

LHDにおける精密科学を目指した計測 Diagnostics for LHD aiming exact science

江尻 晶

A. Ejiri

東京大学 大学院新領域創成科学研究科

Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo

精密科学とは

予測との定量的な一致をもって精密科学とするならば、これまでの核融合研究は発展途上と言わざるを得ない。しかしながら、実証炉を見据えつつある現段階では、精密科学を避けて通れない。すなわち、我々は、定性的な測定と簡略化したモデルによる物理の理解を進めながらも、より進化した計測による測定とより精緻な理論との比較を同時に進めなければならない。

一口に計測の進化と言っても、その方向はさまざまである。例えば、古くから用いられているトムソン散乱による電子密度・温度測定を取り上げれば、精確度の向上、時空間における測定点数の増加（分解能の向上）は、他の計測の解析に大きな利益をもたらす。本講演では、その例としてLHDにおける反射計を用いたICRF波動の計測を取り上げる。

また、別の進化の方向として、これまで測定できなかった物理量の測定が挙げられる。上記のICRF波動計測は、これまであまり実績がなく、この部類に入る。さらには、これまで測定できなかった領域での測定が挙げられる。一つ前の講演で取り上げる水素・重水素はこのような例である。トムソン散乱では、非等方性の測定や電流の測定、極低密度での測定が新たな物理量、新たな領域での測定として考えられる。本講演では、TST-2、QUEST球状トカマク装置におけるトムソン散乱を取り上げる。

LHDでの計測の開発はまさにこのような進化の途上であり、各々の計測の進化により、それぞれの精密科学を期待できるとともに、種々の計測データの利用（統合的解析）により、新たな精密科学を切り開くと期待できる。

反射計を用いたICRF波動計測

波動物理を理解するうえで、波の波数や振幅等を測定して、波動の伝搬、吸収を理解することは重要であるが、これまでプラズマ中での局

所的な測定、特に定量的な測定は易しくなかった。しかしながら、近年、マイクロ波反射計、レーザー位相コントラスト法などにより、波動により誘起される密度揺動（密度振動）を定量的に測定できる例が増えつつある。ここでは、LHDにおける測定例を示す。

周波数30.5 GHz、正常波反射計を設計製作し、2012年度よりLHDのPort 3.5Uに取り付け、測定を開始した。RF計測では、高パワーRFによるノイズが測定上の一番の問題で、対策を行った結果、測定が可能となった。図1に反射計から得られた密度揺動と関連する物理量の時間発展を示す。

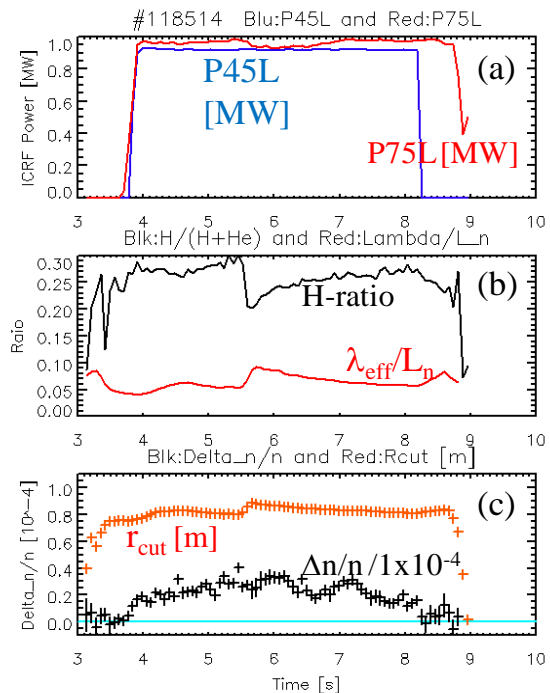


図1 ICRFパワー(a)、軽水素比、波長・密度勾配長比(b)、相対密度揺動、測定位置 (c)の時間発展。 $B_0=2.75$ T / $R_{ax}=3.60$ m

図から、反射計測定位置に近いアンテナ (P45L) の方が遠いアンテナ (P75L) よりも大きな密度揺動を引き起こしていることがわかる。

この測定・解析ではトムソン散乱で得られた密度分布が必須である。すなわち、密度分布から求めた密度勾配長とマイクロ波の実効波長の比が感度となり、反射計で測定した位相揺動から密度揺動が計算される。さらに、この密度分布と磁場強度分布といくつかの仮定からRF電場を評価することができる。この例の場合は、放電中の最大電場（ E_y ~ポロイダル電場）は1 kV/m程度である。

今回の測定は空間一点での測定であるものの、様々な物理の解明につながる可能性がある。電場の絶対値は波動コードとの比較を可能とする。観測された密度揺動の大小は、吸収の小ささに関係し、異なる位置にあるアンテナの応答を比べることで、吸収長を評価することが可能となる。速度分布関数のゆがみに関連すると考えられている非線形性も実験的に確かめることができる。また、少数イオン加熱シナリオでは、混成共鳴が存在し、その領域で波数が小さくなり、振幅は大きくなる。この位置は少数イオン比に依存し、これを計測することで少数イオン比を求めることができる。ただし、Alcator C-Mod装置でのレーザー位相コントラスト計測の経験では、現在の測定精度はそれほどよくない[1]。一つ前の講演では、重水素軽水素比測定として反射計の別の利用法が取り上げられている。

反射計は、他にも様々な用途があり、ドップラー反射計は乱流研究の有力な手段として注目されている[2]。

これら反射計の解析にはトムソン散乱による密度分布が必須であり、その精度・確度の向上は重要である。一方、反射計による密度分布測定も可能であるが、これまでのところ、分布の信頼性・安定性の点でトムソン散乱が勝るようである。しかしながら、トムソン散乱の密度測定の精度・確度にも限界があり、両者の比較は、精確度の向上や、磁気面上の密度分布の非一様性を探る上で重要なツールとなりうる。

先進的トムソン散乱計測

トムソン散乱は、古くから用いられている計測手法であるが、近年はいくつかの高性能化が試みられている。その一つは、マルチパス光学系の採用した上での(1)信号積算によるSN比の改善、(2)前方後方散乱同時測定による温度非等方性の測定である。(1)についてはTEXTORでの結果が有名であるが、国内でもいくつかの装置で行われつつある。(2)は、散乱角が90度と180

度の中間程度の幾何学的な配置で有効であり、TST-2装置で行われた例がある。図2は、オーミックプラズマで測定した結果で、密度が高いために、非等方性は10%程度の精度で見られないという結論であった[3]。

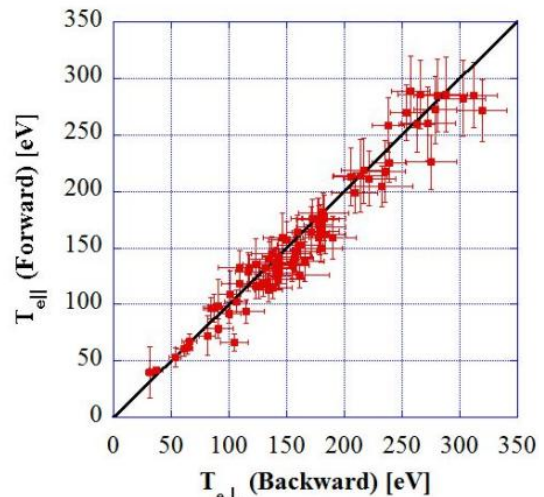


図2 TST-2 球状トカマクの磁気軸近傍で測定した磁力線に垂直な温度と平行な温度[3]。

極低密度プラズマでは、非等方性が現れる可能性があり、興味深い。研究対象としてRF波動で生成・維持された球状トカマクが考えられる。QUEST装置では、ピークで $1 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ 以下となるプラズマの電子温度・密度分布がトムソン散乱装置で得られている。この時は、定常で長い放電時間と再現性のよいプラズマを用いてトムソン散乱信号を積算することで分布が得られた。このプラズマは、いくつかの理由で静電プローブによる温度、密度測定が不可能であり、トムソン散乱の適用領域を低密度側へ拡張することの重要性を示された。今後、このようなプラズマでの非等方性の探索が期待される。

まとめ

精密科学のための計測の進化にはいろいろな方向性がある。そのような観点で見れば、LHDにはその能力があり、今後が期待できる。

参考文献

- [1] N. Tsuji, Private Communication (2013).
- [2] e.g. T. Tokuzawa, et al., Proc. 14th International Workshop on H-mode Physics and Transport Barriers (H-modeWS2013), Oct. 2-4, 2013 Kyushu University, Japan.
- [3] J. Hiratsuka, et al., Plasma Fusion Research, **6**, 1202133 (2011).