

KAGRA 真空監視系への KEK 加速器技術の導入 II

INTRODUCTION OF ACCELERATOR KNOW-HOWS TO KAGRA'S VACUUM SYSTEM II

上窪田紀彦^{#, A)}, 楊敏^{A)}, 都丸隆行^{B)}, 木村誠宏^{C)}, 中垣浩司^{C)}, 内山隆^{C)}, KAGRA Collaboration
 Norihiko Kamikubota^{#, A)}, Min Yang^{A)}, Takayuki Tomaru^{B)}, Nobuhiro Kimura^{C)}, Koji Nakagaki^{C)}, Takashi Uchiyama^{C)}

^{A)} KEK/J-PARC, ^{B)} NAOJ, ^{C)} ICRR, the University of Tokyo

KAGRA Collaboration

Abstract

KAGRA is a detector for gravitational waves, a laser interferometer with 3km x 3km arms, located in an underground site in Kamioka, Gifu, Japan. Vacuum system for KAGRA was constructed already, while a remote monitoring system for it is not well implemented yet. In 2021, KEK staff members started to discuss the issue with KAGRA on-site staff members. During 2022-2023, EPICS-based prototypes were developed for monitoring vacuum components, and were evaluated for near future mass production. This report describes the current status of KAGRA vacuum monitoring system, various problems behind, and future plans.

1. はじめに

KAGRA は東京大学宇宙線研究所(ICRR)、高エネルギー加速器研究機構(KEK)、自然科学研究機構 国立天文台(NAOJ)を共同ホスト機関として遂行するプロジェクトである。KAGRA は重力波観測施設で、3 km x 3 km のレーザ干渉計が岐阜県神岡の地下に建設されている[1, 2]。重力波観測で先行するアメリカの LIGO[3] やヨーロッパの VIRGO[4]も同様の長基線(3-4 km)レーザ干渉計であるが、KAGRA は冷却した鏡で干渉計を構成すること、また地下に建設されていることが特徴である。また、重力波源の方向決定には、距離が離れた複数のレーザ干渉計の同時観測が重要で、アジアに位置する KAGRA の運用が期待されている[5]。

上の事情から、Fig. 1 で示すように、LIGO-VIRGO-KAGRA 間で重力波を観測する期間(Observing Run)を合わせるよう調整している[6]。2015 年以降 2020 年までに 3 回の Run があり、現在は 4 回目の Run "O4" が進行中である。O4 は、2023.年 5 月開始で 20 か月観測する予定である(1 か月 x2 回の中断を挟む)。

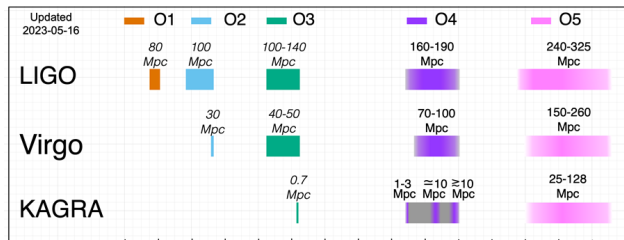


Figure 1: Timeline of observing runs, quoted from [6].

KAGRA の建設・運用では、ICRR、NAOJ、KEK の 3 者間で覚書 (MOU) が締結されている[7]。KEK は、

[#] norihiko.kamikubota@kek.jp

KAGRA の副推進機関として、真空システム、極低温システム、機器測量、などで協力する。ICRR と KEK の覚書は 2010 年度から始まっているが、2020 年度から「機器制御システム(主として EPICS 機器制御システム、干渉計制御システムは含まない)」が追加された。しかし 2020 年はコロナ禍が始まった年で、実際に機器制御の活動が始まったのは 2021 年度の後半からである。活動の中心は KAGRA 真空監視系の構築となっており、真空機器向けの最初の Prototype の開発が 2022 年の加速器学会で報告されている[8]。

この報告では、2021 年度以降の KEK 加速器から KAGRA 機器制御への貢献について解説する。中心の話題は KAGRA 真空機器の遠隔監視であるが、その背景の問題点についても議論する。

2. KAGRA 真空監視系の状況

2.1 KAGRA 真空システムと真空監視系整備の経緯

レーザ干渉計の光の空気散乱は重力波検出のノイズ源となるため、干渉計は真空中に置かなければならない。KAGRA の真空システムは、KEK 加速器の超高真空技術を参考に設計された。約 500 本の Φ800 mm・12 m の真空ダクトを中心に生まれ、その真空容積(~3000 m³)は大型加速器より 1 桁大きい。最終的に要求される真空度は 2x10⁻⁷ Pa とされる[9-11]。

KAGRA 真空システムの全体レイアウトを Fig. 2 に、また基本ユニットの構成を Fig. 3 に示す。各ユニットは、Gate Valve (GV) 2 台、Pump 3 台(Roots、TMP、IP)、Cathode gauge = 真空計 1 台、から成るが、それらが約 40 か所に分散配置されている。3 km の X/Y arm 部分の真空ユニットは、約 500 m 毎の配置である。また、X/Y arm の真空を遮断する大口径 Gate valve (Φ800 mm と Φ1000 mm) が 8 か所ある。

一方、真空機器の遠隔監視は、KAGRA 機器制御の MOU が発効した 2020 年時点で構築されていなかった。現場の真空作業は、Gauge のパネル表示で真空値を確認し、Pump の ON/OFF や Gate valve 開閉は手動操作

で対応していた。2021 年度後半から、KAGRA スタッフと KEK スタッフ間で真空監視系整備の実質的な議論が始まった。真空機器の状態が遠隔で監視できるよう(遠隔制御は原則望まない)、順次整備を進めることとなった。

2022 年 2 月、PLC ベースの機器信号取合い装置(Prototype-1)を開発し、KAGRA の真空機器セット(Gate Valve 2 台、Pump 3 台、Cathode gauge 1 台)の EPICS 遠隔監視に成功した[8]。2023 年 3 月には、低コストの LAN-DIO ベースの機器取合い装置(Prototype-2)を新規に開発し、Prototype-1 同様に真空機器の EPICS 遠隔監視に成功した(2.2 参照)。

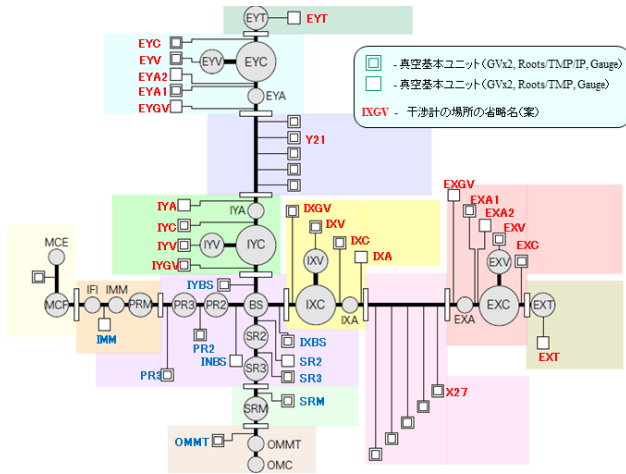


Figure 2: Layout of KAGRA vacuum units.

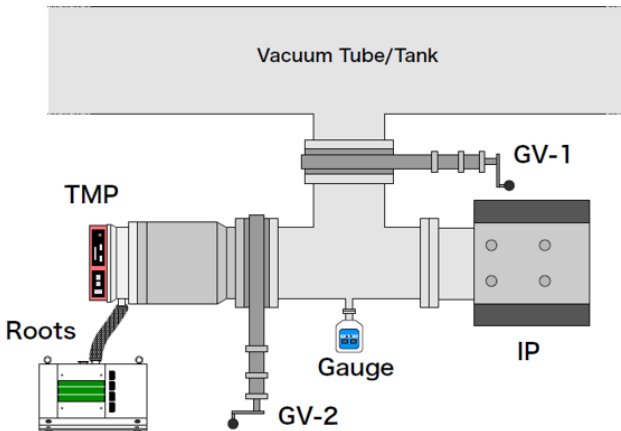


Figure 3: Vacuum components for one unit.

2.2 2 つ目の信号取合い装置: Prototype-2

2022 年 2 月導入の Prototype-1 は、Gate valve や Pump の digital 信号を PLC I/O module で受ける。この取合い方式は J-PARC MR 加速器の標準で、信頼度や拡張性に優れ、加速器での実績も申し分ない[12, 13]。一方 Prototype-1 は、PLC1式で約 15 万円かかること、2022 年の夏はコロナ禍で PLC の納期が不安定だったという事情もあり、低コストの別の方式が無いか模索していた。

PLC I/O module の替わりとなるものとして、Digital I/O

信号を LAN に変換するデバイス(LAN-DIO)に注目した。何社かの候補を検討したが、2022 年度内の納品が確実にかつ会社の技術サポートがある製品として、最終的に Century System 社の FutureNet XIO-100 [14]を選んだ。XIO-100 は 8 点の D-in と 8 点の D-out を持ち、価格は 5 万円弱である。また、上位計算機と Modbus 通信(LAN または RS485)が可能である。XIO-100 選択の経緯や EPICS support の詳細は、[15]で別途報告する。

PLC の代わりに XIO-100 を用いた信号取合い装置 Prototype-2 を設計した(Fig. 4)。Gate valve, Roots pump, Agilent 社 Ion pump の信号を XIO-100 の D-in で取込む。Edwards 社 Ion pump は、Pump 本体の LAN port で接続する。TMP と Cathode gauge は、RS485 回線を MOXA (NPort5250A)経由で LAN 接続する。XIO-100 の D-out 8ch は使用していない。Prototype-1 との違いは、PLC が XIO-100 に置き換わった点、TMP の監視が PLC の D-in から RS485 シリアル通信に変わった点、である。

2023 年 3 月、Prototype-2 型の信号取合い装置を、Y-arm の 2100m 地点(Y21)に持ち込んだ。KAGRA トネル内の湿気や水滴を避けるため、装置はプラボックス内に組込まれている(Fig. 5)。Y21 の真空機器のうち、Gate valve 2 台、Roots pump, Ion pump(XIO-100 に接続される機器)の EPICS 監視に成功している。

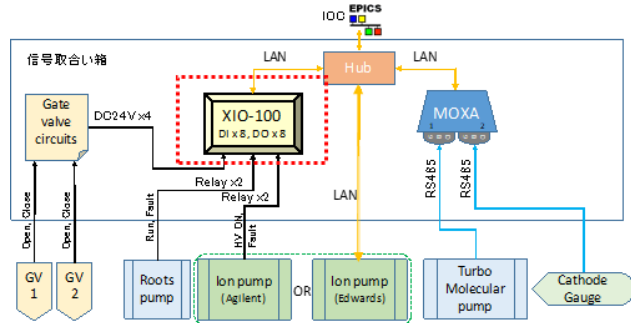


Figure 4: Prototype-2 design for one vacuum unit.

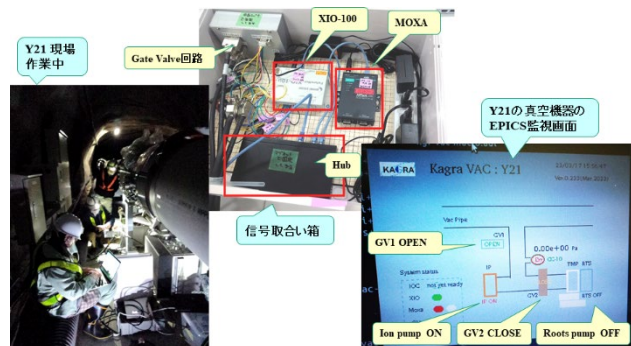


Figure 5: Prototype-2 implemented at the location Y21.

2.3 共同観測 O4a での真空監視

Figure 1 で示す LIGO-VIRGO-KAGRA 間の共同観測”O4”は、5 月 24 日に始まった。現時点では KAGRA は感度向上のための Commissioning が最重要で、20 か月の O4 の最初の 4 週間のみ観測に参加することとした

(O4aと呼ばれる)。O4a 時点の LIGO の感度は 150 Mpc、KAGRA の感度は 1.3 Mpc、VIRGO は観測に参加していない。O3 では KAGRA の鏡は常温だったが、O4a では 4 つの鏡のうち 1 台(ETMX)が 87K まで冷却された[16]。次の O4 参加は 2024 年春の予定である(O4b)。

O4 開始前、KEK の活動とは別に、KAGRA スタッフにより暫定真空監視システムが整備された。約 20 か所の Cathode gauge それぞれに Raspberry pi を取付け、Python script で RS485 経由で真空値を読み出す。それらの値を 1 台の Soft IOC に集約 (caput) し、Web ベースの表示画面で情報共有する、という仕組みである[17]。この暫定システムでは、Gate valve や Pump は監視していない。

O4a 直前、KAGRA スタッフとの相談で、至急追加で X27 の真空度を監視したい、という要望があった。これを受け、2023 年 5 月に X27 の Cathode gauge が Prototype-2 の機材で整備された(Gate valve と Pump 分は未実装)。Figure 6 に、O4a 期間の KAGRA 真空トレンド(X-center, arm, end エリア)を示す。KEK が整備した X27 の真空値が、KAGRA 整備のものと共に表示されている。

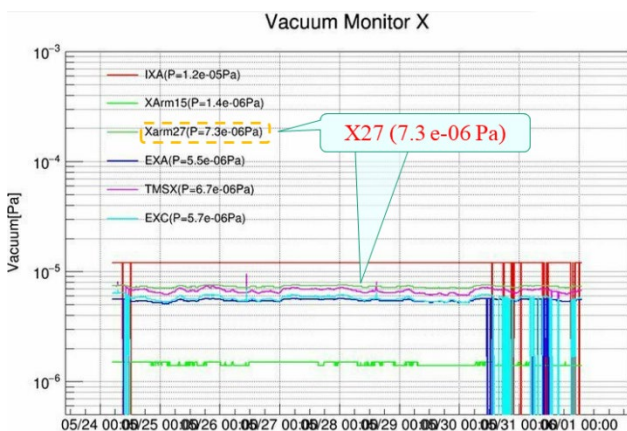


Figure 6: KAGRA vacuum trend of X area during O4a (May 25-June 01).

2.4 今後の予定

2023 年夏時点までに KEK が整備したのは、1) 2022 年 2 月に Prototype-1 が IXC に、2) 2023 年 3 月に Prototype-2 が Y21 に、3) 2023 年 5 月に Prototype-2 (Cathode gauge のみ)が X27 に、の 3 か所に過ぎない。今後は Prototype-2 を量産モデルとして、Raspberry pi ベースの暫定真空系の置き換えを含め、順次数を増やしていく。KAGRA スタッフとの相談の結果、O4b 開始前(おおむね 2023 年度中)に、4 か所(X27, EXA, IXA, EYA)を優先整備する方針である。

一方、O4a 終了後、大口徑 Gate valve の監視と Interlock 整備(真空が悪化したら自動で GV 閉)が議論された。現在、Interlock logic を PLC ladder に組み込んだ新 Prototype (Prototype-3)を検討中である。こちらも O4b 開始前に 4 か所程度で実装を目指す。

3. 議論

3.1 技術的な問題

3.1.1 機器 Network

真空監視系の整備に影を落とす問題として、KAGRA の Network 環境がある。KAGRA では、干涉計の Digital Control のための Network(Fig. 7 の DGS)が用意されている。Digital Control は LIGO から導入したもので、Epics-base のパラメータ監視が可能である[18]。一方、DGS network の IP アドレス空間は 256 個に制限されており、IP 機器の追加は困難である。このため、追加機器は Kagra(ICRR) (Office LAN)に接続されることがある。しかし Office LAN を機器制御運転に使うのはご法度であろう。本稿で紹介する真空機器でも、IXC は DGS、Y21 と X27 は Kagra(ICRR) に接続されている。

この問題の根本的な解決案として、KEK からは、機器制御用 VLAN(VAC=真空用、CCR=監視端末用、Cryo = 冷凍機用、など)を定義した追加 Network の構築を提案している(Fig. 7)。

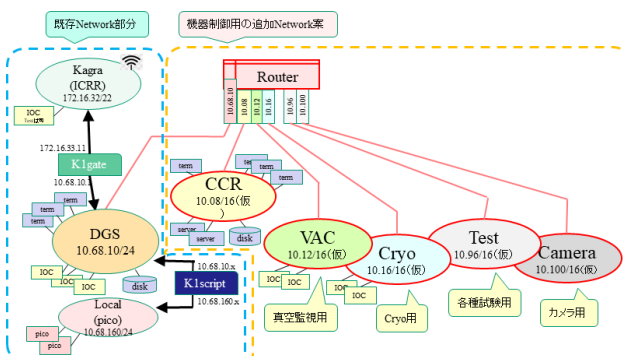


Figure 7: Network extension plan for device controls.

3.1.2 高湿度による Ion Pump 故障

KAGRA 真空機器(特に X/Y arm の機器)は、高湿度の地下トンネルに設置されている。このため、Ion pump 高圧系での故障が発生する。O4a 期間にも一部で Ion Pump が停止していたため、TMP と Roots pump での代用運用を余儀なくされた。

この問題は、加速器や LIGO、VIRGO では起こり得ない。KAGRA 独自で経験を重ね、対応策を練っている段階である。

3.2 研究環境の問題

3.2.1 人的資源と加速器型機器制御

J-PARC MR 加速器の標準に沿った Prototype-1 (PLC-based) が量産モデルとして採用できなかったのは、加速器施設と KAGRA の予算・人員規模の違い(加速器施設がおおむね 1 桁大)が背景にある。今回の Prototype-2 の開発のように、KAGRA の条件に合ったカスタマイズが必要であった。

KAGRA の人的規模で、制御グループや Network 専任者を置くことは難しい。3.1.1 の機器制御 Network 案も修正が必要かもしれない。今後関係者と意見交換しながら現実的な案を探っていく。

3.2.2 トンネル内作業環境

KAGRA トンネル内では様々な作業や調整が並行して行われる。他の高優先度の作業次第で、トンネル内で真空機器制御の作業が制限されることも多い。また、Arm 部は春には湧水で地面が水浸しになる場所もある。受け入れざるを得ないが、真空機器制御の実装がなかなか進まない事情の一つである。

4. まとめ

2021 年度以降の約 2 年間の、KEK の KAGRA 機器制御への貢献について報告した。KEK 加速器の EPICS ベースの機器制御の経験をもとに、a) J-PARC MR 仕様の PLC ベースの Prototype1 が KAGRA 真空機器 (Gate valve, Pump, Cathode Gauge) の監視に使用できることを実証し、b) LAN-DIO ベースの低コストな Prototype2 を量産モデルとして開発した。現時点で 3 か所の真空機器を監視している。今後は、Prototype2 を基本に全体約 40 か所の整備を目指す。関連して大口径 Gate valve の監視・Interlock にも着手する。

一方、KAGRA サイトでの真空監視系の整備では、ネットワーク環境に問題があると考え、KAGRA スタッフと協力して解決策を議論する。

謝辞

KAGRA 真空監視系向けの計算機(特に EPICS IOC となる micro server)の初期調整は、KEK 山田秀衛氏の技術協力が不可欠でした。また、PLC 機材の選択や手配では、KEK 佐藤健一氏に協力していただきました。真空機器のうち Cathode gauge や Ion pump controller の監視では、KEK 佐藤吉博氏との議論が役に立ちました。深く感謝いたします。

KAGRA サイト(飛騨市神岡町)での活動は、ICRR の多くの皆さんにご協力いただいております。深く感謝いたします。

参考文献

- [1] T. Akutsu *et al.*, “Overview of KAGRA: Detector design and construction history”, *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 2021(5):05A103, May 2021.
- [2] <https://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/>
- [3] <https://www.ligo.caltech.edu/>
- [4] <https://www.virgo-gw.eu/>
- [5] T. Tomaru, “Gravitational wave observation now and future”, Presentation in the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2022), Kitakyusyu (Online meeting), Japan, Oct. 2022, https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2022/proceedings/PDF/TUOP/TUOPA01_oral.pdf
- [6] <https://observing.docs.ligo.org/plan/>
- [7] 内部文書 “大型低温重力波望遠鏡 KAGRA を用いた重力波天文学の推進についての覚書”, 令和 2 年 4 月 1 日
- [8] M. Yang *et al.*, “Introduction of accelerator know-hows to KAGRA’s vacuum system”, *Proc. PASJ2022, Kitakyusyu (Online meeting)*, Japan, Oct. 2022, pp. 780-782.
- [9] 齊藤芳男, 高橋竜太郎, “大型低温重力波望遠鏡用 3km 大口径真空ダクトの製作”, *Journal of the Vacuum Society of Japan*, Vol.54 (2011), pp.621-626.
- [10] 齊藤芳男, “KAGRA の真空装置”, *日本機械学会誌* Vol. 120 (2017), pp. 16-19.

- [11] T. Tomaru *et al.*, “Vacuum System in KAGRA Gravitational Wave Telescope”, Presentation in IVC-22, Sapporo, Sept. 2022.
- [12] J. Odagiri *et al.*, “Application of EPICS F3RP61 to Accelerator Control”, *Proc. ICALEPCS 2009, Kobe, Japan, Oct.2009*, pp. 916-918.
- [13] 佐藤健一, 高橋大輔, 上窪田紀彦, 吉田奨, “J-PARC MR における PLC module の管理方法の実体”, 平成 26 年度北海道大学総合技術研究会, Sapporo, Japan, Sept. 2014.
- [14] プロトコル変換器 FutureNet XIO-100, <https://www.centurysys.co.jp/products/protocol/xio100.html>
- [15] M. Yang *et al.*, “Evaluation of a LAN-DIO (Digital-IO to LAN) Converter”, The 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2023), Funabashi, Japan, Aug.29 – Sept.1, 2023, THP11, this meeting.
- [16] Y. Itoh on behalf of the KAGRA Collaboration, “Status of KAGRA”, *Proc. 38th International Cosmic Ray Conference (ICRC2023)*, Nagoya, Japan, July 26 - Aug.3, 2023.
- [17] T. Yokozawa (横澤孝章), private communication.
- [18] O. Miyakawa on behalf of KAGRA Collaboration, “Real Time control for KAGRA covered by EPICS”, Presentation in EPICS collaboration meeting, Osaka, Japan, May 2017, https://www.rri.kyoto-u.ac.jp/EPICS/materials/Osamu_Miyakawa_KAGRA_20150517_EPICS2up.pdf