

小特集 ITER に向けた遠隔実験の現状

6 . BA 遠隔実験センターと ITER における遠隔実験

6. BA Remote Experimentation Center and Remote Experiments in ITER

小関 隆久, 米川 出¹⁾

OZEKI Takahisa and YONEKAWA Izuru¹⁾

日本原子力研究開発機構, ¹⁾イーター国際核融合エネルギー機構

(原稿受付: 2013年5月23日)

日欧共同の幅広いアプローチ(BA)活動の一つの事業として ITER 遠隔実験センター事業がある。この事業の目的は、ITER への遠隔実験を実現するため、技術的課題の検討や開発を行い、原子力機構青森研究開発センターに ITER 遠隔実験センターを構築し、JT-60SA や EU の現存するトカマク装置等を用いて、遠隔実験を実証することにある。この事業では、1) 遠隔地のユーザがオンサイトの実験室と同等の環境で効率的な遠隔実験を行えるシステムの開発、2) 実験計測データ量の巨大化に対応した効率的な大量データ転送および日本における ITER データストレージとしてのデータ保存、3) 遠隔地におけるリアルタイムなデータ参照を可能とするシステムおよびデータ解析ソフトの開発、4) プラズマシミュレーションと実験との融合を図り、より効率的な実験のプラズマ性能予測と実験結果の解明、等を活動のスコープとして挙げている。また、ITER における遠隔実験に向けた制御システム CODAC およびデータアクセスについての準備状況を報告する。

Keywords:

Broader Approach (BA), ITER, remote experiment, awareness, fast data transfer, storage, simulation, CODAC

6.1 はじめに

ITER は世界の 7 極が、核融合エネルギーの科学的・技術的実現可能性を実証することを目的として、共同して一つの装置を建設し、実験・運転を行うものであるが、ITER が建設される EU への実験参加には、日本など EU 以外の参加国には地理的に不利な状況にある。これを補う有力な方法として、遠隔実験参加があり、共同研究を行う大型施設においては、共通した必須の課題と言える。

日欧共同の幅広いアプローチ(BA)活動の一つとして、国際核融合エネルギー研究センター(IFERC)事業があり、原型炉設計R&D研究開発調整センター、計算機シミュレーションセンター、ITER 遠隔実験センターの3つのサブプロジェクトからなる。この内 ITER 遠隔実験センターは、青森県六ヶ所村の国際核融合エネルギー研究センターから ITER への遠隔実験を可能とするための事業である。2012年から、日欧間で遠隔実験センター事業の予備的議論が始まり、計画の全体計画について議論し、BA 運営委員会で承認された。ここでは、この ITER 遠隔実験センター事業の概要を報告する。

6.2 BA における ITER 遠隔実験センターの概要

当遠隔実験センター活動の目的は、核融合装置における遠隔実験センターのもつべき機能を確認し、ITER への遠隔実験を実現するための技術的課題の検討・開発を行う

こと、六ヶ所に ITER 遠隔実験センターを構築し、JT-60SA や EU の現存するトカマク装置等を用いて、実証することにある。この目的を達成するため、日欧間での議論により、遠隔実験の技術的課題として次のことを挙げた。1) 遠隔地のユーザがオンサイトの実験室と同等の環境で、ストレスなく効率的な遠隔実験を、臨場感をもって行えるシステムの開発、2) 実験計測データ量の巨大化に伴い、効率的な大量データ転送および効率的なデータ保存、3) 遠隔地においてもリアルタイムなデータアクセスと参照を可能とするシステムおよびデータ解析ソフトの開発、4) プラズマシミュレーションをより身近なものとし、実験とシミュレーションの融合を図り、より効率的な実験のプラズマ性能予測と実験結果の解明、等を活動のスコープとして挙げた。

また、これらを進めるため、ITER における制御システム CODAC との密接な情報交換や、JT-60SA や EU のトカマク装置との共同活動が必要であるとしている。

6.2.1 実験参加形態と放電シーケンス

遠隔実験の放電スケジュールの概念としては、図1のようになるであろう。図の右側は、ITER(サン・ポール・レ・デュランス*)や JT-60SA(那珂)の設置されているオンサイト側となり、左側は、リモートサイトでありこの場合は遠隔実験参加センター(六ヶ所)側である。オンサイトの研究者は、実験放電の条件パラメータを準備し、それらを保存管理する放電スケジュールストレージに保存され

Japan Atomic Energy Agency, Rokkasho, AOMORI 039-3212, Japan

¹⁾ITER Organization, St Paul Lez Durance, France

Corresponding author's e-mail: ozeki.takahisa@jaea.go.jp

* ITER 建設地については、ITER 機構の表記に合わせ、これまでの“カダラッシュ”(地元の呼称)から“サン・ポール・レ・デュランス”(行政住所)へ変更しました。

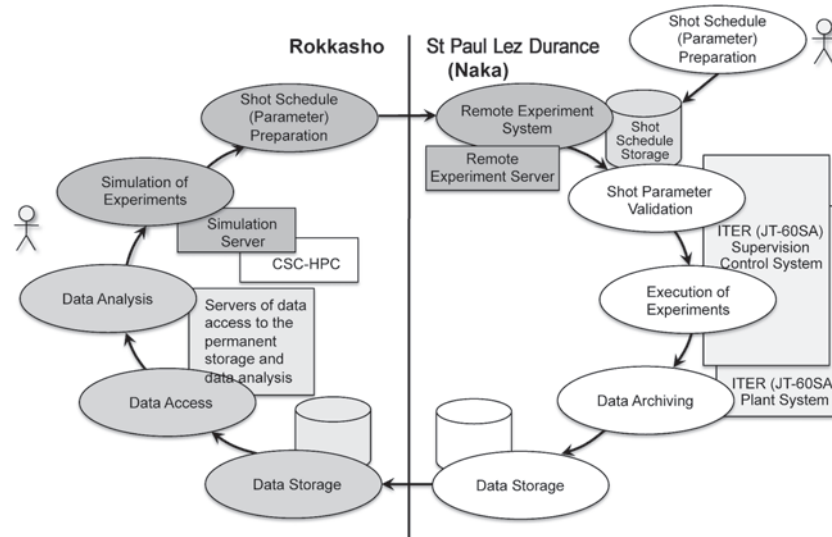


図1 遠隔実験における放電スケジュール概念。

る。放電条件パラメータは、装置の安全性上実行しても問題ないかを確認した後、放電を実施する。放電が終了すると直ちにデータは収集され保存される。オンサイトではこれを繰り返すことになるが、リモートサイトでは、オンサイトの実験データをリモートサイトまで転送し、リモートサイトでのデータ参照やデータ解析を行い、オンサイトと同様に放電パラメータの準備を行う。ここで作成された放電パラメータは、オンサイトへ送られ、同様に装置上の安全性を確認した後、放電が実施される。ここで、研究者が放電の解析や放電性能の予測のために、シミュレーションを利用し、実験放電をより効率的に実施することを想定する。

トリチウムを扱い、大電力システムとなる ITER 設備を遠隔で操作することは、設備の保護や安全上、許されないが、上記のシーケンスのように、実験放電の条件の設定と結果データの解析により、オンサイトの研究者と同等の条件で核融合実験を行うことはできる。これを実現するため、遠隔実験システムとしては、実験パラメータの設定およびオンサイトとの設定パラメータの送受信、運転状態や放電スケジュールの監視、プラズマ放電状態の実時間情報を表すデータストリーミング、等の機能を備えた遠隔実験システムが必要である。また、オンサイトとリモートサイトを結ぶ、テレビ会議等の情報交換システムが必要である。ここで、リモートサイトにおいて実験に参加している臨場感をもてることや、オンサイトにおける存在感を与えることが必要である。そのためには、テレビ会議において、大画面を用いて等身大の人物表示や可能なら立体的表示が有効である。また、テレビ会議画面や相手方の制御室画面だけでなく、装置の運転状態表示、プラズマの状態表示、解析データ表示等を同時に大画面で表示できるような、多機能を持った情報交換および表示機器が必要となるであろう。これらの詳細な仕様については、今後、日欧の議論に基づいて構築され、その機能について JT-60SA や EU のトカマク装置を用いて実証を行う予定である。

6.2.2 高速データ転送とデータストレージ

ITER の実験で得られる実験計測データは、1 放電あたり 1-10 TB のオーダになることが考えられ、従来の大型磁場閉じ込め装置の 10 - 100 倍以上となるであろうと予測されている。遠隔地からのこれらのデータ参照やデータ解析には、高速のデータ通信が必要となる。そのためには、まず六ヶ所の遠隔実験サイトから ITER サン・ポール・レ・デュランスまでのネットワークインフラが整備されることが必要であり、2012年に六ヶ所サイトから最寄りの SINET 4 のデータセンター(弘前)まで、10 Gbps の専用線で接続した。これにより、欧州まで SINET4 の国際回線により広帯域のネットワーク接続が実現できた。本小特集の第 3 章で詳しく述べられているように、今度、ITER の実験・運転が行われる時代には、100 Gbps 以上になると想定され、そのとき、ボトルネックとなるような地方の回線の広帯域化も忘れてはならない。またこのとき、整備されたネットワークインフラを最大限に利用可能な技術開発が求められている。これらの最新技術との連携協力によって、より良いものの導入の可能性を検討し、実現させることが必要である。

各々の研究者が、実験結果の参照や解析のため、ITER サン・ポール・レ・デュランスのサーバ機へアクセスして、その都度大規模データを転送するのは効率的でない。六ヶ所サイトに ITER のデータストレージがあれば、日本国内の研究者は、六ヶ所サイトのデータを利用することによって、効率的に ITER のデータ参照およびプラズマ解析が可能になる。また、このデータストレージは、ITER のデータストレージのミラーサイトとなり得る可能性がある。貴重な燃焼プラズマ実験データの保存としての意義がある。ITER の実験で予想されるデータの蓄積量は、1 年で 1 PB 規模になることが予想される。これは、2.2 章の LHD の場合に顕在化してきているように、データ量はムーアの法則(5 年で 10 倍、20 年で 1 万倍)で増加する可能性があり、巨大データストレージシステムは構築だけでなく、その後の維持管理の負担が大きな課題となる。さらに、

巨大データへの効率的な検索方法の検討およびストレージへの高速データアクセスが課題となる。これらの課題は、ITER オンサイトにおいても同様の課題であるため、ITER との連携が必要と考える。

6.2.3 データ解析とシミュレーション

ITER の燃焼プラズマ実験においては、1 放電あたりのコストが高く、多くの研究者が利用するとマシンタイムも多くは取れなくなることが想定される。そこで、限られたマシンタイムを有効に使うため、より効率的で詳細なデータ解析や、プラズマ性能予測が行える環境の整備を行う必要がある。そこでまず、実験時においては、主要な実験データのリアルタイムでのデータ参照や放電後の短時間でのデータ参照が必要になる。さらに、これらの実験データを必要に応じた解析コードの結合による迅速な解析を可能とすべきである。例えば、加熱・電流駆動解析、温度・密度計測による輸送解析による熱・粒子輸送解析、電流・圧力分布による MHD 安定性、高エネルギー粒子挙動、等である。

プラズマシミュレーション活動は、日本、EU を初めとして、各国で進められている。統合化コードはその代表的な活動であり、現時点で実験と連携してプラズマ性能予測・解析するには最も有効であると考えられる。詳細は、4 章に記述されたとおりであるが、プラズマ熱・粒子輸送コードと MHD 平衡コードをシミュレーションのプラット

フォームとして、加熱・電流駆動、MHD 安定性、プラズマ周辺およびダイバータ、高エネルギー粒子、ペレット入射、等のモデルの統合化が行われている。解析する物理課題に対応して、モデルを構築・統合し、あるいは不要なモデルを除くことの柔軟性をもたせることによって、効率的なシミュレーションが行える。これらの、モジュール化やコードの結合性機能が、統合化コードにおいて大事であり、ユーザに使いやすい環境構築が併せて求められる。

これらの統合化コードに加えて、プラズマモデルを単純化し外部コイル・電源系や粒子・熱の供給システムと組み合わせた統合モデルも実験運転上で必要である。さらに、放電の長時間化や将来の核融合炉に向けて、プラズマを囲む壁との相互作用やダイバータによる排気システム、外部設備との結合も順次、開発・整備することが望まれる。

これらのシミュレーションおよびデータ解析コードを有機的に利用可能とするため、ユーザに親しみやすいインターフェースを作成していくことが、遠隔実験システムとして求められる要件と考えられる。このため、国内外のシミュレーション活動との協力に基づき、実験データの解析・シミュレーションコードへのデータインターフェースや、複雑な入力パラメータを簡易な手法での入力可能なシミュレーションコードのプラットフォームの開発が必要と考える。(小関隆久)

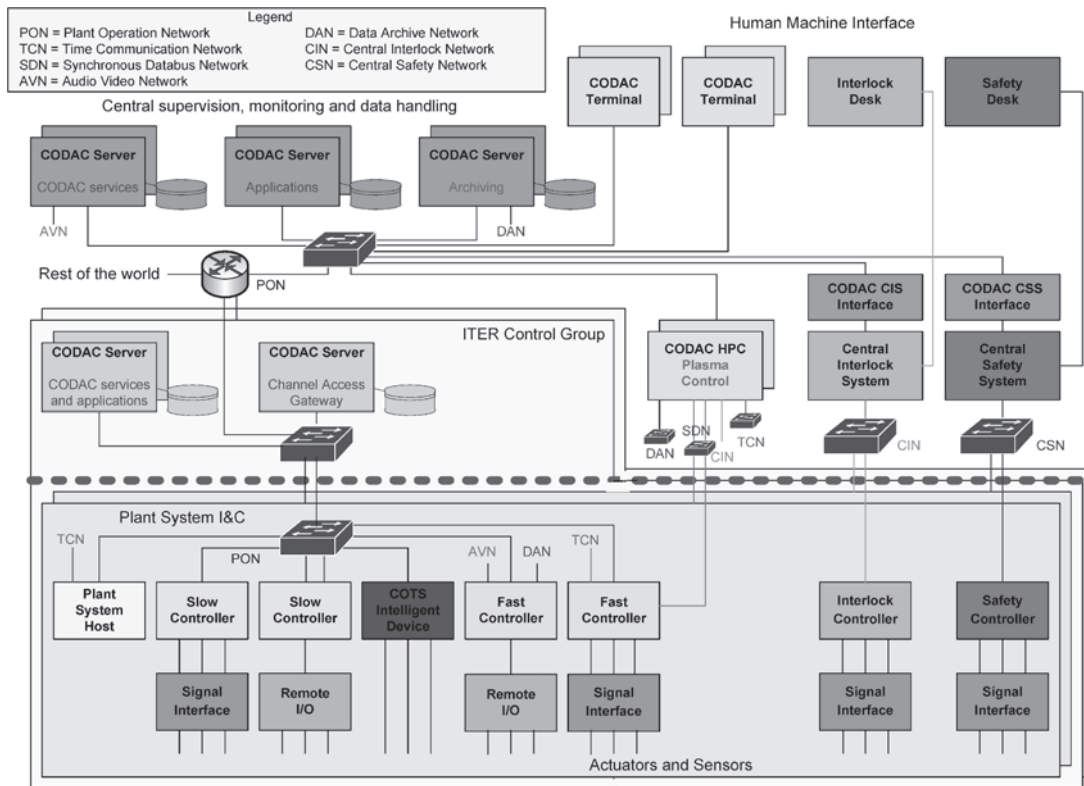


図 2 ITER 制御システムのアーキテクチャー構成図。

左側から順に通常制御系 (CODAC Server など)、保護系 (Interlock Control System) および安全系 (Safety Control System) を示す。中央制御系とプラント制御系との通信を行うネットワークとして、その機能別に、以下のネットワークが用意されている。ここで、PON: 通常の運転制御系データ通信ネットワーク、SDN: 主としてプラズマ制御系に用いるフィードバック制御データ通信ネットワーク、TCN: 時刻信号通信ネットワーク、DAN: プラズマ計測等大容量データ通信ネットワーク、AVN: 画像データ通信ネットワーク、CIN: 保護系ネットワーク、CSN: 安全系ネットワーク。

6.3 ITERにおける制御システムの現状と遠隔実験参加に向けた構想

6.3.1 ITER 制御系の現状

ITER 制御系のシステム構成は図2に示すように、通常制御系(CODAC)、ITER 設備機器の保護系(ICS)および安全系(SCS)と独立した3つの機能に分かれている。さらに、これら3つの機能は、ITER 機構が設計、製作の責任を持つ中央制御系と、ITER を構成する7極が設計、製作しITER 機構に納入するプラント制御系の2重の階層に分かれている。

現在のところITER の制御系は、プラントの機能毎に運転、制御の観点から19のグループに分類され、プラント制御系全体としては220システムとなる。各プラントの通常制御系はプロセス量の検出器および操作器、それらを制御するコントローラと中央制御系との通信を行うネットワークから構成される。保護系および安全系も同様のシステム構成である。統合されたITER 全体の運転は中央制御室に用意されたCODAC ターミナルから実行され、各プラントの試験運転やトラブル処理は現場近くに移動可能なターミナルを用いて実施される。安全系については専用の安全系ターミナルが中央制御室とバックアップ制御室に設置され、ITER の安全運転を確保している。さらに詳細な制御系の構成については文献1を参照。表1にITER 制御系設計の主要パラメータを示す。

6.3.2 ITER 遠隔実験参加の構想

ITER 遠隔実験への参加のためのデータアクセス方法としては、現在、ITER CODAC の設計では、主として遠隔実験サイトからITER へ運転依頼用のデータアクセスのためのゲートウェイ(ORG)と、ITER から遠隔実験サイト向けに用意された通常のゲートウェイ(Outgoing data gateway)を個別に用意している(図3参照)。このORG 設計に対する基本的な要求項目としては、

- Plant Operation Network (PON) と呼ばれるプラント運転ネットワークに対しては、他のネットワークから自動的なデータの伝送は行わない、
 - PON に伝送するすべてのデータは、そのデータの作成元で責任をもって承認、検証されること、
 - ORG における如何なる機能もITER の保護、安全機能に影響を及ぼさないこと、
- である。自動転送なしとする基本的な方針は、ORG の機能の一部がPON の外部に必要であることを意味する。このORG は、外部からの要求受付とPON に対する処理の依頼を行う。ORG は、指令 応答処理の基本に基づいて設計されている。指令に対する動作としては、CODAC 内部のデータの変更である。連続的なデータ受信は現在のORG の設計においては考慮していない。ORG は、主としてデータ検証を行うことと、ゲートウェイ機能としてデータ伝送効率を上げるために応答データの返送は行わず、要求に対する状態の応答のみを返す。

ORG は要求の妥当性とその要求のもたらす影響を判断する機能を備えており、制御室の運転員をサポートすることが可能である。ほとんどの要求は用意された論理機能により十分に検証されるため、その処理が遅延したり拒絶される場合がある。受け入れ可能な要求は、ORG データベースで整理される。要求には以下の項目が含まれている；

- 要求の許可者(役割)
- 入力データフォーマット
- 出力データフォーマット(必要な場合)
- 検証に必要な論理モジュール

ORG を介して伝送するデータリストについては現在、検討中である。注目すべき伝送データとしては、運転スケジュール、特別なプラント設備(例；プラズマ計測システム

表1 ITER 制御主要パラメータ。

Parameter	Value
Total number of computers	1.000
Total number of signals (wires)	100.000
Total number of process variables	1.000.000
Total number of active operator screens	100
Update rate per screen (200 PVs)	5 Hz
Maximum sustained data flow on PON	50 MB/s
Total engineering archive rate	5 MB/s
Total scientific archive rate (initial)	1 GB/s
Total scientific archive rate (final)	20 GB/s
Total scientific archive capacity	Few PB/year
Accuracy of time synchronization	50 ns RMS
Number of nodes on SDN	100
Maximum latency asynchronous events	1 ms
Maximum latency sensor to actuator (SDN)	500 μs
Maximum jitter sensor to actuator (SDN)	50 μs
Maximum sustained data flow on SDN	25 MB/s

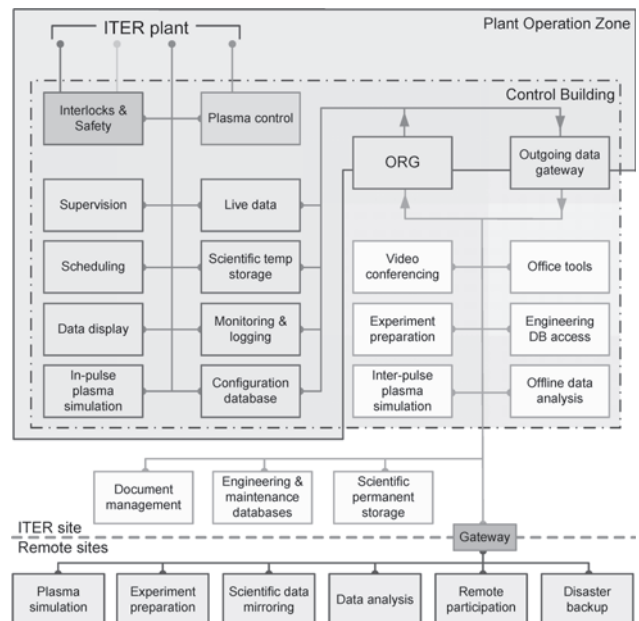


図3 遠隔実験サイトとのデータアクセス概念。

Disclaimer

The views and opinions expressed herein do not necessarily reflect those of the ITER Organization.

ム)の遠隔設定,ソフトウェアの改訂などが考えられる。一方,ORGはFirewallによりネットワークとしての安全が確保されたPlasma Operation Zone(図3参照)とその外部との通信をするためのインターフェースであり,通信手順などアプリケーションプログラムインターフェース(API)を含むリクエストの仕様を定める必要がある。ORGはユーザその個人と同時に実験における役割を認知しており,これらの情報をアクセスの検証に使用する。CODACはORGのプロトタイプを作成し,インターネット上のユーザからウェブ・インターフェースを介し認証・承認等の検証を経て,POZ領域にリクエストをする通信試験を実施している。

一方,ITER 実験データ,一部の長時間プラント運転状態データ等,ITER から遠隔サイトへ送出するデータは通常のゲートウェイ(図3, Outgoing data gateway)を介して伝送する。(米川 出)

6.4 最後に

BA活動に基づきITER遠隔実験センターの構築に向けた準備が始まって,概要がみえてきており,ITERにおけ

る準備も進んでいる。本小特集の2章から5章まで述べていただいたように,遠隔実験センターを構築する上での技術課題は幅広く,多岐に渡っているが,これらの研究開発活動との連携を図りつつ,最新技術に基づいて,ITER遠隔実験センターを構築していくことが肝要であろう。数十年前に思考していた段階の科学技術が,現在,日常的に使われているというのは,よくみられることである。まだ遠いと思われるITERを用いた実験が,当遠隔実験センター活動を通して身近なものとなり,ITERにおける核融合研究への日本からの貢献に資することが期待できる。

最後に,本章はITER遠隔実験センターの全体計画に基づき作成いたしました。ITER遠隔実験センターの全体計画の議論および作成にご尽力いただいた,IFERC事業長の中島徳嘉教授(核融合科学研究所),欧州実施機関技術調整役Susana Clement Lorenzo(Fusion for Energy),および議論いただいた日欧の専門家の方々に感謝いたします。

参考文献

- [1] A. Wallander *et al.*, IEEE Trans. Nucl. Sci. 58, 1433 (2010).

小特集執筆者紹介

お げき たか ひさ
小 関 貴 久

日本原子力研究開発機構核融合研究開発部門。長い間、那珂核融合研究所で、トカマクプラズマのMHD安定性の研究、燃焼プラズマの統合コード研究など、炉心プラズマの実験解析に従事。7年程前からBA計画の計算機シミュレーションセンターや遠隔実験センターに関わり始め、昨年からは、六ヶ所BAプロジェクトユニットに異動。ちょっと涼しい北国での単身生活を楽しんでいる。

いさ やま あき ひこ
諫 山 明 彦

日本原子力研究開発機構核融合研究開発部門研究主幹。大阪府豊中市出身。日本原子力研究所に入所後、JT-60Uの電子サイクロトロン放射計測、新古典テアリングモード等のMHD不安定性研究、高ベータプラズマの定常化研究、およびJT-60SA用高周波加熱装置開発等に従事。今回の執筆でJT-60Uの実験のことを懐かしく思い出しました。

なか にし ひで や
中 西 秀 哉

核融合科学研究所高温プラズマ物理研究系准教授/情報通信システム部(併任)。長年の悲願がかなってICS部が核融合研に新設されました。情報化元年となるよう不惜身命、粉骨碎身、... CIOs must "get control" and "say yes" to the business.の精神で何でもやります!

は せ がわ まこと
長 谷 川 真

九州大学応用力学研究所、助教。主に、プラズマ制御およびそのシステム開発などを行っています。質実剛健の思想で、見ただけで使い方が分かるシンプルなシステムをいつも目指しています。が、それに慣れすぎて、その背後にある複雑な事柄をいつの間にか、すっかり忘れてしまっている自分自身もいて苦心する日々です。

よし かわ まさ ゆき
吉 川 正 志

筑波大学数理物質系、准教授。もともとは、プラズマ分光、マイクロ波診断がメインでしたが、最近はビームプローブを経てトムソン散乱計測にも手を染めています。GAMMA 10の低密度プラズマに対応したトムソン散乱計測の精度向上に努めています。最近では、25年以上通勤に使用しているオートバイのメンテナンスに頭を悩ませています。これまでにいろいろ部品をオークションで落札して交換してきましたがそろそろ部品がなくなりつつあり、いつまで乗れるか心配しています。

やま ちと たか し
山 本 孝 志

核融合科学研究所大型ヘリカル研究部、助教。情報ネットワークに従事。太陽エネルギーは地球上の生命を育む源です。その恩恵を得るべくキッチンガーデンを二羽の鶏と共に実践中。庭の食物連鎖の頂点に立つ鶏は、本当に素晴らしく可愛い鳥です。

え ちと まさ ひこ
江 本 雅 彦

核融合科学研究所ヘリカル研究部助教。主な研究分野はデータ処理。趣味はカメラとドライブ。こちらに来て10年以上経ちますが、土岐の夏には未だに慣れません。今年も暑い。

ふく やま あつし
福 山 淳

京都大学大学院工学研究科、教授。抵抗壁安定化、低域混成波電流駆動、イオンサイクロトロン波加熱、トカマク乱流輸送、アルヴェン波固有モード、電子サイクロトロン波電流駆動等の理論とシミュレーションを経て、炉心プラズマ統合モデリングに従事。今春、桂キャンパスに研究室が移転し、新緑のかなたに岩清水八幡の丘を眺めつつ、この原稿を仕上げればコード開発に時間をとれると楽しみにしています

たん やす お
丹 康 雄

北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科教授。現在は主にホームネットワークやスマートグリッドの研究と標準化活動を行っている。総務省情報通信審議会では電気通信システム委員会と放送システム委員会の両方で専門委員をつとめるなど、通信、放送、エネルギーなど、様々な分野に出没する。

よね かわ いづる
米 川 出

ITER 機構、制御・加熱・計測部門、中央制御 Division、プラント計測・制御 Section Leader; 20数年の JT 60制御に関わる研究・開発経験をもとに現在 ITER 機構にて丁度20数年前にタイムスリップしたような仕事をしています。しかし、周りを取り巻く環境と風景は、その当時とは大きく変わっており、時の流れを痛切に感じています。