



## 博士論文紹介

# 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

大石 鉄太郎

核融合科学研究所

(原稿受付：2007年2月28日)

### Keywords:

beam emission spectroscopy, compact helical system, heliotron, edge transport barrier, H-mode, fluctuation, MHD, edge harmonic oscillations

## 1. 序論

核融合発電の実現をめざしたトラスプラズマの磁場閉じ込め研究において、Hモードと呼ばれる閉じ込め改善モードの発見は、閉じ込め性能の向上に大きく寄与した[1]。粒子または熱の閉じ込めが改善されたHモード状態のプラズマでは、プラズマ周辺部で急峻な圧力勾配が形成される。勾配が急峻化された領域は「周辺部輸送障壁(edge transport barrier: ETB)」と呼ばれる。このETBの形成は、定常運転に適す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ている。

一方、ETBの急峻な勾配に起因すると考えられる不安定性が粒子輸送を促進し、閉じ込めを劣化させる現象も観測されてきた。周辺局在モード(edge localized mode: ELM)と呼ばれる間欠的な熱・粒子の吐き出しや[3]、境界層高調波振動(edge harmonic oscillation: EHO)\*と呼ばれる定常的な振動が挙げられる[4]。このような不安定性に代表される揺動を制御できれば、粒子輸送の制御という観点から核融合炉の定常運転に貢献できる。そのためには、揺動を詳細に計測し、その性質を把握することが、実験的アプローチの第一歩となる。

ここで、揺動と閉じ込めとの相関に関する知見を与えてきた計測法の一つとして、ビーム放射分光法 (beam emission spectroscopy: BES) が挙げられる[5]<sup>†</sup>。プラズマに中性粒子ビームを入射すると、ビーム粒子はプラズマとの衝

突によって励起し、線スペクトル (ビーム輝線) を放射して脱励起する。ビーム輝線はビームが速度を持つことによりドップラーシフトしているため、分光的手法を用いることで背景光と区別して計測できる。信号強度は、ビームと視線が交差する領域 (観測体積) におけるプラズマ密度に比例するため、信号強度の揺動を局所的な密度揺動と解釈できる。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が調べられる。トカマク型装置での計測結果は、Hモード遷移時の乱流揺動の抑制[7]や、ETB領域でのEHOの発生[4]など、閉じ込め性能の変化と密度揺動との相関を示唆している。

このようにBESは、発光位置を決定する能力に優れた局所計測であるが、観測体積中に複数の磁気面が含まれる場合、計測される値が異なる磁気面上の密度揺動の足し合わせとなる。この線積分効果は空間分解能を低下させる。特にトロイダル方向にも変化する磁場構造を持つヘリカル型装置では、線積分効果を避けるための観測視線の設定や、線積分値として得られた信号の解釈が困難であるとされ、本研究以前にはBESの適用例がなかった。

そこで本研究では、自然科学研究機構核融合科学研究所 (核融合研) のヘリカル型プラズマ閉じ込め装置 Compact Helical System (CHS) において、空間分解能を最適化したBES計測システムを開発し、密度揺動を計測した。これに加え、信号強度が局所的な密度に比例することを利用し、隣り合う2点間の信号強度の差分を密度勾配と解釈した。

\*高調波を伴う準コヒーレントな揺動であり、「調和振動」とも訳されるかもしれないが、波形の変型を特徴づける高調波成分に着目して、著者らはこの訳を用いている。

<sup>†</sup>我が国では、かつてリチウムビームを用いた周辺揺動計測として、「ビームプローブ分光」等とも呼ばれていた[6]が、加熱ビームを用いた文献[5]以来、BESの名称が定着した。シンクロトロン放射光等、加速された荷電粒子からの連続スペクトルとの区別を明瞭にするため、ビームからの輝線スペクトルについて「ビーム輝線」の名称を用いることにした。

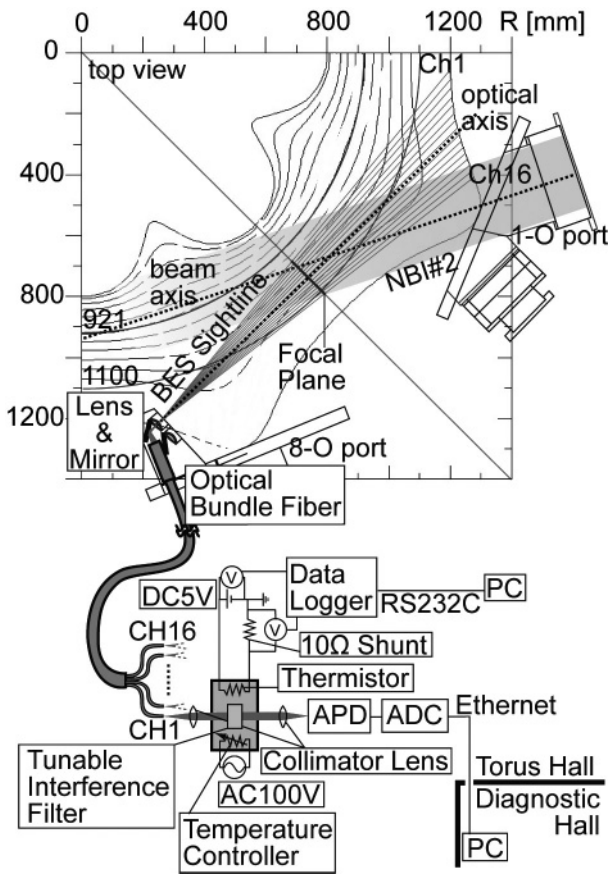


図1 CHSの磁気面の赤道断面と、BES計測システムの概念図。(参考文献[10] Fig.1より転載)

これにより、BES計測単独で揺動と勾配の相関を議論することが可能になった。

CHSにおいてもETBの形成を示唆する遷移現象が観測されている[8]。その時のプラズマを対象としてBES計測を行い、「ETB遷移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本研究の目的とした。

## 2. CHSにおけるBES計測システムの構築

CHSは大半径1 m、小半径0.2 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。本研究で構築したCHSにおけるBES計測システムの概念図を図1に示す[9,10]。レンズ・ミラー・ファイババンドルが設置されているポートは、磁気面にできるだけ平行にBES計測の観測視線を確保できるように、真空容器の内側に突き出す形状に設計された。これにより、磁気面の線積分効果を極力回避し、空間分解能を向上させることを試みた。対物レンズと光ファイバ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 cm間隔で配置し、プラズマの小半径程度にわたる領域を同時計測する。プローブビームとして、CHSの加熱用中性粒子入射装置(neutral beam injection: NBI)を用いる。これは、入射エネルギー25~32 keVの水素原子ビームである。観測するビーム輝線はドップラーシフトした水素原子  $H_\alpha$  スペクトルである。これを

光学干渉フィルタを用いて選択的に、カットオフ周波数100 kHzのアバランシェフォトダイオード検出器で検出する。

## 3. CHSにおけるETBの形成とそれに伴う密度揺動

### 3.1 CHSにおけるETBの形成

図2に、ETB遷移を伴う放電におけるプラズマパラメータの典型的な経時変化を示す。図示した放電には、真空磁場の大半径  $R_{ax} = 92.1$  cm、磁気軸でのトロイダル磁場  $B_t = 0.88$  Tとなる、CHSの標準磁場配位と呼ばれる磁場配位が適用されている。(a)は加熱と粒子供給である。電子サイクロトロン加熱によって生成された水素プラズマが、2本のNBIによって追加加熱される。密度を増加させるために、ガスパフが適用される。NBIの加熱パワーがあるしきい値(典型的には、遷移前の線平均電子密度  $2.0 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$  程度のプラズマに対してNBIのポートスルーパワーが1.0 MW程度)を超える場合、(b)に示すように、 $H_\alpha$  輝線の急激な減少で特徴づけられる遷移現象が起こる。この遷移はNBIの入射から数~十数ミリ秒の遅れを持つ。(c)は蓄積エネルギー、(d)は線平均電子密度であり、遷移と同時に増加する。本研究では、図2に示した放電波形を、(1)遷移前の「L相(L-phase)」、(2)遷移後に密度勾配が上昇を続ける「密度上昇相(density building-up phase)」、(3)密度勾配の上昇が飽和し、ETBが安定に維持されている「ETB飽和層(ETB-saturation phase)」に分類して議論を進めた。

図3は、最外殻磁気面(last closed flux surface: LCFS)付近(平均小半径  $\rho = 0.95$  および1.03)を観測するBES計測視線にて得られた信号の経時変化である。遷移と同時に、LCFSの内側である  $\rho = 0.95$  では密度が増加し、外側である  $\rho = 1.03$  では減少した。これは、LCFS近傍で粒子輸送障壁が形成されることを示している[11]。

### 3.2 EHOに類似した密度揺動の観測

NBIの加熱パワーがETB遷移のしきい値を十分超える場合(典型的にはポートスルーパワーが1.2 MW以上)、

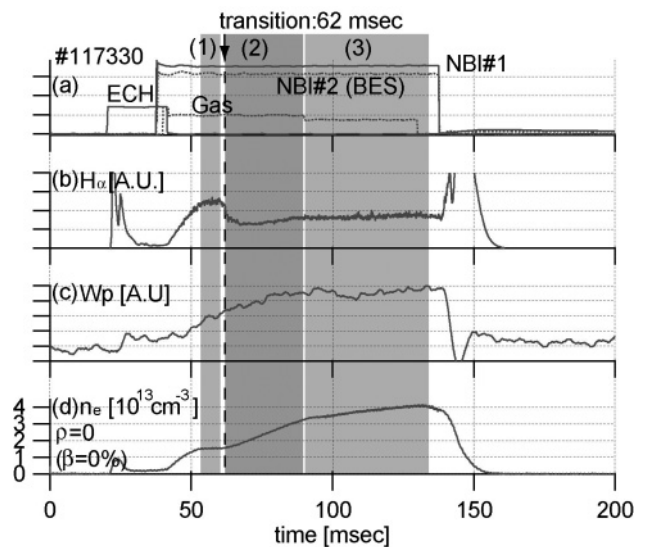


図2 CHSにおけるETBプラズマの放電波形。(参考文献[11] Fig.2より転載)

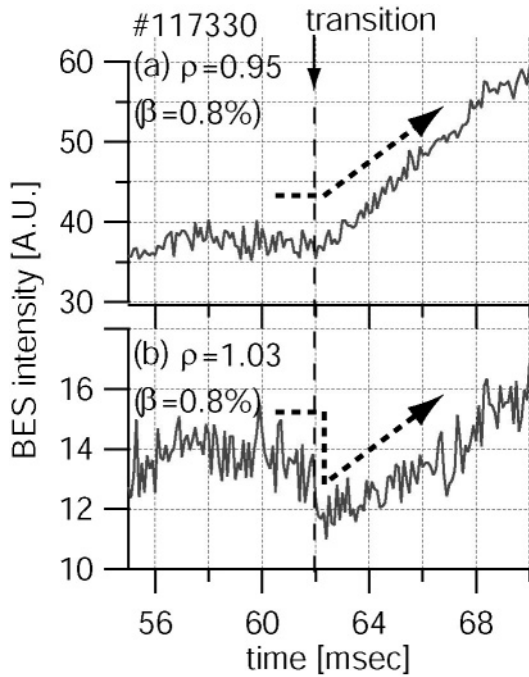


図3 LCFS 付近を観測する BES 計測視線にて得られた信号強度の経時変化。(参考文献[11] Fig. 3 より転載)

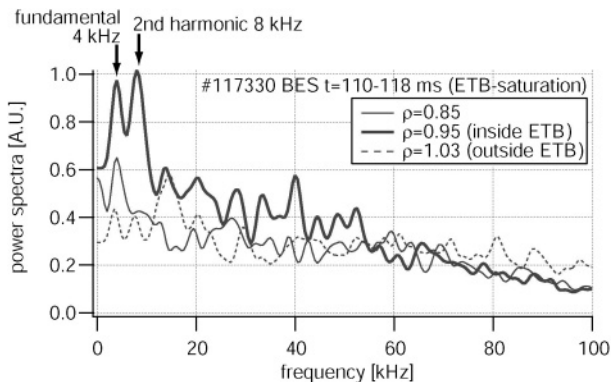


図4 ETB 飽和相での密度揺動の、 $\rho = 0.85$ ,  $\rho = 0.95$ ,  $\rho = 1.03$  における周波数スペクトル。(参考文献[11] Fig. 6 より転載)

ETB 飽和層においてのみ、4 kHz 程度の周波数を持った基本波とその倍波からなるコヒーレントな MHD 揺動が観測された。このモードの発生位置を、BES を用いて調べた。図4は、EHO を伴う放電における、ETB 飽和相での  $\rho = 0.85$ ,  $\rho = 0.95$ ,  $\rho = 1.03$  の周波数スペクトルである。EHO のパワー密度は  $\rho = 0.95$  で最大値をとることがわかった。このモードの、プラズマ周辺部に局在し高調波を伴うという特徴は、トカマクの EHO と類似する。したがって本研究でもこれを EHO と呼ぶ。

※学位論文提出後、BES の計測範囲をコア部にまで拡張し、磁気プローブを併用することで、EHO の 3 次元的な空間構造の計測を試みている。径方向の多点同時計測より、EHO は、周辺部 ( $\rho = 0.95$ ) の  $\ell = 1$  有理面近傍に発生する MHD 揺動 (周辺部モード) と、中心部 ( $\rho = 0.53$ ) の  $\ell = 0.5$  有理面近傍に発生する MHD 揺動 (中心部モード) の 2 組からなることがわかった[13]。いずれも数 kHz 程度の基本波とその高調波からなり、周辺部モードと中心部モードとは基本波の周波数に 0.5 kHz 程度の差がある。周辺部モードおよび中心部モードのポロイダル (イオン反磁性方向を正)/トロイダル (トロイダル磁場方向を正) モード数は、それぞれ  $-1/1$  と  $-2/1$  であり、モード位置近傍の有理面の回転変換と対応している[14]。さらに、どちらの MHD 揺動も、高調波と基本波のモード数、つまり波数は同じであることがわかった。そのため、高調波の位相速度が基本波の整数倍になるという、通常の MHD 揺動とその高調波との関係とは異なった分散関係を示している[15]。

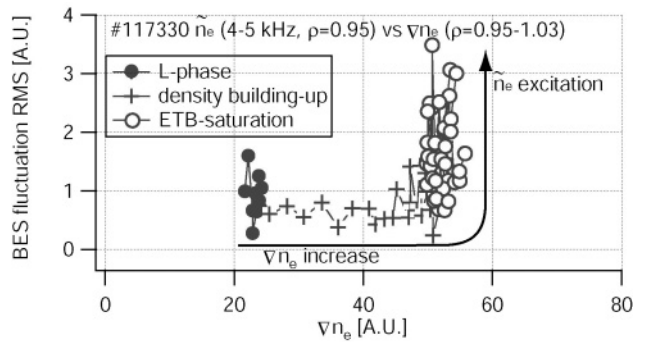


図5 EHO の振幅と周辺部の密度勾配との関係。(参考文献[11] Fig. 8 より転載)

EHO が発生する  $\rho = 0.95$  の近傍では、回転変換  $\ell = 1$  の有理面や、ETB 遷移によって急峻になった密度勾配といった、揺動が成長しやすい条件が存在する。ポロイダル磁場の四重極成分と呼ばれる値を制御して、ポロイダル断面の楕円形状を変化させたところ、 $\ell = 1$  有理面および密度勾配が急峻な領域の位置に追従して EHO が発生する位置が移動することがわかった。

ETB が形成される空間領域である  $\rho = 0.95$  と  $\rho = 1.03$  の間の密度勾配を粒子閉じ込め改善の指標と考え、それらと EHO との相関を調べた。図5は、EHO の基本波の振幅を、密度勾配に対してプロットしたものである。密度勾配は遷移後増加し、ある閾値に達すると EHO が成長する。EHO が成長した後は、密度勾配はほぼ一定レベルに飽和した。さらに、EHO が発生しない放電では、密度勾配の飽和レベルは NBI の加熱パワーとともに増加するが、EHO が発生する放電では、加熱パワーを増やしても密度勾配の飽和レベルが変化しない傾向が見られた。EHO と勾配が互いにバランスを取って、お互いの飽和レベルを決定していると考えられる。特に、EHO が観測される放電において、加熱パワーを増加させても ETB 飽和相での密度勾配が増加しなくなることから、EHO によって閉じ込め改善が制限されている可能性が考えられる。

多点同時計測により EHO の空間相関を調べたところ、EHO の周波数におけるコヒーレンスは  $\rho = 0.8 - 1.1$  程度の空間領域で高い値となり、その空間領域で EHO は径方向に連続的な位相差を持つことがわかった。この位相差を径方向への伝播であると解釈すると、見かけ上の位相速度は径方向外側向きに数 100 m/s となる。この見かけの伝播方向と位相速度はトカマクの EHO と類似している。ただし実際に揺動が伝播しているかどうかは結論できず、周辺部の有理面に起因する構造を持つプラズマの剛体回転が位相差となって現れている可能性も否定できない[12] †。

#### 4. 総括および今後の展望

本研究では、核融合研 CHS 装置に BES 計測を適用し、ETB 形成時の密度勾配と密度揺動を同時計測した。その結果、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。加熱パワーが遷移しきい値よりも十分高い場合、ETB 飽和相において、4 kHz 程度の周波数を持つ基本波とその 2 倍波からなる、トカマクの EHO に類似した揺動が観測された。この CHS における EHO の発生位置は、LCFS のすぐ内側の有界面上であり、EHO が成長するためのしきい値が発生位置の密度勾配に存在することがわかった。EHO を伴う放電では、加熱パワーを増加させても ETB 飽和相での密度勾配は有意に変化しなかった。これより、EHO が閉じ込め改善に制限を与え、密度勾配がある程度以上増加しなくなっている可能性が指摘される。

以上のように、ヘリカル型プラズマ閉じ込め装置における初の試みである BES 計測の実現によって、ETB を伴うプラズマに生じる密度揺動について、揺動と密度勾配との相関や、揺動の閉じ込めへの影響を議論することが可能となった。今後様々なヘリカル型装置に BES 計測が適用され、揺動と閉じ込め改善との相関を議論できることが展望される。実際に、核融合研の大型ヘリカル型プラズマ閉じ込め装置 LHD において、BES 計測システムの構築が進行中である [16]。このようなヘリカル型装置での揺動計測の進展は、トカマクとの比較を通じて、トラスプラズマに共通する輸送と揺動に関する物理の解明を促進すると期待できる。

#### 謝辞

本研究は、核融合研の一般共同研究 (NIFS02KZPD003 : 代表 門 信一郎) の支援を受けた。

#### 参考文献

- [ 1 ] F. Wagner, G. Becker, K. Behringer *et al.*, Phys. Rev. Lett. **19**, 1408 (1982).
- [ 2 ] V. Erckmann, F. Wagner, J. Baldzuhn *et al.*, Phys. Rev. Lett. **70**, 2086 (1993).
- [ 3 ] H. Zohm, Plasma Phys. Control. Fusion **38**, 105 (1996).
- [ 4 ] C.M. Greenfield, K.H. Burrell, J.C. DeBoo *et al.*, Phys. Rev. Lett. **86**, 4544 (2001).
- [ 5 ] R.J. Fonck, P.A. Duperrex and S.F. Paul, Rev. Sci. Instrum. **61**, 3487 (1990).
- [ 6 ] 門田 清, 藤田順治 : 分光研究 **32**, 223 (1983).
- [ 7 ] M. Jakubowski, R. Fonck, J.S. Kim *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **70**, 874 (1999).
- [ 8 ] S. Okamura, T. Minami, C. Suzuki *et al.*, J. Plasma Fusion Res. **79**, 977 (2003).
- [ 9 ] T. Oishi, S. Kado, M. Yoshinuma *et al.*, J. Plasma Fus. Res. SERIES **6**, 449 (2004).
- [ 10 ] T. Oishi, S. Tanaka, S. Kado *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **75**, 4118 (2004).
- [ 11 ] T. Oishi, S. Kado, M. Yoshinuma *et al.*, Nucl. Fusion **46**, 317 (2006).
- [ 12 ] T. Oishi, S. Kado, M. Yoshinuma *et al.*, Phys. Plasmas **13**, 104504 (2006).
- [ 13 ] S. Kado, T. Oishi, S. Tanaka *et al.*, 21st IAEA Fusion Energy Conference Proceedings, EX/P8-1 (2006).
- [ 14 ] T. Oishi, S. Kado, M. Yoshinuma *et al.*, to be published in Plasma Fusion Res.
- [ 15 ] S. Kado, T. Oishi, M. Yoshinuma *et al.*, J. Nucl. Mater, in press (2007), doi: 10.1016/j.jnucmat.2006.12.039.
- [ 16 ] 門 信一郎, 大石鉄太郎, 飯田洋平 他 : 日本物理学会講演概要集 **61** 第 1 号 第 2 分冊 p240 (2006) 30aUD-12.