



NBI 補助真空排気系設備及び 1次冷却系設備制御システムの更新

Update of Control System for Auxiliary Pumping and Primary Water Cooling
Facilities in JT-60 NBI

菊池 勝美 秋野 昇 海老沢 昇 池田 佳隆
関 則和* 竹之内 忠 棚井 豊

Katsumi KIKUCHI, Noboru AKINO, Noboru EBISAWA, Yoshitaka IKEDA
Norikazu SEKI*, Tadashi TAKENOUCI and Yutaka TANAI

核融合研究開発部門
粒子ビーム加熱システム開発グループ
NBI Heating Group
Fusion Research and Development Directorate

April 2008

本レポートは独立行政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。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2008

NBI 補助真空排気系設備及び1次冷却系設備制御システムの更新

日本原子力研究開発機構 核融合研究開発部門
トカマクシステム技術開発ユニット

菊池 勝美^{*1}・秋野 昇・海老沢 昇・池田 佳隆
関 則和^{*}・竹之内 忠^{*2}・棚井 豊^{*1}

(2008年 3月 6日受理)

NBI 補助真空排気系設備は、主排気システムであるクライオポンプの補助を行う真空排気設備である。1次冷却系設備は、NBI 加熱装置の受熱機器への冷却水を供給する設備である。この補助真空排気系設備及び1次冷却系設備の両設備の制御システムは、約22年前に製作され、入出力数約2000点、ラダーソフト3600ラインからなる大規模なものである。しかし、高経年化により信頼性の低下や修理の対応が困難となった。今回、高経年化対策として低価格の最新汎用PLCを最大限に活用した更新用制御システムを原子力機構独自で設計・製作した。その結果、低価格なPLCでも、従来の大規模制御機能を完全に実現できることを示した。さらに最新PLCの有するPLCネットワーク機能を用いることで、従来不可能であった遠隔制御を実現した。この結果、各機器の詳細な状態判別が可能となり、機器トラブル箇所の調査と修復が迅速となるとともに、運転監視業務が軽減できた。

那珂核融合研究所（駐在）：〒311-0193 茨城県那珂市向山 801-1

*¹ 出向職員（原子力エンジニアリング（株））

*² 出向職員（（株）巴商会）

* 日本アドバンステクノロジー（株）

Update of Control System for Auxiliary Pumping and Primary Water Cooling Facilities in JT-60 NBI

Katsumi KIKUCHI^{*1}, Noboru AKINO, Noboru EBISAWA, Yoshitaka IKEDA
Norikazu SEKI*, Tadashi TAKENOUCI^{*2} and Yutaka TANAI^{*1}

Division of Tokamak System Technology
Fusion Research and Development Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Naka-shi , Ibaraki-ken

(Received March 6 ,2008)

The control system for auxiliary pumping facility and primary water cooling facility in JT-60 NBI was updated. To realize the cost reduction, the control system with many input and outputs of 2000 was updated by JAEA itself using commercial Programmable Logic Controllers (PLC's). JAEA also made software with 3600 ladder lines by JAEA itself based on commercial basic programs. In addition to the simple replacement of the hardware and software, the function of remote operation has been newly added. At present, the auxiliary pumping facility and the primary water cooling facility have been stably operated without troubles. The remote operation enables to collect the detailed information on the trouble more easily, resulting in a quick countermeasure for the trouble.

Keywords:

NBI, Accelerator Grids, Vacuum Pumping Facility, Water Cooling Facility, Control System, PLC, I/O Device

^{*1} Research Staff on Loan (Nuclear Engineering Co.ltd)

^{*2} Research Staff on Loan (Tomoe Shokai Co.ltd)

* Nippon Advanced Technology Co.ltd

目 次

1. はじめに	1
2. 既存制御システム	1
2.1 補助真空排気系設備	2
2.2 1次冷却系設備	2
3. 更新システムの基本設計	3
3.1 基本方針	3
3.2 システム選定	3
3.3 更新スケジュール	4
4. 更新システムの製作	4
5. 試験運転	5
5.1 補助真空排気系設備	5
5.2 1次冷却系設備	6
6. まとめ	6
謝 辞	6
参考文献	7
付録1 補助真空排気系設備の性能と構成	8
付録2 1次冷却系設備の性能と構成	9

Contents

1. Introduction	1
2. Existing control systems	1
2.1 Auxiliary pumping facility	2
2.2 Primary water cooling facility	2
3. Basic design of new control systems	3
3.1 Basic policy	3
3.2 Selection of new PLC	3
3.3 Replace Schedule	4
4. Construction new control systems	4
5. Working test of new control systems	5
5.1 Auxiliary pumping facility	5
5.2 Primary water cooling facility	6
6. Summary	6
Acknowledgments	6
References	7
Appendix 1 Performance and structure for Auxiliary pumping facility	8
Appendix 2 Performance and structure for Primary water cooling facility	9

1. はじめに

中性粒子入射装置（以下 NBI と略称する。）は、JT-60U トカマクの主加熱装置であり、垂直入射用 NBI（以下 P-NBI と略称する。）、接線入射用 NBI（以下 T-NBI と略称する。）及び負イオン NBI（以下 N-NBI と略称する。）の計 15 ユニットから構成される 1)。図-1 に配置図を示す。この NBI の主要機器の 1 つであるビームラインは、イオン源で生成・加速された高エネルギーイオンを中性粒子に変換する中性化セル、中性化できなかったイオンを熱化处理するイオンダンプ等からなる。P-NBI ビームラインは、上ユニットと下ユニットを重ねて配置しており、計 10 ユニットから構成される。なお、下 3 ユニット（#1,5,11）に関しては、現在ビーム入射を行わず、そのビームラインに内蔵したクライオポンプによりダイバータ排気を行っている。T-NBI は、入射方向がプラズマに対して接線方向であり、上下 2 つのビームラインが一つの大型真空排気タンク内に収納されている。N-NBI は、約 23m の長尺なビームラインを持ち、真空排気タンクがイオン源出口と中性化セル出口に一台毎配置されている。

これらビームラインに加えて、吸着・脱離を繰り返す大型クライオポンプ及びその補助真空排気系が設置されており、これらの排気設備を安定に動作することが要求されている。また、1 次冷却系設備は、各ビームライン内の受熱機器に 1 次冷却水を安定に供給することが要求されている。これらの設備の制御システムは、1986 年の NBI 装置稼動開始以来、約 22 年間、適正な運転を実施してきたが、ここ数年、経年化により故障が頻発している。これまで故障の際は、部品交換を行い対処してきたが、メーカーでの部品生産は中止し、且つ後継互換機が無いため、部品を交換による修理が困難となった。これに対処するために、2005 年、故障時の影響が最も大きい大型クライオポンプ（ヘリウム冷凍設備）の制御システムを、原子力機構独自に、全面的に更新した。今回この更新に続き、補助真空排気系設備と 1 次冷却系設備の制御システムの全面更新を実施した。実施に当たっては、ヘリウム冷凍設備の制御系更新作業で得た知見・経験を最大限に活用することで、エンジニアリングメーカーに依頼することなく独自に制御システムの更新を行い、コスト低減と運転経験に基づく機能追加を実現した。本稿では、この補助真空排気系設備と 1 次冷却系設備の制御システムの全面更新について報告する。

2. 既存の制御システム

補助真空排気系設備は、ビームラインの主排気ポンプである大型クライオポンプが 1 週間凝縮・吸着した重水素ガスまたは水素ガスをクライオポンプ再生時に真空排気するとともに、大気解放後、ビームラインの真空度をクライオポンプの動作領域まで下げるために用いられている。さらに同設備は、クライオポンプを使用しない NBI 短パルスビームコンディショニング時の主排気装置である。1 次冷却系設備は、イオン源或いは残留イオンダンプ等のビームライン機器への冷却水の供給（ビームライン循環系）と、レギュレータバルブ[RV]や NNBI インバータ電源機器へ冷却水の供給（RV 循環系）を行う。補助真空排気系設備と 1 次冷却系設備の性能、構成は付録 1, 2 に示す。

これらの制御システムは、以下に示すような機能を有しており、今回のシステム更新において

も同等の機能を、低コストで且つ高信頼性で実現することが求められた。

2. 1 補助真空排気系設備（付録図-1）

補助真空排気系は、以下の制御機能を有する。

- ・ 15 基のビームラインを並列で同時に真空排気するシステムであり、それぞれのビームライン（真空容器）は真空配管を介して共通のマニホールドに接続されている。各ビームラインは、圧力及び排気状況により **TMP** 排気ポンプ系または粗引きポンプ系を選択して排気を行う。
- ・ ビームラインの真空排気操作は、各ビームライン真空度に応じて自動運転の選択が可能であり、大気圧領域から **TMP** 真空排気の高真空領域まで自動運転することができる。
- ・ クライオポンプ再生時の重水素及び水素の可燃性ガスを真空排気するための水素排気モードが設けられ、ドライポンプ排気下部で窒素ガスを導入し、可燃性ガスの希釈処置を行う。なお、排気側で常時水素濃度のモニタリングにより濃度上限のインターロックを備えている。
- ・ **NBI** ビームコンディショニング運転条件に不可欠な真空排気情報や真空度情報を出力する。
- ・ 計装用圧空供給設備は、空気圧縮機を 2 機備え故障により停止した場合、バックアップ機が自動的に起動する。

上記の機能を確保するために、従来の制御システムでは、日立製 **HIZAC** シリーズのシーケンサー(PLC)を導入し、サンプリング **46ms**、プログラムエリア **16kW** の **P-2000H** の基本ユニット (CPU) と **26** 台の増設ユニットで構成されたシステムを用いていた。補助真空排気系設備の従来の制御システムの構成を図-2 に示す。増設ユニット部は、**64** チャンネル (**16** チャンネル **X4** モジュール) の **I/O** 部、電源及び伝送部からなり、1つのパッケージに収納されている。**26** 台の増設ユニットは、制御盤内ローカル配線近くに分散して設置されている。入出力総点数 **1664** 点 (**DI1168** 点、**DO496** 点) であり、ラダープログラムは、排気共通部、ビームライン共通部及び各ビームライン (**15** ユニット) 制御部の系統別に整理されており、総数は **3,252** ラインである。

2. 2 1次冷却系設備（付録図-2）

1次冷却系は、以下の制御機能を有する。

- ・ **NBI** ビーム入射運転を行う定常運転モード、単独で電源系機器冷却を行う **RV** 循環系運転モード及びクライオポンプ運転時に、ビームライン内部配管の凍結を防止するためのクライオ凍結防止運転モードを備え、これらは完全自動制御運転を行う。
- ・ ポンプが何らかの異常により停止した場合、ビームライン循環系は定常運転からクライオ凍結防止運転に運転モードが移行し、**RV** 循環系運転では、ポンプ予備機がリカバリーとして自動的に起動する制御を持つ。
- ・ ビームライン循環系は、通水選択したビームライン数を検出し、自動的にポンプ運転台数を決定する制御機能を備える。
- ・ ビームライン循環系及び **RV** 循環系は、それぞれにイオン交換塔を持ち冷却水の絶縁性を

管理するシステムである。また、水温上昇を防ぐため熱交換器への通水量の制御を行う。

従来の制御システムにおいては、補助真空排気系設備と同様、日立製 HIZAC シリーズの PLC を導入されている。ただし入出力点数とプログラムメモリ容量が少ないため、プログラムエリア 2kW、サンプリング 25ms である P250 の小規模システムを採用している。基本ユニット 2 台 (I/O 64 点を含む)、I/O 増設ユニットは 3 台からなり、入出力点数は 320 点 (DI160 点、DO160 点) である。P250 1 台当たりの最大入出力点数が、256 点であるので、基本ユニット 2 台を用いている。ラダープログラムは、約 260 ラインである。図-3 に 1 次冷却系設備の従来の制御システムを示す。

3. 更新システムの基本設計

3. 1 基本方針

コスト低減化を図るためのシステム更新は、エンジニアリングメーカーに依頼することなく原子力機構自身で実施する。更新の際、以下の点について留意した。

- ・ 大型クライオポンプ (ヘリウム冷凍設備) の制御系更新作業で得た知見・経験を最大限に活用すること。
- ・ 更新後、長期間システムの保守管理が容易なこと。
- ・ 機能の追加、修正が容易なこと。
- ・ 運転員の負担軽減のため遠隔操作、監視機能を有すること。
- ・ 更新に伴う設備側の運転停止期間は、3 ヶ月程度以下とし、JT-60 の運転休止期間 (1 年間) に全ての更新作業を終了すること。

これらの要件を基に検討した結果、従来の制御システムで採用していた PLC 方式を踏襲するとともに、その機能を最新の PLC で置換えることが、最も短期間、低コストでシステム更新を行うことができると判断し、この方針の基にシステム設計を実施した。

3. 2 システム選定

22 年前の PLC と現在の PLC の性能を比較すると、現在の PLC は低価格の汎用機種においても、処理速度、ワーキングメモリ容量、入出力点の拡張性及び通信インターフェイス等の性能は優れている。機種選定の基準として、これらの基本性能に加えて、PC 端末で遠隔監視・操作が可能であることを考慮した。さらに、既設のラダープログラム内容を調査し、以下の事項をソフトウェアの選定基準とした。

- ・ 論理演算命令比較や旧システムで用いているワード演算処理を行うために、BASIC ライクなフロー言語等の置換え処理等が容易に可能であること。
- ・ 短期間での制御更新が必要であることから、ソフトデバッグ及び PLC 単体でのシーケンス試験が容易にできること。

上記の条件を満たす機種はいくつかあったが、2005 年に冷媒循環系 PLC 計装制御システムでの実績 2) や同システム開発で培った経験を考慮し、オムロン製 SYSMAC CS1 シリーズを選定した。

3. 3 更新スケジュール

以前のヘリウム冷凍設備の制御系更新作業で得た PLC に関する知見・経験を最大限に活用するとともに、プログラム製作開始前に十分な検討時間を行うことで、JT-60 の運転に影響を与えることなく、本更新作業を実施できると判断し、本更新作業を実施した。更新作業のスケジュールを図-4 に示す。全ての更新作業は JT-60 の運転休止期間である 1 年間で終了する必要がある。更新当初 4 が月間、既存制御システムの調査（入出力ハード、制御ロジック）や導入 PLC システムの検討・調査を実施した。最初の NBI 実験時期である 2007 年 1 月～4 月に設計検討を行い、その後ハードシステムの構築を始めた。5 月から本格的にラダー開発ソフトでプログラミングし、完成後、プログラムのデバッグを行った。デバッグと並行して CX-Designer ソフトで監視制御画面を新規に製作した。開発ソフト単体でのシーケンス確認を終え、7 月後半から旧制御システムの撤去と開発機の組み込みを行った。システム実装後に入出力試験を行い配線接続の健全性を確認後、模擬動作によるシーケンス試験及びインターロック試験を行う。総合試験運転で実際に機器稼働させ、最終的なシステム全体の健全性を確認した。

4. 更新システムの製作

新規導入したオムロン SYSMAC CS1 シリーズの PLC システム構成を図-5 に示す。補助真空排気系に対して、1 台の CPU ベースと 3 台の増設 I/O ベース、1 次冷却系に対しては、1 台の CPU ベースと 1 台の増設 I/O ベースを用いた。I/O バス通信のために、CPU ベースと増設ベースとは相互リンクしている。各ベースは 1 台当たり最大で 10 台のユニットを増設することが可能である。本 PLC はインターネットに接続されており、ネットワーク上の PC 端末で設定・監視することが可能である。

CPU ベースには、CPU ユニット、通信ユニット、アナログ入力ユニットを装着した。採用した CPU は 32bitRISC プロセッサを使用した CPU(CS1H)であり、プログラム容量 60k ステップ、データメモリ 128k ワード、最大入出力総点数 5120 点を有している。通信ユニットとして、一般的な Ethernet 100Base-TX 規格を採用し、TCP-IP 通信プロトコルで PC と通信を行い、ラダープログラミングソフトやグラフィック操作画面ソフトで PLC-PC 間のデータ通信を行い、リモート化を図った。アナログ入力ユニットとして、絶縁型直流入力タイプを採用した。各種真空計出力、流量、温度等をモニターするために、新規に計 32ch を増設した。

一方デジタル I/O ユニットは、旧システム I/O ユニット当たりの点数と整合性を取るため、1 ユニットあたりの接点数を 64 とした。また、旧システムの入出力接点の出力電圧 (AC100V) を本システムで用いている I/O ユニットの出力電圧 (DC24V) に変換するために、電圧変換を行うリレーターミナルを配置した。これにより、信号配線の大幅な変更を回避した。リレーターミナルから PLC までは、専用の多芯線で接続した。

ラダープログラミングは、メーカーから提供されている CX-Programmer を使用して作成した。CX-Programmer によるグラフィックプログラミングは、簡単な手法で回路図を作成できるため、旧システムの制御ロジックを新 PLC 用ソフトに変換する作業の簡素化が可能である。図-6 に作成例を示す。基線から論理演算記号をショートカットキーまたは指定アイコンで書き込み、そこに入出力また

は内部補助リレーのメモリアドレスを割り当てるとともに、それぞれの論理記号を実線で最右端の最終出力に繋げることによって、簡単に回路を作成できる。これを用いて作成した回路中の接点や出力リレーは信号の ON-OFF 状態によって色が変わるため、回路の接続状態を容易に確認することが可能である。また、新旧ラダーソフトの基本論理演算命令機能の違いなどがあったために、旧システムのプログラムを新システムのプログラムに移行する際には、単純な置き換えばかりでなく、新システムに適応する新たなロジックも考案した。さらに旧システムのフロー言語命令に関しては、新システムで同等の機能を持たせるために、最新 PLC の豊富な関数命令の組合せによって置き換えた。

プログラムデバッグは、ラダー回路上で視覚的に確認を行い進めた。すなわち図-6(2)に示す PLC メモリ一覧を見ながら、メモリアドレス信号の強制セット、リセットを行いソフト上で動作確認を行った。また、ラダープログラムのセクション分割機能により制御区分別けができること、制御パーツのアドレス検索が便利であること及び入出力リレーや内部補助リレーの名称入力表示によるロジック解読が迅速に出来ることにより、シーケンス・インターロック試験の省力化が図れた。なおこれらのデバッグは、PC-PLC 間ネットワーク機能を用いることで、PC 上のグラフィック画面上で行った。

監視・制御用グラフィック画面は、CX-Designer ソフトで作成した。機器のグラフィック画面の作成に当たっては、操作状態や警報状態等を容易に識別できるように心がけた。グラフィック画面は、描画部品ほとんどがソフト付属のテンプレート（スイッチ、ランプ、配管、タンク等のプラント部品）を利用することで短期間に作成した。補助真空排気系共通排気部のメイン画面を図-7に示し、主排気タンク部（#1～#4）の監視制御画面を図-8に示す。また、1次冷却系設備監視制御のメイン画面を図-9に示す。図中で使用した描画部品は、機器の動作指令信号の送信や機器状態信号の受信を行うために、PLC I/O 通信アドレスを設定することにより、PC 端末画面から機器動作や状態把握が可能である。このためポンプ運転、バルブの開閉動作・状態、真空及び冷却水配管等が、視覚的に認識できるようにグラフィック画面上に描画部品を配置した。CX-Designer の他機能としては、アラーム・イベント信号をテーブル登録できることであり、異常発生時のテロップ表示や履歴の表示・保存の機能を備えている。（図-10 参照）CX-Designer で製作した監視制御画面は、NS-Runtime ソフトと組み合わせて使用することで、マウス操作により監視制御 PC 画面でおこなうことが可能となっている。

5. 試験運転

PLC システム更新後のシーケンス試験、保護インターロック試験及び実負荷での総合試験運転で、以下の特徴的な制御機能の動作確認を行った。

5. 1 補助真空排気系設備

- 1) ビームライン圧力及び TMP 背圧状態に応じて、TMP が正常に動作することを確認した。また、異常圧力時に TMP ポンプ機器保護のインターロックが正常に動作することを確認した。

- 2) 自動モードシーケンス試験において、共通排気部 **TMP** 背圧系及び粗引き系の **DRP**、**MBP**、真空排気弁等が自動起動することを確認した。
- 3) 計装用圧空供給設備においては、空気圧縮機の異常を模擬する動作試験で、異常検出した圧縮機を停止させることにより、バックアップ機が代わって起動することを確認した。
- 4) クライオポンプ再生時の重水素排気モードにおいて、グループ自動運転（排気するユニットを選択して、重水素を排気すること。）を実施した結果、粗引き運転から **TMP** 排気運転まで一連の自動運転が確認できた。

5. 2 1次冷却系設備

- 1) 定常運転モード（ビームライン循環系及び **RV** 循環系 2 系統の同時運転を行うモード）、クライオ凍結防止運転モード、**RV** 運転モードでの運転・停止及びモード移行運転を実施した結果、正常な水ポンプの起動・停止やバルブ開閉動作を確認した。
- 2) ポンプリカバリー機能の確認試験（ポンプ無負荷、模擬信号入力）
ビームライン循環系ポンプ 2 台運転（ポンプ **A**、**C** を運転）において、1 台を異常停止させた結果、稼働していないポンプ **B** の起動を確認した。同様に、**RV** 循環系運転で稼働機に異常信号を模擬入力した結果、正常に待機ポンプが起動することを確認した。
- 3) 熱交換器入口冷却水温度による熱交換流量制御の確認
入口冷却水温度 25°C 以下で入口バルブ開度の絞り込みと 35°C 以上でのバルブ開度増加制御が正常に動作した。

総合試験により機能の正常動作を確認後、実際の **JT-60** の運転で稼働した。今回新たに導入した遠隔制御により、運転員の運転監視の負担が軽減されるとともに、各機器の詳細な稼働状態を容易に判別することが可能となった。現在まで、補助真空補助排気系及び 1 次冷却系設備は問題も無く安定に運転されており、今回の制御システムの更新作業が高い完成度で実施できた。

6. まとめ

20 年以上経過した制御システムの多くは、経年化の問題を抱えるが、本更新により、両設備で入出力数約 2,000 点、ラダーソフト 3,600 ラインの制御システムにおいても、低価格な汎用 **PLC** を導入することで、ユーザー独自にシステム更新が可能であることを示した。これは、今後の高経年化対策の指針を示すものである。加えて、最新の **PLC** を用いることで、既存システムでは不可能であった遠隔制御が簡便になった。これにより、運転監視における運転員の負担軽減及び各機器の詳細な状態判別が可能となり、機器トラブル箇所の調査と修復が迅速となった。

謝 辞

本報告書をまとめるにあたり、粒子ビーム加熱システム開発グループの皆様には、試験でのご協力と貴重なご意見を頂き感謝を申し上げます。なお、本研究遂行にあたり、貴重なご意見・ご指導を頂きました細金延幸トカマク技術開発ユニット長、山本巧研究主席に感謝を申し上げます。

参考文献

- 1) 栗山正明他;JT-60粒子入射加熱装置の設計及び技術開発,JAERI-M 87-169,1987.
- 2) 本田 敦 他, JT-60UにおけるNBI加熱装置用ヘリウム冷凍設備のPLC制御,JAEA-Technology 2006-020, 2006.
- 3) 大賀 徳道他: 私信

付録 1 補助真空排気系設備の性能と構成

NBIの運転では、ビーム入射タイミングに合わせて、多量の重水素ガスをイオン源及び中性化セルに導入する。導入されたガスの多くは、大排気容量のクライオポンプで排気される。これにより、中性化セルより下流の真空度を 10^{-3}Pa 台に維持している。補助真空排気系設備の主目的は、クライオポンプの再生時に、クライオポンプから放出される重水素ガス（または水素ガス）を排気すること、及び大気解放後のビームラインの真空度をクライオポンプが動作可能な高真空動作領域まで、排気することである。

補助真空排気系全体系統図を付録図-1 に示す。補助真空排気系は、大別すると主排気タンク部と共通真空排気部から成る。主排気タンク部は、15 あるビームライン毎に設置された 5000L/sec のターボ分子ポンプ（TMP[Turbo Molecular Pump]と略称する）と、大気圧から TMP 動作領域まで真空排気を行う粗引きポンプ系の2系統から成る。TMP 背圧ポンプ系と粗引きポンプ系は、それぞれにビームライン共通排気マニホールドで接続されている。

TMP 背圧ポンプ系は、4 台のメカニカルブースターポンプ（MBP と略称する）と 4 台のドライポンプ（DRP と略称する）で構成されている。また、粗引きポンプ系は、3 台の MBP と 4 台の DRP で構成され、真空排気を効率よく行う構造である。また、TMP 背圧ポンプ系や粗引きポンプ系の機器故障に備え、どちらかの系統が稼働出来ない場合においても、バイパスラインを用いることにより、真空排気が行える。また、NBI 全体の計装用機器に供給する空気圧縮機設備も、補助真空排気系設備に含まれており、常時 NBI 設備全体の圧空動作機器に供給されている。以下の表-1 に補助真空排気系設備の構成機器一覧を示す。

表-1 補助真空排気系機器一覧

機 器	数 量	仕 様
ターボ分子ポンプ	P-NBI 14 台 N-NBI 2 台 テスト排気系 1 台	大阪真空 HR-5000 排気速度 5000 L/sec (D2 ガス) 定常回転 14400rpm
メカニカルブースターポンプ	7 台	大阪真空 RD2500 排気速度 $2070\text{m}^3/\text{h}$ モータ 7.5kW
ドライポンプ	8 台	日本エドワーズ DP180 排気速度 $180\text{m}^3/\text{h}$ 、モータ 7.5kW
小型クライオポンプ	4 台	鈴木商館 A570-AS3N 排気速度 18000L/sec 排気容量 $4800\text{Pa}\cdot\text{m}^3$
L 型真空バルブ	400A 14 台 300A 5 台 200A 20 台 100A 26 台等	圧空作動型ベローズ高真空タイプ

ゲートバルブ	IGV 28 台 GV1 15 台	レーストラック O リングシール 600A、アンシール機構(#7,8,9,10,N-NBI)
真空計スイッチ 圧力スイッチ	78 個 51 個	ピラニ真空計接点方式 ダイヤフラム式
空気圧縮機	2 台	Y 型 2 気筒復動 2 段圧縮水冷無給油式 吐出流 7.5m ³ /min、吐出圧力 9.5kg/cm ² 電動機 AC400V、75kW
脱湿器	1 式	ヒータ 6kW/1 筒 2 筒切換式 シリカゲル 200kg

付録 2 1 次冷却系設備の性能と構成

粒子や放射熱を除去するために、イオン源は水で冷却されている。ビームライン機器も同様に、中性化されない高速イオンビームや再電離により発生するイオンを熱化処理するために、冷却されている。1 次冷却系設備は、これらの受熱機器に冷却水を安定に供給する設備である。

1 次冷却系設備系統図を付録図-2 に示す。1 次冷却系設備は、イオン源及びビームラインの受熱機器を冷却するためのビームライン循環系と電源系設備（主にレギュレータバルブ及び NNBI インバータ電源）を冷却するための RV 循環系から構成される。ビームライン循環系及び RV 循環系の循環ルートにおいては、冷却水はポンプで昇圧され、吐出電動弁、マニホールド配管を通過して、各機器に供給される。各機器からの冷却水は、熱交換器を通りバッファータンクへ戻る。イオン源及び電源設備には、高電圧が印加されるため接地間絶縁を保つ必要があり、イオン交換塔でろ過された純水（電気抵抗率 2M Ω ・cm 以上）が供給される。このため、ポンプ吐出配管の一部は常時イオン交換塔に流れる。1 次冷却系設備の主要機器を表-2 に示す。

ビームライン循環系は、P-NBI 14 ユニットと N-NBI のイオン源、中性化セル、ビームダンプ、カロリメータ、偏向磁石、ウォータジャケット及びビームリミタ等に通水するための系統である。冷却を必要とするユニット数に応じて、ビームライン循環系ポンプの運転台数を 2~3 台に決定している。これらの循環ポンプに加えて、クライオポンプ運転時に、放射冷却によりビームライン冷却水配管が凍結することを防止するために、凍結防止ポンプが配置されている。RV 循環系は、レギュレータチューブ、水冷抵抗器及び N-NBI 用 GTO 素子の冷却のための系統であり、2 台のポンプのうち 1 台を選択して運転する。もう一台のポンプは、故障等が発生した場合のバックアップである。

表-2 1次冷却系設備 機器一覧

機 器	数 量	仕 様
ビームライン循環系ポンプ	3 台	エハラ 両吸入渦巻ポンプ 350X200CKNM、吐出力 3675m ³ /h 揚程 135m AC6.6kV,620kW 三相誘導電動機
RV 循環系ポンプ	2 台	エハラ 片吸入渦巻ポンプ 200X150IFWM、吐出力 635m ³ /h 揚程 60m AC6.6kV,160kW 三相誘導電動機
クライオ凍結防止ポンプ	1 台	エハラ 片吸入渦巻ポンプ 250X200IFWM、吐出力 700m ³ /h 揚程 50m AC400V,150kW 三相誘導電動機
ビームライン用熱交換器	1 台	プレート式 伝熱面積 305m ²
RV 用熱交換器	1 台	プレート式 伝熱面積 300m ²
イオン交換塔	2 台	縦置円筒型混床式 ビームライン用 通水量 140m ³ /h 陽イオン交換樹脂量 3000 ㍻ 陰イオン交換樹脂量 3000 ㍻ RV用 通水量 35m ³ /h 陽イオン交換樹脂量 500 ㍻ 陰イオン交換樹脂量 500 ㍻
ビームライン用 バッファータンク	1 台	円筒型支柱支持型円錐屋根貯槽 寸法 φ6500 X H6200 容量 216m ³
RV 用バッファータンク	1 台	自己支持型コーンルーフ 寸法 φ3500 X H3800 容量 35m ³
油圧電動弁 電動弁	3 台 31 台	油圧ポンプ式バランス型ダブルポートゲージ
圧力計 流量計 温度計	1 式	圧力伝送器、ブルドン管式 オリフィス及び差圧伝送器 白金測温抵抗体 Pt100

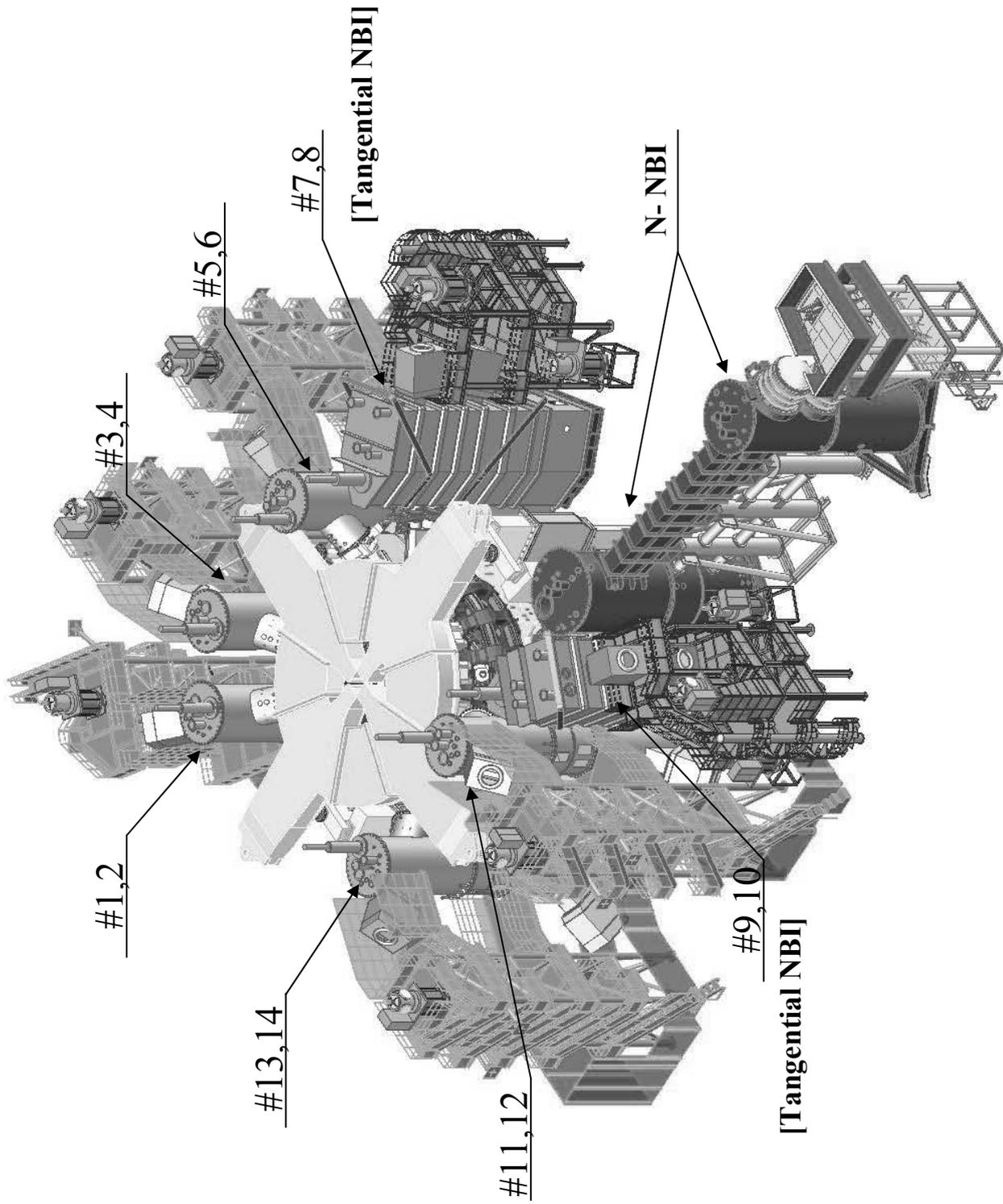


図-1 JT-60U NBIビームライン配置図

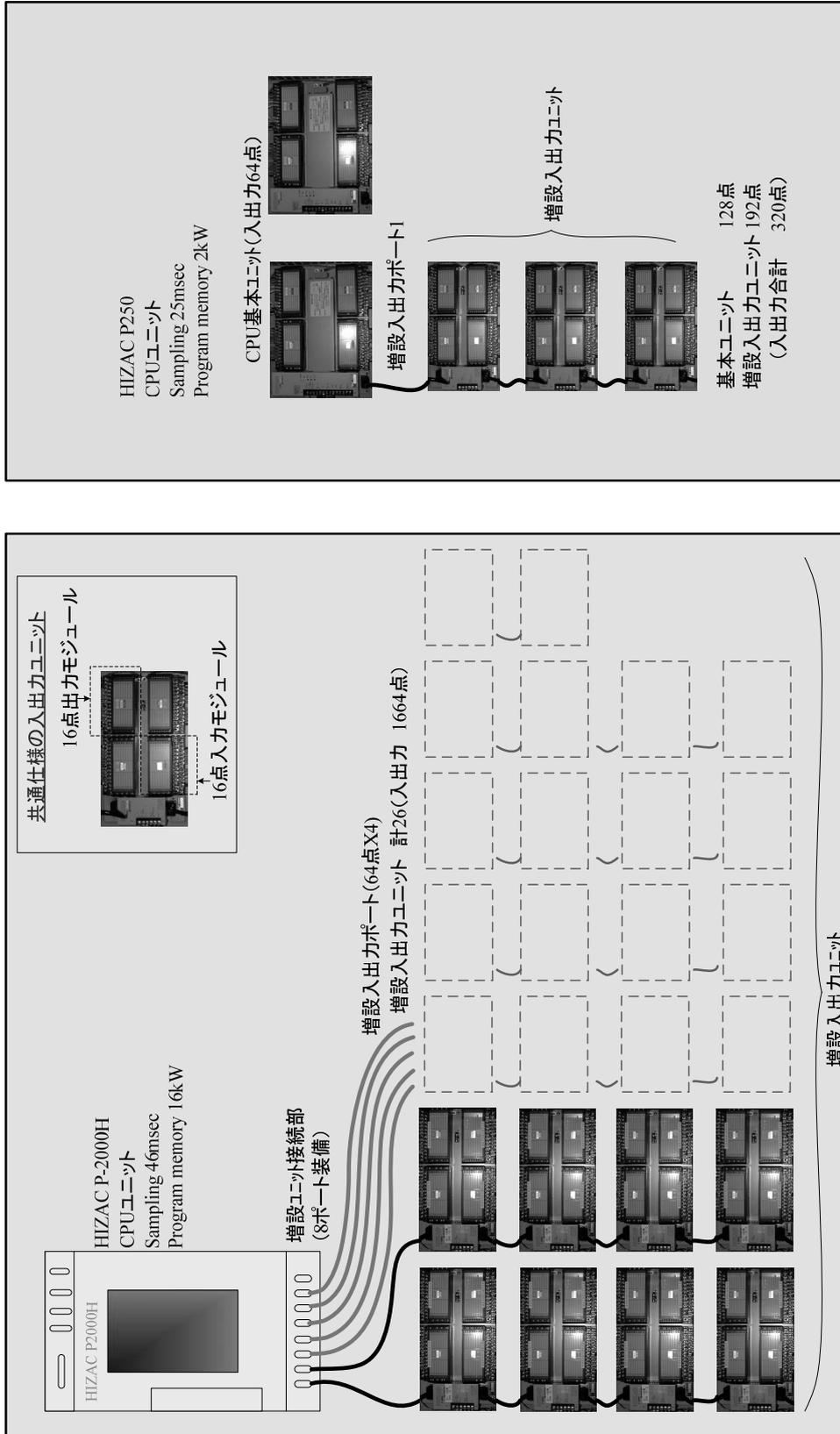


図-2 補助排気系制御システム

図-3 1次冷却系制御システム

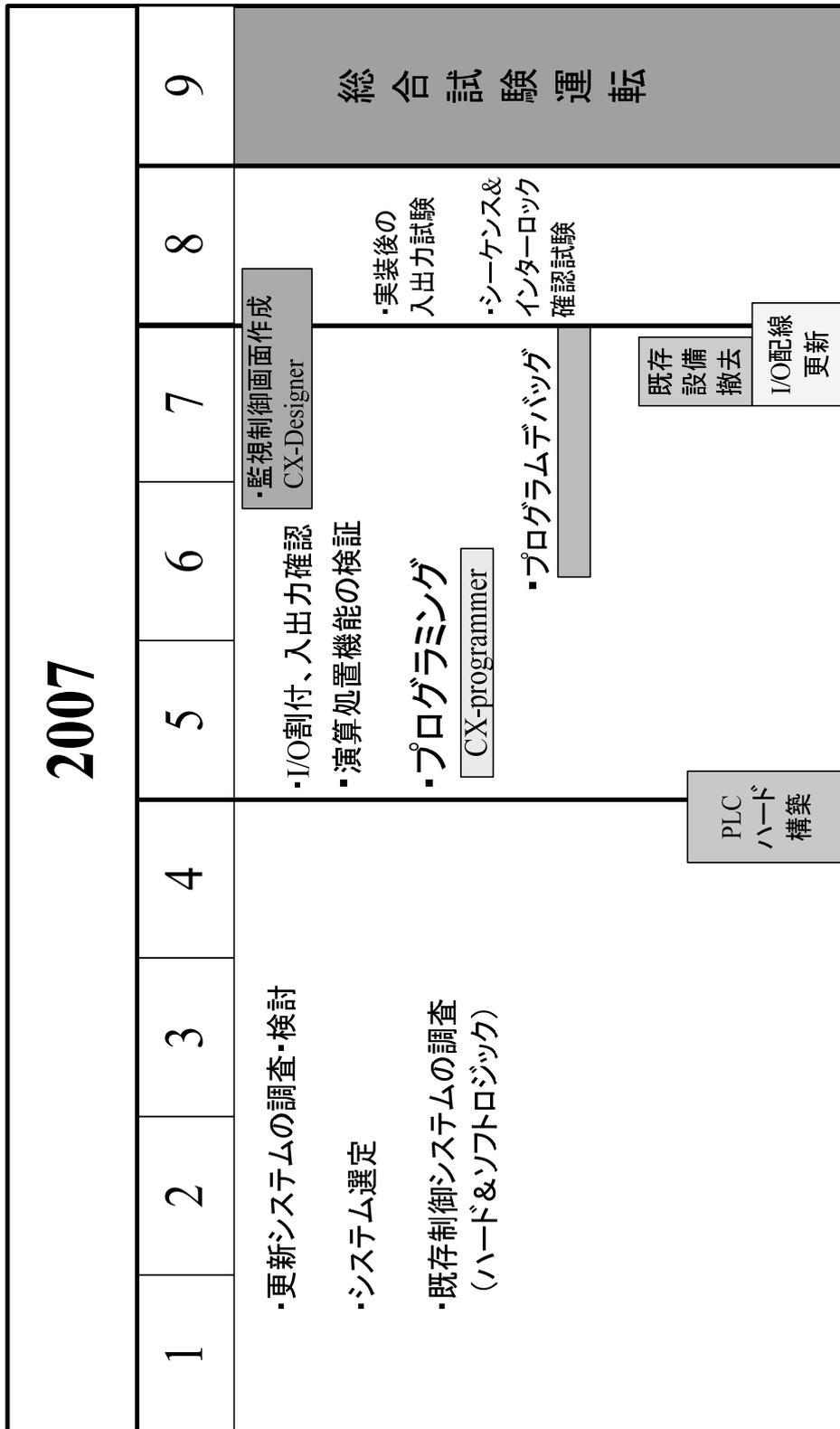


図-4 PLC制御システムの更新スケジュール

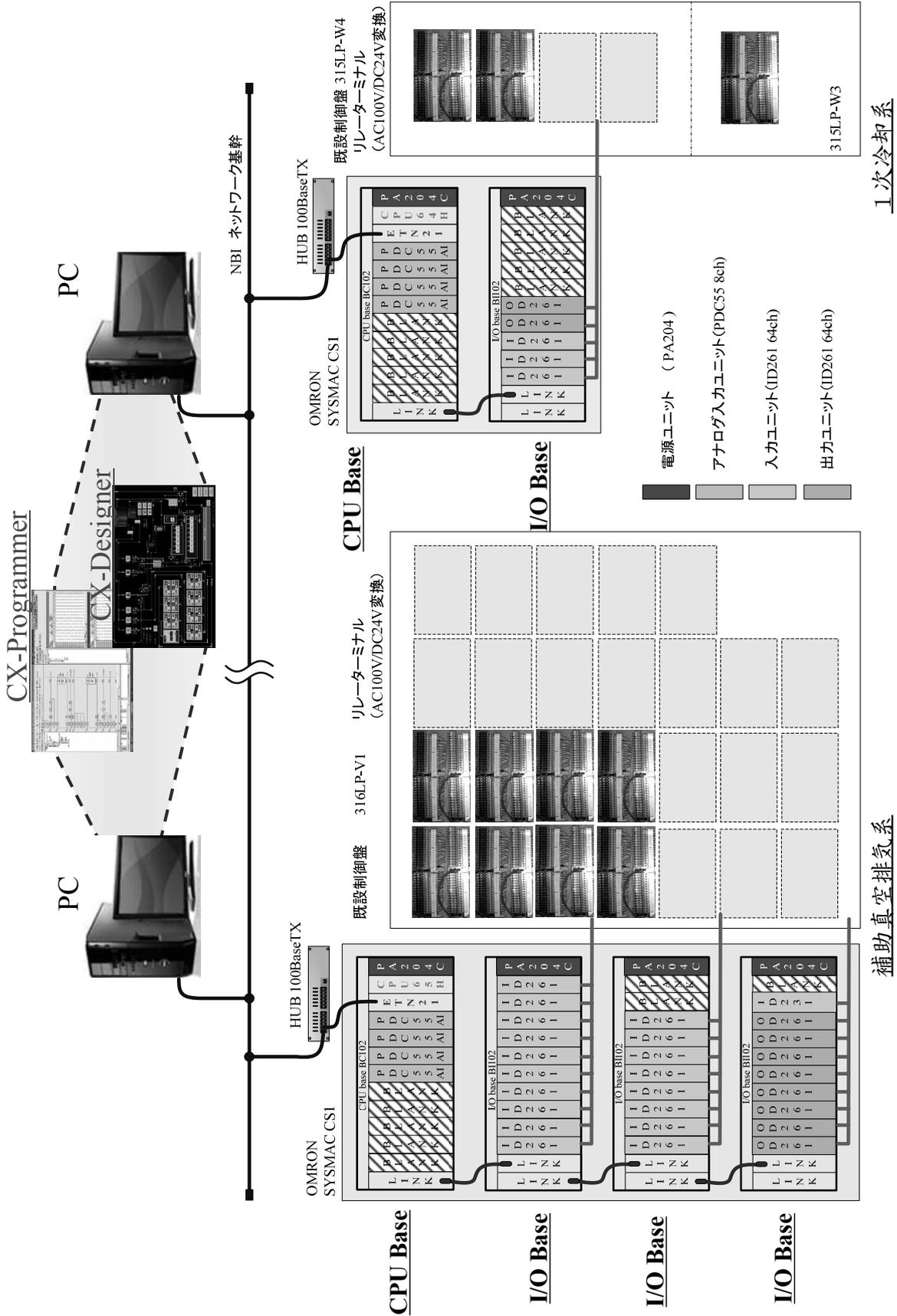


図-5 PLC更新システム構成図

(2)メモリー一覧

先頭アドレス	ビット数	コメント	強制セット	強制リセット	強制解除
W000	0		0	1	0
W001	0		0	1	0
W002	0		0	1	0
W003	0		0	1	0
W004	0		0	1	0
W005	0		0	1	0
W006	0		0	1	0
W007	0		0	1	0
W008	0		0	1	0
W009	0		0	1	0
W010	0		0	1	0
W011	0		0	1	0
W012	0		0	1	0
W013	0		0	1	0
W014	0		0	1	0
CIO0000	0		0	0	0
CIO0001	0		0	0	0
CIO0002	1		0	0	0
CIO0003	1		0	0	0
CIO0004	0		0	0	0
CIO0005	0		0	0	0
CIO0006	0		0	0	0
CIO0007	0		0	0	0
CIO0008	1		0	0	0
CIO0009	1		0	0	0
CIO0010	1		0	0	0
CIO0011	0		0	0	0
CIO0012	1		0	0	0
CIO0013	0		0	0	0

図-6 CX-Programmer画面(プログラミングとデバッグ)

This is a blank page

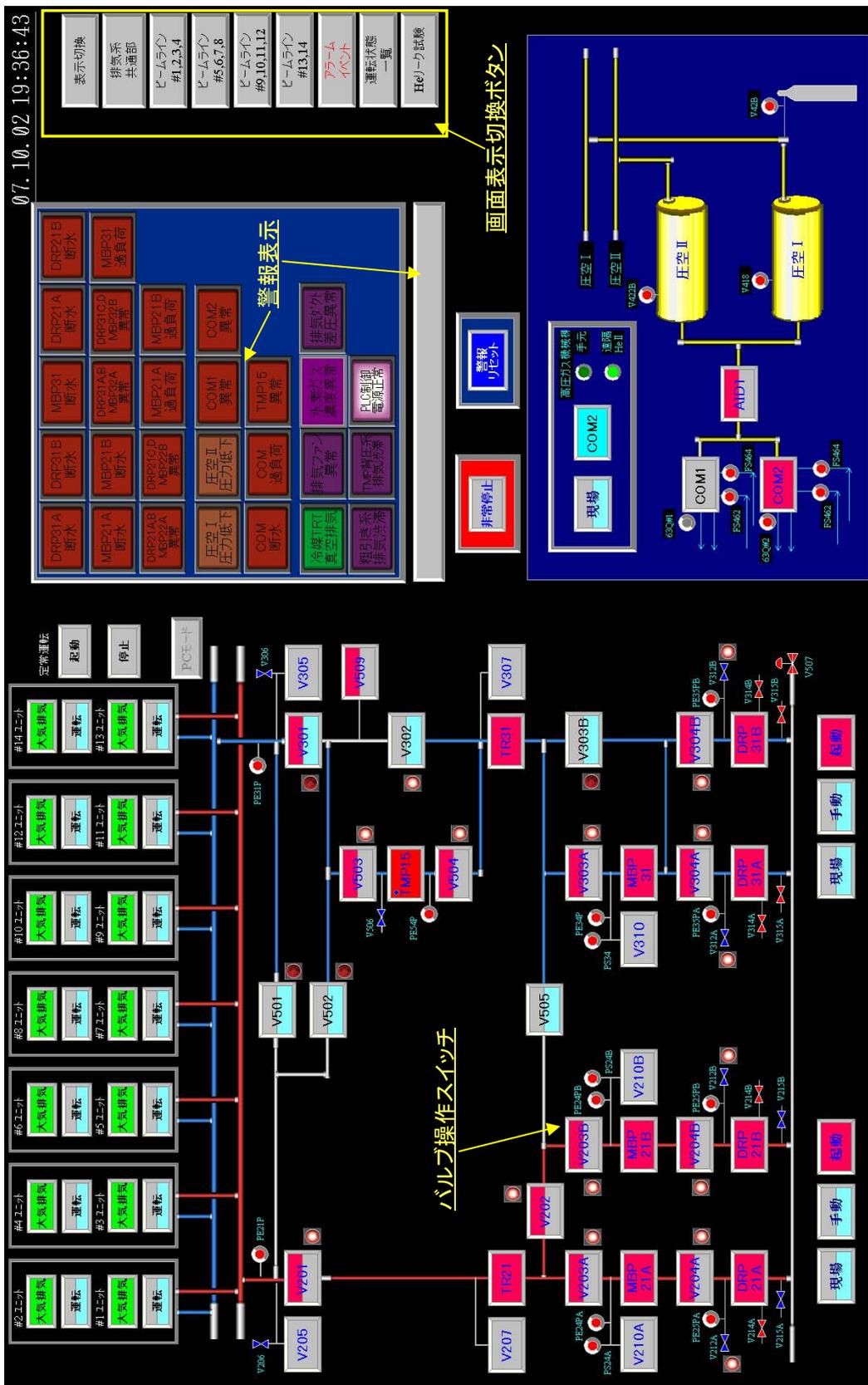


図-7 補助真空排気系共通排気部の監視制御画面

This is a blank page

07.10.02 19:37:44

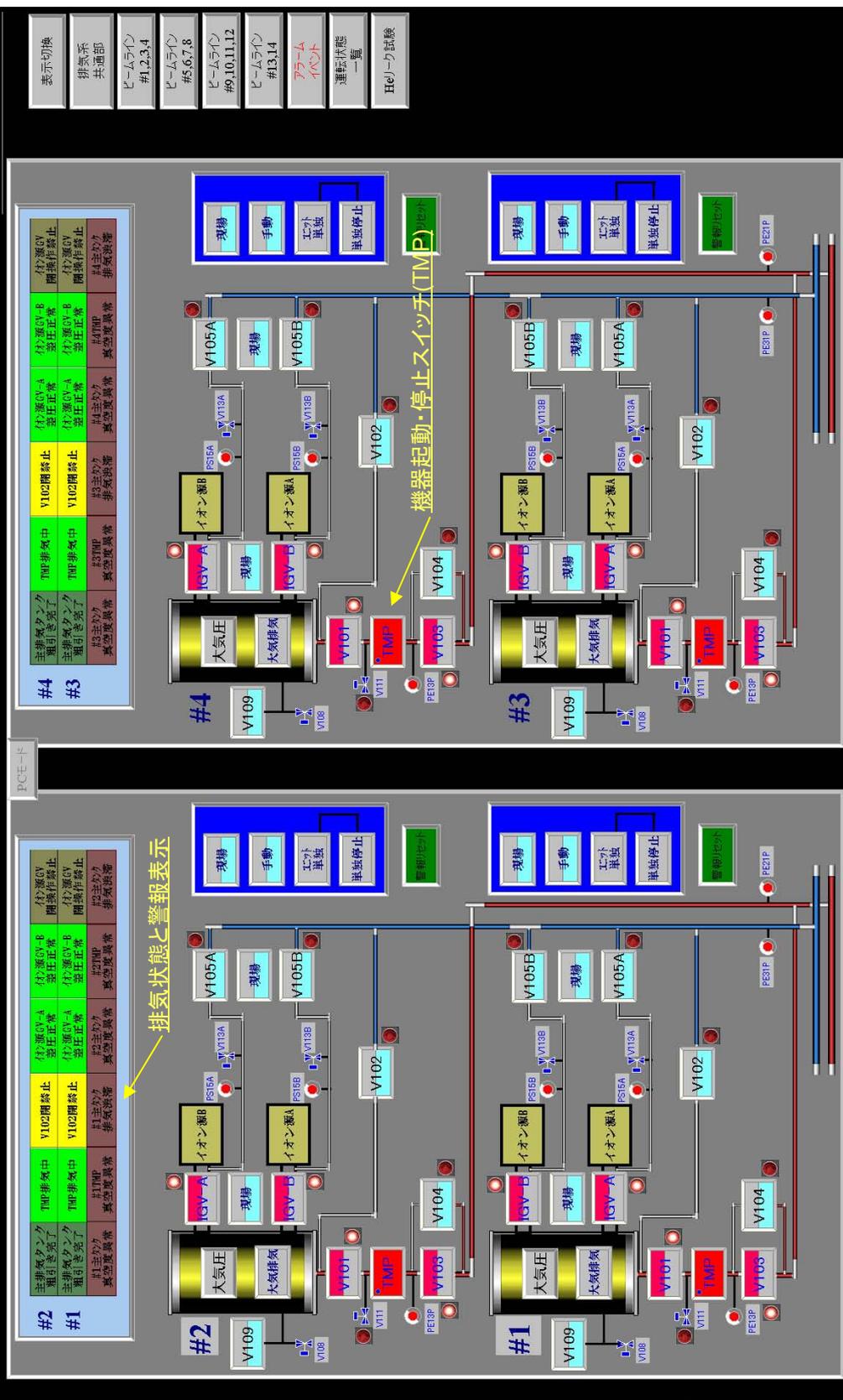
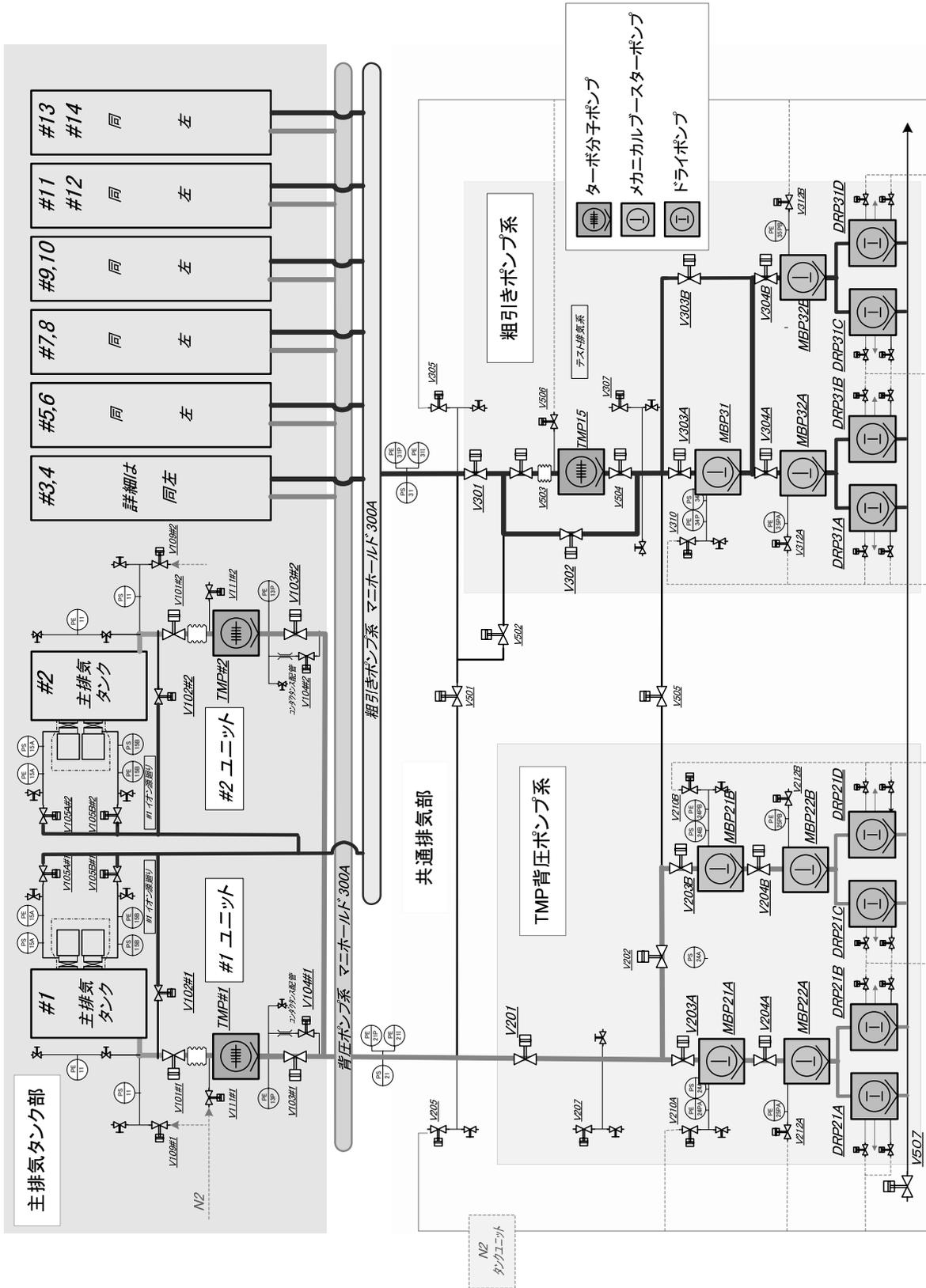


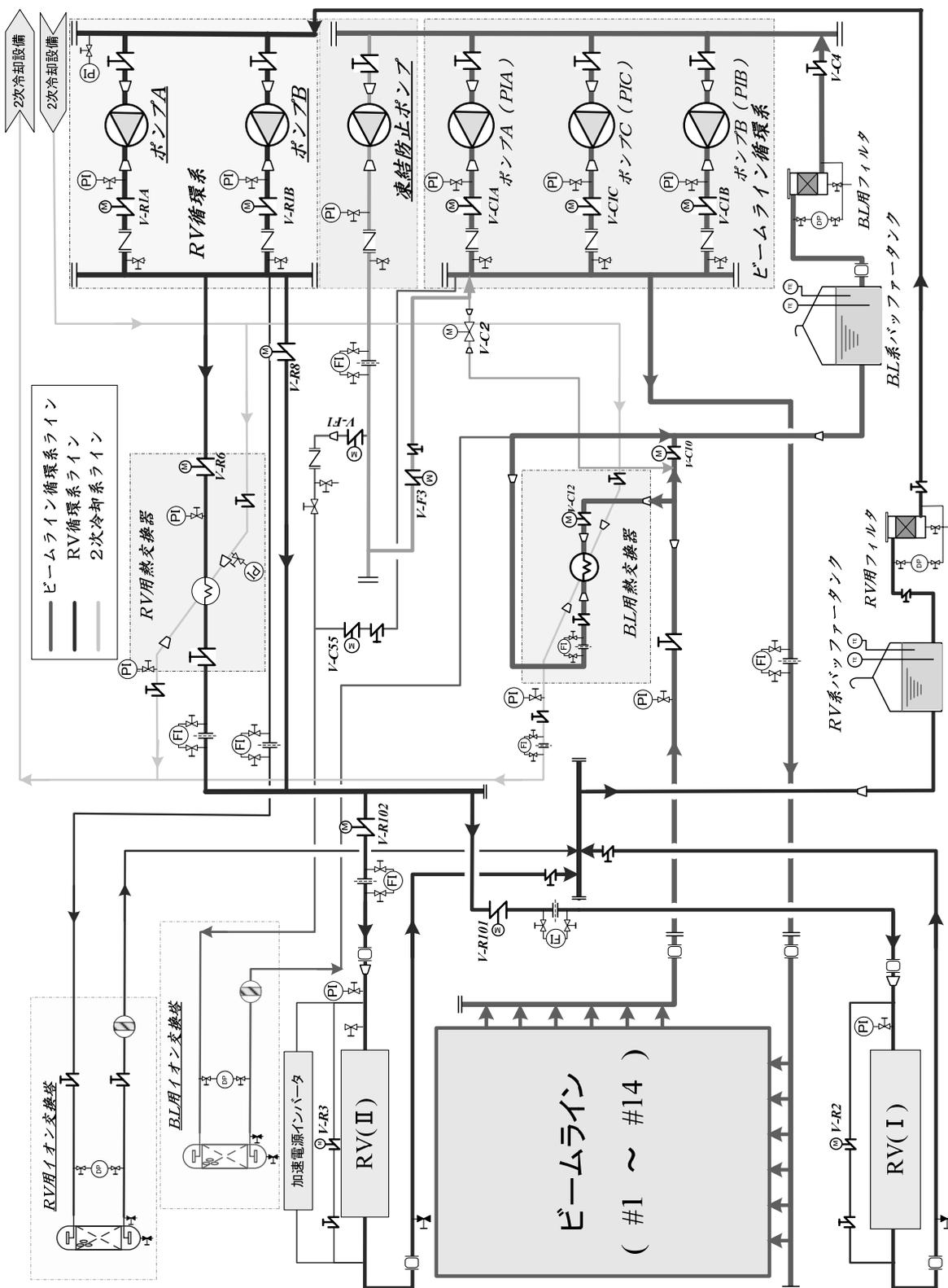
図-8 補助真空排気系主排気部の監視制御画面 (ビームライン#1~#4)

This is a blank page

This is a blank page



付録図-1 補助真空排気系設備系統図



付録図-2 1次冷却系設備系統図

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度 (質量密度)	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
質量体積 (比体積)	立法メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
(物質質量の)濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率	(数の) 1	1

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(a)	rad		m ² ・m ⁻¹ =1 ^(b)
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)		m ² ・m ⁻² =1 ^(b)
周波数	ヘルツ	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m ² ・kg ² ・s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ ・kg ² ・s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N・m	m ² ・kg ² ・s ⁻²
工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² ・kg ² ・s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s ² ・A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² ・kg ² ・s ⁻³ ・A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² ・kg ² ・s ⁻³ ・A ⁻²
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ³ ・A ²
磁束	ウェーバ	Wb	V・s	m ² ・kg ² ・s ⁻² ・A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg ² ・s ⁻² ・A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² ・kg ² ・s ⁻² ・A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	°C		K
光照射 (放射線核種の)放射能	ルーメン	lm	cd・sr ^(c)	m ² ・m ⁻² ・cd=cd
吸収線量, 質量エネルギー分与, カーマ線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量, 組織線量当量	グレイ	Gy	J/kg	m ² ・m ⁻² ・cd=m ² ・cd
	シーベルト	Sv	J/kg	s ⁻¹

- (a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なった性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作る際のいくつかの用例は表4に示されている。
 (b) 実際には、使用する際には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号“1”は明示されない。
 (c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。
 (d) この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を併せて用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘力のモーメント	ニュートンメートル	Pa・s	m ⁻¹ ・kg ² ・s ⁻¹
表面張力	ニュートン毎メートル	N・m	m ² ・kg ² ・s ⁻²
角速度	ラジアン毎秒	N/m	kg ² ・s ⁻²
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s	m ² ・m ⁻¹ ・s ⁻¹ =s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	rad/s ²	m ² ・m ⁻¹ ・s ⁻² =s ⁻²
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	W/m ²	kg ² ・s ⁻³
質量熱容量 (比熱容量), 質量エントロピー (比エネルギー)	ジュール毎キログラム	J/K	m ² ・kg ² ・s ⁻² ・K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg・K)	m ² ・s ⁻² ・K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	W/(m・K)	m ² ・kg ² ・s ⁻³ ・K ⁻¹
電界の強さ	ボルト毎メートル	J/m ³	m ⁻¹ ・kg ² ・s ⁻²
体積電荷	クーロン毎立方メートル	V/m	m ² ・kg ² ・s ⁻³ ・A ⁻¹
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ³	m ⁻³ ・s ² ・A
誘電率	ファラド毎メートル	C/m ²	m ⁻² ・s ² ・A
透磁率	ヘンリー毎メートル	F/m	m ⁻³ ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²
モルエネルギー	ジュール毎モル	H/m	m ² ・kg ² ・s ⁻² ・A ⁻²
モルエントロピー	ジュール毎モル毎ケルビン	J/mol	m ² ・kg ² ・s ⁻² ・mol ⁻¹
モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol・K)	m ² ・kg ² ・s ⁻² ・K ⁻¹ ・mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	グレイ	C/kg	kg ⁻¹ ・s ² ・A
吸収線量	グレイ	Gy/s	m ² ・s ⁻³
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ ・m ⁻² ・kg ² ・s ⁻³ =m ² ・kg ² ・s ⁻³
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² ・sr)	m ² ・m ⁻² ・kg ² ・s ⁻³ =kg ² ・s ⁻³

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
リットル	l, L	1l=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1t=10 ³ kg
ネーパ	Np	1Np=1
ベル	B	1B=(1/2) ln10(Np)

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位でSI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	1eV=1.60217733(49)×10 ⁻¹⁹ J
統一原子質量単位	u	1u=1.6605402(10)×10 ⁻²⁷ kg
天文単位	ua	1ua=1.49597870691(30)×10 ¹¹ m

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里		1海里=1852m
ノット		1ノット=1海里毎時=(1852/3600)m/s
アール	a	1a=1 dam ² =10 ² m ²
ヘクタール	ha	1ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
バール	bar	1bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 ⁵ Pa
オングストローム	Å	1Å=0.1nm=10 ⁻¹⁰ m
バーン	b	1b=100fm ² =10 ⁻²⁸ m ²

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイナ	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポインズ	P	1 P=1 dyn・s/cm ² =0.1Pa・s
ストークス	St	1 St=1cm ² /s=10 ⁻⁴ m ² /s
ガウス	G	1 G ≡ 10 ⁻⁴ T
エルステッド	Oe	1 Oe ≡ (1000/4π) A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx ≡ 10 ⁻⁸ Wb
スチルブ	sb	1 sb =1cd/cm ² =10 ⁴ cd/m ²
ホト	ph	1 ph=10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm/s ² =10 ⁻² m/s ²

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R = 2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
X線単位	1X unit	1X unit=1.002×10 ⁻⁴ nm
ガンマ	γ	1γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
ジャンスキー	Jy	1 Jy=10 ⁻²⁶ W・m ⁻² ・Hz ⁻¹
フェルミ	1 fermi	1 fermi=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット	metric carat	1 metric carat = 200 mg = 2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリ	cal	
マイクロン	μ	1 μ = 1μm=10 ⁻⁶ m

