

論文の内容の要旨

論文題目 「Study of Non-inductive Current Drive Using High Energy Neutral Beam Injection on JT-60U」

「JT-60Uにおける高エネルギー中性粒子ビーム入射による非誘導電流駆動の研究」

氏名 及川 聡 洋

トカマク型核融合炉の定常運転のためには電磁誘導に寄らないプラズマ電流維持すなわち非誘導電流駆動が必要となり、中性粒子ビーム (NB) による電流駆動はその有力な方法である。従来の核融合実験装置で使用されている正イオンを元にした NB (P-NB) のビームエネルギーは 100 keV 程度であるが、国際熱核融合炉 (ITER) では高密度において加熱・電流駆動を行うために 1 MeV の NB が必要となる。正イオンビームは 100 keV を超えると中性化効率が大きく減少するために、中性化効率の高い負イオンビームを使う必要がある。従来とはエネルギー領域が大きく異なる NB の電流駆動特性を検証するために、JT-60U トカマクでは負イオンを元にした最大ビームエネルギー 500keV を持つ中性粒子ビーム (N-NB) を開発、設置した。プラズマ平衡の時間発展を解くことによりプラズマ中の電場分布を求め、プラズマ中に流れる電流密度分布の誘導及び非誘導成分を同定することが出来る。この手法では高精度の平衡再構築が必要となるため、動的 Stark 効果を利用したプラズマ内部磁場計測 (MSE) を導入した。高精度の電流分布計測を実現するために MSE 計測システムを 3 系統に増設し、光学系及び較正方法の改良を行った。

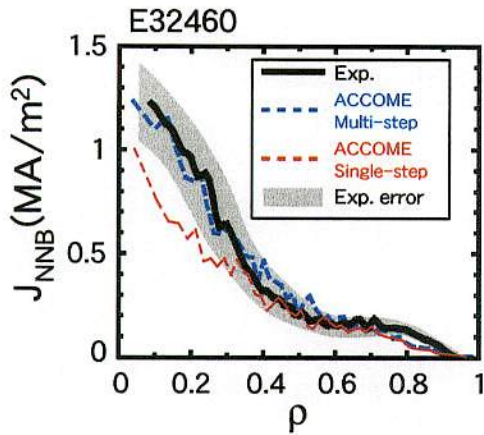


図 1: N-NB 駆動電流密度分布の計測と理論予測の比較。計測値 (Exp.): 実線。影部分は計測誤差を示す。ACCOMME コードによる計算: 多段階電離モデル (太破線)、単一段階電離モデル (細破線)。

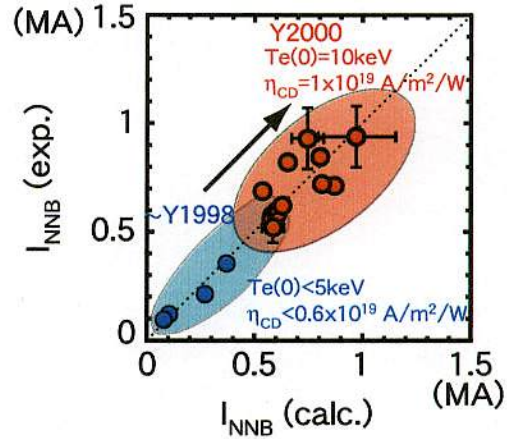


図 2: N-NB 駆動電流の計算値 $I_{\text{NNB}}(\text{calc.})$ (横軸) と計測値 $I_{\text{NNB}}(\text{exp.})$ (縦軸) の比較。電子温度上昇により N-NB 駆動電流量が 0.1 MA から 1 MA まで変化している広い範囲で計測値と理論値が一致。

上記方法により 360 keV の N-NB による非誘導駆動電流分布を初めて測定した (図 1)。新古典効果を取り入れた二次元フォッカープランク方程式から求めた N-NB 高速イオン速度分布関数により評価した駆動電流分布と良い一致を示している。また、ビーム粒子の電離モデルとしては多段階電離を支持している。ビーム電流駆動の理論モデルは電子温度上昇と共に電流駆動性能の改善を予測しており、これに基づいて 20 keV 以上の電子温度をもつ ITER の NB 設計及びプラズマ性能予測が行われている。これを実験的に検証するために高周波加熱を使って中心電子温度を 10 keV まで上昇させたプラズマにおいて N-NB 電流駆動の計測を行い、高電子温度領域においても N-NB 駆動電流分布が理論予測と一致し、電流駆動性能が改善することを確認した (図 2)。中心電子温度 10 keV においては、NB による電流駆動として最大の 1 MA の電流駆動に成功した。また、N-NB 入射により高閉じ込めと高圧力を両立した H モードプラズマにおいて完全電流駆動状態を実現し、N-NB 入射が NB 電流駆動効率の最高値 $1.55 \times 10^{19} \text{ Am}^{-2}\text{W}^{-1}$ を達成していることを電流分布の時間発展の計測と非定常輸送コードによる解析から明らかにした。

NB 電流駆動の理論モデルが高ビームエネルギー、高電子温度領域で検証され、核融合炉設計における外挿性の信頼が高まったが、NB 電流駆動を理解する上でもう一つの重要な要素はプラズマ中

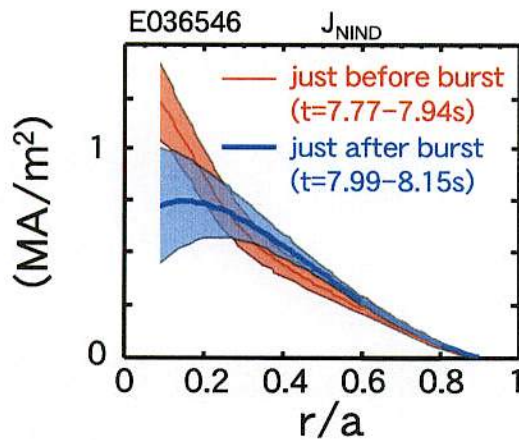


図 3: ビーム駆動不安定性が発生する直前(細線)と発生した直後(太線)における N-NB 駆動電流密度分布の比較。規格化小半径 r/a が 0.3 よりも内側の領域で駆動電流密度が減少。

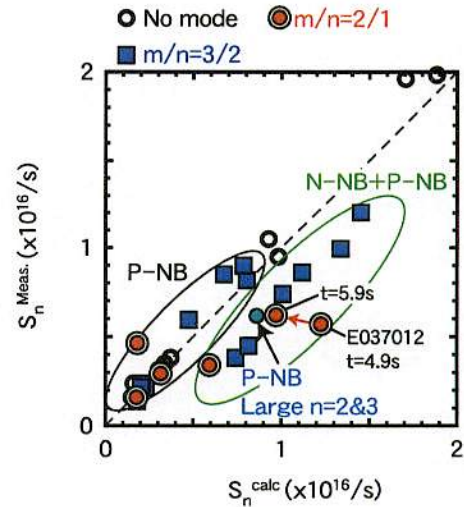


図 4: 中性子発生率の計測値 $S_n^{\text{Meas.}}$ と計算値 S_n^{calc} の比較。NTM 無し (白丸○)、 $m/n=2/1$ 有り (黒丸●)、 $m/n=3/2$ 有り (黒四角■) の場合を示す。

の MHD (Magnetohydrodynamic) 不安定性による影響である。非誘導電流を担う NB 由来の高エネルギーイオンが MHD 不安定性により輸送され、電流駆動性能にどの程度影響するかを実験的に検証した。低電子密度プラズマに N-NB 入射を行うと、ビーム圧力の高いプラズマ中心部において N-NB 高速イオンが駆動する不安定性が突発的に発生する。この不安定性により N-NB 高エネルギー粒子がプラズマ中心部よりはき出され、非誘導駆動電流が減少することを初めて観測した(図 3)。また、高プラズマ圧力を維持した時に発生する新古典テアリングモード (NTM) による N-NB 高速イオンへの影響も調べた。NB 高速イオンの核融合反応により発生する中性子発生割合が熱核融合反応による割合より十分に高いプラズマにおいては、中性子発生率の計測値と輸送コードによる計算値の違いは NB 高速イオンの損失を意味する。中性子発生率の計測値と計算値の比較から、NTM により高エネルギーイオンが輸送されることを明らかにした(図 4)。P-NB (~ 85 keV) 入射時に比べてエネルギーの高い N-NB (360 keV) 入射時には計測値と計算値の相違が大きくなり、高速イオンの損失が大きいことを示唆している。また、NTM による揺動が大きいほど高速イオン損失が大きいことも示している。NTM による高速イオン損失のビームエネルギー依存性は初めて明らかにされたものである。また、高速イオン圧力分布の計測値(平衡解析から同定)と輸送コードによる計算値を比較した結果か

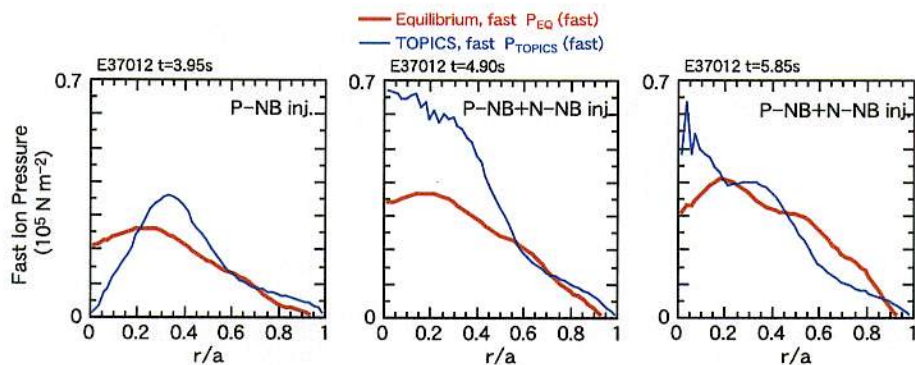


図 5: NB 高速イオン圧力分布の計測値 $P_{EQ}(fast)$ (太線) と計算値 $P_{TOPICS}(fast)$ (細線) の比較。左から、 $t=3.95$ s (P-NB 入射、モード有)、 $t=4.90$ s (P-NB 及び N-NB 入射、モード有)、 $t=5.85$ s (P-NB 及び N-NB 入射、モード無し) を示す。

らも、NTM 発生中は P-NB 入射に比べて N-NB 入射の方が高速イオン損失が大きいこと、NTM が消滅すると高速イオン損失がほとんど見られなくなることを明らかにした (図 5)。計測された高速イオン圧力分布から N-NB 駆動電流分布を評価し、NTM により最大で N-NB 駆動電流の 71 % が失われていることが分かった。NTM では平衡磁場とは異なる径方向の揺動磁場が発生し、磁気島構造が成長する。この径方向揺動磁場が高速イオン軌道に影響を与え、径方向の輸送を引き起こしていると考えられる。

本研究では、高エネルギー NB の電流駆動特性が理論予測通りの性能を持つことを実験的に検証したが、同時に、NTM による高速イオン損失による加熱電流駆動性能が許容できないほど劣化する可能性があることを明らかにした。従って、NTM の抑制方法の確立は必須の物理課題である。磁気島領域に電子サイクロトロン波を使った局所電流駆動を行うことにより NTM を消滅させられることが理論的に予言され、実験でも実証されている。