

© 1984 ISIJ

コールドボンドペレット開発の現状と将来

高橋 愛和*・高橋 礼二郎*²

Present Status and Future of Development of Cold Bond Pellets

Yoshikazu TAKAHASHI and Reijiro TAKAHASHI

1. はじめに

現在の高炉用鉄装入原料は自溶性焼結鉱が主流を占めており、焼結に向かない微粉鉄鉱石(ペレットフィード)を利用する方法として開発された焼成ペレットは、欧米においては高炉に高配合で使用されているほか、鉄品位が高いものは直接製鉄用原料として使用されたり、小規模ではあるが製鉄ダストなどの処理にも利用されている。これらの焼成塊成鉱に対して非焼成型のコールドボンドペレットがある。セメントを結合剤としたコールドボンドブリケットは70年以上前から知られ、高炉内において優れた強度を示しながら養生法の難しさのために実用化されるに至らなかつたと言われている¹⁾。cold bondingという言葉が使われ出したのは、スウェーデンで新しいGrangcoldプロセスが発表された頃からのようであるが²⁾、わが国においても小規模ながら一部で実用化されているほか、エネルギーの節約、SOXやNOXの環境対策、焼結に向かないペレットフィードや製鉄ダストなどの活用の面より、最近それに対する関心が高まりつつあるように思われる。本稿ではコールドボンドペレット(以下コールドペレットと略する)開発の歴史と現状を述べ、とくに注目すべき物理的・化学的性質の現状と今後の課題にふれることとする。

2. 開発の歴史と現状

スウェーデンにおいては1960年代より国内の鉄精鉱を活用する新しい方法の研究をRoyal Institute of Technologyが中心となつて開始した。Grängesberg Companyでは1963年バッチスケールの試験を、1966年にはパイロットプラントの試験を経て、1970年160万t/yの工場を建設して、Grangcoldプロセスと呼ぶ方法を開発した。このプロセスは硬化ビン養生法と呼ばれるべきもので、最終的には³⁾、磁鉄精鉱に結合剤として、6%のポルトランドセメントクリンカーと4%の高炉水砕を粉砕したものを混合しペレットに造粒している。平均粒径15mmの生ペレットを50%の粉鉱とともに12000

tの能力を有する硬化ビンに入れて、約60kgf/pの強度になるまで2日間の一次養生を行う。その後硬化ビンより切り出して粉鉱を篩い分け除去し、ふたたび二次硬化ビンに入れて、150kgf/pになるまで5日間の二次養生を行い、その後ストックヤードで3週間の最終養生を行つて、170kgf/pの強度を得ている。そのプロセスの特色は生ペレットを粉鉱とともに硬化ビンに入れて一次養生中のペレットの固結によるクラスター生成を防止している所にある。Grangcoldペレットは国内のみならず国外への輸出をねらつたもので、多くの高炉において使用試験が行われ、その結果は高炉装入物として満足すべきものと報告されている。わが国においても検討され一部の高炉では使用試験も行われたがそれらの報告の文献は見当たらない。

わが国においては新日本製鉄(株)が硬化ビンによらないNCP(Nippon Steel Cold Bond Pellet Process)と称するヤード養生法を開発し、製鉄ダストなどを対象として、1978年高炉向けに54万t/yの工場を名古屋製鉄所に^{4)~6)}、1979年転炉向けに12万t/yの工場を大分製鉄所に建設し⁵⁾⁷⁾⁸⁾、順調な操業を続けている。名古屋製鉄所のNCPを例にとれば⁵⁾、7%の早強セメントを配合した生ペレットを屋内ヤードに2mの高さで多層積付を行い、50kgf/p以上に達するまで2~3日の一次養生を行い、次いで軽く固結したペレットを解砕しながら屋外ヤードにふたたび積付を行つて、5~7日の二次養生を行い、150kgf/p以上の強度を得ている。このプロセスの特色は屋内ヤードに積付けるだけで一次養生中の固結を防止するところであり、そのため高い圧潰強度や落下強度を有しかつ変形やクラックを発生しない生ペレットの製造技術を開発している⁹⁾¹⁰⁾。また最近の報告¹¹⁾によれば、CDQなどより発生する微粉コークスを積極的に配合して内装炭とし、高炉におけるコークス比の低減に寄与している。

転炉向けの場合には強度も高炉向けよりずつと低く、>30kgf/pであり、セメントの配合量も4.5%まで低減している。S<0.15%であるので吹き止めSの若干

昭和58年9月16日受付(Received Sep. 16, 1983)(依頼解説)

* 東北大学工学部(現:株)鐵原)工博(Faculty of Engineering, Tohoku University, Now Tetsugen, 1-4-4 Fujimi Chiyoda-ku 102)

*² 東北大学選鉱製錬研究所 工博(Research Institute of Mineral Dressing and Metallurgy, Tohoku University)

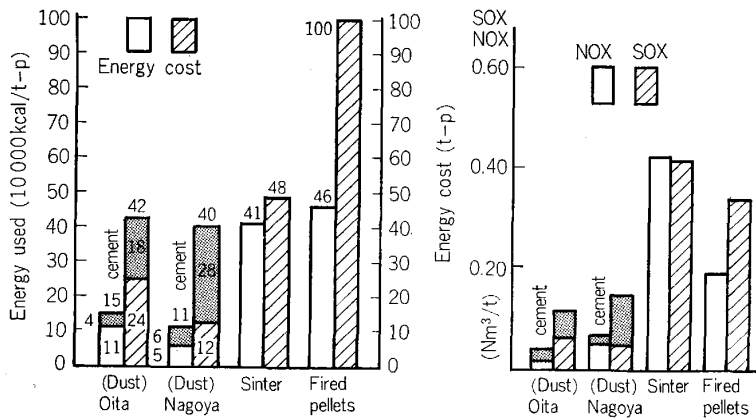


Fig. 1. Comparison of energy consumption and environmental burden between this new processes and conventional process (cold-bond pellets include cement as binder in heavy-oil equivalents⁷⁾).

の上昇はさげられないが、水分は8%以下にすることにより、スロッピングも防止でき、支障なく鉄鉱石の代替として使用されている。

またNCPにおけるエネルギー消費量とコスト、SOXやNOXの発生量の比較をFig. 1に示しているが⁷⁾、コールドペレットはエネルギー消費量やSOX、NOXの発生量が焼結鉱と比較しても著しく少ないことが分かる。

日本鋼管(株)ではシャフト炉による常圧水蒸気養生法を開発し¹²⁾¹³⁾、1981年6.5t/dのパイロットプラントを建設し稼働させている。この方法は十字流加熱方式のシャフト炉で前乾燥—水蒸気養生(50~100°C, 3h)—後乾燥(150~250°C, 2h)—冷却の一連の操作を連続的に行うもので、約10hという短時間でコールドペレットを製造できる一歩進んだより科学的なプロセスと言える。さらに後乾燥において付着水分を除去できるのみならず、後乾燥による強度上昇が見られ、さらに燃焼排ガスなどの利用による炭酸化による強度発現が得られる。この試験においては電気製鉄炉を想定して、微粉鉄石にポルトランドセメント10%を結合剤として使用し、強度100kgf/pのものを、また高炉を想定して、製鉄ダスト、砂鉄、粉鉄に高炉水砕14%、消石灰1%を結合剤として140kgf/p以上のものを得ている。

常圧水蒸気養生を一歩進めたものにオートクレーブ養生法がある。Ca(OH)₂とSiO₂とを混合してオートクレーブ養生を行えば硬化物を得られることはすでに1907年にSCHUMACHERにより発見されていた²⁾。その原理を応用して、スウェーデンのRoyal Institute of Technologyでは、205°C, 16atmでオートクレーブ処理するCOBOプロセスを開発し²⁾、クロマイトを処理する最初の同プロセスによる工場を建設している。一方アメリカ合衆国においてもMichigan Technological Universityが21atmでオートクレーブ処理するMTU Cold Bondプロセス¹⁴⁾の特許を1962年に取得し、その実用化はPelle Tech Corporationによつて引き継がれ、Fontana工場の高炉による使用試験も行われた¹⁵⁾。

この二つの方法は類似した方法でいずれもCa(OH)₂やCaOを結合剤としているが、後者の場合に例¹⁴⁾をとれば、5~7%のCaOと粉鉄のSiO₂が低い場合には必要に応じて、1~2%のSiO₂粉を、さらに望ましくはコークスや石炭粉などの炭材を加えて混合造粒し、前乾燥後21atmで1~2hの短時間養生を行い、200kgf/p以上の強度を得ている。セメントを用いたオートクレーブ処理は、高強度コンクリートパイルの製造などに用いられているが、この場合には、180°C, 10atm, 5h程度の保持により1000kgf/cm²以上の高強度が得られているが¹⁶⁾、セメントを結合剤としたコールドペレットのオートクレーブ処理を行った報告はほとんど見当たらない。

住友金属工業(株)では従来のコールドペレットの発想とは異なつた破砕型のコールドボンド鉄と称するプロセスを開発し高炉における使用試験も行っている¹⁷⁾¹⁸⁾。このプロセスではむしろ焼結フィードのような8mm以下の粗粒粉を対象とし、ポルトランドセメント8%、石灰石粉8%を混合して118mm×128mm×170mmのブロックに加圧振動成型したものを養生後、破砕、篩い分けたものである。

一方大学側においても東大生産研においてコールドペレットに関する一連の研究を発表しており^{19)~21)}、とくに1977年実施された試験高炉による100%コールドペレットの操業結果は²⁰⁾コールドペレットに対する評価を高くし、多大の関心を集めたものであつた。筆者らもガス還元プロセスによる還元鉄用原料に注目して若干の報告を行つている²²⁾²³⁾。

3. 物理的・化学的性状と今後の課題

前述のごとく高炉向けのコールドペレットはGrängesberg Companyと名古屋製鉄所において実用化され、高炉における使用試験結果も満足すべきものとして報告されているが、本章では特に重要と思われる強度、被還元性、内装炭の効果高温還元性状について述べ、今後の展望にも若干触れてみたい。

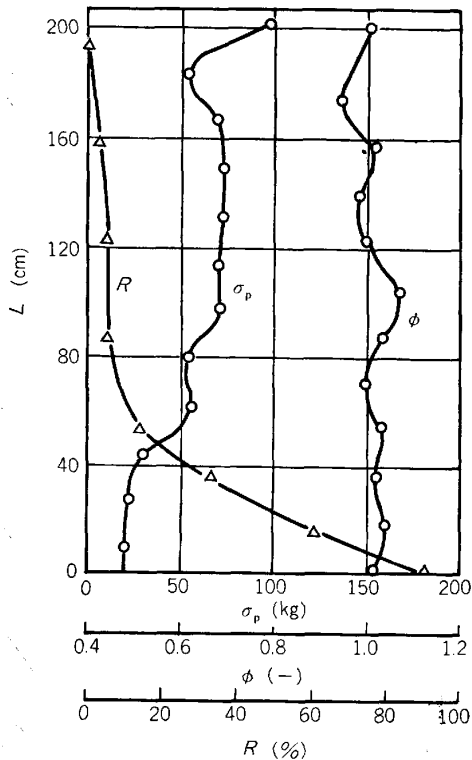


Fig. 2. Longitudinal distributions of σ_p , ϕ , and R obtained by Run 26²³⁾.

3.1 強度

高炉用コールドペレットの強度としては、Grangcoldペレットで 170 kgf/p, 名古屋製鉄所の NCP では 150 kgf/p 以上, MTU コールドペレットでは 200 kgf/p 以上, 日本鋼管(株)の水蒸気養生プロセスでは 140kgf/p を目標にしている。ペレットの必要強度は、高炉内における還元強度もさることながら、海外からの輸送や高炉に装入されるまでのハンドリングにより発生する粉率、ガス還元鉄プロセスにおいては、シャフト炉内での粉化、成品としての還元鉄の歩留りなどによって支配されることも多く、今後なお十分検討されるべき余地があると思われる。Fig. 2 は筆者らが小型高圧移動層還元反応装置を用いて、チャー内装コールドペレット 100% で操業を行つた時のシャフト炉内での還元率、圧潰強度の推移を示したものである²³⁾が、あらかじめ 500°C で乾燥し装入前には 100 kgf/p であつたものが、 Fe_3O_4 段階で 50~70 kgf/p に低下し、さらに還元が進むにつれて 20 kgf/p 近くまで低下しているが操業には支障がなかつた。また 200~300 kgf/p の強度を有する焼成ペレットも Fe_3O_4 の段階で 30~50 kgf/p まで低下したことも経験している²⁴⁾。

セメントを結合剤としたコールドペレットの強度はセメントの配合量によつてもつとも大きく左右され⁹⁾²²⁾、ひいては脉石量の多少さらに製造コストにもつながるので適正強度の把握はいつそう重要であると考えられる。

焼成ペレットは 325 mesh より細かい微粉を中心とし

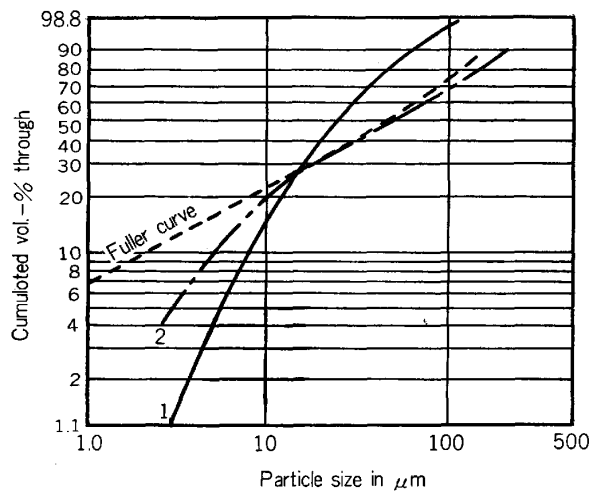


Fig. 3. Particle size distribution for different materials magnetite concentrate for sintered pellets 1 and concentrate mixture for COB pellets 2²⁵⁾.

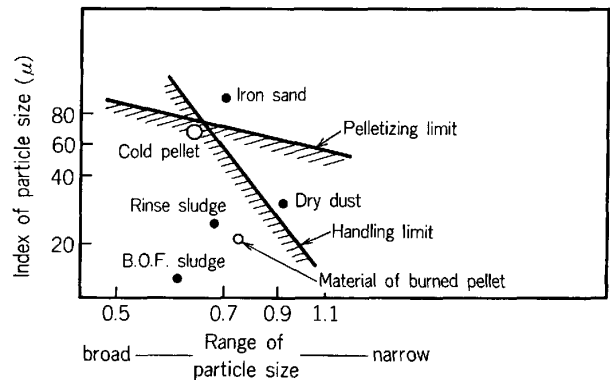


Fig. 4. Particle size of cold pellet material⁶⁾.

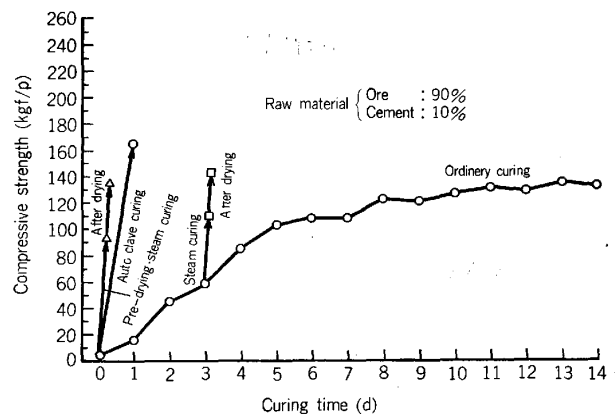


Fig. 5. Increase of strength by various kinds of curing methods¹³⁾.

た微粒造粒が常識であるが、コールドペレットの場合には生ペレットの充填密度をあげた方が良いことが指摘されている。HÄSSLER²⁵⁾は Fuller の理論にもとづいて Fig. 3 に示す粒度構成を採用しており、NCP においても粗粒配合の効果を見出し、適正粒度限界とハンドリング限界の関係より、Rosin-Rammler の式を用いて Fig. 4 のごとく整理⁶⁾し、高炉向けのダストコールドペレット

では約 35% の砂鉄 (平均粒径 0.2 mm) を配合している⁵⁾。また佐藤ら¹⁰⁾は 10 μm 以下の微粉が落下強度と強い相関関係を有していることを見出し、ヤード養生法においては、微粉鏡鉄鉱と粗粒鏡鉄鉱の混合原料に対し、30% 以上の褐鉄鉱系鉄石を微粉碎して混合することが効果的であると述べている⁹⁾。

セメントや高炉水砕を結合剤として用いた場合、強度発現に対する養生温度の影響は大きい。宮下ら¹³⁾は Fig. 5 のように水蒸気養生により強度発現が著しく促進されることを指摘しており、筆者ら²²⁾も養生温度を上げることによつて養生時間が著しく短縮されるという結果を得ている。オートクレーブ養生法ではさらに温度を上げて高圧を用いているわけであるが、この場合には結合剤として $\text{Ca}(\text{OH})_2$ や CaO が用いられていて、セメントを用いた例は上述の Fig. 5 の比較において見られる程度である。オートクレーブ養生法はコストが高くつくと考えられているが、セメントの水和反応とは異なつた硬化機構が知られており¹⁴⁾、その点からもオートクレーブ養生法を併用する可能性について、コストも含めての評価が望ましい。

セメントを結合剤としたコールドペレットの高温における強度の変化は脱水状況とも併せて重要である。宮下ら¹³⁾は Fig. 5 に見られるごとく、水蒸気養生後、150~250°C の後乾燥により強度がさらに上昇することを見出し、筆者らの場合²²⁾も 500°C の乾燥により約 2 倍の強度発現を見出している。上野ら¹⁹⁾は高温での強度は 700°C 付近から急激に低下すること、また脱水は 580°C と 700°C 付近で若干の停滞があるものの 800°C まで続くことを報告している。養生後の後乾工程は水分の除去のみならず強度発現の効果からも大いに活用されるべきであり、高温における強度と脱水の関係もいまだ解明されるべき余地が残つているように思われる。

そのほかセメント配合量を低減させる可能性としては、適当な刺激剤の選択 (石膏は S を高めるもので S を問題にする場合にはそれに代わる刺激剤が望まれる)、表面活性剤の検討、鉄粉、ミルスケール、転炉ダストなどの添加による、金属鉄や FeO の酸化過程における強度発現への寄与の解明など基礎的知見を含めて見直す余地があると思われる。結合剤としてはセメントが中心となると思われるが、コールドペレットにより適したセメントの開発、セメントの一部代替としての高炉水砕のみならず、転炉スラグさらには転炉スラグを改質して結合剤としての可能性を追求する余地も残されている。GOKESL の報告¹⁴⁾によればコールドブリケット以来結合剤としては実に 20 種類以上のものが特許などで知られており、これらを改めて見直すことも有用であるかも知れぬ。

3.2 被還元性ならびに炭材内装の効果

コールドペレットは開気孔が多いため優れた被還元性

を有しており、JIS 法による還元率では自溶性焼結鉱や焼成ペレットが 60~70% であるのに対し、90% 内外を示すことが報告されている⁴⁾¹²⁾²⁶⁾。東大の試験高炉における炉内サンプリングによれば¹⁹⁾、シャフト下部での還元率が自溶性焼結鉱操業では 40~60% であるのに対し、コールドペレット操業では 95% に達するという結果を Fig. 6 のごとく示している。また名古屋第一高炉の解体調査によれば²⁷⁾²⁸⁾、コールドペレットはよく原形を保持しており、焼結鉱の粉化に伴う粒径の影響を考慮すれば、被還元性も自溶性焼結鉱より良いと報告している。

コールドペレットは被還元性が良好であるうえに、炭材を内装しさらに還元を促進し得ることは GOKSEL¹⁴⁾ や安藤²⁹⁾によつて述べられている。春名³⁰⁾らはダストコールドペレットに 5% の粉コークスを内装させると、被還元性は向上し、とくに還元ポテンシャルの低い雰囲気においても還元が良く進行すると述べている。筆者らもチャー内装コールドペレットの単一粒子を用いて等温還元実験を行い、Fig. 7 に示すごとく、とくに 5 atm の高圧還元においてその特色が発揮されるという結果を得ている²²⁾。一方筆者らはチャー内装コールドペレットを小型高圧移動層還元反応装置を用いて還元したが、Fig. 8 に示すごとく、焼成ペレットに較べて、シャフト部での

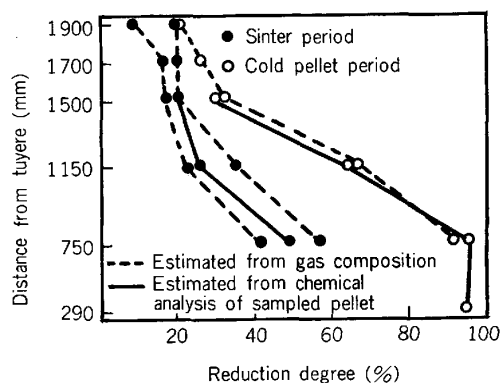


Fig. 6. Distribution of reduction degree²⁰⁾.

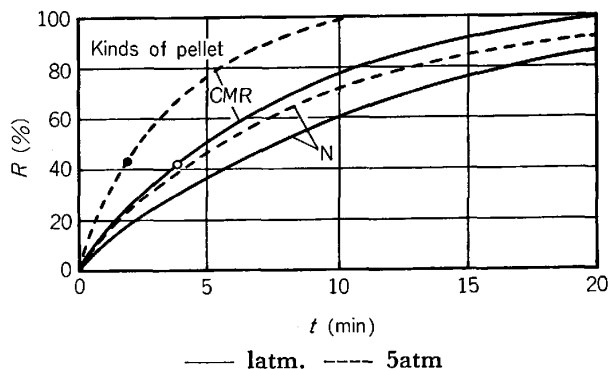


Fig. 7. Effect of pressure on the reduction curves of CMR pellet containing 4.6% char content and N pellet at 850°C²²⁾.

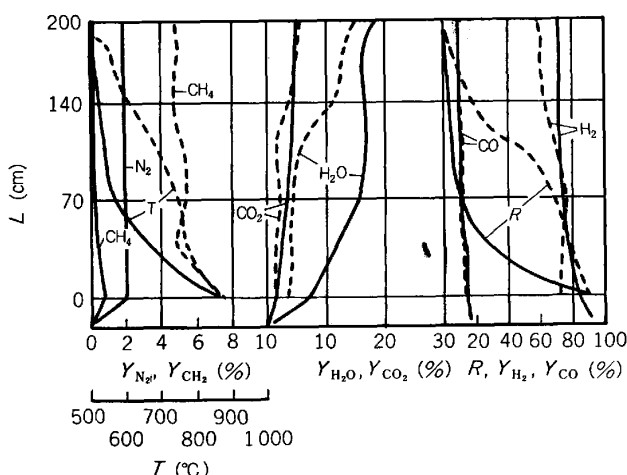
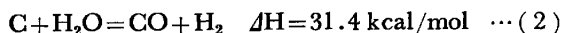
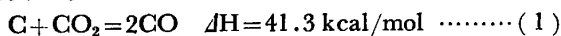


Fig. 8. Longitudinal distributions of process variables observed by Run 26 (—) and Run 15 (----)²³⁾.

温度上昇がおそく、したがって還元もシャフト下部で急速に進行するという結果を得た²³⁾。これは結晶水の分解蒸発に伴う吸熱のほか、次式で示すごとく炭素のガス化に伴う吸熱の影響が大きいことを示すもので、とくに熱流比の大きい場合にはその熱バランスに十分な考慮を払う必要がある。



コールドペレットの還元挙動に関しては基礎的な研究もほとんど行われておらず、還元様式もいまだ明らかにされていない。最近高炉内における鉄鉱石類の還元もコークスのガス化を含めたカップリング現象としての取り扱いが行われている³¹⁾が、炭材を内装したコールドペレットにおいてはさらに結晶水の分解蒸発なども加わってさらに複雑になるが、これらの挙動をカップリング現象として解明することは基礎的にも興味深い課題であろう。現在高炉操業も高圧下で行われており、ガス還元による直接製鉄プロセスも高圧化が指向されている。高圧下における還元に関する研究は非常に少ないが、とくに炭材を内装したコールドペレットの還元挙動を明らかにし、そのメリットを追求することも今後の興味深い課題である。炭材を内装することのメリットについては、ロータリーキルンによるクロム鉱石の予備還元や、製鉄ダストの脱亜鉛をかねた還元鉄製造プロセスにおいてはすでに知られており、最近では高炉においても微細コークスを内装したコールドペレットのメリットが指摘されている¹¹⁾。

3.3 高温還元性状

高炉装入物として要求される性状の一つに高温還元性状がある。コールドペレットは高炉における使用実績も少なく報告も少ないが、佐藤³²⁾らは他の塊成鉱と比較しながらコールドペレットのふくれと荷重軟化試験を行

い、その高温還元性状を明らかにした。すなわち焼成ペレットの場合には昇温還元過程において還元性の悪い $2FeO \cdot SiO_2$ などの鉄珪酸塩が生成し、この低融点スラグが気孔を閉塞することによつて還元の進行を妨げるのに対し、コールドペレットは還元性の良い CaO を含有した鉄珪酸塩を生成させ、高融点の珪酸塩に転換するため良好な高温還元性状を保つと述べている。そのためにはコールドペレットの CaO/SiO_2 を 1.2~1.9 に、かつ次式で示されるスラグ量(SV)の値を 220~440 kg/t-Fe に調整することが望ましいとしている。

$$SV = (CaO + SiO_2 + MgO + Al_2O_3) (\%) / T \cdot Fe (\%) \times 100 \text{ (kg/t-Fe)} \dots\dots(3)$$

呉²¹⁾も軟化溶融性状に関する研究を行い、コールドペレットは一般に脉石量が多く、 FeO を含むスラグから先に熔融滴下する傾向にあるので、その改善には、被還元性の向上、脉石塩基度の上昇、 MgO の添加、適当の炭材内装が有効であると述べているが、とくに炭材内装の効果については高温還元性状の上からも十分明らかにされる必要がある。

3.4 今後の展望

コールドペレットは Grangcold ペレットに見られるごとく、本来高炉向けに開発されたものである。高炉は現在世界的な鉄鋼不況と連铸による歩留り向上のあおりを受けて、60~70% の減産体制にあり、焼結工場を休止してまでコールドペレットに移行する段階ではない。焼成ペレットは燃料費の高騰により製造コストが高くなり、減産のこともあつてかなりの工場が休止している模様であるが、ペレットフィードの活用として焼成ペレットに代替し得る可能性は持つていよう。ただし脉石成分が増加すること、水分が多いことなどの悪いイメージをなくすためには、なおいつそうセメント配合量の低減、水分の乾燥コスト低減に努力が払われる必要があり、微粉コークスの活用のメリットなども考慮しながら将来の出番に備えることになるかと思われる。

転炉向けコールドペレットは製鉄ダストの亜鉛の問題を考える時、転炉で発生した転炉ダストは転炉で消化するという考えはきわめて卓越した発想であり今後の発展が期待される。この場合にも水分の除去、S の低減、セメント配合量の低減に努力する必要がある。

筆者らが将来の展開についてもつとも興味を持つて期待しているのは直接製鉄プロセスへの応用である。3.2 で述べたごとく、コールドペレットは被還元性が良好なうえに炭材を内装できる特色を有している。直接製鉄プロセスへ応用する場合にはまず脉石量を下げ、鉄品位の低下をできるだけ少なくすることが最大の課題である。3.1 で述べたごとくセメントを低減して強度を確保する可能性はなお検討する余地が残されていると考える。最終的には還元鉄の溶解まで含めたトータルコストで決まることであるが、最近では予備還元-溶融還元プロセスが

しだいに注目されつつあり、このプロセス開発の発展を見守りながらコールドペレットの発展を期待したい。

4. お わ り に

コールドボンドペレットはエネルギーの節約, SOX や NOX の環境対策, 炭材内装などの特色を持った, 焼結に向かないペレットフィードや製鉄ダスト, 砂鉄などを活用できるきわめて魅力のある塊成鉱である。また技術開発の段階で言えば, 自溶性焼結鉱はすでに 70~80% の熟成度と考えられるのに対し 30~40% かと考えられ, 今後なお多くの開発要素を持つていると言えよう。他の塊成法には見られないメリットを徹底的に追求し, 基礎的に, 応用的にプロセスとともに設備的にも一步一步堅実な積み重ねを行つてその将来の発展を期待するものである。最後にあたり本稿をまとめるにあたって御協力をいただいた新日本製鉄(株)郷農雅之氏, 稲角忠弘氏, 佐藤勝彦氏, 国井弘道氏, 小野田セメント(株)右川猛氏, (株)鉄原 田中務氏に厚く御礼申し上げます。

文 献

- 1) J. SVENSSON: Trans. Metall. Soc. AIME Soc. of Min. Eng., 247 (1970), p. 26
- 2) B. HÄSSLER and P. G. KIHLESTEDT: Agglomeration 77, AIME, ed. by K. V. S. SASTRY (1977), p. 901
- 3) J. SVENSSON, G. BRASK, U. HENNING, E. von KRONHELM, and R. LINDER: Grängesberg Ore News (1975)
- 4) 嶋田駿作, 稲角忠弘, 野島健嗣, 野田多美夫: 鉄と鋼, 62 (1976), S 432; 63 (1977), S 474; 64 (1978), S 520; 65 (1979), S 575, S 576
- 5) 新日本製鉄(株): ジャパンクリーンセンター昭和 56 年度再資源化貢献企業表彰申請文 (1981)
- 6) M. GOUNO, Y. KOJIMA, T. INAZUMI, and M. TAKASAKI: Seminar-cum-Workshop on Energy Recovery and Utilization of Solid Wastes (1982), p. 405
- 7) T. INAZUMI, H. FURUTAKU, T. KUWABARA, K. ESAKI, K. NAKAYAMA, and S. KOHNO: Conservation and Recycling, London に投稿中
- 8) 江崎 澁, 和栗真次郎, 小菅暉一, 古宅英雄, 花香 実: 鉄と鋼, 66 (1980), S 152, S 153, S 154
- 9) 斧 勝也, 佐藤勝彦, 鈴木 悟, 仲田 泰三, 稲角忠弘: 学振 54 委-No. 1646 (昭和 58 年 7 月)
- 10) 佐藤勝彦, 沢村靖昌, 鈴木 悟, 桜井 哲, 北西 碩: 製鉄研究, (1979) 299, p. 35
- 11) 小島 清, 三輪 隆, 郷農雅之, 湯村篤信, 鈴木章平, 春名淳介: 鉄と鋼, 69 (1983), S 780
- 12) 吉越英之, 近藤国弘, 福与 寛, Dr. A. DEJA: 鉄と鋼, 65 (1979), S 99, S 577, S 578; 68 (1982), S 29, S 30, S 7
- 13) 宮下恒雄, 田島 治, 松井正治, 吉越英之, 福与寛, 佐藤道貴: 学振 54 委-No. 1590 (昭和 57 年 2 月)
- 14) M. A. GOKSEL: Agglomeration 77, AIME, ed. by K. V. S. SASTRY (1977), p. 877
- 15) M. A. GOKSEL and L. L. FRENCH: Proc. Ironmaking Conference, AIME, 38 (1979), p. 481
- 16) 西 晴哉, 大塩 明, 江藤清光, 木下幸一: 小野田研究報告, 23 (1971) 83, p. 9; (1971) 84, p. 33
- 17) 吉永真弓, 一伊達稔, 重松達彦, 戸沢洋二, 河合晨: 鉄と鋼, 68 (1982), S 765, S 766, S 767
- 18) 水野 豊, 永見晋太郎, 川崎正洋, 三宅貴久, 吉永真弓, 羽田野道春, 重松達彦, 岩永祐治: 学振 54 委-No. 1650 (昭和 58 年 7 月)
- 19) 上野英生, 館 充, 大蔵明光: 鉄と鋼, 66 (1980), p. 317
- 20) 呉 平男, 桑野芳一, 鈴木吉哉, 張 東植, 松崎幹康, 中村武子, 辻 英太, 館 充: 鉄と鋼, 66 (1980), p. 1870
- 21) 呉 平男, 館 充: 鉄と鋼, 68 (1982), p. 1889
- 22) 高橋愛和, 石井正夫, 高橋礼二郎: 選研彙報, 39 (1983), p. 1
- 23) 石井正夫, 高橋礼二郎, 高橋愛和: 鉄と鋼, 69 (1983), S 768
- 24) 高橋礼二郎, 古藪幸夫, 石井正夫, 石垣政裕, 高橋愛和: 鉄と鋼, 66 (1980), p. 1985
- 25) B. HÄSSLER: Stahl Eisen, 95 (1975), p. 725
- 26) 渡辺 良, 尻枝正夫, 今西信之, 藤田勇雄: 鉄と鋼, 68 (1982), S 8
- 27) 江崎 澁, 阿部幸弘, 岩月鋼治, 今田邦弘, 高崎誠, 井上展夫: 鉄と鋼, 67 (1981), S 50, S 51
- 28) 郷農雅之, 野田多美夫, 下村泰人, 杉山 喬, 佐藤裕二, 西 徹: 学振 54 委-No. 1651 (昭和 58 年 7 月)
- 29) 安藤 遼: 日本特許, 特開昭 48-22313
- 30) 春名淳介, 鈴木章平, 野島健嗣, 高崎 誠: 鉄と鋼, 67 (1981), S 104
- 31) GABALLAH and J. SZEKELY: Ironmaking Steelmaking, 10 (1983), p. 65
- 32) 佐藤勝彦, 沢村靖昌, 神原健二郎, 古井健夫: 鉄と鋼, 65 (1979), p. 1673