

高度なセキュリティーで遠隔地からの核融合実験を実現 Realization of a nuclear fusion experiment from a remote place by the advanced security

独立行政法人日本原子力研究開発機構
核融合研究開発部門
小関 隆久

核融合研究分野では、実験装置の大型化・集約化に伴い、遠隔地の多数の研究者が大型装置の実験に参加する研究協力が推進されている。しかしながら、インターネットを利用した遠隔研究システムにおいては、不正侵入による大型施設のセキュリティーが課題となっていた。そこで、IT Based Laboratory (ITBL)の基盤技術とWeb技術を応用することにより、高度なセキュリティーを保ちつつ遠隔地からインターネットを用いて臨界プラズマ試験装置 (JT-60)の実験を行うシステムを開発し、京都大学から安全かつ実用的なJT-60実験に成功した。これは、遠隔地の研究者が大型の核融合実験装置を用いた実験をオンサイト研究者とほぼ同等な環境で実施できることを世界で初めて実証したものであり、国際熱核融合実験炉ITERの遠隔実験の実現に向けて世界を先導する成果である。

1. はじめに

大型核融合プラズマ実験装置JT-60による遠隔実験は、ネットワーク上に遠隔コラボレーション環境を構築し、研究開発プロセスの高度化および変革を検討することから始まった。様々な分野で共通する遠隔での利用環境を最新の情報技術を用いて構築することは重要である。このようなシステムを構築するにあたり、遠隔地との情報交換のための要素技術や臨場感のある操作性の良い統合システムを開発し、実際の研究現場に適用・検証して、競争力のある技術開発を行う必要がある。大型装置を用いるビックサイエンス分野は、全国に分散した多くの研究者・技術者が様々な形態で遠隔参加することが考えられ、階層的構造を構成すると考えられる。また、大型実験装置への遠隔参加と、スーパーコンピュータを用いた大規模シミュレーション研究との有機的な統合化を広帯域ネットワーク

により構築し、新たな研究形態を形成することが様々な分野で考えられる。これらの研究の一部は、文部科学省ITプログラム「スーパーコンピュータネットワーク上でのリアル実験環境の実現」通称 VizGrid projectの受託研究（平成14年～18年）^[1]の基に進められ、VizGridプロジェクトで開発された各要素技術およびその統合システムの適用・検証の知見は、核融合研究における遠隔研究環境の構築にフィードバックされている^[2-5]。

ここでは、核融合分野における遠隔研究のあり方を述べ、JT-60において開発された遠隔実験システムおよびその実施について報告する。

2. 核融合研究開発分野における遠隔研究

核融合研究分野では、研究の進展により実験装置の大型化が進み、それに伴う集約化が求められている。このため、核融合研究のエ

キスパートをITにより結集し、全国に分散した解析手法・解析コードの有効利用と膨大な実験データの多角的利用により、大型実験装置のコストパフォーマンスの向上と科学的理解の向上を図ることが必要である。

一つの理想的な遠隔研究協力体制として、図1の様に、大規模装置による実験データベースやスーパーコンピュータによる数値実験と直結した大規模なデータベースを持ち、広帯域の基幹ネットワークへ連結することによって、データベースとシミュレーションおよび解析コード、大型施設での実験結果、全国のエキスパートを結集することが可能となる遠隔協力研究システムが構築できる。ここで、我々はこれを「核融合研究グリッド」と呼ぶこととした^[5]。このグリッドの有機活用によって、研究活動のスピードアップや経済的効率化の点で重要であると同時に、研究体制の変革により新たな研究の発展が期待できる。

また、遠隔協力研究は、様々なレベルの協力形態があり、核融合分野においては、遠隔

実験、遠隔計測、遠隔解析・評価が考えられる。遠隔実験では密接な情報交換による臨場感のある遠隔研究参加が求められ、同時に大型実験装置を遠隔地から操作するため高いセキュリティで守られたシステムが必要である。一方、遠隔解析・評価では臨場感や厳格なセキュリティより、シミュレーション結果の画像処理など巨大なデータのリアルタイム処理・転送が求められる。また、各レベルにおいては各々異なった技術を持ったエキスパートの結集が必要であり、階層的構造を持った協力研究システムの構築が必要である(図2)。

これまでに、複数拠点における遠隔地の研究者と実験結果データあるいはシミュレーション結果データの可視化画面を共有して遠隔討論が行える遠隔協調解析システム(VizAnalysis)を開発し^[2]、円滑なリアルタイムコミュニケーション環境構築を試みた。遠隔研究支援のため、遠隔研究者の文書管理システムとして、Web画面によるポータル機能(VizSquare)の開発・適用を行った^[2]。

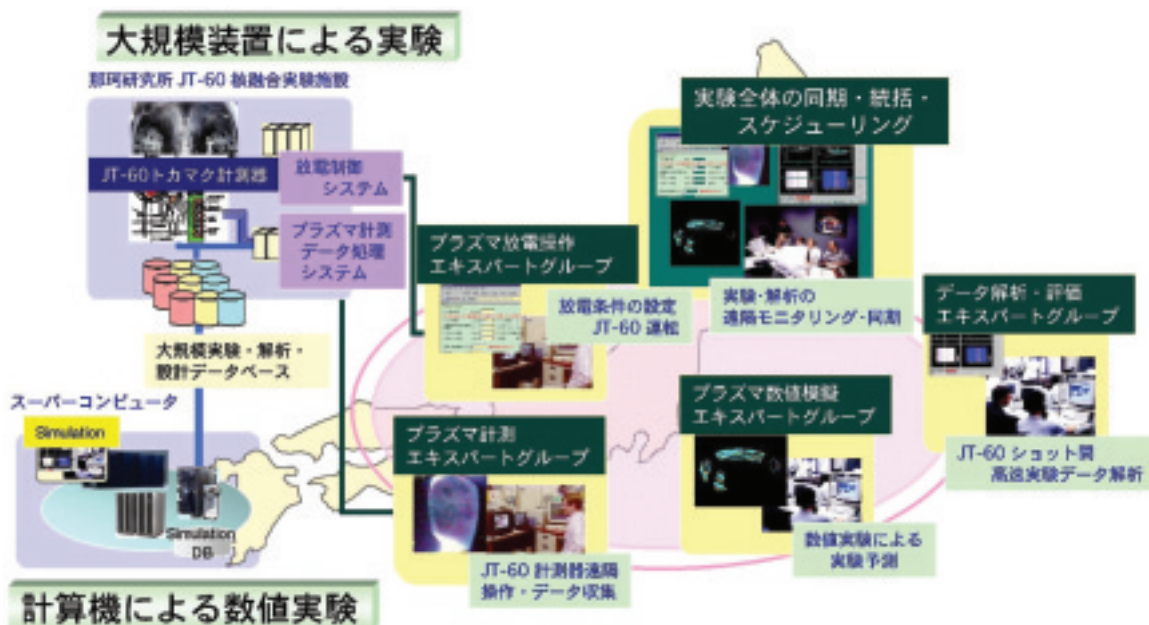


図1 協調型研究環境システムの構築、実験・計算融合型遠隔核融合研究による「核融合研究グリッド」

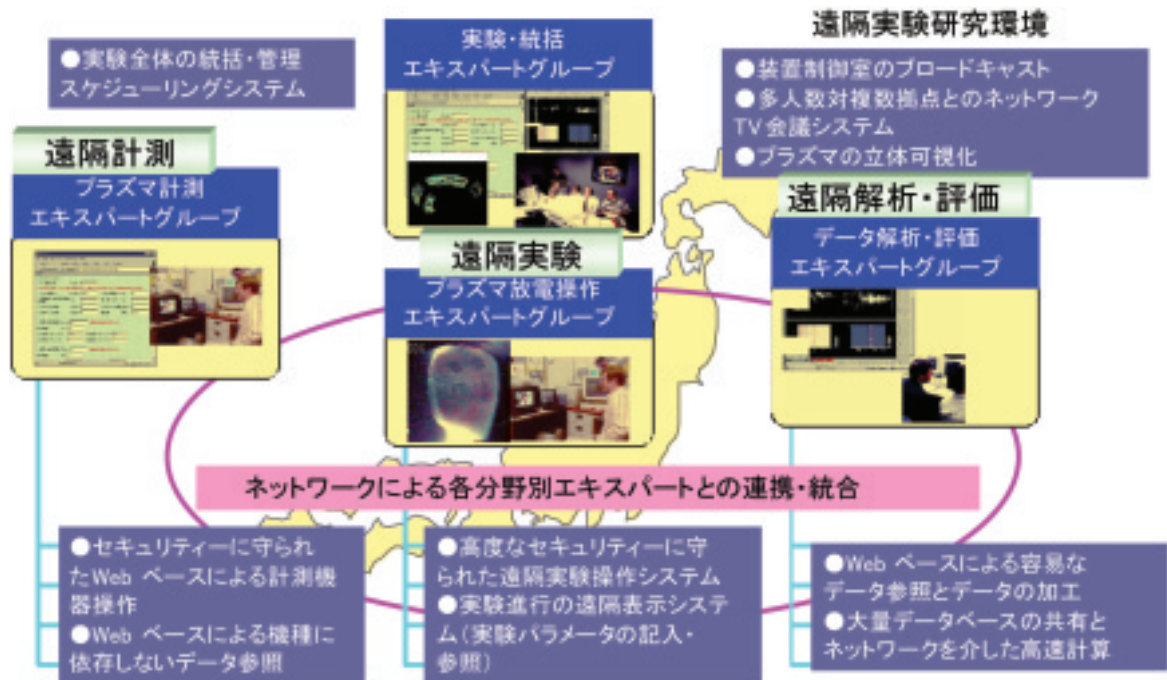


図2 階層的遠隔研究

さらに、核融合分野への適用・検証に向けて、JT-60U核融合施設での遠隔計測を可能とするため、ネットワークを用いて遠隔地から計測機器を操作、監視するプログラムを開発した^[3]。セキュアな環境下での遠隔実験システムの開発、遠隔地との情報交換の基本となるテレビ会議と情報配信システムの適用・検証を行った^[4,5]。

3. 遠隔実験システムの開発

国際熱核融合炉ITERやJT-60Uなどに代表されるように、世界で一台あるいは日本で一台に集約化された大型実験装置になっており、遠隔地の多数の研究者が大型装置の実験に参加する研究協力が必須となっている。このため、グリッド技術を用いて円滑なコミュニケーションとデータ及び計算機資源の統合を行い、汎用性の高いシステムを構築することが急務となっていた。一方、クラッカーなどによる計算機への攻撃やデータへの不正アクセスなどが社会問題化しており、ネットワークを利用する遠隔実験環境では、セキュ

リティーに配慮することが最重要課題となっている。そこで、IT Based Laboratory (ITBL)^[6]の基盤技術を利用することによりセキュアな環境を保ちながら、遠隔実験や遠隔解析・評価を可能とする遠隔研究環境の構築を行った。

開発した本システムは、セキュリティーを確保しつつ、遠隔地の大学等の研究者がパソコン等のウェブブラウザを使ってJT-60Uの実験条件（通常、放電条件と称している）の設定や運転状況の把握ができる環境を提供する。本システムと、テレビ会議システム、遠隔からの運転状態表示、実験データ表示・解析ツールを併用することにより、外部の研究者は所内の研究者とほぼ同等の環境で実験を実施できる。

JT-60U遠隔実験システム構成概念を図3に示す。このシステムは大きく分けて、外部からのアクセスに対してネットワーク・セキュリティを保つITBLセキュリティシステム、及びJT-60実験条件作成、実験結果の表示、JT-60設備の運転状態監視の情報を提供

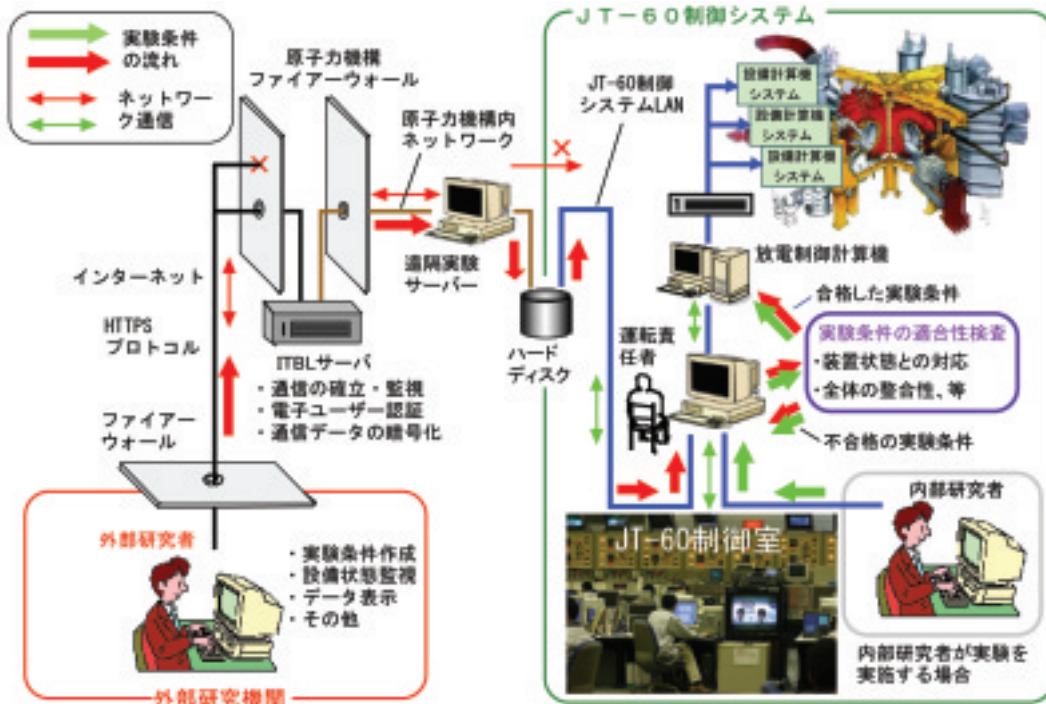


図3 遠隔実験システムによるJT-60実験の実施

する遠隔実験管理システム（遠隔実験サーバに搭載）の2つのシステムから構成される。

ITBLのセキュリティシステムにおいては、Public Key Infrastructureを用いて利用者とITBLフロントサーバについて認証を行い、利用者PCとITBLフロントサーバ間で通信経路の暗号化を行う。

まず、本システムを利用するためにWebブラウザより遠隔実験システムのサーバにアクセスしていくと、ITBLフロントサーバ認証を行う手順が始まる。フロントサーバからサーバ証明書が利用者側に送信されてくると、利用者PCにおいて、証明書に書かれている証明書の発行機関であるITBL認証局の署名の真偽を確認する。ITBL認証局の証明書が、利用者のWebブラウザに「信頼される認証機関」の証明書としてインプリメントされているものの中に含まれているかどうか確認し、含まれている場合には、証明書は信頼できるものとしてサーバは認証される。

サーバの認証手続きが終わると、今度は利用者の認証が行われる。サーバの認証とは逆に、

クライアント証明書がサーバに送られ、証明書にあるITBL認証局の署名の確認が行われ、サーバ側が信頼している認証局の発行であることが確認できると、利用者は認証される。

認証のプロセスが終了すると、暗号化通信路を開くために、利用者PC及びITBLフロントサーバが使用する共通鍵を作成する。共通鍵の作成のために、クライアント側は、プレマスタシークレットという共通鍵の元となるデータをサーバ証明書に含まれているサーバの公開鍵を利用して暗号化しサーバに送る。サーバ側では、サーバの秘密鍵を用いて復号し、プレマスタシークレットを取得する。クライアント及びサーバ双方で共通のプレマスタシークレットから共通鍵を作成する。この共通鍵を用いて、通信時に暗号化復号化することで、サーバとクライアント間で暗号化通信路が開かれる。

認証及び暗号化通信路の確保が終了すると、遠隔実験サーバから利用者PC上のWebブラウザに対して、遠隔実験管理システムのアプリレットがダウンロードされ、放電実験

に関わる各種機能が利用可能となる。

本システムは、このようなセキュリティーにより、不正利用者のJT-60U制御システムへのアクセスや実験条件データの改ざん及び盗聴を防止することができる。

遠隔実験管理システムでは、JT-60U制御システム外のネットワークからのアクセスを遠隔実験サーバまでに限定することにより、JT-60U制御システムへの外部からの侵入を防止しつつ、実験条件等のデータの送受信を可能とした。当初、X-windowを用いたシステムであったため、十分な応答速度が得られなかった。そこで、スループットの向上が見込めないため、データの総送受信量を減らし、インタフェースの操作中の通信を無くすことで応答性能の改善を図ることにした。そのために、JAVA言語を用い、実験条件作成、結果表示、設備状態監視の各機能を新たに製作することにより、マウスやキーボード操作情報等のリアルタイムデータの送受信がなくなって、放電条件を作成するための必要な総データ送受信量が激減し、ITBLのセキュリティシステムを経由した状態でも十分な応答速度を実現した。また、サーバの処理負荷が大幅に軽減されるとともに、操作性が向上した。これによって、Webブラウザから利用可能となり、ユーザーフレンドリーで且つプラットフォームに依存しないシステムとすることが出来た。

さらに実験運転の安全を確保する観点から、外部からJT-60U装置へ直接的な運転操作はできないシステム構成とした。外部の研究者が作成・保存した実験条件は、所内の研究者が作成・保存した実験条件と同様に、JT-60U運転体制の管理下に置かれ、装置に重大な支障を来すことが無いように、実験条件の適合性検査を経て実行される。この様に、多重のセキュリティシステムによって、安全かつ機能的な遠隔実験システムを構築することができた。

4. JT-60遠隔実験の実施

当システムを用いて、京都大学の共同研究者からJT-60Uへの遠隔実験を実施した。このときの主要な通信経路は、京都大学宇治キャンパスから、Super SINETを経て、ITBL東海サイトフロントサーバ及び中継サーバ、那珂研遠隔実験サーバであった。実験は、高プラズマ圧力の定常維持に向かう時に生じる磁場の乱れの発生の条件、即ち、プラズマ加熱入力パワーに対する乱れの発生依存性を調べる共同実験を実施した。テレビ会議システムを利用して、JT-60制御室実験チームと遠隔地との間でリアルタイムに議論しつつ、実験を進めた。

始めに、Webブラウザを用いて遠隔実験サーバに接続すると、ユーザーの電子認証の手続きを行い、その後、遠隔の端末機へ放電条件設定のJAVAアプレットがダウンロードされ、遠隔実験を実施する環境となる。実験運転責任者からの指示により、遠隔地で放電条件を設定し、条件が書かれたファイルを遠隔実験サーバへ転送した。転送された条件は、装置の健全性が確認された後、装置側へインプットされ準備状態となり、実験運転責任者の許可により入力された放電条件に従いプラズマ放電が実施された。この間、遠隔地の研究者は、装置の運転状態および放電によってできたプラズマの状態を遠隔地からモニターし、次回放電の条件を作成した。

この様にして、遠隔実験が実施された。これは、大型の核融合実験装置において、遠隔地の研究者がオンサイト研究者と同等な環境で実験を実施できることを世界で初めて実証したものである。

5. おわりに

当遠隔実験システムの開発によって、国内共同研究重点化装置としてのJT-60Uの役割を高めるだけに留まらず、青森県の六ヶ所村に国際協力によって建設予定の遠隔実験セン

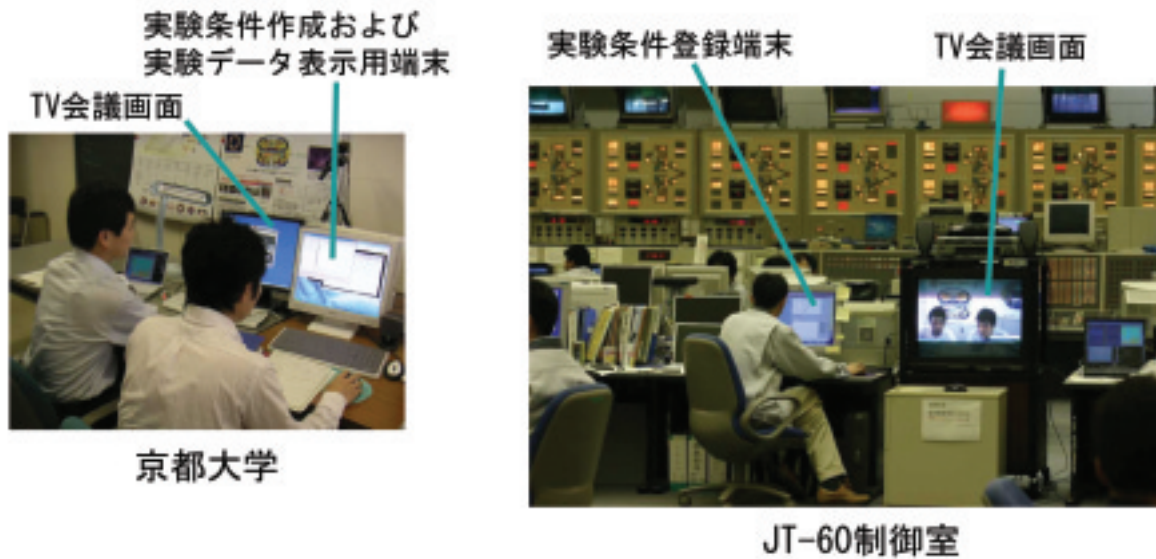


図4 JT-60への大学からの遠隔実験の実施写真

ターから、欧州に建設される次期核融合実験炉ITERへの遠隔実験の実現へ向けた技術基盤を実証するものとなった。また、ここで開発された遠隔研究の要素技術は、産業界における大型プラント施設の遠隔操作技術へ発展することが期待できるものである。

参考文献

- [1] M.Okuda, et al., VizGrid:Development of teleimmersive collaboration environment, The 3rd International Conference on Parallel and Distributed Computing, Applications and Technologies,(2002)94-99.
- [2] T.Oshima, O.Naito, K.Hamamatsu, K.Iba, M.Sato, T.Tsugita, T.Matsuda, K.Iwasaki, Y.Karube, T.Koyama, T.Ozeki, Development of environment for remote participation of fusion research in JT-60, Fusion Engineering and Design, 71 (2004) 239-244.
- [3] M.Sato, T.Tsugita, T.Oshima, S.Sakata, K.Iwasaki, T.Matsuda, K.Iba, T.Ozeki, Development of workstation-based CAMAC data acquisition system for JT-60 data processing system, Fusion Engineering and Design, 71 (2004) 145-149.
- [4] S.Sakata, T.Totsuka, K.Kiyono, T.Oshima, M.Sato, T.Ozeki, Progress of data processing system in JT-60-Development of remote experiment system-, Fusion Engineering and Design, 81 (2006) 1775-1778.
- [5] K.Iba, T.Ozeki, T.Totsuka, Y.Suzuki, T.Oshima, et al., Development and verification of remote research environment based on “Fusion research grid”, Fusion Engineering and Design, (2008) in press.
- [6] K.Higuchi et al., Development of a virtual research environment in ITBL Project, Proceedings of the International Conference on Supercomputing in Nuclear Applications, Paris, (2003) 22-24.