

回転炉床式還元炉による製鉄ダスト類リサイクルプロセスの開発

Development of Technologies of the Rotary Hearth Process for Recycling Dust Emitted in Steel Mills

新日本製鐵株式會社

新日鐵住金ステンレス株式会社

1. 研究開発の背景と目標

(1) 製鉄ダスト類リサイクルの課題と資源化の必要性

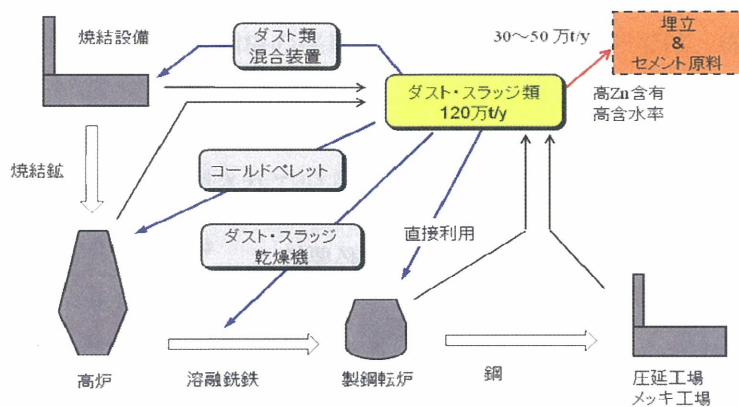
廃棄物処分に係る諸問題や省資源・省エネルギーへの期待から、リサイクルへの社会要望が高まっている。当然ながら CO₂ 排出量削減は素材産業の最重要課題であり、加えて昨今の新興諸国での鉄鋼等資源の消費量急増は原燃料や副原料資源の高騰を誘起するという課題にも直面している。わが国の鉄鋼業では、以前から製造プロセスの連続化による熱ロス削減・歩留り向上や、高温・高圧部からのエネルギー回収を徹底して追及してきた。これらの結果、1970 年代以降、20% 以上の省エネルギーと 10% 以上の粗鋼歩留り向上（省資源）を達成してきた。これらの経済的に成立し得る省エネルギー・省資源技術は、1990 年代までに殆どすべての製鉄所で標準装備化され、世界最高水準のエネルギー消費原単位・歩留りを達成することになったが、同時にそれ以上の効果的な技術向上を、現行の製鉄プロセスの枠内で進めるには限界感があった。そこで新日本製鐵では、従来からのアプローチに加え、製鉄所系外も視野に入れた資源リサイクルが省エネルギー・省資源に重要であると考え、積極的にリサイクル技術を開発し、その処理実績も拡大してきた。例えば、鉄、アルミ、銅等のスクラップを鉄原料や合金材料としてリサイクルする活動や、廃プラスチックのコークス炉リサイクル、タイヤのガス化・油化・鉄回収事業などが挙げられる。

一方、鉄鋼生産プロセスに於いて、鉱石焼結設備、高炉、転炉等の還元炉・精錬炉から発生するガス中に含まれるダストや圧延時に発生するスケールは、酸化鉄、炭素、その他の成分から成り、その発生量も極めて多い。例えば、高炉から発生するダスト量は、銑鉄生産の 2~4% にも達し、高炉を有する一貫製鉄所であれば、図 1 に示すように製鉄所全体から粗鋼生産量の約 10% のダスト・スラッジ・スケール（以下、「製鉄ダスト類」という）が発生している。

従来からこれらの製鉄ダスト類は、鉱石と混合して焼結設備で焼成しての高炉原料化や、乾燥・粒度調整による転炉原料化の物理的処理によって再使用されてきた。しかしながら、このような従来技術では総発生量の 70~80% しか再使用できないという課題があった。その主な理由は、製鉄ダスト類には亜鉛、鉛、アルカリ金属等の高温で揮発し易い元素が含まれること、およびスラッジ状でハンドリングや乾燥処理が難しいことであった。

亜鉛その他の成分は、鉄鉱石などに混在しているものが精錬過程で濃縮したものと、鉄スクラップ中に混在している元素が蒸発して濃縮したものであり、0.1~5 質量% の含有率に達するものもある。これら元素は 800℃ 以上で気化し易いことから、高炉等において高温部で蒸発した後、ガスと共に炉内を移動して炉内低温部で凝集して高付着性物質となる。その結果、高炉側壁などに付着して経路閉塞を起こす可能性があることから、精錬炉への亜鉛等を含有した製鉄ダスト類

の装入量は制限されている。そこで再利用できない製鉄ダスト類は廃棄物として処理されるか、セメント原料となるかという選択しか無かった。この結果、例えば粗鋼年産 1000 万トン規模の製鉄所において、30～50 万トン／年の鉄資源および 3000～6000 トン／年の亜鉛が有効利用されずに廃棄されることになる。このような亜鉛等を含有する製鉄ダスト類を含めて、効率的・安価に 100% 再利用する技術およびシステムの開発・体制整備を目標とした。



	T.Fe	T.Ni	T.Cr	C	Zn	Na+K
普通鋼製鉄ダスト類	45～55%	—	—	6～15%	0.3～3%	0.1～0.6%
ステンレスダスト	20～30%	2～4%	8～12%	—	少量	3～5%

図1 製鉄ダスト類のフロー（君津製鉄所の例）およびその成分例

表 1 に新日本製鐵全体の副産物発生量と資源化を示す（「環境・社会報告書」2008 年度版）。本説明書で言う「製鉄ダスト類」は、表中のダストとスラッジの一部（道路清掃汚泥等は除く）を対象とする。粗鋼生産量（2007 年度、約 3600 万ト）のおよそ 1 割が「製鉄ダスト類」であり、再資源化の必要性が理解できる。これらのリサイクル率の増加が、本業績による効果である。これらの 2006 年から 2007 年にかけてのリサイクル率の増加が本業績による効果であり、2008 年に更に 2 基の設備を増設しており、今後本研究の成果を拡大していく。

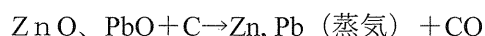
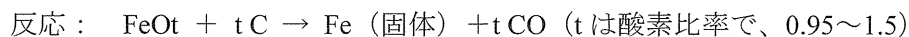
表1 副産物発生量と資源化（出典：新日鐵「環境・社会報告書」2008年度版）

発生物	発生工程	発生量(湿潤重量)		資源化用途	リサイクル率	
		2006年	2007年		2006年	2007年
高炉スラグ	高炉で溶融された鉄以外の成分	945万トン	918万トン	高炉セメント、コンクリート、細骨材、路盤材他	100%	100%
製鋼スラグ	鋼製造時に発生する鋼以外の成分	526万トン	548万トン	路盤材、土木資材、肥料他	98%	98%
ダスト	集塵機に捕集された微粉類	288万トン	303万トン	事業所内原料、亜鉛精錬用原料	96%	98%
スラッジ	水処理汚泥、メッキ液処理残さ、道路清掃汚泥	45万トン	50万トン	事業所内原料	64%	70%
石炭灰	石炭焚き発電設備からの燃え殻	39万トン	38万トン	セメント原料	100%	100%
使用済炉材	製鋼設備、炉設備からの耐火物	22万トン	22万トン	再利用、路盤材等	84%	87%
その他	スケール、その他	193万トン	196万トン	所内利用、その他	95%	94%
合計2,058万トン2,075万トン				※全体リサイクル率98%(2006年度は98%)		

（２）目標を達成する手段の選択と開発すべき課題

製鉄ダスト類の資源化、特に亜鉛分離の方法として、先ず高温還元蒸発法（乾式法）と湿式沈殿・電気分解法（湿式法）がある。後者は、比較的高濃度の亜鉛・鉛から回収する方法であり、設備費・ランニング費も高く、鉄資源は酸化鉄（水酸化鉄）でしか回収できないことから検討の対象外とした。

一方乾式法は、酸化鉄と酸化亜鉛などを含む粉体を 1000℃以上の温度で還元する方法である。



還元された亜鉛や鉛は蒸気として系外に排出され、酸化鉄から得られた金属鉄と分離できる。また還元鉄製造プロセスと考えれば、設備は適正なものとなる。従って、乾式法による処理方法を調査、研究した。

粉原料の還元処理プロセスの基本形として種々の炉形式がある。先ず、これらを技術的に比較検討した（表 2）。[ロータリーキルン法] 処理原料範囲が広く、処理コストが低いものの、低温処理のため、鉄金属化率が低く、処理エネルギーをうまく還元反応に転換できない。[シャフト式還元炉法] 唯一ドイツで稼働しているが、設備投資の多い焼結とシャフト炉の組合せであり、低経済性と高環境負荷の問題がある。[電気式還元炉（Submerged Arc Furnace：SAF）法] 電気を使用することから、高エネルギーコストであり、生産性も低い。[回転炉床炉（Rotary Hearth Furnace：RHF）] 造粒物の加熱条件が優れており、反応的優位があるが、商業プラントで達成できる操業温度が低く、排ガス処理設備の閉塞問題があり稼働率が低い問題がある。

表 2 亜鉛含有の酸化鉄を還元するためのプロセス比較表

		回転炉床法	ロータリーキルン法	還元電気炉	シャフト炉
設備構成		造粒－還元炉－製品回収設備	原料混合－還元炉－製品回収設備	原料乾燥－電気炉－熔融鉄処理	焼結－シャフト炉－熔融鉄処理
操業	原料	酸化物-炭素混合物（粉）	酸化物-炭素混合物（粉）	酸化物粉	粉原料（焼結原料化）
	事前処理	混合・造粒	混合	なし	事前焼成処理
	熱源	石炭系（ダスト中C）	石炭系（ダスト中C）	電気	コークス
	操業温度	1200(1400)℃	1000～1100℃	1500℃	1500℃
	反応時間	30分以下	8～10時間	数十分	4～8時間
製品		還元鉄 高還元 M.Fe >70%	還元鉄 中還元 M.Fe 50%	溶鉄	溶鉄
最大設計可能規模（dry）		50万トン／年	10～15万トン／年	6万トン／年	10万トン／年
ランニングコスト		低	低	高	高
設備投資額（t／年当たり）		低	低	高	高
省エネルギー効果		◎ 高M.Fe利用	△ 中M.Fe利用	×	現状とほぼ同じ
実施箇所（1997年当時）		3例 順調な操業は1例	多数（亜鉛回収が主）	日本で1例 （ステンレスダスト）	1例（ドイツ）
操業安定性		還元の安定性・排ガス処理設備の付着問題あり	キルン内の付着リング生成	—	—
評価		還元反応の到達可能度・省エネ効果では優位。操業的な改善が必要	実績はあるが、低還元率で省エネ効果が小さい問題あり	高エネルギー使用であり、コスト・省エネ評価的に不可	設備投資が大きく、環境負荷が大きい。

研究開発の開始の際に、これらの各方法が有する経済的・安定的処理の可能性を基準として、RHF 法が適切であると判断したが、当時は安定操業技術が確立しておらず、更に多種多様な製鉄ダスト類の成分・物性に対応し得る造粒技術、高炉や溶解炉等の種々の製鉄プロセスで再利用できるための還元技術、亜鉛や鉛の濃縮資源化技術、および製鉄ダスト類の全量利用をエネルギー消費ミニマムで達成するためのシステムなどを開発する必要があった。

2. 研究開発の経緯

(1) 研究開発の経緯

製鉄ダスト類の全量リサイクルを実現するには、一貫製鉄所の高炉での使用（主として還元鉄強度が必要）、普通電炉や溶解炉での使用（主として高還元率が必要）、および特殊鋼電炉での使用（Ni や Cr 等の高合金対応が必要）が必要となる。これらを視野に入れた製鉄ダスト類のリサイクルを達成する技術要目と開発の経緯を図2に示す。

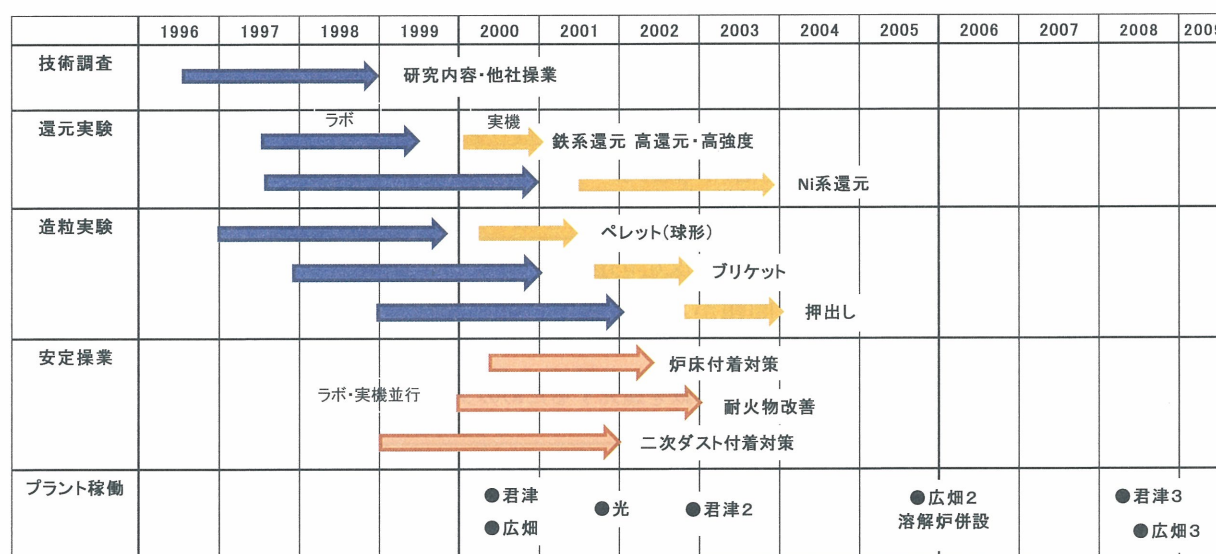


図2 新日本製鐵における RHF 技術開発の経緯

1996 年から調査研究に着手、実験室規模での還元実験と原料調合・造粒の実験を 1997 年から開始し、2000 年に君津製鉄所と広畑製鉄所で各々約 20 万トン／年の処理能力を有する商業プラント規模の設備を建設した。この実設備を通じてしか開発できない技術課題である原料調合技術・安定操業技術・耐火物の開発を進め、2002 年に一応の設備・操業技術を確立した。

並行して 1997 年からステンレス製造で生じるダスト類の処理技術開発を進め、2001 年に光製鉄所にて RHF の設備化、以降、これによって造粒性や品質を高める技術開発を継続し、ステンレスダスト類の全量リサイクル化を達成した。

更に湿式押出しによるスラッジの再利用技術を開発して 2002 年に君津 No.2 プラントを建設し、これを適用した。また 2005 年には、溶解炉との直結技術を開発してエネルギー効率的に改善した広畑 No.2 プラントを建設すると同時に、他製鉄所のダスト処理も含む広域ダストリサイクルシステムを構築した。加えて 2008 年に君津と広畑に各々 No.3 プラントを増設して、新日本製鐵で発生する製鉄ダスト類を全量リサイクルする体制を完成させた。

(2) 分担

RHF によるダストリサイクルに関する基礎調査・研究および還元技術開発は、技術開発本部と君津・広畑・光の各製鉄所で実施した。主として、ペレット造粒は君津製鉄所、ブリケット造粒は広畑製鉄所、光製鉄所およびプラント機械事業部、スラッジの押出し成形技術は技術開発本部と君津製鉄所が分担した。還元技術は基礎的な研究を技術開発本部が担当して、実炉での反応条件の最適化を各製鉄所で実施した。安定操業技術開発は君津、広畑、光の各製鉄所、耐火物は技術開発本部が担当した。亜鉛濃縮技術は君津と広畑の両製鉄所、RHF と溶解炉直結技術は広畑製鉄所とプラント機械事業部が担当した。

RHF の炉本体設備は、君津 No.1 は大同特殊鋼(株)製 (INMETCO 式)、広畑製鉄所 No.1～3 は(株)神戸製鋼所製 (FASTMET 式)、また光製鉄所の設備と君津 No.2, 3 は新日本製鉄(株)プラント機械事業部製 (Maumee 式) である。

尚、光製鉄所は 2003 年に新日鐵住金ステンレス(株)光製造所として、またプラント機械事業部は 2006 年に新日鐵エンジニアリング(株)として分社化されている。

3. 研究開発の内容と特徴

RHF 法を選択した理由 (1 節) と従前の RHF 法の問題 (2 節) を説明した上で、本研究開発の課題を整理 (3 節) し、開発した各技術課題の内容と特徴を 4 節にて述べる。

(1) 回転炉床 (Rotary Hearth Furnace : RHF) 法の概要と選択の理由

RHF は図 3、4 に示すように、ドーナツ状の回転炉を中心とする高温還元プロセスである。プロセスは、主として原料準備・造粒工程と RHF での還元工程、排ガス処理工程からなる。ダスト類は、まず造粒されて、酸化鉄等の氧化物と炭素を含む造粒物に加工されて、これを RHF 炉内で還元処理する。排ガスは冷却され、亜鉛濃縮ダストを除塵した後に、大気に放散される。



図3 君津 No.3 RHF プラント

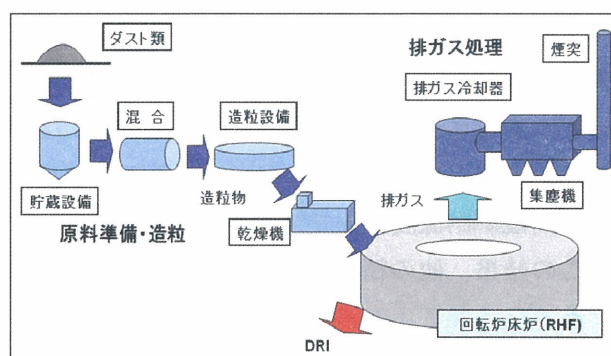


図4 RHF の全体プロセスフロー概略図

図 5 に RHF の炉内概要を示す。耐火物による天井と側壁の下で、ドーナツ状炉床が一定速度で回転する。側壁には複数のバーナーが設置され、炉床上の造粒物を加熱する。製鉄ダスト類と炭素粉からなる造粒物を炉床上に敷き詰めて炉床を移動させることにより、造粒物を加熱ゾーン内で加熱し、更に還元ゾーン内では酸化鉄・酸化亜鉛等と炭素が反応して還元反応が起きる。

炉内での造粒物の反応を図6に示す。炉内の造粒物は輻射熱で加熱され、1000℃以上となった段階で、造粒物中のFeOとCが盛んに反応して、金属鉄とCOを生成する。炉上部にてCOがバーナーの燃料とともに燃焼しCO₂となり、熱を発生する。RHFの利点は、炉床上で造粒物が静止しているために造粒物から発生したCOが造粒物周辺で高還元雰囲気（CO保護ゾーン）を形成することにある。この結果、炉上部空間で熱発生増加のためにCO₂濃度を上げても、造粒物周辺は還元雰囲気に留まり、炉内熱発生の増加と造粒物の還元雰囲気保持とが両立するという特長がある。従って輻射熱による高伝熱速度と微粉原料の高反応速度のため、10～20分間で反応が完了する利点があり、炉床面積当たりの生産性が高い。還元処理された造粒物は金属鉄を多く含む還元鉄（DRI：Direct Reduced Iron）となる。

本開発の基本プロセスとしてRHF法を選定した理由は、以下のような技術優位性・可能性があると判断したからである。

- 1) 炉床上での原料転動がないため、反応効率が良く、塊状の製品が得られる。

原料転動がないため、低強度の製鉄ダスト造粒物でも炉床上で粉化し難い。また、上部ガスのCO₂によるCO保護ゾーンへの乱れを最小限に抑えられ、この結果、高還元反応率が期待できるとともに、塊状DRI製品を高歩留で回収できる可能性がある。RHFでは、高金属化率が期待され、製品利用工程での省エネルギーが可能となる。

- 2) 炉内全域の温度を900℃以上に管理できるため、亜鉛等の炉内付着問題を回避できる。

高温炉内温度で操業すれば、排ガス中の亜鉛等の炉内耐火物面への付着問題を起こさない。この結果、他の精錬炉と異なり、亜鉛やアルカリの多い製鉄ダスト類をリサイクル処理できる。

- 3) 1300℃以上の高温操業が可能であれば、生産性を画期的に高めることができる。

耐火物への酸化物付着・耐火物寿命の問題が解決できれば、操業温度を1300℃以上とでき、約1100℃のロータリーキルンに対して、輻射熱供給速度を大幅に向上させることができ、造粒物周辺の還元雰囲気の改善も含めると同程度以上の反応速度向上が可能となる。

(2) RHF プロセスの課題

RHFは、還元反応原理的には優位性の高いプロセスであるが、単純な炉体構造であるため操業制御が難しく、商業プラントとして実用化するには多くの課題があった。本研究に着手した当時の他社開発では、RHFはDRI製造プロセスとして研究されており、実験室レベルでの検討（最大

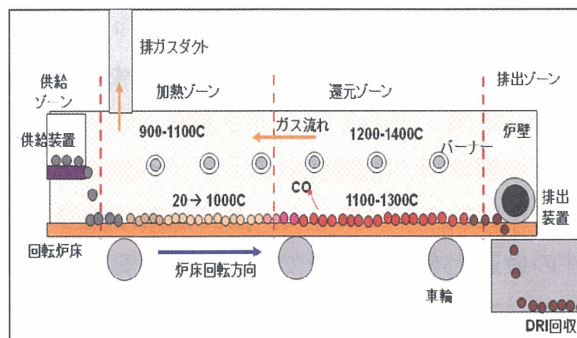


図5 RHFの設備構成と炉内状態

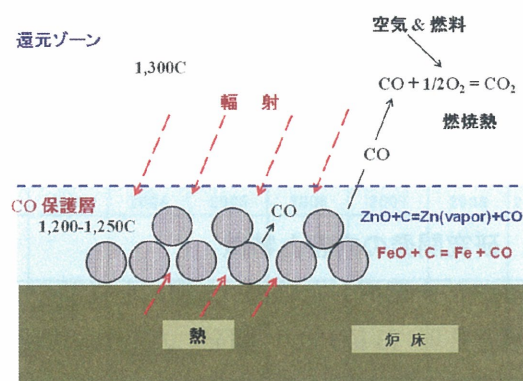


図6 ペレットの反応概要図

数 kg バッジ処理) やパイロットスケール (200 kg/時程度) での実験が行われてきた。これらの研究は単純化された条件での検討であり、原料組成や造粒の変動要因による還元反応への影響や操業時の諸課題の検討は不十分であった。

またダスト処理設備としても注目されていた。1999 年時点、世界で 4 基の RHF が稼働していた。製鉄ダスト類のリサイクルを意図した設備が 2 基あったが、技術的問題があり稼働開始後約 1 年で操業を停止している、また鉄鉱石還元の Iron Dynamics 社の設備は、造粒不調、RHF 炉床トラブル等の問題から、50~70% 程度の稼働率であった。唯一、INMETCO 社で年間処理量 6 万トンの操業が行われていたが、ここでは RHF は溶解還元炉 (SAF) の前処理プロセスであり、RHF では原料加熱と簡易還元 (鉄金属化率 50% 以下) に留まり、また原料がステンレス製造工程からの発生物であり、本研究が目標とする製鉄ダスト類の処理とは対象原料が異なるものであった。

更に詳細に調査した結果、以下のような操業技術課題があることが判明した。

1) 原料種毎の反応制御の安定性が確立されていない。

反応制御が単純なプロセスであるため、原料不純物等の条件差による反応条件変化に対して適正に対応できない。雑多な原料を使用したリサイクルの場合は制御がいっそう容易でない。また製鉄ダスト類では造粒物製造が難しく、造粒物の割れ・粉化などで造粒物の大きさにバラツキが大きく、還元反応が安定しない。

2) 成品の還元性が低く、且つ低強度である。

特に製鉄ダスト類を対象にした場合、安定な還元反応が実現されておらず、かつ高い炉内温度が実現されていないことから、金属化率が不十分である。また還元生成物の物理的形態制御が不十分であり、DRI の強度が極めて低く搬送に耐えられない。

3) 原料や中間反応物と炉床への付着が激しく、高温操業を実施できない。

酸化物のうち低融点のものと炉床が反応して、炉床ビルトアップが激しく、その結果操業温度を上げられない問題もあった。

4) 長時間連続操業ができていない。

原料中の亜鉛、鉛、アルカリ、ハロゲンが排ガス中に移行し、排ガス冷却装置内で付着する問題から、閉塞障害による操業中断が頻発した。INMETCO 社では 2 週間の頻度で閉塞、また原料から蒸発するアルカリ金属の浸潤反応により、耐火物の化学スポーリングが生じて定期的な炉材修繕が必要であり、1 年間以上の長期連続操業ができないという課題があった。

(3) 目標を達成するための研究開発課題

本研究開発を進めるに際し、新日本製鐵では、ダスト処理での RHF プロセスを「原料事前処理ー造粒ーRHF 焼成還元ー排ガス処理ー亜鉛ダスト回収」の一貫プロセスとして捉え、全体系を適正化することが重要として次のような研究開発の課題を設定した。

- 1) 成分・物性が不安定な劣質原料である製鉄ダスト類に則った造粒技術・プロセスを開発し、製鉄ダスト類の完全な利用を狙う。従来はリサイクルが難しかった、亜鉛含有ダスト類・高含水スラッジ類・その他発生物の完全利用を目指す。
- 2) 最終使用先での操業成績を向上させる DRI 製造技術とする。DRI 利用プロセスとなる高炉・鉄浴溶解炉・電炉のプロセス毎の特性に適合した物性・成分の DRI を製造する。

- 3) 長時間安定操業技術を確立して、商業プラントとしての操業技術確立を行う。高還元率を維持できる状態で、1 年間以上の連続稼働を可能とする対策と耐火物開発を主体とする研究開発を行う。
- 4) 亜鉛・鉛の濃縮回収技術を開発し、製鉄所・亜鉛精錬所間の亜鉛リサイクルルートを形成することで、非鉄金属精錬との連携も含めた金属資源の有効利用率を高める。
- 5) 製鉄所のダスト・スラッジを全量利用できるシステムを作る。RHF 単独ではなく、他のリサイクルプロセスもあわせて、エネルギー消費ミニマムの製鉄ダスト類の全量リサイクル体制を確立する。

(4) 開発した技術の内容と特徴

1) 劣質な原料である製鉄ダスト類の資源化

鉄鉱石などと比較して劣質な製鉄ダスト類の資源化に、先ず重要なのが粉体の造粒技術である。製鉄ダスト類には不純物が多く、粒度(サブミクロン～数ミリの範囲)・水分(0～98%)・成分のばらつきが大きい。従来の造粒技術は粉鉱石からペレットを製造するものであり、鉄鉱石原料の粉碎工程にて適正な粒度分布となるように加工して、粒度分布や水分が一定条件のものを造粒してきた。

そこで、ダスト類の造粒方法として、ペレット法、ブリケット法、および押し出し成形法の三方式の造粒技術と、それによる成品の特徴を検討した。成果一覧を表 3 に示す。各々の造粒法に適した製鉄ダスト類の種類や配合があること、また生産性や経済性にも差があり、製鉄ダスト類の発生比率と RHF の操業条件設定により、三種類の方法を使い分けることが効果的であることを解明した。

表 3 造粒技術の開発内容と技術評価

造粒技術		ペレット法	ブリケット法	押し出し法
原料	原料種	製鉄ダスト 粒度分布制約あり	製鉄ダスト 粒度分布制約が弱い	スラッジ(ダストも可) 粒度分制約小
	水分範囲	<5%	<5%	>25%
造粒方法		原料を混合後に、加水しながら円盤状パン上で転動させながら造粒	原料を水分を調整して、凹状の型のあるローラーで圧縮成形する	湿潤粉体をノズルから押し出し成形する
造粒物	造粒物形状	球	アーモンド状	円柱状
	写真			
	生産性	高(>60t/h)	高(最大20～30t/h)	低
技術改善点	技術改善点	粒度分布の計測とブレンディング制御	同左	原料水分の安定化
	水分管理		同左	適切な気孔率管理-造粒物の炉内爆裂の防止技術
	配合毎の処理条件の適正化		新バインダー開発 高強度・粉低減	
	特徴のまとめ	高生産性・低コスト・高強度生ペレット。 ただし、原料物性変動抑制が必要。	高生産性・比較的低コスト・生産速度安定。 原料物性変化に対応可能範囲が広い	高コスト。 原料配合変動に強い。 湿潤原料でも炉内に供給できる。

①ペレット法による造粒技術開発

ペレット法は、原料混合後に加水し、パン上で転動しながら直径 10mm 程度の粒を得るものである。高い粒強度の成品を高生産性で製造できる。しかし原料粒度分布等の物性が安定していることを製造の前提とするため、原料であるダスト粒度分布の変動を吸収するブレンド比率調整が重要となり、更にそれに応じた水分含有率管理と、造粒条件の適正化が、高強度生ペレットの製造に重要となった。

君津製鉄所では、原料ダスト粒度を適正範囲内にブレンドする方法を開発した。これに加えて新バインダー開発を行い、バインダー適正化等も行い、高強度の造粒物（生ペレット）を得ることができた。

またペレット生産速度の変動がプロセス制御上の問題になっていたため、この側面での造粒技術改善も行った。図 7 に、君津製鉄所にて No.1 プラントが操業を開始した直後（左）のペレットの生産量の変動を示す。この後上述した造粒技術を開発した結果、右に示すように数カ月後には安定した生産を得る結果を得た。

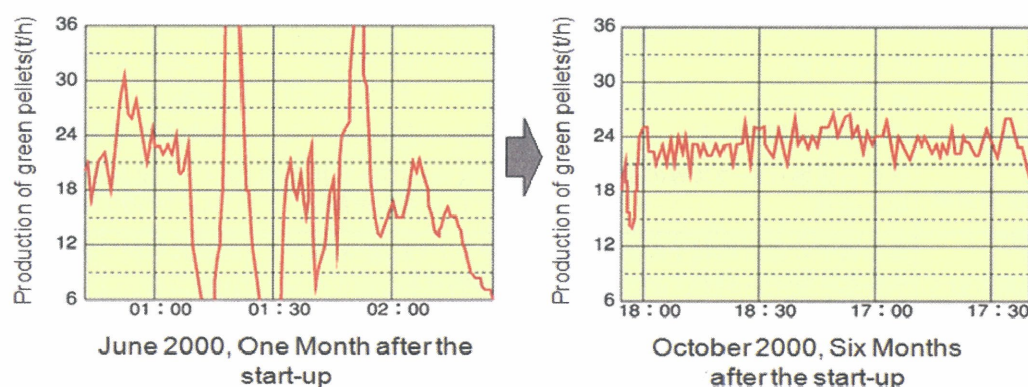


図7 生ペレット製造技術改善による RHF 処理での生産速度変動改善の例（君津）

②ブリケットによる造粒技術開発

ブリケット法は、原料とバインダーを混合後に加水し、凹状型を有する円筒ローラーで圧縮成形するものである。生産性やバインダー費用の点でペレット法より劣るが、原料粒度制約の自由度に利点を有する。ダスト配合により、含有水分や粒度分布が変わることから、各々の原料条件に応じた、ローラーの回転速度・押付け力、水分管理等のこまめな条件適正化を実施した。更に粒度分布の変動に対応できる手段として新バインダーを開発した。これらによってペレット法と比較して原料の製鉄ダスト類の粒度分布変化に対応力のある方法を開発した。

③押出し成形法による造粒技術開発

高水分比率のスラッジは、微細粒子であることからハンドリングと造粒が困難であり、かつ 1000℃近い高温炉内に装入すると爆裂する可能性があることから乾燥処理が不可欠であった。

高含水スラッジを資源化するために、連続式で高脱水率の脱水機を開発し、低位安定した含水率とし、この脱水機と貫通穴型押出し機の組合せによって低粉体充填率にする方法が有効であることを解明した。更に気孔率と水分範囲の適正化等に適切な方法を開発することに

よって、搬送可能な強度を有し、乾燥工程なしで炉内に装入し、急速な加熱によっても爆裂しない造粒技術を世界で初めて開発した。

2) 製鉄ダスト類の還元技術－DRI 使用プロセスに合わせた還元技術

DRI を使用する製鉄所の還元炉または精錬炉は、高炉、スクラップ溶解炉、電炉等である。これらの使用炉毎に、必要とされる DRI 品質が異なる。即ち、①高炉向け DRI；高炉内装入物の中で壊れず通気性を確保できる高強度、②溶解炉向け DRI；高金属化率の実現および還元炉－溶解炉の熱間リンクによる省エネルギーの達成、③ステンレス電炉向け DRI；鉄、ニッケル、クロムの高金属化率が得られ、且つ粉化せず塊状を維持すること、である（表 4）。これらの各品質を実現するために原料調整と還元条件を追及することが求められた。

表 4 各精錬プロセスで使用する DRI への要求条件と操業技術開発内容

		高炉	鉄浴溶解炉	ステンレス電炉
還元鉄使用条件	プロセスの 操業内容	コークスで鉄鉱石を還元・熔融する	スクラップ・還元鉄を石炭燃焼熱で溶解する	スクラップ・還元鉄を電気で溶解する
	DRI使用方法	鉄鉱石代替	還元鉄・鉄スクラップ代替	ステンレススクラップ代替
	DRIへの 要求事項	高強度 約10MPa 還元率は中程度以上	高還元率 (金属化率>85%)	高還元率 (鉄金属化率>80%)
	DRI使用効果	鉄鉱石置換・コークス等の還元 剤比低減	スクラップ置換・ダスト直接利用 に対して、石炭原単位削減	ダスト直接利用の代替とステン レススクラップ(Fe・Ni・Cr)置換
操業改善内容	操業方針	造粒物中の還元鉄粒子の焼結 反応を促進して、粒鉄ネットワ ークを形成する	高還元率のDRI製造・溶解炉と のホット連結技術	高還元率かつ粒状のDRI製造
	具体的な 技術開発	1. 還元中のペレット局部的凝 集を防止 2. 炉内温度の高位安定化 －高温耐火物・炉床付着物対 策・ゾーン毎燃焼管理 3. 還元末期に焼結反応促進 4. 造粒物の粉化防止	1. 原料成分を高還元性に調整 2. 原料粒度分布調整 3. 炉内温度の高位安定化 －高温用耐火物・炉床付着物 対策・ゾーン毎燃焼管理	1. Cr ₂ O ₃ を含む原料を還元性 成分に調整 2. 炉内温度の高位安定化 －高温用耐火物・炉床付着物 対策・ゾーン毎燃焼管理 3. 造粒物の粉化防止－造粒改 善

①圧潰強度を 1MPa 以下から 10MPa に向上（君津製鉄所にて実用）

DRI を高炉原料として使用すると、還元材（コークスと微粉炭）消費量を大幅に削減できることから、大きな省エネルギー・CO₂ 排出量抑制効果がある。また、RHF で製造した DRI は 0.3～0.6% の高硫黄濃度となることから、君津製鉄所のように大量の DRI をリサイクル使用する場合は、高脱硫能力の高炉での DRI 使用が経済的である。

高炉内には数千トンの炉内充填物があり大荷重がかかるため、高強度 DRI を製造して炉内粉化を防止する必要がある。従来の RHF で製造される DRI 強度は 1MPa (10kg/cm³) 以下であったが、高炉内の荷重条件に耐え得るための約 10MPa の高強度 DRI を製造することが求められた。実験室規模での還元実験により、還元生成した金属鉄粒 (1～10 μm) を焼結させ、造粒物全体をカバーする金属鉄ネットワークを形成することで、高強度 DRI 粒を製造できる可能性を解明した。

これを商業プラントで実現するための処理条件として、過剰な還元速度に起因する CO 発生で DRI 内部の空洞化を防止することと、生成物の軟化を防止することが重要で、還元中の

温度プロフィールを適正に制御した。この結果、世界で初めて高炉に直接装入できる DRI を製造する技術を開発した。

②商業プラントでの金属化率を 50%以下から 85%に向上（広畑製鉄所にて実用）

実験室規模等では高還元率の DRI が得られるが、商業プラントでの高還元率の達成は困難であった。この理由は、商業プラント内では、炉内 CO_2 が造粒物の FeO と C の反応平衡に悪影響するからである。

広畑製鉄所の鉄浴式溶解炉で、DRI を溶解する石炭エネルギーコスト削減の目的から、高い鉄金属化率の DRI を製造する必要があるとあり、広畑 No.1 商業プラントで還元条件の実験的検討を進め、高還元率条件を実現できる操業諸元を解明した。耐火物改善、炉内ガス温度の高温化と温度制御性向上、原料組成調整による反応速度向上等の新操業技術を開発した。これらの技術開発の結果、商業プラントとして初の 85%以上の鉄金属化率を達成することが可能となった。

③ステンレス電炉ダストの還元原料化処理（光製鉄所にて実用）

ステンレス製造工程から発生するダスト・スラッジ類は鉄、ニッケル、クロムの酸化物を多く含むものであり、それらの融点や還元特性から、普通鋼中心の製鉄所の製鉄ダスト類とは異なる操業条件の開発が必要であった。

このダスト類を原料とした造粒物では、鉄・ニッケルの還元率が低位に留まる問題があった。これは、特に酸化クロムが難還元性・高融点であることが原因であることを解明した。酸化クロム含有化合物反応性の問題を解決するために、造粒物の粒度と成分調整が重要であることを発見し、改善技術を開発した。酸化鉄と酸化ニッケルの金属化率が向上する結果が得られた。これらの技術開発によって RHF で製造した還元物の全量を電気炉で使えるようになった。

3) 長時間安定操業のための技術開発

長時間安定して操業できることが商業プラントに不可欠である。2 節で説明したようにこれを満足できる技術が確立されていなかった。そのためには炉床管理、DRI 排出スクリーン管理、排ガス処理系内部への付着物対策、耐火物技術の項目での技術改善策が必要であった。

①炉床耐火物への造粒物の付着

RHF の実操業で、造粒物の炉床耐火物への付着対策が重大である。付着物生成の理由は、反応中に原料が付着性の高い物質に変化すること、原料粉が炉床と付着し易いこと、また温度の要因が大きいことが判明した。

原料に含まれる物資が高温で化合して生成する FeO 系複合酸化物は、 1200°C 付近で付着性が高い組成域があることを解明した。そこで還元過程で複合酸化物が低融点化しない組成域を見出し、原料配合の判断基準とした。また粉は還元後に排出装置前後で Fe から FeO に変化し、炉床に焼付く問題があった。従って造粒技術を改善し粉発生率を減らすことで、炉床付着対策にも効果があった。

②低融点・高付着性不純物含有の原料処理での排ガス冷却装置での付着

亜鉛・鉛・アルカリ・ハロゲン等の低融点・揮発性物質を原料に含有することが RHF の安定操業に影響する。これらは精錬炉内高温部で蒸発し、炉内や排ガス処理装置内の壁（低温部）に付着物を形成する。検討の結果これらは $\text{ZnO-PbO-ZnCl}_2\text{-NaCl-KCl}$ の複合体であり、 500°C 以上の条件では高粘性物質であることが判明した。そこで付着防止策として、原料配合を調整して複合体が融体化する温度を高温化すること、付着しやすい温度域の排ガス冷却装置の長さを短くすること、また排ガス冷却装置の内面に工夫をして付着物除去を容易化することとした（図8）。これらを実現して、蒸気による排熱回収が可能な場合（君津製鉄所での事例）、急速冷却型ボイラーを設置し、熱交換部表面温度を複合体の完全凝固点以下の温度とすることで付着物を剥離しやすくすることを可能とした。ボイラーを設置しない場合（広畑、光製鉄所）、水噴霧型ガス急速冷却装置を設置して付着物生成域を局所化し、且つその部位に生成する付着物を容易に剥離できる構造とした。

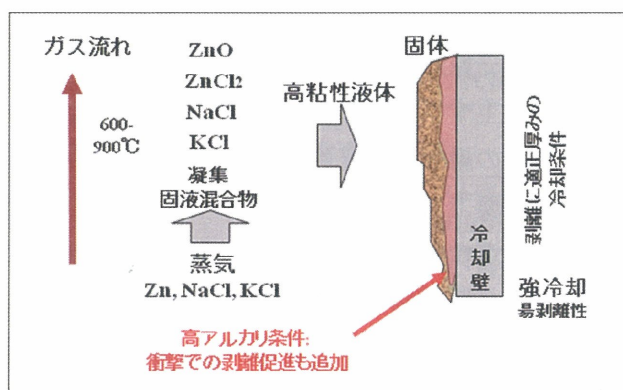


図8 排ガス冷却時の付着物対策

③耐久性に優れた耐火物の開発

高温還元炉用耐火物として Al_2O_3 系耐火物が最も耐久性が高いが、RHF では原料中のアルカリ金属が蒸発して耐火物へ浸潤する結果、 Al_2O_3 系耐火物が膨張して表面剥離が生じる問題（化学スポーリング）があった。これにより従来の RHF プラントでは、 1200°C 以上のガス温度の場合、耐火物寿命が1年以下である問題があった。

そこで高温化学的な検討から、アルカリ浸潤時の膨張の低いモルタル添加物を採用して、耐火物内部へのアルカリ金属拡散と反応を抑制する組成の耐火物を開発した。この結果 $1300\sim 1400^\circ\text{C}$ の高温操業を継続しても5年程度の耐火物寿命を得ることが可能となった。これによってガス温度を最高 1400°C まで高温化することが可能となり、商業プラントとして十分な生産性および還元率の向上効果が得られた。

4) 亜鉛・鉛の濃縮資源化技術

RHF によって金属鉄や金属ニッケルを製造するのみならず、金属として価値の高い亜鉛や鉛等の低融点金属を排ガス中に蒸発させて濃縮分離し、これらの非鉄金属をリサイクルすることも重要な利点である。亜鉛・鉛を効率的に濃縮・分離回収する技術も開発した。

排ガス冷却過程の高温部（ 500°C 以上）に於いて、塩化物（ NaCl 等）の多い組成部分を濃化

析出させ、残りの高亜鉛濃度の組成部分を排ガスバグフィルターで回収する。亜鉛濃度 (T.Zn) は 35～60% となり、金属亜鉛製造向け原料とした。亜鉛濃度は、原料条件に強く影響されることが判明した。条件の良い広畑での処理では、トータル 50% 濃度以上の二次ダストを粗亜鉛原料として回収している。

4. 研究開発の成果

製鉄ダスト類の全量リサイクルを実現するには、個別要素技術の開発のみならず、製鉄ダスト類を適正なリサイクルルートに配分することも重要である。製鉄ダスト類を粒径、鉄・炭素含有率、亜鉛含有率、アルカリ含有率、含水率等で区分し、製鉄所の特性に合わせた、処理コストを最小化するダスト類のリサイクルシステムを構築した。

(1) システム 1：大型一貫製鉄所での製鉄ダスト類の全量リサイクルシステム（君津製鉄所）

粗鋼年産 1000 万 t 規模の君津製鉄所では、製鉄ダスト類の発生量が合計約 120 万トン／年、そのうち亜鉛含有ダストが 30～50 万トン／年となる。これに対応する高炉での DRI 使用を実現する製鉄ダスト類リサイクルシステムを構築した。高強度 DRI を製造する方法を採用し、他の高炉原料と同様の 8～20MPa の高圧潰強度を実現した。

また製鉄所内で比較的ドライなダスト類とともに高含水のスラッジ類が発生する。図 9 に示すように、省エネルギー・低コストで生産性に優れたペレット法による造粒を優先し、ペレット造粒が難しいダスト類および高い含水スラッジ類は湿式押し出し法による造粒を併用するダスト処理システムを採用することで、君津製鉄所内で発生する製鉄ダスト類の全量をリサイクルすることとした。3 基の RHF を建設し、No.1（年処理能力 18 万 t）および No.3（同 31 万 t）プラントではドライなダスト類をペレット法で造粒したもの、No.2（同 13 万 t）プラントで含水スラッジを湿式押し出し法で造粒したものを、それぞれ高強度 DRI 化して、全量リサイクルを達成するシステムを構築した。この結果、難処理のダスト・スラッジを No.2 プラントに集中することで、No.1、No.3 プラントの造粒生産性を最大限に高めることができた。

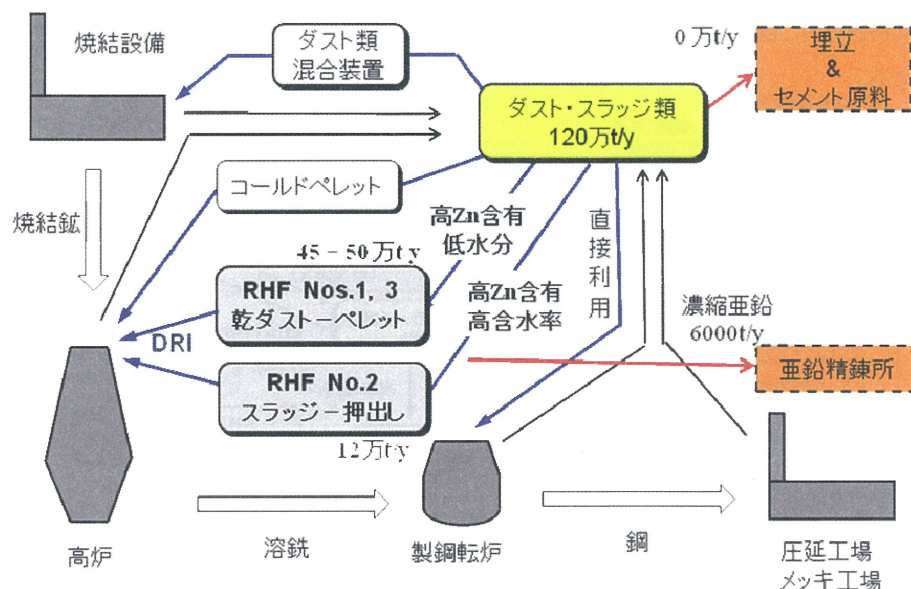


図9 一貫製鉄所での製鉄ダスト類の全量リサイクルシステム

この形式のシステムでは、生産容量の大きい高炉に DRI をリサイクルすることで、安定消費が可能となる。DRI の高炉操業に与える効果として、高炉装入物 1 トン当たり 30kg の DRI を含むることにより、図 10 に示すような DRI を製造し、高炉の還元剤比（コークスおよび補助燃料の使用量）の低減効果が確認できた。

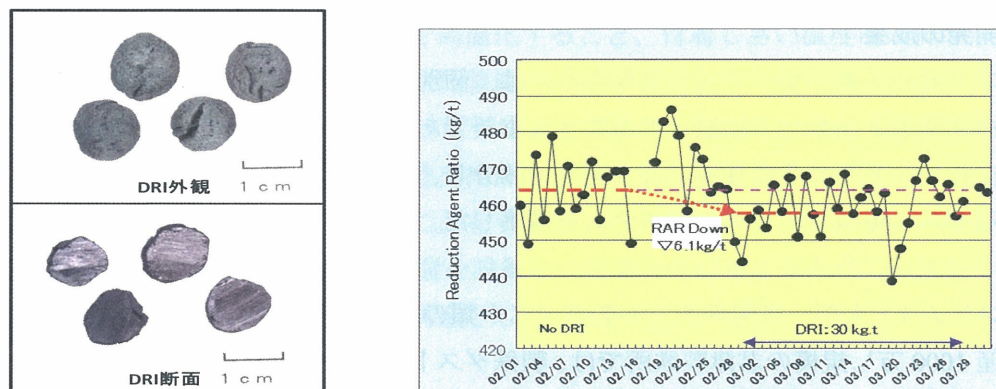


図 10 高強度 DRI 写真と、DRI 使用による高炉還元剤比の低減結果

(2) システム 2：ダスト集中処理による多製鉄所連結リサイクルシステム（広畑製鉄所）

広畑製鉄所は高炉を有さず、他の製鉄所で生産された型銑やスクラップ等の冷鉄源を原料として溶解炉で熔融鉄源を生産する製鉄所である。他製鉄所（大分・名古屋製鉄所）で発生した製鉄ダスト類の集中リサイクルを実施できる体制を広畑製鉄所の RHF を中心に構築し、発塵対策等の環境対策の集中化と処理コスト削減を追求した。広畑製鉄所の溶解炉では、気化した亜鉛を含む排ガスが急冷されることから亜鉛に付随する問題がない。そこで他の一貫製鉄所では低亜鉛の製鉄ダスト類を鉱石焼結設備や製鋼工場で再利用が難しい高亜鉛含有ダストと含水スラッジを適度な比率で混合して搬送し易い状態にして広畑製鉄所に船輸送する方法を採用した。

広畑製鉄所では図 11 に示すように自所ダストと他所ダストを混合して RHF 原料として再利用する。従って粒度分布を始めとする物性が変動する混合ダストを適正に造粒処理できる技術が重要となる。そこで原料粒度制約の自由度を有するブリケット法で造粒する。原料の発生元別の混合比管理と原料配合に合わせた圧縮成形技術が重要である。また高還元率を実現する RHF 操業技術が重要となる。

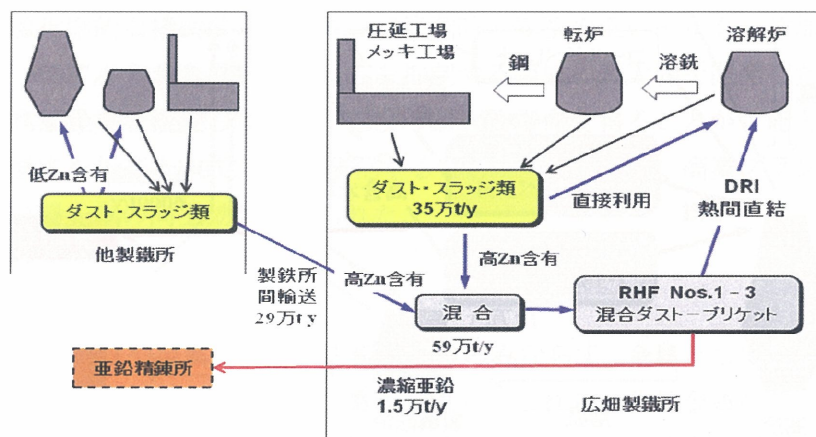


図 11 他製鉄所間の製鉄ダスト類集中処理による製鉄ダストリサイクルシステム

RHF で製造された DRI を鉄浴式溶解炉で熔融鉄とする。高還元 DRI の RHF と溶解炉間での直結を実現するための装置を開発し、高温 DRI を溶解炉に供給可能とした。他製鉄所での製鉄ダスト類を含めたリサイクル体制を構築するために、3 基の同型 RHF（年処理能力各 19 万^ト）を設置した。

（3）システム 3：Ni、Cr を含む高不純物濃度のダスト類の特殊鋼電炉での使用（光製鉄所）

ステンレスダスト、スラッジのリサイクルにおいては電気炉での酸化物還元負荷および高温アークによるフッ素蒸発等の課題があったが、図 12 に示すように RHF 処理による高還元ブリケット化、原料配合比適正化によるフッ素排出抑制により、一部のフッ素含有スラッジ以外の発生ダストリサイクルを達成した。

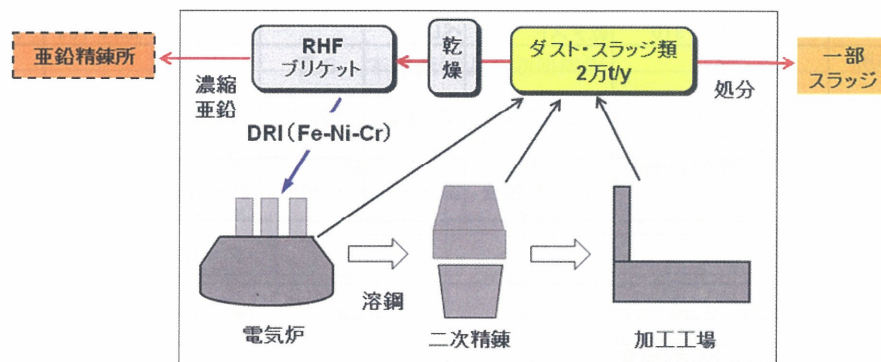


図 12 ステンレスダストリサイクルの全体システム

（4）製鉄所－非鉄精錬所間の亜鉛循環のシステム構築

本開発により、鉄資源のみならず、亜鉛めっき鋼板や鉄鉱石資源に微量に含まれる亜鉛や鉛のリサイクルが可能となった。図 13 に示すように、RHF で亜鉛を濃縮分離し、亜鉛精錬所で金属亜鉛となり、製鉄所で再使用するリサイクルルートを構築した。

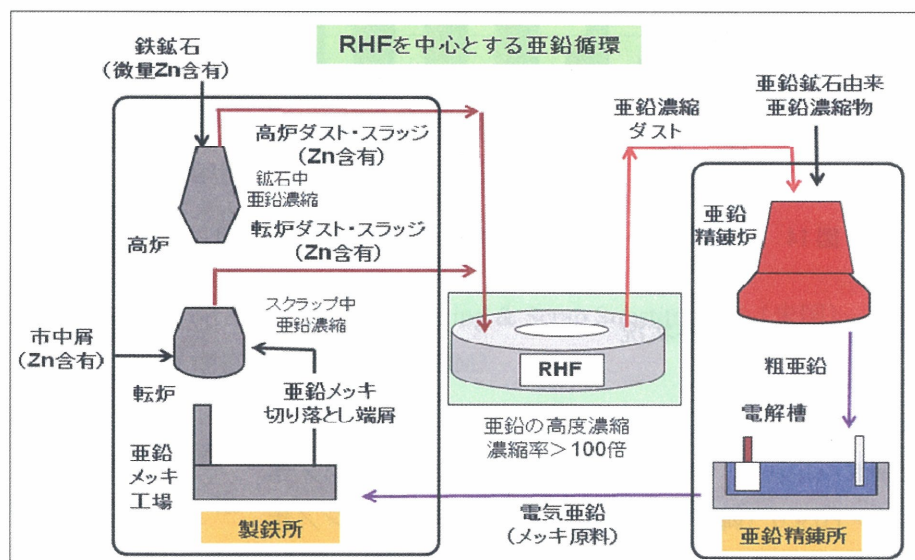


図 13 RHF を中心とする製鉄所－亜鉛精錬所間の亜鉛リサイクル

(5) 回転炉床式ダストリサイクルプロセスの適用状況

1) 新日本製鐵(株)及び新日鐵住金ステンレス(株)での実施状況

君津製鉄所	設置基数	3基	処理能力計	62万トン/年	2000年～
広畑製鉄所	〃	3基		57万トン/年	2000年～
光製鉄所	〃	1基		2万トン/年	2001年～
合計		7基		121万トン/年	

表5 設備仕様リスト

プラント	運転開始年	設備規模 千t/年	原料	還元条件			製品	稼働率 %
				造粒	還元温度	還元時間		
君津製鉄所								
No.1	2000	180	乾ダスト	ペレット	1300℃	10～20分	高強度	92%
No.2	2002	130	含水スラッジ	押出し		15～25分	還元鉄	90%
No.3	2007	310	乾ダスト	ペレット		10～20分	M.Fe 70%	>90%
広畑製鉄所								
No.1	2000	各々190	混合ダスト	ブリケット	1400℃	10～20分	高還元率 還元鉄 M.Fe 85%	>90%
No.2	2005							
No.3	2008							
光製鉄所	2001	20	ステンス発生物	ブリケット	1250℃	20～30分	Fe・Ni・Cr の還元物	>80%

注) 年修を含む

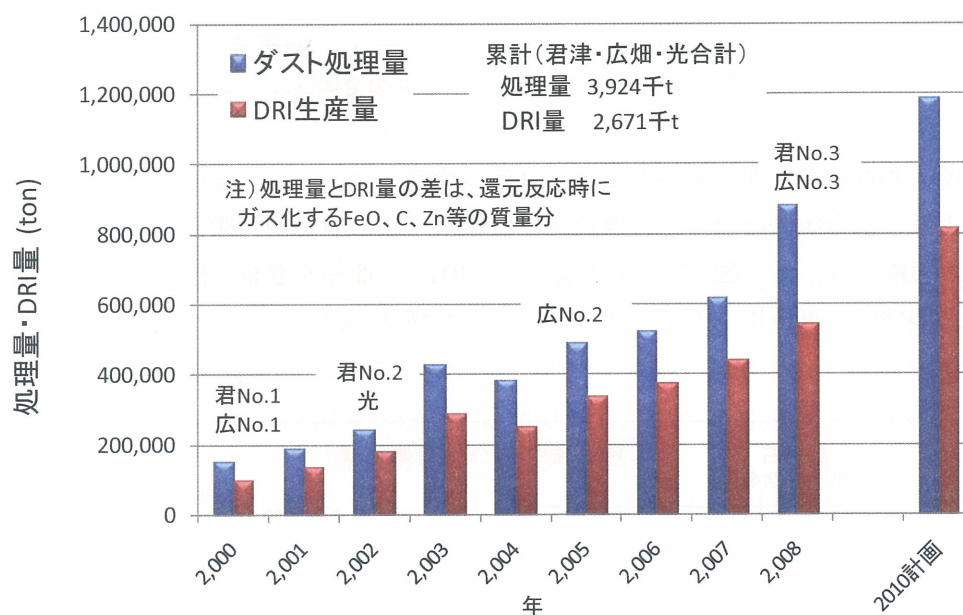


図14 新日本製鐵・新日鐵住金ステンレスでのダストリサイクル実績

2) 国内外他社への技術供与状況

朝日工業(電気炉)	1基	1万トン/年	2008年～
中華鋼鉄/CSC(台湾)	1基	13万トン/年	2008年～
馬鞍山鋼鉄(中国)	1基	20万トン/年	2009年～
浦項製鉄/POSCO(韓国)	2基	40万トン/年	2009年～

(追加設置の計画あり)

(6) 本開発による効果

表6に本開発による効果内訳を記す。2008年度実績でダスト処理量は89万トン、これによる還元鉄製造量は55万トン、粗酸化亜鉛製造量は1万トンであった。この結果、鉄源購入削減効果・鉄鉱石換算60万トン、還元鉄を高炉に使用したことによる高炉還元剤の改善効果等で、石炭換算7万トン、粗酸化亜鉛回収効果・亜鉛精鉱換算2万トン（亜鉛原鉱採掘量換算11万トン）なる省資源化効果が得られた。また還元鉄を高炉に使用したことによるRAR改善効果及び蒸気回収等の直接的な省エネ効果は2088TJ／年であった。これは原油削減効果として6万キロリットル／年、CO₂排出量抑制効果16万トン／年に相当する。なお同省エネ効果については還元鉄を高炉で使用する君津製鉄所の場合のものである。

さらに2008年度中に稼働を始めた君津ならびに広畑のNo.3RHFプラントがフルアップする2010年度以降には、ダスト処理量120万トン／年まで処理能力が拡大する計画である。

表6 本開発による効果内訳

	単位	2008年度実績	2010年度目標	備考
ダスト処理量	(万トン/年)	89.3	120	君津No.3&広畑No.3RHFフルアップ
生産量				
還元鉄生産量	(万トン/年)	55.5	83	
粗酸化亜鉛生産量	(万トン/年)	1.1	1.5	
省資源化効果				
鉄鉱石省資源	(万トン/年)	60.4	81	ダスト中铁分を鉄鉱石換算
コークス・石炭省資源	(万トン/年)	7.1	9	還元鉄の高炉使用効果 (君津分のみカウント)
亜鉛精鉱省資源	(万トン/年)	2.2	3	国内非鉄精錬での省資源効果
亜鉛原鉱採掘量削減	(万トン/年)	11	15	海外山元での省資源効果
省エネ効果				
省エネ効果	(TJ/年)	2,088	2,622	●還元鉄の高炉使用効果(君津分のみカウント) ●広畑:還元鉄製造増エネ分は型鉄製造省エネと同等 ●光:還元鉄製造増エネ分は合金鉄製造省エネと同等
同原油削減効果	(万kℓ/年)	6	7	
炭酸ガス排出抑制	(万t-CO ₂ /年)	16	20	

5. 学会発表、論文、特許等

(1) 学会発表・論文

学会発表：12件 うち、国際会議 7件

日本鉄鋼協会講演大会	3報
2002年 省エネセンター省エネルギー事例報告（経済産業大臣賞受賞）	1報
2002年 フランス鉄鋼協会講演大会	1報
2004年 アジア鉄鋼会議	1報
2005年 耐火物協会講演大会	1報
2007年 Symposium on Alternative Ironmaking & Scrap Substitute IV（米国）	2報
2006年 ブラジル鉄鋼協会講演大会（ABM）	1報
2007年 ドイツ鉄鋼会議（METEC）	1報
2008年 台湾鉄鋼会議	1報

論文 4報 うち海外 1報

新日鐵技報	2報
ATS（フランス鉄鋼協会誌）	1報

高温学会誌	1 報
その他	
日本鉄鋼協会 共同研究会製鋼部会 自由議題として発表・議論	2 報

(2) 特許出願状況

出願総数：	出願数	79 件	うち、登録件数	33 件
出願中	国内：	46 件	海外：	7 件
登録済	国内：	33 件	海外：	9 件

6. 今後の展望

回転炉床法をベースとして、鉄鋼生産プロセスで発生する金属系製鉄ダスト類の 100%リサイクルを実現するための各種技術要素および全体システムを開発した。これによって資源の有効利用とそれによる経済効果、および省エネルギーなどが期待できる。新日本製鐵㈱内での全量リサイクルを計画通り達成することに加えて、以下のような今後の展開が期待できる。

1) リサイクルハブ構想による広域リサイクル

新日本製鐵㈱のみならず国内製鉄他社・他産業で発生する類似資源のリサイクルの実現本業績で説明した技術を活用して広畑製鉄所において大規模な4基目のRHFを㈱神戸製鋼所との合弁で建設し、住友金属工業㈱、日新製鋼㈱、中山製鋼㈱で発生する製鉄ダスト類を資源化し、新日本製鐵㈱、㈱神戸製鋼所、山陽特殊鋼㈱にDRIを供給することにより関西圏での効率的な製鉄ダスト類のリサイクルを計画している(2008年10月公表)。当該技術の国際的な展開による省資源・省エネルギーへの貢献

2) 各位内外への技術供与による技術の普及

国内1基、海外は韓国、台湾、中国に4基のRHF設備の技術供与を行っている。韓国のプロジェクトでは、国連CDM理事会にCDMプロジェクトとして申請している。現在、世界的には数百万トン/年規模の製鉄ダスト類のリサイクルポテンシャルがあり、省資源・省エネルギーに貢献する重要技術として、積極的に技術供与を進めていく。

3) 非鉄金属精錬への適用

本技術は亜鉛・鉛等の高温で蒸気圧の高い金属の分離が可能であることから、非鉄精錬での揮発性金属の分離設備としての応用が可能である。特に亜鉛精錬での利用が期待される。

4) 低品位・難使用鉱石の還元による鉄・非鉄金属の資源拡大

世界的には、鉄分30%程度の低品位、かつ酸化チタンや酸化バナジウムなどの不純物を含む鉄鉱石が大量に存在している。鉄含有量が低いこと、および酸化チタンなどが高炉操業に悪影響を及ぼすことから、現在は利用されていない。今後、高品位鉄鉱石資源が減じると考えられる中、RHFを用いて還元鉄を製造することで、このような不純物含有鉄鉱石を鉄資源として活用することが可能となると考えている。