

論文の内容の要旨

論文題目

Electron temperature and density measurements by Thomson

scattering on the QUEST spherical tokamak

(QUEST 球状トカマクにおけるトムソン散乱による電子温度・密度の計測)

氏 名 山口 隆史

1. 序論

球状トカマクは、コンパクトで経済性の高い核融合炉として有望である。九州大学応用力学研究所に設置された QUEST 球状トカマク装置は、中型の装置であり、高周波を用いた非誘導的電流立ち上げと定常的な配位維持と定常プラズマを用いたプラズマ壁相互作用の研究を目的とした装置である[1]。5 時間の世界最長プラズマ維持時間を達成した TRIAM 計画の結果を元に開発がおこなわれており、QUEST では高温壁を使用する事によって、長時間放電を妨げるプラズマ壁相互作用の制御をおこなうことが計画されている。このトカマクは、2008 年に運転を開始し、電子温度等の基本的なプラズマパラメータを計測するシステムの開発・整備が求められていた。

QUEST プラズマ中心でのトロイダル磁場は 0.25 T 程度であり、現在、周波数 2.45 GHz、8.2 GHz、28 GHz の電子加熱用の高周波システムが稼働している。高周波維持プラズマの最大プラズマ電流は、60 kA 程度であり、プラズマ維持時間は現在最長で 3 分である。定常維持時の密度は $10^{17} \sim 10^{18} \text{ m}^{-3}$ 程度である。

QUEST 装置では高周波電流駆動のメカニズムの研究と最適化が重要なテーマである。特に電子密度・温度分布に強く依存するモード変換は重要であり、信頼できる電子密度・温度分布計測が求められている。電子温度・密度測定手法の中でトムソン散乱は最も信頼度の高い手法である。しかしながら、対象とするプラズマは従来のトカマクと比べて非常に低密度であり、これまでトムソン散乱で電子温度・密度分布測定が行われた例はない。そこで、効率の良いトムソン散乱計測システムを構築し、これらの基礎パラメータを求め、QUEST プラズマの基本的な性質を理解することを本論文の目的とする。

2. トムソン散乱計測

構築にあたって、ASDEX [2]やLHD [3]、TST-2 [4]等で使用されている Nd:YAG トムソン方式を採用した。これらのシステムでは、1 J 程度のレーザーを用いており、 10^{18} m^{-3} 以上の電子密度の計測がおこなわれている。

QUEST のトムソン散乱システムで使用するレーザーは波長 1064 nm の Nd:YAG レーザーである。レーザーは 10 Hz で繰り返し入射され、1 パルスあたりの出力は 1.65J、パルス幅は 6-8 ns である。

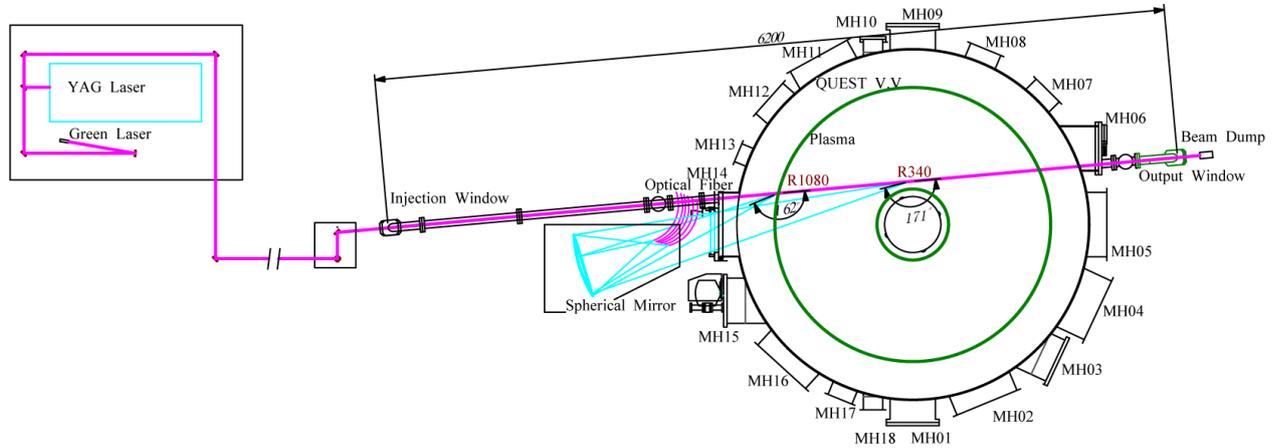


図 1.QUEST トムソン散乱計測システム概観図

図 1 にシステムの概観を示す。トカマク内でのレーザー航路は赤道面上にあり、黒鉛版を使用したビームダンプによって計測に支障がないレベルまで迷光は抑えられる。集光ミラーは直径 500 mm, 焦点距離 500 mm の球面ミラーであり、金コーティングが施されている。この集光ミラーで計測可能な空間点は $R = 340, 488, 636, 784, 932, 1080 \text{ mm}$ の 6 点であり、散乱角は $165^\circ \sim 171^\circ$ の後方散乱となっている。

集光された散乱光は光ファイバーで伝送され、ポリクロメーターで分光される。ポリクロメーターは、6 チャンネルの干渉フィルターと APD で構成される。標準光源の光をモノクロメーターを通して波長幅 0.15 nm の単色光にして、これをポリクロメータに接続された光ファイバーに入射して較正を行った。図 2 に較正結果およびマクスウェル分布の様子を示す。

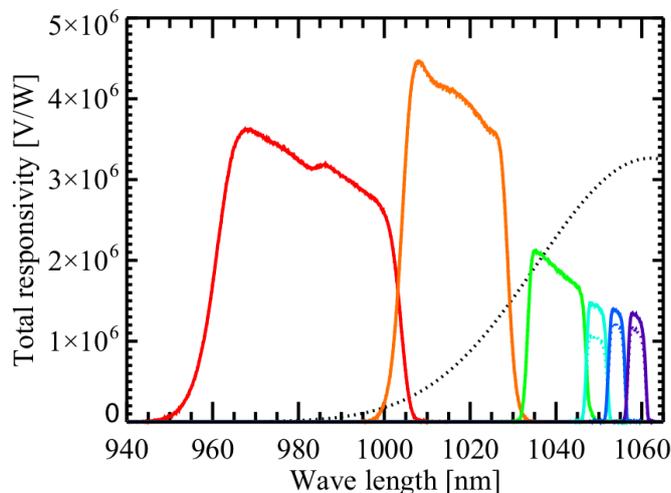


図 2. ポリクロメータの各チャンネルの波長感度分布。それぞれの色は 6 個ある各波長チャンネルを示し、点線は 150 eV のときのマクスウェル分布の様子を表す。

3. 解析手法

定常維持プラズマでは密度が低く、トムソン散乱信号は、小さい。そこで、レーザーが 10 Hz で繰り返し入射できることとプラズマの定常状態が数秒以上であることを利用して信号の重ね合

わせを行い、S/Nを改善する。散乱信号の重ね合わせ結果を図3に示す。これは、20秒程度の放電を10ショット繰り返したときのデータに対して信号の重ね合わせをおこなった結果である。

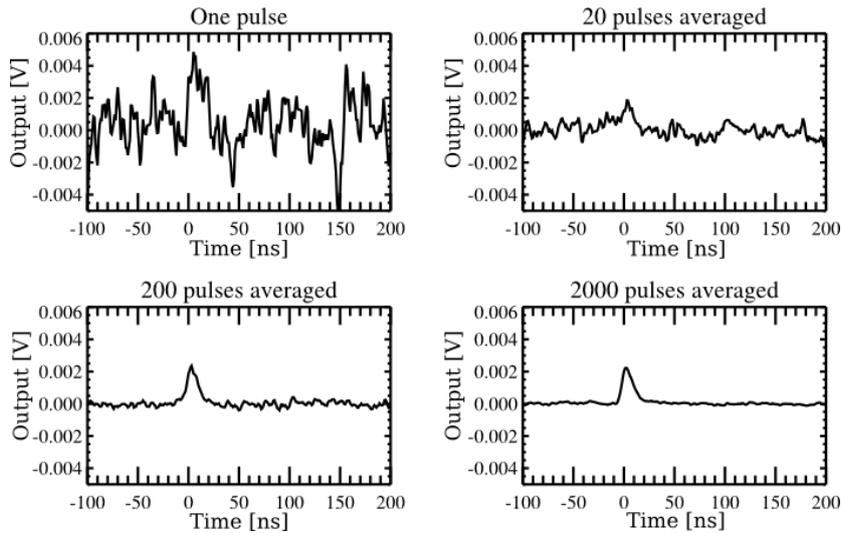


図 3. 散乱信号波形の重ね合わせ結果

また、少ない重ね合わせ回数もしくは低強度の信号を解析しなければならない状況も存在するため、信号波形に対して次の式の関数を用いたフィッティングをおこなう。

$$I_s(t; C, \tau_L, \tau_a, t_L) = C \exp\left(-\frac{t-t_L}{\tau_a}\right) \times \left(1 - \operatorname{erf}\left(\frac{\tau_L}{2\tau_a} - \frac{t-t_L}{\tau_L}\right)\right)$$

各チャンネルについて得られた関数の積分値を用いて、電子温度を表すマクスウェル分布関数へのフィッティングをおこなう。

4. 実験結果・考察

各波長チャンネルでの積分値に対してマクスウェル分布へのフィッティングを行った例を図4に示す。この例における電子温度は 89 ± 5 eV である。

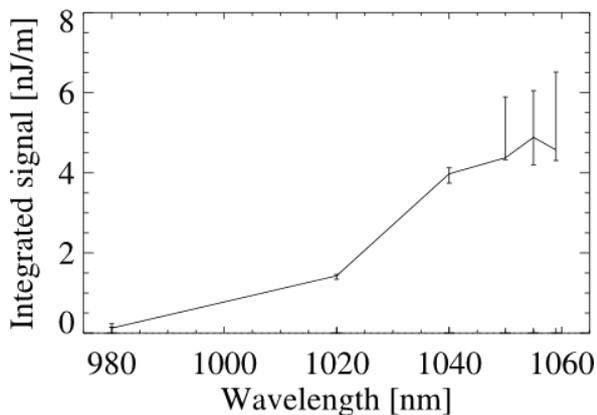


図 4. マクスウェル分布へのフィッティングの様子。エラーバー付データ点は各チャンネルで得られた信号波形の積分値を感度分布の積分値で割った値、実線はフィッティング結果を示す。

図5に8.2 GHz高周波システムを用いたインボードヌル配位での実験結果を示す。インボードヌル配位は、プラズマ中心に対してトカマクの内側にヌル点を持つ磁場配位であり、高ポロイダルベータ β_p (ポロイダル面内におけるプラズマ外周の平均ポロイダル磁場の磁気圧に対するプラズマの平均圧力の大きさ) を特徴とする。この実験ではトロイダル磁場を変え、吸収が起きる共鳴面の位置を変化させている。

リミター放電、ダイバータ放電に比べてインポートヌル配位では高密度が実現でき、密度の最大値は $1.6 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ で8.2 GHzのカットオフ密度の5分の1である。電子サイクロトロン共鳴面付近で、高温であることが分かり、電子サイクロトロン共鳴加熱が起きていると考えられる。

典型的なトカマクではプラズマ中心部に温度のピークを持つが、高周波を用いた非誘導的電流立ち上げプラズマでは、通常のトカマク放電とは異なるプラズマ中心にピークを持たない電子温度分布となった。真空磁場に関するトカマクの平衡の関係式から計算される β_p^{EQ} に対してトムソン散乱計測より算出された圧力より計算される β_p^{Thom} は非常に小さく、電子の圧力に関して高速電子の寄与が支配的あることが示唆される。バルクの電子温度自体が非常に低く、高エネルギー電子が電流を担っている事を示唆し、X線測定の結果[5]と矛盾しない。

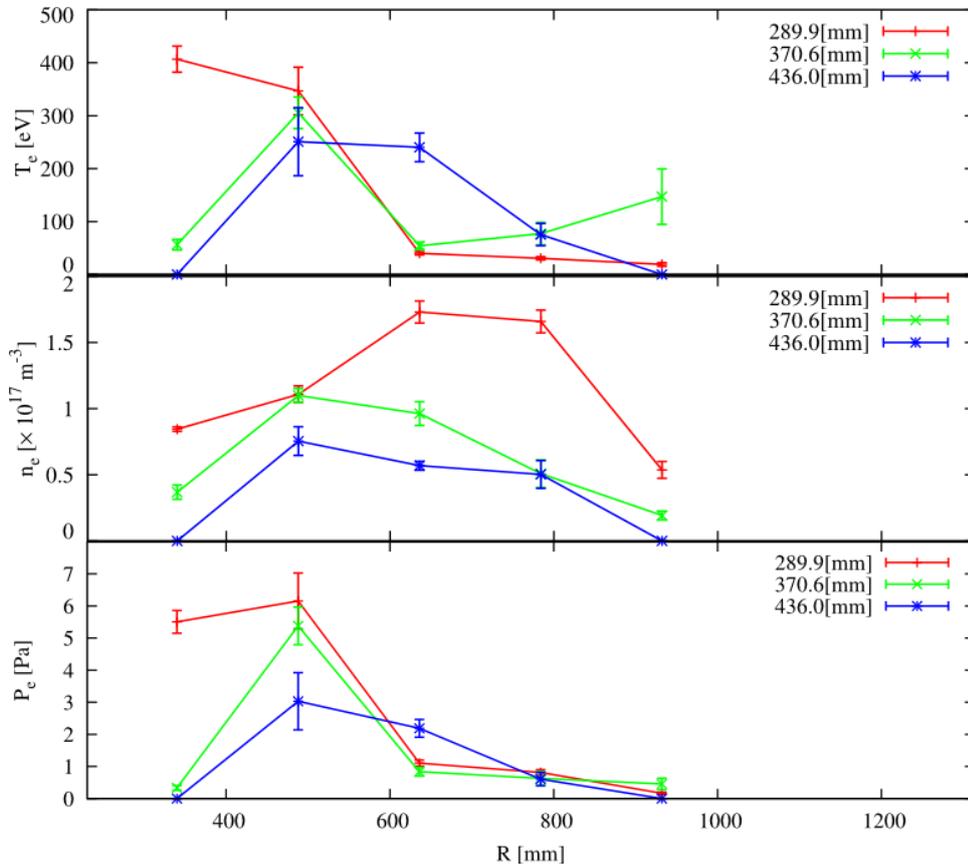


図 5. 8.2 GHz 高周波システムを用いたインボードスル配位における電子温度(T_e)、密度(n_e)、圧力(P_e)の空間分布。凡例の数値は共鳴面の位置を示す。

5. 結論

QUEST におけるトムソン散乱計測システムを構築し、低密度高周波維持プラズマの電子温度分布、電子密度分布の測定に成功したことにより、波動物理を研究するための基礎データを供給する体制が構築された。

高周波維持プラズマでは、通常のトカマク放電とは異なり、プラズマ中心にピークを持たない電子温度分布を持つことが明らかになり、 β_p の評価と併せて、平衡を決めるのはバルク電子ではなく、高速電子であることが示唆された。このことは、高周波維持プラズマが従来のトカマクプラズマとは異なる性質をもつことを意味する。

6. 参考文献

- [1] K. Hanada et al., Plasma Fusion Res. **5**, S1007 (2010).
- [2] H. Röhr et al., Nucl. Fusion **22**, 1099 (1982).
- [3] K. Narihara et al., Rev. Sci. Instrum. **72**, 1122 (2001).
- [4] T. Yamaguchi et al., Plasma Fusion Res. **5**, S2092 (2010).
- [5] S. Tashima et al., Plasma Fusion Res. **8**, 2402118 (2013).