

## 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 4 日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2012

課題番号：21360469

研究課題名（和文） 異種元素添加した核燃料模擬材料の高エネルギー重イオン照射効果

研究課題名（英文） Heavy Ion Irradiation Effects on Fuel Simulation Materials Doped with Impurities

研究代表者

岩瀬 彰宏（IWASE AKIHIRO）

大阪府立大学・工学研究科・教授

研究者番号：60343919

研究成果の概要（和文）：

可燃毒を添加した核燃料体（ウラニア）の核分裂片照射効果を模擬するために、類似の性質を有するセリアにガドリニアやエルビアを添加した試料を高エネルギー重イオンで照射し、結晶構造や短距離秩序の変化を調べた。結晶構造や原子配列に現れる照射効果は、異種元素を添加した場合のほうが大きく現れることが見出された。また、計算機シミュレーションによる重イオン照射効果の評価をウラニア、セリアで行った結果、特に酸素配列が大きく乱れ、その乱れはウラニアのほうが安定であることなどが判明した。

研究成果の概要（英文）：

To simulate the effect of high energy fission fragments on nuclear fuels doped with burnable poisons, we doped CeO<sub>2</sub> with Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> or Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and irradiated them with high energy heavy ions. The change in lattice structures by the irradiation was studied. We have found that the doping of Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> or Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> enhanced the irradiation effect. The result of the computer simulation showed that the irradiation mainly destroyed the oxygen atom arrangements and the disordering of oxygen atom arrangement in UO<sub>2</sub> is much stable than in CeO<sub>2</sub>.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	8,200,000	2,460,000	10,660,000
2010 年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2011 年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2012 年度	1,600,000	480,000	2,080,000
年度			
総計	13,000,000	3,900,000	16,900,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・原子力学

キーワード：原子力材料、核燃料

## 1. 研究開始当初の背景

原子力発電の効率化を図るため、核燃料の高燃焼度化が有効であるが、初期の燃焼度の安定化のため、可燃毒を燃料に添加する。可燃毒を含んだ核燃料が高エネルギー核分裂生成片によりどのように構造や物性が変化するかを知ることは、今後の原子力発電にとって極めて重要である。

## 2. 研究の目的

核燃料が原子炉稼働中に受ける 100MeV 程度の核分裂片の照射効果が、可燃毒を添加することによりどのような影響があるかを調べるために、核燃料の模擬物質 CeO<sub>2</sub> に、核分裂片照射を模擬するための高エネルギー重イオンを照射し、その構造や物性の変化を測定する。実験に加え、計算機シミュレー

ションによる評価も行い、核燃料体への核分裂片照射効果に関する総合的知見を得る。

### 3. 研究の方法

本実験に用いた試料は、CeO<sub>2</sub>(セリア)粉末を高温で焼結して作成したバルクペレット、および、CeO<sub>2</sub>粉末にGd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(ガドリニア)またはEr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(エルビア)を1-10 mol%添加して焼結したバルクペレットである。各試料は、まずX線回折法(XRD)、放射光広域吸収分光法(EXAFS)によって結晶構造や原子配列の評価を行った。その後、各試料を、原子力機構東海のタンデム加速器を用いて200MeVXeイオン照射を行った。比較のため、10MeV Iイオン照射やGeV領域の重イオン照射も実施した。照射した試料は、XRD, EXAFS法を用いて、結晶構造のイオン照射による影響を調べた。さらに、物理的性質への照射効果を見るために、磁性評価を試みた。照射前後の試料の磁性を、SQUID磁束計を用いて評価した。さらに、計算機的アプローチとして、核燃料用材料UO<sub>2</sub>およびその模擬物質CeO<sub>2</sub>への重イオン照射効果を明らかにするための分子動力学シミュレーションを行った。〈100〉, 〈010〉, 〈001〉の各方向にユニットセルで5個の大きさを持つUO<sub>2</sub>単結晶と、〈100〉, 〈010〉, 〈001〉の各方向にユニットセルで6個の大きさを持つCeO<sub>2</sub>単結晶を作成し、そこに〈001〉方向から高エネルギービームが照射されたと考える。照射の結果、試料の中心部に〈001〉方向を軸とする円筒状の領域に高温領域が生じる。この状態を分子動力学法の初期状態として、これ以降のUO<sub>2</sub>およびCeO<sub>2</sub>試料の構造変化を計算した。

### 4. 研究成果

まず、異種元素(Er, Gd)を添加することによるCeO<sub>2</sub>の結晶構造の変化について述べる。異種元素を加えても、結晶構造は蛍石構造を保つことが分かった。これは、Er, Gd原子がCe原子位置に置き換わっていることを示す。しかし、各ピークを詳しく見ると、異種元素

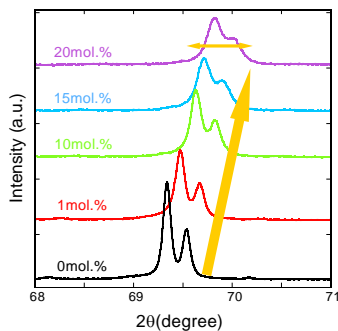


図1 Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>添加によるCeO<sub>2</sub>のXRD(400)ピークの変化

添加効果が明確に見える。図1は(400)回折ピークのEr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>添加による変化を示す。Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>添加量の増加に伴い、ピークは右にシフトし、ピーク幅も増加する。これは、Ceよりもイオン半径の小さいErを添加したために格子定数が減少し、原子配置に乱れが生じたためと考えられる。Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>添加時も同様な現象がみられたが、Gdイオン半径はCeに近いので、添加効果は、Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>添加の場合と比べて大分小さいことがわかった。

つぎに、200MeV Xeイオン照射効果について述べる。Xeイオン照射によっていずれの試料についても格子定数は増加し、XRDピーク幅は増加する。これは、イオン照射により結晶中に格子欠陥が生じ、格子を膨張させるとともに、原子配列を乱したためである。興味深いのは、照射による効果が、異種元素添加によりどう変化するかということである。図2は、単位照射量あたりの格子定数増加量(増加率)を、Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>添加量の関数としてプロットしたものである。

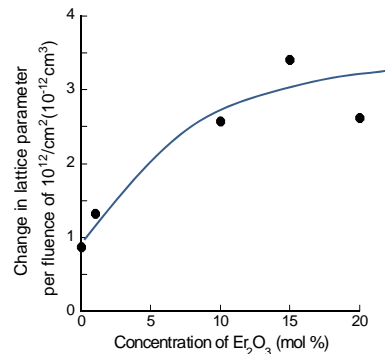


図2 照射による格子定数増加率のEr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>添加量依存性

Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>添加量が増加するとともに、同じ照射量でも格子定数の増加量が大きくなることが明確に示されている。半値幅も同様に、添加量が多いほど、その増加量は大きい。この実験結果は、Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を添加することにより、CeO<sub>2</sub>は、高エネルギーイオン照射に対して敏感になるということを示している。同様な結果はGd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を添加した場合にも示される。図3は、Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を5mol%添加したCeO<sub>2</sub>に対して、Ce-L3吸収端近傍で測定したEXAFS-FTスペクトルである。大きなピークが2つみられるが、左のピークはCe原子の最近接原子である酸素に対応するもの、右のピークは、第2近接原子であるCe(一部Gd)に対応するピークである。Xeイオン照射することにより、2つのピークの高さは減少する。これは、Ce原子周辺の0原子、Ce原子の原子配列が乱れたためである。XRDが長距離秩序を見るのに対して、EXAFSは、注目した原子(いまの場合はCe)の周りの短距離秩序をみていることになる。また、ピークの位置は、それぞれ、

Ce-O, Ce-Ce (Gd) の原子間距離を表す。

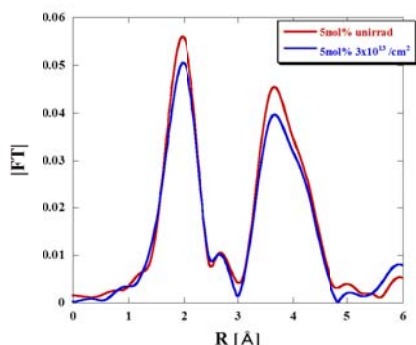


図3 Gd203 を 5mol% 添加した試料を Xe イオン照射したときの EXAFS-FT スペクトル (青色)。赤色のスペクトルは未照射試料

図4に、EXAFS-FT スペクトルから求めた Ce-Ce 原子間距離の Gd203 添加量依存性を示す。未照射の試料では、Ce-Ce 原子間距離は、Gd203 添加量にほとんど依存しないが、Xe イオン照射した場合、添加量増加に伴って、Ce-Ce 原子間距離は大きく増加する。

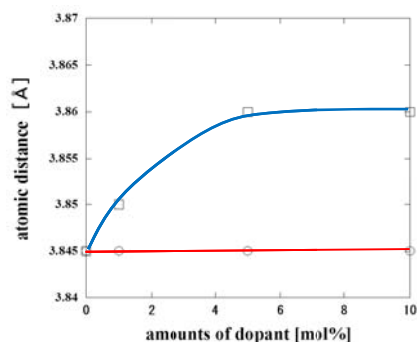


図4 EXAFS-FT スペクトルから求めた Ce-Ce 原子間距離の Gd203 添加量依存性。赤線は未照射試料、青線は 200MeV Xe イオン照射試料

この結果は、XRD 測定で得られた結果と同様である。すなわち、異種元素を添加することによって、CeO<sub>2</sub> には、高エネルギーイオン照射効果が大きく現れるということを示すものである。はじめに示したように、CeO<sub>2</sub> 結晶は、大きさや価数が Ce 原子と異なる異種元素 (Er, Gd) を添加することにより、結晶に乱れが生じ、また結晶全体が収縮する。このような不安定な結晶状態は、イオン照射によるエネルギー付与に対してより敏感になり、格子定数や原子配列の乱れが大きく現れることになったと考えられる。本研究では、核燃料 UO<sub>2</sub> そのものではなく、模擬物質 CeO<sub>2</sub> を用いているので、今後、UO<sub>2</sub> と CeO<sub>2</sub> の照射効果の差異を詳細に検討する必要があるが、模擬物質とはいえ、構造や性質の類似している物質で、可燃毒添加によって高エネルギー核分裂片照射効果が増大する可能性が示さ

れたことは、今後の核燃料高燃焼度化、およびそれに伴う Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> を可燃毒として添加した核燃料の評価に重要な知見を与えたものといえる。

さて、実験で核燃料物質 UO<sub>2</sub> を用いるのは大きな困難を伴うが、それを補うのは計算機実験である。「研究の方法」で述べた手法を用いて計算した結果を図5、図6に示す。図5は、高エネルギー重イオン照射後の UO<sub>2</sub> の<001>方向から見た原子構造、図6は、同じく重イオン照射後の CeO<sub>2</sub> の<001>方向から見た原子構造である。これらの結果から、UO<sub>2</sub> およびその模擬物質 CeO<sub>2</sub> との間に照射に対する安定に違いが認められる。すなわち、CeO<sub>2</sub> の方が単結晶への回復が容易であり、UO<sub>2</sub> では特に酸素が乱れたまま残りやすいことが分かった。

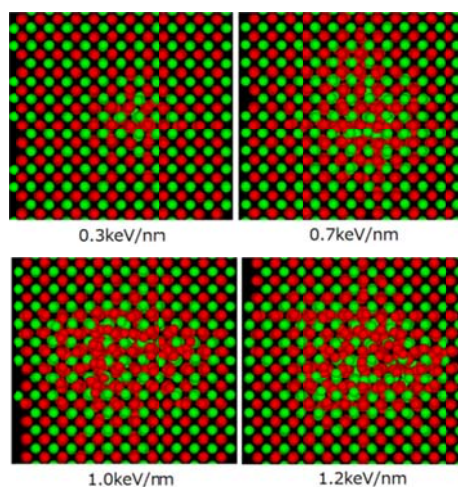


図5 高エネルギー重イオン照射後の UO<sub>2</sub> の<001>方向から見た原子構造。下の数字は高温領域に与えた有効阻止能を表わす。緑の球が U 原子、赤の球が O 原子を示す。

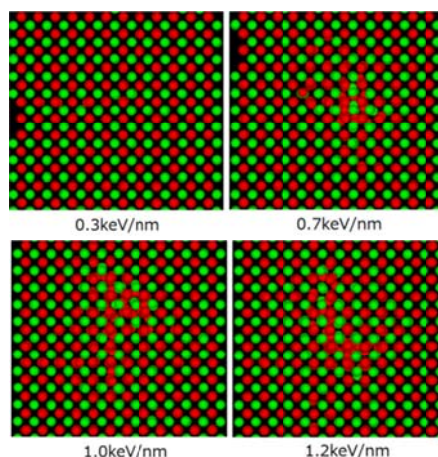


図6 高エネルギー重イオン照射後の CeO<sub>2</sub> の<001>方向から見た原子構造。下の数字は高温領域に与えた有効阻止能を表わす。緑の球が U 原子、赤の球が O 原子を示す。

これら計算結果からは、模擬物質 CeO<sub>2</sub> よりも核燃料物質 UO<sub>2</sub> のほうが、高エネルギー重イオンによって乱れた状態が持続することがわかるが、ここでは、励起電子系から格子へ移行したエネルギー（いわゆる有効電子阻止能）が同じ値で比較していることに注意すべきである。実験結果によると、アモルファストラックの残る阻止能の閾値が UO<sub>2</sub> の方が CeO<sub>2</sub> よりも高いことが指摘されている (UO<sub>2</sub> : 22-20 keV/nm, CeO<sub>2</sub> : 16 keV/nm) が、これは電子系から格子系へのエネルギー移行の割合が異なるためと考えられる。最後に、本研究の by-product として得られた、しかし重要な結果について紹介する。本来は非磁性である CeO<sub>2</sub> を高エネルギー重イオン照射すると、強磁性になることが分かった。しかし、照射量を大きくしすぎると、発現した磁化は減少に転ずる。高エネルギーイオン照射によって強磁性が発現する現象は、イオン照射によって酸素原子がはじき出され、酸素の空孔が生ずることで、以下のように説明できる。酸素空孔ができると、電荷のバランスを保つために、Ce 原子の一部は価数が +4 から +3 に変化し、不対 4 f 電子が現れる。この 4 f 電子の磁氣的相互作用により、強磁性が発現する。高エネルギーイオン照射によって酸素原子のほうが Ce 原子よりも乱されやすいことは、図 6 に示す計算結果からも予測できる。なお、照射量の大きい場合は、酸素原子の空孔だけでなく、Ce 原子も含めた原子の配列が乱れ、磁気秩序も低下することにより、磁化が低下すると考えられる。

#### 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 9 件)

- ① Y.Sasajima, T.Osada, N.Ishikawa, A. Iwase, Computer simulation of structural modifications induced by highly energetic ions in uranium dioxide, Nucl. Instr. Meth. B(2013) accepted for publication
  - ② Y.Sasajima, N.Ajima, T.Osada, N.Ishikawa, A. Iwase, Molecular dynamics simulation of fast particle irradiation on the single crystal CeO<sub>2</sub>, Nucl. Instr. Meth. B(2013) accepted for publication.
  - ③ T.Kishino, K.Shimizu, Y.Saitoh, N.Ishikawa, F.Hori, A.Iwase, Effects of high-energy heavy ion irradiation on the crystal structure in CeO<sub>2</sub> thin films, Nucl. Instr. Meth. B(2013) accepted for publication  
DOI:http://dx.doi.org/10.1016/j.nimb.2013.04.028
  - ④ K.Shimizu, S.Kosugi, Y.Tahara, K.Yasunaga, Y.Kaneta, N.Ishikawa, F.Hori, T.Matsui, A. Iwase, Change in magnetic properties induced by swift heavy ion irradiation in CeO<sub>2</sub>, Nucl. Instr. Meth. B286(2012) 291-294.  
DOI:10.1016/j.nimb.2012.01.008
  - ⑤ Y.Tahara, K.Shimizu, N.Ishikawa, Y.Okamoto, F.Hori, T.Matsu, A.Iwase, Study on effects of energetic ion irradiation in Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-doped CeO<sub>2</sub> by means of synchrotron radiation X-ray spectroscopy, Nucl. Instr. Meth. B277(2012) 53-57.  
DOI:10.1016/j.nimb.2011.12.048
  - ⑥ Y. Tahara, B. Zhu, S. Kosugi, N. Ishikawa, Y. Okamoto, F. Hori, T. Matsui, A. Iwase, Study on effects of swift heavy ion irradiation on the crystal structure in CeO<sub>2</sub> doped with Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nucl. Instr. Meth. B, 269 (2011)886-889  
DOI:10.1016/j.nimb.2010.12.032
  - ⑦ Effects of swift heavy ion irradiation on the structure of Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-doped CeO<sub>2</sub>, B. Zhu, H. Ohno, S. Kosugi, F. Hori, K. Yasunaga, N. Ishikawa, A. Iwase, Nucl. Instr. Meth. B268(2010) 3199-3202.  
DOI:10.1016/j.nimb.2010.05.088
  - ⑧ B. Zhu, Y.Tahara, K.Yasunaga, T.Matsui, F.Hori, A. Iwase, Study on analysis of crystal structure in CeO<sub>2</sub> doped with Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> or Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, J. Rare Earths, 28(2010) 164-167.  
DOI:10.1016/S1002-0721(10)60378-X
- [学会発表] (計 3 1 件)
- ① K. Shimizu, T. Kishino Y. Tahara, K. Yasunaga, N. Ishikawa, Y. Okamoto, Y. Baba, N. Hirao, Y. Saitoh, F. Hori, T. Matsui, A. Iwase, Effects of swift heavy ion irradiation and high temperature annealing on the structure and magnetic properties of CeO<sub>2</sub>, 8<sup>th</sup> International Symposium on Swift Heavy Ions in Matter (Oct.26, 2012, Kyoto, Japan)
  - ② A. Iwase, T. Kishino, K. Shimizu, Y. Tahara, F. Hori, T. Matsui, N. Ishikawa, Y. Okamoto, Effects of Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> doping and swift heavy ion irradiation on CeO<sub>2</sub> bulk pellets and thin films, 8<sup>th</sup> International Symposium on Swift Heavy Ions in Matter (Oct.26, 2012, Kyoto, Japan)
  - ③ Y.Sasajima, T.Osada, N.Ishikawa, A. Iwase, Computer simulation of high-energy-ion irradiation of uranium dioxide, 8<sup>th</sup> International Symposium on Swift Heavy Ions in Matter (Oct.26, 2012, Kyoto, Japan)
  - ④ Y.Sasajima, N.Ajima, T.Osada, N.Ishikawa, A. Iwase, Computer simulation of high energy beam of ceria,

- 8<sup>th</sup> International Symposium on Swift Heavy Ions in Matter (Oct.26, 2012, Kyoto, Japan)
- ⑤ Y.Sasajima, T.Osada, N.Ajima, N.Ishikawa, A.Iwase, Computer Simulation of High Energy Beam Irradiation of Ceria and Uranium Dioxide, IUMRS-ICEM (Sept.25, 2012, Yokohama, Japan)
  - ⑥ 岸野孝典, 石川法人, 斉藤勇一, 清水浩貴, 堀史説, 岩瀬彰宏, RF スパッタリング法で作製した CeO<sub>2</sub> 薄膜の高エネルギー重イオン照射効果、日本物理学会秋季大会 (9月19日、2012年、横浜)
  - ⑦ 安島直紀, 長田卓也, 篠嶋妥, 石川法人, 岩瀬彰宏, 単結晶への高速粒子線照射の分子動力学シミュレーション、日本金属学会秋季大会(9月19日、2012年、松山)
  - ⑧ 長田卓也, 安島直紀, 篠嶋妥, 石川法人, 岩瀬彰宏, Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 添加 CeO<sub>2</sub> への高速粒子線照射に関する分子動力学シミュレーション、日本金属学会秋季大会 (9月19日、2012年、松山)
  - ⑨ K. Shimizu, Y. Tahara, K. Yasunaga, N.Ishikawa, Y. Baba, N. Hirao, Y. Okamoto, F. Hori, Y. Kaneta, T. Matsui, A. Iwase, Modification of Magnetic Properties of CeO<sub>2</sub> by using swift heavy ion irradiation 21<sup>th</sup> MRS-J Academic Symposium (Dec.20, 2011, Yokohama, Japan)
  - ⑩ 長田卓也, 小貫英昭, 篠嶋妥, 石川法人, 岩瀬彰宏, UO<sub>2</sub> の高エネルギービーム照射に関するシミュレーション実験、日本金属学会秋季大会 (11月8日、2011年、沖縄)
  - ⑪ 小貫英昭, 篠嶋妥, 岩瀬彰宏, SiO<sub>2</sub> の高エネルギービーム照射によるトラック形成シミュレーション日本金属学会秋季大会 (11月8日、2011年、沖縄)
  - ⑫ 岩瀬彰宏, 高速イオンビームによる固体内高密度励起反応と物質改質への応用、第7回励起ナノプロセス研究会 (11月1日、2011年、大阪)
  - ⑬ 岩瀬彰宏, 高エネルギーイオンと物質の相互作用—その基礎過程と物質改質への応用—、日本原子力学会九州支部講演会 (9月28日、2011年、福岡)
  - ⑭ 岩瀬彰宏, 清水浩貴, 堀史説, 松井利之, 石川法人, 金田保則, 高速重イオンビームによる CeO<sub>2</sub> の磁性制御、日本物理学会秋季大会 (9月21日、2011年、富山)
  - ⑮ 岩瀬彰宏, 高速重イオン照射による原子力材料の特性分析、第21回格子欠陥フォーラム (9月20日、2011年、立山)
  - ⑯ Y.Tahara, K.Shimizu, N.Ishikawa, Y.Okamoto, Y.Baba, N. Hirao, Y. Saitoh, R. Neumann, C. Trautmann, F. Hori, T. Matsui, A. Iwase, Effects of MeV-GeV ion irradiations on Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-doped CeO<sub>2</sub>, 16<sup>th</sup> International Conference on Radiation Effects in Insulators (Aug. 16, 2011, Beijing, China)
  - ⑰ K. Shimizu, S. Kosugi, Y. Tahara, K. Yasunaga, Y. Kaneta, N. Ishikawa, F. Hori, T. Matsui, A. Iwase, Change in magnetic properties induced by swift heavy ion irradiation in CeO<sub>2</sub>, International Conference on Radiation Effects in Insulators (Aug. 16, 2011, Beijing, China)
  - ⑱ Y.Tahara, K.Shimizu, N.Ishikawa, Y.Okamoto, F. Hori, T. Matsui, A.Iwase, Study on Effects of Energetic Ion Irradiation in Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-doped CeO<sub>2</sub> by Means of Synchrotron Radiation X-ray Spectroscopy, European Materials Research Society Spring Meeting (May 10, 2011, Nice, France)
  - ⑲ 長田卓也, 小貫英昭, 篠嶋妥, 石川法人, 岩瀬彰宏, UO<sub>2</sub> の高エネルギービーム照射によるトラック形成の解析 (日本金属学会春季大会、3月26日 2011年)
  - ⑳ A.Iwase, Interaction between energetic ions and solids, -fundamental study and their application to the modification of magnetic properties of materials, Workshop on Osaka University HVEM (1月28日、2011年、大阪)
  - ㉑ H.Onuki, Y.Sasajima, N.Ishikawa, A. Iwase Computer Simulation on high-energy-beam irradiation of Uranium dioxide, 20<sup>th</sup> MRS-J Academic Symposium (Dec. 21, 2010, Yokohama, Japan)
  - ㉒ H. Ohuki, Y.Sasajima, N.Ishikawa, A. Iwase, Computer simulation of high energy beam irradiation of single crystalline silicon and β-cristobalite 20<sup>th</sup> MRS-J Academic Symposium (Dec. 21, 2010, Yokohama, Japan)
  - ㉓ 清水浩貴, 松井利之, 小杉晋也, 田原佑規, 藤田直樹, 堀史説, 岩瀬彰宏, 高エネルギー重イオン照射による CeO<sub>2</sub> への磁性付加 京都大学原子炉実験所材料照射効果の解明と照射技術の高度化ワークショップ (12月17日 2010年、大阪)
  - ㉔ 田原佑規, 岩瀬彰宏, Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> をドーブした CeO<sub>2</sub> の高速重イオン照射効果、日本原子力懇談会 (12月17日、2010年、大阪)
  - ㉕ 小貫英昭, 篠嶋妥, 岩瀬彰宏, SiO<sub>2</sub> の高エネルギービーム照射によるトラック形成の解析、日本金属学会秋季大会 (9月26日、2010年、札幌)

- ②⑥ 田原佑規、朱宝琳、小杉晋也、堀史説、松井利之、岩瀬彰宏、石川法人、岡本芳浩、馬場祐治、平尾法恵、Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> を添加した CeO<sub>2</sub> における高エネルギー重イオン照射効果、日本金属学会秋季大会 (9月 25 日、2010 年、札幌)
- ②⑦ B. Zhu, Y. Tahara, K. Yasunaga, T. Matsui, F. Hori, A. Iwase、Study on analysis of crystal structure in CeO<sub>2</sub> doped with Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> or Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 6<sup>th</sup> International Conference Rare Earth Development and Application (Beijing, China, August, 8<sup>th</sup> 2010)
- ②⑧ 小貫英昭、篠嶋妥、岩瀬彰宏 SiO<sub>2</sub> の高エネルギービーム照射に関する分子動力学シミュレーション、日本金属学会春季大会 (2010 年 3 月 29 日、筑波)
- ②⑨ 朱宝琳、大野裕隆、堀史説、安永和史、石川法人、岩瀬彰宏、Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> をドープした CeO<sub>2</sub> の高エネルギー重イオン照射効果、量子理工学研究実験センター第 10 回 QSEC 公開シンポジウム (2009 年 10 月 23 日 京都)
- ③⑩ 朱宝琳、大野裕隆、岩瀬彰宏、安永和史、石川法人、CeO<sub>2</sub> の高エネルギー重イオン照射効果における Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 添加の影響、日本金属学会秋季大会 (2009 年 9 月 17 日 京都)
- ③⑪ A. Iwase, B. Zhu, N. Ishikawa, T. Matsui Effects of swift heavy ion irradiation on the structure of Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-doped CeO<sub>2</sub>, 15th International Conference on Radiation Effects on Insulators (Sept.1st 2009 , Padova ,Italy)

茨城大学・工学部・教授  
研究者番号：80187137

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

岩瀬彰宏 (IWASE AKIHIRO)  
大阪府立大学・工学研究科・教授  
研究者番号：60343919

### (2) 研究分担者

堀史説 (HORI FUMINOBU)  
大阪府立大学・工学研究科・准教授  
研究者番号：20275291

### (3) 研究分担者

岡本芳浩 (OKAMOTO YOSHIHIRO)  
独立行政法人・日本原子力研究開発機構・量子応用部門・研究主幹  
研究者番号：70370369

### (4) 研究分担者

石川法人 (ISHIKAWA NORITO)  
独立行政法人・日本原子力研究開発機構・原子力基礎部門・研究主幹  
研究者番号：90354828

### (4) 研究分担者

篠嶋妥 (SASAJIMA YASUSHI)