

機関番号：14301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2008～2010

課題番号：20686061

研究課題名(和文) 荷電交換再結合分光装置の高速・高精度化と粘性の高いプラズマでの径電場微細構造

研究課題名(英文) Development of high time- and spectral-resolved charge exchange recombination spectroscopy and fine structure of radial electric field in high-viscosity plasmas

研究代表者

小林 進二 (KOBAYASHI SHINJI)

京都大学・エネルギー理工学研究所・助教

研究者番号：70346055

研究成果の概要(和文)：荷電交換再結合分光装置の高速・高精度化をめざし、開口数 F2.9 の明るい光学系において $2.82 \times 10^{-3} \text{ nm/pixel}$ の高い波長分解能を持つ分光装置を開発した(波長 529.05nm)。これは回転速度に換算すると一ピクセルあたり 1.6km/s のドップラーシフトに相当する。実機における試験に先立ち、複雑な 3 次元磁場配位プラズマにおいて加熱用 NBI を計測に用いても高い空間分解能 ($\Delta\rho$ が ± 0.05 程度) が得られる視線を設計できた。実機での試験を行ったところ、イオン温度・回転速度の高精度計測が可能となった。

研究成果の概要(英文)：A high spatial- and spectral-resolved charge exchange recombination spectroscopy (CXRS) has been developed aiming at improving the resolution of the CXRS measurement. A monochromator with a numerical aperture of F2.9 has been developed having a linear dispersion of $2.82 \times 10^{-3} \text{ nm/pixel}$. This corresponds to the resolution of the rotation velocity of 1.6 km/s/pixel. The sightlines for CXRS in the three dimensional magnetic configuration have been designed having a good spatial resolution around $\Delta\rho = \pm 0.05$ even when the heating neutral beam is used for diagnostics. The initial result obtained in the Heliotron J NBI plasmas shows the ion temperature and the rotation velocity have been measured with high spatial and spectral (velocity) resolution.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	7,100,000	2,130,000	9,230,000
2009 年度	5,900,000	1,770,000	7,670,000
2010 年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	13,900,000	4,170,000	18,070,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学・プラズマ科学

キーワード：プラズマ計測

1. 研究開始当初の背景

(1) 磁場閉じ込め方式の核融合プラズマにおいて、プラズマ径方向の電場“径電場”が、高閉じ込めモードや内側輸送障壁等の遷移現象の鍵となる $E \times B$ シアフローの駆動力と考えられており、詳細な計測が求められている。

径電場はプラズマ中の径方向の力学的な釣り合いより評価する手法が広く用いられている($E_r = \nabla p + v \times B$, ここで E_r , p , v , B はそれぞれ径電場、プラズマ圧力、回転速度ベクトル及び磁場ベクトル)。従って径電場分布を得るためには、プラズマ圧力(温度×密度)と流体としての回転速度の詳細な時間・空間

分布計測が必要不可欠である。

(2) プラズマの回転のし易さは磁場配位で決まる粘性係数に依存する。3次元の磁場構造を持つヘリカル配位ではポロイダル粘性係数が高く、トカマク配位と比べてポロイダル回転速度が遅くなる事が予想される。

不純物イオンの温度及び回転速度は、中性粒子ビームと完全電離したイオンとの荷電交換再結合反応による励起光のドップラー広がり・ドップラーシフトからそれぞれ評価する手法(CXRS法)が広く用いられている。従って、粘性の高いプラズマで回転速度を高精度で評価するためには、ドップラーシフトを高い分解能で計測できるCXRS分光器の開発が必要となる。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、CXRS計測に特化した分光器を開発する。プラズマ回転速度の測定精度を現有装置より数倍改善するために、従来型の3倍の波長分解能を目指す。これにより回転速度の分解能(誤差)1km/sを達成することを目標とする。同時に高時間分解のため分光器の開口数をF2.9とすることで、高効率の分光器を製作することを目標とする。

(2) 観測対象のプラズマは3次元の複雑な形状のため、加熱用の中性粒子ビームを用いても高い空間分解能が得られる視線を見いだす。目標の空間分解能は $\Delta\rho=\pm 0.05$ (実効小半径で換算すると $\pm 8\text{mm}$)を目指す。

3. 研究の方法

(1) 本研究課題で開発するCXRS用分光器は、(A)プリズムとエシエル型回折格子により分光し、(B)2つの波長(468.57nm, 529.05nm,

表1 CXRS用分光器の仕様

1	焦点距離	200mm (レンズの焦点距離)
2	開口比	・F/2.9 (ただしレンズはF/2.8で回折格子の口径で制限)
3	回折格子	エシエル型 グレーティング: 31.6本/mm ・寸法: 110×220×t30
3	波長選択	回折格子+プリズム分光 ・内蔵プリズムを設定 <波長設定> マイクロメータ方式
4	分散	~0.003nm/pixel at 468.57nm (for HeII) and 529.05nm (for CIV) (ただし Andor 社製 CCD カメラ DV887の場合: ピクセルサイズ 16 μm ピクセル数 512 x 512)

それぞれヘリウム, 炭素のCXRSラインに相当)でおよそ0.003nm/pixel程度の分散を目指す。なお、焦点距離 $f=200\text{mm}/F2.8$ のカメラレンズを採用することで、実効的な開口比F/2.9を達成する。表1にレンズ分光器の設計当初の仕様を記載する。

(2) 実機での計測を鑑み、プラズマを見込む対物光学系の設計を進める。特に対象とするプラズマがヘリカル型配位であるため、磁場構造が3次元となる。トロイダル・ポロイダル方向の回転速度を高精度で計測するためには、視線を磁力線に対して平行および垂直にする必要がある。中性粒子ビームの吸収過程も含めた軌跡を考慮してCXRS発光強度分布を評価することで、最適な観測ポート・視線の設計を行う。

4. 研究成果

(1) 製作したCXRS用分光器は $f=200\text{mm}$ の1対のカメラレンズ、プリズム、エシエル型回折格子(31.6 gr/mm, ブレーズ角71度)、CCDカメラ(Andor社製, 16 $\mu\text{m}^2/\text{pixel}$, 512×512pixels)で構成される(図1参照)。実効的なF値を2.9とし、開口数0.2の光ファイバーを用いた場合に効率よく入射光を分光できるようにした。またCCDカメラは波長領域450nm~750nmにおいて量子効率が0.8以上である。

元素ランプのラインペアより分光器の逆線分散を評価したところ、529.05nmの波長において $2.82\times 10^{-3}\text{ nm/pixel}$ が得られた。これを回転速度に換算すると一ピクセルあたり1.6km/sのドップラーシフトに相当する。なおエシエル分光器に不要次数の波長のクロストークが認められたため、干渉フィルターを追加することで排除した。468.57nmの波長においては適当なラインペアが観測できなかったため、波長校正された単色光を入射光とすることで逆線分散を評価した。その結果 $2.60\times 10^{-3}\text{ nm/pixel}$ (回転速度に換算すると一ピクセルあたり1.7km/s)が得られた。

以上、当初目標の一ピクセルあたりの分解能1km/sをほぼ達成できた[S. Kobayashi, et al.,

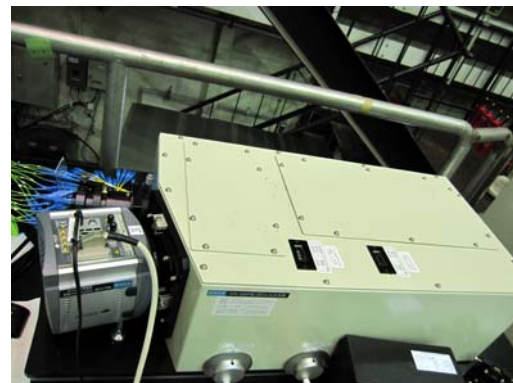


図1 CXRS用に開発したエシエル型分光器

J. Plasma Fusion Res. SERIES, Vol. 9 59-63, (2010)]. 現在、前置モノクロメーターを追加する改造を行っており、上記2波長以外の高分散分光も可能になる予定である。

(2) 観測対象とするヘリオトロン J 装置のプラズマはヘリカル軸配位であるため磁気面形状は3次元であり、トカマクのような2次元対称性はない。このような3次元配位で加熱用の中性粒子ビーム(NBI)を CXRS 計測に用いた場合、視線の方向によっては高い空間分解能が得られない。そこで高い空間分解能を持つトロイダル回転速度計測用の視線を設計した(2ケース)。この成果の一部は研究協力者との共同研究によって得られた[S. Kobayashi, S. Kado, et al, Review of Scientific Instruments, 81, 10D726, (2010)]. 視線設計のコンセプトとして、ヘリオトロン J の磁気軸は装置上部からは四角形、側面からは余弦に似た形状であるので、視線が NBI 通過領域でな

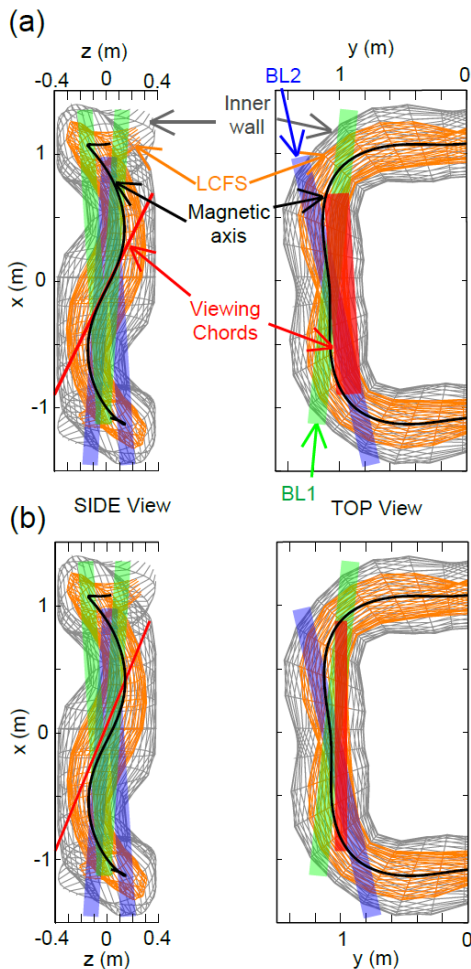


図 2 CXRS 用の観測視線。(a)新設ポートからプラズマ全体を見込む 15 の視線、および(b)既存ポートから $r/a > 0.4$ の領域を見込む 20 視線。

るべく磁気軸に沿うようにすれば空間分解能を高めることができる。後述する数値計算とあわせて視線の鉛直・左右方向の最適な角度を決めた。視線候補の一つは新規に設置した観測ポートからの視線で、中心部で高い空間分解能が得られるようにした(図 2(a)参照)。もう一つは既存のポートからの視線であり、規格化小半径 $\rho > 0.4$ の領域でよい分解能が得られるようにした(図 2(b)参照)。これらの視線はビーム放射分光計測にも用いることができ、NBI を用いたプラズマ診断への展開が期待できる。

視線設計における空間分解能を評価するため、荷電交換再結合(CXR)光強度の空間分布を数値計算で求めた。立体角 $d\omega$ をもつ視線 l における CXR 強度 I_{CXR} は以下の式で表される。

$$I_{\text{CXR}} \propto \int A_{\text{nm}} n_{\text{imp}} n_{\text{beam}} \sigma_{\text{CXR}} |v| d\omega dl, \quad (1)$$

ここで、 A_{nm} , n_{imp} , n_{beam} , σ_{CXR} および v は遷移確率、不純物密度、NBI ビーム密度、CXR 反応断面積およびビームと不純物イオンとの相対速度である。NBI ビーム密度の空間分布はビーム吸収計算コードを用いてビームの減衰を考慮して評価した。

図 3 に新設ポートからの視線の CXR 発光強度分布を示す。なお、不純物密度としてプラズマ中心部でピークした分布(図 3(a))およびホロー分布(図 3(b))を仮定した。

中心部でピークした分布の場合には $\rho = 0$ で空間分解能 $\Delta\rho$ が ± 0.05 以下を達成できた。なお、 $\rho = 0.1$ から 0.4 の範囲では、 $\Delta\rho$ は ± 0.05 より若干悪い。周辺部では CXR 発光強度は 1/100 以

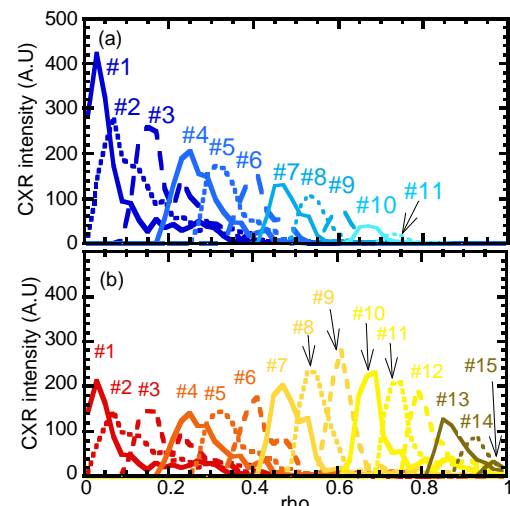


図 3 CXRS 用の観測視線。(a)新設ポートからプラズマ全体を見込む 20 の視線、および(b)既存ポートから $r/a > 0.4$ の領域を見込む 15 視線

下であり、S/N の悪化が予想される。十分な発光を得るためには図 3(b)の様に周辺部にピークした分布が得られる不純物を用いると効果的であることが予想される。実際にはプラズマの輸送を考慮する必要があるが、ヘリウム等の低電離電圧の不純物の追加導入が候補としてあげられる。同様に既存ポートからの視線での空間分解能を評価したところ、 $0.4 < \rho < 1.0$ の範囲において $\Delta\rho$ が ± 0.06 以下であることがわかった。

以上、適切な視線を選択することで、複雑な 3 次元磁場配位において加熱用 NBI を CXRS 計測に用いても $\Delta\rho$ が ± 0.05 程度の空間分解能が得られることがわかり、当初の目標が達成できた。本手法は NBI を用いた他のトロイダル方向の計測視線の設計にも応用でき、広く一般的な磁場配位でも適用できる。一方でポロイダル回転速度用の計測視線についてはさらなる工夫が必要である。

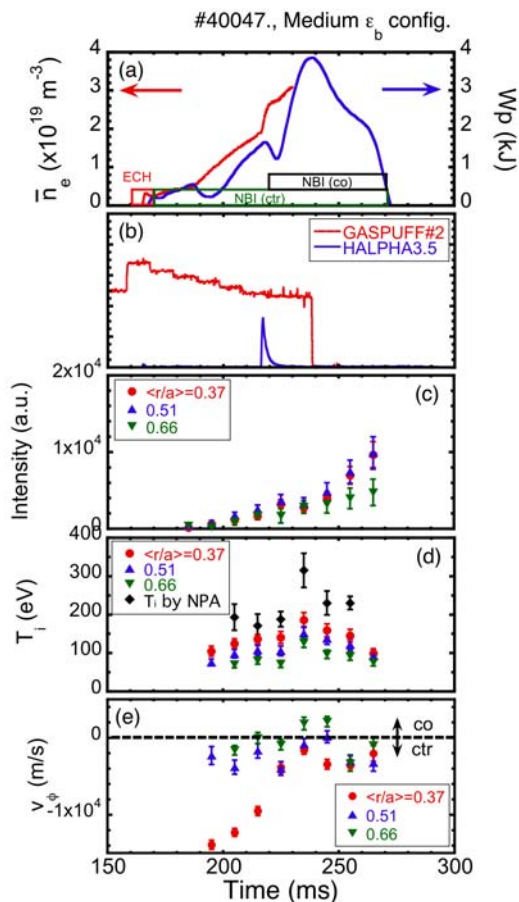


図 4 実機での CXRS 計測初期結果。(a)線平均電子密度及び蓄積エネルギー、(b)ガスパフ指令値及び $H\alpha$ 線放射輝度、(c)CXRS 発光強度、(d)イオン温度、(e)トロイダル回転速度の各時間発展。[H. Y. Lee, S. Kobayashi et al., to be submitted to Plasma and Fusion Research.]

(3) 粘性の高いプラズマでの CXRS 計測の高度化を検証するため、実機（ヘリオトロン J 装置）での試験を行った。今回は観測視線の都合上、別途分光器を用意し計測した。用いた分光器は $f=400\text{mm}$ 、開口数 F2.8 の Czerny-Turner 型分光器である（逆線分散 0.012nm/pixel ）。図 4 に観測結果の例を示す。放電はヘリオトロン J 標準配位で NBI パワーを段階的に上げており、時刻 $t=170\text{ms}$ より逆電流 (Ctr) 方向の NBI (BL1)、 $t=220\text{ms}$ より順電流 (Co) 方向の NBI (BL2) を追加入射している。CXRS の観測視線は図 2 (b) で示す視線を用いた。 $<r/a>=0.37$ の視線は放電初期で Ctr 方向に約 14km/s であるのが、密度・蓄積エネルギーの増加・および BL2 の入射に伴って速度が低下し、 $2\text{--}4\text{km/s}$ 程度となった。 $t=220\text{--}240\text{ms}$ における追加ガスパフに伴う急峻な蓄積エネルギー (W_p) の増加に伴って、イオン温度は 150eV から 200eV 程度までの増加が見られた。中性粒子分析器による中心部のイオン温度と比較すると、時間発展の傾向は似ている。

同放電におけるイオン温度・回転速度の径方向分布を図 5 に示す。時間・空間的に $2\text{--}3\text{km/s}$ 程度の回転速度の変化を観測することができ、回転速度分布の空間構造を詳細に計測できるシステム構築の目処が立った。

今回の計測では時間分解能は 10ms であったが、これは CXRS の発光量および S/N で制限されている。現在、光ファイバーのコア径を 0.2mm から 0.8mm に大きくした対物光学系を設置したため S/N の改善が期待でき、次期実験キャンペーンから、より高速の測定も可能

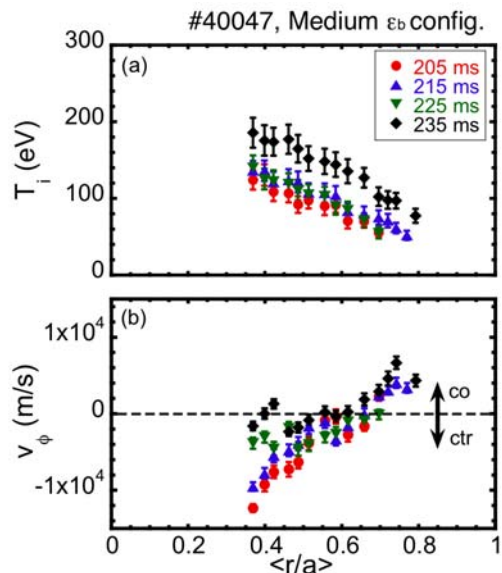


図 5 (a)イオン温度、(b)トロイダル回転速度の空間分布。[H. Y. Lee, S. Kobayashi et al., to be submitted to Plasma and Fusion Research.]

になると予想される。今後、トロイダル回転速度の計測系構築により、トロイダル回転速度との同時計測を試みることで、径電場の微細構造の評価が可能になると予想される。

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 12 件)

- ① S. Kobayashi, K. Nagasaki, S. Yamamoto, 他16名, "Plasma startup using neutral beam injection assisted by 2.45 GHz microwaves in Heliotron J", Nuclear Fusion, **51**, 062002 (2011), 査読有
- ② S. Kobayashi, S. Kado, T. Oishi, 他16名, "Application of beam emission spectroscopy to NBI plasmas of Heliotron J", Review of Scientific Instruments, **81**, 10D726, (2010), 査読有
- ③ S. Kobayashi, S. Ohshima, S. Kado, 他15名, "Development of Highly Spectral-Resolved Charge Exchange Recombination Spectroscopy in Heliotron J", J. Plasma Fusion Res. SERIES, Vol. 9 59-63, (2010), 査読有
- ④ S. Kobayashi, K. Nagaoka, S. Yamamoto, 他 16 名, "Fast-Ion Response to Energetic-Particle-Driven MHD Activity in Heliotron J", Contribution to Plasma Physics, **50**, 539-543, (2010), 査読有

[学会発表] (計 12 件)

- ① S. Kobayashi, K. Nagaoka, T. Mizuuchi, 他 16 名, "NBI experiments in Heliotron J", 37th European Physical Society Conference on Plasma Physics, 2010.6.21-6.25, Dublin, Ireland, P1.1053.
- ② S. Kobayashi, 他 15 名, "Development of Highly Spectral-Resolved Charge Exchange Recombination Spectroscopy in Heliotron J", Asia Plasma and Fusion Association 2009/Asia-Pacific Plasma Theory Conference in 2009, Aomori, Japan, 2009.10.27-30, P28p-02.
- ③ S. Kobayashi, 他 18 名, "Energetic particle transport in NBI plasmas of Heliotron J", 17th International Stellarator/Heliotron Workshop, 2009.10.12-16, Princeton, New Jersey (USA), I31(招待講演).
- ④ S. Kobayashi, 他 19 名, "Configuration effect on energetic particle and energy confinement in NBI plasmas of Heliotron J", 18th International Toki Conference, December 9-12, 2008, Toki, Japan, I-16(招待講演).
- ⑤ S. Kobayashi, 他 19 名, "Effect of Bumpy

Magnetic Field on Energy Confinement in NBI Plasmas of Heliotron J", 22nd IAEA Fusion Energy Conference, 2008.Oct.12-18, Geneva, Switzerland, EX/P5-13.

[その他]

ホームページ等

<http://www.iae.kyoto-u.ac.jp/kbutsu/kbutsu.html#AR>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小林 進二 (KOBAYASHI SHINJI)

京都大学・エネルギー理工学研究所・助教

研究者番号：70346055