

セメント製造技術の系統化調査

History of Cement Manufacturing Technology

1

下田 孝 Takashi Shimoda

■ 要旨

今日の日本のセメント産業は、セメントの品質はもとより、省エネルギー技術、労働生産性、廃棄物・副産物の原燃料への再資源化技術など、あらゆる面で世界のトップクラスにある。

本稿では、19世紀初めに英国で発明されたセメント製造技術が、明治時代初期（19世紀後半）に欧米から日本に導入されて以来、今日の世界トップレベルの技術水準に至るまでの技術の発展を、系統的に紹介する。

第1章では、セメント産業についての基本的な知識を紹介する。

第2章ではまず「古代のセメント」について略記し、続いて「近代のセメント」すなわち「ポルトランドセメント」が産業革命期の英国で誕生する過程を述べ、その技術が明治初期に導入されて、日本のセメント産業が始まった経緯を述べる。

第3章では、明治期から大正期にかけての日本のセメント製造技術の進歩について紹介する。この時期の画期的な技術進歩としては、①石膏添加の開始、②回転窯の導入、③セメント規格の制定、④余熱発電ボイラーの導入、などが挙げられるが、いずれも欧米技術の導入であった。

第4章では、昭和初期から太平洋戦争をはさんで昭和30年代までの技術進歩を述べている。この時期には、乾式法、湿式法、半湿式法など様々な焼成方式が欧米から導入され、それぞれが特長を競った。この時期の画期的な技術進歩としては、①セメント品種の多様化、②エアクエンチングクーラーの採用、③改良（生灰）焼成法の開発、④連続式ブレンディングサイロの導入、などがある。この中でも③は、明治草創期以来全てを導入技術に頼ってきた日本のセメント産業にとって、初めての「独自」の技術開発であり、これが後の日本発の大型技術・NSPキルン開発につながっていった点で重要である。

第5章では、昭和40年代以降、日本発のセメント製造技術が華と開いた状況を紹介している。昭和30年代末に「SPキルン」の技術がドイツから導入されるや、その優れた熱効率や、大型化・長期連続運転に適するという長所から、日本国内の新増設キルンはほとんどがSP方式を採用するほどの勢いとなった。と同時に、日本では早速そのSPキルンに「改良焼成法」の技術を加えた「NSPキルン」の開発競争が起こり、いろいろな型式のNSPキルンが成功裏に開発された。NSPキルンはSPキルンよりもさらに熱効率、大型化、長期連続運転に優れ、結果として、日本のセメント産業のエネルギー効率や品質を、世界のトップレベルに押し上げた。また、NSP開発の成功が、日本のセメント業界に自信を与え、渦流型セパレーター、セメント粉砕用豎型ミルなど、省エネ指向の世界的に競争力のある日本発の新技術が次々と生み出されることにつながっていった。

第6章では、1970年代に日本のセメント産業が直面した環境・公害問題の取組み、また1990年代以降課題になっている「気候変動問題」についての国際的なセメント業界の取組みを紹介している。

第7章の「セメント化学の進歩」では、製造上で重要な「焼成反応・セメント鉱物化学」の分野と、利用上で重要な「水和反応・セメント水和物の化学」の分野について、近代セメント誕生以来のセメント化学の進歩を説明する。この分野でも1950年代以降、日本人研究者の活躍が目立つようになってきた。クリンカー品質の顕微鏡判定法「小野メソッド」は、工場現場で役立つ技術として、世界的に高い評価を受けている。

第8章では、日本のセメント規格と、セメント品種の多様化の変遷について述べる。

第9章では、20世紀を通じて培ってきたセメント製造の設備・技術やセメント化学の知識を基盤に、「建設基礎資材供給の基幹産業」から、「資源循環型社会構築を支える中核産業」へと発展しつつある日本のセメント産業の姿を紹介する。ここでも、塩素バイパス、灰水洗、エコセメントなど、廃棄物再資源化のための日本発の新しい技術が、次々と生み出されていることを紹介する。

■ Abstract

The Japanese cement industry today produces the best quality portland cement with the lowest energy consumption and highest labor productivity in the world. In addition, since the 1990s, the industry has been demonstrating a new role for the cement industry by using industrial and municipal waste as Alternative Fuel and Raw Materials (AFR). The Japanese cement industry has thus come to pursue two industrial missions: the manufacture of quality cement and contribution to a sustainable society.

The cement industry in Japan started in the 1870s when the Japanese government constructed the country's first cement plant, in Tokyo, which relied on European technology and equipment. For the next 90 years, up until the 1960s, Japan imported new technology and equipment from Europe and the U.S.A. Rotary kilns, tube mills, vertical mills, kiln waste-gas boilers/generators, air-quenching coolers, and blending silos were among those imports. Also, major imports of technology included the addition of gypsum in cement, cement quality standards, and several types of special cement such as high-early-strength, low-heat, blast-furnace-slag, fly-ash, and silica cements.

During that time, in 1959, Onoda Cement Co. Ltd. (now Taiheiyo Cement Co.) developed a new cement manufacturing process called the "New Calcined Lime (NCL) Process." With this process, limestone is separately calcined in specially designed shaft kilns, then mixed with other raw materials and sent to a rotary kiln for clinker formation. This produced the astonishing result of a four-fold expansion in unit volume output from the same kiln. The NCL process is considered the first major "Japan original" cement manufacturing technology.

In the 1960s, the Suspension Preheater (SP) kiln process was introduced from Germany. This process rapidly came to prevail in Japan because of its high energy efficiency, excellent upscalability, and prolonged operation period.

Soon after the introduction of the SP process, Japanese cement manufacturers and plant builders, observing the NCL process, began competing with each other to develop a New Suspension Preheater (NSP) process, assuming that unit volume output would greatly increase if a calciner were installed at the bottom of the preheater. These efforts produced fruit in early 1970s. A couple of companies successfully developed NSP processes of their own. Each type of NSP equally achieved higher energy efficiency, better upscalability, and a longer operation period than the SP process. Consequently, the NSP process made the Japanese cement industry the most energy efficient in the world.

The success of NSP stimulated Japanese engineers to innovative further with cement manufacturing technology. The O-SEPA separator, the OK vertical grinding mill, and the vertical pre-grinding mill are among their inventions since the 1980s.

Japanese cement chemists, too, have made a great contribution to the cement industry's progress and development. In 1968, Japan hosted the 5th International Symposium on the Chemistry of Cement. Through this epoch-making conference, Japanese cement chemists played a major role in elucidating the scientific basis for the formation of clinker minerals and the hydration of cement, applying the very latest modern technology such as Electron Probe Micro Analysis (EPMA). In the 1970s, Dr. Yoshio Ono of Onoda Cement created a microscopic method to estimate clinker quality onsite. This method, called the Ono Method, is now recognized worldwide.

The Japanese cement industry began using AFR as early as the 1960s for the purpose of reducing manufacturing costs. Since the late 20th century, however, the industrial and municipal waste problem has become a center of focus along with growing concerns about the global sustainability of natural resources. The Japanese cement industry realigned its position on the use of AFR from mere reduction of manufacturing costs to the even more positive one of contributing to sustainability through greater use of alternative fuels and more recycling of raw materials. In pursuing this new mission, the industry has been developing innovative processes and equipment in order to make greater use of a wider range of AFR. To date, several processes and kinds of equipment have been successfully developed, such as the Chloride Bypass Process, the Ash Washing Process, the Biochemical Conversion Process for household waste (AK System) and Ecocement. These recycling practices are now widely recognized internationally.

Cement consumption in Japan fully matured in the middle of 1990s; however, the Japanese cement industry and its engineers have great hopes for a future in which the industry is positioned at the core of the sustainable society.

■ Profile

下田 孝 Takashi Shimoda

国立科学博物館産業技術史資料情報センター主任調査員

1963年 東京大学工学部工業化学科卒
小野田セメント(株)入社、中央研究所配属。
以降、セメント製造工場、本社生産部、米国事業所などを転任。
企業合併で社名も、小野田セメント(株)→秩父小野田(株)
(1994)→太平洋セメント(株)(1998)と変更になる。

1996年 秩父小野田(株) 中央研究所長
2002年 太平洋セメント(株) 常務取締役、研究所・建材事業・セラミックス事業担当
2005年 セントラル硝子(株) 社外監査役
2006年 太平洋セメント(株) 取締役常務執行役員退任
2009年 セントラル硝子(株) 社外監査役退任

■ Contents

1. はじめに	3
2. セメント・コンクリートの歴史 ー近代セメント産業の誕生まで	7
3. 明治・大正期の日本のセメント製造技術	14
4. 昭和初期から太平洋戦争を経て 戦後復興期へ(1926 - 1960)	24
5. 日本のセメント製造技術の開花(1960 -).....	46
6. 環境保全技術・地球温暖化対策	66
7. セメント化学の進歩	71
8. セメント規格の変遷と品種の多様化の歴史	86
9. 資源循環型社会構築貢献産業への進化	96
10. まとめ：セメント製造技術の系統化	106
11. 結び・謝辞	109
付図：日本におけるセメント製造技術系統図.....	110
付表：セメント製造技術史調査資料 所在確認.....	111
セメント製造技術史 年表.....	112

1 | はじめに

今日の日本のセメント産業は、製品であるセメントの品質はもとより、省エネルギー技術、労働生産性、産業廃棄物や副産物の原燃料への利用技術など、あらゆる面で世界のトップクラスにある。さらに1990年代以降、日本のセメント産業は、それまでの「建設基礎資材の供給産業」の役割に加えて、「資源循環型（持続型）社会の中核産業」を産業の使命として、その存在感を一層増しつつある。本稿「セメント技術の系統化調査報告」では、これら「省エネ技術」「品質管理技術」「資源リサイクル技術」に焦点を合わせつつ、セメント製造技術が欧米から日本に導入された明治初期以降、今日に至るまでの技術の発展を述べる。

世界のセメント会社を見ると、「プラントメーカーから購入したセメント製造装置を、上手に運転して良質なセメントを安く作る」ことに専念している会社がほとんどである。それに対して、日本の主だったセメント会社は、その技術開発の対象を単なる「セメント製造装置の運転技術向上」に限ることなく、コンクリートや土壌改良など「セメントの利用に関する技術」、さらには「セメント製造装置の開発」にまで深く関わってきた。このような技術開発姿勢が、結果的には世界最高水準のセメント製造技術へと導くことになったと言える。この点についても本稿の中で触れておきたい。

技術内容の記述に関しては、セメントの製造技術ないしセメントの種類・品質について、その発展の歴史を学びたいと考える研究者・技術者・学徒にとって、最初に参照すべき手引きとなる技術内容を目指した。

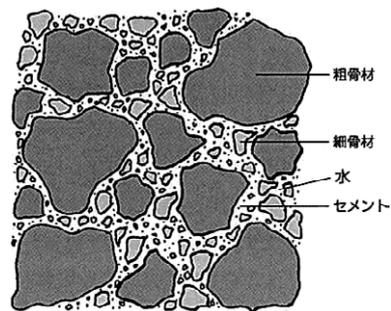
1.1 セメントとコンクリート¹⁾

「セメント」は灰色の粉末で、水と接触して固まる性質（水硬性）を有している。セメントは「コンクリート」を作るための材料の一つであり、製造されたセメントは、そのほとんどがコンクリートとして使われている。別な言い方をすれば、セメントはコンクリートという形になってはじめて世の中の役に立っている、ともいえる。

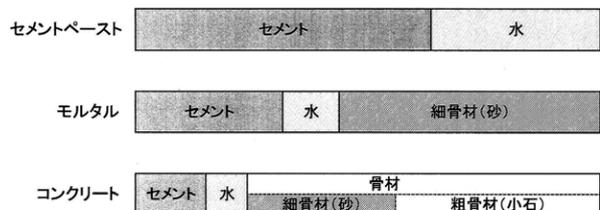
「セメント」の主原料は、石灰石と粘土類である。セメント1トンの製造に、石灰石約1.2トン、粘土類約0.3トンを必要とする。これら原料を乾燥・粉碎し、回転窯（焼成炉、注1参照）内で1450～1500℃で焼成してクリンカー（焼塊、注1参照）を得る。ク

リンカーの主要構成鉱物は、ケイ酸カルシウム化合物を主体に、アルミン酸カルシウム、アルミン酸鉄カルシウムなどが含まれている。これら鉱物には、水と反応して水和物を生成し硬化する性質（水硬性）がある。このクリンカーに3%程度の石膏を添加して粉碎した粉末製品がセメント（ポルトランドセメント）である。

「コンクリート」は、セメント、水、細骨材（砂）、粗骨材（砂利）、混和材料（注2参照）から構成される（図1.1）。これらをコンクリート中に占める体積で見ると、もっとも多いのが粗骨材で、次いで細骨材、水、セメント、混和材料の順になる。コンクリートは、建設材料として建築物、橋梁、道路、河川護岸、トンネル、ダム、港湾、空港など社会生活に必要なさまざまな構造物の建設に必要不可欠な材料になっている。



(1) 硬化したコンクリートの断面



注：割合は質量比で、おおよその目安。

(2) コンクリート製造時の材料の配合

(注) 上記に加えて、コンクリートの作業性改善や品質改善を目的として、混和材料が配合される場合も多い（注2参照）。

図1.1 コンクリートの構成¹⁾

セメントの用途には、「コンクリート」以外に、「セメントペースト」「モルタル」「固化材」としての使い方がある。「セメントペースト」はセメントを水で練混ぜたもの、「モルタル」はセメントペーストに砂（細骨材）を練混ぜたものである（図1.1 (2)）。セメントペーストは、グラウト材（注3参照）などに使われている。モルタルは木造建築の外壁塗装や、レンガやコンクリートブロックなどの目地材として広く利用されている。固化材は軟弱地盤の改良などに使われる

材料のことで、固化材としてのセメントの使い方には様々な技術が開発されている。

1.2 日本のセメント産業¹⁾

日本のセメント産業は、1875（明治8）年に初めて国内でセメントが製造されて以来、絶えまなく技術開発を重ね、我が国の経済成長とともに拡大・発展を遂げ、冒頭でも述べたとおり、現在ではセメントの品質、製造技術いずれの面でも世界のトップクラスにある。

生産規模は2012年4月現在、企業数17社、工場数で30を数え、クリンカー生産能力は5,476万トンである。企業規模は、資本金100億円以上の大企業が7社、100億円以下の中堅企業10社である。また、17社のうち11社はセメント製造を主とする専業会社で、残り6社が化学工業などの兼業会社である。

1.2.1 国内のセメント工場¹⁾

セメント工場の一例を図1.2に示す。国内のセメント工場は上述のとおり全国に30か所あるが、特に主原料の石灰石資源が豊富な北九州地区（4工場）、山口県（4工場）と、国内最大のセメント消費地を抱える関東地区（6工場）に多く立地している。また、セメント工場は典型的な装置産業で、一工場当たりの年産能力は全工場平均で約180万トン、年産600万トンを超える大規模工場も存在している。また、工場では機械化や情報化も進み、一工場当たりの常備労働者数は全工場平均で100名余りである。わが国最大の敷地面積を持つセメント工場は68万m²、東京ドームが15個も入るほどの広さである。



図1.2 セメント工場全景²⁾

1.2.2 セメント製造工程¹⁾

セメントの製造工程の概略を図1.3に示す。セメン

トの原料は石灰石と粘土類である（詳しくは表7.1参照）。「原料工程」は原料を受入れて調合・乾燥・粉碎する。この原料を1450～1500℃で焼成する「焼成工程」には、高さ約80mにもなる予熱機（プレヒーター）のタワーがあり、心臓部である回転窯（キルン）は直径5m～6m・長さ100mに及び、工場の中でもひととき威容を誇る巨大な設備である（図1.4）。セメント焼成用の燃料（主として石炭）は、図1.3「焼成工程」の中の「仮焼炉」と「回転窯」でバーナーから炉の内部に吹込まれる。回転窯を出たクリンカー（焼塊）は、「仕上工程」に送られ、石膏を添加して粉碎される。製品になったセメントは「出荷工程」のサイロ群に保管される。セメント工場から出荷されるセメントの大部分は、粉体のまま（パラセメント）出荷される。紙袋に詰めた「袋詰め出荷」は3%程度である。パラセメントの輸送にはタンカー船・貨車・トラックなどが使われる。

1.2.3 セメント生産量^{1) 3)}

セメントの国内生産量は、1979年度の8,794万トン进行ピークとして、その後、経済の低成長に伴って減少基調をたどったが、1987年度以降回復に転じて1996年度には消費税率引き上げ前の駆け込み需要や阪神大震災の復興需要が旺盛になったことに加え、アジア諸国への輸出が堅調で、9,927万トンと史上最高の記録を更新した。その後は再び減少基調に転じ2001年以降は、7,000万トン台を維持していたが、2008年にはこれを割り込み、以降減少傾向が続いている。2014暦年の生産量は、輸出用クリンカーも含めて6,191万トンであった。

1.2.4 セメントの国内需要^{1) 3) 4)}（図5.1参照）

セメントの国内需要は、戦後復興から高度経済成長期を通じて、一貫して右肩上がりでの拡大が続けた。これは公共投資によって鉄道・道路・港湾・ダムといった基礎的な社会資本が整備されるなか、電力や鉄鋼、石炭など素材型産業の生産活動が高まり、その後の石油化学、電機、機械、自動車などの加工型産業の設備投資が集中投下されたため、この時期のセメント国内需要は欧米先進諸国にキャッチアップを挑んだわが国の工業化の歩みとともにあった。

第一次石油危機（1973年10月）を契機に、セメント需要の拡大路線は終わる。その後、浮き沈みを繰り返すなかで、ピークを記録するのはバブル景気の終盤、1990年度のことである。この年に8,629万トンに達した需要も、その後の長引く不況により低迷が続

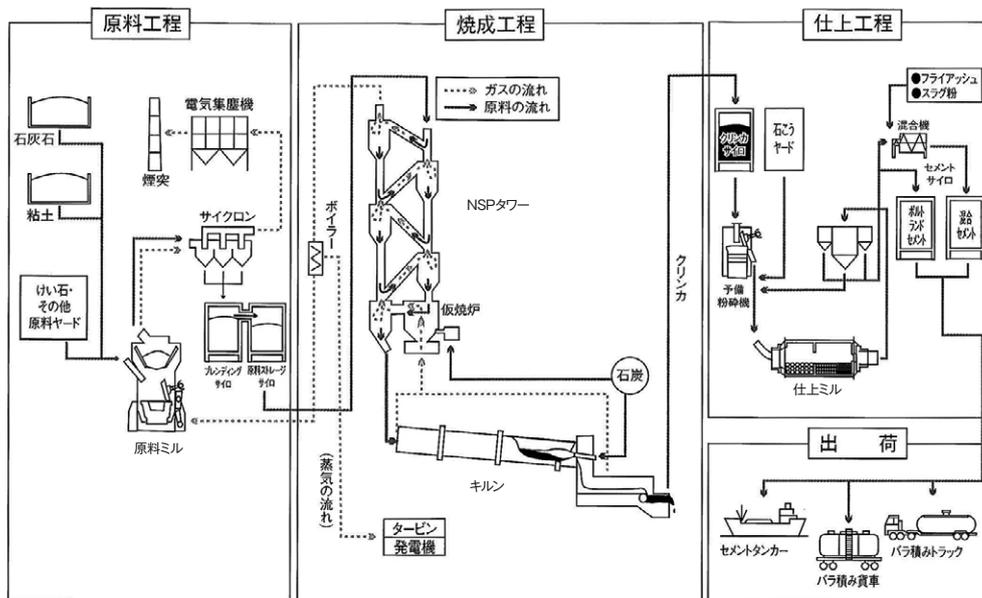


図 1.3 セメント製造工程¹⁾



図 1.4 プレヒータータワーと回転窯²⁾

き、最近では4,000万トン台の水準にまで落ち込んでいる。2014暦年の国内販売数量は約4,590万トンであった。

セメントの国内販売（輸入品は除く）を需要部門別にみると、2014年度では生コンクリート向けは72%、コンクリート製品向けは12%と、この2部門で84%を占めている。これをセメントの最終消費の需要部門でみると、官需：民需で51.0%：49.0%とほぼ半々になっている。

セメントの国内価格は、1トン約1万円（2012年、普通ポルトランドセメント、東京地区）であり、化学製品でありながら10円/kgという驚くべき安さは、「物価優等生」とも言われている。

1.2.5 セメントの輸出・輸入^{1) 3)}

日本はセメント輸出国として世界上位の位置を維持してきた。その理由は、セメント工場に臨海工場が多く、大型船によるバラ輸送が可能なおことから、輸送コストの面で競争力があることが大きい。最近（2010年以降）は1,000万トン前後の輸出が続いており、2014暦年は911万トン、国内生産量の約15%であった。一方、わが国へのセメント輸入は60万～90万トンの水準で推移している。セメントは完全自由化商品であり、日本のセメント生産・流通コストは国際的にも競争力があると言える。

1.2.6 日本のセメント企業の海外進出¹⁾

戦後におけるわが国のセメント企業の海外進出は、輸出の安定供給先の確保を目的とした中継基地の建設が中心であったが、1990年代に入って、セメント工場建設などの大型投資を伴う海外進出が本格化してきた。これら海外投資の対象地域は、成長著しい環太平洋圏が中心となっている。2012年現在の海外セメント生産拠点としては、韓国の2工場（生産能力1,476万t）を筆頭に、中国7工場（887万t）、東南アジア2か国6工場（1,100万t）、アメリカ・カリフォルニア州とアリゾナ州の4工場（484万t）、大洋州1か国（20万t）で全体では6か国20工場で年産能力は約4,000万トン規模に達している。

1.3 資源循環型社会の中核産業としての使命^{1) 4)}

わが国では、経済の発達とともに多くの廃棄物や副

産物が排出されるようになった。しかし、近年では最終処分場の新規立地が困難なことから、いかにしてリサイクルを進め、最終処分量を減らすかが社会全体の問題になってきている。そのような社会的背景の中で、セメント産業は、大量の廃棄物や副産物を原燃料代替資源としてセメント製造に活用することによって、「産業基礎資材であるセメントを製造し供給する」という伝統的な役割に加えて、わが国の「資源循環型社会の中核となる」重要な役割も担いつつあり、その使命は年を追って大きくなってきている。

すなわち、セメント業界では、既存のセメント製造設備や焼成技術をベースに、多岐にわたる廃棄物・副産物のリサイクル技術を開発し、20種類以上の廃棄物・副産物を他産業等から年間約2,850万トン（2012年度）を受け入れて再利用している。これを容積に換算した場合、東京ドームの約17杯分に相当する。

セメント生産は1996年度の9,930万トンをピークに減少傾向を続けてきたが、セメント1トンを製造するために使用する廃棄物・副産物の量は、セメント業界各社の努力により、逆に増加してきている（1990年度251kg/t-cement → 2012年度481kg/t-cement、図9.2参照）。

1.4 本稿「セメント産業技術系統化」の対象技術範囲

本稿では、図1.3に示す範囲を対象技術範囲として報告する。これはほとんどのセメント製造工場の内部で行われている工程の範囲である。

セメントの製造技術の開発においては、省エネルギー、労働生産性向上、大量生産、安定供給、安定品

質が、時代を超えて常に開発目標であった。近年ではこれらに加えて、前項に触れた「資源循環型社会の中核産業としての使命を果たす技術開発」、すなわちセメント工場における資源リサイクル技術の開発の比重も大きくなってきている。

注1： 焼成炉（竖窯・回転窯）とキルン（kiln）、焼塊とクリンカー（clinker）

セメント業界内では、「焼成炉（竖窯・回転窯）」と「キルン」、「焼塊」と「クリンカー」、いずれの呼び方も普遍的に使われている。本稿でも、竖窯・回転窯とキルン、焼塊とクリンカーは同義として、業界の慣例的な言い方に従って、適宜使い分けることとする。

注2： 混和材料、混和材、混和剤

コンクリートの作業性改善、あるいは品質改善を目的として、コンクリートに混入する材料である。混入する割合の大小により混和材と混和剤に分類される。混和材としては、高炉スラグ、石炭灰（フライアッシュ）、石灰石粉などがあり、混和剤としては空気連行剤（AE剤）、減水剤、急結剤、硬化促進剤、凝結遅延剤、防錆剤など、種々の無機系、有機系の化学製品がコンクリート混和剤用に開発されている（2.4、8.4参照）。

注3： グラウト（grout）

トンネルの地山や地盤との間隙部や各種コンクリート構造物の打継ぎ部の充填のために注入材として用いるセメントミルクやセメントモルタルの一般的な名称である。プレストレストコンクリート鋼線の付着力増強のためにも使われる。

参考文献

- 1) セメント協会，セメントの常識，2013
- 2) 太平洋セメント株式会社提供
- 3) セメント協会ホームページ，2015年9月
- 4) セメント協会，セメントハンドブック，2014

2 | セメント・コンクリートの歴史-近代セメント産業の誕生まで

本章では①古代の「セメント」、②産業革命期の英国における近代セメント「ポルトランドセメント」の発明、そして③明治初期における日本のセメント産業発祥の経緯、④近代コンクリート技術の誕生、について述べる。

2.1 近代以前のセメント・コンクリートの歴史^{1) 2) 3) 4)}

セメントの定義を「無機質の接合材」と広義にとらえると、そのルーツは、いまから約9千年前の新石器時代にさかのぼるといわれている。イスラエル・ガリラヤ地方のイフタ (Yiftah) から発掘された住居の床と壁から、現在のコンクリートと類似性のある水硬性材料が見つかったからである。このコンクリートは、セメントは石灰石をベースとしたもので、骨材には石灰石を砕いたものを用い、かなり少なめの水で練ったものである、と報告されている。また中国でも、西安に近い約5千年前の遺跡の住居跡の床から、炭酸カルシウムを主成分とし、シリカ質を含有する料疆石^{りょうきょうせき}を主成分とする硬化部材が発掘され、水と反応して硬化したものであると推定されている。これらの「セメント」は「水硬性」(注1参照) だといわれているが、どのように作られたかは解明されておらず、その技術は後世に伝えられることなく消滅したとみなされている。

一方、BC2600年頃につくられたといわれる古代エジプトのピラミッドの建設では、石材と石材との接合に、石灰、焼き石膏、火山灰などに砂や泥などを混合し、これを水で練って大気中に放置・固化させることが行われていた。これらの接合材は、水中では固化しない性質であり、イフタや西安で発見された水硬性の接合材とは別種のものと考えられているが、「無機質の接合材」として見れば「セメント」と言える。

また、BC1000年頃のギリシャの遺跡からは消石灰 ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) と火山灰とを混合したモルタルが目地材として使われていたことが確認されている。

かくして人類は長い時間経過を通じ、天然に産する石膏や石灰石に熱を加えたものは、水を添加すると硬化することを体験的に会得するに至ったようである。紀元前200年頃のローマ時代に至って、積極的に天然の石膏や石灰石を焼成することが試みられ、焼石膏(半水石膏・ $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$) や生石灰 (CaO) が「窯

を使って製造されるようになった。焼石膏は水を吸って二水石膏になる過程で硬化する。生石灰は水と反応して消石灰 ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) となり、消石灰は空気中の二酸化炭素と反応して炭酸カルシウム (CaCO_3) になる。この変化(炭酸化)の過程で硬化する(気硬性、注1参照)。

ローマ時代もさらに下ると、「石灰と火山灰との混合物は、①水で硬化し、②水中でも崩壊しない」(水硬性、ポズラン反応=8.3.2参照) ことが知られて、道路・城壁・水道から住宅、神殿に至るまで、石材と組み合わされて盛んに利用された。

これら古代のセメントは「無機質の接合材」という定義からは「セメント」といえるが、「混ぜる材料を工夫して強い接合材料をつくった」ということであって、現代のセメントの特色である「原料を調合して焼成し、化学反応させた」ものではなく、今日我々が目にする「セメント」とは基本的に異なる材料だったといえる。このような「古代セメント」の品質では、今日に見るような「コンクリート建造物」は不可能である。

その後、中世を経て18世紀初期に至るまで約2千年もの長い間、セメントの歴史にほとんど進歩はみられず、それ故に、現代に残る中世ヨーロッパの建築物は、材料・工法とも古代ローマ時代とほぼ同様で、そこに基本的な変化は見られないといわれている。

2.2 近代セメントの発明^{1) 2) 3) 5)}

18世紀中頃、イギリスに産業革命が起こり、その大きな技術革新のうねりの中で近代セメントの発明を促す研究や発明が相次いだ。

1756年、ジョン・スミートン (John Smeaton、英) は、自国のエジストーン灯台(図2.1)の復旧工事を請け負った。海水に洗われる灯台の基礎の石組みの目地材には、それまで一般的に使われてきた消石灰モルタルよりも高い耐水性が要求された。彼はいろいろの石灰石を焼いて研究をした結果、「粘土分を多く含んだ不純な石灰石」(注2参照) を焼いて作った消石灰を使ったモルタルは、水中でも硬化し耐水性に優れていることを見出し、これを「水硬性の結合材」として発表した。

その当時までは、古代ローマのカトー (Marcus Porcius Cato, BC234-149) が書き残した「良い接合材

を作るためには、粘土分などを含まず、石灰分の純度の高い石灰石を焼くべし」との説が、文字通り金科玉条のごとく信じられてきていた。スミートンは、実験研究の結果、その「常識」を覆したのである。

スミートンは、著書の中で「自分の発明品はポルトランド石 (Portland Stone) に匹敵する強さと耐久性を持つ」と述べているが、材料についても材料名についても特許申請はしなかった。

スミートンから40年後の1796年、ジェームス・パーカー (James Parker, 英) は、粘土を含んだ石灰石を石灰窯で1100℃前後³⁾で焼いて粉碎し、水硬性セメントをつくつた。このセメントはのちに「ローマンセメント」と呼ばれ、テムズ川底のトンネル工事などに広く使われた。そしてこのセメントは、1810年代にはジェームス・フロスト (James Frost, 英) や、ルイ・ヴィカー (Louis Joseph Vicat, 仏) によって改良が加えられ、原料に粘土を含む石灰石 (マール) を使う製法だけでなく、石灰石と粘土をそれぞれ粉碎混合して焼成する方法 (現在のセメント製造法と同じ) も採用されるようになった。



図2.1 スミートンがつくったエジストーン灯台¹⁾

イギリスのれんが積み職人ジョセフ・アスピジン (Joseph Aspdin, 英) は、石灰石を粉碎して焼いた生石灰に一定の割合で粘土を混ぜ、水を加えて微粉碎し、それを乾燥させたものを再び堅窯 (図2.2) で焼成し粉碎してセメントをつくる方法を発明した。1824年10月、彼はこのセメントでつくった人造石材について「人造石製造法の改良」という標題で特許をとり、このセメントを「ポルトランドセメント」と名づけた (注3参照)。これにより、アスピジンは「近代セメントの発明者」といわれるようになるが、先行したスミートンやヴィカーなどの功績も大きかったといえる (7.4参照)。

アスピジンの特許には、今日のポルトランドセメントの定義からすると重要な二つのポイントが欠けてい

た。すなわち「石灰分と粘土分の比率の範囲」、「調査原料を半溶融するまで焼成すること」が書かれていなかった。このために、アスピジンをポルトランドセメントの発明者とするについて、のちに異議が提出されるようなことにもなった。この辺りについては、7.4.1で多少詳しく述べてある。

アスピジンの発明当初のポルトランドセメントの焼成温度は1200℃程度³⁾と推定され、生石灰と粘土分が反応して少量のビーライト ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ 固溶体) や空隙質物質などのセメント鉱物が生成していたであろうが、他に多量の生石灰が共存したと推定され、その品質はローマンセメントと大差はなかったようである。しかし、このアスピジンの発明がきっかけとなり、ポルトランドセメントの研究が急速に進むことになった。



図2.2 アスピジンのつくった堅窯¹⁾

ローマンセメント業者・ホワイト商会 (英) の技術者であったチャールズ・ジョンソン (Isaac Charles Jonson, 1811-1912) は、アスピジンが開発した新セメントを自社でも製造したいとの同商会の意を受けて、1844年、独自の実験と研究から、①石灰と粘土の間には良い品質のセメントを得る比率が存在すること、②原料が半溶融するまで焼成すること、③原料の十分な混和による均斉性が、均質な製品を得る基本条件であること、を明らかにし、今日のポルトランドセメント製造の基本原則を打ち立てた。

チャールズ・ジョンソンによるこのポルトランドセメントの製造条件「石灰石と粘土の混合物を1250℃以上の高温で半溶融するまで焼成する」によって、セメント鉱物にはアスピジン時代の「ビーライト+空隙質」に、新たに「エーライト ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ 固溶体)」が加わり、大幅な品質改良が達成された³⁾。(注: エーライト、ビーライト、空隙質については第7章で詳述している)

このように、ポルトランドセメントはイギリスで発

達し、1850年には四つの製造工場が操業を開始、1851年のロンドン博覧会ではその品質の優秀性が立証され、以後ローマンセメントに代って世界各国で工業規模で生産されるようになった。ポルトランドセメントの製造開始は、イギリス1825年、フランス1848年、ドイツ1850年、アメリカ1871年、日本は1875年となっている。

2.3 日本のセメント産業の発祥（19世紀後半）^{1) 2) 3) 6) 7) 8) 9) 10) 11) 12)}

2.3.1 官営セメント工場が始まり

日本にポルトランドセメントが輸入され、工事に使用されたのは、1861（文久元）年に幕府が長崎製鉄所をオランダ海軍士官ハルデス（H. Hardes）の指導で建設したとき、煉瓦の接着に使用したのが最初ではないかといわれている。その後、1866（慶応2）年に幕府が起工して明治政府に引き継がれた横須賀製鉄所（1872（明治5）年竣工、横須賀造船所と改称）、野島崎灯台（1869（明治2）年竣工）、城ヶ島灯台（1870（明治3）年竣工）などに少量の輸入セメントが使用された。当時の輸入セメントの価格は、1トン当たり50～60円（180kg入り1樽8円50銭、135kg入り1樽7円50銭）であった。当時と現在の白米の価格で比較すると、当時の輸入セメントは、現在の価格では1トン当たり50万円程度であったと推定される¹¹⁾。（2013年の普通ポルトランドセメントの価格は約1万円/tonである。）

その後、1871（明治4）年、横須賀造船所2号ドックの工事をする際に、ドック工事を指揮していた工部省造船頭^{ぞうせんのかみ}平岡通義（図2.3）は、セメントが築港・建築の用に供する材料の中で最も巨額であつたことから、国産化が急務であると痛感し、セメント製造を官業^{たいふ}で始めるべきことを工部大輔伊藤博文に建議した。



図2.3 平岡通義¹⁾

折しも、1872（明治5）年2月、銀座街に大火があり、当時の京橋区一帯の町々を焼きつくし、築地の工部省、築地本願寺、築地ホテルなども烏有^{うゆう}に帰した。政府は銀座街を不燃化のために煉瓦建築とすることと

し、銀座煉瓦街建築工事は大蔵省土木寮建築局が監督し、お雇い外国人のトーマス・ウォートルス（Thomas James Waters・英）によって計画が進められた。ウォートルスは、煉瓦とともにセメントの自給をはかり、彼の指導によって東京府下深川清住町仙台屋敷跡に「^{セメント}撰綿篤製造所」が建設されることとなった（図2.4）。1872（明治5）年7月に起工して、1873（明治6）年末にはセメント製造を開始したとされる。製造方法の詳細は明らかでないが、後述するように、宇都宮三郎が「湿式法に変更して成功した」とされていることから、「乾式」ないし「半乾式」であったかと推察される（乾式・半乾式については図3.2参照）。いずれにしても諸設備は不完全で、製造されたセメントは品質的に舶来品に及ばなかった。

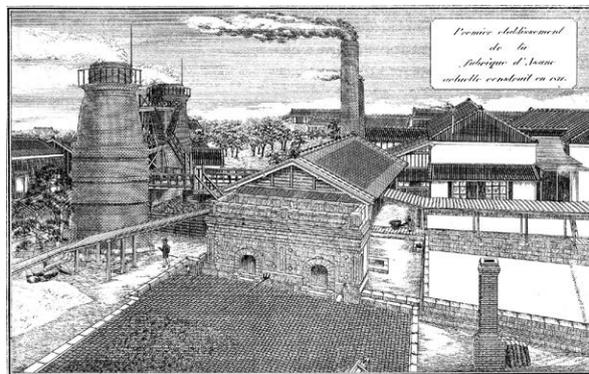


図2.4 官営^{セメント}撰綿篤製造所（東京・深川）⁷⁾

一方、工部省も、前記した平岡通義の建議を受けて、セメント製造の研究に着手した。平岡通義は、1872（明治5）年5月～翌年9月近代工業調査のため欧米に出張して帰朝した化学技術者・宇都宮三郎（図2.5、1834-1902）を配下に招き、東京・赤坂に開設した化学試験所でセメント製造の研究に取り組んだ。



図2.5 宇都宮三郎¹⁾

この間、深川の撰綿篤製造所は、1873（明治6）年11月に内務省所管となり、さらに翌年1月に工部省製作寮に移管された。ここで初めて大蔵・工部両省のセメント製造業務が工部省に統一され、宇都宮三郎がこれを監督することとなった。

宇都宮は深川工場で実験を重ねたが、満足できる品質のセメントは得られなかった。そこで、製造法を根本的に改め、新たに英仏流の「湿式法」(図 2.6 参照)を採用することを決断、官営深川工場の設備を全て取り壊し、新たな設備を導入することとした。1875(明治8)年に工場が完成し、5月19日に、初めて少量ながらわが国で初めて外国品に比べほとんど遜色のないセメントが製造された。その後、この日を記念して5月19日は「セメント記念日」とされ、この前後にセメント技術大会などの行事が開催されてきている。

(注) 宇都宮三郎による湿式法堅窯でのポルトランドセメントの製造成功は、上記のごとく明治8年5月19日と記録されているが、上野孝「セメント技術史補遺」¹²⁾によれば、ウォートルスの指導で明治6年に操業を開始した乾式法の堅窯でも、セメントが製造され、出荷がされていたことが報告されている。この辺りの史料考察については、同書 p.5~7 に詳しい記述がある。

セメントの製造に成功した宇都宮は、その年(1875(明治8)年)から翌年にかけて再び米英2国を視察、帰国すると直ちに工場設備の改善・増強に着手した。結果として、明治10年代に入ると生産量も徐々に増加していった。この時期は、政府主導のもとに経済・産業の近代化が急速に進められており、鉄道、港湾、軍施設、官庁、大学、工場などの建設が盛んに行われ、セメント需要が増大していた。

宇都宮の手になる官営深川工場の生産設備は次の通りであった。

セメント焼窯2基(堅窯、高さ14.5m、直径最上部1.2m・中央部3.6m)、乾燥場1棟、粉末場1棟、沈殿池2か所、攪擾池^{かくじょう}1か所。

これらの製造設備を用いて宇都宮が採用した「湿式法」の工程を図2.6に示す。

すなわち、消石灰と深川付近の川泥を攪擾池と呼ばれる池において一定割合で混ぜ、水を加えて攪拌し、粗粒や爽雑物を除去して、微粒の混じった泥水を沈殿池に送って沈殿させる。上澄み水を抜いた後の濃い泥

水(スラリー)を汲み上げて乾燥し、塊状となった消石灰と粘土との混合物を石炭とともに「徳利窯」と呼ばれる煉瓦造の堅窯に装填して焼成し、焼塊(クリンカー)を得ていた。その堅窯から取り出した焼塊を、粉碎して風化倉で約3カ月風化(注4参照)した後、セメント製品としていた。しかしこの方式は、原料の粉碎機は不要であるものの、多量の水を要し、また工程も沈殿・乾燥工程を含むため多くの日数と労力を要した。当時はまだ硬い石灰石を粉碎する適当な粉碎機がなく、仮焼した石灰石を水と混ぜ、微粒の石灰成分を得る方法をとっていたと思われる。

2.3.2 「お雇い外国人」に頼らず、日本人の自身の手で技術習得

明治期、わが国の多くの産業が、いわゆる「お雇い外国人」と呼ばれる技師を招いて、設備の建設から操業技術まで指導・伝授を受けて立上ったと伝えられているが、セメント産業については、「お雇い外国人を使わず、自分たち自身の精進・努力で欧米の技術を習得して立ち上げた」という事実を特記しておきたい。

銀座煉瓦街建築工事を請け負って、そこで使うセメントを作るために、深川に最初の「^{セメント}撰綿篤製造所」の建設を指導したウォートルスは建築技術者であって、セメント製造の経験はなく、従って彼の指導で建設された当初の工場で作られたセメントは、品質的に不十分なものであった。宇都宮三郎が、自分自身の欧米出張での見聞、そして自らの実験と創意工夫によって、深川工場を全面的に建替えて、ようやく市販できるセメントが製造できるようになったと伝えられる。

我が国のセメント工業の創業に尽くした「平岡通義」「宇都宮三郎」、そしてセメント製造を「産業」に育て上げた「笠井順八」「浅野総一郎」(次項参照)については、杉下捨三著「日本のセメント」(ポプラ社、1962)¹³⁾に詳しい記述がある。

2.3.3 民営の産業として発展

1881(明治14)年、現在の山口県山陽小野田市に、わが国初の民営セメント工場が建設され、1883(明

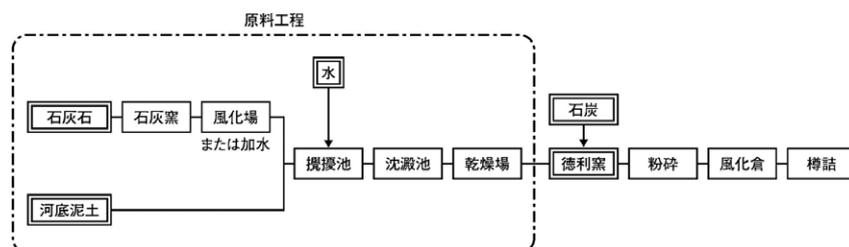


図 2.6 堅窯・湿式法によるセメント製造工程⁷⁾

治16)年から操業を開始した。のちの「小野田セメント」の誕生である。

この起業の中心になったのが、旧・長州藩士の笠井順八(図2.7、1835-1919)である。笠井順八は、1875(明治8)年に地元の山口県の倉庫建設に使用されたセメントを目のあたりにし、水と混ぜた粉末が硬化して石材を強固に結合させることに強い関心を持ったといわれている。その後、笠井は、平岡通義が1879(明治12)年山口県に帰省した際に話した官営工場でのセメント製造技術を伝え聞き、「廃藩置県で禄を失った長州藩士の救済のために」セメント事業を立ち上げることを考えるに至ったという。翌年、知人の荒川佐



図2.7 笠井順八¹⁴⁾

兵衛とともに、山口県産の大理石と泥土を持って上京、深川工作分局(以前の摂綿篤製造所)で宇都宮三郎の指導を得るに至り、セメント事業を立ち上げる意を固めたと伝えられる。笠井順八が小野田の地を選定した理由は、主要原燃料である石炭・石灰石・泥土が近くで得られること、海に面して製品の搬出に便利であることに加え、この地が埋め立てによる新開地で地代が低廉だったことが挙げられている。図2.8に1883(明治16)年建設の小野田セメント工場の徳利窯(現存・国指定重要文化財)、図2.9に1890(明治23)年頃の同工場全景写真を示す。



図2.8 太平洋セメント(株)小野田工場に残る豎窯(徳利窯)⁷⁾

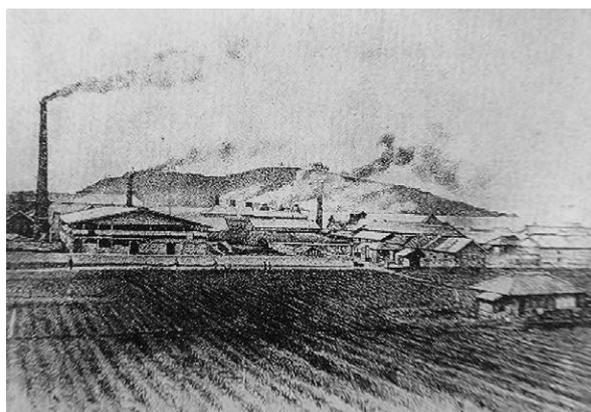


図2.9 小野田セメント工場(1890(明治23)年頃)⁷⁾

一方、深川の官営摂綿篤製造所は、1884(明治17)年に、同工場に石炭を納入していた商人であり事業家の浅野総一郎(図2.10、1848-1931)に払い下げられ、その後「浅野セメント」として発展していった。



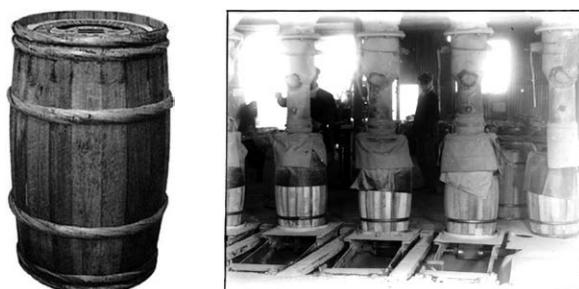
図2.10 浅野総一郎⁹⁾

これら2社の誕生が契機となり、日本のセメント産業は「民営事業」として今日まで発展を続けてきている。小野田セメントと浅野セメント(第二次大戦後に「日本セメント」と社名変更)、それに「秩父セメント」を加えた3社が1990年代に合併して現在の「太平洋セメント」となり、今日もセメント事業を基幹事業として継続している。

このような経緯を経て民営でのセメントの生産が始まったが、政府の財政難やセメントに対する認識不足から、需要に思ったほどの伸びはみられなかった。当時の生産量は、深川・小野田両工場合わせても月産約25トン(1,400樽→下注参照)程度だったといわれている。しかし、1891(明治24)年に起きた濃尾大地震によりコンクリート構造物の耐震性が証明され、また日清(1894~95年)・日露(1904~05年)戦争の勝利によってセメント需要が高まり、生産量も大きく伸びることになった。セメント会社も1897(明治30)年には15社に増え、また原料を焼成する窯も従来の「豎窯」に代わる「回転窯」(図3.5)が1903(明治36)年にアメリカから輸入され、これによって品質・生産量とも飛躍的に向上した。明治20(1887)

年代以降の我が国セメント製造技術の進歩については、次章・第3章で詳述する。

(注) 明治時代のセメント出荷は「樽詰め」で(4.12.1参照)、小野田・浅野工場創業当時(1883年頃)の1樽は400ポンド=約181kgであった。図2.11(1)に「セメント樽」、(2)に樽詰め作業の様子を示す。



(1) セメント樽¹⁾

(2) 樽詰め作業¹⁵⁾

図2.11 明治時代のセメント出荷用木樽

2.4 コンクリート技術の発展¹⁾

「コンクリート技術」は、本調査報告の対象外である。しかし、セメントは、そのほとんどがコンクリートの構成材料として使われており、いわばセメントはコンクリートという形になってはじめて世の中の役に立っているともいえる。そのようなことから、近代セメントが発明された後のコンクリート技術の発展について、略記しておく。

アスブジンによって発明され、ジョンソンによって改良されたポルトランドセメントは、品質の優秀性からローマンセメントをしのぐようになり、使われ方も、石材と石材の接合材(モルタル)としてだけでなく、コンクリートだけで作る構造物へと広がっていった。しかし、コンクリートだけでは引張り方向の力(引張強度)に弱い(もろい)ことがわかり、この弱さを補強するための研究が1850年代にフランスで始められた。

1867年、植木職人だったジョセフ・モニエ(Joseph Monier、仏)は、モルタルの中に針金を網状に入れ、薄くて丈夫な植木鉢をつくることに成功した。これは、モルタルの弱点を針金で補ったもので、のちの構造物に大きな影響を与える「鉄筋コンクリート」の誕生となった。以後、モニエは、管・貯水槽・床版などにこれを応用し、1875年には長さ156m、幅42mの鉄筋コンクリート橋を建設した。

これを契機として、欧米では1900年頃までに建築物・橋・トンネル・ダムなど鉄筋コンクリートによる構造物が作られ、「鉄筋コンクリート時代」の幕が

開かれた。

コンクリートの引張強度をさらに高める「プレストレストコンクリート」の研究は、1886年P.H. ジャクソン(P.H. Jackson、米)によって行われた。これは、コンクリートの中に入れた鋼材を、コンクリートの両端で緊張し固定させるもので、弾性のある強いコンクリートを作ることができる。その後、この方法は各国の多くの研究者によって改良され、1928年、ユージェーヌ・フレシネ(Eugene Freycinet、仏)は、コンクリートと緊張材の関係を理論的に明らかにするとともに、多くのコンクリート製品や構造物に応用し、プレストレストコンクリート技術の基礎を確立した。

日本に鉄筋コンクリートの技術が導入されたのは、1895(明治28)年頃だといわれているが、この工法による最古の土木構造物は1903(明治36)年に京都・琵琶湖疏水路上に架けられた橋(図2.12、長さ73m)で、現存している。建築構造物は1904(明治37)年に建てられた長崎県・佐世保重工業のポンプ小屋である、といわれている。



図2.12 琵琶湖疏水に残る日本最初のコンクリート橋¹⁾

プレストレストコンクリートの日本への紹介は1939(昭和14)年のことで、実用化は1949(昭和24)年頃に鉄道のまくら木へ、そして1951(昭和26)年頃には東京駅のプラットホームに応用された。

鉄筋コンクリートとプレストレストコンクリートの発明は、セメントの品質向上と相まって、その後のコンクリート構造物を「高く・長く・広く・深く・強く・軽く」する原動力となった、といえよう。

また、近年におけるコンクリートの施工性向上や高性能化に貢献した材料としてコンクリート用混和剤の存在がある。混和剤は、AE剤(空気連行剤)が1930年代にアメリカで発明・実用化後、1940年代後半に日本に導入され、ワーカビリティ(硬化前の作業性)やブリーディング(打設後の浮き水)性状の改善、耐

凍害性の向上のための活用が始まった。その後、コンクリートポンプによる施工が拡大するなかで AE 剤と減水剤の機能を兼ね備えた AE 減水剤や流動化剤、これらの性能をさらに向上した高性能 AE 減水剤が 1990 年代までの間につぎつぎと出現した。これにより最近では、圧縮強度 $100\text{N}/\text{mm}^2$ を超えるような超高強度コンクリートの製造が可能になり、コンクリートによる超高層建築の可能性を一段と拡げている。

このほかにも膨張剤、水中不分離性コンクリートなど、特殊混和剤を含め多種多様な性能をコンクリートに付与する混和剤が登場し、今後のコンクリート技術の発展に必要な不可欠な材料のひとつになっている。(第 8 章注 2, 3, 4 参照)

注 1 : 気硬性と水硬性

水と化学反応して固まる性質を水硬性、それに対して空気(主に炭酸ガス)と反応して固まる性質を気硬性と呼んでいる。

注 2 : 粘土を含んだ石灰石

日本で産出する石灰石は、炭酸カルシウム (CaCO_3) の純度が高くしかも硬い岩石であることがほとんどであるが、欧州や米国では、軟らかい石灰石(チョーク、chalk)や、かなりの粘土分を含んだ泥灰岩(マール・Marl)などが産出する。マールは、そのまま焼けば水硬性材料が得られ、セメント岩(cement rock)と呼ばれることもある。ローマンセメントは、このマールを原料にして盛んに製造されたようである。現在でも、若干の成分調整をすることでセメント原料として利用されている。

また、チョークは粉碎が容易であり、粉碎機が十分に発達していなかったセメント製造初期の頃の原料調合に、とりわけ役に立った。

注 3 : ポルトランドセメントの名称の由来

アスプジンとは、作ったセメントの硬化した色や硬さなどが、当時英国で建築用材としてさかんに使われていたポルトランド岬から産出される石材(ポルトランド石)に似ていたため、このセメントをポルトランドセメントと名付けた。

注 4 : 風化

セメントを床面に広げ、空気中の二酸化炭素を吸収させて、セメント粉末中の遊離石灰(free lime、P.23 注 4 参照)を炭酸化、不活性化させることをいう。

参考文献

- 1) セメント協会, セメントの常識, pp.64-67, 2013.
- 2) 藤井光蔵, ポルトランドセメント発達の沿革 (1) - (18), セメント・コンクリート, No. 105-130, 1955-1957.
- 3) 内川 浩, セメントの材料技術の社会史 (1), 材料技術, Vol. 12, No. 9, pp. 23-28, 1994.
- 4) 早川光敬, 古代セメント・コンクリート, コンクリート工学, Vol. 40, No. 9, pp. 8-10, 2002.
- 5) 名和豊春, 近代ポルトランドセメントの工業化, コンクリート工学, Vol. 40, No. 9, pp. 11-16, 2002.
- 6) 台信富寿, 明治・大正期におけるセメント製造技術の変遷, 山口大学博士論文, 2007.
- 7) 台信富寿, 明治・大正期におけるセメント製造技術の変遷, CEM's (太平洋セメント広報誌), No. 37, pp. 2-5, 2008.
- 8) 小野田セメント株式会社, 小野田セメント百年史, 1981.
- 9) 日本セメント株式会社, 日本セメント百年史, 1983.
- 10) 太平洋セメントホームページ、セメントはじめて物語, 2015年9月.
- 11) 松里広昭, 近代ポルトランドセメントの工業化, コンクリート工学, Vol. 40, No. 9, pp. 73-77, 2002.
- 12) 上野 孝, セメント技術史補遺, 小野田セメント, 1980.
- 13) 杉下捨三, 日本のセメント, ポプラ社, 1962.
- 14) 小野田セメント製造株式会社, 創業五十年史, 1931.
- 15) 太平洋セメント株式会社提供

3 | 明治・大正期の日本のセメント製造技術

前章で、平岡通義・宇都宮三郎らの努力の結果、日本人の手でセメントが製造できるようになり、それを受けて、笠井順八や浅野総一郎らの手でセメントが「事業」として育ち始めたことを述べた。明治20年代に入ると、他産業の勃興につれてセメント需要も増大し、セメント会社の創業が各地で見られ、日本のセメント産業の基盤が形成されてきた。

この章では、明治20(1887)年代以降、大正期(～1926年)に至る時期のセメント製造技術の発展について述べる。この時期のセメント製造上の革新技術として、以下の3点がとりわけ重要である。これらはいずれも欧米からの技術・装置の導入であった。

①焼成工程での焼成窯の「堅窯」から「回転窯」への転換が進められた。

明治時代は堅窯(徳利窯)が主流、大正時代になると回転窯が急速に普及する。

②仕上工程におけるセメントの凝結硬化調節材としての「石膏添加」が開始された。

明治時代は風化で凝結を調節、大正時代になって石膏添加が急速に普及する。

③セメント規格(日本最初の工業規格)が制定された。

3.1 明治・大正期のセメント産業の状況^{1) 2) 3)}

明治初期に始まった我が国のセメント生産は、その後、日本の国力の伸長に伴って生産量も増大していった。この期間中の国内セメント生産量および輸出入量を図3.1に示す。

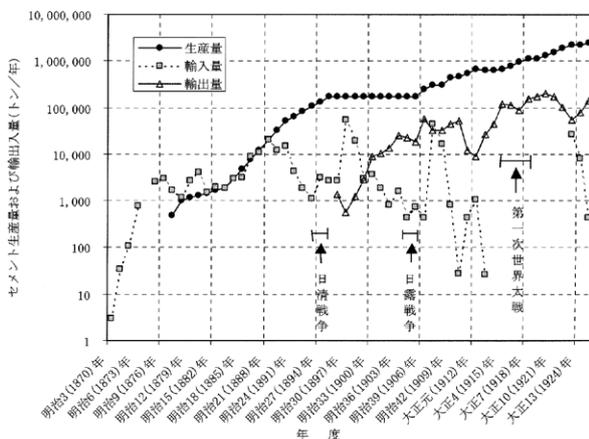


図3.1 明治・大正期の国内セメント生産量と輸出入量推移¹⁾(縦軸は対数目盛)

図に示されるように、1881(明治14)年頃までは輸入量が国内生産を大幅に上回っており、官営深川セメント工場のセメントでは、国内需要の一部を充足するに過ぎなかった。その後、国内生産量は明治21(1888)年頃には約2万トン程度にまで増加しているものの、輸入量もほぼ同量であり、国内需要の約半分をまかなうに過ぎなかった。

しかし、1889(明治22)年以降になると、国内セメント企業数の増加により、生産量は明治21年比で、5年後の1893(明治26)年には5倍の約10万トン、23年後の明治期末には30倍の約60万トンにと飛躍的に増加した。結果的に輸入量は数千トン以下となり、国内生産量の1%以下まで低下した。しかし一方でセメント企業は乱立気味となり、生産量の増加が必要を上回る時期も発生した。販路開拓・確保のために、日清戦争後は輸出の動きも出てきたが、その量は国内生産量の1割程度までであった。

企業乱立により、個々の会社の経営状況は安定せず、会社の興亡常無きというような業界状況であった。明治期および大正期に設立されたセメント会社は51社にのぼったが、そのうち大正期末まで存続したのはわずか18社に過ぎなかった。

このようなセメント会社のめまぐるしいまでの興亡の理由としては、以下のような要因が考えられる：

- ①セメントの主要原料である石灰石の鉱床が全国的に分布し、燃料も国産の石炭で、原燃料が国内で容易に調達できた。
- ②当時のセメント製造設備は比較的簡単で、容易に建設ができた。
- ③セメントはその性質上長期保存ができないので、不況・過剰生産となるとダンピングが横行し、価格の極端な下落に見舞われた。

結果的に工場建設から数年で破綻してしまうケースも少なくはなかった。

3.2 堅窯時代(明治末・1920年頃まで)の製造技術^{1) 2) 4) 5) 6)}

官営セメント工場で始まった我が国のセメント製造は、明治時代のほぼ全期間を通じて「堅窯によるセメント製造」であった。本節では、明治末に回転窯が外国から輸入されて次第に普及するまでの期間の、堅窯によるセメント製造技術について述べる。

3.2.1 堅窯の原料工程：湿式法から、粉砕機の発達で乾式法へ

セメント原料の調製にあたっては、セメントの焼成反応が「固相反応」であることから、

- ①石灰石・粘土類の配合比率を適正にコントロールして、セメントの化学成分をできるだけ一定に保つこと（化学成分）
- ②原料粉末をできるだけ細かくすること（粉末度）
- ③石灰石や粘土類の粉末ができるだけ均等に分散・分布していること（均斉度）

が非常に重要である。明治期前半のセメント産業草創期には、粉砕機などの機械装置がまだ十分発達しておらず、先人たちは上記①②③を少しでも改善するために、さまざまな工夫を行っていた。

1873（明治6）年に建設された我が国最初の官営セメント工場を引き継いだ宇都宮三郎は、従来の設備を全面改修し、図2.6に示した「湿式法」と呼ばれる製造方式を採用して、1875（明治8）年、日本で初めて信頼できる品質のポルトランドセメントの製造に成功した（2.3.1参照）。この時代に湿式法を採用した最大の理由は、石灰石を十分に粉砕できる粉砕機がまだ開発されていなかったことにあると見られる。そのために、石灰石を仮焼して生石灰にし、それに水を加えて消石灰にするという手間をかけて、石灰原料を微細化していたのである。

明治初期のセメント工場は、東京・深川の官営セメント工場を模倣することから出発したため、総て「湿式法」を採用していた。しかし、湿式法は経済性や生産効率が低いため、やがて「乾式法」へと移行していった。乾式法は、明治21（1888）年、小野田セメントが機械設備一式をドイツから輸入して採用したのが最初であり、漸次他社に普及していった。

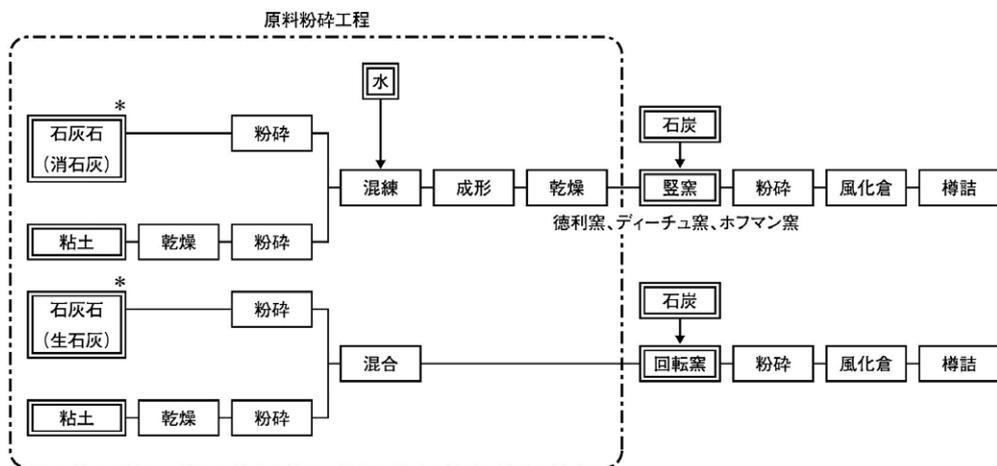
乾式法では、堅窯焼成の場合は図3.2の上段に示すように、まず粘土を乾燥し、石灰石とともに荒割機、中砕機および磨機（注1参照）の三つの機械に順次かけて粉末とし、それに水を加えつつ混和機で練り、練り上げたものを型切機へ送って煉瓦大の形に切った。これを乾燥後、堅窯に装填して焼成した。なお、3.3で述べる回転窯の場合には原料の成形は必要なく、同図下段に示すように、粉砕・調合後、直ちに窯へ送入して焼成した。

図3.2の乾式法と図2.6の湿式法を比較して見ると明らかなように、乾式法では原料に「粉砕」の工程が入っている。前述のとおり、堅窯時代の湿式法は「硬い石灰石を粉砕できる適当な粉砕機がまだなかった」ための代替策であった。粉砕機の発達によって湿式法から乾式法への移行が実現した。

乾式法としては、石灰原料として石灰石を用いる「純乾式法」が一般的であるが、石灰石の代替として消石灰を用いる「半乾式法」、同じく石灰石の代りに生石灰粉末を用いる「生石灰焼成法^{きばい}」の3方式があった。

生石灰焼成法は、石灰石を石灰窯（堅窯）で別に仮焼（脱炭酸）した後、粘土類と調合する方式で、明治後期に浅野セメントが特許を取得し、同社の回転窯に採用した方式であり、堅窯での採用はなかった。生石灰焼成法は、1980年代に日本の技術として開花するNSPキルンの先駆け技術として重要であり、この点については4.2.5及び5.2で詳述する。

乾式法の時代になって、原料粉砕では1899（明治32）年に浅野セメントが導入したチューブミル（図3.3、ボールミルともいう。注2参照）、原料調合では同年に小野田セメントが採用した「自動連結天秤」が新機軸となり、その後、各種粉末篩別機械の採用とともに、原料粉末度の向上、均斉度の改善が図られた。



*石灰原料として石灰石を使用する場合を純乾式法、消石灰使用の場合を半乾式法、生石灰使用の場合を生石灰焼成法という

図3.2 乾式法（堅窯・回転窯）によるセメント製造工程²⁾

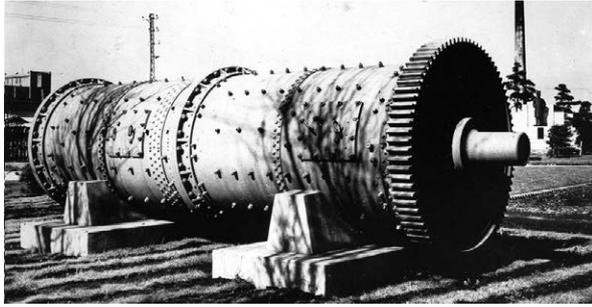


図 3.3 我が国最初のチューブミル⁷⁾

3.2.2 窯 (徳利窯) の焼成工程

(1) 窯の焼成方法

図 2.8 は、太平洋セメント小野田工場に保存されている徳利窯で、これが明治期のセメント焼成窯の主流をなしていた形式である。煉瓦造でその形が徳利に似ているところから名づけられたもので、外国でも「Bottle Kiln」と称され、高さは 15~20m 程度のものが多かったようである。上部は煙突で、下部がいわゆる焼成室であるが、火格子の上に松の枯枝等の「焼き付け」を置き、その上に燃料となる「石炭」を煉瓦約 2 枚分、さらにその上に「煉瓦大に成形した原料」をおよそ煉瓦 5 枚分の厚みにならべ、これを交互に積んで火床上の焼き付けに火を入れる。火を入れておよそ 5 日程度で燃料が燃え尽きると、下部の火格子のところから焼成されたクリンカー（焼塊）を取り出し、これを「良品」と生焼けの「不良品」に選り分け、良品を粉砕してセメントとする。すなわち 1 回の焼成ごとに火入れ、火止めを繰り返す非連続式（バッチ式）の焼成窯である。その生産能力は 22~30t/cycle・kiln

(130~180 樽 /cycle・kiln) が多かったようである。

(注) 当時の表記は樽数であり、1 樽の正味重量は時期によって変化している（巻末年表参照）。ここでは 1 樽を 380 ポンド = 172kg として換算した。

(2) 明治期のセメント焼成窯の型式別設置基数

我が国のセメント焼成窯としては、明治期にはこれまで述べてきたように、徳利窯（窯）が主流であったが、明治後期に回転窯が欧米から導入されると、急速に普及し、大正時代以降は回転窯が主流となった。他に、明治期には、ディーチュ窯（窯）やホフマン式輪窯も一部の工場で採用された。

明治末から大正初年における我が国の焼成窯の設置状況を、履歴が判明しているセメント会社 12 社の 17 工場についてまとめて、表 3.1 に示す。

同表に示すように、大正初年において、徳利窯数は 17 工場で 158 基にもものぼり、焼成窯数の約 8 割を占めている。セメント業界は 1904~1905（明治 37-38）年の日露戦争を契機として急速な拡大期を迎え、セメントの需要は拡大する一方であったのに対し、窯の大型化はその形状ゆえに困難であった。そのため、窯数の増加によって対応せざるを得なかったと考えられ、愛知セメント東熱田工場のように 49 基も設置した例がある。表からわかるように、窯の主流は徳利窯であり、ディーチュ窯とホフマン窯はごく少数であった。

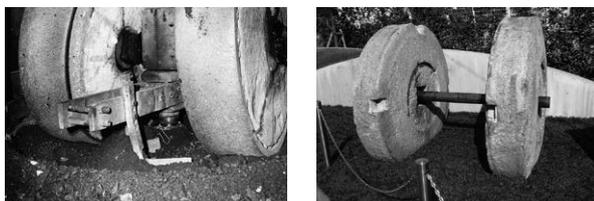
表 3.1 明治期のセメント焼成窯設置基数（12 社 17 工場、1913（大正 2）年現在）²⁾

社名・工場名	徳利窯	ディーチュ窯	ホフマン窯	回転窯
官営深川工作分局	(2→8)*	—	—	—
浅野セメント	深川工場	14	—	4
	門司工場	8	—	5
小野田セメント	小野田工場	12	16	1
	大連工場	—	—	2
三河セメント	二ツ坂工場	1	—	—
	田原工場	9	—	—
中央セメント	川口工場	4	2	—
	黒崎工場	17	—	—
愛知セメント	白鳥工場	4	—	—
	東熱田工場	49	—	—
北海道セメント	北海道工場	—	—	3
桜セメント	大阪工場	20	—	—
(旧)日本セメント	八代工場	—	—	2
土佐セメント	土佐工場	不明	—	3
東亜セメント	尼崎工場	20	—	—
盤城セメント	四倉工場	—	—	2
合計	158	18	4	21

*官営深川工作分局は当初の2基から8基に増設された後、浅野セメント深川工場に引き継がれたので同工場の14基に重複する

3.2.3 豎窯時代の仕上げ工程：「風化」による仕上げ

徳利窯では、焼成が終ると下部の火床を外し、焼塊（クリンカー）を取出した。徳利窯は焼成が不均齊であったため、窯から取出した焼塊を選別しなければならなかった。焼塊粉碎には蒸気力で回転するフレットミル（図 3.4、注 3 参照）を使用した。初めは、1 時間当たり 250kg（1 樽半）程度の製品を得るにすぎなかったが、熟練するにしたがって 1 時間 500kg を粉碎することができるようになった。粉碎されたセメントは回転型六角篩でふるい分け、精粉はセメント風化倉へ送り、残滓（篩上残分）はフレットミルへ送り返して再び焼塊とともに粉碎した。



(1) クリンカー粉碎中の様子

(2) 東京都江東区深川の太平洋セメント敷地内に保存されているフレットミルのローラー

図 3.4 フレットミル⁷⁾

このようにして得られた精粉も、十分「風化」しなければ使用に耐えないので、細心の注意を払って風化させた。風化の方法としては、風化場を設け、セメントを 0.1~1m 層に散布し、時々「返し」を行って風化を促進させた。風化期間は 4 週間位が普通で、長い場合は半年以上のこともあった。

精粉として得られたセメントをこのように風化させる必要があったのは、以下の理由による。

- ① 豎窯の焼成過程では、遊離石灰（フリーライム・注 4 参照）を生ずることが多く、このまま使用すれば硬化後に亀裂を生ずるおそれがある。
- ② セメントに水を加えた時の凝結時間（注 5 参照）を適切な範囲に調節する。

②の問題は後述するように 1890 年代（明治 20 年代）に始まる「石膏の添加」で解決されたが、①の問題については、回転窯焼成が普及して遊離石灰が僅少なセメントが作れるようになる大正期後半までは、セメントを風化させることで対応することが一般的であった。

風化が完了し、石灰分が安定した製品は、風化倉内で樽詰めした（図 2.11）。樽詰めも初めは手詰めによっていた。

なお、焼塊粉碎でも明治末頃からチューブミル（図

3.3) が使用されはじめ、粉碎媒体として鋼球が使用されるようになり、粉碎効率と品質向上改善が進んだ。

3.3 回転窯時代の到来：高品質のセメントを大量生産する大革命技術^{2) 4) 5) 6)}

セメント製造の 4 工程（原料・焼成・仕上・出荷）のうち、焼塊（クリンカー）を得る「焼成工程」がコスト面・品質面から最も重要であり、特に焼成窯の形態はセメントの品質や製造原価に直接的に影響を及ぼすことから、近代セメント産業誕生以来、改良が継続して行われてきた。

セメント焼成は全体としては固相反応であり、実際には高温下で部分的に液相が生じ、その液相を媒介として、CaO と SiO₂ の反応が進む。固相中では、液相や気相中と比べるとはるかに物質移動が難しく、従って化学反応が進みにくい。豎窯焼成では、原料は煉瓦状に成形されているので、焼成中の外部からの物理的な力による物質移動はほとんどない状態であり、固体粒子間の化学反応は進みにくい。一方、19 世紀末に米国で開発された回転窯は、窯内に送入された粉末原料を回転力によって混合させながら焼結させるので、固相反応の上からははるかに合理的な方式である。

セメント製造への回転窯の採用は、1 基当りの焼成能力、焼成効率、品質の均一性などの面で、豎窯に対してはるかに優位であり、その後の回転窯焼成技術の発達とともに、安価かつ高品質のセメントが大量生産されるようになり、20 世紀の「コンクリート文明」が開花することになった。

なお、回転窯導入で「高品質セメントの大量生産」ができるようになった背景には、前後の原料工程・仕上げ工程の技術・設備が並行して発達していたことを忘れてはならない。チューブミルの導入などはとりわけ重要である。

3.3.1 回転窯の導入^{2) 4) 5) 6) 7) 8)}

回転窯はすでに 1881 年には鉍石の焙焼に用いられていたが、1885（明治 18）年、英国のフレデリック・ランサム（Frederick Ransom）が、これをセメントの焼成に利用する特許を得た。試験回転窯で試みた後、英国エセックス州グレー工場で、直径 18 インチ（約 46cm）、長さ 15 フィート（約 4.6m）の試験窯で工業的試験を行い、さらにキルン径 48 インチ（約 1.22m）、長さ 30 フィート（約 9.1m）の回転窯までスケールアップして、実験的には成功した。しかし、当時の英国のセメント工場は湿式製造法であり、この湿式調合物を回転窯で焼成する適当な手段が見つけられ

なかったことと、多量の燃料を要するためクリンカーと煉瓦が溶着するなどの問題があって、実用化には至らなかったようである。

このアイデアを拾い上げてさらに工夫を重ね、工業的に成功させたのが米国・アトラスセメント社のニューヨーク州ロンドート工場で、1890（明治23）年頃、直径50インチ（約1.27m）、長さ50フィート（約15.2m）のキルンを設備して生産を開始したと伝えられる⁸⁾。

我が国最初の回転窯は、1903（明治36）年、浅野セメントが米国から輸入して深川工場に据え付けた回転窯で、直径6フィート（約1.83m）、長さ60フィート（約18.29m）であった（図3.5）。これは型式上からは、現在使われている巨大回転窯と同じものであり、煉瓦を内張りした鋼製の円筒に約3%の傾斜を持たせて回転させ、傾斜の高い方から原料粉末を送入し、低い方から燃料を吹き込んで焼成する（向流式焼成）。

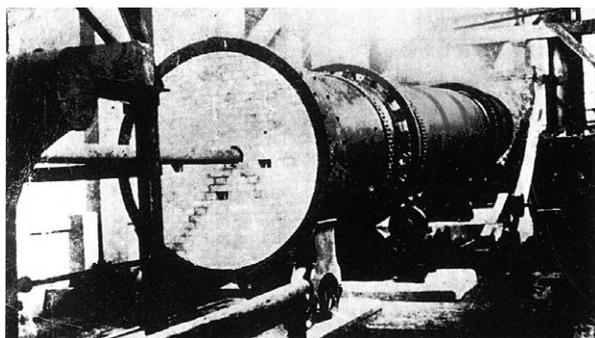


図3.5 我が国最初の回転窯（1903年）²⁾

この国内第1号の回転窯は、焼成効率、能力、品質の均一性の面で、堅窯（ディーチュ窯、ホフマン窯を含め）に対する優位性が、同業他社にも次第に認められるところとなり、新增設される焼成窯は回転窯になっていった。回転窯の大型化も進んだようで、10年後（大正2年）に建設された小野田セメント工場の回転窯は、直径2.5m、長さ60mと記録されている（図3.6）。



図3.6 図3.5から10年後に建設された回転窯の例²⁾

浅野セメントの回転窯導入を先導したのは同社の坂内冬蔵技師で、同技師は後述する「石膏添加」の技術導入にも先鞭をつけ、また「生灰焼成法」の特許を取得するなど、明治期の浅野セメント、さらには日本のセメント製造技術の先達的な役割を果たした技術者といえる。

3.3.2 回転窯の普及

セメント工場の履歴が判明している8社14工場（官営セメント工場を含む）について、1917（大正6）年までの原料工程と焼成窯の変遷をまとめると図3.7のようになる。

官営セメント工場をモデルにして湿式法の徳利窯で始まった我が国のセメント製造方式は、明治30（1897）年代から順次乾式法堅窯に転換し、さらに明治40（1907）年以降、回転窯への転換が進んだ。もっとも、この時代の回転窯は熱効率がきわめて悪く、コスト面で堅窯との間に決定的な差が現れたとは言い難く、回転窯時代の本格的な幕開けは余熱利用装置（余熱発電）の導入（1920（大正9）年、4.2.2参照）を待たねばならなかった。

1924（大正13）年頃には、日本ポルトランドセメント同業会加盟会員20社（32工場）のうち、回転窯のみの工場が29工場、徳利窯と回転窯を併設した工場が2工場、徳利窯のみを設置した工場は1工場（休止中）となり、徳利窯の時代は大正時代の末で終わったといえる。回転窯焼成については、4章以降で詳しく述べる。

3.4 石膏の添加：「ポルトランドセメント」「回転窯」と並ぶ大発明の日本への導入^{2) 5)}

現在のポルトランドセメント中には3%程度の石膏が配合されており、これによってセメントの凝結時間が、施工時に使いやすい時間範囲になるように調節されている。アスプジンのポルトランドセメント発明（1824年）当時は、焼塊をそのまま粉砕しただけだったので、製品のセメントは非常に急結性であった。そのセメントを散布風化することによって凝結を緩和するようになったのは、英国では1800年代半ばであり、米国では「散布風化による凝結調節法」が1870年に特許になっている。我が国でも、明治期から大正期後半までは、工場に風化場を設けて散布風化を行っていたことは、3.2.3で述べた。

セメントの凝結の安定性を得るために石膏を混ぜることが、欧米のセメント業界で「発明」された経緯については、7.5.1に詳細を記す。

社名	年月		M6	M11	M16	M21	M26	M31	M36	M41	T元	T6	備考
	(1873)	(1878)	(1883)	(1888)	(1893)	(1898)	(1903)	(1908)	(1912)	(1917)			
(官営)深川工作分局	M8	(湿式)德利窯	浅野総一郎に払い下げ(浅野セメントへ)										M5 セメント製造所設置
浅野セメント			(湿式)德利窯										M39 德利窯廃止
深川工場			M17				M36	(乾式)回転窯					
門司工場					M26	(乾式)德利窯				M41	回転窯		M43 德利窯廃止 M41 回転窯設置
小野田セメント			M16	(湿式)德利窯	(乾式)德利窯								T2 德利窯廃止
小野田工場			M22	輪窯(ホフマン窯)	(乾式)ディーチュ窯								T11 ディーチュ窯廃止
大連工場				M22~23使用		M32					T2	回転窯	T2 回転窯設置
三河セメント			M16	(湿式)德利窯	M22工場廃止					M42	(乾式)回転窯		
ニツ坂工場													
田原工場				M22	(湿式)德利窯								T13 回転窯設置・德利窯廃止
大阪川口セメント製造所 (中央セメント)川口工場			M17	(湿式)德利窯								M44工場廃止	
黒崎工場					M29	(乾式)ディーチュ窯							
愛知セメント				M20	(湿式)德利窯		M32	工場廃止					
白鳥工場													
東熱田工場						M30	(乾式)德利窯						T9 回転窯設置・德利窯廃止
北海道セメント (浅野セメント)北海道工場					M25	(乾式)ホフマン窯				M42	(乾式)回転窯		T6 ホフマン窯廃止
桜セメント									M41	(乾式)德利窯			T8 工場廃止
大阪工場											T3	回転窯	
徳浦工場												T6	回転窯

M:明治時代 T:大正時代

図 3.7 明治・大正期における原料製造方式と焼成窯の変遷²⁾

この技術の我が国への導入は、浅野セメントの坂内冬蔵技師が、1888(明治21)年ドイツ留学から帰国後、同社深川工場で使用を開始したのが最初である。しかし、日本でも当時は「ませ物」として、一部需要家の非難を受けた。この頃にはまだ石膏による凝結調節は不完全だったので、こうした非難もいわれなきものではなかった。その後、セメント成分の研究によって、アルミナ分が多くケイ酸分が少ないと凝結が早くなることが判明し、ケイ酸分の増加、アルミナ分の減少が進み、石膏による調整の方法が定着、凝結の安定をもたらした。

このような品質の改善で、それまで急結を避けるために実施されていた風化は、大正初めには廃止された。風化の廃止によって、セメントの強度を犠牲にすることなく、凝結の安定したセメントの製造が可能になった。セメントへの石膏添加は、回転窯の発明と並ぶセメント製造技術上の一大発明といえる。なお、石膏のセメント凝結遅延作用については、第7章で詳しく述べる。

3.5 動力源：蒸気機関から電力へ^{2) 4) 5) 7)}

明治創業期に使用された機械類の動力源は蒸気機関であり、工場内照明はランプであった。小野田セメント小野田工場の場合、1899(明治22)年に工場内に40kwの直流発電機を設置して一部に電灯照明が行われた。工場の動力源として電力が使われたのは1911

(明治44)年で、回転窯に余熱発電設備を付けて工場動力が本格的に電力化したのは1913(大正2)年であった⁴⁾。

浅野セメントでも同時期に電力使用を開始したとある⁷⁾ので、セメント工場の動力源は、明治時代は蒸気機関、大正以降は電力の時代になったとみられる。

3.6 セメント製造の品質管理とセメント品質規格^{2) 6)}

1875(明治8)年5月、我が国で初めてポルトランドセメントの生産が開始されて以来、日本のセメントの品質は明治・大正・昭和期を経て、21世紀の今日まで著しい向上を遂げてきた。

しかし、明治20(1887)年頃までの草創期のセメント会社は、全くゼロからのスタートであり、会社運営はもとより、製造現場での管理も試行錯誤の連続であった。

生産管理の面では、工場運営に必要な原料、燃料および製品などの物質収支に必要な記録程度で始まり、その後の技術の進歩に応じて主要設備の運転時間など運転管理に必要な管理項目が加わっていった。

品質管理においても、当初はおよそ科学的管理とは程遠いものであったが、やがてセメントの強さ試験に始まり、化学分析、さらには粉末度等の物理試験が追加されていった。明治30(1897)年代になると、品質管理の基礎が確立され、大正末期には現在とほぼ同じ内容にまで充実したと判断される。

3.6.1 明治20年代頃までの品質管理の状況

セメント草創期においては、およそ品質管理の意識すら希薄で、少なくとも1887(明治20)年頃までの試験成績値は皆無といってよい。

明治20(1887)年代に入ると、次第に科学的管理がなされるようになり、原料やセメントの粉末度、セメントの化学分析、モルタルの耐伸強(強さ)や硬化度(凝結)などが測定されるようになった。しかし、化学分析は自社ではできず、農商務省などに依頼しなければならず、また、自社で試験するとはいえ、硬化度も「急硬」「緩硬」などと定性的な評価がなされており、モルタルの試験に使用する砂はセメントメーカーが独自で決めるなど、統一されたものはなかった。

3.6.2 品質試験法統一への流れ

明治中頃(1890年代)になると、コンクリート工事はかなり普及してきたが、なおセメントの国家規格は制定されていなかった。従って、官公庁の土建技術者たちは、自分の留学した欧州先進国の流れを汲み、それぞれの国のセメント規格を踏襲・改訂し、あるいは独自の試験方法を案出する等、その内容は種々雑多であった。このため各セメント会社は、技術面だけでなく、操業面も煩雑になり、セメント会社経営上の大きな障害となっていた。

このような背景の中から、セメント同業者間で試験法統一について協議がなされ、1893(明治26)年7月15日付で、有力なセメント会社8社連名の上、時の農商務大臣、後藤象二郎宛に「セメント試験法一定ノ儀ニ付願書」を提出している。この提案は採用されなかったが、これをきっかけに業界努力はその後も続けられた。

1896(明治29)年頃、ドイツなどの規格を参考として、同業者間で検討した結果、「帝国日本ポルトランドセメント試験法附請渡方」という規格の原案を作成し、これをもとに、1898(明治31)年7月、東京での同業者の会合で「日本帝国ポルトランドセメント試験法」が提案されている。

「帝国日本ポルトランドセメント試験法附請渡方」では、まずポルトランドセメントの定義と成分を規定した上で、第1条から第4条まで、「凝結」、「容積ノ固定」、「耐力試験」、「細末ノ度」の試験項目を織り込んでいる。ここで「容積ノ固定」とは、セメントを硬化させた場合のペーストの膨張、「細末ノ度」とはセメント粉末度のことである。さらに附属の請渡方の内容では、樽の正味重量や商標の貼付などを規定してい

る。「日本帝国ポルトランドセメント試験法」においても同様の試験項目を定めている。

セメント有力9社で作成したこれらの試案は実施に至らなかったが、各メーカーはこうした業界案をもとに日常の製造・品質管理を進め、1897(明治30)年頃から順次試験体制を充実していったと考えられる。

やがて政府も品質規格の重要性を認めるようになり、当時の工業試験所およびセメント各社の技術者6名によって試験法の研究を進めた結果、1905(明治38)年2月10日「日本ポルトランドセメント試験方法」が農商務省告示第35号をもって公布された。これは、政府発注のセメントに対する品質と試験法を明示したもので、法律でも規則でもない単なる政府の購入基準であるが、政府の権威において定めた基準であり、次第にほかの需要者にも普及していった。これは、前述の「日本帝国ポルトランドセメント試験法」に類似した内容で、第1条「粉末ノ程度」、第2条「凝結」、第3条「膨張性亀裂」、第4条「強度」、第5条「苦土及硫酸ノ定限」で構成されており、これが今日の品質規格の原点である。

この試験方法の制定は、英国の1905年、米国の1906年と時を同じくしており、欧米に比べて立ちおくれていたわが国セメント産業の発達を刺激した効果は大きかった。この後、わが国セメント産業は製造設備の改善とともに、品質も急速に向上し、旧来の面目を一新するに至った。そして、セメントの品質向上に合わせて、セメント規格も、比重などの項目の追加、粉末度や強さの規格値の改定など、数次の改正を経て次第に精密なものになっていった。

セメント規格は、技術の進歩や需要者側の要望などを踏まえて、その後も繰り返しきめ細かい改定・追加がなされ、今日のJIS規格の姿になった。セメント規格の変遷については第8章で詳述する。

3.6.3 セメント技術団体の結成

我が国のセメント産業発祥後の十数年は、一般に科学的知識の水準も低く、セメント製造あるいは応用面においても、科学的・技術的に研究・解明が急がれるような課題も少なくなかった。各セメントメーカーでもそれぞれ独自の研究が進めていたが、早くも1900(明治33)年には、同業10社の構成によって、「日本ポルトランドセメント業技術会」が結成された。その結成の趣旨は、経済問題を離れて、セメント及びコンクリートの発達を正しい方向に導くために、セメント製造およびその応用方面の学問・技術に関するあらゆる研究を取り扱うことにあった。

まずとりあげられた問題は、セメント試験用標準砂の選定ならびにセメント国家規格の制定であった。その努力は報いられ、1905（明治38）年農商務省告示で「ポルトランドセメント試験方法」が公布された。

その後数年して、本会と業務内容上の関係も深い「日本ポルトランドセメント同業会」が結成された。この団体は最初業者の親睦団体として発足したが、のちには、セメント試験用機器の検定、試験用標準砂の頒布の外、セメントの利用の普及等が主な業務内容となった。この両団体はその後も戦時統制の時代に入るまで存続し、セメント工業の技術面の発達に貢献するところが大きかった。

戦時中は、両団体ともセメント統制会に吸収されていたが、戦後すぐの1946（昭和21）年、新たに「社団法人日本セメント技術協会」として再発足、1966（昭和41）年、「社団法人セメント協会」と組織統合して「セメント協会研究所」となって今日に続いている。

セメント協会研究所の現在の主な業務内容は以下の通りである。

1. 研究・技術支援
セメント技術大会・講演会開催、研究奨励金・論文賞運営、セメント・コンクリート論文集発行、セメント共同試験など
2. セメントの規格類の整備
セメント協会標準試験方法整備、標準物質・標準砂の管理・販売
3. 受託試験
セメントおよびコンクリートの受託試験。

3.7 明治・大正期のセメント焼成窯の操業実績^{1) 2)}

以上、本章3.1～3.6で、明治・大正期におけるセメント製造技術の技術史を述べてきたが、100年以上の昔になるこの期間のセメント製造に関して残されている原史料は乏しく、技術の詳細については不明な点も多い。その中であって、小野田セメント（現・太平洋セメント）の小野田工場は、1881（明治14）年の創業以来、今日まで同じ場所・敷地に存続してきており、戦災も受けなかったため、明治・大正期の技術資料もかなりの量が今日まで残されてきている。太平洋セメントは、同社退職者の台信富寿博士の協力を得て、2004年からそれら史料の整理に取り組み、その成果の要約を太平洋セメントの季刊広報誌「CEM's」2008年4・7・10月号および09年1月号に発表した。

一社の一工場の記録ではあるが、明治・大正期のセ

メント工場の操業状況を知る上での貴重な資料であると考え、要点を以下に紹介する。

（注）太平洋セメント小野田工場のセメント生産は1985年に終了し、以後はコンクリート混和材剤、静的破砕材等の生産を関係会社が行っている。

3.7.1 徳利窯の操業実績

湿式法から乾式法への転換や大型化を含む1885（明治18）年から1894（同27）年の生産実績を時系列的に示すと表3.2のようになる。ここで、「やきだしかまですう焼出窯数」とは当該期間中における窯の運転回数であり、窯から焼き出された製品は良品である「なまやけ精品」と不良品である「生焼・過焼品」に分類される。燃料比はセメント1トンを焼成するために必要な石炭の質量をkg単位で示している。なお、当時、製品重量は樽数による表記なので、1樽を172kgとして換算しトン表記にしている（以下、回転窯についても同様）。

表3.2に示すように、1886（明治19）年度から1894（明治27）年度までの僅か10年弱の間に、精品量は約626トンから8,415トンへと約13倍に、また1窯当たりの精品量も約10トンから約34トンへと3倍強まで増加している。特に1890（明治23）年度を境に精品量が飛躍的に増加しているが、これは同表の窯基数に示すようにこの年度に徳利窯が4基から6基に増設されたこと、セメント製造方式が湿式法から乾式法へと切り替わったこと、ならびに国内の鉄道敷設、港湾建設、紡績工場建設等によるセメントの需要の高まりにより、一部の徳利窯が大型化されたこと等によるものと考えられる。

また、不良品率には年度による若干の変動はあるものの、1885（明治18）年当時は25～30%弱であったものが徐々に低下し、1893（明治26）年には約11%にまで改善されている。このような不良品率の減少、精品量ならびに1窯当たりの精品量の増加、を併せ考えると、この期間においてセメント製造技術が飛躍的に向上したことが窺える。

徳利窯の燃料比の推移については、一部記録が欠落した年もあり、操業年により240～519kgと変動の幅が大きい。これは徳利窯による焼成方式に起因するもの、すなわち同窯による焼成は非連続式のいわゆるバッチ式であり、1回の焼成が終了する度に運転停止が避けられず、これに伴う熱損失や焼き出された焼塊（クリンカー）品質のばらつきも大きかったものと考えられる。

表 3.2 徳利窯における生産実績²⁾

年 度	項 目	窯 基数	焼出 窯数	精品量 (a) (t)	生焼・ 過焼量 (b) (t)	合計 (c=a+b) (t)	不良品率 (b/c) (%)	1窯当たり 精品量 (t/運転)	燃料比 (kg/t)	原料製造 方法
明治 18(1885)年	下期	4	湿式 39	366	130	496	26.2	9.4	404	湿式法
明治 19(1886)年	上期	4	湿式 37	352	135	487	27.8	9.5	519	
	下期	4	湿式 26	274	97	371	26.1	10.5	464	
明治 20(1887)年	上期	4	湿式 38	539	96	635	15.1	14.2	284	
	下期	4	湿式 50	760	142	902	15.8	15.2	266	
明治 21(1888)年	上期	4	湿式 60	941	271	1212	22.3	15.7	240	
	下期	4	湿式 56	870	259	1129	23.0	15.5	270	
明治 22(1889)年	上期	4	湿式 47	743	248	991	25.0	15.8	364	
	下期	4	湿式 51	838	227	1065	21.3	16.4	350	
明治 23(1890)年	上期	4	湿式 61	1161	233	1394	16.7	16.3	372	
	下期	6	湿式 34	649	134	783	17.1	19.1	(523)	
明治 24(1891)年	上期	6	乾式 63	1750	292	2042	14.3	27.8	(427)	
		6	湿式 2	32	9	41	21.9	16.0	—	
	下期	6	乾式 88	2632	497	3129	15.9	29.9	397	
明治 25(1892)年	上期	6	乾式 88	2776	452	3228	14.0	31.5	386	乾式法
	下期	6	乾式 99	3195	391	3586	10.9	32.3	記録なし	
明治 26(1893)年	上期	7	乾式 102	9426	434	9860	11.2	33.6	記録なし	
	下期	7	乾式 103	3553	452	4005	11.3	34.5	記録なし	
明治 27(1894)年	上期	7	乾式 109	3856	705	4561	15.5	35.4	記録なし	
	下期	12	乾式 142	4559	860	5419	15.9	32.1	記録なし	

注 1. 明治 23(1890)年上期までは湿式法、同 23(1890)年下期～24(1891)年上期は湿式・乾式併用、同 24(1891)年上期以降は乾式法である。
 2. 燃料比の()内は記録値少なく、通期平均ではない。

3.7.2 回転窯の操業実績

回転窯の場合、原料や石炭を連続的に送入し、焼成状態に応じてこれらの送込量を増減できることから、均質な焼塊を連続的に焼成できることが特徴である。また原料の成形工程や焼塊の選別工程が不要となり、製造工程の簡略化が可能となるので、結果として大量生産に対応することができる。なお、窯の構造ゆえ、放散熱量が多く、また原料は窯内の底部を、熱ガスは窯内の上部をそれぞれ移動するために、縦窯と比較して熱効率が劣るという短所があるが、廃ガスの熱エネルギーを有効利用した余熱発電が、大正時代初めから行われるようになった。回転窯の余熱利用については、次章・第 4 章で詳しく述べる。

(1) 回転窯の運転率等

小野田工場では、1913(大正 2)年 12 月には縦窯が廃止されて回転窯単独時代に入ったが、その時から 1924(同 13)年度までの 1 号回転窯(径 3m、長さ 50m)の操業実績を表 3.3 に示す。この表には、焼出量、回転窯運転時間の暦時間に対する比である運転率、アンザツ落とし休憩時間(注 6 参照)、アンザツ落とし休憩時間の休憩率、さらには燃料比等について時系列的に示した。

表 3.3 回転窯における生産実績²⁾

年 度	焼出量		運転率* (%)	アンザツ落とし休憩時間		燃料比 (kg/t)
	t	t/日		時間/年	休憩率(%)	
大正 2(1913)年						
大正 3(1914)年	38131	129	81.3	記録なし	—	302
大正 4(1915)年	53082	177	82.4			262
大正 5(1916)年	56459	179	86.1			283
大正 6(1917)年	57845	188	85.6	473	6.4	289
大正 7(1918)年	53148	176	82.9	308	4.3	297
大正 8(1919)年	55842	180	86.0	407	5.5	281
大正 9(1920)年	53497	174	85.2	208	2.8	285
大正10(1921)年	60266	191	87.1	356	4.7	291
大正11(1922)年	58698	185	88.7	220	2.9	292
大正12(1923)年	64519	195	89.7	221	2.7	262
大正13(1924)年	60266	184	87.5	記録なし		282

*暦時間に対する運転時間の比率。稼働率に同じ。
 **回転窯の運転時間に対するアンザツ落とし休憩時間の比率。

ここで「アンザツ落とし休憩時間」の「休憩率」とは、回転窯内に過剰付着したアンザツを人力により除去する(1回/1交代)ため短時間窯を停止した時間の、窯の運転時間に対する比のことである。運転率は窯設置当初の 81% から 1924(大正 13)年には約 88～89% にまで向上しているものの、それでもなお 1 カ月当たり約 3 日以上休止していたことになる。この原因としては、窯内壁の煉瓦の脱落、回転窯の前後に位置する機械装置類の不調や原料不足によるものが多かった。回転窯の操業で特徴的なことは、窯内に付着するアンザツの除去のため、1917(大正 6)年～1921(同 10)年頃でも毎交代(8時間)定期的に 20 分程度(1日当たり約 1 時間)窯を火止めして、アンザツを人力で掻

き出していたことであり、この「アンザツ落し休転時間」における休転率は1922（大正11）年頃に至ってもまだ3%前後（1日当たり40分前後）にまで及んでいた。当時は回転窯の回転数は固定であったが、原料や燃料送入手量のコントロール等に習熟して、このアンザツ落しが解消されるのは、大正末（1926）年頃であった。

このように、大正期（1912年～1926年）のセメント焼成が、それ以前よりも安定していたとはいいつつも、アンザツ除去や機械的故障等により頻繁に窯の小休止を繰り返していた。

また、回転窯の作業（焼成）日誌に燃料石炭吹き込み側の圧力の記録が記載されるのは1924（大正13）年以降であり、温度の記録はないことから、当時は計測機器が未発達であり、原料や燃料の送入手量は、窯内状況や焼塊の目視観察等でコントロールしていたことが窺える。

(2) 回転窯の焼出量の推移

回転窯においては焼成が均一になるので、焼成後、良品である精品と不良品である生焼けに区分することはせず、「焼出量」がそのまま徳利窯等における精品量と同義で用いられるようになった。

表3.3に示すように、年間の焼出量は回転窯稼働直後の1914（大正3）年には約3.8万トンにものぼり、1日当たりに換算すると約130トンとなる。これは徳利窯の35t/日に対し約3.7倍となる。焼出量は運転技術の向上等によってその後漸増し、1923（大正12）年頃には、190t/日前後に、また年産量も約6万トンと1914（大正3）年の約1.5倍強にまで飛躍的に増加している。

回転窯の燃料比（石炭kg/t-cement）については、表3.3に示すように、当該期間における燃料比は回転窯の使用を開始した当初の大正3（1914）年では300kg/t-ct.を僅かに超えたが、それ以外の期間では常に300kg/t-ct.以下であった。徳利窯の240～519kg/t-ct.と比較すると、堅窯に対する回転窯の窯形式による熱効率の低下にも拘わらず、その燃料比は確実に低減するとともに、その変動も少なく、徳利窯と比較するとより安定した運転であったことが窺える。

注1：磨機

円形（直径約1.2m、厚さ02-04m）の上石と下石を組み合わせた石臼。下臼には放射状の溝があり、中央に原料投入口を設けた上臼を回転させることにより、せん断・

摩砕され、粉末は外周方向に排出される。

注2：ボールミルとチューブミル

ボールミルは、円筒の中に砕料と粉碎媒体としてボールを入れ、回転することによって粉碎を行う「回転円筒粉碎機」の総称である。ボールミルの中で、直径に比べて円筒部が長いミルは「チューブミル」と呼ばれる。現在、セメント工場で使われているボールミルは、ほとんど全てがチューブミルなので、本稿ではボールミルとチューブミルの用語は互換性のある言葉として使う。チューブミルの発明・本邦へ導入・ミルの構造などについては4.5.1および図4.12で説明している。

注3：フレットミル（図3.4）

エッジランナーともいう。自由に回転する石材製テーブル（後に鋼鉄製）上で直径約1.2mの2個のロール（石材製）を回転させ、圧縮せん断粉碎する。

注4：遊離石灰（フリーライム）

焼塊（クリンカー）中に残存する未反応の石灰（CaO）をいう。焼成工程においては、原料からの石灰分をできるだけ粘土成分と反応させて、水硬性あるセメント鉱物にすることが重要課題であり、遊離石灰の少ないクリンカーほど「良く焼けたクリンカーだ」とされる。遊離石灰が多いと、コンクリートにひび割れを生じる原因になる。

注5：凝結と硬化

セメントに水を加えてから固まるまでの過程を「凝結」、固まってから強さが増していく過程を「硬化」と呼んでいる。

注6：アンザツ（Anzatz）

ドイツ語で、窯内壁煉瓦面に原料の溶融物が付着したものをいう。英語の「コーティング（Coating）」という言い方も使われる。適当な厚さのアンザツは、回転窯内での原料の滑りを防いで熱交換を良くし、煉瓦面を保護する役割をするが、付着が過剰になると窯内の原料の流れを阻害し、窯内容積が減少して生産効率が低下する。

参考文献：

- 1) 台信富寿, 明治・大正期におけるセメント製造技術の変遷, 山口大学博士論文, 2007.
- 2) 台信富寿, 明治・大正期におけるセメント製造技術の変遷 1~4, CEM's (太平洋セメント広報誌), No. 37-40, 2008-2009.
- 3) 杉下捨三, 日本のセメント, ポプラ社, 1962.
- 4) 小野田セメント株式会社, 小野田セメント百年史, 1981.
- 5) 上野 孝, セメント技術史補遺, 小野田セメント, 1980.
- 6) 藤田 稔, セメント, 有斐閣, 1960.
- 7) 日本セメント株式会社, 日本セメント百年史, 1983.
- 8) 藤井光蔵, ポルトランドセメント発達の沿革 (1) - (18), セメント・コンクリート, No. 105-130, 1955-1957.

4 | 昭和初期から太平洋戦争を経て戦後復興期へ（昭和元年～35年／1926～1960）

前章で、徳利窯で始まった日本のセメント製造技術が、大正から昭和に年号が変わる時期（1926年）までには、特に以下のような点で大きな進歩を遂げたことを述べた。

- ①焼成方法が回転窯になってセメントの大量生産が可能になった。
- ②石膏添加で凝結・硬化が安定した。
- ③品質試験法・品質規格の制定で品質が向上してきた。

1882（明治15）年頃、浅野総一郎の東京・深川工場と笠井順八の山口県・小野田セメント製造会社の2工場ができて、明治末年には60万トン、昭和元年には300万トンまで増大した。

本章では、昭和初期から太平洋戦争を経て戦後の復興期を終える1960（昭和35）年頃までの日本国内のセメント製造技術の変遷を述べる。この時期の製造技術発展の重要なポイントとしては以下の4点が挙げられる。

- ①回転窯の排熱（余熱）の回収・利用方法の技術開発が進み、その方式の違いによって、いくつか回転窯（キルン）様式が生みだされた。
- ②回転窯で大量生産するためには、原料工程や仕上げ工程もそれに対応できる能力が必要になり、前後工程での技術改善も進んだ。と同時に、工場の規模の拡大に伴って公害問題も発生し、集塵機の設置が進んだ。
- ③コンクリートの用途の拡大につれて、セメント品種の多様化が始まった。
- ④この時期までのセメント製造技術のほとんどは、まだ欧米技術の導入であったが、生灰焼成法の一つ「改良焼成法」は、その後の日本独自の技術開発の先駆けとなった。

（注）1909（明治42）年、小野田セメントが当時の関東州（現・中国東北部）に大連工場を建設、操業を開始した。以後、大正期から昭和戦前期には、日本のセメント会社が台湾・朝鮮半島・満州（中国東北部）に進出して新鋭工場を各地に建設したが、そこで採用した設備・技術については、本稿では「日本で最初」といった表現の対象には取り上げていない。

4.1 昭和初期から昭和30年代までのセメント業界の状況（1926～1960年）¹⁾²⁾

この時期のセメント生産量の推移を図4.1に示す。1926（昭和元）年に約300万トンだった生産量は、1937（昭和12）年には約600万トンにまで増大した。しかし、図のように生産が順調に伸びたセメント業界ではあったが、明治・大正期から昭和戦前期のセメント会社の興亡は激しかった。1920（大正9）年頃から始まった第一次世界大戦終了後の戦後不況、1927（昭和2）年の金融恐慌、1929（昭和4）年の世界恐慌と、打ち続く不況に加えて、各社の無秩序な増産競争やダンピング販売で、弱小メーカーには苦境に陥って大会社に吸収合併される、あるいは消滅するなどしたものも多かった。

1937（昭和12）年、日中戦争の勃発により、我が国経済界は戦時体制に切り替えられ、セメント産業も他産業同様、国家統制のもとに、生産・販売・価格、資材割当等、あらゆる面に拘束を受けることとなり、太平洋戦争突入とともに事業経営は非常に困難な時期を迎えた。戦時中は、①資材割当の減少と生産の低下、②企業整備（強制的な企業合併）、③軍命令による南方占領地域への工場移転の強行、など国内のセメント事業は著しい制約を受けて衰退を余儀なくされた。

敗戦によってセメント業界の受けた損害は非常に大きかった。幾多の海外工場資産（新鋭設備が多かった）は一挙に失われ、しかも内地工場は、爆撃などによる直接的な被害こそ少なかったものの、戦時中酷使された機械設備の老朽化により、生産量は極度に低下した。終戦時の月産は3万トン（戦前平均30万トン）にまで減少し、結局1945（昭和20）年は終戦前後を含んで年産100万トン台にまで減少した。

しかし、1949（昭和24）年9月に燃料である石炭の統制が撤廃されてからは、生産条件は急速に好転し、月産30万トン台に躍進、1950（昭和25）年にはセメントの価格・配給統制が撤廃されて自由販売に復帰、1951（昭和26）年には年間生産量も650万トンと、戦前の最高時を超えるに至った。

統制撤廃後の我が国セメント工業の躍進はまさに驚異的であった。まず国内外セメント需要の急上昇である。戦災によって荒廃した河川・道路・港湾等のインフラストラクチャーの復旧、経済力回復のための鉄

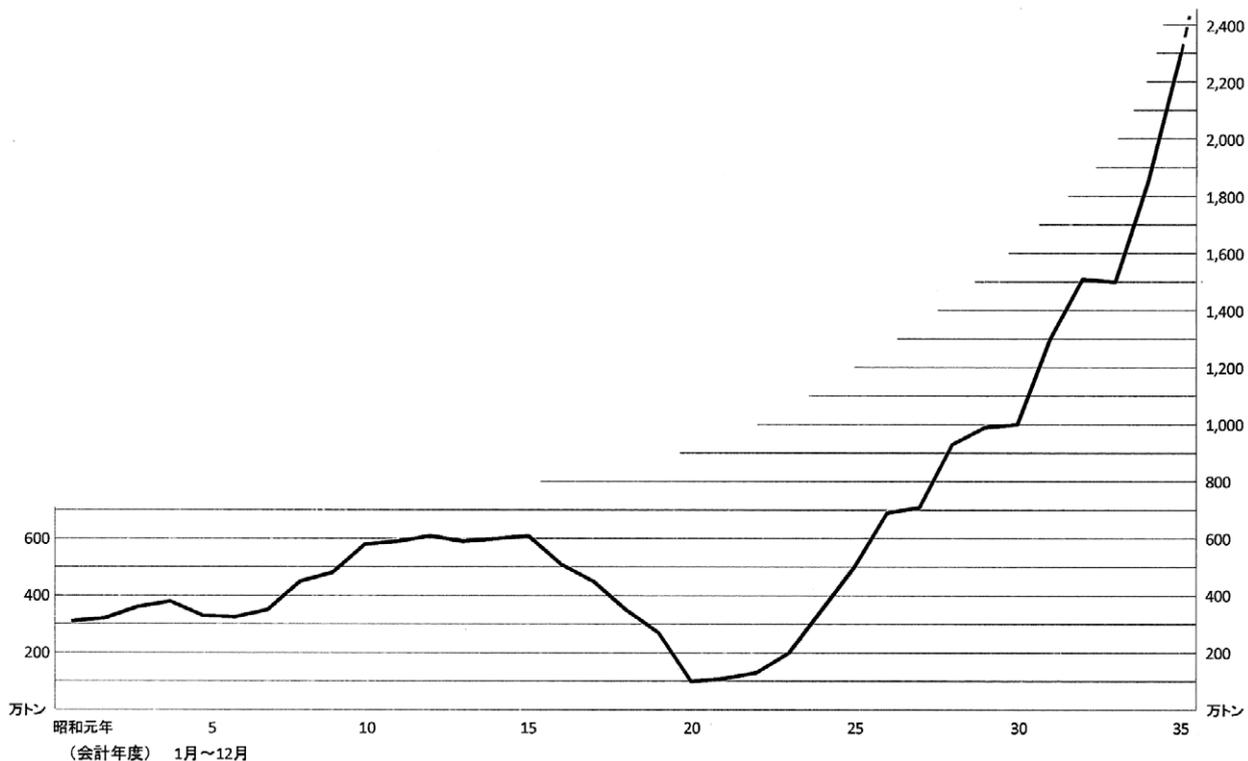


図 4.1 セメント生産高の推移 昭和1～35年（1926 - 1960）¹⁾

道・ダム建設、あるいは住宅・工場の再建にしても、なによりもまず大量のセメントを必要とした。そのうえこれら「復興需要」は、1950（昭和25年）の朝鮮動乱を契機とする国内の景気好転を背景に、一層の拍車をかけられたのである。

1951（昭和26）年を起点とする逐年の生産量は、かつて見られなかった急カーブを描いて増加していった。1951（昭和26）年以降の国内需要の平均増加率は約17%で、戦前の増加率約8%に比べると倍以上の増加率になった。

この需要急増の要因としては、第一に活発な復興需要が挙げられる。しかし戦後10年を経た1956（昭和31）年以降の上昇は、我が国経済力の拡大とこれを支える道路・港湾・ダム等の産業関連施設への公共投資の増大という、より積極的な需要が根本的な要因となっていたと見られる。

一方、セメント輸出も、1947（昭和22）年の輸出再開以来年々増加、1956（昭和31）年には220万トンを輸出し、世界第1位のセメント輸出国となった。

このような急激な需要の増大に対し、セメント業界は増産できちんと応えることができた。戦後いち早く経営体制を立て直し、設備の復旧さらには積極的な新増設に踏み切ったことが大いに奏功したといえる。

4.2 セメント焼成技術の発展（昭和初期から昭和30年代まで）^{1) 2)}

1903（明治36）年、浅野セメントが日本で初めて米国製の回転窯（直径1.8m、長さ18.3m）を据え付けたことは、前章3.3で述べた。

この回転窯は以後各社に普及し、大正末までには旧来の竪窯は全部回転窯に代ったことも3.3で述べた。回転窯の出現は、セメント製造技術史上に一大変革をもたらしたものだといえよう。これによって、セメント工場は回転窯を中心とする「大量生産設備」へと移行したのである。

1920（大正9）年、小野田セメントは、小野田工場ですべて回転窯の排ガス余熱を利用した自家発電装置を設置した。この余熱発電方式（4.2.2参照）は、電力事情が窮屈だった当時の我が国ではその経済性が認識され、その後、大部分の回転窯が余熱ボイラーを設置するほどに普及していった。

回転窯の形式では、乾式法（乾燥状態の原料粉末をそのまま窯に送る方法）の採用が多かった。しかし大正末期頃から欧州で「早強セメント」（第8章で詳述）の利用が進んできたため、日本でも1929（昭和4）年、浅野セメントがその製造を企て、原料をスラリーにして回転窯に送る湿式工場を東京・西多摩に建設した。続いて、1932（昭和7）年には、小野田セメント

が新設の三重県・藤原工場の回転窯で、湿式キルンに初めて「スラリーフィルター」を取り付け、湿式ながら余熱発電を可能とした。以後湿式ではこのフィルター付の形式が多く選ばれた。

1934（昭和9）年、三河セメント（後に小野田セメントに吸収合併）田原工場が日本最初の「レポールキルン」を設置した。このレポールキルンの革新性は、排ガスの熱回収に史上初めて「プレヒーター（予熱機）」を採用したことである。「プレヒーター」とは、キルン排ガスの熱を原料に「伝導」伝熱させて、石灰石の脱炭酸、すなわち「仮焼」を行う装置である。

昭和初期から今日までに使われてきたキルン様式を表4.1に示す。本節では、これら「乾式」「湿式」「半湿式」の焼成法について、昭和初期から昭和30年代までの変遷・発展と、それぞれの方式の問題点を述べる。それらの問題点を克服しながら、我が国セメント産業は、次章・第5章で述べるセメント製造技術の現時点での最高峰「NSP方式」の開発に成功するのである。

表4.1 セメントキルンの様式別分類（昭和初期以降～）（筆者作成）

乾式キルン
* ショートキルン
余熱ボイラー付（DB）
生灰焼成法（改良焼成法）（NCB）
サスペンションプレヒーター付（SP、NSP）
* ロングキルン
* シャフトキルン（S）
湿式キルン
* ショートキルン
フィルター付（WF）
フィルター付・ボイラー付（WFB）
* ロングキルン（W）
半湿式キルン
* レポールキルン（L）
注：括弧内はセメント業界内で使われている各様式の略称である。

（注）表の中で「シャフトキルン」とあるのは明治期の堅窯（徳利窯など）ではなく、戦後の一時期、一部のセメント会社がドイツから技術導入して建設した堅型の焼成窯で、建設費が安く、熱効率も他様式に比して優れていたが、セメントの品質上および運転操作上からいろいろ難点があり、10年程度使われて廃止された。外国技術で、しかも短命に終わって他の製造技術への波及効果もほとんど見られないので、本章では説明は省略する。また「乾式ロングキルン」も米国で

は実例があるものの、日本国内での採用はなかったもので、これも説明は省く。一方、「SPキルン」「NSPキルン」については次章第5章で詳述する。

4.2.1 回転窯の熱効率の向上と燃料消費量の低減

回転窯の導入は、「セメント品質の向上」と「大量生産」を実現したという意味において、セメント産業技術史上の画期的（エポックメイキング）な出来事であった。しかし、この回転窯は、それら大きな長所の反面でいくつかの欠点もある。最大の欠点が「熱効率が悪い」ことである。その「熱が逃げてしまう」原因は二つ、「排ガス持去り熱」と「クリンカー持去り熱」である。

（1）排ガス持去り熱

回転窯による焼成では、円筒底部を流下する原料とその上側を流れる燃焼ガスとの間で向流熱交換をさせることで、原料成分の間で焼成反応を起こさせる。この燃焼ガスと原料間の熱伝達の大部分は燃焼火焰（フレイム）からの放射（輻射）伝熱によるものであり、伝導伝熱の寄与はわずかである。したがって、窯の奥の方でガス温度が下がってくると、放射伝熱は絶対温度の4乗に比例するだけにガス－原料間の熱交換率が低下するので、窯から出る排ガスの温度はどうしても高くなり、熱損失が大きくなる。

（2）クリンカー持去り熱

回転窯で焼成された高温のクリンカーは、回転窯出口で空気と接触して冷却され、その冷却空気は2次空気（注1参照）として窯内に吸引されるが、熱せられたクリンカーと窯内に向かう空気との間の放射（輻射）による熱交換率は低く、クリンカーは高温のまま窯から系外に出てしまうことになる。したがってこの熱損失も大きい。

セメント製造コストのうち燃料費の占める割合は大きい。それ故、回転窯の熱効率を高めて所要熱量を低減することは、コスト低減への最重要課題なのである。本節4.2では「キルン排ガス持去り熱」回収のための工夫について述べ、「クリンカー持去り熱の回収」については次節4.3で述べる。

4.2.2 乾式回転窯における排ガス熱の発電利用（余熱ボイラー付乾式キルン／DB）^{2) 3)}

余熱ボイラー付乾式（ショート）キルン（DB）は、昭和初期から戦後復興期までのキルン様式の主流をな

していた。多くのDBキルンの長さが70~80mであるため、排ガス温度は、約800~900℃と高く、回転窯に吹込まれた熱量の約50%を持っている。この排ガス熱量を有効利用するために、「余熱（排熱）ボイラー」を窯尻に設置し発電を行う方法が開発され、1910年代には米国ボイラーメーカーなどが技術を売り出していた。折しも第一次世界大戦の時期にぶつかって日本国内への導入が遅れたようだが、1920（大正9）年に小野田セメントの小野田工場が設置したのが最初で、その後全国の工場で広く採用されることとなった。

この方式によって排ガス熱量の60~70%が回収され、クリンカー1トン当たり120~150kWhの発電が行われるようになり、原料工程から仕上工程までのキルン1系統の所要電力の90%程度が自給されることとなり、工場内の動力源も蒸気機関から電力にと変わっていった。

太平洋戦争中および戦後の電力不足の時代にあっても、セメント生産は石炭不足にこそ悩んだが、電力の点についてはほぼ自給可能で比較的順調な生産ができたことは、この排熱発電の賜物であった。

しかし戦後復興期も終る昭和30年代になると、回転窯の排熱回収に対する考え方が変化してきた。排熱を発電に利用する間接的利用よりも、排ガス温度をできるだけ下げて熱効率を高める方式が、コスト的に有利になってきたのである。ボイラーを回転窯に直結させることは、排ガス中の高熱粉塵のためにボイラー水

管の消耗も多く、長期運転が阻害される原因ともなる。余熱ボイラーをやめて、電力は別に電力会社からの買電、あるいは効率の良い自家発電設備に頼ることで、回転窯の長期運転を確保するほうが得策とされるようになってきた。したがって、1970年代から始まる「SP（サスペンションプレヒーター）化」の流れの中で、「乾式ボイラー付キルン」は次第に姿を消していった。「SP化」による排熱回収については、次章の高度成長期のセメント製造技術の項で取り上げる。

乾式ボイラー付キルンの構成図を図4.2に、熱収支の例を表4.2に示す。

4.2.3 湿式法：スラリーフィルター方式とロングキルン方式^{2) 3) 4) 5) 6)}

1929（昭和4）年、浅野セメントが早強セメント製造のために、東京・西多摩工場に湿式法を採用した。当時の技術水準では、乾式法に比して湿式法は、原料の調合・粉砕が容易であり、品質向上の面で乾式法よりも優れていた。しかし、焼成熱量では乾式法が有利で、湿式法では燃料消費量が15%位多くなっていた。しかも、排熱ボイラーによる発電量も少なく、回転窯単位容積当りのクリンカー焼成量も少なかった。早強セメントが「高級セメント」として普通セメントよりも高値で売れるという前提での湿式キルン選択だった。

湿式法の長所「品質の良いクリンカーが焼ける」という点を生かしながら、その欠点である「燃料消費が

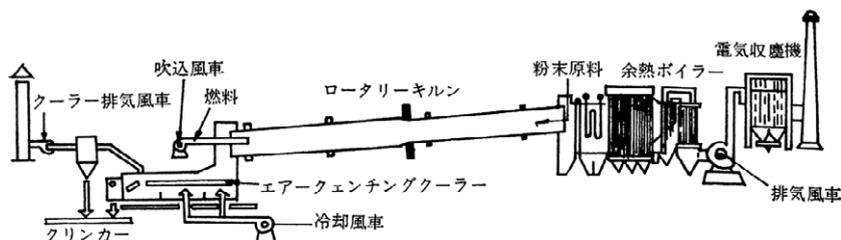


図4.2 乾式ボイラー付キルン³⁾

表4.2 乾式ボイラー付キルンの熱収支の一例³⁾

キルンサイズ 3,500φ×3,200φ×82,000
 有効内容積(シェル内面積) 718m³
 焼成能力 25.5t/d
 比焼成能力 35.5kg/m³h
 焼成熱量(低発熱量) 1517×10³kcal/tcl'
 焼成効率 29.4%
 ボイラー伝熱面積 2063m²
 蒸気圧 23.8kg/cm²
 ボイラー効率 70%
 タービン効率 20%
 蒸発量 17.5t/h
 発電量 120KWH/tcl'

熱収支(低発熱量)		×10 ³ kcal/tcl'	%
入熱	燃料の燃焼熱 Q _a	1517	99.5
	燃料の顕熱 Q _b	4	0.3
	原料の顕熱 Q _c	3	0.2
	一気空気の顕熱 Q _d	—	—
	合計	1524	100.0
出熱	クリンカー焼成用熱 Q _e	449	29.5
	(クレーンに入るクリンカーの顕熱) Q _f	(289)	(19.0)
	クリンカーの持去る熱 Q _g	19	1.2
	クレーン排気の持去る熱 Q _h	26	1.7
	原料中の水分蒸発熱 Q _i	0	0
	キルン排ガスの持去る熱 Q _j	739	48.5
Q ₂	ダスト、放射その他 Q _k	291	1.91
	合計	1524	100.0
焼成効率 $\frac{Q_e - e}{Q_a} \times 100$		—	29.4

高い」「生産能力が劣る」の克服を図ったのが、「スラリーフィルター付湿式キルン」と「湿式ロングキルン」であった。

(1) スラリーフィルター付湿式キルン (WFB)

湿式法では、水分蒸発のためクリンカー1kg 当り約2,100kj (500kcal) 前後の熱量を消費する。その対策として原料スラリーの水分をフィルターで濾過して減少させる方式が考案された。湿式フィルターは、鉱山関係では早くから使用されていたが、セメント業界では1925 (大正14) 年に米国で採用されたのが最初とされる。

小野田セメントが、1932 (昭和7) 年、新設の三重県・藤原工場の回転窯に日本最初の「スラリーフィルター・余熱ボイラー付湿式キルン (WFB)」を設置、湿式ながら使用熱量・余熱発電が乾式法に遜色ない成績を出した。以後湿式ではこのフィルター付の形式が多く建設された。翌1933 (昭和8) 年、浅野セメント西多摩工場で既設湿式キルンをフィルター付に改造を行った時の記録として、原料水分をフィルターで濾過して20%まで減少させたことで、燃料費15%節減、生産量20%上昇、発電量も20%増加したとされている。

(2) 湿式ロングキルン (W)

排ガス温度を低下させて熱効率を高める最も簡単な方法は、回転窯を長くすることである。我が国では戦

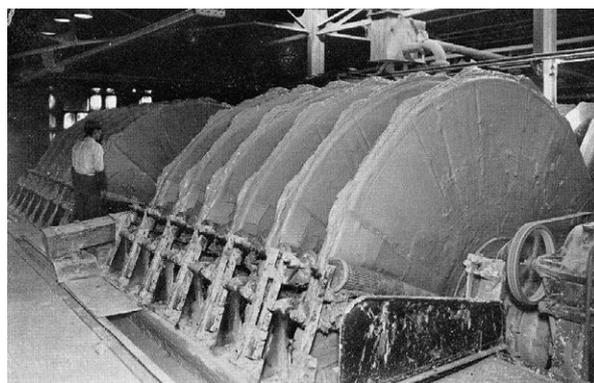


図 4.3 湿式ボイラー付キルンのスラリーフィルター⁷⁾

前戦後を通じて60~80m までのいわゆるショートキルンが多かったが、1954 (昭和29) 年徳山曹達が徳山工場にロングキルン (135m) を採用して以来、その新設もかなり増えた。ロングキルンでは原料スラリーをそのままキルン内に流し込む。その使用熱量は昭和30年代後半にはクリンカー1kg 当り5,440kj (1,300kcal) にまで改善されてきて、排ガス温度は160℃まで低下していた。一方で、余熱発電がないためボイラーでのトラブルがなく、スラリーを扱うので原料工程も簡素化され、キルン送入原料の均斉度は高く、窯の単独運転による長期運転が可能になって、結果的に他様式に対する競争力が出てくるので、「エコノミカルロングキルン」ともいわれた。

湿式ロングキルンの構成図を図4.4に、熱収支の例を表4.3に示す。また、写真の一例を図4.5に示す。

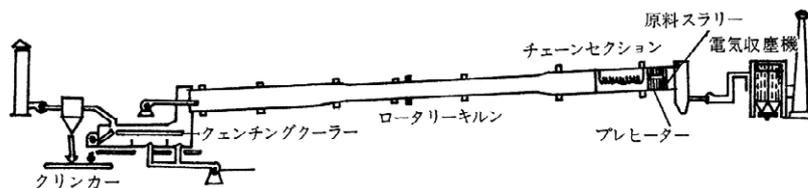


図 4.4 湿式ロングキルン³⁾

表 4.3 湿式ロングキルンの熱収支の一例³⁾

キルンサイズ 3,750φ × 3,450φ × 3,750φ × 170,000		熱収支 (低発熱量)	
		×10 ³	%
		kcal/tcl'	
有効内容積	1730 m ³	燃料の燃焼熱 Q _a	1269 98.3
焼成能力	30.0t/h	燃料の顕熱 Q _b	2 0.2
比焼成能力	17.4 kg/m ³ h	原料の顕熱 Q _c	15 1.2
焼成熱量 (低発熱量)	1,269 × 10 ³ kcal/tcl'	一気空気の顕熱 Q _d	4 0.3
焼成効率	33.4%	合 計	1290 100.0
プレヒーター	スミス型	クリンカー焼成用熱 Q _e	440 34.1
チェーンの伝熱面積	1660 m ²	(クーラーに入るクリンカーの顕熱) Q _f	(291) (22.5)
		クリンカーの持去る熱 Q _g	13 1.0
		クーラー排気の持去る熱 Q _h	46 3.6
		原料中の水分蒸発熱 Q _i	524 40.6
		キルン排ガスの持去る熱 Q _j	146 11.3
		ダスト、放射その他 Q _k	121 9.4
		合 計	1290 100.0
		焼成効率 $\frac{Q_e - Q_c}{Q_a} \times 100$	33.4



図 4.5 湿式ロングキルン写真(キルン長さ 170m)⁷⁾

4.2.4 半湿式法：レポールキルン (L) の採用^{2) 3)}

レポールキルンの革新性は、排ガスの熱回収に史上初めて「プレヒーター (予熱機)」を採用したことである。プレヒーターとはキルン排ガスの熱を「伝導」で原料に直接伝え、原料の仮焼 (脱炭酸) を行う装置である。発明者レップ (Lellep・独) とプラントメーカー・ポリジウス (Polysius・独) の名をとり、「レポールキルン」と名付けられた。

レポールキルン (図 4.6) では、移動するグレート (火格子、図 4.6 では「プレヒーター」と記載) を窯尻 (回転窯の排ガス出口=原料送入口) に設け、その上にペレタイザーで水分 14% 程度を加えて粒状とした原料を 20cm くらいの厚さに敷き、排ガスをその上面からグレートを通じて吸引し、ガスが原料層を通過する間に熱交換を行なわせるものである。窯に送入される原料は 900℃ 以上に予熱され、排ガス温度は

200℃ くらいに下って、燃料消費が低減される。また回転窯も短くできて、長さは直径の 10~13 倍程度で足りる。レポールキルンが我が国で最初に設置されたのは、1934 (昭和 9) 年、三河セメント田原工場である。戦後になって、磐城セメント (現・住友大阪セメント) が静岡県浜松に建設した新工場を始め、同社四倉 (福島)・栃木・七尾 (石川) 等のほぼ全工場にレポールキルンを採用したことなどもあり、国内でかなり普及した。その理由としては、使用熱量が 4,200kJ/t-cl. (1,000kcal/t-cl.) を切るほどの低さであったことが挙げられる。一方、弱点としては、以下の点が挙げられる。

- ①原料 (粘土) の造粒性が良いことが求められ、工場立地や原料手配に制約がある。
- ②プレヒーターのグレートは 900~1,000℃ という高温の中で運転するため、大型化すると機械的に無理が生じて故障が多くなり、キルンの大型化が難しい (1200t/d あたりが最大能力だろうと言われる)。

②の理由から、1980 年代から始まる 3,000t/d を超えるような大型 SP・NSP キルンが建設される波の中で、レポールキルンも日本のセメント業界からは姿を消した。

レポールキルンの構成図を図 4.6 に、熱収支の例を表 4.4 に示す。

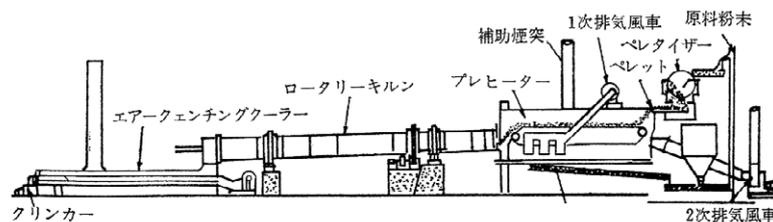


図 4.6 レポールキルン³⁾

表 4.4 レポールキルン熱収支の一例³⁾

キルンサイズ 3,900φ×70,350
 有効内容積 (シェル内容積) 837m³
 焼成能力 50.2t/h
 比焼成能力 60.2kg/m³h
 焼成熱量 (低発熱量) 884.5×10³kcal/tcl'
 焼成効率 48.1%
 グレートサイズ 3,804×29,252

熱収支 (低発熱量)		×10 ³ kcal/tcl'	%
入熱 Q _i	燃料の燃焼熱 Q _a	875.6	99.0
	燃料の顕熱 Q _b	3.6	0.4
	原料の顕熱 Q _c	15.3	0.6
	一気空気の顕熱 Q _d	—	—
	合計	884.5	100.0
出熱 Q _e	クリンカー焼成用熱 Q _e	426.3	0.6
	(クーラーに入るクリンカーの顕熱) Q _f	(393.1)	(38.8)
	クリンカーの持去る熱 Q _g	8.5	0.6
	クーラー排気の持去る熱 Q _h	120.4	13.8
	原料中の水分蒸発熱 Q _i	134.1	15.2
	キルン排ガスの持去る熱 Q _j	76.3	8.7
	ダスト、放射その他 Q _k	126.2	13.6
	合計	884.5	100.0
焼成効率 $\frac{Q_e - Q_c}{Q_a} \times 100$		—	48.1

4.2.5 改良焼成法（生灰焼成法の改良、NCB）：初めての「国産」製造技術^{4) 5) 8)}

上述してきたセメント製造法はいずれも、石灰石をそのまま砕いて粘土と調合し回転窯に送る「原石焼成法」である。これに対し、「生灰焼成法」は、あらかじめ石灰石を石灰窯で焼いて生石灰にし（仮焼）、これを粘土と混ぜて回転窯で焼く、という方式である。

原石焼成法の場合、使用総熱量の約50%が、石灰石からの脱炭酸のために消費される。石灰石を熱効率のよい堅窯で生石灰にすれば、理論的には総使用熱量が少なくて済む。石灰石に比べて生石灰の方がずっと軟らかく、粉碎動力も少なくなる。

この生灰焼成法は、1907（明治40）年、浅野セメントが特許を取得し、同社門司工場に採用した。同じ容積の回転窯で焼出量（生産量）が増加することから、同社の他の数工場にも横展開したと記録されている⁴⁾。一方で、①原料調合の変動がやや大きい、②石灰を焼く作業に労力を要する、③コークスを必要とする、といった問題点があったと記録されている。結果として浅野セメントでは、昭和年間になってからは、建設する新工場には全て原石焼成法を採用、生灰法は昭和20年代の初め頃には廃止したと報告されている。

1956（昭和31）年、当時の小野田セメント社長・安藤豊祿（技術系）は、生灰法のもつ有利性、すなわち「熱効率に優れ」、「焼出量が増大する」点に着目、同法のもつ課題を克服してその実用化を試みるよう、同社技術陣に命じた。課題としては、上記①②③に加え、④その当時使われていた石灰窯が小型で、セメントの大量生産には使えない、いう点もあった。

技術陣は、文献調査からテストプラント、ミニプラント、小規模現場プラントと、手順を踏んで開発を進めた結果、以下のように「コークス使用」以外の問題点を解決することができた。

- ①生石灰を大量生産できる大型石灰窯（堅窯・350t/d/基）の技術開発に成功した。
 - *それまでの堅窯では難しかった「窯の隅々まで均等に焼く」ことに成功した。
 - *品質の面でも、「生石灰を均一に焼く」ことができるようになった
 - *石灰窯の運転操作に「オートメーション」を導入、少人数で能率的に運転できるプロセスを開発した。
- ②生石灰粉末と粘土粉末を混合するためのエアブレンディング方式（空気攪拌混合、4.8項参照）の採用（日本最初の「連続式」ブレンディング）で、他のキルン様式に劣らない品質確保ができる

ようになった。

（注）原石焼成法では、石灰石と粘土類と一緒に粉碎するが、生灰法では、生石灰と粘土類は別々に粉碎し、その後で成分調整・混合を行うので、生石灰粉末と粘土粉末をできるだけ均齊に混合する装置が必要であった。

ただし、課題の一つであった燃料については、燐石（天然コークス）、無煙炭などを検討したが、供給が不安定と見込まれ、「コークス使用」での実用化に踏み切った。図4.7に改良焼成法用石灰窯の一例の写真を示す。

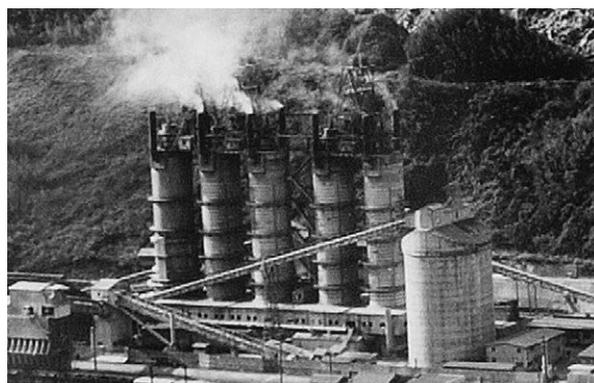


図4.7 改良焼成法用石灰窯⁷⁾

小野田セメントが「改良焼成法」と名付けたこの焼成法は、在来の乾式ボイラー付キルン（DB）を改良焼成法に転換した場合、同じキルンで約4倍の増産が達成できた。1959（昭和34）年から1961年にかけて、小野田セメントは、同社の藤原、津久見、小野田、大船渡工場で、合計10基の回転窯を「改良法転換」し、同社のセメント生産高は、1959年の270万トンから1962年の515万トンへと、わずか3年間で約2倍に増大した（図4.8）。改良焼成法への転換の成果であった。これに伴って同社シェアも高まり、1960年には一気に3%-pointも上昇した。

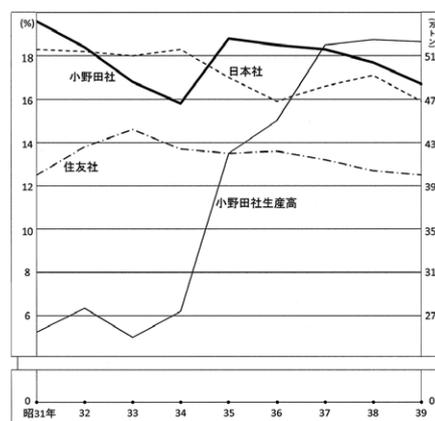


図4.8 改良焼成法前後における小野田セメントの生産高とシェア⁵⁾

しかし、1961（昭和36）年の貿易自由化で、重油が安価かつ容易に入手できる「エネルギー革命」が起きると、既存回転窯の燃料も、石炭から重油への転換が急速に進んだ（4.9参照）。そのようなエネルギー環境の激変の中、堅窯にコークスを使う「改良法」は、一方でコークスの価格上昇もあり、燃料コスト面で他様式キルンに対して劣位に立たされるようになってきた。高価なコークスの代わりに「重油焼き石灰窯」、あるいは「石灰窯燃料に安価なオイルコークス（注2参照）をペレットにして使う」などの技術開発の努力もそれなりの効果を上げたが、最終的には次章で述べるSP・NSPキルンという大革新技術の登場で、他様式キルンと同様、改良焼成法キルンも昭和50年代初め（1970年代後半）に廃止となった。

浅野セメントの特許技術が出発点となって、小野田セメントが開発した「改良焼成法」は、明治以来欧米からの導入技術に頼ってきた我が国セメント産業の歴史の中で、初めての「日本が生んだ製造技術」であり、1980年代から花開く様々な「日本生れ」のセメント製造技術、とりわけNSPキルン開発に先鞭をつけた、という点で高く評価できる。技術開発の過程で遭遇した幾多の経済的・技術的困難をなんとか克服できたのは、安藤社長の強いリーダーシップがあったからだといえる。また、この技術開発を通じて、それまで「機械・装置のユーザーの立場」だった機械・電気・化学工学の技術者たちが、初めて機械・装置の設計段階にも関わるようになったことが、その後の「日本生れ」のセメント製造装置の開発につながっていったといえる。

小野田セメントはこの改良法開発以来培った技術群を基に、それらを国内外で販売する目的で、1976（昭和51）年、エンジニアリング部門を独立させて「小野田エンジニアリング」（現・太平洋エンジニアリング）を発足させた。その後、数社が同様の子会社を立ち上げている。

4.3 クリンカー持去り熱の回収：エアクエンチングクーラーの採用^{2) 3)}

クリンカークーラーは、キルン出口端で1200～1300℃ある赤熱クリンカーからの「熱回収」と、その赤熱クリンカーの「速やかな冷却（急冷）」という二つの大きな役割を担っている。「熱回収」は燃料使用量に、「急冷」すなわち冷却速度はセメントの品質に、それぞれ大きく影響する。

回転窯の熱効率の悪い理由の一つが、高温で回転窯から出てくるクリンカーの持去り熱損失であること

は、4.2.1でも述べた。このクリンカーの持つ熱量を有効に回収し、回転窯の熱効率を高めようとする努力がいろいろと続けられてきたが、昭和期になって、プラネタリークーラー（planetary cooler）、さらにはエアクエンチングクーラー（air quenching cooler、AQC）が欧米で開発されて我が国に導入され、クリンカー持去り熱の回収について大幅な改善がなされた。これら二つの形式はいずれも、クリンカーと空気との熱交換に「熱伝導」を最大限利用することをねらっている。

以下にクリンカー持去り熱回収技術、すなわちクリンカークーラーの発展を略記する。

4.3.1 回転窯と冷却機の単独設置時代

初期の回転窯にはクリンカー冷却廃熱を回収・利用する目的の冷却機はなく、窯から出た高温のクリンカーを冷却するためだけの装置を、窯の近傍に設けただけであった。

4.3.2 回転円筒式冷却機を直列させた時代（アンダークーラー式）

回転窯から出た高温クリンカーを、回転窯の下に設置した回転円筒型の冷却機に落とし込む。送風機からの空気は、向流熱交換方式でクリンカーを冷却しながら2次空気として窯内に吸いこまれていく。クリンカー持去り熱を2次空気として回収することで熱効率は向上した。しかし、単一の円筒型で熱交換があまり良くないので、冷却後のクリンカーの温度はまだ300℃程の高温であった。

大正5年頃から大正末期（1916～1926）に建設された回転窯はこの方法を採用していたが、1960年代までには廃止された。図4.9にアンダークーラーの例を示す。

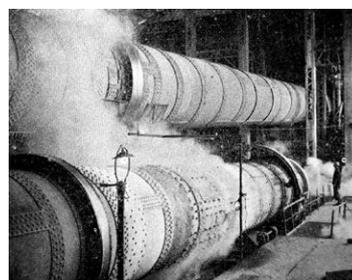


図4.9 回転窯（上）の下に取り付けられたアンダークーラー²⁾

4.3.3 多筒式冷却機（プラネタリークーラー）⁹⁾

10～15本の冷却筒（1m～2.5m φ、5mL程度）をキルン出口端に遊星状に装着し、回転窯と一体にして回

転させる型式のクーラーで、クリンカーは冷却筒内で冷却空気と「向流熱交換」される。プラネタリークーラーの代表機種であるFL スミス社（デンマークのプラントメーカー）のユナックスクーラーを図4.10に示す。この写真は、1972（昭和47）年に建設された大型SPキルン（直径6m、長さ100m、4,700t/d）に据え付けられたユナックスクーラーで、計10本の円筒クーラーが遊星状に取付けられている。

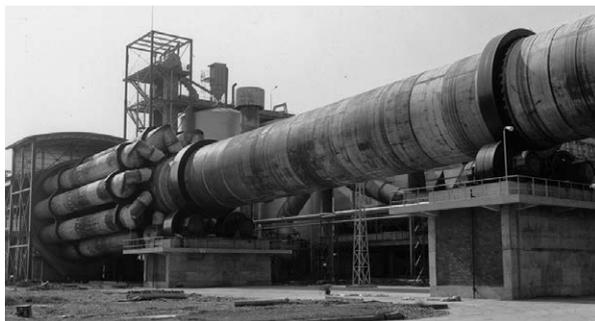


図4.10 ユナックスクーラー（秩父セメント熊谷工場）¹⁰⁾

この型式のクーラーとしては、1927（昭和2）年、浅野セメントが東京工場の窯を「ユナックスクーラー」に改造したのが我が国最初である。アンダークーラーに比べて、冷却効果が良好であったので、その後の戦前期（1940年代まで）の新設キルンは、ほとんどプラネタリークーラーが採用された。ユナックス型のほかに、コーベックス型、窯業社型等があった。いずれも、クリンカーと空気の接触面積を増やすために、冷却機内に鎖を張る、リフターを取付ける等をして、熱効率の向上を図っている。この形式のクーラーの特長は以下の通りである：

- ①高い熱回収効率が得られる。
- ②次項で述べるエアクエンチングクーラー（AQC）に比較して機構が単純であり、運転が容易である。
- ③冷却空気はキルン焼成用2次空気に全量使用されるので、クーラー用の排気風車や集塵機が不要である。
- ④電力原単位が低い。

一方で、以下のような欠点も指摘されていた：

- ①多数の重い円筒が回転窯の本体高温部に取り付けられているので、熱歪・機械歪が避けがたく、故障の原因になる。
- ②空気全量が2次空気になるため冷却空気量としては不足気味になり、クリンカーの冷却速度が徐冷傾向になりやすく、その場合セメント品質上好ましくない。（クリンカーの冷却速度と品質の関係については「7.1.2 クリンカー鉱物」の（2）項で

述べる。）

- ③出口クリンカー温度が150～200℃であり、AQCに比較して高い。

現在ではこの型式のクーラーもほとんど姿を消した。その理由は、1980年代以降主流になったNSPキルンでは、クーラー排ガスのうち、2次空気としてキルンに入れた後の余剰ガスを仮焼炉の燃焼空気に利用して、一層の熱効率の向上を図るようになったからである（詳細は次章・第5章参照）。

4.3.4 エアクエンチングクーラー（AQC）⁹⁾

回転窯から排出される赤熱したクリンカーと冷空気（大気）との熱交換を、効率よく行うべく考案された「直流熱交換」のクーラーである。このクーラーの特徴は、以下の通りである。

- ①クリンカーを移動させるグレートの下から空気を吹き込み、クリンカーを冷却する。1300℃位で回転窯から冷却機に落下するクリンカーが、常温の空気と直接接して急冷される。したがって、高温の2次空気が得られると同時に、急冷された品質の良いクリンカーが得られる。クーラーを出るクリンカー温度は100℃前後まで低下する。
- ②冷却用空気は、2次空気に必要な空気量よりも多くなる。余剰の予熱空気は原料乾燥用（乾式の場合）に向ける等、セメント生産全体の総所要熱量の低減に役立つよう工夫がなされる。とりわけ5章で述べる最も新しいキルン形式「NSPキルン」では、この余剰予熱空気を仮焼炉の2次空気として利用できるため、NSPキルンの一層の熱効率改善に役立っている。

AQCは戦前から米国で使用されはじめ、戦後欧米に広く普及した。我が国での初めての採用は、1928（昭和3）年建設の徳山セメントにおけるFLスミス社製クーラーとされているが、本格的な普及は太平洋戦争後の1951（昭和26）年、日本セメント（旧・浅野セメント、現・太平洋セメント）西多摩工場にフラー型が据え付けられて以降であり、その後は新設窯はもちろん、在来のプラネタリークーラーも次々とAQCに転換されていき、昭和30年代の始めには、日本のセメントキルンの大部分がAQCになった¹¹⁾。

AQC形式としては、いずれも開発したプラントメーカーの名前が付いたフラー式（米）、アリスチャーマー式（米）、FLスミス式、あるいは純国産の川重型（川崎重工製作）およびKY型（窯業社と汽車製造会社の合作）などがある。

4.3.5 フラー型クーラー^{12) 13)}

AQCのなかでもフラー型は大型化に適していて、キルンがSP・NSPになった1970年代以降に据え付けられたクーラーは、すべてこの型式になっており、8,000～9,000t/dayの処理能力のものまで建設されている。図4.11にフラー型エアクエンチングクーラーの構成図を示す。

フラー型クーラーについては、基本的な設計思想はその後大きな変化はないが、改良は続いている。フラー型クーラーの欠点の一つとして、「赤い川」と呼ばれる「グレート上を赤熱クリンカーが流れる現象」があるが、これを防いでグレート焼損による故障休止を減少させ、長期連続運転の確保と熱回収効率の向上を図る構造上の工夫などが、1990年代以降もいくつか開発されてきている。

その一つとして、グレートプレート数枚単位に冷却用空気を専用ファンで供給する機構を備えた「エアビーム式」のクリンカークーラーが我が国でも普及しつつある¹²⁾。この方式では、「エアビーム」はクリンカー落下部から2次空気回収領域に適用され、熱回収効率が従来方式よりも数ポイント改善される実績を示している。

エアビーム式にはいくつかのタイプがあるが、2000年までの導入実績はキルンへの導入率で32%となっており、既設クーラーの更新などを契機に今後も普及してゆくと考えられる。

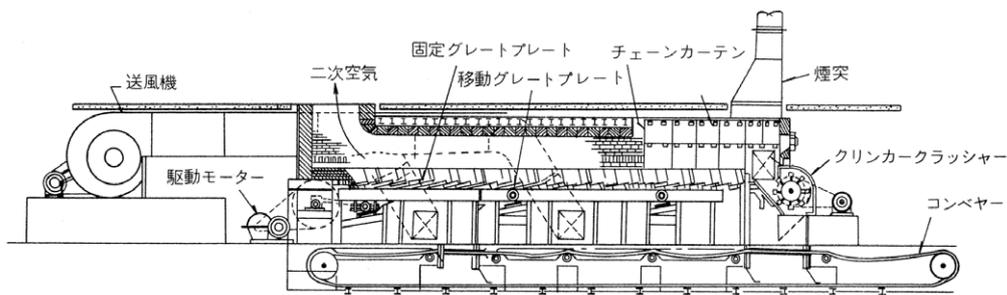


図4.11 フラー型エアクエンチングクーラー¹⁴⁾

4.4 昭和初期から昭和35年頃までの使用熱量改善の推移

以上述べてきた「回転窯排ガスの余熱活用」と「クーラー排ガスの余熱活用」という二つの熱回収効果を主に、その他の使用熱量削減の努力を加えて、この期間中の製造様式別吹込総熱量の変化を表4.5に示す。

4.5 粉砕と分級：原料工程・仕上工程の能力向上

前節4.2で、回転窯やクーラー、すなわち焼成工程が大量生産可能になったことを述べた。中心部の焼成工程が大量生産できるためには、前後工程である原料工程・仕上工程の能力もそれに対応する能力向上が必要になる。以下の節では、原料・仕上両工程に共通する粉砕・分級装置の昭和初期から昭和30年代までの技術開発を概観し、続けて原料調合を含む原料工程と仕上工程の各論を述べる。

4.5.1 粉砕¹⁵⁾

「粉砕」という操作は、古代エジプトや古代ギリシャの壁画などにも挽臼などの例が描かれているように、操作としては簡単である。しかし、技術の進んだ現代の工業的な粉砕機であっても、運転時に消費される動力のうち本来の粉砕（固体の破壊）に費やされる

表4.5 製造様式別吹込総熱量推移²⁾

		(単位 1,000 Kcal/t-clinker)								
		昭15.8 ～15.12	昭26	昭27	昭28	昭29	昭30	昭31	昭32	昭33
乾式	式	1,891	1,772	1,764	1,738	1,716	1,681	1,652	1,616	1,581
	ショート	2,089	2,041	2,034	1,976	1,941	1,874	1,676	1,819	1,823
湿式	ロング	-	-	-	-	-	-	-	1,442	1,400
	レポール	1,300	1,381	1,349	1,377	1,424	1,305	1,080	1,095	1,012
	シャフト	-	-	-	-	-	1,327	1,106	1,107	957
平均	均	1,934	1,839	1,829	1,777	1,748	1,710	1,624	1,547	1,487

(注) 1. いずれもセメント協会調査による。
2. 昭和30, 31年は、湿式ショート中にロングも含まれる。
3. () 内数字は重油原単位で、1/t-clinkerである。

部分は極めてわずかであって、供給されたエネルギーの95%以上が、主に熱エネルギーの形で失われるという、いわば「エネルギー大浪費機械」ともいえる装置である。しかし、この事実は一方では、「粉碎工程」が省エネルギーの面では改善余地の大きい分野だ、ともいえる。

セメント工場で使用される粉碎機には、「チューブ（ボール）ミル」と「堅型ミル（ローラーミル）」とがある。堅型ミルについては、次章・第5章で取り上げる。

チューブミルは、1892年にダビッドセン（M. Davidsen・独）が発明した。日本への最初の導入は、浅野セメントが1899（明治32）年、原料粉碎用にドイツから輸入したもので、（図3.3参照）。動力はまだ蒸気機関であった。工場動力が蒸気から電力に代ったのは、明治から大正に年号が変わった時期頃からである（3.5、4.2.2参照）。

チューブミル第1号機の内部がどのようなであったか不明であるが、昭和期になってからのチューブミルは、内部を有孔隔壁で仕切って2～5室の多室ミルとし、前室には粗砕用に大径ボールを、後室に行くに従って微粉碎用に小径ボールを使用する形になってい

る。後述する「開回路方式」で使う場合は3～5室、「閉回路方式」では2室のことが多い。

図4.12に、チューブミルの外観（1）、内部断面図（2）、粉碎中のボール・砕料の様子（3）を示す。写真のミルは原料ミル（径5.6m、6,500kW）であるが、仕上ミルの外観・内部も基本的には同じである。図4.12（1）（2）はいずれもミルが大型化した昭和40年代以降の写真・図である。昭和30年代までのミルは、形状はほぼ同じだが、寸法がずっと小さいものであった。図4.13に戦後昭和20年代以降の仕上ミルの大型化の推移を、また図4.14（1）に1932（昭和7）年据付の仕上ミル（径2.47m、長さ14m、637kW）、（2）に1950年代後半（昭和30年代）据付の原料ミル（径3m、長さ10m、975kW）の写真を示す。

（注）チューブミルの後室の微粉碎用媒体としては、1960年代末頃まで「シルベップ」も使われた。シルベップは径16～25mmφ、長さ16～35mmの円筒状の鋼材であった。耐摩耗性の小径ボールの普及で使われなくなり、シルベップの使用がその後の技術発展に及ぼした影響もほとんど見られないので、本稿では詳細の記述は省略する。

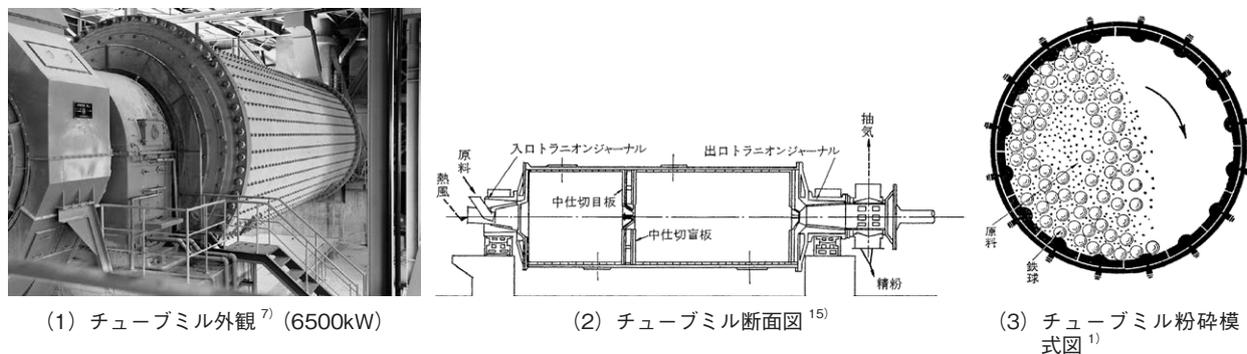


図4.12 チューブミル

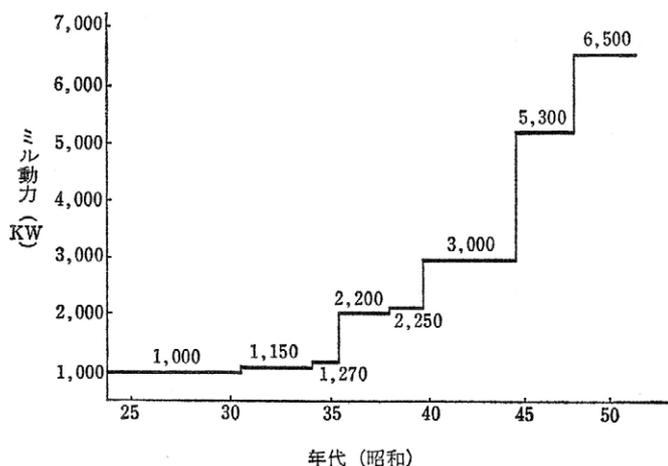
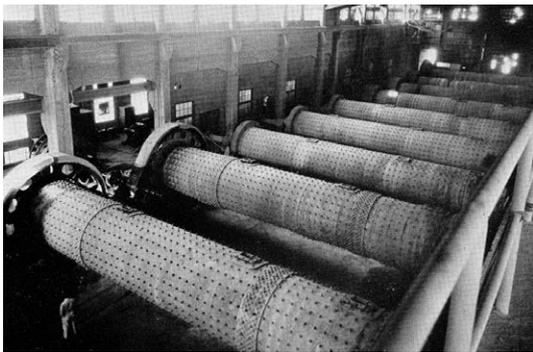
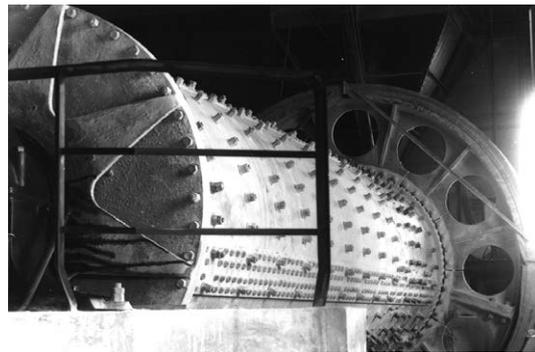


図4.13 仕上ミル動力大型化の推移³⁾



(1) 1932年設置の仕上ミル (637kW)



(2) 1950年代後半設置の原料ミル (975kW)

図 4.14 粉砕機 (ミル) 大型化の変遷の例示 (図 4.12 (1) と比較) ⁷⁾

4.5.2 乾式粉砕 (原料粉砕) ¹⁵⁾

原料の粉砕方式は、セメント製造様式別からは「湿式粉砕」と「乾式粉砕」、また粉砕プロセス別からは後述する「開回路粉砕」と「閉回路粉砕」がある。

乾式粉砕の粉砕機には、「チューブミル」と「堅型ミル (ローラーミル)」とがある。チューブミルの場合には①「乾燥と粉砕を別々に行うタイプ (乾燥別粉砕型)」と、②「原料乾燥と粉砕を同時に行うタイプ (乾燥粉砕型)」とがある。①の場合は、粉砕機の前に「原料乾燥機」が置かれる。堅型ミルは日本に導入された当初から、全て乾燥・粉砕を同時に行うタイプになっている。昭和30年代 (1960年代前半) までの乾式原料粉砕は「乾燥機前置のチューブミル粉砕」であった。乾燥と粉砕を同時に行う「乾燥粉砕ミル (エアスエプトミル)」と「堅型ミル」については、次の第5章で扱う。

4.5.3 湿式粉砕 (原料粉砕)

我が国のセメント製造が全て SP・NSP の乾式製造法になる 1975 (昭和 50) 年頃までは、湿式キルンがあり、原料粉砕に「湿式粉砕」も行われていた。チューブミルに原料と共に水を注入し、得られた水分 35% 程度のスラリーはポンプで輸送される。

湿式粉砕は、粒子の分散が良く動力消費も少ないなどの長所がある。また後の工程で原料のホモジナイジング (均斉化) を行いやすいという利点があり、その利点ゆえに、日本で最初の湿式キルンの採用は、1929 (昭和 4) 年、浅野セメントが品質レベルの高い「早強セメント」を製造するためであった (4.2.3 参照)。

一方で、粉砕媒体の摩耗速度は、乾式に比べはるかに大きくなる。なお、湿式粉砕においても、スラリー水分はできるだけ少ないほうが後の工程で有利なので、ポンプ輸送が可能な範囲でできるだけ水分を減らすために、減水剤としてリグニンスルホン酸カルシウ

ムなどを用いているケースもあった。

4.5.4 仕上粉砕 ^{3) 10)}

明治期の仕上粉砕は、フレットミル (図 3.4) が使われていたようである。原料粉砕へのチューブミルの採用は、上述のとおり 1899 (明治 32) 年の浅野セメントが最初だったが、仕上粉砕へのチューブミルの応用がいつから始まったのかははっきりしていない。しかし、以下の状況から、原料ミルへの採用後まもなく仕上ミルへのチューブミルの採用も始まり、大正年間を通じて次第に普及していったものと推定される。

秩父セメントの秩父工場は、大正から昭和に年号が変わる時期、1925 (大正 14) 年に完成して操業を開始した。この新工場に設置された仕上ミルはチューブミルで、アリスチャーマーズ社 (米) 製の長さ 7.32m、680kW、2室ミルで粉砕量 7.6t/h、その後、1927 (昭和 2) 年の増設に際しては FL スミス社の長さ 13m・3室・粉砕量 12.6t/h のミルなどを逐次増設したと記録されている。したがって大正末時点では、仕上粉砕もすべてチューブミルが採用されるようになっていたと判断される。

当時の仕上粉砕工程はほとんどが開回路だったようである。仕上工程に閉回路粉砕方式が本格的に採用されるのは、昭和 30 年代 (1955 年以降) からである。

4.6 分級 / 開回路粉砕・閉回路粉砕 ¹²⁾

「分級」とは、連続的な特性変化のある固体粒子を、ある特性値を境として分離する操作をいい、セメント工業の場合はこの特性値が「粒子径」である。分級をする装置を「分級機 (セパレーター)」といい、次の 4.7 で述べる。

乾式粉砕では、分級媒体として空気を用いた「乾式分級」がなされる。湿式粉砕では、ミル内のボール面

が常にスラリーで洗われているために、ボール面にコーティングが生成しないこと、および湿式セパレーターに適当なものがないことから、多くの場合、分級工程は付加されていなかった。

粉碎工程の構成としては、粉碎機だけの「開回路粉碎」と、粉碎機と分級機を組み合わせた「閉回路粉碎」がある（図 4.15）。

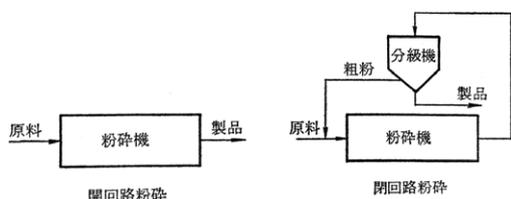


図 4.15 開回路粉碎と閉回路粉碎³⁾

開回路粉碎（Open circuit grinding）は、粉碎機の一方から原料を送入して、他の端から製品を取出す最も簡単な方式である。したがって、設備は割安となるが、製品の粒度調整がむずかしい。一方、閉回路粉碎（Closed circuit grinding）は、一旦粉碎したものを分級し、粗粒を再び粉碎機に戻す方式で、粒度分布の調整がある程度自由であり、過粉碎を避けることによって、粉碎能力ならびに粉碎効率が向上できるなどの利点があるが、それだけ設備費は増加し、また上屋も大きなスペースが必要となる。

4.7 分級機（エアセパレーター）¹⁶⁾

閉回路方式の乾式粉碎では、粉碎効率と得られる製品の品質は、セパレーターの分級性能に負うところが大きい。

分級機は、固体粒子群が受けている外力、たとえば重力、遠心力などと、固体粒子が流体中を運動することによって受ける流体抵抗とのつりあい関係が、それぞれの粒子径、密度によって相異なることを利用して、各粒子部に分離する機械である。

セメント工場で使用されているセパレーターは、分級媒体が空気であることから「エアセパレーター」に分類され、「渦流型セパレーター」が発明される 1979（昭和 54）年までは、以下の三つの型式が原料工程・仕上工程ともに使われてきた。いずれも遠心力による分離を主体とした型式である。

- ①ゲーコ型エアセパレーター
- ②スターテバント型エアセパレーター（一軸駆動方式、二軸駆動方式）
- ③サイクロンエアセパレーター

なお、渦流型セパレーターについては 5.5.4 で述べ

る。

4.7.1 ゲーコ型およびスターテバント型エアセパレーター

日本では、ゲーコ型は大正時代から使われ始め、スターテバント型（一軸型）は 1955（昭和 30）年頃から急速に普及した。ゲーコ型とスターテバント一軸型とは、基本的な構造および操作はほとんど同じであり、違いは原料の送入方法である。ゲーコ型は主翼・補助翼・散布板が取り付けられている縦軸が中空になっていて、そこを通じて原料は散布板に落ちる。スターテバントでは、原料は縦軸外周の固定シュートを通して散布板に供給される。縦軸は中空にはなっていない。スターテバント一軸型は、分級性能やメンテナンス面でのゲーコ型の改良版と言える。

図 4.16 にゲーコ型セパレーターを、図 4.17 にスターテバント型セパレーターを示す。

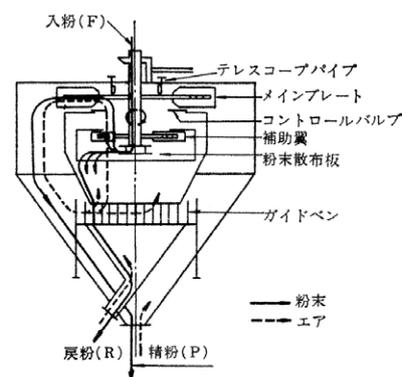


図 4.16 ゲーコ型セパレーター¹⁶⁾

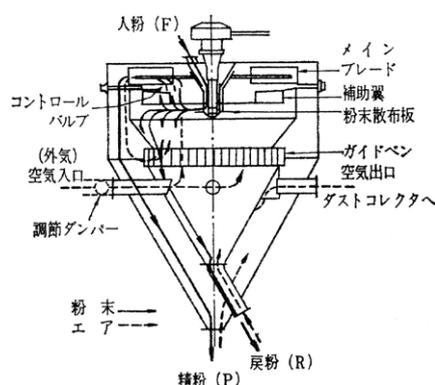


図 4.17 スターテバント型セパレーター¹⁶⁾

ゲーコ型やスターテバント一軸型では、運転中に精粉粉末度を調節できるのは、コントロールバルブの開閉面積を増減することだけである。したがって、原料の被粉砕性が大きく変わった場合など、コントロールバルブ開度の変更だけでは粉末度の調節が困難になっ

たときには、機械の運転を停止して補助翼の枚数の増減などを行なわなければならない。しかも所要の精粉粉末度、分級効率を得るためには、時には10回以上にわたって同じ調整作業を繰り返すことが必要とされ、相当の時間と労力を費やすことになる。また、主軸回転数を上げて補助翼の遠心力を増加させ精粉粉末度を細かくしようとする、同じ主軸に取り付けられたメインブレードの風量が2乗で増加し、ガイドベーンを通して入ってくる上昇気流が増加して相反する働きをするために、主軸回転数増加の効果が減殺されてしまう。

1972（昭和47）年に登場した二軸駆動方式セパレーターは、一軸型のもつ上記欠陥を修正し、機械の運転を休止せずに補助翼の回転数を変えて精粉粉末分離粒度を調節するようにしたものである。次項で述べるサイクロンセパレーターに対抗して開発されたと思われるが、ほとんど普及しなかったので詳細は省略する。

4.7.2 サイクロン型エアセパレーター

本体分級筒の周囲に6~8個のサイクロンを設置し、ファンは独立して外部に設置されており、これらの間を風管（ダクト）で接続したもので、ゲーコ・スターテバント両セパレーターと比べて基本的な分級の仕組みについては特に変わりはない。

しかしこのサイクロン型セパレーターは、分級用の循環空気ファンと粉体分散用の電動機が機械的に完全に分れているので、運転中の分級点の調節が容易であり、また装置の大型化に適しているため、昭和40年代（1960年代後半）以降の新設セパレーターは原料工程も仕上工程もほとんどがこの型式になっていった。

図4.18にサイクロン型セパレーターを示す。

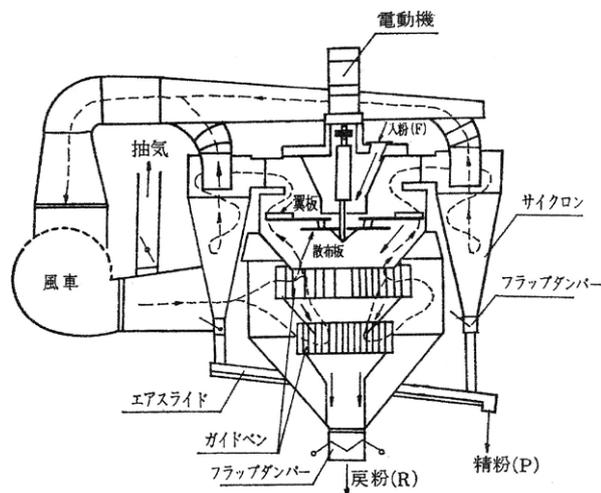


図4.18 サイクロン型セパレーター¹⁶⁾

原料は上部シュートから入り、散布板から与えられる遠心力により、旋回上昇気流中に散布される。粗粒は遠心力および重力の影響をより強く受け、そのまま沈降するかまたは側壁に達し、失速して内部バッフルまで落下する。ここで上下2段に設けられたガイドベーンを通して流入する循環気流の作用を再び受け、粗粉中に混入している微粉は旋回上昇気流に乗って再び上昇し、粗粉はそのまま落下して戻り粉となる。

微粉は気流中に散布されると、上昇気流に乗って上昇する。そして翼板の分級作用を受ける。微粉中に混入している粗粒分は、翼板によって与えられる遠心力により側壁まで飛ばされ失速して落下する。粗粉分を分離された微粉はさら上昇して排気筒に達し、旋回方向に配列されたサイクロンに導かれて気流中から分離捕集され精粉となる。サイクロンで微粉を分離した循環空気はサイクロン上部に設けられた集気ダクトに導かれ、ファンを経て中部ケーシングに入りセパレーター内を循環する。

サイクロン型セパレーターは、1962（昭和37）年にドイツのプラントメーカー・ベダグ社が開発した。我が国最初の導入は、1966（昭和41）年の秩父セメント（現・太平洋セメント）第2工場と記録されている。

4.8 原料混合貯蔵設備：エアブレンディングサイロの登場、流れは乾式法へ^{3) 17)}

原料ミル仕上り粉（精粉）は、ミル供給量を一定にしても原料の成分の変動が大きいため、そのままキルンに送ることができない。成分変動をできるだけ小さくするため、窯送り粉末原料の混合装置が必要である。

湿式ではスラリータンク、スラリーベースンにより比較的簡単に均一混合が可能である。一方、乾式の場合、均一混合の操作は非常に難しく、例えば調整タンクと呼ばれる小タンク群にミル仕上り粉を分散投入し、引出しは3~4本のタンクから同時に行う、などの操作を行っても、窯入成分変動をなかなか小さくできなかった。

このような理由から、「エアブレンディング」方式が出現する以前は、大規模な原料調合には湿式が優れていたため、セメント各社いずれも湿式の全盛期（4.2.3参照）があったのである。

しかしながら、1934年、ポリジウス社（Polysius、独）によって「エアブレンディング（air blending）」装置が開発され、乾式原料の均斉化混合が、湿式と同等ないしそれ以上のレベルで可能になってきた。そう

なると、乾式法は使用熱量が少なく、プロセスの大型化が容易であり、湿式法にとって代わる時代となった。

エアブレンディング方式には、回分式ブレンディング（バッチ式）と連続ブレンディングがある。回分式は、複数基のブレンディングタンクを交互に使用して調合を行い、目標成分の範囲に入ったものをストレージ（貯蔵）サイロに落とし、不合格のものについては、別に用意しておいた補正用粉で補正してからストレージサイロに落す方式をいう。この場合、補正の計算は比較的簡単なので、手計算でも調合が可能である。

一方、連続式ブレンディングは、仕上り粉を一定時間間隔で採取・分析し、目標からのずれの補正を計算して、CFW（Constant Feed Weigher：自動定量供給機）をセットしなおして目標と合わせる方式である。昭和40（1965）年代以降、原料の連続分析装置と連動したコンピューター制御が発達すると、連続式の威力が発揮されて、以後のブレンディングサイロはすべて連続式になった。

エアブレンディング装置の基本構成を図4.19に示す。エアブレンディングサイロの基本的な仕組みは、以下の通りである。

- ①サイロ底部に付設した「散気盤」を通じて高压空気をサイロ内部に吹込み、
- ②サイロ内の粉体を吹き上げて混合（エアレーション）する。

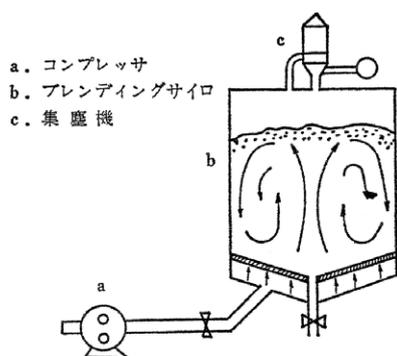


図4.19 エアブレンディング装置の基本構成¹⁷⁾

散気盤の配置やエアレーションの方法の違いなどで、いくつかの型式が発表されている。日本国内への導入は1957（昭和32）年の麻生セメント（バッチ式）が最初、連続式は1959（昭和34）年の小野田セメントが最初である。

代表的なフラージャ（米）型連続式エアブレンディング「フラージャ四分法ブレンディング（Fuller Quadrant Blending）」の仕組みを以下に記す（図4.20）。

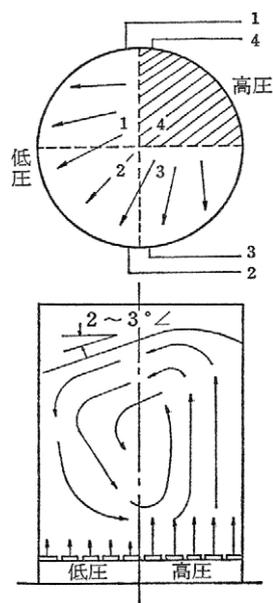


図4.20 フラージャ社エアブレンディングサイロ¹⁷⁾

このサイロの底部は出口側に向かってわずかに傾斜しており、底部全面にエアレーションユニットが配置されている。各々のエアレーションユニットの空気配管は、サイロ底を4等分して、1区画毎に独立して空気を供給できるようになっている。この仕組みを使って「サイクリング運転」が行われる。すなわち、サイロ内のある1区画のエアレーションユニットに低压の空気を送り粉体のエアレート（空気浮遊）を促した後に、高压の空気を送り込み、同時に他の3区画へ低压の空気を送る。一定時間経過後、高压空気を隣接の区画に切換えて、順次4区画が高压の空気の供給を受けるような運転を行う。高压空気の供給を受けた区画においては、エアレートされた粉体は容積を増すと同時に持ち上げられ、そのレベルが低压空気の供給を受けている他の3つの区画のレベルを越え、高压部の粉体は低レベルの方へ流動し始める。サイクリング運転によって、粉体はその高レベルの位置を変え、上下左右に巻き返し攪拌される。この切り換え時間は、通常10～20分で、粉体は40分～2時間で完全に混合する。また高压は定圧ではなく、周期的な脈動（pulsation）を与える装置が採用されている。

エアブレンディング装置も、セメント製造技術史上の画期的な技術開発の一つである。この装置によって、乾式法でも湿式法と同等ないしそれを上回る「窯送り原料の均斉性」を得られることになり、湿式法の有していた「原料の均斉化に優れ、良い品質のセメントができる」優位性が失われ、1965（昭和40）年以降建設されるキルンはすべて、熱効率が良く大型化にも有利な乾式法になった。現在では、国内にはポルト

ランドセメント製造用の湿式キルンはなくなった。

4.9 燃料の変遷 石炭→重油→石炭²⁾ 4)⁵⁾

セメント産業は「燃料多消費産業」である。セメント製造のための燃料は、明治草創期 1870 年代の竪窯以来、昭和 30 年代初め (1960 年頃) までの約 90 年間、ほとんどすべてが国内産の石炭であった。資源小国の日本にあって、セメント産業は「原料・燃料すべてが国内で調達できる」珍しい貴重な産業だったといえる。また石炭は、通常の燃焼炉では灰の処理が悩ましい問題であるが、セメント焼成炉では石炭灰はそのままセメント原料の一部となるので、灰処理の問題が生じないという点でも好都合な燃料である。

そのようななか、1951～52 年 (昭和 26～27 年) における数度の炭鉱労働者のストライキによる石炭入手難を契機に、セメント業界は重油焼成に関心をもち始め、1951 年末に宇部興産が重油焼成を始めたのを皮切りに、各社は徐々に石炭を重油に切り替えていった。しかし、国際収支悪化による 1955 年の重油消費規制や 1956 年のスエズ動乱などの影響で、重油の供給にも不安定感があり、価格も石炭に比べ若干割高であったので、この傾向は一時停滞した。しかしその後、セメントの大量生産に伴う燃料需要の増加と貿易自由化による重油価格の下落で、1960 年 (昭和 35) 年以降重油への転換が急速に進んだ。

ところが、1973 (昭和 48) 年のいわゆる「オイルショック」で、重油の供給不安と価格急騰に見舞われ、さらには 1978 (昭和 53) 年のイラン革命に伴う「第 2 次石油危機」で再び供給不安と価格上昇に直面し、セメント業界では「石炭回帰」の動きが急速に広まった。以前の石炭設備は既に廃棄されており、また国内石炭産業はほぼ消滅していたので、効率が良く安全性にも十分配慮した新設の石炭設備で、輸入炭による石炭焼成の再開となった。第 2 次石油危機からわずか 2 年後の 1980 (昭和 55) 年末には、業界全体の石炭転換率が 72% に達したと報告されている。

その後、現在に至るまで、輸入石炭がセメント焼成燃料の主体をなしているが、一方で、1980 年代以降、古タイヤ、廃油、廃プラスチック、廃木材、さらには都市ごみまで、「廃棄物の燃料化」も積極的に進められてきている。この点については、第 9 章で詳述する。

4.10 セメント品種多様化のはじまり²⁾

1873 (明治 6) 年、東京・深川の官営セメント工場において初めてポルトランドセメントが誕生したが、これが我が国における「普通ポルトランドセメント」(普通セメント・普通品) の起源である。

その後の明治期は、このポルトランドセメントの品質改良、製造方法の改善に没頭した時代で、品種の多様化はまだ見られなかった。しかし、やがてこの「普通」セメントの品質特性値・機能の一層の強化などを目的に、品種の多様化が始まった。品種の多様化は主に以下の二つの方向で進んで行く。

①ポルトランドセメントの化学成分などの調製で目的を達成する。

②ポルトランドセメントに他の混合物を添加することで目的を達成する (混合セメント)。

これら「多様化されたセメント品種」については第 8 章で詳述する。本節では、この多様化・分化の流れが、昭和初期から始まった状況について述べる。

1900 (明治 32) 年に小野田セメントは、日本で初めて「混合セメント」を製造し、佐世保軍港船渠用に納入した。この混合セメントは、セメントに化学的抵抗性を付与するため、セメントと火山灰を 3:1 (重量比) に混合したもので、その後登場する高炉セメント、シリカセメント等と同一効果をねらう「混合セメントの元祖」と称さるべきものであった (混合セメントおよびその品質改善効果については第 8 章で述べる)。

その後、1913 (大正 2) 年、八幡製鉄が高炉水滓を混合した「高炉セメント」を製造した。これは、高炉での製鉄過程で出てくる高炉スラグ (鉍滓) を有効活用しようとする試みであり、同時に小野田セメントの火山灰混合セメントと同様、普通ポルトランドセメントの品質を改善しようとする試みでもあった。

1916 (大正 5) 年には、小野田セメントが「白色ポルトランドセメント」の製造に乗り出し、当時の建築学界の注目を集めた。この白色セメントはその後今日まで引き続き製造され、品質も漸次改善されて、彫刻用あるいは塗装用のみならず、構造用コンクリートとしても十分使用にたえる品質のものとなっている。

昭和期に入って、コンクリートの応用・利用分野の広がりに応じて、需要家からも用途に応じたセメントの出現を要求する声が高まり、一方でセメント工業は、既述の通り各種の新式製造設備が相次いで導入され、またセメントに関する化学的研究も進展し (第 7

章に詳述)、需要家からの様々な要望への対応力も増してきて、セメント品種の多様化が進展しはじめた。

1929(昭和4)年、浅野セメントは「早強ポルトランドセメント」の製造に着手し、「高級ポルトランドセメント」あるいは「アサノベロセメント」の名称で販売を開始した。他社も続いて「微細」または「高級」ポルトランドセメントと銘打って、同様のセメントの製造を始めた。これらはいずれも早期に高強度を発現できるように品質改善を行ったものである。

さらに1934(昭和9)年に、浅野セメントは低熱および中庸熱ポルトランドセメントの製造に成功し、「アサノマスコンセメント」の商品名で販売を開始した。これは、水和熱(7.3参照)を少なくするため、セメントの化学成分に工夫を加えたもので、ダム・堰堤工事等に使用されるようになった。

以上、「白色」「早強」「中庸熱」など、ポルトランドセメントの品種の多様化については、第8章で詳述する。

各種の「混合セメント」の製造も昭和期に入って本格化してきた。前記の高炉セメントは、新たに浅野セメントが系列の鶴見製鉄社(現・デイ・シイ)で製造を開始した。またシリカセメントは、1935~37(昭和10~12)年になって数社が、シリカセメント、珪酸セメントあるいは金剛セメント等の商品名をもって製造・販売を始めた。これらはいずれも高炉セメントと同様、セメントに化学的抵抗性を付与するもので、主として護岸工事に使用された。

太平洋戦争は品種多様化の大きな障害となった。早強・中庸熱セメント等の高級セメントは、石炭品位の低下、あるいは製造用資材の欠乏のため製造不能となった。一方、石炭および諸資材の節約となる高炉セメント、シリカセメントが増産され、一時は全生産高の1/3に達した。またセメント使用の合理化が要請されたため、「雑用セメント」「塗装用セメント」等の強度の低い非構造用セメントも製造された。

戦後、1950(昭和25)年、セメントに対する統制が解除となり、自由製造販売体制に復帰すると、早強セメントおよび中庸熱セメントの製造も復活した。その後今日まで、セメント化学理論の発達と近代製造設備の設置にともない、セメントの機能分化による品種多様化はますます進行してきている。現在のセメント品種多様化の状況については、第8章で詳述する。ただし、現在でも、市販セメントの68%が「普通ポルトランドセメント」であり、早強・中庸熱・低熱・耐硫酸塩などを含めた「ポルトランドセメント全体」で約75%、高炉セメントをはじめとした「混合セメン

ト」が25%となっている¹⁸⁾。

4.11 セメント工場の公害問題の発生→集塵機の設置

セメント工場は、製造装置が粉砕機、焼成炉(回転窯)、送風機(ファン)などで構成されているので、粉塵・煤塵(注3参照)・騒音などの公害問題・環境問題への取組みは避けて通れない課題である。

4.11.1 公害問題の発生^{4) 6)}

我が国のセメント会社で、近隣住民との間に「深刻な形での公害問題」が持ち上がったのは、浅野セメントの深川工場(東京)が最初であった。以下、「日本セメント百年史」⁴⁾の文章を要約・引用する形で述べる。

1885(明治18)年ころ、深川区民の間にセメント工場からの降灰に対する苦情の声がたかまってきたので、警視総監(筆者注:85年12月まで大迫貞清、以降は三島通庸)は工部大学助教授で警視庁技手の曾根達蔵に命じて、浅野工場の煙害除去方法について調査させた。結局、宇都宮三郎(筆者注:2.3参照)が「煤煙は不可避、人体には無害」論を主張し、警視庁当局の住民説得の努力によって、深川工場の降灰は、その時はたいした社会問題とならずに済んだ。その後、竖窯に装入する原料を煉瓦状に固める方法の採用で降灰も減少、降灰問題はしばらくの間、解消したかの感があった。

1903(明治36)年、深川工場で我が国最初の回転窯が稼働し、製造方法に一大革命がもたらされるに至り、降灰問題は再燃の兆しをみせ始めた。回転窯を導入した当初は原石焼成法によっていたので、まだそれほどではなかった。しかし生灰焼成法に転換するとともに、回転窯をつぎつぎに増設し、連続焼成によって生産高が急増した結果、外部に飛散する降灰量も増加した。

1907(明治40)年頃になると、問題が再び表面化して、工場付近には深川青年団が組織され、当局に陳情し会社に抗議するなどして、会社と住民との対立関係は1910~11(明治43~44)年ころには険悪な情勢となった。当局の斡旋もあって、1911(明治44)年3月、会社は「5年後(1916年末)までに深川工場を撤廃する」旨、区民側に約束した。代替地を川崎に選定し、新工場の建設を急いだが、第1次世界大戦に遭遇し、諸資材の入手難に加え注文諸機械の到着が遅延したので、深川工場の撤廃期限は区民側の同意を得て1年延長された。

1年延期は認められたものの、深川工場の撤廃はもはや不可避の情勢にあった。ところが、幸運なことに、ちょうどこの時期に、米国で「コットレル式電気集じん装置」が成功している、との情報が得られた。このコットレル式電気集塵法は、1824年にドイツで原理が発見されたものを、米国の化学者コットレル（Fredrich Gardner Cottrell）が工場設備に応用できるように案出した方法である。

1916（大正5）年、浅野セメントは、特許権、機械設備その他一切を米国から直接購入することに決定した。翌1917年、集塵装置の諸機械が到着、米人技師指導のもとに、昼夜兼行で据付け工事を完成、同年末には回転窯4基の集塵装置が完全に機能を発揮することが確認された。社長をはじめ会社幹部と深川青年団、同区民代表者が協議し、区民側も集塵装置の効果が極めて大きいことを認めて、ついに工場撤廃の要求を撤回した。ここに深川工場の降灰問題は円満に解決した。

以上が、「日本セメント百年史」に書かれている「深川工場の降灰問題」の要約引用であるが、この一件が、我が国のセメント工場へのコットレル集塵機（4.11.3参照）導入の最初であり、以後、浅野セメントの工場はもちろん、国内のセメント工場に電気集塵機の採用が広がっていった。ちなみに、小野田セメントでは1933（昭和8）年に岡山県・阿哲工場に最初に設置、磐城セメント（現・住友大阪セメント）では1927（昭和2）年に福島県・四倉工場が最初、また1925（大正14）年に操業を開始した秩父セメント工場では、当初からコットレル設置と記録されている。

4.11.2 環境関係法令の整備、規制強化

昭和30年代（1960年代中頃）までは、セメント工場の公害問題・環境問題は、煤塵・粉塵・騒音といった「五感に感じる」問題が主であった。これらの「公害」対策については、技術的には集塵機や防音装置などの軽減策・抑制策があり、ほとんどの工場で、地域住民との間に大きな問題を生じることなく操業が行われていた。ただし、それはセメント工場からの煤塵・粉塵・騒音がゼロだったということではなく、セメント工場の周囲では、民家の屋根は永年の間に降り積もったダストで真っ白、というのがいわば「当たり前の風景」であった。地域住民が「仕事を与えてくれる工場だから仕方がないこと」と、一応の納得をしていたことが背景にあったと思われる。なお、日本で最初の大气污染防治に関する法律は、1962（昭和37）年に制定の「ばい煙の排出の規制等に関する法律（ばい煙規

制法）」であり、それまでは上記のような状況は「法律違反」の状態ではなかった。

1968（昭和43）年に「大气污染防治法」が制定され、さらに1970（昭和45）年のいわゆる公害国会と呼ばれた第64回国会において、大气污染防治法の大幅な改正や騒音規制法の制定があって、セメント工場は公害防止対策に厳しい対応を迫られることになった。これらの法律およびその後の法改正を通じて、五感に感じる公害だけではなく、窒素酸化物・硫黄酸化物、あるいはセメント中に含まれる重金属など、法的に一層広い範囲の「環境規制」がかかるようになってきた。これらについては第6章で述べる。

以下に、セメント工場で主として用いられている集塵機2種について簡単に触れておく。

4.11.3 電気集塵機¹⁹⁾

上記で触れた「コットレル型」（図4.21）が代表機種で、メーカーによって他にいくつかの機種があるが、基本原理は同じである。

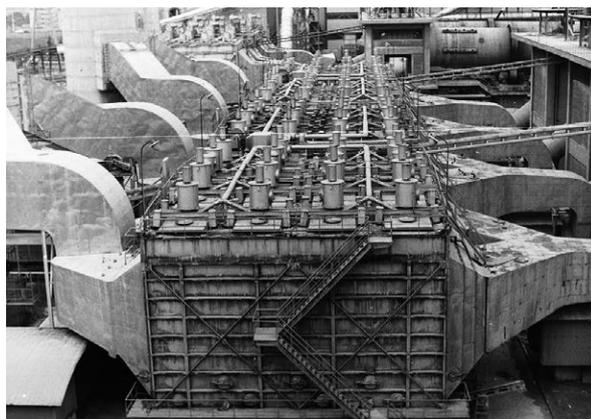


図4.21 コットレル集塵機⁷⁾

電気集塵機の原理は、放電極と集塵極とで構成される電界の中に排ガスを導き、陰極コロナによって発生するマイナスイオンを排ガス中に浮遊する粒子に付着・帯電させ、この帯電粒子を電界作用で集塵極上に分離捕集するものである。

電気集塵機の主な長所としては、①集じん率が高い（90%以上）、②低圧力損失である（10～20mmAq）、③低電力消費である、④保守が簡単、⑤高温ガスの処理が可能、などであり、短所としては、①設備費が高い、②設置面積が大きい、③排気ガスの成分によっては内部腐食や集塵が不安定化する、などがある。このような長所・短所を踏まえ、セメント工場では主に、焼成工程の基幹部分であるキルンおよびクリンカーローラーの排ガス処理に使われてきた。しかし次項で

述べるように、主として短所③の理由から、2000年代以降、キルン排ガス処理にもバグフィルターの使用が広がってきている。

4.11.4 バグフィルター¹⁹⁾

セメント工場の集塵機としては、電気集塵機と並んで、バグフィルターも広範囲に使われている。バグフィルターの原理は、家庭用電気掃除機のバグフィルターと同じである。小型な装置も可能で局所集塵に適し集塵効率も高いが、一方で、繊維質バグを使う関係上、高温・高湿の気体処理には向かないとされ、主に粉碎系統や輸送機系統などの集塵に使われてきた。

2000年代に入って、多種・多量のリサイクル資源が原燃料として使用されるようになり、セメント工場のキルン排気ガスの処理には、従来からの電気集塵機(EP・コットレル)では安定運転阻害や劣化等の問題が発生しがちになってきた。一方で、焼成技術や排熱利用の発達でキルン排ガスの温度が低下かつ安定してきたことや、耐熱性繊維の発達もあってバグフィルターの耐熱性が向上し、キルン排ガス集塵にもバグフィルターを採用する動きが始まってきている(6.1.3参照)。

4.12 セメント出荷形態の変遷：樽→袋→バラ出荷→セメントの流通革命^{4) 5) 10)}

明治時代の日本のセメント産業の草創期、工場から出荷されるセメントはすべて「樽詰め」であった。大正時代になる頃(1912年頃)から「麻袋」の使用が始まり、大正から昭和に代る(1920年代半ば)頃から「紙袋」の使用が始まった。「樽詰め」と「麻袋」は昭和10年代中頃(1940年頃)には廃止された。

明治期の「樽詰」セメントは、主に牛馬車や機帆船で需要家に届けられた。大正時代以降、牛馬車がトラックや鉄道に代り、樽が麻袋や紙袋に代っても、この「セメントを包装して運ぶ」輸送形態は、1950年代半ば(昭和20年代末)まで約80年間、ほとんど変化はなかった。

1936(昭和11)年、宇部興産は、日本で最初のセメントタンカー船(バラセメントの積込・荷揚設備を備えた専用船)によるバラ輸送を開始した。「バラ輸送」とは、セメントを袋などの容器に入れず、粉体のまま輸送することをいう。しかし、その後の約20年間は、業界全体としてのバラ出荷への大きな移行はなかった。1954(昭和29)年前後から、貨車・トラック・船を使ってのセメントのバラ出荷が各社の間で急

速に進んだ。現在ではセメント工場から出荷されるセメントの97%がバラ出荷となっている。

以下にセメント出荷形態の変遷と、バラ出荷がセメント産業全体に与えた大きな影響について述べる。

4.12.1 樽出荷から麻袋へ

セメント産業草創期に販売容器として使われた「樽」は、セメント製造技術とともに西欧から移入されたものである。日本の伝統的な「樽」は、酒・味噌・醤油の樽として今も使われている「桶に蓋をした形」の樽であるのに対し、セメント用の樽は「洋樽」(ウイスキー・ビールの樽と同じ形状、図2.10参照)であった。そのようなことから、当初は桶職人にセメント樽を作らせた。杉の割板に竹の輪をかけた樽に、人手でセメントを詰めていたようである。小野田セメントの記録では、創業から約10年後の1894(明治27)年には製樽作業に機械が導入され、遅くとも明治30年前後には樽詰機が使われはじめていたようである。また、セメントの取引上の重量単位としては、1880(明治13)年に官営工場が「ポンド建て」とした。

小野田や浅野工場の創業時(1883・明治16年頃)は、1樽400ポンド(181kg)であったが、1901(明治34)年1樽380ポンド(172kg)に業界で統一がなされた。しかし、牛馬や人の背で運ぶために、半樽とか4分の1樽なども、客の求めに応じて製作出荷していた。

木製の樽は密閉容器として転がして運ぶこともできて、重宝ではあったが、乾燥不十分な木材を使うと、収縮して中身が漏れ出すような問題や、樽の使用量が増加してくると、用材(木材)の手配に難儀するような課題もあった。

1898(明治31)年、小野田セメントが我が国で初めて麻袋(152ポンド、69kg)による試用出荷を開始したが、袋の規格もなく、砂糖・肥料・小麦粉などの古袋を代用するなど、明治末年までは補助的な利用の段階を脱しなかった。1911(明治44)年、同社が「三分の一袋」(127ポンド=58kg、1樽の1/3の意)の麻袋を標準化し、以降このサイズの袋が広く使われるようになった。

1914(大正3)年、第1次大戦が始まると、木材価格が急騰して樽製造が困難になり、麻袋の使用が拡大された。1921(大正10)年、麻袋入りセメントは127ポンド(58kg)と95ポンド(1樽の1/4、43kg)の2種とされ、1924(大正13)年には、メートル法を採用して、麻袋入り正味50kg、樽入り正味170kgとする

ことを、セメント業界で決議した。

4.12.2 樽・麻袋から紙袋へ

「樽」「麻袋」については、使用後は客先から回収するのを基本としていたが、当然のことながら、手間もコストもかかる。そこで、セメント各社が「使い捨て」の紙袋の使用を開始したのは、年号が大正から昭和に代る時期（1926～27年）からである。

日本で最初に紙袋を採用したのは、秩父セメントの操業開始の時、1925（大正14）年とされている。同社が新工場用に米国に紙袋用袋詰機を注文したところ、紙袋4千枚がおまけに付いてきた。それが「クラフト紙4層重ね」の袋で、以後昭和40年代まで同種の紙袋が使われた、とのことである¹⁰⁾。そのような経緯から、紙袋へセメントを詰める作業（パッキング）は、紙袋導入当初から袋詰機（パッカー）が採用されていた。紙袋を作業者がパッカーにはめ込むと、セメントが自動的に袋に詰められ、所定の重量になると自動的にセメントの供給が停止され、輸送用コンベアに落ちる仕組みになっている（図4.22）。

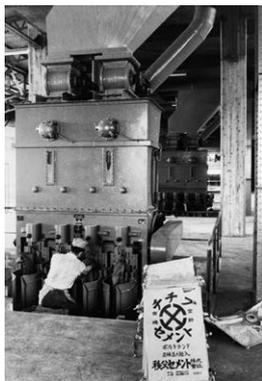


図 4.22 紙袋用袋詰機（パッカー）⁷⁾

紙袋1袋のセメント重量は当初から約50年間正味50kgであったが、その後、左官業界などユーザー側からの要望を受けて、1971（昭和46）年に40kgに、さらに1996（平成8）年に25kgに軽量化された。

昭和初期の紙袋採用から次項で述べる「バラ化」が本格的に始まるまでの約30年間は、工場からの出荷セメントの90%以上が紙袋詰めでお荷されていた。紙袋による出荷は今日も続けられているが、紙袋で流通するセメント量は全体の3%にまで低下している。

4.12.3 紙袋からバラセメント出荷へ：セメント業界の「流通革命」

昭和30年代（1950年代後半）に入って、セメント工場からの出荷形態は、紙袋からバラ出荷に急速に変

化していった。このセメント出荷・流通の「バラ化」は、単に出荷形態の変化にとどまらず、セメント流通形態の大変革、さらに言えば次章・第5章で詳述する「セメント産業の構造改革」を促す大きな要因の一つとなっていった。

セメント会社にこの「バラ化」を促した主な要因は以下の3つである。

- (1) セメント会社自体の「輸送コスト削減」の努力
- (2) 建設現場での「生コンクリート（Ready mixed concrete）」（注4参照）の利用の普及。
- (3) コンクリート製品産業（注5参照）の成長

「バラ化」による輸送コスト削減は需要家側にもメリットが大きいため、需要家側もバラ化対応の設備改善などを積極的に推進、「バラ化」は急速に進展した。

(1) 輸送コスト削減のための「バラ化」²⁾

セメントは商品として、①重くかつ嵩高であり、②長期の保存がきかず、③運賃負担力が弱い、という特性がある。さらに、我が国のセメント工場の大部分は原料立地工場であるため、需要地である大都市圏へのセメント輸送にはかなりの経費がかかる。このような事情から、セメントの販売原価のうちかなりのウェイトを流通コストが占めている。したがって、輸送面の手段・方法において改善・合理化を図り、輸送費の軽減を図ることは、セメント会社にとって非常に重要な課題といえる。

セメントの輸送機関別出荷は、戦前は貨車・船舶各々40%、トラックその他が20%であった。ところが終戦直後は、船舶不足から船運賃が割高となったため貨車輸送が急増し、1945（昭和20）年には、鉄道63%、海送20%、その他17%となった。ついで1952～53（昭和27～28）年の朝鮮動乱の時期には、国内産業界の活況により貨物輸送量が激増し、海陸ともに輸送逼迫の時代を迎えた。さらに1957（昭和32）年の神武景気とうたわれた好況時にもふたたび輸送困難をきたし、鉄道運賃の値上り、海上運賃の急騰を招き、輸送事情は最悪の状態となった。

このような輸送の隘路を開くべく登場したのが、セメントのバラ輸送体制である。セメント会社自身でバラ輸送施設を整備し、セメント輸送を自社運営することで、輸送面の合理化を図る方針が各社で採られることとなった。

「バラ化」セメントの流通経路は、概略以下のようになる：

- ①臨海セメント工場の場合

セメント工場→セメントタンカー船→サービス

ーション (SS) → バラトラック → 需要家 (生コン工場、コンクリート製品工場、ダムなどの大工事現場)

② 内陸セメント工場の場合

セメント工場 → バラトラック → 需要家

臨海セメント工場の多くは、北海道・東北・中国・四国・九州など、大都市圏から離れて立地しており、セメントはタンカー船で首都圏・中京圏・関西圏などの大消費地の SS (サービスステーション) に一次輸送される。一方、内陸工場の多くは大消費地近郊に立地しており、工場から直接バラトラックで需要家に届けるケースが多い。粉体であるセメントが液体の石油製品と同じような流通形態を持つことになったのである。バラトラックへのセメントの積込みの様子を図 4.23 に示す。



図 4.23 バラトラックへのセメント積込み⁷⁾

バラ輸送による流通合理化の主な効果として、次のことが挙げられる。

① 輸送上の機動性

バラ輸送の場合は、荷役はすべて機械化されて、積み卸しも包装品の場合に比べて著しく時間が短縮される。また雨天の際も支障なく荷役可能である。また輸送手段である船舶・貨車・トラック等すべてを、社有かあるいはそれに準ずる形態で運営することにより弾力的な輸送を行なうことができる。

① 輸送費の節減

バラ輸送は、以上のように、荷役が簡素かつ迅速化されるので荷役料も安く済む。輸送中の減損率も包装品に比べて著しく少ない。陸上運賃 (鉄道・トラック) に対する海上運賃の相対的な低下は、遠隔地にある臨海工場を、都市近郊立地の内陸工場と十分競争し得る立場に押し上げた。

(2) 建設現場での「生コンクリート」の利用の普及⁴⁾

前記 (1) のようなメリットがあるにも拘わらず、日本のセメント産業の草創期から約 80 年もの間、出荷・流通形態が「包装品」のままほとんど変化がなかったのは、「工事現場でコンクリートを練る」、すなわち「セメント・砂利・砂・水を工事現場で混練する」というコンクリート施工法が続いていたからである。

この状態に大きな変化を与えることになったのが、生コンクリート (生コン) の導入・普及である。工事現場でコンクリートを練るのではなく、生コン工場で計量・混合した生コンクリートを混練をしながらトラック (生コン車、ミキサー車) で工事現場に運ぶ。工事現場ではその流動化された生コンクリートを打設するだけ、という形にコンクリートの施工形態が大きく変化しはじめたのである。

生コンクリートの利用は、米国ではすでに戦前から普及していたようであるが、日本では、1949 (昭和 24) 年に磐城セメント (現・住友大阪セメント) 系の「東京コンクリート」社が東京・業平橋に設立したのが最初とされている²⁰⁾。その後しばらくは大都市を中心にしての広がりであったが、昭和 30 年代半ば (1961 年以降) からは急激に生コンプラントが増加していった。プラント数は 1967 (昭和 42) 年には 1,067、5 年後の 1972 年には 2,936、その 5 年後の 1977 年には 4,808 工場と、10 年間で約 5 倍に急増し、その分布も全国各地に普及するに至った。

生コン工場へ納入されるセメントは、ほとんどがバラトラックで運ばれている。

(3) コンクリート製品産業の成長

今日では工場生産されたコンクリート製品は、社会の隅々まで行き渡って使われている。これら多様な品種のコンクリート製品の中には、欧米で実用化されて、日本でも戦前から生産が開始されていたものもあるが、今日のようなコンクリート製品の隆盛を見るに至ったのは、太平洋戦争以降である。戦後復興の中で需要のすそ野が広がり、昭和 30 年代以降の高度成長期に、高速道路、新幹線、下水道整備、集合住宅建設等々で、コンクリート製品産業が一挙に拡大の時期を迎えた。

このコンクリート製品工場へのセメントの納入も、昭和 20 年代まではコンクリート製品工場の規模も小さく袋物が使われていたが、昭和 30 年代以降はバラトラックによって搬入されるようになっていった。

(4)「バラ化」総括

戦後の復興期から高度成長期まで、上記(1)輸送コスト削減のための出荷・流通設備のバラ化、(2)生コンクリート化の進展、(3)コンクリート製品産業の成長、これら三つの事象がほぼ同時進行する状況の中で「バラセメント化」が進展した。1951(昭和26)年当時、バラで輸送されるセメント量は全輸送量のわずか6%だったものが、7年後の1958(昭和33)年には25%に達した。1980年頃には90%以上がバラ輸送になり今日では、工場出荷の97%がバラ出荷である。

以上述べてきたような「バラセメント輸送」体制は、経済的有利さが最大の誘因であったことはいまでもないが、粉体をバラ輸送するための輸送設備・貯蔵設備等における技術的な進歩が背景にあったことも忘れてはならない。ただし、これらの設備・装置の多くは、図1.3に示したセメント工場の外にある設備であり、他の粉体工業でも活用されている機械・設備も多く、「セメント工場におけるセメント製造技術」を対象とする本稿では詳細は割愛する。

なお、2013年でのセメント出荷先割合は、生コンクリート向けが約72%、コンクリート製品向けが約13%、その他が約15%となっている¹⁸⁾。

注1： 1次空気、2次空気

窯内に燃料を吹き込むバーナーから、燃料と一緒に吹き込む空気を1次空気、1次空気の不足分を補うためにバーナー以外の通風口から窯内に送られる空気を2次空気と呼ぶ。セメント焼成の場合、2次空気は高温のクリンカーをクーラーで冷却した空気が用いられる。

注2： オイル(石油)コークス

減圧残油等の石油系重質油をコーキング装置等で熱分解処理した固体残渣で、主成分は炭素である。

注3： 煤塵と粉塵

「大気汚染防止法」では以下のように定義されている。
煤塵：燃焼・電気の使用に伴い発生する粉塵(いわゆるスス)。
粉塵：物の破碎、選別その他の機械的処理又は堆積に伴い発生し、又は飛散する物質

注4： 生コンクリート(生コン、Ready mixed concrete)

セメント・砂利・砂・水を計量して混練した状態の、硬化前のコンクリート。フレッシュコンクリートともいわれる。生コンクリートを作る工場を「生コン工場」、その工場から生コンを混練しながら工事現場まで運ぶトラックを「生コン車」「ミキサー車」と呼ぶ。

注5： コンクリート製品

コンクリートを工事現場で打設するのではなく、工場で成形・生産して工事現場に運んで施工されるコンクリート製品を「コンクリート製品」と呼んでいる。U字溝、ブロック塀、舗装ブロック、住宅やビルのコンクリート壁、下水道管、電柱、河川護岸、鉄道橋や道路橋の橋樑、トンネルの内壁等々、様々な製品がある。

参考文献

- 1) 杉下捨三, 日本のセメント, ポプラ社, 1962.
- 2) 藤田 稔, セメント, 有斐閣, 1960.
- 3) 岡部達夫, 秩父セメント(現・太平洋セメント)社内資料「セメント読本 第4巻 製造技術」, pp. 41-51, 1978.
- 4) 日本セメント株式会社, 日本セメント百年史, 1983.
- 5) 小野田セメント株式会社, 小野田セメント百年史, 1981.
- 6) 上野 孝, セメント技術史補遺, 小野田セメント, 1980.
- 7) 太平洋セメント株式会社提供
- 8) 日本工業新聞社, 躍進物語・小野田セメント, 1962.
- 9) 一柳俊一, 磯部郁夫, 須藤勘三郎, 原田 宏, 秩父セメント(現・太平洋セメント)社内資料「セメント読本 第4巻 製造技術」, pp. 144-152, 1978.
- 10) 秩父セメント株式会社, 秩父セメント五十年史, 1974.
- 11) セメント協会, 燃料専門委員会報告 T-2 エアークエンチングクーラーに関する調査, 1955.
- 12) セメント協会, 生産技術専門委員会報告 T-22 省エネルギー・省資源技術に関する報告書, 2002.
- 13) 望月明, クリンカークーラーの現状と将来, 第34回セメント製造技術シンポジウム報告集, pp. 71-84, 1977
- 14) セメント協会, 燃料専門委員会報告 T-11 ローターキルンクーラーに関する調査, 1974.
- 15) 一柳俊一, 黒滝厚俊, 根岸保, 秩父セメント(現・太平洋セメント)社内資料「セメント読本 第4巻 製造技術」, pp. 96-111, 1978.
- 16) 牛木 稔, 黒滝厚俊, 秩父セメント(現・太平洋セメント)社内資料「セメント読本 第4巻 製造技術」, pp. 111-118, 1978.
- 17) 斎藤 満, 秩父セメント(現・太平洋セメント)社内資料「セメント読本 第4巻 製造技術」, pp. 118-125, 1978.
- 18) セメント年鑑 2014年版, セメント新聞社, 2014.
- 19) 加藤孝志, 金子幸一, 秩父セメント(現・太平洋セメント)社内資料「セメント読本 第4巻 製造技術」, pp. 218-229, 1978.
- 20) 住友セメント株式会社, 住友セメント八十年史, 1987.

5 | 日本のセメント製造技術の開花:高度成長期以降 (1960年-) ^{1) 2) 3) 4)}

日本経済は、1960年代初頭から1980年頃までの約20年間、期間中の2回にわたる「オイルショック」を克服して、「高度成長」を続けた。セメント産業もその中であって、拡大成長路線を享受した。1960（昭和35）年に約2200万トンだったセメント生産高は、1979年には約8,800万トン（内需は8,300万トン）とそれまでの史上最高を記録した。その後、日本経済は低成長時代になり、セメント需要も減少基調になってきたが、一時的には阪神・淡路大震災やアジア諸国への輸出増などがあって、1996年には生産高は1億トン直前（内需は8,240万トン）まで伸びた。しかし、以降は減少傾向が続き、2014年の生産高は6,100万トン（内需は4,500万トン）と、東日本大震災の復興需要などがあるものの、1996年の生産高の60%程度にまで減少している。セメント国内需要の推移を図5.1に示す。

このセメント産業の高度成長→低成長→市場縮小の流れの中で、セメント製造技術の技術開発の内容も以下のような変化が見られた。

- ①高度成長期には製造設備の「大型化」が進められた。
- ②低成長期になるとコスト削減のための省エネ技術開発に力が注がれた。
- ③市場縮小に直面してからは「資源循環型社会構築貢献事業」への転進を図るための技術開発が中心になった。

1960年以降のセメント技術に関する流れを大きくまとめると、以下のようになる。

- (1) セメントキルンの大型化が進行した。
キルンの大型化に対応して、原料工程・仕上工程・出荷工程の機械・装置も大型化した。大型化には大きな投資が伴うことから、石灰石鉱山の鉱量とセメント出荷の立地条件に恵まれた「重点工場」を選んで、増設投資が行われるようになった。
- (2) 大型化の過程で、「乾式ボイラー付」「湿式」「レポール」などの在来方式に対するSPキルン（Suspension Preheater Kiln）の優位性が明瞭になった。
- (3) 上記(2)に続いて、SPキルンの改良型としてのNSP（New SP）キルンの開発が始まり、日本発の世界的最新セメント製造技術「NSP方式」が確立した。
- (4) 2回のオイルショックを経て、セメント工場の全ての機械・装置が「省エネ」追求型になっていった。キルンのNSP、粉砕機の堅型ミルの優位性が明確になり、また渦流型分級機（O-SEPAなど）、堅型ミル式予備粉砕機（CKPなど）、堅型セメントミル（OKミルなど）など、粉砕機の大幅な効率アップにつながる日本発の技術開発が続いた。キルン・クーラーの排熱をぎりぎりの低温度まで使い切る「低熱発電（廃熱発電）」も普及した。結果として、日本のセメント産業のエネルギー原単位は世界のトップレベルとなった。

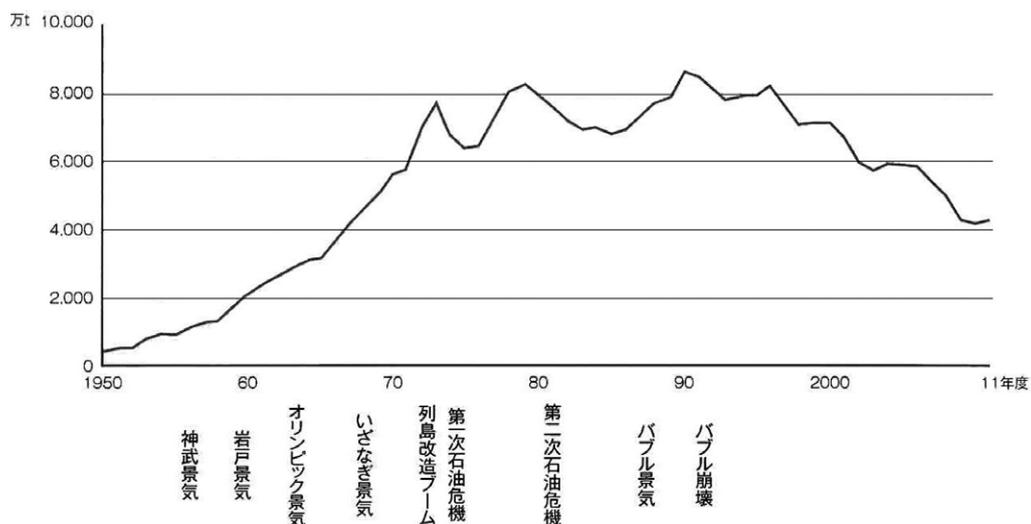


図 5.1 セメント国内需要の推移 (1950～2011) ¹⁾

- (5) 上記 (1) ~ (4) までの全過程・全工程を通じて、プロセスのコンピューターコントロール化が進行し、工程の安定化、品質の向上が進んだ。
- (6) 1970年代に環境関係の規制法が整備され、セメント業界も厳しい対応を迫られたが、既存技術の徹底利用に独自の技術開発を加えて、厳しい規制値をクリアしていった。
- (7) 1990年代に入ってから「地球温暖化問題」が大きく取上げられるようになった。燃料の燃焼に加えて、原料の石灰石の脱炭酸でも二酸化炭素を排出するセメント産業は、国際的に手を結んで対応策を研究するべく取り組みを進めている。
- (8) 1960年代以降、機器分析装置、電子顕微鏡、X線分析装置などに大きな進歩があり、結果として、セメント鉱物やセメント水和物について詳細な知見が得られるようになり、それら知見に基づいた「機能性のセメント」も次々と開発された。
- (9) 「省エネ」そして「地球環境保全のための省資源」を追求する努力の中から、「セメント製造を通じて廃棄物処理をする」という新しい事業の芽が生まれてきた。
- (10) 1990年代後半以降、セメント需要が縮小する事業環境の中で、産業廃棄物や都市ごみを処理する事業は有力な収益源に育ってきた。その「廃棄物再資源化事業」を拡大するために、「より多くの廃棄物をセメント製造工程で処理できる」ための技術開発が追求された。エコセメント、塩素パイパス、AKシステム（いずれも第9章で詳述）などの斬新なアイデアが次々と実用化された。

以上が1960年代から今日に至る約半世紀の日本のセメント製造技術の発展の流れであるが、このうち(1)~(5)を本章で、(6)(7)については次の第6章で、(8)については第7・8章で、(9)(10)については、第9章で詳述する。

5.1 SPキルン（サスペンションプレヒーター付キルン、Suspension Preheater Kiln）^{1) 5) 6)}

1960年~1980年の20年間は、国内のセメント需要が単調増大で増え、一方で公害関係法規制が厳しくなった時期であった。そのような事業環境の下で、セメントキルンの性能としては、①熱効率が良好で、②1基あたりの焼成能力が大きく、③長期安定運転が可能で、④高品位のクリンカーが得られ、⑤環境汚染要素が少ない、ことが求められた。

SPキルン及び後述するSPキルンを改良したNSPキルンは、これらの点において在来キルンよりも優れ

ており、1963（昭和38）年、わが国最初のSPキルンが第一セメント（現・デイ・シイ、神奈川県川崎市）で運転開始されて以降、NSPが開発される1970年代中期まで、新增設されるキルンはほとんどがSPキルンとなっていった。

1975（昭和50）年時点で操業していたキルンの様式別「焼成熱量」、「容積当り焼出量」、それぞれの様式の「最大能力キルン」を表5.1に示す。

表5.1 キルン様式別焼成熱量・容積当り焼出量・最大能力キルン⁵⁾

キルン様式		焼成熱量 (H) kcal/kgcl'	容積当り能力 kg/m ³ ·h	最大能力 t/D
乾式	ボイラ付(DB)	1,520	38.8	3,300
	レボール(L)	850	63.0	2,800
	シャフト(S)	890	125.4	260
	改良焼成法(NCB)	450	167.6	2,600
	サスペンションプレヒーター付(SP)	760	64.4	5,300
	新" "(NSP)	710	141.0	8,000
湿式	フィルタ・ボイラ付(WFB)	1,520	35.4	740
	フィルタ付(WF)	1,390	23.7	860
	ロング(W)	1,240	22.9	2,200
	レボール(WFL)	920	48.7	850

注1) 「焼成熱量」欄はkg-clinker当りの熱量kcalを示す(kgcl' = kg-clinker)。

「容積当り能力」は、キルン内容積1m³当りの1時間当たりクリンカー焼出量。

注2) 「焼成熱量」は「回転窯に吹込まれた焼成熱量」だけである。

NCB（改良焼成法、生灰焼成法）と他様式の比較には、石灰窯の熱量（約550kcal/kgcl'）を加える必要がある。

SPキルンは、プレヒーター中で、①原料粉末をキルン排ガス中に浮遊懸濁（サスペンション）させて熱交換し、②排ガスの保有熱で原料の予熱と脱炭酸を進行させることで、③在来の他様式キルンより高い熱効率を得る、ことを目的として、ドイツのプラントメーカー・フンボルト社が1950年に開発した。その後、ポリジウス、ベダーグ、クルップ（以上ドイツ）、FLスミス（デンマーク）などから、原理的には同じだが多少形式の異なるSPキルンが発表された。図5.2にSPキルンおよびその改良型であるNSPキルン（5.2で詳説）の一般的な構造図を示す。

SP方式が、それまでの在来キルン様式に比べて優れている主な点は、「熱効率が良い」、「大型化が可能」、「長期連続運転が可能」なことである。以下、これらの特長について述べる。

5.1.1 SPキルンの特長^{1) 2) 3) 5) 6)}

(1) 熱効率の良さ

熱効率の良さ（表5.1の「焼成熱量」欄参照）の鍵となっているのは、「サスペンションプレヒーター」

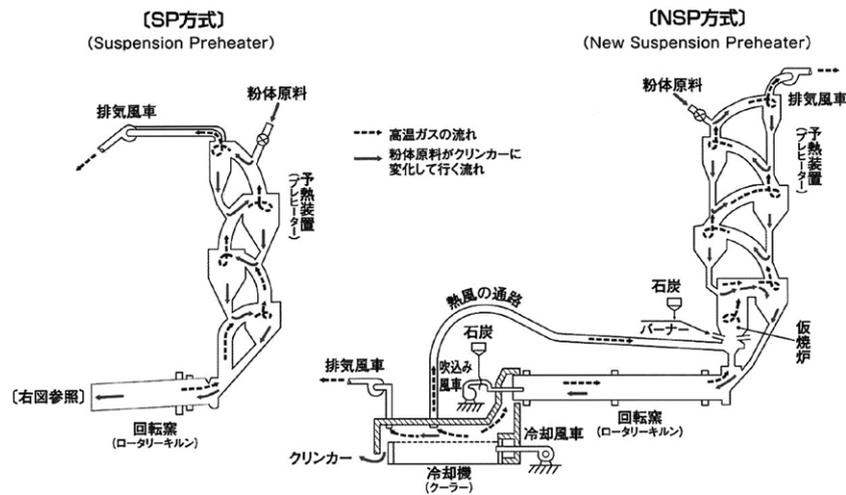


図 5.2 SP方式とNSP方式の構造比較図¹⁾

という熱ガスと原料の間の巧妙な熱交換の仕組みである。

原料は、乾燥・調合・粉砕された後、ブレンディング（原料成分の均斉化）されて、CFW（Constant Feed Weigher、定量供給機）を経てプレヒーターに送られ、最上部から熱ガス中に投入される（図 5.2 参照）。その後、各サイクロンの段ごと（4 段～5 段）に、浮遊→受熱→固気分離をくり返ししながら下降し、約 40% 程度まで脱炭酸されて回転窯に入る。

一方、キルン排ガス（1050～1100℃）は、各サイクロンで原料と熱交換しながら上昇し、最上段サイクロンを出る時はガス温度 350～370℃まで低下する。この排熱は排気風車によりプレヒーターから吸引排出されるが、その余熱はさらに排熱発電・原料乾燥に利用される。なお、サイクロンの段数は 4 段が多いが、プレヒーターでの熱交換の一層の向上を狙って、一部では 5 段サイクロンの SP も建設された。

プレヒーター系全体を見ると、最上部から送り込まれた原料は、サイクロンの各段ごとに効率の良い「並流熱交換」をしながら重力で次々と段を下がりながら高温部に向かって「向流熱交換」をしていく、という熱交換の理に適った巧みな仕組みが作られている。これによって CaCO₃ の約 40% の CO₂ が分解され、熱消費は 3,150～3,250kJ/kg-clinker まで下げられる。また、以下に述べるように、キルンの大型化と長期安定運転を可能とした。

SP キルンの熱収支を表 5.2 に示す。表で見ると各型式間に多少の優劣があるように見えるが、同じ条件で比較したデータではないので、「各型式間での本質的な差は認められない」とするのが妥当な判断であろう。焼成効率の定義は表 4.2 に記載している。

表 5.2 SP キルンの熱収支（単位：kcal/kg-clinker）⁶⁾

項目	型式別 キルン 基 数	S P キ ル ン				計 (43基)
		D ボール (21基)	フンボルト (14基)	ベダーグ (7基)	ス ミ ス (1基)	
入	重油の燃焼熱	(97.1) 816.7	(97.6) 828.9	(97.1) 785.8	(97.1) 782.0	(97.3) 814.8
	その他	(2.9) 24.3	(2.4) 20.6	(2.9) 23.4	(2.9) 23.1	(2.7) 23.0
熱	入 熱 合 計	(100.0) 841.0	(100.0) 849.5	(100.0) 809.2	(100.0) 805.1	(100.0) 837.8
出	クリンカー焼成用熱量	(50.6) 425.9	(47.3) 401.1	(52.3) 423.1	(53.7) 432.9	(49.8) 417.5
	プレヒータ排ガス顕熱 (含スプレー水の蒸発潜熱)	(20.2) 169.5	(22.2) 188.6	(20.9) 169.1	(21.9) 176.1	(21.0) 175.8
	クリンカーの持去る熱量	(2.9) 24.0	(1.9) 16.4	(2.9) 23.2	(4.1) 33.3	(2.6) 21.6
	クーラ排ガス顕熱	(14.2) 119.4	(13.2) 112.3	(12.6) 102.2	(0) 0	(13.3) 111.5
熱	放射その他の損失熱	(11.0) 92.2	(13.4) 114.0	(9.3) 75.1	(19.2) 154.3	(11.7) 98.0
	その他	(1.1) 10.0	(2.0) 17.1	(2.0) 16.5	(1.1) 8.5	(1.6) 13.3
	出 熱 合 計	(100.0) 841.0	(100.0) 849.5	(100.0) 809.2	(100.0) 805.1	(100.0) 837.8
焼 成 効 率 (%)	50.8	46.8	51.9	52.9	49.7	

(2) 長期連続運転、そして大型化が可能

高度成長でセメント需要も急増していくなかで、セメント工場は生産能力の増強・増大が強く求められるようになってきた。そのような経済環境の中で、SP キルンは日産能力の増大と長期連続運転、すなわち（日産能力）×（連続運転日数）の両方を大きくできる可能性を有しているため、1960 年代半ば以降、新增設されるキルンのほとんどが SP キルンになった。「大型化」、「長期連続運転」というこの SP キルンの 2 大特長は、プレヒーター部分、すなわち「高温排ガスの流路に、可動部分やボイラー水管のような摩耗部分がない」ということに起因する。以下に若干の補足説明をする（表 5.1 参照）。

レポールキルンの場合、焼成熱量では、SP に比べて格段に劣るというほどではない。後述するような SP キルンの難点「サイクロン詰り」がないことを考えると、使い勝手の良いキルンだともいえる。しか

し、4.2.4でも述べたように、レポールプレヒーターは、900℃～1,000℃という高温ガス流の中でグレートを連続移動運転するので、大型化すると機械的に無理が生じ故障が多くなるため、最大能力は2,000t/dまでだろうとされていた。このため、1980年代から始まる3,000t/dを超えるような大型SP・NSPキルンが建設される波の中で、レポールキルンは日本のセメント業界からは姿を消していった。

ボイラー付キルン（乾式・湿式）の場合、焼成熱量の面でSPキルンに太刀打ちできないことに加えて、余熱ボイラーの水管のメンテナンスやボイラーの点検のために年に数回の計画休転が必要であり、半年以上の連続運転は不可能であった。また、余熱ボイラーの構造上からも、1960年代のボイラー付キルンは最大規模になっていたと考えられていた。

湿式ロングキルンの場合、SPキルンに対し、焼成熱量では遠く及ばないが、長期連続運転という点では十分合格点であった。しかし、キルンの規模（径・長さ）も機械構造的に最大になっており、当時の既設キルンを上回る大型化は困難であった。なお、ロングキルンは、キルン自体が既に大型であるが故に、SPタワーを付設することで2倍以上の増産が可能になるケースもあり、そのような「様式転換」をしたロングキルンも見られた。

5.1.2 SPキルンの問題点

上記のような優位性で、在来型のキルンを短期間で新增設の対象から駆逐したSPキルンではあるが、一方で、いくつかの問題点も明らかになってきた。なかでも主たる問題点とされた「サイクロン詰り」と「耐火煉瓦寿命の問題」を以下に説明しておく。

(1) サイクロン詰り

SPキルンの運転上の最大の難点が「サイクロン詰り」である。高温の原料が流れるサイクロンでは、原料中あるいは排ガス中の低融点成分（主としてNaやKの塩）が融けてサイクロン内壁に付着し、成長すると剥落して、サイクロン下部の原料出口シュートを詰まらせてしまうことが起こる。一旦サイクロン出口が詰まると、毎分数トンの原料が流れているだけに、サイクロン内部はたちまち高熱原料で埋まってしまう、キルン停止に追い込まれ、人力でのサイクロン内部のダスト除去作業をせざるを得なくなる。高温環境での危険な作業であり、またキルン休止の経済的な損失も大きいものである。対策として例えば以下のような方法が採られている：

- ①アルカリ分の少ない原料を選ぶ。
- ②プレヒーターの安定運転（排ガス温度上昇、原料の量・成分の変動を小さく）を心掛ける。
- ③定期的に（例えば毎交代1回）サイクロン内部のコーティング除去をする（エアブロー装置、超高圧水による人手作業など）。

ほとんどの工場では、①②③の方法を併用してサイクロンが詰まらないように努力する、それでも起きてしまうことはある、というのが実情だった。このサイクロン詰りは、のちのNSPキルンになっても大きな変化は見られなかった。

状況を大きく改善させたのは1990年の秩父セメント（現・太平洋セメント）による「塩素バイパス」の発明である。塩素バイパスとは「プレヒーター内の低融点アルカリ成分の濃度が高くなったら、熱ガスの一部を系外に抜き取る」という装置で、9.2.2で詳述する。これによってサイクロン詰まりは大いに軽減された。塩素バイパスは、今日では「セメントキルンでの廃棄物処理」に欠かせない設備として位置づけられているが、もともとは「サイクロン詰りの解消」のために取り組んだ結果の発明であった。

(2) 内張り耐火煉瓦の寿命

「熱効率」「長期連続運転」「大型化」で選ばれて1960年代から70年代にかけて新增設が進んだSPキルンも、キルン径6m・焼出量5,000t/dあたりまで大型化が進んだところで、一つの壁にぶつかることになった。「内張り耐火煉瓦の寿命」の問題である。

1963（昭和38）年に操業を開始した日本最初のSPキルンは、径4m・長さ62m・能力1,200t/dであった。以後、各社が新增設するSPキルンは次々と大型化され、1972（昭和47）年には径6.2m・長さ125m・能力5,300t/dという巨大キルンまで登場した。

このように、キルン径が6m近くまでになってくると、キルン内部に内張りされている耐火煉瓦の寿命が短くなり、長期運転に制約条件となってくることが明らかになってきた。耐火煉瓦の寿命に影響する主な要因は以下の二つである。

- ①径が大きくなると、キルンの内張り煉瓦を支えるアーチの支持力が弱くなっていく。このために運転中に「煉瓦落ち」する危険が高くなる。
- ②焼出量が大きくなると、キルン内に吹込む燃料も多くなり、焼成帯（最高温部）の熱負荷が大きくなって、耐火物を短命化することにつながる。

この「壁」を乗り越えることが、次項に述べるNSPキルンの開発の大きな目的の一つであった。

5.2 NSP キルン： 「日本発」の世界的技術^{1) 2) 3) 5) 6)}

NSP キルンは、世界中で今も活躍している「日本発」の技術である。日本のセメント会社数社がそれぞれに単独あるいはプラントメーカーと組んで開発を行った。いくつかの方式が成功裏に開発されたが、いずれの方式も、SP キルンのプレヒーター部に、別の燃焼炉（仮焼炉）を組込んで、原料の脱炭酸率を向上させ、回転窯の焼出能力を増大させる焼成方式である。NSP 方式のプレヒーターとキルンの外観写真を図 1.4 に、SP キルンと NSP キルンの構造の比較を図 5.2 に、焼成反応プロセスの比較を図 5.3 に示す。

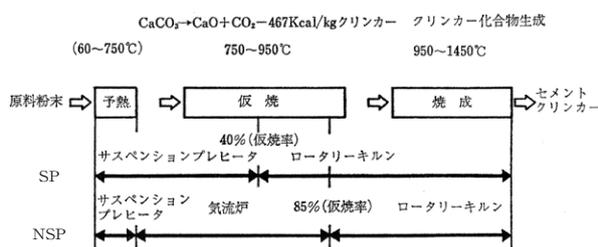


図 5.3 SP と NSP の焼成反応過程の比較⁶⁾

図 5.3 に示すごとく、SP キルンではプレヒーターにおける原料の脱炭酸率が 40%にとどまり、残り 60%の仮焼と焼成反応とを熱効率の悪いロータリーキルン（回転窯）で行なわなければならない。これに対し、NSP 方式ではプレヒーターに仮焼炉を付加し、脱炭酸に必要な熱量を仮焼炉から別途に供給して脱炭酸率を 85%以上に高め、回転窯内では残りわずかの仮焼と発熱反応である焼成反応を行なわせるだけにより、同一サイズの回転窯の焼成能力を、SP キルンの 2 倍以上に増大させることが可能となった（表 5.1 参照）。NSP キルンの熱収支の例を表 5.3 に示す。

表 5.3 NSP キルン熱収支（SF キルン、焼出量：8,000t/d の例）⁶⁾

入 熱			出 熱		
項 目	熱 量 (kcal/kg- クリンカ)	比 (%)	項 目	熱 量 (kcal/kg- クリンカ)	比 (%)
燃料の燃焼熱	745.0	97.0	クリンカー焼成用熱	420.9	54.8
燃料の顕熱	3.1	0.4	原料中の水分の蒸発熱	4.7	0.6
原料の "	12.2	1.6	プレヒータ排ガスがもちさる熱	166.5	21.6
1次空気の "	7.5	1.0	クーラ排気がもちさる熱	85.0	11.1
			クリンカーがもちさる熱	17.9	2.3
			ダストがもちさる熱	7.2	0.9
			放射損失熱	66.6	8.7
合 計	767.8	100.0	合 計	767.8	100.0

5.2.1 NSP キルンの着想

エネルギー多消費型産業であるセメント産業の技術者にとって、「省エネルギー技術の開発」は、時代を超えて変わらない技術開発目標である。日本に SP キルンが導入されて間もなく、日本のセメント製造技術者の頭に、「セメント焼成プロセスの中で最も多くの熱量を必要とする石灰石の脱炭酸反応を、プレヒーターに助燃炉を付設して効率よく行わせ、キルン内容積当りの焼出量を大きくして熱効率を高める」という NSP キルンの基本的な着想が浮かんだのは、ある意味当然の成り行きでもあった。そして技術者たちに、「そのアイデアを実現できれば、SP キルンの一層の増産と省エネは間違いなし」と確信を与えたのが、小野田セメントで当時まだ現役で活躍していた「改良焼成法」の実績であった。

改良法のキルン内容積当り焼出量が、SP キルンを含めた他の様式に比べて、まさに「桁違い」の高い数字であることは、当時のセメント業界ではよく知られた事実であった（表 5.1 参照）。セメント製造技術先進国の欧米に先駆けて日本のセメント技術者が「NSP」のアイデアに気付いたのは、まさに「日本で独自開発された改良焼成法」が目の前に存在していたからである。

昭和 40 年代（1965 年頃）に入ると、三菱セメントは三菱重工、秩父セメントは石川島播磨と組み、小野田セメントは独自開発路線（実操業キルン建設段階で川崎重工と提携）で、それぞれ NSP 開発の取り組みを開始した。開発の目標は、SP キルンに対して更なる、①熱効率の改善、②長期連続運転の達成、③キルン能力の増大、であった。

実機として我が国最初の（=世界最初の）NSP キルンは、三菱セメントの福岡・東谷工場で、1971（昭和 46）年 12 月に完成した。三菱セメント／三菱重工はこの NSP を「MFC 式」と名付けた。翌 1972 年 7 月には秩父セメント／石川島播磨重工が、埼玉県・秩

父第一工場で「SF式」の実運転を開始、同年12月には小野田セメントが独自開発した「RSP式」キルンを愛知県・田原工場で火入れした。1971年末からのわずか1年間に、3方式のNSPが一挙に操業を開始したのである。

大手セメント専門会社のなかでも、日本セメントと住友セメントは、当初は他社開発のNSPを採用していたが、やがて住友社は独自にNSP「SCS式」を開発し、1979年に子会社の八戸セメント（青森県）で操業を開始した。また日本セメントは神戸製鋼所と組んで「DD式」を開発し、1979年北海道・上磯工場で実運転を開始した。

(注) MFC: Mitsubishi Fluidized Calcinater System

SF : Suspension Preheater & Flash Furnace

RSP : Reinforced Suspension Preheater

DD : Dual Combustion and Denitration Process

SCS : Sumitomo Cross Suspension and Spouted Calciner

NSPについては、その後も新機種の開発や改良などが発表されている。1982（昭和57）年までに開発されたNSP様式の一覧を表5.4に示す。

表5.4 NSP様式一覧（1982年現在）²⁾

様式	基数	(注) 平均能力 (t/d)	開発者
DD	7	3,950	日本セメント㈱ 神戸製鋼所
FLS	1	4,001	F.L.S.ミズス社
GG	2	3,300	三菱重工業㈱
KSV. NKSV	8	3,600	川崎重工業㈱
MFC NMFC	16	3,532	三菱鉱業セメント㈱
RSP	12	3,258	小野田セメント㈱
SCS	4	3,780	住友セメント㈱
SF. NSF. CSF	19	3,776	秩父セメント㈱ 石川島播磨重工業㈱
計	69	3,617	

(注) 平均能力はセメント協会届出能力に基づき算定した。

5.2.2 NSPキルンの特長

それぞれの様式の開発者はそれぞれの「特長」を述べているが、NSPの各様式間の差は、使用原料や前後工程設備などを同一条件にしての比較がそもそも困難なこと、技術的に見ても、お互いの差はほとんどなさそうだと判断されるので、本稿ではNSP各様式間の比較の詳細は省略する。

開発されたNSPには、以下のような非常に優れた特長があることが、結果として明らかになった⁴⁾。

1) キルンの単位容積当りの生産性が高く、大容量化

が可能である。また、設備投資額、設置面積が同規模のSPキルンに比較して小さい。稼働中の最大キルンは日産9000トンに達し、キルン内容積当り焼出量は、SPキルンの60~70kg/m³hに対し130~150kg/m³hである。

2) キルン操業が安定する。供給原料が、キルンに入る前に、あらかじめ仮焼されるので、キルン内が安定した状態で運転できる。従って、プロセスコンピュータコントロールを適用しやすい。

3) キルン内熱負荷が減少するので、内張り耐火レンガの耐用時間が伸び、長期連続運転が可能となる。

耐火物原単位改善: SP式 800~900g/t-clinker
NSP式 500~600g/t-clinker

(注) 耐火物原単位: キルン内に施工した耐火物の重量を、その耐火物を除却するまでの期間内にそのキルンで生産したクリンカー量で除した数字。

4) 仮焼炉内ではキルン内ほど温度を上げる必要がないので、低品位炭などの低質燃料を使用することができる。

5) NO_xの発生率が低く、またSPと同様にSO_xの吸収率が高い。

以上のように、NSPキルンは、キルン1基当りの生産能力を格段に向上させただけでなく、省エネルギー、省力化、自動化、コンピュータコントロールの面でも大きな効果があり、また、低NO_x（窒素酸化物）焼成にも有効で、環境対策の面でも画期的なものとして、内外の注目を浴びることとなった。なお、低NO_x対策としてのNSPの有効性については、6.1.1で述べる。

NSPの技術開発成功が引き金になり、また「技術開発ノウハウ」が社内に蓄積されて、日本のセメント会社では、以後次々と斬新なセメント製造関連装置が開発され、我が国のセメント製造技術が世界をリードするに至っている。現在、日本国内のセメント製造は、すべてSP・NSPキルンによって行われている。

また、NSP技術は、海外へも積極的に技術導出された。1974（昭和49）年、石川島播磨重工/秩父セメントは、SFキルンの技術をフラー社（米）に技術導出した。我が国初のセメント技術輸出である。続いて、RSP技術は、小野田セメントからクルーズ・ロワール社（仏）、アリスチャーマーズ社（米）などに技術導出された。

5.3 「SP・NSP化」と「バラ輸送化」で実現したセメント産業構造改革^{2) 3)}

1970年代から80年代にかけてのセメント産業は、需要はトレンドとしては伸びがあった一方で、以下のような厳しい環境にもさらされていた。

- ①高度成長に伴う労働力の逼迫で、賃金が毎年大幅に上昇する。
- ②オイルショックや産油国のカルテルにより、エネルギー価格が大幅に上昇する。
- ③公害規制強化への対応で、公害防止設備への投資に迫られる。

これらの外的要因による厳しい経営環境を乗り越えるために、セメント各社は抜本的な「構造改革」の方針を打ち出した。すなわち、「重点工場を選定」して「工場の集約化」を進めるのである。それまでは「大工場」「小工場」の違いはあっても、設備投資や修繕費などの製造固定費は、どの工場にも同じ評価基準で配分されてきていた。それを「今後は重点工場に経営資源を集中投入する」方針に変更したのである。「重点工場」の選択基準としては、概略以下のような条件であった。

- ①石灰石鉱山の鉱量が将来的に十分ある。
- ②SP・NSP化投資、公害防止投資に見合う生産規模・販売規模の拡大が確保できる。
- ③タンカー船によるバラ出荷ができる、または大消費地が近く、陸送でも十分競争力が保てる。

この「工場集約化」によって、各社の労働生産性は向上し、公害防止投資のような、いわば生産に直結しない投資を、効率的・効果的に実施することができた。「重点工場」指定からはずれた工場は、閉鎖されるか、分社化されてセメント以外の事業を営むなどの独立採算の道を進むことになった。

この1970年代から80年代の生産構造合理化は、「自社工場の選択と集中」、つまり「社内合理化」であった。1995年にセメント生産量が過去最高まで達した後、セメント需要が減少局面に入ると、もはやそれぞれのセメント会社の自社内合理化だけでは企業存続が困難視される状況になってきた。この危機的状況を脱するために、1994年には小野田セメントと秩父セメントが合併して「秩父小野田」、住友セメントと大阪セメントが合併して「住友大阪セメント」が誕生し、さらに1998年には秩父小野田と日本セメントが合併して「太平洋セメント」に、また宇部興産と三菱マテリアルが共同販売会社「宇部三菱セメント」を発足させるなどの企業合併による業界内再編が進んだ。

この企業合併の後、それぞれの合併会社内で、旧会社の枠を超えた「工場のさらなる集約化」が進んだ。

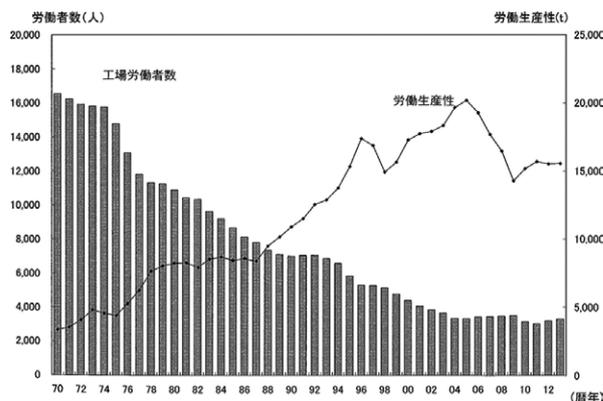


図 5.4 セメント工場の労働生産性推移¹⁾

表 5.5 セメント工場数・キルン数の変化⁷⁾

年	工場数	キルン基数	セメント生産能力 (mt-cl/y)	クリンカー生産能力 (mt-cl)	従業員数	労働生産性 (t/y,man)
1970	58	226	86.4	54.9	16,549	3,316
1975	58	246	120.8	63.2	14,774	4,275
1980	53	192	126.4	86.3	10,830	7,965
1985	44	98	98.0	70.7	8,617	8,207
1990	41	80	87.2	75.3	6,949	10,834
1995	41	81	97.6	89.1	5,830	15,282
1999	39	75	95.6	74.3	4,758	15,606
2000	37	65	87.2	75.6	4,387	17,227

表 5.5 で見るとおり、1970（昭和 45）年から 2000（平成 12）までの 30 年間で、工場数は約 2/3 に、キルン数は約 1/3 に、工場従業員数は約 1/4 にまで減少したのである。この間、クリンカー生産量は約 1.4 倍になり、労働生産性は約 5.2 倍に改善された（図 5.4）。

このように、工場の集約化で、セメント企業は、高度成長から低成長、そして需要減少に直面する厳しい経営環境を乗り越えてきた。その経営努力を支えた技術基盤として「SP・NSP による工場大型化」があり、そのセメントを運ぶ「バラセメント物流体制」（4.12.3 参照）があったことを、明記しておきたい。

5.4 原料工程の「大型化」「省エネ化」

SP 化・NSP 化によって、焼成工程が「大型化」「省エネ化」されるに伴って、前後工程である原料工程・仕上工程にも、当然のことながら、それぞれの工程の役割をきちんと果たすための「大型化」「省エネ化」が要求される。本節では、原料の工場への受入れ設備の大型化と、乾燥・粉砕工程における大型化・省エネ化について述べる。

5.4.1 原料受入設備の大規模化：スタッカー&リクレーマー方式⁸⁾

SP・NSP化によるキルンの大型化は、必然的に原料ヤードの大規模化（貯蔵量及びハンドリング能力）が必要になる。これに対する対応策は、工場の立地条件によって異なり、当然ながら山元が近い工場は小さな貯蔵場でよいが、遠くなるほど貯蔵量を大きくする必要があるのである。

日産5千トンを超えるような大型キルン数基を抱える工場では、石灰石受入量も一日1万トン、時間当りの払出量も500トンを超えるような設備が必要になる。この解決策の一つとして、鉱山、炭鉱、製鉄所、発電所などで鉄鉱石や石炭などの大量の粉粒体を扱うのに使われてきた「スタッカー&リクレーマー（stacker & reclaimer）方式」が、セメント工場でも採用されるようになった。

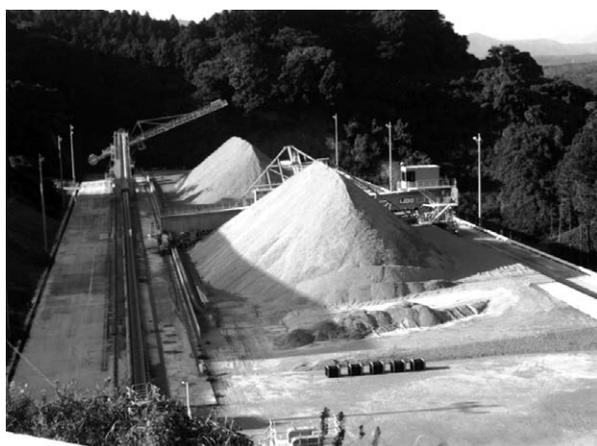


図5.5 スタッカー&リクレーマー⁹⁾

この方式は、「ベッドブレンディング（bed-blending）」とも言われる。採掘した原料はまずスタッカー（図5.5左側のアーム形装置）で互層に積み付ける。払出しは逆にその積み付けられた互層に直角にリクレーマー（同図右側の三角形の装置）で切り出す。かくして、受入原料よりも払出原料の成分変動（ばらつき）を小さくできる点に特長があり、その意味で原料の均斉化にもプラス効果がある。また無人運転ができることも、大きな長所である。能力的には、従来のクレーンによるクラブバケット（crab-bucket）方式では300t/h程度の払出し能力だったが、スタッカー&リクレーマー方式では1,000t/h以上の能力が可能で、大きくなればなるほど経済的に有利である。

なお、粘土類の受入れ・払出しについては、①量的に少ない、②付着水分による粘着の問題がある、などもあって、SP・NSP化以前からの受入れ・払出し設備（例えばクレーンによるクラブバケット方式）を拡

充・強化する形での対応が多かったようである。

5.4.2 原料の乾燥・粉砕工程の大型化・省エネ化

1960年代（昭和40年頃）までの原料の乾燥・粉砕方式は、受入れた石灰石と粘土類を、

- ①石灰石乾燥機・粘土乾燥機（いずれも回転式乾燥機＝ロータリドライヤー）で乾燥後、
- ②ミル前の連続自動秤量機（CFW）で石灰石／粘土比の調製をして、
- ③チューブミルに送入して混合粉砕する、

という「乾燥・粉砕別方式」であった。乾燥用の熱風炉は、それぞれの乾燥機に個別に備付けられていた。

SPキルン方式が導入されると、SPの最上段サイクロンを出た排ガス温度は350℃程度であり、この排ガス余熱を原料乾燥に利用する方法が一般的に採用されるようになった。

排ガス余熱の原料乾燥利用方式としては、当初は従前の乾燥と粉砕を別けて行う方式が採用されたが、やがて「排ガスを粉砕機に導いて、乾燥・粉砕を同時に行う方式」が導入された。「同時乾燥粉砕方式」では、ドライヤー設置方式に比べて、乾燥設備の修理・保全の手間が省け、動力的にも有利（省エネ）である。従って、1970年代以降の新設原料工程では、ドライヤー設置方式はほとんど採用されなくなった。

同時乾燥粉砕ミルにはチューブミル形式と堅型ミル形式があるが、本稿ではチューブミルの代表例である「ダブルローテーターミル」、および堅型ローラーミルの代表例である「ロッシェミル」について説明する。

(1) ダブルローテーターミル^{6) 10) 11)}

ポリジウス社（独）の開発による原料用同時乾燥粉砕ボールミルで、わが国のセメント工場では、1963（昭和38）年に三菱セメント・東谷工場（福岡）に設置されたのが最初で、1975（昭和50）年8月現在、28基が稼動していたと報告されている。

このミルの特徴は、原料供給側に乾燥室を有し、砕製品の排出口はミル中央部にあって、エアスエプト方式（注1参照）と、セパレータによる閉回路方式を組合わせているところにある。ミル本体は、乾燥室と粉砕1・2室および中央排出室からなる。乾燥能力は、330～350℃のプレヒーター排ガスを利用した場合、給鉱水分の限界は5%程度であるとされる。

なお、次項で述べるように1970年代後半以降は、原料ミル新設は堅型ミルが選ばれるようになった。ダブルローテーターミルの詳細は文献（10）が参考になる。

(2) 堅型ミル（ローラーミル）^{11) 12)}

堅型ミルは、砕料を回転するテーブル上に供給して複数のローラーで加圧粉碎する方式のミルである。ローラー上部には分級機が内蔵されていて、乾燥・粉碎・分級が一つの装置の中で完結する。特長としては以下のような点が挙げられる。

- ① 据付面積が小さく、騒音も低い、
- ② チューブミルよりも粉碎効率がよく、電力原単位が低い、
- ③ 粉碎機内部での被粉碎物の滞留時間が短いので、原料調合変更への応答が早く、品質も安定する、
- ④ 高温排ガスをミル内に導入することによって乾燥と粉碎を同時に行える。

④の理由から、原料粉碎と石炭粉碎に広く普及し、工程の簡素化と省電力に大きな効果を発揮してきた。なお、堅型ミルの仕上粉碎への応用については、5.5.5で述べる。

堅型ローラミルには、ロッシェミル、MPS ミルなどがあるが、わが国においては、宇部興産がロッシェ社（独）との技術提携により製作している「宇部ロッシェミル」が大多数を占めている。図 5.6 は、大型の LM32/4 型宇部ロッシェミルの (1) 外観、(2) 内部構造、(3) 堅型ミルの粉碎の仕組みを示す。

その動作は次のごとくである。

回転する粉碎テーブルの上に、4 個の粉碎ローラーが、油圧シリンダによってテーブル上に加圧されている。原料はシュートから供給され、テーブルの中心付近に落下し、遠心力により外周に押し出され、テーブルとローラーの間にかみ込まれて粉碎される。このミルは、乾燥同時粉碎方式であり、熱ガスはファンによって下部ダクトからミル内部に入る。この時に熱ガスはテーブル外周のブレードリングで旋回力を与えられる。テーブル外周からオーバーフローする砕料は、

この熱風によって吹き上げられ、上部に内蔵されたセパレーターに送り込まれ、分級される。粗粉は外周に飛ばされてテーブル上に落下し、再粉碎される。精粉は、排気とともにセパレーター羽根の間を通過して、サイクロン捕集機に導入分離される。

原料粉碎用のチューブミルと堅型ミルとの電力原単位改善例として、以下の数字が示されている。⁷⁾

(計算前提条件)

粉碎機能力：200t/h、年間稼働時間：7,000 時間

(電力原単位比較)

チューブミル：20～26kwh/t-原料、

堅型ミル：14～18kwh/t-原料

すなわち、約 30%の電力削減になるとされている。

日本最初のロッシェミルは 1959（昭和 34）年の宇部セメント・伊佐工場に設置された。当初の型式は、能力も小さく、テーブルやローラーの材質なども弱く、メンテナンス上でも手間がかかったなどがあり、普及のスピードはそれほど速くはなかった。機械構造の改善や使用材料の材質の向上で次第に大型化が可能になり、1970 年代には粉碎能力 200t/hr を超える大型ロッシェミルが開発され、以後普及が加速され、1970 年代後半には、原料ミルを新設する場合は、堅型ミルが最初の選択肢となるようになった。

同時に、ロッシェミルの大型化に伴って、1 キルン系統に原料ミル（ロッシェミル）1 基での対応が可能になり、非常にシンプルな工程設計が可能になった。この「1 キルン・1 ミル」体制を最初に実現したのは、1977（昭和 52）年の宇部セメント荊田工場（福岡県）である。

5.5 仕上（セメント粉碎）工程の省エネルギー化

SP・NSP キルンの時代になってからの原料工程の

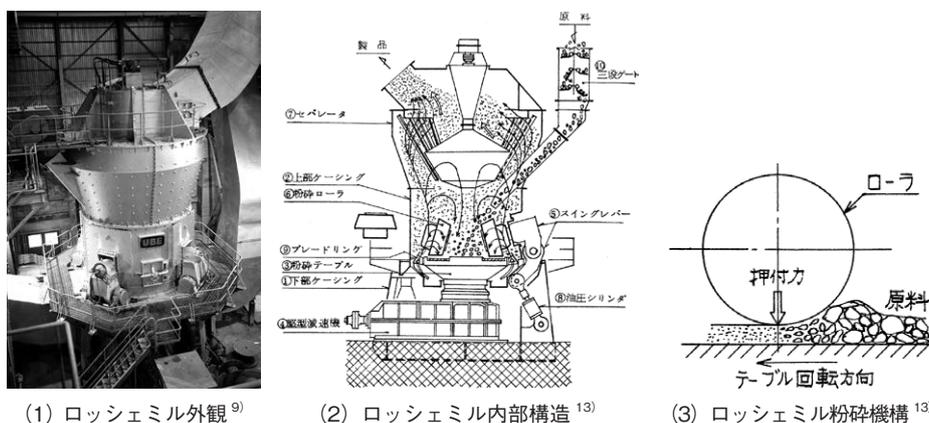


図 5.6 原料粉碎用堅型ミル（ロッシェミル）

大型化・省エネ化が、上述の通り「堅型ローラーミル」の技術を中心に展開されたのに対し、仕上ミルの大型化・省エネ化は、第1段階（1960年代・1970年代）として、「チューブミル」の「大型化」「粉碎助剤添加」「分級ライナーと小径ボールの採用」があり、続いての第2段階（1980年代以降）として、チューブミルへの「高効率分級機（O-SEPA など）の適用」「予備粉碎機の設置」という流れで進展した。「仕上チューブミルの大型化」については、図 4.16 にその推移を示してある。

一方、仕上（セメント）粉碎への堅型ローラーミルの適用は、運転上・保守上・セメント品質上の問題から、進展が阻まれていたが、これも日本発のセメント粉碎用堅型ミル「OKミル」が1988年に開発され、その設計思想・技術が世界に広がって、いろいろな様式の堅型ミルが、セメント粉碎に応用可能になるといふ快挙になった。

以下に仕上工程における「チューブミルの省エネ化」、すなわち上記「第1段階」「第2段階」について詳述する。クリンカー粉碎用堅型ローラーミルについては、5.5.5 で述べる。

5.5.1 原料工程と仕上工程の「粉末度」管理指標の違い

原料工程も仕上工程も、粉碎・分級が中心であり、次工程に送り出す産物の重要な品質管理項目が「粉末度」であることは共通している。しかし、粉末度を表す方法としては「篩上残分」「比表面積」「粒度分布」などいくつかの表現方法があり、原料工程と仕上工程ではその工程の機能の違いから、採用する粉末度の表現も異なっている。両工程の省エネの取組みを理解する上では、原料工程・仕上工程それぞれが重視する粉末度の表現を理解しておくことが必要であり、本項にて説明する。

(1) 原料工程管理のための粉末度：篩^{ふるい}残分

原料工程管理の粉末度としては、標準篩の上に残る残分量「篩上残分」が使われ、今日では主に90 μ JIS標準篩の「90 μ 篩残分」が採用されている。

原料工程で製造された原料粉末は、クリンカー生成反応のために、次の焼成工程に送られる。この原料中に粗大粒子（例えば90 μ 以上）があると、十分反応しきれないうちに回転窯から排出されることになりかねない。原料成分の中でも、ケイ酸質原料に含まれる石英質粗粒などは、被粉碎性が悪く、粗大粒子として残りやすい。このような粗大粒子が未反応のままキル

ン内を通過してしまうと、その分に相当する石灰分が「遊離石灰（フリーライム）」（3章注4参照）としてクリンカー中に残ってしまうことになり、セメント品質に悪影響を及ぼす。

原料粉碎工程の粉末度管理指標が、①ほとんど「篩残分」だけで済むという単純さ、そして、②次工程が引続き「工場内」の焼成工程であるため、粉末度の影響が工場内に限られる、という点は、原料工程の大型化や省エネに向けての工程改善に好都合な点である。

(2) 仕上工程管理のための粉末度：比表面積と粒度分布

仕上工程の最終産物は「セメント」である。この「セメント」は、そのまま工場から出荷されて、客先の使用現場で水を加えられ、「凝結・硬化」という化学反応過程を経て、最終的にコンクリートなる。凝結・硬化の反応過程は、セメント粉末が水に一旦溶けた上で水和物を生成する過程なので、セメントの粉末度に対する管理項目は、「比表面積（ cm^2/g ）」が重要視される。

仕上工程の粉末度管理でもう一つ重要な要素が「粒度分布」である。粒度分布は、製品であるセメントの凝結過程、すなわち「使いやすさ」に大きな影響がある。「粒度分布がややブロード」なセメントが使いやすいセメントであるとされ、逆に「粒度分布がシャープなセメント」は、同じ軟らかさのフレッシュコンクリートを得るための水量が多くなり、結果としてコンクリート強度が落ちるとされている。しかし、粒度分布の測定は手軽ではなく、日常の工程管理のために測定を行うのは困難がある。一方で、同じような原料で同じような焼成条件で焼いたクリンカーを、同じように設定した粉碎機・分級機で粉碎している場合には、粒度分布も大きく変わることはないので、日常管理としては代理特性として「32 μ 篩残分での管理」が使われている。

仕上工程で、もう一つ重要な管理項目が「粉碎温度」である。粉碎温度は、粉碎時に添加される石膏の脱水に影響する。セメント中の石膏の脱水程度は、セメントの「凝結」に大きく影響し、セメントの使いやすさに関わってくる。粉碎温度に関わる要因は、①ミルに入るクリンカー温度と、②ミル内での粉碎熱、が主である。

そのようなことから、セメントの日常管理試験項目に「凝結試験」があり、その結果は「粒度分布（32 μ 残分）」や「セメント粉碎温度」の管理にフィードバックされる。

5.5.2 粉砕助剤^{7) 14)}

粉砕助剤とは、粉砕過程に微量添加することによって粉砕速度を大きくする第3物質をいう。

チューブミルの場合、微粉砕段階になると一般に粉砕効率が著しく低下する。これは被粉砕物の微粉の凝集（アグロメレーション）が起り、その凝集した微粉が、①ミルのライナーや粉砕媒体にコーティングとして附着してミルの衝撃力が弱まること、②凝集微粉がセパレーターにて粗粉側に紛れ込み、ミルに再循環するため、である。粉砕助剤はこのアグロメレーションを防止することにより、粉砕効率を向上させる作用を持つものである。

粉砕助剤の利用条件としては、「助剤添加によるコストアップ」より「粉砕効率改善効果によるコスト低減」の方が大きく、かつ「製品の品質を低下させない」ものであることが重要である。したがって、セメント工業では、効果対コストの面から専らセメントの仕上粉砕に適用され、原料粉砕での利用はほとんど見られない。

仕上粉砕への助剤利用は、米国で1930年頃、パルプ廃液から回収したリグニンの有効利用が目的で研究され、効果が確認されて、1932（昭和7）年、米国で初めてRDAという商品名で販売された。1950年代半ば頃から、石油化学工業の発展とともに助剤作用のある有機系材料がいろいろ開発され、現在ではもっぱらこの種の石油化学製品がセメント工場で使用されている。

日本では、需要家側のコンクリートの耐久性への不安の声もあって、米国よりもかなり遅れて1973（昭和48）年のJISセメント品質規格の改正により助剤の使用が認められ、以降、盛んに利用されるようになった。日本では「ジエチレングリコール」が広く使われており、他に「トリエタノールアミン」、「アミンアセテート」などが使われている。

仕上ミルでの使用方法としては、水で5～10倍に希釈したものをミル内にスプレーする方法が一般的で、添加量はクリンカーに対して重量比0.01～0.03%である。使用効果としては、助剤添加率0.01%につき粉砕量が4～6%増加すると報告されている。

5.5.3 分級ライナー・小径ボール^{7) 11)}

原料ミル・仕上ミルいずれもミル内部には、①ミル胴体の保護と、②媒体の掻き揚げ効果を目的に「リフター付ライナー」が取り付けられている。

仕上ミル第2室では微粉砕が中心となるため、小径ボール（径20～17mm）を使用して媒体の表面積を増

やして摩砕作用を強化することが、効率改善につながることが知られていた。しかし、従来のリフター付ライナーでは、2室入口側に小径ボール、出口側に中径ボールが集まる逆分級状態が生じてしまい、粉砕効率が極端に低下するので、思い切ったボール小径化は困難であった。

この逆分級現象を解消することを目的に「分級ライナー」（図5.7）が開発された。分級ライナーはミル入口側に向かって傾斜している形状であるため、掻き揚げられたボールはミルの入口方向に転がる。また、大径ボールほどミルの回転力（遠心力）の作用を受けてミル入口側に移動するため、徐々にボールが分級され、2室入口側ほどボール径が大きい分布になる。分級ライナーの開発によって2室に20～17mmの小径ボールの使用が可能となり、過粉砕することなく効率的な微粉砕が行えるようになった。

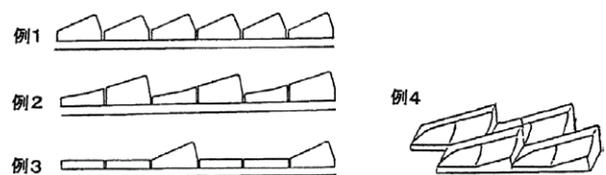


図 5.7 仕上ミル2室用分級ライナー⁷⁾
(例4は「掻き揚げ型」と呼ばれる分級ライナー)

分級ライナーと小径ボールの採用で、粉砕電力原単位が1～2kwh/t低減されると報告されている。なお、2室入口での粗砕能力も改善されることから、状況によっては1室の短室化（2室の長室化）によってミル全体の粉砕能力が向上する場合もあるとされる。

5.5.4 O-SEPA：日本発の画期的高効率「渦流型エアセパレーター」

「O-SEPA」は、小野田セメント中央研究所の古川猛所員の独創的アイデアから開発が始まり、1979（昭和54）年に最初の実機が完成した画期的な「日本発の高効率セパレーター」である。

セメント工業の粉砕工程で利用されている分級機は、4.6.3で述べたファン内蔵型のゲーコ型やスターテバント型が「第1世代」、ファンが外付けのサイクロンエアセパレーターが「第2世代」、そして今日では、欧米はじめ世界的に「O-SEPAは第3世代の分級機」とされている。「O-SEPA」は商品名であり、その後、同じ分級原理に基づくセパレーターが国内外で発表されるようになり、普通名詞として「渦流型セパレーター」、「ローター型セパレーター」「High Efficiency Separator (HES)」などの語が使われるよ

うになった。本稿では「渦流型セパレーター」を使うこととする。

以下に渦流型セパレーターの元祖・O-SEPAの原理・構造・運転データ・分級性能およびセメント粉砕工程に応用した代表的な事例を紹介する。

(1) O-SEPAの原理・構造¹⁵⁾ 16)

O-SEPAはエアセパレーターの種類であり、分級原理としては、第1世代・第2世代のセパレーターと同じである。すなわち「固体粒子群が受けている外力（重力、遠心力など）と、固体粒子が空気中を運動することによって受ける空気抵抗との釣り合い関係が、それぞれの粒子径、密度によって相異なることを利用して精粉・粗粉に分離する機械」である。

O-SEPAの大きな特徴は、第1世代・第2世代のセパレーターがいずれもガイドベーン（外周部の固定羽根）による「自由渦」だけの分級であるのに対し、O-SEPAでは自由渦に加えて、回転する渦流調整羽根による「強制渦」による「二段階分級」であるという点である。したがって、O-SEPAの型式を正確に表現すると「自由渦・強制渦複合型分級機」ということになる。

図5.8にO-SEPAの全体構造を、図5.9に水平断面図を示す。

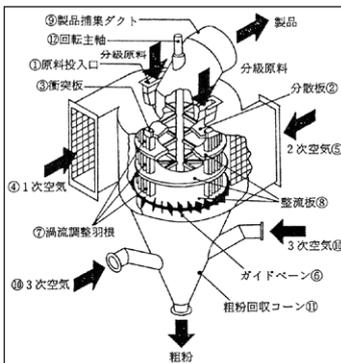


図5.8 O-SEPAの構造¹⁵⁾

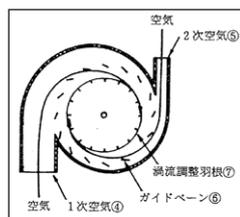


図5.9 O-SEPAの水平断面図¹⁵⁾

分級に要する気流としては、粉砕機や輸送機等から吸引した含塵空気や外気、また、その混合体のいずれでもよく（O-SEPAの長所の一つ）、1次空気④、2次空気⑤、および3次空気⑩の各空気取入口より導入される。1次空気および2次空気は、図5.9に示したように、各取入口から接線方向に吸引され、ある角度をもったガイドベーン⑥を経由して、渦流を形成しながら分級空間に導かれる。ここで分級空間とは、ガイドベーンと渦流調整羽根⑦の間の領域であり、粒子が分級作用を受けて粗粉と細粉に分かれる空間である。こ

こで気流は、回転する渦流調整羽根と整流板⑧の作用で精密な水平渦を形成し、渦流調整羽根の回転周速度まで加速されながら渦流調整羽根の内側に入り、製品捕集ダクト⑨へ排気される。

一方、原料投入口①から送入された分級原料は、回転する分散板②および衝突板③を経由して、分散された状態で分級空間に入る。ここで、原料粒子は、ガイドベーンよりの旋回流で1次分級され、渦流調整羽根での旋回気流の遠心力と中心方向へ流れる空気流速とのバランスにより2次分級されて、微粒は製品捕集ダクトより排出され、集塵機で捕集される。一方、粗粉回収コーン⑩で回収される粗粉は、3次空気取入口よりの流入空気により、粒子に付着している微粒子が完全に除去される。

(2) 運転データ¹⁵⁾

大型チューブミル（4,000kw）に付設されていたサイクロンセパレーターを、O-SEPA（N-3000型）に据えかえた改造前後の運転データを、表5.6に示す。

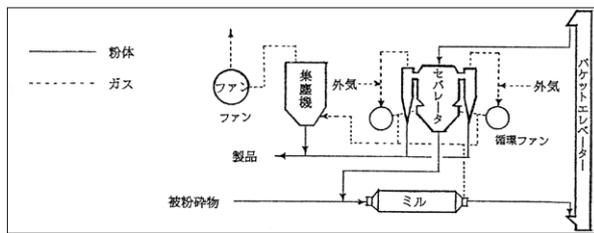
表5.6 サイクロンセパレーターからO-SEPAへの改造前後比較¹⁵⁾

	粉砕量 t/h	動力原単位 kWh/t			製品の粉末度			セメント温度		
		ミル	補機	総合	ブレーン cm ² /g	90μm 残分 %	30μm 残分 %	散水量 t/h	ミル 出粉 ℃	精粉 ℃
サイクロンセパレーター (改造前)	110.1	35.42	10.06	45.48	3230	1.2	25.9	2.2	135	112
O-SEPA (改造後)	126.7	30.78	5.25	36.03	3090	0.8	20.0	1.2	120	84

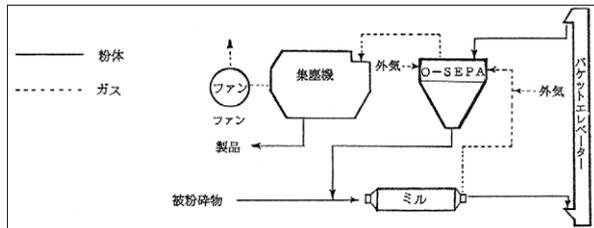
(3) O-SEPAの特長⁴⁾ 15)

以下にO-SEPAの特長をまとめる。

- 分級性能の向上により、動力原単位が低減される。
- 同一のセメント品質レベルで比表面積が低減でき、動力原単位が低減される。
- 粒度分布の改善、セメント温度低下によりセメント品質が向上する。
- 操作性が向上し、セメント品質の維持、品種の切替えが容易である。
- 粉砕機や輸送機などからの含塵空気を大量に処理できるため、発塵が減少し、作業環境の改善、機器の寿命延長につながる。
- 機器の点数が少なく、フローがシンプルで、機器の故障低減、操業安定化の効果がある。比較のためにサイクロンセパレーターとO-SEPAのフローシートを図5.10に示す。
- 在来の分級機に比べて、据付面積も大幅に減少し、メンテナンスが容易になる。



(1) サイクロンセパレーター



(2) O-SEPA

図 5.10 サイクロンセパレーターと O-SEPA のフローシート比較¹⁵⁾

O-SEPA は、1985 年、小野田セメントからセメントプラントエンジニアリングの世界的大手企業・フルー社 (Fuller、米国、現在 FL Smidth 社と合併) への技術導出契約が成立し、翌年にはクレール社 (CLE Technip・仏) ととも技術導出契約を締結、欧米のこれら 2 社と日本の小野田エンジニアリング社 (現：太平洋エンジニアリング社) から世界に向けて普及が進んだ。また、O-SEPA はその後、高炉スラグ、石炭、石灰石 (タンカル) 粉砕、さらにはファインセラミックス原料 (例:窒化ケイ素、炭化ケイ素) や各種微粉フィラーなど、多様な材料の粉砕工程に応用されてきている。

O-SEPA の発表後、同じ原理を利用した「渦流型」の分級機を国内外の数社が開発している。

5.5.5 仕上 (セメント) 粉砕用堅型ミル:「OK ミル」が先鞭をつける^{17) 18)}

堅型 (ローラー) ミルが、原料工程で粉砕効率が高く省エネルギーになっていることから、堅型ミルをセメント粉砕にも応用しようというアイデアに、欧米も含めて先人たちがいろいろ挑戦を試みた。しかし、なかなか実現できなかった。主な理由 (問題点) は以下の 3 点であった。

- ① 運転上：被粉砕物であるクリンカーが硬いため、粉砕中にミルが振動を起こすことがある。
- ② メンテナンス上：上記と同じ原因で、粉砕ローラーやテーブルの摩耗・損傷が大きい。
- ③ セメント品質上：堅型ミルでは粉砕産物 (セメント) の粒度分布が狭くなるため、コンクリートを練る際

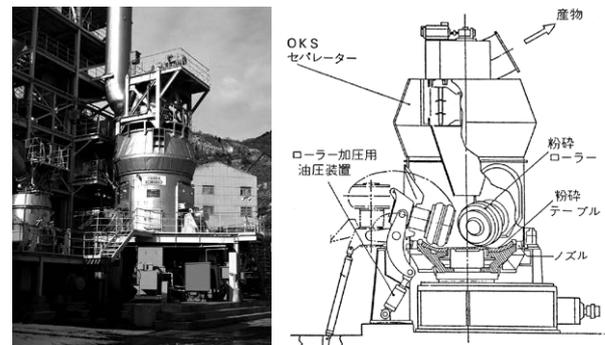
の水量が多くなり、セメント強さが落ちる。

この難関に突破口を開いたのが、小野田セメントと神戸製鋼の共同開発で生まれた「OK ミル」であった。パイロットプラントテストを経て、1988 年 7 月、同社大船渡工場で、世界最初のセメント粉砕用大型堅型ミル「OK ミル」(130t/h) が運転を開始した。

(1) OK ミルの構造

上記①②③の問題に対し、OK ミルは以下のような解決策を採った¹⁸⁾ (図 5.11 参照)。

- ① 振動：粉砕ローラー中央部に凹みを設け、粉砕が行なわれる部位を狭く限るローラー形状にした。この結果、被粉砕物が圧縮破壊される部位を狭くすることができ自励振動が起きにくくなった。同時に粉砕効率を上げることができた。
- ② 摩耗：ローラー中央部に凹みを設けて粉砕が行なわれる部位を狭くした結果、摩耗の発生も抑制できた。また、ローラー鑄物の材質を改良して耐摩耗性を上げた。
- ③ 粒度分布：内蔵された高効率渦流型分級機 OKS (注：O-SEPA を堅型粉砕機搭載用に改造) の採用で、分級機回転速度、風量、ローラー加圧力、テーブル高さなどの独立した調整機能を駆使することになった。この結果、最終製品品質を決定する粒度分布を容易かつ広範囲に調整できるようになった。



(1) OK ミル外観⁹⁾

(2) OK ミル構造図¹⁷⁾

図 5.11 OK ミル

(2) OK ミル成功の鍵¹⁸⁾

先人たちの長年の試みにも拘わらず実現できなかった堅型ミルの仕上工程への適用に、OK ミルが成功した鍵は、「堅型ミル用に改造した O-SEPA を内蔵した」ことにある。その開発の思考過程を以下に記す。

- ① 堅型粉砕機において、粉砕効率はローラーのテーブルへの加圧力と線形の関係がある。
- ② 加圧力が高いと粉砕効率の向上とともに製品の粒度分布は狭くなる

③加圧力には機械的制約と振動が発生しやすくなるという制約がある。

④テーブル層厚を調整するテーブル最外周に設けた堰（ダム）は、低いと粉砕効率は良くなるが運転の安定を損なう。すなわち「ダム高さ」は、上記①②の「加圧力」に近い機能を持ち、粒度分布を変える機能もある。

⑤粒度分布は一般に、「全体として細かいか粗いか」の要素と「分布が広い狭いか」の要素がある。

⑥旋回型分級機（従来の堅型ミルの内蔵分級機）も渦流型分級機も、この粒度分布の2要素を風量と旋回羽根の回転速度によって調整する機能を持っている。

⑦いずれの型式の分級機においても、
 * 風量を増すと製品が粗くなる。
 * 旋回羽根の回転速度を増すと細くなる。
 * 旋回羽根の回転速度を調整すれば同じ細かさをそれぞれの風量レベルで達成できる。
 * 風量を大きくすれば、製品の粒度分布は狭くなる。

⑧渦流型分級機における粒度分布の2要素の調整機能は、旋回型分級機のそれに比較して独立して機能する。

⑨セメント粉砕における製品粒度分布は、セメント強さの発現だけではなく施工性に大きく関係する。粒度分布が狭ければ強さ発現には良いが施工性が悪くなるので、施工性を考えれば、粒度分布はチューブミル粉砕品と同じような分布であることが使いやすいセメントになる。

⑩以上のことから、「製品粒度分布を変えないで粉砕効率を上げる」ためには、「チューブミルから堅型ミルへ粉砕機構が変わることを補う分級機構が必要」であり、製品粒度分布を自由に調整できる渦流分級機が必要だった。その先鞭を切ったのがOKミルである。

(3) OKミルの操業実績¹⁷⁾

太平洋セメント大船渡工場に新設したOKミルの成績を、同じクリンカーを粉砕する同工場の仕上チューブミルと比較したデータを表5.7、5.8に示す¹⁷⁾。表に見る通り、OKミル粉砕セメントの品質は、普通品・早強品いずれについても、従来品と同等ないし若干上回る一方で、動力原単位は大幅に改善されている。

表 5.7 OKミルの粉砕能力、動力原単位¹⁷⁾

品 種	ミ ル	ミ ル 通風量 m ³ /min	分級機 回転数 rpm	産 物 Blaine cm ² /g	粉砕量 t/h	ミル 動力 kw	動力原単位 kwh/t		
							ミル	補機	合計
普通品	OKミル	4750	71.7	3210	135.5	3000	22.1	5.7	27.8
	チューブミル	—	—	3280	99.2	3300	33.3	5.5	38.8
早強品	OKミル	4540	92.6	4390	103.3	2800	27.1	5.7	32.8
	チューブミル	—	—	4350	21.0	950	45.2	7.5	52.7

表 5.8 OKミル粉砕セメント品質データ¹⁷⁾

品 種	粉砕機	ブレ ーン cm ² /g	残分値 %		凝結 水量 %	凝結時間 *		70- mm	圧縮強度 kgf/cm ²			
			30μ	15μ		始発	終結		1日	3日	7日	28日
普通品	OKミル	3200	19.3	51.3	28.5	2-19	3-10	256	—	151	255	431
	** 従来ミル	3280	20.3	53.2	28.4	2-24	3-29	253	—	142	243	420
早強品	OKミル	4350	5.0	34.4	30.8	1-32	2-27	247	181	311	399	485
	** 従来ミル	4350	5.2	35.6	30.8	1-47	2-39	250	169	292	385	480

* hr-min. ** チューブミル

このOKミルの開発成功が引き金になって、他の様式の堅型ミルでも「渦流型分級機」を搭載した仕上粉砕用堅型ミルの開発が進められ、世界的にセメント粉砕用堅型ミルの普及が進んだ。

5.5.6 仕上ミル用予備粉砕機：セメント需要減少の環境下での省エネ手段^{4) 7)}

「仕上ミル用予備粉砕機」は、仕上工程のチューブミルの前段に設置して、粉砕電力原単位低減を図る目的の装置である。予備粉砕機としては「ローラープレス式」と「堅型ミル式」がある。「堅型ミル式」は「日本で開発された技術」である。

「ローラープレス式」は、対になって噛みこむように回転する2つのローラーの間隙に、クリンカーを送り込んで粗粉砕させる方式である。欧州で開発され、比較的安価なため一時期かなり導入されたが、ロールの寿命やメンテナンス性が十分とはいえず、期待ほどの成果が得られない場合が多かった。

「堅型ミル式」は、粉砕効率に優れる堅型ローラーミルから分級機の部分を取除いて簡略化したもので、1987（昭和62）年に秩父セメントが川崎重工と共同開発した「CKP」が先鞭をつけた。以降、予備粉砕機では堅型ミルタイプが主流になっている。構造図と系統図を図5.12に示す。

堅型ミル式の導入効果としては、以下の数字が報告されている。

- ①仕上粉碎チューブミルの能力：30～60% 増加
- ②仕上工程の電力原単位：10～20% 低減

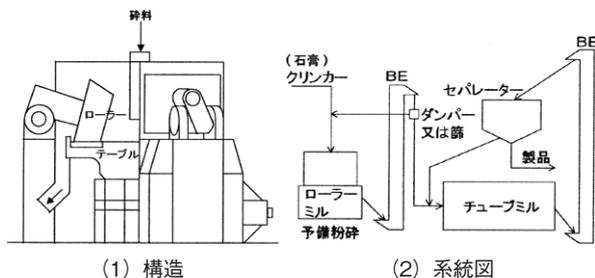


図 5.12 仕上ミル用予備粉碎機（縦型ミル式）⁷⁾

OKミルなどの仕上げ粉碎用縦型ミルが開発・商品化された時点では、日本のセメント産業は成熟過程から需要減少過程に入っており、仕上ミルの新增設はほとんどなくなってしまっていた。また、電力原単位削減だけでは、縦型ミルへ据替える投資採算は無理である。そのようなセメント市場環境の中で、既存のミルを増産しながら電力原単位が下げられる「予備粉碎機付設」は、時代の要請にかなった技術開発だったといえる。縦型ミル式予備粉碎機の技術も海外に技術導出されている。

5.6 廃熱（排熱）発電：究極までの排熱の回収・利用^{7) 19)}

SP・NSPキルン系から排出される排ガス熱エネルギーとしては、①プレヒーター排ガス（キルン排ガス）と、②クーラー排ガス（クリンカー冷却排ガス）の二つがあることを既に述べた。プレヒーター排ガスは原料乾燥に利用し、クーラー排ガスは、①キルン焼成の2次空気、②仮焼炉の燃焼空気、③石炭粉碎用乾燥空気に利用されていることも述べた。1970年代までは、排ガス熱利用もそこまでであった。

NSP方式の普及によりキルン1基あたりの生産規模が増大したことから、400℃程度のプレヒーター排ガスと250℃程度のクーラー排気の熱を廃熱ボイラーで回収し、混圧蒸気タービンと発電機で電気に変換してエネルギーを回収する「廃熱発電設備」が1980年頃から急速に普及した。この理由は、クリンカー1トン当りの発電量が平均的に35～40kWで、5,000t/dのキルンで時間当たり約8,000kWの出力が可能となり、投資採算に見合うものとなったことによる。

廃熱発電設備を備えたNSPキルンでは、焼成工程のエネルギー利用効率が80%を超えるまでに改善される。プレヒーター側の廃熱ボイラー出口ガス温度は約250℃となり、その後さらに原料乾燥などに使用されて100℃程度となる。また、クーラー排気も廃熱ボ

イラー通過後に100℃程度となり、両者とも工業的な利用価値がほとんどない極限に近い状況となる。このため、焼成工程における一層の熱量原単位低減は廃熱発電量の低下につながることであり、新たな省エネルギー投資が経済的に成り立ちにくいという究極的な状況をもたらしている。いわゆる「乾いた雑巾をさらに絞る」まで省エネを追求する、セメント製造技術者たちの執念を示す廃熱発電の取組み成果である。

5.7 コンピューター制御（コントロール）^{4) 20)}

本節では、セメント製造工程へのプロセス制御用コンピューター応用技術の発達について述べる。セメント製造プロセスのコンピューター制御は、「セメント製造の固有技術」+「温度・圧力・化学成分などのセンサー技術」+「通信・情報処理機器（ハードウェア）」+「システム統合・制御技術（ソフトウェア）」が総合される一つの大きなシステムであり、それぞれの技術が今日でも日進月歩の進化の過程にあり、加えてセメント産業自身が、「天然原料からセメントをつくる産業」から、「廃棄物を再資源化してセメントをつくる産業」へと大きく変わりつつあり、コンピューター制御のセメント製造工程への応用も「現在進行形」の流れの中にあるといえる。

なお、コンピューター制御に関する専門用語については専門書に委ねることとして、本稿では説明は省略する。

5.7.1 セメント製造工程へのコンピューター制御導入の流れ^{4) 20)}

1958年に米国のTRW社（Thompson Ramo Woodridge Inc.）が制御用コンピューターを発表し、1959年にはリバーサイドセメント（Riverside Cement）社が原料調合を中心に、また1964年にCPC（California Portland Cement）社のコルトン（Colton）工場、原料調合と焼成プロセスの制御を中心に試行されるなど、1960年代の米国でプロセス制御用コンピューターの普及が始まった。

日本のセメント産業でも、1960年代初頭から各社でプロセス制御用コンピューターの導入が始まった。多くの場合、原料工程のコンピューター制御開発が最初に取り組みされた。

焼成工程についても、やはり1960年代から、コンピューターを用いた操業データの収集とデータ解析によって、焼成プロセスの特性解析などを調べることから開発作業がはじまった。セメント製造プロセス、特

に焼成プロセスは、入出力の間にフィードバックがあり、多くの雑音を含むことからモデル化が難しく、そのためコンピューター制御を行うことは非常に難しいとみなされた。その困難さに対して多くの挑戦的な研究開発が行われ、1970年頃には各社で焼成プロセスの制御について基本的手法がほぼできあがってきた。例えば、以下のような方法が開発されていたと報告されている²⁰⁾。

- ①キルン内の静的数式モデル
- ②時系列統計解析に基づく最適化制御の実操業キルンへの適用
- ③コーティング（アンザツ）落ちなどの擾乱検出とその回復最適化操作

その後1970年代に入ると、NSPが開発され、燃料が重油から石炭に転換されていった。

これらの動きは制御にも影響を及ぼした。例えば1980年前後の石炭転換の時には、従来のアナログ計装がデジタル式の1ループコントローラに置き換えられた。

1990年前後にはNSPや石炭焼成への転換工事も一段落し、DCS（Distributed Control System）を導入して操作室を統合し、省力化によって生産性を上げようという取り組みが盛んになった。

1990年代から、セメント製造プロセスで処理する廃棄物の種類と量が年を追って増加し、しかもそれら廃棄物の成分・性状、あるいはプラントレイアウト上の制約などにより、キルン系のさまざまな位置から系内に添加されている。これらのリサイクル資源の使用法に合わせて種類の変更や供給装置の起動停止に対応するためには、処理の高速化とDCS、PLC（Programmable Logic Controller）との連携が必要不可欠となった。

2000年ごろになると、DCS等の各計測制御機器とアプリケーション間の通信方法にOPC標準規格（注2参照）が用いられるようになってきた。OPC通信機能によりDCSメーカーに依存せずプロセス制御用コンピューターシステムの構築が可能となり、さらに計算機の高速化により、プロセス制御用コンピューターにおける制御周期は1990年代の分から秒周期へと高速化が図られた。

2010年時点での計装制御装置はDCS、PLCによるCRT（Cathode Ray Tube）オペレーションが一般的で、ほとんどはPID（Proportional Integral Derivative）制御である。原料調合や焼成プロセスの制御等いくつかの制御については、上位にプロセス制御用コンピューターを置き、ゲートウェイなどを介してDCS

の制御ループの設定値を変更する「セットポイントコントロール」が行われている。

5.7.2 セメント製造工程におけるコンピューター制御の難しさ²⁰⁾

セメント工業で扱う原燃料の大部分は、様々な形状・性状の固体・粉体であり、付着、詰まり、偏析（粒度や成分などの偏り、分離）、フラッシュ（瞬間的な噴き出し）など挙動が不安定で、制御だけでなく計測においても大きな困難が伴う。セメントの窯送り原料（キルンに送入される原料）は、たとえすべてが天然原料で、その成分のバラツキや平均値がわかっている場合でも、窯に送入する時点での成分を測定できないため、焼成工程制御は予測値から調整しなければならない。ましてや、リサイクル原燃料は成分や熱量のバラツキ・変動がさらに大きい。加えてキルン系（プレヒーター及びキルン本体）内では、高温下での固体／気体、固体／液体反応が起こっている。つまり、セメントキルンは、大きな外乱・むだ時間・分布定数・非線形・時変など、制御を難しくする要素の寄せ集めのようなシステムである。ステップ応答テストにより特性をつかもうとしても、プロセス内に閉ループを持ち時間的にゆっくりした反応を示すプロセスであり、テスト中の他の変数の変化の影響や、入力の変化が多くの経路を通じて複雑に影響し合うことなどのためにテストが非常に困難となる。

このようなプロセスに対して、セメント各社のコンピューター制御開発担当者たちは挑戦を続け、結果を出していった。各社いずれの開発においても共通している点は、現場操作（人間の操作）の実態を観測しながら、データ解析に数年以上かけてプロセスの解析を実施していること、また、協同研究や理論的裏づけ等社外専門家と共に学術的アプローチによる解決策の検討を行っていることである。なお、社外専門家との協同研究を行ったことで、他工場への展開や他のプロセスへと応用範囲を広げることが可能となり、さらにプロセスの変化に対して、ロバスト（robust：外的要因による変化を内部で阻止する仕組みや性質）な設計を行うとともに、パラメーター調整方法を実運用のイメージに近い形にすることで、長寿命の制御システムを構築可能となった。

なお、開発された制御システムの具体例は、文献(20)に詳しい。

5.7.3 コンピューター制御：2010年時点の現況と今後の課題^{4) 20)}

日進月歩のIT技術、その流れの中でのセメント製造技術へのコンピューター制御の2010年時点での現況と、今後の課題について、簡単に触れておく。

近年、リサイクル資源の種類・量の増加と主燃料である石炭の種類が多様化によって、それらを使いこなすための操作が煩雑化しており、セメント製造工程の不安定化にもつながりかねない。また、需要の変化に伴う生産量の大幅な変更（例えば5,000t/dのキルンで4,000t/dの抑制運転をするなど）により、従来の制御方法では系の安定化が難しくなり、オペレーターの負荷も増大している。高温処理の必要なリサイクル資源の多くは原料工程と焼成工程で処理しており、リサイクル原燃料を最大限活用しながら、如何に原料成分や燃焼状態を制御するかが最重要課題になっている。

セメント製造工程のうち仕上工程は、被粉砕物であるクリンカーが「化学製品」であり、硬さや成分など性状面での変動が少ないので、自動制御だけの時代にもかなり効率的な運転ができていた。したがって、コンピューター制御の導入も、原料・焼成工程に比べれば比較的容易な対応であった。

(1) 原料調合制御^{21) 22) 23)}

原料工程は、オンライン (on-line) 蛍光 X 線分析装置とコンピューター制御の組合せで、1960年代後半には原料調合に飛躍的な発展がみられ、ブレンディングサイロとの組合せで、乾式法の泣き所だった「均斉化」の問題が大幅に改善され、湿式法を完全に過去のものにした (4.8 参照)。

工場における調合原料成分の分析手法としては、一般的にはガラスビード法による蛍光 X 線分析が主流であったが、小野田セメント (現・太平洋セメント) では、ガラスビード法の装置の他に特殊な粉末プレス機構を用いた連続測定装置が現場設置され、調合原料の化学成分が管理されていた。ただし、この装置は高い分析精度を求めるものではなく、成分変化を連続的に捉えて傾向管理を行うことを主眼とするものであった。後述のような新たなシステムが進歩したことなどもあって現在では用いられなくなったが、連続的な管理を可能にしたという点で当時としては優れた特徴を持った方式であった。

1990年代になるとリサイクル原料が活用されるようになり、その種類と量は増え続け、その成分、性状、設備レイアウト上の制約などにより、工程内のさまざ

まな位置からリサイクル原料が添加されている。その結果、原料調合における制約条件も増加して、リサイクル原料を最大限活用しながら如何に成分を制御するかが最重要課題になってきた。

一般的に用いられてきたガラスビード法による蛍光 X 線分析は、従来から十分な高精度が得られるものであったが、当時の工程管理の体制としては、現場での試料採取から試験室への搬送、試料の前処理 (粉砕・溶融ビード作成)、蛍光 X 線分析まで基本的に人手により行う必要があった。このため、分析頻度は1~2時間に1回程度が限界であり、調合原料の化学成分の安定化を図るうえでの制約のひとつとなっていた。

これに対して、現在の主要な方法は、上記のすべてを自動化 (現場自動サンプラー⇒気送管による空気搬送⇒ロボットによる試料前処理⇒蛍光 X 線分析) したものである。得られた分析データは、コンピューターによる「モデル予測制御」を行う原料調合システムに自動転送され、各種原料の調合比率の自動コントロールが行われている。自動化することにより分析頻度を従来に比べて大きく増すことができ (例えば、3~4回/時間)、調合比率をより繊細にコントロールすることが可能となった。複雑化した原料事情のなかで、化学成分の安定度への寄与は大きいといえる。

原料調合制御には「モデル予測制御」をほとんどのセメント会社が採用している。その理由は、モデル予測制御が多入力多出力の制御システムを容易に実現でき、かつロバスト性にも優れていて、リサイクル原料比率の増加に対応するのに適しているからといえる。従来は、調合した結果の成分を分析し、それを目標値に合わせるために調合割合を調整するフィードバック制御であったが、「リサイクル資源を成分限界まで優先的に使用する」ことが制御目標に追加されている。なお「モデル予測制御」についての説明は専門書にゆだねる。

このような工程管理用化学分析の自動化システムは、焼成工程や仕上工程についても組み上げられている。原料工程に関しては化学成分の分析を行う蛍光 X 線分析装置だけであるが、焼成工程や仕上工程では「リートベルト法」(注3)による解析が可能な粉末 X 線回折装置を組合せたシステムも多い。化学成分と同時にクリンカー/セメントのf.CaO (フリーライム、焼成度の指標) や鉍物組成を自動的に定量することができるようになり、少人数体制のなかでオペレーターや品質管理要員が迅速に適切なアクションを取るうえで大変に役立っている。

(2) 焼成プロセスの制御²⁰⁾

焼成プロセスのなかでもプレヒーター部のリサイクル資源の使用が増大している。プレヒーター部の原料通過時間は数秒であり、従来のロータリーキルン部の分周期の制御とは異なって秒周期の制御を必要とする。

また、リサイクル燃料の変動とプロセス内の閉ループに関係する部分の変動は、周期等その影響が大きく異なるため、それぞれ個別に調整可能な制御構造としている。これらの影響度の調査には、多変量自己回帰モデルで開発された統計的解析手法を含めた解析を行っている。さらに、手動で行っていたリサイクル燃料供給装置の起動/停止操作、詰り検出とその回復処理等のノウハウを、運転支援システムと呼ばれるパッケージソフトを使用し最適化/自動化を図っている。これらの操作は1990年代末まではDCSやPLCで行われていたが、リサイクル資源による天然原料代替の増大により、その操作頻度が増し連続制御との連携が必要となった。2000年以降各社で運転支援システムの導入が進んでいる。

(3) コンピューター制御技術開発の課題²⁰⁾

近年、ネットワーク上でデータ収集、プログラムの改造、修正等が集中管理して行えるようになった。さらに、OPC通信機能を用いることで、運転支援システムをはじめとしたパッケージソフトや開発ツールの利用が可能になってきた。

一方、セメント需要の減少傾向が強くなり始めた2000年頃から計測制御技術者が減少し、2010年時点では半減しており、開発技術者がいなくなった会社もあると伝えられている。そのため、本来製造業の計測制御技術者が行うべき「制御理論と製造現場との橋渡し」を行うことが難しい状況になってきている。

新しい制御理論を持ってきても、オペレーターの理解とプロセスに対する理解が伴っていなければ制御性の向上がないのは当然で、色々な新技術にチャレンジし現場に適用しても、いつの間にか使われなくなったというようなことは、他産業と同様セメント産業でも決して珍しいことではない。特にリサイクル資源使用方法の変化が激しいこの時期に、現場の変化に対応していかなければ、現在稼働している制御システムもいずれ使われなくなってしまう可能性がある。

そのため、パッケージソフト、汎用のツールを利用して出来る限り効率的に開発を行うとともに、プロセスの知識や運転ノウハウの必要性の高いモデリングや工程解析、制御の現場調整に関しては、自社が中心と

なり協同研究等社外専門家の知恵も借りて開発を行っていくというような開発体制の構築がますます必要になっている。

5.8 1970（昭和45）年以降の省エネルギー技術の成果の総括¹⁾

セメント製造に用いられるエネルギーは、「熱エネルギー」および「電力エネルギー」である。この第5章では、1970年代以降に導入あるいは開発されたセメント製造装置・製造方法について述べてきた。その技術導入・技術開発は「省エネルギー」が主たる目的であった。以下に、結果として実際にどれだけエネルギー原単位が改善されたのか、について述べる。

5.8.1 熱エネルギー原単位の推移

2011年現在、セメント工場で使用される熱エネルギーは、石炭が約73%、石油コークスが約12%、廃油や廃タイヤ等の産業廃棄物・副産物等が約14%で、重油は僅少（約1%）である。石炭は中国、豪州、ロシア、インドネシアなどから輸入している。なお、石炭を燃焼させたときの発熱量は27~29MJ/kg程度である。今日のセメント焼成工程における熱エネルギーの回収およびその利用の状況を図5.13に示す。

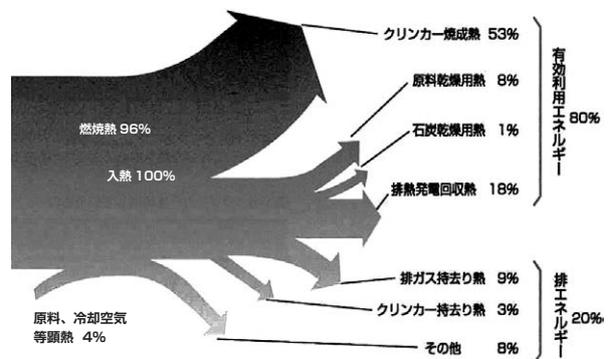
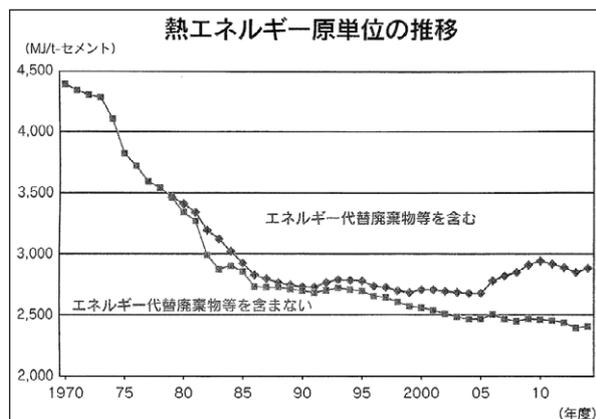


図 5.13 セメント工場の熱エネルギーの流れ¹⁾

図5.14には、セメント製造用熱エネルギー原単位（セメントを1トン製造するのに必要な熱エネルギー）を示す。図に見るとおり、1970~1990年度の20年間で、熱量原単位は約40%低減している。この最大の要因は、既に述べてきたように、旧来の乾式ボイラー付キルンや湿式キルンに比べてエネルギー効率が飛躍的に優れ、かつ量産効果の高いSP・NSPキルンへの転換が進んだことであり、1997年度には国内全てのキルンがSP・NSPとなった。

近年、セメント製造用の化石起源の燃料の一部代替として可燃性の廃棄物（熱エネルギー代替廃棄物）が利用されている。省エネ法（正式名「エネルギーの使

用の合理化に関する法律)のエネルギーの定義(第2条)には、「廃棄物の燃焼によるエネルギー」は含まれていないので、セメント製造用熱エネルギーの原単位は、廃棄物起源の熱量をゼロとみなした数字で表示することを基本とし、廃棄物熱量を含めた数字は「参考」として提示している。実際のところ、「廃棄物中の可燃物が、熱量として焼成プロセスにどの程度寄与しているのか」を明瞭に把握するのは困難である。



注) エネルギー代替廃棄物等使用量の調査は1980年度に開始

図 5.14 1970 (昭和 45) 年以降の熱エネルギー原単位の推移²⁴⁾

5.8.2 電力エネルギー原単位の推移

1970 年以降の電力エネルギー原単位の推移を、図 5.15 に示す。

セメント製造における熱エネルギーの有効利用策の一つとして、廃熱発電(4.2.2 及び 5.6 参照)が行われている。廃熱発電は、排ガスの持つ熱エネルギーを利用して発電を行うものである。廃熱発電により得られた電力エネルギーは、電力会社からの買電や自家火力発電による電力エネルギーとは区別し、プロセスが消費した総使用電力から廃熱発電分を差し引いた電力を「基本」とし、総使用電力は「参考」として提示している。

図から分かる通り、1970~1990 年度の 20 年間で、電力原単位は約 20% 低減している。

これは、原料工程において粉砕効率の優れた壱型ミル(5.4.2 参照)が、また、仕上工程において粉砕助剤(5.5.2)、分級ライナー・小径ボール(5.5.3)、渦流式分級機(5.5.4)、予備粉砕機(5.5.6 参照)などが積極的に導入された等の結果である。

しかし、近年は廃棄物・副産物の利用の拡大に伴い、そのハンドリング(破碎・混合・搬送など)のための電力が必要になって、若干上昇傾向にある。

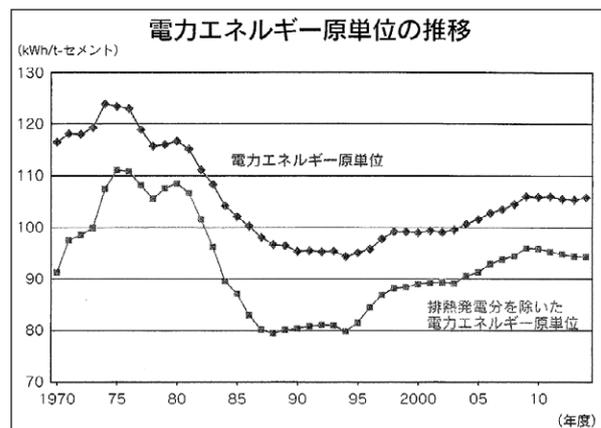


図 5.15 1970 年以降の電力エネルギー原単位の推移²⁴⁾

5.8.3 エネルギー原単位の国際比較

日本のセメント産業が達成した産業技術史上の輝かしい成果「世界最高水準の省エネルギー技術」を後世に伝える具体的表現として、エネルギー原単位の国際比較を図 5.16 に示す。

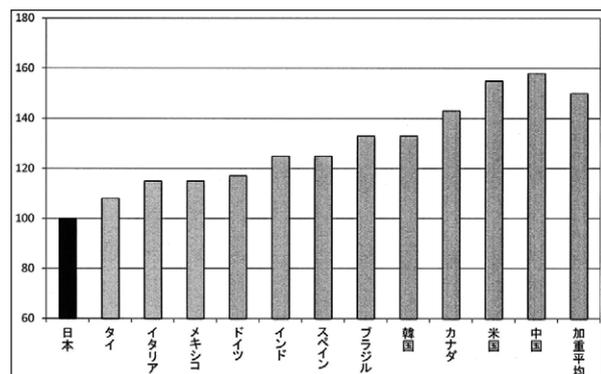


図 5.16 エネルギー原単位の国際比較²⁵⁾

クリンカー ton 当たり エネルギー消費量指数比較(日本=100、2003 年)

原データ出所: The International Energy Agency、2008 年
電力については 1MWh=0.086/0.33toe にて換算

(toe: 石油換算トン (ton of oil equivalent) 1toe=41.8605GJ)

注 1: エアスエプト(ミル)

通常のミルでは、内部の通風は「外部への発塵を抑える」ことを目的に、ミル内部を若干負圧にする程度の通風である。これに対し、エアスエプトミルは、ミル内部の冷却・乾燥・微粉除去などを目的にして、ミル内通風を強化したタイプのミルをいう。

注 2: OPC (OLE for Process Control)

米国 OPC Foundation が策定した国際標準のアプリケーション間通信インターフェイスの統一仕様をいう。

注 3: リートベルト法²¹⁾

1969 年にオランダ人結晶学者ヒューゴ・リートベルトが中性子回折のために考案した手法で、X 線回折を適用したものを XRD/リートベルト法と呼ぶ。XRD/リートベルト法では得られた X 線回折図に対して、理論的な回折プロファイルを最小二乗法で精密化し、各鉱物の結晶構造パラメーターを決定する。これにより結晶構造を精密化することが可能となる。近年、セメントのよう

な複数種の鉱物を含む試料にも、本法が適用されるようになり、その際、結晶構造と同時に尺度因子とよばれる各相の比率を示すパラメーターも精密化される。これにより、どの鉱物がどれだけ試料中に含まれているか知ることができるようになりつつある。

参考文献

- 1) セメント協会, セメントの常識, 2013.
- 2) 日本セメント株式会社, 日本セメント百年史, 1983.
- 3) 小野田セメント株式会社, 小野田セメント百年史, 1981.
- 4) 伊藤光弘, セメント製造技術の研究開発, 太平洋セメント研究報告, No. 150, pp. 29-56, 2006.
- 5) 岡部達夫, 秩父セメント (現・太平洋セメント) 社内資料「セメント読本 第4巻 製造技術」, pp. 41-51, 1978.
- 6) 須藤勘三郎, 佐田益男, 秩父セメント (現・太平洋セメント) 社内資料「セメント読本 第4巻 製造技術」, pp. 130-144, 1978.
- 7) セメント協会, 生産技術専門委員会報告 T-22 省エネルギー・省資源技術に関する報告書, 2002.
- 8) 林雄之輔, 秩父セメント (現・太平洋セメント) 社内資料「セメント読本 第4巻 製造技術」, pp. 77-83, 1978.
- 9) 太平洋セメント株式会社提供
- 10) 近藤希賢, 渡辺則幸, 高椋淳之, ドポールキルンの運転実績について, 第21回セメント製造技術シンポジウム報告集, pp. 33-42, 1964.
- 11) 一柳俊一, 黒滝厚俊, 根岸 保, 秩父セメント (現・太平洋セメント) 社内資料「セメント読本 第4巻 製造技術」, pp. 96-111, 1978.
- 12) 宇部興産株式会社, 中安閑一伝, 1984.
- 13) 鈴木健司, 今橋一博, 古閑忠之, 大桐隆夫, 大型ロッシュミルの低圧損化について, 第40回セメント製造技術シンポジウム報告集, pp. 62-67, 1983.
- 14) 内田郁夫, 秩父セメント (現・太平洋セメント) 社内資料「セメント読本 第4巻 製造技術」, pp. 31-35, 1978.
- 15) 豊岡重利, 大宅 智, 小川喜久雄, 高性能分級機O-SEPAによるセメントミルの実績, 第45回セメント製造技術シンポジウム報告集, pp. 31-36, 1988.
- 16) 玉重宇幹, 2015年5月26日付私信
- 17) 尾花博, 佐藤晃一, 玉重宇幹, 在津賢一, 上田敏之, 浜口正記, セメント粉砕用大型OKミルの操業実績, 第45回セメント製造技術シンポジウム報告集, pp. 25-30, 1988.
- 18) 尾花 博, 2015年8月1日付私信
- 19) 内田貴久, 渋谷恭一, 関和富一, 外谷与生, 蒲生正夫, 井原友水, 中利 浩, セメント工業における排ガス発電について, 第38回セメント製造技術シンポジウム報告集, pp. 18-23, 1981.
- 20) 武智伸夫, セメント産業-その変容を支える計測と制御技術-, 計測と制御, Vol.50, No.8/9, pp.640-644, 2011.
- 21) 太平洋セメントホームページ, 2015年9月.
- 22) 岡村隆吉, セメント製造と人との関わり, コンクリート工学, Vol. 52, No.9, pp. 759-764, 2014.
- 23) 岡村隆吉, 2015年11月24日付私信
- 24) セメント協会, パンフレット「環境にやさしいセメント産業」, 2015.
- 25) セメント協会ホームページ, 2015年9月.

6 | 環境保全技術・地球温暖化対策

本章では、以下の2点について述べる。

- (1) 1970年代に環境関係の規制法が整備され、セメント会社も厳しい対応を迫られたが、「既存技術の徹底利用」の上さらに「新規技術開発」を加えて、厳しい規制値をクリアしてきた。
- (2) 1990年代以降「地球温暖化問題」が大きく取上げられるようになった。セメント産業は、燃料の燃焼による二酸化炭素（燃料起源CO₂）に加え、原料の石灰石の脱炭酸でも二酸化炭素（プロセス起源CO₂）を排出する宿命を負っており、セメント企業間で国際的な組織を設立、互いに手を結んで対応策を研究する取り組みを進めている。

6.1 環境保全技術開発

1968（昭和43）年に「大気汚染防止法」が制定され、さらに1970（昭和45）年のいわゆる公害国会と呼ばれた第64回国会において、大気汚染防止法の大幅な改正や騒音規制法の制定がなされた。一方、大正時代に浅野セメント深川工場で公害問題が発生（4.11.1参照）して以降、各社各工場は、電気集塵機やバグフィルターを設置、騒音対策の実施などを行い、その過程でいわゆる「五感に感じる公害」については、問題に対する対応技術の蓄積がほぼ出来上がっていた。

しかし、上記1970年の公害国会以降、大気汚染防止法、水質汚濁防止法、騒音・振動対策防止法等々の法律およびその後の改正を通じて、五感に感じる公害だけではなく、「窒素酸化物」「硫黄酸化物」あるいは「セメント中に含まれる重金属」など、法的に一層広い範囲の「環境規制」がかかるようになってきた。

セメント製造工程における硫黄酸化物（SO_x）は、発生源のほとんどが燃料中の硫黄分である。しかし、セメントキルンは燃焼排ガスが石灰石原料と熱交換する装置であるため、SO_xは熱交換過程で原料中に取り込まれ、最終的には硫酸カルシウム化合物の形でクリンカー中に含まれてキルンから排出される。とりわけSP・NSPキルンは、排ガスが石灰石と熱交換するプレヒーターが巨大な「脱硫装置」にもなっており、ほとんど対策の必要性は生じなかった。

一方、窒素酸化物（NO_x）は燃料の高温燃焼過程で必然的に発生するために、セメント業にとって大きな問題となった。クリンカー焼成には、バーナーで1500℃程度の高温のフラム（火焰）を形成する必要

があるため、そこでのNO_xの発生は避けがたい。しかし、そのNO_xは、その後の排ガスが煙突から大気中に排出されるまでの過程で吸収されることがないため、工場によっては厳しい対応を迫られるケースも生じてきた。窒素酸化物に対する技術的対応策について、6.1.1項で説明する。

セメント中には、後述する理由から、極々微量の重金属（Cu、Pb、Znなど）が含まれている。水質汚濁防止法関連の規制が整備され、生コンクリート工場やコンクリート製品工場に「排水基準」が適用されるようになると、これらの工場から排出される排水中の重金属が監視対象になり、セメント中の重金属量についても、しっかりと管理する必要がでてきた。この「セメント中の重金属対策」について、6.1.2項で説明する。

6.1.1 窒素酸化物：NSP化が切り札¹⁾

セメントキルンから発生する窒素酸化物（ノックス・NO_x）は、キルン系に吹込まれる燃料の燃焼に伴って発生する。燃焼炉から発生する窒素酸化物には、その発生のメカニズムから、燃焼自体によって空気中の窒素が酸化されて発生する「サーマル（Thermal）NO_x」と、燃料中に含まれている微量の窒素酸化物が燃焼（酸化）されて発生する「フュール（fuel）NO_x」がある。セメントキルンから発生するNO_xは、高温燃焼によって発生するサーマルNO_xが大部分であるとみなされている。

2014年時点でのセメントキルンに関する国のNO_xの排出基準は、1975年以前からの設備については480ppm（O₂：10%換算）、1975年以降に新設の設備については250ppmとされている。しかし、地方自治体によっては、条例で上乘せ規制をしているケースもある。セメントキルンに対するNO_x規制の内容が発表された1977年時点では、480ppmを超えている工場・キルンが一部にあることが判明していた。

セメントキルンにおけるNO_x発生のメカニズムとしては①燃焼フラムの最高温度、②最高温度の持続時間、③燃焼空気比、これら3要因の相互作用だとされている。一方で、これら3要因は「高品質のクリンカー」を焼き出すためにも重要な要因であり、「NO_x規制をクリアすること」と「高品質のセメントを作ること」とが相反する方向にあることが、セメント工場にとって非常に悩ましい問題となった。各社は自らの

生き残りをかけてNO_x対策に取り組むと共に、業界としても低NO_xバーナーの共同開発に取り組むなどの努力を行った。それらの努力の結果、以下のようなNO_x低減対策が有効であることがわかってきた：

- 1) NSP化：燃焼が回転窯と仮焼炉の2か所に分けられるので、高温域を要する回転窯の燃料の比重が下がり、NO_xが低減される。
- 2) 低NO_xバーナーの採用：バーナー構造の改善で、①フレーム中のNO_x還元領域を安定形成・拡大し、②微粉炭の均一な噴出と最終的な燃え切り性能を確保する。
- 3) 緻密な運転管理：焼成炉出口NO_x値を運転指標に使い、NO_x値が高くなれば、バーナーのフレーム操作や低空気比燃焼などでNO_xを下げる操作を行う。
- 4) 下水汚泥など、脱硝効果（還元効果）のある廃棄物原料を利用する。
- 5) 脱硝剤添加：アンモニア、尿素などをプレヒーター部の高温ガス中に添加する。

結果的に現在では各社とも、それぞれの状況に応じて1)、2)、3)、4)の対策の採用できるもの全てを採用し、それでもなお規制値を超える部分のNO_xに対して5)を使用しているようである。2014年の我が国のセメントキルンは全てSP・NSPで、そのうちNSPはキルン数で83%、生産能力で86%となっている。

6.1.2 セメント中の重金属

セメント原料は、塩基性質原料である「石灰石」と、酸性性質原料である「粘土類」で構成される。粘土類の主たる成分は、SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃である。この3成分間の比率を調整するために、Fe₂O₃源として鉍滓（銅がらみなど）が利用される。この鉍滓類の中に、微量ながら重金属（Pb、Crなど）が含まれている場合があり、その場合には焼成工程を経て、最終製品であるセメント中に残存することになる。

日本のセメント産業140年の歴史の中で、セメントに含まれる重金属が人体に有害な影響を及ぼしたという報告はされていない。しかし、1970年代以降、水質汚濁防止法関連の規制が整備され、生コンクリート工場やコンクリート製品工場に「排水基準」が適用されるようになると、これらの工場排水に含まれる重金属が監視対象になった。生コン工場やコンクリート工場が、余ったコンクリートを処理した後の排水や、床や設備などの清掃に使った排水に、セメント中の重金属が溶出してくる可能性があるのである。また、セメントが軟弱地盤改良材、廃棄物の埋立用固化材として

利用されるようになってきたので、土とセメントを混ぜた「改良土」が、土壌に関する重金属の規制に適合することの確認も必要になってきた。かくして、セメント会社としてはセメント中の重金属について、しっかりと管理する必要が生じてきた。

重金属対策として重要なポイントは以下の3点である：

- ①製造工程に持ち込まれた重金属は、そのままセメントに含まれて出てくる。
- ②従って入量を抑えれば、出量も減少する。
- ③重金属の存在は、セメントの品質（強さや凝結）にほとんど影響しない。

そのようなことで、各社は受入原料中の重金属量に自主基準を設けて、問題が起これないように対応している。

なお、セメント産業が「循環型社会構築貢献産業」を目指すようになって、各種産業廃棄物や都市ごみ廃棄物を代替原燃料として積極的に受け入れるようになって以降は、重金属問題は、セメント会社にとっては、受身ではなく、積極的に取り組むべき重要な課題となっており、そのための技術開発も進められている。この点については、第8章で述べる。

6.1.3 キルン排ガス処理にバグフィルター採用

セメント工場のキルン排気ガスの処理には、従来から電気集塵機（EP、コットレル）が使用されてきたが、最近、多種・多量のリサイクル資源が原燃料として使用され、EPの安定運転阻害や劣化等の問題が発生し、工場操業に対するリスクが高まってきた。一方、低熱発電の採用で最終的な排ガス温度が100℃程度まで低下し、かつアラミド繊維のような耐熱性繊維が開発され、キルン排ガス処理にバグフィルターが使える条件が整ってきた。2005年、太平洋セメントは熊谷工場の既設のEPを解体撤去し、バグフィルター化する工事を行い、工場の安定操業に改善があった。その後、キルン排ガス処理へのバグフィルターの採用が業界内に次第に広がってきている。

6.2 地球温暖化対策²⁾

1992年6月に開催された地球サミットを契機として、全地球的（グローバル）に「地球温暖化」に関する問題意識が高まった。国内でも、京都議定書における削減目標の実行のため、産業・運輸・民生等各部門で種々の取り組みが開始された。セメント産業においては、製造コスト削減対策として取り組んできた省エ

エネルギー対策が、燃焼起源 CO₂ の排出削減につながることは明らかである。その一方で、セメント産業にとって悩ましいのは、原料の石灰石が脱炭酸する過程で発生するプロセス起源 CO₂ である。このような事情を踏まえたセメント産業の地球温暖化問題への取組みについて、以下に説明する。なお、セメント製造で発生する温暖化ガスは CO₂ がほとんど全てであり、他の温暖化ガスの発生については、科学的に見て無視できる微量である。

6.2.1 温暖化ガス (CO₂) の排出減少対策

日本のセメント工場のポルトランドセメント製造工程における CO₂ の発生量は、2014 年で 0.73kg-CO₂/kg-cement である。発生源は、①燃料の燃焼 (排出 CO₂ の約 45%) と②石灰石の脱炭酸 (同 55%) である。これに対するセメント産業の現時点での技術的な対応策としては、以下の方策がある。

- (1) 省エネの徹底
- (2) 脱炭酸された石灰質廃棄物の原料への利用
- (3) バイオマス (植物系) 廃棄物の燃料への利用
- (4) 混合セメントの利用
- (5) 混合材の利用

(1) 省エネの徹底

本件については、既に述べてきたとおり、産業の草創期以来、文字通り「不断の努力」を続けてきており、とりわけ 1970 年代以降の省エネの進展には目を見張るものがある。また、エネルギー原単位も世界のトップレベルである。それら点については、すでに 5.8 で述べた。

(2) 脱炭酸された石灰質廃棄物の原料への利用

(3) バイオマス (植物系) 廃棄物の燃料への利用

これら (2)・(3) 項についての技術開発状況は第 9 章で述べるが、利用にあたっては以下のような制約条件があるケースも多い。

- ①発生量が限られている場合も多い。
- ②利用 (入手) できる地域が限定される。
- ③廃棄物の化学成分から使用量に制約を受ける場合もある。

しかし、廃棄物の利用は、(1) の省エネの場合と同様、セメントの製造コストの削減にもつながるので、利用拡大のための技術開発が、今後とも続けられることは間違いない。

なお、ここで「可燃性廃棄物をセメント工場で燃料

代替として使う場合の CO₂ 削減効果」について触れておきたい。廃プラスチックなどは原料が化石燃料であり、燃焼すれば CO₂ の増加につながる。その点では「二酸化炭素中立」な廃木材などバイオマス系の廃棄物とは異なる。しかし一方で、廃プラスチックなどの可燃性廃棄物を焼却炉で焼却する場合に比べれば、セメント工場で燃料代替として使うことが CO₂ 削減になる。その理由を図 6.1 に示す。可燃性廃棄物を焼却炉で燃した場合は、大気中に CO₂ を排出するだけで終わるが、セメント工場の焼成工程で利用する場合には、廃棄物の熱量 (もちろん全量ではないが) が化石起源エネルギーの一部を代替することになり、セメント工場の排出 CO₂ 量は同じでも、地球全体としてみると CO₂ の削減になるのである。

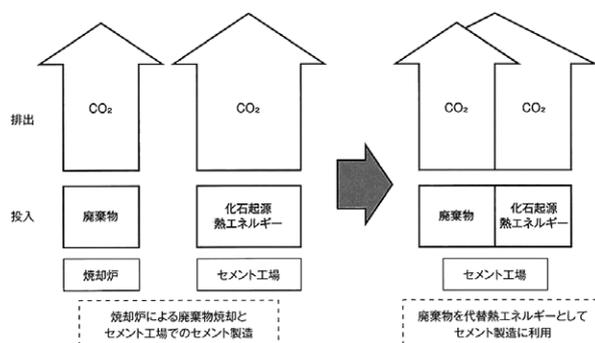


図 6.1 セメント製造でのエネルギー代替廃棄物等使用による CO₂ 排出量低減²⁾

(4) 混合セメントの利用

JIS 規格にある混合セメントの種類や内容については第 8 章で詳説するが、ポルトランドセメントに高炉スラグやフライアッシュ (石炭灰) などを混合した製品なので、混合材による希釈分だけ「セメント」1 トン当たりの CO₂ 排出量は少なくなる。

国内セメント業界各社は、混合セメントの供給体制をすでに整えている。しかし、どのセメントを購入・使用するかは需要家側の判断であり、2012 年度では、混合セメント (高炉セメント・シリカセメント・フライアッシュセメント) の構成比は、全セメント生産量の 25% 程度となっている。混合セメントの生産比率の推移を図 6.2 に示す。

日本のセメント産業にとって、廃棄物処理は大きな収益源に育っており、各社各工場とも、セメント品質に影響のないぎりぎりの限度まで、廃棄物を原燃料として取り込んでいる。従って、①セメントの需要が伸びず、②廃棄物処理の技術水準が現状のまま、③混合セメントの比率が増えていくと、「セメント工場での廃棄物の処理量にマイナスの影響が出てきて、焼却炉での処分が増えて、最終処分場の寿命が短くなる」、

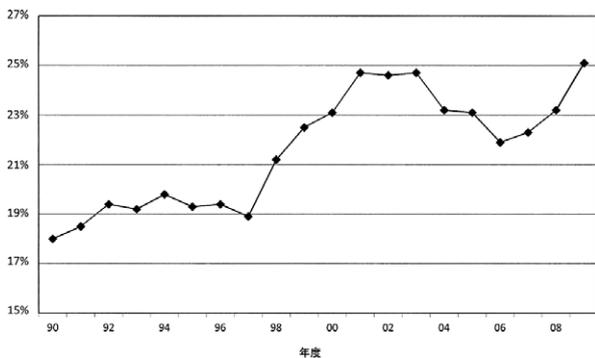


図 6.2 混合セメント生産比率推移³⁾

という「環境」に関してトレードオフの関係が生じる。セメント製造工程における廃棄物処理技術開発が、地球温暖化防止対策としても重要な取り組みになってきている。

(5) 混合材の利用

日本のセメント業界の地球温暖化対策への真摯な努力の一つとして、1979年のJIS改正に際して、「ポルトランドセメントに対して、少量混合成分を5%まで混合すること」が、業界の要望で認められた。少量混合成分としては、JISで高炉スラグ、フライアッシュ、シリカ質混合材、石灰石の4種類が認められている。このことによって、ポルトランドセメント1トンの製造で排出するCO₂量は、最大5%削減されることになった。

6.2.2 温暖化ガス排出削減のためのセメント産業のグローバルな連携取り組み

地球温暖化問題に関しては、いずれの国のセメント産業も共通して以下の課題を抱えている：

- ①エネルギー多消費産業である。
- ②しかも、製造工程では燃料起源のCO₂のみならず石灰石脱炭酸のCO₂も加わる。

一方で、地球温暖化問題は地球全体に影響の広がる「グローバルな課題」であるのに対し、その対策に関する各国政府の方針は、自国の産業の保護・育成などの問題もからみ、先進国、開発途上国等それぞれの国家間で大きなばらつきがある。同じくセメント企業側に関しても、企業規模についていえば、いわゆる多国籍企業から1社1工場のローカルメーカーまで、立地についていえば、市街地近接の工場から砂漠の中の工場まで、生産規模についていえば、年産1千万トンの工場から数十万トン規模の工場まで大小さまざまである。

このような状況の中、セメント産業に関する地球温

暖化問題について、共通している課題については共通の認識を持って、国際的な連携で取り組みを進めよう、という趣旨で、1990年代以降いくつかの国際的な連携が始まった。ここでは、代表的な2件の国際的な連携活動を紹介する。

(1) 「クリーン開発と気候に関するアジア太平洋パートナーシップ (APP)」²⁾

APPは、2005年7月、米国の提案により、日本、米国、オーストラリア、中国、韓国、インドの6カ国が協力し、「クリーンで効率的な技術の開発・普及を通じて、環境問題、エネルギー安全保障、気候変動問題へ対処する」ことを目的として、各国官民の参加で発足した。2007年10月には、カナダが加盟し7カ国となった。このAPPでは、増大するエネルギーの需要、大気汚染、エネルギーの安全保障、および温室効果ガス濃度に関する課題について、政府と産業とが共同して取り組んだ。

活動した8つのセクターのうち、セメントセクターは日本が議長国となり、セメント協会は政府（経済産業省）と協力して、APPに参加している途上国に対して、省エネ技術の紹介、セメント工場からのCO₂排出量の計算方法の説明などを行った。

2011年4月にAPPの活動は終了したが、日本のセメント産業は、①日本のセメント製造用エネルギーの使用状況、②省エネ技術（設備）の導入状況、③廃棄物の利用状況、などを世界に発信して、各国のセメント製造用エネルギーの削減や循環型社会への構築に貢献をしていく方針を掲げている。

(2) 「WBCSD」および「WBCSDのセメント産業部会 (CSI)」⁴⁾

セメント企業として国内最大の太平洋セメントは、WBCSD (World Business Council for Sustainable Development、持続可能な発展のための世界経済人会議) および WBCSD の産業部会として 1999 年に発足した CSI (Cement Sustainability Initiative、セメント産業部会) の活動に積極的に参画し、海外セメント企業と協力して社会・環境問題に効果的に対処すべく、セメント産業の「持続可能な発展」に向けた取り組みを進めてきている。

CSIのこれまでの具体的な活動成果として、以下のようなガイドライン（世界中のセメント企業に準拠を勧める基準）をまとめている。

- ①セメント産業向けCO₂・エネルギー算定基準
- ②セメント製造過程における原燃料の利用のための

ガイドライン

- ③セメント産業における安全：測定と報告に関するガイドライン
- ④セメント産業向け安全衛生マネジメントガイドライン
- ⑤セメント産業用大気汚染物質の監視・報告ガイドライン
- ⑥地域社会の影響評価ガイドライン
- ⑦鉱山修復ガイドライン

ここで地球温暖化問題に関連して重要な成果は①の「CO₂・エネルギー算定基準」(Cement CO₂ and Energy Protocol: CO₂ and Energy Accounting and Reporting Standard for the Cement Industry)である。

セメント産業の企業活動によって排出されるCO₂は、焼成工程に限られるものだけではない。鉱山での原料採掘、セメントを工場から需要家まで運ぶ輸送機関から発生するCO₂、使用電力源における発生CO₂、購入原料（例えば鉱滓や石膏）の製造時のCO₂、その輸送時に発生するCO₂、などなど、非常に多岐にわたる。そこで、セメント企業が「自社の企業活動に伴うCO₂排出負荷」を計算する「対象範囲 (boundary)」

や「計算方法」の基準を策定したものが、①の「算定基準」である。これによって、多国籍企業からローカル企業まで、世界中のセメント会社が「同じ基準で容易に」自社関連のCO₂発生量を算出できるようになり、各社公表数字の相互比較が可能になった。政府への排出量報告やCO₂削減目標設定なども、世界のセメント業界が同じ算出方法で行う体制ができたと言える。

なお、CSIには、日本からは太平洋セメントのみの参加であるが、実態的には日本のセメント業界代表の形であり、CSIの協議内容や合意事項はセメント協会を通じて国内各社に共有されている。

参考文献

- 1) 環境省ホームページ，セメント業におけるNO_x排出対策技術・運転管理技術，2015年11月。
http://www.env.go.jp/en/water/wq/ine/pdf/tool/3_guideline-fixed%20sources-jp.pdf
- 2) セメント協会，セメントの常識，2013.
- 3) セメント協会ホームページ，2015年10月.
- 4) 太平洋セメントホームページ，2015年6月.

7 | セメント化学の進歩

セメント業界に限らず、製造業にとっては「良い製品を安く作る」ことが、時代を超えて変わらぬ使命である。本稿「セメント製造技術の系統化調査」でも、第2章から第5章までは、主として「安く作る」ための技術進歩を述べてきた。一方、「良いセメント」を作るには、セメント化学の知識とそれに基づく知恵が重要な役割を果たす。本章では、近代セメントの発明以来今日までの「セメント化学」の発展について述べ、第8章で扱う「セメント品種の多様化」すなわち機能性のあるセメントを開発してきた歴史、そして第9章で扱う「循環型社会構築の基幹産業への進化」につなげることにしたい。機能性のセメントの開発、あるいは、セメント製造工程における廃棄物処理技術は、セメント化学の基礎があって初めて実現が可能になったのである。

セメント化学を学問の分野として見た場合、関わる領域は非常に広い。無機化学であり、合成化学であり、分析化学も大いに関わる。鉱物学や結晶学の対象となる領域も広く、一方でレオロジー（流動学）の分野もある。そのような広大なセメント化学の学問領域の中で、本稿では、「セメントの製造技術に直接応用されているセメント化学」に焦点を絞って記述することにする。

日本人の研究者も、1930年代頃から国際的な学術誌などに論文を提出するようになり、1960年代ころからは、世界をリードするような日本人研究者も次々と登場してきた。

セメント化学には大きく分けて2つの化学反応のカテゴリーがある。「焼成反応」と「水和反応」である。

1) 焼成反応：セメントを「製造する」うえでの重要な研究分野

石灰石と粘土類を粉砕して成分調整した原料を、1400～1500℃で焼成する過程で進行する化学反応である。焼成反応は、部分的に液相を含む固相反応である。この「高温下での固相反応」と、反応の結果得られる「クリンカーに含まれる鉱物類のキャラクターゼーション」（注1参照）が、主たる研究対象となる。

2) 水和反応：セメントを「利用する」うえでの重要な研究分野

クリンカーに3%程度の石膏を加えて粉砕して得られるセメントは、水を加えると硬化する。セメントが

水と反応して硬化する過程を水和反応という。ここでも、「水和反応過程」と「水和物のキャラクターゼーション」がセメント化学の主たる研究対象になる。

本章では、まず「セメント製造技術の系統化」の内容理解に必要な範囲内に絞って、焼成反応、水和反応およびそれらの反応生成物について、基本的な内容を簡単に紹介する。それらの基本的知識を前提に、近代セメント発明以来今日までのセメント化学の進歩について述べることにする。

7.1 焼成反応とクリンカー鉱物

7.1.1 焼成反応過程での化学変化^{1) 2)}

普通ポルトランドセメント1トンを作るのに必要な原料の量（原料原単位）の業界平均値（2011年度）を表7.1に示す。

表 7.1 原料原単位¹⁾

	単位:kg
石灰石類	1,191
粘土類	223
けい石類	75
鉄原料他	27
せっこう	39
計	1,555

これらの原料を所定の比率に応じて調合・乾燥・粉砕して得た原料粉末を、予熱装置（SP・NSP）を通して回転窯で焼成する。焼成されたクリンカーは冷却機（クリンカークーラー）で急冷される（第5章参照）。

予熱装置から回転窯そして冷却機に至る連続した流れの中で、原料に含まれる各成分は、温度の上昇に伴って徐々に化学変化を起こし、やがて最終的に所要の化合物になっていく。その変化の過程を図7.1に示す。

日産3千～1万トンに及ぶ大量の原料の高温焼成を行い、でき上がった「クリンカー」から所要の品質のセメントを得るためには、精度の高い原料調合技術と温度制御技術が要求され、安定した品質を確保するために、昼夜を問わない生産管理体制がとられている。

7.1.2 クリンカー鉱物^{1) 2)}

焼成・冷却されたクリンカーを光学顕微鏡で観察すると、粒径が10～60μm程度の数種の鉱物の集合体であることがわかる（図7.2）。これらクリンカーを構

加熱温度(℃)	〔主要な化学変化〕
100~ 110	各原料の付着水の蒸発
110~ 700	粘土類の結晶水の脱水蒸発
700~ 750	MgCO ₃ の分解(MgO+CO ₂)
750~ 900	CaCO ₃ の分解(CaO+CO ₂) 2CaO・SiO ₂ の生成開始
950~1200	β・2CaO・SiO ₂ への転移
1200~1300	3CaO・Al ₂ O ₃ の生成、4CaO・Al ₂ O ₃ ・Fe ₂ O ₃ の生成
1350~1450	3CaO・SiO ₂ の生成(Al ₂ O ₃ 、Fe ₂ O ₃ 、Na ₂ O、K ₂ Oなどは溶けた状態になる。)
冷却	冷却する過程で、1200℃付近になると一度溶けたAl ₂ O ₃ やFe ₂ O ₃ がふたたび3CaO・Al ₂ O ₃ や4CaO・Al ₂ O ₃ ・Fe ₂ O ₃ などを生成する。最終的に生成するのは次の4化合物で、これらが混ざり合って黒い粒となる。この黒い粒を「クリンカー」という。 〔最終生成物(クリンカーの中の構成化合物)〕 3CaO・SiO ₂ (エーライトC ₃ S) 2CaO・SiO ₂ (ビーライトC ₂ S) 3CaO・Al ₂ O ₃ (アルミネート相C ₃ A) 4CaO・Al ₂ O ₃ ・Fe ₂ O ₃ (フェライト相C ₄ AF)

図 7.1 焼成工程での化学変化¹⁾

成している主な鉱物（化合物）は4種類で、「エーライト (Alite)」（図7.2のA）、「ビーライト (Belite)」（図のB）、「アルミネート (Aluminate) 相」、「フェライト (Ferrite) 相」と名付けられ、まとめて「クリンカー鉱物」と総称される。

このうち、「エーライト」と「ビーライト」は、いずれも化学成分は「けい酸カルシウム」であり、全体の70~80%を占める。また、「アルミネート相」および「フェライト相」は、これら2種類のけい酸カルシウムの間隙を埋めるように存在することから、まとめて「間隙質」（図のI）とも呼ばれ、全体の15~18%を占めている。

これらの化合物の化学組成を化学式で表すと表7.2のようになる。表中（ ）に示す記号は、セメント化学の分野で使う独特の略記号である（注2参照）。

表 7.2 クリンカーを構成している化合物¹⁾

クリンカーの構成化合物	化学組成	備考*
けい酸カルシウム	エーライト 3CaO・SiO ₂ (C ₃ S)	微量のアルミニウム、鉄、マグネシウム、ナトリウム、カリウム、チタン、マンガンなどを含んでいる。
	ビーライト 2CaO・SiO ₂ (C ₂ S)	
間隙相	アルミネート相 3CaO・Al ₂ O ₃ (C ₃ A)	少量のけい素、マグネシウム、ナトリウム、カリウムなどを含んでいる。
	フェライト相 4CaO・Al ₂ O ₃ ・Fe ₂ O ₃ (C ₄ AF)	

*各化合物は、通常備考欄に示したような成分を含んでいる。

これら4種類の化合物は、それぞれに下記のような特性を有しており、クリンカー中の構成比率を変えることにより、さまざまな用途に応じたセメントが開発されている。この点については第8章で述べる。以下に各クリンカー構成鉱物の特性について簡単に述べる。

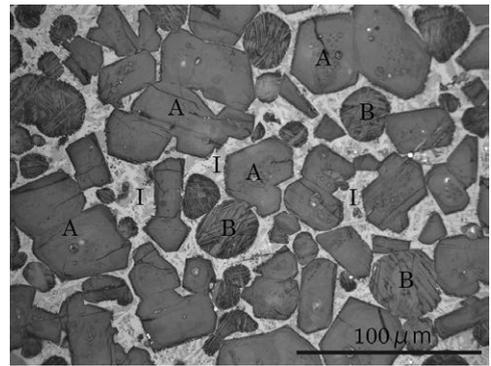


図 7.2 クリンカーの顕微鏡写真³⁾
(A: エーライト、B: ビーライト、I: 間隙質)

(1) エーライト

C₃S（けい酸3石灰）に、微量成分としてMg、Na、K、Feなどが固溶（注3参照）した結晶であり、ポルトランドセメントを構成する最も重要な化合物である。普通ポルトランドセメント中には約50%のエーライトが含まれており、水和速度が速く、材齢1~28日の強度発現を支配する（材齢→注4参照）。一方で、水和熱の放出も多い。

顕微鏡下では、10~60 μmの柱状ないし六角板状の無色結晶として観察される（図7.2 A）。

(2) ビーライト

C₂S（けい酸2石灰）に、微量成分としてMg、Na、K、Feなどが固溶している結晶であり、普通ポルトランドセメント中には約30%のビーライトが含まれている。エーライトに比べて水和速度が遅く、強さの発現までの時間が長い、水和熱の放出も少ない。

顕微鏡下では、20~60 μmの塊状をなし、淡黄色ないし淡褐色を呈する（図7.2 B）。

エーライト、ビーライトとも、高温変態（注5参照）のほうが低温変態より活性で、水和性・強度発現性ともに良好であることから、高温でできるだけ長く焼成して高温変態の結晶を増大させ、かつクリンカーを高温から急冷して低温変態への転移（注5参照）を阻止するのが、製造技術上の一つの重要なポイントであり、クリンカークーラーの重要な役割である。

(3) アルミネート相

クリンカーの間隙質を構成する鉱物のひとつで、C₃A（アルミン酸3石灰）に近い化学組成をもち、Na、K、Mgなどが固溶する。水との反応が急激で、瞬時に多量の熱（水和熱）を放出し瞬結してしまう。この瞬結反応を抑えるために、凝結調節材として石膏が加えられている（7.5.1参照）。アルミネート相は、

凝結と材齢1日強度の発現、そして水和熱に影響する。

普通ポルトランドセメント中のアルミネート相は10%前後であるが、アルミネート相を少なくして水和熱を抑制した「中庸熱ポルトランドセメント」などが、ダムなどのマスコンクリート向けに作られている(8.3.1参照)。

また、アルミネート相は、硫酸塩と反応して膨張性のあるエトリンガイトを生成し(7.5.1(2)項、図7.4参照)、コンクリートやモルタルの組織を破壊して構造物の劣化を進行させる。このため、アルミネート相を少なくして耐硫酸塩性(化学的抵抗性)を高めた「耐硫酸塩セメント」も製造されている(8.3.1参照)。

(4) フェライト相

クリンカーの間隙質を構成する鉱物のひとつで、 C_4AF (鉄アルミン酸4石灰)に近い組成をもち、Mg、K、Naなどが固溶している。普通ポルトランドセメント中には約10%のフェライト相が含まれている。セメントの水和反応(凝結・強度発現)への影響は小さいが、焼成反応では液相を構成して、化学反応の促進媒体として重要な役割を果たしている。つまり、フェライト相はセメントの「品質」よりも「製造時の省エネルギー」に寄与の大きい鉱物相だともいえる。また、セメント粉末の薄灰色は主としてセメント中の鉄分に由来するものである。「白色セメント」は、鉄分がほとんどない、すなわちフェライト相がほとんどないセメントである。

(5) クリンカー中のその他の鉱物相

クリンカーを顕微鏡観察すると、原料や焼成条件によっては、①遊離石灰(free lime, f-CaO)、②硫酸アルカリ($(Na, K)_2SO_4$)、などが観察されることがある。

f-CaOは、未反応の石灰分であり、正常に焼成されたクリンカーでは1%以下である。f-CaOは、化学分析でも機器分析でも容易に定量分析ができるので、現場でのクリンカー焼成度の迅速判定方法として利用されてきている。

7.1.3 セメント成分の調合管理のための諸率・諸係数(モジュラス)^{4) 5)}

すでに述べてきたように、セメント(クリンカー)を構成する化学成分は、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、CaOで代表され、この4成分の配合割合の違いによって、クリンカー焼成の条件設定や、製品としてのセメントの強度発現性、水和熱、化学的抵抗性、乾燥収縮性状

などの諸特性の大概が方向づけられる。したがって、セメント製造工場では主にこの4成分についてセメント原料の成分調合管理を行っている。

この場合、個々の化学成分量を個別に設定・管理するより、4成分間の量的比率で管理するほうが効率的かつ効果的である。そのため、原料の化学成分の管理には、「モジュラス(modulus)」と呼ばれる3種の指標を一組にして使用する。製造しようとするセメントの品種と生産性(易焼成性、被粉碎性など)を考慮して目標モジュラスを設定し、これを維持するように原料調合を管理する。モジュラスは「諸率」「諸係数」などともいわれる。モジュラスが3つ1組で運用されるのは、主要成分が4つだからである。モジュラスの3つの数値と「焼成後の質量が合計で1トンとなる」ことを条件とすれば、4元連立方程式の解として原料原単位を決定できる。

現在、セメント工場でポルトランドセメントの成分管理に用いられている諸率・諸係数を表7.3に示し、以下に説明する。

表7.3 セメント成分調合のための諸率・諸係数⁴⁾

	名 称	化 学 式
水 硬 率	H. M. =Hydraulic Modulus	$\frac{CaO-0.7 \times SO_3}{SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3}$
けい 酸 率	S. M. =Silica Modulus	$\frac{SiO_2}{Al_2O_3+Fe_2O_3}$
鉄 率	I. M. =Iron Modulus	$\frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}$
活 動 係 数	A. I. =Activity Index	$\frac{SiO_2}{Al_2O_3}$
石灰飽和度	L. S. D. =Lime Saturation Degree	$\frac{CaO-0.7 \times SO_3}{2.8 \times SiO_2+1.2 \times Al_2O_3+0.65 \times Fe_2O_3}$

(1) 水硬率 (Hydraulic Modulus, HM)

ポルトランドセメントクリンカー中の主要4成分のうち、CaOは塩基性成分、他の3成分(SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3)は酸性成分である。つまり、クリンカー焼成反応は、高温下における酸と塩基の塩形成反応であり、水硬率はこの酸と塩基の量の比率を表すもので、セメントの諸率・諸係数の中でも最も重要なものである。

高HMの原料は、一般的には、焼成に高い温度と十分な時間が必要になって燃料原単位が増大するし、もし焼成が不十分であれば未反応の遊離石灰が残存しやすくなる。高HMのセメントは C_3S が多いため、早期強度が高く水和熱も大きくなる傾向がある。

現在の日本国内の普通セメントのクリンカーのHMは2.0~2.2である。

(2) 珪酸率 (Silica Modulus, SM)

酸性成分間の量的関係を表す比率の一つである。珪酸率が高いと、焼成反応を助ける液相の量が少なくな

り、焼成温度を高くする必要がある。その結果、内張り煉瓦等を損傷しやすくなる。一方で、高SMのクリンカーは、間隙質相が少なくピーライトに富むクリンカーとなるので、低発熱性で長期材齢の強さに優れたセメントが製造できる。逆に、SMが低すぎると液相量が多くなるので、キルン内壁のコーティング量の増加による原料流れの障害（コーティングトラブル）の懸念がある。

現在の国内の普通セメントクリンカーのSMは2.4～2.8である。

(3) 鉄率 (Iron Modulus, IM)

Al_2O_3 と Fe_2O_3 の量的関係を表す比率である。鉄率が低い原料混合物は、低い焼成温度でのクリンカー鉱物生成が容易になる。また、セメント中には C_3A が少なく C_4AF が多くなるため、初期強度は低いが水和熱が小さく、硫酸塩抵抗性が大きくなる。一方、鉄率が高い場合は、セメントには C_3A が多くなり速硬性を持つため、初期強度は高いが水和熱は大きく、硫酸塩抵抗性は小さくなる。

現在の国内の普通セメントクリンカーのIMは1.9～2.1である。

(4) 活動係数 (Activity Index, AI)

我が国のほとんどのセメント工場では、水硬率・珪酸率・鉄率を管理目標に定めて製造を行っている。しかし、一部には珪酸率の代わりに「活動係数」を用い、鉄率の代わりに Fe_2O_3 量を用いて管理している工場もある。

現在の日本国内の普通セメントクリンカーでの標準的なAI値は3.8～4.2である。

(5) 石灰飽和度 (Lime Saturation Degree, L.S.D)

上記(1)から(4)までの諸率・係数の化学成分値は、クリンカー中の化学成分の重量%の数字そのままであり、酸・塩基成分の化学当量はまったく考慮されていない。その意味では、簡易簡便に工程管理をするための実用的な比率・指標であって、化学的な意味は小さい。

これに対して、石灰飽和度は、各クリンカー鉱物相に含まれるそれぞれの化学成分の化学当量を踏まえて導かれた比率である。

酸性成分と結合し得る最大のCaO量（飽和CaO量）を表すこの計算式の、分母の各成分の係数は、キュール (Hans Kuhl, 独) が最初に提唱し、その後多くの研究者によって検討がなされてきた。現在の係

数は、リーとパーカー (F.M. Lea & T.W. Parker・英) の研究を基礎に決められている。

$$CaO_{max} = 2.8SiO_2 + 1.2Al_2O_3 + 0.65Fe_2O_3$$

石灰飽和度が1.0に近い原料混合物を完全に反応させると、 SiO_2 はすべて C_3S になるため、早強クリンカーが得られる。一方、石灰飽和度の低い調合原料を焼成した場合は、 C_3S が少なく C_2S の多い遅硬型のクリンカーになる。

石灰飽和度は、新種セメントの開発などの場合の成分値設計に利用される。またHMの代わりに石灰飽和度を利用している工場もあるとされる。

日本国内の普通セメントクリンカーの石灰飽和度の標準的な値は0.92～0.96である。

7.2 水和反応と水和物^{1) 2)}

セメントに水を加えてよく練り混ぜた状態を「セメントペースト」という (図1.1参照)。この状態で放置すると、初めは粘土のように変形することができるが、時間が経過するにしたがって徐々に硬くなって変形は困難になり、さらに時間が経過すると強固な固まりになる。これはセメントを構成する化合物が水と反応して新しい化合物「水和物」になるからである。このセメントと水との化学反応は「水和反応」と呼ばれる。セメントペーストが徐々に硬くなって変形できなくなる過程を「凝結」といい、凝結した固まりがさらに強固なものになる過程を「硬化」という。

図7.3は、水がセメントと反応して「水和物」を生成する過程の概念を示したものである。水和反応は水と直接接するセメント粒子の表面から始まり、反応が進行するに従い未反応の部分が小さくなり、セメント粒子が生成した水和物で覆われ、水和物が互いに結びついて硬化していく様子が描かれている。

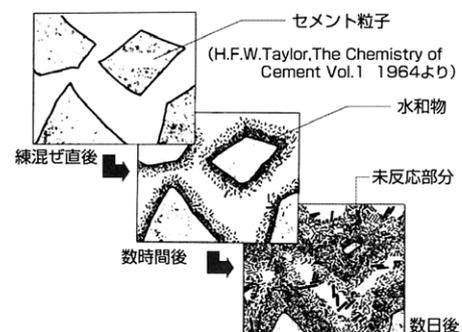


図7.3 ポルトランドセメントの水和過程¹⁾

水和反応と水和物についての理解は、セメントを「利用」する上で非常に重要である。生コン工場でセ

メント・砂利・砂・水などを計量・混合し、ミキサー車で工事現場に運び、現場で型枠の中に打設する。この「コンクリートの運搬・作業時間」を確保するのが「セメントの凝結時間」であり、「初期の水和反応」である。

打設されたコンクリートは時間とともに硬化していく。あるところまで固まってきたら、次の段取りの工事にかかる。例えば、基礎コンクリート工事であれば、上物を載せる、機械を据付けるなどの作業にかかる。この「コンクリートの供用開始時間」を決めるのがセメントの強度の発現、「セメント硬化時間」である。

このように、セメントを使う立場からすると、セメントの品質は、

- ①凝結時間を使いやすい範囲内で安定しており、
- ②強度発現の速度と到達強度が十分でかつ安定している、

ことが非常に重要である。セメント製造者にとっても、セメントの使用者にとっても、水和反応と水和物の知識が非常に重要であることが容易に理解されよう。

水和反応は発熱反応であり、この反応熱を「水和熱」と呼ぶ。水和熱については7.3で述べる。

図7.4にセメントの水和反応の基本的な反応式を示す。セメントの水和反応は、クリンカー鉱物という多成分系の固体が、いったん液相（水）に溶けて互いに反応し、新たな多成分系の微細な水和物（0.1 μ m以下）として析出する、という極めて複雑な化学反応であり、その全貌には膨大な記述が必要となる。本稿では「セメント産業技術系統化」の記述内容を理解するために必要な範囲・内容に絞って、水和反応・水和物について以下に述べる。

なお、図7.4で、エーライト・ビーライトの水和生成物の一つとしてCa(OH)₂が生成しているが、セメント水和物、そしてセメントの硬化体であるコンクリートは、このCa(OH)₂の存在で内部はアルカリ性

になっていることを記しておきたい。

7.2.1 水和初期、「凝結」段階

7.1.2項で述べた4種類のクリンカー鉱物（化合物）は、水と接触するとただちに化学反応を始める。なかでも「エーライトC₃S」と「アルミネート相C₃A」は反応が速い。特にアルミネート相は反応が急速で、わずか数分で固まってしまう性質（瞬結性）をもっており、そのままではモルタルやコンクリートが作業中に固まってしまうことになる。

この瞬結性を抑制・制御するために、クリンカーを粉砕してセメントにする時に3%程度の「石膏」を加える。石膏は水に溶解するとまずアルミネート相と反応して「エトリンガイト」（図7.4参照）と呼ばれる化合物を生成する。生成したエトリンガイトはアルミネート相を覆い、アルミネート相が引き続き水と接触するのを抑制して水和反応の速度を適度に遅らせる役割をする。石膏無添加だと「数分」で固まりはじめるのが、「数時間」にまで遅れることとなる。

一方、エーライト相は、アルミネート相と同様に初期水和反応が速いが、その後の水和反応を一時的に遅らせる性質がある。その遅延機構が何に起因するのかについては諸説あり、まだ完全には解明されていないようである。

凝結の試験方法はJIS R 5201「セメントの物理試験方法」で規定されており、その試験方法で、「こわばり」が始まる「始発」は「60分以上」、変形できない固さになる「終結」は「10時間以内」、とJIS R 5210「ポルトランドセメント」で定められている。現在実際に市販されている「普通ポルトランドセメント」の場合、始発が2時間半前後、終結はその1時間後位になるよう品質設計されているようである。

7.2.2 強度の発現、「硬化」段階

セメントの凝結から硬化への過程は、水和反応によって生成した水和物が3次元的に結合し合い、水や

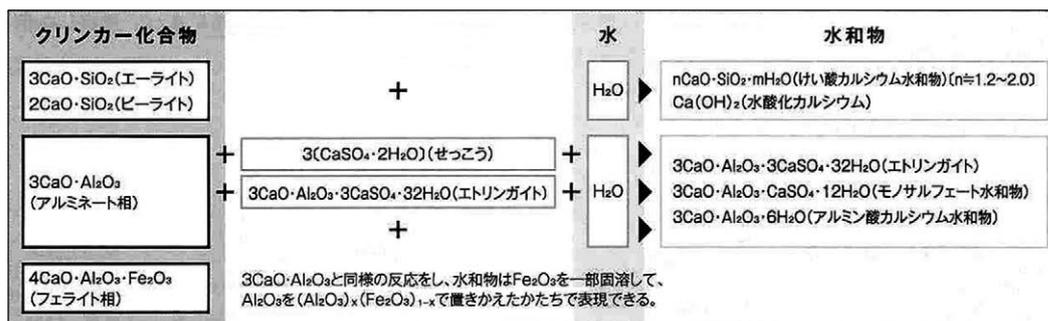


図7.4 セメントの水和反応¹⁾

空気の存在する部分を埋めながら緻密になっていく状態といえる。緻密になるに従って一層強固になり、その程度は反応する時間とともに増大していき、セメント・コンクリートの「強度」が発現される。

「硬化」は、クリンカーを構成するそれぞれの化合物が、最終的にすべて水和物となって完了する。しかし、一般にセメントの各粒子は表層から水和反応を開始し、完全に水和するには長い年月を必要とする。一方、セメント水和物の硬化体が所要の強さを発現するには、全粒子が完全に水和する必要はない。セメント粒子の表層の水和物が、互いに隣接する水和物と物理的・3次元的に強固に結合した構造になればよいのである。したがって、水和反応の面からみる限り、セメント粒子表層からある程度の厚みの水和物をつくることのできる水があれば十分といえる。一方で、コンクリート施工現場でセメントに加える水の量は、セメントの水和に必要な水量として決められるのではなく、コンクリート打設作業に適切な軟らかさ（軟度）を出す水量として決定されるのが一般的であり、結果的にコンクリートの使用水量は、セメントの水和に必要な量よりも多くなっているのが普通である。

7.3 水和熱¹⁾

セメントが水と反応して水和物をつくる化学反応は「発熱反応」である。セメントに水を混ぜてから、ある材齢までに発生した総発熱量を「その材齢の水和熱」といっている。

水和熱の大きさは、①セメントの鉱物組成（化学組成）、②セメント粒子の細かさ、③練り混ぜる水の量、などによって異なるが、①の各クリンカー鉱物の含有量が最も重要な要素である。

水和熱は、コンクリートに対してプラス・マイナス両方の影響がある。例えば、寒冷地での保温養生の一つとして、コンクリートを打設する時にコンクリートを断熱材で覆い、セメントの水和による発熱を利用する方法がある。その一方で、ダムや巨大橋脚など大容積のコンクリート（マスコンクリート）では、水和熱によってコンクリート内部の温度が上昇し、内部と表面との間に温度差が生じて、ひび割れ（温度ひび割れ）の原因となることがある。このため、マスコンクリート用の低発熱のセメントが開発されている（第8章参照）。

ポルトランドセメントの水和熱の測定方法はJIS R 5203「セメントの水和熱測定方法」に規定されており、その方法で測定した普通ポルトランドセメントの水和

熱は、材齢7日で318～336 J/g、28日で370～396 J/gである。

7.4 焼成反応とクリンカー鉱物化学の進歩

新石器時代から使われていた痕跡のある「古代セメント」は、古代エジプト、ギリシャ、ローマ、あるいは中国文明を通じて、産業革命まで数千年間使われ続けてきたが、職人による経験の伝承の範囲を出ず、地元で入手可能な材料の混合物であって、材料としての発展はほとんど見られなかった（2.1参照）。

18世紀中葉、スミートン（John Smeaton・英）が「水硬性石灰」を発明した（2.2参照）のが端緒となって、科学的手法に基づくセメント化学の研究も始まった。この時代、研究に使える手段は湿式化学分析や光学顕微鏡程度に限られていた。しかし、先達研究者たちは、焼成反応やクリンカー鉱物について、緻密な観察から大胆な仮説を立て、その実験的な証明に努力を傾注してきた。

20世紀に入ると、X線回折装置、電子顕微鏡をはじめ、各種の機器分析装置が開発され、クリンカー鉱物の結晶構造や水和物の微細構造などが精密に観察・測定・解析されるようになり、セメント化学の研究は、飛躍的に拡大・深化することになった。

7.4.1 焼成反応とクリンカー鉱物化学：19世紀末までの進歩^{5) 6) 7) 8)}

本節では、18世紀中葉の近代セメントの発明から19世紀末までの約150年間において、セメント化学に大きな貢献をした化学者たちを主体にして、「セメント産業技術としてのセメント化学」発展の歴史を述べる。

- (1) スミートン（Smeaton・英）が1756年に「水硬性石灰」を発明したことは、第2章で紹介した。当時の焼成技術では高温を得ることが困難であったため、焼成温度は1000℃程度と低かったものと推定され、したがって、今日のセメント化学の知識で見ると、いわゆるセメント（クリンカー）鉱物は生成していなかったと想定される。しかし、仮焼の効果により粘土分中のSiO₂、Al₂O₃が活性化され、CaOとの反応性を向上させていた、と考えられる。
- (2) スミートンから40年後の1796年にパーカー（J. Parker・英）が「ローマンセメント」を発明したことも、第2章で紹介した。このローマンセメントは、粘土を含んだ石灰石を、石灰窯で推定

1100℃前後で焼いて粉碎したもので、古代から使われてきていたセメント（消石灰と火山灰との混合物）に比べ、硬化が早く、耐水性に優れ、19世紀前半までテムズ川底のトンネル工事などイギリスにおいて広く使用された。

- (3) スミートンやパーカーらによるこれら「水硬性材料」の発明に触発されて、18世紀後半以降、大学教授や専門化学者などが「何故に粘土を含む石灰石から水硬性セメントができるのか」について研究を始めた。
- (4) 1810年、オランダ科学院は、「粘土分を含む石灰石から得られる生石灰を使ったモルタルは、貝殻から得られる純度の高い生石灰を使ったモルタルよりも、硬くかつ耐久性がある。これはいかなる化学的理由によるのか」という課題で懸賞論文を募集した。

1815年、ドイツのジョン（Johann Friedrich John, 1782-1847）が賞金を獲得し、その論文の中でジョンは以下の報告をした：

- ①粘土分を含む石灰石を焼成して得た石灰を、水に浸して全部の遊離石灰を溶解させ、残渣を硝酸で処理したところ、「焼成中に石灰の一部が、その中に混在するケイ酸、アルミナ、酸化鉄と結合している」ことを発見した。
 - ②貝殻石灰原料に適量の粘土を加えて焼けば、石灰石と同じ結果が得られる。
- (5) 1818年、ビカー（Lois Joseph Vicat, 1786-1861・仏）は、「水硬性石灰の人工製造法」を発明したと発表した。その当時までの水硬性モルタルの製造法は、①生石灰に煉瓦粉末またはポズランを混ぜて作る古代ローマ時代からの方法、②粘土混じりの石灰石を焼く（スミートンの発明）、のいずれかであった。ビカーは第3の方法、すなわち「生石灰または石灰石に粘土を加えて焼成してつくる」方法を発明したのである。ビカーの論文の公表は前記（4）のジョンより遅れたが、印刷に出した時期から、ジョンとは独立に発明した、と認められている。

「水硬性」（仏 hydraulique、英 hydraulic）の用語もビカーが使い始めた用語であり、また現在 JIS 規格の凝結試験に使われる「ビカー凝結測定装置」や硫酸マグネシウム溶液によるセメント浸食試験法は、いずれも彼の発明である。

- (6) 1824年、アスプジン（J. Aspdin・英）が「ポルトランドセメント」を発明し、特許を得た。
パーカーの「ローマンセメント」発明から 30

年後である。

ここで注意すべきは、アスプジンの特許には、以下の二つの理由から、彼を「ポルトランドセメントの発明者」とすることに疑問が提出される余地を残したことである。

- ①アスプジンに先立って、スミートンが水硬性石灰を焼成し、ビカーやジョンが、「水硬性石灰は石灰に粘土を加えて焼成することでも製造できる」ことを、既に証明していた。
 - ②アスプジンの特許は、今日のポルトランドセメントの定義からすると重要な二つのポイントが欠けている。すなわち「①石灰分と粘土分の比率の範囲」、「②調合原料を半溶融するまで焼成すること」が書かれていない。
- アスプジン発明当初のポルトランドセメントの焼成温度は 1200℃程度と推定され、生石灰と粘土分が反応して少量のビーライトや間隙質物質などのセメント鉱物が生成していたであろうが、他に多量の生石灰が共存したと推定され、その品質はローマンセメントと大差はなかったようである。
- (7) 1830年、オランダ科学院は再び次の懸賞論文を募集した。テーマは「水中で硬化するセメントの具有すべき特性は何か、また硬化を起こす化学的結合成分は何か」であった。

ドイツのフックス（Johann Nepomuk Fuchs, 1774-1856）は、懸賞発表からわずか2か月後に論文を提出、金賞を獲得した。この論文の中でフックスは、「水硬性モルタルの水硬性は主としてケイ酸と石灰との化学的結合によるものである」と結論づけた。

- (8) ローマンセメント業者の英国・ホワイト商会の技術者であったジョンソン（Isaac Charles Jonson, 1811-1912）は、アスプジンが開発した新セメントを自社でも製造したいとの同商会の意を受けて、1844年、独自の実験と研究から、①石灰と粘土の間には良い品質のセメントを得る比率が存在すること、②原料が半溶融するまで焼成すること、③原料の十分な混和による均斉性が均質な製品を得る基本条件であること、を明らかにし、今日のポルトランドセメント製造の基本原則を打ち立てた。

ジョンソンによるこのポルトランドセメントの製造条件「石灰石と粘土の混合物を 1250℃以上の高温で半溶融するまで焼成する」によって、セメント鉱物にはアスプジン時代の「ビーライト+

間隙質」に、新たに「エーライト」が加わり、大幅な品質改良が達成された⁸⁾。

アスプジンの特許からジョンソンの「新セメント」までの20年間、アスプジンの製品はなかなか品質が一定しなかったようであり、ジョンソンは後年になって自分を「ポルトランドセメントの真の発明者」と認めるよう英国ポルトランドセメント協会に求めたが却下され、代わりに協会は「ポルトランドセメントの改良者」との確認を与えたとのことである。

1924年、英国と米国のセメント協会が合同で、アスプジンの生れ故郷・リーズ市に「ポルトランドセメント発明100年」の記念碑を建て、その銘に「アスプジンが発明した」と刻んで一応の決着をつけた。

- (9) 19世紀後半になると、いろいろな研究者たちによって、クリンカーが「ケイ酸カルシウム」「アルミン酸カルシウム」などから成り立っているとの「仮説」がなされるようになってきた。これらの仮説に対して、実験に基づいて科学的(化学的)な実証を試みた先駆者が、化学平衡に関する「ルシャトリエの法則」で有名なルシャトリエ(仏、Henry Le Chatelier, 1850-1936)である。ルシャトリエは、セメント化学のみならず、セメント工業全般にわたる諸問題について、理論付けに注力し大きな功績を残した。

ルシャトリエのセメント化学に対する重要な貢献の一つが、「クリンカー鉱物研究への鉱物学的手法の導入」、すなわち偏光顕微鏡の利用である。1882(明治15)年の「セメントの顕微鏡的組成と凝結」の論文で、彼は、偏光顕微鏡によるクリンカー薄片の検鏡から、クリンカー中には4種の合成鉱物相(4種の結晶と1種のガラス相)が存在することを確認し、その中で最も多い相は $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (C_3S)であると同定した。同定には、純薬で合成した C_3S などを参照したようである。

- (10) テルネボーム(Alfred Elis Törnebohm, スウェーデン)は、1897年に発表した論文でセメント化学に以下の二つの新たな貢献を行った。

①顕微鏡下で観察されるクリンカー鉱物に名前を付した。

②これら鉱物を重液分離で個別に取り出した。

彼は顕微鏡下で「4種の結晶と1つの等方性の相(多分ガラス)」を認め、それらに、量の多い順に、Alit(英: Alite、アリット/エーライト)、Belit, Celit, Felitと名付けた。A、B、Cの語

尾に“-lit”、ギリシャ語の“lithos”(石)を付けた命名法であった。これらの鉱物名は今日も使われている。

テルネボームは、10年前に発表されたルシャトリエの論文の存在を知らなかった。その後、彼は自分が命名した鉱物が、ルシャトリエの論文記載のどの鉱物相に当たるかを明らかにした。顕微鏡下で観察されるクリンカー鉱物相について、両者の観察は一致していたが、それぞれの鉱物相の化学組成については異なる見方をしていた。いずれの意見も、今日の視点からは正しいとはいえないものの、解析手段が極めて限られていた当時としてはやむを得ないことであった。

- (11) ミハエリス(Wilhelm Michaelis, 1840-1911・独)は、ルシャトリエと同時代人であり、やはりセメント化学の進歩に大きな貢献をした。工業大学で化学を専攻し、鉱物の研究所やセメント工場の化学技師としての職歴の後、1872年、同志と建築材料試験を目的とする「化学工業試験所」を設立、1877年その所長となった。ミハエリスのセメント製造技術への貢献は、①セメント製造に関わる「水硬率」の提案、②クリンカーへの石膏添加による凝結調節作用の発見、③セメントの水硬性に関する理論、④セメント品質試験・規格に関する様々な提案、など多岐にわたる。

ミハエリスが1885年に発表した「水硬率(HM)」はその後、彼の後任の化学工業試験所所長・キュール(Hans Kuhl, 1879-1969・独)が1913年に提案した「珪酸率(SM)」「鉄率(IM)」と組み合わせられて、セメント原料調合の基本指標として、今日に至るまで広く活用されてきている(7.1.3参照)。

「石膏添加による凝結調節作用」の発明が画期的であることは、3.4で触れたが、7.5.1でさらに詳しく説明を加えた。また④のセメント品質試験・規格に関する貢献については8.2.1で述べる。

7.4.2 焼成反応とクリンカー鉱物化学：20世紀初頭以降の進歩

20世紀に入ると、X線回折装置や電子顕微鏡等各種の機器分析装置が開発されて、クリンカー鉱物の化学成分や結晶構造などが精密に観察・測定・解析されるようになり、焼成反応とクリンカー鉱物の研究は、20世紀末までにはほぼ完成の域に達したといえる。

(1) 製造現場での簡便迅速な「焼成度判定」法：遊離石灰の定量⁷⁾と容重測定

回転窯による焼成が発明されて、今日では一つのキルンから毎日数千トンのクリンカーが焼き出されてくる。しかし、その日製造されたセメントの品質規格試験の結果ができるまでには、少なくとも3日から1週間を要する。品質試験結果が出てからでは、現場の対応が手遅れになる可能性が大いにある。そこで、キルン・クーラーから出てきたクリンカーの「焼成度」を現場で迅速に判定する方法が求められ、①遊離石灰の定量、②容重測定、が考案され、いずれも生産現場の作業員レベルで対応できる測定操作として、今日まで使われ続けてきている。

クリンカー中の遊離石灰の定性分析は、1909（明治42）年、ホワイト（A.H. White・米）によって提案された。フェノールとニトロベンゼンの溶液（浸液）にクリンカー粉末を落して顕微鏡観察する方法であった。

これがきっかけで、定量分析の方法がいろいろ研究され、1915年、エムリー（W. Emley・米）が「グリセリン・アルコール溶液で遊離石灰を抽出し、酢酸アンモニウムで定量する」方法を提案した。1930（昭和5）年、この方法にラーチとボーグ（W. Lerch & R.H. Bogue・米）が改良を加えて、セメント製造現場で広く使われる焼成度迅速判定手段として広まっていった。わが国のセメント協会標準試験方法（JCAS/I-01「遊離酸化カルシウムの定量方法」）にも採用されている。なお、JCASでは、グリセリン・アルコール法とエチレングリコール法の2方法を規定している。

一方、「容重」測定は、クリンカークーラーから出てきたクリンカーを篩にかけて粗粒（例えば篩目10mm以上）と細粒（例えば篩目5mm以下）を除去し、中粒部分を一定容量の容器に詰めてその重さを測る、という方法である。測定が単純かつ容易であって、しかもクリンカーの焼け具合を「容重値」として数字的に把握・記録できるので、工場現場では広く使われている。かなり古い時期から利用されている方法と思われるが、いつ始まったかは不明である。

遊離石灰も容重も、近年は自動測定装置が開発されており、「現場で焼成度を迅速に判定する」指標として、今日においても重要な役割を果たしている。

化学技術者（Chemist）レベルによる焼成度判定方法として、1960年代に小野吉雄博士が提案した「光学顕微鏡によるクリンカー焼成度判定法」は、「小野メソッド（Ono's Method）」と名付けられて世界各国

で利用されるようになった。小野メソッドについては(6)項で述べる。

(2) クリンカー鉱物の相平衡図の作成⁷⁾

米国の地球物理学研究所（The Geophysical Laboratory of the Carnegie Institution of Washington）は、1906～1915、多数の科学者の参加を得て、石灰・アルミナ・シリカ系鉱物について、単一酸化物・2成分系・3成分系までの相平衡を研究、相平衡図（phase diagram）を次々と発表した。その中で、ポルトランドセメントクリンカー成分の90%までを占めるCaO-SiO₂-Al₂O₃成分系の相平衡図（図7.5）は、1915年、同研究所のランキンとライト（G. A. Rankin and F.E. Wright）によって発表された。

以降、クリンカー鉱物に関連する相平衡図は、Fe₂O₃を含む系、さらにはMgO, Na₂O, K₂Oなどの微量成分を含む系まで、多くの研究者によって発表されてきている。それらの相平衡図は参考文献(9)にほぼ完全に収録されている。

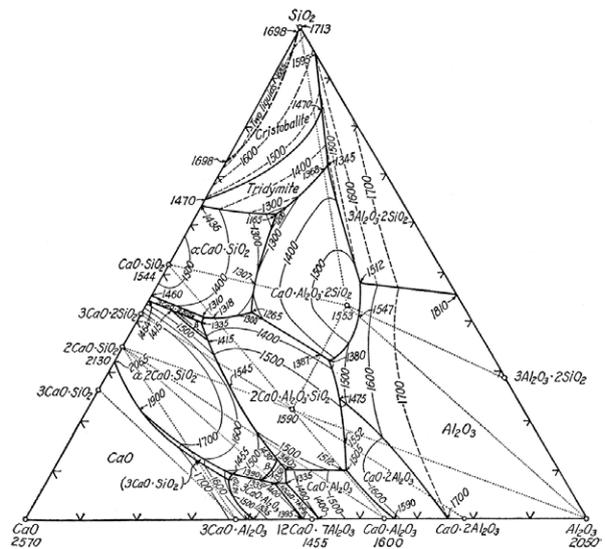


図 7.5 CaO-SiO₂-Al₂O₃ 3成分系の相平衡図⁷⁾

(3) X線回折のクリンカー鉱物研究への応用¹⁰⁾

1895（明治28）年、レントゲン（Wilhelm Conrad Röntgen・独）によって発見されたX線について、1912年にラウエ（Max von Laue・独）がX線回折現象を見出し、続く1913年にはブラッグ父子（Henry & Lawrence Bragg・英）が、X線回折による結晶構造解析に理論的な基礎を与えた。

粉末法X線回折は、デバイとシェラー（Peter Debye・蘭 & Paul Scherrer・スウェーデン）が1916～17年に、そしてハル（A.W. Hull・米）が1917年に、それぞれ独立に見出した。この方法が物質の同定・定

性・定量に有効なことは当時から予想されたが、実際に分析が行われたのは1930年代以降のことであった。1938年、ハナワルトとリンとフレヴェル(J.D. Hanawalt, H.W. Rinn & L.K. Frevel・米)は、X線回折による定性・同定用の回折データ整理法を提案した。これが「ASTMカード」へとつながり、粉末X線回折が強力かつ普遍的な解析手段になっていった。

このようなX線回折に関する技術進歩の流れの中で、1926(昭和1)年、ハンセンとボーグ(W.C. Hansen & R.H. Bogue・米)は、X線回折をクリンカー鉱物の同定に応用した論文を発表した。続く1927年、ハーリントン(E.A. Harrington・米)はX線回折を結晶構造解析に応用し、C₃Aの結晶構造が立方晶系であるとして、結晶格子定数を算出した。

これらの研究が端緒となり、その後のX線回折装置の発達、ASTMカードなどのデータベース(Powder Diffraction File)の構築なども相まって、X線回折はセメント化学においても、①鉱物の同定・定量、②鉱物の結晶構造の解明、に非常に有用・有効な手段として活用されることになり、以降、クリンカー鉱物のキャラクタリゼーション研究が広く深く展開されることとなった。

(4) クリンカーの鉱物組成計算法の提唱⁷⁾

1929年、ボーグは、クリンカーの化学分析値(重量%)を簡単な計算式(ボーグ式)に代入するだけで、そのクリンカーの鉱物組成を算出する方法を提唱した。この計算式は、「セメントの4主成分CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃は、最終的にはC₃S, C₂S, C₃A, C₄AFの4固相になる」との前提に立ち、4主成分以外の微量成分は無視することになっている。

この計算式は簡単でありながら、化学組成と各鉱物の大略の値の関係を知るには便利であることから、今日に至るまで広く使われている。各国の国家規格等では、品質を担保するために、ボーグ式により得られる特定のクリンカー鉱物量を指標にして、上限または下限を規定している場合がある。JIS R 5210「ポルトランドセメント」においても、中庸熱セメント・低熱セメント・耐硫酸塩性セメントについては、このボーグ式に基づいて算出された鉱物組成の上限値あるいは下限値が規定されている(第8章参照)。

(5) EPMAのクリンカー鉱物研究への応用¹¹⁾

EPMA(Electron Probe Micro Analyzer)は、電子線が照射されている微小領域(およそ1μm³)における構成元素の検出および同定と、各構成元素の比

率(濃度)を分析する装置であり、固体の試料をほぼ非破壊で分析することが可能である。

1950年代後半にこの装置が市販されるようになり、セメント化学研究者の間でも関心が高まった。1968年、東京で開催された「第5回セメント化学国際会議」(7.6.2参照)で、山口悟郎(東大教授)と高木茂栄(小野田セメント)は、主論文(Principal Paper)「ポルトランドセメントクリンカー解析」と題して、EPMAをクリンカーのキャラクタリゼーションに応用し、クリンカー鉱物各相のキャラクターを解析した結果を報告した¹¹⁾。この論文によって、クリンカー鉱物のキャラクターの研究については一つの区切りがついたといえる。

(6) 日本発の技術「小野メソッド」：クリンカー検鏡による焼成度判定^{2) 12)}

焼成プロセスは、セメント製造において最も重要な工程であるにもかかわらず、窯内の温度分布、原料の移動、各位置に於ける焼成反応等の時々刻々の変化を知ることが非常に困難である。セメント原料はキルン内で完全には溶融せず、半溶融の状態焼成されるため、キルン内の昇温・冷却の全焼成過程がクリンカーの粒度分布、組織及びクリンカー鉱物の形状等に反映し、特にクリンカー鉱物の光学的性質は複雑かつ多様に変化する。

小野吉雄博士(小野田セメント)は、表7.4に示すように、焼成過程を「昇温速度」「最高温度」「高温保持時間」「冷却速度」に単純化し、これらが顕微鏡観察によるクリンカー鉱物の光学的性質である「エーライトの粒径」、「エーライトの複屈折」、「ビーライトの粒径」、「ビーライトの色」の4項目にそれぞれ独立して対応することを見出した。これにより、「光学顕微鏡でクリンカー鉱物の光学的性質を目視観察する」という簡単な手段で、「クリンカーの熱履歴(焼成条件)を推定する」ことが可能となり、さらには「セメントのJISモルタル28日強度も推定」することができるまでになった。

表7.4 クリンカーの焼成条件とエーライト・ビーライトの性状²⁾

●焼成条件▲光学的性質	優(4)	良(3)	普通(2)	劣(1)
●昇温速度	速い←			遅い→
▲エーライトの粒径(μm)	15-20	20-30	30-40	40-60
●最高温度	高い←			低い→
▲エーライトの複屈折	0.010-0.008	0.007-0.006	0.006-0.005	0.005-0.002
●高温保持時間	長い←			短い→
▲ビーライトの粒径(μm)	25-40	20-25	15-20	5-10
●冷却速度	速い←			遅い→
▲ビーライトの色調	透明	淡黄	黄	黄濁

この「小野式クリンカー検鏡法」は以下の特長を有している：

- ①光学（偏光）顕微鏡という持ち運び容易かつ比較的安価な、セメント工場であればどこでも備えられる道具だけで測定可能である。
- ②セメント化学の基本を学習すれば工場技術者が測定・判定できる。
- ③クリンカー焼成状態の判定から、そのクリンカーのセメント強度まで予測できる。

これらの特長ゆえに小野式検鏡法は世界的に大きな反響を呼ぶことになった。米国セメント協会（PCA）が「小野メソッド（Ono's Method）」と名付けて、全米のセメント会社を対象に小野博士を招いて講習会を開いたことが引き金になり、日本国内はじめ世界各地で「小野メソッド講習会」が開催された。1980年、PCAは年次総会の席上で小野博士の功績を表彰した。小野メソッドは、基礎研究と製造の現場が直結した見事な成果であった。

7.5 水和反応と水和物：その生成とキャラクタリゼーション^{1) 2)}

今日のセメント・コンクリートは、次のような特長をもつ：

- ①高強度で耐火・耐久性のある建設材料である。
- ②実用強度を、わずか数日～数週間で発現する。
- ③しかも自由自在に成形することができる。
- ④鉄筋などによる補強をして、機能性をさらに高めることができる。

このようなセメント・コンクリートの特長の中でも、②と③は水和反応とその反応生成物によりもたらされるものである。水和反応と水和物の化学は、学問的に大変興味深い内容を含んでいるだけでなく、コンクリートとしての実際的な応用面にも重要な役割を果たしている。

しかし、その水和反応と水和生成物は、多種類のイオンや元素を含む結晶性の悪い微細な粒子（ミクロン以下）である場合が多く、電子顕微鏡が普及し始める20世紀半ばまで、水和現象の真の姿の把握は困難であった。

しかし、先駆者たちは、目に見える現象の詳細な観察から、水和反応と水和物の本質に迫ろうと努力を続けた。それらの先行研究者の知見の上に20世紀後半以降に普及した電子顕微鏡やX線回折を含む機器分析が応用されて、水和反応と水和物の姿が次々と明らかになってきた。しかし、今日もなお、水和反応は以下のような複雑な反応系であるため、まだまだ解明さ

れていない点も多い。

- ①セメントの構成鉱物自体が前節7.4で述べたとおり複雑な固溶体である。
- ②水和反応は、多数の水溶性成分（ Na_2O 、 K_2O 、 SO_3 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ など）をも含んだ固液間の不均一反応系である。
- ③凝結・硬化をもたらす水和反応生成物は、多種類のイオン・元素を含む結晶性の悪い微細な粒子である場合が多い。
- ④水和物は、相互間あるいは骨材との間の結合点が多い上に、共有結合、イオン結合、水素結合など多種類の結合状態を示し得る。

本節では、近代セメント発明以来の大発明とも言われる「石膏添加」とそれに関わる C_3A の水和、そしてセメントの最終強度を担う C_3S 、 C_2S の水和について、「セメント製造技術史」の立場から重要な内容と思われる事象について簡潔に記すこととする。

7.5.1 水和反応における石膏の役割と C_3A 水和生成

(1) 凝結調節材としての石膏添加の発明¹³⁾

現在のポルトランドセメント中には3%程度の石膏が添加されており、これによってセメントの凝結時間が施工時に使いやすいように調節されている。アスプジンのポルトランドセメント発明（1824年）当時は、クリンカーをそのまま粉砕しただけだったので、製品のセメントは非常に急結性であった。その急結性を「散布風化」することによって緩和するようになったのは、英国では1800年代半ばであり、米国では「散布風化による凝結調節法」が1870年に特許になっている。我が国でも、明治期から大正期後半までは工場に風化場を設けて散布風化を行っていたことは、3.2.3で述べた。

セメントの凝結の安定性を得るために石膏を混ぜることを考えついたのは、1870（明治3）年、ドイツのミハエリス（7.4.1の（11）参照）だとされている。ミハエリスが石膏の凝結遅延効果に気付いたのは、以下のような現象についての観察からだったようである。すなわち、ドイツのステッテン工場で、それまで急結性だったセメントが急に緩結性になり、急結性に慣れている使用者から苦情が出た。この時、その工場の社長のデルブリュック（Hugo Delbruck, 1825-1900）は試験の結果、「緩結性セメントは急結性のセメントより高い強度を示す」ことを立証した。この話を聞いたミハエリスは、セメントが緩結性に变化した原因は、使用したコークス中の硫黄含量が多くなったこと、すなわちクリンカー中に CaSO_4 が生じ

たことに起因することを突き止め、石膏 (CaSO₄·2H₂O) 添加の発明につながったと伝えられている。しかし、当時はセメントに他の添加物を加えることは禁じられており、石膏添加は「マル秘扱い」とされていたようである。1883 (明治16) 年に至って、ドイツセメント協会はセメントに2%までの混合物の添加を認め、石膏添加は公認された。

しかし、ドイツ以外では1880年代にはまだ石膏添加は知られていなかった。米国ではアトラス社が回転窯でのセメント焼成に成功 (1890年、3.3.1参照) したが、製造したセメントの急結性が著しく、回転窯採用拡大の障害になった。この問題解決のために同社は仏の技術者ジロン (P.L. Giron) を招いた。ジロンは、回転窯がガス焼成であるため、クリンカー中の硫黄分が減少したことが原因と考えた。彼は、フランスで道路舗装工が水に石膏を溶かしてセメントを使用していることにヒントを得て、セメントに石膏を加えることで問題を解決した。このことで、以後、回転窯焼成が広く普及していった¹⁴⁾。

もっとも米国でも、秘かに石膏添加を行っていた会社もあったようである。テキサス州のサンアントニオ・セメント社 (San Antonio Portland Cement) のバウムベルガー (C. Baumberger) 社長は、「ドイツのセメントを取り寄せて、顕微鏡下でセメントの中から白い粒子を取出して分析したら石膏だとわかったので、石膏使用で急結性の問題は解決した」と談話で述べている¹⁵⁾。

我が国では、浅野セメントの坂内冬蔵技師が、1888 (明治21) 年ドイツ留学から帰国後、同社深川工場で使用を開始したのが最初である。しかし、日本でも当時は「まぜ物」として、一部需要家の非難を受けた。(3.4項参照)

このような経過を経て、石膏添加による改善で、それまで急結を避けるために実施されていた風化は廃止された。風化の廃止は、強度を犠牲にすることなく、凝結の安定したセメントの製造が可能になったことを意味し、セメントへの石膏添加はセメント製造技術上の大発明といえる。

(2) 石膏添加がセメントの水和反応に与える影響¹⁶⁾

1870年のミハエリスの石膏添加の発明後、早速多くの研究者が石膏を添加したセメントの水和反応に取り組みはじめた。

1892年、ミハエリス自身により、セメントと石膏との水和反応生成物として「アルミン酸硫酸カルシウム水和物の複塩」が発見され、「セメントパチルス」

と名付けられた。この発見により石膏存在下のセメントの水和反応の端緒が開かれた。その後、このアルミン酸硫酸カルシウム水和物「C₃A·3CaSO₄·32H₂O」が、天然鉱物としてドイツのエトリングゲン (Ettringen) 地方で産出することがわかり、その地名に因んで「エトリングタイト (ettringite)」と名付けられた。(図7.4、7.6、7.7)

石膏によるセメント凝結調節作用の機構およびそれに関連するC₃Aの水和反応については、その後、非常に多くの研究が行われ、様々な見解が述べられてきた。1950年前半までのそれらの見解は、ボーグ (R.H. Bogue・米) が文献(7)に取りまとめており、以後1995年までの研究成果は、テイラー (H.F.W Taylor・英) が文献(17)にまとめている。



図7.6 ポルトランドセメント水和物の生成過程¹⁾
(原写真：室井宗一)

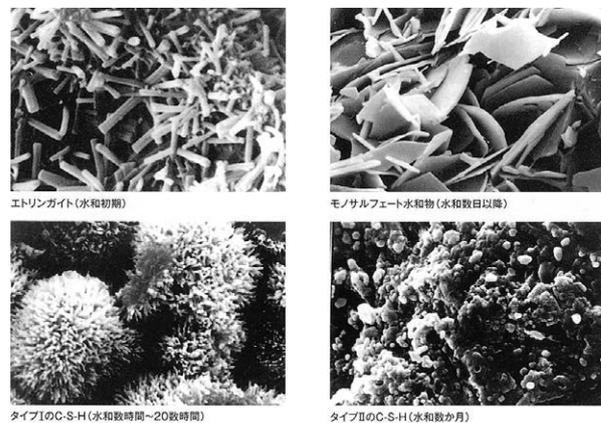


図7.7 代表的な水和物の電子顕微鏡写真¹⁾

(3) 最適石膏添加量¹⁶⁾

当初、石膏の添加は凝結の調節を目的としたが、その後、凝結以外のセメントの性質に対し、プラス・マイナス種々の影響があることがわかってきた。

最初に注意が喚起されたのは、硬化後に発生する異常膨張であり、いろいろな事象の観察や実験から、石膏の量が関係することがわかってきた。1886年、ドイツがセメント規格を改正して「3%以上のセッコウ

を含有するセメントは異常膨張を呈することがある」と記し、セメント規格にSO₃量限度（当時の設定は2%以下）を定めた。以後各国にSO₃量の上限規制が広がった。日本でも1898（明治31）年の「日本帝国ポルトランドセメント試験法」でSO₃は2.0%以下と規定された。

1938年、ムサグヌグ（G. Musagnug、独）とヘーゲルマン（G. Haegermann、独）は、モルタル強度が最大になる石膏の添加量があること、石膏量の増加によりモルタル乾燥収縮が小さくなることなどを報告した^{18) 19)}。ラーチ（W. Lerch）はさらに広範に研究して、1946年、①石膏添加量には、強さ最大、膨張・収縮最小になる「最適添加量」があること、②その最適の石膏添加量は、C₃Aおよびアルカリの多いセメントの場合高い、と報告した²⁰⁾。さらに1950年、マイスナー（H.S. Meissner）らにより、モルタル中の残存石膏抽出測定による「石膏最適添加量推定法」が提案された²¹⁾。1955年、山内・近藤ら（東工大）は、石膏添加によりセメントの耐硫酸塩性をより改善出来ることを報告した²²⁾。

これらの研究の結果、それまでの規格で定められていた上限値よりも石膏添加量をやや増加することによって、セメントの性質をより良く改善出来ることが判明した。米国規格では1946年頃よりセメント中のSO₃許容限度をゆるめるべく数度の改正が行われ、また1958年には英国規格も同じ方向に改正された。現在のJISの「普通ポルトランドセメント」のSO₃規定は3.5%以下となっている。

(4) 偽凝結^{16) 23)}

セメントによっては、注水後5~10分で軽いこわばりを生じ、その後混練を続けると再び軟化して、以後正常な凝結現象に戻る、という現象が見られることがある。このような現象は「偽凝結」と呼ばれている。偽凝結についても、20世紀初頭以来数々の研究論文が発表され、結論的には、①セメント中の石膏の加熱による脱水、②セメントの風化、によって起こるとされている。

①の石膏の脱水は主に仕上粉碎工程でのセメント温度の上昇に起因することが多く、製造工程において種々対策が取られてきている。②は工場出荷後の問題であり、セメントを風化させないことは、セメントの輸送・貯蔵などハンドリング上の要諦である。

なお、偽凝結を現わしたセメントをコンクリートに使用しても、ほとんど支障はない。

7.5.2 シリケート相（C₃S、C₂S）の水和²³⁾

ポルトランドセメント中のシリケート相の水和については、「C₃Sの水和速度は速く、それに対してC₂Sは著しく遅い」が、その生成物はともに珪酸カルシウム水和物とCa(OH)₂である。プルナウアとコープラント（S. Brunauer & L.E. Copeland・米）らは、1958年にC₃SやC₂Sは常温水和によって、天然産のトベルモライト（Tobermorite）に近似した3CaO・2SiO₂・3H₂O（C₃S₂H₃）を生成するとした²⁴⁾。

その後、多数の研究者によりカルシウムシリケート水和物（C-S-H系水和物と略す）が研究された。C-S-Hの成分間の比率は、水和時間や水和温度など水和条件によって左右されることが明らかになり、CSH_n~C₃S₂H_n（n=1~2.5）は同一構造であるからCSH（I）と表現し、C₂SH_nの構造はCSH（I）と異なるのでCSH（II）と区別することが一般的な表現となった。なお、カルシウムシリケート相の水和反応については、1995年までの研究成果をテイラー（H.F.W Taylor）が文献（17）にまとめている。（図7.7参照）

セメントクリンカー鉱物の水和物の特性を、表7.5にまとめて示す。これらの各鉱物の特性を活かすことで、次章・第8章で述べるセメント品種の多様化が育ってきた。

表7.5 セメントクリンカー鉱物の水和物の特性²⁵⁾

特 性	エーライト (C ₃ S)	ビーライト (C ₂ S)	アルミニート相 (C ₄ A)	フェライト相 (C ₄ AF)
	強さの発現	大	小	中
短期	大	大	小	小
長期	大	小	きわめて大	中
水和熱	大	大	小	中
化学抵抗性	中	小	大	小
乾燥収縮	中	小	大	小

7.6 セメント化学への日本人研究者の貢献

「セメント化学」の領域は、大部分が学問の世界であり、科学（Science）の世界である。したがって、セメント化学への日本人の貢献といっても、工学の世界のように経済的な効果で貢献度を評価するのは困難である。科学の世界では、貢献度の物差しの一つとして、その研究者の論文がどれだけ他の研究者に引用されたか、を指標にしているケースがある。そこで本稿でも、①セメント化学でバイブル的な位置づけにある二つのセメント化学専門教科書に引用された日本人研究者の数、②セメント化学に関する国際会議での発表論文数、を指標として、日本人研究者の台頭と活躍の一端を示すことにしたい。

7.6.1 セメント化学に関する専門教科書に見る日本人研究者の貢献

セメント化学については、日本でも「ボグの本」、「テイラーの本」と親しみを込めて呼ばれている下記の本が、世界的に認められた専門的な教科書である。

- (1) “The Chemistry of Portland Cement”, Robert Herman Bogue, Reinhold Publishing, 1955
- (2) “The Chemistry of Cement”, Vol. I & II, H.F.W. Taylor, Academic Press, 1964
- (3) “Chemistry of Cement, 2nd edition”, H.F.W. Taylor, Thomas Telford, 1997

「ボグの本」(1)と「テイラーの本」(3)について、それらの本に論文が引用された研究者総数と、その中の日本人研究者の数を比較すると、1955年の「ボグの本」では、

引用された研究者総数	651
うち日本人	7
(日本人論文数)	19

であった。(共著論文は筆頭者のみ数える。また下注参照)

それに対して1997年の「テイラーの本」では、	
引用された論文総数	1,535
うち日本人論文数	112
(日本人研究者数)	45

となっており、1964年から1997年までの約40年間に、日本人セメント化学研究者の国際的な存在感が飛躍的に大きくなったことがわかる。「テイラーの本」では、牧巖博士(名古屋工大)は20論文、内川浩博士(太平洋セメント)は14論文が引用されており、この引用論文数は世界の研究者の中でもトップレベルである。

(注) ボグ本(1)とテイラー本(3)では、引用論文リストの様式が異なるため、(1)では研究者総数と日本人研究者数対比、(3)では論文総数と日本人論文数対比とした。

7.6.2 セメント化学国際会議における日本人研究者の存在感の増大

「セメント化学国際会議(ICCC: International Congress on the Chemistry of Cement)」は、セメント化学の研究者・技術者を中心にした国際会議である。1918年にロンドンで第1回が開催され、1960年以降は4~6年に1回のペースで開催されて今日に至っている。

第2回は1938(昭和13)年ストックホルムで開催されたが、第1回、第2回での日本人の論文発表はゼ

ロであった。第3回は1952(昭和27)年、再びロンドンで開催され、初めて永井彰一郎博士(東大)と小柳勝蔵博士(秩父セメント)が、主論文(Principal Paper)に対する討論(Discussion)に参加して議事録に名を残している。第4回は1960年、米国ワシントンDCで開催された。この大会では、日本人研究者による主論文(総数20論文)の発表はまだなかったものの、副論文(Supplementary Paper)は6論文(総数48論文)と、日本人研究者が存在感を示し始めた。この大会で「次回大会は東京」が決定された。

第5回大会は1968年10月、東京文化会館(上野)で5日間開催された。日本は、開催国引受けを要請されるまでにセメント化学界での国際的地位が高まり、大会での主論文20件のうち、日本人研究者が5論文を発表するまでの存在になった。この東京大会は、電子顕微鏡やEPMAなどの発達で、クリンカー鉱物やセメントの水和に関する研究が一つの頂点に達した時期の開催でもあった²⁶⁾。

東京大会以降は、第6回モスクワ(1974)、第7回パリ(1980)、第8回リオデジャネイロ(1986)、第9回ニューデリー(1992)、第10回イエテボリ(スウェーデン、1997)、第11回ダーバン(南アフリカ、2003)、第12回モントリオール(2007)、第13回マドリード(2011)と続き、第14回大会は2015年北京で開催された。いずれの大会でも、日本からの発表参加は途切れることなく続いている。

注1: キャラクターゼーション(characterization)

「これは一体何であるか?」という設問に対する回答を探求すること。

セメント化学の場合では、クリンカーや水和物の構成鉱物の結晶構造、化学成分、物理的・化学的性質などを探求・解明することをいう。

注2: セメント化学で使う独特の略記号

C:CaO, S:SiO₂, A:Al₂O₃, F:Fe₂O₃, H:H₂Oを表す。たとえば、C₃Sは化学式では“3CaO·SiO₂”を意味する。本稿でも、以降は適宜この略記号も使うこととする。

注3: 固溶・固溶体

固相の中で異なる物質が互いに均一に溶け合うことを固溶といい、その固相を固溶体という。全組成にわたって固溶体をつくる場合と、限られた範囲だけで固溶体をつくる場合がある。

注4: 材齢

セメントに水を加えてからの時間の経過を「材齢」という。材齢7日までの「短期強度」、28日以降を「長期強度」ともいう。

注5: 変態と転移

同一の化学組成でありながら、温度・圧力の相違あるいは生成条件が異なるために、物理的性質や原子配列を異にする物質の状態をいう。変態Aから変態Bに移ることを転移という。

参考文献

- 1) セメント協会, セメントの常識, 2013.
- 2) 内川研究室, わかりやすいセメント・コンクリートの科学, 秩父小野田株式会社, 1995.
- 3) 太平洋セメント株式会社提供
- 4) 黒木康貴, セメントの化学組成を表現する率・係数の意味, C&Cセメント・コンクリートエンスアイクロペディア, セメント協会, pp.67-68,1996.
- 5) 笠井康一, 百年前のセメントの書 Michaelis 1869, 小野田研究報告, No.77, pp.15-18, 1969.
- 6) 藤井光蔵, ポルトランドセメント発達の沿革 (1) - (18), セメント・コンクリート, No.105-130, 1955-1957.
- 7) R.H. Bogue, The Chemistry of Portland Cement, Reinhold Publishing, 1955.
- 8) 内川 浩, セメントの材料技術の社会史 (1), (2), 材料技術, Vol.12, No.9, pp.293-298, No.10, pp.320-324, 1994.
- 9) American Ceramic Society, Phase Diagrams for Ceramists, Part I,1956, Part II, 1959.
- 10) 桃木弘三, 内川 浩, X線工業分析法, オーム社, 1965.
- 11) G. Yamaguchi, S. Takagi, Analysis of portland cement clinker, Proceedings of the 5th International Symposium on the Chemistry of Cement, pp.181-218, 1968.
- 12) Y. Ono, Microscopical estimation of burning condition and quality of clinker, Proceedings of the 7th International Congress on the Chemistry of Cement, Paris, Vol.2, pp.I/206-I/217, 1980.
- 13) 上野 孝, セメント技術史補遺, 小野田セメント, 1980.
- 14) R. H. Bogue, Digest of literature on nature of setting and hardening processes in Portland cement, Part.VI, Rock Products, Sept.29 1928, pp.65-68.
- 15) E. Shaw, The rock products industries in Texas, Rock Products, July 23 1927, pp.56-60,
- 16) 竹本国博, ポルトランドセメントの凝結硬化におけるセッコウの役割, 小野田セメント株式会社, 1960.
- 17) H. F. W. Taylor, Cement Chemistry, 2nd ed., Thomas Telford, 1997.
- 18) G. Mussgnug, Einfluss einiger Kalziumsulfatsorten auf die Eigenschaften des Zementes, Zement, Vol.27, No.20, pp.303-307, 1938.
- 19) G. Haegermann, Die Beeinflussung des Schwindens von Portlandzement durch Sulfate, Zement, Vol.28, No.40, pp.599-602, 1939.
- 20) W. Lerch, The influence of gypsum on the hydration and properties of Portland cement pastes, Proceedings of ASTM, Vol.46, pp.1252-1297, 1946.
- 21) H. S. Meissner, The optimum gypsum content of portland cement, ASTM Bulletin, No.169,p.39 (TP-225), 1950.
- 22) 近藤連一, 山内俊吉, セメントに添加される石膏の適正な形態と量, Vol.63, No.705, pp.42-46, 1955.
- 23) 後英太郎, 新しいセメントとセメント技術, 誠文堂新光社, 1971.
- 24) S. Brunauer, D. L. Kantro, L. E. Copeland, The stoichiometry of the hydration of β -dicalcium silicate and tricalcium silicate at room temperature, Journal of the American Chemical Society, Vol.80, No.4, pp. 761-767, 1958.
- 25) セメント協会, セメントの常識, p.20, 1994.
- 26) Proceedings of the 5th International Symposium on the Chemistry of Cement, Tokyo, 1968.

8 | セメント規格の変遷と品種の多様化の歴史

いずれの産業においても、「規格」は商取引上からも、技術の維持向上の面からも、非常に重要であることは言を俟たない。しかし、セメント産業においては、以下の2つの理由から、「規格」はとりわけ重要な位置づけにあると言える：

(1) セメントは、コンクリートの最も重要な構成材料であり、そのコンクリート構造体の耐用年数は50年100年あるいはそれ以上を期待される。コンクリートの機能の核心を担うセメントには、顧客からそれだけの期待がかけられているのであり、セメント規格は、その顧客の期待に対するセメントメーカーの「約束」であるとも言える。

このことは一方で、セメント規格に変更、修正を加えようとする場合に、需要者側から「安全・安心」面について厳しい目が注がれることにもつながる。「石膏添加」や「粉砕助剤の利用」が、安全・安心の面の不安から、技術的な研究成果が規格に反映されるまでに若干の時間遅れが出たことは、既に触れたとおりである(3.4、5.5.2参照)。

(2) セメントメーカーにとって「JIS規格のセメントを作る」ことは、会社存立の絶対要件でもあるといえる。セメントの最終的な用途の約半分は公共事業であり、公共事業を発注する官公庁の仕様書には、「セメントはJIS規格合格品を使用」が一般的な条件になっているからである。

規格に関連してもう一つ重要な点に触れておきたい。わが国のセメントの生産・流通体制は、臨海の大規模工場から大型船で各消費地のターミナルに大量輸送される形態になっており(4.12.3参照)、この徹底的に合理化された生産・流通体制が、重量物の化学製品としては驚くべき低価格を支えている。ちなみに、2013年のセメント価格は、普通ポルトランドセメントで約10,000円/t=10円/kg¹⁾である。この生産・流通体制は、一方で「少品種・大量生産・大量輸送」を前提に成り立っており、したがって大量に使われるセメントでないと、この生産・流通体制のメリットが活きにくい。このために、せっかくの新技术・新材料であっても、営業面の見通しから「規格化して商品化する」ことを断念する結果になることもある。また、既に規格が制定されている品種でも、製造・流通コスト高のために実際には商品が生産・販売されていない状況にある品種も存在する。

セメント規格を巡る以上のような環境条件を前提

に、この第8章では、市場の変化と技術の進歩に伴う日本のセメント規格の変遷と、セメント品種多様化の歴史をたどる。

8.1では、規格の変遷や品種の多様化を理解する事前知識として、日本国内で販売されている①JIS規定のセメント、②セメント会社のカタログなどに掲載されているJIS規定以外の特殊セメント、および③セメントの試験法に関するJISの概要(項目)を紹介する。

8.2では、ドイツを発祥の地として「セメント規格」が制定されるようになった経緯を述べ、それを範として明治38年「日本ポルトランドセメント試験法」が制定されて以来、2010年代までの我が国のセメント規格の変遷を述べる。

8.3では、8.1で紹介したセメント品種の主なものについて、それぞれの起源・沿革をたどることとする。

8.1.1 2015年時点のセメント関係JIS規格²⁾

セメントに関する日本工業規格(JIS: Japan Industrial Standard)は、現在(2015年4月1日時点)、品質に関する規格が5規格、試験方法に関する規格が4規格、制定されている。

(1) 品質の規格(5規格)

*ポルトランドセメント: JIS R 5210

①普通、②早強、③超早強、④中庸熱、⑤低熱、⑥耐硫酸塩

およびそれぞれの「低アルカリ形」計12品種

*混合セメント

①高炉セメント: JIS R 5211

②シリカセメント: JIS R 5212

③フライアッシュセメント: JIS R 5213

それぞれA種・B種・C種あり、計9品種

*エコセメント: JIS R 5214

普通形と速硬形 計2品種

参考に各セメントの構成を図8.1に示す。規格の内容は参考文献(3)に詳しい。

(2) 試験方法に関する規格(4規格)

セメントの特性を評価するために規定された試験方法で、強度や粉末度などを求める物理試験、化学組成を求める化学分析や蛍光X線分析、水和熱を求める水和熱試験が規格化されている。これらの規格は、上記「セメントの品質規格」で規定される品質を確認す

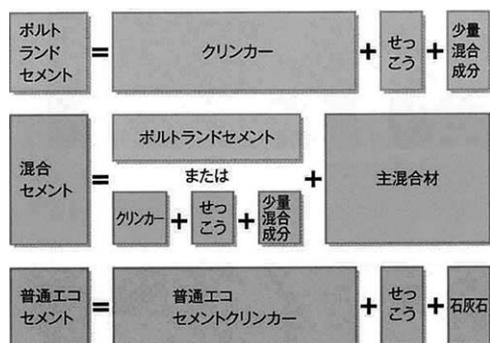


図 8.1 JIS 規定のセメントの構成²⁾

るために用いる。これらの試験方法によって求めた結果を、セメントの試験成績表に記載することになっている。

- JIS R 5201 「セメントの物理試験方法」
- JIS R 5202 「セメントの化学分析方法」
- JIS R 5203 「セメントの水和熱測定方法 (溶解熱方法)」
- JIS R 5204 「セメントの蛍光 X 線分析方法」

8.1.2 特殊なセメント²⁾

JIS R 5210 に規定されている品質 (項目と規格値) 以外の品質が要求される場合に使用されるセメントがある。これらを一般的には「特殊セメント」と呼ぶ。それらは多岐にわたるので、代表的なものを表 8.1 に示し、本稿では、生産量が比較的多い「ビーライトセメント」と「白色セメント」について、前者は 8.3.1 (4) 項で、後者は同 (7) 項で説明する。

表 8.1 特殊なセメントの種類²⁾

分類	セメントの種類
ポルトランドセメントをベースにしたもの	膨張セメント 2成分系の低発熱セメント 3成分系の低発熱セメント
ポルトランドセメントの成分や粒度の構成を変えたもの	ビーライトセメント 白色ポルトランドセメント 超微粒子セメント 油井・地熱井セメント
ポルトランドセメントとは異なる成分のもの	超速硬セメント アルミナセメント

8.2 セメント規格の誕生と変遷

8.2.1 セメント規格の誕生⁴⁾

世界で最初にセメント規格が誕生したのは、1878年のドイツであった。この時、主導的な役割を果たしたのが、デルブリュック (Hugo Delbruck, 1825-1900) とミハエリス (Wilhelm Michaelis, 1840-1911) であ

る。デルブリュックがリーダーシップを発揮してドイツセメント業界を取りまとめ、ミハエリスが規格案を作成したのである。

デルブリュックとミハエリスのコンビは、7.5.1の(1)項「石膏添加の発明」(1870年)でも触れた。すなわち、急結性であったセメントが緩結性になった独・ステッチン工場で、工場長だったデルブリュックが「緩結性のセメントのほうが急結性より強度が高い」と証明したことが、ミハエリスの石膏添加発明につながったことを述べた。デルブリュックが引き受けた当時のステッチン工場は、赤字に悩むぼろ工場であったようだが、彼は科学的基礎に立って工場の設備や作業を改善し、見事に高収益の工場に立てなおした。

このステッチン工場立直しの実績で業界内での評判と信用が高まったデルブリュックは、自ら発起人となり1877(明治10)年、ドイツセメント製造者協会を設立、初代会長に就任、1899年まで在任した。この協会の設立趣旨5項目の1つ(後世から見れば最も重要な項目)に「ポルトランドセメントの請渡および試験の標準規格の制定」があった。その原案を作成提出したのがミハエリスである。ミハエリスは1872年、建築材料試験を目的とする「化学工業試験所」を設立していた。

1860年代のドイツセメント業界には、統一されたセメント試験法はなく、各工場が独自の考えで試験を行っていた。セメント1樽の重量も、正味であったり、風袋込であったり、ドイツポンドであったり、英ポンドであったりと、まさに混沌とした状態であった。デルブリュックは、このような混乱状態を是正し、業界永遠の繁栄の基礎を固めたい、と業界団体設立に動き出した、といわれている。

このセメント製造者協会で検討された案が、ドイツ(プロシア)政府の省令により公布され、政府事業に供給されるポルトランドセメントはすべてこの適用を受けることとなった。この公規格が、今日世界各国で用いられているセメント規格の始祖をなした。内容的には以下の5項目とその試験法が規定されていた。

- ① 1樽の重量、②凝結時間、③安定性、④粉末度、⑤ 28日強度

8.2.2 我が国セメント関係規格の誕生とその後の発展^{5) 6)}

日本で最初のセメント規格は、1905(明治38)年2月10日に公布された農商務省告示第35号「日本ポルトランドセメント試験方法」であった。この規格が成

立するまでの経緯については、3.6.2・3.6.3で詳しく述べているので重複は避ける。この農商務省告示は「日本の工業規格第1号」ともみなされている。それ以降のセメント規格の変遷を大括りすると、以下の3期に分けられよう。

(1) 1900年代から1950年代まで（明治・大正・昭和20年代まで）

セメント化学の進歩や分析方法や試験機器の発達を受けて、規格内容が充実してきた。

太平洋戦争時期は、産業統制による規格の変更もあった。

(2) 1960年代から1980年代まで（昭和30年代から昭和の末まで）

セメントの多品種化の進行に対応して規格が増えてきた。

(3) 1990年代から今日まで（平成期）

セメント産業のグローバル化に伴い、国際規格であるISO規格との整合性を取るための改訂や、セメント産業が循環型社会構築貢献産業の役割を果たすための規格内容の改訂が増えた。

農商務省告示第35号「ポルトランドセメント試験方法」は、単に政府の購入基準であった。しかし、1927（昭和2）年には、日本標準規格第28号（JES28）が公布されて、セメント規格も国家の基準的な存在としての位置づけとなり、1949（昭和24）年に発布された工業標準化法により、国家の基準「JIS」となった。

セメントのJISには品質基準を定めた品質規格と、その品質を試験するための試験方法規格とがあることは前述したが、社会の要請、科学の進歩とともに多品種のセメントが生まれ、セメントの品質が向上するに当たって品質規格の項目、基準値も改正されてきた。試験方法規格では、規格の普及性を考慮に入れながら、科学の進展とともに改正を重ねてきている。以下、主な改正について略記する。さらに詳しくは文献(5)(6)などに記述がある。

(1) 1927（昭和2）年の改訂

試験温度や供試体の養生法、凝結や強度試験方法などを細かく規定し、また、標準砂（下記(4)参照）を東京砂から相馬砂に変更した。用語も「耐伸強」を「抗張力」に、「耐圧強」を「耐圧力」と改めるなど、大幅な改正が行われた。

(2) 1941（昭和16）年、モルタル強度試験法の大改正

セメント品質の最も重要な特性であるモルタルの強度試験に関して、1941（昭和16）年、従来の硬練（かたねり）法に替わって軟練（やわねり）法が採用され、引張強さに代わって曲げ強さを測定するようになるなど、大きな改正があった。このため、それ以前の試験データを現在の数値と正確に比較することは困難である。

(3) 第二次大戦中の産業統制下での規格

第二次大戦中は、早強・中庸熟セメント等の「高級セメント」は、石炭品位の低下、あるいは製造用資材の欠乏のため製造不能となった。しかし一方で、石炭および諸資材の節約となる高炉セメント・シリカセメントが増産され、一時は全生産高の1/3に達した。またセメント使用の合理化が要請され、「雑用セメント」「塗装用セメント」等の強度の低い非構造用セメントの規格が作られ、販売された。雑用セメントの規格（1942（昭和17）年制定）では、製造は「ポルトランドセメント焼塊、高炉急冷鉍滓、セメント焼成窯粉塵、珪酸質混合材、石膏、石灰、その他これに準ずる性質を有するもの」を原料として混合粉砕することとされた。戦後まもなく製造されなくなり、1956（昭和31）年に規格も廃止された。

(4) 標準砂

セメントの強さ試験では、使用する砂の種類によりセメントの強さが変わる。日本でモルタル試験に使用する標準砂は、明治・大正期は東京標準砂、その後1927（昭和2）年に福島・相馬標準砂に変更、さらに1941（昭和16）年に朝鮮の九味浦標準砂、敗戦で入手不能になって1947（昭和22）年山口県豊浦産の標準砂に変更された。1997年4月、国際規格（ISO679）との整合性を図るため、オーストラリア産を標準砂とすることに变更された。標準砂の適合性試験及び品質確認試験は一般社団法人セメント協会が行っている。

(5) 少量混合成分

1979（昭和54）年、省資源の観点から「普通ポルトランドセメント」に「5%までの少量混合成分」を混合してもよいとの規定が加わった。混合材としては、高炉スラグ、シリカ質材、フライアッシュ、石灰石の4種が認められている。その後、2009年のJIS改訂で「早強セメント」「超早強セメント」についても少量混合成分の添加が認められた。

(6) セメント中のアルカリ量の規制^{7) 8)}

1986年、アルカリ骨材反応抑制のために「低アルカリ形ポルトランドセメント」の規定が新設された。

セメントに含まれているアルカリ (Na^+ , K^+) は、湿度などの条件によっては、骨材中のある種の鉱物と反応して体積が膨張する場合がある。この現象を「アルカリ骨材反応」(以下アル骨反応と略称) といい、コンクリート内部に局所的な体積膨張を生じることでコンクリート中にひび割れが発生し、強度低下をもたらす。極端な場合には、コンクリートが崩壊に至ることさえある。このような危険性を避ける目的で、アルカリ骨材反応性のある骨材を使わざるを得ない場合に備え、「低アルカリ形ポルトランドセメント」が規定された。

アルカリ骨材反応は欧米では古くから知られていたが、日本では「アル骨反応を生じる骨材はない」と信じられていて、あまり注意が払われていなかった。ところが、1983年以降、関西地区を中心にアルカリ骨材反応によるコンクリート構造物の劣化が見つかり、日本でも「アル骨反応あり」と、問題が表面化し、セメント中のアルカリ量に目が向けられることになった。

結果として、1986年、JIS R 5210「ポルトランドセメント」規格改正のさい、附属書に「低アルカリ形」が付け加えられ、 Na_2O と K_2O の総量を Na_2O に換算して表示した「全アルカリ含有量」の上限値が0.6%と定められた。

「低アルカリ形」の全アルカリ量の規定値を「0.6%以下」とした経緯は以下のとおりである。アル骨反応の問題発生が早くから発生していた米国で、1940年代の調査・研究から、「セメント中のアルカリが0.6%以下であれば、アル骨反応によるコンクリートの損傷は大部分防止できる」ことが確認され、米国規格では、「低アルカリセメント」のアルカリの規格値が、0.6%以下とされている。欧州諸国でも、「低アルカリセメント」のアルカリ量を0.60%以下と定めており、日本国内で行われてきた研究結果でも「0.6%なら安全」と報告されていたため、0.6%以下とした。

しかしながら、日本のセメントの生産・流通は、臨海部の大型工場から大型船で各消費地のターミナルに大量輸送される形態になっており、アルカリの規定のない普通のセメントと「低アルカリ形セメント」の二本立ての供給は実態として極めて困難であった。

そこで、1992年の規格改正で、すべてのポルトランドセメントに「全アルカリ」の規格値が新設され、全アルカリ含有量の上限値を0.75%以下と定めた。こ

れによって需要家は「JIS規格のポルトランドセメントはすべてアルカリ0.75%以下」が保証されるので、本当に必要な場合に限って低アルカリ形を注文するようになり、事実上は低アルカリポルトランドセメントの需要はほとんどなくなった。

世界各国のセメント規格の中で、すべてのポルトランドセメントでアルカリ量が規定されているのは、極めて少数派(2005年時点では日本だけ)である。アル骨反応に影響するのは「セメント中のアルカリ」ではなく、「コンクリート中の全アルカリ」であり、コンクリートを構成する他の材料(砂利、砂、水、混和材・剤など)が等しく負担すべきであるが、日本では企業規模で大手企業が多い「セメントでの規制」というのが基本とされ、「材料規定」(注1参照)の形となった⁸⁾。この考え方は、その後の塩化物イオンの規制(次項参照)にも引き継がれている。

(7) 塩素⁹⁾

1992年、鉄筋コンクリートの耐久性を考慮に入れて「塩化物イオン量」の規格が新設された。

1980年代から、前述のアルカリ骨材反応によるコンクリート損傷が問題になったことに続いて、1983年にはコンクリートの塩害問題がNHKテレビで放映され、1984年には「コンクリート・クライシス」(NHK)という番組も組まれて、コンクリートの耐久性について世間の疑念が高まった。

1960年代以降の高度成長に伴うコンクリート需要の大幅増加は、骨材、特に細骨材の供給力不足を招き、瀬戸内海に面する地域では、海底から採取した砂が一部水洗不十分のままコンクリート用細骨材として利用された。これが原因となってコンクリート中の鉄筋腐食が進行し、コンクリートの耐久性に問題を引き起こすことになった。

このような事態を受けて、鉄筋の発錆に関係する「コンクリート中の最大塩化物イオン量」を規制する検討が始まった。その結果、欧米では塩化物イオン最大許容量を通常のコンクリートでは $0.6\text{kg}/\text{m}^3$ 、特に重要なプレストレストコンクリートでは半分の $0.3\text{kg}/\text{m}^3$ としているのに対し、日本では、通常のコンクリートにおいても $0.3\text{kg}/\text{m}^3$ に設定した。この最大許容量にコンクリートの各構成材料の構成比を乗じて、セメント中に含有される塩化物の規制値は0.02%を上限とすることで、1992年にJIS R 5210に規定された。この値は、欧州EN規格の上限値0.1%と比較した場合、その1/5という厳しい値であった。

その後、セメント産業が循環型社会構築貢献をする

うえでの産業廃棄物の利用を促進するために、塩化物イオン量の規格値緩和の動きが起こり、実際に打設されているコンクリート中の塩化物量などを勘案し、2003年、セメント中の塩化物イオン量は0.035%以下に緩和された。

一般的に、コンクリートの塩害には、元のコンクリートに含まれている塩化物イオンより、コンクリート構造物となってから外部から浸入する海水や融雪剤などの塩分の影響のほうが大きいといわれている。

8.3 品種の多様化：JIS に品質の規格があるセメントの沿革

セメント品種の多様化が進展した背景には、①セメント化学理論の発展と、②セメント製造設備の発達によって、「求められる機能・品質を有するセメントを、安定して製造できるようになった」という技術的基盤ことがあることは言を俟たない。1960年代以降の新品种開発は、ほとんどの場合、セメント化学の理論に基づいて開発されてきている。

以下、セメント関係 JIS に品質規格がある「ポルトランドセメント」と「混合セメント」について、その沿革を述べる。「エコセメント」については次章・第9章「資源循環型社会構築貢献産業への発展」で詳説する。

8.3.1 JIS「ポルトランドセメント」規定のセメントの沿革

JIS R 5210「ポルトランドセメント」に品質が規定されているセメントは、①普通、②早強、③超早強、④中庸熱、⑤低熱、⑥耐硫酸塩の各ポルトランドセメントとそれぞれの「低アルカリ形」である。普通ポルトランドセメントについては、本稿「セメント製造技術史」そのものが普通セメントの歴史なのでここでは記述を省略し、②早強セメント以下の品種の沿革を記す。とりわけ「低熱セメント」は、高機能コンクリート用のセメントとして1990年代以降、利用が広がっており、多少詳しく記述した。また、「白色セメント（ホワイトセメント）」は JIS にその名を冠した規定はないが、ポルトランドセメントの JIS 規格に合格するものとして、国内でもすでに100年近く製造・販売されてきているので、その歴史についてもこの項で含めて説明する。

(1) 早強ポルトランドセメント⁹⁾

「普通ポルトランドセメント」の3日強さを1日で発現するセメントである。19世紀前半に発明された

近代ポルトランドセメントが普及し、新しい用途がいろいろ開けてくると、設計面や施工面からより一層初期強度の高いポルトランドセメントが要求されるようになってきた。オーストリアの国鉄顧問をしていたスピンドル (Spindel) は鋭意研究を行い、製造工程を精密化し、高石灰質にした原料を強焼し、得られたクリンカーを微粉碎するなどして、1913年「早強ポルトランドセメント」の製造に成功した。

その後各国でも製造されるようになり、日本では1926(大正15)年、大阪窯業(現・住友大阪セメント)が「高級セメント」として試製を開始、1927年に市販を始めたのが最初とされる。1929(昭和4)年には浅野セメントが「アサノベロセメント」の商品名で販売を開始、その後各社が「微細ポルトランドセメント」「高級ポルトランドセメント」などの名称で製造販売を始めた。早強ポルトランドセメントの規格化は1938(昭和13)年(商工省告示)である。

(2) 超早強ポルトランドセメント

普通ポルトランドセメントの7日強さを1日で発現するセメントである。緊急工事に使用することを目的に、セメント化学の知見を基に日本で開発された。1969(昭和44)年より生産されるようになり、1973(昭和48)年に JIS 化された。しかし、その後「超早強コンクリート」は、超早強セメントを使わなくても、コンクリート混和剤等の使用で可能な技術が開発され、超早強セメントは、規格はあるものの製造はされていない。

(3) 中庸熱ポルトランドセメント¹⁰⁾

普通ポルトランドセメントに比べ、ビーライト(C_2S)を増やし、エーライト(C_3S)とアルミニウム相(C_3A)を減らして、水和熱を低減したセメントである。長期強度に優れ、ダムなどのマスコンクリート用に使用される。

1930年頃米国で「セメント中のビーライト量を増し、エーライト、間隙質、特に C_3A 固溶体の量を減らせば、水和発熱量を低減できる」ことが発見された。この知見に基づいた「低発熱のセメント」が実際に初めて使用されたのは、1932年建設のパイン・キャニオンダム工事(米国カリフォルニア州)だといわれている。続いて1933年、同じく米国の有名なボールダーダム(フーバーダム)にも大量に使用された。

日本では1934(昭和9)年、浅野セメントが「アサノマスコンセメント」として製造販売を開始し、同年に行われた宮崎県塚原発電所の堰堤工事に用いられた

のが最初と言われている。JIS規格化は1953（昭和28）年である。

1970年代までは日本の「低発熱のセメント」はJIS「中庸熱」だけであったが、1980年代以降、次項に述べるような「低熱セメント」や「ビーライトセメント」が登場し、低発熱を要求するコンクリートの設計に応じて、「中庸熱」「低熱」「ビーライト」などの選択がなされるようになった。「中庸熱セメント」は大型ダム工事などのプロジェクトに応じて、注文生産されている。

(4) 低熱ポルトランドセメント、ビーライト系セメント^{11) 12)}

JIS「低熱ポルトランドセメント」は、中庸熱ポルトランドセメントよりさらに水和熱が低いセメントであり、成分的にはビーライト（ C_2S ）の含有量を40%以上、アルミネート相（ C_3A ）を6%以下と規定されている。このセメントは、下記①～⑦に列挙するように機能性の高いセメントである。そのため、使用条件や目的に応じて、クリンカー構成化合物の構成比率や比表面積等がJIS規格からはずれた商品設計がなされる場合もある。このようなJIS規格外セメントは「ビーライト（系）セメント」と呼ばれ、一応「特殊なセメント」として扱われている（表8.1参照）。別な言い方をすれば、低熱ポルトランドセメントはビーライト系セメントの一つであるといえる。

ビーライト系セメントの歴史を遡ると、米国のASTM規格に「Type IV」として規定されている「低熱ポルトランドセメント（Low-heat cement）」に源流を求めることができる。その後、1970年代の二度にわたるオイルショックを契機に、エーライトよりも焼成温度が低く、さらに脱炭酸反応に必要な熱量の少ないビーライトが、「省エネルギー」の観点から脚光を浴び、高ビーライト系セメントに関する開発研究がドイツおよび米国を中心に活性化した。

これら欧米での動きに対し、我が国ではむしろ「低発熱」に重点をおいて、高ビーライト系セメントの開発が進められた。すなわち、1980年代の明石海峡大橋などの巨大なマスコンクリート用に、クリンカー自体の改良によるセメントの低発熱化がセメントメーカーに要請され、高ビーライト系セメントの研究・開発が開始された。

また、同じ時期に、都市部を中心にコンクリート構造物の高層化も進展し、それに伴ってコンクリートの高強度化も求められるようになった。しかし、高強度コンクリートはコンクリート $1m^3$ 当りのセメント量

が多いため、普通ポルトランドセメントを用いた場合、水和による発熱が大きくなって、温度ひび割れや長期強度の伸びの低下等の問題点が生じる。これを打破するために、低発熱の高ビーライト系セメントを高強度コンクリートに適用しようとする研究がなされた。その結果、高ビーライト系セメントには高性能AE減水剤が有効に作用し、流動性および長期強度に優れていることが判明して、高強度コンクリートの製造に低熱ポルトランドセメントを含むビーライト系セメントの利用が始まった。

製品としては、1992年に秩父セメントが「ハイフローセメント」として初めて商品化し、1997年に「低熱ポルトランドセメント」がJIS化された。

ビーライト系セメントについては、海外での先行例はあるものの、現在の高機能品は日本で開発されたセメントである。セメント化学の知見が基盤になって開発された様子を紹介するために、低熱ポルトランドセメントの特長を以下に整理して略記しておく。

①温度ひび割れの抑制に有効

水和発熱量が小さいためコンクリートの断熱温度上昇が小さく、発熱速度も小さいため、温度応力によるひび割れの抑制に有効である。

②長期材齢での強度発現性に優れる

長期強度発現性に優れたビーライト（ C_2S ）が多く含まれているため、長期にわたり強度が増進する。

③高強度・高流動コンクリート（注2,3参照）に最適

混和剤を吸着しやすい間隙質相が少ないため、単位水量や高性能AE減水剤（注4参照）の添加量が低減でき、高強度・高流動コンクリートの製造に好適である。低発熱のみならず、高強度・高流動化が可能なセメントの開発は、高性能AE減水剤の性能向上と相まって、高強度・高流動コンクリートの開発につながっていった。

④化学抵抗性に優れる

化学抵抗性の低いアルミネート相（ C_3A ）の含有量が少ないため、硫酸塩などに対する化学抵抗性が大きくなる。

⑤自己収縮（注5参照）が小さい

初期の体積変化の主原因となるアルミネート相（ C_3A ）の含有量が少ないため、他のセメントより自己収縮が小さくなる。

⑥中性化の抑制に有効である

高炉スラグ微粉末やフライアッシュを混合材として使用した混合系低発熱セメントと異なり、クリンカータイプのセメントであるため、コンクリートの

アルカリ性が長期にわたり保持され、中性化の進行を遅延させる効果が長く持続する。

(5) 耐硫酸塩ポルトランドセメント¹³⁾

硫酸塩に対する抵抗性を高めたセメント (sulfate-resisting cement) である。海水中や温泉地付近の土壌、下水、工場排水中や化学工場など、硫酸塩を多く含む環境で使用される。

ポルトランドセメントの硬化体は、硫酸塩を含む土壌、地下水、流水および海水中の硫酸塩にさらされると浸食作用を受ける。この浸食作用に抵抗性のあるセメントの研究は、欧州および北米では19世紀末から始まっていた。その後のセメント化学による理論的な裏付けと相まって、耐硫酸塩ポルトランドセメントが誕生したと言える。

ポルトランドセメントの構成成分である C_3A ($3CaO \cdot Al_2O_3$) は、硫酸塩と反応してエトリンガイトを生成する (7.5.1 (2) 項、図 7.4 参照)。このエトリンガイトは、生成するときに非常に大きな結晶成長圧を生じ、コンクリートやモルタルの組織を破壊して構造物の劣化を進行させる。したがって、耐硫酸塩ポルトランドセメントは、この C_3A が極めて少なくなるよう (JIS 規定は4%以下) に製造し、硫酸塩に対する化学的抵抗性を大きくしている。JIS 規格は1978 (昭和53) 年に公示された。

(6) 低アルカリ形ポルトランドセメント⁷⁾

セメント成分中の全アルカリ量を0.60%以下に抑えたセメントである。コンクリートに使用する骨材が、アルカリ骨材反応性について「無害であるとの判定ができない」場合などに使用できるよう規格化された。規格制定の経緯は、8.2.2 (6) 項で述べている。

(7) 白色 (ポルトランド) セメント¹⁴⁾

「白色セメント」は、文字通り色が真っ白なセメントである。しかし、化学的性質も物理的性質も普通ポルトランドセメントと差はほとんどなく、「JIS 普通ポルトランドセメント」と表示することも可能である。主な用途は、建築物の内外装仕上げ材、吹付け材、人造大理石、カラーセメント、景観コンクリート製品などに広く使われている。

製造上、普通ポルトランドセメントに比して特に重要な注意点は以下の3点である。

- ①原料には、酸化鉄や酸化マンガンなどの呈色成分の少ない石灰石や粘土類を選び、クリンカー中の着色成分である鉄分等を極限まで少なくする、

- ②キルン高温部 (焼成帯) の還元雰囲気中で第一鉄 (Fe^{2+}) になっている鉄分が、クリンカー冷却過程で酸化され第二鉄 (Fe^{3+}) になって発色することのないよう、還元雰囲気中で急冷する。

- ③原料やクリンカーの粉碎にはボールミルが使われるが、鉄分の混入を防ぐため、粉碎媒体は鉄製ではなく、セラミックス粉碎媒体などを使う。

世界最初の白色セメントは、1880年代にドイツのハイデルベルク工場で製造されたといわれる。これはアスプジンによるポルトランドセメントの発明から約60年後のことである。日本で初めて白色セメントを生産したのは小野田セメントの小野田工場 (山口県) で、1916 (大正5) 年であった。その後、需要は戦中・戦後の一時期を除き順調に伸び、国内の複数の会社・工場で生産されるようになり、昭和50年代 (1975年前後) には年間50万トンを生産するまでになった。しかしその後は、生産量の50%以上が振り向けられていた中東・東南アジアへの輸出競争力が落ちて、2015年現在では太平洋セメントの子会社・山陽白色セメント (広島県糸崎) でのみ生産されている。白色セメントの化学的・物理的性質などについては文献 (14) に詳しい。

8.3.2 JIS「混合セメント」規定のセメントの沿革¹⁵⁾

JISに規定されている混合セメントには、高炉セメント・シリカセメント・フライアッシュセメントの3種があり、これらに共通する特性は、長期強度が強く、化学抵抗性が大きく、水和熱が小さいことにある。これらの効果は、高炉セメントについては「潜在水硬性」が、シリカセメントやフライアッシュセメントについては「ポゾラン反応」が寄与している。そこで、各論に入る前に、混合セメントの機能を理解する上で重要な「潜在水硬性」と「ポゾラン反応」について、簡単に説明しておきたい。

<潜在水硬性>¹⁶⁾

高炉水砕スラグは、製鉄所の高炉から熔融状態で排出されたスラグを水で急冷した白色ないし褐色の軽石状の粒状物質である。

高炉水砕スラグは、単に水と練り混ぜただけでは硬化しないが、アルカリなどの物質と共存することによって水和反応を開始し、硬化する性質をもっている。これを「潜在水硬性」と呼び、アルカリが「刺激剤」と呼ばれる役割を果たしている。

高炉水砕スラグの場合、刺激剤のアルカリで溶液のpHを12以上にすれば潜在水硬性が顕在化してくる。

刺激剤により刺激を受けた高炉水砕スラグは、それ自体から溶出する Si、Ca、Mg や Al などのイオンが水和物を生成するとともに、溶出した成分により溶液の pH が維持されてイオンの溶解と水和物の生成が継続し、高炉スラグの水和反応が進行して構造体は硬化していく。

ポルトランドセメントクリンカーは、水和反応により $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が生じて溶液中の pH が 12 を超えることから、刺激剤として機能する。このことから、高炉水砕スラグをポルトランドセメントと混合し高炉セメントとして利用する、という形が成り立つ。

<ポゾラン反応>¹⁷⁾

ポゾラン (Pozzolan) とは、天然または人工の珪酸 (シリカ) 質の微粉末混和材のことである。シリカ (SiO_2) あるいはシリカとアルミナ (Al_2O_3) を主成分とし、それ自身は水で練っても硬化する性質はないが、水の存在下で水酸化カルシウム ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) と常温で反応して、不溶性の物質を生成し硬化する性質を示す。この現象を「ポゾラン反応」と呼んでいる。これは上記「潜在水硬性」とは似て異なるものである。アルカリにより SiO_2 が溶出し、その SiO_2 が CaO と反応して硬化する点では同じであるが、潜在水硬性材料はいったん反応が始まれば以降は自らの CaO で硬化が進むのに対し、ポゾランは自身では CaO を持たないので、水和物の生成・硬化に必要な CaO は外から供給する必要がある、という点で潜在水硬性材料とは異なる。

早強ポルトランドセメントや普通ポルトランドセメントでは、水和によって多量の水酸化カルシウム ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) を生成する。この $\text{Ca}(\text{OH})_2$ は強度発現にはあまり役にたたず、しかも珪酸カルシウムやアルミン酸カルシウムの水和物に比較して溶解度が大きく、長く水と接触していると溶出する可能性が大きくなる。そこで、可溶性のシリカやアルミナを含む混合材 (ポゾラン) をポルトランドセメントに加え、水和によって生じた $\text{Ca}(\text{OH})_2$ と化合させてケイ酸石灰やアルミン酸石灰の水和物を生成させ、安定化させる。結果的に、硬化体コンクリートの不透水性向上、化学抵抗性の増大、水和熱の低減、長期強度の向上などに寄与する。

ポゾランは人工と天然の2種類に分類される。人工ポゾランには、フライアッシュ、シリカフェーム、ライスハスクアッシュ (籾殻灰) などがある。天然ポゾランには、火山ガラスや粘土のようにシリカとアルミナを主成分とするものと、オパールや珪藻土などのシ

リカを主成分とするものに分類できる。

(1) 高炉セメント¹⁸⁾

製鉄所から出る高炉スラグ微粉末を、ポルトランドセメントに混合したセメントである。長期強度の増進が大きく、水和熱が低く、耐海水性や化学抵抗性に優れている。主にダムや港湾などの大型土木工事に使用される。

溶鉱炉から出る高炉スラグを水で急冷・破碎するとガラス質の砂粒状のスラグ (水砕スラグ) が得られる。ドイツの製鉄所技師長をしていたランゲン (E. Langen) は、この水砕スラグと石灰との反応を研究し、1862 年、水砕スラグに潜在水硬性のあることを明らかにした。

1870 年頃ドイツのミハエリス (7.4.1 (11) 項参照) が、「ポルトランドセメントに、火山灰等のポゾランや高炉水砕スラグを混ぜると、ポルトランドセメントの性質が改善される」という研究発表をした。すなわち、次の二つの発見をしたのである。

- ①それまでに知られていた生石灰・消石灰によるポゾラン反応効果や潜在水硬性刺激効果が、ポルトランドセメントから溶出する $\text{Ca}(\text{OH})_2$ でも、まったく同じように作用する。
- ②コンクリート中に残存する $\text{Ca}(\text{OH})_2$ をポゾランや高炉スラグが吸収することで、コンクリート硬化後に $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が溶出したり、空気中の CO_2 と反応して、コンクリートの劣化の原因になることが防げる。

このミハエリスの発見を受けて、1882 年、プリューシング (G. Prussing、独) が、ポルトランドセメントに高炉水砕スラグを 30% 混合した高炉セメントを、フォルヴォール (Vorwolle) セメント工場 (独) で始めて製造した。当時、発明者とドイツセメント協会との間で、セメントの純度について激しい議論が交わされたようである。

その後ドイツでは、1901 年にスラグ量 30% 以内の高炉セメントを「鉄ポルトランドセメント (Eisen Portlandzemente)」と命名、1909 年に規格化された。その後、G. プリューシングの子息 P. プリューシングが、高炉スラグの配合量 60~70% の高炉セメント (Hochofenzement) を 1907 年に生産、1917 年に規格化された。

日本では 1910 (明治 43) 年、当時の八幡製鉄所が高炉スラグ有効利用法の一つとして研究を始め、1913 (大正 2) 年から工場生産に入り、1918 (大正 7) 年にはクリンカーからの一貫生産体制を整えた。

1926（大正 15）年には規格も制定された。昭和 35 年（1960 年）改正された JIS の高炉セメントでは、スラグ量により A 種（30%以下）、B 種（30%をこえ 60%以下）、C 種（60%をこえ 70%以下）の 3 種がある。

(2) シリカセメント⁹⁾

天然のシリカ質混合材（JIS では SiO_2 を 60%以上含む材料と規定）を混合したセメントである。ポゾラン反応により、コンクリートの透水性・耐久性・化学抵抗性が改善される一方で、初期強度が低いことと、乾燥収縮がやや大きい点に留意する必要がある。

この種のセメントの起源としては、ギリシア・ローマ時代から中世を通じて使われてきた「消石灰にポゾランを加えた石灰モルタル」があるが、この消石灰をポルトランドセメントに置換えることを考えたのは前項・高炉セメントの項にも述べたように、ミハエリスである。19 世紀末には良質のポゾランに富むドイツ、イタリアなどで「ポルトランドポゾランセメント」として大量に使用されるようになった。

日本では 1899（明治 32）年、小野田セメントが、佐世保軍港船渠用に、重量比でセメント 3 に火山灰 1 を添加した混合セメントを出荷した。セメントの化学抵抗性（耐硫酸塩性）を高める目的であった。

大正年代（1910 年代）に花崗岩仮焼粉末を混合材にしたセメントが一時製造されたことがあり、その後 1935（昭和 10）年頃より数社のセメント会社から「珪酸セメント」などの商品名で生産が開始された。1940（昭和 15）年に「珪酸質混合セメント」として規格が制定され、1947（昭和 22）年の規格改正で「シリカセメント」と名称が変更された。現行 JIS では混合材の量により、A 種（10%以下）、B 種（10%をこえ 20%以下）、C 種（20%をこえ 30%以下）の 3 種が規定されている。

(3) フライアッシュセメント⁹⁾

主に火力発電所で石炭の燃焼時に発生するフライアッシュ（微粉状の石炭灰）のうち、良質なものを混合したセメントである。良質なフライアッシュは人工ポゾランの一種であり、ポゾラン反応により、長期強度の増進、乾燥収縮と透水性の減少、化学抵抗性の向上など、セメントの性質を改善する効果がある。また、粒子が球形なので、コンクリートのワーカビリティ（作業性）が向上する。主にダムや港湾などの大型土木工事に使用される。

フライアッシュを人工ポゾランとしてコンクリート

の混和材に使用する研究は、アメリカではすでに 1914 年頃には始まっており、1937 年頃より研究も盛んになり、1940 年頃からダムコンクリートに大量に使用されはじめた。

日本では 1950（昭和 25）年頃から研究が始まり、1956（昭和 31）年からは、ポルトランドセメントにフライアッシュを添加した混合セメントが「ポゾランセメント」の名で生産され始めた。1960（昭和 35）年の JIS 改正のさいに、「フライアッシュセメント」として規格が制定され、フライアッシュの混合量によりシリカセメント同様 A, B, C の 3 種が規定されている。

8.4 主役の交代：高機能コンクリートの主役はセメントから混和剤へ^{11) 19)}

セメントそれ自体に特別な機能・性能を付与する方法としては、①クリンカー鉱物を改良する、②セメントの粒度や粒子形状の調整する、の 2 方法がある。本章・第 8 章では「クリンカー鉱物の改良」によって、いろいろな機能をもったセメント品種が開発されてきたことを述べてきた。しかし、この方法によるセメントの高性能化・高機能化は一つの限界に達したとも見られる。クリンカーベースでの高機能セメントの開発は、現在では世界的にもほとんど行われなくなっている。

1995 年、内川浩博士（当時、秩父小野田顧問、長岡科学技術大学客員教授）は、「主役の交代」と題した論説を「セメント・コンクリート」誌に発表した¹⁹⁾。その論旨「コンクリートの主役はもはやセメントではなく化学混和剤である」は、セメント・コンクリート関係者の間に大きな反響を呼んだ。

コンクリートに新たな機能性を付与・改善する手段として、コンクリート混和材料、とりわけ化学混和剤の利用は今後さらに重要な役割を担うと考えられ、新しい機能を持ったコンクリートの開発においても、混和材料の使用、混和剤の性能向上、セメントの粒度や粒子形状の調整による手法が主流となっていくと考えられる。

そして今や、これまで培ったセメント製造技術やセメント化学の知識の蓄積は、セメント産業が 21 世紀の新たな使命「循環型社会貢献産業」を担うための技術開発の礎として、大きな役割を果しつつある。この点について、次の第 9 章で述べる。

（注）コンクリート混和材料は、本稿が対象とする「セメント製造技術」の範囲外であり、本稿でも上記に加え、1.1、2.4 で簡単に触れるにとどめて

いる。コンクリート混和材料の技術内容については、参考文献(20)などに詳しい。

注1: 「材料規定」と「性能規定」

規格の決め方には、材料を個別に規定する「材料規定」と、性能・品質が確保されれば材料は自由に選択できるとする「性能規定」がある。現在のセメント JIS 規格は基本的には材料規定であり、セメント中のアルカリ量の規定(0.75%)も、コンクリートを構成する他の材料(水、骨材、混和材・剤など)の規定とは事実上無関係に決められている。これに対して「性能規定」を採用した場合には、例えば「アル骨反応を防止するために、コンクリート中のアルカリ総量は Na_2O 換算で $3\text{kg}/\text{m}^3$ 以下とする」という形での規定になる。

規格を性能規定化することで、使用者側は施工技術や使用材料の選択幅が広がり、供給者側も市場(需要)環境に応じた材料供給ができるので、結果的に省資源・省エネにつながると考えられ、世界的には性能規定化が流れになっている。

注2: 高強度コンクリート²⁾

通常のコンクリートの圧縮強度は、例えば生コンの JIS でみると、「呼び強度 45」すなわち $45\text{N}/\text{mm}^2$ が最大値である。これに比較して強度が高いものを高強度コンクリートと称している。高強度コンクリートを使用すると鉄筋コンクリートなどの部材断面を小さくすることができ、結果として自重を軽減できる。このことから、橋梁、タンク、高層ビル、プレキャスト工場製品などに多く用いられている。

注3: 高流動コンクリート²⁾

施工性の改善等を目的として、コンクリートの流動性を高めたものを「高流動コンクリート」と称する。高流動コンクリートは、流動性ばかりではなく、材料分離抵抗性にも優れ、型枠の隅々まで充填でき、硬化後の強度や耐久性にも優れるなどの特徴をもっている。

高流動コンクリートは、コンクリート品質の信頼性向上、現場の省力化、打込み・締固め作業にともなう騒音の低減による労働環境の改善、ひいては施工システムの合理化などに効果がある。

注4: 高性能 AE 減水剤¹⁰⁾

高流動化剤とも呼ばれ、コンクリートの流動性を非常に高める混和剤(界面活性剤)である。この性質を利用して、通常のコンクリートと同等のワーカビリティを保ったままで、単位水量を減少させることができるため、高強度のコンクリートが得られる。

注5: コンクリートの収縮: 次の2種類がある:

<乾燥収縮>

コンクリートを施工するさいに添加された水のうち、水和に必要とした以外の水が、その後のコンクリートの乾燥により蒸発して、コンクリートが収縮する現象をいう。

<自己収縮>

セメントの水和反応終了(硬化)後、水和物の体積が、元の(セメント+水)の体積よりも小さくなる(収縮する)現象をいう。通常の場合、自己収縮量は乾燥収縮量の1/10程度だが、減水剤を使用した高強度コンクリートなどでは、自己収縮が問題になることがある。

参考文献

- 1) セメント協会, セメントハンドブック, 2014.
- 2) セメント協会, セメントの常識, 2013.
- 3) セメント協会, セメント規格がわかる本 - JIS 解説書「セメントの品質規格」編 2010年版, 日本規格協会, 2010.
- 4) 藤井光蔵, ポルトランドセメント発達の沿革 (1) - (18), セメント・コンクリート, No.105-130, 1955-1957.
- 5) 平野生三郎, わが国セメント規格の変遷, セメント・コンクリート, No.253, pp.41-47, 1968.
- 6) 村橋均次郎, セメント規格の変遷, セメント・コンクリート, No.500, pp.236-245, 1988.
- 7) 岡本英明, 低アルカリ形ポルトランドセメント, C^3 クリップボード, セメント協会, p.4, 2008.
- 8) 羽原俊祐, 材料開発の技術展開 セメント, セメント・コンクリート, No.700, pp.1-11, 2005.
- 9) 森 仁明, セメントの歴史, コンクリート工学, Vol.16, No.5, pp. 78-85, 1978.
- 10) 内川研究室, わかりやすいセメント・コンクリートの科学, 秩父小野田株式会社, 1995.
- 11) 平尾 宙, セメント化学の発展と貢献, 太平洋セメント研究報告, No.150, pp.5-28, 2006.
- 12) 名和豊春, 高ビーライト系セメントの現状, コンクリート工学, Vol.34, No.12, pp.16-25, 1996.
- 13) 鈴木論一, 硫酸塩抵抗性, コンクリート技術者のためのセメント化学雑論, セメント協会, pp.21-24, 1985.
- 14) 一坪幸輝, 田野崎隆雄, 友竹博一, 三浦啓一, 白色セメントの歴史と最新技術の動向, 太平洋セメント研究報告, No.154, pp.3-20, 2008.
- 15) 後英太郎, 新しいセメントとセメント技術, 誠文堂新光社, 1971.
- 16) 檀 康弘, 潜在水硬性, C^3 クリップボード セメント化学編, セメント協会, pp.115-116, 2008.
- 17) 川村政喜, ポゾラン, C^3 クリップボード セメント化学編, セメント協会, pp.107-108, 2008.
- 18) 鉄鋼スラグ協会, 高炉セメント百年史, 2010.
- 19) 内川 浩, 寸思寸言: 主役の交代, セメント・コンクリート, No.585, p.25, 1995.
- 20) コンクリート工学ハンドブック, I.材料編, 4.混和材料, pp.113-186, 2009.

9 | 資源循環型社会構築貢献産業への進化

日本のセメント産業は、1970年代頃から、産業廃棄物・副産物（注1参照）をリサイクル原燃料として大量に使用するようになってきた。当初は原燃料コスト削減の手段として始まったこの産業廃棄物の利用は、その後、産業廃棄物から都市ごみ等一般廃棄物のリサイクルにまで拡大し、地球環境問題に関する問題意識の高まりや、最終処分場の逼迫という差し迫った現実問題の中で、セメント産業の新しい役割、社会への貢献として高い評価を受けるようになってきた。

この第9章では、21世紀のセメント産業が、20世紀を通じて培ってきたセメント製造の設備・技術やセメント化学の知識を基盤に、「建設基礎資材供給の基幹産業」から、「持続型(Sustainable)社会・資源循環型社会構築を支える中核産業」へと発展しつつある姿を述べる¹⁾。

9.1では、セメント産業がどのような廃棄物を再資源化しているのか、なぜそれができるのかを述べ、9.2では、セメント工場で再資源化できる廃棄物の種類や量の拡大のために、新たに開発された主な技術について説明する。9.3では、2011年に発生した東日本大震災の災害廃棄物の処理に大きな貢献をした太平洋セメント大船渡工場（同工場自体も地震・津波で大被害を受けた）ほか、東北・関東地区のセメント工場の震災廃棄物処理への貢献を述べて締めくくる。

9.1 セメント工場を中心とした資源循環型システム^{2) 3)}

今日、日本のセメント産業が原燃料として再資源化して利用している廃棄物・副産物の量は、2012年度で2,850万トンにも達しており、わが国で最終処分（埋立）されている廃棄物量（12年度約1,300万トン）の2倍以上に相当する膨大な量である。では、どのような廃棄物・副産物がセメント工場で再資源化されているのか、なぜそれが可能なのかについて以下に述べる。

9.1.1 セメント産業で利用される廃棄物・副産物の種類³⁾

セメントクリンカーの製造には、主成分であるカルシウム、珪素、アルミニウム、鉄を多く含んだ原料が必要で、かつてはそのほとんどを天然原料に依存してきた。しかし、これらの成分を含んでいれば廃棄物や

副産物を天然原料の代替（代替原料）として利用することが可能である。また、廃タイヤ・廃油・廃プラスチックなどは高い発熱量を持っているため、セメント焼成に使用する燃料の補助（代替燃料）として活用できる（表9.1）。

表9.1 主な廃棄物・副産物の成分例³⁾

セメント原料 (廃棄物・副産物)	酸化した カルシウム CaO	二酸化 けい素 SiO ₂	酸化 アルミニウム Al ₂ O ₃	酸化第二鉄 Fe ₂ O ₃
石炭灰	5~20%	40~65%	10~30%	3~10%
焼却灰	20~30%	20~30%	10~20%	~10%
下水汚泥	5~30%	20~30%	20~50%	5~10%
鑄物砂	~5%	50~80%	5~15%	5~15%
廃タイヤ			~10%	5~20%
高炉スラグ	30~60%	20~45%	10~20%	~5%

セメント産業は、さまざまな廃棄物や副産物を活用する技術を開発し、代替原燃料として使っている（図9.1）。2012年度の全セメント工場の廃棄物・副産物等の受け入れ総量は年間約2,850万トンとなり、セメント1トンあたりの廃棄物・副産物の使用量は481kgとなった（図9.2、表9.2）。なかでも、表9.2に示すように、高炉スラグと石炭灰は使用量が多い。高炉スラグは発生量の約1/3をセメント産業で混合材や原料として用いている。石炭火力発電所から排出される石炭灰においては、発生量の約半分を原料や混合材として用いている。

9.1.2 セメント製造プロセスが廃棄物処理に適している理由³⁾

セメント産業は多種多様な廃棄物をセメント製造の原料や燃料として再資源化しているが、そのような再資源化ができるのは、次のような製造上の特長があるからである。

- (1) セメントキルンでの焼成温度が高いため、ダイオキシンやフロン等の有害物質は、分解・無害化される。



図9.1 セメント工場を中心とした資源循環システム³⁾

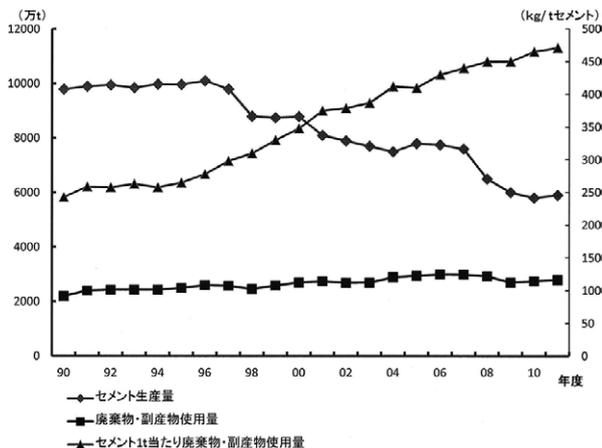


図 9.2 廃棄物・副産物使用量とセメント生産量の推移³⁾

- (2) セメント工場の有効利用エネルギー率は 80% と非常に高く (図 5.13)、焼却炉で焼却する場合に比べて、はるかに高いエネルギー利用率になる。
- (3) 廃棄物を燃やした後の灰中の成分は、セメント原料の一部となって回転窯内で焼成されセメントクリンカーとなる。従って、セメント工場での廃棄物の利用は二次廃棄物の発生を伴わない。

一方でセメントキルンは、1 年に数週間は連続して休転 (計画休転) し、内部に貼ってある耐火煉瓦などの補修・修理をする必要がある。高炉スラグ、石炭灰、焼却灰、廃タイヤ、廃プラスチックなどは、その間の在庫の保管にそれほど大きな問題はないが、下水汚泥や生ごみを受け入れる場合には、休転中の対応策について十分な事前検討が必要である。キルンが複数基ある工場の場合には対応がしやすいが、キルン 1 基の工場の場合には、自社他工場、場合によっては他社工場

への振替えも含めた工場間協力も選択肢となる。

焼却灰や廃油など、廃棄物によっては重金属などの有害物質が含まれていることもありうる。従って、セメント工場では、廃棄物の受入れ契約をする前に、以下のような点を徹底的に調査し、安全性を確認している。

- ①セメント製造工程で有害物質が大気中に排出される可能性がない。
- ②セメントが需要者のもとでコンクリートに使われ、あるいは土壌安定材として使われた時、有害物質が排水や土壌中に溶出する可能性がない。

これらの調査・検討にあたっては、過去に蓄積されてきた製造技術のノウハウやセメント化学の知識が総動員されている。また、受入れ開始後も、契約内容通りの廃棄物が納められているか、排煙や製品品質が管理基準内か、常に厳しくチェックが行われている。

以下、セメント製造プロセスで廃棄物を安全かつ大量に利用する目的のために、新たに開発された技術について述べる。

なお、表 9.2 に掲げられている廃棄物・副産物の内、特別な前処理なしでそのままセメント製造プロセスに投入できる廃棄物・副産物も多い。例えば、高炉スラグ、石炭灰、副産石膏、鋳物砂、製鋼スラグ、廃タイヤ、ボタなどである。

9.2 セメント産業における廃棄物再資源化技術²⁾

従来の廃棄物処理技術では再資源化することが困難な廃棄物を、セメント工場で処理してほしいとする要

表 9.2 セメント産業が活用している廃棄物・副産物の主な用途と使用量⁴⁾

種類	主な用途	1990年度	1995年度	2000年度	2005年度	2010年度	2011年度	2012年度	2013年度
高炉スラグ	混合材、原料	12,228	12,486	12,162	9,214	7,408	8,082	8,485	8,995
石炭灰	原料、混合材	2,021	3,103	5,145	7,185	6,631	6,703	6,870	7,333
汚泥、スラッジ	原料	312	905	1,906	2,526	2,627	2,673	2,987	3,206
建設発生土	原料	—	—	—	2,097	1,934	1,946	2,011	2,407
副産石こう	原料(添加材)	2,300	2,502	2,643	2,707	2,037	2,158	2,286	2,401
懸えがら(石炭灰は除く)、 ばいじん、ダスト	原料	478	487	734	1,189	1,307	1,394	1,505	1,405
非鉄鉱滓等	原料	1,233	1,396	1,500	1,318	682	675	724	770
木くず	熱エネルギー	—	—	2	340	574	586	633	657
鋳物砂	原料	169	399	477	601	517	526	492	461
廃プラスチック	熱エネルギー	—	—	102	302	418	438	432	460
製鋼スラグ	原料	779	1,181	795	467	400	446	410	423
廃油	熱エネルギー	141	107	120	219	275	264	273	273
廃白土	熱エネルギー	41	94	106	173	238	246	253	273
再生油	熱エネルギー	0	126	239	228	195	192	189	186
廃タイヤ	原料、熱エネルギー	101	266	323	194	89	73	71	65
肉骨粉	原料、熱エネルギー	—	—	0	85	68	64	65	63
ボタ	原料、熱エネルギー	1,600	1,666	675	280	0	0	0	0
その他	—	361	379	431	468	595	606	835	887
合計	—	21,763	25,097	27,359	29,593	25,995	27,073	28,523	30,265
セメント1t当たりの使用量 (kg/t)	—	251	257	332	400	465	471	481	486

注) 建設発生土は2001年度までは「その他」に含まれている。

請が、1990年代以降年々高まってきており、セメント会社における環境技術の研究開発が重みを増している。本節では、日本のセメント産業で技術開発され、実用化されている主な再資源化技術について述べる。

9.2.1 廃タイヤの代替燃料化²⁾

1978年から日本セメントはブリヂストンと共同で、廃タイヤをセメント製造工程で有効利用する研究に取り組み、サスペンションプレヒーター下部に廃タイヤ投入用シュートを設け、発熱量換算で全使用燃料の15%以下に相当する廃タイヤを、粉碎せずにそのままロータリーキルン内に投入する技術を確立した。この技術で特許を取得して⁵⁾、現在のセメント工場において大量の廃タイヤを有効利用する嚆矢になった(図9.3)。



図9.3 セメントキルンへの丸タイヤ搬送装置³⁾

本技術の特徴は次の5点である。

- ①プレヒーターのコーチングの成長やサイクロン詰まりを起こすおそれが少なく、排ガス温度の上昇もないので、長期安全運転の障害にならない。
- ②廃タイヤをそのままの形で燃料として使用するため、粉碎による騒音・振動の問題がなく、コスト上も有利である。
- ③廃タイヤの燃焼にともなう2次公害がない。むしろ、従来のセメント焼成におけるNO_xの発生量を減少できる。
- ④生産されるセメントの品質に全く悪影響を与えない。
- ⑤スチール入りの廃タイヤでもそのまま利用できる(鉄成分として原料になる)。

9.2.2 塩素バイパス^{6) 7)}：セメントキルンでの廃棄物大量処理の道を拓いた大発明

セメントの原料や燃料から持ち込まれる塩素、アルカリ、硫黄などの揮発性成分は、キルンおよびプレヒーター系内で循環する。この循環により、特に塩素成分はやがて150倍前後に濃縮され、低融点物質を生成してプレヒーター内壁面へのコーチングを形成する。その結果、通風抵抗の増加やサイクロン詰まりなどのトラブルを引き起こし、キルンの安定運転を損う原因となっていた。

一方、環境保全ならびに資源の有効活用を目的として廃棄物の代替原燃料化が推進されるにつれて、従来にも増してセメント焼成系にインプットされる揮発性成分、特に塩素量が増加してきて、キルンの安定運転の面からも、廃棄物受入量拡大の面からも、効果的に塩素を除去する技術の開発が望まれていた。

このような状況を背景に、秩父セメントはキルン・プレヒーター系からの効率的な塩素除去を目的とした独自の「塩素バイパスシステム」を開発、1990年に1号機を秩父工場に設置した。

この塩素バイパスシステムは、厳密な解析のもとに設計されたプローブ(煙道ガス吸引器)を用いて窯尻ガスの一部を抽気し、そのガスを即座に塩素化合物の凝固点以下まで急冷することによって、塩素化合物を凝縮固化させて抽出・回収するシステムであり、次のような特長を持つ：

- ①塩素成分が最も濃縮されている位置で、かつダスト濃度が低い位置を特定して、そこから抽気するので、系内に持込まれた塩素の大部分を、極めて少ない抽気率で系外に取り出すことができる。一方で、セメント原料として有効な成分を多く持つダストは吸引されにくく、従って熱損失も少ない。
- ②抽気して即座に300℃以下に急冷するので、ダイオキシン類の再合成は起こり難い。
- ③システム内に適切な分離粒子径をもつサイクロンを設置し、塩素含有率の少ない粗粒はキルンに戻すシステムである。その結果、キルン系外に排出される塩素含有ダストの量はクリンカー生産量の0.1%以下と少量であり、そのまま仕上工程でセメントに少量添加することで工程内消化されている。

この塩素バイパスシステムの開発によって、塩素分を含む廃棄物の処理能力が大幅に増加した。一例としてあげれば、塩化ビニールが多い廃プラスチックは、受入れを断る事例が多かったが、塩素バイパスを設置

した工場ではその許容度が大きく拡大した。かつては塩素のキルン系への入量は、プレヒーター内部のコーチング生成など「工程トラブル」が制約要因であったが、今日ではJIS規格の「セメント中の塩化物イオン量」が制約条件になってきている（8.2.2 (7) 参照）。

このシステムは、開発した秩父セメント、合併後の太平洋セメントの全てのキルンに設置されているほか、技術導出先の太平洋エンジニアリング社およびTechnip社（フランスの総合エンジニアリング会社）を通じて、国内外のセメント会社に広く採用され続けている。SP・NSPキルンの泣き所であった「低融点塩化物の蓄積によるサイクロン詰りなどの工程トラブル」の発生を劇的に減少させるのみならず、セメントキルンでの廃棄物大量処理の道を拓いた日本発の大発明の一つである。

9.2.3 廃プラスチックの代替燃料化^{2) 3)}

「廃プラスチック」と一語で表現はされても、廃棄物として排出されるプラスチックは、種類・形状から汚れの程度までまさに千差万別であり、排出側の自治体や企業と、受入れるセメント工場側で十分に打ち合わせて、受入方法、粉砕機選定を含めた受入設備の内容を決めるのが一般的である。ここでは、廃プラスチックを回転窯の補助燃料として窯前吹込みする技術を開発したトクヤマの例と、プレヒーターの仮焼炉用の補助燃料に利用する技術開発をした太平洋セメントの例を、技術開発の参考例として記す。

トクヤマ（山口県）は、1992年に国内セメントメーカーで初めて廃プラスチック（廃プラ）のサーマルリサイクルを目的に廃プラの燃料化の技術開発に着手、破碎された廃プラを回転窯前部（窯前）より安定的に大量に吹き込む技術を開発、1999年に廃プラ燃料化（破碎）プラント（破碎能力：15,000トン/年）を設置した。この技術は、2002年度経済産業省産業技術環境局長賞を受賞した。その後も、同社は廃プラの受入拡大要請にこたえる形で順次プラントの増設を行い、2015年時点では125,000トン/年の廃プラの受入破碎、燃焼能力を有するまでに増強されている。

もう一つの例として、太平洋セメント熊谷工場（埼玉県）におけるポリエチレンフィルム廃材受入のための技術開発のケースについて述べる。

技術開発に当たっては、補助燃料としての使用場所を、サスペンションプレヒーターの仮焼炉用の補助燃料に使うことを目的に定め、電気炉による燃焼試験および熱流体シミュレーションによる熱解析を行い、空間燃焼のための諸条件を検討した。その結果、次のよ

うな知見を得た。

- ①固定炭素をほとんど含まないポリエチレンの燃焼形態はガス化燃焼であり、液滴燃焼と同等と見なせる。
- ②仮焼炉内でポリエチレン粒子を空間燃焼させるためには、吹込み速度が重要であり、20m/secではポリエチレン粒子の質量が0.5mgを超えると炉壁に衝突してしまうが、10m/secでは3.5mgまで、5m/secでは4.0mgまでの粒子が空間燃焼可能である。

以上の予備実験を踏まえ、1999年、廃プラスチックの前処理設備を設置した。異物混入や粉碎品の容重変化等の初期トラブルを解決して、以降安定運転を継続している。

9.2.4 下水汚泥のセメント資源化技術²⁾

下水汚泥のセメント資源化についても、セメント各社がそれぞれの工場の立地条件や下水処理場の施設の状態などを加味して、受入れを行っている。最大の問題は臭気・衛生対策であり、またキルン系統の休転中の対応方法をしっかりしておく必要がある。一般的には、下水汚泥を下水処理場から、例えばアームロール車のような密閉式タンクのトラックで直接セメント工場の密閉タンクに受け入れ、そのままキルン内に送入する「生取り」と言われる方法が採用されているようである。

9.2.5 都市ごみのセメント資源化技術²⁾

都市ごみは、そのほとんどが焼却され、焼却残渣（焼却灰）は埋立て処分されている。しかし1990年代には、埋立て処分場の逼迫が社会問題になり、都市ごみを再利用する技術の開発が急務とされた。このような社会的要請の中で、都市ごみのセメント資源化を目的として開発された3件の技術を紹介する。いずれもその後実機プラントで運転中であり、循環型社会形成に大きく貢献している。

- (1) 灰水洗システム
- (2) エコセメント
- (3) AKシステム

これら3件の技術は、いずれも日本で独自開発された循環型社会構築貢献技術である。今後、海外において日本と同様の都市ごみ問題が生じてくるような国・地域が出てくれば、技術導出などの機会も生まれてくるであろう。

(1) 灰水洗システム²⁾

図 9.4 に灰水洗システムの代表的なフロー図を示す。

焼却残渣をポルトランドセメントの原料として使用する場合に、もっとも問題となるのは焼却残渣に含まれる塩化物である。焼却残渣はボトムアッシュ（焼却灰、主灰）およびフライアッシュ（煤塵、飛灰）の2種類に分類される。主灰に含まれる塩化物イオンは0.4～3%程度と低く、セメントキルンで気化した塩化物を除去する「塩素パイパス」を駆使することによって、脱塩処理をせずに直接セメント原料に使用することが可能である。一方、飛灰には5～20%程度の高濃度の塩化物イオンが含まれているため、前処理をせずセメント原料に直接使用することは不可能であり、セメント原料化には脱塩処理が必要となる。飛灰に含まれている塩化物はそのほとんどが水溶性であることに着目して、秩父小野田（現・太平洋セメント）では、水洗による脱塩技術の開発に着手した。以下にその開発経緯を略記する。

ごみ焼却炉にはストーカ炉と流動床炉がある。いくつかの焼却場からそれぞれの形式の炉の飛灰を得てラボテストの結果、水洗だけではほぼ全量の塩化物イオンを抽出できる飛灰もあるが、飛灰によっては塩化物の一部が不溶性のフリーデル氏塩 ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) を形成しており、水洗だけでは脱塩率は低い値を示した。フリーデル氏塩は酸性溶液中で分解されることは既知であり、飛灰の懸濁液へ二酸化炭素を吹き込みながら洗浄することで、高い脱塩率が得られることを実験的に確認した。二酸化炭素源としてキルン排ガスが使えることも確かめた。しかも、キルン排ガスの吹き込みによってフリーデル氏塩が分解されるだけでなく、溶出したカルシウムイオンが炭酸イオンと結合して炭酸カルシウムを生成することも分かった。かくし

て、フリーデル氏塩を含有する飛灰でも、キルン排ガスの二酸化炭素を用いることによって高い脱塩率を達成できることが判明した。また、飛灰を水洗・ろ過して発生するろ液については、キルン排ガスを吹き込んでpHを7.2～10.2に調整処理した場合、2次ろ液では水銀以外の重金属類は全て検出限界以下になることを確認した。

一方で、飛灰が加湿されたまま日数を経ると、水和反応が進行して固化が進むとともに、フリーデル氏塩の含有量が増加することも判明したので、飛灰は乾燥した状態のままセメント工場に持込むよう、ごみ焼却場側に依頼することにした。

以上のラボテストの結果を基にして飛灰水洗脱塩実証プラントを設計し、1998年に熊谷工場内に設置した(図9.5)。塩化物イオン濃度が15%程度の熊谷衛生センターの飛灰を、水洗脱塩処理して得たケーキ中の塩化物イオン濃度は0.5%以下になり、脱塩率は97%であった。



図 9.5 灰水洗設備¹⁰⁾

水洗脱塩処理によって発生するろ液の処理は、キルン排ガスによる中和法のほか、さらに安全を図るため

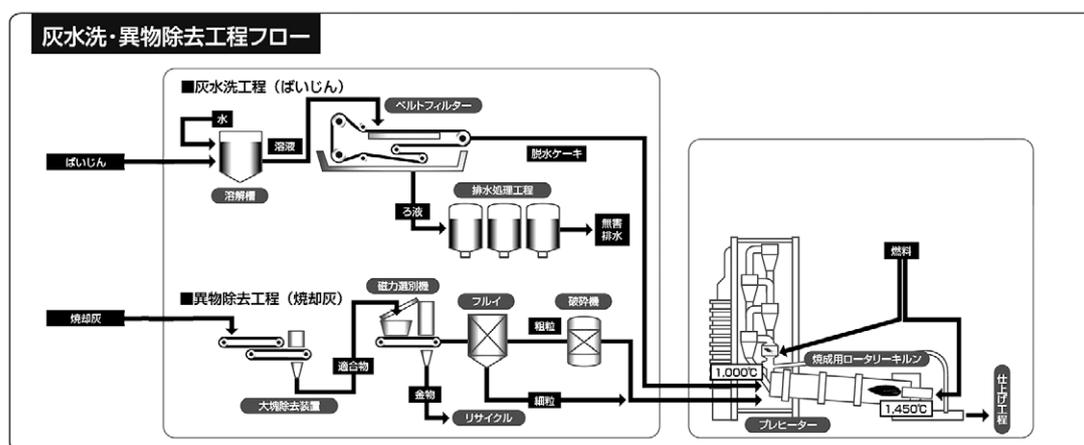


図 9.4 灰水洗システムのフロー図⁹⁾

に液体キレートによる処理、砂ろ過槽による高度ろ過、水銀キレート樹脂による処理などの装置が設置されている。この結果、処理した排水の分析結果は、いずれの数値も規制値をクリアしていることを確認し、「灰水洗システム」技術として実用化された。水洗後のろ布上の固形分と、ろ液からpH調整で沈降・分離・ろ過された固形分は、セメント原料として使用され、処理後の排水は下水道に流される。

(2) エコセメント²⁾

「灰水洗」と同じく、都市ごみや下水汚泥の焼却灰をセメント原料としてリサイクルすることを目標に開発されたのが「エコセメント」である。

都市ごみ焼却灰をセメント原料として利用する際、灰の中に含まれている塩化物が、製品であるセメントの品質の障害となることについては、すでに述べてきた。エコセメントの研究開発の第一段階では、塩化物を水硬性鉱物「カルシウムクロロアルミネート($11\text{CaO}\cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3\cdot \text{CaCl}_2$)」の構成元素として利用する「速硬エコセメント」が開発された。しかし、速硬型だけでは製品(セメント)の用途に限られるので、より汎用性のあるセメントを目指して開発が続けられた。その結果、塩化物を製造工程で重金属類とともに分離・回収し、塩化物の含有量を普通ポルトランドセメントに近いレベルにまで低減した「普通エコセメント」が開発された。

エコセメント製造の実証試験は、1994年通商産業省(現・経済産業省)の事業である「生活産業廃棄物等高度処理・有効利用技術研究開発」のプロジェクトの一つとして採択され、「都市型総合廃棄物利用エコセメント生産技術」の研究開発として、国庫補助を受

けて開始された。この実証試験の成果を基にして、世界初のエコセメント施設として千葉県市原市に「市原エコセメント」の実操業プラントが2001年に稼働した。千葉県の人口の約1/4に当たる150万人分の焼却灰を主原料にして、年間約11万トンのエコセメントを生産できる。続いて、2006年には、東京都西多摩郡日の出町で、東京都三多摩地区25市1町の焼却場の灰を処理する「東京たまエコセメント化施設」が稼働を開始した。多摩地域(人口約390万人)から発生するごみの焼却残渣(年間約9万トン)を主原料として年間約11万トンのエコセメントを生産できる。東京たまエコセメント化施設の写真を図9.6に、フローチャートを図9.7に示す。

都市ごみ焼却場から排出された「焼却灰(主灰)」と「焼却飛灰(ばいじん)」は、エコセメント工場で受け入れた後、天然原料である石灰石等とともに堅型ミルで混合・乾燥・粉砕されて粉末状の原料となり、「原料成分均斉化タンク」へ圧送される。ここで均斉化された原料は、ロータリーキルンへ送られ、1350℃以上で焼成されセメントの半製品であるクリンカーになる。クリンカーはセッコウとともに混合粉砕されてエコセメントになる。一方、焼成工程の排ガスは、冷却塔で冷却された後、サイクロン、バッグフィルター



図 9.6 東京たまエコセメント化施設¹¹⁾

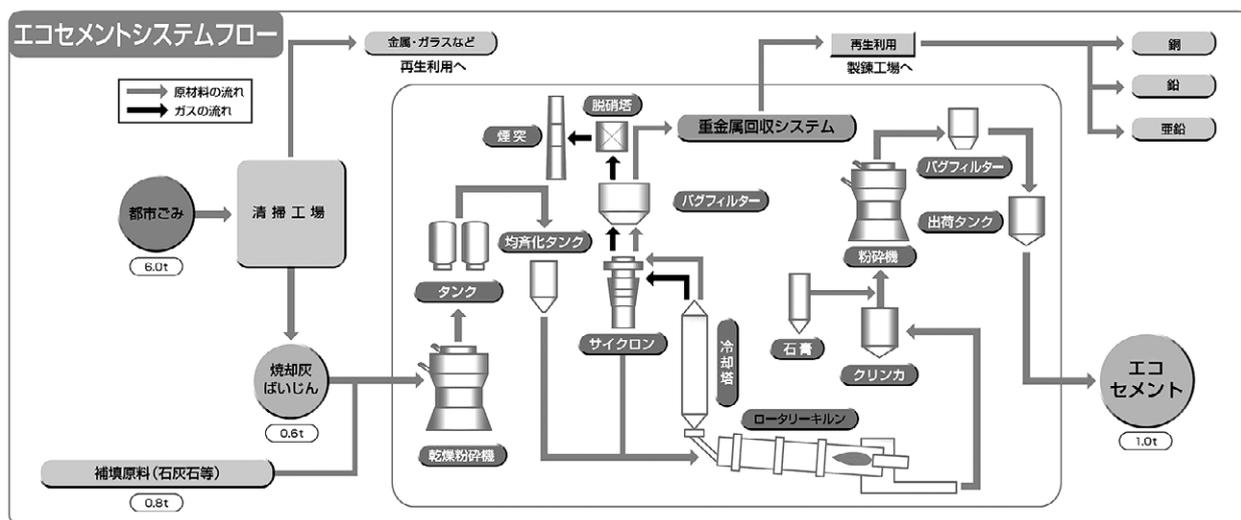


図 9.7 エコセメント製造工程⁹⁾

でダストを回収し、さらに脱硝塔で窒素酸化物を除去して大気放出される。バグフィルターで回収されたダストには、重金属含有塩化物が含まれているので、重金属回収工程（後述、9.2.6）に送り、鉛、亜鉛および銅を含む「人工鉱石」として再資源化される。

エコセメント製造工程が、普通セメントのそれと大きく異なるところは次の3点である。

- ①原料はプレヒーターを通さず、直接キルンへ送入することにより、ダイオキシン類を即時に分解する。
- ②冷却塔により、ダイオキシン類の再合成を防止する。
- ③塩化揮発法による重金属類の回収および塩化物除去を行い、最終的には重金属塩化物から重金属を抽出、再資源化する。

以上の工程で製造されるエコセメントは、2002年にJIS規格が制定された。普通ポルトランドセメントに近い性質を持つ「普通エコセメント」と、速硬性を示す「速硬エコセメント」の2種類に分類される。

「普通エコセメント」の品質規格は、普通ポルトランドセメントとほとんど同じであり、違いは三酸化硫黄(SO₃)量と塩化物イオン量の上限のみである。塩化物イオン量の上限（普通ポルトは0.035%以下、普通エコは0.1%以下）についても、欧州においては「普通セメント」中の塩化物イオン量の基準が0.1%以下(EN197-1:2000)であることを勘案すれば、コンクリート中の塩化物イオン含有量について多少注意を要するものの、一般的な用途では「普通エコセメントは普通ポルトランドセメントとほぼ同等の品質である」という感覚で使用することが可能である。

一方、速硬エコセメントは早強ポルトランドセメントよりさらに早く固まるセメントで、早期に強度が発現する特徴を持ち、無筋コンクリート分野で使用が可能であるが、2015年時点では生産されていない。

(3) AK システム²⁾

灰水洗システムおよびエコセメントは、都市ごみを焼却場で焼却処分したときの「焼却残渣をセメント資源化する技術」である。一方、近年では、ダイオキシンの問題等もあって、焼却炉の建設そのものが難しくなっている。そこで、都市ごみをそのままセメント工場に受け入れてセメント資源化するために、太平洋セメントが「AK システム (Applied Kiln System)」を開発、2002年から商業運転を開始した。その開発過程を以下に略記する。

このシステムの中核となる都市ごみ生分解工程に

は、米国などで実績を有するベドミンスター社 (Bedminster AB、スウェーデン) 保有の「ロータリーキルンを用いた好気性発酵処理技術」に着目した。同社のロータリーキルン型「エワソン発酵装置」(Eweson Digester) は、事前の調査から、もし都市ごみのセメント原料化プロセスとして使えば、大きなメリットがあると判断されたが、技術導入するには、以下の項目を確認する必要がある。

- (1) 当該技術は日本のごみを同様に処理できるか。
- (2) 日本での事業においては、下水汚泥を使用せず、都市ごみのみを処理する可能性もある。当該技術は都市ごみ単独処理でも同様の効果を発揮するか。

そこで、当該技術の有効性確認を目的として、ベドミンスター社保有の設備（所在地：スウェーデン）を用いて、1999年12月に技術確認試験を行った。試験には、実験施設所在地の収集ごみを主として用いたが、ごみの中身を、最初の実機プラントを想定していた埼玉県日高市の可燃性一般廃棄物と同様の組成に調製したうえで実験に供した。実験装置所在地のごみはビニール袋に入れられた状態であったが、発酵装置へそのまま投入しても、3日間の発酵処理後に排出された段階では内容物は全て袋から出ていたので、十分な破袋効果があると判断した。また、段ボールや紙おむつもそのまま投入したが、発酵装置の排出時にはばらばらに細分化されて、ハンドリング性に優れた状態になっていたことから、細片化効果も十分であることを確認した。発酵処理物中の大腸菌群数は 2.5×10^2 MPN/g（乾重量）以下と、米国環境保護局 (USEPA) で規定しているコンポスト処理物の病原性の安全基準 1.0×10^3 MPN/g（乾重量）を十分に満足していた。このことは、発酵装置投入後の温度上昇（1日後に45～50℃）で、都市ごみ中の病原菌が殺菌可能であることを示唆した。このような試験の結果、エワソン発酵装置を応用することにより、都市ごみのセメント資源化プロセスの確立が可能であることを確認し、2000年7月にエワソン発酵装置および運転ノウハウに関する技術導入契約をベドミンスター社と締結した。

この発酵処理技術を基に、以下の①②③を設計の基本思想にした「AK システム」の技術を、太平洋セメント独自の技術として確立した。

- ①家庭から排出されたごみや事業系一般ごみをそのままセメント工場に受け入れ、
- ②セメント焼成キルンを改造した「資源化キルン」で好気性発酵を行った後、

③セメント原料としてリサイクル活用する。

2001年3月より1年間にわたりAKシステムによる都市ごみセメント資源化処理の実証試験を、太平洋セメント埼玉工場（日高市）で行った後、2002年11月から同工場で営業運転を開始した。図9.8に太平洋セメント埼玉工場のAKシステムの全体写真を示す。

日高市は、老朽化していたごみ焼却炉の建替えを止め、可燃性の一般ごみを全て太平洋セメント埼玉工場に処理を委ねることにした。一方、セメント工場側は、需要減少で遊休化していたキルンを「資源化キルン」に転換することで再活用ができた。

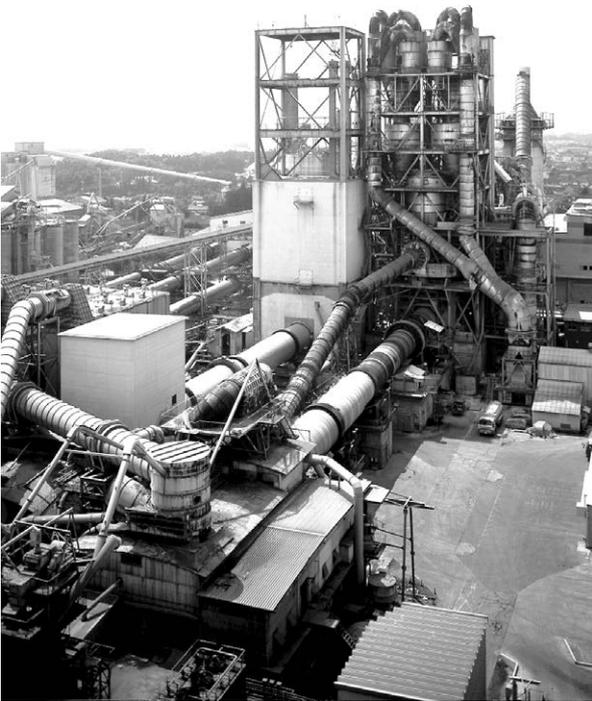


図 9.8 AKシステム：太平洋セメント埼玉工場⁹⁾
2本の回転窯のうち、左側が「ごみ資源化キルン」、右側が「セメント焼成キルン」

図9.9にAKシステムによるセメント製造工程図を示す。AKシステムでは、直接セメント工場に持ち込まれた都市ごみは、まず「発酵工程」で「資源化キルン」に送られる。資源化キルン内で、ごみ袋は破られ、臭気がなく、篩分け・磁選・粉碎等が容易に行えるハンドリング性の良好な「資源化物」になる。続く「破碎・分別工程」では、資源化物中の鉄類を磁選機により除去した後、ハンドリングし易い30~40mm程度の大きさまで破碎する。続く「焼成工程」では、資源化物中のプラスチックなどの可燃分は、セメント焼成のための燃料代替として有効利用される。一方、焼成残渣はそのまま原料の一部として回転窯内で焼成され、クリンカー中に取り込まれる（代替原料）。また、

セメント焼成キルンは1450℃の高温で連続運転しているため、都市ごみ燃焼によるダイオキシン類などの発生はない。

このように、AKシステムは、ごみ焼却炉と最終処分場が不要になり、焼却によるダイオキシン類の発生もなくなったことから、循環型社会にマッチした新しい処理技術として多方面から注目を集めている。

9.2.6 重金属含有塩化物の回収技術²⁾

セメント工場では、1990年代までは、塩化物や重金属の含有量が少ない廃棄物を中心に受け入れてきた。しかし、セメント産業の環境事業の拡大にともなって、焼却飛灰のように塩化物や重金属を含有している廃棄物の受け入れの要請が強くなってきている。

そのため「灰水洗システム」や「エコセメント」のような塩化物に着目した処理技術と同時に、塩化物を構成している重金属に着目した技術開発にも取り組んできている。ここでは、エコセメント工場で発生する重金属含有塩化物の処理技術を紹介する。

エコセメントの製造工程において、原料である都市ごみ焼却灰に含まれている重金属は、焼成工程の回転窯の中で塩化揮発して、バッグフィルターで捕集される。この捕集された重金属含有塩化物から、鉛、亜鉛、銅を抽出して非鉄製錬原料として再資源化すると同時に、カルシウム等も回収してセメント原料として再利用する処理システムが開発された。この処理システム「HMX（Heavy Metal Extraction）システム」は、大きく次の5つの工程で構成されている。

- ①脱アルカリ工程：バッグフィルターで回収した重金属含有塩化物に水を添加して混合することにより、約80%含まれている可溶性の塩化物（NaCl, KCl）を溶出させる。固形分量が約1/5に減容化されるので、以降の工程の装置をコンパクトにすることができる。
- ②銅イオン・亜鉛イオンの溶出工程：脱アルカリ工程で固液分離した残渣に硫酸を添加し、銅イオンと亜鉛イオンを溶出させる。
- ③鉛イオンの溶出工程：②の工程で固液分離した残渣へ水酸化ナトリウム水溶液を添加し、鉛イオンを溶出させる。残渣は水酸化カルシウムなので、セメント原料に戻す。
- ④鉛・銅・亜鉛化合物の析出工程：②と③の工程で固液分離したろ液を混合してpH調整することによって鉛・銅・亜鉛化合物を析出させて回収する。
- ⑤排水水処理工程：④の工程の廃液は、排水基準を

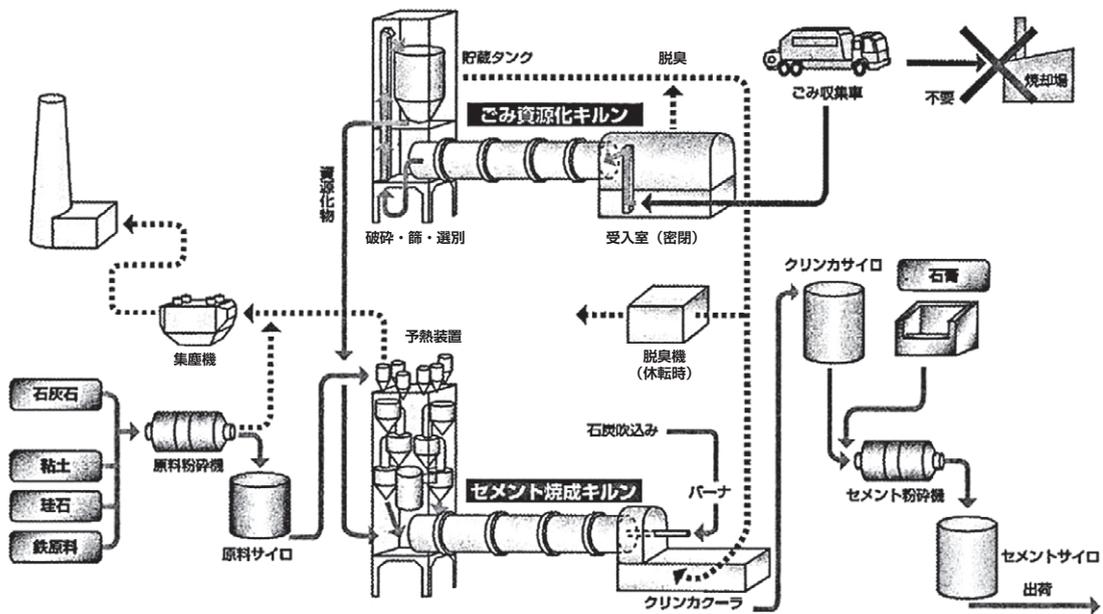


図 9.9 AK システムによるセメント製造工程図⁹⁾

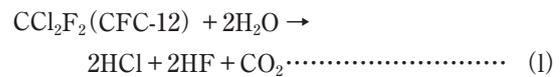
満足するように処理する。

②の工程の残渣物中にはカルシウム成分が含まれているので、添加された硫酸水溶液と反応して硫酸カルシウムが生成する。その結果、②の工程で固液分離して得られる残渣物の主成分は硫酸カルシウムであり、その中に硫酸鉛が少量含まれている。③の工程で添加される水酸化ナトリウム水溶液は、鉛イオンを溶出させるだけでなく、硫酸カルシウムを水酸化カルシウムへ転化させる効果もある。同じカルシウム成分でも、硫酸カルシウムより水酸化カルシウムのほうが、セメント原料として好ましい。この方法によって残渣物のセメント原料への再資源化を可能にしていることが HMX システムの大きな特長である。ミニプラントを設置してスケールアップの技術を蓄積後、2006年に稼働した東京たまエコセメント化施設に採用された。

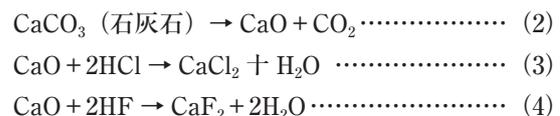
9.2.7 フロンの破壊処理：世界最初のセメントキルン利用破壊技術²⁾

フロンは、オゾン層を破壊する物質として、1990年代から日本を含む世界各国で厳しい法的規制が行われるようになった。そのようななか、安全で確実なフロン破壊処理技術の確立が重要な課題になっていたため、セメントキルン法によるフロンの処理技術の確立に向けて、秩父小野田（現・太平洋セメント）は、1994年度から東京都と共同研究に着手し、世界で初めてセメント焼成炉によるフロン破壊に成功した。セメントキルン法は「オゾン層の保護に関するモントリオール議定書締結国会議」で承認された技術の一つである。その処理の概略は以下のとおりである。

フロンは 900℃ 以上で分解するため、焼成帯の温度が 1500℃ 程度となるセメントキルンに投入することによって、式 (1) に示したような分解反応を起こし、塩化水素とフッ化水素を発生する。



発生した塩化水素およびフッ化水素の酸性ガスは、セメントキルン内を通過する間に、セメント原料や原料ダストのアルカリに吸着され、式 (3)、式 (4) のような反応によって、塩化カルシウムやフッ化カルシウムを生成し、最終的にはセメント中に取り込まれる。



この処理方法は、破壊効率が 99.99% 以上と非常に高く、そのうえ、上述したようにフロンの分解により発生する有害ガス（塩化水素、フッ化水素）はセメントクリンカー中に取り込まれるため、排ガス処理も不要であるという特長を持っている。

この技術は太平洋セメント秩父第 2 工場で実作業していたが、セメント需要減少による同工場のセメント生産中止（2010 年 9 月）で、フロン処理も中止せざるを得なくなった。

9.3 東日本大震災の災害廃棄物処理に活躍したセメント工場¹²⁾

2011 年 3 月に発生した東日本大震災では、巨大地震に加え、津波の発生により、これまでの災害をはる

かに超えた巨大被害が、太平洋沿岸を中心に広範囲に発生した。震災の後には、混じりあってしまった多種多様の地震・津波の災害廃棄物・堆積物が、13道県239市町村（福島県の避難区域を除く）において、災害廃棄物は20,188千t、津波堆積物は6県36市町村において11,016千tも発生した。津波の影響で廃棄物には塩分が混入し、その後の復興処理に大きな阻害要因となった。

岩手県では災害廃棄物処理計画の作成に当り、「県内外のセメント工場で災害廃棄物をセメント原料として処理すること」を計画の中核に位置づけた。その理由として県は、以下の3点を挙げた：

- ①既存の設備で一度に大量の災害廃棄物を処理でき、迅速な対応が可能である。
- ②災害廃棄物焼却灰の埋立処分量の削減が可能になる。
- ③廃棄物処理で製造されたセメントを復興資材として供給できる。

岩手県大船渡市にある太平洋セメント大船渡工場は、工場自体が津波で大きく破壊され、操業不能になってしまったが、工場復旧と災害廃棄物処理事業の立上げを同時に取組み、セメント生産ライン復旧に併せて、災害廃棄物のセメント資源化を可能とする「災害廃棄物除塩システム」を開発し、実機設備（図9.10）を建設稼働させ、県との契約期限である2014年3月末までに、約95万tを超える災害廃棄物の受入れ処理を完了した。

この除塩システムで水洗処理した除塩後の災害廃棄物は、土・砂・可燃系・不燃系と4種類に分別された。このうち、土や砂は、岩手県の復興資材活用マニュアルに適合するよう改質を行い、県の災害復興事業に利用する「災害廃棄物の土工資材化」という新たな処理事業を開始し、セメント資源化との2本柱の取組みにより処理量を増大することができた。



図9.10 災害廃棄物除塩システム
太平洋セメント大船渡工場（筆者撮影）

その他、東北地方にあるセメント工場では、三菱マ

テリアル岩手工場（一関市）、八戸セメント（青森県八戸市）が、広域処理として種々の廃棄物処理を行った。また太平洋セメント熊谷工場、同・埼玉工場、三菱マテリアル横瀬工場（埼玉県秩父市）、同・青森工場（八戸市）は広域処理として木屑の処理を行うなど、東北・関東東部のセメント工場が災害廃棄物の処理に貢献した。

2013年夏、天皇・皇后両陛下が東北被災地の復興状況を視察された際、太平洋セメント大船渡工場にもお立ち寄りがあり、災害廃棄物処理の運転状況を見学された。この行幸啓は、国・県、そして地元自治体が、セメント工場の災害廃棄物処理に対する貢献を非常に高く評価してくれているがゆえに実行されたビッグイベントとして、セメント業界全体が「業界の名誉」と受け止めている。

注1： 廃棄物・副産物

セメント工場が「代価を支払って購入する代替原料」を「副産物」、「処理費をいただいて受け入れる代替原料」を「廃棄物」と呼称している。副産物の例としては、高炉スラグ、副産石膏などがある。

参考文献

- 1) 下田 孝, 21世紀のセメント・コンクリート研究開発とセメント産業の役割, セメント・コンクリート, No.635, 2000.
- 2) 三浦啓一, 環境分野の研究開発, 太平洋セメント研究報告, No.150, 2006.
- 3) セメント協会, セメントの常識, 2013.
- 4) セメント協会, セメントハンドブック, 2014年版, セメント協会, 2014.
- 5) 津田昭一, 菊地元一, 島崎忠俊, 辻敏夫, 植田俊朗, 蒲谷正道, 特公平1-32175「セメントクリンカの製造方法」.
- 6) 伊藤光弘, セメント製造技術の研究開発, 太平洋セメント研究報告, No.150, 2006.
- 7) 上野直樹, 原田 宏, 須藤勘三郎, 塩素バイパスシステムによるセメントキルンの安定運転と廃棄物の有効活用, セメント・コンクリート, No.634, Dec. 1999.
- 8) トクヤマ (株) ホームページ, 2015年10月.
- 9) 太平洋セメント (株) 提供
- 10) 太平洋セメント (株) ホームページ, 2015年9月.
- 11) 東京たま広域資源循環組合 提供
- 12) 近藤秀貴, セメント業界の果たす役割, コンクリート工学, Vol.53, No.1, p.97-101, 2015.

10 | まとめ：セメント製造技術の系統化

以上、第9章まで述べてきたセメント製造技術発展の大きな流れを、別図として「日本におけるセメント製造技術系統図」にまとめた。図の単純化を図るために、対象を我が国のセメント製造技術に絞って描いている。19世紀初頭の英国でのポルトランドセメントの発明から20世紀中期までの欧米のセメント製造技術の発明や開発は、それをお手本とした日本での技術の進展を見ることで、系統的な理解が十分可能であると判断している。20世紀後半には、技術的には日本は欧米と肩を並べ、1980年代以降は世界をリードする立場になっている。この流れを理解する一助とする目的で、本稿の末尾には別表として「セメント製造技術史年表」を添付した。

ポルトランドセメントが発明されて以来、今日までのセメント製造技術の発展は、「省エネルギーの追求」と「良質で安定した品質の確保」が、時代を超えて常に最大の技術開発の目的であり推進力であった。従って、技術の系統化も主としてこの二つの視点から俯瞰している。

10.1 焼成工程：技術開発目標は省エネルギー・高品質クリンカー製造

ポルトランドセメント発明当初はバッチ式の「竪窯」であった。我が国最初の「深川セメント製造所」でも、竪窯時代は、品質は安定せず、窯から出た焼塊（クリンカー）から良品部分を選別するような状況であった。19世紀末に「回転窯」が開発されてクリンカーの連続焼成が可能になり、窯内の原料の転動で焼成反応も改善され、良質のセメントを大量生産できるようになった。しかし、回転窯は熱効率が悪いという大欠点がある。熱損失の主原因は「排ガスの持去り熱」と「クリンカーの持去り熱」であり、回転窯の熱効率を改善する技術開発はこの2点に注がれてきた。

(1) 排ガスの持去り熱（キルン排ガス熱損失）

20世紀初頭に排熱回収用のボイラーを付けて「余熱発電」する技術が開発されて普及した。我が国ではこの「余熱発電」の導入で、セメント工場の動力源が蒸気機関から電力へと進歩し、諸機械の効率向上にもつながった。

しかし、電力の外部からの購入が容易になり、あるいは効率の良い自家発電設備が開発されてくると、ボイラーや発電機の保守に手間がかかるキルン排熱発電

よりも、排ガス熱を直接原料の予熱に利用する方策が追求されるようになった。

1930年には初めてドイツで、「排ガス熱を原料に直接伝導伝熱させる」予熱機付キルン「レポールキルン」が発明され、わが国でも1960年代まで広く採用された。

1950年代になるとドイツで、更に熱回収が良く、大型化や長期運転に適した「サスペンションプレヒーターキルン（SPキルン）」が開発され、その後今日まで、このSPキルンと、その熱効率や長期運転・大型化への適性を一層向上させた日本発の技術「NSPキルン」が、世界のセメント焼成装置を席卷することとなった。

一方で、回転窯が導入されて間もない1907年、回転窯の熱効率を改善する目的で、石灰石を熱効率の良い竪窯であらかじめ脱炭酸させる「生灰焼成法」を浅野セメントが特許取得し、同社の回転窯に採用した。しかし、石灰窯の大型化が難しいなどの理由から1940年代で廃止された。その後1950年代中頃に至って、小野田セメントが大型石灰窯を開発するなどして「改良焼成法」として生灰焼成法を復活、同サイズの乾式ボイラー付キルンで生産量を4倍にすることに成功した。日本にSPキルンが導入されてその優秀性と同時に、大型化の限界が見えてくると、日本のセメント会社は、改良焼成法の特長をSPキルンに組込むアイデアを思いつき、各社競争で「仮焼炉付SPキルン」=New Suspension Preheater (NSP) の開発に取り組んだ。1970年代初めまでにはいくつかの方式が実操業に入った。このNSPは、省エネルギー、長期連続運転、NO_x低減、代替原燃料使用など、多くの点で優れた特長を有し、日本が世界に誇る独自開発のセメント製造技術となっている。

(2) クリンカー持去り熱（クーラー排熱損失）

回転窯開発当初は、キルンから焼き出されるクリンカーからの熱回収は、全くなされなかった。1910年代になると「回転円筒式クーラー」が発明されて、キルン吹込み燃料の2次空気として熱回収できるようになった。1920年代にデンマークで「多筒式クーラー」が発明されて熱回収が一層向上し、国内でも1940年代までの回転窯に多数採用された。ほぼ同時期に欧米の装置メーカー数社が「エアクエンチングクーラー（AQC）」を開発し、わが国でも戦前から導入が始まっ

たが、本格的に普及しはじめたのは第2次大戦後の1950年代からである。AQCは、多筒式に比べて、熱回収効率では若干劣るものの、装置のメンテナンス性とセメント品質の良さで普及した。なかでも「フラー型」は大型化に適しており、1970年代以降に据え付けられたクーラーは全てこの形式になっている。NSPキルンになって、2次空気ですらったクーラー排熱は、仮焼炉の燃焼空気や石炭乾燥に利用するなどの技術が開発され、クーラー排熱の徹底的な利用が進んだ。

10.2 原料粉砕：技術開発目標は省エネルギー・易焼成原料製造

ポルトランドセメント発明から日本でセメント製造が始まった19世紀後半までは、粉砕機も未発達で、石灰石のような硬い原料を微粉砕するのは難しく、石灰石を仮焼して生石灰にした上で加水して消石灰の粉にする、といった手間をかけていた（湿式法）。

1891年、ドイツで「チューブミル」が発明され、粉砕能力も粉砕効率も向上した。日本にも導入されて、19世紀末には堅窯原料粉砕は「乾式法」へと切り替わっていった。

チューブミルでの乾式原料粉砕は、1940年代までは粉末度や原料均斉度の適正化が容易ではなかった。需要家側のコンクリート技術の発達に呼応して1930年代には「早強セメント」や「中庸熱セメント」など「高級セメント」が製造されるようになると、微細な調合原料を均斉度良く調製できる「湿式粉砕」が採用されるようになった。しかし、湿式粉砕した原料は、焼成工程で水分を蒸発させる熱量が乾式より余分にかかる。この水分をフィルターでろ過する「湿式ボイラー付キルン」や、キルンを長大にして排熱で乾燥させる「湿式ロングキルン」などの技術が欧米で開発され、わが国にも、前者は1932年以降、後者は1954年以降、導入された。

1950年代になって、原料の乾式粉砕工程では、セパレーターの改良によって粉末度調整が改善され、さらに1960年代にドイツで開発された「ブレンディングサイロ」が導入されて原料均斉度も向上してきた。1970年代になると「オンライン蛍光X線装置」を組み込んで原料調合を「コンピューター制御」する技術が開発され、乾式原料工程は、原料調合の精度、粉末度、均斉度いずれの面でも、湿式粉砕を凌駕するようになり、焼成熱量の面で不利な湿式法の必要性がなくなった。時あたかも焼成工程で乾式のSPキルンが勃興する時で、湿式法はセメント工場から消えていった。

1930年代にドイツで「堅型（ローラー）ミル」を原料粉砕に応用する技術が開発された。チューブミルに比較してエネルギー消費が少ない長所があるため、粉砕面のローラーやテーブルの材質の発達に伴って、1960年代頃から本格的な普及が始まった。堅型ミルはキルン排ガスで原料乾燥も同時におこなえ、また大型化も進んだので、SPキルンとの組合せで、原料工程から焼成工程までエネルギー効率の良い一貫工程が組立てられるようになった。

10.3 仕上工程：技術開発目標は省エネルギー・高品質セメント製造

堅窯の時代には粉末にしたセメントは「風化」処理によって、セメント使用時の「急結性」と、「遊離石灰に起因するコンクリートの膨張」を抑えるようにしていた。1888年に導入された「石膏添加」によって急結性の問題は解決され、回転窯の導入によって遊離石灰も減少、堅窯の消滅とともに風化処理も廃止された。

19世紀末、仕上工程にも「チューブミル」が導入され、粉砕効率が向上した。また、1950年代以降「閉回路粉砕」が導入され、粉砕効率（エネルギー効率）が向上すると同時に、セメントの粒度分布の改善で品質も向上した。1973年には「粉砕助剤の添加」がJISで認められ、粉砕効率が一層改善された。

SP・NSP化による焼成工程の大型化に伴って、仕上工程も設備の大型化が進んだ。その流れの中で、「渦流型セパレーター」、「クリンカー（仕上）粉砕用堅型ミル」、「仕上ミル用予備粉砕機」など、日本発の新技术・新装置が開発されて、NSPと共に世界に技術輸出されている。

10.4 出荷工程：技術開発目標は流通コストの低減

明治時代のセメントは「樽詰め」で出荷された。大正時代には「麻袋」、そして昭和（1926年以降）時代になって「紙袋」が使われるようになった。1950年代になると、コンクリートを建設現場で練るのではなく、生コンクリート工場で計量・混合してミキサー車で工事現場に運んで施工する形態が広がり、それに対応してセメントの出荷も工場から消費地の中継サイロに運ぶ「バラ出荷」が支配的になってきた。セメント出荷の「バラ化」は、結果的にセメントの物流に「流通革命」とも言える大変革をもたらし、SP・NSP化に伴う工場の大型化と組み合わせられて、セメント工場が「臨海大規模工場へ集約化」される要因となった。

10.5 JIS規格とセメントの品種多様化

わが国最初の工業規格として、1905（明治38）年「日本ポルトランドセメント試験法」が制定され、その後、技術の発展と需要家からの要請を反映した改訂が続けられてきている。1970年代には、セメント化学の進歩を反映してセメントの「品種の多様化」とその規格化が進んだ。1990年代には、コンクリートの耐久性を担保する目的で、セメント中のアルカリ量や塩化物イオン量にJISの規制値が設定された。一方で1990年代になると、コンクリート混和剤が発達、コンクリートのパフォーマンスを決める主役は混和剤になり、セメント自体の新たな多様化の試みはほとんど見られなくなってきた。

10.6 21世紀、資源循環型社会を支える中核産業へ進化

1970年代頃からセメント産業は、産業廃棄物・副

産物をリサイクル原燃料として大量に使用するようになってきた。当初は原燃料コスト削減の手段として始まったこの産業廃棄物の利用は、1990年代以降、産業廃棄物から都市ごみ等一般廃棄物のリサイクルにまで拡大し、21世紀のセメント産業を、「建設基礎資材供給の基幹産業」から、「資源循環型社会を支える中核産業」へと進化させた。この過程で、「塩素バイパス」、「エコセメント」、「灰水洗」、「AKシステム」など、日本発の特長ある技術開発が続いている。いまやセメント会社の技術開発は「より多くの廃棄物をセメント原燃料として再資源化する」目的が中心となっている。

2011年3月の東日本大震災の後では、太平洋セメント・大船渡工場をはじめ東北・関東地区のセメント工場が、災害廃棄物処理で多大な貢献をした。

11 | 結び

20世紀を目前にした1899年、発明王トーマス・エジソンは「20世紀はコンクリートの世紀だ」と喝破して、日産1600tという当時としては破格の規模のセメント工場建設に着手した。そして、まさにエジソンの予言どおり、コンクリートの基幹材料を担うセメント産業は、20世紀を通じて、住宅・高層ビル・道路・鉄道・港湾・河川・上下水道等、社会基盤整備に不可欠な基礎資材を供給する基幹産業として、世の中に大きく貢献してきた。特に20世紀の後半には、セメント製造技術の飛躍的な進歩発展があり、安価良質なセメントを大量に生産・供給できる体制が整い、またコンクリートの高性能化・多機能化の要求に応じてセメント品種の多様化も進んだ。このような高品質のセメントの大量・安価・安定供給が、まさに20世紀の「コンクリート文明」を支えてきたといえる。

本稿第8章までは、そのセメント産業の技術史を述べた。日本のセメント産業は、明治初期の官営セメント工場を振り出しに、欧米から設備を購入し技術を学んで発展したが、1970年代にはNSPをはじめとする日本発の画期的な新技術を生み出すようになり、20世紀末までには、品質・省エネルギーいずれの面でも、世界のトップレベルの位置を占めるに至った。わが国の最高水準のセメント製造技術は、いまや全世界に向けて技術導出されつつあり、さらには1990年代から本格化した日本のセメント会社の海外進出（主としてアジア・太平洋圏）の競争力の源泉にもなっている。

一方で、日本国内のセメント需要は1990年代には完全に成熟し、残念ながら内需の量的拡大は期待できない状況に立ち至った。この厳しい経営環境の中から、日本のセメント産業は、セメント製造技術を基盤にした新しい事業分野として、廃棄物を再資源化する「資源循環型社会構築貢献事業」を展開することにより、21世紀に向けて新たな成長を目指しはじめた。

1970年代から始まった我が国セメント産業の廃棄物利用は、やがて明治期の産業草創期以来蓄積されてきた製造設備や技術、さらにはセメント化学の知識を積極的に活用し、そこに新たな技術開発を付け加えることによって、処理できる廃棄物の種類・質・量を拡大する野心的な新規事業開拓へと進化していった。本稿第9章では、最近20年ほどにおけるこの「セメント産業の事業革新」について述べた。日本が先駆けとなったこのセメント産業における「廃棄物再資源化技

術」は、地球環境問題に関する意識の高まりとともに、いまや国際的な注目を集めつつある。

セメント会社が資源循環型社会構築に貢献できるためには、「セメントが売れる」ことが基本である。セメント事業があつてはじめて廃棄物再資源化事業が成り立つのである。従って、セメント産業人は、資源循環型社会構築の中核産業を担うという矜持を持ちつつ、セメントを大切な商品として育てる伝統的な任務を決して忘れてはならないと思う。一方、社会一般に対しては、セメントという材料が、コンクリートを作る素材というだけでなく、持続型社会・資源循環型社会を築く基礎材料でもあることを、ぜひしっかりと認識していただきたいと願っている。セメント産業界に半世紀の長きにわたってお世話になったOBの一人として、このことを最後に申し添えて、締めくくりとしたい。

謝 辞

本稿の執筆にあたっては、(一般社団法人)セメント協会研究所と太平洋セメント(株)に、全面的な協力をいただきました。関係していただいた方々の氏名を以下に記して謝意を表します。

セメント協会研究所

近藤秀貴氏、永田利貴氏

太平洋セメント株式会社

小川賢治氏、三浦啓一氏、岡村隆吉氏、

石井守氏、香月毅氏、山西佳代美氏、

高橋恵子氏、吉野理恵氏

永田利貴氏には、セメント業界及びセメント協会に関わる資料収集や原稿内容の確認に助力をいただきました。三浦啓一氏・岡村隆吉氏は、太平洋セメントの協力体制を作って下さり、岡村氏には原稿の内容に関しても貴重な気付きをいただきました。山西佳代美氏には、同社図書室での資料探索と原稿の校正に多大な協力をいただき、吉野理恵氏には、技術系統図をはじめ多数の図表の作成・調整をお願いしました。各位に深く感謝申し上げます。

また、本稿の文章作成に引用させていただいた数多くの論文の著者各位にも感謝の意を表します。なかでも第3章「明治・大正期の日本のセメント製造技術」については、台信富寿博士の論文を幅広く引用させていただきました。特記して謝意を表します。

セメント製造技術史調査資料 所在確認
(科学博物館 産業技術史資料データベースより引用)

番号	名称	製作年	製作者	資料種類	資料現状	所在地	選定理由
1	旧小野田セメント製造株式会社堅窯	1883	大平洋セメント株式会社	構造物	公開	太平洋セメント株式会社 小野田事務所 山口県山陽小野田市	わが国に完存する唯一のセメント焼成用堅窯として、近代産業史上、高い価値があり、西日本における建設事業の近代化を支えた旧小野田セメント製造株式会社の中心的施設として重要である。2004年12月、国の重要文化財に指定。 本文2.3.3参照。
2	フレットミル粉砕機ローラー	1875～ 1882頃	不明	設備	公開	アサノコングリート株式会社 東京都江東区	日本初のセメント工場である工部省深川工作分局時代からのセメント製造設備である。同工場は1883年に当社の前身である後の浅野セメント株式会社へ払い下げられる。 本文3.3.2,3参照。
3	蒸気機関	1881	大阪砲兵廠	設備	公開	太平洋セメント株式会社 小野田事務所 山口県山陽小野田市	日本初の民間セメント製造会社である小野田セメントの開業時より、セメント製造用の機械類を駆動していた蒸気機関である。現存している国産の工場用蒸気機関としては最初期のものであり、大阪砲兵廠が民間工場のために製作した機械類のなかで唯一現存するものである。 本文3.5参照。
4	わが国初のばら積セメントタンカー清忠丸	1936	三菱重工業株式会社 神戸造船所	模型 写真	公開	宇部興産海運株式会社 山口県宇部市	清忠丸はわが国初のばら積セメントタンカーであり、昭和11年4月に就航した。総トン数3,079トン（載貨重量3,648トン）の単螺旋のディーゼル船で主機出力は1,650馬力であった。積み込みは欧米のコンベア方式でなく、より合理的な空気で吹き込む方式を採用しており、全国のスチックボイラの設置と相まって輸送面の合理化に著しい成果を挙げた。 本文4.1.2,3参照
5	世界最大のSPキルン 伊佐1号キルン	1972	宇部興産株式会社	写真	公開	宇部興産株式会社 建設資材カンパニー 山口県美祢市	伊佐1号キルンは、直径6.2m、長さ125mのサスペンション・ブレヒータ付キルン（SPキルン）として1972年9月29日に火入れ式が行われた。年産186万トン単一のキルンとしては当時世界最大の能力をもつものであり、SPキルンとしては現在も世界最大の規模である。 本文5.1参照。
6	わが国初のフライアイッシュセメント（ボゾランセメント）	1956	宇部興産株式会社	文献	公開	宇部興産株式会社 建設資材カンパニー 技術開発研究所 山口県宇部市	石炭火力発電設備より排出されるフライアイッシュを活性し、昭和31年2月にわが国で初めてのフライアイッシュをセメントに混合したボゾランセメントを発売した。フライアイッシュを混合したセメントは普通ポルトランドセメントと比較して長期強度増進、優れた仕上面、遊離石灰の減少、耐透水性、化学抵抗性、収縮等にすぐれ、後にJIS R 5213（フライアイッシュセメント）の規格化に発展していった。 本文8.3.2(3)参照。

セメント製造技術史 年表

西暦	年号	日本	世界	関連する主な出来事(日本、世界)
紀元前 (BC)			7000頃 イスラエル遺跡 コンクリート類似材料 3000頃 中国大地湾遺跡 コンクリート類似材料 2600頃 エジプト ピラミッドに無機質接着材 1000頃 ギリシャ、火山灰を消石灰に混合して利用 200頃 ローマ、「窯」を築いて生石灰や焼石膏を製造	
1750			ギリシャ、ローマ、中世へと続く「古代セメント」の時代 (技術的停滞期) 1756 スミートン(英) 「水硬性石灰」の発明(近代セメントの幕開け)	1770年代 イギリス産業革命進行 1776 米国独立宣言 1789 フランス革命
1790			1796 バーカー(英) ローマンセメント発明	
1810			1815 ジョン(独)、1818 ピカー(仏) 石灰石に粘土を加えて焼成し「水硬性石灰」を製造する方法を発明	
1820			1824 アズブジン(英) 「ポルトランドセメント」特許取得	1820年代 ドイツ産業革命
1830			1830 フックス(独) 「水硬性は珪酸と石灰の化学的結合による」	
1840			1844 ジョンソン(英) ポルトランドセメント製造の基本原則確立 1848 (仏) ポルトランドセメント製造開始	
1850			1850 (独) ポルトランドセメント製造開始 1800年代中頃 (英) 散布風化による凝結調節が始まる	
1860				
1861	文久 1	ポルトランドセメント初輸入(長崎製鉄所建設工事)	1862 ランゲン(独) 高炉水砕スラグの潜在水硬性発見 1867 モニエ(仏) 鉄筋コンクリート発明	
1870	明治 3		1870 ミハエリス(独) 石膏の凝結遅延効果発見 混合セメントの基本原則発見 1871 (米) ポルトランドセメント製造開始	1868 明治維新 1872 東京・銀座街大火
1873	明治 6	深川官営セメント工場、初めてセメント製造・出荷		
1875	明治 8	深川官営工場、輸入品並み品質のセメント製造開始		
1880	明治13		1878 (独) 世界最初のセメント規格 1882 ルシャトリエ(仏) 偏光顕微鏡によるクリンカー薄片の検鏡 「クリンカー鉱物中の最多相は3CaO・SiO ₂ 」 と同定 ブリュッシング(独) 高炉セメント発明	1877 西南の役
1883	明治16	小野田セメント工場(山口県) 操業開始(民営) 樽詰め出荷、1樽正味重量400ポンド(181kg)	1883 (独) 石膏添加公認	
1884	明治17	深川官営工場、浅野総一郎に払下げ		
1888	明治21	浅野社、凝結調節に石膏添加開始 小野田社、堅窯乾式法による製造開始	1885 ミハエリス(独) 「水硬率」の提案 ランサム(英) 回転窯をセメント焼成に利用する特許取得 1886 ジャクソン(米) プレストレストコンクリートを発表 1880年代(独) 白色セメント製造開始	
1890	明治23		1890頃 アトラス社(米) 回転窯でのセメント焼成に成功 1892 ダヴィッドセン(独) チューブミル発明 1892 ミハエリス(独) 水和物「セメントパチルス」発見	1891 濃尾大地震(コンクリートの耐震性証明)
1893	明治26	セメント8社、農商務大臣に「セメント試験法一定ノ儀ニ付願書」提出		
1895	明治28	鉄筋コンクリートの技術が導入された		1894-95 日清戦争 1895 レントゲン(独) X線を発見
1897	明治30	小野田社、樽入り正味380ポンド(172kg) とする	1896 アトラス・セメント社(米) 冷却筒付回転窯焼成に成功 1897 テルネボーム(瑞) クリンカー鉱物に命名、重液分離	
1898	明治31	小野田社、麻袋使用開始、190ポンド(86kg) セメント同業者「日本帝国ポルトランドセメント試験法」提案		
1899	明治32	浅野社、チューブミル設置(原料粉砕・門司工場)		
1900	明治33	日本ポルトランドセメント業技術会設立 小野田社、日本最初の「混合セメント」製造	1900 ポリジウス社(独) コンパウンドチューブミル発明	

西暦	年号	日本	世界	関連する主な出来事(日本、世界)
1901	明治34	セメント1樽380ポンド(172kg)に業界で統一	1901(米) 発明王・エジソンのセメント工場竣工	
1903	明治36	浅野社、回転窯設置(深川工場) 最初のコンクリート橋(琵琶湖疏水)		
1904	明治37	最初の鉄筋コンクリート建築(佐世保)		1904-05 日露戦争
1905	明治38	最初のセメント規格制定 農商務省告示第35号「日本ポルトランドセメント試験方法」	1905(英) セメント規格制定	
1907	明治40	浅野社、生灰焼成法特許取得	1906(米) セメント規格制定 (米) ベーツ式包装機の特許成立	1906(米) コットレル集塵機の特許成立 (鉛精錬所で実機利用に成功)
1909	明治42	小野田社、大連工場操業開始(最初の海外工場)		
1910	明治43	浅野社、エアセパレーター設置		
1911	明治44	小野田社、浅野社門司、動力源に電力使用開始		
1912	大正1	「樽詰め」に代って「麻袋」使用が始まる		1912 ラウエ(独) X線回折現象発見
1913	大正2	八幡製鉄「高炉セメント」生産開始	1913 キュール(独) 「珪酸率」「鉄率」の提案 スピンドル(オーストリア) 早強セメント製造に成功	1913 ブラッグ父子(米) X線結晶構造解析
1916	大正5	小野田社、白色セメント製造開始	1915 ランキン(米)&ライト(米) C-S-A 3成分系相平衡図完成 (米) 余熱ボイラー実用化に成功 (強制通風を採用) エムリー(米) 遊離石灰の定量分析法提案(*) (*1930にラーチ(米)&ボーグ(米)が 改良を加えた方法がその後普及)	1914-18 第1次世界大戦
1917	大正6	浅野社、深川工場にコットレル電気集塵機設置		
1920	大正9	小野田社、余熱発電ボイラー設置(小野田工場)		1920(日) 第1次大戦後不況、慢性化
1921	大正10	業界、麻袋重量127ポンド(58kg)、95ポンド(43kg)の2種とする		
1922	大正11	浅野社、ベーツ式袋詰機設置		
1924	大正13	業界、メートル法採用、出荷品重量規格改定、袋50kg、樽170kg	1923 FLスミス社(デンマーク) 多筒式ユナックスクーラー開発	
1925	大正14	秩父社、セメント包装に「紙袋」使用	1925(米) 湿式キルンに連続式スラリーフィルター設置	
1926	大正15	高炉セメント規格化	1926 ハンセン(米)&ボーグ(米) X線回折をクリンカー鉱物同定に応用	
1927	昭和2	浅野社、多筒式クーラー採用(深川工場)		1927(日) 金融恐慌
1928	昭和3	徳山社、エアクエンチングクーラー設置	1928 フレシネ(仏) プレストレストコンクリートの基礎理論確立	
1929	昭和4	浅野社、湿式キルン設置(西多摩工場) 浅野社、「早強セメント」製造開始	1929 ボーグ(米) クリンカー鉱物組成算出の「ボーグ式」提案	1929 世界的大恐慌
1932	昭和7	小野田社、湿式フィルタ付キルン設置(藤原工場)	1930(独) レポールキルン発明 1932(米) 粉砕助剤「RDA」発売さる (米) 大ダム工事に低発熱のセメント大量使用	
1934	昭和9	三河社、レポールキルン設置(愛知県田原工場) 浅野社、「中庸熱セメント」製造開始	1934 ポリジウス社(独) エアプレンドレングサイロ開発 (独) セメント工場に初のロッシェ式堅型ミル	
1935	昭和10	数社が「シリカセメント」製造開始		
1936	昭和11	宇部社、バラタンカー船「清忠丸」(3600t積) 就航 国内初のバラセメント出荷		
1937	昭和12	小野田社、スミス式グレートクーラー採用(大船渡工場)		1937 日中戦争勃発
1938	昭和13	早強セメント規格化	1938 ムサグスグ(独)、ヘーゲルマン(独) 「最適石膏添加量」があることを発表	
1939	昭和14	プレストレストコンクリート技術紹介される		
1941	昭和16	モルタル強度試験法、硬練→軟練		1941 太平洋戦争勃発
1942	昭和17	「雑用セメント」の規格制定		
1945	昭和20			1945(日) ポツダム宣言受諾
1946	昭和21	セメント技術協会発足		
1947	昭和22	セメント輸出再開		
1949	昭和24	最初の生コン工場、磐城社系・業平橋(東京) プレストレストコンクリート実用化		
1950	昭和25	「JES窯業」に代って、「セメントJIS」制定 セメント自由販売体制に復帰	1950 ファンポルト社(独) SPキルン開発	1950 朝鮮戦争勃発
1951	昭和26	日本社、最初のフラウ型クーラー設置(西多摩工場) 宇部社、重油焼成開始 小野田社、電子顕微鏡設置		
1953	昭和28	中庸熱セメントJIS化		
1954	昭和29	徳山社、最初の湿式ロングキルン設置		
1955	昭和30	<この頃からバラ出荷が進展>		1955-56(日) 神武景気
1956	昭和31	宇部社、フライアッシュセメント市販開始		
1957	昭和32	麻生社、プレンドレングサイロ(バッチ式) 導入		
1959	昭和34	小野田社、改良焼成法に転換開始 小野田社、連続式プレンドレングサイロ導入 宇部社、最初の原料用堅型(ロッシェ)ミル設置	1959 リバーサイド社(米)、アイディール社(米)など コンピューター制御開始	1959(日) 岩戸景気
1960	昭和35	フライアッシュセメント、JIS化 この年以降、重油転換が急速に進行		

西暦	年号	日本	世界	関連する主な出来事(日本、世界)
		この頃からプロセス制御コンピューター試行始まる この頃からEPMAのセメント化学研究への応用始まる		
1962	昭和37	秩父社、熊谷工場制御用コンピューター設置	1962 ベダーグ社(独) サイクロンセパレーター開発	1961(日)貿易自由化開始 1962(日)ばい煙規制法
1963	昭和38	第一社、最初のSPキルン 三菱社、最初のダブルローテータミル(東谷工場)		
1966	昭和41	秩父社、最初のサイクロンセパレーター採用 セメント技術協会は「セメント協会研究所」に改組 この頃、検鏡法「小野メソッド」、ほぼ完成		1964(日)東京五輪開催 東海道新幹線開業 1965-70(日)いざなぎ景気
1968	昭和43	第5回セメント化学国際会議、東京で開催	1967 マゴト社(ベルギー) 高Cr耐摩耗ボール開発(小径化が可能に)	1968(日)大気汚染防止法
1971	昭和46	三菱社、世界初のNSPキルン(東谷工場、福岡) 以降1年以内にSF、RSPが開発される セメント袋、50kg→40kgに軽量化		1971ドルショック
1973	昭和48	JIS改訂で粉砕助剤の使用が可能に		1973第1次石油危機
1974	昭和49	秩父社/IHI、SF技術をフラウー社(米)に導出 (初のセメント技術輸出)		
1976	昭和51	小野田社、「小野田エンジニアリング(株)」設立 (セメント専業社で初のエンジニアリング子会社)		
1977	昭和52	セメントキルンのNOx規制始まる		
1978	昭和53	宇部社、ロッシェルで「1キルン・1ミル」体制を実現 耐硫酸塩セメント、JIS化 日本社、廃タイヤをキルン投入する技術の開発	1978(米・独)この頃から高ビーライト系セメントの 開発始まる	1978第2次石油危機
1979	昭和54	小野田社、世界初の渦流型セパレーター「O-SEPA」開発 普通セメントに5%までの「少量混合成分」添加認めらる		
1980	昭和55	<この頃からNSPへの廃熱発電の普及はじまる> <この頃からアルカリ・塩化物によるコンクリート損傷が 問題化> <この頃から高ビーライト系セメントの研究・開発活発化>		
1986	昭和61	セメント中のアルカリ量JIS規制値制定		
1987	昭和62	秩父社、仕上ミル用予備粉砕機「CKP」開発		
1988	昭和63	小野田社、世界初のセメント粉砕用型ミル「OKミル」開発		1988(日)明石海峡大橋着工
1990	平成2	秩父社、塩素バイパスの発明		1990(日)バブル崩壊始まる 1991ソ連邦消滅
1992	平成4	セメント中の塩化物イオン量のJIS規制値制定(0.02%) 全ポルトランドセメントにアルカリ0.75%の規制 秩父社、高ビーライト系セメント商品化 徳山社、廃プラのキルン燃料化技術開発		
1994	平成6	小野田社・秩父社合併「秩父小野田社」 住友社・大阪社合併「住友大阪セメント社」		
1996	平成8	セメント国内生産量9,927万トン(以降減少傾向) セメント袋40kg→25kgに軽量化		1995(日)阪神・淡路大震災
1997	平成9	「低熱ポルトランドセメント」JIS化		
1998	平成10	秩父小野田社・日本社合併「太平洋セメント社」 宇部・三菱共販会社「宇部三菱セメント社」 太平洋社、「灰水洗」最初の実機運転		
1999	平成11	WBCSDのセメント部会「CSI」発足、環境問題の国際的連携		
2001	平成13	太平洋社ほか、市原エコセメント工場操業開始		
2002	平成14	太平洋社、AKシステム商業運転開始		
2003	平成15	セメント中の塩化物イオン量0.035%に緩和		
2005	平成17	太平洋社、熊谷工場のキルンコットレルをバッグフィルター に変更		
2006	平成18	東京たまエコセメント化施設 操業開始		
2011	平成23			2011(日)東日本大震災

セメント製造技術の系統化調査 正誤表

ページ	段落	行	技術の系統化調査報告 第23集 2016年3月 (誤)	全文PDF版 2016年10月 (正)
2	Contents		結び・謝辞・・・119	結び・謝辞・・・109
3	図1.1	注	配合される場合も多い)	配合される場合も多い
8	右	30	3CaO・SiO ₂ 固溶体	3CaO・SiO ₂ 固溶体
9	左	29	平岡義通	平岡通義
9	右	15,16	平岡義通	平岡通義
9	図2.3		平岡義通	平岡通義
10	右	29	平岡義通	平岡通義
10	左	36	沈殿地	沈殿池
11	左	8	平岡義通	平岡通義
11	左	12	荒川佐平衛	荒川佐兵衛
14	左	1	平岡義通	平岡通義
34	右	18	同筒状の鋼材	円筒状の鋼材
40	左	23	12)年、になって	12)年になって
41	図4・21		集塵機 ²¹⁾	集塵機 ⁷⁾
43	右	11	コンクリート 2次製品	コンクリート製品
44	左	2	コンクリート 2次製品	コンクリート製品
44	右	30,41	コンクリート 2次製品	コンクリート製品
44	右	39,42	2次製品	コンクリート製品
45	左	4	コンクリート 2次製品	コンクリート製品
45	左	注5 1	コンクリート 2次製品	コンクリート製品
47	表5.1		石灰焼成法	改良焼成法
47	右	注2	石灰焼成法	改良焼成法
92	右	21	文献(11)	文献(14)
95	左	注2 2	コングノート	コンクリート