

Title	Experimental Investigation of Efficient Heating of High Energy Density Plasma
Author(s)	瀧澤, 龍之介
Citation	大阪大学, 2024, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/96384
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、 〈a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed"〉 大阪大学の博士論文について 〈/a〉 をご参照ください。

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

論文内容の要旨

氏 名 (瀧澤 龍之介)

論文題名

Experimental Investigation of Efficient Heating of High Energy Density Plasma
(高エネルギー密度プラズマの効率的加熱に関する実験的研究)

論文内容の要旨

米国国立点火施設 (NIF) での scientific breakeven の達成を受け、核融合発電への期待が高まっている。我々は潜在的に高利得な核融合方式として圧縮過程と加熱過程の分かれた高速点火方式を研究している。高速点火方式では加熱レーザーによって生成された電子ビームを用いて燃料の加熱を行う。この電子ビームの大きな発散角と高い平均エネルギーが加熱効率を低下させる要因である。本研究では各要因について実験的研究を行い、高速点火レーザー核融合における加熱効率の上昇に関する知見を得た。

一つ目はプラズマの高密度圧縮時におけるレーザー照射分布の改善の研究である。我々が用いている中実球燃料の圧縮には、準静的圧縮が必要である。第2章では、準静的圧縮時の初期段階における吸収一様性を決定する要因をシミュレーションで検証し、実験にて吸収一様性を改善し、圧縮プラズマの球対称性を向上させることに成功した。準静的圧縮の初期段階では 10^{10} W を下回るような低強度レーザーにて圧縮されるため、プラズマ表面は電子温度が低い。そのため圧縮の初期段階ではレーザー吸収率が高く、レーザー強度の空間分布がほとんど平滑化されずに吸収分布になる。

電子ビームに外部磁場を印加することにより電子ビームを集束させ、加熱効率が上昇する。第3章では外部磁場を発生させるレーザー駆動コイルの電位差生成メカニズムを検証した。過去に提唱されたダイオードメカニズムでは我々の実験結果を説明することはできず、観測結果を説明するためにプラズマの温度の非等方性が電位差を生成するという新しいメカニズムを提唱した。本磁場発生メカニズムに基づくと、非熱的電子の割合を増やし、非等方的な温度分布を有するプラズマを作り出すことが強磁場を生成するのに重要であることが明らかになった。

三つ目は加熱レーザーの高コントラスト化による加熱効率の上昇である。高速点火実験ではコーンが用いられている。コーンは加熱レーザーの光路を真空中に保ち、核融合燃料まで効率的に加熱レーザーを導く機能を有する。しかし、加熱レーザーのペDESTAL やプレパルスと呼ばれる不要パルスによって、コーン内部に低密度プラズマが生成されることが知られている。低密度プラズマとレーザーの相互で加速される電子ビームは大きな発散角を有し、平均エネルギーが増加するため加熱効率が減少する。第5章では、プラズマミラーを用いることで、レーザーのメインパルスとペDESTAL 及びプレパルスの強度比で定義されるコントラストを高め、プラズマ加熱実験を行った。高コントラスト加熱レーザーをコーンに照射すると、電子ビームは収束されることを実験とシミュレーションで示した。これはコーンの内壁によって加熱レーザーが反射し、ポインティングベクトルが電子ビーム内側を向くためである。また、圧縮されたプラズマの加熱実験ではコントラストを向上させることにより加熱効率が 2.8 倍上昇した。高速点火レーザー核融合において加熱レーザーの高効率化が本質的に重要であることを示した。

本論文ではこれらの詳細について述べる。

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (瀧澤 龍之介)		
	(職)	氏 名
論文審査担当者	主 査	教授 藤岡 慎介
	副 査	教授 川畑 貴裕
	副 査	教授 千徳 靖彦
	副 査	准教授 有川 安信
	副 査	准教授 岩田 夏弥

論文審査の結果の要旨

瀧澤氏の博士論文は、レーザー核融合の中でも直接照射・高速点火という高エネルギー利得が得られる可能性がある核融合方式に焦点をあてている。本論文では、特に短パルス高強度レーザーによって加速される高エネルギー電子ビームによる高密度プラズマ加熱における障壁、具体的には、電子ビームの大きな発散角と高い平均エネルギーが加熱効率を低下させるという問題の解決に取り組んでいる。瀧澤氏は実験的研究を中心に行い、高速点火レーザー核融合での核融合プラズマの加熱効率の向上に関する新たな知見を創出した。本論文は5章で構成されている。

導入部 (第1章) : プラズマ物理、レーザー核融合、および高速点火レーザー核融合に関連する基礎理論がまとめられている。

プラズマの高密度圧縮に関する研究 (第2章) : 中実球燃料の圧縮に必要な準静的圧縮に関する研究を行い、レーザーの吸収強度分布の改善により圧縮プラズマの球対称性を向上させる方法を示した。二次元のレイトレースコードを用いて、準静的圧縮においてレーザーの吸収強度分布が非一様になる原因を明らかにし、その解決策を示し、実験にて吸収強度分布の一様性の改善を実証した。

外部磁場の生成メカニズムの実験的検証 (第3章) : レーザー駆動コイルを使用して外部磁場を発生させ、電子ビームを集束する方法について研究を行った。外部磁場の発生メカニズムとして、従来のダイオードメカニズムではなく、プラズマの温度の非等方性が重要な役割を果たすことを示し、磁場強度を上昇させる方法を提唱した。電子ビームの集束には、キロテスラ級の磁場が必要であり、それを達成する方法の一つとして、短パルス高強度レーザーを用い、電子温度分布の非等方性を強調することを提案し、研究発展に繋がった。

加熱レーザーの高コントラスト化による加熱効率の増加 (第4章) : 短パルス高強度レーザーの不要パルスによって生じる問題に対処し、プラズマミラーを使用してレーザーのコントラストを高め、加熱効率を大幅に向上させることを示した。高コントラストレーザーとコーン形状のターゲットの相互作用により、集束された電子ビームが加速され、これが加熱効率の増加に寄与していることを示した。

結論 (第5章) : 上記の成果を包括的にまとめると共に、高速点火レーザー核融合研究が目指す方向性を示した。

瀧澤氏の研究は、高速点火レーザー核融合の基本物理を明らかにし、加熱効率を向上させるための有効な方法を提示しており、本論文は博士(理学)の学位論文として十分な価値があると認める。