

## NanoTerasu 真空制御システムの構築

### CONSTRUCTION OF NanoTerasu VACUUM CONTROL SYSTEM

黒木教平<sup>#, A)</sup>, 安積隆夫<sup>B)</sup>, 保坂勇志<sup>B)</sup>, 西森信行<sup>B)</sup>, 大石真也<sup>B, C, D)</sup>, 小路正純<sup>B, C, D)</sup>, 高野史郎<sup>B, C, D)</sup>, 田村和宏<sup>B, C, D)</sup>, 櫻井辰幸<sup>B, C, D)</sup>, 上田庸資<sup>B, C)</sup>, 谷内友希子<sup>B, C)</sup>, 正木満博<sup>B, C)</sup>, 増田剛正<sup>B, C)</sup>, 福井達<sup>D)</sup>, 仲谷光司<sup>A)</sup>, 北村全伸<sup>A)</sup>, 小玉康太<sup>A)</sup>

Kazutoshi Kurogi<sup>#, A)</sup>, Takao Asaka<sup>B)</sup>, Yuji Hosaka<sup>B)</sup>, Nobuyuki Nishimori<sup>B)</sup>, Masaya Oishi<sup>B, C, D)</sup>, Masazumi Shoji<sup>B, C, D)</sup>, Shiro Takano<sup>B, C, D)</sup>, Kazuhiro Tamura<sup>B, C, D)</sup>, Tatsuyuki Sakurai<sup>B, C, D)</sup>, Yosuke Ueda<sup>B, C)</sup>, Yukiko Taniuchi<sup>B, C)</sup>, Mitsuhiro Masaki<sup>B, C)</sup>, Takemasa Masuda<sup>B, C)</sup>, Toru Fukui<sup>D)</sup>, Koji Nakatani<sup>A)</sup>, Masanobu Kitamura<sup>A)</sup>, Kota Kodama<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> Hitachizosen

<sup>B)</sup> National Institutes for Quantum Science and Technology (QST)

<sup>C)</sup> Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI)

<sup>D)</sup> RIKEN SPring-8 Center

#### Abstract

The 3GeV next-generation synchrotron light source facility “NanoTerasu” is under construction on Aobayama New Campus of Tohoku University. The facility consists of a linac accelerator and a storage ring, and will provide high brilliant synchrotron radiation in the soft X-ray region. In order to generate stable synchrotron radiation, a high vacuum is maintained by various devices throughout the beam path, and a vacuum control system that constantly monitors these devices and interlocks when an abnormality occurs is essential for safety and protection of the accelerator components. The vacuum control system of this facility consists of LINAC VACUUM CONTROL, SR VACUUM CONTROL, and VACUUM INTERLOCK that comprehensively monitors the status of both control systems and issues an interlock command. This paper presents the development and design of the control device that is the core of the system and details of the system.

#### 1. はじめに

東北大学青葉山新キャンパス内の次世代放射光施設 NanoTerasu は 2024 年度のユーザ利用運転に向けて、整備が進められている[1]。NanoTerasu は全長 110 m のライナック加速器と周長 348.8 m の蓄積リングで構成され、軟 X 線領域において高輝度の放射光を生成する。電子ビーム経路全域にかけて、イオンポンプ等の真空機器の排気によって高真空が保たれ、その他真空封止のためのゲートバルブや真空ゲージなどが取り付けられている。これらの機器を常時監視し、異常の内容によって電子ビームの出射停止や蓄積ビーム廃棄を行うことを目的とした真空制御システムは安全かつ加速器構成機器の保護の観点で不可欠である。

NanoTerasu に導入した真空制御システムの概略を Fig. 1 に示す。システムは電子ビームを発する電子銃から蓄積リングビーム輸送部までのセクションを個別に監視するライナック真空制御と、蓄積リング部の各セルを監視する蓄積リング真空制御および両制御システムのステータスを集約監視し、インターロック指令を行う真空インターロックで構成する。SPring-8/SACLA においても真空制御システムを導入しているが、ライナック加速部と蓄積リングでシステムが完全に結合している点で独自性を有する。

本稿では、システムの中核となるタッチ式表示器およ

び PLC を組み込んだ制御装置の設計並びにシステムの詳細について示す。また、FA 機器の性能向上により実現した VNC(Virtual Network Computing)通信機能の利用についても触れる。

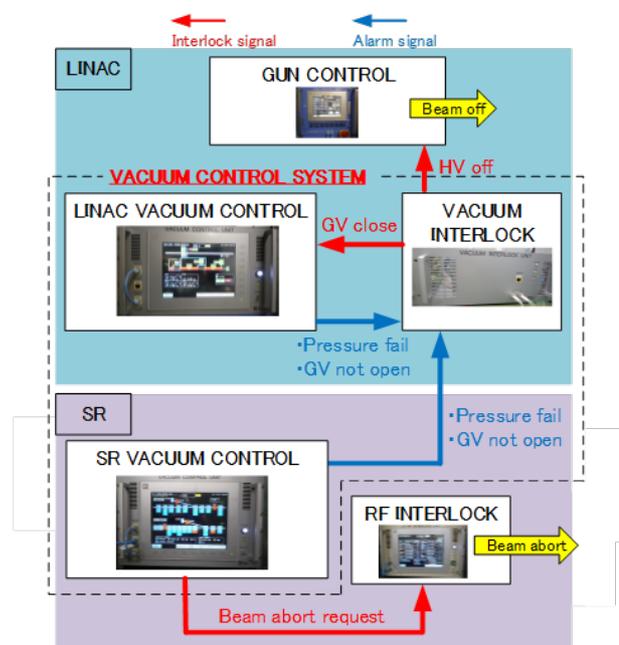


Figure 1: Schematic diagram of the vacuum control system.

<sup>#</sup> kurogi@hitachizosen.co.jp

## 2. 制御装置の設計

### 2.1 ライナック・蓄積リング真空制御装置

ライナック真空制御にあたり、電子銃(GUN)部、S-band(SB)部およびバンチ圧縮(BC)部に各 1 台、C-band(CB)加速管 2 本につき 1 台並びにビーム輸送(BT)部に 3 台の合計 27 台のライナック真空制御装置(LINAC-PLC-VAC)を配置した。装置はクライストロンギャラリーの 19 インチラック内に実装し、各種機器とケーブルにて接続する。Figure 2 に主な接続機器と信号の概要を示す。

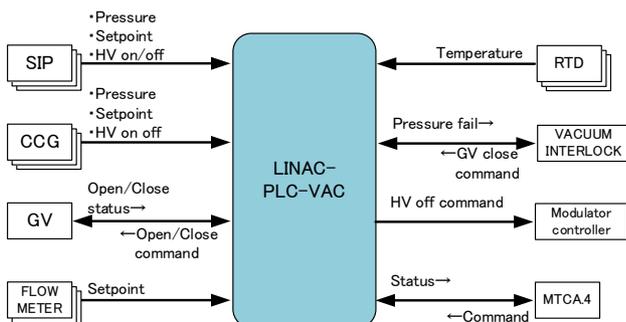


Figure 2: Schematic diagram of connected devices and signals (LINAC-PLC-VAC).

蓄積リング真空制御にあたり、反時計回りにナンバリングされた 16 のセルに各 1 台、高周波(RF)部に 1 台の合計 17 台の蓄積リング真空制御装置(SR-PLC-VAC)を配置した。装置は内周保守通路の 19 インチラック内に実装し、各種機器とケーブルにて接続する。Figure 3 に主な接続機器と信号の概要を示す。

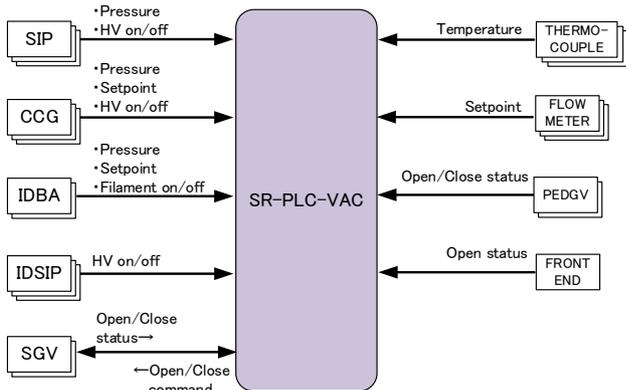


Figure 3: Schematic diagram of connected devices and Signals (SR-PLC-VAC).

両制御装置とも背面に配置したコネクタからケーブルを通じて接続機器の信号入出力を行う。装置内部端子台は省スペース化と従来のねじ式端子台に見られるねじの緩みの問題解消のため、プッシュイン式を採用した。Figure 4 に LINAC-PLC-VAC の外観と内部の様子を示す。



Figure 4: Appearance and interior (LINAC-PLC-VAC).

内部端子台を経由して PLC に取り込んだ信号をシーケンス制御し、結果を付属のタッチ式表示器に出力する。単純なアラーム状態表示のほか、ゲートバルブの開閉操作や短期間の圧力データをトレンドグラフ化し直近の過去データを遡る機能を有する。

SR-PLC-VAC 独自の機能として、長時間の圧力データを SD カードに自動記録する機能を設けた。これは、上位データベース構築以前に実施した蓄積リング真空チャンバのベーキング中における圧力データを記録することを目的とした。

このような制御装置を加速器トンネル外に設置する際の問題点として、トンネル内機器の物理的な状態確認と圧力値を始めとしたデータのモニタを並行することが容易でない点が挙げられる。解決策としてタブレット端末に制御装置のタッチ式表示器と同じ画面を表示する VNC 通信機能を導入した。Figure 5 に示す通り、VNC クライアントであるタブレット端末および VNC サーバである制御装置をトンネル内外に及ぶ加速器無線 LAN に接続することで、トンネル内でも圧力値のモニタを可能とした。

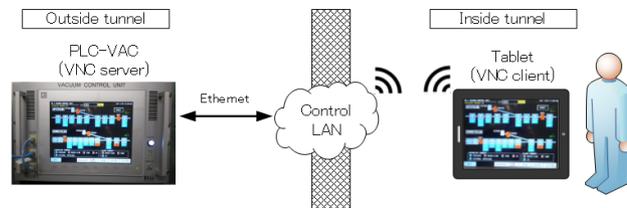


Figure 5: Image of VNC communication.

制御装置とタブレット端末で同時に操作を行うと真空破断等の事故を招く可能性があるため、VNC 通信中はタブレット端末のみに操作権を保有させる排他制御も付与した。Table 1 に排他制御による各機器の制御権の有無を示す。

Table 1: Control Right in Exclusive Control

| Exclusive control | Control                                    |
|-------------------|--------------------------------------------|
| Off               | SR-PLC-VAC: Possible<br>Tablet: Possible   |
| On                | SR-PLC-VAC: Impossible<br>Tablet: Possible |

## 2.2 真空インターロック装置

真空インターロック装置(VAC-INTLK)は3台配置し、LINAC-PLC-VAC とは CC-Link[2]、SR-PLC-VAC とは CC-Link IE コントローラネットワーク[3]を用いて信号を集約監視する。Figure 6 にネットワーク概略図を示す。

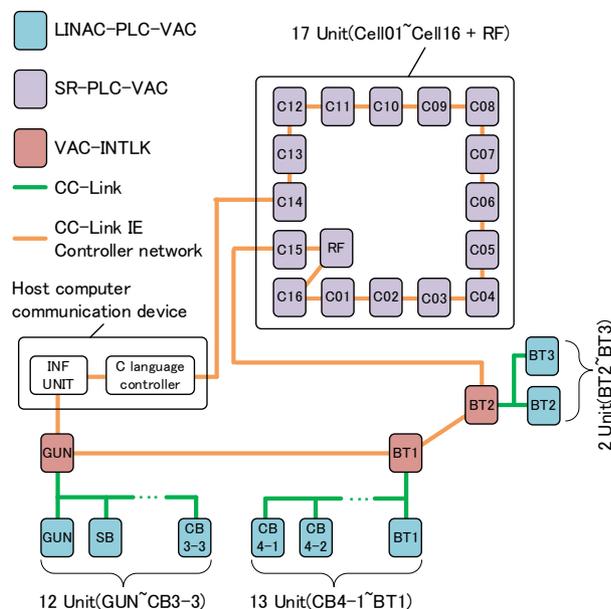


Figure 6: Network schematic.

CC-Link はマルチベンダーに対応しており、異なる機種種の PLC(LINAC-PLC-VAC は横河電機製、SR-PLC-VAC は三菱電機製)間で通信可能という点において有利である。各機器との配線方法はいくつかあるが、1本の幹線と LINAC-PLC-VAC ごとの支線で分岐する方法を採用した。この場合、使用ケーブル本数は少なくなるが、1台当たりのリンク可能点数はビット単位で数十点に制限される仕様となっている。真空制御として必要な圧力異常やゲートバルブ閉鎖指令など特定の信号を選定することで、この問題をクリアした。

CC-Link IE コントローラネットワークはビットおよびワード単位で多数の PLC 間データリンクが可能であり、大規模ネットワーク構築に有利である。本システムの場合、VAC-INTLK、SR-PLC-VAC および上位計算機通信装置間で、多数のアラーム信号、圧力および温度データ等を共有する必要があるため、CC-Link IE コントローラネットワークが最適である。また、環状に正副2系統の光ケーブルで接続することで、1系統で断線が発生しても残りの1系統で運転を継続するため冗長性にも強みを持つ。

VAC-INTLK は実装位置によって、取合機器が異なる。GUN 部 VAC-INTLK は、ビーム経路上のゲートバルブの閉鎖などビーム出射による機器破損等の事象が発生した場合、電子銃に対して HV off を指令する役割を持つ。BT1 部 VAC-INTLK は、ビーム方向をダンプまたは蓄積リング方向に振り分ける電磁石電源の励磁状態を電磁石インターロック経由で取得する。非励磁状態の場合、ビームはダンプ方向に進行するため、ビームが入射しない蓄積リング内の機器について監視対象から除外し、不必要な HV off 指令を回避する。BT2 部 VAC-INTLK は、固有の取合機器はないが、蓄積リング保守通路に設置する LINAC-PLC-VAC の監視を目的としている。

VAC-INTLK 本体はタッチ式表示器を付属しないコンパクトなサイズで、必要に応じて可搬型の表示器を本体に接続し、状態目視を可能なものとした。

## 3. 真空制御システムの詳細

### 3.1 ライナック真空制御システム

ライナック真空制御におけるアラーム発生からインターロック指令までのシステムについて、圧力異常を例とした図を Fig. 7 に示す。

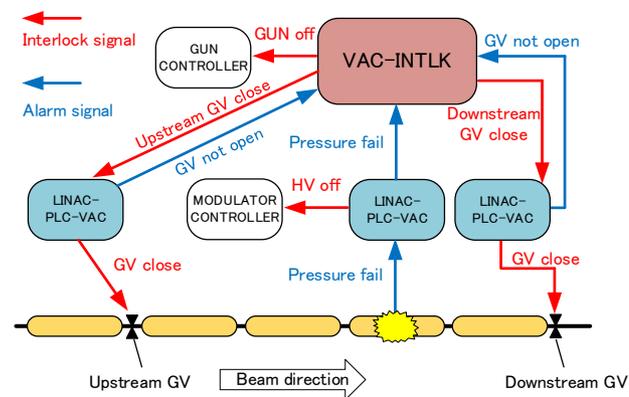


Figure 7: Schematic diagram of LINAC VACUUM CONTROL SYSTEM.

圧力異常が発生した場合、他のセクションへの伝播を遮断するために、一定セクションの間隔で配置したゲートバルブを閉鎖する。このため圧力異常を検知した LINAC-PLC-VAC から直接ゲートバルブを監視する LINAC-PLC-VAC に対して閉鎖指令を伝達する必要がある。各 LINAC-PLC-VAC は直接的な信号通信手段を持たないため、VAC-INTLK を介して信号の伝達を行う。VAC-INTLK は、全セクションの圧力異常状態を CC-Link 経由で監視し、異常を検知した位置に応じてゲートバルブ閉鎖を指令するシーケンスとなっている。

閉鎖後、ゲートバルブへのビーム照射を回避するために、電子銃に対しビーム出射停止を指令する必要がある。この動作についても、全体のゲートバルブの開状態を監視している VAC-INTLK のシーケンスで処理する。

また、圧力異常発生時、同セクションにあるモジュレータ電源の高圧運転を停止する必要もあるが、LINAC-PLC-VAC とモジュレータ電源の制御部が直接的に信号を取り合っているため、LINAC-PLC-VAC から直ちに

HV off を指令する。

### 3.2 蓄積リング真空制御システム

蓄積リング真空制御におけるアラーム発生からインターロック指令までのシステムについて、圧力異常を例とした図を Fig. 8 に示す。

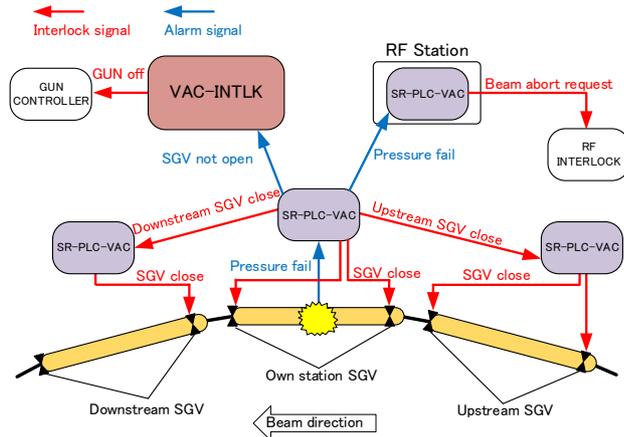


Figure 8: Schematic diagram of SR VACUUM CONTROL SYSTEM.

蓄積リングにおけるゲートバルブは、各セル 2 台配置され、ライナックと同様に圧力異常が発生した場合、他セルへの伝播を遮断するために閉鎖する必要がある。このため圧力異常を検知した SR-PLC-VAC から隣接上下流セルの SR-PLC-VAC に対して閉鎖指令を伝達する必要がある。各 SR-PLC-VAC は CC-Link IE コントローラネットワークにより直接的な通信手段を持つため、閉鎖までの過程において別のシステムを介さない点でライナック真空制御と大きく異なる。SR-PLC-VAC は、自局で圧力異常を検知した場合、直接監視する 2 台のゲートバルブを直ちに閉鎖するとともに、上下流セルの SR-PLC-VAC に対して閉鎖指令を行うシーケンスとなっている。閉鎖指令を受けた SR-PLC-VAC のうち上流側は 2 台のゲートバルブ、下流側は 1 台のゲートバルブの閉鎖を行う。これにより圧力異常発生位置から見て必ず 2 または 3 台を閉鎖する。

蓄積リングのゲートバルブへのビーム照射もライナック同様回避が必要であるため、VAC-INTLK は蓄積リング軌道上の全ゲートバルブの開閉状態も監視の対象としている。一方、ビームがダンプ方向へ進行する場合、蓄積リング内の状態を監視対象外と判断する。

また RF 部に設置した蓄積リング真空制御装置(SR-PLC-VAC-RF)は、蓄積リング内で異常を検知した場合、RF インターロック(RF-INTLK)に対してビーム廃棄(Beam abort)要求を通知する。Beam abort 要求は、Table 2 に示す通り異常元が RF の場合と RF 以外のセルの場合の 2 系統を備える。

2 系統のどちらの Beam abort 通知を受けた場合でも RF-INTLK は RF off を指令し、蓄積電子ビームの廃棄処理を行う。一方、RF 立ち上げ時などにおいて RF 以外のセルの異常を除外して RF の連続運転を行う場合がある。このようなケースを想定して、SR-PLC-VAC-RF では、RF コンディショニングモードを設け、モード設定中は RF

以外のセルを異常元とした Beam abort(System 2)要求を行わないことで、RF 連続運転を継続する。

Table 2: Beam Abort Request Systems

| System | Signal name | Monitored                | Alarm detail                                            |
|--------|-------------|--------------------------|---------------------------------------------------------|
| 1      | WATER-VAC   | RF                       | • Pressure fail                                         |
|        | INTLK       |                          | • Waterflow fail                                        |
| 2      | RING VAC    | None-RF                  | • Pressure fail                                         |
|        | INTLK       | Cells<br>(Cell01<br>~16) | • Waterflow fail<br>• GV not open<br>• Temperature fail |

## 4. まとめ

次世代放射光施設 NanoTerasu 内に、ライナックおよび蓄積リングの各所を制御する真空制御装置と、これらを集約監視する真空インターロック装置を各種ネットワークで接続した真空制御システムを構築した。

真空制御装置の特徴の一つである VNC 通信機能は、トンネル内の機器状態確認とデータモニタの並行を可能にし、保守・メンテナンス性を大幅に改善させる結果となった。また、真空チャンバのベーキング時における圧力状況監視の際など高頻度で機能使用し有用性を示した。

真空制御装置と各接続機器間のアラーム信号取合、異常時におけるゲートバルブ閉鎖、電子ビーム出射停止指令およびビーム廃棄要求インターロック動作のシーケンスに問題のないことが確認された。

NanoTerasu は 2023 年 7 月時点で、蓄積リングの電子周回および蓄積に成功[4]しており、本システムは安定に動作していると評価できる。

## 参考文献

- [1] <https://www.nanoterasu.jp/>
- [2] <https://www.cc-link.org/ja/cclink/cclink/index.html>
- [3] [https://www.cc-link.org/ja/cclink/cclinkie/cclinkie\\_c.html](https://www.cc-link.org/ja/cclink/cclinkie/cclinkie_c.html)
- [4] <https://www.qst.go.jp/site/press/20230714.html>