

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 10 日現在

機関番号：82110

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22760665

研究課題名（和文） 多重輸送障壁の分布形成・崩壊の相互作用ダイナミクスと熱排出抑制の研究

研究課題名（英文） Research of interaction dynamics of formation and collapse of multi transport barriers and reduction of heat exhaust

研究代表者

林 伸彦 ( HAYASHI NOBUHIKO )

独立行政法人日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門・研究副主幹

研究者番号：10354573

研究成果の概要（和文）：

多重輸送障壁の分布形成・崩壊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、境界輸送障壁崩壊の熱排出特性、燃料粒子ペレット入射による境界輸送障壁崩壊誘起機構、高いプラズマ圧力を維持しつつ熱排出を大きく抑制できる条件、電流分布に依存して形成された箱型の内部輸送障壁に境界輸送障壁の崩壊はほぼ影響しないことを明らかにした。また、実験データを用いて放物型内部輸送障壁を模擬する輸送モデルを検証した。

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 profile formation and collapse of multi transport barriers (TB). Simulations with the developed code clarify that heat exhaust characteristics of edge TB collapse, mechanism to trigger the edge TB collapse by the injection of fuel pellet, conditions to reduce the heat exhaust with keeping the high plasma pressure, and low impact of edge TB collapse on the box-type internal TB formed depending on the current profile. The validation of transport models for the parabolic-type internal TB also has been done.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
総計	1,900,000	570,000	2,470,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・核融合学

キーワード：核融合プラズマ、輸送障壁、熱排出、ダイバータ、統合コード、シミュレーション、分布形成、分布崩壊

## 1. 研究開始当初の背景

核融合研究は、建設中の国際熱核融合実験炉（ITER）で初めて核融合反応による自己加熱が大きい燃焼実験を行う段階にきており、そのため経済性を高めるための燃焼プラ

ズマの高圧力化と定常維持が重要となる。この有効な手段は、炉心の内部・境界両方にプラズマ輸送を低減する輸送障壁を形成することである。輸送障壁によりプラズマを高圧力化できて、急峻な圧力勾配でプラズマの自

発電流を大きくし定常化しやすくなる。しかし、図1左に示す様に境界輸送障壁ではMHD不安定性による周期的な分布崩壊が起きて熱エネルギーが炉心から排出され、周辺の磁力線終端にあるダイバータ板への熱負荷低減が課題となる。

これまでの研究から輸送障壁燃焼プラズマは、核融合反応による自己加熱と自発電流で自律的に形成することがわかったが、各々の輸送障壁間の相互作用のダイナミクスは明らかでない。高圧力化には内部輸送障壁をできるだけ境界輸送障壁近くにする必要があり、摂動の伝搬により互いに干渉し合って形成・崩壊することが予測される。さらに、周辺プラズマの固有の状態遷移が、境界輸送障壁に影響すると予測されるが、炉心と周辺の複合したダイナミクスは未解明である。また、相互作用する多重輸送障壁が、外部からの微弱な制御にどう反応するか興味深い。

## 2. 研究の目的

本研究では、燃焼プラズマにおける炉心・周辺の複合した多重輸送障壁の分布形成・崩壊の相互作用ダイナミクスを解明し、高圧力・定常化と熱排出抑制との両立性を検証し、その両立できる運転領域を明らかにすることを目的として研究を行う。

## 3. 研究の方法

本研究では統合化モデリング・コードを開発・改良して、それを用いたシミュレーションにより研究を行う。炉心プラズマの輸送コ

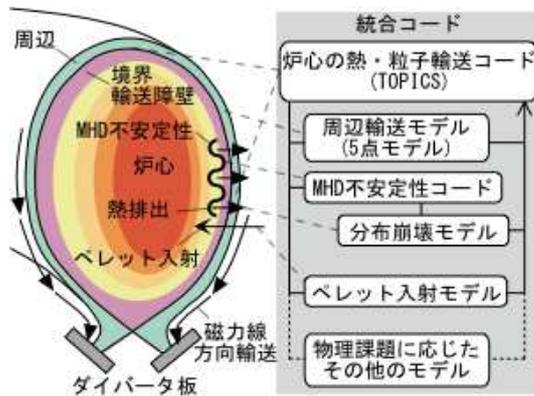


図1 トカマクのトーラス断面における境界輸送障壁崩壊による熱排出とダイバータ板への流れ(左図)、統合コードとの対応(右図)

ードとして、原子力機構で開発されている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。また、統合コード・モデルの開発・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・検証して統合モデル・コードの妥当性を適宜検証する。

## 4. 研究成果

### (1) 統合モデル・コードの開発・改良

燃料粒子(重水素か三重水素)ペレット入射モデルを開発して、炉心・周辺統合コード(炉心プラズマの1.5次元輸送コードTOPICSに周辺プラズマの5点モデルを結合した統合コード)に結合した。これにより、多重輸送障壁の分布形成・崩壊のペレットを用いた制御研究を可能とした。開発した統合モデル・コードの構成を図1右に示す。MHD不安定性コードにより時々刻々のプラズマの安定性を調べ、不安定な場合は不安定モードの分布に基づいて拡散率を増加させて分布崩壊をモデル化した。

### (2) 境界輸送障壁崩壊の熱排出特性

開発した統合コードを用いたシミュレーションにより、図2(a)に示される境界輸送障壁内側の圧力勾配の急峻化により不安定モードの固有関数が広がり(図2(b))、その結果、図3に示される様に境界輸送障壁崩壊による熱排出を増加させることを明らかにした。さらに、この予測をJT-60Uの実験解析により確かめ(図3)、モデルの妥当性を確認するとともに実験で未解明の機構を統合シミュレーションで初めて明らかにすることができた。

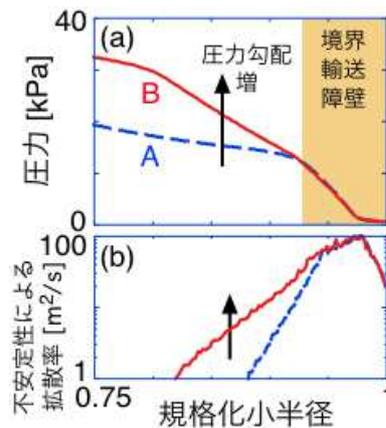


図2 境界輸送障壁内側の圧力勾配を急峻にした(A→B)場合の(a)圧力分布、(b)不安定性による拡散率

### (3) 境界輸送障壁崩壊の熱排出抑制制御

①燃料ペレットによる境界輸送障壁崩壊の誘起機構の解明

境界輸送障壁に燃料ペレットを入射するシミュレーションを行い、ペレットによるエネルギー吸収と輸送の増幅の2つの効果が崩壊を誘起することを明らかにした。図4(a)は、ペレットによるエネルギー吸収効果を考慮した場合の圧力分布変化を示し、圧力勾配が局所的に急峻になり、不安定モードの

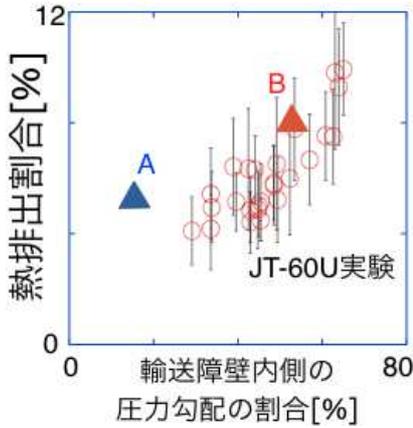


図3 境界輸送障壁崩壊による熱排出割合の、輸送障壁の圧力勾配に対する輸送障壁内側圧力勾配の割合の依存性。A, B は図2のシミュレーション結果。○はJT-60U実験結果。

固有関数が狭くなり (図4(b))、その結果、熱排出を抑制できることを明らかにした。ペレットによる輸送の増幅の効果でも同様の結果になり、2つの効果を同時に考慮するとより確実に崩壊が起きることになる。得られた結果は概ね実験で観測された結果と一致しており、実験で未解明だったペレットによる崩壊誘起機構を明らかにでき、熱排出抑制に対するペレットの有効性を示すことができた。

②燃料ペレットによる境界輸送障壁崩壊の

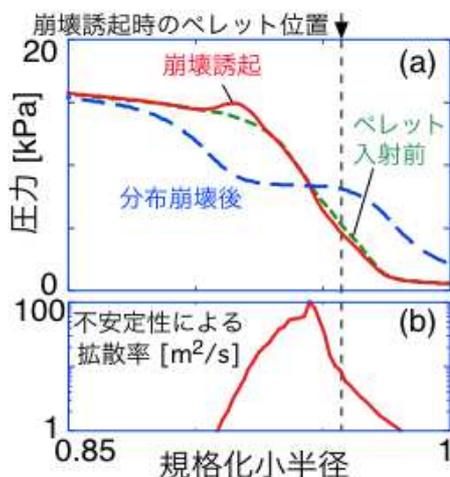


図4 トーラス内側からのペレット入射前(点線)、入射後の崩壊誘起時(実線)、分布崩壊後(破線)の(a)圧力分布、(b)不安定性による拡散率。縦の点線は、崩壊誘起時のペレット位置。

熱排出抑制とプラズマの高圧力化との両立性

統合シミュレーションを行い、高いプラズマ圧力を維持しつつ熱排出を大きく抑制できる条件を調べた。図5に示す様に自然発生する境界輸送障壁形成・崩壊サイクルの中間のタイミングに相当するプラズマにペレットを入射すると、プラズマ圧力をあまり低くしない(自然発生崩壊時より5%程度低い)で、熱排出を大きく抑制できた。その場合の熱排出のペレットの大きさや速度の依存性を、図6に示す。トーラス外側から入射すれば小さいペレット(境界輸送障壁内の粒子数の1%程度)で熱排出を大きく抑制できる(図6(a))。また、ペレットの入射速度を遅くすると浅い位置で崩壊を起こして熱排出を大きくしてしまう(図6(b))ことから、輸送障壁の内側端に近づける速度が必要であった。以上の条件で、ペレットは境界輸送障壁内深く侵入し、境界輸送障壁内側端に局所化した崩壊を起こすことで、熱排出を大きく抑制することを明らかにした。

(4)境界輸送障壁崩壊の内部輸送障壁への影響

内部輸送障壁には、その分布形状から箱型と放物型の2種類があり、各々について調べる必要がある。箱型については実験で検証された輸送モデルがあるが、放物型にはないので、放物型についてはまず輸送モデルの検証を行った。

①箱型の内部輸送障壁

JT-60Uの実験で妥当性を検証した箱型の内部輸送障壁を模擬する輸送モデルを用い

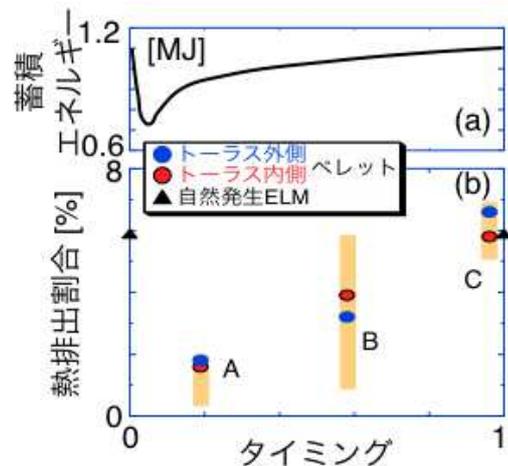


図5 (a)自然発生する分布形成・崩壊サイクルにおける境界輸送障壁内の蓄積エネルギーの時間変化。(b)単発のペレットで誘起した崩壊の熱排出割合。大きさ0.6mm、速度120m/sの球状ペレットを、トーラス外側(●)と内側(●)から入射。自然発生崩壊の排出は▲。影の縦棒は、ペレットの大きさや速度を変えた場合の排出量の範囲。

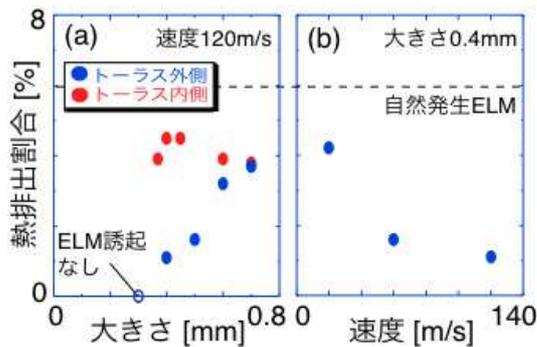


図6 図5のBのタイミングで特定のパラメータをスキャン。(a) 崩壊による熱排出割合のペレットの大きさの依存性。点線は、自然に発生する崩壊の排出量。入射位置に依らず、0.4mmより小さいペレットは崩壊を誘起しない。(b) 熱排出を大きく低減できたトラス外側ペレット(大きさ0.4mm)における熱排出割合のペレット速度依存性。

て、境界輸送障壁崩壊の内部輸送障壁への影響をシミュレーションで調べた。その結果、崩壊が直接に電流分布を変化させない条件下では、電流分布の擾動は内部輸送障壁位置までは伝わらず磁気シア(電流分布に依る)に大きく依存して形成された内部輸送障壁には、ほとんど影響しないことが分かった。

②放物型の内部輸送障壁を模擬する輸送モデルの検証

放物型内部輸送障壁を模擬する輸送モデルは未だ実験で検証されていないため、JT-60Uのデータを用いて輸送モデルを検証した。電流拡散ブルーニングモードモデルとボーム・ジャイロボーム(BgB)モデルは、実験に近い温度分布が得られるが、ドリフト波乱流モデルGLF23は実験に比べ温度が高くなった。ただし、BgBモデルでは明確な内部輸送障壁が見られなかった。今後、より多くの実験データと比べ検証する必要がある。

## 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8件)

- ① N. Hayashi, et al., "Reduction of ELM energy loss by pellet injection for ELM pacing", Proc. 24th IAEA Fusion Energy Conference, F1-CN-197 (2012) TH/5-3(8pp) 査読無
- ② G. Giruzzi, J. Garcia, N. Hayashi, et al., "Model validation and integrated modeling simulations for the JT-60SA tokamak", Proc. 24th IAEA Fusion Energy Conference, F1-CN-197 (2012) TH/P2-3(8pp) 査読無
- ③ J. Garcia, N. Hayashi, et al.,

"Comparative transport analysis of JET and JT-60U discharges", Proc. 39th EPS Conf. on Controlled Fusion and Plasma Physics, 36 (2012) P5.057, ISBN 2-914771-79-7, 査読無

- ④ N. Hayashi, et al., "Integrated modeling of whole tokamak plasma", Plasma Fusion Res. **6** (2011) 2403065(8pp), DOI 10.1585 / pfr.6.2403065, 査読有
- ⑤ N. Hayashi, et al., "Integrated simulation of ELM triggered by a pellet through energy absorption and transport enhancement", Nucl. Fusion **51** (2011) 103030(8pp), DOI 10.1088 / 0029-5515 / 51 / 10 / 103030, 査読有
- ⑥ N. Hayashi, et al., "Effect of core pressure gradient just inside the top of the pedestal on the energy loss due to the edge localized mode in JT-60U", Nucl. Fusion **51** (2011) 073015(7pp), DOI 10.1088 / 0029-5515 / 51 / 7 / 073015, 査読有
- ⑦ N. Oyama, N. Hayashi, et al., "Characteristics and control of the type I edge localized mode in JT-60U", Nucl. Fusion **51** (2011) 033009(9pp), DOI 10.1088 / 0029-5515 / 51 / 3 / 033009, 査読有
- ⑧ N. Hayashi and JT-60 Team, "Advanced tokamak research with integrated modeling in JT-60 Upgrade", Phy. Plasmas **17** (2010) 056112(13pp), DOI 10.1063 / 1.3327917, 査読有

[学会発表] (計14件)

- ① 林 伸彦、他、「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」、第29回プラズマ・核融合学会年会、2012年11月27-30日、福岡
- ② N. Hayashi, et al., "Integrated simulation of ELM pacing by pellet injection", US-Japan JIFT Workshop on Integrated Modeling, 14-16 Nov. 2012, Kyoto (Japan)
- ③ N. Hayashi, et al., "Reduction of ELM energy loss by pellet injection for ELM pacing", 24th IAEA Fusion Energy Conference, 8-13 Oct. 2012, San Diego (USA)
- ④ G. Giruzzi, J. Garcia, N. Hayashi, et al., "Model validation and integrated modeling simulations for the JT-60SA tokamak", 24th IAEA Fusion Energy Conference, 8-13 Oct. 2012, San Diego (USA)
- ⑤ J. Garcia, N. Hayashi, et al.,

- "Comparative transport analysis of JET and JT-60U discharges", 39th EPS Conf. on Controlled Fusion and Plasma Physics, 2-6 Jul. 2012, Stockholm (Sweden)
- ⑥ N. Hayashi, et al., "Integrated modeling in JAEA and its application to ELM control by pellet injection", US-Japan JIFT Workshop on Integrated Modeling, 12-14 Mar. 2012, San Diego (USA)
- ⑦ N. Hayashi, et al., "Integrated simulation study of ELM pacing by pellet injection with TOPICS-IB", Plasma Conference 2011, 22-25 Nov. 2011, Kanazawa (Japan)
- ⑧ N. Hayashi, et al., "Integrated simulation study of ELM pacing by pellet injection with TOPICS-IB", 13th International Workshop on H-mode Physics and Transport Barriers, 10-12 Oct. 2011, Oxford (UK)
- ⑨ 林 伸彦、他、「原子力機構における統合シミュレーションの進展」、招待講演、プラズマシミュレータシンポジウム 2011、2011年9月13-14日、土岐
- ⑩ T. Tatekawa, Y. Suzuki, H. Takemiya, N. Hayashi, I. Kamata, "SOAF: A Grid-based framework for integrating large-scale long-run applications", ITER Integrated Modeling Technology Workshop, 8-10 Jun. 2011, Cadarache (France)
- ⑪ N. Hayashi, et al., "Integrated modeling of whole tokamak plasma", Invited talk, 20th International Toki Conference, 7-10 Dec. 2010, Toki (Japan)
- ⑫ N. Hayashi, et al., "Integrated simulation of ELM triggered by pellet through energy absorption and transport enhancement", 11-16 Oct. 2010, Daejeon (Korea)
- ⑬ N. Oyama, N. Hayashi, et al., "Characteristics and control of type I ELM in JT-60U", 23rd IAEA Fusion Energy Conference, 11-16 Oct. 2010, Daejeon (Korea)
- ⑭ N. Hayashi and M. Honda, "ITER scenario simulations with TOPICS-IB", ITPA topical group meeting on integrated operation scenario, 20-23 Apr. 2010, Princeton (USA)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

林 伸彦 (HAYASHI NOBUHIKO)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・核

融合研究開発部門・研究副主幹

研究者番号：10354573