JAEA-Technology
2007-044

JT-60U NBI加熱装置における長パルス運転時の電源保護検出システムの開発

Development of Protection System for Power Supply Facilities in JT-60U P-NBI for Long Pulse Operation

大島 克己　岡野 文範　本田 敦　篠崎 信一
薄井 勝富　能登 勝也　河合 視己人　池田 佳隆

Katsumi OHSHIMA, Fuminori OKANO, Atsushi HONDA, Shinichi SHINOZAKI
Katsutomi USUI, Katsuya NOTO, Mikito KAWAI and Yoshitaka IKEDA

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

June 2007

Japan Atomic Energy Agency　日本原子力研究開発機構

JAEA-Technology

本レポートは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/index.shtml）より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター*では実費による複写頒布を行っております。

〒319-1195　茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
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
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

*〒319-1195　茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4　日本原子力研究開発機構内

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

© Japan Atomic Energy Agency, 2007

JT-60U NBI 加熱装置における長パルス運転時の電源保護検出システムの開発

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
大島　克己[※1]・岡野　文範・本田　敦・篠崎　信一
薄井　勝富・能登　勝也[※1]・河合　視己人・池田　佳隆

（2007 年 4 月 18 日受理）

JT-60U 用正イオン中性粒子入射加熱装置(P-NBI)の長パルス運転時に電源設備が許容通電電力値を超えないようにする電源保護検出システムを開発した。このシステムでは対象とする電源機器においてリアルタイムで実通電電力量(I^2t 及び V^2t)を監視し、許容値を超過した時に通電を遮断し、電源機器を保護する。第 1 期としては、5 ユニットに対して 1 台の PLC で計測・演算するシステムを構築し、2003 年以来、有効に機能している。一方、2006 年、第 2 期として、8 ユニットに対してユニット毎にパッケージ型 PLC を用いることで、監視サイクルタイムの大幅な短縮とともに、ユニット増加に対して容易に拡張が可能なシステムを構築した。さらに SCADA(Supervisory Control and Data Acquisition；監視制御ソフトの総称)を用いてシステムの状態監視ができる監視画面を採用し、性能と使いやすさを向上させた。

本報告書は、JT-60U P-NBI における長パルス化運転に向けた電源保護検出システムの設計及び主な機能についてまとめたものである。

那珂核融合研究所（駐在）：〒311-0193　茨城県那珂市向山 801-1
[※1] 日本アドバンストテクノロジー株式会社より出向中

Development of Protection System for Power Supply Facilities in JT-60U P-NBI for Long Pulse Operation

Katsumi OHSHIMA※1, Fuminori OKANO,Atsushi HONDA,Shin-ichi SHINOZAKI,
Katsutomi USUI,Katsuya NOTO※1,Mikito KAWAI and Yoshitaka IKEDA

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

(Received April 18,2007)

In the positive ion based NBI (P-NBI) system, we have developed a protection system to protect the power supply facilities from over load during long pulse operation. The protection system monitors the voltage (V) and current (I) in the power supply facilities, and calculates the parameters of V2t and I2t in real-time, where T is the pulse duration. It turns off the power supply facilities when V2t and I2t are beyond the critical values. After two development stages, we have completed the protection system using a package typed PLC (Programmable Logic Controller) which has a high expandability of multi-unit operation. Moreover, we have constructed a user-friendly system by using a SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) system.

Keywords : JT-60U , NBI , PLC, Protection System, $V^2\Delta t$, $I^2\Delta t$ i

---

※1 On loan from Nippon Advanced Technology Co.,LTD

目　　次

1. はじめに …… 1
2. 電源構成機器定格に対する裕度の検討 …… 1
3. 電源保護検出システム …… 2
　3.1 電源保護検出システムの概要 …… 3
　3.2 プログラムのフローチャート …… 3
　3.3 試験結果 …… 4
4. 電源保護検出システムの更新 …… 5
　4.1 新電源保護検出器の概要 …… 5
　4.2 新電源保護検出システムの構成 …… 6
　4.3 プログラム及び画面製作 …… 6
　4.4 システムの制御ロジック …… 7
　4.5 動作試験 …… 7
5. まとめ …… 7
謝辞 …… 8
参考文献 …… 8

Contents

1. Introduction …… 1
2. Examination of capacity margin in power supply facilities …… 1
3. Protection system for power supply families …… 2
　3.1 Outline of protection system …… 3
　3.2 Process flowchart …… 3
　3.3 Test result …… 4
4. Upgrade of protection system …… 5
　4.1 Outline of upgraded protection system …… 5
　4.2 Structure of upgraded protection system …… 6
　4.3 Program and display production …… 6
　4.4 Control logic of system …… 7
　4.5 Operation test …… 7
5. Summary …… 7
Acknowledgments …… 8
References …… 8

１．はじめに

JT-60Uでは、高性能プラズマの長時間維持を目指して、加熱時間の長パルス化を進めている。JT-60U用正イオン中性粒子入射装置(P-NBI)においても、この長パルス化に対応するため、ビームパルス幅を定格の10秒から30秒に伸長する改造を進めている。30秒化の基本的な指針は、既存電源設備の定格容量内で最大ビームパワーを発生することである。すなわち電源設備においては10秒定格電力の約1/3の電力でイオン源を運転するとともに、制御回路制限を30秒まで拡張する。一方、P-NBIの運転においては、実験条件の要請に応じて、ビームパワーや入射パルス幅を変えて行う必要がある。従来、最大パルス幅は制御回路上、10秒が上限であったため電源構成機器に最大定格を越える通電は発生しなかったが、この30秒化改造では誤った設定条件を行うと、電源構成機器が熱的な限界を超える危険性が発生する。このため電源設備の安全な運転のために、熱的余裕の少ない電源機器について実通電電力量を監視し、限界値を超えると通電を停止する電源保護検出システムを開発した。開発は平成14年度から着手し、電源構成機器の熱的裕度の評価、保護機能の基本設計を行った。第1期としては、5ユニットの電源保護検出システムをPLC(Programmable Logic Controller)で構築し、平成15年からの電源設備に実装した。同システムは、JT-60Uプラズマへの30秒ビーム入射実験にて保護動作が正常に動作することが確認され、JT-60Uの長時間放電をともなう実験運転の円滑な進展に大きく寄与している。一方、平成19年度からは、伸長ユニットを5台から8台に増加することが決定し、電源保護検出システムの追加改造を実施することになった。このため平成18年度には第2期として、最新のPLCを導入することで、ユニット数の増加に容易に対応できる新電源保護検出システムを開発した。本報告では、電源保護検出システムの概要、基本設計及び機能詳細について報告する。

２．電源構成機器定格に対する裕度の検討

長パルス化の基本的な方針は、電源設備の設計容量（10 秒運転）を基に、最低限の改造で 30 秒運転を目指すものである。特に加速電源に関しては電源容量が大きいため、加速電力を 10 秒定格の約 1/3 にした場合でイオン源の動作条件を選定する必要がある。一方、加速電源では、加速電圧と加速電流にイオン源のパービアンス条件（$I \propto V^{3/2}$）を満足する必要がある。またプラズマ実験の要請としては、入射パワー約 2MW/ユニット、30 秒の入射が求められている。これらの条件を考慮し、加速電源としては 10 秒設計電力よりも若干大きい、加速電圧 85kV、加速電流 55A、その際のビームパワー2MW を 30 秒運転の目標値とした。加速電源の動作条件が決定すると、そのビーム生成に必要なアーク電源、フィラメント電源等の他の電源構成機器の運転条件が決定できる。表-1 に P-NBI の現定格と 30 秒入射時（加速電圧 85kV）の各電源機器の運転条件の比較を示す。なおアーク電源、フィラメント電源、偏向磁石電源及び打消コイル電源は、加速電源投入時間よりも、1 秒、6 秒、3 秒、3 秒余分に通電する必要がある。10 秒設計電力量(V×I×10S)と長パル

ス電力量(V×I×30S)の比較(J-Ratio)から、30 秒運転において加速電源、フィラメント電源及び偏向磁石電源がこれまでの 10 秒運転に比べて厳しい条件となることが分かる。このため実際に模擬負荷抵抗器を用いて 30 秒通電試験を実施し、加速電源等の熱的裕度の少ない GTO(ゲートターンオフサイルスタ)素子、抵抗器、出力ケーブル等の温度上昇をサーモラベル及び放射温度計により測定し、温度上昇がこれらの電源機器の許容値以内であることを確認した。この結果、電源機器としては表-1 の値を 30 秒通電の上限値とすることとした。

表-1　P-NBI の現定格と 30 秒入射時の運転条件の比較

	10秒ビームの最大値					30秒ビームの最大値					
電源名	V V^2t_{10}	I I^2t_{10}	P	t_{10}	$P*t_{10}$	V V^2t_{30}	I I^2t_{30}	P	t_{30}	$P*t_{30}$	J-Ratio
加速	120kV 144K	94A 88K	11.3 MW	10S	113MJ	85kV 217K	55A 91K	4.7 MW	30S	141 MJ	1.2
減速	2kV	20A 4K	40kW	10S	400kJ	2kV	3A 0.3K	6kW	30S	180 kJ	0.5
アーク×2	120V	1200A 15.8M	144 kW	11S	1.6MJ	70V	700A 15K	49 kW	31S	1.5 MJ	0.9
フィラメント ×2	15V	2400A 1.4M	4.5 kW	16S	72kJ	13V	1680A 1.6M	3kW	36S	108 kJ	1.5
偏向磁石	90V	2300A 69M	207 kW	13S	2.7MJ	70V	1900A 119M	133 kW	33S	4MJ	1.5
打消コイル	160V	1200A 19K	192 kW	13S	2.5MJ	50V	500A 8.3M	25 kW	33S	0.8 MJ	0.3

3．電源保護検出システム

各電源の運転時間伸長に関連する保護機能は、従来、各電源盤内で持つ運転時間超過検出と中央制御室の電源系制御盤内の超過時間検出の 2 つの保護機能があった。しかしながら、いずれも運転時間のみを監視する検出器であったため、10 秒運転と 30 秒運転が頻繁に変わるプラズマ実験での P-NBI 運転においては、従来方式では有効な保護を掛けるには困難である。このため長パルスで熱的余裕のなくなる電源機器の通電電流又は印加電圧を実測し、それらの 2 乗値との時間積分(I^2t 又は V^2t)を監視し、その値が設定値を超過した場合に運転を停止させるため保護が必要であった。そこで運転条件にかかわらず電源構成機器やケーブルの過熱、温度上昇等によるダメージを未然に防止することが可能な電源保護検出システムを開発した。

実際に保護する対象機器については、表-1 に示す P-NBI の現定格と 30 秒入射時の運転条件の比較に基づき、定格電力量との比較(J-Ratio) から裕度のない加速電源(Vacc 及び Iacc)及びフィラメント電源(Vfil.A 及び Vfil.B)について各アナログ値(実電流及び電圧値)を取り込み I^2t 及び V^2t を監視した。表-2 に保護対象機器と設定値を示す。なお、偏向磁石電源については、実電圧値のアナログ信号出力が無いため、偏向磁石電源の直列リアクトルにサーモラベルを貼り付け温

度上昇の監視を行い運転終了後の点検で過熱していないことを確認した。

表-2　保護対象機器と設定値

	30秒時の保護設定値	保護方式
加速電源	85kV×85kV×30S 55A×55A×30S	V_{acc}^2t I_{acc}^2t
フィラメント電源A/B	13V×13V×36S	$V_{fil.A}^2t$ $V_{fil.B}^2t$
偏向磁石電源	サーモラベルによる監視	

３．１　電源保護検出システムの概要

電源保護検出システムは、PLC を主体とて開発した。PLC は、プログラム作成環境が整備されてきておりプログラム作成・変更がユーザー側で容易に可能である利点を有している。平成 15 年に実施した第 1 期では、5 ユニットの 30 秒化対応が必要であり、このため 1 台の PLC により 5 ユニットの電源機器の実通電を監視、保護するシステムとした。PLC の構成は各ユニットを装着するベースユニット、電源ユニット、CPU ユニット及び計算処理開始信号等を入力する DC 入力ユニット、各電圧、電流アナログ値を取り込む A/D 変換ユニット、異常検出時に警報の表示やタイムシーケンスを停止させるリレー出力ユニットからなる。図—1 にシステムの構成を示す。５ユニットの加速電源、フィラメント電源の電流と電圧を CPU ユニットで実時間処理し、I^2t 或いは V^2t が上限値を超えた場合にシーケンスを停止する。プログラムは、Windows 上で動作する専用ソフトウェアにて一般的なラダー言語でプログラミングを行い、パソコンから RS-232C にて PLC に送信する。なお本システムの製作にあたっては、パソコンと PLC を接続することで、PLC の動作状態をパソコンの CRT 上でモニタしながら計算処理が確認できるため、効率的にシステム製作を行うことができた。

３．２　プログラムのフローチャート

作成したプログラムの一部である加速電源用保護検出(I_{acc}^2t)のフローチャートを図-2 に示す。ここで I_{acc}^2t は加速電源の主回路に直列接続する電源機器の発熱量の指標である。基本的なフローは次のとおりである。

全系タイミングシステムより送信される放電１分前信号を受信し、40 秒後に PLC 内のデータベース値の初期化(0 を入力)を行い、警報ランプのリセット操作を行うと共に 1 秒間のアナログデータを取り込み、その平均値を求め、ベース値として認識する。次に、入射準備指令を受信すると、計算処理がスタートし、フィラメントの最長通電時間（36 秒）をカバーできるように 36.5 秒間計算を行う(ビーム入射パルス幅が 30 秒の場合、フィラメントの通電時間は 36 秒)。処理内容としては、ベース値を減算したアナログ値を乗算し、1 スキャン毎(サイクルタイム毎)に加算

する。加算された値は、実際に設定した警報設定値と比較して、その値を超過した場合にデジタル出力(LED の点灯)を行うと共に P-NBI 加熱装置のタイムシーケンスを停止させる。主回路に並列に接続される電源機器の保護である V^2t も同様なフローで行う。なおこれらの演算処理を 1 台の CPU で行うため、1 回のデータ読込み・演算処理に要する時間（サイクルタイム：イニシャル処理→共通処理→演算処理→サイクルタイム算出処理→I/O リフレッシュ→周辺サービス)は約 40ms であった。したがって通電電力が設定値を超える場合、このサイクル時間（約 40ms）後に全ユニットの通電が停止する。

３．３　試験結果

JT-60 のプラズマ実験において 30 秒入射を実施するにあたり、模擬信号動作試験を実施し電源保護検出システムの正常動作を確認した。その後、実際のプラズマ実験において、設定パルス幅を徐々に延ばしながら、電源機器の温度監視を行い、最終的に、定格 30 秒のリミット設定値で保護機能が動作することを確認した。

図—3 に実通電試験時の波形を示す。図-3 は、JT-60U 実験放電 No.E43911 の加速電流の実波形である。加速電流値は矩形ではなく、加速部電極間の高電圧放電破壊(ブレイクダウン)時の跳ね上がり等があり、また実電流モニタ値が少し高かったが、これらの変動も含めて安全に保護インターロックが動作していることがわかる。

現在、JT-60Uプラズマへの30秒ビーム入射実験にて、電源保護検出器の保護動作が正常に動作しており、JT-60Uの長時間放電実験の円滑な進展に大きく寄与している。

４．電源保護検出システムの更新

４．１　新電源保護検出器の概要

平成 15 年から開始した JT-60 の NBI の 30 秒入射により、高性能プラズマの長時間維持に成功した。この成果をさらに発展させるために、平成 19 年度からは、30 秒入射できるユニットを 5 台から 8 台に増加することが決定した。このため電源保護検出システムにおいても追加改造が必要となった。しかし、第 1 期で開発した電源保護検出システムの PLC は、すでに生産中止になっており増設 I/O モジュールの入手が困難であった。加えてユニット数の増大に伴う実時間演算処理時間の増加のため、システムの時間精度に問題が生じることが明らかとなった。そのため、第 2 期として新たな電源保護検出システムを開発することとした。

新電源保護検出システムでは、最新の PLC を導入し、使い勝手が良く・拡張性の高いシステムを目指すこととした。特に PLC の性能の進展は著しいものがあり、低価格ながら高性能なものが入手可能となっている。新システムを構築する上で重要な点は、電源のインターロック機能としての高速演算処理能力である。従来の 1 PLC 方式では、ユニット増設によるサイクル時間が延び、保護動作機能を担保することが困難であるため、新たにユニット毎に PLC を持たせたユニット単独制御方式を開発、これにより、サイクルタイムの大幅な短縮を実現した。採用した PLC は、(株)オムロン製の SYSMAC CP1H である。この PLC は、電源・CPU・各アナログ及びデジタルモジュールが一体型になっているパッケージタイプであり、従来のベース型 PLC に比べ安価でメンテナンスが容易である。また、通信インタフェースオプションを装着することにより、PLC 間で最大 9 台、それぞれ10ch 以内のデータをやりとりできるシリアルPLC リンク機能(データリンク)が標準装備されている。さらにシステム全体の監視を可能にするため、SCADA(Supervisory Control and Data Acquisition;監視制御ソフトの総称)ソフトウェア RSView32(米国、ロックウェル社製)を用いて、マンマシンインターフェースを充実させた。表-３に SYSMAC CP1H の基本性能を示す。

表-3　PLC 基本仕様

項目	仕様
外形寸法　　質量	150mm(W)×90mm(H)×85mm(D)　740ｇ以下
プログラム容量	20Kステップ
命令実行時間	基本命令：0.10μs～　　応用命令：0.15μs～
内蔵入出力点数	40点（入力24点/出力16点）
パルスキャッチ入力	８点（最小パルス入力:50μs以上）
高速カウンタ	４点　単層（パルス＋方向、加減算、加算）100kHz 数値範囲：32bit 割込：目標値一致比較/帯域比較
リレー出力	16点（ON/OFF応答時間：15ms以下）
内蔵アナログ入出力	AD4点/DA2点 分解能：1/6000 変換時間：1ms/点 AD変換データ：フルスケール0000～1770(2EE0)Hex

４．２　新電源保護検出システムの構成

新旧システムの比較を図-4 に示す。

従来の電源保護検出システムは、1 台の PLC に 5 ユニット分(20 点)のアナログを入力していたため、I^2t の数値演算処理等によりプログラム全体で約 40ms 程度のサイクルタイムであった。また各ユニットのどれか１つでも異常を検出すると P-NBI 実験入射ユニットを全て停止させていた。

これに対して新システムは、各電源系制御盤(#2、#6、#7、#8、#9、#10、#13、#14)に 1 台ずつ単独に PLC を設置することにより、サイクルタイムを約 40ms から約 5ms と大幅な短縮ができた。このサイクルタイム時間の短縮により、異常の高速検出・高速停止を実現し、電源機器のより確実な保護が期待できる。また異常検出時の出力信号を PLC 毎に持つことにより、ユニット単位でタイムシーケンスを停止できるようになった。1 台の PLC への入力信号は TDG(タイミング分配器)より受信する放電 1 分前信号と入射準備指令のデジタル信号 2 点及びアナログ信号は表-2 に示す保護対象機器の 4 点である。新システムは、各ユニット用 PLC にて I^2t 及び V^2t を監視し、警報設定値を超過した時点でタイムシーケンス停止信号をユニット毎に出力する機能を有する。新システムの基本構成を図-5 に示す。なおシリアル PLC リンク機能を利用して、操作及び監視用のパソコンとリンクを張ることで、各ユニットの警報設定値の確認や現在の状態を 1 台のパソコンで総括的に監視することが可能である。

４．３　プログラム及び画面製作

プログラミングの開発用ソフトウェアは、メーカーから Windows 上で動作する専用ソフトウェア(CX-Programmer)が提供されている。プログラムは一般的なラダー言語でプログラミングを行い、パソコンから USB にて PLC に送信できる。プログラムの一部を図-6 に示す。

新 PLC は、ユニット毎に使用するため 1 ユニット分のプログラムを製作すればプログラムの複製にて他のユニットに簡単にインストールできる。従って、今後、ユニットの追加に対して容易に増設が可能である。

パソコンでの画面製作には、運転員にアナログおよびデジタルの数値表示はもとより、ビジュアル感覚で装置の監視状態を表現することができる SCADA を採用した。具体的には、各ユニットの警報設定値の確認及び現在の I^2t 積算値をレベルメータにて監視できる画面を製作した。このパソコンの監視画面は、運転員が配置されている NBI 操作デスク上に設置した。PLC リンク機能を利用することで、各ユニット(全 8 ユニット)の現在の I^2t 積算値や警報状態を 1 つの画面で監視できるようになり、運転員の監視業務の負担を大幅に軽減できるようになった。監視操作画面を図-7 に示す。

４．４　システムの制御ロジック

本電源保護検出システムは、インジェクションモード時のみ稼動するシステムである。ここでインジェクションモードとは、JT-60 全系放電シーケンスの指示に従い、カロリメータをターゲットとしてフラッシング運転を行った後、JT-60U プラズマにビーム入射を行う一連の運転モードをいう。実際の制御ロジックは、図-2 に示すプログラムのフローチャートに示すように、全系タイミングシステムより送信される入射準備指令にて計算がスタートし、各電源機器の I^2t 積算値を監視し、実際に設定した警報設定値と比較して、その値を超過した場合にデジタル出力(PLC の DO 出力と監視操作画面出力)を行うと共に該当するユニットのタイムシーケンスを停止させる。タイムシーケンスを停止するには、既設電源系制御盤内の制御ロジックの停止条件に組み込む必要がある。このために、既設の電源設備のインターブロック線において、保護対象機器のいずれかが警報設定値に達したときに、タイムシーケンスを停止させる制御ロジックの追加を行った(図-8)。具体的には、図-9 に示すように、PLC の内部接点が ON になると、全ユニット共通部切予告信号を ON とするリレー回路を追加した。

４．５　動作試験

プログラム製作の終了後に、各電源系制御盤内部の I/O モジュール等の配線作業を実施し、模擬信号動作試験を実施した。図-10 に加速電圧保護検出の動作試験時の波形の一例を示す。この動作試験では、各現場盤から光にて受信される信号ケーブルを取り外し、直流電圧標準発生器にて保護設定値の直流電圧(0～10V)を入力し、設定した時間に対し正常に動作することを確認した。また、全てのユニットにて模擬試験を行い、操作デスク上に設置されている監視用 PC の画面にて正常に信号が交信されていることを確認した。実際の保護動作確認に関しては、H19 年度の P-NBI の入射実験を行う前に健全性を確認し、8 ユニットの 30 秒運転での電源機器の確実な保護を行う予定である。

５．まとめ

P-NBI の 30 秒化に対して、電源構成機器の過大通電を防止し高い安全性を確保するため電源保護検出システムを開発した。特に対象とする電源機器の通電電圧、電流を実時間で演算処理することで、運転パラメターにかかわらず確実に電源機器の過大通電を防止することが可能となった。システム開発としては、第 1 期と第 2 期があり、第 1 期では 5 ユニットの電源機器の監視を 1 台の PLC により実現し、30 秒運転での電源設備の安全確保に貢献した。これにより、PLC を用いた基本プログラムの性能が検証された。30 秒運転が 8 ユニットに拡張する第 2 期では、低価格・高性能の最新の PLC を 8 ユニット毎に設置する新システムを構築した。新システムでは、8 台の PLC がユニット毎に実時間演算処理するため、サイクルタイムが大幅に短縮し、その結果、異常検出時の電源通電遮断動作の高速化を実現した。さらに第 1 期では異常検出時の保護動作は入射ユニ

ット一括停止だったが、第 2 期では異常検出したユニットのみを停止することが可能となった。また新システムでは、ユニットの増力に対しても同じプログラムの PLC を増設すれば良く、高いシステム拡張性を有する。さらに SCADA を用いた監視操作画面を製作し、データリンク機能にてシステム全体の電源構成機器の状態や警報発生時の確認が容易になった。

このように PLC の技術発展を最大限に活用することにより、安価で拡張性の高い電源保護検知システムを開発することができた。新システムに関しては、平成 19 年秋から実際の運転に使用する予定である。

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員の皆様に感謝を申し上げます。加えて、協力を頂きました関則和氏他日本アドバンストテクノロジー運転委託関係者諸氏に深く感謝いたします。また、本システムを開発するにあたり、貴重なご意見・ご指導を頂きました細金延幸ユニット長、山本巧研究主席、宮直之研究主席に感謝を申し上げます。

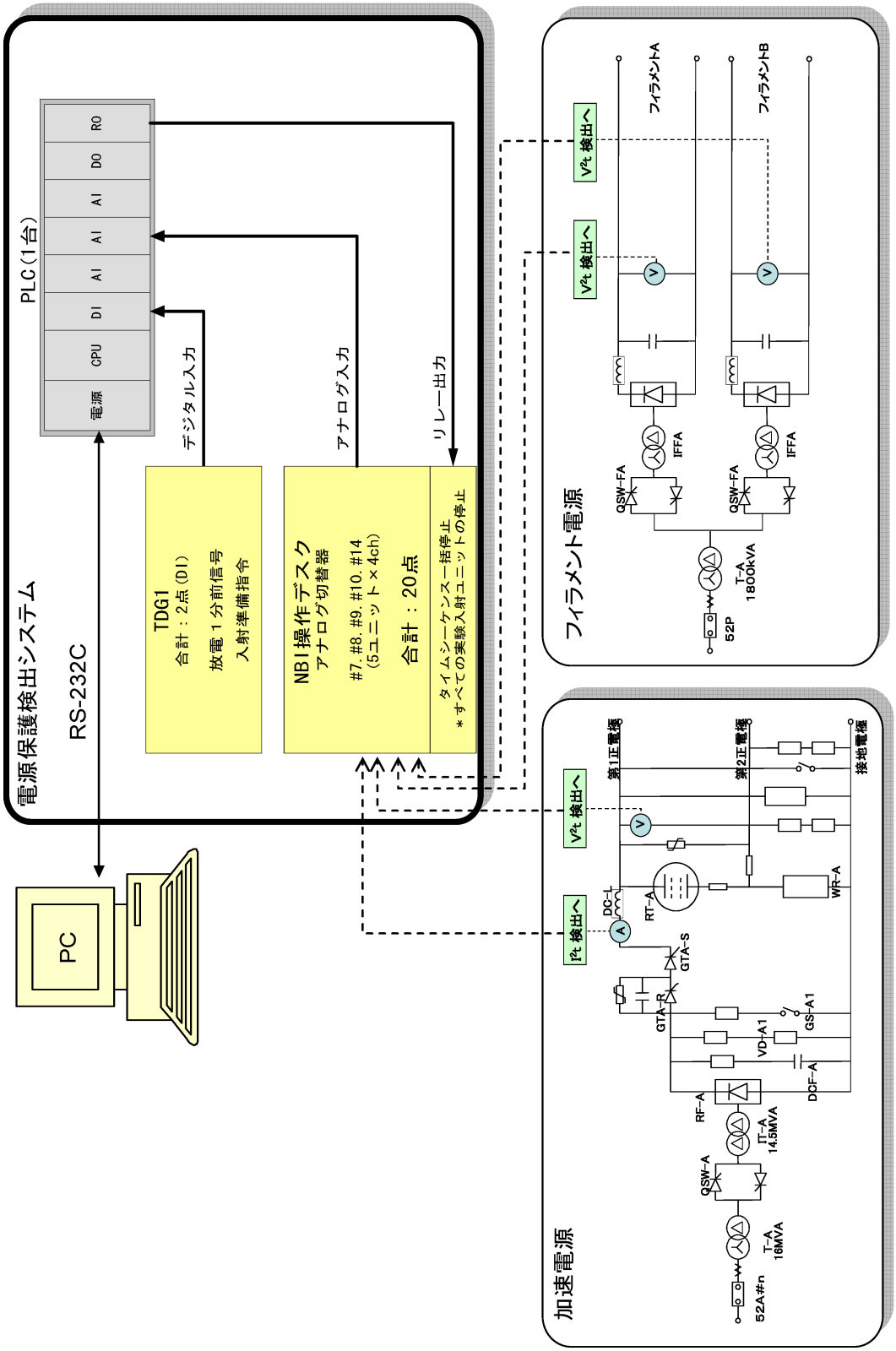
参考文献

[1] 大島克己　他：“JT-60U NBI 装置における 30 秒運転時の機器熱負荷管理”, 平成 16 年度大阪大学総合技術研究会報告集, P3-01 (2005).

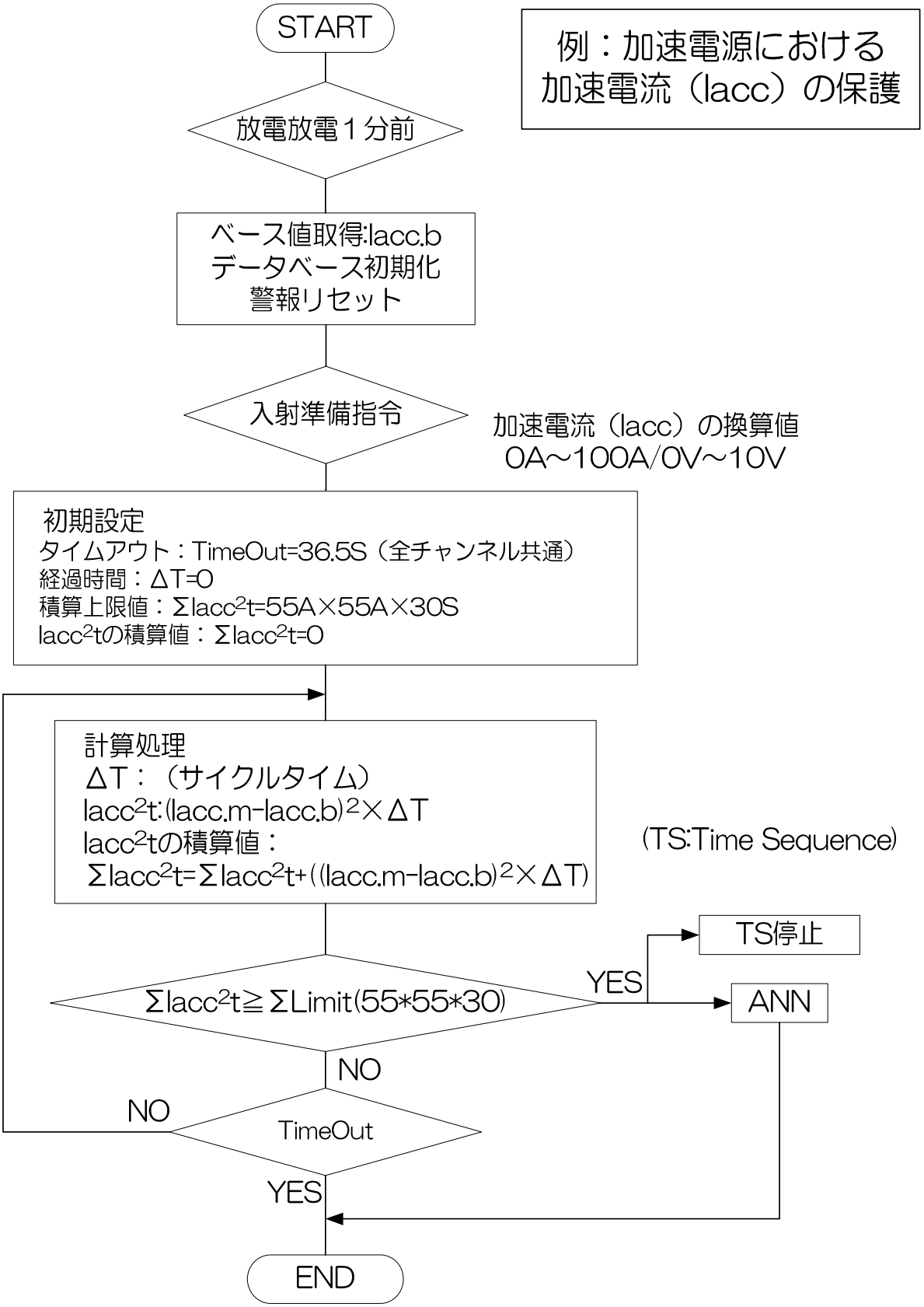
[2] 大賀徳道：私信

[3] 薄井勝富　他：“JT-60NBI 装置の長パルス運転”, 平成 15 年度高エネルギー研究所技術研究会報告集,P-034 (2004).

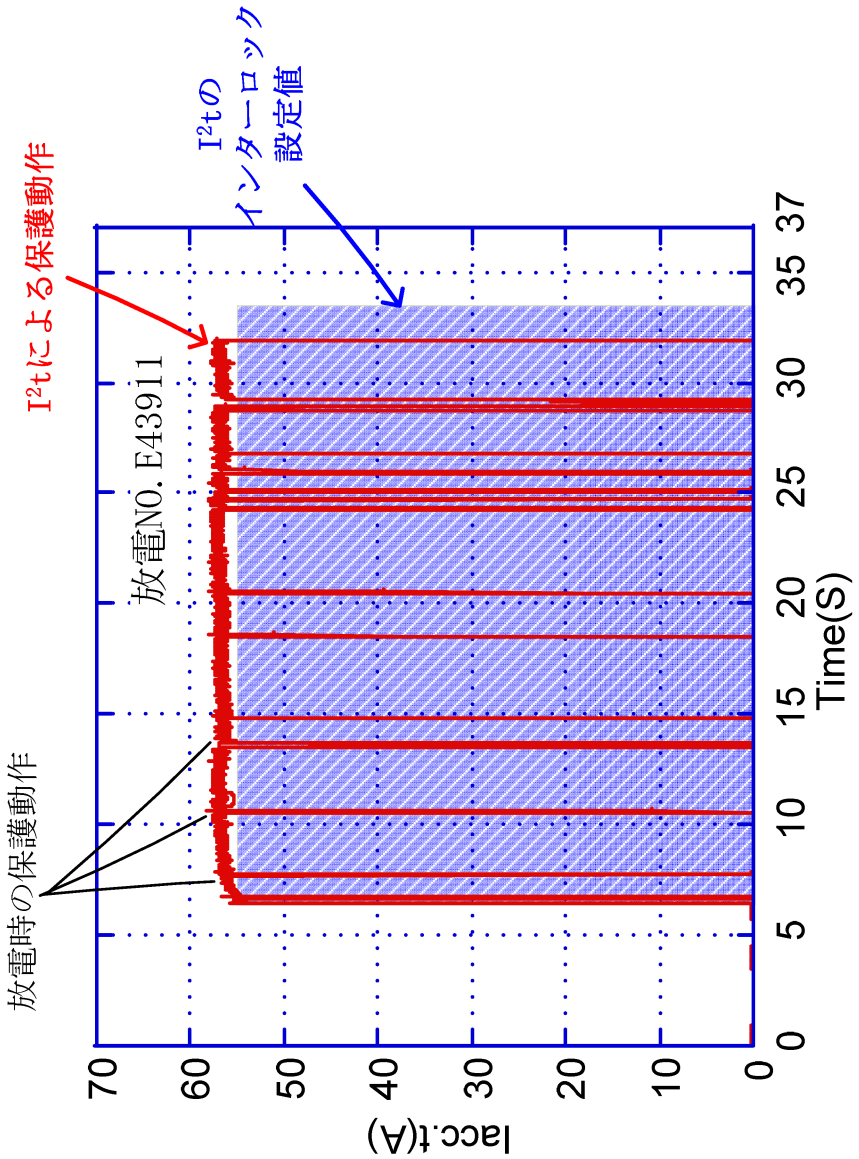
[4] N.Akino et al., “Long pulse operation on NBI systems for JT-60U”, Fusion Science and Technology, 47, 758(2005).


電源保護検出システム
RS-232C
PLC（1台）
電源
CPU
DI
AI
AI
AI
DO
RO
デジタル入力
アナログ入力
リレー出力
TDG1
合計：2点（DI）
放電１分前信号
入射準備指令
NBI操作デスク
アナログ切替器
#7. #8. #9. #10. #14
（5ユニット×4ch）
合計：20点
タイムシーケンス一括停止
＊すべての実験入射ユニットの停止
PC
フィラメント電源
フィラメントA
フィラメントB
V²t 検出へ
V²t 検出へ
QSW-FA
IFFA
T-A
1800kVA
52P
加速電源
I²t 検出へ
V²t 検出へ
第1正電極
第2正電極
接地電極
DC-L
RT-A
WR-A
GTA-S
GTA-R
VD-A1
GS-A1
DCF-A
RF-A
QSW-A
IT-A
14.5MVA
T-A
16MVA
52A#n

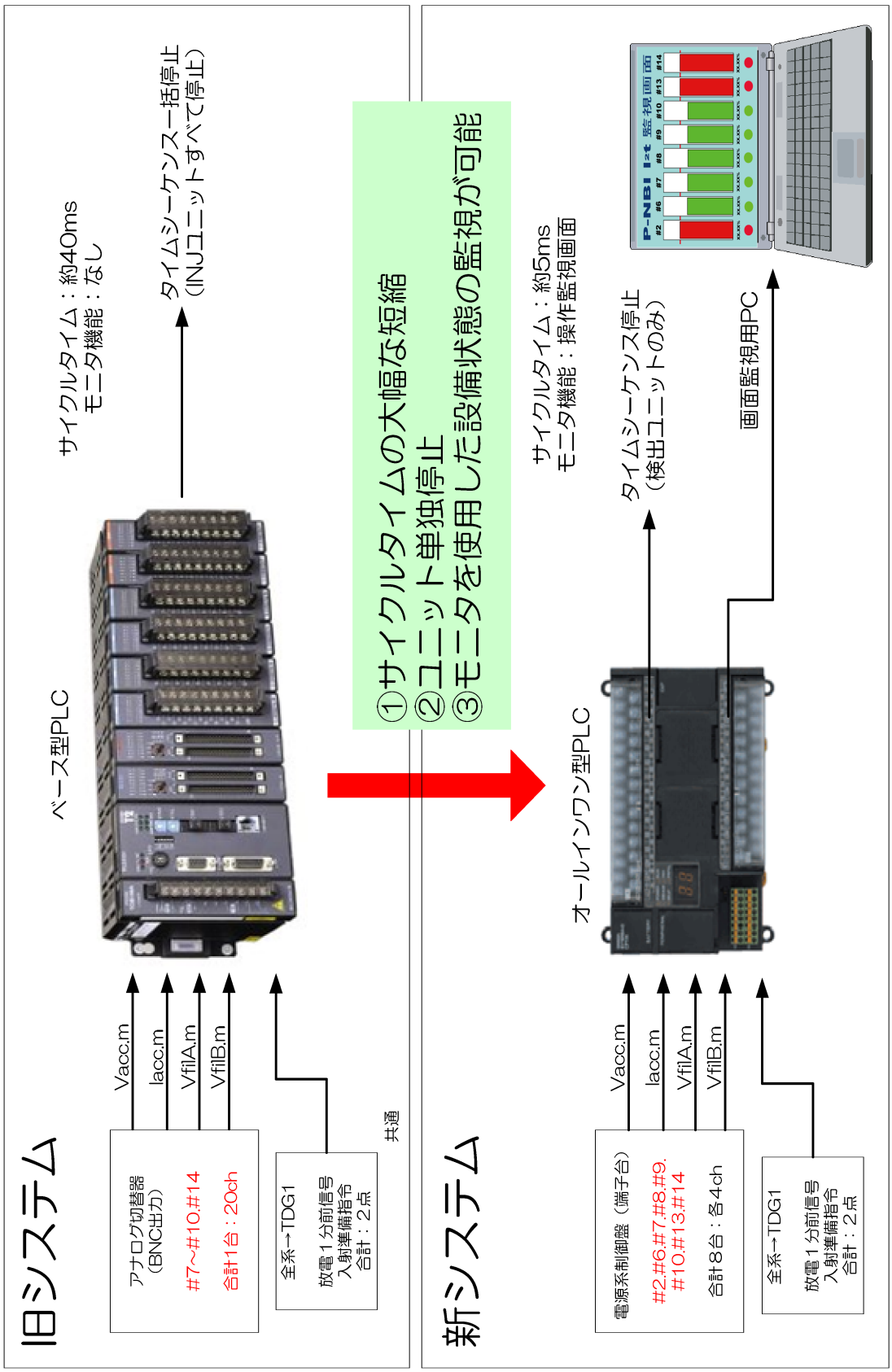
図－1　システム基本構成


START
例：加速電源における
加速電流（Iacc）の保護
放電放電１分前
ベース値取得:Iacc.b
データベース初期化
警報リセット
入射準備指令
加速電流（Iacc）の換算値
0A～100A/0V～10V
初期設定
タイムアウト：TimeOut=36.5S（全チャンネル共通）
経過時間：ΔT=0
積算上限値：ΣIacc²t=55A×55A×30S
Iacc²tの積算値：ΣIacc²t=0
計算処理
ΔT：（サイクルタイム）
Iacc²t:(Iacc.m-Iacc.b)²×ΔT
Iacc²tの積算値：
ΣIacc²t=ΣIacc²t+((Iacc.m-Iacc.b)²×ΔT)
(TS:Time Sequence)
TS停止
YES
ΣIacc²t≧ΣLimit(55*55*30)
ANN
NO
NO
TimeOut
YES
END

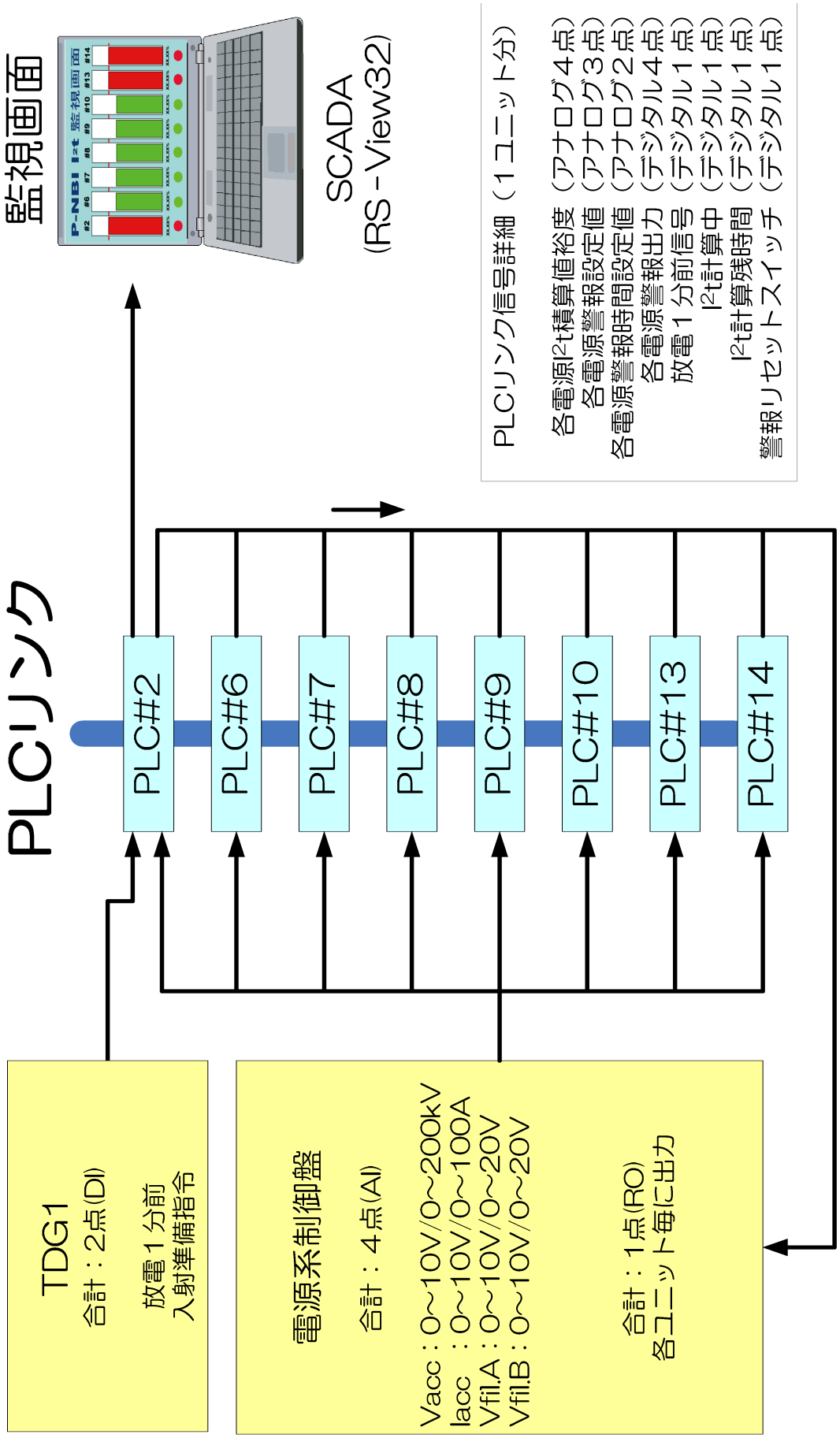
図－2　フローチャート



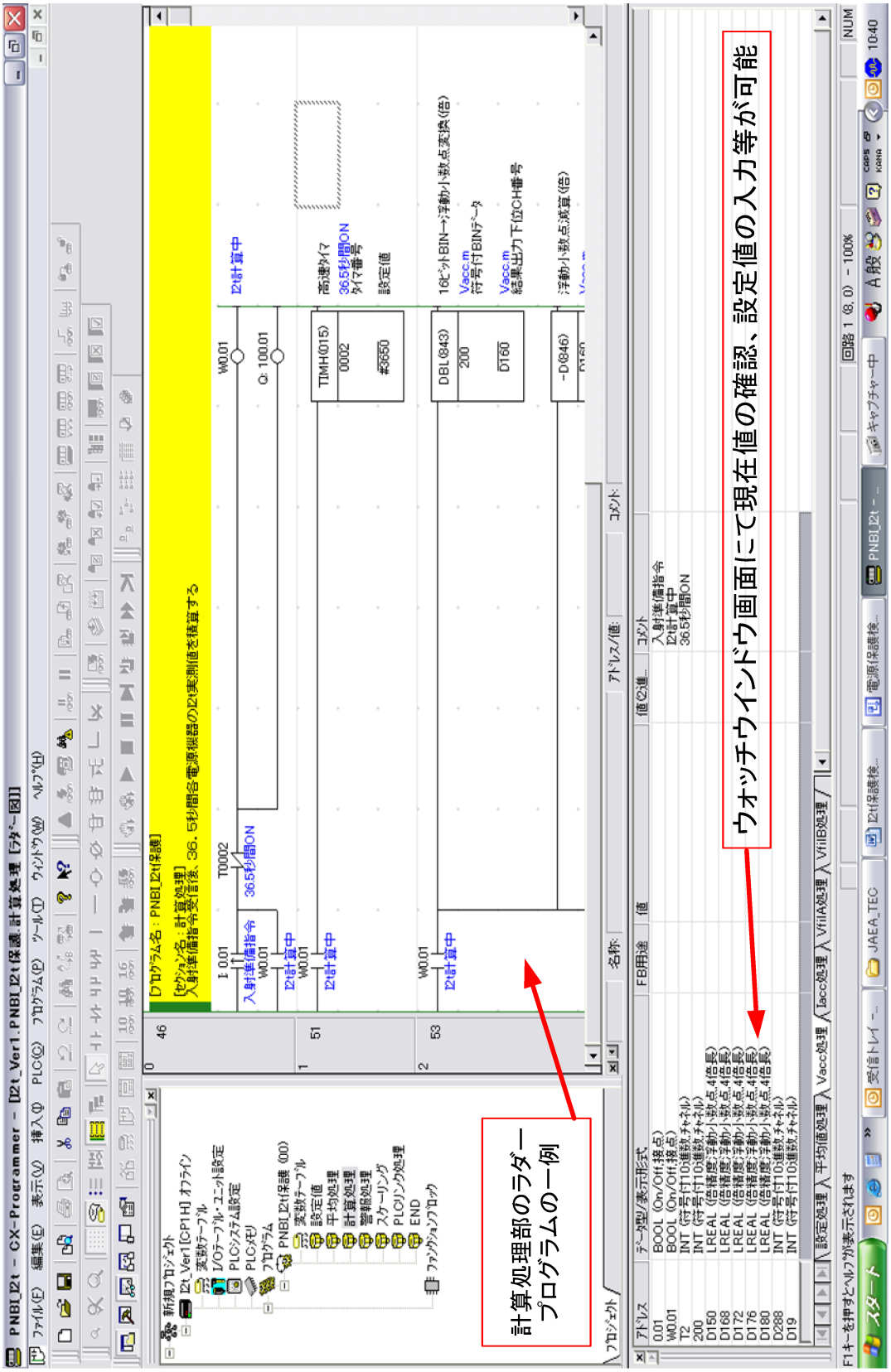
図－3　実負荷シーケンス試験結果



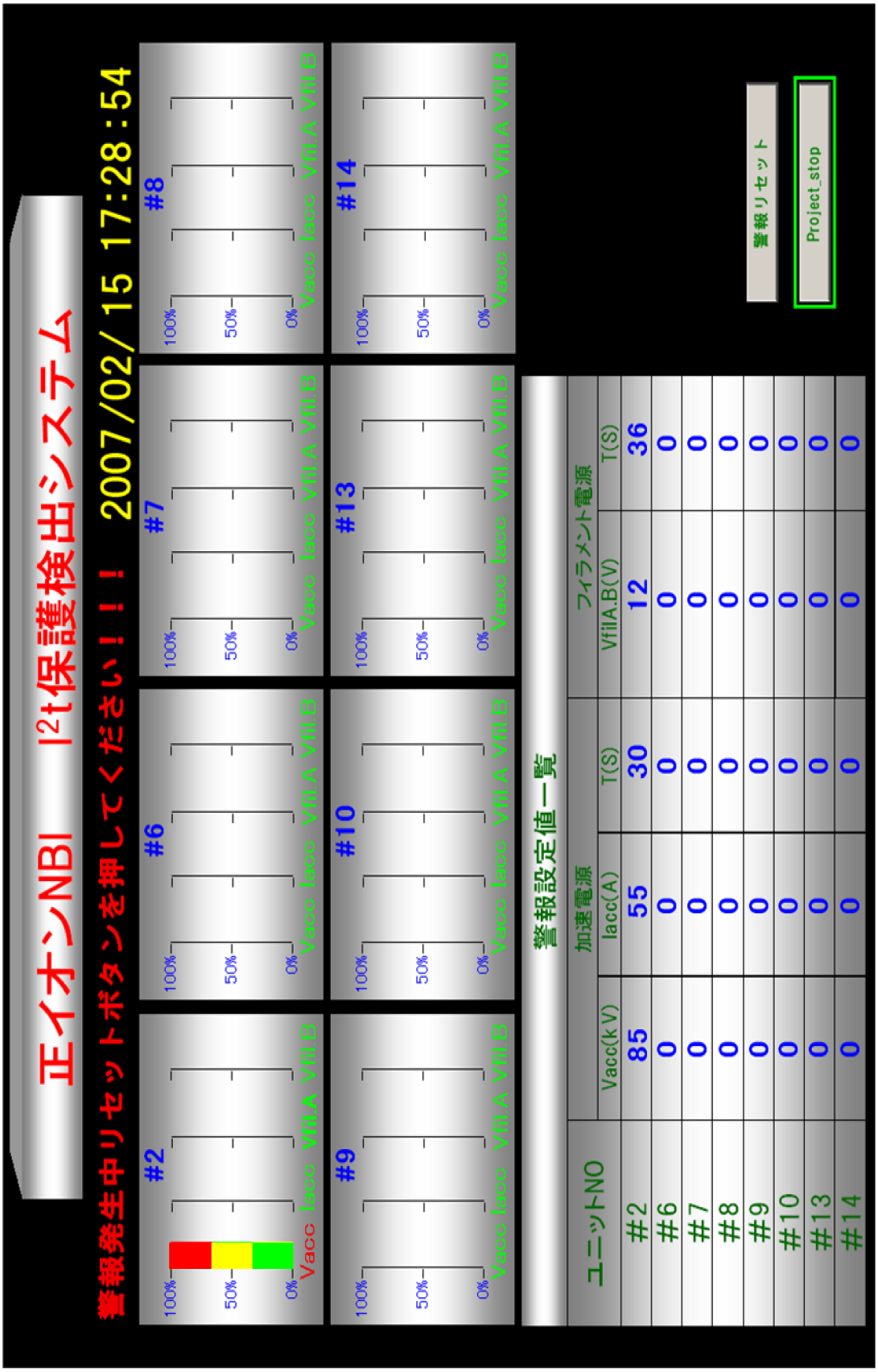
図－4　新旧システムの比較



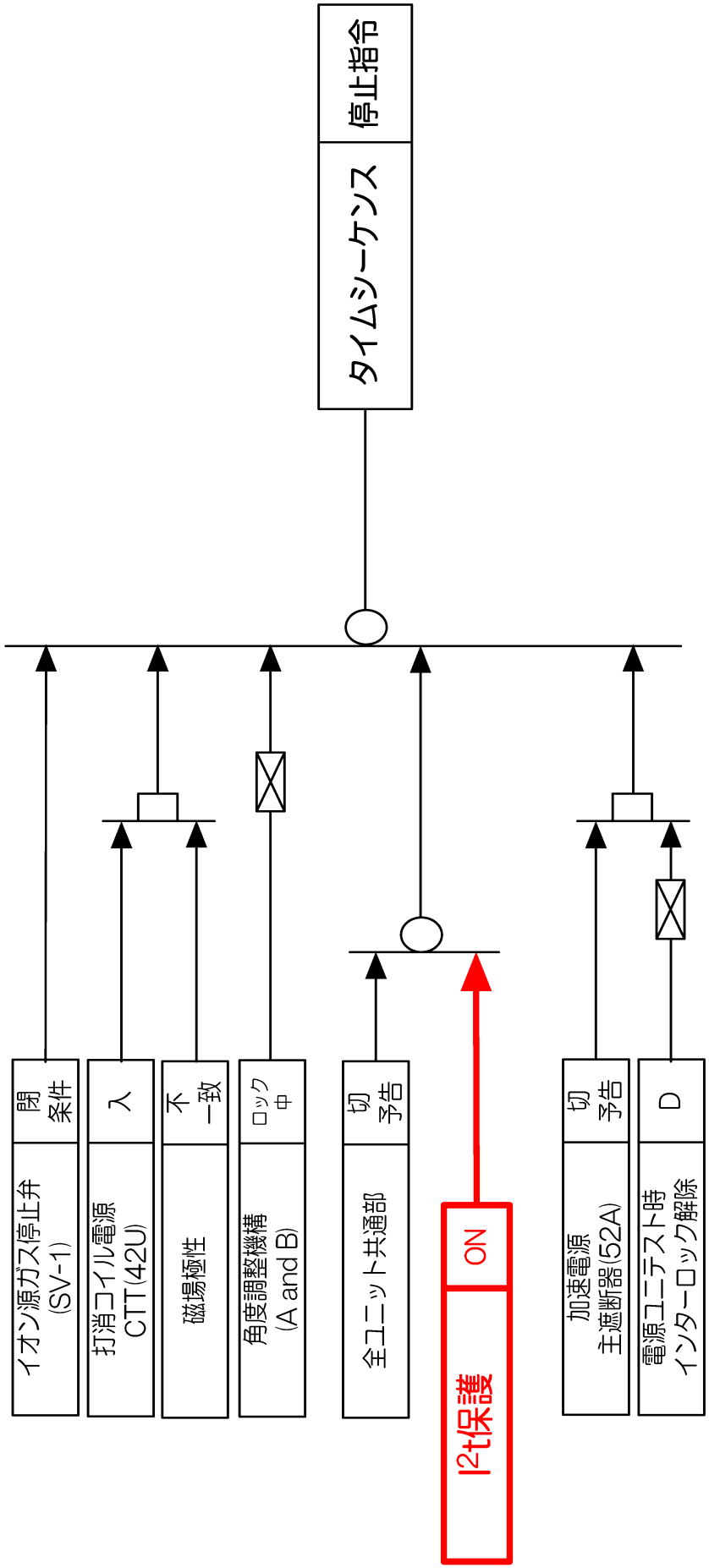
図－5　新システム基本構成図



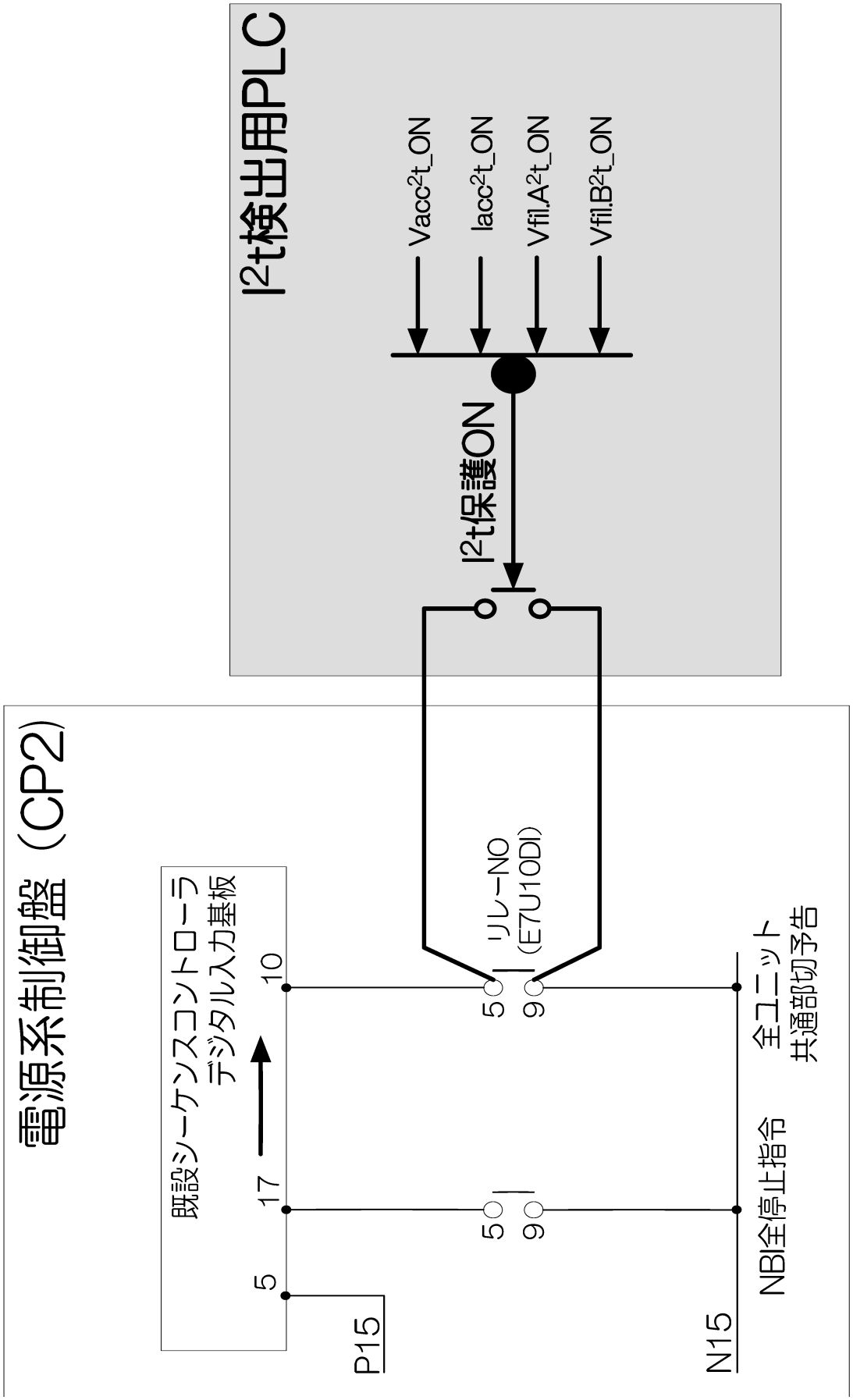
図－6　プログラム


正イオンNBI　I2t保護検出システム
警報発生中リセットボタンを押してください！！！
2007/02/15 17:28:54
#2
#6
#7
#8
#9
#10
#13
#14
100%
50%
0%
Vacc Iacc VfilA VfilB
警報設定値一覧
ユニットNO
加速電源
フィラメント電源
Vacc(kV)
Iacc(A)
T(S)
VfilA.B(V)
T(S)
#2 85 55 30 12 36
#6 0 0 0 0 0
#7 0 0 0 0 0
#8 0 0 0 0 0
#9 0 0 0 0 0
#10 0 0 0 0 0
#13 0 0 0 0 0
#14 0 0 0 0 0
警報リセット
Project_stop

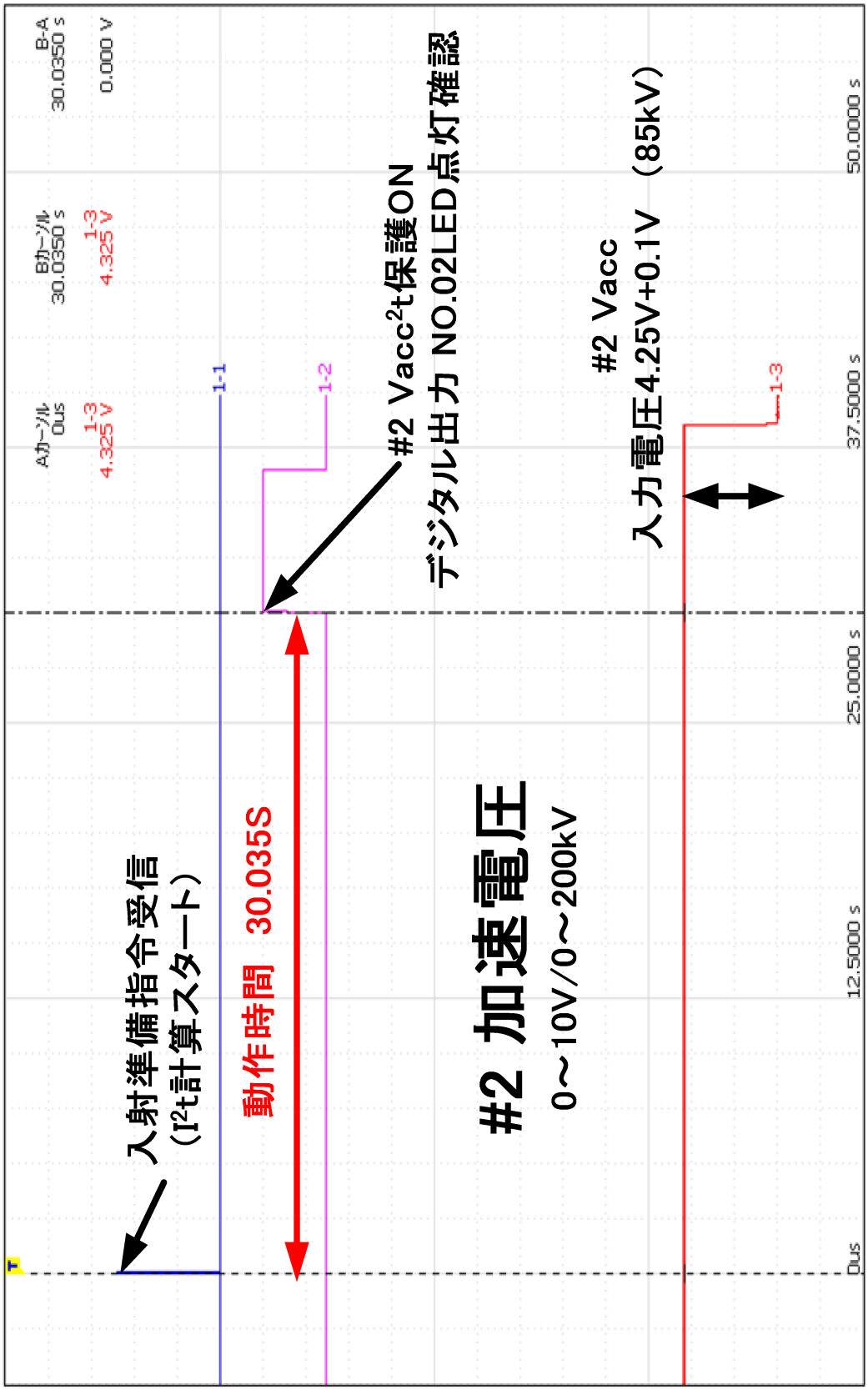
図－7　操作監視画面



図－8 インターブロック線図


I2t検出用PLC
Vacc2t_ON
Iacc2t_ON
Vfil.A2t_ON
Vfil.B2t_ON
I2t保護ON
電源系制御盤（CP2）
既設シーケンスコントローラ
デジタル入力基板
10
17
5
P15
5
9
リレーNO
(E7U10DI)
5
9
N15
全ユニット
共通部切予告
NBI全停止指令

図－9　警報出力回路



図－10 模擬動作試験結果

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	立法メートル	m^3
速さ，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）	キログラム毎立法メートル	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		$m \cdot m^{-1}=1$[(b)]
立体角	ステラジアン[(a)]	sr[(c)]		$m^2 \cdot m^{-2}=1$[(b)]
周波数	ヘルツ	Hz		s^{-1}
力	ニュートン	N		$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
圧力，応力	パスカル	Pa	N/m^2	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
エネルギー，仕事，熱量	ジュール	J	N・m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
工率，放射束	ワット	W	J/s	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
電荷，電気量	クーロン	C		s・A
電位差（電圧），起電力	ボルト	V	W/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$
磁束	ウエーバ	Wb	V・s	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
セルシウス温度	セルシウス度[(d)]	℃		K
光束	ルーメン	lm	cd・sr[(c)]	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot cd=cd$
照度	ルクス	lx	lm/m^2	$m^2 \cdot m^{-4} \cdot cd=m^{-2} \cdot cd$
（放射性核種の）放射能	ベクレル	Bq		s^{-1}
吸収線量，質量エネルギー分与，カーマ	グレイ	Gy	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2}$
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	シーベルト	Sv	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2}$

(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。組立単位を形作るときのいくつかの用例は表４に示されている。
(b)実際には、使用する時には記号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℃のようにSI接頭語を伴って用いても良い。

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	1 a=1 $dam^2=10^2m^2$
ヘクタール	ha	1 ha=1 $hm^2=10^4m^2$
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10^5Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=10^{-10}m
バーン	b	1 b=100$fm^2=10^{-28}m^2$

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

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
ダイン	dyn	1 dyn=10^{-5}N
ポアズ	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 =$1cd/cm^2=10^4cd/m^2$
ホト	ph	1 ph=10^4lx
ガル	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=1.002×10^{-4}nm
ガンマ	γ	1γ=1 nT=10^{-9}T
ジャンスキー	Jy	1 Jy=$10^{-26}W \cdot m^{-2} \cdot Hz^{-1}$
フェルミ		1 fermi=1 fm=10^{-15}m
メートル系カラット		1 metric carat = 200 mg = 2×10^{-4}kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリー	cal	
ミクロン	μ	1 μ =1μm=10^{-6}m

（第７版，1998年改訂）

古紙配合率100%
白色度70%再生紙を使用しています