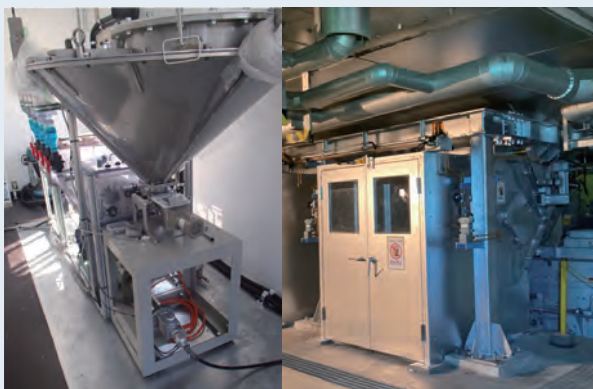


# 燃焼灰のエネルギー回収および有価物化を可能にする 新型灰処理システム

## New Ash Handling System That Makes It Possible to Recover Energy from Combustion Ash and Convert It into Valuable Resources



菊田 宗弘<sup>①</sup> Munehiro Kikuta  
竹村 嘉彦<sup>②</sup> Yoshihiko Takemura  
山口 大輔<sup>③</sup> Daisuke Yamaguchi

2050年までのカーボンニュートラル実現を目指す我が国の方針に対して、当社は石炭やバイオマス燃料とする発電所にて発生する灰を有効利用する技術を活用し、CO<sub>2</sub>削減などの環境負荷低減やエネルギー回収を図ることで社会に貢献できるものと考えている。炉下に排出される燃焼灰であるクリンカと燃焼ガスから収集される飛灰であるフライアッシュのそれぞれに対して、有効利用できるリサイクル技術を確立して、ベンチ試験や実証試験により効果を確認した。

The Japanese government announced its policy for achieving carbon neutrality by 2050. We believe that we could contribute to society through reducing environmental impact, including lowering CO<sub>2</sub> emissions and recycling energy with technologies to make effective use of ash generated in power plants using coal and biomass as fuels. We established recycling technologies to make effective use of bottom ash, which is combustion ash discharged underneath the furnace, and fly ash, which is collected from combustion gases, and conducted bench testing and demonstration testing to verify their effectiveness.

### まえがき

我が国では、2050年までのカーボンニュートラル実現を目指し、各産業においてエネルギー回収やCO<sub>2</sub>削減などのさまざまな取組みが行われている。

### 1 背景

石炭やバイオマス燃料の燃焼灰には、本来はボイラで燃焼されるべき「未燃炭素」が含まれている。灰中の未燃炭素量が多いとエネルギー損失に繋がり、また産業廃棄物としての灰量が増加することから、環境負荷上昇やエンドユーザの灰処分費上昇にも直結する。さらに灰の有効利用の観点からも、灰中の未燃炭素量は減少させる必要がある。

燃焼灰は、ボイラでの燃焼により炉下に排出されるクリンカと、ボイラ燃焼ガスに含まれ大気放出前に集塵装置にて収集されるフライアッシュにより構成されている。

クリンカに関して、現在国内にて稼働中の石炭火力発電所は運転開始から20年を経過したものが6割を超えており、その中の多くが湿式処理方式で老朽化も進んでいる。このため、エネルギー回収や環境負荷低減が可能な乾式処理設備への更新(レトロフィット)需要の増加が見込まれている。

フライアッシュに関して、国内での発生量の多くは粘土

代替としてセメント原料にリサイクルされているが、セメント製造時にはCO<sub>2</sub>が発生する。ただし、フライアッシュセメントと呼ばれる灰中の未燃炭素量を規定値以下にした高品質灰を混合するセメントは、通常のセメントの同量を製造する場合と比較すると製造時のCO<sub>2</sub>発生量を削減可能であるため、循環型社会を目指す社会情勢において需要が増加すると予想される。

このような状況を踏まえ、当社は石炭やバイオマス燃料の燃焼灰に対して、環境負荷低減ならびにエネルギー回収が見込めるリサイクル技術を確立した。

### 2 灰処理システムの概要

クリンカおよびフライアッシュの代表的な処理系統を図1および図2に示す。クリンカは、乾式クリンカコンベヤおよびクリンカ冷却コンベヤにて空気冷却されながら搬送され、クラッシュヤを経てタンクに一時貯留された後、トラック輸送あるいは後流設備へ空気輸送される。一方フライアッシュは、ブロワにて真空輸送され、フィルタセパレータにて捕集された後、フライアッシュサイロに貯留される。サイロからトラックへの払出方法としては2種類あり、乾灰のまま払い出す場合はバラ積装置、湿灰として払い出す場合はダストレスアンローダ(加湿装置)を用いる。

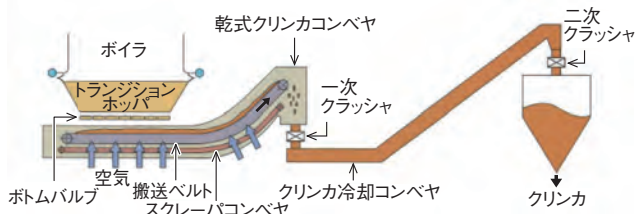


図1 クリンカ処理システム (乾式)  
Fig. 1 Bottom ash handling system (dry)

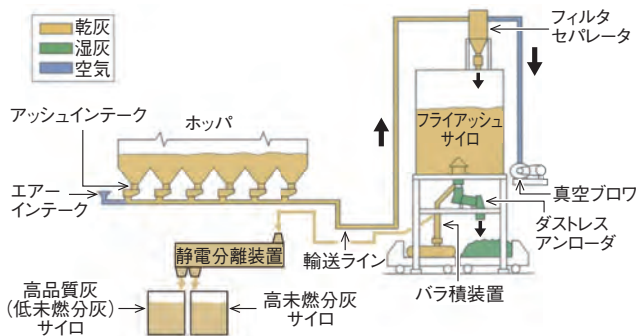


図2 フライアッシュ処理システム (真空輸送)  
Fig. 2 Fly ash handling system (vacuum conveyance)

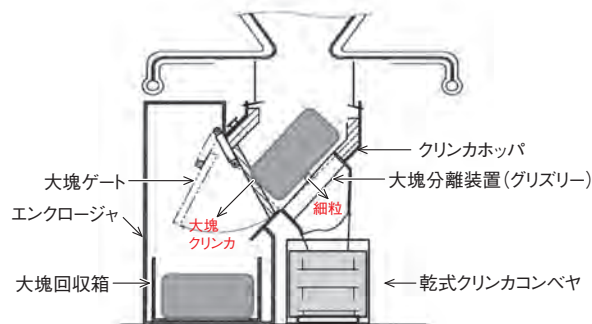


図3 KACE概要図  
Fig. 3 Schematic of KACE

### 3 新型乾式クリンカ処理システム「KACE」 (Kawasaki Ash Cooling / Conveying Extractor)

#### (1) 開発背景

乾式クリンカ処理システムでは、クリンカが乾灰のまま排出されることから有効利用先が拡大し、また設備におけるユーティリティ使用量が削減可能であるなどの利点がある。一方、亜瀝青炭などの低品位炭使用時には、ボイラ内にて過度に成長したクリンカ大塊が発生した場合に、現在の方式では下流への搬送に支障を来すおそれがある。そこで、大塊クリンカを大塊の状態ですべて系外に排出することで後流側機器でのトラブルを抑制可能な新型のクリンカ処理システム「KACE」(Kawasaki Ash Cooling / Conveying Extractor)を開発した。

#### (2) 機器コンセプト

##### (i) 大塊クリンカの系外排出

「KACE」の概要図を図3に示す。ボイラ内にて発生したクリンカは、ボイラ炉底部に配置されたクリンカホップを通過した後、大塊分離装置(グリズリー)にて大塊クリンカと細粒に分別される<sup>1,2)</sup>。大塊クリンカは大塊ゲートを手動操作にて開けることで大塊回収箱へ投入され、その後灰捨場などへ人力で運搬される。細粒は乾式クリンカコンベヤにて下流側へ搬送される。大塊クリンカの系外排出を可能とすることで、

- ① 大塊クリンカの詰まりに起因する乾式クリンカコンベヤ停止の未然防止

- ② 炉下コンベヤの小型化による設置費用の削減が期待できる。

##### (ii) 未燃炭素(未燃バイオマス)のエネルギー回収

バイオマス混焼や専焼のボイラは石炭専焼ボイラと比較すると、クリンカ中の未燃炭素割合が圧倒的に多い。たとえば、石炭専焼ボイラが5%程度なのに対してバイオマス混焼ボイラは40~50%となる。湿式システムを使用すると大量の未燃炭素を廃棄することとなり、エネルギー回収ができない。加えて、CO<sub>2</sub>発生量削減の観点からバイオマス混焼率を上昇させると、付随して未燃炭素量が増加、すなわち産業廃棄物量が増加する。

そこで、クリンカの搬送方式を湿式から乾式へ変更することにより、エネルギー回収の観点から以下が可能となる。

##### ① ボイラ下での燃焼継続による熱回収

コンベヤでのクリンカ冷却には空気取入口からボイラ負圧を利用して取り入れる大気を利用しているため、クリンカは炉下部分やクリンカコンベヤへの落下後も燃焼反応を継続でき、その際に発生した熱エネルギーは流入空気によりボイラに回収される。

##### ② ボイラへの灰再投入による未燃炭素(主に未燃バイオマス由来)の回収

コンベヤ搬送したクリンカを微粉砕した後、空気輸送によりボイラへ再投入することでクリンカに残存する未燃炭素(主に未燃バイオマス由来)を全てボイラにて燃焼させることができる。これは「MAR (Magaldi Ash Recycling)」と呼称され、当社と技術提携関係にあるイタリアのマガルディ社の持つ技術である。

#### (3) ベンチ試験

ベンチ試験機を製作して、熱負荷中の機器動作確認やグリズリーの分別機能に問題のないことを確認した。

ベンチ試験により判明した事項について、以下のように実証機設計に反映した。

##### ① 大塊ゲート・ホップ間のシール性向上

ボイラ正圧時における大塊ゲートとホップ間の隙間からの灰の噴出を防止するため、ベンチ試験時からゲート

形状を変更し、シール性を向上させた。

② グリズリー噛み込み時の解消策

グリズリーでの分離対象となるφ200程度の中塊は、形状によりグリズリーや遮蔽体（回転式シャフトを大塊クリンカ落下の衝撃から保護する耐火材料製ブロック）に噛み込み、自然解消が困難な場合がある。そのため、灰排出を促進するための突起をシャフトに複数設置して、シャフト回転時に噛み込みを解消させる形状とした。また、灰排出が容易となるよう遮蔽体形状も変更した。

(4) 実証試験

実運用中のボイラ下に設置されていた湿式コンベヤを撤去した上で、図4に示すように実証試験機を設置して、以下を確認した。

(i) 機能確認

・グリズリーにおける分別機能

ホッパシュート傾斜部に小中塊が滞留する場合もあるが、多くは一定時間後に排出され、問題なく分別できることを確認した。

・大塊ゲートからの排出

ホッパ内に滞留した大塊が問題なく排出されることを確認した。

・グリズリー部での詰まり発生時の対処方法

クリンカによる排出口閉塞が発生した場合においても、シュート部点検口からの突き作業にて閉塞が解消できることを確認した。

(ii) 各所計測による評価

・クリンカホッパ内雰囲気温度

250~350℃程度であり、強度評価条件の450℃以下と比較し安全側となっていることを確認した。

・乾式クリンカコンベヤ内灰温度

投入口で600~800℃の高温（赤熱）クリンカはコンベヤ傾斜部を搬送される間に100~300℃の温度低下が見られた。

通常落下灰では、投入口で100~200℃である一方、排出口では100℃以下であった。

・各部温度計測（ホッパ、グリズリー、ゲートなど）解析による温度分布と比較して安全側となっていることを確認した。

(iii) エネルギー回収に関する考察

実証試験機設置前の湿式コンベヤ運転時に比べて、設置後は燃焼効率の上昇が認められた（設置前：約99.3%→設置後：約99.6%）。これは、乾式への転換により、クリンカに含まれる未燃炭素分が火炉下にて燃焼反応を継続することなどによるものと考えられる。また、乾式化によってボイラ下の水封水が不要となり炉内へ流入する水分（蒸発した水封水）がなくなったことから、ボイラ全体の温度が上昇して、クリンカのみならずフライアッシュの未燃炭素分にも燃焼を促す効果があったと考えられる。

4 静電分離技術によるフライアッシュの未燃分除去システム

今後の需要増加が見込まれる高品質灰の製造手法として、当社は静電分離技術を有している。2003年頃から本技術を開発してきた<sup>3,4)</sup>が、装置の小型化や回収率向上が課題となっていた。直近では処理量の増大が可能な手法の実現を目指して開発を行ってきた。

(1) 未燃炭素の分離と灰の有価リサイクル

灰を高品質灰（有価物）にするためには、灰中の未燃炭素量を規定値以下にする必要がある。その方法として、図5に示すような静電分離技術により灰から未燃炭素を分離させる装置を開発した。

多孔質の板に原粉を投入し、その上部に網状の板を設置した状態で両者間に電圧を印加すると、正極となる多孔質板には中性の灰分が残り、負極となる網状の板には帯電した未燃炭素が引き寄せられる。多孔質板下部からは流動化エアを流すことで未燃炭素の移動を補助している。この

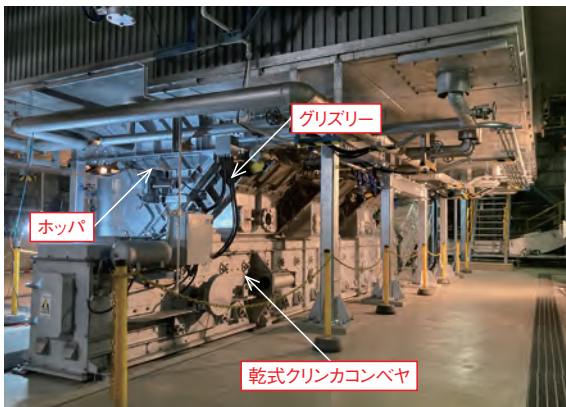


図4 実証試験機外観（缶前側）  
Fig. 4 Exterior of demonstration testing equipment (front of boiler side)

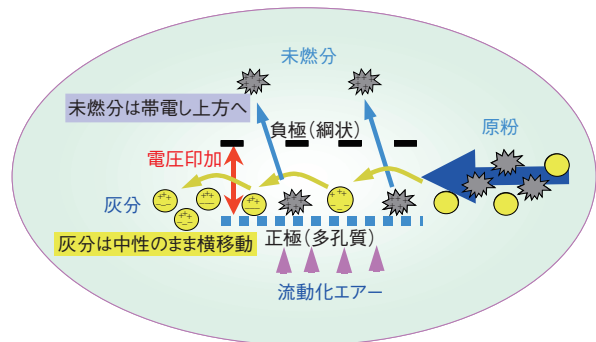


図5 静電分離技術の原理・概念  
Fig. 5 Principle and concept of electrostatic separate technology

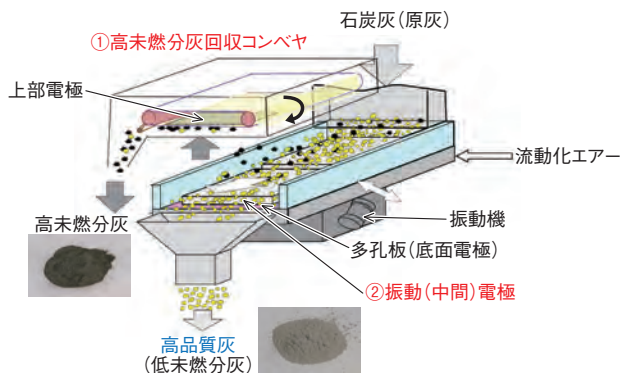


図6 ベンチ試験機  
Fig. 6 Bench testing equipment

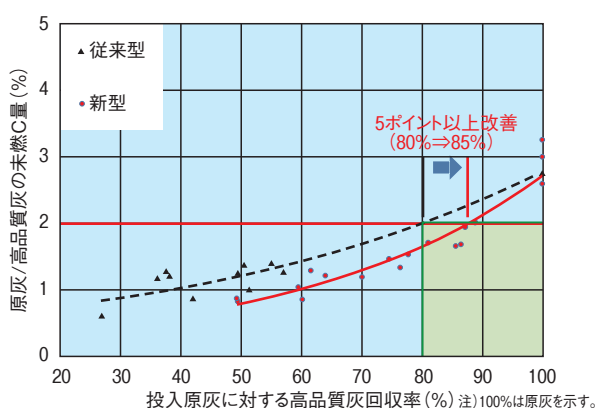


図7 ベンチ試験結果  
Fig. 7 Bench testing results

技術により灰から未燃炭素が分離されることで、従来は処分費を要していた灰の有価物化が可能になる。

### (2) セメント製造時のCO<sub>2</sub>発生量削減

国内のセメント製造時のCO<sub>2</sub>発生量(2019年度)は、直接排出総量11億794万トン<sup>5)</sup>に対して4,147万トン<sup>6)</sup>であり、割合としては3.7%程度である。前述の通り、フライアッシュセメントが普及すれば、国内における高品質灰の需要が増加してCO<sub>2</sub>発生量削減に寄与できる。通常のセメント製造時と比較してCO<sub>2</sub>発生量を20%程度削減可能である<sup>7)</sup>。

### (3) ベンチ試験

ベンチ試験機の概要図を図6に示す。多孔板上に灰を投入し、振動機により排出口へ導く過程において、上部電極となる高未燃回収コンベヤとの間に電圧を印加すると同時に、多孔板下部から流動化エアを導入することで、未燃炭素が回収コンベヤに回収・搬送される構造である。

従来型は装置全体を振動させつつ上部電極に移動した未燃炭素を吸引していたため装置が大型化していたが、ベンチ試験機では中間電極にのみ振動を与えつつ、未燃炭素は吸引せずベルトに付着させることで、装置の小型化および

回収率の向上を実現した。

本装置を用い、実運用中の2箇所の発電所にて未燃炭素の分離性能を確認した。ベンチ試験の結果を図7に示す。本試験における目標性能は、「高品質灰に含まれる未燃炭素量の割合」および「投入原灰に対する高品質灰の回収率」とし、前者はセメント製造時の一般的な要求事項である「2%以下」、後者は従来機以上となる「80%以上」とした。なお未燃炭素量は、回収した高品質灰の加熱前後での質量比から求めた。従来型とベンチ試験機を比較すると、いずれも未燃炭素量の異なる灰を安定的に分離可能である一方で、ベンチ試験機は回収率が5ポイント以上改善され、分離性能が高いことが分かる。

### あとがき

新型乾式クリンカ処理システム「KACE」については実証試験まで完了して、商用機受注に向け営業活動を実施中である。静電分離技術によるフライアッシュの未燃除去システムについては、ベンチ試験で分離性能が高いことを確認しており、今後実証試験のステージへ進める計画である。当社はこれらの技術によりエネルギーの回収や灰の有効利用を行うことで、カーボンニュートラル実現に貢献していく。

### 参考文献

- 1) 特許 第6586359号, “灰排出システム”
- 2) 特許 第6722447号, “グリズリ装置及び主灰排出システム”
- 3) 特許 第3981014号, “粒子の静電分離方法”
- 4) 特許 第4749118号, “静電分離方法および静電分離装置”
- 5) 国立環境研究所 温室効果ガスインベントリオフィス 「日本の温室効果ガス排出量データ」(1990~2019年度確報値)
- 6) 経済産業省 製造産業局 資源エネルギー庁「コンクリート・セメントのカーボンニュートラルに向けた国内外の動向等について」(2022年)
- 7) 一般財団法人カーボンフロンティア機構 ホームページ [https://www.jcoal.or.jp/ashdb/ashqacollection/ashqa\\_common/07.html](https://www.jcoal.or.jp/ashdb/ashqacollection/ashqa_common/07.html)



菊田宗弘



竹村嘉彦



山口大輔