



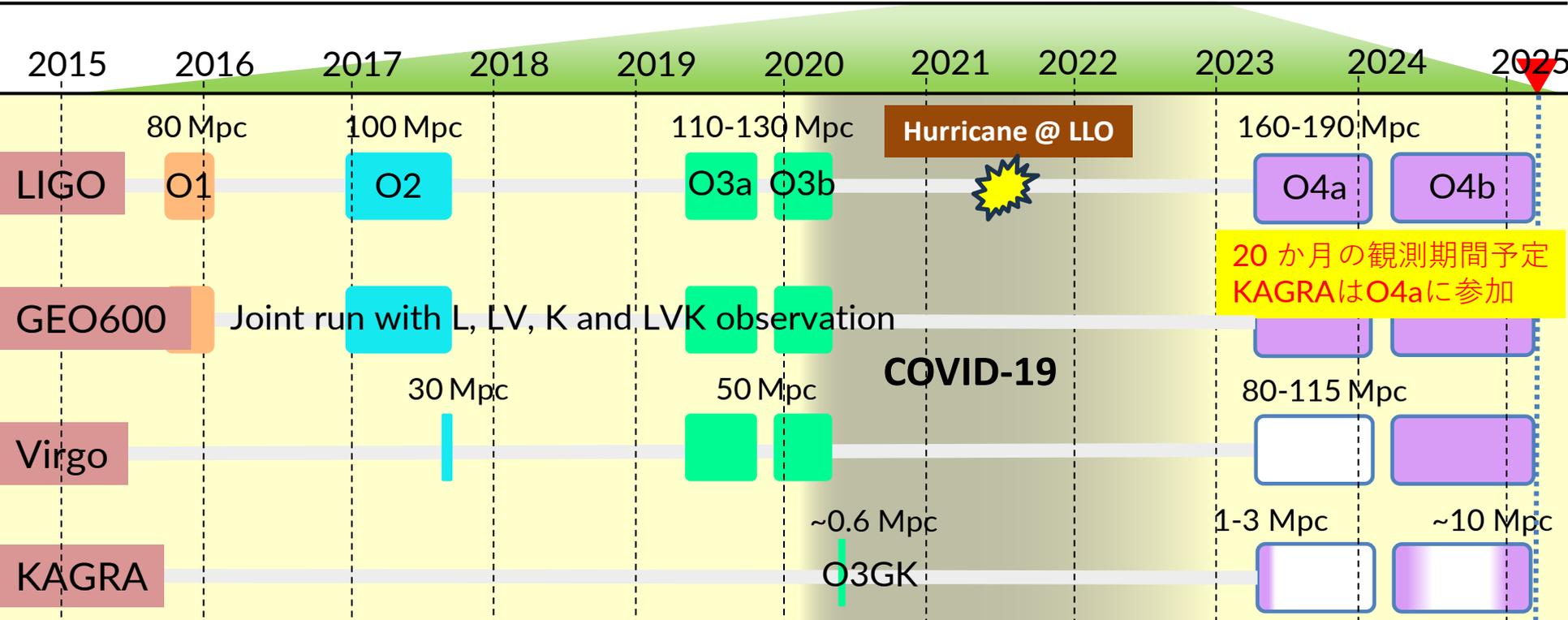
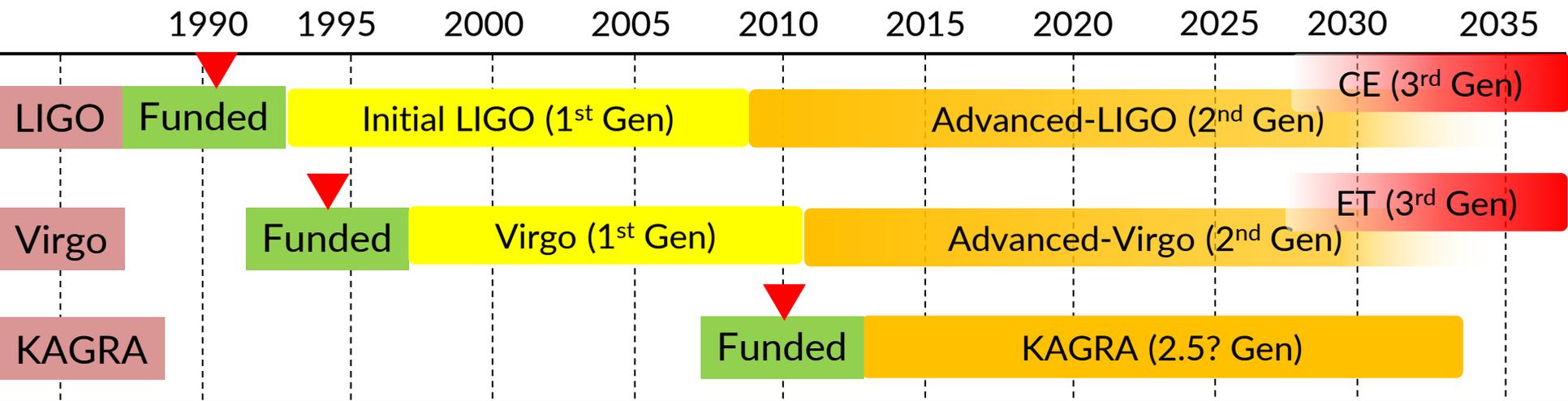
# 大型低温重力波望遠鏡KAGRAの現状

三代木 伸二, on behalf of KAGRA Collaboration

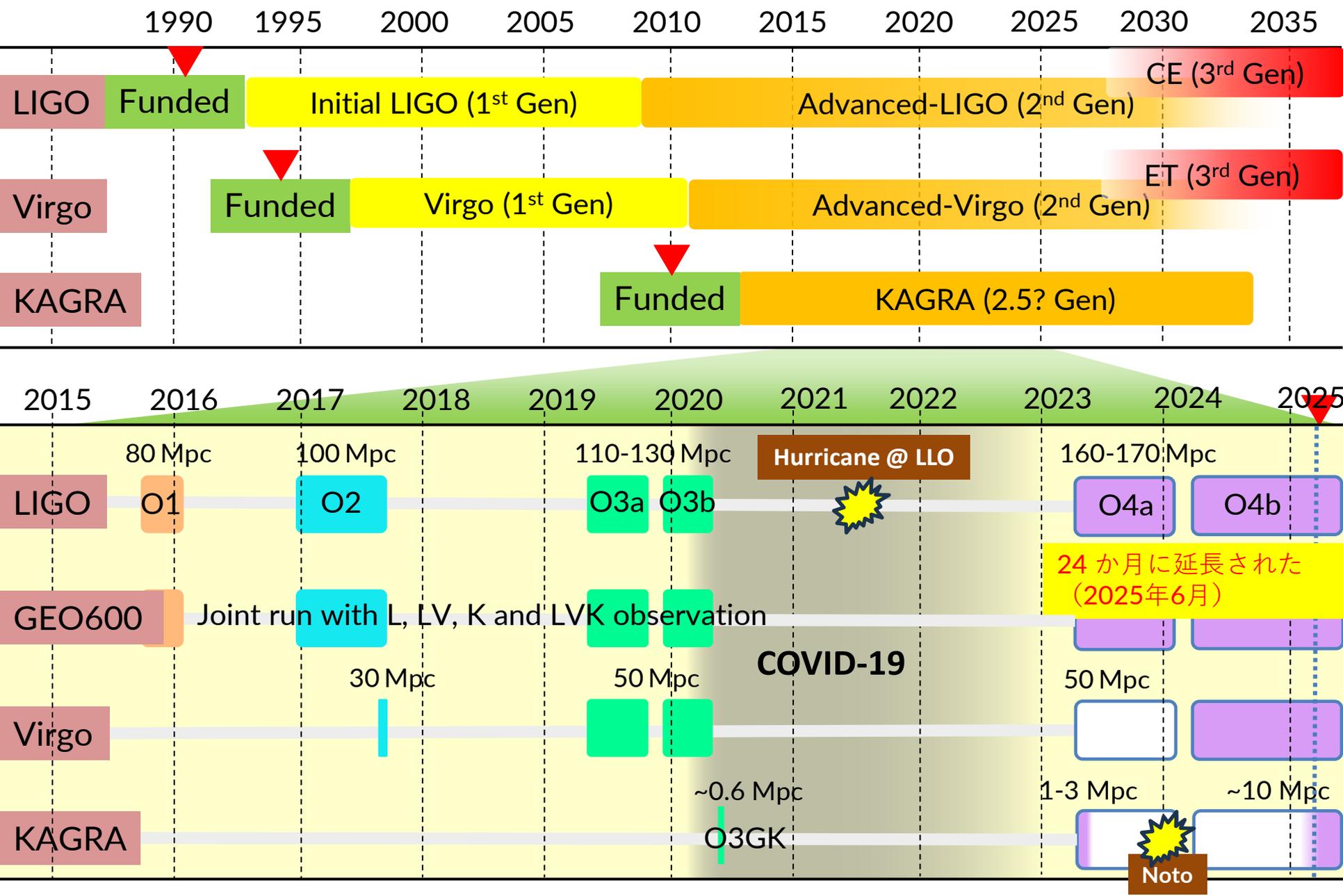
2024年度第一回タウンミーティング  
東京大学宇宙線研究所

2025年3月10日

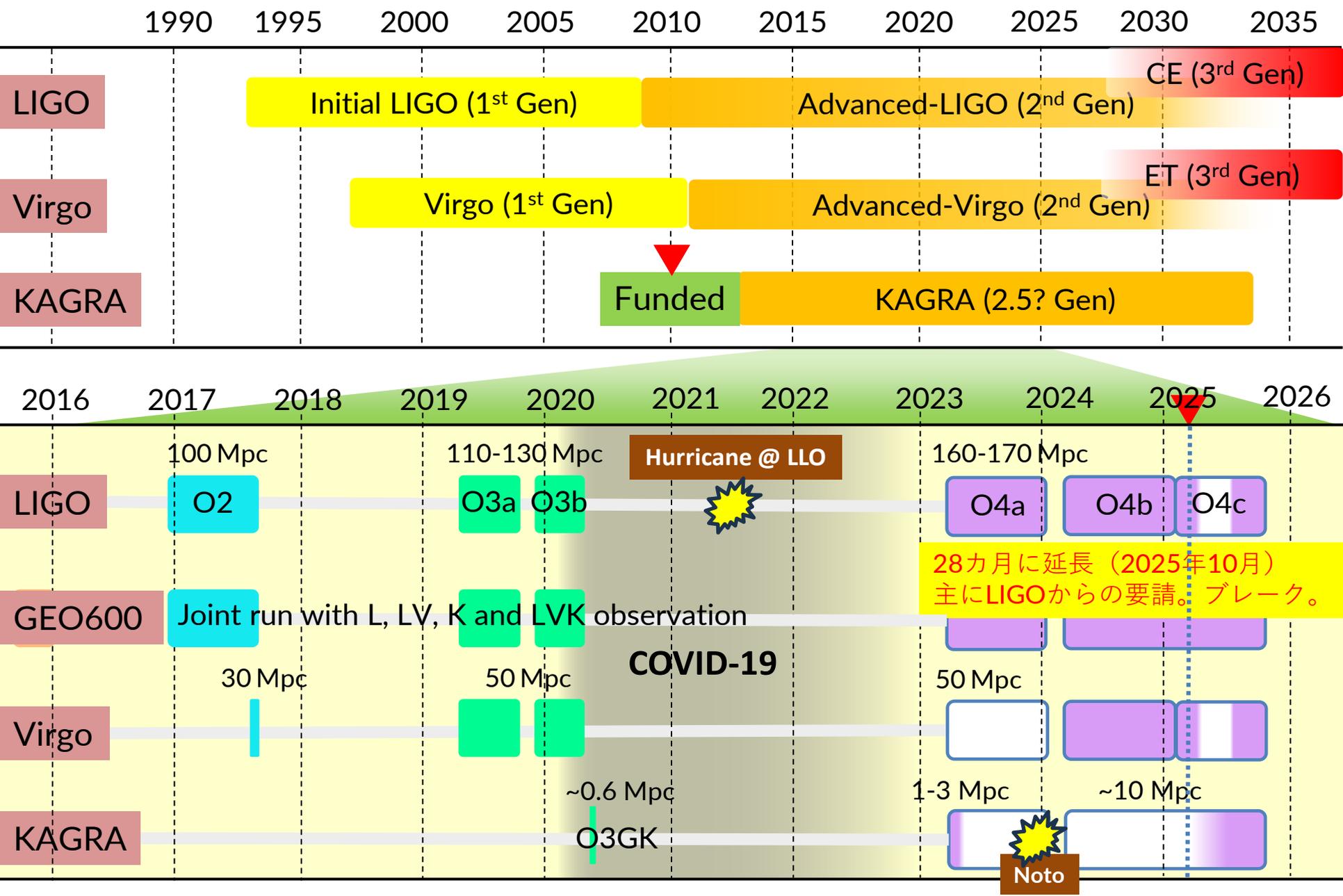
# 重力波望遠鏡の世代とLVK 国際重力波観測



# 重力波望遠鏡の世代とLVK 国際重力波観測



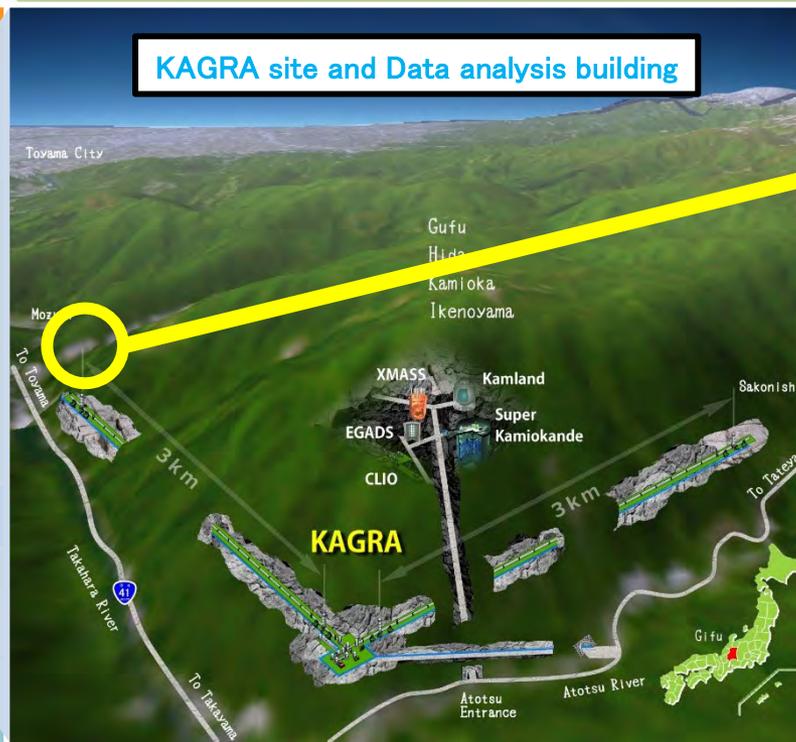
# 重力波望遠鏡の世代と LVK 国際重力波観測



# **KAGRAの復旧作業 (1月~7月)**

# 能登半島地震の影響

地表最大震度は5強、KAGRA坑内は震度3



## ● 飛騨地方の過去100年間の大きな地震

- 1909 Aug 14, M6.8 【Anegawa】 Lv.3
- 1944 Dec 7, M7.9 【Tounankai】 Lv.4
- 2011 Feb 17, M5.5 【Hida area】 Lv.3~4
- 2023 May 5, M6.5 【Noto Peninsula】 LV.2~3
- 2024 Jan 1, M7.6 【Reiwa 6 Noto Peninsula】 LV 5- (Red color means KAGRA was operated.)

## ● 海岸地域では4mの隆起を観測

- このような現象は6000年に1回などと報道

震度5弱は記録が残っている過去100年以上の期間で最大規模。

## ● 国土地理院の発表によると、山自身が、北西に2~3cmに移動。

( <https://www.gsi.go.jp/common/000254115.pdf> )。

# We had EQ Stoppers for Mirror Protection, but ...

Type-Bp EQ Stopper

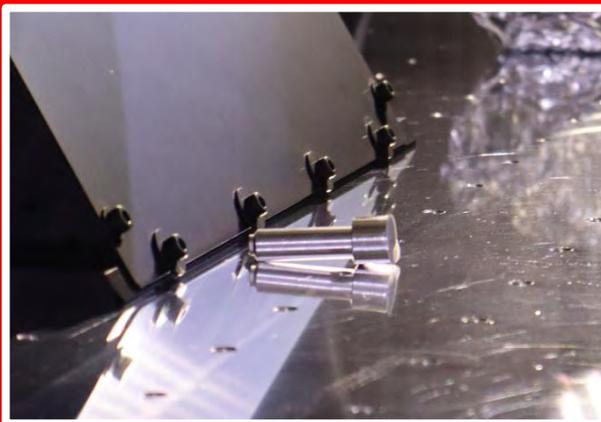


Type-C EQ Stopper



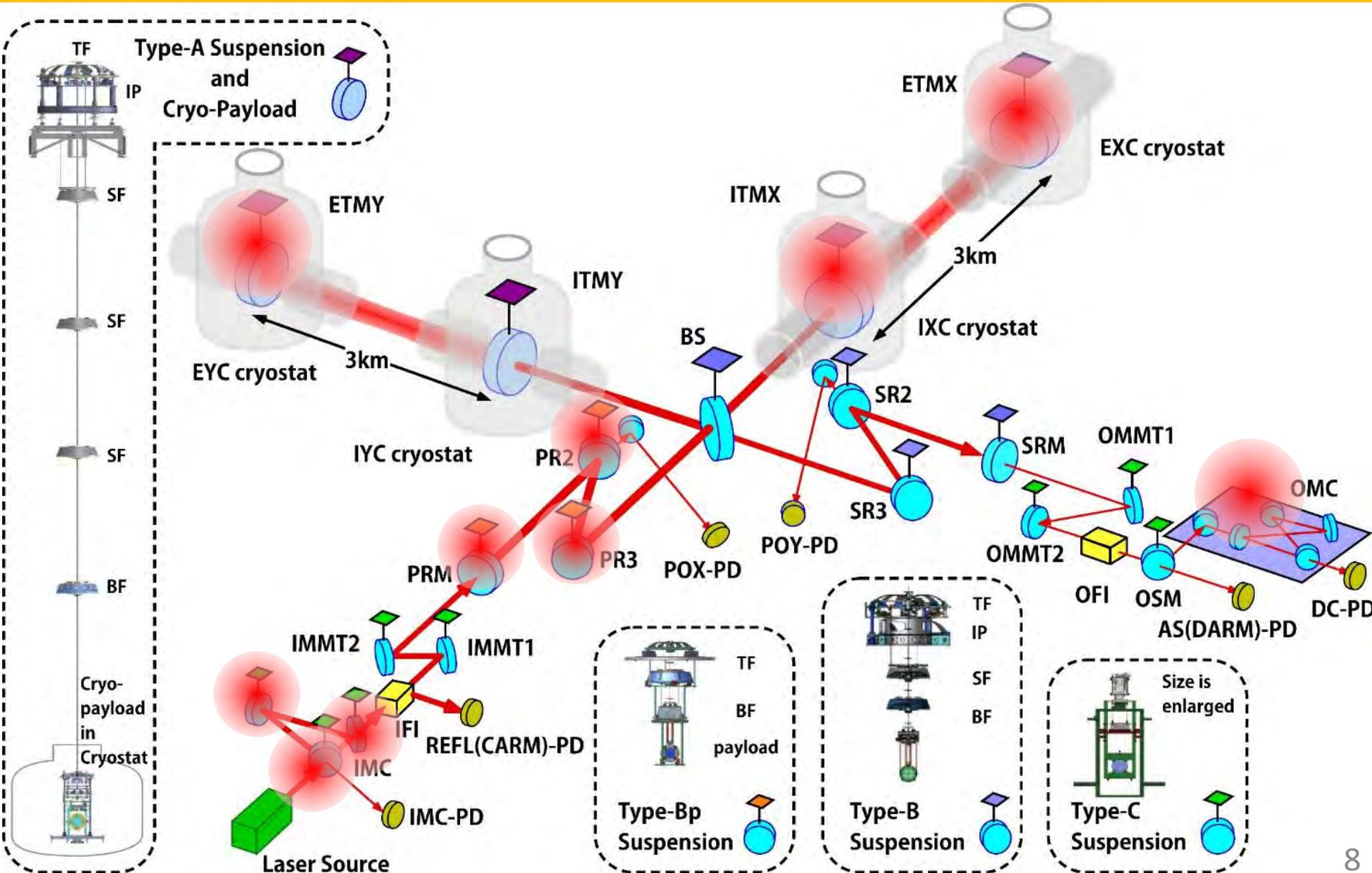
**Signal Wire Cut** because they were sandwiched by suspension components

**Magnet Dropoff** because of hitting on facing coil body



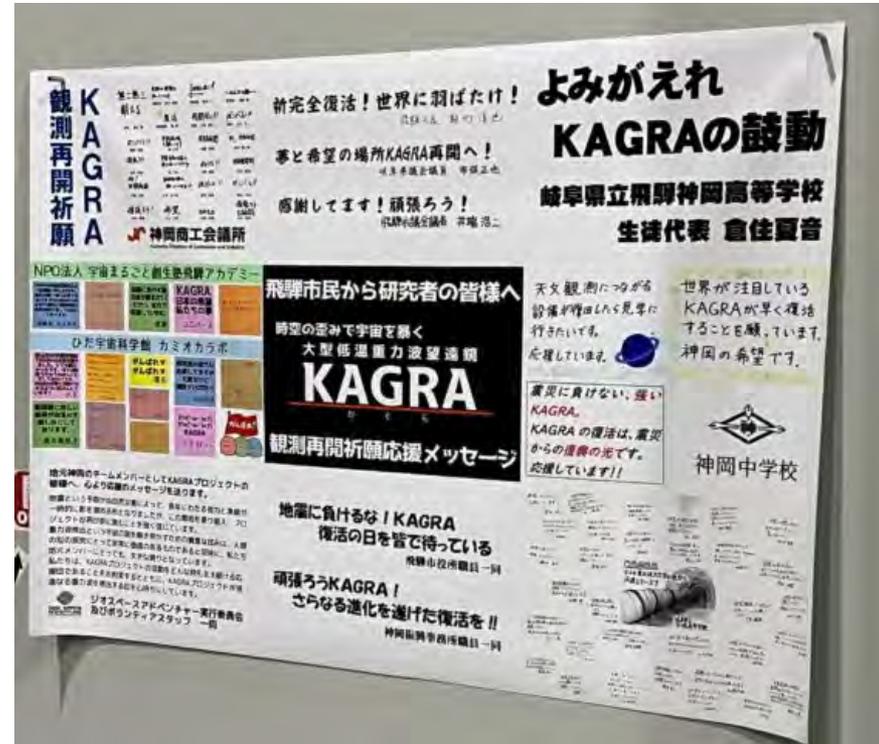
# ミラーサスペンション20中10基が破損

Photo DetectorとLaser以外はすべて真空エリアに收容されている。



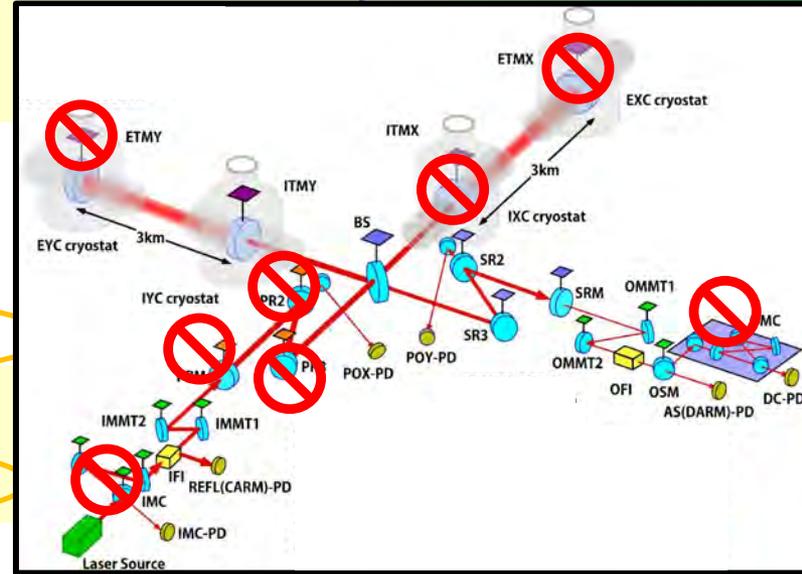
# Heartful Messages

- Many citizens of Hida-city gave us so many heartfelt messages for the KAGRA recovery.



# Recovery Status (started from Jan 2024)

March	April	May	June	July
<ul style="list-style-type: none"> <li>● IMC(MCi, MCo, MCE)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>● Recovered InVac</li> </ul> </li> <li>● IFI-PRM(Type-Bp)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>● Suspension Recovered inAir                                     <ul style="list-style-type: none"> <li>● Finalization</li> </ul> </li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● ETMX(Type-A)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>● Suspension Recovered inAir                                     <ul style="list-style-type: none"> <li>● Pumping/No Leak</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>● ITMX(Type-A)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>● Suspension Recovered inAir                                     <ul style="list-style-type: none"> <li>● Pumping/Leak Repair</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>● ITMY(Type-A)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>● Suspension Recovered inAir                                     <ul style="list-style-type: none"> <li>● Pumping/No leak</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>● PR2,3(Type-Bp)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>● Suspension Recovered inAir                                     <ul style="list-style-type: none"> <li>● Finalization</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>● SRM/2/3(Type-B)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>● No damages as suspensions</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Pumping</li> <li>● Recovered InVac</li> <li>● Recovered InVac</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Recovered InVac</li> </ul>	<p>FPMI Commissioning and Suspension control mitigation</p>



# Recovery Status (started from Jan 2024)

March

April

May

June

July

## ● ETMY(Type-A)

- Oily Material found in EYA
  - Material Component Analysis (4 individual places)
    - Start EYA Cleaning lead by Uchiyama-kun (ICRR)

• Cleaning Finish

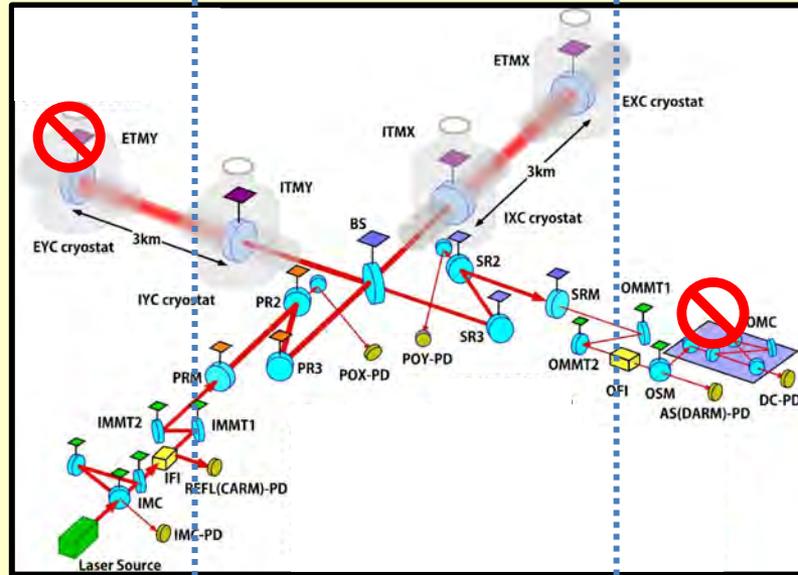
## • Repair In EY Tower

- Pumping/small leak was found (repair in September)

• Recovered InVac

FPMI  
Commissioning  
and  
Suspension control  
mitigation

• Recovered InVac  
• Check Isolation



## ● OMC

- OMC stack function check
  - OMC was confirmed to have troubles in its isolation function
    - We confirmed its malfunction visually
      - Start of recovery

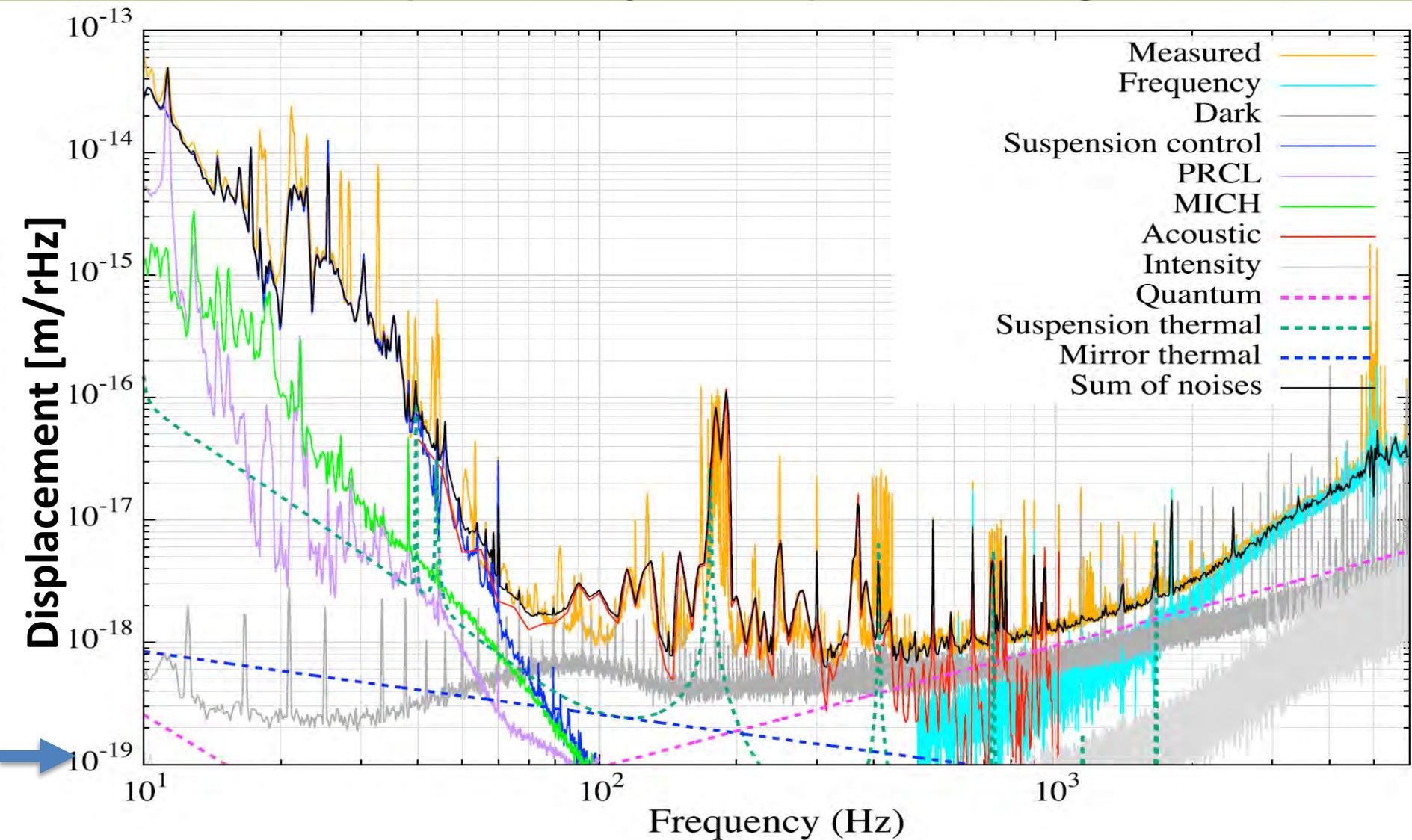
2024年12月 令和6年度文部科学省補正予算(案)  
【東京大学関係】＜国民の安心・安全の確保＞学校施設の災害復旧等：  
◆ 大型低温重力波望遠鏡(KAGRA)(宇宙線研究所)で復旧費が認められた。

# **KAGRAのCommissioning (7月～現在)**

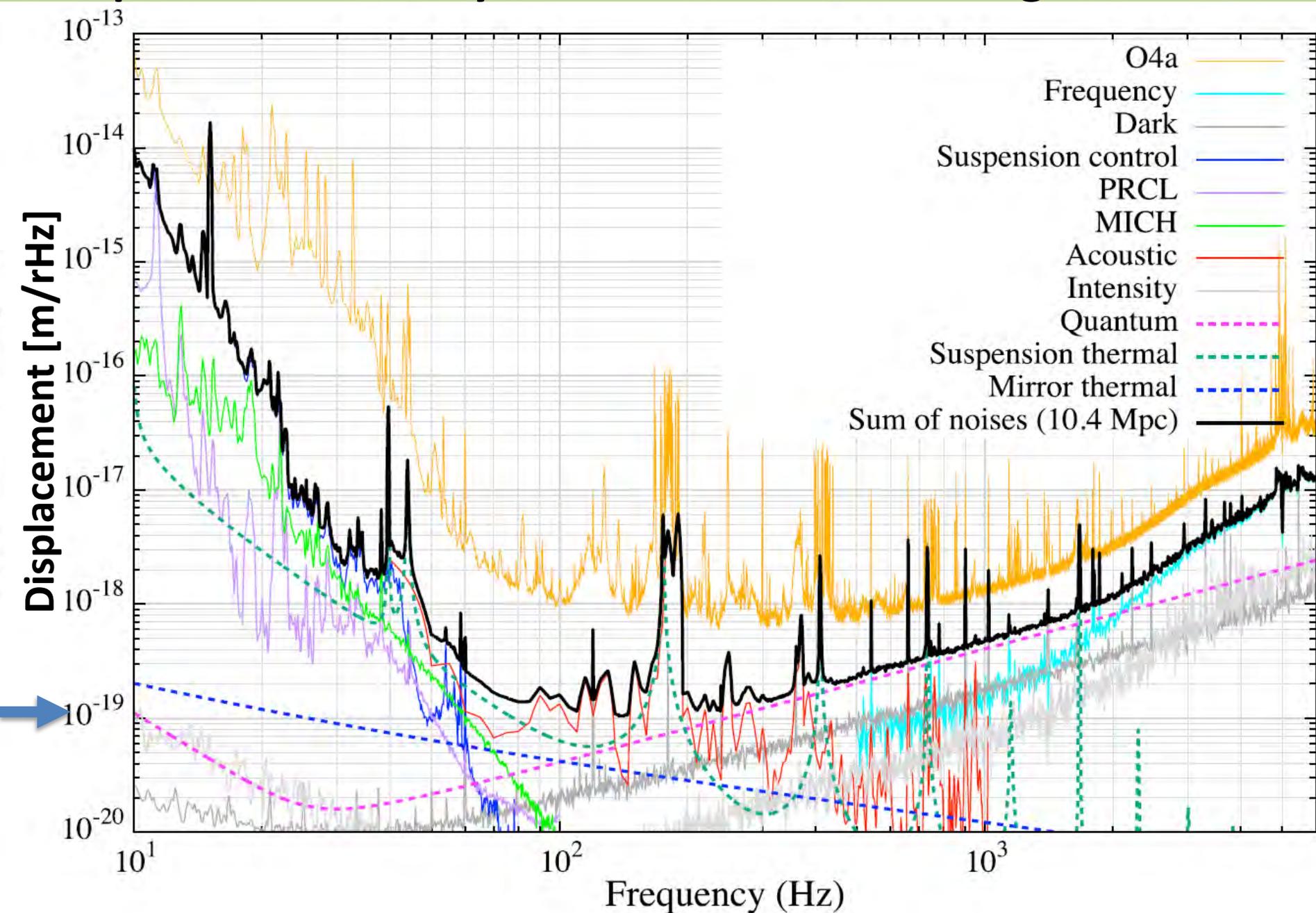
# Overview of Commissioning Works after July 2024

- On Jan 1<sup>st</sup>, M7.6 earthquakes at Noto Peninsula destroyed KAGRA
- O4b start by KAGRA from this Spring became impossible. We started recovery work until July.
- July 2024: Commissioning Restart.
- 8月: FPMI 制御が復旧. 給水システム故障発生.
- 9月:
  - ASC with WFS, BPC and ADS の基本的動作確認.
  - PRFPMI+RF の干渉計制御を復元.
- 10月:
  - OMCスタック改造を行い、よりアイソレーションを確認。
  - レーザーの変調におけるRFAM変換の減少を緩和することに成功。
  - PRFPMI+DCの干渉計制御が復元し、BNSレンジ感度が向上（～2Mpc（O4aでは1.3Mpc））。
  - PEM試験開始。
  - ダクトシールド冷却開始（12月には全ミラーの255K温度を達成）。
  - <<< PAB follow up meeting >>>.
- 11月:
  - いくつかのトラブル（DC PDの焼損、レーザー部屋で水漏れ）で、スケジュールが数日遅延。
  - PDの焼き付き対策開始。→2月に完了。
  - X/Yの給水設備の修理。
  - 能登半島付近でM6.4の地震。KAGRAのアライメントが破壊。復旧とヘルスチェックで1週間遅延。
  - PEM試験再開。
  - ノイズバジェット活動継続。
  - <<< MEXT review meeting >>>.
- 12月:
  - PEMによるタッピングテスト
- 2025年1月～:
  - 10Wレーザー動作。->ショットノイズ低減を実現。
  - 85K付近のミラー冷却による熱雑音低減。
  - ノイズハント継続中
  - クライオクーラーのトラブル

# O4a (2023 May ~ June) Noise Budget



# Expected Sensitivity Curve and its Noise budgets for O4c



# 10Mpcを達成するための戦略

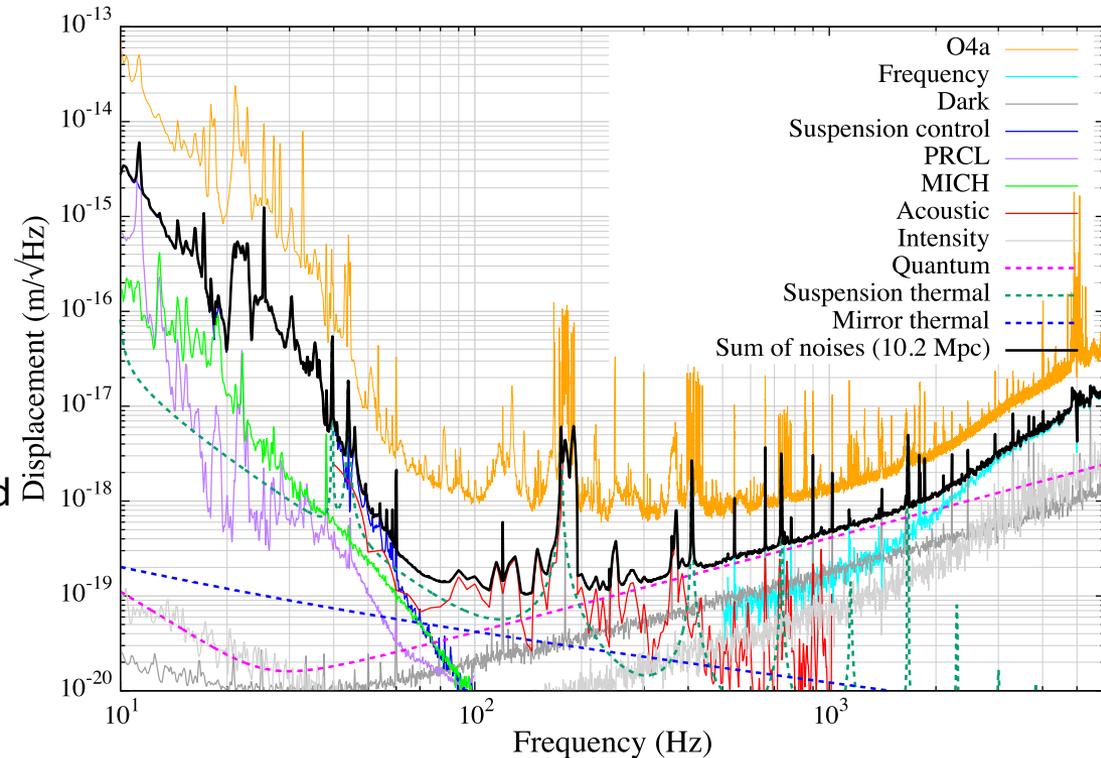
## ● 2023年に低減済みの雑音：

- Susp local control noise : 1/10
- PD dark noise : below shot noise (improved)

## ● 2024年1月1日に能登半島地震発生し修理に注力

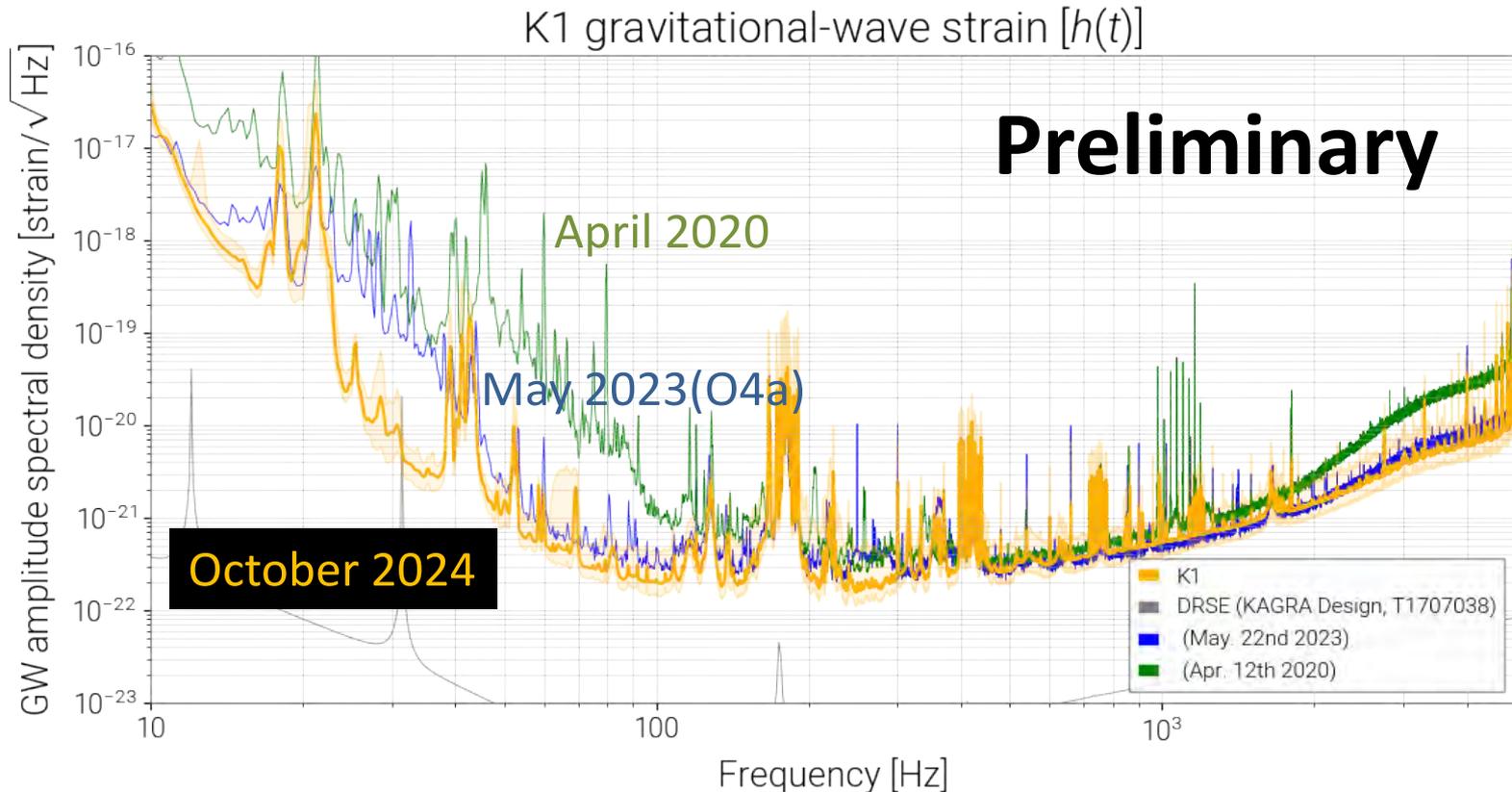
## ● 残りの雑音の低減Plan：

- **High power operation : 10W (5W was done)**
- Auxiliary control noise : 1/10 (done in FY2023)
- Quantum shot noise : 1/3 (was tried in FY2024)
- **Cooling : ~ 100K → Done Jan 2025**
- Thermal noise : 1/5
- **Control/hardware update :**
- Frequency noise :  $\sim 1/2$
- Acoustic noise :  $\sim 1/20$  (partially done)



# Improved Sensitivity(1) (Preliminary)

- KAGRAの感度は、レーザーパワー1.3Wといくつかの改良により、 $\sim 2\text{Mpc}$ に改善。
  - サスペンションの制御雑音は、最適設計されたフィルターで低減 $\rightarrow$  高い電気雑音によるミラーの揺れはかなり軽減できた。
  - OMCスタック構造回復  $\rightarrow$  OMC共振器への振動・音響雑音の侵入を低減。
  - WFS、BPC、ADSを用いたフルミラーアライメントセンシング制御による鏡のアライメント改善  $\rightarrow$  重力波信号検出ポートがより暗くなった。

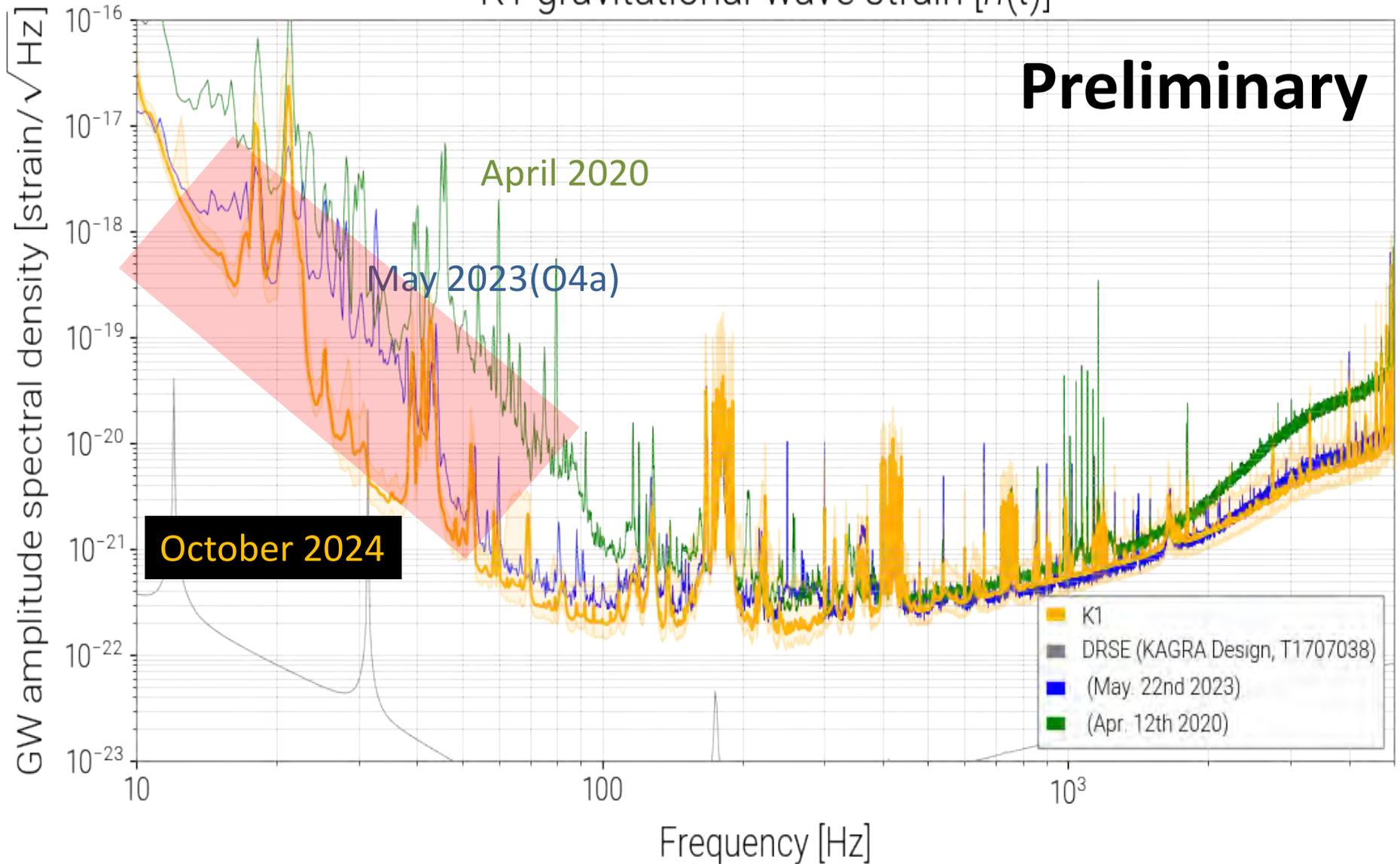


Configuration: Room-temperature PRFPMI with 1.3W injection

# Improved Sensitivity

K1 gravitational-wave strain  $[h(t)]$

**Preliminary**

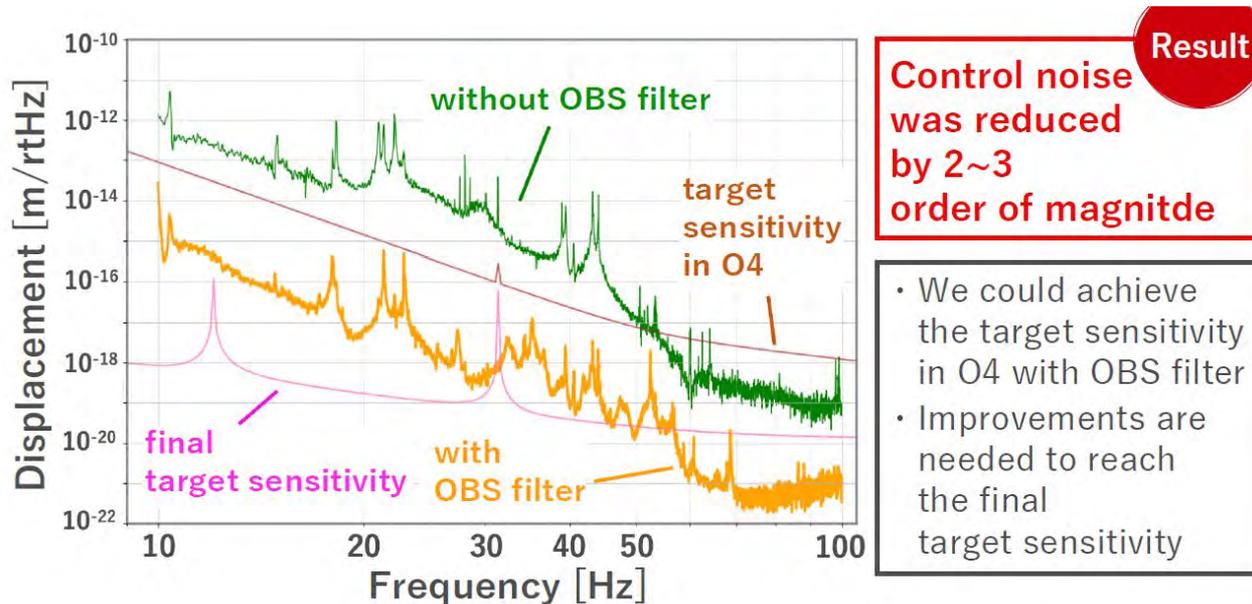


Configuration: Room-temperature PRFPMI with 1.3W injection

# Sensitivity enhanced by better damping control scheme

## ● Almost a factor of 10 improvement between 20 and 30Hz

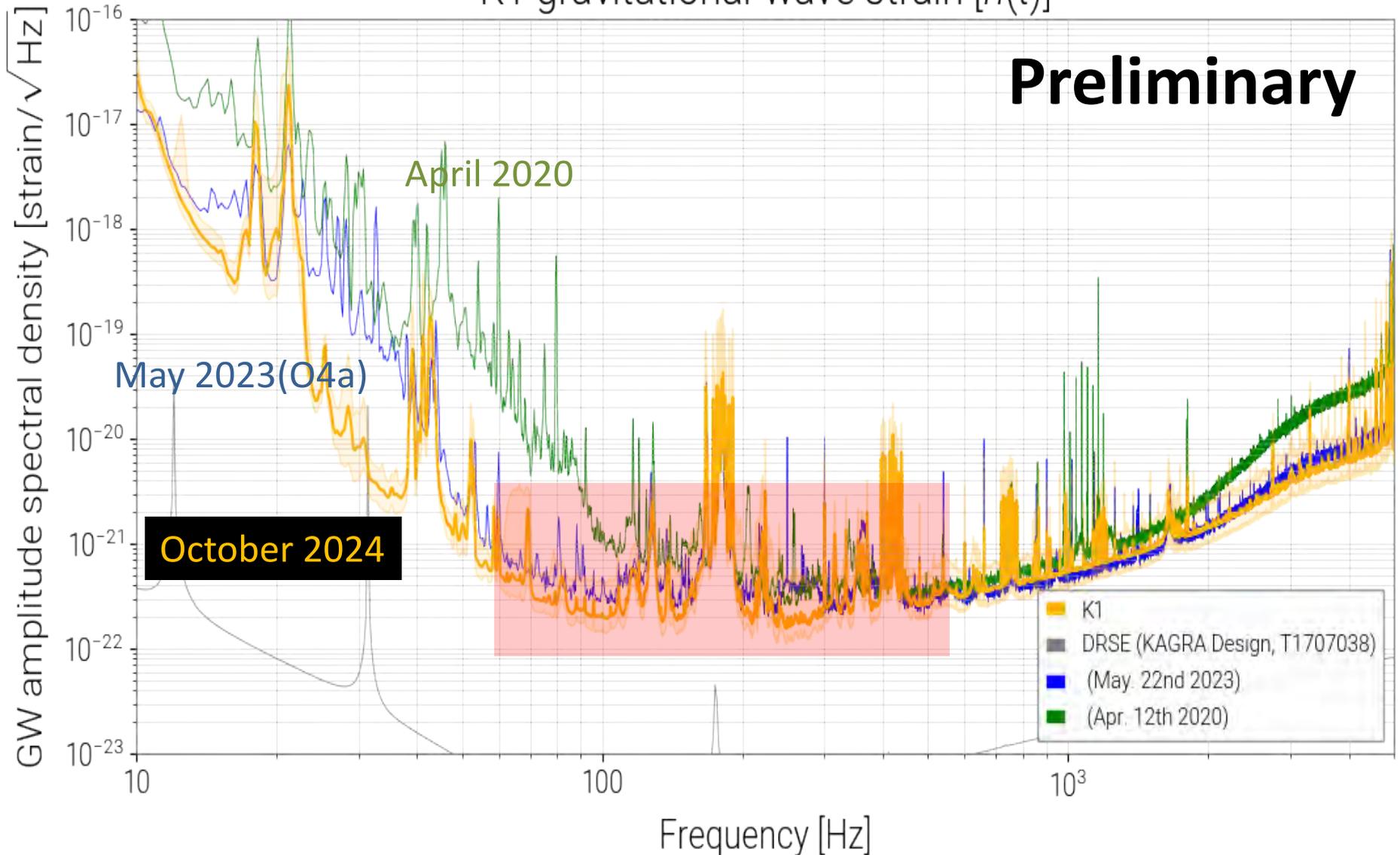
- We changed the local damping control scheme, especially for sapphire mirror suspensions, to reduce the control noise at low frequency. In fact, 10 times reduction of local control feedback signals of sapphire mirror suspensions was already achieved in the end of last year, but we have no chance to check it with the interferometer due to the Noto earthquake on January 1.



- The slight improvement between 30-60 Hz comes from local control update of the other suspension such as BS, SRs, and PRs because the sensitivity during O4a was limited by local control noise of these suspensions up to 60 Hz.

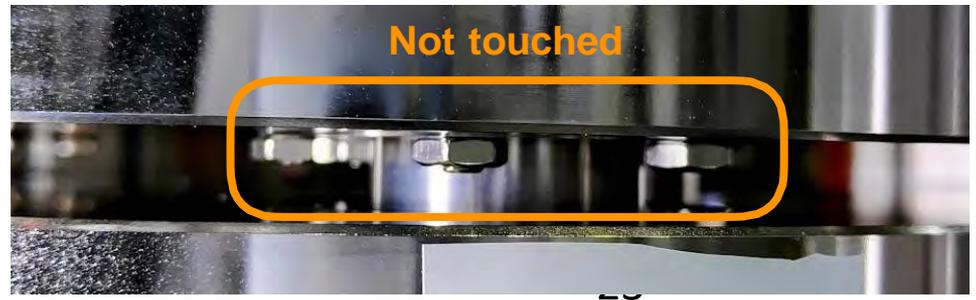
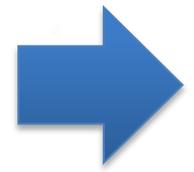
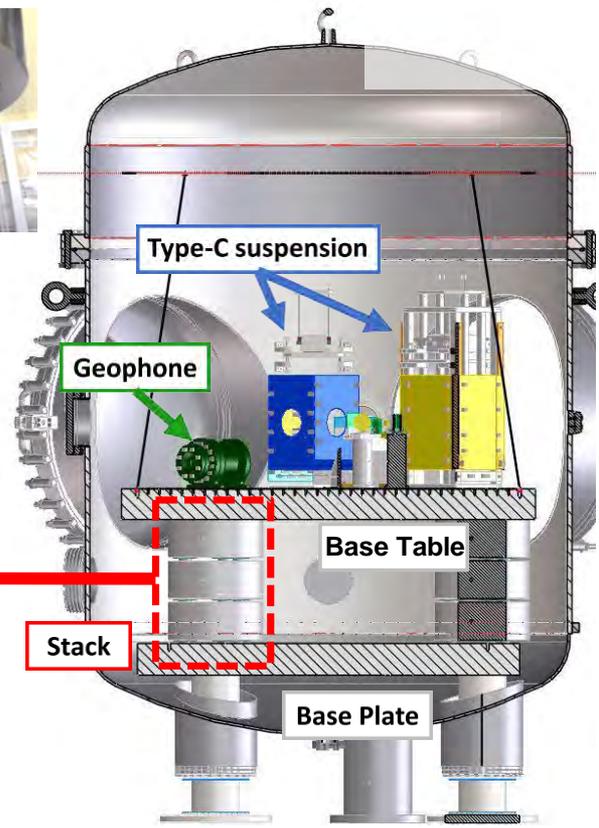
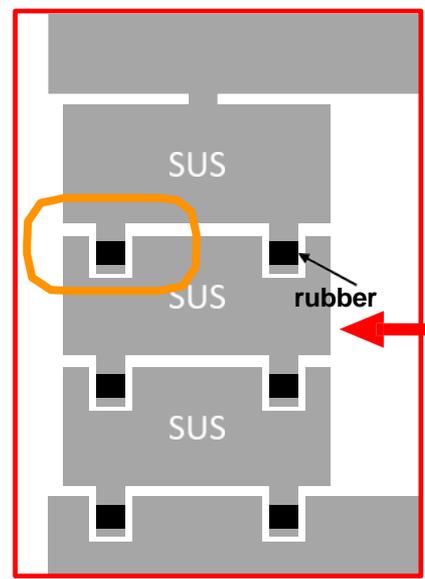
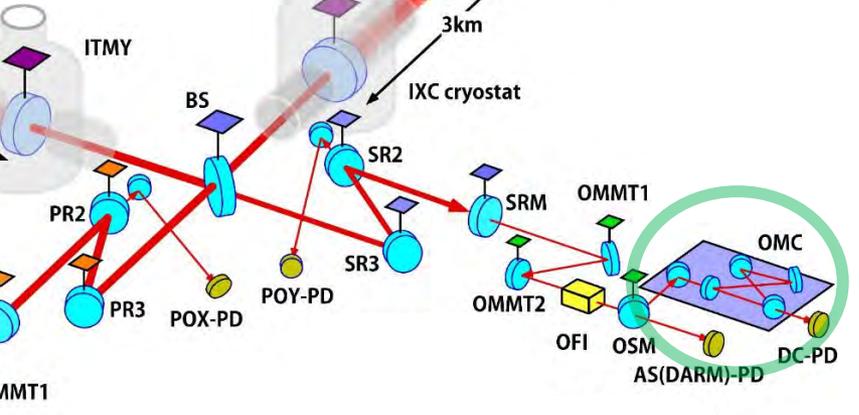
# Improved Sensitivity

K1 gravitational-wave strain  $[h(t)]$



# OMC Stack Isolation Recovery (in July)

- We found that OMC stack structure was damaged, and it lost seismic noise isolation function because the neighboring SAS blocks contacted with each other.
- We decided to remove all optics inside the OMC vacuum tank and reconstruct the stack structure.

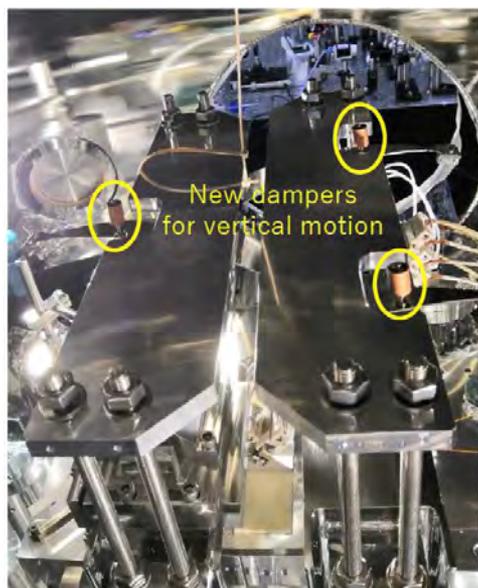


# Sensitivity enhanced by OMC Suspension Damping

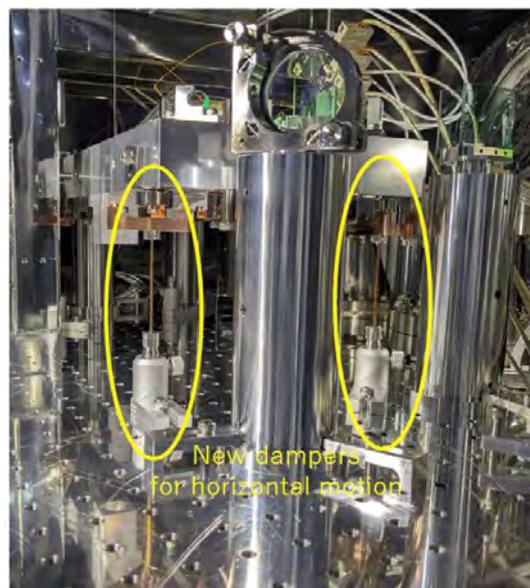
- About the noise reduction between 60-300 Hz, we think it is thanks to some improvements around OMC suspensions.
  - One is improving the passive damping performance of OMC suspension resonances to install new magnet dampers on blade springs and below OMC breadboard.
  - Another is to repair the contacted OMC stacks as already explained.
  - The other is reduction of AC power line noise injected to OMC PZT, which really shakes OMC length.
  - These activities reduce the RMS of OMC length fluctuations, and square coupling from the residual OMC length fluctuation to OMC transmission power becomes smaller.



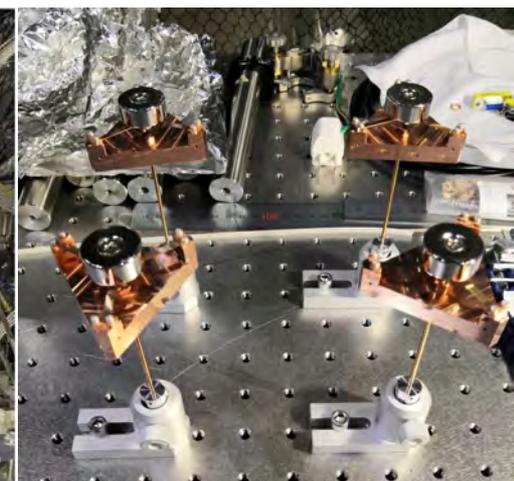
Dumper for blades



Top view of  
OMC suspension blades with dampers



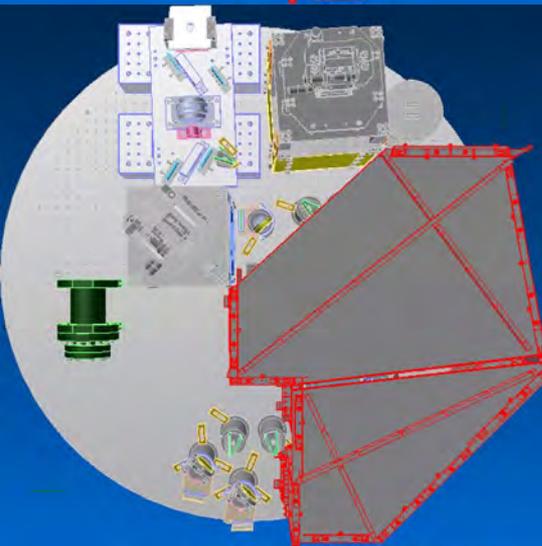
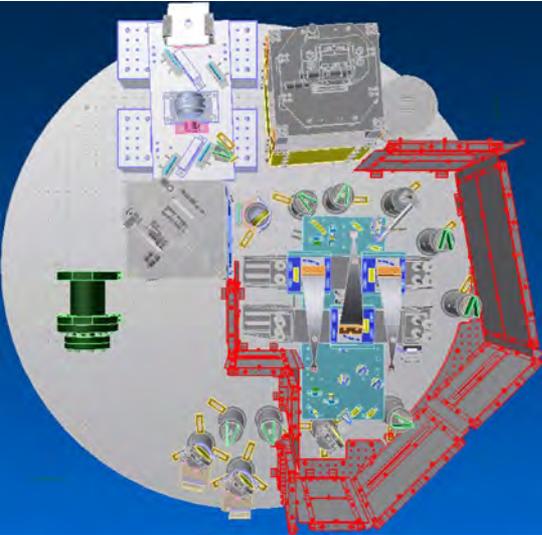
Side view of OMC Plate with Dampers



Dumper for OMC plate

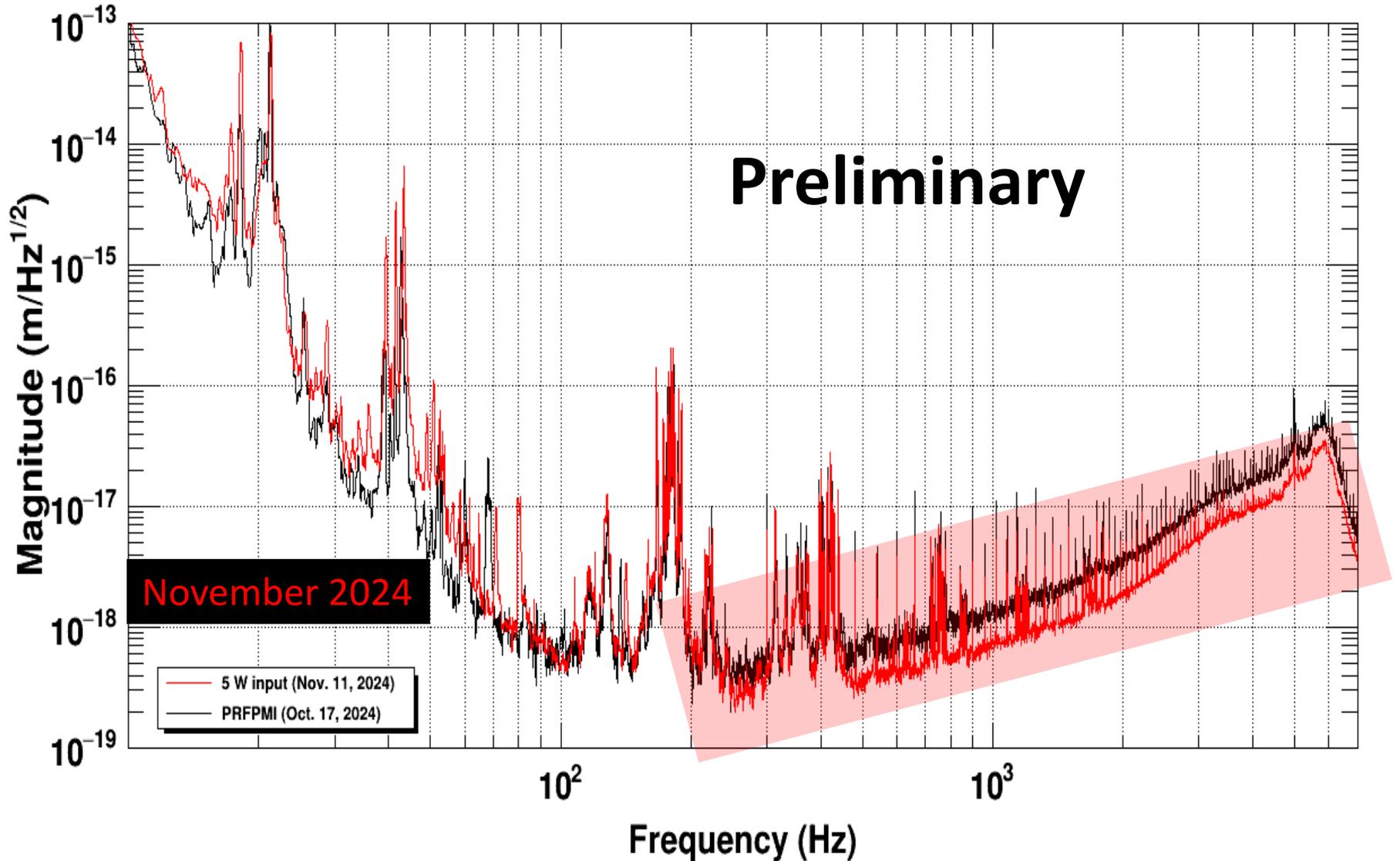
# Stray Light Mitigation Around OMC

Shrouds coated in black around OMC for fit check.



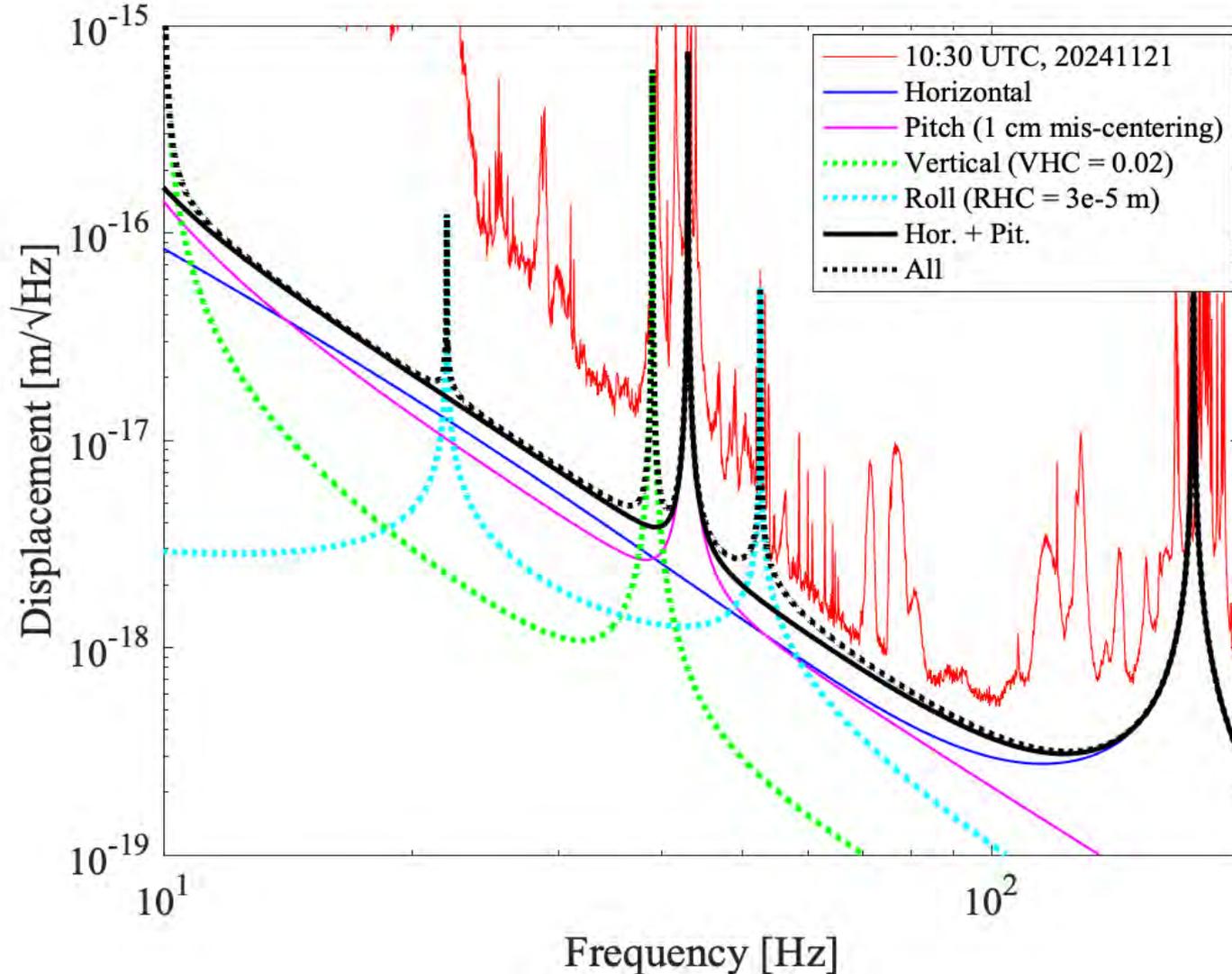
# Improved Sensitivity(2) (Preliminary)

- KAGRA sensitivity was improved for high frequency range owing to 5W laser power

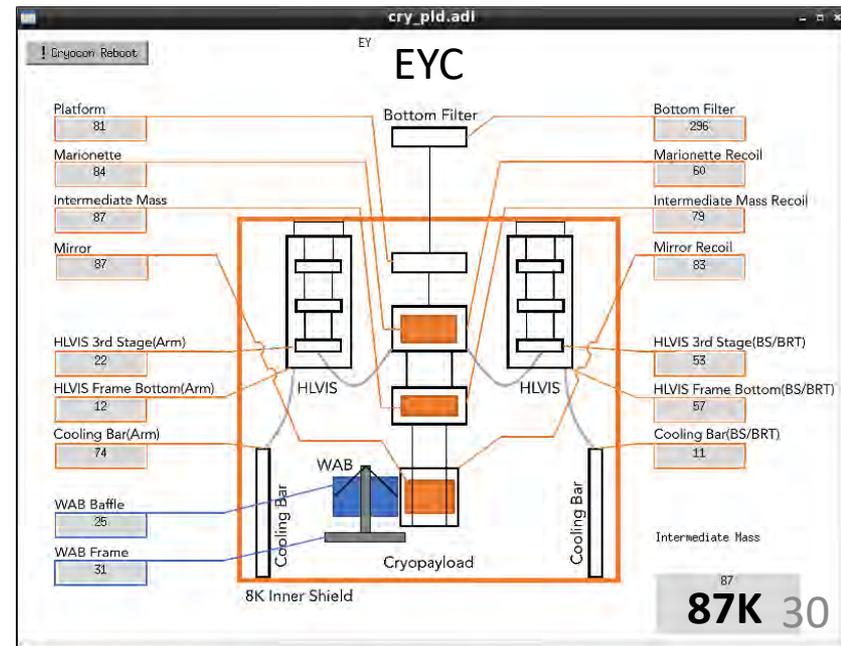
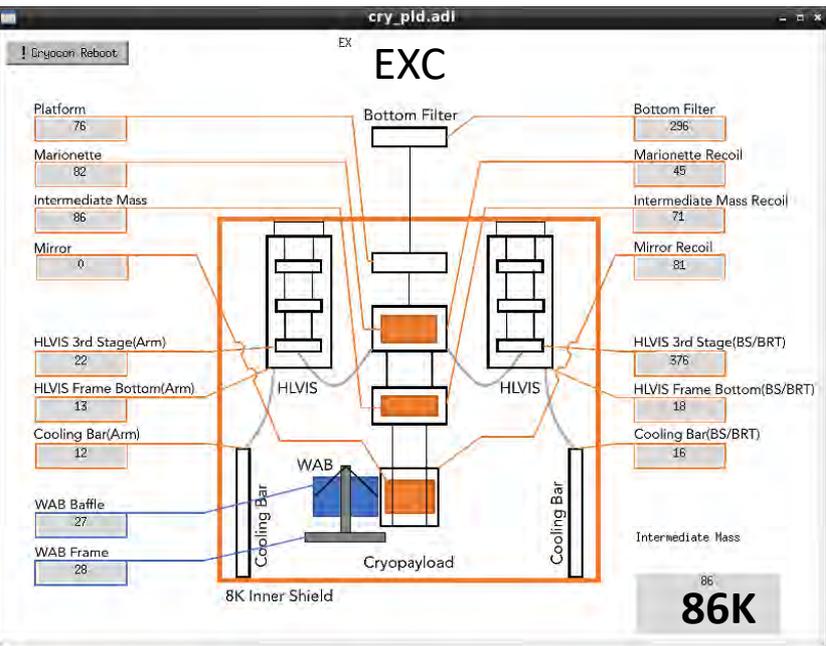
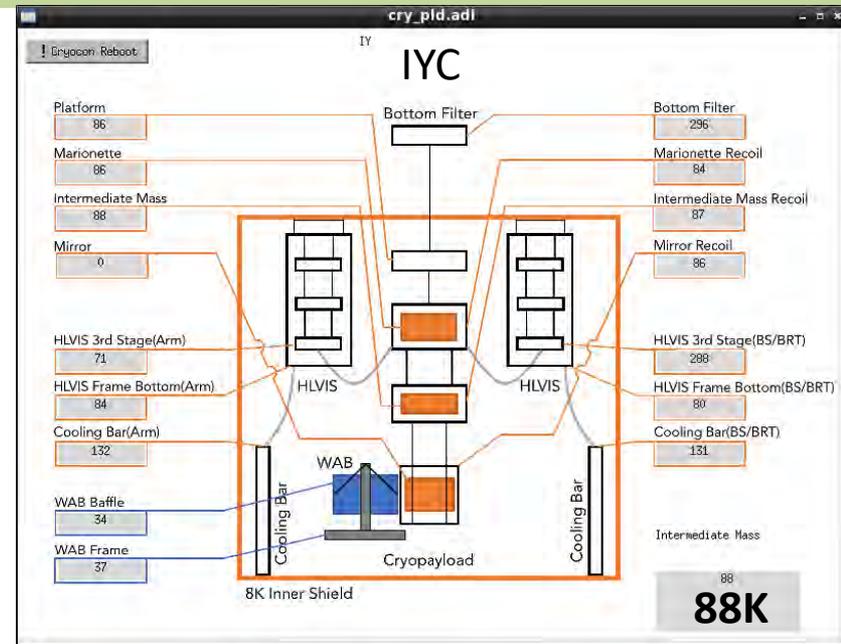
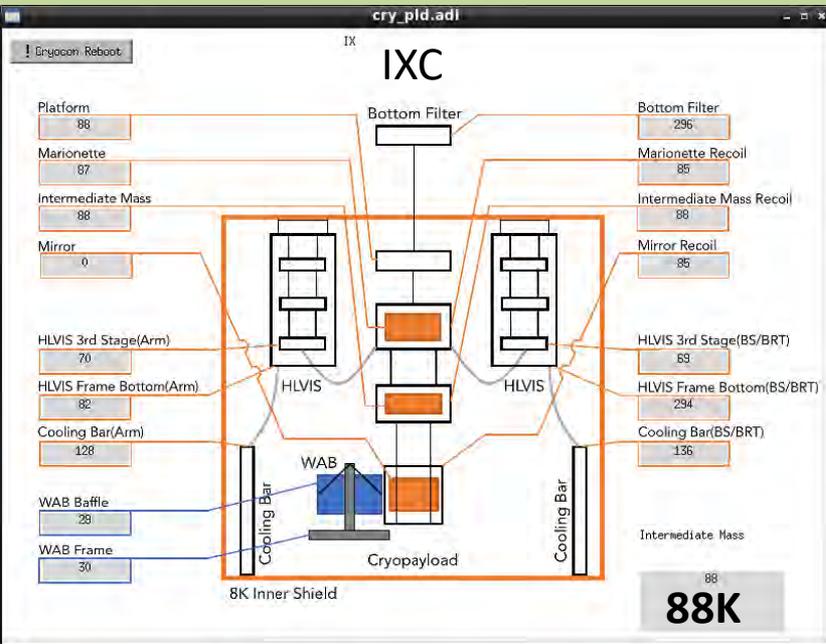


# Thermal Noises are Visible ?

- The  $P \rightarrow L$  coupling thermal noise and suspension thermal noise seem to dominate the sensitivity around  $50 \sim 100\text{Hz}$ .  $\rightarrow$  We decided to cool cryo-payloads.



# Mirror Cooling was completed at ~ 90K

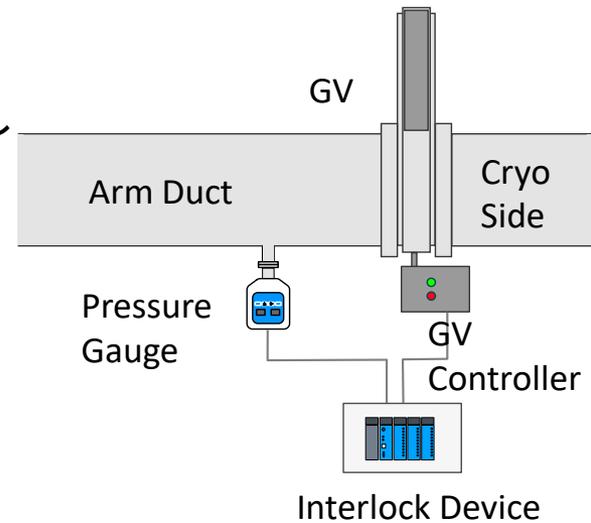


# 真空システムの信頼度を上げる措置

## ● O4a の前後のコミッショニング中に学んだことは？

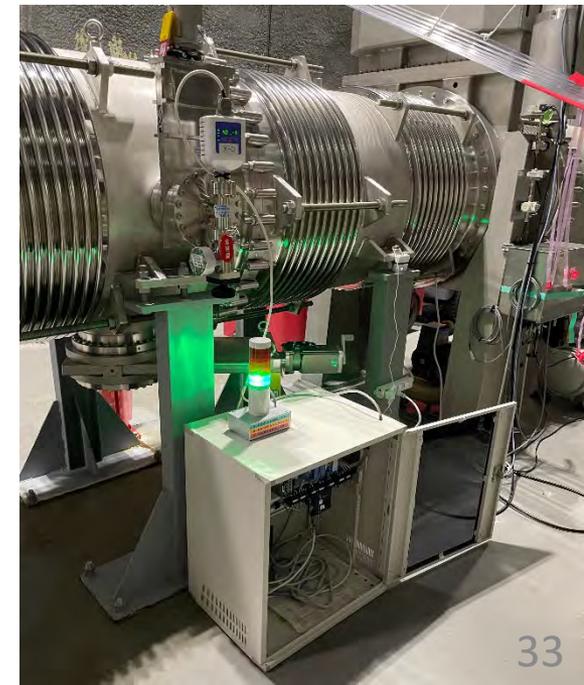
- アーム内のイオンポンプの高電圧コネクターにおける真空漏れが、高湿度環境が原因で発生。→ **ミラーの霜付き**.
- アーム内の真空レベルの低下が、何らかのトラブルにより停止したTMPから、動作中のドライポンプから空気が流入したことが原因で発生。→ **ミラーの霜付き**.
- 各センサーの高真空レベルをトリガーとするメールアラートシステムを設定していましたが、事前にGVをすぐに閉じることはできてなかった。

Interlock configuration diagram

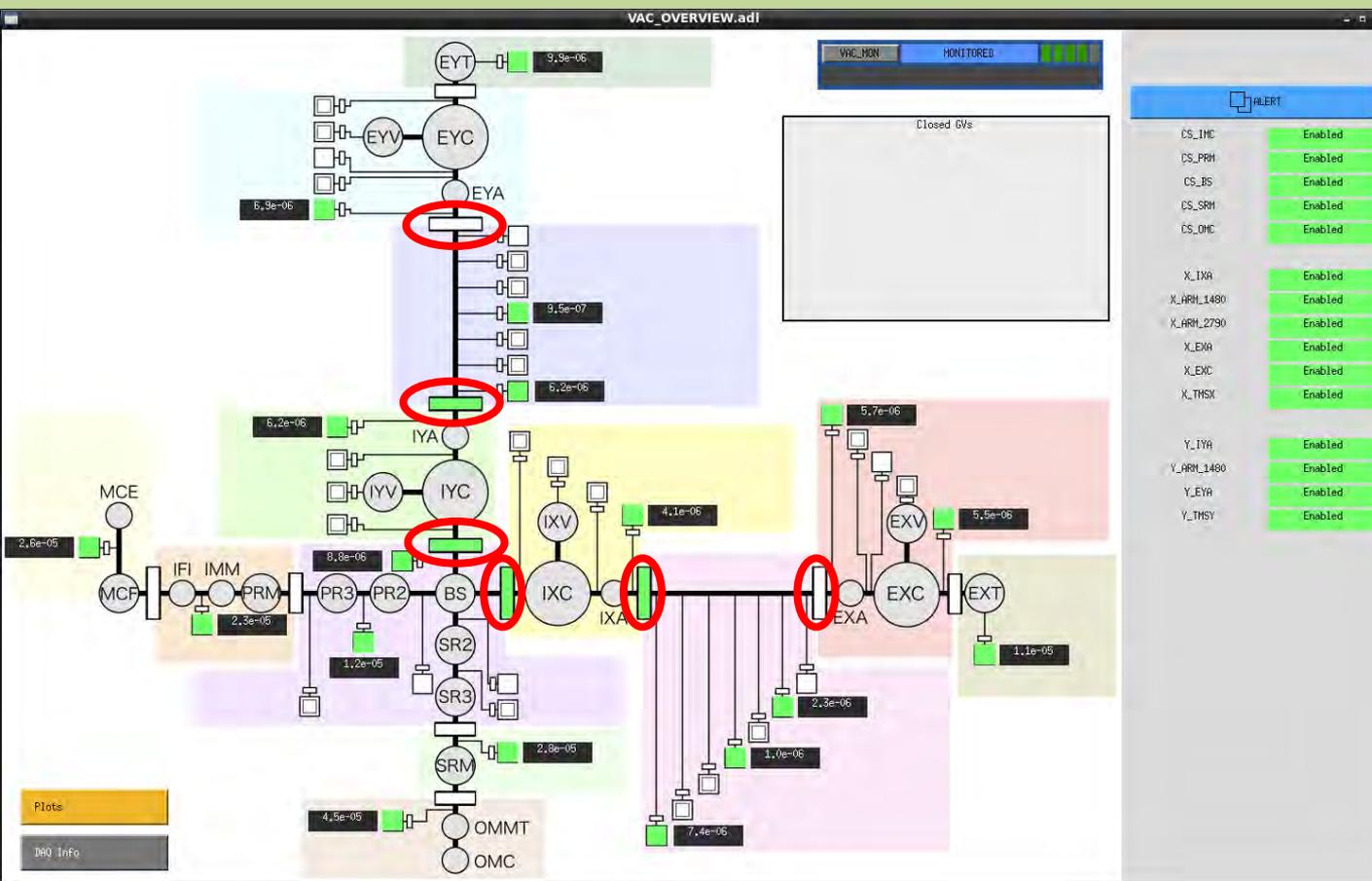


## ● 対策は？

- **アーム内にTMP用のインターロックシステムを準備**
  - ドライポンプとTMPの間のEMバルブを自動で閉じることが可能に。
- **IEXYAとアーム、およびBSの間の自動ゲートバルブ閉鎖システム**
  - IEXYAタンク付近の真空レベルを感知し、
  - 高真空レベル ( $10^{-4}$  Pa) が検出された場合、IEXYAとアーム/BS間のGVが自動で閉止。
  - インターロック装置はゲートバルブを閉じる機能のみ。
  - 閉じた原因を特定し修正した後、ゲートバルブは現場の担当者によって開ける。
- GVの状態はMEDMシステムで監視可能。
- Switch Botを使用することで遠隔での閉鎖も可能。



# 真空システムの信頼度を上げる措置



- 赤丸で囲んだゲートバルブにインターロック装置を設置。
- 6箇所の仕切弁にインターロック装置を設置予定。
- 2024/12/7までに4つのGVにインターロック装置を設置。
- 2024年12月18日までに2つのGVのインターロック装置設置完了。
- 2025年に最後の一つのGVに設置。



## コントロールルームのモニター画面

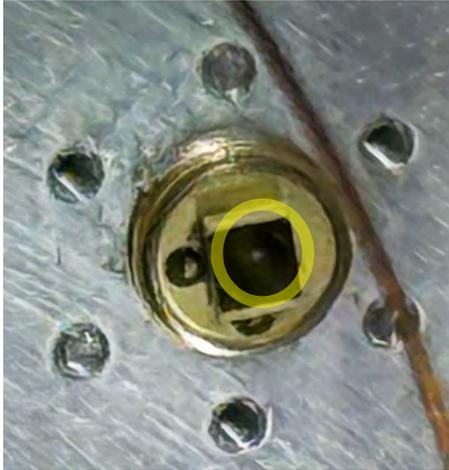
- Gate valve display status

■ → Open    □ → Installation and adjustment in progress  
■ → Close

# 他にもさまざまに深刻な問題が発生し対処中

## ● DC PDs の焼損

- トリガーPDの不適切な選定と不適切なロジックによるもの。→改善済み。根本的には、シャッターを用意。



PDの在庫がない場合、O4への参加が不可能になる可能性が発生。

MIFに1つ、ISSに3つ、CALに2つ、計6つの在庫を確認。しかし、製品自体の供給が困難なようです。

## ● W水供給システムのトラブル

- 老朽化したか、予算がない。
- トラブルと、KAGRAは止まる。



水の供給が止まると、コーナーステーションやPSLルームの温度を安定させることができず、クライオクーラーの運転もできなくなるため、O4への参加が不可能になる

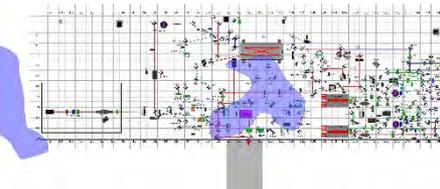
すべてのステーションで緊急メンテナンスを実施。しかし、まだ不十分

## ● レーザー部屋で水漏れ

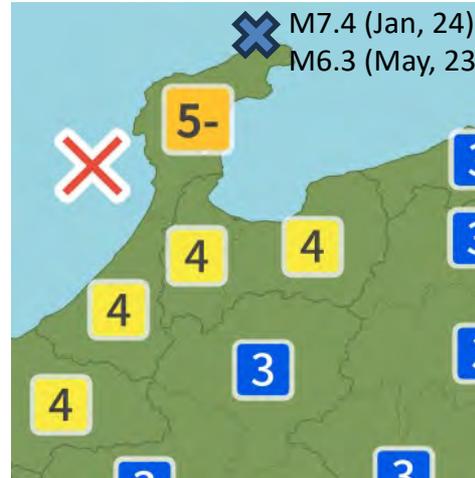
- 接続スリーブの選択ミス



FB/NeoLase が損傷した場合、コミショニングに大きな遅れが生じる可能性がある。



## ● 能登半島で、再度M6.4の地震が発生 (2024年11月27日)



- KAGRAの存続に関わる重大なマグニチュードの範囲は6.4から7.4の間であると推定。

- KAGRAサイトでは、  
**M6.4の地震: 短時間の揺れで震度0.5相当**  
**M7.4の地震: 長時間の揺れで、震度3相当**

# 新しいサファイア鏡の準備状況

- 韓国のグループが、複屈折が良好で吸収レベルが許容範囲内の2枚のサファイア基板を準備。
- 岡本光学は、2023年度に反射/透過面の予備研磨と側面の平面研磨を実施。
- ニコンは、最終研磨のための予備研磨を遂行中。2025年度までに最終研磨を完了する予定。
- その後、LMA社においてコーティングを。
- サファイアアイヤーの準備と接合準備は、富山大学で進行中。

# Summary of LIGO-Virgo observing runs by O3

**O1: from September 2015 to January 2016, LIGO only**

First observation, GW150914, 3 confident events

**O2: from November 2016 to August 2017, LIGO only (+ Virgo in August 2017)**

First observation of BNS, GW170817, 8 confident events

**O3: from April 2019 to March 2020, LIGO and Virgo**

First confident observation of BHNS, GW200115\_042309, 79 confident events

**Total 90 confident events**

**Binary Black Holes (BBH):** about 84-87

**Binary Neutron stars (BNS):** 2 confident events GW170817, GW190425

**Black hole–Neutron star binaries (BH–NS):** 1 confident event GW200115\_042309

GW190814: either BBH or BHNS (23.3 2.6) Msun

GW200210\_092254: either BBH or BHNS (24.1, 2.83) Msun

GW191219\_163120: less confident event

(GW200105\_162426: sub-threshold event)

## Catalog papers

**GWTC-1: O1, O2**

PRX 9, 031040 (2019)

arXiv:1811.12907

**GWTC-2: O1, O2, O3a**

PRX 11, 021053 (2021)

arXiv:2010.14527

**GWTC-2.1: Update of GWTC-2**

PRD 109, 022001 (2024)

arXiv:2108.01045

**GWTC-3: O1, O2, O3a, O3b**

PRX 13, 041039 (2023)

arXiv: 2111.03606

# O4 run

O4: from May 24 2023 to October 7, 2025

- O4a: 2023-05-24 to 2024-01-16
- O4b: 2024-04-10 to 2025-01-28 17:00 UTC
- O4c: 2025-01-28 17:00 UTC to 2025-10-7 17:00 UTC

O4 public alerts (as of Jan. 28, 2025) <https://gracedb.ligo.org/superevents/public/O4/>

- O4 Significant Detection Candidates: **186**
  - O4b Significant Detection Candidates: 105
  - O4a Significant Detection Candidates: 81

データ解析は進行中で詳細はまだ非公表だが、  
今日までに3つの論文を発表

# これまでに発表された論文

1. 中性子星+低い質量のmass gapブラックホール合体 ApJL 970, L34 (2024), [arXiv:2404.04248](https://arxiv.org/abs/2404.04248)

$m_1$ : 3.6 (+0.8 -1.2) Msun

$m_2$ : 1.4 (+0.6 -0.2) Msun

2. 超新星SN2023ixfからの重力波の探索 [arXiv:2410.16565](https://arxiv.org/abs/2410.16565)

ホスト銀河M101, ~6.4 Mpc, SN2023ixfは過去数十年で観測された中で最も近傍で発生した重力崩壊型超新星爆発

重力波は未検出

3. O4aデータを用いた、知られている45個のパルサーからの重力波の探索

重力波は未検出 [arXiv:2501.01495](https://arxiv.org/abs/2501.01495)

# 日伊アクションプランの中の INFN-KAGRA間の研究協定

## ● 盛山大臣がベルニーニ イタリア大学・研究大臣を表敬訪問

6月27日(木曜日)  
科学技術・学術、国際

6月27日、G7教育大臣会合への出席のためイタリアを訪問していた盛山大臣は、ローマにて、アンナ・マリア・ベルニーニ大学・研究大臣を訪問し、日本とイタリア間の科学技術協力について意見交換を行うとともに、新たな連携強化について合意しました。

盛山大臣は、1988年に締結した日伊科学技術協力協定の下で様々な科学技術交流が行われてきたことや、イタリア大学・研究省と文部科学省の間で昨年署名した科学技術・研究分野での協力に関する覚書に基づき、今回、新たに「重力波」及び「蓄電池」の分野での協力が開始されることを歓迎する旨を伝えました。

ベルニーニ大臣からは、科学技術分野において協力関係が進展することを歓迎するとともに、両国の大学間の協力も更に進展させていきたいと期待等が述べられました。

文部科学省は、引き続きイタリアとの協力関係を促進してまいります。



- 2023年度にイタリアの大学・研究省と日本の文部科学省の間で昨年署名した科学技術・研究分野での協力に関する覚書があった模様。
- 2024年2月の二国間協力の中の1つの課題として、**重力波に関する技術協力が含まれており**、イタリアからからは、**両国がそれぞれ費用を負担し実施**することを求められているとの連絡が4月にあった。
- 急遽、2024年6月に、イタリアのINFNとKAGRAの間で、**第三世代重力波望遠鏡の技術開発に関する共同研究協定を締結**。
- 2024年6月14日：日伊アクションプラン発表

([https://www.mofa.go.jp/mofaj/erp/we/it/pageit\\_00001\\_00742.html](https://www.mofa.go.jp/mofaj/erp/we/it/pageit_00001_00742.html))



- 6月27日、イタリアの大学・研究省と日本の文部科学省の間で昨年署名した科学技術・研究分野での協力に関する覚書に基づき、今回、**新たに「重力波」及び「蓄電池」の分野での協力が開始されることを歓迎**するとの声明。
- イタリア側には、ET計画実現に向けた研究開発のための大型予算が措置される模様。
- **ICRRの国際協同利用研究のうちのイタリアの分がマッチングファンドの一部にもなっている。**

# IGWN (The International Gravitational-Wave Observatory Network)

- 国際重力波観測ネットワーク(IGWN)は、重力波(GW)干渉計を用いて重力の基礎物理学を探求し、宇宙を観測するために設立された自主運営のコンソーシアムです。
- IGWNは、重力波天文学、天体物理学、および基礎物理学の最前線を切り拓くことを目的としています。そのために、IGWNの地上型干渉計式重力波検出器の開発・設置・運用を行い、重力波観測のための技術を開発・導入し、さらに重力波データの解析を行います。
- IGWNが設立されれば、既存の大規模地上ベース重力波観測所と、その科学的使命を遂行する世界的コンソーシアムから構成される。
- IGWNは、現世代の重力波望遠鏡グループである、LIGO Scientific Collaboration(LSC)、Virgo Collaboration(VC)、およびKAGRA Collaboration(KSC)の成果の上に立脚する組織であると同時に、いずれは、協調的かつ効率的な方法で、科学プログラムを実行する、統一された世界的コンソーシアムに進化させる予定である。

# Summary

- 10MpcのBNSレンジ感度に到達するためのコミッショニングが進行中。
- サスペンション制御の変更とOMCスタックリカバリーの効果が感度において検証。
- Full Mirror Alignment Sensing Controlにより、安定したコミッショニング作業、ノイズバジェットティング活動が可能となった。
- それでもスケジュールを遅らせるいくつかのトラブルに遭遇。
- O4cの再稼働はLVK合意により6月4日からとなった。
- O4は186の重要な検出候補を報告している。O4イベントに関する3つの論文が発表された。