一种节能的炼铁法—流态化床予还原-等离子炉熔化还原法

郑 国 梁

（中国科学院化工冶金研究所）

评述了《流态化床予还原—等离子炉熔化还原》法的基本原理和国内外现状。

此法是利用熔化还原所产生的 CO，在流态化床中将部分 Fe_2O_3 还原成 FeO 和 Fe，继而用等离子竖炉进行熔化还原，热源则由等离子体供给。

此法在原料要求、焦炭用量、煤气利用率、操作工艺、成品质量和能耗、基建投资、生铁成本等方面都有很大优点，并大大降低由硫引起的污染问题。

无论从能源、交通运输、环境污染以及今后工业合理布局等方面着眼，在攀枝花地区建立以此法为基础的中小型特殊钢企业是切实可行的技术路线。

一、背 景

高炉炼铁技术至今已有数百年的历史，它是目前最主要的一种炼铁方法。近半个世纪以来，高炉炼铁无论在生产规模、技术水平还是在经济指标上，都有了极大的改进和提高。单炉产量已达到300万吨/年以上，几乎成为一种不可取代的炼铁方法。尽管高炉炼铁技术有了很大的发展和提高，但炼铁的基本原理却始终没有改变。因此，随着高炉容积的不断扩大，固有的缺点也更为突出。这就越来越使人们试图去研究和探索新的炼铁原理和工艺。高炉法的主要缺点有：

1. 为了保证在大高炉内炉料有良好的透气性和维持正常生产，愈来愈要求使用更加优质的冶金焦和烧结矿。这不仅需要有大量的焦煤资源而且必须建立包括炼焦、烧结等在内的庞大设备，因而需要增加大量的基建投资。对于现代钢铁企业，炼焦—烧结—高炉三部份的基建费用比例一般为 1：1：1。

2. 能耗高。即使在比较先进的大型工厂，每吨生铁的能耗（包括烧结和炼焦过程，并扣除它们的煤气部份），也高达600多公斤标准煤，占从矿石到粗钢总能耗的70%，因此它是钢铁工业中消耗能源最多的部门。

3. 煤气的CO利用率低，一般为40%以下，而要利用如此大量的低热值高炉煤气，必须通过复杂的煤气净化系统，然后再供热风炉或炼焦炉等使用。

4. 炼焦、烧结和高炉系统所造成的

环境污染比较严重，主要是大量的SO_2和尘埃。其严重程度主要取决于所用矿物燃料的数量。为了满足越来越高的环保标准，必须不断增加设备投资。据日本最近报导，用于炼铁厂的环保投资已由1970年的占总投资的10%增加到1975年的20%以上。

由于以上原因，近百年来，各国冶金学家一直在研究和探索非高炉炼铁的途径。已经提出了使用各种气体或固体还原剂的直接炼铁法，其中如HyL法、Midrex法、HIB法、FIOR法、Krupp—Renn法、SL/RN法等都已达到了数十万吨或更大的工业生产规模，预计今后还会有进一步的发展。不过，就其经济效果而言，目前还只能在有廉价天然气储备的地区（如拉丁美洲、北美、南非和中东等）得到应用。几年前，瑞典SKF公司提出了Plasmasmelt炼铁法。据报导，1980—1981年正在进行1.5兆瓦规模的中间试验，下一步将进行年产六万吨的半工业试验。这一方法引起了人们很大的兴趣和关注。近几年来，我所已成功地完成了从普通铁矿粉和钒钛铁精矿用“流态化床直接还原法”制取海绵铁和工业纯铁的实验研究和半工业试验。鉴于天然气供应的困难，在此基础上提出进一步发展以煤、电为能源的“流态化床予还原—等离子熔化还原”新方法（简称FBR—PSR法），它将是一种既节省能源、保护环境、降低投资，又能连续化生产熔融生铁的比较科学和完善的炼铁方法。它对于在煤、电丰富的地区，迅速发展中小型钢铁企业是有很大现实意义的。预计到本世纪末，由于新能源（如原子能、核能、太阳能等）在工业上的应用，将会进一步促进这一炼铁工艺的发展。

二、基本原理

众所周知，高炉炼铁过程主要是由焦炭在风口前的不完全燃烧和氧化铁的还原两大步组成，其反应式为：

$$C + \tfrac{1}{2}O_2 = CO$$

$$\Delta H = -27.8\text{千卡/克分子} \cdots (1)$$

$$Fe_2O_3 + (n+3)CO = 2Fe + 3CO_2 + nCO \quad n \approx 6$$

$$\Delta H = -6.0\text{千卡/克分子} \cdots (2)$$

$$FeO + C = Fe + CO$$

$$\Delta H = 37.9\text{千卡/克分子} \cdots\cdots (3)$$

由上可见，反应(1)放出的热量约占碳完全燃烧总热值95.4千卡/克分子的30%；并且产生的CO当用于还原氧化铁。由于受热力学平衡条件的限制，在高炉内还不能全部被利用，一般利用率只能达到35～40%（其余的CO则逸出炉外），高炉的热效率仅为60～65%。一吨生铁的能耗达4.0×10^6千卡以上。

六十年代初，瑞典S·Eketorp提出了铁矿石熔化还原理论。熔化还原与高炉过程不同，它用碳的低氧势强还原阶段进行还原，而用碳的高氧势弱还原阶段进行完全燃烧，即：

$$Fe_2O_3 + 3C = 2Fe + 3CO$$

$$\Delta H = +114\text{千卡/克分子} \cdots\cdots (4)$$

$$CO + \tfrac{1}{2}O_2 = CO_2$$

$$\Delta H = -67.6\text{千卡/克分子} \cdots (5)$$

反应(5)放出的热量占碳燃烧总热量的70%，是反应(1)的2.4倍，这部份热足以补偿反应(4)和其它所需要的热量。因此可以看出，熔化还原比高炉过程更为科学、合理，它的优点在于碳最终可以完全转变到CO_2，煤气利用率在理论上可达到100%，热效率也将大大提高。

熔化还原的基本原理很简单，但将这一基本概念应用于实际却还有不少困难。主要的问题是，如何将反应器内所生成的CO同O_2全部燃烧，并把燃烧所产生的热量有效地传递到还原区，同时又不致使还原区发生氧化和炉衬受到严重的烧损。因此到现在为止，还没有出现一种完全遵循熔化还原理论的炼铁生产工艺。

本文提出的“流态化床予还原—等离子炉熔化还原法”，本质上仍属于熔化还原范畴，但它避开了上述困难问题，而又达到同样的最终效果。这种方法是基于Fe_2O_3很容易被CO还原成FeO这一热力学特点，而将还原过程分为流态化予还原和等离子熔化还原两步来完成。即利用熔化还原所产生的CO，在流态化床中将部分Fe_2O_3还原成FeO和Fe，继而用等离子竖炉进行熔化还原。热源则由等离子体供给，因此其基本过程如下：

流态化还原：

$$Fe_2O_3 + CO \rightarrow (FeO + Fe) + CO_2;$$

熔化还原：

$$(FeO + Fe) + C \rightarrow Fe + CO;$$

热源—等离子体电弧加热器。

三、工艺过程

（一）过程的概述

基本过程如图1所示。铁矿石的还原过程由流态化床予还原和等离子熔化还原两步完成。流态化床的还原温度为800℃左右，还原气体$CO:H_2=9:1$，还原度40～60%，其尾气可供矿粉的干燥和予热。予还原的铁矿粉与煤粉以及少量的造渣剂加入等离子熔化还原炉进行终还原和脱硫，得到熔融生铁和炉渣以及很纯的$CO+H_2$煤气。等离子体的出口温度可达3000～5000°K，但由于强烈的吸热反应，温度很快降至2000℃以下。

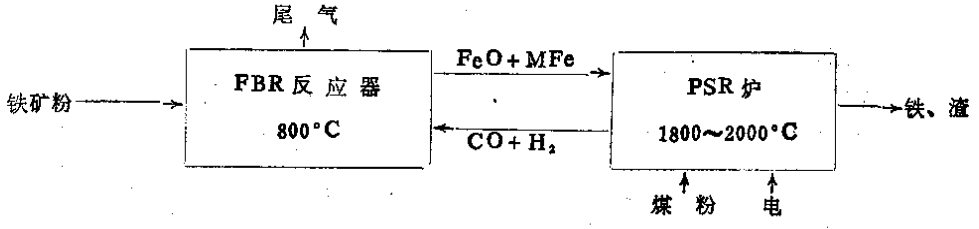


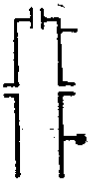
图1 FBR—PSR炼铁过程示意图

过程的单元设备描述如下：为了在还原度为40～60%条件下，使煤气利用率高，流态化床可以采取两层床的形式。第一层主要是将高价氧化铁还原至FeO，还原度约30%。第二层是用由等离子炉中排放出来的具有强还原势的煤气，将部分FeO还原成金属铁，使还原度提高到50%左右。

等离子熔化还原炉包括冶金炉与等离子电弧加热器两部分。从炼铁过程的连续性和提供稳定的煤气来说，采用竖炉是比较合理的，也容易被炼铁工作者所接受。更重要的是，它为中型高炉的改造和利用提供了新的途径。等离子电弧加热器自六十年代以来，已出现了许多形式。单体最大容量和效率已分别达到4兆瓦和90%以上。表1列出了近代可用于提取冶金过程的几种冶金炉和等离子电弧加热器的形式。在我们今后的试验中，主要将采用中空阴极转移型发生器与长弧非转移型发生器两种型式，通过试验再作比较（主要是热效率、寿命、能够接受的粉料量及其稳定性

等）。

等离子提取冶金过程的冶金炉和等离子电弧加热器　　表 1

冶金炉	等离子体电弧加热器					
	转移型			非转移型		
竖炉 回转炉 流态化床 电弧炉 闪速炉	压缩弧等离子体	中空阴极等离子体	膨胀旋进等离子体	长弧等离子体	双铜电极等离子体	流体对流阴极等离子体
						

在操作时，竖炉中要装满焦炭，其目的是为了形成一个焦炭填充床，使气体和液体能够透过，加速渗碳和$CO_2 \rightarrow CO$的反应过程，并保护炉衬和碳素自动调节的作用。

综上所述，流态化予还原—等离子熔化还原过程的优点如下：

1. 矿粉或精矿不要烧结、造块。

2. 焦炭用量仅为高炉的1/10或更低，而且可以大大降低质量要求。

3. 流态化床不需要单独的造气系统，也不需要CO_2、H_2O的重整循环系统，煤气的循环和所消耗之动力都可大大降低。另外，由于降低了予还原度的要求，这就可以大大提高流化床的煤气利用率和生产能力。

4. 可以利用原有高炉，尤其是中小型高炉。

5. 由于竖炉高度的降低和不存在软化区域（900～1500℃温度范围），因而更便于操作。

6. 矿物燃料消耗量的降低，意味着硫负荷和煤气量的降低，有利于生产低硫生铁和减少环境污染。

7. 经济上比高炉法有更大的收益（如能耗、投资、成本）。

（二）计算

基准：以赤铁矿为原料，生产1吨铁，〔Fe〕=95%。

1. 还原过程的CO气体量

赤铁矿用量 1357 公斤；

总氧量　　407 公斤；

予还原度50%时，所需要的气体量315米^3；

予还原度100%时，所需的气体量1265米^3；

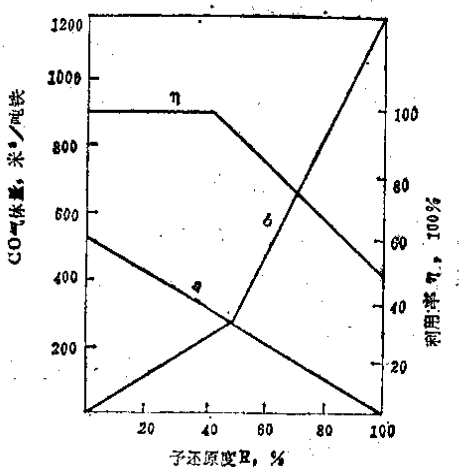
予还原度0%时，熔化还原产生的气体量570米^3；

计算结果见图2。由图可见，在予还原度为48%时，产生的气体量与需要的气体量之间达到平衡。这时流态化床还原尾气含CO 7.6%，即CO利用率达92%。

2. 碳的消耗（以下都按48%的予还原度计算）

100%熔化还原需要碳量 305公斤

52%熔化还原需要碳量 158.6公斤



a—产生的 CO 量； b—所需的 CO 量；
n—CO 的利用率

图 2 产生的与所需的 CO 与予还原度的关系

生铁化合碳 40公斤

SiO_2的直接还原（〔Si〕=0.2%）需要碳量 1.7 公斤

总的碳消耗量 200.3 公斤

折合煤粉 200 公斤

焦炭 52 公斤

3. 电能的消耗

热收入：

焦炭52公斤，折合标准煤50.7公斤；

煤粉200公斤，折合标准煤186公斤；

电能 X 度，折合标准煤 X 公斤；

热支出：

铁水物理热 270×10^3 千卡，折合标准煤 38.6 公斤；

铁水化学热〔C〕=4%，折合标准煤 45.6公斤；

〔Si〕=0.2%，折合标准煤 1.9公斤；

炉渣物理热 84×10^3 千卡，折合标准煤 12 公斤；

还原热 $FeO+C=Fe+CO$

反应热折合标准煤 63.8 公斤；

固体碳折合标准煤 166.3 公斤；

$SiO_2+2C=Si+2CO$，反应热折合标准煤 1.5 公斤。

煤气带走热：

流化床还原所需煤气量 300 米³

等离子工作气与各种载气之和200米³

所以总的煤气量为 500 米³

炉顶出口温度假定为 1300°K；

煤气焓值为 905125 千焦耳，折合标准煤 31 公斤；

热损失（以10%计）$(236.7+X)\cdot0.1$ 公斤。

由热平衡求得 X = 164 公斤，或 X = 1335 度。

4. 循环气体量

主要用于等离子电弧加热器的工作气，矿粉、煤粉和造渣剂的载气。

（1）等离子电弧加热器的工作气体量：

等离子体的焓值 $1335\times860=114810$ 千卡/小时；

工作气体量 160 米³/小时；

则等离子体的比焓 7175 千卡/米³

或 160720 千卡/克分子 CO。

（2）粉料的载气量：

	矿粉	煤粉	合计
送料量，公斤/吨	1700	200	
单位气体载量，公斤/米³	50	30	
载气量，米³/吨	34	6.7	40.7

故总的循环气体量为：

160 + 34 + 6.7 = 200.7米³。

图 3 所示为不同的予还原度对能耗的影响。

由图表明，予还原度提高后，由于碳的消耗量增加，并额外加入了氧气而使电耗降低。

（三）经济比较

1. 能耗

表 2 列出在同等规模下用本法与高炉

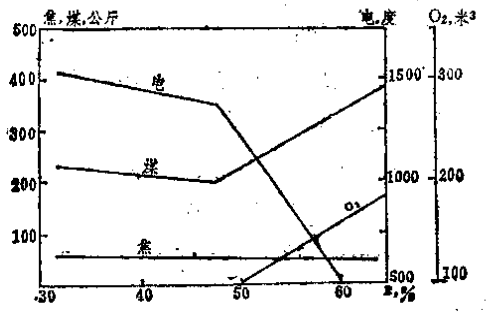


图 3　不同予还原度对能耗的影响

法炼铁的能耗比较。由表可见，流态化—等离子法每吨生铁能耗为420.2公斤标准煤（或2.9×10^6千卡），它比高炉法低400公斤，对年产20万吨的炼铁厂，每年可节省8万吨煤，另外在等离子法中，约占能耗45%的还原剂有很大的灵活性，可以使用固体、液体或气体燃料。

2. 基建投资

表3列出两种基建投资的比较。高炉法两个厂的数据是来自设计院的设计资料。从表中可以看出，用本方法的单位生铁基建投资比高炉法低10～30%。实际上，如果设计20万吨/年的高炉炼铁厂，其投资费还要高于170元/吨。因此本法更适合于发展中小型企业，具有投资少、建设速度快的特点。

高炉法与FBR—PSR法能耗的比较（公斤标准煤/吨铁）　表 2

项目	高炉法		FBR—PSR法（20万吨/年）	
	冀钢·1000万吨/年	南京钢铁厂28万吨/年	48%予还原度	60%予还原度
炼焦	70.0	70.0		
烧结	108.5	101.3		
炼铁	426.0	653		
焦炭			50.7	80.7
煤			186.0	240
电			165.5	135
其它动力			18	18
O_2				14.1
总计	604.5	824.3	420.2	457.8

· 设计数据

高炉法与FBR—PSR法基建投资比较（万元）　表 3

项目	高炉法		FBR—PSR
	攀钢 150万吨/年	涉县钢厂 100万吨/年	20万吨/年
烧结	8600	3710	
炼焦	8400	5172	
炼铁	8600	4482	
流态化			800
等离子炉			1100
电源			500
总计	25600	13364	2200
单位投资元/吨	170	134	120

3. 生铁成本

表4列出两种不同炼铁方法的生铁成本。高炉法采用合肥与南京两个钢铁厂1981年上半年的平均值。为了与之对比，等离子法也使用了该厂的单价。由表可见，

用流态化—等离子法生产的生铁成本正好介於这两个厂之间，而且和国内其它一般中小高炉的成本相近。在等离子法的成本中，电费占了很大比重。图4所示为电价对生铁成本的影响。随着电能价格的降低，用本法生产的生铁成本将很快下降。由此看来，在水电资源丰富的地区发展本法是可以达到经济生产的。

两种炼铁方法生铁成本的比较

（单位：元/吨生铁）　　表 4

项　目	高炉法		FBR-PSR法
	合肥钢铁厂（10万吨/年）	南京钢铁厂（28万吨/年）	（20万吨/年）
烧结矿	106.14	100.28	
铁精矿			67.5
焦　炭	68.92	65.84	4.3
煤　粉			10.0
动　力*	14.31	9.59	111.4
辅助材料	4.33	4.14	2.0
工　资	2.83	2.04	2.0
车间经费与企业管理费	19.07	15.90	8.0
总　计	215.6	197.27	205.2

* 电能价格以0.075元/度计

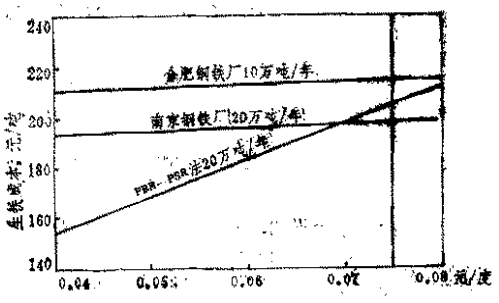


图 4　生铁成本与电价的关系

4、环境污染

图5表示两种不同炼铁法产生的煤气量和排入大气的硫量。本方法产生的煤气量仅为高炉法的5.0%，燃料消耗量为高炉法的40%，因此，由硫引起的污染问题，也可相应降低3倍左右，这样用于改善污染问题的投资费用也可减少。

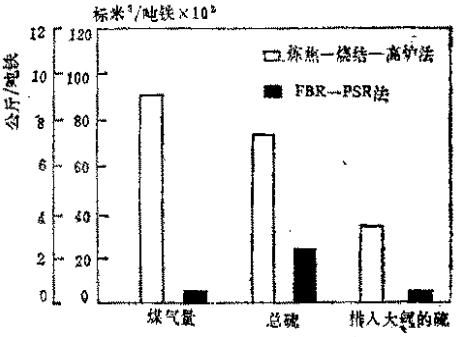


图 5　两种炼铁法煤气量与硫量的比较

四、对象—攀枝花钒钛磁铁矿

攀枝花钒钛磁铁矿除含有铁、钒、钛元素外，还含有镍、铬等有色金属，储量极为丰富。因此对该矿的开发利用，必须全面考虑，综合回收上述有用元素。但是采用目前的高炉炼铁—转炉炼钢流程尚在某些方面不利于资源综合利用。年产150万吨的炼铁厂每年由高炉渣（TiO_2 25%）中损失的 TiO_2 就达20万吨。因此，为了充分利用该地区的资源（包括能源），更好地解决综合回收问题，发展以煤、电为能源的“流态化床予还原—等离子竖炉熔化还原法”，不仅适合该地区长远的能源情况，而且在技术上充分发挥了流态化、竖炉、等离子等技术的长处，看来是值得重视与发展的一种新的炼铁方法。

攀西地区不仅有丰富的铁矿资源，而且也有丰富的水力资源和煤炭资源（炼焦煤较少），因此，从能源、交通运输、环境污染以及今后工业合理布局等方面考虑，在该地区建立以本法为基础的中小型特殊钢企业是切实可行的技术路线和政

策。图6表示用FBR—PSR法冶炼钒钛磁铁矿时，单位生铁的物料与能量平衡。图7表示采用该法的一个20万吨钢铁企业的流程示意图。

我们相信，在过去已进行的研究工作的基础上，一定能为开发“流态化床予还原—等离子竖炉熔化还原炼铁法”的这一新工艺做出新的贡献。

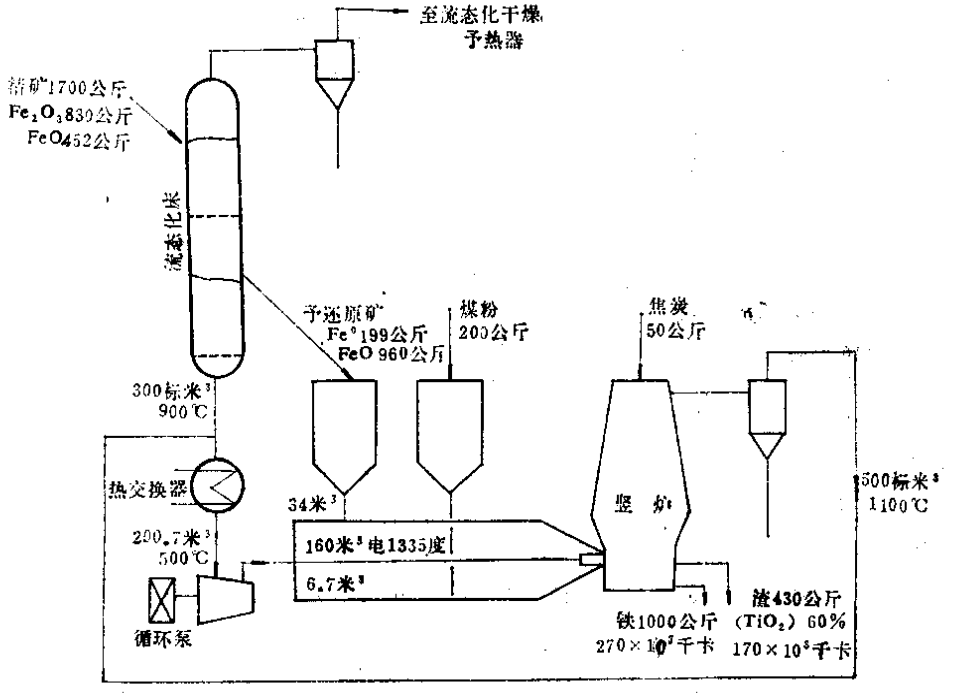


图 6　FBR—PSR 法冶炼钒钛矿的物料与能量平衡

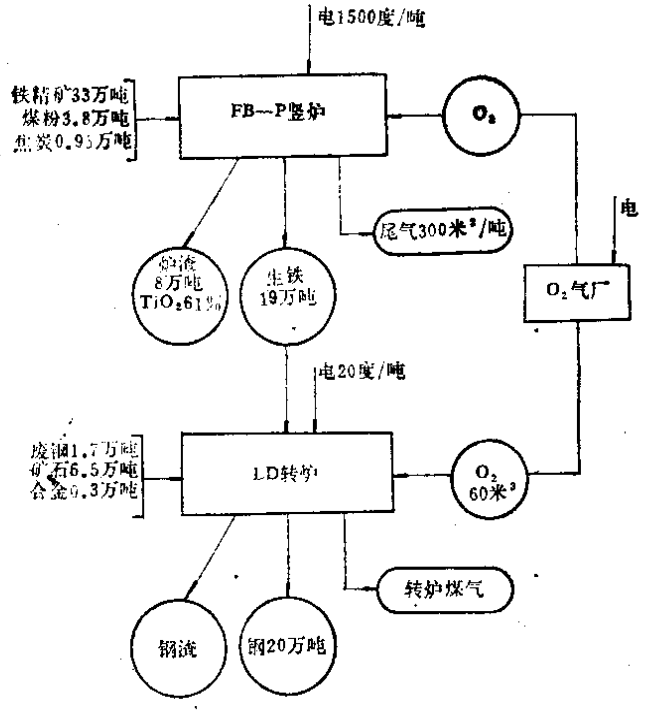


图 7　FBR—PSR 法冶炼钒钛磁铁矿 LD 炼钢的流程示意图（年产 20 万吨钢）

参　考　文　献

[1] 中村正和，德光直树，〈铁与钢〉(日) 67 (1981) 3，480.
[2] Anon. Mines Metall, 1980 153 24.