

科学研究費補助金研究成果報告書

平成24年 5月25日現在

機関番号：16101
 研究種目：特定領域研究
 研究期間：2007～2011
 課題番号：19055005
 研究課題名（和文） 核融合炉のトリチウム蓄積・排出評価のための理論およびシミュレーションコードの開発
 研究課題名（英文） Theory and code development for evaluation of tritium retention and exhaust in fusion reactor
 研究代表者
 大宅 薫 (OHYA KAORU)
 徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス研究部・教授
 研究者番号：10108855

研究成果の概要（和文）：ダイバータ・境界層プラズマとプラズマ・壁相互作用の国内および海外シミュレーションコード開発者の連携研究によって、コード間ベンチマークによる各素過程モデルの評価、基礎実験データに基づくモデルの精密化、素過程コードの統合と実機実験データ解析によるコードの評価・性能向上を図りつつ、核融合炉実環境下での燃料トリチウムの炉内蓄積量を定量予測できる総合シミュレーションコードを開発した。これにより炉内トリチウム蓄積量を評価するとともに、その低減、除去に関わる基礎過程を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：Through a cooperative research on code development by domestic and overseas researchers for divertor/SOL plasma physics and tritium plasma wall interaction, an integrated simulation code was developed in order to evaluate accurately tritium retention and exhaust in fusion reactors. It includes development of each physical models by means of cross-code and code-experiment comparisons in laboratory experiments and validation and improvement of the integrated code by analyzing experiments in present fusion devices. Taking complicated environment into account, in-vessel tritium retention was evaluated and physical processes for reduction and exhaust were found.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	21,200,000	0	21,200,000
2008年度	18,800,000	0	18,800,000
2009年度	17,800,000	0	17,800,000
2010年度	10,100,000	0	10,100,000
2011年度	9,300,000	0	9,300,000
総計	77,200,000	0	77,200,000

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、トリチウム、プラズマ壁相互作用、周辺プラズマ、シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

(1) 核融合炉壁のトリチウムの蓄積・放出挙動には、プラズマイオンの壁材料内への注入、拡散、捕獲、再放出のような炉材料自体のローカルな過程がある。一方、プラズマ対向壁表面の再堆積層中へのトリチウムの蓄積に見られるように、核融合炉内のプラズマ、特

にダイバータや境界層プラズマ中のトリチウムや不純物の輸送が関係したグローバルな過程も関与する。このため、これらの物理過程とそのモデル化が必要である。

(2) ダイバータプラズマや境界層プラズマと壁との相互作用に関わる国内のシミュレ

ーションコード開発は、日本原子力研究開発機構、核融合科学研究所および国内の大学の数少ない研究者が個人レベルで進めてきたため、個々の物理現象についてはすでに世界的に知られたシミュレーションコードが開発されているにも関わらず、欧米の研究機関で開発され極めて組織的に発展したコードが核融合炉設計に使用されている。コード開発力の強化は、ITER や DEMO 炉を日本が主導して推進するために不可欠である。

(3) ITER 炉内トリチウム蓄積量の評価が、最近、欧州を中心として極めて単純化した条件で行われたが、より正確な評価には、炉内実環境下のトリチウム蓄積に関わるプラズマ・壁相互作用とダイバータ・境界層プラズマの複合過程を統合したシミュレーションモデルによる評価が必要である。

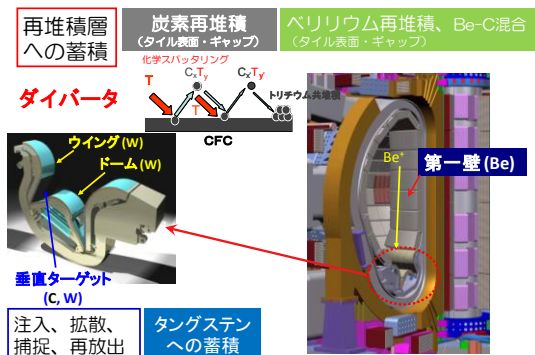


図1 プラズマ・壁相互作用とトリチウム蓄積

2. 研究の目的

(1) 世界的に評価の高いシミュレーションコードを開発している国内および海外研究者の連携研究を立ち上げ、コード間ベンチマークによって各素過程モデルの評価を行う。実験グループとも連携し、基礎実験データに基づいてモデルの精密化を図り、炉内トリチウム蓄積評価を目的として、国内外のプラズマ・壁相互作用とダイバータ・境界層プラズマを取り扱う先進的なシミュレーションコードを開発する。

(2) 素過程コードを統合し、実機実験データ解析によるコードの評価・性能向上を図りつつ、核融合炉の実環境下における燃料トリチウムの炉内蓄積量を定量予測できる総合シミュレーションコードを開発する。

(3) 炉内トリチウム蓄積量を評価するとともに、その低減、除去法開発に資し、トリチウムの安全性を確保し、経済的に成立する核融合炉の燃料システムの構築に貢献する。

3. 研究の方法

プラズマ・壁相互作用とダイバータ・境界層プラズマコード開発者の連携研究によっ

て、以下の(1)素過程モデルの構築、(2)総合コード開発、(3)炉内トリチウム蓄積評価を進める。コード間ベンチマークや実験との比較による素過程モデルの構築と総合シミュレーションコードの評価と性能向上を図るため、海外研究者および基礎実験、実機実験担当者とも連携して計画を遂行する。

(1) 炉材料のトリチウム蓄積・排出挙動の解明とそれに基づく理論モデルの構築

トリチウムと材料との相互作用に関する分子動力学シミュレーションコードを開発し、炭素材の化学スパッタリングと炭化トリチウム放出過程を明らかにする。

プラズマ照射によるタングステン中の水素と格子欠陥の相互作用の第一原理計算を行い、格子欠陥のトリチウム吸蔵量への影響を明らかにする。また、不純物と水素同位体との荷電交換過程を理論計算し、周辺プラズマ中の不純物電荷状態分布の水素同位体効果を明らかにする。

様々なエネルギーと角度で入射するトリチウムイオンによる炉材料の損耗量を評価する解析公式を構築する。タングステン中の水素同位体蓄積量の温度依存性を明らかにし、拡散係数、再結合係数などの材料定数を評価する。

(2) 時間・空間発展および自己無撞着な評価のための総合シミュレーションコード開発

炭素材評価のために、統合ダイバータコード(SONIC)とプラズマ・壁相互作用コード(EDDY)との結合を行い、周辺プラズマ中での炭素、炭化トリチウムなどの不純物輸送解析を可能にするとともに、それを用いて炉内リサイクリングの動的な特性を明らかにする。

タングステン評価のために、背景プラズマ流体コード(SOLPS)との結合による燃料水素同位体と不純物プラズマの自己無撞着な解析モデルを構築し(SOLPS-IMPYRO-EDDY 統合コード)、炉心プラズマへの不純物混入量に対する信頼性の高い予測評価を可能にする。

(3) 実機複雑環境下の炉内トリチウム蓄積評価とその低減、除去

炉内トリチウム蓄積・排出挙動に関わるコードを連携し、炉内実機条件下のダイバータ材(炭素、タングステン)および第一壁(ベリリウム)におけるトリチウム蓄積量を評価する。また、炭素・ベリリウム混合層やタイルギャップへの蓄積量も評価して評価精度を向上する。

プラズマに接する壁から放出されるダスト粒子の運動解析モデルを構築し、ダスト粒子の炉内輸送特性を明らかにすると共に、ダストへのトリチウム吸着による炉内トリチウム蓄積量への効果を明らかにする。

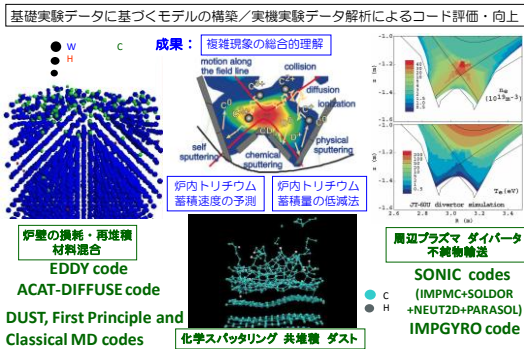


図2 核融合炉のトリチウム蓄積・排出評価のための理論およびシミュレーションコードの開発

4. 研究成果

(1) 炉材料のトリチウム蓄積・排出挙動の解明とそれに基づく理論モデルの構築

炭素と水素同位体の相互作用を扱う分子動力学コードを開発し、炭素同素体（グラフェン、グラファイト、ダイヤモンド、アモルファスカーボン）のスパッタリングのエネルギー、材料温度、結晶構造依存性を定量的に評価した。トリチウムプラズマに照射された炭素材の炭化トリチウム C_xH_y 放出（化学スパッタリング）が、アモルファス化したバルクからの熱脱離による長時間過程と、表面の局所的な化学反応による CH_y の脱離による短時間過程に因ることを明らかにした。また、任意の構造を扱える二体衝突近似コードを拡張して高エネルギー粒子を追跡し、低エネルギー粒子を分子動力学コードで取り扱うハイブリッドコードを開発した。これによりサブミクロン領域での水素同位体と炭素材の相互作用の評価を可能にした。

タングステン格子間の炭素不純物原子と水素原子の相互作用エネルギーの第一原理計算によって、遷移状態理論に基づいて炭素原子の拡散に与える周辺水素の影響を理論的に評価した。特に、タングステン中の高濃度水素同位体が、不純物炭素原子の拡散を促進することを理論的に示すなど、炭化物（WC相）やグラファイト形成がトリチウム吸蔵量に顕著な影響を示すことを明らかにした。一方、低エネルギー不純物イオン（Li, Be, C, W）と水素同位体原子との荷電交換過程における回転結合効果（コリオリ効果）の理論計算を実施し、10-100 eV/amu 程度の低い衝突エネルギーで水素同位体効果が顕著に現れることを示した。

炉材料中の水素同位体の減速過程と熱的過程を同時に扱う ACAT-DIFFUSE コードをタングステンの TDS 実験に適用して、水素同位体の拡散係数、捕獲サイト密度とそのエネルギー、表面での再結合係数などの材料定数を評価し、タングステンに蓄積される水素同位体量の温度依存性や照射中の再放出束の入射粒子束依存性を評価した。また、拡散ルー-

チンの三次元化や拡散係数の評価に分子動力学法を適用するなど、コードの性能向上と材料定数の評価精度を高めた。さらに、再堆積層へのトリチウム蓄積評価に関連して、炉材料からスパッタされる不純物量の理論公式を構築した。100eV~10keV の広範囲エネルギーで 15 種の炉関連材料に対して二体衝突近似 ACAT コードを適用して、公式が約 10% の相対誤差で評価できることを確認した。

(2) 時間・空間発展および自己無撞着な評価のための総合シミュレーションコード開発

プラズマ・壁相互作用を含む統合ダイバータコード SONIC (SOLDOR/NEUT2D/IMPMC/EDDY) を開発し、炭素と炭化トリチウムのダイバータ内の輸送特性を明らかにした。炉心プラズマとの統合化にも成功し、トリチウムと不純物の輸送に関する真の総合シミュレーションコードを開発した。これを用いて JT-60SA の L-H 遷移に伴うダイバータ特性のダイナミックな変化やデモ炉 slimCS での不純物入射によるダイバータ冷却と粒子制御特性を明らかにした。また、タングステン・ダイバータ板についても、トロイダル回転と径方向電場によりタングステンが炉心に蓄積、排出される物理機構を見出した。そのモデル化にも成功し、モンテカルロ不純物輸送コード (IMPGYRO) を用いてその妥当性を確認した。さらに、第一原理粒子コード PARASOL の開発も行い、境界層プラズマ流の発生機構を解明し、イオン軌道誘起流モデルを開発するなど、実機におけるトリチウムと不純物の炉内リサイクリングのダイナミックな特性を明らかにした。

ダイバータ・境界層プラズマ中でのタングステン等、高 Z 不純物輸送コード (IMPGYRO) の開発、IMPGYRO と損耗・再堆積コード (EDDY) との結合、さらには背景プラズマ輸送コード (SOLPS) との結合による統合化を行い、信頼性の高い高 Z 不純物シミュレーションモデルを構築した。クーロン衝突、熱力、多価電離・再結合過程、反射、セルフスパッタリングなどの複雑過程を考慮して、トカマク実磁場配位および第一壁、ダイバータ板、ドームなどの構造物の幾何学形状を忠実に模擬することによって、実機実験との定量的な比較が可能となった。これにより、JT-60U タングステン実験の解析を行い、外側ドームウイングと内側ドームウイングでの顕著なタングステンの堆積を再現し、外側ドームウイングの堆積はプライベート領域のタングステンタイルから中性粒子のまま直接付着したものであること、内側ダイバータへの堆積はプライベート領域を抜け、内側セパトリス周辺でイオン化され、その後、磁力線に沿って到達したものに因ることなど、タングステンのダイバータ内の輸送特性を明らかに

した。また、プラズマ中の不純物輸送に重要な熱力について新しい数値計算モデルを開発し、磁力線を横切る方向の熱力を考慮することを可能にした。

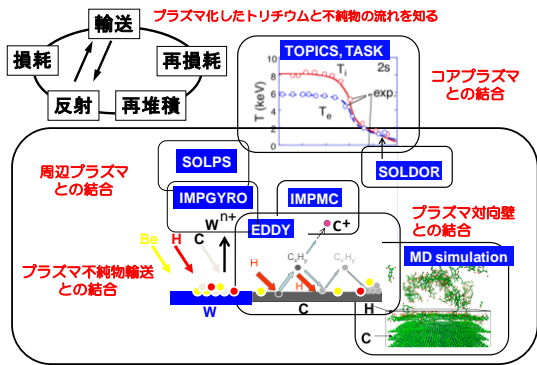


図3 各物理コードの統合化

(3) 実機複雑環境下の炉内トリチウム蓄積評価とその低減、除去

プラズマ中のダスト粒子挙動のモデル化によって、核融合プラズマ中でのダスト電荷のダスト半径、プラズマ電子温度依存性を示した。また、ITER ダイバータ・境界層プラズマ中でダストに働く主たる力がプラズマイオン吸収による力とイオンのクーロン散乱による力であること、大きなダストへの重力の効果やダストの平衡温度なども含め、炉内のダスト粒子の輸送特性を明らかにした。ITER の内側ダイバータから放出されたダスト粒子（炭素、タングステン）の約 30%が、外側ダイバータからの放出では低速で小さな (<1 m/s, <1 μ m) ダスト粒子のほとんどが昇華、溶解することが明らかになった。

炭素堆積層へのトリチウム蓄積評価のため、炭素不純物のプラズマ中の輸送過程を二体衝突近似コード(EDDY)に導入し、化学スパッタリングや炭化水素分子の反射に分子動力学(MD)コード、タイルギャップ近傍のプラズマ・シース領域解析にPICコードなど、素過程コードを開発した。第一壁で損耗されるベリリウムも境界層プラズマを輸送、炉内広範囲に再堆積しトリチウムを蓄積する。プラズマ照射による再損耗も考慮して、炉内炭素とベリリウム再堆積層分布から炭素材をダイバータ板とする ITER のトリチウム蓄積量を評価した。炭素堆積層へのトリチウム蓄積は約 4 mg/s で、ベリリウムへの蓄積はその 1/7~1/3 であった。炭素表面へのベリリウムの堆積で化学スパッタリングが抑制される実験報告から、ベリリウム-炭素混合層からの化学スパッタリングをMDコードで評価し、トリチウム蓄積量評価に導入した。しかし、同時に再損耗も減少するためその効果は小さかった。タイルギャップへの堆積について、ITER の城状構造タイルを想定して 1 mg/s 程度と評価した。また、その低減と除去に関連して、顕著なタイル昇温効果を示した。

タングステンへのトリチウムの蓄積は、注入されたプラズマイオンの材料内部での熱的挙動(拡散、捕獲、表面再結合)に因る。このため、EDDYコードに熱的過程(DIFFUSE)を導入した。また、磁力線がダイバータ板に非常に浅い角度で入射するため、入射角をラーモア回転を考慮したPICコードで評価した。さらに、ダイバータ板に入射するイオンのエネルギーが数 10eV から 1eV と低いため、注入量の評価を MD コードで実施した。これらにより、ITER の実機条件でトリチウムの蓄積が炭素材に比べて 1/100 程度で、ダイバータ板としてのタングステンの優位性を示した。

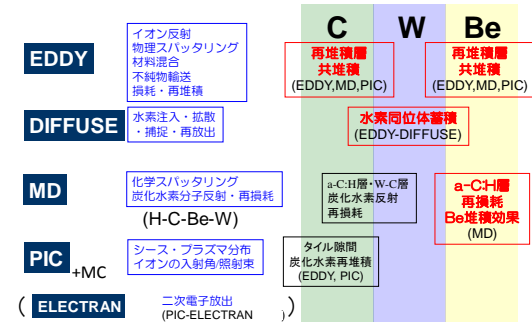


図4 プラズマ・壁相互作用素過程コードとコード結合、連携

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 177 件)

- ① D. Kato, H. Iwakiri, K. Morishita, Formation of vacancy clusters in tungsten crystals under hydrogen-rich condition, Journal of Nuclear Materials, 査読有, Vol.415, 2011, S1115-S1118, DOI:10.1016/j.jnucmat.2010.12.239
- ② S. Saito, A. M. Ito, A. Takayama, T. Kenmotsu, H. Nakamura, Hybrid simulation between molecular dynamics and binary collision approximation codes for hydrogen injection into carbon materials, Journal of Nuclear Materials, 査読有, Vol. 415, 2011, S208-S211, DOI:10.1016/j.jnucmat.2010.12.233
- ③ T. Kenmotsu, M. Wada, Effect of deuterium retention upon sputtering yield of tungsten by deuterons, Journal of Nuclear Materials, 査読有, Vol. 415, 2011, S108-S111, DOI:10.1016/j.jnucmat.2010.08.057
- ④ K. Ohya, Progress in modeling erosion and redeposition on plasma facing materials, 査読有, Journal of Nuclear Materials, Vol.415, 2011, S10-S18, DOI:10.1016/j.jnucmat.2010.11.041

- ⑤ M. Bando, K. Ohya, K. Inai, Modeling of Impurity Transport in edge plasmas and tritium codeposition, Fusion Science and Technology, 査読有, Vol. 60, 2011, pp. 1467-1470, <http://www.new.ans.org/>
- ⑥ K. Ohya, A. Kirschner, Simulation of hydrogen retention and re-emission from tungsten exposed to divertor plasmas, Physica Scripta, 査読有, Vol. T145, 2011, 014047(4pp), DOI: 10.1088/0031-8949/2011/T145/014047
- ⑦ I. Yu. Tolstikhina, D. Kato, V.P. Shevelko, Influence of the isotope effect on the charge exchange in slow collisions of Li, Be, and C ions with H, D, and T, Physical Review A, 査読有, Vol. 84, 2011, 012706 (6pp), DOI:10.1103/PhysRevA.84.012706
- ⑧ Y. Tomita, G. Kawamura, Y.D. Pan, L.W. Yan, Acceleration and Redeposition of a Dust Particle in SOL/Divertor Plasma of HL-2A Tokamak, Contributions to Plasma Physics, 査読有, Vol. 50, 2010, pp. 426-431, DOI:10.1002/ctpp.201010068
- ⑨ 伊藤篤史, 大野哲靖, 星野一生, 藤間光徳, 河村学思, 斎藤誠紀, 井内健介, 小特集「周辺プラズマからプラズマ対向壁材料までのシミュレーションコード・モデルの最前線」, 査読無, プラズマ・核融合学会誌, Vol. 86, 2010, pp. 679-707, <http://www.jspf.or.jp/>
- ⑩ T. Ono, T. Kenmotsu, T. Muramoto, T. Kawamura, Calculation of deuterium retention, re-emission and reflection from a tungsten material under D⁺ ions irradiation with ACAT-DIFFUSE code, Journal of Nuclear Materials, 査読有, Vol. 390-391, 2009, pp. 713-716, DOI:10.1016/j.jnucmat.2009.01.196
- ⑪ M. Toma, K. Hoshino, K. Inai, M. Furubayashi, A. Hatayama, K. Ohya, Coupled IMPGYRO-EDDY simulation of tungsten impurity transport in tokamak geometry, Journal of Nuclear Materials, 査読有, Vol. 390-391, 2009, pp. 207-210, DOI:10.1016/j.jnucmat.2009.01.169
- ⑫ K. Shimizu, T. Takizuka, K. Ohya, K. Inai, T. Nakano, A. Takayama, H. Kawashima, K. Hoshino, Kinetic modeling of impurity transport in detached plasma for integrated divertor simulation with SONIC (SOLDOR/NEUT2D/IMPMC/EDDY), Nuclear Fusion, 査読有, Vol. 49, 2009, 065028 (9pp), DOI:10.1088/0029-5515/49/065028
- ⑬ 畑山明聖, 滝塚知典, 大宅薫, 相良明男 “今、核融合炉が熱い！—数値モデリングでチャレンジ” 第1-3回, 査読無, 日本原子力学会誌, Vol. 50, 2009, pp. 380-383, 443-447, 511-515, <http://www.aesj.or.jp/>
- [学会発表] (計 396 件)
- ① A. Hatayama, High Zimpurity transport code “IMPGYRO” and its integration with SOL/Divertor plasmas (SOLPS) and erosion/redeposition (EDDY) code (招待講演), US-Japan Workshop on Integrated Modeling, 2012. 3. 12, カリフォルニア大学(アメリカ・サンディエゴ)
- ② A. M. Ito, Formation and Classification of Amorphous Carbon by Molecular Dynamics Simulation (招待講演), 4th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials, 2012. 3. 4-8, 中部大学 (春日井市)
- ③ T. Kenmotsu, Multi Scale Modeling on Ion-Solid Interaction in Fusion Devices (招待講演), 21st MRS-J Academic Symposium, 2011. 12. 19-21, 開港記念会館 (横浜市)
- ④ 伊藤篤史, プラズマ-壁相互作用の分子動力学シミュレーション研究, Plasma Conference 2011 シンポジウム「核融合炉におけるトリチウム挙動のシミュレーションコード開発と総合化」, 2011. 11. 22-25, 石川県立音楽堂 (金沢市)
- ⑤ 星野一生, コアプラズマ・ダイバータ・炉壁統合シミュレーション, Plasma Conference 2011 シンポジウム「核融合炉におけるトリチウム挙動のシミュレーションコード開発と総合化」, 2011. 11. 22-25, 石川県立音楽堂 (金沢市)
- ⑥ K. Ohya, Progress in Modeling Plasma-Material Interaction (基調講演), 19th International Conference on Plasma Surface Interactions in Controlled Fusion, 2010. 5. 24-28, カタマランリゾートホテル (アメリカ・サンディエゴ)
- ⑦ K. Ohya, Integrated numerical simulations and modeling of erosion and deposition on plasma facing walls (招待講演), ITER Summer School 2009 -Plasma Surface Interaction in Controlled Fusion Devices-, 2009, 6. 22-26, プロバンス大学 (フランス・エクスアンプロバンス)
- ⑧ T. Takizuka, Modeling and simulation on SOL-divertor plasmas (招待講演), ITER Summer School 2009 -Plasma Sur-

face Interaction in Controlled Fusion Devices-, 2009, 6.22-26, プロバンス大学 (フランス・エクサンプロバンス)

- ⑨ K. Ohya, Modeling of erosion and deposition by the Monte Carlo codes EDDY and ERO (招待講演), 12th International Workshop on Plasma Facing Materials and Components for Fusion Application, 2009. 5.11-14, ユーリッヒ総合研究機構 (ドイツ・ユーリッヒ)
- ⑩ K. Shimizu, Kinetic Modelling of Impurity Transport in Detached Plasma for Integrated Divertor Simulation with SONIC (SOLDOR/NEUT2D/IMPMC/EDDY), 22nd IAEA Fusion Energy Conference, 2008.10.13-18, 国際連合ジュネーブ事務局 (スイス・ジュネーブ)

[図書] (計8件)

- ① 加藤太治, 朝倉書店, 原子分子物理学ハンドブック, 2012, pp. 425-441
- ② A. M. Ito, H. Nakamura, World Scientific Publishing, Spectroscopy, Dynamics and Molecular Theory of Carbon Plasma and Vapors, 2011, pp. 317-341
- ③ 加藤太治, 畑山明聖, 大阪大学出版会, プラズマ原子分子過程ハンドブック, 2011, pp. 49-62, 309-315
- ④ K. Ohya, T. Takizuka, American Institute of Physics, Plasma Interaction in Controlled Fusion Devices, 2010, pp.47-61, pp. 138-152
- ⑤ T. Ono, T. Kenmotsu, T. Muramoto, Springer, Reactive Sputter Deposition, 2008, pp.1-42

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大宅 薫 (OHYA KAORU)

徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス研究部・教授

研究者番号：10108855

(2) 研究分担者

小野 忠良 (ONO TADAYOSHI)

岡山理科大学・総合情報学部・教授

研究者番号：90299173

剣持 貴弘 (KENMOTSU TAKAHIRO)

同志社大学・生命医科学部・准教授

研究者番号：10389009

富田 幸博 (TOMITA YUKIHIRO)

自然科学研究機構核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授

研究者番号：40115605

中村 浩章 (NAKAMURA HIROAKI)

自然科学研究機構核融合科学研究所・ヘリ

カル研究部・准教授

研究者番号：30311210

加藤 太治 (KATO DAIJI)

自然科学研究機構核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授

研究者番号：60370136

清水 勝宏 (SHIMIZU KATSUHIRO)

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：30391262

畑山 明聖 (HATAYAMA AKIYOSHI)

慶應義塾大学・理工学部・教授

研究者番号：10245607

(3) 連携研究者

和田 元 (WADA MOTOI)

同志社大学・生命医科学部・教授

研究者番号：30201263

田中 康規 (TANAKA YASUNORI)

金沢大学・理工研究域電子情報系・教授

研究者番号：90303263

芦川 直子 (ASHIKAWA NAOKO)

自然科学研究機構核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教

研究者番号：00353441

河村 学思 (KAWAMURA GAKUSHI)

自然科学研究機構核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教

研究者番号：70509520

滝塚 知典 (TAKIZUKA TOMONORI)

日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門・研究職

研究者番号：40354576

川島 寿人 (KAWASHIMA HISATO)

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：10354606

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

中村 誠 (NAKAMURA MAKOTO)

日本原子力研究開発機構・核融合研究開発部門・博士研究員

研究者番号：80462886

高山 有道 (TAKAYAMA ARIMICHI)

自然科学研究機構核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教

研究者番号：70311206

伊藤 篤史 (ITO ATSUSHI)

自然科学研究機構核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教

研究者番号：10581051