

平成 30 年 6 月 12 日現在

機関番号：13201

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26289353

研究課題名(和文) JET-ITER Like Wallタイルのトリチウム分布測定

研究課題名(英文) Measurement of Tritium Distributions on Divertor Tiles used in JET-ITER Like Wall Experiments

研究代表者

波多野 雄治 (Hatano, Yuji)

富山大学・研究推進機構 水素同位体科学研究センター・教授

研究者番号：80218487

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 10,000,000円

研究成果の概要(和文)：国際核融合実験炉ITERでは第一壁やリミタ材料としてBeを、ダイバータ材料としてWを用いる。その準備のため、欧州の核融合プラズマ装置JETでBeとWを壁材とするITER-Like Wall実験が実施されているが、トリチウム(T)蓄積量は調べられていなかった。そこで我が国で開発されたT計測法を用い、同実験で使用されたW被覆ダイバータタイルおよびBeタイル表面のT分布を測定した。Tの蓄積機構としてBe等との共堆積ならびに材料バルク中への打ち込みがあった。堆積層中のT濃度は以前の炭素時代と比べ低く、タイル側面への堆積層形成も低減されていた。これらの効果による真空容器中のT蓄積量の減少が期待された。

研究成果の概要(英文)：ITER will use Be as a main chamber wall material and W as a divertor material. To examine the performances of these materials in tokamak environment, JET in EU has performed ITER-Like Wall (ILW) experimental campaigns with Be main chamber tiles and W-coated CFC divertor tiles. In this study, tritium (T) distributions on these tiles were examined using imaging plate (IP) technique and beta-ray induced X-ray spectrometry. Two retention mechanisms were found: (1) co-deposition with Be and other impurities, and (2) implantation into material bulk. T concentrations in Be deposition layers were lower than those in carbon deposition layers formed in previous campaigns with carbon tiles. Far less co-deposition of T on the sides of tiles was observed for ILW tiles compared with carbon tiles. Significantly reduced T retention was expected with Be and W walls in comparison with C walls. Technique to measure T retention in an individual dust particle using IP was also developed.

研究分野：核融合炉工学

キーワード：プラズマ・核融合 放射線 水素 可視化 タングステン

1. 研究開始当初の背景

国際核融合実験炉ITERでは炉内トリチウム (^3H またはT) 滞留量を低減するため、従来の炭素材に替えて、第一壁やリミタ材料としてBeを、ダイバータ材料としてWを用いる。その準備のため、大型核融合プラズマ装置初の試みとして欧州のJoint European Torus (JET) においてBeとWを壁材として用いた重水素 (^2H またはD) による放電実験、いわゆるITER-Like Wall (ILW) 実験が実施されている[1]。BeとWは炭素と比べ水素同位体との化学的親和力が低く、Tを蓄積しにくいと予想されるためであるが、実際にBeとWを炉壁材料として用いる大型核融合実験装置における壁材料中へのTの蓄積を調べた例はなかった。

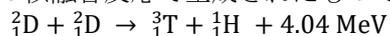
また、核融合装置では水素同位体プラズマの照射で真空容器内壁材料表面が剥がれ落ちることなどにより、ダストと呼ばれる微粒子が発生する。Tを含むダスト粒子は当然のことながら真空容器壁自身と比べはるかに飛散性が高く、放射性物質の拡散防止の観点からは注意を要する。ダスト粒子中でのTの蓄積機構を明らかにするには、微粒子一つ一つについてT濃度と構成元素を調べる必要がある。これまでも真空容器中で収集したダストをまとめて真空中で加熱し放出されたT量を測定することなどはなされてきたが、個々の微粒子中のT濃度を測定する技術はなかった。

2. 研究の目的

本研究では、我が国で開発されたイメージングプレート法 (IP法、放射線に感光する一種の蛍光板を用いる)、およびβ線誘起X線計測法 (BIXS法) を用いて、ILW実験で使用されたW被覆炭素材ダイバータタイル (以下、ダイバータWタイル) およびBeタイル表面のトリチウム分布を測定することを目的とした。IP法では表面近傍のTの2次元分布像が得られる。また、BIXS法では非破壊でTの深さ方向分布を評価できる。これらの方法を組み合わせることで、3次元的なT分布が明らかとなる。加えて、ILW実験前に使用されていた炭素タイルについてもIP法による測定を行った。両者を比較することで、ILW実験において実際にT蓄積量が低減されているかを調べた。

さらに、IP法を用いて個々の微粒子中のT濃度を個別に評価した。まず、参照試料としてTi微粒子を用いて技術開発を行った上で、ILW実験で発生したダスト微粒子中のT濃度を測定した。

先述のように現在JETではD放電が実施されており、トリチウムは僅かな確率で生じるD同士の核融合反応で生成されたものである。



従って、Tはマイナーな水素同位体として存在することとなる。また、上記の反応で生成されたTは1.01 MeVの運動エネルギーを有する。

3. 研究の方法

JET では数カ月実験を行ったのち真空容器

を大気開放し一部の壁材料タイルを取り換え、そののち再び真空排気して実験を再開するというサイクルを繰り返している。これまでに、ILW 実験が3サイクル実施されており、それぞれをILW-1 (2011~2012年)、ILW-2 (2013~2014年)、ILW-3 (2015~2016年) と呼ぶ。

本研究で測定した真空容器内壁タイルおよびダストは以下のものである。

(1) ダイバータ W タイル

① IP 法

ILW-1、ILW-2、ILW-3 後に取り出されたもの。ただし、ILW-2 後に取り出されたタイルの大部分は、ILW-1 と ILW-2 の両期間に渡り使用されたものである。

② BIXS 法

ILW-2 および ILW-3 後に取り出されたタイルから採取された直径17 mmのディスク試料。

(2) Be タイル

ILW-3 実験後に取り出されたもの。IP 法のみ。

(3) ダスト

ILW-1 実験後に取り出されたもの。

ダイバータ W タイルおよび Be タイルの測定は、主にフィンランドの VTT 研究所で実施した。これは、JET から取り出されたタイルの大部分が、ディスク試料採取加工のために一旦 VTT 研究所に輸送されるためである。IP 測定については、研究代表者が毎年 1~2 週間 VTT 研究所を訪問し実施した。BIXS 測定は長時間を要し短期の派遣での実施は不可能であったため、VTT 研究所の研究者に依頼し、データを日本へ送信してもらった。ダストについての測定は、共同研究のために JET から量子科学技術研究開発機構六ヶ所核融合研究所に輸送された試料を用いて行った。

IP 法では、T から放出されるβ線の強度の2次元分布を測定した。T から放出されるβ線は放射線としては極めて低エネルギーであり (最大 18.6 keV、平均 5.7 keV)、その脱出深さはBe 中で約 3 μm、W 中で数百 nm 程度である。すなわち、IP 法では表面近傍の T 分布を測定したこととなる。用いた IP は富士フィルム社製 BAS-TR である。β線で誘起される X 線は、β線より一桁以上大きな脱出深さを持つ。BIXS 法では、半導体検出器を用いてβ線誘起 X 線のエネルギースペクトルを測定し、これを解析することで、より深部の T を検出すると共に深さ方向分布を評価する。本研究では、Amptek 社製 Si ドリフト検出器 X-123SDD (厚さ 8 μm の Be 窓) を用いた。

タイルの測定においては、まず汚染を防止するため IP をβ線が透過する程度の極薄いポリフェニレンサルファイド (PPS) フィルム (厚さ 1.2 μm または 2 μm) で覆った上で、暗所でタイルに 10~40 時間接触させた (図 1)。そののち PPS フィルムを除去し、レーザースキャナ (富士フィルム社製 FLA-5100) を用いて輝尽性発光 (PSL) 強度分布を測定した。PSL

強度分布は、 β 線の入射量に比例する。スキャナはヘルシンキ大学にあるものを借用した。

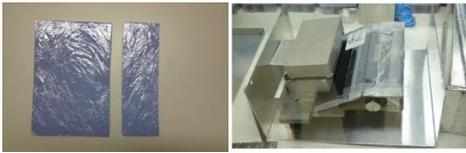


図1 PPS フィルムで覆った IP (左) および タイルに接触させた様子 (右)

JET のタイルは核融合反応で生じた中性子の照射によりわずかに放射化している。放射化核種からの放射線は T が放出する β 線よりはるかに高いエネルギーを持つ。そこで、T からの β 線を完全に遮蔽する厚さ (12 μm) を有する PPS フィルムで IP を覆った状態でも測定し、この強度を他の放射線による寄与すなわちバックグラウンドとした。

ダストの測定では、粒子をインジウム (In) に埋め込んだ状態で IP 測定を実施した。基本的な手順はタイルと同様である。スキャナには富士フィルム社製 FLA-7000 を用いた。

BIXS 測定では、図 2 に示すような内部をガス置換可能なプラスチック容器を用いた。容器に検出器を取り付けたうえで内部に試料をセットし、Ar 雰囲気中で測定を行った。



図2 BIXS 測定の様子

4. 研究成果

(1) ILW で使用されたダイバータ W タイルにおける T 分布

図 3 に ILW-1 で使用されたダイバータ W タイルの IP 像を示す。赤～黄色が PSL 強度すなわち T 濃度が高い領域を、青が低い領域を示す。青い円状のコントラストは、上述した直径 17 mm のディスク状試料を採取した後である。内側上部ダイバータ (タイル 1) の水平部分 (b の左側)、床タイル (タイル 4 および タイル 6) のプラズマから直接見えない部分 (f の左側および i の右側) に、トロイダル方向に伸展した帯状に T 濃度が高い領域が形成されていた。ダイバータ W タイル上では、メインチャンバーにおいてプラズマによりスパッタされた Be が不均一に堆積していたが、これら T 濃度が高い領域では特に厚い Be 堆積層や、比較的薄いものの高濃度に炭素や酸素等の不純物酸素を含む堆積層が形成されていた。以上のことから、ダイバータ領域ではトリチウムは主に Be および炭素・酸素等の不純物と共堆積していることがわかった。また、トーラス内側の方が、外側と比べより大量の T を蓄積することも明らかとなった。

ポロイダル方向に沿った PSL 強度分布を、ILW-1 と ILW-2 を比較して図 4 に示す。横軸

は真空容器内側を原点とした、タイルプラズマ対向面 (表面) に沿っての距離である。ILW-2 では、ILW-1 と比べて T 濃度の局在の度合いが低下している、すなわちタイル 1 左端、タイル 4 左端、タイル 6 右側での PSL 強度がやや低下すると共に、高い PSL 強度を示す領域が広がっている。これは、ILW-2 における磁場配位 (具体的にはストライクポイントの滞在時間分布) が、ILW-1 と比べよりバラエティに富んでいたためと考えられる。ILW-3 の後では、T 濃度が全体的に低下すると共に、より局在の度合いが低下していた。以上のことから、T の堆積が敏感に放電条件の影響を受けることがわかった。

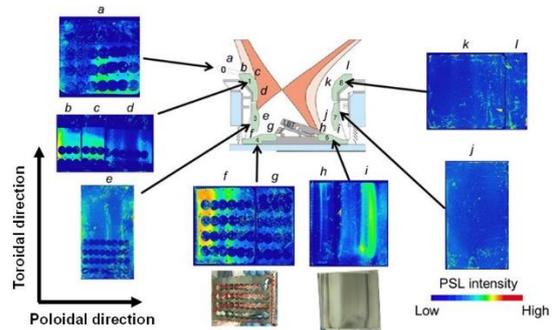


図3 JETダイバータ領域の断面模式図 (上部中央) およびILW-1で使用されたダイバータW タイルのIP像。図の左側がトーラス内側 (中心側、Inboard側)、右側が外側 (Outboard側) である。赤～黄色がPSL強度すなわちT濃度が高い領域を、青が低い領域を示す。詳細は発表論文④に記載。(Journal of Nuclear Materials, 2015, 463, 966-969, <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2014.12.041>)

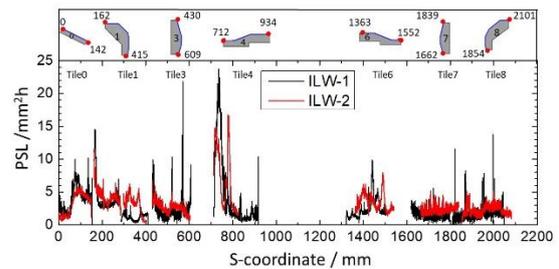


図4 ダイバータWタイル上のPSL強度分布。横軸 (S-coordinate) は図3タイル0左端からのプラズマ対向面に沿っての距離 (単位はmm)。詳細は発表論文②、④に記載。

(2) 炭素タイルとの比較

図5にILW-1で使用されたダイバータW タイル1および4と、2008～2009年の実験で同じポロイダル位置で使用された炭素タイルのIP像を比較して示す。ILW-1の場合にはタイル1の上部 (a, b) およびタイル4トーラス内側 (g左端) にT濃度が高い領域が集中している。炭素タイルでは、これら領域中のT濃度がより高いのみならず、T濃度が高い領域がタイル1の下側およびタイル4の外側に明らかに広がって

いた。加えて、ILW-1タイルでは側面にはTがほとんど検出されなかったが、炭素タイルでは側面においてもプラズマ対向面と大差ない濃度のTが検出された (d, e, i)。炭素タイルにおいてより広い範囲でTが高濃度に検出されたのは、Tが揮発性の炭化水素分子を形成し比較的長距離を移動したのち、タイルのプラズマ対向面あるいは側面に堆積したためである。以上のことから、ILWではBeとWを使用することで狙い通りT蓄積量の低減が期待できると結論した。

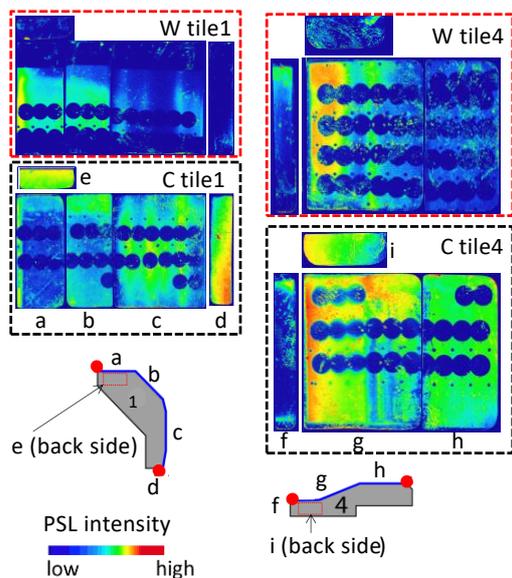


図5 ILW-1で使用されたダイバータWタイルと、2008～2009年の実験で同じポロイダル位置で使用された炭素タイルのIP像の比較。d, e, f, iはタイル側面に取り付けられたIPの像を示す。詳細は発表論文②に記載。

(Physica Scripta, 2016, T167, 14009, <https://doi.org/10.1088/0031-8949/T167/1/014009>)

(3) BIXS 測定の結果

IP法では表面近傍のTの2次元分布を測定できるが、深さ方向分布はわからない。そこで、ILW-2で使用されたダイバータWタイルについてポロイダル方向にほぼ全周のBIXS測定を行い、深さ方向分布を評価した。その結果、内側ダイバータの最上部には第一壁から輸送されたBeをはじめとする金属不純物が堆積しており、この堆積層中にTが高濃度に蓄積していること、それ以外の領域ではW層中にTが打ち込まれていることがわかった。

図6にW中にTが打ち込まれている領域における典型的なX線スペクトルを示す。(a)はタイル1の斜めの部分(図5のb)、(c)はタイル3の中央部からのスペクトルである。雰囲気ガスであるArおよびWの特性X線および1～10 keVに幅広い制動X線のスペクトルが見られる。Arの特性X線は、β線の脱出深さより浅い領域に存在するTにより励起されたものである。すなわち、Arの特性X線強度は、表面近傍のTの分布を示す。一方で、制動X線およびWの特性X

線は主にバルク中のTにより励起される。(a)では10 keV程度まで制動X線が比較的高い強度を保っているが、(b)ではエネルギーの増大と共に強度が減少している。また、(a)ではW $L\alpha$ 線のピークが明確であるが、(b)ではほとんど見えない。バルク中で発生したX線の一部は試料中で吸収され、残りがSiドリフト検出器に到達する。X線のエネルギーが低いほど吸収係数が大きくなるため、深部でX線が発生した場合には、高エネルギー成分のみが検出器に到達する。このことから、Tがより深部まで分布するほど、X線スペクトルにおける高エネルギー成分の強度が相対的に高くなる。(a)と(b)を比較すると前者の方が明らかに高エネルギー成分の強度が高く、Tがより深部にまで打ち込まれていることは明らかである。

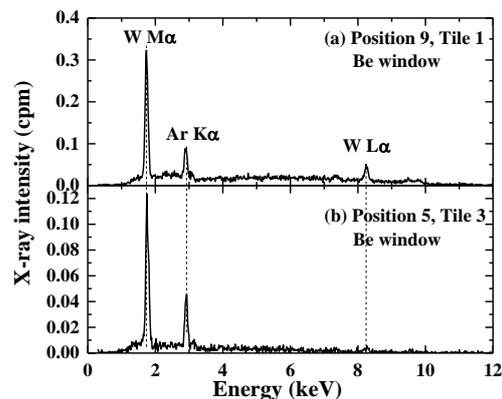


図6 Tからのβ線で誘起されたX線のエネルギースペクトルの典型例。(a) ILW-2タイル1の斜めの部分(図5のb)、(b) ILW-2タイル3の中央部。詳細は発表論文①に記載。

(Physica Scripta, 2017, T170, 14014, <https://doi.org/10.1088/1402-4896/aa8931>)

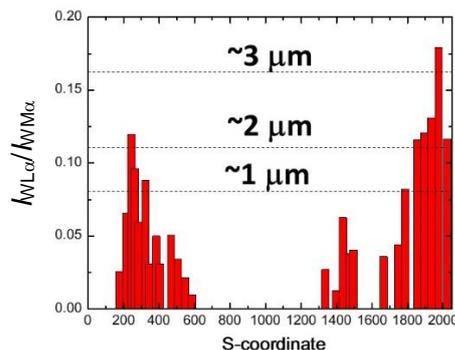


図7 ILW-2におけるW $L\alpha$ 線と $M\alpha$ 線のピーク強度比のポロイダル方向分布。詳細は発表論文①に記載。(Physica Scripta, 2017, T170, 14014, <https://doi.org/10.1088/1402-4896/aa8931>)

以上のことは、W $L\alpha$ 線 (8.398 keV) の強度 $I_{WL\alpha}$ と W $M\alpha$ 線 (1.776 keV) の強度 $I_{WM\alpha}$ の比 $I_{WL\alpha} / I_{WM\alpha}$ がTの打ち込み深さの目安となることを示している。そこで、既知のT深さ方向分布を有する参照W試料およびモンテカルロシミュレーションコードGeant4[2]を用いてW中の

Tの進入深さと $I_{W,cd}/I_{W,ca}$ と相関を評価すると共に、実験値と比較することで、Tの進入深さを評価した。その結果を図7に示す。 $I_{W,cd}/I_{W,ca}$ の値はダイバータ上部では大きく、底部では小さかった。シミュレーションでは、Tの打ち込み深さが0.5 μm のとき $I_{W,cd}/I_{W,ca}=0.060$ 、1.0 μm のとき0.076、1.5 μm のとき0.104、2.0 μm のとき0.114、3.0 μm のとき0.160、4.0 μm のとき0.187と評価された。図7に示した値は、ダイバータ上部においてTが1.5~4.0 μm 程度の深さまで打ち込まれていることを示している。SRIMコード[3]で評価したところ、Dの核融合反応で生成される1.01 MeV TがWに垂直に入射した場合の飛程は4.6 μm であった。図7の結果は、ダイバータ上部においては飛程にほぼ対応する深さまでTが打ち込まれていることを示している。すなわち、ダイバータ上部では、プラズマ中でほとんど熱化されることなく高エネルギーを保ったままのTの打ち込みが支配的であることが明らかとなった。ILW-3で使用されたタイルでも、同様の傾向が見られた。

(4) Beタイル

ILW-3で使用された真空容器内側リミタタイル2XR10、外側リミタタイル4D14、上部保護タイルDump Plate中のT分布を測定した。上部Dump Plateおよび内側リミタタイル2XR10ではTはほとんど検出されなかったが、外側リミタタイル4D14では高濃度に観察された。これらの結果は、酸溶解法および昇温脱離法により測定されたILW-1タイルについての結果と一致した[4]。外側リミタタイル4D14では、トロイダル方向にT濃度の著しい不均一が見られた。今後、このような分布が形成された原因について検討する。

(5) ダストのIP分析

ILW-1後に真空容器から採取されたダストをIn箔に埋め込んだうえで、個々のダスト粒子中のT蓄積量をIP法によって測定するとともに、電子線プローブマイクロアナライザーを用いてダスト粒子を構成する元素を同定した。その結果、ダストは炭素を主成分とするものと、WやBe等の金属を主成分とするものに大別され、金属を主成分とするダスト中のT蓄積量は炭素ダストの1/10~1/100程度であることを明らかにした。これまでも核融合装置中で発生したダスト中のT蓄積量の測定例はあるが、多くのダスト粒子についての平均値のみであり、個々の粒子中のT蓄積量を評価したのは本研究が初めてである。

(6) まとめ

JET-ILW実験で使用されたダイバータWタイルについて、IP法およびBIXS法によるT分布測定を行い、Tの蓄積機構としてBeや他の不純物との共堆積ならびにW層中への打ち込みがあることを明らかにした。堆積層中のT濃度は、以前の炭素タイルが使用されていた時代に形

成された炭素堆積層中の値よりも低く、またILW実験ではタイル側面への堆積層の形成も明らかに低減されていた。これらの効果により、壁材料を炭素からBeおよびWに替えることで、真空容器中のT蓄積量の減少が期待できると結論した。また、ダイバータ上部ほどTがW層中の深部まで打ち込まれていることを見出した。さらに、Beタイル中のT濃度がポロイダル位置により大きく異なることがわかった。加えて、IPを用いて個々のダスト粒子中のT濃度を測定する方法を世界で初めて確立し、構成元素によりT蓄積量が大きく異なることを明らかにした。

<参考文献>

- [1] X. Litaudon et al., Nuclear Fusion, 57, 2017, 102001.
- [2] <https://www.kek.jp/ja/Research/ARL/RC/Geant4/>
- [3] <http://www.srim.org/>
- [4] E. Pajuste et al, Nuclear Materials and Energy, 12, 2017, 642-647.

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 4件)

- ① Y. Hatano, K. Yumizuru, S. Koivuranta, J. Likonen, M. Hara, M. Matsuyama, S. Masuzaki, M. Tokitani, N. Asakura, K. Isobe, T. Hayashi, A. Baron-Wiechec, A. Widdowson, JET contributors, Tritium analysis of divertor tiles used in JET ITER-like wall campaigns by means of β -ray induced x-ray spectrometry, Physica Scripta, 査読有, 2017, T170, 2017, 14014, <https://doi.org/10.1088/1402-4896/aa8931>
- ② Y. Hatano, K. Yumizuru, J. Likonen, S. Koivuranta, J. Ikonen, JET contributors, Tritium distributions on tungsten and carbon tiles used in the JET divertor, Physica Scripta, 査読有, 2016, T167, 2016, 14009, <https://doi.org/10.1088/0031-8949/T167/1/014009>.
- ③ T. Otsuka, Y. Hatano, Tritium retention in individual metallic dust particles examined by a tritium imaging plate technique, Physica Scripta, 査読有, 2016, T167, 2016, 14010, <https://doi.org/10.1088/0031-8949/T167/1/014010>.
- ④ Y. Hatano, A. Widdowson, N. Bekris, C. Ayres, A. Baron-Wiechec, J. Likonen, S. Koivuranta, J. Ikonen, K. Yumizuru, JET-EFDA contributors, 2D tritium distribution on tungsten

tiles used in JET ITER-like wall project, Journal of Nuclear Materials, 査読有, 463, 2015, 966-969, <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2014.12.041>

[学会発表] (計12件)

- ① Y. Hatano, J. Likonen, S. Koivuranta, J. Ikonen, A. Widdowson, S. Masuzaki, JET Contributors, Tritium distributions on W-coated divertor tiles and selected Be tiles used in the third JET ITER-like wall campaign, 23rd International Conference on Plasma Surface Interactions in Controlled Fusion Devices, 2018.
- ② T. Otsuka, S. Masuzaki, N. Ashikawa, Y. Hatano, N. Asakura, T. Suzuki, T. Suzuki, K. Isobe, T. Hayashi, Y. Tokitani, Y. Oya, D. Hamaguchi, H. Kurotaki, R. Sakamoto, H. Tanigawa, M. Nakamichi, A. Widdowson, M. Rubel, JET Contributors, Tritium retention characteristics in dust particles in JET with ITER-like wall, 23rd International Conference on Plasma Surface Interactions in Controlled Fusion Devices, 2018.
- ③ Y. Hatano, K. Yumizuru, S. Koivuranta, J. Likonen, M. Hara, M. Matsuyama, S. Masuzaki, M. Tokitani, N. Asakura, K. Isobe, T. Hayashi, A. Baron-Wiechec, A. Widdowson, JET contributors, Tritium analysis of divertor tiles used in JET ITER-like wall campaigns by means of β -ray induced x-ray spectrometry, 16th International Conference on Plasma-Facing Materials and Components for Fusion Applications, 2017.
- ④ K. Yumizuru, S. Koivuranta, Y. Hatano, J. Likonen, M. Matsuyama, A. Widdowson, JET contributors, Non-destructive tritium analysis of divertor tiles used in JET ITER-like wall campaigns by means of beta-ray induced X-ray spectrometry, 22nd International Conference on Plasma Surface Interactions in Controlled Fusion Devices, 2016.
- ⑤ 弓弦一哉, 波多野雄治, Seppo Koivuranta, Jari Likonen, 原正憲, 松山政夫, JET Contributors, イメージングプレート法および β 線誘起 X 線計測法の JET ITER-Like-Wall 実験で使用されたダイバータ タイル中のトリチウム分布測定への適応性の検討, 第11回核融合エネルギー連合講演会, 2016.
- ⑥ Y. Hatano, K. Yumizuru, S. Koivuranta, J. Likonen, J. Ikonen, M. Matsuyama, JET contributors, Application of imaging plate technique and beta-ray-induced X-ray spectrometry to measurements of tritium distributions in divertor tiles used in JET ITER-like wall campaigns, 11th International Conference on Tritium Science and Technology, 2016.
- ⑦ 波多野雄治, 弓弦一哉, Koivuranta Seppo, Likonen Jari, 松山政夫, JET contributors, イメージングプレート法および β 線誘起 X 線計測法による JET ITER-Like Wall ダイバータタイル上のトリチウム分布の測定, 日本原子力学会 2016 年春の年会, 2016.
- ⑧ Y. Hatano, K. Yumizuru, J. Likonen, S. Koivuranta, J. Ikonen, JET contributors, 2D tritium distributions on tungsten and carbon tiles used in the JET divertor, 15th International Conference on Plasma-Facing Materials and Components for Fusion Applications, 2015.
- ⑨ T. Otsuka, Y. Hatano, Tritium retention in individual metallic dust particles examined by a tritium imaging plate technique, 15th International Conference on Plasma-Facing Materials and Components for Fusion Applications, 2015.
- ⑩ Y. Hatano, A. Widdowson, N. Bekris, C. Ayres, A. Baron-Wiechec, J. Likonen, S. Koivuranta, J. Ikonen, K. Yumizuru, JET-EFDA contributors, 2D tritium distribution on tungsten and beryllium tiles used in JET ITER-like wall project, 21st International Conference on Plasma-Surface Interactions in Controlled Fusion Devices, 2014.

[その他]

ホームページ等

<http://www.hrc.u-toyama.ac.jp/jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

波多野雄治 (HATANO, Yuji)

富山大学・研究推進機構水素同位体科学研究センター・教授

研究者番号：80218487

(2) 研究分担者

大塚 哲平 (OTSUKA, Teppei)

近畿大学・理工学部・准教授

研究者番号：80315118