

機関番号：63902  
 研究種目：若手研究（B）  
 研究期間：2008～2010  
 課題番号：20760582  
 研究課題名（和文） 分布関数の局所的な歪み計測のための軟エックス線エネルギー分解イメージング  
 研究課題名（英文） Energy resolved soft X-ray imaging for the measurements of local distortion of distribution function  
 研究代表者  
 鈴木 千尋（SUZUKI CHIHIRO）  
 核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教  
 研究者番号：30321615

研究成果の概要（和文）：大型ヘリカル装置において、2台の軟エックス線 CCD カメラと、カットオフエネルギーの異なる複数のフィルターを用いて、高温プラズマのイメージングとフォトンカウンティングを同時に行うシステムを構築した。長時間放電において、観測エネルギー領域が高くなるほど、イメージのピークがトラス外側にシフトする傾向がみられた。同時にエネルギースペクトルの計測も行い、局所的な分布関数の歪みの計測につながる結果を得た。

研究成果の概要（英文）：In the Large Helical Device, we have constructed a diagnostic system for simultaneous achievement of imaging and photon counting in high temperature plasmas by using dual soft X-ray CCD cameras and several filters with different cutoff energies. In a long pulse discharge, peak of the image tend to be shifted outward as the energy range becomes higher. The energy spectrum has been measured at the same time, which leads to the future measurement of locally distorted distribution function.

#### 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	2,500,000	750,000	3,250,000

研究分野：プラズマ工学

科研費の分科・細目：総合工学・核融合学

キーワード：軟エックス線、イメージング、CCD カメラ、大型ヘリカル装置、エネルギー分布関数、核融合プラズマ

#### 1. 研究開始当初の背景

核融合を指向した磁場閉じ込め高温プラズマの研究において、CCD カメラを用いたプラズマからの軟エックス線放射光強度分布の二次元イメージング計測が近年行われているが、通常電子・イオンのエネルギー分布関数はマクスウェル分布であると仮定して、解析が行われる。しかし、例えば電子サイクロトロン共鳴加熱を行っている場合、共鳴層

付近で局所的に電子エネルギー分布関数に高温成分が生じて、マクスウェル分布からの歪みが存在する可能性が考えられる。このような状況では、高温成分の強度分布はバルク成分のそれとは形状が異なり、エネルギー領域によって軟エックス線強度空間分布の歪みの程度も異なると考えられる。CCD カメラのイメージングモードでは感度が高く、分布関数の歪みをエネルギー領域に対する軟エ

ックス線イメージの歪みとして間接的に計測できる可能性がある。

大型ヘリカル装置「LHD」では、高温プラズマを数分間以上準定常的に生成することが可能であるため、放電時間中にフィルターを連続的に交換して、エネルギー領域の異なる多数のイメージを同一放電中に計測することができるという特徴がある。

## 2. 研究の目的

本研究では、特定のエネルギー領域で軟エックス線の放射光強度分布が変化する可能性を考慮しつつ、CCD カメラと、カットオフエネルギーの異なる複数のフィルターを用いて、軟エックス線放射光強度の二次元分布のエネルギー分解イメージング計測を行うシステムを開発することが第一の目的である。構築した計測システムを LHD 装置に設置し、イオン/電子サイクロトロン共鳴加熱による長時間放電プラズマを、電子エネルギー分布関数の局所的な歪みが生じると予想される条件下で生成し、異なる透過帯域を持つフィルターで軟エックス線の二次元イメージを得る。異なるフィルターで得られた信号の差分を取ることで、特定エネルギー領域の二次元イメージを算出し、エネルギー領域の違いによる軟エックス線放射光強度分布の違い、ないしは非対称性が見いだされれば、物理的な観点から比較検討を行う。不純物線スペクトルの影響を評価するため、別の観測ポートにもう一台の CCD カメラを設置し、フォトンカウンティングモードで動作させ、波高分析法により軟エックス線領域のエネルギースペクトルを同時に計測する。

## 3. 研究の方法

既存の 2 台の CCD カメラを検出器として用い、長時間放電中にフィルターを交換しながら、CCD の読み出しのタイミングと正確に同期して順次イメージを計測するシステムを開発する。使用するフィルターの仕様を、計測対象とするエネルギー領域を考慮して決定し、フィルター交換機構およびタイミングシステム的设计・製作を行う。不純物線スペクトルの影響を評価するために、フォトンカウンティングモードで動作させるもう一台の CCD カメラの感度校正・設置準備も行い、動作試験の後に LHD 装置に設置する。

長時間放電中にフィルターを交換しながら軟エックス線二次元像を計測し、異なるフィルターで得られた信号強度の差分を取ることでエネルギー領域によるイメージの歪みの違いを見だし、サイクロトロン共鳴層との位置関係を調べる。もう一台の CCD カメ

ラで波高分析法により軟エックス線領域のエネルギースペクトルを同時に計測し、線スペクトルの影響を調べる。影響が無視できる範囲内で、異なるフィルターで得られた信号強度の比をとり、連続スペクトルを仮定して電子温度のポロイダル非対称性を含めた二次元分布を導出するとともに非対称性の有無を調べる。また線スペクトルの影響が顕著なエネルギー領域があれば、その領域で上記と同様の解析を行い、分光器などの他の計測器のデータも参照しながら、不純物密度の分布を反映したデータが得られているかどうかを検証する。一方、観測される放射強度をベッセル関数で与えて逆変換を施すためのプログラムおよび平衡計算コードのデータベースの拡充を行う。

これらの実験結果を総合的に解析・検討し、その成果を国内・国際会議や学術論文誌にて発表する。

## 4. 研究成果

研究の初期段階では、計測システムの設計・開発および動作試験を中心に遂行した。既存の CCD カメラ 2 台のうち、1 台をメインのイメージング計測用、もう 1 台をエネルギースペクトルの確認のためのフォトンカウンティング計測用にそれぞれ流用し、後者は標準エックス線源を用いてエネルギー感度校正を行った。CCD カメラ前面に置かれたフィルターが装着可能なディスクを回転させることでフィルターの種類を放電中に順次交換する機構を設計・製作した。計測開始のトリガーと回転さらに放電のシーケンスとの同期を正確にとるためのタイミングシステムを構築した。計測に適したフィルターの仕様として、材質はベリリウム、厚さは 50~1650 ミクロンの範囲に決定した。ディスクの回転操作はすべて遠隔で行う仕様とし、磁場の影響を受けず、かつ精密な位置決め性能を持つ超音波モーターおよび対応ドライバーを使用した遠隔駆動機構を設計した。製作したシステムに設置されたフォトンカウンティング用の CCD カメラとディスクの写真を図 1 に示す。このカメラに対しては、フィルターだけでなくスリットの幅も変えられるように、2 枚のディスクを重ねて設置した。これらの制御を遠隔で行うための、カメラの制御用パーソナルコンピュータをそれぞれ更新し、「LabView」によるプログラムを開発した。接続する真空配管・フランジなどの仕様も決定して各機器の設計・製作を行い、LHD 装置に設置した。システム全体の動作試験を行い、最適な回転速度を決定した。

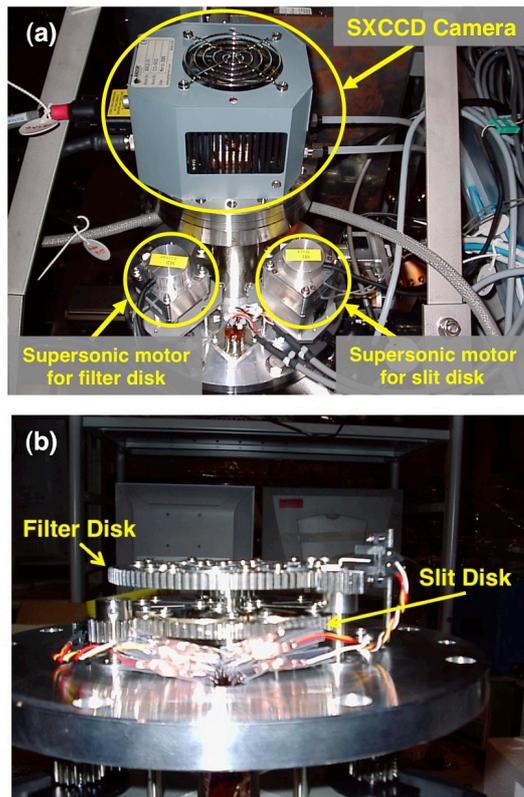


図 1 フォトンカウンティング用軟エックス線 CCD カメラとフィルターディスク。

以上により構築された計測システムを用いて、プラズマ実験期間には、長時間放電中で放電のシーケンスとの同期をとりながら、イメージング用 CCD カメラのフィルターの厚さを徐々に変化させてエネルギー分解イメージング計測を行った。CCD カメラで検出可能な光子エネルギーはおおよそ 0.3-10 keV の範囲である。イオンサイクロトロン共鳴加熱プラズマによる長時間放電において得られた、異なるエネルギー領域の軟エックス線強度分布の例を図 2 に示す。実際には 8 枚のフィルターで測定されたイメージの差分を取ることで、観測エネルギー領域のピーク位置が 1.9 keV から 4.8 keV までの 7 通りの異なるエネルギーのイメージが得られているが、そのうち (a) 1.9 keV 付近、(b) 4.8 keV 付近の 2 つを表示している。明らかに、エネルギー領域が高くなるほど、広がり狭くなりよりプラズマ中心付近に発光が集中する傾向が見られた。

実験と平行して、逆変換用のプログラムに使用するための平衡データベースの拡充を進め、磁気軸や磁気面形状のシフトや変形を定量的に解析することができるようになった。逆変換を上記のデータに施して解析を行ったところ、軟エックス線イメージから得られる形状のピーク位置は、イオンサイクロトロン共鳴加熱プラズマでは、高いエネルギー

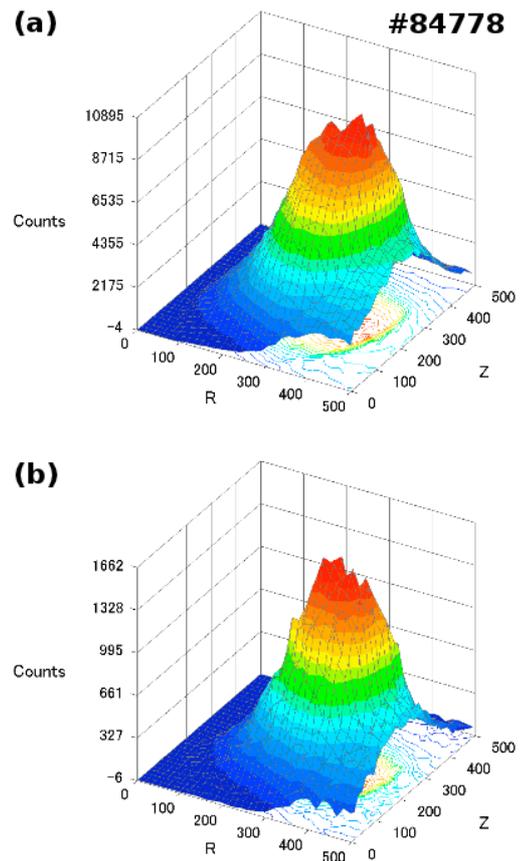


図 2 ICH 長時間放電で得られた異なるエネルギー領域の軟エックス線強度分布。(a) 1.9 keV 付近、(b) 4.8 keV 付近。

領域になるほど、最大数センチ程度トーラス外側にシフトする傾向が系統的にみられた。これはエネルギー領域の違いによって、軟エックス線放射光強度分布の非対称性が存在することを示唆する結果である。分布のポロイダル非対称性とエネルギー領域による差異に留意して解析を進めた。

一方、イメージング計測を行うと同時に、フォトンカウンティング用 CCD カメラを用いて、波高分分析法により軟エックス線領域のエネルギースペクトルの計測を行うことができた。電子サイクロトロン共鳴加熱プラズマによる長時間放電で得られたエネルギースペクトルの例を図 3 に示す。サイクロトロン共鳴層は磁気軸位置に設定している。チタン (4.5 keV)、クロム (5.4 keV)、鉄 (6.4 keV) の各イオンからの K アルファ線のスペクトルが明瞭に観測されていることがわかる。一方、同じ放電のイメージングモードでは、エネルギー領域による軟エックス線イメージ形状のピーク位置のシフトは小さく、イオンサイクロトロン共鳴加熱プラズマの場合とは異なる結果が得られた。

今後の展開としては、今回は実験時間や条件の制約によりデータが得られなかったが、

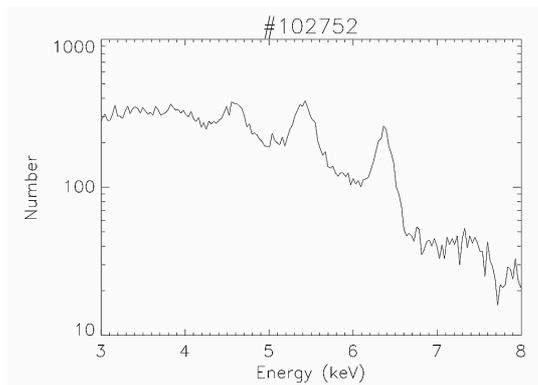


図 3 ECH 長時間放電で得られた軟エックス線エネルギースペクトル。

電子エネルギー分布関数の局所的な歪みがより大きいと予想される実験条件、すなわち共鳴層を磁気軸から外れた位置に設定した場合の長時間放電におけるデータの取得が望まれる。また、モンテカルロ法による電子エネルギーの空間分布の理論計算との比較を行って、電子エネルギー分布関数の局所的な歪みによる放射光強度分布の歪みあるいは電子温度の二次元分布の歪みの計測を実証するとともに、線スペクトルの影響が支配的な条件において、イメージングと組み合わせることで、不純物密度の二次元分布の理解につなげることなどが今後の課題として挙げられる。

#### 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 2 件)

① C. Suzuki, K. Ida, R. Sakamoto and M. Yoshinuma, Shafranov shift measurements by a soft X-ray CCD camera for internal diffusion barrier discharges in the Large Helical Device, Nuclear Fusion, 査読有, Vol. 50, 2010, 064013-1-6

② C. Suzuki, K. Ida, T. Kobuchi and M. Yoshinuma, Energy resolved soft x-ray imaging using a charge coupled device camera for long pulse discharges in the Large Helical Device, Review of Scientific Instruments, 査読有, Vol. 79, 2008, 10E929-1-4

[学会発表] (計 3 件)

① C. Suzuki, K. Ida, M. Yoshinuma, R. Sakamoto and S. Ohdachi, Analysis of magnetic axis shift for high beta and high density LHD plasmas using a soft X-ray CCD camera, 20th International Toki Conference, December 7-10, 2010, Toki

② C. Suzuki, K. Ida, R. Sakamoto and M.

Yoshinuma, Shafranov shift measurements by a soft X-ray CCD camera for internal diffusion barrier discharges in the Large Helical Device, 12th International Workshop on H-mode Physics and Transport Barriers, September 30 - October 2, 2009, Princeton

③ C. Suzuki, K. Ida, and M. Yoshinuma, Extension of the energy-resolved soft X-ray imaging system using two CCD cameras in LHD, 18th International Toki Conference, December 9-12, 2008, Toki

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

鈴木 千尋 (SUZUKI CHIHIRO)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教  
研究者番号：30321615