

## 論文の内容の要旨

論文題目 ビーム放射分光法を用いたヘリカルプラズマの輸送と揺動に関する実験的研究

氏名 大石 鉄太郎

### 第1章 序論

核融合発電の実現を目指したトラスプラズマの磁場閉じ込め研究において、1982年にASDEX トカマクで発見されたHモードと呼ばれる閉じ込め改善モードは、閉じ込め性能の向上に大きく寄与した[1]。プラズマがHモード状態に遷移すると粒子または熱の閉じ込めが改善され、プラズマ周辺部で圧力勾配が急峻になる「周辺部輸送障壁(edge transport barrier:ETB)」という領域が形成される。このETBの形成はその後定常運転に適するとされるヘリカル型装置でも観測され[2]、トラスプラズマにおける閉じ込め改善モードとして広く認識されるようになった。

一方、ETBの特徴である周辺部の急峻な勾配に起因すると考えられる不安定性が成長し、それらが粒子輸送を促進して閉じ込めを劣化させる現象も観測されてきた。代表的なものとして、edge localized mode(ELM)と呼ばれる間欠的な擾乱や[3]、edge harmonic oscillation(EHO)と呼ばれる定常的な振動が挙げられる[4-6]。これらを制御するためには、揺動レベルの局所値、空間分布、空間相関、発生するタイミングなどの性質を、周辺部の密度勾配と同時に計測することが、実験的アプローチの第一歩となる。

この要請を満たす計測法として、1980年代にR. Fonckらによって提唱された、プラズマとの衝突によって励起した中性粒子ビームからの発光(ビーム放射光)を観測するビーム放射分光法(Beam Emission Spectroscopy:BES)が挙げられる[7]。BESは、いくつかのトカマク装置に適用され、DIII-D トカマクにおけるHモード遷移時の乱流揺動の抑制[8]やETB領域でのEHO[4]など、閉じ込め性能の変化と密度揺動との相関を示唆する計測結果が報告されている。一方ヘリカル型の装置では、磁場構造が複雑で観測位置の確保が困難であったが、本研究により、自然科学研究機構核融合科学研究所のcompact helical system (CHS)にて観測視線が最適化され、計測が開始された。

本研究では、CHS装置において、ETBが形成されるプラズマを対象として、局所的な密度揺動と密度勾配をBESを用いて同時計測し、

- ・ ETBを伴うプラズマにはどのような揺動が生じるか
- ・ 揺動と相関を持つパラメータは何か
- ・ 揺動は閉じ込めに影響するか

を実験的に解明することを目的とする。

## 第2章 ビーム放射分光法(BES)

BESは、プラズマ中にとった観測視線が中性粒子ビームと交差する領域から放射されるビーム放射光のみを計測する局所計測であり、発光位置を決定する能力に優れている。さらに、結像光学系を用いた多点同時計測を行うことで、揺動の空間的な相関を調べることができる。本研究では、プローブビームとして、CHSの加熱用中性粒子入射装置(NBI#2, 入射エネルギー $25 \sim 32\text{keV}$ , 水素原子ビーム)を用い、水素プラズマを計測対象とする。観測するビーム放射光は水素原子 $H_\alpha$ スペクトル(波長 $\lambda_0=656.285\text{nm}$ )とする。この時信号強度はプラズマの密度に比例するため、多点同時計測を行った場合、隣り合う2点間の信号強度の差分を密度勾配と解釈することができる。信号強度の揺動に主に寄与するのは電子またはイオンの密度揺動、およびビーム粒子密度の揺動である。このうちビーム粒子密度揺動の寄与が無視できる、または除去することができれば、信号強度の揺動をプラズマの密度揺動とみなせる。

## 第3章 CHS における BES 計測システムの構築

CHS は大半径  $1\text{m}$ 、小半径  $0.2\text{m}$  の低アスペクト比ヘリオトロン型プラズマ閉じ込め装置である。プラズマは電子サイクロトロン加熱によって生成され、2本のNBIによって追加加熱される。本研究で構築したCHSにおけるBES計測システムを概念図を図1に示す。真空容器の内側に突き出した形状のポートを用いることにより、観測位置を最適化している。対物レンズと光ファイバアレイからなる結像光学系を用いて、半径方向に16本の観測視線を約 $1\text{cm}$ 間隔で配置し、プラズマの小半径程度にわたる領域を多点同時計測する。光学干渉フィルタを用いて、ドップラーシフトしたビーム放射光のみを選択的に、カットオフ周波数 $100\text{kHz}$ のアバランシェフォトダイオード検出器によって検出する。

## 第4章 CHS における ETB の形成とそれに伴う密度揺動の計測

CHSにおいてETBの形成が観測されている[9]。ETBは、2本のNBIによって加熱された水素プラズマにおいて、加熱パワーがある閾値を越えた時に形成される。NBI入射後数~数 $10\text{ms}$ の遅れを伴って $H_\alpha$ が低いレベルに遷移すると同時に線平均密度と蓄積エネルギーが増加し、これがETB形成による閉じ込め改善を意味している。

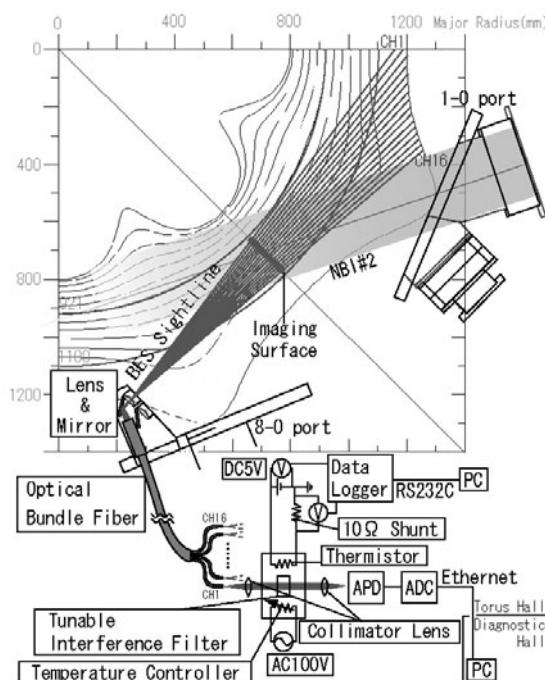


図1 CHS における BES 計測システムの概念図

ETB 遷移時の最外殻磁気面(last closed flux surface: LCFS)付近の密度の経時変化が、BES を用いて詳細に観測された。図 2 に示すように、ETB 遷移時には LCFS 内側(平均小半径  $\rho=0.95$ )で遷移時に密度が増加し、外側( $\rho=1.03$ )で減少した。LCFS の近傍に輸送障壁が形成され、粒子閉じ込めが改善されたことを示している。

加熱パワーが遷移閾値よりも十分高い場合には、4~5kHz 程度の周波数を持つコヒーレントな揺動とその 2 倍の周波数を持った高調波が成長する。この揺動の周波数スペクトルを、磁場揺動と BES による  $\rho=0.95$  における密度揺動について示した結果が図 3 である。この揺動は  $\rho=0.95$  において強度が最大となるが、 $\rho=0.95$  には回転変換  $l=1$  の有理面が存在する。周辺部の有理面に局在し、高調波を持つ点は、トカマクの EHO と類似している[5]。この類似性に着目し、本研究で観測されたこの揺動も EHO と呼ぶ。

図 4 は、BES によって計測された EHO の径方向構造である。(a)は遷移時および EHO 発生時の密度分布を示す。ETB 遷移によって増加した障壁部の密度勾配がある閾値に達すると、EHO が発生する。EHO 発生後は、密度勾配の増加は止まり、一定のレベルを保つようになる。(b)は EHO の基本波の強度分布であり、 $\rho=0.95$  でその強度が最大となることを示す。(c)および(d)はそれぞれ、 $\rho=0.95$  のチャンネルを基準として算出した、EHO の基本波の二乗コヒーレンスおよび位相である。位相は、外側への伝播を、径方向に減少する傾向としてプロットした。 $\rho=0.85$  から  $\rho=1.10$  にわたって、0.8 を超える高いコヒーレンスが得られている。この領域において位相を直線フィッティングして位相速度を求めると、トラス外側に数 100ms で伝播していることがわかった。これは他のトカマク型装置における EHO の径方向伝播の速度と同程度の値である[6]。

トカマクでは EHO が発生すると粒子輸送が増えることが、ダイバータ領域のプロープ計測や受動分光計測から示されている[6,10]。これは、EHO 発生時に線平均密度が減少することからも確認されている[5]。これに対して CHS の EHO では、粒子輸送が促進されているという明確な証拠は得られていないが、EHO の径方向伝播は、外向きの粒子束の存在な

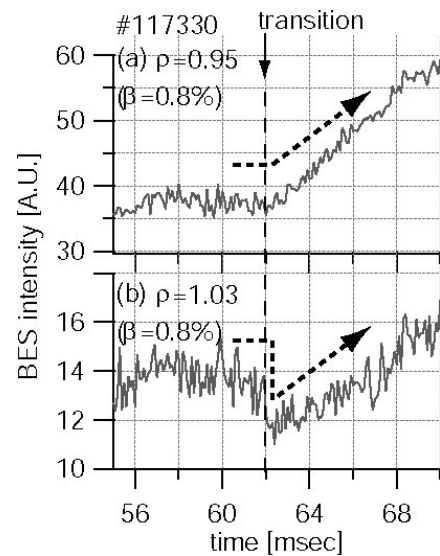


図 2 BES により計測された (a) $\rho=0.95$ , (b) $\rho=1.03$ での密度。

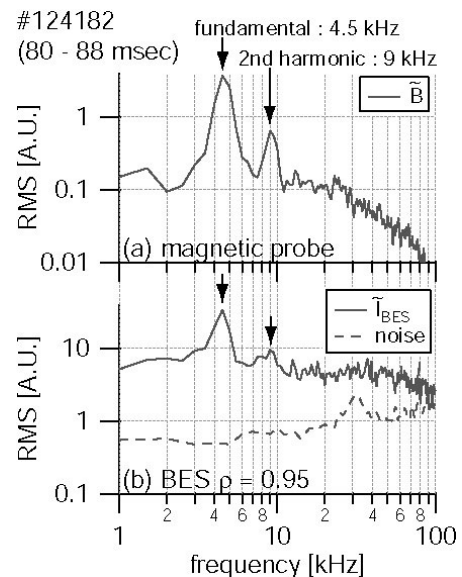


図 3 ETB 形成後に観測される揺動の周波数スペクトル。(a)磁場揺動および (b) $\rho=0.95$ において BES により計測された密度揺動。

しには説明できない．これに加えて，密度勾配を閉じ込め改善の指標とみなすと，EHO 発生後の密度勾配上昇の飽和は，粒子閉じ込め改善の制限を示していると解釈できる．EHO を伴う放電では，ビームパワーを増加させても遷移後の密度勾配は増加しなくなることもまた本研究の中で確認されている．このことから，EHO は粒子輸送と相関がある可能性が示唆される．

## 第5章 総括

本研究では，核融合研 CHS 装置に BES 計測を適用し，密度揺動と密度勾配の同時計測を行った．ETB 形成時の密度勾配と密度揺動を同時計測した結果，密度勾配は，ETB 遷移時に LCFS 近傍で急峻化することがわかった．遷移後に障壁部の密度勾配がある閾値に達すると，粒子輸送に影響を及ぼすと考えられる，トカマクの EHO に類似した密度揺動が観測された．

## 第6章 今後の課題と展望

EHO と粒子輸送との相関に関する議論には課題が残されており，周辺部計測の充実によって，EHO 発生時の粒子吐き出しに関する情報を得ることが必要である．本研究では，ヘリカル型装置における BES 計測の適用可能性が実証された．今後も様々なヘリカル型装置においてこの種の計測が適用され，揺動と閉じ込め改善との相関が議論されることが展望できる．さらに，トカマクとの比較を通じてトーラスプラズマに共通する輸送と揺動の物理の解明が促進されることが考えられる．

- [1] F. Wagner et al., Phys. Rev. Lett. **19**, 1408 (1982)
- [2] V. Erckmann et al., Phys. Rev. Lett. **70**, 2086(1993)
- [3] H. Zohm, Plasma Phys. Control. Fusion **38**, 105 (1996)
- [4] C. M. Greenfield et al., Phys. Rev. Lett. **86**, 4544 (2001)
- [5] W. Suttrop et al., Plasma Phys. Control. Fusion **45**, 1399 (2003)
- [6] N. Oyama *et al.*, Nucl. Fusion **45**, 871 (2005)
- [7] R. Fonck et al., Rev. Sci. Instrum. **61**, 3487 (1990)
- [8] M. Jakubowski et al., Rev. Sci. Instrum. **70**, 874 (1999)
- [9] S. Okamura et al., J. Plasma Fusion Res. **79**, 977(2003)
- [10] K. H. Burrell et al., Phys. Plasmas **8**, 2153 (2001)

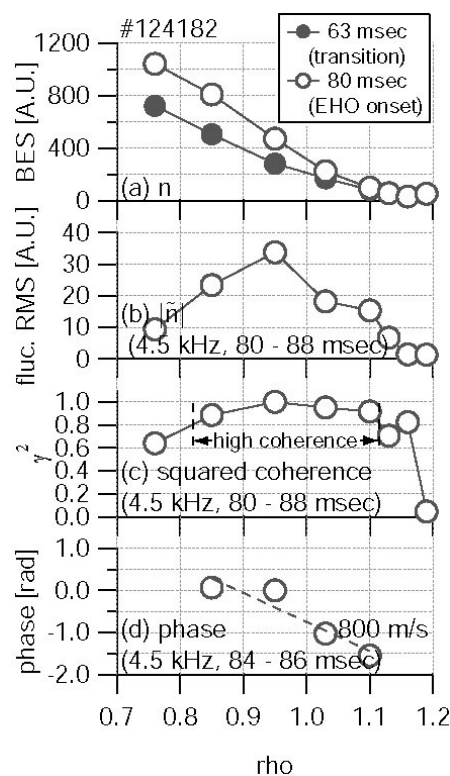


図4 BESによって計測された，密度分布およびEHOの基本波( $f=4.5\text{kHz}$ )の径方向構造．(a)遷移時およびEHO発生時の密度分布，EHOの基本波の(b)強度分布，(c)二乗コヒーレンス，(d)位相．コヒーレンスと位相は， $\rho=0.95$ のチャンネルを基準とした．