

粉体技術の発展と期待

－戦後の金属鉱山選鉱技術から新エネルギー燃料開発へ－

Development and Prospect of Powder Technology
－From a metal mine concentration technology after World War II
to new energy fuel development－

溝口 忠一

Chuichi MIZOGUCHI

要 旨：第2次世界大戦後、復興を図る産業政策の中で金属鉱山が多く開発された。その選鉱、精錬工場は、粉体技術の組合せで構成されており、新しい粉体理論の展開、新部材の採用などにより粉体の新技術が出現している。その後、高度経済成長の中で、鉄鋼、セメント設備などの建設が進み、新しい生産技術が開発されているが、選鉱工場、精錬工場における粉体技術が大きな役割を果たしている。オイルショック後、産業界は重厚長大から軽薄短小の製品へと変わるが、粉体技術は、微粒子技術を中心に、電子、医薬、化学、エネルギーなどの広い産業分野で利用が広がっている。戦後からこれまで、そしてこれからも粉体技術は、多くの産業分野で、その発展のためのキー技術の一つである。

Abstract : After the World War II many metallic mines were developed in the industrial policy aiming at recovery. Their concentration plants are composed of a combination of powder technologies, and new powder technologies have emerged due to the development of some powders theories and the introduction of new materials. Subsequently, in the process of rapid economic growth, many steel plants and cement plants have been constructed, resulting in developing new production technologies. In this regard, the powder technologies in the concentration plants have played an important role. After the oil crisis, the focus of Japanese industries shifted away from “heavy and large” products toward “light and compact” products. However, the powder technologies centered on microparticle technologies are used extensively in many fields of industry such as electronics, medication, chemistry, energy and the like. From the times after World War II powder technologies is a key technology for every industrial development until now and from now on.

キーワード：粉体技術、選鉱技術、高度成長経済、オイルショック、新機能性素材

Keywords : Powder Technology, Concentration Technology, Rapid Economic Growth, Oil Crisis, New Functional Materials

溝口 忠一 化学工学会 SCE・Net

〒112-0006 東京都文京区小日向 4-6-19 (共立会館) cmizo@mbh.nifty.com

2013.1.24 受付、2013.6.19 受理

社会技術革新学会第6回学術総会(2012.9.28)にて講演

1. はじめに

粉体は、こまかい固体（粒子）、或いはその集合状態である。大きさ、形状、表面特性などに分布があって確率・統計的特性があること、また表面積が大きいために、粒子の中身より気体や液体に接している表面特性が全体の挙動に対して支配的であることなどの特徴を持っている。¹⁾

粉体には、粒子間に気体が入った固・気の状態、粒子に液体が付着した固・気・液の状態、あるいは液中に粒子が分散した固・液の状態（スラリー）があって、各々の状態で、その物性は複雑に変化し、物質の第4の状態ともいわれている。

粉体技術は、固体、気体、液体などから付加価値のある粉体を作る技術、また粉体を処理してその付加価値を高める技術である。主な単位操作には、粉碎、分級、乾燥、混合、造粒、ろ過、脱水、焼結、晶析、貯蔵・輸送などがあるが、溶解、凝縮、分散など多くの物理・化学的な操作が関連している。実際の装置は、これらの操作を組み合わせ、一つのプロセスになっているものが多い。

粒子の大きさは、一般に 5mm 程度から数 μm 程度の範囲であるが、最近の素材関連技術においては nm（ナノメートル）単位の粒子が対象になる。20 mm 程度の鉱石なども集合状態になると粉体と同様な挙動を示すことから、粉体技術として扱っている。

鉱山、製鉄、化学、窯業、肥料、医薬、農薬、電子、食品など広い産業分野で原料、中間製品などの処理に粉体技術が利用されている。

第2次大戦後の復興にあたり、金属鉱山の開発、増産が進められ、選鉱、精錬工場の建設が行われた。その工程は多くの粉体の単位操作によって構成されており、海外からの技術導入があって粉体技術に大きな進歩があった。

その後の日本高度経済成長のなかで、鉄鋼、セメント、石油化学の生産量は飛躍的に伸びていくが、鉄鋼における焼結鉱技術、セメント設備にお

ける NSP（新予熱装置、New Suspension Preheater）技術、石油化学における流動層技術など、革新的な技術が開発されている。その開発において選鉱、精錬設備における粉体技術が大きな役割を果たしている。

またセメントとともに骨材需要が拡大している。骨材設備は、選鉱工場の破碎、粉碎、分級技術がそのまま利用されている。

1970 年代に起こったニクソンショック、オイルショックは、産業界に大きな転換を迫った。主力製品は、重厚長大から軽薄短小へと変わっていった。また政策的に推進された省エネルギー、リサイクル技術の開発が進んでいる。

1990 年代以降、ニューセラミック、電子関連素材、医薬品製剤産業などでの新しい需要が高まり、粉体技術は、より微細な粉体を対象にして、高度経済成長時代よりむしろ脚光を浴びて発展する。

さらに 2000 年代以降、新機能性物質開発が産業界における大きな課題となっており、粉体技術がキー技術になっているものが多い。

本稿では、筆者が中心になり、あるいは周辺において関係した実績、経験にそって、第2次大戦後からの社会変革にともなう粉体技術の発展について概説し、今後の期待について述べる。

2. 戦後の復興期・高度経済成長期における粉体技術－1960 年代

第2次世界大戦中、日本の産業は壊滅的に破壊された。戦後の復興にあたり政策として傾斜生産方式が導入され、石炭、鉄鋼産業に資材を重点的に配給し、その製品を化学肥料、電力、セメントなどの基幹産業に供給して経済復興が図られた。

重要な金属資源である鉄、銅、亜鉛、鉛、金、銀などの金属鉱山開発にも多くの資材が投入され、設備の増強が行われた。

さらに日本経済は復興期から高度成長へと繋がっていくが、鉄鋼、セメント、骨材、化学など基幹産業の生産は大幅に増大していく。この中で、粉体技術が発展していった。

2.1 金属鉱山産業

鉱山開発が進み、1960年代後半には、主な選鉱工場は91工場、精錬工場は71工場に達している。

2) 3)

金属は鉱石を精錬して得られるが、鉱山から掘り出したままの鉱石、すなわち採掘粗鉱は、一般に金属の含有量は少なく、また複数の金属を含んでいるものが多い。そのために選鉱工場で粗鉱中の岩石と金属分の分離、金属鉱物相互の分離、すなわち単体分離を行い、金属の品位を高め、次の精錬工場に送られる。選鉱工場の製品を精鉱と呼んでいる。精錬工場では、さらに精鉱の品位を高め、高純度の金属にする。

選鉱、精錬の工程は、多くの粉体技術によって構成されていることから、金属鉱山開発にともなう粉体装置の大きな需要があった。

(1) 選鉱工場

粗鉱中に含まれる金属の品位は数%程度であって、その金属分の大きさは $500\mu\text{m}$ から数 $10\mu\text{m}$ の細かい粒子である。選鉱によって品位が数10%の精鉱にする。但し、金などは粗鉱1t中に僅かに数gから数10g程度で、精鉱でも1t中に数100gから2000g程度である。

図1に選鉱工場の外観図²⁾、図2に選鉱工場と精錬工場の概略フローと示す。



図1：三菱鉱業（株）細倉選鉱、精錬工場（1970年）
（煙突が立つところが精錬工場）²⁾

採掘された粗鉱の最大塊は200～1000mm程度ある。一次破碎機、二次破碎機、三次破碎機によって10～20mm以下に砕く。

次の粉碎工程では、ロッドミルとボールミルで金属粒子の大きさまで粉碎する。ロッドミルで約5mm以下に砕き、ボールミルで約 $100\mu\text{m}$ 以下にする。ボールミルの産物中の粗粒子はサイクロン分級機によって分離されてボールミルに返され、再粉碎される。

この後、選別機で不要な岩石を分離して精鉱を得る。選別法は、金属の種類、または金属分の大

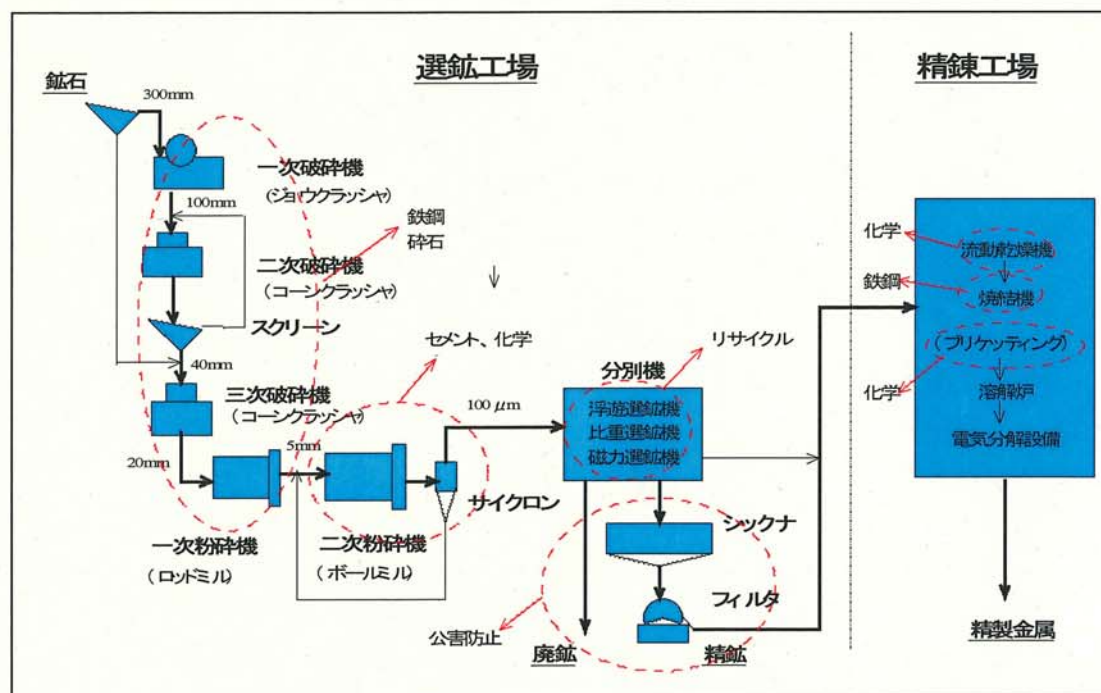


図2：選鉱工場と精錬工場の概略フロー図（例）
（点線で囲まれた部分は他の産業に应用、利用された粉体装置）

きさによって異なる。銅、亜鉛などは浮遊選別法が、比重の大きいタングステンなどは比重選別法が採用される。

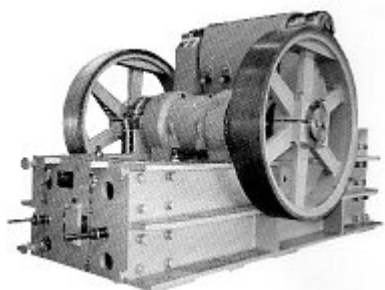


図3：一次破碎機（ジョークラッシャ）
（フレームなど主要部品は溶接構造、軸受けは重荷重型
コ軸受けになっている）

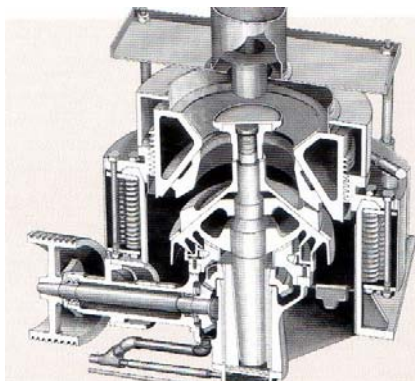


図4：二次、三次破碎機断面図（コーンクラッシャ）

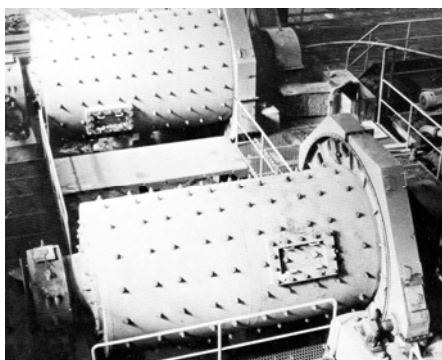


図5：ボールミル（手前）、ロッドミル（背後）

(2) 精錬工場

精錬工場の工程は、金属の種類によって異なっている。図2は、銅精錬の一例を示す。

選別法は液中で行われることから、精鉱は、シックナーで沈殿、濃縮され、ろ過器で脱水されて精錬工場に送られる。

図3に一次破碎機（ジョークラッシャ）、⁴⁾ 図4に二次、三次破碎機（コーンクラッシャ）断面図、⁴⁾ 図5にロッドミル、ボールミル粉碎機を示す。⁴⁾

主な操作は、溶解、電気分解精製であるが、その前段工程には、乾燥、流動焙焼、ブリケットティング、焼結などの粉体装置が設置されている。また溶解、電解スラグから Cd, Sb, Ag などの副産貴金属の回収も行われるが、その工程は選鉱工程とほぼ同じである。

精錬工程においても粉体装置が大きな部分を占めている。

(3) 選鉱、精錬技術の発展

戦後における選鉱、精錬設備には、新しい技術、装置の導入があり、戦前に比し生産性が大幅に向上した。

装置は欧米からの輸入もあったが、殆どが国産であり、多くの進歩があった。また粉体理論については、欧米からの導入があり、設備の評価、スケールアップなどの実践に役立っている。

機械の要素技術、粉体理論のなかで目立った事例をあげる。

1) 機械要素技術

① 鋳造、リベッティング（鋲接技術）構造から溶接構造への転換

第2次大戦中、日本の船舶の多くは撃沈され、海運業は壊滅状態になっていた。造船業界では従来のリベッティングより生産性が高く、水中抵抗も少ない溶接法を採用し、船舶の建設を急いだ。しかし溶接部の欠陥による事故の発生が続いた。

学会、業界は短期間に莫大な溶接部の強度テストを行い、溶接構造及びその欠陥と強度についての設計指針をまとめた。⁵⁾ ⁶⁾ これらのデータは、他の産業機械の設計、製造現場にも応用された。

同時期に鉄鋼技術の進歩によって、厚板鋼板が

安価に製造されるようになった。溶接技術の進歩とあわせて、従来、鑄造製であった部品が鋼板を溶接によって組み合わせた構造に替わった。

鑄造構造は、内部に微小な巣（空洞）ができやすいことから、余裕のある設計強度にすることが必要になり、厚肉の構造になった。また鑄造時の溶解量の制限から大形部品の製作は難しかった。

鋼板を組み合わせた溶接構造になり、機械の軽量化、大型化が可能になった。

② 大型コロ軸受けの採用

従来、大型機の軸受けは、プレーン（平）軸受け構造であった。負荷容量の制限から、軸径を太くし、且つ、潤滑油循環装置を付けることから構造が複雑で大きくなり、大型機の設計を難しくしていた。

特殊鋼の鑄造、鍛造、熱処理技術の進歩、工作機械の自動化などが進み、負荷容量の大きいコロ軸受けが生産されるようになった。

プレーン軸受けからコロ軸受け構造にかわり、機械部品は小形化され、また軸受けの焼き付き事故などもなくなっている。

前述した溶接技術の採用とあわせ、設備の拡大を望んでいたユーザの要望に応じて、信頼度の高い大容量の大型機が製作された。

③ 高圧油圧技術の採用

鉱石の大きさ、硬さ、水分などは不均一であって、また異物も混入もあることから装置の負荷が大きく変動する。そのために破砕機の過負荷による停止、また破砕産物粒度が変わることがしばしば起こっている。

耐高圧のシール材、ホース材の開発が進み、小形で 20 MPa 以上の油圧装置が実現し、負荷の緩衝装置として油圧機構を採用した破砕機が開発されている。その結果、破砕機の過負荷と産物粒度の変動を自動的に防ぐことが可能になった。

溶接構造、コロ軸受けの採用による大型機の製作と油圧機構の採用による安定した操業ができる装置の実現によって、選鉱工場の生産量、生産効率が伸びた。

2) 粉体理論

「粉体は魔物である」あるいは「その技術はアートである」と言われ、粉体技術は経験的な手法が先行し、論理があきらかになっていない分野とされていた。この時期に、欧米から、粉体設備の中で最も多く利用されている粉砕に関連する理論が伝わり、学界、業界で広く論議された。

装置メーカーは、それまで独自にスケールアップについての手法を持っていたが、業界共通の議論の対象にはならず、ユーザの実績、経験からの思考にあわせた装置を提供することが主であり、メーカー側からの新技術の提供は少なかった。

新しい粉砕理論にあわせてメーカー、ユーザとの論議が可能になり、先に述べた機械要素技術の発展とあわせて、メーカーからの新技術、新装置の売り込みもできるようになってきた。

① Bond の法則

粉砕理論としては古くから Rittinger の法則、Kick の法則があった。Rittinger の法則は、粉砕動力は、破壊中に形成される新しい表面積、すなわち粒径 D^2 に比例するとし、Kick の法則は、粉砕動力は、形成される粒子の体積、すなわち D^3 に比例するとしている。

米国 Allis-Chalmers 社の技術者であった Bond は、粒子単位重量当たりの粉砕動力は形成されるクラックの長さに比例するとし、製品粒子直径の $1/2$ 乗に反比例するとした。多くの物質についてテストミルによる実験値から仕事指数（Work index）を求め、原料と製品の大きさから粉砕機の所要動力を算出する式を示した。^{7) 8)}

この式は、実績結果によく合致することから、粉砕機の機能評価、スケールアップに利用されるようになった。

仕事指数測定用テストミルの仕様、テスト要領は JIS に制定された。⁹⁾ さらに細かい微粉砕への応用についての研究もされている。¹⁰⁾

② 部分分級効率

篩い機（スクリーン）、分級機の性能は、破砕、粉砕工程、あるいは選別工程の効率に影響する。

例えば、破砕工程においては、篩い機の網上に

篩い下に行くべき粒子が含まれると破碎機の負荷が上がり破碎機の処理量が低減してしまう。また粉碎機後のサイクロン分級機においては、製品側（微粒側）に多くの粗粒子が混入すると、次の浮遊選別機、比重選別機の効率が低下して精鉱品位を悪くする。

石炭の選炭工場で選炭効率を示す方法であったトロンプ配分率曲線を応用して、篩い機、分級機のパフォーマンスを示す部分分級効率曲線が提案され¹¹⁾、この曲線を利用して篩い機、分級機の構造、運転条件の改善が行われている。

一般の粉碎設備では、粉碎機、分級機を組み合わせた閉回路方式、或いは、粉碎機内に分級機構を取り入れた構造になっているものが多い。粉碎、分級工程を一つのシステムとしてBondの法則と部分分級効率曲線による工程解析が行われるようになり、現在も粉碎、分級工程の設計、運転管理の有効な解析手段になっている。

2.2 鉄鋼、セメント、骨材産業

金属鉱山の開発に次いで、基幹作業である鉄鋼、セメント産業でも新鋭工場の建設、生産量の拡大が続いた。またセメント需要増にともない骨材生産量も増えていく。このなかで選鉱、精錬技術として発展した粉体技術が応用されている。

(1) 鉄鋼設備

鉄鋼需要は、産業機械、自動車、造船産業などの伸びにより飛躍的に拡大し、高炉から圧延設備までの一貫製鉄所の建設が続いた。

高炉の内容積は1950年代には 1000 m³ 程度で、高炉内容積 (m³) 当たり 1 日の出鉄量は約 1t/日 /m³であったが、内容積は5,000 m³ 以上、出鉄量は 2t/日 /m³ 以上に拡大されている。このような生産性の向上に大きく寄与した要素技術に自溶性焼結鉱技術がある。¹²⁾ 図6に鉄鋼設備と自溶性焼結鉱製造設備概略フローを示す。

自溶性焼結鉱技術は、世界各所鉱山から輸入する鉄鉱石の成分が異なっていることから、鉱石を10 mm以下に砕き、配合を調節して成分を一定にし、

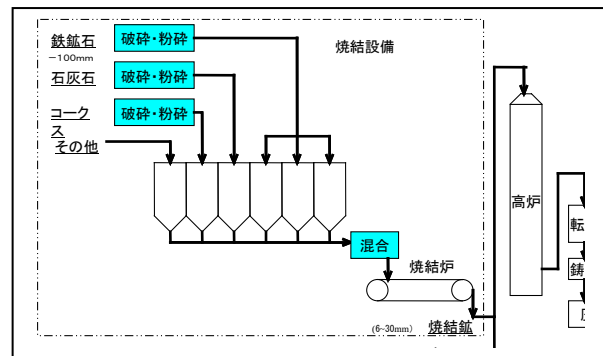


図6：鉄鋼設備における自溶性焼結鉱製造設備概略フロー

さらに石灰石粉を混合して一定の大きさに焼結する方法である。

石灰石は焼結時の溶剤になり、高炉内では異物分離の役割を有している。

焼結鉱は塊状であることから高炉内の還元ガスの流れを均一にし、高炉操業時の鉄の還元効率、生産性を大幅に向上させた。

焼結炉技術は精錬工場技術から展開されたものである。また焼結炉前で100mm程度の鉄鉱石を約10mmまでに砕く工程は、選鉱工場における一次破碎機からロッドミルまでのフローとほぼ同じである。選鉱、精錬工場で発達した設備がそのまま利用されている。

鉄鋼生産では、焼結炉、高炉、転炉、圧延などの設備から大量の排水が発生する。排水量は高炉1基でも約1000m³/h以上になっている。廃水処理設備には、選鉱工場のコロイド粒子を含む精鉱の沈降、ろ過技術が応用されている。¹³⁾

図7に高炉、焼結炉排水処理設備を示す。

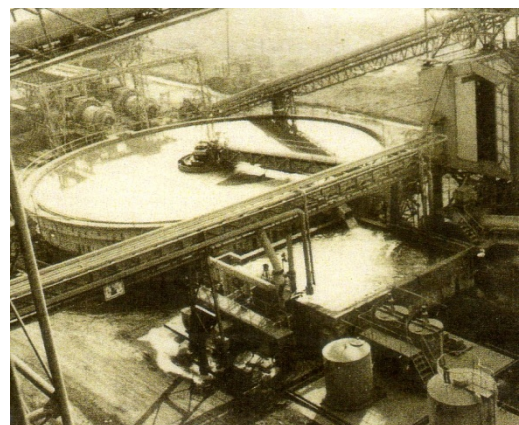


図7：製鉄所の高炉、焼結炉排水処理設備

(2) セメント設備

鉄鋼とならんで、セメント工場の新設が続いた。セメント工場は、その設備の殆どが粉体技術によって構成されていると言っても過言ではない。

石灰石、粘土、鉄原物質を原料としてロータリキルン内で1400℃以上の高温で焼成してクリンカーを作る。このクリンカーに石膏を加えて微粉碎したものがセメントである。図8にセメント工場の概略フローを示す。

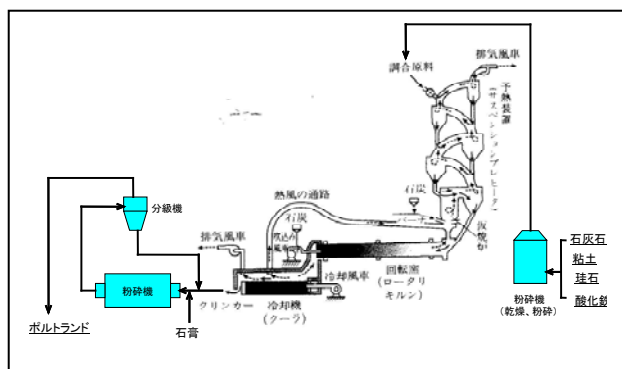


図8：セメント工場フロー（セメント協会資料に加筆）

1950年代までは、原料を水中で粉碎し、脱水した後、直接、キルンに供給して焼成していた。キルンは長く、熱効率、生産性が低い設備であった。

1960年代に原料を粉碎機内で乾燥、粉碎して100 μm 以下の微粉にした後、予熱装置に供給し、キルンで焼成する方式が開発された。

予熱装置はSP (Suspension preheater) と呼ばれ、キルン前にサイクロンを数段組み上げた構造になっている。キルンの排ガスが下部から導入され、上部から粉碎された微粉原料を供給し、原料中の石灰石の脱炭酸反応が行われる。

100 μm 以下の微粉原料は比表面積が大きいことから、予熱装置ではキルン排ガスとの熱交換性がよく、反応が効率よく進む。さらにキルンとSPの間にバーナを設置し、ガス温度を上げ、焼成度をあげる。新しい予熱装置NSP(New suspension preheater)が日本で開発され、焼成能力はSP方式に比し約2倍になった。現在、NSP方式は世界のセメント設備の主流になっている。

セメント設備では、原料、およびクリンカーの粉碎動力が全設備の電力消費量の約70%を占めておりコストに大きく影響している。選鉱工場での実績、論理が粉碎機、分級機の構造改善に応用され、電力消費量を低減している。

(3) 骨材設備

高速道路、新幹線、港湾などの建設が進み、鋼材、セメントと共に砂利、砂などの骨材需要が急増した。河川を保護するために河川からの骨材の採取は禁止され、山、陸地の岩石を原料とする碎石、砕砂製造設備が各所にできた。その需要量は8億t/年まで膨らみ、素材としては最も多い量になっている。

骨材設備の概略フローを図9に示す。

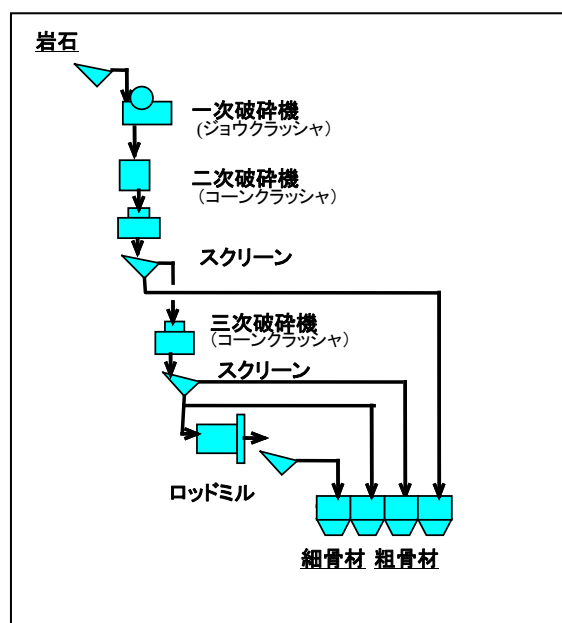


図9：骨材設備フロー

選鉱工場におけるロッドミルまでの工程とほぼ同じである。破碎機の産物を篩い機で分別して規格サイズに合わせた粗骨材をつくる。砕砂は破碎産物を、さらにロッドミルで碎き、分級機で微粒子を除いてつくられる。

機械構造は選鉱工場の機械とほぼ同じであり、選鉱技術が利用された。

2.3 化学産業

化学産業は、戦中、戦後においては石炭を原料とする石炭化学、或いは石灰石、石炭を主原料とする電気化学として発展してきたが、1960年代に安価な石油が多量に供給されるようになり、石油化学へと大きな変革があった。その製品は、合成ゴム、プラスチック、薬品など新しい工業、生活用品として格段に優れた品質と経済性を有しており普及し、化学産業は大きく発展している。

石油化学プロセスの原料、中間製品の処理工程には、粉体装置が組み込まれており、その需要は大幅に伸びている。

精錬工程の流動層技術の応用研究が進み、その技術は、合成樹脂製造工程における反応、乾燥装置として大きな役割を果たしている。¹⁴⁾

また精錬工程でのブリケッティング技術をベースにしたバインダーレス高圧ブリケッティングマシンの研究、開発が進み、粉体原料を高い圧縮力で成形したブリケットは化学プロセスの反応効率を高めることから、多くの工程に採用されている。

15)、16)、17)

3. 産業界の変遷と粉体技術—1970年代

戦後、各国通貨とドルとの交換比率を固定することで通貨の裏付けとしたブレトン・ウッズ体制下で日本、ドイツなどの敗戦国も急成長を遂げてきた。

1971年、ベトナム戦争の影響による米国内の不況脱却のために、ニクソン大統領はドル紙幣と金との兌換停止を宣言した。このいわゆるニクソンショックによってドルと円間も変動相場制度へ移行した。

それまで360円/ドルであった交換レートは大きく変動し、円価値が上昇して、日本経済に大きな影響を与えた。

1972年、知識人の集団であるローマクラブが発行した報告書「成長の限界」では、現在のままで人口増加や環境破壊が続けば、資源が近い将来に枯渇するとの警告を発し、日本国内でも注目された。

さらに1973年、第4次中東戦争の勃発により、3ドル/バーレルであった原油価格は一気に10ドル/バーレルに急騰した。いわゆるオイルショックである。産業資材、生活用品の全てが高騰し生産現場、社会生活で大きな混乱が生じた。

産業界では、「作れば売れる」の時代は終わり、選択の時代に入ったとして、戦後の復興、国土開発などに大きな役割を演じ、安価なエネルギー、資源に頼って成長してきた鉄鋼、造船、素材産業などの重厚長大産業から自動車、電子製品などの軽薄短小産業へと見直しが行われた。

重工業メーカーの大手企業も主力を電子製品へと大きく変換した。

円高から海外鉱山からの精鉱輸入価格が、国内で採掘、選鉱した精鉱コストを下回るようになり、鉱山会社は、精鉱を輸入して、精錬することを行うようになる。金属鉱山の閉山が相次ぎ、1985年までには、殆どの鉱山が閉山していく。金の含有量の多い鉱山が僅かに残るのみになった。

選鉱、精錬の粉体技術が応用されて発展した鉄鋼設備においては高炉の新設はなくなり、またセメント工場の建設もなくなった。

選鉱、精錬技術をベースにした粉体技術は、さらに新しい市場に対応するための技術開発を求められた。

4. 省エネルギー、リサイクル技術・設備への応用、輸出の増加—1980年代

オイルショック後、政策として1974年サンシャイン計画（新エネルギー技術開発計画）、ムーライト計画（省エネルギー技術開発計画）が実行され、さらに地球環境技術開発計画もあわせて1993年にはニューサンシャイン計画が実行されている。石油代替エネルギー、省エネルギー、リサイクル技術の開発が急ピッチで進められた。

選鉱技術をベースにした省エネルギー粉砕装置として自生粉砕ミルが開発されている。精錬工場設備、骨材設備として多く設置された。またその特徴ある粉砕機構から、効果的なリサイクル技術

として応用されている。

この時期には、新興国での経済成長、企業の海外進出に伴い、粉体装置の輸出が拡大している。

4.1 自生粉碎ミル

自生粉碎ミルは、ミル内で原料同士の衝突、圧縮、転動作用によって破碎、粉碎が進行する機構である。300mm程度の原料から数mm程度の粗い粉碎物を作る周辺排出型、100 μ m以下の微粉を作る気流排出型がある。すなわち選鉱工場の破碎、粉碎、乾燥工程が一つの機械の中で行われ、工程が単純化し、運転、管理コストが低減する。省エネルギー或いはリサイクル技術として注目された¹⁸⁾。

図10に気流排出型自生粉碎ミルの構造概念図を示す。図11に外観図を示す。

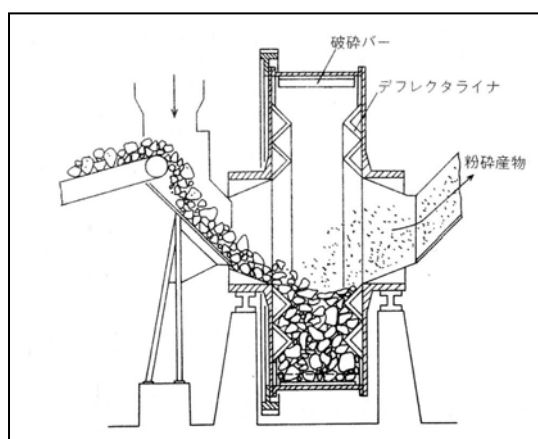


図10：気流排出型自生粉碎ミル構造概念図



図11：自生粉碎ミル外観図

原料同士の破碎、粉碎作用によって微粒子になるので、機械内部の摩耗が少なく、ミル内を通過する空気量の調整によって製品粒度が一定に維持される。特に硬度の高い、あるいは水分の多い原料の処理にその効果が大きい。

省エネルギー、リサイクル技術に効果が大きかった事例を次にのべる。

(1) ニッケル精錬設備

ニッケル鉱石は、最大塊は約300mm、粘土質の微粒子を50%程度含み、含有水分30%以上もある。精錬工程は、ニッケル鉱石を粉碎後、キルン内で溶融還元を行い、フェロニッケルを製造する。

従来のキルン前の工程は、鉱石の破碎を数段で行い、さらに湿式粉碎後、ろ過、脱水する複雑な工程であった。且つ、粘土質の原料であることから、工程の各所で付着による設備の停止がしばしばおこり、運転効率の低い設備であった。

キルン前工程を自生粉碎ミル設備に置き換え、原料から乾燥、粉碎が一気に行われ、原料の粒度、水分の変動にも自動的に対応し、安定した運転が可能になった。安定操業とコスト低減に寄与している。¹⁹⁾

(2) 乾式製砂設備

コンクリートダムのRCD(Roller Compacted Dam-concrete)工法は、日本で開発され、施工速度が速く、建設コストが低減する画期的な工法とされている。

従来の生コンクリートは、打設時の流動性を維持するために、水添加量を理論値より多くしている。そのためにセメント添加量も多くなっている。

RCD工法では、従来法より水、セメント量を10%程度低い理論値に近い値にし、硬く混練した生コンクリートをダンプトラック、コンベヤで運搬して、ブルドーザで一面に敷きつめ、振動ローラで転圧して締め固める方法である。

セメント添加量が少ないので、固化時の発熱量が減少することから養生、冷却による期間が短くなり工期が短縮される。

従来の製砂方式は、湿式ロッドミル法であるので砂の水分が多く、RCD工法用の砂には適さない。

乾式自生粉砕ミルによって大塊の原石から水分の少ない砂の製造が可能になっている。前述した骨材設備における複雑なフローに比し、コンパクトで省エネルギー製砂プロセスとして注目された。

図12にRCD工法における乾式自生粉砕製砂設備を示す。



図12：RCD工法における自生粉砕製砂設備

(3) スラグからの鋼回収設備

廃棄物からの有価物の回収技術は、省資源、環境対策の重要な技術として政策的に奨励された。

製鋼工場の転炉、電気炉から排出されるスラグ中には、鋼が混入しており、この回収には、鉄槌、破碎機などを使って、スラグを砕いて取り出している。人手を使い、回収率も悪い。

自生粉砕ミルでは、原料同士の粉砕作用によることから、柔らかいスラグのみが砕かれてミル内を通過する気流によって排出され、混入している硬い鋼は砕かれずに残る。ミル内にのこった鋼はミルから取り出されて回収される。

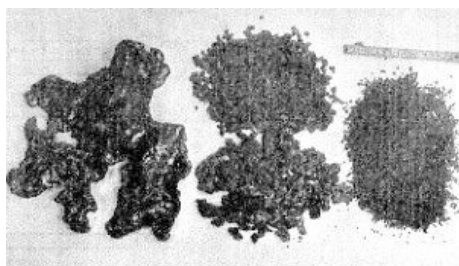


図13：転炉スラグからの回収鋼

回収鋼は、品位が高く、そのまま転炉、電気炉に再投入される。図13に回収鋼を示す。複雑な形状であるが殆ど砕かれずに回収される。²⁰⁾

4.2 粉体装置の輸出

国内ではオイルショックを契機に鉱山、鉄鋼、セメント、碎石などの新設備需要はなくなってきたが、韓国、中国、東南アジア諸国の経済成長による産業機械設備の引き合いが増えた。

また為替の円高から企業の海外進出が進んだが、設備は国内メーカーから調達した。

このような需要から、選鉱、鉄鋼、セメント、化学関連の粉体装置の輸出が増大している。

図14に輸出されたCWM製造用ボールミルの現場設置写真を示す。



図14：CWM用輸出ボールミル（中国向け）

5. 微粒子粉体技術－1990年代以降

産業製品が軽薄短小へと変わるなかで粉体装置は、ニューセラミック、電子関連素材、薬品、機能化化学品などへの需要が増えていく。

微粒子化によって粉体の機能がより高まることから、1960年～1970年代に発展した鉱山、鉄鋼、セメントなどの設備で粉体装置が処理した粒子サイズより細かい数 $10\mu\text{m}$ 以下の粉体を対象とした粉体技術がめざましく発展していく。

装置は小形ではあるが、製品は均一で異物の混入がなく、安定した品質であるものが求められるようになった。

粉体装置メーカーは微粒子技術について独自の

開発を活発に行っている。欧米メーカーからの技術導入も行われた。また粉体関連学会主催による国際シンポジウムなどが多く開催され、国際交流の機会が多くなっている。

表1に各産業分野における粉体技術の需要例を示す。また、次に開発技術の例をのべる。

表1：粉体技術の適用例（1990～2000年代）

産 業	粉体技術の適用例
窯 業	微粉化（ニューセラミックなど）
医 薬	微粉化（主薬）、顆粒化、複合化
農 業	顆粒化
化学・樹脂	微粉化、顆粒化（触媒など）、複合化
食 品	複合化、顆粒化
紙、パルプ	微粒化（充填剤）
化粧品	微粉化、複合化
エネルギー	微粉化（二次電池）、複合化（固体燃料）

5.1 安定した均一な粉体製造技術

医薬品製剤工程は、粉碎、混合、造粒などの粉体装置で構成されている。その製造においてはGMP（good manufacturing practice・医薬品及び医薬部外品の製造管理及び品質管理の基準）が認可基準の要件になり、粉体装置は、この基準に適合する構造であることが厳しく求められた。それに対応して、常に均一品質が得られ、異物の混入がなく、管理しやすい装置が開発されている。

機器の設計、製造には当たっては、高度な表面仕上げ、洗浄の便利さ、密閉構造、耐摩耗性などについての工夫がなされている。

例えば、医薬の錠剤製造機は複雑な構造であるが、粉体に接触する部品は、容易に分解、洗浄ができる構造に設計され、また製品の錠剤の質量、形状は全て自動的に検知されて、不良品は排除される構造になっている。

食品、化学品についてもGMPと同レベルの構造が求められている。また二次電池などの電子素材製造装置では、僅かな品質のばらつき、異物の混

入が製品の機能を大きく低下させることから、GMPレベル並、あるいはそれ以上の装置仕様が要求される。

このような需要に応じて装置材質の高質化（SUS仕様）、加工の高度化が進んでいる。

5.2 微粒子製造技術

素材の高機能化のために、ミクロンオーダーからさらにサブミクロンオーダーまでの微粒子を粉碎、分級操作によって製造する技術が進んだ。

媒体攪拌ミルについては前述したが、1960年代に精錬工場、化成品工場で使用されていた衝撃粉碎機（ハンマーミル）の打撃子周速は、40～60m/sであったが、80～100m/s になっている。

異物の混入を防ぐ粉碎方式として、容器内の周囲から圧縮空気を複数のノズルで中心方向に噴射し、その間に粉体を供給して粒子間の衝突により自生粉碎を行わせるカウンタ型ジェットミルが開発されている。化学品、プリンタ用トナーなどの製造に利用されている。分級機が内蔵されており、粗粒子は再び粉碎される。

図15にカウンタ型ジェットミルの構造図を示す。²¹⁾ 粉碎機の上部に分級機が内蔵されており、粗粒子は、内部で繰り返し粉碎される。

また粉碎物のサイズが揃っていることが求められ、トナー製造例では、印刷を明瞭にするために2～8μm範囲に揃えた粒子が望まれ、粉碎機の粉碎物をさらに分級機で処理している。所望する範囲外の粗粒子と微粒子を分離して粒子サイズを揃える精密な分級機の開発が行われている。

高速回転羽根のスリット間を気流にのせて粉体を通過させ、粗粒子は羽根の遠心力によってもどされ、所定の大きさの粒子はスリットを通過して製品になる構造である。

図16に粗粒と微粒を分離する微粉用精密分級機構造図を示す。²¹⁾

大きな粒子を砕いて微粒子を作る方法、いわゆるダウンサイズ法は、現状ではサブミクロン程度が限度になっている。さらに細かいナノサイズの気相法、液相法などによって製造する、いわゆる

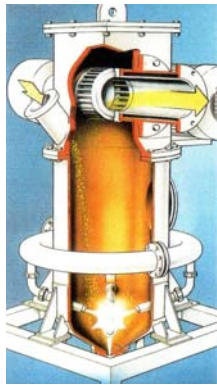


図15: カウンタ型
ジェットミル構造図



図16: 微粉用精密
分級機 構造図

ビルドアップ法で行われている²²⁾。

ダウンサイズ法の中心技術である粉碎、分級操作における理論解析は、前述した選鉱技術で発展した論理が応用されている。

5.3 微粒子測定法の進歩

微粒子の製造にあたって、微粉体の性状を知り、装置の構造、運転条件を評価することは、大変重要である。この時代、微粒子の測定法として小形電子顕微鏡、レーザ光粒度測定機の普及が微粒子粉体技術の発展に大きな役割を演じた。

粒子の形状、品質の均一性の評価には、小形で安価な電子顕微鏡の出現により微粒子の観察、ビジュアル化が有効であった。

また、粉体は、確率・統計的な物性をもつことから、粒度分布を知ることは重要である。従来、数 $10\mu\text{m}$ 以下の微粒子の粒度測定には、ピペット法によって液中を粒子が沈降する速度を測定する沈降法が一般的であった。この方法では、多くの時間と熟練を必要とした。

レーザ光粒度測定機が実用化され、数分間でサブミクロンまでの粒度分布が測定でき、再現性もよく、ほとんどフル・ブルーフであることから、容易に粒度分布を知ることができるようになった。

粉碎機、分級機の機能、運転条件などを直ちに評価することが可能になり、微粒子粉体装置の開発を促進させている。

5.4 複合化造粒技術

粉体の使用にあたって、飛散したり、かさ高であったり、あるいは液体中への分散、溶解を難しくすることがある。また健康への影響も懸念されることもある。

そのために、幾つかの粒子を互いに結合させて粒状にする方法、あるいは成形する方法が行われる。この操作を造粒と呼んでいる。

このような造粒品は、古くから肥料、医薬、農薬などの市場で流通しているが、微粒子の造粒では、従来法とは全く異なる方法が開発されている。

大きさが異なる複数の微粉体を混合し、強い圧縮、衝突、剪断作用を繰り返すと粒子表面にメーカノケミカル反応が起り、大きな粒子表面に細かい粒子が強く結合する。複合化造粒技術である。

²³⁾ ²⁴⁾ 微粒化によって機能を高めた微粒子が大きな粒子表面に一様に結合することにより、流動性、塗布性などが高まり、新しい特長を持った物質になる。

化粧品では、原料を超微粒子にするとその効果は増すが皮膚への塗布性が落ちることから、シリカ球形粒子の表面に超微粒子の二酸化チタン、酸化鉄を結合させ、皮膚への塗布性、なじみ性がよく、くすみにくい特徴をもった製品ができています。

図17に多層構造の化粧品素材粒子の電顕写真を示す。²⁵⁾

微粒子複合化造粒技術は、電池素材開発などにも応用されている。



図17: 多層構造の化粧品素材粒子

5.5 石炭・バイオマス複合化新燃料

原子力発電設備の見直しが行われているなかで、新しい再生可能エネルギー、シェールガスなどと、在来型化石燃料である石油、天然ガス、石炭の利

用を合わせたエネルギーの多様化が進んでいる。

石炭は、化石燃料としては、最も埋蔵量が多く、安価で、また産地が偏ることなく地球上の各地に埋蔵することから安定した供給が得られるなどの特長がある。世界の一次エネルギー消費量の約27%を占めている。2030年には、エネルギー消費量はさらに増加するが、石炭は約30%に伸びると予測されている。

一方、石炭は、石油、天然ガスに比して燃焼時における単位熱量あたりのCO₂発生量、またばい煙、SO_xの発生量が多く、環境を悪くするデメリットがある。燃焼利用効率の改善が大きなテーマになっている。²⁶⁾

石炭粉に農林産廃棄物である玉蜀黍茎、藁、間伐材などのバイオマス粉を15～20%と脱硫剤数%を混合して高圧ブリケッティングマシンで圧縮成形した複合化新燃料が開発されている。この新燃料は、石炭粉と着火性がよいバイオマス粉が密着状態で複合燃焼することから、燃焼性が改善され、ボイラ効率を向上させ、CO₂、ばい煙発生量を大幅に少なくする。

脱硫剤も石炭粒子に密着していることから、燃焼時に石炭中の硫黄と効果的に反応して、SO_xの発生を低減する。新しいクリーンコールテクノロジーとして注目された。²⁷⁾

製造工程における中心技術はブリケッティング技術であるが、2個のロール速度を変えた新しい剪断型ブリケッティングマシンが開発されている。

²⁶⁾ ロールが同速であった従来型に比し、ロール間における粉体原料に高い圧縮力下で強い剪断力がかかることから、粒子間の密着度を高め、複合燃焼効果を大きくし、燃焼効率を高め、従来型では、成形が難しかった繊維状物質、高硬度物質の成形が可能になっている。

多種類の石炭、バイオマスを原料にして複合燃料の製造を容易にしている。また成形物（ブリケット）形状は、従来のブリケットより比表面積が大きくなることから着火性、燃焼速度が、さらに上がる特長を有している。

図18に石炭・バイオマス複合化新燃料製造のフローを示す。

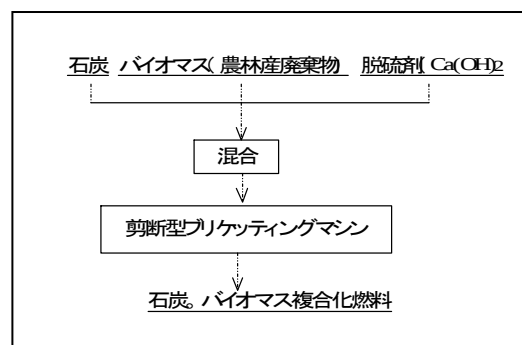


図18：石炭・バイオマス複合化新燃料フロー

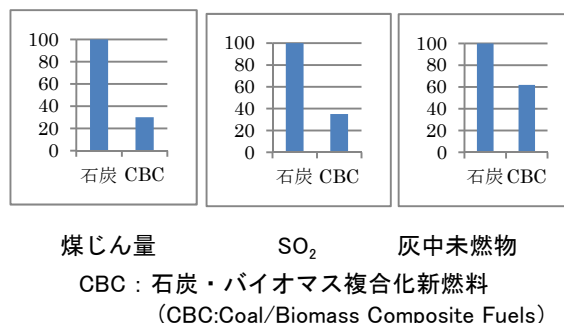


図19：石炭・バイオマス複合燃料燃焼結果

図19に石炭燃焼と石炭・バイオマス複合化新燃料との燃焼結果の例を示す。

剪断型ブリケッティング技術の応用によって製造効率、燃焼効率が共に向上し、経済性メリットが上がっている。石炭産地において低質炭を大量に燃焼しているストーカボイラ、流動床ボイラ用燃料として有効な技術になっている。

6. 粉体技術への期待

他国の産業技術が進み、コモディティ化した技術、製品は他国が安価に作っており、日本の製造産業はより機能性の高い素材、製品をつくることを求められている。

新素材の開発にあたって、粉体技術の発展が必須になっているものが多い。

粒子が細かくなると粒子の表面の原子数は粒子

全原子個数にたいする割合が急速に大きくなる。そのために気体や液体に接している粒子表面は内部の固体中の原子とは異なった特異な性状に変わる。¹⁾ ナノサイズで構成された物質は電気伝導性、熱電伝導性、機械強度などが格段に向上する。ナノ粒子技術には計測、製造、加工、取扱などに大きな開発課題があり、粉体技術の革新的な発展が期待されている。²⁸⁾

ミクロンオーダーの粒子においても光学特性の変化を利用した光拡散材、導電、反導電特性、磁性特性を利用した電子素材、均一径のスペース材、またマイクロカプセル化による食品、医薬、化粧品などへの応用がテーマになっている。²⁸⁾

また異なる粒子の複合化によって新しい特性を持った物質が創成される技術も広い産業分野で注目されている。

7. おわりに

1960年代の第二次大戦後の産業復興期において、金属鉱山開発が活発に進められた。鉱山の選鉱、精錬工程は多くの部分が粉体単位操作の組合せによって構成されている。新しい粉体技術理論の導入、機械要素の改善によって、粉体技術は大きく進歩した。

それまでメーカーは、ユーザとはユーザの経験技術による仕様に従い装置を作るといった関係であった。新しい粉碎理論、分級理論の導入があり、学会、関連団体のシンポジウム、或いはユーザ、メーカーの会議席上において、これらの理論を共通のテーマとして互いに議論ができるようになった。メーカーはユーザニーズについても理解が深まり、新しい装置、技術の提案を積極的に行った。

即ち、新しい学術的な理論をベースにして、メーカー、ユーザが一体になり議論し、その一体感からニーズの技術背景を共有して、メーカーからは、それに適合した装置を提案しユーザが受け入れ、技術の進展につながっている。

金属鉱山において発展した粉体技術は、その後基幹産業である鉄鋼、セメント、骨材、化学産業

の技術革新に大きな役割を果たしている。これら基幹産業の発展は高度経済成長へと結ばれ、粉体技術は、この高度経済成長の一翼を担ったと言える。

オイルショックを機に産業界が重厚長大から軽薄短小製品へと変るなかで、素材、薬品、化成品、エネルギーなどの広い産業分野にわたり、粉体技術は、微粒子を対象にして、その機能性を高める技術へと目覚ましい進歩を遂げている。

戦後の粉体技術は、選鉱技術にはじまり、社会変革に伴うニーズの変化に対応して常に新しい技術が開発されてきた。

高機能性粉体として、より均一性、純粋性であるものが求められている。気体、液体の均一性、純粋性に比し、確率・統計的特性がある粉体物性は複雑である。また粉体技術は広い産業分野に関連している。

新技術の開発にあたって、選鉱技術発展で示されたようにユーザ、メーカーが一体となって、ニーズの技術背景を共有することがその進展をはやめる一つの方策と考える。

引用文献

- 1) 神保元二、粉体の科学、講談社、1985(14-16)
- 2) 日本鉱業会誌選鉱選炭号、Vol.86, No.10, 1970
- 3) 日本鉱業会誌非鉄精錬特集号、Vol.84, No.7, 1968
- 4) 大塚鉄工(株)資料「OTUKA PRODUCTS」, 1988
- 5) 日本造船協会報告書、No.No.18, 1956
- 6) 日本造船協会報告書、No.No.21, 1959
- 7) Bond, F.C., Confirmation of the Third Theory, Trans, AIME. Min. Eng., 217, 1960, (139-153)
- 8) Bond, F.C., Constant Work-Index from the Crack Length, Engr. and Min. J., 164, 1963, (108-109)
- 9) JIS M4002 粉碎仕事指数の試験方法 1969
- 10) 神田良照, 微粉碎に要する仕事量予測, 山形大学紀要, Vol.29, No.1, 2006
- 11) 今泉常正, 湿式サイクロンによる分級, 日本機械学会誌, Vol.59, No.446, 1956, (28-34)
- 12) 徳島秀雄, 高炉技術の系統化調査報告第15集, (独法)

国立科学博物館,2010

- 13) 溝口忠一, 高炉、焼結炉廃水の混合処理設備, 産業機械, 1月号,1971,(35-38)
- 14) 高島久継, 合成樹脂用流動層乾燥装置の変遷と今後の問題, 化学装置, 1月,2009,(134-137)
- 15) 溝口忠一, 造粒, 化学工業社,1968,(58-66)
- 16) 溝口忠一, 他, 高温ブリケットティング, 粉体工学会誌, No.3,1976,(28-31)
- 17) Chuichi Mizoguchi, et al, Briquetting of Sponge Iron -New Briquetting Process and Properties of the Products, AIME 2nd Inta.Symp. Agglomeration,1977, (695-707)
- 18) 溝口忠一, 省エネルギー粉碎装置としてのエロフォーラミルシステム, 産業機械,12月,(34-37)
- 19) 内山恭輔, 大江山製造所のフェロニッケル精錬と副産物の製造, 資源と素材, Vol.109, No.12, 1993, (154-158)
- 20) 溝口忠一, エロフォーラミルによるスラグからの金属回収システム, 粉体と工業, Vol.10, No.5,1978
- 21) ホソカワミクロン(株)資料, 2006
- 22) 奥山喜久男、吉江健一、国家プロジェクト等に見る粉体技術材料開発（ナノ粒子）、粉体と工業、Vol3, No.4, 2001, (38-52)
- 23) 武道男、溝口忠一、他、「ハイカムミルの機能と粉碎特性」、第24回技術討論会最近の精密微粉碎技術テキスト, 1989, (110-113)
- 24) メーカノフュージョン, 杵加ミクロン(株), 1989, (115-116, 135)
- 25) 溝口忠一、他、持田勲編, クリーン・コール・テクノロジー, 工業調査会, 2008
- 26) C.Mizoguchi, Improvement of coal / Biomass Composite Briquettes, 4th 中日化エシボ® シム成都, 2009
- 27) NEDO成果報告書, 木質バイオマスの集荷・高度利用型石炭混燃用複合固形燃料の生産・供給システム開発, 2009
- 28) ナノテクノロジー, (独法) 産業総合研究所, http://www.aist.go.jp/aist_j/aistinfo/pamph/nano_j.pdf
- 29) 内藤牧男編, 究極の粉をつくる, 日刊工業新聞社, 2008