

西豪州における鉄鉱床と今後の鉱石性状

肥田 行博*・野坂 庸二*2

Iron Ore Deposits and Future Properties of Iron Ore Products in Western Australia

Yukihiro HIDA and Nobuji NOSAKA

1. 緒 言

鉄鉱石資源は永遠か、大丈夫か。日頃、鉄鋼製造に関係している読者の中でもこのような心配を抱くことはめったにないと思われる。しかし、世界の大規模良質鉄鉱山の開発が開始されてから25年以上が経過し、切羽レベルの低下、湧水対策の必要など、山元での採掘条件は悪化してきた。一部の鉄鉱山においては鉄量の枯渇化が進み、次世代鉄鉱山の開発が計画されている。

我が国の輸入鉄鉱石中の45%強を占める豪州鉄鉱石についてもその例外ではなく、1966~1972年を第1世代鉄鉱山開発時代とすれば、第2世代としての開発が1990年以降進められている。ヤンディクージナ(Yandicoogina)およびマランドウ(Marandoo)鉄床の開発がその1例として挙げられる。

著者の一人らは既に本誌で鉄石・石炭の資源動向について概説した¹⁾。本報では、西豪州における①鉄鉱床の特徴と今後の開発動向および②鉄床の生成過程と品質の関係について解説し、今後の鉄鉱石の性状変化およびそれに対する技術課題について考察する。

2. 鉄鉱石の世界需給と我が国での豪州鉄鉱石の位置付け

世界における大規模鉄鉱山の開発は1960年代前半から70年代後半にかけて行われた。しかし、第1次オイルショック(73年)を契機として鉄鋼生産の停滞に見舞われ、70年代後半から80年代前半にかけて大幅な供給過剰が続いた。この間、経営環境悪化の下で鉄鉱山では設備の老朽化が進むと共に、生産規模の縮小(供給能力低下)という方向で合理化が進んだ。ところが1987年以降、世界の粗鋼生産量は急激な伸びを示し、88、89年と高い生産レベルで推移した結果、上記の老朽化・合理

化も影響して鉄鉱山の供給体制が間に合わず、鉄鉱石需給は一時期極めて逼迫した。1988年以降、山元の供給能力増強に手が打たれ、かつ90年には粗鋼生産量がやや減少したことによって現状では世界での需給はほぼバランスしている状況にある。今後の鉄鉱石需給については、現在の粗鋼生産レベルが続く限り、山元での増強等の諸対策を取ったとしても余裕のない状態で推移するものと予測される。

過去最高の粗鋼生産量となった1989年の世界の鉄鉱石貿易量をFig. 1に示す。輸出量は約424 Mtで、主要輸出国の豪州、ブラジルはそれぞれ約25%、27%を占めた。一方、輸入国別では、日本はEC 12ヶ国の33%に次いで約30%の128 Mtを輸入している。

豪州鉄鉱石についてみると、豪州の輸出量104.5 Mtの内の78%強がアジア地区に、日本にはその内の53%強の55.9 Mtが出荷されている。一方欧州には総輸出量の約20%が輸出されているに過ぎない。これは輸送距離に起因している。

日本にとって豪州鉄鉱石は、近距離資源として、また供給安定性、インフラの整備状況、鉄床の賦存と鉄量からも今後とも最大の供給ソースであり続けることは間違いない。

3. 豪州における鉄鉱床の特徴とその生成過程

3.1 西豪州ピルバラ地区の鉄鉱床

豪州産鉄鉱石の99%以上はFig. 2に示す西豪州のピルバラ地区(Pilbara Region)において採掘されている。“化学的沈澱作用により生成した鉄床”であり、後述の若いメサ型(Mesa:台形状の山、後掲Fig. 6参照)鉄床を除き、先カンブリア紀に生成した縞状鉄鉱層(BIF: Banded Iron Formation)である。さらにBIF地帯は、①ピルバラ地区北部の始生代(35~30億年前)の

平成4年2月3日受付 平成4年4月10日受理 (Received on Feb. 3, 1992; Accepted on Apr. 10, 1992) (依頼解説)

* 新日本製鉄(株)プロセス技術研究所主任研究員 工博 (Process Technology Research Laboratories, Nippon Steel Corp., 20-1 Shintomi Futtsu 299-12)

*2 新日本製鉄(株)鉄石部専門部長 (Iron Ore Div., Nippon Steel Corp.)

Key words: iron ore; iron ore deposit; hematite; goethite; limonite; pisolite; iron ore sinter; iron ore property; Australia.

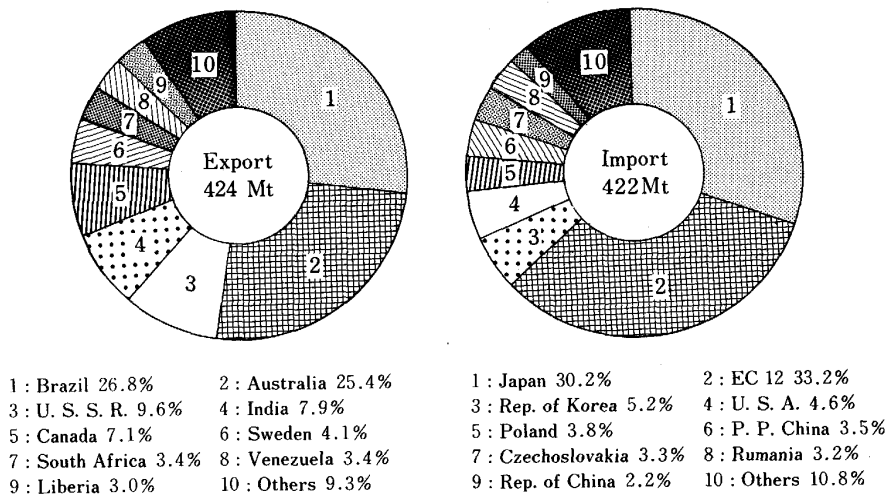


Fig. 1. World trade amount of iron ores in 1989.

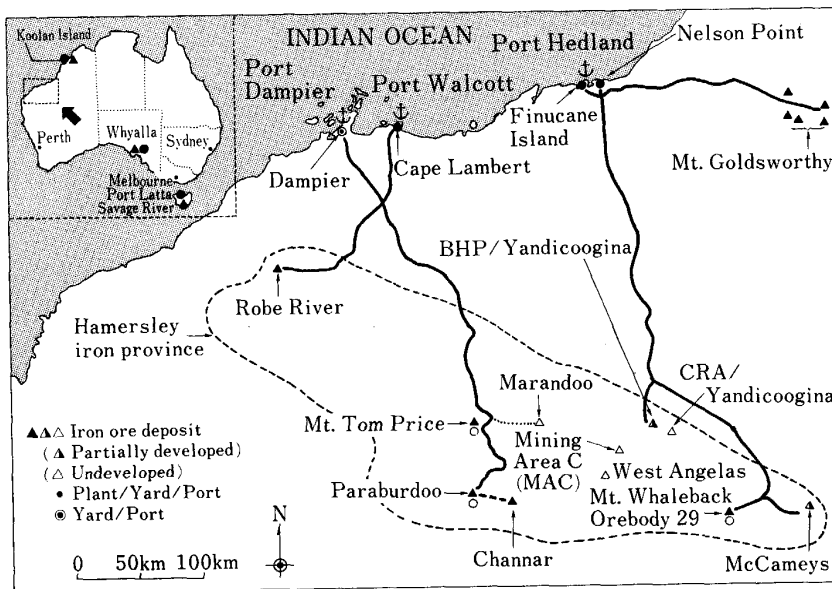


Fig. 2. Iron ore deposits in Pilbara region of Western Australia.

巨大な花崗岩質岩帯と②前期原生代(約25億年前)に生成したハマスレイ鉄地域(Hamersley Iron Province)とに分けられる。一般に前者の鉱床はアルゴマ型(Algoma type)、後者は世界の高品位鉱床の大部分が属するスペリオール型(Lake Superior type)と分類されている²⁾³⁾。

量的には、ピルバラ地区における鉄鉱石の70%がハマスレイ鉄地域から産出されている。我が国でハマスレイ(Hamersley)、ニューマン(Newman)と呼ばれる鉱石である。また約25%はハマスレイ鉄地域北西部のメサ型のローブリバー(Robe River)鉄鉱床で、さらに残りの数%強は前述のアルゴマ型鉱床から採掘されており、それぞれローブリバー、ゴールドワージー(Goldworthy)と呼んでいるものである。

3.2 ハマスレイ鉄地域の縞状鉄鉱層の特徴

今後の豪州産鉄鉱石の性状を検討する場合には、とくにハマスレイ鉄地域の地質構造を知っておく必要がある。この地域には、Fig. 3に示すハマスレイ層群

(Hamersley group of rocks)が80 000 km²にわたって賦存し、様々に褶曲、断層を起し、所々でドレイイト(Dolerite、粗粒玄武岩)が貫入している。また縞状の層はm、cm及びmm単位の幅で、すなわちマクロバンド、メソバンド及びマイクロバンドとして複雑に発達している。なお、メソバンドは沈澱過程における堆積条件の周期的変化を示し、マイクロバンドは構成鉱物の相違によるものとされている³⁾。

このハマスレイ層群にはFig. 3に示すように3つの大きな鉄鉱石累層(Iron formation units)が含まれており、その中でマラマンバ(Marra Mamba)(鉱化前は約230 mの厚さ)とブロックマン(Blockman)鉄鉱石累層(約620 m)が鉱化作用(Iron mineralization)を受けており、経済的には重要なものである。さらにブロックマン層はいくつかの層(Member)から構成されているが、採掘の対象となつているのはダレスゴージ(Dales Gorge)層とジョフレ(Joffre)層である。とく

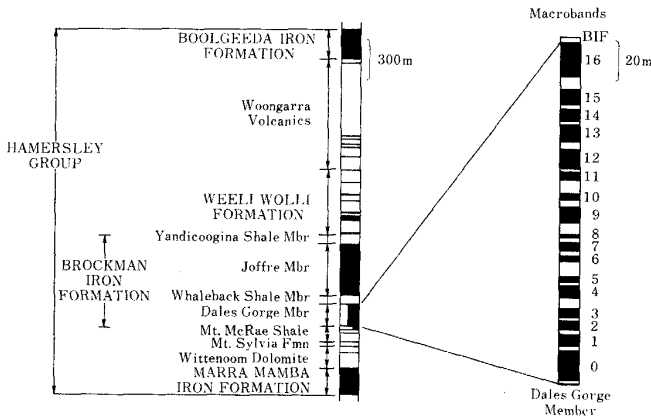


Fig. 3. Hamersley group stratigraphy with detail of the Dales Gorge member of the Blockman iron formation⁶⁾. Black represents banded iron-formation (BIF). (Modified from Trendall and Blockley, 1970, Fig. 3.)

に前者は天水富化作用及び埋没変成作用を強く受けて、Fig. 3のごとく不純物である頁岩 (Shale) 層は薄くて少ないのが特徴である。したがって、このダレスゴージ層を主要鉱体とする鉄鉱山は第 1 世代開発の最初の対象とされ、高品位塊鉄石の主要ソースとなっている。

また、マラマンバ鉄鉱石累層は 3 つの層 (Mt. Newman, Maclead, Nammuldi) から成るが、鉄源としてニューマン層が最も重要である。当層での鉄の富化作用は上層から下層へと進んでおり、上部と下部では鉄石の質が違っている (後掲 Fig. 8 中の Marandoo 鉄床参照)⁴⁾⁵⁾。

3・3 主要鉄鉱床の生成過程

3・3・1 BIF を母岩とする鉄床の生成

Kneeshaw⁴⁾ は BIF を母岩とするハマスレイ鉄地域の鉄鉱石を (I) トムプライス-ホエイルバック (Tom Price-Whaleback; それぞれ鉄山の名前), (II) ブロックマン及び (III) マラマンバの 3 つの鉄石タイプに分類している。これらは鉱物学的には (I) ヘマタイト (Hematite: Fe_2O_3), (II) ヘマタイト-ゲーサイト (Goethite: $FeOOH$), (III) ヘマタイト-リモナイト (Limonite) 鉄石 (以下、それぞれ H, H/G, H/L タイプと略称) に対応する (後掲の Fig. 8 参照)⁴⁾。なお、豪州では“低りんブロックマン”, “高りんブロックマン” 鉄石タイプと分類することがある。この場合、前者が分類 (I), 後者は (II) に対応する。

これらの鉄石タイプの生成過程について、BIF の権威である Morris⁶⁾ の研究結果をまとめて簡略化すると、Fig. 4 のようになる。

† 豪州では同一鉄物の $FeOOH$ でも特に鉄石の色調が黄色のものをリモナイト鉄石、褐色でガラスのような破面を呈するものをゲーサイト鉄石、また豆状粒子の凝集体になったものをピソライト鉄石 (後述) と分類している。本報でもこの分類に従った。また、1 次のマグネタイトが酸化して生成した Fe_2O_3 をマータイト (Martite) と区別しているが、本報では一括してヘマタイトとした。

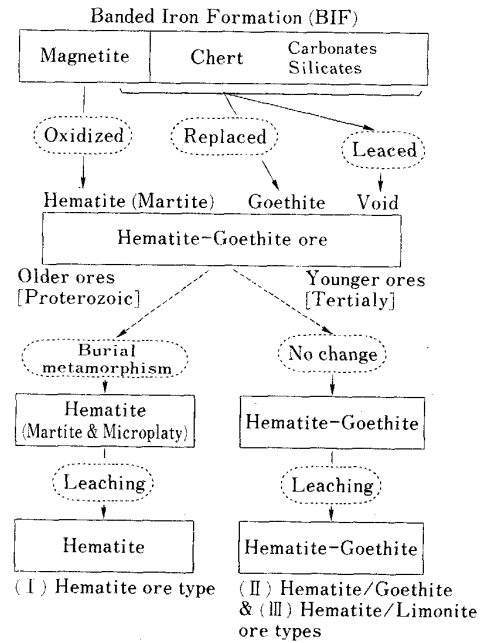


Fig. 4. Diagrammatic representation of the progress of iron enrichment and subsequent modifications during supergene alteration of BIF (Simply modified from figures by Morris⁶⁾).

母岩である BIF は、Fe 分が約 30% で、メソバンド及びマイクロバンド状にマグネタイトと脈石 (主にチャート (Chert: SiO_2)) が互いに層を成している。

分類 (I) の H タイプ鉄石の生成は以下のように考えられる。まず BIF の褶曲及び断層に沿って地下水が浸入し、最初の“天水富化作用”が起こった。約 20 億年前のことである。この間に、BIF 中のマグネタイトは酸化されてヘマタイト (顕微鏡組織では元のマグネタイトの菱形を示し、Morris はマータイト (Martite) と呼んでいる) に、あるいは酸化過程で水と反応してゲーサイトに変わっていった。また脈石の多くは溶出し、一部がゲーサイトに置き代わった。このようにして最初のヘマタイト-ゲーサイト鉄体 (Ore bodies) が形成された。

この鉄体はつづいて埋没し、さらに“埋没変成作用 (Burial metamorphism: 上部の岩石の荷重によって発生する圧力と熱によって起こる変化)”を受けて Fe 分は増加し、鉄石は硬化していった。この間、ゲーサイトは脱水作用を受けてマイクロプレイティ ヘマタイト (Microplaty hematite: 顕微鏡組織では細い葉片状) と分類されている 2 次ヘマタイトに変化した。その後、埋没変成作用を受けた鉄体は再び地表に露出し、地下水が残りのゲーサイトを溶脱することによってさらに富化が進み、現在のヘマタイト鉄石となった。前掲 Fig. 3 中のダレスゴージ層がこれである。鉄化作用を受けた層は元の厚さの約半分はまだ縮小すると言われている。

第 1 世代に開発された大規模高品位鉄山のトムプライス (Mt. Tom Price) およびホエイルバック (Mt.

Whaleback) がこの鉱床であり、塊鉱石の重要なソースとなってきたものである。残念ながらハマスレイ鉄地域では、このタイプの鉱床は希にしか賦存していない。その理由として、その後の侵食が著しかったためと考えられている。

分類(Ⅱ)のH/Gタイプ及び分類(Ⅲ)のH/Lタイプの鉱石は、第2期の“天水富化作用”がかなり後の、約6000年前の新生代第3紀に起こり、両タイプはほぼ同じプロセスで生成したと推察されている⁵⁾⁷⁾。2種の鉱石の違いはゲーサイトの脱水程度であり、脱水作用がやや進んだものが、H/Gタイプ鉱石である。前掲Fig. 3中のジョフレ層がこれである。現在未利用の“高りんブロックマン”鉱石タイプ(りん分はHおよび低りんのH/Gタイプの約2倍でゲーサイト部に分布)も低りんのH/Gタイプと同様に生成したものとされている⁷⁾。

なお、A社主要採掘鉱山中のパラバドゥ(Paraburdoo)鉱山やチャナー(Channar)鉱山は上記のHタイプ鉱床生成の最終過程のゲーサイトの溶脱作用が十分に進んでいないものである。著者らの観察ではダレスゴージ層よりもジョフレ層が多く賦存しており、分類(Ⅱ)と取り扱うのがよいと考えられる。鉱物組織面では、葉片状の2次ヘマタイトを比較的多量に含み、トムプライス鉱山やホエイルバック鉱山よりも多くのゲーサイトが残存している。このため、後述のようにやや軟らかく、P分が高い。

3.3.2 メサ型鉱床の生成過程

本鉱床は、約5000年前の新生代第3紀に2次的に堆積した若い“河床堆積鉱床”である。その第3紀の初期にハマスレイ鉄地域で隆起が起こり、ブロックマンおよびマラマンパ層が露出して物理的および化学的な風化が起こり、ハマスレイ鉄地域に源を有する川などのストリームが鉄分を溶液状及び固体懸濁物として運んでいた。約5000年前にそれらが氾濫して当時の古代Robe溪谷を埋めた。このとき鉄鉱石片、木片などが、Fig. 5のように核となってピソライト(Pisolite)と呼ばれる“豆の集合体”のごとき特徴的な構造を持つ鉱石へと変化していった(本来のピソライトは核がないとして、Fig. 5ではPseudo-pisoliticと表されている⁹⁾)。その後地表が隆起し、さらに現在のRobe川による侵食作用によってFig. 6に示したようなメサ型の鉱床となった。

このメサ型鉱床は、東はハマスレイ鉄地域から西はインド洋まで、広く賦存している。希には地表に出ていないものもある。B社が開発中のヤンディクーヅナ鉱床(Eastern Mesa 2)も同時期に同じような過程で生成したものであるが、Fig. 7のように、あまり地表に露出していない⁵⁾⁹⁾。鉱量の60%が地下水位(Water table)以下に賦存している。

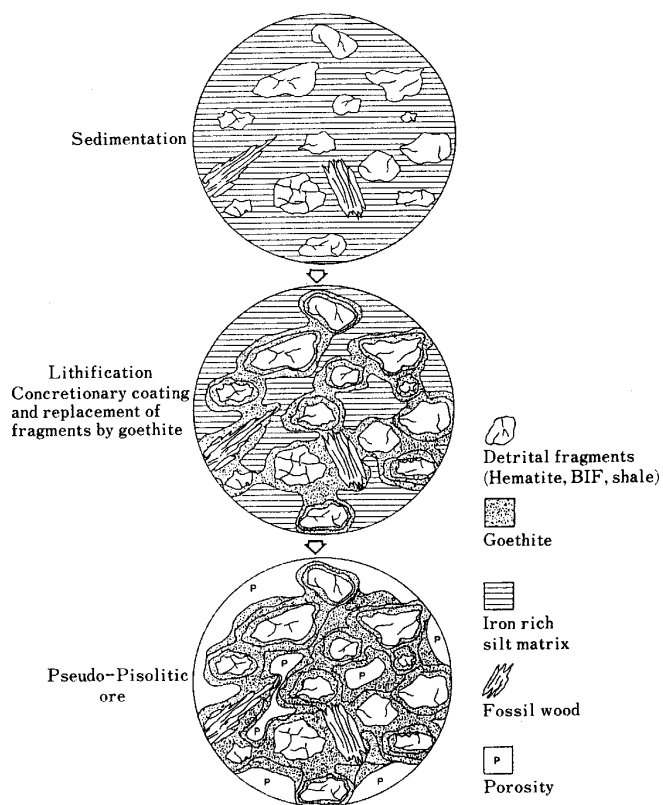


Fig. 5. Schematic diagram of formation of pisolite ore⁹⁾.

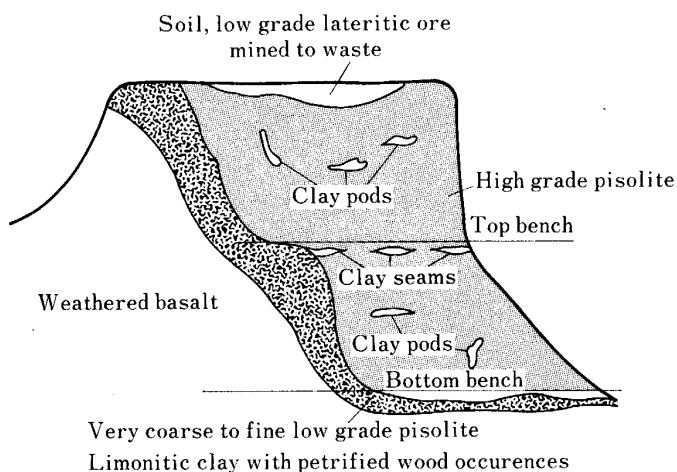


Fig. 6. Schematic section of Mesa "L" (Height of each bench ; 10-20 m)⁸⁾.

4. 鉱石タイプと品質の関係

コンピューターによる品質管理など、豪州の鉄鉱石関係者によく用いられているKneeshawの鉱石の分類と品質の関係⁴⁾をFig. 8に示す。一般にゲーサイト部は脆い特徴がある。これまでの主要鉱体であった分類(Ⅰ)の高品位ヘマタイト鉱石は分類(Ⅱ)のヘマタイト-ゲーサイト鉱石及び分類(Ⅲ)のヘマタイト-リモナイト鉱

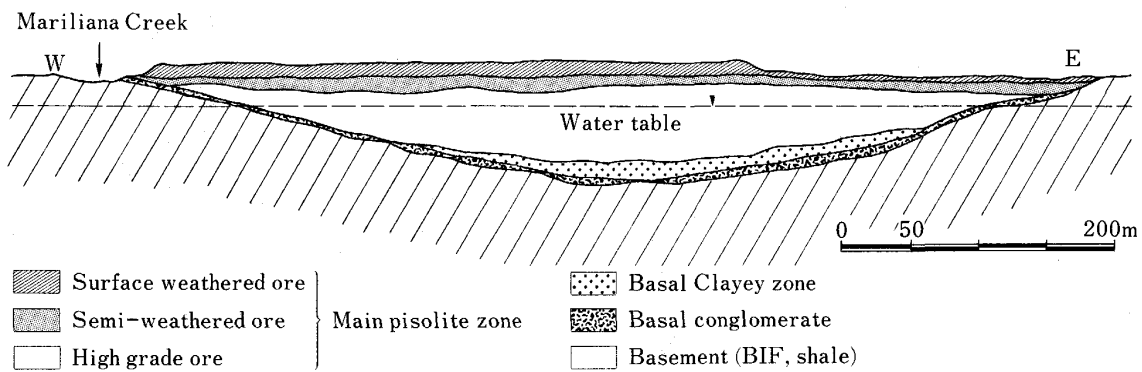


Fig. 7. Typical cross section of Yandicoogina Eastern Mesa 2⁹⁾.

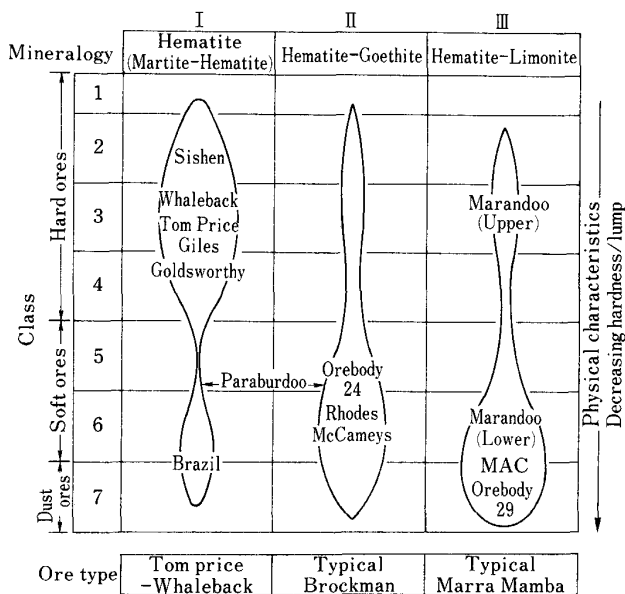


Fig. 8. The Pilbara iron ore classification. (Modified from the figure by Kneeshaw⁴⁾.)

石に比較して硬く、塊鉱石歩留の高いことが明瞭である。また、同一グループでも鉱床によって、さらに鉱床の上下によっても性状の異なることが分かる。

5. 鉄鉱床の開発動向と今後の鉱石性状の変化

ピルバラ地区では3社が採掘、出荷を行っている。新規鉱床の開発計画については、企業戦略として極めて重要であり、慎重に検討されている。最近公表された事例としてはB社が開発中のヤンディクージナ鉱床とA社が開発計画中のマランドゥ鉱床がある。ここでは、著者らが入手した情報を含めて今後の開発動向と鉱石性状変化について考察する。

5.1 今後の鉄鉱床の開発動向

5.1.1 原生代 BIF を母岩とする鉄鉱床

ハマスレイ鉄地域での最大の課題は第1世代に開発された大規模高品位鉱山の残存鉱量である。現状の出荷量を続けると、これまで優良塊鉱石の供給源となってきた

た“低りんブロックマン鉱床”は2015年頃までには掘り尽くしてしまうことになる。

一方、近年の高度な探査技術を駆使してもトムプライス鉱山およびホエルバック鉱山に匹敵するHタイプの鉱床は見つかっていない。すなわち、高品位塊鉱の新規大規模ソースを期待することは難しい。

新規鉱床の開発には採掘に必要な設備のほか鉄道、住居など各種のインフラを必要とする。これらに莫大な投資が必要となれば鉱石価格を大幅に上昇する以外には鉄鉱石シッパーは成り立たず、また製鉄会社の経営に与える影響も大きい。言い替えば、新規鉱床開発には、既存の設備をいかに活用できるかが鍵となる。

以上の状況から、鉱山会社は今後、現在採掘中のトムプライスおよびホエイルバック等の主力鉱体の延命策として、現鉱区周辺のいくつかの小、中規模のブロックマン(例えばFig.8分類(II)のMcCameys, Orebody 24など)及びマラマンバ鉄鉱石累層(例えばFig.8, 分類(III)のOrebody 29)での採掘増量、さらに鉱石の質は劣るが長期間安定して生産が行える大規模なマラマンバタイプ鉱床の新規開発等に進まざるを得ないと推察される。

マラマンバ大規模鉱床開発の具体案は、A社によるFig.8中のマランドゥ鉱床の開発である。早ければ1994年度に出荷が開始されるものと思われる。同鉄鉱床は露頭がスプーン状に賦存した丘陵を成しているが、走行約7.2kmの比較的フラットな地形であり、鉱体自体は北側に向かってなだらかに傾斜している。ただし、Fig.8に示されているように上部と下部では質に違いがある。初期採掘対象地区の地質学的鉱量は約180Mt(全体では370Mt)と推定されており、20年間以上は安定して生産されているものと考えられる。

その他にトムプライス鉱山とホエイルバック鉱山のほぼ中間にあるH/LタイプのマイニングエリアC(MAC: Mining Area C)鉱床(Fig.2, 8参照)も開発対象になり得るであろう。本鉱床の地質学的埋蔵鉱量は2500Mtとも言われており、最も大きなマラマンバ鉱石タイプの

鉱床である。いずれにしても、今後の新規大規模鉱山は軟らかい H/G, H/L タイプとなることは明白である。

5.1.2 メサ型鉱床

(1) ローブリバー鉄鉱床⁸⁾

鉱床は上流から下流に（東から西に）4 区分されており、それぞれにいくつかの独立したメサが分布している。1972 年の出荷開始以来 1982 年まではローブ川上流、Pannawonica から東南東に約 10 数 km 離れた Middle Robe River 鉱区で採掘されていた。現在は Pannawonica からほぼ南へ数 km の East Deepdale 鉱区の Mesa “L”, “M”, “N” と同町から南西約 10km の Deepdale 鉱床地区の Deposit “K” で採掘されている。しかし、現生産規模（24 Mt/Y）でも 1993 年度中に枯渇するために、1993 年度末からは Deposit “K” に隣接する下流側の “J” に全面移行することが計画されている。メサの集約によって更に合理化が期待できる。本メサは単一では最も大きく、4×6 km の広さで厚みは約 20 m あり、鉱量は約 600 Mt と推定されている。

(2) ヤンディクージナ鉄鉱床⁹⁾

本鉱床の開発は西豪州 Koolan 島のヤンピーサウンド (Yampi Sound) 鉄鉱山の枯渇に対応したものである。開発対象の鉱床は Mt. Whaleback から北西約 90 km にある Marillana クリークの古代の川床中に賦存している。現鉄道まで約 32 km の支線を新設し、既存のインフラを活用する。

鉱床は、19 の独立したメサからなり、全長 25 km に及んでいる。幅は 400~600 m で深さは 80~90 m ということである。鉱区は Marillana, Munjina の 2 つに分かれており、全体の推定鉱量は約 2100 Mt となっている。最初の開発対象は Marillana 鉱区の Eastern Mesa 2 で、採掘可能鉱量は 161 Mt と計算されている。1992 年 4 月から、約 5 Mt/Y の数量で出荷すべく開発中であり、ローブリバー鉱石と同様に全量が粉鉱である。

5.2 今後の塊/粉比率と鉄鉱石性状の変化

5.2.1 塊/粉比率

メサ型鉱床からの鉄鉱石はすべて粉鉱であり、ヤンディクージナ鉱床の出荷開始を考慮すれば、豪州鉱石中に占める当鉱石の比率増大による塊率低下は明らかである。

一方、主要塊鉱ソースは“原生代の BIF を母岩とする鉱床”である。当鉱床は前掲 Fig. 8 に示すように (I) H, (II) H/G および (III) H/L の 3 鉱石タイプに分類され、各タイプ毎に塊鉱歩留が異なる。

“原生代の BIF を母岩とする鉱床”からの鉱石は、商業的には上記 3 種の鉱石タイプがブレンドされ、我が国には粉、塊各 2 銘柄に集約されて出荷されている（厳密には、上記 Orebody 29 粉の一部はマラマンバ粉として販売）。このため、塊/粉比率の今後の動向を予測する場合には、各鉱石タイプの配合比率とそれぞれの塊鉱歩

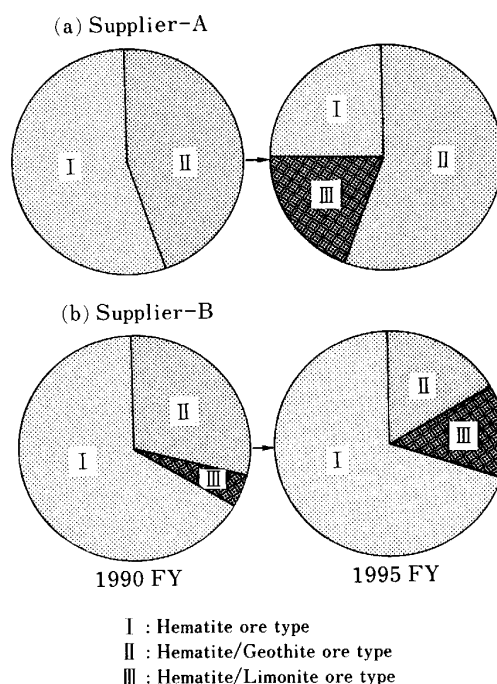


Fig. 9. Estimated change in ore type composition of saleable products from iron ore suppliers-A and -B.

留が問題となる。

(1) A サプライヤー鉱石について

今後数年間にマラマンバの鉱床 (Fig. 8 中 Marandoo) が開発され、全出荷鉱石中の鉱石タイプは 1990 年度から 1995 年度にかけて Fig. 9(a) のようになると予測され、塊鉱比率は 55% から 50% へと低下する。焼結用粉鉱石の量的増加は必至と言える。

(2) B サプライヤー鉱石について

現高品位鉱山延命計画確定のため周辺の鉱床を探索中であり、確度の高い長期予測は難しいが、周辺鉱床 (Fig. 8 中 McCameys, Orebody 24 など) は H/G タイプであること；既開発の H/L タイプの Orebody 29 での採掘状況、ヤンディクージナの開発状況などを考慮すると、“原生代の BIF を母岩とする鉱床”から生産される鉄鉱石中の鉱石タイプ構成は Fig. 9(b) のようになると予測され、塊鉱比率は 54% から 50% へと低下する。

5.2.2 塊鉱石の品質の変化

豪州産塊鉱石の 90% 以上を占める“原生代の BIF を母岩とする鉱床”からの鉱石では、上述のように H タイプが減り、ゲーサイトあるいはリモナイトを多量に含有する H/G および H/L タイプの増えることは明白である。すなわち、従来の高品位鉱石の柱であったタイプ (I) の鉱石比率が低下し、タイプ (II), (III) の比率が上昇するという『鉱質の変化』である。ゲーサイトおよびリモナイトの増加に起因し、塊鉱石の化学的品位の低下に加えて以下の品質変化は避けられない。

(1) まぶり付き微粉の増加

Table 1. Analysis of Australian iron ores.

Ore No.	Ore type	L/F	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	LOI
1	<H>	L&F	64.1%	3.6%	1.9%	0.062%	2.0%
2	<H>	L&F	64.1	4.3	2.1	0.056	N. A.
3	<H/G>	L&F	62.7	4.1	2.5	0.072	N. A.
4-1	<H>	L	63.7	5.8	0.9	0.040	1.0
4-2	<H>	F	62.7	6.1	1.6	0.043	1.5
5-1	Blend	L	65.0	3.1	1.5	0.052	2.4
5-2	Blend	F	62.8	4.3	2.6	0.072	3.0
6-1	Blend	L	64.2	4.0	1.5	0.052	1.4
6-2	Blend	F	62.2	5.9	2.5	0.069	1.9
7-1	<H/L>	L	62.0	2.6	1.3	0.060	6.9
7-2	<H/L>	F	61.6	3.0	2.1	0.070	N. A.
8-1	<H/L>	L	62.2	3.4	1.8	0.042	4.9
8-2	<H/L>	F	61.9	3.2	2.2	0.060	N. A.
9	<H/L>	L&F	62.4	2.8	1.7	0.059	5.5
10	Pisolite	F	57.1	5.6	2.8	0.038	9.3
11	Pisolite	F	59.1	4.9	1.3	0.041	9.0
12	(Brazil)	F	66.3	5.2	1.1	0.039	1.1
13	(Brazil)	F	67.8	0.7	0.7	0.048	1.0
14	(Brazil)	F	68.3	0.7	0.6	0.026	0.5

L: Lump F: Fines LOI: Loss on ignition

- (2) 冷間強度の低下 (搬送中の粉発生量の増加)
 (3) 結合水分解後の強度の低下 (高炉内発生粉の増加)
 (4) 還元後の強度の低下 (同上)

各シッパーにとって主力鉱体の延命をはかり、かつ急激な品質変化を避けるためには、ブレンドは不可欠である。このような状況から我が国鉄鋼業にとっては、高炉内粉化特性を的確に反映した評価法に基づいて従来より質の劣る塊鉱石のブレンド比率の上限を見極め、ブレンド管理を強化することが特に重要と考えられる。

5・2・3 粉鉱石の性状の変化

(1) 化学組成

豪州産鉱石で問題とすべき成分は、SiO₂、Al₂O₃ 及び P である。なお豪州産鉱石では、Al₂O₃ は粘土鉱物 (SiO₂-Al₂O₃) として存在していると見なしてよい。ここでは、“原生代の BIF を母岩とする鉱床”からの鉱石とピソライト鉱石について検討する。Table 1 にピルバラ地区およびブラジルの代表的鉱石の分析結果例を示しておく。

(a) “原生代 BIF を母岩とする鉱床”からの鉄鉱石

本鉱石では、前掲 Fig. 4 の鉱床生成過程から推察されるように不純物の大部分はゲーサイトと共沈する。そのため、H タイプ鉱石よりもゲーサイトの多い H/G タイプの方が Al₂O₃ 及び P が高くなるのが一般的である。(Table 1 中 Ore No. 1 と 3 の比較)。またゲーサイト部は軟らかく粉化しやすいので H タイプ塊鉱石中のゲーサイトは少なくなる。しかし、H/G タイプではゲーサイトの含有量は全体に多く、塊の部分にもかなり多量に存在するので塊と粉の化学的品位の差は H タイプに比較して小さくなる (Table 1 参照)。

A 社粉鉱石 (Table 1 中 Ore No. 5-2) の鉱石タイプの 10 年間の成分変化を Fig. 10 に示す。H タイプと H/G タイプの成分の違いが明瞭である。出荷粉鉱石の化学成分には大きな変化が認められない。注目すべきは H タイプ鉱石中 P 分の増加である。これは H タイプの

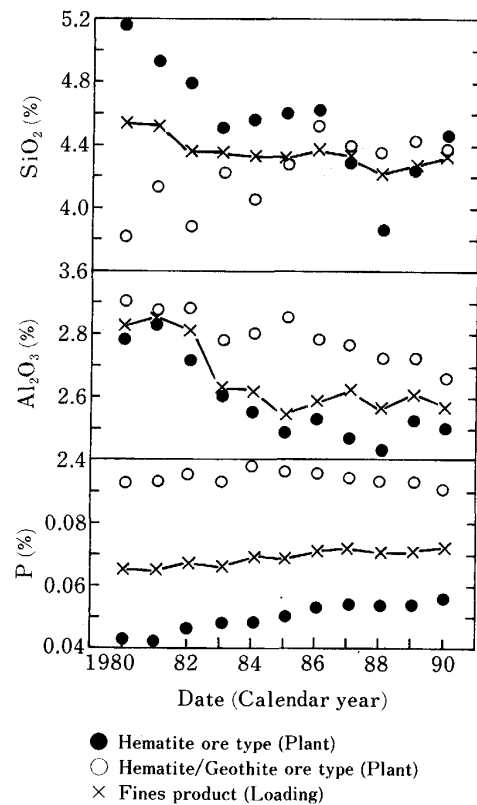


Fig. 10. Change in concentration of gangue minerals in iron ore fines product from supplier-A in past decade⁷⁾.

中でも良質な部分が年々減少していることを示唆しているものと考えられる。

今後、H タイプの割合が減少し H/G タイプが増加すれば、Al₂O₃ 及び P の増大は必至である。しかし、今後の粉鉱石中の構成は前掲 Fig. 9 に示したように H タイプの代わりに主として H/L (マラマンバ) タイプが増加する。ところが、H/L タイプの粉鉱石中の SiO₂ および Al₂O₃ は Table 1 に示すように H タイプ並である。したがって、出荷時には過去 10 年間と同様に脈石成分量をほぼ一定に維持してくるものと予測される。

(b) ピソライト鉱石

ローブリバー鉄鉱床では、下流へ向かうほどゲーサイトは減少し、わずかではあるが品位はよくなってきた。開発当初の上流の Middle Robe River 鉱区の鉱石は現在入荷中の、ヘマタイト鉱石粒子を核とする構造のもの¹⁰⁾とは異なり、大部分がゲーサイトであった。今後採掘予定の Deposit “J” は若干ではあるが現メサよりも下流側にあることから、SiO₂ および Al₂O₃ の低下が期待できる。

新規開発中のヤンディクージナ鉱床からの鉱石は地下水水位上下でやや異なると言われているが、平均組成は Table 1 (Ore No. 11) のように Al₂O₃ の低い特徴がある。これは、ローブリバー鉱床での脈石は粘土鉱物であるのに対して、当鉱床での脈石は石英と粘土鉱物で、その比

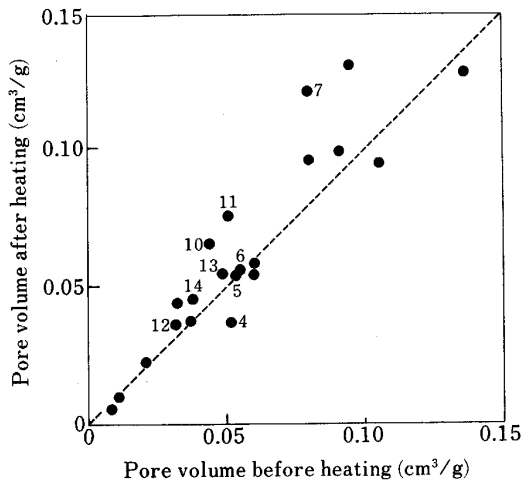


Fig. 11. Pore volumes of iron ores measured by mercury penetration porosimetry before and after heating up to 1350°C. (Numbers accord to those in Table 1.)

率がほぼ 50 : 50 となっているためである¹¹⁾。

以上のようにピソライト鉱石に関しては、化学組成面で問題となる変化はないものと考えられる。

(2) 粒度

今後、軟らかい H/L タイプの比率が増大するので、ブレンド粉鉱の粒度構成が変化する。タイプ(Ⅲ)の鉱石は前掲の Fig. 8 に示されているように主に Dust ore と分類されており、現在生産中のタイプ(Ⅲ)粉鉱石は 125 μm 以下の微粉を約 30% も含む細かいものである。

昨秋、日本ミルおよびサプライヤー合意のもとに B 社粉鉱石 (Table 1 中の Ore No. 6-2) 中のタイプ(Ⅲ)粉ブレンド比率を 10% 強に増加しており、今後の粒度分布の変動などよく注意しておく必要がある。

(3) 焼結反応から見た性状の変化

粉鉱石の焼結特性は CaO との同化速度と同化後の鉱物組織から概ね評価できる¹²⁾。この同化速度は、①加熱後の気孔量 (結合水含有量と亀裂の発生量) および②脈石の種類 (石英、粘土鉱物、ギブサイト) とそれぞれの量によって決まる。とくに前者の気孔量の影響が大きい (後掲の Fig. 12 参照)。また、脈石では粘土鉱物のみが同化を促進する。

脈石が石英の緻密質鉱石の配合率の低い我が国の原料条件下では、同化速度の遅いものが望ましい。各国の粉鉱石の加熱前後の気孔量 (水銀圧入法で測定した 100 μm 以下の気孔) を Fig. 11 に、また加熱後気孔量と 1250 °C、2 min 後の CaO との同化率の関係を Fig. 12 に示す。

H/L タイプ鉱石 (Ore No. 7) およびピソライト鉱石 (Ore No. 10, 11) の加熱による気孔量の増加は大きい。結合水を多く含むためである。なお、結合水分解にはかなり大きな熱量を必要とするので、これら鉱石の使用は

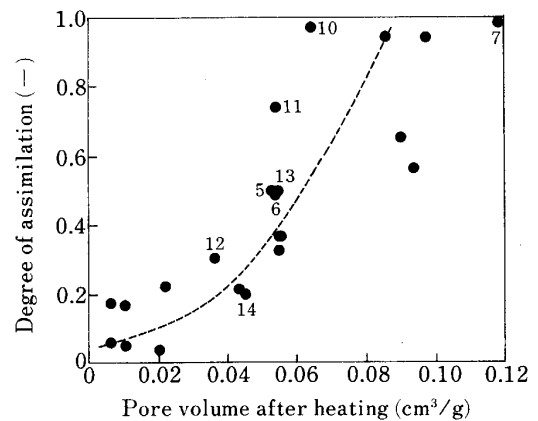


Fig. 12. Relationship between pore volume of iron ores after heating and their assimilation degree with lime at 1250°C for 2 min. (Numbers accord to those in Table 1.)

焼結時の熱量原単位を増大させる欠点も有する。またピソライト鉱石では水銀圧入法では測定できない 100 μm 以上の大きな亀裂が発生し、実際には Fig. 11 に現れている以上に多孔質となる¹⁰⁾。

Fig. 12 より、これらの鉱石 (Ore No. 7, 10, 11) の同化速度は従来の代表的な豪州粉鉱石 (Ore No. 5, 6) に比較して極めて早いのも特徴的である。焼結ベッド中融液生成帯の通気性を阻害し、焼結時間の延長および歩留低下の 1 原因である“焼けむら”を引き起こすことになる。さらに鉱物組織において、100 μm 以上の粗大気孔の生成を促進することによって、強度、歩留の悪化につながる。

従来、ピソライト鉱石を多量に使用すると焼結鉱の品質、歩留、生産率の低下を招くことから、各種の対策が検討されてきた¹⁰⁾¹³⁾。新規のピソライト鉱石 (Table 1 中 Ore No. 11) を従来のも (同表中 No. 10) と比較すると、鉱物組織は変わらないが、とくに Al₂O₃ 分は少なく (Table 1)、同化は遅く (Fig. 12)、カルシウムフェライトを生成しやすい¹¹⁾ という特長を有する。鉱石性状としては改善されることになるが、A 社粉鉱石あるいは B 社粉鉱石と比べれば大きく劣る。

以上で、タイプ(Ⅱ)、(Ⅲ)の鉱石性状は理解できたものと思う。今後の使用者側における豪州産粉鉱石の性状変化の影響は、H/G 及び H/L タイプの鉱石とピソライト鉱石がどれだけ増加するか、あるいは増加できるかによって決まることは言うまでもない。すなわち日本鉄鋼業各社の高炉操業まで含めた製鉄技術力でその影響度は異なるものと考えられる。

6. 今後の課題

資源的には未利用の“高りんブロックマン鉱床”の活用という大きな課題があるが、溶融還元プロセスが稼働する次世代に譲ることとし、現高炉製鉄法における課題

を考えてみる。

6.1 製鉄部門における課題

(1) 塊鉱石の評価の徹底

今後は H/G 及び H/L タイプの塊鉱比率の増大に伴い、塊鉱石の搬送過程での粉発生率上昇に加えて、高炉内における発生粉の増加も避けられない。炉内粉化特性を的確に反映した新しい評価法の確立を含め、高炉用塊鉱石の炉内性状の評価が肝要と考える。

(2) 鉱石性状の変化に対応可能な製鉄技術

まず、塊鉱石の歩留低下に伴って焼結鉱生産率の増大が要求される。つぎに鉱石性状からは、同化の速いマラマンバ粉、ピソライト粉の増加は明白であり、代わりに高品位のヘマタイト粉鉱石は減少する。これらの鉱石性状の変化に対応できる焼結操業技術及び高炉操業技術を早期に確立しておく必要がある。とくに、ゲーサイト(過溶解)化、微粉化の条件下での高生産率焼結技術の開発が重要課題として挙げられる。

6.2 鉄鉱石サプライヤーにおける課題

(1) ブレンド管理の徹底

主要鉱体延命のために、また急激な品質変化を回避しながら資源の有効活用を図るために、新規の性状の異なる多種鉱石のブレンドは不可欠となる。このためハードの検討を含めた総合的なブレンド管理体制の再構築が必要と言える。

(2) 粉鉱石中の Al_2O_3 の低減

今後の高炉はより一層の高微粉炭・低燃料比操業に向かうことは間違いない。炉下部の通気性の確保はますます重要になると推測される。我が国の高炉操業では Al_2O_3 の高い豪州鉱石の多量使用に起因して、欧州の高炉よりもスラグ量をはるかに多く、余裕のない状況を余儀なくされている。

豪州鉱石では Al_2O_3 分は粘土鉱物としてゲーサイト部に分布しているため、 Al_2O_3 の低下は鉄分回収率の低下、ひいては採掘コスト上昇による競争力低下につながるが、遠距離・低 Al_2O_3 ソースとの競争力という面からも技術的可能性の検討に値すると思われる。

7. 結 言

豪州鉱石の今後の性状変化を知るには鉄鉱床の成因まで立ち帰る必要があると考え、成因からみた鉱石タイプの分類とそれに基づく鉄鉱床の特徴について概説し、次に今後の鉱石性状について考察した。

我々ユーザーとしては、資源に対する地球規模での洞察力と国際的視野を育成すると共に、資源の変化に対応できる技術を一步先行して準備しておく必要がある。資源対応研究者・技術者には、ロマンと情熱をもって着実に進展させるようお願いしたい。また、本解説が結果的に需給のバランス維持と鉱石価格の安定化にも寄与すれば幸いである。

文 献

- 1) 野坂庸二, 細谷陽三: 鉄と鋼, **66** (1989), p. 1957
- 2) 牟田邦彦, 鈴木 勝, 畠山征之: 鉄鋼便覧(第3版), 第II巻(日本鉄鋼協会編)(1979), p. 3 [丸善]
- 3) 竹内寿久: 鉄と鋼, **66** (1980), p. 724
- 4) M. Kneeshaw: Proc. Australian Inst. Min. Metall., No. 289 (1984), p. 157
- 5) R. A. Harmsworth, M. Kneeshaw, R. C. Morris, C. J. Robinson and P. K. Shrivastava: Geology of the Mineral Deposits of Australia and Papua New Guinea, **1** (1990), p. 617 [Australasian Inst. of Mining and Metal, Victoria, Australia]
- 6) R. C. Morris: Handbook of Strata-Bound and Stratiform Ore Deposit (Chapter 2), ed. by W. H. Wolf, Vol. 13 (1985), p. 73 [Elsevier, Amsterdam]
- 7) Hamersley Iron Pty. Ltd.: Technical Report (1991) (私信)
- 8) Robe River Mining Pty. Ltd.: Project Outline (1990)
- 9) M. Kneeshaw, J. A. Longbottom and C. W. Brock: Yandicoogina (Marillana) Project Report (1987) [BHP-UTAH, Australia]
- 10) 肥田行博, 岡崎 潤, 中村圭一, 葛西正樹: 鉄と鋼, **78** (1992), p. 1021
- 11) 岡崎 潤, 肥田行博: 材料とプロセス, **5** (1992), p. 132
- 12) 肥田行博, 岡崎 潤, 伊藤 薫, 平川俊一: 鉄と鋼, **78** (1992), p. 1013
- 13) 佐々 豊, 石井晴美, 樽本四郎, 河野正人: 日新製鋼技報 (1988)59, p. 68