

報告番号	甲 第 13151 号
------	-------------

## 主 論 文 の 要 旨

論文題目 トカマク型核融合中性子源及び原型炉の設計最適化に関する研究  
(Study on design optimization of tokamak fusion neutron source and demonstration power plant)

氏 名 坂井 亮介

## 論 文 内 容 の 要 旨

トカマク型磁場閉じ込め核融合発電炉実現に向けて、国際熱核融合実験炉 ITER の建設が進められており、ITER 建設以降はより小型の中性子源を建設しその後発電実証炉(原型炉)を建設する案がある。それらの装置の工学設計及び物理設計の最適化が社会受容性及び実現可能性向上の観点から必要である。

ITER 建設以降の超ウラン元素核種変換目的の小型中性子源設計例が見られ、核種変換に関する核計算及び熱計算等が実施されている。しかし、それらの設計では、磁場コイルの種類(常伝導コイルか超伝導コイルか)やトーラスプラズマの形状(アスペクト比:プラズマ小半径に対するプラズマ大半径の比)などの条件は固定されており、経済性の観点における比較検討及び最適化に関する研究は殆ど行われていなかった。

トカマク装置の経済性に外部駆動電流が影響する。外部駆動電流は要求プラズマ電流達成のため、自発的に流れるブートストラップ電流( $I_{BS}$ )を補う目的で用いられる。トカマク装置設計において、 $I_{BS}$ の算出には、主に零次元評価式により予測計算される $I_{BS}$ 割合(要求プラズマ電流に対する $I_{BS}$ の割合:  $f_{BS}$ )が用いられる。いくつかの $f_{BS}$ 評価式が作成されているが既存 $f_{BS}$ 評価式は単純さ及び精度等に関して改良の余地があった。これらの問題を解決し簡素で比較的広範囲のトカマク装置設計条件で適応可能な精度を持つ $f_{BS}$ 評価式が求められていた。

近年の原型炉設計において十分な発電を想定した核融合出力達成のためにグリーンワールド密度限界(経験則により求められた閉じ込め状態を維持出来るプラズマ電子密度の指標)

を超えた平均密度が要求され、その実現可能性が危惧されている。密度分布を中心ピークにすることで同じ核融合出力を低い平均密度で得られる。他方、ダイバータ(プラズマ対向材の一つ)の熱負荷を低減する目的での不純物入射を考慮すると、密度分布を中心ピークにすることで炉心プラズマへの不純物蓄積量増加も誘発し、その蓄積不純物の電離等により平均密度が増加してしまう懸念もある。このように、現在想定される原型炉運転条件において、密度限界の観点から密度分布形状の系統的な検討は重要であるが行われていなかった。

本研究では、トカマク型磁場閉じ込め核融合小型中性子源及び原型炉の設計最適化による核融合発電炉実現可能性向上を目的として、上記課題に対して (1)小型中性子源の経済性検討及び最適化、(2)設計最適化に適した $f_{BS}$ 評価式作成、(3)原型炉運転密度の実現可能性検討及びその最適化を実施した。本論文は全5章で構成されている。

第1章では、核融合発電炉実現シナリオ、及びそのシナリオと小型中性子源の関係性等について述べ、解決が必要な3つの課題を挙げた後、本研究の目的を述べた。

第2章では、システムコードを用いて超ウラン元素の核種変換を目的としたトカマク型小型中性子源の経済性を検討した。先行研究に超伝導装置及び常伝導装置それぞれの設計例があるが、定量的な比較がなされていなかった。常伝導装置(NCC)及び超伝導装置(SCC)に対してシステムコードを用いてプラズマアスペクト比(A)に重きを置いたパラメータスキャンを行った。初めに、球状トカマク型のD型垂直断面設計を持つ中性子源を想定したNCCに対してのみ経済性を検討した。A及びいくつかの物理量変化の経済性への影響を調査した。核融合出力と外側第一壁表面積等の設計値を参考設計の数値と合わせた。Aが低すぎると装置中心のセンターポスト断面積の減少によりコイル抵抗損失( $P_{coil}$ )が増加し、売電収入が減少するため、低A側で経済性の劣化が見られた。その一方で、A増加に伴い装置規模が肥大化することにより建設費が増加してしまい、高A側でも経済性の劣化が見られた。 $P_{coil}$ と装置規模のA依存性の兼ね合いから、経済的最適なA(~2.13)の存在を明らかにした。プラズマ閉じ込め改善度(Hファクター)及びプラズマベータ値(プラズマを保持する外部印加磁気圧に対するプラズマ圧力の比)に対する依存性を調べた。閉じ込め改善度の向上はプラズマ加熱のための電力低減をもたらし経済性が改善された。プラズマベータ値の増加はプラズマ電流の低下に起因する閉じ込めの劣化をもたらすプラズマ加熱電力が増大し経済性劣化を招いた。一方低すぎるプラズマベータ値では外部印加磁場増加に起因する $P_{coil}$ 増加が顕著になり経済性が低下した。経済的最適なプラズマベータ値が存在することを示した。次に、D型ではなく矩形断面を有し、核分裂燃料領域の体積、核分裂燃料領域プラズマ対向側表面積に照射される中性子出力等が先行研究と同程度となるように計算条件を変更した。そのNCC設計を基に矩形断面を有する典型トカマク型SCC設計も導入した。Aに重きを置き、稼働率等の工学パラメータ変化の経済性への影響を調査した。NCCではA及び炉内機器径方向厚さ変化が $P_{coil}$ を著しく変化させ、この $P_{coil}$ 変化が主にNCCの経済性に大きく影響することを示した。その他の所内電力はほとんどAや炉内機器径方向厚さに依存せず、 $P_{coil}$ 最小値を持つ経済的最適なA(~2)が存在することを示した。SCCでは、 $P_{coil} = 0$ のためA変化の

経済性への影響は小さい。SCC のための遮蔽材厚さや超伝導導体の臨界電流密度及び臨界磁場は文献値を用いており、工学的に実現可能なAはこの条件にも左右されることを示した。NCC と SCC を比較した。SCC では超伝導導体の臨界磁場とコイル電流からコイル断面積を決定した一方、NCC では $P_{coil}$ 最小化のため利用可能なスペース内でコイル断面積を最大としたため、コイル重量及び炉建設資本費のA依存性は NCC の方が大きくなった。しかし、NCC、SCC それぞれの経済的最適なA同士で炉心建設資本費を比較すると同程度(700 M\$程)であった。稼働率スキャンをもとに比較した結果、本研究で仮定した条件においては、NCC に対する SCC の稼働率の低さが 0.15-0.25 以下の場合、SCC がより経済的設計となる可能性を示した。この研究により今まで殆どなされなかった中性子源の経済性検討及び超伝導装置と常伝導装置の定量的比較を行い、経済的最適なプラズマアスペクト比や、その他各種物理・工学パラメータの経済性に対する影響の強弱及びその原因を詳細に明らかにした。これは、今後原型炉設計の補間及び核廃棄物処理のための中性子源設計において、経済性の観点から物理設計及び工学設計を行うための指標として有意義である。

第3章では圧力分布、安全係数分布を考慮したブートストラップ電流( $I_{BS}$ )等を含めたプラズマ電流密度分布を解き、そのプラズマ電流密度分布と電磁流体平衡との整合性の評価が可能な電流駆動解析コードを用いて、システムコード用 $I_{BS}$ 割合( $f_{BS}$ )評価式の作成及び評価を行った。フィッティングデータベース(FDB)作成のためにパラメータスキャンを行い、12,150 のデータ点から FDB を構築した。A と電流密度分布形状の考慮の仕方を変えて 6 通りの重回帰分析を FDB に対して行い、 $f_{BS}$ 評価式を 6 式作成した。FDB に対する予測精度評価を平均二乗誤差(RMSE)により行った。作成した評価式の精度検査のため、FDB と装置規模、電流密度分布が異なる 3 種類のデータセット(DS)を用いて、その DS に対する $f_{BS}$ 予測精度を RMSE により確かめた。また、いくつかの既存の $f_{BS}$ 評価式とその DS に対する RMSE 比較を行った。結果、FDB に対して最高精度(予測値 0~1 に対して RMSE=0.025)の式は比較的広い装置条件に対して適用出来るであろう精度(3 種の DS それぞれに対する RMSE: 0.069, 0.179, 0.076)を示した。この研究により比較的広範囲なトカマク装置設計条件で用いられる式を作成することができた。作成した評価式は比較的簡素でもあるため今後の経済性評価及び装置設計最適化に対して有意義である。

第4章では、統合輸送コードを用いて、既存の原型炉設計値を基に、不純物(アルゴン:Ar)入射を考慮し、燃料粒子供給帰還制御による核融合出力一定条件下で密度分布形状変化が運転密度及びプラズマパラメータに与える影響並びにグリーンワールド密度限界( $n_{GW}$ )の観点における実現可能性を検討した。先行研究の原型炉ダイバータシミュレーション結果を電子密度( $n_e$ )、電子温度、イオン温度、及び Ar 濃度( $n_e$ に対する Ar 密度の割合)の境界条件に用いた。乱流による燃料イオンのピンチを導入することで $n_e$ 分布をスキャンした。まず、新古典輸送による $n_e$ 勾配に伴う Ar の蓄積を調べるため、乱流による Ar のピンチを無しとして $n_e$ 分布をスキャンした。結果、 $n_e$ 分布の中心ピーク度合の指標であるピーキングファクター( $n_{e0}/\langle n_e \rangle$ :体積平均 $n_e$ に対するプラズマ中心部 $n_e$ の比)の増加に伴い Ar 入射前の $\langle n_e \rangle$ は

単調減少する一方 Ar 入射後の Ar 蓄積量が加速度的に増加し、 $n_{e0}/\langle n_e \rangle \approx 1.6$ で Ar 入射後の $\langle n_e \rangle$ は最小となった。Ar 入射後、 $n_{e0}/\langle n_e \rangle$ 増加に伴いペデスタル部電子密度( $n_e^{\text{ped}}$ )は単調減少し $n_{e0}/\langle n_e \rangle \approx 1.3$ で $n_{\text{GW}}$ を下回った。線平均電子密度( $\bar{n}_e$ )は $1.5n_{\text{GW}}$ 程度を増減し $n_{e0}/\langle n_e \rangle \approx 1.6$ で最小( $\bar{n}_e < 1.5n_{\text{GW}}$ )となった。文献により $\bar{n}_e = 1.5n_{\text{GW}}$ の達成報告がある一方、 $n_e^{\text{ped}} > n_{\text{GW}}$ は得られていないことを確認した。これにより実現可能性向上の観点における最適密度分布形状( $n_{e0}/\langle n_e \rangle \approx 1.6$ )の存在の可能性を示した。次に、乱流による Ar のピンチを考慮して密度分布形状をスキャンした。 $n_{e0}/\langle n_e \rangle$ 増加に伴う Ar 蓄積量増加量が乱流による Ar のピンチを考慮しない場合よりも最大 2 倍程度増加した一方で Ar 入射後の $\langle n_e \rangle$ の増加量は最大 1.2 倍程度であった。Ar 入射後の $\langle n_e \rangle$ 及び $\bar{n}_e$ は $n_{e0}/\langle n_e \rangle \approx 1.3$ で最小( $\bar{n}_e < 1.5n_{\text{GW}}$ )となり、 $n_e^{\text{ped}} < n_{\text{GW}}$ となった。本研究の全設計値は H モード遷移閾パワーの条件を満たしたため高閉じ込め状態維持も期待出来る。また、本研究の密度分布形状設計値は実験で実証された設計値範囲内であることを文献により確かめた。この研究により殆ど初となる原型炉炉心プラズマの密度分布形状の系統的スキャンを行うことで、密度限界の観点における実現可能性に対する密度分布形状の寄与及び最適な密度分布形状の存在を示した。この結果は今後、同様に不純物入射及び燃料供給を想定した原型炉の炉心プラズマ設計の参考として有意義なものである。

第 5 章では総括として、まとめと今後の課題を述べた。

以上のように本研究では、トカマク型核融合発電炉実現可能性向上のため、(1) 小型中性子源の経済的最適な設計パラメータ決定(第 2 章)、(2) 中性子源及び原型炉の設計最適化に適したブートストラップ電流割合評価式作成(第 3 章)、(3) 原型炉設計におけるダイバータ熱負荷低減のための不純物入射及び燃料供給による核融合出力維持を考慮した運転密度実現可能性並びに最適密度分布形状の検討(第 4 章)を行った。これらの成果は、小型中性子源及び発電実証炉(原型炉)の工学設計及び物理設計の最適化に新たな知見を与えトカマク型発電炉実現可能性向上へ貢献するものである。