

JCMA 報告

平成 25 年度
「建設施工と建設機械シンポジウム」開催報告 (その 4)
優秀論文賞・論文賞 受賞論文紹介

論文賞 (2)

アスファルトプラントにおける 固形燃料燃焼システムの開発

日工株式会社	榊	真司
日工株式会社	吉野	健治
株式会社 NIPPO	相田	尚



写真—1 RPF

本装置で使用した RPF を写真—1 に示す。RPF は原料として廃プラスチックを使用しているため、発熱量が木材チップより 2 倍程度高く、固形で密度が高いため、ハンドリングも容易である。また、品質が安定し、不純物混入が少ないため、塩素ガス発生による腐食や、ダイオキシン発生がほとんどない。

1. はじめに

加熱アスファルト混合物 (以下、合材) を製造するアスファルトプラント (以下、AP) は、様々な種類の骨材を乾燥・加熱するバーナを複数使用しており、多くの化石燃料を消費し、且つ多くの CO₂ を排出している。近年、地球温暖化問題等の環境問題への関心の高まりから、低炭素社会ならびに循環型社会の構築に寄与する様々な省エネ技術が提案されている。しかし、運転効率が悪い等の技術的な課題や採算性が悪いといった経済的な課題が多いのも現状である。

本研究では、低炭素社会ならびに循環型社会への貢献を目指すため、化石燃料の代替燃料として木材チップや再生資源燃料等の固形燃料を使用した熱風発生装置を AP に増設し、その熱を AP に直接利用するシステムを開発した。本文では、開発したシステムの概要、開発過程での課題と対策、および実工場導入後の検証結果について報告する。

2. 固形燃料について

(1) 再生資源燃料

化石燃料の高騰や地球温暖化などにより、環境問題への意識が高まる中、循環型社会の構築として再生資源燃料の使用が進んでいる。その中で、主に産業系廃棄物のうち、マテリアルリサイクルが困難な古紙および廃プラスチック類を主原料とする固形燃料 RPF (Refuse Paper & Plastic Fuel の略称)²⁾ に着目した。

(2) 木材チップ

木材チップを写真—2 に示す。本装置で使用する木材チップは、建築廃材や製材残材をチップ化した建廃チップを使用した。木材チップは発熱量が小さく、燃料として利用するために含水比管理や、軽比重のため運搬効率が悪い等課題も多い。しかし、カーボンニュートラルの性質を持っているため、CO₂ 排出量削減対策として期待されており、環境負荷低減に有効な燃料である。



写真—2 木材チップ

(3) 固形燃料の特性比較

表—1 に各固形燃料の特性を示す。RPF と木材チップは比重、低位発熱量、理論空気量が大きく異なっており、特性が異なる燃料である。そのため、固形燃料の種類によって燃焼空気量等の諸条件を変更する必要がある。

表一 各固形燃料の特性

項目		RPF	木材チップ
密度	kg/m ³	400	200
低位発熱量	MJ/kg	25.1	12.6
燃焼速度		速い	遅い
理論空気量 A ₀	m ³ (N)/kg	6.44	4.23

表二 各固形燃料の主要 3 元素

		RPF	木材チップ
C	%	57.68	46.17
H	%	7.90	5.70
O	%	23.90	41.93
S	%	0.11	0.00

理論空気量 A₀ は、表二の元素組成をもとに、式(1)より算出した。RPF の元素組成は、実際に使用している RPF をサンプリングし分析した値である。木材チップは、一般的な値を利用した。

$$A_0 = \frac{1}{0.21} \left\{ \frac{22.4}{12} C + \frac{22.4}{4} \left(H - \frac{O}{8} \right) + \frac{22.4}{32} S \right\} \dots (1)$$

$$= 8.89C + 26.7 \left(h - \frac{O}{8} \right) + 3.3S \quad 1)$$

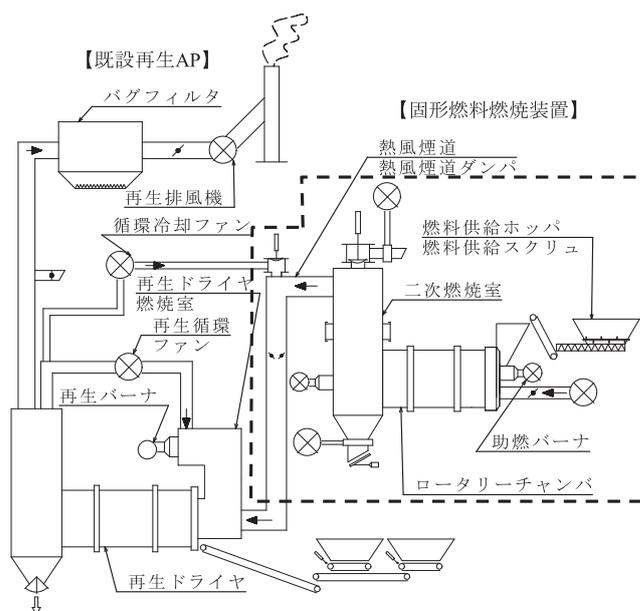
3. 開発コンセプト

AP では、骨材の乾燥・加熱が必要とされる熱量は大きく変動するため、細かな温度管理が要求され、熱量調整を行わなければならない。ただ、固形燃料は液体である化石燃料に比べ燃焼速度が遅く、熱量調整の応答速度も必然的に遅くなる。このため、AP の燃料全てを固形燃料に置き換えることは困難と考え、化石燃料を燃料としたバーナの補助熱量として併用することとした。以下に、開発コンセプト・目標を示す。

- ① 特性が異なる 2 種類の固形燃料を安定的に燃焼する自動制御システムを構築する
- ② AP と固形燃料燃焼装置を安全に連結させるための自動制御システムを構築する。
- ③ 熱風は AP のドライヤに利用し、必要熱量の 50% を目標とする。

4. 固形燃料燃焼システムの概要

開発したシステムのフローを図一に、実工場へ導入した固形燃料熱風発生装置を写真一に、主要



図一 システムフロー図



写真一 固形燃料燃焼システム全景

表一 固形燃料燃焼装置主要諸元

項目	仕様・能力
燃料供給方式	二軸スクリュウフィーダ
ロータリーチャンバ	内部耐火キャストブル 150 mm 施工
最大燃焼能力	2.09 MW
再生バーナ	2 流体バーナ (ターンダウン比 1 : 10)

諸元を表一にそれぞれ示す。既存の再生 AP へ固形燃料燃焼装置を増設し、再生ドライヤ燃焼室へ熱風を送り込む設備とした。再生 AP は、再生骨材と呼ばれる、道路工事などで発生したアスファルト発生材を破碎、選別した骨材の乾燥・加熱を行う装置である。以下、システムフローについて説明する。燃焼炉は、ロータリーキルン方式を採用している。この方式は連続投入が可能で、流動性のある材料には最適であり、効率よくガス化させ、燃焼することが可能となる。しかし、固形燃料をガス化させた後に発生する多量の炭化物は

燃え残り、無理に燃焼を行うと、クリンカを発生させるという特性をもつ。

固形燃料は、燃料供給ホッパから燃料供給スクリュで定量供給され、ベルコンでロータリーチャンバに投入される。ロータリーチャンバは、内面に150mm厚の耐火キャストブルを施工しており、これが高温に蓄熱し、尚且つロータリーチャンバの回転により、効率よく固形燃料を燃焼する。助燃バーナは、固形燃料が安定的に燃焼を行うための種火的な役割を担うと共に、運転初期の予熱を行う。固形燃料の燃焼により発生した可燃ガスは二次燃焼室にて完全に燃焼される。二次燃焼室は、発生した可燃ガスを完全に燃焼するのに必要な温度と時間を確保している。二次燃焼室と再生ドライヤ燃焼室は熱風煙道で接続されており、熱風煙道ダンパを開けることで、APと固形燃料燃焼装置が連結され、熱風を導入する。導入された熱風は、再生ドライヤにて再生骨材の乾燥・加熱に利用される。再生ドライヤから発生した排ガスは、バグフィルタで集塵され、煙突で排気される。

5. 開発における課題と対策

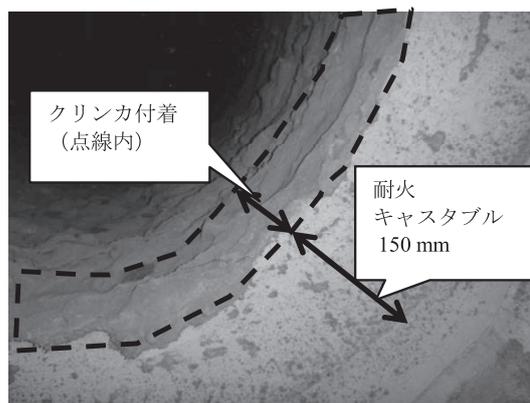
(1) 各固形燃料の燃焼最適化

使用する固形燃料によって比重、発熱量、燃焼速度、理論空気量が異なるため、燃焼空気量や、ロータリーチャンバ内の滞留時間を調整する必要がある。実際に燃焼を行うと、表一4のような燃焼特性が得られた。以下、内容について説明を行う。

まずRPFの場合では、発熱量が高く高温で燃焼するという特性を持っているため、滞留時間を長くすると高温域で滞留した灰が溶融し、クリンカが発生した。写真一4にクリンカ付着状況を示す。このクリンカを全て除去した後、ロータリーチャンバの回転数を上げ、尚且つ高温域を抑制するために空気比 $m = \text{約} 2.0$ 、つまりガス中の酸素濃度 O_2 が $10 \sim 11\%$ になるように燃焼空気を導入することで、クリンカ生成は抑制された。空気比 m は、式 (2) より算出した。上記より、RPFは非常に燃焼しやすく、高温になるため、温度を抑制する操作が必要となる。空気比 $m = \text{約} 2.0$ で、

表一4 各固形燃料の燃焼特性

	RPF	木材チップ
ロータリーチャンバ内滞留時間	短 (約 20分)	長 (約 45分)
燃焼空気量	多	少
空気比 m	約 2.0	1.7 ~ 1.8



写真一4 クリンカ付着の様子

二次燃焼室温度が 650°C 以上で燃焼が安定した状態でCO濃度は $50 \sim 260 \text{ ppm}$ 程度であった。

木材チップは、RPFに比較して発熱量が小さいため、高温域が発生しにくく、クリンカはほとんど発生しない。しかし、高温域が発生しにくいいため、ガス化後の炭化物の燃焼が促進されず、大量の炭化物が灰化されないまま排出された。そのため、滞留時間を可能な限り長くすることで、灰化率を向上させた。しかし、ロータリーチャンバ内で完全に灰化させることは困難であった。ガス中の酸素濃度 O_2 は 9% 程度、空気比 $m = 1.7 \sim 1.8$ で燃焼状態がよく、CO濃度は $120 \sim 250 \text{ ppm}$ であった。

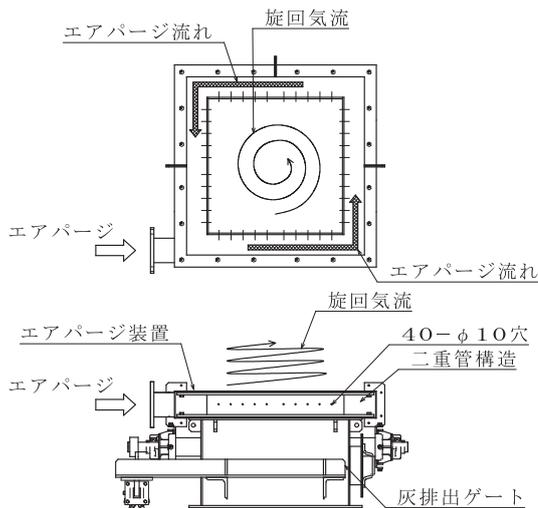
$$m = \frac{20.9}{20.9 - O_2} \dots (2)$$

(2) 灰化率の向上

灰化率は、排出された灰の容積を供給量の容積で割った値とした。ロータリーキルン方式の燃焼炉は、ガス化燃焼が終了した後の炭化物に効率よく空気を供給することが困難なため、炭化物の燃焼が促進されず、多量の炭化物が燃え残る特性がある。RPFは、ロータリーチャンバ内で急速に燃焼し、投入部付近で高温になり炭化物も灰化するため、灰の量は少量であった。木材チップの場合は燃焼速度が遅く、ロータリーチャンバ全長のうち半分を過ぎたところでガス化燃焼が終了しているため、炭化物が滞留している箇所は高温になっておらず炭化物が灰化されずに排出されてしまう。木材チップ供給量 300 kg/h で3時間運転すると、容量 0.9 m^3 の排出ホッパを満たしてしまうため、3時間以上の運転が困難な状態であった。写真一5に、供給量 300 kg/h で3時間運転した後の炭化物排出状況を示す。この炭化物にはC分が残留しており、空気を送り込み燃焼させると発熱させることが可能とな

る。すなわち、灰化されないまま炭化物を排出することは、有効な熱を効率よく利用できないこととなる。そこで、**図一2**のように四方から空気を送り込み、炭化物の燃焼を試みた。しかし、局所的に炭化物の温度が1000～1200℃になり、灰が溶融してクリンカが発生し排出口が閉塞された。クリンカとは、温度が1000℃を超えたとき、灰の粒子が溶けて炉壁に固着する現象のことをいう。つまり、炭化物が溜まっている場所に空気を送り込むだけでは、高温になりクリンカが発生するため、何らかの対応策が必要となる。

クリンカが生成する原因としては、排出ホッパに空気を送り込んで炭化物を燃焼させる際に灰の挙動が無く高温状態になりやすいためと推測される。そこで、排出ゲートの上部にエアパージ装置（**図一3**）を取り付け、炭化物燃焼用の空気を送り込む際に排出ホッパ内で炭化物を攪拌することが可能となる旋回気流を与え、燃焼させる方式を採用した。この方式により、同じ運転内容で木材チップを燃焼させても、炭化物は大幅に減容化され、クリンカによる閉塞も無くなった。**写真一6**に減容化した炭化物の状態を示す。**写真一5**



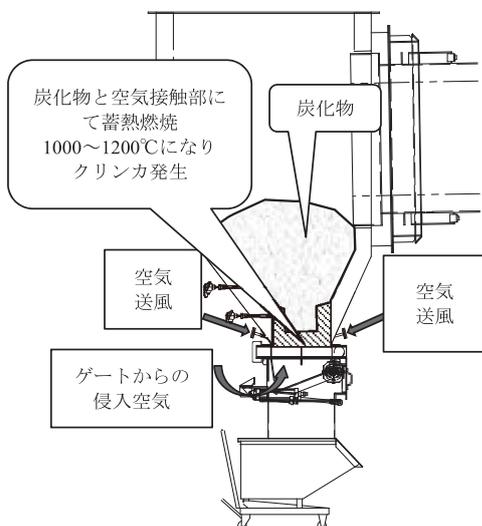
図一3 排出ゲートエアパージ構造



写真一6 エアパージ装置取付後の炭化物排出状況



写真一5 木材チップ炭化物排出状況



図一2 排出部でのクリンカ発生状況

表一5 エアパージ風圧と灰化率

エアパージ風圧 kPa	灰化率 %	灰化傾向
0.01	5.0	残留炭化物が多い
0.49	2.2	残留炭化物が少し多い
1.30	1.8	灰化状態良好
1.80	0.5	灰化状態良好
2.25	-	灰化率計測不能

と**写真一6**を比較しても、その効果は大きい。減容化された灰には□50～100mm程度のクリンカは存在していたが、排出口で詰まることはなかった。

エアパージの風圧と灰化率の関係を**表一5**に示す。エアパージ風圧を2.25kPaまで高めると、ほとんどの炭化物が火の粉として飛び、再生ドライヤ内に入り、再生骨材に引火する危険性が高かったため、途中で試験を中止したため、計測不能であった。エアパージ風圧を1.30kPa以上にすると、灰化率は2%以下になり、良好であった。

(3) AP と固形燃料燃焼装置の併用化

既設再生 AP の再生バーナからは 1800℃ 程度の熱風が発生しており、排ガスを循環し燃焼室で混合することで、700℃ 程度の熱風になり、再生ドライヤへ供給される。再生ドライヤの排ガス温度は 160～180℃、加熱後の材料温度は 150～160℃ で運用している。排ガス温度の温度調整は再生バーナの燃焼量を増減させることで行っている。再生骨材にはアスファルト分が付着しているため、過度に温度を上昇させると火災の危険性が高くなる。そのため、熱風温度、排ガス温度、材料温度の管理は重要な点になる。

本システムでは、外部の装置である固形燃料燃焼装置より再生 AP へ熱量を供給することになり、固形燃料燃焼装置にて異常な燃焼や温度異常が発生した場合には、即座に再生 AP への熱風供給を停止する必要がある。固形燃料燃焼装置から供給する熱風温度について、排ガス温度以下の温度で熱風を供給した場合、熱風を排ガス温度まで昇温させるための熱量が必要となるため、再生バーナの燃焼量が上昇することとなり、省エネにならない。そのため、熱風供給の条件として、熱風温度が排ガス温度以上であることが求められる。また、総合的な全体熱量の調整は再生バーナ燃焼量で調整しているため、再生バーナが自動制御されていない場合、燃焼量が低下されずに過剰熱量を供給する可能性があり、火災の危険性が高くなる。また、必要熱量の 50% 以上の熱量を供給した場合、再生バーナの制御範囲を逸脱する可能性があり、制御性が著しく低下する。

固形燃料供給量を急激に変化させた場合、燃焼空気量も急激に変化させることになるため、熱風量が大幅に変化する。この変化により、再生バーナの燃焼量が大幅に変化し、燃焼量と排ガス温度のハンチングの原因となる。上記で述べたことから、以下の点に留意して制御システムの構築を目指した。

- ①既設再生 AP、固形燃料燃焼装置にて温度異常が発生した場合には、即座に熱風供給を停止する。
- ②固形燃料燃焼装置のガス酸素濃度が著しく低下した場合には、即座に熱風供給を停止し、固形燃料供給を停止する。(不完全燃焼の危険性があるため)
- ③熱風供給時、再生ドライヤへ導入する熱風温度が 650℃ 以下、750℃ 以上にならないよう再生 AP の再生循環ファン風量を自動調整する。
- ④熱風の供給開始は自動で行わず、プラントオペレータによる手動操作で開始する。
- ⑤再生 AP の運転が終了した際は、自動で熱風供給を停止する。

- ⑥再生バーナが自動制御になっていない場合は、熱風供給を行えないようにする。

(4) 固形燃料燃焼熱量調整制御

本システムの供給装置は二軸式のスクリーフィーダを使用している。二軸式のスクリーフィーダは、木材チップのような繊維質の材料でも詰まりが発生しにくく、安定して供給することが可能である。固形燃料供給量の設定は、事前に固形燃料毎にキャリブレーションを行い、そのデータに基づいて決定した。しかし、固形燃料の比重が大きくなると、質量基準の供給量が増加することになるため、単位質量あたりの発熱量を一定とすると、結果的には固形燃料燃焼により発生する熱量が増加することになり、空気不足による不完全燃焼が発生する可能性がある。そのため、二次燃焼室に設置したジルコニア式酸素濃度計で計測している燃焼ガスの酸素濃度が著しく低下する、もしくは二次燃焼室の急激な温度上昇が発生した場合には空気不足が発生しているとみなし、固形燃料供給量を自動で減少させた。この操作により、必要燃焼空気量が抑制でき、空気不足を解消することが可能となる。このように、酸素濃度と温度で制御することで、固形燃料の発熱量や比重にバラツキが生じても安定して燃焼させることが可能となる。

(5) 固形燃料燃焼装置熱風温度制御

再生ドライヤへ導入する熱風温度は 650～750℃ の範囲になるのが好ましい。この温度域より低い温度になると、再生ドライヤ投入部で付着が発生し、逆に高いと再生骨材への引火の危険性が懸念される。RPF を燃焼させた場合、過剰空気が入らなければ二次燃焼室でのガス温度が 1000℃ 以上になる場合がある。この場合、再生バーナの熱風と固形燃料燃焼装置の熱風がしっかりと混合されずに再生ドライヤへ導入された場合、750℃ 以上の熱風が導入されることになり、再生骨材へ引火する危険性が上昇することとなる。

固形燃料燃焼装置の熱風温度を低下させるには空気を通常よりも過剰に入れる必要があるが、この場合排ガス量が大幅に増加するため、再生 AP のバグフィルタ、再生排風機の負担が増大する。そこで、再生 AP の排ガスを一部循環冷却ファンで吸気して熱風煙道に循環させることで、全体の排ガス量を増加させずに温度制御を行うことが可能となった。図 4 に温度制御時のグラフデータを示す。温度制御設定値は 740℃ で制御しており、温度制御が良好に行われている。

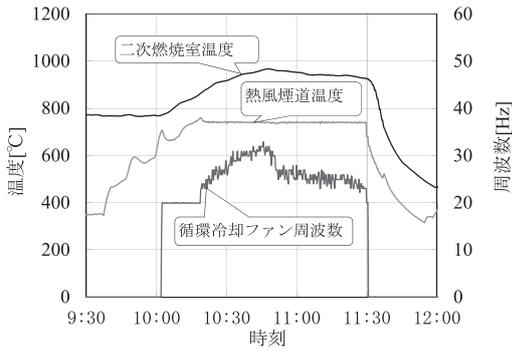


図-4 熱風温度制御結果

6. 固形燃料燃焼装置導入の効果

2012年8月宮城県内にある既設AP工場へ固形燃料燃焼装置を増設した。9月より固形燃料燃焼装置の燃焼試運転を開始し、10月に既設再生APとの連結試運転を行い、その後課題に対して改善・改良を行った。2013年4月より操業運転を開始した。図-5にRPF、図-6に木材チップを燃焼させた時の再生バーナA重油消費量推移グラフをそれぞれ示す。再生APと固形燃料燃焼装置を連結することで、再生バーナA重油消費量が低下する事が確認された。木材チップは、RPFに対して低位発熱量が低く、高密度が小さいため、熱風量が減少しA重油削減量は低下する。しかし、木材チップはカーボンニュートラルの特性を

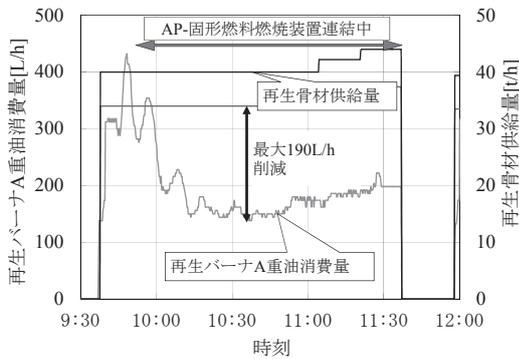


図-5 RPF 利用時運転データ

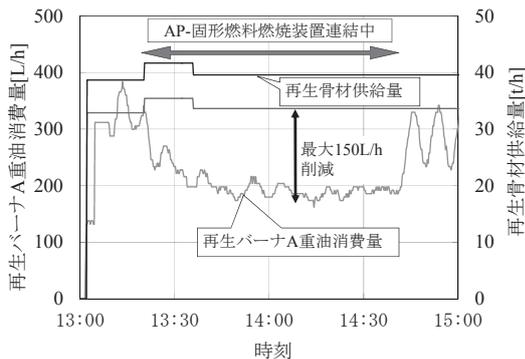


図-6 木材チップ利用時運転データ

表-6 固形燃料別の燃焼装置導入効果

			RPF	木材チップ
導入前	A 重油消費量	L/h	340	
導入後	A 重油消費量	L/h	150	190
	削減量	L/h	190	150
	削減率	%	56	44

持つため、A重油燃焼により発生されるCO₂を約35%削減することが可能となった。表-6に固形燃料別の燃焼装置導入効果を示す。A重油削減量は、実工場の当該燃焼装置導入前の平均A重油消費量と連結中のA重油消費量の差とした。A重油削減率は、固形燃焼装置連結中においてRPFで56%、木材チップで44%となる。再生AP全体での削減量は装置稼働における予熱ロス、また再生AP運転条件等により、前述より10%程度減少する。

7. おわりに

異なる2種類の固形燃料を燃焼させるため、複雑な制御システムが必要であったが、実工場のオペレータに負担を掛けることなく自動制御運転させることが可能となった。設備費用に関してだが、本研究は初めての試みであり、今後の耐久性等を調査している段階のため商業ベースとなる金額は未だ算出できていない。また、本研究では既存設備に増設したが、AP新設時に予め設計に取り入れ、納入する場合とでは設備費や現地工事費が大きく異なる。また、固形燃料燃焼装置へ投入する燃料熱量によっても本装置の能力が変わるため、設備費は異なる。本装置は、入荷可能な燃料の単価、熱量と設備費のバランスを考慮することが必要である。地球温暖化が危惧される中、燃焼形態の異なる2つの燃料を再生APで直接熱利用する当技術は、APの加熱乾燥技術に新たな選択肢を加えたものと考えられる。今後は、普及展開を図り、更に完成度を高めていく所存である。

JCMA

《参考文献》

- 1) 社団法人 産業環境管理協会：公害防止の技術と法規 大気編、五訂、pp.80～81、2001
- 2) 一般社団法人 日本RPF工業会：http://www.jrpf.gr.jp/、RPFとは、(2013/8/12)

お断り

このJCMA報告は、論文賞を受賞した原文とは一部異なる表現をしてあります。