

令和 3 年 6 月 28 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03586

研究課題名(和文)新しいポリクロメーターを用いた先進トムソン散乱計測

研究課題名(英文)Advanced Thomson scattering diagnostic using novel polychromator

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：核融合プラズマの温度を計測するためのトムソン散乱計測の先進的開発研究を行いました。トムソン散乱計測においてトムソン散乱光の波長を分析するポリクロメーターは、測定する温度範囲や計測精度を決める重要な要素です。これまでのLHDトムソン散乱計測のポリクロメーターは波長チャンネル数が5で、散乱角約167度の後方散乱光を観測し、20 eV - 10 keV (220万度 - 1.1億度)の温度範囲に最適化して設計されています。本申請課題では測定温度領域の拡大と計測精度の向上を目的とし、後方散乱に加えて散乱角約13度の前方散乱光も観測できるよう波長チャンネル数9の新しいポリクロメーターを開発しました。

研究成果の学術的意義や社会的意義

トムソン散乱計測装置は、核融合プラズマの三つの重要パラメーターの一つであるプラズマの温度を計測する基幹計測装置です。核融合研のLHDトムソン散乱装置は、後方散乱と前方散乱の二つを観測できるメリットを活かし、これまでの測定温度領域20 eV - 10 keVから1 eV - 20 keVに拡大するためのポリクロメーターを開発しました。併せて、後方散乱では磁力線に対して垂直成分、前方散乱では平行成分を観測できます。これにより、磁場閉じ込め核融合プラズマにおける電子温度の非等方性の観測が可能になり、新しい世代の核融合研究に資する計測機として期待されます。

研究成果の概要(英文)：We performed the advanced study of laser Thomson scattering system for measuring the electron temperature and density of thermonuclear fusion plasmas. Polychromators, which analyze the Thomson scattering spectra, are the key devices for the measurable temperature range and data accuracy. Current LHD Thomson scattering polychromators have five wavelength channels, observe the backward scattering light (about 167 degree), and they are optimized to the temperature range of 20 eV - 10 keV.

In this study, we developed new polychromator with nine wavelength channels that both the backward and forward scattering lights can be observed for expanding the measurable temperature range and improving the data accuracy.

研究分野：核融合学

キーワード：トムソン散乱計測 プラズマ計測 核融合プラズマ LHD ポリクロメーター

1. 研究開始当初の背景

トムソン散乱装置は核融合プラズマの電子温度・密度を測定する基幹計測器として世界中の核融合研究施設で稼働しています。これまでのトムソン散乱計測では、「電子の運動はプラズマ中で等方的で、その速度分布関数はマクスウエル分布である」という仮定を前提にプラズマの温度、密度を算出してきましたが、これに一石を投ずる結果が理論的にも実験的にも報告されるようになりました。そこで、これを実験的に検証するための新しいトムソン散乱計測を計画しました。

2. 研究の目的

現在のLHDトムソン散乱装置は散乱角167度の後方散乱光を観測する装置として開発されたものですが、原理的に散乱角13度の前方散乱光も測定でき、前方・後方散乱のハイブリッド計測が可能です。しかしながら、現在のLHDトムソン散乱装置においてトムソン散乱光の波長分布を分析する分光器(ポリクロメーター)は後方散乱に最適化されたままであるため、ハイブリッド形式の特徴を十分活かしていません。そこで、これまでの後方散乱に加え、後方散乱と前方散乱の両方に最適化した新しいポリクロメーターの開発を目的とした研究を行いました。

3. 研究の方法

トムソン散乱計測では光のドップラー効果によって波長が変化した散乱光を観測します。図1にトムソン散乱計測で観測する電子の運動方向を示します。図に示すように、入射レーザー方向と観測方向の差ベクトルに平行な速度成分によって波長変化した光を観測します。LHDトムソン散乱装置では図2の上図のように、YAGレーザー($\lambda=1064\text{nm}$)をプラズマの左から右へ入射し、後方散乱光を観測しています(プラズマ中心での散乱角167度)。この場合は磁場 B に垂直に近い温度成分を測定します。これに加え、レーザーをミラーで折り返して逆向きにして再入射すると、散乱角13度の前方散乱光も観測できるようになります。差ベクトルは磁力線にほぼ平行になり、平行成分の温度が測定できます。

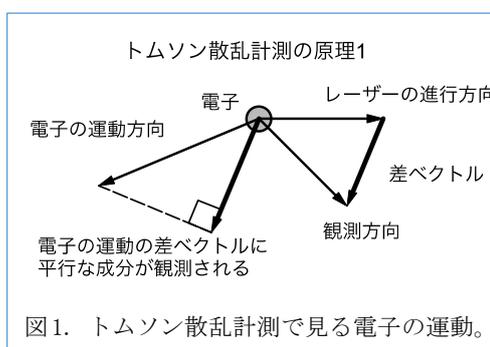


図1. トムソン散乱計測で見る電子の運動。

ただし、後方散乱と前方散乱では散乱光の波長分布が著しく異なります。前方散乱のそれは後方散乱のそれと比べて半値幅で1/10-1/50程度の広がりしかありません(図3)。よって、散乱光を観測するポリクロメーターのフィルターも後方散乱と前方散乱の2つを分けて考える必要があります。図3にポリクロメーターの各波長チャンネルの感度曲線のモデルを示します。スペクトル幅の狭い前方散乱光の測定はCH. 1-5を用い、分布幅の広い後方散乱光はCH. 5-CH. 9を用いて温度を解析します。

LHDトムソン散乱装置のポリクロメーターは後方散乱の観測を目的として、CH. 4-CH. 8の5チャンネルで構成されています。これを前方散乱計測も行えるよう、CH. 1-CH. 9の9チャンネル型へ拡張したものを開発しました。

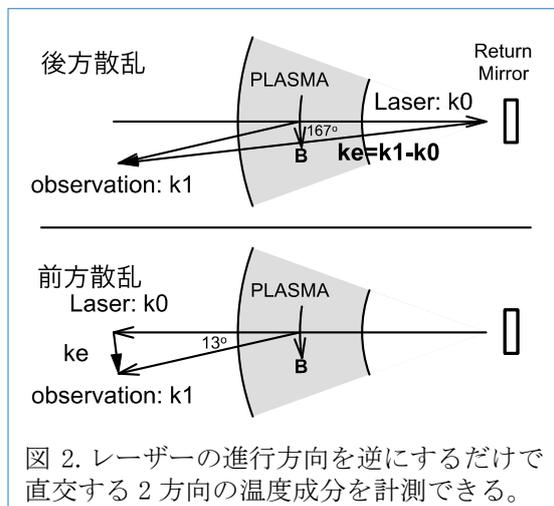


図2. レーザーの進行方向を逆にするだけで直交する2方向の温度成分を計測できる。

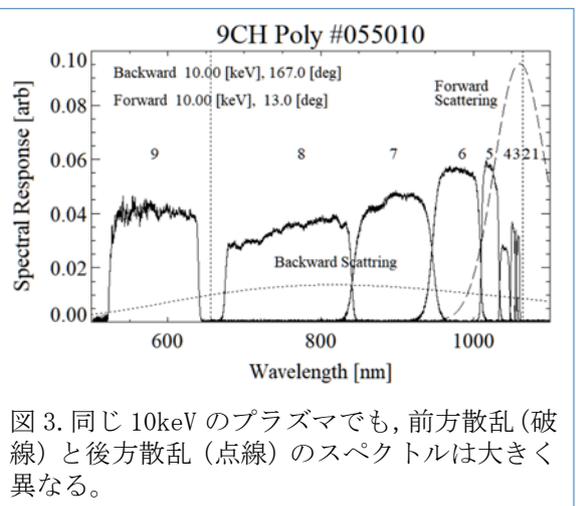


図3. 同じ10keVのプラズマでも、前方散乱(破線)と後方散乱(点線)のスペクトルは大きく異なる。

4. 研究成果

本研究課題では、LHD トムソン散乱装置において後方散乱計測と前方散乱計測の両者に対して測定温度領域 $T_e=100 \text{ eV} - 20 \text{ keV}$ の範囲で計測誤差がともに 10 %以下となるように最適化したポリクロメーターを製作しました。ポリクロメーターの開発では、正確に光路を伝送できる内部光学伝送の設計、波長チャンネルのフィルターの選定、光検出器 (APD) の選定が重要になります。

(1) 筐体の基本設計

当初の計画プラン A では筐体全体のコンパクト化と内部光路調整の効率化から、ダイクロイックミラーを用いて波長選別をするタイプを第一候補としておりました。しかしながら、複数の光学素子製造会社との打ち合わせの結果、本研究の仕様を満たすダイクロイックミラーの製作は困難 (失敗の危険性が高い) と判断し、実績のあるバンドパスフィルター方式のプラン B へ変更しました。図 4 にプラン B の組立図を示します。基本的な形式はこれまでの LHD トムソン散乱ポリクロメーターのそれを踏襲しておりますが、細部の寸法や内部光学素子 (リレーレンズと集光レンズ) の仕様や組立誤差を減じるための変更を行い、より正確な光伝送が実現できました。

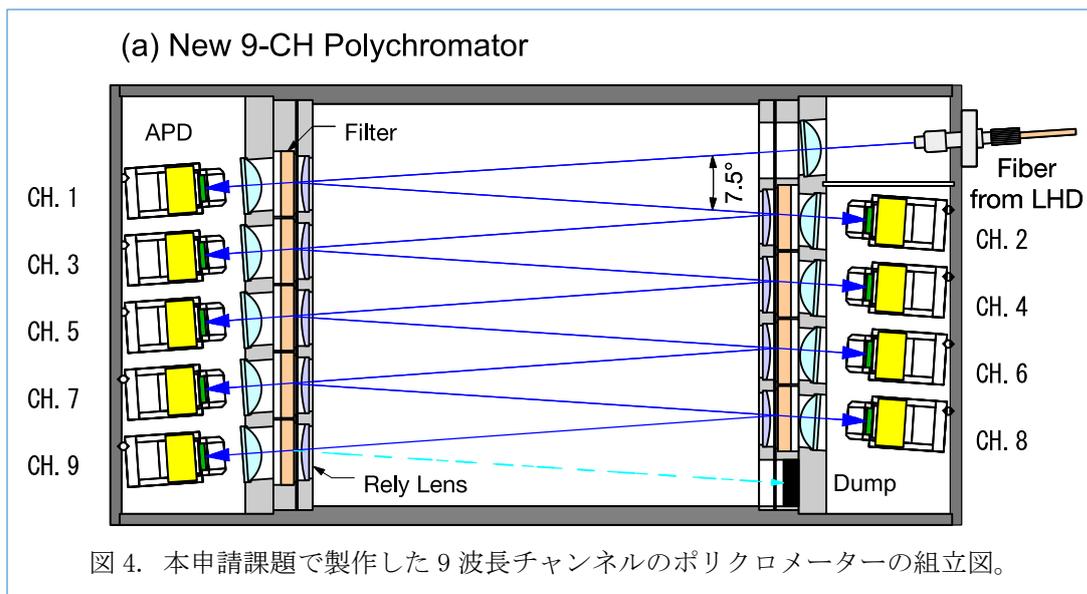


図 4. 本申請課題で製作した 9 波長チャンネルのポリクロメーターの組立図。

(2) 波長フィルターの選定

波長チャンネルのフィルターの選定においては、波長チャンネル数 9 のポリクロメーターを模擬するシミュレーションプログラムを用い、種々の最適化の方法を検討しました。当初の計画ではトムソン散乱光の測定のための 9 チャンネルに加え、レイリー散乱を用いた絶対較正用に 10 チャンネル目も実装する計画でした。もう一つの較正方法としてトムソン散乱光用のフィルターをそのまま使えるラマン散乱を利用した絶対較正を LHD において試験したところ、レイリー散乱による較正と遜色ない結果が得られることが確認できました。このため、絶対較正はラマン散乱で行うという方針を切り替えることで、レイリー散乱較正専用 10 チャンネル目を省くこととしました。

(3) 光検出器の選定とプリアンプ回路

光検出器には浜松ホトニクス社製のアバランシェフォトダイオード (Avalanche Photo Diode, APD) S11519 型を用いました。この S11519 型は従来の S8890 型と比べ波長 950 nm 以上での感度が高く、本研究で重要な前方散乱光の波長域 $\lambda=900-1050 \text{ nm}$ での観測に適しています (図 5)。

プリアンプ回路は、超低ノイズ・広帯域オペアンプであるテキサス・インスツルメンツ社製 LMH6624 を採用しました。プリアンプ回路を図 6 に示します。回路自体はオペアンプの標準的な構成です。出力波形にオーバーシュート現象が出ないようにするため、S11519 の浮遊容量 (230 pF) や像倍率 ($M=100$) に合わせ、いくつかの試行錯誤の結果 R2, R3 の値を決めました。

(4) 9 チャンネルポリクロメーター

以上のような設計、要素試験を経て完成した 9 チャンネル型ポリクロメーターの写真を図 7 に示します。また、図 8 はこのポリクロメーターの各波長チャンネルの感度曲線を較正したものです。左が CH. 1~CH. 9 の全体図で、右は CH. 1~CH. 5 の領域を拡大したものです。

図の中で右から 4 番目、6 番目の CH. 4, CH. 6 は他のチャンネルと比べて感度が高くなっています。これは、次の理由によります。個々の APD のブレークダウン電圧にはいくらかバラツキがあります。このため、ブレークダウン電圧が一番低い APD を基準として、同じ逆バイアス電圧を印加すると、増倍率にもバラツキが生じます。このバラツキを抑えるため、9 個の APD はブレー

クダウン電圧が±1 V以内となるよう選別したいところですが、購入した物の中で組み合わせを選別した場合でも±5 V程度のバラツキがあり、結果として感度にもバラツキが生じています。しかしながら、今回の場合は感度に2倍程度のバラツキがあったとしても、ポリクロメーター全体としての測定誤差に与える影響は小さく、許容できる範囲と考えています。

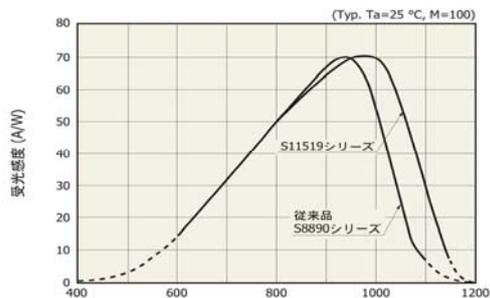


図 5. 光検出器の感度曲線。長波長領域で感度が向上した S11519 型を採用した。(浜松ホトニクス (株) カタログより)

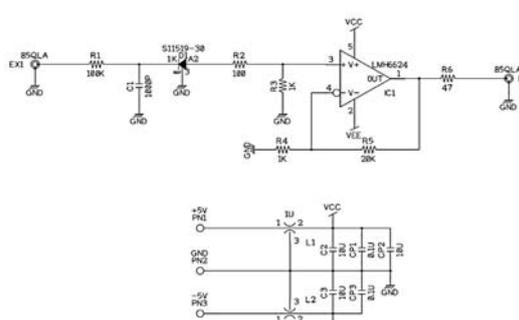


図 6. APD プリアンプの回路図



図 7. 開発した 9 チャンネル型ポリクロメーターの完成写真。

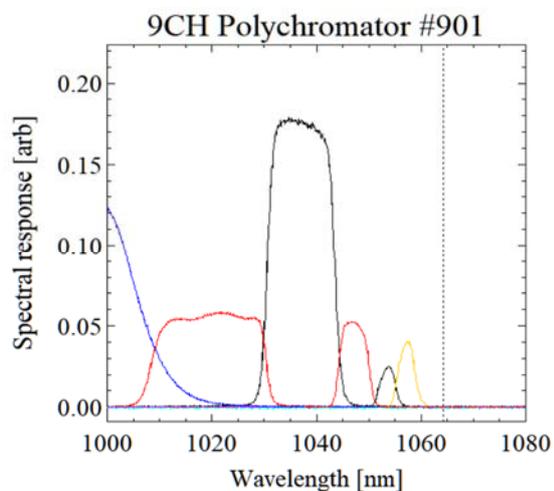
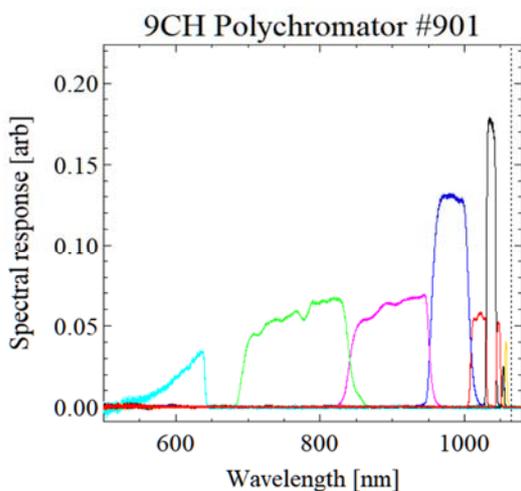


図 8. 開発した 9 チャンネル型ポリクロメーターの感度曲線。左が CH. 1~CH. 9 の全体図で、右は CH. 1~CH. 5 の領域を拡大したもの。

(4) LHD における応用について

前方散乱計測と後方散乱計測に必要となるレーザーの遅延光学系および遅延信号を扱うためのデータ収集系の設計と改良を行いました。しかしながら、LHD 本体に設置されているレーザー窓がプラズマからの粒子による汚れ（堆積物）が付着するというトラブルが発生しました。このままレーザーを入射するとレーザー窓が破損し、LHD 装置全体に甚大な被害が及ぶこと、窓の交換およびその交換作業は法令によって制約があることから前方散乱計測は断念し、今後の課題とすることとしました。

(5) 今後の展望

本研究で開発したポリクロメーターは当初の研究計画の指針をほぼ満たすものが完成しました。また、懸念していた箇所も期待以上に性能が確保できていることが確認できたため、今後の発展性に明るい展望が開けました。現在世界で稼働しているトムソン散乱装置のポリクロメーターの波長チャンネル数は 4-5 であり、電子温度の測定には十分でも、温度計を超える新しい物理の発見、検証には不十分です。本研究で開発した 9 チャンネルポリクロメーターは今後のプラズマ物理研究においても強力な武器になると考えます。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 YAMADA Ichihiro, FUNABA Hisamichi, LEE Jong-ha, HUANG Yuan, LIU Chunhua	4. 巻 15
2. 論文標題 Influence of Neutron Irradiation on the Large Helical Device Thomson Scattering System	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 2402075 ~ 2402075
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.15.2402075	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 LIU Chunhua, HUANG Yuan, YAMADA Ichihiro, FENG Zhen, WANG Yuqin, HOU Zhipei, FUNABA Hisamichi	4. 巻 15
2. 論文標題 The Stray Laser Light Simulation of the Beam Dump for Thomson Scattering Systems in HL-2M Tokamak	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 2402045 ~ 2402045
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.15.2402045	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Ichihiro Yamada, Hisamichi Funaba, Jong-ha Lee, Yuan Huang, and Chunhua Liu
2. 発表標題 Influence of Neutron Irradiation on LHD Thomson Scattering System
3. 学会等名 28th International Toki Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ichihiro YAMADA, Hisamichi FUNABA, Jong-ha LEE, Yuan HUANG, and Chunhua LIU
2. 発表標題 Neural Network Data Analysis for Thomson Scattering Diagnostics
3. 学会等名 31st Symposium on Fusion Technology (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 LIU Chunhua, HUANG Yuan, YAMADA Ichihiro, FENG Zhen, WANG Yuqin, HOU Zhipei, FUNABA Hisanichi
2. 発表標題 The Stray Laser Light Simulation of the Beam Dump for Thomson Scattering Systems in HL-2M Tokamak
3. 学会等名 28th International Toki Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Funaba, I. Yamada, R. Yasuhara, D.J. Den Hartog, E. Yatsuka, J.H. Lee, H. Uehara, LHD Experiment Group
2. 発表標題 Data processing for fast signals of Thomson scattering and application in the high repetition frequency laser system on LHD
3. 学会等名 23rd Topical Conference on High Temperature Plasma Diagnostics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H. Funaba, I. Yamada, R. Yasuhara, H. Hayashi, S. Sakakibara, LHD experiment group
2. 発表標題 Evaluation of Electron Temperature from the Time-Developing Thomson Scattered Signals on LHD
3. 学会等名 27th International Toki Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
韓国	Korea Institute of Fusion Energy			
中国	Southwestern Institute of Physics			