

## 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 1日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2008～2012

課題番号：20246135

研究課題名（和文）エルゴディック層と閉構造ダイバータによるプラズマの閉じ込め改善研究

研究課題名（英文）Confinement improvement study with ergodic layer and closed divertor

研究代表者

小森 彰夫（AKIO KOMORI）

核融合科学研究所・所長

研究者番号：50143011

研究成果の概要（和文）：

先行研究で大きな成果を挙げたローカルアイランドダイバータを、定常運転に対応した閉構造ダイバータに発展させ、大型ヘリカル装置（LHD）に設置した。初期実験では、閉構造化によって中性粒子が数値実験の予測通りに圧縮されていることが確かめられた。また、閉構造ダイバータ配位と共存可能なプラズマ周辺部のエルゴディック層を、外部摂動磁場によって変化させることで、ダイバータへの熱・粒子輸送を制御できることを示した。

研究成果の概要（英文）：

The closed helical divertor (CHD) which was based on the outstanding results of the local island divertor (LID) has been developed to be applied to the steady-state operation. The installation of CHD to the Large Helical Device has been performed step by step. In the initial experiment, the sufficient neutral gas compression, as expected in the numerical simulation, was observed in CHD. In addition, it was demonstrated that the edge energy and particle transport can be controlled by changing the edge magnetic ergodicity with resonant magnetic perturbations applied with LID coils.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	8,500,000	2,550,000	11,050,000
2009年度	7,700,000	2,310,000	10,010,000
2010年度	7,000,000	2,100,000	9,100,000
2011年度	7,400,000	2,220,000	9,620,000
2012年度	4,400,000	1,320,000	5,720,000
総計	35,000,000	10,500,000	45,500,000

研究分野：プラズマ工学

科研費の分科・細目：総合工学・核融合学

キーワード：炉心プラズマ，周辺プラズマ，エルゴディック層，ダイバータ

## 1. 研究開始当初の背景

ヘリカル系やトカマク等，トーラス装置におけるコアプラズマの閉じ込めは，プラズマ周辺部における熱・粒子輸送の影響を受けることが分かっている。さらに周辺プラズマはその外側，つまり真空容器壁との間に存在する中性粒子や不純物の挙動に大きく左右され

ることから，「周辺プラズマから真空容器壁（プラズマ対向壁）に至る領域」を制御することによって，コアプラズマの閉じ込め性能を向上させる可能性がある。

LHDでは，ローカルアイランドダイバータ（LID）を用いた先行研究で，周辺部の中性粒子を効率的に制御することにより超高密度プ

ラズマの生成に成功する等、大きな成果を上げてきた。しかしLIDは熱負荷が大きいために定常運転ができず、実機（燃焼炉）の周辺制御には使用できない。そこでLIDに代わる本格的な周辺制御ツールの開発と、それを用いたプラズマの閉じ込め性能の改善が期待されている。

## 2. 研究の目的

本研究は、大きな成果を上げることができた「LIDによる周辺プラズマ制御研究」で得られた知見を、エルゴディック層を有する閉構造ダイバータ研究に発展させ、主プラズマの閉じ込め性能向上に寄与することを目的としている。また、トラス装置に共通な閉じ込め改善のメカニズムを解明し、閉構造ダイバータが具備すべき物理要素を確定し、将来の核融合炉設計に貢献する。

具体的には、エルゴディック層を有する閉構造ダイバータが、LIDと同等以上のダイバータ機能を有するか否かを、中性粒子および不純物の制御性、ペレットによる中心燃料粒子供給との整合性、密度および温度分布の制御性等に着目した実験で明らかにする。

## 3. 研究の方法

(1) ローカルアイランドダイバータ実験で得られた結果を解析し、内部拡散障壁の形成メカニズムを明らかにしてエルゴディック層を有する閉構造ダイバータが具備すべき物理要素を確定する。

(2) 計算機シミュレーションを行い、エルゴディック層を有するダイバータ磁場配位を決定する。

(3) ダイバータ板、バップル板、真空ポンプの等の工学設計を行い、磁場配位の最適化を図る。

(4) 閉構造ダイバータを製作する(別予算)。

(5) エルゴディック層を有する閉構造ダイバータを用いて実験を行い、ダイバータ機能、プラズマ性能に与える影響を検証する。

(6) 実験結果を解析し、理論・シミュレーション結果との比較・検討を行い、トラス装置における物理の総合的理解に貢献するとともに、実証炉に向けた研究につなげる。

## 4. 研究成果

先行研究で大きな成果を挙げた、ローカルアイランドダイバータ (LID) 実験の成功を

受けて、排気装置を備えた閉構造ヘリカルダイバータ (CHD) の開発・設計を 2008 年度より開始した。同ダイバータは LID 同様、閉構造を有することで効果的な粒子排気を目指しているが、ダイバータレッグとターゲット板 (炭素タイル) の接触面積を LID と比べて極めて大きくとることができるために、熱負荷に対する耐性が大きい点が特徴である。このため、LID では不可であった高パワー放電、長時間放電が可能となる。

バップルによる閉構造化では、その形状および設置位置がダイバータ性能を大きく左右する。我々は工学設計の前に、詳細な磁場構造解析と 3 次元中性粒子輸送モンテカルロシミュレーションによる物理設計を行った。目標とする性能は、ペレット粒子供給による定常放電を想定し「約  $20\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$  のダイバータ排気の達成」とした。このためには、開発中の内蔵クライオポンプの性能を鑑みると、ダイバータ室内の中性粒子圧力を、これまでの開いたダイバータ部より一桁程度上げる必要がある。

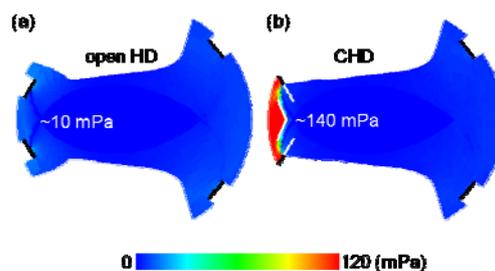


図 1. 3 次元モンテカルロシミュレーションによる中性粒子圧力分布. (a) 従前の開いた構造のダイバータ. (b) バップルによる閉構造ダイバータ.

### (1) シミュレーションによる物理設計

図 1 に、シミュレーション結果に基づいて最適化された CHD 配位における中性粒子圧力分布を示す。従前の「開いた」ダイバータ配位と比べると、バップルによる閉構造部で 10 倍以上の圧力が得られていることが分かる。このような条件が達成できれば、ペレットでプラズマ中心部に供給した粒子をすべて排気することが可能となり、リサイクリングの極めて低い放電が達成されることになる。これは LID で得られた高性能放電を、HD でも再現可能であることを意味している。

また、ダイバータ部の高い中性粒子圧力は、ダイバータ板の熱負荷軽減に効果的な、「ダイバータデタッチメント」の実現と、その安定維持に寄与できる可能性がある。これはプラズマの定常維持に極めて重要である。

### (2) CHD の建設

上述の物理設計を経て、各コンポーネント

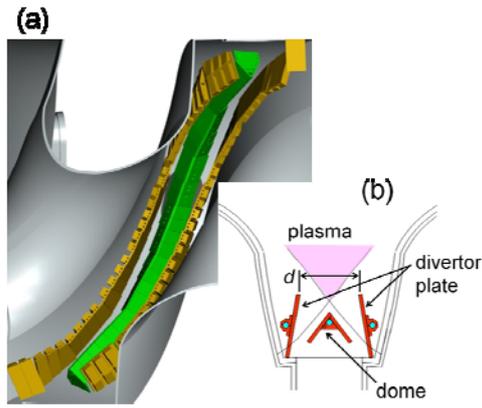


図 2. トーラス内側に設置された(a) CHD モジュールと(b) その断面.

の工学設計を行った。ヘリカルダイバータのダイバータレッグは、トーラスに沿って連続的に存在するが、これまでに行われたシミュレーションおよび実験結果から、ダイバータ粒子束は、その約 90% がトーラス内側に集中することが分かっている。このため CHD は内側だけに 10 分割 (モジュール化) して設置することにした。

図 2 に、トーラス内側に設置された CHD の鳥瞰図とモジュールの断面を示す。CHD は、ダイバータレッグと接触するターゲット板、ドーム、クライオポンプから成る。ターゲット板はバッフルを兼ねており、中性化した粒

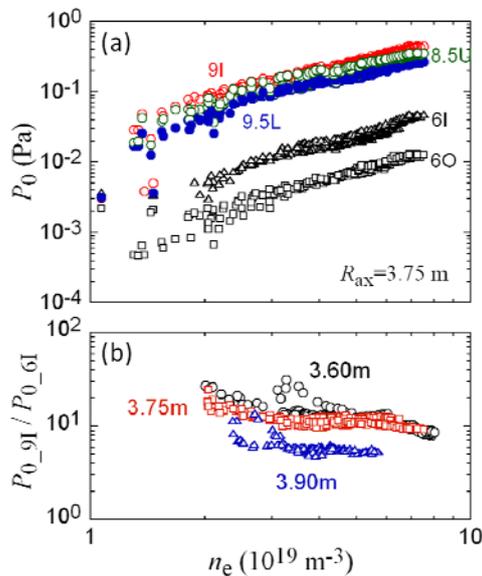


図 3. (a)  $R_{ax}=3.75m$  配位時の CHD (6.5L, 6I, 6O), 開いたダイバータ (6I) およびダイバータ領域外 (6O) における中性粒子圧力の平均密度依存性. (b) 異なる磁気軸位置における中性粒子圧力比の密度依存性.

子がクライオポンプに向かうように、底部に対してほぼ垂直に設置されている。ドームは中性粒子が再びプラズマ側に戻らないように遮蔽するとともに、ドーム内の中性粒子圧力を上昇させて、そこに設置されたクライオポンプの排気速度を高める働きをする。尚、クライオポンプは初期段階では設置されていない。

### (3) 実験結果 1 — 中性粒子の圧縮 —

2010 年度は、まず 2 モジュールの CHD を LHD に設置した。初期実験では、バッフルが設計通りに機能し、標準断面形状 ( $B_q=100\%$ ,  $\gamma=1.254$ ) において、磁気軸  $3.60 < R_{ax} < 4.00m$  の範囲で異常な温度上昇が見られない等、機器の健全性を確認した。

閉構造部の中性粒子圧力は、図 3 (a) に示すように電子密度の上昇とともに増加し、最高値は  $0.7Pa$  に達した。この傾向は内寄せ配位ほど著しく、開構造部と閉構造部の圧力比は、内寄せ時で 10~20 倍であった (図 3 (b))。また、閉構造化によって以前より中性粒子のリサイクリングが低く抑えられていることも明らかになった。

### (4) 実験結果 2 — デタッチメント —

閉ダイバータ部は (3) で示したように、開いたダイバータ部と比較して、中性粒子圧力が 10 ~ 20 倍高い。このような条件下では、粒子リサイクリングの増大が期待される。

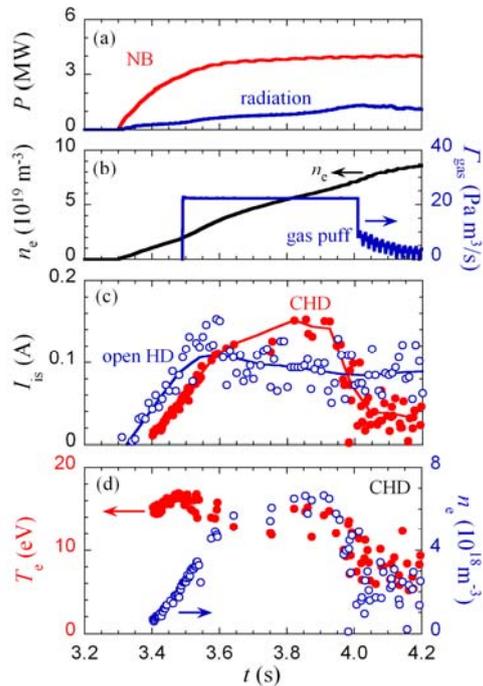


図 4. デタッチメント放電時の(a)加熱パワーと放射パワー, (b)平均密度とガスバフ, (c)ダイバータ粒子束, (d)ダイバータプラズマの電子温度・電子密度.

プラズマの平均密度が上昇し、 $4 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ 以上になると CHD のダイバータ粒子束は飽和傾向になり、さらに上昇すると、突然ダイバータ粒子束が減少する「ダイバータデタッチメント」に移行する現象が観測された(図4)。一方で、開いたダイバータ部では、デタッチメント現象は見られないことが分かった。デタッチメントによってダイバータへの熱負荷は大きく減少する。

### (5) 実験結果 3

#### —エルゴディック層の制御—

LID と対称的に CHD は、ヘリオトロン配位に特有な周辺エルゴディック層との共存が可能である。これまでの研究で、エルゴディック層は、コア領域からダイバータに至る過程の、エネルギー・粒子輸送に大きな影響を与える可能性があると考えられている。エルゴディック層の特性は、磁場配位(磁気軸位置)やプラズマのベータ値(圧力)で変化する。また、外部から加えた「共鳴摂動磁場(RMP)」で積極的に制御することも可能である。LHD には、LID で磁気島を印加するために使用する RMP コイルが設置されている。

このコイルを使用してエルゴディック層を制御する実験を行った。密度を連続的に上昇させる放電では、RMP を印加しない場合、通常、密度がある閾値を超えると、放射強度が急激に上昇して「放射崩壊」に至る。一方、RMP を印加すると、密度上昇中、前述の閾値に至る前にダイバータデタッチメントに移行し、以後安定した放電が続く。この時、放

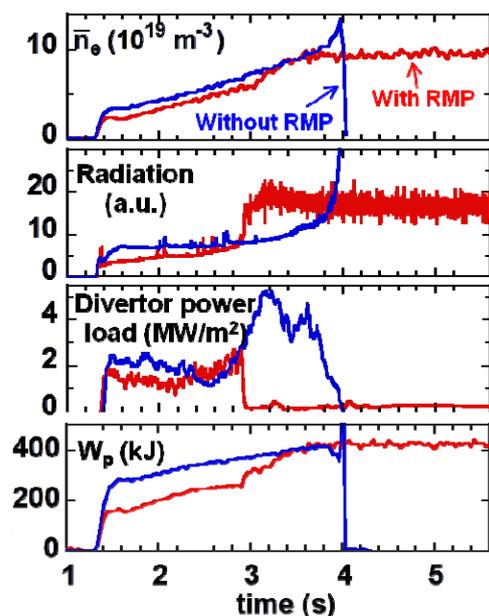


図5. RMPの有無による放電の違い。上から平均密度、放射パワー、ダイバータへの熱負荷、蓄積エネルギー。青線がRMPを印加した時の波形。

射強度はデタッチメント移行前の2倍以上に増加するが、それ以上増加することは無く、高い放射強度は長時間維持される。これはRMPの印加によって、エルゴディック層内のエネルギー・粒子輸送が影響を受け、ダイバータに流れ込む粒子束のパワーが減少したために、デタッチメントに至ったものと思われる。

これは「RMPによって、ダイバータへの熱負荷を制御することが可能」であることを示唆する実験結果であり、将来の燃焼炉における熱負荷制御法として大いに期待されるものである。

### 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20件)

① T. Morisaki, S. Masuzaki, M. Kobayashi, 他12名, "Initial experiments towards edge plasma control with a closed helical divertor in LHD", Nuclear Fusion, vol. 53 (2013) 063014, 査読有, doi:10.1088/0029-5515/53/6/063014

② M. Shoji, S. Masuzaki, M. Kobayashi, 他3名, "Effect of a baffle divertor structure on neutral hydrogen and helium transport in the Large Helical Device", Journal of Nuclear Materials, to be published in 2013, 査読有, http://dx.doi.org/10.1016/j.jnucmat.2013.01.116

③ S. Masuzaki, M. Kobayashi, T. Akiyama, 他20名, "Divertor heat and particle control experiments on the large helical device", Journal of Nuclear Materials, to be published in 2013, 査読有,

④ M. Shoji, S. Masuzaki, T. Morisaki, 他3名, "Design of a Vacuum Pumping System for the Closed Helical Divertor for Steady State Operation in LHD", Plasma and Fusion Research, vol.7 (2012) 2405145, 査読有, DOI: 10.1585/pfr.7.2405145

⑤ S. Masuzaki, M. Shoji, M. Tokitani, 他7名, "Design and installation of the closed helical divertor in LHD", Fusion Engineering and Design, vol. 85 (2010) 940, 査読有, http://dx.doi.org/10.1016/j.fusengdes.2010.08.048

⑥ S. Masuzaki, M. Kobayashi, M. Shoji, 他10名, "Neutral gas compression in the helical divertor with a baffle structure in the LHD

heliotron”, Plasma and Fusion Research, vol.6, p.1202007, 2011年, 査読有  
[http://www.jspf.or.jp/PFR/PFR\\_articles/pfr2011/pfr2011\\_06-1202007.html](http://www.jspf.or.jp/PFR/PFR_articles/pfr2011/pfr2011_06-1202007.html)

⑦ M. Shoji, S. Masuzaki, M. Kobayashi, 他6名, “Investigation of the helical divertor function and the future plan of a closed divertor for efficient particle control in the LHD plasma periphery”, Fusion Science and Technology, 58, No.1, (2010) p208, 査読有  
<http://epubs.ans.org/?a=10808>

⑧ M. Kobayashi, Y. Feng, S. Morita, 他12名, “Transport characteristics in the stochastic magnetic boundary of LHD: magnetic field topology and its impact on divertor physics and impurity transport”, Fusion Science and Technology vol.58 (2010) 220-231, 査読有  
<http://epubs.ans.org/?a=10808>

⑨ Y. Suzuki, K.Y. Watanabe, H. Funaba, 他3名, Effects of the stochasticity on transport properties in high- $\beta$  LHD, Plasma and Fusion Research, vol.4, p.36, 2009年, 査読有  
[http://www.jspf.or.jp/PFR/PFR\\_articles/pfr2009/pfr2009\\_04-036.html](http://www.jspf.or.jp/PFR/PFR_articles/pfr2009/pfr2009_04-036.html)

⑩ A. Komori, H. Yamada, S. Sakakibara, 他140名, Development of net-current free heliotron plasmas in the Large Helical Device, Nuclear Fusion, vol. 49, p.104015, 2009年, 査読有  
doi: 10.1088/0029-5515/49/10/104015

[学会発表] (計46件)

① M. Kobayashi, S. Masuzaki, I. Yamada, 他7名, “Control of 3D edge radiation structure with resonant magnetic perturbation fields applied to the stochastic layer and stabilization of radiative divertor plasma in LHD (Oral)”, 24th IAEA Fusion Energy Conference, Oct. 8-13, 2012, San Diego, USA.

② T. Morisaki, S. Masuzaki, M. Kobayashi, 他12名, “First Results of Closed Helical Divertor Experiment in LHD”, 24th IAEA Fusion Energy Conference, Oct. 8-13, 2012, San Diego, USA.

③ T. Morisaki, D. Ogawa, Y. Hasuike, 他7名, “Development of Helium Beam Probe for Edge Plasma Measurements”, 39<sup>th</sup> European Physical Society Conference on Plasma Physics / 16<sup>th</sup> International Congress on Plasma Physics, 2-6 July 2012, Stockholm, Sweden.

④ T. Morisaki, S. Masuzaki, M. Kobayashi, 他

12名, “Experimental Results of Closed Divertor Plasma in LHD (invited)”, 18th International Stellarator/Heliotron Workshop, February 1, 2012, Australian National University, Canberra, Australia.

⑤ A. Komori, “Prospects of fusion research in Japanese universities for the next two decades (invited)”, 20<sup>th</sup> International Toki Conference, Dec. 7-10, 2010 (Ceratopia Toki).

⑥ M. Shoji, S. Masuzaki, T. Morisaki, 他6名, “Simulation analysis of the design of a vacuum pumping system for the closed helical divertor in the Large Helical Device” 20<sup>th</sup> International Toki Conference, Dec. 7-10, 2010 (Ceratopia Toki).

⑦ 森崎友宏, 増崎 貴, 小林政弘, 他11名, 「LHDダイバータ実験の初期結果」第27回プラズマ・核融合学会年会(2010年11月30日~12月3日 北海道大学)

⑧ 小林政弘, 増崎貴, 時谷政行, 他4名, 「LHDヘリカルダイバータの閉型化による中性粒子圧縮率の測定」第27回プラズマ・核融合学会年会 2010年11月30-12月3日 北海道大学.

⑨ T. Morisaki, M. Goto, R. Sakamoto, 他8名, “Progress of Superdense Plasma Research in LHD: Sustainment and Transport Study” IAEA FEC 2010, Daejeon, Korea Oct.12, 2010

⑩ S. Masuzaki, “Helical divertor in LHD experiments and FFHR demo design”, 6<sup>th</sup> Japan-Korea Workshop on Fusion Materials and Engineering toward Next Fusion Devices, 8 July 2010, Seoul.

[その他]  
ホームページ等  
<http://www.nifs.ac.jp/NIFS-NEWS/pdf/194-1.pdf>

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者  
小森 彰夫 (KOMORI AKIO)  
核融合科学研究所・所長  
研究者番号: 50143011

(2) 研究分担者 ( )  
研究者番号:

(3) 連携研究者  
大藪 修義 (OHYABU NOBUYOSHI)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授  
(平成 22 年 3 月退職)  
研究者番号：60203949

森崎 友宏 (MORISAKI TOMOHIRO)  
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・  
准教授  
研究者番号：60280591

増崎 貴 (MASUZAKI SUGURU)  
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・  
准教授  
研究者番号：80280593

庄司 主 (SHOJI MAMORU)  
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・  
准教授  
研究者番号：00280602

小林 政弘 (KOBAYASHO MASAHIRO)  
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教  
研究者番号：30399307

鈴木 康浩 (SUZUKI YASUHIRO)  
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教  
研究者番号：20397558

水口 直紀 (MIZUGUCHI NAOKI)  
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・  
准教授  
研究者番号：70332187