

無水石膏製造設備の安定した急速冷却キルンの開発

柳井 瑛・田中 翔太
Yanai Akira, Tanaka Shota

概要

石膏ボードは防火性、遮音性、寸法安定性に優れており、一般的に建築資材において多用されている。近年では老朽化した建築物の解体にともない石膏ボードによる廃棄物（以下、廃石膏ボードと記述）が大量発生し、廃石膏ボードの廃棄量は今後増加していく傾向にあるため、再利用など有効利用方法が研究されている。当社は、無水石膏がセメントの凝結遅延材として一般的に用いられていることから、廃石膏ボードから無水石膏を製造する無水石膏製造設備を2014年に開発し市場投入している。ところが、当該装置の無水石膏を冷却するプロセスにおいて、熱による機器への損傷が著しく頻繁に修理を必要とすることが課題となっていた。本稿では、冷却能力と耐久性とを向上させた間接方式の冷却キルンを新たに開発し運用を開始したので、その概要と特徴について報告する。

1. 緒言

石膏ボードは、約20%の結晶水が安定した形で含まれるため防火性に優れ、遮音性、寸法安定性、工事の容易性などの特徴を有し、古くは、大正12年に旧帝国ホテルの内装と天井に採用されてから現代に至るまで一般家屋やオフィスビルなど建築物で幅広く利用されている。とりわけ、我が国の木造建築の耐用年数が欧米に比べて20年程度と短く、老朽化した建築物の解体にともない廃石膏ボードが大量発生し、年々増加傾向にある。¹⁾²⁾そして、石膏ボードの年間出荷量は400万トンにも及んでいることを反映して、やがて、廃石膏ボードの発生量もこの値に近づいていくものと予測されている。このことから、地方自治体における最終処分場が逼迫し、処分費用の高騰に伴う不法投棄などの社会問題へと発展して行くことが懸念されている。

我が国は、大量生産、大量消費、大量廃棄の社会システムの下で経済成長を遂げてきた。近年では、資源枯渇や環境破壊などの社会問題が指摘されるようになってきている。以上のことから、廃石膏ボードのリサイクル化に関しても、大量の需要を見込むことができる農業用肥料や土木建築用資材などへの有効利用が待ち望まれている所である。

このような時代を背景にして、当社は、廃石膏ボードをセメントの原材料として大量にリサイクルすることができる無水石膏製造設備を開発した。この無水石膏製造設備は、二水石膏である廃石膏を1,000℃まで加熱することにより、結晶水を

熱脱離して無水石膏を生成する原理に基づいている。そして、この高温の無水石膏をスクリュ方式の冷却装置で200℃まで冷却している。ところが、高温の無水石膏による冷却装置への熱損傷が著しく頻繁に修理とメンテナンスを必要としていた。

本稿では、これらの課題を解決すべく耐久性とメンテナンス性を向上させた間接キルン方式の冷却装置を新たに開発し運用を開始したので、その概要と特徴について報告する。

2. 石膏

石膏は硫酸カルシウムを主成分としている鉱物であり、「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種類に分けられる。半水石膏はα型とβ型が存在し、無水石膏はⅢ型、Ⅱ型、Ⅰ型に分けられ、さらにⅢ型はα型とβ型が存在する。その中でも半水石膏と無水石膏について説明する。³⁾

2.1 半水石膏

半水石膏は、焼石膏とも呼ばれ前述したようにα型とβ型が存在しており、α型は緻密な構造で粒子密度が高く、水硬時の強度がβ型よりも大きいことから骨折時の治療用具であるギプスといった医療用途に用いられる。また、加圧焼成することで生成されることから一般的にはオートクレーブ

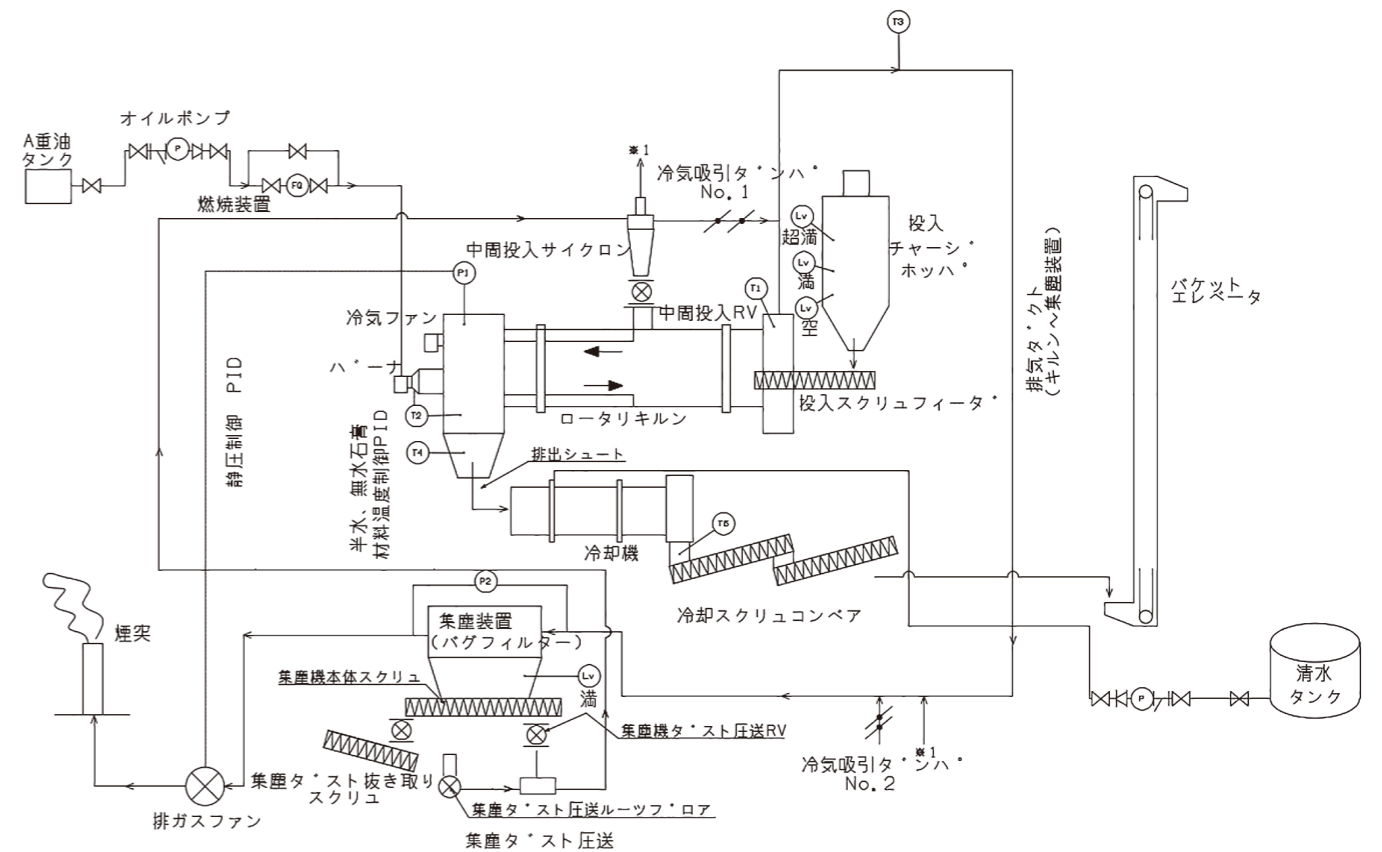


図2-1 II型無水石膏設備のシステムフロー図

(圧力釜)での蒸し焼きで製造されるため、キルン方式での製造は難しい。β型は、ポーラス状の空隙があるため粒子密度がα型よりも小さく、石膏ボード等の建築資材として利用される。α型と違い加圧を必要としないため、キルン方式で製造可能である。また、半水石膏を180℃以上で加熱処理することにより、結晶水が熱脱離した無水石膏を生成することができる。⁴⁾

近年は、半水石膏の水硬生を利用し、添加剤としてセメントと混ぜ合わせることで土壌の改良剤とする用途が増えてきている。但し、半水石膏は吸湿性が高く大気中の水分を吸水し、二水石膏に戻ってしまう為、品質管理が難しいことから、製造後すぐに利用することが推奨されている。⁵⁾

2.2 無水石膏

無水石膏は、前述したようにⅢ型、Ⅱ型、Ⅰ型が存在しており、さらにⅢ型に関してはα型とβ型に分類される。Ⅲ型無水石膏は、180~215℃の温度帯で加熱することにより生成され、空気中の水分を吸って半水石膏に戻る。その吸湿性より、塗料・樹脂などの乾燥材として利用される。Ⅱ型無水石膏は、330℃以上で加熱することによって得られ、加水しても半水石膏に戻らないことから、不活性無水石膏とも呼ばれている。

その性質上、長期間の貯蔵が可能であること、さらには、必要量に応じて製造し貯蔵することができるなどの運用上の調整ができる材料である。Ⅰ型無水石膏は、1180℃以上の加熱により生成される。Ⅱ型、Ⅰ型ともに吸湿性がないことから建設系フィラー材として建築材に幅広く利用される。⁴⁾

3. II型無水石膏製造設備

本無水石膏製造設備は、乾燥加熱領域と焼成領域を設け、投入から排出まで材料が1方向に流れる過程で半水石膏が生成され、最終的には無水石膏を製造できるようにした。

システムフロー図を図2-1に、設備全体像を写真2-1に示す。

図2-1より、II型無水石膏製造設備フローを説明する。まず、材料は投入スクリュから焼成キルンに投入され、焼成キルン内で乾燥・加熱・焼成される。1000℃となった材料は排出シュートを通過して冷却装置に投入。冷却装置後段には付帯設備が配置されており、それらの付帯設備に対して熱損傷を防ぐため、各装置の耐熱温度200℃以下になるように材料を冷却する。冷却された材料はスクリュを通過しエレベーターに送られるというフローとなっている。



写真2-1 II型無水石膏製造設備

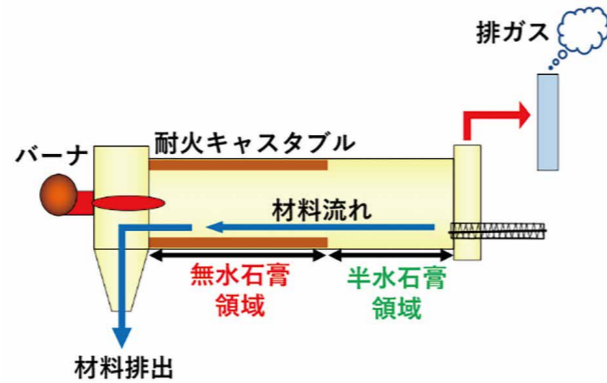


図2-2 焼成キルン内部

直接冷却		間接冷却	
スクリュ方式	キルン方式	スクリュ方式	スクリュ方式
材料流れ	材料流れ	材料流れ	材料流れ

図2-3 従来冷却方式一覧

3.1 焼成キルン

図2-2は焼成キルン内部を示し、図の右側より材料が供給される。リフターが取り付けられている部分は半水石膏を生成する乾燥加熱領域になり、この領域では、石膏を掻き揚げ自由落下させ、石膏をペール状に分散することで、材料の表面積を大きくする。これにより短時間で表面水を乾燥後、材料を180℃まで昇温し、半水石膏を効率良く製造することができる。

無水石膏を生成する焼成領域においては、バーナ燃焼による熱風及び火炎からの輻射熱により耐火キャストブルが蓄熱される。そして、乾燥加熱領域を通過した半水石膏がバーナ火炎と蓄熱された耐火キャストブルとの空間を通過する時に、1000℃まで昇温され無水石膏になる。

3.2 冷却装置

3.2.1 従来方式

当社では、これまでに4種類の冷却方式を採用してきた。これらの方式にはそれぞれメリット、デメリットがあり、対象となる材料加熱温度帯やシステム構成により区別してきた。以下では従来の冷却方式についてその特徴を説明する。従来冷

却方式一覧を図2-3に示す。

(1) 直接冷却方式

当社が採用してきた直接冷却には、図2-3に示す通りスクリュ方式とキルン方式とがある。両者は、キルン・スクリュ内部の材料に対してノズルより直接水を噴霧する方式である。

メリットは、水の顕熱と潜熱を100%有効利用することが可能であり、冷却水の水温を制御するためのクーリングタワーなどが不要になることである。また、機械構造よりメンテナンスが容易であることが考えられる。

デメリットは、水を直接噴霧するので凝縮すると石膏の付着要因となること、更には石膏が熱分解して生成する硫酸化合物と水とが反応して、硫酸を生成し、煙道内や機器の腐食が激しくなることである。とりわけ、キルン方式では、内部で材料を分散させ、表面積を広くし、材料全体に噴霧水が接触できるようにするため、材料の粒径や分散状況で熱交換状況が変化してしまうことがある。材料の粒度分布が変わると更に顕著に影響を及ぼし、材料の物理形状変化が激しい材料を採用すると付着によるトラブルが発生する可能性がある。

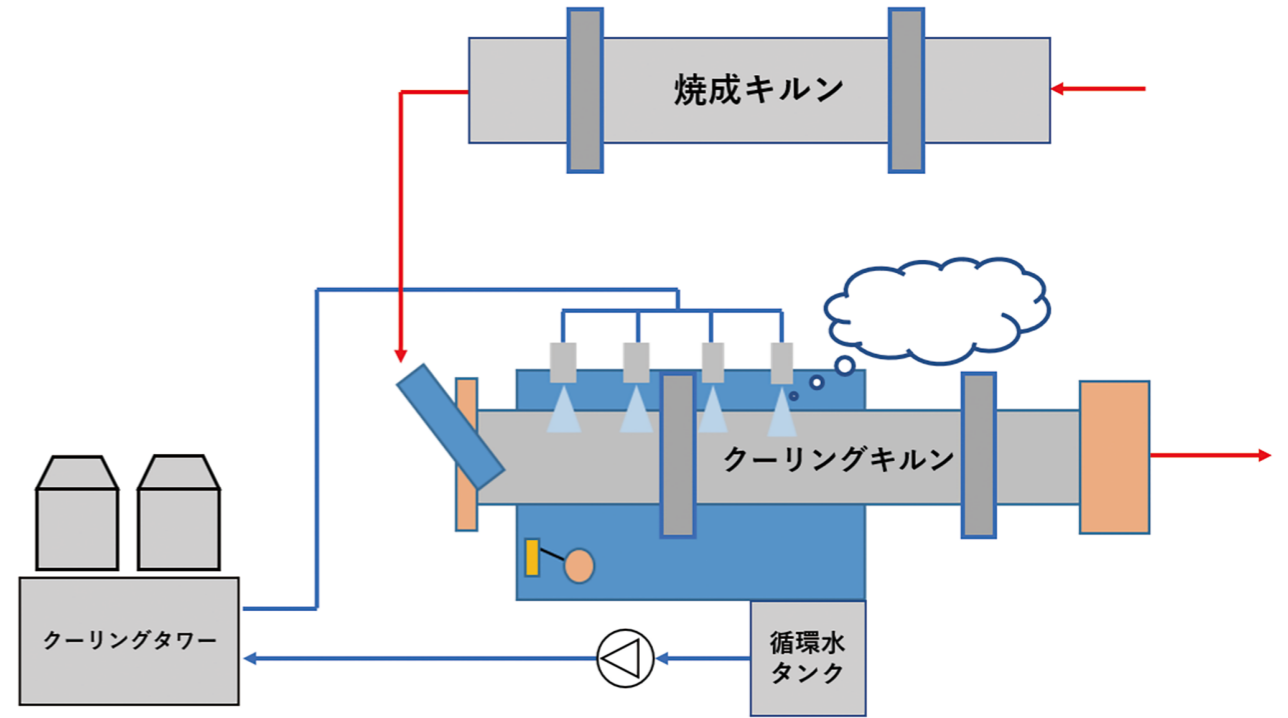


図3-1 間接冷却キルン方式フロー図

(2) 間接冷却方式

当社が採用してきた間接冷却のスクリュ方式では、二重構造のスクリュ軸とジャケット方式としたスクリュトラフに水を循環させることにより間接的に冷却する方式である。

メリットは材料と水蒸気が接触しないため、水蒸気による材料の品質劣化が発生しないことである。

デメリットは、鋼材を介しての間接冷却を行っているため、水の潜熱を100%冷却に使用することができないことで、直接冷却よりも大量の水を使用することになる。また、これらの水は、クーラで冷却して再利用するため、循環経路が複雑かつ設置面積が広くなることある。この方式では、材料と鋼材との熱のやり取りに依存するため、冷却効率は接触面積と熱伝達率に影響される。

(3) 直接+間接冷却方式

当社が採用してきた直接+間接冷却方式は、スクリュを二重構造にしてジャケットと軸の中空部に水を流す間接冷却と製品に直接水を噴霧する直接冷却の両方を採用した方式である。

メリットは、直接冷却と間接冷却の両方を採用していることで間接冷却スクリュよりは短時間で冷却できることに加えて、水の潜熱を利用することから装置サイズも小さくすることが可能である。

デメリットは、装置に対する熱損傷等の影響を直接冷却と間接冷却の両方から受けることから、耐久性が低いことである。

また、装置の設置スペースと機器点数が増えるため、トラブル発生の可能性が高く、著しく頻繁に修理が必要なことである。

3.2.2 新方式

新たに開発した間接冷却キルン方式のフロー図を図3-1に示す。

本冷却方式ではこれまでと同等の冷却能力を有しつつ、耐久性を高めるために間接冷却キルン方式を採用している。これまでの直接+間接冷却スクリュ方式では、熱負荷による機器の損傷度合いや複雑な構造による高頻度のトラブルにより、安定した運用が困難であった。これらの問題を回避するためできるだけシンプルな構造の間接冷却キルン方式を採用している。本方式を採用することにより、キルン回転数を任意に変更することで、材料温度がコントロール可能になった。よって、冷却対象の材料が変わったとしても回転数を変更することで材料に適した温度にコントロールすることができる。

(1) 投入シュート

投入シュートでは、焼成した1000℃近い高温の無水石膏が通過しクーリングキルンへと入って行く。シュートの冷却は、空冷二重方式を採用し、材質は鋼材の耐久性を考慮し、SUS310Sを選定した。

この空冷二重方式は、二重構造の空隙に冷却ファンで空気を供給することによって鉄皮温度の上昇を抑制できるようにしている。これによりトラフ温度は鋼材が赤熱する600℃以

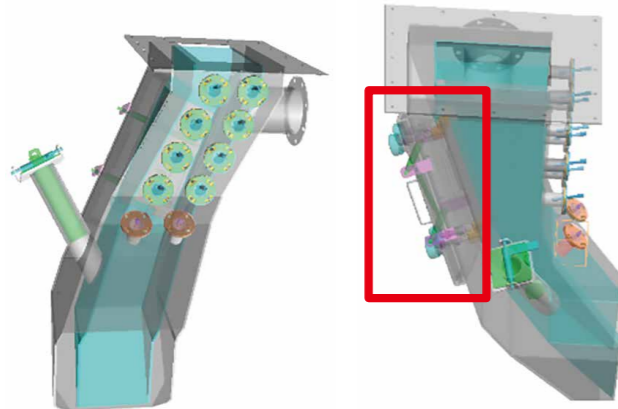


図3-2 投入シュート3Dモデル

上に上昇せず、安全に使用することができるようにした。また、複雑な構造によるトラブルを防ぐと共に、設置スペースをコンパクトにできる空冷式を採用した。

本シュートの懸念点として、落下した材料がシュートの1点に集中的に当たることが分かっている。そのために局所的な摩耗による損傷が想定される。摩耗対策として定期的な点検と図3-2のような構造にしてトラフを容易に交換できる構造にした。この構造によりシュートの摩耗及び熱損傷が進行した場合でも一部トラフを交換することで定期的なメンテナンスと部品交換により恒久的に使用できるよう設計した。対象材料の性状によっては、シュート内での材料詰まり等が発生するケースもあるため、今回は堆積する箇所にエア噴射ノズルを設置し、一定間隔でパルス動作させて堆積を防止できるようにしている。

(2)クーリングキルン

クーリングキルンは、焼成した材料を急速冷却させる装置であり、間接冷却キルン方式を採用している。写真3-1に実機の写真を示す。

クーリングキルンでは、キルン鋼材に水を噴霧して間接冷却することから投入側に配置する2つの支えローラーが水に接触する雰囲気下にある。当社で従来から採用しているフリクション駆動は水に接触する雰囲気下では使用することが困難なため、排出側の水と接触しない部分で本体を直接駆動させるチェーン駆動を採用した。また、水と接触する雰囲気下にある部分であるドラムローラー、支えローラーは、各々ステンレス製を採用した。

図3-3より、クーリングキルン内に投入される高温材料はキルン鋼材へ熱が移動するため、材料温度が下がる。高温に



写真3-1 クーリングキルン

なったキルン鋼材は外側から水による顕熱と潜熱で冷却された後に、再度高温材料からキルン鋼材へ熱が移動する。この熱のやり取りを繰り返すことで材料温度が冷却されるメカニズムである。運用中はこのような一連の流れで連続的に冷却している。

更には、冷却時、キルン上部に水噴霧し、キルン表面に沿って水が下方向に流れるため、水の顕熱を最大限に利用できる構造にしている。また、構造上、水の排水がほぼないため、ランニングコストを最小限で運用可能にしている。

図3-4に乾燥加熱と冷却の場合でそれぞれロータリーキルンの材料挙動を示す。乾燥加熱の場合は、リフターで持ち上げた材料をベール状に分散させて落下させることにより、表面積を広くとり、熱風との熱交換を効率良くしている。

冷却の場合は、冷却効率が材料とキルン鋼材の接触面積に大きく左右されるため、リフターを取付け低頻度で材料攪拌することで、キルン鋼材との熱交換を行っている。写真3-2のように、リフターの数が乾燥加熱の場合よりも少ないのは材料を掻き上げる回数が多いことによって材料落下時に発生する粉塵の飛散及び冷却に必要な接触面積の割合を必要以上に小さくしないためである。このような構造により、材料を均等に効率良く冷却している。

(3)水噴霧装置

水噴霧装置は、水の潜熱を最大限活用し省スペースで急速に冷却するために、狭いスペース内で広範囲かつ均一に噴霧可能なノズル選定及び設置位置を最適化した。

一般的に水噴霧ノズルとして用いられる噴霧形として扇型、円錐型が広く採用されており扇型は比較的広い範囲をカバーすることができる。本装置では広角扇型を採用し扇型

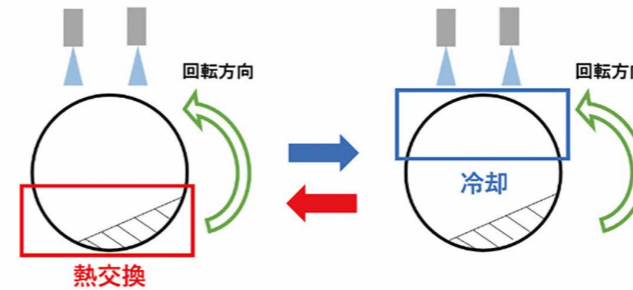


図3-3 冷却メカニズム

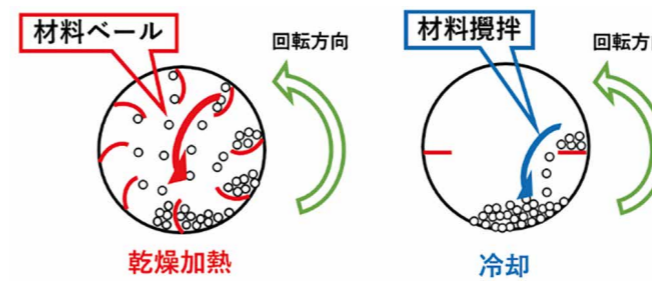


図3-4 ロータリーキルン内の材料挙動

よりもさらに噴霧角が大きく、広範囲をカバーすることができるノズルを選定している。このノズルは、異物通過径が大きく、不純物が通過した場合に目詰まり発生の可能性が低い。また、ノズル設置位置は面によって千鳥に配置することで少量のノズルで広範囲をカバーすることができる。

水の噴霧方式は、ランニングコストを優先し、水圧だけで噴霧できる1流体ノズルを採用した。蒸発しないでキルン表面を伝って水槽へ溜まった水はキルン鋼材保護の目的として再利用できるように汲み上げリフターをキルン外側に取り付けた構造にした。また、噴霧後にドラム下の水槽に溜められた水は、一定の水位に達すると排出されるようになっており、これらの水はクーリングタワーにより冷却後の水が約10~20℃冷却されるように、循環水を常時利用することで節水を可能にしている。写真3-3は水噴霧の様子と汲み上げリフターの様子である。

4. 間接冷却キルンの運用

ここでは、従来方式である直接+間接冷却スクリュ方式と新方式である間接冷却キルン方式のRUN1とRUN2を比較する。その際の運転データとしてRUN1を図4-1に、RUN2を図4-2に示す。



写真3-2 クーリングキルン内部



写真3-3 水噴霧の様子

図4-1のように直接+間接冷却スクリュ方式の運用では冷却装置出口温度が200℃後半~300℃を推移しており、付帯設備の耐熱温度である200℃以下まで十分冷却することができていないことがわかる。図4-2のように間接冷却キルン方式の運用では、材料の冷却装置出口温度は100℃~150℃を推移しており、付帯設備はトラブルがなく安定して運用している。

新方式での夏期と冬期の運用を比較するデータとしてRUN3を図4-3に示す。RUN3の夏期の運転では水温が20℃高くなり、RUN2の冬期の運転よりも冷却に水の顕熱を有効に利用できていない。図4-3より、冬期運転と比較すると冷却装置出口温度が平均して10℃上昇している。しかしながら、冷却能力は十分に発揮しており、耐熱温度である200℃以下に温度を抑えることができていたため、2022年12月から運用し、年間を通した運用データを見ると安定運用している。

5. 今後の予定

本冷却方式の対象となる材料は石膏であるが、コークス、鉄鉱石、アルミナなどの粉粒体など、直接水との接触ができない材料へ利用する装置として幅広く展開できると考えている。

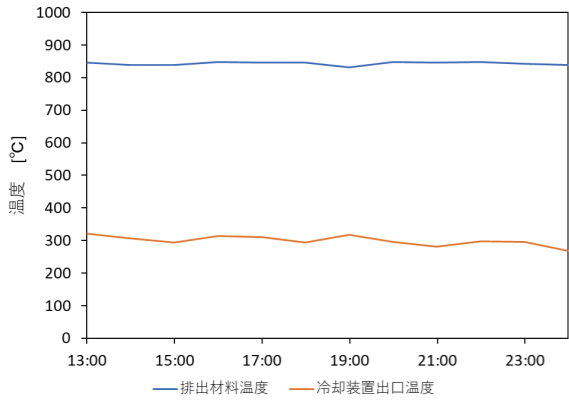


図4-1 RUN1運転データ(従来方式)

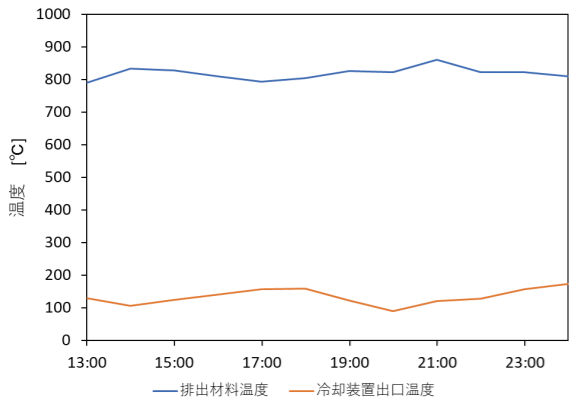


図4-2 RUN2運転データ(新方式 冬期)

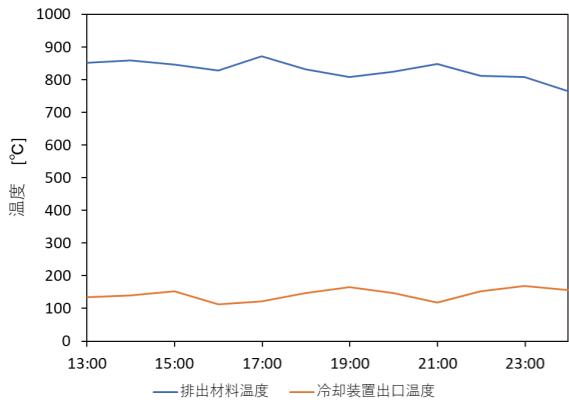


図4-3 RUN3運転データ(新方式 夏期)

これまでの従来シリーズに新たに本装置を加えることで、対象材料に適した冷却方式を提案できる分野も多くなると考えている。

今回報告した装置は、1機種であるが、プラント能力に対して最適な出力(0.5~10t/h)にスケールアップしたラインナップを今後は展開していく予定である。

6. 総括

当社で開発した急速間接冷却方式により、1000°Cの石膏を安定して急速冷却することを可能にした。これまでの冷却システムではスクリュのスパイラル、二重構造の熱損傷により定期メンテナンスが必要なために安定して運用することができていなかった。これらの問題がシンプルな構造かつ材料温度コントロールが容易になったことで解決し、年間を通して安定した運用が可能になった。

メンテナンス頻度が減ることで連続稼働が長くなり、生産性が向上したこともユーザーから報告を受けている。

References

- 1 「廃石膏ボードのリサイクルにおける現状・課題」、環境省 <https://www.env.go.jp/council/former2013/03haiki/y0317-07p/mat04-3.pdf>
- 2) 石膏ボードの歴史、一般社団法人石膏ボード協会 <https://www.gypsumboard-a.or.jp/about/history.html>
- 3) 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,pp138-143,1996.
- 4) 国立研究開発法人国立環境研究所「再生石膏粉の有効利用ガイドライン」 https://www-cycle.nies.go.jp/jp/report/recycled_gypsum_powder_guidelines.pdf
- 5) 蓬莱秀人、神尾昌宏、藤戸幹大「半水石膏およびII型無水石膏の製造システムの開発」 [technical-report-2020_06.pdf \(nikko-net.co.jp\)](https://www.nikko-net.co.jp/technical-report-2020_06.pdf)

筆者紹介



YANAI Akira
柳井 瑛

2021年入社
開発部 開発1課



TANAKA Syota
田中 翔太

2015年入社
開発部 開発1課

MEMO

Lined area for memo notes.