



写真-1 1933年(昭和8年)製造の高野式APの3号機

エネルギー化をはかり生産性を向上させることができる合材サイロなども普及している。

いずれにしても、合材を製造する本質的なプロセスは、昔も今も大きくは変わっていない。

2.2 過去のAP

まず、国内におけるAPの歴史を紐解く上で、高井らの報告²⁾が参考となる。この報告によると、最も原始的な合材の製造方法として、薪や炭を燃やして鉄板を加熱し、その上に骨材を載せて乾燥加熱を行い、アスファルトはドラム缶ごと加熱溶解を行い、これらを人力で攪拌混合して合材として舗装に供していたと述べている。これは、国産APが普及し始める戦前までの話である。また、このような最も原始的な当時の合材製造プロセスの熱効率率は、10～20%であったものと推測される。ただし、たとえ熱効率が悪くとも、バイオマス由来の薪や炭を燃料として燃やしている限り、現在のルールに則れば発生するCO₂はカーボンニュートラルの扱いとなる。したがって、大気中のCO₂は相殺されて増加することはない。

時代が下り、国内に初めてAPが輸入されたのが、1921年(大正10年)に東京市の明治神宮外苑道路工事のときである。そして、国産AP第1号機(高野式)が浦和市で試運転されたのが関東大震災後の1928年(昭和3年)の復興事業においてである。写真-1は、1933年(昭和8年)製造の高野式APの3号機である。その後、昭和10年代の大不況や第二次世界大戦へと移行したこともあり、APに特段の進化は見られない。

戦後、第一次道路整備5ヶ年計画が作成され、それに基づく道路建設の増大に伴い全自動型のAPが求められるようになる。それまでのAPは、骨材やアスファルトの計量操作を手動で行っていたために安定した合材を製造するためには高度な運用ノウハウと経験とが求められ、これがオペレーターへの負担となっていた。そして、1956年(昭和31年)に米国パーバーク



写真-2 1964年(昭和39年)製造の日工(株)製AP

リン製の連続式APが、1957年(昭和32年)に西独のウイバウ製のバッチ式APが輸入されている。このウイバウ社製のバッチ式APが国産APの原型となっている。

連続式APは、ドラムミキシング方式とも呼ばれ、骨材の粒度配合を各切り出しフィーダの供給量で決定し、ドライヤ内部でアスファルトを添加する合材製造プロセスである。このため骨材の計量やミキシングを行うバッチタワーが不要となる。単品種の合材を大量に製造する場合に有効であるが、その品質安定度はバッチ式APに劣る。

バッチ式APは、前述の図-1に示す合材製造プロセスで、バッチ毎に骨材やアスファルトの計量を行うために多品種の合材製造にも適応でき品質の安定性に優れている。今や国内のほとんどのAPがバッチ式となっている。

また、昭和30年代後半の名神高速道の舗装工事に伴い、米国パーバークグリーン製のバッチ式APが輸入され、これに刺激を受けて、国産メーカーが相次いでAPの製造を始めている。写真-2は、1964年(昭和39年)製造の日工(株)製APである。生産能力は合材を毎時80トン出荷することが可能で、そのときとしては国産で最も大型のプラントであった。当時は高度経済成長期の真ただ中で、安価な燃料(A重油、B重油、C重油など)を湯水の如く使用して、合材の生産能力を最大限に引き上げる運用がもてはやされた。公称能力以上に合材を生産できることがAPの評価に繋がっていた時代である。

このことに反して、燃費、ばい煙、粉塵、騒音、振動などの直接生産性に依存しない作業環境や自然環境への弊害は、それほど重要視されていなかったようである。むしろ、ある程度の環境を犠牲にしても経済成長を優先にすべきであるとのことが大勢を占める時代でもあった。

さらに時代が下り、高度経済成長期の終焉を迎えつつあった日本経済であるが、この頃から、経済優先政策の綻びが公害問題として浮き彫りになってくる。人の健康を蝕む水



写真-3 最近のAPの事例



写真-5 旧型APの骨材乾燥システム



写真-4 最新APの事例

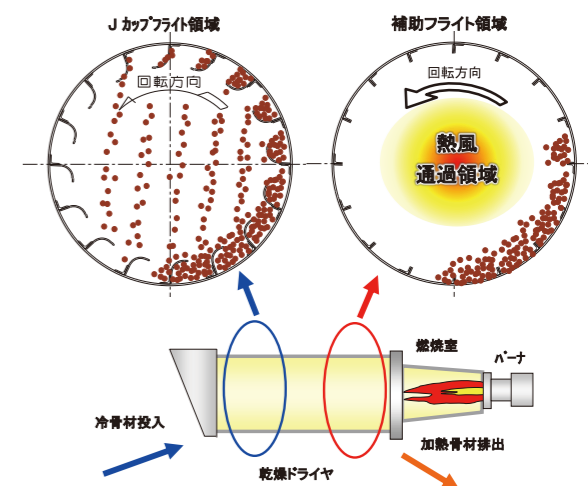


図-2 旧型APのドライヤ内部の骨材分散形態と装置構成のイメージ

俣病や四日市ぜんそくを始めとする公害病が社会問題として顕在化してきたのである。これらのことを受けて、1970年(昭和45年)11月に開催された第64回国会、通称公害国会で知られる臨時国会では、これまでの経済活動を優先にした法律体系とするのではなく、公害による健康被害者の救済と公害の防止を最優先に進める国の基本的な姿勢を明確にしている。そして、1973年(昭和48年)6月6日第4次中東戦争が勃発。これを機に原油価格が高騰し、第一次オイルショックが訪れる。追い打ちを掛けるように、1979年(昭和54年)のイラン革命によりイランでの石油生産が中断。これを発端として再び原油価格が高騰し、第二次オイルショックが到来する。1バレル3ドル台を推移していた原油価格が一気に10倍の30ドルにまで跳ね上がる。このように公害対策の法規制強化と2回に渡るオイルショックの洗礼を受けて、APは大きな変革を遂げることになる^{3~12)}。

1つ目は、大気汚染防止法によるばい煙規制が強化されたことにより、バグフィルタの設置が事実上義務化したことや、同時に硫酸化合物や窒素化合物の排出規制も強化されることになり、灯油やガスなどの良質な燃料への転化が余儀なくされたこと。2つ目は、燃料の高騰を受けて省エネルギー化が積極的に推進されたこと。3つ目は、後段でもその詳細に触れるが、建設廃棄物である舗装発生材(アスファルト・コンクリート塊)を資源として有効利用するための一連のリサイクル設備と、APの連続稼働を可能とする合材サイロの普及である。4つ目は、1986年からのバブル景気の影響を受け、環境保全に対する社会意識の向上や、安全性は元より操作性や居住性の向上などがAPに求められるようになったこと。5つ目は、かつてのAPであった仮設プラントのイメージから脱却し、地域社会に根付き調和して、都市空間に適合した都市型AP^{13~14)}が強く求められるようになったことなどを挙げることができる。

2.3 現在のAP

写真-3は、最近のAPの事例を示している。V骨材の乾燥加熱を毎時60トン、R材の乾燥加熱を毎時30トン同時に処理することが可能で、このことにより合計毎時90トンの合材を生産する能力を備えている。また、写真のように合材サイロを2基併設していることから、合材ダンプへの積み込みが途切れてもAPの連続稼働を可能にして省エネルギー化をはかっていることや、瞬発力として2基の合材サイロを併せて毎時



写真-6 現在型APの骨材乾燥システム

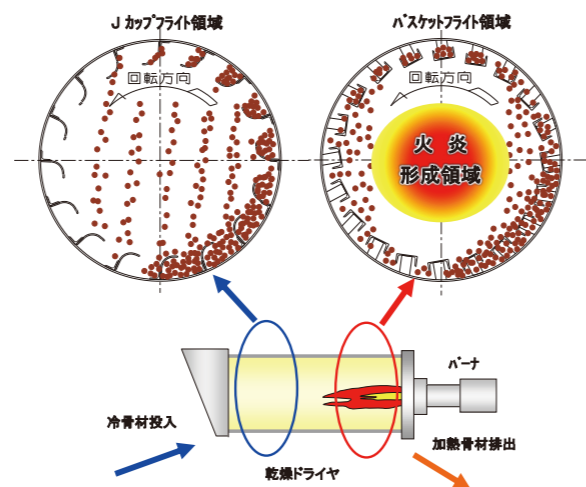


図-3 現在型APのドライヤ内部の骨材分散形態と装置構成のイメージ

200トン近い合材の出荷に対応することも可能である。そして燃料には、硫黄酸化物の生成がなく、CO₂の排出量がA重油に比べて25%少ないLNG(Liquefied Natural Gas: 液化天然ガス)を使用していることなどが特徴として挙げられる。

写真-4は、最新APの事例で、生産量の過半数以上を占めるR合材を製造するための最適解を求めたシステムである。従来APのV骨材の流れを中心に位置づけたシステム構成から、R材の流れを主体としたシステム構成としているのが特徴である。具体的には、上部からRドライヤ、サージピン、R材計量器、ミキサを積層配置し、プロセスの主体となる加熱R材が構成システムの中心部を鉛直方向に流れ落ちるようにすると共に、粒調材としてのV骨材は側面方向からミキサに投入するように配置構成を大きく見直している。このことにより、R材計量器やミキサ投入装置への付着やこぼれの軽減により、メンテナンス性を大きく向上させている。

3.アスファルトプラントの省エネルギー化技術

3.1 骨材乾燥システムの変遷

写真-5は、1964年(昭和39年)当時のAPの骨材乾燥システムである。装置構成は、バーナ、燃焼室、Vドライヤ、乾式サイクロン、排風機、湿式集塵機一体型の煙突などからなっている。また、当時のAPのドライヤ内部の骨材分散形態と装置構成のイメージを図-2に示す。写真と図より、当時のAPは、バーナ火炎を燃焼室内部に形成し、燃焼で生成する熱風を直接Vドライヤに導入している。

即ち、熱媒体である熱風と骨材とを直接接触させて熱交換を行う直接加熱方式を採用している。Vドライヤには、骨材を内部で均一に分散させて効率良く熱風と接触させるためのリフタが取り付けられている。このリフタは、J型断面を有し

ていることからJカップフライトと称し、Vドライヤの回転に伴って、骨材をすくい上げて図のようにドライヤ上部より分散させている。また、リフタで持ち上げられた骨材は鉛直落下するが、ドライヤが骨材の流れ方向に3~4°傾斜しているため、骨材は落下を繰り返すごとに $L=D \cdot \tan\theta$ 前進することになる。ここで、Lは骨材の落下による前進距離、Dはドライヤの内径を示す。そして、Vドライヤの排出口付近には、骨材の均熱化をはかるための補助フライトを設けている。これは、骨材粒径の差異により加熱温度に偏りがあることから、Vドライヤ底部に骨材を滞留させて相互の接触伝熱により骨材温度の均熱化をはかることが狙いである。

当時のAPは、前にも触れた通り、省エネルギー化や環境負荷の低減をはかることよりも、多少の燃費を犠牲にしてまでもVドライヤの排ガス温度を200℃近くまで高めて生産能力を優先したシステムであった。このことから、Vドライヤの熱効率率は65~75%であったものと推定される。さらに、当時のAP用集塵機は、乾式サイクロンと湿式集塵機との組み合わせが主流で、その役割はドライヤから飛散した微細骨材を捕捉回収し、骨材としての有効利用をはかることが主目的であった。このことは、この写真当時の社会情勢から類推してみても、これらの集塵機が燃焼排ガスの浄化を目的にしたものではないことは容易に伺い知ることができる。

写真-6は、現在型APの骨材乾燥システムである。装置構成は、バーナ、Vドライヤ、バグフィルタ、排風機、煙突などからなっている。また、Vドライヤ内部骨材の分散形態と装置構成のイメージを図-3に示す。写真と図より、旧型のAPと比較して燃焼室が存在しないことに気付く。

これは、バーナ火炎を直接ドライヤに導入する燃焼技術を新たに開発し、日常的に保守メンテナンスを余儀なくされていた燃焼室を不要としたことに起因している。具体的には、次章で詳細に触れるが、水平方向にシャープでコンパクトな



写真-7 NBバーナ



写真-8 WELLバーナ

火炎を形成する新たなバーナを開発すると共に、図に示すように骨材とバーナ火炎とが接触しないように、骨材がトンネル状に分散落下するバスケットフライトを新たに考案している。

そして、このトンネルの中心部でバーナ火炎が水平方向に保持され燃焼することにより、骨材がバーナ火炎の輻射熱を効率よく吸収するようにしている。さらに、このことと合わせて、Vドライヤ壁面への遮蔽断熱効果が増大することにより、ドライヤ表面温度が低下して外気への放散熱が著しく減少している。加えて、ドライヤ全域に渡り、リフタ(Jカップフライト)の形状と枚数の最適化をはかることにより、Vドライヤの排ガス温度を100~120℃にまで低減している。

このような省エネルギー化技術により、最新APの熱効率は80~85%に達している。

3.2 燃焼システム

3.2.1 燃焼システムの変遷

1964年(昭和39年)当時のAPは、写真-5に示す高压気流噴霧式の油焚きバーナを搭載している。このバーナは、高静圧のプロワーにより燃焼空気の一部をノズル内部に高速で吹き込み、ベンチュリー効果を利用して燃料と混合して霧化を促進させる構造となっている。部品点数が少なく構造が簡単であることから安価でメンテナンス性に優れるが、燃焼量を大きく変化させることができない。燃焼範囲はTDR=1:2(最低燃焼量:最大燃焼量)程度であった。(TDR: Turndown Ratio)

また、燃焼の安定化をはかるために、バーナ火口周辺にバーナタイルを設けている。バーナタイルは、耐火レンガなどで構成され、燃焼中はこれが高温に蓄熱して赤熱し、この輻射熱により保炎効果を高める働きを担っている。さらに、燃焼性を高めるために、二次燃焼空気として大量の外気をバーナ火口の周辺から燃焼室に導入していることなどが、本気流噴霧式バーナの特徴である。

そして、本燃焼システムの燃焼室には、内面に耐火材が施工されており、これが蓄熱して高温となり、バーナタイルと



写真-9 NTBバーナ

同様に輻射熱による燃焼の安定化をはかっている。また、この燃焼室は、バーナの燃焼や消火による急激なヒートショックを受けて耐火材が脱落することなどから、定期的な補修を必要としていた。

当時のAP用燃料としては、安価なC重油、B重油が主流であり、前述したように合材の生産能力のみを追い求めて熱効率や排出ガスの浄化に関しては優先度が低い時代でもあった。繰り返しになるが、この時代のAPの省エネルギー性能は、排ガス温度が180~200℃、侵入空気が多いために排ガス中の酸素濃度が17~18%であったことから、65~75%のドライヤ熱効率であったものと推定される。

つぎに、写真-7に示すNBバーナは、1976年(昭和51年)当時、西ドイツのバーナメーカーであったベニングホーベン(Benninghoven)社との技術提携により、新たに開発した比例制御バーナである。送風機に軸流ファンを採用してスタイリッシュな円筒形状とし、油圧戻り油式ノズルを採用したことから、燃焼範囲をTDR=1:3まで拡大している。

この燃焼システムは、定期的な補修が必要となる燃焼室とバーナタイルとを廃し、Vドライヤに直接バーナ火炎を導入している。このため、安定した保炎機能とシャープでコンパクトな火炎形状が求められる。そこで、バーナ先端部にメタリック製のミックスチャンバーを取り付けて、安定した大きな火種であるファイアボールを形成するようにしている。このようにし

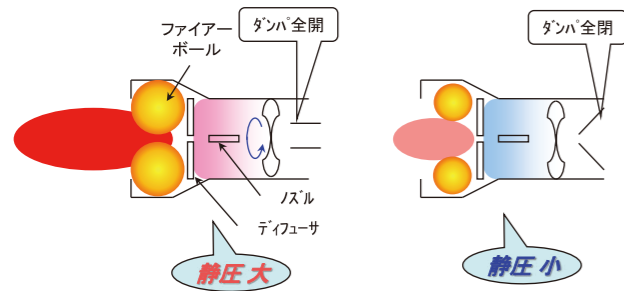


図-4 従来型バーナにおける風量コントロールと燃焼状態のイメージ

て、NBバーナでは、バーナタイルに替わってファイアボールからの輻射熱を受けることにより、安定した燃焼を持続させることができるようになった。

写真-8に示すWELLバーナは、さらなる低燃焼領域の拡大と低空気比化、低騒音化を推し進めるために1995年(平成7年)に、当社が独自に開発したバーナである。フロントマルチベーンダンパを搭載することにより、燃焼範囲をTDR=1:7まで拡大している。送風機を軸流タイプから斜流タイプに変更して静圧を高めることにより、空気比を最大燃焼時で1.1、実用燃焼範囲の全域に渡り1.3以下を達成しているのが特徴である。

写真-9に示すNTBバーナは、今現在APに搭載している最新型のバーナで、2004年(平成16年)に開発している。バーナファンを斜流ファンからターボファンに変更して機械効率をさらに高めている。

次項以降では、AP用バーナの課題である燃焼範囲の拡大、低空気比化、一定空気比制御に関するメカニズムの詳細について触れる。

3.2.2 低燃焼領域の拡大技術

Vドライブ用バーナの低燃焼領域を拡大することは、R材の混入率が高いR合材を製造する場合に求められる。すなわち、合材混合用ミキサの容量が不変であるため、V骨材の供給量をR材混入率の割合に応じて減少させる必要がある。このとき、バーナの燃焼量を絞ることができない場合、過剰に骨材温度が上昇して燃費の悪化を招いてしまう。建設リサイクル法の推進理念から、R材混入率を高くする配合の合材が増大し、このことによりVドライブの定格能力に対して半分以下にV骨材供給量を減じる必要がある場合もある。しかも、含水比が低い乾いた骨材も想定すると、必然的に広い燃焼範囲、すなわち、低燃焼領域の拡大がVドライブ用バーナの機能として求められる。

(1) 従来型バーナで燃焼範囲を拡大できない理由



写真-10 WELLバーナに搭載したフロントマルチベーンダンパ

APで骨材の乾燥加熱の熱源として使用されている燃料は、一部の都市ガスを除くと、そのほとんどがA重油または灯油などの液体燃料である。そして、これらの液体燃料用のバーナには、一般的に油圧戻り油式ノズルが用いられる。このノズルは、供給した燃油の一部を燃油タンク側に戻すことにより、燃焼量が少ない領域においても、ノズル先端部の渦巻き室に流れ込む燃油量を増大させることができる。渦巻き室では、燃油による高速な旋回流が形成されており、この旋回流の運動エネルギーを利用することにより、燃油の吐出速度を失速させることなく噴霧することを可能としている。このような理由から、油圧戻り油式ノズルは、圧力噴霧式ノズルに比べてTDRを大きく採ることができる。ただ、TDRが大きい油圧戻り油式ノズルにおいても、その原理上の制約から、実用範囲を超えて燃焼量を減じて行くと、油の噴霧粒子が大きくなるのと同時に、旋回流の影響を強く受けて噴霧角が円錐状に広がる特性を有している。

一方、油の燃焼に必要な燃焼空気量の調節は、バーナ送風機の吸い込み側にダンパを設け、燃焼量の変化に連動させてダンパを開閉させるか、もしくは、インバータを採用してバーナ送風機の回転数を連続的に変化させて行っている。しかしながら、燃焼室を不要とするAP用のバーナは、裸火(燃焼室なし)で、シャープでコンパクトな火炎を形成させる必要があることから、従来方式の油圧戻り油式バーナでは、TDR=1:3が燃焼範囲の限界となる。このことは、同バーナにおいて、燃焼量に比例して燃焼空気量を削減して行くと、ある燃焼領域以下で白煙や燃料微粒子が多量に発生し、燃焼状態が悪化することに起因している。

図-4は、従来型バーナにおける風量コントロールと燃焼状態のイメージを示している。まず、燃焼量が大きい場合、図の左に示すように空気調整用ダンパが開いて燃焼空気の静圧が高まることにより、バーナ先端部のミックスチャンバー内の保炎器であるデフィューサ周辺部から燃焼空気が高速に流れている。この高速気流により、デフィューサ前面部に大きな負圧領域が形成され、霧化した油滴の一部を巻き込んでファイ

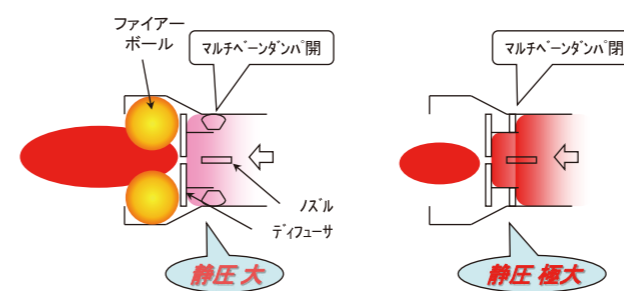


図-5 WELLバーナの各燃焼状態におけるノズルケーシング内部の静圧のイメージ

アボールを形成する。そして、ノズルから噴霧した油滴がこのファイアボールを通過するときに輻射熱を受けて気化蒸発し、燃焼空気と混合拡散しながら安定な燃焼を維持している。いわば、このファイアボールがバーナタイルの役割を担い、油燃焼を安定化させている。

つぎに、燃焼量が小さい場合、図の右に示すように空気調整用ダンパが閉じて燃焼空気の静圧が低下することにより、デフィューサ周辺部から流れる燃焼空気が失速する。この燃焼空気の失速により、デフィューサ全面の負圧領域が縮小し、ファイアボールの形成が不安定に至る。さらに、前項の(1)でも触れたが、油圧戻り油式ノズルの特徴である燃焼量を減じるにより油滴が大きくなることと、遠心力の影響を受けて噴霧角度が円錐状に広がることにより、油滴が十分に気化せずにファイアボールを突き抜けてしまうことなどが、燃焼範囲を拡大できない大きな要因となっていた。

(2) 燃焼範囲拡大の手段

Vドライブにおいて、V骨材の少量送りに対応する手段としては、小型のバーナを複数台設置する方法や、燃焼範囲(TDR)の大きい二流体ノズルなどを採用すれば、燃焼状態を悪化させることなく低燃焼領域の拡大をはかることができる。しかしながら、複数台のバーナをVドライブに搭載するには設置スペースに課題があり、二流体ノズルの採用には、噴霧媒体を供給するための空気コンプレッサーや水蒸気ボイラーなどが必要となりコスト面での課題が残る。

また、既設APにおけるバーナの入替需要を考慮した場合、従来型バーナの燃焼装置である燃料噴霧用高圧ポンプの互換性を担保する必要があるなどの制約もある。これらの理由から、新たなバーナは、従来方式の油圧戻り油式ノズルを基本ベースとし、高静圧な斜流ファンとフロントマルチベーンダンパとの組み合わせにより、低燃焼領域の燃焼状態を改善して燃焼範囲の拡大をはかっている。

斜流ファンは、軸方向に空気が流れる軸流ファンと高静圧を得ることができるターボファンの両特性を兼ね備えている。

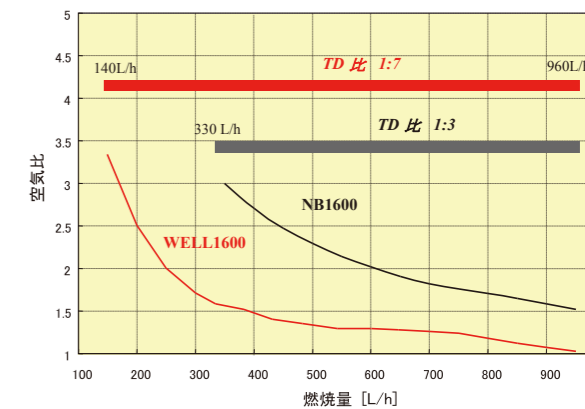


図-6 WELLバーナと従来のバーナ(NBバーナ)との燃焼範囲とその空気比との関係

この高静圧な特性を利用して、燃焼空気比を低減させながらも、燃焼空気の失速をなくし強力なタンブル(縦渦)を発生させて燃料と空気とのミキシングの改善をはかっている。なお、低空気比化については次項の3.2.3で詳細に触れる。

一方、フロントマルチベーンダンパは、低燃焼領域で同ダンパを閉じてノズル近傍の静圧を高めることにより、油圧戻り油式バーナノズルの欠点である、燃焼量を絞ったときの油粒子の大型化と噴霧角度の広がりを抑制している。

写真-10は、WELLバーナに採用したフロントマルチベーンダンパの全閉状態を示している。また、図-5は、各燃焼状態におけるノズルケーシング内部の静圧のイメージを示している。写真と図より、バーナノズルケーシング内部に円筒型の内筒を設けて二重構造とし、その外周に12枚のマルチベーンダンパを設置している。このダンパは、斜流ファンの吐出側に位置することになり、図の右側のようにダンパを閉めることによって風量を減じながらもノズルケーシング内部の静圧を高めることを可能としている。

この機構により、低燃焼領域において円錐状に広がっていた燃油の噴霧角度が、ノズル先端部近傍からデフィューサ中心部に向かって吐出する高速気流により狭められる。さらに、この高速気流により大きな粒径となっていた噴霧粒子の霧化が促進されるために、デフィューサ前面に形成されるファイアボールでの燃油のガス化を向上させている。

以上のことから、低燃焼領域の燃焼状態の改善をはかり、燃焼範囲(TDR)1:7を達成している。

3.2.3 低空気比化技術

(1) 従来型バーナにおける低空気比化の課題

Vドライブの燃焼排ガスとして大気に排出される無効エネルギーは、全体の20%近くを占めている。このことから、バーナの空気比(過剰空気係数)を低減することにより、燃焼排ガスを削減し、排ガスで持ち去られる無効エネルギーを減じることが可能となる。

しかしながら、AP用バーナの場合、燃焼室を設けずに

バーナ火炎を直接Vドライヤに導入していることから、バーナ火炎の長さに制約が生じる。このことは、単純にバーナの空気調整ダンパを絞って燃焼空気量を減じてもミックスチャンバー内部の気流が失速することにより、燃油と空気とのミキシングが緩慢となり、火炎の全長が伸びる傾向を示す。Vドライヤ内部でバーナ火炎が伸びると、3.1項でも触れた通り、内部で分散している骨材に直接火炎が接触して不完全燃焼に至り、燃焼効率の低下を招いてしまう。

(2) 低空気比化の手段

空気比を低減させながらバーナの火炎長さを従来バーナと同等に保持するためには、ミックスチャンバーでの気流速度を高めて燃料とのミキシングを促進させる必要がある。このため、前述の通りバーナ送風機を従来の軸流タイプから、斜流タイプに変更し、静圧を約50%高くしてミキシング速度(燃焼静圧)を改善している。

また、デフィサ外径とミックスチャンバー先端絞り径とが、火炎の長さや太さに大きく影響を及ぼすが、それらの最適解を燃焼実験により決定している。具体的には、デフィサ径を大型化し、ミックスチャンバー先端絞り径を小さくするほど、気流速度が高まりミキシングが促進されて火炎長さが短くなる。ただし、ミキシング速度(燃焼静圧)が高くなり過ぎるとデトネーション(異常燃焼)が発生し、燃焼音の増大やこれに伴う燃焼振動が生じる恐れがあるので注意が必要である。

そして、フロントマルチベーンダンパを採用することにより、中間燃焼領域から低燃焼領域におけるノズル先端部近傍を流れる燃焼空気のみキシング速度を高めていることは前節でも触れているが、これらの燃焼技術を組み合わせることにより、相反する要因である燃焼空気比を下げながらも火炎長さを短くすることを燃焼範囲全域に渡り可能にしている。

3.2.4 一定空気比制御(燃料マップ)技術

図-6は、WELLバーナと従来のバーナ(NBバーナ)との燃焼範囲とその空気比との関係を示したものである。図より、従来のバーナでは、燃焼量調節用オイルバルブとリンク機構を介して送風機の吸い込み側に設けたエアードンパを駆動させているため、燃焼範囲全域に渡って一定の空気比で燃焼させることが難しい。

さらに、軸流ファンから、ダンパで空気量を絞ると一定の範囲以下でサージング領域に突入し、たちまち運用できなくなってしまう。加えて、低燃焼域では、ミックスチャンバー内部で燃焼空気が失速して、燃焼状態が悪化する傾向にあることなどから、軸流ファンがサージングを起こさない範囲で燃焼空気量を多くして(空気比を上げて)ミキシングを促進させるようにしている。これらのことから低燃焼領域の排ガス量が増大することになり、燃費の悪化に繋がっていた。

一方、WELLバーナでは、フロントマルチベーンダンパにより燃焼空気量をコントロールしている。このことにより、低燃焼領域で燃焼空気量を減じても、デフィサ中心部から高速の空気が吐出して燃料とのミキシングを促進するので、良好な燃焼状態を維持することができる。そして、このフロントマルチベーンダンパの流量特性に基づき、広い燃焼範囲で一定の空気比を得るために燃料マップを作成し、オイルバルブ開度(燃焼量)とフロントマルチベーンダンパ開度(燃焼空気量)とを独立したアクチュエータにより制御している。

以上のことにより、低燃焼領域から一定の低い燃焼空気比で燃焼することが可能となり、従来バーナで課題となっていた中間燃焼領域から低燃焼領域に渡り空気比が上昇することによる燃費の悪化を改善している。

3.3 排ガス温度の低減と排ガス量の削減技術

APにおいて、骨材の乾燥加熱に利用する熱エネルギーを有効エネルギーと定義すると、無効エネルギーは、ドライヤからの放散熱と大気に放出する燃焼排ガスが持ち去る熱エネルギーである。中でも、燃焼排ガスが持ち去る熱エネルギーの割合が最も大きく、全体エネルギーの15~20%を占めている。この排ガスが持ち去る無効エネルギーを減らす有効な手段としては、排ガス温度の低減と排ガス量の削減に特定される。

以下では、排ガス温度の低減と排ガス量の削減に関する技術について記述する。

3.3.1 排ガス温度の低減技術

Vドライヤの熱効率(有効エネルギーの割合)は、ドライヤの容積、傾斜角度、回転数、リフト枚数、骨材の掻き揚げ容量、骨材粒度、侵入空気量などの要因で決定される。そして、無効エネルギーの要因の1つであるVドライヤ出口の排ガス温度が必然的に定まる。ドライヤの熱効率を追求し過ぎると排ガス温度が極端に低下して包含する水蒸気が凝縮し、煙道やバグフィルタなどに低温腐食や濾布の目詰まり、回収ダストの詰まりなどの弊害を招く恐れがある。このため一般的なAPの排ガス温度は、酸露点温度よりも高い100~120℃で運用されている。

また、都市近郊部では、大気汚染防止法のK値規制(硫黄酸化物の排出量規制)が厳しいことから、燃料を硫黄含有量が少ない白灯油や都市ガスに転化して行く傾向にある。この場合、低温腐食の弊害が軽減されるため、濾布の目詰まりや回収ダストの詰まりが生じない80~100℃の範囲で排ガス温度を下げることは、省エネルギー化にとって極めて有効な手段となる。

一方、最近のリサイクル率の高いR合材の製造にAPを適用する場合、VドライヤでのV骨材供給量を定格の1/3以下に減

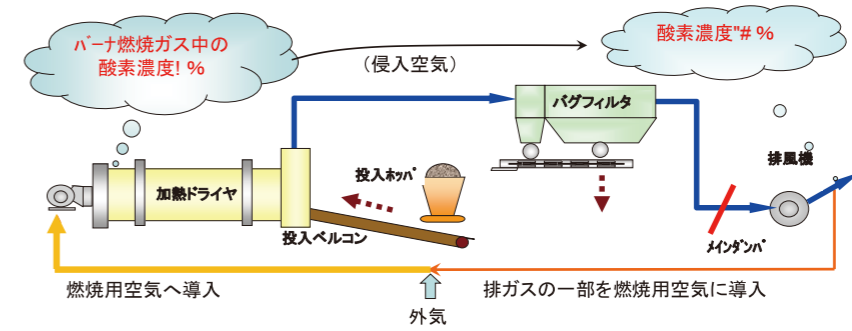


図-7 EGR (排ガスの再循環) システム

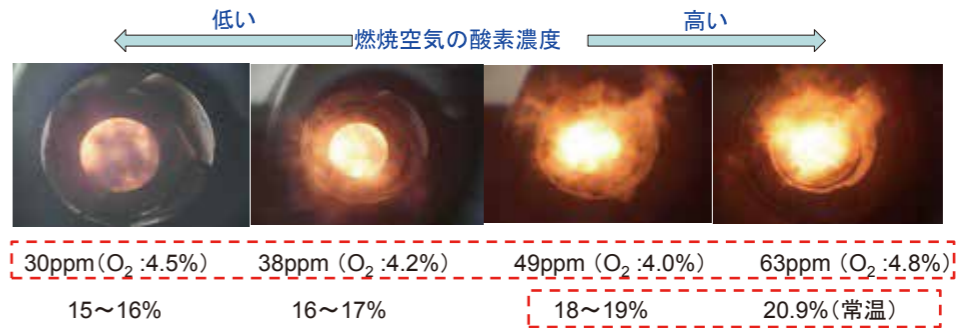


写真-11 EGRシステムの酸素濃度と燃焼状態

じような運用が求められる。この場合、燃焼範囲(TDR)の大きいバーナを適用することにより定格の1/3負荷まで燃焼量を減じることが可能である。しかしながら、ドライヤの熱交換に影響を及ぼす重要な要素であるドライヤ容積、傾斜角度、回転数、リフト枚数などが不変であるため、排ガス温度が極度に低下し、水蒸気の凝縮によりバグフィルタの目詰まりや回収ダストの詰まりなどの弊害を招いている。この対策として、ドライヤ内部のリフトを取り外して最適な排ガス温度に調整しているが、V骨材を定格で供給した場合、逆に排ガス温度が上昇して熱効率の悪化を引き起こしている。

以上のことから、Vドライヤの回転数を排ガス温度の変化に応じて増減するドライヤ回転数制御技術^{15~18)}を確立している。この技術により、V骨材供給量の大きな変動に対して最適な排ガス温度に管理することが可能となる。

具体的には、排ガス温度が目標値よりも高い場合、ドライヤ回転数を上げて骨材の分散量を増大させて熱風との熱交換を促進させている。逆に、排ガス温度が低い場合、ドライヤ回転数を下げて骨材の分散量を減少させ、熱風との熱交換を抑制させている。このことにより、低温腐食や濾布の目詰まりが起らない限界の温度まで排ガス温度を制御することが可能となり、省エネルギー化に極めて有効な手段となる。

さらに、最近ではRドライヤからの排ガスや、脱臭装置からの排ガスをVドライヤに導入して廃熱回収を行う省エネルギー技術も市場に投入している。この場合、Vドライヤの対数平均温度差が低下するために、排ガス温度が上昇する傾向を示す。このような場合においても、ドライヤ回転数制御を適用することにより最適な排ガス温度に管理することが可能

となる。

3.3.2 排ガス量の削減技術

Vドライヤからの排ガス量は、バーナの燃焼ガス量、侵入空気量、骨材から発生する水蒸気量の総和で決定される。

バーナの燃焼ガス量を減じるためには、燃料を低空気比で燃焼させる必要がある。そのためには、前項の3.2.3でも触れたがバーナ送風機の静圧を高めると共に、油と燃焼空気とのミキシングを促進させてバーナ火炎が伸びないように燃焼改善をはかる技術が必要となる。

侵入空気量の削減は、余分な外気がドライヤに吸い込まれないようにすることが重要である。このことは、侵入空気が、外気温度から排ガス温度にまで昇温するのに必要な熱エネルギーを奪い無効エネルギーとして大気に放出されてしまうからである。したがって、侵入空気量を低減させるために、ドライヤのシール部構造の工夫と内部静圧の最適コントロールが極めて重要な要素となる。また、次項の3.3.3で詳細を述べるが、EGR(Exhaust Gas Recirculation:排ガスの再循環)の技術^{15~18)}を用いることで、侵入空気の一部をバーナ燃焼空気として利用し、その利用分に相当する排ガス量を減少させることも可能である。

骨材から発生する水蒸気量に関しては、骨材の含水比にのみ依存するので、特に比表面積の大きな砂の含水比管理が重要となる。骨材の含水比は、排ガス量を増大させるだけでなく、水の蒸発のために大量の潜熱(気化熱)が奪われる。APの場合、この潜熱を有効エネルギーとして扱っているが、無効エネルギーとして考えた場合、熱効率は実に40~50%



写真-12 リサイクルドライヤ全景

にまで大きく低下してしまう。

このことから、排ガスに含まれる水蒸気の潜熱を回収して有効利用することができれば、大きな省エネ効果を得ることができる。後でも触れるが、水蒸気の凝縮潜熱を回収してヒートポンプを用いて水蒸気を生成し、これを熱媒体としてAP各部の加熱や保温に利用することや、熱交換器を介して水蒸気潜熱を回収し、新たな熱媒体として外気に伝熱して温風を生成し、これを砂の乾燥に利用することなどが考えられる。

3.3.3 EGR(Exhaust Gas Recirculation)システム

APの煙突から大気へ放出される排ガスは、温度が100℃前後で酸素濃度が10～15%である。この排ガスをバーナ燃焼空気の一部としてEGR(排ガスの再循環)させ、残存する酸素を燃焼に使用することにより、最終的な排ガス量を低減させることができる¹⁵⁻¹⁸⁾。即ち、排ガス中の酸素は、ドライヤシール部から侵入した外気に由来することから、排ガスを再循環させることにより、侵入空気中でバーナ燃焼空気の一部を補うことになる。

図-7にEGRシステムの概念図を示す。図より、EGRによる排ガス温度の低下が無視できる程度であれば、EGRを多くするほど排ガス量の低減と省エネルギー化に寄与することができる。しかしながら、バーナ燃焼用の空気中の酸素濃度は21%であるが、拡散燃焼を基本原理とする本バーナの燃焼において、EGR量を増大して酸素濃度を下げて行くと燃焼が緩慢となり、最終的には失火に至る。

写真-11は、EGRシステムの酸素濃度とバーナ燃焼状態の関係を示している。EGR本来の目的は、バーナ燃焼により生成するサーマルNO_xの低減にある。写真の右から、酸素濃度が21%、18～19%、16～17%、15～16%での燃焼状態を示す。また、NO_xの値は順番に、63ppm、49ppm、38ppm、30ppm、燃焼ガス中の残存酸素濃度は、4.0～4.8%である。これは、空気比1.2を基準として、排ガス中の酸素濃度が4.0%になるように調整している。このEGR燃焼テ

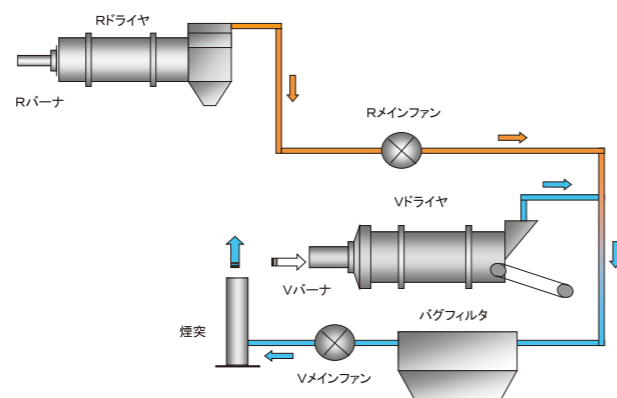


図-8 R排ガスとV排ガスのバグフィルタ併用処理システム

ストから、実用的なEGRの酸素濃度は16～17%であると考えられる。

このようにして、APにEGR技術を導入して排ガス量低減による省エネルギー化とサーマルNO_xの低減をはかるためには、バーナのミックスチャンバー内部で形成されるファイアボールの安定化と酸素濃度の制御技術が重要となる。

3.4 リサイクルドライヤと脱臭装置

3.4.1 リサイクルドライヤ

廃棄物の発生量を抑制し、繰り返し製品を利用し、素材をリサイクルする、いわゆる3R(Reduce, Reuse, Recycle)の基本理念の基、資源の有効利用を推進し循環型社会の構築を目指す循環型社会推進基本法が2001年に施行された。

そして、この基本法に基づきその翌年の2002年に個別リサイクル法として建設リサイクル法が施行され、一定要件を満たす建設廃棄物を資源として循環利用することが法的に義務化されている。この法律で、特定建設資材として指定を受けているアスファルト・コンクリート塊の発生量は、年間約2,500万トンに達している。その内の98%以上が路盤材やR合材として有効に活用されている。そして、今やR合材は、合材全体の70%以上を占め、その製造の主体がバージン合材(以下、V合材と記載)に取って替わっている。とりわけ、法律の施行に先立ちR材をV骨材に混合して製造するR合材は、1980年代より民間駐車場の舗装用などとして普及し始めている。

R合材の黎明期には、V骨材をスーパーヒートし、ミキサにR材を常温で10～20%投入するキット方式で製造されている。V骨材の顕熱を伝熱することによりR材がミキサ内部で乾燥加熱される原理である。このことから、V骨材の加熱温度の限界から、R材の最大混入率の制約を受ける。このような経緯を経て、R合材の需要増加とR材混入率の増大に応えるべく、R材の乾燥加熱に特化した写真-12に示すようなRDライヤが開発され市場に投入されている¹⁹⁻²²⁾。そして、RDライヤで加熱したR材をミキサで一定割合V骨材と混合して

R合材を製造するユニット方式が普及して行く。

3.4.2 アスファルトの劣化とブルースモーク

R材は、バインダーであるアスファルトを約5%含有している。このことから、R材の乾燥加熱プロセスにおいてアスファルトの劣化が進行することやブルースモークや悪臭の発生が増大することなどから、Vドライヤと同様の加熱プロセスである熱風とR材の流れ方向とが対向するカウンターフロー方式を適用することが難しいとされてきた。

以下では、アスファルトの劣化及びブルースモークと悪臭の生成メカニズムと悪臭防止法についての概要に触れる。

(1)アスファルトの劣化

バインダーとしてのアスファルトの劣化が進行すると、道路舗装の施工性(ワーカビリティ)が悪化するだけでなく、舗装面における早期のひび割れや骨材の剥がれなどの問題を引き起こす。このアスファルトの劣化に関しては酸化劣化が主因で、その酸化反応速度は温度に対して指数関数的に増大することが知られている。したがって、RDライヤでは、この酸化劣化を抑制するために、V骨材に比べて緩慢に乾燥加熱を行う必要がある。このことから、熱風とR材とが同一方向に流れるパラレルフロー方式のドライヤを適用している。

なお、アスファルトの劣化度合いを評価する指標として針入度が挙げられる。針入度の値が小さくなるほど硬いアスファルトであり劣化が進行していることを意味する。最近では、アスファルトの原材料としての品質評価よりも、アスファルト混合物としての評価が合理的であるとの考えから、圧裂係数での評価が用いられるようになってきている。

(2)ブルースモークと悪臭

ブルースモークや悪臭が発生する要因に関しては、RDライヤでの加熱プロセスに依存するところが大きい。即ち、RDライヤでは、バーナ燃焼による高温の熱風とR材とを直接接触させて乾燥加熱を行っている。そして、R材の温度上昇に伴いアスファルト皮膚の蒸気圧が高まると共に、熱風の残存酸素により酸化分解を受けて低沸点の揮発成分が生成してくるものと考えられている。

ここで、原油の残渣油であるアスファルトは、アスファルテン、油分、レジンなどに分類される炭化水素で構成されている。アスファルテンは、縮合多環芳香族の炭化水素で層状構造を成しており、分子量は1,000～10万の範囲である。これらアスファルテンが、油分やレジンの中にコロイド状に分散してアスファルトを構成している。油分は、パラフィン系やナフテン系の脂肪族炭化水素や芳香族炭化水素を含んでおり、その分子量は300～2,000の範囲である。レジンも、縮合多環芳香族が主成分で分子量は500～5万の範囲である。

これらのアスファルト構成成分の内、分子量が小さい油分やレジン分から先行して酸化分解を受けて酸化蒸発して行くものと考えられる。そして、揮発成分の酸化が進行し、臭いの官能基となるアルデヒド基(-CHO)やケトン基(-CO-)を生成して行く。このようにして生成した臭気成分は、RDライヤの排ガスに随伴して集塵機を経て、煙突から大気へ排出される。そして、排ガスが大気へ拡散することに伴い温度が低下し、過飽和に達したこれらの臭気成分が凝縮してミスト状のブルースモークと化して地上に降下してくる。このことが、近隣住民からの悪臭苦情としての問題を顕在化している。

これらの悪臭対策として、図-8に示すようにRDライヤの排ガスをVドライヤの排ガスに混合してバグフィルタで濾過集塵する技術を実用化し、APではこのシステムが主流を占めるようになってきている。特に、RDライヤから発生する粘着性のミストやダストをバグフィルタで捕捉するために、濾布への目詰まりや脱塵機能の弊害を招かないように、濾過助剤としてバージンダストを濾布表面にプレコーティングするようにしている。これは、Vドライヤの排ガスに随伴してくる多量のバージンダストにより、粘着性のミストやダストをコーティングし、その粘着性から濾布を保護することが狙いである。さらに、この技術は、R排ガスをV排ガスで希釈混合することにより、揮発成分の蒸気圧が下がり、その凝縮温度を低下させることができ、ブルースモーク生成の抑制に一定の効果がある。

以上のことから、バグフィルタを経て煙突から放出される排ガスは、ブルースモークが消失した無色透明となる。そして、R排ガスは、多量のV排ガスにより希釈され、大気へ拡散して行くことから、再びこの排ガスが地上に降下して悪臭苦情となる件数が減少している。

(3)悪臭防止法

臭気規制に関して、悪臭防止法の2号規制(排出口規制)が適用される地域では、臭気濃度や臭気強度で規制する自治体が増加している。

臭気濃度は、特定の臭気成分の濃度で規制するのではなく、悪臭公害の当事者となる人間の嗅覚により評価する三点比較式臭袋法が用いられる。これは、臭気成分を順次無臭の空気中で希釈して行き、人の嗅覚で臭わなくなる希釈倍数を指標としている。このように臭気濃度規制は、臭いの質に関係なく、臭いの強さのみを評価する規制でもある。

臭気強度は、排出口における臭気濃度と排ガス量との積で評価される。これは、煙突高さに応じて許容される臭気強度を計算で求める方法で、煙突が高いほど大気への拡散効果が作用して地上に降下する臭気濃度が弱まることに基づいている。即ち、煙突を高くすることによって、その規制値をクリアすることができる仕組みであるが、その適用範囲は



写真-13 直接燃焼方式の脱臭装置

実用的な煙突高さを考慮すると限定的となる。

したがって、APでこの煙突出口(2号規制)の臭気濃度や臭気強度をクリアできない場合には、本格的な脱臭装置を検討する必要がある。

以下では、本格的な直接燃焼式脱臭装置について、その詳細に触れる。

3.4.3 脱臭装置

(1)無機質系と有機質系の臭気成分

臭い物質は、100万種類以上の存在が確認されており、大きくは無機質系と有機質系に分類することができる。

無機質系臭気物質は、炭素を含まない化合物で硫酸化合物や窒素酸化物が代表的である。その他、硫化水素のように微量でも有害な物質も多く存在する。

有機質系臭気物質は、炭化水素を主とする化合物で、脂肪族炭化水素や芳香族炭化水素が代表的である。これらの臭気成分は、炭素と水素の化合物であることから、無臭の水とCO₂に酸化分解することが可能である。一部の有機化合物で硫黄や窒素もしくは、フッ素や塩素などのハロゲン族を含むものがある。これらは、酸化分解により無臭のCO₂と水に加え、臭い物質である硫酸化合物や窒素酸化物、フッ化水素や塩化水素などの酸性ガスを生成する。生成したこれらの臭い物質は、その特性に応じて別途臭気対策が必要となる。

(2)脱臭装置の種類とその概要

実用化されている脱臭方式には、活性炭や薬液による吸着や吸収法、化学薬品による化学分解法、加熱による酸化分解を基本原理とする直接燃焼法や触媒燃焼法などがある。

吸着法は、臭い物質を分解することなく物理的、化学的に吸収除去することが特徴である。ヘンリーの法則でも知られる通り、臭い物質の温度が低いほど吸着性能が優れる。このことは、冷蔵庫内の臭い吸収剤として活性炭などが用いられていることから明白である。いずれにしても、これらの吸着剤は、臭

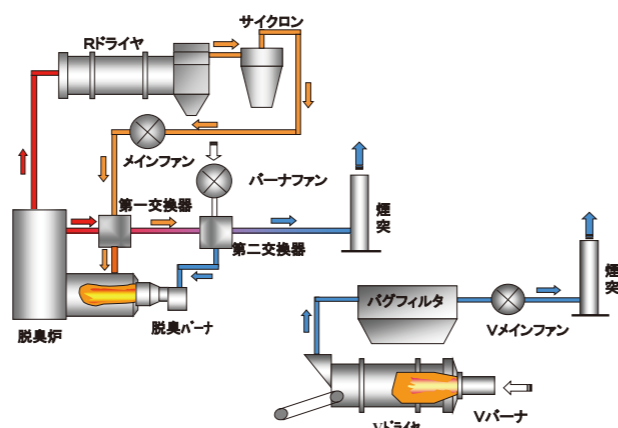


図-9 1バーナ脱臭システムのフロー

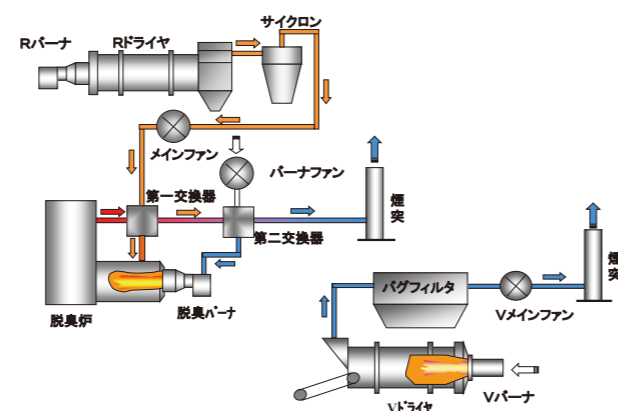


図-10 2バーナ脱臭システムのフロー

い物質で飽和状態に達した段階でその効果が薄れるので、吸着材の入替が必要となる。そして、飽和状態の吸着材から臭気成分を取り出し二次処理を行う必要がある。

以上のことから、この吸着法をAPの脱臭手段として適用する場合、吸着効率を向上させるために排ガス温度を常温近くまで冷却する必要があり、排ガス冷却装置の設備費用や吸着材のランニングコストが高くなることから実用的ではないと考えられる。

化学分解法は、主に酸化剤であるオゾンや塩素を発生する薬剤が用いられる。水溶液に臭い成分を吸収溶解させて酸化分解する方式や、臭気ガスに直接噴霧して酸化分解する方式などがある。前述のようにRドライヤから発生するアスファルト由来の臭気成分は、何万種類もの炭化水素を含んでおり、これら全てに有効な薬剤は確認されていない。また、これら薬剤が排ガスと共に大気へ拡散したときの安全性などについても十分に検討を加える必要があることなどから、APに採用するには現実的ではない。

直接燃焼法は、有機質系臭い物質に有効で化石燃料を熱源として臭気成分を加熱昇温し、酸化分解を促進させている。酸化分解反応は温度に対して指数関数的にその分解速度が高まることから、高温雰囲気を一定時間保持する機能を有する脱臭装置が用いられる。APには、この直接燃

焼式脱臭装置が適しており、次項の(3)で詳細を記述する。

触媒脱臭法は、貴金属である白金やパラジウムなどが触媒として用いられる。臭い物質の酸化分解温度を下げるのが可能であることから、直接燃焼法よりも低い温度での運用が可能となり、燃料費などのランニングコストを低減することができる。因みに、食品を加熱する電子レンジの内壁には白金触媒が塗布されており、食品からの臭い成分を含む有機物を低い温度で酸化分解し無害化している。

筆者らは、白金触媒を実際のRドライヤの排ガスの処理に適用し、その脱臭性能と耐久性に関する検討を行っている。その報告²³⁾によると、R排ガスを300~350℃に昇温することにより、一定の脱臭性能が認められ、直接燃焼式脱臭装置に比較して省エネルギー化に極めて優れている。

しかしながら、触媒として貴金属で高価な白金を使用していることから、APの排ガスを処理する場合を想定すると、大型で極めて高額なシステムとなる。さらに、APの排ガスには、触媒毒となる硫黄やハロゲンなども含まれていることから、触媒活性が低下した段階で交換する必要がある。

以上のことから、稼働率の低いAPへの適用は経済的に難しいと結論づけている。

(3)直接燃焼方式のAP用脱臭装置

APに適用する脱臭システムを検討する上で、安全性、経済性、ハンドリング性、耐久性などを総合して評価する必要がある。

Rドライヤは、バーナの着火と消火を頻繁に繰り返す間欠運用が多い。しかも、バーナ着火から5分足らずで予熱を完了してR材の供給を開始するような急激に熱負荷が変動する運用が一般的に行われている。また、集塵装置として乾式サイクロンを備えているが、これで捕捉できない粘着性のミストやダストが排ガスに随伴してくる。さらに、R排ガスは、アスファルト由来の多種多様な臭気成分を含むことから、個々の臭気成分を特定してその分解性能を評価することは極めて合理的でない。

このような諸条件の下、APに適用可能な脱臭装置として写真-13に示す直接燃焼方式を挙げることができる。

熱負荷の急激な変動に関しては、脱臭装置の耐火材として熱容量の小さいセラミックファイバーを採用することにより、急激な加熱や冷却に耐えうるだけでなく、炉体の膨張と伸縮に柔軟に追従することが可能である。

排ガスに随伴する粘着性のミストやダストに関しては、熱交換器としてプレートフィン方式の元素を採用し、メタリック構造の燃焼室とすることで粘着性のミストやダストの付着に対する剥離性を高めるとともに、そのメンテナンス性を向上させている。

アスファルト由来の多様な臭気成分を含む排ガスに対して

は、ほとんどの炭化水素を酸化分解することが可能な温度である750℃と、その酸化分解が完結するのに必要な時間である0.6秒の滞留時間を実験により導き出している。また、この脱臭装置は、酸化分解で最も重要な要因である3T (Time:滞留時間, Temperature:脱臭温度, Turbulence:攪拌)に関して、AP専用最適化をはかっている。

(4)直接燃焼式脱臭装置の構造

AP用の直接燃焼式脱臭装置は、燃焼室と滞留室とから構成されている。

燃焼室は、円筒形の外筒と内筒からなる二重構造で横方向に配置している。燃焼室端部の脱臭バーナから水平に形成されるバーナ火炎に向かって、内筒に放射状に設けた噴出口から被処理ガスを高速で衝突させている。このことにより、バーナ火炎と被処理ガスとを均一に混合し、臭気物質の酸化分解を促進させている。また、内筒は高温のバーナ火炎から輻射熱を受けるため、オーステナイト系の耐熱鋼材を使用し、内筒内部へ高速に吐出する被処理ガスにより冷却している。

滞留室は、堅型の一重構造で内面には耐火材であるセラミックファイバーを施工している。セラミックファイバーは、熱容量が小さく伸縮性と吸音性に富むことから、急加熱、急冷の使用に耐え、バーナ燃焼音を吸収する働きがある。そして、燃焼室で高速に混合昇温された臭気成分の酸化分解が完結するのに必要な時間を滞留させている。

つぎに、同脱臭システムには、Rドライヤと脱臭装置の組み合わせにより、1バーナ脱臭システムと2バーナ脱臭システムとが存在する。図-9に、1バーナ脱臭システムのフローを示す。図より、同脱臭装置には、脱臭処理した排ガスの熱エネルギーを有効に回収するために、2系統の熱交換器を備えている。第1熱交換器は、脱臭炉から排出される排ガスの熱エネルギーを回収し、被処理ガスを予熱している。第2熱交換器は、第1熱交換器を通過した排ガスの熱エネルギーをさらに回収し、バーナ燃焼用空気を予熱している。また、この1バーナ脱臭システムは、Rドライヤから発生する排ガスの全量を脱臭炉で処理した後、リサイクル材を乾燥加熱するのに必要な熱風をRドライヤの一部供給し、残りの熱風を排ガスとして大気へ排出している。このようにして、1バーナ脱臭システムは、Rドライヤと脱臭装置の加熱を1台のバーナで賄うシステムである。

図-10に示す2バーナシステムは、Rドライヤ用バーナと脱臭装置用バーナの2台のバーナを備えている。Rドライヤから発生した排ガスを、熱交換器で予熱して脱臭炉へ導き脱臭処理を行う。脱臭処理後の排ガスは、第1熱交換器ならびに第2熱交換器で廃熱を回収し煙突から大気へ排出している。Rドライヤ用バーナに予熱空気を利用していないことから、1バーナ脱臭システムより燃費が少し劣ることは否めない。



写真-14 RAVコンビネーションシステム1号機の全景

(5) 直燃燃焼式脱臭装置の燃料消費量

直接燃焼式脱臭炉をR排ガスの脱臭処理装置として適用した場合、R排ガスの温度よりも高温の処理ガスを排気することになる。省エネルギー化の観点より、熱交換器を大型化して廃熱回収量を増大することにより、この処理ガスをR排ガス温度に近づけることは技術的に可能であるが、経済合理性の観点から最適な熱交換器の大きさが決定される。即ち、熱交換器のコスト、耐久性、入替コストと燃料単価、稼働率などの要因により、最適な熱交換器の面積を求めることができる。

現実の熱交換器は、APの年間稼働時間が1,000～1,500時間の範囲で極めて稼働率が低いことから、小型の熱交換器を採用して燃料消費量を増大して経済性のバランスをはかっている。したがって、排ガス温度が350～450℃と高い状態で運用されているのが実状である。

以上のことから、脱臭装置を増設した場合、R材のトン当たりの燃料消費量がA重油換算で2～3リットル増大することは否めない。このことに鑑み、省エネルギー型の脱臭装置を備え熱風のカスケード利用を行うことにより、V骨材とR材とを経済的に乾燥加熱することができるRAVコンビネーションシステムを開発するに至る。

次項の3.4.4では、このRAVコンビネーションシステムの特徴について触れる。

3.4.4 RAVコンビネーションシステム

(1) 概要

前述のように、Rドライヤから発生するブルースモークや臭気成分を脱臭処理すべく、直接燃焼方式の脱臭装置を1995年に自社開発し、R排ガスに特化した脱臭処理システムとして市場に投入している。このシステムは、熱源となる化石燃料を燃焼することによって臭気成分を所定の温度まで加熱し、無臭のCO₂と水とに酸化分解することを基本原理としている。このことから、脱臭を行わない従来のRドライヤに比べ燃料消費量が増大することは否めない。したがって、温

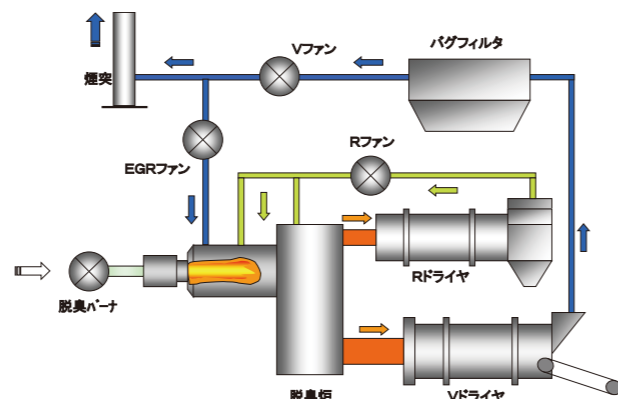


図-11 RAVコンビネーションシステムの全体フロー

室効果ガスであるCO₂の削減という国際社会の趨勢から、脱臭装置の省エネルギー化ならびにCO₂の削減が、最も強く求められている課題でもある。

このような社会要請から、R排ガスの脱臭処理と同時に、R材とV骨材とを極めて効率良く乾燥加熱することができるRAVコンビネーションシステム(Recycle And Virgin Combination System: 以下、RAVシステムと記載)を1998年に自社開発するに至る。このRAVシステムは、バーナ1基と脱臭炉、Rドライヤ、Vドライヤ、バグフィルタなどをコンパクトな3層構造として省スペース化をはかると共に、脱臭処理した高温の熱風を、R材とV骨材の乾燥加熱にカスケード利用を行うことで、省エネルギー化とCO₂排出量の削減をはかっている。

なお、筆者らは、本RAVシステムの省エネルギー効果とその特性に関する報告^{24)～26)}を既に行っている。

(2) 熱風のカスケード利用による省エネルギー化技術

写真-14にRAVシステム1号機の全景を、図-11に本RAVシステムのフローを示す。

図より、Rドライヤの排ガスを、直接燃焼式の脱臭炉に導入して700～1200℃に加熱し、無臭のCO₂と水とに酸化分解している。そして、この脱臭処理した熱風を再びRドライヤに熱源として供給している。この循環サイクルにおいて、R材から発生する水蒸気、侵入空気、バーナ燃焼空気に相当する熱風が余剰となり増大してくるが、この熱風を脱臭炉からVドライヤに導入して、V骨材を乾燥加熱するのに利用している。最終的に、Vドライヤからの排ガスは、後述するドライヤ回転数制御により、最適な温度にコントロールし、バグフィルタを経て大気に排出している。

このようにして、本RAVシステムは、熱風のカスケード利用を行うことにより、従来、大気に直接排出していたRドライヤの排ガスに相当する排ガスを削減し、システム全体の熱効率を20%以上向上させている。

(3) EGRと二段燃焼による省エネルギー化とサーマルNOxの削減技術

本RAVシステムでは、無効エネルギーとして排ガスで持ち去られる熱エネルギーを削減すること、サーマルNOxの析出を抑制することを目的に、二段燃焼技術を導入している。

この二段燃焼技術は、バーナの一次燃焼空気比が0.8前後になるよう、脱臭炉内の酸素濃度によりフィードバック制御を行うと共に、R排ガスの全量とV排ガスの一部を脱臭炉内の二次燃焼空気としてEGRを行い、それら排ガスの残存酸素により、燃焼に不足する酸素を補っている。R排ガスとV排ガスの酸素濃度は、各ドライヤへの侵入空気量で決定され、EGRによりこの侵入空気を二次燃焼空気として利用することで、それに相当する排ガスを削減することを可能としている。

さらに、この二段燃焼技術により、火炎の局所的な高温部分が減少して、サーマルNOxの析出が抑制されると同時に、一次燃焼空気が不足することにより生成するCOがサーマルNOxを式(1)に示すように還元している。



これらのことにより、排ガスに含まれる窒素酸化物の濃度を20ppm以下に低減することを可能としている。

なお、本RAVシステムのバーナは、3.2.2項で述べた燃焼範囲拡大技術を用いて、TDR(燃焼範囲比)1:7以上を確保し、幅広い熱負荷の変動にも精度良く追従できるようにしている。

(4) Vドライヤ回転数制御による省エネルギー化技術

3.3.1項でも触れているが、本RAVシステムのVドライヤは、V骨材の供給量や含水比などの変動に対し、幅広い範囲で最適な熱効率が維持できるように、ドライヤ回転数制御技術^{15)～18)}を取り入れている。この技術を採用することにより、Vドライヤの排ガス温度を熱負荷の変動にかかわらず常に露点温度近傍で制御し、煙道やバグフィルタの低温腐食の影響を回避しながら高い熱効率を維持することを可能としている。

(5) RAVコンビネーションシステムの制御技術

本RAVシステムにおけるV骨材とR材の加熱温度制御は、バーナ1基でそれぞれ独立に温度コントロールができる制御方式を確立している。V骨材温度は、脱臭炉の圧力を増減させることによりVドライヤに流れ込む熱風量を制御し、加熱R材温度は、脱臭炉の圧力変動に影響を受けることなくRドライヤに流れ込む熱風量をコントロールする制御方式を新たに開発している。

具体的には、V骨材温度が目標値を下回った場合、その偏差に応じて脱臭炉の圧力を高めてVドライヤに流れ込む

熱風量を増大させる。脱臭炉の圧力を高めるには、バーナ燃焼量を増大させて目的の炉圧まで上昇させる。このとき炉の温度も上昇するが、EGRファンによるEGR量を増大させて炉の温度が上昇するのを抑制している。逆に、V骨材温度が目標値を上回った場合、逆動作で偏差に応じて脱臭炉の圧力を低下させてVドライヤに流れ込む熱風量を減少させている。なお、Vドライヤに流れ込む熱風量は脱臭炉とVドライヤとの差圧の平方根に比例することから、この差圧と炉温度からVドライヤに流入する熱量を求めてV骨材温度制御に利用している。

一方、加熱R材温度が目標値を下回った場合、その偏差に応じてRファンの回転数を増大させRドライヤに流れ込む熱風量を増大させている。逆に、加熱R材温度が設定値を上回った場合、逆動作で偏差に応じてRファンの回転数を減じてRドライヤに流れ込む熱風量を減少させている。このように、脱臭炉を熱源としてVドライヤとRドライヤへの熱風の供給量を独自に制御し、これら熱風量の変化が相互に干渉しない制御方式を確立させている。

4. アスファルトプラントにおけるCO₂排出量削減技術の展望

4.1 燃料転化によるCO₂排出量の削減技術

4.1.1 概要

APは、合材が熱く軟らかい内に道路舗装現場で打設転圧を行う必要性から、ダンプでの輸送時間に制限を受け、そのことを補うようにして全国に分散して立地している。したがって、APは生産性や経済性を追い求めて大型集約化をはかることができない製造設備である。また、大気汚染防止法に基づく硫黄酸化物や窒素酸化物の排出規制に対して、APはC重油などの安価な燃料を使用せず、硫黄や窒素の含有量が少ない良質な燃料を使用することにより、排ガスの浄化設備である脱硫装置や脱硝装置の設置を回避している。このことは、APが前述の理由で全国に分散立地していることなどから他業種の製造設備に比べて稼働率が極めて低く、これらの浄化設備の減価償却費と燃料費との関係によるところが大きい。

以下では、地球規模で温室効果ガスの削減への取り組みが必要とされるCO₂の排出量削減に関して、CO₂の排出量が少なくなる燃料のAPへの適応性について検討する。

4.1.2 LNGサテライトシステム

LNG(Liquefied Natural Gas: 液化天然ガス)は、アメリカを始めとするシェールガスの日本への輸入増大や日本海に多くの埋蔵量が確認されているメタンハイドレートなどから将来の燃料として極めて有望である。また、LNGは、燃焼することによりCO₂を排出するが、A重油と比較して、炭素の構



写真-15 LNGサテライトシステムの全景

成割合が少ないために、単位熱量当たりのCO₂排出量を約25%削減することができる。とりわけ、化石燃料の中では最もCO₂の排出量が少なくなる。

メタンを主成分とする天然ガスは、ガス田と需要地とが陸続きであれば、その輸送にパイプラインが用いられている。我が国のように、周囲が海でガス田がない場合、輸送効率を高めるために天然ガスを-162℃まで冷却することにより、その体積を1/600の液体としてLNGタンカーで輸送している。陸揚げされたLNGは、海水の熱を利用してガス化し、パイプラインを通じて各需要家に供給されている。

我が国は、中東アジアやインドネシアから多くのLNGを輸入しているが、2017年初頭からアメリカからのシェールガスの輸入が本格的に始まっており、今後輸入量が增大することにより国内のLNG流通価格に大きく影響を及ぼすものと考えられる。

一方、大手ガス会社は、国内の都市部からガス供給パイプラインの敷設エリアを順次拡大し、都市ガスの普及に努めている。AP用燃料として都市ガス13Aの使用事例も増加しているが、APの立地場所とガス供給エリアとが合致しない場合も多い。この場合には、AP専用のLNGサテライトシステムを適用することによって、CO₂排出量の削減が可能となる。写真-15にLNGサテライトシステムの全景を、図-12にAP専用LNGサテライトシステムの全体フローを示す。写真と図より、AP専用LNGサテライトシステム(特許登録済)は、LNGの貯蔵タンクと気化器やその他安全保安設備を加味したもので、都市ガス用のAP用バーナをそのまま適用させることが可能である。さらに、省エネルギーの観点より、APの排ガスに含まれる水蒸気の凝縮潜熱を回収してLNGのガス化に利用している。このことにより、一般的なLNGサテライトシステムが備えているガス温水ボイラーとその使用燃料を不要としている。

近い将来シェールガスの輸入が増大し、メタンハイドレートなどの開発が本格的に始まりLNG価格が安定すれば、AP

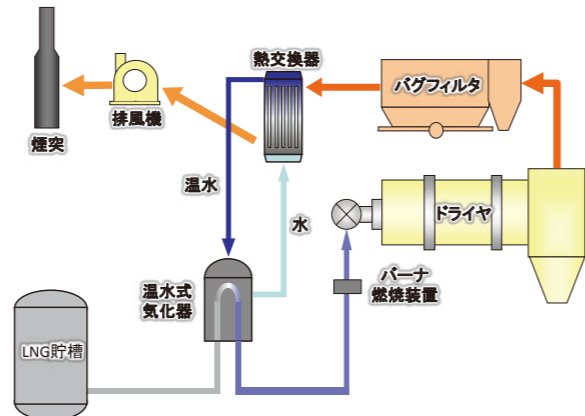


図-12 AP専用LNGサテライトシステムの全体フロー

にとって極めて有望な燃料となり得るものと考えられる。しかしながら、化石燃料を使用している限り、CO₂の排出量削減(省エネルギー化)技術は限界に近づいている。今後は、カーボンニュートラルなバイオマス燃料への転化などの推進を積極的にはかって行く必要がある。

4.1.3 バイオマス由来燃料

バイオマス燃料: Biomass Fuelは、動植物由来の燃料で燃焼することによりCO₂を大気へ放出するが、概ね100年以内の周期で光合成などにより再び大気中のCO₂を取り込んで固定するメカニズムが働く。このことから、燃焼しても大気中のCO₂を増加させないカーボンニュートラルであると定義される。石炭や石油などは、同じ動植物由来の燃料ではあるが、その炭素の循環周期が実に数億年を要することから正に化石燃料となる。このことから、CO₂の排出量を削減させるべく、重油や灯油などの化石燃料に替わってバイオマス燃料をAPで適用する動きが一部で始まっている。バイオマス燃料は、その状態から気体燃料、液体燃料、固形(固体)燃料に分類することができる。

気体のバイオマス燃料には、メタン発酵で生成するメタンガスなどがあるが、そのハンドリング性や経済性からAPへの適用事例は今のところ見当たらない。メタンは、都市ガスの主成分であることから、バーナなどの燃焼機器類には特別な対応は不要である。また、都市ガスの供給インフラを利用してバイオマス由来のメタンガスを都市ガスに混入する実証実験などが始まっている。このことから、バイオマス由来のメタンガスを液化してLBG: Liquefied Biomass Gas(液化バイオマスガス)として、AP専用のLNGサテライトシステムでの運用も技術的には可能であると考えられる。

液体のバイオマス燃料は、貯蔵や運搬などの安全性やハンドリング性に優れていることから、一部のAPで運用が始まっている²⁷⁻²⁸⁾。この事例として、木材チップのガス化発電設備で副産する木質タールや、廃食油からBDF(Bio



写真-16 バイオマス燃料バーナ(液体)



写真-17 木質タールの燃焼実験

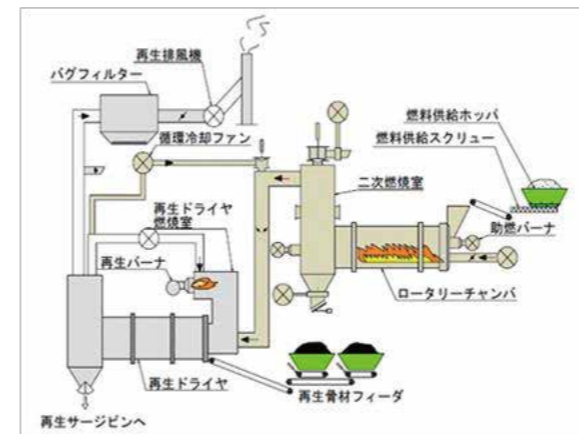


図-13 固形バイオマス燃焼システムの全体フロー

Diesel Fuel)を製造するときの副産物である廃グリセリンなどを燃料とするAP専用のバイオマス燃料バーナを2009年に自社開発(特許登録済)し、既に市場に投入している。写真-16にバイオマス燃料バーナの全景を、写真-17に木質タール燃料の燃焼実験の様子を示す。このバイオマス燃料バーナは、木質タールや廃グリセリンの粘性が高いために加温して粘度を下げ、霧化状態を改善するために圧縮空気を媒体とする二流体ノズルを採用している。さらに、木質タールは、その生成プロセスから木酢液を多く含んでおり、pHは強酸性を示すことから、バイオマス燃料と接するところは全て耐酸部材を用いている。

固形バイオマス燃料には、古くから木材チップなどが燃料として活用されているが、単位質量および単位容積当たりの発熱量が化石燃料よりも低く、ハンドリング性、貯蔵性、輸送性に劣ることからAPへの適応事例は少ない。また、RPF: Reuse Paper and Plastic Fuelは、産業系廃棄物の古紙や廃プラスチックを主原料とした固形燃料である。このRPFは、産業廃棄物が主原料となっていることから、カーボンニュートラルではないが、A重油と比較して熱量当たり20%のCO₂排出量の抑制効果がある。さらに、APの立地条件やRPFの流通形態にもよるが、燃料単価が発熱量ベースでA重油の1/10程度であることが魅力的である。ただし、RPFをAPに適用させる場合、大型の燃焼装置が必要となることが今後



写真-18 固形バイオマス燃焼システムの全景

の課題となる。2011年に市場投入した固形バイオマス燃焼システム(特許登録済)のフローを図-13に、その燃焼システムの全景を写真-18に示す²⁹⁻³¹⁾。

4.1.4 微粉炭燃料

バイオマスや廃棄物由来の固形燃料をAPに適用するためには、写真-18に示したような大型の燃焼装置とその設置スペースが必要となる。このことが足枷となり、固形バイオマス燃料のAPへの普及が進んでいない。

固形燃料が大型の燃焼装置を必要とするのは、ガスや液体燃料のような拡散燃焼を基本とする燃焼メカニズムと大きく異なるところにある。固形であるがために酸素との接触反応が、固形燃料の表面積に支配されて燃焼速度が極めて遅いことに起因している。このことから、固形燃料を細かく粉碎して比表面積を増大させることが、燃焼速度を速める上で重要な要素となる。したがって、固形燃料を細かく粉碎してバーナ単独で燃焼させることができれば、大型の燃焼装置やそれらの設置スペースが不要となり、固形バイオマス燃料のAPへの普及が促進されるものと思われる。その手段の一つとして、バイオマスや廃棄物を炭化して微粉炭燃料とすることにより、微粉炭バーナで燃焼させることが可能となる³²⁾。

また、微粉炭燃料の燃焼特性は、粉体粒子径とVOC: Volatile Organic Compound(揮発性有機物)の含有量

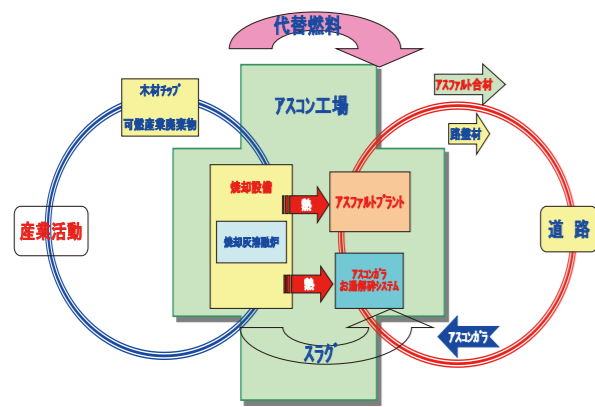


図-14 焼却廃熱を利用した合材工場のイメージ

が燃焼性に大きな影響を及ぼす。即ち、VOC含有量が多く粒子径が小さいほど、着火性と燃焼速度が改善されることになる。

以上のことから、バイオマスや廃棄物由来の固形燃料を炭化粉碎して微粉炭燃料を製造するシステムと、この微粉炭燃料を効率よく燃焼させることができる微粉炭バーナの開発(特許出願中)が待ち望まれるところである。

4.1.5 焼却廃熱のAPへの有効利用

前項までは、CO₂の排出量を抑制する代替燃料などを検討したが、ここでは、将来のAP像として焼却設備からの廃熱の直接利用を考える。

焼却設備には、市町村などの地方自治体が運営管理する一般廃棄物処理施設と、民間の産廃処理業者が運営管理する産業廃棄物処理施設とに大別される。前者の処理施設は、一般家庭から発生するごみを主に焼却処理する施設で市町村がその処理義務を負う。後者の処理施設は、民間での産業活動により発生した産業廃棄物を焼却処理する施設で、その処理義務は廃棄物の発生元が負う。いずれにしても、廃棄物の減容化を主目的に焼却処理が行われている。最近では、これらの焼却施設から廃熱を回収して発電を行う廃棄物発電施設が増加しつつある。

しかしながら、これらの廃熱から電気への変換効率は、20%不足で極めて低い。このことは、廃棄物の多様性により、発熱量の変動や酸性ガスやクリンカーの発生によりボイラーなどの設備への悪影響が顕在化するためである。

一方、APでは、化石燃料の燃焼による熱風をV骨材の乾燥加熱に直接利用しているため、その熱交換効率は80%以上に達している。このことから、焼却施設の廃熱から電気エネルギーを得るよりも、骨材の乾燥加熱に直接この熱を利用した方が合理的にCO₂の排出量を削減することができる。しかし、焼却施設の廃熱から回収した熱エネルギーを離れた需要家であるAPに供給するのは極めて困難である。熱エネルギー

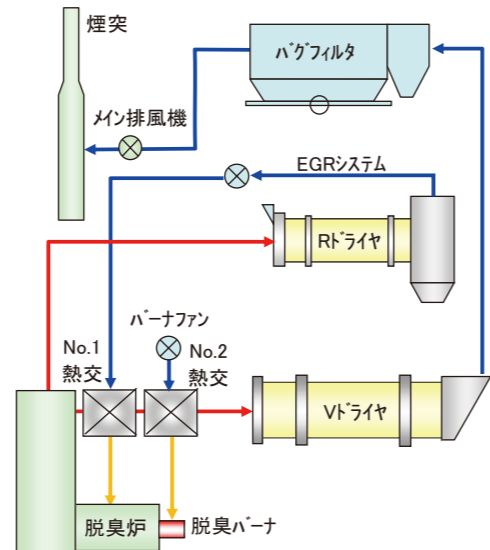


図-15 改良型のRAVコンビネーションシステムの全体フロー

は、電気エネルギーに比較して、その有効な熱媒体(ヒートキャリア)が存在しないことから、輸送性が極めて劣ることは否めない。したがって、図-14に示すように、焼却施設とAPとを隣接させることにより、輸送性の短所を補うことができる。このためには、地方自治体での焼却施設の建て替えや増設のタイミングとAP建設とのタイミングを合致させる必要があり、官民通じての綿密な検討と調整が必要である。さらに、APに必要な熱エネルギーを運ぶ熱媒体が廃棄物の燃焼ガスであるため、その貯蔵性が極めて悪いことから、回収する廃熱量に応じたAPの運用が求められることも課題となる。

新たなビジネスモデルとして、骨材の製造や流通を営む企業と自治体の焼却施設とがタイアップし、焼却施設に骨材乾燥システムを併設する。特に、比表面積の大きい砂の含水比が高いので、この乾燥システムに焼却設備からの廃熱を導入して砂を乾燥し、それを乾燥砂と言う付加価値を付けて合材工場に販売する。通常、合材に使用される砂は、水分を12~15%含んでいることから、乾燥砂にすることでAPでの燃料消費量を大きく減らすことができ、これに伴いCO₂の排出量が減少する。さらに、この乾燥砂を用いることにより、ダンプによる輸送効率が10%以上向上し、CO₂の削減に相乗的な効果が期待される。

4.2 省エネルギー化によるCO₂排出量の削減技術

4.2.1 概要

炭素の含有割合が少ない燃料やカーボンニュートラルなバイオマス由来の燃料に代替することにより、CO₂の排出量を削減するだけでなく、このことと併せてAPの本質的な省エネルギー化にも取り組んで行く必要がある。しかしながら、合材の製造プロセスが現状と大きく変わらない限り、APに求められる省エネルギー化技術に限界が近づいている。このこと

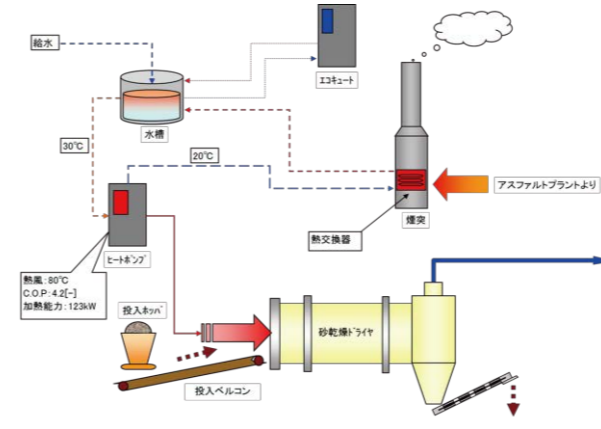


図-16 水蒸気の凝縮潜熱を熱源とするヒートポンプによる砂乾燥システム全体フロー

は、最新型APの熱効率が80~85%に達していることから改善の余地が残されていないことが明らかである。

特に、排ガスが持ち去る20~15%の無効エネルギーを回収して有効利用するためには新たな省エネルギー技術のブレークスルーが必要となる。

以下では、筆者らがAPへの適用の検討を進めている新たな省エネルギー技術として、RAVコンビネーションシステムの改良、凝縮潜熱回収技術、酸素富化燃焼技術、蓄熱技術、炭素固定技術などの概要を紹介する。

4.2.2 RAVコンビネーションシステムの改良

アスファルト舗装における、R合材のR材混入率が增大している。このことは、循環型社会形成推進基本法に基づく建設リサイクル法施行の成果であるとともに、リサイクル技術や品質管理技術の向上によりR合材が経済的に優位であることなどを裏付けている。このように、R合材のR材混入率が高くなることにより、3.4.4項で述べたRAVシステムの運用が難しくなり、本システムの普及には至らなかった。

RAVシステムのR材混入率は、50%が限界であり、V骨材の含水比が低下すると混入率がさらに低下する傾向にある。このことは、省エネルギー化を担保しながらRドライヤからの排ガス全量を800~1200℃で脱臭処理し、その廃熱の全量をVドライヤで回収する熱のカスケード利用を基本原理とする省エネ技術の課題でもある。即ち、R材とV骨材とが必要とする熱量のバランスにより、その混入率の限界値が決定されてしまうのである。

したがって、R材の混入率を増大するために図-15に示すように、Vドライヤの熱風導入側に2基の熱交換器を増設し廃熱を回収している。No.1の熱交換器は、R排ガスを、No.2の熱交換器は、バーナ燃焼空気をそれぞれ予熱している。このことにより、Vドライヤに流れ込む熱風から熱エネルギーを回収してR排ガスとバーナ燃焼空気に分配することで、Vドラ

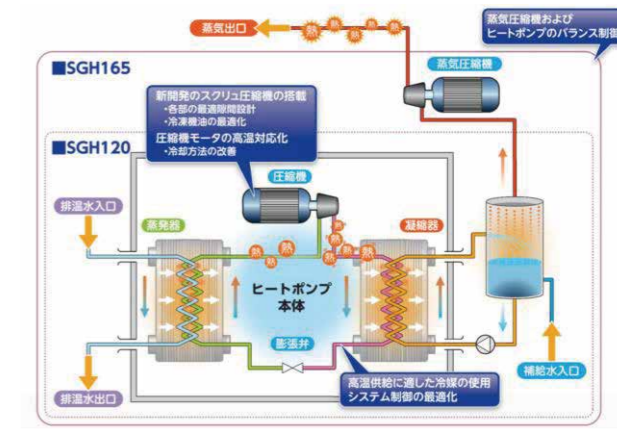


図-17 ヒートポンプによる水蒸気発生システム³³⁾

イヤに流れ込む熱エネルギーを減じることができ、このことによりR材の混入率を増大することが可能となる。

4.2.3 凝縮潜熱回収とヒートポンプ技術

APで有効エネルギーと定義しているのは、骨材を乾燥加熱するための水の蒸発潜熱と骨材の昇温顕熱である。ただし、蒸発潜熱を奪った水蒸気は排ガスと一緒に外気に放出されてしまう。骨材に残った顕熱を有効エネルギーと再定義すると、熱効率は35%不足となり、排ガスで持ち去られる無効エネルギーは、60%以上に達する。エネルギー保存則(熱力学の第一法則)を適用すれば、化学反応や状態変化の前後でエネルギーの総和は不変であることから、排ガスは、水蒸気の潜熱を含む多くの熱エネルギー(エンタルピー)を保有していることになる。

このことから、排ガスに含まれる水蒸気を凝縮させて、その凝縮潜熱を回収して有効利用することができれば、大きな省エネルギー効果を得ることができる。水の凝縮潜熱は、2.63MJ/kg(628Kcal/kg)とエネルギー密度が極めて大きいことから、効率的に熱エネルギーを回収することができる。しかしながら、熱エネルギーの第0法則が示す通り、熱エネルギーは、温度差に比例して移動するため、温度差を設けなければ有効な熱エネルギーを取り出すことができない。したがって、回収した熱エネルギーの質(温度)が低いと利用する用途が限定的となってしまふ。

ヒートポンプ技術を応用することにより、利用価値のある温度にまで被加熱物を昇温することが可能である。例えば、図-16に示すように、AP排ガスの凝縮潜熱を回収して50~60℃の温水を生成し、これを熱源としてヒートポンプにより120℃の温風を発生させる。この温風により高含水比の砂を乾燥させて省エネルギー化をはかる一連のシステム(特許出願中)を考えることができる。ヒートポンプの性能は、成績係数(COP:Coefficient Of Performance)を指標として評

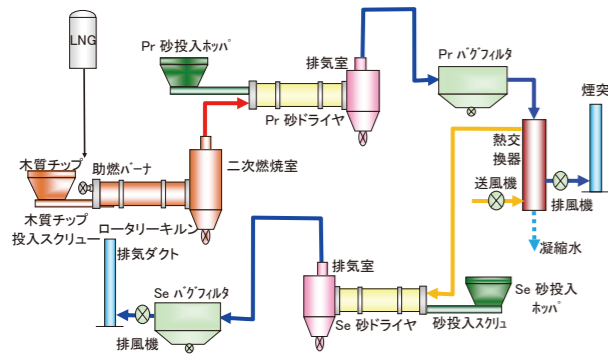


図-18 排ガス中の水蒸気潜熱を回収利用する砂乾燥システム

備えられる。例えば、COP=3.0は、1kWhの電力を投入して3kWhの出力(熱風)を得ることを示している。

また、図-17は、ヒートポンプによる水蒸気発生システムで、160~170℃の水蒸気を得ることができる³³⁾。まず、ヒートポンプにより120℃の水蒸気を発生させ、これを水蒸気圧縮機で圧縮することにより160~170℃に昇温が可能である。この水蒸気を用いて、アスファルトタンク、ホットビン、合材サイロなどの加温に利用することが可能となる。

4.2.4 排ガス中水蒸気の凝縮潜熱を回収利用する砂乾燥システム

APでは、合材の製造で使用する燃料の大半を、骨材の水分を除去する乾燥プロセスで消費している。中でも、砂は、比表面積が大きく不純物であるシルトや粘土を除去するために水洗していることから10~15%の高含水比となっている。また、このことは、APで乾燥する骨材全体の70%以上の水分を砂が持ち込んでいることになる。したがって、砂の水分を事前に削減することは、APにおける省エネルギー化とCO₂削減に大きく寄与することに繋がる。

APは、他産業と同様に二度に渡るオイルショックの影響を強く受けたことにより、徹底した省エネルギー化技術を導入してきたことは前章で詳細に触れている。その結果、APドライヤの排ガス温度が100℃を下回り、包含する水蒸気が凝縮する温度域にまで熱エネルギーを有効に回収し骨材の乾燥加熱に有効利用している。このことにより、ドライヤの熱効率は実に85%を超える域に達しており、これ以上の省エネルギー化ならびにCO₂の削減をはかる余地は殆ど残されていない。いわゆるAPの「省エネルギー化の限界」を迎えようとしている。

一方、合材の舗装施工時に要求されるワーカビリティなどの品質が温度に大きく依存することが知られており、合材の温度低下を招かない熱い状態でダンプ輸送が可能な時間は、概ね1.5時間程度であると言われている。そして、全国津々浦々の道路へ熱い状態の合材を供給するため

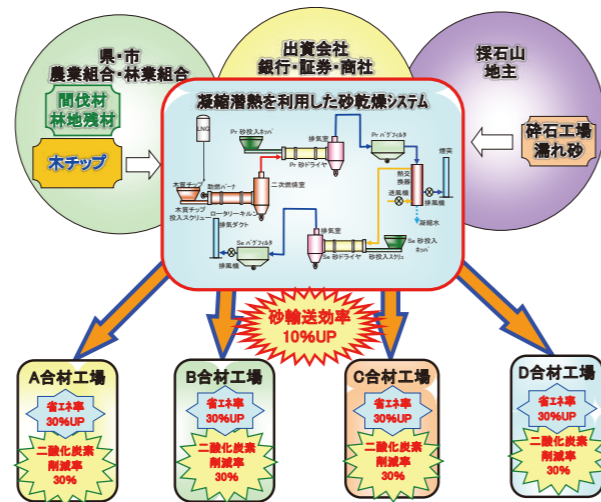


図-19 砂乾燥システムのビジネスモデル

には、ダンプの輸送時間を補完することができる場所にAPを分散立地させる必要があった。このことから、APはダンプでの輸送時間を短縮できるような進化の過程を辿ってきたとも言える。

さらに、R合材用生産設備の増設やダンプ積載時間の短縮などの要請に答える形でAPの大型化(ミキサの大型化)が進んできている。そして、このことは裏腹に、公共投資削減の煽りを受けて合材生産量が半減したことにより、APの稼働率が大きく低下し、合材の生産性や省エネルギー化の足枷となっている。具体的には、APの稼働率が低下することにより、間欠運用の頻度が増大すると共に停止インターバルが長くなり、合材生産には寄与しない設備の予熱のために多くの燃料が消費され、多くのCO₂を排出するに至っている。このことから、APの集約化による稼働率の向上をはかることは、もはや限界に近づいていると言える。いわゆるAPの「稼働率向上の限界」を迎えようとしている。

以上の理由により、従来技術に立脚したAPの省エネルギー化並びにCO₂削減の行き詰まり感から脱却するために、筆者らは図-18に示す「排ガス中の水蒸気潜熱を回収利用する砂乾燥システム」を考案(特許出願中)している。

図より、砂乾燥に特化したパラレルフロー方式の第一のドライヤで砂を乾燥すると共に、そこから排出する水蒸気を包含した排ガスから熱交換器を介して水蒸気の凝縮潜熱を回収し、新たな熱媒体として取り入れた外気に伝熱し温風を生成する。そして、この温風を第二のドライヤに導入して新たな砂の乾燥に有効利用している。この新たに考案した砂乾燥システムにより、熱効率は従来比で70ポイント以上増大して実に150%を超えている。

一方、当該システムの燃料として、4.1.3項で述べた固形燃料用ロータリーキルンを用いて、カーボンニュートラルである木質チップを燃焼している。さらに、助燃バーナ用の燃料としては、化石燃料の中でCO₂の排出量が最も少ないLNG

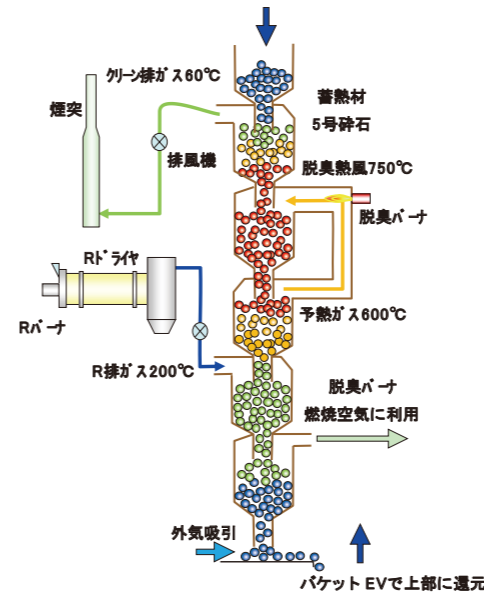


図-20 骨材を蓄熱材として利用するAP用蓄熱脱臭装置

を用いている。このことにより、従来比で80%以上のCO₂削減を達成している。

図-19は、砂のサプライチェーン途上に当該砂乾燥システムを組み入れ、製造した乾燥砂を各APに供給する場合のビジネスモデルを示している。これによると、既存APの大型集約化や省エネルギー機器の導入を行うことなく、省エネルギー化とCO₂の削減とを極めて合理的に推進することが可能となる。

さらに、当該砂乾燥システムでは意図して常温の乾燥砂を製造していることから、砂の放散熱によるエネルギーロスが生じなくなり、乾燥砂の長期貯蔵や長距離輸送にも適応することが可能となる。このことにより、当該砂乾燥システムの稼働率を高めるとことにより、省エネルギー化による経済合理性とCO₂削減による環境適合性とを高次元でバランスさせている。

4.2.5 骨材を蓄熱材として利用するアスファルトプラント用脱臭装置

APでは、臭気(悪臭)を含む排ガスの特殊性から直接燃焼式脱臭装置を採用している。そして、省エネルギー化の観点から、この脱臭炉に熱交換器を搭載して高温の脱臭処理ガスから熱エネルギーを回収し、被処理ガス及びバーナ燃焼空気の予熱に有効利用している。ただし、稼働率が低く間欠運用が多用されるAPの脱臭装置では、加熱と冷却の繰り返しによる金属疲労の影響を強く受けることから、熱交換器の定期的な入れ替えを余儀なくされている。このことから、その時の燃料価格に影響を受けるものの、その熱交換面積を小さく設定して減価償却費を下げ、その分をランニングコストである燃費に振り向けた方が合理的である。このような理

由から、AP用脱臭装置の排ガス温度が300~400℃の比較的高温の設定とならざるを得なくなり、経済合理性と環境適合性とが乖離する矛盾が生じている。

一方で、前述の通り温室効果ガスであるCO₂の排出量を削減することが社会的使命となる今現在において、合理的に廃熱を回収してCO₂の削減をはかることができる脱臭装置及び、それを構成するAP全体の最適システムの技術開発を惜しみなく進めて行くことが、AP製造メーカーに求められる所である。

蓄熱式脱臭装置(以下、RTOと記載、RTO:Regenerative Thermal Oxidizer)は、直接燃焼式脱臭装置の中でも廃熱回収能力に優れ、APへの採用事案がここ近年の内に数例報告されている。このRTOは、ハニカム構造のセラミックス製蓄熱材を熱交換器として装備しており、そのメカニズムの違いから熱交換面積を大きく採ることが可能で、従来の金属製エレメントを備える熱交換器に比べて省エネルギー化に優れることが特徴である。ただし、前述のように稼働率が極めて低く間欠運用が多用されるAPにおいては、ヒートショックによる蓄熱材の損傷を防ぐために、昇温速度に制限を設けて緩慢に予熱することが要求される。このため、予熱に時間を要し余分な燃料を消費することとなりRTO本来の高い熱交換効率の恩恵は限定的であるのが実態である。さらに、RTOは、その基本原理より、蓄熱材への蓄熱と放熱とを交互に繰り返す必要があることから、放熱ガスと受熱ガスとの入れ替え操作を行うための複雑な切換え機構を備えていることなどが課題となる。

筆者らは、AP用脱臭装置のこれらの課題に鑑み、合材の原材料となる骨材を蓄熱材として利用するAPに特化した図-20に示す蓄熱式脱臭装置を考案(特許出願中)している。

当該脱臭装置は、骨材を合材の原材料として使用する前に、脱臭装置の蓄熱材として先行利用し、一定の熟履歴を経た蓄熱材を順次入れ替えて、合材用の骨材として再利用している。このことにより、ヒートショックによる蓄熱材の劣化を回避できるだけでなく、蓄熱材の調達費用や処分費用を不要としている。

そして、骨材である蓄熱材を連続的に循環移動させることにより、放熱ガスと受熱ガスとを交互に入れ替える操作を不要とし、従来のRTOに必要であったガスを交互に入れ替えるための複雑な機構を無くしている。

さらに、蓄熱材の粒度を5~7号砕石及び砂に至る範囲で連続的に変更することにより、熱交換面積を自在に増減させると共に、蓄熱材の間隙を流れるガスの通気抵抗との最適化をはかれるようにしている。

加えて、蓄熱材の循環移動速度を自在に変更することにより、蓄熱部の熱容量(水当量)を増減することができるようにしている。このことにより、被処理ガス量の変化に応じて、

熱交換効率が最大となる被処理ガスと蓄熱材との熱容量比（水当量比）を理想の1:1で運用することを可能としている。

以上の結果、従来のAP用脱臭装置の課題であった定期的な熱交換器の入れ替えを不要とすると共に、構造が複雑なガスの切り替え機構や、高額なハニカム構造のセラミックス製蓄熱材を用いないことから、初期設備費と保守メンテ費とを低減させている。さらに、RTOの課題でもあった緩慢な予熱による余分な燃料の消費を削減すると共に、予熱時間を短縮して操作性を向上させている。加えて、被処理ガスを予熱した後の蓄熱エネルギーをバーナ燃焼空気の予熱にカスケード利用することで、最終的に大気へ放出する脱臭処理後の排ガス温度をAPの排ガス温度よりも低い80℃以下に下げることができ、このことにより熱効率が向上して、燃料消費量とCO₂排出量とを大きく削減している。

このように、当該脱臭装置は、経済性と環境性とのバランスが取れた極めて合理的な脱臭システムをAPに提供することが可能となる。

4.2.6 酸素富化燃焼技術

酸素富化燃焼は、燃焼空気の酸素濃度を高めて燃料を燃焼させる技術である。空気中には燃焼に必要な酸素が約21%、燃焼には寄与しない窒素が約78%含まれているが、通常の燃焼では燃焼に関与しない78%の窒素を排ガス温度まで加熱して排気しているに過ぎない。燃焼空気の酸素濃度を高めることにより、余分に加熱する窒素の割合が減少し、無駄に排気する排ガス量を低減させることができる。

さらに、加熱する窒素の割合が減少することで燃焼温度が上昇するが、この温度上昇で増加した熱エネルギーに相当する熱風量を減じることが可能となり、相乗的に排ガス量を削減することが可能となる。鉄鋼業の高炉などに既に導入されている技術である。

酸素濃度を高める手段として、PSA法（Pressure Swing Adsorption）、VSA法（Vacuum Swing Adsorption）、PVSA法（Pressure Vacuum Swing Adsorption）の3つに大別することができる。PSA法は、吸着材にゼオライトなどを用いて圧縮空気を供給して酸素と窒素の吸着圧の差を利用して酸素を分離する原理である。VSA法は、PSA法に改良を加えて脱着再生の時に真空ポンプを用いて吸引し、その分離効率を高めている。PVSA法は、両者の中間的な位置づけの装置である。この酸素富化燃焼技術をAPに適用した場合、その稼働率にもよるが燃焼空気中の酸素濃度が30%前後で経済合理性が最も高くなる

4.2.7 アスファルト合材への炭素固定システム

概ね、100年程度の周期で炭素の吸収と放出とが繰り返されるバイオマス燃料は、カーボンニュートラルであると定義

される。同じ動植物由来の石炭や石油などの化石燃料は、数億年以上のカーボンサイクルとなることから、正に化石であり、カーボンニュートラルとはならない。例えば、木材を伐採して燃焼させた場合、それ相応のCO₂が生成するが、木材伐採後に植樹を行いその成長過程においてCO₂を吸収し固定すると見なされるのでカーボンニュートラルである。また、燃焼させなくとも木材を地中に埋めると、微生物の分解作用を受けて（腐敗して）CO₂を発生することになるが、このCO₂もカーボンニュートラルである。

日本最古の木造建築である法隆寺は、建立が7世紀の奈良時代であることから実に1,400年が経過している。この法隆寺に使用されている木材はCO₂を放出することなく（燃焼も腐敗もすることなく）炭素をセルロースやリグニンの形で固定している。このまま、化石燃料と同等に半永久に存続することができるのであれば、大気中のCO₂を減少させるカーボンネガティブ（ネガティブエミッション）であると考えられる。

木材の腐敗を防ぐ方法として炭化が古くから知られている。炭は、大気中で燃焼はするものの、微生物による分解は皆無である。したがって、炭を土中に埋設しても分解されことなく（腐敗することなく）半永久に土中に留まる。したがって、動植物由来の有機物を炭化し、土中に埋設することで半永久的に安定して土中に固定することが可能となる。石炭などの化石燃料もその生成プロセスは異なるもの数億年以上地中に眠っている。

また、化石燃料の排ガスからCO₂を分離回収して地中に貯留するCCS（Carbon Dioxide Capture and Storage）、大気中のCO₂を直接分離回収して地中に貯留するDAC（Direct Air Capture）、バイオマス燃料の排ガスからCO₂を分離回収して地中に貯留するBECCS（Bio-energy Carbon Dioxide Capture and Storage）などの研究開発が先進諸国において積極的に進められている。特に、DACとBECCSは、使用すればするほど大気中のCO₂が減少して行く理屈となる。ただし、BECCSは、濃度が8～12%と比較的高い燃焼排ガス中のCO₂を回収の対象としているのに対し、DACは、濃度が420ppm（0.042%）と極めて低い大気中のCO₂を回収の対象としている。このことから、現在の技術においては、エネルギー消費とそのコストが安価となるBECCSの方が優位である。

さらに、CCSやBECCSのように燃焼排ガスからCO₂を分離回収し、地中深く安定した地盤に気体のCO₂を高圧に圧縮して注入して貯留する手段に対して、木質バイオマスを乾溜して木ガスを取り出し、これを燃料として有効利用する傍ら、残留する常温常圧で個体のチャー（炭）を土中に埋設する方が、技術的課題やエネルギーコストの観点から、より合理的であると言える。

例えば、アスファルト合材に1%程度のチャー粉末をフィ

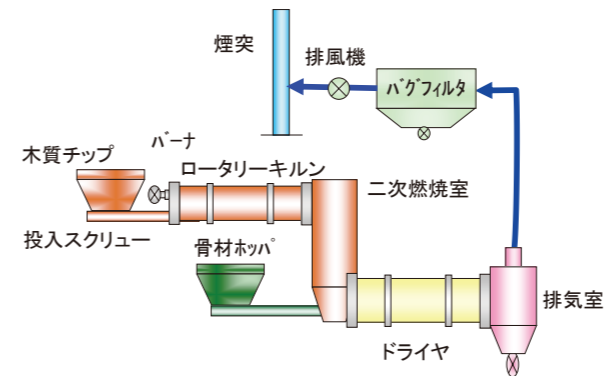


図-21 アスファルト合材への炭素固定システム概要

ラーとして配合することにより、炭素を道路に直接固定することが可能となる。因みに、1kgのチャー（炭）は、3.7kgのCO₂に相当する。年間の合材生産量が4,100万トンであることから、1%のチャー粉末を添加した場合、41万トンの炭素を固定し、CO₂換算で151万トンを道路に固定することが可能となる。

具体的には、図-21に示すロータリーキルン方式の木質バイオマス燃焼装置（特許出願中）を用い、ガス化した木質ガスは二次燃焼炉で完全燃焼させて骨材乾燥ドライヤの熱源として利用する。片や、ロータリーキルンで滞留しているチャーを乾燥ドライヤに直接投入して、それが持つ顕熱を骨材の乾燥加熱に有効に利用する。ロータリードライヤでは、チャーは、骨材により粉砕されると共に温度低下と窒息消火により消火し、その顕熱を骨材に伝熱することが可能となる。

5.おわりに

18世紀の中期にあたる1750年ごろからイギリスで始まった産業革命までは、人類はバイオマス燃料である薪などを燃料として利用していた。現在と比べれば決して生産性は高くないが、自然との調和が保たれ、必要なものを必要な時に必要な量だけ使用する生産活動を行っていた。このことにより、大気中のCO₂濃度は280ppm前後でバランスしていたことが知られている。

やがて、産業革命を経て蒸気機関などが普及することにより、国内の森林資源を燃料として使い果たしてしまった人類は、これまでは採掘や燃焼が困難であった化石燃料の石炭を新たな燃料として合理的に利用する技術を開発するに至る。薪に比べてエネルギー密度が格段に高い石炭を燃料として使用することにより、産業活動が加速度的に向上して行くと共に、CO₂の排出量も急激に増大して行った。また、1906年のハーバーボッシュ法によるアンモニアの工業生産の開始により、これを原料とする化学肥料の生産量が増大し食料事情が大きく改善して行く。1800年に10億人足らずであった世界人口が2000年までの200年間で8倍の80億人へと人口爆発をもたらしたことも大気中CO₂濃度の増大要

因として挙げるができる。

さらに、追い打ちを掛けるようにして、1914～1918年と1939～1945年の二度に渡る世界大戦を経ることにより、より便利でエネルギー密度の高い安価な液体燃料である石油を求めて油田探索と油井開発が大手石油メジャーの手により精力的に進められた。そして、石油を原料とする石油製品や石油化学製品の開発が進み、これを湯水の如く使用して、一握りの先進国の人々が豊かな生活を求めて、大量生産、大量消費、大量廃棄の時代を容認し続けたあげくの果てに、大気中のCO₂濃度を420ppmまで高めてしまった。このことにより、地球温暖化に伴う異常気象、生態系への影響による種の絶滅などの弊害が起こりつつある。我々人類が、このままのペースで化石燃料の使用を続けて経済発展を続けると、今世紀末には大気中のCO₂濃度が800ppmを超え、地球の平均気温が4.8℃上昇するとIPCCが警鐘を鳴らしている。さらに、石油製品であるプラスチックごみが海洋に流れ出し、マイクロプラスチックとして生態系に影響を与え国際問題にまで発展してきている。

一方、エネルギー資源を持たない我が国は、高度経済成長を経て1973年と1979年の二度に渡るオイル危機を経験している。このオイル危機が発端になり、10倍以上に跳ね上がった原油価格の影響を緩和させるべく省エネルギー化の波が一気に押し寄せてきた。特に、産業部門における省エネルギー化の躍進には目を見張るものがあり鉄鋼やガラス産業においては、エネルギー消費量を増大させることなくその生産性の拡大を達成している。国を上げてこれらの省エネルギー化に取り組んできたことにより、先進国の中で我が国はGDPに占めるエネルギー消費量が世界最小を達成している。

同様にしてAPにおいても、新たな省エネルギー技術を積極的に取り入れて経済合理性の追求とCO₂排出量削減との両立に取り組んでいる。そして当社は、AP製造メーカーとして、地球環境の変化、社会の趨勢、経済動向などに敏感に反応し、タイムリーに新技術の開発を行うと共に、お客様にご提案を行える風土と文化を育てていきたいと考えている。

参 考 文 献

- 1) アスファルト合材協会:アスファルト合材製造数量推移(全国), http://www.jam-a.or.jp/images/activity/act02/act02_suii_202108.pdf
- 2) 高井照治, 井手上宏:アスファルト舗装用機械の変遷・現況・課題Ⅳ アスファルトプラント, アスファルト, Vol.25, No.133, pp.18-24, 1982.
- 3) 西川辰男:アスファルトプラントにおける新しい計量システムと低公害システム, 産業機械, No.304, pp.39-41, 1976.
- 4) 西川辰男:これからの合材販売用アスファルトプラント, 産業機械, No.333, pp.29-32, 1998.
- 5) 岸田正男:ヨーロッパ輸出アスファルトプラント, 産業機械, No.385, pp.11-13, 1982.
- 6) 田島 修:最新のバッチ式アスファルトプラント, 建設機械, Vol.20, No.5, pp.24-30, 1984.
- 7) 西尾勝彦:小型アスファルトプラント ATOMシリーズ, 産業機械, No.429, pp.30-32, 1986.
- 8) 高井照治:アスファルトプラント, 産業機械, No.467, pp.49-51, 1989.
- 9) 高山 清:アスファルトプラントからの舗装の品質管理への取り組み, 舗装, Vol.28, No.7, pp.33-36, 1993.
- 10) 西川辰男, 井手上宏:アスファルトプラント専用合材サイロ, 産業機械, No.335, pp.54-56, 1978.
- 11) 井手上宏:アスファルト貯蔵供給システム, 産業機械, No.359, pp.8-10, 1980.
- 12) 井手上宏:アスファルト貯蔵供給システム, 建設機械, Vol.17, No.9, pp.47-49, 1981.
- 13) 高山 清:都市型アスファルトプラント(MEGA TOP, SUPER BOND シリーズ), 建設機械と施工法シンポジウム論文集, pp.226-229, 1991.
- 14) 西尾勝彦:アスファルトプラントのファクトリー化, 建設機械, Vol.29, No.10, pp.36-39, 1993.
- 15) 蓬萊秀人:アスファルトプラントの省エネルギー化, アスファルト合材, No.82, pp.6-13, 2007.
- 16) 蓬萊秀人:アスファルトプラントのCO₂削減技術, 建設の施工企画, No.738, pp.18-23, 2011.
- 17) 蓬萊秀人:アスファルト混合物製造におけるCO₂削減技術=ドライヤ回転数制御とEGR燃焼システムによるAPの省エネ技術の開発=, 建設機械, Vol.48, No.9, pp.54-61, 2012.
- 18) 蓬萊秀人:アスファルトプラントにおける二酸化炭素排出量削減技術, 日本アスファルト合材協会設立30周年記念応募論文集, pp.188-193, 2015.5.
- 19) 井手上宏:ドラムミキシングプラント リサイクル兼用型 DM-100, 産業機械, No.347, pp.48-50, 1979.
- 20) 井手上宏:ドラムミキシングプラントの概要, 建設機械, Vol.17, No.4, pp.83-87, 1981.
- 21) 井手上宏:建設機械の多用途化と専用化リサイクルユニット, 建設機械, Vol.18, No.8, pp.140-144, 1982.
- 22) 井手上宏:建設機械の技術動向Ⅱ アスファルトプラント, 建設機械, Vol.25, No.9, pp.100-103, 1989.
- 23) 蓬萊秀人:再生アスファルトプラントにおける触媒を用いた排ガス脱臭の基礎研究, 建設機械と施工法シンポジウム論文集, pp.74-79, 1993.
- 24) 蓬萊秀人:舗装廃材リサイクルプラントの計画と設計, 建設機械, Vol.34, No.7, pp.6-9, 1998.
- 25) 蓬萊秀人, 藤原和也, 川村克裕:アスファルトプラント“RAVコンビネーションシステム”の開発, 建設機械と施工法シンポジウム論文集, pp.192-197, 1998.
- 26) 岡本紀海夫, 吉野健治, 西尾勝彦:アスファルトプラント, 建設の機械化, No.595, pp.16-22, 1999.
- 27) 守安弘周, 傳田喜八郎, 蓬萊秀人:バイオマス燃料による低炭素アスファルト混合物の製造, 建設の施工企画, No.732, pp.24-28, 2011.
- 28) 傳田喜八郎, 今田雄司:アスファルトプラント用ガス・バイオマス燃料混焼バーナの開発, 建設機械と施工法シンポジウム論文集, pp.195-196, 2015.
- 29) 蓬萊秀人, 相田 尚:アスファルトプラントに適応させた固形燃料燃焼システムと将来展望, 日本アスファルト合材協会設立30周年記念応募論文集, pp.159-164, 2015.5.
- 30) 榊 真司, 相田 尚:固形燃料併用形アスファルトプラン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, 日本建設機械施工協会誌, Vol.66, No.2, pp.50-55, 2014.
- 31) 榊 真司, 吉野健治, 相田 尚: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, 日本建設機械施工協会誌, Vol.66, No.3, pp.84-89, 2014.
- 32) 蓬萊秀人, 大隈 修, 林 順一:自立燃焼型炭化炉とアスファルトプラント用微粉炭バーナによる難利用バイオマスの有効利用, 第26回日本エネルギー学会大会講演要旨集, pp.84-85, 2017.
- 33) 和田大祐, 飯塚晃一郎, 前田倫子, 吉本友憲:高効率蒸気供給システム「スチームグロウヒートポンプ(SGH)」, 神戸製鋼技報, Vol.63, No.2, pp.51-55, 2013.

Transition and Prospects of Carbon Dioxide Emission Reduction Technology in Asphalt Plant

Hideto HORAI¹

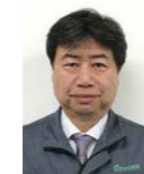
1 Nikko Co. Ltd. Engineering Division

Abstract

The increase in carbon dioxide concentration in the atmosphere causes global warming, and natural disasters such as large-scale droughts, forest fires, heavy rains, heavy snowfalls, and large typhoons that have never been experienced occur frequently, etc. Furthermore, the extinction of various organisms that cannot adapt to the rapid changes in the global environment is accelerating. And these global harmful effects are urgent and important issues that should be solved by the generations living in the present rather than carrying them over to the next generation. On the other hand, asphalt plants that produce asphalt mixtures, which are road pavement materials, consume a large amount of fossil fuels and emit a large amount of carbon dioxide among civil engineering and construction machinery. In order to reduce the carbon dioxide emitted by asphalt plants, technological developments related to energy saving and carbon-neutral alternative fuels have been vigorously carried out. This paper gives a bird's-eye view of the past and present and looks into the future of our asphalt plant's carbon dioxide emission reduction technology and energy-saving technology.

Key words: Asphalt plant, Carbon dioxide, Energy saving, Carbon neutral, Combustion technology

筆者紹介



HORAI Hideto

蓬萊 秀人
博士(工学)1986年入社
技術本部