

JAEA-Technology 2019-009 DOI:10.11484/jaea-technology-2019-009

TEF-T 統括制御システムプロトタイプ機の開発

Development of Prototype for TEF-T Integral Control System of J-PARC

酒井 健二 大林 寛生 斎藤 滋 佐々 敏信 菅原 隆徳 渡邊 聡彦

Kenji SAKAI, Hironari OBAYASHI, Shigeru SAITO, Toshinobu SASA Takanori SUGAWARA and Akihiko WATANABE

原子力科学研究部門J-PARC センター核変換ディビジョン

Nuclear Transmutation Division J-PARC Center Sector of Nuclear Science Research

C

July 2019

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

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(<u>https://www.jaea.go.jp</u>) より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 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 Institutional Repository Section,

Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department, Japan Atomic Energy Agency.

2-4 Shirakata, 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, 2019

TEF-T 統括制御システムプロトタイプ機の開発

日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門 J-PARC センター 核変換ディビジョン

酒井 健二、大林 寛生、斎藤 滋、佐々 敏信、菅原 隆徳、渡邊 聡彦*1

(2019年4月9日受理)

大強度陽子加速器施設(J-PARC)では、加速器駆動システム(ADS)による 核変換技術に関す る基礎的な研究を行う核変換実験施設(TEF)の建設を計画している。その中の ADS ターゲット試 験施設(TEF-T)では、鉛・ビスマス共晶(LBE)ターゲットに陽子ビームを照射することで、ADS 独自の構成要素に関するシステム技術を研究開発する。TEF-Tでは、施設全体の安全かつ円滑な運 転を実現するために全体制御システム(GCS)を構築する。GCSは、ターゲット機器を中心とした 施設内の装置群を独自に運転制御する一方で、J-PARC 中央制御棟(CCB)を経由し、加速器や他 実験施設と密接に連動しながら稼働することが要求される。

GCS は、その役割に応じて、ネットワーク系(LAN)、統括制御系(ICS)、インターロック系(ILS)、 タイミング配信系(TDS)など幾つかのサブシステムで構成される。特に ICS は施設全体の包括的 な運転制御から運転データの収集・蓄積・配信まで GCS の中心的な役割を担う。我々は ICS のプ ロトタイプ機を開発して、通信速度・容量、運転操作性・安定動作などの性能を具体的に評価し、 ICS の実機設計に反映させることにした。本書では ICS プロトタイプ機の製作と、その LBE ター ゲット技術開発装置への応用について報告する。

原子力科学研究所:〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方2-4 *1 日本アドバンストテクノロジー株式会社 JAEA-Technology 2019-009

Development of Prototype for TEF-T Integral Control System of J-PARC

Kenji SAKAI, Hironari OBAYASHI, Shigeru SAITO, Toshinobu SASA, Takanori SUGAWARA and Akihiko WATANABE^{*1}

Nuclear Transmutation Division, J-PARC Center, Sector of Nuclear Science Research, Japan Atomic Energy Agency Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received April 9, 2019)

Construction of Transmutation Experimental Facility (TEF) is under planning in the Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC) program to promote R&D on the transmutation technology with using accelerator driven systems (ADS). ADS Target Test Facility (TEF-T) in TEF will develop spallation target technology and study on target materials with irradiating high intensity proton beams on a lead-bismuth eutectic (LBE) target. For safe and efficient beam operation, a general control system (GCS) will be constructed in TEF-T. Although GCS is the independent system for controlling equipment in the facility with a focus on a LBE target station, it is requested to work closely with control systems of accelerators and other facilities through a central control building (CCB) of the J-PARC.

The GCS comprises several subsystems, such as a network system (LAN), an integral control system (ICS), an interlock system (ILS), and a timing distribution system (TDS) according to their roles. Especially, the ICS plays the important role that executes integral operations in the entire facility, acquires, stores and distributes operation data. We planned to develop a prototype of the ICS, to evaluate its concrete performances such as data transmission speeds, data storage capability, control functions, long-term stability of the system, and to utilize them for design of the actual ICS. This report mentions to product the prototype of ICS and to apply it to remote operations of instruments for developing LBE target technology.

Keywords: J-PARC, TEF, ADS, Integral Control System

*1 Nippon Advanced Technology Co., Ltd.

目次

1.	序		1					
2.	統括制	御システムプロトタイプ機の開発	3					
	2.1 統括制御システムの概要							
	2.2 彩	括制御システムプロトタイプ機	6					
	2.2.1	概要	6					
	2.2.2	データベースサーバー	6					
	2.2.3	監視操作 PC	7					
	2.2.4	データストレージサーバー	7					
	2.2.5	Web 配信サーバー	8					
	2.3 🖆	後の課題1	5					
	2.3.1	プロトタイプ機の改良1	5					
	2.3.2	プロトタイプ機開発の課題1	5					
3.	総括		7					
謝	辞		7					
参	考文献		.8					

Contents

1.	Introduction						
2.	Development of prototype for integral control system						
	2.1	Out	line of integral control system				
	2.2 Prototype for integral control system						
	2.2	2.1	Outline				
	2.2	2.2	Data base server				
	2.2	2.3	Monitor and operation PC7				
	2.2	2.4	Data storage server				
	2.2	2.5	Web distribution server				
	2.3	Fut	ure agenda15				
	2.3	3.1	Improvement of prototype				
	2.3.2 Agenda of development for prototype15						
3.	Sur	nma	ry17				
Ac	Acknowledgment						
Re	References						

1. 序

大強度陽子加速器施設(Japan Proton Accelerator Research Complex; J-PARC)では、加速器駆動システム(Accelerator driven System; ADS)による 核変換技術に関する基礎的な研究を行う核変換実験施設(Transmutation Experimental Facility; TEF)の建設を計画している。その中の ADS ターゲット試験施設(TEF-T)では、J-PARC LINAC から陽子ビームを分岐し、1 次ビーム輸送ラインを経由して鉛・ビスマス共晶(LBE)ターゲットに 40ms 周期のパルスビームを照射することで、ADS 独自の構成要素(ターゲット、ビーム窓など)に関するシステム技術を研究開発する¹⁾。並行して 1 次ビーム照射により発生する 2 次ビームを利用した様々な研究も提案されている。TEF-T では、施設全体の安全かつ円滑な運転を実現するために全体制御システム(General Control System; GCS)を運用する²⁾。GCSには、ターゲット機器を中心とした施設内の設備群を独自に運転制御する一方で、J-PARC 中央制御棟(Central Control Building; CCB)を経由し、加速器や他実験施設と密接に連動しながら稼働する制御システムが要求される。Fig. 1.1 に GCS の概要を示す。

Fig. 1.1 において、J-PARCのネットワークは、加速器・施設運転のための制御系 LAN と 主に実験装置・一般利用者のための JLAN に分かれている。制御系 LAN は、CCB の J-PARC 制御系コアスイッチと各施設のエッジスイッチがダイレクトに接続され、エッジスイッチの下 に各施設の制御系 LAN が展開される。TEF-T 制御系 LAN では、BT 系(1 次ビーム輸送ラ イン機器)、TG系(ターゲット関連機器)などの制御系 VLAN(Virtual LAN)を構築して、 TEF-T 制御室内の監視操作 PC から各制御システムのインターフェース(I/F)を経由して、 VLAN に接続された現場制御盤 PLC (Programmable Logic Controller) 群を監視操作する。 TEF-T 制御系 LAN には、運転情報やカメラ画像の収集・蓄積・配信を行うデータベース (Data Base; DB)、データストレージ (Data Storage; DS)、Web 配信、カメラなどの各種サーバ ー、及びタイミング配信システム(Timing Distribution System; TDS)なども接続され、制 御系 LAN を経由して管理・運用される。また GCS は、想定外のビーム照射から機器を守る 機器保護システム(Machine Protection System ; MPS)、運転員や装置利用者を放射線被ば くから守るための人員安全保護システム(Personnel Protection System; PPS)、ビーム運転 時にターゲットに関わる重大異常が発生した時に事象の拡大を防ぐためのターゲット保護シ ステム (Target Protection System; TPS) などのビーム停止インターロックシステム (InterLock System; ILS) も運用する。電気・機械設備や放射線安全管理設備の制御システ ムと同様に、PPS/TPS は独立性を保ちながらも、専用の中継用 PLC を介して制御系 LAN と 最低限のデータ送受信を行う。

Fig. 1.1 において、現場制御盤 PLC と監視操作 PC 間のデータの入出力管理から運転情報 の収集・蓄積・配信までを実行する統括制御システム(Integral Control System; ICS)は、 GCS の中心的な役割を担う。我々は ICS のプロトタイプ機を開発して、PLC との通信速度、 画面表示機能、DS サーバーの取込速度・容量、運転時の安定性などの性能を具体的に評価し、 実機設計に反映させることにした。本書では ICS プロトタイプ機の開発と、その TEF-T モッ クアップループ(Integrated Multi-functional MOckup for TEF-T Real-scale TArget Loop; IMMORTAL) や高温材料腐食試験ループ(Oxygen-controlled Lbe LOop for Corrosion tests in HIgh temperature; OLLOCHI) など LBE ターゲット技術開発装置への応用について報告する。



Fig. 1.1 Outline of TEF-T general control system

2. 統括制御システムプロトタイプ機の開発

2.1 統括制御システムの概要

Fig. 1.1 において、TEF-T GCS の ICS は、BT 系(1 次ビームライン関連)や TG 系(ター ゲット関連)などの主要な制御システムと各種サーバーによって構成される。TEF-T 制御系 LAN では、制御室内に設置された監視操作 PC から、各制御系 VLAN に接続された現場制御 盤 PLC を介して、BT 系や TG 系の様々な機器の監視操作を行うことで、施設全体に渡る多 種・多様な機器の運転制御を実行する。DB サーバーを経由して収集された運転データは、DS サーバーに保存されるとともに、Web サーバーを経由して運転員や装置利用者に必要な情報 を配信する。また施設を監視する全体監視カメラシステムは、建家内及び周辺に設置された多 数の監視カメラを遠隔操作するとともに、画像の記録や配信を実行する。Fig. 2.1 に TEF-T ICS の機器構成図を示す。TEF-T ICS は、装置の追加・変更に柔軟に対応できる分散型デジ タル制御システム(Distributed digital Control System; DCS)の概念に基づいて設計されて おり、BT 系と TG 系という 2 つの独立した ICS によって構成されている。J-PARC の既存施 設を参考にして^{3), 4), 5)}、BT 系及び TG 系の ICS には横河電機製及び三菱電機製の PLC を使 用する予定でいる。Fig. 2.1 の CPU-M は三菱電機製、CPU-Y は横河電機製のラダープログ ラム処理用 PLC-CPU を表す。以下に、プロトタイプ機設計に関連する TEF-T ICS の主な仕 様を列挙する。

- a. J-PARC では多くの加速器・実験施設が、制御システムの基盤ソフトウェアとして、 Channel Access (CA)というネットワークプロトコルを使ってデータを送受信する EPICS (Experimental Physics and Industrial Control System)を採用している^{4),5),6)}。 J-PARC 内の運転実績や開発ソフトウェアの蓄積、サポート体制などの利点を考慮して、 TEF-T ICS でも基盤ソフトウェアとして EPICS を採用する。
- b. 各々の制御系 VLAN に接続された現場機器は、EPICS 操作インターフェース(OPeration Interface; OPI)から、EPICS 入出力制御機器(Input/Output Controller; IOC)及び 現場制御盤を経由して設備機器を監視操作する。ここで EPICS-IOC は、現場制御盤 PLC のデータを EPICS プロセス変数(PV)に変換する機能を持ち、EPICS-OPIと各現場制 御盤 PLC 間のデータ入出力を管理する。
- c. 現場制御盤の PLC ユニットは、電源、CPU、通信(イーサネット、専用 PLC リンク、 及び入出力(I/O)などの各種モジュールで構成される。ここで FL-net は、種類の異なる PLC 間の通信を実行する。
- d. EPICS-PV はレコード名で管理する。制御系 LAN を経由した他制御システムとのデータ 送受信を想定して、データ名は J-PARC 標準の EPICS レコード命名則に従う ⁷⁾。
- e. EPICS-OPIとして機能する監視操作 PC の制御画面ソフトウェアには、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ある CSS (Control System Studio)を採用する。CSS は、施設全体及び設備単体の監視操作、警報、運転履歴など多数の制御画面を切り替えながらの運転制御が可能、適時・適切な範囲で制御機器

やプログラムの修正・更新か可能、画面の保守・管理が容易などの点で優れている。

- f. DS サーバーには EPICS との相性や J-PARC での運転実績を考慮して、汎用 RDB (Relational Data Base)である Postgre SQLを採用する。ハードディスクは適切な RAID を組んで冗長性を確保する。
- g. 情報共有を目的として、リアルタイムで運転情報を配信できる CSS の Web-OPI 機能を 利用した Web サーバーを設置する。一方、リアルタイム配信はクライアント数が増える とシステムに負荷がかかるため、制御画面をコピーして数十秒周期で更新するスクリーン ショットサーバーも併設する。
- h. 外部中継用 PLC ユニットには、ラダープログラム処理用 CPU と EPICS-IOC として機 能する Linux-OS をインストールした CPU を搭載して、電気・機械、放射線安全管理な ど独立した制御システムと最小限のデータ送受信が行えるようにする。

J-PARC の加速器制御系に準拠した性能が要求される BT 系 ICS は、制御系 LAN に接続し た BT 監視操作 PC (EPICS-OPI)、DB サーバー用 PC (EPICS-IOC)、及び電磁石電源系、 入射系統括系、真空機器系などの各 BT 現場機器を制御する現場制御盤 PLC で構成される (Fig. 2.1)。監視操作 PC からの遠隔操作は DB サーバー及び制御系 LAN を経由して実行す る一方、各 PLC 間のデータ共有や信号授受は、FA リンク(横河電機 PLC 専用リンク)を経 由して実行する。それとは別にビーム入射に同期するイベントデータを収集するために、VME、 CAMAC などの標準データバス規格を利用したビーム計測システム(EPICS-IOC)も構築す る。現場制御盤 PLC から送信されるデータは約1秒周期で、ビーム計測システムから送信さ れるイベントデータはパルスビームの入射周期(40ms)で、各専用 DS サーバーに保存され る。

一方で、ターゲット施設として安全で確実な運転が要求される TG 系 ICS は、リモート入 出力(IO)盤、LBE 循環設備盤、ターゲット台車制御盤などのような現場制御盤 PLC と、TG 監視操作 PC や TG 統括制御盤などで構成される(Fig. 2.1)。TG 統括制御盤と各現場制御盤 の PLC を CC リンク IE (三菱電機 PLC 専用リンク)で接続して PLC 間のデータ共有を可 能にすることで、TG 統括制御盤による安全で確実な運転制御を実現する。さらに EPICS-IOC として機能する TG 用 DB サーバーを経由して PLC 専用 LAN と制御系 LAN を間接的に接 続することで、PLC 専用リンクの独立性を確保するとともに監視操作 PC から各現場制御盤 PLC の包括的な監視操作を実行する。TG 系 ICS では建家各所に入出力 PLC モジュールを搭 載したリモート IO 盤を設置し、各種 PLC 通信モジュールを搭載して様々な種類の PLC デー タを取り込めるようにする。



Fig. 2.1 Structure of TEF-T ICS

2.2 統括制御システムプロトタイプ機

2.2.1 概要

TEF-T モックアップループ (IMMORTAL) は TEF-T ターゲットシステムの 1 次冷却系 (LBE 循環系) および 2 次冷却系の実証試験を実施する目的で、高温材料腐食試験ループ (OLLOCHI) は酸素濃度制御下での LBE 中における鋼材腐食を試験する目的で開発された LBE 循環ループ装置であり、高温工学特研の大実験室に設置されている。両装置の現場制御 盤には、電源、CPU、イーサネット、光リンク、入出力など各種モジュールで構成される三菱 電機製 PLC ユニットとタッチパネルが設置されて、ローカル操作を実行している。各々の LBE 循環ループ装置には、LBE 高温流体による金属腐食を抑制するための酸素濃度制御装置 (O2A, O2B) が併設されている。

我々は、IMMORTAL、OLLOCHI、O2A、O2Bを監視操作対象装置として、2.1節の仕様 に基づいて、現場制御盤 PLC と監視操作 PC 間のデータの入出力管理から運転情報の収集・ 蓄積・配信まで一連の ICS 機能を実証するプロトタイプ機の開発を進めた。Fig. 2.2 に実際に 設計・製作したプロトタイプ機の全体構成を示す。Fig. 2.2 において、黄色塗枠の部分が本開 発で新たに製作した制御機器を示す。Table 2.1 には、プロトタイプ機を構成する制御機器の 機能やソフトウェアのリストを、Fig. 2.3 には、それらの機能構成やデータの流れを示す。

- a. TG 系の ICS 設計仕様に準拠して、PLC 専用 LAN と PC 専用 LAN に分け、①DB サー バーが 2 つの LAN を中継する構成にすることで、PLC 専用 LAN の独立性を担保した。 両 LAN ともイーサネットケーブルで構成している。
- b. IMMORTAL と OLLOCHI のリモート監視操作ができるように、PLC 専用 LAN を設定 して既存の PLC とタッチパネルをイーサネットケーブルと LAN スイッチで接続した。 更に 2 台の酸素濃度制御装置 (O2A, O2B) のリモート操作も可能にするために、各現場 制御盤に新たな PLC-CPU を増設してラダープログラムを組んだ上で PLC 専用 LAN に 接続した。4 つの装置の PLC-CPU には、MELDevice01, 02, 03, 04 というデバイス番号 を定義した。
- c. ICS プロトタイプ機の基盤ソフトウェアとして EPICS を採用し、EPICS- IOC として① DB サーバーを、EPICS-OPI として②監視操作 PC を製作した。その上で PC 専用 LAN に接続した監視操作 PC から DB サーバーを経由して PLC 専用 LAN 上の各 PLC-CPU をリモート制御することで、装置単体及び複数装置間の監視操作を可能にした。
- d. 運転データの収集・保存・配信ができるように、③DS サーバー、④ Web-OPI サーバー、
 ⑤スクリーンショットサーバーを製作した。両 Web サーバーとも、PC 専用 LAN の外側にある JLAN 上でも運転状態を監視できるようにした。

2.2.2 データベースサーバー

DB サーバー (Windows® OS) には、PLC と Windows® OS の標準的な I/F である OPC 形式間のデータ変換を行う OPC サーバー、OPC と EPICS レコード形式間のデータ変換を行 う EPICS IOC (opclocShell) というソフトウェアがインストールされており、CA プロトコ ルを使ってデータの送受信を実行する (Fig.2.3)。DB サーバーで扱うデータは DB 定義ファ イルに登録して管理している。Table 2.2 に DB 定義ファイルの例を示す。Table 2.2 には、 EPICS レコード名、レコード型、データ型、デバイス型、入出力アドレスなどが示されてい る。入出力アドレスは (デバイス番号): (メモリアドレス) で表示されている。

- a. ICS プロトタイプ機では、4 つの装置の PLC-CPU デバイスメモリから OPC サーバーに 取り込んだプロセスデータを EPICS レコードに変換するという 2 段階の過程を経て、1 秒程度のサンプリング周期でデータ更新を行う。
- b. J-PARC の EPICS レコード命名則⁷に基づき、レコード名は"HTEL-LER_(装置名)_ (データ入出力)_(機器番号/名称)_XXX"としている。HTEL-LER は、場所名(高温特 研_大実験室)を表している。(データ入出力)はアナログ/デジタル入出力に分けている。
- c. レコード型として、アナログ入出力(ai/ao)、デジタル入出力(bi/bo)、演算(ca)を定義している。演算(ca)は、整数型式のアナログデータを実数や指数など工学値に変換する役割を担う。Table 2.2(A)は ai、(B)は ao、(C)は biの DB 定義ファイル例を示している。
- d. デバイス番号毎の入出力データ数を Table 2.3 に示す。DB サーバーは約 700 点のデータ 入出力を管理している。

2.2.3 監視操作 PC

監視操作 PC(Linux OS)は、CSS で作成した OPI 画面を使って、DB サーバーを経由し て各設備機器を監視操作する。2つの装置(IMMORTAL、OLLOCHI)の監視操作と警報画 面という 4 つの OPI 画面を切り換えながら運転制御を実行する。酸素濃度制御装置(O2A、 O2B) は独立した画面を持たずに、2 つの装置の画面に組み込んである。

Fig. 2.4 に監視操作 PC の OPI 画面例を示す。Fig. 2.4 (A)、(B) の IMMORTAL と OLLOCHI の監視操作画面ではプロセス系統画面上に各モニタの計測値がリアルタイムで表示される。画面の操作スイッチについては状態表示のみにしている。一方で、各画面の右端には O2A 及び O2B のモニタ計測値、流量設定値、バルブ開閉スイッチなどを表示しており、 実際にリモート操作でバルブ開閉が可能になっている。Fig. 2.4 (C) は IMMORTAL の警報 画面を表す。警報の点灯表示のほか、ブザー停止、リセットなどの操作スイッチを表示している。

2.2.4 データストレージサーバー

PostgreSQL をインストールした DS サーバー(Linux OS)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 RDB に保存する。保存データの管理は、xml 形式で書かれた Archive Configurator 定義ファイルを変更することで行う。

Table 2.3 において、約 120 点のアナログ入出力データは 5 秒周期で保存される。一方、約 470 点のデジタル入出力データは値に変化がある場合のみ保存される。アナログデータは工学

変換値(ca)を保存している。Fig. 2.4 (D) に示すように、保存されたデータはリアルタイム データと併せて運転データトレンドとして表示できる。DS サーバーのハードディスク(HDD, 2TB)は RAID-1 で冗長化されている。

2.2.5 Web 配信サーバー

Web 配信サーバーとして、CSS の Web-OPI 機能を利用して作成した OPI 画面をリアルタ イムで配信する Web-OPI サーバー、及び画面をコピーして約 30 秒周期で更新するスクリー ンショットサーバーを構築している。Fig. 2.5 (A) に前者、Fig. 2.5 (B) に後者の配信画面 例を示す。Web-OPI サーバーは、監視操作 PC 上の CSS とほぼ同じ制御機能を汎用 Web ブ ラウザ画面上で実現できるが、現時点では状態監視と運転データ履歴の表示・取出に機能を限 定している。また通信・処理負荷によっては動作が若干不安定になるため、現在は毎月 1 回サ ーバーの自動リセットを実行している。一方、スクリーンショットサーバーは、OPI 画面を PNG 方式でコピーして配信しており、機能が単純なためサーバーは比較的安定して稼働して いる。

両Web配信サーバーには、JLANのIPアドレス(XX.XX.XX及びYY.YY.YY)が 付与され、PC専用LANの外側にある端末からJLANの無線アクセスポイントを経由して接 続できる構成にしているため、WebブラウザからURLを指定することで運転状態を監視でき る。だたしユーザー名とパスワードを設定することでアクセス制限をかけている。

制御機器	項目	ソフトウェア	備考
	OS	Windows® 7 Professional (64-bit)	
DBサーバー	OPC Server	Device XPlorer OPC Server 5.3.0.1	OPC (OLE for Process Control)はMicrosoft® が提 供する標準インタフェース (I/F)仕様であり、プロセス制 御機器間でのリアルタイムデータ通信を行うための標 準規格である。
	EPICS-IOC	opcIocShell 3.8.0.1	EPICSは分散制御システムを開発するためのソフト ウェア開発環境と汎用アプリケーションセット。 EPICS-IOCは、CAプロトコルを利用して、EPICS-OPI と制御装置間のデータ送受信を行う。
► 相塌作PC	OS	Scientific Linux 6.7 (x86_64)	
	EPICS-OPI	SNS CSS 3.2.16	EPICSのCAに対応した監視操作I/Fツール。
	OS	Scientific Linux 6.8 (x86_64)	
DS#	RDB	PostgreSQL ver.9.5.5.1	汎用的なRDB(Relational Data Base)ソフトウェア。
	CSS Extensions	Archive Engine ver.3.2.16	定義ファイルに基づいてIOC のプロセスデータをRDB に保存。
	OS	Scientific Linux 6.7 (x86_64)	
Web-OPI サーバー	CSS Extensions	WebOPI ver 3.3	CSSでサポートするリアルタイムWeb画面ツール。
		Tomcat ver 8.0.30	Java Servlet やJSPを実行するためのサーブレットコン テナ。
7.511	os	Scientific Linux 6.7 (x86_64)	
スクリーク ショットサー	EPICS-OPI	SNS CSS 3.2.16	
バー		Image Magic 6.7.2.7 Apatch 2.2.15	スクリーンショット画面とWeb配信を実施。

Table 2.1 List of application software installed in PCs of ICS prototype

		レコード名		前明	レコード型	データ型	デバイスタイプ	入出力	-
(\mathbf{A})	ž	NAME	P	DESC	RTYP	TYPENAME	▲ DTYP ▼	INP	_
	49	HTEL-LER_IMMORTAL_AI_062:EMP:MON:VOLT:IN		[D162] 出力電圧	ai.	short	MEL	MELDevice01:D162	
	50	HTEL-LER_IMMORTAL_AI_063:EMP:MON:CUR:IN		[[D163] 出力電流	ai	short	MEL	MELDevice01:D163	
	51	HTEL-LER_IMMORTAL_AI_101:AV-1:MON:XXX:IN		[D1] AV-1	ai	short	MEL	MELDevice01:D1	
	52	HTEL-LER_IMMORTAL_AI_100:TS:MON:XXX:IN		[D100] TS	ai	short	MEL	MELDevice01:D100	
	53	HTEL-LER_IMMORTAL_AI_110:VT01:MON:XXX:IN		[D800] VT01	ai.	short	MEL	MELDevice01:D800	
	54	HTEL-LER_02A_AI_001:VM1:MON:V0LT:IN		[D20] 酸素濃度 電圧1	ai.	long	MEL	MELDevice02:D20	
	55	HTEL-LER_02A_AI_002:VM2:MON:V0LT:IN		[[D22] 酸素濃度 電圧2	ai.	long	MEL	MELDevice02:D22	
	56	HTEL-LER_02A_AI_003:VM3:MON:V0LT:IN		[D24] 酸素濃度 電圧3	<u>a</u> .	long	MEL	MELDevice02:D24	
	57	HTEL-LER_02A_AI_004:VM4:MON:V0LT:IN		[D26] 酸素濃度 電圧4	ai.	long	MEL	MELDevice02:D26	
	58	HTEL-LER_02A_AI_005:MFC_A:MON:FLOW:IN		[D40] マスフロー流量A	ai.	short	MEL	MELDevice02:D40	
	59	HTEL-LER_02A_AI_006:MFC_B:MON:FLOW:IN		[[D41] マスフロー流量B	ai.	short	MEL	MELDevice02:D41	
	60	HTEL-LER_02A_AI_007:MFC_C:MON:FLOW:IN		[D42] マスフロー流量C	ai.	short	MEL	MELDevice02:D42	
	61	HTEL-LER_02A_AI_008:PS_1:MON:PRS:IN		[D86] ガス供給圧力1	ai	long	MEL	MELDevice02:D86	
	62	HTEL-LER_02A_AI_009:PS_2:MON:PRS:IN		[D96] ガス供給圧力2	ai.	long	MEL	MELDevice02:D96	
	63	HTEL-LER_OLLOCHI_AI_041:T1:MON:TEMP:IN		[D141] T1	<u>a</u> .	short	MEL	MELDevice03:D141	
	64	HTEL-LER_OLLOCHI_AI_042:T2:MON:TEMP:IN		[D142] T2	a.	short	MEL	MELDevice03:D142	
(a)		アコード名		説明	レコード型	データ型	デバイスタイプ	入出力	
	,► Z	NAME	•	DESC	RTYP	TYPENAME V	DTYP <	● OUT	
	-	HTEL-LER 02A AO 005:MFC A:SET:FLOW		[D100] マスフロー流量A	ao	float	MEL	MELDevice02:D100	1
	2	HTEL-LER_02A_A0_006:MFC_B:SET:FLOW		[D102] マスフロー流量B	ao	float	MEL	MELDevice02:D102	_
	ო	HTEL-LER_02A_A0_007:MFC_C:SET:FLOW		[D104] マスフロー流量C	ao	float	MEL	MELDevice02:D104	
	4	HTEL-LER_OLLOCHI_AO_060:EMP_SV:SET:HELTZ:	NI	[D1060] 周波数SV	ao	short	MEL	MELDevice03:D1060	
	2	HTEL-LER_02B_A0_005:MFC_A:SET:FLOW		[D100] マスフロー流量A	ao	float	MEL	MELDevice04:D100	
	9	HTEL-LER_02B_A0_006:MFC_B:SET:FLOW		[D102] マスフロー流量B	ao	float	MEL	MELDevice04:D102	
	Ŀ	レ コ ード名		前田		データ型	デバイスタイプ	入出力	
C	0N	NAME		DESC	▼ RTYP	TYPENAME	▼ DTYP ▼	INP	
	218	HTEL-LER_IMMORTAL_BI_183A:H01:ALM:OC	[D522:03][]	5熱ヒータ漏電/過電流] H01	bi.	bool	MEL	MELD evice01:D522:03	
	219	HTEL-LER_IMMORTAL_BI_183B:H01:ALM:OC	[D622:03][₹	5熱ヒータ漏電/過電流] H01	Pi	bool	MEL	MELD evice01:D622:03	
	220	HTEL-LER IMMORTAL BI 403:PLC:STAT:FLASH	[SM413] 1利	> 点滅	p:	bool	MEL	MELDevice01:SM413	
	221	HTEL-LER_02A_B1_001:1V_A:STAT:POS	[Y220] 電磁	并 IV_A	<u>م:</u>	bool	MEL	MELDevice02:Y220	
	222	HTEL-LER_O2A_B1_002:IV_B:STAT:POS	[Y221] 電磁	弁 IV_B	Pi	bool	MEL	MELDevice02:Y221	
	223	HTEL-LER_O2A_BI_003:IV_C:STAT:POS	[Y222] 電磁	并 Ⅳ_C	p;	bool	MEL	MELDevice02:Y222	
	224	HTEL-LER_02A_BI_004:MV_1:STAT:POS	[Y223] 電磁	并 MV_1	p:	bool	MEL	MELDevice02:Y223	
	225	HTEL-LER_02A_BI_005:MV_2:STAT:POS	[Y224] 電磁	并 MV_2	<u>ם:</u>	bool	MEL	MELDevice02:Y224	
	226	HTEL-LER_02A_BI_006:LV_1:STAT:POS	[Y225] 電磁	<u> </u>	<u>.</u>	bool	MEL	MELDevice02:Y225	
	227	HTEL-LER_02A_BI_007:LV_2:STAT:POS	[Y226] 電磁	并 LV_2	bi	bool	MEL	MELDevice02:Y226	-
	228	HTEL-LER_OLLOCHI_BI_96:HT:STAT:RUN	[Y60] 加熱品	景 [OFF色:緑][ON色:赤]	bi	bool	MEL	MELDevice03:Y60	
	230	HTEL-LER_OLLOCHI_BI_100:FAN:STAT:RUN	[Y64] ファン	[OFF色:緑][ON色:赤]	bi	bool	MEL	MELDevice03:Y64	-
	231	HTEL-LER_OLLOCHI_BI_101:CL:STAT:RUN	[Y65] 冷却晶	昬入[OFF色:緑][ON色:赤]	bi	bool	MEL	MELDevice03:Y65	

Table 2.2 Example of data definition file for data base server

装置名(略称)	アナログ	アナログ	デジタル	デジタル	演算値	備老
デバイス番号	入力(ai)	出力(ao)	入力(bi)	出力(bo)	(ca)	
TEF-Tモックアップループ (IMMORTAL) MELDevice01	53	0	220	5	53	レコード名は HTEL-LER_IMMORTAL_XXX: AI:LBE循環系温度、圧力、流量、液位、圧力など BI/BO:ヒーターON/OFF、各種警報、バルブ開閉など CA:AIの工業換算値
酸素濃度制御装置A (O2A) MELDevice02	9	3	7	7	9	レコード名は HTEL-LER_O2A_XXX: AI/AO:酸素濃度(電圧)、マスフロー流量、供給圧力など BI/BO:各種警報、バルブ開閉操作など CA:AIの工業換算値
高温材料腐食試験ループ (OLLOCHI) MELDevice03	46	1	200	6	46	レコード名は HTEL-LER_OLLOCHI_XXX: AI/AO:LBE循環系温度、圧力、流量、液位、圧力など BI/BO:ヒーターON/OFF、各種警報、バルブ開閉など CA:AIの工業換算値
酸素濃度制御装置B (O2B) MELDevice04	9	3	7	7	9	レコード名は HTEL-LER_02B_XXX: AI/AO:酸素濃度(電圧), マスフロー流量、供給圧力など BI/BO:各種警報、バルブ開閉操作など CA:AIの工業換算値
計	117	7	434	25	117	

Table 2.3 List of process data stored into Data Storage server



Fig. 2.2 Structure of prototype for integral control system



Fig. 2.3 Data flow of prototype for integral control system



Fig. 2.4 OPI windows for monitoring (A) IMMORTAL and O2A, (B) OLLOCHI and O2B, (C) alarm status of IMMORTAL, and (D) operational data trend



Fig. 2.5 Web windows distributed by (A) Web-OPI server and (B) copy screen server

2.3 今後の課題

2.3.1 プロトタイプ機の改良

我々は、TG系のICS 仕様に準拠して開発したプロトタイプ機を用いて、IMMORTAL 及び OLLOCHI という 2 つの装置の監視操作から運転データ保存・配信まで一連の運転制御がで きるようにした。現段階では 2 つの装置の試験運転に合わせて、プロトタイプ機の操作性・安 定動作などを確認しながら、より使い易い監視操作システムを目指して、装置側の要求に応じ てシステムの修正・改造を実施している。

- a. Fig. 2.2 のプロトタイプ機は、約1秒のサンプリング周期でDBサーバー上のプロセスデ ータを更新し、5秒周期でDSサーバーに保存している。まずは本機を長期稼働させて、 通信速度・容量、運転操作性・安定動作など各種機能を評価していく。
- b. 本機はデータ毎に更新・保存周期を変更できる。装置側の要求に応じて特定範囲のデータ をより短い周期(0.1秒~1秒)で更新・保存するように設定を変更して、その通信速度・ 容量について評価する。
- c. 監視操作 PC、DB サーバー、DS サーバーなどの主要機器を2重化して、障害に強いシス テムを構築する。
- d. 現在、監視操作 PC の機能を対象装置の状態監視と警報表示に限定しており、運転自体は 各現場制御盤のタッチパネルから実行している。装置側の要求に応じて、一部の操作スイ ッチや温度・ヒーター電流・警報発報の設定など、監視操作 PC 上から操作・設定できる ようにする。

2.3.2 プロトタイプ機開発の課題

TEF-TのICSは、BT系とTG系という2つの独立したICSで構成される。Fig. 2.1 において今回製作したTG系プロトタイプ機で実証試験が可能な範囲は、Windows®OS上にOPCサーバーとopcIocShellをインストールするTG用DBサーバーPC(EPICS-IOC)を中心に、TG系LANに接続されたTG監視操作PC、TG用DSサーバー、及びPLC専用LANに接続されたTG統括制御盤に渡る部分である。今後は他の部分のプロトタイプ機を製作して実証試験を行うことも検討する。そこでは制御対象機器やデータ更新速度・容量に応じて、最適なEPICS-IOCの機器選択とソフトウェア開発が要求される。

- A部中継用 PLC のプロトタイプ機を製作して実証試験を行う。ラダープログラム処理用 PLC-CPU、EPICS-IOC 用 PLC-CPU (Linux-OS)、及び FA-link や FL-net などの各種 通信モジュールで構成される PLC ユニット (横河電機製)を構築して、外部制御システ ムを模擬した PLC 等から通信モジュールを使ってデータを取り込む。更に EPICS-IOC 用 PLC-CPU でデータ変換した後に、監視操作 PC や DS サーバーでデータを処理・保存 する。取扱うデータ数は 5000 点以上、サンプリング周期は1秒程度と想定している。
- b. BT 系プロトタイプ機を製作して実証試験を行う。EPICS-IOC として機能する BT 用 DB サーバーPC (Linux-OS 搭載)、BT 監視操作 PC、BT 用 DS サーバーPC などを BT 系

LAN に接続してプロトタイプ機を構築し、現場制御盤を模擬した PLC(横河電機製)から、BT 系 LAN 経由でデータを取り込み、DB サーバーでデータ変換した後に、監視操作 PC や DS サーバーでデータを処理・保存する。取扱うデータ数は 5000 点以上、サンプリング周期は1秒程度と想定している。

- c. 前述の BT 系プロトタイプ機の DB サーバーPC を EPICS-IOC 用 PLC-CPU に置き換え て、両システム間でデータ通信速度・容量、操作性・安定動作などの性能を比較する。そ の結果をもとに、実機の要求に応じて EPICS-IOC 機能を持つ PC と PLC を使い分ける。
- d. ビームモニタ信号などビーム入射に同期するイベントデータを収集・保存するために、 VMEや CAMAC などの筐体コントローラを EPICS-IOC とする計測システムのプロトタ イプ機を構築する。サンプリング周期は 40ms、取扱うモニタ数は 100 点以上を想定す る。特にデータの数え落としや時刻の正確なタグ付など通信速度・容量について実証試験 を行って実機設計に反映させる。
- e. 装置の改造・増設に伴い、登録データの追加・変更だけではなく、設計図書(接続機器リ スト、信号伝送リスト、インターロックブロック線図、展開接続図など)の変更履歴の管 理も適時・適切に実行していく。

3. 総括

J-PARC の TEF-T では、施設全体の安全かつ円滑な運転を実現するために GCS を構築す る。GCS は、LAN、ICS、ILS、TDS など幾つかのサブシステムで構成される。特に ICS は、 施設全体の包括的な運転制御から運転データの収集・蓄積・配信まで行い、GCS の中心的な 役割を担う。我々は、TG 系の ICS 仕様に準拠したプロトタイプ機を開発して、IMMORTAL 及び OLLOCHI という 2 装置のリモート監視やデータ保存ができるようにした。プロトタイ プ機は、各現場制御盤 PLC、監視操作 PC、DB サーバー、DS サーバー、Web-OPI サーバー、 スクリーンショットサーバーで構成し、基盤ソフトウェアとして EPICS を採用した。現段階 では 2 装置の稼働に合わせて、プロトタイプ機の操作性・安定動作などを確認している。今後 は、本プロトタイプ機の開発や運転で得た経験・知見を活かして、ICS 実機設計に役立ててい く。

TEF が J-PARC の1ターゲット実験施設として加速器や他の実験施設と連動して稼働する 限り、その制御系は J-PARC 標準仕様に準拠することになる。本研究開発の意義は、J-PARC 標準仕様の EPICS をベースとした制御システムを TEF のターゲット技術開発装置に実際に 適用することで、TEF-T ICS の技術開発の基本的な方向性を示したことである。加速器や核 融合などの大型実験施設での EPICS をベースにした運転制御系構築は世界的にみても1つの 潮流であり、TEF がデータ収集・解析などを国内外の類似の実験施設と協力しながら進めて いく上でも、本研究開発の成果はその着実な一歩になると期待している。

謝辞

TEF-TICS プロトタイプ機の設計・製作では、核変換ディビジョン員を始めとする 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。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) 核変換ディビジョン, 2. TEF-T の目的, J-PARC 核変換実験施設技術設計書, JAEA-Technology 2017-003, 2017, pp. 13-34.
- 2) 核変換ディビジョン, 6.7 全体制御システム, J-PARC 核変換実験施設技術設計書, JAEA-Technology 2017-003, 2017, pp.420-450.
- 3) 酒井健二ほか, J-PARC/MLF 全体制御システム (MLF GCS) の設計・構築・運用, JAEA-Technology 2009-042, 2009, 44p.
- 4) Neutron Source Section, Technical Design Report of Spallation Neutron Source Facility in J-PARC, JAEA-Technology 2011-035, 2011, 536p.
- 5) Sakai, K. et al., Progress of General Control System for Materials and Life Science Experimental Facility in J-PARC, Proceedings of the 21st Meeting of the International Collaboration on Advanced Neutron Sources (ICANS-XXI), JAEA-Conf 2015-002/ KEK Proceedings 2015-7, 2015, pp.593-598.
- (6) 渡邊聡彦ほか, 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, JAEA-Technology 2013-028, 2013, 21p.
- 7) 福田真平ほか, J-PARC Linac, RCS における EPICS レコード命名規則の策定, JAEA-Testing 2010-004, 2010, 34p.

_

表 1. SI 基本単位					
甘大昌	SI 基本単位				
本平里	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	Α			
熱力学温度	ケルビン	Κ			
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
AI 立 是 SI 組 立 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 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 ⁸
質量濃度 キログラム毎立方メートル	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	t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

	SI 旭立単位				
組立量	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	
立体鱼	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	Ν		m kg s ⁻²	
E 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	С		s A	
電位差(電圧),起電力	ボルト	V	W/A	$m^2 kg s^{\cdot 3} A^{\cdot 1}$	
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	ジーメンス	s	A/V	$m^{2} kg^{1} s^{3} A^{2}$	
磁東	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^2 A^{-1}$	
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m ²	$kg s^{-2} A^{-1}$	
インダクタンス	ヘンリー	Н	Wb/A	$m^2 kg s^2 A^2$	
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K	
光東	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd	
照度	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	カタール	kat		s ⁻¹ mol	

酸素活性(1) ダール kat [s¹ mol]
 (w)SH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。
 (h)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。
 (a)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)へルツは周期現象についてのみ、ペラレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。 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。それシウス度とケルビンの
 (a)やレシウス度はケルビンの特別な名称で、温度器や温度開隔を表す整備はどもらの単位で表しても同じである。
 (b)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物告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

	S	[組立単位	
組立量	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 kg s ⁻¹
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
表 面 張 九	リニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
角 加 速 度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	$m m^{-1} s^{-2} = s^{-2}$
熱流密度,放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	kg s ⁻³
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 kg s^{2} K^{1}$
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^{2} s^{2} K^{1}$
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2 s^2$
熱伝導率	「ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ 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 kg s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電 荷 密 度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
表面電荷	「クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
電東密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ² s A
誘 電 卒	コアラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$
透 磁 率	ペンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 kg s^2 mol^1$
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)	$m^2 kg s^{-2} K^{-1} mol^{-1}$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
吸収線量率	ダレイ毎秒	Gy/s	$m^{2} s^{3}$
放 射 強 度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 m^{-2} kg s^{-3} = m^2 kg s^{-3}$
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 s ⁻³ =kg s ⁻³
酵素活性濃度	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	名称	記号	乗数	名称	記号	
10^{24}	э 9	Y	10 ⁻¹	デシ	d	
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	с	
10^{18}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m	
10^{15}	ペタ	Р	10^{-6}	マイクロ	μ	
10^{12}	テラ	Т	10^{-9}	ナノ	n	
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	р	
10^{6}	メガ	М	10^{-15}	フェムト	f	
10^3	+ 1	k	10^{-18}	アト	а	
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z	
10^{1}	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	v	

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=60 s			
時	h	1 h =60 min=3600 s			
日	d	1 d=24 h=86 400 s			
度	۰	1°=(π/180) rad			
分	,	1'=(1/60)°=(π/10 800) rad			
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648 000) rad			
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²			
リットル	L, 1	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³			
トン	t	$1 t=10^3 kg$			

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						
3	名称		記号	SI 単位で表される数値		
電子	ボル	ŀ	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J		
ダル	- F	\sim	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg		
統一原	子質量単	単位	u	1 u=1 Da		
天 文	単	位	ua	1 ua=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=100 kPa=10 ⁵ Pa	
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg≈133.322Pa	
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m	
海 里	М	1 M=1852m	
バーン	b	$1 \text{ b}=100 \text{ fm}^2=(10^{-12} \text{ cm})^2=10^{-28} \text{ m}^2$	
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s	
ネーパ	Np	ci単位しの粉結的な間接け	
ベル	В	対数量の定義に依存。	
デシベル	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			
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J			
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N			
ポアズ	Р	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s			
ストークス	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{\cdot 1} = 10^{\cdot 4} \text{ m}^2 \text{ s}^{\cdot 1}$			
スチルブ	$^{\mathrm{sb}}$	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd cm}^{-2} = 10^4 \text{ cd m}^{-2}$			
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx			
ガ ル	Gal	1 Gal =1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²			
マクスウエル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$			
ガウス	G	1 G =1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T			
エルステッド ^(a)	Oe	1 Oe ≙ (10 ³ /4 π)A m ⁻¹			
(a) 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	ユ		IJ	ſ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq		
$\scriptstyle u$	\sim	ŀ	ゲ	\sim	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$		
ラ				K	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy		
$\scriptstyle u$				L	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv		
ガ		$\boldsymbol{\mathcal{V}}$		7	γ	$1 \gamma = 1 \text{ nT} = 10^{-9} \text{T}$		
フ	T.		N	11		1フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m		
メー	ートル	/系	カラゞ	ット		1 メートル系カラット= 0.2 g = 2×10 ⁻⁴ kg		
ŀ				ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa		
標	準	大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa		
+1	ы		11	_		1 cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J		
15	Ц		9		cal	(「IT」カロリー), 4.184J(「熱化学」カロリー)		
3	ク			~	u	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$		