

Techno Scope

世界が注目する日本の ロータリーキルン



製造中の世界最大級のロータリーキルンを構成する部品(タイヤ)。穴あけ加工などを行うための「ケガキ」作業が行われている様子。

世界人口の増加や経済成長に伴い、世界のセメント生産量は増加している。大量のエネルギーを必要とするセメント生産において、省エネルギー化は大きな課題になっている。セメント製造の省エネルギー化にいち早く取り組んできた日本では、ロータリーキルンを使用した高効率の製造プロセスへの移行が1997年度に完了し、国際的に熱効率の高いセメント製造様式と認められている。

写真提供：(株)日本製鋼所室蘭製作所

注目される日本のセメント製造プロセス

世界のセメント生産量は1994年の約14億tから、2017年には40億tを超えるまでに増加している。中でも中国とインドの生産量が大きく伸び、2017年の生産量では、約24億tが中国、約2.7億tがインドで生産され、両国で世界のセメント生産量の70%近くを占めている(図1)。

セメントの製造プロセスは「原料工程」「焼成工程」「仕上げ工程」の3つに大別される。このうち、石灰石を加熱して「クリンカ」を製造する焼成工程に多くのエネルギーが投入され、早くから省エネルギーへの取り組みが行われてきた。エネルギー消費量の多い「クリンカ」製造のための熱効率(GJ/tクリンカ)は、ロシアの4.1、中国、アメリカが4.0と、日本の3.3と比較して大きい(図2)。これは、日本が世界に先駆けて乾式ロータリーキルンを導入するなどの省エネルギー対策に取り組んできた結果である。このことから、ロシア、中国、アメリカなどでは、エネルギー効率改善の余地が残されているといえる。

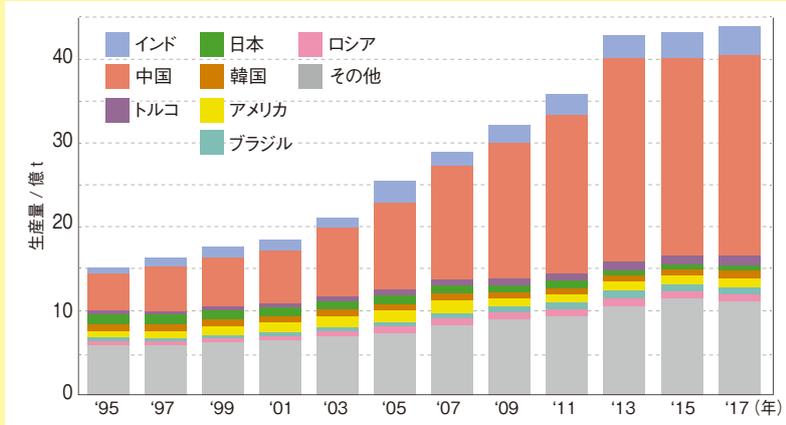
セメント需要の増加に対応するために、従来方式よりも高い熱効率、焼成能力の向上、長期安定運転などが求められ、1950年代にドイツで開発されたのが、SPキルン(Suspension PreHeater Kiln)である。1960年代には日本でもSPキルンが導

入され、その後、1970年代にSPキルンを改良した「NSPキルン」(New Suspension PreHeater Kiln)(図3)が日本で開発された。SPキルンはロータリーキルンによる焼成工程の前に予熱装置(PreHeater)を置くことで熱効率向上、大型化、連続安定運転を実現したが、NSPキルンでは予熱装置とロータリーキルンの間に仮焼炉を設けることで、一層の熱効率向上とロータリーキルンの焼出能力の増大を実現した。日本発の技術である「NSPキルン」は、現在、世界中で活躍している。

高効率プロセスに不可欠なロータリーキルン

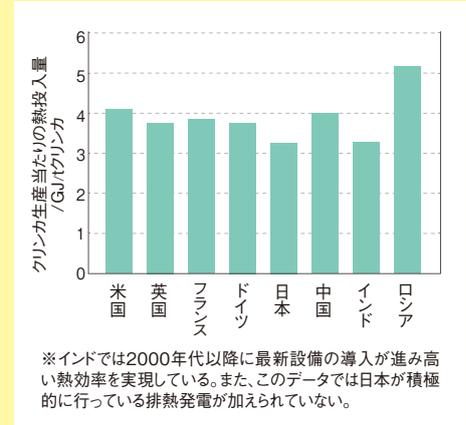
SPキルンやNSPキルンを構成する重要な装置であるロータリーキルンは、セメント製造用だけでなく、廃棄物などの焼却施設や石灰製造用など広く使用されており、石灰製造用は大型のものが多く、その構造は非常にシンプルで、本体は炭素鋼などで作られた直径数mの筒状の構造物でその長さは数十mにもおよぶ。その巨大な質量を支えるために筒の部分(胴)の厚さは十数mmから数十mmになる。また、ロータリーキルンを回転させるために、胴の外側には回転力を伝えるための駆動ギヤと、胴を支持するための「キルンタイヤ」と呼ばれる部材が取り付けられる。高温になる胴の内部を保護し、保温するためにその内部には耐火レンガが貼り付けられている。

■ 世界のセメント生産量の推移(図1)



アメリカ地質調査所のデータより作成。

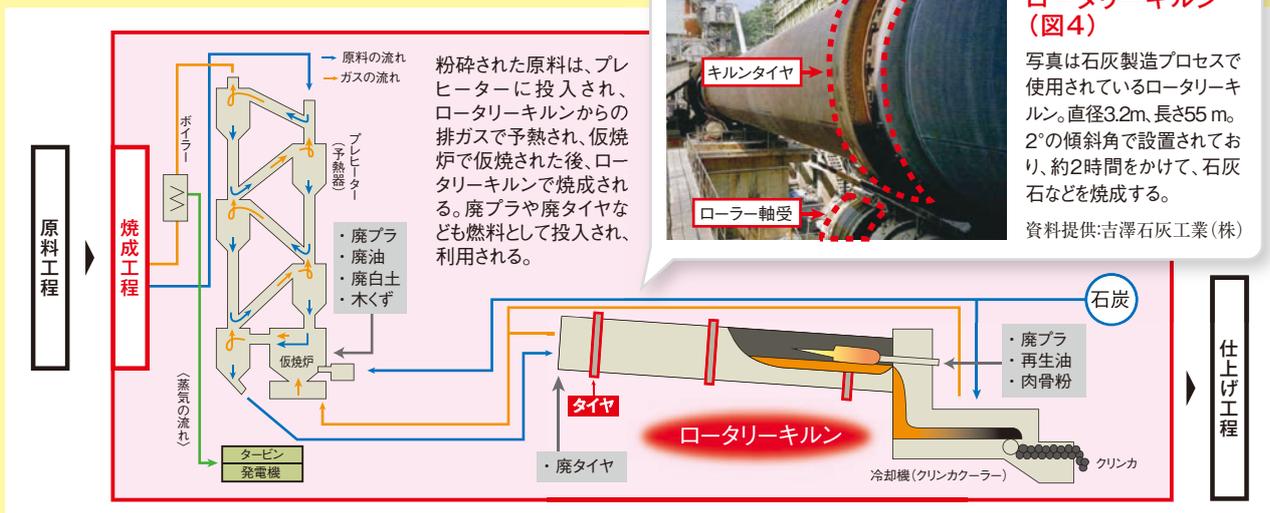
■ 各国のクリンカ製造の熱効率(図2)



※インドでは2000年代以降に最新設備の導入が進み高い熱効率を実現している。また、このデータでは日本が積極的に行っている排熱発電が加えられていない。

地球環境産業技術研究機構「2010年時点のエネルギー原単位の推計(セメント部門)」より作成。

■ NSPキルン焼成工程のモデル図(図3)



資料提供:(一社)セメント協会

これらによる大きな重量を支える必要があるキルンタイヤや、それを支えるローラー軸受は高荷重に耐える必要がある。加えて転動接触するため、強度と耐摩耗性が求められる(図4)。

世界最大級の「キルンタイヤ」の製造

このほど日本のメーカーがデンマークの設計メーカーより依頼を受け、米国向けの世界最大級のキルンタイヤを製造した。外径は8.7m、内径が6.9m、材質はマンガン鋼で製品質量は約213tにおよぶ。なお、日本国内に設置されるロータリーキルンのキルンタイヤは100tクラスが主流となる。以下、巨大なキルンタイヤの製造工程について詳しく紹介する。

大型のキルンタイヤは鋳鋼が一般的だが、今回製造されたキルンタイヤには高靱性が求められたため、鍛鋼製とされた。

素材となる鋼塊を作ることからはじまる。120tの電気炉で溶

解された原料鋼は、精錬され、超大型の鋼塊ケースに铸込まれる(図5)。

今回使用された鋼塊ケースの容量は600tで、約500tの鋼塊が造塊された。巨大な鋼塊を铸造するためには、溶鋼が凝固・収縮する際に発生する空間である「引け巣」を防止するために、製品質量を超えた溶鋼を鋼塊ケースに投入する。これは凝固収縮を補填するためで、「押湯」と呼ばれる。また、機械加工による削り代なども見込むため、製品質量200tに対して500tもの鋼塊が必要になる(図6)。

造塊された500t鋼塊は、鋼塊ケースに最初に接触する鋼塊の下端部分と上端の押湯の部分を除いた直径約4m、高さ約3.5mの鋼塊にされ、次の鍛錬工程に進む。不要部分の切除作業は鍛錬工程の後に行われる場合もあるが、今回は鋼塊が巨大なために、鍛錬工程の前に不要部分が取り除かれた。

次の鍛錬工程は、鋼塊を変形させることによって金属組織の

■ 世界最大級キルンタイヤの製造



鑄込み作業の様子(図5)

巨大な鋼塊を鑄込むためには、複数基の取鍋が必要になる。



世界最大級の670t鋼塊(図6)

日本製鋼所室蘭製作所では最大で670tの鋼塊を製造することが可能である。今回のキルンタイヤ製造では500tの鋼塊が造塊された。



鍛錬工程の様子(図7)

金属組織の緻密化と均一化が行われた後、14000t油圧プレスによる「据込」が行われる。

緻密化と均一化を目的に行われる。加熱された鋼塊は長さ方向(軸方向)に伸ばされた後に、長さ方向から力を加えられる。長さ方向を圧縮し、直径を大きくする工程を「据込」と呼ぶ(図7)。

また、巨大な鋼塊では成分偏析が起こりやすくなる傾向があり、それを防止することも重要になる。今回は特に強度や韌性への影響が大きい炭素とマンガン比率の詳細な検討が行われたという。大型鋼塊の製造が難しいのは、実物大の事前試験が事実上、行えないことにある。単純にスケールアップしたモデルでは、「質量効果」と呼ばれている影響により、予測どおりの挙動を示さないことが多い。そのため、これまでの造塊実績の解析とシミュレーションによる予測が不可欠になる。これは熱処理工程などでも同様である。

このようにして、直径約5m、高さ約2mに整形された鋼塊には、中央に直径約1mの穴が開けられ、リング形状の原型が形作られる。14000t油圧プレスにより、外周部分の厚みを徐々に鍛錬により薄くしていくことで、それに合わせて中央の穴が大きくなっていく。鍛錬工程ではこの後の機械加工の削り代を考慮した仕

上がり寸法+50mmの精度で成形されていく(図8)。

今回製造されたキルンタイヤの外径は約8.7mで、これは14000t油圧プレスの作業空間には収まらない大きさである。そのため、キルンタイヤの一部だけを油圧プレス外で加工する必要があった。そのためには、油圧プレス機の外にあるキルンタイヤを支持するための治具などを、新たに製造する必要がある。加工方法や治具の設計なども、大型工作物を製造するには重要でメーカー各社がさまざまな工夫を凝らしている。

鍛錬により成形されたキルンタイヤは熱処理が行われた後、大型NC立旋盤による機械加工が施される(図9)。200tを超える大型工作物の場合、機械加工にもさまざまな工夫が必要になる。立旋盤で機械加工を行う場合、一度に加工できる面は、上面と側面の一部になる。そのため、最低、1回はキルンタイヤを反転させる必要が生じる。工作物が巨大であるため、反転作業には特別な治具を使用する必要があった。ここにも、大型製品の製造で蓄積された経験が生かされたという。数日かかる反転作業を効率的に行うための作業手順や、加工の順番などは事前に詳細な検討が加えられた。

キルンタイヤは胴との連結などに使用されるボルト穴の穴あけ加工や、寸法や探傷などの完成検査が行われた後、出荷された(図10)。

日本では1997年に高効率なNSPキルンへの切り替えが完了しているが、世界的に見るとセメント製造プロセスの効率化を一層進めていく余地が多く残されている。セメントの増産が続く中、大型のNSPキルンのニーズは今後も高いことが期待される。これまで見てきたように、大型の鍛造品はその製造にさまざまなノウハウが要求される。そしてそれは、これまでの技術的な蓄積によるところが大きく、日本国内でも対応できるメーカーは少ない。唯一無二のノウハウは、今後も日本のものづくりのアドバンテージを支えていくと期待される。

● 一層の省エネルギーを実現する 日本初の新しいセメント

近年、鉄鋼製造の副産物である高炉スラグを大量に混合したエネルギー・CO₂・ミニマム(ECM)セメントが開発され、実用化が目指されている。日本が排出するCO₂の3%強はセメント製造に由来するとされ、ECMセメントは大きなCO₂削減効果が期待されている。



開発されたECMセメント

資料提供:新エネルギー・産業技術総合開発機構

- 取材協力 (株)日本製鋼所室蘭製作所、吉澤石灰工業(株)
- 文 石田亮一



14000t油圧プレスによる鍛錬(図8)

写真は、キルンタイヤに似たリング状構造物を鍛錬している様子。



粗削り・仕上げ加工の様子(図9)

大型NC立旋盤により、機械加工が施される。



梱包され、出荷される世界最大級のキルンタイヤ(図10)

大型製品の製造では、輸送行程なども考慮する必要がある。

写真提供:(株)日本製鋼所室蘭製作所

鉄鋼の生産に欠かせない石灰をつくるロータリーキルン

セメント製造プロセスで活躍するロータリーキルンであるが、鉄鋼製造に欠くことができない石灰の製造でも活躍している。

石灰は日本が自給できる数少ない天然資源の一つであり、九州から北海道まで広く産出している。年間の生産量は約1億7000万tで、そのうち13%が鉄鋼用に使用されている。

高炉では、鉄鉱石、コークスに石灰石を加えて鉄を製造する。また、転炉や電気炉では、生石灰によりシリコンや硫黄、リンなどの不純物を取り除いている。なお、転炉の連続操業などの際には、耐火レンガを保護する目的でMgOを含む軽焼ドロマイト(CaO+MgO)を使用する場合もある。

生石灰(CaO)や軽焼ドロマイト(CaO+MgO)は石灰石(CaCO₃)やドロマイト(CaCO₃・MgCO₃)を焼成することによって得られ、日本製鉄(株)君津製鉄所などの一貫製鉄所内ではオンサイトプラントが設けられている。

石灰石やドロマイトの焼成には、本稿で紹介したロータリーキルンのほかに、縦型のシャフトキルンが用いられている。シャフトキルンと比較して、ロータリーキルンは生産能力が高い、燃料の選択性が高い、予熱・焼成・冷却までが約3時間で完了するため、用途に合わせた品質調整が容易、などの特長を持つ。

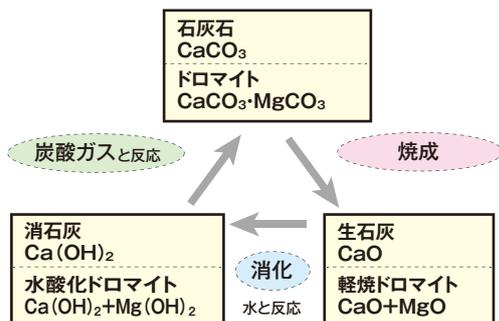
石灰石やドロマイトは焼成温度や時間によって、表面形状が異なることが知られており、これらを制御する点でもロータリーキルンは優れている。

石灰石の採掘の様子



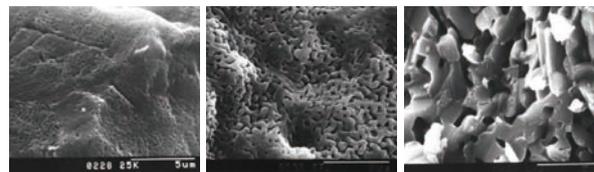
高さ約10mの階段状に採掘するベンチカット法と呼ばれる露天掘りが行われている(栃木県三峰山)。

石灰・ドロマイトの化学的特性



焼成による形態変化

石灰石やドロマイトは熱分解により、CO₂が分離し、表面に微細な孔が生じる。焼成条件によって表面積が変化し、表面積が大きいほど反応速度も大きい。製鉄用途では反応性の高いもの、建築用途では中程度の反応性のものなど、用途に応じて製造される。



資料提供:吉澤石灰工業(株)