

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289339

研究課題名(和文)超熱伝導ダイバータの高熱流束エネルギー移行現象

研究課題名(英文)High heat flux energy transport phenomena in hyper thermal conductivity divertor

研究代表者

小西 哲之(KONISHI, Satoshi)

京都大学・エネルギー理工学研究所・教授

研究者番号：40354568

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)：本研究は、熱利用を可能とする核融合炉ダイバータの概念を構築し、その試作試験で極めて大きな熱輸送性能を持つ受熱素子の技術的可能性を実証することを目的とし、実験と解析により所期の成果を上げた。熱輸送素子は、高熱粒子負荷を受ける面にはタングステン、その基盤材料としては最終的に薄肉の銅合金を最適として見出し、照射影響も寿命中運転に懸念を生じないことを示した。熱輸送特性は、相変化を用いたヒートパイプ構造とすることで大きな熱輸送を、小さな温度差で達成することを始めて示した。この特性には、特に単パルスの繰り返しが重要な因子であることから、ELMを模擬する繰り返しレーザーパルスを用いてその影響を評価した。

研究成果の概要(英文)：This study intends to propose and verify a new concept of fusion divertor that utilizes energy by extremely large heat transport capability. The divertor device investigated in this research receives high heat and particle flux on tungsten armor covering thin copper target material, followed by heat transport in small temperature gradient as latent heat by heat pipe mechanism, that was found to be optimum. This feature was found to be subject to the repeated pulses by plasma mode named ELM, and the test was performed with YAG laser to simulate this effect. The heat transport performance was proved to be affected little by this heat pulses, and the concept of this divertor was verified to effectively convert fusion energy from plasma and provide it for the power train for electricity generation.

研究分野：核融合学

キーワード：ダイバータ 熱輸送 銅合金 水中爆接 低温冶金

## 1. 研究開始当初の背景

核融合炉に発展可能な現実的ダイバータ概念、すなわちプラズマからの高熱流束を受け、それを熱利用可能な形で、ターゲットに空間的・時間的に局在し変動し集中する熱粒子負荷を安定的な熱媒体に移送する素子が存在していなかった。本研究開始当初、最も進んだダイバータ概念は ITER を対象としたものであって、代表的に平均  $10\text{MW/m}^2$ 、ピーク値で  $20\text{MW/m}^2$  の熱粒子負荷を受け、それに耐えて定常的に除熱を可能とするものであった。

そのためにサブクール条件の水冷却による CC コンポジット、あるいはタングステンモノブロックの概念に基づくダイバータの材料と構造が開発された。これらは、運転の過程で一定の確率、頻度で想定される、さらに高い熱負荷に対しては、部分的な熔融などが想定され、許容された。本質的に実験装置としての ITER の運転に耐えればよく、またそれが現在までの研究で可能と思われた領域である。

これに対し、さらに将来的に原型炉などで必要とされる、より高い熱負荷と耐久性のために、外国では円筒型のタングステン壁に高速ヘリウムジェットを吹き付けて冷却するフィンガータイプや T チューブ、日本ではモノブロックタングステンの内側に冷却水配管を循環する形式が提案されていた。しかしその熱を有効利用するためには、より小さな温度差で熱を除去、輸送する必要があり、熱除去に加えてそれを可能とする概念は存在していなかった。

## 2. 研究の目的

本研究は上記の問題を工学的に解明し、解決するための新たなダイバータ概念を構築してその効果を理論的・実験的に評価することを目的とした。

ダイバータにおける負荷は粒子と輻射により、それが空間的には  $3\sim 5\text{cm}$  幅に在して時に移動し、時間的には鋭いピークを持つ繰り返しパルスであることが知られている。これまでは平均値として  $10\text{MW/m}^2$  という数字だけが目標とされ、この熱を除去できる設計でダイバータは成立するものと考えられていた。

しかし既存の概念はいずれも、平均値としての熱負荷を大流量の熱媒体で除去するという目標は達成するとみられるものの、時間的・空間的偏在の問題には、ダイバータを構成するヒートシンクの熱伝導、熱容量のみで対応している。しかも、熱除去性能は満たしても、その冷却材温度は低く、熱利用を可能とできるような高温熱を取り出せない。本研究の目的を達成するためには、類例のない核融合炉ダイバータの熱的環境とその影響を解明し、それに対応した熱移送体系を構築する必要がある。そこで本研究では、ダイバータの直面する高熱粒子負荷の特性を解析と実験で解明し、その影響を評価した。次に、その結果に基づき、熱エネルギーの移送、利用を想定した

ダイバータ概念、特に熱の移送と伝達と分配のためのヒートシンク構造を構築し、その工学的要素を開発し、その技術的可能性を実験的に検証した。さらに、そのための材料屋構造の製作法を研究するとともに、想定される核融合炉条件での特性と現象を検討し、最終的にダイバータへの熱粒子負荷を最大限利用可能な熱媒体に利用可能な形に変換移送する概念を提示することで、目標の達成を目指した。

## 3. 研究の方法

上記目的のために、本研究では、ダイバータへの熱粒子負荷を直接受け、それを熱媒体に移送するためのターゲットを構成するアーマーとヒートシンクについて、モノブロックでなく、異なる特性を持つ材料と構造を組み合わせる最適化する方法論を開発した。具体的には薄肉構造のターゲットと、アーマーであるタングステンから熱媒体までをつなぐ革新的な熱伝導材と熱輸送経路での相変化潜越の利用である。ここでは、①有限要素法モデルによる空間的に局在し時間的に鋭いピークを持つ繰り返しパルスの影響分析、②薄肉ターゲットにおける異材接合、③パルス熱負荷実験による現象解明と性能評価、④ヒートパイプ原理に基づく熱輸送を利用したダイバータ概念と炉設計、の課題に分けて、きわめて高い熱輸送性能を持つ『超熱伝導』ダイバータの研究を展開し、その問題を明らかにした。

## 4. 研究成果

### (1) ダイバータ熱負荷のモデル解析

定常的に平均  $10\text{MW/m}^2$  級の熱負荷の上に、プラズマの挙動等に起因する過渡的な変動の影響を考慮するためのモデルを構築した。

図 1a に定常  $10\text{MW/m}^2$  の上に短時間の急峻なパルス負荷が加わった時のモデル計算の結果を示す。ここで想定したのは、ELM と呼ばれる核融合ダイバータに特有のパルスであり、平均すれば  $0.13\text{MW/m}^2$  と、合計を大きく変えるものではない。しかし、パルスの尖頭値はパルスが短いほど高く、最大では  $100\text{MW/m}^2$  に達する。このパルスが上のタングステン上加えられた時の温度分布と応力分布を図 1b に示す。図 1b に見られるように、温度と応力は表面に局在し、平均で見ればその影響は無視される恐れがあるが、これが繰り返し加わる場合、最表面においては局在かつ短時間の高温部において、タングステンの再結晶や、繰り返し熱応力による疲労による亀裂の発生進展が起りうることを明らかにした。応力は、表面では圧縮、その下では引っ張り、その間でせん断があるが圧縮が最も大きく、タングステン表面を剥離するよりは、亀裂を発生する可能性が高い。

図 1c には、同じエネルギーのパルスにおける、長さや影響の関係を示す。この影響はパルス長が短いほど厳しく、典型的な ELM の時定数である 1ms では温度、応力ともに局所的には極めて大きな値になる。一方、10ms 以上の長さではあまり大きな問題にならない。以上のように、ダイバータにおける熱負荷の特性を明らかにしたことが、この研究の第一の成果である。

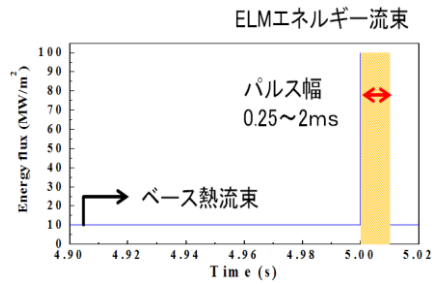


図 1 a ダイバータ熱負荷のモデル

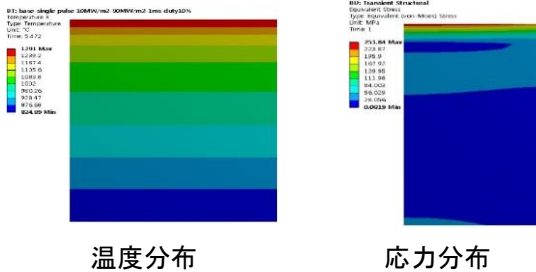


図 1 b パルス負荷による温度と応力の分布

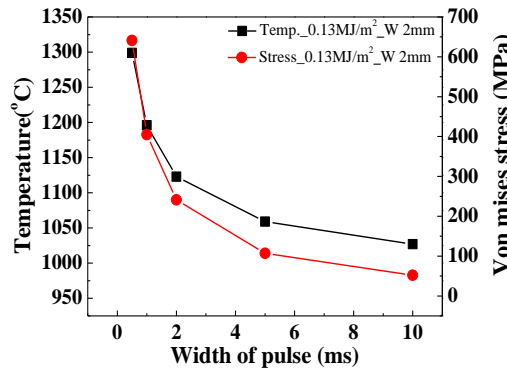
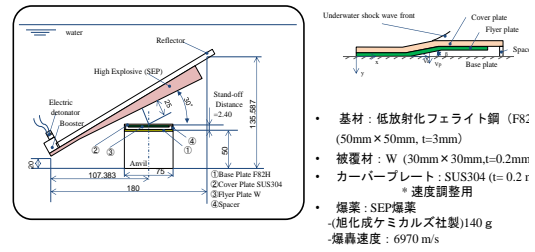


図 1 c パルス長さと負荷

(2) 薄肉ターゲットにおける異材接合

ダイバータの熱輸送現象において、本質的な熱負荷の問題の一つである時間的空間的な集中の問題が極めて局所的であることが明らかになったことから、本研究の中心的課題である薄肉構造の妥当性が確認された。この場合、ターゲット構造としてモノブロックでなく、粒子負荷に強いアーマ材のタングステンと、それを熱として冷却材に伝えるターゲット構造材を異なる材料を用いることができるが、それらを熱的に接合しなければならない。

この解決のために、本研究では水中爆着を採用した。図 2a にその模式図を示す。0.2mm



- 基材：低放射化フェライト鋼 (F8: 50mm×50mm, t=3mm)
- 被覆材：W (30mm×30mm, t=0.2mm)
- カーバプレート：SUS304 (t=0.2mm) \* 速度調整用
- 爆薬：SEP爆薬 (旭化成ケミカルズ社製)140g
- 爆轟速度：6970 m/s

図 2 a 水中爆着法

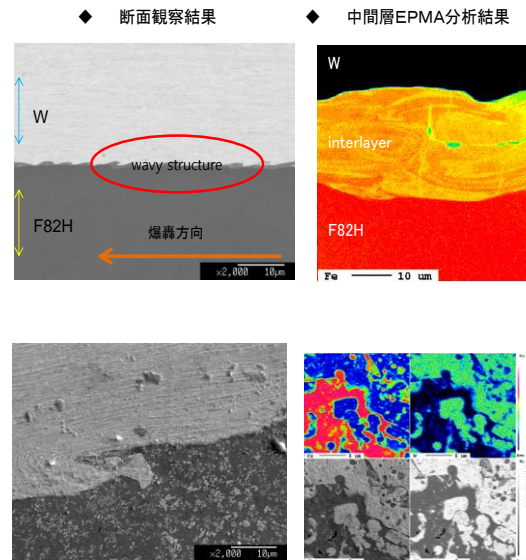


図 2 b 接合面断面の構造と元素分布

上：タングステン-F82H 材

下：タングステン-Cu 材

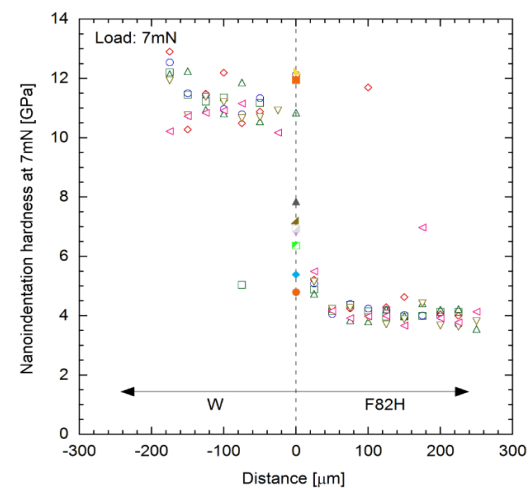


図 2 c 接合断面のナノインデンテーション測定

厚さのタングステンを 30mm 角の基材に載せ、水中でななめ方向に衝撃波を与え、良好な接合を得た。

図 2b は接合部断面である。上の図はタングステンと低放射化フェライト鋼 F82H の接合の結果を示す。左側には本法特有の波状の構造が見られ、これは材料に大きな温度履歴がなく、固体のまま機械的に強固な接合が得られたことを表している。右側にはその元素組成を示すが、タングステン相とフェライトの間に、混合したような中間層が生成していることがわかる。これも、接合過程で液化を経っていないことが不均一性から示唆される。薄く見られる中間層は両者の混合物であり、金属間化合物である場合、脆性をもつ相（ラーベス相 Fe<sub>2</sub>W）である恐れもある。

ターゲット材としては、機械的強度、耐照射性から低放射化フェライト F82H には大きな利点があるが、熱伝導性に問題がある。一方、熱流束を冷却材に効率的に伝えるためには高熱伝導率が望ましい。最近検討されている原型炉では、より現実的な設計とするために、出力の減少、フルエンスの低下が考えられており、この場合、これまで問題と考えられていた照射損傷の問題がより緩和され、Cu 合金の利用が考え得ることから、タングステンと銅合金の接合を実施した例が図 2 b の下である。接合部断面の SEM 像と、元素分布を示す。接合自体は強固であるが、昨年報告した W-F82H の接合の場合と比較すると、接合界面が W-F82H では明瞭であった爆接に特有の波状構造が明確に見られず、銅がより大きな変形を受けていることがわかる。また元素分布では銅とタングステンはかなり広範囲に混合しており、銅中にタングステンが分散している。この結果は短時間部分的に熔融した銅中に微細化したタングステンが混入した可能性を示している。

以上から、薄肉ダイバータターゲット構造は、タングステンアーマーと基材を、熱的履歴を最小とする結合が水中爆発接合で得られることという結果が明らかになった。

### (3) パルス熱負荷実験

水中爆発接合材について、負荷に耐える薄さのタングステン被覆の耐久性評価のために YAG レーザーを用い高熱流束条件の熱負荷模擬実験を行った。

図 3 a に片側加熱条件を作る試験体とパルス条件、3 b に装置の写真を示した。この装置で、表 1 の条件でタングステン表面に熱負荷を与えると同時に背面のヒートシンク側で冷却を行うことで、表面温度、接合部温度及び温度勾配による熱応力という、ダイバータに特有な運転条件を模擬した。連続パルスで約 1500 回、接合部温度 550°C に達する加熱を繰り返した。この繰り返しパルスがプラズマ放電の模擬となるが、この熱負荷は CW のレーザーで与え、平均熱流束は 30MW/m<sup>2</sup> であり、原型炉までカバーできる領域相当となる。

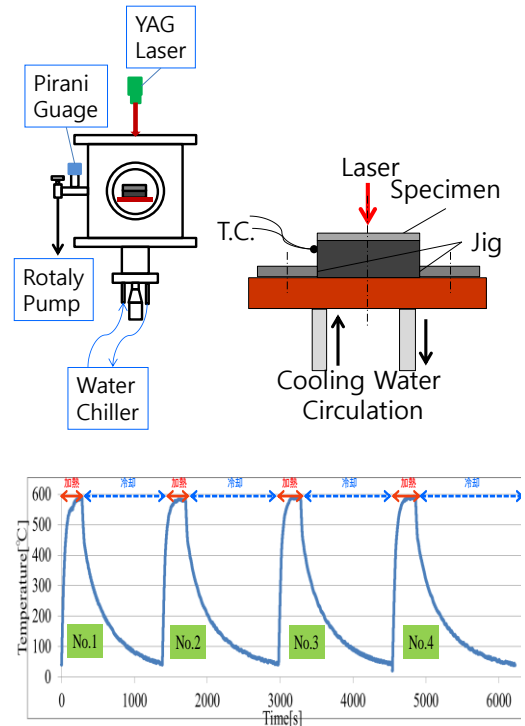


図 3 a レーザーによるダイバータ熱負荷模擬試験

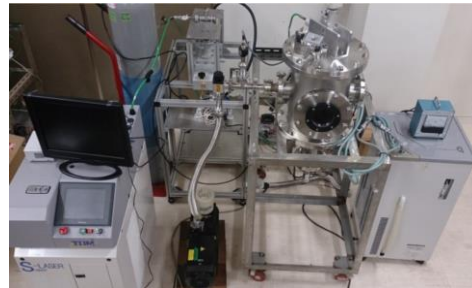


図 3 b レーザー試験装置

この熱負荷試験は、有限要素法解析と比較して、ダイバータの運転パラメータを模擬することが確認され、その範囲において、大きな

Laser	YAG laser
Wave length	1.064 μm
Diameter of beam	1.2 mm
Max. rated output	30W
Max. peak output	3.0kW
Pulse width	0.3-20ms
Max. frequency	30 Hz

表 1 レーザー主要パラメータ

亀裂や剥離は発生せず、受熱体としての健全性は得られたものと言える。

一方パルス応答から熱拡散率を求め、熱伝導度を評価した結果が図3cである。W-F82H 接合材はタングステン層は 0.2mm、F82H 層は 3mm の厚さであり、合成熱伝導度はわずかに F82H より向上する。熱負荷試験により若干熱伝導度の減少がみられたが、伝熱性能に影響する程度ではなく、剥離等のみられなかった。この伝熱性能の劣化は、W-F82H 接合界面に伝熱抵抗を持つ層が生成した可能性を示唆している。

さらにパルスを 10000 回与えたのちの表面 SEM 像を図3dに示す。表面では再結晶は起こっていないものの、粒界き裂と塑性変形が認められる。この損傷は表面に限定されており、き裂の進展や伝熱性能に影響のある剥離を直ちに生成することはなかった。しかし、長時間の使用では損耗を起こし、ダスト等を生成する可能性がある。

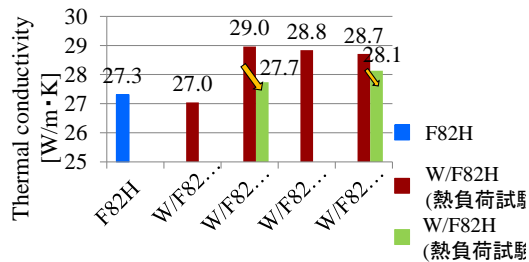


図3c レーザー照射前後での合成熱伝導度

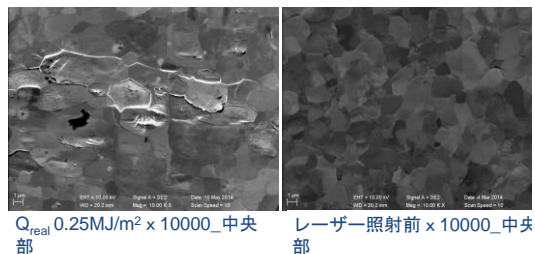


図3d タングステン表面の変化

#### (4) 熱輸送特性

本研究では、ダイバータターゲットに入射した熱負荷は、冷却媒体の相変化によって移送する概念を開発した。一般のヒートパイプの熱移送量は、蒸気速度と液の滴下によって制限され、理想的には流路断面積あたり  $10\sim 100\text{MW/m}^2$  が期待される。内径 10mm の石英管と水媒体を用いて熱移送量を測定した結果を図4に示す。得られた熱移送量は流路断面積あたり数  $\text{MW/m}^2$  であり、流下する液体による entrainment limit がヒートパイプに一般に用いられる数値の  $1/4\sim 1/6$  になっている。これは、図4bに示すように、石英管内で流下する液体が流路を大きく塞いでいるためとみられるが、その割合は一定しない。こ

の結果から、流路断面積をより大きく取り、またダイバータとしてターゲット面に接して熱移送を行うためには角管とする必要があると考えられる。 $10\text{MW/m}^2$  の移送に必要な流路断面積はこの結果から  $0.01\text{m}^2$  であり、熱媒体への大きな熱移送能力を持つことが明らかになった。

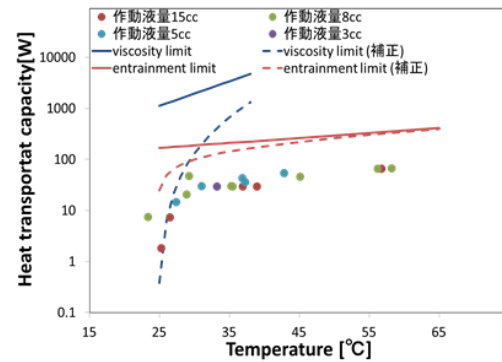


図4 a ヒートパイプ構造による熱移送量の評価結果

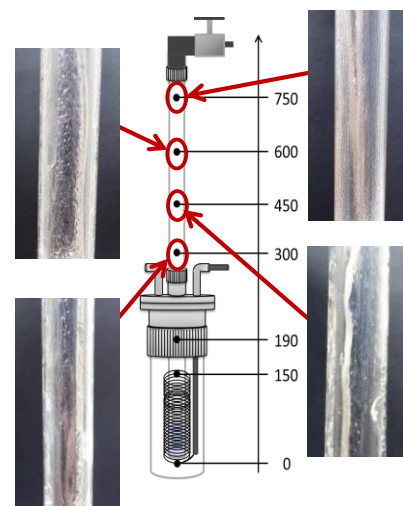


図4 b ヒートパイプ内の液体の流動

以上の結果を総合すると、本研究の当初目的とした熱利用を可能とするダイバータ概念は、以下のような構造と機能を持つエネルギー変換素子として構成できることが彰になったと言える。

- 薄肉ターゲットによるパルス熱負荷の受容と平均化
- 水中爆接によるタングステンアーマと熱伝導体の接合
- 熱伝導体から液体熱媒体の相変化とヒートパイプ熱移送による低温度差エネルギー輸送

#### 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 6 件)

- ① Ryota Ihira, Hyoseong Gwon, Ryuta Kasada, Satoshi Konishi, "Improvement of tensile properties of pure Cu and CuCrZr alloy by cryo-rolling process", Fusion Engineering and Design, In press. (査読有)  
DOI: 10.1016/j.fusengdes.2016.02.070
- ② Hyoseong Gwon, Shinzaburo Matsuda, Ryuta Kasada, Satoshi Konishi, Yoshinori Kawamura, "Study on the characteristics of thermal structural response of full tungsten divertor under ELM-like heat pulse", Fusion Engineering and Design, In press. (査読有)  
DOI: 10.1016/j.fusengdes.2015.10.027
- ③ H. Gwon, Y. Takeuchi, R. Kasada, S. Konishi, "Evaluation of heat transfer by sublimation for the application to the divertor heat sink for high fusion energy conversion", Fusion Engineering and Design 89 (2014) 1003-1008. (査読有)  
DOI: 10.1016/j.fusengdes.2014.03.041
- ④ D. Mori, R. Kasada, S. Konishi, Y. Morizono, K. Hokamoto, "Underwater explosive welding of tungsten to reduced-activation ferritic steel F82H", Fusion Engineering and Design 89 (2014) 1086-1090. (査読有)  
DOI: 10.1016/j.fusengdes.2013.12.038
- ⑤ R. Kasada, S. Konishi, K. Yabuuchi, S. Nogami, M. Ando, D. Hamaguchi, H. Tanigawa, "Depth-dependent nanoindentation hardness of reduced-activation ferritic steels after MeV Fe-ion irradiation", Fusion Engineering and Design 89 (2014) 1637-1641. (査読有)  
DOI: 10.1016/j.fusengdes.2014.03.068
- ⑥ A. Kanai, C. Park, K. Noborio, R. Kasada, S. Konishi, T. Hirose, T. Nozawa, H. Tanigawa, "Compatibility of Ni and F82H with liquid Pb-Li under rotating flow", Fusion Engineering and Design 89 (2014) 1653-1657. (査読有)  
DOI: 10.1016/j.fusengdes.2014.03.008

[学会発表] (計 10 件)

- ① 権 暁星, 笠田竜太, 小西哲之, 松田慎三郎, 江里幸一郎, 関 洋治, 鈴木 哲, 「ELM を想定したパルス熱負荷下でのダイバータの健全性に関する研究」, 日本原子力学会 2015 年春の年会, 2015.3.20-22, 茨城大学日立キャンパス (茨城県日立市)
- ② 青木孝輔, 落合良介, 権 暁星, 笠田竜太, 小西哲之, 森園靖浩, 外本和幸, 「核融合プラズマ対向機器を目的とした水中爆接法によるタングステン銅被覆材」, 日本原子力学会 2015 年春の年会, 2015.3.20-22, 茨城大学日立キャンパス (茨城県日立市)
- ③ 笠田竜太, 井平椋太, 落合良介, Gwon Hyoseong, 小西哲之, 「原型炉級ダイバータ用高熱伝導材料の要求性能検討と耐照射性向上を狙った新規材料の開発」, PLASMA2014, 2014.11.17-21, 朱鷺メッセ(新

潟県新潟市)

- ④ S.Konishi H.Gwon, R.Kasada, "Development of high temperature high flux divertor for fusion power reactor", 28<sup>th</sup> Symp. On Fus.Technol., 2014.9.29-10.3, San Sebastian (Spain)
- ⑤ 権 暁星, 笠田竜太, 小西哲之, 松田慎三郎, 関 洋治, 江里幸一郎, 鈴木 哲, 「ダイバータにおける非定常熱負荷による破壊挙動評価」, 日本原子力学会 2014 年秋の年会, 2014.9.8-10, 京都大学吉田キャンパス (京都府京都市)
- ⑥ D. Mori, R. Kasada, S. Konishi, Y. Morizono, K. Hokamoto, "Underwater explosive welding of tungsten and reduced-activation ferritic steel F82H", 11th International Symposium on Fusion Nuclear Technology (ISFNT-11), 2013.9.16-20, Barcelona (Spain)
- ⑦ H. Gwon, K. Wada, Y. Takeuchi, R. Kasada, S. Konishi, "Evaluation of heat transfer by sublimation for the application to the divertor heat sink for high fusion energy conversion", 11th International Symposium on Fusion Nuclear Technology (ISFNT-11), 2013.9.16-20, Barcelona (Spain)
- ⑧ 森大知, 小西哲之, 笠田竜太, 外本和幸, 森園靖浩, 「水中爆接法によって作製したタングステン被覆 F82H 鋼の特性評価」, 日本原子力学会 2013 秋の大会, 2013.9.3-5, 八戸工業大学 (青森県八戸市)
- ⑨ 権暁星, 笠田竜太, 小西哲之, 「一方向繊維複合材を導入したダイバータにおける非定常熱負荷に対する応答特性評価」, 日本原子力学会 2013 秋の大会, 2013.9.3-5, 八戸工業大学 (青森県八戸市)
- ⑩ S.H. Kim, H.S. Gwon, R. Kasada, S. Konishi, "Evaluation of Thermal Conductivity of Unidirectional SiC Composite Enhanced with Carbon Fibers" 25<sup>th</sup> IEEE/SOFE, 2013.6.10-14, San Francisco (USA)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

小西哲之 (KONISHI, Satoshi)  
京都大学・エネルギー理工学研究所・教授  
研究者番号: 40354568

### (2) 研究分担者

山本靖 (YAMAMOTO, Yasusi)  
関西大学・工学部・教授  
研究者番号: 50158309

笠田竜太 (KASADA, Ryuta)  
京都大学・エネルギー理工学研究所・准教授  
研究者番号: 20335227

登尾一幸 (NOBORIO Kazuyuki)  
京都大学・エネルギー理工学研究所・助教  
研究者番号: 40456827