特集≫≫ 道路

固形燃料併用型アスファルト合材製造技術の開発
アスファルト合材工場とSFCシステムの併用化

榊 真司・相田 尚

加熱アスファルト混合物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／加熱するバーナを使用しており，多くの化石燃料を消費し，且つ多くのCO_2を排出している設備である。本開発では，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（SFCシステム：Solid Fuel Combustion System）をAPに増設し，その熱を直接利用するシステムを開発し，低炭素社会ならびに循環型社会への貢献を目指した。実工場での検証結果では，使用する燃料により再生骨材の乾燥加熱に必要な燃料使用量を最大60％まで削減，CO_2は約14％削減できることを確認した。本稿では，開発したシステムの概要，および稼働後の検証結果について報告する。

キーワード：固形燃料，木材チップ，RPF，アスファルトプラント，低炭素社会，循環型社会

1. はじめに

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が，アスファルトプラント（以下，AP）では多品種少量生産の出荷形態と客先からの注文に応じて出荷を行うため，運転効率が悪い等の技術的課題や採算性が悪いといった経済的な問題が多く，普及展開されていないのが現状である。

本開発では，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，その熱を直接骨材乾燥加熱に使用し，化石燃料の使用量を削減する技術を開発した。本稿では，開発した技術の概要，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. 開発コンセプト

国内のAPでは多品種少量生産が多く，骨材の種類や温度設定を変更するため，骨材の乾燥加熱工程で必要とされる熱量は大きく変動せざるを得ない状況となっている。一方，固形燃料は液体燃料である化石燃料に比べ燃焼速度が遅いため，熱量調整の変動速度も必然的に遅くなる。このため，APで使用される燃料全てを固形燃料に置き換えることは困難と考え，化石燃料と固形燃料を併用することとした。また，近年においてはアスファルトや砕石のリサイクル率が向上しており，新規合材は1263万t，再生合材は3478万tと再生合材の割合が増加[1]しており，また再生ドライヤは比較的連続運転されており，熱量変動の少ない再生ドライヤへ固形燃料熱風発生装置（以下，SFCシステム）を増設することとした。以下に開発コンセプト・目標を示す。

①固形燃料の燃焼で発生した熱量を全て骨材の乾燥加熱に利用する。
②熱風は全て再生APの再生ドライヤに利用し，必要熱量の50％を目標とする。
③再生資源燃料に限らず，地域産燃料の利用も可能とする。
④特性が異なる複数の固形燃料を安定して燃焼する自動制御システムを構築する。

3. 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。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

写真―１　RPF

が高く，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。

(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。一方，バイオマス燃料である木材チップは，カーボンニュートラルの性質を持っているため，CO_2 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

また，2011 年 3 月に起きた東日本大震災で発生した震災ガレキは，一部の自治体で燃料チップ化されており，当システムにおいてバイオマス燃料として利用することを検討した。

(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―１　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

理論空気量 A_0 は，**表**―２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。

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

$$= 8.89C + 26.7\left(h - \frac{O}{8}\right) + 3.3S \quad [3] \qquad \cdots (1)$$

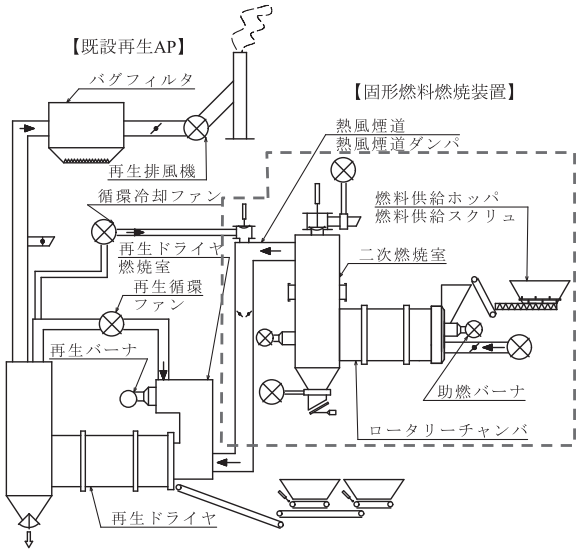
表―２　各固形燃料の主要３元素

		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

4. SFC システムの概要

本開発では，既存の再生 AP へ SFC システムを増設し，固形燃料燃焼で発生した熱風を再生ドライヤ燃焼室へ熱風を送り込む設備とした。ここで，再生 AP とは，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砕，選別した骨材の乾燥加熱を行う装置である。

固形燃料の燃焼炉はロータリーキルン炉を採用した。ロータリーキルン炉は，耐火物を内張りした円筒状の横型炉で，傾斜と回転により材料を移動させ，乾燥，着火，燃焼させる[4]。ロータリーキルン炉は連続投入が可能で，流動性のある材料や形状が不均一な材料にも対応することが可能である。しかし，固形燃料と空気との混合が不十分であるため，多量の炭化物が燃え残りやすく，強制的に燃焼を行うと，クリンカを発生させるという特性をもつ。開発したシステムのフローを**図**―１に示す。



図―1 システムフロー図

5. 実工場への導入

本システムは宮城県内にあるアスファルト合材工場へ導入した。増設したSFCシステムの全景を**写真―3**に，主要諸元を**表―3**にそれぞれ示す。本システムの燃焼能力は2.09 MWで，A重油に換算すると200 L/h相当の燃焼能力となる。固形燃料の熱風を再生APに供給すると，再生バーナの燃焼量を下げる必要があり，低燃焼域での燃焼が必要となるため，通常1：4程度のTD比を1：10まで広げることができる2流体バーナを採用している。

写真―3 固形燃料燃焼システム全景

表―3 SFCシステム主要諸元

項目	仕様・能力
燃料供給方式	二軸スクリューフィーダ
ロータリーチャンバ	内部耐火キャスタブル 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）

6. 開発における課題と対策

(1) 各固形燃料の燃焼最適化

本システムでは，2種類の異なる固形燃料を同じ装置で燃焼させることを目標としている。しかし，RPFと木材チップでは，**表―4**で示すように，空気比や燃焼速度に違いがあり，同一装置で燃焼させるには，ロータリーチャンバ内の滞留時間や燃焼空気量を調整する必要がある。

表―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
燃焼速度	速い	遅い

まずRPFは，発熱量が高く高温で燃焼するため，ロータリーチャンバ内での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。クリンカとは，焼却灰や未燃分が炉壁に溶融付着固化したもので，局部的な高温部やごみが薄く停滞した部分に発生しやすい[5]。このクリンカ付着を抑制するため，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 ＝約2.0，つまりガス中の酸素濃度 O_2 が10～11 %になるように燃焼空気を導入することで，クリンカ付着は抑制された。ここで，空気比 m は，式（2）より算出した。

木材チップは，RPFと比較して発熱量が低いため，高温域が発生しにくく，ガス化後に発生した炭化物に効率よく空気を送り込むことができず，ほとんどの炭化物が燃焼して灰化されないまま排出された。そこで，木材チップに関しては，ロータリーチャンバ内滞留時間を可能な限り長くすることで灰化を促進させたが，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。木材チップの燃焼状態としては，ガス中の酸素濃度 O_2 は9 %程度，空気比 m ＝1.7～1.8で燃焼状態がよく，CO濃度は120～250 ppmであった。

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

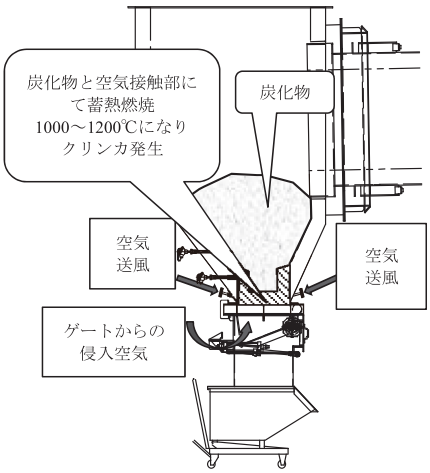
(2) 灰化の向上

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定義した。本システムでは，燃焼炉としてロータリーキルン炉を使用しているが，多量の炭化物が燃

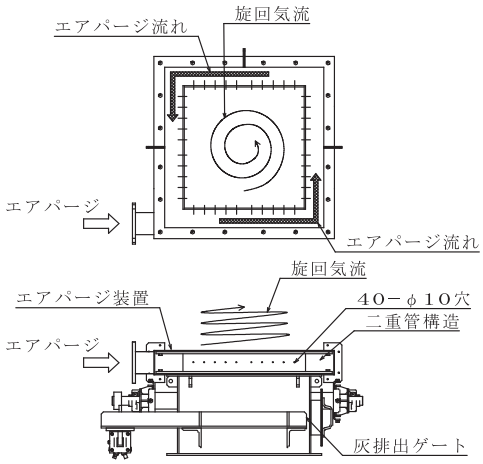
え残る特性がある。RPF は，燃焼速度が速く，ロータリーチャンバ中間部で既に炭化されており，高温下であることと，投入部に近いことで燃焼空気が効率よく炭化物と接触するため，燃焼が促進され，灰の量は少量であった。しかし，木材チップの場合は燃焼速度が遅く，ロータリーチャンバ全長のうち半分を過ぎたところでガス化燃焼が終了しているため，炭化物が滞留している箇所は高温になっておらず，また投入部から離れているため，燃焼空気が効率よく炭化物と接触しないので，燃焼が促進されず，炭化物が灰化されずに排出される。木材チップ供給量 300 kg/h で 3 時間運転すると，容量 0.9 m^3 の排出ホッパを満たしてしまうため，3 時間以上の運転が困難な状態であった（**写真**―４参照）。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ていないといえる。そこで，**図**―２のように四方から空気を送風し，炭化物の燃焼を試みたが，局所的に炭化物の温度が 1,000 ～ 1,200℃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。クリンカが発生する原因としては，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停滞している部分が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**図**―３に示すエアパージ装置を取り付け，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浮遊させ撹拌することが可能となる旋回気流を与え，燃焼させた。この方法により，同じ運転条件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**―５に減容化した時の排出ホッパ残留炭化物の状態を示す。**写真**―４と**写真**―５を比較しても，その効果が大きいことが伺える。

エアパージの風圧と灰化率の関係を**表**―５に示す。

写真―４　木材チップ炭化物排出状況



図―２　排出部でのクリンカ発生状況



図―３　排出ゲートエアパージ構造

写真―５　エアパージ装置取付後の炭化物排出状況

表―５　エアパージ風圧と灰化率

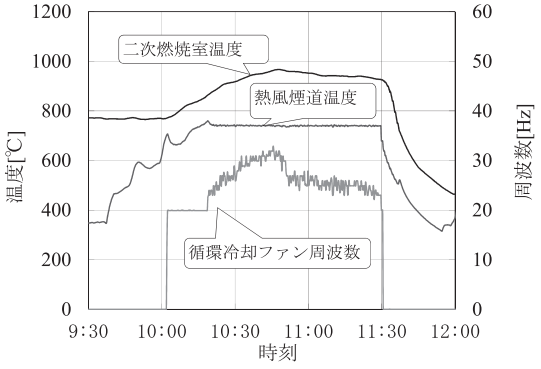
エアパージ風圧 kPa	灰化率 %	灰化傾向
0.01	5.0	残留炭化物が多い
0.49	2.2	残留炭化物が少し多い
1.30	1.8	灰化状態良好
1.80	0.5	灰化状態良好
2.25	－	灰化率計測不能

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んでしまったため，計測不能であった。エアパージ風圧を 1.3 kPa ～ 1.8 kPa にすると，灰化率が 2%以下になり，良好となった。

(3) 固形燃料熱風温度制御

再生骨材にはアスファルト分が付着しているため，劣化と火災防止のため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。RPF を燃焼させた場合，発熱量が高いため，二次燃焼室でのガス温度が 1,000℃以上になる場合がある。この場合，再生バーナの熱風と SFC システムの熱風が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高くなる。

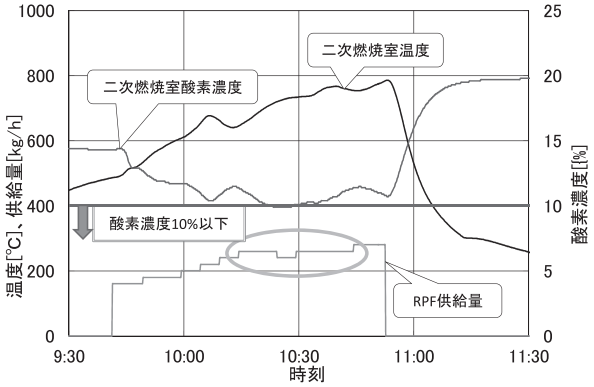
固形燃料熱風温度を低下させるには空気を通常よりも過剰に入れる必要があるが，この場合排ガス量が大幅に増加するため，再生 AP のバグフィルタ等の排ガス処理装置の負担が増大する。そこで，再生 AP の排ガスの一部を循環冷却ファンで吸気して熱風煙道に循環させることで，全体の排ガス量を増加させずに温度制御を行うことが可能となった。**図―4** に熱風温度制御時のグラフデータを示す。温度制御設定値は 740℃としており，温度制御が良好に行われている。



図―4 熱風温度制御結果

(4) 固形燃料熱量調整制御

本システムの供給装置は二軸式のスクリューフィーダを使用している。二軸式スクリューフィーダは，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，スクリューフィーダの特性から質量基準の供給量が増加することになり，単位質量あたりの発熱量を一定とすると，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考えられる。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，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。**図―5** に固形燃料供給量自動制御のグラフデータを示す。酸素濃度が 10%以下になると，自動で供給量を低下させ，酸素濃度が再び 10%以上になると，供給量が自動で増加している。このように，酸素濃度と温度で供給量を制御することで，固形燃料の発熱量や比重にばらつきが生じても安定して燃焼させることが可能となった。



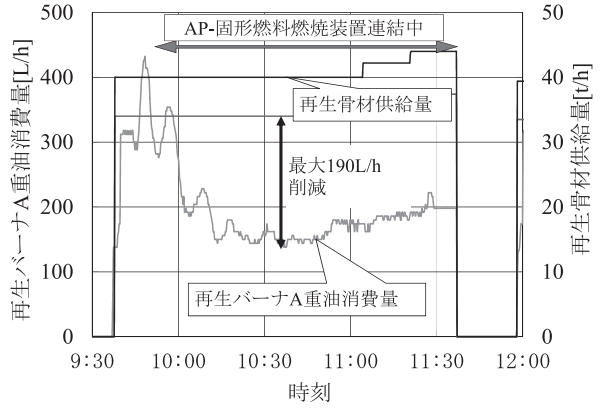
図―5 固形燃料調整グラフ

(5) ガレキ燃焼

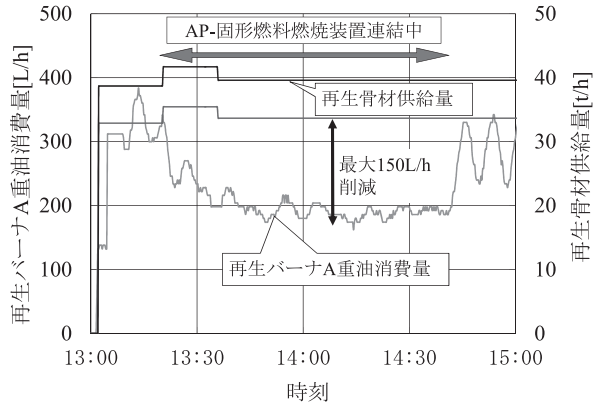
中間処理施設でチップ化された震災ガレキを有価物として購入し，燃焼によって発生する熱を有効利用することを試みた。震災ガレキには，津波被害による泥分が大量に混入しており，またチップ化時の粉じん対策として散水を行っており，含水率が高い状態であった。そのため，震災ガレキ単体での燃焼は困難を極めたが，市販の木材チップと一定量混合して燃焼させることで，燃料として再利用できることが確認できた。

7. SFC システム導入の効果

2012 年 9 月より装置の燃焼試運転を開始し，改善・改良を行い，2013 年 4 月より操業運転を開始した。**図―6** に RPF，**図―7** 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 SFC システムを連結することで，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，かさ密度が小さいため，熱風量が減少し A 重油削減量は低下した。**表―6** に固形燃料別の導入効果を示す。A 重油削減率は，SFC システム連結中において，瞬時



図―６　RPF 利用時運転データ



図―７　木材チップ利用時運転データ

表―６　固形燃料別の熱風発生装置導入効果

			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

値ではあるが，RPF で 56%，木材チップで 44%となった。実際の削減率としては，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。

8. おわりに

同一の装置で異なる複数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となったが，実工場のオペレータに操作負担を増加させることなく自動制御運転を行うことが可能となった。固形燃料と液体化石燃料という，性状の異なる燃料から発生する熱風を併用して運用するシステムの構築も図ることができた。CO_2 削減については，木材チップを利用することで，合材製造時に発生する CO_2 の約 14%を削減することができ，低炭素社会への貢献を実現した。

従来，埋め立てや焼却されていた廃棄物を，合材製造のエネルギーとして有効活用するという今回の試みは，一定の成果を得ることができた。また，地球温暖化が危惧される中，複数の固形燃料を再生 AP で直接熱利用する当技術は，AP の乾燥加熱技術に新たな選択肢を加えたものと考える。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）一般社団法人 日本アスファルト合材協会：http://www.jam-a.or.jp/iinkai/suii/suiiH25.pdf，アスファルト合材製造数量推移（全国），(2013/12/16)
2）一般社団法人 日本 RPF 工業会：http://www.jrpf.gr.jp/，RPF とは，(2013/8/12)
3）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
4）タクマ環境技術研究会：ごみ焼却技術絵とき基本用語，pp.16 ～ 17，1998 年 11 月
5）タクマ環境技術研究会：ごみ焼却技術絵とき基本用語，p.59，1998 年 11 月

［筆者紹介］

榊　真司（さかき　しんじ）
日工㈱
事業開発本部　研究開発センター　ヒーテック G

相田　尚（あいた　ひさし）
㈱ NIPPO
総合技術部　生産機械第一グループ
機械開発担当課長