

研究種目：基盤研究 (C)
研究期間：2007～2008
課題番号：19540530
研究課題名 (和文) 協同トムソン散乱による燃焼プラズマの模擬計測
研究課題名 (英文) Development of burning plasma diagnostic by Collective Thomson Scattering
研究代表者 近藤 貴 (KONDOH TAKASHI) 独立行政法人日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門・研究主幹 研究者番号：70360427

研究成果の概要：

燃焼プラズマに閉じ込められたアルファ粒子を計測するために、炭酸ガスレーザーを光源とした協同トムソン散乱法を開発した。JT-60U を用いた実証実験のデータ解析結果では、迷光の発生を完全に抑えることができず、プラズマからの散乱光は同定できなかった。研究期間内にアルファ粒子測定法の実証には至らなかったものの、従来に無い性能 (出力エネルギー17J, 繰り返し周期 15Hz の単一モード発振) のレーザーを完成させるとともに、電源の増設による、エネルギー17J、繰り返し周期 30Hz のレーザー出力の見通しを得た。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,900,000	870,000	3,770,000
2008年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学

キーワード：プラズマ・核融合、高性能レーザー、光源技術、燃焼プラズマ計測、炭酸ガスレーザー

1. 研究開始当初の背景

燃焼プラズマでは、核燃焼プラズマ中のDT核融合反応 ($D+T \rightarrow \alpha [3.5\text{MeV}] + n$)、により発生するアルファ粒子がプラズマを加熱する「アルファ加熱」が燃焼維持に利用される。その物理特性は現在行われているプラズマを外部から加熱するプラズマとは大きく異なる。プラズマ中に閉じ込められたアルファ粒子が効率的にプラズマにエネルギーを伝達し、プラズマを加熱しているか、アルファ

粒子の閉じ込めを決定している要因は何かを調べることは、核燃焼プラズマ実験の中心課題になると考えられる。これら核燃焼プラズマの物理特性を把握するためにはプラズマ内部のアルファ粒子の速度分布と空間分布の計測が必要不可欠である。しかし、その計測法は未だ確立されておらず、核燃焼プラズマのアルファ粒子計測手法の開発は、国内外の主要な懸案事項であった。これまでに、光源としてパルス炭酸ガスレーザーとジャイロトロンを使った

2つの方法が提案され、それぞれで開発が行われていた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、パルス炭酸ガスレーザーを光源として用いて、協同トムソン散乱計測によるアルファ粒子計測法を開発することである。協同トムソン散乱計測は、プラズマ中にレーザーを入射して、プラズマ中の電子の集団運動（イオンの速度分布を反映する）によるレーザー光の散乱光を測定し、そのスペクトルの広がりからイオンの速度分布・密度を計測するものである。本計測法では、高出力で単一波長の光源の開発が鍵であり、 α 粒子計測に必要となる単一モード、単一周波数の高出力、高繰り返し周期のパルス炭酸ガスレーザーの目途を得ることが必要である（図1）。また、炭酸ガスレーザーを用いた本測定法は未だ実証されておらず、JT-60U プラズマを燃焼模擬プラズマとし、計測手法の実証を行うことが必要である。

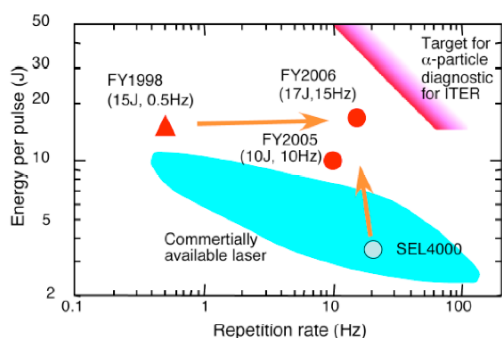


図1 協同トムソン散乱計測用の炭酸ガスレーザーの開発の進展

3. 研究の方法

(1) パルス炭酸ガスレーザーの開発

これまでに開発を行ってきたパルス炭酸ガスレーザー（図2に示す）により達成したレーザー出力は、出力17J、繰り返し周期15Hzであり、図1に示すようにアルファ粒子計測のためには、さらに出力を高める必要がある。

アルファ粒子測定が可能なレーザーを実現するために、発振周期を倍増するための電源改造を検討する。これにより、実際に燃焼プラズマのアルファ粒子に必要な性能を実現する見通しを得る。

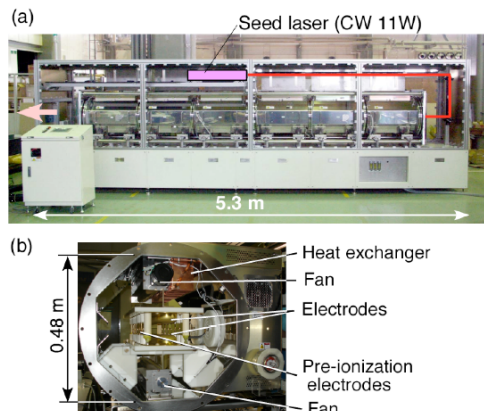


図2 開発したパルス炭酸ガスレーザー
(a)レーザーの全体 (b)レーザーの内部

(2) JT-60U トカマクにおける協同トムソン散乱測定法の実証

JT-60U プラズマに炭酸ガスレーザーを入射された散乱光の散乱信号の解析を行なう。図3に JT-60 における実験配置を示す。JT-60U 真空容器上部より、真空容器内にレーザーを入射し、散乱角 0.5 度の微小角で散乱された光を真空容器下部の集光ミラーで集光する。集光された光を迷光フィルタ（高温炭酸ガス吸収セル中）中を通過させることにより、レーザー光が真空窓などで反射されて発生する迷光を除去する。散乱光は、量子井戸型赤外線検出器(QWIP)を用いたヘテロダイン受信システムにより検波した後、フィルターバンクにより周波数解析を行う。

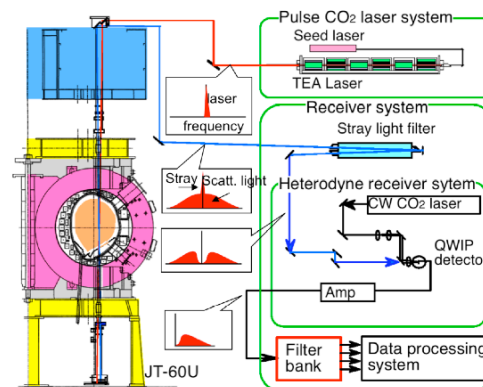


図3 JT-60U における実証実験の概念図。パルス炭酸ガスレーザーシステム、受信システム、JT-60U の入射受信系から構成される。

4. 研究成果

(1) パルス炭酸ガスレーザーの開発

協同トムソン散乱計測用に開発しているパルス炭酸ガスレーザーは図4に示されるように、不安定共振器にシードレーザーを入射することで、単一モード、単一周波数の発振を得ている。また、共振器中にガスを励起するための電極部を6連結することで、高出力を得ている。これまででは、3台の電源を使用して6電極に給電していたため、1つの電源で2つの電極に給電する必要があり、繰り返し周期が15Hzに制限されていた。電源を増設して1つの電源でそれぞれ1つの電極を給電することで、電源容量によって制限されていた繰り返し周期を30Hzに倍増できることを示し、アルファ粒子計測への見通しを得ることが出来た。

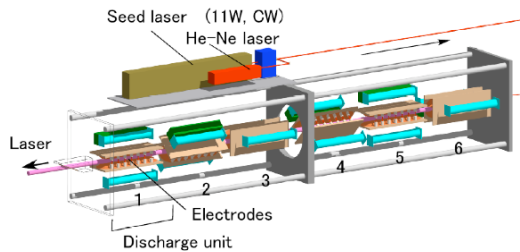


図4 開発した炭酸ガスレーザーの原理図。不安定共振中にシードレーザーを入射して、タンモード発振を得る。

(2) JT-60U トカマクにおける協同トムソン散乱測定法の実証

JT-60U プラズマへのレーザーの入射実験における散乱光の解析を行った。

散乱光に含まれる迷光の除去は、散乱光を迷光フィルタ（高温炭酸ガス吸収セル）を通すことにより除去している。パルス前半の迷光はシードレーザーの発振周波数と同じ成分であり、迷光フィルタにより容易に除去する事が可能であった。しかし、パルス後半から立ち上がる多モード発振成分に起因する迷光については、迷光フィルタによる完全な除去には成功していない。ヘテロダイン受信システムの入力信号に、パルス後半の迷光によるノイズが重畳したため、プラズマからの散乱信号の同定が困難であった。

そのため、レーザーの運転条件の改善、種レーザーの安定度改善による多モード発振成分の除去を実施した。その結果、迷光の発生するレーザーパルスの割合は全パルスのうち約30%となった。レーザーパルスのパ

ワーモニタの波形と散乱信号の波形を図5に示す。約30%のパルスではパルス後半から、大きなノイズ成分が見られるが（この場合には $t=4.6s, 5.0s, 5.6s$ ）、残り約70%のパルスでは、プラズマパラメーターから予想される散乱信号と同程度のレベルまで、ノイズ成分を抑制できた。

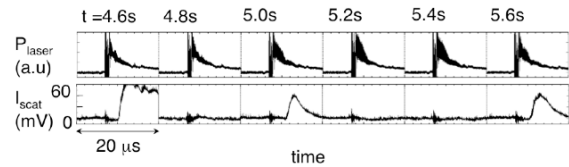


図5 レーザーのパワーモニタ波形(P_{laser})と散乱光信号(I_{scat})。 $t=4.6s, 5.0s, 5.6s$ の散乱信号に迷光による大きなノイズ成分が見られる。

次に、迷光成分の多い約30%のパルスを除去し、残りのパルスを重畳して信号成分を抽出する手法を開発した。図6にそのために開発した、データ収集・解析系を示す。フィルタバンクから出力された周波数解析後の信号を、信号処理プログラム機能を持つデジタルオシロスコープに入力し、内部の演算機能により、レーザーパルスに対応した散乱光信号を積算した。

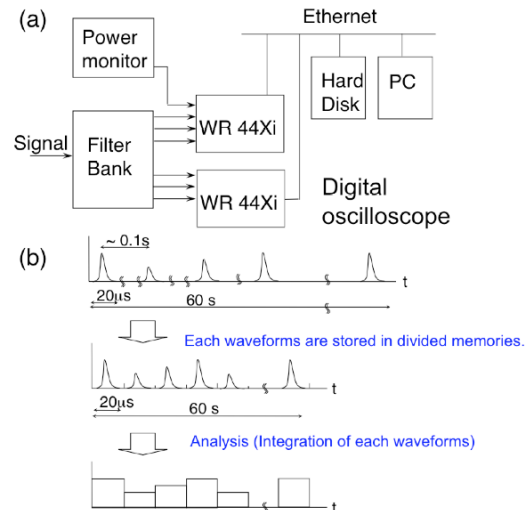


図6 データ収集・解析系 (a)ブロックダイアグラム (b)デジタルオシロスコープのメモリーを分割して全波形を記憶した後、それぞれのパルス波形を内部プログラムにより積算して出力する。

その結果、迷光の影響を減少させることができたものの、積算した散乱光信号か

らは、協同トムソン散乱成分は同定されていない。迷光が完全には除去されていないことが原因と思われる。レーザー光の更なる周波数安定が必要である。

これまでに、高速イオンからの散乱信号の同定は出来ず、アルファ粒子測定法の原理実証には至っていないものの、従来に無い性能（出力エネルギー17J, 繰り返し周期 15Hz の単一モード発振）のレーザーを完成させるとともに、電源の増設による、エネルギー17J、繰り返し周期 30Hz のレーザー出力の見通しを得ることができた。

現在、国際熱核融合実験炉(ITER)におけるアルファ粒子計測法として、周波数60GHzのジャイロトロンを光源に用いた協同トムソン散乱計測法がEUを中心とした研究グループにより進められている。これまでにジャイロトロンを光源として行われてきた実証実験は、電子サイクロトロン周波数より高いマイクロ波を使用しているのに対し、ITERでは電子サイクロトロン周波数よりも低い周波数のマイクロ波が用いられる。この周波数の条件での計測法は既存装置では実証されていない。そのため、ジャイロトロンによるアルファ粒子計測の代替光源として、炭酸ガスレーザーの開発を進めて光源を確保する意義は大きい。

今後、炭酸ガスレーザーのレーザーパルス後半の多モード発振に起因する迷光をどのように除去するかが、本計測法の重要な鍵となる。JT-60U実験の終了により高温プラズマを用いた実証実験は当面実施できないが、レーザーの発振周波数の安定化のために開発を継続して行うことが重要である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計7件)

- ① Masao Ishikawa, Takashi Kondoh, Takeo Nishitani, Yoshinori Kusama, Rev. Sci. Instrum., 79, (2008) 10E507-1~4、査読有
- ② L. Bertalot, M. Sasao, T. Kondoh(10番目), 他13名, Proc. of 35th EPS Conference on Plasma Phys., ECA Vol 32D, O-2.001~4 (2008)、査読無
- ③ Takashi KONDOH, Toshimitsu HAYASHI, Yasunori KAWANO, Yoshinori KUSAMA, Tatsuo SUGIE, Plasma and Fusion Research 2,(2007) S1111-1~4、査読有

- ④ T. Kondoh, Y. Kawano, T. Hatae, T. Sugie, T. Hayashi, Y. Kusama, Proc. 13th International Symposium on LASER-AIDED PLASMA DIAGNOSTICS, (2007) P126~P129、査読無
- ⑤ 笹尾真実子、近藤貴、榊田創、尾崎哲、Journal of Plasma and Fusion Research, 83, (2007) P962~P981、査読無
- ⑥ T. Nishitani, M. Ishikawa, T. Kondoh, Y. Kusama, K. Asai, M. Sasao, Proceedings of International Conference on Burning Plasma Diagnostics, (2007) 267-274、査読無
- ⑦ A.J.H. Donne, A.E. Costley, Y. Kawano (15番目), T. Kondoh (16番目), Y. Kusama (18番目), T. Sugie (28番目), 他27名, Nuclear Fusion, 47, (2007) S337-S384、査読有

[学会発表] (計2件)

- ① 近藤貴、笹尾 真実子、榊田 創、尾崎哲、落合謙太郎、閉じ込められたアルファ粒子計測、プラズマ・核融合学会第24回年会、2007年11月27日姫路
- ② T. Kondoh, Y. Kawano, T. Hatae, T. Sugie, T. Hayashi, Y. Kusama, "Progress in development of collective Thomson scattering diagnostic with high power CO₂ laser" 13th International Symposium on LASER-AIDED PLASMA DIAGNOSTICS, Sep. 19, 2007, Takayama

6. 研究組織

(1) 研究代表者

近藤 貴 (KONDOH TAKASHI)
独立行政法人日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門・研究主幹
研究者番号：70360427

(2) 連携研究者

波多江 仰紀 (HATAE TAKAKI)
独立行政法人日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門・研究副主幹
研究者番号：10343914

河野 康則 (KAWANO YASUNORI)
独立行政法人日本原子力研究開発機
構・核融合研究開発部門・研究主幹
研究者番号：90354589

杉江 達夫 (SUGIE TATSUO)
独立行政法人日本原子力研究開発機
構・核融合研究開発部門・研究主幹
研究者番号：50360425

草間 義紀 (KUSAMA YOSHINORI)
独立行政法人日本原子力研究開発機
構・核融合研究開発部門・研究主幹
研究者番号：70343902