

## 2. 製鉄

### 2.1 製鉄技術最近 10 年の進歩

#### 2.1.1 概説

我が国の粗鋼生産量は、この 10 年間で、国内外の不安定な経済動向の影響を受け変動したが、概略 1 億 t 前後で推移した。この間、製鉄部門では合理化の観点より、大型設備への集約、効率化が行われ、平成 6 年 1 月現在の稼働高炉基数は 31 基とピーク時の半数まで低下した。焼結機、コークス炉においても同様な休止が行われた。また、高炉寿命延長技術の進歩により、従来 6 ~ 7 年であった高炉寿命はほとんど 10 年以上となった。

この 10 年間の高炉操作の特徴は、原燃料の大幅な変更に伴う経済操作の徹底である。第 2 次石油危機後、高炉は重油をカットし、オールコークス操業へと移行した。その後、各種の重油代替燃料の中でもコスト的に有利な微粉炭吹込が注目された。さらに、コークス炉延命の観点からも微粉炭吹込のニーズが高まり、各社で能力増強および吹込量の増量が行われている。また、原料面では、ペレット価格が塊鉱および粉鉱に比べ割高となったため各高炉はペレット配合比を下げた。その他、昭和 59 年頃から小粒焼結鉱、小粒コークスなどの小粒原燃料が積極的に使用されるようになった。

焼結関係では、安価原料のペレットフィード、高結晶水鉱

石の使用拡大のほか、歩留向上、省エネルギー、低シリカ操業などコスト低減に向けた対策が実施された。

コークス関係では、大型コークス炉の寿命が 21 世紀初頭には、30 年を超え製造能力が急激に減少することが予想され、その対策を中心とした技術開発が進められた。

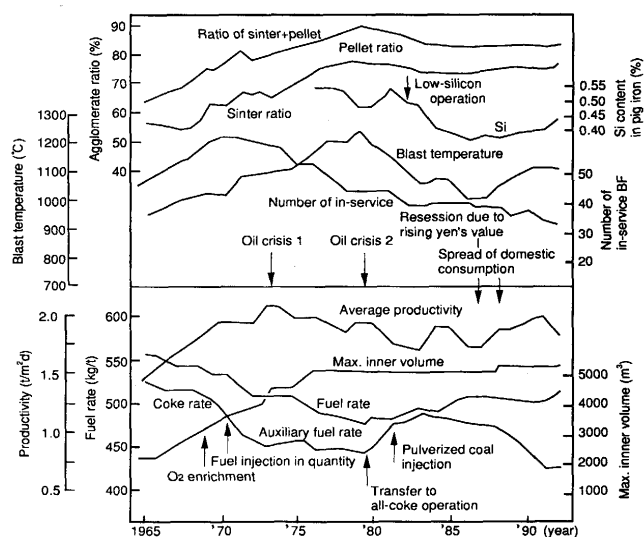


Fig. 2.1. Transition of operating technology in blast furnace.

Table 2.1. Principal ironmaking technology for recent ten years.

	1984-1988	1989-1993
Feature of all over ironmaking division	<ul style="list-style-type: none"> <li>Oil-free operation of blast furnace</li> <li>Increase in number of BF with PCI</li> <li>Progress of measurement technology</li> <li>Development of computer hardware</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Wide spreading of PCI blast furnace</li> <li>Progress of BF life extending technology</li> <li>Highly utilization of computer system</li> <li>Test operation of smelting reduction</li> <li>Foundation of committee for creative and comfortable workshop</li> <li>Utilization technology of scrap</li> </ul>
Cokemaking	<ul style="list-style-type: none"> <li>Propagation of CDQ facility</li> <li>Improvement of energy saving</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Progress of coke oven life extending and maintenance technology</li> <li>Application of AI to blending of coal</li> <li>Introduction of coal moisture control equipment</li> <li>Automatic control of machines</li> <li>Commense of consideration of next generation coke oven</li> </ul>
Raw materials and sintering process	<ul style="list-style-type: none"> <li>Start of commercial HPS plant</li> <li>Introduction of ISF</li> <li>Improvement of product yield</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Introduction of continuous unloading crane</li> <li>Development of exhaust circulation</li> <li>Utilization technology of goethite ore</li> <li>Structural analysis of sinter cake by CT</li> </ul>
Blast furnace process	<ul style="list-style-type: none"> <li>Application of AI</li> <li>Hot stove operation with automatic control system by microcomputer</li> <li>Low silicon operation</li> <li>Central coke charging technology</li> <li>Usage of small sinter and middle size lumpy coke</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Short term operation of blast furnace</li> <li>Low coke rate operation with massive coal injection</li> <li>Development of hot blast control valve</li> <li>Construction of runner with premixed castable refractories</li> <li>Injection of iron ore fines with pulverized coal</li> </ul>

その他、労働環境改善のため3K対策を基本とする、製鉄各工程での自動化、省力化が推進した。また、計算機の普及による知識工学(AI)などを用いた操業管理技術が大きく発展し安定操業に寄与した。以下製鉄各工程における最近10年間の技術の進歩について概説する。Table 2.1, Fig. 2.1にこの10年間の製鉄の主要技術および操業技術の推移を示す。

## 2.1.2 製鉄技術の進歩

### (1) コークス製造技術の進歩

過去10年間におけるコークス製造技術面の特徴は、現有設備の効率的使用と炉命延長、環境対策への取組が重点的に推進されてきたことである。その一方で、21世紀に向けた次世代コークス炉の開発が並行して推進されている。

まず、現有設備の効率化については、事前・事後処理設備の設置による省エネルギーの推進と安価原料の積極使用および自動化・機械化の推進が挙げられる。事前処理設備である石炭調湿は、この10年で9基が新設され、乾留熱量を7%低減し、2,300 MJ/t-coal レベルまで低減させた。さらに、石炭調湿技術を発展させた技術として、乾燥炭の微粉部分を塊成化することにより発塵を防ぎ、装入炭水分を2%レベルまで低下できる新方式の調湿設備であるDAPS (Dry-cleaned and Agglomerated Precompaction System) が新日本製鉄(株)大分3,4炉で平成4年に実用化された。炉本体では、自動燃焼管理システムが標準装備として普及し、さらなる省エネルギーと品質改善効果を狙った窯ごと乾留制御システムがNKK福山、新日本製鉄(株)八幡に設置された。また、コークス乾式消火(CDQ)については大型化の傾向を伴いながら、この10年間で11基が新設され、ほぼ標準的な設備として定着したと言える。自動化・無人化については、各社とも逐次実施しているが、平成4年には新日本製鉄(株)大分3,4炉で全移動機械の無人化が実現している。また、制御技術の進歩によりAI、エキスパートシステムなどを石炭配合・CDQなどへ適応しているのが最近の特徴である。

炉命延長については、既存炉の平均稼働年数が25年に達しており、各社とも炉命対策を強力に進めている。延命技術としては、日常補修としての溶射装置が標準装備化された。加えて、特別補修である熱間積み替え補修技術の改善と炉壁診断システムの組み合わせにより、各社とも炉寿命35年から40年を目標としている。

環境については、シール性の良好な炉蓋、高圧水クリーナーや安水処理技術として新日本製鉄(株)名古屋ではCODオゾン分解処理などの設備が導入された。その結果、労働・地域環境は確実に改善されてきている。その他、NKK、川崎製鉄(株)、住友金属工業(株)、(株)神戸製鋼所4社共同による快適職場造りに向けた開発で、上昇管自動清掃装置などの開発が進められている。

基礎研究の分野では、乾留メカニズムの検証のため、炭化

室急冷による乾留の進行過程の解析が実施され、乾留進行過程の軟化熔融層の挙動が明らかになった。また、新日本製鉄(株)ではX線CTによる乾留挙動の直接観察により炉内気孔率分布推定モデルが開発された。さらに、押出し抵抗管理の目的で炉内乾留モデルにより石炭の膨張収縮量の推定を実施し関西熱化学(株)、川崎製鉄(株)、住友金属工業(株)では操業管理に適用している。

次世代コークス炉の開発は、国家プロジェクトとして200t/dの成形コークスパイロットプラントの運転評価と高炉使用試験を目的として「成形コークス製造プロセス(FCP)」の開発が昭和53年から62年の9年間にわたり行われた。FCPは連続密閉プロセスであり、環境対策面からも進んだ技術として期待されている。また、高炉での使用に関しては、20~30%配合まで安定して操業できることが確認されている。

室炉式コークス炉の抜本的改善技術の延長線上に、現在ドイツを中心に開発が進められているJCR (Jumbo Coking Reactor)がある。その特徴は、単位炭化室容積を従来の6~7倍にし、ガスシール面を相対的に縮小するとともに、装入・押出し頻度を減少して発煙、発塵抑制を図ろうというものである。パイロットプラントが平成5年から稼働しており、その成果には大きな関心が寄せられている。

日本鉄鋼協会では、平成2年から特定基礎研究会の場で産学一体となり、研究目標を、①使用石炭の自由度拡大、生産変動への柔軟性確保、②環境・労働問題への抜本的対応、③設備投資の大幅削減とした次世代コークスに関わる研究を実施している。その中で、新プロセス構築のための新たなシーズとして①石炭粉の軟化熔融直前温度までの急速加熱、②軟化熔融温度域での塊化処理、③セミコークスの均一・低温加熱からなる連続乾留方式が提案された。

### (2) 焼結・ペレット製造技術の進歩

焼結製造技術は省エネルギー技術が積極的に導入され焼成エネルギーの低減のほかSiO<sub>2</sub>量の低減、(JIS-RI)の向上など大きく進歩した。この10年間では、安価な原料の多量使用を目的とした事前処理技術、装入方法の改善、および焼成制御による高歩留高生産性対応技術、粉塵防止や排ガス量低減を目的とした環境対応技術など多くの技術開発が行われ、溶銑コスト低減に大きく貢献した。

安価原料の多量使用では、原料粒度が細かく焼結プロセスでは通気性が悪化し、その使用に量的制限のあったペレットフィードについて多くの技術開発が行われた。焼結事前処理過程での造粒強化のため振動造粒機、アイリッチミキサー、パンペレタイザーなどの造粒機を用いたプロセスが実用化された。特に、全原料をパンペレタイザーにて造粒するHPS (Hybrid Pelletized Sinter) はNKK福山第5焼結機を改造して実機化されペレットフィードを60%まで使用し、生産性を維持して、JIS-RIの向上、コークス原単位の低減を達成している。また、豪州系鉱石はマラマンバ系、ピソライト系

などの高結晶水鉍石を多く含む鉍体へ移行しつつある。これに対応した研究や実機での多量使用が行われた。そのため高結晶水鉍石の床敷焼結法や蛇紋岩、高結晶水鉍石との選択造粒による自己緻密化焼結法が実用化された。

高歩留高生産率へ向けた焼成技術改善として焼結での焼成安定化の基本である通気、燃焼安定化のために、原料装入、焼成変動管理、焼結層の通気構造などの改善を指向した開発がなされた。原料装入技術についてはシュート方式での粒度偏析形成に限界があることが判明し、篩を装入部に導入したスリットバー方式、装入時のナダレの影響をも解消する整粒分散式装入装置などの実用化が行われた。その他、焼成時の通気性を改善するため、原料充填後に通気バーを挿入し通気改善を図る方法や燃焼焼成帯へ掛かる荷重の低減を目的としたスタンド支持、磁気浮揚焼結法の開発が行われている。

焼成管理面では、センサーやコンピュータなどの高度化を背景に、操業の安定化による合理化を目的として、最適な操業アクションを自動的に算出する AI を用いた自動操業システムの導入が行われた。また、焼結機の幅方向の均一焼成を行うため、焼結機排鉍部での排ガス温度分布に基づいて焼結原料の幅方向の原料装入密度分布を自動的に制御する方式が実用化された。

環境対応面では、主排ガスの除塵強化のため主排ガス用電気集塵機の増強のほか集塵効率の高い間欠荷電やパルス荷電方式の導入が図られた。さらに、電気集塵機の効率向上を図るため槌打方式に替え一部の集塵室に移動電極方式を採用した電気集塵機も導入された。また、脱硫設備については、すでに約半数の焼結機に設置されているが、水酸化マグネシウム方式、活性炭方式など設備コストを低減した方式が導入された。また、排ガス処理量を低減する排ガス循環技術が開発実用化され 25% の主排ガスを循環使用するプロセスも稼働した。

ペレットの製造については、焼成ペレットについては脱オイル化、原料コスト低減、高 MgO 化が進んだほか、高炉での使用技術も進み焼結に比べ低スラグである利点が活かされて、高炉での評価が高まりつつある。また、焼成エネルギー、公害負荷が低い非焼成ペレット法がダスト処理に実用化されている。最近ではコスト低減を図るためバインダーに製鉄所発生のスラグを利用しセメントレス化したプロセスも稼働している。

### (3) 高炉操業技術の進歩

高炉操業技術は、円高不況および内需拡大とその後のバブル崩壊後の調整など目まぐるしく変化する経済情勢の中で、高炉基数は大幅に集約され、安定操業、高弾力操業、溶銑コスト削減などの技術開発が積極的に行われた。

円高不況の減産期に高炉の集約が進められたが、その後の内需拡大に伴う好景気を迎え、限られた高炉基数のもとで高出銑比操業の達成を強いられた。昭和 48 年の重油吹き込み下および昭和 54 年のオールコークス操業下の高出銑比操業

実績をもとに微粉炭吹き込み操業下においても、炉内通気性、通液性、熱流比を考慮した適正な羽口先条件、装入物分布制御、出銑滓管理の検討を行うことにより、NKK 京浜 1 高炉、新日本製鐵(株)大分 2 高炉などの大型高炉において長期間の高出銑比操業が可能となり、年間平均で 11,000 t/d の出銑量を達成した。

微粉炭吹き込みは溶銑コスト削減およびコークス炉老朽化問題に対応するため、我が国では、昭和 56 年新日本製鐵(株)大分に設置され、以降急速に普及した。平成 6 年 1 月には 31 基中 26 基の高炉で吹き込みを行っている。当初、60 kg/t の吹き込み量であったが、設備能力増強を図るとともに、羽口吹き込み位置変更、酸素富化率や送風温度など羽口先条件の適切な設定、装入物分布制御の高精度化により、高微粉炭吹き込み操業が可能となりつつある。新日本製鐵(株)君津 3 高炉では平成 5 年 11 月に 181 kg/t、(株)神戸製鋼所加古川 1 高炉では平成 6 年 2 月 197 kg/t を記録した。高炉内における装入物分布はガス流れを支配し、通気性、溶融帯形状に影響を与え、操業の安定性、燃料比、銑中 Si など操業成績を大きく左右する。このようなニーズに対応するため、高い分布制御の自由度を有するベルレス高炉が積極的に導入され、平成 6 年 1 月現在、31 基中ベルレス高炉は 13 基と 40% を占めている。ベルレス高炉の分布特性を実機操業に活かすために、実物大規模実験をベースとした高精度のシミュレーションモデルの開発が行われた。また、川崎製鉄(株)水島 3 高炉の 3 並列バンカーにみられるようにベルレス装入装置の改良、さらには、半径方向の粒度分布、空隙率分布、装入物分布の形状の制御など装置特性を活かした装入物の分布制御も試みられている。装入物分布制御における特筆する技術として、(株)神戸製鋼所で開発されたコークス中心装入法がある。本方法では、高炉内ガス流が安定化するとともに、中心に装入されたコークスが優先的に炉芯部に降下することから、炉芯部の通気性、通液性も改善されるとしている。本方法はベル高炉、ベルレス高炉にも適用されており、微粉炭多量吹き込み操業、および小粒焼結鉍石などの劣質原料の多量使用など溶銑コスト削減に寄与している。また、ストックラインの円周方向のバランスを制御する新しい技術も開発された。これは、羽口ごとに設置された送風量を制御できる熱風制御弁を用いた操業技術の一つであり、NKK 京浜 1 高炉で実用化されている。今後、装入物分布制御と組み合わせた応用技術の開発が期待されている。

数学モデルは炉内状態の理解に有効であり、操業条件の変更、仮想的な操業の予測に不可欠となっている。最近では、高炉を 2 次元軸対象として扱い、炉内における主要な移動現象すなわち流動、熱移動、物質移動、反応など総合的に組み込んだモデルが主流となっている。このモデルの適用により、高出銑比操業、高微粉炭吹き込み操業などの極限操業時の精度の良い予測が可能となり、高炉操業の高効率化に寄与している。また、日常操業管理の強化、省力化を目的として

炉熱制御、分布制御などの操業エキスパートシステムが開発された。NKK 福山 5 高炉では、全自動制御の炉熱制御システムが実用化され、溶銑成分の安定化に大きく寄与している。今後、徐々に進歩しつつある数学モデルとエキスパートシステムの組み合わせによる高度な利用技術の開発が期待されている。

### 2.1.3 製銑理論および研究

この 10 年間、鉄鋼業の体質強化に呼応するため、研究面においても製銑プロセスのいっそうの省エネルギー、コスト削減、効率化あるいは既存設備の延命を目的とした研究開発が積極的に推進された。

コークス分野では乾留効率化の基本となるコークス化機構について、炉幅方向の移動現象解明や性状分布解析などが行われ、乾留過程のコークス化挙動の理解が深まった。さらに、乾留の促進と均一化を図る抽気乾留法が提案された。また、炉体延命に関してはコークスケーキの亀裂生成、膨張と収縮に関する定量的研究も行われ、炉壁にかかる膨張圧や炉壁とのクリアランス推定技術が大きく進歩した。一方、新プロセスとして、通常 1,000℃ 前後の乾留温度を 700~800℃ に下げると中低温乾留法の基礎検討がなされた。これと並行し、中低温乾留コークスの CDQ 内再熱処理による品質維持方法の検討も行われた。

焼結分野においては、いっそうの品質向上、原料選択性拡大を目指した研究が数多くなされた。品質改善に関しては鉱物組織の生成を制御する技術が開発された。例えば、低温還元粉化性の改善として石灰粉の粗粉化や高 FeO 原料配合技術、CaO 成分分割造粒法などが開発された。さらに、カルシウムフェライトの還元に関しては酸化鉄と同様の還元平衡状態図および還元速度が近年明らかにされつつある。また従来の焼結プロセスでは使用量に限界のあった微粉鉱石多量使用、ゲーサイト質鉱石の利用に関する研究開発も積極的に推進された。その他、焼結層内の焼結メカニズムに関する基礎研究も発展した。X 線 CT を用いた焼結層内の観察など、塊成化過程の解明が進んだ。

高炉に関しては、微粉炭多量吹き込み、粉鉱石吹き込みおよび小粒焼結鉱多量使用などコスト削減に関する研究、基礎的な面から還元効率向上を目指した高反応性コークスの使用、安定操業確立のための高炉内降下挙動解析に関する研究などが発展した。中でも微粉炭多量吹き込み技術に関しては、試験炉および実炉試験により、レースウェイ内の燃焼挙動、未燃微粉炭の移動・蓄積挙動に関する数多くの検討がなされ、これらのモデル化も精緻化した。また、粉鉱石吹き込みにより、難焼結鉱の使用拡大や事前処理エネルギーコストの低減が図れる可能性が示された。さらに、固体の降下挙動解析により、中心コークス装入の効果が明らかにされるとともに、熱風制御弁の使用による装入物降下の円周バランス制御法も提案された。以上のような各種技術の開発と並行し

て、新日本製鉄(株)の BRIGHT モデルに代表されるように高炉数学モデルもますます高精度化し、操業予測、炉内現象解析の手段としていっそう普及した。今後は 4 流体(気、固、液、粉)の挙動を総合的に考慮したトータルモデルの進展に期待される。

### 2.1.4 環境問題

一貫製鉄所の消費エネルギーの約 70% を占める製銑部門は、環境に与える影響が大きく、公害問題や省エネルギーに対応した技術開発に取り組んできた。この 10 年間では焼結工場から多量に排出される排ガス中のダスト含有量、NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub> などの低減を目的とした多くの技術開発が行われるとともに、高炉から発生するダストやスラグなどの積極的利用に関する技術開発およびヤードからの発塵防止対策が進められた。

製銑部門では多量の排ガスを排出する焼結工場において、総排出量を低減する排ガス循環技術が開発され、25% の排ガスを循環使用するプロセスが稼働した。SO<sub>x</sub> については排煙脱硫設備が約半数の焼結機に設置されている。NO<sub>x</sub> については、従来より 2 機の焼結機にアンモニアによる選択触媒還元方式の排煙脱硫設備が稼働している。最近では、粉コークスに代わりミルスケールなどの発熱原料を多配合し焼結過程での NO<sub>x</sub> 発生抑制が試みられている。

ダスト対策に関しては、高炉ダストやスクラップ使用時の転炉から発生する含亜鉛ダストに関して、環境対策のために脱亜鉛を目的とし、ロータリーキルンなどを用いた還元揮発方式や高炉ダスト中の微粒に亜鉛が多いことを利用した湿式分級設備が稼働している。最近では高炉ダストを転炉ダストやヤードダストとともに水硬性結合剤を添加したのち造粒養生して高炉にリサイクルするコールドペレット法などのプロセスが稼働している。

製鉄所で発生するスラグは非常に多く、高炉スラグの発生量は年間 2,200~2,500 万 t である。最近では土木やセメント向けの公的規格や指針類が制定整備され、道路用、セメント用、コンクリート用資材として広く利用されるようになった。また、さらなる高付加価値を狙ってスラグ品質の向上と水砕スラグ微粉末の用途開発研究が行われている。

また作業環境面においてはいわゆる 3K 対策、また、将来予想される高齢化に対応するため、作業の機械化、自動化、および作業形態の見直しが行われた。コークス工場では移動機運転作業の無人化とカーボン除去装置の設置などがあり、原料焼結工場では AI による操業管理などの各種システムの導入、運転室の統合による省力化および落鉱炭防止対策、発塵防止対策が積極的に実施された。また、高炉では、樋解体機の開発、測温サンプリング作業の自動化などの重筋作業の軽減、樋施行時の粉塵防止対策が進められた。

### 2.1.5 将来技術

高炉を中心とした現行の製銑法は優れた点を数多く有する

が、将来の原燃料事情、地球環境問題などを考慮すると、今後これらの点に関して制約、問題の少ない新プロセスの開発が望まれる。

NKK では純酸素送風により微粉炭の多量吹き込みを可能とした酸素高炉法を開発し、試験高炉規模でその実証試験を行った。また住友金属工業(株)では羽口から微粉炭と同時に粉鉱石を直接、炉内に吹き込む試みを実施された。また抜本的な新プロセスとして現在、各国で精力的に熔融還元法が開発が進められつつあり、日本では DIOS 法のパイロットプラント試験 (500 t/d 規模) が平成 5 年 10 月より開始された。諸外国では豪州の HIsmelt 法、米国の AISE 法、欧州の CCS

法の開発も進捗しつつある。コークス炉に関しても同様な背景から、次世代コークス炉の構想造りもなされている。炉室コークス炉の大型化の極限を狙ったものとしてドイツでは JCR が提唱され、パイロット試験が平成 5 年より開始されている。また日本でも急速加熱、中温乾留、CDQ 内改質を組み合わせたプロセスの事前研究がナショプロとして平成 6 年度から始まり、将来のコークス炉の改修の際にも適用しうるものとして注目されている。

以上のように将来の製鉄プロセスのつながる技術がこの 10 年の間にも生まれつつあり、今後の展開が期待される。

## 2.2 高炉内の気固液粉体の移動現象理論の展開

高炉内では気体、液体、粉体の流れに加え、重力により充填粒子が降下運動をするので、4 相の流体が存在する。これら 4 流体の運動は相互に運動量、物質、熱の交換という形で影響しあいながら移動している。高炉の安定操業の確保や操業効率の改善のため、プロセス内における各相の流動状態を予測することは極めて重要であり、モデル化とシミュレーションに関する研究が進められている<sup>1)</sup>。

歴史的には、高炉のプロセス解析は実炉の直接調査やワールドモデル実験による炉内現象の把握とともに進歩してきた。初期における高炉の解析は区分的熱収支法に基づいていたが、その後移動現象論に基づく方法が主流となり、コンピュータならびに数値計算法の進歩とともに 1 次元モデルからの多次元化、および、定常モデルからの非定常モデル化が進められてきた。近年、高炉への微粉炭の多量吹き込みの進展に伴い、4 相の移動現象を記述するため、連続の式と運動の方程式に基づく統一的な 4 流体モデルが提案されている。

### 2.2.1 4 流体の流れの定式化

4 流体が共存する充填層において、各流体の占有率を容積分率  $\varepsilon$  により表すと、次式が成立する。

$$\varepsilon_g + \varepsilon_f + \varepsilon_l + \varepsilon_s = 1 \quad \dots\dots\dots(2-1)$$

この 4 流体モデルにおいては、運動の方程式について数値解を得ることを可能にするため、Navier-Stokes の式に基づく連続体モデルが採用されている。

連続の式:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_m \rho_m) + \nabla \cdot (\varepsilon_m \rho_m \mathbf{u}_m) = \sum_i \sum_k S_{m,i}^k \quad (m = g, f, l, s, \quad k \neq m) \quad \dots\dots\dots(2-2)$$

$\sum_i \sum_k S_{m,i}^k$  は変化経路 "i" による k 相からの湧き出しあるいは吸い込み項で、ガス相の連続の式の場合には ( $m = g$ )、液

相、粉体相、粒子相による物理・化学変化によって生じる。他の 3 相の連続の式も同様に扱われている。

運動の方程式:

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\varepsilon_m \rho_m \mathbf{u}_m)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon_m \rho_m \mathbf{u}_m \mathbf{u}_m) \\ = \nabla \cdot (\varepsilon_m \mu_m \nabla \mathbf{u}_m) - \varepsilon_m \text{grad } P_m + \sum F_m^n + \varepsilon_m \rho_m \mathbf{g} \\ (m = g, f, l, s, \quad n = g, f, l, s, \quad n \neq m) \quad \dots\dots\dots(2-3) \end{aligned}$$

式中の  $F_m^n$  は相間の相互作用項であり、(2-4)~(2-12) 式で表されている。

充填層中のガス流れの場合、充填粒子とガスの相互作用力  $F_g^s$  は (2-4) 式で示される Ergun の関係式で与えられる。

$$\begin{aligned} F_g^s = - \left[ 150 \mu_g \cdot \frac{a_{gs}^2}{36 \varepsilon_g} (\mathbf{u}_g - \mathbf{u}_s) \right. \\ \left. + 1.75 \rho_g a_{gs} (\mathbf{u}_g - \mathbf{u}_s) |\mathbf{u}_g - \mathbf{u}_s| \right] \quad \dots\dots\dots(2-4) \end{aligned}$$

気液間の相互作用力は抵抗係数を用いて (2-5) 式で表されている。

$$F_g^l = - \frac{a_{gl}}{a_{gl} + a_{sl}} \left[ \frac{3}{4} C_d \rho_g |\mathbf{u}_g - \mathbf{u}_l| (\mathbf{u}_g - \mathbf{u}_l) / d_l \right] \quad \dots\dots\dots(2-5)$$

粉体とガス間の相互作用力は抵抗係数  $C_d$  および空間率関数 (2-7) 式を用いて (2-6) 式で与えられる。

$$F_g^f = - \frac{3 C_m \rho_g |\mathbf{u}_g - \mathbf{u}_f| (\mathbf{u}_g - \mathbf{u}_f) \varepsilon_f}{4 \phi_f d_f} \quad \dots\dots\dots(2-6)$$

$$C_m = \varepsilon_g^{-4.7} C_d \quad \dots\dots\dots(2-7)$$

$$\left. \begin{aligned} C_d &= 24 / \text{Re}_p & \text{Re}_p < 1.0 \\ C_d &= (24 / \text{Re}_p) (1 + 0.15 \text{Re}_p^{0.69}) & 1.0 < \text{Re}_p < 10^3 \\ C_d &= 0.44 & 10^3 < \text{Re}_p \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(2-8)$$

粉体と充填粒子間の相互作用力  $F_f^s$  は (E-9) 式で与えられる。

$$F_f^s = - \left[ \frac{1}{2D} \rho_f \varepsilon_f |\mathbf{u}_f - \mathbf{u}_s| (\mathbf{u}_f - \mathbf{u}_s) F_k \right] \quad \dots\dots\dots(2-9)$$

ここで、 $F_k$  は Fr 数の関数で次式により与えられる。

<sup>1)</sup> 高炉下部における移動現象、特定基礎研究会充填層中の気固液移動現象部会、1992 年参照