

『KAGRA』で捕らえる 重力波

2017/12/8 @富山大学

東京大学宇宙線研究所
宮川 治

ノーベル街道

日本の自然科学系ノーベル賞受賞者19人のうち
11人が国道41号線沿い

利根川進 (1987年生理学・医学賞)
名古屋生まれ、小1～中1まで富山
県大沢野町で過ごした。
「子どものころに自然の豊かな所で
伸び伸びと過ごせた」



田中耕一 (2002年化学賞)
富山市で生まれ、高校まで富
山で過ごしました。「田舎こそが
創造性を引き出してくれる」「立
山連峰を見ているだけで心が
落ち着く」



小柴昌俊 (2002年物理学賞)
愛知県豊橋市で生まれ、岐阜県神
岡町の実験装置「カミオカンデ」で
ニュートリノを検出しました。



梶田隆章 (2015年物理学賞)
富山市在住。大学院時代から岐阜県神岡
町で研究。「スーパーカミオカンデ」でニュ
ートリノに質量がある事を証明。小柴氏の愛弟
子。最近では重力波の研究にシフト。



白川英樹 (2000年化学賞)
小3～高3まで岐阜県高山市で過
ごす。「子どものころは野山をかけ
めぐっていた」



野依良治 (2001年化学賞)
若いころの名古屋大での研
究が受賞対象になった。



益川敏英 (2008年物理学賞)
名古屋市出身。小林誠氏は名古
屋大学の研究室の後輩です。

下村脩 (2008
年化学賞)
名古屋大学の
研究生でした。



赤崎勇・天野浩
(2014年物理学
賞) 青色発光ダ
イオードの発明

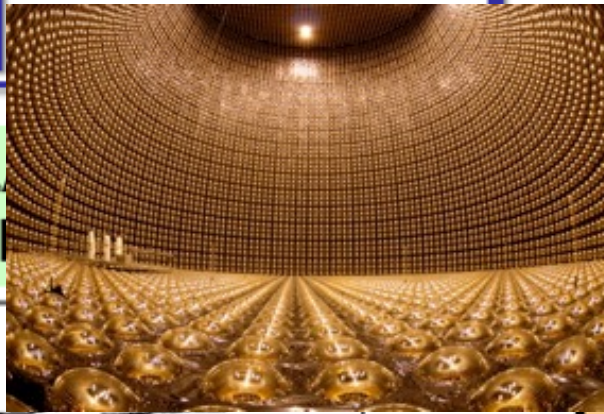
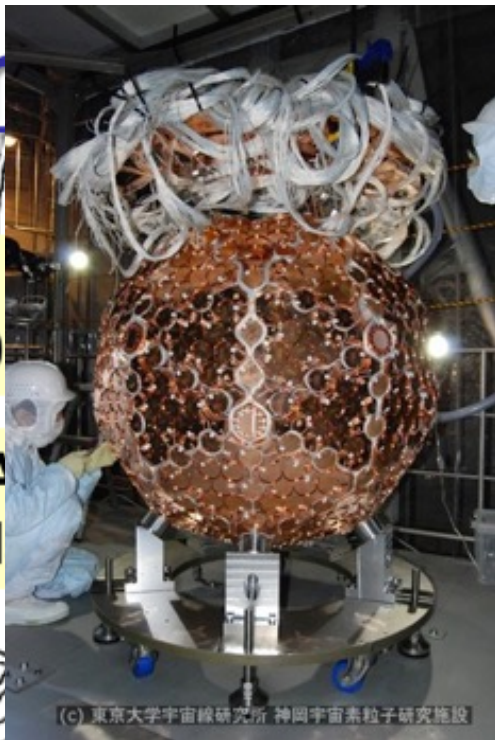


小林誠 (2008年物理学賞)
名古屋市出身、名古屋大学で物理
博士となりました。

Kar

XMASS
(Mar. 20

CA
(M



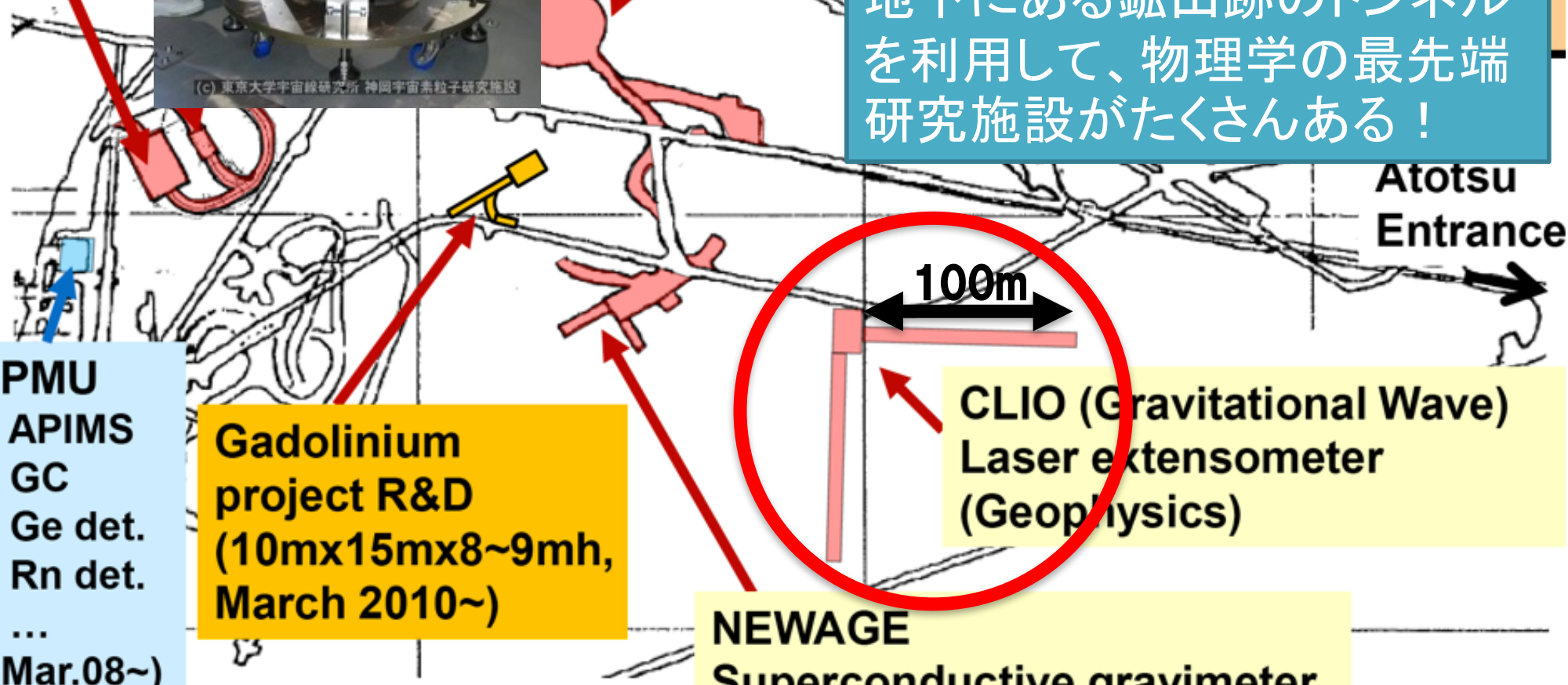
Super-Kamiokade



KAMIOKA
OBSERVATORY
yo.ac.jp/

sites

地下にある鉱山跡のトンネルを利用して、物理学の最先端研究施設がたくさんある！



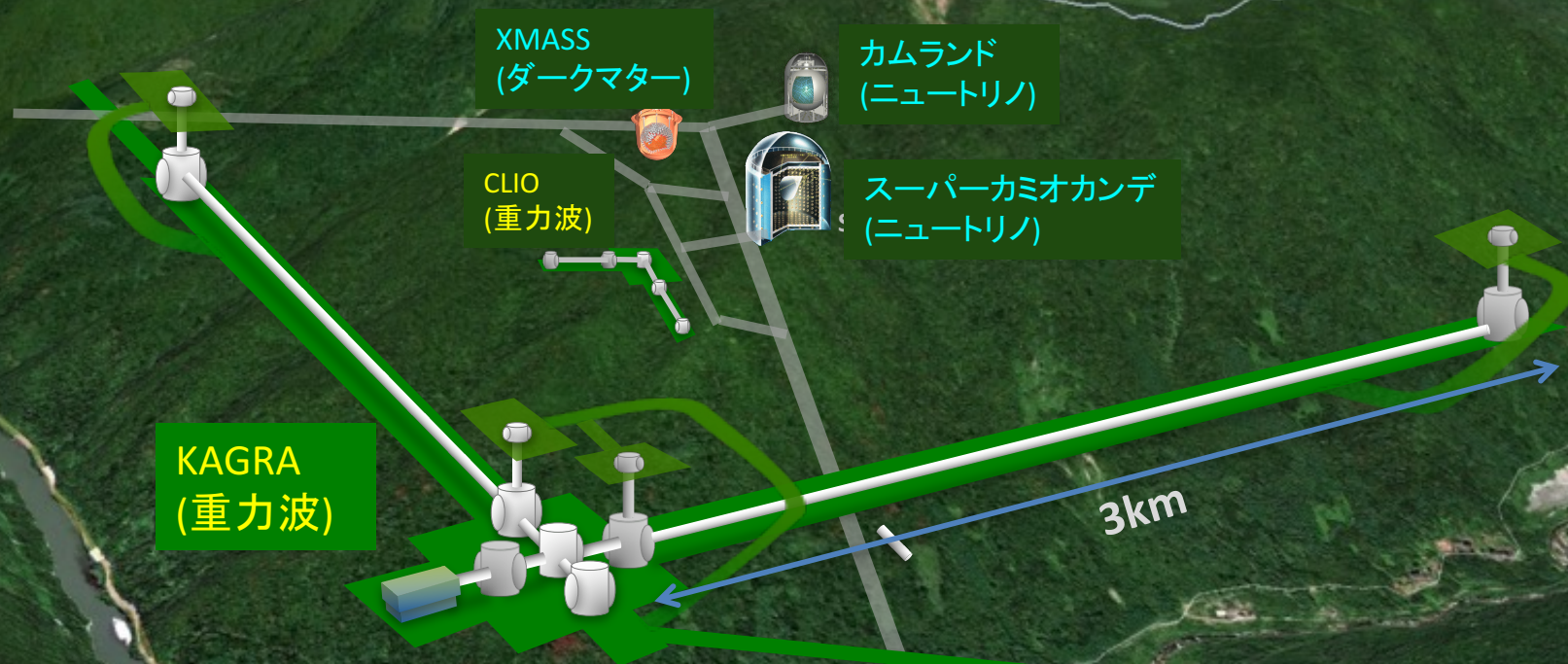
IPMU
APIMS
GC
Ge det.
Rn det.
...
(Mar.08~)

Gadolinium
project R&D
(10mx15mx8~9mh,
March 2010~)

NEWAGE
Superconductive gravimeter

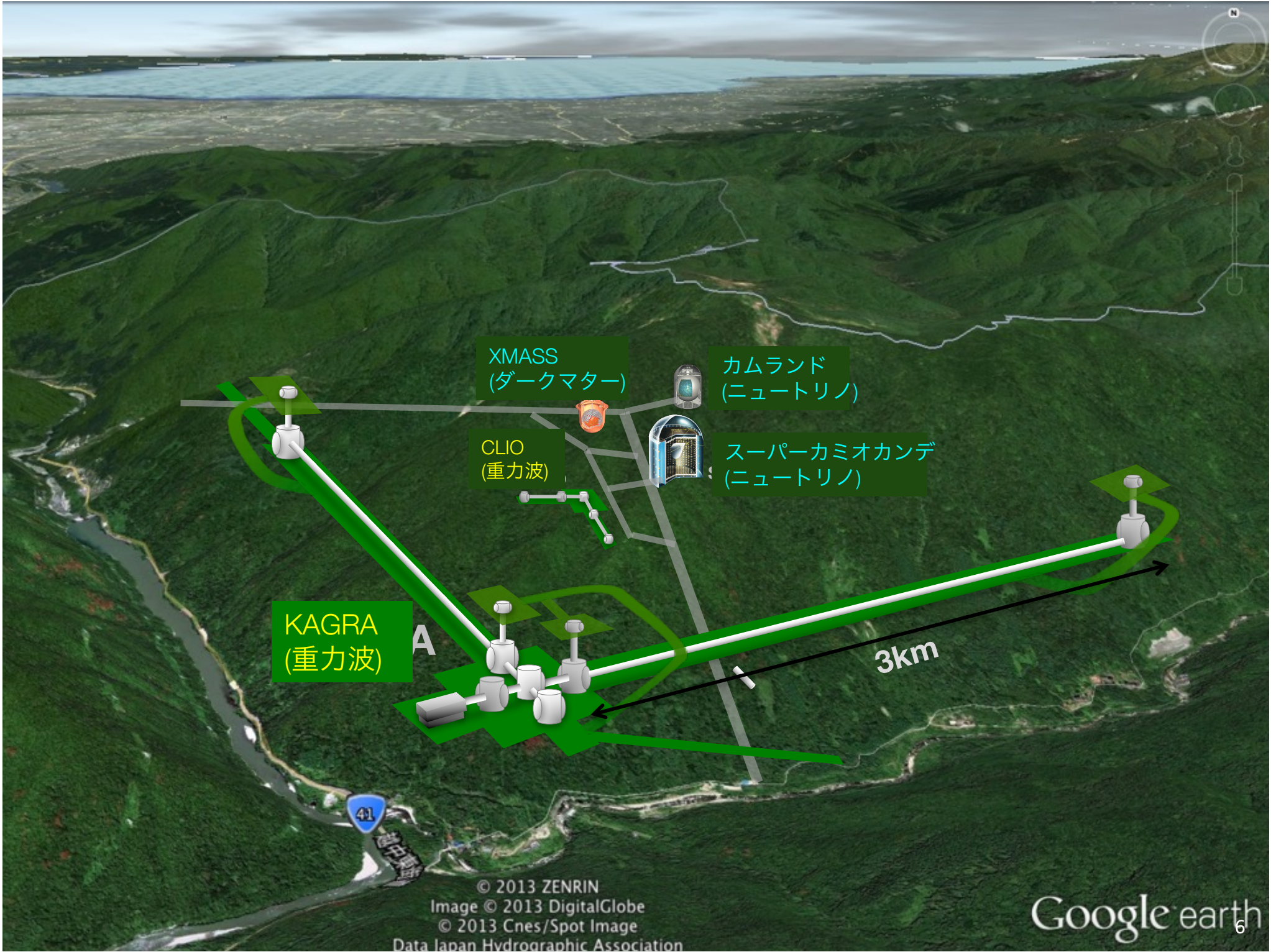
CLIO (Gravitational Wave)
Laser extensometer
(Geophysics)

レーザー干渉計型低温巨大重力波望遠鏡 かぐら (KAGRA) か=KAmioka(神岡) ぐら=GRAvitaion(重力)



映画君の名はの「糸森町」は実在した
KAGRAはそのすぐ近くの「池の山」の中





XMASS
(ダークマター)

カムランド
(ニュートリノ)

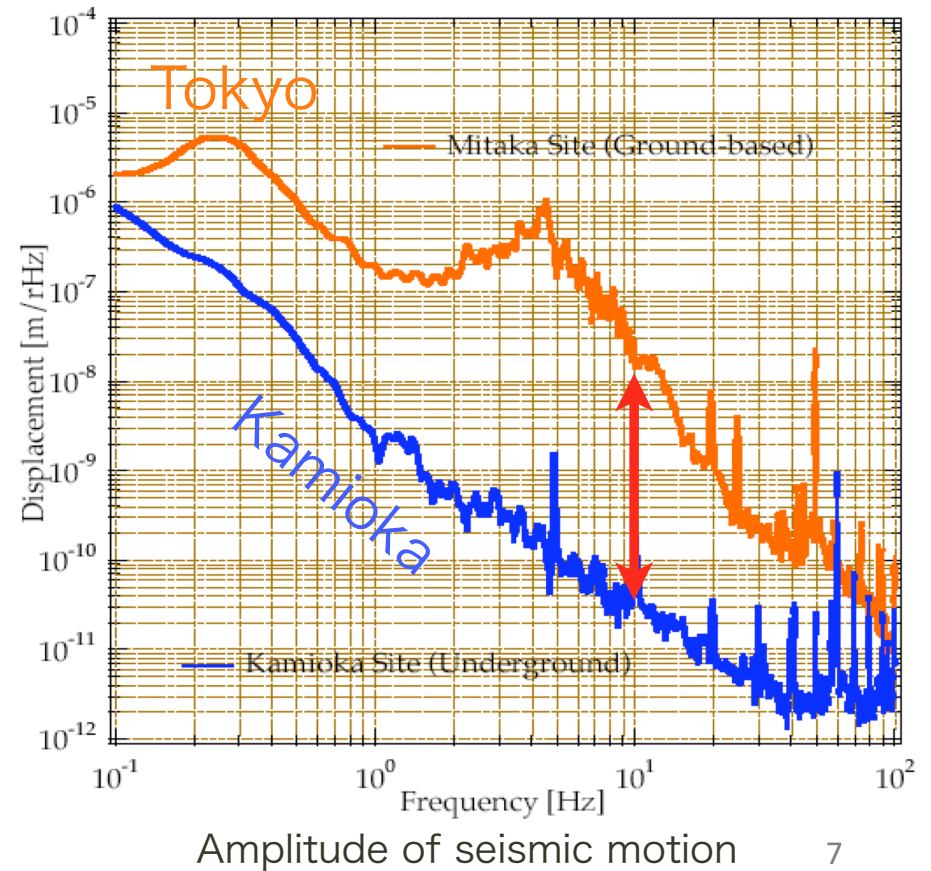
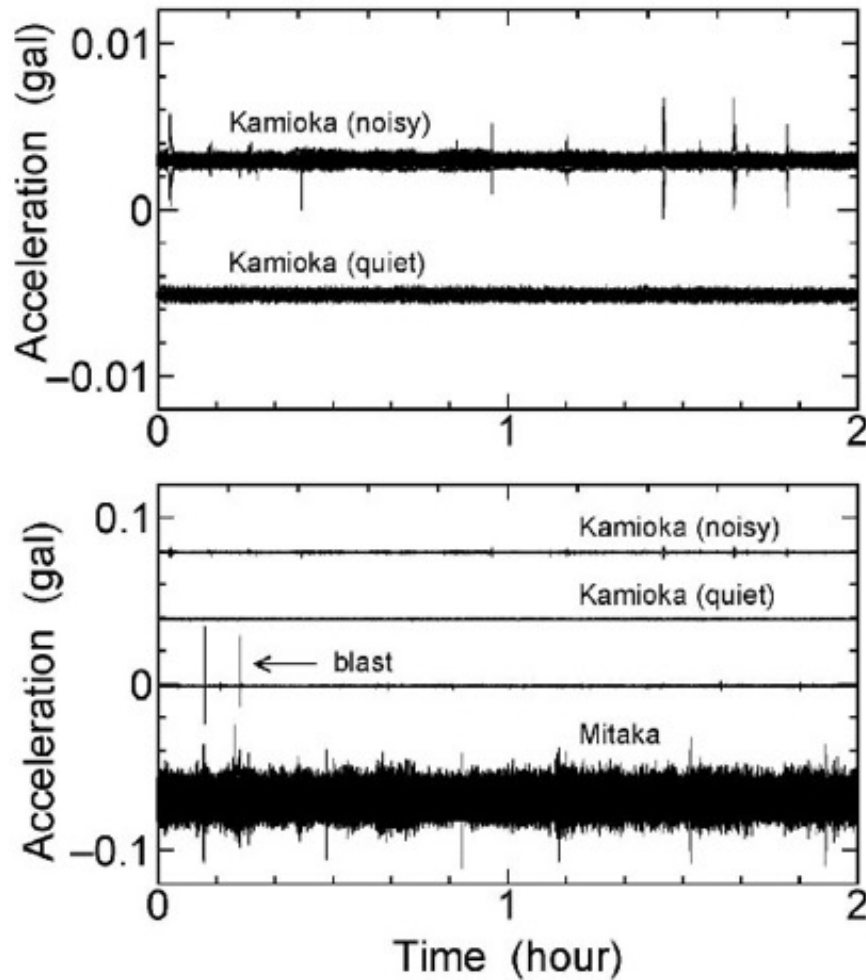
CLIO
(重力波)

スーパーカミオカンデ
(ニュートリノ)

KAGRA
(重力波)

3km

Underground site is QUIET





Laser room



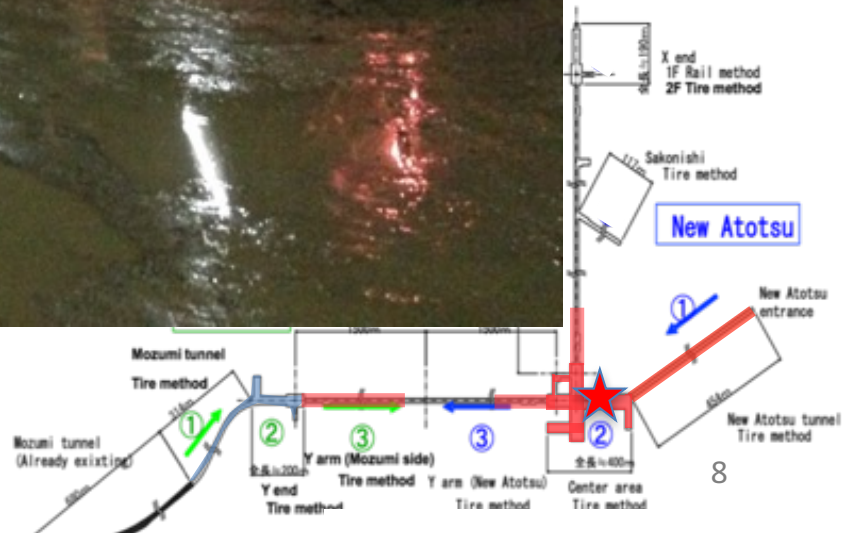
X arm



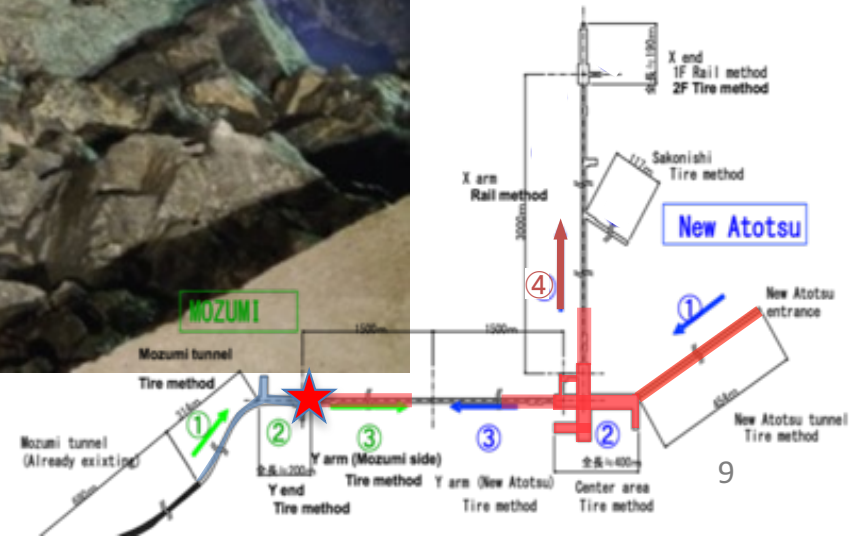
Y arm

Center room

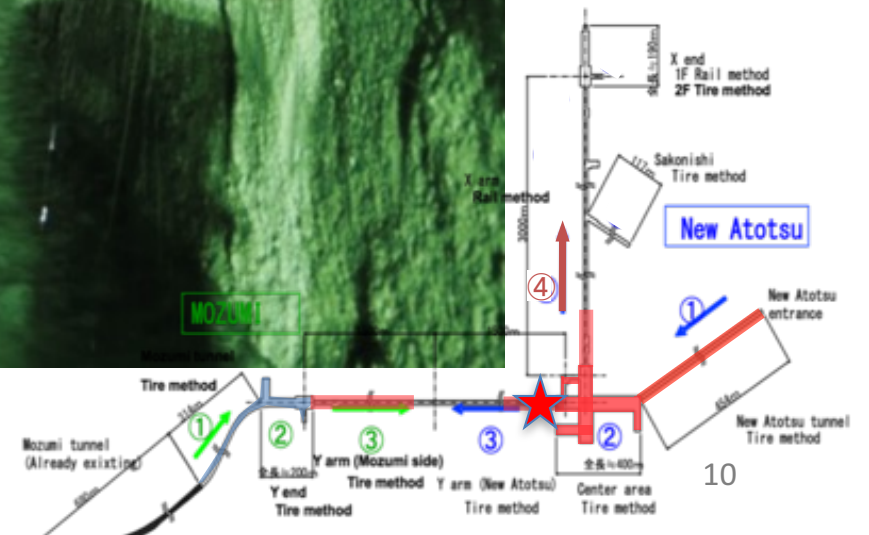
JGW-G130166



Y end area for chamber location

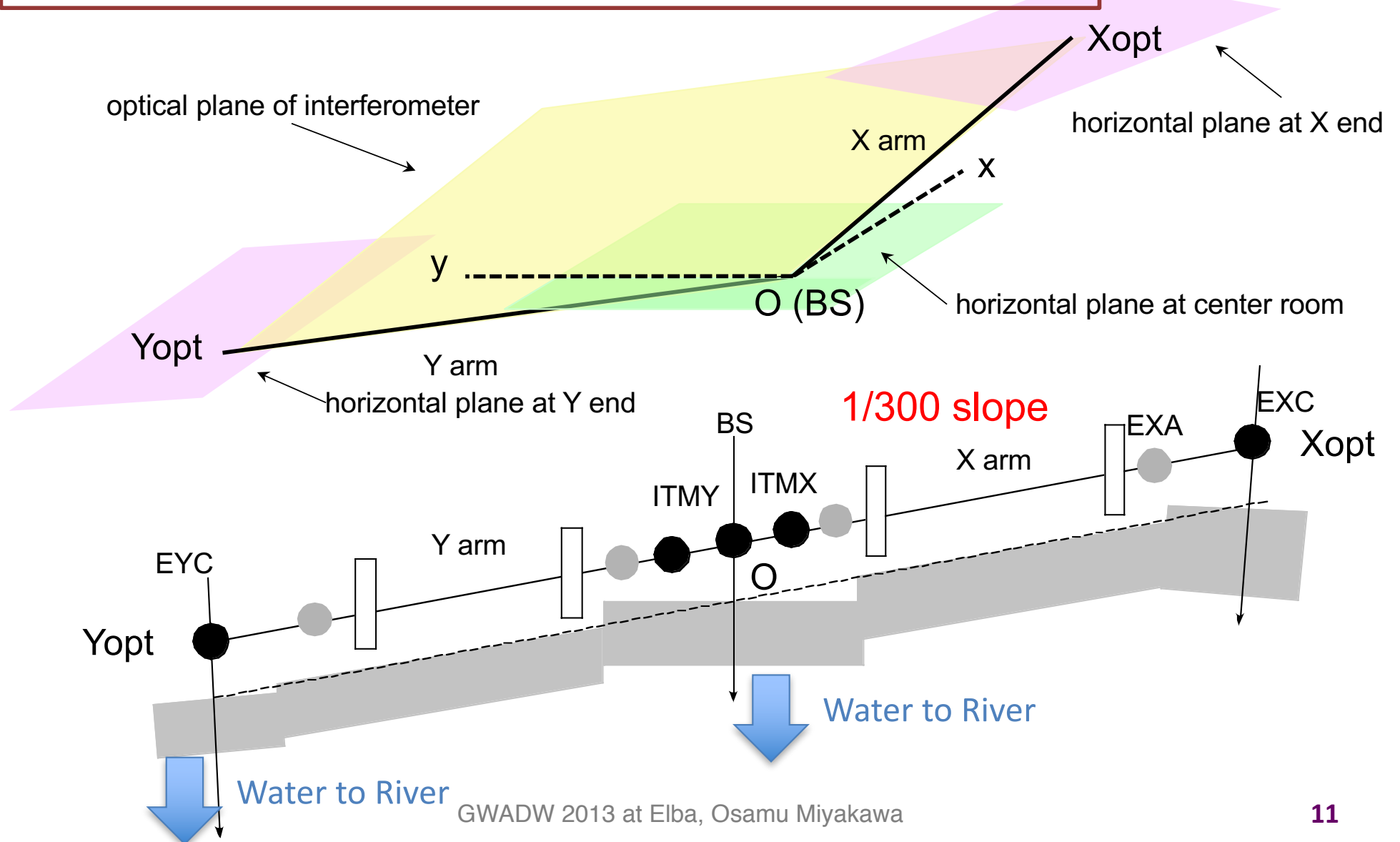


Y arm under water

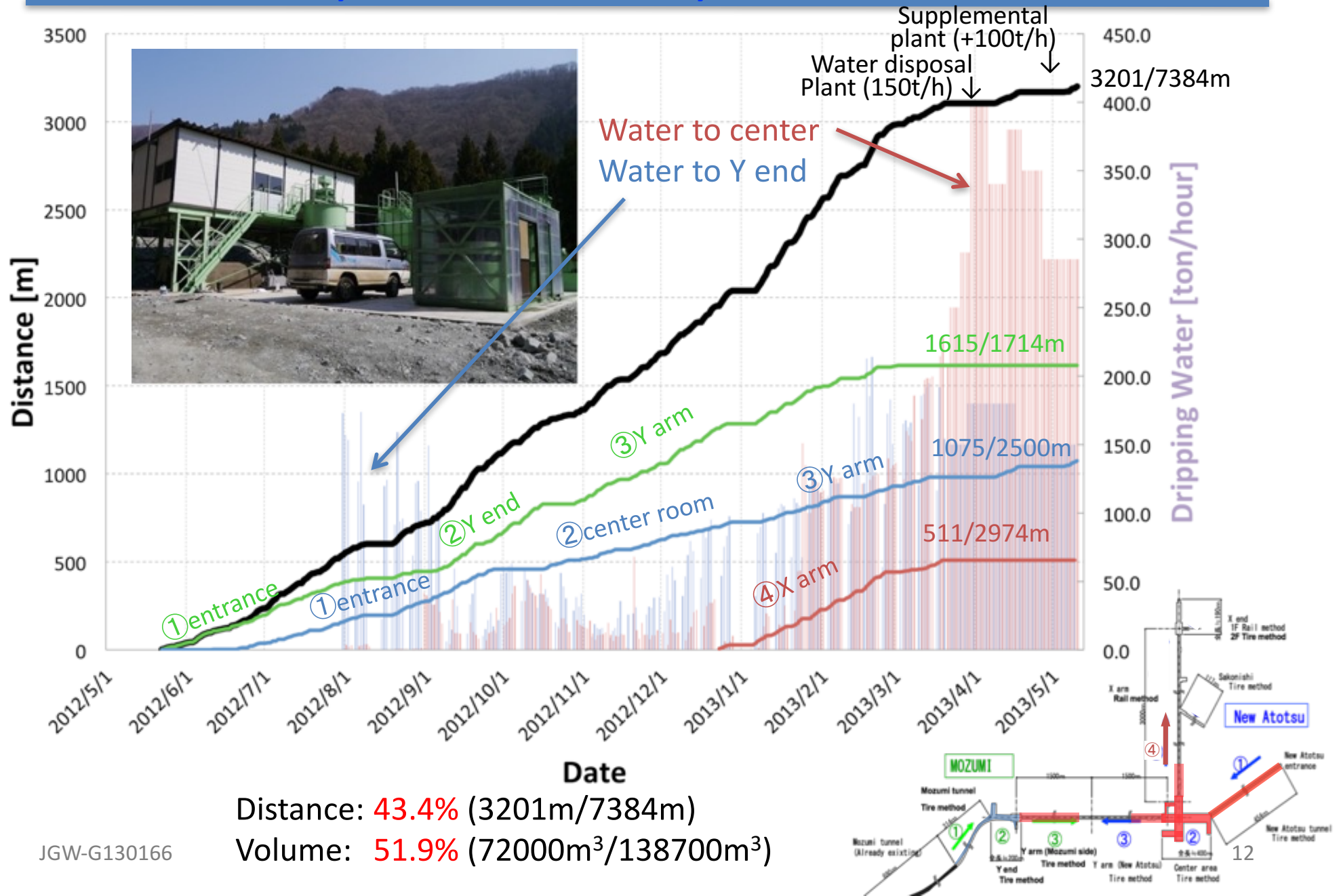


1. Layout (four planes/floors)

- ** horizontal floors in each room prepared for installing chambers
- ** translation matrix confirmed for four sets of coordinates



KAGRA tunnel distance for May 22, 2012 – May 10, 2013



Distance: **43.4%** (3201m/7384m)

Volume: **51.9%** (72000m³/138700m³)



Snow in winter.
Melted snow in April.



KAGRA風景



マイケルソン部分

トンネル入り口

コントロールルーム
(KAGRAの脳みそ)

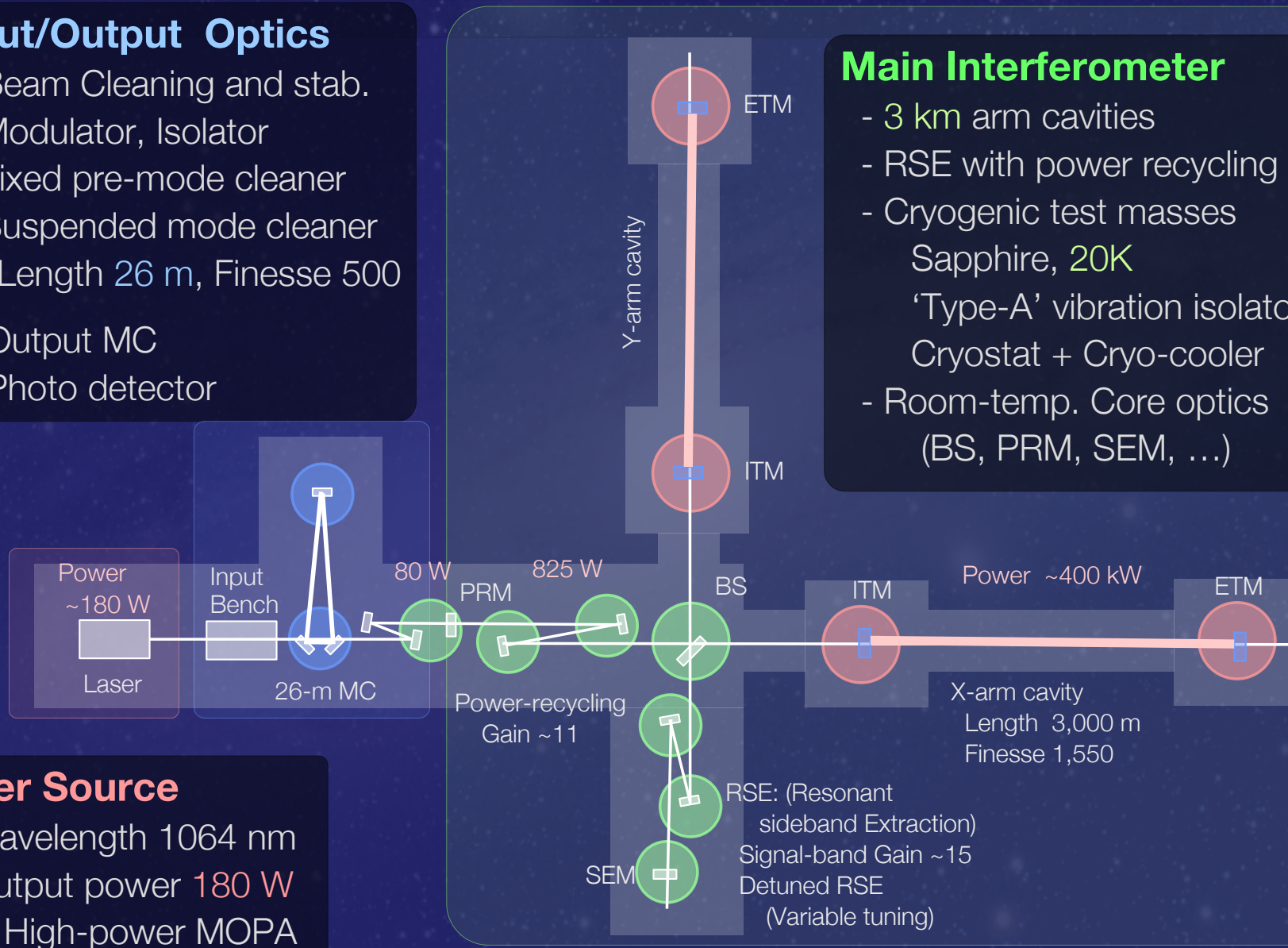
KAGRA configuration

Input/Output Optics

- Beam Cleaning and stab.
- Modulator, Isolator
- Fixed pre-mode cleaner
- Suspended mode cleaner
Length 26 m, Finesse 500
- Output MC
- Photo detector

Main Interferometer

- 3 km arm cavities
- RSE with power recycling
- Cryogenic test masses
Sapphire, 20K
- 'Type-A' vibration isolator
Cryostat + Cryo-cooler
- Room-temp. Core optics
(BS, PRM, SEM, ...)



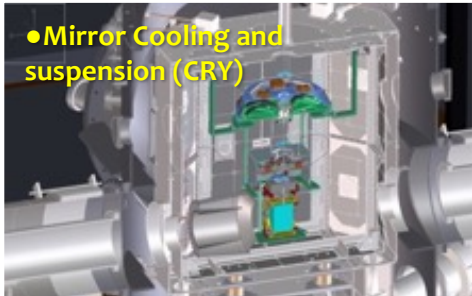
Laser Source

- Wavelength 1064 nm
- Output power 180 W
- High-power MOPA

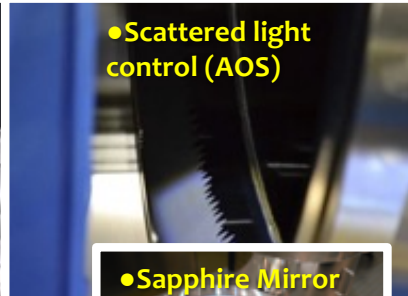
- 一般相対性理論: 重力波
- レーザー
- 真空
- 物性: 鏡基材、研磨、コーティング
- 低温
- 制御
- 計算機(リアルタイムOS)
- ネットワーク(超低遅延、大容量)
- 電気回路

雑音を抑える様々な技術

●Mirror Cooling and suspension (CRY)



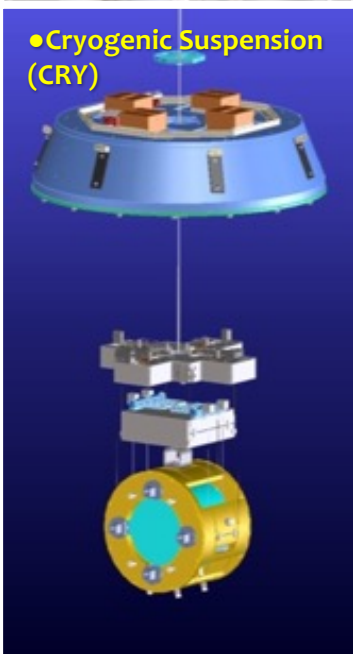
●Scattered light control (AOS)



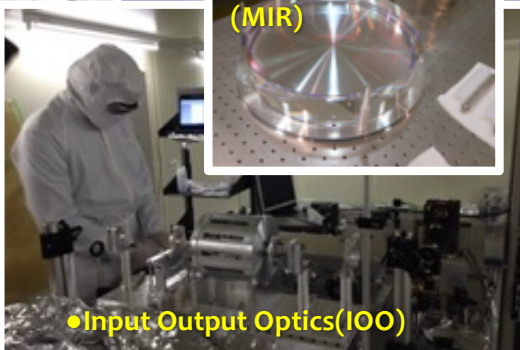
●Sapphire Mirror (MIR)



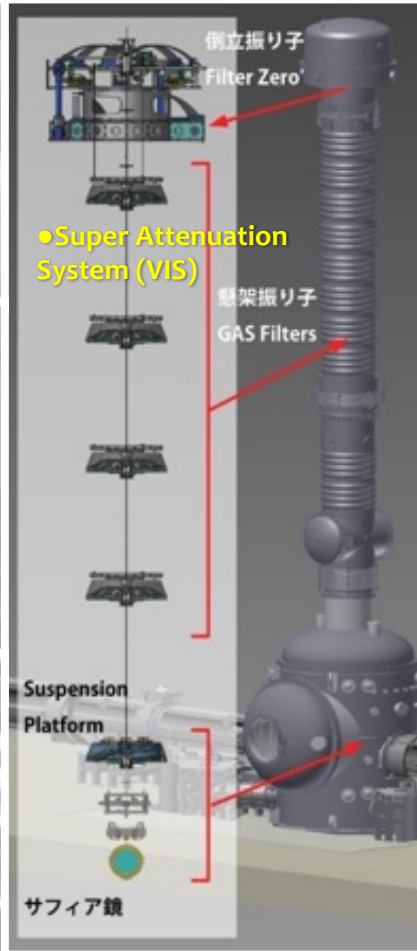
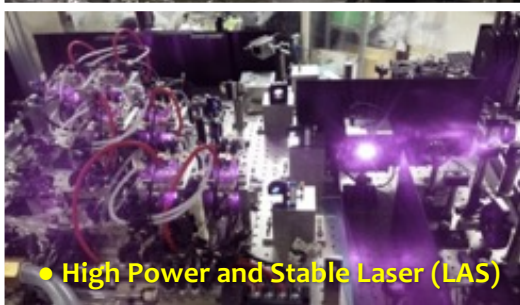
●Cryogenic Suspension (CRY)



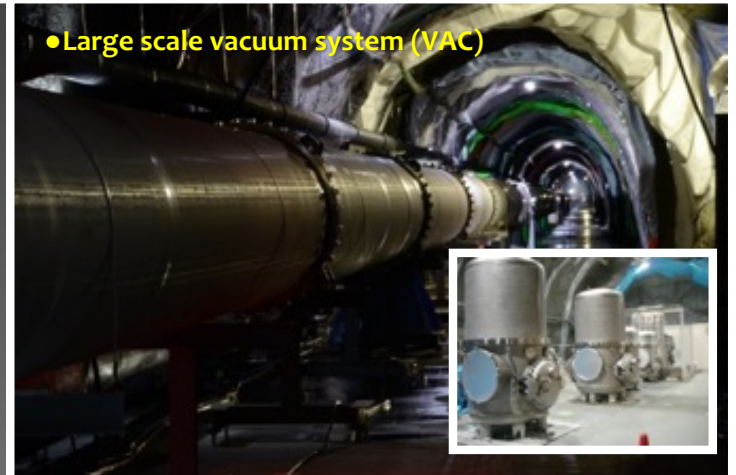
●Input Output Optics(IOO)



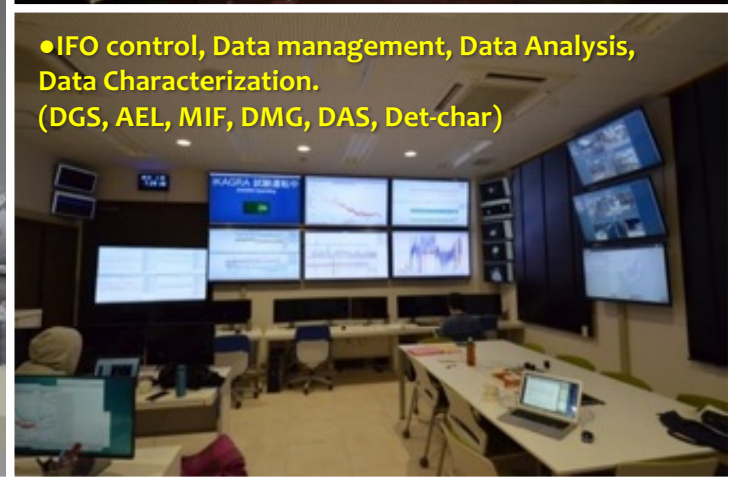
●High Power and Stable Laser (LAS)

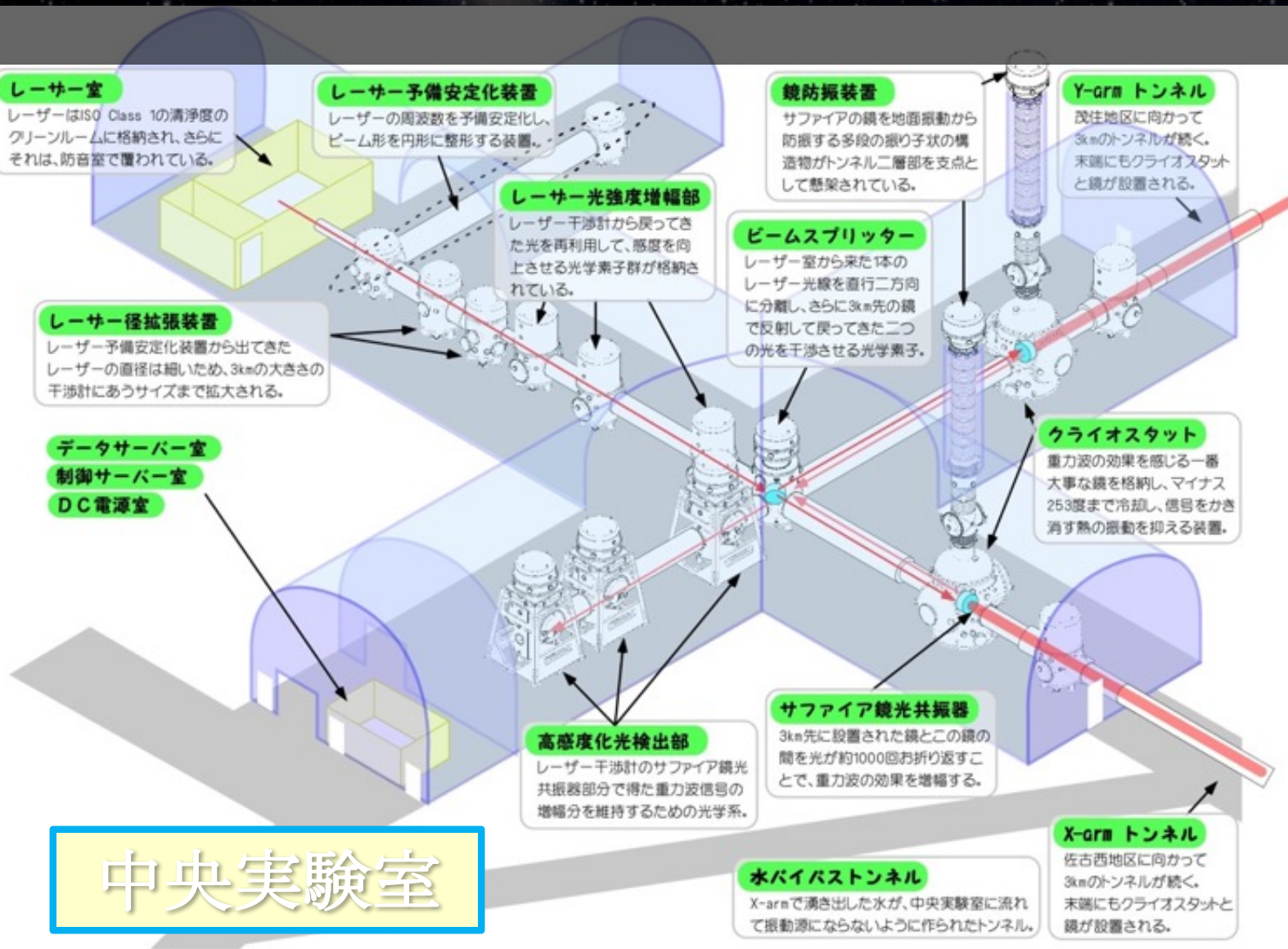


●Large scale vacuum system (VAC)



●IFO control, Data management, Data Analysis, Data Characterization.
(DGS, AEL, MIF, DMG, DAS, Det-char)





中央実験室

スーパークリーンルーム内のレーザー格納部屋

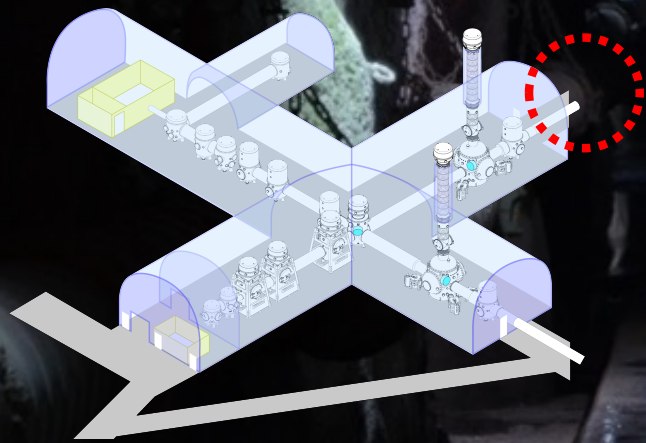


X-Arm



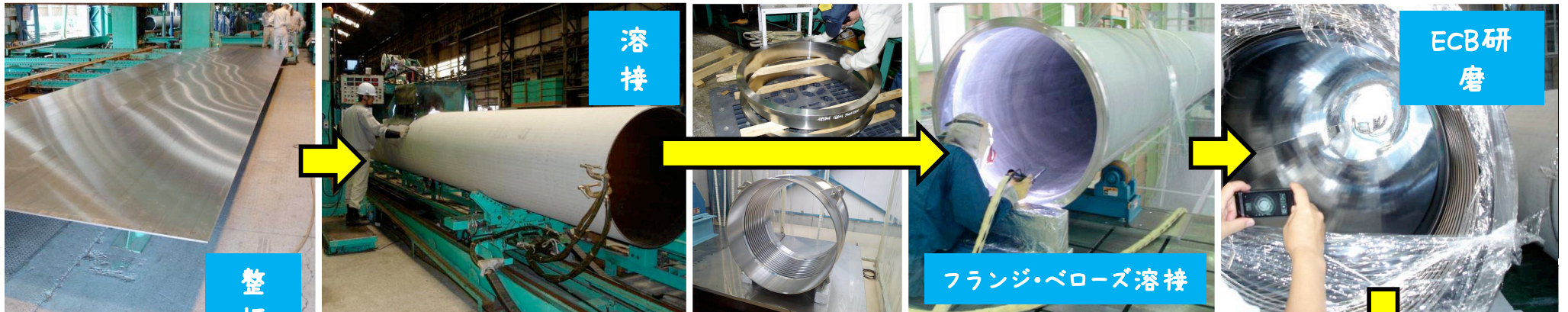
3km つながった直径80cmの真空ダクト
(この中をレーザー光線が通過)

Y-Arm

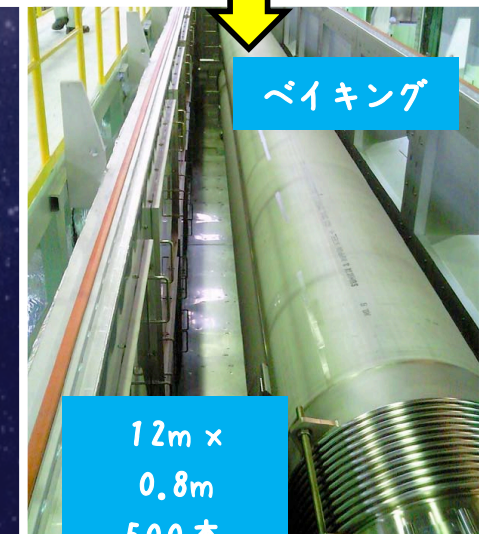


3km つながった直径80cmの真空ダクト
(この中をレーザー光線が通過)

超大な超高真空空間を実現する日本の技術



ミラプロ社の
先進真空ダ
クト・タンク製
造技術



大型・超高品質鏡基材と超絶研磨精度

ビームスプリッター (d380mm t80mm)

旭硝子社の
超高品質な石英
透過損失が
0.1ppm/cm程度

サファイア鏡 (d200mm t150mm)
20~50ppm/cmの吸収損失

超絶平滑研磨 (0.1nm 以下の凹凸しかない)

曲率2km程度の曲面研磨

鏡の冷却

常温に置かれた鏡は熱を持っている。



熱によって表面が揺らぐ。



重力波検出の邪魔になる。

⇒ 鏡をマイナス253度以下
(絶対温度で20度以下) に冷やして熱による揺れを押さえる。

反射鏡

分子運動で鏡の表面がわずかに揺らぐ。

分子

全て酸化アルミニウム(Al_2O_3)という物質



サファイア

不純物: 鉄、チタン



ホワイトサファイア

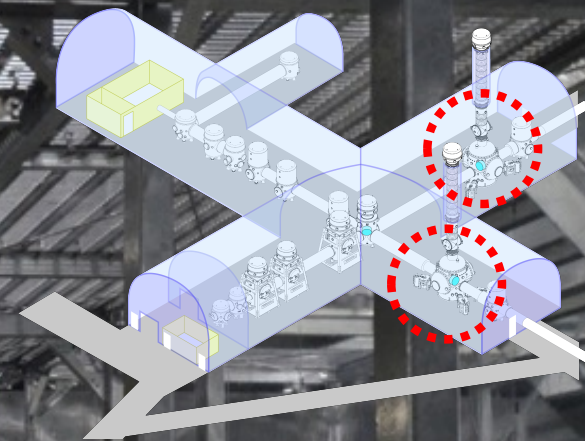


ルビー

クロム

最高級サファイア: 1カラット(0.2グラム)で500万円

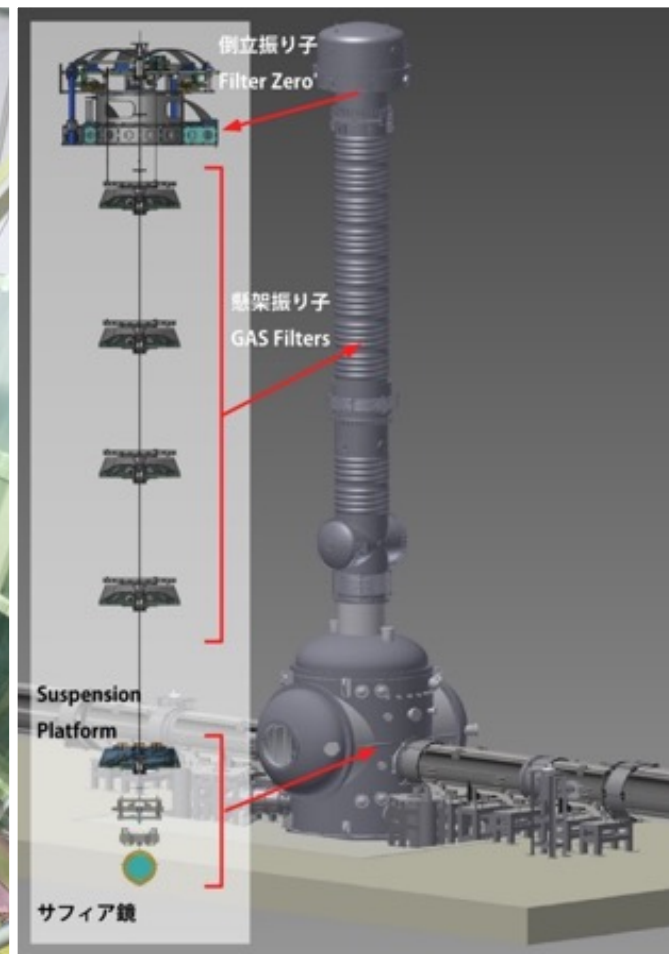
サファイア鏡を格納し
マイナス253度まで冷やす
クライオスタット

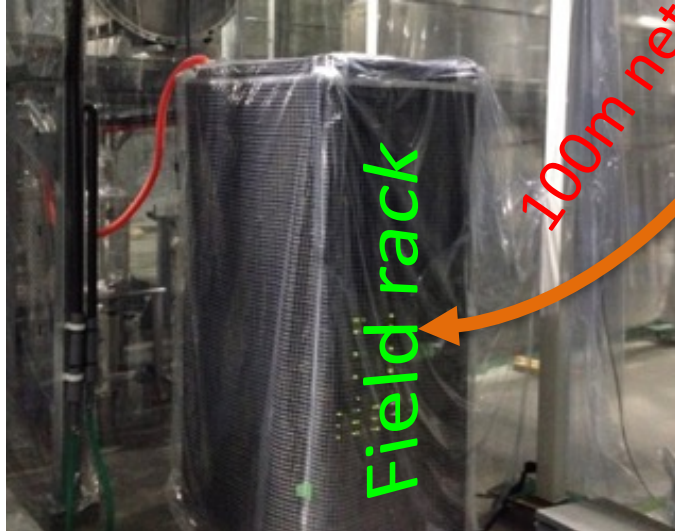


日本の超高真空・極低温空間生成を支える技術



鏡の防振（多段制御振り子）技術

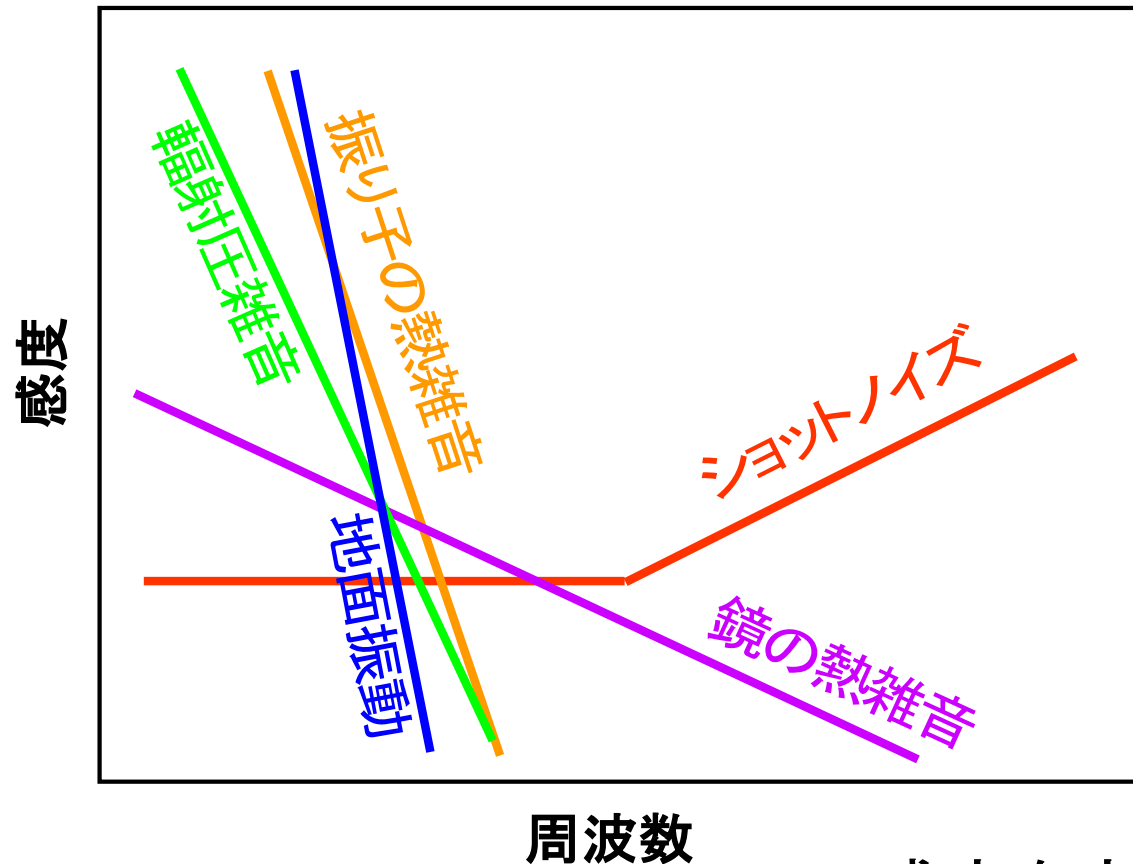




KAGRA制御室



感度 = 雑音 / 干渉計の応答

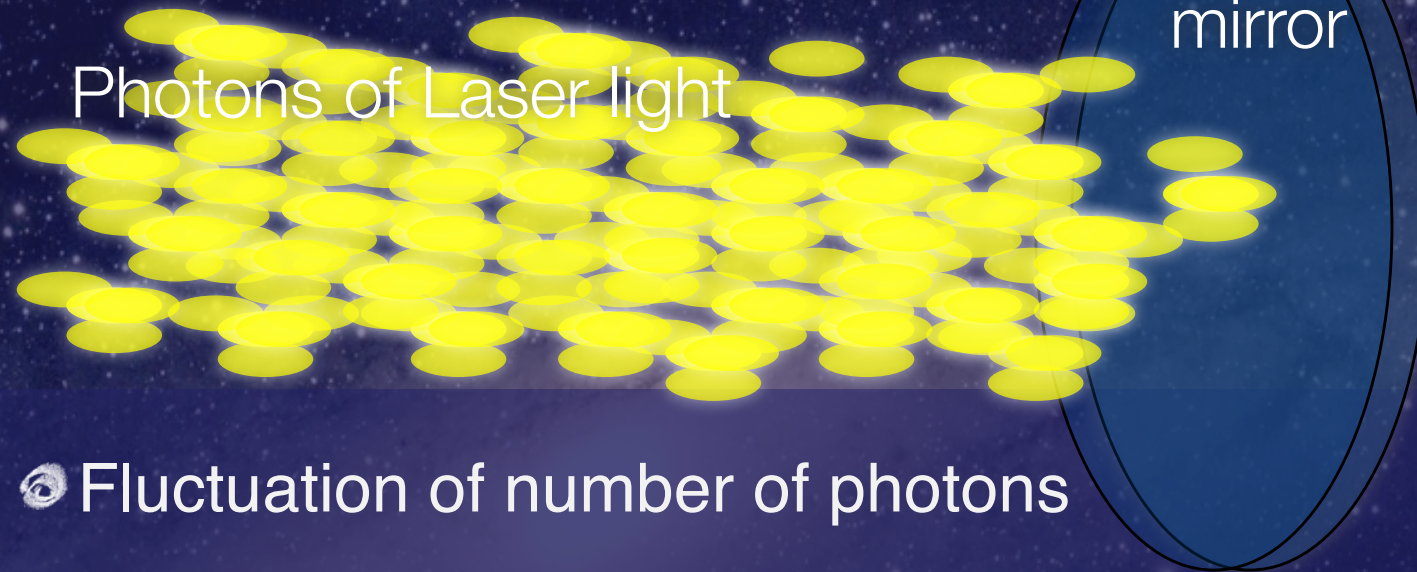


感度を良くするには

1. 雑音を下げる
2. 干渉計の応答を高める

Shot Noise

Radiation Pressure Noise



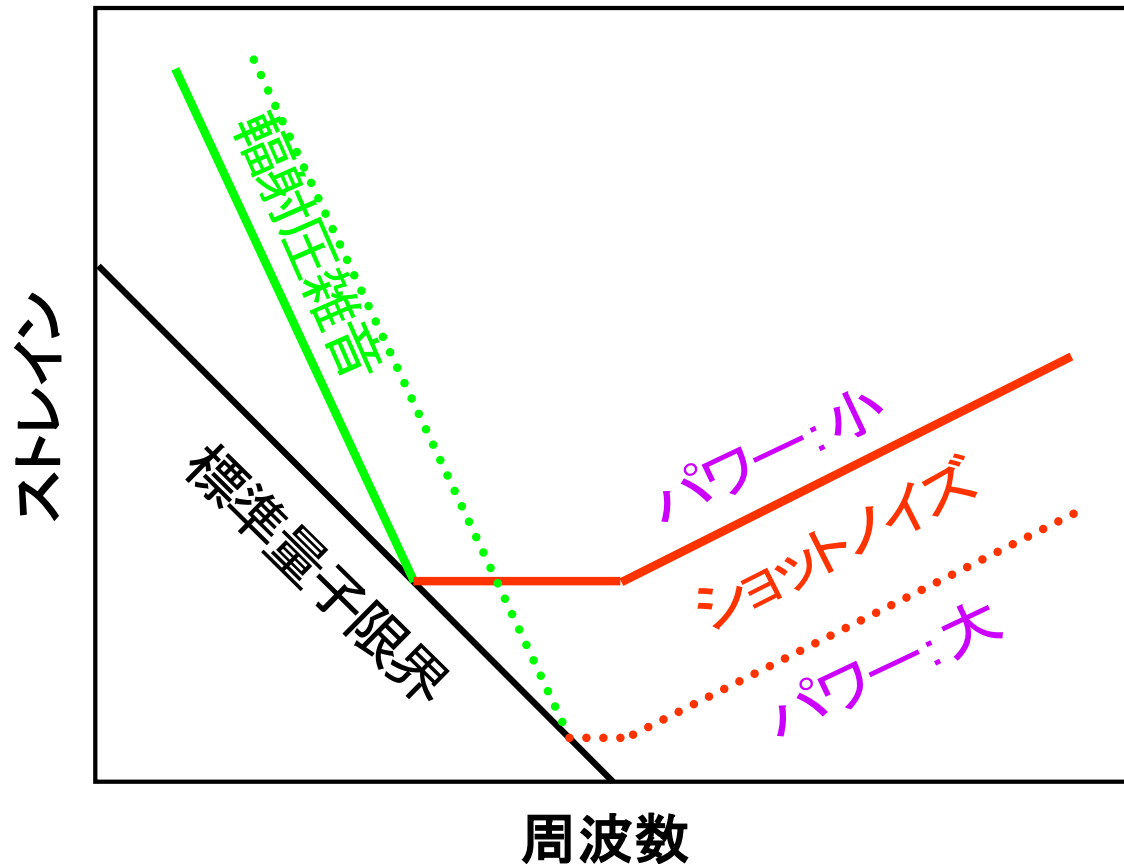
Shot Noise

$$x_{shot}(f) \propto \sqrt{\frac{\hbar c \lambda}{P}}$$
$$x_{rp}(f) \propto \frac{1}{m f^2} \sqrt{\frac{\hbar P}{c \lambda}}$$

Radiation Pressure Noise

High Power ? or Low Power ?

レーザー光のパワーを上げるとショットノイズが下がり
輻射圧雑音が増える



光の量子雑音

・ 光の量子雑音 --- 干渉計における原理的な雑音

- 散射雑音 (Shot Noise)

光検出時の光子数計数誤差

$$h_{\text{shot}} \propto 1/\sqrt{P}$$

- 輻射圧雑音 (Radiation Pressure Noise)

鏡での反射時の光子反跳雑音

$$h_{\text{RPN}} \propto \sqrt{P}$$

[P : 干渉計入射光パワー]

標準量子限界 (Standard Quantum Limit)

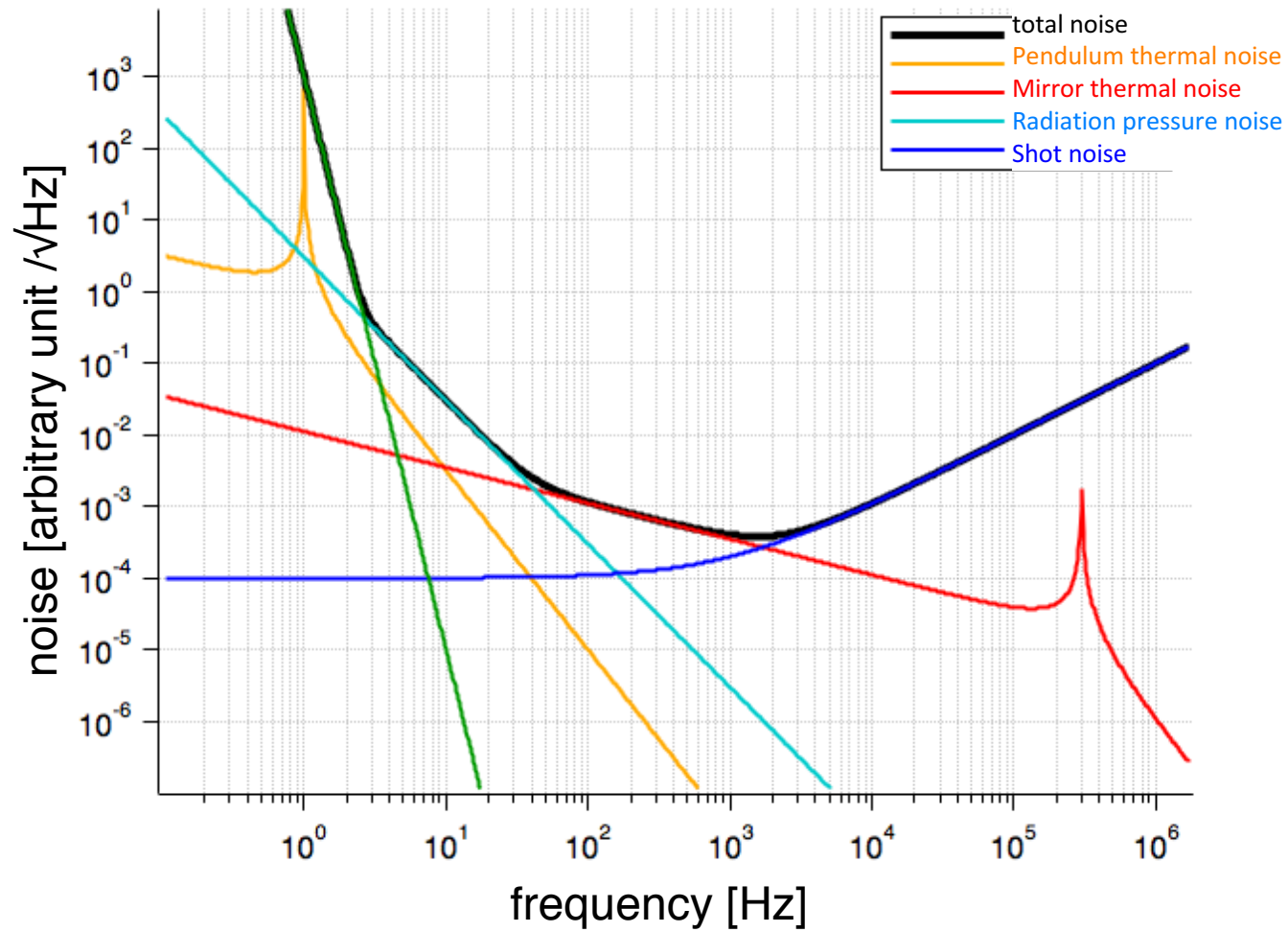
$$h_{\text{SQL}} \propto \frac{1}{\sqrt{M L^2}} \left[\begin{array}{l} M : \text{鏡の質量} \\ L : \text{基線長} \end{array} \right]$$



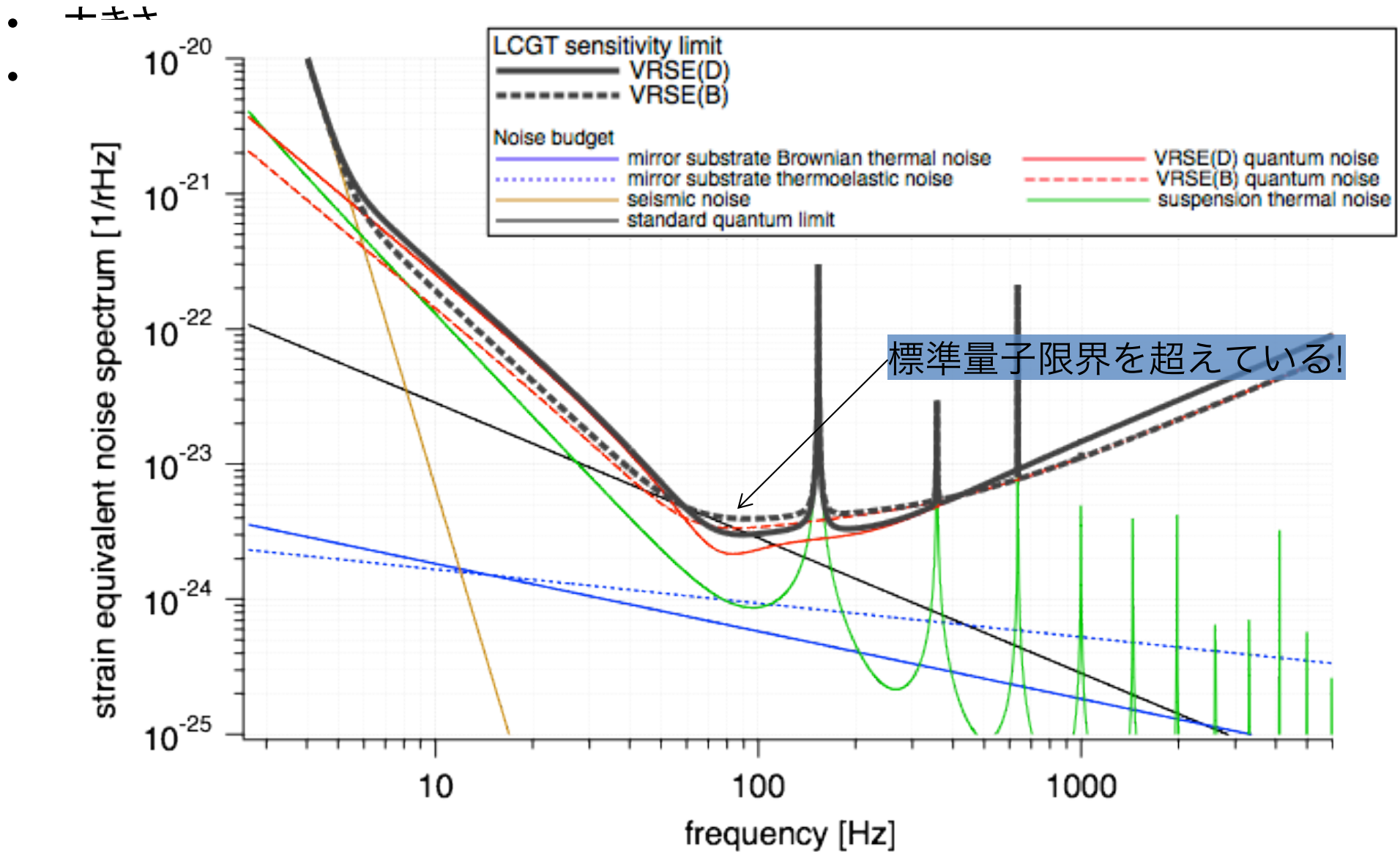
長い干渉計基線長
大質量鏡

KAGRA : 大型・大光量干渉計

基線長 3km, 鏡質量 22kg, 干渉計内光パワー ~800kW



$$h \sim 10^{-22} - 10^{-24} [1/\sqrt{\text{Hz}}]$$



SEMを波長のfraction程度動かすと一部の帯域で感度が向上する

