

平成 30 年 6 月 22 日現在

機関番号：82502

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26420862

研究課題名(和文) トカマク炉における燃料供給と不純物排出と整合した境界分布崩壊緩和の研究

研究課題名(英文) Study of mitigation of edge profile collapse consistent with fueling and impurity exhaust in tokamak reactor

研究代表者

林 伸彦 (Hayashi, Nobuhiko)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・那珂核融合研究所 先進プラズマ研究部・グループリーダー(定常)

研究者番号：10354573

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)：トカマク炉における燃料供給と不純物排出、境界分布崩壊緩和の研究を可能とする炉心・周辺プラズマ統合コードを開発した。開発した統合コードを用いたシミュレーションにより、ペレットによる分布崩壊緩和制御手法の最適条件の解明、分布崩壊緩和制御と燃料粒子供給との整合性の解明、流体コードとモンテカルロ粒子コードとの結合モデルの開発、及び不純物蓄積と炉心プラズマ性能への影響評価による高圧力定常運転シナリオの成立性の解明を行った。

研究成果の概要(英文)：An integrated code for core and peripheral plasmas has been developed so that the code enables the study of fueling, impurity exhaust and mitigation of edge profile collapse. In the study, an interface model to couple fluid code with Monte-Carlo particle code has been also developed. Simulations with the developed code clarified that optimum conditions for pellet injection to mitigate the edge profile collapse, the compatibility between the mitigation control and fueling, and the realization of high-pressure steady-state operation scenario by the evaluation of impurity accumulation and its effect on core plasma performance.

研究分野：核融合プラズマモデリング・シミュレーション

キーワード：統合モデリング 崩壊現象 制御 不純物 燃料 シミュレーション

### 1. 研究開始当初の背景

トカマク型核融合炉において、ダイバータ板の熱負荷と損耗の低減が重要課題である。建設中の国際熱核融合実験炉 (ITER) の標準運転では炉心の境界に輸送障壁を形成してプラズマを高圧力化するが、電磁流体力学的不安定性により周期的に分布が崩壊してプラズマの熱・粒子を吐き出し、周辺の磁力線終端にあるダイバータ板に過大な熱負荷・損耗を与える。そのため、分布崩壊を緩和する方法を開発することが必須である。炉心に燃料を供給するペレットをプラズマが自発的に不安定になる前に入射すると、不安定性を誘起して崩壊を緩和できることが実験的に確認された。崩壊緩和ペレットは、崩壊が小さく分布回復が早い分、より早い周期で多数入射しなければならず、燃料供給とできるだけ分離した制御を行いたいために、燃料供給用のペレットとは別に小さいペレットを浅く入射することが考えられている。ITER も燃料供給するペレットとは別に崩壊緩和用のペレットの導入を検討している。

一方、損耗したダイバータ板から発生する不純物 (タングステン等の高 Z 粒子) や、周辺プラズマを冷却してダイバータ板の熱負荷を低減するために入射する不純物 (アルゴン、ネオン等の中程度 Z 粒子) は、燃料プラズマの密度勾配やプラズマの回転に起因する内向き対流 (ピンチ) で炉心に蓄積し、放射損失と燃料希釈化により炉心プラズマの高圧力化を阻害する。分布崩壊は炉心に蓄積した不純物を排出し不純物蓄積量を低減できることが実験的に確認された。しかし、上述したペレットで緩和した分布崩壊で不純物排出を維持できるのか明らかでない。崩壊緩和ペレットは境界の密度勾配を急峻にしてピンチを増加させ不純物蓄積を増加させるおそれがある。一方、温度勾配も急峻になることから、温度勾配に起因する外向き対流がピンチを弱めるか、打ち消す可能性もある。不純物の分布によりプラズマ中に自発的に流れる電流が変わり、崩壊を起こす不安定性に影響する。また、緩和した分布崩壊でダイバータ板の熱負荷・損耗を低減できることから、不純物発生を抑制し炉心の蓄積を低減できる可能性もある。

### 2. 研究の目的

本研究では、まず、燃料ペレットによる分布崩壊緩和と核融合反応を維持する燃料粒子供給との整合性を解明し、次に、緩和した分布崩壊による不純物粒子排出性能と不純物蓄積量を評価して、燃料供給と不純物排出と整合した分布崩壊緩和状態における燃焼プラズマの性能評価を行うことを目的として研究を行う。

### 3. 研究の方法

本研究は、統合モデル・コードを開発・改良し、統合シミュレーションにより、燃料供給と不純物排出と整合した境界分布崩壊緩和を

調べる。炉心プラズマの輸送コードとして、量研で開発されている 1.5 次元輸送コード TOPICS を用いる。その炉心輸送コードと結合する周辺モデルとしては、周辺 5 点モデルかダイバータ統合コード SONIC を用いる。この炉心・周辺統合輸送コードに、必要に応じて物理モデルを開発あるいは導入、改良して結合する。開発・改良を効率良く行うために、シミュレーション結果を実験結果と比較して妥当性を適宜検証する。研究を効率的に進めるため、簡約化したモデルを用いて、まず物理現象の見通しを立てることに主眼を置き、可能であればより詳細なモデルを用いてより定量的に評価する。

### 4. 研究成果

#### (1) 統合モデル・コードの開発・改良

統合コード TOPICS に結合したペレット入射モデル APLEX で、崩壊緩和用と燃料供給用のペレットの切り替えをリスタートできるように改良した。炉心不純物輸送コード IMPACT を整備・改良し、TOPICS に結合して、複数不純物の各価数の密度の時間発展分布を解き、放射損失等を計算して、バルクプラズマへの影響を矛盾なく考慮して結合計算できるように整備した。また、流体コード IMPACT と SONIC の不純物部分のモンテカルロコード IMPMC との結合モデルを開発し、IMPACT 側に導入した。この結合のために、IMPMC 及び SONIC の非定常化改良を行った。あわせて、不安定性による境界分布崩壊時の不純物排出を模擬するために TOPICS に導入されている粒子排出モデルを IMPACT に導入、イオン化・再結合、放射損失等の原子データを従来の ADPAK だけでなく最新の OpenADAS も使えるように導入、プラズマ体積の拡大・縮小に対応できるように改良、不純物輸送で重要なクーロン衝突輸送モデルで従来の NCLASS を整備すると共に、TOPICS に導入されている最新の MI 法モデルも使えるように改良した。

#### (2) ペレットによる分布崩壊緩和と燃料粒子供給との整合性

開発した統合コードを用いて、ペレットの様々な入射条件 (入射位置、大きさ、速度) で JT-60U と ITER のシミュレーションを行った結果 (図 1)、境界輸送障壁の圧力が自然発生する不安定性の圧力から 5% 程度低い時点で、境界輸送障壁内の蓄積粒子数の数%程度をもつペレットを輸送障壁の内側の端まで近づくことができる程度の速度でトラス外側から入射すれば、分布崩壊を緩和して熱排出を低減できることが分かった (図 1 の ○●)。入射速度が遅い等、適した入射条件でない場合、深く侵入する前に不安定性を誘起し熱排出が大きくなる (図 1 の □)。この制御に必要なペレットの粒子数は、蓄積粒子数が大きいほど、あるいは、輸送障壁の内側近くで理想バレーニングモード安定限界からプラズマが離れているほど、大きくなることを明らかにした。

ITERで必要なペレット粒子数は概ね現在の設計範囲内だが、その設計値は単にペレットが輸送障壁内側に届くように経験的に評価されており、今回の結果がその設計に物理的背景を与えることができた。さらに、燃料供給ペレットは、分布崩壊緩和直後にトラス内側から入射すれば、分布崩壊緩和制御を乱さないことが分かり、分布崩壊緩和と燃料供給が整合することを示した。本成果は、ITERにおけるペレットによる制御の指針となるものであり、開発した統合コードを用いれば、ITER等における分布崩壊緩和制御と矛盾のない運転シナリオ構築に今後貢献できる。

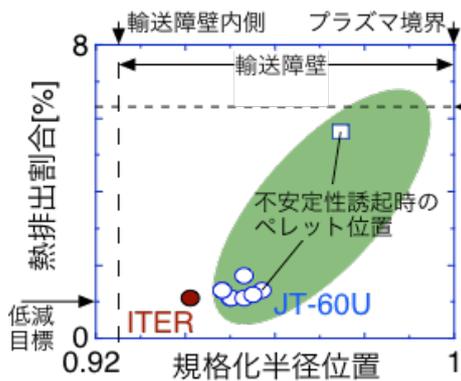


図1. 輸送障壁に蓄積された熱エネルギーに対する不安定性による熱排出割合と、不安定性誘起時のペレット位置 (○□: JT-60U、●: ITER) のシミュレーション結果。○●は制御に適した条件でペレットを入射した場合、□はそれ以外の条件で入射した一例、影の領域はその他のJT-60U結果。水平の点線はペレット制御をしない場合の値、縦の破線は輸送障壁の内側位置。

### (3) 流体コードとモンテカルロ粒子コードとの結合モデルの開発

ダイバータの熱負荷低減のために入射する不純物の炉心への蓄積とプラズマ性能への影響を矛盾なく評価するためには、炉心不純物輸送1次元流体コード IMPACT とダイバータの不純物輸送2次元モンテカルロコード IMPMC とを結合する必要がある。モンテカルロ法により、壁との相互作用や運動論的效果等の原理により近いモデリングが可能であり、他の統合コードにない優位性がある。しかし、炉心領域まで拡張するのは計算コストが高く困難で炉心の IMPACT に結合する必要があり、また、境界では炉心内部への片側だけの拡散粒子束しか評価できず正味の粒子束を扱う流体コードの境界条件に直接には使えない。そのために結合モデルを開発した。結合の手順として、まず、①IMPMCの境界近くで不純物イオンの密度を価数毎に評価し、その密度をIMPACTの境界密度に設定しIMPACTを実行して、正味の径方向粒子束Fを評価する。次に、②IMPMCで評価した内向き粒子束F<sub>-</sub>から、③外向き粒子束F<sub>+</sub>(=F<sub>-</sub>+)を評価し、IMPMCに渡して実行する。以上の手順を繰り返して定常

解を得るか、時間発展させる。このモデルの適用性を確認するために、不純物としてアルゴンを使い全領域で一定の異常輸送拡散係数のみを考慮した単純なケースで計算を行った。IMPACTで得られた正味粒子束と不純物密度分布は、結合モデルを使わずにIMPACTを炉心領域まで拡張して得たものとほぼ一致し、結合モデルのIMPACT側の適用性を確認した。今後、IMPMCの内向き粒子束から結合モデルで得られた外向き粒子束に基づいてIMPACT側の境界でテスト粒子を発生させ計算を繰り返し、炉心領域まで拡張したIMPACTの結果と変わらないことを確認してIMPACT側でも結合モデルの適用性を確認し、その後より詳細なケースを解析する必要がある。

### (4) 高圧力定常運転シナリオにおける不純物蓄積と炉心プラズマ性能への影響評価

トカマク型核融合炉の高圧力定常運転シナリオでは、不純物を入射して放射損失によりダイバータ板への熱負荷を低減する必要がある。しかし、入射した不純物が炉心に蓄積しプラズマ性能を低下させるおそれがある。これを調べるために、まず、TOPICSでJT-60UとJETの実験データを用いて検証した乱流輸送モデルを用いて、JT-60SAにおいて高圧力定常運転プラズマを得られる加熱パワーを評価し、そのパワーを用いて統合ダイバータコードSONICでアルゴン不純物を入射してダイバータ板の熱負荷を10 MW/m<sup>2</sup>以下に低減し、その時のアルゴンのプラズマ最外殻磁気面での密度等の境界条件を評価した。そして、この境界条件をTOPICSに結合されたIMPACTで用いて、炉心のアルゴン蓄積量とプラズマ性能低下が最大となる状況でシナリオの成立性を評

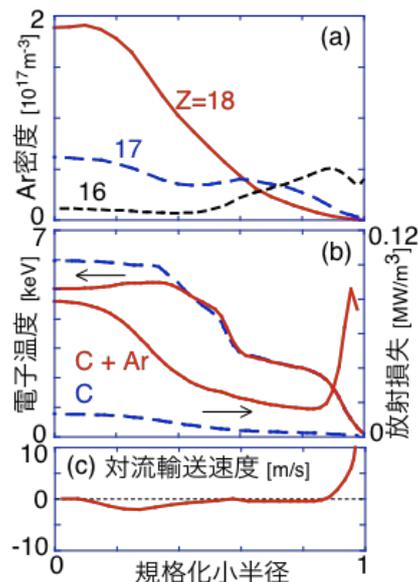


図2. ダイバータ板熱負荷低減のため入射したアルゴンの炉心に蓄積する価数Z毎の密度分布 (a)。元々混入していた炭素と蓄積したアルゴンが加わった放射損失分布と各場合の電子温度分布 (b)。アルゴンの蓄積に影響する対流輸送速度分布 (c)。

価した。

図2(a)に示すように、炉心にはアルゴンの16価から完全電離の18価までが蓄積し、その他の低価数のアルゴンは境界領域(規格化小半径 $\sim 1$ )に留まる。元々壁材料で炉心に混入していた炭素の放射損失に加えてアルゴン蓄積で放射損失が増大(+3.8MW)したため電子温度が低下(図2(b))して、炉心プラズマ性能は下がる(規格化ベータ値3.9から3.6へ低下)。しかし、この程度の放射損失量の増大は、全中性粒子加熱パワーの範囲内で補えるレベルで、炉心プラズマ性能を十分回復できる。この結果から、JT-60SAの高圧力定常運転シナリオの成立性を確認できた。また、蓄積は境界領域の外向き対流輸送(図2(c))で低減されており、炉心プラズマの境界密度の低下で対流輸送が低下し蓄積が増えることから、ダイバータ板の熱負荷を低減させることもできる境界の高密度化がシナリオに重要であるという知見を得た。また、ダイバータ板の許容熱負荷を5 MW/m<sup>2</sup>以下に低減した場合や、炉心プラズマの圧力をより高く(規格化ベータ値4.3)した場合等の条件でも解析を行い、より広いパラメータ領域でシナリオの成立性を検証した。壁材料が金属となるITERや原型炉では不純物入射は必須であり、今回行った解析手法はITERや原型炉のシナリオ構築に適用し貢献できる。本成果が評価されて世界的に著名なIAEA核融合エネルギー会議の口頭発表に選出された。

## 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 7件)

- ① N. Hayashi, K. Hoshino, M. Honda, S. Ide, "Predictive modelling of JT-60SA high-beta steady-state plasma with impurity accumulation", Nucl. Fusion **58** (2018) 066001(8pp), DOI 10.1088 / 1741-4326 / aab7bd, 査読有
- ② N. Hayashi, J. Garcia, M. Honda, et al., "Transport modelling of JT-60U and JET plasmas with internal transport barriers towards prediction of JT-60SA high-beta steady-state scenario", Nucl. Fusion **57** (2017) 126037(11pp), DOI 10.1088 / 1741-4326 / aa88de, 査読有
- ③ Y. Shimizu, T. Fujita, A. Okamoto, H. Arimoto, N. Hayashi, K. Hoshino, T. Nakano, M. Honda, "Particle pinch model of passing/trapped high-Z impurity with centrifugal force effect", Plasma Fusion Res. **11** (2016) 2403082(5pp), DOI 10.1585 / pfr.11.2403082, 査読有
- ④ N. Hayashi, M. Honda, J. Shiraishi, Y. Miyata, T. Wakatsuki, K. Hoshino, et

al., "Advance in integrated modelling towards prediction and control of JT-60SA plasmas", Proc. 42nd EPS Conf. on Controlled Fusion and Plasma Physics, 39E (2015) P5.145, ISBN 2-914771-98-3, 査読無

- ⑤ Y. Shimizu, T. Fujita, H. Arimoto, T. Nakano, K. Hoshino, N. Hayashi, "Analysis of tungsten transport in JT-60U plasmas", Plasma Fusion Res. **10** (2015) 3403062(4pp), DOI 10.1585 / pfr.10.3403062, 査読有
- ⑥ K. Hoshino, et al., "Development of the backflow model for simplified impurity exhaust in Monte-Carlo calculation", Contrib. Plasma Phys. **54** (2014) 404(5pp), DOI 10.1002 / ctp.201410032, 査読有
- ⑦ N. Hayashi, N. Aiba, T. Takizuka, N. Oyama, "Integrated simulation study of ELM pacing by pellet injection in ITER", Contrib. Plasma Phys. **54** (2014) 599(6pp), DOI 10.1002 / ctp.201410040, 査読有

[学会発表] (計 23件)

- ① N. Hayashi, J. Garcia, et al., "Predictive integrated modelling of plasmas and their operation scenarios towards exploitation of JT-60SA experiment", 27th IAEA Fusion Energy Conference, 22-27 Oct. 2018, Ahmedabad (India)
- ② 林 伸彦, 「プラズマ内部からダイバータ領域までを含む統合シミュレーション研究の進展」、第12回核融合エネルギー連合講演会シンポジウム「核融合原型炉に向けたシミュレーション研究の進展」、2018年6月28-29日、滋賀
- ③ 林 伸彦, 「統合モデリングコード開発プロジェクト IMSAID の研究成果」、第7回 IFERC-CSC 研究会、2018年3月2日、京都
- ④ 林 伸彦, 「トカマクプラズマ周辺輸送シミュレーションの進展」、Plasma Conference 2017 (PLASMA2017) シンポジウム「国際核融合エネルギー研究センター・計算機シミュレーションセンタープロジェクトにおける核融合シミュレーション研究の進展と今後の展開」、2017年11月20-24日、姫路
- ⑤ N. Hayashi, K. Hoshino, K. Shimizu, M. Honda, S. Ide, "Integrated modeling of JT-60SA high-beta steady-state plasma with impurity accumulation", 22nd Numerical Experiment of Tokamak (NEXT) Workshop, 9-10 Mar. 2017, Kyoto (Japan)
- ⑥ 林 伸彦, 「統合モデリングコード開発プロジェクト JIMS の研究成果」、第6回

- IFERC-CSC 研究会、2017年1月10-12日、東京
- ⑦ N. Hayashi, K. Hoshino, K. Shimizu, M. Honda, S. Ide, "Integrated modeling of JT-60SA high-beta steady-state scenario", 14th Burning Plasma Simulation Initiative (BPSI) Meeting, 7-8 Dec. 2016, Fukuoka (Japan)
- ⑧ 林 伸彦, 星野一生, 清水勝宏, 本多 充, 井手俊介, 「JT-60SAにおける高ベータ定常運転シナリオの統合モデリング」、第33回プラズマ・核融合学会年会、2016年11月29日-12月2日、仙台
- ⑨ 林 伸彦, 「原型炉に向けたプラズマモデリング研究の現状と課題」、第11回核融合エネルギー連合講演会シンポジウム「原型炉における計装制御の検討と開発」、2016年7月14-15日、福岡
- ⑩ N. Hayashi, K. Shimizu, K. Hoshino, M. Honda, S. Ide, "Core-edge coupled predictive modelling of JT-60SA high-beta steady-state plasma with impurity accumulation", 26th IAEA Fusion Energy Conference, 17-22 Oct. 2016, Kyoto (Japan)
- ⑪ N. Hayashi, N. Aiba, F. Casson, M. Honda, S. Ide "Validation of the matrix inversion method for bootstrap current calculation", 16th ITPA topical group meeting on integrated operation scenario, 26-29 Apr. 2016, Garching (Germany)
- ⑫ 林 伸彦, 「統合モデリングコード開発プロジェクト JIMS の研究成果」、第5回 IFERC-CSC 研究会、2016年2月14-15日、東京
- ⑬ 清水友介, 藤田隆明, 岡本 敦, 有本英樹, 林 伸彦, 星野一生, 仲野友英, 本多 充, 「JT-60U トロイダル回転プラズマにおけるタングステン輸送の解析」、第32回プラズマ・核融合学会年会、2015年11月24-27日、名古屋
- ⑭ 林 伸彦, 清水勝宏, 星野一生, 本多 充, 「炉心と SOL/ダイバータプラズマにおける不純物輸送の統合モデリング」、第32回プラズマ・核融合学会年会、2015年11月24-27日、名古屋
- ⑮ N. Hayashi, K. Shimizu, K. Hoshino, M. Honda, "Integrated modeling of impurity transport in core and SOL/divertor plasmas", 13rd Burning Plasma Simulation Initiative (BPSI) Meeting, 10-11 Dec. 2015, Fukuoka (Japan)
- ⑯ N. Hayashi, K. Shimizu, K. Hoshino, M. Honda, "Integrated modeling of impurity transport in core and SOL/divertor plasmas", 15th International Workshop on Plasma Edge Theory in Fusion Devices, 9-11 Sep. 2015, Nara (Japan)
- ⑰ N. Hayashi, M. Honda, J. Shiraishi, Y. Miyata, T. Wakatsuki, K. Hoshino, et al., "Advance in integrated modelling towards prediction and control of JT-60SA plasmas", 42nd EPS Conf. on Controlled Fusion and Plasma Physics, 22-26 Jun. 2015, Lisbon (Portugal)
- ⑱ 林 伸彦, 「統合モデリングコード開発プロジェクト JIMS の研究成果」、第4回 IFERC-CSC 研究会、2015年2月19-20日、東京
- ⑲ N. Hayashi, J. Garcia, M. Honda, K. Shimizu, K. Hoshino, et al., "Integrated modeling of JT-60SA plasma operation scenarios with model validation and verification", 12nd Burning Plasma Simulation Initiative (BPSI) Meeting, 11-12 Dec. 2014, Fukuoka (Japan)
- ⑳ N. Hayashi, J. Garcia, M. Honda, K. Shimizu, K. Hoshino, et al., "Progress in integrated modeling of JT-60SA plasma operation scenarios with model validation and verification", Plasma Conference 2014 (PLASMA2014), 18-21 Nov. 2014, Niigata (Japan)
- 21 Y. Shimizu, T. Fujita, H. Arimoto, T. Nakano, K. Hoshino, N. Hayashi, "Analysis of tungsten transport in JT-60U plasmas", 24<sup>th</sup> International Toki Conference, 3-6 Nov. 2014, Toki (Japan), Plasma Conference 2014 (PLASMA2014), 18-21 Nov. 2014, Niigata (Japan)
- 22 M. Hosokawa, A. Loarte, G. Huijsmans, T. Takizuka, N. Hayashi, "Kinetic modelling of divertor fluxes during ELMs in ITER", 41st EPS Conf. on Controlled Fusion and Plasma Physics, 23-27 Jun. 2014, Berlin (Germany)
- 23 清水友介, 藤田隆明, 有本英樹, 仲野友英, 星野一生, 林 伸彦, 「JT-60U プラズマにおけるタングステン輸送の解析」、第10回核融合エネルギー連合講演会、2014年6月19-20日、筑波

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

林 伸彦 (HAYASHI NOBUHIKO)

量子科学技術研究開発機構・先進プラズマ研究部・グループリーダー (定常)

研究者番号：10354573

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

星野一生 (HOSHINO KAZUO)

量子科学技術研究開発機構・先進プラズマ  
研究部・主幹研究員（定常）  
研究者番号：50513222

相羽信行（AIBA NOBUYUKI）  
量子科学技術研究開発機構・核融合炉シス  
テム研究開発部・上席研究員（定常）  
研究者番号：20414584

本多 充（HONDA MITSURU）  
量子科学技術研究開発機構・先進プラズマ  
研究部・主幹研究員（定常）  
研究者番号：90455296