

半水石膏およびⅡ型無水石膏の製造システムの開発

Development of Manufacturing System for Hemihydrate Gypsum and Type II Anhydrous Gypsum

蓬萊秀人¹・神尾昌宏²・藤戸幹大³

- 1 技術本部 テクノセンター 副テクノセンター長
- 2 技術本部 テクノセンター エンジニアリング部 EG3課 担当課長
- 3 技術本部 テクノセンター エンジニアリング部 EG3課

概要

石膏ボードは、耐火性、経済性、加工性等に優れていることから、建物の内装材として広く普及しているが、その生産量を反映して、建築物や住宅の解体によって発生する廃石膏ボードの量は近年増加傾向に転じている。このような社会情勢から、最終処分場の容量不足に起因する廃石膏ボードの処分費の高騰や不法投棄などの問題が指摘されていることから、廃石膏ボードのリサイクル技術の確立と用途開発の早期実現が急務である。筆者らは、廃石膏ボードから半水石膏を製造するシステムを先行開発し市場に投入している。さらに、そのリサイクル用途の拡大をはかるべくⅡ型無水石膏を製造するシステムを開発している。本稿では、これらの製造システムの概要とその特徴を報告する。

キーワード: 廃石膏ボード, 半水石膏, Ⅱ型無水石膏, ロータリーキルン, 加熱焼成

1. はじめに

「循環型社会形成推進基本法」が2000年(平成12年)に施行され、これに基づく関連の法律が順次改正される。なかでも、「資源の有効な利用の促進に関する法律」いわゆる改正リサイクル法は、資源の少ない我が国が限りある資源の3R, Reduce(減らす), Reuse(再利用), Recycle(再資源化)を推進し、循環型社会をいち早く構築することにより、国民経済の健全な発展に寄与することを目的としている。

また、「建設工事に係る資材の再資源化等に関する法律」いわゆる建設リサイクル法は、全産業廃棄物に占める建設廃棄物の割合が2割程度であるのに対し、全廃棄物の不法投棄量に占める建設廃棄物の割合が9割にのぼるなどの実情を鑑みて制定している。この不法投棄を削減するための法律は、コンクリート塊、アスファルト・コンクリート塊、建設発生木材を特定建設資材として指定し、一定規模以上の建設工事に關して、分別解体による特定資材の再資源化を義務付けている。

さらに、建設廃棄物の発生の抑制と、減量化を推進すると共に、分別解体により建設資材の再資源化や再利用を促進し、適正な処理が行われていることを行政が監督指導する仕組みとなっている。ただし、分別解体の結果、最終的に残される建設混合廃棄物に関しては、中間処理業者でどのように分別が行われ、再資源化施設もしくは最終処分場へどのように搬入されているのか、統計的にその実態が整理されていないのが実情である。

日本の一般家屋の平均耐用年数は、欧米の約100年にくらべて30年程度と極めて短い。しかも、木造建築が中心となることから耐用年数が過ぎた家屋の解体時には、大量の廃木材が発生することになる。さらに、内壁や天井の建築資材として昭和の高度経済成長期から普及し始めた石膏ボードに関しても、これら家屋の解体に伴い発生する石膏ボードの廃棄物(以下、廃石膏ボードと記載)が増加してきている。

石膏ボードは、今やほとんどの建築物の内装材として使用されている。これは石膏ボードが安価で安全、しかも耐火性に優れ、日本古来の土壁に比べて施工性が良いなどの特徴があるからである。このことから、年間の石膏ボード生産量は500万トンを超えている。なかでも、石膏ボード生産量の半数に当たる約250万トンが、化学石膏と呼ばれる排煙脱硫石膏を原料として供給されており、残りの半数は、石膏鉱石として、タイ、メキシコ、オーストラリア、などの海外から輸入されている。

排煙脱硫石膏は、もっぱら火力発電所や重化学工業の工場で、化石燃料を燃焼させたときに発生する有害な硫黄酸化物(一酸化硫黄:SO、二酸化硫黄:SO₂、三酸化硫黄:SO₃など)を除去するために、消石灰(水酸化カルシウム:Ca(OH)₂)や炭酸カルシウム:CaCO₃などが排煙中に吹き込まれ、式(1)と(2)に示す化学反応(石灰-石膏法)で生成することが知られている。



このようにして、石膏ボードが急速に家屋の内装材として普及してきた背景には、副産物として生成する排煙脱硫石膏が、石膏ボードの原材料として安価で大量に供給されていることなどが挙げられる。逆に、このことがコスト面で、廃石膏ボードから再び石膏ボードへのリサイクル化を阻害している要因の一つであると考えられる。

廃石膏ボードは、建設リサイクル法の特定建設資材廃棄物として指定を受けていないことから、再利用や再資源化などのリサイクルがほとんど進んでいないのが実情である。このことは、廃石膏ボードの発生量が、コンクリート塊の3,500万トン、アスファルト・コンクリート塊の2,500万トン、建設廃木材の500万トンに比べると、120万トンと少ないために、行政の対応が遅れていることに起因している。

廃石膏ボードを廃棄処分する場合は、管理型の最終処分場に処分することが法律で厳しく規定されている。このことは、石膏(二水石膏:CaSO₄・2H₂O)の組成から、硫酸塩を含んでいることが明らかであるが、土中などに生息している硫酸塩還元菌が石膏の硫酸塩を分解して、有害な硫化水素(H₂S)を発生させる恐れがあるためである。また、排煙脱硫石膏が原材料として使用されていることから、微量のフッ化カルシウム(CaF₂)が混入しており、これが水に溶出して土壌の環境基準を超過する場合が想定されるなどの理由がある。

このように、廃石膏ボードを管理型の最終処分場に処分することが義務付けられたことにより、廃石膏ボードの処分費の高騰を招くとともに、各自治体の管理型最終処分場の容量が逼迫していることなどの社会問題に発展してきている。このことから、廃石膏ボードのリサイクル技術の確立および用途開発の早期実現が求められている。

一方、筆者らは、建築資材の有効利用、循環型社会の構築などの観点より、廃石膏ボードを紙と石膏とに分別し、粉碎した石膏(以下、リサイクル石膏と記載)を加熱処理することで、水硬性の特徴をもつ半水石膏を効率よく安定して生産するシステムを開発している。そして、このシステムで製造した中性で安全な半水石膏の大量消費が見込まれる軟弱地盤などの改良材としての有効性を検討している^{1)~11)}。

さらに、半水石膏製造システムから発展させて、セメントの原材料またはセメント系固化剤として有用なⅡ型無水石膏の製造システムを開発している。

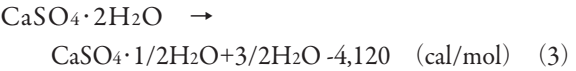
本稿では、これらの半水石膏製造システムとⅡ型無水石膏製造システムの概要とその特徴を報告する。

2. 石膏の特性

石膏は、結晶水の数により二水石膏(CaSO₄・2H₂O:硫酸カルシウム2水和物)、半水石膏(CaSO₄・1/2H₂O:硫酸カルシウム1/2水和物)、無水石膏(CaSO₄:硫酸カルシウム)の3種類が存在する。さらに、半水石膏は、結晶構造の違いにより α 型と β 型に、無水石膏は、Ⅲ型、Ⅱ型、Ⅰ型に

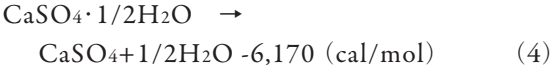
分類することができ、Ⅲ型無水石膏にも α 型と β 型とが存在することが確認されている。したがって、石膏は結晶水の数ならびに結晶構造の違いから、7種類に分類することができる¹²⁾。

二水石膏は、自然界では極めて安定で化学的には水とほとんど反応しない。この二水石膏を130～180℃の温度管理の下、加熱処理(脱水反応)することにより、水硬性の半水石膏(硫酸カルシウム1/2水和物)が生成する。式(3)にこのときの熱化学反応式を示す。式中の熱量にマイナス符号があるのは、吸熱反応であることを示している。



半水石膏には、 α 型と β 型が存在することは前述したが、半水石膏の α 型は緻密な構造で密度が大きく、水硬時の強度が β 型よりも大きいことなどから医療用などに用いられている。この α 型半水石膏を製造するには、加圧水蒸気環境下で焼成する必要があるが、加圧釜(オートクレーブ)などが使用される。

一方の β 型半水石膏は、ポーラス状の空隙があることから密度は α 型よりも小さく、石膏ボードなどの建築資材として利用されている。この β 型半水石膏の製造には、連続式のロータリーキルンなどが使用される。この半水石膏を180℃以上で加熱処理(脱水反応)することにより式(4)に示す結晶水の取れた無水石膏が生成する。



無水石膏には、その結晶構造の違いからⅢ型、Ⅱ型、Ⅰ型が存在し、Ⅲ型の無水石膏はさらに α 型と β 型に分類することができることは既に述べている。Ⅲ型無水石膏は、180～350℃の範囲で加熱することにより生成し、空気中の湿気を吸って半水石膏に戻る。Ⅱ型無水石膏は、350～1,000℃の範囲で加熱することにより得られ、加水しても半水石膏に戻らない、別名硬石膏と呼ばれている。

筆者らが開発した半水石膏製造システムは、リサイクル石膏である二水石膏を加熱処理することにより、 β 型半水石膏やⅢ型無水石膏に相転移して行くプロセスを応用したものである。

3. 半水石膏製造システム

3.1 基本原理

3.1.1 連続処理方式とバッチ処理方式

加熱処理方式には、被加熱物を連続的に処理する連続処理方式と、バッチ処理するバッチ処理方式とに分類することができる。

連続処理方式は、リサイクル石膏を連続的に加熱装置に投入し、かつ、加熱装置から連続的に半水石膏を排出する方式である。したがって、本稿の半水石膏とⅡ型無水石膏の製造システムに採用したロータリーキルンは連続処

理方式に属する。この他に、ベルトコンベア上に載せた被加熱物を周囲から加熱して、被加熱物を搬送しながら加熱する方式などがある。連続加熱方式は、被加熱物を大量に処理する場合に優れている。

一方、バッチ処理方式には、ケトル釜やオートクレーブなどを挙げることができる。*a*型半水石膏を製造するケトル釜は、一定量のリサイクル石膏を釜に投入し、所定の時間水蒸気雰囲気中で加熱処理を施して*a*型半水石膏を製造し、それを一括して釜から排出するバッチ処理方式を採っている。

3.1.2 電気加熱方式と燃料燃焼加熱方式

リサイクル石膏を加熱処理する熱源として、電気エネルギーを利用する場合と、化石燃料の化学反応である燃焼熱を利用する場合によりシステムの構成が大きく異なる。

(1)電気加熱方式

電気エネルギーを利用した加熱方式には、抵抗加熱、誘導加熱、マイクロ波加熱、ヒートポンプ加熱などが挙げられる。

抵抗加熱は、発熱体に電流を流すことによって生じるジュール熱を利用した加熱である。このジュール熱を直接的、間接的に熱伝導、熱対流、熱輻射の熱伝達形態を経て被加熱物を加熱する方式である。

誘導加熱は、発熱体(導電体に限る)に磁界をかけて渦電流を生じさせ、これによるジュール熱を利用した加熱方式である。抵抗加熱と同様に、直接的、間接的に3つの熱伝達形態を経て被加熱物を加熱する方式である。

マイクロ波加熱は、被加熱物の内部より分子を磁界で振動させて摩擦熱を発生させる原理で、唯一の内部加熱方式となる。ただし、被加熱物に水などの極性分子が含まれていることが条件となる。

また、最近では周囲の空気などから熱エネルギーを集めてくる高効率のヒートポンプが、家屋の冷暖房用空調機や温水器として普及している。これによると、投入した電気エネルギーの数倍(成績係数:COP=3～6)の熱エネルギーを得ることが可能であり、ガスや灯油焚き温水給湯器よりも省エネルギー性能と経済性に優れている。しかしながら、半水石膏の第一次沸点である130℃にまで加熱するヒートポンプの実用化には至っていない。

電気加熱方式には、この他にもアーク加熱や輻射加熱などを挙げることができるが、ヒートポンプ加熱方式を除き電気エネルギーを熱に変換する原理は、エネルギー保存則により、1kwh=3.60 MJ(860 kcal)が熱変換の基本原則である。

以上のことより、電気加熱は排ガスが発生せずクリーンで加熱デバイスがコンパクトに設計できるなど極めて有用であるが、次項で述べるように熱エネルギーコストの観点から化石燃料に大きく劣る。

以下では、上記のことを鑑みて燃料の燃焼による加熱について検討する。

(2)燃料燃焼加熱方式

燃焼熱は、燃料が燃焼(酸化反応)することにより発生する化学エネルギーを熱エネルギーとして利用する方法である。

化石燃料による加熱方式には、燃料を空気と混合して燃焼させるバーナ燃焼方式や触媒を介して燃焼させる触媒燃焼方式などがある。いずれも空気中の酸素により燃料を酸化させたときに生じる熱や光を利用している。

バーナ燃焼は、燃料(固体、液体、気体)と空気とを所定の割合で混合させて燃料を燃焼させる方式である。発熱量は、燃料の供給量を可変して調整する。ただし、化石燃料の燃焼に伴い地球温室効果ガスである二酸化炭素は元より、水蒸気ならびに公害の原因物質である硫黄酸化物や窒素酸化物を排出することは否めない。

触媒燃焼は、白金などの触媒作用により比較的低温度で燃料を燃焼させる方式である。燃料の酸化反応が300℃程度の低温でも進行するために、光を放たない緩慢燃焼となる。このように、燃料燃焼加熱方式は、空気が存在する場所であれば燃料と各種燃焼機器を用いて容易に熱エネルギーを取り出すことができる。

一方、電気加熱方式と燃料燃焼加熱方式で発生する単位熱量当たりのコストで比較すると、燃料燃焼加熱方式が優位である。たとえば、前述のように1kwhの電力は3.60 MJ(860 kcal)の熱エネルギーに変換でき、A重油1リットルは36.0 MJ(8,600 kcal)の低位発熱量がある。したがって、これらの単位熱量当たりのコストは、A重油:電力=1:3.6となり、化石燃料がコスト的に有利であることが明らかである。(電力:18円/kWh, A重油:50円/リットルで計算。)

さらに、化石燃料の場合、燃焼ガスをそのまま熱媒体として利用することができる加熱プロセスの場合には、エネルギーロスが少なくなるが、電気加熱方式にくらべて燃焼ガスが大量に発生するので、排ガス処理装置が大型化する傾向にある。また、加熱プロセスが間接加熱となる場合には、熱媒体である燃焼ガスからの熱伝達にロスが生じ、電気加熱方式が優れる場合もある。

本稿の半水石膏とⅡ型無水石膏の製造システムは、単位エネルギー当たりのコストが安価な化石燃料(重油、灯油、ガス)を熱エネルギー源としている。

3.1.3 直接加熱方式と間接加熱方式

熱は、温度の高い物質から温度の低い物質に流れ、接触伝熱の場合には温度差に比例し、輻射伝熱の場合は温度差の4乗に比例して伝わる。このことは、ジョセフ・フーリエの法則とステファン・ボルツマンの法則として知られている。

また、加熱方式として、被加熱物と熱媒体(気体や液体)とを直接接触させる直接加熱方式と、熱媒体で隔壁を加熱して、この隔壁から被加熱物に伝熱する間接加熱方式に分類される。例えば、網に乗せた焼き肉は、直接加熱方式であり、フライパンによる焼き肉は間接加熱方式である。

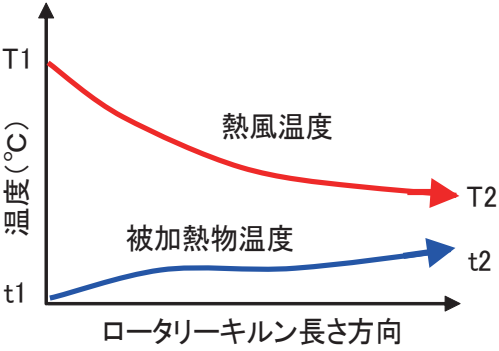


図-1 パラレルフロー方式の概念

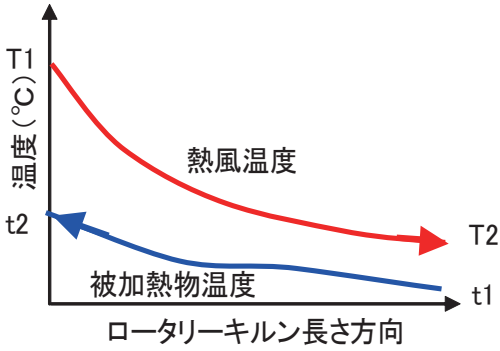


図-2 カウンターフロー方式の概念

表-1 半水石膏製造装置・NPRシリーズ仕様一覧

機 種	NPR-100	NPR-200	NPR-400	NPR-600	NPR-800	NPR-1000
タイプ	移動式	←	定置式	←	←	←
処理能力 (t/h)	1.0	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0
ドライヤ径 (mm)	900	1,100	1,300	1,300	1,550	1,750
ドライヤ長 (mm)	3,000	3,500	5,000	6,000	6,500	7,000
ドライヤ容積 (m³)	1.91	3.33	6.64	7.96	12.26	16.84
バーナ最大燃焼量 (L/h)	40	80	150	225	300	375
バーナファン動力 (kw)	1.5	2.2	3.7	5.5	7.5	7.5
バグフィルタ濾過面積 (m²)	40	75	150	200	250	300
排風機処理風量 (m³/min)	40	75	150	200	250	300
排風機動力 (kw)	5.5	11	18.5	22	30	37

直接加熱方式には、赤外線ヒータなどに代表される熱媒体を介さない輻射加熱も含まれる。直接加熱方式の熱媒体としては、空気や燃焼ガスを用いることが多く、間接的な伝熱面を介さないで熱の伝達ロスが生じない。

一方、間接加熱方式には、被加熱物と熱媒体との間に隔壁が存在し、隔壁に伝熱する段階で放散熱などによる伝達ロスが生じる。さらに、両方式とも熱媒体の熱エネルギー全てを被加熱物に伝熱することはできない。

本稿の半水石膏とⅡ型無水石膏の製造システムは、バーナ燃焼ガスを熱媒体としてリサイクル石膏と直接接触させ伝熱を行う直接加熱方式である。

3.1.4 パラレルフロー方式とカウンターフロー方式

ロータリーキルンには、被加熱物とバーナ燃焼ガス(熱風)などの熱媒体とが、同一方向に流れるパラレルフロー方式と、被加熱物と熱媒体とが対向して流れるカウンターフロー方式とがある。それぞれの概念を図-1と図-2に示す。両図において、T₁は熱風入口温度、T₂は熱風出口温度、t₁は被加熱物入口温度、t₂は被加熱物出口温度を表す。熱風が流れる方向は、T₁→T₂へ、被加熱物が流れる方向は、t₁→t₂となる。

図-2に示すカウンターフロー方式は、理論上、熱風出口温度T₂を被加熱物出口温度t₂以下にまで下げることができる。このことは、図-1に示すパラレルフロー方式の熱風出口温度

T₂が被加熱物出口温度t₂以上となることに比較すると、カウンターフロー方式が熱効率に優れていることがわかる。しかしながら、熱効率を追求し過ぎると、被加熱物投入側のロータリーキルン壁面温度が低下することにより、被加熱物の水分による付着が成長することや、ロータリーキルンや排ガス処理装置の低温腐食を招く恐れがある。

本稿の半水石膏製造システムは、図-1に示すパラレルフロー方式を採用している。この方式は、被加熱物出口温度t₂および熱風出口温度T₂の制御性に優れている。さらに、熱風出口温度T₂を制御することにより被加熱物が水分の影響によってロータリーキルン内壁や掻き揚げフライトへ付着成長するのを抑制する効果がある。

一方、Ⅱ型無水石膏製造システムは、図-2に示すカウンターフロー方式を採っている。この方式は、熱風出口温度T₂よりも被加熱物出口温度t₂を高くすることが可能で、パラレルフロー方式よりも熱効率に優れている。

3.2 半水石膏製造システムの特徴

3.2.1 NPRシステムの概要

表-1に半水石膏製造装置・NPRシリーズの概要を示す。NPR:Nikko Plaster Reactorは、二水石膏であるリサイクル石膏を加熱処理することにより、半水石膏を製造する装置である。表より、NPRシリーズとして、リサイクル石膏の処理能力が毎時1トンから10トンまでの処理能力に応じて6機種を

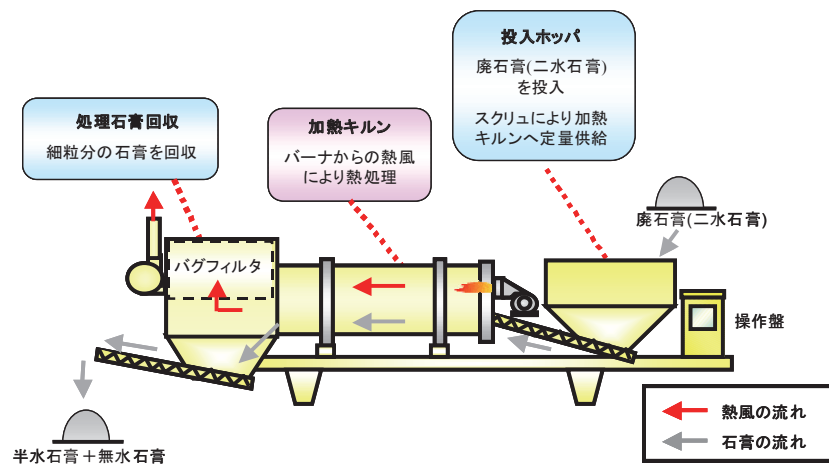


図-3 移動式半水石膏製造システムNPR-100のフロー¹³⁾

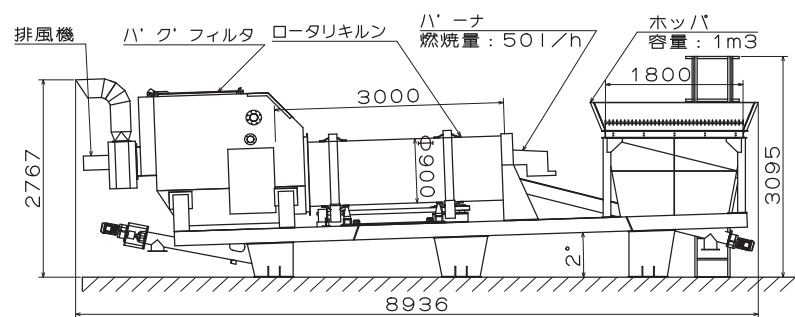


図-4 移動式半水石膏製造システムNPR-100の外観

取り揃えている。また、NPR-100とNPR-200の2機種は、小型の移動式で、NPR-400からNPR-1000の4機種は、大型の定置式となっている。

処理能力が毎時1トンである移動式半水石膏製造システムNPR-100のフローと外観を図-3¹³⁾と図-4に、その全景を写真-1⁸⁾に示す。図と写真より、供給ホッパーフィーダ、加熱バーナ、ロータリーキルン、バグフィルタ、排風機などを一体構造とし、全長9,000mm、全幅2,000mm、全高2,800mmの寸法に抑えて10トン積みのトラック1台での輸送を可能としている。このことにより、比較的小規模な廃石膏ボードの中間処理業者の間で本装置を融通することにより、必要な時に必要なだけ半水石膏の製造を行うことができる。

また、加熱バーナの最大燃焼量を毎時40リットルとすることで、大気汚染防止法のばい煙発生施設（燃焼量が毎時50リットル以上に届出義務）に該当せず届出が不要となる。さらに、燃料タンク容量を危険物の指定数量の1/5未満である390リットルとすることで、届出を不要としている（A重油：第4類第3石油類の場合）。ただし、本装置を用いて作業するためには、労働安全衛生法における乾燥設備主任の講習を受ける必要がある。

一方、定置式である処理能力が毎時4トンの定置式半水石膏製造システムNPR-400のフローと外観を図-5²⁾と図-6に、その全景を写真-2に示す。図と写真より、供給ホッパ



写真-1 移動式半水石膏製造システムNPR-100の全景⁸⁾

フィーダ、加熱バーナ、ロータリーキルン、バグフィルタ、排風機などが大型になり、個々の装置が独立していることがわかる。また、ロータリーキルンや排風機などの回転機器を据え付けるための頑丈なコンクリート基礎が必要となり、特に燃焼排ガスを大気に放出する煙突に関しては、建築基準法の工作物の適応を受けることから、構造指針に準拠した強度とコンクリート基礎が必要となる。さらに、大型であるがために、消防法、大気汚染防止法、騒音規制法、振動規制法、労働安全衛生法などの関係する法令に基づき申請や届出が必要となる。

なお、移動式および定置式の両者とも熱源である燃料は、A重油と灯油を基本としており、都市ガス13Aやバイオマス燃料などの対応も可能である。

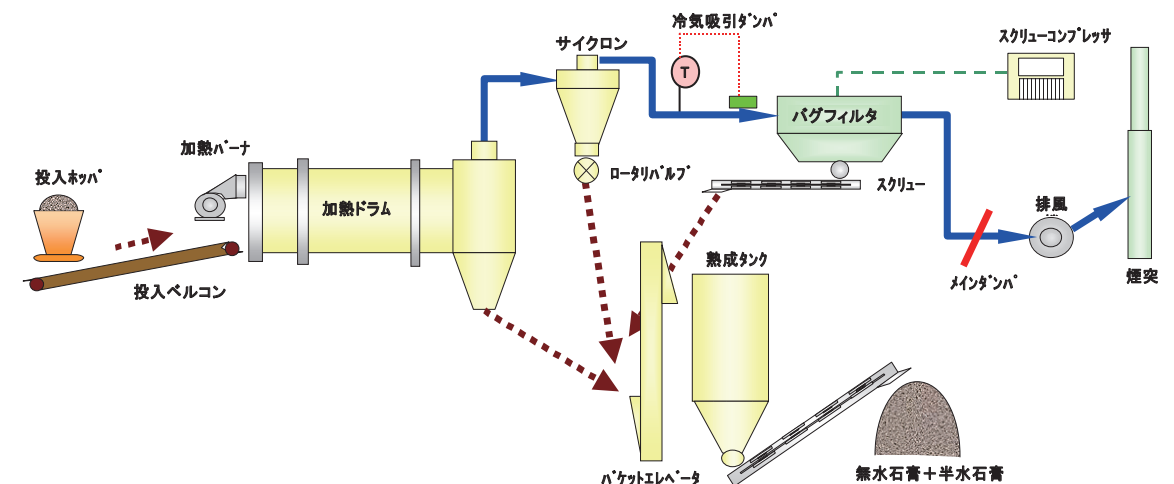


図-5 定置式半水石膏製造システムNPR-400のフロー²⁾

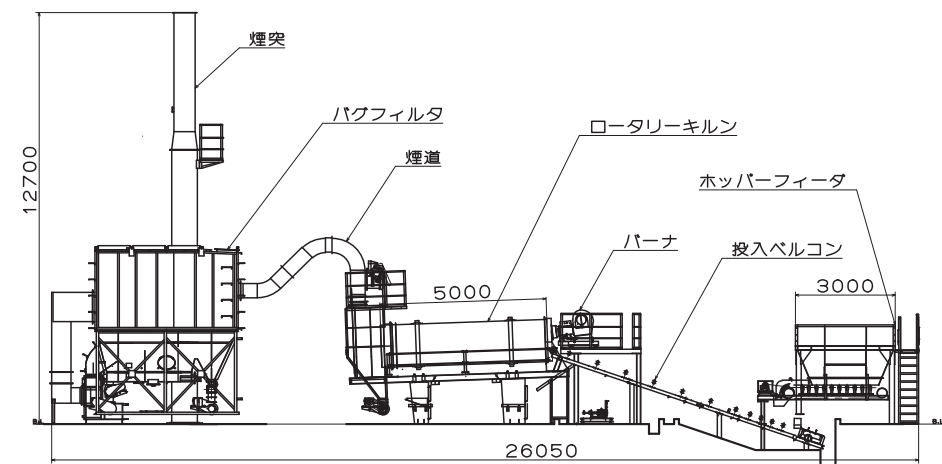


図-6 定置式半水石膏製造システムNPR-400の外観

以下では、半水石膏製造装置であるNPRシリーズの構成装置毎の特徴について詳細を述べる。

3.2.2 供給ホッパーフィーダ

供給ホッパーフィーダは、ロータリーキルンにリサイクル石膏を定量供給するための装置で、リサイクル石膏の供給量を連続的に可変することができる。

移動式の半水石膏製造装置は、コンパクト化をはかるために供給ホッパーを図-3¹³⁾と図-4および写真-1⁸⁾のように、本体フレームと一体構造とし、その容量を1m³としている。さらに、供給ホッパー下部のリサイクル石膏の供給量を調整するフィーダと、ロータリーキルンへリサイクル石膏を投入するコンベアとの機能を兼ね備えた一体型のスクリーコンベアを搭載している。このことにより、コンパクト化とコストダウンをはかっている。なお、リサイクル石膏の供給量は、スクリーコンベアの回転数を可変することにより、自在に制御できるようにしている。

写真-3は、定置式の供給ホッパーフィーダを示している。図-5²⁾および図-6のように、容量が5m³の供給ホッパーと、その下部に設けたベルトフィーダと、ロータリーキルンにリサイク



写真-2 定置式半水石膏製造システムNPR-400の全景

ル石膏を投入する投入ベルコンから構成されている。あらかじめベルトフィーダの回転数とリサイクル石膏の供給量との関係を測定しておき、リサイクル石膏の含水比や半水石膏の品質に応じて、供給量を自在に可変することができる。

両者とも供給ホッパーへのリサイクル石膏投入は、ショベルローダもしくはフォークリフトによるフレコンパック投入に対応している。そして、異物の混入や人の転落を防止するために、上部にグリズリーバーを備えている。



写真-3 定置式の供給ホッパーフィーダ

3.2.3 加熱バーナ

移動式および定置式の両者とも、ロータリーキルン用の加熱バーナとして専用に開発した油圧戻り油式の比例制御バーナを搭載している。写真-4に定置式の加熱バーナを示す。このバーナは、燃焼量の可変幅を大きくするためにノズル内部に渦巻き室を設け、ここに実際の燃焼量よりも多い燃料を供給することによって得られる高速の回転力を油の霧化に利用している。さらに、この渦巻き室から余分な燃料をリターンさせることにより、燃焼量を連続的に可変することができるようにしている。本システムに採用した加熱バーナの燃焼幅は1:5(最少燃焼量:最大燃料量)である。

また、これらの加熱バーナは、省エネルギー化と温室効果ガスである二酸化炭素の排出量を削減することを目的に低空気比燃焼をはかっている。1リットルの燃料を完全燃焼させるのに必要な空気を理論空気量というが、実際のバーナでは燃焼効率を高めるために、この理論空気量より過剰の空気で燃焼させている。理論空気量の何倍の空気で燃焼させているかを示す指標として空気過剰係数が用いられる。本システムに採用した加熱バーナの空気過剰係数は1.1~1.2の範囲にある。このように、加熱バーナの低空気比化をはかることにより、無効エネルギーとして排出する排ガス量を削減している。

加熱バーナの使用燃料は、一般産業用に流通している重油、灯油、ガスなどに対応しており、カーボンニュートラルな植物由来(メタノール、BDF、木質タール、廃グリセリンなど)の燃料にも適応させることも可能である。

3.2.4 ロータリーキルン

写真-5²⁾は、定置式のロータリーキルンを示している。写真より、本ロータリーキルンは、移動式および定置式の両者とも被加熱物が流れる方向に2°傾斜している。また、加熱バーナの燃焼ガスと、被加熱物のリサイクル石膏とが同じ方向に流れるパラレルフロー方式を採用している。さらに、後段で詳しく述べる

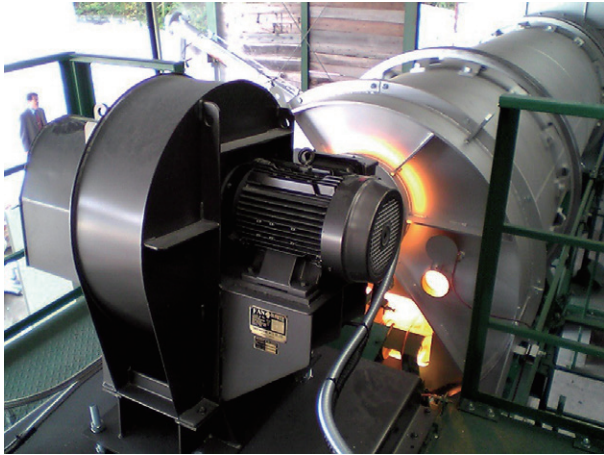


写真-4 定置式の加熱バーナ

写真-5 定置式のロータリーキルン²⁾

が、バーナ火炎がロータリーキルン内部に導入されるので、被加熱物であるリサイクル石膏とバーナ火炎とが直接接触しないようにするため、ロータリーキルン内部の掻き揚げフライトの形状を工夫している。

つぎに、石膏の性状変化(粒度や含水比)に対応するため、ロータリーキルンをインバータによる回転数制御とし、その回転数を2~8 m⁻¹の範囲で調整が可能としている。このことより、リサイクル石膏のロータリーキルン内部での滞留時間が5~20分の範囲で調整することができ、石膏の性状に応じたコントロールを可能にしている。

一方、省エネルギー化と作業環境への配慮から、ロータリーキルンの内部圧力(静圧)を大気圧力より僅かに低い、マイナス圧(-40Pa)にする静圧コントロールシステムを導入している。これにより、燃費の削減とリサイクル石膏の微粒子がロータリーキルン外部に噴出しないクリーンな作業環境を実現している。

3.2.5 バグフィルタ

写真-6²⁾は、定置式のパグフィルタを示している。移動式および定置式の両者とも、ロータリーキルンから排ガスに伴って飛散する半水石膏と未反応の二水石膏とを捕捉回収すると

写真-6 定置式のパグフィルタ²⁾

ともに、パグフィルタの濾布表面で未反応の二水石膏を半水石膏へ相転移させる機能を有している。

また、パグフィルタの濾布表面で捕捉された半水石膏の一部は、さらに脱水反応を経て、水を加えると硬化するⅢ型無水石膏に相転移している。両者のシステムとも排ガス温度の設定を自在に変更することにより、二水石膏、半水石膏、Ⅲ型無水石膏それぞれの割合を任意に管理できるようにしている。

一方、定置式のパグフィルタは、写真-6²⁾のように独立型としているのに対して、移動式のパグフィルタは、写真-1⁸⁾のように本体フレームと一体構造とすることでコンパクト化をはかっている。

3.2.6 熟成タンク

排ガスに伴ってパグフィルタで捕捉されたりサイクル石膏の微粒子は限りなく排ガス温度に近づいていることから、半水石膏またはⅢ型の無水石膏に相転移している。逆にロータリーキルンから排出されるリサイクル石膏の中で、比較的大きな粒子は内部まで十分に加熱されておらず、二水石膏の状態で排出されるものも含まれている。

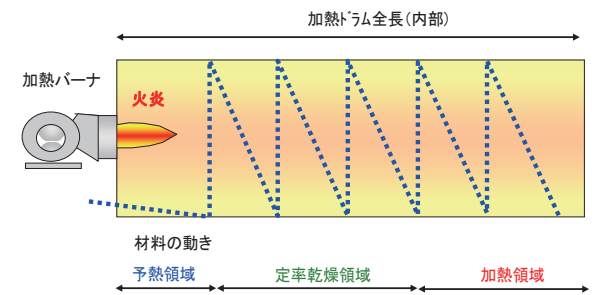
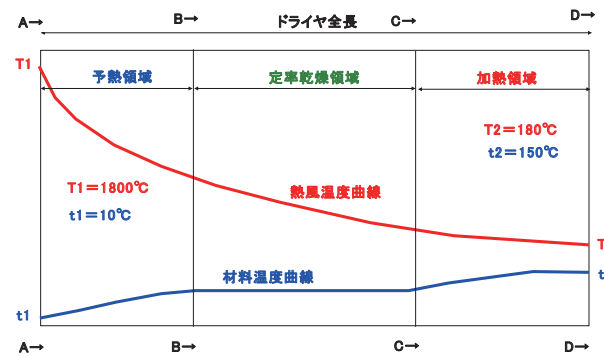
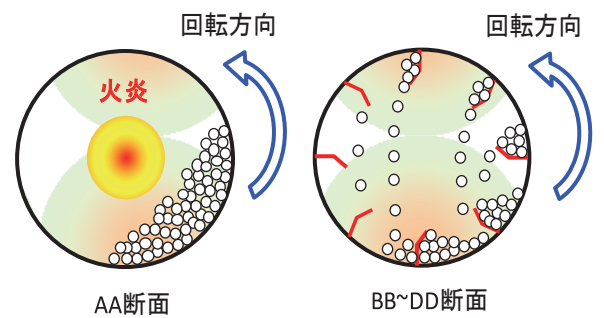
図-5²⁾に示すように、熟成タンクにこれらが混在した石膏を投入することにより、温度の高いⅢ型無水石膏が温度の低い二水石膏を加熱し、二水石膏の結晶水が脱離して半水石膏となる。さらに、二水石膏から脱離した結晶水をⅢ型無水石膏が吸収して半水石膏となる。具体的な時間として、60分程度の熟成をはかることにより、半水石膏の収率を上げることが可能となる。

一方、小型の移動式は、パグフィルタ下部の排出ホッパーが熟成タンクとしての機能を有しており、コンパクト化をはかっている。

3.3 半水石膏製造メカニズム

3.3.1 ロータリーキルンでの加熱原理

以下では、移動式および定置式の半水石膏製造システム

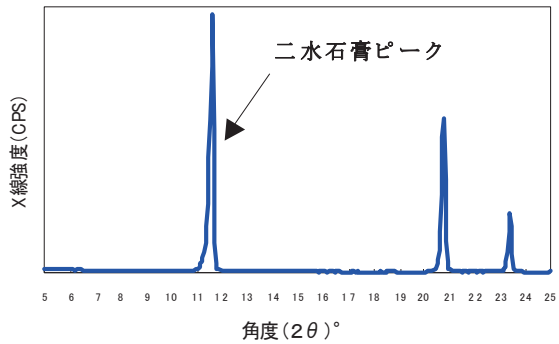
図-7 ロータリーキルン内部の流れ方向の材料の動き¹³⁾図-8 ロータリーキルン内部の温度分布¹³⁾図-9 ロータリーキルンの断面¹³⁾

におけるロータリーキルンでの加熱原理について、被加熱物であるリサイクル石膏の挙動を(1)予熱領域、(2)定率乾燥領域、(3)加熱領域に分けて詳述する。なお、図-7¹³⁾は、ロータリーキルン内部の流れ方向の材料の動きを、図-8¹³⁾は、内部流れ方向の材料と熱風の温度分布を、図-9¹³⁾は図-8¹³⁾の各断面における材料の分散の状態を示している。

(1) 予熱領域

移動式および定置式の両者とも、図-7¹³⁾に示すように加熱バーナの火炎を直接ロータリーキルン内部に導入している。加熱バーナの火炎長さは、移動式で0.5~1.5m、定置式で1.0~3.0mである。この火炎は、加熱バーナ先端部よりロータリーキルンの中央部に向かって水平方向に形成される。

したがって、図-7¹³⁾の予熱領域ならびに図-9¹³⁾のAA断面に示すように加熱バーナの火炎とリサイクル石膏とが直接接触するのを防ぐために、火炎が形成される領域ではリサイクル石膏を分散させないよう掻き揚げフライトの構造を工夫している。

図-10 加熱処理前のリサイクル石膏のX線回折結果²⁾

また、この予熱領域では、リサイクル石膏がロータリーキルンの底部を滑りながら排出方向に向かって進んで行くが、図-8¹³⁾に示すとおり熱風温度 T_1 と材料温度 t_1 の温度差が最も大きい領域となる。熱エネルギーは温度差に比例して流れることやバーナ火炎からの輻射伝熱を受けることにより、材料を積極的に分散させなくても加熱することが可能である。このように、リサイクル石膏は予熱されながら定率乾燥領域へ進んで行く。

(2)定率乾燥領域

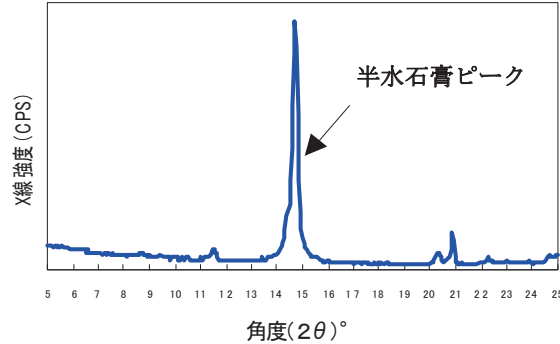
図-7¹³⁾に示す定率乾燥領域は、加熱バーナの火炎が直接材料に届かない領域であるため、図-9¹³⁾のBB～DD断面に示す掻き揚げフライトを円周上に複数枚取り付けている。そして、ロータリーキルンの回転に伴い掻き揚げフライトでリサイクル石膏を持ち上げて自由落下させ均一に分散させている。このようにして、リサイクル石膏を積極的に分散させることにより熱風との接触面積を大きくして熱交換効率を高めている。

また、この定率乾燥領域は、石膏に供給される熱エネルギーと石膏の表面水が蒸発するときに吸収する気化熱とがバランスする領域である。図-8¹³⁾に示す定率乾燥領域の材料温度のように温度の変化が生じない湿球温度と呼ばれる温度で安定すると考えられる。水の気化熱は、温度によっても異なるが、熱風中の水蒸気量(蒸気圧)により湿球温度が決定され、これにより水の気化熱も定まる。本稿で報告する半水石膏製造装置のロータリーキルンにおける湿球温度は概ね75℃で、その時の気化熱は2.31 MJ/kg(553 kcal/kg)である。

(3)加熱領域

加熱領域では、リサイクル石膏の表面水が蒸発して減少したところで熱エネルギーの授受バランスが崩れてリサイクル石膏の温度が上昇して行く。結晶水が脱離して二水石膏から半水石膏になるときの水和熱は17.25 MJ/kmol(4,120 kcal/kmol)で、130℃が石膏の一次沸点であることは既に述べた通りである。

水が常圧の下で100℃以上に温度が上昇しないのと同様に、二水石膏が存在する場合は130℃以上に温度は上

図-11 加熱処理後のリサイクル石膏のX線回折結果²⁾

昇しない。このため、ロータリーキルン出口の石膏温度を管理して、半水石膏の収率をコントロールすることは難しい。

したがって、本稿で報告する半水石膏製造システムでは、ロータリーキルン出口の排ガス温度を加熱バーナの燃焼量で比例制御する排ガス温度のフィードバック制御方式を採用している。

これにより、ロータリーキルン出口排ガス温度を80～200℃の任意の値に設定することで、二水石膏と半水石膏の割合を自在にコントロールすることを可能としている。たとえば、加熱処理した石膏中の半水石膏の割合が少ない場合には、排ガス温度の設定値を上げ、逆に半水石膏の割合が多い場合には、排ガス設定温度を下げるように調節を行う。

一方、パラレルフロー方式のロータリーキルンでは、図-8¹³⁾に示すように加熱処理後の材料温度 t_2 よりも排ガス温度 T_2 の方が高くなることから、ロータリーキルン内部で飛散したりサイクル石膏の微粒子は、排ガス温度に近づきながらバグフィルタに導入され捕捉される。

石膏は、130℃の一次沸点を超えると、さらに結晶水が脱離してⅢ型の無水石膏となる。このときの水和熱は25.83 MJ/kmol(6,170 kcal/kmol)で、二水石膏から半水石膏になるときの水和熱よりも大きい値を示す。このことは、石膏の二次沸点が180℃と一次沸点よりも高い値を示すことで明らかである。また、二次沸点が存在する限り、一次沸点における半水石膏の収率と同様に、石膏の温度管理のみによりⅢ型無水石膏の収率を管理することは難しい。

これらのことから、本半水石膏製造装置は排ガス温度のコントロールにより、バグフィルタで捕捉される石膏の半水石膏とⅢ型無水石膏との比率を任意に管理することを可能にしている。

3.3.2 半水石膏製造装置の性能評価

(1)半水石膏の収率

石膏を加熱処理して生成する半水石膏の収率を評価する方法として、熱質量分析法、示差熱分析法、粉末X線回折法などがある。

熱質量分析法は、石膏を加熱して結晶水を脱離させ、質量が減少した差分で半水石膏の収率を求める方法である。この方法では、二水石膏、半水石膏、無水石膏の構成割合

表-2 移動式で製造した半水石膏のX線回折結果¹³⁾

種 類	加熱処理前①		加熱処理後②		増減 (②－①)	
	質量%	mol%	質量%	mol%	質量%	mol%
二水石膏	98.30	97.94	11.90	10.14	-86.40	-87.80
半水石膏	1.00	1.18	75.30	76.08	74.30	74.89
無水石膏	0.70	0.88	12.80	13.79	12.10	12.91

までを求めることはできない。また、表面水(付着水)の影響や加熱温度の管理が難しく、誤差が大きくなる傾向にある。

示差熱分析法は、石膏の結晶水が脱離する場合は吸熱反応、水和する場合は発熱反応になることから、熱エネルギーの授受(吸熱反応と発熱反応)をDTG曲線(示差熱質量分析:Differential Thermo-gravimetry)として表す。このDTG曲線の変曲点を特定して、二水石膏、半水石膏、無水石膏の割合を求めるが、変曲点の見極めが難しい。

これらのことから、粉末X線回折法を用いることで、二水石膏、半水石膏、無水石膏の割合を明確にすることが可能である。粉末X線回折分析から得られた加熱処理前のリサイクル石膏のX線回折パターンを図-10²⁾に、加熱処理後のリサイクル石膏のX線回折パターンを図-11²⁾に示す。図-10²⁾に現れたX線回折パターンは、二水石膏のパターンとほぼ一致しており、特に角度(2θ)が11°～12°付近で明瞭なピークを示している。この(2θ)が11°～12°付近のピークは二水石膏に特有のものである。

一方、図-11²⁾では、半水石膏のX線回折パターンで特有のピークが得られる角度(2θ = 14°～15°)付近において、明瞭なピークが認められる。これらX線回折パターンより、加熱処理の前後でピーク値が二水石膏から半水石膏へと相転移していることがわかる。さらに、これらX線回折パターンの面積を求め、それを用いて計算された加熱処理前と加熱処理後の構成割合を表-2¹³⁾と表-3²⁾に示す。

表-2¹³⁾は、移動式のX線回折結果であり、表-3²⁾は、定置式のX線回折結果である。なお、無水石膏の特有のピークは半水石膏と同程度の角度(2θ)で得られるので、その他のピークの値なども考慮して二水石膏と半水石膏に分類されなかった量として計算から求めている。

以上の結果から、水硬性の半水石膏とⅢ型無水石膏との質量%の合計は、移動式で1.7%から88.1%まで、定置式で1.7%から87.5%まで増加し、移動式の半水石膏収率に関して定置式とほぼ同等であることが明らかとなった。このことは、システムの大小を問わず半水石膏の品質が排ガス温度に極めて密接な関係にあることを裏付けている。

(2)熱効率

今回のX線回折結果に基づいて、移動式と定置式の熱効率を検討する。なお、熱効率は、有効熱量/入熱で定義される。有効熱量は水和熱、結晶水のエンタルピー変化、表面水のエンタルピー変化および石膏の顕熱の和で表される。

表-3 定置式で製造した半水石膏のX線回折結果²⁾

種 類	加熱処理前①		加熱処理後②		増減 (②－①)	
	質量%	mol%	質量%	mol%	質量%	mol%
二水石膏	98.30	97.94	12.50	10.67	-85.80	-87.27
半水石膏	1.00	1.18	76.50	77.46	75.50	76.27
無水石膏	0.70	0.88	11.0	11.87	10.30	10.99

表-4 移動式と定置式の熱効率と燃費比較¹³⁾

タイプ	熱 効 率 (%)	燃 費 (ℓ/トン)
定置式	82.6	24.7
移動式	80.8	25.3

まず、移動式は、1トン当たりのリサイクル石膏の処理に25.3リットルの重油を消費したことより、その燃費は25.3リットル/トン(A重油使用:低発熱量36.00 MJ/リットル(8,600 kcal/リットル))であった。したがって、その入熱は900.0 MJ(215,000 kcal)となる。

つぎに、有効熱量を計算する。加熱処理前のリサイクル石膏1トン当りの総mol数を、表-2¹³⁾を用いて計算すると、5.836 kmolとなる。前述した二水石膏および半水石膏を脱水する際の熱化学式(2)、(3)より、脱水反応に要する水和熱は、104.2 MJ(24,900 kcal)となる。

また、結晶水の脱離に要するエンタルピー変化は、38.51 MJ(92,000 kcal)となる。また、リサイクル石膏の含水比(表面水)を5.0%、表面水のロータリーキルン内部での湿球温度を75℃とすると、表面水の温度上昇に要するエンタルピー変化量は129.3 MJ(30,900 kcal)となる。

さらに、石膏を150℃まで加熱するのに要する顕熱は117.2 MJ(28,000 kcal)程度となることから、有効熱量は735.9 MJ(175,800 kcal)程度となる。このことから、熱効率は80.8%となる。

一方、移動式と定置式の熱効率と燃費の比較を表-4⁸⁾に示すが、定置式の熱効率が82.6%であったことから、本移動式から得られた熱効率80.8%の結果は、定置式より僅かに低い値となったが、十分満足な値であると考えられる。同様に、半水石膏を1トン当たり生産するのに必要な燃費を計算すると表-4のように定置式で24.7リットル/トン、移動式で25.3リットル/トンとなった。

なお、移動式の熱効率が僅かに低下した要因は、系全体の放散熱量やロータリーキルンへの侵入空気およびバーナ燃焼の過剰空気などが無効熱量となったことが考えられる。

(3)ばい煙

ばい煙とは、燃料を燃焼させたときに生じる燃焼ガス中の硫黄酸化物、窒素酸化物、ばい塵、その他政令で定める有害物質を意味し、大気汚染防止法でその排出量や排出濃

図-5 移動式と定置式のばい煙排出濃度

タイプ	硫黄 酸化物 (ppm)	窒素 酸化物 (ppm)	ばい塵 (g/Nm ³)
定置式	3.2	26.3	0.01
移動式	3.1	25.0	0.01

度が厳しく規制されている。ばい煙の各項目を移動式と定置式とで比較した値を表-5に示す。

硫黄酸化物は、燃料に含有している硫黄分が燃料の燃焼に伴い酸化されて生成し、一酸化硫黄：SO、二酸化硫黄：SO₂、三酸化硫黄：SO₃などの硫黄酸化物として燃焼排ガス中に含まれる。これら硫黄酸化物は、酸性雨や大気汚染の原因物質であることから大気汚染防止法によりその排出量が厳しく規制されている。この硫黄酸化物の排出量や濃度は、燃料中の硫黄含有量により決定される。このため定置式ならびに移動式ともに同様の燃料を使用した場合、表-5に示すとおり硫黄酸化物の排出濃度に差は生じない。

硫黄酸化物の排出規制に関しては、地方自治体ごとにさらに厳しい上乗せ基準が存在することから設置場所によって異なる。ただし、硫黄酸化物の排出量は使用する燃料に含まれる硫黄成分により依存されることから、規制値の厳しい自治体で運用する場合は硫黄の含有量が少ない白灯油や都市ガスを使用することで規制値をクリアすることが可能である。なお、移動式は加熱バーナの燃焼量を毎時40リットル以下としていることから、大気汚染防止法のばい煙発生施設の届出義務の要件には該当しない。

窒素酸化物は、その生成プロセスの違いから2つに分けることができる。1つ目は、燃料由来で発生する窒素酸化物でFuel NO_xと呼び、2つ目は、高温雰囲気で空気中の窒素：N₂と酸素：O₂とが結合して生成する窒素酸化物でThermal NO_xという。

Fuel NO_xは、窒素分を含まない良質の燃料を使用する場合生成することはない。一方のThermal NO_xは、空気中に含まれている79%の窒素と21%の酸素とが1,000℃以上の高温で結合し、一酸化窒素：NO、二酸化窒素：NO₂などを生成する。

これらの窒素酸化物は酸性雨や高化学スモッグの原因物質の1つとしてその排出量や濃度が大気汚染防止法で厳しく規制されている。また、窒素酸化物の排出基準は硫黄酸化物同様地方自治体ごとに定める上乗せ基準が存在することから設置場所によってその規制値が異なる。定置式ならびに移動式の両者とも、表-5に示すとおり同等の低い値を示している。これは、燃焼ガスを自己再循環させる構造のバーナを採用したことによる。

技術的には、EGR(Exhaust Gas Recirculation：燃焼排ガスの再循環)システムを導入することにより、さらに厳しい規制

図-6 移動式と定置式の騒音と二酸化炭素排出量

タイプ	騒 音 (dB)	二酸化炭素排出量 (kg-CO ₂ /トン)
定置式	85.3	66.7
移動式	79.8	68.3

値(酸素濃度16%換算基準で16ppm)までの対応が可能である。なお、移動式に関しては、硫黄酸化物同様加熱バーナの燃焼量が毎時40リットルであることから届出の義務はない。

ばい塵濃度は、本システムの場合ロータリーキルンから排ガスに随伴して飛散するリサイクル石膏の微粒子をバグフィルタで捕捉している。バグフィルタを吹き抜けてくる粒子状物質の濃度が規制対象なる。

移動式と定置式の両者ともバグフィルタを装備しており、バグフィルタに使用している濾布も同仕様のものを採用している。表-5に示すとおり規制値の0.5g/Nm³に対して0.01g/Nm³と1/20倍の値に収まっていることから、最も厳しい上乗せ基準が適応される地域でも対応が可能である。

(4)騒音

表-6に移動式と定置式の騒音に関する比較を示す。騒音の発生源としては、加熱バーナと排風機を挙げることができる。加熱バーナに関しては、移動式および定置式においてインバータ制御方式の送風機を採用していることから、本システムの側面1mの距離で80(dB)を下回っている。

定置式で最も騒音の発生源となるのが排風気である。定置式は、排風気の制御にインバータ制御を取り入れていないことから、85dBを超える騒音となっている。一般的に、定置式においては、建屋内部に設置されることや設置される敷地が広いことなどにより音圧レベルが減衰し、敷地境界での騒音は規制値をクリアしている。

一方、移動式の排風気制御にはインバータ制御方式を採用しているので全体の騒音を低下させるのに寄与している。移動式の側面1mにおいて80(dB)を下回っていることから、騒音規制における特段の対策は必要ないと考えられる。

(5)二酸化炭素排出量

表-6に示す二酸化炭素排出量は、システムの熱効率と使用する燃料の炭素含有量で決定される。表-4¹³⁾より、移動式の燃費が25.3リットル/トン、定置式の燃費が24.7リットル/トンであることより、A重油の二酸化炭素排出係数を2.7 kg-CO₂/リットルとすると、半水石膏を1トン生産するのに、定置式では66.7kg-CO₂/トン、移動式では68.3 kg-CO₂/トンの二酸化炭素を排出することになる。

地球温室効果ガスである二酸化炭素の排出量は、このように炭素を含んだ化石燃料を燃焼させることにより発生するが、

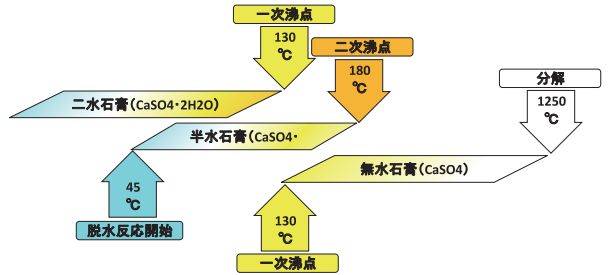


図-12 常圧下における石膏の相転移温度

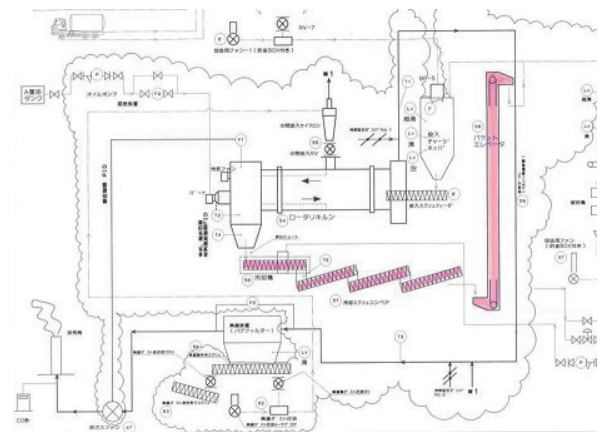


図-13 II型無水石膏製造装置のシステムフロー

システムの効率を上げることにより削減することができる。さらに、使用する燃料に関して、炭素含有量の少ない天然ガスなどを使用することにより単位発熱量当たり約25%の二酸化炭素排出量を削減することができる。

今後の課題として、さらに二酸化炭素の排出量を削減させるべくシステムの効率を改善させることが挙げられる。

4. II型無水石膏製造システム

4.1 概要

リサイクル石膏から製造した半水石膏の水硬性を利用して、軟弱地盤や土壌の改良材として有効活用する実施例が増加している^{1～11)}。ただ、半水石膏は、空気中の湿気を吸収して二水石膏に相転移してしまうため、半水石膏の水硬性を活用する用途に対しては、その品質管理が難しい側面がある。

即ち、半水石膏を製造してから実際の現場で土壌の改良材として適用するまでの貯蔵期間が限定的となり、前以て半水石膏の作り置きをして、その収率を一定に管理することが難しくなる。このことから、半水石膏やⅢ型無水石膏を貯蔵する場合には、大気との接触を断つ必要があることから、セメントと同様の扱いが余儀なくされる。

さらに、石膏の一次沸点が130℃に存在するために石膏の加熱温度を制御して、半水石膏の収率を管理することが原理上できない。このことは、この一次沸点で石膏の加熱を続けても二水石膏が存在する限り温度が上昇せず、温度と半水石膏の収率との間に相関が取れないことを意味してい

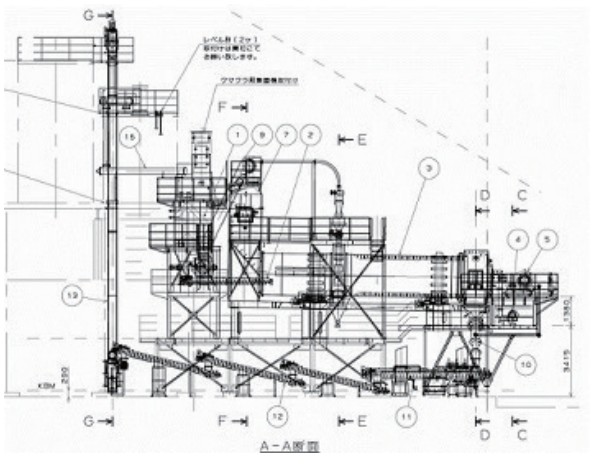


図-14 II型無水石膏製造装置の外観



写真-7 II型無水石膏製造装置の全景



写真-8 II型無水石膏製造装置のロータリーキルン

る。このような半水石膏が有している短所に鑑み、水和反応が極めて遅効性であるⅡ型無水石膏を製造し、セメントとブレンドして土壌の改良材とする用途が増加の傾向にある。

Ⅱ型無水石膏は、空気中の湿気を吸収して二水石膏に相転移することがほとんどないことから作り置きが可能となり、必要量に応じて計画的な製造が可能となる。また、石膏の二次沸点である180℃を大きく超えた350℃以上の領域で



写真-9 ロータリーキルンの内部(乾燥加熱領域)

Ⅲ型無水石膏からⅡ型無水石膏に相転移を起こすが、このとき潜熱が介在しないので石膏の温度管理によりⅡ型無水石膏の収率をコントロールすることが可能となる。

ここで、常圧下における石膏の相転移温度を図-12に示す。図より、二水石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)の沸点(一次沸点)が 130°C に存在し、これ以上の温度域では二水石膏は存在することはできない。また、二水石膏は 45°C から脱水反応が始まり半水石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$)を生成するが、この半水石膏の沸点(二次沸点)が 180°C に存在し、これ以上の温度域では半水石膏は存在することができない。

このようにして、半水石膏は 45°C から 180°C の温度域で存在することができる。さらに、半水石膏は、一次沸点である 130°C から脱水が始まり無水石膏(CaSO_4)を生成する。そして、二次沸点である 180°C 以上の温度域では、無水石膏のみが存在することができ、 $1,250^\circ\text{C}$ で無水石膏が分解して酸化カルシウム(CaO)と三酸化硫黄(SO_3)を生成する。加えて、無水石膏は、 $130 \sim 350^\circ\text{C}$ の範囲でⅢ型無水石膏、 $350 \sim 1,000^\circ\text{C}$ の範囲でⅡ型無水石膏、 $1,000 \sim 1,250^\circ\text{C}$ でⅠ型無水石膏へと相転移して行く。

一方、今回新たに開発したⅡ型無水石膏製造装置の初号機は、設置上のレイアウトや排ガス温度などの制約により、カウンターフロー方式のロータリーキルンとしている。そのシステムフローを図-13に、その外観を図-14に、その全景を写真-7に示す。

図より、このシステムは、省エネルギー化をはかることと、耐熱温度に制約があるバグフィルタで排ガスに随伴してくる微細石膏を回収するために、乾燥加熱領域と焼成領域を併せ持つカウンターフロー方式のロータリーキルンを採用して排ガス温度を低下させていることが特徴である。

4.2 Ⅱ型無水石膏製造システムの特徴

写真-8は、カウンターフロー方式のロータリーキルンの全景を示している。なお、本ロータリーキルンは、写真右手側のリサイクル石膏投入部から、写真左手側の排出部に向かって 2° 傾斜させることにより、材料の流れを促進させている。

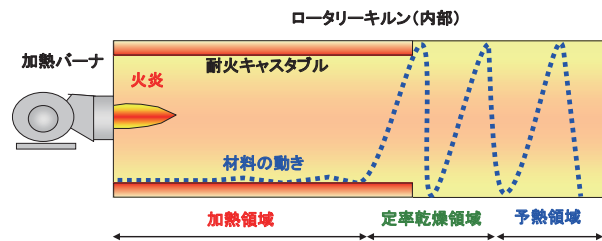


図-15 ロータリーキルン内部の材料の動き

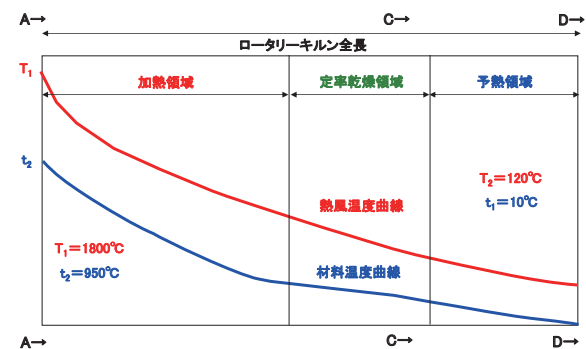


図-16 ロータリーキルンの内部の熱風温度と材料温度分布

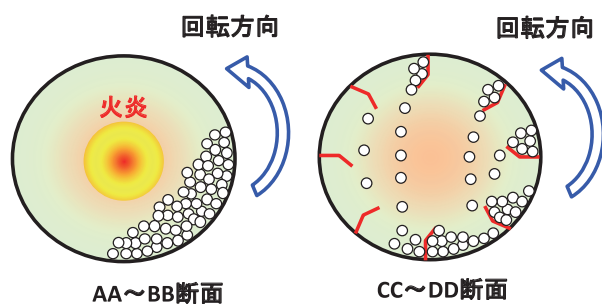


図-17 ロータリーキルンの内部断面

以下では、本ロータリーキルンの乾燥加熱領域と焼成領域ならびにⅡ型無水石膏製造装置の性能評価について詳細を述べる。

4.2.1 乾燥加熱領域

写真-9は、奥手のリサイクル石膏投入スクリューから、手前のキルン中央部に至る乾燥加熱領域の内部を示している。写真より、キルンの回転方向は時計回りであり、リサイクル石膏を掻き上げて分散させるためのリフターを取り付けている。このリフターにより持ち上げたリサイクル石膏をシャワー状に分散して落下させ、熱風との熱交換を促進させている。

図-15は、ロータリーキルン内部の材料の動きを示しており、図の右手側から投入されたりサイクル石膏は、リフターで掻き上げられて分散落下しながら左手側に進んで行く。そして、耐火キヤスタブルの領域では、掻き上げられることなく、キルン底部を滑って左手側へ進んで行く様子を表している。

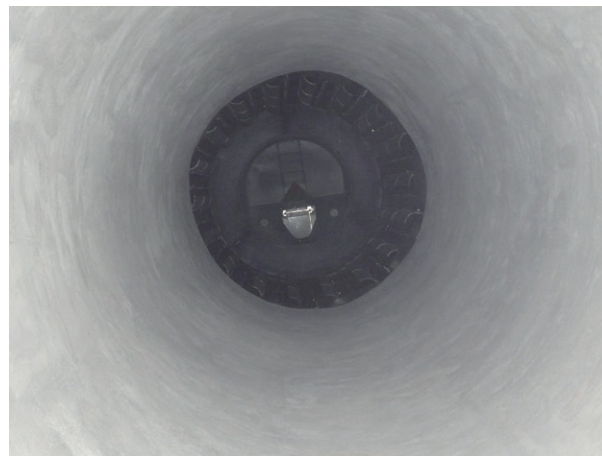


写真-10 ロータリーキルンの内部(焼成領域)

また、図の右手側より、材料の予熱領域、定率乾燥領域、加熱領域を示している。予熱領域は、材料ならびに表面水の温度が上昇する領域で顕熱が支配的な領域である。定率乾燥領域は、表面水の気化熱ならびに結晶水の脱離に熱エネルギーが消費される潜熱が支配的となり、温度変化が極めて緩慢な領域である。加熱領域は、石膏の一次沸点ならびに二次沸点以上の温度域で、受熱量に比例して温度が上昇する顕熱が支配的となる領域である。

図-16は、ロータリーキルン内部の熱風温度と材料温度の分布を示しており、それぞれの領域は図-15に対応している。図より、本ロータリーキルンは、カウンターフロー方式としていることから、排ガス温度 T_2 を材料加熱温度の t_2 よりも下げることができ、対数平均温度差をパラレルフロー方式に比べて大きく採ることが可能で、熱効率に優れている。

図-17は、ロータリーキルンの断面を示しており、AA~BB断面は耐火キヤスタブルを施工した焼成領域を、CC~DD断面は写真-9に示すリフターを取り付けた乾燥加熱領域を示している。

一方、写真-9の手前に見える長方形のボックスは、乾燥加熱領域の終端部に設けた石膏の中間投入口であり、バグフィルタで捕捉回収した半水石膏をここから再投入し焼成領域に送り込んでいる。

本ロータリーキルンは、カウンターフロー方式を基本原理として採用していることから、内部のリフターで掻き上げられて分散するリサイクル石膏は、その一部の微細石膏が排ガスに随伴してロータリーキルンから飛び出しバグフィルタで捕捉回収される。このときの排ガス温度が $120 \sim 150^\circ\text{C}$ で管理されていることから、図-12から明らかのように、これらの微細石膏には半水石膏とⅢ型無水石膏とが共存しており、二水石膏はほとんど含まれていないと考えられる。

また、バグフィルタで回収した微細石膏は、このまま取り出すと一部Ⅲ型無水石膏を含んでいるが、半水石膏として有効利用することが可能である。このことは、Ⅲ型無水石膏の水和熱が半水石膏のそれを上回ることから、空気中の湿気などを優先的に吸収して半水石膏に相転移するためである。した

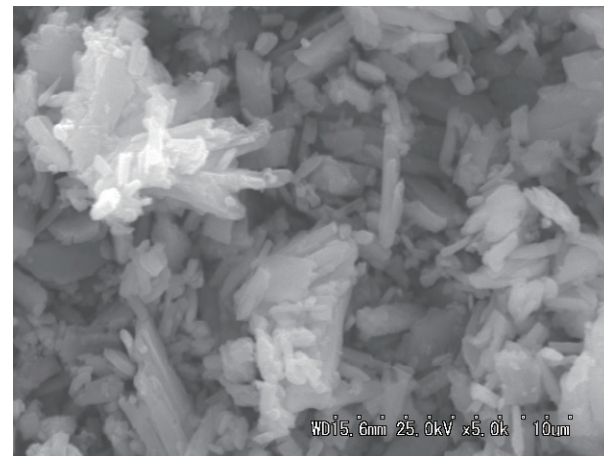


写真-11 二水石膏のSEM ×5,000倍

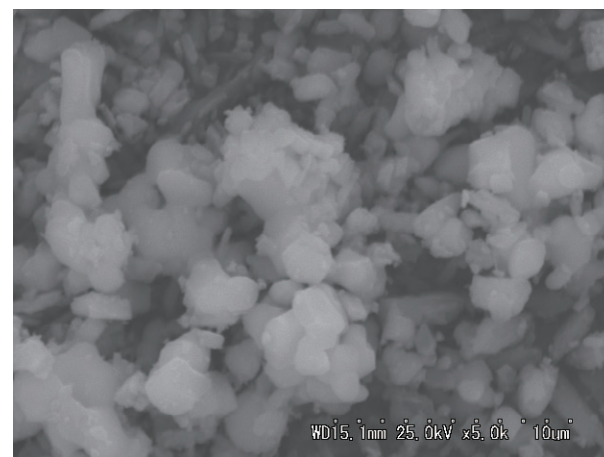


写真-12 Ⅱ型無水石膏のSEM ×5,000倍

がって、図-12でも示すように、Ⅲ型無水石膏が混在している半水石膏には、二水石膏がほとんど存在し得ない。

4.2.2 焼成領域と冷却

写真-10は、キルンの中央部から排出側に至る焼成領域の内部を示している。写真奥手の乾燥加熱領域を通過してきた比較的粒度の大きなリサイクル石膏は、耐火キヤスタブルを施工した写真手前の焼成領域に流れ込んでくる。また、繰り返しになるが排ガスに随伴して飛散した微細石膏の一部は、バグフィルタで捕捉回収されて、ロータリーキルンの中央部から再びロータリーキルンに投入され、焼成領域に流れ込んでくる。

なお、この焼成領域は、耐火キヤスタブルを施工して分散用のリフターを設けていないことから、飛散する微細石膏は極めて少なくなる。このことは、ロータリーキルン内部を流れる熱風の速度分布が、キルンの中心部が最も速く、キルン中心部から耐火キヤスタブルに近づくにつれ、その風速は低下し、耐火キヤスタブル表面では限りなくゼロに近づいているためである。

焼成領域における石膏の加熱のメカニズムは、図-17の

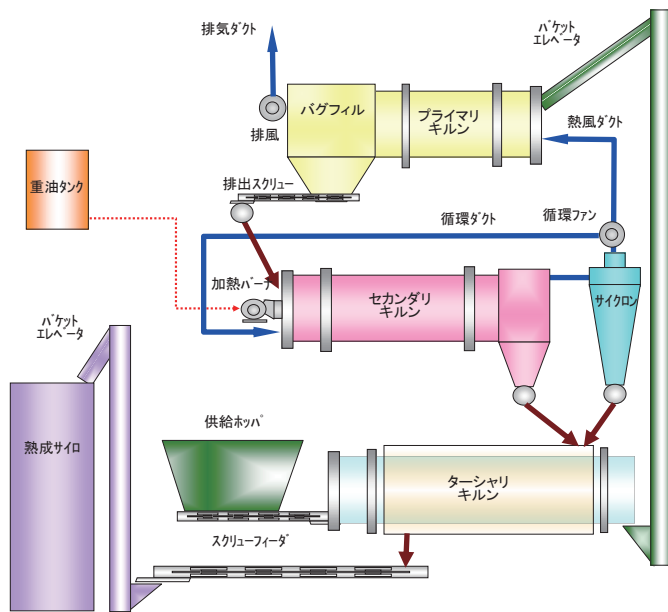


図-18 省エネルギー型のⅡ型無水石膏製造システム

AA～BB断面に示すように、バーナ燃焼により発生する熱風および火炎からの輻射熱を耐火キャスタブルが受けて蓄熱する。そして、高温に蓄熱した耐火キャスタブルからの接触伝熱およびバーナ火炎と蓄熱した耐火キャスタブルから輻射する赤外線や遠赤外線を受けて、石膏が加熱され温度が上昇して行く。なお、高温領域においては、接触伝熱よりも輻射伝熱が支配的となる。このことは、ステファン・ボルツマンの法則によると、輻射伝熱は温度差の4乗に比例することは既に述べた通りである。

焼成領域で950～1,000℃に加熱したⅡ型無水石膏は、ロータリーキルンから冷却装置に送られる。この冷却装置は、ウォータージャケットを備えたスクリー方式である。スクリーの軸を中空とし、ここに冷却用の水を通して。そして、熱を吸収して昇温した冷却水を、高温のⅡ型無水石膏に直接噴霧し冷却効率を高めている。間接加熱方式の冷却器の性能は、熱伝達率とその接触面積に支配され、大きな熱交換面積を必要とする。

一方の水の直接噴霧は、この伝熱面積が石膏の表面積に相当することから、桁違いの熱交換面積を有することになる。さらに、水の潜熱を利用することから、そのエネルギー密度は極めて大きい。

4.2.3 Ⅱ型無水石膏製造装置の性能評価

(1) Ⅱ型無水石膏の品質

セメントやセメント系固化剤の原材料として適用するⅡ型無水石膏の物理特性として、1.0 g/cm³以上の密度が要求される。このことは、セメントの比重に近づけてブレンド性能を高めるためである。

写真-11は、焼成前のリサイクル石膏（二水石膏）のSEM（5,000倍）を示す。写真より、円柱状の二水石膏の結晶が絡まっている様子がわかる。また、二水石膏およびβ型の半水石膏の密度は、両者とも0.8～0.9 g/cm³を示している。

石膏は、常圧下で加熱処理を受けるとβ型の半水石膏を経てβ型のⅢ型無水石膏となり、350℃以上の温度でⅡ型無水石膏となる。β型半水石膏は、3/2結晶水が離脱することから、これら結晶水が抜けた所が欠損となり密度が低下するものと考えられる。この密度を上げるためには、350℃からさらに温度を上昇させて950～1,000℃の焼結領域まで加熱する必要がある。

写真-12は、950～1,000℃で焼成したⅡ型無水石膏のSEM（5,000倍）を示す。写真より、Ⅲ型無水石膏の結晶が球状を帯びていることがわかる。この焼結は、石膏が完全に溶融するのではなく、半個体状態で結晶が成長して行く領域である。この温度領域で結晶が成長し、その密度が増大して行く。実際の運用では、1.1～1.2 g/cm³の密度範囲で管理している。

なお、石膏を1,050℃以上の高温にすると、Ⅰ型無水石膏へ相転移を起こし、1,250℃以上に加熱することで分解が始まり、酸化カルシウム（CaO）と三酸化硫黄（SO₃）が生成する。この硫黄酸化物は、大気汚染防止法での規制対象物質である。

(2) 燃費性能

燃料消費量に関して、カウンターフロー方式の乾燥加熱領域を設けたことにより、熱風が有している熱エネルギーを効率よく石膏の予熱として吸収することができる。排ガス温度が、120～150℃の範囲でコントロールが出来ることから、その熱効率率は80%近くを達成している。ただ、石膏の加熱温度が1,000℃前後となることから、燃料消費量ならびに二酸化炭素発生量は、半水石膏製造装置の2倍近くになることは否めない。

(3) エミッション

リサイクル石膏を極度に加熱し過ぎると、石膏が分解して

硫黄酸化物（三酸化硫黄：SO₃）が生成する。これは、本Ⅱ型無水石膏製造装置が、カウンターフロー方式を採用していることから、最も温度が高いバーナ火炎の近傍に、950～1,000℃に加熱されたりサイクル石膏が近づいてくるためである。このことから、局部的に石膏の分解温度である1,250℃以上に加熱され易くなり、分解して硫黄酸化物が生成する。したがって、Ⅱ型無水石膏の密度を高めることと、硫黄酸化物の発生量を抑えることが最も重要な運用ノウハウとなる。

5. 半水石膏とⅡ型無水石膏の製造システムの将来展望

廃石膏ボードから製造したりサイクル石膏から、半水石膏とⅡ型無水石膏を製造するための省エネルギー型の製造システムの構想を図-18に示す。図より、プライマリキルン、セカンダリキルン、ターシャリキルンの3基のキルンを備えている。

プライマリキルンは、熱風と被加熱物とが同一方向に流れるパラレルフロー方式とし、メタリック構造で内部にリフターを設けて被加熱物の分散を改善している。このことにより、熱風との接触面積が増大し、効率よく熱交換を行うことが可能である。

まず、ターシャリキルンで予熱したりサイクル石膏をバケットエレベータで搬送し、プライマリキルンに投入している。そして、プライマリキルンの熱風は、セカンダリキルンの排ガスを熱源として導入している。ここで、二水石膏であるリサイクル石膏を、約130℃まで加熱して半水石膏を製造している。この半水石膏は、単独で取り出すことも可能であるが、Ⅱ型無水石膏を製造する場合は、これをセカンダリキルンに導入する。

セカンダリキルンは、プライマリキルン同様に熱風と被加熱物とが同一方向に流れるパラレルフロー方式とし、内面に耐火キャスタブルを施工した構造としている。バーナの燃焼により発生した熱風を導入し、熱風からの接触伝熱とバーナ火炎からの輻射伝熱により、耐火キャスタブルを蓄熱し、石膏を加熱する。

特に、接触伝熱は温度差に比例するが、輻射伝熱は温度差の4乗に比例することから、500℃を超える高温領域では、接触伝熱よりも輻射伝熱が支配的となる。このようにして、半水石膏を950～1,000℃に加熱してⅡ型無水石膏を得るようにしている。

ターシャリキルンは、メタリック構造とし、外面に高温のⅡ型無水石膏を導入してターシャリキルンを加熱する。接触面積を大きく取るためにキルン外周に伝熱フィンを設け、Ⅱ型無水石膏からの熱回収を促進している。キルン内部にリサイクル石膏を投入し、それを攪拌して熱伝達を促進するためのリフターを設けている。このとき、外部のⅡ型無水石膏と内部のリサイクル石膏の流れ方向は、互いに向かい合うカウンターフロー方式としている。これにより、温度効率を大きく取ることができる。

以上のように、Ⅱ型無水石膏の顕熱を利用してリサイクル石膏の予熱を行うためのターシャリキルンを備えることにより、リサイクル石膏の表面水5%に相当する熱エネルギーの省エネルギー化をはかることが可能となり、従来システムのⅡ型無水石膏製造装置にくらべて約15%の省エネルギー化が可能となる。

6. おわりに

石灰石は、資源の乏しい我が国において、国内で数少ない自給可能な鉱物資源である。我が国には、高品位の石灰岩が各地に大量に賦存する。明治の時代、殖産興業として発足した八幡製鉄所や宇部セメントで、これらの石灰石による不純物の除去や原材料としての使用が始まっている。今では、製鉄やセメントは元より、電力、ガラス、製紙、建築、土木、食品、医療など、ありとあらゆる製品や製造プロセスで直接的または間接的に石灰が使用されている。

これも、賦存量が豊富な国内鉱物資源であるがため、早くより各地で採掘され、その流通網が整備されたことによるものと考えられる。また、石灰は、石灰石（炭酸カルシウム：CaCO₃）を焼成して生石灰（CaO）を生成し、水を添加して消石灰（Ca(OH)₂）とするなど、その種類と用途は多様である。

中でも、炭酸カルシウム、生石灰、消石灰などは、化石燃料の燃焼により生成する酸性ガスの中和剤として利用されている。化石燃料の多くは硫黄を含有しており、これが燃焼することにより硫黄酸化物が生成し、光化学スモッグや酸性雨などの公害の原因となる。このことから、大気汚染防止法で厳しく硫黄酸化物の排出濃度や排出量が規制されている。特に、化石燃料を多用する火力発電や重化学工業の脱硫剤としてこれら石灰が用いられ、副産物として排煙脱硫石膏または化学石膏と呼ばれる石膏を得ている。

これら化学石膏の用途として、筆記具のチョーク、運動場の白線、農業用肥料などとして一部有効利用されているが、その生成量が莫大であることから建築資材である石膏ボードの原材料として、その多くがリサイクルされている。

また、建築物を解体した時に発生する廃石膏ボードを、再び石膏ボードとしてリサイクルする動きもあるが、これが増大すると排煙脱硫石膏の用途がたちまち逼迫してしまう。このように、各種石灰の需要と供給のバランスをはかりながら、これら石灰資源をカスケード利用することが環境的にも経済的にも最も合理的な利用方法であると考えられる。

即ち、地中から採掘した石灰を燃焼排ガスの中和剤として利用し、得られた石膏から石膏ボードを製造して建築資材としての役割を一定年数担った後に、その廃石膏ボードを土壌の改良材として再び地中に戻すことで石灰を3度有効利用することができる。

一方、国は、廃石膏ボードのリサイクル技術の確立が未熟

であるとの立場から、建設リサイクル法における特定建設資材としての廃石膏ボードの指定を見送っている。しかしながら、民間レベルで廃石膏ボードのリサイクルに関する研究会が各地で立ち上がり、情報交換や研究報告などが精力的に行われている。そして、行政や大学を巻き込んだ産官学連携の形で、そのリサイクル用途の開発や実証試験が絶え間なく行われている。

廃石膏ボードの発生量は、特定建設資材に指定されているコンクリート塊やアスファルト・コンクリート塊に比べその発生量が1/20程度の120万トンに不足である。コンクリート塊は約3,500万トン、アスファルト・コンクリート塊は約2,500万トン年に発生している。

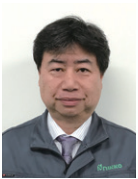
しかしながら、廃石膏ボードの特殊性から、その最終処分場が管理型となり、その処分費用は1～3万円とコンクリート塊やアスファルト・コンクリート塊にくらべて約20倍の価格となっている。このことから、その市場規模は、コンクリート塊やアスファルト・コンクリート塊と同等の300～400億円規模と見なすことができ、今後そのリサイクル技術が確立することにより、有望なリサイクル市場となり得る可能性が示唆される。

参考文献

- 蓬萊秀人：廃石膏ボードの加熱リサイクルシステム
廃石膏ボード粉砕粉からの半水石膏製造プロセスについて、環境浄化技術, Vol.6, No.9, pp.58-64, 2007.
- 蓬萊秀人, 亀井健史：半水石膏生産システムの開発とその地盤工学的意義－廃石膏ボードの再生－, 地盤工学ジャーナル, Vol.3, No.2, pp.133-142, 2008.
- 蓬萊秀人：廃石膏ボード再資源化への道 各社の廃石膏ボード再資源化技術と取り組み 廃石膏ボードの加熱リサイクルシステム 日工（株）、いんだすと, VOL.3, No.10, pp.38-39, 2008.
- 亀井健史, 蓬萊秀人：高炉セメントB種による半水石膏のフッ素不溶化技術の開発, 地盤工学ジャーナル, Vol.4, No.1, pp.91-98, 2009.
- 亀井健史, 蓬萊秀人：半水石膏・石炭灰・高炉セメントB種を用いた安定処理度中のフッ素・六価クロム・ホウ素の不溶化－廃石膏ボードのリサイクル化－, 地盤工学ジャーナル, Vol.5, No.3, pp.449-461, 2010.
- 蓬萊秀人, 亀井健史, 松田哲夫：半水石膏に含まれるフッ素の不溶化技術, 地盤と建設, Vol.28, No.1, pp.31-38, 2011.

- 亀井健史, 蓬萊秀人：複合リサイクル材料によるフッ素の不溶化技術, 地盤と建設, Vol.31, No.1, pp.21-28, 2013.
- 亀井健史, 蓬萊秀人：リサイクル石膏を用いた硬化時間が任意に調節可能な地盤改良材の開発, 地盤と建設, Vol.32, No.1, pp.29-36, 2014.
- KAMEI Takeshi, HORAI Hideto：A novel solidification technique for fluorine-contaminated bassanite using waste materials in ground improvement applications, J Mater Cycl Waste Manag, Vol.17, No.2, pp.380-390, 2015.
- 亀井健史, 蓬萊秀人：複合リサイクル材料による六価クロム・カドミウム・鉛の不溶化, 地盤工学ジャーナル, Vol.12, No.4, pp.397-408, 2017.
- 亀井健史, 蓬萊秀人：不溶化剤としての複合リサイクル材料の実汚染土壌への適用性, 地盤と建設, Vol.36, No.1, pp.31-38, 2018.
- 無機マテリアル学会：セメント・セッコウ・石灰ハンドブック, pp.138-143, 1996.
- 蓬萊秀人, 亀井健史, 鵜飼恵三：半水石膏生産システムの小型化・その能力と地盤改良材としての可能性, 土木構造・材料論文集, Vol.28, No.1, pp.104-114, 2012.

筆者紹介



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



KAMIO Masahiro
神尾 昌宏
博士(工学)
1998年入社
エンジニアリング部



FUJITO Yoshihiro
藤戸 幹大
2005年入社
エンジニアリング部

Development of Manufacturing System for Hemihydrate Gypsum and Type II Anhydrous Gypsum

Hideto HORAI¹, Masahiro KAMIO¹, Yoshihiro FUJITO¹

¹ Nikko Co. Ltd. Engineering Division

Abstract

Plaster boards have been widely used as building materials because of their excellent fire resistance, economy, workability, etc. However, the amount of waste plaster board generated by dismantling of buildings and houses, reflecting the production volume has turned to an increasing trend in recent years. Because of this social background, problems such as soaring disposal cost of waste plaster board due to insufficient capacity of the final disposal site and illegal dumping are pointed out, so development of recycling technology for waste plaster board is an urgent issue. The authors have developed a system for manufacturing bassanite from waste plaster boards in advance and put them on the market. In addition, we are developing a system for manufacturing type II anhydrous gypsum to expand its recycling application. We report the outline and characteristics of these manufacturing systems.

Key words: waste gypsum board, bassanite, type II anhydrous gypsum, rotary kiln, heat sintering