

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 11 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360382

研究課題名(和文)トカマク炉の共鳴磁場摂動ヘリカルフェライト設置によるELM抑制と熱粒子制御の研究

研究課題名(英文) Study of ELM Suppression and Heat-Particle Control with Resonant-Magnetic-Perturbation Helical-Ferritic-Steel Inserts in Tokamak Reactors

研究代表者

滝塚 知典 (Takizuka, Tomonori)

大阪大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：40354576

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 8,300,000円

研究成果の概要(和文)：トカマク核融合炉研究開発において、ダイバータ板の熱負荷と損耗の低減が最重要課題のひとつである。特にHモード運転中の境界局在モード(ELM)を抑制することが必須である。共鳴磁場摂動(RMP)によるELM抑制が実験的に立証されているが、RMPコイルを中性子束が強い原型炉環境で採用することは難しい。ここで、RMPコイルを用いずに、トカマク炉にフェライト鋼をヘリカル状に設置する革新的方法により、容易にRMPを形成できることを示した。RMP中の周辺プラズマ研究のシミュレーションモデルとコードの開発を行った。またELM抑制後のダイバータ熱負荷を低減する新ダイバータ配位を提示した。

研究成果の概要(英文)：Reduction of heat load and erosion of the diverter plate is one of the most important issues for the research & development of tokamak fusion reactors. The edge localized mode (ELM) in H-mode operation is especially to be suppressed. Although suppression of ELM by the resonant magnetic perturbation (RMP) has been experimentally demonstrated, it is difficult to apply the RMP coils to the DEMO-reactor circumstance with strong neutron flux. Here we showed that the RMP is easily generated in a tokamak reactor by an innovative method to install the ferritic steel helically. For the study of edge plasmas under RMP we developed simulation models and codes. We also presented new diverter configurations to reduce the diverter heat load after the ELM suppression.

研究分野：プラズマ物理

キーワード：周辺プラズマ 熱粒子制御 トカマク核融合原型炉 ELM抑制 共鳴磁場摂動 ヘリカルフェライト鋼設置 ダイバータ

### 1. 研究開始当初の背景

トカマク核融合炉研究開発において、ダイバータ板の熱負荷と損耗の低減が最重要課題のひとつである。特に高閉じ込め H モード運転中に、巨大な熱負荷と損耗をもたらす間欠的な境界局在モード (Edge Localized Mode: ELM) を抑制する方法を開発することが必須である<sup>1)</sup>。共鳴磁場摂動 (Resonant Magnetic Perturbation: RMP) を印加して周辺ペDESTAL プラズマの圧力勾配を下げ、ELM を抑制できることが実験的に立証された<sup>2)</sup>。ITER も RMP の導入を企画している<sup>3)</sup>。しかし、RMP はプラズマに近接して設置されたコイルで誘起しているので、この RMP 用コイルを中性子束が強い核融合原型炉/商用炉環境で採用することは難しいと考えられている。原型炉/商用炉に適合する画期的な ELM 抑制法の開発が求められている。

### 2. 研究の目的

実験的に立証されている RMP による ELM 抑制法を原型炉にも適用するために、RMP コイルを用いずに、トカマク炉のブランケット構造材であるフェライト鋼をヘリカル状に設置することで、容易に RMP を形成する革新的な方法を提示することが研究第一目的である。

このアイデアは、最初に我々が 2011 年に発表したものである<sup>4)</sup>。実験で用いられている RMP コイルは、主にトロイダルモード数  $n=3$  (ポロイダルモード数  $m$  は広く分布) の摂動磁場を誘起する。95% 磁束面安全係数  $q_{95}$  が 3.5 程度の H モードプラズマに対して、ELM をほぼ全抑制できている。 $q=3$  有理面で  $m=9/n=3$  の摂動磁場が共鳴して、近傍の磁場が乱され磁力線は統計的に拡散すると考えられている。摂動磁場はコイルを設置しなくても、フェライト鋼を  $n/m$  モードのヘリカル状に配置すれば、軸対称トロイダル磁場から自然に  $n/m$  モード摂動磁場を形成できる。

コイル誘起でも、ヘリカルフェライト誘起でも、RMP は周辺ペDESTAL プラズマの圧力勾配を低下させることができる。統計的に乱れた磁場中では、高速電子が磁力線に沿って径方向に逃げるので、単純理論では、「密度分布はあまり影響されずに電子温度の径方向勾配が減少する」と考えられていた<sup>5)</sup>。しかし RMP 実験では、電子温度分布はほとんど変わらずに、電子密度が減少しなだらかな分布になる<sup>2)</sup>。この興味深い結果の物理解釈は、いまだ結論が得られていない。そこで第二研究目的は、RMP による周辺ペDESTAL プラズマの圧力勾配低下の物理機構を解明することである。さらに核融合研究開発の観点から、1次元輸送シミュレーションにも適用できる RMP 輸送モデルを構築する。

RMP 印加により損失率が上昇した周辺プラズマがスクレイプオフ層 (SOL) 境界プラズマに流出するとき、その径方向の熱・粒子束はもはやトロイダル方向に一様でない。そし

て、磁力線に沿ってダイバータ板に流入する熱・粒子束は縞模様になる。その結果、ダイバータ板には局所的に熱負荷が大きくなる。ITER では、もし RMP 用コイルを設置するならば、この縞状の局在熱負荷を避けるために、コイル電流位相をトロイダル方向に時間的に回転させることを考えている。しかしヘリカルフェライト RMP は、時間的に変動させることができない。そこで第三研究目的として、RMP によるダイバータ板熱負荷の局在化の回避法を開発する。ダイバータ形状の工夫と不純物制御注入による放射冷却で非接触ダイバータプラズマを形成すれば、熱負荷の局在化を回避できると考えている。

プラズマ物理に基づきモデルを構築し、さらに実験との比較シミュレーションで検証して得られた RMP 輸送モデルをトカマク統合シミュレーションコードに組み込む。そして第四研究目的として、そのトカマク統合シミュレーションにより RMP 印加トカマク中の燃焼プラズマの性能評価を行う。

### 3. 研究の方法

本研究は、革新的アイデアの解析的検証と、これまでに開発してきたシミュレーションコードを用いた数値的研究を主体に研究を進めた。基盤となるコードは (i) 磁力線追跡コード、(ii) 粒子シミュレーションコード PARASOL<sup>6)</sup>、(iii) ダイバータシミュレーションコード SONIC<sup>7)</sup>、(iv) トカマク輸送コード TPICS-IB<sup>8)</sup> および TASK/TX<sup>9)</sup> である。

#### < 引用文献 >

- 1) A. Loarte et al., Nucl. Fusion **47** (2007) S203.
- 2) T.E. Evans et al., Phys. Plasmas **13** (2006) 056121.
- 3) H. Takatsu, Nucl. Fusion **51** (2010) 094002.
- 4) T. Takizuka, N. Oyama, T. Fukuda, Helical ferritic steel inserts for resonant magnetic perturbation to suppress ELMs in tokamak DEMO Reactor, Plasma Conference 2011/ プラズマ・核融合学会第 28 回年会 (石川県立音楽堂, 金沢, 22-25 Dec 2011) 23P055-P.
- 5) A.B. Rechester, M.N. Rosenbluth, Phys. Rev. Lett. **40** (1978) 38.
- 6) T. Takizuka, Plasma Sci. Technol. **13** (2011) 316.
- 7) H. Kawashima, K. Shimizu, T. Takizuka, Plasma Phys. Control. Fusion **49** (2007) S77.
- 8) N. Hayashi et al., Plasma Fusion Res. **6** (2011) 2403065.
- 9) M. Honda, A. Fukuyama, J. Comput. Phys. **227** (2008) 2808.

### 4. 研究成果

(1) トカマク原型炉の ELM を抑制するために、RMP コイルを用いずにブランケット後部にフェライト鋼をヘリカル状に設置し RMP を形成するとき、周辺プラズマペDESTAL 部における摂動磁場強度をヘリカルフェライト鋼の設置位置と厚みの関数として導出し

た。現実的な原型炉設計値で、ELM 抑制のための磁場摂動を誘起できることを示した。また、フェライト鋼を使用しているブランケットをヘリカル状に配置し効率よく RMP を形成できることを示した。

(2) RMP があるときのペDESTAL プラズマの挙動に関する実験およびシミュレーションについて調査を行い、急峻な電子温度分布を保ちつつ密度輸送を増大させている物理機構を記述するペDESTAL 輸送モデルの開発を行った。衝突の少ないペDESTAL プラズマにおいて、イオンのロスコーン損失と電子の RMP 中の統計的損失で決まる径方向電場と磁力線方向電場の形成により、粒子輸送が増大し電子の磁力線方向熱輸送が抑制される物理モデルを考案した。2次元粒子シミュレーション PARASOL への適用と1次元輸送シミュレーション TOPICS および TASK/TX への適用を考察した。

(3) ELM 特性の統合的シミュレーションを1次元輸送コード TOPICS-IB を中心に進めた。RMP に並ぶペレット入射による ELM 緩和についてシミュレーション研究を行い、ペレットのサイズ、速度、入射タイミングにより ELM エネルギー損失  $\Delta W_{ELM}$  を減少制御できることを示した。ITER における  $\Delta W_{ELM}$  を減少させるためのペレット入射条件を定量的に調べ、最適制御により  $\Delta W_{ELM}$  を無制御のときの 1/5 以下に減少できることを示した。

(4) コア周辺プラズマの ELM 特性だけでなく SOL-ダイバータプラズマ中の ELM 伝搬特性について調べた。磁力線方向伝搬について粒子コード PARASOL を用いてシミュレーションを行い、ITER 等の大型核燃焼トカマクにおけるダイバータ板への ELM 熱負荷に対する内外ダイバータ非対称リサイクリングの影響を明らかにした。また、SOL プラズマ中の ELM フィラメントの径方向伝搬について実験解析を行い、伝搬速度はフィラメントサイズが小さいほど速くなるという理論モデルを検証した。

(5) ペDESTAL の形成に係る H モード遷移について、コアプラズマと周辺プラズマを統合したシミュレーション研究を進めた。ペDESTAL プラズマにおいて、加熱パワーが増加しプラズマ圧力勾配が大きくなると、電場シア流が増大し乱流輸送を抑制する。ペDESTAL 中の電場構造を新古典モデルから計算し TOPICS に組み込んだ。H モード遷移パワー比例則に矛盾無く H モード遷移のシミュレーションが出来る事を示した。またダイバータコード SONIC を統合することにより、遷移後の SOL ダイバータプラズマのダイナミクスまで模擬することができた。

(6) LH 遷移とペDESTAL プラズマ形成につ

いて更に正確なシミュレーションモデルを構築するために、周辺プラズマを含む乱流輸送モデリングについて JT-60U 実験と比較しつつジャイロ運動論解析および検証輸送シミュレーションを行った。乱流輸送に対するプラズマ電流分布やプラズマ回転速度等の影響を明らかにした。また非線形流体シミュレーションにより、巨視的渦生成による周辺とコアを結合する非局所輸送機構を明らかにした。ITER のハイブリッドシナリオにおける ELM 発生に影響する電流分布の形成機構について、プラズマ柱のヘリカル変形による新古典電気抵抗の増大が重要であることを実験解析と理論解析的に示した。RMP がある周辺プラズマ中の半径方向電場がプラズマ圧力分布に大きく影響するので、その電場を自己無道着に求める TOPICS 輸送シミュレーションモデルを開発した。さらに RMP による粒子輸送の増大を調べるために、輸送シミュレーションコード TASK/TX の粒子輸送モデルを改良した。またポロイダル方向変化も記述できる TASK 2次元輸送シミュレーションコードの開発を進めた。RMP 周辺プラズマに重要な運動論効果を調べるために、PARASOL 粒子シミュレーションコードを任意形状ダイバータ境界に拡張するための新規高速ポアソンソルバーを開発した。

(7) RMP によるダイバータ板熱負荷局在化の緩和についてシミュレーション研究を進めるために、非接触ダイバータプラズマの形成に関するダイバータプラズマモデル構築を進展した。ダイバータ統合コード SONIC の不純物輸送モンテカルロパートにおいてダイバータ下部室内の不純物中性粒子追跡にかかる大計算コストを下げる新手法を開発し、効率的にダイバータ熱制御の研究を進めた。また周辺プラズマ流体モデルを非等方温度に拡張するとともに仮想ダイバータモデルを開発して、シミュレーション精度を高めることに成功した。非接触ダイバータに対する粒子拡散効果、磁力線方向熱伝導効果、放射冷却プラズマの超音速効果を、SONIC を用いたシミュレーションで調べた。

(8) ELM によるダイバータ板損耗と ELM 間ダイバータ熱負荷の低減のための新概念；プラズマ断面形状を逆D型にして、中心プラズマの高閉じ込めを維持しつつ周辺プラズマ圧力勾配を緩和し ELM を抑制するとともに外側ダイバータの受熱面積を拡大して熱負荷を低減する；を提示した。またダイバータ受熱面積の拡大のための先進ダイバータについて SONIC シミュレーションを進めた。さらには、トロイダルコイル内側にポロイダル磁場カスプコイルを最適位置設置することにより、少ないカスプコイル電流値で十分な磁束管拡大と遠隔放射領域拡大ができる Flux-Tube-Expansion (FTE) ダイバータを提案した。ヘリカルフェライト誘起 RMP による

ELM 抑制後のダイバータ定常熱負荷までも効率良く低減できることを示した。低減熱負荷ダイバータと高機能・高機動性を考慮して、負三角度断面や誘導電流混成型高アスペクト比を採用した原型炉概念設計を始めた。

トカマク原型炉にヘリカルフェライト鋼を設置しRMPを誘起してELM抑制が可能であることを示す事ができた。RMPがあるときのプラズマ特性を研究するためのシミュレーションモデルの開発とシミュレーションコードの改良開発を進展できた。ELM抑制とELM抑制後のダイバータ熱負荷減少を両立するダイバータ新概念を提示する事ができた。今後の核融合炉開発の再重要課題である熱制御について方向性を示す事ができた。

## 5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 27 件)

- [1] T. Takizuka, S. Tokunaga, K. Hoshino, K. Shimizu, N. Asakura, Combination of helical ferritic-steel inserts and flux-tube-expansion divertor for the heat control in tokamak DEMO reactor, *J. Nucl. Mater.*, 査読有 (2015) in press  
DOI: 10.1016/j.jnucmat.2014.12.065
- [2] K. Hoshino, K. Shimizu, T. Takizuka, N. Asakura, T. Nakano, Influence of the particle transport in the private region on the divertor plasma detachment, *J. Nucl. Mater.*, 査読有 (2015) in press  
DOI: 10.1016/j.jnucmat.2014.11.133
- [3] S. Togo, T. Takizuka, M. Nakamura, K. Hoshino, Y. Ogawa, SOL-divertor plasma simulations introducing anisotropic temperature with virtual divertor model, *J. Nucl. Mater.*, 査読有 (2015) in press  
DOI: 10.1016/j.jnucmat.2014.09.081
- [4] T. Takizuka, Enhanced neo-classical resistivity due to the  $m/n = 1/1$  MHD-mode deformation of the central core plasma column for the tokamak hybrid scenario, *Nucl. Fusion*, 査読有, **54** (2014) 092001(1-6)  
DOI: 10.1088/0029-5515/54/9/092001
- [5] K. Hoshino, N. Asakura, K. Shimizu, S. Tokunaga, T. Takizuka, Y. Someya, M. Nakamura, H. Utoh, Y. Sakamoto, K. Tobita, Divertor study on DEMO reactor, *Plasma Fusion Res.*, 査読有, **9** (2014) 3403070 (1-8)  
DOI: 10.1585/pfr.9.3403070
- [6] T. Takizuka, S. Azuma, A. Fukuyama, K. Shimizu, Simple and fast Poisson solver with arbitrary boundary shape and condition for PIC simulation, *Contrib. Plasma Phys.*, 査読有, **54** (2014) 388-393  
DOI: 10.1002/ctpp.201410043
- [7] K. Hoshino, K. Shimizu, H. Kawashima, T. Takizuka, T. Nakano, S. Ide, Development of the backflow model for simplified impurity exhaust in Monte-Carlo calculation, *Contrib. Plasma Phys.*, 査読有, **54** (2014) 404-408  
DOI: 10.1002/ctpp.201410032
- [8] N. Hayashi, N. Aiba, T. Takizuka, N. Oyama, Integrated simulation study of ELM pacing by pellet injection in ITER, *Contrib. Plasma Phys.*, 査読有, **54** (2014) 599-604  
DOI: 10.1002/ctpp.201410040
- [9] H. Seto, A. Fukuyama, Formulation of two-dimensional transport modeling in tokamak plasmas, *Plasma Fusion Res.*, 査読有, **9** (2014) 1403002(1-9)  
DOI: 10.1585/pfr.8.1403002
- [10] T. Takizuka, N. Oyama, T. Fukuda, Resonant Magnetic Perturbation for ELM suppression with helical ferritic steel inserts in tokamak DEMO reactor, *Fusion Sci. Technol.*, 査読有, **63**, No. 1T (2013) 64-69  
<http://www.ans.org/pubs/journals/fst/>
- [11] E. Narita, M. Honda, N. Hayashi, T. Takizuka, S. Ide, K. Itami, A. Isayama, T. Fukuda, Turbulence analyses of improved electron energy confinement in H-mode plasmas with gyrokinetic calculations, *Plasma Fusion Res.*, 査読有, **8** (2013) 1403082 (1-8)  
DOI: 10.1585/pfr.8.1403082
- [12] M. Honda, S. Ide, T. Takizuka, N. Hayashi, M. Yoshida, M. Yagi, T. Fujita, Development of the transport-code framework for self-consistent predictions of rotation and the radial electric field, *Nucl. Fusion*, 査読有, **53** (2013) 073050 (1-11)  
DOI: 10.1088/0029-5515/53/7/073050
- [13] N. Hayashi, N. Aiba, T. Takizuka, N. Oyama, Reduction of ELM energy loss by pellet injection for ELM pacing, *Nucl. Fusion*, 査読有, **53** (2013) 123009(1-10)  
DOI: 10.1088/0029-5515/53/12/123009
- [14] N. Asakura, K. Shimizu, K. Hoshino, K. Tobita, S. Tokunaga, T. Takizuka, Simulation study of large power handling in divertor for DEMO reactor, *Nucl. Fusion*, 査読有, **53** (2013) 123013(1-15)  
DOI: 10.1088/0029-5515/53/12/123013
- [15] M. Yagi, K. Shimizu, T. Takizuka, M. Honda, N. Hayashi, K. Hoshino, A. Fukuyama, Simulation study of L/H transition with self-consistent integrated modelling of core and SOL/divertor transport, *Contrib. Plasma Phys.*, 査読有, **52** (2012) 372-378  
DOI: 10.1002/ctpp.201210019
- [16] A. Froese, T. Takizuka, M. Yagi, PIC simulation study of heat transport kinetic factors in scrape-off layer plasmas, *Contrib. Plasma Phys.*, 査読有, **52** (2012) 534-538  
DOI: 10.1002/ctpp.201210045
- [17] K. Hoshino, K. Shimizu, N. Asakura, T. Takizuka, M. Nakamura, K. Tobita, Simulation study of an extended divertor leg for heat control in the SlimCS DEMO reactor, *Contrib. Plasma Phys.*, 査読有, **52** (2012) 550-554  
DOI: 10.1002/ctpp.201210048
- [18] H. Seto, A. Fukuyama, Formulation of

two-dimensional transport modeling in tokamak plasmas for integrated analysis of core and edge plasmas, *Contrib. Plasma Phys.*, 査読有, **52** (2012) 384-390

DOI: 10.1002/ctpp.201210021

〔学会発表〕(計75件)

[1] 菊池満, 滝塚知典, 他6名, 負三角度トカマクにおける輸送改善機構, 日本物理学会第70回年次大会(早稲田大学早稲田キャンパス, 東京, 21-24 Mar 2015) 22aAP-2

[2] T. Takizuka, History of PARASOL, 第20回NEXT研究会(京都テルサ, 京都, 13-14 Jan 2015) <http://www-jt60.naka.jaea.go.jp/next/next20th.html>

[3] T. Takizuka, Strategy for the development of tokamak DEMO reactor with hybrid scenario, Plasma Conference 2014/プラズマ・核融合学会第31回年会(朱鷺メッセ, 新潟, 18-21 Nov 2014) 18PB-037

[4] S. Togo, T. Takizuka, M. Nakamura, K. Hoshino, Y. Ogawa, Simulation study using a virtual divertor model on the supersonic flow in SOL-divertor plasmas considering the anisotropic ion temperature, *ibid.* 20pC2-4

[5] M. Kikuchi, A. Fasoli, T. Takizuka, 他26名, Feasibility studies of negative triangular tokamak configuration for fusion reactor, *ibid.* 19pC2-1

[6] 金森涼介, 福山淳, 本多充, TASK/TX によるトカマクプラズマ中の粒子輸送シミュレーション, *ibid.* 18PB-099

[7] 星野一生, 朝倉伸幸, 清水勝宏, 徳永晋介, 原型炉ダイバータの熱制御に対する核融合出力及び不純物放射の影響, *ibid.* 21PA-031

[8] S.Yu. Medvedev, M. Kikuchi, L. Villard, T. Takizuka, 他10名, Negative triangularity tokamak: stability limits and perspectives as fusion energy system, 25th IAEA Fusion Energy Conf. (St Petersburg, Russia, 13-18 Oct 2014) PD/P5-1

[9] K. Hoshino, N. Asakura, K. Shimizu, S. Tokunaga, Studies of impurity seeding and divertor heat handling in fusion reactor, *ibid.* FIP/P8-11

[10] A. Fukuyama, H. Nuga, S. Murakami, Kinetic integrated modeling of burning start-up phase in tokamaks, *ibid.* TH/P6-4

[11] M. Hosokawa, A. Loarte, G. Huijsmans, T. Takizuka, N. Hayashi, Kinetic modelling of divertor fluxes during ELMs in ITER, 41st EPS Conf. on Plasma Physics (Berlin, Germany, 23-27 Jun 2014) P5-003

[12] 東郷訓, 滝塚知典, 中村誠, 星野一生, 小川雄一, 仮想ダイバータモデルを用いた周辺プラズマシミュレーション, 第10回核融合エネルギー連合講演会(つくば国際会議場, つくば, 19-20 Jun 2014) 19-068

[13] T. Takizuka, S. Tokunaga, K. Hoshino, K. Shimizu, N. Asakura, Combination of helical ferritic-steel inserts and flux-tube-expansion divertor for the heat control in tokamak DEMO reactor, 21st Int. Conf. on Plasma Surface

Interactions in Controlled Fusion Devices (Kanazawa, Japan, 26-30 May 2014) P2-026

[14] K. Hoshino, K. Shimizu, T. Takizuka, N. Asakura, T. Nakano, Influence of the particle transport in the private region on the divertor plasma detachment, *ibid.* P2-027

[15] S. Togo, T. Takizuka, M. Nakamura, K. Hoshino, Y. Ogawa, SOL-divertor plasma simulations introducing anisotropic temperature with virtual divertor model, *ibid.* P2-038

[16] 菊池満, 滝塚知典, 古川勝, 負三角度トカマク核融合プラズマの可能性(1:配位の特長), 日本物理学会第69回年次大会(東海大学湘南キャンパス, 平塚, 27-30 Mar 2014)

[17] 滝塚知典, Enhanced neo-classical resistivity due to the  $m/n = 1/1$  MHD-mode deformation of central core plasma column for tokamak hybrid scenario, 第11回核燃焼プラズマ統合コード研究会(九州大学応力研, 春日, 19-20 Dec 2013) <http://www.riam.kyushu-u.ac.jp/sosei/bpsi/bpsi11.html>

[18] 林伸彦, 相羽信行, 滝塚知典, 大山直幸, ペレットによるELM制御の統合シミュレーション, *ibid.*

[19] 滝塚知典, トカマクハイブリッドシナリオにおける中心コアプラズマ柱の  $m/n = 1/1$  MHDモード変形による新古典電気抵抗の増大, プラズマ・核融合学会第30回年会(東工大, 東京, 3-6 Dec 2013) 05aE39P

[20] 林伸彦, 相羽信行, 滝塚知典, 大山直幸, ITERにおけるペレット入射によるELM制御の統合シミュレーション, *ibid.* 04aE38P

[21] 朝倉伸幸, 新谷吉郎, 星野一生, 宇藤裕康, 清水勝宏, 他6名, トカマク原型炉の先進ダイバータ概念設計における物理および工学要素の検討, *ibid.* 05pE49P

[22] K. Hoshino, N. Asakura, K. Shimizu, S. Tokunaga, T. Takizuka, 他5名, Divertor study on Demo reactor, 23rd Int. Toki Conf. (Toki, Japan, 18-21 Nov 2013) I-10

[23] M. Yagi, N. Miyato, A. Matsuyama, T. Takizuka, Simulation study on non-local transport for peripheral density source, *ibid.* P1-43

[24] A. Fukuyama, Progress of integrated modeling of tokamak plasmas by the TASK code, *ibid.* P1-41

[25] H. Seto, A. Fukuyama, Two-dimensional transport simulation of tokamak plasma including core and peripheral region, *ibid.* P1-42

[26] T. Takizuka, S. Azuma, A. Fukuyama, K. Shimizu, Simple and fast Poisson solver with arbitrary boundary shape and condition for PIC simulation, 14th Int. Conf. on Plasma Edge Theory in Fusion Devices (Cracow, Poland, 23-25 Sep 2013) P1-30

[27] K. Hoshino, K. Shimizu, H. Kawashima, T. Takizuka, T. Nakano, S. Ide, Development of the backflow model for impurity exhaust in Monte-Carlo calculation, *ibid.* P1-13

[28] N. Hayashi, N. Aiba, T. Takizuka, N. Oyama, Integrated simulation study of ELM pacing by pellet injection in ITER, *ibid.* P1-26

[29] M. Kikuchi, T. Takizuka, M. Furukawa, Negative D shape plasma as possible operational scenario of tokamak reactor, 12th Asia Pacific Physics Conference (Makuhari Messe, Chiba, Japan, 14-19 Jul 2013) D1-PMo-10

[30] M. Kikuchi, T. Takizuka, Is H-mode relevant for fusion reactor - Transport, divertor particle and power handling, and implications for fusion?, US-EU Joint Transport Task Force 2013 (Santa Rosa, USA, 9-12 Apr 2013)

[31] 滝塚知典, 清水勝宏, 星野一生, 福田武司, トカマク中のヘリカルフェライト鋼設置による共鳴磁場擾動とペデスタルプラズマ輸送, プラズマ・核融合学会第 29 回年会(クローバープラザ, 春日, 27-30 Nov 2012) 30E01P

[32] 星野一生, 清水勝宏, 滝塚知典, 中村誠, SONIC と SOLPS による JT-60U 非接触ダイバータプラズマモデリング, *ibid.* 28D36P

[33] 林伸彦, 相羽信行, 滝塚知典, 大山直幸, ELM ペーシングのためのペレット入射による ELM エネルギー損失の低減, *ibid.* 27D31P

[34] 朝倉伸幸, 星野一生, 飛田健次, 宇藤裕康, 清水勝宏, 他 3 名, トカマク原型炉に置ける先進ダイバータ磁場配位とコイル配置の検討, *ibid.* 28D29P

[35] N. Hayashi, N. Aiba, T. Takizuka, N. Oyama, Integrated simulation of ELM pacing by pellet injection, US-Japan JIFT Workshop on Integrated Modeling (Kyoto Univ., Kyoto, Japan, 14-16 Nov 2012) <http://bpsl.nucleng.kyoto-u.ac.jp/bpsi/usjws8/>

[36] M. Honda, N. Hayashi, T. Takizuka, M. Yoshida, S. Ide, T. Fujita, Recent development of the integrated transport code TOPICS with emphasis on rotation and a radial electric field, *ibid.*

[37] N. Hayashi, N. Aiba, T. Takizuka, N. Oyama, Reduction of ELM energy loss by pellet injection for ELM pacing, 24th IAEA Fusion Energy Conference (San Diego, USA, 8-13 Oct 2012) TH/5-3

[38] N. Asakura, K. Shimizu, K. Hoshino, K. Tobita, H. Utoh, Y. Someya, M. Nakamura, Y. Sakamoto, T. Takizuka, Divertor design and physics issues of huge power handling for Slim CS Demo reactor, *ibid.* FTP/P7-32

[39] A. Fukuyama, H. Nuga, D. Raburn, A. Wakasa, Kinetic integrated modeling of burning plasmas in tokamaks, *ibid.* TH/P6-13

[40] T. Takizuka, N. Oyama, T. Fukuda, Resonant magnetic perturbation for ELM suppression with helical ferritic steel inserts in tokamak DEMO reactor, 9th Int. Conf. on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement (Tsukuba, Japan, 27-31 Aug 2012) I-9

[41] K. Hoshino, M. Toma, K. Shimizu, N. Asakura, K. Tobita, A. Hatayama, T. Takizuka, Numerical analysis of tungsten erosion at the plasma facing surface in DEMO reactor, 20th Int. Conf. on Plasma Surface Interactions in Controlled Fusion Devices (Aachen, Germany, 21-25 May 2012) P1-53

[42] T. Takizuka, M. Yagi, Radial speed of ELM filament in SOL plasma, 2nd Asia Pacific Transport Working Group Meeting (SWIP, Chengdu, China, 15-18 May 2012) B-P06

[43] M. Yagi, K. Shimizu, T. Takizuka, M. Honda, N. Hayashi, K. Hoshino, A. Fukuyama, Simulation study of L-H transition with self-consistent integrated modelling of core and SOL-divertor transport, *ibid.* B-P05

## 6 . 研究組織

### (1) 研究代表者

滝塚 知典 (TAKIZUKA, Tomonori)  
大阪大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：40354576

### (2) 研究分担者

福田 武司 (FUKUDA, Takeshi)  
大阪大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：50354585

福山 淳 (FUKUYAMA, Atsushi)  
京都大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：60116499

清水 勝宏 (SHIMIZU, Katsuhiko)  
日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門・研究員  
研究者番号：30391262

### (3) 連携研究者

林 伸彦 (HAYASHI, Nobuhiko)  
日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門・研究主幹  
研究者番号：10354573

本多 充 (HONDA, Mitsuru)  
日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門・研究員  
研究者番号：90455296

星野 一生 (HOSHINO, Kazuo)  
日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門・研究員  
研究者番号：50513222

大山 直幸 (OYAMA, Naoyuki)  
日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門・研究主幹  
研究者番号：80354596  
(平成 24-25 年度)

菊池 満 (KIKUCHI, Mitsuru)  
日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門・上級研究主席  
研究者番号：10150525  
(平成 26 年度)