

## 自己評価報告書

平成23年 5月19日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究（S）

研究期間：2008～2012

課題番号：20226018

研究課題名（和文） 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

研究課題名（英文） Production and Control of Super-Dense Plasmas  
towards an Innovative Ignition Regime for a Fusion Reactor

研究代表者

山田 弘司（YAMADA HIROSHI）

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授

研究者番号：20200735

研究分野：核融合科学

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. 研究計画の概要

本研究は在来型の高温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。

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しうる。

本研究では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ものとする。

## 2. 研究の進捗状況

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に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、現在よりも運転温度領域が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可能であることを示した。

本研究開始後の2年目までは、研究遂行上必須の粒子供給装置、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。

燃料供給量を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するとともに、供給燃料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。この実験結果は、中心粒子供給による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。

プラズマからの入熱によるプラズマ対向壁の損傷を避ける方策として、対向壁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、この非接触状態が制御できることを示した。さらに、不純物ガスを用いることによって、プラズマ対向壁へ流入する熱を放射によって散逸させ、壁の熱負荷を低減できることを示した。また、プラズマの外向きの流れによって不純物がコアプラズマ部へ流入することが妨げられるため、コアプラズマの閉じ込め特性劣化を避けられることも示した。

### 3. 現在までの達成度

①当初の計画以上に進展している。

5年計画のうち3年を終え、初期の研究資金の投資によって高性能の固体水素ペレット入射システムなどの整備を行い、目的にかなった実験を遂行できてきている。得られた実験データをもとにしてシミュレーションを含めた解析・解釈も進んでおり、計画以上の成果が順調に得られてきている。今後、鍵となる要素課題毎における成果をさらに統合、収斂させていくことによって、計画以上の成果が見込まれる。特に、合理的な物理モデルによって確度の高い検証を進めることによって、計画を上回る、あるいは計画よりも早く成果を上げることが可能と考えている。

本研究課題の鍵となる課題として、内部拡散障壁による超高密度状態に関わり、3つの課題を定義し、これに回答を与えることが研究目的を達成することにつながる。すなわち、(1)定常保持の実証、(2)高温化、(3)不純物の輸送特性の同定である。各々に対して、既に以下の成果が得られている。(1)内部拡散障壁を有する高密度プラズマを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制御によって、この3年間の研究で従来の3倍、プラズマ輸送の特徴時間であるエネルギー閉じ込め時間の50倍以上の間準定常に維持できることを実証した。(2)内部拡散障壁による強い密度勾配を持つ尖塔化した密度分布が、規格化衝突周波数では、核融合プラズマに近い(2倍程度)領域まで維持されることを明らかにした。規格化衝突周波数は温度に強い依存性を持つことから、高温化を物理的に担保できる成果である。(3)不純物ガスを用いてプラズマ対向壁へ流入する熱の20%を放射によって散逸させ、熱負荷の低減とコアプラズマの劣化回避を両立できることを明らかにした。

### 4. 今後の研究の推進方策

今後、これらの領域をさらに核融合条件に物理的に近づけるとともに、最終的にはこれらの実験研究とシミュレーションの検証によって妥当な物理モデルを提示し、この運転モードが核融合炉に適切であるかをアセスメントすることとなる。

そのアセスメントをさらに高度化するために排気制御の最適化、不純物流入遮蔽、対向壁熱負荷軽減についてもシナリオを議論できるデータベースを集積しつつある。このため、さらに衝突頻度、規格化ジャイロ半径、ベータ値などの代表的な無次元量での信頼性の高いスケリングが可能となるような次元相似放性に留意した実験を行う。

炉心プラズマで懸念されるプラズマ対向壁の熱負荷低減手法の最適化を進めるとと

もに、外部摂動磁場印加によるプラズマ非接触化と統合することにより、より安定した非接触プラズマ状態を作り出す条件を見いだす。また超高密度運転との両立条件を同定する。

得られた知見を炉心プラズマパラメータに外挿し、詳細な固体水素溶発物理モデルと組み合わせることによって、ペレット粒子供給と適合する燃焼制御シナリオのモデル構築を進める。最終的に目的に叶う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。

### 5. 代表的な研究成果

[雑誌論文] (計11件)

- ① R. Sakamoto, H. Yamada, M. Kobayashi, J. Miyazawa (他12名), "Advanced operational regime with internal diffusion barrier on LHD", Fusion Science and Technology 58 (2010) 53-60. (査読有)
- ② M. Kobayashi, Y. Feng, S. Morita, S. Masuzaki, N. Ezumi, T. Kobayashi, M.B. Chowdhuri, H. Yamada (他7名), "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. (査読有)
- ③ M. Kobayashi, J. Miyazawa (20名中10番目), H. Yamada (20名中18番目), "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. (査読有)
- ④ R. Sakamoto and H. Yamada, "Development of Advanced Pellet Injector Systems for Plasma Fueling", Plasma and Fusion Research 4 (2009) 1-9. (査読有)

[学会発表] (計37件)

- ① H. Yamada, "Overview of Results from the Large Helical Device", 23rd IAEA Fusion Energy Conference, Daejeon (Korea), 2010年10月11日.
- ② R. Sakamoto, "Effects of Pellet Fueling and Wall Recycling on Plasma Confinement in LHD (招待講演)", 19th International Conference on Plasma Surface Interactions, San Diego (USA), 2010年5月26日.

[その他]

ホームページ <http://iis.lhd.nifs.ac.jp/>

この他、核融合科学研究所が主催する一般公開やアウトリーチ活動において情報発信