

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 1 月 21 日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25630422

研究課題名(和文) 球状トカマクにおけるプラズマエネルギーのセンサーレス反磁性測定

研究課題名(英文) Sensorless Diamagnetic Measurement of Plasma Energy in Spherical Tokamak

研究代表者

中村 一男 (NAKAMURA, Kazuo)

九州大学・応用力学研究所・教授

研究者番号：30117189

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：光CTの場合は光ファイバ中を伝搬する電磁波の偏波面が進行方向の磁界により回転するファラデー効果を利用する。光ファイバをTFC給電プスパーの回りに100回以上巻くことにより1万以上のダイナミックレンジを確保することが可能である。反磁性効果による微小な誘導電流成分を抽出するためには、ファラデー効果の感度であるベルデ定数が温度変化にてドリフトしないようにTFC給電プスパーからの熱絶縁、周囲温度の恒温化が必要である。ファラデー回転の計測には光ファイバの形状が温度、振動により変化しても検出誤差とならず、光ファイバとの相性が良いサニャック干渉法を適用する。

研究成果の概要(英文)：In the spherical tokamak QUEST, when plasma energy increases by heating, toroidal magnetic field in the plasma varies from the toroidal magnetic field in vacuum due to diamagnetic effect. If the voltage induced in the toroidal magnetic field coil is measured, the increase in the plasma energy can be estimated inversely. And when the voltage applied to the toroidal field coil is constant, the increase in the plasma energy can be estimated inversely by measuring the induced current change with optical CT (Current Transformer based on Faraday rotation). We adopted Sagnac interferometer without detection error even for the optical fiber deformation due to the temperature change and the vibration.

研究分野：核融合学

キーワード：球状トカマク プラズマエネルギー 反磁性測定 センサーレス測定 ファラデー回転 ファイバー光学 偏波面回転型光CT ループ型サニャック干渉計

1. 研究開始当初の背景

(1) トカマクプラズマのエネルギーを測定する方法として、プラズマの反磁性効果を利用してプラズマエネルギーの上昇に伴うトロイダル磁束変化を検出する方法(反磁性測定法)がある。従来はトカマクプラズマの回りに小円周方向に導線(反磁性ループ)を巻いてこの磁束変化を測定する方法が採用されてきた。しかし、真空容器による渦電流の影響を避けるため真空容器内壁に設置せざるを得ないので、国際熱核融合実験炉ITERのような場合には真空容器内の計測素子の脱着・補修にリモートハンドリングが必要となる。したがって、反磁性ループ法の代替案を提案・実証する必要がある。そこで、トロイダル磁場コイルにもファラデーの法則により、減少する磁場を補う方向に電圧が誘起されることに着目し、この誘起電圧もしくは誘導電流を測定することにより、プラズマエネルギーの上昇を逆算する方法の確立を提案・実証する次第である。

2. 研究の目的

(1) 球状トカマクプラズマにおいて電子は磁力線の回りにラーマー運動をする。そのラーマー運動による(反磁性)電流が作る磁場は元々存在していた真空磁場に対して反磁性を示す。したがって加熱などによりプラズマエネルギーが上昇すれば、反磁性効果も大きくなり、プラズマ中のトロイダル磁場は元々存在していたトロイダル磁場よりも減少する。ファラデーの法則により、トロイダル磁場コイルにも減少する磁場を補う方向に電圧が誘起される。この誘起電圧を測定すれば、プラズマエネルギーの上昇を逆算することが可能である。また、トロイダル磁場コイルへの印加電圧を一定にした場合は、誘導電流を測定することによりプラズマエネルギーの上昇を逆算することが可能である。プラズマの回りにいわゆる反磁性ループを設置することなく、トロイダル磁場コイル誘起電圧もしくは誘導電流を測定(センサーレス反磁性測定)することによりプラズマエネルギーを逆算する方法を確立することが本研究の目的である。

3. 研究の方法

(1) 反磁性効果によりトロイダル磁場コイルに誘起される微小な電圧および電流を種々の方法で測定および解析する。初年度はトロイダル磁場コイル電源を通常のように定電流制御している状態で誘起電圧を測定する。次にトロイダル磁場コイル電源を定電圧制御モードで運転できるようにしてから、トロイダル磁場コイルへの誘導電流を測定する。トロイダル磁場コイル電源電流は現在のところ、ホール素子を用いたDCCTで測定している。したがって、トロイダル磁場コイル電流のDC成分を有するので、次年度にはロゴスキーコイルによりプラズマ放電中

において、反磁性効果に起因する電流変化のみを測定する。最終年度には積分する必要のない光CTを用いて誘導電流を測定する。

(2) 反磁性効果によりトロイダル磁場コイルに誘起される微小な電圧および電流を種々の方法で測定および解析する。初年度はトロイダル磁場コイル電源を通常のように定電流制御している状態で誘起電圧を測定する。定格電圧の10分の1程度の大きなサイリスタリップル電圧の中の1万分の1程度以下の信号を抽出するために4桁以上のダイナミックレンジを有する差動増幅器を購入して測定する。次にトロイダル磁場コイル電源を定電圧制御モードで運転できるようにしてから、トロイダル磁場コイルへの誘導電流を測定する。トロイダル磁場コイル電源電流は現在のところ、ホール素子を用いたDCCTで測定している。この場合も1万分の1程度の信号を抽出するために4桁以上のダイナミックレンジを有する差動増幅器を使用する。

誘起電圧測定の場合、電源電圧測定用分圧器の後段に電気保安のための絶縁アンプを使用しているので、周波数特性およびダイナミックレンジの劣化が危惧される。したがって、分圧器の出力を直接取り出して差動増幅する方法を採用する。絶縁アンプを使用しない代わりに、差動増幅器およびデータ収集機器の電源には絶縁トランスを挿入する。誘起電圧信号に関しては、ウェーブレット変換により、サイリスタリップル電圧波形に特有な周波数成分を差し引けば、微小な信号成分が抽出できると期待される。誘起電圧測定については研究代表者(中村)および研究協力者(藤田)が担当する。

誘導電流測定の場合、電流測定用DCCTの後段に多点接地防止のための絶縁アンプを使用しているので、周波数特性およびダイナミックレンジの劣化が危惧される。したがって、この場合もDCCTの出力を直接取り出して差動増幅する方法を採用する。絶縁トランス、ウェーブレット変換についても同様である。QUESTにおいて長時間放電の場合、一定電圧であっても放電中にトロイダル磁場コイルの温度上昇に起因する抵抗増大によりトロイダル磁場コイル電流値が減少し、球状プラズマ特性が変化してしまうので、プラズマ圧力が変化する時間帯のみ定電圧制御に切替える制御法を新しい方法論の提案とともに計画の一つに加えたい。誘導電流の測定、定電圧制御への切替については研究代表者(中村)および研究協力者(藤田)が担当する。

ロゴスキーコイルのダイナミックレンジは広いが、積分に起因するドリフトのため定常特性は良くない。積分する前の生の波形を測定することを考えると、リップルが10分の1程度となるため、1万以上のダイナミックレンジを有するロゴスキーコイルの設計

が必要となり、連携研究者（御手洗）が担当する。

光CT計測回路について検討する。既存のPEM (Photoelastic Modulator) 法からサニャック干渉法に移行するための試験に必要な最小限の光学機器を購入して、試験、検討、設計を連携研究者（飯尾）が担当する。

(3) 次年度は反磁性効果による誘導電流を前年度に設計したロゴスキーコイルを製作して測定する。原理的には誘導電流により生成される磁場の時間変化を測定するので、誘起電圧を測定することになるが、トロイダル磁場コイルの時定数で1次遅れ（ローパスフィルタ）となっている点が利点である。トロイダル磁場コイル給電ブスバーから電気的に絶縁されている点も利点である。しかも給電ブスバーの接地側にロゴスキーコイルを取付ければ、静電的結合による影響も少ない。反磁性効果による誘導電流をロゴスキーコイルにて検出するためには少なくとも1万回以上の巻数が必要である。巻数が多いため、そのインダクタンス分を小さくするために、単なるリターン線ではなく、対称ハネカム巻きなどの特殊な巻き線法を適用する必要がある。また、層間の静電容量などにより周波数特性が劣化しないよう、層間にアルミシールドを挿入するなどの対策が必要である。ロゴスキーコイルの製作については連携研究者（御手洗）が担当する。

光CT計測回路については、サニャック干渉法にてモデルコイルの電流測定試験ができるよう、光学機器の購入を進める。光CT計測回路全体の組立て、調整、試験を連携研究者（飯尾）が担当する。

(4) 最終年度は誘導電流を光CTにて測定する。ロゴスキーコイルの場合は給電ブスバーの回りに生成される磁場をコイルに沿った巻線にて実効的に周回積分し、誘導電流の時間変化による出力電圧を時間積分することにより誘導電流を計測する。光CTの場合は光ファイバ中を伝搬する電磁波の電界の向きが進行方向の磁界により回転するファラデー効果を利用する。ロゴスキーコイルの場合のように時間積分する必要がない点が利点である。光ファイバを給電ブスバーの回りに100回以上巻くことにより1万以上のダイナミックレンジを確保することが可能である。光CTは超高電圧回路電流測定などに適用されているが、反磁性効果による微小な誘導電流成分を抽出するためには、ファラデー効果の感度であるベルデ定数が温度変化にてドリフトしないように給電ブスバーからの熱絶縁、周囲温度の恒温化が必要である。ファラデー回転の計測には既存のPEM (Photoelastic Modulator) 法を用いるとともに、光ファイバの形状が温度、振動により変化しても検出誤差とならず、光ファイバとの相性が良いサニャック干渉法を適用する。

光CT計測回路の実機 QUEST への適用に関しては連携研究者（飯尾）が担当する。

4. 研究成果

(1) 反磁性効果によりTFCに誘起される微小な電圧および電流を種々の方法で測定および解析する。初年度前期実験では、TFC電源を通常のように定電流制御している状態で誘起電圧を測定した。サイリスタの位相制御、GTOのPWM制御などパワーエレクトロニクスに起因する、定格電圧の10分の1程度の大きなリップル電圧の中の1万分の1程度以下の反磁性誘起電圧信号を抽出する必要がある。なお、球状トカマクでは低アスペクト比のため、反磁性効果の時間変化による誘起電流、誘起電圧は通常トカマクより大きくなる。

(2) 次に、TFC電源を定電圧制御モードで運転できるようにしてから、TFCへの誘導電流を測定する。TFC電源電流は現在のところ、ホール素子を用いたDCCCTで測定している。この場合も1万分の1程度の信号を抽出する必要がある。光CTの場合は光ファイバ中を伝搬する電磁波の偏波面が進行方向の磁界により回転するファラデー効果を利用する。ロゴスキーコイルの場合のように時間積分する必要がない点が利点である。光ファイバをTFC給電ブスバーの回りに100回以上巻くことにより1万以上のダイナミックレンジを確保することが可能である。

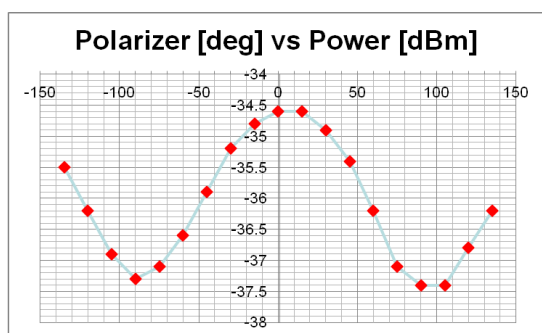
(3) 反磁性効果による微小な誘導電流成分を光CTにて抽出するためには、ファラデー効果の感度であるベルデ定数が温度変化にてドリフトしないようにTFC給電ブスバーからの熱絶縁、周囲温度の恒温化が必要である。ファラデー回転の計測には光ファイバの形状が温度、振動により変化しても検出誤差とならず、光ファイバとの相性が良いサニャック干渉法[1]を適用する。最初はファラデー回転の計測ができる最低限の光学機器（SLD光源、偏光子、光ファイバ、パワーメータ）にてTFC電流を実環境で計測する。サニャック干渉法には2種類あり、反射型[2]の実験結果によれば、ミラーからの戻り光のパワーを一桁増やす必要がある。サニャック干渉法（ループ型）[1]の実験に必要な光学機器（ベルデ定数が大きく、複屈折率の小さな光ファイバ）および変調および計測に必要な2位相ロックインアンプにてTFC電流を実環境で計測する。

<引用文献>

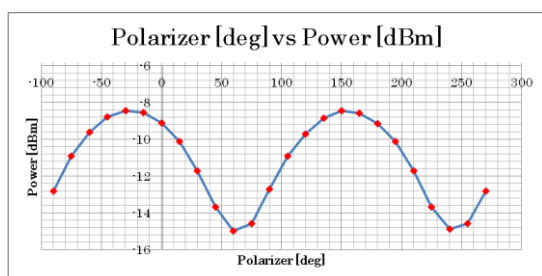
[1] Y. Ichinose, M. Abe: Measurement of Plasma Current Using Sagnac Interferometer Current Transformer, J. Plasma and Fusion Res. 76, No. 6, 593-600 (2000).

[2] K. Hotate, Y. Konishi: Simulation of Performance Degradation of Fiber-Optic Current Sensor, Technical Report of IEICE OME2000-115, OPE2000-67 (2000-10).

(4) クロスニコル法 (偏波面回転型) による光CTの予備実験として、SLD 光源→マルチモード光ファイバ→偏光子→マルチモード光ファイバ→偏光子→シングルモード光ファイバ→パワーメータの光学回路構成において偏光子の相対角度依存性を測定した。理想的には、相対角度のコサイン二乗特性が得られるはずであるが、最大値と最小値のパワー比は 2.8dB (1.8 倍) しか得られなかった。なお、光ファイバと偏光子のカップリングにおいては、ファイバポート焦点距離の選択、コリメータ光軸の微調整が重要である。

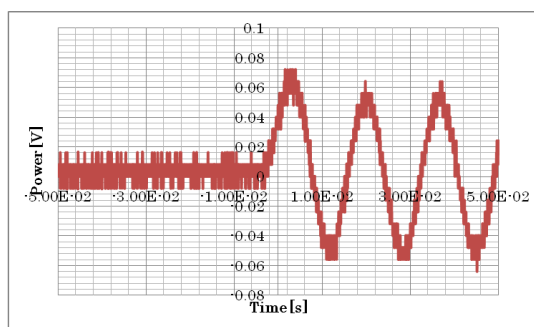


(5) 光ファイバの種類を変更し、SLD 光源→偏波保持光ファイバ→偏光子→シングルモード光ファイバ→偏光子→マルチモード光ファイバ→パワーメータの光学回路構成に変更して偏光子の相対角度依存性を測定した。最大値と最小値のパワー比は 6.55dB (4.5 倍) が得られた。パワー比増大の原因としては偏光子と偏光子の間の光ファイバをマルチモードからシングルモードに変更したことが主に効いている。

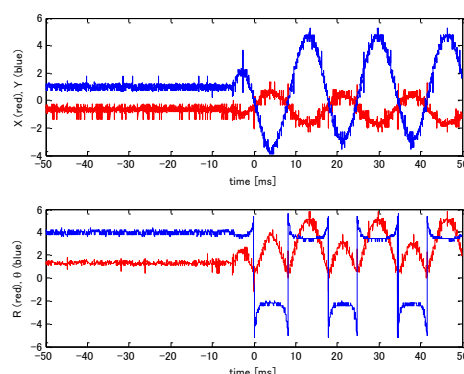


(6) クロスニコル法 (偏波面回転型) にて、すなわち、SLD 光源→偏波保持光ファイバ→偏光子→シングルモード光ファイバ (22 ターン) →偏光子→マルチモード光ファイバ→InGaAs デテクタの光学回路構成を用いて、約 7A、約 265 ターンのコイル電流 (60Hz) を測定した。偏光子と偏光子の間のシングルモード光ファイバのヴェルデ定数は $1.7 \times 10^{-6} \text{ rad/A}$ と逆算される。最終的な測定対象である TFC 給電ブスバーは 1 ターンであるので、原理的には光ファイバを TFC 給電ブ

スバーに $22 \times 265 = 6000$ ターン巻けば、トロイダル磁場コイル電流の $50\text{kA} \div 7\text{A} = 7000$ 分の 1 の反磁性効果を測定可能である。



(7) ファラデー回転の計測には光ファイバの形状が温度、振動により変化しても検出誤差とならず、光ファイバとの相性が良いサニャック干渉法 (ループ型) にて、すなわち、SLD 光源→偏波保持ファイバカップラ→位相変調器→偏波保持ダミーファイバ (50m) → $\lambda/4$ 波長板→シングルモード光ファイバ (22 ターン) → $\lambda/4$ 波長板→偏波保持ファイバカップラ→InGaAs デテクタ→ロックインアンプの光学回路構成を用いて、約 7A、約 265 ターンのコイル電流 (60Hz) を測定した。X(red)は変調波と同位相基本波、Y(blue)は 90 度位相基本波、R(red)は基本波の絶対値、 θ (blue)は位相を表す。なお、位相変調周波数は 220kHz、ロックインアンプのフィルタ時定数は $50\mu\text{s}$ とした。



(8) 前項 (7) において理想的には、基本波はサイン成分 Y(blue)のみであるが、コサイン成分 X(red)が Y(blue)より弱く変動している。原因としては、 $\lambda/4$ 波長板の 45 度設定がずれている、シングルモード光ファイバ (22 ターン) の複屈折が無視できない、等のため、円偏光が楕円偏光になっている可能性が考えられる。 $\lambda/4$ 波長板の 45 度設定が δ ずれている場合について、Jones 行列によるモデル化[2]により計算したところ、サニャック干渉法 (ループ型) では、 δ の 1 次の量の影響はコサイン成分 X(red)の変動分 ($t > 0$ のファラデー回転) には現れず、一定分 ($t < 0$ のオフセット) として現れることが分った。

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 0 件)

[学会発表] (計 5 件)

① 中村 一男, 御手洗 修, 飯尾 俊二, 長谷川 真, 徳永 和俊, 荒木 邦明, 関子 秀樹, 花田 和明, 藤澤 彰英, 出射 浩, 永島 芳彦, 川崎 昌二, 中島 寿年, 東島 亜紀, 永田 貴大, QUESTにおけるTFC電流の光CT測定に基づく反磁性計測, プラズマ・核融合学会, 2015. 11. 24, 名古屋大学東山キャンパス・豊田講堂 (愛知県名古屋市).

② 中村 一男, 御手洗 修, 飯尾 俊二, 長谷川 真, 徳永 和俊, 荒木 邦明, 関子 秀樹, 花田 和明, 藤澤 彰英, 出射 浩, 永島 芳彦, 川崎 昌二, 中島 寿年, 東島 亜紀, QUESTにおけるTFC電流信号に基づく反磁性測定, プラズマ・核融合学会, 2014. 11. 21, 朱鷺メッセ (新潟県新潟市).

③ 中村 一男, 御手洗 修, 飯尾 俊二, 長谷川 真, 徳永 和俊, 関子 秀樹, 花田 和明, 藤澤 彰英, 松岡 啓介, 出射 浩, 永島 芳彦, 川崎 昌二, 中島 寿年, 東島 亜紀, 荒木 邦明, QUESTにおけるプラズマエネルギーのセンサーレス反磁性測定, プラズマ・核融合学会, 2013. 12. 05, 東京工業大学大岡山キャンパス (東京都目黒区).

④ 中村 一男, 御手洗 修, 飯尾 俊二, 長谷川 真, 徳永 和俊, 荒木 邦明, 関子 秀樹, 花田 和明, 藤澤 彰英, 出射 浩, 永島 芳彦, 川崎 昌二, 中島 寿年, 東島 亜紀, 永田 貴大, QUESTにおけるサニャック干渉型光CTによるTFC電流微細測定, 核融合エネルギー連合講演会, 2016. 07. 15, 九州大学伊都キャンパス (福岡県福岡市).

⑤ 中村 一男, 御手洗 修, 飯尾 俊二, 長谷川 真, 徳永 和俊, 荒木 邦明, 関子 秀樹, 花田 和明, 藤澤 彰英, 出射 浩, 永島 芳彦, 川崎 昌二, 中島 寿年, 東島 亜紀, 永田 貴大, QUESTにおけるサニャック干渉型光CT測定によるトロイダル磁場コイル電流微細測定, プラズマ・核融合学会, 2016. 11. 30, 東北大学青葉山キャンパス (宮城県仙台市).

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中村 一男 (NAKAMURA, Kazuo)
九州大学応用力学研究所・教授
研究者番号: 30117189

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

御手洗 修 (MITARAI, Osamu)
東海大学熊本教養教育センター・教授
研究者番号: 00181925

飯尾 俊二 (IIO, Shunji)
東京工業大学原子炉工学研究所・教授
研究者番号: 90272723

(4) 研究協力者

藤田 広樹 (FUJITA, Hiroki)
九州大学大学院総合理工学府・修士課程