

平成 22 年 5 月 20 日現在

研究種目：基盤研究（B）	
研究期間： 2006～2009	
課題番号：18360443	
研究課題名（和文）	ELMによるタングステンダイバータ板損傷の基礎過程の解明と材料の最適化
研究課題名（英文）	Fundamental behavior of damage on tungsten divertor plate by ELM and optimization of materials
研究代表者	
徳永 和俊（TOKUNAGA KAZUTOSHI）	
九州大学・応用力学研究所・准教授	
研究者番号：40227583	

研究成果の概要（和文）：

タングステン材に対して、パルス高熱負荷実験、高熱流水素・ヘリウム照射実験、低エネルギー・高粒子束重水素・ヘリウム照射実験を行い、試料の表面及び断面形状・組織変化、損耗量、水素・ヘリウムリテンション、光学的性質等を調べ、ITERのELM時に発生するタングステンダイバータ板の表面損傷を明らかにした。さらに、各種の改良タングステン材を試作すると共に、その熱・粒子負荷特性を評価し、タングステン材を最適化した。

研究成果の概要（英文）：

Pulse high heat loading experiment, high heat flux hydrogen/helium irradiation experiment, low energy and high flux deuterium/helium irradiation experiment have been carried out to investigate surface modification on tungsten due to the ITER ELM like loading. Modification of surface and cross section, microstructure change, hydrogen and helium retention and optical property change have been investigated. In addition, new developed tungsten materials have been fabricated and its heat and particle loading properties have been evaluated and optimization on tungsten materials has been carried out.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	9,100,000	2,730,000	11,830,000
2007年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2008年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2009年度	1,900,000	570,000	2,470,000
年度			
総計	15,000,000	4,500,000	19,500,000

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：プラズマ・核融合、タングステン、高熱負荷、水素同位体、ヘリウム

1. 研究開始当初の背景

(1) 高性能ダイバータ開発の重要性

磁場閉じ込め型核融合炉において長時間燃焼を行うためには、核融合反応によって発

生するヘリウムや不純物を排気することが必要である。このため、ダイバータ板にヘリウムや不純物を含むプラズマ粒子を衝突させ中性化し磁場に捕捉されない状態にし、これらを真空排気する。このダイバータ板は、プラズマ粒子(水素同位体、ヘリウム)や核融合反応中性子等の照射により、粒子負荷効果を受けると共に、これらのエネルギーは、最終的に熱に変換され高熱負荷を受ける。核融合炉の実現のためには、この熱・粒子を制御する高性能のダイバータを開発することが重要な課題の一つとなっている。

(2) タングステン製ダイバータアーマ材の有用性

このダイバータのアーマ材としては、これまで大型プラズマ閉じ込め装置では、プラズマ中に不純物として混入した際に影響が少ない炭素材料が主として使用されている。しかし、炭素材はプラズマによる損耗やトリチウムリテンションが大きく、さらに中性子照射による照射損傷により熱伝導率が大きく低下する等の致命的な欠点がある。従って、将来の定常炉では、高温特性に優れた高融点金属材料(高Z材)で、中でも最も融点が高く、さらに水素化物を形成しないタングステン(W)を使用することが計画されている。国際熱核融合実験炉(ITER)のダイバータでは、バップル板及びドームにはタングステンが使用される予定である。さらに、プラズマ制御のR&Dが進展すれば、または、運転領域を工学試験用に限定することによって、ダイバータ・ターゲットやまた、第一壁にも使用することも可能である。さらに、将来の発電実証プラント以降においても、タングstenはダイバータのアーマ材料として有望視されている。しかし、どのような形態のタングstenをどのような形態で使用するかについては、ITERのダイバータアーマ材を含め検討中であり、それぞれの段階に応じて交換し、放電実験を進めていくことになる。本研究は、核融合炉ダイバータのタングstenアーマ材料を開発し評価するという中期的構想の一環として実施される。

(3) ダイバータアーマ材の使用環境の特徴

① 周期的なパルス高熱負荷

ITERでは、ダイバータの表面は、定常的な $5\text{MW}/\text{m}^2$ 程度の高熱負荷に加え、ディスラプション時及びITERの標準運転モードであるエネルギー閉じ込め性能が良いHモード(ELM)時には、パルスの高熱負荷を受ける。特に、Type-I-ELM時には、エネルギーが数 MJ/m^2 で、負荷時間が $0.1\sim 1\text{ms}$ のパルス熱負荷を $2\sim 0.5\text{Hz}$ 程度の周期で受け、1回の放電時間が 400s でも、 1000 回に近い繰り返し高熱負荷を受けることになる。その結果、熱負荷が大きい部分では、表面近傍では、溶解、蒸発、飛散等が発生し、ダスト形成の原

因ともなり、また損耗と共に表面形状・組織変化が起こる。また、この損耗等による寿命低下と共に、タングsten等の放出によりプラズマ放電にも大きな影響を及ぼす可能性が指摘されている。さらに、繰り返し熱負荷の際の熱応力により、静的に荷重を加えた場合には破壊を生じることがないような小さい応力でも、それを繰り返して加えると破壊が生じる金属疲労も発生することが考えられる。これらに加え、パルスの温度上昇による温度変動下での損傷組織の回復、再結晶化等も同時に起こる。

② 水素同位体・ヘリウム・中性子負荷

このような表面高熱負荷は、電子に加えプラズマの水素同位体やヘリウム、X線、電磁波等によるものである。特に、ヘリウムはタングsten中の潜在欠陥や照射欠陥及び高温時に導入される熱平衡空孔との相互作用が強く、そのため高温まで捕捉され、高温下での材料挙動に大きな影響を与えると共に、タングstenの脆化を引き起こすことが明らかとなっている。しかし、タングsten等の金属中に侵入した水素やヘリウムが、熱負荷による大きな温度変動と高い熱応力がパル的に発生するような際の挙動とどのようにかかわりあうかという視点での研究はこれまで行われていない。さらに、核融合反応によって発生する中性子の照射効果が加わることになるが、ITERでは、中性子積算量は小さく、その影響は限定的である。

2. 研究の目的

本研究では、上記のは背景を踏まえ、核融合炉実験装置のタングstenダイバータ板に関して、以下の点について調べる。

(1) 国際熱核融合炉(ITER)のELM時のダイバータ熱負荷を模擬し、周期的なパルス高熱負荷を受けた際に発生するタングstenの損傷・損耗及びダスト・不純物発生、注入水素同位体の再放出挙動を明らかにする。

(2) パルス熱損傷に対する水素同位体・ヘリウム(He)注入効果について明らかにする。

(3) ELM時の負荷によるタングstenの耐損傷特性を、製造方法、加工度、組織の異なるタングsten材に対し評価を行うことにより、その依存性やさらに損傷メカニズムを明らかにし、ダイバータアーマ材としてのタングsten材を最適化する。

3. 研究の方法

(1) パルス高熱負荷実験

パルス熱負荷は、日本原子力研究開発機構(JAEA)の高熱負荷試験装置(JEBIS)及びレーザ照射装置を用いて行った。高熱負荷試験装置(JEBIS)では、 1ms 程度のパルス幅の単発の高負荷実験を行い、周期的な熱負荷を受けた際の繰り返しに至る前の単発での素過程

を調べる。また、多数回繰り返し照射を行うことにより、繰り返し効果についても調べることが出来る。また、レーザー照射装置では、周期的なパルス熱負荷実験を行い、同時に熱放水素同位体・ヘリウム等の測定を行う。これらの実験は、通常の定常的な粒子負荷を受けたダイバータアーマ材にディスラプションやELM時の熱負荷を受けた場合のシミュレーション実験ともなる。

(2) 水素・ヘリウム照射実験

高熱流水素・ヘリウム照射実験は、日本原子力研究開発機構(JAEA)のダイバータ受入試験装置(DATS)を用いた。この装置では、ITERのダイバータアーマ材での高熱流束のプラズマ照射に対応する粒子負荷(5~15MW/m²)が可能である。また、低エネルギー・高粒子束重水素・ヘリウム照射実験は、直線型プラズマ発生装置を用いて行った。

(3) 試料の観察・分析

試料の観察・分析は、表面形状変化を走査型電子顕微鏡(SEM)、原子間力顕微鏡(AFM)を用いて調べると共に、内部組織を透過型電子顕微鏡(TEM)を用いて調べた。また、熱負荷による損耗量を電子天秤を用いて測定した。

(4) 試料作製

試料は、メーカに特注し圧延方向や加工度の異なる試料を作製した。さらに、再結晶特性が優れていると考えられるLa₂O₃及びKドーパングステンを作製した。また、東北大学金属材料研究所で作製された超微細結晶粒タングステン合金についても評価を行った。

4. 研究成果

(1) 粉末焼結タングステン材(PM-W)に加え、各種改良タングステン材に対して実験を進め、材料依存性を調べ、タングステン材の最適化を行った。使用したタングステン材は、圧延方向が表面に対して垂直及び平行の2種類の粉末焼結W、La(0.86wt%)ドーパW、K(0.003wt%)ドーパW、超微細結晶粒W(W-0.5wt%TiC/H₂及びW-0.5wt%TiC/Ar)及びプラズマ溶射Wである。これらの試料に対して、ELM時の熱負荷に相当するパルス高熱負荷実験(1GW/m²、0.6m等)を行った。超微細結晶粒Wは、それぞれ、製造の際のメカニカルアローイング(MA)時にH₂及びAr雰囲気中で作製したものである。粉末焼結Wは、照射部分の中止部分の表面が、薄く熔融凝固しているが、クレータや液滴等は観察されない。一方La(0.86wt%)ドーパWでは、中心部分が熔融凝固し、熔融部分は波状の凹凸が形成されている。K(0.003wt%)ドーパWでは、凹凸は少ないものの突沸した跡等が観察された。超微細結晶粒Wでは、MAをAr雰囲気中で行ったものでは、波状の熔融凝固部分が観察されたが、H₂雰囲気中で行ったものでは、中心

部分と比較的薄く平坦に熔融凝固している。特に、K(0.003wt%)ドーパW及びW-0.5wt%TiC/H₂は、このパルス熱負荷による損耗量が少なく損耗特性が良好である。また、それぞれ、粉末焼結Wと比較し優れた特性を持っていることから、改良材として有望であることが明らかとなった。

(2) パルス高熱負荷による材料損傷・損耗については、粉末焼結W材で圧延方向が試料表面に垂直な試料では、熱応力により深さ方向(圧延方向)に亀裂が発生し易く、亀裂のエッジでは、Wの破片等も形成され、ダスト形成及び損耗の原因となることが分かった。また、La₂O₃(0.96wt%)ドーパW及び超微細結晶粒W合金(W-0.5wt%TiC/Ar)の損耗量が多い原因は、La₂O₃やArバブルの突沸により、熔融物が飛散されるためであることがわかった。この影響が少ないと考えられるK(0.003wt%)ドーパW及び超微細結晶粒W合金(W-0.5wt%TiC/H₂)は損耗量も少ない。

(3) プラズマ溶射Wでは、特に、大気中溶射試料では被覆タングステンの層間で剥離が発生するが、一方、真空溶射試料では熱の拡散が早く皮膜の性能が優れていることが明らかとなった。また、プラズマ溶射タングステン被覆F82H(真空溶射試料)に対して、集束イオンビーム加工装置(FIB)を用いて界面部における薄膜試料を作製し、透過型電子顕微鏡(TEM)を用い微視的な組織観察を行った。タングステン皮膜では、タングステン粒子間の接合性の良い部分ではタングステン粒が柱状構造を形成しており、一方、空洞部の周辺では粒成長せず微細粒が集合している。密度の高いタングステン皮膜を形成するには、微細粒部分を少なくし、柱状構造の部分を増やすことが必要である。また、界面部ではWFe等の反応層は観察されない。また、接合界面部のF82H鋼は微細な組織に変質しており、部分的にクロムカーバイドの析出物が存在していることが明らかとなった。

(4) 予め水素同位体及びヘリウム(He)を照射したタングステン材に対して、ディスラプション、ELM時の熱負荷に相当するパルス高熱負荷実験を行った。He照射を受けていない焼結Wは、ディスラプション・ELMレベルのパルス熱負荷(1GW/m²、1ms)には耐え、また損耗も少ない。さらに、繰り返しの回数が多い場合を検討する必要がある。一方、He照射を受けた焼結Wでは、ディスラプション・ELMレベルのパルス高熱負荷によって表面層の剥離や、プリスターの形成、熔融などが促進され、大きな損耗やダストの発生をもたらす。これは、表面直下にスポンジ状のHeバブルが形成されたことによる熱伝導率の低下、原子の熱拡散の低下による回復の遅れ、材料脆化などが起こったためと考えられ、損耗やダストの発生には大きな差が出てくる

ことが明らかとなった。

(5) 水素及びヘリウムビーム照射実験では、表面形状については、粉末焼結 W 材の場合は、アメーバ状の凹凸が形成されており、スパッタリングによる表面形状変化と共に損耗により内部の組織が表面に露出しているものと考えられる。この形状変化は、特に、ヘリウム単独照射の場合に顕著であった。また、形状変化は結晶粒依存性があることが明らかとなった。これは、スパッタリングによる損耗やビームのチャンネルリングによる飛程等が異なるためであると考えられる。一方、W-TiC 合金の場合は、照射後の表面形状は、粉末焼結 W 材に見られるようなそれぞれの結晶粒において凹凸が異なる部分は見られず、一様に変化している。これは、結晶粒の大きさが数 100nm 程度と小さいためであると考えられる。さらに、これらの光反射率等の光学的性質変化についても調べ、特に、照射により、吸収・反射に寄与するバンド構造が変化することが明らかとなった。さらに、水素・ヘリウム混合ビーム照射材の表面損傷を調べると共に、反跳原子検出法により表面近傍における注入水素及びヘリウムの捕捉量を調べた。表面形状変化は、粉末焼結タングステン、W-TiC 合金等の種類により異なり、組織依存性があることが明らかとなった。また、水素捕捉量は、ヘリウム同時照射により大きく増加しており、ヘリウム照射による微視的な表面損傷が水素捕捉量に大きく影響しているものと考えられる。

(6) 超微細結晶粒 W-TiC 合金 (W-0.5wt%TiC/H₂) 及び粉末焼結 W (PM-W) にダイバータの表面材料の負荷条件に近い高粒子束 D-He 混合プラズマを照射し、表面形状・組成及び断面組織変化を調べた。照射温度が、ダイバータのターゲット部分に使用された際の使用温度付近である 1123K では、表面は黒色化し、ナノ構造を持つ繊毛状の構造が形成された。これは、ヘリウム照射によるバブル形成・移動等により形成されたものと考えられる。また、ナノ構造の厚みは照射時間の 1/2 乗に比例し増加し、拡散過程が律束していることがわかった。このナノ構造は、トリチウムリテンションに影響を与え、さらに、簡単に剥離することから、損耗やダスト形成にも影響を及ぼすものと考えられる。また、ナノ構造が形成され始める照射時間や、照射時間に対するナノ構造の厚みが、この二つのタングステン材では異なる等の組織依存性が見られた。

(7) 強制冷却下での高熱流束の熱及びビーム照射実験が可能である、冷却管の表面にタングステンを被覆したダイバータモックアップを作製することができた。特に真空プラズマ溶射法により W を被覆することにより、これまでの溶射法で作製したものと比較し

高熱伝導率の W 被覆ダイバータモックアップを作製することができた。これを元に、冷却水への熱伝達を含めた熱解析を行った。

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 10 件)

- ① H. Sakakita, S. Kiyama, H. Koguchi, Y. Hirano, T. Shimad, M. Tokitani, N. Yoshida, K. Tokunaga, Development of High-Power-Density Ion Beam System with High-Repetition Pulse Operation, Proceedings of ITC19, 2010, in press, 査読有
- ② M. Tokitani, N. Yoshida, K. Tokunaga, H. Sakashita, S. Kiyama, H. Koguchi, Y. Hirano, S. Masuzaki, Microscopic Deformation of Tungsten Surfaces by High Energy and High Flux Helium/Hydrogen Particle Bombardment with Short Pulses, Plasma and Fusion Research Vol.5(2010)012-1, 012-4, 査読有
- ③ M. Sakamoto, T. Miyazaki, Y. Higashizono, K. Ogawa, K. Ozaki, N. Ashikawa, M. Tokitani, T. Shoji, S. Masuzaki, K. Tokunaga, K. Ohya, A. Sagara, N. Yoshida, K. N. Sato, Surface modification of tungsten mirrors due to low-energy helium plasma irradiation in the compact PWI simulator APSEDAS, Physica Scripta, T138(2009)014043-1-5, 査読有
- ④ K. Tokunaga, T. Fujiwara, N. Yoshida, A. Ebihara, M. Tokitani, A. Sagara, S. Nagata, B. Tsuchiya, Optical Property Change on Metallic Mirror Materials by Low Energy Helium Irradiation, Journal of Plasma and Fusion Research SERIES Vol.8(2009)1374-1378, 査読有
- ⑤ K. Tokunaga, T. Fujiwara, K. Ezato, S. Suzuki, M. Akiba, H. Kurishita, S. Nagata, B. Tsuchiya, A. Tonegawa, N. Yoshida, Effects of high heat flux hydrogen and helium mixture beam irradiation on surface modification and hydrogen retention in tungsten materials, Journal of Nuclear Material Vol. 390-391(2009)916-920, 査読有
- ⑥ M. J. Baldwin, R. P. Doerner, D. Nishijima, K. Tokunaga, Y. Ueda, The effects of high fluence mixed-species (deuterium, helium, beryllium) plasma interactions with tungsten, Journal of

- Nuclear Materials 390-391(2009)886-890, 査読有
- ⑦ Y. Yahiro, M. Mitsuhashi, K. Tokunaga, N. Yoshida, T. Hirai, K. Ezato, S. Suzuki, M. Akiba, H. Nakashima, Characterization of thick plasma spray tungsten coating on ferritic/martensitic steel F82H for high heat flux armor, Journal of Nuclear Materials, in press, 査読有
- ⑧ K. Tokunaga, T. Fujiwara, K. Ezato, S. Suzuki, M. Akiba, N. Yoshida, Effects of helium implantation on damage during pulsed high heat loading of tungsten, Journal of Nuclear Materials, Vol. 367(2007)812-816. 査読有
- ⑨ Y. Ueda, N. Ohno, S. Kajita, H. Kurishita, H. Iwakiri, K. Tokunaga, N. Yoshida, Development of tungsten materials for plasma facing components in Japan, FUSION SCIENCE AND TECHNOLOGY Volume: 52 Issue: 3 Pages: 513-520 Published: OCT 2007, 査読有
- ⑩ K. Tokunaga, Y. Kubota, N. Noda, Y. Imamura, A. Kurumada, N. Yoshida, T. Sogabe, T. Kato, B. Schedler, Behavior of actively cooled mock-ups with plasma sprayed tungsten coating under high heat flux conditions, Fusion Engineering and Design, Vol181(2006)133-138. 査読有
- [学会発表] (計20件)
- ① 徳永和俊、藤原 正、荒木邦明、宮本好雄、中村一男、栗下裕明、江里幸一郎、鈴木 哲、横山堅二、関 洋治、榎枝幹夫、秋場真人、タングステン材料のパルス高熱負荷による表面損傷と損耗、日本原子力学会春の年会、2010年3月27日、水戸市
- ② H. Sakakita, S. Kiyama, H. Koguchi, Y. Hirano, T. Shimada, M. Tokitani, N. Yoshida, K. Tokunaga, Development of high-power-density ion beam system with high repetitive pulse operation, International TOKI Conference, 2009年12月8日～11日、土岐市(岐阜県)
- ③ K. Tokunaga, T. Fujiwara, K. Araki, Y. Miyamoto, K. Nakamura, H. Kurishita, K. Ezato, S. Suzuki, K. Yokoyama, M. Enoda and M. Akiba, Surface modification and erosion on newly-developed tungsten materials by pulse high heat loading, Asia Plasma Fusion Association 2009, 2009年10月28日、青森市
- ④ K. Tokunaga, M. J. Baldwin, R. P. Doerner, D. Nishijima, H. Kurishita, T. Fujiwara, K. Araki, Y. Miyamoto, N. Ohno, Y. Ueda, Nanoscopic morphology formation on tungsten induced by Be seeded D-He mixture plasma exposure, 14th International Conference on Fusion Reactor Material, 2009年10月28日、札幌市
- ⑤ K. Tokunaga, M. J. Baldwin, R. P. Doerner, D. Nishijima, H. Kurishita, T. Fujiwara, K. Araki, Y. Miyamoto, N. Yoshida, N. Ohno and Y. Ueda, Nanoscopic morphology formation on tungsten induced by D-He mixture plasma exposure, 25th Symposium on Fusion Technology, 2008.09.17. Rostock(Germany)
- ⑥ K. Tokunaga, T. Fujiwara, N. Yoshida, A. Ebihara, M. Tokitani, A. Sagara, S. Nagata, B. Tsushiya, ELLIPSOMETRY MEASUREMENT ON METALLIC MIRROR MATERIALS IRRADIATED WITH LOW ENERGY HELIUM ION, International Congress on Plasma Physics 2008, 2008.09.09. Fukuoka(Japan)
- ⑦ 徳永和俊、低エネルギー・高粒子束 D-He 混合プラズマ照射によるタングステン材表面におけるナノ構造の形成、日本原子力学会、2008年9月4～6日、高知工科大学
- ⑧ M. J. Baldwin, R. P. Doerner, D. Nishijima, K. Tokunaga, Y. Ueda, The effects of high fluence mixed-species (deuterium, helium, beryllium) plasma interactions with tungsten, 18th International Conference on Plasma Surface Interactions, 2008.05.30. Toledo(Spain)
- ⑨ K. Tokunaga, T. Fujiwara, K. Ezato, S. Suzuki, M. Akiba, H. Kurishita, S. Nagata, B. Tsushiya, A. Tonegawa, N. Yoshida, Effects of high heat flux hydrogen and helium mixture beam irradiation on surface modification and hydrogen retention in tungsten materials, 18th International Conference on Plasma Surface Interactions, 2008.05.30, Toledo(Spain)
- ⑩ K. Tokunaga, A. Ebihara, M. Tokitani, T. Fujiwara, N. Yoshida, K. Ezato, S. Suzuki and M. Akiba, Optical property change on plasma facing materials irradiated with hydrogen isotope and helium, 13rd International Conference on Fusion Reactor Materials, 2007.12. Nice(France)
- ⑪ Y. Yahiro, K. Tokunaga, N. Yoshida, N.

- Tsukuda, A. Kobayashi, K. Ezato, S. Suzuki, M. Akiba, M. Mitsuhashi, H. Nakashima, Material Properties of Tungsten Coated F-82H Ferritic/Martensitic Steel, 13rd International Conference on Fusion Reactor Materials, 2007. 12. Nice (France)
- ⑫ 八尋由樹、徳永和俊、吉田直亮、平井武志、小林 明、江里幸一郎、鈴木 哲、秋場真人、光原昌寿、中島英治、W/F82H プラズマ対向材料の開発と評価、プラズマ・核融合学会第 24 回年会, 2007. 11. 姫路市 (兵庫県)
- ⑬ 徳永和俊、藤原 正、吉田直亮、江里幸一郎、鈴木 哲、秋場真人、タングステン材料の高熱流束水素・ヘリウム混合ビーム照射実験、日本原子力学会「2007 年秋の大会」、2007 年 9 月 27 日、北九州市
- ⑭ 八尋由樹、徳永和俊、佃 昇、吉田直亮、光原昌寿、中島英治、小林 明、江里幸一郎、鈴木 哲、秋場真人、低放射化フェライト・マルテンサイト鋼へのタングステン被覆と熱・粒子負荷特性 2, 日本原子力学会「2007 年秋の大会」, 2007. 09. 27. 北九州市
- ⑮ K. Tokunaga, Y. Yahiro, N. Yoshida, N. Ashikawa, S. Masuzaki, M. Tokitani, A. Komori, N. Noda, A. Kobayashi, K. Ezato, S. Suzuki, M. Akiba, Applications of tungsten coated materials for divertor and first wall, 2007 Japan-US Workshop on Heat Removal and Plasma Materials Interactions for Fusion, Fusion High Power Density Components and System, and IEA Workshop on Solid Surface Plasma Facing Components, 2007. 07. 26. Nara (Japan)
- ⑯ 八尋由樹、徳永和俊、佃 昇、吉田直亮、小林 明、江里幸一郎、鈴木 哲、秋場真人、光原昌寿、中島英治、タングステン被覆低放射化フェライト・マルテンサイト鋼の材料特性, 高温学会平成 19 年度春季学術講演会, 2007. 05. 30. 吹田市 (大阪府)
- ⑰ 八尋由樹、徳永和俊、佃 昇、吉田直亮、小林 明、江里幸一郎、鈴木 哲、秋場真人、光原昌寿、中島英治、低放射化フェライト鋼へのタングステン被覆と熱・粒子負荷特性, 日本原子力学会春の年会, 2007. 03. 名古屋市
- ⑱ 八尋由樹、徳永和俊、佃 昇、吉田直亮、小林 明、江里幸一郎、鈴木 哲、秋場真人、光原昌寿、中島英治、プラズマ溶射法による低放射化フェライト鋼へのタングステン被覆, プラズマ応用科学会第 14 回年会, 2007. 03. 仙台市
- ⑲ 徳永和俊、藤原 正、吉田直亮、江里幸一郎、鈴木 哲、秋場真人、ヘリウム予注入されたタングステンのパルス高熱負荷による損傷, プラズマ・核融合学会 第 23 回年会, 2006. 11. 筑波市
- ⑳ K. Tokunaga, K. Ezato, S. Suzuki, M. Akiba, T. Fujiwara, N. Yoshida, Effects of hydrogen and helium irradiation on optical property of tungsten, 24th Symposium on Fusion Technology, 2006. 09. Warsaw (Poland)
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
徳永 和俊 (TOKUNAGA KAZUTOSHI)
九州大学・応用力学研究所・准教授
研究者番号: 40227583
- (2) 研究分担者
坂本 瑞樹 (SAKAMOTO MIZUKI)
九州大学・応用力学研究所・准教授
研究者番号: 30235189
江里 幸一郎 (EZATO KOICHIRO)
独立行政法人日本原子力研究開発機構・研究員
研究者番号: 30354624
鈴木 哲 (SUZUKI SATOSHI)
独立行政法人日本原子力研究開発機構・研究員
研究者番号: 60354619
谷川 尚 (TANIGAWA HISASHI)
独立行政法人日本原子力研究開発機構・研究員
研究者番号: 70370426