

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 8 月 8 日現在

機関番号：63902

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26630476

研究課題名(和文) トーラスプラズマのスクレイブ・オフ層を活用した新たな周辺プラズマ制御法の開発

研究課題名(英文) Development of a new method for edge plasma control using scrape-off-layer in a toroidal plasma

研究代表者

東井 和夫 (Toi, Kazuo)

核融合科学研究所・その他部局等・名誉教授

研究者番号：20093057

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：トロイダル方向に分割した複数のダイバータ板に位相制御したバイアス電圧を印加する新たなダイバータバイアス法を小型トカマクプラズマに適用し、コアプラズマを取り囲むスクレイブ・オフ層(SOL)プラズマの制御を試みた。このバイアス法で駆動したSOL電流群のフーリエ分析は、指定したトロイダルモード数の共鳴磁場摂動(RMP)が生成できることを示した。正バイアスによるSOL電流駆動は、高い電流値と長い電流路長が得られるのでRMP生成に特に有効である。本バイアス法はダイバータ板への粒子束分布の径方向への拡張とピーク値低減ももたらした。本バイアス法は、ダイバータの熱負荷の新たな制御法として有望である。

研究成果の概要(英文)： Electric biasing of toroidally segmented divertor plates with adjusted phasing was applied to a small tokamak for active control of plasma in the scrape-off-layer(SOL) surrounding a confined core-plasma. Fourier decomposition of the observed SOL currents driven by the biasing indicates generation of resonant magnetic perturbations with specified toroidal mode number. Positive biasing is most effective for generation of RMPs because high SOL currents and the long length of the current paths are realized. This biasing also showed the radial expansion of particle flux to the divertor, reducing the local peak value. In conclusion, this new biasing method has high potentiality for effective control of divertor heat load.

研究分野：核融合プラズマ工学

キーワード：ダイバータ スクレイブ・オフ層(SOL) 周辺プラズマ 電氣的バイアス法 SOL電流 共鳴ヘリカル磁場摂動

1. 研究開始当初の背景

国際熱核融合実験炉 ITER では、重水素・三重水素 (DT) 核融合反応プラズマ生成とその安定維持をめざしており、良好な閉じ込め特性とダイバータ熱負荷の適正な制御の両立が不可欠である。このため閉じた磁気面で囲まれた閉じ込め領域の周辺部に急峻な圧力勾配を有する輸送障壁 (あるいは”ペDESTAL”) を有する改善閉じ込め形態である H モードが標準運転の候補となっている。ただ、H モードではコアプラズマ周辺部の急峻な圧力勾配と大きなトロイダル電流密度に起因した電磁流体的安定性が急激に成長し周辺局在化モード (edge localized mode: ELM) を誘発する。この ELM 発生による間歇的な大きな熱負荷が定常的なダイバータ熱負荷に加算される。しかも、ITER プラズマでは ELM 影響が特に厳しくなることが予想され、ダイバータ板の寿命を大きく低下させることが危惧されている。このため多くのトカマクで共鳴摂動磁場(RMP)による ELM 制御が試みられ、再現性良く有望な結果が得られている。このような成果を受けて ITER の真空容器内に RMP コイルが設置され、これによる ITER プラズマにおける ELM の抑制制御が計画されている。ただ、ITER 以後の核融合原型炉 (DEMO) で真空容器内への RMP コイルの設置は不可能である。これまで真空容器外に設置した RMP コイルによる ELM 制御も行われているが、容器内設置コイルによる効果に匹敵する結果は得られていない。今後の性能向上が期待されるものの、これまでの ELM 制御法に加えダイバータ熱負荷制御法を補完する新たな ELM やダイバータ熱負荷の制御法の開発の意義は大きい。

2. 研究の目的

本研究は、通常のコイルを使用せず RMP を発生させる手法を開発し、ELM 制御への適応性を明らかにするとともに、ダイバータ熱負荷に対する影響も明らかにすることを目

的としている。すなわち、トラスプラズマの閉じた磁気面を囲むように存在し、ダイバータ板と鎖交する磁力線群で構成されるスクレイプ・オフ層(SOL)のプラズマに分割した複数のダイバータ板の電氣的バイアス法により SOL 中に複数の電流フィラメント群を生成し、RMP を発生させる新たな手法である。小型トカマクプラズマを利用して、この手法による SOL 電流駆動の有効性と大型装置への拡張性、さらにはダイバータ熱負荷制御への可能性を実験的に検証することを目指した。

3. 研究の方法

まず静電プローブ理論に基づく簡単な理論モデルにより分割した各ダイバータ板の電氣的バイアスにより駆動できる SOL 電流値およびその電流路の長さを評価した。分割したダイバータ板に正、負あるいは浮動電位を組み合わせた単純な位相制御のバイアス電圧印加により指定したトロイダルモード数 n のフーリエ成分を有する共鳴磁場摂動を生成できることを示した。このような予備検討をもとに、九州大学応用力学研究所の小型トカマク QUEST において本提案のダイバータバイアス法の有効性の実験的検証を行った。

4. 研究成果

(1)トロイダル分割型ダイバータ・バイアスによる SOL 電流駆動モデル

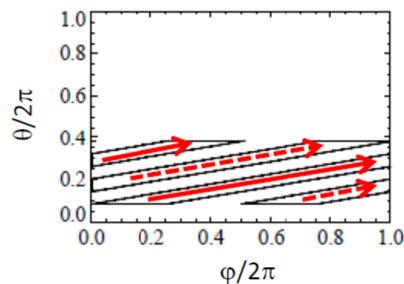
バイアス板に十分大きな負電圧を印加した場合、バイアス板に流入する電流は、イオン飽和電流密度 j_{is} で規定される。一方、正にバイアスした場合に駆動される電流 (電位飽和電流密度) j_{es} は、イオン飽和電流の $\sqrt{m_i/m_e}$ 倍と大きくなる (m_i : イオン質量、 m_e : 電子質量)。ただ、磁力線がバイアス板とかなり小さな角度で入射する場合、 j_{es}/j_{is} はかなり小さくなる [1, 2]。後述する QUEST トカマクの実験では $j_{es}/j_{is} \sim 3$ が観測された。SOL 電流

を維持するためには、SOL 中の磁力線に沿っての有限抵抗による電圧降下とシース及びプレシースにおける電圧降下の和のバイアス電圧が必要である。SOL 電流群により必要な RMP を発生させるためには SOL 電流路の長さも重要な因子である。バイアスダイバータ板と SOL 中の磁力線でつながる接地電位のダイバータ板間の磁力線の接続長 L_c は $L_c \approx 2\pi R q_{95}$ 程度である。ここで R はプラズマ大半径である。また、 q_{95} は最外殻磁気面 (LCFS) のすぐ内側の安全係数であり LCFS のすぐ外側の SOL の等価的な安全係数 q_{SOL} とほぼ等しい[3]。SOL 電流路長が L_c より十分長ければ、対向する接地ダイバータ板にバイアスダイバータ板で駆動された電流と同程度の電流が流入するはずである。SOL 電流路長は、大面積静電プローブモデル[4, 5]で近似的に評価できる。すなわち、無衝突 SOL プラズマの磁力線方向の粒子束 Γ_{\parallel} と磁力線を横切る粒子束 Γ_{\perp} のバランス ($A_{\parallel}\Gamma_{\parallel} + A_{\perp}\Gamma_{\perp} = 0$) から SOL 電流路長を評価できる。また、SOL 電流の径方向の拡がりを d 、磁力線の垂直方向に投影したバイアス板の長さを h とするとそれぞれの面積は $A_{\parallel} = dh$ 、 $A_{\perp} = 2(d+h)L_{\parallel f}$ であり、電流路長は $L_{\parallel f} = d^2 h v_{\parallel} / [8(d+h)D_{\perp}]$ と表される。ここで、 v_{\parallel} 及び D_{\perp} はそれぞれ粒子の熱速度及び粒子拡散係数である。SOL では電子温度とイオン温度がほぼ同じなので電子電流に対する電流路長 $L_{\parallel ef}$ がイオン電流に対するそれに比べ十分長い。したがって、正のバイアス電圧印加で電子をバイアス板に引き込むときバイアス板から SOL 中に長い電流路が形成され、RMP 生成に有効となる。実際の SOL プラズマは衝突性であるので電子の電流路長は $L_{\parallel ecol} = \sqrt{\lambda_{ei} L_{\parallel ef}}$ となる。ここで λ_{ei} は電子の平均自由行程である。

たとえば、SOL 電流の径方向の拡がりを $d=0.03\text{m}$ 、粒子拡散係数を $D_{\perp}=0.3\text{ m}^2/\text{s}$ と仮定する。また、ITER サイズのトカマクを考慮 $R=6.2\text{m}$ 、トロイダル磁場 $B_T=5\text{T}$ とする。ダイ

バータ板をトロイダル方向に 4 分割し、磁力線のバイアス板への入射角度 θ_{in} を 2.5° とすると $h=(2\pi R/4)\sin\theta_{in}\sim 0.42\text{m}$ となる。また、 $D_{\perp}=0.3\text{ m}^2/\text{s}$ と仮定した。熱接触ダイバータプラズマのパラメータ ($T_e = 100\text{eV}$, $n_e = 5 \times 10^{19}\text{m}^{-3}$) を想定し、SOL の衝突性を考慮すると $L_{\parallel ecol}=51\text{ m}$ が得られる。 $q_{SOL} = 3.5$ とすると SOL での磁力線接続長は $L_c=136\text{m}$ となる。このようなダイバータプラズマでは正バイアスで駆動した電子電流路は磁力線接続長の 40% 程度となる。したがって、正バイアスダイバータ板から発した電子による電流路は、対応した接地ダイバータまでには到達しない。上で仮定したパラメータに対し、各バイアス板で駆動される SOL 電子電流は 11 kA となる。図 1 に、4 分割のダイバータ板への印加電圧を正、浮動 (電源とバイアス板を電気

(a)



(b)

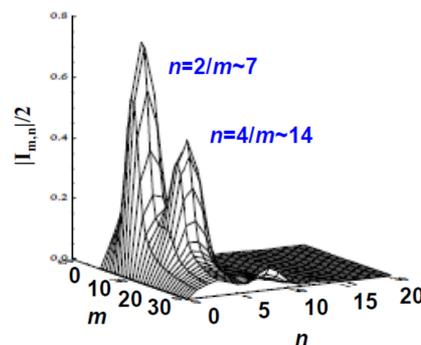


図 1 (a) 4 枚のバイアスダイバータ板を正電位、浮動電位、正電位及び浮動電位と設定した場合のモデル計算における $\phi - \theta$ 平面上の SOL 電流パターン。(b) 生成される径方向磁場摂動のフーリアスペクトル。

的に切り離す)、正及び浮動とした場合の SOL 電流フィラメントパターンを SOL のトロイダル角 φ とポロイダル角 θ で形成される平面に示す。ここで、正バイアス電圧が印加されたダイバータ板から発せられた電流路が途中でとぎれ、その後、径方向に電流が流れ接地された真空容器に戻り、RMP 生成に寄与しないと仮定する。図 1(a)の SOL 電流路で生成される径方向磁場のフーリエスペクトルは図 1(b)に示されるように $n=2/m\sim 7$ とその 2 倍高調波の $n=4/m\sim 17$ が支配的となる。このフーリエ成分は LCFS すぐ内側の $q_{95}=3.5$ と共鳴する。SOL 電流とペDESTALの肩(高温端)との距離を、 $\Delta r/\langle a \rangle \sim 0.05$ ($\Delta r \sim 0.13$ m)と仮定すると RMP 強度 b_{mn} とトロイダル磁場 B_t との比は $b_{mn}/B_t \sim 6 \times 10^{-4}$ となり、ELM 制御が期待できる値[6]に達する。

(2) 球状トカマク QUEST でのトロイダル分割型ダイバータバイアス実験

本研究で提案した新たなダイバータバイアス法の有効性を実証するため、九州大学の球状トカマク QUEST に 4 枚のバイアス板を取り付けた。同トカマクではプラズマ生成とプラズマ電流の立ち上げが 8.4 GHz、30 kW の高周波で行われている。このため、生成されるプラズマの線平均密度 $\langle n_e \rangle$ は $1 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ とかなり低い。これを考慮し、バイアスダイバータ板でのプラズマパラメータを $T_e \sim 20 \text{ eV}$, $n_e \sim 1 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ と推定し、 $R \sim 0.8 \text{ m}$, $q_{\text{SOL}} \sim 10$ 及び $B_t = 0.3 \text{ T}$ の実験データ、さらに $D_{\perp} = 2 \text{ m}^2/\text{s}$ の Bohm 拡散を仮定した。これらのパラメータを用いると、 $L_c \sim 50 \text{ m}$ に対し $L_{\parallel \text{ecol}} \sim 19 \text{ m}$ となる。また、各バイアス板で駆動されるイオン飽和電流は $0.1 \sim 0.2 \text{ A}$ 程度と推定される。

現状の QUEST で生成しやすい上下対称の内側 X 点ダイバータ配位でプラズマ電流が 11 kA 、 $\langle n_e \rangle \sim 1 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ の低密度プラズマにおいてダイバータバイアス法による SOL 電流駆動実験を行った。トロイダル方向に 180° 離れた TSU302 と TSU306 の両バイアス板に共

に正あるいは負のバイアス電圧を印加した。他の 2 枚のバイアス板 TSU304 及び TSU308 は電源から切り離し、浮動電位とした。バイアス電圧のピーク値は $\pm 90 \text{ V}$ で周波数 2 kHz の三角波としたが $\pm 85 \text{ V}$ で飽和している。この波形では正電圧のピーク値から負のピーク値まで線形に掃引されるのでバイアス板のシングル静電プローブ特性も得られるという利点がある。図 2(a)はバイアス板への印加電圧 V_{bias} とバイアス板 TSU302 と TSU306 を通過する電流 I_{bias} を示す。バイアス板から流出する方向の電流を正として表

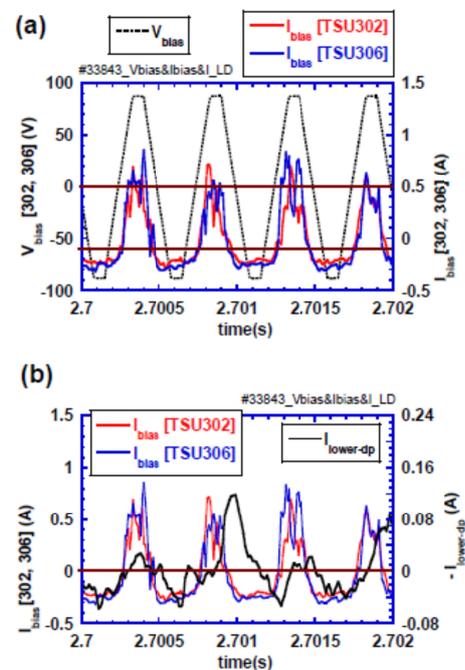


図 2 (a) QUEST トカマクにおけるダイバータバイアス実験で観測されたバイアス板(TSU302 及び 306)を通過する電流 (I_{bias}) と印加したバイアス電圧 (V_{bias}), (b) 2 枚のダイバータバイアス駆動電流 (I_{bias}) 及び接地された下側全周ダイバータ板を通過する電流 ($I_{\text{lower-dp}}$)

している。また、図 2(b)に、接地された下側全周ダイバータ板を通過する電流波形を示す。もし、バイアス板で駆動された SOL 電流

の径路長が下側ダイバータ板まで達しておれば、2枚のバイアス板で駆動された電流の総和がこのダイバータ板を通過することになる。図2(a)からわかるように、正バイアス時にそれぞれのバイアス板から0.6-0.7Aが流れ出している。下側ダイバータ板には0.04-0.08Aの電流($I_{lower-dp}$)が流入している(同図では $I_{lower-dp}$ の符号を反転して示してある)。すなわち、2枚の上側バイアスダイバータ板の総電流のうち約5%のみが到達している。今回の実験条件では、上で述べたように電流路長は上下ダイバータ板間の磁力線接続長の40%程度と予想され、上側に設置した分割ダイバータ板のダイバータバイアスにより駆動された電流のごく一部しか下側ダイバータ板に到達していないと考えられる。ダイバータバイアスで駆動された大部分の電流は、下側ダイバータ板を通過せず真空容器を通してパイプライン電源に戻っていると考えられる。また、図2(b)の下側ダイバータ板電流は、バイアス板を通過する駆動電流に対し0.1ms-0.2msの立ち上がり時間を要している。これは下側ダイバータ板まで達したSOL電流路の抵抗とインダクタンスで定まる時定数に近い。今回使用したバイアスダイバータ板の印加電圧に対する駆動電流の依存性から、負のバイアス電圧に対し電流は明確な飽和特性を示しており、イオン飽和電流に達している(図3)。一方、正のバイアス電圧に対し電流の飽和傾向は見えるものの明確な飽和に至っていない。ただ、予想される電子飽和電流はイオン飽和電流の3~5倍程度にとどまっていると予想される。また、通常のシングル静電プローブ特性と異なり、浮遊電位は+10Vから+40Vと正の値を取っていることにも注目すべきである。この要因は、平板形状のバイアス板に磁力線が相当小さな角度($\sim 3^\circ$)で入射するためと考えられる。この現象はすでにトカマクや線形プラズマ発生装置の実験で観測されている[1, 2]。

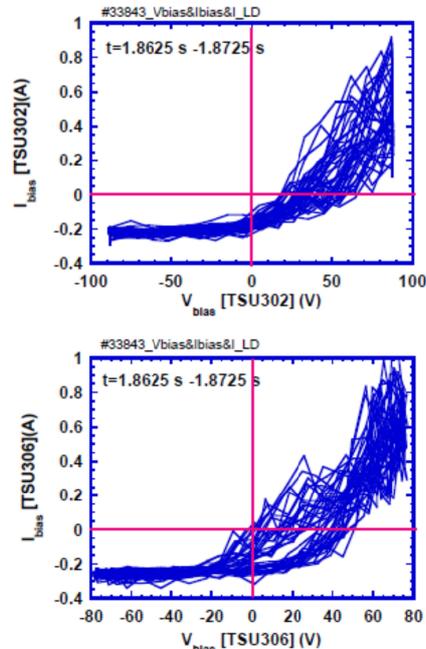


図3 QUEST トカマクのダイバータバイアス実験で観測された2枚のバイアスダイバータ板(TSU302, 306)の電圧—電流特性。2kHzの三角波電圧に対し10ms間にバイアス電圧を40回掃引した時の駆動電圧—電流特性を示している。

このダイバータバイアス実験から、本研究開始当初では予想されなかった興味深い新たな結果が得られた。本研究で試みたダイバータバイアスにより、ダイバータ部に達す

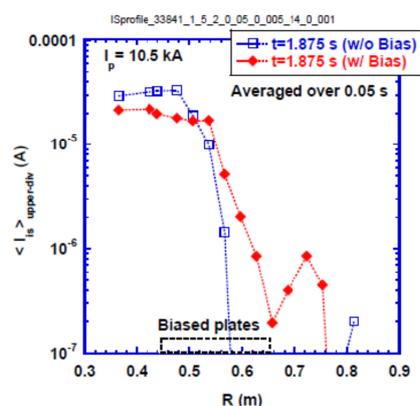


図4 QUEST トカマクのダイバータバイアス実験で観測されたダイバータのイオン飽和電流、すなわちダイバータ粒子束の径方向分布に対するダイバータバイアスの影響。

る粒子束の分布が径方向(大半径 R 方向)に拡がるとともに局所ピーク値も低減されることが観測された(図4)。 R 方向は、ほぼ SOL プラズマの径方向に相当している。この結果は、トロイダル方向に分割した新たなダイバータバイアス法によりダイバータ部への粒子束、さらには熱流束の径方向分布を上げ、それらの局所ピーク値の低減につながる可能性を示している。

本挑戦的萌芽研究で提案した新たなダイバータバイアス法は周辺プラズマやダイバータ熱負荷制御として有望な手法となりうることを示した。今後、この手法の有効性と課題の抽出のため、さらに高加熱電力で生成される ELM を伴う高温・高密度のトカマクプラズマ等へが必要である。また、このようなダイバータバイアス実験はコアプラズマ周辺部、SOL やダイバータプラズマさらには固体壁との相互作用に関する基礎的物理機構の理解にも極めて有用である。

<参考文献>

- [1] G.F. Matthews et al., Plasma Phys. Control. Fusion **32** (1990) 1301.
- [2] B. Koch et al., J. Nucl. Mater. **313-316** (2003) 1114.
- [3] S. Abdullaev, Chapters 1 and 2 in “*Magnetic Stochasticity in Magnetically Confined Fusion Plasmas*”, Springer, 2013.
- [4] S. A. Cohen, J. Nucl. Mater. **76 & 77** (1978) 68.
- [5] P.C. Stangeby, J. Phys. D: Appl. Phys. **18** (1985) 1547.
- [6] G.M. Schaffer et al., Nucl. Fusion **48** (2008) 024004.

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)

[学会発表](計 5 件)

東井和夫, 「球状トカマク QUEST におけるトロイダル分割型ダイバータバイアシングによる周辺・SOL プラズマ制御実験

計画と予備実験」(ポスター発表), 第33回プラズマ核融合学会年会, 30pP39, 2016年11月29日~12月2日, 東北大学青葉山キャンパス, 宮城県・仙台市.

K. Toi, “Generation of magnetic perturbations for ELM control using SOL currents in a tokamak plasma”(ポスター発表), 22th International Conference on Plasma Surface Interactions in Controlled Fusion Devices, 2016年5月30日~6月6日, The Pontifical Urbaniana University, Rome, Italy.

K. Toi, “Interaction of ELMs with the SOL plasma in EAST and HL-2A tokamaks and a plan for the external control”(招待講演), A3 Foresight Program Workshop on Critical Issues Specific to Steady-State Sustainment of High Performance Plasmas, 2016年5月17日~20日, Yinchuan, China.

K. Toi, “A new control method of edge MHD stability in tokamak plasmas using scrape-off-layer and divertor plasmas”(招待講演), A3 Foresight Program Workshop on Critical Issues Specific to Steady-State Sustainment of High Performance Plasmas, 2015年12月1日~4日, Gotemba, Japan.

東井和夫, 「トロイダル閉じ込め装置における SOL・ダイバータ電流を利用した新たな周辺プラズマ制御法」(口頭発表), 第32回プラズマ核融合学会年会, 25pB02, 2015年11月24日~27日, 名古屋大学東山キャンパス, 愛知県・名古屋市.

6. 研究組織

(1)研究代表者

東井 和夫 (TOI, Kazuo)

自然科学研究機構・核融合科学研究所・名誉教授

研究者番号: 20093057

(2)連携研究者

図子 秀樹 (ZUSHI, Hideki)

九州大学・応用力学研究所・特命教授

研究者番号: 20127096

山本 聡 (YAMAMOTO, Satoshi)

京都大学・エネルギー科学研究所・助教

研究者番号: 70397529