

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20740320

研究課題名(和文) 2次元イメージ撮像型X線偏光検出器によるLHDプラズマの測定

研究課題名(英文) The measurement of LHD plasmas using X-ray imaging polarimeter

研究代表者：

櫻井 郁也 (SAKURAI IKUYA)

名古屋大学・工学研究科・特任准教授

研究者番号：10397482

研究成果の概要(和文)：我々は、核融合科学研究所の大型ヘリカル装置(LHD)で行われている高温プラズマ燃焼実験の偏光測定を行うための2次元イメージ撮像型偏光検出器の開発を行った。X線偏光計は、偏光X線のガス中での光電子放出異方性を利用したもので、ガス中に広がった光電子の飛跡情報を得ることができるガス電子増幅(GEM)フォイルを利用している。2次元平面内の飛跡情報を保持したままガス増幅された電子は、その下に設置されたCMOSセンサーと呼ばれるピクセル検出器によって検出される。本研究で用いたCMOSセンサーは、検出面積 $2.5 \times 2.5 \text{cm}^2$ 、検出器表面は表面のCdTeレイヤーを取り除く改造を行いガス増幅された電子を直接読みだすピクセル型電荷読み出し検出器として使用した。我々は、偏光計としての予備実験を行い6.4keVのFe K α X線から偏光を示す光電子の放出異方性を検出したが、LHDに取り付けてのプラズマ測定実験の直前にCMOS検出器が放電によって故障し、LHDプラズマの偏光測定は行う事ができなかった。

研究成果の概要(英文)：We developed an X-ray imaging polarimeter to measure the X-ray polarization from high temperature plasmas on the Large Helical Device (LHD). The X-ray polarimeter is based on the photoelectric effect in gas to detect X-ray polarization. In order to trace a photoelectron track in the gas, we have to measure the electron distribution which is produced by a photoelectron ionizing the gas. Therefore, we make use of the Gas Electron Multiplier (GEM), which the number of electron is multiplied without losing the information of electron distribution. And multiplied electron are detected by the underneath CMOS sensor without a CdTe layer. It is a fine pixelized electron reader with the usable area of $2.5 \times 2.5 \text{cm}^2$. We detected the X-ray polarization from the Fe K α , which energy was 6.4keV. But CMOS sensor breaks down for an electric discharge before measure the LHD plasmas. So, we could not carry out the measurements of LHD plasmas using X-ray polarimeter.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学、原子・分子・量子エレクトロニクス・プラズマ

キーワード：プラズマ

1. 研究開始当初の背景

(1) 宇宙に存在する X 線天体の観測から検出される偏光 X 線の観測は、宇宙空間での粒子加速やその周辺の磁場の状態、中性子表面の強磁場測定や放射機構、ブラックホールの時空構造等においてこれまでの宇宙観測だけでは得られなかった情報を我々に与えてくれる観測手法であり宇宙物理の新分野を切り開く道具になりうると期待されている。しかし、これまで X 線領域での偏光測定は様々な技術的問題から検出感度などの問題が解決できず、宇宙での X 線偏光観測の成功は 1970 年代に行われた極めて明るい数例の天体でしか実現していない。しかし、近年の技術的進歩から偏光観測の重要性と可能性が再認識され X 線偏光計の基礎開発が世界各地で精力的に行われているのが現状である。(Katagiri et al, SPIE, 2006 等)

(2) 核融合の実現を目指す磁場閉じ込めプラズマにおける偏光測定は、プラズマ領域における原子、分子の電離、再結合、解離等の空間的な流れなど、プラズマの密度、温度、磁場分布などプラズマ研究を行うためには不可欠な情報を与えてくれる。特にプラズマの長時間放電の研究ではプラズマの立ち上がりとその崩壊過程でのプラズマ内部の磁場、それに伴う原子、分子の挙動は将来の核融合実現に向けた研究で大変重要な意味を持つ。これまでに行われてきた核融合科学研究所の大型ヘリカル装置 (LHD : Large Helical Device) でのプラズマの偏光測定では LHD 赤道面に視野を持つ偏光観測装置を使用しその一方向視野内で得られたプラズマ分光データから水素分子のゼーマン・パターンの分離計測を行い、プラズマ燃焼時の磁場パラメータと組み合わせることでバルマー線の発光位置、原子温度等の物理情報を得ることに成功している (Iwamae A et al, Phys.Plasmas 12, 2005)。このように LHD でも偏光測定が注目され実行され始めているが、これまでに LHD で行われてきた偏光の検出は、水素やヘリウムのような低いエネルギー領域の発光現象を利用しているため偏光情報の得られる領域はプラズマ温度の低いプラズマ周辺部分に限定され、得られる情報も視野方向に積分された一次元のスペクトル情報であった。そのため、プラズマ中心付近の偏光情報を直接的に観測できる X 線偏光計の開発が期待されている。

2. 研究の目的

将来的な目標は、本検出器を X 線天文衛星に搭載し、宇宙 X 線天体の偏光観測を行える検出器へと進化させてゆく事であるが、本研究では、以下の 2 つを目的として設定した。

(1) 高温プラズマから照射される X 線は、プラズマ閉じ込めに伴う磁場方向に依存した偏光情報を保持しているはずである。核融合を目指した磁場閉じ込めプラズマの実験において、プラズマ燃焼時とプラズマ崩壊過程で閉じ込め磁場の振る舞い、物理情報は核融合を目指すプラズマ実験において重要な情報を我々にもたらす事が期待される。そこで、高温プラズマから照射される X 線を、その入射位置情報を保持したまま電子の増幅を行い、その X 線のエネルギーと偏光情報を測定できる実用レベルの 2 次元イメージ撮像型偏光検出器の開発を行う。

(2) 製作した 2 次元イメージ撮像型偏光検出器を、核融合科学研究所の大型ヘリカル装置 (LHD) に取り付け、核融合実験で発生する高温プラズマの発生から消失までの X 線輝度分布と高温プラズマ内の偏光情報を測定することで、高温プラズマの磁場情報やプラズマパラメータの測定を行う。

3. 研究の方法

現在、一般に研究が進められている偏光計は、トムソン (コンプトン) 散乱の偏光に対する異方性を用いたものと光電子放出の異方性を用いる物の 2 つに大きく分けられる。本研究では、偏光の検出に光子検出そのものに内在する異方性を利用する光電効果を利用するガス電子増幅フォイルとピクセル検出器を使用した。

(1) ガス電子増幅フォイル (GEM フォイル)
ガス増幅には、欧州合同素粒子原子核機構 (CERN) で 1998 年に開発されたガス電子増幅 (GEM) フォイルを用いる。GEM フォイルは、ポリイミドシート (厚さ $\sim 50\mu\text{m}$) の両面に銅を薄く (厚さ $\sim 5\mu\text{m}$) を蒸着し、微細な穴を無数に開けた物である。フォイル上下に電位差を与えると微細な穴付近で大きな電場勾配を与える事ができ、その状態でガス中に設置するとその穴を通過する電子を増幅する性質を持つ。GEM フォイルは、ガス中の 2 次元平面内に広がった電子の軌跡情報を保持したまま、その 1 次電子雲の増幅を実行できる。このような 2 次元イメージを取得できる電子増幅系で電子の飛跡を精度よく検出するためには十分に細かな穴径と穴間隔を持つ事が要求される。我々は、高性能な GEM フォイルを製作するべく様々な開発を行い、CERN と異なる独自の方法で穴径 $30\mu\text{m}$ 、穴間隔 $50\mu\text{m}$ という高性能な GEM フォイルの製作に成功した。本研究では、我々の開発した GEM フォイルをガス増幅器として使用した (写真 1)。我々は、印可電圧と GEM フォイルのガス増幅能力の試験を行い性能の確認を行った。

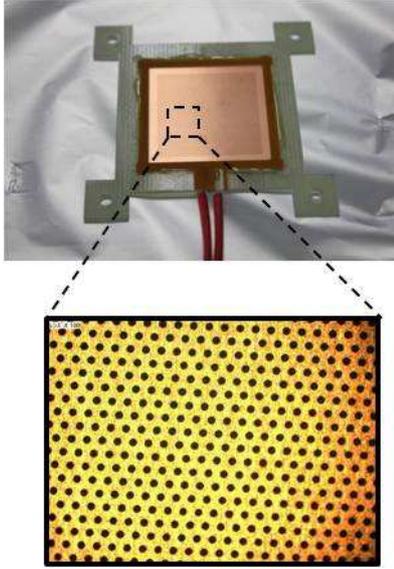


写真1. 試験に使用した GEM フォイル、増幅領域は、中央部分の $2.5 \times 2.5 \text{ cm}^2$ (上写真) と表面の拡大写真 (下写真)

(2) ピクセル検出器 (CMOS 検出器)

飛跡検出に使用するピクセル検出器には、CMOS 技術を用いた光センサー、CMOS イメージセンサーを利用する。CMOS イメージセンサーは、数ミクロン角のピクセルを多数並べた CCD に似たイメージセンサーで高い放射線耐性と早い読み出し速度を有する検出器である。CMOS イメージセンサーは、Rad-Icon 社製、ピクセルサイズ $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ /ピクセルが 254×253 ピクセル並んでいる。検出器の有効面積 $2.5 \times 2.5 \text{ cm}^2$ を使用した。今回の飛跡読み取りに使用した CMOS イメージセンサーは、表面の CdTe レイヤーを取り除く改造を行いガス増幅された電子を直接読み出すピクセル型電荷読み出し検出器として使用した (写真2)。また、ピクセル検出器の表面拡大写真を示す (写真3)。

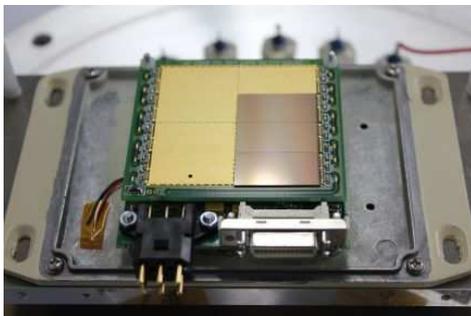


写真2. ピクセル型電荷読み出し検出器 (CMOS 検出器)。電荷読み出し様に改造しているため使用可能検出面は、右下の3枚分。本試験では、中央部の2枚分 $2.5 \times 2.5 \text{ cm}^2$

の領域を検出器として使用した。

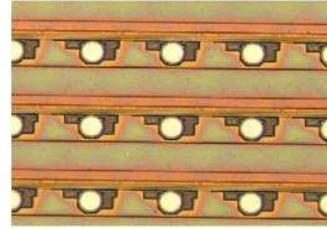


写真3. 使用した CMOS 検出器表面拡大写真。電荷読み出しのための電極が、 $100 \mu\text{m}$ 間隔で並んでいる。

(4) 偏光測定用ガスチェンバ

偏光測定時に組み上げた検出器を収納し、X線を吸収するためのガスを満たすためのガスチェンバの製作を行った。GEMによる電子増幅はガスの圧力、揺らぎにより影響を受けるためガスチェンバは、フロー式ではなく封入できるようにガス封入口にステンレス製のバルブをつけて製作した。ガスチェンバのLHD側蓋は、LHDへ取り付けが出来るようにICF152のフランジを取り付け、内側にLHDの高真空を守るためにICF70フランジに0.5mm厚のベリリウム板を溶接した物を取り付けた。また、ベリリウム板はLHDプラズマから照射される可視光、赤外線等低エネルギーバックグラウンドが検出器に入射しないためのフィルターの役目も果たしている。ベリリウム板手前にはピンホール (穴径1mmと0.5mmを用意) を設置し、プラズマと検出器の距離を調節することでピンホールカメラの原理でプラズマイメージを取得できるように設計した。検出器を設置する蓋には、電圧印加用に真空用のSUHNER社製SHVフィールドスルーを5箇所取り付け、CMOS検出器の信号出力と電源入力用に真空用Dsubピンを2箇所取り付けている (写真4)。チェンバ内部への測定用ガスは、ガスチェンバ内部を一度真空状態にしてから使用ガスを封入する。



写真4. 偏光測定用ガスチェンバ
手前部分が検出器設置用蓋。内部に偏光検出器を設置している。写真奥側が、LHD取り付け部分ICF152、写真ではX線入射試験用にICF70の変換フランジが取り付けられている。真空計は、チェンバの内部の真空度とガス封入時のガス圧のチェックのために取り付け

ている。

(3) 偏光検出器のセットアップ

GEM フォイルと CMOS 検出器を組み合わせて X 線偏光検出器の製作を行った。検出器の構成は、X 線入射面から、 $12\mu\text{m}$ 厚のアルミ箔を用いたドリフトプレーン、電子増幅領域として 2 層の GEM フォイル (GEM1、GEM2)、最後に CMOS 検出器を配置している (図 1)。ドリフトプレーンと GEM 1 の間の 2mm の領域が、X 線が光電吸収されるターゲット領域。

GEM 1 と GEM 2 が、高電圧が印加されている電子増幅領域。GEM 1 と GEM 2 の間が、電荷が転送されるトランスファー領域、GEM 2 と CMOS 検出器の間が電荷収集領域である。それぞれの領域間の調整、GEM フォイルの保持には高絶縁性を有するガラスエポキシ樹脂積層板 G10 を使用している (写真 5)。

偏光検出器をガスチェンバの中に設置し、ガスを封入する。封入したガスは、Ar (70%) + CO₂ (30%)、室温でほぼ 1 気圧となるように調整して封じ切った。

電圧印加は、図 1 に示す抵抗チェーンを製作し、印加電圧の入力 V_{chain} に 3.0kV をかけて試験を行った。この時の電場の強さは、それぞれ $E_d=2.3\text{kV/cm}$ 、 $E_g=3.5\text{kV/cm}$ 、 $E_c=1.1\text{kV/cm}$ 、GEM1、GEM2 の両面にかかる電位差 $\Delta V_g=693\text{V}$ である。

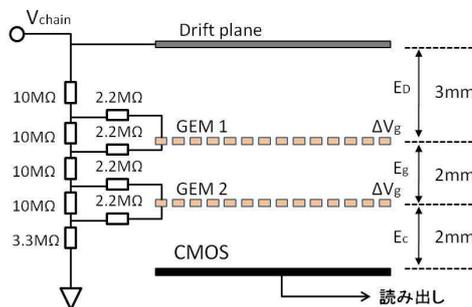


図 1. 偏光検出器セットアップ模式図

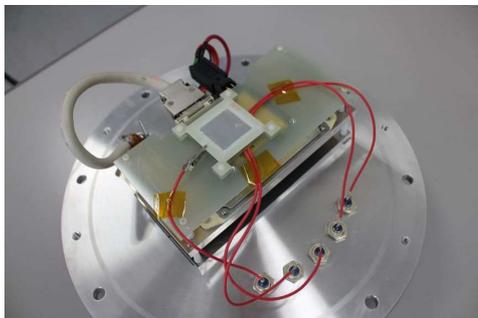


写真 5. チェンバー内の偏光検出器セットアップ写真。上部に見えるアルミ箔の板がドリフトプレーン。検出器本体は、偏光測定用ガスチェンバの蓋の上に設置している。

4. 研究成果

核融合科学研究所 LHD に偏光検出器を取り付けて高温プラズマからの偏光 X 線の測定は、LHD へ偏光検出器の取り付け前に GEM フォイルの放電事故により CMOS 検出器が故障し実行することができなかった。本報告書では、偏光観測の予備実験として行った CCD 検出器を用いた LHD プラズマ中心の鉄イオンスペクトルの測定の結果と実験室での偏光検出器の光電子放出による電子雲の取得について報告する。

(1) LHD プラズマの鉄イオン分光測定

LHD でのプラズマ燃焼実験は、様々なプラズマ測定の情報から鉄イオンを電離するのに十分な温度を有している事が知られている。また、プラズマ内には周囲のステンレス製真空槽から不純物としてプラズマ内への鉄イオンの流入が予想されているが、その放射強度が偏光測定に足るものかの検証を行うために偏光検出器の製作に先駆け、LHD プラズマ内の鉄イオンからの X 線放射の測定を結晶分光器と CCD 検出器を利用して行った。

図 2 が、予備実験から得られた LHD 高温プラズマの鉄ラインスペクトル (エネルギー範囲: 6.3-6.75keV) である。測定は、プラズマから 13m の位置に quartz (2023) 湾曲結晶 ($15\times 15\text{mm}$)、焦点位置に CCD 検出器を設置した。結晶視野はプラズマ中心部分、可視光や低エネルギー X 線の散乱を防ぐために偏光計の設計と同じく 0.5mm 厚の Be 板を遮光用に設置した。得られた鉄イオンスペクトルは、十分な強度を有していることが確認できたため、偏光計のピンホールサイズ的设计はプラズマの輝度では無くイメージ分解能のみで決定している。

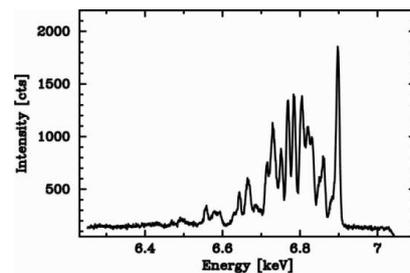


図 2. CCD と結晶分光器による高温プラズマの鉄イオン輝度確認実験で得られたスペクトル。十分な輝度を有することが確認できた。

(2) 偏光検出器での X 線の飛跡取得

偏光検出器での X 線の偏光検出には、入射 X 線がガス中で放出する光電子の異方性の検出が必要になる。我々は、偏光検出器を製作し実験室で X 線入射試験を行った。試験に用いた X 線照射装置は、Oxford Instruments 社製 XTF5011 小型 X 線発生装置 (Max: 50kV、1mA)。

ターゲットは、タングステン。我々は、X線発生装置からのX線を照射し、2次ターゲットの鉄を励起したFe K α X線(6.4keV)を偏光検出器に入射した。入射したX線から飛び出し光電子のエネルギー損失が最大となるのは光電子が止まる直前であるため、得られる電子雲の形から光電子は放出方向を確認できる。また、シミュレーションの結果より、Arガス中でのFe K α X線の光電子の平均飛距離は、約1mmになることが予想されている。

我々は、X線照射実験によりX線の飛跡を取得することができた(図3)。得られた光電子の飛距離、取得イメージは予想の通りで偏光の検出は十分可能であり、作成した検出器は偏光測定用検出器として正常に動作することが確認できた。これにより、LHDへの偏光検出器の取り付けが実現できていれば、LHDプラズマからのX線偏光の測定は十分可能であったと考えている。

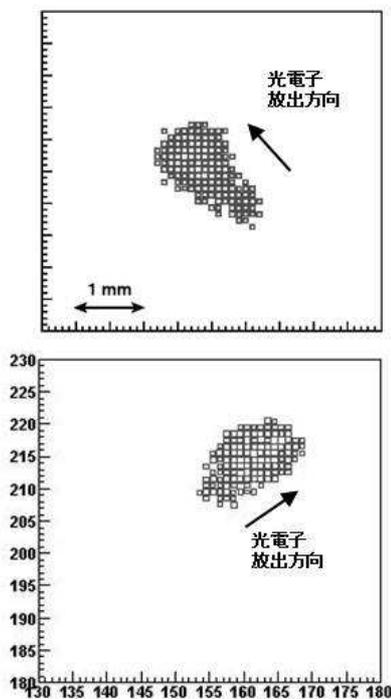


図3. 偏光X線検出器によって得られた電子雲の飛跡。Fe K α X線 6.4keV。矢印の方向へ光電子が放出されている。電子雲の大きさは約1mm。光電子放出方向の異方性を確認する事でX線の偏光方向を検出することができる。

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1件)

S.Morita, M.Goto, M.Kobayashi, S.Muto, M.B.Chowdhuri, D.Chunfeng, Z.Hangyu,

C.Zhengying, K.Fujii, A.Furuzawa, M.Hasuo, A.Iwamae, J.Yinxian, M.Koubiti, I.Sakurai, Y.Tawara, W.Baonian, W.Zhenwei, N.Yamaguchi, Edge and Core Impurity Transport Study with Spectroscopic Instruments in LHD, Plasma Sci. Technol, 査読有, Vol.11, 2009, pp402-408

6. 研究組織

(1) 研究代表者

櫻井 郁也 (SAKURAI IKUYA)

名古屋大学・大学院工学研究科・特任准教授

研究者番号: 10397482

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし