



# 日本鉄鋼業の鉄鉱石・石炭資源の現状と将来

長野 研一\*

The Current Status and Future of Iron Ore and Coal Resources for Japanese Steel Mills

Ken-ichi NAGANO

**Synopsis :** There are iron ore and coal resources to supply raw materials for ironmaking for many years. Recent developments, such as the consolidation of raw materials suppliers and increase of iron ore imports in China, influence the present and future availability of raw materials. Carajas iron ore, pisolitic iron ore and “semi-soft” coking coal are the accomplishment of about 20 years’ cooperative development of new sources and raw materials utilization by Japanese steel mills. To adopt the changes and natural resources availability, the next targets are Marra Mamba and high P Brockman iron ores from Western Australia for iron ore and less usage of prime coking coal for coal. In future, utilization of scrap is a key for steel industries.

**Key words:** coal; iron ore; ironmaking.

## 1. はじめに

製鉄の主原料である鉄鉱石・石炭について、主に資源の視点から、

- 資源としての基本的な考え方の整理
- 最近の大きな状況変化
- 資源開発の過去10~20年の主要な成果
- 現在および今後の主要な課題

を述べる。鉄鉱石では、Pisolite, Marra Mamba等、石炭では、“Semi-soft”という日本鉄鋼業が主体的に推進してきた資源選択について言及する。将来には、高P Brockmanやスクラップ利用、資源的にも制約される優良原料炭への依存軽減の課題がある。末尾の参考で用語についての解説を加えた。

## 2. 鉄鉱石、石炭資源の基本理解

### 2.1 長い可採年数

天然資源として高炉製鉄法の主要な原料である鉄鉱石と石炭を見ると、共に可採年数は100年以上である<sup>1-3)</sup>。天然資源の中には可採年数が30年程度といわれているものも多い事からすると、鉄鉱石や石炭は十分な埋蔵量が確認されている。一般に可採年数は、可採確認埋蔵量と生産量から計算される。経済活動としての探査により未確認の埋蔵量が確認埋蔵量に繰り入れられる事で、可採年数は必ずしも採掘の時間経過と共に減少しない。むしろ、過去20~30年で多くの資源の可採年数は一定、ないしは増大してきて

いる<sup>4)</sup>。この事から鉄鉱石や石炭は今後の極めて長い期間にわたり製鉄業に豊富な資源を供給できる。

### 2.2 偏在性の少ない賦存

鉄鉱石や石炭の鉱床は、他の資源に比べ偏在性が小さく世界中に分布している<sup>5,6)</sup>。鉄鉱石資源の60%以上を占める縞状鉄鉱石(BIF; Banded Iron Formation)は18~30億年前の地球的活動で生成されたものであり<sup>7-12)</sup>、石炭は3億年前の大型の陸上植物の出現以来、安定地塊の周辺の造山帯<sup>13)</sup>の地向斜と呼ばれる堆積盆を生成の場として継続的に生成されてきたものである。鉄鉱石や石炭は、地理的あるいは地史的に普遍的な資源である。

### 2.3 安価大規模生産型の資源

鉄鉱石と石炭は生産規模と価格の双方で他の資源と比較すると、大量生産と安価な事で相対的に抜きん出た天然資源である(Fig. 1)。堆積成の鉄鉱石と石炭は、場合によっては100 km単位での水平方向の連続性をもち、火成鉱床のそれが数100 m程度のものも多い事と較べれば、著しく優位である。鉱床の規模が相対的に大きく、安価である事が必要な鉄鉱石、石炭は大規模開発が行われる。大規模生産には、鉱山開発に加えて、大量輸送のための鉄道、港、あるいは労働者のための町、住居といったインフラ(社会基盤)の整備が必要となる。グリーンフィールド(未開発地域での新規)の開発では、そのようなインフラの建設費が総開発コストの70%を占める事もある<sup>15)</sup>。従って、既存鉱山の拡張やブラウンフィールド(既開発地域での新規)の開発がグリーンフィールドの開発に較べ経済性で大幅に有利となる。既存インフラへのアクセスが容易な既存生産者

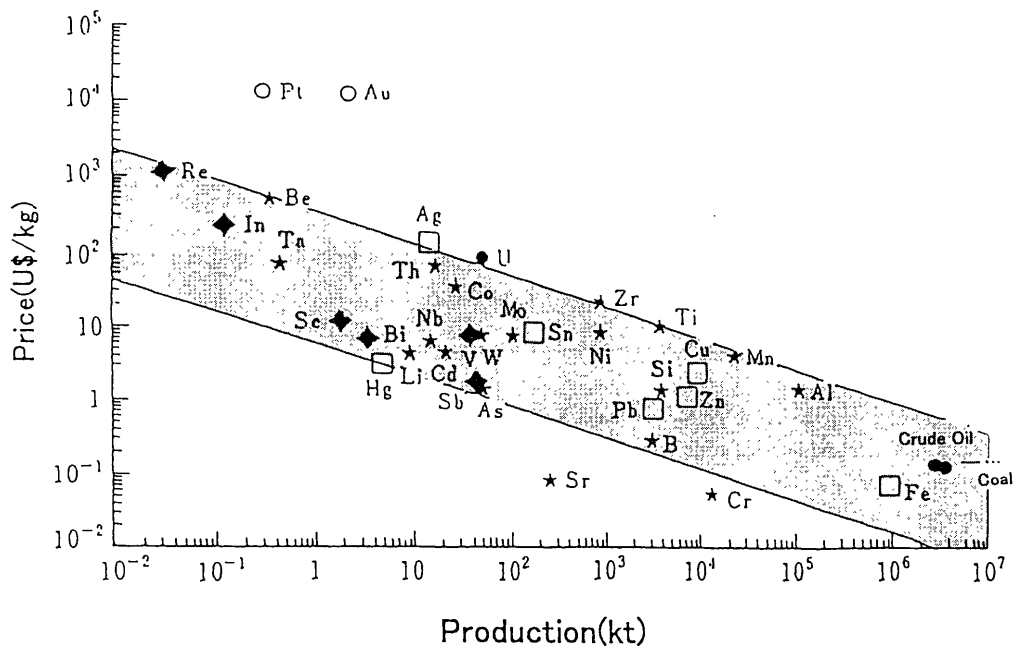


Fig. 1. Relation between production and price of resources.

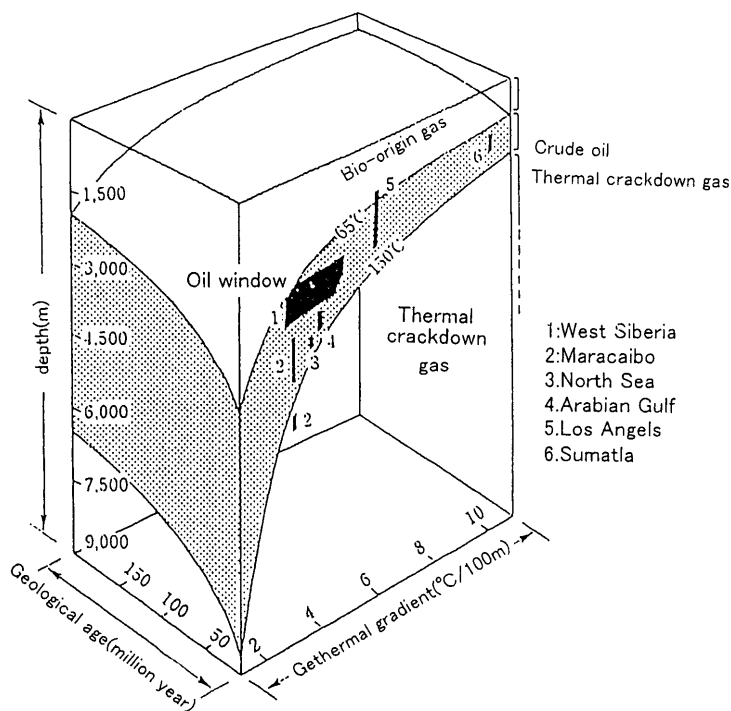


Fig. 2. Oil window – geothermal gradient, geological age, and depth.

が有利で、新規参入の障壁となる。グリーンフィールド等でインフラを含めた初期投資が大きくなる場合には、生産トンあたりの投資の低減のため、生産規模の極大化が必要となる。

2・4 地殻中存在比でのFeの優位性

地殻中の元素の存在度でFeとCを比較すれば、Feは5.00%、Cは0.02%と大きな差がある<sup>16)</sup>。エントロピー増大の原則に従えば、Feは酸化物等の形で地中に固定され、CはCO<sub>2</sub>として大気の一部あるいは炭酸塩となる。素材資

源としてのFeは安定的であり、還元材として必要な低エントロピーのCは非安定的という事もできる。低エントロピーのCとしての炭化水素化合物である石炭や石油の賦存は、Feに較べ希少性を帯びる。

2・5 原料炭生成の地質条件と偏在性

植物からの石炭の成因については多くの専門書で触れられている<sup>17-19)</sup>。その炭化度が原料炭の範囲になるためには、地温勾配、深度、時間等の条件が合致する必要がある<sup>20)</sup>。石油の生成にも温度、圧力、地質的時間の条件が揃う事が

要件となる。これをOil Window（石油窓）と呼び、石油資源が中東地域に偏在する一因といわれている(Fig. 2)<sup>21)</sup>。このような有機物起源の資源の成熟条件の制約から単味でコークスにできるものは、石炭資源（褐炭、亜瀝青炭除く）の10%程度とされる<sup>22)</sup>。

1977年のドイツ経済研究所のデータ等を参考にして原料炭資源の賦存を試算するとTable 1となる。旧ソ連・東欧地域やUSA、カナダの北米、中国の埋蔵量が多く、現在の原料炭の主力ソースの豪州はそれ程大きな埋蔵量を有していない。

### 3. 最近の環境の変化

#### 3.1 供給サイドの寡占化

鉄鉱石を例に挙げれば、生産会社の世界的統合が進められている<sup>23,24)</sup> (Table 2)。2000年で鉄鉱石の貿易量の50%近くが、CVRD、Rio Tinto、BHP-Billitonの3社の影響下にある。石炭でも、Rio TintoやGlencore社の進出が目覚しい。BHP-Billiton社は、豪州Queensland州の強粘結炭輸出の3分の2を占めるに至っている。カナダでも2004年初めに、Fording、Elkview、Luscarの3社が強粘結炭年産2500万tの単一の石炭組織Elk Valley Coalを発足させている。資源経済学のホテルリング・ルールでの研究によれば、独占が起きた場合は、短期的に見れば供給の制限が起きうる<sup>25,26)</sup> (Fig. 3)。

Table 1. "Coking coal" reserves.

Area	Gt
North America	41.4
South America	1.4
Western Europe	13.8
ex-CIS Countries	45.5
Africa	1.4
China	23.5
India	1.4
Australia	9.7
Total	138.1

#### 3.2 中国ファクター

他のビジネス同様、鉄鉱石、石炭でも中国の動向が大きな影響を与えている。鉄鉱石では、その鉄鉱石輸入の急増が挙げられる。出鉄の伸び、中国国内鉄鉱石供給の減少で、鉄鉱石輸入量は急増している(Fig. 4)。毎年1~2の新規開発鉱山が必要な程の増分となっている。石炭では、一般炭の海上貿易量が急増しており、中でも中国炭の輸出量の急増が挙げられる(Fig. 5)。えん州や神華の大型開発により、

Table 2. Consolidation amongst iron ores producers from 1995 to 2002.

1995	2001
QCM MBR CVRD Ferteco Samitri	CVRD (CVRD, 100 % Ferteco and Samitri, 50 % each of MBR and Samarco, 25 % QCM)
Samarco BHP	BHP Billiton Iron Ore (BHPIO and 50 % Samarco)
Robe Hammersley IOC	Rio Tinto Iron Ore (100 % Hammersley, 53 % Robe, 69.9 % IOC)
LKAB	LKAB
SNIM	SNIM
CVG	CVG
ISCOR	Kumba (ISCOR)
CMP	CMP

D.Smith<sup>23)</sup>

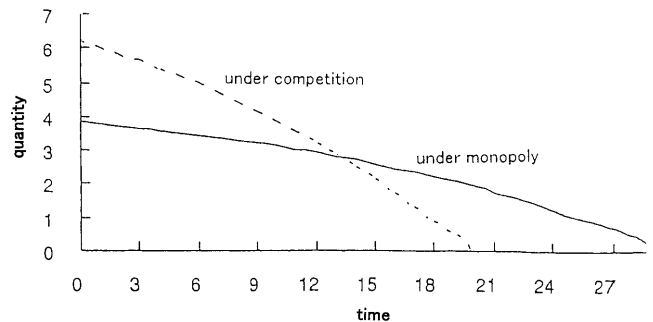


Fig. 3. Production route – under monopoly and under competition.

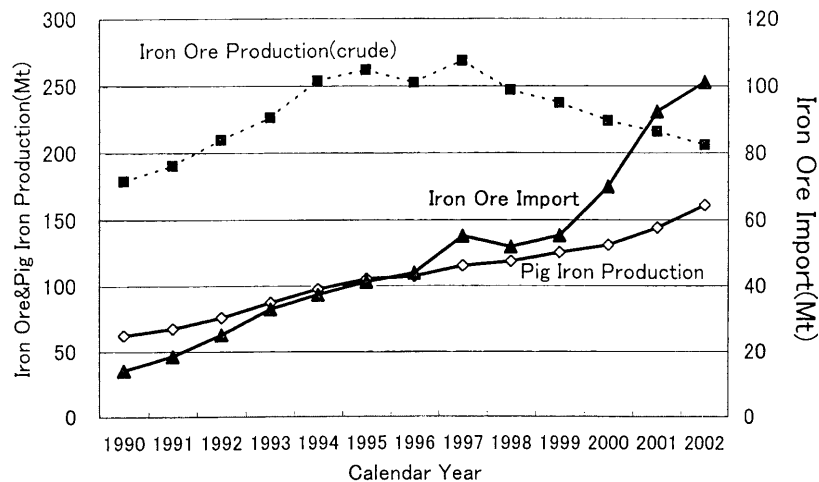


Fig. 4. Pig iron, iron ore production and iron ore import in China.

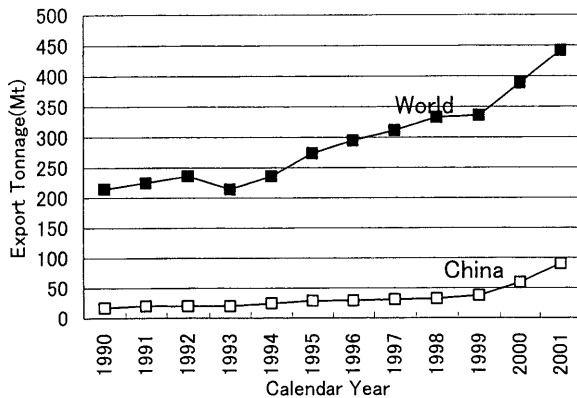


Fig. 5. Steaming coal export.

一般炭が中心ながら、世界の一般炭需要の増大に添えている。鉄鉱石輸入国、石炭輸出国としての中国の動向が日本鉄鋼業の鉄鉱石、石炭の需給に大きな影響を及ぼしている。量のみならず日本鉄鋼業の製鉄原料の品質にも影響を与える。中国の鉄鉱石輸入が粉鉱石に偏っている現況では、サプライヤーは粉鉱増産のため、塊鉱の篩い強化や、粉鉱の粗粒化を指向する。結果的に日本に入荷する塊鉱の-6.3 mm%が改善したり、粉鉱の+6.3 mmの増加となっている。中国一般炭の輸出の増加は、その中の低灰分部分や粘結性のある部分の日本の鉄鋼業での使用の機会を生んでいる。

### 3.3 資源概念の拡大

最近のリサイクルの高まりで、資源の埋蔵量の概念に変化が起きている。資源の範囲に備蓄（蓄積）量や廃棄物を加えた概念である<sup>14)</sup>。鉄でいえば、鉄鋼備蓄量であり、日本国内で既に9億tに達している<sup>27)</sup>。世界的な鉄の蓄積量120億t<sup>28)</sup>は、鉄分を考えれば、豪州Hamersley Basinに匹敵する資源量である。

還元材としては、廃プラスチックである。高炉やコークスでの廃プラスチック活用も重要なテーマであろう<sup>29,30)</sup>。日本国内で発生する廃プラの10%に相当する年間100万tの鉄鋼業での利用には循環型社会への貢献と資源領域拡大の意義が大きい。

## 4. 鉄鉱石資源開発の動向

過去の日本鉄鋼業の鉄鉱石資源開発と使用技術の協調の代表的な成果として、CarajasとPisolite鉄鉱石を取りあげ、最後に今後の動向と課題について述べる。

### 4.1 Carajas鉱山の開発

1985年から出荷が開始されたCarajas鉄鉱床は、西豪州Hamersley Basinの10分の1の狭い地域に高品位の鉄鉱石170億tが賦存する傑出した鉱床である。鉱山に加えて、町、890 kmの鉄道、港の新規開発が日本等の支援によりタイミング良く行われた事は世界の鉄鋼業に量的な面だけでなく、質的にも低 $Al_2O_3$ 鉄鉱石を供給した事で大きな貢献となっている。出荷開始以来生産量は世界の鉄鉱石需要に

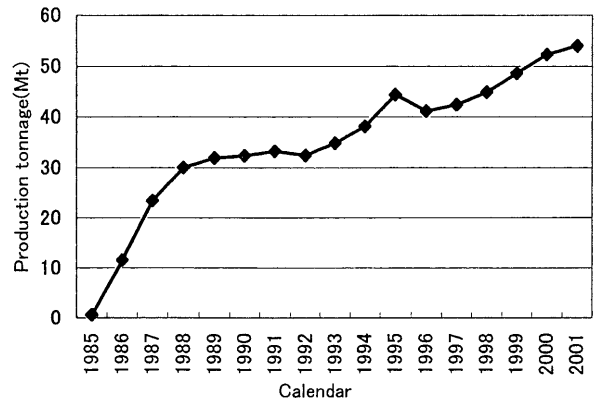


Fig. 6. Production of Carajas Mine.

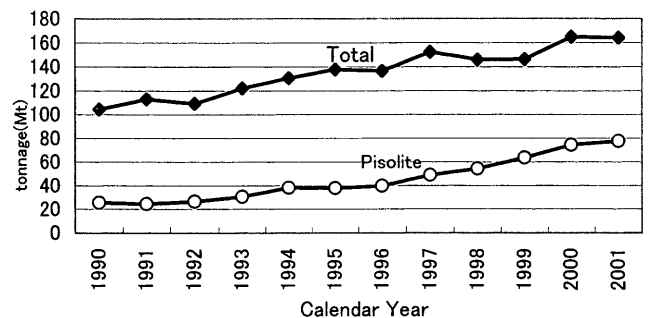


Fig. 7. Iron ore shipment from western Australia.

応え、順調に増大させてきている(Fig. 6)。多雨地域から出荷される鉱石であり、粉鉱石の全量水洗化や、現在も課題となっている航海中の溜水への対策が続けられている。また、開発当初の塊鉱と粉鉱の2成品から、現在は、39の多品種生産を行っている。2002年には港の第3ローダー（船積み設備）の建設も決定され、近い将来には年間8000万tの出荷体制が整備されよう。

### 4.2 豪州Pisolite鉄床の開発

太平洋圏での鉄鉄生産の伸びは著しいものがある。これを支えたのは近距離ソースとしての西豪州鉄鉱山である。西豪州の鉄鉱石生産の伸びを“Hematite”とPisoliteに分類すれば、最近は後者の出荷の伸びが著しい(Fig. 7)。このPisoliteの伸びの背景には以下の3点があったと考えられる。

- 相対的に短い鉄道距離200 km未満のRobe Riverの先駆的開発
- 日本鉄鋼業での高 $Al_2O_3$ ・Pisoliteの同鉱石の利用技術の開発<sup>31,32)</sup>
- Newman, Hamersleyの“Hematite”鉄石の先行開発によるインフラ整備でのYandicoogina Pisolite鉄床開発のブラウンフィールド化

現在ではPisolite鉄石は、日本の鉄鉱石輸入の40%、西豪州から日本鉄鋼業に出荷される鉄鉱石の60%を占めるに到っている。低 $Al_2O_3$ のYandicoogina鉄床の出荷開始は日本鉄鋼業の主たる鉄鉱石ソースである豪州鉄石全体での

低 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 化を促した。従来からの Hematite 鉱石でも選鉱の導入や強化、選択採掘で Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 低減が行われた (Fig. 8)。このような日本に供給される鉄鉱石の低 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 化は焼結鉱の Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 低下に如実に現れている (Fig. 9)。

4.3 今後の動向と課題

今後とも日本が鉄鉱石の多くを依存するであろう西豪州の鉄鉱石資源は成因や地質、主要な鉱物相で分類されている<sup>33)</sup> (Table 3)。その埋蔵量は Table 4 に示される<sup>34)</sup>。Newman や Hamersley のベースである Low P Brockman 鉱床に追加の供給力はなく、Pisolite、Marra Mamba や High P Brockman が西豪州に残された鉄鉱石資源である。Pisolite については前述の様に開発が推進されさらに増加も期待されている。High P Brockman は P が 0.1% 以上と高く単味での出荷には制約がある。Marra Mamba 鉱床は Newman の OB29、Hamersley の Marandoo の様に、High P Brockman は Newman の OB25、Hamersley の Brockman の様に、既に一部が Low P Brockman にブレンドされて出荷されてきた。これらに

伴う鉱質の変化も報告されている<sup>35)</sup>。Marra Mamba 鉱床は、Hamersley の Nammuldi 鉱石の試験出荷に引き続き、2002 年半ばから Robe River 社 West Angelas 鉱石の単味出荷が開始された。BHP-Billiton 社の MAC Project も 2003 年後半の本格出荷の準備中である。Marra Mamba 鉱床は本格的開発の段階を迎えようとしている。Marra Mamba 鉱石の特性評価の研究も進められている<sup>36,37)</sup>。強い鉄鉱石需要に支えられた West Angelas 鉱石は開発初年で 1000 万 t を出荷し、その 70% が日本向けであった。Pisolite 鉱石同様に、Marra Mamba 鉱石も日本鉄鋼業の使用サイドから受け入れられれば、その供給力とあいまって新たな鉄鉱石ソースとして期待される。High P Brockman も膨大な資源量があり、採掘条件は一般に Marra Mamba 鉱床より優れている。しかし、P と CW (結晶水) との相関 (Fig.10) に見られるように、P は、鉄鉱石である Goethite と共存しており、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> と異なり採掘や選鉱で低減させる事は難しい。P への製鉄工程の対策は将来の課題である。Hamersley 社は、2005 年稼働に向けて石炭と高 P 鉱石を活用する直接還元 HIs melt プロセスの実機プラントを建設している。

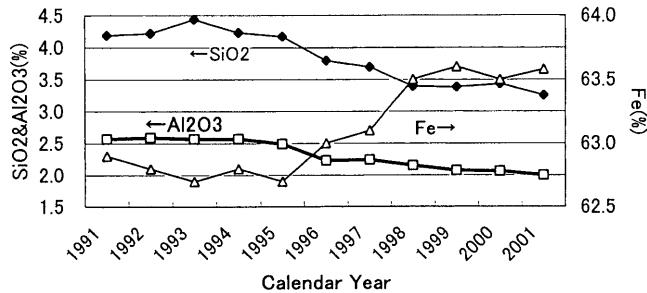


Fig. 8. Quality improvement of an Australian fine ore.

5. 石炭資源開発と動向

石炭資源は、他炭化水素の石油や天然ガスに比べ、資源量が優位にある<sup>38)</sup>。実際に、前述の様に一般炭は中国からの輸出増等で供給の拡大が見られるが、原料炭は安定した

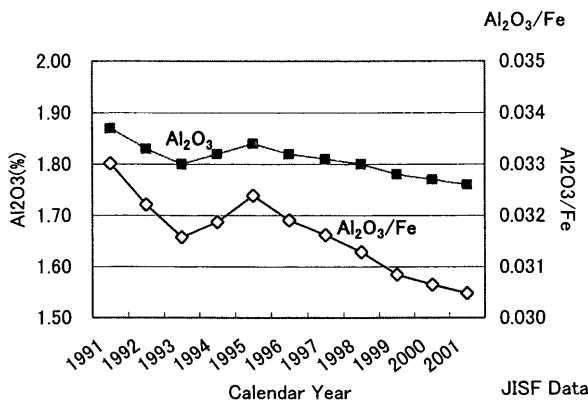


Fig. 9. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Fe of sinter.

Table 3. Features of the genetic ore type classification scheme.

Genetic Ore Group	Genetic Ore Type	Dominant Mineralogy	Example Deposit
BIF-derived Iron Deposit (BID)	Low P Brockman (LPB)	Haematite (-goethite)	Mount Tom Price Paraborndoo
	High P Brockman (HPB)	Haematite-goethite	Brockman
	Marra Mamba (MM)	Haematite-goethite	Marandoo
Channel Deposit (CID)	CID (Pisolite)	Goethite-haematite	Yandicoogina
Detrital Iron Deposit (DID)	DID (Detrital)	Haematite(-goethite)	Brockman Detritals

J.Box, J.Phillips and J.Clout<sup>33)</sup>

Table 4. West Australia's Pilbara region iron ore resources estimates.

Company	Unit: Mt				Total
	Low P Brockman	High P Brockman	Pisolite	Marra Mamba	
BHPIO	1,000	4,100	1,800	3,300	10,200
Hamersley	970	4,700	3,400	1,800	10,870
Robe River			3,000	1,000	4,000
Hancock	100	200		800	1,100
Total	2,070	9,000	8,200	6,900	26,170

Brian W.Steane, R.Faeldan and C.Booker<sup>34)</sup>

需要ながら異なる状況にある。

原料炭供給をソース別推移で見ると豪州の増加, USAの減少が顕著である(Fig.11)。日本の原料炭購入ソースの1990年と2001年の比較でも大きな変化が起きている(Table 5)。PCI (高炉への微粉炭吹込み) 増による原料炭消費の減があるが, 日本の原料炭マーケットから米国炭は消滅し, カナダ, 旧ソ連炭の減少, 豪州炭の大幅な増加が認められる。中国炭については統計上にPCIとして使用されたものも含まれていると思われるが, 原料炭もわずかながら増加している。

以前の日本鉄鋼業は日本国内炭や米国を含む多くのソースから品質的にも多様(Fig.12)な原料炭を購入し, 多銘柄配合と配合技術に特色があった<sup>40)</sup>。

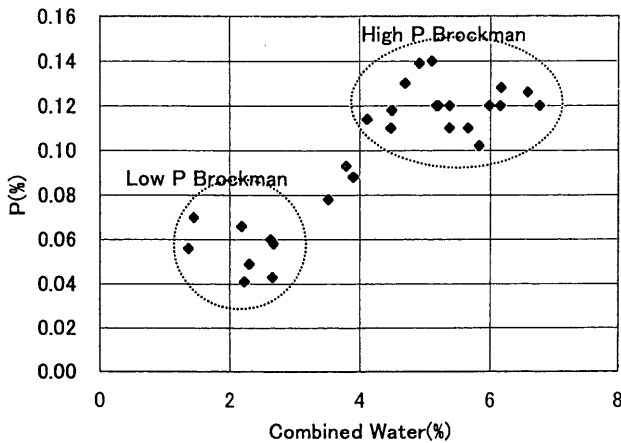


Fig. 10. Relation between CW and P of Brockman ore.

### 5.1 カナダ原料炭の開発と終掘

1980年代の初めに, Quintette, Bullmoose, Gregg Riverの新規炭鉱がカナダで開発された。これら3炭鉱の生産量は, 合計約900万t/年であった。コスト競争力や炭量の制約から, これらの炭鉱を含む幾つかのカナダ原料炭鉱の終掘が進行しつつある(Table 6)。1980年代は, 日本の国内炭,

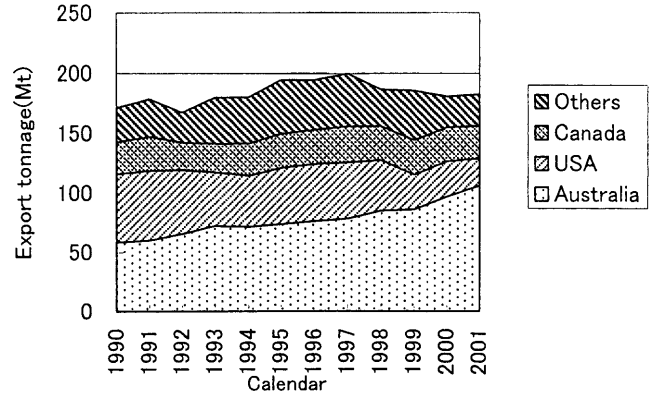


Fig. 11. Coking coal export by country.

Table 5. Coking coal import to Japan.

(Unit: Mt)

	1990	2001 estimate
Australia	29.6	36.4
Canada	17.6	9.0
USA	9.6	0.0
ex-USSR	5.5	2.9
China	1.3	5.2
Others	3.9	2.5
<b>Total</b>	<b>67.6</b>	<b>56.0</b>

Source: Coal Information 2002

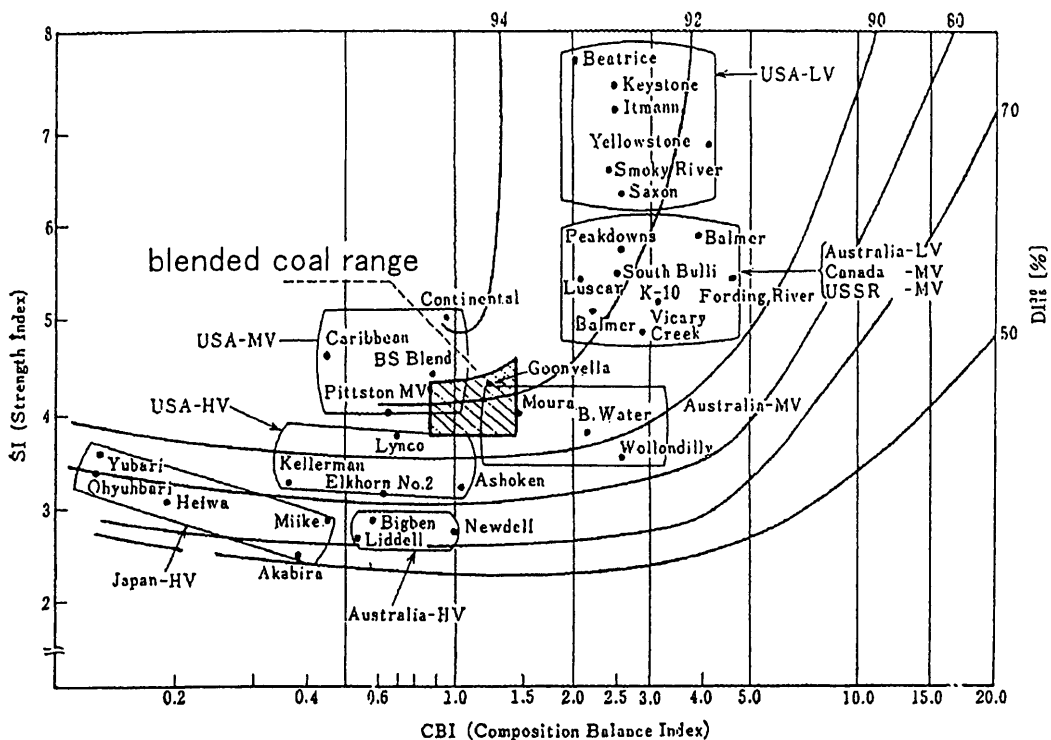


Fig. 12. CBI-SI chart for coke strength estimation.

1990年代の米国炭は、共に高VMの高流動性炭が主体であり、低～中VMで比較的流動性は低い炭化度の高いカナダ炭とは良い配合であった。

日本国内炭や米国炭がコスト競争力から日本の原料炭ソースから姿を消し、日本の原料炭配合パターンの中でのカナダ炭の評価も低下している。

## 5.2 “非微粘結炭”の増加

“非微粘結炭”，あるいは“Semi-soft”と呼ばれる石炭のマーケットへの本格的な登場は1980年代初めからである。技術的には、高炉のPCI導入による高炉での石炭使用、従来からの成型炭配合法に加えて、CMC（調湿炭）の普及、さらにはDAPS（Dry-cleaned and Agglomerated Precompaction Process）と続くコークスでの“非微粘結炭”使用技術の進歩がある。非微粘結炭の供給面では、当時購入していた弱粘結炭に類する弱粘結炭付随型、一般炭需要増に伴う一般炭付随型、また前述のカナダ等での新規開発による原料炭の世界での供給増での副次的な結果としての原料炭付随型とがあった<sup>42)</sup>。非微粘結炭，あるいは“Semi-soft”と呼ばれた石炭には品質には大きな幅があり、当然ながら、強粘付随型は一般炭付随型に較べ概ね良好な粘結性を有した。粘結性からは、“非微粘結炭”という分類にそぐわないものも存在した。いずれにせよ、コークス技術の進歩とPCIは、供給される広範な範囲の非微粘結炭を使用する事を可能にした。

現在では、強粘付随型非微粘結炭の供給前提となった状況は、原料炭のソースが限定されてきている点で変化して

いると考えられる。一方、今後も一般炭付随型非微粘結炭の供給には大きな変化は認められない。むしろ一般炭生産が増加すれば付随して供給される非微粘結炭の拡大の可能性もある。世界的に見れば、非微粘結炭をコークス用に積極的に使用して行こうとしている点で日本鉄鋼業は際だっている。

## 5.3 今後の動向

Table 1の原料炭埋蔵量の分布と現在の世界および日本で豪州依存の上昇は、資源的にも中長期的な懸念材料である。資源的には、世界での原料炭の供給ソースとしては、旧CISや東欧、北米、中国が期待される。一方、現実には、たとえば北米、特に米国では、優良原料炭の産地アパラチア炭田（原料炭は坑内掘り）は、人件費も相対的に高く多くは期待できない。坑内掘りの旧CISや東欧でも今後の生産の安定には、採掘深度の増加やガスへの対策に時間を要すると思われる。

日本にとり近距離で高品質の原料炭も多い中国には期待が大きいが、鉄鋼生産の増加による優良原料炭への国内需要が極めて強い。中国製鉄重点企業でのコークス比やPCR（高炉への微粉炭吹込み原単位）は着実に向上が認められ（Table 7）、原料炭需要の緩和が望まれる。しかし、山西省を中心とする原料炭ソースの長い鉄道輸送距離に加え、坑内掘りで炭層厚さもそれ程厚くない状況（Table 8, Fig.13）は、短期的に過度の期待は難しい事を示唆している。

以上のような強粘結炭の供給事情を考えると、日本鉄鋼業にとり脱優良強粘結炭の技術開発が重要であると考えられる。

Table 6. Closed or closing Canadian coal mines.

Mine	1998 Production (Mt)	
Quintette	2.9	Closed in 2000
Gregg River	1.7	Closed in 1999
Bullmoose	1.8	Closing in 2003?
Luscar Cardinal	2.4	Closing in 2004?
Total	8.8	

## 6. まとめ

鉄鉱石では、Pisoliteに続き、Hematite-GoethiteのMarra Mamba 鉄鉱石の使用技術確立が当面の課題であろう。鉄鉱石ソースが、遠距離のブラジルに依存するところ少なくな

Table 7. Coke ratio & PCR of major Chinese steel mills.

		1995	2001	The 10th 5yr Plan(01-05)
Coke Ratio	Kg/t-pig iron	508	423	<400
PCR	Kg/t-pig iron	59	124	>150

Source:China Steel Yearbook et al.

Table 8. Examples of coking coal producers.

Country	Mine	Mining Method	Annual Production (Mt)	No. of Coal Seam	Total Thickness of coal seams (m)	Distance to port (Km)
Australia	Peakdowns	Opencut	7.2	2-4	15-20	190
	Hail Creek	Opencut	5.5	2	15	160
	Moranbah North	Underground	4.4	1	4.5	240
Canada	Elkview	Opencut	6.0	10-15	60	1200
China	Xiqu	Underground	1.5	2	7	1000
Russia	Neryungri	Opencut	3.0	1	25	2600

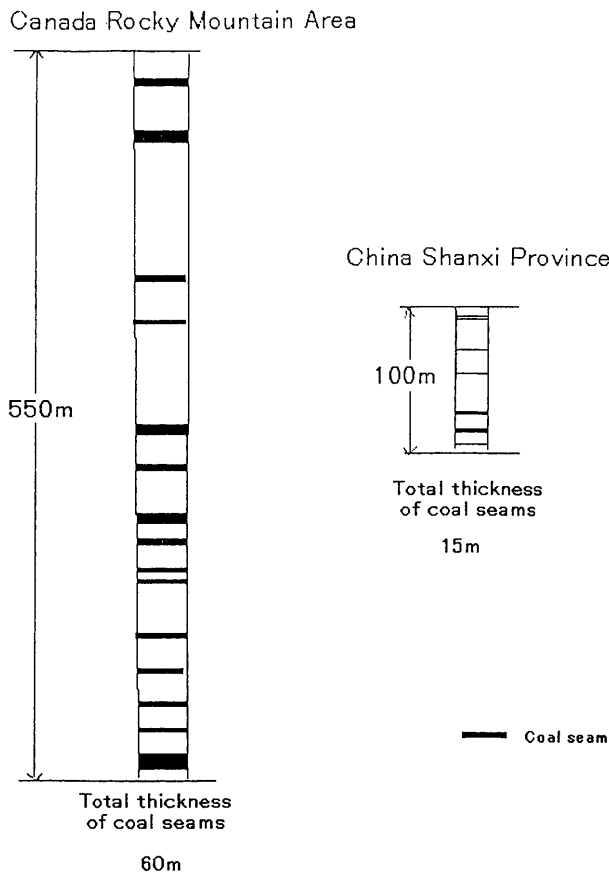


Fig. 13. Coal-bearing strata and coal seams of Canada and China (example).

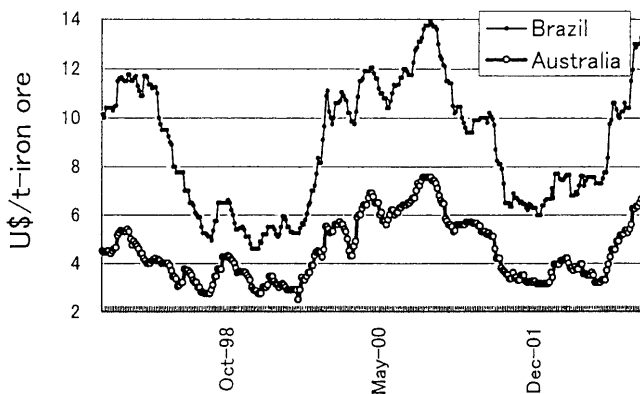


Fig. 14. Ocean freight market to Japan.

い事やフレートの変動の大きさ(Fig.14)を考えれば、柔軟で敏速な対応が使用技術に求められる機会も増えると予測される。

石炭については、優良強粘結炭のソースは限定されており脱優良強粘結炭依存が最も大きな課題である。PCI増を含む、高炉でのコークス比低減や、将来的には、DIOS (Direct Iron Ore Smelting Reduction Process)<sup>43)</sup>のような直接還元法、コークス製造技術では、究極的にはSCOPE21 (Super Coke Oven for Productivity and Environmental enhancement toward the 21st century)<sup>44)</sup>で実現されるような一般炭付随非微粘結炭の利用技術が必要とされる。

さらに、資源の概念の拡張と一致した考え方である循環型社会での資源生産性向上<sup>45)</sup>という考え方に沿ったスクラップの利用技術が課題となる。

## 解 説

### 西豪州鉄鉱石

- BIF (Banded Iron Formation; 縞状鉄鉱層)

世界的に35~18億年前を中心に堆積した鉄鉱層。大気、海水中にO<sub>2</sub> (酸素) が存在しない環境でイオンとして古代の海水に溶解していた2価のFeイオンが、生物の登場により光合成で発生するO<sub>2</sub>と結合し、主にFe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (磁鉄鉱)として沈殿した。同時に海水中に溶けていたSiO<sub>2</sub> (珪酸)等も沈殿し、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>とSiO<sub>2</sub>等が細かい互層を形成。Fe分は、20~30%。風化を受けていない場合は、堅固な岩石である。ジャスピライト、タコナイト、イタピライト等、地域固有の名前で呼ばれる場合もある。

このような低Feの堅固なBIFが、米国五大湖周辺、中国、ロシア等で鉄鉱石として現在も採掘され、破碎・磨鉱後に選鉱され微粉の多い高品位精鉱となる。微粉のためペレットに加工される場合が多い。西豪州やブラジルでは、このような低Feの堅固なBIFが採掘対象とされる事は現在のところ稀である。

- BrockmanとMarra Mamba

西豪州には採掘対象となっているBIFが2層あり、Brockman やMarra Mambaはそれぞれの地層につけられた名前。本来、鉱質等を表すものではない。西豪州鉄鉱石の開発がLow P Brockman主体で行われてきたため、BrockmanがLow P Brockmanだけを指すように誤用されてきたケースもある。BIFの段階での分析例では、P (燐)は、Brockmanで0.09%、Marra Mambaで0.03%と、Brockmanが高Pである。

- 天水富化作用

地質的に長い時間の雨水等により侵食作用の一種である溶食によりBIFからSiO<sub>2</sub>等が溶脱<sup>46)</sup>される作用。結果的に溶脱されにくいBIFの中の鉄鉱物が主体に残される。地表水にCO<sub>2</sub>や動植物からの有機酸の溶解した地下水や温泉地帯の温熱水ではさらに溶脱作用は促進される<sup>47-52)</sup>。その過程で、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (磁鉄鉱、マグネタイト)は、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (赤鉄鉱、ヘマタイト)へと酸化される。この赤鉄鉱は、磁鉄鉱の形状(仮像)を留めておりMartite (マータイト)と呼ばれる事もある。Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>だけが残ったとしてFe分は70%。SiO<sub>2</sub>等が溶脱された後の空隙には鉄鉱物が析出する。温度により鉄鉱物の種類が異なる。低温ならFeO(OH) (Goethite ゲーサイト、針鉄鉱)、高温ならFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (赤鉄鉱、ヘマタイト)となる。実験室的には(圧力によって異なるが)、150°C前後を境としている<sup>53,54)</sup>。PHやEhによっても析出する鉱物が異なる<sup>55)</sup>。



- Ochreous goethite (土状ゲーサイト)

天水富化作用の過程で、BIF中の鉄珪酸塩鉱物を交代したもので、黄色の土状を呈する。Marra Mambaに多く見られる。

- Low P Brockman 鉱石

Brockman層由来のBIFの鉄鉱床でPが相対的に低いもの。前述の様に、PはGoethiteと共存していると考えられ、Low P BrockmanはGoethiteが少ない。SiO<sub>2</sub>等の溶脱されたMartite粒子間の空隙を埋めたGoethiteが、埋没変成作用の高温で、Hematite (特に形状からMicroplaty Hematiteとも呼ばれる)に変化している。この段階で、Goethiteに吸着されていたPが遊離され低下したとされる。豪州で“Hematite” 鉱石と呼ばれるものは、Low P Brockmanを主体としているが、Marra MambaやHigh P Brockman 鉱石が一部ブレンドされている。

- High P Brockman 鉱石

Brockman層由来のBIFの鉄鉱床でPが相対的に高いもの。SiO<sub>2</sub>等の溶脱されたMartite粒子間の空隙をGoethiteが埋めた組織。Martite-Goethite 鉱石に分類される。0.1%程度よりPが高いものを高Pと分類している事が多い。

- Marra Mamba 鉱石

Marra Mamba層由来のBIFの鉄鉱床でPが相対的に高いもの。SiO<sub>2</sub>等の溶脱されたMartite粒子間の空隙をGoethiteが埋めた組織。Martite-Goethite 鉱石に分類される。鉱物組織的には、High P Brockman 鉱石と類似のMartite-Goethite 鉱石に分類されるが、Ochreous goethiteが目立つものが多い。また、High P Brockman 鉱石に比べPは低い。

- Pisolite 鉱石

魚卵状の構造を持つ鉱石。豪州では、5~25百年前の古河川(Channel)に堆積した鉄鉱床。Channel Ironore Deposit (CID)と呼ぶ場合もある。Feの供給源は主に周辺のBIFである。Goethiteに富む。魚卵状鉄鉱石は、世界各地に分布しているが、多くは著しく高いPに特色がある<sup>56)</sup>。高P鉄鉱石が1878年のトーマス製鋼法の発明で各地の製鉄業で大いに活用された<sup>57)</sup>。しかし、豪州で現在採掘されているRobe RiverやYandiは比較的低P。

### “Semi-soft” (非微粘結炭)

非微粘結炭は字義上はNon and poor coking coal。1980年代に本格的に登場して以来、その技術的、品質的な定義は曖昧かつ広範になっている。旧来の弱粘結炭相当のものや、準強と呼ばれていたものよりやや粘結性が劣る程度のもまで含まれている(Table 9)。更に、粘結性やコークス化性では強粘結炭に相当するが、AshやS等が高いために“Semi-soft”と分類されるものに対しては、“Semi-hard”として区別する考え方もある。

Table 9. Quality of present “semi-soft” and 1980’s soft and semi-hard.

Time	Classification	Example	Ash	VM	MF(log)
Present	“Semi-soft”	Australia-NSW	8.9	34.7	2.08
		China	8.3	36.1	1.48
		Australia-Qld	9.8	26.2	1.56
1980’s	Soft	Australia	8.9	36.5	2.17
		South Africa	7.3	32.7	1.17
	Semi-hard	Australia-Qld	8.1	26.5	1.91
Thermal Coal		Australia-NSW	13.5	36	-

## 文 献

- 1) 熊本俊一：第4版鉄鋼便覧第II巻1・1・1+, 日本鉄鋼協会編, 東京, (2002), (CD-ROM).
- 2) 八田正治：第4版鉄鋼便覧第II巻1・2・1+, 日本鉄鋼協会編, 東京, (2002), (CD-ROM).
- 3) BP Statistical review of world energy 2002, <http://www.bp.com/>, (accessed 2002-11-16).
- 4) T.Nishiyama and T.Adachi: *Shigen-to-Sozai*, **109** (1993), 476.
- 5) 牟田邦彦, 鈴木 勝, 島山征之：第3版鉄鋼便覧第II巻, 日本鉄鋼協会編, 丸善, 東京, (1979), 8.
- 6) 大竹信彦：第3版鉄鋼便覧第II巻, 日本鉄鋼協会編, 丸善, 東京, (1979), 36.
- 7) 岡村 聡, 武蔵野実, 渡辺暉夫, 石田 聖, 久保田善裕, 久家直之, 棚瀬充史, 水落幸広, 吉野博厚：岩石と地下資源, 東海大学出版会, 東京, (1995), 163.
- 8) 加納 隆, 菊地隆男, 小室裕明, 小森長生, 立石雅昭, 鈴木茂之, 矢野孝雄：地球の歴史, 東海大学出版会, 東京, (1995), 101.
- 9) 鹿園直建：地殻の進化, 岩波書店, 東京, (1997), 124.
- 10) 飯山敏道：地球鉱物資源入門, 東京大学出版会, 東京, (1998), 111.
- 11) 川上紳一：全地球史解説6.1, 東京大学出版会, 東京, (2002), 405.
- 12) J.Law, G.N.Phillips and R.Myers: *J. AImm*, **6** (2002), 28.
- 13) 清川昌一：地球進化論, 岩波書店, 東京, (1998), 164.
- 14) 岩田修一, 柳田博明, 西山 孝：エネルギー・資源ハンドブック, エネルギー資源学会編, オーム社, 東京, (1996), 998.
- 15) N.Ohtake: *Shigen-to-Sozai*, **109** (1993), 411.
- 16) 鹿園直建：地球システム科学入門, 東京大学出版会, 東京, (1996), 112.
- 17) 木村英雄, 藤井修治：石炭化学と工業, 三共出版, 東京, (1984), 9.
- 18) 相原安津夫：地球の資源/地表開発, 岩波書店, 東京, (1992), 68.
- 19) K.Fujii: *J. Fuel Soc. Jpn.*, **67** (1988) No. 6, 375.
- 20) 西岡邦彦：太陽の化石：石炭, アグネ技術センター, 東京, (1999), 13.
- 21) 田口一雄：石油はどうしてできたか, 青木書店, 東京, (1993), 46.
- 22) H.Higami: *Suiyokwai-Shi*, **19** (1983) No. 10, 709.
- 23) D.Smith: Proc. Iron Ore 2002, PGC, South Australia, (2002), (CD-ROM).
- 24) The Iron Ore Market 2001-2003, UNCTAD, Switzerland, (2002), 33.
- 25) J.M.コンラッド：資源経済学, 岩波書店, 東京, (2002), 90.
- 26) 内山洋二：エネルギー工学と社会, 放送大学教育振興会, 東京, (2003), 149.
- 27) 鐵源年報第13号, 日本鉄源協会, 東京, (2002), 50.
- 28) 萬谷興亜：日本鉄源協会シンポジウム基調講演「循環型社会と鉄鋼業の役割」, (2001.11.15.).
- 29) M.Asanuma: *Shigen-to-Sozai*, **116** (2000), 737.
- 30) H.Kuwatori, H.Kondo, K.Ujiyama and T.Yamaguchi: *Resource Processing*, **48** (2001) No. 4, 227.
- 31) T.Inazumi: *Tetsu-to-Hagané*, **82** (1996), 965.
- 32) T.Haga, A.Ohshio, K.Nakamura, T.Kozono and K.Uekawa: *Tetsu-to-Hagané*, **83** (1997), 103.
- 33) J.Box, J.Phillips and J.Clout: Proc. 1st Japan-Australia Symp. of Iron & Steelmaking, ISIJ, Tokyo, (2002), (CD-ROM).

- 34) W.Steane, R.Faeldan and C.Booker: *Skullings' Min. Rev.*, **86** (1997) No. 10, 6.
- 35) H.Hida and N.Nosaka: *Tetsu-to-Hagané*, **78** (1992), 966.
- 36) J.Okazaki, M.Nakano and Y.Hosotani: *CAMP-ISIJ*, **14** (2001), 187.
- 37) C.E.Loo, M.F.Hutchens and L.Jelenich: Proc. 1st Japan-Australia Symp. of Iron & Steelmaking, ISIJ, Tokyo, (2002), (CD-ROM).
- 38) R.C.Bergstrand, A.G.Waters and J.M.F.Clout: Proc. 3rd Int. Conf. on Science and Technology of Ironmaking, VDEh, Düsseldorf, (2003), 424.
- 39) K.Adachi: *Shigen-to-Sozai*, **116** (2000), 1005.
- 40) 井川勝利: 第4版鉄鋼便覧第II巻4・3・1+, 日本鉄鋼協会編, 東京, (2002), (CD-ROM).
- 41) 坂輪光弘, 古牧育男, 山口一良: 石炭・コークス, 日本鉄鋼協会, 東京, (2002), 175.
- 42) N.Nosaka and Y.Hosotani: *Tetsu-to-Hagané*, **75** (1989), 1961.
- 43) T.Kitagawa: *Tetsu-to-Hagané*, **88** (2002), 430.
- 44) K.Nishioka: *Tetsu-to-Hagané*, **82** (1996), 9.
- 45) Y.Harada: *Bull. Iron Steel Inst. Jpn.*, **7** (2002), 243.
- 46) R.Harmsworth, M.Kneeshaw, R.Morris, C.Robinson and P.Shrivastava: *Geology of the Mineral Deposits of Australia and Papua New Guinea*, AIMM, Victoria, (1990), 517.
- 47) C.Klein and E.A.Ladeira: *Economic Geology*, **95** (2000), 405.
- 48) D.Taylor, H.Dalstra, A.Harding, G.Broadbent and M.Barley: *Economic Geology*, **96** (2001), 837.
- 49) 針谷 宥, 服部定育, 藤原善樹, 渡辺暉夫, 高橋伸幸, 赤松守雄: 概説地球科学, 朝倉書店, 東京, (1996), 137.
- 50) 北野 康: 水の科学, 日本放送協会, 東京, (1981), 76.
- 51) 松葉谷治: 熱水の地球化学, 裳華房, 東京, (1991), 14.
- 52) 飯山敏道, 河村雄行, 中嶋 悟: 実験地球化学, 東京大学出版会, 東京, (1994), 164.
- 53) T.Yamaguchi: *Bull. Iron Steel Inst. Jpn.*, **6** (2001), 175.
- 54) R.Garrels and C.Christ: *Solutions, Minerals and Equilibria*, joint of Harper & Row, New York and John Weatherhill, Tokyo, (1965), 329.
- 55) 守田和之: 私信.
- 56) 飯山敏道: 地球鉱物資源入門, 東京大学出版会, 東京, (1998), 106.
- 57) 大森弘喜: フランス鉄鋼業史, ミネルヴァ書房, 京都, (1996), 38.