



研究最前線

微粒子のトリチウム蓄積測定技術の開発と JET ITER-like Wall 実験で生成されたダストへの応用

Development of Measurement Technique of Tritium Retention in Fine Particles and Its Application to Dust in JET with ITER-like Wall

大塚 哲平, 芦川 直子¹⁾, 増崎 貴¹⁾, 朝倉 伸幸²⁾, 林 巧²⁾,
谷川 博康²⁾, WIDDOWSON Anna³⁾, RUBEL Marek⁴⁾

OTSUKA Teppei, ASHIKAWA Naoko¹⁾, MASUZAKI Suguru¹⁾, ASAKURA Nobuyuki²⁾,
HAYASHI Takumi²⁾, TANIGAWA Hiroyasu²⁾, WIDDOWSON Anna³⁾ and RUBEL Marek⁴⁾

近畿大学, ¹⁾核融合科学研究所, ²⁾量子科学技術研究開発機構, ³⁾Culham CFE, ⁴⁾Royal Institute of Technology

(原稿受付: 2019年9月24日)

トリチウムイメージングプレート法 (TIPT) によりダスト (微粒子) のトリチウム蓄積を定量する技術を開発し, 本技術を実機 JET における ITER-like Wall 1st キャンペーンで発生したダストに応用した. 電子プローブマイクロアナライザ (EPMA) による元素分布像と TIPT によるトリチウム分布像を重ね合わせることで, 個々のダストのトリチウム取り込み挙動に及ぼす元素組成やサイズの影響を調べていくことが可能となった.

Keywords:

tritium, dust, JET ITER-like wall, imaging plate

1. はじめに

炭素壁を用いた磁場閉じ込め核融合炉では, プラズマ-壁相互作用により多量の炭素ダストが発生し, 炭素 (C) ダストに多量のトリチウム (T) が蓄積することが報告されている [1]. ダストに蓄積した T は, 取り除くことが困難であり, 炉内の T インベントリを増加させるので, 炉運転の安全性に大きな影響を及ぼすと考えられる. このため国際熱核融合実験炉 ITER では, ダストの発生を抑制し, T インベントリを小さくすることを目的として, 金属壁が用いられることになっている. 金属壁には, ダイバータとしてのタンゲステン (W) や第一壁としてのベリリウム (Be) が利用される. また, 壁の取り付けボルト材には鉄 (Fe) やニッケル (Ni) 系の合金も利用される. これら金属 (合金) とプラズマとの相互作用で生じたダストの T 蓄積特性は金属の種類 (組成), サイズや微細構造によって異なると予想される.

従来の C ダストへの T 蓄積挙動の評価として, ダストの総量または単位質量あたりの T 蓄積量が調べられてきた. しかし, 個々のダスト, すなわち微粒子について, 組成, サイズや微細構造と T 蓄積特性との関係を調べた例はない. 本報告では, まず, トリチウムイメージングプレート法 (TIPT) [2] をダストを模擬した微粒子に適用し, その有用性を示し [3], 実際の核融合実験炉 JET で発生したダストに応用した結果を紹介する [4].

2. TIPT による微粒子のトリチウム蓄積測定

TIPT は, 材料中の T から放射された β 線をイメージングプレート (IP) の輝尽性蛍光物質に入射させ, β 線の積算入射強度を輝尽性蛍光強度に変換して定量するとともに, その 2 次元 (表面) 分布を可視化するものである. その空間分解能は, 原理的には, 材料中および輝尽性蛍光物質中のトリチウム β 線 ($T\beta$ 線) 飛程に相当する数 μm であるが, IP 読み取り装置のレーザーの分解能の制限があるため 25 μm または 50 μm である.

図 1 (a) はダスト (微粒子) への TIPT 適用の概念図を示している. 図中, 飛散しないようにダストを粘着シートや銅テープなどに固定したあと, IP をダストに密着させて, ダスト表面または内部に含まれる T から放射された β 線を IP で可視化・定量化する様子を示している. 図 1 (b) に本研究で用いたダストの模擬微粒子を示す. TIPT の定量性を確認するために, 模擬微粒子として水素 (T) 吸収量が既知であるチタン (Ti) の球状粒子 (平均粒径 30 μm および 100 μm) を用いた.

図 2 (a) に粘着テープ上に分散したチタン粒子の分布状況の光学顕微鏡写真を, (b) に同じ領域の $T\beta$ 線強度分布を示す. 図中, $T\beta$ 線強度は赤色で最も高いことを表しており, 黄色, 緑色から青色になるにつれて指数関数的に減少している. 粒子分布と β 線強度分布とは良く一致しており, ダスト粒子に吸収された T が検出されていることがわかる. チタン粒子が完全な球形であり, 粒子中の T 濃度が

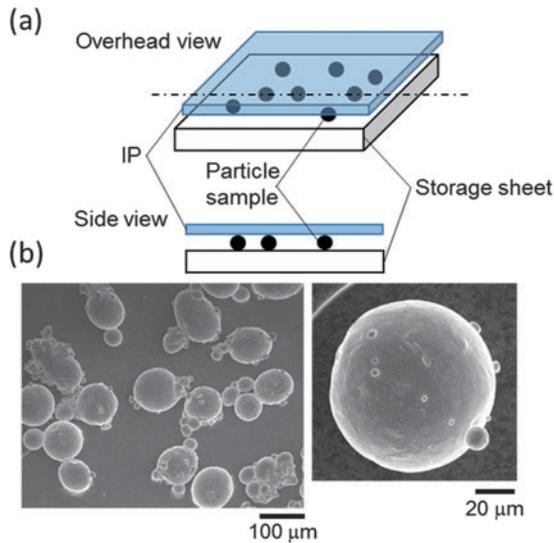


図1 (a)ダスト模擬粒子へのTIPT適用の概念図および(b)球状Ti微粒子。

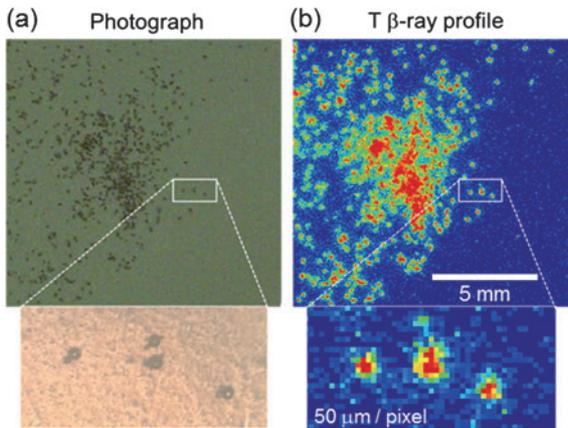


図2 (a)トリチウムを吸収させたTi微粒子の分布状態の光学写真および(b)IP像。

一定であると仮定すると、 β 線強度とラジオグラフィ用T濃度ラベルとの関係から得られた粒子中のT量は 41 ± 3 Bq/粒子と求められた。これはチタン粒子に吸収させたTの既知量から算定した値(42 Bq/粒子)と良く一致していた。一方、粒径 $30 \mu\text{m}$ の粒子では、予想よりも β 線強度が10倍程度大きかったことから、粒子が小さくなるにつれて表面積が相対的に増加することにより、内部に吸収されたTよりも表面近傍に偏在したTから放射された β 線強度の影響が大きくなることがわかった。また、吸熱型水素溶解金属の微粒子(ステンレス鋼やタングステン)では、内部のTが拡散放出されてしまった後、強く表面近傍に捕獲され、取り残されたTが検出されることがわかった。

3. JET-ILW ダストへの応用

ITERにさきがけて、JETにおいてITER-like Wall(ILW)を用いたプラズマ実験(1stキャンペーン)が行われた結果、ダストの発生は極めて少なく、炭素壁を用いていたJET(JET-C)での実験に比べて、ダスト量は1/100以下であることがわかった[5,6]。また、ダストの種類や形状、微

細組織が多岐に渡ることも報告されている[7]。幅広いアプローチ活動(BA)活動共同研究において、JETで採取された0.77gのダストのうち、0.14gが青森県六ヶ所村の国際核融合エネルギー研究センター(IFERC)に運搬された。IFERCにおいて、0.1mg程度のダストをインジウム(In)製のベッドに固定した後[8]、電子プローブマイクロアナライザ(EPMA)で観察した。今回、C, Fe, Ni, BeおよびWをそれぞれ主成分とするダストが観察された。図3にBeを主成分とするBeダストおよびWを主成分とするWダストの二次電子像(SEI)と元素マッピング像を示した。図に示したように、WダストにはBeが含まれるものが観察された。なお、図中の酸素成分は取り出し後に大気成分によってBeが酸化したためであると考えられる。

EPMAによる元素分布分析領域と同じ領域について、ダストに取り込まれたTから放射された β 線強度分布を測定した。TIPTで得られた $T\beta$ 線強度分布およびEPMAで得られた元素分布を重ね合わせた結果が図4である。図中、 $T\beta$ 線強度が高い(赤色や黄色)の領域には主にCダストが存在することが示されている。

表1にCダスト、Fe、Niダスト、BeダストおよびWダストの個数を数え上げ、トリチウム含有の有無について調べた結果を示す。

今回採取された試料では大多数がCダストであり、ほとんどのT(85%以上)がCダストに取り込まれていることがわかった。さらに、BeおよびWダストに取り込まれたトリチウムを検出することに成功した。

図4中において、Cダスト、BeダストおよびWダストの中心付近を横断するような線上において、元素と $T\beta$ 線強度とを線分析し、両者を比較したものを図5に示す。元素分布と $T\beta$ 線強度分布は良く一致しており、ダストに取り込まれたトリチウムが検出されていることがわかる。 $T\beta$ 線強度が元素分布周辺に広く検出されているのは、ダスト表面近傍のTから発せられた β 線が空気中を通してIPに入射したためである。(b)Wダストおよび(c)、(d)Beダストの $T\beta$ 線強度(右軸)が、(a)Cダストに比べて1/100~1/10であることを注意されたい。

図5に示した元素線分布のピーク幅をダストのサイズ

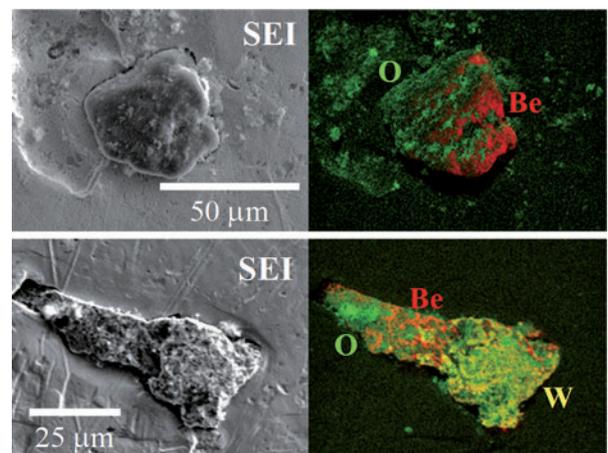


図3 BeダストおよびWダストの二次電子像およびEPMA像。

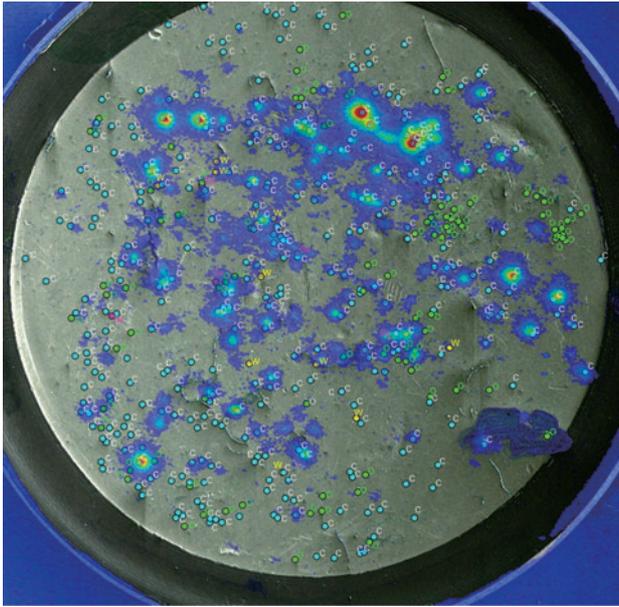


図4 IP像とEPMA像との重ね合わせ結果。

(直径)とし、 $T\beta$ 線強度のピーク高さをダストに取り込まれたT強度であるとして、図4中の30個のCダストおよび8個のWダスト、4個のBeダストについて調べた結果を図6に示す。Cダストに取り込まれたT強度は最も高かった値から3桁以上にわたってばらつきがみられた。3桁にわたるC-ダストのT強度(I_T)を、目安としてHigh ($I_T > 1$),

表1 ITER-ILWダストから採取した試料中のダスト粒子の主成分および数、トリチウム含有の有無。

ダストの主成分	ダスト粒子数	トリチウムを含むダスト粒子数	トリチウムを含むダストの割合 (%)
C	322	124	85
Fe, Ni	93	11	< 7
Be	5	4	< 3
W	11	8	< 6

Moderate ($0.1 < I_T < 1$), そしてLow ($0.01 < I_T < 0.1$)とグループ分けしてみると、BeダストおよびWダストに取り込まれたT強度は、大部分はCダストの I_T のLowグループよりも小さいことがわかった。

図中の点線はダストの直径 d の2乗に比例する直線を表している。IP測定ではダスト粒子の表面に吸着、または表面近傍に存在したTがT強度に反映されやすいので、ダストサイズすなわち表面積が増加するにつれてT強度が高くなる傾向にある。ただし、今回の試料では、EPMA測定およびIP測定の分解能を $20\mu\text{m}$ および $25\mu\text{m}$ としたため、これより小さいダストに関する知見が得られていないことに注意が必要である。これには、 $T\beta$ 線強度分布を手がかりにして、微細なダストを探し出していくことが有効であると考えている。

本試料では、WダストではおしなべてTの取り込みが少ないことが示唆されたが、BeダストではCダストの I_T のLowグループと同等かやや高いTの蓄積が観察された。ま

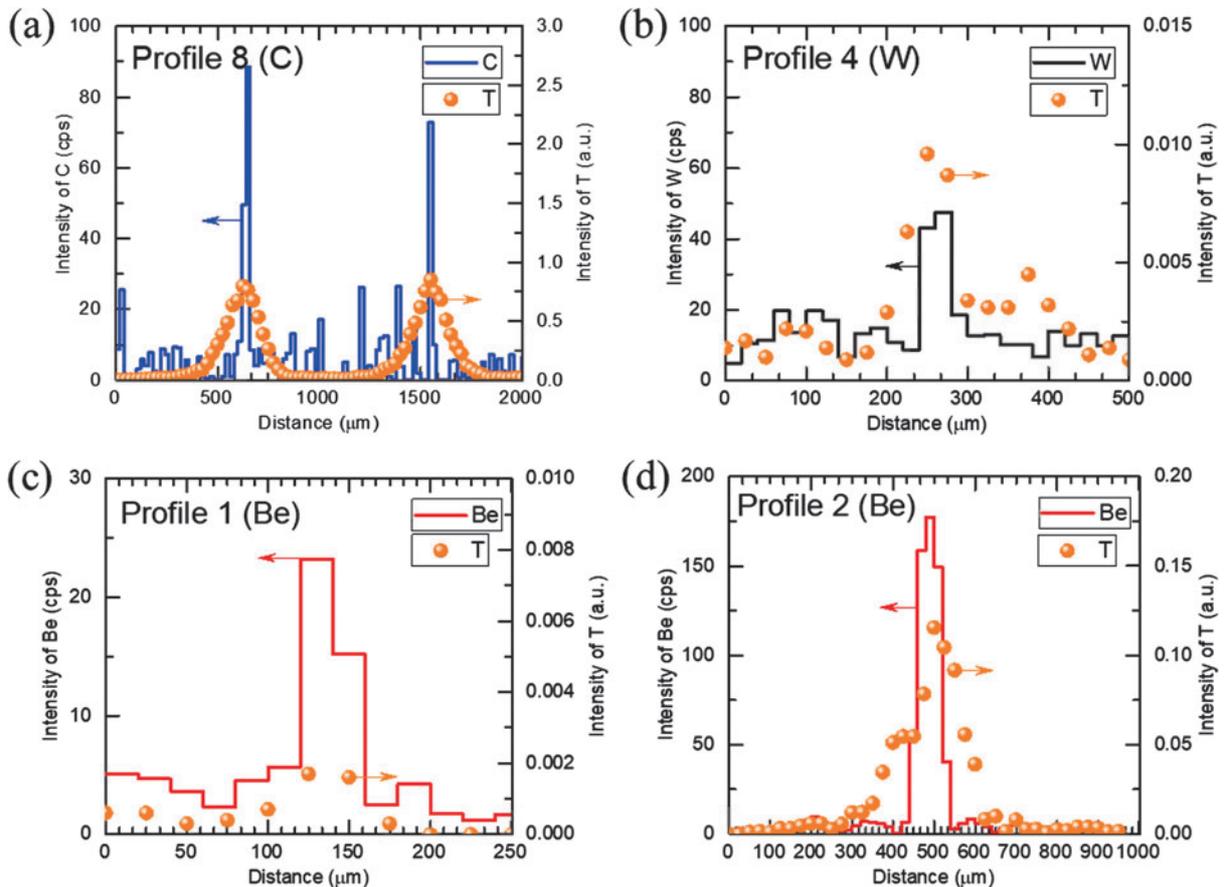


図5 EPMA像およびIP像中の同じにおける元素と $T\beta$ 線強度の線分析結果。

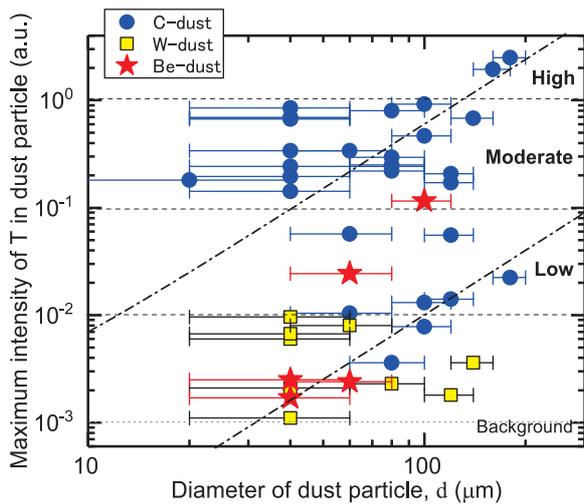


図6 ダストサイズとT強度との関係.

た、Beダストの標本数は極めて少ないので、本手法により知見を集積する必要がある。また、Tの取り込みが大きかったダストをピックアップして、透過型電子顕微鏡(TEM)による微細構造分析を行うことも視野に入れて研

究を進めている。

今後は、JET-ILW 3rd campaign で得られた試料にも本手法を適用し、より長い期間にわたる水素同位体プラズマ実験で発生したダストのトリチウム取り込み挙動を調べるとともに、引き続きダストの組成、サイズおよび微細構造がT取り込みにどのような影響を及ぼすのかを明らかにしていく予定である。

本研究はITER BA 活動、科学研究費 No.26289353、およびNIFS-富山大学双方向研究 No.NIFS13KUHR023 の成果です。

参考文献

- [1] J. Roth *et al.*, Plasma Phys. Control. Fusion **50**, 20 (2008).
- [2] T. Otsuka and T. Tanabe, Mater. Trans. **58**, 1364 (2017).
- [3] T. Otsuka and Y. Hatano, Phys. Scri. **T167**, 4 (2016).
- [4] T. Otsuka *et al.*, Nucl. Mater. Energy **17**, 279 (2018).
- [5] A. Baron-Wiechec *et al.*, Nucl. Fusion **55**, 113033 (2015).
- [6] N. Ashikawa *et al.*, Nucl. Mater. Energy, *in press* (2019).
- [7] M. Rubel *et al.*, Fusion Eng. Des. **136**, Part A, 579 (2018).
- [8] N. Ashikawa *et al.*, J. Nucl. Mater. **S438**, S664 (2013).