

日本製造業における競争力の源泉

素材関連技術を中心とした一考察

1993 年 6 月

科学技術庁 科学技術政策研究所

第 1 研 究 グ ル ー プ

永 田 晃 也
菊 池 純 一¹⁾
森 俊 介²⁾

- 1) 客員研究官、青山学院女子短期大学助教授
2) 客員研究官、東京理科大学助教授

Source of Japan's Competitiveness in manufacturing

; One Approach on the Material Technology

June 1993

Akiya NAGATA, Jun-ichi KIKUCHI, and Shunsuke MORI

1st Theory-Oriented Research Group

National Institute of Science and Technology Policy (NISTEP)

Science and Technology Agency

目 次

	頁
1. 序説	1
1. 1. 研究の背景と目的	1
1. 2. 作業仮説と対象業種の選定－素材関連技術の本位機能	2
2. 鉄鋼技術の現状と課題	5
2. 1. 日本鉄鋼業の国際競争力	5
2. 2. 日本鉄鋼業の成長過程	7
2. 3. 研究開発投資と設備投資	9
2. 4. 鉄鋼業の技術的成果	12
2. 5. 競争力優位の背景	18
2. 6. 日本鉄鋼業の技術課題	19
3. セメント産業技術の現状と課題	23
3. 1. セメント産業の性質	23
3. 2. セメント産業の技術限界	25
3. 3. セメント産業の基盤的役割と今後の課題	29
3. 4. 技術革新の活性化方策	31
4. 半導体技術の展開	33
4. 1. 半導体微細加工技術の進歩	33
4. 2. 半導体デバイスの製造プロセスと技術課題	37
4. 3. 微細化と構造の問題	40
4. 4. 産業における半導体デバイス技術	45
5. 総括	49

1. 序説

1. 1. 研究の背景と目的

戦後日本は、優れた外国技術を導入するとともに、自主技術開発に積極的な投資を行うことにより、驚異的な復興と成長を経て、今日の経済大国、技術大国と称される地位を確立してきた。日本の産業が既に十分な国際競争力を有するという事は、1992年末の時点で1,200億ドルを超えた巨額の貿易黒字の存在によって周知とされている。

しかし金融経済のシステムからすれば、特定の国に資金過剰が集中し、その状況が恒常化することは、信用創造上のリスク増大につながり、世界金融システムの脆弱性が増していることを意味する。同時にケインジアン理論枠組みからすれば、財・サービスの消費・投資が偏在して資源の利用効率が悪化していることを意味する。巨額の貿易黒字とは、金融リスクを増加させ、資源利用効率を悪化させていると判定するシグナルでもある。

日本の貿易収支をゼロに近付けるように操作することは、規模的にみても、輸出輸入の財構成からみても、かなり困難である。もし、短期的に現在の貿易黒字を整理することになれば、その歪みは単に国際為替に止まらず、マクロ経済の成長に大きな影響を及ぼすことになる。貿易収支は、自由貿易のスタイルを維持しながら、時間をかけて調整せざるを得ないのである。

もともと貿易黒字の発生は輸出・輸入双方の事情に依存するものであるが、一人勝ちが続いたことにより、その主たる原因を日本の特殊性に求める傾向が強まりつつある。競争力を持つことは自由貿易のルールに則る以上、プレイヤーの鉄則である。しかし、その競争力に「公正な」という形容詞が付けられると、不公正さを取り除くことが貿易のインバランスを改善する唯一の方法のように考えられてしまう。そして「不公正さ」の内容は、始めは産業組織の制度・慣行などの特性に集中したが、次第に日本の産業構造を支える技術力に目が向けられるようになり、知的所有権の所在問題に絡んで「基礎研究ただ乗り論」などが提起されるに至っている。

一方、このようなマクロ政策論議を背景として、日本の競争力に独自の「源泉」を見出だそうとするアカデミックな関心も、国際的に増大している。自国の産業競争力の衰退を分析する過程で日本の産業を比較分析の対象として取り上げたもの[1][2]、高い競争力を有する日本の特定産業について組織論的・戦略論的分析を行ったもの[3][4]など、既に多くの先行研究が著されているが、それらに共通する認識は、日本企業の技術開発力ないし

製品開発力における独自のパフォーマンスを、マクロ的な国際競争力の源泉としてみている点である。また国の競争優位を決定する要因としては、安い労働力や豊富な資本の存在よりも、むしろ技術革新を効率的に生み出し、その効果を産業間に波及させるシステムを内包していることが重要であるというM. Porter[5] の指摘は、技術革新過程に関わる幅広い研究者の間で支持されている。

本研究は上記の認識を継承しつつ、日本製造業の競争力に対する国際理解の一助とするため、その源泉と目される技術開発力のパフォーマンスに焦点をおき、内側からみた日本的特質の分析を行うことを目的とする。

1. 2. 作業仮説と対象業種の選定

ー素材関連技術の本位機能ー

前述のように、日本製造業の競争力の源泉を技術開発力に求めたものとして、既に多数の先行研究が挙げられる。そこで我々は文献調査を踏まえた上で、作業仮説に基づく対象業種の特定化を行うこととした。

そもそも国際競争力を有する製造業種を定義すること自体、多くの論点を孕む問題であるが、一例としてPorterは前掲書の中で『国連国際貿易統計年報』を始めとする各種データに基づいて、8ヶ国につき競争優位にある業種のクラスターを作成している。この結果、日本については、原材料・金属、石油・化学、半導体・コンピュータなどの「川上産業」、輸送（自動車製造業を含む）、通信などの「支援」産業、及び食品、繊維などの最終消費財産業が抽出されている。

これら業種の中で従来[3][4]等で詳細に研究されてきたのは、かつてPeter F. Druckerによって「産業の中の産業」と称された自動車製造業である。しかし、我々は以下の作業仮説に基づき、Porterの言う「川上産業」、すなわち半導体などを含む広義の素材産業を、「製造業の中の製造業」として取り上げることにした。

もし技術がマクロ的な競争力の源泉になっているとすれば、経済システムの中には、いくつかの技術が「源泉」として点にあるいは集積し、その周囲には、あたかも深海の鉱泉の周りにコロニーができるごとく、産業群が形成されている筈である。そして、各々の源泉に起因して成長した産業群が相互に強い依存関係を築いているとすれば、技術はかつての「米」のように、財・サービスの経済的価値を決定し、それを配分するための価値基準として機能しているとみることができる。例えて言えば、今日の経済システムの中では、

技術が本位機能を果たしているのである。そして、かかる本位機能を有する技術は、製造業種間の産業連関の最上流工程に位置する素材産業、就中これまで産業の「米」と称されてきた鉄鋼や半導体の分野に存在するであろう。

超電導技術であろうと、ライフサイエンス分野やマイクロマシンの分野であろうと、関連する素材の性質がその後の技術的發展を左右する。どのような性質を持った素材が手に入るか、その素材をどのように利用できるか、先端的なフロンティアの探索は素材開発にかかっていると言える[6][7]。また「リーン生産方式」として世界的に知られるに至った日本の自動車生産システムと言えども、安定価格で高品質の鋼板がジャスト・イン・タイム納入されるという前提が崩れれば、今日の国際競争力を維持し得ないであろう。

ところで、近年における米国の科学技術政策は、自国の製造業における国際競争力の衰退に対する反省の上に立って、素材関連技術の重要性を明確に意識したものとして体系化されつつある。これまで米国は、財政政策、金融政策を中心とした政策を、自由競争の結果を調整する上での基本にしてきた。しかし、財・サービスの販売競争以前の競争に対処するためには、歴史的にみて後発国であった日本などが採択してきた産業政策を見直さざるを得なくなった。そこで強調され始めたのが、「先端素材産業の内部化」である。先端的科学活動から創造された研究成果を製造段階と結び付けるための施策、軍事関連部門からスピルオーバーを受ける民生産業部門の育成施策、研究関連素材・試験材の国内調達施策などは、その根底に「ハイテク・マテリアルズ」を“National Critical Technology”の最優先課題とする施策を置き、将来の米国経済を支える素材産業を積極的に育成しようとする強い意思を窺わせている。まさに、米国はハイテク・マテリアルズに基づく一種の「傾斜生産方式」を採択したのである。

米国の産業政策では、素材開発の「先端的側面」が強調されている。しかし、このような傾斜性はうまく作動するのであろうか。新素材開発初期の着眼は研究者の個人的なマインドに依存することが大きい。研究開発のステップを積み上げていく局面においては、むしろ重要な要素は在来素材の改良改善の際に蓄積された組織的技能であり、在来素材の取扱いに係わるシステミックな技術・ノウハウであろう。つまり新素材開発を産業に結び付けることの成否は、在来素材に係わる組織的技能(Institutional Skill) 及びSystemic Technology の水準に依存すると考えられる。

ここで言う組織的技能(Institutional Skill) とは、研究開発段階及び製造段階において、組織体の内部で活動している人々が共有できる技能（暗黙知）を意味する。またSys-

temic Technologyとは、運輸・交通、空間利用などを含む多種多様な技術の総合力に支えられている分野を総称する概念であるが、素材のようにシステムを構成する部分と全体の相互作用を意識して開発しなければならないような技術分野も含まれる。これらの概念が示唆するところは、素材開発の「先端的」側面よりも、むしろ在来素材産業の中に将来の競争力の源泉となるダイナミズムが隠されているということである。我々は、この点を考察するきっかけを作るために、対象業種として鉄鋼業と半導体産業の他に、典型的な在来型素材産業であるセメント産業を取り上げることとした。

本研究を進める過程で、我々は素材関連技術が日本製造業の競争力を支える主要な源泉の一つであることを明確にすると同時に、その技術がいまや限界に直面しつつあることに気付かされた。続く第2章では鉄鋼業、第3章ではセメント産業について、その競争力の現状を分析するとともに、課題としての技術限界を提示する。また第4章では、これらの業種とは異なる技術成長過程を辿りつつある半導体産業を取り上げる。

(参考文献)

- [1] John Zysman and Laura Tyson “American Industry in International Competition” 1983 (邦訳『日米産業競争の潮流』)
- [2] Michael L. Dertouzos et al. “Made in America ” 1989 (邦訳『Made in America 』)
- [3] Daniel Roos et al. “The Machine that changed the World” 1990
(邦訳『リーン生産方式が世界の自動車産業をこう変える』)
- [4] Kim B. Clark and Takahiro Fujimoto “Product Development Performance ” 1991
(邦訳『製品開発力』)
- [5] Michael E. Porter “The Competitive Advantage of Nations” 1990
(邦訳『国の競争優位』)
- [6] 菊池純一「技術本位制時代の研究開発」
(オプトエレクトロニクス社『R & Dフォーラム』No. 2, 1991)
- [7] 菊池純一「2010年未来技術がもたらすビジネスチャンス」
(NHK編『情報通信』1991)
- [8] 永田晃也「過渡期を迎えた民間の研究開発投資」
(エコノミスト臨時増刊『図説日本経済1993』)

2. 鉄鋼技術の現状と課題

本章では、国際競争力を有する代表的な素材産業として鉄鋼業を取り上げ、その技術的な現状と課題を分析する。

はじめに日本鉄鋼業の国際競争力を概観し、現在の競争力を構築せしめるに至った技術的な成長過程を分析する。また果敢な研究開発投資と設備投資が生み出してきた省力化、省エネルギー化、高付加価値化などの技術進歩の現状を分析すると同時に、こうした技術進歩が経済的な限界に直面しつつある点を指摘する。

2. 1. 日本鉄鋼業の国際競争力

まず日本鉄鋼業の国際競争力を把握するために、その生産高及び輸出量の世界的な位置づけをみる。表2-1に示すように、1990年時点における日本鉄鋼業の粗鋼生産高は1億1,034万トンであり、世界70カ国計の14.3%を占めるに至っている。これは旧ソ連に次いで第2位であるが、水口編[6]によれば、旧ソ連は経済混迷によって91年の生産高を1億3,300万トン程度に激減させており、しかも製品歩留りが日本より20%程度劣っているとみられるため、製品ベースでみると旧ソ連と日本とは現状でほぼ同程度と評価できる。

1989年の我が国の鋼材輸出量は1,988万トンで、世界第1位となっている。日本と同水準にあるドイツの場合、鋼材輸出はEC域内の取引が多く、域外輸出は全輸出量の3分の1に過ぎないため、世界的な規模でみると日本が最大の鉄鋼供給基地としての地位を占めていると評価できる。

しかし、このような製品の輸出量は交易条件に伴って大幅に変動する場合がある。例えば日本の鋼材輸出量は、80年代後半の円高以降に半減している。そこで鉄鋼業の国際競争力を生産ポテンシャルの観点から比較するために、しばしば大型高炉設置基数などの指標が用いられる。因みに1990年現在の我が国における炉内面積2,000m³以上の大型高炉設置基数は34基で、世界第1位の保有数となっており、旧ソ連の30基、ドイツの8基、米国の7基を大幅に上回っている（日本鉄鋼連盟[1]）。

また日本鉄鋼業は労働生産性の観点からみても、顕著な競争力を示している。日本生産性本部の労働生産性指数によれば、1988年時点での日本の製造業全体の労働生産性を100とすると、米国の製造業は124で世界的に優位な水準にある。しかし鉄鋼業については、日本の労働生産性は80年代を通じて米国の1.2倍前後の水準を推移しているのである。

表2-1. 世界の鉄鋼生産及び輸出入シェア-1990年

(単位: 万トン)

			粗鋼生産	シェア %	国民1人 当りkg/人	輸 出 量	シェア %	輸 入 量	シェア %
先進 製鉄 国 12 カ 国	主 要 8 カ 国	日 本	11,034	14.3	893	1,988	12.1	725	4.2
		ア メ リ カ	8,866	11.5	355	415	2.5	1,571	9.2
		西 ド イ ツ	3,843	5.0	608	1,988 (628)	12.1	1,511 (324)	8.9
		イ タ リ ア	2,544	3.3	441	772 (217)	4.7	1,024 (335)	6.0
		フ ラ ン ス	1,902	2.5	337	1,149 (281)	7.0	990 (56)	5.8
		イ ギ リ ス	1,791	2.3	312	674 (207)	4.1	550 (95)	3.2
		ベ ネ ル ッ ク ス	1,495	1.9	516	1,401 (284)	8.5	470 (65)	2.8
		カ ナ ダ	1,210	1.6	456	399	2.4	263	1.5
	計		32,685	42.5	507	8,786 (4,419)	53.3	7,104 (3,434)	41.6
合 計		35,209	45.7	489	9,935 (5,311)	60.3	7,898 (3,773)	46.3	
中進 製鉄 国 8 カ 国	主 要 4 カ 国	韓 国	2,313	3.0	541	735	4.5	380	2.2
		ブ ラ ジ ル	2,058	2.7	137	1,077	6.5	20	0.1
		イ ン ド	1,487	1.9	18	22	0.1	195	1.1
		ス ベ イ ド ン	1,271	1.7	326	357 (152)	2.2	317 (45)	1.9
	計		7,129	9.3	67	2,191 (1,986)	13.3	912 (640)	5.3
合 計		9,653	12.5	79	2,710 (2,505)	16.4	1,624 (1,352)	9.5	
旧共 産圏 8 カ 国	主 要 5 カ 国	ソ 連 国	15,393	20.0	532	527	3.2	1,020	6.0
		中 国	6,724	8.7	59	50	0.3	700	4.1
		チェコスロバキア	1,481	1.9	946	380	2.3	33	0.2
		ポ ー ラ ン ド	1,355	1.8	355	240	1.5	120	0.7
		ル ー マ ニ ア	1,100	1.4	474	300	1.8	120	0.7
	計		26,053	33.9	173	1,497	9.1	1,993	11.7
合 計		27,552	35.8	177	2,033	12.3	2,570	15.1	
その他製鉄国42カ国		4,548	5.9	40	1,799 (1,648)	10.9	4,972 (4,611)	29.1	
世界70カ国計		76,962	100.0	150	16,477 (11,497)	100.0	17,064 (12,306)	100.0	

出典：水口弘一編『日本企業の競争力』1992年

資料：国際鉄鋼協会（IISI）統計、EC, IRON & STEEL

注1. 輸出入は鋼材ベース（1989年）。

2. ()内はEC域内を除く数値。

さらに日本鉄鋼業の技術的な優位性は、技術貿易収支の観点からも検証することができる。我が国の技術貿易は戦後一貫して入超傾向にあり、近年漸く収支が均衡するに至っている。総務庁『科学技術研究調査』によれば、1991年における産業全体の技術貿易収支比（輸入額／輸出額）は0.94である。一方、鉄鋼業の貿易収支は早くから出超を記録しており、91年の収支比は1.77となっている。

産業の国際競争力を厳密に定義し、定量的に把握することは困難な課題である。しかし、日本の鉄鋼業に関しては、以上のように競争力の指標と考えられる様々なデータが、その優位性を示しているのである。

2. 2. 日本鉄鋼業の成長過程

では、このような日本鉄鋼業の国際競争力は、どのように形成されてきたのであろうか。その軌跡を簡単に辿っておこう。

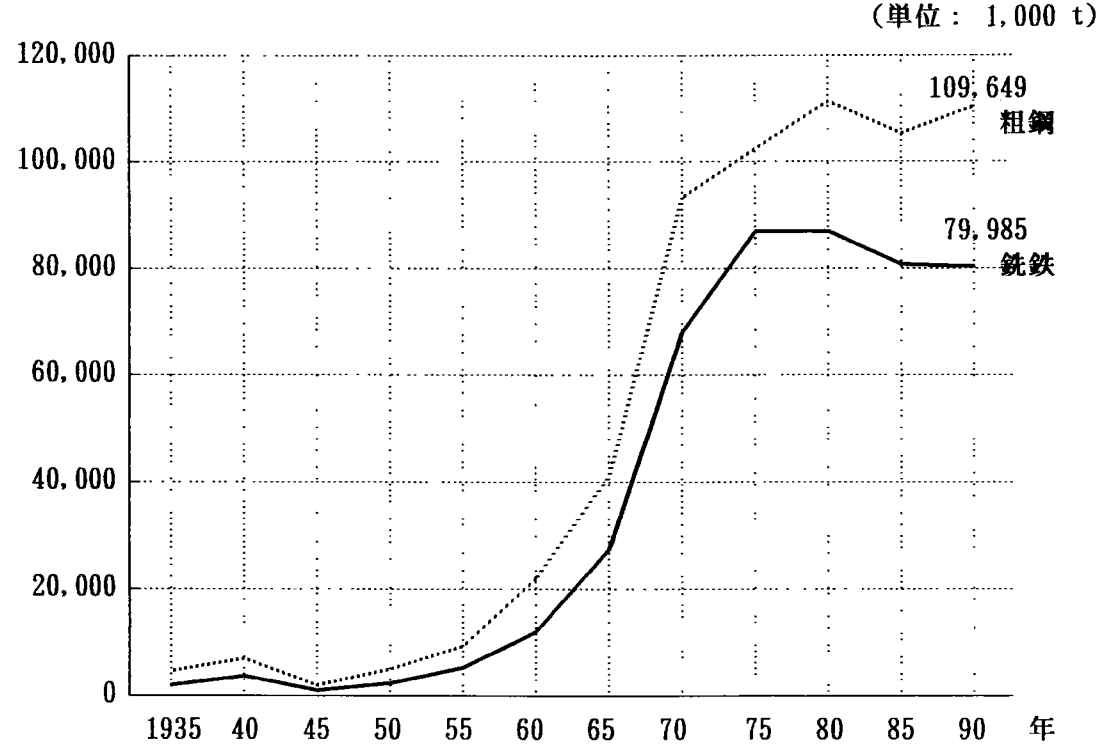
図2-1に示すように、戦後日本の鉄鋼業は200万トン程度の粗鋼生産から出発して、高度経済成長期には年率30%を上回る急激な産出量の増加を達成した。1970年代の粗鋼生産は1億トンの大台に上り、その後いわゆる鉄鋼不況に直面しつつも、1980年には約1億1,140万トンで始めて自由世界第1位に達した。80年代後半以降は対米輸出自主規制などの影響を受けて粗鋼生産は停滞しているものの、相変わらず世界的に高い生産規模を維持していることは、先にみた通りである。今日の日本鉄鋼業は、国内的には主として建設業や自動車をはじめとする各種機械産業などに膨大な素材を供給する、文字通りの「基盤」的な産業として成熟したと言えるであろう（表2-2）。

戦後日本鉄鋼業が臨海一貫製鉄所方式を展開し、急激な生産増加を達成していく過程で、エポックを画する重要な技術革新が相次いでみられた。製鋼プロセスにおけるLD転炉（純酸素上吹き転炉）法の導入、連続鋳造法の導入などである。これらによって、エネルギー及びコスト面での生産効率が著しく向上した。

70年代にはコンピュータ・システム技術の導入などにより、工程の自動化及び高速化が進み、80年代以降は製品の高級化の要請に対応して、高張力鋼板などの高付加価値製品の開発が進展している。

こうした技術革新を生み出してきたものは、鉄鋼企業の積極的な研究開発投資と設備投資に他ならない。以下では80年代以降を中心に、鉄鋼業の投資状況を概観する。

図 2－1．日本における鉄鋼生産の長期的推移



資料：日本鉄鋼連盟『日本の鉄鋼業』1992年版

表 2－2．用途別鉄鋼受注量の推移

(単位：千トン)

用途部門別	年	85	86	87	88	89	90	91
建設用		11,691	12,530	14,634	16,076	17,612	19,165	18,678
産業機械用		2,678	2,235	2,478	3,047	3,466	3,828	3,617
電気機械用		2,627	2,318	2,452	2,917	3,145	3,252	3,378
家庭用・業務用機器		897	780	831	1,043	1,185	1,201	1,150
船舶用		3,317	2,114	1,815	1,995	2,432	2,734	2,746
自動車用		12,038	11,146	11,646	13,287	14,350	15,050	14,741
鉄道車両用		66	57	58	75	76	80	77
容器用		2,071	1,936	2,088	2,156	2,326	2,386	2,407
次工程用		6,406	5,982	6,288	7,201	7,437	7,644	7,541
その他		474	392	433	494	502	492	461
販売業者向		17,052	17,281	19,765	21,248	23,706	25,580	24,412
国内向合計		59,318	56,773	62,487	69,539	76,238	81,412	79,207

資料：日本鉄鋼連盟『日本の鉄鋼業』1992年版

2. 3. 研究開発投資と設備投資

(1) 研究開発投資

総務庁『科学技術研究調査』のデータによれば、1991年における鉄鋼業の研究開発支出は総額約 3,600億 5,400万円となっている。鉄鋼業の1社平均研究開発費は24億 8,300万円、製造業全体の1社平均 7億 2,200万円を大幅に上回っているが、対売上高比率は 2.8%で製造業全体の平均 3.7%よりも低い水準にある。また対営業利益高も41.2%で製造業平均の80.6%を下回っていることから、鉄鋼業の研究開発投資は大規模ではあるが、利益再投資の観点からみると、日本製造業の中ではむしろ低レベルにあることが分かる。

しかし、図2-2に示すように、日本鉄鋼業の研究開発投資を諸外国の同業種と比較すると、1社平均、対売上高比率のいずれの指標をとっても、際立って高い水準を維持しているのである。

なお近年の日本鉄鋼業における研究開発投資の主要な特徴の一つは、投資分野の多角化傾向である。高炉メーカー各社は、輸出規制や中進国の追い上げに伴う鉄鋼需要の停滞に直面したことにより、経営多角化の方針を鮮明にしている。このため研究開発投資についても、従来の鉄鋼製品分野の枠を超えて、エレクトロニクス、複合素材、バイオテクノロジー等の分野への多角化が図られている。『科学技術研究調査』のデータでは、5年前の1986年には66.2%であった本業分野（鉄鋼製品）への投資比率が、91年には50.9%まで低下し、代って通信・電子・電気計測器などの製品分野への投資比率が上昇している。

(2) 設備投資

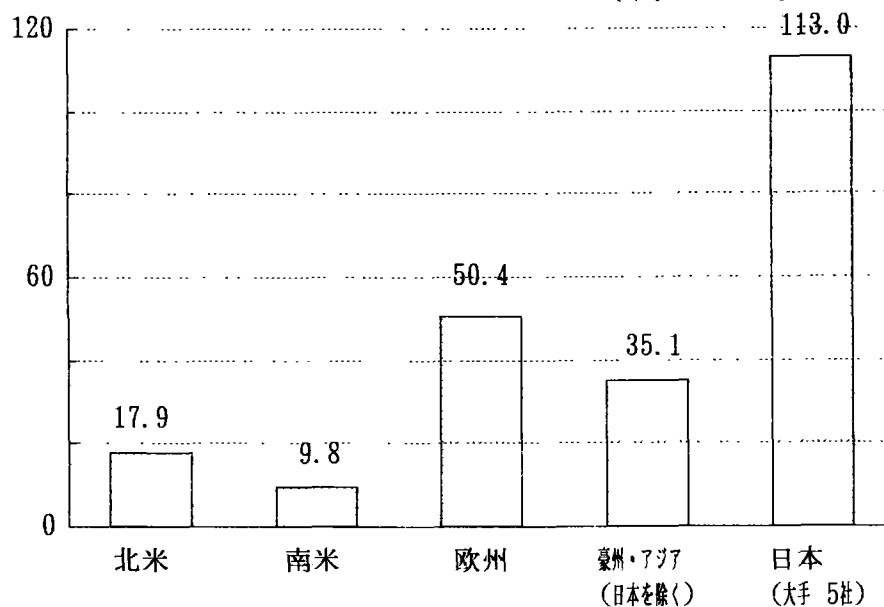
近年の鉄鋼需要の停滞と、それに伴う経常利益の悪化にも拘らず、鉄鋼業の設備投資は依然として活発である。図2-3に示すように、1991年の設備投資額（工事ベース）は1兆 1,091億円、前年比16.3%増で、前年に続く大幅な増加となった。その主要な投資目的は、高炉を中心とする普通鋼における合理化投資、更新及び維持・補修であり、また生産関連投資では表面処理鋼板等へのニーズに対応する投資が中心となっている [2]。

70年代以降における設備投資の成果をみるための一つの指標として、図2-4に示す連続鑄造比率が用いられる。これによると製品合計の連続鑄造比は80年代半ばに、ほぼ天井に達し、91年現在95.6%の水準にある。

図 2 - 2. 地域別主要鉄鋼企業の研究開発費 - 1990年

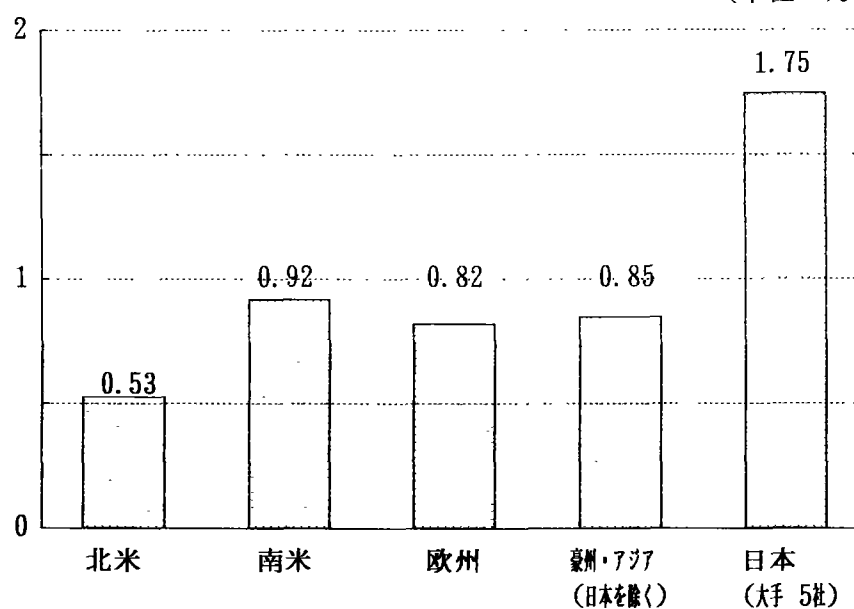
(1) 1社平均研究開発費

(単位: 100万USドル)



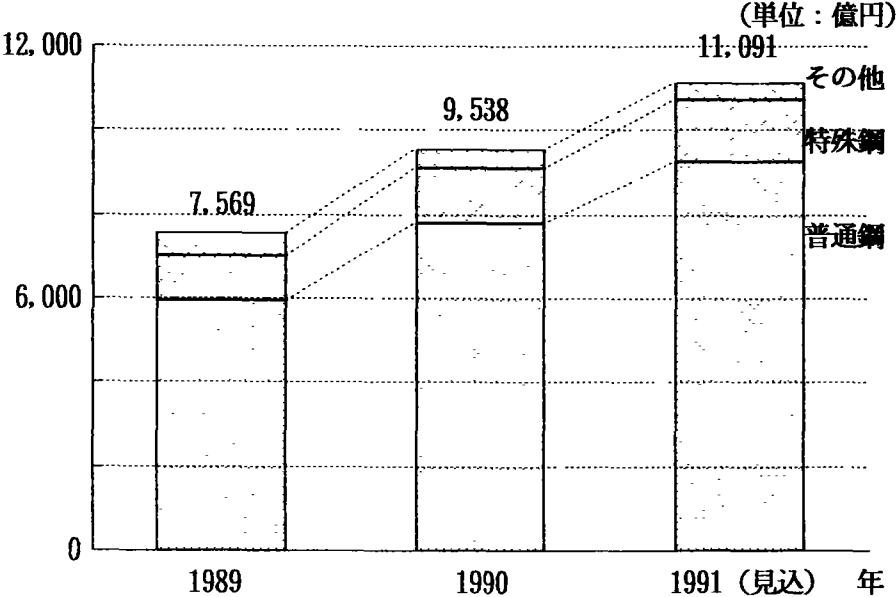
(2) 1社平均対売上高研究開発費比率

(単位: %)



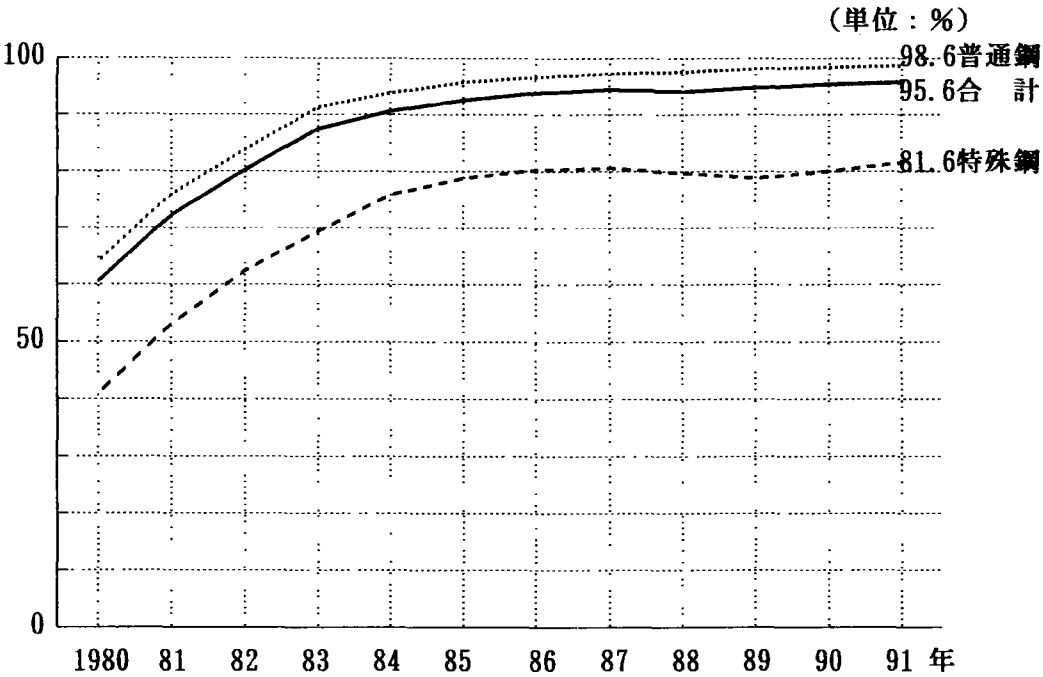
出典: 日本鉄鋼連盟『我が国鉄鋼業の技術力』1992年
資料: 国際鉄鋼協会 (IISI) 統計。

図2-3. 鉄鋼業の設備投資額



出典：日本鉄鋼連盟『日本の鉄鋼業』1992年版
資料：通商産業省産業構造審議会資料。

図2-4. 連続鑄造比率の推移



資料：通商産業省『鉄鋼統計年報』各年版より試算。

2. 4. 鉄鋼業の技術的成果

ここでは、前節でみた研究開発投資及び設備投資による技術的成果を、省力化、省エネルギー化及び高品質化の三つの側面から概観する。

(1) 省力化

日本の大手鉄鋼メーカーは、1950年代の後半に汎用コンピュータの導入を開始して以来、業務の積極的な省力化を図り、60年代の後半からはオンライン・リアルタイム化及びデータ・ベース化の作業に取組み、70年代の前半には中枢的な販売・生産管理業務及び経営管理業務全般のシステム化をほぼ完了した。

80年代の後半からは製品の高品質化、多品種・小ロット化、ジャスト・イン・タイム納入などの要請に応えるため、システムの再構築が図られた。製鉄所の生産管理システムについては、同期化・連続化操業を達成するために、上流工程から下流工程まで一貫した生産計画システムが構築された。この過程で、プロセス全般に亘るコンピュータの増設と新設により、生産の自動化レベルの向上が図られた[12]。

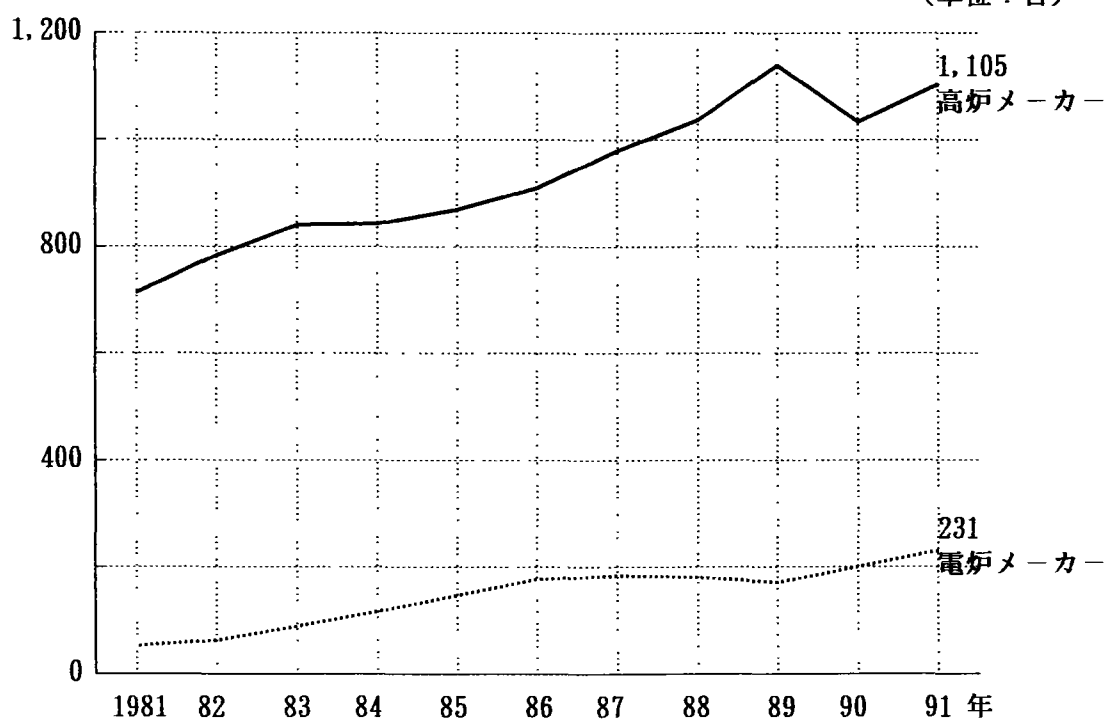
図2-5に、80年代以降の日本鉄鋼業におけるプロセス・コンピュータの設置状況を掲げる。これによると91年現在の設置台数は、高炉メーカーでは1,105台、電炉メーカーでは231台に達した(注)。このようなコンピュータの利用状況は、国際比較の観点からみても極めて高い水準にある。IISIの90年モントリオール大会の資料によれば、1990年の日本鉄鋼業における従業員1,000人当りのメガバイト数は1,120であり、米国の170という水準を大きく上回っている[3]。

プロセス・コンピュータの導入による省力化の影響で、鉄鋼業の従業員数は顕著に減少している。図2-6に示すように、80年代初頭に16万人台の水準にあった高炉メーカーの従業員数は、91年現在10万6,000人にまで減少した。特に直接部門における従業員数が、大幅に減少した。

注：図2-5において、高炉メーカーにおける設置台数が90年に一時減少し、その後再び増加しているのは、80年代後半の円高不況の影響から漸く脱却した高炉メーカーが、図2-3でみたように設備投資を活発化させ、主として圧延、製鋼工程におけるプロセス・コンピュータの更新を、90年から91年にかけて集中的に行った結果である。

図2-5. 鉄鋼業におけるプロセス・コンピュータの設置状況

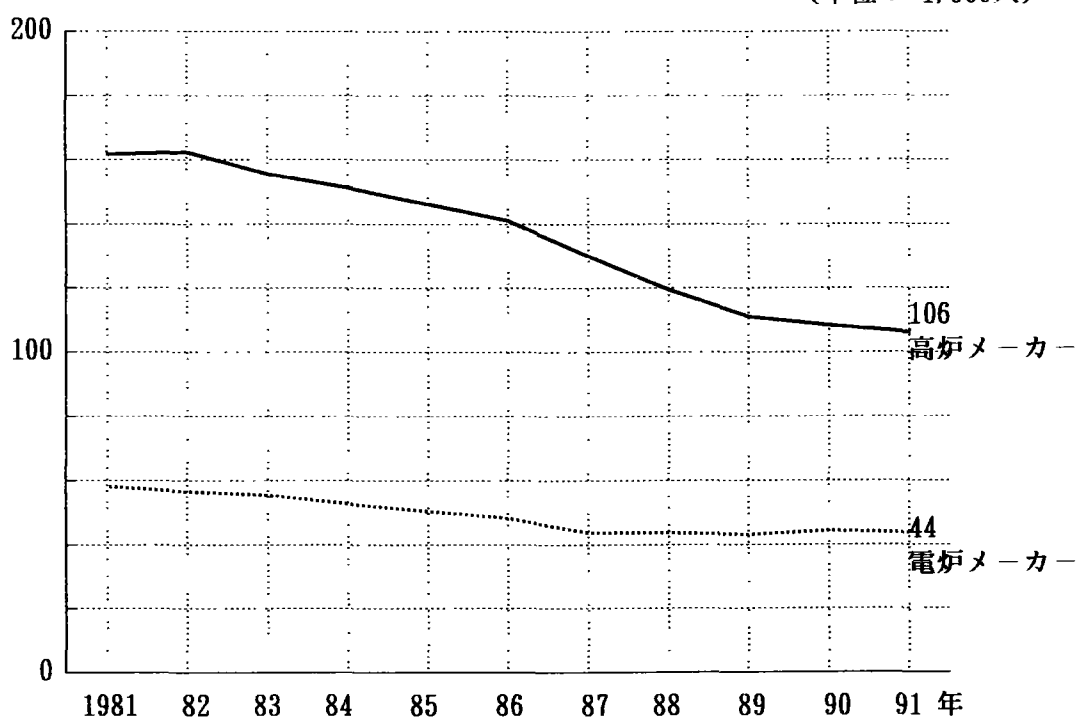
(単位：台)



出典：日本鉄鋼連盟『日本の鉄鋼業』 91, 92年版
資料：日本鉄鋼連盟の会員企業43社のデータ。

図2-6. 鉄鋼業における従業員数の推移

(単位：1,000人)



資料：通商産業省『鉄鋼統計年報』各年版
注：鉄鋼加工製品部門を含む各年末の全国値。

(2) 省エネルギー化

もともと日本鉄鋼業は、LD転炉技術の導入過程において転炉内の発生ガスを回収・再利用するOG法（酸素転炉排ガス回収システム）を開発するなど、省エネ技術については独自の技術的成果を生み出していた。ところが、1973年に始まるオイル・ショックを契機として、我が国最大のエネルギー需要産業である鉄鋼業においては、省エネルギー化を図るための技術革新が一層重要な命題とされるに至った。

70年代の省エネ化において重要な役割を果たしたのは、連続鋳造法の普及である。この技術は溶鋼を鋼片の断面を持つ鋳型に注ぎながら冷やし固めるものであって、従来の溶鋼を鋳型に注いで冷やし固め（造塊）、これを長時間加熱して分塊圧延機で鋼片にする（分塊）方法に比して、膨大な省エネ効果を持つものであった [7]。

また今日では一貫製鉄所で発生する排エネルギーを、CDQ（コークス乾式消化設備）、TRT（高炉炉頂圧発電設備）などを用いて、様々な段階で回収利用する技術が普及している（注）。こうした技術によるエネルギー回収量は、1991年度に石油換算で約 276万Kl、鉄鋼業の石油消費量の 3分の 2に相当すると報告されている [2]。

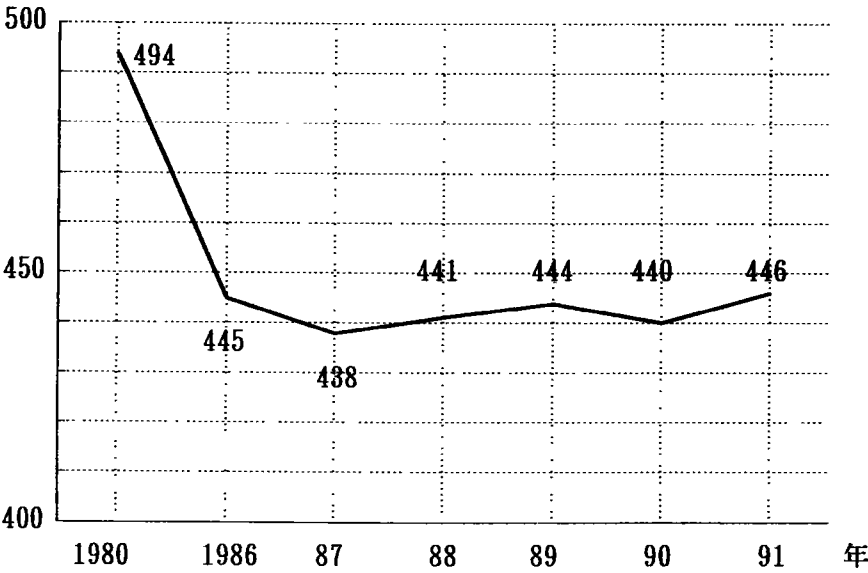
省エネ技術の普及により、日本鉄鋼業のエネルギー消費原単位は大幅に減少した。図2-7に示すように、80年代の始めに粗鋼トン当り 494万Kcalであった原単位は、80年代後半には 440万Kcal台の水準まで低下した。我が国のエネルギー最終消費に占める鉄鋼業のウエイトは、75年の19.8%から、80年には16.9%、90年に13.1%と低下した。図2-8にみられるように、日本鉄鋼業のエネルギー消費効率は世界最高の水準にある。

しかし、かつて省エネ化の切り札となった連続鋳造法の普及は、図2-4でみたように80年代後半から飽和水準にあり、またCDQやTRTも既に相当の普及率にあることから、近年の新設は減少傾向にある。このように既存技術による省エネ効果が飽和水準に達したため、図2-7にみられるように、80年代後半のエネルギー消費原単位は横ばいを続けているのである。

注：一貫製鉄所における省エネ設備対策は、第一段階での設備の保温、断熱、焼却管理、第二段階での素材の加熱、冷却の繰り返しを抑制するための生産プロセスの省略や直結化対策、第三段階でのエネルギー利用のための排熱回収と、区分される。連続鋳造化などは第二段階の対策であり、CDQ（コークス炉から取り出された赤熱状態のコークスに窒素ガスを吹き込み、昇温した窒素ガスを排熱ボイラーに送って蒸気を発生させる設備）などは第三段階の対策に属する [7]。

図 2 - 7. 鉄鋼業のエネルギー消費原単位

(単位：万Kcal／粗鋼 t)

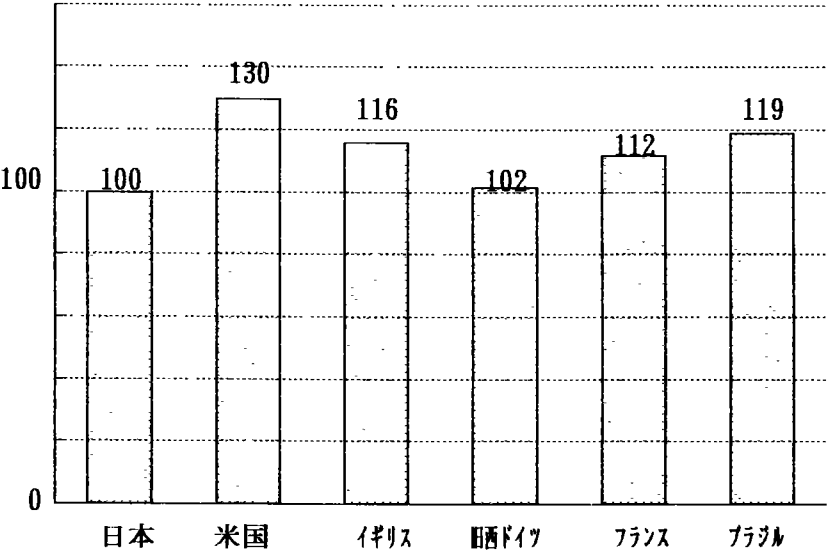


資料：日本鉄鋼連盟『日本の鉄鋼業』 1991, 92年版

注：エネルギー消費原単位は、鉄鋼業の全エネルギー消費量を粗鋼生産量で除したもの。

図 2 - 8. 主要製鉄国のエネルギー消費原単位の比較 - 1990年

(日本を 100とする指数)



出典：日本鉄鋼連盟『日本の鉄鋼業』 1992年版

資料：国際鉄鋼協会 (IISI) 統計。

(3) 高品質化

エネルギー危機は鉄鋼業の省エネ化に拍車を掛けると同時に、他産業の需要を喚起することによって、鉄鋼製品の高品質化を要請することになった。

エネルギーを生産する分野で使われる鋼材については、過酷な環境条件の下でのエネルギー開発にも耐え得る高強度・高耐蝕性・高靱性の高抗張力鋼・構造用合金が開発され、エネルギーを使用する分野に対しては、その省エネ・省資源対策に適合するため鋼材が開発された。後者の代表的な例としては、鋼材の中で最も需要の伸びた自動車用材料としての高張力鋼板が挙げられる。すなわち、自動車産業において燃費節減を目的とする車体の軽量化が重要な課題となったことに対応して、鉄鋼業は高張力鋼板を用いての板厚の薄肉化を実現してきた。自動車用鋼材としては、この他、軽量化と防振・防音を兼ねたプラスチックとの積層鋼板や、錆びにくい二層表面処理系の防錆鋼板などが開発された [7]。防錆鋼板は、家電製品分野の品種転換にも対応した。また、建設・土木用鋼材の高張力化も進展した。鋼材需要の高品質化の状況を、普通鋼鋼材に占める表面処理鋼板の比率によってみると、91年時点で約20%に達したことが分かる（図2－9）。

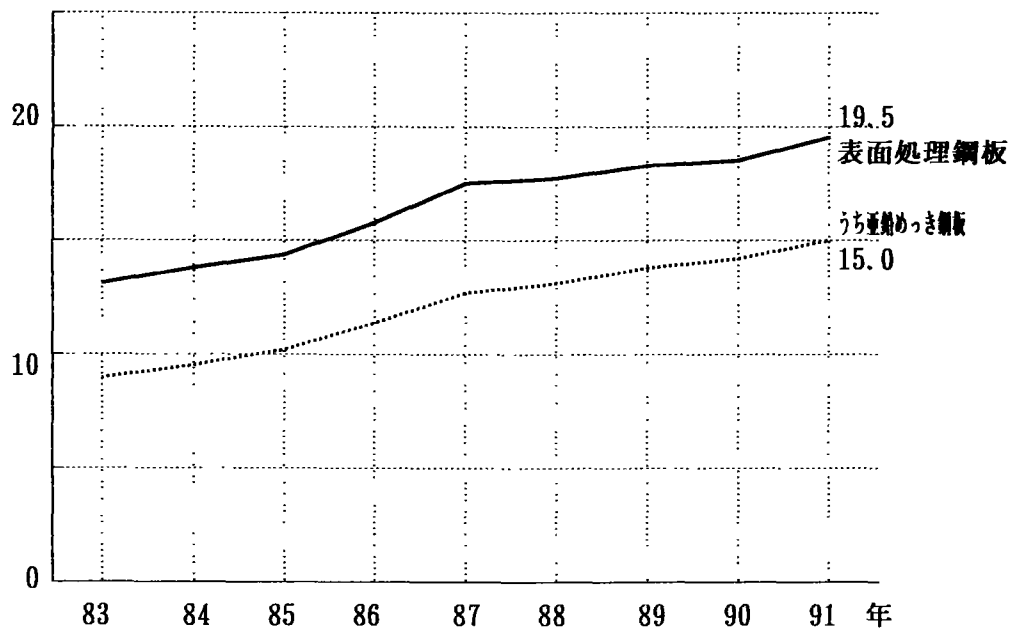
以上のように、製品の高品質化はエネルギー危機以降、顕著な進展をみたが、鋼材価格は長期的な横ばい傾向にある。図2－10に示すように、鋼材の国内卸売物価指数は80年代を通じてほとんど上昇しておらず、80年代後半に輸出依存型の加工組立業種が円高不況に直面した折には、むしろ低下している。

このような価格の安定は、鉄鋼の多品種・大量生産体制を効率的に機能させるために、鉄鋼企業とユーザー企業間の取引が、先物契約（現物の受渡しを一定の条件のもとに何ヶ月か先に実行することとして売買の約定を結ぶ取引）と、紐付販売（あらかじめメーカーとユーザーが交渉などによって取引の諸条件を決定した上で、問屋を仲介して販売する方法）に支えられていることによる [10]。鉄鋼価格は、ユーザー企業との長期的な契約関係の中で決定される。それ故、製品の高品質化にも関わらず、円高不況期にはユーザー企業の要請に応じて鋼材価格が低下することになったのである。自動車用薄板については、鉄鋼メーカーと自動車メーカーの交渉の結果、漸く1991年に至って 9年ぶりに値上げを実施することが決定された。

以上のようにみてくると、製品の高品質化は日本鉄鋼業の国際競争力を高めたばかりでなく、他の製造業種の競争力を維持・向上させる上で、多大の寄与を果たしてきたことが明らかになる。

図2－9. 普通鋼鋼材に占める表面処理鋼板の比率

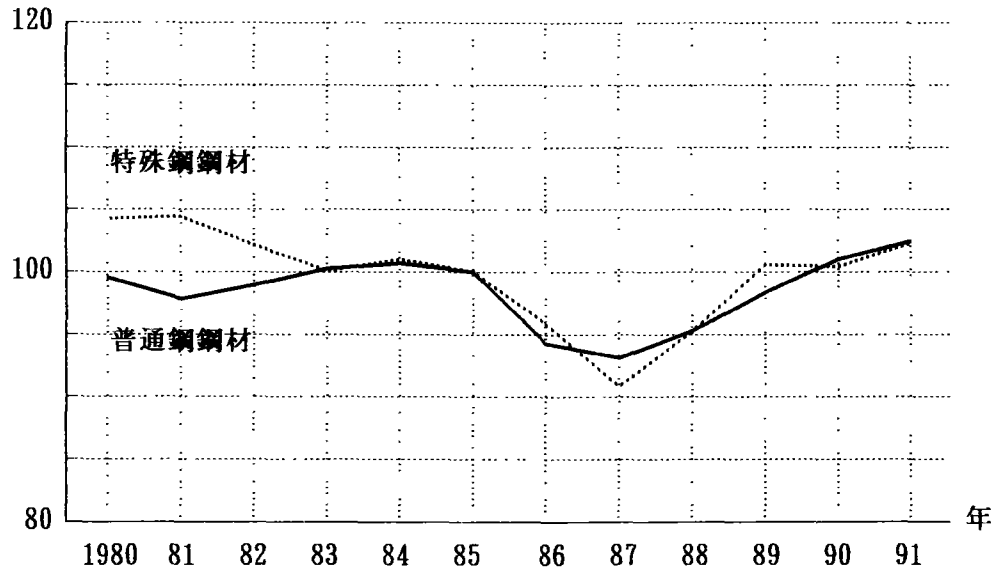
(単位：％)



資料：通商産業省『鉄鋼統計年報』各年版より試算。
注：最終鋼材生産実績（重量ベース）による。

図2－10. 鋼材の国内卸売物価指数

(1985年＝100)



資料：日本銀行調査統計局『物価指数月報』

2. 5. 競争力優位の背景

ここでは、前節で検討した日本鉄鋼業の技術的成果に帰結した要因として、以下の三点を指摘しておきたい。

(1) コスト競争

鉄鋼業における急速な省力化・省エネ化を促進してきた主な要因の一つは、企業間の激しいコスト競争である。かつて八幡・富士両社の合併計画が浮上した際に、独占的管理価格を懸念する見方に対抗する論拠が、価格競争ではなく生産コストの競争を重視する[9]という主張であったことに端的に示されるように、日本鉄鋼業には伝統的にコスト競争を重視する体質がある。

この体質は、70年代に大手企業の企業構造が同質化することによって、一層顕著なものとなった。鉄鋼需要の急速な拡大期であった高度成長期には、スケール・メリットを迫及することができるため、製品単位当りのコストを低減させる主要な方法は主として設備の大型化におかれていたが、70年代後半の不況期には最早、生産量の拡大を随伴する方策はとり得なかった。しかも、この頃既に大手企業は近似的な生産構造、製品構成及び市場条件を有し、コスト上の格差はほとんど無くなっていた。このように生産を抑制しなければならない条件の下で、同時にコストを低減させるためには、生産要素の購入価格を引き下げるか、その単位当り投入量を引き下げるしかない。ところが前者の方法は、石油ショック以降のエネルギー価格の急騰の中にあって、主要な方策とはなり得なかった。このため、残されたコスト低減方策として、投入原単位の低減ないし歩留りの向上が、企業間競争の焦点とされたのである。この省エネ・省資源運動と結び付いたコスト競争は、QCサークル活動などを動員する全社的な規模で展開されることとなった[10]。

(2) 研究開発における協調的關係

コスト面において激しい競争を展開する一方、鉄鋼企業は敗戦以来、共同研究・共同開発を通じた協調関係を培っている。ことに1963年に鉄鋼技術共同研究会の伝統を受け継いだ日本鉄鋼協会・共同研究会が発足し、同年、鉄鋼基礎共同研究会が新設されてからは、これら共通の場が、エネルギー危機以降における鉄鋼技術開発に関する基礎研究の源泉になったと評価されている[7]。また製品の高品質化を達成する上では、鉄鋼企業と自動車メーカー等のユーザー企業との共同研究が、重要な役割を果たしたとされている。

(3) 人的資源の有効利用

MIT産業生産性調査委員会の“Made in America” [17]は、その産業研究編において、日米鉄鋼業の比較分析を踏まえ、日本企業にみられる人的資源の有効利用の重要性を次のように強調している。

「日本の技術者やその他の社員は、マーケティング、工場労働、基礎研究、金融、新製品・新製法開発などの部署を配置転換される。管理職になるとときには、この経験のおかげで、会社の技術面・生産面の能力について幅広い知識を獲得しているのである。」

実際、日本企業においては職能の多様化を目的として、直接部門と間接部門の間ですら頻繁な配置転換が行われている。そして技術者等が、このような職務経験を通じて幅広い知識を獲得することによって、複雑な一貫製鉄所の業務のシステム化が効率的に達成されたのである。

2. 6. 日本鉄鋼業の技術課題

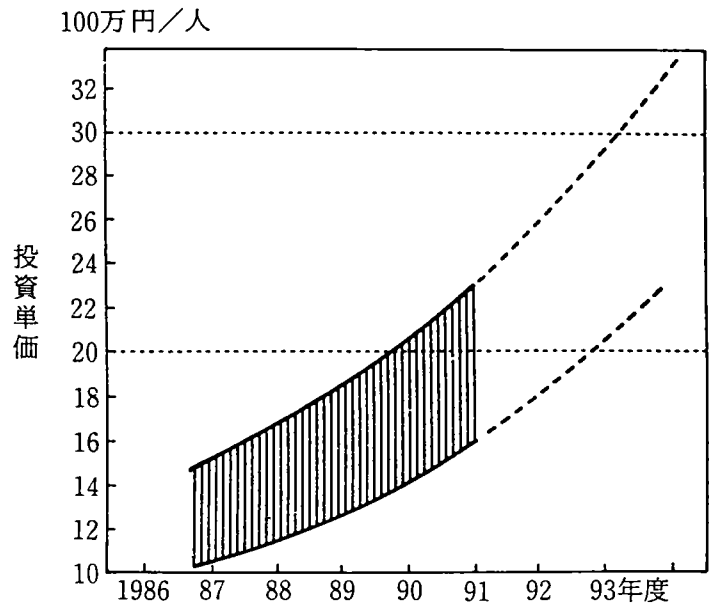
以上、我々は日本鉄鋼業の国際競争力の源泉である技術的成果の現状と、その技術的成果をもたらしてきた背景を分析した。最後に、これまでの分析を踏まえて、日本鉄鋼業の技術課題を展望しておきたい。

日本鉄鋼業は国際的に顕著な省エネ・省力化を達成してきた。しかし、これらの実績を支えてきた技術は近年、成熟ないし飽和段階に達し、投資効率が悪化している。エネルギー消費効率が限界を迎えていることは既にみた通りであるが、省力化についても一人当たり投資額が逡増傾向にあり、近年では 2,000万円程度にまで上昇しているとの分析結果がある（図2-11）。

鉄鋼業は、高品質・高付加価値製品を低価格で供給することによって、日本製造業全体の競争力源泉として機能してきた産業である。しかし、コスト・ダウンに直結する既存技術が限界を迎えた今日、このような供給構造がなお長期的に続くならば、源泉そのものを枯渇させる危険性を孕むことになるだろう。

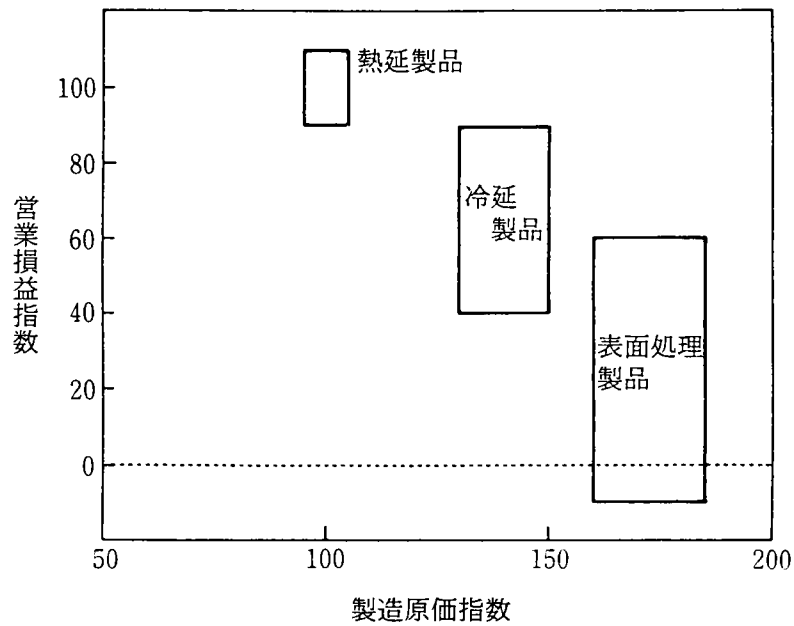
図2-12にみられる薄板製品を事例とした収益性の分析結果によれば、製造原価が大幅に上昇した高付加価値製品ほど、収益性が顕著に低下していることが分かる。周知のように高品質・高付加価値製品ほど、研究開発費や設備投資の負担は大きい。このため近年、積極的な設備投資が行われた表面処理鋼板の製品分野では、一部採算割れが発生している

図 2 - 11. 省力化投資単価の推移（推定を含む）



出典：日本鉄鋼連盟『鉄鋼界』1993年 4月号

図 2 - 12. 高付加価値化と収益性の関係
(熱延製品 = 100)



出典：日本鉄鋼連盟『鉄鋼界』1993年 4月号

と言う[4]。高付加価値製品の低収益性が続くならば、研究開発・設備投資を抑制することになるであろう。

このような現状に対処するため、鉄鋼業界では新たな省力化を生み出すための技術開発、高付加価値製品分野でのコスト・ダウンを実現するための技術開発などが課題とされている。しかし、過度の人員削減を伴う省力化は、計画的な配置転換を阻害することから、日本鉄鋼業の競争力源泉である幅広い知識の育成を困難にし、ひいては熟練技術者の不足等を招来する可能性がある（注1.）。また、高付加価値製品の低収益性を技術的に解決することは重要な課題であるが、その技術成果がもたらす収益を再びコスト競争に殺到させるならば、投資効率通減への悪循環を生み出し、企業の疲弊を招くであろう。

むしろ新技術のもたらす収益を産業内部に制度的にストックし、現在鉄鋼業の内外から期待を寄せられている溶融還元プロセス（注2.）等の次世代技術の共同開発のために活用していくことが、望ましい方法の一つとして考えられる。

注1. 近年の主な省力化対策の一環として、高炉メーカーでは工程の様々な段階において

AI技術を応用したエキスパート・システムの開発・導入を進めている。しかし、有効なエキスパート・システムを実現するためには、幅広い知識を持った熟練技能者と知識技術者の存在が必要とされる。この点については、高炉エキスパート・システムの顕著な開発事例を分析した[14]を参照されたい。

2. 溶融還元製鉄法とは、現在用いられている高炉法に比べてコークス炉、焼結機が不要であり、需要変動に応じた弾力的な生産を可能とする等の優れた特徴を持つプロセスである。また、このプロセスによれば石炭使用量が少なくなり、炭酸ガスの発生量を低減できる可能性があるため、地球温暖化問題への対応策としても期待されている。

我々は続く第3章において、鉄鋼業と同じく在来型素材産業の一つであるセメント産業を取り上げ、そこでも同様の技術課題に直面していることを見るであろう。

(参考文献)

- [1]日本鉄鋼連盟『日本の鉄鋼業』1991年版
- [2]日本鉄鋼連盟『日本の鉄鋼業』1992年版
- [3]日本鉄鋼連盟『我が国鉄鋼業の技術力』1992年
- [4]日本鉄鋼連盟・鉄鋼技術政策委員会「21世紀へ向けての鉄鋼技術の展望」
(『鉄鋼界』1993年 4月号)
- [5]通商産業省『鉄鋼統計年報』各年版
- [6]水口弘一編『日本企業の競争力』1992年
- [7]飯田賢一編「製鉄」(『日本の技術 100年 2. 製鉄 金属』1988年)
- [8]飯田賢一『日本鉄鋼技術史』1979年
- [9]稲山嘉寛『私の鉄鋼昭和史』1986年
- [10]岡本博公『現代鉄鋼企業の類型分析』1984年
- [11]多田研三『鉄鋼(改訂版)』1990年
- [12]増田行治「鉄鋼業における生産システムの現状と今後の方向(1)(2)」
(『産業動向』1990年11月号、90年12月・91年 1月合併号)
- [13]王寺睦満『我が国におけるLD転炉技術の導入と発展』1992年
(科学技術政策研究所 調査研究資料 講演録34)
- [14]野中郁次郎・永田晃也『共同体験に基づく知識創造の循環プロセス－高炉操業エキスパート・システムの開発事例をめぐって』1992年
(科学技術政策研究所 調査研究資料 調査資料22)
- [15]Leonard H. Lynn “How Japan Innovates : A Comparison with the U.S. in the Case of Oxygen Steelmaking ” 1982
(邦訳『イノベーションの本質－鉄鋼技術導入プロセスの日米比較』)
- [16]John Zysman and Laura Tyson “American Industry in International Competition : Government Policies and Corporate Strategies” 1983
(邦訳『日米産業競争の潮流－経済摩擦の政治経済学』)
- [17]Michael L. Dertouzos et al. “Made in America ” 1989
(邦訳『Made in America －アメリカ再生のための米日欧産業比較』)

3. セメント産業技術の現状と課題

本章では、製造業の競争力の源泉及びその変質を考えるためのきっかけとして、在来型の素材産業であるセメント産業を取り上げる。セメント製造プロセスの内部で発生した技術的改良改善は、極めて単線的な技術限界にたどり着き、競争力の減衰に帰結する恐れがある点について述べる。そして、このような「単線的技術限界型」の素材産業の技術力を再度育成するには、技術革新の成果を素材価格に反映させることが一つの選択であることを述べる。

なお、ここで言う「技術限界」とは、技術開発・改善目標、あるいは研究開発者たちが目指す技術水準における論理的な限界、またはその技術分野にとって特異な制度環境的な制約から生じる限界のことを意味する。例えば、研究開発の路線として、省エネによるエネルギー効率の改善を進めてきたとする。しかし、研究開発の懐妊期間当りの改善効率が低下してきたために、研究開発方式の抜本的な改善、あるいは省エネに関する原理的な見直しが必要になる状況を技術限界とみなす。この種の技術限界は、大なり小なり色々な分野で見られる筈である。シュンペータ的に考えれば、技術限界は停滞であると同時に、新しいダイナミズムの発生源でもある。従って、どの分野で技術限界が発生しているのかを系統的に調査することは、科学技術振興政策の一貫として位置づけられる。

3. 1. セメント産業の性質

日本のセメント産業は表3-1に示す歴史を経て、現在22社、45工場から成り立っている。1991年度のセメント生産動向は、次のような状況であった。

販売量（9,185万トン：対前年 1.8%増）

＝生産（8,881：2.3）＋在庫放出（304：-10.3）

＝内需（8,529：-1.2）＋輸出（809：29.6）－輸入（153：-33.1）

セメント生産は基本的に需要近接の生産立地パターンを取っている。しかし、製造能力と需要の間に地域的な偏在があるため、沖縄、近畿、東海、関東圏が域外からの移入に頼っている。輸送コストの兼ね合いから貿易財としての役割は低いが、需給調整として貿易市場が利用されている。また、経済の不況期（1973、1979、1992）には、財政政策による

公共投資増加の影響を直接受け、設備投資が積み増しされる。その逆に景気の安定期には、過剰供給設備の廃棄、調整を行わなければならないという需給調整型循環プロセスがある。

一方、セメントの生産技術は単線的な改良改善が進められてきた。ポルトランドセメントは、石灰石、粘土、珪石、酸化鉄等の原料を調合・粉砕し、これを焼成し中間製品であるクリンカーを作り、さらに石膏を加えて微細粉砕して製造される。従って、生産プロセスを技術的にみれば、利用資源としては賦存量が膨大なただ同然の石灰石を燃焼させるという、単線的な処理に基づいている。

原料前処理工程では、蛍光X線分析機、制御コンピュータにより正確に調合され、セパレータ微粉砕機、乾燥機にかけられるのが主流である。次の焼成工程では、予熱仮焼された原料を回転移動させながら加熱し、半熔融状態にしたクリンカーを冷却し、貯蔵する。最後の仕上工程では、冷却されたクリンカーに凝結時間調節のための石膏を加えて再度微粉砕する。このような各プロセスの技術的発展の課題は、省エネ化と省力化の動きに集約されることになる。

なお以上については文献 [1] [2] [3]を参照した。

表 3 - 1. セメント産業史の概要

1822	ポルトランドセメント	英国人フロスト特許
1825	商品化「ブリティッシュ・セメント」	
1952	英国からドイツへの技術移転	
1871	日本 内務省土木寮でのセメント製造実験 工部省深川工作分局 英国湿式セメント工場建設 (原料の白堊がないため生石灰代用)	
1975	英国から米国への技術移転	
1880	民営小野田湿式セメント工場	
1884	官営事業の民間払い下げ	
1891	小野田セメント 乾式セメント工場 (コスト節減のため湿式から乾式へ転換)	
1893	輸出 始まり 北海道セメント(株) 耐海水性セメント特許 港湾用途	
1923	関東大震災特需	
1950	外資法施行 甲種技術 (契約期間または耐価支払期間が1年を越える) 1950 ~ 1960 セメントの甲種技術 (ノウハウ・特許権等) 導入は無し (国内技術が確立されていた)	
1971	西ドイツより焼炉付きサスペンションプレヒータ付きキルンに関する技術導入	
1983	特定産業構造改善臨時措置法の適用	
1986	産業構造転換円滑化臨時措置法の適用	

3. 2. セメント産業の技術限界

3. 2. 1. 省エネの技術限界

エネルギー原単位は、1980年度の日本の水準を 100とすると、1990年度には米国が 127、日本が82であった。図3-1を見れば分かるように、日本のエネルギー消費効率は世界一の水準である。

省エネの努力は素晴らしいと言わざるを得ない。例えば、1950年度に 207万Kcalであった総エネルギー消費原単位が、1990年度には76万Kcalの水準に達している（図3-2）。

しかし、総エネルギー消費原単位の低下は80年代後半以降鈍化し、省エネのスピードにブレーキがかかった。今後、さらに省エネを持続することは可能なのだろうか。

ポルトランドセメントの理論最小エネルギー原単位は、セメント・クリンカ（溶解物）当たり42万Kcal必要生成熱量＋粉砕用電力、動力用電力19万Kcal＝合計61万Kcal（一次換算ベース）ということになる。1991年度の総エネルギー消費原単位は76万Kcalであるから、まさにセメント生産の理論限界に近づき、省エネに対する限界効率が低下したと言える状況なのである。稼働設備全体のエネルギー効率は新旧設備の組み合わせに依存するだろうから、技術限界はすでに1986年時点で表面化していたと考えられる。

持続的成長を遂げて世界一の水準にまで到達した、という意味では、セメントの生産技術は改善の目標を失ったのである。

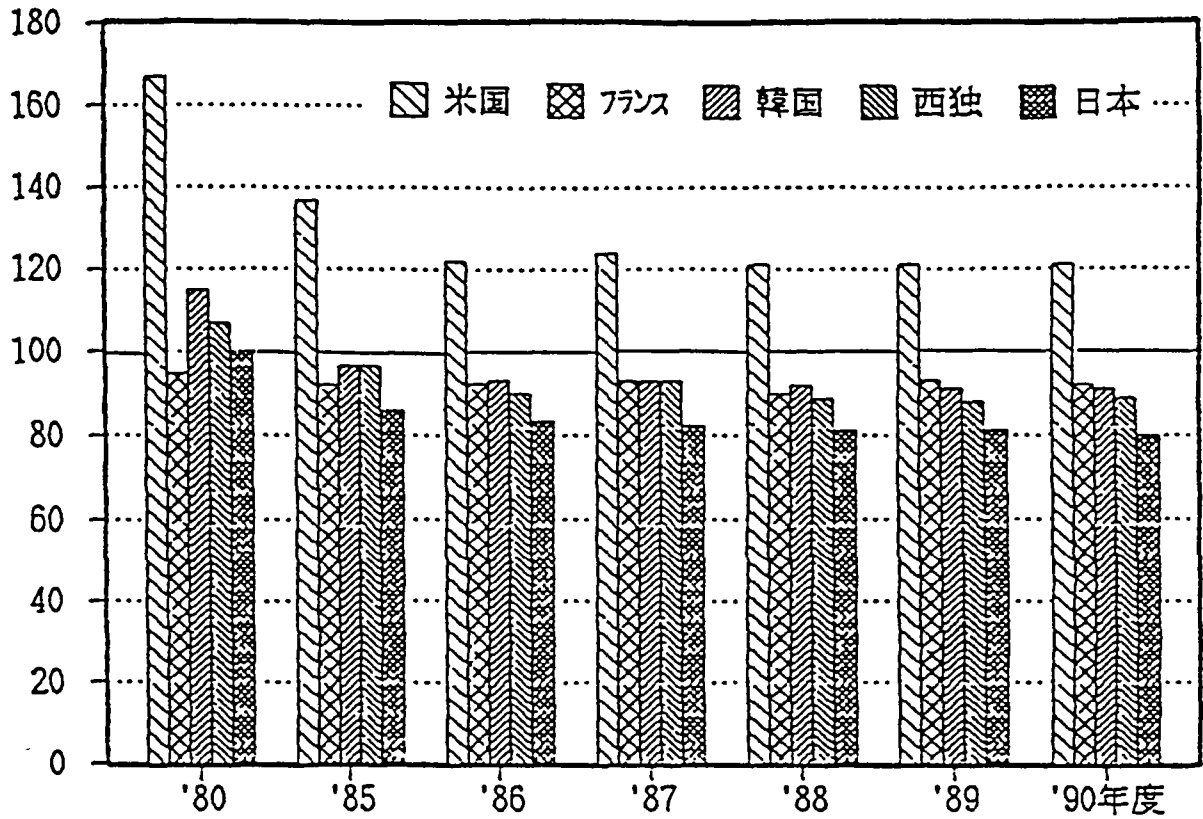
3. 2. 2. 投資の多様化

技術的停滞期には、投資内容の多様化が生じる。産業全体として技術効率の合成効果を上げるため、旧設備の廃棄処分が進む。産業政策の構造改善に支援されて、設備更新が増大する。主流の研究開発課題よりも探査型プロジェクトが重視され、研究開発費が増える。そして、セメント生産技術に残された大きな課題である省力化が強調されるようになる。技術課題は、省エネ化から省力化へシフトするのである（表3-2）。

この点に関しては、まだ技術革新のダイナミズムを内包していると言えるのだが、プロダクト・イノベーションにつながるような方向性を持たない限り、単線的な技術限界に再度直面すると思われる。

図3-1. エネルギー原単位の国際比較

(1980年度の日本 = 100)



出典：セメント協会

資料. 米国：U.S. Department of the Interior. 暦年

フランス：Syndicat National des Fabricants de Ciments et de Chaux. 暦年

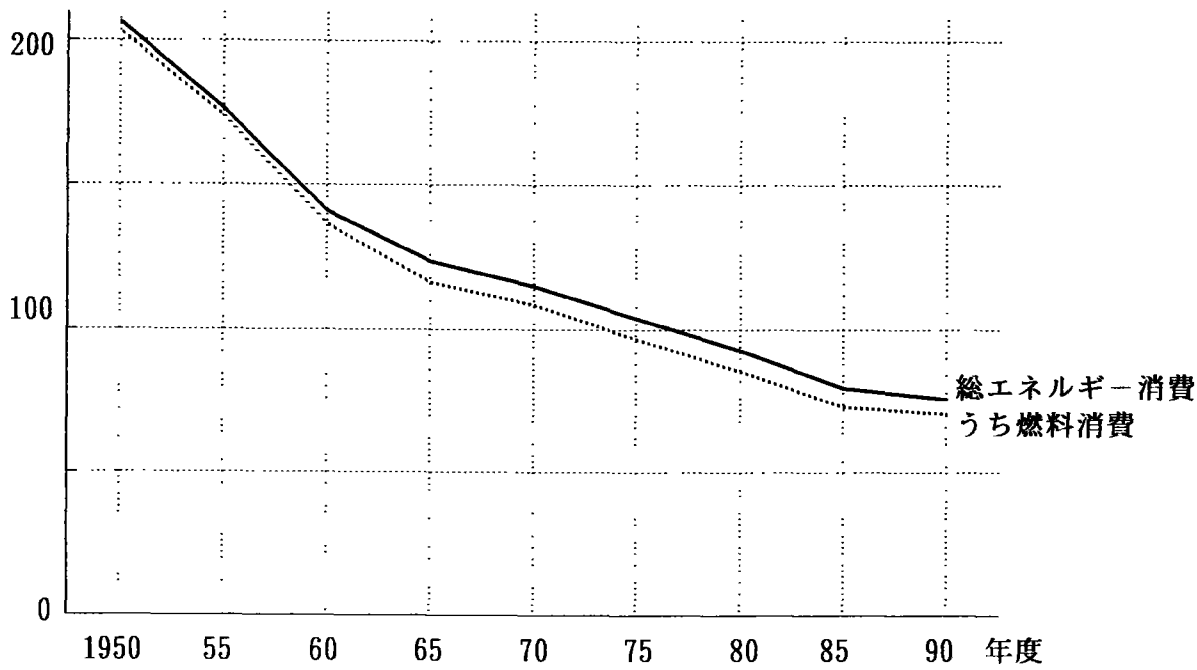
韓国：韓国洋灰工業協会. 暦年

西独：CEMBUREAU. 暦年

日本：セメント協会. 会計年度

図3-2. エネルギー消費原単位の推移

(単位：万Kcal)



資料：セメント協会

注：セメント協会会員企業に関するデータであり、自家発電を含む。

表3-2. セメント産業における投資の多様化

	1986	1987	1988	1989	1990	1991
投資額(億円/年)						
研究開発	57	49	69	48	81	136
設備更新	18	38	60	25	112	186
省エネ化	92	47	71	41	32	30
省力化	121	112	212	343	312	483
1工場当り人数(人/年)						
間接部門従業員数	209	224	228	231	231	229
直接部門従業員数	202	189	178	172	169	171

資料：セメント協会

3. 2. 3. セメント単価の低落

セメント需要の量的拡大は止まってはいない。セメント生産の世界総計は1986年に約10億 550万トン、1990年には約11億 5,186万トンであるから、年率 3.5%で増大している。日本の生産は1986年に約 7,320万トン、1990年には約 8,697万トンで、年率 4.4%で増大した。また 5年間の累積でみれば、セメントの需要はバランスしている状態にある。従って、現時点で中期的にみて生産能力が過剰であるとは言い難い。

では何故、セメント単価は表3-3にみられるように低落を続けているのか。供給過剰の状況下で過当競争が続けられる場合、安売り競争の結果、市場価格が下落し、それに対して生産余剰を確保するために減量経営の方法が採られる。1980年当時、セメント製造能力のピークは約 1億 2,635万トンであった。それに対し、10年間で生産能力の調整が進み、1991年度の実産能力は、8,929万トンになった。10年という期間でみれば、生産能力が過剰であるという判断があり、それに市場価格が対応したと考えられる。しかし、需給調整は 5年程度で行われたのにも関わらず、市場価格は「オーバー・シュート」傾向を持ち、数年ずれ込んだのであろう。さらに、低価格の状況を生産者側が許した背景には、平成景気、バブル経済という爆発的な規模拡大効果があったものと思われる。

セメント単価が低く抑えられている状況の下で、生産余剰を確保するためには、技術革新（省エネ化、省力化）が必要である。しかし、その省エネ化に限界が現れ、生産余剰の確保が困難になっている。省力化も直接生産労働者よりも間接部門従業者の問題がクローズ・アップされる。省力化へ向けた研究開発、情報化機器の導入によって、新しい躍動力が萌芽すると期待できるのであろうか。世界的にみて極めて優秀な技術水準であっても、中長期的な発展基盤の原資となる生産余剰を安定的に確保できないのでは、競争力の源泉は崩壊しつつあると判断せざるを得ない。

表3-3. 普通ポルトランドセメント単価の低下

（生産者価格、上段：円／トン、下段：1991年生産量ウェイト指数）

1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991
14,600	14,000	14,300	14,200	14,000	13,500	12,600	12,100	12,000	12,000
121.7	116.7	119.2	118.3	116.7	112.5	105.0	100.8	100.0	100.0

資料：セメント協会

3. 3. セメント産業の基盤的役割と今後の課題

セメント産業は10年単位で発生する需給調整の循環プロセスの中で、あたかもヨットを操るがごとく成長を持続してきた。その持続的成長を支えたのが技術進歩であった。しかし、その技術的発展の方向は、プロダクト・イノベーションを引き起こす程の技術革新ではなく、100年前に考え出された、極めて安価な原料を燃焼粉砕加工するという生産プロセスの延長線上にあった。その意味で、プロセス・イノベーションが目指したゴールには、単線的技術発展の限界が待ち受けていたと言える。このような性質を持った素材産業を、便宜的に「単線的技術限界型」素材産業と名付けておく。

「単線的技術限界型」素材産業を再度活性化させるためには、どのような政策的視点を持てばよいのだろうか。

3. 3. 1. 安価な必需財としての役割

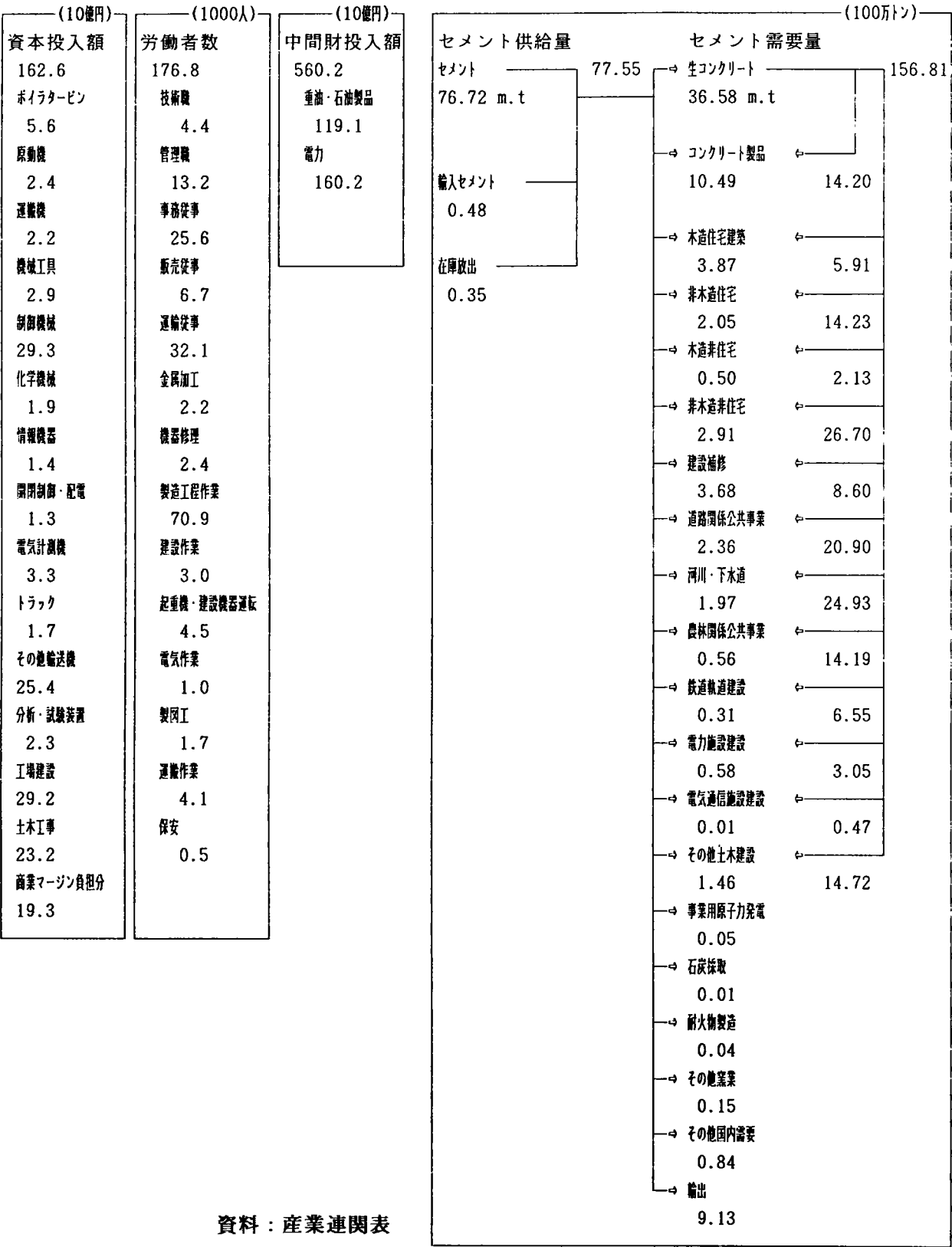
セメントの蓄積量（1913～1990年累計、CEMBUREAU資料）は、日本の場合、約20億トン、人口1人当たり 681Kg、国土面積当たり 5,272トン/Km² である。蓄積総量は米国の 6割程度であるが、人口1人当たりでは 2倍、国土面積当たりでは16倍となり、極めて大量のセメント商品に囲まれた生活をしていることになる。このような生活パターンは異常であると否定するのは簡単ではあるが、安い材料を上手に使うという視点からすれば、経済合理性に適った結果であると言える。

図3-3は、1985年当時のセメント産業の投入産出パターンをフロー図にしたものである。特徴となる点は、次の5項目である。

- ① 7,851億円のセメント生産が生コンクリート、セメント 2次製品という 4倍の製品市場を生み出すということ。
- ② 資本投入において、制御機器の比率が大きく、マイクロエレクトロニクス、情報処理技術の進展に支えられていること。
- ③ 直接製造工程の労働者比率が 4割程度と低い割合であること。
- ④ 中間投入コストの半分がエネルギー費用という、エネルギー集約型であるということ。
- ⑤ 構造物の建築、補修等における構造素材として、セメント及びその関連製品が需要され、必需財としての役割を果たしていること。

図 3 - 3. セメント産業の投入産出パターンの事例(1985年ベース)

製品項目 (10億円)	生産額	中間経費	素付加価値
セメント	785.1	560.2	224.9
生コンクリート	1830.0	1343.2	486.8
セメント 2 次製品	1358.9	821.4	537.5



3. 3. 2. 生産誘発係数の低下

前節でも述べたように、セメント需要は量的に拡大している。しかし、セメント単価は下落傾向にある。産業連関統計からセメントの生産誘発係数を整理したものが表3-4であるが、1985年を100とすると10年間で6割程度、特に1980年代に入ってから急速に低下している。この生産誘発係数は、マクロ経済全体で例えば1億円の支出活動が生じた場合、生産の乗数効果を考慮したとして、直接間接にセメント生産は金額にしてどの位増えるかを推計したものである。従って、この係数が低下することは、マクロ経済にとって当該財の利用コストが軽減することを意味する。

表3-4. セメントの生産誘発係数の推移

1975年	1980年	1985年
0.03562	0.03440	0.02134
167	161	100

資料：産業連関表

つまり、必需財であるセメントのコスト負担が年々軽減され、国際的にみれば高価なエネルギー資源を効率よく燃焼させて、安価な素材を製造加工することができたのであるから、資源希少国日本にとっては競争力を確保するのに好都合だったと言える。さらに、この安価な素材を大量に投入して、土地の生産性を継続的に上昇させることができたからこそ、マクロ的な経済余剰の蓄積が増大したのである。もし、このような説明が誇張であるとするならば、国土面積当りでは米国の16倍ものセメントが、たった70年程度の短い期間に集中投下されたという事実を、どのように説明すればよいのであろうか。

3. 4. 技術革新の活性化方策

安価な素材を集中的に利用することは、経済合理性が許すところである。しかし、その仕組みがうまく作動しない恐れが生じてきている。何故ならば、安価な素材を作り続けるための躍動力は、これまで省エネ化、省力化という技術革新に支えられてきたのだが、その技術革新に一種の限界が現れ、今後、躍動力を継続的に確保することが困難になることが予想されるからである。

これまでの産業技術振興は、生産調整を軸に、マクロ経済活動から吸い上げられた資金を構造改善補助金として配分することであった。しかし、この政策は、縮小均衡をするような局面においては、必ずしも有効な手段とはなり得ない。従って、財政政策の公共投資を積み増しすることによって、拡大均衡を目指すことが必要である。

ところが、セメントという素材産業では、拡大均衡を迎える局面においても、製品価格が下落するという事態を伴うため、生産余剰の確保が効率的に行われない。そしてさらに、需給の時間的ラグ効果によって、過剰調整が行われる危険性もはらんでいる。

これでは、成熟期を迎えた産業が自然消滅するのを傍観するに等しい。経済活動にとって必需財、あるいは基盤的存在であると、その経済価値を認めるのであるならば、積極的な科学技術振興政策を行うべきである。

その一つの方法として、技術革新の成果をマクロ経済に還元してしまうのではなく、再投資のための基金として産業内部に留保できるような仕組みを作ることが考えられる。例えば、技術革新の貢献度合を製品単価にマークアップすることを認め、そのマークアップ分をセメント産業全体の活性化を図るための基金として積み立て、それに基づいて新しいプロジェクトを起案していく仕組みが必要である。

(参考文献)

- [1]化学工業編『明治工業史』（日本工学会明治工業史発行所）1930年
- [2]特許庁編『工業所有権制度百年史・下巻』1984年
- [3]セメント協会『セメントハンドブック』1992年

4. 半導体技術の展開

本報告のモチーフの一つは、技術が一つの流れに沿って改良を受け技術的限界を乗り越える過程の後、やがて何らかの物理的限界の壁に達し、そこから従来技術の改良型でない新たな革新へと技術体系が不連続的にシフトする、という仮説を検証していくことで、我が国の製造業の競争力の源泉を探ろうとするものであった。

本章では半導体技術を取り上げ、微細加工技術が技術的制約を乗り越えつつ次第に物理的制約に近づいていくと同時に、常にこれと平行して次世代の技術が視野に入って研究されてきた状況を述べることにする。

4. 1. 半導体微細加工技術の進歩

周知のように、半導体技術進歩の歴史は微細加工による高集積化の歴史であった。1971年に1kbitの半導体メモリが現れて以来、DRAMは常に高集積化の一端をたどってきた。そのペースはほぼ3年で4倍であり、10年前には「技術の一つの壁」と考えられてきた1Mbit=1 μ mルールが乗り越えられて以来、現在すでに0.8 μ mルールによる4MbitDRAMが市場の中心となった。今や0.55 μ mルールによる16MbitDRAMもすでに量産体制に入っている。0.35 μ mルールによる64MbitDRAMも2年後には市場に導入されるとみられている[1]。図4-1にはその推移が示されている[6]。

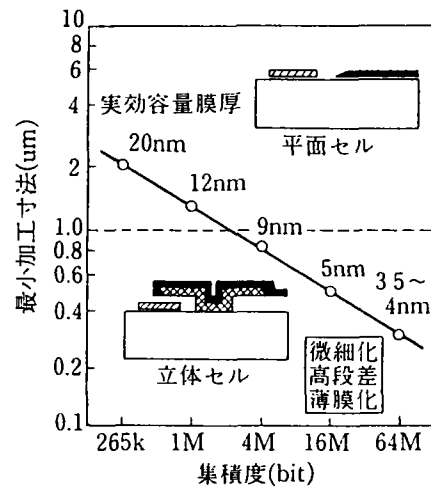
やや古い予測であるが、1990年に発表された電子協の技術予測[2]には、表4-1のような予測がなされている。これを上記の最新の文献[1]と比較すると、技術的課題の予測の正確さと同時に、予想されていた諸問題が確実にクリアされていることに驚かされる。

さて、この微細加工による高集積化には、スケーリング則[3]と呼ばれる機能上の利点と、経済性の利点が両立したため、世界各メーカーとも熱心な研究が進められてきた。電子デバイスの1ゲート当たりの価格の変遷を図4-2[4]に示す。

一方の機能上利点であるスケーリング則とは次のようなものである[3]。各素子寸法をスケーリング則に従って $(1/K)$ 倍すると、集積度は K^2 に上がり、動作速度は K 倍に、消費電力は $1/K^2$ になる。ただし、2次元的な加工寸法の縮小は可能であっても、3次元方向での縮小は同様に可能であったわけではない。

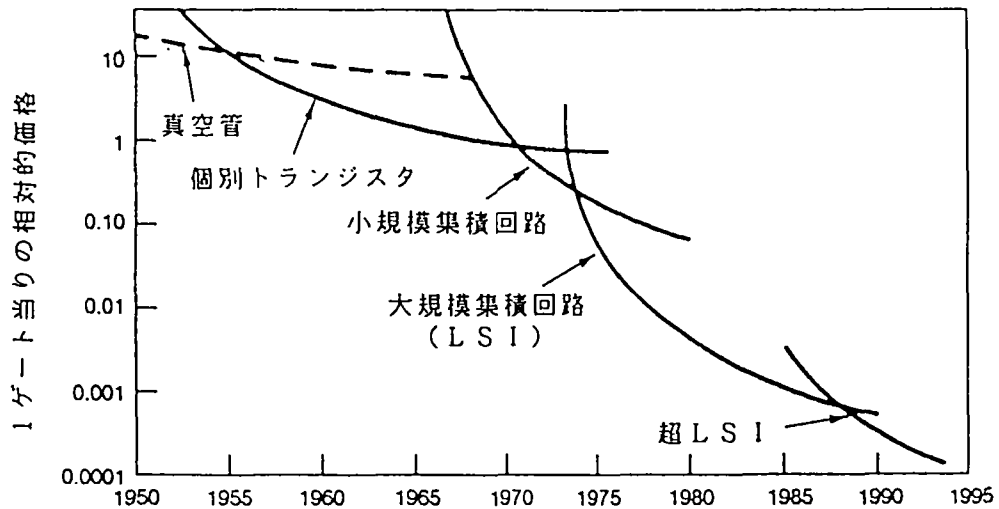
このように、微細化は多額の投資を必要とする研究の積み重ねであると同時に、結果が直ちに市場での収益に反映したまさに時代の核となる技術であったことがわかる。この点

図4-1. DRAMの技術トレンド



出典：新田(1992)

図4-2. 電子論理回路の価格の変遷



集積回路の導入以来、1ゲート当たりの価格は大きく下がり続けている
(ゲート：単一の理論機能をはたす回路)

出典：米国技術評価局(1992)

表 4 - 1. シリコンDRAMの将来動向 (1990年時点での予測)

シリコンDRAMの将来動向 (2/2)

	実 現 時 期		アクセス タイム	最小 線幅	ボトルネック／解決すべき技術的課題	左欄の課題を解決するための具体的方向
256M		1998 ～ 1999	40ns	0.2 μ	<ul style="list-style-type: none"> ・プロダクションアフィニティをここまで伸ばせるかどうか。 ・電源電圧の問題 (現在と同じ電圧でここまで縮小すると、ホットエレクトロン等、種々の問題が発生する)。 ・電源電圧を下げるという合意が広がる必要がある。 ・エキシマで行けるか、X線、電子ビームに移らざるを得ないかの分かれ目。多分、両方とも使わずに済むのではないか。もし使わざるを得ないとすると、過去の技術進歩のトレンドにのせることができず、ここまでのペースで製品を提供できるかどうか分からない。 	
	1995 ～ 1996	2001 ～ 2002	40ns ～ 60ns	0.3 μ ～ 0.2 μ	<ul style="list-style-type: none"> ・リソグラフィ (パターン精度、合わせ精度) ・トランジスタ耐圧、信頼性 (現在のLDD構造はダメ) ・配線材料のマイグレーション (Al, Cu はダメ) ・メモリセル (構造、キャパシタ) 	<ul style="list-style-type: none"> ・X線 (SOR) リソグラフィ、新アライメント構造の開発 ・高傾斜イオン注入トランジスタ ・新配線材料の探索 ・Ta₂O₅ キャパシタ ・SORリソグラフィ
	1995	2005	<100 ns	0.2 μ	<ul style="list-style-type: none"> ・リソグラフィ (エキシマレーザ等に代わる光源の開発) 	
1 G		2001 ～ 2002	—	0.15 μ	<ul style="list-style-type: none"> ・Physics, デバイスの動作原理が問題になってくる。 ・スタンバイの時にもエネルギーを消費する現象が起ってくる。 ・On-Offの区別が鈍くなる結果、動作電圧が高くなる必要が生じる。 ・10億個のデバイスを協調的に動かすことが難しくなってくる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・SOI, SIMOX等はキャリアのモビリティを落とさずに動作させることができる。 ・SOIが一つの突破口になれば1GDRAMの実現性が出てくる。 ・デバイスの動作原理に立ち帰った研究が必要
	2000 ～ 2002	2005 ～ 2007	40ns ～ 50ns	0.2 μ ～ 0.15 μ	<ul style="list-style-type: none"> ・リソグラフィ (パターン精度、合わせ精度) ・トランジスタ耐圧、信頼性 (現在のLDD構造はダメ) ・配線材料のマイグレーション (Al, Cu はダメ) ・メモリセル (構造、キャパシタ) ・発熱 ・高濃度化によるバンド間トンネル ・素子特性の統計的ゆらぎ 	
	2000	2015	<100 ns	0.1 μ	<ul style="list-style-type: none"> ・リソグラフィ ・量子効果・熱雑音の回避 	<ul style="list-style-type: none"> ・SOR縮小投影 ・低温動作化

表4-1. シリコンDRAMの将来動向(続き)

シリコンDRAMの将来動向(1/2)

	実現時期		77x8 タム	最小 線幅	ボトルネック/解決すべき技術的課題	左欄の課題を解決するための具体的方向
4M	1986	1989	80ns	0.8 μ	<ul style="list-style-type: none"> サブミクロンプロセスが生産ラインとして一貫プロセスを組むに足りるかどうか。 リソグラフィ技術(初めてサブミクロン領域に突入) メモリセルの立体構造化(トレンチ, スタック) 	<ul style="list-style-type: none"> 基本的に過去の延長線上で技術が整えられた。 g線ステッパ技術, それに連なるリソグラフィ応用。
		1989 ~ 1990 (第1世代)	80ns	0.8 μ		
		1990 (第2世代)	60ns	0.7 μ		
		1990	<100 ns	0.8 μ	<ul style="list-style-type: none"> リソグラフィ マスクアライメント クリーン化(水, 空気) 	<ul style="list-style-type: none"> g線の縮小投影
16M	1987	1992 ~ 1993	60ns	0.5 μ	<ul style="list-style-type: none"> リソグラフィの光源をi線にすべきかg線にすべきかの議論があろう。いずれにしてもエキシマレーザを使用するところまでは行かず, i線で行けるであろう。但し, 将来の技術確立のために第二世代でエキシマレーザを使う可能性はある。 キャパシタの方式の検討(スタックかトレンチか)。ひとりに比べるとトレンチに対する現実的な困難が認識されつつある。 従来の延長線上でラインを整えることができる。 	<ul style="list-style-type: none"> ウェハの大口径化(8インチ) i線ないしg線で行ける。 自動化ラインの確立
		1992 (第1世代)	80ns	0.6 μ	<ul style="list-style-type: none"> チップサイズが4Mに比べ1.5倍になる。 	
		1993~1994 (第2世代)	60ns	0.5 μ	<ul style="list-style-type: none"> 量産化技術確立 基本的技術は4Mと同じ 	
		1993	<100 ns	0.5 μ		
64M	1990	1995 ~ 1996	50ns	0.3 μ	<ul style="list-style-type: none"> エレメンタルなレベルで各社が技術を開発している段階 i線で行けるかどうか, エキシマレーザに本格的に移るかどうかの分かれ目になる。 エキシマレーザの信頼性による(オーバーオールにリソグラフィ用光源として使用に耐える安定性を出せるか否か) 	<ul style="list-style-type: none"> エキシマレーザステッパの実用化 トレンチ・スタック型メモリセルの開発。新スタックメモリセルの開発。Ta₂O₅ キャパシタの開発(窒素膜, 酸化膜でも行けるかも知れない。できるだけ新しい材料は使いたくない) 高安定エキシマレーザ
		1991 1社百万個の レベルならば 2000年	60ns	0.45 μ ~ 0.35 μ	<ul style="list-style-type: none"> リソグラフィ技術 メモリセル(容量値)>20fF) 	
	1990	1998	<100 ns	0.3 μ	<ul style="list-style-type: none"> 遠紫外リソグラフィ技術の実用化 	

出典: 日本電子工業振興協会(1990)

については、後の各種半導体デバイス製造技術であらためて検証される。

4. 2. 半導体デバイスの製造プロセスと技術課題

過去の半導体技術の変遷を振り返る前に、高集積化回路デバイス製造のための技術がどのようなプロセスからなるか、技術課題を踏まえつつここで概説しておく。

4. 2. 1. Ultra Clean 技術[5]

現在最も広く用いられている集積回路（T F T等の能動型ディスプレイを含む）は、純度の高いシリコン結晶基盤上に酸化絶縁膜を作り、素子パターンを彫りこみ、ここにリンなどの不純物をドーピングしさらにアルミ等の配線を蒸着して製造する。従って、まず欠陥の少ないシリコンウェハーを製造することが最初の課題である。しかし、原子レベルでの欠陥や不純物の混入を阻止することは決して容易ではない。そのための技術はクリーンルーム、純水製造装置などのクリーン技術と呼ばれるが、今や従来のレベルを越えたUltra Clean Technology が必要となっている。これは、Ultra Clean Surface, Ultra Clean Process Environment, Perfect Process-Parameter Control 3原則からなる[5]。この文献では、次の6項目をUltra Clean Surface 技術として上げている。すなわち、(1). パーティクル汚染の除去、(2). 有機物汚染の除去、(3). 金属汚染の除去、(4). 自然酸化膜の除去、(5). 表面吸着分子、(6). 表面マイクロラフネスである。この(1). ～(3). は、古くから知られていたもので、ウェット洗浄が有効とされる。しかし、微細化が進むに連れ問題となってきたのが(4). ～(6). である。これらは従来「クリーン」とみなされていた空気中でも容易に発生する。

(4). で注目されることは、水分のない純空気（純酸素と純窒素のみからなる）、超純水（溶存酸素量1ppb以下）のいずれの環境でも自然酸化膜成長が見られない点である。半導体プロセスはすべてが精密にコントロールされねばならないので、このような自然酸化膜成長を抑止するために、純空気、純水の製造技術も周辺技術として重要なのである。(5). 、(6). への対処は、空気に全く触れずかつ製造装置からの発じんを徹底的になくした密閉型自動化ラインが必要となると言われている[6]。

4. 2. 2. リソグラフィ技術[1]

シリコンウェハー上に素子パターンを転写する技術は、基本的に保護する部分を何かで

覆い、そうでない部分を薬品で溶かすという版画の技術と本質的に異ならない。しかし、この古典的とも言える技術があればこそ、集積回路デバイスは大量生産が可能となっているのである。

リソグラフィ技術は、基本的に素子形成のマスクパターンをシリコンウェハー上に投影し、エッチング保護膜を生成する。従来から縮小露光投影法、すなわちウェハー表面から距離をおいた位置にマスクパターンを置き、これをレンズ光学系で縮小してウェハーに投影する。これにより、マスクパターン作成の精度を向上させると同時に、ウェハー表面との干渉を抑えることができる。

微細加工のためのポイントは2点ある。第1は解像度、第2は焦点深度である。

解像度は光源の波長に逆比例し、投影レンズの開口数 NA に比例する[1]。一方、ウェハー上の素子は決して平面ではない。DRAMは原理的にキャパシタに蓄積された電荷が記憶保持であるが、20~40fF必要とされる容量はメモリセル内には確保できず、4MbitDRAM以降はスタック型と呼ばれるトランジスタ上部に積む構造やトレンチ型と呼ばれる分離部の下方に向けて溝を彫り、その側面を利用する構造が取られている。このように、平面技術のように思われる単層集積回路も、実際には3次元的な構造を利用している。このため、高さ方向の精度を保持する焦点深度の重要性も増してきた。この焦点深度は、しかし解像度とは逆に NA の2乗に逆比例し波長に比例する。そこで、 NA を抑えつつ光源の波長を短くする方向で研究が進められてきた。

現在多く用いられているのは、水銀灯を光源とする紫外線であり、4MbitDRAMまでは g 線(436nm)が用いられたが16MbitDRAMでは i 線(365nm)に高められた。

文献[1]によれば、1ショットの露光面積(20mm²平方)でのシリコンウェハーの凹凸とセル高低差を考慮すると1.5~2 μ mの焦点深度が望まれるとされるが、最近では i 線の解像力が大きく進歩し、焦点深度がかなり得られるようになったとしている。

解像度と焦点深度の双方を改善するには、原理的に光の位相も制御に含める方法が考えられる。すなわち、像にボケを生じる部分が干渉により弱まれば、それだけ解像度は改善されることになる。こうして、現在光源の可干渉性を高める超解像技術が注目されている。微細加工のためには、さらに波長を短くする研究が進められているが、光学系では、KrFエキシマレーザ(248nm)までが一つの限界と考えられている。その場合、高解像度に耐えるレジストの開発も重要である[1]。しかし、光学系の解像度は、0.2 μ mが一つの限界と考えられている[4]。

さらに波長を短くして解像度を上げるには、SOR（シンクロトロン光源）を利用したX線領域や、さらに解像度が問題とならない電子線ビーム露光が考えられ、以前から実験室段階で研究が進められている。事実、1983年の1 MbitDRAMでは、NTTは0.8 μm ルールによる電子線ビーム露光による試作品を発表している。しかし、従来の電子ビーム露光は光学系のように広い面積を一度に照射することはできず、ブラウン管と同様、スキャンしていかなければならない。このため、大量生産に向く方法ではない。この意味では、リソグラフィ技術の現行技術の技術的限界は常に研究開発の現場では意識されつづけ、平行して走る代替技術を横目に睨みながら研究が進められてきたと言えよう。最近では、マスクを利用した電子ビームの一括露光技術が実用レベルに近づきつつあるとされ、この意味では従来の光学系技術が次の段階に飛躍する時期が近づいたとも考えられよう。

4. 2. 3. エッチング技術

保護膜を付けた材料を腐蝕性の液体につけ、不要部分をエッチングする方法はさすがに半導体デバイスでは通用しない。レジストをつけたウェハの加工の方向性を制御せねばならないためである。従来はイオンを照射し衝突により物理的にパターン生成を行っていたが、その場合は基盤も同様に痛むことになる。そこで加工される物質と蒸気圧の他界物質を生成するF、Cl、Brなどを含むイオンを用い化学プロセスと併用することで選択的にエッチングを行うプロセスが現在課題となっている。

16Mbit以降のDRAMでは、ECR(electron cyclotron resonance)やマグネトロンを利用したプラズマ加工技術が考えられている[1]。

4. 2. 4. 配線技術

半導体が形成されても、配線を行わねばデバイスとして機能しない。ここで問題となるのは、ウェハ上に形成された半導体の上部だけではなく、下部からも導線を外部に導く必要がある点である。マスク生成からエッチングの段階で、当然下部電極と接続するための穴は開けてあるが、16MbitDRAM以降では従来のようなアルミ合金のスパッタリングでは下部電極まで届かず、穴をふさいでしまう。そこで、タングステンをCVD法で用いプラグを形成する技術が開発された[1]。

4. 2. 5. 検査技術

微細化工が進むと、製品やプロセスの検査技術も急激に困難なものとなる。図4-3、図4-4にはプロセスごとの評価項目とそのための技術を示す[7]。このように、検査技術はきわめて多岐にわたるが、これらの開発は微細加工技術と平行して進まねばならない。文献[7]では、現状でも検査が製造技術に一部追い付かない状況が見られる、というコメントがなされている。

半導体デバイスのプロセスの要素技術はきわめて多岐にわたり、以上で紹介したものはごく一部でしかない。表4-2には、文献[6]より製品別の要素技術の推移を引用したが、「3年で4倍」の集積度の高度化の背景に地道な技術の変遷のあることが見て取れる。

4. 3. 微細化と構造の問題

4. 3. 1. 微細化に伴う現象

以上から見られるよう、個々の技術の制約には物理的（理論的）限界が明らかに見えているものは光源による解像度・焦点深度の波長の制約のみである。

しかし逆に、微細化の進展には物理的な制約の壁はないのか、という疑問に行き当たる。本節では、微細化に伴う半導体デバイスアーキテクチャの物理的な限界について述べる。

先に、微細化の利点としてスケーリング則を示したが、このルールはどこまでも成り立つわけではもちろんない。理論的な問題点として、以下の3点が上げられる[3]。

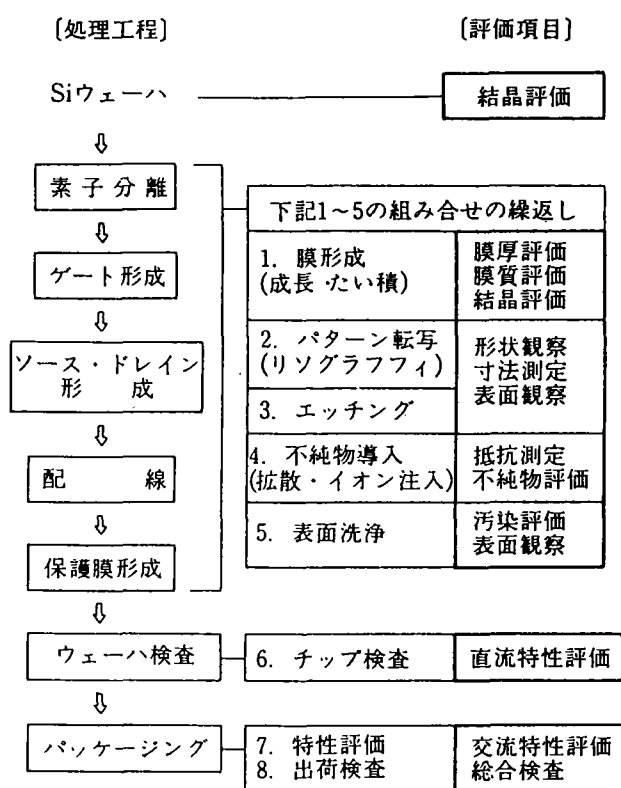
(1). 短チャネル効果

これは、チャネル（半導体のp層あるいはn層の電流の流れる長さ）が短くなるに従い、p層とn層の閾値電圧が低下する減少である。MOSFETでは、ソースからドレインへ、ゲート電圧により制御される電子または正孔のキャリアが流れるが、チャネル長が短くなるとこのドレイン接合の空乏層広がりが無視できなくなる現象である。従って、低いゲート電圧でも電流が流れてしまう。これを防ぐために、構造設計に様々な工夫がなされてきた。これをチャネルエンジニアリングと呼ぶ。

(2). 狭チャネル効果

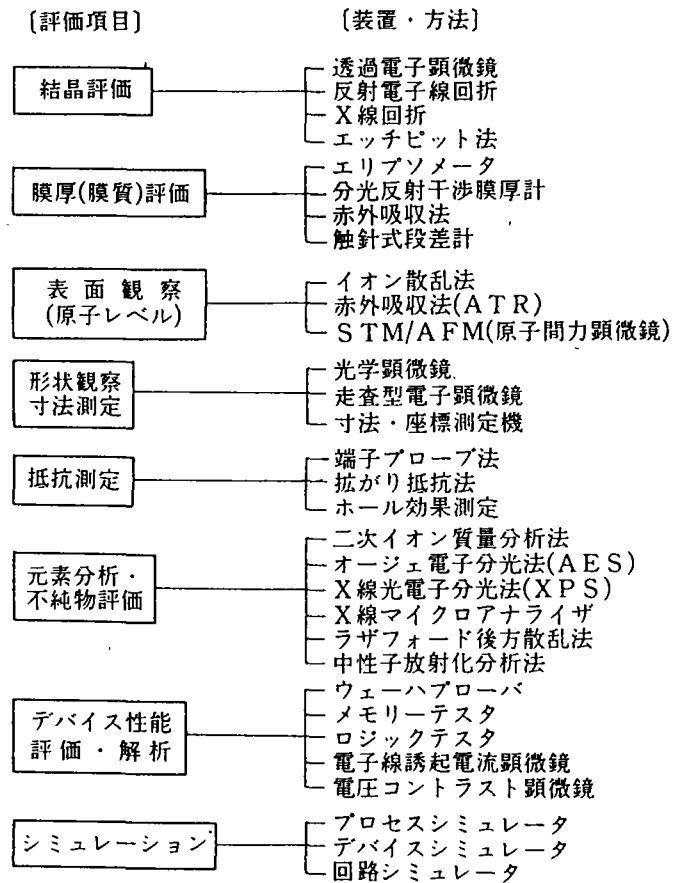
これは、チャネル幅が狭くなると、素子分離領域からの不純物混入のため、閾値電圧が高くなる現象である。これを防ぐためにフィールドシールドプレート型の素子分離技術が開発された。しかし、この技術は必ずしもすべてのデバイスに利用できるわけではない間

図4-3. MOSウェハープロセスと評価項目



出典：堀内(1992)

図4-4. 評価項目別の検査・評価技術



出典：堀内(1992)

表 4-2. 要素プロセス技術の推移

要素技術		開発方向	0.8 μ m	0.5 μ m	0.3 μ m
			4M	16M	64M
リソグラフィ	露光装置	短波長露光化	g線ステッパ1/5	i線ステッパ1/5	エキシマ
	レジスト		ポジ型単層レジスト	CEL	位相シフト
ドライエッチング		低エネルギー化 ウェーハ温度制御化	μ 波/マグネトロン	低温化	
CVD スパッタ	低圧CVD	界面高純浄化	横型炉	縦型炉	+L/L
	配線形成	高カバレシ化	マグネトロン+リークタイト	マルチ化	前処理CVD
	Via電極形成	低ダメージ化	テーパエッチ	BPSGリフロー	Wプラグ
	層間膜形成		無機SOG	有機SOG+エッチバック	NEW CVD
酸化・拡散	酸化	低欠陥化 (高純浄化)	横型炉	縦型炉	+L/L
	拡散 アニール	低熱処理化	炉体アニール(バッチ) 低温化	RTA(枚葉)	
製造装置		L/L 枚葉化 マルチ化	単能バッチ式	L/L	枚葉化 マルチ化

出典：新田(1992)

題がある。

(3). ホットキャリア注入による劣化

チャンネルを流れるキャリアがドレイン空乏層内で加速されると、結晶格子との衝突でホットな電子正孔対を発生することがある。これをドレインアバランシェホットキャリアと呼ぶ。これは、Si-SiO₂ 界面の電位障壁を越え、ゲート酸化膜中に捕獲されたりする。ホットキャリアは、基本的にチャンネル内の電界が高くなるに従って発生しやすくなるので、電源電圧を下げるのが対策と考えられる。例えば多くのIC、LSIの動作電圧は5Vであるが、近年3.3Vとする素子が増えている。これは、消費電力の削減だけでなく、発熱による熱暴走による誤動作、さらにこのようなチャンネル内の電界の低減の意味もある。

しかし、動作電圧の低下は、動作温度によっては熱雑音による影響を受けやすくなり、誤動作につながる危険性を増すことになる。そこで、1.5 μm から0.7 μm ルールのデバイスでは、動作電圧を5Vのままドレイン電界を低下させる工夫がなされはじめた。例えば、ドレイン側の不純物分布プロファイルを制御するLDD (Lightly Doped Drain) 技術と呼ばれるものがある。これらをドレインエンジニアリングと呼ぶ。

また、微細化が進むに連れ問題となったものに、ソフトエラーやエレクトロマイグレーションを上げることができる。前者はデバイスパッケージ中の極微量の放射性同位体から出る α 線が誤動作を引き起こす現象であり、後者は配線を流れる電子流のために配線中の金属原子が移動し、配線中にボイドやヒロックが発生する現象である。

以上の問題点は、基本的にアナログ回路としての問題点であるが、その範囲では以上のように何らかの対策技術が開発されてきた。256MbitDRAMで必要と予想される0.2 μm ルールまでは、アナログ回路技術の対策で対応ができるが、リソグラフィには先のエキシマレーザで可能か、X線あるいは電子ビーム露光技術が必要かどうかの分かれ道と予想されている[2]。しかし、そのさらに次世代の1GbitDRAMでは0.1 μm ルールが必要となり、ここで電子が粒子として振る舞い得る限界に達する。これはまさに物理的限界であり、デバイスの動作解析もアナログではなく量子論的振る舞いとして取り扱わねばならなくなる。これらを量子効果デバイスと呼び、まだ概念設計の段階であって実用化には今後相当な時間と研究が必要とされているが、そのような原子レベルでのデバイス製造の要素技術には、すでに開発済みのものがある[8]。これらは、量子効果デバイスのためだけでなく、先の64MbitDRAMや256MbitDRAMのようなアナログ集積回路の製造のためにも利用できるものと考えられる。

しかし、さらなる高集積化を行うための対策技術は必ずしも量子効果のみではない。以下に、アナログ技術の延長で集積化を高める技術として期待される多層集積技術に触れておく。

4. 3. 2. 多層集積技術について[9][10]

集積回路を多層化すれば、同じ $0.4\ \mu\text{m}$ ルールでもそれだけ集積度を高められることは当然であるが、しかし先に述べたよう単層デバイスそのものが決して平面のみで構成されているわけではないため、決して容易なものではない。ことに、各層の張り合わせ技術と素子の垂直方向の分離技術は難しい。

しかし、近年前者、ウェハーの張り合わせ技術も、後者の絶縁層埋め込み技術（SIMOX）とも基盤構成技術となりつつある[9]。SIMOX技術の歴史は古く、1966年に松下電器がSiに酸素を注入してSiO₂膜を作成した後、1978年にはSIMOX技術でCMOSリング発振器の試作を行っている。張り合わせSOI基盤上に実際にLSIを試作した例として、1987年の64kDRAMに始まり、1989年には256kbitCMOS-SRAMが上げられる。後者のSRAMは、DRAMに比べほぼ集積度が1/4になることから、SOI基盤の技術レベルはかなり高まったことがわかる。

米国でもTI、モトローラ、MITをはじめ研究が盛んに行われており、ヨーロッパでも英、独、ベルギー等で基礎から研究を行っている。このように、日本以上に欧米ではSIMOX技術のプロジェクトは盛んである[9]。

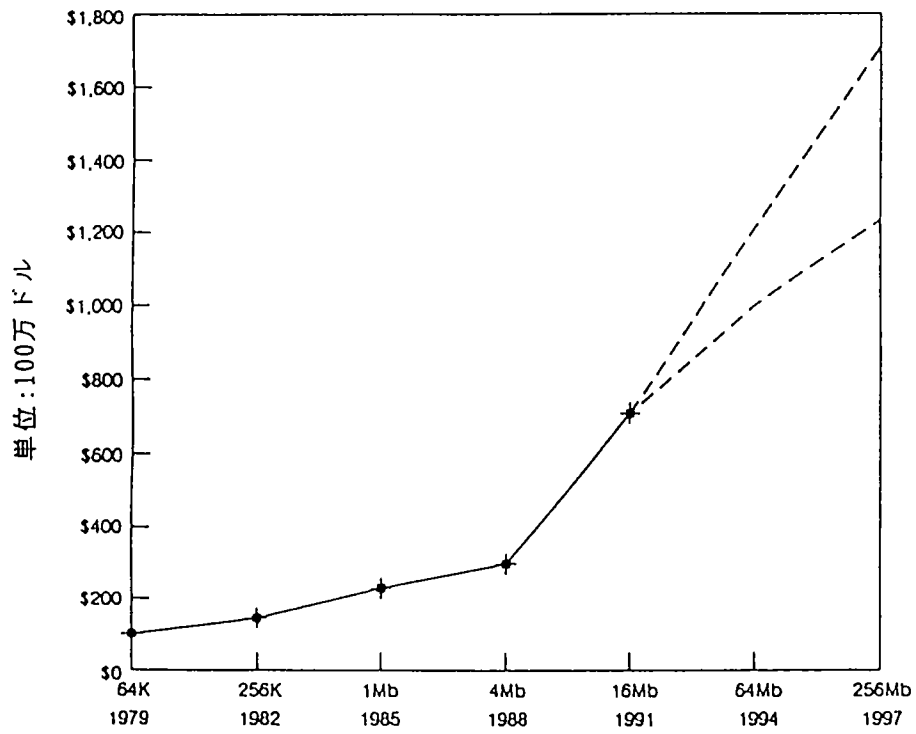
興味深い点は、電子工業振興協会[10]が1991年に技術者に対して行ったアンケートである。ここで、SOIは近い将来CMOSの高速化・高集積化に必要なとの認識が行き渡っており、その必要性が $0.2\ \mu\text{m}$ ルール以下の次世代技術の場合と、 $0.5\ \mu\text{m}$ ～ $0.25\ \mu\text{m}$ ルールの領域に分化している点であろう。すなわち、多層化技術には $0.2\ \mu\text{m}$ という先に述べた従来技術改良の限界を3次元化で克服しようとする期待と、それ以上の次世代技術のキーとして捉える見方が平行しているのである。

4. 4. 産業における半導体デバイス技術

新しいメモリ製造設備に多大な投資が必要なのは広く認識されている。図4-5には、文献[4]より新しいメモリ製造施設の建設費の予測がなされているが、R&Dまで含めれば、これ以上の投資が必要なのは明らかである。このため、果たして世界でどれほどの

図4-5. 新しいメモリ製造施設の建設費

(DRAM製造施設)



出典：米国技術評価局(1992)

企業が64Mbit、256bitという将来技術に参入できるのか、資金調達の問題を開発リスクまで含めて考えると、今後半導体技術がどのような開発形態になるのかは大変興味深い問題となっている。これは今回の報告では直接は触れないが、以上を振り返ると間接的にいくつかの知見を拾うことができる。

第1に、半導体デバイス技術の裾野は、きわめて広いという点である。単に微細加工のみならず、ultra clean な水や空気、一貫した製造装置が要求される。これらは、わが国の製造業の層の厚さを考えると、日本の有利な点の一つと思われる。

第2に、技術の限界を乗り越える様々な改良が不断に続いてきたと同時に、常にその限界に対する次世代技術が平行して走っており、しかも「微細加工」という視点で互いに補完しあっているように見える点である。度々述べたように、光学系リソグラフィ技術は半導体デバイスの量産化のための基幹技術であったが、同時にその技術的困難さや物理的限界が古くから意識されており、その度に電子ビーム露光やX線露光が代替案としていつ出るか、いつ出るとささやかれつづけた。これは、1985年次、1990年次の電子工業振興協会技術予測等をはじめ様々な技術予測報告書で見ることができる。

しかし、実際には予測された困難さは結局は従来技術の改良で切り抜けられてきた。と同時に、電子ビーム露光やX線露光技術の研究が低下したわけではなく、逆に先に述べたよう電子ビーム一括露光のような次世代の量産化技術が実現しつつある。すなわち、技術が本当の意味で物理的限界に達した場合の代替策がすでに意識されているのである。しかも、その先の量子効果デバイスの研究も盛んであり、すでに通信用素子としてはHEMTで実用化に達している[11]。これは、核融合や増殖炉に代表されるエネルギー技術のように「次世代」と唄われていた技術がなかなか実現しない間に、次第に研究そのもののポテンシャルが低下した状況ときわめて対照的である。

以上、半導体デバイスの技術動向を簡単に見た。このように、現状技術と次世代技術が同一企業内で平行して走りつづけ、互いに補完しあっているようにみえることは、基幹技術として誠に興味深いものがあり、基本的には、まだ当分はこの状況は続くものと考えられる。

しかし、微細加工技術は半導体技術の必要条件ではあるが、十分条件ではないことに気を付けておく必要がある。ここまでに述べた素子は基本的にDRAMという簡単な構成の素子をどれだけ多く一つの基盤に組み込めるかという、言わば数の論理であった。しかし、電子デバイスには記憶素子の他に論理素子（ロジック）、センサ、入出力デバイス、その他

の機能デバイス等様々なものがある。わが国の半導体産業は、とりわけ記憶素子やディスプレイデバイスに強く、論理素子で米国に遅れを取っていることは周知である。事実、1992年度、半導体部門で80X86CPUを武器としたインテルの売り上げはNECを抜き首位に立った。インテル自身は、ここまでに上げたような微細加工技術の発展推移の中に顔を出すわけではない。しかし、CPUという大規模システムのアーキテクチャ設計が鍵を握る素子では、必ずしも微細加工技術でトップを走る必要はない。極端な場合は、設計だけを行い、生産は他企業に委託しても利益を上げることができる。（もちろん、そのような行き方は短期的に利益を上げられても、長期的にその位置を保てるかは別問題である）スケールメリットを一筋に追求しつづけてきた半導体メモリも、近年ではその収益性にややかげりが見えはじめたと言われている。技術の広い裾野が巨額のR&D投資を要求し、一方で激しい企業間の競争は直ちに製品価格を下げていく。従来は、記憶素子の価格低下（図4-1）がそれ以上の市場を開拓したが、その趨勢が今後も続くか否かは、技術開発全体に影響する問題となったと言えよう。

（参考文献）

- [1] 小川「プロセス・加工技術」（『電気学会雑誌』Vol. 112, No. 1, 1992）
- [2] 日本電子工業振興協会『電子工業の長期展望』1990年3月
- [3] 篠崎「デバイス構造設計技術」（『電気学会雑誌』Vol. 112, No. 1, 1992）
- [4] 未来工学研究所報告書「微細化技術（その1）」（米国技術評価局レポートUSA02-22-92/1, 1992）
- [5] 大見「半導体製造システムの先端技術動向」（『電気学会雑誌』Vol. 112, No. 1, 1992）
- [6] 新田「装置技術」（『電気学会雑誌』Vol. 112, No. 1, 1992）
- [7] 堀内「評価・解析・検査技術」（『電気学会雑誌』Vol. 112, No. 1, 1992）
- [8] 蒲生「量子効果細線構造の作成技術」（『電子情報通信学会誌』Vol. 72, No. 12, 1989）
- [9] 日本電子技術振興協会『多層集積技術動向に関する調査研究報告書Ⅰ』91-基-20、平成3年3月
- [10] 日本電子技術振興協会『多層集積技術動向に関する調査研究報告書Ⅱ』92-基-19、平成4年3月
- [11] 伊東「量子ヘテロ構造FETの現状と将来」（『電子情報通信学会誌』Vol. 72, No. 12, 1989）

5. 総括

本研究で、我々は日本製造業の競争力源泉として広義の素材産業における技術開発力を取り上げ、その現状と課題を分析してきた。

鉄鋼、セメントを事例として検討した在来型素材産業については、その不断の技術的な改良改善が高品質素材の安定価格での供給を可能にし、製造業全体の競争力を支えてきたことが明らかになった。しかし、同時にこれらの業種では、世界最高水準を誇るエネルギー消費効率がいまや技術的な限界を迎えており、また高付加価値製品の低収益性が研究開発への利益再投資を抑制する危険性を孕んでいる。

半導体産業では、在来技術の改良と同時に、常にその技術の限界を乗り越える次世代技術の開発が平行して進められており、しかも改良と開発とが「微細加工」という視点で互いに補完しあってきたことから、当面、技術限界を迎える危険性は回避されている。しかし半導体産業においても、その幅広い要素技術分野が巨額の研究開発投資を要求する一方、激烈なシェア競争が絶えず製品価格を低下させているため、従来のスケールメリットの追及による収益性にかげりが見え始めている点が指摘された。特定の技術課題に複数企業が殺到し、開発の過当競争をもたらしてきた慣行が、研究開発投資の収益率の低下に帰結しているのである。また、半導体分野では製品市場が需要飽和に達したことから、研究開発投資が抑制されているという見方もある。

過当競争は素材技術の不断の改良と開発を促す一方で、その技術的成果の市場価格を低減させてきた。言い換えれば日本製造業は、財・サービスの価格を左右する本位機能を有する素材技術自体の価格を抑えることを代償として、その持続的な国際競争力を維持してきたのである。しかし、コスト低減に対応してきた技術改良が限界に達し、スケールメリットの追及が需要飽和に直面しつつある現在、なお素材技術の低価格・低収益性が続けば、やがて競争力の源泉そのものを枯渇させることになるだろう。

折しも、第一次石油ショック以降最悪と称される最近の景気後退の中で、企業は深刻な収益環境の悪化に直面し、92年度中に相次いで設備投資計画の見直しを行った。この結果、大手半導体メーカーの中でも、研究開発費の大幅削減を決定した企業が少なくない。

企業内における研究開発投資の低収益性に対処するためには、新技術のもたらす収益を必ずしもマクロ経済に還元してしまうことなく、産業内部に制度的にストックし、将来の技術限界を乗り越える次世代技術の共同開発のために活用していくシステムが必要になるものと考えられる。そのあり得べきシステムに関する検討は、また別の研究課題である。

付注：本報告書の執筆分担は下記の通りである。

第1章 菊池純一 永田晃也

第2章 永田晃也

第3章 菊池純一

第4章 森 俊介

第5章 永田晃也

なお本研究を進めるに当り、東京大学・人工物工学研究センターの馬場靖憲助教授
(元・科学技術政策研究所 第1研究グループ主任研究官)より助言を頂いた。

