

課題番号： 1-1907

研究課題名： 排熱で運用可能な高効率連続再生式
PM2.5除去装置の開発

体系的番号： JPMEERF20191007

重点課題：

主： ③環境問題の解決に資する新たな技術シーズ
の発掘・活用

副： ⑮大気・水・土壌等の環境管理・改善のための
対策技術の高度化及び評価・解明に関する研究

研究代表機関名： 九州大学

研究代表者名： 山本 剛

研究実施期間： 令和元年度一令和3年度

研究分担機関名： 愛知電機株式会社

1.はじめに

PM (Particulate Matter ; 粒子状物質)

- ・ 自然起源・・・黄砂, 火山噴煙, 海塩粒子 etc.
- ・ 人為起源・・・工場, 自動車, 火力発電所 etc.

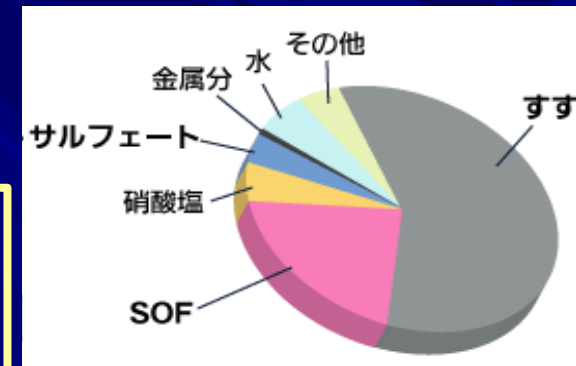


Fig. PMの構成の一例

燃焼技術の向上



PMの微小化

・ PM_{2.5}と言われる微小径のPMが増加

微小のPMは長期間大気に留まる
気管支や肺の奥深くに入り込む

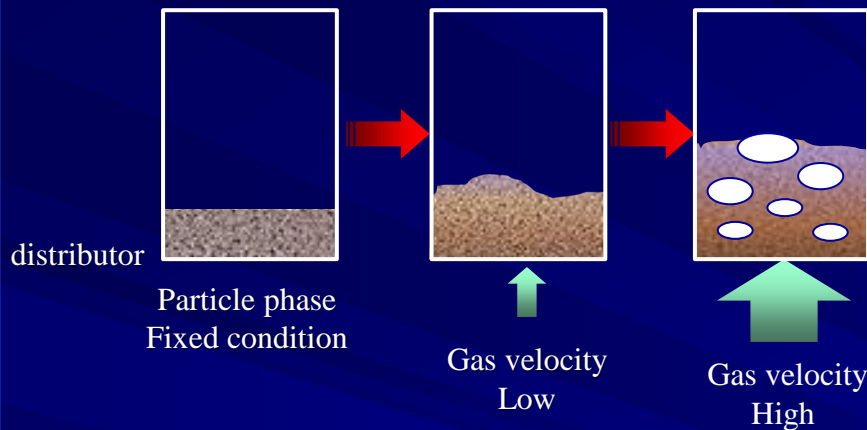


呼吸器系疾患, 循環器系疾患,
肺癌の原因物質とされている

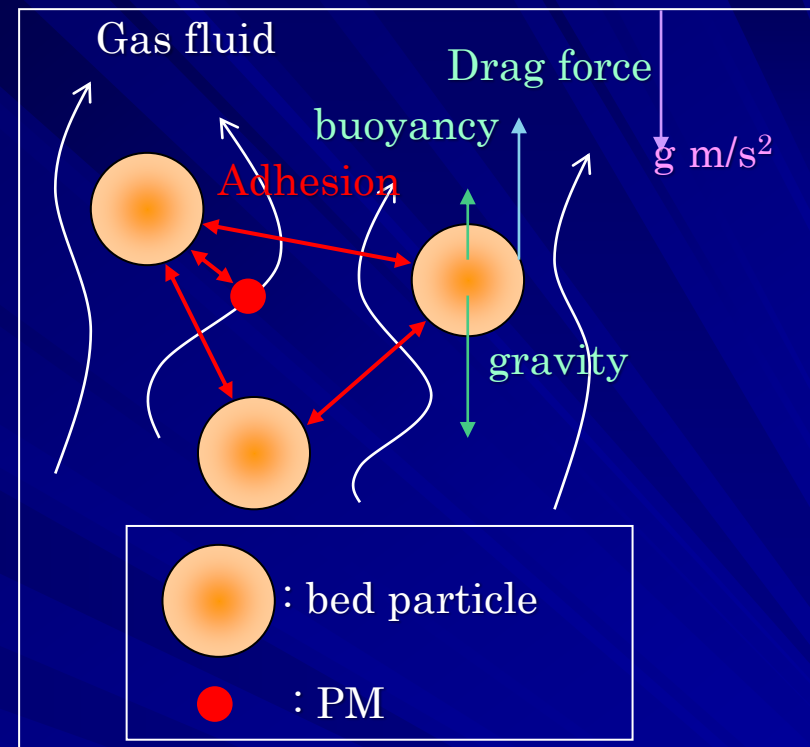


現在, PMの除去には, バグフィルタ, 電気集塵機, DPFが用いられているが,
PM_{2.5}の高効率捕集が難しいため, 新たな装置の開発が必要である。

粒子層の下部から上向きに流体を噴出させることにより，固体粒子を流体中に懸濁浮遊させた状態



固相(粒子層)は重力，浮力，流動抵抗および粒子間付着力に支配され，流体のような挙動を示す



本研究グループは，粒子間付着力を利用して $PM_{2.5}$ を高効率捕集するため，緩やかな流動層をPM除去装置に適用

燃焼器から排出されるPMは多くの未燃分を含む．流動層は低温燃焼機関．
→ 連続再生式として運用可能

2.研究開発目的

これまで、本法がPM_{2.5}に対して有効な捕集手段となること、400°Cで連続再生の運用が可能であることを示してきた。

本研究では、流動層の低温燃焼機関としての特性、水蒸気の低温燃焼促進効果、ミネラル分の触媒効果を利用してPMの燃焼速度を向上させ、排熱で運用可能な高効率連続再生式PM_{2.5}除去装置を開発する。

サブテーマ(1) 九州大学(山本, 岸田)

ミネラル分と水蒸気によるPM燃焼反応の促進と再生温度の低温化に関する研究

サブテーマ(2) 愛知電機(田中, 山田)

フィジビリティスタディ(FS)

3.研究目標

全体目標

本研究では、流動層の低温燃焼機関としての特性、ミネラル分および水蒸気の低温燃焼促進効果を利用してPMの燃焼速度を向上させ、排熱で運用可能な高効率連続再生式PM_{2.5}除去装置を開発する。また、ディーゼル等を用いて実証試験を実施し、本法の性能評価を行う。

サブテーマ(1)

- 水蒸気の酸化特性により、PMの燃焼速度を向上させる。
- ミネラル分の触媒効果を用いて、PMの燃焼を促進させ再生温度の低温化を図る。
- ミネラル分と水蒸気を同時に考慮し、PMの燃焼反応を相乗的に向上させ、排熱で運用可能な高効率連続再生式PM_{2.5}除去装置を開発する。
- スケールアップデータを取得する。
- ディーゼルを用いて実証試験を実施し、本法の性能評価を行う。

サブテーマ(2)

- 要素技術の開発を進め、経済および環境評価を行う。
- 本装置の最適化およびスケールアップデータの取得を行う。
- 工業レベルでの評価を行うことで従来技術に対する明確なメリットを示す。

4.研究開発内容

全体

本研究では、流動層の低温燃焼機関としての特性、ミネラル分および水蒸気の低温燃焼促進効果を利用してPMの燃焼速度を向上させ、排熱で運用可能な高効率連続再生式PM_{2.5}除去装置を開発する。

サブテーマ(1)

- ・PMの捕集・燃焼挙動における水蒸気およびミネラル分の影響を調べる。
- ・水蒸気およびミネラル分の効果により、連続再生温度をどの程度下げることができるのかを明らかにする。
- ・ミネラル分と水分の相乗効果により本装置のさらなる再生温度の低下を目指す。
- ・実用化を踏まえて実験装置をスケールアップし、そのデータを取得する。
- ・ディーゼルを用いて実証試験を実施し、本法の性能評価を行う。

サブテーマ(2)

- ・最適な操作・装置条件を選択して連続再生装置の各設計値を決定する。
- ・詳細図を計画するとともに、性能の確立、経済面における優位性等を明確にする。
- ・全体プラントへの配置想定を織り込み、性能計算、各要素設計計算を行い、装置の詳細図を起こす。

5-1.成果の概要

サブテーマ(1)

ミネラル分と水蒸気によるPM
燃焼反応の促進と再生温度の
低温化に関する研究

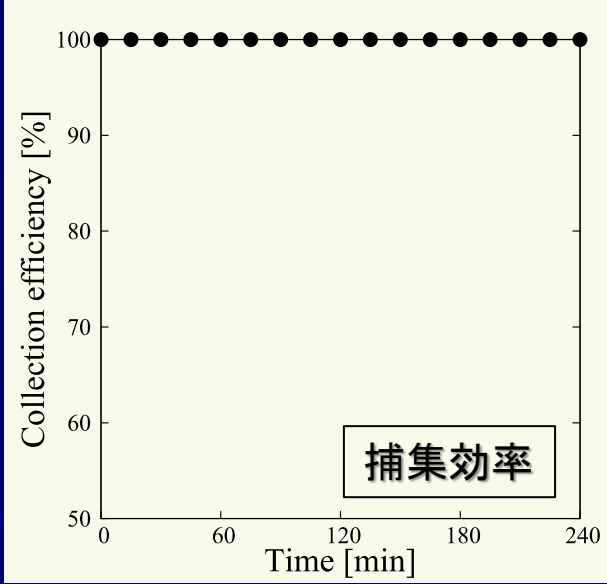
カリウム担持 & 水蒸気添加 - 最適条件 (at 330°C)

(0.4 m/s, <20 μm, 30 mg/m³, Water Vapor 10 vol.%, with K)

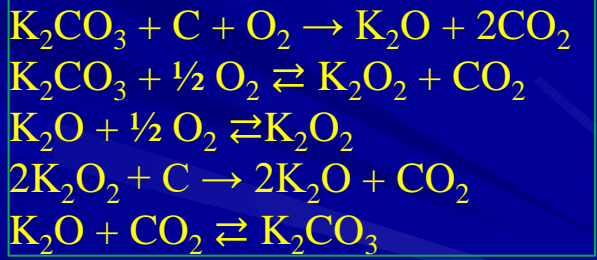
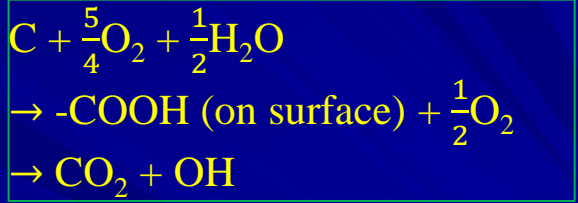
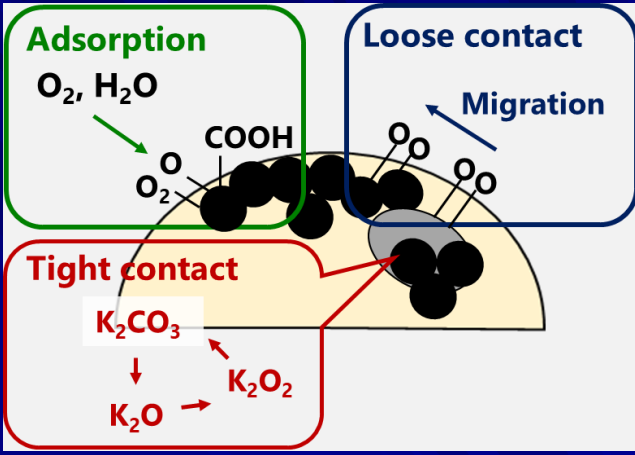
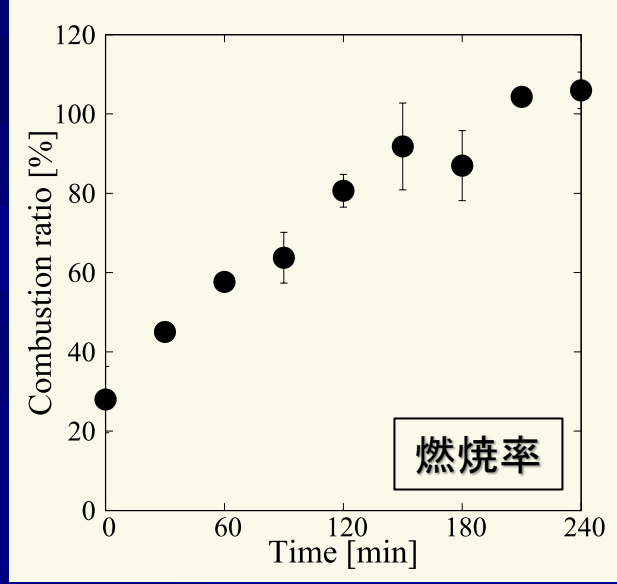
燃焼率の定義:

$$\text{Combustion Ratio} = \frac{\text{Outlet CO} + \text{CO}_2}{\text{Inlet PM} \times \text{Coll. Eff.}}$$

PM捕集効率: 100%



付着速度 ≤ 燃焼速度



210分以降は『PM燃焼速度 > PM付着速度』⇒ 定常状態

既存のPM除去装置では、PMの燃焼に600 °Cの熱が必要. 本装置ではカリウム担持 & 水蒸気添加により, “330°C”で連続再生が可能

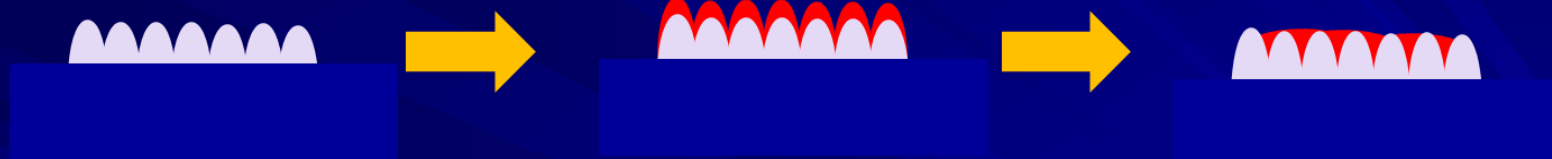
カリウム担持量増加－最適条件(at 300°C)

(0.15 m/s, <math><20 \mu\text{m}</math>, 30 mg/m³, Water Vapor 10 vol.%, with K)

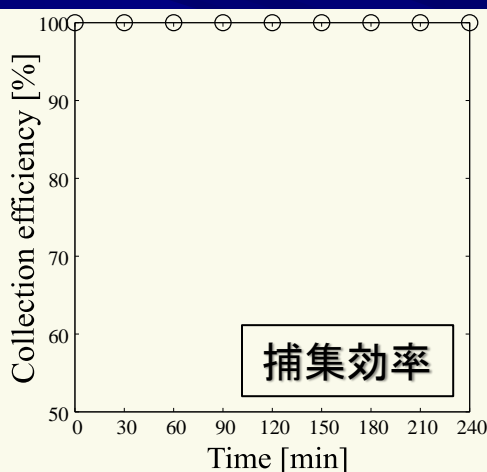
(a) アルミナイトボール(既往の研究)



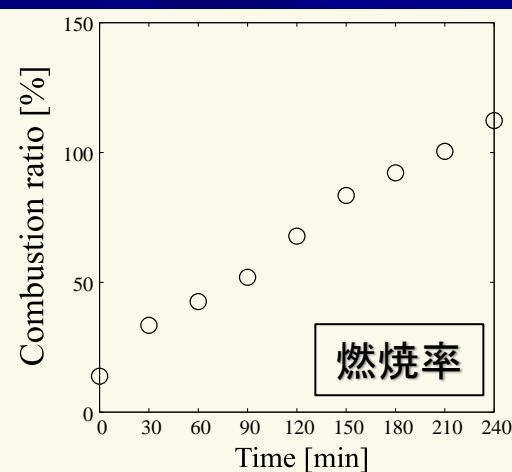
(b) ナイガイセラビーズ(本研究)



PM捕集効率:100%



付着速度 ≤ 燃烧速度

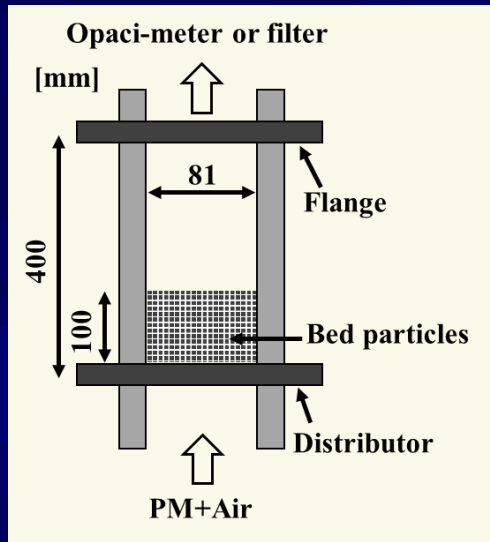


210分以降は『PM燃烧速度 > PM付着速度』⇒定常状態

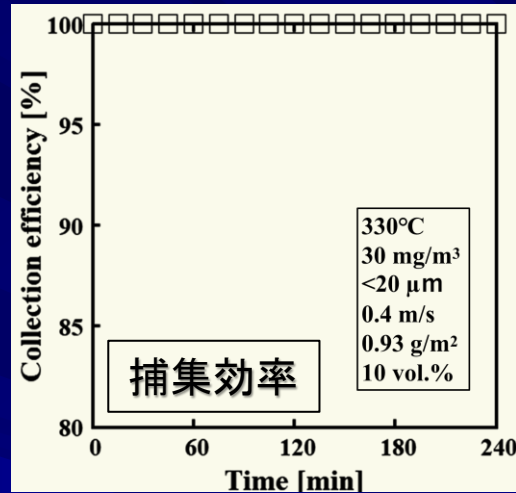
カリウム担持量増加により, “300°C”で連続再生が可能

スケールアップデータの取得

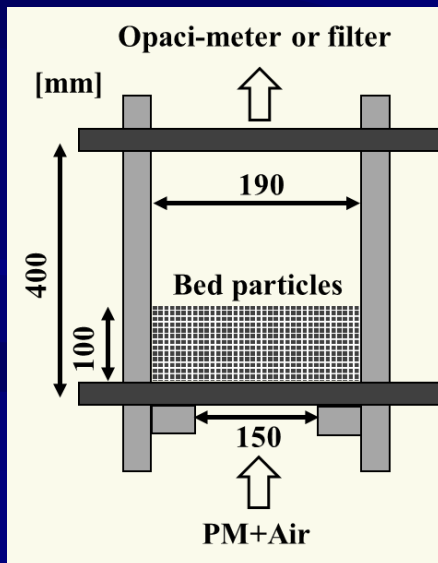
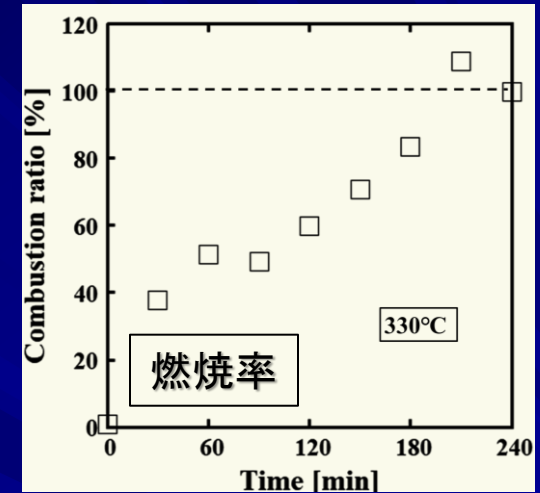
(0.4 m/s, $<20 \mu\text{m}$, 30 mg/m^3 , Water Vapor 10 vol.%, with K)



PM捕集効率: 100%



付着速度 \leq 燃烧速度



210分以降は
『PM燃烧速度 $>$ PM付着速度』
⇒ 定常状態

スケールアップ前と同様に
“330°C”で連続再生が可能

ディーゼルを用いた実証試験

(0.4 m/s, with K)



Fig. L70N, ヤンマー製

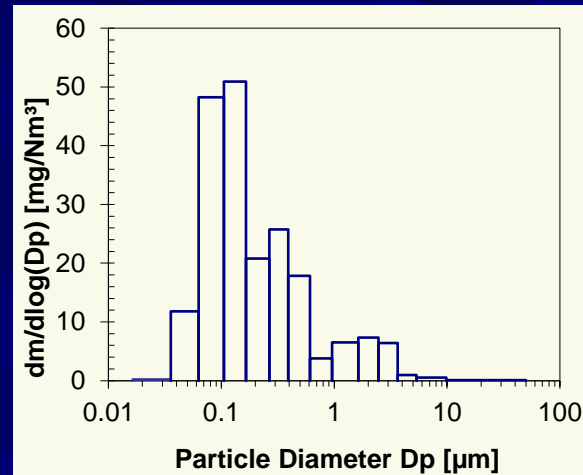


Fig. PM粒径頻度分布

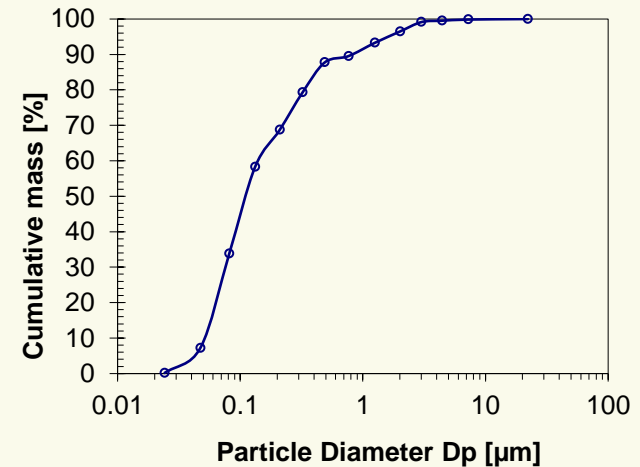
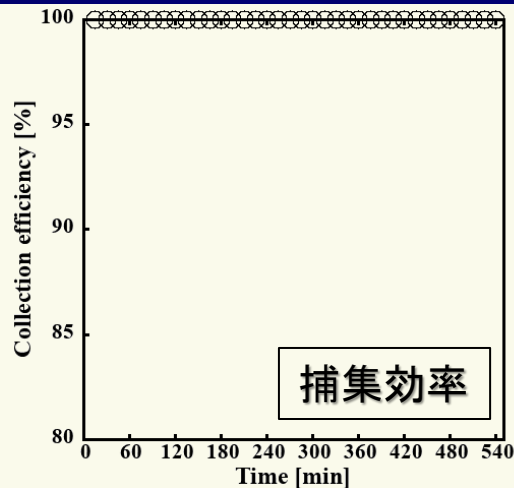


Fig. PM粒径積算分布

PM捕集効率: 100%



・用いたディーゼル: ヤンマー製 L70N

・回転数は 2000rpm

・PMは 0.1 μm 前後のものが多い

・PM濃度は 約 40 mg/m³

・540分間連続的に排ガスを供給したが、
捕集効率は100%を維持

⇒ 本装置の優れたPM捕集性能が示された。

サブテーマ(2)

フィジビリティスタディ
(FS)

装置設計 (400°C, 10kPa)

設計の要点

- ・2.8tクレーンおよび10tトラックで運搬可能.
- ・ガスケットは耐熱温度が高いドイツ製ノバフィット.
- ・材質はステンレス. (ボルトは強度区分8.8の鉄製)
- ・上部パネルはほぼ全面開放かつ軽量.
- ・吊耳は湾曲する方向が相殺する位置に設置.

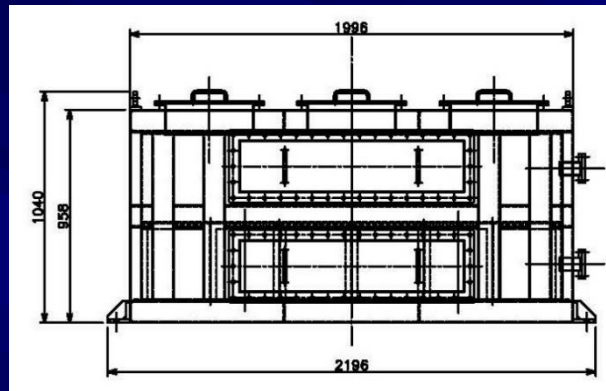


Fig.流動層集塵機の正面(短辺)

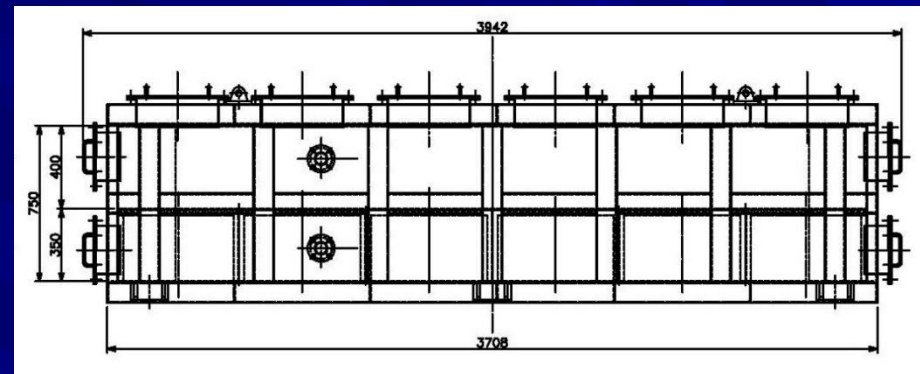


Fig.流動層集塵機の側面図(長辺)

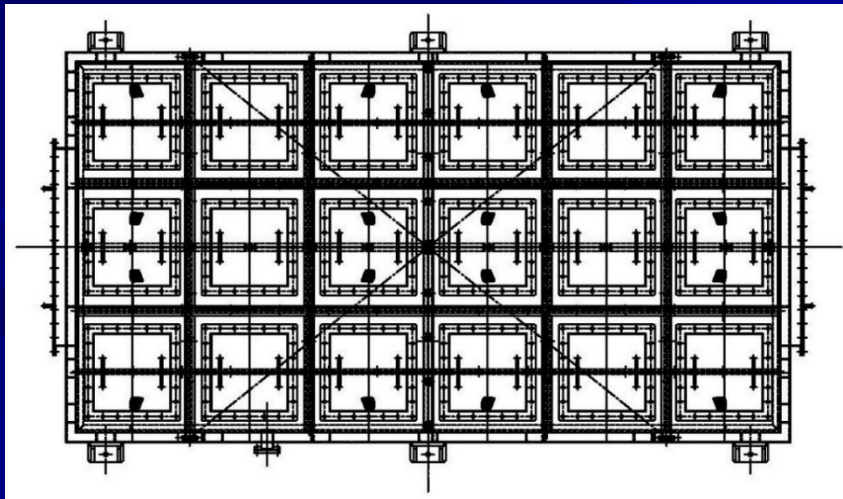


Fig.流動層集塵機の平面図(上面)

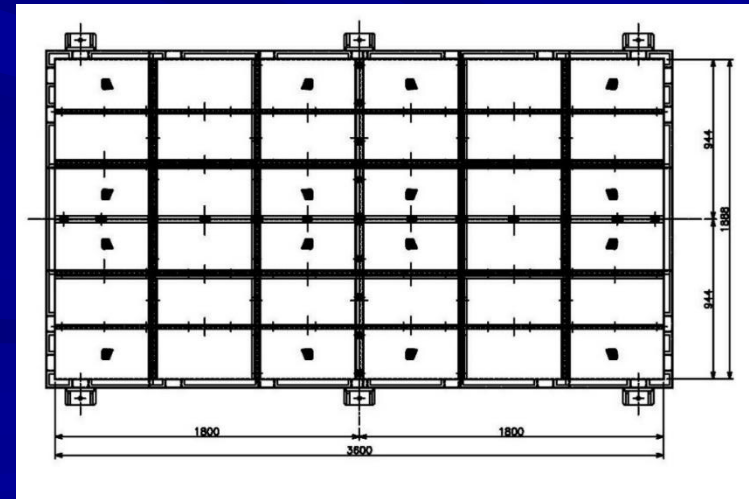


Fig.流動層集塵機の平面図(分散板面)

装置設計

コストダウンの指針

- 前項の流動層集塵機の価格は 11,824千円

- 圧力損失を10kPaとして計算し板厚を4mmとしたが、圧力損失を5kPaとすると板厚を3mmとできる。

⇒ 864千円のコストダウン

- 温度を300°Cにできれば、材質をSUSからSSに変更可能。また分散板は溶接取り付けとしたが、ビス止めにするコストダウン可能。

⇒ 合わせて 4,119千円のコストダウン

- 分散板について、開口率を保ったまま、穴径を0.3mmから0.6mmにすれば、穴の数は4分の1になり、コストダウン可能。

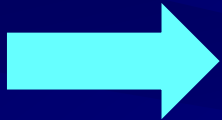
⇒ 232千円のコストダウン

5-2.環境政策等への貢献

行政等が活用することが見込まれる成果

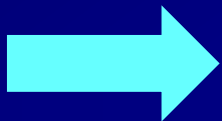
流動層の低温燃焼機関としての特性, ミネラル分の触媒効果, 水蒸気の低温燃焼促進効果を利用してPMの燃焼速度を向上させ, 排熱で運用可能な高効率連続再生式PM_{2.5}除去装置を開発

既存のシステム(バグフィルタ, DPF, 電気集塵機)ではPM_{2.5}の高効率捕集が難しい



本システムは粒子自身を持つファンデルワールス力等の付着を利用し, PM_{2.5}の高効率捕集が可能.

既存のシステム(DPF)ではPMの燃焼に600°C程度の熱が必要



本システムは, 排熱程度の300°CでPMの捕集と燃焼処理を同時に行う連続再生式の運用が可能.

5-3. 研究目標の達成状況

サブテーマ(1)

- 水蒸気の燃焼促進効果により、再生温度は380°Cまで低減.
- ミネラル分の触媒効果により、再生温度は350°Cまで低減.
- 水分とミネラル分の相乗効果により、再生温度は330°Cまで低減.
- 表面が粗くミネラル分をより多く担持できる流動媒体を用いることで、再生温度300°Cを達成.
- スケールアップデータの取得、ディーゼルを用いた実証試験を実施.

サブテーマ(2)

- $PM_{2.5}$ の100%捕集、連続再生温度300°Cを達成し、本システムの優位性を示す.
- 流動層は装置形状が簡単であるため、既存のシステムより低コストと考えられる。(既存システムのコストは調べられなかった.)
- 装置の運搬や設置を考慮した詳細な設計図を製作し、コスト削減の道筋を示す.

全体

本研究の目標はある程度達成したと考えている。しかし、既存のシステムのイニシャルコスト、ランニングコストを調べられず、経済面の詳細な比較ができなかった。



目標にはやや及ばないが、一定の成果をあげた。

6. 研究成果の発表状況

査読付き論文

- 1) K. YOKOO, H. MATSUNE, M. KISHIDA, J. TATEBAYAH, T. YAMAMOTO:
Powder Technology, 355, 657-666 (2019) (IF:5.134)
- 2) K. YOKOO, H. MATSUNE, M. KISHIDA, J. TATEBAYAH, T. YAMAMOTO:
Advanced Powder Technology, 31, 718-729 (2020) (IF:4.833)
- 3) K. YOKOO, A. KUSU, M. KISHIDA, J. TATEBAYAH, T. YAMAMOTO:
Chemical Engineering Journal, 388, 124247 (2020) (IF:13.273)
- 4) K. YOKOO, M. KISHIDA, T. YAMAMOTO:
Mechanical Engineering Letters, 6, 20-00444 (2021) (IF:-)
- 5) K. YOKOO, M. KISHIDA, T. YAMAMOTO:
Powder Technology, 380, 506-517 (2021) (IF:5.134)
- 6) K. YOKOO, A. WAKIZAKA, M. KISHIDA, T. YAMAMOTO:
Advanced Powder Technology, 32, 151-165 (2021) (IF:4.833)
- 7) K. YOKOO, T. YAMAZAKI, M. KISHIDA, T. YAMAMOTO:
Advanced Powder Technology, 33, 103508 (2022) (IF:4.833)
- 8) K. YOKOO, M. KISHIDA, T. YAMAMOTO:
Powder Technology, 402, 117336 (2022) (IF:5.134)