

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19H01882

研究課題名(和文) マルチハイブリッド計算の発展によるプラズマ照射と長時間構造緩和の競争機構の解明

研究課題名(英文) Competition mechanism between plasma irradiation and long-time structure relaxation by multi-hybrid simulation

研究代表者

伊藤 篤史 (Ito, Atsushi)

核融合科学研究所・研究部・准教授

研究者番号：10581051

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 7,800,000円

研究成果の概要(和文)：プラズマと固体物質の相互作用においては、プラズマ粒子の入射頻度と固体物質側の現象の時間スケールの競争を論ずることが正しい理解の鍵となる。これをシミュレーションで調べるために、原子を直接扱いながらも長時間スケールに到達できる手法としてオンザフライ動的モンテカルロ法(KMC)を開発した。特に結晶構造に縛られず構造緩和途中の不規則構造も扱えるように、局所的な分子動力学(MD)と組み合わせることで格子フリーなKMC手法を実現した。最終的に、有限温度効果を取り入れた自由エネルギーバリアの算出を可能とすることで、タングステンのナノ構造が高温で消失する様子を再現できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

核融合におけるプラズマ対向材料や耐中性子材料の研究においては、長時間の構造変化を追うためにKMCが度々利用されてきたが、粒子が格子点上だけを移動するという従来の制約のために適用できる問題が限られていた。本研究において格子フリーなKMCを開発し、さらに生体分子シミュレーション等で取り上げられている自由エネルギーの観点を取り込むことで、多くの材料に適用できる手法となった。本研究期間においては核融合研究における貢献としてタングステンの高温時挙動の模擬に注力したが、今後は半導体分野をはじめとする多くのプラズマ-物質相互作用問題や、より一般的な表面・ナノ構造の関わる問題に適用できると期待できる。

研究成果の概要(英文)：In the interaction between plasma and materials, it is important to understand the competition between the frequency of plasma particle injection and the time scale of phenomena in the material side. To treat these processes in simulation, we have developed an on-the-fly Kinetic Monte Carlo (KMC) method that can reach long time scales while dealing atoms directly. In particular, in order to treat not only crystal structure but also the irregular structures during structural relaxation, we realized the lattice-free KMC method by using localized molecular dynamics (MD). Finally, the we considered also the finite temperature effects by estimating free energy barrier, and then we demonstrated the disappearance of tungsten nanostructures.

研究分野：プラズマ-壁相互作用シミュレーション

キーワード：動的モンテカルロ法 分子動力学 ハイブリッドシミュレーション プラズマ-壁相互作用 プラズマ-物質相互作用

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 様式 C - 19 , F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 磁場閉じ込め型核融合炉内壁である第一壁やダイバーターは、運転中にプラズマ照射を受け続けることで表面がゆっくりと改変する。その結果、ダスト粒子の発生やマクロなひび割れ、燃料水素リテンションの増加など、プラズマ閉じ込めに対して無視できない問題を引き起こす。そのため、プラズマ - 壁相互作用(PWI)における表面構造変化を理解し、材料を長期間健全に保つ方法を見出すことが大きな目標である。

(2) ところで、プラズマ照射による材料表面の改変は、実際にはナノスケールで起こっていることが多くの実験観測から分かっており、現在ではナノスケールレベルで表面構造変化のメカニズムを明らかにすることが重要とされている。そのため、原子スケールのシミュレーションとして、分子動力学(MD)や、古くは二体衝突近似(BCA)が使われてきた。しかし、これらの方法の大きな問題は、再現できる時間スケールがピコ秒から百ナノ秒程度と短いことである。プラズマ照射は、飛来するイオン粒子のエネルギーは高いものの、その飛来頻度(フラックス)は非常に低い。一般的な実験環境のフラックスは  $10^{20} - 10^{22} \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$  であるが、これをナノスケールの世界に焼き直すと、よく扱う  $100 \text{ nm}^2$  程度の表面に対して、1 マイクロ秒に 1 粒子が飛来する程度の頻度である。これは材料側の原子運動の時間スケールと比べると非常に長い時間である。このことから、これまで当該分野で行われてきたような入射イオンが表面到達時に瞬間的に起こす衝突・反応過程だけでなく、次の粒子が飛来するまでの長時間構造変化は無視できない。そして、レアイベントである粒子の飛来と材料側の長時間構造変化を、幾重にもわたり積み重ねることで、現実の実験で観測されるようなナノスケール構造物が形成される。

(3) このような観点から現象を見るには、先に挙げた MD や BCA のようなシミュレーションでは不十分である。一方で、動的モンテカルロ(KMC)であれば長時間スケールの構造変化を再現できる可能性がある。しかし、既存の KMC では、一般的に原子の移動を格子点上に制限することでモデルを単純化して計算の高速化を図っている。格子に制限された KMC では、プラズマ照射下でマイクロな破壊が起こったような材料表面の様子や、長時間の構造変化途中の非格子構造は扱えないという問題があった。海外のグループも KMC の利用は限られた問題に留まっていた。PWI 研究におけるシミュレーションの貢献を拡大するためには、KMC を拡張し、適用先を広げる必要があった。

### 2. 研究の目的

(1) 本研究の目的は、プラズマ - 壁相互作用におけるプラズマ照射の頻度と材料表面の長時間変化の競争をシミュレーションで再現し、調査することである。そのために、マイクロ秒から分に迫るような長時間の表面構造変化を再現できる計算手法として KMC の拡張を行う。具体的には 2 つの物理現象を設定することで、KMC に対する 2 種類の拡張法を開発する。

(2) 1 つ目に取り上げる物理現象は、He プラズマ照射で誘起されるタングステンナノ構造(ファズ)の成長過程である。ここでは、プラズマ照射下における He 照射頻度と、材料中での He 拡散の競争によって成長が決まる。この現象に対する KMC 手法の拡張は、拡散を扱う KMC と、照射を扱う BCA や MD を結合したコードを開発し、ナノ構造の成長過程をシミュレーションで再現することである。

(3) 2 つ目に取り上げる物理現象は、高温時のタングステンナノ構造の消失である。消失の主な要因は表面における原子の拡散と考えられている。また、同様の表面拡散は成長過程にも効いているという説もあるが、詳細は分かっていない。KMC の適用の観点での課題は、表面拡散による構造変化は必ずしも結晶構造を保っていないことである。そこで、この現象に対する KMC 手法の拡張として、オンザフライかつ格子フリーな KMC 手法を開発する。

### 3. 研究の方法

(1) 前者の He プラズマ照射で誘起されるタングステンナノ構造の再現を目指した KMC の拡張では、He の入射過程を BCA で扱い、He の材料中の拡散を格子状の KMC で扱い、母材金属の連続的な変形を MD で扱う BCA-MD-KMC 三連ハイブリッド法を用いる。本科研費研究の開始時点では、BCA-MD-KMC 三連ハイブリッド法のコード[1]は基本部分の開発が概ね完了していたものの、タングステンナノ構造の成長を再現するには至っていなかった。そこで、BCA、MD、KMC の各モデルと結合法を見直し、不足している物理過程を洗い出すことで、最終的にナノ構造の成長を再現する。

(2) 後者の高温時のタングステンナノ構造の消失を題材にした KMC の拡張では、通常は格子

点上の移動に制限される KMC を、オンザフライかつ格子フリーの手法へと大きく拡張する。研究開始時点では、格子フリー-KMC の原理実証[2]は済んでいたが、事前計算の割合が大きく、リアルタイム性のあるオンザフライ計算ではなかった。そこで、オンザフライ化のために根本的にコードを作り直すところから始めた。また、後述のナノ構造の消失がうまく扱えない問題に遭遇したことから、効率的にイベントを取捨選択する手法や、有限温度効果を取り入れる手法の開発にも取り組んだ。

#### 4. 研究成果

(1) ナノ構造形成に関して BCA-MD-KMC 三連ハイブリッド法の問題点を追求した結果、2つの問題を見出した。1つ目は到達できる時間スケールが当時は1秒程度であったことである。これは He の総照射量において  $10^{22} \text{ m}^{-2}$  に相当する。一方で、実験においてナノ構造が形成されるには  $10^{24} \text{ m}^{-2}$  以上の照射量が必要である。そこで、KMC コードのアルゴリズムを見直し、MD や BCA 側の並列化手法との結合も見直すことで大幅に効率化した。着目している入射頻度と材料中の He 拡散の競争を議論するためには、実験と同様のフラックスを計算条件に採用することが重要であるが、コードの効率化により、フラックスを実験と揃えたまま 100 秒 ( $10^{24} \text{ m}^{-2}$ ) を達成することができた。

2つ目の改善点として、入射過程における弾き出しモデルを改善した。ナノ構造形成において、実験での He の入射エネルギーは 100 eV 以下である。このエネルギーは He がタングステン(W)原子を弾き出すために必要な閾値エネルギーよりも低いことから、本分野では He による弾き出しはナノ構造成長に影響しないと考えられてきた。しかし、大量の He が注入され He ナノバブルが材料内部に形成すると、表面付近のナノバブルが破裂する。破裂により表面にナノスケールの凹凸ができることで、局所的に W 原子の結合エネルギーが下がる。そのような W 原子であれば、100 eV 以下の He 入射でも弾き出せるはずである。このようなモデルを BCA 部分に導入すると、それまで一向に再現できなかったナノ構造の成長がみられるようになった。成長の様子を解析すると、弾き出された W 原子が、別の凹凸部分に高確率で再堆積していることが分かった。このような弾き出しと再堆積による W 原子の表面垂直方向の輸送が、ナノ構造の成長を引き起こしていた。成長速度も実験同様に照射時間の平方根に比例し、かつ、実効的なスパッタリング収率も再堆積により低く保たれている点は、実験同様であった。本計算は原子レベルのシミュレーションとして He プラズマ誘起ナノ構造の成長を再現したユニークな例である。結果として、He バブルの破裂をトリガーとした弾き出しと再堆積という新しい成長メカニズムの提唱を行うに至った[3,4]。

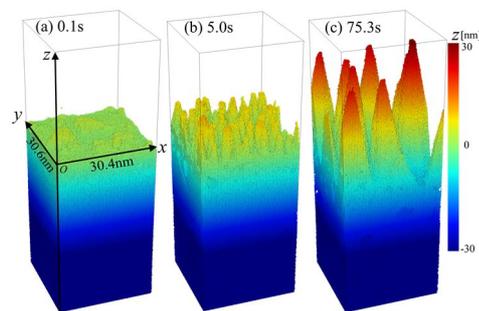


図1 BCA-MD-KMC 三連ハイブリッド手法による He プラズマ誘起タングステンナノ構造形成

(2) 高温時のタングステンナノ構造の消失を題材にした KMC の拡張として、オンザフライかつ格子フリーの KMC を実現する FlyAM コードを開発した。格子フリーな運動を実現するには、任意構造に対する移動経路の探索と移動障壁エネルギーの算出が必要である。加えて、移動候補となる大量の原子に対してオンザフライでこれらを実現する必要がある。そこで、Multi-Program Multi-Data(MPMD)型の並列化手法を採用した。注目する原子の周辺の小領域を切り出し、その中において移動経路と移動障壁エネルギーの算出を1つの局所 MD タスクとする。このタスクを、マルチ CPU クラスタやスーパーコンピュータを用いてバックグラウンドで大量に処理できるような MPMD 実装を実現した。これにより、格子フリーとオンザフライの2つの特性を実現したコードとなった。

(3) 上記(2)によってオンザフライかつ格子フリー-KMC の実用的な基本フレームワークは完成した。一方で、実用的な観点からは、到達時間をさらに伸ばす必要があった。少なくとも実験で観測される規模の構造変化まで追いかけるには秒のオーダーの再現が必要である。そこで、ボトルネックを解析したところ、局所的なトラップサイト内で特定の原子だけが往復移動を繰り返すフリッカーイベントが多発していることが分かった。一方で、大域的な構造変化のためにはトラップ状態からの脱出というレアイベント必要であるものの、それらは殆ど起こらないことに気づいた。つまり、トラップサイト内のフリッカーイベントは、将棋等でいう「千日手」の状態にある。そこで、KMC の理論フレームワークの範囲内で、千日手を作為的に禁じてしまう手立てを理論的に考案した。考案手法で千日手イベントを禁じた場合でも、他のイベントの発生率や経過時間に関しては禁止前と確率的に等価にできる点が重要である。結果として到達時間を5倍以上向上させた。タングステンナノ構造の表面拡散では、温度にも依存するものの、24時間の計算で13マイクロ秒以上に到達した。

(4) ここまでに開発した手法およびコードを図 3(a)のようなナノ構造の消失現象に適用したところ、表面拡散によって図 3(b)のように変化した。突起構造が千切れてドロップレットが残ってしまっているが、これは明らかに不自然であり、想定外の問題であった。本問題を詳細に調査した結果、移動障壁エネルギーに対する熱揺らぎの影響が重要であることを突き止めた。通常、KMC における移動障壁エネルギーの算出で用いる Dimer 法[5]などでは、移動原子以外の原子配置を完全に緩和させるため、それらの原子の熱揺らぎの効果が加味されていない。本研究では熱揺らぎの効果を反映させるべく、移動障壁エネルギー $\Delta E_i$ の代わりに Helmholtz 自由エネルギー障壁を用いたオンザフライ KMC へと発展させた。自由エネルギー障壁 $\Delta F_i(T)$ を局所領域内で計算するには、Dimer 法の代わりに Jarzynski 等式[6]の操作を用いた。移動対象の原子の移動方向の自由度は強制的に動かしつつ、その他の自由度は周辺粒子も含めて Langevin 熱浴下で運動させることで仮想的な仕事を得る。通常の Jarzynski 等式の利用では、乱数を変えて何度も同じ操作を行い、仕事の平均を算出することで自由エネルギーを得る。しかし、こと KMC との組み合わせにおいては、たった一回の操作で得た仕事をそのまま移動確率に用いても、KMC におけるイベントの発生頻度や、1 ステップの経過時間の期待値が変わらないことを見出した。条件として、イベントの総数が十分に大きい必要があるが、多くの場合には問題にならない。このように KMC のアルゴリズムと併用する上で、Jarzynski 等式の利用は大変相性の良い組み合わせである。結果として、自由エネルギー障壁 $\Delta F_i(T)$ を用いて KMC を実行したところ、図 3(b)のような不自然なドロップレットができることもなく、図 3(c)のようにナノ構造の自然な消失を模倣することができた。

(5) 本研究で開発したオンザフライかつ格子フリーな KMC は、タングステンナノ構造の問題に限らず、非常に適用先が広くロバストな手法になったと考えている。今後、分野内外を問わず多くのナノスケール構造変化現象の理解に役立つと期待できる。

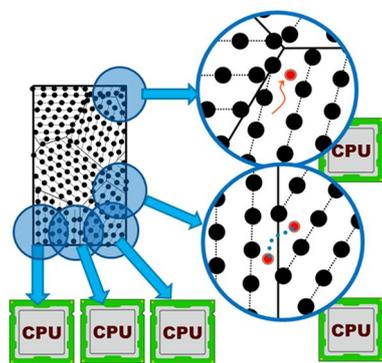


図2 オンザフライかつ格子フリー KMC コード FlyAM. 局所 MD タスクを MPMD 並列で処理する概念図。

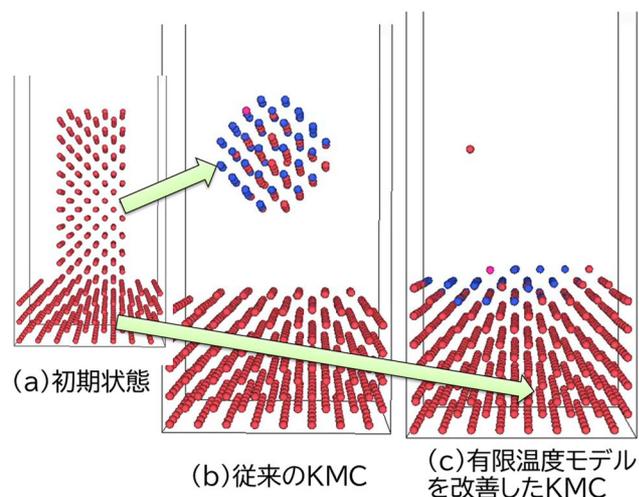


図3 有限温度効果の有無によるナノ構造消失の違い。

<引用文献>

Atsushi M. Ito, Arimichi Takayama, and Hiroaki Nakamura, Plasma and Fusion Research, **13** (2018) 3403061.  
 Atsushi M. Ito, Shuichi Kato, Arimichi Takayama, and Hiroaki Nakamura, Nuclear Materials And Energy, **12** (2017) 353-360.  
 Atsushi M. Ito, Arimichi Takayama, Hiroaki Nakamura, Materials Research Express, **10** (2023) 125002.  
 Shin Kajita, Atsushi M. Ito, and Kenzo Imano, Journal of Applied Physics, **132** (2022) 181101.  
 G. Henkelman and H. Jónsson, J. Chem. Phys. **111** (1999) 7010  
 C. Jarzynski, Phys. Rev. Lett. **78** (1997) 2690.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Atsushi M. Ito, Arimichi Takayama, Osamu Watanabe, Vijendra Singh, Shubham Tyagi, and Shashank S. Singh	4. 巻 15
2. 論文標題 Tuning of Density Functional Theory Simulation on Vector Processor System - Plasma Simulator Raijin -	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 1203085
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1585/pfr.15.1203085	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Morishita Tetsuya, Ito Atsushi M.	4. 巻 1
2. 論文標題 Traveling without dwelling: Extending the timescale accessible to molecular dynamics simulation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 33032
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevResearch.1.033032	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Ito Atsushi M, Takayama Arimichi, Nakamura Hiroaki	4. 巻 10
2. 論文標題 Tungsten nanostructure growth by sputtering and redeposition in BCA-MD-KMC hybrid simulation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Materials Research Express	6. 最初と最後の頁 125002 ~ 125002
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/2053-1591/ad0ea9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Ito Atsushi M., Takayama Arimichi, Toda Yuto	4. 巻 62
2. 論文標題 High accuracy interatomic potential model for binary collision approximation and its application into sputtering yield estimation for amorphous carbon	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SL1012 ~ SL1012
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/acd4c9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Atsushi M. Ito	4. 巻 2023
2. 論文標題 Simulation for plasma-material interaction on fusion science and nanotechnology	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 JSAP Review	6. 最初と最後の頁 230412
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11470/jsaprev.230412	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 NUNAMI Masanori, ITO Atsushi M., GOTO Motoshi, HASEGAWA Hiroki, IGAMI Hiroe, KASAHARA Hiroshi, KAWAMURA Gakushi, KAWATE Tomoko, MATSUOKA Seikichi, NAGAOKA Kenichi, SAKAMOTO Ryuichi, SEKI Tetsuo, TAKAYAMA Arimichi, TODA Shinichiro, Meta-hierarchy dynamics unit	4. 巻 18
2. 論文標題 Perspective of Meta-Hierarchy Dynamics	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 2501057 ~ 2501057
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.18.2501057	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kajita Shin, Ito Atsushi M., Imano Kenzo	4. 巻 132
2. 論文標題 Growth of fiberform nanostructures on metal surfaces by helium plasma irradiation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 181101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0123430	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計21件(うち招待講演 8件/うち国際学会 12件)

1. 発表者名 Atsushi M. Ito, Arimichi Takayama, Yuto Toda
2. 発表標題 Simulation Development for the Next Stage of Plasma-Material Interaction
3. 学会等名 Global Plasma Forum in Aomori (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Atsushi M. Ito, Arimichi Takayama, Yuto Toda
2. 発表標題 Temperature Dependence of Energy Barrier in Kinetic Monte-Carlo Simulation using the Jarzynski Equality
3. 学会等名 6th International Conference on Molecular Simulation (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 伊藤篤史, 高山有道
2. 発表標題 自由エネルギー障壁を利用したオンザフライ動的モンテカルロ法の開発
3. 学会等名 第37回 分子シミュレーション討論会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 伊藤篤史
2. 発表標題 プラズマ - 物質相互作用現象に対する分子シミュレーションの開拓
3. 学会等名 第36回分子シミュレーション討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Atsushi M. Ito
2. 発表標題 Simulation Study of Tungsten Surface Diffusion Process on Fuzzy Nanostructures under Helium Plasma Irradiation
3. 学会等名 15th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 伊藤篤史
2. 発表標題 プラズマ-物質科学におけるシミュレーションと情報科学の協同とは
3. 学会等名 プラズマ材料科学第153委員会 150回記念研究会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Atsushi M. Ito, Arimichi Takayama, Hiroaki Nakamura
2. 発表標題 Effects of Sputtering, Re-deposition and Diffusion Processes for Helium Plasma Induced Metal-nanostructure with Multi-hybrid Simulation Analysis
3. 学会等名 74th Annual Gaseous Electronics Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊藤篤史
2. 発表標題 プラズマ照射下の空間ミクロかつ時間マクロな構造変化の再現計算への挑戦
3. 学会等名 化学工学会 第52回秋季大会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 A. M. Ito, A. Takayama, and H. Nakamura
2. 発表標題 Gapped Scale Simulation Approach for Plasma-Material Interaction
3. 学会等名 30th International Toki Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Atsushi M. Ito, Arimichi Takayama, Hiroaki Nakamura
2. 発表標題 Modernization of Binary Collision Approximation Simulation for Plasma-Material Interaction
3. 学会等名 10th Asian Conference on High Pressure Research (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊藤篤史, 高山有道
2. 発表標題 動的モンテカルロ計算を効率化する千日手禁止法
3. 学会等名 第38回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊藤篤史, 高山有道
2. 発表標題 千日手の制限による動的モンテカルロ法を高速化
3. 学会等名 第35回分子シミュレーション討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Atsushi M. Ito and Arimichi Takayama
2. 発表標題 Finite temperature effect of kinetic Monte-Carlo on tungsten surface diffusion
3. 学会等名 14th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Atsushi M. Ito, Arimichi Takayama, Hiroaki Nakamura
2. 発表標題 Incident Energy Dependence of Tungsten Fuzzy Nanostructure Growth with BCA-MD-KMC Multi-Hybrid Simulation
3. 学会等名 4th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics, Remote e-conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 伊藤 篤史, 高山 有道, 中村 浩章
2. 発表標題 シミュレーションで見られるファズ成長のスパッタリング・再堆積過程の重要性
3. 学会等名 第37回プラズマ・核融合学会年会(JSPF Annual Meeting)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 伊藤 篤史
2. 発表標題 オンザフライ動的モンテカルロ法の開発と金属ナノ構造の原子表面拡散への応用
3. 学会等名 第76回日本物理学会年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Atsushi M. Ito
2. 発表標題 Multi-hybrid simulation for tungsten nanostructure formation induced by helium plasma
3. 学会等名 Satellite Workshop of XXXIV ICP1G and ICRP-10, Sapporo, Japan, July 14, (2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Atsushi M. Ito, Arimichi Takayama, Hiroaki Nakamura
2. 発表標題 Sputtering and Re-deposition Effects during Fuzz Growth Process Simulated by BCA-MD-KMC Multi-hybrid Simulation
3. 学会等名 4th International Workshop on Models and Data for Plasma-Material Interaction in Fusion Devices(MoD-PMI2019), National Institute for Fusion Science, Gifu, JAPAN, June 18-20, (2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Atsushi M. Ito, Arimichi Takayama, Hiroaki Nakamura
2. 発表標題 Realistic timescale simulation for helium plasma induced tungsten nanostructure formation by multi-hybrid simulation
3. 学会等名 The 12th Asian-European International Conference on Plasma Surface Engineering (AEPSE2019), Maison Glad Hotel, Jeju Island, Korea, September 1-5, (2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤篤史
2. 発表標題 二原子間ポテンシャルのユニバーサルモデル再考
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会 岐阜大学, 2019年9月10-13日
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Atsushi M. Ito
2. 発表標題 Two-body Potential for Atomic Collision in Plasma-Material Interaction
3. 学会等名 ISPlasma2020/IC-PLANTS2020, Nagoya University, Nagoya, Japan, March 8-11, (2020). (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 伊藤篤史、笠田竜太、金子俊郎、福田努、小池耕彦、坂本貴和子	4. 発行年 2022年
2. 出版社 マイナビ出版	5. 総ページ数 176
3. 書名 機動戦士ガンダム 宇宙世紀vs.現代科学	

〔産業財産権〕

〔その他〕

研究代表者Webページ <a href="http://www-fps.nifs.ac.jp/ito/">http://www-fps.nifs.ac.jp/ito/</a> NowType a Markdown Editor (研究ノート・原稿執筆支援ツール) <a href="https://atsushi-m-ito.github.io/nowtype/">https://atsushi-m-ito.github.io/nowtype/</a>
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	高山 有道  (Takayama Arimichi)	核融合科学研究所・研究部・助教  (63902)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------