

编号: (76) 007

内 部

出国参观考察报告

日本化工冶金研究情况

科学技术文献出版社

出国参观考察报告

日本化工冶金研究情况

(内部发行)

编辑者: 中国科学技术情报研究所

出版者: 科学技术文献出版社

印刷者: 中国科学技术情报研究所印刷厂

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经销

开本 787×1092· $\frac{1}{16}$ 5.25印张 129.6千字

统一书号: 15176·201 定价: 0.30元

1976年12月出版

毛主席语录

搞社会主义，不知道资产阶级在那里，就在共产党内，党内走资本主义道路的当权派。走资派还在走。

千万不要忘记阶级和阶级斗争。

自力更生为主，争取外援为辅，破除迷信，独立自主地干工业、干农业、干技术革命和文化革命，打倒奴隶思想，埋葬教条主义，认真学习外国的好经验，也一定研究外国的坏经验——引以为戒，这就是我们的路线。

目 录

一、名古屋大学的化工冶金	(1)
二、气体炼铁	(6)
2.1. 原子能炼铁	(6)
2.2. 竖炉法	(9)
2.2.1. 威伯格~安来法 (Wiberg-Yasugi)	(9)
2.2.2. 米德列法 (Midrex)	(10)
2.2.3. 新日铁的高压竖炉	(17)
2.3. 流态化法	(18)
2.3.1. 新日铁的八幡东研法	(19)
2.3.2. 金属材料技术研究所的粗粒铁矿高温高压流态化还原法	(22)
2.3.3. 公害资源研究所: 铁矿粉还原熔化	(23)
2.3.4. 国井大藏对于流态化气体炼铁的研究	(25)
2.3.5. 相马胤和研究室的气体炼铁试验	(26)
2.3.6. 脉动流态化床还原铁矿	(27)
2.3.7. 喷射和成粒床在气体炼铁中的应用	(28)
2.3.8. 白井、石田研究室: 搅拌流态化床	(28)
2.4. 应用基础研究一	(30)
2.4.1. 铁氧化物的还原形态学	(30)
2.4.2. 还原动力学	(32)
2.4.3. 反应工程	(33)
三、流态化技术	(34)
3.1. 快速流态化	(34)
3.1.1. 高床	(39)
3.1.2. 浅床	(42)
3.1.3. 细粉块料混合床	(43)
3.2. 板式砂滤器	(44)
3.3. 搅拌流态化床	(49)
3.4. 悬浊电解	(56)
3.5. 光学纤维在流态化技术中的应用	(59)
3.6. 关于“KK法”的补充	(64)
3.7. 气固流态化床中的气泡	(66)

日本化工冶金研究情况

中国科学技术协会代表团

前 言

中国科学技术协会代表团，应邀于1975年11月至12月对日本进行友好访问。代表团参观访问了大学、工厂和科研单位共四十三个，其中在化工冶金专业方面，同四所大学（东京大学金属工学科、东京大学化学工学科、京都大学化学工学科、名古屋大学金属工学科）、四所研究所（金属材料技术研究所、公害资源研究所、新日铁基础研究所、东京工业大学资源化学研究所）进行了参观座谈，另外，同神户制钢所东京本社及美国纽约市大学教授斯夸 尔 斯，分别就竖炉气体炼铁及快速流态化等技术进行了座谈。现将这些交流参观的内容结合有关资料按以下三个方面加以整理，供参考。

1. 名古屋大学的化工冶金
2. 气体炼铁
3. 流态化技术

由于参观不够深入，加之水平有限，不当之处，请批评指正。

一、名古屋大学的化工冶金

日本名古屋大学为过去的帝大之一，共有九个学院，其中之一为工学院，下设16个系，其一为冶金系。该系于1940年建立，1962年扩建成13个“讲座”，包括一些边缘学科，例如所参观的黑色冶金的反应工程讲座，采用化工原理来研究和讲授钢铁冶炼。这一讲座由化工教授鞭岩负责，还有副教授一人、助理二人和研究工作者一人。这五个人带领了大学本部、修士生和博士生共约15个学生，进行试验研究。

这些试验研究涉及流动模型，化学反应动力学等方法，其目的为向钢铁工艺的设计，自动化及改进，提供数学模型、化工反应分析、过程模拟、过程控制以及过程设计的最佳化。当前的主要研究课题如下：

1. DL烧结机和热风炉的模型研究 (Dwight-Lloyd) —
 烧结过程的理论分析
 有关烧结机最佳化的问题
 热风炉交错并联操作的理论分析
2. 高炉的计算机模拟和模型—
 高炉中一些工艺参数纵向分布以及高炉产量的理论估算

高炉炼铁的动态数学模型

分层加料下高炉操作的数学模型

3. L. D. 转炉吹炼过程的理论研究 (Lintz-Donawitz) —

LD转炉的数学模型及其在精炼过程理论分析中的应用

在改变操作条件时, 废钢熔融对LD转炉诸工艺参数的影响

超音速喷射特征对LD转炉操作的影响

4. 有关钢水再次精炼的研究—

DH脱气过程的理论分析 (Dortmund-Hörder)

RH脱气过程的理论分析 (Ruhrstahl-Heraeus)

某特殊钢精炼过程的数学模型

5. 钢水凝固的模型研究—

糊状区凝固率的数学模型

垂直型和圆弧型连续铸锭机中钢坯凝固梯度的理论分析

6. 流态化现象的实验研究以及流态化反应器转化率的理论估算—

气固流态化床中气泡的行为

动态流态化数学模拟的探索

流态化床中催化和非催化反应的数学模型

通过十二年的工作, 该讲座发表了以下一些论文:

炼铁: 包括高炉、烧结、热风炉等 33篇

炼钢: 包括转炉、钢锭凝固等 29篇

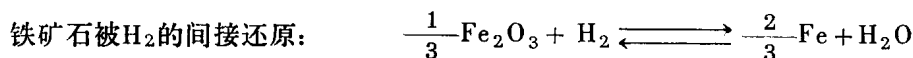
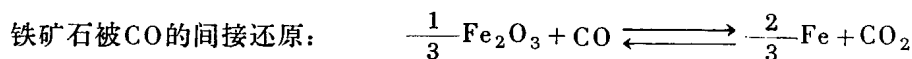
工程: 主要为流态化技术 16篇

共计78篇

总结这些研究工作, 鞭巖写了二本书: 冶金反应工学, 1972; 制炼化学工学演习, 1973。

前书共11章, 前5章为一般的化学反应工程, 从第6章开始, 逐章论述流态化、烧结机、高炉、转炉、真空脱气和钢锭凝固六个工艺。论述的方式一般从工艺过程出发, 首先说明其流体力学和化学反应原理, 然后用化学反应工程的方法, 进行理论分析, 最后提出数学模型。

现以高炉为例, 对其研究方法作进一步说明。鞭岩等对于高炉较完整的理论分析最初发表于1967年^[1]。他们首先分析了高炉冶炼中以下7个主要反应中的气膜扩散、颗粒内部扩散、化学反应的速率, 以及温度、气速的影响:



然后提出了有关高炉冶炼主要参数的 9 个常微分方程，即：气温，固温，铁矿还原率，石灰分解率，气相CO含量，气相CO₂含量，气相H₂含量，固体颗粒堆密度，气体压力。以及两个代数方程，即：气体密度及气体流量。

为了解以上方程组，又对有关的化学和物理参数提出了数学关联，即：各化学反应的反应热，固体比热，气固换热系数，固体颗粒的平均粒径，以及热损失。此外，并提出了整体高炉的物料平衡和热量平衡计算方法。借电子计算机，用以上数学模型对于图 1 中高炉 A 和 D 计算出了诸参数随炉身的变化，如图 2 和 3 所示。

三年后，鞭岩等对上述方法进行了改进^[2]，纳入了氧化硅在渣中的还原反应速率、水煤气变换反应的顺向和逆向反应速率，并采用以下三个反应来求得氢的利用率：

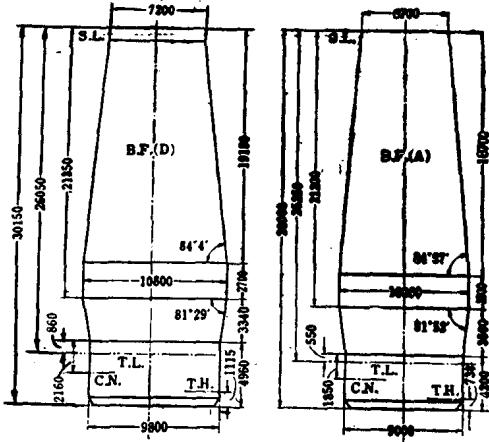
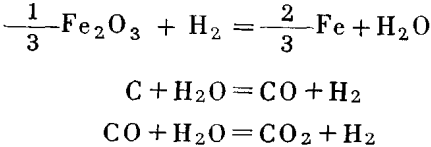


图 1 高炉 (A) 和高炉 (D) 的剖面图

除了如图 2、3 所示的各参数梯度外，又计算了一些主要反应速率随着炉身的变化，如图 4 所示。

最后，鞭岩又纳入了压力对高炉内诸主要反应的影响^[3]，对高炉的强化进行了定量分析，提出了高压、矿石粒度、风量、风温、喷入蒸汽、富氧、预还原对于高炉产量，降低焦比的数学模型，如图 5—11 所示。

1975 年，鞭岩等又分析了高炉装料方式对于气体流动的影响^[4]，结合有关流体力学基本方程，在上述数学模型的基础上，算出了高炉内的等温曲线，图 12，和矿石的等还原度曲线，图 13。

据云，以上数学分析已被新日铁、日本钢管等企业所采用。显然，在摸清了高炉的内在规律后，可以不经现厂试验，而通过计算机的模拟，达到设计、预测、强化、改进操作、自动化等目的。

建立数学模型，已如上述，

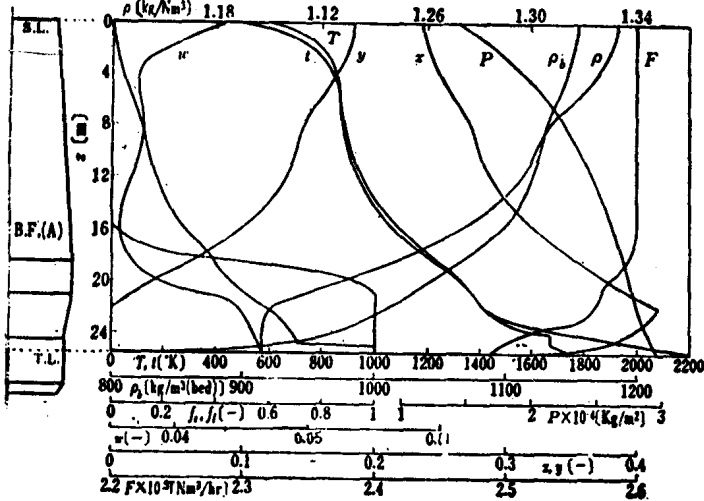


图 2 高炉 (A)：鞭岩数学解

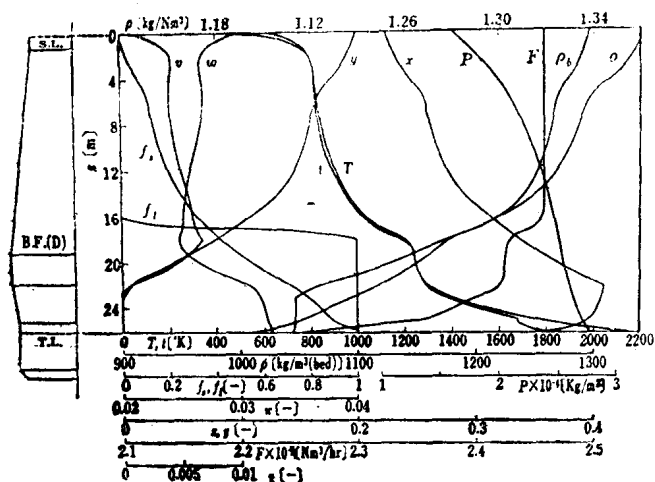


图3 高炉(D): 数学模型

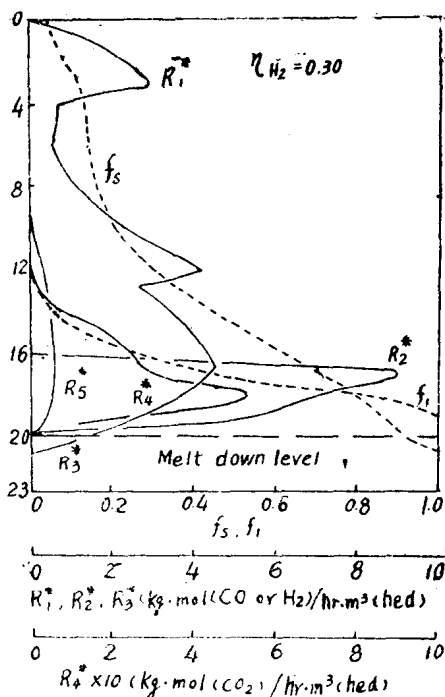


图4 高炉(A): 反应速率的纵向分布

不仅仅依靠数学分析,而首先需查明其物理化学过程,为此有必要进行实验室研究。例如,对于连续铸锭,鞭展研究室正在从事KCl 溶液的模拟试验,采用百里酚蓝流动显示技术^(5,6,7),考查进料嘴、温差等引起的流型对于凝固过程的影响。又如,为了对付流态化气体炼铁的粘结问题,他们正在研究脉动床的动态特性(见本文2、3、6节)。

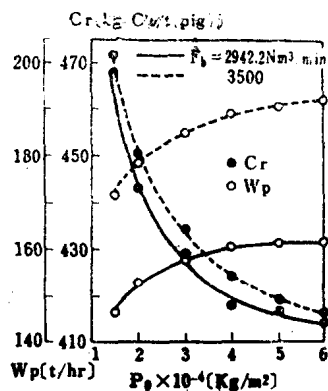


图5 高炉(A): 炉顶压力 P_0 对于产率 W_p 和焦比 Cr 的影响

铁矿粒度 $d_{p1}=19.35\text{mm}$
 风温 $T_b=1366^\circ\text{K}$
 蒸汽含量 $W_{st}=23.2\text{g}/\text{Nm}^3$
 富氧 $X_{O_2}=0$

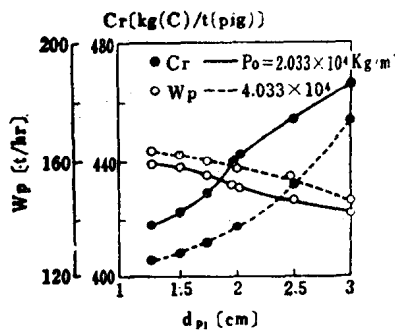


图6 高炉(A): 铁矿粒度 d_{p1} 对于产率 W_p 和焦比 Cr 的影响

风量 $F_b=2942.2\text{Nm}^3/\text{min}$
 风温 $T_b=1366^\circ\text{K}$
 蒸汽含量 $W_{st}=23.2\text{g}/\text{Nm}^3$
 富氧 $X_{O_2}=0$

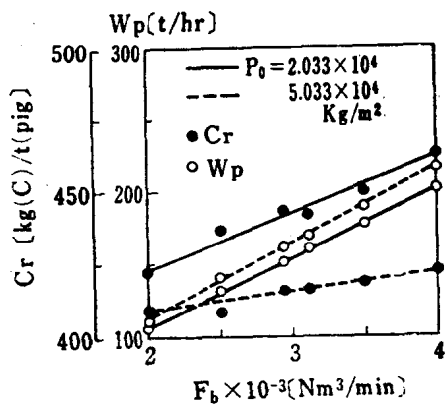


图7 高炉(A): 风量对于产率 W_p 和焦比 Cr 的影响

铁矿粒度 $d_{p1}=19.35\text{mm}$
 风温 $T_b=1366^\circ\text{K}$
 蒸汽含量 $W_{st}=23.2\text{g}/\text{Nm}^3$
 富氧 $x_{O_2}=0$

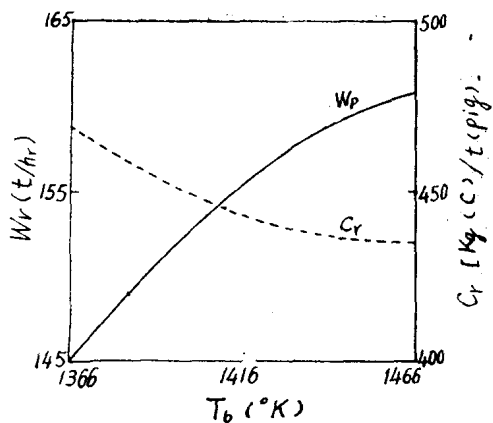


图8 高炉(A): 风温对于产率 W_p 和焦比 Cr 的影响

炉顶压力 $P_0=1.433 \times 10^4 \text{kg}/\text{m}^2$
 矿石粒度 $d_{p1}=19.35\text{mm}$
 风量 $F_b=2942.2\text{Nm}^3/\text{min}$
 蒸汽含量 $W_{st}=23.2\text{g}/\text{Nm}^3$
 富氧 $x_{O_2}=0$

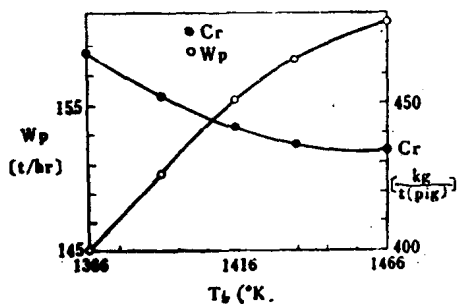


图9 高炉(A): 同图8, 但火焰温度用蒸汽交替喷入法使之恒定

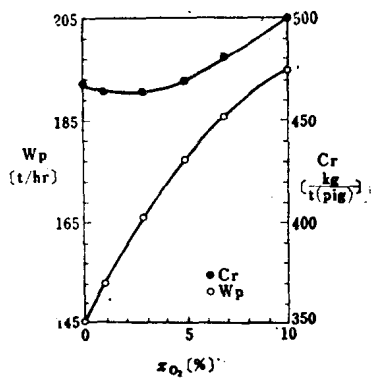


图10 高炉(A): 富氧 x_{O_2} 对于产率 W_p 和焦比 Cr 引起的变化

炉顶压力 $P_0=1.433 \times 10^4 \text{kg}/\text{m}^2$
 矿石粒度 $d_{p1}=19.35\text{mm}$
 风量 $F_b=2942.2\text{Nm}^3/\text{min}$
 风温 $T_b=1366^\circ\text{K}$
 蒸汽含量 $W_{st}=23.2\text{g}/\text{Nm}^3$

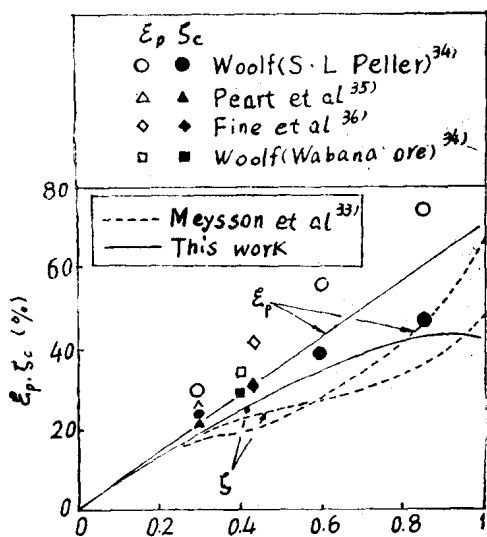


图11 铁矿预还原对于铁水增产 ε_p 和节约焦炭 ζ_c 所起的作用

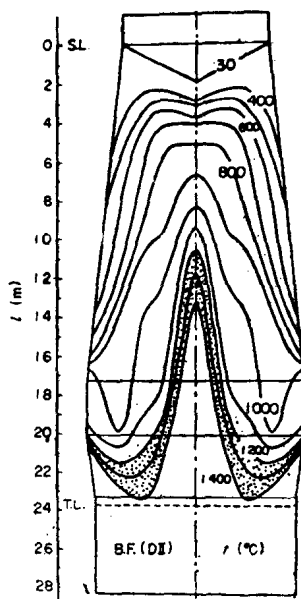


图12 高炉 (D11) : 等温曲线的分布

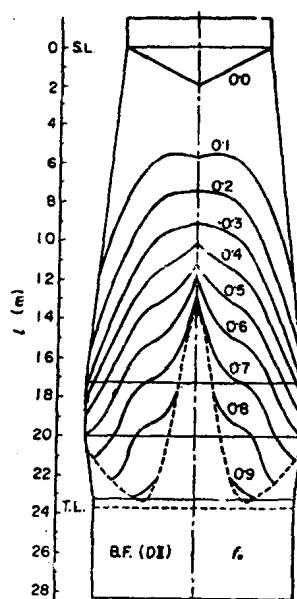


图13 高炉 (D11) : 等还原度曲线的分布

鞭岩等人研究化工冶金的方法，一方面与日本的科研体制有关（请阅本代表团有关日本科研体制概况的报告），另一方面也反映了日本当前科技发展的趋向。日本大学只从事所谓的基础研究和应用研究，那些开发研究都在专门研究所和企业中进行。自二次世界大战以来，日本的科学技术在很大程度上依赖进口，就在目前，日本的技术进口比技术出口还大8倍。为了扭转这种状态，从独创的角度发展本国技术，日本企业界和政府都已认识到自己从事基础研究的重要性。目前，日本大学的研究人员占全国的33%，而经费仅占全国的18%。加强国家研究投资，加强基础研究，不仅是日本学术界的希望，也成为企业界的呼吁。

二、气体炼铁

日本进行气体炼铁的目的有二：其一为原子能炼铁计划的一部分，指望于1985~1995年间工业化；其二为出口该技术，主要对象为富产能源的第三世界国家。

2.1 原子能炼铁

按人头计，日本每个国民平均年产1吨钢，位世界首位。但不论铁矿和燃料，几乎全靠进口。日本钢铁工业消耗能量约占全国全部能量消耗的20%。此外，日本人多地少，又多山区，平原人口密度极高，因此工业污染是一突出的问题。为此，八幡制铁副社长故汤川正夫提出，要进行原子能炼铁的研究，其目的显然为解决能源进口和减轻污染这两个问题。于是，日本协铁协会于1968年9月成立了“原子力部会”，开始原子能炼铁的研究。这一工作很快得到了通商产业省的支持，于1970年给补助金900万日元，支持新日铁基础研究所的竖炉气体炼铁，于1971年又补助2,400万日元，支持石川岛播重工业技术研究所，从事高温热交换器和还原气制造的研究。1972年，通产省重工业局作了制铁工艺闭路化的调查，于1973

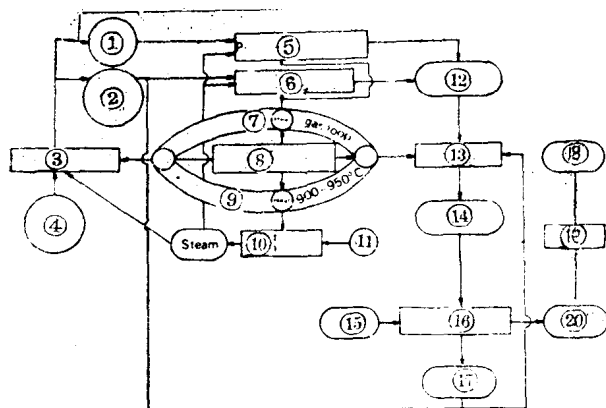


图14 日本通产省大型研究开发计划：原子能炼铁流程示意图

①沥青；②轻油；③裂化器；④真空残渣油；⑤沥青气化器；⑥水蒸汽转化器；⑦第二氮循环；⑧多用气冷式高温反应堆。1000°C 氦气；⑨氦气；⑩蒸汽换热器；⑪水；⑫氢和一氧化碳；⑬热交换器；⑭高温还原气850°C；⑮铁矿；⑯海绵铁生产工段；⑰废气；⑱钢坯；⑲电炉；⑳海绵铁。

年制订全国大型工业技术开发计划时，纳入了原子能炼铁，并成立了包括12种工业的原子能炼铁工程研究协会（ERANS*）。大型计划原子能炼铁，只列出了第一期研究的内容和目标，为期6年，从1973年至1978年，共投资73亿日元，其中8亿用于1975年。

日本铁钢协会的原子力部会共有四个机构，如表1所示：一个直属的专利组和一个掌管整体工艺的工艺系统小委员会，采用系统工程的方法对于各分系所组成的整体原子能炼铁工艺进行研究，包括经济因素。此外有五个小委员会，分别考查原子能发电和电力的利用，原子热于制铁中的应用、高温源子炉、高温热交换器以及还原气的制造。再有五个实验小委员会、分管竖炉、还原气和热交换器，这些实验都由通产省补助研究经费。各小委员会下均设有进行具体工作的工作组。

日本钢铁协会的原子能炼铁整体工艺过程如图14所示。流程采用了气冷式的反应堆，第一循环用40kg/cm²的氦将热量从1000°C导出，进入第二氮循环(45kg/cm²，900~950°)，然后将其热量输至4个需用点：预热还原铁矿的气体、裂化真空残渣油制轻油、轻油的水蒸汽转化、和蒸汽锅炉。原子能炼铁的最终目标为年产300—350万吨铁的原子能炼铁厂，包括6台还原反应器（其中之一为备用），这样三个系列可年产铁1,000万吨。第一期的研究为考查设计、建造和运转这一工厂中的各种技术环节，包括必要的实验。重点研究有以下5项：

（1）高温热交换器—设计效率较高的，能用于800°C以上的气~气热交换器。

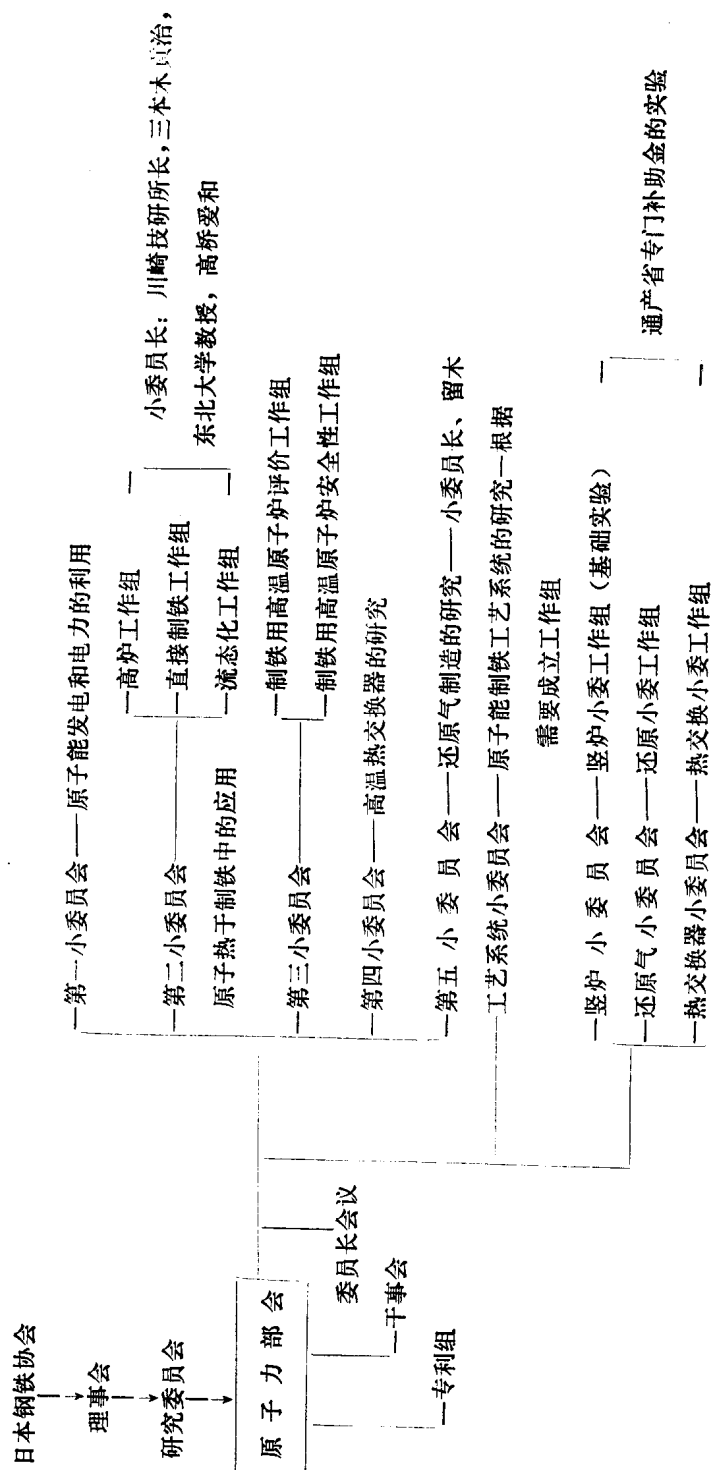
（2）超耐热合金—一般合金在1,000°C下工作数千小时即会损坏，此外，在氦气中既不会生成氧化物保护层，同时还要求这种合金对850°C以上的水蒸汽和还原气有抗蚀性。

（3）高温绝热材料—在导热率较高的氦气中要有绝热能力，且在高温下需保持其性能稳定。

（4）还原气的制造装置—适应日本的燃料方针，采用真空残渣油气化造气，同时要求

* Engineering Research Association of Nuclear Steelmaking

表1 日本原子能炼铁的研究组织



循环铁矿还原炉气作为造气的氧化剂。

(1) 铁矿的还原装置—要求高压还原, 希望能将一步造成的还原气在 850°C 通入铁矿还原炉。目前重点试验竖炉还原球团矿, 但流态化还原法在第二小委员会领导下仍按排试验。

以上5项重点研究的第一期目标如表2所示。

表2 日本原子能炼铁第一期研究的目标(1973~78)

高温热交换器——1 MW热交换器

第一氢气循环: 1000°C , $40\text{kg}/\text{cm}^2$

第二氢气循环: $900\sim 950^{\circ}\text{C}$, $45\text{kg}/\text{cm}^2$

还原气加热: 850°C , $20\sim 30\text{kg}/\text{cm}^2$

超耐热合金——氢气 1000°C , 50,000小时, 蠕变破断强度 $1\text{kg}/\text{mm}^2$

制管性能: 外径25mm, 壁厚5mm, 长7,000mm

合金种类: 铁基锻造合金, 镍基锻造合金, 高熔合金

高温绝热材料——氢气 1000°C , $40\text{kg}/\text{cm}^2$, 还原气或蒸汽 900° , 50,000小时

导热率增加 $<10\%$

通气率增加 $<10\%$

热收缩率增加 $<10\%$

50%压缩状态的复原率 $<20\%$

考虑钢玉或石英纤维

还原气制造装置—原料: 减压残渣油重质油; 要求还原气循环使用

规模: $100,000\text{nm}^3/\text{hr}$

气体成份: $\text{CO}:\text{H}_2$ 50:50~0:100

$$\frac{\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}}{\text{CO} + \text{H}_2} \quad 1/50 \sim 1/10, \text{约} 1/30$$

CH_4 1~3%, 约2%

工艺: 一步将 $>200^{\circ}$ 馏份转化成高温还原气, 不经冷却直接送入铁矿还原炉;

残渣油用部份氧化, 水蒸汽转化或甲烷化, 进行气化

铁矿还原装置—规模: 单炉产铁2,000吨/日

金属化率: $>90\%$

脉石: $<5\%$

含C: 0.5~2.0%

含S, P: $<0.03\%$

团矿粉碎率: $<5\text{mm}$ 颗粒 $<5\%$

制品强度: 单球强度 $>50\text{kg}$

还原气进: 850°C

2.2. 竖炉法

日本有三种竖炉气体炼铁法: 最老的是瑞典的威伯格法, 其二为美国的米德列法, 其三为新日铁正在试验的高压竖炉法。兹对这三种方法简述如下。

2.2.1. 威伯格~安来法 (Wiberg-Yasugi)

威伯格竖炉气体炼铁法起源于瑞典, 已有半个世纪左右的历史。这一方法的特点是将还原炉尾气引入电阻加热的焦炭层使 CO_2 和 H_2O 被还原至 CO 和 H_2 , 再循环至竖炉。这一工艺于1964年引入日本, 在日立金属(株)安来工厂应用^[8,10]于生产, 改进后称为威伯格-安

来法。所用原料为山阴产砂铁，该矿含磷、硫和钛极少，适用于生产高级特殊钢，产量约每年10,000吨。入炉的还原气所含 $\text{CO}:\text{H}_2$ 比为2~3:1，温度约850℃，炉顶气的2/3循环使用，1/3入预热室燃烧。电阻加热的焦炭层中同时喷入液化石油气，以节约焦炭。

以一吨金属铁产品为基准，威伯格-安来法的消耗指标为：

球团铁矿：1,350kg； 焦炭：128kg； 燃料：50kg； 电极：0.8kg；
电耗：870KWH

显然，该法耗电高，因此成本无法降低，在日本仅用于生产特殊钢，目前不足为大量生产一般钢铁的工艺进行研究开发。

2.2.2.米德列法 (Midrex)

米德列竖炉气体炼铁法原由美国米德兰-罗斯公司 (Midland-Ross Corp.) 研究试验成功，属其米德列部 (Midrex Division)，后来于1974年并入科夫实业公司 (Korf Industries, Inc.)，成立米德列公司Midrex Corp.^[14]该工艺研究成熟后，由三个公司在世界各地分售米德列技术：

Midrex Corp., Charlotte, N. C., U. S. A. 美洲

Korf Eng. GmbH, Düsseldorf, W. Germany 欧洲

Mitsui & Co. Ltd. (三井公司), Tokyo, Japan 亚洲、澳大利亚及委内瑞拉
已生产的米德列气体炼铁厂有四个：^[14]

Hamburger Stahlwerke GmbH., W. Germany

产量：400,000吨/年

原料：团矿 (瑞典矿)

Oregon Steel Mills, Portland, Oregon, U. S. A.

产量：400,000吨/年

投产：1969

原料：团矿 (磁铁矿)

Georgetown Steel Corp., Georgetown, S. Car., U. S. A.

产量：400,000吨/年

投产：1971

原料：团矿、块矿

Sidbec-Dosco, Ltd., Contrecoeur, Canada

产量：400,000吨/年

投产：1973

原料：团矿、块矿1,600,000吨/年

在锡德贝克—多斯科Sidbec-Dosco，现正在建造另一个600,000吨/年的米德列气体炼铁厂，此外正在谈判和计划中的工厂有20个，其总产量为23,000,000吨/年，包括日本三井公司在非洲卡塔尔建造的400,000吨/年米德列气体炼铁厂。该厂的工程及设备制造由日本神户制钢所负责，投资30%属日本，70%属卡塔尔。卡塔尔的米德列厂利用本地的天然气，但铁矿将来自澳大利亚和印度。

目前，日本没有在本土建造米德列气体炼铁厂的打算，但很想将技术出售。

图15表示了米德列法还原工段的流程，图16和17分别为该工段的侧面和平面布置，图18为米德列竖炉的剖面，图19为与还原工段配套的矿石原料准备和产品处理、贮存和输出流程。

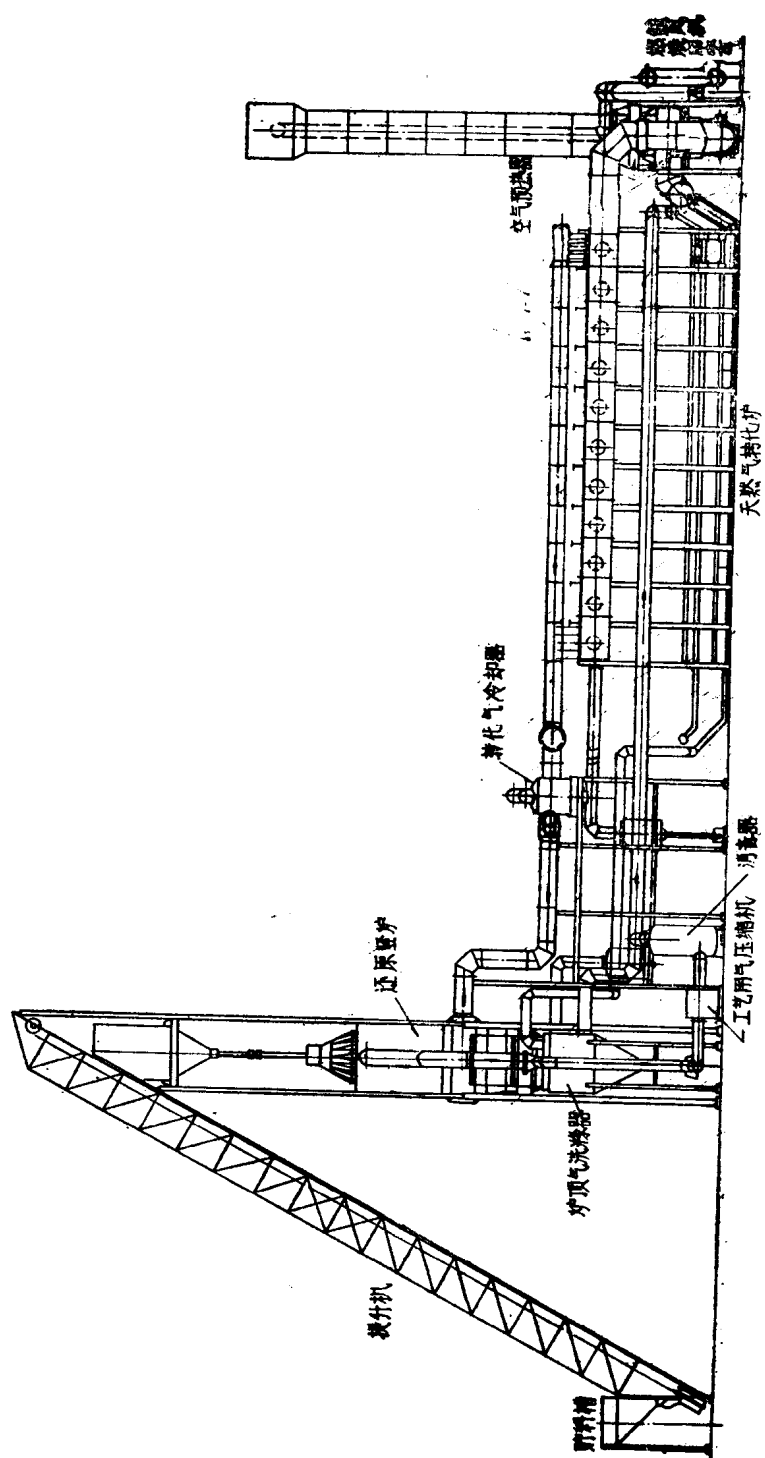


图16 米德列竖炉气体炼铁法侧视图

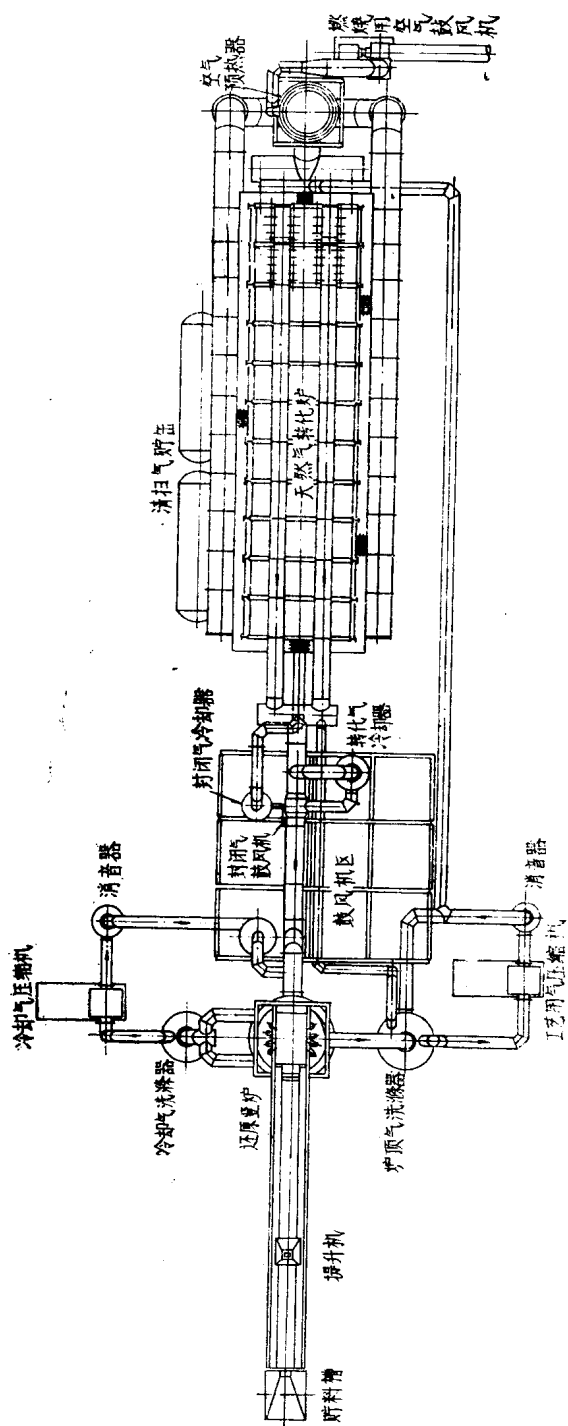


图17 米德列竖炉气体炼铁法平面图

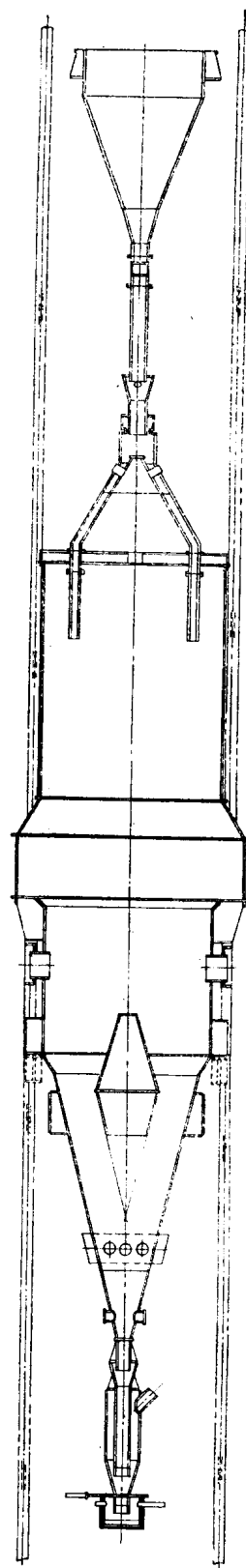


图18 米德列竖炉气体炼铁法竖炉示意图