

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 1 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560860

研究課題名（和文） 複走レーザートムソン散乱装置の開発

研究課題名（英文） Development of a multipath laser Thomson scattering system

研究代表者

山田 一博（YAMADA ICHIRO）

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授

研究者番号：80222371

研究成果の概要（和文）：LHD トムソン散乱装置の測定温度領域の拡大（50eV～10keV → 5eV～30keV）と高温核融合プラズマにおける電子温度の等方性・非等方性の実験的探索を目的とし、LHD トムソン散乱装置を前方散乱・後方散乱のハイブリッド形式が可能な複走レーザートムソン散乱装置へ発展的に改造する研究を行った。このために、1.5J/50Hz のハイパワーYAG レーザーを開発した。また、筑波大 GAMMA10 トムソン散乱装置を複走レーザートムソン散乱装置へ改良した。

研究成果の概要（英文）：To extend the measurable temperature range of the LHD Thomson scattering system (50eV - 10keV → 5eV - 30keV) and to search for electron temperature anisotropy of high temperature fusion plasmas, we have improved the LHD Thomson scattering system by using a multipath laser configuration. In this study, we have developed a high-power 1.5J/50 Hz YAG laser. And, a multipath laser system has been installed on the GAMMA10 Thomson scattering system.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2010 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2011 年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・核融合学

キーワード：核融合，プラズマ計測，トムソン散乱，

## 1. 研究開始当初の背景

LHD トムソン散乱装置は 50 eV～10 keV の電子温度領域に最適化して設計されており、これ以上の温度領域では実験誤差が急激に増加します。LHD では最高 20 keV 前後の電子温度加熱が達成されており、このような高電子温度プラズマの電子温度を精度よく測定する必要が生じてきました。

また、近年の核融合プラズマの研究において、高電子温度プラズマにおいては電子温度

の等方性・非等方性の実験的検証が物理的な興味の対象となっています。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は2つあり、1つ目はLHD トムソン散乱装置の測定温度領域の拡大であり、2つ目は前方散乱・後方散乱を利用した電子温度の非等方性の研究です。

## ① 測定温度領域の拡大

LHD トムソン散乱装置は測定温度領域を 50

eV~10 keV と想定して設計開発されたものですが、LHD プラズマの性能向上は目覚ましく、10 keV をゆうに越える 20 keV 程度の電子温度が達成されています。15keV 程度までは装置の小改良で対応してきましたが、測定誤差は 10 keV を超えると急激に増大することが実験的にもシミュレーションでも確認されています。このため、将来の電子温度 50 keV、100 keV といった核燃焼プラズマの電子温度を精度良く測るためには、LHD トムソン散乱装置の根本的な部分を変更することも必要と考えます。本実験課題では、測定温度領域をこれまでの 50 eV~10 keV から 5eV~30keV へと拡大することを目的の 1 つとします。

## ② 電子温度の等方性・非等方性の研究

近年の核融合プラズマの研究において、高電子温度プラズマにおいては電子温度の等方性・非等方性の実験的検証が物理的な興味の対象となっています。現在の LHD トムソン散乱装置は後方散乱配置を用いています、これを電子温度の等方性・非等方性の実験的検証を行うために、前方散乱・後方散乱のハイブリッド形式が可能な複走レーザートムソン散乱装置へ発展的に改造することも目的の一つです。

## 3. 研究の方法

本申請課題では現在の後方散乱配置の LHD トムソン散乱装置を前方散乱・後方散乱のハイブリッド形式が可能な複走レーザートムソン散乱装置へ発展的に改造する。このために次の 2 つのハードウェアの開発・整備を行いました。

### ① 高出力 YAG レーザーの開発

複走レーザートムソン散乱装置のために、既存の市販のレーザー装置 2 台を組み合わせた高出力 YAG レーザーを開発しました。

### ② 複走レーザー光学系の開発

折り返しミラーを用い、前方散乱と後方散乱を組み合わせた複走レーザートムソン散乱装置の開発を行いました。

## 4. 研究成果

### ① 高出力 YAG レーザーの開発

平成22年度において複走レーザートムソン散乱に欠かせない位相共役鏡を用いた縦単一モード発振可能な高繰り返し・高出力レーザーの開発を重点的に実施しました。このレーザーは既存のコンテニウム製 50 Hz/0.5 J (平均出力 25 W 相当) レーザーと同 10 Hz/2 J レーザー (平均出力 20 W 相当) の 2 台を組み合わせることをベースとしています。図1にこのレーザーの概念図と写真を示します。

平成22年度の研究ではアンプ段を1個追加

することと電源部を強化することで 1.2 J/50 Hz (平均出力 60 W 相当) の性能を引き出すことに成功しました。また、縦単一モード発振を安定に動作させるために発振段を改良し、ビーム形状、ビーム発散角、志向安定性、エネルギー安定性等の諸性能において必要な性能が得られていることが確認できました。

このレーザーはLHDトムソン散乱装置で使用中のレーザーの中で最も高出力の装置となり、サンプリング周波数を既存のシステムの2倍 (50Hz→100Hz) へ向上することができました。実際のLHDプラズマの電子温度分布計測に応用し、過誤なく運転できることを確認しました。

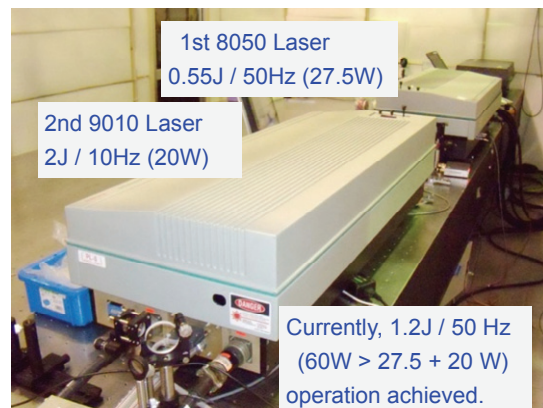
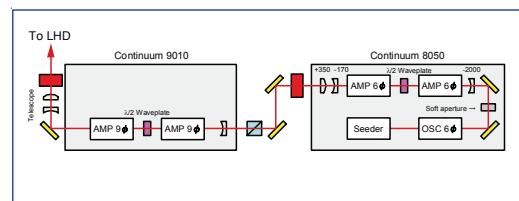


図1 開発した高パワーYAG レーザー

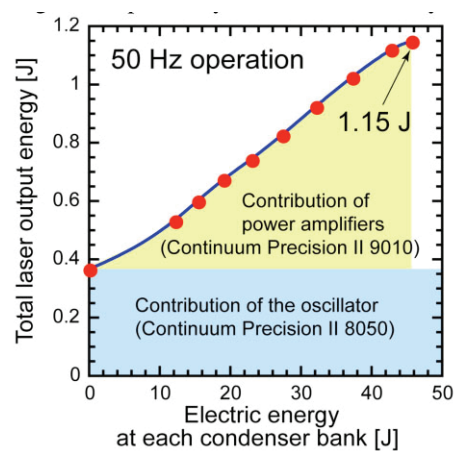


図2 開発した高パワーYAG レーザーの出力特性。横軸が入力電力で、縦軸が出力パルスエネルギー。

このレーザーは最大1.5 J/50 Hz (75 W相当)の試験運転にも成功しています。また、図2に示す通り、現有の電源を用いた範囲ではまだ出力パルスエネルギーは飽和の兆候が表れていないため、電源部を強化することで、更なる高性能化も可能と考えています。

## ② 複走レーザー伝送系の開発

複走レーザー伝送系の開発については、LHDの実験スケジュール(マシンタイム)と設置許可の都合で、研究期間内に複走伝送系をLHDに設置することは諦めざるをえなくなりましたが、その代わりとして筑波大・ガンマ10トムソン散乱装置に同様のシステムを平成23年度に組み込ませていただき、種々の試験・実

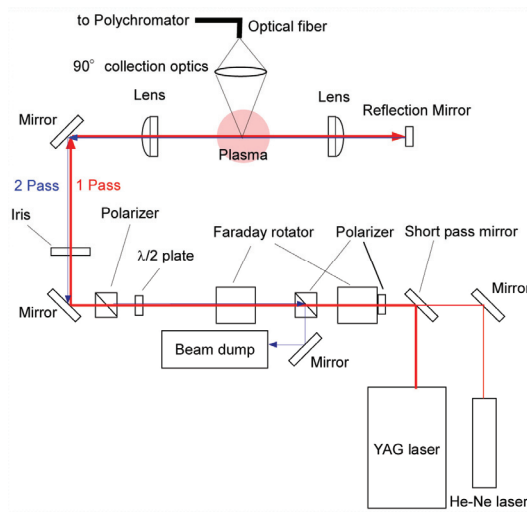


図2 複走レーザーガンマ10トムソン散乱装置の概略図

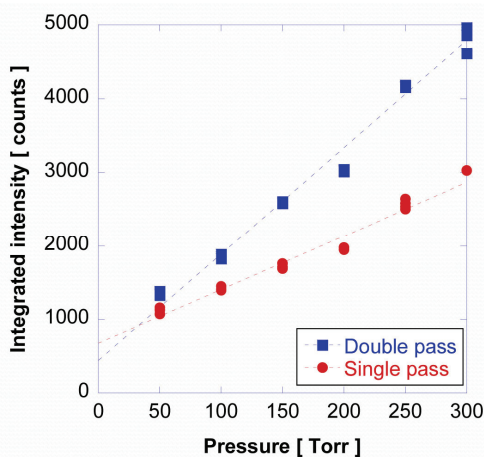


図3 窒素ガスのレイリー散乱によるポリクロメーターの絶対較正。横軸窒素ガスの圧力で、縦軸が信号強度を示す。赤線はレーザーを往路のみ入射させた場合で、青線は往復路入射させたもの。

験を行いました。

いくつかの困難を克服し、筑波大・ガンマ10トムソン散乱装置を複走レーザー形式のものへ改良し、安定的に過誤なく運転できることを確認しました。筑波大・ガンマ10のプラズマはLHDのそれより1桁以上電子密度が薄いため散乱信号強度も弱く、このような状況では複走レーザー形式によりレーザー強度を増大させることが実験誤差を小さくすることに効果的であることを検証しました。図2に同装置の概略図を示します。図4はポリクロメーターの波長チャンネル(a)~(d)で検出されたトムソン散乱信号で、赤線はレーザーを往路のみ入射させた場合、青線は往復路入射させたものです。期待通り、信号強度(面積)はほぼ2倍弱になっており、得られた電子温度の実験誤差も約半分へ小さく、測定精度が向上しました。

複走レーザートムソン散乱装置は国内外でも応用例は数例に限られ、今回の成功は一つのマイルストーンとなると同時に技術的にも貴重な経験を積み重ねることができました。

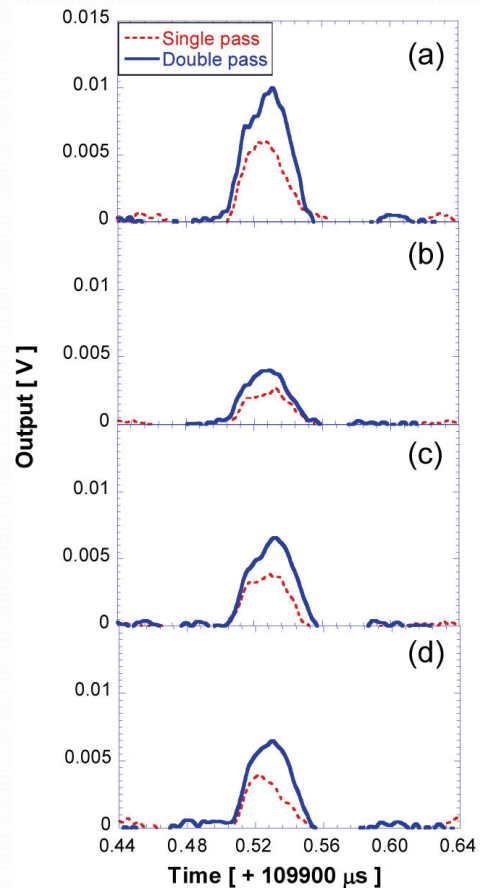


図4 ポリクロメーターの波長チャンネル(a)~(d)で検出されたトムソン散乱信号。赤線はレーザーを往路のみ入射させた場合で、青線は往復路入射させたもの。

当初予定していたLHDでの応用の代わりにガンマ10での実施となった点を除けば、本申請課題はほぼ所定の成果をあげることができたと考えます。

最後に、研究業績として本報告書のリストに加え、平成24年5月に計3編の学術論文をReview of Scientific Instruments誌へ提出したことを付記いたします。これらが受理されれば、本申請課題において計11件の論文発表と計11件の学会報告を行ったこととなります。

#### 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 8 件)

- ① I. Yamada et al. (12 名中 1 番目), “Current status of the LHD Thomson scattering system”, J. Instruments, Vol.7, C05007-0-9 (2012). 査読有
- ② M. Yoshikawa et al. (14 名中 6 番目), “Measuring Electron Temperature in the Tandem Mirror GAMMA 10 Plasma Using a Yttrium – Aluminium - Garnet Thomson Scattering System”, Plasma Fusion Res., Vol.6, C05007-0-9. 査読有
- ③ I. Yamada et al. (11 名中 1 番目), “Improvements of data quality of the LHD Thomson scattering diagnostics in high-temperature plasma experiments”, Review of Scientific Instruments., Vol. 81, 10D522-1-3 (2010). 査読有
- ④ I. Yamada et al. (6 名中 1 番目), “Recent Progress of the LHD Thomson Scattering”, Fusion Science and Technology, Vol.58, 345-351. 査読有

[学会発表] (計 11 件 : 内招待講演 3 件)

- ① I. Yamada et al., “Extension of the Measurable Temperature Range of the LHD Thomson Scattering System”, 19th Topical Conference on High-Temperature Plasma Diagnostics, Monterey, CA, USA, 2012.5.7..
- ② I. Yamada et al., “Current status of the LHD Thomson scattering system”, 15th International Symposium on Laser-Aided Plasma Diagnostics (招待講演), Jeju, South Korea, 2011.10.10.
- ③ M. Yoshikawa et al., “Electron temperature measurements by using newly installed Thomson scattering system in GAMMA 10”, 15th International Symposium on Laser-Aided Plasma Diagnostics (招待講

演), Jeju, South Korea, 2011.10.10.

- ④ I. Yamada et al., “Improvements of data quality of the LHD Thomson scattering diagnostics in high-temperature plasma experiments”, The 18th Topical Conference on High-Temperature Plasma Diagnostics, Wildwood, NJ, USA, 2010.5.17.
- ⑤ I. Yamada et al., “Current Status and Future Plans of the LHD Thomson Scattering for Burning Plasma Diagnostics”, International Workshop on Microwave - Laser diagnostics for burning plasma experiment, Toki, Japan, 2009.8.18.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

山田 一博 (YAMADA ICHIHIRO)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授

研究者番号 : 80222371