

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 28 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289355

研究課題名(和文)核融合炉事故シーケンスに照らした放射化ダストハザード研究

研究課題名(英文)Study on activated dust hazard by fusion reactor accident sequence

研究代表者

横峯 健彦 (YOKOMINE, Takehiko)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：40240204

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、核融合の安全解析に関して不確定要素の一つである炉内で生成、放射化されたダストのソースタームの評価に関して、特に、ダストの炉外放出機構を明らかにすることを目標とする。従来の研究が1個粒子の飛散をモデル化していたのに対し、堆積層からの飛散、特に凝集体としての飛散挙動に着目して、飛散モデルに必要なデータを集積した。粒径、初期堆積層、流入空気湿度などを変化させて、真空破断実験における粒子飛散挙動を測定した結果に対し、従来モデル予測結果はいずれの粒径に関しても大きく過小評価した。従来モデルは飛散率は一定であるのに対し、実際には凝集体として粒子が飛散し飛散率が変化することがその原因と考えられる。

研究成果の概要(英文)：This research aims to clarify the out-of-reactor release mechanism of dust, especially concerning the evaluation of the source term of activated dust in a fusion reactor which is one of uncertainties concerning safety analysis of nuclear fusion. Conventional model reproduces resuspension behavior of single particle, whereas this study focuses on resuspension of dust from the deposited layer as aggregates. The results of conventional model prediction for experimental data were largely underestimated, as a result of measuring the particle resuspension behavior in the vacuum rupture experiment by changing the particle size, the initial deposited layer, the inflow air humidity and so on. In contrast to the conventional model in which the resuspension rate is constant, it is considered that the cause of this large difference between model and experimental data is that particles actually are resuspended as aggregates and the resuspension rate changes temporally.

研究分野：核融合炉工学

キーワード：核融合炉安全性 放射化ダスト 再飛散モデル 真空境界破断 粒子凝集体 粒子堆積層

1. 研究開始当初の背景

(1) 核融合炉安全性研究においても事故解析の重要性が再認識されている。核融合炉事故時評価においていまだ不確定性要素とされているのが、核融合炉のソースターム評価、特にトリチウムとダストである。ダストの炉外放出は、被害の広範囲化を伴うため、きわめて重要な事象であるが、国内におけるダストの研究は、炉内で生成されるダストのキャラクタリゼーションが主であり、事故時のダスト挙動についての研究は、Takase らの実験及び数値解析、申請者らの実験研究以後行われていない。

(2) IAEA でも 2008 年から CRP (調整研究プロジェクト) としてダストハザードの調査研究が始まっており、放射化されたダストが炉外へ放出された場合の公衆被ばくが懸念されるが、ICE (真空容器内冷却材侵入事象) および LOVA (真空境界破断事象) 時においては、ダストによる粉塵および水素のハイブリッド爆発が最悪のケースとして想定されている。しかし、これらを予測するツールはなく、欧米では現在開発を行っている。

(3) 現在欧米で開発中のダスト流出解析コードは、計算された流れ場の中を運動する代表粒子のラグランジ的追跡計算となっているため、粒子間相互作用などに起因する濃度分布/温度分布を有するダスト挙動は全く考慮されておらず、安全性研究としては不十分である。

2. 研究の目的

粉塵爆発の発生クライテリアはダストの状態と与えられる点火エネルギーで決まる。後者に関して、壁からの放射熱、プラズマ加熱用アンテナなど外的受熱だけでなく、ダストに蓄えられた静電気の放電も点火源として考慮しなければならない。原型炉を想定した場合、問題はダスト初期温度が非常に高いことである。解析では、ダストが炉外へ流出するに要する時間スケールは事象発生後ミリ秒オーダーであり、また、ダスト自体崩壊熱を有していることから、ダストが高温を維持したまま破断口から放出されると考えられる。その場合、点火閾値が下がっており、また静電気放電による自己点火も十分可能であれば、残りは、粒子濃度が点火を決する重要因子となる。よって、本研究は、ダスト放出時の紛体挙動について、以下のことを明らかにする。

3. 研究の方法

核融合炉真空容器破断事象 (LOVA) および真空容器内冷却材侵入事象 (ICE) におけるダスト群の破断口からの流出挙動について、相対的な濃度分布およびダスト群運動に伴う温度分布の時間的变化を明らかにする。特に、空気流および蒸気流にエントレインメ

ントされ高速運動するダスト群の濃度/温度分布は、粉塵爆発の自己点火クライテリアを判断するうえで非常に重要であるが、これまで全く情報がなかった。実験と同時に、数値解析を行い、ダスト群の流動不安定等を含む挙動の物理モデル構築に関する指針を与える。具体的な方法としては、以下の項目に従って行う。

(1) 非湿潤状況での破断口近傍のダスト群挙動の解析

(2) 真空境界破断時のダスト挙動測定：本研究では、小破断を想定して、各シーケンスの組み合わせに対して、流出速度、流出圧力(希薄効果)を変化させる。

(3) 湿分を伴う真空境界破断時のダスト挙動測定：湿り空気の浸入を模擬し、ダスト雲と蒸気流との相互作用を調べる。

(4) 真空境界破断時のダスト挙動のモデル検証：従来事故時のダスト挙動解析に用いられてきた数値モデルと検証し、課題を抽出する。

4. 研究成果

(1) 上記、課題(1)～(3)を行うための真空実験装置を図1のように製作した。実験装置は、真空容器、湿度調整容器、電磁弁などの流体供給体系、高速ビデオカメラ、光源などの可視化観察システムから構成されている。真空容器は、長さ 1000 mm、直径 380 mm のアクリル型円筒である。真空ポンプを用いて真空容器内圧力を 147 Pa とした。コンプレッサー式ネブライザーを用い、湿度調整容器内の空気湿度を調整する。本実験では電磁弁の開放により真空環境を破断させることで、真空容器内部に湿度調整された湿度調整容器内の空気を流入させた。実験では、空気中水蒸気分圧 10～13hPa 条件下(中間湿度条件)で保管された粒子を用いた。流入空気の空気中水蒸気分圧は 17hPa 以上(高湿度空気流入条件)と、10～13hPa (中間湿度空気流入条件)の2条件に調整した。流入空気により、微粒子堆積層から粒子が飛散される様子を高速ビデオカメラ(3000fps)で撮影した。本実験では平均粒径 60、30、14 μ m のフレイク状のアルミナ粒子を用いた。初期微粒子堆積層は、長さ 27.5mm、幅 8.8mm とした。層高は 1.3mm、2.7mm、5.4mm と変化させた。また、流入速度分布はスモークワイヤ法で測定した。

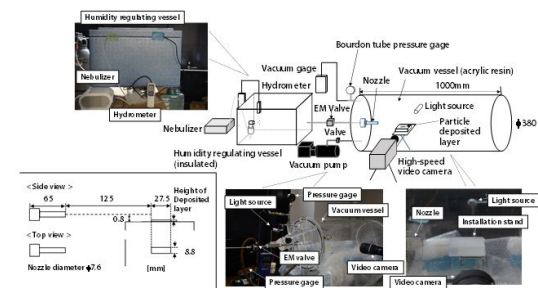


図1 真空実験装置

時刻 t において得られた画像から微粒子層領域面積 I_t を求め、初期微粒子層面積 I_0 に対する各時刻の面積比 I_t / I_0 から $1 - I_t / I_0$ を飛散率として定義した。

(2) 平均粒径 60 μm の粒子の飛散挙動

得られた結果から平均粒径 60 μm の粒子飛散挙動に関して、以下のような現象が起こっていると推測される。流入空気が粒子層前縁に衝突し渦が発生する。この渦により粒子層前縁の粒子が一度持ち上げられた後、再び粒子層中に戻る。それら粒子が堆積層に再付着することで、粒子層内の一部に歪みが生じ粒子層の一部分が同時に持ち上がる。この渦は大気中では雰囲気空気の粘性により消失されるが、真空中においては雰囲気空気の密度が小さいため粘性により消失しづらく、粒子の運動に影響を与えたと考えられる。また、波状粒子群が流れ方向に進行している様子が見られることから、波後方部ではこの波状粒子群が障壁となりよどみ領域が発生し、このよどみ域と波の上部を通過する流れとの流速差が生じる。この結果、波状粒子群の後方部に位置する粒子層中の粒子に揚力が加わり持ち上げられる。その後、波状粒子群は粒子層になだれ込み、せん断応力により粒子層表面から粒子が飛散される状態へと遷移していく。さらに、付着壁面近くに位置する粒子層前面下部の粒子が粒子層を離れ、流れ方向とは逆向きに進行していく様子が確認された。これは、粒子層前縁に空気が衝突したことで粒子層前縁から壁面に向かう渦が発生したことによると考えられる。60 μm では、他の粒径に比べ波状粒子群の付着壁面からの高さ（波高）はそれほど高くなり、他の粒径より早くせん断応力により飛散される状態へと遷移していた。波高が低いことから、流速差により巻き上げられる波後方部の粒子も他の粒径に比べ少なかった。流入空気が高湿度条件、中間湿度条件のいずれの結果に関しても、その傾向は同様であり飛散挙動にも差異は見られなかった。これらのことから、この粒径では湿度による飛散挙動への影響はないものと考えられる。飛散率の時間変化は時間に対して線形であることから、粒子が粒子層表面から一定の速度で飛散されていることを示しており、粒子群としての挙動が飛散率変化に影響を与えていない可能性を示唆している。60 μm の結果に関して、飛散率の時間依存性はなかったこと、湿度による飛散進行への影響も見られず、波状粒子群の挙動が他の粒径に比べて隠微であったことから、粒子群としての挙動、湿度を考慮しない従来モデルの考え方を適用できる可能性を示唆している。

(3) 平均粒径 30 μm 粒子の飛散挙動

60 μm 粒子と同様、流入空気が粒子層に到達し粒子層内の一部分が同時に持ち上がった部分をきっかけに波状粒子群となり進行する様子が確認された。粒子層前方において、流れ方向と逆向きに粒子が進行する現象も

確認された。しかし、60 μm と比較すると波状粒子群の付着壁面からの波高が大きく、粒子堆積層の後方部は層全体が上部へと持ち上げられた。また、中間湿度空気流入条件において、多くの粒子が凝集した状態で一度に離脱し、揚力により上昇、流れにより破碎されるという現象が確認された。一方、高湿度空気流入条件ではその現象は確認できなかった。以上より、粒子層内部の湿度が粒子群の挙動に大きな影響を及ぼすものと推察される。

(4) 平均粒径 14 μm 粒子の飛散挙動

他の粒径と同様、流入空気が粒子層に到達、一度は粒子層を離れた粒子の再付着により生じた歪みをきっかけに波状粒子群となり進行する様子が確認できた。また、同様に粒子層前方粒子が逆向きに進行する様子も確認された。14 μm の粒子では、粒子間の付着力により粒子が大きな塊（agglomerates）となって層内に存在しているのが確認された。中間湿度空気流入条件の測定に関しては、流入空気の摩擦力により層内にとどまれなくなった塊が、塊の形状を維持したまま粒子層から離脱すると考えられる。さらに、高湿度空気流入条件の測定では、粒子塊が離脱していく頻度が中間湿度に比べて高く、塊の大きさも比較的大きいものであった。大きさに関して、流入空気中の湿分により粒子塊の表面に吸着層を形成し、離脱する粒子塊が大きくなったと推察される。さらに、高湿度空気流入条件の場合には、粒子塊での離脱が起こった後、再び波状粒子群を形成し粒子塊が離脱していくという現象が確認された。この高湿度空気流入条件では、波の立つ角度が中間湿度空気流入条件に比べ大きくなり、流入空気により受ける水平方向の力が増大し、粒子塊での離脱が起こりやすくなったものと考えられる。

(5) 従来モデルの検証

本実験結果を従来モデルのダスト飛散モデル VZFG (Vainshtein-Ziskind-Fichman-Gutfinger) モデルの計算結果と比較した。飛散率変化は、いずれの粒径に関してもモデルは実験結果を大きく過小評価した。VZFG モデルでは、全ての粒子に対して一様な流れが接触した場合、全ての粒子の中で再飛散される割合を求めている。しかし、本実験では粒子堆積層として設置しているため、流入空気到達時において、層前縁、上面の粒子は流体に接触するが、粒子層後方、内部の粒子は流れに接していない。すなわち、流体に接する粒子が飛散挙動とともに時間変化する。また、VZFG モデルでは粒径の増大に伴って飛散率が増大する傾向を示しており、中間湿度空気流入条件ではこの傾向と一致する結果であったが、高湿度空気流入条件では、14 μm 粒子に関して、実験結果を再現することはできなかった。従来モデルでは粒子層からの飛散における、飛散確率の時間変化には対応できていないことから、粒子堆積層からの粒子飛散予測に

適用することは困難であると考えられる。

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 1 件)

T. Yokomine, K. Oohara, T. Kunugi,
Experimental investigation on heat transfer
of HEMJ type divertor with narrow gap
between nozzle and impingement surface,
Fusion Engineering and Design, 査読有、
Vol. 109-111, Part B, 2016, pp. 1543-1548,
<https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2015.11.028>

〔学会発表〕(計 3 件)

T. Yokomine, Experimental investigation on
heat transfer of HEMJ type divertor with
narrow gap between nozzle and
impingement surface, 12th International
Symposium on Fusion Nuclear Technology,
2015.9.14-18, Jeju Island, Korea

Z. Zhang, Visualization of shear stress
distribution on impingement wall of
multiple-impinging jet, 2016.8.21-8.25,
Philadelphia, USA

T. Yokomine, Particle resuspension behavior
from thick deposited layer in vacuum vessel,
10th Japan-Korea Symposium on Nuclear
Thermal Hydraulics and Safety,
2016.11.27-11.30, Kyoto

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

横峯 健彦学 (YOKOMINE, Takehiko)
京都大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 4 0 2 4 0 2 0 4

(2)研究分担者

功刀 資彰 (KUNUGI, Tomoaki)
京都大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 4 0 3 0 1 8 3 2

河原 全作 (KAWARA, Zensaku)
京都大学・大学院工学研究科・講師
研究者番号: 1 0 2 0 1 4 5 1

(3)連携研究者

なし

(4)研究協力者

税所 大貴 (SAISYO, Daiki)

大原 健 (OOHARA, Ken)

Zeyu Zhang