



J-PARC 物質・生命科学実験施設の 全体制御システムのアップグレード

Upgrade of General Control System Employed
for Materials and Life Science Experimental Facility of J-PARC

渡邊 聡彦 酒井 健二 大井 元貴 明午 伸一郎
高田 弘

Akihiko WATANABE, Kenji SAKAI, Motoki OOI, Shin-ichiro MEIGO
and Hiroshi TAKADA

J-PARC センター
物質・生命科学ディビジョン
Materials and Life Science Division
J-PARC Center

November 2013

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

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

J-PARC 物質・生命科学実験施設の全体制御システムの アップグレード

日本原子力研究開発機構
J-PARC センター 物質・生命科学ディビジョン

渡邊 聡彦※、酒井 健二、大井 元貴、明午 伸一郎、高田 弘

(2013 年 6 月 11 日受理)

大強度陽子加速器施設 (J-PARC) の物質・生命科学実験施設 (MLF) に備えた全体制御システムは、3GeV、1MW の高エネルギー大強度陽子ビームで駆動される核破砕中性子源やミュオン標的を構成する多種多様な機器と、23 本の中性子ビームラインと 4 ポートのミュオンビームラインに設置される実験装置の運転制御を行うもので、加速器施設の制御システムとも密接に連動している。この全体制御システムは、MLF が 2008 年に運転を開始して以来、設計どおりに機能しているが、その OS やソフトウェアバージョン選択の自由度が少ないために、OS の更新時期にはシステムを構成する全ての PC 等を更新する必要があるなど、メンテナンスコストが高い欠点がある。このため、メンテナンス機能を高め、全体制御システムの基盤ソフトウェアや運転制御のための各種機能に用いるソフトウェアを見直した。この検討では、複数台の専用の監視操作用 PC から多数の現場制御盤を制御できること、共有サーバが 7000 以上の運転情報を収集・蓄積し、WEB 画面などの形式に変換し配信するといった運転制御機能を維持できること、を前提条件とした。さらに、プロトタイプシステムを製作し、実際の運転で通信されているデータを用いて、PLC との通信速度、画面表示機能、DS サーバの取込速度・容量、長期運転時の安定性など、具体的に性能を評価し、その妥当性を確認した。この結果、次期の全体制御システムでは、EPICS を基盤ソフトウェアとし、根幹的な要素を成すデータ入出力モジュール、ユーザーインターフェース用画面作成ソフトウェア及びデータストレージサーバ用ソフトウェアに、各々Takebishi 製の OPC サーバ、Control System Studio (CSS) 及び PostgreSQL を採用するという結論を得た。

Upgrade of General Control System Employed for Materials and Life Science Experimental Facility of J-PARC

Akihiko WATANABE✧, Kenji SAKAI, Motoki OOI, Shin-ichiro MEIGO and Hiroshi TAKADA

Materials and Life Science Division, J-PARC Center, Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received June 11, 2013)

The General Control System (GCS) of the Materials and Life Science Experimental Facility (MLF) of J-PARC controls various devices of a pulsed spallation neutron source and a muon target which are driven by proton beams with energy of 3 GeV and a power of 1 MW, neutron instruments of 23 neutron beam lines and muon instruments of 4 secondary muon beam lines under a network of the control system of accelerators. The current GCS has performed its function as designed since operating MLF was started in 2008. However, it has a weakness that it costs very much in the maintenance because of its poor flexibility on Operating System (OS) and software versions. For example, all computers composed of the GCS must be replaced when the OS is upgraded.

For improving the potential flexibility of the GCS in maintenance in view of sustainable long-term operation, therefore, we have re-examined the framework software and those employed for individual functions of GCS under the condition of current functions so as to control all local control panels by plural exclusive PCs, and acquire, store and distribute operation data over 7000 items in the suitable data format. Furthermore, we have made a prototype of an upgraded GCS and evaluated its concrete performances with true data/information such as data transmission speed from PLCs, control functions from operating windows, storage capability of data server and long-term stability/reliability of the system. In conclusion, we decided to adopt following softwares for the upgraded GCS: Experimental Physics and Industrial Control System (EPICS) as framework software, Takebishi-made OPC server as data input/output module, Control System Studio (CSS) as user interface window and PostgreSQL as the data storage server.

Keywords : J-PARC, MLF, GCS, EPICS, CSS, Maintenance

✧ Collaborating Engineer

目次

1. 序.....	1
2. MLF 全体制御システムの監視操作システム.....	5
2.1 現行監視操作システムの概要.....	5
2.2 メンテナンス上の問題.....	6
3. 新しい監視操作システムの検討.....	8
3.1 新しい監視操作システムの仕様調査.....	8
3.1.1 データ入出力ソフトウェアの検討.....	8
3.1.2 データ入出力機能の評価.....	9
3.1.3 ユーザーインターフェース機能.....	11
3.1.4 データストレージ機能.....	12
3.1.5 Web 配信機能.....	12
3.2 新しい監視操作システムの概要.....	12
4. プロトタイプ機製作と開発スケジュール.....	16
4.1 統括制御プロトタイプ機の製作.....	16
4.2 PPS プロトタイプ機の製作.....	17
4.3 開発スケジュール.....	19
5. 総括.....	20
謝辞.....	20
参考文献.....	21

Contents

1. Introduction.....	1
2. Monitor and operation system in MLF general control system	5
2.1 Outline of present monitor and operation systems	5
2.2 Problem on maintenance function	6
3. Consideration of new monitor and operation system	8
3.1 Specification investigation of new monitor and operation system.....	8
3.1.1 Consideration of software for data input/output function	8
3.1.2 Evaluation on data input/output function.....	9
3.1.3 User interface function	11
3.1.4 Data storage function.....	12
3.1.5 Web distribution function	12
3.2 Outline of new monitor and operation system.....	12
4. Prototype production and development schedule	16
4.1 Prototype production for integral control system	16
4.2 Prototype production for PPS	17
4.3 Development schedule	19
5. Summary.....	20
Acknowledgment.....	20
Reference.....	21

1. 序

大強度陽子加速器施設（Japan Proton Accelerator Research Complex ; J-PARC）の物質・生命科学実験施設（Materials and Life Science Experimental Facility ; MLF）は、リニアック、3GeV-RCS (Rapid-Cycling Synchrotron)で加速された大強度陽子ビームを、3GeV 陽子ビーム輸送施設（3NBT）で輸送し、MLF 建家内に設置したグラファイトや水銀ターゲットに入射させて2次ビーム（ミュオン、中性子）を生成し、それらを各種実験装置に供給することで、物質科学、材料科学や生命科学に関する様々な実験・研究を行う施設である^{1)、2)}。

Fig.1-1 は MLF の鳥瞰図、Fig.1-2 は中性子源ステーション内の構造を示す。MLF 建家は長さ 146m、幅 70m、高さ 30m という規模の建家で、その長手方向に 2 つのターゲット装置と陽子ビーム輸送ラインがあり、3NBT を通じて陽子エネルギー 3GeV、1MW、25Hz のパルス状大強度陽子ビームが供給される。MLF に入射した陽子ビームのうち約 10%はミュオン生成のためのグラファイト標的通過時に失われ、残りが水銀ターゲットに入射する。陽子ビーム入射による核破砕反応によって発生した中性子は、水銀ターゲット上下に設置された 3 台の超臨界水素モデレータで減速され、中性子ビームライン下流の各中性子実験装置に供給される。モデレータの周囲には反射体や水冷遮蔽体が配置され、それらはヘリウムガスを封入したベッセル内に設置されている。その外周には中性子シャッター、生体遮蔽体、アウターライナー、前置き遮蔽体などの機器が配置され、中性子ターゲットステーションを形成している。水銀ターゲットやモデレータの配管経路は循環ループ形状になっており、核破砕反応により発生する熱を除去するために、ステーション外側で冷却された水銀や超臨界水素が一定の流量を保ちながら供給されている。またターゲット容器や水銀循環ポンプなどの水銀ターゲット機器は可動式の台車上に設置され、ターゲット機器の保守・交換作業は、台車をホットセル内の保守位置まで移動してから、インセルクレーンやパワーマニピュレータなどの遠隔操作機器を利用して行われる。RCS から MLF まで陽子ビームを約 330m 輸送する 3NBT は、平均 1 W/m 以下という厳しいビームロス条件で、ミュオン・中性子ターゲットに最適な陽子ビームプロファイルが得られるように陽子ビームを制御している。J-PARC では、中央制御室（CCR）を中心とした加速器の運転制御に、EPICS（Experimental Physics and Industrial Control System）をベースとした制御システムを採用しており、加速器施設の一部である 3NBT の運転制御システムも EPICS をベースとして構築されている。

核破砕中性子源やミュオン標的などを安全に効率よく運転するために、MLF は独立した全体制御システム（MLF General Control System ; MLF-GCS）^{3)、4)、5)、6)、7)、8)}を持ち、運転状況に応じた機器の監視操作やインターロックなどを運用している。MLF-GCS は、監視操作 PC（Personal Computer）から専用光リンクを介して、MLF 内の機器を独自に運転制御する一方で、J-PARC の CCR を介して、加速器や他実験施設と連動しながら MLF への安全で効率的なビーム運転を実現している。Fig. 1-3 に MLF - GCS の構成を示す。MLF-GCS は、統括制御・インターロック系、人員安全保護系（Personnel Protection System; PPS）共有サーバ系、ネットワーク（LAN）、タイミング配信系などの幾つかのサブシステムより構成される。統括制御系

及び PPS の主要機器は MELSECNET/H¹や FA リンクなど専用の光リンクで接続されており、複数台ある専用の監視操作 PC から光リンクを介して PLC (Programmable Logic Controller) を内蔵した多数の現場制御盤を制御することで、MLF 内の機器を監視操作している。MLF では、高線量となる場所を PPS インターロック区域に指定しているが、PPS は人員の被曝防護の観点から、このインターロック区域への入退域を制限するとともに、例えば運転員がインターロック区域から緊急脱出するなどの非常事態が起こった場合に、陽子ビームを緊急停止する。共有サーバは Web、データストレージ (DS) など各種サーバで構成され、7000 以上ある運転情報を収集・蓄積し、Web 画面など適切な形式に変換して配信している (本報告では、上述の専用監視操作 PC と共有サーバで構成される系統を、MLF-GCS の監視操作システムと定義する)。更に MLF - GCS は、使用目的に応じた 3 種類のネットワーク (制御系 LAN、館内系 LAN、J-LAN) や、陽子ビームの入射周期に連動したタイミング信号を配信する機器も運用している。

MLF の安全な運転制御を実現するために、MLF-GCS の監視操作 PC には、プラント制御などで十分な実績のある iFIX-SCADA²を基盤ソフトウェアとして、共有サーバもそれに適合した iHistorian³などのソフトウェアを各々インストールしている。MLF-GCS は、2008 年 5 月の最初の陽子ビーム入射から現在まで、加速器や実験装置と連動しながら MLF の安全な運転制御を実現し、iFIX をベースとした監視操作システムも十分に機能してきた。一方 MLF では、加速器からの陽子ビームパワーの段階的な増強 (最終的には 1MW) に対応すべく、水銀にヘリウムの微小気泡を注入するためのガス供給系や水銀循環設備統合監視系 (UHAM) の増設、気体廃棄物処理系の改造、ミュオン回転標的の導入などが適時進められている。実験装置も、ビーム運転開始当初の 5 台から年々増設され、2013 年 2 月には、中性子・ミュオン合わせて 22 台が稼働している。MLF ではターゲット関連機器や実験装置の増強・増設を、安定したビーム利用運転を維持しながら行う必要がある、これらを統括的に運転制御している MLF-GCS にも、利用運転の合間に一部 PC 機器やソフトウェアを必要に応じて変更・更新するなど、適時・適切な範囲で柔軟なメンテナンス性能が要求される。しかし OS やソフトウェアバージョン選択の自由度が小さい現行システムを長期的に維持するためには、全 PC を数年毎に一括更新することが必要で、これは MLF-GCS に要求される柔軟なメンテナンス性能とは矛盾する。

¹ MELSECNET/H とは、三菱電機製の光ネットワークで右回りと左回りの 2 重のリング状に最大 64 局 PLC を接続できる。この中で異常局が 1 か所あってもその前の局でループバックを行い生存局の通信が確保される。MELSECNET/H には全局が読書き可能な共有メモリ (リンクデバイス、リンクレジスタ) がある。共有メモリの書き込みアクセス方法であるが、PLC は管理局と子局とに別れ (制御室の PLC が管理局で、それ以外が子局)、管理局はトークンと呼ばれるパケットを送信する。子局はトークンを受信した時のみ共有メモリに書き込みができる。このため共有メモリの二重書き込みを防ぐことができる。

² SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) とは、産業制御システムの一種であり 1 つのサイト全体や地理的に分散したシステム群を集中的に監視制御するシステムを指す。制御のほとんどは遠方監視制御装置や PLC が自動的に行い、ホストの制御機能は監督的な介入や優先的なものに限られることが多く、リアルタイム性は必ずしも重要視されていない。なお iFIX は、GE インテリジェント・プラットフォームズが提供する SCADA 用アプリケーションセットを指す。

³ iHistorian は、GE インテリジェント・プラットフォームズが提供する高性能データ収集管理システムを指す。

そこで我々は、現行システムの優れた運転制御機能を維持しながらも、メンテナンス性能に優れた MLF-GCS の監視操作システムを新たに構築することにした。

本報告では、新監視操作システムの仕様調査、基盤及び付属ソフトウェアの選択と新システムの概念設計、更にはプロトタイプ機の設計・製作・稼働試験など、新システムの詳細仕様をほぼ確定するまでの経緯について報告する。

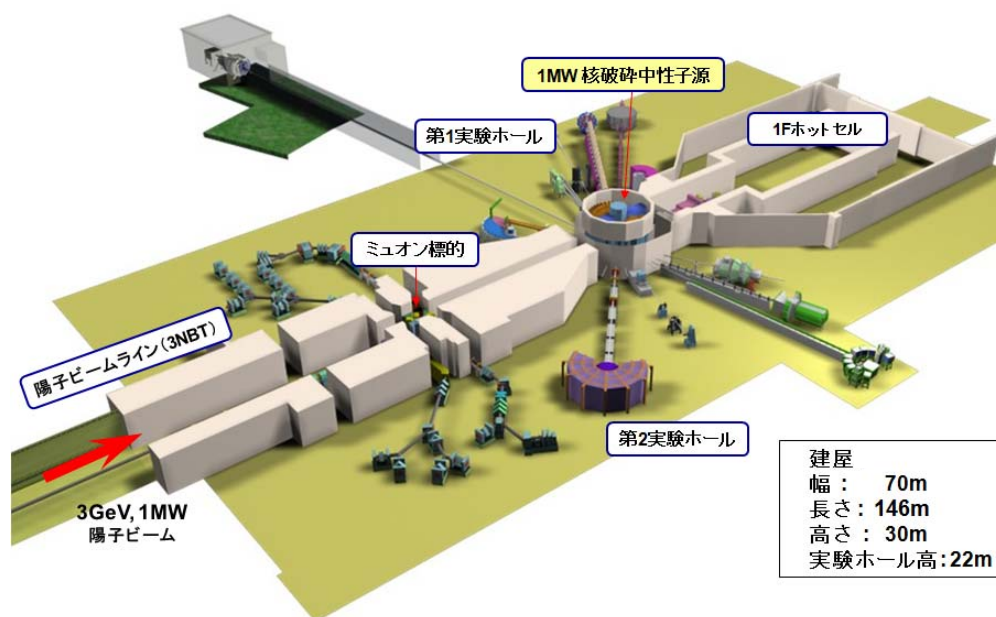


Fig.1-1: Bird's-eye view of Materials and Life Science Experimental Facility (MLF)

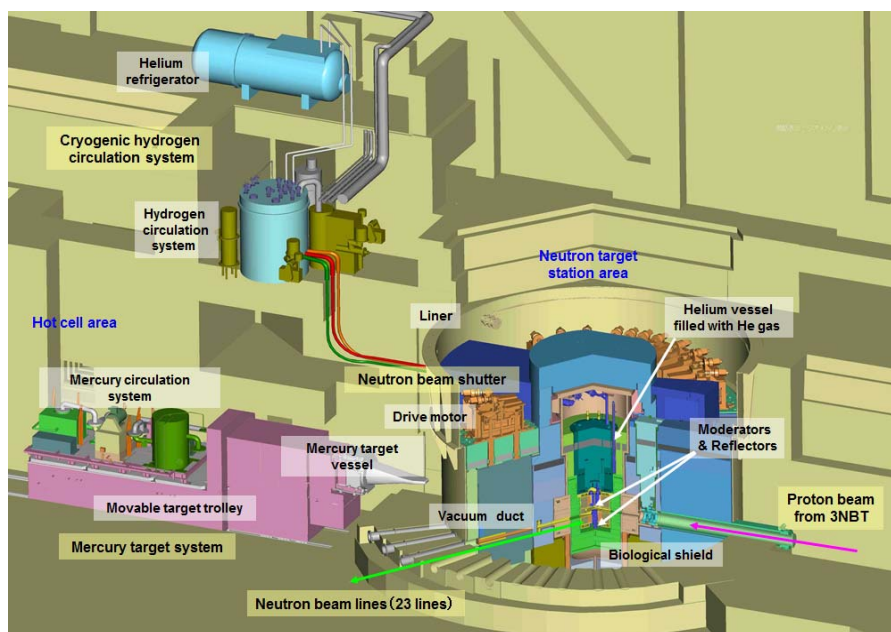


Fig. 1-2 Cut view of the Neutron Target Station (NTS) in the MLF of J-PARC

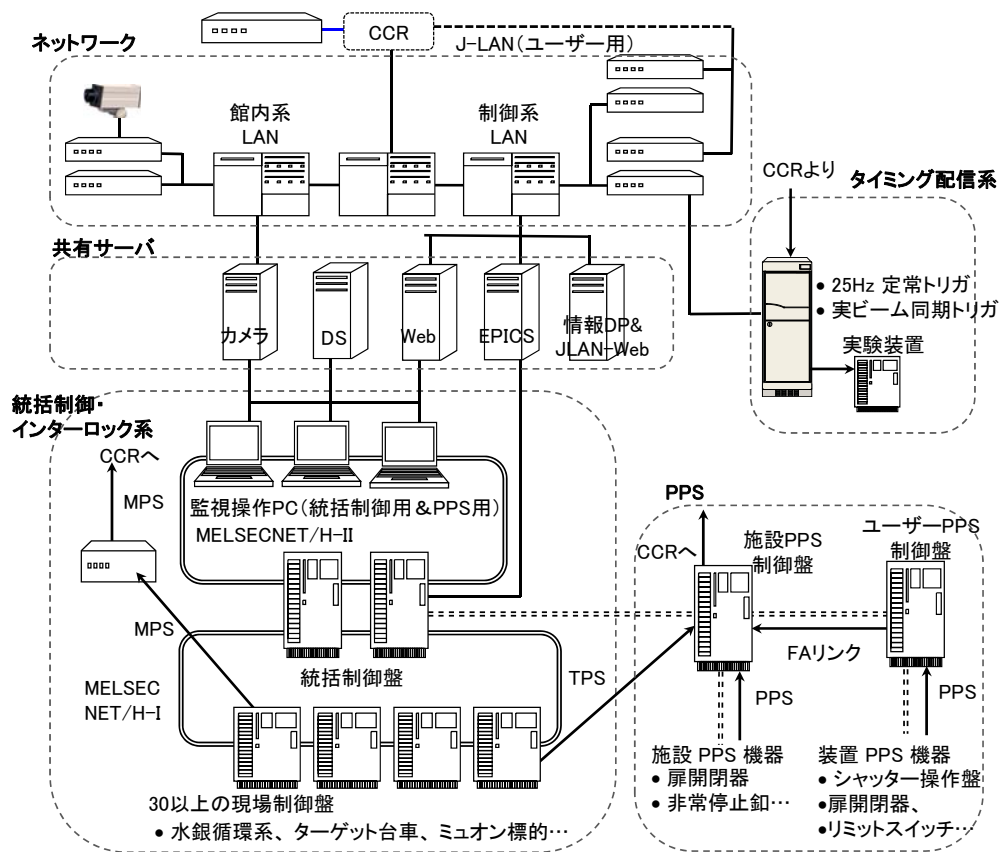


Fig. 1-3 Structure of MLF General Control System (GCS)

2. MLF 全体制御システムの監視操作システム

2.1 現行監視操作システムの概要

現在の MLF-GCS の監視操作システム概要を Fig. 2.1-1 に示す。本システムは、主に統括制御系と PPS を監視操作している。統括制御系は MLF-GCS の中枢で、MLF 全体を監視操作するとともに機器を保護するインターロックを制御している。統括制御系では、三菱電機製 PLC（以降、M-PLC と記す）ユニットを内蔵する統括制御盤や現場制御盤が、光二重ループの伝送路を持つ PLC ネットワーク（MELSECNET/H；以下、NET/H と略す）を介して接続されている。NET/H は、2 重化された統括制御盤と 30 以上の現場制御盤内を接続する経路（NET/H-I）と、統括制御盤と監視操作 PC を接続する経路（NET/H-II）を有する。PPS では、横河電機製 PLC（以降、FA-PLC と記す）を内蔵する専用制御盤や専用機器が、専用の光ネットワーク（FA リンク）を介して接続されている。NET/H-II には、統括制御系及び PPS の専用操作 PC も接続されており、統括制御盤から現場制御盤や PPS 制御盤を介して各設備機器を監視操作することで、施設全体の一括集中制御を実現している。この監視操作システムには、OS（Windows -XP）上に SCADA ソフトウェアとして iFIX-3.5 がインストールされており、ユーザインターフェース（各設備機器の監視・操作、警報やトレンド表示；以降 UI と記す）機能、PLC との通信、プロセスデータの入出力管理などを実行している。以下に、Fig. 2.1-1 の監視操作システムについて機能別に列挙する。

・ NET/H-I

統括制御盤と現場制御盤の M-PLC を接続し、各 PLC のメモリに割り振られた共通のリンクリレー（B）とリンクレジスタ（W）に記録する形で、プロセスデータの送受信を実行する。

・ NET/H-II

iFIX の PLC 通信機能を用いて、統括制御盤 PLC と監視操作 PC 間で、データの送受信を行う。監視操作 PC にはプロセスデータ入出力を管理するためのタグ構造のデータベース（DB）がインストールされている。iFIX-DB タグには、上述の共有リンクリレー（B）、リンクレジスタ（W）の他、PLC の内部デバイス（M,D デバイス）も登録しており、7000 以上のプロセスデータを約 1 秒周期で更新する。

・ 統括監視操作 PC

運転制御、警報、トレンドなど 130 以上ある制御画面を切り替えながら、施設全体の運転制御の実行に用いる。運転制御画面の種類は、設備を選択する「制御盤メニュー」、設備単体の監視操作を行う「設備制御」、及び施設全体に関わる系統の監視操作を行う「統括監視」画面に大別できる。

・ データストレージ（DS）サーバ

iFIX の DS ソフトウェア（iHistorian）がインストールされており、5 秒周期で iFIX-DB を読

み込み、容量 1TB の冗長化されたハードディスクにデータを保存している。

・ PPS 監視操作 PC

監視操作・警報など 6 つの制御画面を切り替えながら、NET/H-II と統括制御盤増設 PLC を介して、PPS 区域や機器の管理運用をしている。同 PC 上の iFIX - DB は、1000 以上の PPS 機器のプロセスデータを、1 秒周期で更新している。上述の DS サーバとは別に、同 PC は自作した DS プログラムをインストールしており、PPS 機器のデータを 1 秒周期で保存する。

・ Web サーバ

iFIX および iHistorian と連携してリアルタイムでデータ配信できる Real Time Information Portal (RTIP) を利用して、監視操作 PC 上の制御画面を Web 配信している。ただし RTIP はブラウザの種類やクライアント数の制限が厳しいため、制御画面をコピーして数 10 秒周期で Web 配信を行う方式も併用している。

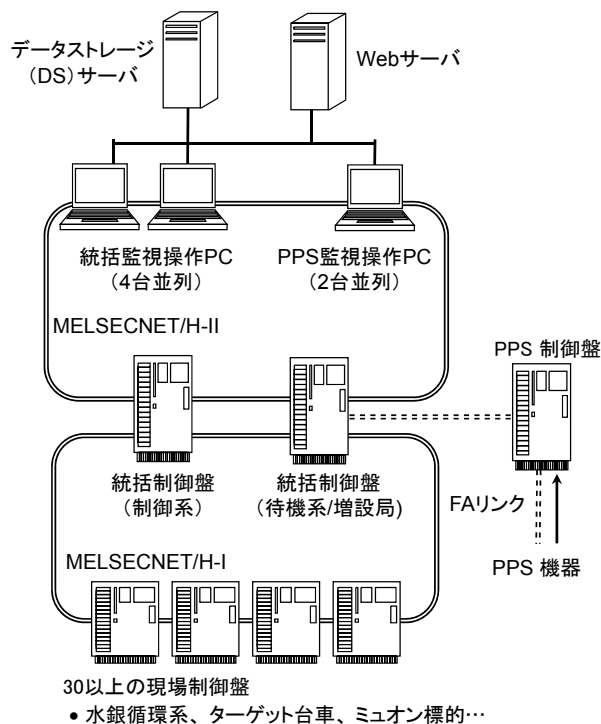


Fig. 2.1-1 Outline of present Monitor and Operation (M&O) system in MLF-GCS

2.2 メンテナンス上の問題

MLF では、ビーム利用運転と並行して、陽子ビームパワー増強のための線源機器の改造や実験装置の段階的な増設が進められている。従って MLF-GCS には、利用運転の合間に監視操作システムの一部 PC 機器やソフトウェアを必要に応じて変更・更新するなど、適時・適切な範囲で柔軟なメンテナンス性能が要求されている。しかし iFIX をベースとしたシステムは、メンテナンス性能の面で以下に示すような問題点があることがわかった。

- ・現在使用している SCADA ソフト (iFIX-3.5) や DS サーバ (iHistorian-2.0) は、Windows7 などの最新 OS 上では動作しない。このため故障などで一部の PC を交換する際には、インストールされた最新 OS をダウングレードして使用している。
- ・新旧バージョンの iFIX や iHistorian をインストールした PC を混在して使うことができない。
仮に DS サーバ (iHistorian) を最新バージョンに更新すると、iFIX をインストールした PC も全て最新バージョンに更新しなければならない。
- ・iFIX は使用可能な PC 台数、データ数、サーバにアクセスできるクライアント数などの制限が厳しい。システムの更新・拡張時には、その度にライセンスを購入する必要がある。

従って iFIX をベースとした監視操作システムを継続的に使用するためには全 PC を数年毎に一括更新することが前提となり、PC 本体、ソフトウェア、画面やデータの入換作業など、更新の度に多くの費用、労力、時間を要することになる。これでは MLF-GCS に要求されている柔軟なメンテナンス性能を実現できない。加えて、近年の OS や PC のアップグレードのスピードに iFIX 自身のバージョンアップが追従できているとは言い難く、iFIX-SCADA のサポート体制を不安視する意見も出ている。

このような現状を考慮し、PC 機器を更新する時期に差し掛かったことも踏まえて、2013 年度ビーム利用運転の長期シャットダウン期間にシステムの大幅な更新をすることを前提に、我々は新監視操作システムの設計を行った。

3. 新しい監視操作システムの検討

3.1 新しい監視操作システムの仕様調査

新監視操作システムには、現在の運転制御機能を維持しながらも、適時・適切な範囲で柔軟なメンテナンス性能が要求される。以下に、主な要求項目を列挙する（Fig. 2.1-1 参照）。

- ・統括制御盤 PLC プログラムを変更することなく、NET/H の共有リンクリレー（B）、リンクレジスタ（W）、PLC の内部デバイス（M、D デバイス）を用いた PLC と監視操作 PC 間の通信仕様を維持するとともに、7000 以上のプロセスデータを約 1 秒周期で更新できること。
- ・運転操作、警報、トレンドなど 130 以上ある制御画面を切り替えながら、施設全体の運転制御を実行する。原則として、制御画面など現行システムのユーザーインターフェース（UI）機能を踏襲するとともに、画面の作成や保守管理が容易にできること。
- ・OS やバージョンの違いの影響の少ないソフトウェアを選択することで、PC 機器を適時・適切に更新できること。
- ・大型実験施設での使用実績があり、中長期的なサポートを受けることが可能なソフトウェアを用いること。また DS や Web サーバは、データ数、クライアント数、ブラウザの種類などの制限を受けない汎用ソフトウェアが望ましい。

J-PARC では、CCR を中心とした加速器制御システムとして EPICS を採用しており、MLF でも CCR との情報授受を行う IOC サーバとして採用している。また 3NBT でも、EPICS をベースとした制御システムを運用しており、ターゲット関連装置の増強や実験装置の増設など MLF-GCS の制御範囲や役割が年々増大・複雑化する状況で、限られた人員で運用の合理化を図る観点からも、可能な限り両制御システムの保守管理を共有化することが望ましい。従って J-PARC 内で蓄えられてきた運転実績、開発ソフトウェアの蓄積、サポート体制などが有効に活用できる利点を考慮し、我々は EPICS を新システムの基盤ソフトウェアと位置づけ、データ入出力、UI、DS、Web 配信などの機能について検討・評価を行った。

3.1.1 データ入出力ソフトウェアの検討

はじめに、J-PARC で使用している EPICS が新システムのデータ入出力モジュールに利用できるかを検討した。J-PARC の EPICS は加速器制御用に開発されたためアクセス速度重視の設計になっており、M-PLC に Ethernet 経由でアクセスする。アクセス可能なデバイスは D デバイスのみで、144 ワード単位で連続したエリアのみアクセスが可能である。一方で、MLF-GCS の M-PLC は、Fig. 2.1-1 に示すように、NET/H 経由で iFIX から PLC の 4 種類（B,W,D,M）のデバイスにアクセスしており、そのアドレスも点在している。また統括制御盤 PLC は 2 重系設定（制御系/待機系）になっており、運転状況に応じて制御系と待機系が切り替わる。従っ

て J-PARC の EPICS を利用する場合、NET/H の 4 種類のデバイスを、新たに増設した PLC の D デバイスに転送する必要がある。このプログラム開発には労力を要する上に、新たな転送アドレス管理も必要になる。現在安定に動作している PLC プログラムの変更は避けたいので、そのままの導入は難しいと判断した。

次に我々は、ドイツ軌道放射光施設 BESSY で使用されている EPICS OPC に着目した。この EPICS OPC は OPC サーバ⁴とアクセスできる機能を持つ。従って M-PLC にアクセスできる OPC サーバと組み合わせると、M-PLC のデータを、そのまま EPICS まで取り込める。調査の結果、Takebishi 製 OPC（以下、TK-OPC）サーバであれば、NET/H 経由で M-PLC の 4 種類のデバイス（B,W,M,D）全てにアクセスできること、統括制御 PLC の 2 重系設定（制御系/待機系）にも対応できることが分かったため、この OPC サーバを採用することにした。

3.1.2 データ入出力機能の評価

現行システムは、M-PLC の 4 種類のデバイス（B,W,M,D）のアドレスに登録された 7000 以上のプロセスデータを、約 1 秒周期で更新している。新システムで PLC と EPICS 間の通信を実現するには、PLC のプロセスデータを TK-OPC のデータベース（DB）形式で取り込んだ後、EPICS レコード形式に変換することになり、その 2 段階の過程で現行システム同等の通信速度が要求される。我々は、EPICS と TK-OPC をインストールした試験用 PC を用いて、iFIX-DB から TK-OPC-DB 及び EPICS レコード定義ファイルの雛形を作成し、通信性能を評価した。

① TK-OPC 用タグの作成

EPICS レコード定義ファイルの作成のために、現在の iFIX-DB 形式でタグ登録されたデータを、TK-OPC-DB 形式に変換する必要がある。そのために両 DB に登録されたデータが CSV ファイルへ変換できる機能を利用し、まず iFIX-DB を CSV ファイルに変換し、この CSV ファイルを TK-OPC 用の CSV ファイルに変更してから、TK-OPC-DB に読み込ませた (Fig. 3.1.2-1)。CSV ファイル変更過程では、EXCEL の Visual-Basic マクロを作成して、セルの入れ替え処理を実施した。さらにデータ書式の違い（デバイス名称⇒番号指定、16 進数⇒10 進数、ビット、ワード、ロング⇒番号指定）を変更するプログラムを作成した。また iFIX-DB では、アナログ入力（AI）、デジタル入力（DI）、デジタル出力（DO）では作成する項目が異なるので、各々 EXCEL のシート別に作成し、最後に合成する形で TK-OPC タグデータを作成した。

② EPICS レコード定義ファイルの作成

AI、DI、DO 別に 1 ブロックのプロセス変数（PV）データの雛形を作成し、必要ブロック数をコピーしておき、PV レコードナンバーのみを書き換えた。さらに上記の EXCEL ファイルからタグ名称のみコピーするプログラムを Visual Basic で作成した。作成された EPICS レコ

⁴ OPC（OLE for Process Control）は、Microsoft Windows 向けに開発された OLE、COM、DCOM を利用した標準インターフェース仕様であり、プロセス制御機器間でのリアルタイム通信を行うための標準規格である。OPC サーバ（OPC を実装したサーバソフトウェア）は、様々なソフトウェアパッケージがプロセス制御機器（PLC など）にアクセスする方法を提供する。

ード定義ファイルの例を Fig. 3.1.2-2 に示す。

③ TK-OPC+EPICS の動作試験

TK-OPC サーバ、EPICS 共に 0.5 秒周期で動作させた。既設の AI、DI と比較し、同一なことを確認し、更にタイムアウト等のエラーが発生していないので正常動作していると判断した。

iFIX-Tag-Data

タグNo	説明文		デバイス種類、アドレス									
00_6523_DI_0001	「リモート」選択中	MEL	Device00:B:9E0	AUTO	ON	1	NO	OPEN	CLOSE	ENABLE		
00_6523_DI_0002	「リモート」選択許可	MEL	Device00:B:9E1	AUTO	ON	1	NO	OPEN	CLOSE	ENABLE		
00_6523_DI_0003	サージタンク入口温度高高高	MEL	Device00:M:2515	AUTO	ON	1	NO	OPEN	CLOSE	ENABLE		
00_6523_DI_0004	サージタンク入口温度高高	MEL	Device00:M:2516	AUTO	ON	1	NO	OPEN	CLOSE	ENABLE		
00_6523_DI_0005	ポンプ入口水銀圧力高高	MEL	Device00:M:2517	AUTO	ON	1	NO	OPEN	CLOSE	ENABLE		
00_6523_DI_0006	サージタンク気相部圧力高高	MEL	Device00:M:2518	AUTO	ON	1	NO	OPEN	CLOSE	ENABLE		
00_6523_DI_0007	ターゲッ容器出口水銀圧力高高	MEL	Device00:M:2519	AUTO	ON	1	NO	OPEN	CLOSE	ENABLE		
00_6523_DI_0008	水銀流量低低	MEL	Device00:M:2520	AUTO	ON	1	NO	OPEN	CLOSE	ENABLE		
00_6523_DI_0009	水銀流量低低低	MEL	Device00:M:2521	AUTO	ON	1	NO	OPEN	CLOSE	ENABLE		

TK-OPC-Tag-Data

00_6523_DI_0001	「リモート」選択中	1	2	0	1	0	0	0	4	2528	0	1
00_6523_DI_0002	「リモート」選択許可	1	2	0	1	0	0	0	4	2529	0	1
00_6523_DI_0003	サージタンク入口温度高高高	1	2	0	1	0	0	0	3	2515	0	1
00_6523_DI_0004	サージタンク入口温度高高	1	2	0	1	0	0	0	3	2516	0	1
00_6523_DI_0005	ポンプ入口水銀圧力高高	1	2	0	1	0	0	0	3	2517	0	1
00_6523_DI_0006	サージタンク気相部圧力高高	1	2	0	1	0	0	0	3	2518	0	1
00_6523_DI_0007	ターゲッ容器出口水銀圧力	1	2	0	1	0	0	0	3	2519	0	1
00_6523_DI_0008	水銀流量低低	1	2	0	1	0	0	0	3	2520	0	1
00_6523_DI_0009	水銀流量低低低	1	2	0	1	0	0	0	3	2521	0	1

Fig. 3.1.2-1 Conversion process from iFIX-tag data to TK-OPC-tag-data in CSV file format

```

record(bi,"MLF:00_6523_DI_0001"){
    field(DESC,"「リモート」選択中")
    field(SCAN,"I/O Intr")
    field(DTYP,"opc")
    field(INP,"@EzSoc_Device1.00_6523_DI_0001")
    field(TSE,"0")
    # TSE=0 => EPICSTIME=SYSTEMTIME
    # TSE=-2 => EPICSTIME=OPC-SERVER-TIME
    # PINI=0 UDF INVALID until OPC server updates value
    # PINI=1 value will be read and UDF gets VALID
    field(PINI,"1")
    field(MASK,"0x0001")
    field(ZNAM,"0")
    field(ONAM,"1")
}

```

Fig. 3.1.2-2 Example of program component for making EPICS record DB file

3.1.3 ユーザーインターフェース機能

MLF-GCS では、運転操作、警報、トレンドなど 130 以上ある画面を切り替えながら施設全体を運転制御しており、ユーザーインターフェース (UI) 機能選択には全制御画面の作成と保守管理が容易にできることが重要である。iFIX の制御画面作成ソフト (VBA) は、画面の作成は容易で、スイッチ、メータ等のソフト上の付属部品も充実しており、MLF のような複雑で多様な大型施設の制御画面作成に適している。我々は、iFIX の VBA と同等の UI 機能を維持しながら、EPICS との連動使用に実績のある 4 種類の画面作成ソフトの検討を行った。以下に検討結果を示す。

- EDM、MEDM は EPICS 用画面作成ソフトで、簡単な画面を手軽に作成することができる。しかし画面作成機能は充実していると言い難く、画面切替機能や日本語対応も十分でない。従って MLF のような複雑で多様な施設の制御画面作成には不向きと判断した。
- Java は Web サーバで広く使われているプログラミング言語、及び開発環境の総称を指す。多くの Web サイトが、Java Servlet や JSP (JavaServer Pages) などの Java の技術を使って、動的にページを生成する Web 画面を構築している。Java で制御画面を作成するには、プログラミング技術に関する相応の知識と技術力が必要で、130 以上ある制御画面の作成や保守管理に労力や時間を要するため、導入は難しいと判断した。
- LabVIEW は、計測データ収集や制御ツールとして汎用的なソフトウェアで、企業や大学の多くの研究室で使用されている。画面作成も比較的容易で、スイッチ、メータ、グラフ等の付属部品も充実しており、Windows や Linux など様々な OS 上で動作する。しかしながら、冷却水循環系やターゲット台車操作など中性子源の運転監視に使用する典型的な画面を LabVIEW で試作した結果、配管・開閉弁などの色の変更による状態切替えやターゲット台車のアニメーションによる移動処理などが複雑になり、画面によっては作成に相応の技術力を要することがわかった。更に切り替えた画面をメモリ上から消去する機能を持たないため、全画面を常にバックグラウンドで動作させる必要があり、130 以上ある MLF の制御画面での使用は難しいと判断した。
- CSS (Control System Studio) は、米国オークリッジ国立研究所の SNS で開発された EPICS 対応の画面作成ソフトで、複雑な制御画面が必要となる大規模制御システムにも対応可能である。iFIX 同様に制御画面の作成が容易で、付属部品や画面の切替え機能も充実している。また Windows や Linux など様々な OS 上で動作し、ライセンスによるクライアント PC 台数の制限も無い。冷却水循環系やターゲット台車操作などの画面を CSS で試作した結果、配管・開閉弁などの状態切替えやターゲット台車の移動処理なども、比較的容易にできることがわかった。

以上の検討結果から、我々は CSS を採用することとした。

3.1.4 データストレージ機能

現行システムの DS サーバである iHistorian は、iFIX-DB から 5 秒周期で 6000 以上のデータを冗長化されたハードディスクに保存している。新システムの DS サーバは、EIPCS と連動使用の実績があり、OS やデータ数などで制限を受けない汎用ソフトウェアが望ましい。3NBT 制御システムとの保守管理の共有化の観点から、我々は、3NBT で使用実績のある PostgreSQL を採用することにした。

3.1.5 Web 配信機能

新システムでは、現行システムで同様に、監視操作 PC 上の制御画面の一部を制御系 LAN に Web 配信する。CSS は WebOPI という Web 配信のための付属機能を持つ。WebOPI は、ブラウザの種類やクライアント数の制限がなく、CSS で作成した監視操作システム PC 上の制御画面をそのまま流用して、Web 配信ができる。我々は、実際に Apache Tomcat (Java Servlet や JSP を実行するためのサーブレットコンテナ) を試験用 PC にインストールし、CSS で模擬的な制御画面を作成し (Fig. 3.1.5-1)、別の PC から Internet Explorer や Chrome 等の Web ブラウザを使って画面表示ができることを確認した。

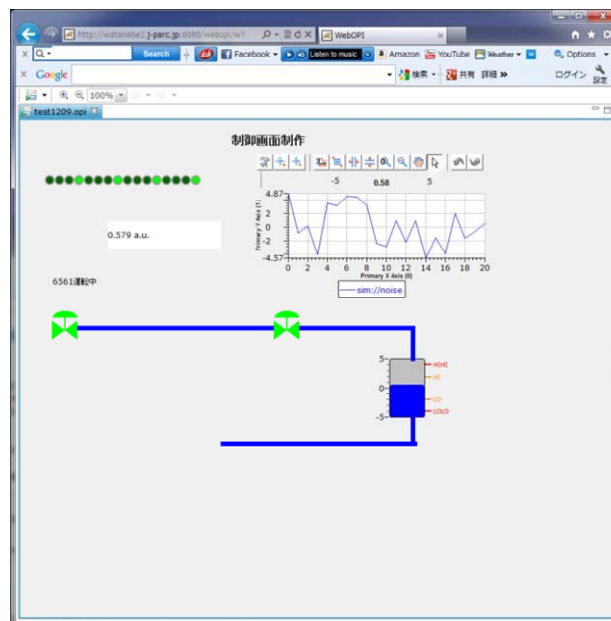


Fig. 3.1.5-1 Example of test window by CSS for checking Web OPI function

3.2 新しい監視操作システムの概要

Fig. 3.2-1 に、MLF-GCS の新監視操作システム構成案を示す。NET/H は 2 重化された統括制御盤と 30 以上の現場制御盤内を接続する NET/H-I と、統括制御盤と OPC サーバ用 PC を接続する NET/H-II に分けられる。NET/H-II には、統括制御及び PPS の専用 OPC サーバが接続され、OPC サーバに Ethernet で接続された監視操作 PC から、各機器を監視操作する。OPC サーバには PLC との通信のための TK-OPC と EPICS が、監視操作 PC には CCS が各々インス

トールされている。Fig. 3.2-1 では、iFIX の代わりに EPICS を基盤ソフトウェアとして使用することで、PC やソフトウェアの適時・適切な範囲でのアップグレードが可能になる一方で、PLC との通信や UI 機能など iFIX の優れた運転制御機能を維持できるように最大限考慮した。以下に、新システムの機能構成について列挙する。

- NET/H-II では、PLC の 4 種類 (B,W,D,M) のデバイスから TK-OPC データベース (DB) に取り込んだプロセスデータを、EPICS レコードに変換することで、PLC と EPICS 間でデータ通信を実行する。
- CSS の機能を用いて、統括制御用監視操作 PC から、130 以上ある制御画面を切り替えながら、施設全体の運転制御を実行する。OS は Windows や Linux を状況に応じて選択する。
- LinuxPC に PostgreSQL をインストールした DS サーバは、5 秒周期で冗長化されたハードディスクにデータを保存するとともに、保存したデータを CSS のトレンド画面で表示する。
- 現行システムは、PPS 機器のデータを 1 秒周期で保存する DS 機能を DS サーバとは別に持っている。この PPS-DS 機能は新システムでも継続する。
- WebOPI 機能を利用し、CSS で作成した制御画面を流用して Web サーバで配信する。

Table 3.2-1 に、主にメンテナンス性能に関する新旧システムの対比を示す。Table 3.2-1 からわかるように、新システムに移行する時は画面作成やデータの移植作業などに手間がかかること、しばらくは新旧両システムを並列に稼働させることなど、システムの運用に様々な配慮が必要となる。しかしながら完全移行後は、更新時の労力や費用が軽減され、サポートを受けやすいなど大きなメリットが期待できる。

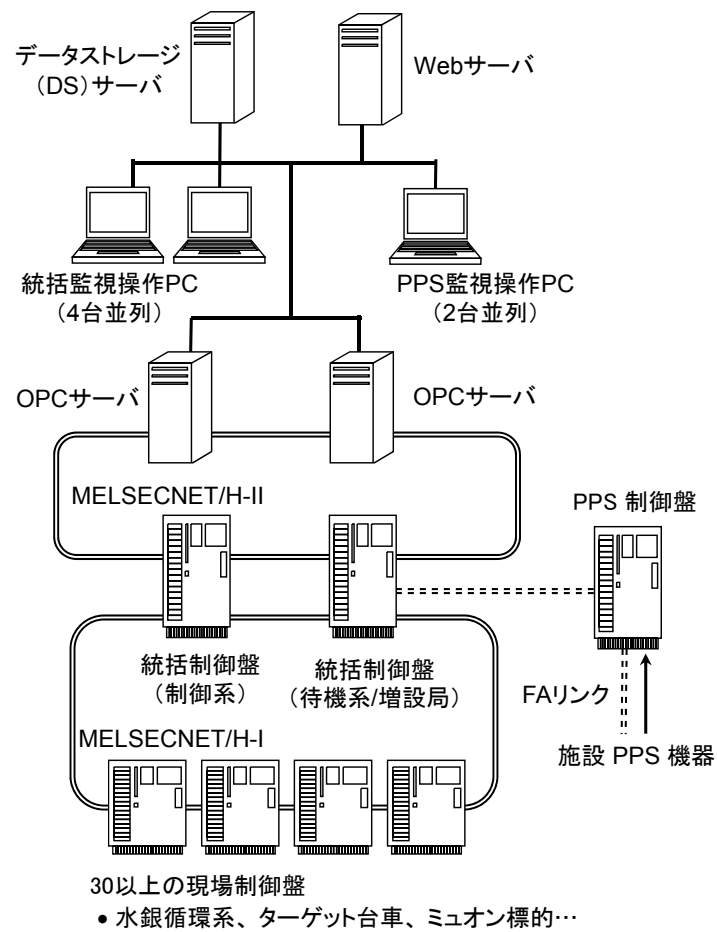


Fig. 3.2-1 Outline of new M&O system in MLF-GCS

Table 3.2-1: Comparison table on maintenance functions between present and new M&O systems

	現行監視操作システム		新監視操作システム	
システム構成	iFIX-SCADA (制御画面、PLC 通信)、 iHistorian (データストレージ)		EPICS+TK-OPC (PLC 通信)、 CSS (制御画面)、PostgreSQL (データストレージ)	
データ転送 通信時間	○	iFIX データベース： ⇒1 秒周期で、7000 点のデータ入出力の実績有。	△	OPC データベース+EPICS レコード： ⇒1 秒周期で、7000 点のデータ入出力に対応可。
制御画面	○	大型プラント制御で実績有。約 130 の画面を切り替えながら、MLF の複雑な運転制御を実現。画面作成も容易。	○	加速器制御で実績有。画面作成に CSS を導入することで、iFIX-SCADA と同レベルの運転制御画面（画面切替機能、警報、運転履歴表示）が作成可能。画面作成も容易。
保守管理性	×	柔軟性に乏しく利用者が保守や改良しにくい。iFIX でも異なるバージョンだと協調運用は困難。	○	異なる OS やバージョンでも協調運用は可能。部分的な適時更新も可能で、保守管理や機器更新が容易。
更新性	×	部分的な適時更新は困難。7～8 年毎にソフト・ハードの総入れ換えが必要で、人件費を含めると数千万円かかる。	○	移行時には iFIX 更新と同程度の費用（数千万円）がかかるが、移行後は、機器単位で適時に更新するため、大がかりな更新はない。またオープンソースを使用するため、ソフトウェア代も殆ど発生しない。
移行時の 手間	○	ソフト・ハードを総入れ換えした後の画面やデータの移植は容易。DS サーバも現在の iHistorian 書式で使い続けることができる。	×	移行時に、画面やデータの移植に手間がかかる。移行期間中の 1 年間は、新旧システムを並列に稼働させるなど、制御システムの運用に様々な配慮が必要。
技術 サポート	△	性能自体は良いが、保守やサポートの面で問題あり。iFIX の OS に対する更新が遅く、将来的なサポートが不安。iFIX のサポートが無くなると、全システムを更新することになる	○	J-PARC の加速器制御で実績があるため、技術的サポートの継続性が期待でき、保守やサポート面で優れている。

4. プロトタイプ機製作と開発スケジュール

我々は、EPICS を新システムの基盤ソフトウェアと位置づけ、EPICS、TK-OPC サーバ、CSS などを PC に試験的にインストールし、個別機能の評価を進め、Fig. 3.2-1 で示した案が新システム構成に適しているとの結論に達した。しかし最終的な仕様を固めるためには、統括制御 PLC との実データの送受信を行い、現行システムと同等の性能があるか、想定外の不具合がないか、現行システムとの並列運用が可能かなどを検証する必要がある。そこで新システムのプロトタイプ機を製作して、稼働試験を実施した。

4.1 統括制御プロトタイプ機の製作

Fig. 4.1-1 に製作したプロトタイプ機の機能構成を示す。プロトタイプ機は、NET/H-II に接続された OPC サーバ用 Windows-PC と、Ethernet で OPC サーバに接続された CSS/DS 用 Linux-PC で構成した。OPC サーバ用 PC には、TK-OPC サーバ、EPICS OPC Device ソフトウェアが、CSS/DS 用 PC には CSS、PostgreSQL、EPICS Base、Archive Engine が、各々インストールされている。プロトタイプ機には、制御対象設備を絞って、データ入出力、画面表示、データ蓄積までの新システムに要求される一通りの機能を持たせた。更に新システムの性能を、並列運転中の現行システムと比較することで評価した。以下、Fig. 4.1-1 に基づいてプロトタイプ機の機能構成について列挙する。

- ・画面を機能別に分類し、「メニュー」、「統括監視」、「設備単体」、「警報・注意報」、「警報履歴」、及び「トレンド」の 6 種類の画面を作成する。「統括監視」画面は、ターゲット台車などホットセル内の駆動機器の状態を監視する「機器保守全体監視」を、「設備単体」画面は「再結合器」を対象とし、対象設備・操作機器の監視制御内容（機器状態、プロセス値）を表示した。
- ・警報やトレンド表示、DS サーバでなどで扱うプロセスデータ範囲も対象設備に限定した。「警報画面」はプロセス値の異常または機器・装置の異常項目を画面に表示する。「警報履歴画面」は、警報履歴を時系列順に表示し、1 分周期で更新した。「トレンド画面」は、CSS Data Browser を利用してプロセス値のトレンド表示を行った。
- ・プロセスデータ入出力機能（OPC サーバ、EPICS OPC Device support）は、PLC より 0.5 秒サンプリング周期で OPC サーバに収集したアナログ・デジタルデータを、0.5 秒サンプリング周期で TK-OPC-DB から EPICS レコードに書き込む役割と、制御画面からの制御信号を PLC に出力する役割を担う。
- ・DS サーバは、EPICS レコードに書き込まれたプロセスデータのアナログ・デジタル値を、CSS の Archive Engine を利用して、PostgreSQL 形式で保存する。保存では、前回値と最新値に差があるデータのみ周期的（アナログ値が 5 秒、デジタル値が 1 秒サンプリング）に保存

する方式と、全データを 30 秒周期で保存する方式を併用した。

プロトタイプ機の製作後、データ入出力、画面表示などに関する様々な試験データを細部に渡り評価した。DS については、全てのプロセスデータ（約 6500）を登録して PostgreSQL 形式で書き込むことで、約 40kbps のデータ通信速度、約 20MB/hour のハードディスク使用量などのより現状に即した実測値を得た。また 2 か月以上、現行システムと並列運転を行い、プロトタイプ機は長期間安定に動作することを確認した。このようなプロトタイプ機の評価で得た知見は、新監視操作システム実機の詳細設計に反映させた。

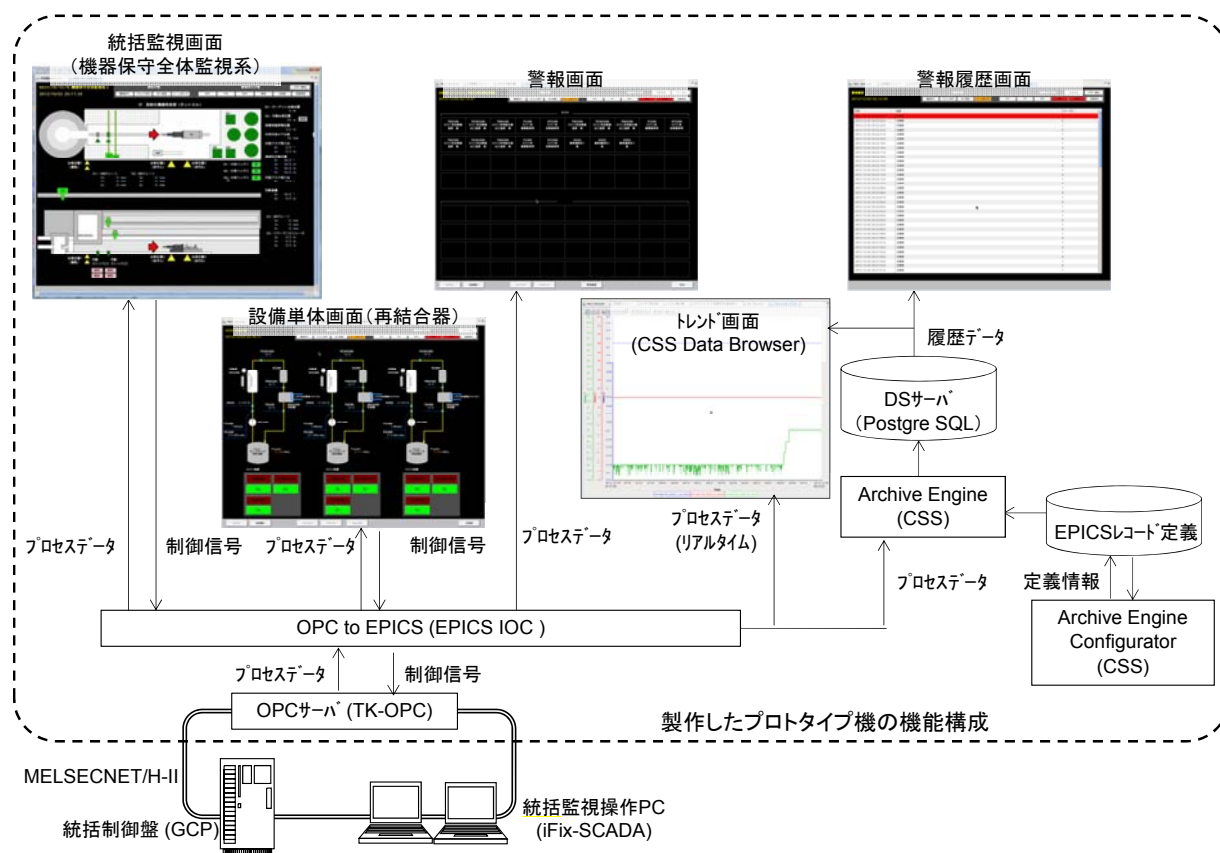


Fig. 4.1-1 Function structure of new M&O system for integral operation in MLF-GCS

4.2 PPS プロトタイプ機の製作

我々は、TK-OPC サーバ、EPICS-IOC、CSS をインストールした Windows-PC を、Fig. 2.1-1 の統括制御盤増設局 PLC に Ethernet で接続する形で PPS プロトタイプ機を構築した。製作したプロトタイプ機の機能構成を Fig. 4.2-1 に示す。PPS プロトタイプ機の PLC と CSS 間のプロセスデータの通信は、統括制御プロトタイプ機と同じ手法を用いている。iFIX をベースとした現行システムは、PLC と 1000 点以上のデータを 1 秒周期で更新しながら、6 つの画面（施設 PPS 管理、2 次ビームライン PPS 管理、情報表示 1 及び 2、メンテナンス、PPS 発報表示）

を駆使して、MLF-PPS 全体を管理運用している。PPS プロトタイプ機的设计では、PPS の DS 機能追加と多少の改造をした後で、新システム実機としてそのまま使用することを考慮し、制御画面数、データ数、データ更新頻度など、現行システムの制御対象範囲・機能をほぼ再現できるようにした。

製作した PPS プロトタイプ機は、統括制御盤増設局 PLC を介して NET/H-II に接続した (Fig. 4.2-1)。その上で、プロトタイプ機と現行システムの PPS 監視操作画面上的プロセス表示値や操作信号の挙動を一つずつ比較しながら、実データに対するプロトタイプ機の監視・操作機能の試験を実施した。実際にプロトタイプ機の画面上で挙動を確認した信号数は約 1400 に及ぶ (施設 PPS 管理 : 148、2 次ビームライン PPS 管理 : 416、情報表示 1 : 201、情報表示 2 : 367、メンテナンス : 160、PPS 発報状態表示 : 107)。ただし PPS の場合、今回の試験は施設の利用運転期間中に行わざるを得なかったため、施設や加速器の運転に影響を与える操作については、一部は模擬信号を発生させて試験を実施した。試験終了後は、現行システムと 2 か月以上の並列運転を通じて、その長期安定動作を実証した。

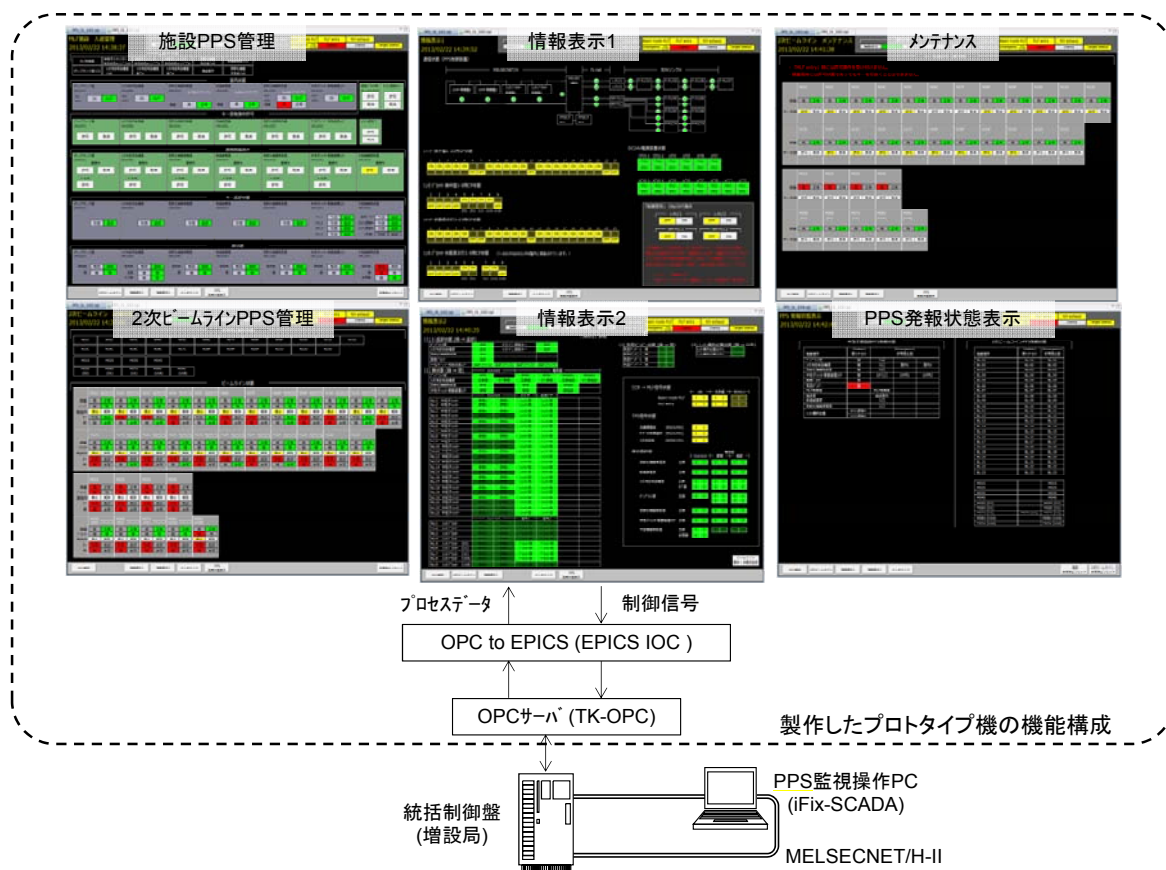


Fig. 4.2-1 Function structure of new M&O system for PPS in MLF-GCS

4.3 開発スケジュール

Table 4.3-1 に、MLF-GCS の新しい監視操作システムの開発スケジュールについて示す。2013 年 2 月時点では、新監視操作システムの詳細設計までは、ほぼ終了している。新監視操作システム導入後、暫くは新旧両システムの並列運転を継続して、2014 年度以降に新システムへの完全移行を目指している。

Table 4.3-1: Development schedule of New M&O system in MLF-GCS

年度	開発・製作項目
2011	●新監視操作システム仕様調査・検討 ・画面作成、PLC 通信、データストレージ (DS)、メンテナンス性、サポートなどを考慮
2012	●新監視操作システムの詳細仕様の調査・試験 ・ EPICS や OPC をインストールして、OS やソフトウェアバージョンの違いによる操作性を調査 ・ PLC⇔CSS 間の OPC-DB や PV データファイルの雛形を作成し、通信機能（速度・容量）の調査 ・ CSS の Web-OPI サンプル画面作成と配信機能の評価 ●統括制御プロトタイプ機の製作 ・ 基盤ソフトウェア（CSS, EPICS, TK-OPC, Postgre-SQL）をインストールしたプロトタイプ機試作。実機の中の数画面（運転監視、警報、トレンド）を試作、現行システムに接続して稼働試験を実行。 ●PPS プロトタイプ機の製作 ・ 基盤ソフトウェア（CSS, EPICS, TK-OPC）をインストールしたプロトタイプ機を 1 台試作。 ●新監視操作システムの仕様確定
2013	●新統括監視操作システムの製作 ・ 7000 以上の iFIX-DB タグ、約 130 の iFIX-SCADA 制御画面、及び Web 画面を全て新システムに移行 ・ 過去数年の運転データ（iHistorian 形式）を、新 DS（PostgreSQL 形式）に移植 ●新 PPS 監視操作システムの製作 ・ PPS プロトタイプ機に PPS 独自の DS 導入→そのまま新 PPS 監視操作システム実機に移行 ・ 先行機ソフトウェアを複製する形で、2 台目を導入。
2014 以降	●現行システムと新システムの並列運用を継続しながら、時機を見て新システムに完全移行。

5. 総括

iFIX をベースとした現在の MLF-GCS の監視操作システムは、加速器や実験装置と連動しながら MLF の安全なビーム利用運転に、十分にその役割を果たしてきたが、OS などの選択の自由度が小さく、システムの部分的な修理や交換時に柔軟な対応ができない欠点があったので、メンテナンス性能を重視した新システムの検討を行った。本検討では、J-PARC 内での EPICS の運転実績やサポート体制が充実していることを考慮し、これを新システムの基盤ソフトウェアと位置づけた。それに基づいて、データ入出力、UI、DS、Web 配信など個別機能に関するソフトウェア選定、試験ツール開発、及び性能評価を行った。その結果、次期監視操作システムには、EPICS、TK-OPC、CSS、PostgreSQL、WebOPI を搭載することを決定し、概念設計をまとめた。更に統括制御系と PPS プロトタイプ機を各々製作し、現行システムと並列に稼働させることで、PLC との通信速度、画面表示機能、DS サーバ取込速度・容量、長期安定性など、実データによる具体的な性能評価を実施した。特に通信速度や DS サーバ機能については、全てのプロセスデータを登録して現状に即した条件で試験を行い、現行システムとほぼ同程度の性能を得られることまで確認した。一方 PPS プロトタイプ機に関しては、そのまま実機として使用することを考慮して、PPS 独自の DS を除く現行システムの運転制御機能をほぼ再現できるところまで作り込んだ。今後は、2013 年度に新しい監視操作システム実機を導入し、暫くは新旧両システムの並列運転を継続して、2014 年度以降に新システムへの完全移行を目指す計画である。

今回設計した新システムにおいて、PLC、TK-OPC、EPICS、CSS というソフトウェアの連動運用では、通信時のタイムラグや TK-OPC-DB と EPICS レコード定義ファイルという大規模設定ファイルが 2 種類必要なことを考えると、データ入出力過程をより単純化することが望ましい。TK-OPC サーバのため Windows-PC が 1 台必要なことも、メンテナンス上の短所になる。将来的な方向性として、我々は高エネルギー加速器研究機構で開発している NET-Dev という EPICS から Ethernet 経由で M-PLC の 4 種類のデバイスに直接アクセスできるモジュールの使用を検討している。現時点では、NET-Dev が MLF-GCS の安定動作に与える影響の評価や、統括制御 PLC の 2 重系設定対応のためのプログラム改造など、まだ検討が不十分であるために、この方式の採用を見送った。しかし TK-OPC から NET-Dev への移行自体は、それほど難しくないので、引き続き検討する。

謝辞

MLF-GCS の新しい監視操作システムの仕様調査と概念・詳細設計では、中性子源セクション員や加速器の制御グループ員を始めとする J-PARC センターの関係スタッフの皆様に様々な協力を仰ぎました。またプロトタイプ機の設計や試作は、株式会社 日立情報制御ソリューションズや新日鉄住金ソリューションズ株式会社等の方々の協力を得て行いました。多大なるご協力を頂いた関係者の皆様に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Ikeda, Y., Current Status of 1 MW pulse spallation neutron source (JSNS) of J-PARC, J. Nucl. Materials, 343, 2005, pp.7-13
- 2) Neutron Source Section, Materials and Life Science Divisions, Technical design report of spallation neutron source facility in J-PARC, JAEA-Technology 2011-035, 2012.
- 3) Sakai, K. et al., Design, Construction and Operation of General Control System of Materials and Life Science Experimental Facility (MLF-GCS) in J-PARC, JAEA-Technology 2009-042, 2009. (in Japanese)
- 4) Sakai, K. et al., Commissioning of Operation and Control System for Materials and Life Science Experimental Facility (MLF) in J-PARC, JAEA-Technology 2010-001, 2010. (in Japanese)
- 5) Sakai, K. et al., Development status of the General Control System of the Materials and Life Science Experimental Facility (MLF) of J-PARC, Physica B 385-386, 2006, pp.1324-1326.
- 6) Sakai, K. et al., Construction status of the General Control System of the Materials and Life Science Experimental Facility (MLF) of J-PARC, Nucl. Instr. Meth. A 600, 2009, pp.75-77.
- 7) Ooi, M. et al., Developmental status of a server system for the MLF general control system, Nucl. Instr. Meth. A 600, 2009, pp.120-122.
- 8) Kai, T. et al., Users' beam interlock system at the materials and life science experimental facility of J-PARC, Nucl. Instr. Meth. A 600 (2009), pp.176-178.

This is a blank page.

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량	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
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方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
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立法メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の) 1	1
比透磁率 ^(b)	(数字の) 1	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。
(b) これらは無次元量あるいは次元 1 をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の 1 は通常は表記しない。

表 3. 固有の名称と記号で表される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 ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg 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 kg 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 s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス度 ^(e)	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光束度	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
照射度	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² 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	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性化	カタール	kat		s ⁻¹ mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
(b) ラジアンとステラジアンは数字の 1 に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。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である数字の 1 は明示されない。
(c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
(d) ヘルツは周期現象についてののみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてののみ使用される。
(e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
(f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
(g) 単位シーベルト (PV,2002,70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表 4. 単位の中に固有の名称と記号を含む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
粘着力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電荷密度	ジュール毎平方メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
表面電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m ⁻³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ =m ² kg s ⁻³
酵素活性濃度	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 s ⁻³ =kg s ⁻³
	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ⁻³ s ⁻¹ mol

表 5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨ	Y	10 ⁻¹	デ	d
10 ²¹	ゼ	Z	10 ⁻²	セ	c
10 ¹⁸	エ	E	10 ⁻³	ミ	m
10 ¹⁵	ペ	P	10 ⁻⁶	マイ	μ
10 ¹²	テ	T	10 ⁻⁹	ナ	n
10 ⁹	ギ	G	10 ⁻¹²	ピ	p
10 ⁶	メ	M	10 ⁻¹⁵	フェ	f
10 ³	キ	k	10 ⁻¹⁸	ア	a
10 ²	ヘ	h	10 ⁻²¹	ゼ	z
10 ¹	デ	da	10 ⁻²⁴	ヨ	y

表 6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	′	1′=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	″	1″=(1/60)′=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1ha=1hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1L=1l=1dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1t=10 ³ kg

表 7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、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 単位で表される数値
電子ボルト	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1u=1 Da
天文単位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表 8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm ² =(10 ⁻¹² cm)2=10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	B	
デジベール	dB	

表 9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エル	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 ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フオット	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe ≡ (10 ³ /4π) A m ⁻¹

(c) 3 元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ≡ 」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
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
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1メートル系カラット = 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	cal	1cal=4.1858J (「15°C」カロリー) , 4.1868J (「IT」カロリー) 4.184J (「熱化学」カロリー)
マイクロン	μ	1 μ =1μm=10 ⁻⁶ m

