

インド鉄鉱石資源の現状と今後の課題 —インド鉄鉱業の多様性への対応—

Mitsui Iron Ore Development Pty. Ltd.
専務取締役

(株)日鐵テクノロジーサーチ
環境・プロセスソリューションセンター 所長

野坂庸二

Nobuji Nosaka

肥田行博

Yukihiro Hida

1 はじめに

インド鉄鉱石資源の対日輸出は1935年の0.012 Mtを嚆矢とし、その後1951年の鋼管鉱業(株)とGoa Chougle & Co間の鉄鉱山開発援助協定(延べ3回)、更には政府間ベースでの1958年キリブル鉄鉱山開発資金援助、1960年バイラデイル鉄鉱山開発資金援助協定により開発、出荷が本格的に始まった¹⁾。2000年では、インド産鉄鉱石は、我が国の年間総輸入鉄鉱石量131.7 Mt/a内の12.6%を占め、豪州、ブラジルに次いで多く^{2,3)}、今後は我が国のみならず中国、韓国、台湾にとっても重要な供給ソースになり得ると推察される。本報では、インド鉄鉱石産業(鉄鉱業と略称)について、その特徴である多様性に焦点を当てて紹介する。

2 インド鉄鉱業の現状 —多様性の実態—

2.1 インドの鉄鉱石生産状況

インドの鉄鉱石生産量と輸出比率の推移⁴⁾を図1に示す。2000年の統計によると^{2,3)}、世界の生産量(約940 Mt)では、

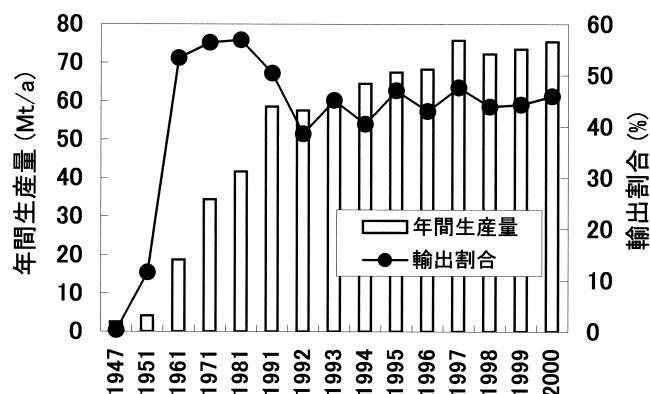


図1 インドにおける鉄鉱石の生産量と輸出割合

インドはブラジル、豪州、旧ソ連邦、中国に次ぐ第5位(75.4 Mt)に位置し、輸出量(約490 Mt)では、豪州、ブラジルに続く第3位(34 Mt)となっている。輸出比率は図1の如く、1995年以降45%前後で推移している。輸出先は日本、中国、韓国が多く、2000年ではこれら3国向けに輸出量の85%以上を占めていた^{2,3)}。特に1990年以降、中国向けがほぼ直線的に増加しており、2000年には30%を越えた(日本:45%強)。

1965年(世界生産量:624.2 Mt)以降の世界における年率輸出増加量(8 Mt/a)の大半は豪州、ブラジルに依存してきたが、インドのそれは0.8 Mt/aで、年率生産増加量(世界:9 Mt/a, インド:1.3 Mt/a)に比較して低くなっている。これは、輸出産業を主体として開発してきた豪州、ブラジルと異なり、インドでは国内需要を念頭にいた資源開発が行われてきたためである。これがインド鉄鉱業の特徴の1つと言える。

2.2 インド鉄鉱業における多様性の実態

インド鉄鉱業について、資源の賦存状況、鉱石の質、採掘状況、処理プロセス、内陸輸送並びに港湾状況、更には企業形態の面から調査、整理すると表1のようになる。各項目毎に多様化しているのが特徴的であり、以下にその多様性の実態について補足する。

2.2.1 インド鉄鉱床の多様性

インドのみならず世界の主要な鉄鉱床である縞状鉄鉱層(Banded Iron Formation: BIF)は先カンブリア紀片岩帯(Pre-Cambrian schist belt)の重要な構成層である。BIFの成因、特性についてはR.C.Morrisらを始めとして数多くの報告例があるが、インドのBIFに関してはあまり述べられていない⁵⁻⁸⁾。またインドでの地質関連調査は主に鉄鉱石資源の経済性に関連した分野に焦点が当てられておりBIFに関

表1 インド鉄鉱業多様性の概要

鉄鉱石の 鉱量 (’95.4.1)	主要鉄鉱山は5地域(東部,中央部,西部,南部,南西部)に区分できる (a)赤鉄鉱量; 10,052Mt (Fe分65%以上:13%, Fe分62-65%:43.7%) (b)磁鉄鉱量; 3,408Mt
鉄鉱石の 種類・質 (ore type)	(a)赤鉄鉱系 ・Hard ore (Steel gray, hard massive, Blue hematite) ・Laminated ore (Hard laminated, Hard flaky, Biscuit ore) ・Soft ore (Soft massive, Soft laminated, Soft lateritic, Soft limonitic) ・Blue dust (Friable, Powdery blue dust) ・その他 (Goethitic, Limonitic, Shaly, Canga, Float) (b)磁鉄鉱系
採掘状況	人力〜機械化(採掘鉱山数202の内機械化は112) ①機械化鉱山の生産量:総生産量の80% ②生産規模:2Mt/a以上:9鉱山(総生産量の50%), 1-2Mt/a:18鉱山 ③最大規模鉱山:切込鉱(ROM)処理量:22.5Mt/a(生産量7.5Mt/a)
処理 プロセス	人力:破碎及び篩分け 機械化:乾式(破碎・分級) 湿式(破碎・分級〜選鉱; Spiral classifier, Hydro-cyclone, Column flotation, Magnetic separator など)
輸送・ 港湾状況	積込:人力〜機械化 輸送:トラック, はしけ, 鉄道, スラリー パイプ システム 港:船の喫水8m〜16.2m
企業	鉱山(鉄鋼省)、鉄道(鉄道省)、港湾(運輸省)、販売(商業省)の管轄区分 自家使用(生産能力29Mt/a)、非自家使用(56Mt/a)、総生産能力85Mt/a 国家鉱山(38鉱山)、民間鉱山(164)、総鉱山数202
生産品	切込鉱(ROM)、整粒塊鉱(高炉用,直接還元用)、整粒焼結粉、微粉、ペレット、

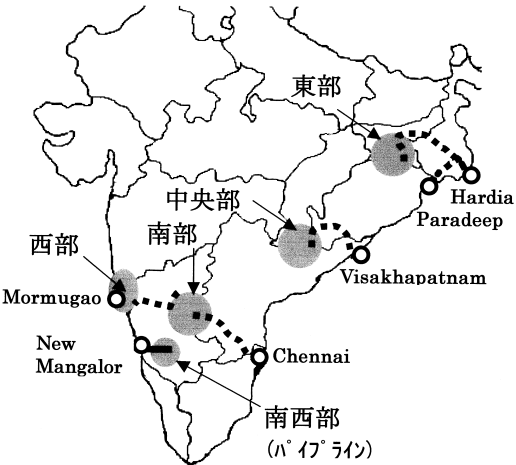


図2 インドにおける鉄鉱床と鉄道及び積出港

する基礎的な研究調査は体系的には行われていないとも言われている⁸⁾。ここではインドの鉄鉱床の分類、鉱量、賦存分布の多様性に焦点を当てて概説する。

①鉄鉱床の分類

インド鉄鉱床の成因に関する基礎的研究(堆積環境、堆積盆地特性、層序、地質構造、地球化学、鉱物、続成作用、動力変成、古生物など)は不十分で、系統だった調査研究が必要であるとの認識により、Geological Socieity of India は1985年5月Dharwarにて、これまでの知見と今後の課題について討議を行っており⁴⁾、今後の研究成果が待たれる所である。最近の研究では、始生代片岩帯(Archaean schist belt)での鉄鉱石成因にG.A.Grossの分類⁹⁾(先カンブリア紀での成因をArgomaタイプとSuperiorタイプの二つに分類)を適用する事の困難性が認識されている^{8,10)}。現在では、インド鉄鉱石の成因はTamil Nadu タイプ(30億年以上前)と29〜26億年前に形成された緑色片岩帯(Greenstone schist belt)に胚胎したArgomaタイプに類似した特性を有する2つであると考えられており^{8,11)}、インドの主要鉄鉱床は後者に分類されており、豪州ビルバラ・ハマスレー堆積盆地の鉄鉱床とは異なった分類に属すると考えている^{5,12)}。

②採掘中鉱山の分布

現在稼行中の主要なインド鉄鉱山は、表2に示す如く5つの地域に大別できる¹³⁾。図2は、夫々の位置関係を鉄道と港湾と合せて示したものである。インド半島全体にわたって夫々独立して分布している、と言える。

③鉱量並びに品位別分布状況

インドでの鉱量は赤鉄鉱系と磁鉄鉱系を合せて約13,400 Mtである(前掲表1)。赤鉄鉱については、表3に示す様に東部地域に約60%、中央部地域に20%強賦存している。表3からFe分別の分布を見ると、高品位(65%以上)から低品位(62%以下)まで幅広く賦存し、かつ鉄鉱床地域別

表2 インドにおける主要鉄鉱山地域

賦存地域	存在州名	主要鉄鉱山地域 (Range / Mine / Deposit / Group)
赤鉄鉱	東部	Jharkhand ~ Orissa Barsua-Kalta range, Bolani range, Thakurani range, Kiriburu-Meghabataburu Range, Noamundi-Katamati range, Joda group, Chiria-Budhaburn range, South Banspani group, Malangtori block, Gandhamardan - Daitari group
	中央部	Chhatigarh ~ 東 Maharashtra Bailadila range, Dalli-Rajhara, Rowghat range, Kanta-Jabalpur area, Malamaya-Aridoungri group
	南部	Karnataka (Bellary-Hospet 地区) Donimalai range, Kumaraswamy range, Ramandurg range, NEB Thimmappannagudi range, Eltinahatti range, Kemmangundi range
	西部	Goa ~ 西 Maharashtra Goa range, Redi range
磁鉄鉱	南西部	Karnataka (Shimoga-Chikmagalur) Kudremukh deposit, Bababudan range, Bellaryanadurga area, Bangarkal area
		Assam ~ Kerala
	西部	Goa ~ 西 Maharashtra Tudo mine, Bimol mine, Shindidurgu district
	南部	Himachal ~ Pradesh Mandi deposit
		Andhra ~ Pradesh Ongole deposit, Guntur districts
		Tamil Nadu Kanjamalai deposit, Thiruvanamalai deposit, Salem district, Tiruchirappally district

表3 州別及び品位別の赤鉄鉱鉱量比率(1995年4月1日現在)

州名	賦存地域	高品位 (Fe65%以上)	中品位 (62-65%)	低品位 (62%以下)	未分類	Blue dust/ Black ore	合計
Jharkhand 及び Orissa	東部	3.0 %	35.0 %	15.7 %	4.9 %	0.7 %	59.3 %
Chattigarh 及び 東 Maharashtra	中央部	5.8	6.1	5.6	4.2	0.2	21.9
Karnataka	南部	3.0	6.0	0.7	0.9		10.6
Goa 及び 西 Maharashtra	西部		2.2	4.8	0.5		7.5
その他		0.1		0.5	0.1		0.7
合計 (%)		11.9%	49.3%	27.3%	10.6%	0.9%	100%

に夫々の比率が異なっていることがよく分かる。

磁鉄鉱系については、南西部及び西部地域を主体に3,000 Mt賦存している。その内、南西部のKarnataka州Simoga-Chickmagalur地区にてその80%以上が胚胎しており、現在Kudremukh 鉱山にて年産7 Mt/a規模の微粉(Concentrate)が生産され、ペレット及び微粉がほぼ等量、輸出されている^{14,15)}。

著者らは鉱物組織から、インド磁鉄鉱の成因は火成岩由来

のKirna 鉱山（スエーデン）、Malmberget 鉱山（同）、Romeral 鉱山（チリ）等とは異なり、Mikhylovskaya 鉱山（ロシア）、北米タコナイト等と同様の縞状磁鉄鉱－石英層（Banded Magnetite- Quartzite：BMQ）由来であると推察している。

2.2.2 鉱石タイプ（Ore type，鉱質）の多様性

鉱石タイプ区分は、学術的区分としてよりは夫々の鉱山・鉱床での採掘管理、品質管理のための1つの要素として、各鉱山の地質構造、富化作用、塊粉比率、物理性状などを網羅した鉱質特性を表すものとして活用されている。著者の1人がインド各鉱山を調査した際に入手した鉱石タイプを相対的に比較した結果を表4に示す。なお、原語の方が理解し易いと考えそのまま記載することにした。

鉱石タイプの1及び2は超高品位であり、鉱物組織的にも、成因的にも他のタイプと異なり、熱水の影響を受けたタイプ（Hypogen）であると推察している。

この様に鉄鉱床賦存地域間、更には各地域内での鉱質の多様性は表4のように大きく、「インド鉄石」として一括的に理解する事はできない事が明らかである。

2.2.3 鉱山採掘規模、経営形態の多様性

現在採掘中の鉱山は202もあり、各鉱山の平均年間採掘量は0.37 Mt/a、且つ生産規模2 Mt/a以上の鉱山は9鉱山、更には機械化された鉱山は約半数の112鉱山となっており、前掲表1のように経営形態、生産規模、採掘方式何れにおいても多岐にわたっている⁴⁾。

また、主要鉱山を経営形態別（自家或いは非自家使用、国家或いは民間）採掘能力で調査した結果¹³⁾でみると、自家使用（Captive mine）比率及び民間企業比率は夫々全採掘能力の34%、39%となっており、豪州、ブラジルとは全く異なった形態で運営されている。

2.2.4 処理プロセスの多様性

インドでは、高Al₂O₃系鉄鉱床が多いことから選択採掘が

一般的であり、更に乾式処理（10 mm以下の低品位粉鉱のデッドストック化）、湿式処理（超微粉粘土鉱物の除去）の中から最適な選鉱方法が選択され、品位維持が行われている（Al₂O₃；切込塊鉱で2-4%，切込粉鉱で4-6%）。著者らによる調査では表5に示す様に、鉱山別に異なった各種の処理プロセスが採用されてきている。

2.2.5 インフラストラクチャー（内陸輸送・港湾設備）の多様性

鉄鉱業にとってインフラストラクチャー条件は極めて大きな評価要因である。表6はK.Nagano¹⁶⁾の報告に加筆し、西豪州、ブラジル等の状況と比較して示したものである。インドは豪州、ブラジルに比較して規模、効率面等で大きく劣っていることがよく分る。また、前掲表1のように管掌区分が多岐にわたって複雑であるのも特徴である。その結果として、化学品位の船間バラツキは豪州、ブラジルに比較して大きいことが報告されている¹⁶⁾。

2.2.6 鉱石特性から見た多様性

①冶金性状

著者らはインド鉄石の性状を把握する為に、各鉱山調査を行うと共に採掘切羽から試料を採取し、鉱石特性、冶金性状、更には脈石の単体分離性などを調査してきた¹⁷⁾。その結果、ブラジル及び南アフリカの緻密質鉄石、豪州のブロックマン

表5 インドにおける鉄鉱石の処理プロセス例

地域	鉱山	能力	方式	処理プロセス（段数）
東部	Joda East	2.0 Mt/a	湿式	CR(2), WS(2), DR(1), SC(1), DW(1), TH(1)
	Barsua	2.5	湿式	CR(2), WS(2), SR(1), Jig(1), SC(1), DW(1), TH(1)
	Thakurani	1.0	乾式	CR(2), SR(3)
中央部	Bailadila	6.0	湿式	CR(2), WS(2), SC(1), DW(1), TH(1)
	Donimalai	4.0	湿式	CR(3), WS(2), SC(1), HC(1), DW(1), TH(1)
南部	Karadikolla	0.6	乾式	CR(2), DS(3)
西部	Goa Codli	3.0	湿式	CR(2), WS(2), LW(2), SC(2), HC(2), FW(1), FT(1)
南西部	Kudremukh	7.0	湿式	CR(2), WA(1), WS(3), MS(2), SC(1), FD(2), CF(1), MF(1), BM(2), HC(3), TH(2), AT(1), SP(1)

備考；AT：Agitator Tank，BM：Ball Mill，CF：Column Flotation，CR：Crusher，DR：Drum Scrubber，DS：Dry Screen，DW：Dewatering screen，FD：Floatex Density Separator，FT：Filter，FW：Ferrous Wheel Separator，HC：Hydro-cyclone，LW：Log Washer，MF：Mechanical Flotation，MS：Magnetic Separator，SC：Spiral Classifier，SP：Slurry Pipe，SR：Screen，TH：Thickener，WA：Wet Autogenous Mill，WS：Wet screen

表6 世界における主要鉄鉱石会社の輸送および港湾設備の状況

国	港	出荷量 (FY2000) (kt)	港湾能力			内陸輸送			
			貯鉄 (kt)	喫水 (m)	荷積 (t/h)	鉄石銘柄	手段	距離 (km)	単位量 (kt)
インド	Mormugao	16,042	1,000	13.0	4,000	Goa	はしけ	40-60	0.8-3
	COH	6,740	670	16.2	4,000	Donimalai	鉄道	550	3.4
	VOH	13,617	1,350	16.2	8,000	Bailadila	鉄道	470	3.4
	Paradeep	2,648	600	13.0	2,500	MMTC	鉄道/ トラック	650	
	New Mangaloo	4,740	600	12.5	6,000	Kudremukh	パイプ ライン	67	20/batch
豪州	Hardia		300	8-8.5	1,000	Sesa Orissa	鉄道	340	
	Port Headland	66,306	6,400	16.9	10,500	Mt.Newman BHPB-Yandi	鉄道	426 210	26
	Port Dampier	67,205	3,600	17.1	8,800	Hammersly HY-Yandi	鉄道	288	24
	Port Walcott	31,496	4,600	17.2	9,000	Robe River	鉄道	196	21
	Ponta da Madeira	42,460	3,200	23.0	16,000	Carajas	鉄道	890	21
ブラジル	Tubarao	67,272	6,000	20.0	16,000	Itabira	鉄道	550	14
	TIG	22,625	3,000	20.0	8,400	MBR	鉄道	586	12
南ア	Saldhana	24,453	3,200	20.5	8,000	Shisen	鉄道	861	20

表4 鉄鉱床賦存地域別の鉱石タイプ

鉱石 タイプ	東部地区 (Orissa 地区)	中央地区 (Bailadila 地区)	南部地区 (Donimalai 地区)	西部地区 (Goa 州)
1	Hard-Massive hema.	Steel Grey hematite		
2		Blue hematite		
3	Hard-Laminated Hard-Flaky hema.	Laminated hematite	Hard-Medium hema Hard-Laminated hema.	
4	Soft-Massive hema. Soft-Lateritic Soft-Limonitic		Soft-Laminated hema.	Soft hematite Soft hematite- limonite
5	Friable hema.	Flaky/Blue dust	Friable hema.	Friable hema.
6	Powdery Blue dust		Blue dust	Blue dust
7	Ochery Limonitic	Lateritic/Limonitic	Laterite re-cemented	Laterite re-cemented
8	Shaly-Flaky		Shaly	Shaly
9	Shale	Shale	Shale	Shale
10	BHQ	BHQ	BHQ/J	BHQ
11	Canga	Float	Float & Soil	Laterite

層及びマラマンバ層鉄鉱石に類似した様々な鉄鉱石の存在することが明らかとなってきた。その多様性について冶金特性に関する代表的結果の中の極一部を引用して紹介する。

焼結鉄の結合相となる融液の生成状況を評価するタブレット焼成試験による鉄鉱石性状調査結果（原料粒度：0.5 mm以下，CaO/鉄鉱石比：0.1，最高温度：1300℃）の1例を図3に示す。高流動性の融液が生成し易いほど試料は変形し、気孔は丸くかつ大きくなる。東部地区および西部地区の赤鉄鉱は夫々豪州のブロックマン層鉄鉱石、マラマンバ層鉄鉱石に近く、中央地区赤鉄鉱および西部地区磁鉄鉱はブラジル産緻密質鉄鉱石に類似していた。

つぎに、粗粒鉄鉱石の同化状態（核粒子機能を評価する為の試験）について、東部地区の同一鉄鉱床から採取した赤鉄鉱の微小充填焼結試験結果（2-2.8 mm 鉄鉱石粒子にCaOを付着させて充填，CaO/鉄鉱石比：0.1，最高温度：1300℃）の1例を図4に示す。粗大気孔が少なく、気孔間の壁が厚くて緻密な焼結体が望ましいが、その構造は鉄鉱石によって大きく違っている。

以上の様に、一言でインド鉄鉱石の冶金性状を表すことはできず、鉄鉱石賦存地区別のみならず、同一鉄鉱区内においても採掘場所によって大きく異なる可能性のあることを認識しておく必要がある。

②高Al₂O₃鉄鉱石の使用技術

我が国では高Al₂O₃鉄鉱石は焼結鉄の耐還元粉化性（RDI）を悪化するとして、使用については極めて消極的である。し

かし例えば、インドのTISCO (TATA STEEL) では自社の鉄鉱石は高Al₂O₃系であることからAl₂O₃が2.5-3%でRDI (-2.8 mm) は25-35%の焼結鉄を製造し、我が国と遜色ない高炉操業成績を上げている。

③ 今後の動向と課題

3.1 鉄鉱石資源の動向

インド鉄鉱石資源の今後の動向については、地質、成因などの調査を深め、その多様性をより詳細に把握・理解する必要があるが、ここでは現時点までの情報に基づいて展望する。

①鉄量

B.J.Skinner¹⁸⁾は、鉄鉱石品位と埋蔵鉄鉱石量はほぼ正規分布になると推定している。

インドでの鉄品位別赤鉄鉱量分布もその例にもれず、前掲表3のようにほぼ正規分布となっている。これより、多少の品位の低下で鉄量は大幅に増える、と読み取れる。また、著者の一人による現地調査では、東部及び中央部地区では探査精度、探査深度増により、鉄量の増加は充分期待できると判断している。

我が国への出荷量が比較的多い西部・ゴア州では、10社強にて年間15 Mt/aの規模で生産、全量輸出されている。しかしながら既に最盛期を過ぎて中品位粉鉄主体となっており、今後10年前後以降には、鉄量枯渇問題が顕在化してくるであろう。

②品位

日本でのインド鉄鉱石の品位イメージは、バイラディラ鉄鉱石

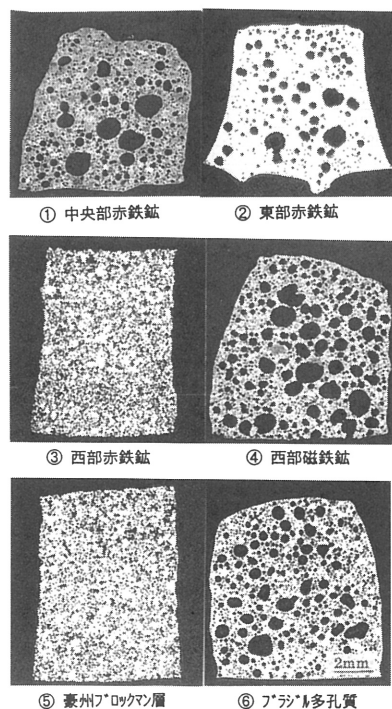


図3 0.5mm以下鉄鉱石粉の融液生成性
(タブレット焼成試験) (1300℃, CaO/鉄鉱石=0.1)

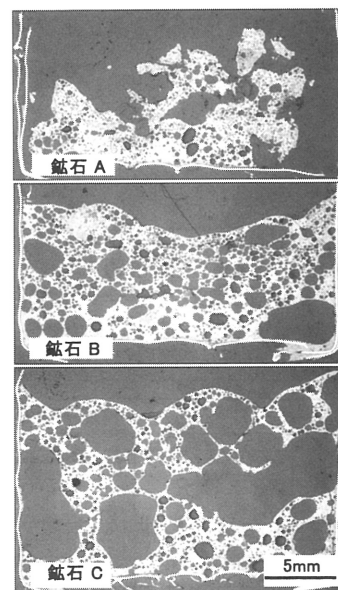


図4 同一地区（東部）鉄鉱石の同化挙動の相違例
(微小充填層焼結鉄試験) (1300℃, CaO/鉄鉱石=0.1)

(中央地区)とゴア州産鉱石(西部地区)という性状の大きく異なる2種類から形成されていると言っても過言ではない。前者はインド鉱石入荷開始当初に構築された「高品位で Hard hematite」というイメージであり、後者は「中品位、Soft hematite-goethite」とするものである。

前者良質鉱石についても、現在採掘中の鉱床の枯渇化が顕在化してきており、#14 鉱床の枯渇対策として採掘を開始した鉱床(#10, #11-A)の品位から判断すると、「若干の品位低下」と「Hard hematiteから一部Hematite-Goethite化」は避けられない。

③鉱質

赤鉄鉱系鉱石の鉱量は10,000 Mt強であるが、前述のようにその60%は東部地区に分布している。当地区での鉄鉱石は中央部地区に比較して褐鉄鉱系の軟質のものが賦存している(前掲表4)。一方、採掘能力はインド全能力(85 Mt/a)の35%程度に留まっている。今後は、資源量的にも、東部地区の生産量が増加すると予測される。そのため、インド全体として平均塊率は低下し、かつ硬質赤鉄鉱の一部は軟質化、褐鉄鉱系化する方向であると推察される。

④磁鉄鉱微粉(Magnetite concentrate)

上述のようにインドには3,000 Mtの磁鉄鉱系鉱石が賦存し、微粉鉱石として出荷されている。著者らは、本磁鉄鉱微粉は低Pでもあることから、地球温暖化対策(焼結過程での酸化発熱による炭素量の削減)に加えて西豪州粉鉱石の高P化傾向対策に有効な、貴重な資源であると考え、ゴア州全域と隣接のMaharashtra州で探査及び露頭試料採取を行い、鉱物特性の調査を続けている¹⁷⁾。その結果、従来賦存しないとされてきた地区にも強い動力変成作用を受けた、微粉碎しやすいBMQの賦存していることを確認している。単体分離性に優れるものも多く、今後本格的な生産への探査が期待される。

3.2 今後の課題

①環境との共生

インドでの資源産業は“National Mineral Policy (1993)”に則り、環境(土地、水、空気、森林)と鉱物資源のバランス、更には生態系への配慮が義務付けられている。特に1993年以降、インド鉄鋼業は探査・開発段階から終掘後の剥土処理、尾鉱ダム(Tailing dam)管理にまで厳しい規制が課せられている。

インドでは上述の如く高 Al_2O_3 系鉄鉱床が多い。それ故、 Al_2O_3 源の一つである粘土鉱物の水洗除去が進んできた。この湿式処理では、0.5 mm以下の微粉がスライム(slime)として廃棄される。その量はインド全体で15-20 Mt/aにもなっている。資源の有効活用、環境への影響等の面から、

「 Al_2O_3 を2%以下に低下させ、粉鉱として回収」する事を目標とした取り組みが進められており、スライム処理技術、回収微粉の塊成鉱化に関する多くの研究成果が報告されている^{19)・22)}。

その例として、溶融還元法の一つであるROMELTプロセスの適用が進められている。Chhattisgarh州Bastar地区Nagarnarに年間0.3 Mt規模のプラントが建設中であり、2004年には稼働の予定である^{23)・24)}。この新プロセスの導入は、各鉱床内にポケット状に胚胎しているBlue Dustがスライムとして流出している事も加味したものであるが、「環境との共生」がここまで強く求められている事を示している。

②インフラストラクチャー

インド鉄鋼業における輸送・港湾設備の特徴、課題については前掲表6からも明らかである。鉄鉱石賦存の多様性にも関連するが、機械化、効率化が豪州、ブラジルに比較して遅れている。インド鉱石の競争力はインフラストラクチャーの合理化対応如何にかかっており、その推移を見守る必要がある。

3.3 我国原料技術者への提言

今後の我が国鉄鋼業の更なる発展を念頭に、上述のインド鉄鋼業の多様性を考慮した技術課題を以下に提言する。

①鉄鉱石の鉱量・品位・性状の多様性を考慮した使用技術の開発

前述のようにインドでは、低品位から高品位までの各種鉱床が広い範囲に分布しており、それぞれ性状が異なっている。それ故、これらの量的および品位的多様性を理解した鉄鉱石の使用技術の開発、購買戦略の構築が必要であると言える。

② Al_2O_3 と焼結鉱品質の関係の再整理

鉄鉱石資源制約から、極めて高 Al_2O_3 濃度の焼結鉱を製造し、超高 Al_2O_3 組成のスラグで高炉安定操業を維持せざるをえないのがインド鉄鋼業の宿命と言える。著者らの調査結果では、鉄鉱石中の Al_2O_3 の多くは粘土鉱物ではなくヘマタイト(Fe_2O_3)中に分布しており、焼結過程においても未同化の残留元鉱や粒(斑)状ヘマタイト粒子中に留まっていた。今後の「環境との共生」型焼結技術のヒントが隠されているように思われる。高 Al_2O_3 鉱石は高RDIとのこれまでの一義的な理解は改め、 Al_2O_3 の鉄鉱石中形態と焼結反応時の挙動、焼結鉱品質への影響について基本的に調査、整理し直す時期になっており、若き研究者・技術者に期待したい。

③環境にやさしい焼結鉱製造技術

資源小国日本での粉鉱使用技術は、豪州ブロックマン層鉱石、ブラジル鉱石を中心とした高品位赤鉄鉱使用技術をベースに、安価原料としてのピソライト鉱石、ペレット用微粉、更にはマランバ層鉱石の増量为目标に展開されてきた。し

かし今後は、資源国での「環境との共生」に資することができる技術開発（例えばスライムの活用）を積極的に展開する事が重要となるであろう。

④ さいごに

インド鉄鉱石は今後、中国、韓国を含むアジアの鉄鋼業にとってより重要なソースになると予測される。しかし、入荷鉄鉱石の粒度、成分等の性状以外についてはあまりよく知られていない。そこで、インド鉄鋼業の全般にわたり、多様性に焦点を当てて概説した。

グローバル化の進んだ21世紀の我が国資源利用技術者は「資源小国日本という概念」からの脱却が必要であり、鉄鉱石資源の利用については、優良鉄鉱石資源の枯渇化、環境との共生も考慮に入れた「供給国から需要国まで含めたトータルベストシステムの確立」が求められている。これらのためには、鉄鉱石の量や性状の動向に留まらず、資源国の総合的な状況を広く知る必要がある。本解説がこれらのきっかけになれば幸甚である。

引用文献

- 1) 海外製鉄原料委員会：インドの鉄鉱資源，(1966版)
- 2) UNCTAD：Iron Ore Statistics (August, 2001)
- 3) S.Batra：Outlook on global iron ore trade and prospective for India, Federation of Indian Minerals Industries (10-12 Dec., 2001)
- 4) D.K.Ghosh et.al.：Scenario of Iron Ore Mining in India- Current status, National Seminar on New Trends in Cost Effective Iron Ore Mining, (6-7 April, 2001)
- 5) M.S.Krishnan：Iron Ores of India, Indian Association for the Cultivation of Science, Jadavpur, Calcutta, (1955)
- 6) R.C.Morris：Handbook of strata-bound and stratiform Ore Deposits, Elsevier, Amsterdam, 13 (1985) 2.
- 7) UNESCO：Occurrence and Origin of the iron ores of India, (1973)
- 8) B.P.Radhakrishna et.al.：Precambrian Banded Iron-Formation of India Journal Geological Society of India, 28 (Aug.-Sept. 1986), 71.
- 9) G.A.Gross：Geol. Surv. Canada, Econ.Ser. Rep. (1965), No.22 (1), 181.
- 10) A.F.Trendall et.al.：Iron Formation；Facts and Problems, Elsevier, (1983), 1.
- 11) C.V.R.K.Prasad et.al.：Iron formations in Archaean granular- gneiss belts with special reference to South India, Jour. Geol. Soc. India, 23 (1982), 112.
- 12) D.Taylor et.al.：Genesis of High Grade Hematite Orebodies of the Hamersley Province WA, Economic Geology, 96 (2001), 837.
- 13) R.N.Singh：Domestic Market for Iron Ore from Non-captive supply source, Federation of Indian Minerals Industries, (10-12 Dec., 2001)
- 14) M.Venkataian：Status of Iron Ore Industry in Bellary-Hospet sector, Federation of Indian Minerals Industries, (10-12 Dec. 2001)
- 15) M.S.Murthy et.al.：Regional Evaluation for Cost-Effective winning of iron ore of Karnataka-A case study, National Seminar on New Trends in Cost Effective Iron Ore Mining, (6-7 April 2001)
- 16) K. Nagano：Indian Iron Ores and Japanese Steel Mills, Federation of Indian Minerals Industries, (10-12 Dec., 2001)
- 17) 例えば野坂庸二，肥田行博：CAMP-ISIJ, 11 (1998), 912.
- 18) B. J. Skinner：American Scientist, 64 (1976)
- 19) B.Das et.al.：Beneficiation aspects of Indian Iron Ore Slimes, National Seminar on New Trends in Cost Effective Iron Ore Mining, (6-7 April 2001), 203.
- 20) K. S. Raju et. al.：Cost Effective Futuristic Approach for Beneficiation of Indian Iron Ore, National Seminar on New Trends in Cost Effective Iron Ore Mining, (6-7 April 2001), 203.
- 21) Bandyopadhyay A, Roy et.al.：Beneficiation of iron ore slimes by Hydro-cyclones, National Seminar on New Trends in Cost Effective Iron Ore Mining, (6-7 April, 2001)
- 22) Dr.Pradip：Towards an integrated resources utilization strategy for the processing of Alumina rich Indian Iron Ores, National Seminar on New Trends in Cost Effective Iron Ore Mining, (6-7 April 2001)
- 23) V. Satyanarayana et.al.：NMDC consideration for setting up of plant based on ROMELT Process, ROMELT-2000 International Workshop on ROMELT Process, (6-7 April, 2000)
- 24) NMDC：Financial Express, (19, June, 2002)

(2003年2月4日受付)