

J-PARC LINAC-RCS 間ビーム輸送ラインの 新真空システム制御系

Construction of J-PARC LINAC-RCS Beam Transport Line New Vacuum System

小林 史憲 神谷 潤一郎 高橋 博樹 鈴木 康夫
田崎 竜太

Fuminori KOBAYASHI, Junichiro KAMIYA, Hiroki TAKAHASHI, Yasuo SUZUKI
and Ryuta TASAKI

J-PARC センター
加速器ディビジョン

Accelerator Division
J-PARC Center

July 2024

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Technology

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。本レポートはクリエイティブ・コモンズ表示 4.0 国際 ライセンスの下に提供されています。本レポートの成果（データを含む）に著作権が発生しない場合でも、同ライセンスと同様の条件で利用してください。（<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja>）
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト（<https://www.jaea.go.jp>）より発信されています。本レポートに関しては下記までお問合せください。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究開発推進部 科学技術情報課
〒319-1112 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49
E-mail: ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>).
Even if the results of this report (including data) are not copyrighted, they must be used under the same terms and conditions as CC-BY.
For inquiries regarding this report, please contact Library, Institutional Repository and INIS Section, Research and Development Promotion Department, Japan Atomic Energy Agency.
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1112, Japan
E-mail: ird-support@jaea.go.jp

J-PARC LINAC-RCS 間ビーム輸送ラインの新真空システム制御系

日本原子力研究開発機構 J-PARC センター 加速器ディビジョン

小林 史憲、神谷 潤一郎、高橋 博樹、鈴木 康夫*1、田崎 竜太*2

(2024年4月3日受理)

J-PARC LINAC において、LINAC と 3GeV シンクロトロン (3GeV Rapid Cycling Synchrotron: RCS) をつなぐビーム輸送ライン (LINAC to 3GeV RCS Beam Transportation Line: L3BT) を超高真空に保つために、真空システムが整備されている。

真空システムは LINAC 棟及び L3BT 棟に設置されており、真空ポンプ、真空計、ビームラインゲートバルブ (Beam Line Gate Valve: BLGV) 等の真空機器により構成され、BLGV にてエリア分けされた区域ごとに管理される。

既存真空システムでは、それぞれのエリアごとに真空機器が独立に制御され、隣接するエリアの状態に関わらず真空機器が操作できる。このため、ヒューマンエラーによる誤操作の排除が不可能となっている。また、ビーム輸送ラインの真空悪化が生じた場合、その真空悪化 ILK 信号が MPS 伝送信号経由で BLGV リレーユニットに伝送されることにより、BLGV が強制閉鎖される仕組みとなっている。しかし ILK 信号伝送範囲が L3BT のすべての BLGV に及ぶ系になっているため、真空悪化の影響を受けないエリアの BLGV も強制閉鎖される。このことは、不必要な開閉動作が BLGV のメンテナンスの頻度を高くしてしまうといった問題を引き起こす可能性がある。また、BLGV の動作は MPS 信号経路を利用して動作させていることから、真空悪化 ILK 信号での開閉信号がすべての BLGV に一律に送信することしかできず、各個別制御ができない。さらには、真空制御システムのメンテナンスにおいても、MPS 信号経路を絡めた作業が必要になり、真空制御システム単独でメンテナンスすることが難しく作業が煩雑であるという問題もある。このような各種課題を解決するためには、まずエリア相互間の機器の情報や真空圧力を監視可能とすることでヒューマンエラーを排除し、安全性を高くする必要がある。さらに、MPS 信号経路を真空システムと分離し、各々の BLGV を個別に自動制御をすることで保守性を改善させる必要がある。

そのため、L3BT 真空システムの安全かつ効率的な保守と運転維持を考慮した制御を実現することを目的とし、真空システム制御系の再構築を実施した。本報告書は、L3BT 真空システム制御系の再構築の詳細とその使用方法について取りまとめたものである。

J-PARC センター: 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 2-4

*1 株式会社トータル・サポート・システム

*2 関東情報サービス株式会社

Construction of J-PARC LINAC-RCS Beam Transport Line New Vacuum System

Fuminori KOBAYASHI, Junichiro KAMIYA, Hiroki TAKAHASHI,
Yasuo SUZUKI*¹ and Ryuta TASAKI*²

Accelerator Division, J-PARC Center
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received April 3, 2024)

In J-PARC LINAC, the vacuum system is in place to maintain an ultra-high vacuum in the beam transport line (LINAC to 3GeV RCS beam transportation line: L3BT) between the LINAC to the 3GeV synchrotron.

The vacuum system is installed in the LINAC and L3BT buildings and consists of vacuum pumps, vacuum gauges, beam line gate valves (BLGVs), and other vacuum. In existing vacuum systems, vacuum equipment is controlled independently for each area, and vacuum equipment can be operated regardless of the status of adjacent areas. This makes it impossible to eliminate erroneous operation due to human error. In addition, when a vacuum deterioration occurs in the beam transport line, the vacuum deterioration ILK signal is transmitted to the BLGV relay unit via the MPS transmission signal, which causes the BLGVs to be forcibly closed. Because the ILK signal transmission range extends to all BLGVs in the L3BT, however, BLGVs in areas unaffected by vacuum deterioration are also forced to close. This could cause problems such as unnecessary open/close operations leading to more frequent maintenance cycles of the BLGVs. In addition, since the BLGV is operated using the MPS signal path, maintenance of the vacuum control system requires work involving the MPS signal path, making it difficult to maintain the vacuum control system alone and making the work complicated. To solve these problems, it is necessary to improve maintainability by separating the signal paths and automatically controlling BLGV separately. Therefore, the vacuum control system was modified and constructed with the aim of realizing a control system that takes into account the safety and efficient maintenance and operation of the L3BT vacuum system. This report summarizes the development and use of the L3BT vacuum system control system.

Keywords: Vacuum System, J-PARC, LINAC, L3BT

*1 Total Support Systems Corporation

*2 Kanto Information Service Co., Ltd.

目次

1. はじめに	1
2. J-PARC LINAC L3BT	2
3. L3BT 真空システム制御系の改修	7
3.1 既存制御系の構成	7
3.2 新真空システムの構成	7
3.2.1 各真空コントローラ PLC 間の情報共有化 (FL-net 接続)	9
3.2.2 ビームダンプ真空制御系及びその他真空制御系の整備	9
3.2.3 L3BT 真空システム制御系ラダープログラムの改良	10
3.2.4 ビーム運転を考慮した異常を判断する機能論理の改良	10
3.2.5 BLGV に関連する MPS 機能の変更	11
3.2.6 L3BT ビーム輸送ライン用低圧真空計追加及び論理改修	12
3.2.7 L3BT 真空システム監視操作用ソフトウェアの作成	13
4. 新真空システム	14
4.1 真空システム制御系の概要	14
4.2 真空システム監視操作画面	14
4.3 真空システム操作画面	18
4.4 圧力分布表示画面	23
4.5 アラームリスト表示画面	24
4.6 イベントロギング表示画面	25
4.7 トレンドグラフ表示画面	25
4.8 メンテナンスモード機能	28
5. まとめ	28
謝辞	28
参考文献	28

Contents

1. Introduction.....	1
2. J-PARC LINAC L3BT	2
3. Improvement of L3BT vacuum system control system	7
3.1 Configuration of existing control system	7
3.2 New vacuum system configuration	7
3.2.1 Information sharing among vacuum controller PLCs	9
3.2.2 Improvement of beam dump vacuum control system and other vacuum control systems	9
3.2.3 Improvement of ladder program for L3BT vacuum system control system	10
3.2.4 Improvement of functional logic to determine anomalies considering beam operation ...	10
3.2.5 Modification of MPS functions related to BLGV	11
3.2.6 Addition of low-pressure vacuum gauge for L3BT beam line and modification of logic...	12
3.2.7 Creation of L3BT vacuum system monitoring and operation software	13
4. New Vacuum control system	14
4.1 Vacuum system control system overview	14
4.2 Vacuum system monitoring and operation screen	14
4.3 Vacuum system operation screen	18
4.4 Pressure distribution display screen	23
4.5 Alarm list display screen	24
4.6 Event logging display screen	25
4.7 Trend graph display screen	25
4.8 Maintenance mode function	28
5. Summary.....	28
Acknowledgements.....	28
References	28

1. はじめに

J-PARC LINAC において、LINAC と 3GeV シンクロトロン (3GeV Rapid Cycling Synchrotron: RCS) をつなぐビーム輸送ライン (LINAC to 3GeV RCS Beam Transportation Line: L3BT) ^[1]を超高真空に保つために、真空機器が整備されている。

真空システムは LINAC 棟及び L3BT 棟に設置されており、主排気用にイオンポンプが使用され、粗排気用にはターボ分子ポンプとルーツポンプの組み合わせを使用している^[2]。また、真空圧力測定には高真空域には電離真空計 (Bayard-Alpert Gauge: BAG) が、低真空域にはピラニ真空計をそれぞれ使用している。それらの真空機器は、ビームラインゲートバルブ (Beam Line Gate Valve: BLGV) によりエリア分けされた区域ごとに制御されている。

真空機器のうち真空ポンプや BAG 等は、Programmable Logic Controller (PLC) を用いた真空コントローラで制御されており、大気状態から超高真空状態に移行/保持する論理が組みられ、真空圧力悪化や機器の故障時においてもビーム輸送ラインや真空機器への影響が最小限になるようなシステムになっている。一方、BLGV はリレーユニットを介して VME コントローラにて制御されており、遠隔での開閉操作が可能となっている。また、真空圧力悪化インターロック (Interlock: ILK) 発生時においては、Machine Protection System (MPS) を介して ILK 信号が BLGV リレーユニットに入力されることにより BLGV 強制閉動作等が行われる。

既存真空システムでは、BLGV 間のエリアごとに真空機器が制御され、相互間の機器の情報や真空圧力を監視していない。そのため、隣接するエリアとの真空圧力差が大きいにも拘わらず、BLGV の開操作ができるため、ヒューマンエラーによる誤操作の排除が不可能となっている。そのため誤操作により、高真空エリアの真空圧力を急激に悪化させたり、運転中の真空機器に大気を突入させて機器を故障させてしまうといったトラブルが発生している。また、ビーム輸送ラインの真空悪化が生じた場合、その真空悪化 ILK 信号が MPS 伝送信号経由で BLGV リレーユニットに伝送されることにより、BLGV が強制閉鎖される仕組みとなっているが、ILK 信号が L3BT すべてのエリアの BLGV へ伝送される系であるため、真空悪化の影響を受けない加速空洞またはビーム輸送ライン部の BLGV も強制閉鎖される。BLGV の開閉限度回数や摩耗の点から、より適切な動作を行わせる必要がある。また、BLGV の動作について MPS 信号経路を利用して動作させていることから、ILK 信号での開閉信号がすべての BLGV に一律に送信され各個別制御ができない^[3]。真空制御系のメンテナンスにおいても、MPS 信号経路を絡めた作業が必要になり、単独でメンテナンスすることが難しく作業が煩雑である。このような各種課題を解決するためには、まずエリア相互間の機器の情報や真空圧力を監視可能とすることでヒューマンエラーを排除し、安全性を高くする必要がある。さらに、MPS 信号経路を真空システムと分離し、各々の BLGV を個別に自動制御をすることで保守性を改善させる必要がある。

そのため L3BT 真空システムの安全かつ効率的な保守と運転維持を考慮した制御を実現することを目的とし、真空システム制御系の改修と構築を実施した。

2. J-PARC LINAC L3BT

図 1 に J-PARC LINAC L3BT トンネルの真空機器配置図を示す。L3BT ビーム輸送ラインには真空計や真空ポンプ、BLGV 等の真空機器が配置されビームラインの高真空状態を維持している。真空機器は BLGV で区切られたエリアごとに管理される。図 2 にビームライン排気系統図、図 3～5 に各ビームダンプの排気系統図、表 1 に各図で用いたアイコンをそれぞれ示す。

真空機器の制御装置は、J-PARC LINAC 棟 1 階クライストロンギャラリ及び J-PARC LINAC L3BT 棟 2 階電源室に設置されている。図 6 及び図 7 に、クライストロンギャラリ及び電源室の真空機器制御装置配置図をそれぞれ示す。制御装置は、ラック列と呼ばれる 19 インチラック列ごとに BLGV で分けられたエリアごとに独立して構成される。図中に 19 インチラック列名称と真空コントローラ名称を、表 2 に L3BT 真空システムの制御機器と設置場所を示す。

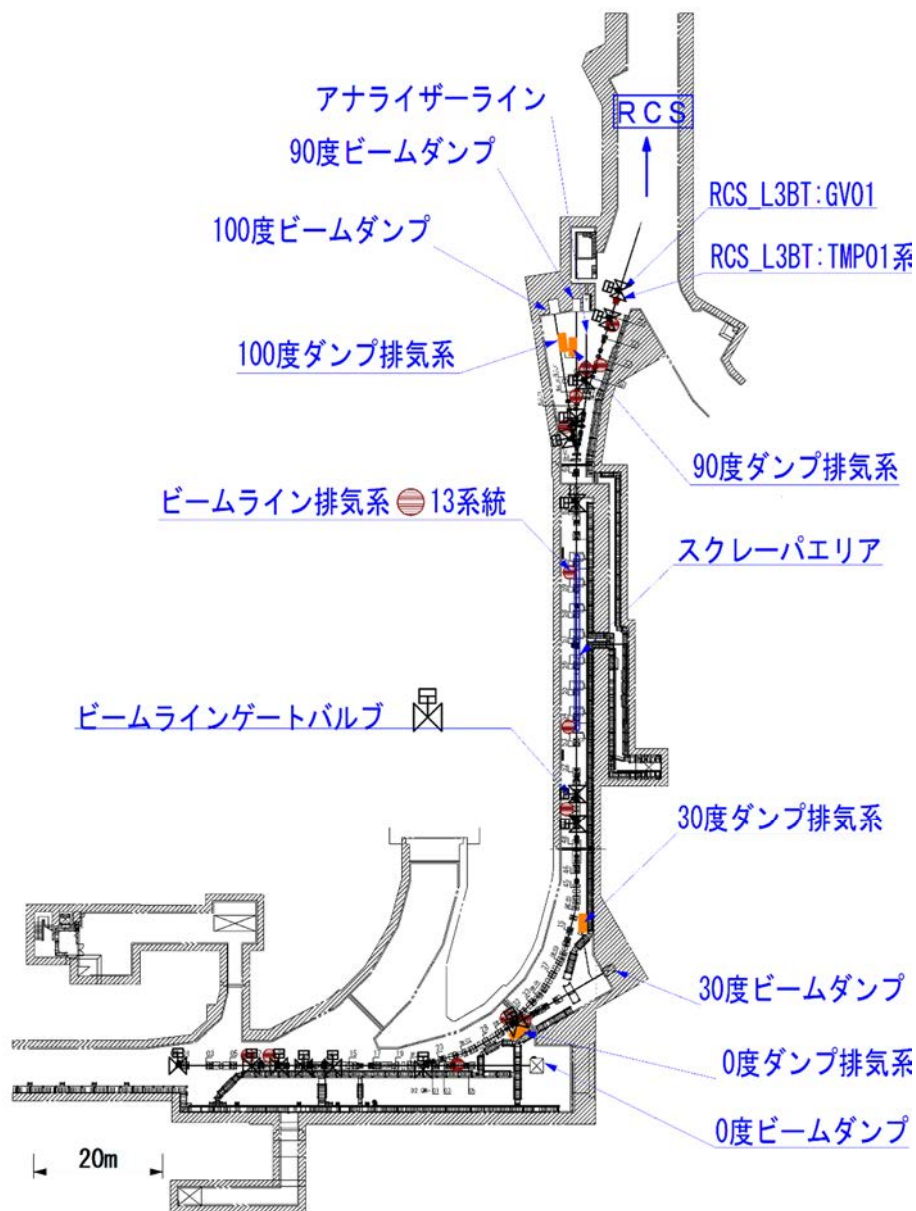


図 1 J-PARC LINAC L3BT トンネルの真空機器配置図

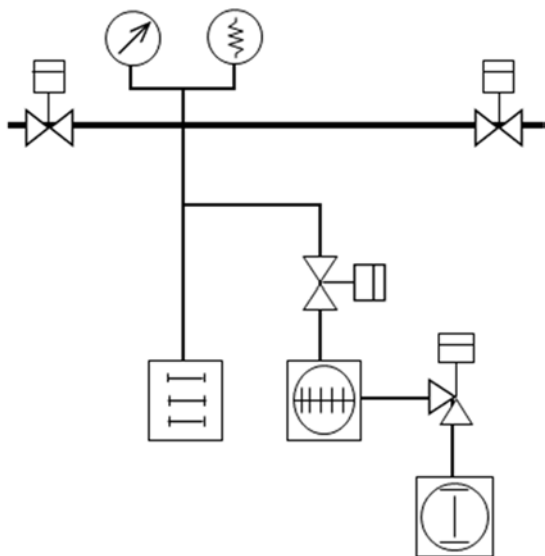


図2 ビームライン排気系統図

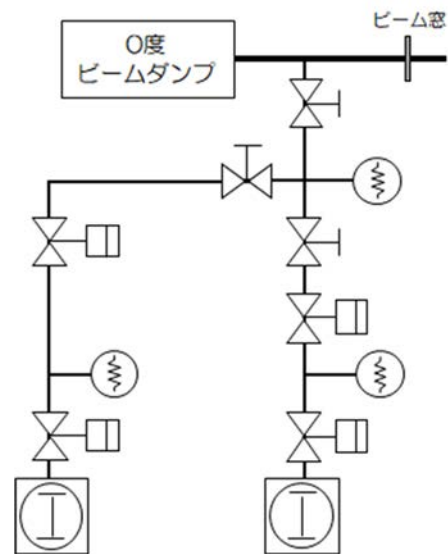


図3 0度ビームダンプ排気系統図

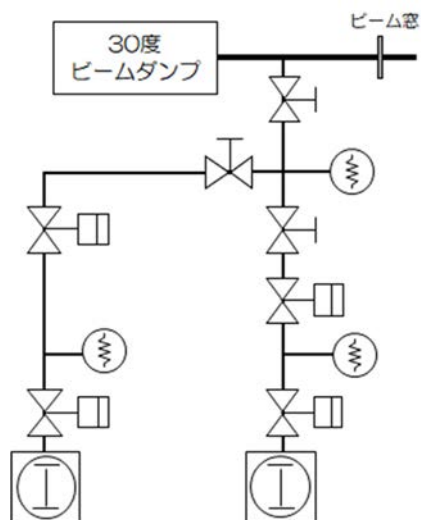


図4 30度ビームダンプ排気系統図

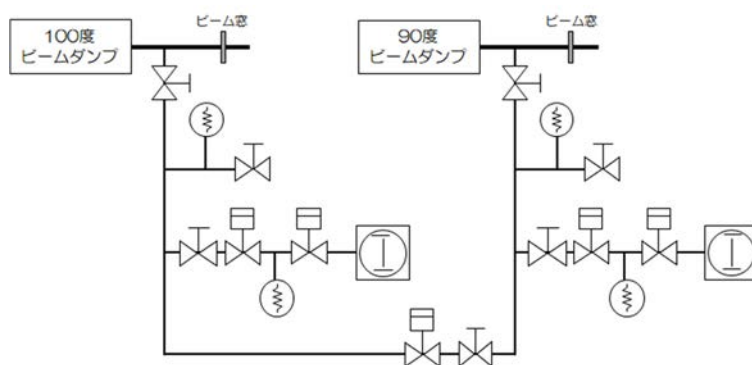


図5 90度、100度ビームダンプ排気系統図

表1 機器アイコンと機器名称 (略称)

機器	機器名称 (略称)
	電離真空計 (BAG)
	低圧真空計 (CONVCT/PIG)
	ビームラインゲートバルブ (BLGV) ポンプゲートバルブ (PMGV)
	アングルバルブ (LTV)
	手動バルブ
	イオンポンプ (IP)
	ターボ分子ポンプ (TMP)
	ルーツポンプ (RP)

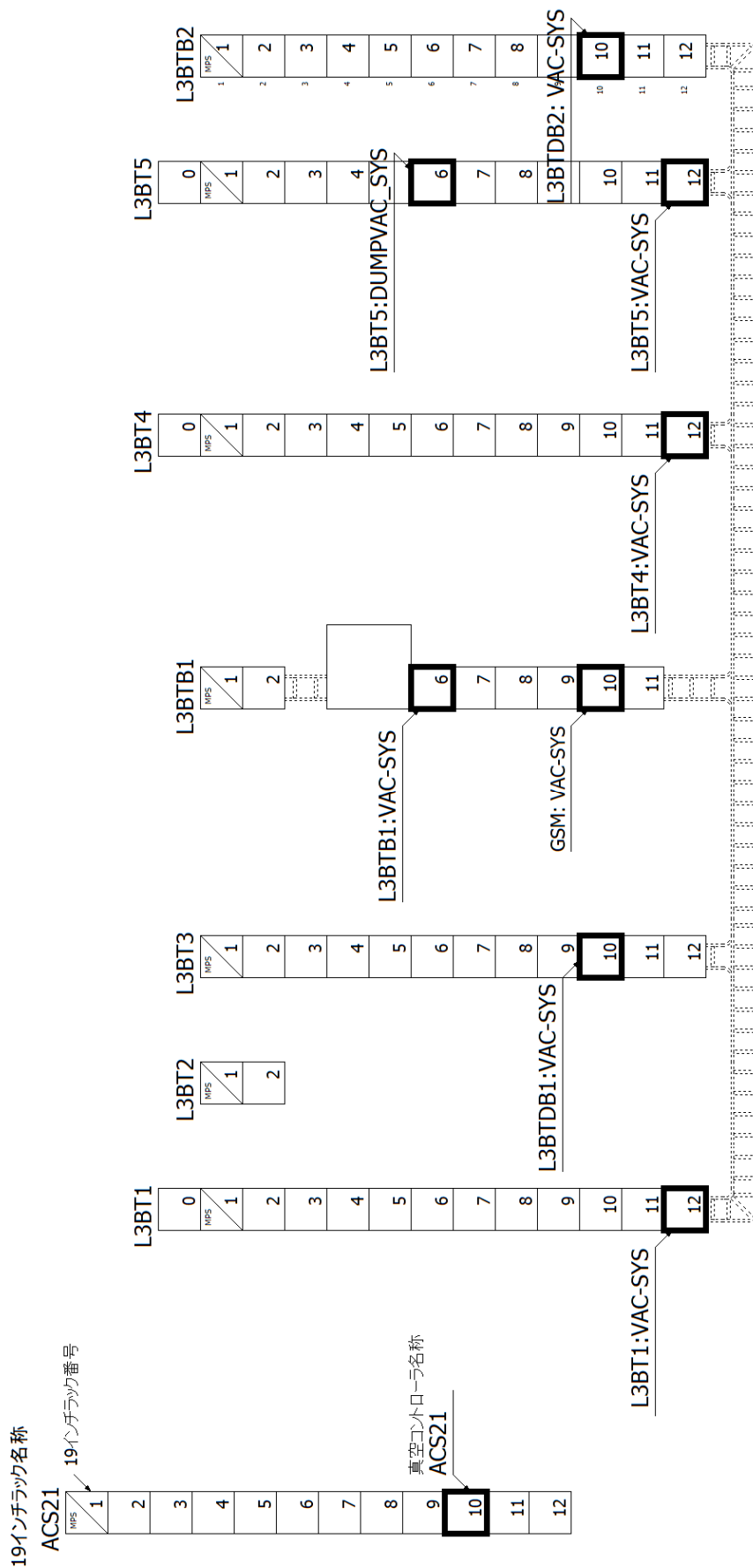


図 6 J-PARC LINAC 棟 1 階クライストロンギヤラリ 真空機器制御装置配置図

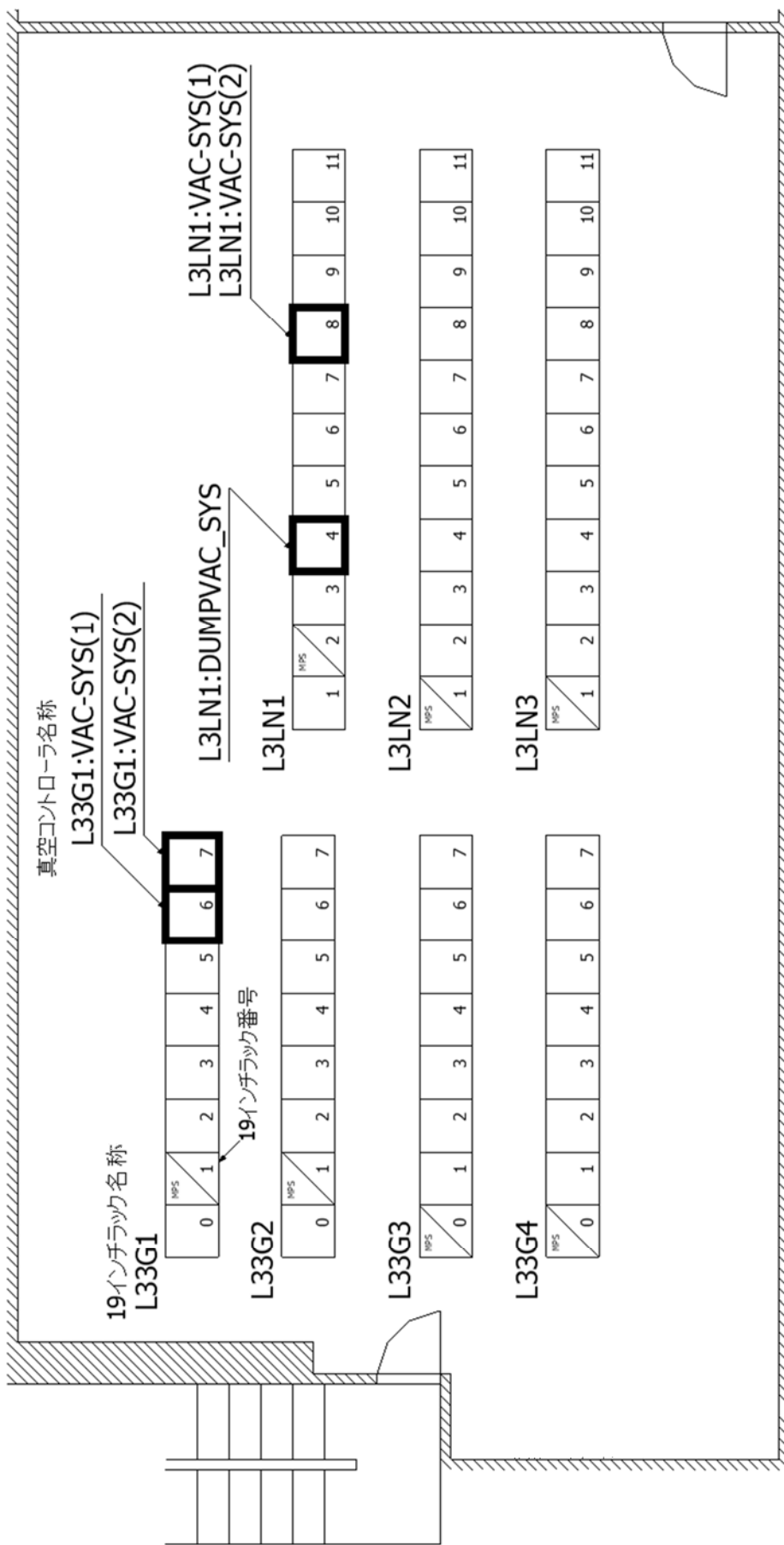


図 7 J-PARC LINAC L3BT 棟 2 階電源室 真空機器制御装置配置図

表2 L3BT 真空システム制御機器及び設置場所

真空コントローラ名称	設置場所	設置ラック	制御機器（レコード名称）
ACS21	LINAC棟 クライストロン ギャラリー	ACS21-10	ACS21A: BAG01, ACS21A: BAG02 (真空圧力のみ共有)
L3BT1: VAC-SYS		L3BT1-12	LI_L3BT: RP06, CNVCT06, LTV06, TMP06, PMGV06, IP04, IP06, BAG04, BAG06, BLGV00, CNVCT06A
L3BTDB1: VAC-SYS		L3BT3-10	L3BT: BAG08A, L3BT: BAG08B (真空圧力のみ共有)
GSM: VAC-SYS		L3BTB1-10	L3BT: GSM12: DIFF_BAG01 (真空圧力のみ共有)
L3BTB1: VAC-SYS		L3BTB1-6	LI_L3BT: BLGV12A, BLGV12B, BLGV18A, BLGV18B, BAG12, IP12 LI_L3BT: GSM12: BL_BAG01, BL_BAG012, BL_DSP01, BL_AV01, BL_LTV01, BL_TMP01, BL_PIG01, BL_PIG01A
L3BT4: VAC-SYS		L3BT4-12	LI_L3BT: RP30, CNVCT30, LTV30, TMP30, PMGV30, IP18, IP24, IP30, BAG18, BAG24, BAG30, CNVCT30A
L3BT5: VAC-SYS		L3BT5-12	LI_BD0: RP04, CNVCT04, LTV04, TMP04, PMGV04, IP04, BAG04, BLGV00, CNVCT04A LI_BD30: RP00, CNVCT00, LTV00, TMP00, PMGV00, IP00, BAG00, BLGV00, CNVCT00A
L3BTDB2 VAC-SYS		L3BTB2-10	L3BT: BAG50A, L3BT: BAG50B (真空圧力のみ共有)
L3BT5: DUMPVAC_SYS		L3BT5-6	LI_BD0: RP06A, RP06B, CNVCT06, CNVT06A, CNVCT06B, PMGV06A, PMGV06B
L3LN1: VAC-SYS (1)		L3BT棟 2階 電源室	L3LN1-8
L3LN1: VAC-SYS (2)	L3LN1-8		LI_L3BT: RP53, CNVCT53, CNVCT53A, LTV53, TMP53, PMGV53, IP51, IP53, IP56, BAG51, BAG53, BAG56, BLGV56, RP60, CNVCT60, CNVCT60A, LTV60, TMP60, PMGV60, IP58, IP60, IP63, BAG58, BAG60, BAG63, BLGV60B, BLGV63
L33G1: VAC-SYS (1)	L33G1-6		LI_L3BT: RP70, CNVCT70, CNVCT73, LTV70, TMP70, PMGV70, IP63, IP73, BAG68, BAG73, BLGV73 LI_L3ANA: BLGV00, RP00, CNVCT00, CNVCT00A, LTV00, TMP00, PMGV00, IP00, BAG00
L33G1: VAC-SYS (2)	L33G1-7		LI_BD100: BLGV00, RP00, CNVCT00, CNVCT04A, LTV02, TMP02, PMGV02, IP04, BAG04 LI_BD90: BLGV00, RP02, CNVCT02, CNVCT04A, LTV02, TMP02, PMGV02, IP04, BAG04
L3LN1: DUMPVAC_SYS	L3LN1-4		LI_BD30: RP04A, RP04B, CNVCT04, CNVT04A, CNVCT04B, PMGV04A, PMGV04B LI_BD100: RP04, CNVCT04, CNVCT04B, PMGV04A LI_BD90: RP04, CNVCT04, CNVCT04B, PMGV04A, PMGV04B
L3BT: VAC-SYS (RCR)	RCS棟	—	RCS_L3BT: BLGV01 (真空圧力のみ共有)

3. L3BT 真空システム制御系の改修

3.1 既存制御系の構成

既存制御系の構成の概略を図 8 に示す。この制御系は、真空ポンプ動作や圧力監視などを行う真空制御部と、BLGV 監視操作を行う BLGV 制御部から構成されている。

BLGV 制御部は、VME と BLGV リレーユニット及び MPS にて構成されている。BLGV の開閉制御やその状態の監視は BLGV リレーユニットを介して VME にて行っており、エリア間相互の真空圧力値や真空機器の状態を監視できていない。ビームラインの真空圧力が悪化した場合、真空悪化 ILK 信号 (VAC-Err 信号) で真空悪化エリアのみの BLGV を強制閉鎖するのが望ましい。しかし、真空悪化 ILK 信号 (VAC-Err 信号) は MPS の信号経路を利用しており、個別に強制閉鎖動作をさせることができないことから、L3BT 全体の BLGV の強制閉鎖を行っていた。

真空コントローラは PLC (横河電機製: FA-M3) と操作・監視用タッチパネルで構成され、イオンポンプ、ターボ分子ポンプ、ルーツポンプ及びポンプゲートバルブ (Pump Gate Valve: PMGV) 等の制御・監視、真空計の監視などを行っており、これらの真空制御系は 19 インチラックの列ごとに独立して構成され、隣接する真空システム制御系との情報共有はできていない状態になっていた。

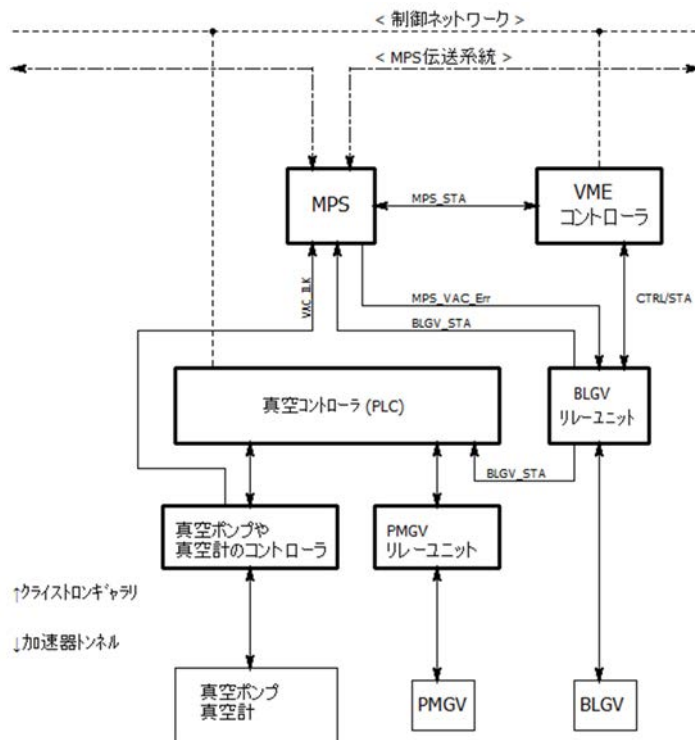


図 8 既存制御系の構成概略図

3.2 新真空システムの構成

既存真空システムにおいては、監視は制御ネットワークを経由する必要があるが、真空システムのみでエリア間相互の状態を監視できなかった。このため、既存システムは真空システムのコン

トローラではなく、制御系 VME、MPS を利用してリレーユニットを操作する必要があった。また、真空異常時は MPS からの信号により BLGV 閉等の動作が行われていた。

既存システムのこれらの問題点を解決するために、新真空システムは、BLGV の開閉制御及び状態監視を行う BLGV 制御部について、コントローラを VME から PLC に変更をした。また、PLC の FL-net を用いることでエリア相互間の情報共有を可能とし、制御ネットワークに依存することなく真空系のみで完結するシステム構成とした。これにより、真空異常時において、MPS からの信号によらず、PLC が真空異常を判断し動作することを可能とした。また、真空制御系のみでのメンテナンスや改修が容易に行えるようになった（制御ネットワークは、遠隔監視操作にのみ利用とした）。新しい制御系の構成概略を図 9 に示す。PLC は基本的に既設の真空コントローラのものを利用し、モジュールの空きチャンネルを流用した。空きチャンネルがない真空コントローラについては、必要に応じて DI/DO モジュール（横河電機製：FA-M3）を追加した。

BLGV 制御部コントローラの PLC への変更に伴い、既存真空システム内の配線変更が必要となったが、変更作業を加える個所については極力 BLGV の制御に関する部分のみとし、その他の真空制御系の部分については既存機能を損なわないようできる限り変更はしない方針とした。また、BLGV リレーユニットについては基本的に変更しない方針とした。

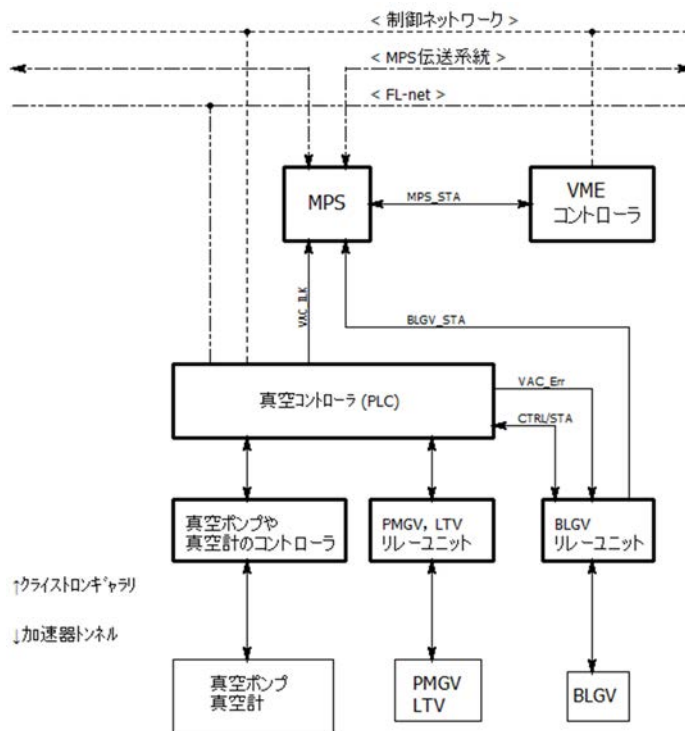


図 9 新真空システムの構成概略図

各真空コントローラについては、真空コントローラの PLC を FL-net で接続し情報の共有化を行うことで、隣接するエリアの真空状態を把握できるようにした。これまで独立で動作していたビームダンプ真空制御系は、真空システムに組み込むことで L3BT 真空システム制御系より監視、操作を可能とした。また、制御系ラダープログラムやビーム運転を考慮した真空機器の機能倫理

の改良、異常を判断する機能論理の改良、BLGV の動作に関する MPS 機能の変更、真空計追加による論理改修や改良などを行った。それぞれの詳細については次項以降に示す。

3.2.1 各真空コントローラ PLC 間の情報共有化 (FL-net 接続)

FL-net 接続の模式図を図 10 に示す。隣接するエリアの真空状態を把握するために、各真空コントローラの PLC を FL-net で接続し情報の共有化が必要である。FL-net 接続は同一建屋内では HUB (BUFFALO 社製 : LSW4-GT-24NSR) を用いて LAN ケーブルにて行い、建屋間は光メディアコンバーター (MC : BUFFALO 社製 : LTR2-TX-MFC2R) を用いて光ケーブル接続とした。

FL-net は日本電機工業会 (JEMA) によって制定されたオープンネットワークであり、工場など産業界で広く利用されている。また、PLC の接続状態を相互に監視することができ、信頼性の高いネットワーク構築が可能であることから、本システムで採用した。FL-net モジュールは横河電機製 PLC (FA-M3) の F3LX02-2N とし、各真空コントローラ PLC の空きスロットに装填をした。

対象の系統、機器について、上位から総括的に監視や操作を可能とするため、L3BT 真空システム制御系に組み込んだ。

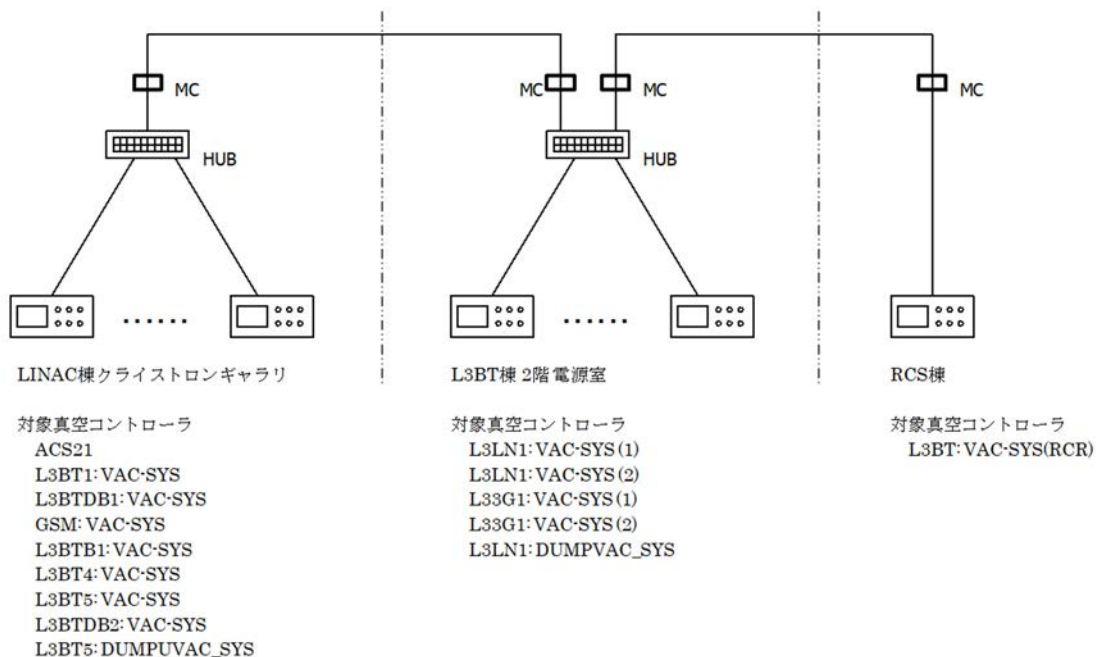


図 10 FL-net 接続の模式図

3.2.2 ビームダンプ真空制御系及びその他真空制御系の整備

これまで真空システムとは切り離され独立で動作していた下記(1)から(4)に示す真空機器について、L3BT 真空システム制御系より監視や操作を可能とするために、新真空システムへ組み込んだ。

- (1) ビームダンプ部 (0 度、30 度、90 度、100 度、アナライザーライン) 真空系 (SP、RP、真空バルブ、真空計)

- (2) スクレーパーエリア手動バルブリミットスイッチ
- (3) ガスシートビームモニター真空系
- (4) RCS との取り合いゲートバルブ (RCS_L3BT : GV01) 及びその上流の真空系 (RCS_L3BT : TMP01 系等)

3.2.3 L3BT 真空システム制御系ラダープログラムの改良

真空コントローラの PLC ラダープログラムを改良し、以下の機能を追加した。

- (1) BLGV 状態の監視／操作機能
- (2) 各 BLGV が関連する圧力等より、BLGV 開の可否を判断する機能
- (3) 各 BLGV が関連する圧力上昇等の異常発生時に、BLGV を強制閉鎖する機能
- (4) 真空コントローラからの操作にかかる論理修正
- (5) リニアック全体に関わる制御ネットワークと EPICS による情報授受を行う機能

3.2.4 ビーム運転を考慮した異常を判断する機能論理の改良

実際の真空機器の運用時において、既存真空システムの機能論理では機器の操作が煩雑であったり、機器の保護機能が十分でなかったりしたため、以下の改良を行った。

- (1) PMGV 開閉条件について、LTV の開閉ステータスを追加

これまで PMGV の開閉操作は、LTV (アングルバルブ : 表 4 参照) の状況に拘わらず操作可能であった。この場合、LTV が閉状態で PMGV を開操作すると、TMP 内の残留ガスがビームライン内に逆流する。また、LTV が閉状態のときに PMGV を閉操作すると、TMP の背圧が急激に上昇し機器を故障させる可能性があった。そのため、PMGV 開閉条件に、LTV の開閉ステータスを追加した。

- (2) RP ON 条件について、RP 異常の場合はメンテナンスモードであっても ON 不可

これまでメンテナンスモードでは、機器の ILK 状態に関わらず機器の操作が可能であった。そのため RP が異常の ILK 信号を発報していても ON 操作が可能であったため、RP を破損する恐れがあった。その対策として、RP 異常の場合はメンテナンスモードであっても ON 不可とした。

- (3) RP 停止条件について、TMP の状態を削除

これまで、RP を停止する場合は TMP が停止している必要があった。この場合、高真空状態で TMP を停止すると RP 側のガスが TMP 内に逆流してしまい、TMP 内の真空圧力が悪くなる。その状態で不用意に PMGV を開操作するとビームライン内にガスが流入し、真空圧力を悪化させてしまう。このような事態を避けるために、TMP 排気側の LTV 閉→RP 停止→TMP 停止の手順が取れるように、RP 停止条件から TMP の状態を削除した。

- (4) BAG フィラメント ON 条件の CNVCT セットポイント監視を粗引きモードのみに変更

これまで高真空状態からの BAG の復旧時において、CNVCT (低圧真空計 : 表 4 参照) のセットポイント監視していたことにより、必ず粗排気系統を立ち上げてからフィラメントを ON する手順となっていた。今回、BAG フィラメント ON 条件の CNVCT セッ

トポイント監視を粗引きモードのみに変更したことにより、高真空状態での BAG フィラメント ON 操作が可能になった。

- (5) BAG フィラメント OFF 条件を同一エリア内の別の BAG フィラメントが ON 状態、もしくは同一エリア内の IP がすべて OFF であることに変更

これまで、BAG フィラメントの OFF は、対となる（同じ場所に設置されている）IP が OFF である必要があった。今回の真空システム制御系の構築に伴い、BLGV で閉じられたエリアを同一エリアとして見ることにしたため、BAG フィラメント OFF 条件を同一エリア内の別の BAG フィラメントが ON 状態、もしくは同一エリア内の IP がすべて OFF であることにした。

- (6) IP ON/OFF 操作条件を同一エリア内の BAG のセットポイントで許可するように変更

これまで、IP の ON/OFF 操作は対となる（同じ場所に設置されている）BAG のセットポイント ON で操作可能であった。今回の真空システム制御系の構築に伴い、BLGV で閉じられたエリアを同一エリアとして見ることにしたため、同一エリア内の何れかの BAG のセットポイントが ON 状態であれば操作可能とするように変更した。

- (7) BLGV 強制閉の閾値と BAG MPS 閾値の分離

これまで、BLGV の強制閉鎖動作は MPS の真空悪化 ILK 信号によって行っていた。この場合、BAG MPS 閾値まで真空圧力が悪化してから BLGV が閉動作をするために、ビームラインの真空圧力は BAG MPS 閾値よりも悪くなってしまふ。今回、BLGV 強制閉の閾値と BAG MPS 閾値を分離し、MPS 閾値まで真空圧力が悪化する前に BLGV を強制閉の閾値で閉状態にすることにより、ビームラインの真空圧力悪化を最小限にできるようにした。

3.2.5 BLGV に関連する MPS 機能の変更

既存真空システムにおいては、MPS の真空悪化 ILK 信号（VAC-Err 信号）は、LINAC 棟クライストロンギャラリ内及び L3BT 棟内でグループ化されていた。つまり、グループ内のある個所で局所的な真空悪化が検知された場合でも、グループ内に VAC-Err 信号が伝送されクライストロンギャラリもしくは L3BT 電源棟で制御されているすべての BLGV が強制閉鎖される状態だった。

新しい制御系では、グループ単位ではなく BLGV と BLGV の間を一つのエリアとし、下記の条件が揃った時にそのエリアが正常であると判断し、エリア両端の BLGV の開操作を可能とした。

- (1) 同一エリア内にある BLGV がすべて正常。
- (2) 同一エリア内の BLGV を管理する真空コントローラ PLC と FL-net の接続が正常。

各 BLGV において隣接するエリアがともに正常であるときに開操作許可状態、どちらかのエリアが一方でも異常状態である場合は BLGV が強制閉鎖されるように変更をした。図 11 に BLGV 開操作許可／強制閉動作論理例を示す。

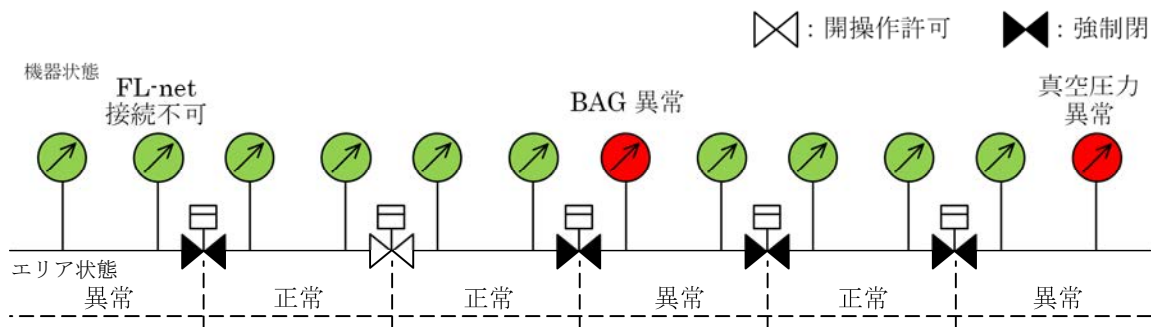


図 11 BLGV 開操作許可／強制閉動作論理例

3.2.6 L3BT ビーム輸送ライン用低圧真空計追加及び論理改修

既存の真空システムは、ビーム輸送ラインの低真空圧力の監視を行っていなかった。そのため、真空システムの長期停止後の再起動時はビーム輸送ラインを一旦大気圧状態に戻す必要があり、真空復旧に多大な時間を要していた。この問題を解決するため、BLGV 間のエリアごとのビームラインに低圧真空計を設置し、その圧力値を新真空システム制御系に取り込んだ。この改良により、ビームラインと粗排気系統の圧力差で PMGV の動作を管理し、ビームラインの圧力によって適切な真空排気作業が可能となった。併せて、この低圧真空計の圧力を用いて圧力値が大気圧の時は BAG のフィラメント ON 操作不可、また隣接するエリアとの間に圧力差があるときには BLGV 開閉操作不可の論理を構築した。

低真空圧力監視用低圧真空計の追加個所を図 12 に示す。低圧真空計にはピラニ真空計（MKS 社製、シリーズ 475 Convectron®）を用いた。

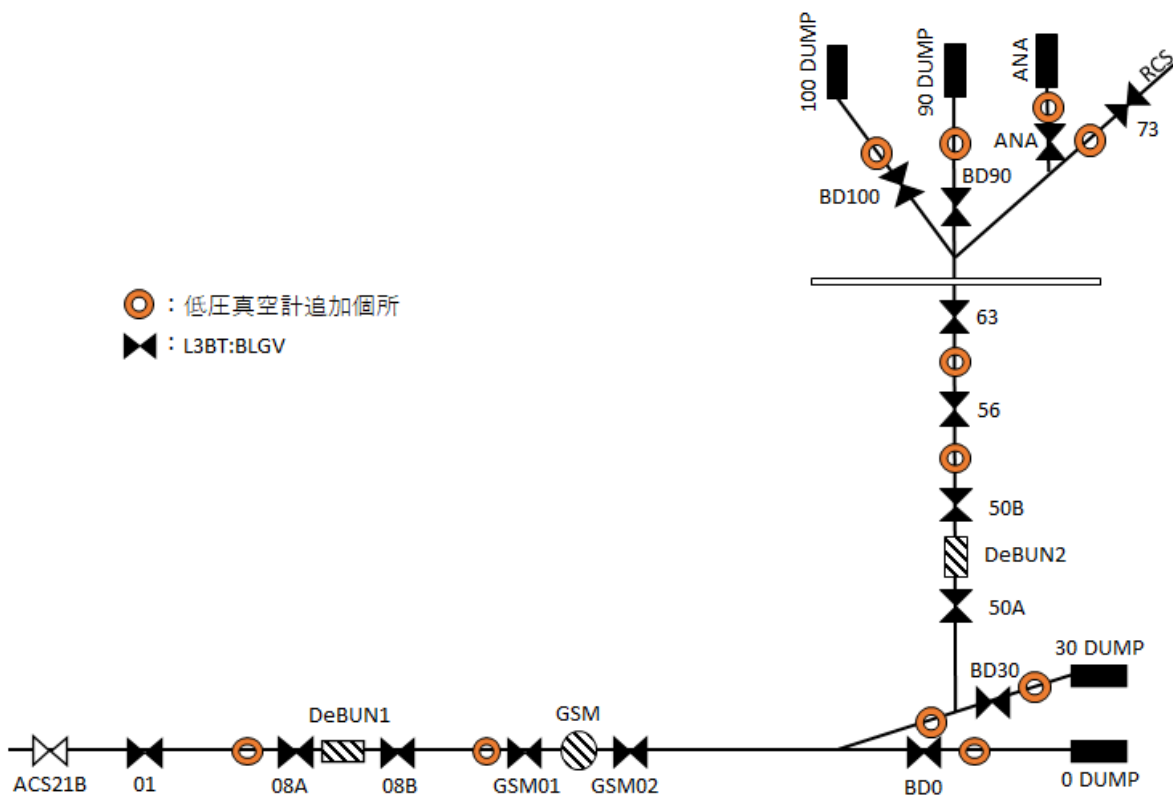


図 12 低圧真空計追加個所

3.2.7 L3BT 真空システム監視操作ソフトウェアの作成

既存の真空装置は EPICS を介して個別に監視されていたが、真空システムとして現場にて監視、操作を行うための専用監視操作ソフトウェア（真空システム監視操作画面）が整備されていなかった。そのため、L3BT 真空システム全体を総括的に監視、操作する機能を有するソフトウェアの開発をした。詳細を以下に記す。

(1) EPICS IOC 真空システム監視操作画面

今までの真空システム監視操作画面をもとに新真空システム用の監視操作画面を作成し、新真空システム監視操作端末へセットアップした。端末はクライストロンギャラリ及び L3BT 棟 2 階電源室の 19 インチラック 2 個所に設置し、同時に操作することがないように、操作権は排他的にした。

(2) EPICS IOC

EPICS IOC（Input/Output Controller: 制御対象の装置の側に置かれる計算機で、信号線を介して装置を直接制御する）機能を動作させるためのサーバ計算機の設置及びセットアップを行った。

(3) 遠隔監視操作画面

19 インチラック内にある既存の真空コントローラのタッチパネルによる監視操作画面について、本件の BLGV 制御部変更等に伴い、操作画面の機器表示の追加・修正、表示名称をレコード名へ修正をした。

(4) 圧力分布表示

真空システム監視操作画面に、対象個所のビームライン及びフォアラインの圧力分布がそれぞれ棒グラフで視覚的に表示される機能を設けた。

(5) アラームリスト機能

アラームやインターロック事象発生時等に、発生時刻、発生個所、発生装置及び発生内容等のリストを表示・記録する機能を設けた。

(6) イベントロギング機能

マニュアル操作やインターロックによる操作に関わらず真空機器に対する操作時に、状態変化の開始、完了時等のイベントログを時系列でリスト表示、記録する機能を設けた。

(7) トレンドグラフ表示機能

L3BT ビーム輸送ラインに設置してある電離真空計や低圧真空計、イオンポンプの真空圧力を個別または複数選択して表示する機能を設けた。

(8) メンテナンスモード機能

BLGV を個別に操作するためのメンテナンスモードの機能を新たに設けた。メンテナンスモード設定の機器については、インターロック及び MPS と関連することなく操作可能とした。メンテナンスモードに設定した BLGV は制御システム監視操作ソフトウェアに表示される機器アイコン上部に「M」と表示して、操作者が容易に認識できるようにした。

なお、機器を安全に操作するために、真空システム監視操作画面から操作している際は、真空コントローラからの操作を排除する（逆に、真空コントローラから操作している際は、真空システム監視操作画面からの操作を排除する）仕様とした。

4. 新真空システム

4.1 真空システム制御系の概要

既存の真空システム制御系では、BLGVで区切られたエリアごとに設置された個別の真空コントローラによって制御されていた。今回構築した制御系では、真空機器をFL-netによりリンクさせ、L3BTエリア全体の真空機器を統括して管理することにより、相互間の真空圧力や機器状態を把握することを可能とした。それにより、相互間の真空機器状況を把握することが可能となり、より安全な真空機器の操作が行えるようになった。

システムの各画面では、機器のアイコン色が状態に応じて変化する。また、それぞれのBAGアイコン上部に真空圧力が数値で表示される。それぞれの機器のアイコン表示色と動作状況を表3に示す。

表3 機器アイコン表示色と機器状態

アイコン表示色	BLGV/PMGV	TMP	BAG	IP/RP/SP	CNVCT
ピンク	開	定常運転	フィラメントON	定常運転	正常
緑	閉		フィラメントOFF	停止	—
黄色	移動中		—	—	—
赤	異常	異常	異常	異常	異常
白	ステータス監視対象外				

新真空システムは複数の端末からアクセスや操作が可能のため、新真空システムを操作する権限を獲得した端末からのみ操作可能となる仕様とした。操作権限の獲得は新真空システムの画面上から行う。また、機器操作中に別に設置されている操作端末に権限が移行できないLOCK機能も備えた。

4.2 真空システム監視操作画面

真空システムの監視画面を図13に示す。ビームライン上にBLGV及びBAGの動作状況をアイコンで示し、BAGの真空圧力の値をそれぞれのアイコンの上部に示した。L3BTを一つの画面で一括表示することにより、全体の機器及び真空状況を同時に確認できるようになっている。また、この画面上にBAGのメンテナンスモードボタンを設置し、パスワードを入力することによりBLGV閉動作の閾値設定画面へ移行できる仕様とした。

BLGVメンテナンスモード表示画面を図14に示す。BLGVメンテナンスモード表示画面では、真空圧力悪化時にBLGVの自動閉動作するための閾値を確認することができる。また、それぞれのエリアを選択することにより、BLGVメンテナンスモード入力画面へ移ることができる。

BLGVメンテナンスモード表示画面では、BLGV閉の閾値を設定することができる。閾値設定画面を図15に示す。閾値は、GV ThresholdとMPS Thresholdの2段階に設定することができる。

GV Thresholdの設定値はBLGVの開許可／強制閉の真空圧力の値、MPS Thresholdの設定値はMPSの発報値である。

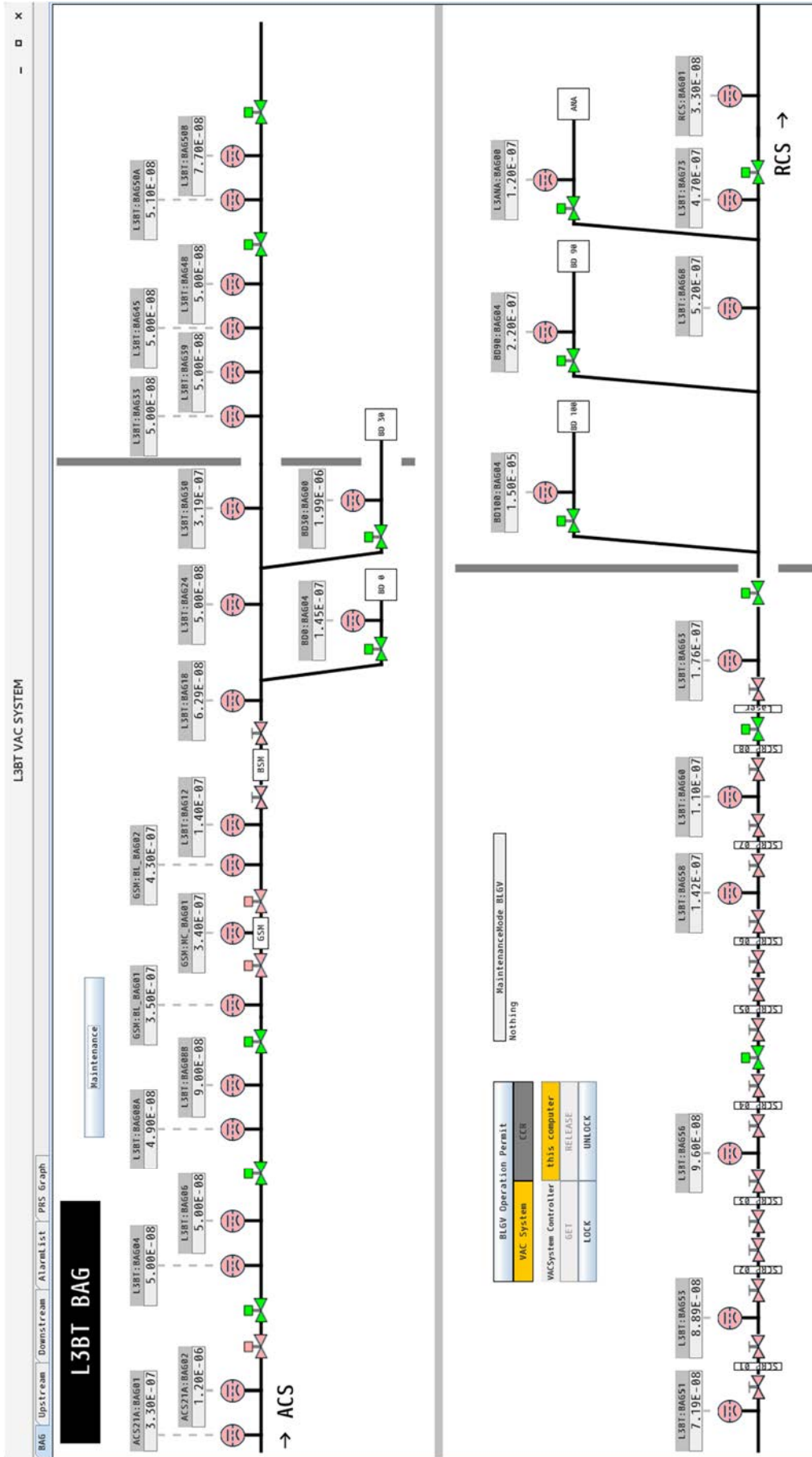


図 13 真空システム監視画面

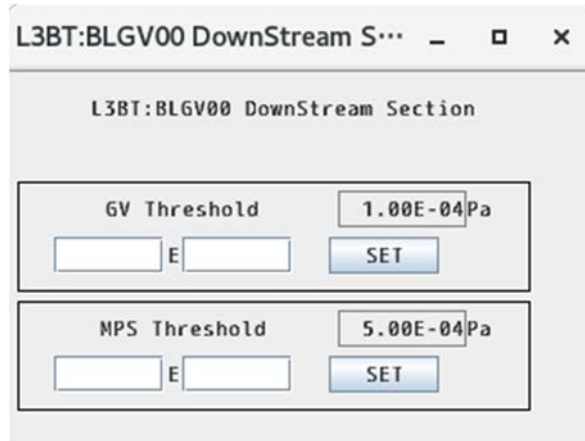


図15 BLGV閉閾値設定画面

4.3 真空システム操作画面

真空システム操作画面をL3BTビーム輸送ラインの上流と下流で2分割し、それぞれのエリアに設置されている真空機器をアイコンで示した。真空システム操作画面を図16（上流）、図17（下流）にそれぞれ示す。

それぞれの機器アイコンにカーソルを合わせると状態表示画面が表示され、クリックすると機器操作画面に切り替わり、機器の操作やILKのリセットが可能となる。また、機器操作画面には機器の動作状況や操作許可、ILKの発報、セットポイント等の情報が表示される。各真空機器の状態表示画面・操作画面を表4に示す。

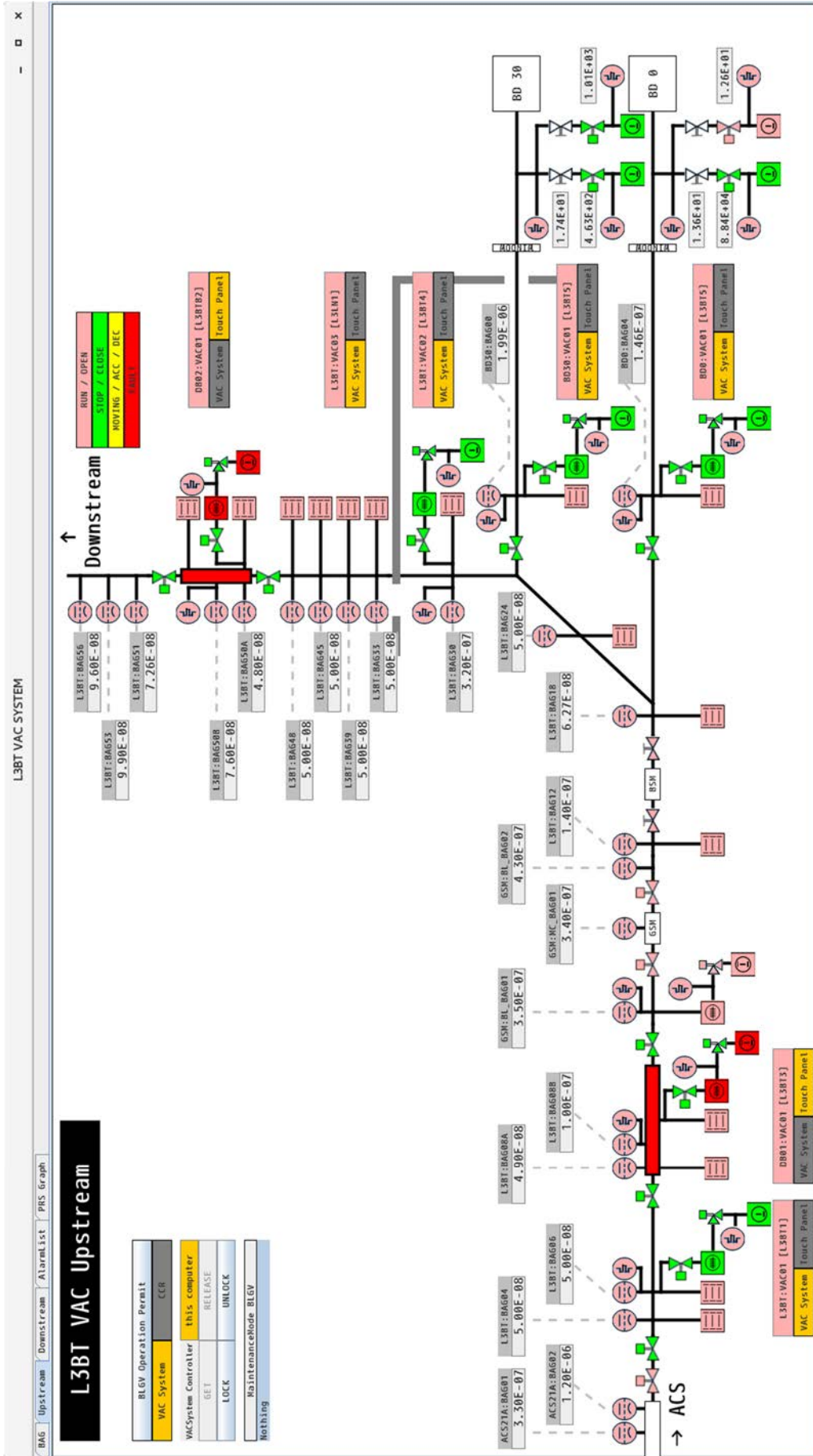


図16 真空システム操作画面 (L3BT上流)

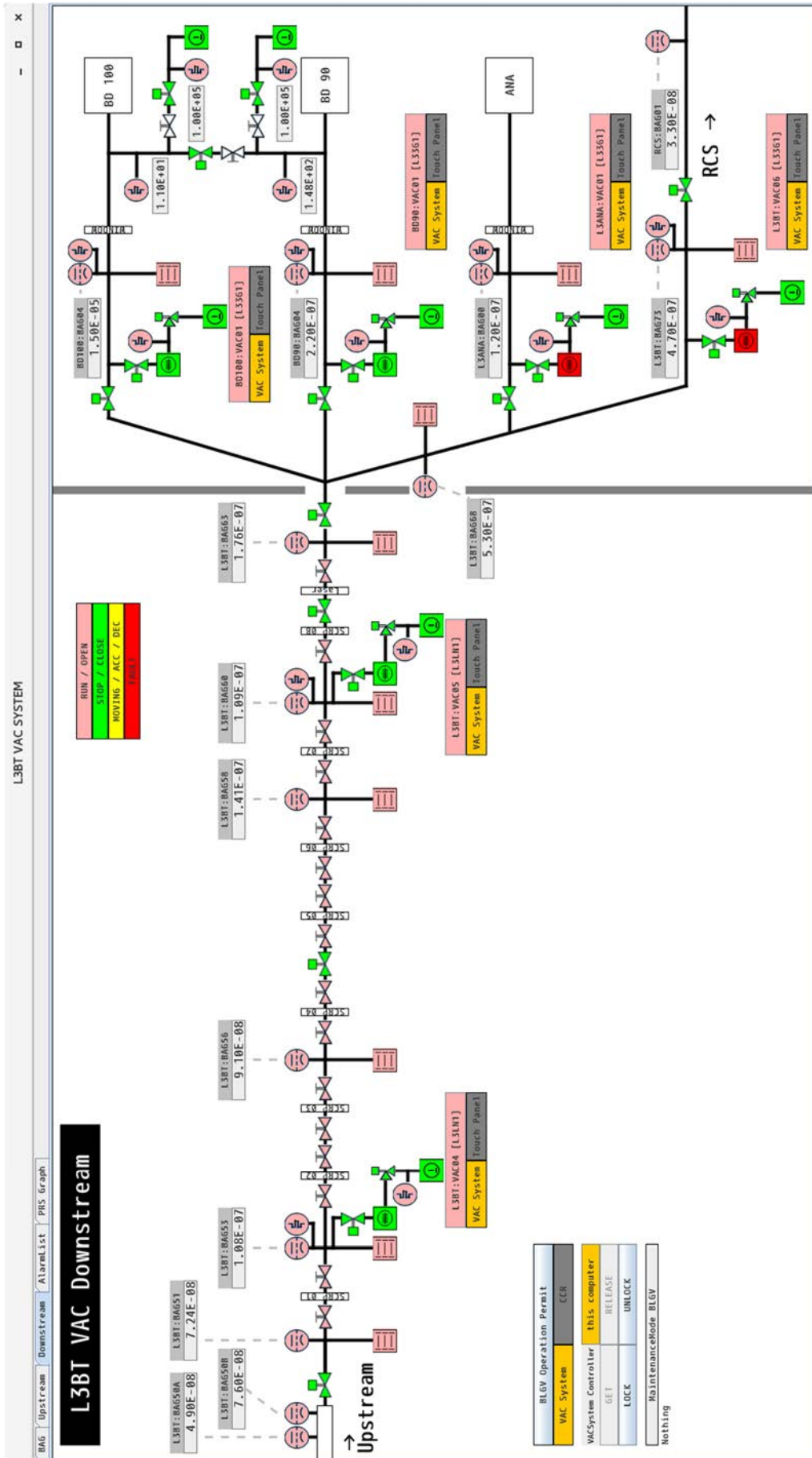


図17 真空システム操作画面 (L3BT下流)

表4 真空機器の状態表示画面・操作画面 (1/2)

機器名称	アイコン	状態表示画面	操作画面
電離真空計 (BAG)		<p>L3BT:BAG04</p> <p>PRS <input type="text" value="5.00E-08Pa"/></p> <ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="radio"/> Filament ON <input type="radio"/> Set Point 1 <input type="radio"/> Fault <input checked="" type="radio"/> Power ON <input checked="" type="radio"/> Emission 1mA <input type="radio"/> DEGAS ON <input type="radio"/> Over Threshold <input type="radio"/> Mask Enable 	<p>L3BT:BAG06</p> <p>PRS <input type="text" value="5.00E-08Pa"/></p> <ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="radio"/> Filament ON <input type="radio"/> Fil. ON Permit <input type="button" value="FIL. ON"/> <input checked="" type="radio"/> Fil. OFF Permit <input type="button" value="FIL. OFF"/> <input type="radio"/> Set Point 1 <input type="radio"/> DEGAS ON <input checked="" type="radio"/> Power ON <input checked="" type="radio"/> Emission 1mA <input checked="" type="radio"/> Remote <input type="radio"/> Fault <input type="button" value="Reset"/> <input type="radio"/> Over Threshold <input type="radio"/> Mask Enable <input type="button" value="Mask Enable"/> <input type="button" value="Mask Disable"/>
低圧真空計 (CNVCT)		<p>L3BT:CNVCT06A</p> <p>PRS <input type="text" value="2.31E-02Pa"/></p> <ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="radio"/> Set Point 1 <input checked="" type="radio"/> Set Point 2 	<p>L3BT:CNVCT06A</p> <p>PRS <input type="text" value="2.16E-02Pa"/></p> <ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="radio"/> Set Point 1 <input checked="" type="radio"/> Set Point 2
イオンポンプ (IP)		<p>L3BT:IP04</p> <p>PRS <input type="text" value="9.92E-08Pa"/></p> <p>CUR <input type="text" value="3.07E-06A"/></p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="radio"/> Emergency Stop <input checked="" type="radio"/> RUN <input type="radio"/> Fault <input checked="" type="radio"/> Start <input checked="" type="radio"/> Set Point 1 <input checked="" type="radio"/> Set Point 2 	<p>L3BT:IP04</p> <p>PRS <input type="text" value="9.68E-08Pa"/></p> <p>CUR <input type="text" value="2.70E-06A"/></p> <ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="radio"/> RUN <input type="radio"/> RUN Permit <input type="button" value="RUN"/> <input checked="" type="radio"/> Stop Permit <input type="button" value="STOP"/> <input checked="" type="radio"/> Set Point 1 <input checked="" type="radio"/> Set Point 2 <input checked="" type="radio"/> Start <input checked="" type="radio"/> Remote <input type="radio"/> Fault <input type="button" value="Reset"/> <input type="radio"/> Emergency Stop
ターボ分子ポンプ (TMP)		<p>L3BT:TMP06</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="radio"/> Forced Stop <input type="radio"/> Start <input type="radio"/> RUN <input type="radio"/> Fault <input type="radio"/> BackPress Fault <input checked="" type="radio"/> Power ON <input type="radio"/> Acceleration <input type="radio"/> Deceleration 	<p>L3BT:TMP06</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="radio"/> Acceleration <input type="radio"/> RUN <input type="radio"/> Deceleration <input type="radio"/> RUN Permit <input type="button" value="RUN"/> <input type="radio"/> STOP Permit <input type="button" value="STOP"/> <input checked="" type="radio"/> Power ON <input type="radio"/> Start <input checked="" type="radio"/> Remote <input type="radio"/> Fault <input type="button" value="Reset"/> <input type="radio"/> Forced Stop <input type="radio"/> BackPress Fault

表 4 真空機器の状態表示画面・操作画面 (2/2)

機器名称	アイコン	状態表示画面	操作画面
ルーツポンプ (RP)		<p>L3BT:RP06</p> <ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="radio"/> RUN <input type="radio"/> Forced Stop <input type="radio"/> Fault 	
ポンプゲート バルブ (PMGV)		<p>L3BT:PMGV06</p> <ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="radio"/> Forced Close <input type="radio"/> Open <input checked="" type="radio"/> Close <input type="radio"/> Fault <input checked="" type="radio"/> Diff Pressure Large <p>Diff.PRS TL <input type="text" value="0.00E+00"/></p>	
アングル バルブ (LTV)		<p>L3BT:LTV06</p> <ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="radio"/> Forced Close <input type="radio"/> Open <input checked="" type="radio"/> Close <input type="radio"/> Fault 	
ビームライン ゲートバルブ (BLGV)		<p>BD0:BLGV00</p> <ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="radio"/> OPEN Permit <input checked="" type="radio"/> OPEN <input type="radio"/> Moving <input type="radio"/> CLOSE <input type="radio"/> UpStream BAG Err <input type="radio"/> DownStream BAG Err <input type="radio"/> Sensor Err <input type="radio"/> Maintenance Mode 	

4.4 圧力分布表示画面

圧力分布表示画面を図 18 に示す。本画面にて L3BT ビーム輸送ラインに設置されている BAG の値を棒グラフにて一画面に表示することにより、視覚的にビーム輸送ラインの真空圧力状況を把握できる。

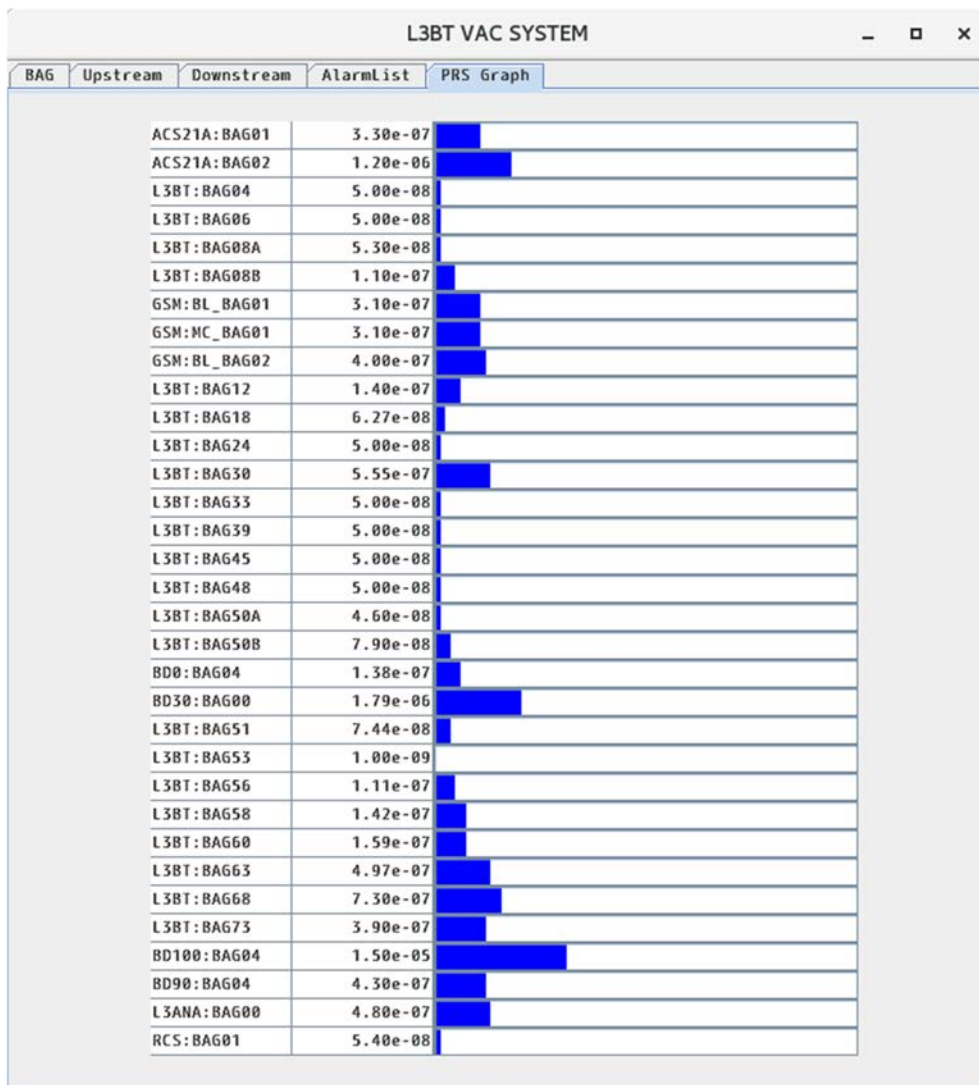


図18 圧力分布表示画面

4.5 アラームリスト表示画面

アラームリスト表示画面を図 19 に示す。本画面で L3BT ビーム輸送ラインに設置されている機器に発生しているアラームを一画面に表示することにより、エリア全体の機器状況を把握できるようにした。

Time	Alarm
2022/11/08 13:46:55	LI_L3BT:TMP08 Forced Stop ③
2022/11/08 13:46:55	LI_L3BT:SP08 Forced Stop ②
2022/11/08 13:46:55	LI_L3BT:SP08 Fault ②
2022/11/08 13:46:55	LI_L3BT:TMP50 Forced Stop
2022/11/08 13:46:55	LI_L3BT:SP50 Forced Stop
2022/11/08 13:46:55	LI_L3BT:SP50 Fault
2022/11/08 13:46:55	LI_L3BT:TMP70 Forced Stop
2022/11/08 13:46:55	LI_L3BT:TMP70 Fault
2022/11/08 13:46:55	LI_L3ANA:TMP00 Forced Stop
2022/11/08 13:46:55	LI_L3ANA:TMP00 Fault

図19 アラームリスト表示画面

機器に異常が発生すると、Time欄に発生日時、Alarm欄に機器のEPICSレコードと機器状態がそれぞれ表示される。図19に示すように、SP08に異常が起これ強制停止すると、Time欄に異常の発生した日時が表示され (①)、Alarm欄にSP08機器異常を示す『LI_L3BT: SP08 Fault』、異常により強制停止を示す『LI_L3BT: SP08 Forced Stop』が表示される (②)。SP08が停止すると粗排気システムの論理でTMP08も強制停止するので『LI_L3BT: TMP08 Forced Stop』 (③) が表示される。

4.6 イベントロギング表示画面

イベントロギング表示画面を図 20 に示す。機器操作時やアラーム／インターロック事象発生時等において、時刻（Time）、エリア（Area）、信号の種類（Signal）、機器及び状況（Contents）等のリストを記録・表示する。

それぞれの項目には、

- ・ Time（時刻）：発生時刻
- ・ Area（エリア）：機器の位置を示す Upstream、Downstream
- ・ Signal（信号の種類）：ALM（アラーム）、OPE（操作ログ）、STAT（機器ステータス）
- ・ Type（動作の種類）：NEW（機器動作）、Recover（インターロック回復）
- ・ Contents（機器及び状況）：機器状態

が表示される。

例えば、BAG60B の閉操作時において、

- ① Time 欄に操作時間
- ② Area 欄に下流エリアを示す『Downstream』
- ③ Signal 欄に操作ログを示す『OPE』
- ④ Contents 欄に BLGV60B が閉じられたことを示す『L3BT: BLGV60B Close』

がそれぞれ表示される。

また、真空悪化より BLGV60B が開状態から閉動作すると、

- ① Signal 欄に機器ステータスを示す『STAT』
- ② Contents 欄に BLGV60B が動作中の『L3BT: BLGV60B Moving』

と表示され、BLGV60B が閉じきると、

- ① Signal 欄に機器ステータスを示す『STAT』
- ② Contents 欄に BLGV60B が閉状態を示す『L3BT:BLGV60B Close』
- ③ Signal 欄に真空悪化によるアラームで動作したことを示す『ALM』
- ④ Contents 欄に真空悪化により開動作不可を示す『MPS_L3BT:BLGV60B_Not Open』

と表示される。

4.7 トレンドグラフ表示画面

トレンドグラフ表示画面を図 21 に示す。L3BT ビーム輸送ラインに設置してある電離真空計、低圧真空計及びイオンポンプの真空圧力を個別、または複数選択して表示可能であり、真空圧力範囲と表示時間は任意の値で設定可能である。

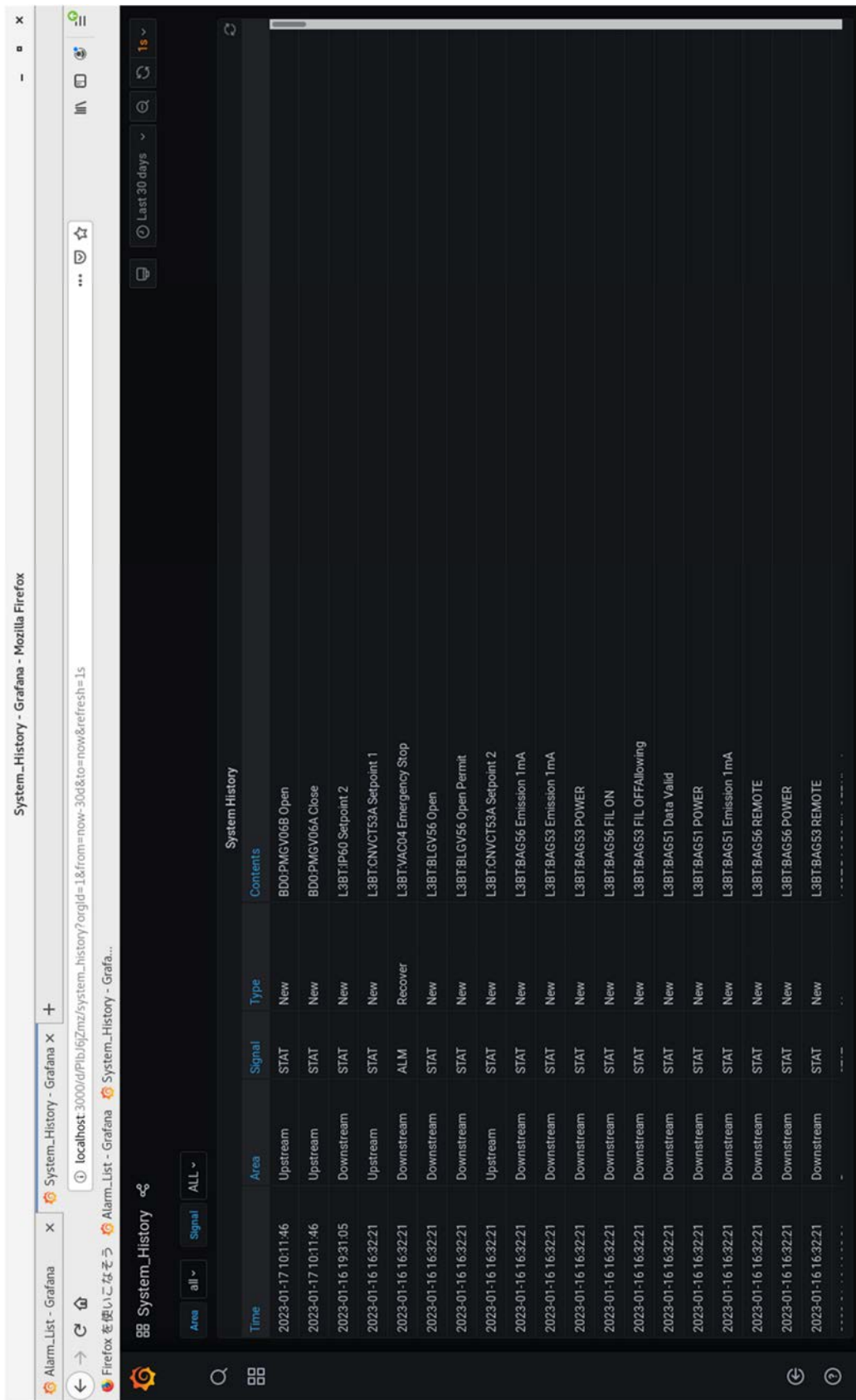


図 20 イベントログ表示画面

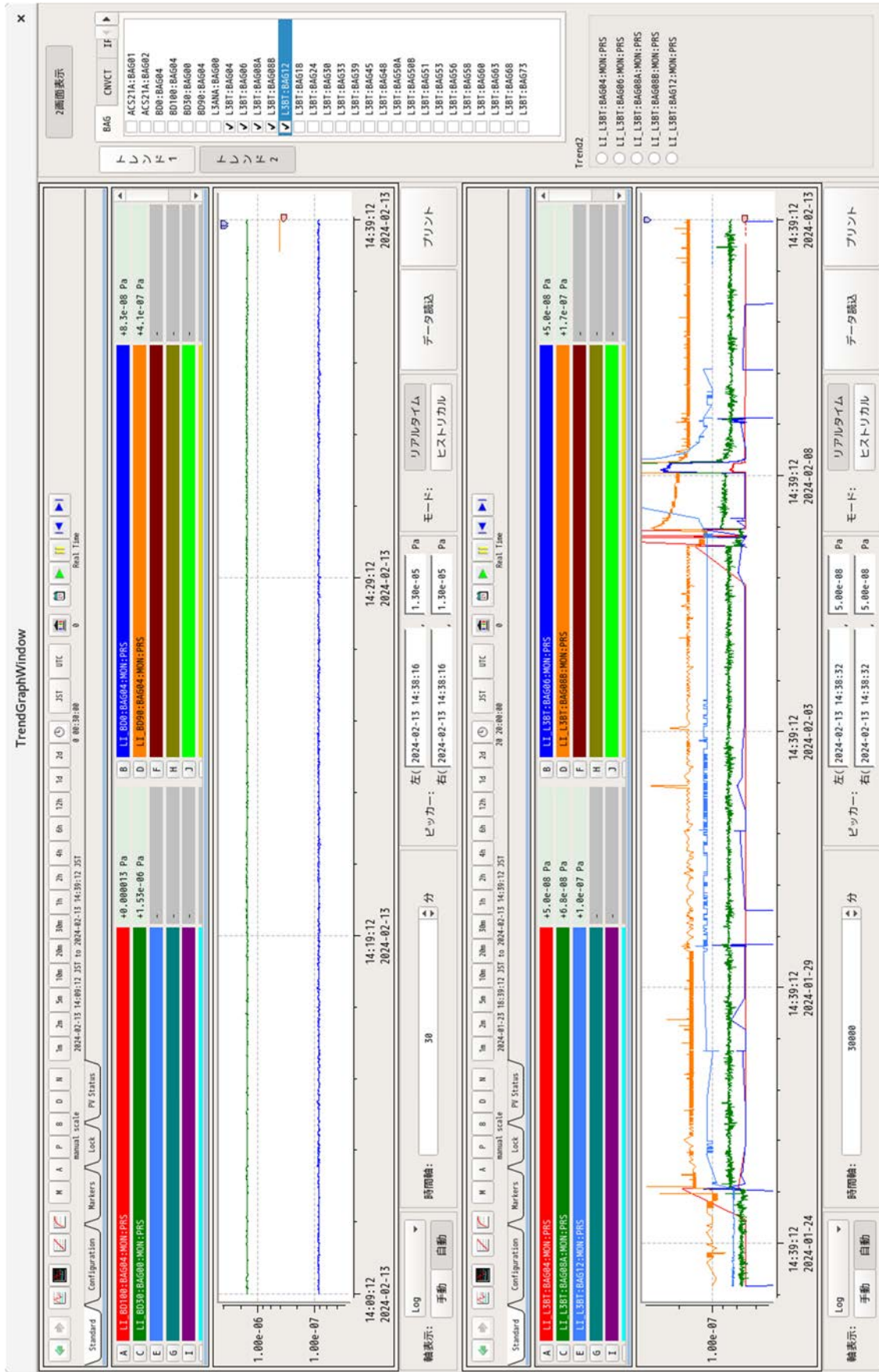


図 21 トレンドグラフ表示画面

4.8 メンテナンスモード機能

真空システム操作画面に、各機器を個別に操作するためにメンテナンスモードの機能を設けた。各機器のメンテナンスモードでは、インターロックや MPS の発報に関係なく機器操作が可能である。この機能は、機器の動作確認時や真空試験時において通常の運用とは異なる動作時に使用する。

5. まとめ

今回構築した新 L3BT 真空システム制御系により、真空エリア相互間の機器状態や真空圧力の監視と、ビームライン上の各々のゲートバルブを個別に自動制御することが可能となった。また、監視操作画面を一新し、L3BT エリア全体の真空機器を統括して管理できるようになった。この新制御系により、真空機器が相互間の情報を共有し、機器の無駄な動作を低減することにより寿命の短縮の懸念を減らすとともに、機器の誤使用による真空圧力の悪化や機器の損傷を防げる制御が可能となった。これにより、真空機器の信頼性が向上し、J-PARC 加速器の安定かつ高稼働率運転の実現に大きく寄与することが期待できる。

謝辞

本報告にあたり、制御プログラムの改修及び真空システム監視操作画面作成作業において三菱電機システムサービス株式会社 鈴木隆洋氏、石山達也氏、藤山浩樹氏にご協力をいただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] The Joint Project Team of JAERI and KEK, The Joint Project for High-intensity Proton Accelerators, JAERI-Tech 99-056, 1999, 78p.
- [2] 高野一弘, 古徳博文, 小林史憲, 宮尾智章, 守屋克洋, 神谷潤一郎, J-PARC LINAC L3BT におけるインバータ制御多段式ルーツ型真空ポンプのノイズ対策, JAEA-Technology 2021-017, 2021, 35p.
- [3] G.Shen, K.Watanabe, Y.Kato, H.Sakaki, H.Sako, Y.Ito, H.Yoshikawa, K.Hanawa, S.Mizuno, Construction of the J-PARC L3BT Control System, Proceedings of the 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan And the 31st Linear Accelerator Meeting in Japan, 2006, pp.364-366.

