

排ガスに含まれる水蒸気の凝縮潜熱を利用した 砂乾燥システム

The sand drying system utilizing the latent heat of condensation of water vapor contained in exhaust gases

蓬萊秀人

HORAI Hideto

日工株式会社 技術本部

概 要

道路舗装資材の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は、その進化の過程において省エネルギー化技術を積極的に取り入れて来たことから、今では実に**85%**を超える熱効率を達成している。反面、このことは、アスファルトプラントの省エネルギー化の限界が近付いていることをも示唆している。また、同加熱アスファルト混合物は、そのワーカビリティが低下しない熱い状態で舗装を施工する必要があることからダンプトラックによる輸送時間が限定的となり、このことを補完するようにして全国に**1,000**基以上のアスファルトプラントが分散立地している。そして、このことが、アスファルトプラントの稼働率を引き下げ、生産性、引いては省エネルギー化の足枷となっている。一方で、同加熱アスファルト混合物を製造するときの熱源として化石燃料を消費するアスファルトプラントは、全国で年間**103**万吨にも及ぶ**CO₂**を排出しており、その中でも、骨材の水分を除去する乾燥プロセスでその過半数を排出している。とりわけ、比表面積が大きい砂が骨材全体の**70%**以上の水分を保持していることから、廃熱などを有効利用してこの水分を事前に除去することができれば省エネルギー化と**CO₂**削減に極めて有効な手段となる。

本稿では、稼働率が極めて低いアスファルトプラントの運用上の制約から影響を受けることがない砂のサプライチェーンにおいて、従来、骨材の乾燥に有効利用することができずに廃熱として捨てていた排ガスに含まれる水蒸気の凝縮潜熱を回収利用することにより、実に**150%**を超える熱効率で砂を乾燥することができる砂乾燥システムの概要と、この乾燥砂を用いることによってアスファルトプラントで期待される燃費並びに**CO₂**排出量の削減効果について検討を行っている。

キーワード: **CO₂**排出量削減、水蒸気の凝縮潜熱、砂乾燥、凝縮塔

1. はじめに

今世紀末までの気温上昇を産業革命前に比べて**1.5℃**未満に抑えることを目標に、国際社会が大きく動いている。2021年11月にイギリスのグラスゴーで**194**ヵ国の代表が一堂に会し開催された**COP26**(国連気候変動枠組条約第26回締約国会議)において、我が国を始めとする先進7ヵ国は、温室効果ガス(**Green House Gas**以下、**GHG**と記述)の排出量を2050年までに実質ゼロにする野心的な目標を掲げている。そして、我が国は、その中間時点にあたる2030年に2013年比で**GHG**排出量を**46%**削減し、さらに、**50%**の高みを目指して行くことを国際社会に向けて約束している。

加えて、2025年2月に国連への提出期限を迎えた2035年に向けての**GHG**削減目標を、2013年比で**60%**とすることを、我が国は**NDC: Nationally Determined Contribution**として表明している。そして、このことを裏付ける根拠として第7次エネルギー基本計画を新たに作成し閣議決定している。その方法論としては、**CO₂**を始めとする**GHG**を排出しない再生可能エネルギー並びに原子力エネ

ルギーへの転換比率を以前までも増して高めて行くことと、今まで以上の省エネルギー化の推進を図ることに帰結する。

再生可能エネルギーへの移行に関しては、そのコストの削減が課題となる。化石燃料に比べてエネルギー密度が極めて低い再生可能エネルギーは、電気エネルギーなどへの変換設備が巨大化する傾向にある。さらに、気象や天候の影響を大きく受ける不確実性を伴うことから蓄電池や送配電などへの巨額な設備投資が必要となる。

原子力エネルギーに関しては、2011年の福島第一原発事故の教訓と猛省の下、世界一安全基準が厳しい原子力規制委員会の承認と地元住民との合意形成が再稼働に向けてのハードルとして立塞がる。さらに、2050年のカーボンニュートラル達成に向け、老朽化して行く原子炉のリプレースや新規建設並びに原子力産業としての技術者や従事者の育成などの課題が残る。

省エネルギー化に関しては、2度に渡る石油危機の影響を強く受けて我が国は産業界を上げて世界に誇れる省エネルギー化を推進してきた。これ以上の省エネルギー化を図るには乾いた雑巾を絞るようなものであると比喻されるが如く限界に近付いていることが課題である。ただし、省エネ

ギー化は、それを推進するほど**CO₂**排出量とそのコストを削減することが可能で、しかも、再生可能エネルギーや原子力エネルギーなど全てのエネルギー資源を対象として有効に働く。

一方、このような社会の趨勢の下、交通インフラの要である道路に目を転じると、道路の新規建設やメンテナンスなどの維持管理に必要となる舗装資材の加熱アスファルト混合物(以下、合材と記述)は、国内で年間**3,800**万吨余りが製造されている¹⁾。そして、これを製造するアスファルトプラント(以下、**AP**と記述)からは、年間**103**万吨に上る**CO₂**を排出していると推定される。**AP**においても、過去2度に渡るオイルショックの境遇の下、早くから省エネルギー化技術を積極的に取り入れており、今では実に**85%**を超える熱効率(**LHV: Lower Heating Value**)にまで達している。逆に、このことは、**AP**の省エネルギー化が限界に近付いていることをも示唆している。

また、同合材は、そのワーカビリティ(作業性)が低下しない熱い状態で輸送し舗装を施工する必要があることから、ダンプトラックによる搬送可能時間(距離)が限定的となる。そのために、このことを補完するようにして全国に**1,000**基以上の**AP**が分散して立地している。そして、このことが、**AP**の稼働率を引き下げ生産性、引いては省エネルギー化の足枷となっていることは否めない。

次に、同合材を製造するときに**AP**で消費する化石燃料に着目すると、骨材の水分を除去する乾燥プロセスでその過半数を消費している。とりわけ、比表面積が大きい砂が骨材全体の**70%**以上の水分を保持していることから、廃熱などを有効に利用してこの水分を予め除去することができれば省エネルギー化による燃費と**CO₂**の削減に極めて大きく寄与することができる。

本稿では、稼働率が極めて低い**AP**の運用上の制約から影響を受けることがない砂のサプライチェーンにおいて、従来、骨材の乾燥に有効利用することができず廃熱として捨てていた排ガスに含まれる水蒸気の凝縮潜熱を回収利用することにより、実に**150%**を超える熱効率(**LHV**)で砂を乾燥することができる砂乾燥システムの概要と、この乾燥砂を合材の骨材として供給することにより**AP**で期待される燃費と**CO₂**の削減効果を検討している。

2.APの課題

第2章では、「**2.1 APの概要**」において、**AP**の特徴を概観した上で、2050年の**GHG**排出量を実質ゼロに、引いては2030年に**46%**、2035年に**60%**の削減目標を目指して行くために、今現在の**AP**が抱えている課題を「**2.2 省エネルギー化の限界**」と「**2.3 稼働率向上の限界**」にフォーカスし掘り下げている。

2.1 APの概要

APは、質量割合で約**90%**の碎石と砂などのバージン(新規)骨材(以下、**V**骨材と記述)を乾燥加熱し、それに原油の残渣であるアスファルトをバインダーとして約**5%**、石粉(炭酸カルシウム)をフィラーとして約**5%**添加混合して、道路舗装資材である合材を製造する装置である。

代表的な**AP**の全景を写真-1と写真-2に、そのフローを図-1²⁾に示す。図より、**V**骨材を乾燥加熱する新材用ドライヤ(以下、**V**ドライヤと記述)、乾燥加熱した骨材を各粒度に篩い分けるスクリーン、ホットビンに貯蔵された各粒度の骨材を配合設計に応じて計量する計量器、計量した**V**骨材と所定のアスファルトとフィラーを添加して熱い状態で混合する2軸のパグミルミキサなどで構成されている。



写真-1 最近のAPの事例 ①

出典:日工株式会社発行 2024.7 NAPニュースNo.364



写真-2 最新APの事例 ②

出典:日工株式会社発行 2022.4 NAPニュースNo.355

さらに、循環型社会形成の観点より、老朽化したアスファルト舗装を打ち換える時に発生する舗装発生材であるアスファルト・コンクリート塊(以下、アスコンガラと記述)を破碎して粒度調整したものをリサイクル材(以下、**R**材と記述)と称し、これを骨材の一部として一定割合、**V**骨材に添加混合してリサイクル合材(以下、**R**合材と記述)を製造する設備を国

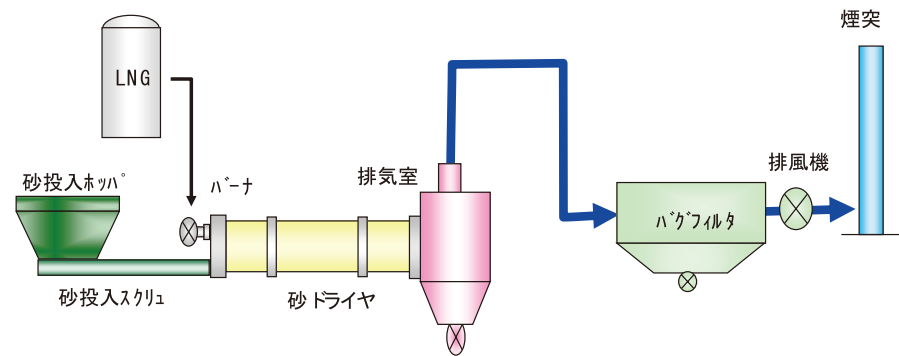


図-5 従来の砂乾燥システム全体フロー

×5 時間/日×20日/月×12月/年としている。このことから、年間稼働時間は、1,200時間/年足らずで製造設備としては極めて少ない。年間7,200時間稼働する一般的な製造設備と比較すると、APの稼働率は実に1/6(1,200/7,200×40%=16.7%)を下回る低調振りとなり、このことがAPの特殊性を浮き彫りにしているとも言える。

このような背景から、全国津々浦々の道路へ合材を滞りなく供給するためには、APの稼働率がいくらか下がろうとも、現状の立地場所にAPを存続させておくことが必須条件となる。これらのことから、APをさらに集約して稼働率を高めて合材の生産性を向上させ、省エネルギー化とCO₂削減とを推し進めることは、合材の輸送時間およびダンプへの積載時間などの制約から、もはやAPは「稼働率向上の限界」を迎えていると言わざるを得ない。

3.砂乾燥システムの概要と特徴

第3章では、本砂乾燥システムを構成する「3.1 主要な装置構成」及び「3.2 熱効率向上の基本原則」を確認した上で、先進的な省エネルギー技術の要である「3.3 凝縮塔による廃熱回収と砂乾燥メカニズム」の各論に触れる。そして、水蒸気の露点温度を上昇させて凝縮潜熱の回収量を増大させるための要素技術である「3.4 不凝縮ガス濃度の低減(侵入空気の削減)」並びに、砂を昇温することなく供給する熱エネルギーを水分蒸発のみに利用するための重要な技術となる「3.5 乾燥砂の残留水分」についての詳細に触れる。

3.1 主要な装置構成

まず、本砂乾燥システムとのベンチマークとすべく、排ガスが包含する水蒸気の凝縮潜熱を回収する装置(以下、凝縮塔と記述)を備えない従来の砂乾燥システム(以下、従来システムと記述)のフローを図-5に示す。図より、従来システムは、砂供給装置、熱風発生用バーナ、パラレルフロー(並流)方式のドライヤー、集塵装置であるバグフィルタ、排風機、煙突

などの装置で構成している。詳細は後述するが、砂乾燥システムのドライヤーには敢えてパラレルフロー方式を採用している。そして、前章でも触れた通りAPのドライヤーは、熱効率が既に85%以上に達しており、このことにより排ガス温度が100℃を下回り、包含する水蒸気が飽和の状態でもはや、「省エネルギー化の限界」を迎えている。

次に、この従来システムを基本ベースとして、凝縮塔を備えた本砂乾燥システムのフローを図-6に示す。図より、本砂乾燥システムは、熱風発生用バーナを搭載するPrimary砂ドライヤー(以下、Pr砂ドライヤーと記述)と同バーナを搭載しないSecondary砂ドライヤー(以下、Se砂ドライヤーと記述)の2基のドライヤーを備えている。それぞれのドライヤーに関しては、従来システムと同様のパラレルフロー方式とし、排ガスを除塵するためのバグフィルタおよび排風機その他の付帯設備を備えている。そして、Pr砂ドライヤー用バグフィルタの後段には、本砂乾燥システムの特徴でもある凝縮塔を装備している。この凝縮塔では、排ガスに直接散水を施すことにより、排ガスが含有する水蒸気を凝縮させると共に、その時の凝縮潜熱を温水として回収している。

その上で、この温水を温風生成用の熱交換器へと導き、常温の外気と熱交換を行って温風を生成し、これを熱媒体としてSe砂ドライヤーで新たな砂を乾燥するように工夫している。即ち、Se砂ドライヤーで砂を乾燥するために供給される熱エネルギーは、従来システムでは利用されずに廃熱として捨てていた水蒸気の凝縮潜熱で賄っており、Se砂ドライヤーで砂乾燥に利用する熱エネルギーの全てが省エネルギー化とCO₂削減とに寄与することになる。

なお、各機器を低温腐食から保護するために、同バーナの燃料には、酸性ガスである硫黄酸化物の析出要因となる硫黄成分を含まない白灯油もしくは都市ガスやLNG(Liquefied Natural Gas)などを想定している。

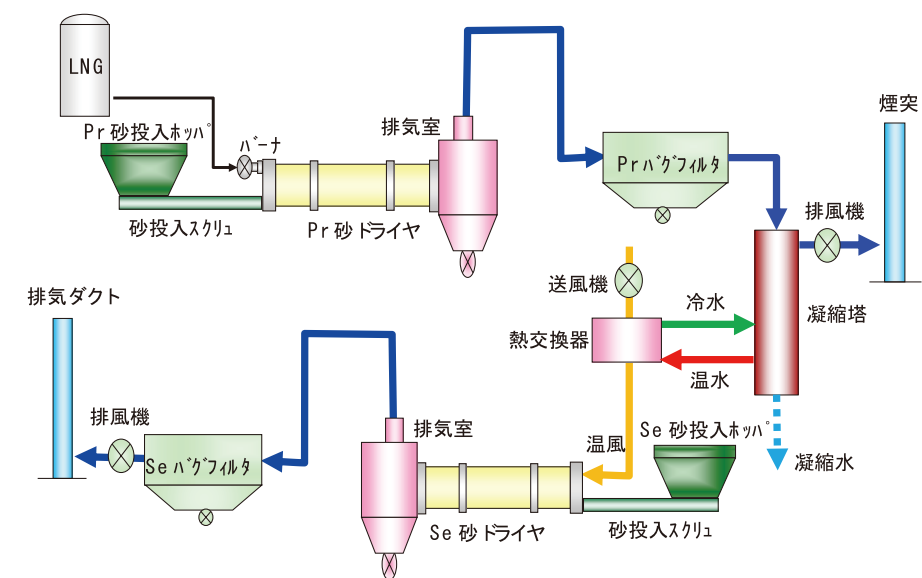


図-6 本砂乾燥システム全体フロー

3.2 熱効率向上の基本原則

第2章で述べた通り、骨材の乾燥と加熱プロセスに主眼を置いたAPにおける熱効率の定義は、有効エネルギーを骨材の顕熱(加熱)と水分の潜熱(蒸発)としている。そして、骨材の乾燥加熱に利用することができない無効エネルギーは、放散熱、水蒸気を含む排ガスの顕熱、不明熱などとし、その内の大半を排ガスの顕熱が占めている。いずれにしても、これらAPで定義される有効エネルギーの総和が入熱全体(燃焼熱)の85%以上に達していることから、同熱効率の定義においては優れた乾燥システムであると評価することができる。

以上のことを数式で表わすと、

$$(\text{入熱}) = (\text{有効熱}) + (\text{無効熱})$$

$$(\text{熱効率}) = (\text{有効熱}) / (\text{入熱})$$

ここで、

$$(\text{有効熱}) = (\text{骨材の顕熱}) + (\text{水分の潜熱})$$

$$(\text{無効熱}) = (\text{放散熱}) + (\text{排ガスの顕熱}) + (\text{不明熱})$$

となる。

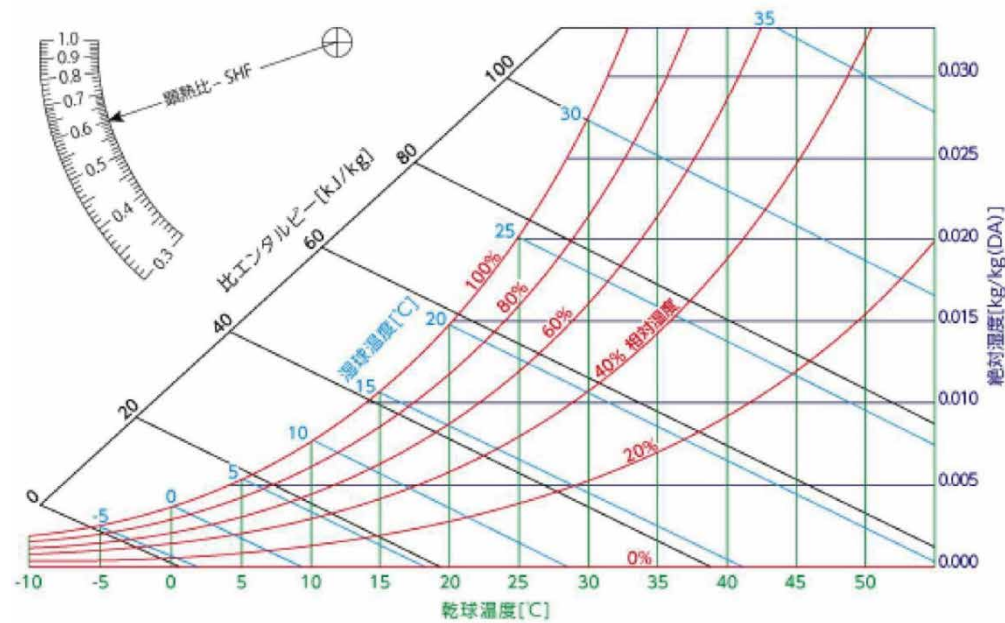
しかしながら、視点を骨材の乾燥後に転じると、骨材に蓄熱している有効エネルギーは入熱全体の38%足らずの顕熱のみで、残りの47%以上の潜熱は水蒸気のエンタルピーとして排ガスに随伴して排気している。このことから、エネルギー保存則が担保されている限り、水蒸気を大量に含む排ガスは、エネルギーの質(エクセルギー)が低く利用価値が限定的ではあるものの、秘めたる熱エネルギーを多く保持していることになる。このように、排ガスを顕熱のみで評価した場合、その無効エネルギーは、入熱全体の10~15%足らずであるが、水蒸気のエンタルピー(顕熱+潜熱)を考慮に入れた場合、実に入熱全体のおよそ60%以上を排ガスとして廃棄していることになる。

カウンターフロー方式のVドライヤーにおいては、排ガス温度

が100℃を下回って水蒸気の凝縮が起こる「省エネルギー化の限界」に達していることは既に触れた。ただ、10℃常温の骨材と100℃を少し下回る排ガスとの温度差は、90℃近く採ることができ熱交換の余地が十分に残されている。しかしながら、飽和水蒸気を大量に包含した100℃以下の排ガスと常温骨材との直接的な熱交換においては、熱移動と物質移動(水蒸気の凝縮)とが同じ空間で同時に起こることが熱交換、とりわけ、水分乾燥の阻害要因となっている。即ち、常温の骨材に排ガスからの熱移動が始まると同時に水蒸気の凝縮が始まって骨材の含水比が上昇することが熱効率の向上に大きな障壁となり、APの「省エネルギー化の限界」を招いているのである。

この骨材の含水比が上昇する現象は、カウンターフロー方式のVドライヤーの骨材投入近傍で局部的に起こっている。排ガスの水蒸気分圧が大きくその露点温度が骨材温度よりも高い場合に骨材に付随するシルトや粘土などの比表面積が大きい細粒分から凝縮水で湿潤して行き、これらがドライヤー内壁へ付着成長して行くと言う弊害が実際のAPでも生じている。この付着の対策として、省エネルギー化とは逆行するものの排ガス温度を上昇させてドライヤー内壁温度を高めることが有効である。即ち、ドライヤー内壁温度が露点温度よりも高く、表面が凝縮水で濡れない限り付着が成長しないためである。

ここで、思考実験として、カウンターフロー方式のドライヤーに関して、その長さを無限に伸ばした場合を考える。すると、ドライヤー内部の長手方向のどこかの位置で、排ガス温度、骨材温度、ドライヤー壁面温度、露点温度が同一温度となる平衡状態に至り、その温度は限りなく水蒸気分圧の飽和温度(常圧では100℃以下)に近づいて行くものと容易に推察することができる。排ガスと骨材との温度差がおおよそ90℃近く採れるにも拘らず水蒸気の凝縮の影響を受けて、これ以上

図-7 湿り空気線図¹⁷⁾

の乾燥が進まなくなる主因である。

以上の思考実験から、骨材への熱移動と物質移動（水蒸気の凝縮）とが同一空間で同時に起こらないように、熱（顕熱＋凝縮潜熱）と凝縮水とを分離することが本砂乾燥システムの本質となる。言い換えると、水蒸気の凝縮潜熱により骨材を昇温するも、その含水比が増大しないように凝縮水を骨材から分離することが熱効率を向上させる上で最も重要な技術となる。

3.3 凝縮塔による廃熱回収と砂乾燥メカニズム

本砂乾燥システムは、水そのものを熱回収の媒体として利用する凝縮塔を装備している。同凝縮塔では、水を微粒化して極めて大きな熱交換面積を形成させると共に、これを排ガスと直に接触させることにより排ガスに含まれる水蒸気の凝縮潜熱を温水として回収している。

具体的には、凝縮塔に100℃を下回り飽和水蒸気を含む排ガスを導入している。ただし、この排ガスは、図-6に示すPr砂ドライヤからの排ガスを集塵処理したものである。そして、排ガスを凝縮塔の上部の中心部から導入して下部で外周部に折り返して上方へ流すアップドラフト方式としている。上昇する排ガスに15℃前後の冷水を下部に向かって散水を行っている。この場合、上昇する排ガスと落下する水滴とは直交するカウンターフローとなる。

凝縮塔の内部では、雨の生成メカニズムと同じように、散水した水滴を核として排ガス中の水蒸気が凝縮しながら水滴が大きく成長し温度が上昇して行く。ここで、熱交換面積を増大させるために水滴の粒径を小さくする程、比表面積が増大して行くが、逆に水滴粒径が小さいと排ガスに随伴して飛散する割合が多くなる。このため、排ガスの密度、温度、速度

などに対して最適な水滴粒径の範囲が存在する。このようにして、水を熱交換の媒体として利用することで従来の課題であった熱移動と物質移動（水蒸気の凝縮）が同空間で同時に起こることを回避している。

次に、凝縮塔で回収した約80℃の温水を温風生成用の熱交換器に導入し、15℃、相対湿度50%RHの空気を70℃の温風にまで昇温している。このことにより、温風の相対湿度は2.7%RHまで低下し、ヘアードライヤや衣類乾燥機と同様の乾燥能力を有することになる。

ここで、規模感を把握するために具体例を挙げると、本砂乾燥システムでPr砂ドライヤに毎時30トンの湿潤砂を供給し、その排ガスから回収する凝縮潜熱を利用して、Se砂ドライヤで毎時20トンの湿潤砂を乾燥することを想定する。ここで、1 Nm³の70℃、湿度2.7%RHの温風が砂と熱交換を行い30℃の排ガスに至るまでの温度差40℃で利用することができる熱エネルギーは、水20gを蒸発させる程度に過ぎない。そして、30℃排ガスの湿度は、およそ80%RHまで上昇することになる。このことから、Se砂ドライヤの乾燥能力を毎時20トン、含水比の低減を10%とすると、時間当たり2,000kg/h（33.3 kg/min）の水を蒸発させる温風が必要となり、その量は10万Nm³/h（1,667 Nm³/min）となる。

このようにして、本砂乾燥システムでは、APで熱移動と物質移動とが同時に進行するために乾燥に有効利用することができなかった水蒸気の凝縮潜熱を回収利用することにより、従来比で投入エネルギー当たり1.67倍の乾燥能力を有する砂乾燥システムを構築することが可能となる。

3.4 不凝縮ガスの低減（侵入空気の削減）

水蒸気の凝縮潜熱を凝縮塔で温水として回収する場合、その露点温度は図-7¹⁷⁾に示す通り排ガス中の水蒸気分圧（右側縦軸：絶対湿度）と相対湿度100%の交点の乾球温度（横軸）で決定される。即ち、排ガスは、不凝縮ガスの窒素（N₂）、酸素（O₂）、二酸化炭素（CO₂）などを含んでおり、これらの不凝縮ガスの分圧と水蒸気分圧との比率により、常圧下における水蒸気の露点温度が決定するのである。このことから、水蒸気分圧を高めるほど露点温度が上昇して高い温度の温水を回収することができ、凝縮潜熱の回収効率が向上する。

仮に、不凝縮ガスの混入がゼロであれば、常圧下での水蒸気の露点温度が100℃まで上昇し、凝縮潜熱を高効率で回収することができる。因みに、火力発電所などにおける蒸気タービンを駆動する水蒸気は、不凝縮ガスを含まない水蒸気が100%の状態 で用いられており、この水蒸気を復水器で100℃以下に冷却することで大気圧を下回る圧力（負圧）となり、蒸気タービンの背圧を下げた発電効率を高めることに有効利用されている。

以上のことを踏まえた上で、この露点温度を上昇させるために図-4に示すPr砂ドライヤの侵入空気量とバーナ燃焼の過剰空気量とを徹底的に削減して、不凝縮ガスであるN₂、O₂、CO₂の分圧を減じることと、次節の「3.5 乾燥砂の残留水分」で詳細に触れるが、砂の水分蒸発のみに熱エネルギーを消費することが重要な技術要件となる。

バーナ燃焼空気の削減に関しては、温度や圧力に応じて空気密度が変動することから、燃焼空気の温度補正と圧力補正を加味した上で燃焼量に応じた燃焼空気量の制御が重要となる。本砂乾燥システムでは、燃油流量と燃焼空気流量とを常時フィードバック制御することにより、バーナの最適な低空気比燃焼を実現している。因みに、コンベンショナルなバーナでは、夏季と冬季とで外気温が30℃以上異なるが、夏季の空気量で燃焼空気比を調整するのが一般的である。このために、冬季で外気温が下がると空気密度が高まり過剰の燃焼空気量で燃焼することになる。夏季と冬季とで外気に30℃の温度差があると、空気密度は約10%冬季が大きく、過剰空気量が10%増大することになる。このことから、排ガス量が増大することとなり、熱効率と水蒸気分圧とが低下する。さらに、バーナ燃焼に予熱空気を利用することにより、燃焼温度を高めて燃焼排ガス量を減じること、熱効率と水蒸気分圧とを高める有効な手段となる。

ドライヤからの侵入空気の削減に関しては、ドライヤの前後に位置する摺動部のシール機構を工夫して密閉性を高めていることと、ドライヤ内部圧力（静圧）と外気圧との差圧をゼロに近づける静圧コントロールにより行っている。Pr砂ドライヤのバルクヘッドに微差圧計を装備し、ドライヤ内部の静圧と外

気との差圧がゼロに近づくように、排風機の誘引量をフィードバック制御している。

以上の技術を採用することにより、本砂乾燥システムのPr砂ドライヤの排ガス中の水蒸気分圧をおよそ50%以上に高めて凝縮塔では、およそ80℃の温水を回収している。このことに対して、一般的なAPの排ガス中の水蒸気分圧は、10～15%と低い。これは、ドライヤからの侵入空気、バーナ燃焼の過剰空気、水の蒸発以外に骨材の加熱に必要な熱エネルギーを供給する必要があるため、その熱量に相当する燃料を燃焼させることにより、燃焼排ガス量が増大し水蒸気分圧が低下することに起因している。即ち、骨材の乾燥加熱過程で水の蒸発が完了した骨材を加熱する場合の燃焼排ガスは、水蒸気量が不変でN₂、O₂、CO₂などの不凝縮ガスのみが増加して行くことになる。

具体的には、ドライヤへの侵入空気量、バーナの空気比、砂からの水蒸気量が一定である場合、水の蒸発を伴わない乾燥した骨材の加熱（顕熱）では、化石燃料の水素含有量に応じて燃焼排ガス中の水蒸気が供給されるのみである。即ち、燃焼空気には、燃焼に関与しない窒素（N₂）が79%を占めており、メタン（CH₄）を1 Nm³燃焼させた場合、空気中の2 Nm³の酸素（O₂）を消費し、1 Nm³の二酸化炭素（CO₂）と2 Nm³の水（H₂O）が生成する。このとき、燃焼に関与しない7.5 Nm³の窒素（N₂）が介在する。したがって、理論上10.5 Nm³の燃焼ガスが生じ、CO₂濃度は、9.5%、水蒸気濃度は、19%となる。そして、この理論燃焼ガスに過剰燃焼空気や侵入空気が加わることで水蒸気分圧はさらに低下するのである。

3.5 乾燥砂の残留水分

凝縮潜熱の回収効率を引き上げるためには、排ガス中の水蒸気分圧を最大限に高めることが重要であり、そのためにも侵入空気やバーナ燃焼の過剰空気を削減して不凝縮ガス濃度（分圧）を低減することが重要であることは前節で触れた通りである。その上で、本砂乾燥システムの乾燥プロセスで砂の水分を残留させることが省エネルギー化と稼働率の向上に大きな意味を持つ。即ち、APでの乾燥加熱プロセスと同様に、砂を100℃以上に加熱して絶乾状態にするのではなく、砂ドライヤから排出する乾燥砂の残留水分を取って5%程度とすることにより、以下に述べる三つの効果を狙う。

1つ目は、前節でも触れた通り、水分の蒸発のみに熱エネルギーを消費することが重要となる。排ガス中の水蒸気分圧は、砂から蒸発した水蒸気が排ガスの一部として取り込まれることにより上昇する。そして、砂の水分を残留させることにより、ドライヤ内部では砂に供給される熱エネルギーと水の蒸発で消費される熱エネルギーとがバランスして砂の温度変化を伴わない定率乾燥の状態となる。このようにして、供給される熱

表-1 省エネルギー化とCO₂削減効果の比較

方 式	従来システム	本砂乾燥システム
砂乾燥能力 Primary ドライヤ	50.0 t/h	30.0 t/t
砂乾燥能力 Secondary ドライヤ	-	20.0 t/h
TOTAL 砂乾燥能力 ※含水比 10%削減	50.0 t/h	50.0 t/h
燃料消費量 LNG	471.3 Nm ³ /h	250.8 Nm ³ /h
総合熱効率 ※LHV 基準	80.0 %	150.6 %
省エネルギー化率 ※ベンチマーク基準	0 %	88 %
燃料由来 CO ₂ 発生量	923.7 kg/h	491.6 kg/h
電力由来 CO ₂ 発生量	35.0 kg/h	80.0 kg/h
TOTAL CO ₂ 発生量	958.7 kg/h	571.6 kg/h
CO ₂ 削減率 ※ベンチマーク基準	0 %	40 %

4.3 稼働率の向上

APは、合材の製造能力とその出荷量や出荷タイミングのミスマッチ等により間欠運転が多用されている。そして、起動時の予熱に多くの熱エネルギーを消費し、多くのCO₂を排出している。予熱は、ドライヤを始めとする煙道やバグフィルタへの水蒸気の凝縮を未然に防ぎ腐食の進行を抑制すると共に、一早く加熱骨材温度の安定化をはかるためには必要不可欠なプロセスである。このようにして、APの間欠運転が繰り返されることにより、折角ドライヤやバグフィルタに蓄熱された熱エネルギーが無駄に大気放散していることは否めない。APで間欠運転が多用されるのは、合材の温度が低下しない時間内にダンプ輸送し舗装施工を完了させる必要があり、APはこのことを補完する形で全国に分散配置されてきたこと、さらには、ダンプへの積載時間短縮の要請に答えるためにAPを大型化し、合材の製造能力を増大することにより瞬発力を求めたことなどがAPの稼働率を大きく引き下げている要因であることは第2章でも触れた通りである。

このため、骨材で最も高含水比でエネルギーを多く消費する砂の乾燥においても、従来システムでは稼働率が極めて低調なAPでそのプロセスが行われている。いくら定常運転時における熱効率が**85%**を上回っていたとしても、間欠運転が多用されることによりエネルギーロスが多くなり総合的な熱効率が大きく阻害されていることは否めない。

このことから脱却するために、高含水比な砂の乾燥をAPから切り離しサプライチェーンで砂を単独で乾燥することにフォーカスしている。そして、少量の水分を残留させた乾燥砂を製造することで、砂の顕熱が残留水分の蒸発に消費され外気温よりも低い湿球温度まで低下する。この原理により、砂の顕熱放散によるエネルギーロスを削減し、雨養生は必要であるものの乾燥砂の長期貯蔵、長距離輸送を可能としている。

このようにして、稼働率向上の阻害要因を取り除くことによ

り本砂乾燥システムを連続運転することが可能となり、最もエネルギーを消費する砂の乾燥プロセスをAPの間欠運転の影響を受けることなく遂行でき、間欠運用によるエネルギーロスと生産性の低下を回避させている。

そして、本砂乾燥システムで製造した乾燥砂を複数のAPに供給することにより、たとえ、合材製造量が少ない閑散期においてAPの間欠運用が多用されたとしても、間接的に省エネルギー化とCO₂削減を実現することを可能としている。

4.4 省エネルギー化とCO₂削減

本砂乾燥システムを砂のサプライチェーン途上に組み込み、APの「**省エネルギー化の限界**」と「**稼働率向上の限界**」に対峙して行く必要があることは既に述べた通りである。

省エネルギー化に関しては、APの従来技術（経済合理性、法規制、社会通念、既成概念などによる制約）で踏み込むことができなかった排ガスからの水蒸気潜熱の回収にフォーカスしアプローチしている。繰り返しになるが、排ガス中の水蒸気分圧を増大させて水蒸気潜熱の回収効率を高めるために、高含水比な砂の乾燥に特化すると共に、燃焼空気と侵入空気を厳格に管理して不凝縮ガスの分圧を下げている。さらに、乾燥後の砂からの放散熱によるエネルギーロスをなくすために、水分を少し残した状態で砂を乾燥している。このことにより、砂に供給された熱エネルギーの殆どを水分蒸発で消費することができる。そして、回収した水蒸気潜熱を新たな熱媒体である常温空気に移動させて温風を生成し、これを新たな砂乾燥に利用している。

表-1は、従来システムをベンチマークとし、本砂乾燥システムとの比較を行ったものである。ここで、砂の乾燥能力を**50トン/h**、含水比の削減幅を**10%**、ベンチマークの熱効率を**80%**としている。表より、省エネルギー化に関しては、その熱効率がベンチマークの**70%**増である**150%**（LHV）となっている。これは、**Pr**砂ドライヤで発生した水蒸気を回収して温風を生成し、**Se**砂ドライヤで新たな砂を乾燥していること

に起因している。言い換えると、砂**30トン/h**の含水比を**10%**削減するのに必要な燃料（熱エネルギー）で、砂**20トン/h**を乾燥することを可能にしている。

つぎに、本砂乾燥システムのCO₂削減効果に関しては、ベンチマークである従来システムの**40%**のCO₂削減を達成している。加えて、表-1に示す全てのシステムでLNGを燃料としたときのCO₂排出量を示している。APで最も多く使用されている**A**重油での比較を行うと、ベンチマークで**19%**、本砂乾燥システムでは実に**52%**のCO₂を削減していることになる。

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地産地消に即した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糧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ことができる。

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んで行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_202408.pdf
- 2) 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の変遷と展望, NIKKO TECHNICAL REPORT 2022, No.3, pp.7-32, 2022.
- 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) 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.
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) 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.
- 17) 計装豆知識：ビルディングオートメーションの空調自動制御，<https://www.mgco.jp/magazine/plan/mame/pdf/m2110.pdf>
- 18) 国土交通省：令和4年度建設廃棄物の再資源化に関する調査・検討業務方向書，pp. 122-123，令和5年3月
<https://www.env.go.jp/content/000143784.pdf>
- 19) 経済産業省 資源エネルギー庁統計資料：
令和4年採取場数
https://www.enecho.meti.go.jp/category/resources_and_fuel/mineral_resource/situation/004/

筆者紹介



HORAI Hideto
蓬萊 秀人
博士(工学)
1986年入社
技術本部

MEMO