

## 革新的な核融合炉点火領域を目指した 超高密度プラズマの生成と制御

Production and Control of Super-Dense Plasmas towards  
an Innovative Ignition Regime for a Fusion Reactor

山田 弘司 (YAMADA Hiroshi)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授



### 研究の概要

本研究は在来型の高温度低密度での制御熱核融合点火のシナリオとは異なった超高密度低温で点火を行う科学的モデルを提示することを目的として、定常性を保証する制御法の確立、不純物流入の遮蔽とヘリウム灰排気の両立、プラズマ対向壁でのプラズマの非接触化による熱負荷の低減、将来の核融合反応の熱平衡制御に必要な閉じ込め特性などの要素課題に取り組んでいる。

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・核融合学

キーワード：プラズマ・核融合、物性実験、燃料供給効率、ペレット入射、排気

### 1. 研究開始当初の背景

超高密度低温での炉心プラズマは、深刻な壁熱負荷を軽減させ、核融合反応生成物であるアルファ粒子を含めてプラズマの閉じ込め特性に優れた革新的な運転領域を可能とし、核融合実証炉の実現への要件を緩和する。本研究グループは大型ヘリカル装置をプラットフォームとして利用した固体水素ペレット入射による高効率燃料供給実験研究において、粒子拡散が抑制される運転条件を見出し、プラズマ密度を核融合臨界条件の10倍になる1000兆個/ccまで上昇させることに成功した。

### 2. 研究の目的

本研究は在来型の高温度低密度での制御熱核融合点火のシナリオとは異なった超高密度低温で点火を行う科学的モデルを提示することを目的としており、従来の温度2億度、密度150兆個/ccという点火条件の目安に対して、工学的要求を画期的に下げることのできる温度8000万度、密度600兆個/ccという革新的な制御熱核融合点火シナリオの提示を目指す。

### 3. 研究の方法

大容量かつ繰り返し可能な高性能固体水素ペレット入射装置を開発し、大型ヘリカル装置に導入する。固体水素ペレット入射を用いた高温プラズマへの粒子供給実験を行うことによって、超高密度プラズマの定常保持

実証と密度限界の同定を行う。実験データの取得、解析に当たっては理解及びモデルの外挿性を担保することに留意し、半経験的な相似則を導き出すことによって、核融合プラズマにおける燃焼シナリオを提示できるようにする。

### 4. これまでの成果

制御熱核融合炉における高密度低温での点火シナリオを目指し、高密度プラズマの長時間維持を可能とする制御法にかかる研究を推進してきた。これまでの3年間にわたる研究によって、内部拡散障壁を有する高密度プラズマの保持時間を大幅伸ばすことに成功し、高密度プラズマは固体水素ペレットの連続入射によるコア部への直接粒子供給によって、準定常的に維持できることを示した。また、達成できる規格化密度勾配はプラズマの衝突周波数に対して、ほとんど依存性がないことを実験的に示し、運転温度領域が1桁ほど高くなり、低衝突状態となる核融合プラズマにおいても、本研究で対象とした内部拡散障壁を有する高密度プラズマを外挿できる可能性があることを示した。

内部拡散障壁による超高密度プラズマの定常保持実証と密度限界の同定に取り組むためには、高温プラズマへの高効率粒子供給手段が必須となる。本研究開始後の1, 2年目は、研究遂行上必須な粒子供給装置、すなわち、固体水素ペレット入射装置群および超

音速ガスパフ/クラスタビーム入射装置を開発・製作するとともに、既設設備を利用しつつ本研究による製作を合わせてシステム化し、実験に供する整備を重点的に行った。

超高密度プラズマを準定常維持する為には、高速かつ大サイズの固体水素ペレット入射によるコアプラズマへの直接粒子供給が本質的であることを明らかにした。固体水素ペレット入射による粒子供給は高効率である反面、一度に供給する粒子数がターゲットプラズマに含まれる粒子数の数10%にもなるため、粒子供給に伴う擾乱が大きく、特に密度限界近傍の高密度放電では入射タイミング制御が重要となる。本研究では密度信号を参照して、ペレットの入射タイミングを実時間フィードバック制御することによって、粒子供給過多によるプラズマの放射崩壊を避けつつ、内部拡散障壁による超高密度プラズマを維持することに成功した。この実験結果は、中心粒子供給を行うことによって、超高密度プラズマを準定常的に保持できることを実証しており、超高密度低温での制御熱核融合点火領域の運転法につながるものである。

超高密度プラズマの生成、維持はプラズマ中心部への粒子供給が本質的な役割を果たすことから、高速カメラと分光手法や立体視手法を組み合わせた観測系を用いることによって、(1) 固体水素がプラズマからの入熱で溶発して高密度のプラズモイドを形成する過程と、(2) 高密度プラズモイドが背景プラズマに吸収される過程の観測を行い、固体水素ペレット粒子供給を理解する上で、プラズマ中のどの場所で固体水素が溶発するかに加えて、溶発後の高密度プラズモイドの非拡散的な輸送現象が重要であることを明らかにした。

将来の核融合炉では、プラズマからの入熱でプラズマ対向機器が損傷を受けることが懸念されるが、これを避ける方策として、対向機器と相互作用する周辺プラズマの温度を低下させる「プラズマの非接触化」がある。外部摂動磁場の印加とガスパフによる周辺粒子供給制御によって、プラズマの非接触状態が再現性良く制御できることを示した。さらに、不純物(ネオン)ガスを用いることによって、プラズマ対向機器へ流入する熱の20%を放射によって散逸させ、機器へ直接流入する熱負荷を低減できることを明らかにした。周辺密度が高い内部拡散障壁による超高密度プラズマでは、プラズマの外向きの流れに伴う粘性によってネオンガスがコアプラズマ部へ流入することが妨げられるため、ネオンガス印加に伴うコアプラズマの閉じ込め特性劣化は見られないことも示した。

## 5. 今後の計画

超高密度プラズマの、定常維持可能性および核融合炉条件プラズマへの外挿性に関して、実験研究の観点からは当初計画の目標をほぼ達成しており、今後はそれを検証する段階となる。これまでの3年間に整備したハードウェアの性能を最大限に引き出して実験研究を行い、基盤となるデータを集積し、解析を進める。

これまでの実験的研究によって得られた知見より半経験的な相似則を導出する。これにより、核融合炉におけるプラズマパラメータを推定し、固体水素ペレットによる粒子供給特性と適合する燃焼制御シナリオのモデル化を行い、制御熱核融合点火シナリオを総合的な整合性を備えた形として提示する。

## 6. これまでの発表論文等(受賞等も含む)

R. Sakamoto et al., "Advanced operational regime with internal diffusion barrier on LHD", Fusion Science and Technology 58 (2010) 53-60.

M. Kobayashi et al., "Transport characteristics in the stochastic magnetic boundary of LHD: magnetic field topology and its impact on divertor physics and impurity transport", Fusion Science and Technology 58 (2010) 220-231.

R. Sakamoto et al., "Effects of Pellet Fueling and Wall Recycling on Plasma Confinement in LHD (招待講演)", 19th International Conference on Plasma Surface Interactions, May 2010.

M. Kobayashi et al., "Detachment stabilization with  $n/m=1/1$  resonant magnetic perturbation field applied to the stochastic magnetic boundary of the Large Helical Device", Physics of Plasmas 17, 056111 (2010) 1-12.

R. Sakamoto et al., "Development of Advanced Pellet Injector Systems for Plasma Fueling", Plasma and Fusion Research 4 (2009) 002.

H. Yamada et al., "Achievements and Continued New Phase of Large Helical Device Project (招待講演)", Asian Plasma and Fusion Association 2009/ Asia-Pacific Plasma Theory Conference 2009, October 2009.

ホームページ等  
<http://iis.lhd.nifs.ac.jp/>