

(続紙 1)

京都大学	博士（エネルギー科学）	氏名	伊庭野 健造
論文題目	DESIGN STUDY OF SMALL POWER TOKAMAK NUCLEAR FUSION REACTOR FOR THE BIOMASS-FUSION HYBRID CONCEPT		
（論文内容の要旨） 本論文は、バイオマス・核融合ハイブリッド概念への応用を可能にする高温運転ブランケットを持つ低出力トカマク型核融合炉のプラズマ設計、ブランケットとダイバータの熱負荷の解析と成立可能性の検討、核熱分布を考慮した冷却材ポンプ動力の解析、さらに設計に対するコスト評価とハイブリッド概念を考慮したエネルギーコスト試算を論じた結果をまとめたもので、序論と6章からなっている。 序論では核融合研究における低出力核融合炉設計の意義と位置づけ、またバイオマス・核融合ハイブリッド概念研究の意義と実用上の展望について述べられている。 第1章では、核融合炉設計研究の核融合研究における役割を踏まえ、設計を進めるうえで必要となる炉工学技術の最新の研究内容と既存の原型炉設計例についてまとめている。また、炉設計を行う上で用いられた、プラズマパラメータを解析するシステムコード、中性子輸送コード、応力解析コードなどの各種計算コードの計算フロー、およびそれらを組み合わせて総合的に整合性ある設計を行うため、本研究において開発した方法論が示されている。 第2章では、システムコードによる物理モデル解析により、現在の物理的知見から十分な成立性の想定できる領域として、国際熱核融合実験炉 ITER のプラズマパラメータと、その想定される物理から大きな飛躍なく実現可能な核融合プラズマとして、主半径 5 m 級のトカマク型核融合炉の運転領域を解明した結果が示されている。次にプラズマパラメータ解析とあわせ、核融合反応により発生するエネルギーフローを、中性子輸送解析により核熱分布として求め、リチウム鉛増殖材—SiC 材料の組み合わせによる高温ブランケットの成立性を検討している。次いで熱エネルギー輸送として有限要素法などにより熱伝達と発生応力を解析し、その結果をプラズマ解析に回帰することで、整合性あるエネルギープラントとして成立しうる核融合炉の工学的な存在範囲を検討した。その結果、プラズマ入力に対するエネルギー増倍率 $Q \sim 5$、300-500 MW 級の、従来検討例のほとんどない小出力領域において、合理的な設計パラメータ領域が存在することを示している。 第3章では、設計の成立性に大きく影響するダイバータへの熱負荷に関して、第2章の検討に基づいて熱粒子負荷の解析を行った過程が示されている。外部加熱装置による駆動電流を考慮したプラズマ平衡解析を行うことで、プラズマから放出される熱エネルギーを求め、粒子バランスとエネルギーバランスを考慮したモデルと合わせて、ダイバータに対する熱流束を評価する手法が報告されている。検討結果として、本研究によって設計された低出力低利得炉において、ダイバータ近傍のブ			

ラズマからの放射パワーによりダイバータ素子への熱流束を制御すべきことを見出している。また、熱負荷に加えて問題となる粒子負荷によるプラズマ対向材料の損耗に関しては、モデル計算の結果を示す一方、物理的実験により評価する必要を指摘し、そのためのイオン源照射装置による粒子負荷の評価方法と、それに基づくダイバータ設計の手順を示し、実験装置と試験計画を策定している。

第4章では、核融合炉設計におけるエネルギーフローを解析し、核熱の集中とその移送、除去のために流通する冷却材運転のポンプ動力を評価するため、中性子解析と圧力損失計算モデルを組み合わせた手法が提示されている。まず3次元中性子解析コードにおける核融合装置の核熱モデルを構築し、核熱分布解析を行い、得られた核熱分布から、ブランケットとダイバータそれぞれにおいて必要な冷却材の速度と、生じる圧力損失についてモデルを分析して、核融合出力の関数としてポンプ動力を評価している。この解析から、核融合出力が大きくなるにつれてポンプの運転動力が大きく増大し、3 GW 核融合出力の炉ではプラントによる正味の出力の得られる設計領域がなくなることを見出している。この結果、核融合炉設計において、プラズマ対向機器において、要求される冷却能力と流路圧力損失によるポンプ動力が、炉システム全体の設計上重要な要素となることを指摘し、現実的な核融合炉の設計において、小出力に対応したパラメータ群にひとつの有力な領域が存在することを示している。

第5章では、本研究において解析した核融合炉の熱出力を、さらに廃棄物系バイオマスの燃料化に使用することで総合的なエネルギープラントとするバイオマスハイブリッド概念について、異なるエネルギー製品の生成について、経済性が分析されている。ハイブリッド概念では、見かけ上のエネルギー変換効率は高いが、高温熱交換器や燃料電池、もしくは合成燃料製造プロセスなど、タービン駆動による発電プラントと大きく異なる機器についてコストの感度依存性が特殊であり、ハイブリッド概念の妥当性はそれらを検証してさらに設計に反映する必要があることが指摘されている。各種プラント機器のコストを核融合出力の関数として概算式にまとめ、核融合コスト評価コードを基に、ハイブリッドプラントのコスト評価モデルを新たに構築し、エネルギーコストを評価する手法が提示された。その結果として、ハイブリッド概念は低出力核融合炉において特に経済的に有利となることが見出され、また熱交換器コストやブランケットコストなどのプラント機器や、バイオマス調達費など、今後の開発などによる大きな変動余地を持つ要因が最終コストに及ぼす影響の感度についても明らかにされている。

第6章は結論であり、複雑に関係し合うパラメータ間の整合性を確保する新たな核融合炉設計の方法論を構築した成果がまとめられ、バイオマスハイブリッドという新たなエネルギー変換体系に適した核融合炉として従来にない小出力プラントの物理的工学的特徴と可能性を論じ、その優位性を結論している。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、バイオマス・核融合ハイブリッド概念への応用を想定した小出力核融合炉の設計方法論を研究し、プラズマの物理的パラメータと、ブランケットとダイバータという主要な炉内機器の工学的成立性を整合させる手法を構築して検討した結果、従来知られていたより小出力の設計可能領域を見出し、さらにそれに基づいたプラント概念のエネルギーコストを試算することで、その有効性を研究した結果をまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

1. システムコードを用いた解析により、低出力プラズマによる核融合炉が成立するパラメータ領域が存在することを明らかにした。また、有限要素法を用いた伝熱解析と構造解析により、リチウム鉛と SiC によるブランケット構造を設計評価し、構造体温度を許容温度内に保ちつつ、従来例のほとんどない 900℃超の高温媒体を取り出す設計を示した。
2. 設計された 3 次元設計に対して中性子輸送解析を行って、トリチウム増殖能、コイル遮蔽、核熱除去の成立する構造を見出し、またその設計可能範囲を解明した。さらにこれらを総合して再びプラズマパラメータを検討し、加熱装置による電流駆動を加味した平衡計算を行って、プラズマからの熱粒子エネルギーを評価した。さらにダイバータ負荷を考察し、周辺プラズマからの放射の必要性を論じて、小出力炉に特徴的なダイバータ運転法と、その実験的検証法を示した。
3. 炉内の核熱分布を検討し、冷却材の圧力損失計算モデルと組み合わせて、冷却材循環のためのポンプ動力のプラントエネルギーバランスへの影響を評価し、従来の高出力炉設計で看過されていた問題を指摘して、小出力炉の優位性を示した。
4. バイオマス・核融合ハイブリッド概念による廃棄物系バイオマスのガス化プラントの経済性を解析し、燃料電池による発電と FT 合成燃料製造のシナリオに対してコスト評価モデルを構築して、エネルギーコストに及ぼす種々のパラメータの感度を評価した。以上の結果から小出力核融合炉により経済的に成立しうるエネルギープラントの優位性を見出し、その設計手法を確立した。

以上、本論文は、従来の大型核融合発電炉の設計と大きく異なる、バイオマスハイブリッド概念の炉設計手法を新たに構築し、その主要パラメータ間の関係を明らかにして成立可能範囲を広範囲に記述し、複合エネルギー変換装置としての核融合プラントの特性を明らかにするとともに、核融合工学とゼロエミッションエネルギー研究に大きく貢献するもので、得られた成果は、学術上、實際上寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（エネルギー科学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 24 年 8 月 16 日実施した論文内容とそれに関連した試問の結果合格と認めた。