

## 特 別 講 演

### 原子力エネルギーの製鉄プロセスへの利用\*

#### On Application of Nuclear Energy to Iron Making Process

藤 木 俊 三\*\*

Shunzo FUJIKI

#### 1. 製鉄業における原子力エネルギー 利用の意義

##### 1.1 わが国製鉄技術の特色

近年におけるわが国鉄鋼業の発展は、世界史上類を見ないもので、粗鋼生産実績として 1960 年の 2 200 万 t、1970 年における 9 300 万 t の実績は表 1 に示す海外主要諸国の生産量推移と比較していちじるしい懸隔を端的に示すものである。

製鉄業に不可欠の主原料、エネルギー資源を国内にほとんど持たないわが国のこのような異例の発展要因は、巨大規模の高炉、LD 転炉、ストリップミルなどにわたる大臨海製鉄所を相ついで建設稼働させ、その主原料、エネルギー源を大型船により効率的に輸送し、また一貫製鉄工程全般にわたり、その操業技術成績を極限に近く追求してやまぬことにあつた。とくに前表に見られるように、諸外国に比べて、製鋼工程における LD 転炉への移行をはるかに早いテンポで推進したことは、わが国鉄鋼業の国際競争力を強大ならしめた要因である。高炉溶銑を多量に消費するこのプロセスが、高炉技術の向上と大型化に拍車をかけることになつた反面、必然的に高炉用原料炭所要量の飛躍的増大を招来した。

表 1 鉄鋼生産内容の比較 (暦年)  
× 10<sup>8</sup> mt

		1960	1965	1968	1969	1970
日本	銑鉄粗鋼	11 896	27 502	46 397	58 147	94 327
	内 LD %	22 138	41 161	66 893	82 166	
		11.9	55.0	73.7	76.9	
米国	粗鋼	90 068	118 985	118 932	127 977	119 414
	内 LD %	3.4	17.4	37.1	42.7	
ソ連	粗鋼	65 292	91 021	106 532	110 291	116 000
	内 LD %	3.8	4.4	10.6		
西独	粗鋼	34 100	36 821	41 159	45 316	45 042
	内 LD %	2.5	19.1	37.1	46.1	

表 2 製造業のエネルギー消費構成比 (1969)

種 別	石炭 (%)	石油 (%)	電力 (%)	ガス (%)	対製造業比 (%)
製造業計	18.3	48.7	24.7	8.3	100
鉄鋼	46.3	17.3	17.0	19.4	34.8
化学工業	2.6	74.6	18.0	4.8	25.6
窯業セメント	6.4	84.7	8.9	—	7.4
金属機械	2.3	54.9	42.8	—	4.5
その他	3.4	53.5	41.8	1.3	27.7

出所：エネルギー経済研究所

表 3 鉄鋼業における 1 次および副生エネルギー消費実績 (1969)

種 別	単 位	消 費 量	カロリ-比 (%)	
1 次 エ ネ ル ギ ー	原 料 炭	10 <sup>8</sup> t	25 034	38.5
	その他の石炭*1	〃	516	0.7
	コークス*2	〃	17 583	26.0
	重油	10 <sup>8</sup> kl	8 541	17.3
	電力	10 <sup>6</sup> kWh	34 876	17.5
	計	10 <sup>9</sup> kcal	*3(42 876) 487 506	(21.5) 100.0
副 生 エ ネ ル ギ ー	高 炉 ガ ス	10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>	80 595	13.2
	コークス炉ガス	〃	8 710	8.6
	L D ガ ス	〃	3 372	1.5
	計			23.3
粗鋼 t 当り 1 次エネルギー	10 <sup>3</sup> kcal	5 601		

出所：通産省指定統計

\*1 発生炉炭 (6 500 kcal) 一般炭 (5 500 kcal) 無煙炭 (7 000 kcal)

\*2 僅少の石油コークスを含む

\*3 ( ) 内は自家発電分をふくめた場合

#### 1.2 鉄鋼業におけるエネルギー使用実態

最近の産業界全般にわたる生産規模の拡大と、立地上の高密度化の急速な進展は、環境対策の課題をふくめて、エネルギー問題を、全産業に共通な深刻な問題としてクローズアップしつつある。1970 年代は、このエネルギー問題を中心に、激動の 10 年間として展開し、

\* 昭和46年3月30日受付

昭和46年4月6日開催の学会講演大会特別講演会において講演

\*\* 共同研究会原子力部長

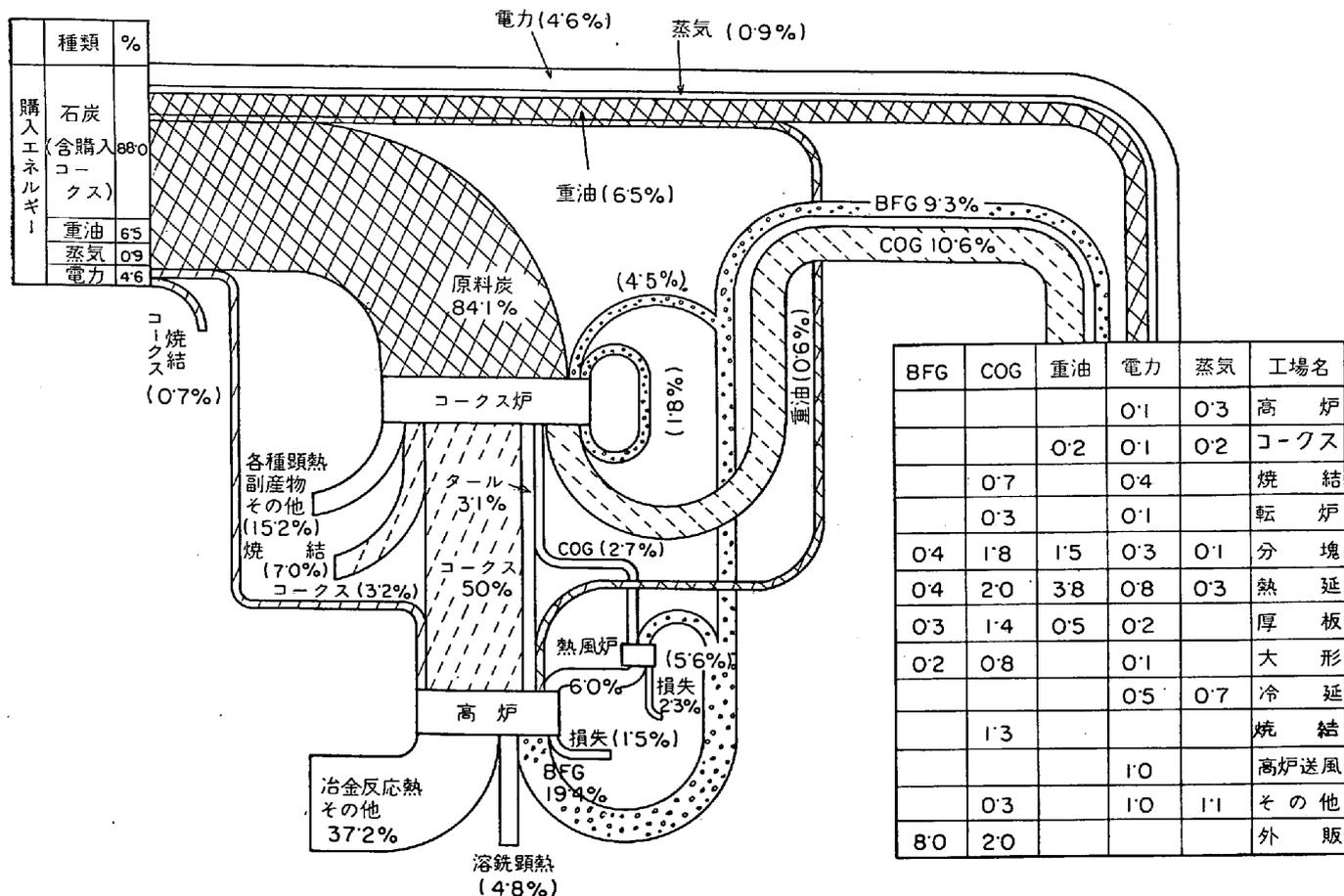


図1 一貫製鉄所のエネルギーバランスの例

—出所：熱経済技術部会 S45 資料—

1980年代に持ち越されることは必至であろう。

表2にわが国全産業におけるエネルギー消費の内容を一括したが、周知のように、鉄鋼業はエネルギーの最多消費産業であり、したがってエネルギー動向に対して深い関心を抱くものである。表3にわが国鉄鋼業における1次及び副生エネルギー消費実績を掲げた。1次エネルギー中、原料炭に由来するものは、コークスの形態での購入分をあわせ、カロリーベースで約65%を占める。ただしこの数値は高炉を持たない特殊鋼、電炉メーカーなどをもふくめた総括的な実績値である。次に一貫製鉄所(原料炭からのコークス化を行なう)におけるエネルギーバランスの平均的な一例を図1に示した。製鉄所の全工程を総合して、購入エネルギーの中で、原料炭は80%以上の圧倒的高率を占めることがわかる。圧延加熱部門などにおいて、原料炭に由来する副生ガス(COG, BFG)を使用する部門も多く、現行の一貫製鉄方式にあつては、原料炭は、単に高炉部門のみでなく、全製鉄所内の主要なエネルギー源として、いかに重きをなしているかが認識されよう。

1.3 原料炭の使用実態

前節のごとき製鉄用主力エネルギー源である原料炭は表4に見られるごとく、わが国は海外諸国に比べてその

表4 原料炭の輸入依存度の比較

国別	年度	原料炭内訳		
		国内×10 <sup>3</sup> t	輸入×10 <sup>3</sup> t	輸入比%
日本	1968	9 495	27 652	74
	70	8 500	46 900	84
	75	6 000	92 800	94
米国	1968	73 700	—	0
	70	74 400	—	0
	75	75 800	—	0
EEC	1968	64 800	12 000	16
	70	60 000	16 000	21
	75	59 200	22 000	27

[注] 1970年……予定 1975年……想定

輸入依存度が著しくたかく、今後国内炭の調達量が減少してゆくとされているので、この比率は逐年上昇することになる。この中、高炉操業に不可欠の強粘結炭(現状では原料炭使用量の2/3を占める)は、完全に全量を輸入に仰いでいる。このような逼迫した原料炭事情のさ中にあつて、わが国鉄鋼業としては、原料炭節減方策の積極的な推進をはかり、成果は着実に挙りつつある。従来の標準コークス比500kgに比べ、重油吹込量の増加

などの諸対策により最近では 350~400 kg 級の実績を記録する高炉が多数ある。

原料炭は、今後に深刻な問題を残しているというものの、世界的に見て、遠からぬ時期に、資源的に枯渇するという類のものではない。しかし世界的に偏在資源であり、産炭国、採炭地域における労働事情は急激に悪化しつつあること、炭鉱の新規開発には龐大な資金と、長期間を要すること、また需給調達の実際面や、取得条件において、完全に売手市場で需要者側の主体性をおりこみがたいことなど、先行きその量的確保と取得価格の両面から危機感を深めざるをえない。

1.4 その他のエネルギー

現行の製鉄方式にあつては、原料炭を除く他のエネルギー源は、量的に副次的立場に位置付けされるが、原料炭節減、公害対策の推進などから重油(とくに低硫黄系)、天然ガス、あるいは電力の量および使用範囲の拡大を考慮しなければならない。最近の産油国をはじめとする石油業界の世界的動静は、単なる一時的現象とは見なしがたい重大性をはらんでいる。天然ガスは公害対策の上からも、今後の需要の激増が予想され、日本列島近傍からの新資源の開発には、石油とともに大きな期待が寄せられている。しかし現実問題としては、LNG による海外依存を建前とせざるを得ず、輸送と利用の実態から、海外諸国と比較すると使用条件は著しく不利で、鉄鋼業を初め、産業界で単なる熱源として大量に消費するエネルギーとしては大きな問題を残すものと見られる。

電力は、最近やかましい環境対策の上からも、また使

用面における簡便性と合理性や、技術的にプロセスの近代化や自動化に好適であることなど、一般用はもとより、産業のエネルギー源としてのウェイトは加速度的に増大するものと予測される。しかし現状の火力主体の発電方式では、公害、立地問題に伴う設置上の障害や、発電の量、コスト両面から期待にそいがたい要素が多い。

1.5 原子力エネルギーへの期待と鉄鋼業

原料炭を初め、重油、天然ガス、さらに現行発電方式による電力にいたるまで、個別に、又共通にそれぞれ重大な問題に直面している。かかる変化の多いエネルギー情勢の中で、原子力エネルギーの産業界への利用が漸く実用開花期を迎えたことは、まことにその意義が大きい。原子力エネルギー利用の歴史はきわめて浅いが、技術進展のテンポは異常に急速に行なわれており、早くも原子力発電は将来の発電の主導的役割を約束されている。原子力発電の今後が、発電規模の大型化と、他エネルギーの相対的なコスト上昇との関連で、量と価格の両面を満足する方向をとるならば、鉄鋼業にあつても溶解・加熱エネルギー源として、その使用分野を大幅に拡大しうる可能性がある。このように、現実的に新しく登場した原子力エネルギーの利用という問題に前向きな姿勢で取り組むことは、時代の趨勢と、エネルギー界の現実問題を直視すれば当然のことというべきである。国体燃料の主力時代から液体、気体燃料への転換が行なわれてすでに久しいが、今や「赤い火から白い火」への時代的転換を促す技術開発に鉄鋼業も積極的に取り組む必要がある。最近における高温ガス炉(He・ガス冷却原子炉)の技術

表 5 海外における高温ガス炉の開発状況

原子炉	Dragon	Peach Bottom	AVR	UHTREX	KSH	Fort. St Vrain	1 100MWe (GGA)	THTR	MARK-III
場 所	Winfrith (英)	Peach Bottom (米)	Jülich (西独)	Los Alamos (米)	(西独)	(米)	(米)	(西独)	(英)
熱出力 (MWt)	20	115	46	3	65	842	2 800	750	1 517
電気出力 (MWe)	—	40	15	—	24	330	1 100	300	647
熱効率 (%)	—	34.6	32.6	—	37	39.2	39.3	40	42.6
冷却材種類	He	He	He	He	He	He	He	He	He
炉出口温度	750 ~850°C	750°C	850°C	1 316°C	735°C	778°C	788°C	750°C	800°C
炉入口温度	350°C	345°C	175°C	890°C	425°C	405°C	326°C	270°C	300°C
圧力 (kg/cm <sup>2</sup> )	20	23.8	10	35	25	49	49	40	—
減速材種類	黒鉛	黒鉛	黒鉛	黒鉛	黒鉛	黒鉛	黒鉛	黒鉛	黒鉛
燃料要素形状	UC <sub>2</sub> /ThC <sub>2</sub>	UC <sub>2</sub> /ThC <sub>2</sub>	UC <sub>2</sub> /ThC <sub>2</sub>	UC <sub>2</sub>	UC <sub>2</sub> /ThC <sub>2</sub>	UC <sub>2</sub> /ThC <sub>2</sub>	UC <sub>2</sub> /ThC <sub>2</sub>	UC <sub>2</sub> /ThC <sub>2</sub>	U/Pu または UC <sub>2</sub> /ThC <sub>2</sub>
粒子径 (mm)		(0.25 ~0.52)				0.36 ~0.86			1.1~1.2
(うち核部分)		(0.15 ~0.40)				(0.1 ~0.6)			(0.8)
燃料要素形状	柱状	柱状	ボール状	柱状	柱状	柱状	柱状	ボール状	柱状
圧力容器	鋼製	鋼製	鋼製	鋼製	鋼製	PS	PS	PS	PS
臨 界 年	1964年	1966年	1966年	1968年	1973年	1971年	1974年	1974年	1975年頃

出所: 通産省総合エネルギー政策課報告書

開発はきわめて急速に行なわれ、ことに核燃料の技術進歩によつて、抽出されうる He ガス温度は逐次上昇しつつあり、これを 1000°C 程度にまで高めることにより熱エネルギーをプロセスヒートとして直接利用することの可能性を期待させるものである。表 5 に海外における高温ガス炉の開発状況を示した。特殊実験炉の UHTREX 炉を除外すると、He ガス出口温度は、現状において 850°C 程度までの開発はすでに完了したものと考えられている。原子力エネルギーを熱及び電力の両形態で、効率的に組み合わせ利用しようとするいわゆる原子力製鉄の技術開発の構想は、このような背景の中から生れてきたものであり、海外諸国に比較し、エネルギー事情の格段に劣悪なわが国においてこそ顧慮すべき必要性が最も大きいと考えられる。

このような観点から昭和 44 年 6 月 日本鉄鋼協会と日本鉄鋼連盟は連名で「高温原子炉開発に関する要望書」を政府に提出することにより、国の機関による実験炉の開発およびその設置についての具体的施策を要望したが、同時に原子力製鉄に関する技術的問題点などについて日本鉄鋼協会原子力部会で検討を進めているものである。

## 2. 原子力利用のあり方と技術的課題

### 2.1 原子力製鉄プロセスの概要

#### 2.1.1 原子力製鉄システムの基本的な方式

高温ガス炉のエネルギーを製鉄プロセスに導入利用する原子力製鉄システムの標準基本方式として図 2 のパターンを採択する。これ以外にも原子力エネルギーの投入分野として、高炉への熱エネルギー利用、電気製鉄炉方式としての原子力電力の集中投入なども考えられる。しかし前者にあつては、He ガス温度としてさらに一段と高温が要求されること、原料炭の節減対策の範囲に止まること、また後者では電力のみの利用に近く、また現実的に問題があることなどから、それぞれ、比較対象のパターンとして考慮されるべきものと判断した。上記基本方式の場合は、原子力エネルギーは、①高温部分を還元ガスの製造、改質および加熱用の熱エネルギーとして用い、②ついで温度の下つた He ガス顕熱で発電を行ない電炉製鋼部門への利用分とするカスケード方式である。

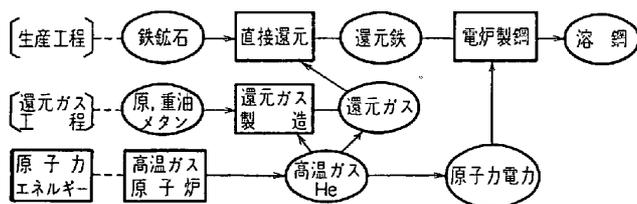


図 2 原子力製鉄・プロセス・モデルパターン (直接製鉄—電炉製鋼)

#### 2.1.2 原子炉出口のガス温度

原子炉冷却材である He ガスの顕熱を利用する原子力製鉄においては、He ガス出口温度、熱交換方式、還元ガスおよび還元鉄製造方式等が相互に密接な関連を有する。

##### (1) 還元鉄製造における還元ガス所要温度

後述するごとく、原子力製鉄における還元鉄製造プロセスとしては、シャフト炉、流動層の二方式が対象とされるが、前者では炉入口の還元ガス温度として 950~1000°C が要望され、最低限 850°C は必要である。これ以下の温度になると、還元所要時間と還元度が低下する。しかし 1000°C 以上では炉内装入鉱粒の融着現象を起す危険性がある。流動層法では、粒状鉱石を使用し、一般に多段式であるため還元層間における還元ガスへの熱補給も可能で、シャフト炉に比べて還元ガス入口温度は低目としてよい。H アイアン法は低温、F10R 法は高温の流動層法としての典型的な例であるが、低温法では生産性が低く、大規模な生産炉を目標とする場合、開発の対象としたい。高温流動層法では、還元ガス温度として 850~900°C は最低限必要である。以上から熱交換器部分における He—還元ガスの温度差を約 150°C と想定すると、He ガス温度として 1000°C 以上が要求されることとなる。

##### (2) 還元ガス製造プロセスにおける温度

現在すでに確立されている天然ガス(メタン)の水蒸気改質法では、メタンと水蒸気を混合予熱の上、Ni 触媒充填層中へ通入し、管外からの間接加熱により分解改質を行なわせるプロセスである。この場合の管の外壁温度は 900~1000°C に達する。改質ガス中のメタン残量を少なくする上からも高温が望まれる。外熱を He ガス顕熱により行なう場合は、He ガス温度は当然 1000°C 程度が要求される。さらに原油、重油などを還元ガス源とし、これを熱媒体流動層方式などにより、全量ガス化する新技術にあつては、He ガス温度はさらに高温(1000°C 以上)が好ましいとされる。

##### (3) 耐熱金属材料の耐熱特性からの温度制約

以上から原子炉出口 He ガス温度として、1000°C 以上が望まれることが理解されるが、一方熱交換器をはじめ、原子炉内、ダクト部における金属材料の特性面からの制約を考慮に入れねばならない。1000°C 以上の高温環境下で、長期にわたり、所要特性を維持しうる超耐熱金属材料の開発は現状では不十分である、現実問題として、1000°C 程度までならば、現用の鉄ベース材(例: Incoloy 800, HK 40)、Ni ベース材(例: Inconel 600, Hastelloy X)などの材料を使用し、設計構造面からのバックアップと、使用期間に若干の制約を付すなどの弾力的運用によつて措置されることとなる。しかし、1000°C 以上の温度領域では、一般金属材料の耐熱特性は急激に低下し、また材料の成形、溶接加工性、さらにコス

ト問題など、現状では直ちに適切な対象材料が見当たらないというのが実態である。したがって以上の3項目の条件を総合し、現段階としては材料面からも He ガス出口温度 1000°C を目標とすることが妥当と見られる。さらに実験原子炉以降の段階では当然 1000°C 以上が実現さるべく、原子炉サイド、とくに材料開発面に強く期待しなければならない。

## 2.2 開発上の技術的課題 (製鉄側)

### (1) 還元ガス製造プロセス

鉄鉱石還元用として、資源的に制約の少ない原料を対象に、原子力エネルギーを有効に利用し、低廉な還元ガスの量産に適したプロセスの開発が要請される。天然ガスやナフサからの還元ガス製造技術は、ほぼ確立されているが、製鋼業で大量に使用する還元ガス源にこれらの資源をもとめることは現実的に問題である。したがって、原油、重油を対象とするのが妥当と考えられ、また原子力熱エネルギーの有効利用という立場から、熱媒体による流動層方式の開発を主に考える必要があろう。しかもこのガス化の際に、同時に硫黄分の除去を能率的に行なうごとき体系を付加しなければならない。

### (2) 鉄鉱石還元

シャフト炉、流動層炉両方式に対する最適操業の選択と開発(還元ガスの組成、温度、供給方式などが操業上に及ぼす影響など)が課題とされる。また設備技術面において、とくに単位設備能力の大幅な引上げを目途とする技術開発は最も重要である。現在海外では原子力製鉄とは無関係にこれらの技術の開発が行なわれているが、その開発実績は、日産 500~600 t 級で、1000 t 級がようやく計画段階にある現況である。このように現段階で直接還元設備の規模は現存の高炉に比較して小さく、また還元ガス源である天然ガス等を容易に入手出来る地域に立地している。したがって近代的製鉄所の必須条件である量産、高能率、低コストを実現する上からも、現状の規模は開発の前段階の域を出ていないことを銘記すべきである。

### (3) 熱交換器の開発

原子炉冷却材である He ガスの顕熱 (1000°C またはそれ以上) を効率よく、製鉄側に伝達熱交換を行なうには、適切な熱交換システムの開発を必要とする。これには、①適切な耐熱金属材料の選択と開発、②直接熱交換方式にあつては還元ガス中の H<sub>2</sub> の He ガスループへの透過対策技術の開発 (He ガス中の H<sub>2</sub> 含有許容限度量の確定と、洩入 H<sub>2</sub> の除去技術の開発)、③直接熱交換方式に加え間接熱交換方式の併行検討 (H<sub>2</sub>、核分裂生成物の漏洩対策としてその設計構造の研究、中間媒体の選択など)、④大型熱交換器の設計、製作に伴う問題点の解決 (形式および製造関係技術、検査法の確立など) が技術的課題とされる。

### (4) 電炉製鋼技術の開発

還元鉄を主配合とする高性能の UHP 電炉の技術と関連設備面の開発。還元鉄の輸送貯蔵、取扱上の問題点の解明など。

### (5) その他

①原子炉、製鉄工程直結に伴う安全問題対策、②He ガスサイクル中におけるエネルギーの効率的な使用配分に関するトータルシステムの研究、③原子力製鉄の経済性の検討なども重要な課題である。

## 3. 日本鉄鋼協会原子力部会の活動状況

### 3.1 原子力部会の組織と運営

高温原子炉のエネルギーを鉄鋼製造工程に熱エネルギーとして直接導入し、化石燃料の節減を図り、とくに原料炭問題解決への有力手段と考え、またわが国将来の重要なエネルギー源として開発の必要性について旧八幡製鉄株式会社副社長故湯川正夫氏が提唱され、これは日本鉄鋼協会昭和 43 年 4 月の理事会において協議のうえ、研究の具体化をはかることとなった。

原子力製鉄の技術開発に関する研究は、その性格上、日本鉄鋼協会における共同の場で運営されることが適切であるとの判断の上に立ち、昭和 43 年 9 月、原子力部会が設立され、湯川氏が初代部会長に委嘱された。原子力エネルギーを製鉄工程に利用する上においての大きな課題である「原子力発電による電力の利用」および「原子力熱エネルギーの製鉄工程への直接利用」に関し調査検討すべく、また製鉄用原子炉の検討をも対象として、当初、第 1~第 3 小委員会が設置された。その後の検討経過と、研究活動の進展に伴い、現在は、以上の 3 小委員会に加えて、熱交換器を担当する第 4 小委員会、還元ガス製造検討を対象として第 5 小委員会、更に製鉄プロセスパターンの設定、サブシステムの開発手順など総合的に企画するシステム小委員会が設置された。また実験担当の小委員会として、45 年度シャフト炉小委員会が、また昭和 46 年度共同実験を対象とし、本年 2 月熱交換器小委員会と還元ガス小委員会の発足を見た。図 3 に現在の鉄鋼協会原子力部会の組織内容を示した。

### 3.2 部会としての技術体系の検討

原子力部会活動の全般に関連し、検討の前提とすべき数項目についてふれておこう。

#### (1) 原子力製鉄基本方式の設定 (前出)。

(2) 原子炉出口 He ガス温度 (2.1.2 参照) 計画中の実験炉段階では 1000°C を目標とし、それ以降の段階で、原子炉側と製鉄側、とくに金属材料の開発により 1000°C 以上を目指す。1000~1200°C の間での引き上げ可能な温度幅の想定は今後行なう。

#### (3) サブシステムの技術項目

①還元プロセス——シャフト炉、流動層炉の両方式を併行して検討の対象とするが、開発実験のステップとしては、実績の多いシャフト炉を先行させる。

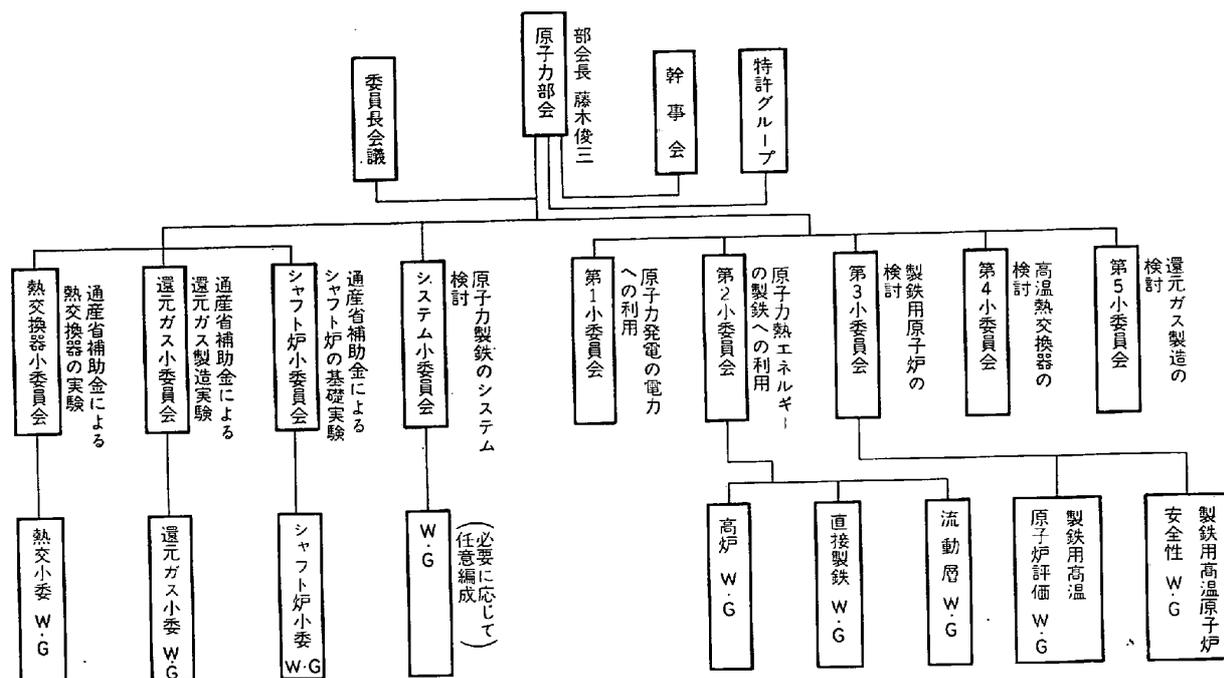


図 3 日本鉄鋼協会原子力部会組織 (昭和 46 年 3 月 31 日現在)

②還元ガスの性状と取扱い——ガス成分としては、 $H_2$  および  $H_2+CO$  の両系統を対象とする。循環システムを取扱いからは  $H_2$  系統がすぐれているが、 $H_2+CO$  系には  $CO$  による熱補償のメリットがある。  $H_2$ 、 $CO$  以外の不純成分総量は当面 5% 以下を目標とする。還元炉からの排ガスは完全循環再使用を建前とする。これは原子力製鉄システムのエネルギー有効利用の根幹をなすべきものである。

③還元ガス製造——ガス源として前述のごとく原油、重油（とくに重質油）を対象とし、メタンなどは比較対象物として取り扱う。還元ガス製造には原子力熱エネルギーの有効利用を第一義とする。

④熱交換器関係——原子力製鉄技術開発上のキーポイントに当たるサブシステムとして、部会としても特に重点的開発項目とする。熱交換方式として直接換熱式と間接換熱方式（後出）の二者択一は今後の課題とし、双方の検討を併行させるが、とくに当面直接熱交の場合の問題点の解明と開発（ $H_2$  除去対策、 $H_2$  の炉心構造材への影響度の確認など）に重点をおく。また間接熱交型の媒体としてはスチーム、 $He$  および溶融メタルとしての  $Pb$  を重点的に検討する。

⑤トータルシステムにおけるマテリアルおよびエネルギーバランスの検討——原子力製鉄のトータルシステムにおけるエネルギー配分上効率の高い体系を研究する。原子炉出入口の  $He$  ガス温度として  $1000^\circ C$  および  $400^\circ C$ 、プロセスヒートとしての  $He$  ガス利用範囲  $1000^\circ C \sim 750^\circ C$ 、また  $He$  ガス循環システム中には水蒸気発生、発電部門を挿入してエネルギーバランスの効率化をはかる。

### 3.3 原子力部会第 1 小委員会関係(原子力発電による電力の利用)

第 1 小委員会は将来の製鉄所への原子力発電の導入を想定し、(1) 原子力発電による電力の現行製鉄工程への適用、(2) 電力の利用による製鉄工程改善について、主として経済的観点からその導入の可能性につき検討を加えている。検討対象としての製鉄所規模を粗鋼年産 1000 万トンの生産能力を有するモデルプラントとし、その主要設備内容は表 6 に示すものを想定した。

#### 3.3.1 原子力発電による電力の現在の製鉄工程への適用

1000 万トンモデルプラントの内容に従い各設備の稼働率およびエネルギー原単位を想定し、エネルギーバランスを作成した結果、モデルプラントの粗鋼 t 当たりの電力原単位は 485 kWh/t と算出された。したがって平均使用電力は 555 MW となり、この電力を単純に原子力発電の電力に置き換えるとほぼ 500 MW の原子力発電所に相当する。まず、単基 500 MW を基準ケースとして、これと共同電力またはコンビナート方式を予想した 1000 MW の軽水型原子力発電所について送電単価の試算を行ない、共同火力発電所 (125 MW × 2 基、375 MW × 2 基) の場合と比較した。

原子力発電所の稼働率の決定は、今後の技術的進歩を考慮し、定期検査に 2 カ月を予測し事故なども含めて稼働率 80% として、その送電単価を共同火力と比較したのが表 8 である。すなわち「自家用原子力」は発電単価は安い、停止時の自家予備電力料金が大きく電力費は高くなる。一方「共同原子力」はスケールメリットを十分に発揮して電力費は安くなり、その節減額は昭和 50

表 6 1000 万 トン モデル プラント の 設 備

設 備 名	能 力	基 数	生 産 量	年間操業時間 曆年年間時間 × 100
高 炉	3 000 m <sup>3</sup> 級	4	876 万 t / y	95%
焼 結 炉	6 000 t / d	4		95%
コークス炉	3 350 t / d	4		100%
転 炉	300 m <sup>3</sup>	6		95%
石灰焼成炉	300 t / d	6	1 000 万 t / y	
連続鑄造設備	100 万 t / y	2		
分塊ミル	480 万 t / y	2	170 万 t / y	75%
大形ミル	96 万 t / y	2	830 万 t / y	72.3%
厚板ミル	120 万 t / y	2	170 万 t / y	80%
ホットストリップミル	120 万 t / y	2	212 万 t / y	80%
コールドストリップミル	480 万 t / y	1	428 万 t / y	85%
大径管ミル	100 万 t / y	2	200 万 t / y	85%
亜鉛メッキ設備	60 万 t / y	1	54 万 t / y	70%
錫メッキ設備	24 万 t / y	3	72 万 t / y	85%
	24 万 t / y	1	24 万 t / y	85%

表 7 原子力発電による発電コスト

稼働率	80%	75%	70%
500MW	50年 2.26円/kWh	2.35円/kWh	2.47円/kWh
	55年 2.06円/kWh	2.14円/kWh	2.24円/kWh
1 000MW	50年 1.84円/kWh	1.92円/kWh	2.01円/kWh
	55年 1.69円/kWh	1.76円/kWh	1.83円/kWh

表 8 発電単価の比較 (共同火力=100 とする)

	共同 火力	自家用原子力		共同原子力	
		50年	55年	50年	55年
発 電 原 価	100	97	89	79	72
補充(予備)料金	100	165	165	133	133
買 電 料 金	100	100	100	100	100
合 計	100	109	104	93	89

年度完成の場合で年間 9.3 億円、55 年度完成の場合で 14.5 億円が期待される。しかしながらここで想定した原子力発電所は単基発電であるため、保安電力対策、負荷の変動に伴う電圧変動対策、あるいはガスの消化対策などいろいろの問題が残されている。

### 3.3.2 製鉄プロセスの変換

鉄製造法は現在高炉法が主流であるが、変換プロセスとして現在工業的に操業されかつ電力を多量に消費する電気製鉄炉法を選定した。電気製鉄法は一炉当たりの生産規模が小さく、また鉄 t 当たり 1000~2500kWh と多量の電力を消費するため、現在では特殊な条件にある場合のみ成立している。電気製鉄炉の能力は、今後の大型化を考慮しても電極径 1900 mm、トランス容量 65000 KVA が一応の技術的限界点と考えられる。なお、その特徴として、還元剤としては、入手が容易で安価な弱粘結炭が使用できる。

比較の対象を 3000 m<sup>3</sup> 級高炉に求めた場合、高炉 1 基の生産能力に見合う上記電気製鉄炉の必要基数は「ホットチャージ法」では 6 基、「コールドチャージ法」では 2 基となり、これらを基に鉄単価を算出し経済性を比較した。電気製鉄法での鉄単価は電力費により変動し、高炉法と経済的に対抗できるのは 1.5 円/kWh 以下の場合であることがわかった。

電気製鉄法では安価な弱粘結炭が使用できるメリットがある反面、単位設備の生産性の制約、製鉄部門の土地占有面積、発生ガスの利用などプロセス変換上の問題点が残されている。

### 3.3.3 製鋼プロセスの変換

製鋼プロセスの経済性の比較は LD 転炉 (200 t 炉 × 4/6 基操業) と電気製鋼炉について行なった。製鋼用電気炉は今後の大型化と超高電力操業への趨勢から 300 t 炉、トランス容量 170000 KVA とし、この平均電力原単位を 450 kWh/溶鋼 t とすると、必要基数は 9 基整備の 7 基稼働となる。

転炉の主原料構成はそのスクラップ単価を 15000 円/t と 18000 円/t の二通りに評価し、その混鉄率をそれぞれ 70%、80% とした。電気炉の主原料として還元鉄 (外部より供給されるとする) を選定し、これを連続装入するものとする。還元鉄組成は M. Fe 90%、その配合率を 80% とし、スクラップ単価は転炉の場合と同じとする。電気炉溶鋼単価はその主原料である還元鉄単価および電力単価により変動するが、電力単価を 1.5 円/kWh とした時の溶鋼単価の比較は図 4 のごとくであり、これより転炉鋼に匹敵する還元鉄の価格が求められる。

また、電力単価が 1 円上昇した場合には還元鉄価格が 500 円下降しないと変換プロセスは経済的に成立しない。この検討結果は原子力製鉄により生産される還元鉄の経済性の目安となるものである。

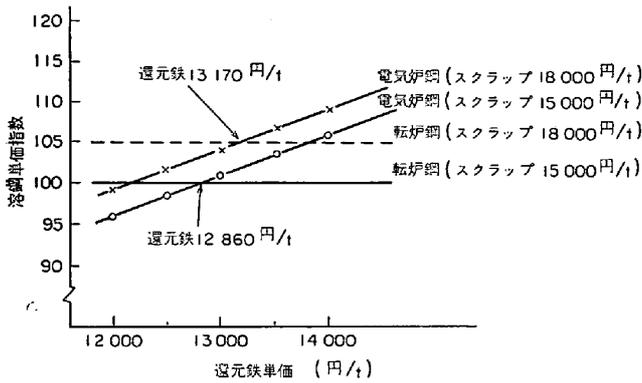


図 4 還元鉄単価による電気炉鋼溶鋼単価の変動 (電力価格 1.5 円/kWh)

表 9 変換プロセスの成立する電力価格

設備名	電力価格
分塊均熱炉	1.6 円/kWh
大形連続加熱炉	1.9 //
厚板連続加熱炉	1.4 //
〃焼鈍炉	2.3 //
ホット連続加熱炉	1.8 //
コールド焼鈍炉	1.0 //

3.3.4 加熱プロセスの変換

現在の一貫製鉄所の圧延用加熱炉の熱源は主として B ガス, C ガスなど副生ガスに依存しているが, 将来直接還元-電気炉製鋼という組合せの製鉄所が実現した時は, 他の熱源によらなければならない。したがってここでは加熱炉熱源への電力の利用という面から電気誘導加熱による鋼材の加熱の経済性について検討を加える。

電気誘導加熱は電気エネルギーを熱エネルギーとして直接変換し, 材料自体が発熱昇温する方式であるため, 燃焼加熱に比べ加熱効率がよい, 鋼材内外の温度差が少ない, 加熱時間が短くてよい, スケール発生量が少ない, 自動制御が容易, 排ガスが出ないなどのメリットがある。その他エネルギー効率も高く操作も簡単で炉稼働率, 生産性も良好である。経済性の検討は加熱炉費について行なつたが, これは主として燃料費とスケールロス分に左右される。燃焼炉のスケール発生は 1~1.5% の範囲にあるが, 誘導炉では 0.2% 程度である。燃焼炉の熱源価格として 0.7 円/10<sup>6</sup>kcal を採用すると電気誘導加熱が経済的に優位になる電力価格は表 9 の如く求められた。

次いで 1000 万トンモデルプラントの所要電力量について検討を加えた。この場合製鉄プロセスは還元鉄装入の電気炉製鋼-電気誘導加熱とすると, 総所要電力量は約 2250 MW に達し, 原子力発電所のスケールメリットによる電力価格の低下が十分期待できる値であるが, 現在引続きこの場合の電力価格予想値, その他電力上の諸問題について検討を加えている。

3.4 第 2 小委員会関係 (原子力熱エネルギーの利用)

第 2 小委員会においては原子力熱エネルギーの製鉄プ

ロセスへの直接利用に関する調査, 検討を行なうために現行高炉製鉄プロセスへの直接利用を検討するワーキング・グループと, 直接還元法への直接利用を検討するワーキング・グループ両者を設けて活動を行なつている。さらに, 図 3 に示した流動層 WG は, いわゆる高温域流動層法を技術的に検討しようとするものである。

3.4.1 原子力熱エネルギーの高炉プロセスへの利用

高炉に必要な良質の強粘結炭を入手することは, 価格的条件も考慮に入れて, ますますきびしさを増すことが予想され, コークス消費量を減少させることはもちろん, 多量消費のコークスを原子力熱エネルギーのような他のエネルギーに転換させていくことを考えなければならないが, 今日隆盛を極めて大型高炉に原子力熱エネルギーを利用することはまず第一に考えるべき課題である。ここにおいて高炉プロセスへの原子力熱エネルギーの利用の可能性については, 第一に高炉に吹込んでいゝる熱風を原子力熱エネルギーで加熱する方法が考えられる。これはコスト的にも, 副生ガスの有効利用という点からも熱風炉加熱用高炉ガスを原子力熱エネルギーにより代替することで得策でない。第二は原子力熱エネルギーで製造, 加熱した還元ガスを高炉腹部へ吹込む方法である。この方法によれば現在大型高炉に吹込まれている重油量よりさらに多量の燃料吹込みが可能となりコークス比の低下が考えられるので, この方法について調査と理論的検討を行なつた。その結果, 不純物の少ない 1000°C 以上の還元ガスを装入物温度が 800~1000°C 以上の直接還元のおこる領域以上のできるだけシャフト下部から吹込むことが有利であり, 理論的な最低コークス比は溶解炭素を含めて 220~260 kg と推定された。またコークス価格 10000 円/t, 重油 7000 円/t とした場合, 吹込み還元ガス価格が Nm<sup>3</sup> 当たり少なくとも約 3 円程度になれば経済的に成り立つことが推定された。以上のごとく高炉製鉄プロセスへの原子力熱エネルギーの利用は還元ガスの温度と価格によつてはその可能性があると考えられた。

3.4.2 原子力熱エネルギーの直接還元法への利用

現在までに報告されている直接還元法は, その原理, 規模などさまざまであり, ある特定の地域の鉱石, 燃料などの条件において開発されたプロセスが多い。したがつて一般性があり, スケールアップが可能で, なおかつ原子力熱エネルギーが有効に利用できる直接還元プロセスを選択することが重要となる。ワーキング・グループにおいては多くの直接還元プロセスを表 10 に示すごとく 7 分類して, これらの各プロセスの代表的なものについて原子力熱エネルギーの利用の可能性について検討した。

(1) 流動層法——代表的なものとして H-Iron 法, Nu-Iron 法, F10R 法などがある。これは粉鉄鉱石を還元ガスによつて浮遊させながら還元するもので, 特徴

表 10 直接還元法の分類と代表的プロセス

分類	代表例
流動層法	H-Iron 法, Nu-Iron 法, F10R 法
シャフト炉法	Midrex 法, Purofer 法, Wiberg-Söderfors 法, 日立金属 Wiberg 法
ロータリーキルン法	SL/RN 法, Krupp-Renn 法, Elektrokemisk 法
レトルト炉法	HYL 法, Höganäs 法
移動床法	D-LM 法, Heat-Fast 法
電気炉法	Albert de Sy 法, Lubatti 法, Baglio-Tradardi 法
熔融還元法	Eketorp 法, Cyclo-Steel 法, Jet-Smelting 法

は粉鉱石の反応面積, 還元速度が大であることを利用するため, 還元ガス温度はやや低目であつても操業できることである. 一方欠点としては還元過程において流動を阻害する還元鉱石の焼結現象がある. この問題を克服すれば原子力熱エネルギーは還元ガスの製造と加熱, 鉱石の予熱に大幅に利用できる. EEC における調査, 研究においてもこのプロセスを有力なものとして検討している.

(2) シャフト炉法—この方法はペレット, 塊鉱石の向流式ガス還元法であり, 長所は設備が簡単で生産性が高いことである. また問題点としては装入物の円滑降下, 還元ガスの炉内均一上昇, 鉱石と還元鉱の給排出機構などがあげられる. 現行プロセスにおいては, CO と H<sub>2</sub> の混合ガスを約 1000°C に加熱して還元炉に送入しているが, 850°C 以上の還元ガス温度が得られるならば, 装入鉱石の予熱などを行なうことによつて反応率の大幅な低下はさけられると考えられる. したがつてシャフト炉法は原子力熱エネルギーの利用可能なプロセスである.

(3) ロータリーキルン法—この方法は工業的にも広く用いられている方法で, 代表的な例として SL/RN 法, Krupp-Renn 法, Elektrokemisk 法などがある. 回転炉内の伝熱はバーナーの火炎からの放射伝熱が主であるため, これを原子炉からの He の顕熱で代替することは温度の点と, 回転炉の構造上からも困難である.

(4) レトルト炉法—この方法の代表例はメキシコの HYL 法である. 特徴はバッチ式に操業する点であるが, その他の点はシャフト炉法と大体同じである. したがつて原子力熱エネルギーの利用は可能な方法といえるが, 操業がバッチ式であり, 生産性にも難点があつて設備費が高くなるなど原子力製鉄の対象プロセスとは見なしがたい.

(5) 移動床法—代表例としては D-LM 法, Heat-

Fast 法などがある. これは固体還元剤を内装したペレットを原料とし, 還元剤中の揮発分, 炭素の部分燃焼による熱を利用して 1200~1300°C へ急熱し, 還元剤の全部は消費されないような短時間内に還元を行なわせることを特徴とする. したがつて生産性は高いが還元率は低い. 以上の点から判断して, 加熱温度が高いので原子力熱エネルギーの利用は困難である.

その他電気炉法, 熔融還元法なども検討したが, 原子力製鉄として検討の対象とはなしえなかつた.

以上, 高炉プロセスと直接還元法への原子力熱エネルギーの直接利用について検討した. この結果高温ガス炉の He 出口温度 1000°C を用いて得られる還元ガス温度を 850°C とするならば, この還元ガス温度では十分ではないが, 原子力製鉄を実施できるプロセスの対象としては流動層法とシャフト炉法が考えられるとの結論を得た.

原子力部会としては, この2つのプロセスの国内, 国外の情報を収集すると共に, 実用化における基礎資料を得ることが重要と考え, 前述のごとく流動層ワーキング・グループを新たに設置して調査, 問題点の抽出を行なつている. 一方シャフト炉法については, 国内的にも日立金属-Wiberg 法などデータの蓄積もかなりあるので流動層法に優先して実験を先行させることとなり, 部会にシャフト炉小委員会を設置して, 45年度より共同実験を開始した

#### 3.4.3 シャフト炉による直接還元の基本実験

昭和 45 年度通産省重要技術研究開発費補助金を受け, 鉄鋼 7 社共同によるシャフト炉還元実験を行なつた. これは新日鉄基礎研究所内に設置された日産 500 kg 規模の実験炉を用い, 原料ペレット銘柄, 還元条件を種々に組み合わせて基礎研究を行なうもので 45 年 7 月末実験設備完成後 4 回の連続試験を実施した. 図 5 に試験設備のフローシートを, また表 11 に試験条件と試験結果の一部を示したが, 要約すると次のようになる.

(1) 製品還元率については, 還元ガスとして 95% 程度の H<sub>2</sub> ガスを使用した場合 700°C 以上の還元温度と, 約 2000 Nm<sup>3</sup>/t-製品以上のガス量で, 95% 以上が達成された. 還元ガスに CO が添加された場合は, 還元率は若干低下する.

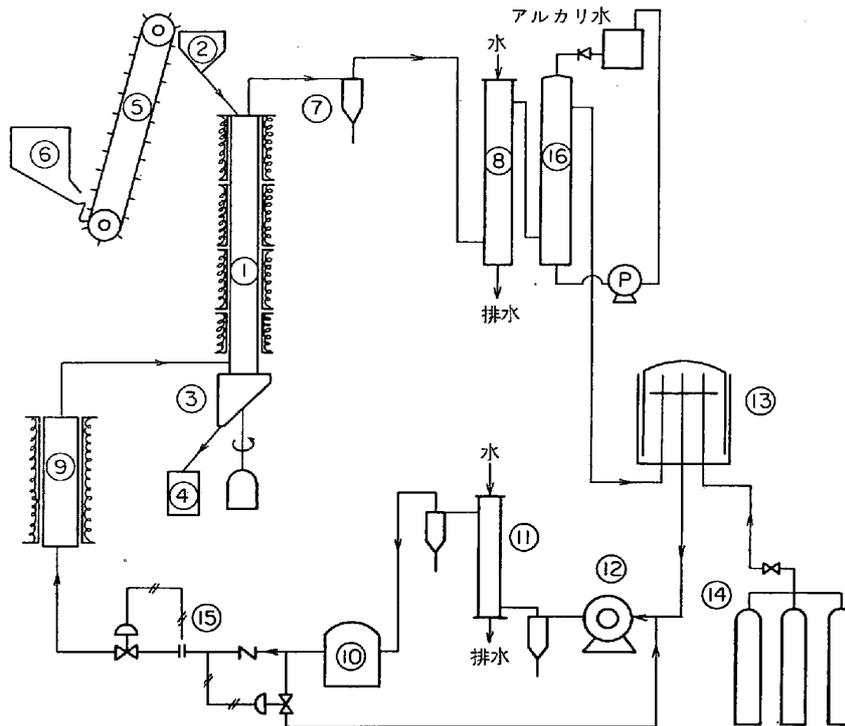
(2) 還元温度が 950°C の場合, 還元率 90% 以上の製品が 25 t/m<sup>3</sup>·day 以上の生産性で得られた.

(3) 良質なペレットを原料として定常運転を行なつた場合, 還元温度 950°C でもペレットの融着によるトラブルなしに操業することができた.

なお, シャフト炉小委員会では, 還元ガス中の CH<sub>4</sub> の影響を検討するため, 今年度も試験を継続することになつている.

#### 3.5 第 3 小委員会関係 (製鉄用原子炉)

第 3 小委員会は, 原子力製鉄における原子炉の開発と



- ①シャフト炉 (反応炉 100 mm φ×4 000 mm)
- ②原料ホッパー
- ③排出装置
- ④還元ペレット受器
- ⑤秤鉦機
- ⑥貯缶槽
- ⑦サイクロン
- ⑧水洗塔
- ⑨ガス加熱炉 (アルミナボール充填, 加熱温度~1 000°C)
- ⑩サージタンク
- ⑪ガス冷却器
- ⑫循環用コンプレッサー
- ⑬ガスホルダー
- ⑭ガスポンプ
- ⑮圧力・流量・コントロールバルブ
- ⑯CO<sub>2</sub> 洗滌装置

図 5 シャフト炉実験炉設備フローシート

表 11 シャフト炉実験の試験条件と結果

	還元ガス組成 %	還元ガス量 (l/min)	還元温度 (°C)	原料装入量 (kg/hr)	還元率 (%)	ガス利用率 (%)	生産性 (t/m <sup>3</sup> ·day)
第 I 期 連続試験 (45.8.6~45.8.14)	H <sub>2</sub> : 92~98%	500	700	17	69.0	25.1	9.2
	N <sub>2</sub> : 残り	1 000	950	48	100	48.4	28.0
第 II 期 連続試験 (45.9.24~45.10.1)	H <sub>2</sub> : 89.5~97.8	500	700	19.5	69.6	20.5	10.9
	N <sub>2</sub> : 残り	1 000	870	49.5	98.9	47.0	27.8
第 III 期 連続試験 (45.11.25~45.12.3)	H <sub>2</sub> : 70~95	390	700	31.4	85.0	36.4	18.4
	CO: 0~25 N <sub>2</sub> : 残り	880	950	54.5	98.3	57.4	35.2
第 IV 期 連続試験 (46.2.1~46.2.9)	H <sub>2</sub> : 43~95	390	700	30.0	80.0	30.0	13.7
	CO: 0~40 N <sub>2</sub> : 残り	750	950	40.0	99.0	48.0	39.8

[注] 原料ペレット: カイザー, ワイヤラ, サベージリバー  
試験焼成ペレット (塩基度 0, 0.5, 1.0, 1.5)

研究を目的としている。当初諸外国の高温ガス炉の文献を調査することから始め、GGA の高温ガス炉 (ピーチボトム炉とフォート・セント・ブレイン炉) OECD のドラゴン炉およびイギリスのマーク III ガス冷却炉、ドイ

ツの AVR, さらに超高温炉 UHTREX, 熔融塩炉および特殊高温炉について調査し、昭和 44 年 5 月高温ガス炉に関する調査報告をまとめた。原子力製鉄用として 1 000~1 200°C の原子炉出口温度を有する冷却剤が必要

な場合には当面 He ガス冷却高温ガス炉が唯一のものであることを報告した。当時運転中の高温ガス炉の出口温度はピーチボトム炉とドラゴン炉が 750°C, AVR が 850°C であり, UHTREX は運転にいたらず, 計画中の高温ガス冷却発電炉ではいずれも 750°C 前後であった(ロスアラモス研究所の UHTREX はその後運転を開始し 1300°C で運転されているが, これは高温を出すために特殊な設計がなされたもので, この設計を実用炉に適用することは問題がある。)したがって He ガスの原子炉出口温度 1000~1200°C の高温ガス炉を開発するためには実験炉から始めることが必要であり, このような実験炉は当時の状況からみて, 世界の高温ガス炉開発に貢献できるものであり, またわが国の国情を背景に高温ガス炉開発を地道な軌道にのせるのにも有益であると判断した。

この考えに基づき, 設計ワーキンググループを設け実験炉の基本構想を検討した。この実験炉としては被覆粒子燃料を使用する He 冷却高温ガス炉で, 炉心出口温度は 1200°C 程度の極力高温を目標としたもので, 出力は将来の原型炉へのスケールアップファクターと燃料照射ベッドとしての炉心サイズを考慮して, 熱出力 50MW を想定した。また原子力製鉄プロセス開発のためには, 高温のガス-ガス熱交換器が原子炉と同じく重要な実験設備であるので, 炉出力の高温部分約 40% をガス-ガス熱交換器で吸収し, 低温部分を水冷却で除去する冷却方式を提案した。二次系ガス冷却材としては当時十分な資料がないまま炭酸ガスとしたが, その後第 4 小委員会などの検討の結果水素あるいは水素と一酸化炭素の混合ガスを使用する方向に改められた。また建設, 実験の融通性をもたせるため原子炉本体と熱交換器は分離型とし, 鋼製二重圧力容器を使用する方式とした。

その後部会の方針により, 実験炉開発に関しては原研に委ね, 原型炉あるいは実用規模の大型の製鉄用高温ガス炉に関する技術的評価および立地安全性の問題を研究することとなった。原子炉の場合, 同じ 1000°C の出口温度を出す場合でも, 小型でありかつ種々の項目についての実現性のテストを主眼とする実験炉と大型実用炉とでは, その構造, 材料工学的安全施設など大きく異なる面があることから, 大型炉の技術的検討を行なうため, 昭和 45 年 7 月, 製鉄用高温ガス炉評価ワーキンググループを発足させた。同ワーキンググループでは一応 He の出口温度 1000°C の大型炉を想定して検討を進めることとし, コンクリート圧力容器 (PCR) など他で研究されているガス炉の一般的な問題はできるだけ省略し, 高温ガス炉で炉出口温度を現在の 750°C から 1000°C に上げる際の問題点, あるいは還元ガス中の水素がヘリウム側へ拡散する問題のように製鉄用として使用するときに生ずる問題点などに重点を置くよう配慮している。

検討された主要な問題は以下の如くである。現在の被覆粒状燃料は 1400~1450°C 程度までは安定であるがそれ以上の温度では次第に損傷を受ける。したがって He の平均出口温度と燃料最高温度の差を極力小さくするような炉心の核熱設計, 炉心の構造材である黒鉛の照射に対する安定性および二次側の還元ガスから一次 He に拡散透過してくる水素と黒鉛との反応, 耐熱材料および PCR のライナーなどの内張りに使用される断熱材料, 炉の構造, 取替え燃料方式の場合の炉心の耐震構造, He サーキュレーター, チタンスポンジによる水素除去装置, 緊急遮断弁などである, さらに原子炉と製鉄プロセスの結合や溶融鉛, 溶融ナトリウムによる熱交換の検討も進められている。

製鉄用高温ガス炉評価ワーキンググループで, 炉および PCR の耐震構造など安全性に関する問題が次第に解明されてきたので, これを受けて, 昭和 46 年 2 月, 安全性ワーキンググループが設けられ, とくに安全性の問題を取上げて研究することになった。原子炉はその開発の歴史からみても, 安全性には慎重な注意が払われ, 所謂無公害を前提として建設されてきた。開発初期においては原子炉の危険性についての知識の欠如から, 最終的な安全の確保は人口密集地域から遠隔の地に設置することにより保証するという方針がとられた。現在では原子炉に関する知識, 経験が蓄積されるとともに, このような考えから工学的安全施設などにより安全を確保する方向に変わりつつある。原子力発電の場合は送電により発電所は人口密集地域から離すこともできるが, 原子力製鉄の場合は必然的に原子炉を製鉄所内, あるいはコンビナート内の如く, 原子力発電所に比して比較的人口の多い地域に設置せねばならないと予想される。したがって原子炉自身の安全性および立地は非常に重要な問題であり, 対策をたてるべく検討をすすめている。

### 3.6 第 4 小委員会関係 (熱交換器)

前述のように原子力熱エネルギーの製鉄プロセスへの利用に当たっては, 高温 He ガス (原子炉出口 1000°C またはそれ以上) の顕熱を効率的に製鉄側に伝達することが重要であり, その接点部分に当たる熱交換器技術の開発の成否がきわめて大きい。そこで第 4 小委員会としては, まず高温ガス-ガス熱交換器の現状の使用実態の内容調査から着手した。ガスタービン, MHD 発電, 化学プラント, 実用ガス冷却原子炉, また EEC が行なつた原子力製鉄の検討に使用された熱交換器などを対象として検討した。一般に使用温度条件は, 今回部会で目標とされている温度より相当低目であり, 直接的に利用しようものはないが, 一般的な傾向を調査した。

#### (1) 熱交換器形式の検討

第 4 小委員会では, 熱交換器の設計構造の前提となる熱交換の基礎条件——直接型か間接型か——の問題についても検討を続けてきた。直接熱交換型は高温 He の顕熱

を隔壁を通して、直接熱を与えるもので He ガス側への H<sub>2</sub> の透過、炉側の核分裂生成物の漏洩などに対する安全性が確保されるならば明らかに間接型より著しく大きなメリットを持っている。H<sub>2</sub> の透過については H<sub>2</sub> と炉心グラファイト構造との反応  $C + 2H_2 \rightarrow CH_4$  の平衡は高温ほど分解側へ進み、少量の H<sub>2</sub> 洩入であれば実際上は問題とはなりがたいという見方がありうることも検討された。また間接熱交換器は高温 He の顕熱を中間熱媒体を経て与えるもので安全性は保証されるが、2重熱交換に伴う設備上、経済上の不利が大きくなること、間接熱交換の場合の媒体としては、水蒸気、He または溶融鉛が候補として考えうることなどが検討された。この結果、これらの技術的問題点を解明し、開発の方向を究明するため、H<sub>2</sub>透過の実態の把握と除去対策の技術、中間媒体としての水蒸気と He ガスの熱交換に関するテーマなどを包含する実験を施行する必要があると結論した。

## (2) 耐熱金属材料に対する検討

高温熱交換器でもつとも問題となるのは材料選択と、その開発に関するものである。原子力製鉄用熱交換器の金属材料としては 1000°C またはそれ以上の環境下で、長期間所要のクリープ破断強度を持ち、H<sub>2</sub>、CO などの雰囲気の中で、滲炭、部分酸化、H<sub>2</sub>脆化などの現象に対して耐久性があり、また材料加工、溶接性において問題を生じないこと、さらにコスト的にも実現可能性があることなどのむずかしい条件がつく。これに対し第4小委員会では、わが国における各種の耐熱合金に対し、主として高温強度の点から、その適用の可否、問題点の集約を行なった。Fe 基、Ni 基、Co 基の耐熱合金の調査対象材を表 12 に例示した。この検討の結果を一括すると次のようになる。①1000°C までの使用温度に対しては、現在実用中である Fe 基合金のインコロイ 800、Ni 基合金のインコネル 600、ナイモニック 90、インコネル Xなどが対象として考えられ、その使用期間に制限を設けることにより使用可能と考えられる。②HK 40、HP、supertherm などのステンレス系遠心铸造管材は、前項の鍛造用合金材料に比し、対高温特性は良好となるが、小径、薄肉、長尺管の製造方法の開発、延性の低い欠点を設計で補うなどの措置が必要である。③Co 基合金、高融点金属にも有望な合金はあるが、加工性、価格面、実用化までの開発期間などに問題がある。

以上から (1000°C を目標とする) He ガス温度に対応出来る耐熱材料としては、当面、上記 Fe、Ni 基合金を採用し、使用条件については自重と熱応力以外の機械的応力を極力下げ、クリープ問題を低減するよう設計上配慮することと、使用期間に制約を付すことなどの弾力的な考えによつてカバーすべきであると結論した。

## (3) 熱交換器の構造設計に関する検討

高温のガス-ガス熱交換器は、その性能、耐久性、原子炉側よりの安全性の問題や経済性を考慮して、そ

の型式、構造、寸法、材料を決定すべきであるが、高温、高圧、大熱量のみならず、1次側 He ガス中には核分裂生成物が含まれるので、その安全性をも考慮した複雑な構造の大型厚肉の熱交換器となる。前述のごとく、高温用熱交換器では材料強度低下のため、機械的応力と熱応力の和を許容応力以下に抑える必要がある。その結果熱流束の大きさに制限が加わり、この熱流束はクリープ考慮係数と降伏応力との積に依存するなど、高温熱交換器特有の問題があるので、熱応力を考慮した構造の検討などを行なっている。さらに設計上、製作上の問題点については、大型高温の金属管隔壁熱交換器についての実績が全くないので、He-還元ガス熱交換器に近い条件下で使用されるスチームリフォーマにつき調査検討を加えた。反応管は 5~40 気圧、使用温度 700~900°C で、HK 40 の铸造管で一端固定で熱膨張を逃げるよう設計されている。従来の損傷原因の大部分は、炭化物の析出、浸炭腐食、シグマ相形成による脆化、割れ感受性の増大などで H<sub>2</sub> に起因する問題は少ないことがわかった。以上より、熱交換方式、縦型か横型かの選択、管の支持法、熱応力対策、工作、溶接法、断熱材の使用法、耐震性などを考慮する必要があると考えられた。いずれにしても、設計研究、安全性試験、流動伝熱試験を順次スケールアップし、いずれメガワット級の熱交換器を実験原子炉ループに併設して熱交換器としての特性試験を行なうことの必要性が検討された。

## (4) 昭和 46 年度共同実験

上記検討の結果、原子力部会として早急に熱交換器開発の基礎実験を開始すべき必要性をみとめ、昭和 46 年度の共同実験として 17 社 (鉄鋼会社、機器製作メーカー・特殊金属材料メーカー) 参加による実験を準備中である。これには H<sub>2</sub> 透過と除去に関する技術調査と開発、He-水蒸気の熱交換、構造上問題となる熱応力現象の第一次的把握耐熱金属材料の検討などを検討項目としている。

## 3.7 第5小委員会関係 (還元ガス製造)

### 3.7.1 還元ガス製造方式の検討

将来実現されるべき原子力熱エネルギー使用の製鉄プロセスには大量の還元用ガスが必要とされるが、その原料は産業全体、とくに石油精製、燃料ガスおよび石油化学工業との関連において考えられねばならない。第5小委員会においては現存の還元ガス製造技術のみに止まらず、向後数年間に開発完成を予定されている新技術までを含め、産業全体における炭化水素源最適使用の立場から還元用ガス製造プロセスを検討し、原子力熱エネルギー利用の方法およびプロセスシステムの大綱を策定する事を目的としている。

当初は原子力製鉄と還元ガス製造の関連および現存のガス化技術に関する資料蒐集を主としたが、その後原子力製鉄プロセス実現時における炭化水素原料の見通しな

表 12 耐熱合金の成分とクリープ強度 (kg/mm<sup>2</sup>)

合 金 名	化 学 成 分										ク リ ー プ 強 度 (kg/mm <sup>2</sup> )							
	C	Cr	Ni	Co	Mo	W	Ti	Al	そ の 他	900°C			1000°C			1100°C		
										30 000 hr	100 000 hr	30 000 hr	100 000 hr	30 000 hr	100 000 hr	30 000 hr	100 000 hr	30 000 hr
Fe 基合金	Incoloy 800 LCN 155 Incoloy 901 HK 40(C) HP(C) Suprtherm(C)	0.05 0.15 0.05 0.4 0.4 0.5	20 21 14 25 26 26	32 20 43 20 35 35	20	3 6.2 5	2.5	0.5 2.5	0.5 0.25	1Nb, 0.15N 0.1Cu	1.1 2.5 2.5 2.0 2.4 4.5	0.9 1.5 1.5 1.6 1.9 3	0.6 0.8 0.8 1.2 1.4 1.7	0.4 0.5 0.5 0.7 1.0 1.1	0.4 0.5 0.5 0.7 0.3 0.3 0.4			
Ni 基合金	Inconel 600 InconelX Hastelloy X Nimonic 80A " 90 " 100 " 115 Udimet 700 Rene 41 " 62 TA Z-8 Astrolloy	0.04 0.04 0.1 0.1 0.1 0.3 0.2 0.15 0.1 0.05 0.12 0.06	16 15 22 20 20 11 15 15 19 15 6 15	残 " " " " " " " " " " " "	1.5 2.0 18 20 15 18.5 11	9 5 3.5 5.2	16	2.5 2.2 2.5 1.2 4 3.5 3.1 2.5 3.5	0.9 4.5 1.5 4.5 5 4 1.5 1.3 6 4.4	7.2Fe, 0.1Cu 7Fe, 0.9Nb 18.5Fe 1Fe 5Fe 1Fe 1Fe 1Fe 0.01B 22Fe, 2Nb, 0.01B 8Ta, 1Zr, 2.5V 0.03B	1.0 2 2.4 0.8 2 3.5 6.5 6.5 5 2.5 13 11	0.8 1.5 1.9 0.5 1.5 1.7 4.5 4 4 1.5 9 9	0.5 0.2 1.1 0.2 0.4 2.8 1.8 1.2 0.8 5 6	0.3 0.1 0.8 0.1 0.2 2 1 1 0.5 3 5	0.4 0.5 0.5 0.7 0.3 0.3 0.4			
Co 基合金	S816 G32 HS25 J I 570 J I 650	0.4 0.3 0.1 0.2 0.2	20 19 25 20 19	20 11 10 28 27	残 " " " "	4 2	4 1.2 15 6 12	4 0.4 3.8	4Fe, 4Nb 15Fe, 3V 1Fe 2Fe 2Ta, 0.02B	2.4 3 3.3 5 7	1.6 2.3 2.4 3.5 5	0.8 1.1 1.2 2 3	0.5 0.7 0.9 1.4 2	0.2 0.4 0.5 0.7 1 2.5				

どが検討された。

ついで水素 10 000 000 Nm<sup>3</sup>/try プラントを想定して、水素製造コスト計算例、および直接還元プロセスと必要なガス組成の関連について検討が加えられた。

以上の検討に基づき、各種の原料炭化水素および製造プロセスに対して水素製造原価を比較するために簡単な計算方式を設定し、本方式によつて次の各場合に対する原価の比較を行なつた。

- (1) メタンを原料とする場合
  - (a) LNG 利用酸素製造, 部分燃焼
  - (b) 外部加熱水蒸気改質
- (2) ナフサを原料とする場合
  - 外部加熱水蒸気改質
- (3) 原油を原料とする場合
  - (a) 蒸留, 水蒸気改質をふくむオレフィン併産, オフガス, 残油の酸素による部分燃焼方式
  - (b) オレフィン, アセチレン併産
    - 熱媒体加熱プロセス\*
    - 酸素使用単一流動層\*
    - 高温水蒸気アセチレン併産\*
  - (c) 完全ガス化
    - 酸素使用部分燃焼
    - 熱媒体プロセス\*
- (4) 重油を原料とする場合
  - (a) 酸素使用部分燃焼
  - (b) 熱媒体プロセス\*
- (5) 缶残油またはアスファルト
  - (a) 酸素使用部分燃焼
  - (b) 熱媒体プロセス\*

以上の諸方式中、大規模化に当り今後の開発を必要とするものには\* 印を付した。

(6) 以上の検討に基づき第5小委員会は次のような見解に達した。

1) 7~10 年後に予測される原子力発電の普及、石油化学原料用のナフサ需要および燃料油無硫黄化の必要性から、原子力熱エネルギーを利用する直接還元のために大量・安定に供給できる炭化水素資源としては、液化メタンおよび重質油(原油、重油、減圧缶残油など)が適する。

2) 原子力製鉄用の還元ガス原料としては唯一のものに限らず、液化メタンおよび重質油の両者を併用することが、資源産出の経済側の忒威を封ずるために必要である。

3) メタン、ナフサを原料とする場合は外部加熱型の水蒸気改質プロセスが技術的に完成しているが、改質炉の加熱方式を高温の He に代替するためには、まず反応管壁を通しての水素透過の現象が明らかになつた上で設計および開発研究を進める必要がある。また、高温 He の熱エネルギーを炭化水素に与えるために熱媒体、たと

えば水蒸気、鉛などを利用する場合の概念設計を行なう必要がある。

4) 原油、重油、減圧缶残油などの重質油は酸素を用いる部分燃焼によつてガス化されるが、酸素コストのために製造原価を小さくすることができない。1 400°C 程度の高温ガスが発生するのでそのまま直接還元反応装置に送入できる有利性はあるが、これはほとんど硫黄の存在しない高価な重質油に限られる。

5) 上述の理由により原子力製鉄のプロジェクト進行に先だつて、重質油(原油、重油、減圧缶残油など)を原料とし、酸素を用いることなくガス化・脱硫反応を行なわせ、しかも原子力熱エネルギーを大量効果的に利用しうるプロセスの開発研究を行なうことが肝要である。

各種重質油のうち技術的に最も処理しにくいものは減圧缶残油であるため、これについてのガス化技術を完成しておけば原油、重油に対してはそのまま容易に適用できる。

6) 公害予防のため燃料油中の硫黄含有量は低い値に押える必要性が増加し、高硫黄含量の減圧缶残油は将来有力な低廉炭化水素源とならう。ガス化反応装置はそのまま水添脱硫装置であるから、原油中の硫黄の大半を減圧残油に集中させ、これを大量に使用して発生する還元ガスから硫化水素の形で硫黄を吸収除去することができれば、公害予防と硫黄の資源化が一挙にできることになる。すなわちコスト高の原因となる重質油からの脱硫プロセスを使用する必要がなくなり、石油資源全体としての無硫黄化を低コストで行ないうることになる。

#### 3.7.2 昭和 46 年度共同実験

以上の観点から第5小委員会としては第一段階として「重質油からの還元ガス製造プロセスの開発研究」が重要であるとの結論に達しそれに基づき原子力部会は昭和46年度の共同実験として12社(鉄鋼メーカー、機器製作メーカー、エンジニアリング会社)参加による還元ガス製造に関する実験を準備中である。この共同実験は熱媒体循環方式による重質油(特に減圧缶残油を対象とする)からの還元ガス製造技術の開発を目指しているものである。

### 4. 海外における研究活動

海外における原子力エネルギーの製鉄工程への利用の開発研究は、とくに西独において、Aachen 工大、Jülich 研究所を中心にもつとも積極的に進められている。米国では、還元鉄製造・電炉製鋼の方式を、今後高炉一転炉方式と相補完させるべきものとして、技術開発とその実用化に意欲的な動きが見られる。原子力熱エネルギーの利用は、その次のステップとならうという見解の模様である。

#### 4.1 EEC における研究

EEC では、1969 年1月、Aachen 工大 Prof. H.

表 13 EEC における原子力製鉄の研究の概要

研究担当 アーヘン工大 総合調整  
 BBK (西独) 原子炉, 発電設備  
 SOCIA (仏) 中開ループ (含熱変)  
 GSM (伊) メタン還元プロセス, 海綿鉄, 全般設備計画

項目	ガス還元法	備考
原子力製鉄基本方式	直接製鉄—電炉製鋼方式 (CH <sub>4</sub> 改質による流動層 H <sub>2</sub> 還元)	
製鉄所規模	溶鋼生産規模 360万 t / y (日産 1 万 t) 還元鉄工場, 製鋼工場 (電炉—連続铸造) 成品工場 (Strip mill, Plate mill)	360万 t 生産規模は経済的に適正規模と認識 コンビナートとして Fe-alloy (3 万 t/y) Al (10万 t / y) 生産系列を考慮
原子炉関係	熱出力 1 923 MWt He 温度 入口 366°C, 出口 900°C He 圧力 40 気圧 燃料温度 表面 1 170°C, 中心 1 520°C	PCRV 構造 熱交換器等内蔵せず 稼動時間 8 000 hr / y 制御棒 91本
エネルギー関係バランス	熱出力 1 923 MWt 内訳 プロセス用 648 MWt 34% 発電用 1 275 MWt 66% 発電容量 540 MWe* スチーム, タービン方式 発電熱効率 42% 還元ガス H <sub>2</sub> , 圧力 21 気圧	* 電力内訳 30万 kW 製鉄所内 (内電炉用 20万 kW) 24万 kW コンビナート (Fe-alloy, Al) 用
鉄鉱石還元	流動層炉 (4 段) 6 基 各 1 800 t / D 還元ガス: H <sub>2</sub> , 炉生産性 3.5 t / m <sup>3</sup> · day Fe ore: T. Fe. 67% gangue 4%, 粒度 0.3~1.5 mm 成品還元鉄 M. Fe 92.16%	
電炉製鋼	電気炉 200T / ch 8 基 (6 基稼動) UHP, 製鋼能率 75 t / hr 配合率 還元鉄 80%, 屑鉄 20% 電力原単位 cold chage 550~580 kWh / t hot chage 450 "	鉄石還元炉と電気炉 (各実働炉) は 1 基づつ series に連結した操業を行なう。
溶鋼製造コスト比較	溶鋼製造コスト 41.224 \$ / t 高炉…L/D 方式コスト 45.583 \$ / t ロータリーキルン…電炉方式コスト 50.521 \$ / t	エネルギー単価 原子力熱エネルギー 0.4円 / 1 000 kcal 原子力電力エネルギー 1.15円 / kWh (火力 3.6円 / kWh) 天然ガス 4.9円 / Nm <sup>3</sup>

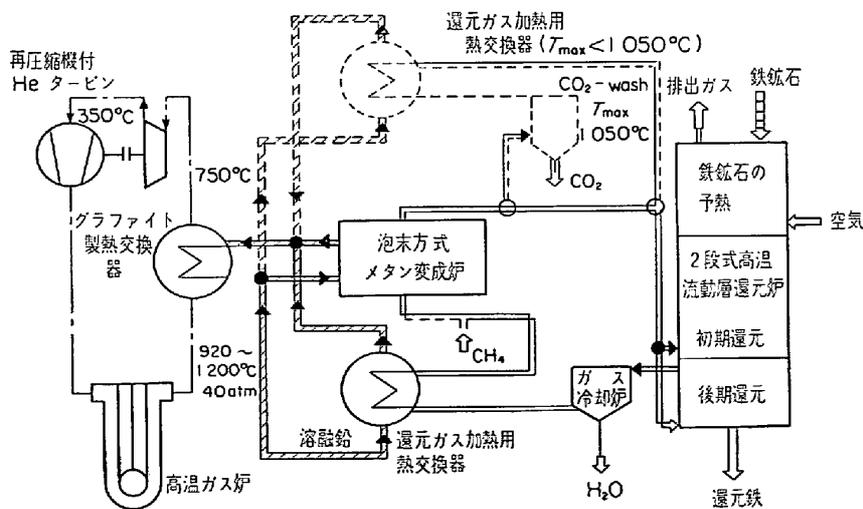


図 6 原子力熱エネルギーを利用してメタンから還元ガスを製造する  
 アーヘン工大方式製鉄プロセス

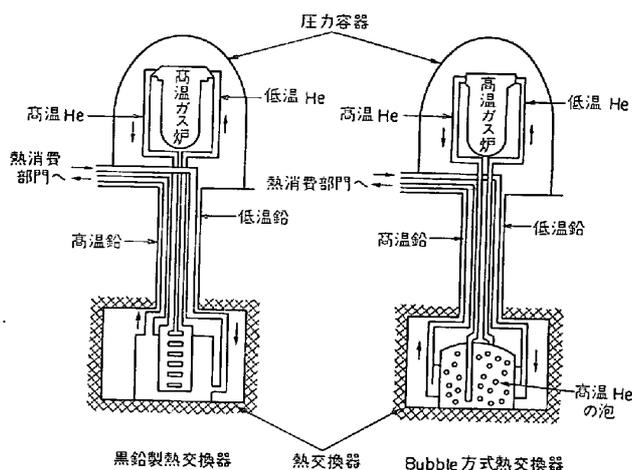
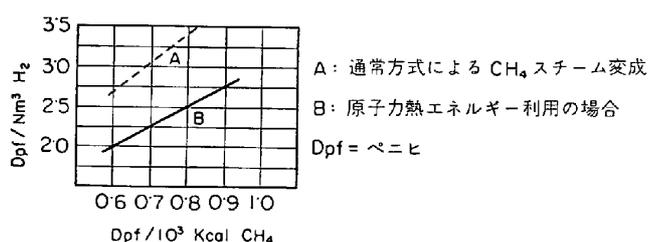


図 7 溶融鉛による熱交換法の表示

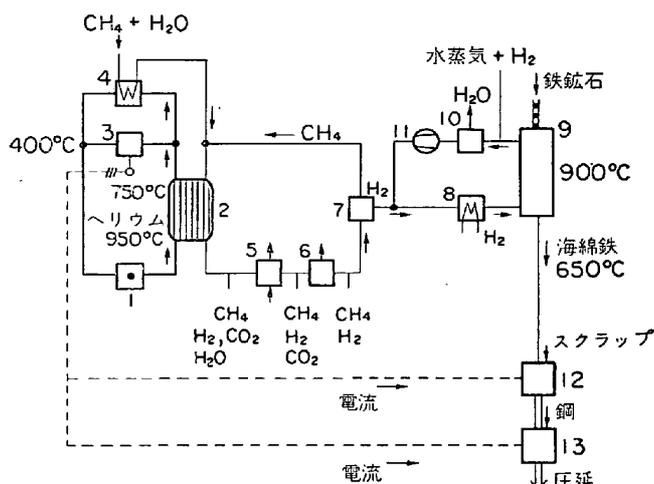
表 14 Jülich 原子力研究所の検討による  
原子力製鉄プラント

生産規模と生産方式	粗鋼年産 620万 t, CH <sub>4</sub> 源による H <sub>2</sub> 直接還元一電炉製鋼
原子炉熱出力	3 000MWt
熱エネルギー利用 電気	1 300 〃 43% 1 700 〃 57% (製鉄所内使用)
He ガス温度	HTGR 出口 950°C
還元および還元炉	H <sub>2</sub> ガス予熱 1 000°C シャフト炉 (900°C)
製 鋼	電炉 (80% 還元鉄 20% スクラップ) 525kWh/t

CH<sub>4</sub> 分解ガス化のコスト -Jülich-  
(原子力エネルギー使用の有利性)



SCHENCK および Prof. W. WENZEL を中心に、EEC 域内の関係機関の共同により、年産 360万 t 規模の原子力製鉄一貫体制を想定して、1 年間にわたる研究結果を発表している。ここでは高温ガス炉を中核に、直接製鉄一電炉製鋼のプロセスモデルを対象に、総合一貫的に、技術、設備、コストの全般にわたり検討を加えており、部分的にいくつかの問題点を残しているとはいえ、その業績は高く評価されるべきものである。(表 13 参照)  
昨年 9 月東京における鉄鋼科学技術国際会議において Prof. W. WENZEL はこの EEC パターンを修正発展させたひとつのパターンを発表している。図 6 に示すこの



1. 原子炉 (3 000 MWt)
2. 分解反応炉 CH<sub>4</sub> + H<sub>2</sub>O → CO + 3H<sub>2</sub> - 49 kcal/mol
3. ガスタービン施設 (or スチームタービン)
4. 熱交換器
5. 変換 CO + H<sub>2</sub>O → CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>
6. CO<sub>2</sub> 洗滌
7. メタン分離
8. 水素予熱 20°C → 1 000°C
9. 還元炉 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 3H<sub>2</sub> → 2Fe + 3H<sub>2</sub>O - 195 kcal/kg Fe
10. H<sub>2</sub>O 凝縮
11. H<sub>2</sub> 圧縮機
12. 製 鋼
13. 圧 延

図 8 Jülich 原子力研究所により検討された  
原子力製鉄プラントフローシート

提案は、中間熱媒体として溶融鉛を採用、とくに溶融鉛槽中における He ガスのバブリング (bubbling) により隔壁を不要とする熱交換方式の開発の有意義性を強調している (図 7)。

#### 4.2 Jülich 研究所における研究

Jülich 研究所では上述の EEC の研究とは別個に、粗鋼年産 620万 t 規模の原子力製鉄プラントの経済性評価を行なっている。表 14 および図 8 に示すごとく、直接還元一電炉方式のモデルを対象とし、現行高炉一転炉プロセスとの経済性の比較を行ない、原子力製鉄の有利性と、とくに原子力熱エネルギーを利用しての還元ガス製造のメリットを強調している。

### 5. 結 語

以上原子力製鉄の技術開発に関し、問題意識、フィロソフィといったものについて冒頭考察し、ついで鉄鋼協会原子力部会における共同研究検討の経過を中心に説明を加えてきた。ここに結語として当面する問題を要約し、今後の開発の進め方について所見の一端を述べる。

(1) 原子力エネルギー導入を顧慮すべき必然性—エネルギー最多消費部門である製鉄業として、原料炭以下の現行エネルギー需給と使用実態面に、公害環境対策の課題も加わり問題が深刻化しエスカレートしつつある中に登場した新エネルギー源としての原子力エネルギー利用の技術的方途を研究すべきことは当然である。殊に

エネルギーの全般にわたり他国に比し格段に劣悪条件中におかれているわが国として、その必然性は最も大きい。原料炭の問題など現実局面の変転に一喜一憂する態度でなく、さらに高い次元、広い観点から行なうべき開発テーマであることを十分に理解することが肝要である。

(2) 技術開発の特質と要望される体制—前述したように最終的な原子力製鉄の標準方式と目される直接還元、電炉製鋼方式は、原子力エネルギーの積極導入には適しているとはいえ、現状では高炉—転炉の主流方式に比較し、生産性、コスト面で全く太刀打ちしがたい条件下にある。原料炭のコストアップなど、直接還元を相対的に有利にする要素はあるが、これに安価豊富を期待される原子力エネルギー（熱および電力）のバックアップが加わり、どの程度の比較競争力を持ちうるものかは今後の検討に待たねばならない。また生産設備単位の大規模化、能率化に対しては抜本的な開発が実現されることが肝要である。前述のように、開発の対象と局面の多様性と広汎にわたることから、組織的で効率のよい開発体制と運営がはからねばならない。

(3) 高温ガス実験炉の意義—原子炉々型として He ガス冷却高温ガス炉方式が適格であり、他国とエネルギー事情を異にするわが国として、この炉型の開発に対し独自の推進を図るべきものである。He ガスの、それぞれ高温、中温、低温域を製鉄プロセス、発電、化学工業、一般蒸気や海水淡水化など、いわゆる多目的利用を実現すれば、原子力エネルギー利用の総合的経済性をいちじるしく高めることが可能である。この観点から、日本原子力研究所で計画中の 5 万 KWh の実験炉は、原子炉々型の技術開発と多目的利用技術開発の両面から、極

力早期に実現されるよう強く要望するものである。この実験炉段階を目途として、原子力製鉄の技術開発の道は大きく拓かれることと期待するものである。

(4) 原子力製鉄実現に至る道の研究の必要性—前述した原子力製鉄標準プロセスの実現、さらには高温ガス炉を中核とする多目的コンビナート形態などは、いわば最終的ビジョンであり、現実問題としては、これへの移行段階における中間体系のあり方、あるいは現行製鉄方式の枠中における原子力エネルギー導入と調和の可能性の追及などについて真剣に研究を行なうことが必要である。このような現実措置は、原子力エネルギーの利用の突破口を拓くべきものであり、最終的なビジョン実現のアプローチを、より現実的ならしめるものであろう。またここで強調しておきたいことは、原子力製鉄の技術開発への挑戦を通じて、副次的に、現状技術水準を破る諸種の革新的と称すべき技術開発の成果が期待されるという点である。新製鉄技術方式の開発、超高温材料の開発、産業界の発展に共通に貢献する新熱交換方式、新しい還元ガス製造技術の展開など、開発と応用の可能性は極めて広汎である。特殊鋼電炉メーカーを主とする主原料対策としての還元鉄技術の推進の意義も大きいと見られる。

(5) 以上のごとく原子力エネルギー利用の技術開発は、単に鉄鋼業の範囲にとどまらず、ひろく将来の産業構造の問題に関連するところが大きい。また開発規模が大きく、多方面にわたること、多額の開発資金を要することから考え、鉄鋼業としては、関係機関、関連産業分野との密接な協力関係のもとに、効率的総合開発の推進をつよく要望してやまないものである。