

# 先進ヘリカル磁場配位のヘリオトロンJ装置による 高温プラズマ閉じ込め研究

エネルギー科学研究科 エネルギー基礎科学専攻 エネルギー物理学講座 電磁エネルギー学分野

教授 近藤 克己

kondo@energy.kyoto-u.ac.jp

助教授 中村 祐司

nakamura@energy.kyoto-u.ac.jp

助手 別生 榮

besshou@energy.kyoto-u.ac.jp

## 1. はじめに

21世紀におけるエネルギー源の一つの選択肢として核融合研究は約半世紀の歴史を持つ。現在では核燃焼プラズマの研究装置として国際熱核融合実験炉（ITER: International Thermonuclear Experimental Reactor）の建設準備が進められている。将来的には経済的に成り立つシステムとしての核融合発電所が建設されるべきであるがそのためにはまだ解決すべき課題が残されている。特に磁場によってプラズマを閉じ込めるときどのような磁場配位がよいのかは今なお精力的に研究が進められている分野である。核融合炉を見据えた磁場配位ではプラズマ圧力と磁場圧力の比である $\beta$ 値を高くできるかという点が最も大きなポイントとなる。このような観点から $\beta$ 値を大きくできる磁場配位の一つとしてヘリカルヘリオトロン配位を選んでヘリオトロンJ装置を完成させ研究を進めている。

ヘリオトロンJ装置では磁気シアーは小さいが、プラズマ全体で磁気井戸を作ることにより安定化をはかる。捕捉粒子をgrad Bの小さい直線部に局在させることにより閉じ込めを改善する。また閉じ込め領域周辺部の磁場構造は磁気島をつくることが可能である。これらの特徴を活かした大きな研究課題として次の三項目を掲げている。

- (1) バンピー磁場制御による無衝突領域の輸送低減
- (2) 周辺部まで広がる磁気井戸のMHD平衡・安定性への効果
- (3) ヘリカルダイバータおよび磁気島ダイバータの基礎研究

これらの研究を近藤研究室、佐野研究室、水内研究室の三つの研究室が一体となって進めている。

## 2. ヘリオトロンJ装置の磁場構造

ヘリオトロンJ装置は、 $L=1$ 、 $M=4$ の連続巻きヘリカルコイル（HFC）と起磁力の異なる2種類

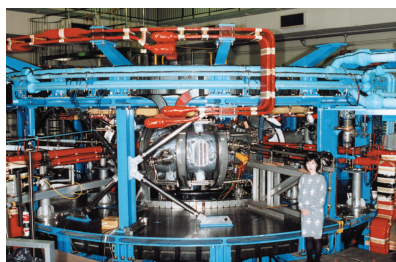


図1. ヘリオトロンJ装置

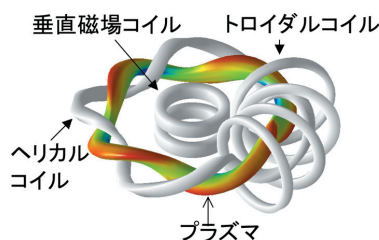


図2. ヘリオトロンJ模式図

表1

主半径	1.2 m
小半径	0.1~0.2 m
プラズマ体積	0.24~0.95 m <sup>3</sup>
最大磁場強度	1.5T
回転変換	0.3~0.8
磁気井戸	1.5%

のトロイダルコイル (TFC-A、TFC-B)、三組の垂直磁場コイル (MVFC、AVFC、IVFC) によって高温プラズマを閉じ込める装置である。主な装置パラメータを表1にまとめる。図1に装置の写真を、図2にはプラズマとそれを閉じ込める磁場コイルを模式的に示す。図3では、 $\rho$  (規格化されたプラズマ半径) = 0.9における2ピッチ分の磁気面の磁場強度を色によって識別できるようにしている。この図からトーラスが直線部とコーナー部から構成されていることがわかる。磁場の最も強い場所は、コーナー部の内側でヘリカルコイルに最も近い位置で、最も弱い場所は直線部の斜め上と下でヘリカルコイルから最も離れた場所である。

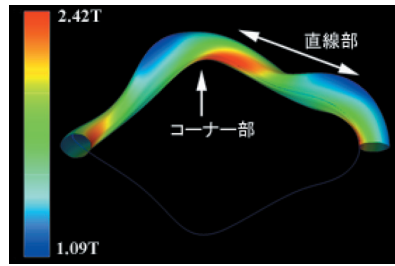


図3. 磁気面上の磁場強度分布

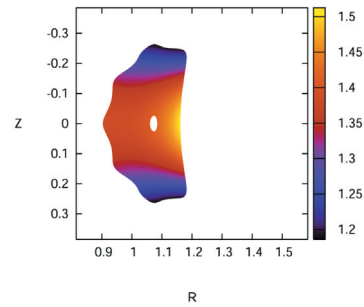


図4. ポロイダル断面上の磁場強度分布

図4では直線部における磁場強度分布を示している。ここでは径方向で磁場強度が大きく変化することがなく  $\text{grad } B$  が小さくなっていることがよくわかる。

図4では直線部における磁場強度分布を示している。ここでは径方向で磁場強度が大きく変化することがなく  $\text{grad } B$  が小さくなっていることがよくわかる。

### 3. ヘリオトロンJ磁場配位における平衡、安定性解析

ヘリオトロンJ装置の磁場構造は、軸対称性がなく3次元の構造を考慮した解析が必要でありこれまでの数値解析コードを適用することが困難であった。そこで新たに実際に即した解析ができるコードを開発し、ヘリオトロンJで想定されるプラズマの平衡磁場分布と安定性を調べている。

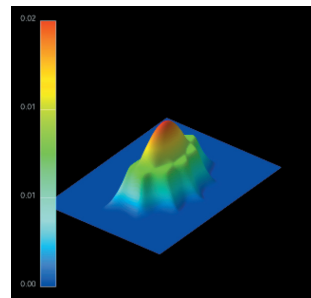


図5. 平衡解析結果の一例

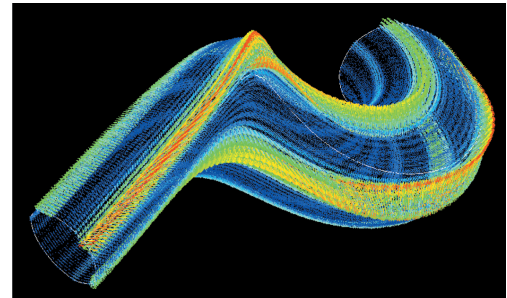


図6. バルーンング不安定性解析結果の一例

図5は、このようにして求められた平衡磁場分布の一例である。ここではプラズマの圧力分布の変化によってどのような平衡磁場が得られるかを解析している。また安定性に関しては、バルーンング不安定性に注目して研究を進めている。その結果の一例を図6に示す。赤色の部分で不安定性が局在して強く発生しているところである。このように従来軸対称性を仮定して解析が進められていた領域を超えて3次元非軸対称系の物理を明らかにするツールが開発されプラズマの安定性解析に大きく貢献することができるようになった。

### 4. ヘリオトロンJ実験結果

ヘリオトロンJ装置におけるプラズマ生成と加熱は、電子サイクロトロン加熱 (ECH: Electron Cyclotron Heating) によって行っている。現在周波数53.2GHzのジャイロトロンが3本と70GHzのジャイロトロンが1本用意されている。前者の最大入射パワーは400kW、最大パルス幅50msで2ヶ所からTE<sub>02</sub>モードで入射されている。他方70GHzシステムでは、最大入射パワー400kW、最大パルス幅200msでTEM<sub>00</sub>モードで入射されている。可動ミラーによりトロイダル、ポロイダル方向にそれぞれ±15度、±23度可変になっており集光位置ではビーム半径22mmである。また偏波板により偏波モードの制御が可能である。したがって高いパワー密度で吸収分布の制御が可能となっている。

生成されたプラズマの電子密度の測定は、140GHzのマイクロ波干渉計を用いた。電子温度は、 $5\mu\text{m}$ 、 $10\mu\text{m}$ 、 $50\mu\text{m}$ 、 $125\mu\text{m}$ のBe薄膜のうちの二つの薄膜を透過した制動輻射、再結合輻射からなる軟X線の強度比で評価している。この他に反磁性ループ、ロゴスキーコイル、可視及び真空紫外分光、可動プローブ、ダイバータプローブアレー、ポロメータ、高速カメラなどでプラズマエネルギー、プラズマ電流、不純物、巨視的な運動などを測定している。

先進的な閉じ込め装置であるヘリオトロンJでは、広いパラメータ領域での閉じ込め特性を明らかにすることが重要である。特に低衝突領域ではバンピー成分の効果が大きいので低密度高温のプラズマを生成することが必要である。このために低密度高電子温度と高電子密度のプラズマ生成・加熱を目標とした。当初53.2GHzのジャイロトロン3本によるプラズマ生成と加熱が行われた。磁気軸上での最大磁場強度が1.5Tであることから第2高調波によるプラズマ生成・加熱が主であるが、磁場強度を大きく変化させた結果0.8~1.45Tの非常に広い磁場強度でプラズマ生成・加熱を行うことができた。第2高調波による最適な加熱ができている場合の直線部における磁場強度は0.95Tである。高磁場領域でも有効なプラズマ加熱が観測されている。

70GHz ECHシステムを導入することにより放電時間が長くなり十分低い密度で高温のプラズマを維持することが可能となった。図7は標準配位で磁場強度は1.27T、平均電子密度 $1.5 \times 10^{18} \text{m}^{-3}$ で電子温度1keVの放電の一例である。このような放電を多数集め0.5msごとに電子温度、密度を求めそれらがどのような範囲にあるかを表示したものが図8である。この図には同時に電子温度分布を放物型、電子密度分布は平坦として規格化された平均半径0.5で $\nu^* (= \nu \pi R_0 / (\nu_{th} l))$ がそれぞれ1、0.1、0.01となる時の中心電子温度と平均電子密度の値を点線で示している。平均電子密度が $5 \times 10^{18} \text{m}^{-3}$ 以下では電子温度が400eV以上で、 $\nu^* < 0.1$ 、電子密度 $2 \times 10^{18} \text{m}^{-3}$ 以下では600eV以上で $\nu^* < 0.01$ と十分に衝突周波数の低い領域のプラズマが生成されていることが明らかになった。

他方プラズマエネルギーは電子密度の上昇とともに増加する。53.2GHz、70GHzに対するOモードの遮断密度は、 $3.5 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ 、 $6.1 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ 、また第2高調波Xモードに対する低密度遮断密度は、 $1.8 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ 、 $3.0 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ であるのでこれらの密度領域でのプラズマエネルギーの挙動を考える。プラズマエネルギーの測定は、直線部に巻かれた反磁性ループで行った。図9は実験で得られた閉じ込め時間とISS95スケーリング則で予測される閉じ込め時間との関係である。ここでISS95スケーリング則とは、これまでにヘリオトロンE装置など世界各国のヘリカル系装置で得られた閉じ込め時間をプラズマの大半径、小半径、磁場強度、回転変換角、加熱入力などのパラメータ依存性を整理した実験式である。ヘリオトロンJ実験では最大10msの値

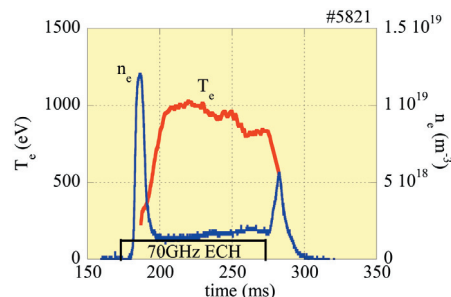


図7. 電子温度 ( $T_e$ )、密度 ( $n_e$ ) の時間変化

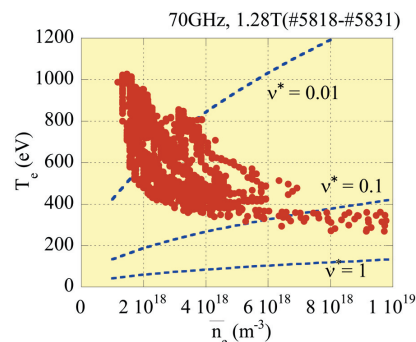


図8. 電子温度、密度領域

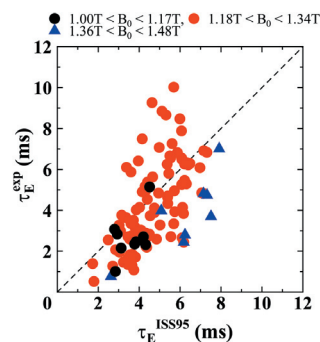


図9. ISS95スケーリング則で予測される閉じ込め時間と実験値との比較

が得られておりISS95スケール則で予測される値を倍ほど超える値を達成していることがわかった。

現在加速電圧30 k Vの中性粒子ビーム入射（NBI：Neutral Beam Injection）とイオンサイクロトロン周波数領域（ICRF: Ion Cyclotron Range of Frequency）の波動加熱を始めたところでイオンの効果的な加熱と高エネルギーイオンの生成、閉じ込めの解析を進めている。図10はICRFパワーを断続的に印加したとき、ICRFパルス中に高エネルギーイオンが生成されることを荷電交換中性粒子エネルギー分析器で確かめたデータを示す。このように今後は高エネルギーイオンの生成と閉じ込め過程の研究をさらに進めていくことにしている。

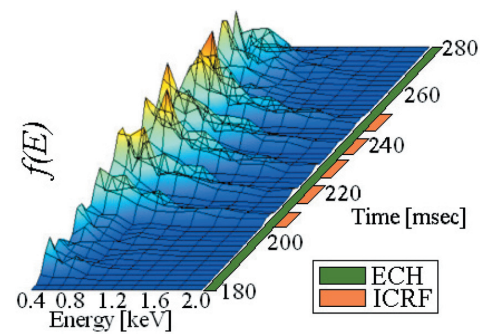


図10. ICRF印加時における高エネルギーイオンの生成

## 5. 今後の課題

ヘリオトロンJ装置は、これまでの平面磁気軸の磁場配位と異なり、MHD安定性と良好な粒子閉じ込めを兼ね備えた先進的な磁場構造の装置である。この種の概念は世界的に見ても次世代のヘリカル系装置の中心的な位置を占めるものとして研究が始められているところである。特に日本ではこのヘリオトロンJ装置が唯一であり、国外のEU（スペイン）のTJ-II装置、USAのHSX装置、オーストラリアのH-1NF装置などと連携をして国際的な研究拠点形成に努めている。

核融合発電の実現に向けてはITERの建設が準備されつつあるが、核融合によるエネルギー源が社会的に受容されるためにはその経済性において十分採算がとれるものにしなければならない。そのためにも $\beta$ 値の向上と定常性が確保できる可能性を持った先進磁場配位を探求する研究が大学において先駆的に進められることが重要であると考えている。特に3次元非軸対称系のプラズマはその複雑さゆえにこれまで十分な精度で解析が進まなかったが物理的にも興味深い対象であるのでこれからの進展に期待したいと考えている。