

論文内容の要旨

Title

Experimental Analysis of the Magnetic Field Structure on the High-Beta Plasmas in the Magnetospheric Plasma Device

論文題目

(磁気圏型プラズマ閉じ込めにおける
高 β プラズマの磁場構造の実験的解析)

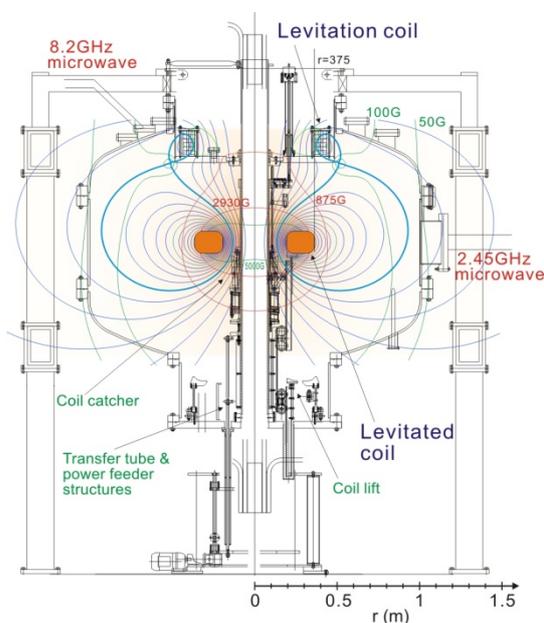
氏名 矢野善久

yano@ppl.k.t.u-tokyo.ac.jp

磁場閉じ込め核融合エネルギーは既存の商用発電に比べ、クリーンで資源が無尽蔵にあるという意味で実用化が期待されているエネルギー源である。しかしながらその実現のためには10億度近いプラズマを磁場中に閉じ込めるために多くの物理的・工学的課題を有し、世界中で研究開発が行われている。磁場閉じ込め核融合の本流はトカマク型と呼ばれる磁場配位であり現在建設中であるITERに採用されており、第一世代の核融合炉として最も有望な閉じ込め方式である。

本研究で実験研究を行った、RT-1 (Ring Trap-1)装置は先進核融合を目指したプラズマ閉じ込め装置である。特徴として磁気浮上式の超伝導コイルを備え、まさに惑星が宇宙に浮かぶような磁気圏中に支持構造物の無いプラズマを閉じ込めることができる。元来は磁気圏の磁場配位はほとんどを悪い曲率に囲まれているためにプラズマ閉じ込めとしては不向きであると考えられてきたが、木星磁気圏の衛星探査による観測事実や圧縮性による磁気圏内のプラズマの安定化の効果などの理論的説明などから次世代の核融合炉として有望な超高 β (プラズマ圧と磁気圧の比、閉じ込め効率を表す。)閉じ込めが可能であると近年では研究が行われるようになってきた。

本研究では磁気圏型プラズマ装置 RT-1 において超高 β プラズマ生成を目指すとともに、その閉じ込め特性(β 値や閉じ込め時間)を精度良く評価することを目指す。 β 値の推定のためにはプラズマの圧力分布を評価する必要があるが、RT-1 装置において局所的な圧力分布の直接計測を行うのは困難である。本研究では磁気圏型プラズマにおいて圧力を評価するために磁気計測系を開発した。プラズマが平衡にある場合、プラズマ中には圧力勾配と磁場強度に応じて反磁性電流が流れる。そこで MHD 平衡計算コードを用いて間接的に磁気信号からプラズマの圧力を推定することができる。



[図 RT-1 実験装置]

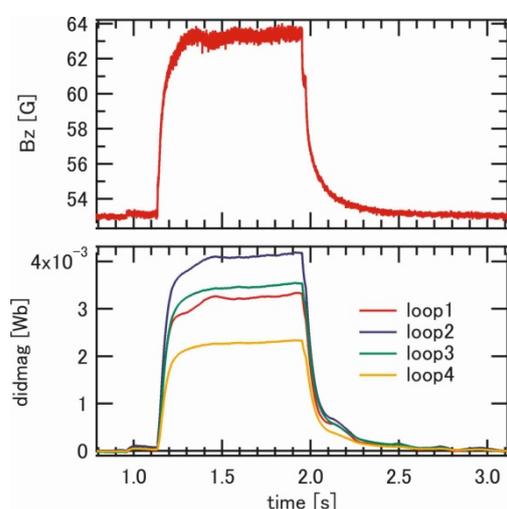
初めに高 β プラズマの生成のために必須である磁気浮上系の最適化から行った。浮上制御系が乱れていると磁場の精度が悪くなりプラズマ生成と磁気計測の両方の影響があると考えられる。本研究では新型地磁気補正コイルによる浮上コイルの傾き制御と誤差磁場の低減、そして浮上ゲインの最適化を行っており、その結果として高 β プラズマの生成が行えるようになった。

RT-1 装置ではプラズマは 2.45GHz と 8.2GHz の 2 種類のマイクロ波によって生成することができる。また封入する中性ガスの圧力を最適化することで高 β プラズマの生成が可能である。RT-1 での高 β プラズマは軟 X 線計測の結果より Te が 10keV 程度の高エネルギー電子が大きな圧力を担っており、低いガス圧にてプラズマの反磁性が顕著に増大することからも説明できる。RT-1 における高 β プラズマの磁気計測は真空容器に巻かれたコイルによる反磁性計測が中心である。4 環まかれた反磁性ループの平均をプラズマの反磁性量と評価すると、RT-1 では最大で 4mWb の反磁性量が観測されている。この 4mWb という反磁性量は平衡計算から最大限に過小評価して局所 β が 50%あると評価される。しかしながら反磁性ループ単独による計測では、ル

ープがプラズマから遠くあることや真空容器による渦電流が発生することから時空間的な分解能に乏しいといえる。そこで本研究では新たにホール素子を用いた磁気計測装置を開発し、測定を行った。

ホール素子の利点は、時間応答が十分に早く($>1\text{kHz}$)コンパクトであるためにプラズマの近く(または内部)での多点計測が可能である点である。大きく分けて赤道面上を駆動できるプローブとプラズマの真下の磁場構造を計測できるプローブが本研究にて開発され、計測を行った。

赤道面上を駆動するプローブでは低 β (\sim 数%)プラズマ中に挿入してプラズマの磁場変化を直接計測した。プラズマ中にプローブを挿入するという点から、高 β プラズマでは計測できないこととプラズマにも影響を与えるという点が欠点である。しかしながら、直接計測することによって圧力分布のピーク付近に存在する急峻な磁場変化を観測することができかなり高い精度での圧力分布の推定が行えた。



[図 磁気計測の典型波形。(上)ホール素子 (下)反磁性ループ]

ホール素子の持つ特性のひとつとして時間分解能が比較的高いことを利用して、エネルギー閉じ込め時間の評価も行った。加熱終了後の減衰過程を解析すると数 10ms と数 100ms の2つの減衰成分が観測された。速い時定数の成分はまだよくわからないが、長時定数の閉じ込め時間がコイルよりも外側の領域にて閉じ込められている高エネルギー電子の成分だと評価できる。

プラズマの真下を計測するプローブは高 β プラズマでも計測ができるという意味で有用である。圧力分布の推定はプラズマ中の直接計測ほどの精度ではないけれども、高 β プラズマの持つ圧力分布を推定することができた。その結果によると、前述の 4mWb の高 β プラズマの場合に圧力分布のピークの位置は赤道面上にて $R=0.602\text{m}$ に対応し局所 β は 70% に対応する。