

令和 4 年 4 月 17 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02463

研究課題名(和文)照射環境下におけるアモルファス物質の構造変化と安定性

研究課題名(英文)Structural changes and stability of amorphous materials under radiation environments

研究代表者

石丸 学 (ISHIMARU, MANABU)

九州工業大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：00264086

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではアモルファス材料の構造および照射誘起構造変化を、量子ビーム技術、先端電子顕微鏡技術、計算機シミュレーションを駆使して調査し、以下の成果を得た。(1)シリコンオキシカーバイド(SiOC)に500℃にてイオン照射を施したところ、顕著な構造変化は検出されず、高温照射環境下でもアモルファス構造を保つことが確認された。(2)SiO₂:SiCの比が異なるSiOCにHeイオン照射を行った結果、SiCの濃度が高くなるとHeバブルが形成されることが明らかとなった。(3)イオンビーム技術により作製したアモルファス炭化ホウ素には20面体クラスターに由来する構造の存在が示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

原子力産業分野で使用される構造材料は高温環境下に加え、中性子線や荷電粒子等のエネルギー粒子線場という、特殊な環境下に曝される。高エネルギー粒子線は材料を構成する原子を弾き出し、格子間原子や空孔等の原子レベルの欠陥(照射損傷)を与える。損傷を受けた材料では欠陥の蓄積に伴う体積膨張(スエリング)やアモルファス化による機械的性質の劣化が起こり、原子炉の破壊等の深刻な危機的事象が誘発される。本研究では新規耐照射性材料として注目されているアモルファス材料の照射環境下での安定性を調査した。得られた成果は、原子力発電の安全かつ安心な運用に寄与することが期待される。

研究成果の概要(英文)：The structures of amorphous materials and irradiation-induced structural changes were examined using quantum beam technology, advanced electron microscopy, and computer simulations. The following results were obtained: (1) When silicon oxycarbide (SiOC) was subjected to ion irradiation at 500°C, no significant structural changes were detected, and it was confirmed that the amorphous structure was maintained even under high-temperature irradiation conditions. (2) Helium (He) ion irradiation of SiOC with different SiO₂:SiC ratios revealed that He bubbles were formed when the SiC concentration increased. (3) The existence of structures derived from icosahedral clusters was suggested in the amorphous boron carbide prepared by ion beam technology.

研究分野：材料科学

キーワード：照射効果 透過電子顕微鏡 アモルファス 構造解析 動径分布解析

1. 研究開始当初の背景

総電力量に占める原子力発電の割合は2010年において30%程度であったが、東日本大震災以降その割合は急激に低下し、研究開始当初である2018年においては1~2%程度に留まっている。一方、2015年12月に採択されたパリ協定において、我が国は2030年の温室効果ガスの排出を、2013年度の水準から26%削減することを目標としており、天然ガス、石油、石炭等の火力発電の割合を極力低く抑える必要がある。これを受け、2030年のエネルギーミックス(電源構成)案が検討されている。2017年7月に閣議決定されたエネルギー政策の方向性を示す「第5次エネルギー基本計画」では、原子力発電の依存度を可能な限り低く設定しながらも、2030年時点でも総電力量の20~22%を占めることが望ましいとし、本発電を重要電源として位置付けている。

原子力発電の運用にあたっては、安全かつ安心なシステムの構築が必要不可欠であり、様々な学問分野からの寄与が求められている。発電所に用いられる構造材料は、高温環境下で使用される。原子力発電の場合はこれに加えて、中性子線や荷電粒子等のエネルギー粒子線場という、特殊な環境下に材料が曝される。高エネルギー粒子線は材料を構成する原子を弾き出し、格子間原子や空孔等の原子レベルの欠陥(照射損傷)を与える。損傷を受けた材料では欠陥の蓄積に伴う体積膨張(スエリング)やアモルファス化による機械的性質の劣化が起こり、原子炉の破壊等の深刻な危機的現象が誘発される。このため、材料工学分野の1つの研究テーマとして、照射環境下に曝されても構造変化や材料劣化が起こらない材料の開発が求められており、米国や欧州を中心に耐照射性材料の探索が精力的に行われている。

2. 研究の目的

本研究では、原子力発電所に使用可能な新規構造材料を実現するため、優れた耐照射性・熱的安定性を有するアモルファス材料の開発を試みる。この目的を達成するには、アモルファスの構造情報の取得が必要不可欠である。しかしながら、アモルファス材料の照射環境下での挙動は結晶化に着目した研究のみで、結晶化の前駆現象であるアモルファス自体の構造変化に関する研究は全く行われていない。この原因として、アモルファスには周期性がないために構造評価が困難であることが挙げられる。そこで本研究では、電子線動径分布解析法によりアモルファスの構造解析ならびに照射に伴う構造変化を調査することを目的とする。

3. 研究の方法

スパッタリング法により熱酸化したシリコン単結晶基板の上にアモルファスシリコンオキシカーバイド(SiOC)薄膜を室温にて成膜した。この試料に希ガスイオンを照射した。試料はMichael Nastasi 教授(米国ネブラスカ大学リンカーン校)より提供いただいた。アモルファス炭化ホウ素(B₂C)は(1)イオン照射あるいは(2)プラズマ励起化学気相成長法(PECVD)により作製した。イオン照射はWilliam J. Weber 教授、Yanwen Zhang 博士の協力で米国テネシー大学ノックスビル校にて行った。PECVD 試料はNastasi 教授より提供いただいた。試料の評価には九州工業大学に設置してある透過電子顕微鏡(JEOL-JEM-3000F)を用い、加速電圧300 kVで観察を行った。電子回折図形はイメージングプレートに記録し、強度の定量解析を行うことにより電子線動径分布解析を行った。

4. 研究成果

4-1. アモルファス SiOC の耐照射性と熱的安定性

図1は、照射前のSiOCから得られた(a-c)高分解能像と(d-f)電子回折図形である。組成(SiO₂:SiC)は(a,d)2:1、(b,e)1:1、(c,f)1:2である。高分解能像は均一なソルト&ペッパーコントラストを呈し、電子回折図形はハローパターンを示した。すなわち、SiOCはアモルファス構造を有し、顕著な結晶化や相分離が生じていないことが明らかとなった。図1(g,h,i)はエネルギー分散型X線分光法(EDX)により得られたスペクトルで、Si-K線で規格化している。酸素と炭素のピーク強度が系統的に変化しており(図1(g,h,i))組成の制御が出来ていることが確認された。

図2は、組成の異なるSiOCに120 keVのHeイオンを室温で照射した時の(a-c)断面明視野像と電子回折図形である。黒の線はSiO₂(熱酸化Si)とSiOCの境界である。比較のため、モンテカルロ法(SRIM-2008)で計算したHeおよび損傷の深さ分布も示している(図2(d-

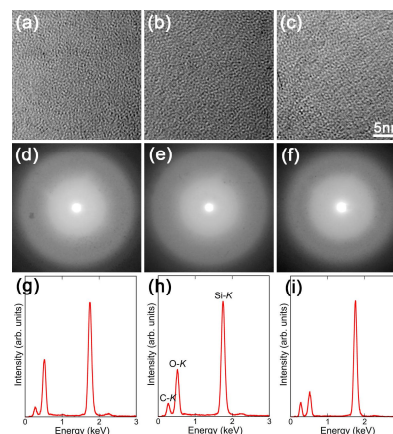


図1. SiO₂:SiC が(a,d,g)2:1、(b,e,h)1:1、(c,f,i)1:2であるSiOCの高分解能像、電子回折図形、EDXスペクトル。

f) 照射領域から得られた電子回折図形にはハローリングが現れており、照射後もアモルファス構造が保たれていることが分かる。電子線動径分布解析の結果、照射前後においてアモルファス構造に大きな変化がないことが確認された。90 at.%以上のHeを注入しているにも関わらず、SiO₂:SiC=2:1および1:1のSiOCでは照射前後で体積膨張は起こっておらず、優れた耐照射性を有することが明らかとなった(図2(a,b))。一方、SiO₂:SiC=1:2のSiOCではHe濃度が高い領域でポイドが形成し、著しい体積膨張が生じている(図2(c))。

2:1および1:1試料におけるHeバブルの抑制は、Heの拡散が大きいことを示唆している。照射により導入された点欠陥は拡散を増大させることが知られている。Jungら[1]はSiO₂中のHeの拡散を調べ、イオン注入により導入されたHeは熱的に導入されたHeの拡散係数とほぼ同じであることを報告している。このことは、SiOCで確認されたHeの高い移動度は照射により導入された点欠陥が主たる原因でないことを示唆している。

図3は、電子回折強度を定量解析して得られた還元干渉関数の低散乱角側の拡大図である。横軸の散乱ベクトルは $Q=4 \sin \theta / \lambda = 2 / d$ (θ:散乱角、λ:電子線の波長、d:面間隔) である。2:1および1:1試料の第1ピークは1.7-1.8 Å⁻¹に出現している。このピークはプレピーク(first sharp diffraction peak: FSDP)と呼ばれるもので、中範囲規則構造の存在を意味している。一方1:2試料では、ハッチングで示したFSDPの範囲外に第1ピークが出現している。FSDPの起源は現在も議論の余地があるが、ネットワークの空隙(リングサイズ)と相関があることが指摘されている[2]。FSDPの位置から見積もられた空隙のサイズは3.5-3.7 Åであり、Heの原子半径(0.62 Å)に比べると圧倒的に大きい。このためSiO₂:SiC=2:1および1:1のSiOCではHeがアモルファスネットワーク中を容易に拡散でき、Heバブルの形成が抑制されたと推察される。一方、Si-C結合はSi-O結合よりもボンド長が短いため、リングサイズは小さくなる。このため、SiC濃度が高くなるほどHe拡散がしにくくなり、Heの蓄積によりバブルが形成されると思われる。

原子炉の実操業環境下では、材料はしばしば高温に曝される。SiOCの結晶化温度は1200°Cであるが、照射により構造変化が生じる可能性がある。SiOCの照射環境下における熱的安定性を調べるため、高温イオン照射実験を行った。この際、より過酷な条件にするためにHeと同時に重元素であるKrを照射した。500°CでHeおよびKrイオン照射を行ったところ、73dpaと極めて高い損傷量においてもSiOCのアモルファス構造が保たれ、顕著な結晶化や相分離が起こっていないことが確認された。また、He濃度が200 at.%を超える注入量においてもHeバブルの形成や体積膨張は見られなかった。このことはアモルファスSiOCが高温においても優れた耐照射性を有することを示しており、原子力産業分野における構造材料として有用であることを示唆している。

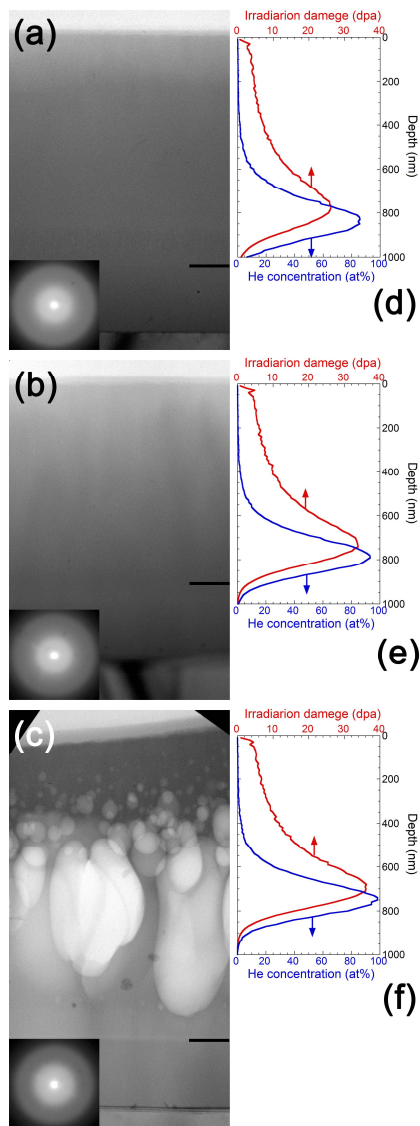


図2. (a-c) He照射したSiOCの断面明視野像と照射領域から得られた電子回折図形。(a) SiO₂:SiC=2:1、(b) 1:1、(c) 1:2。(d-f) モンテカルロ法により見積もったHeおよび損傷の分布。

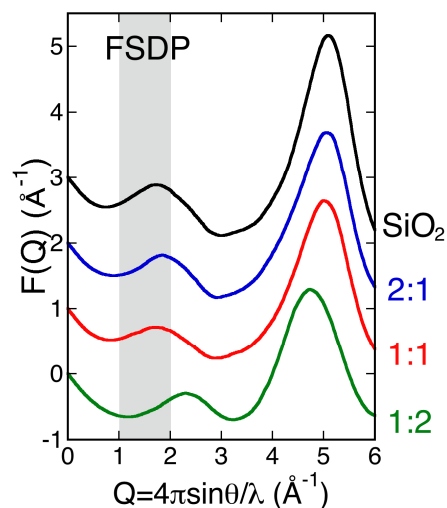


図3. SiO₂およびSiOCの電子回折図形から得られた還元干渉関数。ハッチング部はFSDPの範囲を表している。

4-2. アモルファス B₄C の構造解析

図 4 は、極低温で 2 MeV の金(Au)イオンを $5 \times 10^{15} / \text{cm}^2$ 照射した B₄C の高分解能像と対応する制限視野電子回折図形である。未照射領域の高分解能像では原子が規則正しく配列している (図 4(a))。図 4(a') の電子回折図形は、結晶 B₄C (空間群 R $\bar{3}m$ (No.166) : $a=5.6043 \text{ \AA}$, $c=12.0841 \text{ \AA}$) の (12 $\bar{1}$) 逆格子面と一致している。図 4(b) は、図 4(a) と同じ結晶粒から得られた高分解能像であるが、損傷の大きい領域から撮影されたものである。図 4(b) の下部では原子配列に乱れはあるものの結晶が維持されているが、上部では格子縞が見えなくなっている。図 4(b') には B₄C のブラッグ反射に加え、アモルファス化に伴うハローリングが現れている。このハローリングはブラッグ反射と重なっており、イオン照射によって結晶からアモルファスへの相変態が起こっていることが分かる。図 4(c) の高分解能像ではアモルファスの典型的なソルト&ペッパーコントラストが観察され、図 4(c') の回折パターンにはブラッグ反射が検出されなかった。このことはイオン照射により完全なアモルファス化が起こっていることを意味している。モンテカルロシミュレーションの結果、今回の照射条件における最大損傷量は 11.4dpa と見積もられた。この値は B₄C の非晶質化に必要な損傷量(6-8dpa) [3,4] よりも十分大きく、イオン照射によりアモルファス化が起こるのは妥当であると言える。

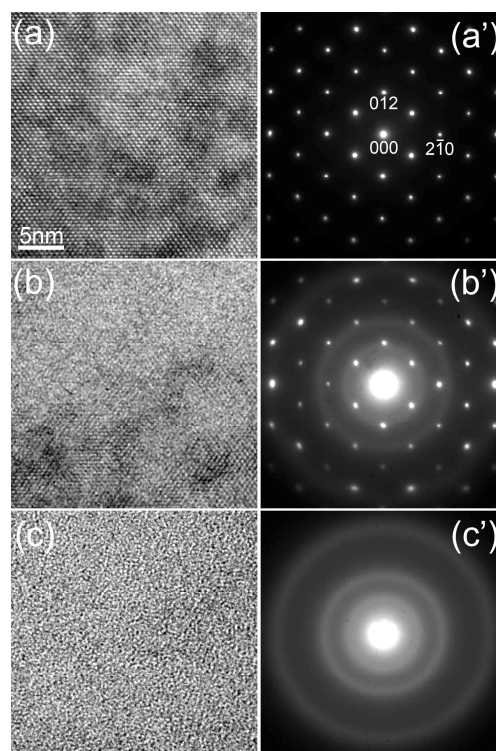


図 4 . 2 MeV の Au イオンを $5 \times 10^{15} / \text{cm}^2$ 照射した B₄C の (a-c) 高分解能像と (a' -c') 電子回折図形。(a) 未照射領域、(c) 結晶/アモルファス界面、(c) 最大損傷領域。同じ結晶粒の異なる領域から得られている。

アモルファス構造を電子線動径分布解析法により調べた。電子回折図形から、散乱ベクトルの大きさが 20 \AA^{-1} まで強度振動が見られた。この値は従来の電子回折実験 [5] で得られた散乱ベクトル (6 \AA^{-1}) よりも圧倒的に大きく、我々の技術により精密構造解析が可能であることを示している。電子回折強度の定量解析により求めたアモルファス B₄C の 2 体分布関数を図 5(a) に示す。アモルファス B₄C は室温および低温照射で作製した。顕著なピークが 1.7 \AA および 2.9 \AA 付近に存在している。低温照射試料の第 1 ピークは室温照射試料よりも高さが低く、幅が広がっており、アモルファスがより不規則な状態になっている。これは低温において欠陥の回復が抑制されたことによるものと思われる。

2 体分布関数 $g(r)$ のピークを解釈するために、アモルファス構造と結晶構造を比較した。B₄C の結晶構造については未だ議論があるが、基本的に B₁₂ または B₁₁C から構成される 20 面体は、B-B-B、C-B-C または C-C-C の直鎖を介して他の 20 面体と結合しているモデルが提案されている [6-8]。正 20 面体の原子配置を図 5(b) に示す。簡単のため、炭素原子とホウ素原子の区別していない。ボンドは第 1 配隣接の原子対を表し、原子に示した数字は「0」で示される原子からの第 n 隣接にある原子を意味する。原子間距離は正 20 面体において、第 1 近接が $1.69 \sim 1.83 \text{ \AA}$ 、第 2 近接が $2.73 \sim 2.96 \text{ \AA}$ に分布している。結晶 B₄C の原子間距離は、図 5(a) の横軸に幅 0.1 \AA の棒で示されている。 $g(r)$ のピーク位置は、B₄C 結晶の第 1、第 2 原子間距離と一致している。第 1 ピークの短距離側には肩が存在し、C-C 原子対の形成を示唆している。アモルファス

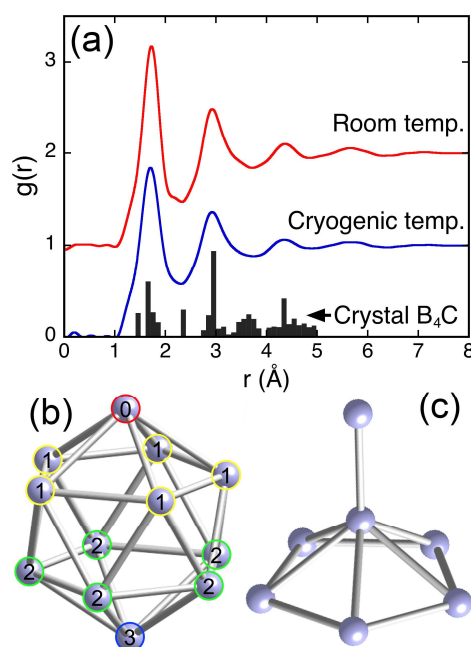


図 5 . (a) 室温および低温イオン照射により作製したアモルファス B₄C の 2 体分布関数。比較のため、結晶 B₄C の原子間距離も示している。(b) 正 20 面体と (c) 五角錐の原子配置。簡単のため、ホウ素原子と炭素原子の区別はしていない。

第 1 近接が $1.69 \sim 1.83 \text{ \AA}$ 、第 2 近接が $2.73 \sim 2.96 \text{ \AA}$ に分布している。結晶 B₄C の原子間距離は、図 5(a) の横軸に幅 0.1 \AA の棒で示されている。 $g(r)$ のピーク位置は、B₄C 結晶の第 1、第 2 原子間距離と一致している。第 1 ピークの短距離側には肩が存在し、C-C 原子対の形成を示唆している。アモルファス

ス B₄C ネットワークにおける炭素同種原子対の存在は、第一原理分子動力学シミュレーションによって確認されており[8,9]、本研究の妥当性を支持している。

図5(a)のg(r)において、結晶の第3近接原子間距離に相当する3.6 Å付近にはピークが観測されなかった。正20面体の最長の対角線の長さが第3近接距離に相当する(図5(b))。第3のピークの欠如から、図5(c)に示す原子配置がアモルファスB₄Cに存在するクラスターの一つであると考えられる。この構造単位は五角錐に相当し、図5(c)の0と書かれた原子と一番上の原子の原子間距離は約1.7 Å(B-Cは1.70 Å、B-Bは1.68 Å)である。この五角錐の存在は、実際にアモルファスホウ素[10]やアモルファスB₄C[9]で、ポロノイ多面体解析と組み合わせた第一原理分子動力学シミュレーションによって確認されている。また、ラマン分光法でも五角錐に起因する振動モードの存在が検出されている[11]。

PECVDにより作製したB_xC薄膜は、高分解能像観察と電子回折実験によりアモルファス構造を有することが確認された。図6(a)は、PECVDにより得られたアモルファスB_xC薄膜の還元干渉関数である。比較のため、低温イオン照射で作製されたアモルファスB₄Cのデータも示している。PECVD試料の還元干渉関数では、イオン照射試料と同様に20 Å⁻¹まで強度振動が明瞭に見られ、ほぼ同じ位置にピークが存在する。4.8 Å⁻¹にある最も強いピークがわずかに高散乱角側にシフトしていることから、イオン照射により生成したアモルファスB₄Cよりも平均結合長が短くなっていることが示唆される。PECVD試料では1.3 Å⁻¹のピーク(矢印)が見られないが、中範囲規則構造が乱れていることに起因すると考えられる。

還元干渉関数をフーリエ変換することにより得られたg(r)を図6(b)に示す。イオン照射によって作製されたアモルファスB₄Cと比較して、PECVD試料のg(r)の振幅は5 Å以上で急激に減衰しており、アモルファス構造がより無秩序であることが示唆される。この結果は、中範囲規則構造が乱れていることと一致している。イオン照射した試料(図6(a))と同様に、1.7 Åおよび2.9 Å付近に顕著なピークが存在する。これらのピーク他に、1.4 Åおよび2.5 Å付近に、イオン照射試料のg(r)では見られない余分なピークや肩が現れている。この原因を明らかにするため、X線光電子分光法により組成および結合状態を調査した。その結果、PECVDアモルファスはB₄CよりもCリッチになっており、炭素同種原子対が形成されていることが明らかとなった。C-Cの結合長は約1.5 Å、C-C-C結合(第2隣接)は約2.5 Åであることから、PECVDのg(r)に見られた余分なピークは炭素結合に由来すると考えられる。実際、アモルファスB_{2.5}Cにおいては炭素由来のピークが中性子回折法により検出されている[12]。アモルファスB_xCは軽元素から構成されているため、実験室レベルのX線回折では構造解析が困難である。電子線はX線よりも10³~10⁴倍大きな相互作用を有するため、アモルファスB_xCの解析に有効である。

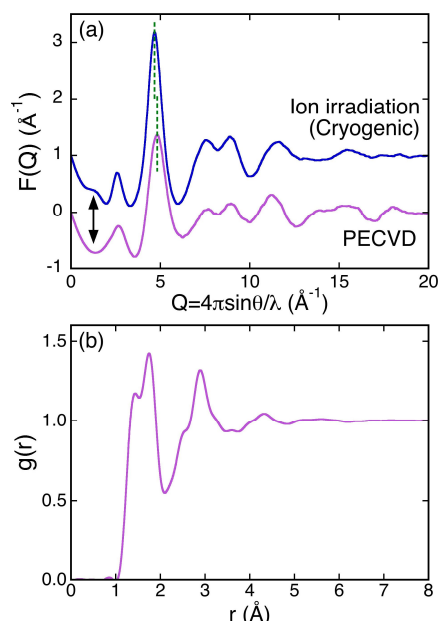


図6. (a)PECVDおよびイオン照射により作製したアモルファスB_xCの還元干渉関数。(b) PECVDアモルファスB_xCの2体分布関数。

- [1] P. Jung, Nucl. Instrum. Meth. B **91**, 362 (1994).
- [2] C. Crupi et al., Phys. Rev. B **92**, 134206 (2015).
- [3] D. Gosset et al., J. Nucl. Mater. **476**, 198 (2016).
- [4] G. Victoret et al., J. Eur. Ceram. Soc. **39**, 726 (2019).
- [5] R. Bao and D. B. Chrisey, J. Mater. Sci. **46**, 3952 (2011).
- [6] F. Mauri, N. Vast, and C. J. Pickard, Phys. Rev. Lett. **87**, 085506 (2001).
- [7] K. Rasim et al., Angew. Chem. Int. Ed. **57**, 6130 (2018).
- [8] V. I. Ivashchenko et al., Phys. Rev. B **80**, 235208 (2009).
- [9] T. A. Yildiz and M. Durandurdu, Comput. Mater. Sci. **173**, 109397 (2020).
- [10] M. Durandurdu, J. Non-Cryst. Solids **417-418**, 10 (2015).
- [11] R. Bao and D. B. Chrisey, Thin Solid Films **519**, 164 (2010).
- [12] C. Pallier et al., Chem. Mater. **25**, 2618 (2013).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Nakamura R., Matsumoto A., Ishimaru M.	4. 巻 129
2. 論文標題 Explosive crystallization of sputter-deposited amorphous germanium films by irradiation with an electron beam of SEM-level energies	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 215301 ~ 215301
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0052142	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Ishimaru Manabu, Nakamura Ryusuke, Zhang Yanwen, Weber William J., Peterson George G., Ianno Natale J., Nastasi Michael	4. 巻 42
2. 論文標題 Electron diffraction radial distribution function analysis of amorphous boron carbide synthesized by ion beam irradiation and chemical vapor deposition	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the European Ceramic Society	6. 最初と最後の頁 376 ~ 382
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jeurceramsoc.2021.10.020	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Inenaga Kohei, Motomura Ryo, Ishimaru Manabu, Nakamura Ryusuke, Yasuda Hidehiro	4. 巻 127
2. 論文標題 Liquid-mediated crystallization of amorphous GeSn under electron beam irradiation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 205304 ~ 205304
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0006416	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Su Qing, Greaves Graeme, Donnelly Stephen E., Mizuguchi Shoki, Ishimaru Manabu, Nastasi Michael	4. 巻 72
2. 論文標題 Dual-Beam Irradiation Stability of Amorphous Silicon Oxycarbide at 300 °C and 500 °C	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JOM	6. 最初と最後の頁 4002 ~ 4007
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11837-020-04332-z	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 Sato Kazuhisa, Asakura Naoya	4. 巻 130
2. 論文標題 Domain switching dynamics in relaxor ferroelectric Pb(Mg _{1/3} Nb _{2/3})O ₃ ?PbTiO ₃ revealed by time-resolved	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 164101 ~ 164101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0064291	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ishimaru Manabu, Nakamura Ryusuke	4. 巻 59
2. 論文標題 Behavior of Sn Atoms During Crystallization of Amorphous GeSn	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Materia Japan	6. 最初と最後の頁 662 ~ 668
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2320/materia.59.662	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 長岡駿弥、石丸 学
2. 発表標題 分子動力学法によるアモルファスGeの爆発的結晶化過程の解析
3. 学会等名 日本金属学会・日本鉄鋼協会・軽金属学会九州支部令和3年度合同学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 長岡駿弥、石丸 学
2. 発表標題 分子動力学法によるアモルファスGeの液相媒介結晶化過程の解析
3. 学会等名 応用物理学会第82回秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 長岡駿弥、石丸 学
2. 発表標題 アモルファスGeの液相媒介結晶化の検討：分子動力学シミュレーション
3. 学会等名 日本金属学会2021年秋期講演大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 本村 凌、稲永航平、石丸 学、仲村龍介、保田 英洋
2. 発表標題 電子線照射下におけるアモルファスGeSnの融液媒介結晶化
3. 学会等名 応用物理学会第81回秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岡 壮磨、本村 凌、石丸 学、仲村龍介、保田英洋
2. 発表標題 アモルファスGeSnの電子線照射誘起結晶化におけるSnの挙動
3. 学会等名 日本金属学会2020年秋期講演大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岡 壮磨、本村 凌、石丸 学、仲村龍介、保田英洋
2. 発表標題 アモルファスGeSnの電子線照射誘起構造変化と液体媒介結晶化
3. 学会等名 第62回日本顕微鏡学会九州支部学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 M. Ishimaru
2. 発表標題 Crystallization processes of amorphous GeSn by thermal annealing and electron-beam irradiation
3. 学会等名 International Symposium on Applied Science 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Mizuguchi, M. Ishimaru, Q. Su, and M. Nastasi
2. 発表標題 Composition dependence of amorphous structure and radiation tolerance in silicon oxycarbide glass
3. 学会等名 International Symposium on Applied Science 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 西隈光右、石丸 学
2. 発表標題 透過電子顕微鏡法によるアモルファス炭化ホウ素の構造解析
3. 学会等名 日本金属学会・日本鉄鋼協会・軽金属学会九州支部令和元年度合同学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 本村 凌、稲永航平、東山将史、石丸 学、奥川将行、仲村龍介
2. 発表標題 電子線照射および熱処理に伴うアモルファスGeSnの構造変化
3. 学会等名 日本金属学会・日本鉄鋼協会・軽金属学会九州支部令和元年度合同学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 西隈光右、石丸 学
2. 発表標題 アモルファス炭化ホウ素の電子線動径分布解析
3. 学会等名 応用物理学会第80回秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 本村 凌、稲永航平、石丸 学、奥川将行、仲村龍介
2. 発表標題 アモルファスGeSnの電子線照射による結晶化
3. 学会等名 応用物理学会第80回秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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 分担者	佐藤 和久 (Kazuhisa Sato) (70314424)	大阪大学・超高压電子顕微鏡センター・准教授 (14401)	
研究 分担者	仲村 龍介 (Ryusuke Nakamura) (70396513)	大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授 (24403)	

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			
米国	University of Nebraska - Lincoln	University of Huddersfield	University of Tennessee - Knoxville	
米国	University of Nebraska - Lincoln			