

令和 6 年 6 月 17 日現在

機関番号：32619

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2023

課題番号：19K04929

研究課題名(和文) ポーラス構造部材を用いた高気密空間内水素ガス爆発事故被害低減法の実現可能性検証

研究課題名(英文) Verification of the feasibility of damage reduction method for hydrogen gas explosion accidents in highly airtight spaces using porous structural members

研究代表者

斉藤 寛泰 (Saitoh, Hiroyasu)

芝浦工業大学・工学部・教授

研究者番号：80362284

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：原子炉建屋などの気密性の高い空間内で発生した水素ガス爆発発生時の圧力上昇を緩和させ、構造物の壊滅的損壊を防ぐための減災法の確立を目指し、爆発空間の一部の壁面にポーラス構造体(本研究ではガラスビーズなどの球形粒子を使用)を充填した空間を設置する方法の提案とモデル実験装置を用いた検証を行った。その結果、本研究で提案する手法によって、爆発空間の圧力上昇が緩和できることが示され、効果的な球形粒子サイズ、爆発空間体積に対する圧力緩和に有効なポーラス構造体充填空間体積の比率などの知見が得られた。さらに、充填粒子に、多孔質などの機能性を追加することにより、減災効果が向上することを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

福島第一原子力発電所原子炉建屋における一連の水素ガス爆発の発生は、回復が極めて困難かつ甚大な被害をもたらした。近年では、水素を代替エネルギー源として普及させ、利用する試みも活発化しており、水素ガス爆発安全への対策が増々重要になっている。本研究で実証したポーラス構造部材を充填した空間を爆発が発生する可能性のある空間に隣接して設置する爆発圧力緩和法は、スケール効果等、さらに検討すべき事項も多いが、効果的な水素ガス爆発減災法の実現に資するものとなることを期待している。

研究成果の概要(英文)：Aiming to establish a disaster mitigation method to reduce the pressure rise during a hydrogen gas explosions in an airtight space such as a nuclear reactor building and prevent catastrophic damage to the structure, we proposed a method of installing a space filled with porous structures (in this study, spherical particles such as glass beads were used) on part of the wall of the explosion space and verified it using a model experimental device. As a result, it was shown that the method proposed in this study can effectively reduce the pressure rise in the explosion space, and knowledge was obtained such as the effective spherical particle size and the ratio of the volume of the porous structure filled space effective for pressure reduction to the volume of the explosion space. Furthermore, it was shown that the disaster mitigation effect can be improved more by adding functionality such as high porosity to the filled particles.

研究分野： 燃烧工学，熱工学

キーワード： 水素ガス爆発 減災システム 爆発圧力緩和 ポーラス体 消炎

1. 研究開始当初の背景

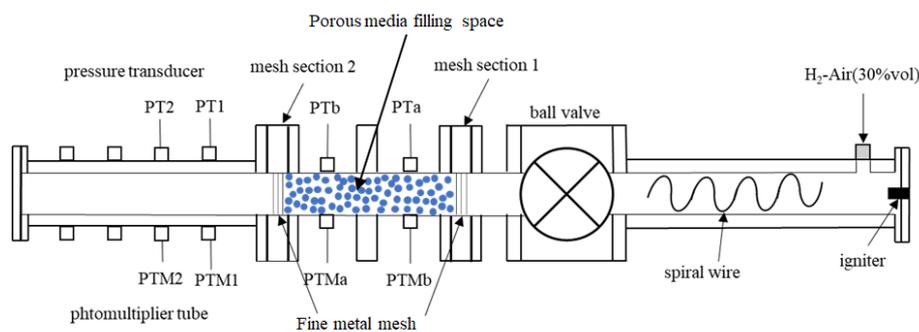
2011年の東北地方太平洋沖地震に起因して発生した福島第一原子力発電所原子炉建屋における一連の水素ガス爆発事故は、水素ガス爆発事故の回避の難しさと被害軽減のための減災対策の必要性を浮き彫りにした。一方、近年、次世代エネルギー源として水素を利用する社会の形成を目指し、水素の生成、貯蔵、利用に関する検討が続けられているが、水素関連設備において、漏洩、爆発、火災事故も多数発生しており、水素ガス爆発安全に関する研究の重要性が増している。これまで、水素の燃焼学的研究は、実験、理論、シミュレーションの各アプローチによって、国内外の研究機関で広く行われており、多くの基礎的知見の蓄積がある。しかしながら、水素に限らず、燃焼現象は非線形性の極めて強い支配方程式群によって記述される反応性熱流体现象であるため、個別のケースにおける火炎の動きや燃焼特性は、実験的検証を実際に行ってみるか、物理モデルの妥当性がある程度検証された計算コードを用いて適切な境界条件や初期条件のもとで数値予測を行い、その結果を精査するしかない。本研究は、水素ガス爆発事故の減災法としてポーラス構造体を用いた爆発圧力緩和法を提案し、その有効性を調べるものである。ポーラス構造体内のような微細複雑構造をもつ空間内を進行する燃焼波のメカニズムは十分に解明された現象ではなく、さらに、本研究で提案するような利用法を検討した報告も見当たらない。

2. 研究の目的

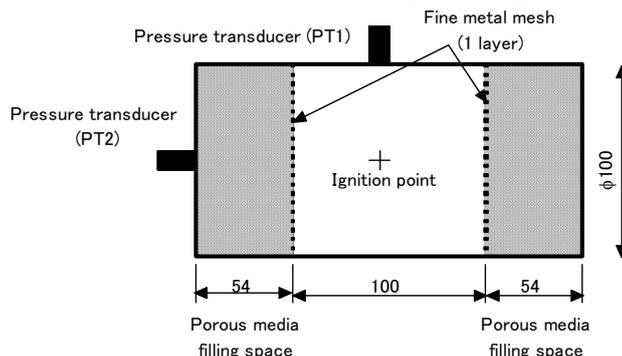
本研究は、水素ガスの爆発事故を想定した革新的被害低減法の確立を目的として行われたものである。具体的には、爆発空間内の膨張火炎により押し上げられ圧縮される火炎進行方向前方の未燃ガスを、爆発空間に隣接して設置したポーラス構造体充填空間内に一旦「隔離」して背後の高速火炎伝播を中断させ、その後ポーラス構造体充填空間内部での緩慢な燃焼、もしくは、消炎により爆発圧力上昇に寄与する予混合気量を減少させる、という方法である。建物の損壊を防ぐなど、気密性の高い空間における爆発事故の被害を低減するためには、爆発空間内の最大圧力上昇速度と最大爆発圧力とともに可能な限り減少させることが必要である。本研究では、三次元爆燃空間ならびに一次元燃焼波に対するポーラス構造体充填空間設置の効果を調べた。なお、本研究は、研究代表者がこれまで開発に参画した爆発ガス捕集バッグとフレームアレスタを組み合わせた水素ガス爆発減災システム[1]に着想を得たものである。

3. 研究の方法

爆発空間内を伝ばする火炎が、爆発圧力緩和のためのポーラス構造体充填空間とどのように干渉するかを詳しく調べる必要がある。また、ポーラス構造体充填空間に入射する伝ば火炎の速度は、爆発空間スケールや構造物の複雑さによって数 100 m/s 以上となるケースや、もし、衝撃波を伴う爆轟波の状態となれば燃焼波の速度が 2000 m/s にまで及ぶケースも想定しておかなければならない。そこで、本研究では、ポーラス構造体充填区間を設けた一次元燃焼波管による実



(a) 一次元燃焼波(爆燃波/爆轟波)に対する効果検証用の配管装置



(b) 三次元爆燃空間における効果検証用の定容燃焼容器

図1 ポーラス構造体充填空間設置による爆発圧力緩和効果の検証実験装置概要

験と、定容燃焼容器を用いた三次元爆燃空間における実験の2通りの検証実験を行い、消炎や爆発圧力低減の効果を調べた。図1に、用いた実験装置の概略を示す。

図1(a)の配管装置では、らせん状ワイヤを管内に挿入し管端で着火すれば、爆燃波から爆轟波への遷移が生じ、2000 m/s程度の速度をもつ燃焼波をポーラス構造体充填空間に入射させることができるようになる。配管内の燃焼波の進行を、圧力センサ(PT)による圧力計測と光電子増倍管(PMT)による火炎自発光計測を多点同時時系列で行うことにより観測した。三次元的な爆燃空間を対象とした図1(b)の定容燃焼容器は、円筒容器の両側にポーラス構造体充填空間を接続したものであり、容器中央の爆発中央空間とポーラス体充填空間の体積比を変化させることができる。ポーラス構造体には様々な種類のものがあるが、ここでは、図2に示す各種粒子を用いた。粒子充填空間の空隙率は、0.4~0.55程度の範囲である。容器内の圧力上昇を圧力センサにより検知し、アンプで増幅してオシロスコープで記録した。

配管装置、定容燃焼容器内に充填する水素-空気混合気は、予め混合チャンバ内で作製したものを用いた。水素濃度は消炎が最も困難な理論混合比に近い30 vol.%とし、所定の初期圧となるように装置内に充填し、スパークギャップからの火花放電により着火した。

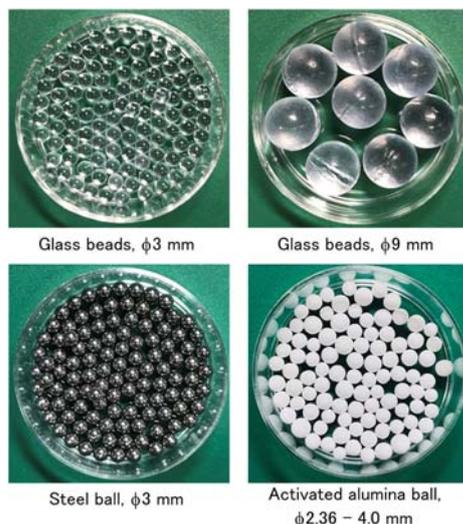


図2 ポーラス構造体形成に使用した粒子例

4. 研究成果

図3は、図1(b)の装置を用いて、初期圧100 kPaの条件で得られた爆発圧力の時間履歴である。充填粒子の空隙率を考慮し、充填混合気の総体積はいずれの条件も同じになっている(粒子充填なしの場合は、円盤スペーサをポーラス構造体充填空間端に挿入)。粒子充填空間の空隙率はほぼ同程度であるが、充填粒子サイズにより圧力履歴は全く異なる結果であることがわかる。充填粒子は燃焼波との接触でヒートシンクとして機能すると考えられるが、充填粒子径が大きい場合は、急峻な圧力上昇を招き、粒子を充填しない場合よりも最大爆発圧力が大きくなる。本研究で試みた条件の範疇では、3 mmのガラスビーズの条件において最大爆発圧力は減少したが、圧力上昇の勾配は粒子充填なしの場合と比べて同様に急峻であった。これは、燃焼波が粒子充填空間を進行する際に、部分的に火炎加速が生じたことによるものであると推察している。最大圧力上昇速度は、圧力放散設備の設計に用いられる重要な爆発特性値であるが、表面吸着性などの付加機能がない固体粒子では粒子充填によりかえって増加することを示している。

一方、図3右に示した活性アルミナボールの結果は、最大爆発圧力、圧力上昇速度ともに粒子充填なしの条件に比べて、かなり緩和できていることを示している。活性アルミナボールは、いわゆる機能性粒子であり、粒子自身に多くの微細孔が存在する。この微細孔(サイズは、理論混合比の水素-空気混合気に対する最大安全すきまMESGの0.31 mm未満である)に押し込まれた混合気が爆発圧力上昇に寄与しないためであると推察している。初期圧と爆発後の終圧の差から、活性アルミナボール充填の場合は、爆発後の容器内に未燃混合気が多く残留していることが確認されており、図3の圧力履歴の要因を裏付けるものである。図3の圧力履歴より、最大爆発圧力と最大圧力上昇速度を求めたものを表1にまとめて示す。表1に示す通り、活性アルミナボール充填の際に、最大爆発圧力、最大圧力上昇速度(dp/dt)_{max}はともに最も小さくなることがわかった。さらに、爆発空間体積を2倍に増やした実験では、3 mmガラスビーズでは爆発圧力の低減効果は限定的となったが、活性アルミナボールの場合は、なお最大爆発圧力を半減させ、かつ、最大圧力上昇速度も抑制できるという結果を得た。これらの結果は、機能性粒子が爆発圧力

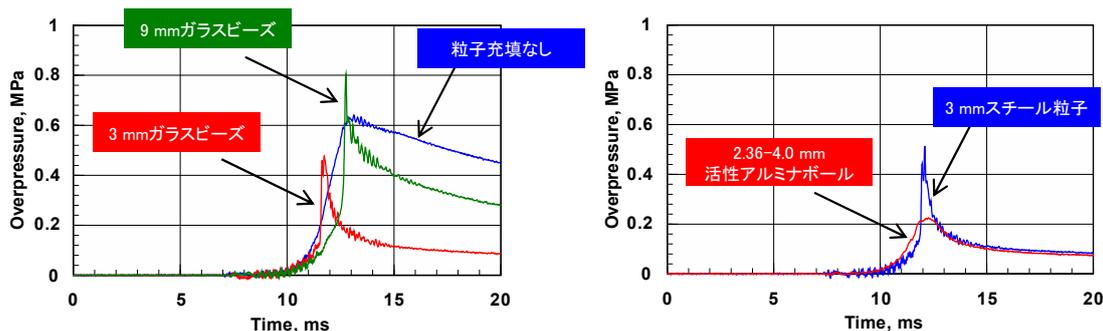


図3 定容燃焼容器内の爆発圧力履歴の比較(混合気の水素濃度30 vol.%)

を効果的に緩和できることを示唆しており、本研究で初めて実証されたものである。

表 1 各充填粒子における爆発特性値(最大爆発圧力, 最大圧力上昇速度)の比較

Particle type	Particle size [mm]	Maximum overpressure [MPa]	$(dP/dt)_{max}$ [$\times 10^2$ kPa/s]
(Spacer)	-	0.64	0.40×10^4
Glass beads	3	0.48	4.05×10^4
	9	0.81	1.18×10^5
Stainless steel	3	0.51	1.60×10^5
Activated alumina	2.36 - 4	0.23	0.18×10^4

次に、図 1(a)の配管装置を用いた爆轟条件で得られた知見について述べる。三次元爆燃空間における爆発圧力緩和効果が高い結果となった 3 mm ガラスビーズと活性アルミナボールを粒子充填区間に充填し、30 vol%水素-空気混合気の初期圧力を変化させながら、消炎性能を調べた。一般に、可燃性混合気圧力が高いほど燃焼波は消炎しにくくなり、従って、消炎可能となる混合気圧力が高いほど設置した粒子充填区間の消炎性能は高いことになる。実験結果によれば、3 mm のガラスビーズは 43 kPa 以上、活性アルミナボールは 52 kPa 以上の混合気初期圧で消炎不可となった。この結果は、爆轟波に対しても、活性アルミナボールは高い消炎性能を有することを示唆するものである。なお、配管装置をガラス製に変え、低圧条件における燃焼波を対象として、ポーラス構造体内部の熱の移動や粒子群の加熱状況を赤外線カメラにより可視化することを試みたが、S/N 比の良好な映像を取得できておらず、引き続き検討を行っている。

<参考文献>

[1] H. Saitoh, et al., “Development of a mitigation system against hydrogen-air deflagrations in nuclear power plants”, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 60 (2019) 9-16.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 齋藤寛泰, 大塚輝人, 吉川典彦
2. 発表標題 ポアラス構造部材壁面の設置による高気密空間内水素ガス爆発圧力の抑制
3. 学会等名 第60回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 一條大介, 金澤孝希, 大塚輝人, 齋藤寛泰
2. 発表標題 光学センサーを用いた細孔金網による爆轟波減衰の観測
3. 学会等名 第59回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

本研究の成果の一部について、第59回燃焼シンポジウム（日本燃焼学会主催）にて研究発表を実施し、ベストプレゼンテーション賞を受賞した。

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	Shepherd J. E. (Shepherd J. E.)		米国Caltechの教授であり、研究代表者の留学時のsupervisorである。本研究で得られた実験結果等についての助言を得た。

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------