

トムソン散乱計測システムを例としたQUEST における遠隔実験参加のための環境整備

河野, 香
九州大学大学院総合理工学府

井戸, 毅
九州大学応用力学研究所

東島, 亜紀
九州大学応用力学研究所

PENG, Yi
東京大学大学院新領域創成科学研究科

他

<https://doi.org/10.15017/4067782>

出版情報 : 九州大学応用力学研究所所報. 158, pp.6-12, 2020-09. 九州大学応用力学研究所
バージョン :
権利関係 :

トムソン散乱計測システムを例とした QUEST における遠隔実験参加のための環境整備

河野 香^{*1} 井戸 毅^{*2} 東島 亜紀^{*2} Peng Yi^{*3} 大澤 佑規^{*3} 江尻 晶^{*3}

(2020 年 7 月 31 日受理)

Development of Remote Participation System for the Thomson Scattering Measurement on QUEST

Kaori KONO, Takeshi IDO, Aki HIGASHIJIMA, Yi PENG, Yuki OSAWA and Akira EJIRI

E-mail of corresponding author: kono@triam.kyushu-u.ac.jp

Abstract

The electron temperature (T_e) and electron density (n_e) are important parameters for fusion plasma research. In QUEST, T_e and n_e are measured by Thomson scattering (TS) measurement. The TS measurement system has been developed by the research team of the University of Tokyo since FY2009. However, because of restraint of business trip due to the spread of COVID-19, the TS measurement system was not operated for several months in this year. In order to continue collaborative research between the University of Tokyo and Kyushu University, we have developed a new remote participation system for the QUEST experiments. We have built support team in Kyushu University and have introduced Virtual Private Network (VPN) connection. In addition, we establish several procedures for efficient operation and communication. As a result, the TS system has remotely operated by a researcher in the University of Tokyo, successfully. The remote participation via the VPN is applicable to the other diagnostics systems operated under collaboration with other institutions, and the success of remote participation experiment will lead the enhancement of collaboration research in QUEST.

Keywords: Remote Participation, Thomson Scattering Measurement, QUEST

1. はじめに

現在、応用力学研究所附属高温プラズマ理工学研究センター（以下、センター）では将来の基幹エネルギー源として必要とされる核融合炉の実現を目指し、球状トカマク実験装置 QUEST において高出力マイクロ波発振管（ジャイロトロン）を用いた高温高密度プラズマの生成と定常維持を目標とした研究が展開されている¹⁾。プラズマによるマイクロ波の吸収過程を解明し、また生成されたプラズマの閉じ込め性能を調べるために、高温プラズマ内部において様々な物理量を測定することが必要である。特に QUEST では、ジャイロトロンが整備されたことでプラズマの高性能化が進み、核融合プラズマの研究の基礎パラメータである電子温度・電子密度計測の重要性が増している。QUEST のプラズマ研究

においてもこれらを精度良く計測することが求められている。

このプラズマ中の電子温度・電子密度を計測する手法の一つとしてトムソン散乱 (TS: Thomson Scattering) 計測法がある。QUEST においては 2009 年度より東京大学の研究チーム（以下、東大チーム）によって TS 計測システムが導入され、現在も同チームにより運用が行われているとともに、先進的な TS 計測手法の開発が進められている。しかし、遠隔地であるため計測システムの稼働率は高くなく、トラブルや急な実験スケジュールの変更に柔軟に対応できないことが課題になっていた。また、今年度は COVID-19 の影響で出張自粛措置がとられたため、東大チームが来所できなくなり、TS 計測システムを運用できなくなった。このような状況を改善し、共同研究を推進するために、東京大学から遠隔実験参加できるような環境整備が急務となった。TS 計測システムの運用にはリアルタイムで計測機器の操作やデータ解析が必要である。また、単に取得したデータを遠隔地から確認するだけでなく、九州大学に来所して実際にプラズマ実験に

*1 九州大学大学院総合理工学府

*2 九州大学応用力学研究所

*3 東京大学大学院新領域創成科学研究科

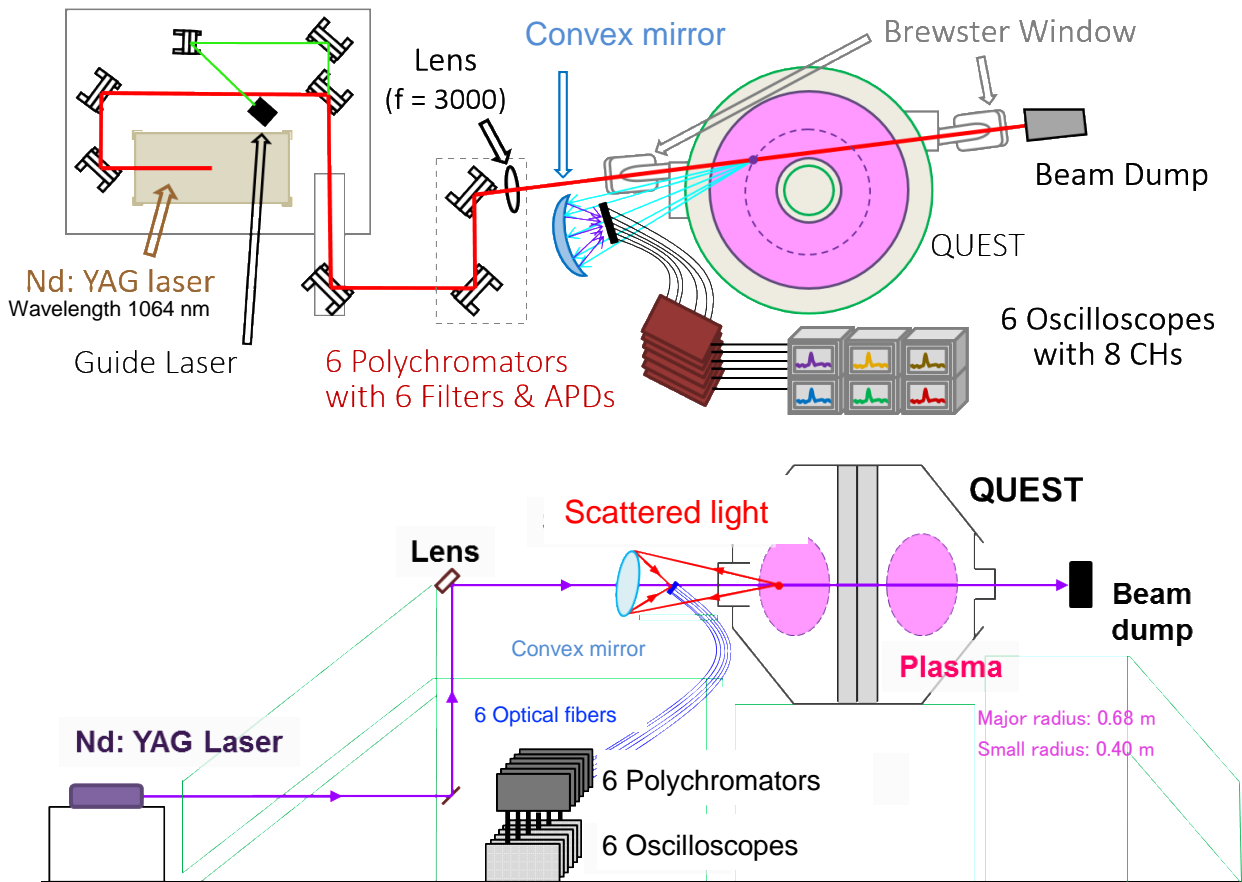


Fig. 1 Schematic diagram of the TS measurement system on QUEST (top: top view, bottom: sectional view).

参加している際と同じようにプラズマ実験の情報が得られる実験環境の整備が必要である。

本技術報告では、センター初の試みとして遠隔地から TS 計測システムを運用し、実際にリアルタイムでプラズマ実験に参加できるよう新たに行った環境整備について述べる。論文構成は以下のとおりである。2 章で QUEST における TS 計測の概要、第 3 章に遠隔実験参加のための環境整備について、第 4 章に今後の課題、5 章にまとめを述べる。

2. QUEST における TS 計測

TS 計測はプラズマ中の電子によるレーザーによる散乱スペクトル分布を計測し、高空間分解能で電子温度・電子密度を求める確立された計測手法であり、核融合プラズマ研究において古くから用いられてきた²⁾。QUEST における TS 計測の概要について以下に述べる。

2.1 東京大学との共同研究実施状況

センターでは、東京大学との双方向型共同研究により、

2009 年度から現在に至るまで電子温度・電子密度分布計測を目的とした TS 計測システムの開発を継続して行っている。QUEST のプラズマが比較的低密度であるために、研究初期(2009~2011 年度)には、まず高速・高効率な分光系の開発が進められ、現在の TS 計測システムの基礎が完成した³⁾。その後、第 2 期(2012~2019 年度)には精度と稼働率の向上を図るとともに、QUEST における種々のプラズマの電子温度・電子密度分布計測、測定可能な空間点の拡充、QUEST の放電や CT 入射タイミングと TS 計測タイミングの同期システムの開発などが行われた⁴⁾。

2.2 現在の TS 計測システムの概要

QUEST で運用している現在の TS 計測システムの概略図を Fig. 1 に示す。レーザー光はレンズで集光され、入射窓から真空容器内に入射される。レーザー発振器から入射窓までの距離は約 12 m である。入射されたレーザー光はプラズマ中の電子によって散乱され、観測窓を通過して集光用の凹面鏡によって反射され、ファイバーで伝送された散乱光はポリクロメータで分光され、アバランシェフォトダイオード

(APD: Avalanche Photo Diode) によって電気信号に変換される。さらに、検出された信号はオシロスコープで記録され、その後解析される。

QUEST における TS 計測システムは以下に示す 5 つの要素から構成されている。

- 1) レーザー系:
Nd: YAG レーザー (TS 計測用・近赤外光)
ガイドレーザー (アライメント用・可視光)
- 2) 入射光学系:
ミラー、レンズ、ビームダンプ、プリュースター窓
- 3) 散乱光集光光学系:
観測窓 (合成石英)、凹面鏡、光ファイバー、可動式ファイバーホルダー
- 4) 散乱光分析系:
ポリクロメータ (分光器)、APD
- 5) データ収集・解析系:
オシロスコープ、PC

これらの概要を次節以降で順に述べる。

2.2.1 レーザー系

TS 断面積が微小であるため、TS 計測で得られる信号強度は非常に弱い。より大きな信号を得るためプローブ光として使用されるレーザーは高出力である必要がある。また、プラズマからの背景光は主に可視光領域に大きく現れる。S/N 比の高い信号を得るためにも入射レーザーの波長は可視光以外の領域で、しかもパルス幅が短いことが望ましい。加えて、電子温度・電子密度を計測する上で分布計測だけでなく時間発展の情報も必要とされるために繰り返し周波数が高いレーザーが最適である。

これらの条件を満たすレーザーとして、TS 計測では Nd: YAG レーザー (ネオジウムヤグレーザー、以下 YAG レーザー) を用いている。このレーザーの波長は近赤外領域の 1064 nm であり、プラズマ背景光が付近にノイズとして発現しない。また、10 ns という短パルスかつ数 J という高出力で、10 Hz の高い繰り返し発振が可能な Q スイッチ式が採用されている。

なお、YAG レーザーは目で見えない光であるため、光路を可視化してアライメントを行う必要がある。アライメント用のガイドレーザーとしては最大出力 5 mW、ビーム径 8 mm、波長 532 nm (可視光: 半導体レーザー) のグリーンレーザーを使用している。

2.2.2 入射光学系

光学設計で考慮された点は主に 3 点ある。1 点目はレーザーの光路が QUEST の赤道面を横切るような水平光路と

なるよう設計されている点である。水平光路では計測対象である磁場閉じ込めプラズマの磁気軸がプラズマ圧力の増加に伴ってシフトしたとしても、プラズマ中心部の計測が可能という利点がある。2 点目はレーザー光がプラズマ中心付近で焦点を結ぶようレンズで調整できるように設計されている点である。3 点目は入射レーザーの偏光方向を調整できるようにした点である。レーザーの光路と同様に、集光光学系の凹面鏡の中心とファイバーは装置の赤道面上に設置されているため、散乱光が最大になるように入射レーザーは偏光方向が鉛直方向となるよう設計されている⁹⁾。

2.2.3 散乱光集光光学系

入射窓からプラズマに入射したレーザーは、プラズマ中で散乱され、観測窓を通して真空容器外側に設置されている集光用の凹面鏡に到達する。この凹面鏡は散乱光の反射率を高めるために、近赤外領域の波長の光を最も反射する金で被覆されている。

観測窓には赤外域の光の透過率に優れている合成石英を使用している。一般的に真空容器内側の観測窓表面には、プラズマ放電時にプラズマによる真空容器内部壁面のスパッタにより発生する不純物が付着する。特に QUEST ではプラズマ放電時間が数時間にわたることがあるため、不純物の発生量と付着量が多くなる。その結果、透過率が明らかに悪化し、TS 計測の際に検出信号の低下が生じる。そのため、真空容器の大気開放が行われる際に観測窓を取り外し、窓表面を洗浄または研磨する必要がある。

観測窓を通り、凹面鏡で反射された散乱光はファイバーの位置で集光される。光ファイバーは 6 本設置されており、同時に空間 6 点で計測することができる。この光ファイバーは可動式ファイバーホルダーに固定され、XY ステージでファイバーホルダーを動かすことで計測する空間位置を自由に変更することができる。原理的には連続的に計測位置を変えることができるが、ファイバーホルダーの位置毎に迷光計測や信号強度の較正が必要であるため、現在ファイバー位置は 2 セットあらかじめ準備し、運用している。放電中にファイバー位置を変えられないので、1 回のプラズマ放電あたり 1 セットであるが、ファイバー位置を変えて類似のプラズマ放電を行うことで、6 点×2 セットの合計 12 点の空間分布計測が可能である。Fig. 2 に QUEST におけるレーザー光路と計測空間点の位置関係を示す。青で示したレーザー光路上に 1 セットにつき 6 点の計測空間点 (橙と水色の点はセット例) を測定することができる。例えば、橙で示したセットでは、センタースタックに最も近い計測空間点で散乱された光は、緑の点線のように凹面鏡で集光され最も外側の光ファイバーに取り込まれる。同様に最も外側の計測空間点で散乱された光は桃色の点線のように凹面鏡で集光され、最も内側

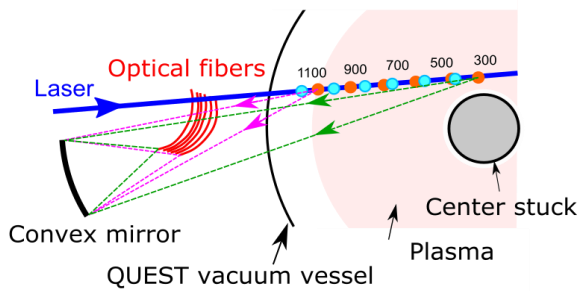


Fig. 2 Measurement positions of the TS measurement system. The scattered light from six points (for example, Orange colored points) are detected by six optical fibers, simultaneously. Since the optical fibers can be moved, the scattered light from light-blue colored points is also measured.

の光ファイバーで取り込まれる。TS 散乱信号強度が大きい高密度プラズマの場合は最低 2 回のプラズマ放電で合計 12 点の計測が可能である。しかし、低密度プラズマの場合は 1 セットずつ複数回の計測データを積算して空間分布を求める必要がある。

2.2.4 散乱光分析系

光ファイバーに集められた光はポリクロメータを用いて分光・検出される。各ポリクロメータでは、透過帯域が異なる 6 種類の干渉フィルター(バンドパスフィルター)により 6 つの波長領域に分光され、それぞれ APD により電圧信号として出力される。

2.2.5 データ収集・解析系

ポリクロメータからの出力はオシロスコープへと伝送され記録される。サンプリングレート 1 GHz、バンド幅 500 MHz のオシロスコープ(6 台)で記録され、記録されたデータはネットワークストレージに転送される。このデータを解析することにより、電子密度分布及び電子温度分布データを求める。QUEST 本体室に設置されているオシロスコープの操作は、制御室の解析用 PC から専用ソフトウェアを用いて遠隔操作で行っているが、省力化のためにはデータ収集の自動化を進める必要がある。

2.3 TS 計測システムの運転

本節では 2.2 節で述べた TS 計測システムを実際に動作させるために必要な作業を簡潔に述べる。

2.3.1. ポリクロメータの印加電圧調整

検出器として APD を使用しているが、この増倍率は印加電圧と室温に大きく左右される。APD の持つ性能を最大限に活かすために、計測開始前には予め APD の増倍率が最大付近となるような逆電圧の閾値を確認し、手動で調整している。また、できるだけ室温の変化が大きくなるように(0.5°C程度以内)空冷を施している。制御室からは遠隔カメラで室温測定の実行を監視しており、室温変動が大きい場合には適宜印加電圧の調整を行っている。

2.3.2. 標準光源を用いた相対感度の較正

TS 計測における電子温度計測は電子温度の速度分布を反映する散乱光の波長スペクトルから求めるため、各波長域の検出感度の較正が必要である。そのため、実験開始前及び終了後に実験時と同じ環境で感度較正データの取得を行っている。これを簡易較正と呼んでいる。

簡易較正は、標準光源からの光を拡散板で一様に拡散させ、それを凹面鏡で光ファイバーに集光し、ポリクロメータへ伝送して検出することによって行う。

2.3.3. 迷光測定

TS 計測で用いる YAG レーザーは指向性が高いが、ビームは有限の広がりを持つ。そのため、QUEST 装置内にレーザーを入射する際、光軸から外れたごく微弱なレーザー光は設定光路を外れ、装置内外で反射や散乱を受ける。結果的に、様々な光路を通りながら光ファイバーやポリクロメータに迷光として入り、TS 信号とは異なる信号として検出されるため、高精度の計測が難しくなる。特に低密度プラズマの場合は TS 信号が微弱であり、迷光信号が無視できない場合がある。この迷光対策の一つとして、現在はプラズマ放電直後に迷光計測用にレーザーを約 100 ショット連続発振し、得られた信号を平均化した後、迷光信号としてプラズマ放電中の信号から差し引いている。

2.3.4. アライメント

2.2.1 節で述べたように、YAG レーザー光は波長が 1064 nm であるため目に見えず、また高出力であるため直接光に限らず散乱光でも目に入ると失明の可能性がある。よってそれ自体によるアライメントが容易ではない。そのため光路のアライメント用のガイドレーザーとして最大出力 5 mW、ビーム径 8 mm、波長 532 nm(可視光: 半導体レーザー)の低出力グリーンレーザーを使用している。このガイドレーザーからの可視光を YAG レーザー光路上に揃えた上で、この可視光を用いて全光路のアライメントを行う。ガイドレーザー

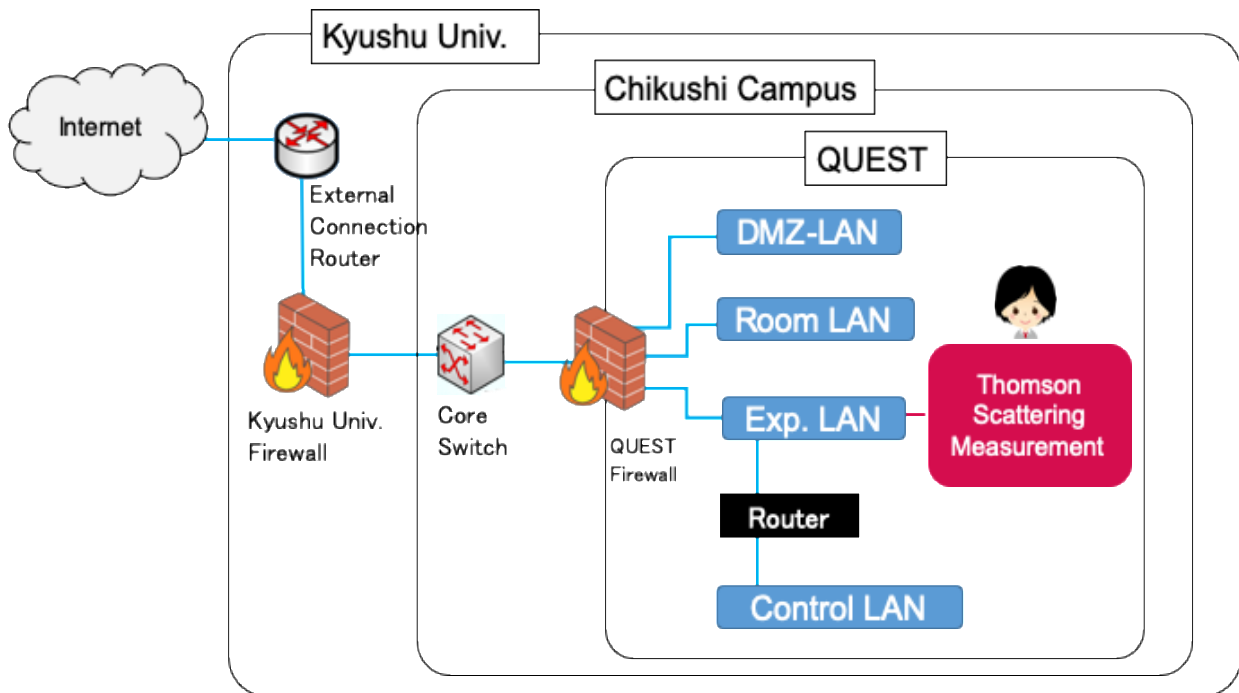


Fig. 3 Schematic diagram of the network system in Kyushu University.

によりアライメントが終了した段階で、YAG レーザーを通しビームダンプ位置でパワー測定を行い、最終的にアライメントが正確に行えているかどうかを確認する。

このアライメント作業は Fig. 1 上図に示すようにミラーとビームダンプが QUEST 本体を挟んだ形であるため、2人以上での作業が必須である。

2.3.5. 電子密度の絶対較正

電子密度の絶対値の算出のため、窒素ガスを QUEST 真空容器内に 40 torr 程度まで充填し、分子密度が既知である状況でラマン散乱による散乱光を検出し、散乱光強度の絶対較正を行っている。これは数ヶ月に一度の頻度で行っている。

また、電子密度の絶対較正に関しては、他の計測器との比較を行うことでも可能である。例えば干渉計は視線方向の線積分電子密度を精度よく測定できるので、これと一致するように TS 計測で得られた電子密度分布を較正することが行われている。

3. 遠隔実験参加のための環境整備

2章で示したシステムを用いて TS 計測を実施するには、下記のような作業が必要となる。

【実験日の作業】

1. レーザーと検出器系の立ち上げと立ち下げ

2. 実験前後のポリクロメータの較正
3. 実験シーケンスに同期したレーザーの発振
4. 実験に応じたオシロスコープの調整
5. オシロスコープのデータの保存
6. 計測された生データから電子密度・電子温度データへの変換

【年に数回の作業】

- A) レーザー光路のアライメント
- B) ラマン散乱を用いた較正実験
- C) ビーム透過用ビューポートの清掃等の保守作業

従来これらは全て東大チームによって行われてきたものであるが、東大チームが不在でも TS 計測システムが運用可能かつ遠隔地からデータ解析などを通じてリアルタイムで QUEST のプラズマ実験に参加できる環境整備が今回の課題である。

本章では、遠隔実験参加のために新たに構築した九州大学のサポート体制と仮想プライベートネットワーク (VPN) の導入による遠隔操作及びデータへのアクセス環境の整備について述べる。

3.1 九州大学のサポート体制

【実験日の作業】で示した1~3、及び【年に数回の作業】は現場での作業が必要であるため、新たに九州大学のスタッフによるサポート体制を立ち上げた。東大チームから事前に YAG レーザーの取り扱いのための安全教育、及び TS 計

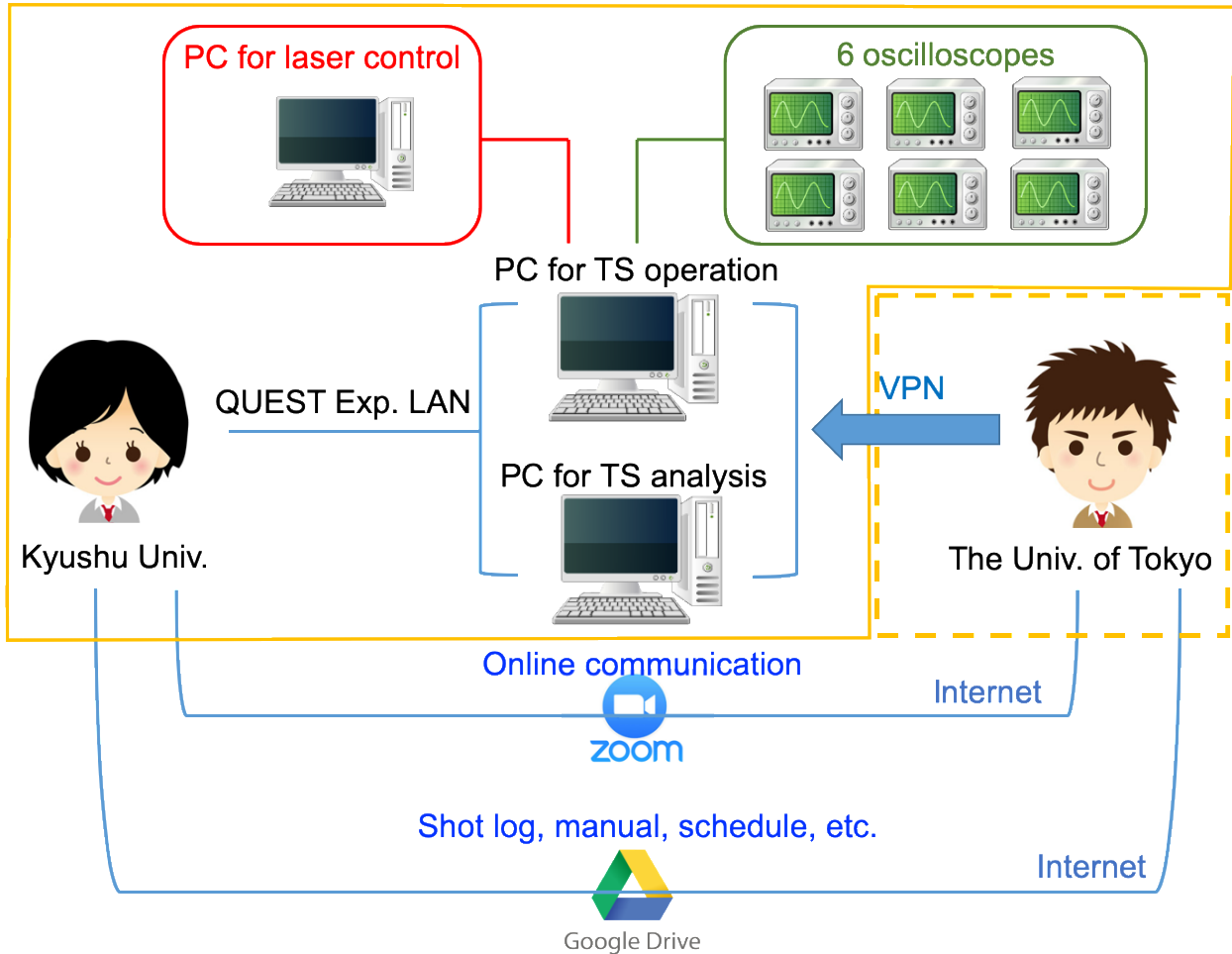


Fig. 4 New remote participation system for TS measurement system.

測システム運用に関する各種機器操作の教育を受けた上で実施することとした。また、マニュアルの整備や機器の状況などの情報共有は Google ドライブを用いて双方向で行うこととした。

3.2 VPN を用いたネットワークアクセス

【実験日の作業】で示した項目のうち、4～6 はプラズマ実験中の計測時に必要な操作である。TS 計測に必要な機器は全て QUEST 実験系 LAN に接続されているため、インターネットに接続することができれば遠隔地からの操作も可能である。しかし、QUEST 実験系 LAN は九州大学のファイアウォールと、さらにその中にあるセンターのファイアウォールの中にあり、外部からのアクセスはできない (Fig. 3)。そこで、遠隔地からインターネットを介して実験に必要な不可欠な端末にだけアクセスできるように VPN の整備を行った (Fig. 4)。

センターに導入した VPN はプロトコルとして SSL/TLS を

用いている。接続許可するユーザーは採択されている双方向型共同研究に登録された者に限定し、ユーザー毎にワンタイムパスワードを設定することにより、高いセキュリティを確保することとした。この VPN を経由し、VNC などリモートデスクトップを用いることによって、東京大学から QUEST 実験系 LAN に接続し、TS 計測システムの制御用 PC 及び解析用 PC へアクセスが可能となった。

東京大学側では、遠隔参加でも円滑に実験を進められるようにデータ収集の自動化のための改良が進められた。従来オシロスコープのデータは PC を介したマニュアル操作による保存が行われてきた。その理由は、これまでは計測器自体の開発が主目的であり、実験条件に応じてオシロスコープの調整が必要であったことに由来する。このためデータ収集に 1 名が常駐する必要があった。しかし、遠隔実験時の通信の時間遅れによる操作失敗の可能性や、今後の TS 計測の使用頻度の増加によって人手不足が発生することが予想される。そのため、今回の遠隔実験のための環境整備の一環として、QUEST のプラズマ実験のシーケンスに同期し

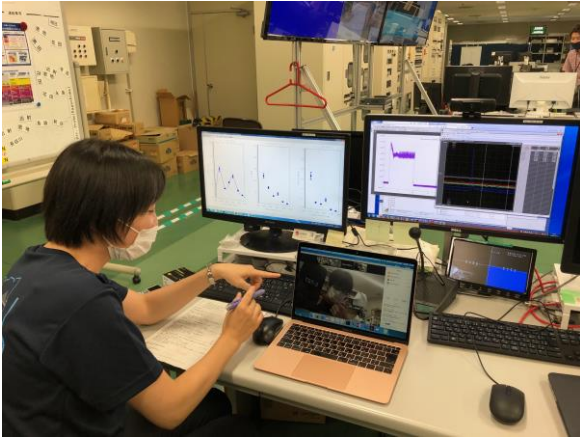


Fig. 5 Remote participation system for QUEST experiment (left PC: results of TS measurement, right PC: TS signal monitoring of 6 oscilloscopes, and a signal of line-integrated electron density measured by interferometer, PC in front: online communication with TS team staff in the Univ. of Tokyo using Zoom).

てデータ収集が可能となるようにソフトウェアの改良を行った。

また、遠隔地から TS 計測を含めプラズマ実験を行うにあたっては現在行われている実験に関する情報共有が必要不可欠である。QUEST で実施されているプラズマ実験の実験ログは“ショットログサーバー”、プラズマ実験に関わる物理量に関しては“Graph View”など、従来から利用されている web システムを用いて閲覧することができる。また、制御室内での音声による情報交換も重要であり、これに関しては Zoom を用いて各種情報の共有を円滑に行えるようにした。TS 計測自体の制御パラメータは、遠隔地と現場から双方向に同時に情報の記録と閲覧を行う必要があり、これは Google ドライブのスプレッドシートを用いて行うこととした。

Fig. 5 に QUEST におけるプラズマ実験で九州大学と東京大学が連携して TS 計測システムを操作している写真を示す。図の右上の画面にはポリクロメータの出力を収集しているオシロスコープの波形と、干渉計で測定した線積分電子密度の時間変化の図が表示されており、左上の画面には解析して求めた電子密度分布、電子温度分布、電子圧力分布が表示されている。これらは東京大学の PC から VPN を介して操作して表示させたものである。操作速度に問題はなく、リアルタイムでの TS 計測システムの遠隔運用が可能であることが確認できた。

4. 今後の課題

QUEST を含め、磁場閉じ込め高温プラズマは様々な時間スケール、空間スケールを持ち非常に複雑な振る舞いをするため、全ての物理現象を一つの計測器で明らかにすることはできず、様々な物理量を同時に観測してそれらを総

合的に解析しながら議論を進めることが必要である。

QUEST には多数の計測器が取り付けられているが、計測器毎に個別に収集されているものも多く、その場合は担当者に依頼してデータを提供してもらっている。そのため、特に遠隔実験の場合は多くのデータを集めるのに手間と時間が増えると予想される。逆に、遠隔参加している研究者による計測データに基づいて議論をしたい場合も同じように煩雑さが増すと考えられる。実験データ解析の生産性を上げるためには、計測等担当者の権利を保護しつつ、基本的なデータの共有化を進める必要がある。

TS 計測により求めた電子温度・電子密度についても、データの共有化に向けて共同研究者に速報的にでも公開できるシステムを構築する必要がある。そのためにはデータ解析の自動化と共有用サーバの立ち上げを進める必要がある。

5. まとめ

センター初の試みとして、遠隔地から TS 計測システムを運用し、QUEST で行われるプラズマ実験にリアルタイムで参加できるように環境整備を行った。新たに整備したのは以下の 2 つである。

1 つ目は九州大学が TS 計測システムをサポートする体制を構築したことである。各種校正やレーザー発振、アライメント等は現場で行う作業であり、QUEST 装置を所有する九州大学がこれらをサポートすることで従来のシステムを継続して運用できるようになった。また、これらの作業サポートを円滑にするためのマニュアルや自動データ収集ソフトを整備した。

2 つ目は VPN を用いて遠隔地から TS 計測用 PC へのアクセスを可能としたことである。これにより QUEST のプラズマ実験のシーケンスに合わせてリアルタイムでデータ収集・解析系の操作が可能となった。

QUEST では、TS 計測以外にも他大学、研究機関との共同研究で運用されている計測器が存在する。VPN による接続はそれらの計測器にも適用可能であり、今回の VPN による接続の成功は、今後予想される出張が難しい局面においても共同研究を維持し、さらに発展させる基盤になると考えられる。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、九州大学応用力学研究所高温プラズマ理工学研究センターの皆様から協力いただきましたことを感謝いたします。また、大学外からのネットワーク接続に関して協力いただいた九州大学情報統括本部ネットワーク事業室の方々に感謝いたします。本研究の一部は核融合科学研究所双方向型共同研究(NIFS20KUTR155)の

支援を受けました。

参考文献

- 1) H.Idei, T.Onchi, K.Mishra, H.Zushi, T.Kariya, T.Imai, O.Watanabe, R.Ikezoe, K.Hanada, M.Ono, A.Ejiri, J.Qian, K.Nakamura, A.Fujisawa, Y.Nagashima, M.Hasegawa, K.Matsuoka, A.Fukuyama, S.Kubo, M.Yoshikawa, M.Sakamoto, S.Kawasaki, A.Higashijima, S.Ide, Y.Takase and S.Murakami, Electron heating of over-dense plasma with dual-frequency electron cyclotron waves in fully non-inductive plasma ramp-up on the QUEST spherical tokamak, Nuclear Fusion, 60, (2020) 016030
- 2) N.J.PEACOCK, D.C.ROBINSON, M.J.FORREST, P.D. WILCOCK & V.V. SANNIKOV, Measurement of the Electron Temperature by Thomson Scattering in Tokamak T 3, Nature, 224, (1969) 488-490
- 3) 江尻 晶, QUEST用コンパクトトムソン散乱計測器の開発, 平成23年度双方向型共同研究成果報告書, 2012
- 4) 江尻 晶, 先進的トムソン散乱計測システムの開発, 平成30年度双方向型共同研究成果報告書, 2019
- 5) 松本直希, トムソン散乱計測法による非誘導立ち上げ球状トカマクプラズマの電子温度密度分布計測, 東京大学大学院新領域創成科学研究科複雑理工学専攻平成29年度修士論文, 2018