

3.1.3 窯業土石のエネルギー効率向上

製造部門が消費する二次エネルギーは日本全体の43%（2016年度）で、窯業土石（セメント）分野はそのうちの6.4%（全体では約3%）を占めています。セメントは基礎素材で生産量が多く、エネルギー多消費型製品です。このため、本稿で述べる焼成工程の技術革新がエネルギー効率の向上に大きく寄与しています。産業廃棄物のエネルギー有効利用にも貢献しています。

砕に多くの電力を消費しています。利用している産業廃棄物は、製鋼スラグ、鋅滓、石炭灰、鋳物砂などです。焼成工程では、原料を約1450℃で焼成する炉（ロータリーキルン）で大量の石炭を消費しています。このため、焼成炉の排熱を原料の乾燥に利用する一方、燃料代替品として廃タイヤや廃プラスチックなどの産業廃棄物も使用しています。仕上げ工程の電力消費は、主にクリンカー（焼成体）の予備粉砕機と仕上げ粉砕機（ミル）です。

日本のセメント工場は、1970年代の後半まで煙突から白くて長い煙を出していたので、遠くからでも容易に見分けることができました。白い煙の正体は石灰石とセメントの粉末、それに大量に使っていた石炭の灰でした。しかし1980年代になると省エネルギー対策が重視されるようになり、石炭の消費量が減るとともに環境規制が強化され、煙突の煙は目立たなくなりました。その後もエネルギー効率の向上を目的に設備投資が続き、2010年にはクリンカー（セメント焼成体）のエネルギー消費原単位が世界最小の水準に達しています。

2. セメント製造のエネルギー効率向上

2.1 原料調合工程の省エネルギー対策

1960年代までの原料の粉砕は、石灰石と粘土類をそれぞれロータリードライヤーで乾燥し、チューブミルで混合粉砕する乾燥・粉砕別方式でした。ところが1960年代にSP（サスペンション・プレヒーター：後述）が開発され、焼成炉の排熱を有効利用できるようになりました。しかも原料を乾燥したSPの排熱は、まだ350℃～370℃もあります。

1. セメントの製造工程と使用するエネルギー

表1に示すのがセメントの製造工程と各工程の役割、主要な設備、および使用するエネルギーの種類です。原料の調合工程では、石灰石と副原料に使用する産業廃棄物の粉

表1. セメントの製造工程

特性項目	原料調合工程	焼成工程	仕上げ工程
役割	原料の粉砕と調合	原料の乾燥と焼成 クリンカー製造	クリンカーの粉砕 セメントの調合
主要設備	石灰石や粘土などの原料ヤード 使用産廃ヤード 原料粉砕機 集塵機	原料乾燥機 (SP/NSP)：後述 仮焼炉（脱炭酸） 焼成炉（キルン） クリンカー冷却器	石膏ヤード 予備粉砕機 仕上げ粉砕機（ミル） 分級セパレーター 混合機（特定副原料用）
電力消費	約28%	約30%	約42%
燃料消費	約0.5%	約99%	約0.5%

そこで石灰石と粘土類のロータリードライヤーの代わりに、SPの排熱をチューブミルに吹き込む方法が採用されるようになり、約2割の省エネルギー効果が得られました。その後、小型で大能力の図1に示す縦型で分級機能を内蔵する高効率ミルが開発され、1980年代からさらに約1割の節電効果が得られています。

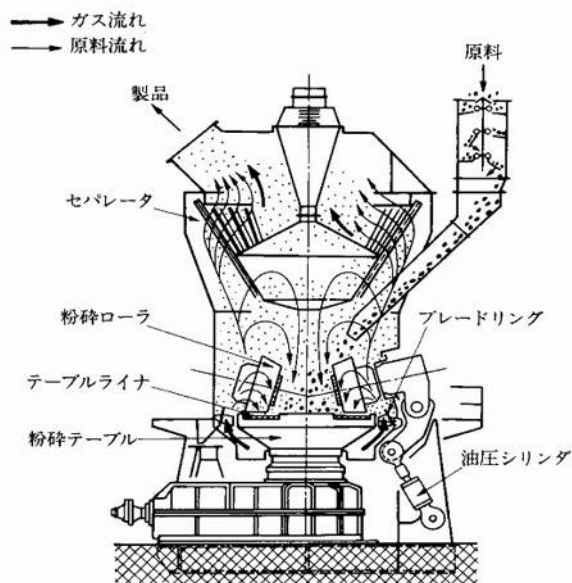


図1. 縦型原料ミル（分級機内臓・同時乾燥粉砕）
（出典：国立科学博物館・技術の系統化調査報告
Vol.23 2016. March）

2.2 焼成工程の省エネルギー対策

国内のセメント工場は、かつて熱効率の劣る湿式キルンや、原料予熱装置のない乾式キルンが主流でした。しかし1960年代に入ると、原料予熱機能のあるSPキルンがドイツで開発され、日本にも導入されました。その後、1970年代に石灰の脱炭酸効果が大きい仮焼炉を備えたNSP（ニューサスペンションプレヒーター）キルンが日本で開発され、国内では1997年に転換が完了しています。

2.2.1 SPキルン

SPキルンの構成を図2に示しますが、物理的には「多段サイクロン型の原料予熱装置付き焼成炉」になります。サイクロンは図1の右上に示した漏斗型の粉体分離器です。粉体を含む気流は漏斗の上部から円周方向に沿って送入され、回転しながら下方に移動します。粉体は遠心力で外周に飛ばされ、内壁に沿って落下します。粉体を分離した気流は、サイクロンの下部から円筒形のダクトを通して上方に移動し、外部に排出されます。構造が単純で安価なことから、古くから製粉工場の粉体回収や、石炭ボイラーの排ガス除塵機に使われてきました。最近は家庭用の電気掃除機にも同じ原理が応用されています。

SPキルンは通常は4段のサイクロンを縦に繋げ、最下部から1050℃～1100℃の焼成炉（ロータリーキルン）排ガスを送入します。最下部のサイクロンでは、上から落下してきた原料（主に石灰石と粘土類）を旋回流の状態加熱し、上段のサイクロンに移動します。上段ではその上のサイクロンから落下してくる原料を旋回流で加熱し、さらに上の段のサイクロンに移動します。このように、焼成炉排ガスが次々に原料を加熱するので、最上段のサイクロンから排出される段階では350℃～370℃にまで低下します。一方、原料は最上段のサイクロンに入る段階ではまだ低温ですが、浮遊→受熱→固気分離をくり返ししながら下降し、最下段のサイクロンを出る段階では高温に熱せられています。SPキルンは原料の予熱で石灰石（CaCO₃）のCO₂を約40%分解（脱炭酸）します。このため、後に続く焼成炉の熱負荷を大きく軽減することができます。SPキルンは、通常は粉体の分離器として使われるサイクロンを、焼成炉排ガスと原料との熱交換に利用し、熱回収と原料予熱を同時に実現した巧妙な装置です。

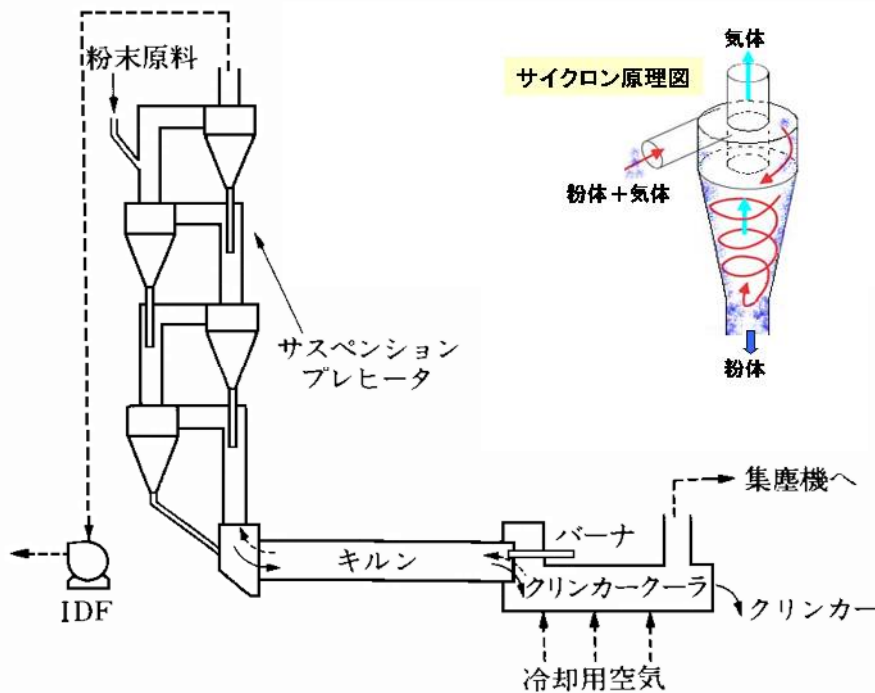
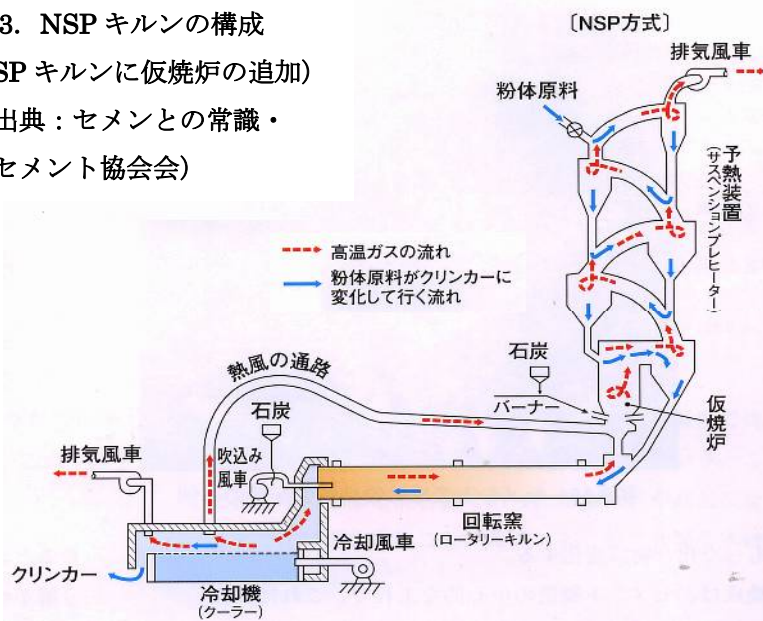


図 2. SP キルンの構成とサイクロンの原理

図 3. NSP キルンの構成
(SP キルンに仮焼炉の追加)
(出典：セメントの常識・セメント協会)



莫大な省エネルギー効果がある SP キルンが開発された結果、日本では最初に SP キルンの運転

が開始された 1963 年から 1970 年代の中期までに、新增設されるキルンはほとんどが SP キルンになりました。なお前述のように、SP キルンから排出される排ガスは、原料調合工程の原料粉砕機に送られ、粉砕工程のエネルギー効率の向上にも寄与しています。

2.2.2 NSP キルン

日本最初の SP キルンは、径 4m・長さ 62m・能力 1,200 トン/日でしたが、以降の SP キルンは次々と大型化され、1972 年には径 6.2m・長さ 125m・能力

5,300 トン/日という巨大キルンまで登場しました。一方、キルンの内径が大きくなると内張り煉瓦の支持力が弱くなり、操業中に脱落しやすくなります。また焼成量が大きくなると吹込む燃料も多くなるので、最高温部の温度が上昇して煉瓦を短命化します。そこで SP キルンのプレヒーターと焼成炉（ロータリーキルン）の間に仮焼炉を追加し、焼成炉の熱負荷を軽減したのが図 3 に示す NSP（ニューサスペンションプレヒーター）キルンです。SP キルンでは、プレヒーターの石灰の脱炭酸率は約 40%でした。

したがって、残る 60%の脱炭酸と焼成反応は、焼成炉（ロータリーキルン）が果たしていました。しかし、ロータリーキルンは原料を一定の時間、高

温の環境に曝して焼成するには適していますが、構造上の制約から熱効率を高めるのが困難です。そこで原料を噴流状態で加熱する仮焼炉を焼成炉の前に設置し、原料の脱炭酸率を40%から80%以上に高める方法が開発されたのです。その結果、ロータリーキルンでは残る約20%の脱炭酸と、焼成だけを行なわせるだけになり、熱負荷が大幅に低減されました。加熱の負荷が大幅に低下したロータリンキルンは、同一サイズなら焼成能力をSPキルンの2倍以上に増大させることが可能になったのです。また、仮焼炉は原料の焼成ではなく脱炭酸が目的ですから、焼成より低温での操作でよく、発熱量の少ない低品位炭も燃料に利用できるようになりました。

2.3 仕上げ工程の省エネルギー対策

仕上げ工程では高温の灼熱クリンカーを冷却し、粉砕して粒度を調整して製品セメントにします。大量に消費するエネルギーは粉砕機の電力なので、省エネルギー対策も粉砕機と周辺設備が対象になります。節電に寄与したのは主に次の4対策です。一つはクリンカー粉砕機（チューブミル型）の大型化で、主力工場では処理量が30トン/時から180トン/時と6倍にもなりました。その結果、チューブの径が3.5mから5.3mにもなり、長さは5.9mから15mにもなりました。単純化すると粉砕能力はチューブの容積に比例し、所要動力はチューブの表面積にしか比例しません。その結果、粉砕能力あたりの動力が少なくなったのです。

二つ目はチューブミルで得られる粉体クリンカーを、再粉砕が必要な粉体と不要な粉体に分けるセパレーターの改良です。効率のよいセパレーターの開発で粉砕効率を高め、約2割の節電を達成しました。三番目の対策はチューブミル前段への、

クリンカー粗粉砕用予備粉砕機の導入です。粉砕を粗粉砕と、製品に必要な粒度にまで粉砕する微粉砕の二段階に分けることで、1割から2割の節電効果が得られています。四番目は仕上げ工程だけでなく、焼成工程も含めた廃熱発電の導入です。セメント工場の排ガスにはプレヒーター排ガス（キルン排ガス）と、クーラー排ガス（クリンカー冷却排ガス）があります。1970年代までプレヒーター排ガスの熱は原料乾燥に利用し、クーラー排ガスはキルンでの焼成と、仮焼炉の燃焼空気に利用してきました。しかし1980年代からセメントの生産量が増大し、排ガス量も増加しました。そこでプレヒーター排ガスとクーラー排ガスの熱を廃熱ボイラーで回収し、蒸気タービンと発電機で発電する廃熱発電が採用されるようになり、エネルギー効率の向上に寄与しました。

3. セメント産業の産業廃棄物利用

セメントの製造には多くの燃料を必要とする一方で、ごみ焼却炉の燃焼残差や、無機質の廃棄物がセメントの原料になります。現在では主に高炉スラグ、石炭灰、排煙脱硫副生石膏、排水処理汚泥、非鉄金属の鋳滓、鋳物砂が原料として利用されています。燃料としては廃タイヤ、廃プラスチック、木屑、廃油、廃白土が使われ、石炭のボタは燃料と原料を兼ねて利用されています。現在のセメント産業は、産業廃棄物処理の一翼も担っているのです。

（おわり）

参考：セメント協会資料（HP）、セメントハンドブック（セメント協会）、セメント産業の省エネルギー対策について（セメント協会）。
下田孝：セメント製造技術の系統化調査