



小特集 ITER に向けた遠隔実験の現状

2. 既存装置の遠隔実験の現状および予定と課題

2. Status of Remote Experiments in Fusion Reactor, Issues and Plans

2.1 JT-60U における遠隔実験

2.1 Remote Experiments in JT-60U

諫山 明彦

ISAYAMA Akihiko

日本原子力研究開発機構

(原稿受付：2013年5月23日)

本章では、JT-60U において行われた遠隔実験について述べる。JT-60U ではセキュリティが確保された条件のもとでリモートサイトで実験条件を作成するシステムを開発した。リモートサイトから実験データ解析サーバにアクセスするツールと併用することにより、放電条件の作成、プラズマ放電後の実験データの解析、データ解析結果に基づく次の放電条件の決定が可能となった。このシステムを用い、京都大学およびドイツ・マックスプランクプラズマ物理研究所と遠隔実験を実施した。実験データの解析結果に基づき、中性粒子ビームパワーや電子サイクロトロン波パワーを変更することにより、研究対象の不安定性の挙動に関するデータが取得でき、所期の目的を達成することができた。本章ではこれらの結果とともに、JT-60U での実験経験から、将来実験チームの一員として遠隔参加する際に重要と考えられる項目も述べる。

Keywords:

remote experiment, JT-60U, SINET, AEGIS, ITBL

2.1.1 はじめに

本章では、日本原子力研究開発機構の臨界プラズマ試験装置 JT-60 において行われた遠隔実験について述べる。JT-60U においては、「遠隔実験」が何度か行われ、TV 会議システムを使ってリモートサイトから参加し、実験解析を行ったり計測装置の設定や変更を行ったりした例があった。例えば、テレビ会議システムを用いて米国・プリンストン大学から JT-60U の高性能プラズマ維持実験に参加した[1, 2]。本章では、これをさらに進め、JT-60U の実験条件をリモートサイトで作成してそれを JT-60 制御装置へ転送し、実験を実行した遠隔実験の概要について述べる。また、この遠隔実験では、決められた条件を機械的に実行するのではなく、実際の放電の状況を見ながら次の条件を設定するようにして、将来に想定される遠隔実験に近い状況にした。このような遠隔実験にあたっては、情報セキュリティを確保した上で実験条件を転送することが必要であり、かつ重要な開発要素であるが、JT-60U の遠隔実験の技術開発に関しては過去に報告がある[3, 4]。さらに、遠隔実験に関する最新の技術開発の状況が本小特集で詳細に記述されている。そのため、重複を避けるため本章では遠隔実験の実施時における状況や課題を主に述べることとする。本節の構成は次の通りである。第2節で JT-60U の実験

シーケンスの流れ、第3節で遠隔実験の設備について概説する。第4節で京都大学およびドイツ・マックスプランクプラズマ物理研究所との遠隔実験の実績を述べる。最後の第5節でまとめを述べる。

2.1.2 JT-60U 実験の流れ

JT-60U の運転では、運転全体を統括する実験運転責任者、実験内容を決定する実験主任、装置の状態を監視する当直長から構成される。中央制御室にはこのほか、JT-60 班（本体と電源）、計測、高周波（RF）、中性粒子ビーム（NB）の各運転班が配置につき、各設備の現場運転員と情報をやりとりする（図1）。

中央制御室では実験条件は通常専用端末で作成する。この条件作成では、プラズマ電流、プラズマ位置（水平位置、垂直位置、X 点位置など）・形状（プラズマ三角度など）、加熱（RF, NB）、ガス注入（密度フィードバックも含む）、計測条件などを設定する（図2）。加熱装置には複数の系統あるので、それぞれの系統の波形を設定する。また、電子サイクロトロン（EC）加熱装置では入力パワーの波形設定のほか、可動ミラーの角度の設定もある。その他、放電に必要なほとんどの条件はこの端末で設定される。

このように、1つの放電では非常の多くの条件を設定す

る必要があることから、通常は過去の類似の実験条件を呼び出して作成する。過去の放電データが保存されている領域から読み出して変更したデータは、一時保存することができる。実験放電としてシーケンスを実行する予定の放電条件は、「放電スケジュール表」(図3)に登録される。当日の設備状況との整合性や装置運転上の安全性の観点から、放電条件の妥当性は「合理性検査」で自動的にチェックされる。

以上は実験主担当と実験チーム(1名は実験主任)により作成される。作成された条件をプラズマ実験の観点から

実験主任がチェックし、問題なければ「サイン」をする(承認欄をクリック)。その後、運転責任者が放電条件を運転および実験の観点からチェックし問題なければ同様にサインする。2つのサインが揃うと当直長が設備状態の最終確認を行った後、シーケンスを実行する。このように複数のチェックを経た後、実験シーケンスが実行される。実験を行う時間は限られているため、実験の際は直前の放電の状況(加熱装置の入射実績、プラズマの可視カメラ画像など)や実験結果(温度、密度分布など)に基づき、素早く次の条件を作成する必要がある。このため、実験データを収集/処理する計算機と、データを解析するチームの能力が重要となる。

2.1.3 遠隔実験のための設備

遠隔実験に必要な設備として、(1)実験時の状況を把握するとともに先方と情報交換するためのテレビ会議システム、(2)リモートサイトでデータを表示・解析するためのシステム、(3)実験条件を設定・転送するためのシステムがある。(1)に関しては市販のものが利用可能であり、後述の遠隔実験でも既存のシステムを使用した。(2)に関連しては、トークン(フォブ)を使ったワンタイムパスワードにより認証手続きをして、リモートサイトから那珂研究所内の実験データベースサーバにアクセスするようにした。(3)に関連して、条件作成システムは元来JT-60専用につくられたものであり、オンサイトサーバに接続可能でかつ条件作成ソフトウェアがインストールされた端末でのみ条件作成が可能であった。しかし、このシステムはX-Windowをベースにつくられていたため画像データを通信することになり、リモートサイトで実験条件を作成するには応答時間がかかりすぎ、実用化は困難であった。そこで、通信量のより少ないJAVAをベースにしたソフトウェアを開発した。その結果、データ転送量が約1/10となりリモートサイトでの実験条件作成・転送が可能となった[5]。さ

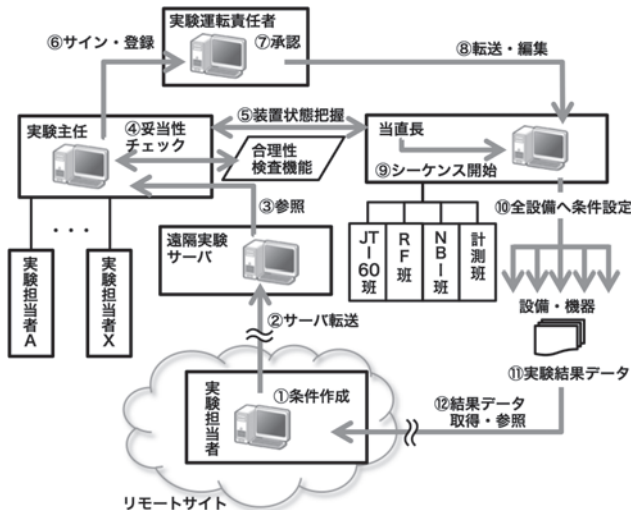


図1 遠隔実験での流れ。リモートサイトで作成された実験データは遠隔実験サーバに転送される(①-③)。JT-60中央制御室での読み出し・内容確認・承認(④-⑦)ののちシーケンスが開始される(⑧-⑩)。この図では実験運転に関する流れのみを示しているが、これとは別に実験データ解析サーバにアクセスし、各種計測データを用いて実験データの解析(⑪-⑫)を行う。リモートサイトから実験データ解析サーバへの接続に際してはワンタイムパスワードを用いた認証手続きによりセキュリティを確保している。

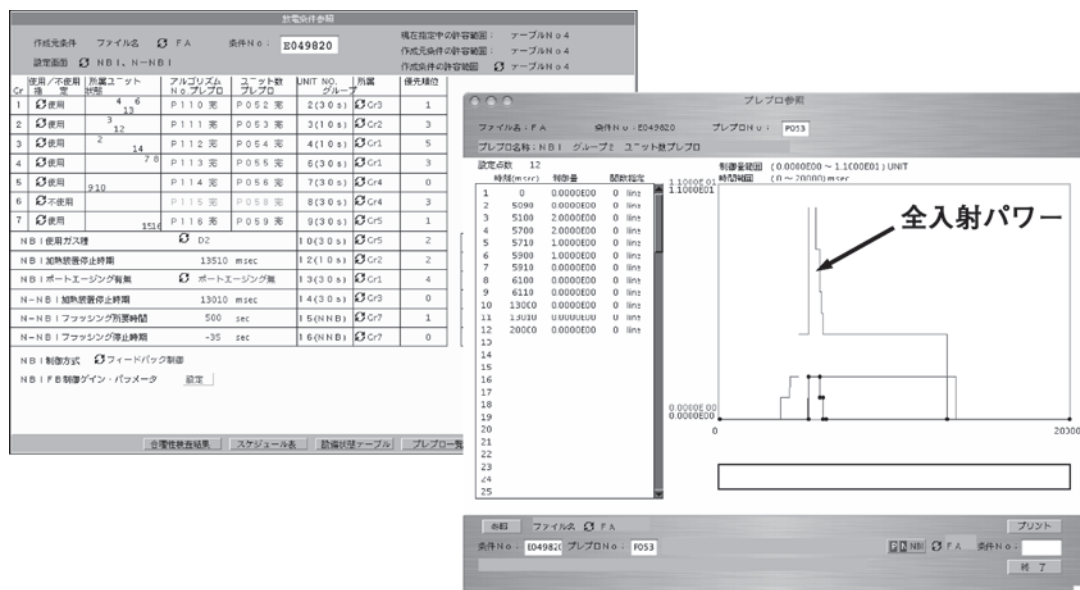


図2 実験条件作成画面(図はNB入射条件設定画面)。13ユニットのNBを最大7つのグループに分け、各グループの入射波形を設定する。また、各グループにおける各ユニットの入射優先順位も設定する。

No	案件No. 状態/実施日時	メインパラメータ	プラズマ 位置 (m)	ペレット (ms) トムソン (ms)	ガス注入量 (Pm3/s)	加熱 条件	サイン 承認	コメント
10	E049820 08/08/27 11:55:33 実行済	IP = 0.9 MA BT = 1.54 T NB = 11 unit NNB = 2 unit ECH = 0 unit, LH/IC = 0 unit	DR = 0.09 DZ = 0.17 DX = 0.30	P1 P2 P3 P4 T1 6000 T2 7000	1 D2 1.70 2 3 4 P 0.20 X 0.1 sec	-	ク 佐	from E49807, 20s, D2FB1.75MJ [high beta_N > 3], wNNB PNB: 3B, 4B, 7B, 8B, 12B DISRUPT
11	E049821 08/08/27 12:26:11 実行済	IP = 0.9 MA BT = 1.54 T NB = 11 unit NNB = 2 unit ECH = 0 unit, LH/IC = 0 unit	DR = 0.09 DZ = 0.17 DX = 0.30	P1 P2 P3 P4 T1 6000 T2 7000	1 D2 1.70 2 3 4 P 0.20 X 0.1 sec	-	ク 佐	from E49820, 20s, D2FB1.75MJ high beta_N > 3, NNB, chg gr1&6ofNE PNB: 3B, 4B, 7B, 8B, 12B GOOD
12	E049822 08/08/27 12:50:10 実行済	IP = 0.9 MA BT = 1.54 T NB = 11 unit NNB = 2 unit ECH = 0 unit, LH/IC = 0 unit	DR = 0.09 DZ = 0.17 DX = 0.30	P1 P2 P3 P4 T1 6000 T2 7000	1 D2 1.70 2 3 4 P 0.20 X 0.1 sec	-	山 小	from E49820, 20s, D2FB1.75MJ high beta_N > 3, NNB, chg gr1&6ofNE PNB: 3B, 4B, 7B, 8B, 12B DISRUPT
13	E049823 08/08/27 13:16:13 実行済	IP = 0.9 MA BT = 1.54 T NB = 11 unit NNB = 2 unit ECH = 0 unit, LH/IC = 0 unit	DR = 0.09 DZ = 0.17 DX = 0.30	P1 P2 P3 P4 T1 6000 T2 7000	1 D2 1.70 2 3 4 P 0.20 X 0.1 sec	-	山 小	from E49820, 20s, D2FB1.75MJ high beta_N > 3, NNB, chg gr1&6ofNE PNB: 3B, 4B, 7B, 8B, 12B GOOD
14	E049824 08/08/27 13:45:43 実行済	IP = 0.9 MA BT = 1.54 T NB = 11 unit NNB = 2 unit ECH = 0 unit, LH/IC = 0 unit	DR = 0.09 DZ = 0.17 DX = 0.30	P1 P2 P3 P4 T1 6000 T2 7000	1 D2 1.70 2 3 4 P 0.20 X 0.1 sec	-	山 小	from E49820, 20s, D2FB1.75MJ high beta_N > 3, NNB, chg gr1&6ofNE PNB: 3B, 4B, 7B, 8B, 12B SOFT LDG
15	E049825	IP = 0.9 MA	DR = 0.09	P1	1 D2 1.70			

図3 実験スケジュール表. E049820等はショット番号. メインパラメータの項目で, IPは(最大)プラズマ電流, BTはトロイダル磁場強度(大半径で3.32mの位置での値). 「ペレット(ms), トムソン(ms)」の項目は, ペレット入射時刻およびリバーレーザートムソン散乱計測(4秒おきに計測)の時刻. コメントには参照ショット番号や変更点などを記入する.

らに, 設定画面の変更があったときも容易に変更が可能である. また, リモートサイトのPC上で作成された実験条件は情報セキュリティの観点から安全に転送する必要がある. このためのシステムとしては, 原子力機構のシステム計算科学センターが開発してきたIT Based Laboratory (ITBL) [3]の基盤ソフトウェアおよびAtomic Energy Grid InfraStructure (AEGIS) [4]を用いて接続システムを開発した[6,7]. このシステムにより, リモートサイトでの研究者の認証および承認が完了すると, 通信は暗号化され, インターネット上のどのPCでもJT-60用の遠隔実験サーバとの接続が可能となった. リモートサイトで作成された実験条件が那珂研究所内の遠隔実験サーバに転送されると, JT-60中央制御室の端末から読み込むことが可能となり, オンサイトでの確認・登録が可能となる.

2.1.4 遠隔実験の結果

(1) 京都大学との接続

国内研究機関との遠隔実験の実証として, 2006年6月に京都大学宇治地区の長崎研究室と接続して実施した. このときの接続経路は, Super SINET→原子力機構LAN(ITBLサーバーを経由して遠隔実験サーバへ)であった.

遠隔実験での内容は, ポロイダルモード数(m)が2, トロイダルモード数(n)が1の新古典テアリングモード(NTM)が発生するベータ値(プラズマ圧力と磁場圧力の比)を調べるものであった. 実験条件としては, 過去にNTMが発生した条件を参考に作成した. NTMはベータ値の高いプラズマで発生する不安定性であり, 当日の第一壁の状態により圧力分布や電流分布がわずかに異なった結果, 発生しなくなったりする場合がある. そこで, 可視カメラ画像や計測データ等をリモートサイトから参照し, 次の放電のNB加熱パワーを決定した. 実験は順調に進み,

成功裏に終了した.

(2) マックスプランク・プラズマ物理研究所との接続

京都大学との遠隔実験の成功を受け, より遠方からの実行可能性を検証するため, ドイツのマックスプランク・プラズマ物理研究所(IPP)との遠隔実験を行った(図4). IPPからの通信は国内の数倍の伝送遅延が想定されたので, 遠隔実験を行う上で支障が生じないようにサーバでの入出力プロセスを減少させる等の最適化を実施し, 性能の向上を図った. また, 条件作成端末の表示を英語化するなどの作業を行った. 上記のように条件作成ソフトウェアはJAVAベースでつくられていたため, 更新作業はスムーズに進んだ. IPPとの通信は, IPP LAN→ドイツ国内ネットワークDFN→ヨーロッパネットワークGEANT(アムステルダム)→Super SINET→原子力機構LAN(ITBLサーバーを経由して遠隔実験サーバへ), という経路で行った.

実験目的は, 電子サイクロトロン波により $m/n = 2/1$ のNTMを完全に安定化させるために必要な最小のEC波パワーを明らかにする[8]というものであった. 京都大学との遠隔実験同様, 過去の実験条件をもとにNTMを発生させるようにNBパワーを調節した後, EC波パワーを徐々に減らしていった. JT-60UではEC波入射装置は4系統あったので, 各系統でパワーを変えて調整しておき, それを組み合わせることで入射パワーのステップ幅が小さくなるようにした. 実験においては, EC波入射によるNTMの安定化の効果を磁場揺動の信号等でリモートサイトから確認することにより, 次のショットにおけるEC波パワーの決定と放電条件の入力をリモートサイトで行い, 放電条件を日本へ転送して実験を実施した. 一連の実験により, NTM安定化に必要な最小EC波パワーの範囲を絞ることができた. この遠隔実験は新聞社やテレビ局を招いて行われ, その結果は日本およびドイツの多くの報道機関で取り上げられた.

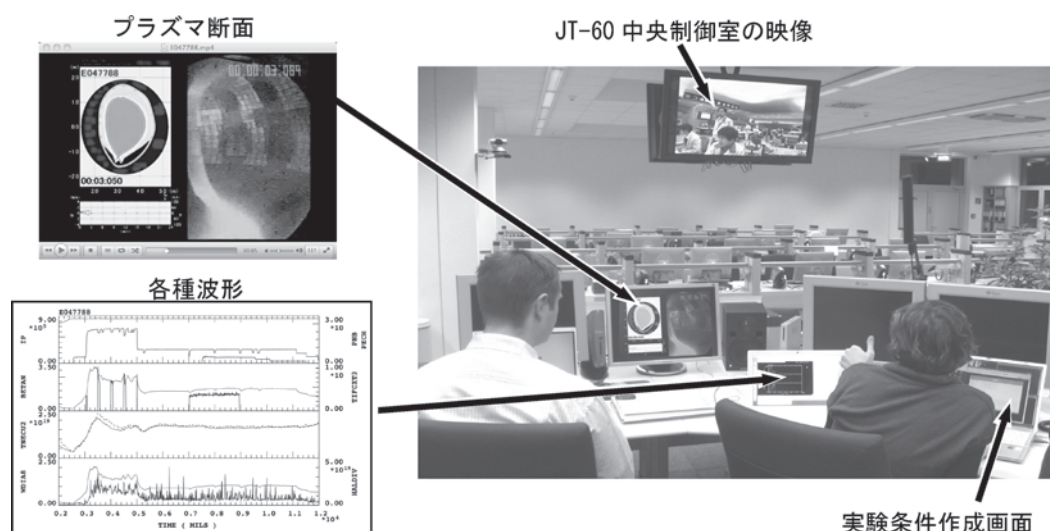


図4 IPP との遠隔実験の様子 (IPP 側) . IPP 側では、実験条件作成ツール、実験データ (各種波形および磁場揺動スペクトル)、プラズマ断面 (可視カメラ画像および実時間プラズマ形状計算) を PC 上で表示した。また、JT-60 中央制御室とテレビ会議システムで接続し、原子力機構側の担当者と情報交換した。このほか、磁気プローブの信号を音声信号に変換した情報も転送した。NTM が発生すると可聴帯の音 (典型的には 5 kHz) として聞こえるので、NTM の有無が実時間で確認できた。

2.1.5 終わりに

上述のように、京都大学や IPP との遠隔実験は非常にスムーズに行われた。磁場揺動の周波数スペクトルなど、データ量が多い一部のデータでは表示に時間がかかったが、通信速度の改善により解消されることが期待できる。一方で、筆者が他装置へ実験参加した経験も含めると、リモートサイトではオンサイトに比べ情報量が圧倒的に少なくなることから、今後の遠隔実験に向けては留意する点や改善の余地があると思われる。いずれも「実験は研究者・技術者がチームをつくって行っている」ということを実感させられるものである。その中でも特に、複数の人のショット間解析の結果が交換できる仕組みが必要であると思われる。上述の遠隔実験では、直前のショットの情報として、NTM の発生や安定化の状況を考慮しながら次の実験条件を設定した。実験によっては、次のショットの条件を決めるための判断材料が非常に多くなる場合がある。JT-60U の実験では、温度・密度・電流分布、実時間制御 (密度、蓄積エネルギーなど)、加熱装置入射実績、不安定性の挙動、不純物発生状況などの解析を複数の人で分担し、その結果を持ち寄って議論して次の条件を決めることもあった。その前の数ショット分の解析結果もあることを考えると、多くのデータが必要になる。筆者の経験ではボードに紙のデータを貼り付けて議論するという方法が原始的ではあったが当時では最も効果的であったように思われる。将

来に向けては、限られた時間内で多くの情報から最適な実験条件を決定するために、オンサイトの研究者とリモートサイトの研究者とで文字 (手書き文字を含む) および図・グラフの情報が共有できるような設備を整備することが望まれる。また、遠隔実験に限らず、将来は放電時間が長くなることでデータ量が膨大になることから効率よく解析することが重要となる。ショット間解析の可能性も含め、大量データの処理法を検討することも重要である。

現在、国内においてチームとして実験が行える装置は多いとはいえない。ITER や JT-60SA の実験が始まったときでもチームとして実験が進められるような組織や人材を維持するよう努めることが重要であると考えられる。

参考文献

- [1] Y. Koide and the JT-60 team, *Phys. Plasmas*, **4**, 1623 (1997).
- [2] H. Shirai and the JT-60 team, *Phys. Plasmas*, **5**, 1712 (1998).
- [3] K. Higuchi *et al.*, Development of a virtual research environment in ITBL Project, *Proc. Int. Conf. Supercomputing in Nuclear Applications*, Paris, 22-24 (2003).
- [4] Y. Suzuki *et al.*, *Fusion Eng. Des.* **83**, 511 (2008).
- [5] T. Totsuka *et al.*, *Fusion Eng. Des.* **83**, 287 (2008).
- [6] T. Ozeki, *Proc. 22nd IAEA Fusion Energy Conference* (Geneva, Switzerland), FT/P2-22 (2008).
- [7] 小関隆久: シミュレーション **27**, 27 (2008).
- [8] A. Isayama *et al.*, *Nucl. Fusion* **49**, 055006 (2009).