

鉄鋼業の計測・制御技術の系統化

Systematization of Technology, "Instrumentation and Control in the Steel Industry"

岩村 忠昭 Tadaaki Iwamura

■ 要旨

大島高任が現在の釜石に日本最初の高炉を建てて今年（2008年）でちょうど150年になる。一方、世界で最初のコークス高炉は18世紀初頭であり、最初の木炭高炉にいたっては紀元前にできている。何処をはじめりとして比較するのは難しいが、いずれにせよ、日本の近代的鉄鋼業の始まりは遅い。また、第2次世界大戦直後では日本は鉄鋼業も壊滅状態であり、戦争で生じた鉄屑の電気炉を使つての再生から再出発となった。その日本がこの半世紀近く、世界の1割以上の粗鋼を生産し続けている。また同時に、各種の操業技術あるいは設備技術を世界に発信しており、量から質への転換により1970年代半ばからは世界のリーダー的存在といつて過言ではない。この半世紀の動きを振り返ることで、日本はどのようにして現在の地位を手に入れたのか、鉄鋼の設備技術者の立場から考えてみたい。

2章で日本の鉄鋼業の状況を概括する。戦後の状況は「(a)キャッチアップ期」、「(b)高度成長期」、「(c)量から質への転換期」、「(d)国際比価への転換期」の4つに大きくは分けられる。1955～1975である(b)の時期に鉄鋼の粗鋼生産量は1.2億トン／年に達し、世界の15%以上を生産するにいたっている。しかし生産設備や生産技術のほとんどは「欧米発」のものであり、日本はこの時期にそれらの技術を自分のものに消化していった。1975～1995である(c)がもっとも重要な時期であり、操業面でも鉄鋼設備や技術面でも大きな進歩があった。この時期に大きく発展した技術の一つにIT技術があり、それが鉄鋼の計測・制御技術を、ひいては日本の鉄鋼の技術を進歩させ、「日本発」の技術として海外に技術供与する。その後(d)の1990～現在において、韓国・台湾や中国等の新しい鉄鋼への参入国と生産コストで戦うことになる。労務費や本社費に圧倒的な差があり、苦戦を強いられ、リストラや大型合併が生じる。しかし21世紀に入つての、中国における新しい鉄鋼需要が世界の第2次成長を起し、日本においても生産量が維持・拡大されている。

日本の鉄鋼業のもっとも大きな特長は「臨海一貫製鉄所」での新しい設備による生産を基本としていることであり、原料に制約されない、かつ高い技術力に支えられた操業が、低い生産コストと高い製品品質を維持している。

3章で鉄鋼の主要プロセスについて戦後の日本における進歩を示している。プロセス上の大きな変革は、製鋼工程における「平炉から転炉へ」と「造塊・分塊から連続鑄造へ」の二つだけである。進歩の多くは、設備の「大型化」と「連続化」、そして計測・制御技術を中心とした「プロセスの見える化」である。

4章で鉄鋼における制御系を中心とした設備技術の同時期の進歩を示している。先ず計測・制御技術では欧米からの熱管理思想の導入が出発点である。官学からの指導や協力もあり、熱管理のための計測制御が鉄鋼設備の計装化を拡大していった。計測関係の開発では鉄鋼メーカー自身の力によるものが多く、非接触計測の採用、in situ センサの採用、さらには品質センサの重視が特長である。制御では1970年代のサプライヤによるデジタル化の推進がもっとも大きな貢献をしており、DCSやPLCの存在が複雑な制御を容易に実現している。計算機技術ではミニコンのプロセス計算機化、自律分散技術の普及、そしてマイコンを中心とするシステムのオープン化が大きな貢献を行なっている。電気技術では最も大きなものは圧延電動機の交流化であり、また電磁力や誘導加熱等の技術の各種応用がある。最後に制御論理ではAI技術を含めた経験則の活用や新しい制御理論の導入が進んでいる。なおこれらの各種技術の競争と協調の場として、日本鉄鋼協会の下部組織である例えば計測部会等がある。鉄鋼メーカー同士の情報交換の場だけでなく、ある場合は鉄鋼で先行した技術の他の産業への普及の場ともなった。

5章では鉄鋼プロセスの進歩に大きなきっかけを与えた個別課題を選んで、それらの系譜と評価をまとめている。

(1) 高炉プロセスの見える化、(2) μ 波応用計測システム、(3) 溶鋼の温度・成分のオンライン測定と転炉終点制御、(4) 連続鑄造溶鋼レベル測定と制御、(5) 圧延プロセスにおける板厚制御の進歩、(6) 鋼板形状の制御、(7) 製品品質センサとプロセスの見える化の7つのテーマについて記している。いずれの場合も「プロセスの見える化」がそのきっかけや進歩のkeyとなっているが、多くは機械技術をも含めた総合技術の成果である。

6章は全体のまとめであり、技術の系統化と今後の課題をまとめている。鉄鋼プロセスにおいては、(1) 臨海一貫製鉄所の建設、(2) 平炉における熱管理思想の実現、(3) 平炉の転炉化と転炉の高度化、(4) 連続鑄造化とその高度化、(5) 高炉の見える化と安定化、(6) 圧延設備の高機能化と連続化となる。制御系設備技術においては、(1) 熱管理思想の導入と実現、(2) 官学民での指導と鉄鋼協会共同研究組織の存在、(3) 1970年代のデジタル化とDCS,PLCの導入、(4) プロセス計算機の早期導入とそれへの習熟、(5) パソコンの活用とオープン化への動き、などが大きなインパクトとしてあげられる。

■ Abstract

It's been about 150 years since Takato Oshima constructed the Japanese first blast furnace in what is now Kamaishi City. The world's first coke furnace, however, was constructed at the beginning of the 18th century, and the first charcoal furnaces go back to ancient times before the current era. Although it's difficult to compare the origins of furnaces between countries, it can be said nevertheless that Japan's modern steel industry began relatively late. Furthermore, World War II left Japan and its steel industry in a state of destruction, and the reemergence of the steel industry began with the use of scrap steels that generated during the war.

For nearly a half century, this resurgent Japan has been producing more than 10 percent of the world's supply of crude steel. During this time, moreover, Japan has been disseminating a variety of new operating technologies and facilities technologies to the world, and it would be no exaggeration to say that Japan has been a world leader in this area since the middle of the 1970s. Looking back at the trends of this last half century, I would like to consider how Japan got its current position from the viewpoint of a facilities engineer in the steel industry.

In Chapter 2, I provide an overview of Japan's steel industry. Its development after the war can be divided into four main periods: (a) "catch-up" period, (b) high-growth period, (c) shift-from-quantity-to-quality period, and (d) international-parity period. Period (b) ran from 1955 to 1975, and during this time, crude-steel production in Japan achieved an annual rate of 120 million tons or more than 15% of world production. In this period, however, most production facilities and production technologies were of European or American origin, and those technologies came to be assimilated into those of Japan. Period (c), which covers the years from 1975 to 1995, is the most important period of all as great progress was made not only in operational aspects but also in steel facilities and technologies. One of the technologies that developed significantly during this time was information technology (IT), which helped to advance instrumentation and control technologies, and by extension, Japanese steel-production technologies overall. These "Japanese technologies" made contributions to the steel industry overseas. Finally, in period (d), which covers 1990 to the present, Japan found itself competing in production cost with new participants in the steel industry such as Korea, Taiwan, and China. The dramatic disparity in labor costs, corporate costs, and other expenses forced Japan into a hard fight giving rise to restructuring and major mergers in the steel industry. However, on entering the 21st century, new demand for steel in China gave rise to a second period of growth in the world steel industry, and production volume in Japan also has either held steady or expanded.

In Chapter 3, I describe the progress made in Japan after the war with regard to major steel-production processes. During this time, there were only two significant changes in the steel-production process: shift from open-hearth furnaces to converters and shift from ingot casting to continuous casting. Most of the advances involved the move toward larger facilities and continuous operation as well as "process visualization" centered about instrumentation and control technologies.

In Chapter 4, I describe the advances made in the same period in facilities technologies centered about control systems in steel production. First, in relation to instrumentation and control technologies, I describe the introduction of heat management concepts from Europe and the United States. At this time, the steel industry also received guidance and assistance from the government and academic institutions, and the adoption of instrumentation and control systems for heat management helped to expand the instrumentation of steel-production facilities. In the area of measurement, steel manufacturers often took it upon themselves to develop sensors, and they came to adopt non-contact measurement systems and "in-situ sensors" as well as quality sensors. In the area of control, the conversion to digital control equipment by system vendors in the 1970s made the greatest contribution, and the coming of distributed control systems (DCS) and programmable logic controllers (PLC) simplified the implementation of complex control tasks. Also, in the area of computer technologies, introduction of process computers using minicomputers, the spread of autonomous distributed technologies, and the trend toward open systems centered about the microprocessor all made big contributions to steel-production facilities. Advances were also made in the field of electrical technologies, with the most significant one being the conversion of rolling-machine electric motors to AC current. Electromagnetic power, induction heating, and other technologies also came to be applied in various ways. Finally, in the area of control logic, advances were made in the use of heuristics including AI techniques and in the introduction of new control theories. The Instrumentation Division and other committees of the Iron and Steel Institute of Japan have provided a competitive and cooperative forum in support of these various technologies.

In Chapter 5, I describe the history and give an evaluation of seven key themes that I have selected as major catalysts in the advance of steel-production processes. These themes, which are all related to the visualization of processes, are (1) visualization of blast-furnace processes, (2) microwave measurement systems, (3) online measurement of molten-steel temperature and components and control of converter end point, (4) measurement and control of continuous-casting molten-steel level, (5) advances in thickness control in the rolling process, (6) shape control in the rolling process, and (7) product quality sensors. Each of these themes acted as a catalyst to process visualization and became a key to major advances, and most of them resulted from comprehensive and total technologies that included mechanical technologies.

In Chapter 6, I give an overall summary, discussing the systematization of these technologies and future issues. In steel-production processes, I point out that (1) construction of coastal-based integrated steel mills, (2) application of heat management concepts to open-hearth furnaces, (3) conversion of open-hearth furnaces to converters and enhancement of those converters, (4) adoption of continuous casting and its enhancement, (5) visualization and stabilization of blast furnaces, and (6) development of high-function and continuous rolling facilities have all had a major impact on the steel industry. And in control systems and facilities technologies, I point out that (1) the introduction and incorporation of heat management concepts, (2) guidance from the government and academia and the establishment of steel-industry associations and joint research organizations, (3) digitization of control systems in the 1970s and introduction of DCS/PLC, (4) early implementation of process computers and their skillful application, and (5) use of personal computers and the open-systems movement have also had a major impact.

■ Profile

岩村 忠昭 Tadaaki Iwamura

国立科学博物館産業技術史資料情報センター 主任調査員

昭和41年3月 横浜国立大学 工学部機械工学科卒業

昭和43年3月 東京工業大学大学院 理工学研究科 制御工学専攻修士課程修了

昭和43年4月 川崎製鉄入社 製鉄所計測・制御の建設開発に従事

平成4年4月 水島製鉄所プロセス開発部長

平成6年4月 本社プロセス技術部長(理事)

平成9年6月 川鉄情報システム株式会社取締役

平成10年6月 川鉄電設株式会社取締役

平成12年6月 同常務取締役プラント事業本部長

平成14年6月 退職(嘱託)

平成16年6月 東京工業大学 大学院 イノベーションマネジメント研究科、産学官連携研究員、技術経営プログラム開発委員会

平成20年4月 国立科学博物館産業技術史資料情報センター主任調査員

■ Contents

1. はじめに	267
2. 日本の鉄鋼業	268
3. 鉄鋼プロセスとその進歩	273
4. 鉄鋼制御系設備技術とその進歩	283
5. 具体的技術革新とその系譜	307
6. まとめと今後の課題	340
7. おわりに	345
謝辞	345
略語集	345

1 | はじめに

今年（2008）は大島高任が現在の釜石（大橋）に近代製鉄業のシンボルとも言うべき高炉を独力で建設してから、ちょうど150年が経つ。ペリー等の外国船来訪の緊張感が漂っていた1850年代の半ば、伊豆韮山、佐賀、日立那珂等に反射炉が、いずれも日本人だけで造られている。そして日立那珂の反射炉を1857年に造った大島高任がより良い銑鉄を求めて58年に造ったのが大橋高炉であり、共に蘭書「鉄煩鑄鑑図（自分で翻訳）」だけが頼りであったことに驚きを禁じえない¹⁻¹⁾。その後、1880年官営製鉄所が釜石（高炉不調により83年に閉鎖し、86年に民営で再開）に次いで、1901年九州八幡に建設され、1934年には鋼材の自給率は100%を超えている。我が国の近代製鉄の夜明けとも言うべきであろうが、相応の歴史がある¹⁻²⁾。

しかし当時の粗鋼生産量は4百万トン程度（現在の1/30以下）であり、10倍以上の鉄を生産する米国に戦争を挑むことになる。そして完膚無きまでに叩き潰された戦後の焼け野原で、今後の立国は「鉄をおいて他には無い」との思いを我々の先達が持つ。

1951年の川鉄千葉の臨海一貫製鉄所着工を皮切りにひたすら高度成長を続け、1975年には全国で1.2億トンに到達し、そこから「量から質」に転換するが、世界の1割以上の鉄を造り続けた。そして高度成長期に取り入れた技術を、より洗練されたものに造り替え、世界に再発信することにより世界のリーダーとしての地位を築いていく。21世紀に入ってからは中国の目覚めにより、世界の生産量は倍増し、日本もそれまでの最高値を2007年に更新する。

20世紀の初め、ならびに戦後の高度成長期は製鉄技術は全て欧米からのものであり、「日本発」と言うものはほとんど見当たらない。例えば開戦直前に駆け込みで米国から八幡製鉄所戸畑に導入されたタンデム圧延機は、指導すべき米国人技術者がいないため、それがフルに能力を発揮できるようになるのは、戦後のGHQを介しての指導があったのであったと聞く。

日本で圧延機の国産化がはじまったのは1960年代であり、それまでは米国の壁はどうしても打ち破れなかった。日本が鉄鋼技術を世界に冠たるものとしていくきっかけとなった転炉や連続鑄造も当初は欧州発の技術である。また、今でこそ日本の鉄は世界一のエネルギー原単位を誇っているが、その重要な武器の一つとなったエネルギー回収設備のほとんどは海外発の技術である。我が国の計測・制御の指南役であった「熱管理

あるいは熱経済技術」は戦前に欧米からもたらされたものであり、GHQなどを介して戦後急激に普及する。

「鉄立国」を思い立った時、日本の技術的なポテンシャルをどう思い描いていたのであろうか。

我が国が転炉や連続鑄造を使いこなし、圧延機が国産化していくのは、サブランスや複合吹錬、モールド部の介在物処理や連々鑄、あるいは油圧圧下や形状制御、さらには冷延における完全連続化等々、従来技術の上に高度な付加価値技術を開発したことがきっかけになっている。これらは1970年代に開発されたものが多く、それを大きく後押ししたものに計測、制御、電気等の制御系の設備技術がある。本報告の中でいくつかの事例を紐解くが、操業技術が制御系の技術で洗練化され、完成度を高め、そして「日本発」の技術として海外に再発信されて行く。「重厚長大」とあまりありがたくないニックネームをつけられた鉄の技術も、それを裏でしっかりと支える技術は「軽薄短小」をも取り入れた総合技術なのである。

自分自身の現役時代を振り返ってみる。入社とともに、他では見たことの無いプロセス計算機を任せられ、ロードセルを初めとする多くのセンサを調査し、未発達だった新技術の完成度を高め、メーカでは供給できなかった新原理のセンサの開発に取組み、ちょうど油の乗り切ったときにDCSやPLCなどのデジタル化技術の洗礼を受け、その恩恵を享受する。さらにLANやPCなどのオープン化技術を業務に取り込んでいくなど、まさにIT技術がゆりかごから墓場までを用意してくれた感がある。

このような背景の下で鉄鋼業の計測・制御の技術的歴史を振り返り、それが戦後の日本の発展の中でどう寄与し、さらにこれからどう発展できるのかを考えてみたい。「計測・制御」の役目は一言で言うと「プロセスの見える化」であり、単に見える状態にするだけでなく、見えたことによりどう操業にフィードバックするかを与えて初めて仕事が終わる。

本章の参考文献：

- 1-1) 半沢周三：「日本製鉄事始 大島高任の生涯」、新人物往來社、1974
- 1-2) 飯田賢一：「日本鉄鋼技術史」、東洋経済新報社、1979

2 | 日本の鉄鋼業

本章においては鉄鋼業そのものを紹介し、全体的な20世紀の日本鉄鋼業の推移と製鉄所の状況を説明する。

2.1 20世紀における鉄鋼業の推移と日本

2.1.1 20世紀の鉄鋼業

20世紀は「鋼の時代」と言われる²⁻¹⁾ように、鉄鋼の製造技術と製品は多様化し、量的にも後半に急拡大した。図2.1に20世紀の粗鋼生産量の推移を全世界ならびに日本で示している。量的拡大は第2次大戦後急速に進み、わずか30年足らずで7倍の生産量7億トンに達した。そこが一つの飽和点であるかに見えたが、20世紀末から中国等の社会資本の充実を目指す国においてニーズが拡大し、新たに急激な生産拡大が起こっている。

日本の鉄鋼業は20世紀当初の1901年に官営製鉄所の誕生があり、1934年（昭和9年）には鋼材自給率も100%を越えるにいたった²⁻²⁾。

しかし、1941年の太平洋戦争開戦時点でも鉄の生産量は「敵国」米国の1割以下（表2.1参照）であり、それも敗戦により壊滅的打撃を受けた。戦後にゼロリセットの形で復興が始まり、15年後の1960年には世界の6%以上の粗鋼を生産するまでに回復かつ成長した。1950年前半の富士製鉄（日本製鉄から分離）広畑における一貫化計画の実施、および一平炉メーカーであった川崎製鉄での新規千葉製鉄所と高炉建設の成功がいわゆる「臨海一貫製鉄所」の契機となり、その後の日本の驚異的な成長につながった²⁻²⁾。

表2.1 日本の粗鋼生産量 百万t/年（データ:IISI）

	1900	'41	'50	'60	'75	2000	'06
世界	28	154	190	347	644	848	1244
米国	10	75	88	90	106	102	98
日本	>1	7	5	22	102	106	116
同%	>4	4.5	2.6	6.3	16	13	9.3

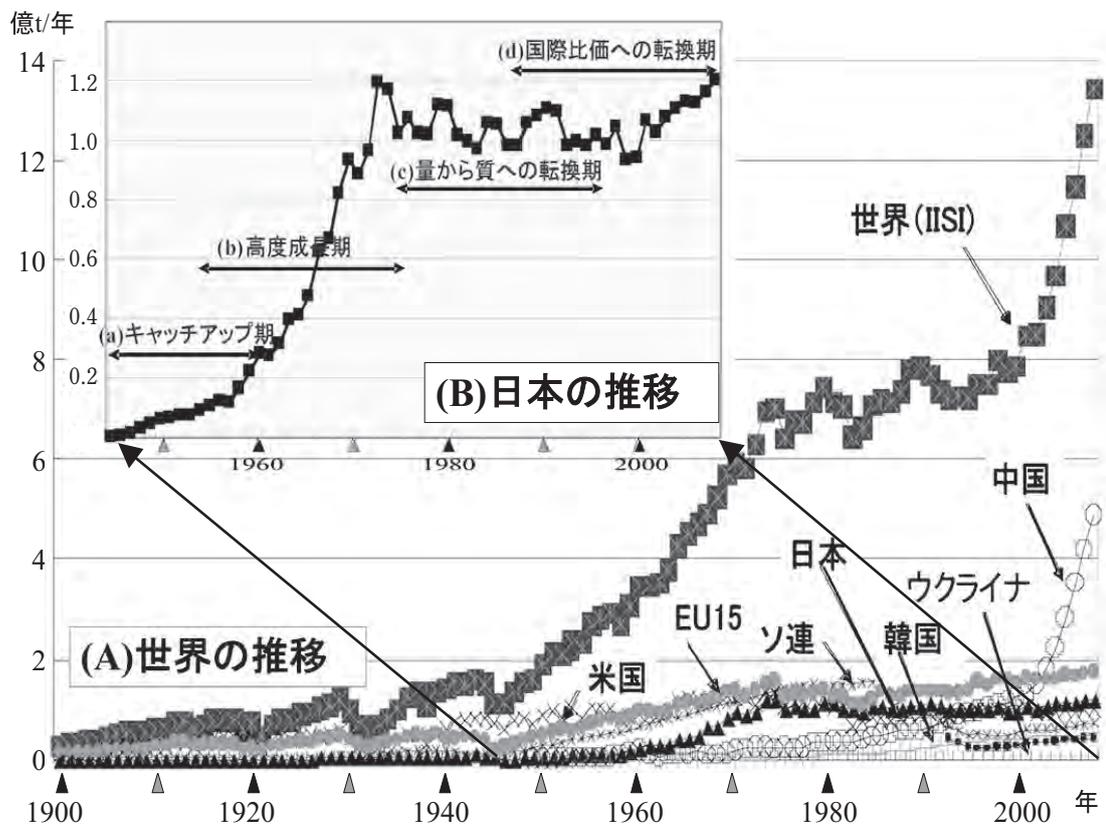


図2.1 20世紀の世界の粗鋼生産量（データ:IISI 国際鉄鋼協会）

2.1.2 日本の戦後の鉄鋼業

戦後の半世紀の動きを以下に概括する²⁻²⁾²⁻³⁾。

(a) キャッチアップ期：～1960

戦後の復興期であり、大きくは三つの時期に別れる。一つは1950年までの戦前型生産構造への復帰である。1950年の「朝鮮動乱」の勃発が、日本鉄鋼業復活の大きな追い風となった。

二つ目は、戦後型生産構造を目指した「第一次合理化計画」の作成と実施であり前述の広畑製鉄所や千葉製鉄所はその一環である。

三つ目は高度成長期と一部重複するが、上記の成果の上にさらなる投資計画（第二次合理化計画）を実行し、折からの日本経済の高度成長に対応できる体制が作られた。この時期においてはキャッチアップの課題はほぼ果たし、世界のトップグループへの仲間入りを果たしつつあった。

(b) 高度成長期：1955～1975

広畑製鉄所や千葉製鉄所の成功が、日本各地に大型臨海一貫製鉄所の建設に引き継がれ、急激な量的拡大があった。図2.2に現在の臨海一貫製鉄所の一覧を示すが、図に*印をつけた神戸、和歌山、名古屋、呉、福山、倉敷（水島）、君津、鹿島、加古川、大分、京浜（扇島）と20年の内に実に11臨海製鉄所がさらに完成した。1975年には粗鋼ベースで生産量は年産1億トンを超え、世界の16%を生産するようになり、名実共に世界をリードする立場になった。この時期、多くの製鉄設備や操業技術は欧米から輸入されたが、それらは新しい製鉄所の建設と1億トン/年越えの生産の中で、完全に消化されていった。

(c) 量から質への転換期：1975～95

2度にわたるオイルショックから高度成長の時代は終わりとなり、安定成長の時代となる。鉄への要求も量から質に転換する。この時期、生産量が横這いの中で、鋼材平均歩留まりで約1割、エネルギー単位で約2割、労働生産性では実に約5割の向上を得ている。同時に製品の付加価値の向上も得られている²⁻³⁾。

この質への転換を支えるものの一つとしてIT (Information Technology) † 技術の進歩による計測制御技術の急速な導入がある。ちょうど制御装置のデジタル化が進み、またプロセス計算機の高機能化が進んでいる。例えば一つの製鉄所でのプロセス計算機のソフトウェアの所有量はこの20年間で40倍以上になっている。またこの時期は高度成長の中で消化し蓄えられた操業および設備技術が日本固有のものとして再生産された時期である。上記計測・制御技術との結びつ

きが、技術をさらに高度化し、日本固有の技術に昇華していった。操業に大きな変革を与えた「日本発」と考えられる技術の実用化は、まさにこの時期に開発され、実用化された²⁻⁴⁾。



図2.2 日本の臨海一貫製鉄所

(d) 国際比価への転換期：1985～

韓国や台湾をはじめとするいわゆる当時の中進国が、鉄鋼生産に国策として進出し、最新の設備と人件費の安さを大きな武器として日本を猛追してきた。円高の急速な展開がそれに拍車をかけ、鉄鋼製品もグローバルプライス（国際比価）で2割近い差をつけられる状態であった。本社費や労務費がその差の原因であり、いわゆるリストラ²⁻⁵⁾や、それまでの常識を破る大型合併に進んでいった。設備投資や老朽化更新も一時的に抑えられ、ソフトウェアなど投資効率の良い分野に限られていた。また、それまで鉄を支えていた設備メーカーにおいても鉄対応を縮小せざるを得ず、メーカーにおけるリストラや再編成が進んだ。

†：本文末に略語一覧を示す。

2.1.3 21世紀の状況

20世紀末から中国や中東諸国を中心とする鉄の消費量の急速な拡大が起こり、図2.1に示されるように世界の鉄生産の第2次成長が起こった。そしてそれに支えられる形で日本においても生産量の拡大が起こっている。

2007年の13億tという数字は莫大な量である。総重量10万トンの霞ヶ関ビルが年に13,000も建設が可能であり、60mm×7mの鋼板で月まで橋がかかると言われる。

表2.2に人口あたりの見掛け鉄消費量を示すが、中国は社会資本が整備された場合に落ち着くと言われる

0.4～0.6トン/人・年²⁻²⁾にはまだまだ達しておらず、今後さらにニーズは拡大し続けると考えねばならない。旧ソ連、中東、インド等も同様である。

逃げ道はある。但し最近の資源民族主義の高まりや、良質石炭の枯渇は大きな問題である。

表2.2 各国の鉄鋼見掛け消費量

kg/人・年 (生産+輸入-輸出) データ：鉄鋼統計要覧

国	'80頃	2000	2006	中国		109	286
米国	800	472	424	中東		149	235
ソ連		161	232	インド		90	41
EU15	560	431	465	日本	660	627	650
韓国	200	1015	1051	世界		151	202

一方、資源面から考えた場合、鉄はまとまって存在する鉱物資源としては埋蔵量最大のものである。資料²⁻¹⁾によれば確定埋蔵量で1,500億t、確定・推定埋蔵量合計で3,000億tと言われており、単純計算をすると、現状では50から100年は大丈夫と言える。資源問題は新しい技術の進歩で先伸びするのが常であり、また鉄の場合は低品位鉱(1兆トンの埋蔵量がある)の利用や、スクラップの再資源化(2007年で約27%)に

2.2 現状の製鉄所の状況

2.2.1 臨海一貫製鉄所

日本においては前述の大型臨海一貫製鉄所が現在の基本的な姿であり、図2.2に示すように15(広畑を含めると16)製鉄所が存在する。臨海製鉄所においては石炭や鉄鉱石等の原料供給にとられない立地条件を得ることができる。良質な原料を選択的に使用し、操業の安定や製造歩留まりを高め、それらによる効率的な製鉄所運営が日本製鉄業の大きな武器となった。現時点において73%の鉄鋼生産が臨海一貫製鉄所で行なわれており、他は電気炉による生産である。電気炉の場合は、多くは原料である屑鉄を得やすい都市部に立地されたが、最近は臨海に製鋼以下一貫の形を取る(あるいは臨海一貫製鉄所内に設置)場合も出てきている。

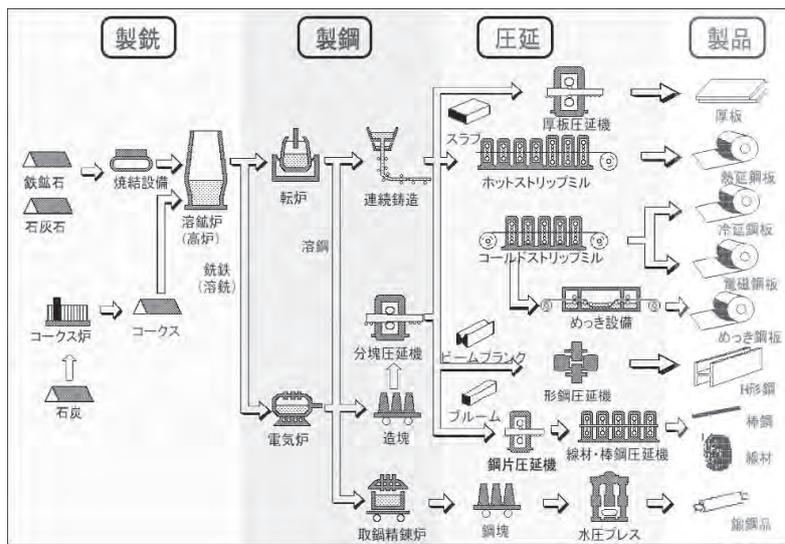


図2.3 臨海一貫製鉄所における工程と製品例

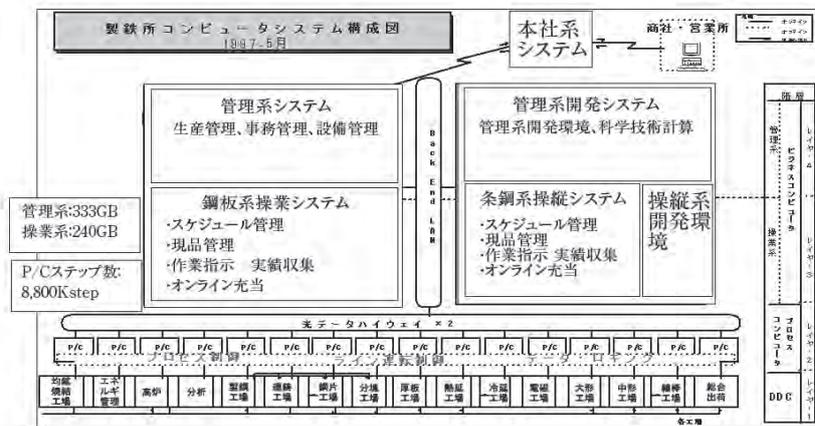


図2.4 大型一貫製鉄所の計算機階層構成の例(1990年代後半)

2.2.2 一貫製鉄所の工程

図 2.3 は一貫製鉄所における生産工程と主なプロセスならびに製品例である。鉱石やコークスは一般的に一ヶ月以上の在庫を持つ必要があること、ならびにユーティリティを含め多種多様なプロセスを内蔵する必要のあることから、1 m²/粗鋼トン・年以上の敷地面積が必要となり、広大な敷地に様々なプロセスが存在することになる。年産 1000 万トン製鉄所では、JR 山手線の半分くらいの規模に、原料の受け入れと貯蔵、さらに後述する製鉄、製鋼、圧延の各工程が整然と合理的に配置されている。

2.2.3 情報システムの構成と機能

一貫製鉄所は少数の原料から多数の製品を作り上げていく典型的なブレークダウン型工程（対照的なものは自動車などのビルドアップ型）である。製品は材質や形状での分類では 1 万種類を越え、またそれらの多くがいわゆる「紐付き」と呼ばれる注文生産の形態をとる。したがって厳密な生産管理が必要であり、高度な計算機階層の中に全情報が組み込まれる²⁻⁶⁾。最初の製鉄所オンライン総合管理システムは 1970 年新日鐵君津製鉄所に世界に先駆けて完成した。その後、日本の一貫製鉄所では次々と構築された。図 2.4 は大規模製鉄所における 1997 年頃の計算機階層構成であり、製鉄所レベルで 3 または 4 階層の構成を取っている。最下層は計装または電気の制御装置であり、それぞれ PLC (Programmable Logic Controller) および DCS (Distributed Control System) がデータの収集と制御を担当している。また、3 万点程度のセンサがプロセス情報を PLC や DCS を通じて 24 時間リアルタイムで取り込まれている。そしてビジネス計算機に言語として Cobol 主体、プロセス計算機に Fortran や C 言語主体の巨大なソフトウェアが操業を支配している。

センサやソフトウェアに基づいた製鉄所の運営は、有形な情報に基づいた工場管理であり、それ自体は日本の産業界の中でもその先駆けとなる非常に先進的なものであったが、それらの膨大なシステムの維持管理や技術継承²⁻⁶⁾や技術流出と言う面で見ると、いくつかの問題を抱えた。

2.3 日本の製鉄業の特徴

2.3.1 高度な操業・設備技術

日本の鉄鋼業は戦後、西欧の操業・設備技術を導入し、熱管理や品質管理の諸管理手法もドイツやアメリカ

から学ぶことで発展した。1970 年代には量的にも質的にも西欧諸国を完全にキャッチアップし、それまでに導入した技術を、より完成度の高い「日本発の技術」として多くを発信するにいたっている。鉄鋼の場合、技術貿易では取引量そのものは高くはないが、1975 年以降つねに輸出が輸入量を上回っている²⁻⁴⁾。この数字には日本の設備メーカーから直接輸出されたものは入っていないため、実質的な数字はより輸出額が大きいものと思われる。

「日本発の技術」の基本的な取組みは「プロセスの見える化」と「プロセスの連続化（自動化を含む）」であり²⁻⁴⁾、その成果が前項で示した情報システムに取り込まれ、高度な生産体系を具現化し維持している。

2.3.2 低いエネルギー原単位と高度な製品品質

日本の鉄鋼業の強みは、一つは鉄鋼製品全体に関して生産性や品質が高いことであり、もう一つは付加価値の高い高級製品に強いことである。

製造コスト面では本社費や労務費に弱点はあるが、「量から質への転換」時点での技術的な取組み、ならびに「国際比価への展開」で行なわれた経営的努力が現状でもわが国の競争力を高いものに維持している。主要操業成績の一つであるエネルギー原単位はこの半世紀で半減しており、現状の国別比較を図 2.5 に示すが、中国や西欧の諸国より 2 割以上優位な立場であることが判る。

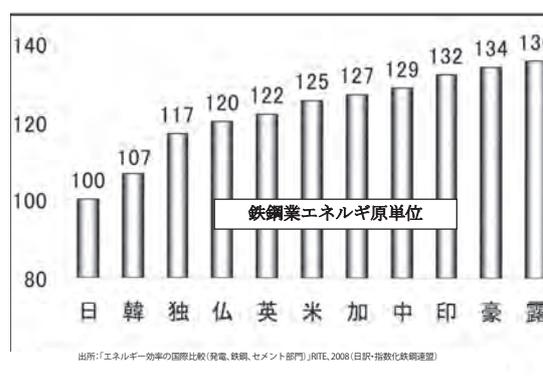


図2.5 鉄鋼業のエネルギー原単位各国比較

製品の高級化と言うことでは、腐食に強い表面処理鋼板、合金化や熱処理により鉄の機械的強度を高める高強度鋼、Ni, Cr, Si 等との固溶体を作ることで美しさ、耐腐食性、対電磁気特性等を大きく改善したステンレス鋼や珪素鋼（電気鋼板）が挙げられる。図 2.6 に国際市場における品種ごとの日本の輸出シェアを示しているが、高付加価値製品における優位性が明らかである。

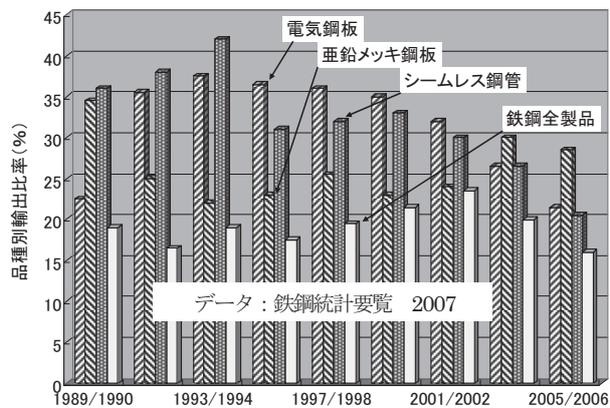


図2.6 高付加価値製品の輸出シェア比較

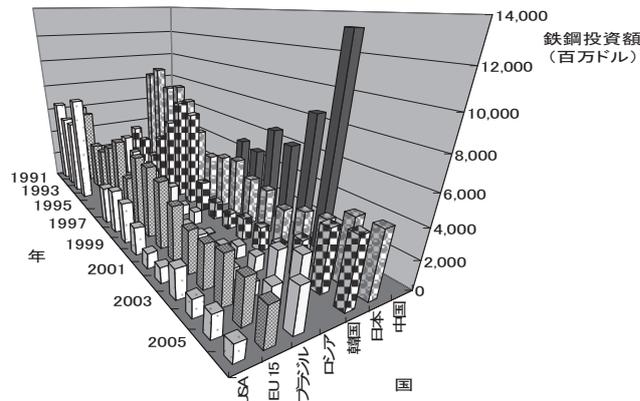


図2.7 鉄鋼関連主要国設備投資状況
データ 韓国鉄鋼協会 鉄鋼統計年報 1999～2008

2.3.3 設備投資状況について

図 2.7 に最近の設備投資状況をまとめる。

- (1) 中国の最近 2 年のデータは不明であるが、やはり中国の投資が群を抜いているのは間違いない。
- (2) 米国は明らかに投資が減っており、今後も復活の見込みは少ないと思われる。
- (3) ブラジル、ロシア、ならびに韓国は 2000 年前後に投資が落ちたが、最近では復活しており、特に韓国は最近日本に迫る勢いである。
- (4) 日本も 20 世紀後半から投資が落ちており、先にも述べた通り投資効率の良い分野に限定されていた。また設備の長寿命化が投資を抑える方向に寄与したが、最近の高生産状態から設備更新が必要になってきており、事実投資も増えてきている。

本章の参考文献：

- 2-1) 下村泰人：「20 世紀鉄鋼技術史のトピックス」、日本鉄鋼連盟、1995
- 2-2) 上岡一史：「戦後日本鉄鋼業発展のダイナミズム」日本経済評論社、2005
- 2-3) 岩村忠昭：「計装エンジニアの道 製鉄業における計装エンジニア」、計測と制御、35-11、p. 890-894、1996
- 2-4) T. Iwamura: “Breakthrough Control Technologies in the Japanese Steel Industry”, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration Vol.1 No. 5, pp. 001-010, Sept. 2008
- 2-5) 江本寛治：「転換期の日本鉄鋼業と川鉄のリストラチャリング」、ふえらむ、4-9、p9-14、1999、日本鉄鋼協会
- 2-6) 十名直喜：「鉄鋼生産システム」、同文間、1996

3 | 鉄鋼プロセスとその進歩

本章においては主要な鉄鋼プロセス、およびその20世紀後半における進歩について説明する。なお、形鋼、鋼管、表面処理については、紙面の都合で省略する。

3.1 全体感

図3.1に鉄鋼プロセスの大きな特徴である工程毎の温度推移を示す。各工程間で1000℃近い温度の上昇と降下が起きており、したがってエネルギーロスがどうしても大きくなる。まず、工程の省略や設備の連続化によるそれらの上下動の削減がプロセス変革のターゲットであり、「造塊・分塊から連続铸造へ」、あるいは「バッチ焼鈍から連続焼鈍へ」などの変革はまさにその典型である。同時に鉄鋼設備にはこのような温度の上下動がどうしても残るが故に、設備の大型化による熱原単位削減やエネルギー回収が大事となる。さらには高温プロセスであるが故に設備の長寿命化はいつまでも付きまとうテーマである。

表3.1にプロセス毎の系譜をまとめる。

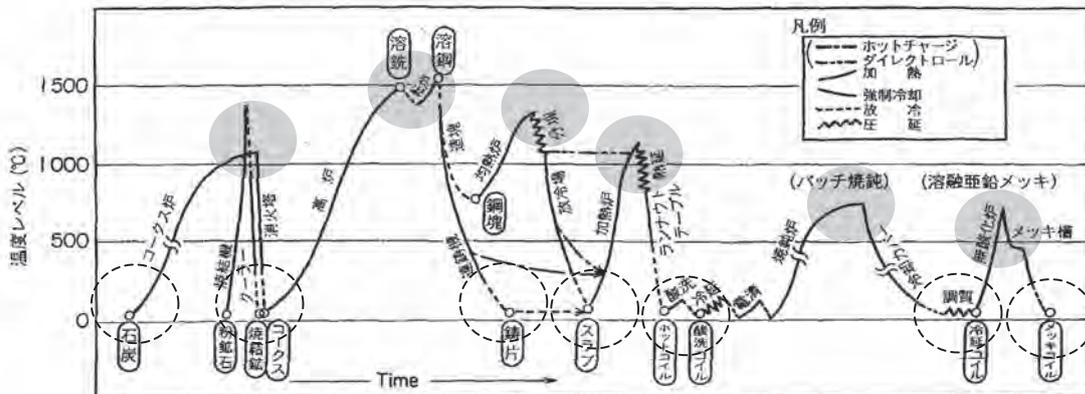


図3.1 鉄鋼プロセスの特質(工程間の温度変化) 片田:鉄と鋼,64-13,P1835,1978

3.2 製鉄プロセス

表3.1(A)に製鉄プロセスの主な変化を示す。プロセスそのものの変革は少なく、長寿命化とプロセスの大型化が主な進歩である。

3.2.1 コークス炉

高炉での鉄鉱石の還元剤となるコークスを石炭から乾留するプロセスであり、日本への最初の導入は19世紀末のコークス製鉄(従来は木炭)の普及に伴うも

のである。図3.2にコークス炉の全体構造を示す³⁻¹⁾。図の炭化室に石炭が装入され、サンドイッチ状に配置された燃焼室(多数のフリュー(加熱煙道)に細分化)からの熱で乾留される。

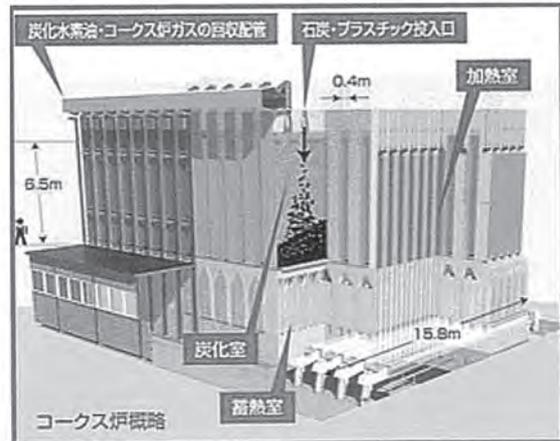


図3.2 コークス炉の構造 3-1) p57による。

コークス炉は高炉にコークスを供給するばかりでなく、一貫製鉄所に熱量の高いコークス炉ガスを供給する役目があり、製鉄所のエネルギーバランスの面でもその安定操業は重要である。

プロセスの進歩としては高炉の大型化に対応した①炉の大型化(戦前は一炭化室の体積が20 m³以下であったものが1976年には50 m³以上になっている)、ならびに乾留後のコークスを不活性ガスで急冷させ、そのガスの潜熱を蒸気で回収するCDQ(Coke Dry Quench)の普及がある。CDQは従来の水冷方式に比して製品に水分が残らないこと、ならびに大気への

表3.1 主な鉄鋼プロセスの進歩

イタリック：海外の事例

1900	1940	1950	1960	1970	1980	1990	2000	2010
		(a) キャッチアップ期	(b) 高度成長期		◎量から質への転換期		(d) 国際比価への転換期	
太平洋戦争開戦	終戦	朝鮮戦争	東京オリンピック	オイルショック	チェルノブイリ原発事故	東西ドイツ統一	中国・インドの発展	
八幡宮製鉄所 (1901)	粗鋼生産量0.07億t (1941)	川鉄千葉製鉄所	鋼管福山、川鉄水島、新日鉄君津	粗鋼生産量1.2億t (1973)	粗鋼生産量1億t (1982)	粗鋼生産量1億t (1995)	粗鋼生産量1.2億t (2006)	
A. 製鉄工程			コークス炉					
1930年代「日鉄式」コークス炉 3~4m			1961 新日鉄・室蘭 4.6m 1960年代 成型研究	1976 NKK 扇島 7.55m 1976 CDQ			炉壁監視装置 ガラスコーティング 2010 JFE倉敷新設予定	
1857 日本最初の高炉 (大島高任)	冷え込み爆発	複合送風 ターナル・重油吹込み 高圧操業	高炉 スチープ冷却装置 炉頂圧降電 高炉解体調査 (融着帯の発見)	①大型化 ②プロセスの見える化 高炉操業安定化 微粉吹込み(PCI) エキスパードシステム 中間補修技術			②量産命化 超短期改修技術 精緻なプロセスモデル	
1901 八幡宮製鉄所								
高炉内容積 1105m³	1603m³	2021 3016	4063 5050				5555 5775m³	
高炉寿命 年	3~5年	3~5	5~7				20~25	25~年
B. 製鋼工程								
1860 シーメンス・マルテン 爐酸性平炉 1880 ベッセマー 転炉 1930 トーマス爐酸性転炉	平炉	①熱管理手法 ACC制御装置 融業大量吹込み 1957 八幡宮同炉へ転炉導入	転炉への早期転換 サブランス 1977 川鉄千葉Q-BOP 転炉炉寿命急速に伸張: 2030→5035→6666回		①大型化 ②炉寿命増大 動的吹練制御 複合吹練 83%	③複合吹練 ④サブランスと計算機制御		
アルミ、真鍮の連鑄化			連鑄への早期転換 電磁攪拌 操業中幅変更 連鑄技術進展 モールドレベル制御高度化		①大型化 ②連鑄 電磁ブレーキ タンディッシュ加熱 HCRの進展	③モールド ④電磁力、 レベル制御 ⑤HCR、 タンディッシュ無酸化加熱 (リジエネバーナ) 鑄型内流動制御		
転炉生産能力 ton/ch (50 ton/ch)	0	150	220 320	30~60	60~95	350	95~	~100
連鑄比率 %	0	0	5~30	30~60	60~95	95~	95~	~100
C. 圧延工程								
1920 蒸気駆動→電動化	1941 日本初の厚板設備 日鉄八幡		厚板 制御冷却					
1924 米国アッシュランド 連鑄シートミル →ローリングラウン 1926 米国ハトラー 連鑄トリップミル →4Hi、ローラー-Brg/ 1945 米国&L	1941 日本初の熱延設備 日鉄八幡		連鑄熱延 制御冷却					
1940 日本初の冷延設備 日鉄戸畑			連鑄冷延 制御冷却					
圧延速度 熱(冷)	600 m/Min	1000 (1000~1200)	1400 (1500~2500)	1700 (1500~2500)	(1500~2500)	(2800)	(2800)	
国内圧延機新設数	分?+厚1+熱1+冷1	分?+厚1+熱3+冷3	分11+厚6+熱8+冷11	分8+厚4+熱6+冷9	分2+厚1+熱3+冷5	分0+厚0+熱2+冷4	分0+厚0+熱1+冷1	
1900	1940	1950	1960	1970	1980	1990	2000	2010

コークス粉の放出がないこと等、製品品質および環境上の改善効果が著しい。従来の大量の水蒸気を吹き上げる一貫製鉄所の悪イメージを一変させるものである。

またコークスは高炉の中で還元剤の役目を持つだけでなく、燃焼するまでは固体としての強度を保ち、炉内に反応槽を自分で形成する。そのため良質な高粘結炭を必要とするが、その使用量を緩和するものとして成炭製造および使用技術が日本で開発されている。

コークス炉は大型のものでは百万個以上の煉瓦で構成され、非常に精緻なレンガワークで建設される設備であり、その建設費用（現在計画されているものでは約200億円）は大きな負担である。また現在ではその建設技術者や熟練技能者も減ってきている。そのためその炉の②寿命延長が最も大きな課題であり、炉壁のオンライン観察装置やガラスコーティングによる補修技術の開発等、設備技術の寄与が大きい。

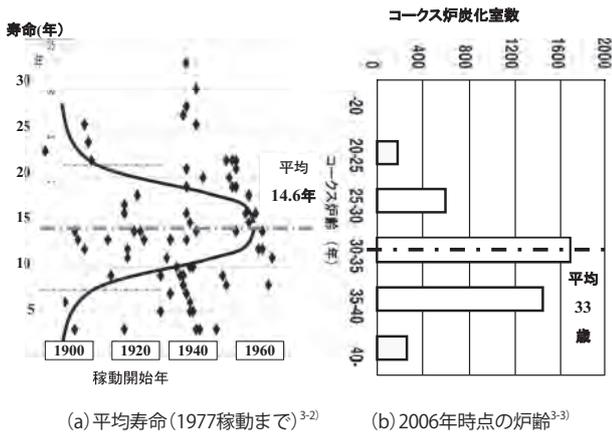


図3.3 コークス炉の寿命

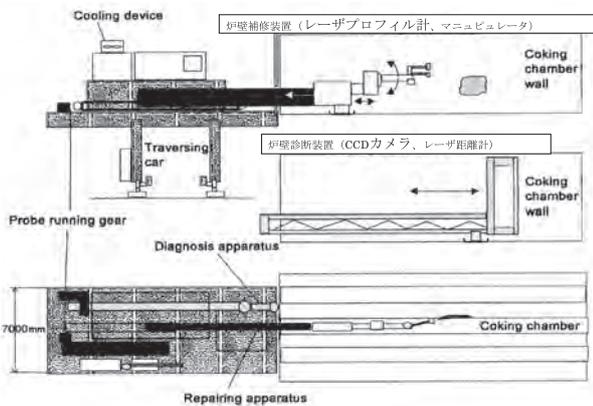


図3.4 炭化室診断・補修装置 新日鉄大分³⁻⁴⁾

図3.3 (a) に示すように、当初の寿命は短く、1970年時点での寿命は10～20年程度である³⁻²⁾。現在そ

れが伸びてきているとは言え、(b) に示すように現時点で平均炉齢が33年に達しており³⁻³⁾、2011年になると稼働中の半数以上の炉が40年以上を越えることになる。一層の寿命延長と適切な時期での新炉建設、あるいは直接還元等のコークス炉を使わない製鉄法の普及が大事となってくる。

炉寿命の延長は各社で1980年代から真剣に取り組まれており、図3.4に示すものは、炭化室の内部で炉壁の診断と補修を行なう設備の一例³⁻⁴⁾であり、新日鉄の各製鉄所の標準設備となっている。

3.2.2 高炉

一貫製鉄所のシンボルと呼ばれる設備であり、焼結装置等で予備処理された鉄鉱石と前述のコークスから1500℃前後の銑鉄を製造する。図3.5 (a) が高炉の全体像、(b) にその内部を示すが、冷却装置であるステーブに覆われた徳利状の設備であり、化学反応のための特別な装置は何もない。原料である鉄鉱石とコークスが自分で反応槽を形作るのが特徴であり、操業の難しさもそこにある。

わが国での高炉の導入は、1858年の大島高任等による大橋一番高炉（能力年間50～60t程度）である。近代高炉は、1901年官営化された日本製鉄八幡製鉄所に導入されたものであり、ドイツ人の設計による公称165t (495m³) 高炉であった。また、1953年、新しい臨海一貫製鉄所である川崎製鉄千葉に建設された第1高炉は、ドイツの設計で公称600t (877m³)、わが国鉄鋼業の戦後の驚異的成長のさきがけとして記念碑的存在である。

3.2.3 高炉プロセスの進歩

この50年におけるプロセスとしての進歩は、第一がその①大型化であり、第二は②プロセスの見える化である。第三がその結果としての③炉寿命の増大である。



図3.5 (a) 高炉の全体像 元図:3-1) p38,42

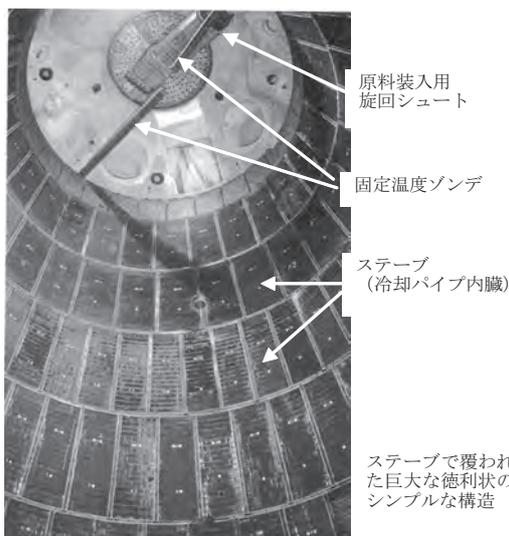


図3.5 (b) 高炉の内部 元図:3-1) p 38,42

①： 図 3.6 に高炉の大型化の歴史を示すが、25 年で 5 倍以上の大きさになっており、それが生産性の向上に結びついている。5000m³ 以上の超大型高炉は世界で 13 基あるが、そのうち実に 11 基までが日本である。

②： 従来高炉は「冷え込み」と称する重大な操業トラブルを多発し、その場合は出鉄量が 1/10 以下になってしまい、製鉄所工程を大きく乱し、また高炉自体の寿命をも縮めてしまっていた。その原因の究明や修復方法は長い間確立されず、通常の操業自体も熟練操業者の経

最近四半世紀の進歩により高炉が初めて現代プロセスの仲間入りをしたと言って過言ではない。

③： 図 3.7 は高炉操業の 20 世紀後半における進歩を示している。炉寿命も 5 倍以上に伸びており、最近の改修期間の大幅な短縮とともに一貫製鉄所の中での入口工程としての安定化が製鉄所運営に非常に寄与が大きい。炉体冷却のためのステープや、カーボン煉瓦に代表される炉底耐火物等の進歩と共に、前項の「②プロセスの見える化」に伴う操業改善に基づく所が非常に大きい。

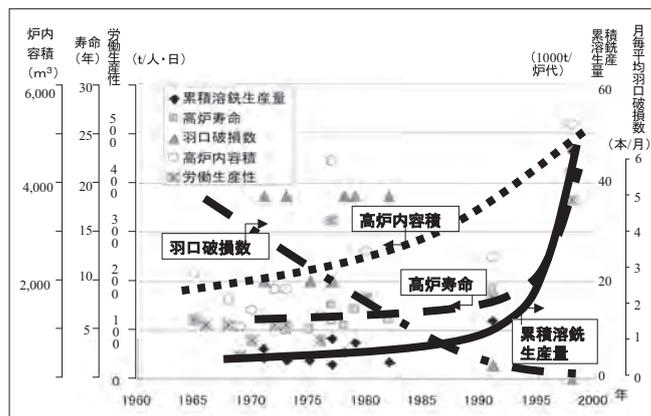


図3.7 20世紀後半での高炉操業の安定化

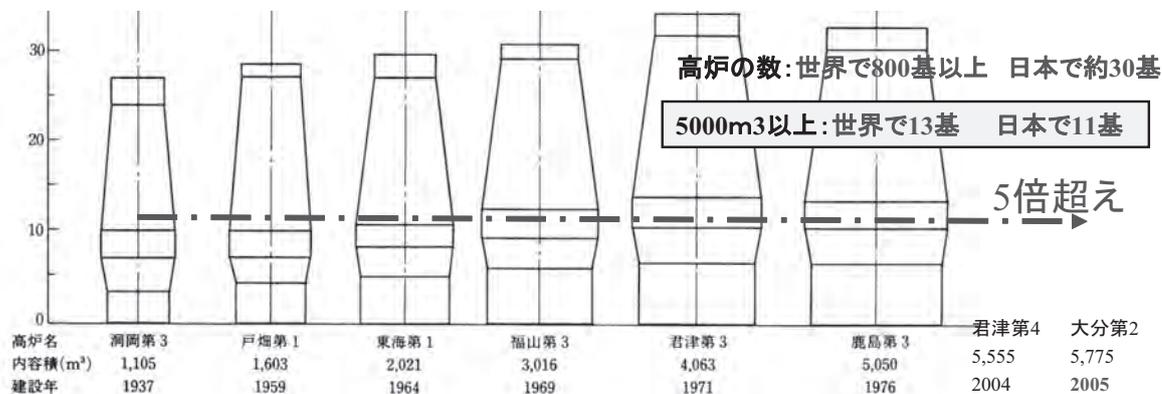


図3.6 日本の高炉の大型化 出典: 3-1)、3-5) p 175などより。

験と勤に依存する所が大であった。複合送風や高圧操業、あるいは重油吹込みや微粉炭吹込み (PCI) は操業の操作量に定量性と自由度を与える物であったが、その Know-how は操業者の中で必ずしも共有化されてはいなかった。それを打開するために、多くのセンサの開発や設置、それらの情報に基づいた種々の物理モデルの開発や操業管理システム等、「プロセスの見える化」が進められた。さらにそれを大きく進めたものが高炉の解体調査である。5章においてその経緯を説明するが、これら

3.3 製鋼プロセス

19 世紀後半にベッセマー転炉、トーマス塩基性転炉ならびにシーメンス・マルチンの塩基性平炉法等が発明され、安定した品質の「鋼」が安価に生産されることになり、それが 20 世紀の「鋼の時代」をもたらす。

表 3.1 (B) に製鋼における主なプロセスの変化を示す。図 3.8 に示す「平炉から転炉へ」と、「造塊・

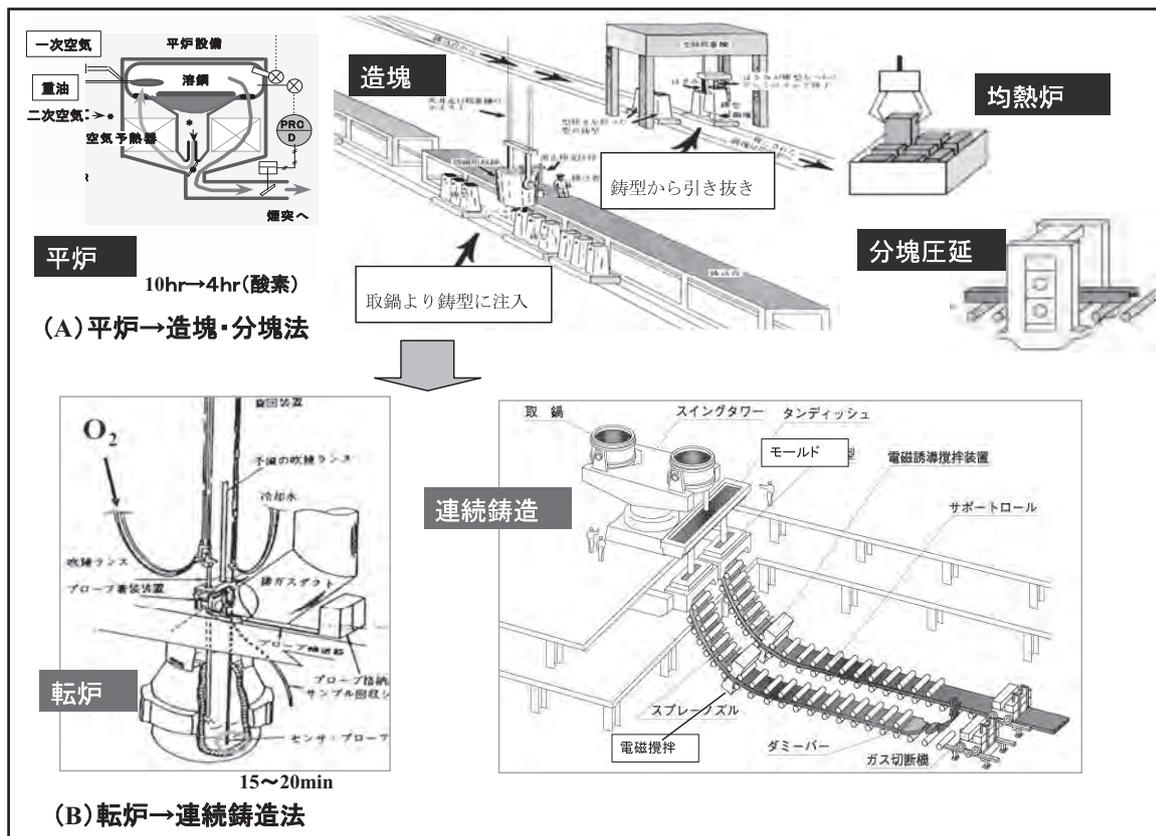


図3.8 製鋼プロセスの変革 元図:3-6) p.324,325,3-7)p.2J(2)などより

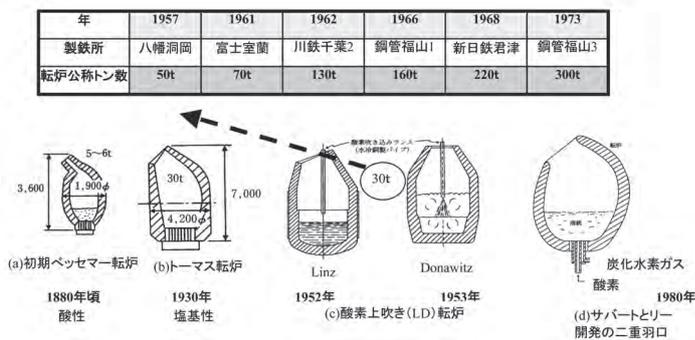


図3.9 転炉の変遷および日本における大型化 2-1) p38など

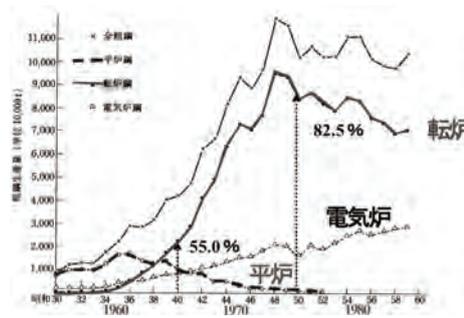


図3.10 日本における製法別比率 3-5) p274

分塊から連続鋳造へ」の二つのプロセスの変革が製鋼プロセスの進歩の主体となる。

3.3.1 平炉時代

20世紀前半のわが国における鋼の精錬は基本的に塩基性平炉によるものである。図3.10に示すように、1950年には粗鋼の80%以上が平炉で生産された。

わが国の平炉の歴史で特筆すべきは、戦前のドイツならびに戦後の米国人技術者の指導に基づく①熱管理思想の導入と②酸素製鋼の発展である。

①：4章で後述するが、戦前にはドイツで熱管理思想の普及があり、米国では戦中、戦後を通じて工業計器が長足の進歩をとげる。それが戦後に日本の鉄鋼業で、もっとも効果的に導入されたのが平炉である。

②：1950年代に純酸素の多量吹込みが試みられ、生産性の大幅な向上を得た。転炉への序奏とも言うべきであり、製鋼時間が酸素無しで10hrであるのが、1957年には3.5hrと約3倍の生産性を得たとの報告がある³⁻¹⁾。

その後も酸素製鋼はさらに発展するが、大量吹込みは炉体寿命、特に天井寿命を縮めることとなり、次代の純酸素上吹き(LD)転炉に取って変わられる。

3.3.2 平炉から転炉へ

19世紀半ばに発明されたベッセマー転炉は空気を炉底から吹き込むものであったが、発明時に純酸素を吹き込むアイデアも持っていた。この夢が実現したのが大型酸素設備の登場であり、1951年オーストリア、

フェースト社リンツ製鉄所とドナヴィッツ製鉄所で初めて実用化された。図 3.9 にベッセマー転炉に始まる転炉の推移を示す。LD 転炉は平炉への酸素吹込みが盛んであった 1957 年に新日鉄洞岡、1958 年に NKK 川崎にいち早く導入された。その後 16 年間で日本での稼働は 15 基に増加している。転炉の吹錬時間は 100 トン炉で 20 ～ 30 分であり、前述の酸素吹込み平炉の 7 ～ 10 倍の圧倒的な生産性を得る。さらに酸素による鋼浴の攪拌力が大きく、吹錬の均等な進捗および溶鋼品質の均質化のメリットも大きい。図 3.10 から判るようにわが国における平炉から LD 転炉への切換えは急速（1973 年で 80%以上が転炉）であり、この新技術の利点の正確な把握と切換えへの決断の早さ、そしてその新技術のさらなる革新が製鋼分野におけるわが国の競争力を高め、その後のわが国の鉄鋼業の飛躍的發展につながったと言って良い。

3.3.3 転炉プロセスの進歩

転炉プロセスの大きな革新は、①炉の大型化と②炉寿命の延長、③ Q-Bop（酸素底吹き転炉）の採用に端を発する複合吹錬、④プロセス計算機による終点制御、ならびにサブランスによる吹錬中溶鋼の温度と成分の同時測定が挙げられる。

①： 図 3.9 に大型化の推移を示しているが、20 年経たない間に炉容積で 6 倍、生産能力でそれを上回るものとなっている。

②： 塩基性煉瓦の品質の著しい向上により炉寿命は 1973 年住金小倉で 2030 回、1975 年新日鉄君津で 5035 回、1977 年新日鉄戸畑で 6666 回と驚異的に伸びている³⁻⁵⁾。また酸素ランスは 1964 年以降の多孔ランスの採用によりスロッピング（炉内からスラグが吹出る）の減少等の大きな効果を得ている。

③： 図 3.9 (d) に構造を示すが、アメリカで考案された炉底の二重羽口は、外管を流れる炭化水素ガスの分解吸熱反応により内管の酸素による高温酸化反応を抑えることができる。これが US スティールで Q-Bop と称する純酸素底吹き転炉に発展した。わが国では 1977 年川鉄千葉に導入され、その強攪拌性、それによる溶鋼の均質さ、さらにはプロセスとしての再現性の良さがプロセス制御と高度な自動化を可能としている。

その後、底吹きの効果は 10%の量の何らかのガスを底から吹き込むことによって得られることが判り、1980 年代に従来の酸素上吹きに加えて不活性ガスを炉底から吹き込む「複合吹錬」に発展して行った³⁻⁸⁾。1990 年わが国では複合法が 83%（世界では 63%）と

なっている³⁻⁹⁾。

④： 転炉の特質はその均一性と再現性の良さであり、早くから計算機制御の格好の対象であった。1970 年代にサブランスが開発され、カーボンと溶鋼温度が吹錬中に同時測定されることで大きく進歩した。5 章で詳述する。

その他の変革に転炉排ガスの OG 化がある。

3.3.4 造塊・分塊時代

転炉や平炉あるいは電気炉で製造された溶鋼は、ブルームやビレット等と称する中間製品に凝固（造塊）および粗成形（分塊）される。造塊技術は平炉や転炉の工程化の時点で新たに必要となったものであり、世界的には 19 世紀末にはすでに安定したものとなっていた³⁻¹⁾。日本においても、20 世紀半ばまでは、図 3.8 (A) に示す造塊・分塊プロセスがその主流であった。鑄型に溶鋼を注入して自然冷却により凝固させ、均熱炉で均質に過熱された後で分塊圧延機により、必要な形状の中間製品を得る。造塊プロセスでは鑄込み方法や偏析・欠陥部を少なくするための品質および歩留まり向上の努力は数多くなされた³⁻⁵⁾が、種々の面で進歩の早い鉄鋼プロセスでは珍しく、1 世紀近くプロセス自体の画期的な変化はなく、次の連続鑄造の登場により姿を消していった。

3.3.5 造塊・分塊から連続鑄造設備へ

連続鑄造（以下連鑄）設備は銅やアルミあるいは真鍮の非鉄金属の世界では 20 世紀前半から工業的に導入されていたが、対象金属の融点が高く必要な抜熱量の大きい鉄の世界では開発が遅れ、1950 年代になって初めて実用化された。真鍮の連鑄で振動モールドを発明したドイツの Junghans、Rossi 法（Concast 法）を開発した米国 Rossi 等の貢献が大きい。

日本においては 1954 年に住友金属で、1960 年に八幡製鉄でいずれも Rossi 法が導入されており、それらがその後の急速な発展のきっかけとなった。1970 年代になると連鑄法は石油ショックに直面する中で大躍進を遂げる。偏析を含めた内部品質が造塊法の鋼塊に較べて均質であること、表面状況が平滑で優れていること、さらには形状や寸法が均一であることが認識され、また設備としての使い込みを進めるに従い、大容量の連続生産設備としての利点が設備・鉄鋼メーカーで共有されることになる。これらの大きな成果を背景に世界の中で日本が最も熱心に連鑄化に取り組み、1980 年後半には連鑄比率が 95%を越える。

図 3.8 (B) にプロセスの概要を示している。転炉

から溶鋼は取鍋（現在は 300t 以上もある）で搬送され、連鑄工場のタンディッシュに注入される。タンディッシュでは堰を利用して酸化物等を浮上分離した上で、溶鋼は水冷銅モールドに注入される。このモールドは作ろうとする半製品の断面形状を与え、適切な抜熱により溶鋼の表層部を凝固させ、モールドの上下振動によりモールドと鑄片の固着を防ぐ。その後、二次冷却により内部の凝固を進行させ、引抜き（ピンチ）ロールにより鑄込み量に見合う速度で鑄片を引き抜き、最後にトーチカッターで必要な長さに切断する。

3.3.6 連鑄プロセスの進歩

まずは①大型化であり、次いで②「連連鑄」操業技術の開発と普及、③モールドレベルセンサと、それによるレベル制御の開発、④製品品質の改善を目的とした電磁力利用や誘導過熱、あるいはリジエネ等の種々の要素技術の利用、⑤HCR や HDR の実施などが挙げられる。

①： 1967 年には 15 万 t / 年程度であったスラブ連鑄機が 1970 年には 120 万 t / 年、1980 年には 240 万 t / 年に拡大されている³⁻¹⁾。

②： 「連連鑄」とは連続して複数チャージの取鍋を鑄込むことであり、1970 年代初めでは 10 チャージ程度であったが、70 年代終わりには 200 チャージ以上の報告がある。そのための設備の改善としてはタンディッシュの大型化や鍋継目鑄片の品質向上がある。さらにスラブ鑄片の操業中の幅変更技術が 1975 年に開発されている。

③： 自動的に安定した鑄込みを行なうには、モールド溶鋼レベル制御が必須であり、センサでは 1970 年代末に開発された渦流法が現在は主力である。さらに、モールドレベル制御において制御理論の導入を行なうことにより、より安定した制御を得た。5 章で述べる。

④： 中心偏析等の鑄片内質改善に大きな効果を得た電磁攪拌や電磁ブレーキ、誘導加熱やプラズマによるタンディッシュの溶鋼加熱、リジエネバーナを用いたタンディッシュの無酸化加熱などがある。

⑤： 連鑄鑄片の欠陥の少なさは HCR (Hot Charge Rolling…鑄片を手入れ無しに熱間圧延の加熱炉に直接装入する) を可能とし、さらにそれを発展させた HDR (Hot Direct Rolling…加熱炉を省略して連鑄鑄片を直接圧延する) への挑戦をも可能とした。

表 3.2 に造塊・分塊法と連鑄法の比較³⁻¹⁰⁾をまとめているが、生産性で 20 倍以上、歩留まりで 10% 以上、省エネルギーで 2～4 倍、労働生産性で 4 倍以上である。

図 3.11 に世界における連鑄化率の進捗を示しているが、日本がいち早く全量連鑄化に近付いている。平炉の転炉化とともに連鑄への転換の大英断が日本の製鋼技術、ひいては鉄鋼技術を世界をリードするものに押し上げた。

表3.2 連続鑄造化のメリット³⁻¹⁰⁾

	連続鑄造法	造塊～分塊圧延法
1.生産性(溶鋼～スラブ)	30分～60分	1～2日
2.歩留(溶鋼～スラブ)	96～99%	80～90%
3.省エネルギー	1/2～1/4	ベース
4.省力化	6～10人/シフト	20～30人/シフト
5.建屋面積の減少	1/3以下	ベース
6.その他	造塊～分塊圧延法に対して鋼材の均質化と品質向上が図られると同時に、過酷な労働負荷が大幅減少	

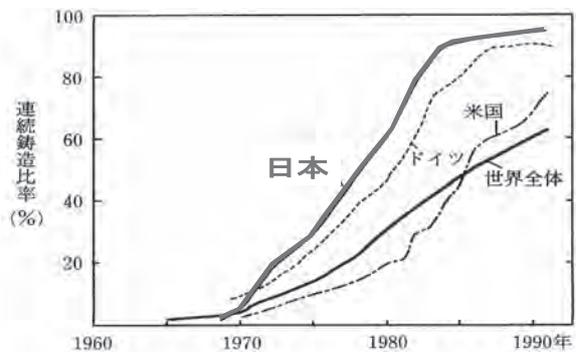


図3.11 日本における連鑄比率の変化 2-1)p85

3.4 圧延プロセス

製鋼プロセスで作られたスラブ、ビレットあるいはブルーム等の中間製品は金属ロールを用いて必要な形状にまで圧延される。金属材料の圧延技術は、すでに 19 世紀末にはある程度確立されていた。表 3.1 (C) に圧延における主なプロセスの変化を示す。今世紀における圧延技術の発展は動力の転換（蒸気から電力）、連続化、巨大化、制御やセンサの高度化、あるいは製品品質の向上が主体となる。本節では先ず分塊圧延、そして薄板圧延（熱間・冷間圧延）、厚板圧延について、プロセスおよびそれらの主な進歩について説明する。

表 3.1 (C) に我が国における圧延機の導入台数を 10 年単位で示している。熱間・冷間共に 1960 年代後半より国産化されている。分塊や厚板は 1980 年、熱圧や冷圧は 2000 年以降の新設はほとんど無い。

3.4.1 分塊圧延機と電動駆動化

連続鑄造法が普及する前（1980 年以前）は造塊・

分塊法が主力であり、造塊で造られた鋼塊（インゴット）は製品に応じた分塊圧延機（スラビングミル、ブルーミングミル、ビレットミル）で必要な中間製品まで圧延された。これらの多くは圧延過程で正転・逆転を繰り返すため、その電動化は遅れたが、1920年代終わりに大型直流電動機の登場により米国やオーストリーで完成している。図3.12(a)(b)に両者の比較を示すが、電動化により駆動部が簡素化しているのが良く判る。この大型圧延機の電動化が電動をベースとした薄板連続圧延、ならびに厚板圧延での技術進歩につながっている。

日本への導入は文献が見つからないため不明であるが、1920年以前のものであり、恐らくは蒸気駆動であったものと思われる。戦後しばらくは主として米国から電動設備が導入されたが、1965年からは電動機も含めて国産化が進み、能力の拡大（10年で約2倍）、生産性の向上、そして計算機の導入を含めた自動化が進められた³⁻¹¹⁾³⁻¹²⁾。分塊工程は製鋼から圧延の橋渡しをする根幹のプロセスであったため、計算機の導入も1960年代と早かった³⁻¹²⁾が、1980年以降の連続化の推進と共に分塊圧延は表舞台からは消えていった。

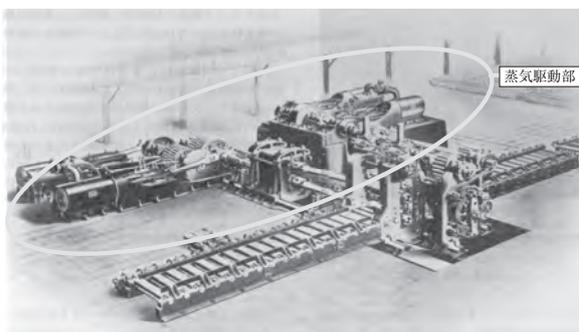
3.4.2 薄板圧延における連続圧延

連続圧延（タンデム化）とは材料である鋼片を複数の圧延機を用いて、途中で止めることなく圧延する方法であり、当初はレールや線材で実現された。1870

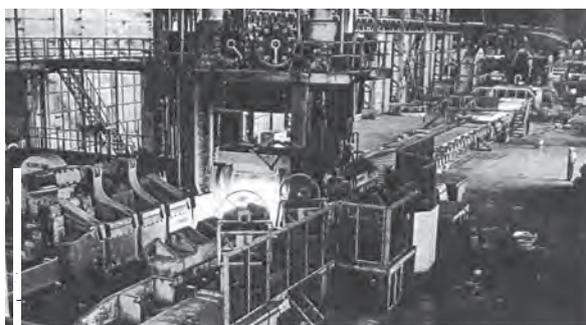
年代末に登場したモルガン連続線材圧延ミルが有名であるが、薄板の連続化は20世紀になってからである。それ以前は分塊圧延されたスラブをシートバー圧延機やフープミル等により薄板にまで圧延されていたが、これらは作業環境も能率も極めて悪いものであった。図3.12(c)に旧設備の代表例であるプルオーバー圧延機の作業状況を示す。高熱の複数の板を重ねて圧延するが、それらの板のハンドリングはすべて手動であった。(d)は米国より導入されたタンデム圧延機であり、作業性の差は比較にならない。

1924年米国アームコ社アッシュランドにおいて連続シートミルが稼動し、さらに1926年11月米国のコロンビア製鋼会社バトラーで連続熱延設備（ホットストリップミル）が稼動し、それらが製鉄の圧延操業に画期的な改革をもたらした。それはその後の米国の自動車産業の発展と旺盛な需要をささえることになる。また、アッシュランドにおけるロールクラウン（ロールの撓みによる被圧延材の形状悪化を防ぐため、ロール切削時にクラウンをつける）の必要性の発見、バトラーにおける4重ロールとローラベアリングの採用は、広幅ストリップ連続圧延のその後の発達に大きく貢献した²⁻¹⁾。

日本においてはその導入は15年を待たざるを得ず、太平洋戦争開戦直前の1940および1941年の八幡製鉄所の戸畑が最初である。冷延ならびに熱間設備とも、戦後（1948年）の米国調査団の指導によりはじめて



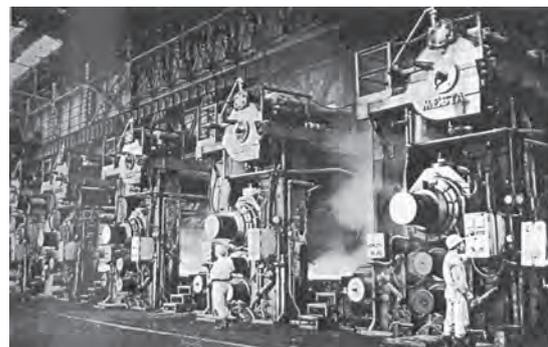
(a) 蒸気駆動分塊圧延機 米国 1920頃
2-1) p 89



(b) 電気駆動分塊圧延機 鋼管水江 1950頃
日本鋼管50年史 1962



(c) プルオーバー熱延圧延機 川鉄葺合 1953
川崎製鉄 千葉製鉄所建設15年の歩み 1968



(d) タンデム熱延圧延機 鋼管水江 1960頃
日本鋼管50年史 1962

図3.12 各種の圧延機

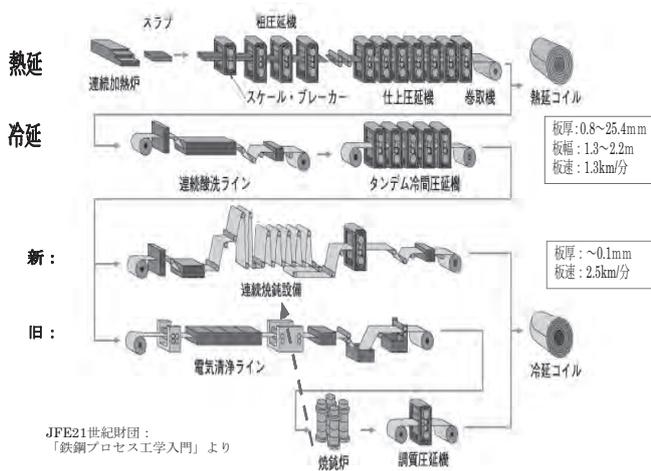


図3.13 薄板圧延の工程(熱間圧延と冷間圧延)³⁻⁷⁾

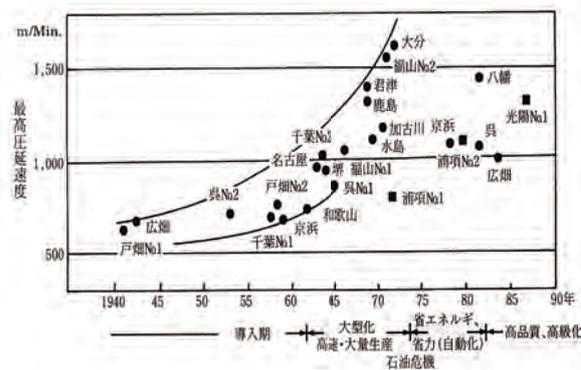


図3.14 熱間圧延における最高圧延速度の推移³⁻¹³⁾

その圧延能力を発揮することができた³⁻¹¹⁾。また、臨海一貫製鉄所として稼動した川鉄千葉において、熱間・冷間連続圧延への投資を1958年に当初計画より前倒したことが日本における連続圧延設備発達の大きな刺激となった。しかし、それらの連続圧延技術を自分の物として消化し、独自技術を産み出すにはさらに20年以上の月日を要している。

薄板の熱間圧延においては、圧下力を高め、ロール径を小さくすることにより、板を薄くすることができるが、板巾の1/1000程度に限界がある。そのため、より薄くするためには常温で圧延する冷間圧延が必要となる。図3.13は熱間と冷間を並べて図示したものであり、冷間の場合、熱間圧延でできたスケールを除去するための酸洗設備や、鋼板の成形性を高めるための熱処理設備が付加される。なお冷延の図に「新」「旧」の二つが表示されているのは、1970年代における連続焼鈍炉の誕生がその理由であり、それが冷延工程の完全連続化につながる。

3.4.3 薄板圧延における進歩

圧延設備の国産化は1965年頃より始まるが、その後のプロセスの進歩は日本の主導によるものである。主なものに、①圧延速度の高速化、②プロセスの完全連続化、③圧延機の圧延操作端としての高速化、④合目的(In situ)センサの導入、⑤鋼板形状制御機能を持った圧延機の開発、⑥新しい制御理論の採用も含めた圧延プロセス操業の計算機化がある。

①： 図3.14に熱延における圧延速度の変遷を示すが³⁻¹²⁾、1970年代までは生産能力の向上要求に伴い上昇の一途であり、熱延は当初の3倍の速度になっている。冷延ではぶりき材で2,800m/minを越すものが出ている。

②： 冷延プロセスにおける連続焼鈍炉、完全連続圧延、完全連続冷間鋼板製造³⁻¹⁵⁾、さらには熱延プロセスにおけるエンドレス圧延³⁻¹⁶⁾が含まれる。図3.15に完全連続冷延鋼板製造設備の例を示す。

冷延の場合、完全連続圧延(複数のコイルを溶接により接続して連続に圧延)と連続焼鈍を接続することにより、全体の処理時間を10日から15~20分へと1/1000以下に縮めている。製鋼プロセスにおける転炉・連続の誕生と並ぶ革新である。また、ともにコイルやシートバーの接続により、先後端の板厚精度が飛躍的に向上している。

③： 圧延機電動圧下の油圧圧下化および駆動直流電動機の交流化が含まれ、ともに応答速度の改善と、特に後者は保全性の向上も大きな成果となる。

④： センシングの場所を、極力操作場所に近づけることによる制御系応答性の改善である。当然ながらセンサの耐環境性と保全性の維持に工夫が必要である。

⑤： 圧延機の従来から持つ欠点である断面方向の形状不良を改善するための新機能付加であり、この開発により日本の圧延機メーカーは米国を凌駕することができている。③④⑤については5章で詳述する。

⑥： ②~⑤の成果により圧延プロセスの見える化が進み、PLCやプロセス計算機の高性能化、あるいは制御論理の高度化により圧延機操業の計算機化が著しく進んだ。例えば従来は板厚制御に常に操業者が介入していたが、現在はノータッチオペレーションが常識化している。また冷延の完全連続化や熱延のエンドレス圧延では計算機制御の存在が大前提である。

3.4.4 厚板圧延とその進歩

板厚6mm以上の鋼板を厚板と呼び、船舶、海洋構

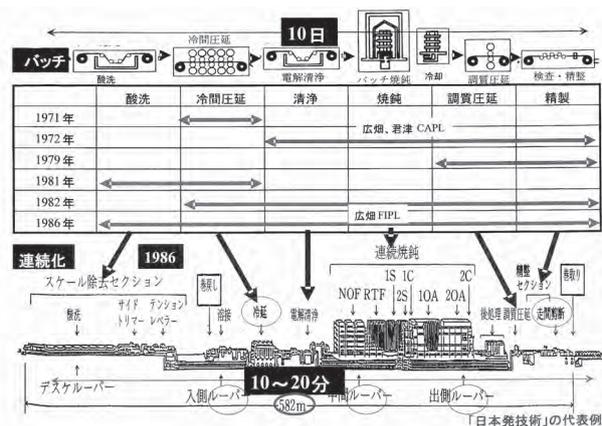


図3.15 冷間圧延製造設備の完全連続化 元図: 3-15) p.21

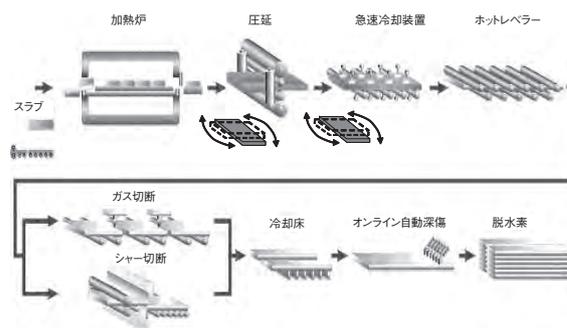


図3.16 厚板圧延工程説明図 (画は東京製鐵HP)

造物、橋梁、建築あるいは化学プラント等で広範に使用される。図 3.16 に製造工程を示すが、厚板の場合は単独の圧延機（粗圧延機を持つ場合もある）で繰り返し圧延（正逆転）をおこなうこと、および巾方向の圧延をおこなうために鋼材を 90 度回転させて圧延することで所定の形状を得る。さらに水冷による熱処理設備や検査ならびに各種精整設備を下工程に持つ。他の圧延設備と同様に 1965 年頃より設備の国産化が進み、特に熱処理や精整設備の近代化が図られた。不断の技術革新に挑む造船や橋梁あるいは化学プラント等、厚板ユーザーからの厳しいニーズに対応することから進歩が得られている。建造物の大型化に伴い、厚板ミルのサイズも当初の 160 inch (4.06 m) から最大 216 inch (5.50 m : 1976 年以降) までが圧延できるように大型化している³⁻⁷⁾。

前節で説明した設備技術の変革は厚板でも殆どが取入れられており、特に④は厚板が出发点となっている。

プロセスの変革と言う面では、さらに⑦制御冷却や加速冷却と呼ばれる熱処理設備の機能強化、⑧製品の形状歩留まりを著しく高めた平面形状制御等が厚板独特のプロセスの進化である。

⑨：成分を変えることなく、冷却方法により厚板鋼板の品質を変える技術であり、1960 年代から厚板プロセスの大きな武器となっている。

⑩：厚板の平面形状を圧延方法の工夫により極力矩形に近付け、歩留まりの向上を狙うものである。油圧圧下による応答性の向上が Key となっており、5 章で述べる。

本章の参考文献：

- 3-1) 新日本製鉄編著:「鉄と鉄鋼がわかる本」、日本実業出版社、2004
- 3-2) 日本鉄鋼協会編、「わが国における製鉄技術の進歩」、共同研究会 製鉄部会 コークス部会、1977
- 3-3) 内藤誠章、「製鉄技術の開発概要と今後の課題」、新日鉄技報、384、p 2-13、2006
- 3-4) 境田他 7 名:「コークス炉炭化室炉壁診断・補修装置の開発」、新日鉄技報、384、p 63-68、2006
- 3-5) 下川義雄:「日本鉄鋼技術史」、アグネ技術センター、1989
- 3-6) ユー・エス・スチール編、日本鉄鋼協会訳:「鉄鋼製造法 上・中・下」、丸善株式会社、1956
- 3-7) JFE21 世紀財団:「鉄鋼プロセス工学入門」、<http://www.jfe-21st-cf.or.jp/jpn/index2.html>
- 3-8) 太田、三枝、数土、野崎:「底吹き転炉による鋼の大量生産」、鉄と鋼、67-10、pp.1829-1833、1981
- 3-9) 遠藤公一、「精錬技術の進歩と今後の展望」、新日鉄技報、351、p 3-9、1994
- 3-10) 奥村裕彦、「連続製造技術の動向と今後の展望」、新日鉄技報、351、p 10-14、1994
- 3-11) 川崎 勉:「日本鉄鋼業 - その軌跡 -」、鉄鋼新聞社、1982
- 3-12) 逆瀬川浩、山岸静直:「分塊圧延技術の進歩」、鉄と鋼、59-13、p 1643-1667、1973
- 3-13) 鎌田征雄:「熱間圧延技術の進展と今後の課題」、鉄鋼界、12-2、p 8-15、1991
- 3-14) 飯田賢一:「日本の技術 100 年 製鉄・金属」、筑摩書房、1988
- 3-15) 大矢清:「冷間圧延と連続焼鈍技術」、鉄鋼界、12-2、p 16-24、1991
- 3-16) 二階堂英幸:「熱間圧延におけるエンドレス圧延の誕生」、ふえらむ、11-1、p 23-28、2006

4 | 鉄鋼制御系設備技術とその進歩

3章では鉄鋼プロセスそのものを紹介し、さらにその中でわが国での進歩（主として20世紀後半における）についてまとめた。大きな流れは（1）プロセスの大型化、（2）プロセスの連続化、（3）プロセスの見える化、（4）それらの結果としての操業の安定、生産性の向上、製品品質の向上、省エネルギー、労働生産性の向上、設備の長寿命化が挙げられる。これらの一つには操業技術の向上にその原動力を求めることができるが、もう一つは、保全を含めたプロセスを支える設備技術力の向上がある。鉄鋼業が装置産業であるが故に、設備技術の寄与する所は大きい。

本章においてはわが国における計測・制御を中心とした制御系の設備技術の進化について、その分野ごとにマクロ的な流れを説明する。表4.1はそれぞれの系譜をまとめたものである。

4.1 計測技術

プロセス量を客観的に定量化することが「見える化」の第一歩であり、鉄鋼業の近代化は計測法の開発から始まったと言って過言ではない。表4.1 Iにその大きな流れをまとめる。

4.1.1 初期の鉄鋼計測技術

鉄鋼業の計測は、その対象が1600°Cを越える超高温であることや、1000トン以上の大重量を扱うなど、18世紀以前では信頼ある計測法や機器が存在せず、例えば温度では赤熱あるいは溶融鉄の色や火花で判断しており、それが操業を客観性の小さい名人芸に依存することにしてしまっていた。それでも高炉の送風量制御やオルザットガス分析等は19世紀に確立されており、20世紀初めには光高温計や1700°Cまで測定可能な熱電対、あるいはベンチュリー管による各種流量測定が可能になってきた²⁻¹⁾。

世界の鉄鋼業において計測技術の発展を大きく促進したものに、1919年のドイツ鉄鋼協会における「熱経済委員会」の発足と、英国における全産業的な「熱管理委員会」の発足がある。さらに1928年の圧力等の測定値を電気変換して遠隔伝送するトランデュースの発明はその後の遠隔監視や自動制御の発展に大きく寄与した²⁻¹⁾。その後この熱管理思想は米国に引き継がれ、鉄鋼だけではなく石油産業へも拡大し、空気圧を中心とした計測体系が席卷する。また、米国の鉄鋼

業の大事な顧客は自動車であり、計測関係もX線厚さ計など鋼板の生産用の測定機が開発され、さらにそれが厚さ制御装置としてクローズループのシステムへと発展する²⁻¹⁾。

4.1.2 海外からの刺激と官学民での対応

日本においては、戦前にドイツからもたらされた「熱管理」の思想や、戦後の米国からの鉄鋼技術者ミッションの「日本鉄鋼業における計測機器の活用の遅れ」の指摘等が大きな契機となる。

前者では1934年（昭和9年）の独Thyssen製鉄所技師F. Kofler氏の講演による「Wärmestelle（熱管理）思想」と、当時の新鋭製鉄所である中国満州の「昭和製鋼所」建設における熱管理思想の反映の紹介が著名である。その講演では図4.1に示すように昭和製鋼所の中央ガス配給所において、ガス流量、圧力の測定と記録、あるいは遠隔信号によりガス過不足の表示がされている旨も紹介されている⁴⁻¹⁾。

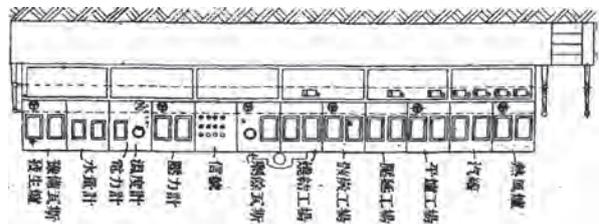


図4.1 満州昭和製鋼所における中央ガス配給所の集中遠隔表示装置(1930年頃) 4-1) p6による。

後者では終戦後まもなくGHQ顧問として来日し、日本の鉄鋼会社に技術指導を行い、1958年再来日したF. N. Hays氏の講演が著名である⁴⁻²⁾。鉄鋼業における「熱管理技術者」の重要性と将来性を示し、測定や制御も含めた業務推進や計画の在り方を示している。同時に日本におけるこの当時の操業の進歩について非常に肯定的な評価を行なっている。しかし氏は早い時期に「日本の平炉は計測器が無く、平炉の中には冷空気が侵入してくる状態で操業しており、冷気を加熱しているような状態である」と指摘している。

これらの外国人技師からの指摘は夫々の時代で鉄鋼関係者に大きな刺激を与えた。製鉄会社だけでなく、官・学・民（戦前は軍も加わった）一体となった共同研究も官主導に近い形ではじまり、「熱管理」や「計測化」の思想普及に大きな力となった。例えば1934年に発足した「日本学術振興会（以下学振）製鋼19

表4.1 計測・制御阻止・計算機・電気・制御論理の進歩

	1900	1940	1950	1960	1970	1980	1990	2000	2010
			(a)キヤッチアップ期	(b)高度成長長期	(c)量から質への転換期	(d)国際比価への転換期			
学協 会他	1919 ドイツ鉄鋼協会 熱管理思想 独、英、米 の熱管理思想	製鋼19委員会 製鉄電気協力班 製鉄器専門分科会 1955 第1回計測工業展	1951 計量法 計測部会専門分科会 1955 第1回計測工業展	計測部会 (鉄鋼各社の開発競争) 1972 第50回記念大会	計測・制御部会 (鉄鋼各社の開発競争) 1972 第50回記念大会	計測・制御部会 (鉄鋼各社の開発競争) 1989 第100回記念大会	計測・制御・システム工学 部会	計測・制御・システム工学 部会	計測・制御・システム工学 部会
I 計測	1928 トランジューサ発明 欧米を中心に空圧計装 機	1940年代 ストレンゲ ジ(米国ポールドウイン) 熱計器のセンサ(リング パランス差圧発信器) 光高温計標準電球 X線厚さ計 ガラス電極pH計(輸入) カーボメータ	国産白金測温抵抗体 光電管式幅幅計 消耗型熱電対 (高温センサの確立) γ線厚さ計 中性子水分計 ガス分析計(赤外線) ストレンゲージ国産化	①非接触センサの採用 監視、操作遠隔集中化 電子管から半導体へ 計装化の進展 制御、監視ルーチ急増 電子式高密度計装 シナケセンサの登場	高炉ガス流分布測定 放射温度計の利用拡大 連鎖モールドレベル計 サブランス μ波サウンディング計、 μ波プロファイル計 水銀灯式表面探傷 マグネスケール ステープ漏洩検知	気体用超音波流量計 μ波温度計 厚板ミル直近厚さ計 熱延スタンド間厚さ計 測測間厚さ計 エッジドロップ計 レーザー式表面探傷 「線CT(備肉計) 「値計	コーガス炉診断装置 光ファイバーOTDR 漏洩磁束介在物センサ M系列μ波レベル計 スタンド間多目的センサ 形熱間形状計 表探オナライン確性装置 CCD方式表面探傷 音波CT法高炉炉心測温	CCD表面探傷DB化 μ波銅板エッジセンサ 偏光利用微小傷検査 装置 リニアアレイによる介在 物検査装置 転炉溶鋼温度連続測 定(未実用)	
II 制御	1930年代 PID調節系の着 想と原型 欧米を中心に空圧計装 機 1930年代 独ルンメル の活 動 1932 アスカニア油圧装置 (独)	1940年代 サーボ機構 熱計器標準計装 PID3項目調節計 空気圧、油圧方式 アスカニア国産化	大容重操作シリンドラ 電子管式自動平衡型記 録計 電気式PID標準・汎用化 電子式の発達 監視・操作の部分遠隔 集中化	②インテリジェンスの導入 4~20mAへの標準化 制御のデジタル化 プログラマ内蔵化 LAN、光データウェイ	E、I、Cの境界のくずれ PAのDCS化、FAのPLC 化推進 HMIのCRT化	E、I、Cの境界のくずれ PAのDCS化、FAのPLC 化推進 HMIのCRT化	E、I、Cの境界のくずれ PAのDCS化、FAのPLC 化推進 HMIのCRT化	E、I、Cの境界のくずれ PAのDCS化、FAのPLC 化推進 HMIのCRT化	高度な制御論理 Single Window、大型ス クリーン E/Cオープンシステムへ
III 計算機	1946 ベル研 ENIAC 1950年代 米インディアナバー ン 米ナショナルスチール 米マククルー 名機IBM1800	「計算機の発見」 外国計算機の模倣 転炉データロガー	「計算機の初期利用」 高炉原料制御 高炉データロガー 転炉成分分析 転炉終点制御 分塊情報処理 熱延・冷延制御 エナルギーセンター	③BUS LAN ⑤HMI CRT化 ④PA、FAの融合 ⑥汎用PLC ⑦E/C一体化 ⑧E/C一体化 「操業の計算機化」 メーカの弱体化 PCのCRTへの利用 PCのプロコン利用 Linuxの採用	④LAN (Pi/レス化) ⑤結合P/C室 ⑥E/C一体 ⑦E/C一体 ⑧E/C一体	④LAN (Pi/レス化) ⑤結合P/C室 ⑥E/C一体 ⑦E/C一体 ⑧E/C一体	④LAN (Pi/レス化) ⑤結合P/C室 ⑥E/C一体 ⑦E/C一体 ⑧E/C一体	④LAN (Pi/レス化) ⑤結合P/C室 ⑥E/C一体 ⑦E/C一体 ⑧E/C一体	汎用DB 上位との共用DB PCのMiddle ware作成 高炉統合システムへ
IV 電気	1890 MG方式による圧延 機直流電動機の制御 1900~25 圧延機蒸気駆 動から電動機駆動へ 1900初期 電気高炉 1900~ アーク炉の誕生 1900~ 誘導熱炉の誕 生 海軍工廠、電気製鋼所に 1.5kV電力式電気炉	MG方式による圧延機直 流電動機の制御	①国産プロコンの流産化 電気炉シェア10~15% 水銀整流器によるMG方 式の改善	②ソフトウエアの自作作成 電気炉シェア約20% 連鎖電磁操作 誘導過導入(パイプ) 直流電動機制御デジタ ル化	③電炉の大型化と流通化 ④E/C一体化 ⑤結合P/C室 ⑥E/C一体 ⑦E/C一体 ⑧E/C一体	④LAN (Pi/レス化) ⑤結合P/C室 ⑥E/C一体 ⑦E/C一体 ⑧E/C一体	④LAN (Pi/レス化) ⑤結合P/C室 ⑥E/C一体 ⑦E/C一体 ⑧E/C一体	④LAN (Pi/レス化) ⑤結合P/C室 ⑥E/C一体 ⑦E/C一体 ⑧E/C一体	④LAN (Pi/レス化) ⑤結合P/C室 ⑥E/C一体 ⑦E/C一体 ⑧E/C一体
V 制御論理	1778 Watt蒸気機関の調 速機 1900年代 微分方程式に よる調速系の解析	1940年代 Bode線図 1942 Zieger Nicholsの PID調整則 熱計装ACC (熱風炉、 平炉、均熱炉、加熱炉)	①定形制御論理 ②数学モデルに基づくもの ③経験則に基づくもの	①定形制御論理 ②数学モデルに基づくもの ③経験則に基づくもの	①定形制御論理 ②数学モデルに基づくもの ③経験則に基づくもの	①定形制御論理 ②数学モデルに基づくもの ③経験則に基づくもの	①定形制御論理 ②数学モデルに基づくもの ③経験則に基づくもの	①定形制御論理 ②数学モデルに基づくもの ③経験則に基づくもの	①定形制御論理 ②数学モデルに基づくもの ③経験則に基づくもの

委員会」は「1500℃以上の高温を実製造プロセスの中で如何に安定に測定するか」が当初の大命題であり、専門の分科会「第2分科会」を設置して、その後の日本の温度測定技術の発展をリードした。

また49年に「熱計器専門委員会」として発足した共同研究会は「日本鉄鋼協会計測（制御）部会」として発展し、その後半世紀近く鉄鋼各社相互の切磋琢磨の場として貢献してきた。ユーザ、メーカおよび中立機関（大学）の3者で構成されており、鉄鋼のみならず我国の計装技術の発展にも大きな影響を与えた。

4.1.3 学振製鋼19委員会の貢献⁴⁻³⁾⁴⁻⁴⁾

吹錬末期の溶鋼温度は1600℃を越える高温であり、これを精度良く測定することが製鋼工程における品質管理上の課題であった。古くは適切な測定手段はなく、前述のように平炉では操業者が鋼浴の色や火花の状況を目視で判断していた。図4.2(a)に示した光高温計はそれを計測器により定量化しようとする取組みであり、第2次世界大戦前に、その測定標準化の研究が軍のリーダーシップで取組まれている。しかし光高温計は測定者の熟練に頼る所が大きく、測定装置の原理上のこともあり、どうしても必要精度は得られなかった。(b)に示す消耗型熱電対は、鉄鋼業界の言わばセンサ開発元年と言えるものであり、学振製鋼19委員会の戦後の主要共同研究テーマとして精力的に取組まれた。熱電対として0.075～0.15mmの非常に細いものが使われ、保護用のスリーブは紙で出来ている。先端部が溶鋼に浸漬されて、熱電対部が溶解するまでに

測定を行い、その先端部は測定毎に取り替える。熱電対が溶解するということは、被測定対象と最大の熱接触を得るということであり、そのため測定精度が飛躍的に向上した。また消耗型ということが熱電対の劣化を無視できる大きな利点がある。

最初の開発はアメリカや英国であったが、学振製鋼19委員会での官学民共同研究により、熱電対の校正方法にいたるまで詳細な標準化の取決めがなされ、±3℃程度までの高温測定技術が1950年頃に確立した。その後、高炉の溶銑や製鋼工程での溶鋼などの高温溶融物測定の標準的手段となった。

4.1.4 熱計器専門委員会の貢献⁴⁻⁴⁾

当初の委員会の活動は、その設立経緯から「熱管理運動」の推進と、その具体的活動である平炉や加熱炉における熱計器の整備であった。

1949年同委員会で平炉、加熱炉、ならびに高炉の標準計器の検討と標準案が作成された。表4.2にその一例を示す。この時点ではすでに閉ループ制御を行なうことを前提に標準が作られており、計測法も研究対象まで含めて23項目に亘ってその詳細が記述されている。鉄鋼各会社および計器メーカこの標準に基づいて、その新たな設置と整備、あるいは計測器の開発と提供を行なっている。日本電気計測器工業会では価格一覧表まで用意している。表4.2を見るに、各計測器の物理的大きさや信頼性は、現在の計測器と大きな差があるが、炉の計装設備としての基本的要件は十分に押さえられている。欧米に較べて遅れていた日本の計

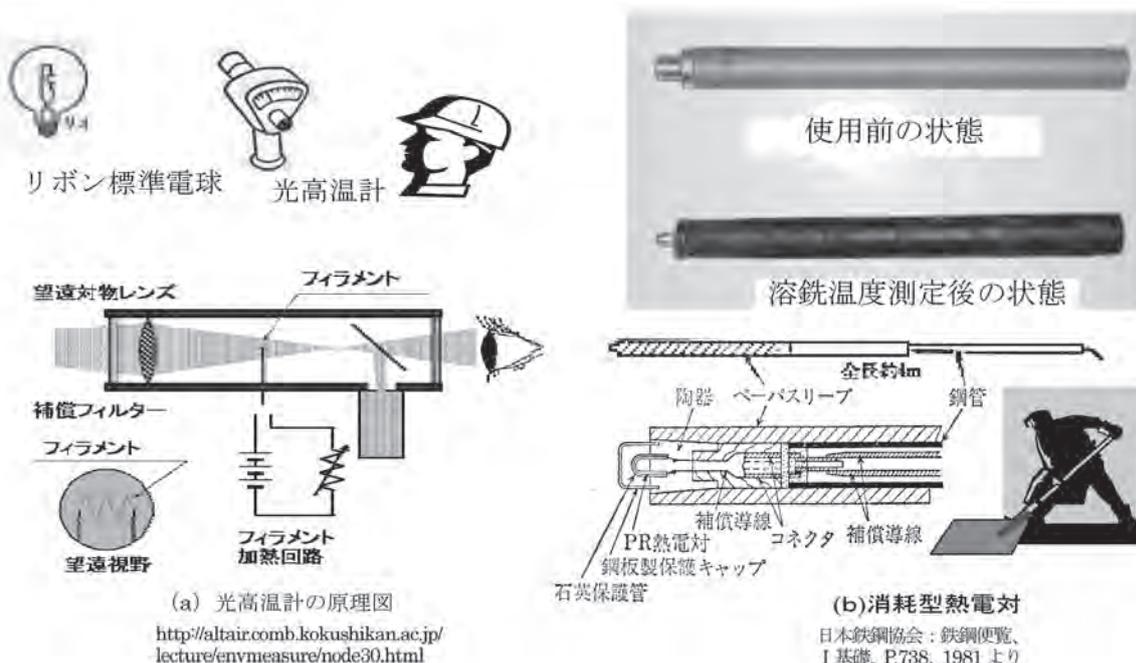


図4.2 学振19委員会の高温測定に対する貢献

表4.2 平炉用標準計器 熱経済技術委員会 熱計器専門委員会(1949)⁴⁻⁴⁾

番号	重要度	名称	発信方法	計器
自-1	A	炉内圧自動制御装置	炉内圧	炉内圧力計等
自-2	A	炉内温度自動制御装置	炉天井温度	燃料流量計、炉天井温度計等
自-3	A	比率自動制御装置	燃料流量	燃料流量計、空気流量計
自-4	A	重油温度および圧力自動制御装置	重油温度および圧力	重油流量計、重油圧力計
自-5	A	自動変更装置	蓄熱室温度 時計	蓄熱室温度計、等

No.	重要度	名称	発信方法	計器 (I:指示、R:記録、S:積算)
1	A	ガス流量	オリフィス板(または遮流板)	沈鐘式、又はリングバランス流量計 I、R、S
2	A	空気流量	オリフィス板、ピトー管(またはその他の風速計)	沈鐘式、又はリングバランス流量計、他風速計 I、R
3	A	炉天井温度		輻射又は光電高温計 I、R
4	A	ガス蓄熱室温度	Pt-Rh熱電対	熱電温度計 I、R
5	A	空気蓄熱室温度	同上	同上あるいは輻射温度計 I、R
6	A	炉内圧力	天井にガス管を挿入して計測	沈鐘式または隔膜式微圧計 I、R
7	A	排ガス分析		オルザット式ガス分析装置によりCO ₂ 、O ₂ 、およびCOを定量
8	A	重油流量		容积式又は面積式流量計あるいは差圧式流量計 I、R、S
...				
15	C	燃焼用空気圧力 (燃焼用空気量の補正)		沈鐘式、又はリングバランス式、又はU字管圧力計 I
...				
21	D	大煙道吸引圧力		沈鐘式、又はリングバランス圧力計 R 又は傾斜管圧力計 I
22	研1	ガスカロリメータ	(ガス発熱量を自動的に測定記録する。)	
23	研2	火焰輻射計	(炉内火焰の輻射熱量を測定する)	

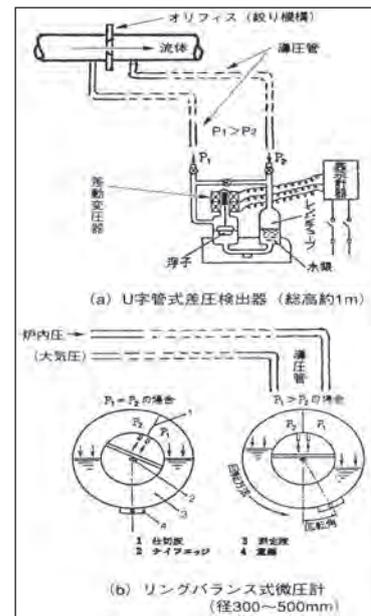
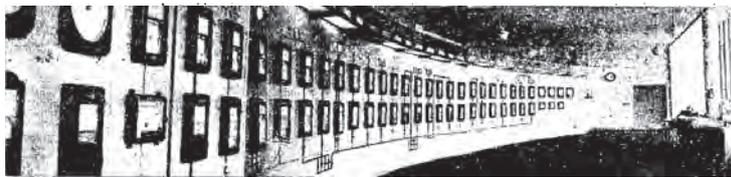


図4.3 当時の差圧発信器 4-5) p814より



(a) 日本初の熱管理センタ (川崎製鉄 千葉 1953)
山岡: 鉄と鋼、41-7、p301、1955より



(b) 最近の熱管理センタ (同 水島 1985)
川崎製鉄 50年史 p163 2000より

図4.4 熱管理センタの新旧比較

測技術も、20世紀の半ばによやくその基礎が固まったと言える。1950年には通産省鉄鋼局長からの依頼により、全国27主要鉄鋼工場の調査と指導が行われ、まさに官民の熱心な取組みにより、各社の生産設備の「計測化」が一般化し、「計測操業」が常識化してきた。さらにこれらの計測器の検定や修理等保全に関することを含めた計測指導書を本委員会が作成し、それらは生きた指導書として鉄鋼界は勿論、他の産業界からもその配付を熱望される状態であった。1953年に発行された「熱経済技術要覧計測編」が代表例である。また政府はこのような計測化の拡がりの中で、1951年に「計量法」を公布している。

図4.3に当時使われた差圧発信機を示している。原理的には単純であるが、装置として複雑であり、水銀の使用などの問題もあった。また形も非常に大きく、保全上も扱い難いものであった。

図4.4(a)に製鉄所の熱計器を1箇所集中管理するために日本で最初に作られた熱管理センタ(戦後初の臨海一貫製鉄所である千葉製鉄所で1953年に実現)を示す。(b)に現在のエネルギーセンタを示すが、受信計器こそ旧型であり管理対象は狭いが、製鉄所の

熱管理を集中化する思想はこの時点で立派に実現されている。

4.1.5 新しい時代における鉄鋼計測

20世紀の後半には多くの生産設備で計測器導入が一般化されていった。一つの計測の実施がそれに関連する他のものの計測化を促す結果となり、計測の対象も質・量ともに複雑化していく。また後述する計算機によるプロセスデータベースの構築が新しいプロセス情報の計測化に拍車をかける。また永年の課題であった計測・制御装置の信号が4~20mAの二線式に統一されたのが1970年代の前半であり、これがその後の発展に大きく寄与している。

図4.5(a)は大規模製鉄所における保全登録センサー数(保全上の単位であり、実センサー数はその1.5倍程度)の推移であり、この15年(1970~1985)で3倍以上になっている。この時点では粗鋼生産量は既に飽和しているが、「量から質への転換」への要請によってセンサー数が非常に増加している。図4.5(b)は1995年における同じ製鉄所のセンサー毎の保有ループ数である。さらに1.5倍に保有数は増加し、多種多様

の物理量の計測化がなされている様子が判る。

表 4.3 は製鉄所における計測化（センサ開発）の特色と対応をまとめたものである。(a) がその特徴であり、センサに対する要求仕様の厳しさが、市販の通常センサでの解決を難しくしている。(b) はその解決のための対応であり、メーカーとの共同開発、あるいは自社単独での開発で対応している。この状況は日本では他社も同じ状況であり、各社が競争で開発を進める状況にある。(a)、(b) 共に約 20 年前に筆者がまとめたもの⁴⁻⁶⁾であるが、状況は変わっておらず、(b) に示した①～⑥の解決の方向性が、各開発対象の中で実現されている。

製鉄会社におけるセンサ開発状況は次のような状態であった²⁻³⁾。まずニーズを調べるが、それらの約 5 割が 2、3 年の内に何らかの形で解決し、3～4 割が 4、5 年を経て実操業に使われる。そして 1～2 割が他社にまで使われるが、それまでには約 8 年を要する。短期間に容易に解決できるものは少なく、また原理的には解決できても、厳しい測定環境に耐えうるまで技術

を熟成させるにはどうしても長期間を要し、良いアイデアとともに粘り強い努力が必要であることを物語っている。

ただし、長期間の開発はニーズの変化により、当初の開発目的が変化し、甚だしい時は開発そのものが全く無駄になることも有り得るわけで、迅速さも大事であるのは言うまでもない。

4.1.6 計測制御部会とその役目

鉄鋼業各社におけるセンサ開発の動機付けを行い、それらの成果を各社が競い合うようになったのは、前述の熱計器専門委員会の発展系である日本鉄鋼協会共同研究会「計測制御部会」の存在が大きい⁴⁻⁷⁾。

1950 年代は当時まだ不安定だった計測装置に関し、鉄鋼各社やメーカーが専門分科会を作り、その安定化や保全方法について議論し、報告することが多かった⁴⁻⁴⁾。

図 4.6 は 18 年間（1972～1989）に於ける各社からのセンサに関する報告例⁴⁻⁷⁾であるが、実に 650 件（36 件 / 年）もの報告がなされている。計測部会は全てが

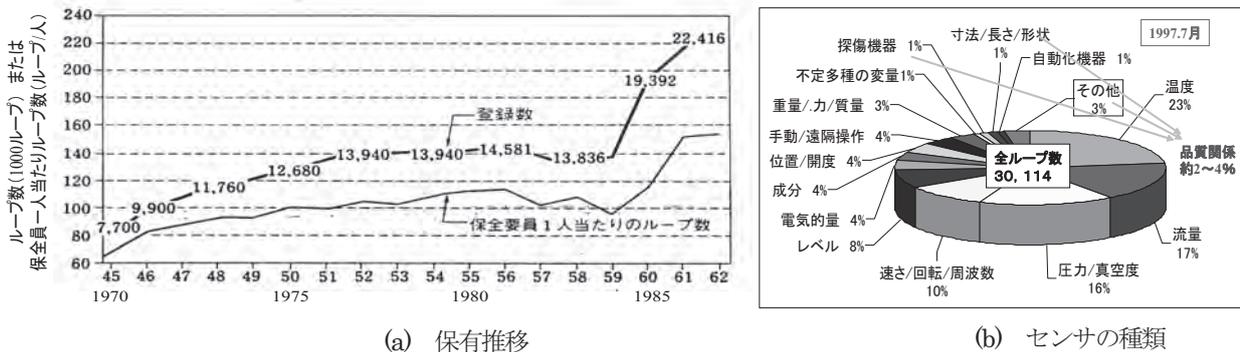


図 4.5 日本の大規模一貫製鉄所における保有センサ数推移例 (川鉄水島製鉄所)⁴⁻⁶⁾

表 4.3 鉄鋼業におけるセンサの難しさに対応⁴⁻⁶⁾

(a) 製鉄所のセンサの要求の厳しさ

特徴	具体例
1 要求精度の厳しさ	溶鋼温度 1600℃付近で ±2℃ 冷延ライン鋼板厚み 0~3mmで ±2μm 圧延ライン秤量機 0~30tで ±10kg
2 測定対象や測定量自体の大きさ (基準や工業規格の欠如)	燃料ガス管径 4000 以上 混鉄車 800t 以上 圧延荷重 4000t 以上
3 測定環境の厳しさ	高温、高湿、高粉塵、振動、24時間連続運転、In situ化
4 測定対象の多様性 (プロセスの多様性)	気体、液体、固体、それらの混合体
5 測定要求の高度化 (センサの質と量の高度化)	省エネルギー、省力化、プロセスの連続化、製品歩留りの向上、製品高付加価値化、環境対策強化、設備長寿命化
6 測定次元の拡がり (点線→面→立体)	プロフィール計測、パターン計測、感覚計測
7 高度な信頼性	保全要員の減少、センサの量の増大 監視から制御へ、In situ化

→市販の技術での解決が困難

(b) センサの対応

- ① 非接触測定の積極的導入**
 - 過酷な環境からセンサの絶縁
 - プロセスへの擾乱の極小化
- ② インテリジェンスの導入**
 - μ-CPUによる情報処理
 - 情報処理によるセンサ欠陥の補間
- ③ In situ (含目的) センサの開発**
 - 過酷な環境への接近
 - 消耗型センサの利用
- ④ パターン計測の導入**
 - 機械式、電子式スキャンング
 - 小型センサ、ラインマウントセンサ
- ⑤ 量から質へ**
 - 鉄の高付加価値への対応
 - 「プロセス見える化」への活用
- ⑥ 新原理の採用**
 - 専門性の深化
 - 完成度の向上

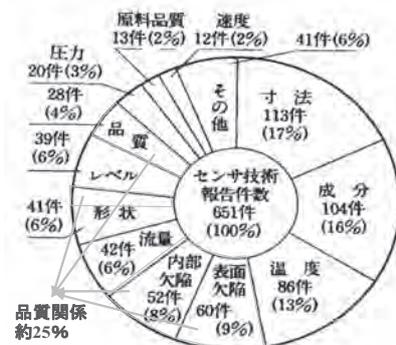
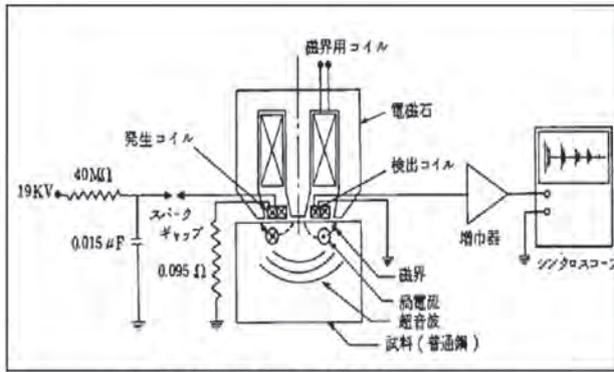
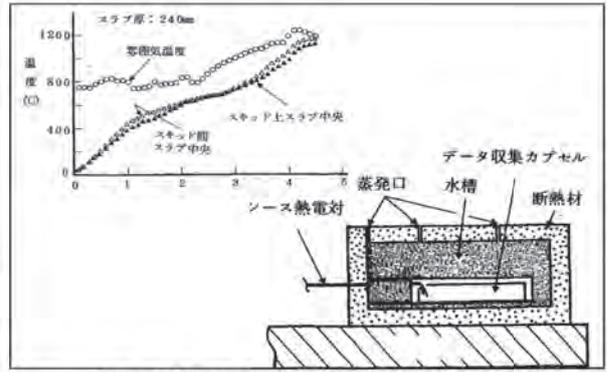


図 4.6 鉄鋼各社におけるセンサ開発状況 日本鉄鋼協会 計測部会での報告数⁴⁻⁷⁾ 1972~1989



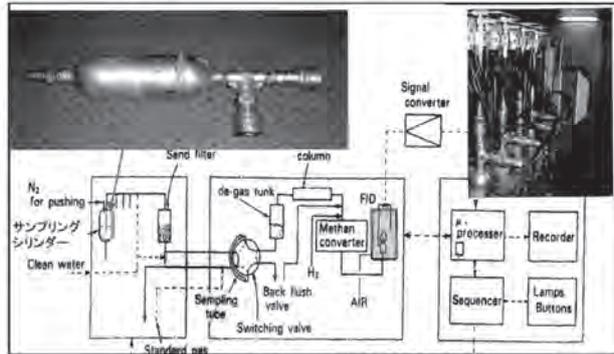
(a) 電磁超音波による探傷
川島:鉄と鋼、63-11、S703、1977

16



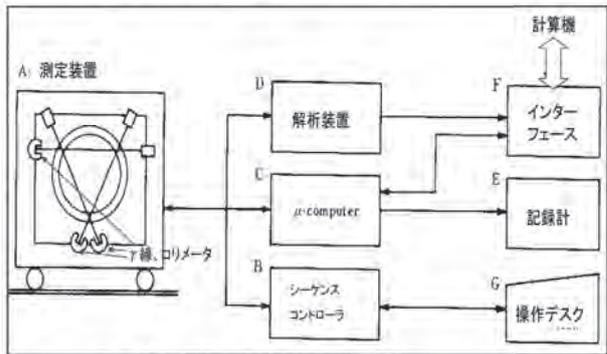
(b) 耐熱温度データロガー
阪本他3名:鉄と鋼、'79-S273、1979

3



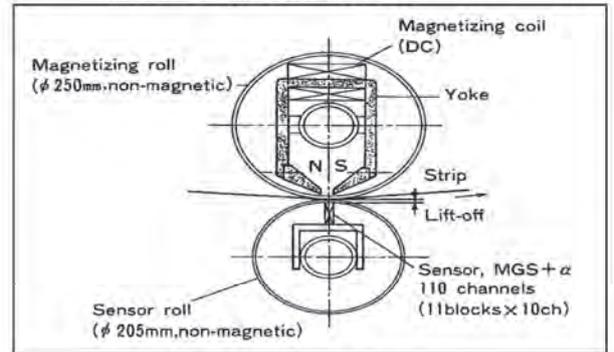
(c) 溶存CO式スラブ漏洩検知装置
岩村他5名:鉄と鋼、65-11、1979

6



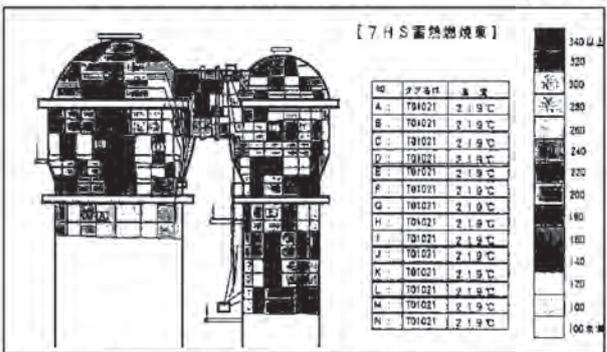
(d) γ線CT方式鋼管熱間肉厚計
船生他:川崎製鉄技報、14-2、1982

14



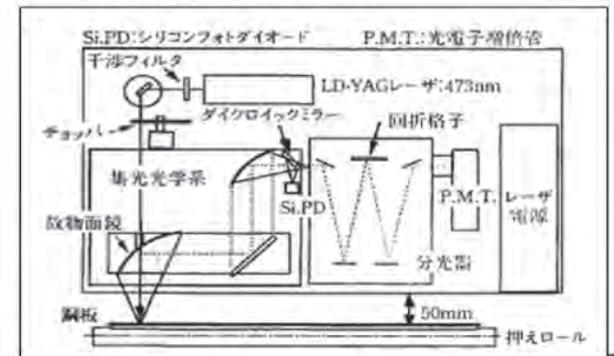
(e) 漏洩磁束方式介在物検出装置
田辺他5名:鉄と鋼、79-7、1993

56



(f) 光ファイバーによる広域温度多点測定
飯田他4名:川崎製鉄技報、26-1、1994

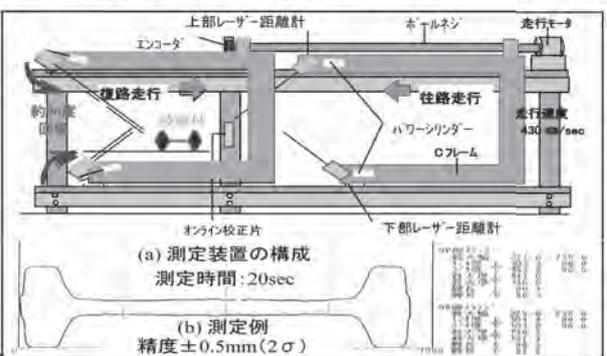
46



(g) オンライン塗油量計

柳本他6名:計測自動制御学会第13回センシングフォーラム、1996

156



(h) 熱間形鋼形状測定装置

松本他3名:材料とプロセス、9-8、1998

134

図4.7 鉄鋼におけるセンサ開発の事例抜粋

開発の報告ではなく、保全や改良も含まれるが、いずれにしても鉄鋼におけるセンサ開発を間違いなくドライブした。各社は年3回あるこの会合を楽しみにし、自分の成果を高らかに自慢しあい、出し抜かれると顔では笑って、苦い酒を飲み下した。この活動は現在も受け継がれてはいるが、最近はややもすれば自由闊達な雰囲気は失われつつあると聞く。

4.1.7 センサ開発の成果

鉄鋼各社と専門メーカーの活発な開発努力により、多くの成果が得られており、図4.7にその実例を示す。前述の①～⑥がセンサ開発のキーワードであるが、図4.7の各事例の中で実現されている。

最近では開発対象が難しくなり、解決のための技術も高度化してきている。開発の対象も製品品質に関する課題にシフトしつつある。また、企業秘密や知的財産の問題から、かなり自由な活動が制限されている。時代の趨勢で止むを得ないと思われるが、それが日本鉄鋼業の発展までを減速させるものであってはならない。

4.2 制御技術

ここでは「制御」を広い意味で捉え、「計装」技術に近い捉え方をする。計測・電気情報と操業者とのインターフェースやデータ処理の方法、ならびに制御やデータ処理のためのシステム構成をも含めて説明する。プロセス計算機に関する事項（含むPC）については次節で説明する。表4.1Ⅱは大きな流れである。

4.2.1 初期の鉄鋼制御技術

初期の制御技術の発展は前節で説明した計測技術の発展とほぼ同じであり、ドイツの熱経済技術委員会、イギリスの熱管理委員会、さらにはアメリカでのオー

トメーション思想の普及がその系譜となる。特にドイツのルンメル博士による1930年前半での制御理論の研究⁴⁻⁸⁾や、イギリスならびにアメリカでの第2次大戦中に開発されたOR手法や対空砲火の位置制御が制御技術の発展に寄与している²⁻¹⁾。

4.2.2 日本における初期の状況

計測技術と同様にドイツやアメリカからの熱管理思想の導入が日本鉄鋼協会「熱計器専門委員会」で受け止められ、表4.2で示した熱関係プロセス標準計器や技術要覧の中で計測器とともに制御も標準化されている。それらを実プロセスで適用したものの例を図4.8に示す^{4-8),4-9)}。(a)は平炉、(b)は均熱炉の計装例であり、いずれも1950年代初めの、当時としての最新技術（米国石油産業の影響から空気圧方式が多い）を盛り込んでいる。機能的にはACC（Automatic Combustion Control：自動燃焼制御）の基本仕様はすべて織り込まれている。平炉の場合は燃料に重油が使われ、均熱炉の場合はMixガスが使われる違いはあるが、空燃比制御、Mガス燃料比率制御（均熱炉）、炉内圧制御、炉壁（天井）温度制御が実現している。(c)は実際の制御装置のパネル例である。

本制御装置の導入により、1～2%の生産性や燃料原単位の向上を得たとの報告があるが⁴⁻⁸⁾、その数値は後年の成果に比して小さい。センサや制御装置の信頼性、およびシステムの保全技術等がまだ不十分であったものと思われる。その後の熱計器専門委員会を中心とする制御装置の普及活動や、保全をも含めた「熱経済技術要覧」の作成、さらには計測器メーカー先駆けた「工業計器標準化活動」などの諸活動が大きな成果を得ることになる。

図4.9はその後の約10年間における鉄鋼熱設備の燃料原単位の推移であるが、平炉では54%、均熱炉では35%の削減がなされている。プロセスや操業方

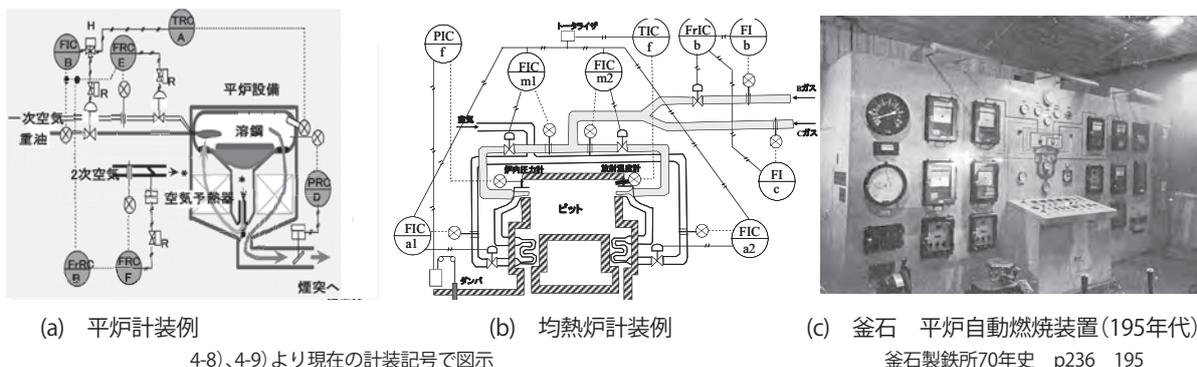


図4.8 初期の熱計器標準の実プロセス適用例

法の改善による所も大きいですが、熱計器と制御の普及とその安定が大きく寄与している。計器の設置により従来不明であったものが次々と判明し、それにより新たな開発意欲と新たな成果が生まれるという好循環があった⁴⁻¹⁰⁾。これらの成果は鉄鋼業における計測制御装置の普及を高めるとともに、計測器メーカーを通じて他産業にも大きな影響を与えている。

4.2.3 新しい時代における鉄鋼制御

前節で述べた熱計器を中心とする制御装置の普及が、各プロセスの制御や計装化の発展につながる。計装機器の電子化も進み、1970年代初期の4～20mAの標準化とその後の機器のデジタル化の寄与する所が大きい。これらの技術を整理すると、図4.10に示すようにPA (Process Automation) とFA (Factory Automation)、さらにP/C (Process Computer) に大別される。あるいは電気 (E) と計装 (I)、さらにはP/C (C) に別けて示すこともできる。PAはプロセスの監視や制御を行い、FAは工場のシーケンスを制御するのが主分担であったが、現在では渾然一体なものになりつつある。大まかに言って製鉄や製鋼はPA主体で、圧延はFA主体で進んだ。

1970年代の後半にはPAではDCS (Distributed Control System)、FAではPLC (Programmable Logic Controller) が登場し、P/Cと共に制御システムを構成する3要素となる。

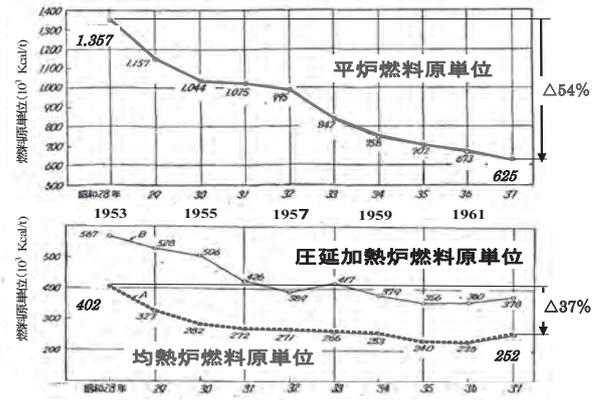


図4.9 鉄鋼熱設備の全国平均燃料原単位推移⁴⁻¹⁰⁾

4.2.4 鉄鋼制御の実推移例 (高炉)

鉄鋼業における制御装置のこの時期の発展の状況を、高炉計装を例にとってまとめたものが図4.11である。図4.12はそれらの操業管理室の状況 (HMI: Human Machine Interface) を示したものである。時代順に整理すると以下ようになる。

(i) 部分集中: 1960年以前は従来の熱計器の延長での構成である。管制室も複数に分かれており、情報密度も粗い。(図4.12 (a) (b) (c))

(ii) 一極集中: 1960年代に入り電子式計器が主体となり、高炉全体の集中監視が実現している。また新しい試みとして登場したばかりのプロセス計算機で秤量制御のDDC (Digital Direct Control) を行なっている (図4.12 (d))。

(iii) 大規模DCS: 1970年には登場したばかりのDCSとPLCならびにプロセス計算機により、高炉

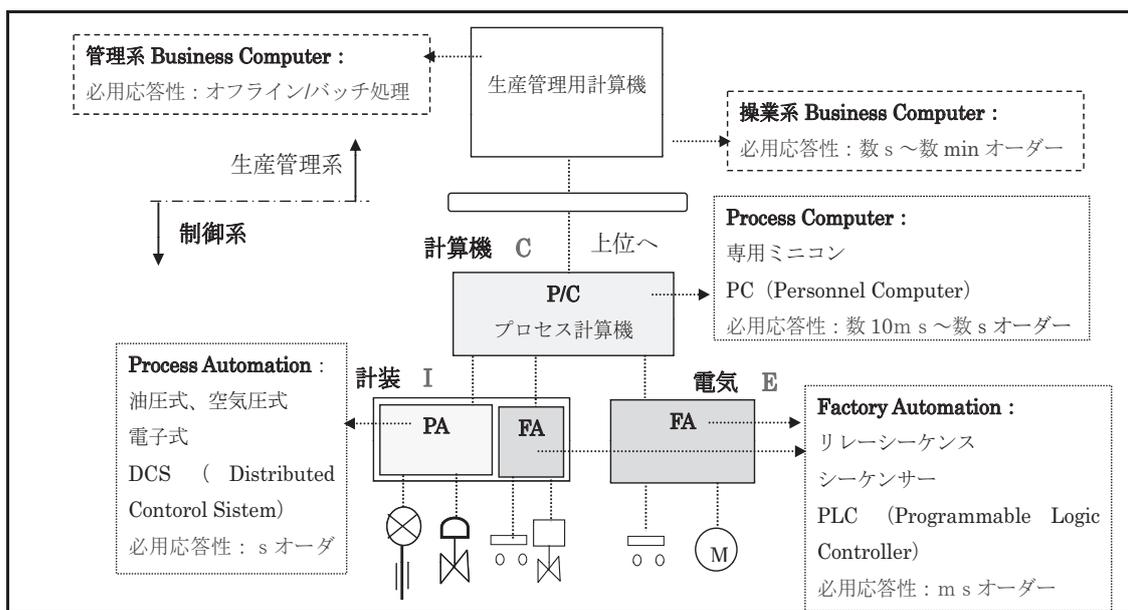
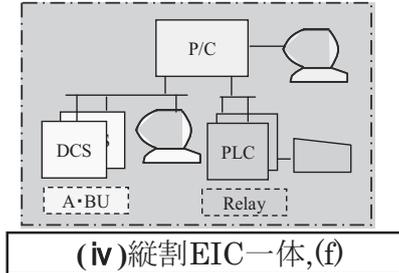
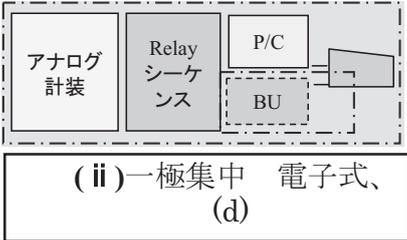
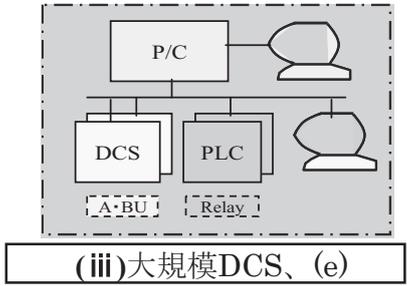
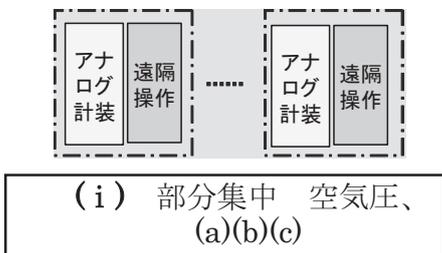
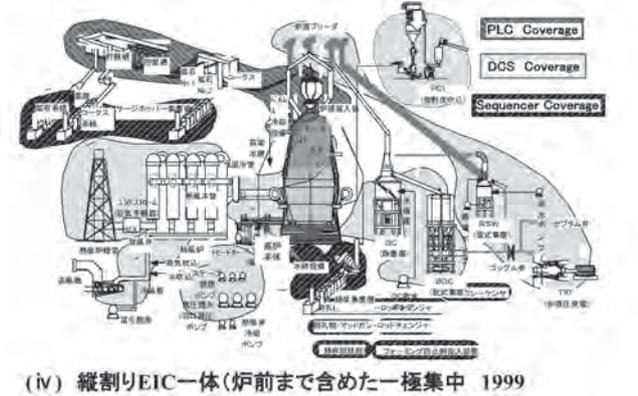
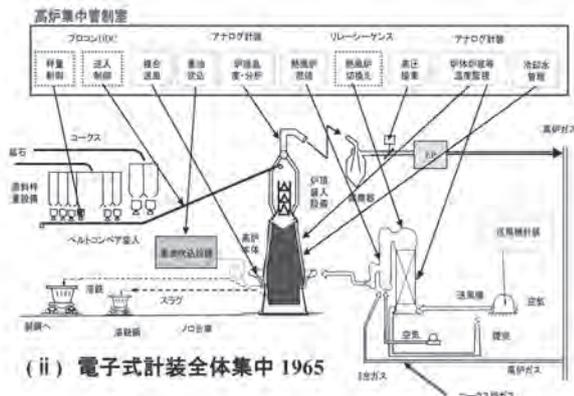
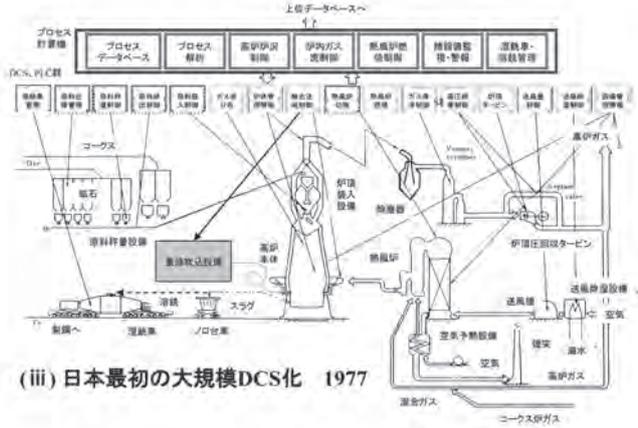
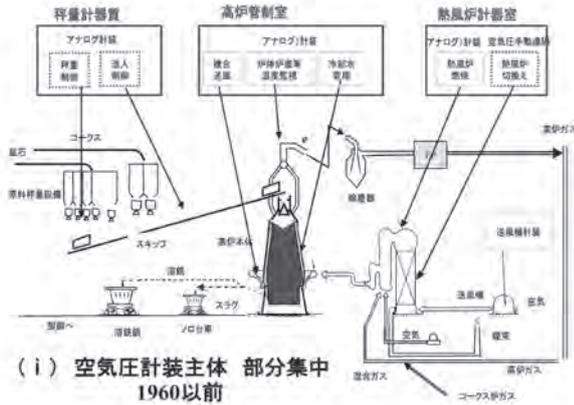


図4.10 製鉄所の計算機システムと標準的な制御システムの構成 (FA+PA+P/C またはE+I+C)



凡例: P/C:プロセス計算機、DCS:総合分散計装(Distributed Control System)
 PLC:Programmable Logic Controller、A・Bu:アナログ計装バックアップ
 Relay:リレーシーケンス(含むバックアップ) (一点鎖線は一つの部屋を示す)

図4.11 制御システムの発展(構成の推移と範囲の広がり)
 出典:4-11),4-40)



図4.12 操業管制室の変化(HMIの変遷)

出典:釜石製鉄所70年史p210、室蘭製鉄所50年史p517、鉄と鋼51-10、およびJEF殿

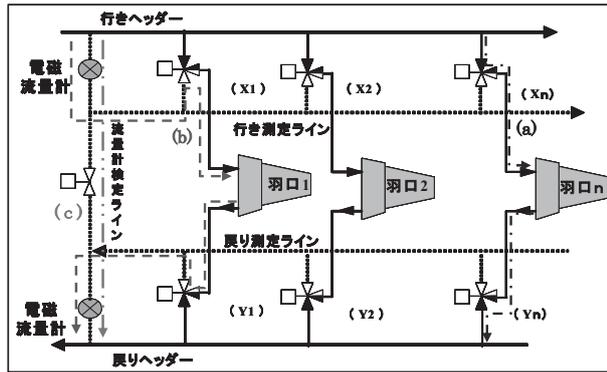
総合管制室化が実現し、管理範囲も前工程の原料処理の一部から後工程の製鋼プロセスの一部にまで拡張している。(図4.12(e))

操業者に自分の前後のプロセスにも気を配った操業が意図できるように考えた設計である。また、DCSが登場したばかりであったため、違和感を少なくし信頼性を挙げるためにアナログによるバックアップをかなり重視している。PAとFAの融合により、制御性能や計装精度の大きな向上が得られている。

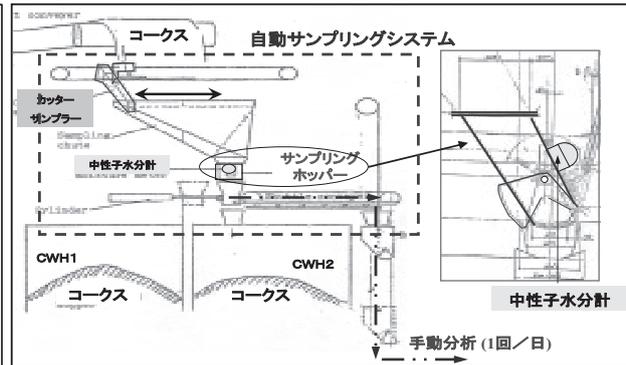
(iv) 縦割りEIC一体: 20世紀末には、よりコンパクトなシステムで炉前も含めた全高炉をカバーする。この場合、操作室を炉前に置く事により高炉操業

者の一層の一体化がなされている。システム的にはEIC(縦割り)一体とCRTのシングルウィンドウ化を行い、かつパソコンの活用も図っている。(図4.12(f))

時代が進むにつれ、制御対象が拡大し、処理すべき情報数が増加している。最終的には高炉に関する全情報が一つの管制室に集約化されており、プロセス要員の省力化にも機能している。1970年代以降の制御装置の進歩は、どのプロセスにおいても同様の傾向をとり、整理すると以下ようになる。①PAのDCS化、②FAのPLC化、③汎用BUSやLANの採用、④PAとFAの融合、⑤HMIのCRT化、⑥汎用PLCの登場と普及、⑦制御論理の高度化、⑧EIC一体化



(a) スキャニング方式の羽口漏洩検知 (DCS)



(b) 専用ホッパー方式コークス水分計 (PLC)

図4.13 PAとFAの融合(計測へのインテリジェンスの付与)⁴⁻¹¹⁾

そして⑨オープン化である。

①②： 当時の高炉は改修や大型高炉の新設があったため、新しい制御システムの導入がもっとも早かったが、その信頼性と高機能化が確認されるや1980年代には全プロセスに適用されている。

③： 図4.13に高炉での典型例を示す。(a)は10本の羽口に一对の流量計を設置したスキャニング方式の羽口漏洩検知装置である。一巡後に常に自動較正を行なうことにより0.3%FSの精度を20年間保った。(b)は測定の代表性が維持できる専用ホッパーを持ったコークス水分計である。秤量制御用のPLCがサンプリングシーケンスと水分補正を行っており、30%近い精度の向上が得られている。ともにPAとFAが融合することにより、インテリジェンスを計測や制御にもたらした好例である⁴⁻¹¹⁾。

④： DCSやPLCの登場はその通信手段に外部BUSやLAN(Local Area Network)を採用することで通信の大きな改革を制御装置にもたらした。前者(DCS)はメーカー固有の仕様のものであったが、光ファイバーの使用や二重化のトークンパス方式が信頼性を確保した。後者(PLC)のプロセスI/Oはやはりメーカー固有のものが多かったが、情報ネットワークにおいては上位プロセス計算機との通信を含めRS232やEthernetが使われるようになり、その後の通信の標準化に大きく寄与した。

⑤： CRT等を活用することにより、プロセスの総括的な把握と必要に応じたパーソナルな、あるいはローカルな詳細情報の把握が自由に選択でき、情報の洪水から操業者を救うことが出来る。プロセス情報がその現場の最先端で細大漏らさず得られることにより、操業管制室の機能と操業解析オフィスの機能が結びついたと良い。

当初はDCSやPLCのHMIはオプション画面をプロセス計算機に任せることが多かったが、EIC一体の

時にSingle Window(一つのHMIからEICいずれも操作し監視する)と言う考え方が実現する(次節参照)。

⑥： 1980年代に登場した小型の汎用PLCであり、安価で高機能なものであったため、自動化機器や複雑な計装装置の制御装置として広く普及した。

プロセスI/Oもオープン化が進み、情報ネットワークもEthernetが標準的に使えるため、PC(Personnel Computer)とともにその後のオープンシステム構築のためにも大きな武器となった。

⑦： DCSにEWS(Engineering Work Station)が設置され、またPLCが高機能化することにより、高度化した制御論理を処理するようになる。従来は後述するプロセス計算機の役割だったものが、より前衛の制御装置で効率的な役割分担となる。

⑧⑨： 次節で紹介する。

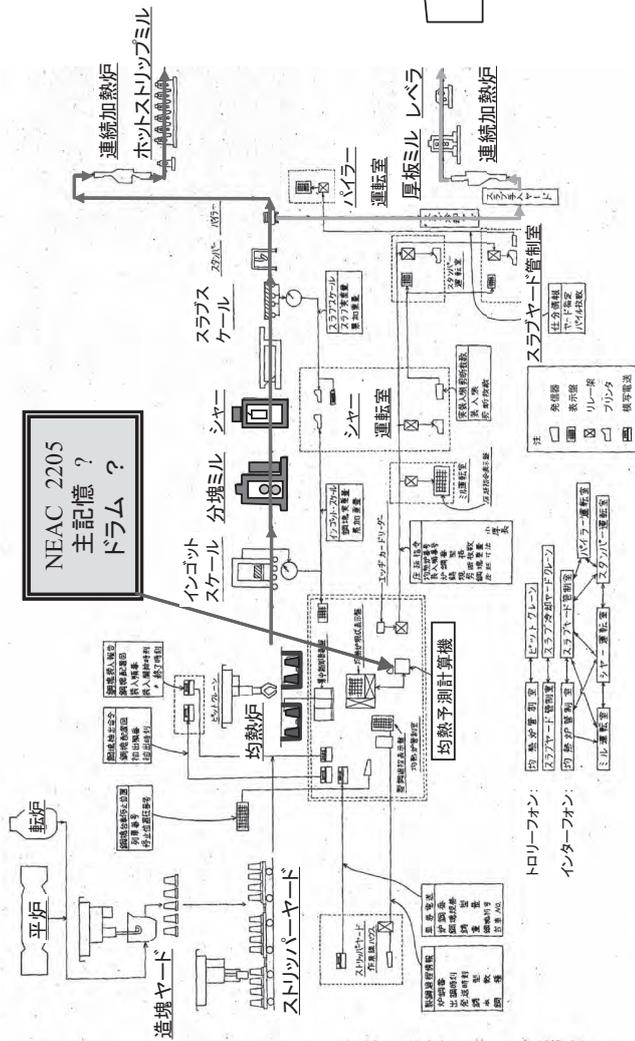
4.3 計算機技術

プロセス計算機について、その動きをソフト面を含めて紹介する^{4-12)~15)}。表4.1Ⅲに大きい流れをまとめる。

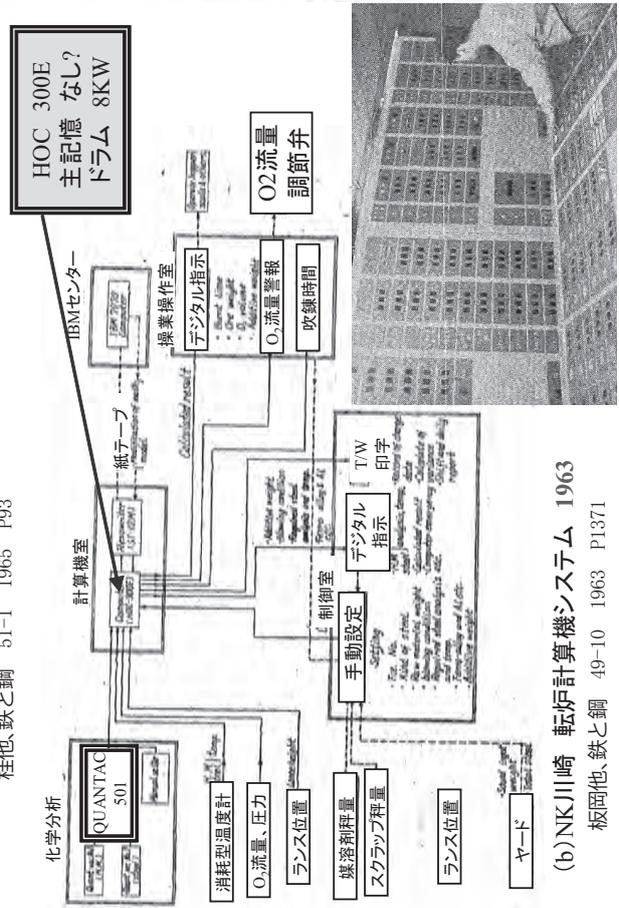
なお、生産管理用の計算機はそれ自体極めて重要な成果を収めたものであるが、ここでは除外する。

4.3.1 初期のプロセス計算機

米国においては1950年代末には焼結、転炉、あるいは熱間圧延等にオンラインでのデータ収集が可能なプロセス計算機(以下プロコンまたはP/C)が導入され、収集されたデータを基に効率良いプロセス解析が進められた。また、米国では鉄鋼だけでなく石油や化学工業等においても制御システムの導入が進んでおり、1960年代前半にプロコン専用のシステムであるIBM 1800が登場した。OS(Operating System)としてMPX(多重処理)やTSX(単一処理)の両方を持ち、



(a) 千葉第2分塊 計算機システム 1961
桂他、鉄と鋼 51-1 1965 P93



(b) NK川崎 転炉計算機システム 1963
板岡他、鉄と鋼 49-10 1963 P1371

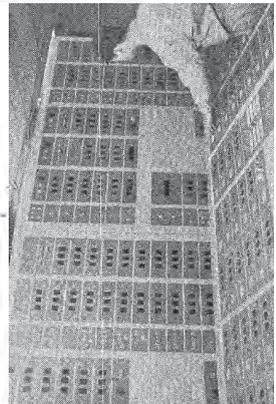
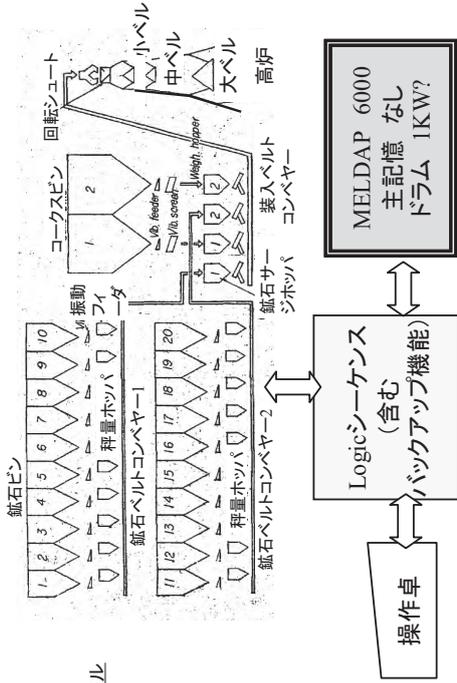
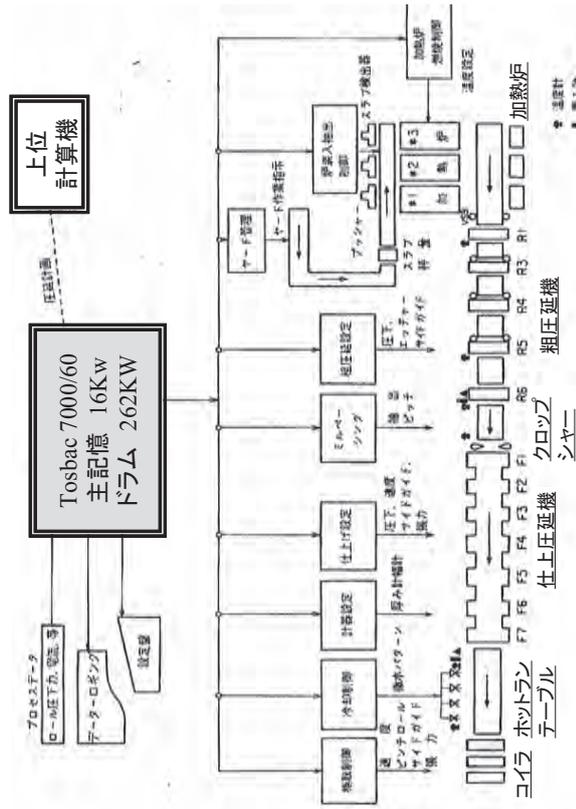


図4.14 初期のプロセッサ計算機例(1960年台)



(c) 千葉5BF 秤量・装入DCCシステム 1965
岩村他、鉄と鋼 51-10 1965 P1718



(d) 君津 熱延計算機システム 1969
野坂、鉄と鋼 59-5 1973 P566

割り込み処理やアナログならびにデジタル入出力処理、手続き言語である Fortran でのソフト製作を可能にした、プロセス計算機での名機である。基本的にユーザでのソフト作成をポリシーとしており、それが可能なだけの機能を持ち合わせていた。

また、1962年に英国 BSC スペンサー製鉄所において、新しい製鉄所の生産と工程管理を受注から出荷まですべて計算機で処理する構想が打ち出された。戦争中に開発された OR 手法の実運用の手段として BISRA (英国鉄鋼研究組合) が打ち出したものであり、ネットワークとハイアラキシステムが現在の製鉄所システムと概念的に非常に近いものとなっている。当時の計算機の能力が不十分であったため、当初の目標である完全オートメーション製鉄所の実現には至らなかったが、世界中に大きなインパクトを与えた^{2-1), 4-14)}。

4.3.2 日本における初期の状況

日本においては計算機そのものの導入は遅れ、1950年代に科学技術計算や事務処理用に用いられていたに過ぎない。プロセス用となるとメーカーでの開発体制は全く整ってはいなかったが、鉄鋼においてはちょうどプロセスそのものや、それをサポートする計装設備が複雑化しつつあり、早期にプロコンを味見したい要求は強かった。そのためバッチ処理用の計算機を操業の補助(高級計算尺)に用いたり、あるいは1960年代になって前述の IBM や GE 社等を模倣した国産のシステムの登場を先取るような形で実プロセスに積極的に適用した。初期に導入されたシステムの中で実操業に深く機能した例を図 4.14 に示し、以下に概要を紹介する。

(i) 分塊プロコン (川鉄千葉 1961):

製鋼と圧延の接点であり、鋼塊の焼き上がり予測と、鋼塊情報の遠隔伝送を目的に開発された。情報の伝達にファクシミリを使用するなど、当時の計算機周辺装置の機能不足を工夫で補っている。NEC 製の計算機をオンライン仕様に改造した形で使用している。

(ii) 転炉プロコン (鋼管京浜 1963):

転炉は当時に新しく導入されたプロセスであり、その特質上プロセスとしての再現性に優れ、そのため計算機の利用が優れた効果を産み出すと期待された。そのため各社が導入を競い、吹錬作業そのものの制御をターゲットとしている。本システムでは溶銑および最終溶鋼温度、銑鉄や鋼の分析値は自動で入力されるが、酸素流量、秤量機や媒溶剤投入量等は写真の操作表示卓から手動入力に頼っておりオンライン計算機としては十分なものとは言えない。メインの計算機は北辰製

であるが、解析用データ収集には IBM 7070 に紙テープで渡される。

(iii) 高炉原料秤量・装入 DDC (Direct Digital Control) (川鉄千葉 1965):

フランスのダンケルク製鉄所においてフランス製の計算機により制御されているのに刺激を受けて、三菱電機と共同開発したものである。我が国最初の DDC システムであり、三菱電機プロセス計算機第一号である。秤量(ロードセル)信号も含めて、すべてデジタル入出力信号で処理している。対象の高炉は高圧操業を実施するため、炉頂装入が高圧操業のため 3 ベル方式を取っており、秤量や排出のタイミングが非常に複雑化したが、計算機処理により全体として簡素なかつ操作性の良いものとなっている。

(iv) 熱延用プロコン (新日鉄君津 1969):

熱延用として最初のもは 1964 年の新日鉄戸畑のものであるが、本システムはその 5 年後に君津で導入されたものである。システムのカバー範囲が加熱炉からコイラーまでの全熱延工程をカバーしており、上位の生産管理用計算機とリンクする等、本格的な構成となっている。ただし使われた計算機の容量や処理速度は現在のものと較べると圧倒的に小さく、機能や効果は十分とは言えなかった。

このようなシステムが各社間で競って導入されることとなり、図 4.15 (a) に示すように 1965 年以降の伸びは急速である。単独のプロセスの生産量の大きい高炉や転炉への適用が最初であり、その後プロセスの複雑な熱延や冷延が増加している。1960 年代末における業種別のプロセス計算機導入数の比較では、(b) に示すように圧倒的に鉄鋼が先行している。海外と比較しても 1960 年代に欧米に追いつき、1970 年代には追い越すに至っている⁴⁻¹⁶⁾。メーカーも鉄をモデルケースとして力を入れ、製鉄所担当者との緊密な連携と熱意がそれを可能にしたと言える。

4.3.3 その後の発展

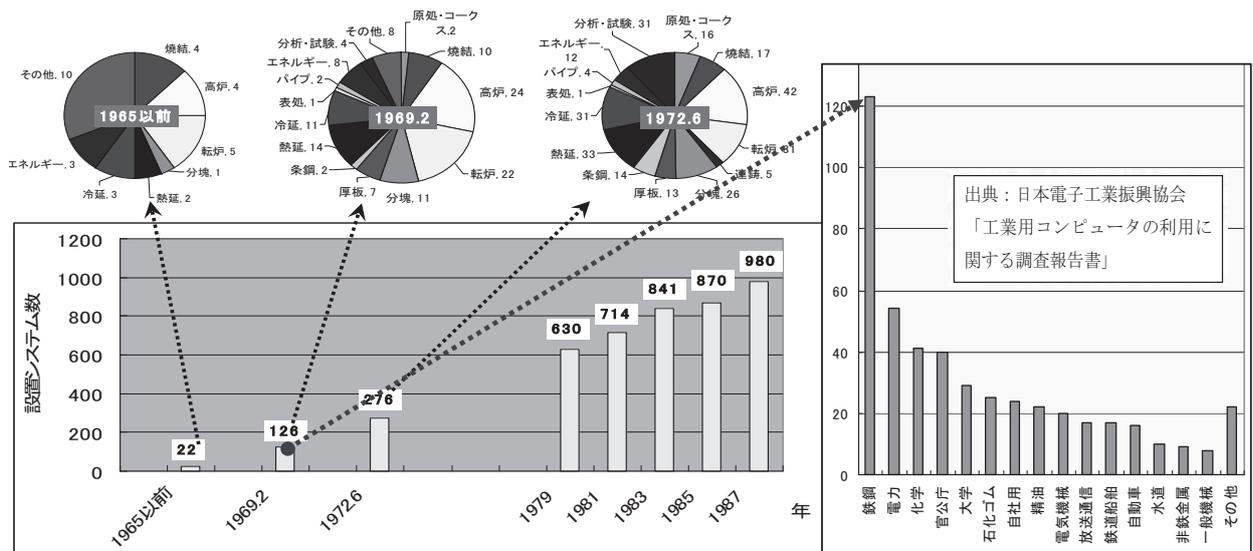
以降の主な動きを以下に示す。

① 国産計算機の進歩:

1960 年後半においては国産の計算機も模倣の段階を終え、また幾つかの応用例をこなすことから真に必要な機能が判り、洗練されたかつ処理機能の優れたものが登場してきた。

② ソフトウエアの自社製作:

当初は計算機メーカーにシステム設計やソフト製作を任ずることが多かったが、1970 年代になって計算機のみをメーカーに発注し、ソフトは鉄鋼自社で製作するこ



(a) 鉄鋼におけるプロセス計算機の適用の拡大 (b) 産業用プロセス計算機導入状況(1968年末)

図4.15 産業用プロセス計算機導入状況
鉄鋼連盟、情報通信委員会調査、鉄鋼協会共同研究会計測部会、調査等より

とが多くなる。ソフトは操業そのものであるという認識が深まり、その改造や保全を含めて自社化する必要性を各社が強く感じたためである。ただし要員の効率化の面から外注ソフトウェアハウスを社内に取り込むケースが多い。1980年代では、大規模な製鉄所では社員が約100名、外注が約200名近くに上る場合が少なくなかった。

③ Unix システムの採用：

ソフトの自社化が進むとともに使用するソフト言語が問題となる。当初は計算機自身の能力の問題から Assembler が多かったが、専門性を軽減することから Fortran 等の手続き型言語に移行する。またソフトウェア資産の部品化やソフト開発や保全に関して多くの機能を持つ Unix 系の計算機が多く使われるようになる。そのため言語も C 言語の利用が多くなる。

別の方向として、欧米の石油関連等で利用の進んでいた問題向き言語 (POL: Problem Oriented Language (IBM PROSPRO 等)) や、その発展系であるパッケージソフト ACS (IBM: Advanced Control System) が製鉄関係で利用された⁴⁻¹⁷⁾⁴⁻¹⁸⁾。ソフト作成や保全の効率化と言う意味では機能したが、バッチプロセスへの対応が悪いこと、CRT やレポートングでグラフィックや日本語対応が十分でなく、製鉄や化成以外での利用には進んでいない。

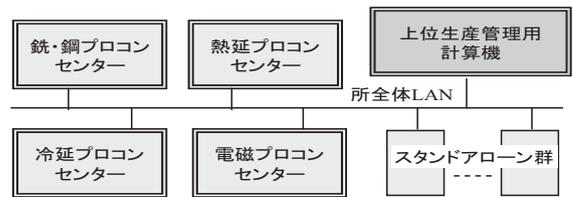
④ LAN の利用 (P/C の PIO レス化)：

1970年代の DCS や PLC の導入により、それらとの情報ネットワークで Ethernet の LAN を使用することが多くなる。それが進むと、プロセスとの入出力 (PIO) は DCS や PLC に任せ、P/C 自体は PIO レス化していくことができ、EIC の新たな機能分担が実現

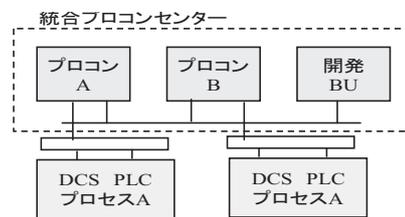
する。そしてそれが後述するオープン化につながっていく。

⑤ 統合プロコン室の採用：

導入当初は P/C 自身が脆弱で、かつ高価なものであり、対象プロセスに「一国一城」の形で計算機室を用意した。1980年代になり各製鉄所での台数も100以上になると、計算機や要員の管理の効率化、災害を含めたセキュリティ等が問題となり、さらにはともすれば時間のかかる計算機プロジェクトの「見える化」の必要性から、製鉄所内に「統合プロコン室」が設置される。図4.16にその代表例を示す。



(a) 製鉄所プロコンならびに生産管理用計算機の構成イメージ



(b) 統合プロコンセンター基本形2(同機種)

図4.16 統合プロコン室による開発の効率化

ソフト開発要員のプール化、計算機およびその周辺機器の節約、およびセキュリティ対応の高度化で具体的な効果を得ている。当時その利用が急速に伸びた前述の LAN、さらには DCS や PLC の機能拡張によるフ

ロントサイドでのオンラインデータ収集機能向上が推進の原動力となっている。

⑥自律分散の概念とプロコンへの活用：

プロコンの大規模化や広域分散化に仕組みとして対応するものが自律分散の概念⁴⁻¹⁹⁾であり、マイコンや光データウェイの誕生や機能拡大がその概念の実機適用を大きく後押しした。図4.17に1980年代半ばに導入されたシステム例を示す⁴⁻²⁰⁾。冷間圧延や表面処理ラインの個々のプロセスをサブシステム用計算機（マイコン1～4）が自律的にカバーし、生産管理とのI/Fを含めた冷延・表処関係のデータベース管理を5,6が担当する。マイコン7は1～6の開発系ならびに非常時のバックアップとなり、マイコンnは将来の拡張対応である。

自律分散は生体における新陳代謝の概念を工学システムに応用したものであり、「システム全体の構造を知らなくても個々のサブシステムが自律的に機能すること」や「一部のサブシステムやコンポーネントが故障してもシステム全体としては停止しない」等が基本的概念である。その結果としてシステムの信頼性が高く、構築後の拡張や変更が非常に容易であり、また1:nの開発系あるいはバックアップ機能を用意することで無駄な投資を抑制している。個々のシステム上の恣意的な冗長性が、全体としてのシステム構築をシンプルなものにしている。メモリー効率を落とすと言うような欠点もあったが、その後のハードウェアの発達もあり、この概念がプロコンだけでなく、その後の制御システムを引張るものになった⁴⁻²¹⁾。

⑦EIC一体化システム：

E（電気）、I（計装）、C（プロコン）それぞれで独自に発展してきた制御装置は、1990年代になって相互の重複をなくし、かつより密な結合を行うことで制御処理の機能を向上させ、さらにHMI（Human Machine Interface）でSingle Windowを実現させること等を目的にEIC一体のシステムが登場してきた。図4.11（iv）に示したものが初期の例であり、次の図4.18に示すものはより進んだ形体である。

（a）図は1980年代後半に導入された冷延大規模プロセス（新日鉄戸畑）の自律分散型のEIC一体システム⁴⁻²¹⁾であり、EIC統合のLAN上に同一メーカーの2台のプロコン、11台のSingle WindowのCRT端末、ならびに11台のE、Iプロセッサから構成される。

（b）図は1995年に新設された熱延システム（川鉄千葉）のEIC一体制御システムであり、同一メーカープロセス計算機とPLC、ならびにSingle windowのHMIからなりたっている。また電気・計装関係を

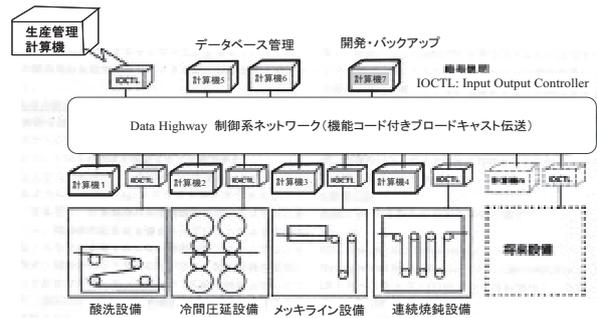
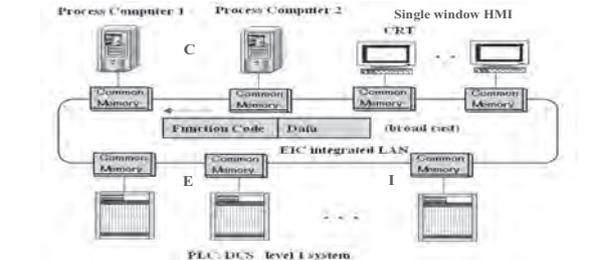
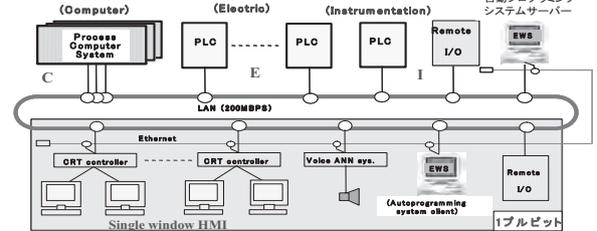


図4.17 自律分散システムの採用例⁴⁻²⁰⁾



(b)冷延プロセス対象のEIC一体自律分散システム例（新日鉄 戸畑）1980年後半 自動プログラミングシステムサーバー



(a)熱延プロセス対象のEIC一体システム例（川鉄千葉3ホット）1995

図4.18 EIC一体システムの例 (Single Vendor)

処理するPLCはEWSにより自動プログラミングを含めた制御装置の保全集中化が実現している。制御対象の熱延プロセスは世界で初めてのエンドレス圧延であり、高度な制御システムを実現し、また加熱炉からコイラーまでの全熱延プロセスの1プルピット化を行い、従来10～15人程度の運転要員を3人にまで縮小している。

（a）（b）ともにEIC一体システムとして優れた存在ではあったが、Single Vendor（EICともに同一メーカーの製品）であることが、ユーザの機器選択の自由度を制限してしまう大きな欠点であった。

⑧オープンシステムの採用：

その欠点を補うために、主としてユーザサイドからの需要と提案⁴⁻²⁵⁾により実現したものがオープンシステム（メーカーに拠らない開かれたシステム。従来に比して軽装備となるためライトサイジングとも言う。）によるプロコンシステムの実現である。Personnel Computer（以下PC）やLAN（Ethernet）を中心とするオープンシステムの機能の飛躍的な向上と、効率的なシステム造りに対するユーザの要求がその端緒となった。また20世紀末から日本の鉄鋼における新設

プロセスの減少が著しく、メーカサイドの熟練要員の鉄以外への移動があり、メーカに任せることに対する危機感が出てきた。さらに、これまでプロコンの持つ特殊性を重要視するあまり、専門性は高いが市場規模の小さい高機能プロコンの開発をメーカに求めすぎたことに対する反省が出てきた。高価な投資が必要となり、かつ今後の更新や日常保全をも難しくしてしまっていることに対してである。

i) CRT等へのオープン系システムの採用

当初はHMIであるCRTやデータ解析部分等、その故障が直接システムに影響しない部分をPCで作成することからスタートした。1990年前後のEIC一体システム登場の時点(図4.11(iv)あるいは図4.17)では、メーカが提供している。

ii) PCのプロコンへの適用^{4-22)~4-24)}

オープン系への信頼性の確認とともに1990年後半からプロコン自体をPCで作成する動きが出てきた。当初は慣れたWindowsが用いられたが、そのバージョンアップの影響が少なく、より透明性の高いLinuxの使用に移行してきている⁴⁻²²⁾⁴⁻²⁴⁾。図4.19(A)のものは新日鉄君津連続鋳造プロセスに導入されたシステムである。計算機ハードウェアの選択に制限がなくなるため、ハードウェア費用で8割、ソフトウェア費用で3割程度削減したと報告されている⁴⁻²²⁾。鉄鋼各社ではこのオープン化の全社展開を系統的に進めるため、オープン系OSとアプリケーションソフトを繋ぐミドルウェアを自社製作し、またソフト作成の生産性を向上させる各種標準ツールを作成している。新日鉄では既存のプロコンシステムをオープン化システムに変更するコンバータを持っており、自社だけでなく鉄鋼以外への適用も含めて2000年半ばで170システム以上のオープン化システム適用実績を持っている⁴⁻²²⁾。

iii) EI(電気・計装)(PLC、DCS)のオープン化

新日鉄では、電気用のPLCならびに計装用のDCSのオープン化を目指すため、最終的な目標として図4.19(B)に示すEICオープン化のイメージを示している⁴⁻²⁵⁾。

現状ではEIC通信とEIネットワークのオープン化、ならびに各メーカ独自のPLCとDCSのオープン化が容易ではなく、直近での実現は簡単では無いが、電気・計装ソフトウェア製作の標準化といった観点から取り組んでおり、それに基づいた電気・計装ソフトウェア製作支援ツールを整備している。

iv) 上位生産管理システムとの共有DBの導入

従来の品質管理等を目的としたデータベースは、プロコンから得られた情報を生産管理用計算機に渡し、その中で重装備のデータベースを構築していた。2000年前後からOracleやIBM DB2 Universal Databaseに代表されるオープン系のデータベースシステムが普及し、プロコンおよび生産管理計算機双方からアクセス可能な「共有DB」が登場してきた。図4.19(C)のシステムはその代表例であり、その品質データは通常のパソコンからのアクセスも可能である。

4.3.4 制御を含めた今後の在り方について

プロセス計算機システムは1960年代の登場から僅か40年の中で急激に進歩した。鉄鋼ではその進歩を常に先取る形で、全プロセスを対象に導入を進めただけに、現時点で色々なレベルのシステムが所内に混在する問題がある。一方、近年の自律分散、EIC統合、そしてオープン化の動きが、その存在を専門性に隠れた特殊なものから、個人に普及しているPCのような普く開かれた存在になりつつある。おそらくE、I、Cと独立した存在で語られる必要も早晩無くなり、また、新しいオープン化システムに徐々に統一されていくものと思われる⁴⁻²⁶⁾。

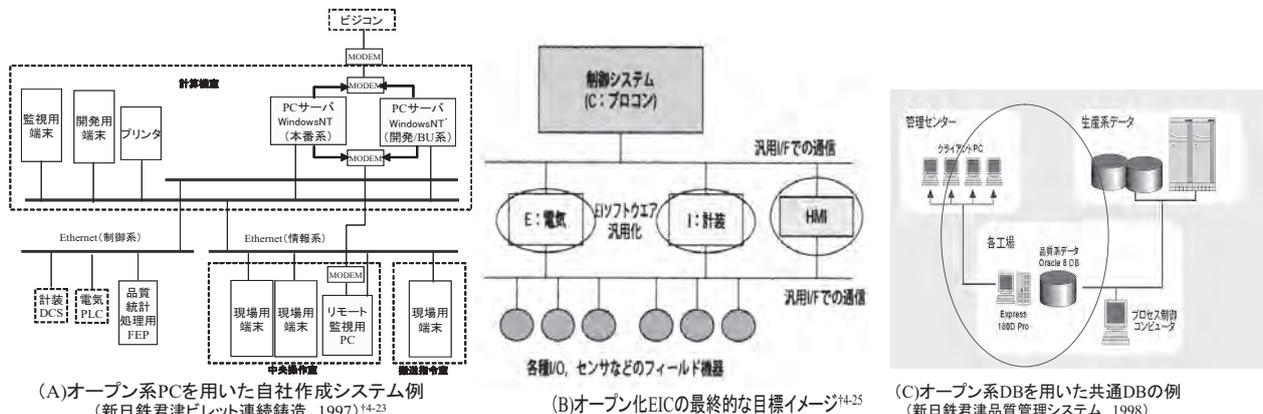


図4.19 オープンシステムの導入と自社化 資料:4-23) p 40、4-25) p 12、oracle HP 1998

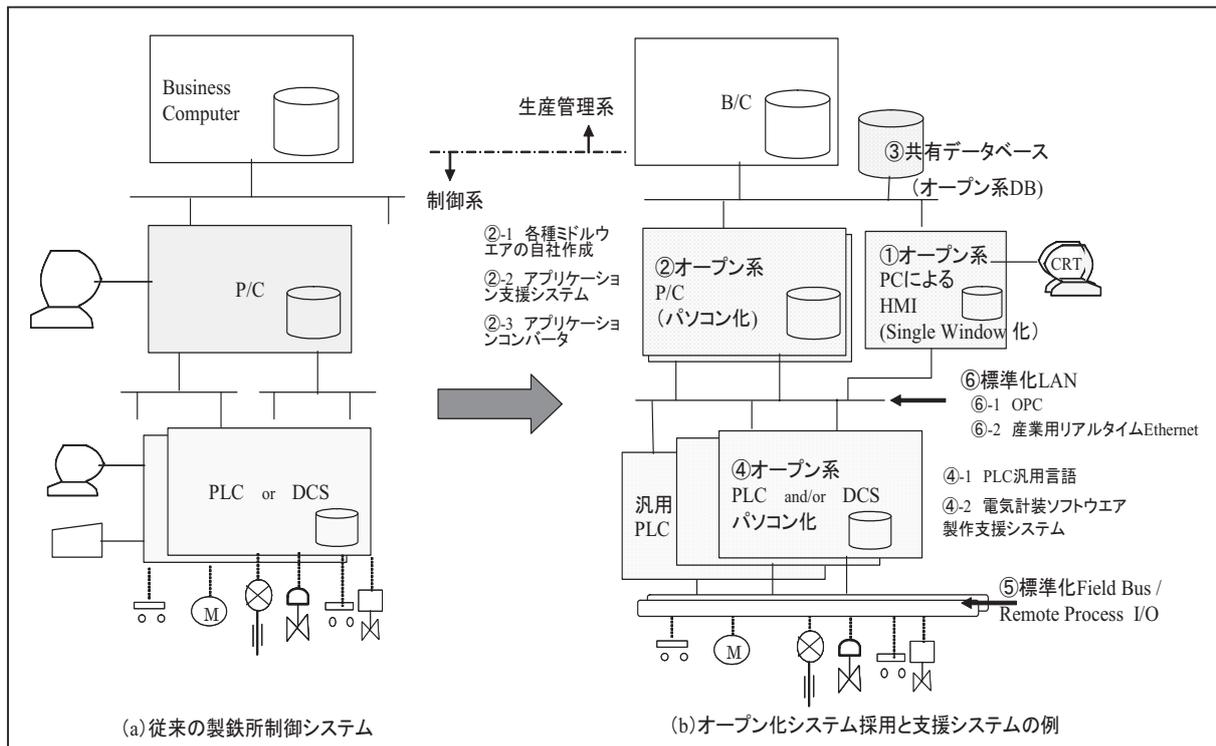


図4.20 新しい制御システムの姿

図 4. 20 は現在までの進歩を踏まえて、今後どうなるかをまとめたものである。

① PCによる Single Window HMI、② PCによるオープン化プロコン、③ オープン系 DB による共有 DB は現在既に実現されており、さらにその傾向が進むと思われる。

①～③：説明省略

④ PCによる DCS、PLC のオープン化： 一時期 Windows をベースとした小規模なものが出たが、信頼性の問題から鉄ではまだ使われていない。しかし PLC 言語の標準化や設計文書の標準化など、その準備は進んでおり、早晚その使用の準備が進むものと思われる。

⑤ Field Bus： 鉄の場合、早い時期に DCS 化や PLC 化が進んだため、Remote I/O の利用が多いが、Foundation Bus などの国際標準化が 90 年代に終わっており、配線工事以外の機能上のメリットに注目した導入が新設設備を中心に進むものと思われる。ただし圧延設備の場合のように m Sec オーダの応答性を持つものは、まだ時間がかかる。

⑥ 標準化 LAN： 現在多くの業務は Excel などの Windows 仕様のソフトウェアで処理されており、それに制御用システムを適用させる OPC (OLE for Process Control) が統一的な手順を定めている。日本ではその協議会 (90 年代末設立) に 50 社近くが

参加しており、制御と監視システムのインターフェースのデファクト標準となっている。また最近は Tc-net や FInet など産業用リアルタイム Ethernet が国際標準化され実用化の段階にある^{4-26)~4-28)}。

その他に制御・監視分野での無線化、HMI ソフトへの Web 技術の活用、あるいはソフトウェアでのオブジェクト指向としての Web 型プロコンや Java 言語の利用など新しい波が起きている。

4.4 電気技術

鉄鋼設備の要素技術として重要なものに電気技術がある。アーク加熱炉、電動機、誘導過熱装置、あるいは電磁力応用装置等、鉄鋼への応用の中で育っていったものが多い。本節ではそれらに焦点をあてて説明する。電気の汎用制御装置であるシーケンサや PLC については、4. 2 で説明しているのでここでは省略する。表 4. 1 IV に大きな流れをまとめる。

4.4.1 初期の電気技術と鉄鋼の関わり

19 世紀に直流電動機や発電機が発明され、その組合せにより大形電動機の回転数を制御できるワードレオナード方式 (図 4. 24 (a) 参照) が鉄鋼圧延機に 19 世紀末に適用された。しかし、その頃は蒸気機関が全盛期であり、正逆回転の難しい当時の電動機が蒸気機

関に置換わるまでには30年以上を要している。最初にその電化に最も貢献したのは1905年に建設を開始した米国USスチールのゲーリ製鉄所であり、高炉ガスによる中央発電所からの電気で全設備を電化する概念で設計された。図4.21は1907年に導入された米国イリノイ製鉄所の逆転ミル用の直流電動機であり、その後1960年でも問題なく使用されたと言う²⁻¹⁾。

一方、19世紀末に電気はアルミニウムの精錬に使われ、それがカナダやスエーデンの電気製鉄や電気高炉を経て、アーク電気炉としてくず鉄の溶解ならびに精錬に使われるようになる。図4.22はスエーデンで30程度実績のある電気高炉、図4.23はアルミニウム精錬に端を発し、その後の鉄鋼の電気炉の基本形となったフランスエルー式アーク炉である。

電気高炉は基本的に木炭が必要であり、炉下部の電極が炉構造を複雑にすることで発展せず、低シャフト炉に破れ、その低シャフト炉も高炉に駆逐された。

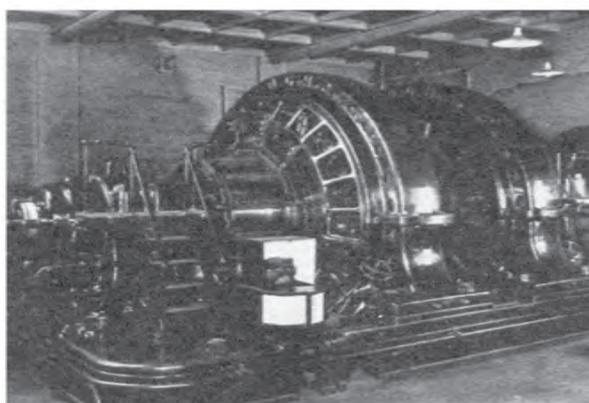


図4-21 米国イリノイ製鉄で1907年から使用されていた逆転ミル用直流モータ
Iron & Steel Engineer, Aug. 1960 p.141

エルー式アーク炉は電極-鋼浴-電極とアークを飛ばす直接過熱方式（間接方式は電極間でアークを飛ばしそれから鋼浴を間接加熱する）であり、3相交流、3本電極を使うものとして、1980年代に直流電気炉が登場するまで電気製鋼炉を独占してきた。

また電磁誘導の原理により金属材料に2次電流を流して過熱する誘導加熱炉が19世紀末にスエーデンで実用化され、電極不要・高効率・局部過熱可能等の理由で普及した。高周波の採用により、アジャックス・ノースラップ炉と呼ばれる高周波誘導炉として発展する。

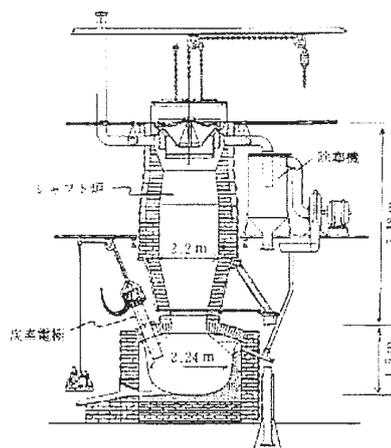


図4-22 スエーデングレノールの電気炉(アーク炉) 2-1) p48

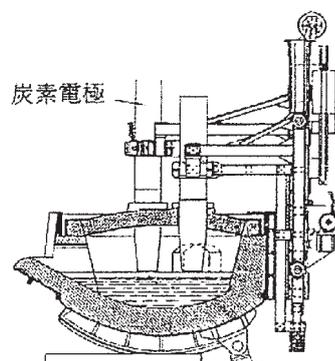


図4-23 エルー式電気炉(アーク炉) 2-1) p48

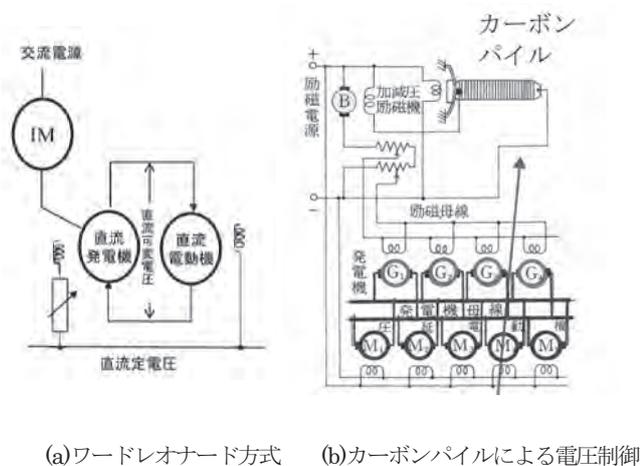
4.4.2 日本における初期の状況

(1) 水銀整流器利用による熱延電動機制御

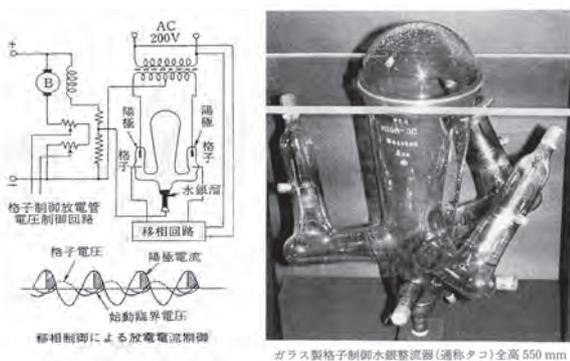
1940年初めに八幡製鉄戸畑に最初のホットストリップミルが輸入されたが、戦時中のことでもあり、その戦力化には時間がかかった。電気設備も米国GE製であり、その技術指導も全く無い状態であった。

1943年、電気学術研究審議会主催で「鉄鋼増産に対し電気の活用に関する懇談会」が開かれ、同年「製鉄電気協働班」として推進実行組織が出来た。官学民（鉄鋼・電気）のメンバーにより100件を超えるテーマに関しての調査と提言がなされたが、その中に「ホットストリップミル電動機電圧制御」があった。当時のアメリカから導入されたものは図4.24(a)のワードレオナード方式(MG方式)であり、その電圧は(b)に示すカーボンパイルで発電機界磁電流を変化させ制御されていた。カーボンパイルは炭素板を多数積層し、両端に加える圧力で抵抗値を変化させるものであり、応答速度が低いため材料噛み込み時のインパクトドロップが大きく、著しく作業を阻害していた。戦後この問題は電気試験所において研究が継続され、1950年代になって図4.23(c)に示す同試験所開発の格子付水銀整流器を導入することにより電圧制御の変動を従来の7%から0.5%に大きく改善し画期的な効果を

得た⁴⁻²⁹⁾。しかしこの方法でも圧延機の要求する高応答、高精度制御には不十分であり、後述するサイリスタレオナード方式や、交流化に変わっていった。



(a)ワードレオナード方式 (b)カーボンパイルによる電圧制御



(c)電気試験所 格子付水銀整流器によるワードレオナード方式 1950~1960

図4.24 直流電動機の初期の速度制御方法⁴⁻²⁹⁾ p617

この「製鉄電気協力班」の活動は終戦と共に解散となったため、活動期間は2年足らずと短命であった。要望技術の中でこの期間に解決されたものは少なかったが、ここで芽生えた技術が現在に至って大きな成果として花開いている例は少なくない。またその会の運営の方針の中に「電気の特異な神経作用を利用して…」とあったのは、戦時中としてはまさに先見の明があったというべきであろう⁴⁻²⁹⁾。

(2) 電気アーク炉

日本には1911年に海軍工廠に電気炉、16年には電気製鋼所(大同特殊鋼の前身)にエルー式1.5tが導入された。記録が無いため不明であるが、電気設備も一括輸入であったものと思われる。

戦後の鉄鋼業は「戦争屑」の溶解が必要だったこともあり、10%を超えるシェアを電気炉が持っていた。現在では30%に近づいている。

4.4.3 日本におけるその後の発展

鉄鋼の操業に影響を与えた電気技術に関し、以下に略述する。

① 電磁力の連続鋳造への適用⁴⁻³⁰⁾

電気アーク炉では電気エネルギーの利用がアークからの熱エネルギーだけでなく、電磁力による攪拌が機能していることは製鋼分野では周知のことであり、早い時期に電気炉炉底にコイルを取り付けた例が報告されている⁴⁻³¹⁾。

連続鋳造技術は日本の鉄鋼業の地位を大きく押し上げた技術であるが、その生産比率拡大とともに鑄片内質改善が必要となり、1970年代に電磁攪拌に目が付けられ、その後電磁ブレーキや遠心分離タンディッシュ、さらには電磁鋳造技術(EMC)へと発展している。図4.25に幾つかの実例を示す。(a)はピレットやブルーム等の小断面連鋳モードでの溶鋼攪拌装置(EMS: In-mold Electro-Magnetic Stirrer)であり、モールド内の磁界を回転移動させることで溶鋼に流れを作り、最初に固まる外側に介在物が留まったまま固まらないようにする。図は上下2段にコイルを有するもので、メニスカスの溶鋼流速の制御している。大断面のスラブではリアモータが同目的のために使われる。

(b)はモールド内電磁ブレーキ(EMBr: Electro-Magnetic Break)であり、タンディッシュからモールド内に流入した溶鋼が、早く下降しないように静磁界をかけてブレーキとする。これにより、介在物が表面に浮上しやすくする。(c)は遠心分離タンディッシュであり、溶鋼注入部にリアモータを配置し平均で1m/secの回転流速を与え、注入溶鋼の流動パターンを変化させ、大形介在物除去を促進している。

② 誘導加熱の各プロセス適用

誘導加熱は電極不要・高効率・局部加熱可能さらには加熱部雰囲気制御が容易であることから多くのプロセスで特殊な鋼材加熱の目的に用いられている。図4.26に幾つかの適用例を示す⁴⁻³²⁾。

(a)図は誘導加熱の特長の一つである高エネルギー密度を利用して、対象の必要な部分のみを加熱する各種エッジヒータを示している。

i): 鍛接管は帯鋼を1350℃に加熱しロール成形、鍛接、レデュースの工程で造管する。加熱炉からは1250℃で取り出し、エッジ部のみエッジヒータで1350℃に加熱することで25%程度の省エネルギーを得ることが出来ている。

ii): 連続鋳造でつくられたスラブはその放冷時間が長くなるとエッジ部の温度低下が大きく、直送圧延(加熱炉を経ない圧延)が出来なくなる。そのためエッジ部の温度を補償するためにエッジヒータを利用

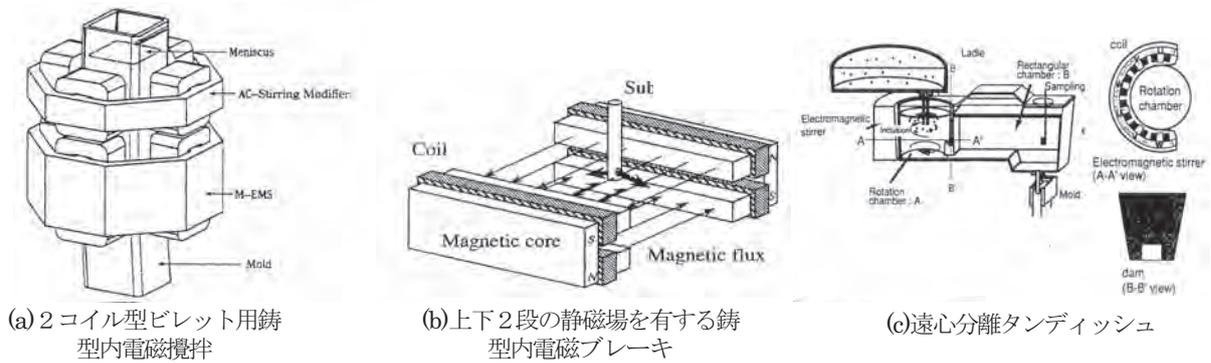


図4.25 連続設備における各種電磁気力の応用 資料 4-30) p11,12

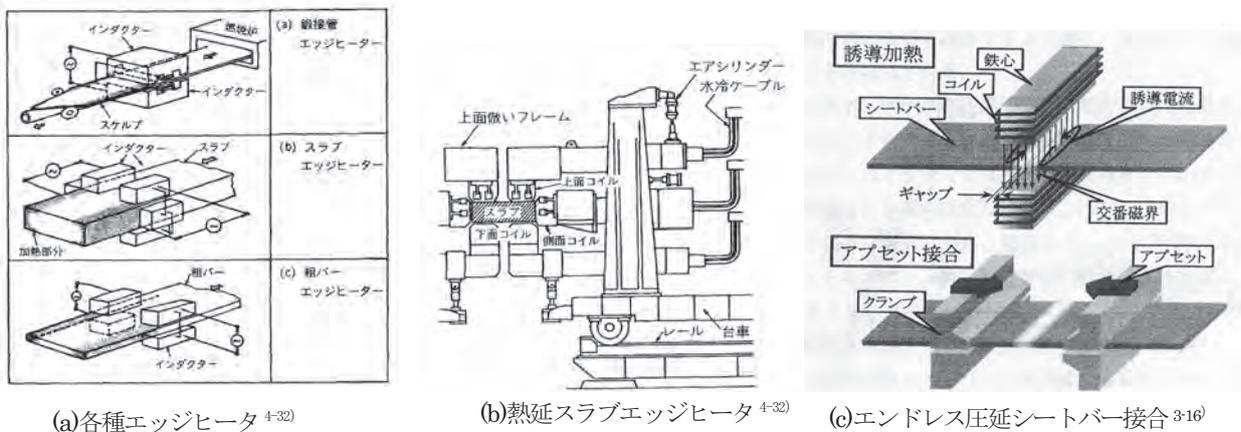


図4.26 各種電磁誘導加熱装置

する。この種の設備では如何にインダクターをスラブに近づけるかがポイントである。(b)に示したように、インダクターは移動台車に搭載され、摺りローラを介して常にスラブに押し当てられる。

iii) : 熱延工程の粗圧延と仕上げ圧延の間で粗圧延されたシートバー（粗バー）のエッジ温度を補償しようというものである。加熱炉抽出温度低減、ロール偏磨耗防止、混粒発生防止等が目的であり、次のエンドレス圧延では必要不可欠である。

(c) 図は熱延のシートバーを仕上げ圧延前に接合することにより、仕上げ圧延を連続的に行なうエンドレス圧延である。1996年川鉄千葉3hotで世界最初に実現したが、図はそのKey技術である誘導加熱接合装置である。接合すべき両端面を誘導加熱により先ず加熱し、その後アップセットすることにより完全に接合される。エンドレス圧延の開発時、種々の技術が試され、誘導加熱方式に決定後もユーザ/メーカーで試行錯誤が繰返され、完成までに1年以上を経ている³⁻¹⁶⁾。

③ 直流大型電気炉

図4.23に示したアーク電気炉は3相交流が用いら

れたこと、炉の容量が大きくなったこと以外にしばらくは大きな変革は少なかった。1970年代に米国提案のUHP (Ultra High Power : 4 → 10 万 KVA) 操業の導入、さらには1991年のフランスから100 t級の大容量直流電気炉が導入されて大きな変革が起こった⁴⁻³⁶⁾⁴⁻³⁷⁾。図4.27(a)は1991年川鉄系のダイワスティールに導入されたものであり、炉容量100t、トランス容量100MVAである。図に示すように3本の炉底電極を独立の電流制御を行なうことによるアーク偏向防止技術の開発や電極原単位の低減、各種操業の自動化や操業の快適化が施され、生産性の向上に機能した⁴⁻³³⁾。(b)は翌年新日鉄系の関西ピレットセンターに導入された1電源2炉方式の導入があり、精錬準備時間の短縮や高温スクラップの予熱がさらなる操業の効率化を得ている⁴⁻³⁴⁾。

これら電力大容量化や直流化には、次項の圧延主機の交流化で紹介するパワーエレクトロニクス³⁾の寄与が大きい。

④ 圧延主機の交流化

電気技術の最も大きい鉄鋼への寄与の一つに、1980年代からの圧延主機の交流化がある。圧延設備はこ

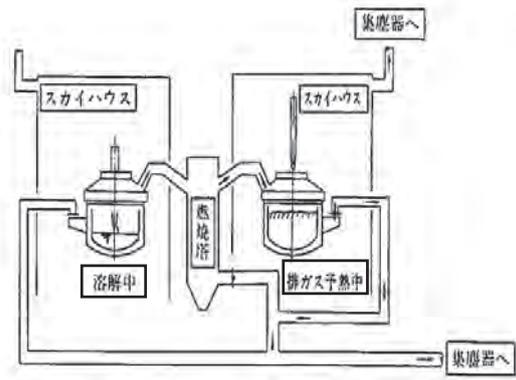
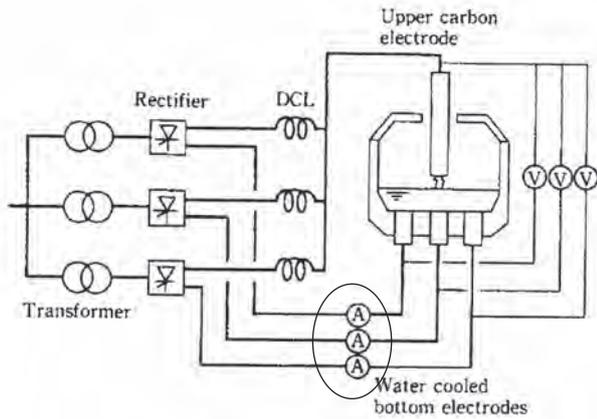


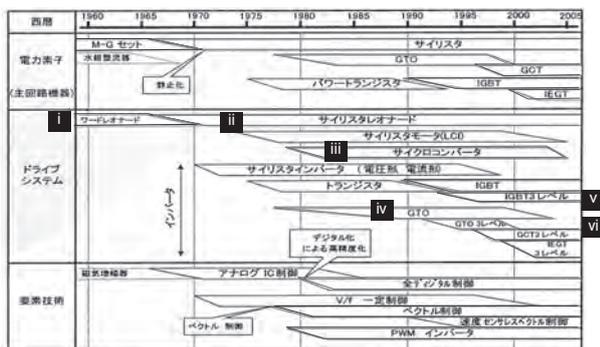
図4.27 大型直流電気炉 4-33) p63,4-36) p54

れまで、その回転速度を精度よく制御するために、直流電動機が多く使われてきた。図 4.28 (a) に示すように、ワードレオナード方式 (i) に代わって 1960 年代のサイリスタレオナード方式 (ii) の登場により応答性が改善され、現在に至るまでも用いられているが、直流電動機は以下の本質的問題がある⁴⁻³⁵⁾。

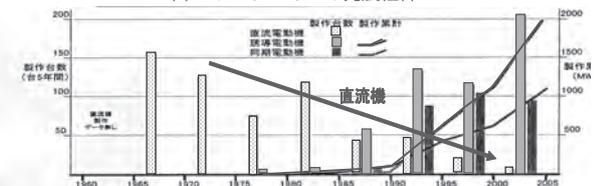
5) 直流機の寿命は 30 年程度であり、1900 年代の中期に建設された主機は更新時期を向かえつつある。

特に 1) と 2) の問題が大きく、図 4.28 に示すように、鉄鋼の主機・準主機関係は 1970 年代より AC 駆動化している⁴⁻²⁷⁾。(b) の製作実績で判るように、直流機の新規製作は暫減しており、21 世紀では皆無といつて良い。

交流電動機の駆動方式は大別して図 4.29 に示すように、サイクロコンバータ (iii) とインバータ (iv ~ vi) に別れる。サイクロコンバータは、優れた制御性能と大容量に適した回路構成から 1990 年代までは多く使われたが、力率と高調波の問題から最近では少なくなっている。インバータは GTO (Gate Turn Off) 等の高圧大容量素子や 3 レベル高圧 PWM (Pulse Width Modulation) の登場に伴い 1980 年代に発展したもので、さらに最近では汎用素子と汎用技術を用いた IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) や IEGT (Injection Enhanced Gate Transistor) に変化してきている。GTO から IEGT の進歩により効率面で 3%、装置の小型化という面で 50% 以上の効果が得られている。また汎用化ということでコストも下がっている。



(a) パワーデバイスの発展経緯



(b) 圧延機主機、準主機用電動機の製作数実績

図4.28 パワーデバイスの発展と圧延機主機、準主機用電動機の推移 元画 4-27) p2

- 1) 回転部に通電するための整流子やブラシが必要不可欠であり、その保全に非常な手間と技能を要する。
- 2) 回転部の電機子にコイルが巻かれるためその慣性が大きくなり、細かい速度制御への反応が難しくなる。
- 3) 電動機そのものがどうしても大型化し、物理的に大きい取り付け面積が必要であり、そのハンドリングにも大きな手間がかかる。
- 4) 力率の悪化や効率の悪さから所要電力量が大きい。

4.5 制御論理の進展

EIC で使われる制御論理は用途毎の個性性が強く、またそれがソフトとして制御装置の中に隠れてしまうためその効果の検証も含めて有形化は難しい。図 4.30 に鉄鋼業の中で内容がよく知られ、その効果についても一定以上の評価があると思われる制御論理の例を示す。大枠を整理すると以下ようになる。

① 鉄鋼各プロセスの定形制御論理

鉄鋼の各プロセス用に開発された用途毎の定番と言

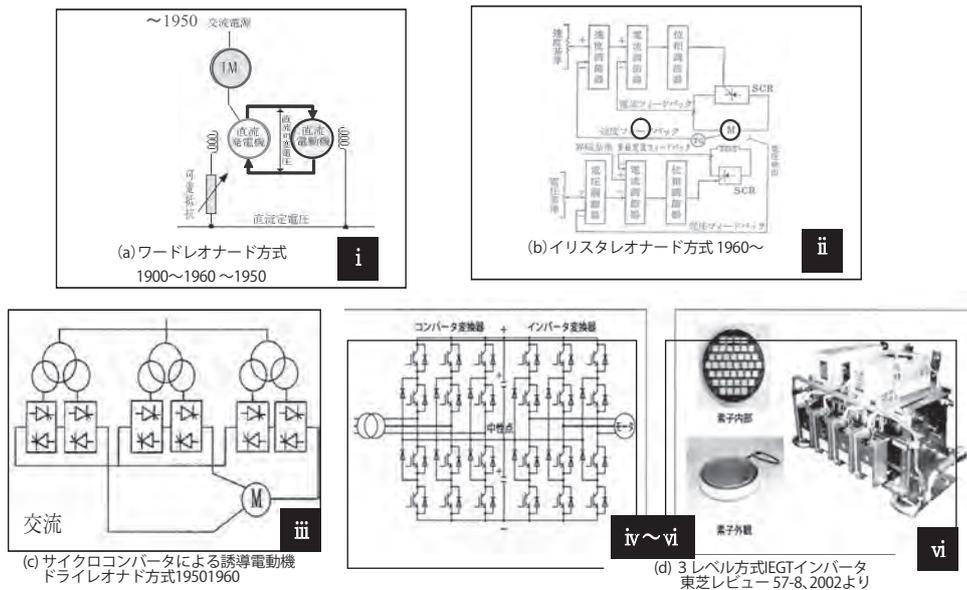


図4.29 電動機各種ドライブ方式⁴⁻²⁷⁾⁴⁻³⁵⁾

える制御論理である。使用者で幾つかの工夫が加えられ、また使用する制御装置の進歩を常に取込んでいる。熱計器に始まる当初のものはアナログベースのPID制御をベースとしているが、パソコンやDCS・PLC等のデジタルシステムの登場とともにPA・FAの融合化や複雑な論理演算を含むものも多くなっている。

② 物理モデルに基づく制御論理

プロセス計算機の導入当初は、プロセス物理モデルから制御方案を導こうとする動きが主流であり、多くの試みがなされた。しかし当時のセンサ技術の未熟さ(信頼性の低さ)、モデル自身のロバスト性の無さ、あるいは使っていた計算機の容量や能力の不足から、必ずしも成功したものは多くない。一時、次の経験則モデルに逃避する感もあったが、最近ではセンサや計算機的能力向上、ならびにモデルそのものの洗練等により、新しい成果が生まれつつある。

③ 経験則に基づく制御論理⁴⁻³⁷⁾⁴⁻³⁸⁾

古くは「テーブル方式」と言われたもので、操業者の経験則をテーブルの形で整理しておき、操業状態に応じてそれを適用する方式である。判別関数等の多変数解析を活用するもの、ES (Expert System) や Fuzzy 論理等のいわゆる AI (Artificial Intelligence) を利用するもの等、手法の洗練化も進んでいる。最近ではデータベースのデータの改廃を管理する Just in Time やデータ検索にニューラルネットを応用するのが表れており、大量に蓄積されたプロセスデータが有効に利用され、プロセスの可視化に寄与している。

④ 新しい制御論理の利用⁴⁻¹⁵⁾⁴⁻³⁹⁾

1960年ごろから当時学問的には進んでいた現代制

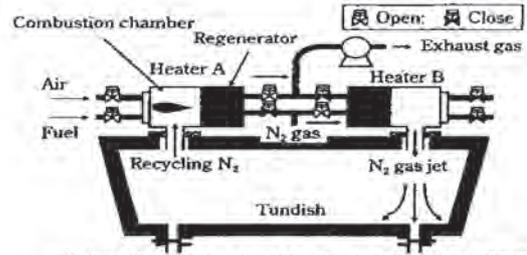
御理論を実プロセスに適用しようとする試みが始まった。制御モデルを適用対象ごとに一品料理的に作り上げるのではなく、系統的なアプローチを与える可能性に大きな魅力があった。当初はその論理が操業者に見えにくく、前述のセンサや計算機自体の能力不足、またそのモデルの適用可能域が小さいこと等、とても実用的とは言いがたかった。しかし、学際側からの積極的な協力や、制御理論自体の技術者への普及、さらには制御理論自身の見える化等の努力により幾つかの成功例が現われ、制御理論へのロバスト性の付与、あるいは干渉制御等それではなければ解決し得ない成果がその利用を推し進めた。

現時点においては、上記①~④を適切に組み合わせることで操業の制御論理化が進んでおり、どのプロセスにおいても EIC 制御装置抜きでは操業は成り立たなくなっている。またロバスト (H ∞ など) 制御に一つの突破口を得た制御理論が一般の制御技術者からの拒否反応が少なくなり、新しい展開に期待がかかっている⁴⁻⁴⁰⁾。さらに最近では精緻な数式モデルに基づくプロセスの見える化も定着してきている⁴⁻⁴¹⁾。

従来(1990以前)は、例えばホットストリップミルの各仕上げ圧延機の圧下量を与えるダイヤルは操業者の聖域であり、計算機がセットアップや圧下中の修正量を与えたとしても、それをさらに修正する権限は操業者が持ち、事実その修正により操業が成り立っていた。現在は「ノータッチオペレーション」により計算機が殆どすべてを支配する。20世紀最後の設備である川鉄(現JFE)千葉3ホットでは、従来10~15人の操業者が存在した領域を、3名でカバーしている。

①定形制御論理の例

タンディッシュ無酸化加熱は酸化介在物の生成を防止するために開発されたものであり、連鑄の表面欠陥がN₂ガス使用で45%、HNガス使用で23%になった。パーナーに小型蓄熱室(リジェネレータ)を持ち、排ガスによる蓄熱と加熱用N₂(HNガス)気の予熱を1分オーダーで繰返す。

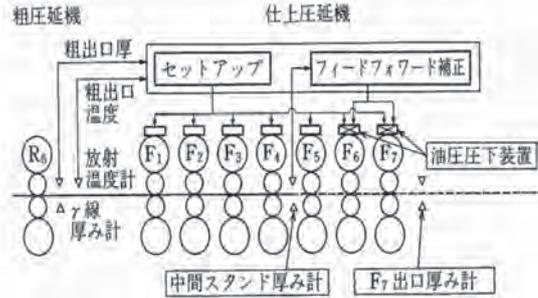


(a) リジェネ方式連鑄TD 無酸化加熱装置
中川他4名、日本機械学会誌、101-954、1998

②数式モデル論理の例

材料先端部が最終粗圧延機出側の厚み計および温度計に到達した時点で、これらの測定値ならびに製造仕様から、各スタンドの目標板厚を決定し、数式モデルに基づき、夫々のロール開度とロール周速度を求め、圧延機にセットする。

最近(1990年代)はスタンド間に厚み計が設置されることが多く、この測定値に基づいて仕上げ出口板厚偏差が零になるように、後段のロール開度とロール周速度をフィードフォワード補正する。



(b) 熱間圧延セットアップ

高橋著:「鉄鋼業における制御」、コロナ社、2002

③経験則モデル論理の例

1) 高炉操業の標準化と伝承、2) 高精度操業管理システムの実現、3) 操業者誤判断の防止、4) システム改造要求への柔軟な対応 のためエキスパートシステムを導入。

(1) 異常炉況診断エキスパートシステム:

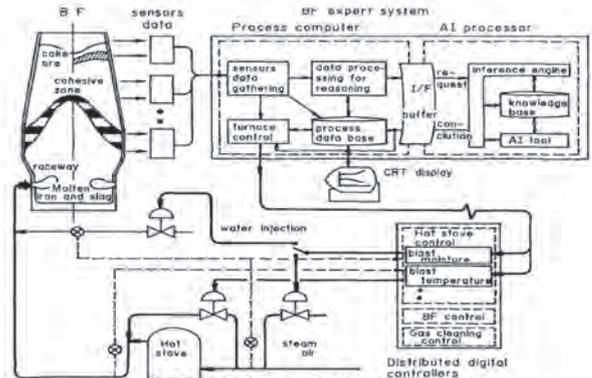
ガスの吹き抜けや装入物のスリップ等の異常炉況を送風圧力や荷下がり状況から判断し、必要な送風量のガイドを行なう。

(ルール数: 約200)

(2) 炉熱制御エキスパートシステム:

各種センサ情報をベースに「炉熱」を管理し、その安定した推移を得るため、送風湿分(水吹込み)等のアクションを指示する。

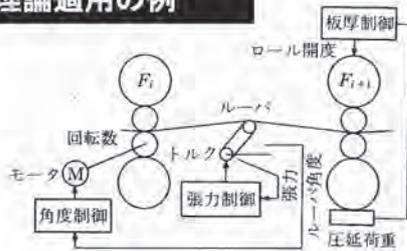
(ルール数: 約550)



(c) 高炉エキスパートシステム

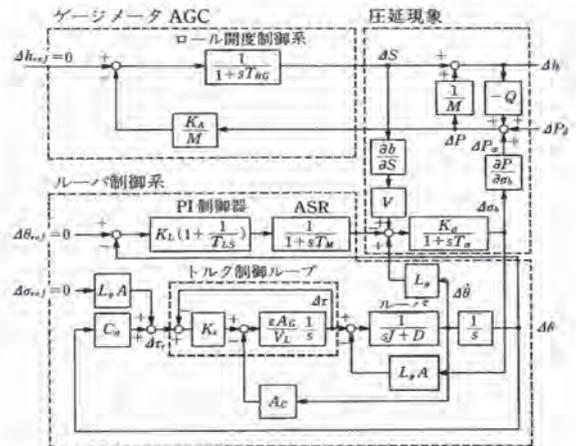
中島他6名、鉄と鋼、73-15、1987

④制御理論適用の例



圧延機間の張力を制御し、上下流スタンド間の出・入板速の差から生じるループ量を吸収しかつ観測するためにルーバがある。板厚制御でロール開度を調節すると圧延機出・入りの板速度を変化させるため、張力を変動させ、板厚・張力制御は干渉系となる。

これらを総合的にモデル化すると右図のようになる。これらを状態方程式で記述し、評価関数を最小にする最適フィードバックゲインをリカッチ方程式の解として求め(最適レギュレータ問題)、従来の制御に付加する。



(d) 熱延板厚制御

高橋他:「鉄鋼製造プロセスにおけるロバスト制御」、計測と制御30-8、1991

図4.30 制御論理の開発抜粋

これらを実現するには制御論理をはじめとする各設備技術の信頼性の高さやタフ（ロバスト）さが必要不可欠である。

本章参考文献：

- 4-1) Franz Kofler：「製鉄所熱経済に就て」、鉄と鋼 20-8、p1-10、1934
- 4-2) Fred N. Hays：「熱管理技術者について」、と鋼、44-1、p69-73、1958
- 4-3) 依国一：「光高温計に依る溶鋼温度測定方法—学振 19 小委第 7 号」、鉄と鋼、27-6、p 369-372、1945
- 4-4) 山内二郎：「本邦鉄鋼業計測技術の進歩」、鉄と鋼、41-7、p787-795、1955
- 4-5) 野坂康雄：「日本の鉄鋼生産における計測・制御の進展」、ふえらむ、2-11、p 812-823、1997
- 4-6) 岩村忠昭：日本機械学会誌 92-842、p32-40、1989 年 1 月
- 4-7) 日本鉄鋼協会 共同研究会 計測制御部会：「計測制御部会第 100 回記念大会講演集」、1989 年 11 月
- 4-8) 加古：「平爐の自動制御装置」、生産研究、3-9、1951 年 9 月、東京大学生産技術研究所
- 4-9) 高橋安人、大島康二郎：「鉄鋼業と自動制御」、鉄と鋼、40-11、p 1080-1084、1954
- 4-10) 藤本一郎、桑畑一彦：「熱経済技術部会報告講演 鉄鋼熱経済 10 年間の歩み」、鉄と鋼、50-6、p 962-972、1964
- 4-11) 岩村、崎村、田宮、瀬川：「製鉄工程における計装技術」、川鉄技報、13-4、p621-638、1981
- 4-12) 桂、磯部：「最近の計測制御技術」、鉄と鋼、51-1、p86-98、1965
- 4-13) 野坂康雄：「日本鉄鋼業における計算機制御の進歩」、鉄と鋼、59-5、1973
- 4-14) 野坂康雄 編著：「鉄鋼業のコンピュータ・コントロール」、産業図書、1970
- 4-15) 高橋亮一 著：「鉄鋼業における制御」、コロナ社、2002
- 4-16) 野坂康雄：「第 3 回鉄鋼オートメーション国際会議出席報告」、鉄と鋼、63-2、1977
- 4-17) 岩村、福武、西山：「千葉製鉄所第 5 高炉計算機システム」、川崎製鉄技報、6-3、p 36-59、1974
- 4-18) 加藤、富田、運崎、秋山、崎村：「製鉄統合プロセス計算機システムの開発」、鉄と鋼、73-3、p 59-66、1987
- 4-19) 森、宮本、井原：「自律分散概念の提案」、電気学会論文誌、104-12、1984
- 4-20) 土井、佐久間、堀、森、鈴木：「自律分散システムの鉄鋼への適用事例」、情報処理学会 第 42 回、3G-4、1991
- 4-21) 鳥越、岩村、尾脇、長山：「自律分散システムの鉄鋼プロセスへの適用と評価」、川崎製鉄技報、20-3、p 210-215、1988
- 4-22) 住田伸夫：「鉄鋼プロセス制御におけるオープン系自律分散システムとその更新」、計測自動制御学会産業論文、4-6、p 35-40、2005
- 4-23) 川原、住田、加藤、福島：「ライトサイジング・オープン化システムの鉄鋼プロセスへの適用事例」、新日鉄技報、363、p 37-43、1997
- 4-24) 「Linux 対応プロセス制御用ソフトウェア」、NKK 技報、174、p 73-74、2001
- 4-25) 住田、上之：「鉄鋼プロセス制御へのオープンシステムの適用」、新日鉄技報、379、p 7-13、2003
- 4-26) 石川：「システムの応用と今後の展開」、日本鉄鋼協会 第 193 回西山記念講座、2007
- 4-27) 町田、執行、伊藤、藤本、山本、浜本、中原、赤松：「電気設備技術の発展と適用状況」、日本鉄鋼協会 第 193 回西山記念講座、2007
- 4-28) 若狭裕：「プロセス制御システムの技術系統化調査」、技術の系統化調査報告 11、国立科学博物館、2008
- 4-29) 野坂康雄：「製鉄電気協力班の活動と技術の芽」、電気学会誌、118-10、p 614-617、1998
- 4-30) 竹内、藤：「鉄鋼業への電磁力適用の現状と今後」、ふえらむ、7-2、p 9-16、2002
- 4-31) 松本、斉藤、阿部、本郷：「電磁攪拌法について」、鉄と鋼、53-7、p 100-103、1967
- 4-32) 大崎、橋本、塚田：「誘導過熱の鉄鋼業への応用」、鉄と鋼、72-2、p 173-181、1986
- 4-33) 高柴、高橋、大坪、大岩、沼田、上田：「GLECIM—川鉄式直流電気炉の開発とその特長」、川鉄技報、24-4、p 62-67、1992
- 4-34) 高橋、本宮、本多：「製鋼用電気炉の最新技術」、新日鉄技報、351、p 52-58、1994
- 4-35) 土井克彦：「鉄鋼業における電動機制御技術の進歩」、日本鉄鋼協会 第 150 回西山記念講座、1993
- 4-36) 吉田、浦上：「高性能交流可変速システム」、新日鉄技報、364、p 40-44、2007
- 4-37) 山崎、岩村、新井：「川崎製鉄における AI の適用」、川崎製鉄技報、23-3、p 1-7、1991
- 4-38) 藤井克彦：「鉄鋼業における制御理論の応用」、ふえらむ、2-1、p 37-43、1997
- 4-39) 藤井克彦：「鉄鋼業における制御理論の応用」、ふえらむ、2-2、p 51-56、1997
- 4-40) 原辰次：「最近の制御・システム技術と今後の方向」、日本鉄鋼協会 第 193 回西山記念講座、2007
- 4-41) 小川、大貝、古賀、伊藤、松崎、内田、田島：「Jaba による高炉統合シミュレータと統合可視化システム」、計測自動制御学会産業論文集、4-13、p 91-97、2005

5 | 具体的な技術革新とその系譜

本章では、計測・制御が進歩のきっかけであり、それがプロセス本体に大きな変革を与えた具体的な案件をいくつか選んで、その革新の系譜について紹介する。多くの技術的変革がどのように進められたか、成功の原因が何であったかを考察する。表5.1に全体感を示す。

5.1 高炉プロセスの見える化

3.2.1で述べたように、高炉は現時点では圧倒的な操業成績と寿命を持つプロセスであるが、20世紀の半ばでは「冷え込み」と称する操業トラブルを頻発し、寿命も4～5年しかない、極めて不安定なプロセスであった。この進歩は、まさにこの半世紀に得られたものであり、「プロセスの見える化」がもっとも大きく寄与している。

5.1.1 初期の高炉の見える化

図5.1.1は高炉にプロセス計算機が導入された1960年代からの高炉プロセスの見える化の努力の一例である。(a)⁵⁻¹⁾(b)⁴⁻¹⁷⁾は炉内反応モデルや熱収支モデルに基づいて高炉の熱的な操業ガイドをオンラインで行なうものであるが、収支モデルがマクロ的過ぎて長期間の操業に耐えうるものではなかった。(c)⁵⁻²⁾は高炉を高さ方向に5分割し、夫々の部分で物質収支や熱収支を高さ・時間の偏微分方程式で記述し、5ゾーンの熱レベルTS5で操業ガイドを行なうものである。より現実の高炉に近いモデルであるが、半径方向のガス流分布の概念が無いことが大きな欠点であり、広く普及するものにはならなかった。

また当時は炉頂ガス分析計を筆頭とするモデル計算に必要なセンサ情報の信頼性が十分でなく、さらに計算機の能力も低くモデルの高度化にも大きな限界が

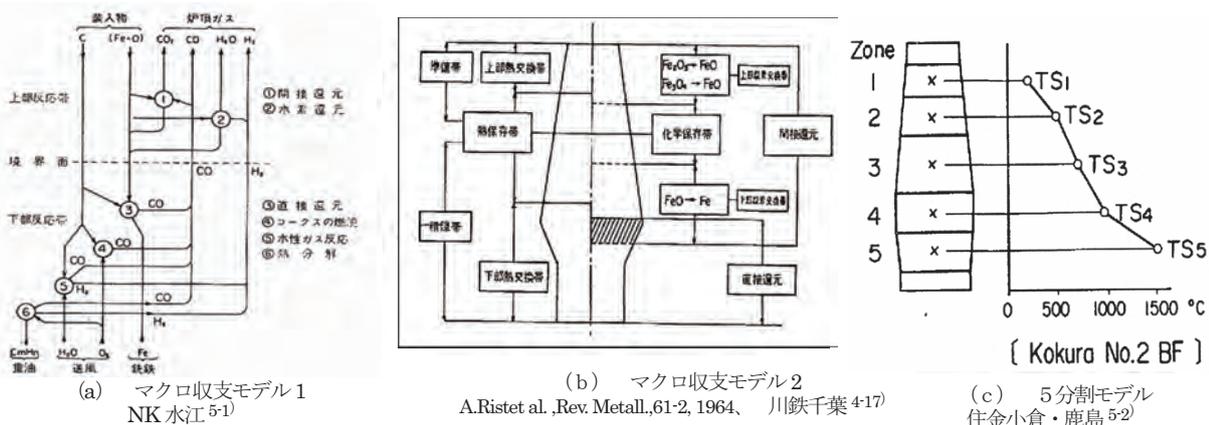


図5.1.1 マクロモデルによる高炉の見える化

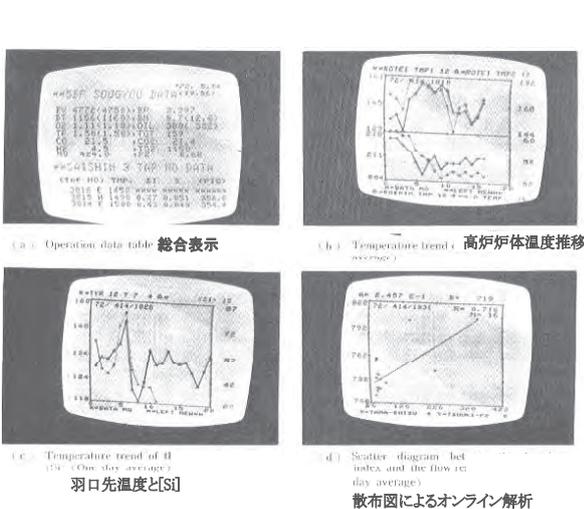


図5.1.2 初期のプロセスデータベースとデータの見える化 川鉄千葉 1971⁴⁻¹⁷⁾ p43

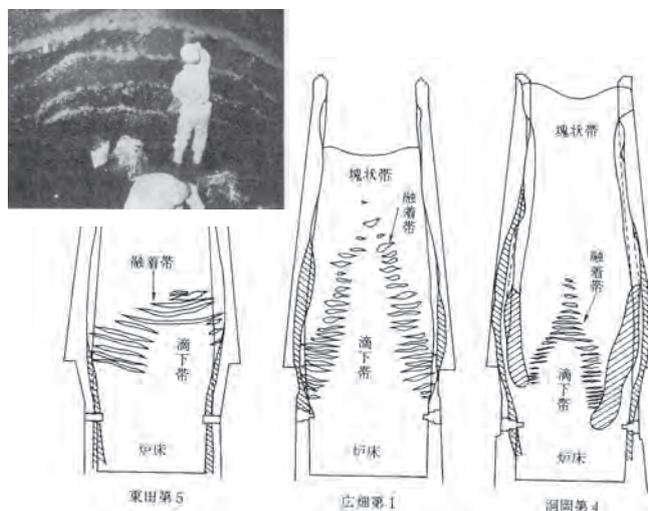


図5.1.3 高炉内部の解体調査 新日鉄³⁻¹⁾ 1970頃 2-1) p40, 3-1) p186

表5.1 個別課題の全体感

工程毎の基本プロセス	1940		1950		1960		1970		1980		1990		2000	
	(a) キャッチアップ期		(b) 高度成長期		(c) 量から質への転換期		(d) 国際比価への転換期		(e) 量から質への転換期		(f) 国際比価への転換期		(g) 国際比価への転換期	
製鉄工程	平炉	コークス炉	高炉	①大型化	②プロセスの見える化	③長寿命化	①大型化	②プロセスの見える化	③長寿命化	①大型化	②炉寿命増大	③複合吹錬	④サブランスと計算機制御	⑤HCR、
製鋼工程	①熱管理手法	②酸素大量吹き込み	転炉への早期転換	①大型化	②炉寿命増大	③複合吹錬	④サブランスと計算機制御	⑤HCR、	⑥電磁力、	⑦モールド	⑧炉寿命増大	⑨複合吹錬	⑩サブランスと計算機制御	⑪HCR、
圧延工程	①熱管理手法	②酸素大量吹き込み	①熱管理手法	②酸素大量吹き込み	③複合吹錬	④サブランスと計算機制御	⑤HCR、	⑥電磁力、	⑦モールド	⑧炉寿命増大	⑨複合吹錬	⑩サブランスと計算機制御	⑪HCR、	⑫HCR、
製品	①熱管理手法	②酸素大量吹き込み	③複合吹錬	④サブランスと計算機制御	⑤HCR、	⑥電磁力、	⑦モールド	⑧炉寿命増大	⑨複合吹錬	⑩サブランスと計算機制御	⑪HCR、	⑫HCR、	⑬HCR、	⑭HCR、
5.1	(コークスの長寿命化)	高炉プロセスの見える化	①大型化	②炉寿命増大	③複合吹錬	④サブランスと計算機制御	⑤HCR、	⑥電磁力、	⑦モールド	⑧炉寿命増大	⑨複合吹錬	⑩サブランスと計算機制御	⑪HCR、	⑫HCR、
5.2	μ波応用の計測システム	①大型化	②炉寿命増大	③複合吹錬	④サブランスと計算機制御	⑤HCR、	⑥電磁力、	⑦モールド	⑧炉寿命増大	⑨複合吹錬	⑩サブランスと計算機制御	⑪HCR、	⑫HCR、	⑬HCR、
5.3	溶鋼の温度・成分のオンライン測定と転炉終点制御	①大型化	②炉寿命増大	③複合吹錬	④サブランスと計算機制御	⑤HCR、	⑥電磁力、	⑦モールド	⑧炉寿命増大	⑨複合吹錬	⑩サブランスと計算機制御	⑪HCR、	⑫HCR、	⑬HCR、
5.4	連続製造溶鋼レベル測定と制御	①大型化	②炉寿命増大	③複合吹錬	④サブランスと計算機制御	⑤HCR、	⑥電磁力、	⑦モールド	⑧炉寿命増大	⑨複合吹錬	⑩サブランスと計算機制御	⑪HCR、	⑫HCR、	⑬HCR、
5.5	板厚制御精度の向上 ・ 油圧圧下 ・ In situ センサ ・ 主機交流化	①大型化	②炉寿命増大	③複合吹錬	④サブランスと計算機制御	⑤HCR、	⑥電磁力、	⑦モールド	⑧炉寿命増大	⑨複合吹錬	⑩サブランスと計算機制御	⑪HCR、	⑫HCR、	⑬HCR、
5.6	鋼板形状の制御 (薄板圧延連続化)	①大型化	②炉寿命増大	③複合吹錬	④サブランスと計算機制御	⑤HCR、	⑥電磁力、	⑦モールド	⑧炉寿命増大	⑨複合吹錬	⑩サブランスと計算機制御	⑪HCR、	⑫HCR、	⑬HCR、
5.7	品質センサによる見える化	①大型化	②炉寿命増大	③複合吹錬	④サブランスと計算機制御	⑤HCR、	⑥電磁力、	⑦モールド	⑧炉寿命増大	⑨複合吹錬	⑩サブランスと計算機制御	⑪HCR、	⑫HCR、	⑬HCR、

あった。

プロセス計算機で収集した情報をプロセスデータベースとして蓄積し、その情報を操業解析や操業補助のためにCRTでグラフ化して技師や操業者にオンラインで提供しようとする試みは当時からあり、図5.1.2は1970年初めに実用化されたものである。現在のパソコンでの表計算(Excel)の概念を先取りし、メモリーチューブを利用して任意のグラフ出力を行なっている。メモリーチューブの寿命やデータベース自体の容量の小ささが弱点であったが、プロセス情報の見える化に先鞭をつけたと言える⁴⁻¹⁷⁾。

5.1.2 高炉の解体調査とセンサの充実

高炉は原料自体が反応槽を形作り、石油化学の蒸留塔や化学反応槽のように特定のものがあつてない。実際に操業している高炉内部がどのような構造になっているかはあくまで想像の世界であり、その上でのモデル構築は説得性の少ないものと言わざるを得なかった。

1970年前後に操業中の高炉を窒素ガスまたは水で急冷して停止させ、それを遺跡調査のように発掘調査を行う、いわゆる高炉解体調査が新日鉄を中心に行われ、多くの貴重な知見が得られた。図5.1.3に解体調査の様子、ならびに3つの高炉のスケッチを示す³⁻¹⁾。ここでの最も大きな発見は「融着帯」であり、軟化を始めた鉱石層が半溶融の状態になっている部分である。高さ方向の前後はコークスが塊状の状態を維持しているため、ちょうどガスの通過するスリットとなり、「融着帯」は整流板のような役目を負う。図5.1.3に示すようにこの整流板の形状は高炉毎に異なり、鉱石とコークスの半径方向の厚み分布を制御することによりこの形状を変えることができる。例えば高炉の中心部のコークスを多くすると鉱石の軟化が中心部で早く始まり、図の広畑第一高炉のような融着帯形状となり、中心部にガス分布の大きい操業(「内部操業」と呼ぶ)となる。

この「融着帯」の発見は、高炉の反応槽としての機能に統一した見解をもたらし、原料の半径方向分布制御によるガス流分布が重要な操業因子であることに共通の認識が得られるにいたった。

図5.1.4はその解釈のもとで高炉をイメージ化したものであり、さらにガス流分布制御を行うための炉頂装入装置(ベルレス装入装置)、ならびにガス流分布を管理するためのセンサを示している。原料は炉頂のシュートの回転角度を変化させることで半径方向の分布を変える。プロフィール計は装入された原料表面のプロフィールを測定し、水平ゾンデならびに固定温度ゾンデはガ

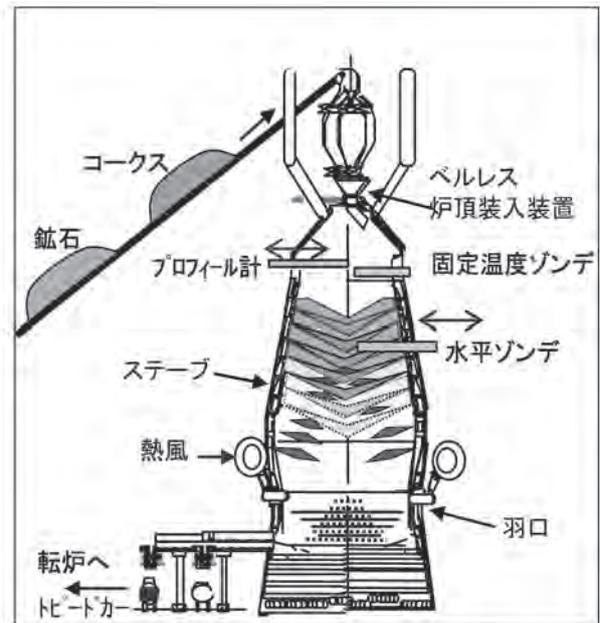


図5.1.4 高炉のイメージ化とセンサの充実

ス流分布を原料内ならびに原料上部で観測する。

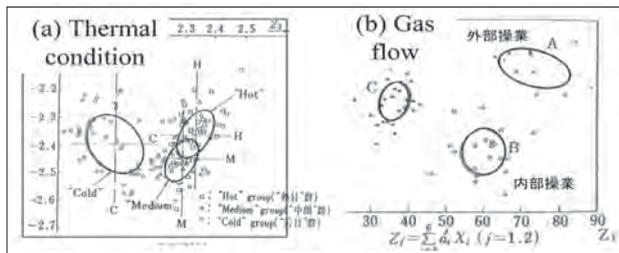
5.1.3 経験ベースのモデルの活用

高炉解体により①従来のマクロモデルでは高炉を記述するのに不十分であること、②ガス流分布の概念を操業管理の一つの柱にしなければならないことが高炉技術者の共通認識となった。

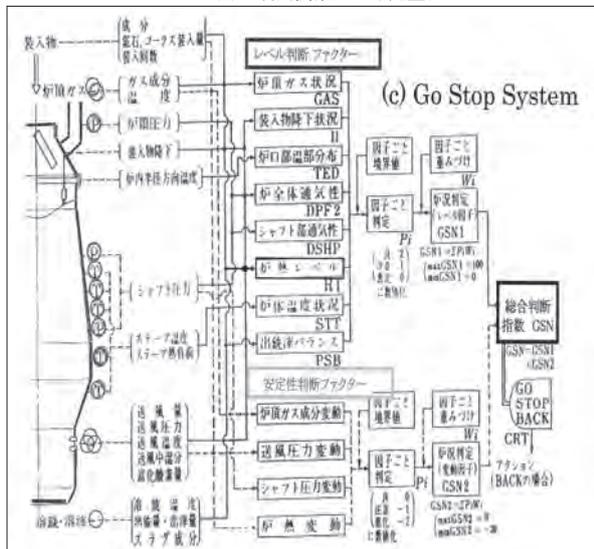
図5.1.5はそれらの認識のもとに、より現実的なアプローチを取った操業管理システムである^{5-3) 5-4)}。(a)に示すものは通常の操業に使われている炉熱ならびにガス流分布の2大管理指標を判別関数を用いて解析した例である。

炉熱の場合は「熱め“Hot”」「若め“Cold”」「中間“Medium”」、ガス流分布については「内部操業」「外部操業」「中間」のいずれも3状態に操業者の判断に基づいて分別し、それを群間分散/郡内分散を最大にする情報の写像(一次結合式)を求めたものである。炉熱ならびにガス流分布ともに、生情報では得られ難い明確な判別ができており、①多数の情報の目的的な優先付けを与えること、ならびに②パターン情報の目的的な定量化を行うことが得られている。(b)は上記の概念を基にして、実際のプロセス計算機にシステム化したものである。当時の操業者の8大関心ファクターを選択し、夫々のファクターは複数の情報の一次結合で作成し、その変動状況も含めた総合判断で操業ガイダンスを行なった。(c)がそのガイダンスの出力方法であり、アクションとしては最も効果の大きい「送風量」を第一優先としている。

なお、このシステムを開発する前提として、コー



(a) 判別関数による定量化



(b) システム構成



(c) Go stop システムの出力例

図5.1.5 経験ベースのモデル例 川鉄千葉⁵⁻³⁾5-4) 1978
5-4) p1026-29

クス水分専用ホップシステムや高速ガスクロの採用等々、センサの選択と信頼性の向上に徹底した改善を行い、それらの不確かさがシステムの信頼性を失うことの無いよう配慮を行なっている⁵⁻⁵⁾。

ここで紹介したシステムは言わば操業の計算機を用いた標準化であるが、操業者の感覚との差が少なく、非常に理解しやすい「プロセスの見える化」が行なわれたことになる。その後日本の各社においても同様なアプローチが行なわれ、また外人労働者の多い海外での評価も高く、本システムは7カ国に技術輸出されている（(c)にフランスでのCRT例を示す）。

さらに1980年代からES（エキスパートシステム）等のいわゆる「AI（人工知能）」手法が鉄鋼に適用されるに伴い、より洗練されたシステムに進化している^{5-6) 5-7)}。情報の充実と信頼性の向上、AI技術の活用も含めたデータベースの充実、そしてパソコンに代表されるIT技術の性能向上が2000年を前後して「見え

る化」の飛躍的なレベルアップをもたらした。

5.1.4 プロセス間の見える化

「見える化」はプロセスに限らない。図5.1.6は川鉄千葉西工場で開発した混銑車管理システム⁴⁻¹¹⁾であり、高炉と転炉をつなぐ混銑車を自動的にトラッキングし、溶銑の秤量や次節で述べる溶銑レベルとともにリアルタイムで管理する。本システムにより高炉の出銑や転炉の吹錬作業の段取りを確実化し、溶銑輸送時間の短縮により溶銑温度の降下が60℃以上抑えられている。また混銑車の回転率が向上することにより、必要な混銑車の数を1割以上少なくすることができ、水島製鉄所の場合では10億円以上の効果を得ている。

5.1.5 最近のモデルおよび見える化の進歩

高炉解体に端を発する高炉モデルの共通認識化、センサ情報の充実上、そしてパソコンに代表されるIT技術の向上が「見える化」の飛躍的なレベルアップをもたらした。

(1) HMIの高度化

図5.1.7は最近の高炉操業管理室（メータ室）の状況であり、パソコンを利用した高度なHMIによりEIC制御装置のSingle Window化が図られ、大型スクリーンの採用、さらには詳細モデルによるシミュレーションや炉内状況の推定が表示される⁵⁻⁷⁾。操業者のための出力だけでなく、技術者も対象とした解析オフィス化の様相も強い。

(2) データベースと「見える化」の高度化

図5.1.8はデータベースならびにその可視化の全社一元化を目的に、研究開発センタに集中化した例である⁵⁻⁸⁾。各高炉からのプロセス情報は1時間に一回センターのホストサーバーに送られ、1炉代（現在では20年以上）のデータが蓄えられ、必要時パソコンを通じて見る事ができる。

高炉は高さ方向、炉周方向に空間的広がりが大きい設備であり、操業情報だけでなく設備監視情報も含めて、非常に多くのセンサが取り付けられている。例えば温度計だけでも300点を越える場合が少なくない。これらの情報を従来の記録計での単なる時間推移の監視では漫然たる監視となり、折角の多次元情報が活かされない。そのためシャフト部の温度や圧力の情報を、図のように2次元情報としての可視化を行い、より直感的表現で操業者に提供している⁵⁻⁹⁾。このような試みは従来にもあった⁵⁻⁵⁾が、社内全高炉について同じ監視方法としたこと、センサの付いていない部分についての補間方法を取り入れていること、空間情報の時間

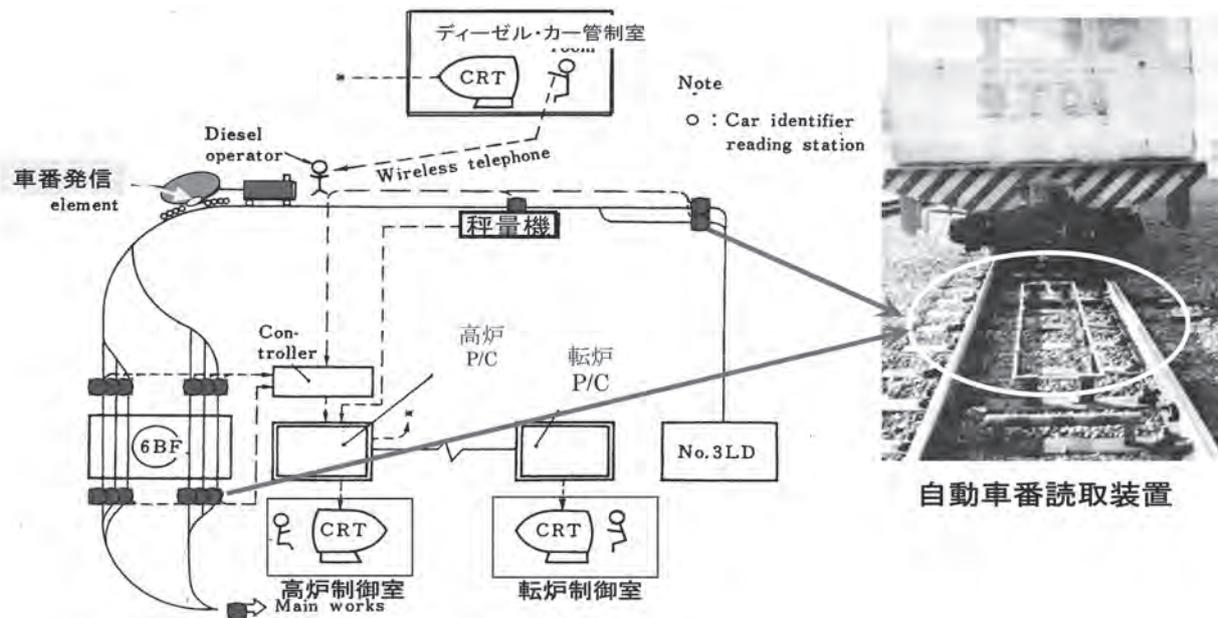


図5.1.6 混鉄車管理システム(プロセス間の見える化) 1977 4-11) p141より



図5.1.7 最近のプロセスの見える化状況
新日鉄君津 5-7)2003 5-8) p7より

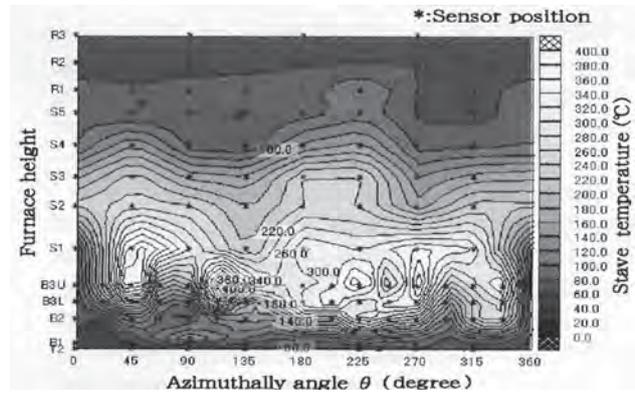


図5.1.8 データベースと可視化方法の充実
新日鉄プロセス研究開発センタ⁵⁻⁹⁾ 2006

的变化も表現しているなど非常に高度なものになっている。さらに Just-In-Time と呼ばれる手法⁵⁻¹⁰⁾を導入して、図 5.1.9 に示すように、莫大なデータベースから関心事(要求点)のデータ群を選んでそのデータ群のみの解析を行ったり、要求点に該当するデータの検索を行ったりすることが容易になっている。

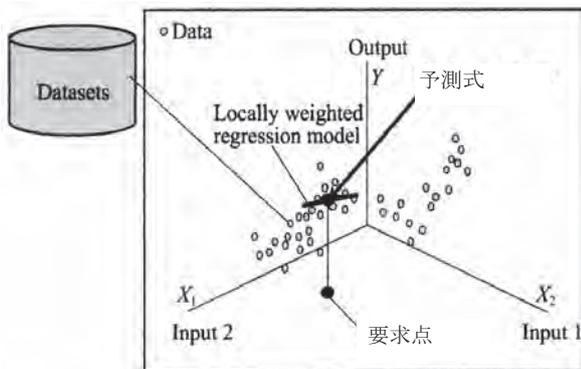


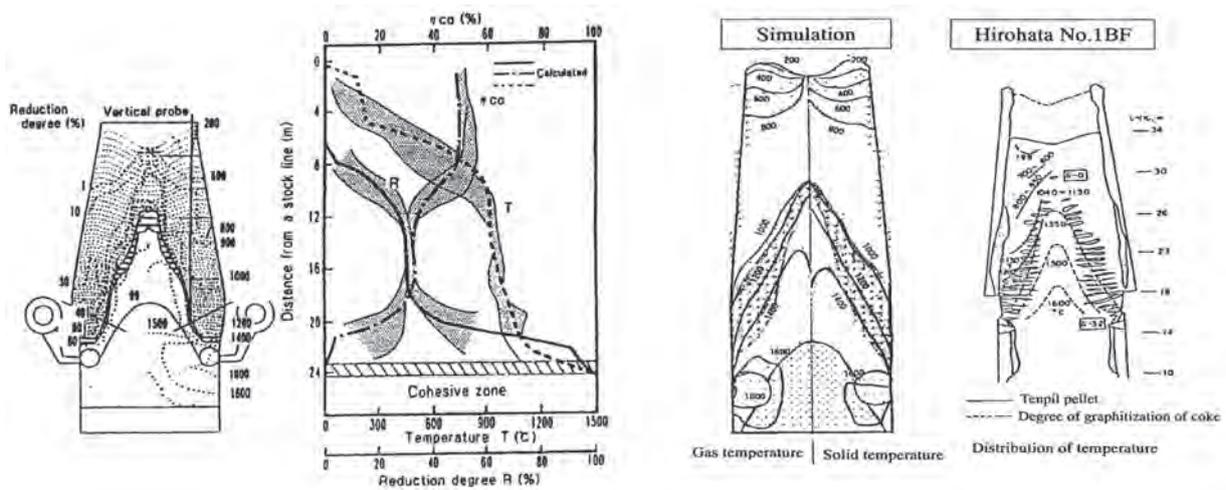
図5.1.9 Just-in-time の概念⁵⁻¹⁰⁾

(3) モデルの高度化とシミュレーションの充実

図 5.1.10 は新日鉄より報告された同社における高炉数式モデルの最近の状況である⁵⁻¹¹⁾。同社では古くは 1970 年代の一次元モデルに遡り、その後二次元トータルモデルや炉頂の装入物分布モデルが開発され、さらに羽口レースウェイ反応モデルや炉心や炉床のモデルが開発され、高炉全体をカバーできるようになってきた。これらのシミュレーション結果は実高炉解体結果や実炉での測定結果と比較され、高い精度が確認されている。最近ではプロセス計算機を通じて計器室にオンライン表示され、操業者の操業方針決定に活用されている。さらにこれらの多くのモデルの統合と総合可視化を進めている。

5.1.6 評価

高炉が信頼あるプロセスに変貌したのはこの 30 年である。高炉の長寿命化にはステーブ冷却装置や炉底カーボンレンガなどの耐火物の進歩の寄与する所が大



(a) モデル計算と実炉測定結果の比較

(b) モデル計算と実炉解体調査の比較

図5.1.10 最近の高炉数式モデルとシミュレーション
新日鉄プロセス研究開発センタ⁵⁻¹¹⁾ 2006

きい。また従来 120 日以上を要していた高炉改修期間を 1/2 にする高炉超短期改修技術も、大型高炉の宿命であった製鉄所全体の及ぼす生産のアンバランスを解消させるものとして評価が大きい⁵⁻¹²⁾。

しかし最も大きく寄与したのは「高炉プロセスの見える化」であり、高炉解体調査を端緒とする地道な努力、高炉プロセスイメージの共有化、それに基づくセンサの質、量に亘る充実、そしてそれらに裏打ちされたプロセスの解析とモデル化がブラックボックスの典型プロセスと言われた高炉を「見えるプロセス」に変貌させた。1970 年代、まだ高炉の冷え込みが頻発していた時代、高炉各所に取り付けたゾンデ類を見て、「花魁（おいらん）の簪（かんざし）」と心ない中傷を受けることがあった。まさに昔日の感があり、「プロセスの見える化」の努力が実ったわけである。ただセンサを取り付けるだけでなく、それを操業で使えるようにするまでが計測技術者の仕事である。高炉操業者をして「ようやく最近高炉が手の内に入った」と言わしめたのは 15 年程度前である。

5.2 μ波距離計の開発と応用拡大

鉄鋼業においては非接触計測がよく使われるが、μ波はその伝播が温度・圧力・粉塵量等の影響を殆ど受けないため、鉄鋼業の計測手段としては好条件を備えている。

本節においては、先ず高炉を中心とした製鉄プラントに導入した μ波レベル計の開発経緯と操業上の効果について紹介する。次いでその発展形としての新原理の μ波レベル計とその新しい応用について紹介する。

開発当初は欧米発の技術であったが、産業界への適

用と言う段階で日本が圧倒的な進歩を獲得し、欧米に逆輸出しているものが少なくないが、μ波レベル計はその典型例の一つである。

筆者は開発の当事者であり、開発の経緯を少し詳しく説明し、かつ何故良い結果が得られたのかも考察する。

5.2.1 非接触測定導入の必要性和初期のμ波

非接触測定の特長は、①厳しい測定環境からのセンサの絶縁と②測定によるプロセスの擾乱を極力避けることである。また、μ-CPU を使って信号処理を強化すること、センサを移動させることにより点計測からプロフィール（一次元）計測を可能にしたことが本センサの別の特長である。

20 世紀初めに船舶の衝突防止用として登場した RADAR (Radio Detection And Ranging) 技術は、第 2 次世界大戦時に射撃照準用として発展し、その後船舶・航空・気象用として社会生活を支えるものとなっている。さらに 1960 年代に μ波半導体デバイスが登場するにいたって、必要電力の小さい小型・軽量の素子が安価に使われるようになり、工業計測への応用が進み⁵⁻¹³⁾、1970 年代では国内外で多くの事例が報告されるにいった^{5-14)~5-18)}。

鉄鋼においてもいくつかの応用例が報告されており、これらの多くは μ波の持つ非接触化と環境依存性の小ささに注目したものであるが、コストに比して用途が特殊なものに限られており、十分に普及するにはいたらなかった。ただし、欧米は軍事用途を含めて応用が活発であり⁵⁻¹⁴⁾、1975 年にはドイツの高炉でサウンディング用として実際に使われた。筆者は同年の欧州出張時、現物を見学したが、驚いたのはその高炉では機械式を廃止しており、しかし μ波式は非常に不安

定で、とても日本では工業用センサとして使えるレベルには達していなかったことである。高炉操業者は通常、装入物の降下状況（スムーズさ、スリップ、棚つり）から炉況を判断しており、とてもそういう判断が出来るものでなく、ドイツにおいても従来の機械式に再度置き換えられたと聞く。

5.2.2 高炉関連のμ波レベル計の開発

ドイツにおける見学は、良ければ導入したいと考えていた筆者をがっかりさせるものであったが、機械式サウンディング計の無いベルレス高炉炉頂のシンプルさは開発意欲を掻き立てるものであった。また、当時の日本の技術雑誌に「自動車の追突防止用に、近い将来μ波距離計が使われる」と言う記事が載せられ、自動車に使われるなら低価格でものが出来るであろうと判断した。ちょうど当時、工場内の鋳物工場の溶融鋳物銃のレベル測定を行っていた安川電機と共同開発契約を1975年に結んだ。図5.2.1がその後開発の対象とし、かつ成功した製鉄プロセス関係の測定対象である⁵⁻¹⁹⁾。

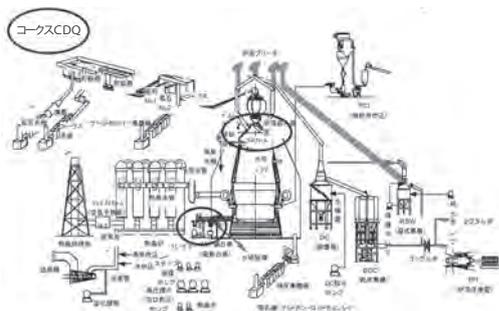


図5.2.1 高炉関連の応用例⁵⁻¹⁹⁾

図5.2.2が最初の開発目標であったプロトタイプの高炉サウンディング装置での開発経緯である。(a)は従来の機械式サウンディング装置（ロッド方式）であり、極めて大掛かりな、測定機会の少ない（原料装入中は測定不可）かつ安全性の悪い装置であった。(b)はプロトタイプとして完成した2アンテナ方式のμ波サウンディング装置であり、(c)はFM-CW (Frequency Modulated- Continuous Wave: 周波数変調連続波)方式と呼ばれる測定原理図である。fs-faを測定する場合、ステップ誤差と呼ばれる量子化誤差が出るため、それを軽減する方策は組み込んであったが、ヨーロッパで見た測定の不安定さは解消していなかった。そのため(d)に示すようなフィールド実験を徹底して行い、不安定さの原因追及を長期間おこなった。その結果、(1)測定対象が鉱石である場合に鉱石表面で干渉が起こっていること、(2)アンテナが小さい場合測定の指向性が広がってしまうこと、の2点が原因であると当たりをつけ、それぞれ(e)(f)に示す解析結果を得た⁵⁻¹⁹⁾。

測定対象の鉱石ならびにコークスの凹凸が（統計的に）使用周波数の半波長（約15mm）に近いこと、原料表面の安息角が25度程度であることから(1)(2)の問題点は原理的に避け得ないことが判明した。(1)についてはμ波の変調範囲を極力拡大し、干渉状態から素早く逃げることで、(2)についてはアンテナを2アンテナから1アンテナ方式にする等、極力アンテナ面積を拡大することが解決策となった。また当時利用が

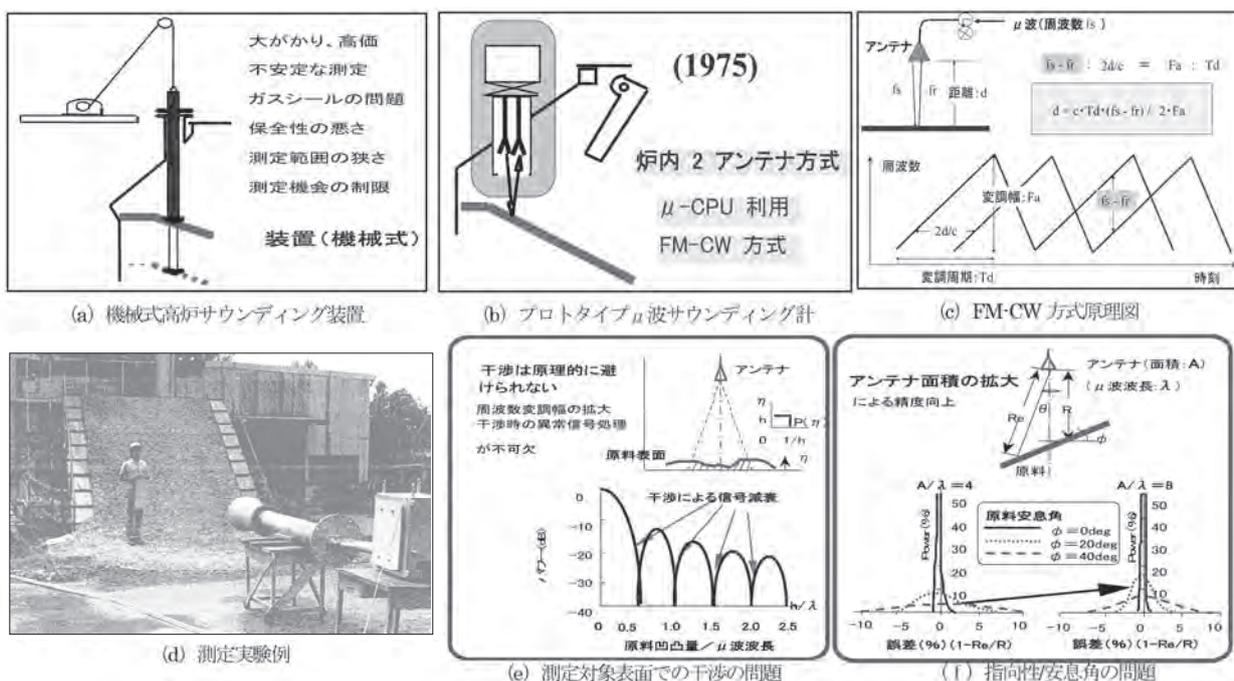


図5.2.2 プロトタイプのμ波レベル計の高炉関連への適用と問題点⁵⁻¹⁹⁾

可能となった μ -CPUを用いて、信号異常の監視と突変等の異常処理を実施し、その情報処理機能により測定結果の信頼性を高めている。

5.2.3 μ 波レベル計の改良と応用の拡大

図 5.2.3 は上記解決策を適用した改良型装置および装入物プロフィール計や混銑車レベル計等の応用拡大製品である。

(g) では1アンテナにすることによる指向性の改良が、アンテナ下にバルブを用意することを可能とし、安全性が格段に良くなっている。また測定可能距離が25 m以上にまで拡大し、大スリップや空炉吹卸においても安定した測定が可能となり、従来の機械式をはるかに凌駕するサウンディング計が完成した。

(h) はゾンデの先端部にリフレクト形アンテナを取りつけた高炉装入物プロフィール計である。当時、機械式やレーザ式のプロフィール計も登場したが、 μ 波式が安全性も含めて最も測定環境に強く、現在まで唯一生残っている⁴⁻¹¹⁾。

(i) は両者の測定結果例を示している。プロフィール計は、測定中にちょうど原料が約1.5 m (約600 t) スリップした時の記録であり、操業上も非常に貴重な記録である。また、 μ 波方式のタフさを証明するものでもある。

(j) は溶銑を次工程の転炉に運送する混銑車が高炉で受銑する時の溶銑レベルをオンラインで測定する

ものである。従来は多量の粉塵のため目視が困難であり、受銑終了時の溶銑レベルは安全サイドになり勝ちであり、そのばらつきも非常に大きかったが、 μ 波レベル計によりばらつきを小さくすることができるため、ぎりぎりまで受銑することが可能になった。このことにより1台の混銑車の輸送可能な溶銑量が10%近く拡大し、それが年間4億円近いメリットを生んでいる⁵⁻²¹⁾。

(k) はコークスのCDQの例であり、従来はレベルスイッチでしか管理できなかったものを連続レベル管理とし、それにより発生蒸気量の安定化に寄与している。

これらの装置は積極的に外販を進め、国内で266件、国外で78件と多大な成果を挙げることができた。ただし、国外に多数供与できたことが類似品をも登場させることになり、販売戦略上は問題を残した。

国内他社からの開発報告は散見するが、他社にまでその成果を技術供与したと言う例は聞かない^{5-21)~5-23)}。

5.2.4 M系列変調方式の新しい μ 波レベル計

前節で述べた応用例は説明した成果を得て開発が完了したが、溶銑予備処理や転炉、あるいは連続铸造等に適用しようとする場合、測定対象のゆれが問題となる。図 5.2.4 は日本鋼管(NKK)で開発された新しい方式である⁵⁻²⁴⁾。

(a) が原理図であるが、僅かに周期の異なる(f_1 、

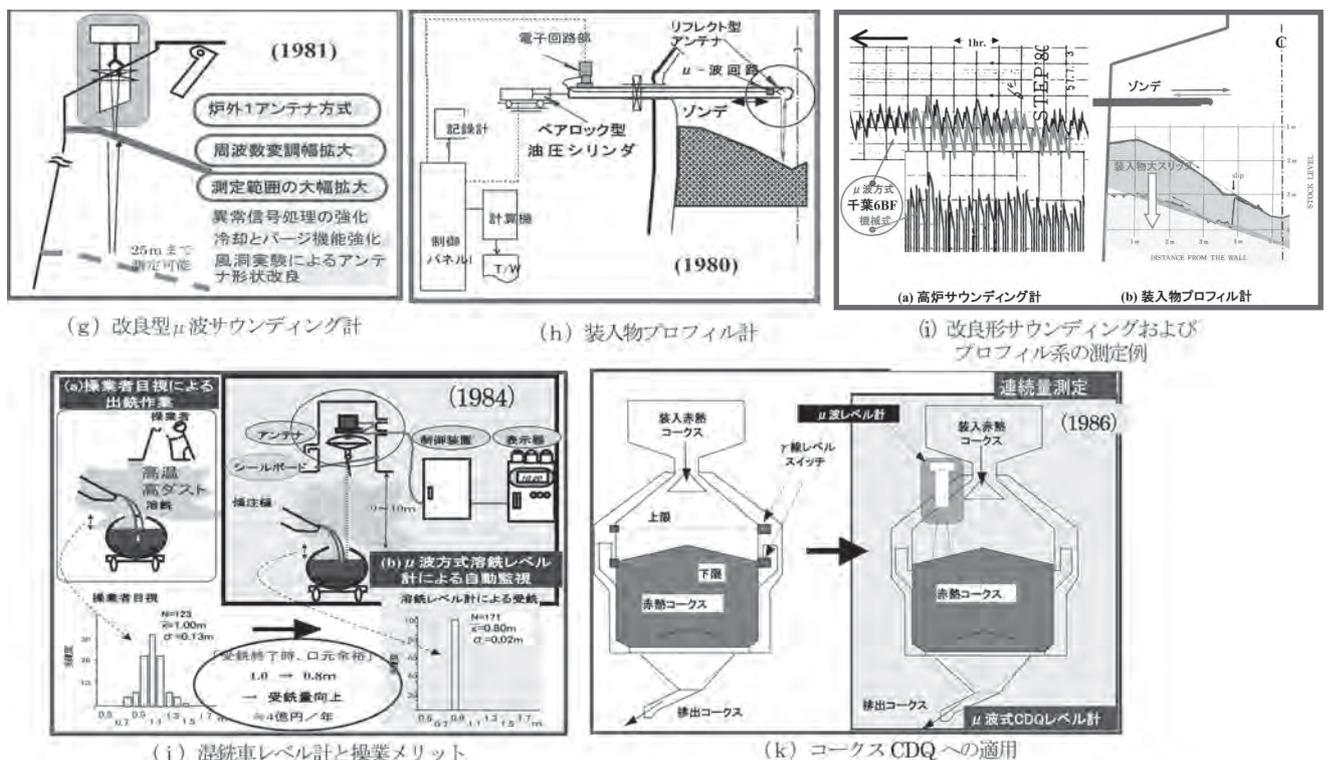


図5.2.3 μ 波レベル計の適用拡大と成果⁴⁻¹⁾⁵⁻²⁰⁾

f_2) 2つのM系列 (Maximal-length-sequence) $m_1(t)$ 、 $m_2(t)$ を用意し、 $m_1(t)$ は μ 波を変調し、測定対象に発信する。 $m_1(t)$ と $m_2(t)$ の相互相関信号を $T(t)$ 、 $m_2(t)$ と測定対象からの反射波の相互相関信号を $S(t)$ とするとアンテナと測定対象の距離 L は以下のようになる。

$$L = (\tau_0' v / 2) (\Delta f / f_1) \quad \dots (1)$$

ただし τ_0' : $T(t)$ と $S(t)$ のピーク時間差、 v : μ 波伝播速度、 $\Delta f = f_1 - f_2$

M系列は擬似ランダム信号と呼ばれるもので、その相関関数は鋭いピークを持ち、そのため τ_0' は観測しやすく、また(1)式から判るように L はその $f_1 / \Delta f$ 倍となるためさらに観測しやすくなる。また当初は2値M系列 (b)を使っていたが、それを3値のものに変える事で、よりシャープな信号が得られている⁵⁻²⁶⁾。

移動中の溶鉄鍋や吹錬中の転炉内スラグレベルを測定しており、応答の速さ、および高分解能が良い測定結果を得ている⁵⁻²⁴⁾。

5.2.5 連続炉CPCへの適用

冷延における連続式均熱炉や表面処理での連続式乾燥炉等では、高温炉内を通る鋼板の位置を測定し、それに基づいて位置制御(Center Position Control 等)を行う。

図5.2.4 (c) (d) に示すものはM系列 μ 波を用いた鋼板位置検出装置である⁵⁻²⁶⁾。従来は静電容量やITVを利用する方式が主であったが、センサとしての信頼性のみならず、高温炉内でのセンサ環境対策、なら

びにセンサ設置のための炉の加工にも難点が多かった。 μ 波は伝播空間の温度や成分の影響を受けず、その設置や保全も極めて簡単である。炉内CPCは従来から手のかかる計測の典型例であったが、本方式の登場により新しい解決が得られたと良い。

5.2.6 評価

先にも述べたように、 μ 波技術はその出発点が軍事用途であり、欧米発の技術の典型例であるが、鉄鋼操業での応用が確立したのは、まさに日本である。その日本での成功の原因を以下に示す。

(1) センササプライヤとユーザの関係:

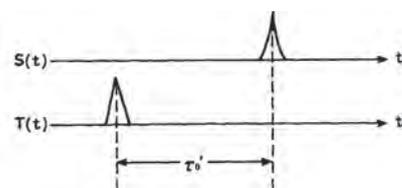
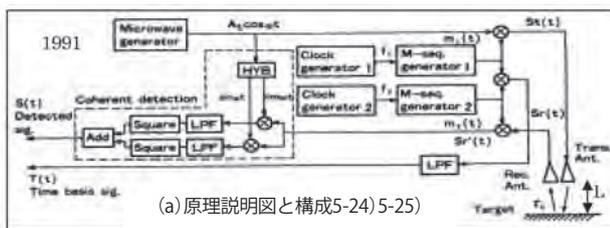
欧米の場合、両者の関係が非常に淡白であり、使えるものは使うが、使えないものをユーザ側で改良までして使おうと言う姿勢は乏しい。日本の場合、ユーザは可能性のあるものについては使う努力を惜しまないし、またサプライヤ側も操業者の口元まで料理を運ぶ努力を行なう。

(2) サプライヤとユーザの共同開発:

特殊なセンサに関してはサプライヤとユーザの知識や開発能力は拮抗したものである場合が少なくなく、適切な組合せが得られた場合、非常に能率的な開発が進められる。場合によってはユーザ主導でサプライヤは材料提供のみと言う場合もある(M系列 μ 波等)。

(3) ユーザ間における情報交流と開発競争:

この当時は鉄鋼協会共同研究会等を通して、各社の情報共有が盛んであり、競争意欲も強い中、良いものは他社の成果であっても導入しようと言う姿勢があっ



$$L = (\tau_0' v / 2) (\Delta f / f_1)$$

(b) 2値M系列とその自己相関関数

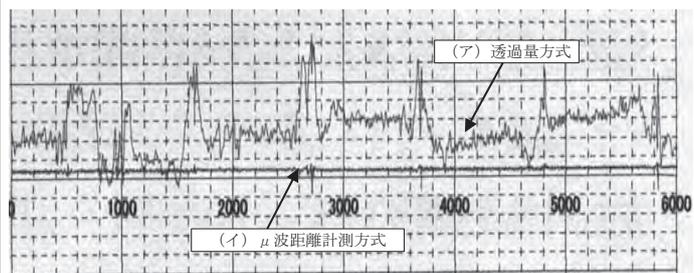
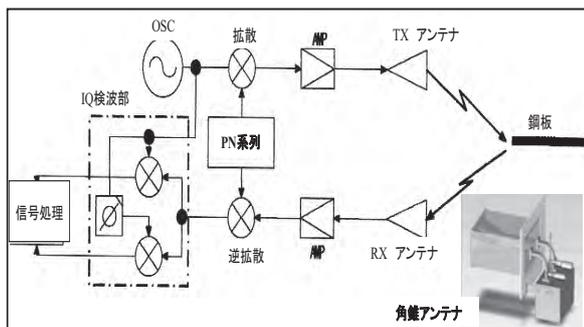


図5.2.4 M系列変調 μ 波レベル計とその応用

た。また開発は殆どの会社がほぼ同時に手がけており、他社の成果に対しても正しい判断をする能力を各社が持っていた。

(4) 操業メリットの徹底追及：

本例では混銑車レベル計がその典型例であるが、センサ導入のメリットを単なる省力にだけに置くのではなく、操業上のメリットを徹底的に追及し、その導入効果の正当性を追及する。その評価努力が開発成果の普及を推し進めるとともに、新しい開発意欲を生んでいる。 μ 波の場合の「芋蔓的」成果の原因はその辺りに起因するものと思われる。

(5) μ -CPUの活用：

技術的な話となるが、1970年代の後半から μ -CPUが容易に信号処理に導入できるようになり、それが従来のアナログ処理で難しかった柔軟なインテリジェンス処理を付加することが出来た。

5.3 溶鋼の温度・成分のオンライン測定と転炉終点制御

平炉から転炉への変革、この半世紀の鉄鋼業の中で最も効果的だったプロセスの変革の一つである。また、転炉プロセスの持つ反応の高速性と均一性、さらには再現性の良さは、計測と制御が大きく機能するプロセスの登場と言ってよい。

本節では先ず溶鋼の温度とカーボン量の正確なオンライン測定方法の開発、そしてその測定手段を活用した転炉の終点制御の進化について説明する。

5.3.1 カーボン量のオンライン測定

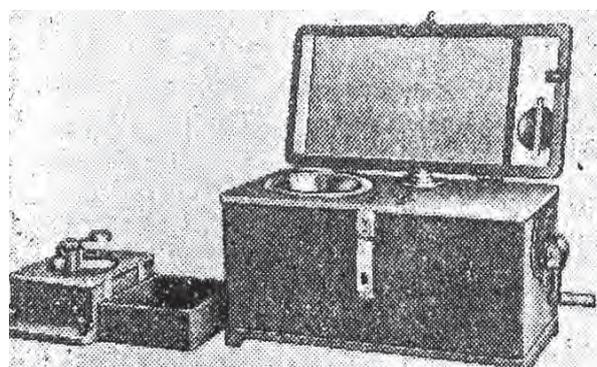
製鋼工程は鉄の品質を最初に決めるプロセスであり、20世紀初頭の平炉の時代からその温度とカーボン量を客観的かつ定量的に求める方法が模索されていた。1600°Cを越える高温の溶鋼が対象であり、当時は

このような高温の測定方法や迅速な分析方法が存在せず、図5.3.1に示すように熟練の操業者の目視判断に頼らざるを得ない状態であった。

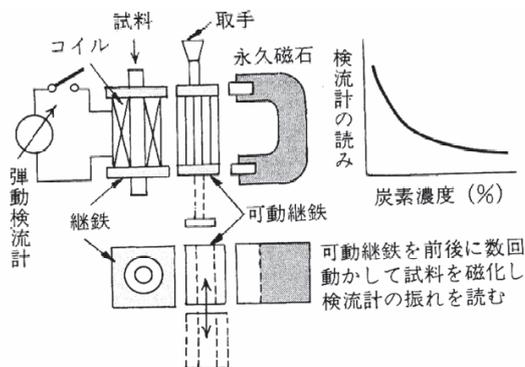


図5.3.1 操業者の目視による判定
(室蘭平炉工場炉前 1950年代
室蘭製鉄所50年史 p401 1958)

カーボン量については1910年前後にスウェーデンで開発された磁気を応用する「カーボメータ」が日本でも1925年ごろから使われることがあった⁵⁻²⁸⁾が、サンプルの作成を含めて、その取り扱いに熟練が必要であり、かつ現場的な計器では無いことがその普及を妨げた。図5.3.2にその原理ならびに測定器の形状を示す。カーボメータは電気学会、官、民の研究組織「製鉄電気協流班」⁴⁻²⁹⁾での検討課題の一つであったが、戦後、電気試験所がその国産化に成功した成果しか挙げられ



(a) スウェーデン Alpha 社製⁵⁻²⁸⁾
(炭素含有量による資料の磁気特性
の変化を利用)



(b) 電気試験所での開発品⁴⁻²⁹⁾

図5.3.2 初期の炭素量測定器 カーボメータ

ず、それも大きな改善はなく、現場に普及するにはいたらなかった。その精度はカーボン量にして $\pm 0.01 \sim 0.02\%$ と低いものでは無かったが、後述するサブランスの場合と較べて校正曲線がそれぞれに必要ななど使い難さがある。

その後、転炉の時代になって、図 5.3.3 に示す光電式発光分析計が実用化された。炉前でサンプルされた試料が気送管を通じて分析室に送られ、短時間で正分析であった化学分析法と同程度の精度の分析が得られるようになった。装置の較正や測定処理を迅速に行なうために、専用の計算機が処理を行なうが、サンプリング時間と試料搬送時間の存在が「In situ (その場) 計測」にはならず、その解決にはサブランスの登場が必要であった。

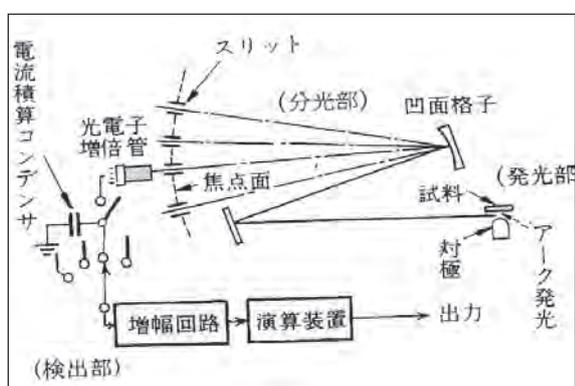


図5.3.3 光電式発光分光分析計⁴⁻²⁹⁾

5.3.2 溶鋼温度の高精度測定

戦前に官学民および軍で組織された共同研究組織「学振製鋼 19 小委員会第 2 分科会 (測温)」の主要課題は 1600°C 以上の溶鋼温度を如何に正確に測定するかであった⁴⁻³⁾。図 4.2 (a) に光高温計の構成と原理図を示すが、基本的に人による手動測定であり、較正装置である標準電球と測定の標準化が共同研究の主体であった。1936 年の呉海軍工廠を初めとして 41 年までに 3 回にわたる「多数同時測定」を開催し、その結果に基づき、標準ランプや輻射率の扱いを含めた測定標準を委員会として作成している。標準電球での比較で「 $\pm 30^{\circ}\text{C}$ を超えれば修繕せよ」とした記述があるが、得られる精度はその程度のものであったと想像する。しかし日本全国の鉄鋼関係者を集めてこのような研究が開かれていたと言うことは、如何に溶鋼温度の正確な測定が強く求められていたかと言うことであり「多数同時測定」の報告などを見ると⁴⁻³⁾、当時の学者や技術者の非常な熱気を感じることができる。

併行して C-SiC、W-Mo、Fe-W、あるいは Pt-Pt・Rh 等の特殊な熱電対の研究もこの委員会で推進され

たが、いずれも素線の製造や耐久性の問題があり、また戦時中であるため希少金属の入手が困難でもあり、良い成果は得られなかった。戦後、この委員会の研究対象はアメリカで開発された消耗型熱電対に移る。図 4.2 (b) にその構成を示したが、髪の毛程度の細さの Pt-Pt・Rh 熱電対を石英保護管の中に入れ、基本的に測定ごとに消耗する測定方法であるが、①最大の熱接触を得ること、②熱電対の劣化が無いこと、の二点により高温熔融物測定に大きな解決をもたらした。

本委員会では、センサの構造、測定方法、ならびに Pd を用いた簡易検定法等を提案し、高温熔融物測定のデファクト標準 ($\pm 2 \sim 3^{\circ}\text{C}$ の精度で $1350 \sim 1650^{\circ}\text{C}$ 測定) となった。

戦後の日本産業界における高温測定のリーダー的役目を演じたと言って過言ではない⁴⁻³⁾。

5.3.3 転炉と初期の計算機システム

1960 年代になって日本にも転炉が導入され、急速に平炉から置換わっていく (図 3-10 参照)。この時点では平炉も 500 トンを越える容量に大型化され、酸素の多量吹込みにより、吹錬時間は 2 ~ 3 時間に短縮されていた。転炉の場合は 150 トン容量 (1970 年代では 300 トン 図 3-10 参照) で 20 分以下に吹錬が終了し 3 ~ 5 倍以上の生産性を持つ。また溶鋼の均一性やプロセスとしての再現性も極めて良い。しかし反応が早いだけに操業者はプロセスの動きについていけず、例えば測温や試料分析等での僅かな時間ロスやミスが全体の生産性を大きく下げてしまう。したがって測温や分析の自動化や精度向上が平炉時代に較べ、より重要な課題となる。

ちょうど転炉の導入と時を同じくして計算機の導入と急速な応用拡大があり、再現性の良いかつ高速の反応プロセスである転炉は格好の計算機導入対象となった。1962 年に川鉄千葉に⁵⁻²⁹⁾、63 年には NKK 川崎 (、図 4.14 (b) 参照) に⁵⁻³⁰⁾ データロガーが導入されている。共に多くのデータの入出力は手動に頼っており、計算機の容量も少なく、どちらかと言えば操業者の計算尺計算を計算機化したものに過ぎないが、それでも転炉の終点制御 (吹錬終了時の溶鋼温度とカーボン量を目標値に制御すること) は同時的中率で 3 割程度向上したとのことである⁵⁻²⁹⁾。

図 5.3.4 は 1965 年に新日鉄八幡に導入されたシステム⁴⁻¹³⁾ で、ほとんどの情報が自動的に入力され、計算機的能力 (主記憶 16kw、補助記憶 164kw) やカバー範囲も拡大し、本格的な転炉プロセス計算機の始まりと言って良い。プロセス計算機も、この時代になると

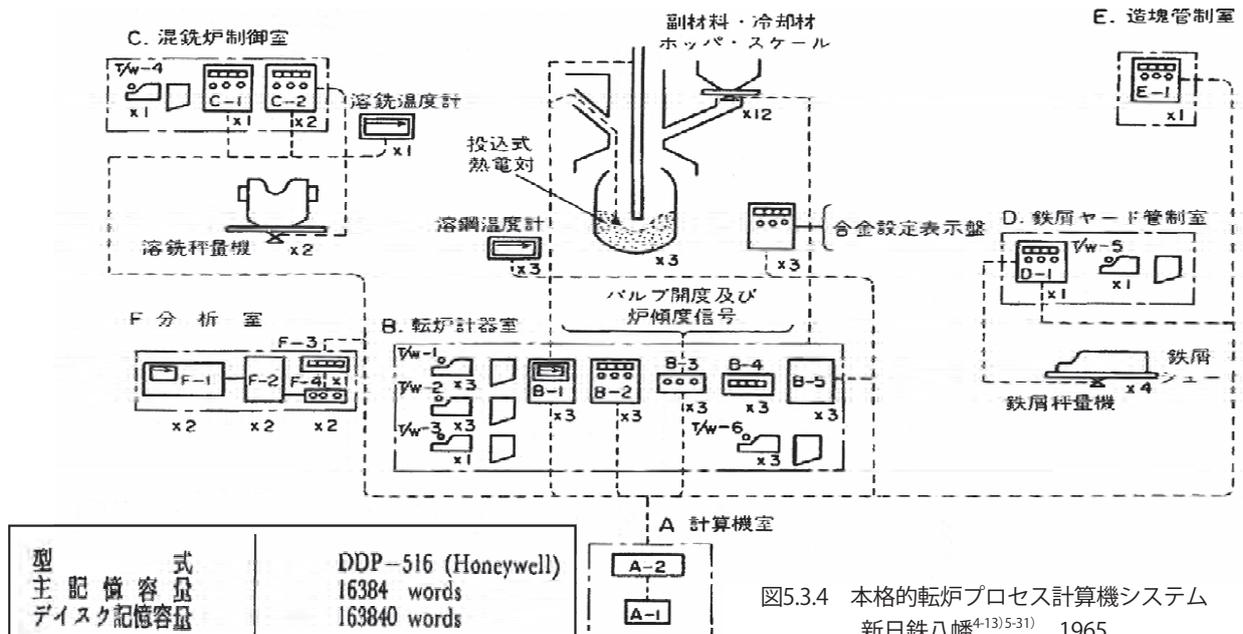


図5.3.4 本格的転炉プロセス計算機システム
新日鉄八幡⁴⁻¹³⁾⁵⁻³¹⁾ 1965

導入目的は操業全体の操業者の良きガイド役あるいは作業進行の促進役を努めること、ならびに管理者、操業者に必要な形で種々なデータを収集し提供する役目も負うようになる⁵⁻³¹⁾⁵⁻³²⁾。

5.3.4 初期の転炉終点制御

転炉計算機の最大の目的は終点制御であり、計算機による指令により吹錬終了時に所定の溶鋼温度とカーボン量を得る「自動吹錬」が最終目的となる。図5.3.5は転炉における吹錬反応と目指すべき自動吹錬を図解したものである。吹錬モデルは次の二つからなる⁴⁻¹⁵⁾⁵⁻³¹⁾。

(1) 静的（スタティック）モデル

吹錬開始前に反応に関係する物質収支・熱収支を基本とする関係式から装入する原料、副原料ならびに必要な酸素量を計算し、その計算値に基づいて吹錬を行ない、吹錬が終わるまでになんら修正を加えない。またモデルの各係数に過去のデータからの重回帰を使う（統計的モデル）、あるいは直近の操業実績で補正する（経験的モデル）場合が多い。

(2) 動的（ダイナミック）モデル

静的制御により吹錬を開始し、吹錬中に何らかの情報により、吹き止め点を予測または判定して終点を制御する。

「吹錬中に何らかの情報」を得るために、投げ込み型温度計（シンカー）や排ガス分析に基づく情報、あるいは鋼浴の一部を採取してその凝固温度からカーボン量を採取するカーボンデターミネータが用いられたが、測定値の代表性やセンサそのものの信頼性がまだ不十分であった⁵⁻³¹⁾⁵⁻³²⁾。それでもこの段階で終点時の溶鋼温度的中率はスタティックモデルのみに比べ10

～15%向上している⁵⁻³¹⁾。

5.3.5 サブランスの開発と終点制御の改良

急速に向上した転炉終点制御の精度もダイナミックモデル用のセンサの問題で頭打ちの状態であったが、これをブレイクスルーするものとして登場したのがサブランスである。カーボン量も含めた終点同時の中率の飛躍的向上には炉内溶鋼の吹錬中での直接サンプリングと測温を可能とさせるものであり、1960年後半から75年にかけては米国、ドイツ、オーストリアならびに日本（新日鉄、NKK、川鉄）でその開発競争が行なわれた。図5.3.6は1974年に川鉄より報告された設備であり、プローブの自動脱着設備を備えた実用度の極めて高い設備である⁵⁻³³⁾。センサとしての原理は前述の消耗型熱電対とカーボンデターミネータの応用であり、新しいものではないが、良い凝固温度を得るための凝固室の形状、スムーズな自動着脱を行なうための機構や測定後のバリ対策等、細かい工夫の積重ねと粘り強い測定実験によって実用化されたものである。開発開始から完成まで約10年を要している。

本装置のシステムへの取込とそれらを用いたダイナミック制御モデルの開発により終点制御は大きく改善され、一つの完成を見た。溶鋼温度的中率で約95%、カーボン濃度的中率は0.3%以上の高炭素鋼でも約87%を得ている。

また特殊なサンプリングプローブとサンプリング時の炉の2回遥動ならびに試料サンプリング位置の特定により、サブランスを用いて代表分析値を得る「無倒炉サンプリング法」も開発され、転炉の生産性向上に機能している⁵⁻³³⁾。

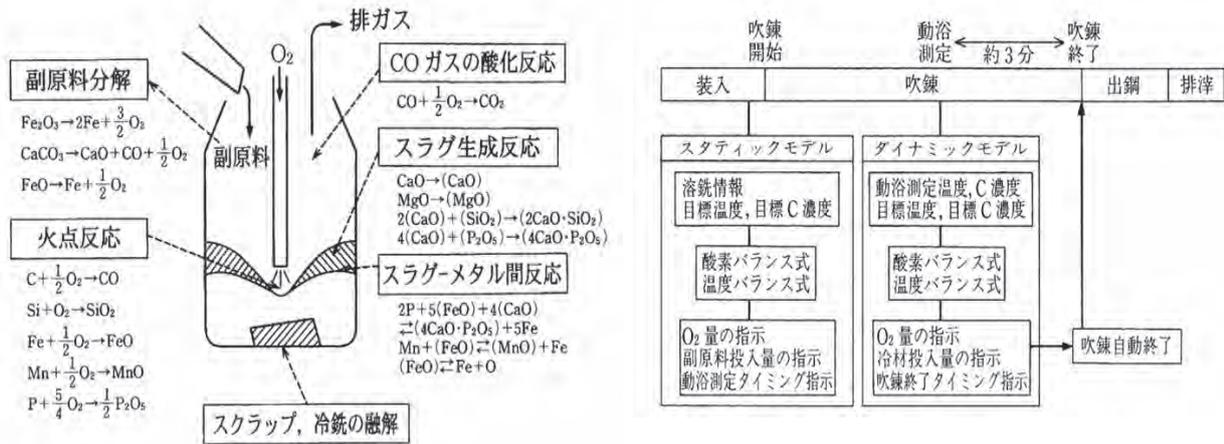


図5.3.5 転炉の吹錬反応と目指す自動吹錬 (4-15) p.37,39

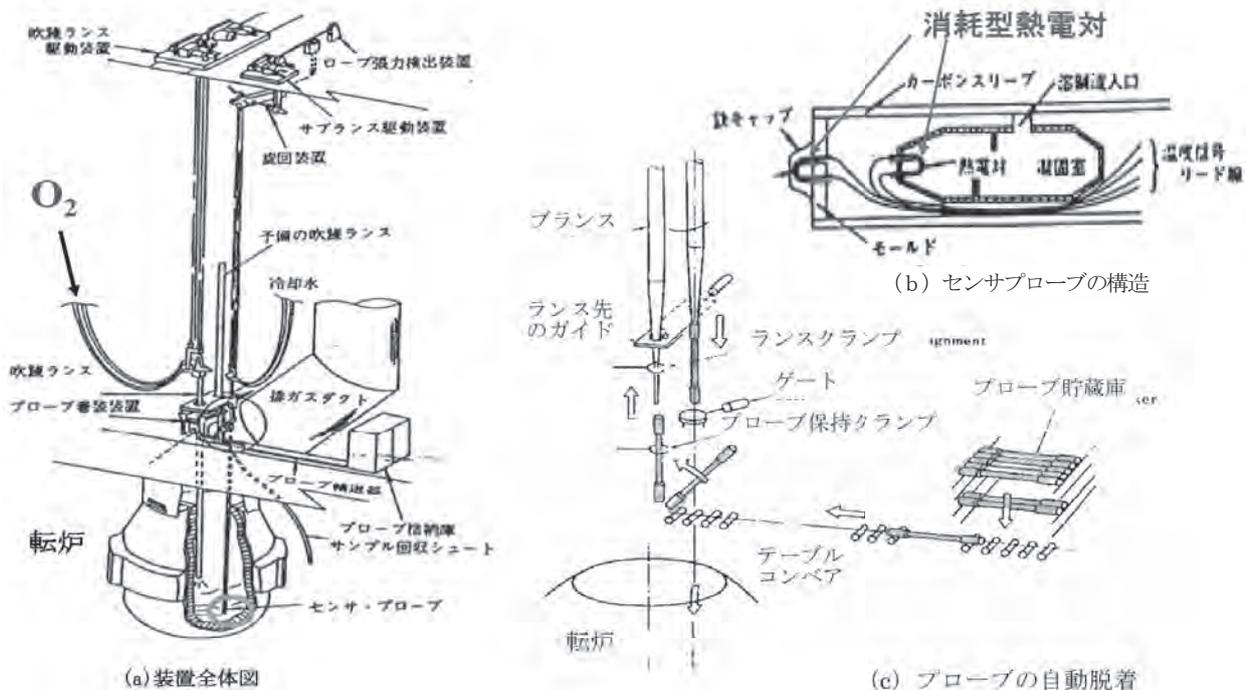


図5.3.6 転炉サブランスシステム⁵⁻³³⁾

5.3.6 複合吹錬とQDT

1977年の川鉄千葉に導入された底吹き転炉(Q-BOP)に端を発する複合吹錬(上底吹き吹錬)は、底吹きの攪拌力がより強いプロセスの再現性と均一性の向上をもたらした。そのためQ-BOPにおける温度・カーボンの同時的中率は約95%に達し、吹錬末期の測定結果に基づく終点予測精度がほぼ100%であるため、吹錬終了後ただちに(代表サンプリングを取らずに)出鋼するQDT(Quick Direct Tapping)法が確立され、さらに転炉操業の生産性を向上させている。1979年の報告によれば、サブランス利用の全自動吹錬の実施

により、同時的中率が86→93%、スロッピング頻度が23→3%、歩留まりで5%向上、転炉耐火物寿命で1500~1600→2200~2500タップと大幅な操業成績の向上を得ている⁵⁻³⁵⁾。

図5.3.7は1986年に導入された川鉄水島の複合吹錬(K-BOP 上底吹き吹錬)の計算機システムと転炉自動吹錬制御モデルの概念図である⁵⁻³⁴⁾。自動吹錬はサブランスによる測定結果である温度(Ts)、カーボン量(Cs)をベースに終点予測がなされ、必要時追加吹錬やカーボン投入が行なわれる。終点制御の成績は温度でσ=2.7°C、カーボンでσ=0.008%の高精度を

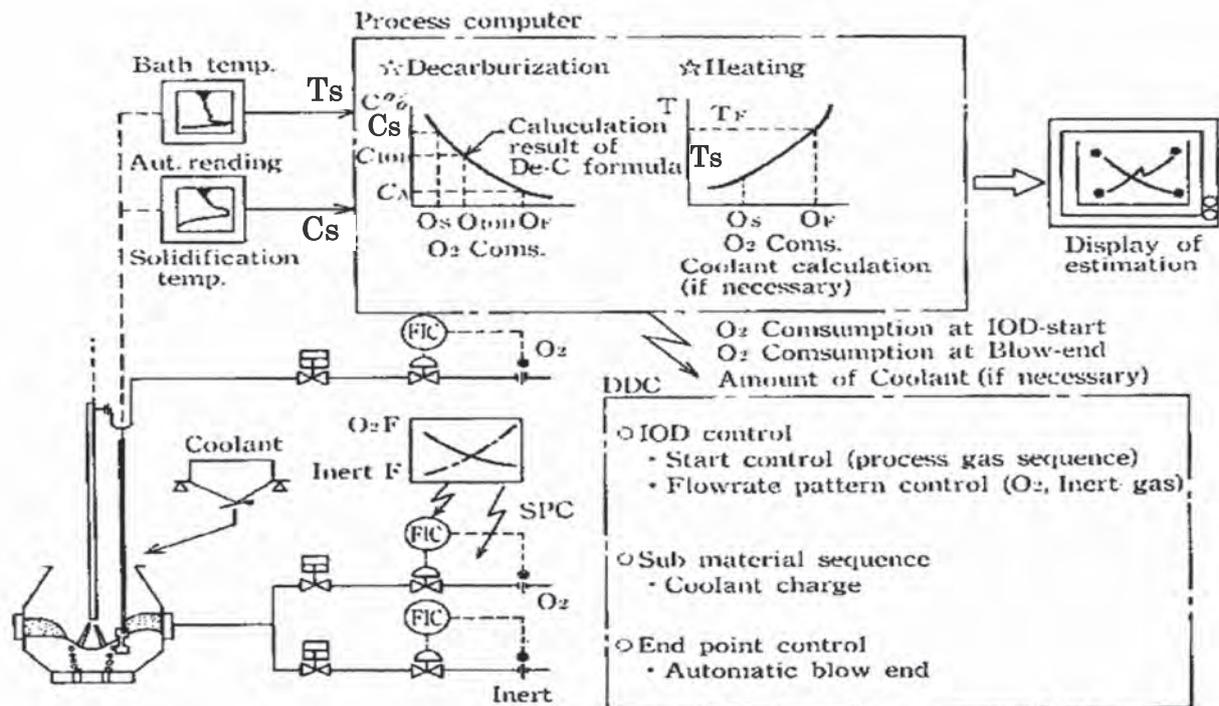


図5.3.7 プロセス計算機による複合吹錬の終点制御 川鉄水島⁵⁻³⁴⁾ 1986

得ている。

また、本システムは約 3000 チャージのデータをプロセス計算機内に蓄える事ができ、統計モデルのアップデートや新しいモデルのオンライン並列試行や評価が出来るようにしている。

5.3.7 評価

転炉は計算機制御の対象として模範のプロセスとあって良く、現在では Q D T 操業が当たり前、計算機なくしての操業はあり得ない状態にある。

一般的に計算機制御は良いセンサと良いモデル両方の開発が相俟って成功を勝ち取ることが出来るのであり、転炉の例はその代表例と言うことが出来る。またセンサはセンシング原理だけでなく、センシングの環境造りとそれを維持するための仕組みが大切であり、サブランスはその典型例ということができる。ここでは紹介を省いたが、測定値の代表性を求めるための測定タイミングや測定場所の決定に多くの時間を費やしている。またサブランスの形状も最適なものが求まるまでに長年の努力がある⁵⁻³³⁾。設備技術力と操業技術力の緊密な連携が原動力であり、我が国の最も得意とする点である。

その後、吹錬中の転炉での温度や成分の連続測定の努力はあるが、まだ実用化の段階には達していない。

5.4 連続铸造溶鋼レベル測定と制御

造塊・分塊から連続铸造への変革、これもこの半世紀の鉄鋼業の中で最も効果的だったプロセスの変革である。またその変革を取り入れるのが最も早かったのが日本であり、その決断的確さと早さが日本の鉄鋼業を世界一に導いた要因の一つである。

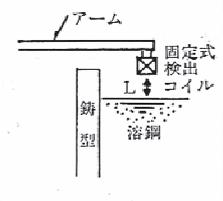
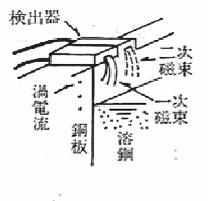
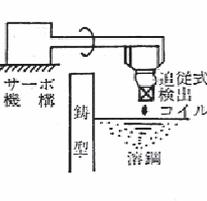
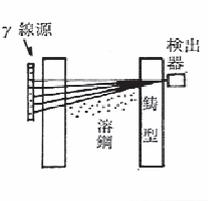
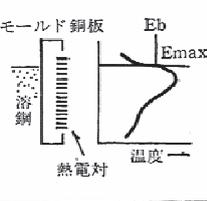
連続での Key 技術の一つであるモールドにおける溶鋼のレベル測定の推移を示し、さらにその制御においての問題点とその解決法について述べる。同時に直接はモールドレベル制御には関係しないが、連続の普及に寄与したモールド幅変更について紹介する。

5.4.1 モールド溶鋼レベルの測定

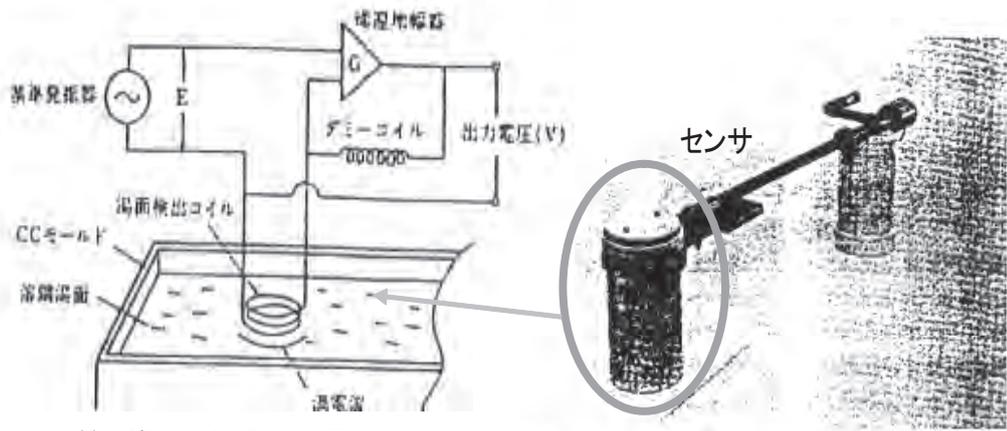
連続铸造機が欧州から 1970 年代に導入されたが、モールド溶鋼レベル計は当初は無く、しばらくしてその必要性が高まり、熱電対を複数個銅板に埋め込む方法か、 γ 線による放射線法が使われた。いずれも一応は機能していたが、その取り付け方法や応答性、あるいは安全性に問題があり、やがていくつかの電磁方式が登場した。表 5.4.1 にそれらの特徴をまとめる⁵⁻²²⁾。あとから登場した電磁方式の中でもそれぞれに長短があったが、もっともシンプルな構造をもつ日本鋼管開発の「帰還増幅渦流型⁵⁻³⁵⁾(以下渦流式)」が生残ることになる。

図 5.4.1 に渦流式の構造とそれでの制御結果を示す。

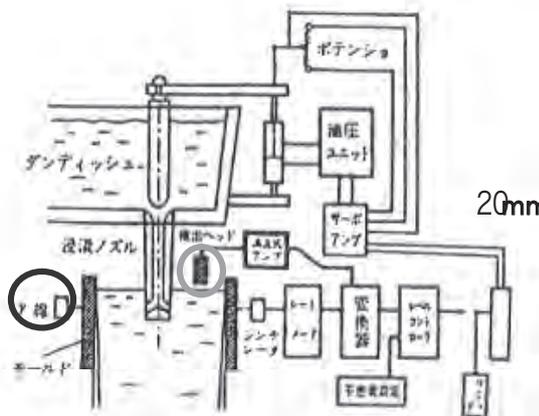
表5.4.1 連続鋳造に於ける主なモールド鋼浴レベルセンサ⁵⁻²²⁾

方式	電磁式			放射線式	熱電対式
	帰還増幅渦流型	EMB型	磁束平衡型		
検出概念図					
原理	溶鋼面上に検出コイルをおき溶鋼面との距離Lによるインピーダンスの変化を帰還増幅回路で検出しレベルを知る。	発信器の一次磁束により銅板内に渦電流を発生させ渦電流の二次磁束を検出してレベルを測定する。渦電流は溶鋼レベルによって変化する。	溶鋼面と検出コイルの距離Lを一定にするようにリンクアームまたはテレスコピック機構をサーボ装置で追従させ移動量でレベルを検出する。	鋳型にγ線源を取り付け、検出器（シンチレーションカウンタ）によって強度を検出しレベルを知る。	銅板内の温度パターンから溶鋼レベルを演算し推定する。 $E_b \approx E_{max} \times 06$

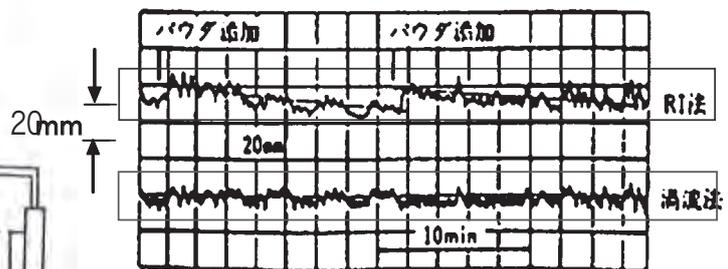
出所：松永ら、製鉄研究（1984）313、p. 3、一部修正



(a) 渦流レベルセンサの原理図



(b) レベル制御の構成図



(c) RI法、渦流法の比較

図5.4.1 帰還増幅渦流型(渦流式)センサの詳細⁵⁻³⁵⁾

(a)が原理図であるが、センサコイルからの磁界によって鋼浴表面生じた渦電流をセンサコイルで検出する。正帰還増幅を用いることにより、非常に感度が向上しており、また鋼浴上に散布されるパウダーの影響を受けないことに大きな特長がある。

(b)は鋼浴レベルの制御装置であるが、本方式ではタンディッシュのストッパーの出口面積を変えることでモールドへの鋼浴の注入量を調節している。最近ではスライディングノズルと呼ばれるゲートバルブで調節することが多い。

(c)はセンサに放射線式を用いた場合と渦流式を用いた場合の制御結果である。応答の速い、かつパウダーの影響を受けない渦流式が圧倒的に優れていることが判る。

渦流式はセンサの構造や耐熱性に工夫が加えられ、現在ではモールド鋼浴レベル計としてデファクトスタンダードとなっており、国内で500件以上、国外で450件以上の使用実績があり、鉄鋼メーカー開発のセンサとしてベストセラーである。

5.4.2 モールドレベル制御の問題点

モールド鋼浴レベル制御は通常の場合、PI制御でも十分機能するが、モールドへのメタルフローに大きなアンバランスが生じる場合に問題が起こる。図5.4.2にその主な場合を示しているが、(a)や(c)の場合のように操業者の意図しない大きな変動が起った場合に、通常のPI制御ではその外乱を吸収できず、大きなモールド鋼浴レベルの変動を招く。その結果としてパウダの巻きこみによる鑄片表面欠陥が起き、甚だしい場合はブレードクアウトのような操業トラブルを招いてしまう。

それを避けるためPI制御にマイナーな変更を加えたり、Fuzzy制御を導入することがあったが、最近では外乱を吸収するための新しい制御論理を導入することが多い。

5.4.3 幅変更装置の登場と普及^{5-36)~5-38)}

元来、モールドの短辺と長辺は鑄込み中固定されていたが、連鑄設備を使い込むと共に、鑄込み中に幅変更を行なおうとする考え方が1970年ごろから出てきた。図5.4.3にその概要を示す。

当初は極めてゆっくり手動に近い状態で短辺を動かしたり、冷却剤を用いたりしていたが、85年には μ -CPUを制御装置に用いた本格的なものとなった。本装置の存在は直接的にはモールドレベル制御とは無関係であるが、メタルフローのバランスを崩すものである。幅変更装置は連鑄設備の稼働率の向上、ならびに

各種原単位の向上に寄与するものであり、その使用頻度は増加するが、その使用がモールドレベルの制御に影響を与えるものであってはならず、レベル制御側に対応が任された。

5.4.4 新しい制御論理の導入

いずれも大きな外乱が働く制御系において、その外乱に如何に対応するかがポイントとなる。

図5.4.4は外乱オブザーバ法であり、外乱をオンラインで推定し、それを打ち消すアクションを自動的に与える⁵⁻³⁹⁾。(a)が制御構成図であり、(b)(c)がその効果である。外乱推定により適切な打消し動作が加わり、全体として安定した制御が実現しているのが判る。

他には外乱に強いと言われる制御論理である $H\infty$ 方式を適用した例である⁵⁻⁴⁰⁾。外乱の種類と全体のゲインに基づいて制御論理を選択できるようにしている。

新しい制御論理はそれぞれに良い制御結果を示すが、操作量であるストッパーやスライディングノズルの動きが大きくなり、耐火物原単位を落としてしまう欠点がある。図5.4.5は制御論理が選択できるようにしたものであり、各種方法による操作量の大きさと振幅量を比較して示している⁵⁻⁴¹⁾。振幅を少なくして高品質の鑄片を得るか、ある程度の欠陥を許して耐火物原単位の向上を図るか操業ポリシーの選択が可能にしている。

5.4.5 評価

本節で紹介したモールドレベル計、モールドレベル制御論理ならびにモールド幅変更技術は、いずれも我が国で開発された技術であり、国外にも数多く技術輸出されている。外国発の連続鑄造技術を使いこなす過程で自然発生的に、かつその高度化を模索する中で生まれてきた技術である。

筆者が1990年代に米国に出張したおり、Armco社においては日本ではとっくに見限った欧州発のEMBを漫然とレベルセンサとして使用し続けていた。レベル制御もよく操業ができると思われる程度のものであり、制御理論まで導入して、より高度化を追及していた日本とは大きな差があった。EMB以外に欧州や米国で何故深い突っ込みがなされなかったのか不明であるが、我が国の場合、操業者と設備技術者の良いコラボレーションにより、開発担当者が常に厳しい目的意識を持って取り組んでいる成果と言うことが出来るかも知れない。

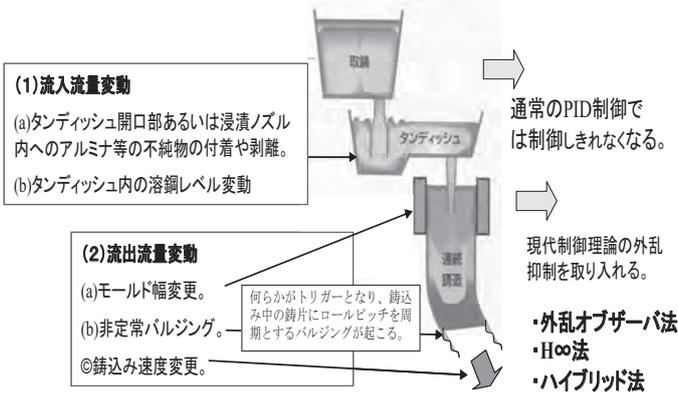


図5.4.2 制御を難しくする要因とその対応

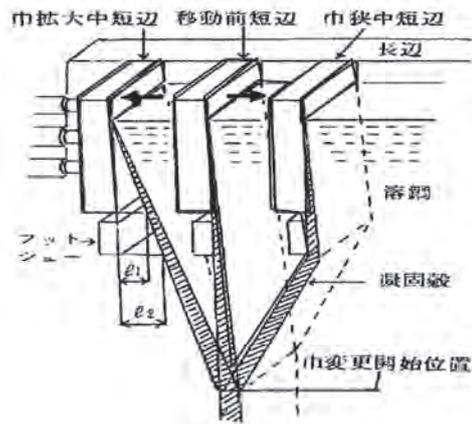
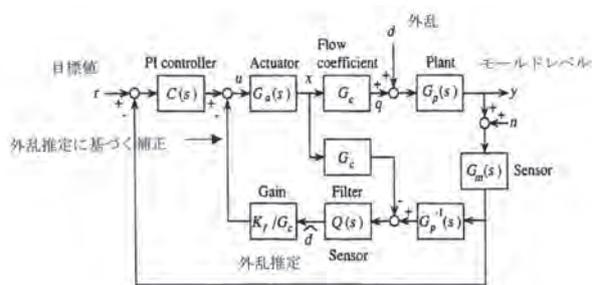
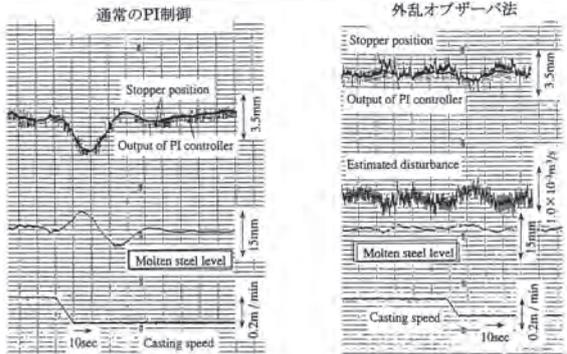


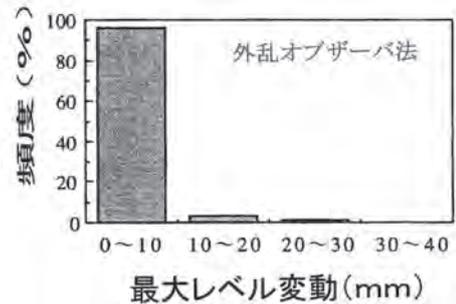
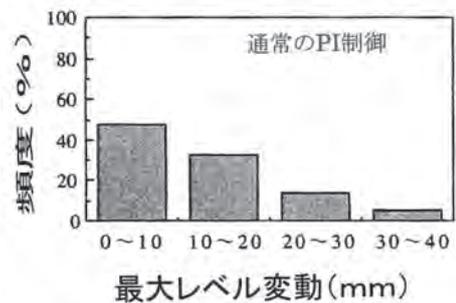
図5.4.3 連続铸造装置における幅可変装置の実用化^{5-36)~5-38)} 1970~



(a) 制御系の構成

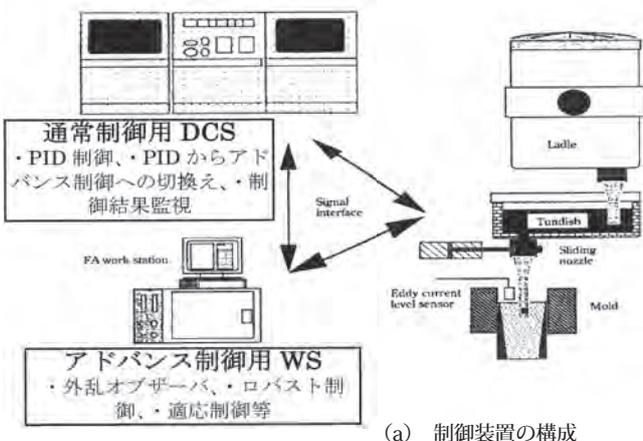


(b) 铸込み速度が低下した場合の応答例

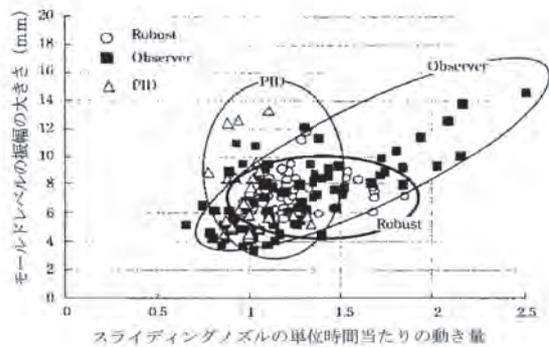


(c) 変動の頻度比較

図5.4.4 外乱オブザーバによる方法 川鉄千葉⁵⁻³⁹⁾ 1994



(a) 制御装置の構成



(b) スライディングノズルの動きとレベルの振幅量

図5.4.5 複合制御と各手法の実機での比較 川鉄水島4CC⁵⁻⁴¹⁾ 1998

5.5 圧延における板厚制御の進歩

圧延プロセスにおける大きな進歩に板厚の制御向上がある。図 5.5.1 に示したものがその推移をまとめたもの⁵⁻⁴²⁾⁵⁻⁴³⁾であるが、1970 年以降の進歩は大きく分けて (1) 油圧圧下、(2) In situ サンサ、(3) 電動機の交流化である。以下に順次説明する。

5.5.1 電動圧下から油圧圧下へ

1950 年代の圧延機はそのほとんどが米国からの輸入であった。やがて三菱重工がメスタ社から、石播が UE 社から、日立がブローノックス社からと言った具合に技術を導入し、1960 年代半ばには完全に国産化された。さらに鉄鋼業界の旺盛な投資意欲と鉄鋼メーカー間、設備メーカー間の峻烈な競争が二つの新しい技術（「油圧圧下」と「板形状制御」）の開発を促し⁵⁻⁴⁵⁾~⁵⁻⁴⁷⁾、1980 年代には世界を先導することになる。

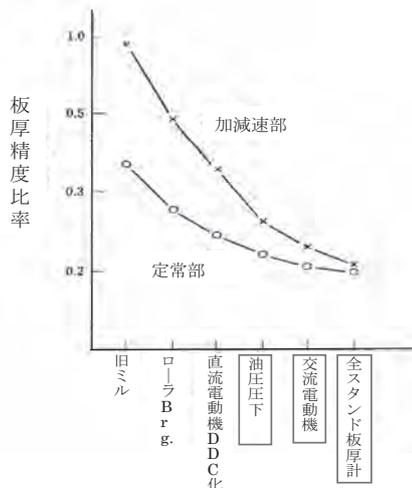
(1) 電動圧下と油圧圧下の比較

図 5.5.2 に電動圧下圧延機と油圧圧下圧延機の代表

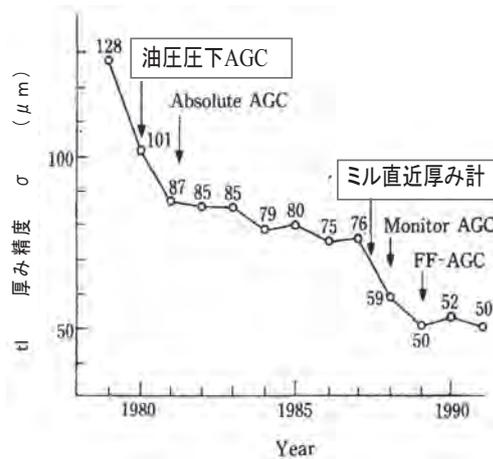
例を示す⁵⁻⁴⁴⁾。前者は電動機でスクリー装置を回転するため、電動機の慣性が大きく、そのため応答性が悪くなる。後者は基本的にはサーボ弁で油圧シリンダへの作動油の量を制御することによりラムを昇降させ、ロール間隔を決定するため、応答が極めて速い。図のものが電動式も併用しているのは、ロール交換時等に、ロール間隔を大きく動かす必要があるためと、圧延材が上下ロールに噛込む（ロックオン）場合、油の圧縮による上下ロール間隙の拡大を最小限に抑えるためである。

電動式圧下装置では操業者は実際に応答遅れを考慮した操業を行っており、そのため熟練が必要であり、操作を誤ると大きな板厚誤差を生じる⁵⁻⁴⁵⁾⁵⁻⁴⁷⁾。

近代的な圧延機（圧延するロールと荷重を支えるロールに分けた 4-H ミル）が誕生して約 40 年も電動圧下が続いたが、その理由は (1) 板厚の精度向上のためには圧延機の剛性を挙げるのが肝要と誤認識されていたこと、および (2) 高精度ならびに耐環境性のある油圧装置がなかったことによる。(1) については剛性を弱くするのはハウジングではなく、補

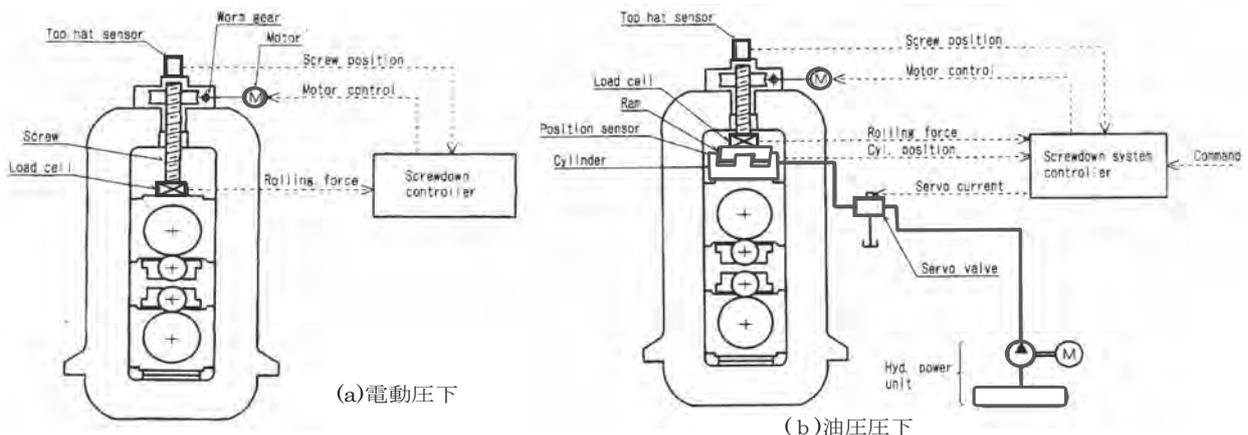


(a) 冷間圧延の場合⁵⁻⁴²⁾



(b) 厚板圧延の場合⁵⁻⁴³⁾

図5.5.1 鋼板厚さ制御精度の動き



(a) 電動圧下

(b) 油圧圧下

図5.5.2 電動圧下と油圧圧下⁵⁻⁴⁴⁾

強ロールのたわみと補強ロールと作業ロール間の接触変形であることが判り、剛性を大幅に高める必要がなくなった。また(2)については適切なパッキンを使うことにより実用上油漏れは問題ないことが経験上得られた。これらの背景により1964年最初の油圧圧下HYROP-M(日立の商品名)が登場した⁵⁻⁴⁵⁾。

(2) 油圧圧下装置の進歩

図5.5.3(a)が世界で最初に登場した油圧圧下装置であり、圧延機下部に補助シリンダ等を含めた油圧圧下制御機構をまとめて配置している。配管ならびに油圧ジャッキからの油漏れに弱い構造であるが、補助シリンダの面積が油圧ジャッキの1/10であるため、位置決め誤差を10倍とれること、ならびに、圧下制御機構を環境の良い場所におけることで保全上有利であること等の理由でこの構造にしている。しかし応答性からみた場合、この圧下制御機構ならびに配管の長さは問題であり、その後の改善は如何に応答性の良い圧下制御機構とするか、さらには如何に配管の長さを保全を犠牲にしないで短くするかに重点が置かれた。(b)は改造による応答速度の進歩(90度位相遅れ周波数)を示しており、(c)は1974年に開発されたHYROP-Fであり、応答速度は電動式の30倍以上になっている。圧下制御機構にコンパクトなフォースモータバルブを採用し、圧下シリンダ内に(d)に示すデジタル式変位計を埋め込んでいる。変位計は図5.5.4に示すマグネスケール(ソニーの商品名)と呼ばれる高分解能・高応答(1/10 μm、1 m sec)のセンサが使われている⁵⁻⁴⁸⁾。このセンサは油圧制御装置のマイナーフードバックに用いられ、応答性を高め、直接ロール位置を測定することによりスクリーンのバツ

クラッシュ等の影響をなくすのに機能しており、油圧圧下装置のKey技術の一つと言ってよい。この時点において油圧圧下は電動圧下に完全に置換わるものになった。一連の装置は1966年に大河内記念賞、1985年に日本機械学会賞を受けている⁵⁻⁴⁴⁾。

図5.5.5は後述する厚板での効果の一例であるが⁵⁻⁵⁰⁾⁵⁻⁵¹⁾、応答速度の向上(90度位相余裕で0.7→7.5Hz)により板厚精度で40%以上向上しており、圧下速度が約10倍となることによりクランプ形状口スが1/5に縮小(5.5.4節参照)している。

5.5.2 In situ センサの採用

鉄鋼業の場合、センサの環境条件が高温、多湿、高振動などと非常に厳しい場合が多く、従来はそれを避けるため本当に必要な場所から離れた、保全しやすい場所にセンサを設置することが多かった。そのため測る場所と操作する場所が遠く離れてしまい、圧延の例ではその距離が無駄時間となり、圧延速度が異なるとその無駄時間も一定でなくなる。これが制御に与える影響は少なくない。最近では非接触測定法の活用やセンサ自身がタフになっており、さらにはセンサ部の環境を整え、かつそれを維持することに工夫することが多い。そのため、より合目的(In situ)の場所にセンサを設置することができ、それにより制御性が著しく向上する例は多い。

(1) 厚板ミル直近厚さ計

図5.5.6(a)は1987年に厚板(川鉄千葉)に導入された「ミル直近」厚さ計であり、従来約10m以上あったセンサと圧延機の距離を2mにまで縮めている⁵⁻⁵²⁾⁵⁻⁵³⁾。線源部と検出機部を分離し、後者をメカニ

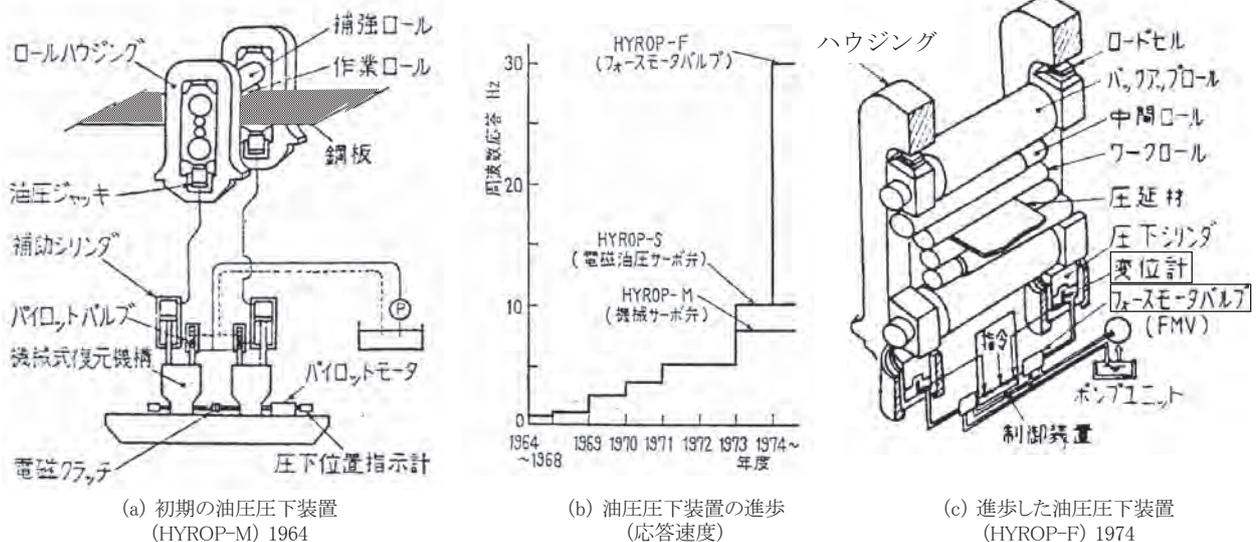


図5.5.3 油圧圧下の進歩(冷間圧延の例)⁵⁻⁴⁵⁾⁵⁻⁴⁶⁾

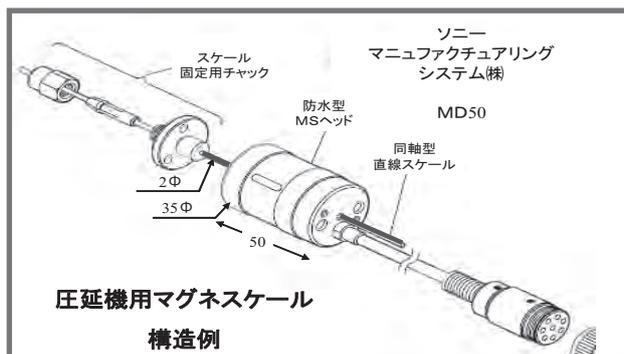


図5.5.4 油圧圧下の位置センサ⁵⁻⁴⁸⁾

油圧圧下の効果例（水島厚板）1981

- ・圧下速度: 1.4 → 12 mm/s
- ・周波数応答: 0.7 → 7.5 Hz(90°位相遅れ)
- ・厚み制御: 138(31) → 80(28) $\bar{x}(\sigma)$ μm
- ・クランプ形状ロス: 5.5 → 1.1 %

図5.5.5 油圧圧下の効果例⁵⁻⁴⁹⁾⁵⁻⁵⁰⁾

カルダンパー応用の緩衝装置付きの恒温槽で保持するなど、センサの環境づくりとその維持に注力している。

後述するが、このセンサを応用したモニタリング AGC（フィードバック制御）とフィードフォワード AGC の例において、それぞれセンサと圧延機の距離が「直近」であるため、時間遅れが 1/5 以下となる。その効果は非常に大きく、操業側からの評価も極めて高い⁵⁻⁵³⁾。AGC の精度は飛躍的に改良され（板厚精度が 1.5 倍向上）、その成果は他の圧延機の厚さ計に引き継がれる。

(2) 熱延スタンド間厚さ計

図 5.5.6 (b) は 1988 年に熱延（住金鹿島）に導入された In situ センサであるスタンド間厚さ計である⁵⁻⁵⁴⁾。(d) が該当熱間圧延の全体構成であり、仕上げスタンド F4 ~ F5 間に「スタンド間」厚さ計を導入している。800°C 以上の板が通過する熱延スタンド間は空間的にも 5.5 m 程度しかなく、振動、圧延スケール、さらには高温の圧延水等、とても繊細な測定装置を設置できる環境ではなかったが、厚板の場合と同様に多くの工夫で対応している。

ロール替え時や通板トラブル時、あるいは厚さ計自体の点検に対応するため、厚さ計を吊り下げ方式にして、圧延ラインへの装入や退避を容易にしておき、さらにプロテクタで保護を行なっている。

線源による精度の比較を行い、F4 出口の厚さでは X 線方式が良いことを確認し、かつルーバーによるパスラインならびにパスアングルの補正を行なうことで ±0.05% 以内に誤差を押えている。

仕上げ圧延機内に一つのスタンド間厚さ計を導入することにより、鋼板先端部の板厚精度が 30% 以上改善し、歩留まり向上に寄与している。この成果がスタンド間センサをより普及させる⁵⁻⁵⁵⁾。

(3) 熱延スタンド間板速計

これらの In situ タイプのセンサの成功に刺激され、いくつかの他の開発例がある。図 5.5.6 (c) は 2000 年代に、住金鹿島で開発された熱延スタンド間

板速計である⁵⁻⁵⁶⁾。従来、圧延による板の伸びは圧延理論式で求めた先進率が用いられていたが、それをオンラインで圧延機の前後で測定しようとするものである。板速計は冷間圧延では同目的で実現されているが、より環境条件の厳しい熱延での試行は初めてである。先に開発された板厚計と F5 仕上げミルを挟む形で設置している。板速計はレーザードプラー型の非接触型センサであるが、水流からの光路の確保が難しい。図に示すように強力なエアパーージと水切り装置等の巻きこみ防止対策によりそれを実現している。さらにバンドパスフィルターや信号演算処理の強化もあり、応答速度 10ms で測定精度 $3\sigma = 0.3\%$ を実現している。

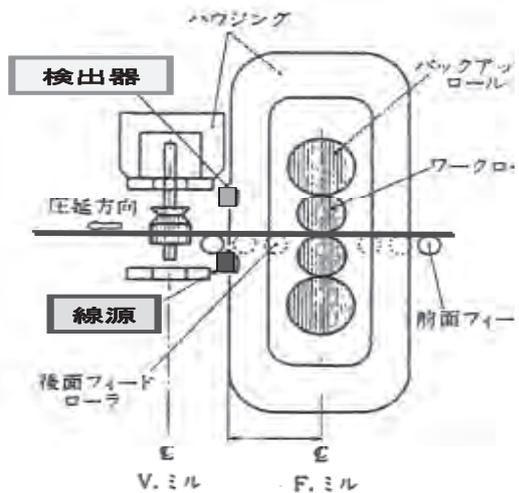
5.5.3 圧延機主機電動機の交流化

圧延機のもう一つの大きな進歩に、主機駆動の交流化がある。4 章で電気技術の進歩については記述しているため、ここでは、電動機の AC 駆動化の実例を略述する。

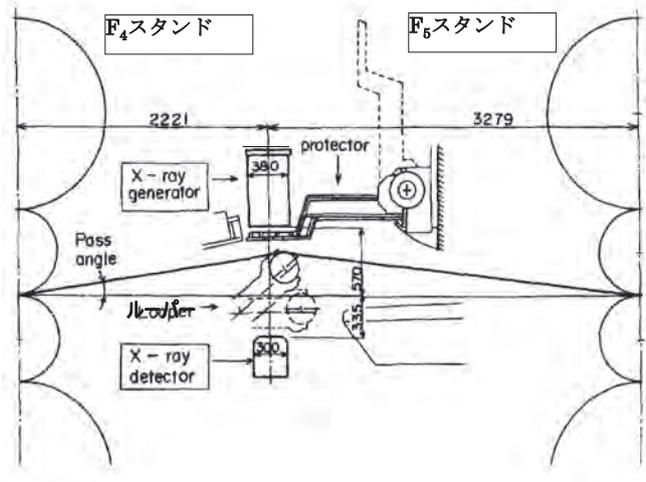
4 章で述べたように、回転速度制御の問題から、従来は直流電動機が使われていたが、保全性ならびに応答性の問題から交流化が進められてきた。日本では 1980 年頃よりサイクロコンバータによるプロセスライン（連続焼鈍炉等）の低容量電動機交流化からその適用がスタートした。

さらにインバータの登場により 80 年代後半に冷延用圧延機が交流化されて各種の圧延機に適用されるようになった。図 5.5.7 は新日鉄八幡の調質圧延機への適用例である⁵⁻⁵⁷⁾。当製鐵所の 2 号調質圧延ラインは 1961 年に稼働し、駆動系設備における電動機には可変速度制御用として直流機を採用し、その直流電源は M-G セットによる電力変換装置で構成していた。老朽更新計画を立案するにあたっては、全社的な省エネ対策を追求するモデル案件と位置付けて活動した。バッチ生産ライン特有の間欠運転による待機運転電力の大幅な低減が最大のターゲットであった。

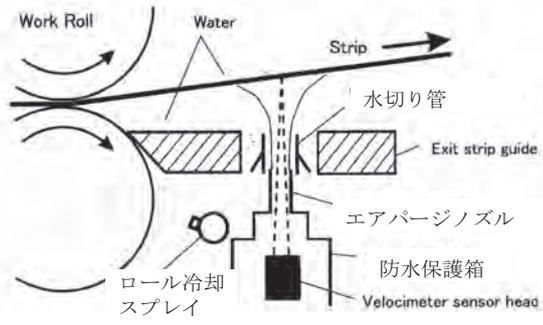
その結果、間欠運転時の待機運転電力及び定常圧



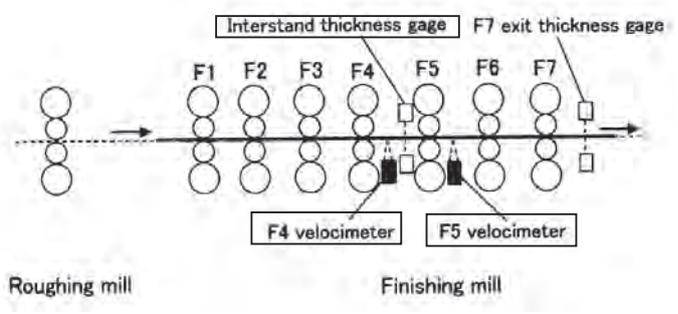
(a) 厚板ミル直近γ線厚さ計川鉄千葉⁵⁻⁵¹ 1988



(b) スタンド間厚さ計 住金鹿島⁵⁻⁵⁴ 1988

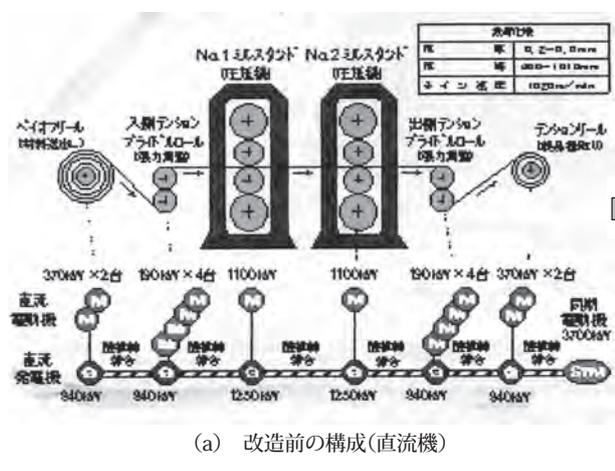


(c) 板速計詳細構成図 住金鹿島⁵⁻⁵⁶ 2004

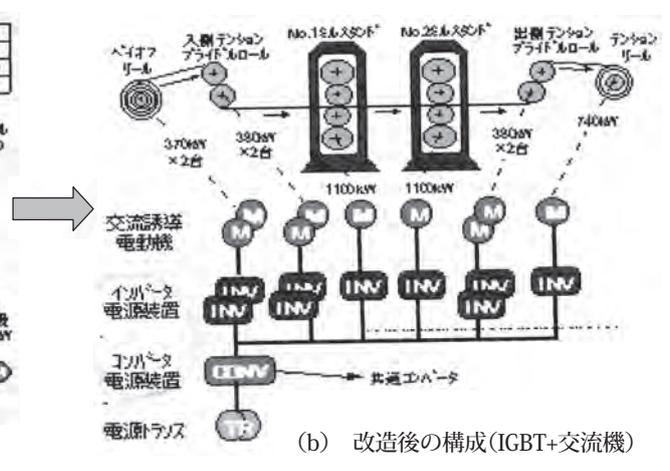


(c) 厚さ計、板速計の取り合い 住金鹿島⁵⁻⁵⁶ 2004

図5.5.6 圧延プロセスにおけるIn situセンサの例



(a) 改造前の構成(直流機)



(b) 改造後の構成(IGBT+交流機)

交流化の効果 直流機→IGBT・電力効率の向上:
 (新日鐵八幡2TPM:2002) 消費電力で23%減
 (Δ1,700MWh/年)
 ・板厚AGC制御大幅精度向上: ・保全性の抜本的向上

(c) 交流化による主な効果
 図5.5.7 交流化の事例 新日鐵八幡 調質圧延⁵⁻⁵⁷ 2000

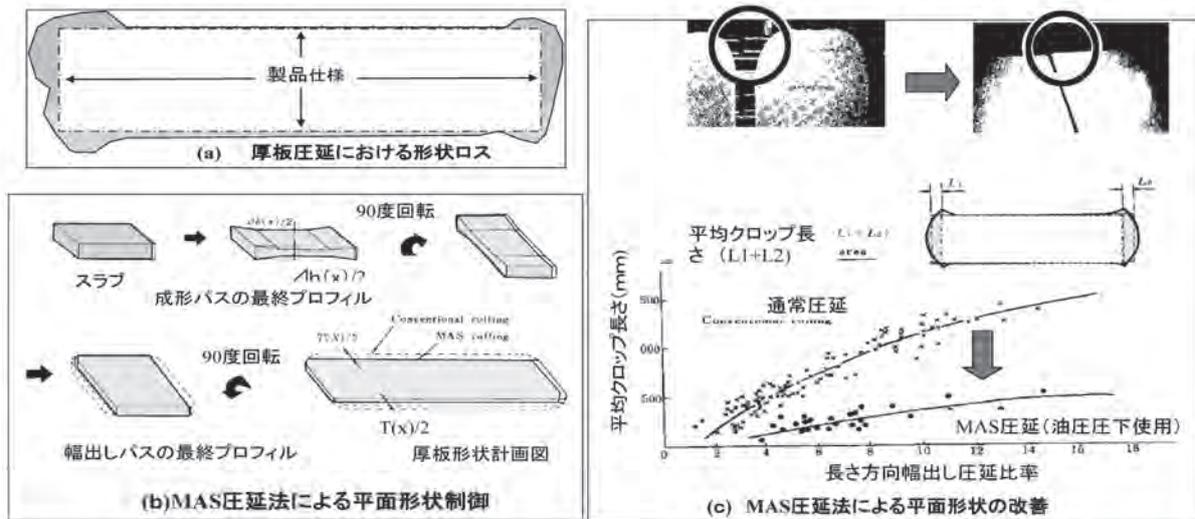


図5.5.8 油圧圧下の効果例 厚板平面形状制御 川鉄水島 MAS圧延⁵⁻⁴⁹⁾⁵⁻⁵⁰⁾ 1979

延操業時の負荷運転電力について、期待通り従来の23%減（削減電力量1722千kWh/年）の省電力を実現した。

また、応答速度の向上からくる板厚精度の向上も大きく、定常部で50%、非定常部で80%の向上を得ている報告例もある⁴⁻³¹⁾。導入当初は高調波問題や、軽量化されたが故の噛み込み時のインパクトドロップの増加の問題等があったが、鉄鋼技術者と電気メカ技術者の緊密な連携により、それらを解決させた。交流化による効率や応答性の向上、ならびに保全性の向上はその効果は極めて大きく、国内外とも、予算の許す中で交流化が進行しており、例えば国内の熱延では5割以上が完了している。

5.5.4 実操業での具体的効果例

(1) 厚板平面形状制御での成果

厚板は船舶や大型構造物に使われるが、その平面形状の歩留まりを大きく改善したものに、平面形状制御があり、油圧圧下の高速圧下機能がそこに極めて有効に働いている。図5.5.8にその概要を示すが開発した製鉄所にちなんでMAS (Mizushima Automatic plan view pattern control System) と呼ばれている⁵⁻⁴⁹⁾⁵⁻⁵⁰⁾。(a)に平面形状の歩留まりを示すが、要は如何に矩形に近く圧延するかである。(b)に圧延方法を示すが、スラブの成形パスの最終プロファイルを鼓状にすることにより、幅出しパスを経て矩形の最終製品が得られる。どのような鼓状にするかが問題であり、理論計算と実験や経験からその形状が与えられるが、圧延機の圧下速度と圧下量が十分でないと目標のものが得られない。油圧圧下装置の登場がそれを可能とした。

(c)にその効果を示しているが、MAS圧延（油圧圧延使用）により製品の角が見事に矩形であることにより、切り捨てられるクランプ長さが1/3以下になっている。

(2) 板厚制御 (AGC) での進歩⁴⁻¹⁵⁾⁵⁻⁵⁸⁾

油圧圧下やIn situセンサにより板厚制御が向上したのは応答速度向上によるものと、新しい制御理論の登場によるものの二つの理由がある。図5.5.9に各種の板厚制御 (AGC: Automatic Gauge Control) をまとめて示す。判りやすくするため単一スタンドで構成される厚板の例で示す。

④⑤に示すモニターAGCやフィードフォワードAGCが最もわかり易いが、通常、センサである厚さ計と操作端である圧延機は保全上の問題から10m以上離れており、In situセンサが登場するまでは遅れの問題から制御系としては使いにくいものであった。そのため電動圧下時代に於いては①に示す「ゲージメータ方式」が専ら用いられた。

英国のBISRA (British Iron Steel Research Association) で1950年代に開発されたためBISRA方式とも言うが、圧延機が板を噛み込んだ時点で圧延荷重をゲージメータ式に基づいて出側板厚として記憶し（ロックオン）、以降はその荷重（板厚）を維持すべく圧下量を調整する。ミル剛性係数が一定の場合はゲージメータ式から板厚を制御していることと等価となる。応答の速い圧延荷重にのみ依存するため安定した制御が得られるが、ミル剛性係数が異なると誤差を生じる。そのため応答遅れを考慮した板厚センサで修正する場合もある。

油圧圧下になると②に示すように、圧延機の圧下位

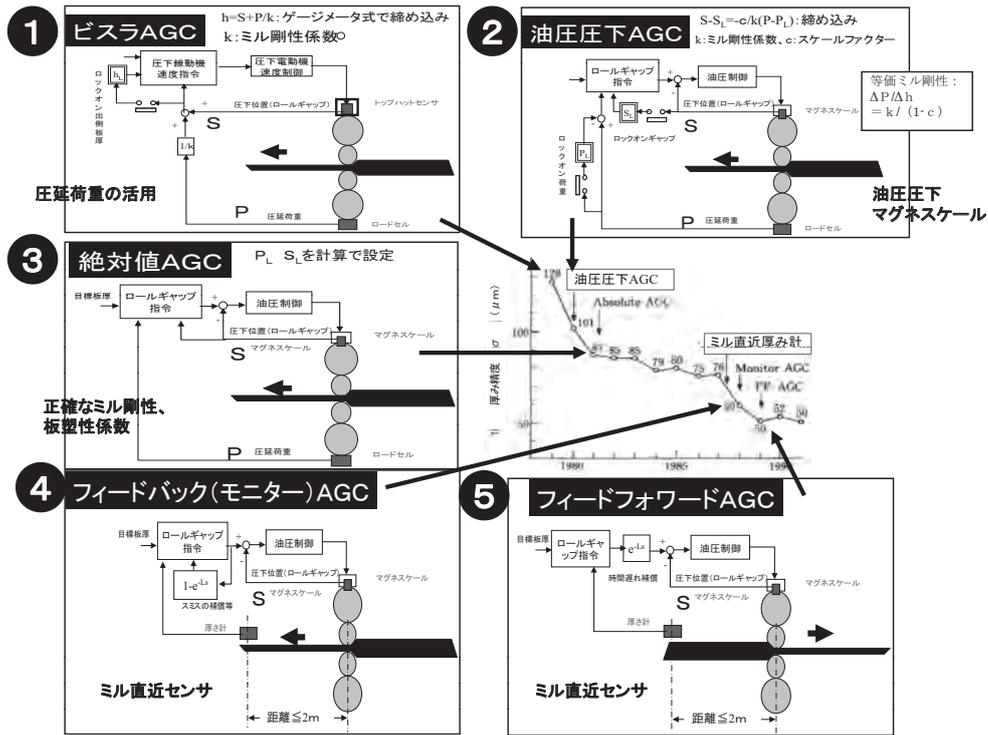


図5.5.9 板厚制御(AGC)の変遷 板厚の場合で説明

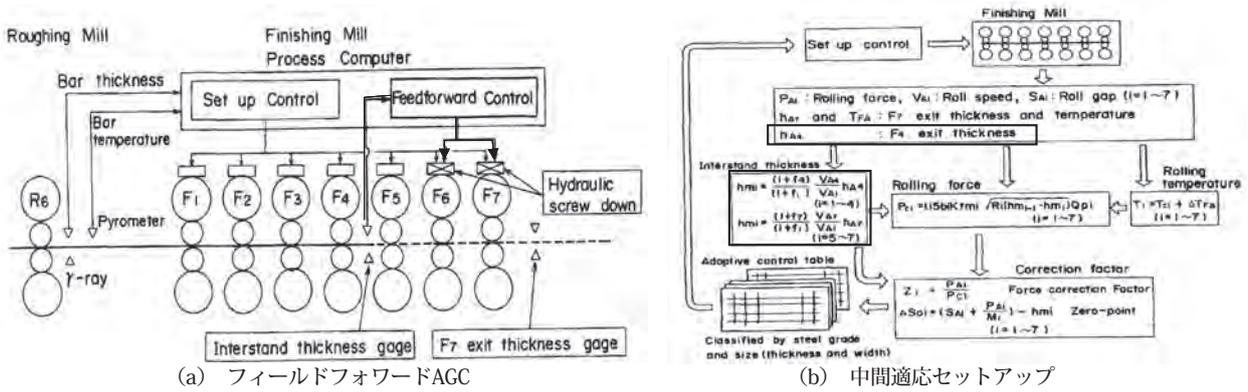


図5.5.10 In situセンサの熱延ラインにおける例⁵⁻⁵⁵⁾

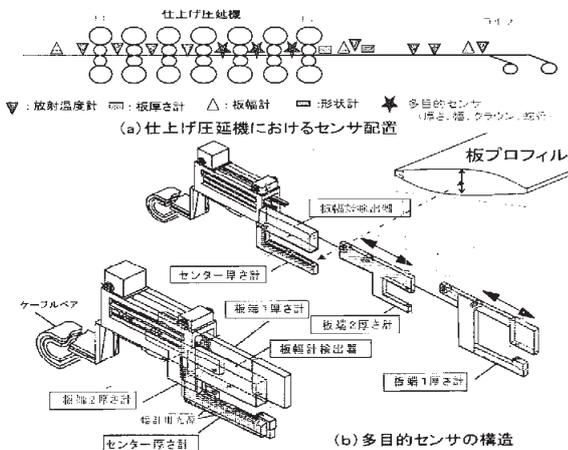
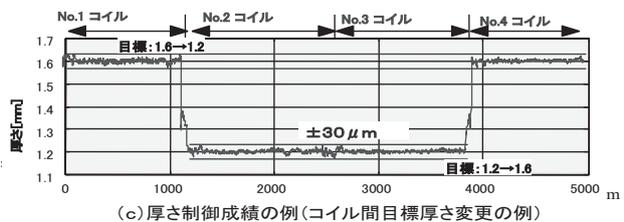


図5.5.11 In situセンサの熱延ラインにおける例2
 川鉄千葉3熱延 エンドレス圧延⁵⁻⁵⁹⁾ 1995



置（ギャップ）が応答も速く得られるため、それを一定に制御することで、より安定した制御が得られる。「油圧圧下 AGC」ではロックオン時の圧延荷重とロールギャップを記憶する。この場合、ロールギャップ演算にスケールファクターを導入し、見かけのミル剛性係数を k から無限大まで変化させることができ、タンデムの場合には配列の圧延機毎にスケールファクターが設定される。

上記二つの AGC ではロックオン時の情報が必要となるが、それを計算により設定する③「絶対値 AGC」の考え方が出てきており、その計算値が正しければ板端から良い制御ができる。

④および⑤は、In situ センサを応用したモニタリング AGC（フィードバック制御）とフィードフォワード AGC の例である。それぞれセンサと圧延機の距離が「直近」であるため、時間遅れがその変動も含めて小さい。フィードフォワードの場合は時間補償も上手く機能する⁵⁻⁵¹⁾。

図 5.5.10 は熱延ライン（タンデム）での利用例である⁵⁻⁵⁴⁾。(a) は本スタンド間厚さ計を鋼板の先端部板厚精度向上のために導入したフィードフォワード制御の構成図である。通常、板の先端部板厚は、板が圧延される前に仕上げミルの圧下位置とロール周速を与える、いわゆるセットアップ制御の精度で定まる。そのセットアップは粗ミル出口（(a) 図の R6 出側厚さ計）の板厚測定値ならびに温度測定値を元に予測演算されるが、圧延温度や変形抵抗等の予測誤差が制御精度を悪くする。そのため本システムでは仕上げスタンド間厚さ計の情報と F4 目標板厚の差にもとづいて、仕上げミル出口の板厚偏差が 0 となるようにフィードフォワード制御で F6、F7 の圧下位置を修正する。

(b) はスタンド間厚さ計の情報に基づき、セットアップ制御を適応的に修正する手順を示している。通常は F7 実績値のみを使用するが、本システムでは F1 ~ F4 までは中間スタンド実績値を、F5 ~ F7 までは F7 実績値を用いて適応修正する。50 μm （約 50%）程度予測精度が改善されていることが報告されている。

(3) 熱間エンドレス圧延での成果

スタンド間厚さ計は、その後熱間圧延や冷間圧延で実績を積んで完成度を高めて行った。図 5.5.11 は 1995 年に新設された熱間圧延設備での設置状況である 4-35) 5-59)。この圧延設備は世界初のエンドレス圧延機（複数のシートバーを圧延前に接続して連続圧延を行ない、先後端にも張力が継続することにより板厚精度を向上させる）である。

(a) が仕上げライン全体の構成とセンサの設置状況である。特長はスタンド間多目的センサ（板厚、板幅、クラウン、蛇行）を後段仕上げラインに設置し、センサの徹底した In situ 化を図っていることである。

5.5.5 評価

本節で紹介した油圧圧下および主機電動機の交流化は日本のメーカ主導で開発されたものである⁵⁻⁴⁵⁾⁵⁻⁴⁷⁾。それをユーザである鉄鋼の操業者ならびに設備技術者が新しい道具として完璧に使いこなすことで大きな成果を得ている。一つのラインの圧延機を新しいものに取り替えるのには、それが高額であるだけでなく、失敗が生産停止を招くだけに大きな勇気が必要であるが、日本の場合はむしろメーカ側をせつつ形で、ものにしていっている。また忘れてはならないのは保全技術の頑張りである。1960 年の半ばに登場した油圧制御設備は当初は保全上の問題から離れた場所に設置していたが、1970 年代には応答性の問題から圧延機側に設置され、また Key 技術となった位置センサも保全技術者の努力の末に使いこなされている。

一方、In situ センサは鉄鋼メーカ主体で開発されたものであり、まさに「虎穴に入らずんば虎子を得ず」である。

1970 年代まではゲージメータ AGC 等の制御系の工夫が主体であり、1970 年代は油圧圧下を主体とした操作系の改造とそれを活用した制御系の再工夫、そして 1980 年代の末からセンサの在り方を再検討し、その In situ 化というコンセプトの導入により飛躍的な制御性の向上を獲得している。制御システムはセンサ、操作機器（アクチュエータ）、そして制御論理の 3 要素が相俟って機能することの典型例であり、制御技術者に良い示唆を与える好例と言える。

5.6 鋼板形状の制御

油圧圧下装置の登場について大きな変革を圧延機にもたらしたのが、形状制御機能である。

鋼板を詳細にみるとその形状は真平らでなく、図 5.6.1 に示すように、わかめのように圧延方向に「しわ」があり、あるいはその直角方向にエッジドロップやクラウンの不均一がある⁵⁻⁶⁰⁾。鋼板を加工するユーザにとってそれらは邪魔な存在であり、極力少ない方がよい。また、強度上の観点から、ある厚さを保証するためにはエッジ部を切り落とさねばならず、鉄鋼メーカにとって歩留まりの大きな損失となる。例えば 1990 年代では仮に冷延鋼板のクラウンがなくなると、日本

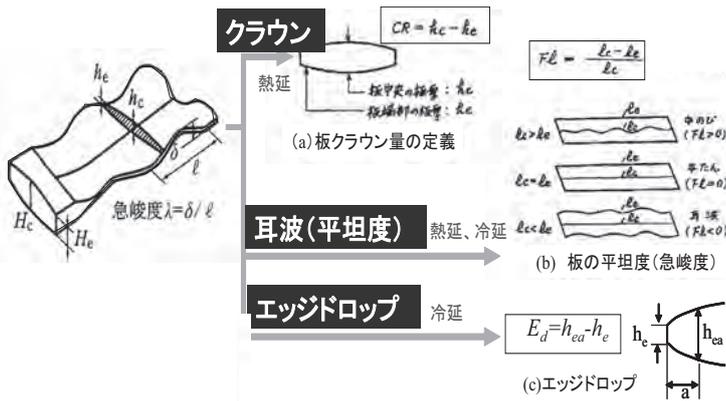


図5.6.1 鋼板の形状不良⁵⁻⁶⁰⁾

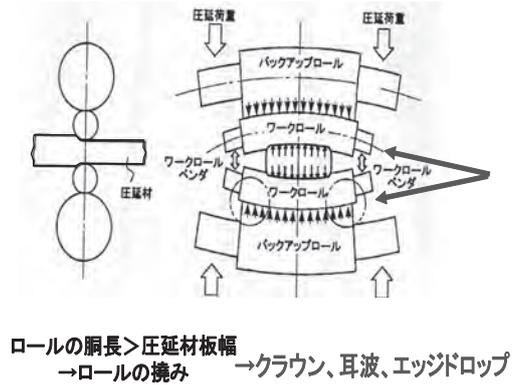


図5.6.2 鋼板の形状不良の原因⁵⁻⁶¹⁾

全体で 200 万トンの鋼材が切断を免れると言われていた。その形状を制御する機能を持った圧延機が、日本の圧延機メーカーから提案され、20 年の内に既設の圧延機に取って代わっている⁵⁻⁴⁷⁾。

5.6.1 鋼板の形状とその悪化原因

熱間および冷間圧延における形状品質を悪化させるのは、図 5.6.2 に示すように圧延機のワークロールの胴長が非圧延材の横方向長さより大きいこと⁵⁻⁶¹⁾であり、ロールの撓みが主原因となる。ロールと圧延材の固さの差を、例えばうどん粉と麺棒の場合のように圧倒的なものに作れないため、どうしてもロールに撓みが生じる。そのため従来はワークロールの形状を調整（研削時逆クラウンを付ける）することにより対処してきたが、圧延材の幅が変化する時はワークロールを次々に取り替えなければならず、その変更の頻度が多いときは現実的ではない。またワークロールのベンディング力を調整する方法も提案されていたが、その形状調整能力には限界があった。

5.6.2 形状の修正ができる圧延機の登場

そのため圧延機メーカーから提案され、製鉄メーカーと共同で開発されたものが、以下に示す形状制御機能を持った圧延機である。図 5.6.3 は HC (High Crown control) ミルと呼ばれるもの⁵⁻⁴⁷⁾⁵⁻⁶³⁾、日立製作所が提案し 1 号機は新日鐵八幡の珪素鋼板用の冷間圧延機に適用された。珪素鋼の場合、積層して使用されるためにエッジドロップを極力小さくしたいニーズがある。

HC ミルでは図に示すように、従来の 4 段圧延機に圧延方向に直角に出し入れ（シフト）できる一対の中間ロールを追加し、それを板幅に合わせて出し入れすることで、板の部分のみに荷重がかかるようにしてい

る。ワークロールベンディング機能も合わせて強化している。

図 5.6.4 はその発展系であり、中間ロールにベンディング機能を付加し、さらにワークロールにシフト機能と片テーパロールを採用したものであり、UC (Universal Crown control) ミルと呼ばれている。形状制御機能が高度化し、複合する形状不良に対応が可能となっている⁵⁻⁶¹⁾⁵⁻⁶⁷⁾。

図 5.6.5 は三菱重工が 8 年後に提案したものであり⁵⁻⁶²⁾⁵⁻⁶³⁾、4 段圧延機のみで上下 2 段の圧延機を平行のまま上下を 1~1.5 度クロスさせるもので PC (Pair Cross) ミルと呼ばれている。原理図に示すようにワークロールがクロスすることでロール間隙が放物線状となり、ロール撓みと相殺することになり、クロス角度を増減させることで形状制御を行なう。上下のミルをクロスすると、原理上圧延中にロール軸方向のスラスト力が大きくなるが、高付加のスラスト軸受けを開発することで対応している。

PC ミルは三菱が日立に対抗する形で開発したが、形状制御機能が大きいこと、既設の 4 段ミルからの改造がやり易いこと、HC に比較して単純であり、ラフな熱延に向いているなどの特長がある。

HC ミルは当初は圧延全体に、現在は冷延を中心に 2007 年時点で約 400 機、PC ミルは熱延ミルを主体に約 100 機、既設の圧延機を置き換える勢いで普及している⁵⁻⁶³⁾。

ここに挙げた以外に、ロールそのものを油圧で形状を変えるクラウン可変ロール等、多くのものがその後出てきているがここでは説明を省略する。これらはいずれも従来の 4 段圧延機の構造を複雑化させるものである。

5.6.3 鋼板の形状センサ

形状を測定するセンサとして、色々なタイプが提案

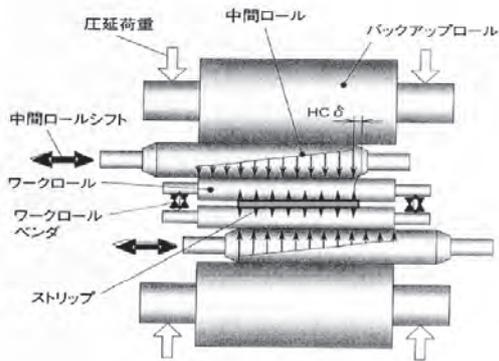


図5.6.3 形状制御機能を持った圧延機 HCミル⁵⁻⁶³⁾ (日立) 1974 (現在は冷延が主体)

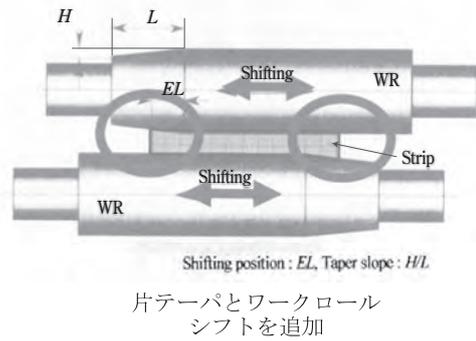
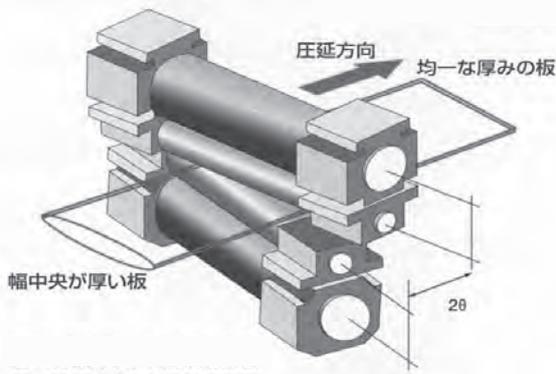
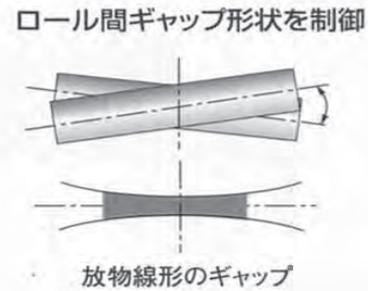


図5.6.4 HCミルの発展系UCミル(日立)⁵⁻⁶³⁾⁵⁻⁶⁴⁾ 1981



(a) 圧延機の構成



(b) 形状制御の原理説明

図5.6.5 形状制御機能をもった圧延機PCミル(三菱)1982 (現在は熱延が主体) 3-1) p97

された。図 5.6.6 に示すものは、圧延と直角方向の形状を捉えるものである。(a) ロードセル方式、(b) 透磁率方式、(c) 変位方式等があるが、いずれも板の張力分布を測定する⁵⁻⁶⁴⁾。(d) は放射線方式非接触タイプであり、エッジドロップ計として定着してきている⁵⁻⁶⁵⁾。図 5.6.7 に示すものは圧延方向のプロフィール測定例であり、レーザ利用の光切断法を用いている⁵⁻⁶⁶⁾。熱間か冷間、接触による傷、磁性・非磁性など選択に注意が必要である。

また得られる情報がパターン情報であるため、その定量化に工夫が必要であり、図 5.6.8 (b) のように数値化を行ったり、直交関数や判別関数法等の多変数解析手法も用いられている。

5.6.4 鋼板の形状制御

形状制御機能が登場してまだ比較の日が浅いこと、形状修正が複雑であること、あるいは定番とする形状センサが固まらなかったこと等の理由により、各社がそれぞれの工夫により形状制御機能を使いこなして

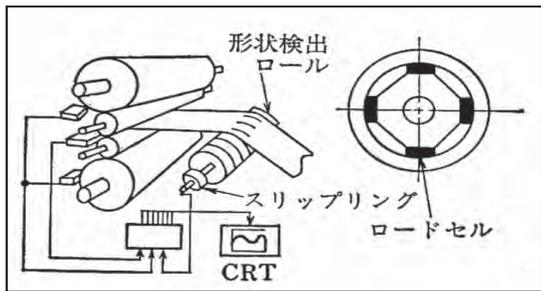
いている。

図 5.6.8 は PC ミルを最初に導入した新日鉄広畑における熱延ミルにおけるクラウン制御の例である⁵⁻⁶⁷⁾。クラウン形状制御理論モデル、コイル間のクラウン学習、ならびにロールプロファイル予測システムに基づき、圧延前に全スタンドのロールクロス角と F5 および F6 のロールベンダ量を与える。圧延中には後者にのみダイナミック制御として補正量が与えられる。(b) は目標クラウンと実績クラウンの比較であり、その差が少ないことが判る。(c) はシステム稼働後のクラウン量の推移であり、2年で板端 25mm 部分のクラウン量が半減している。

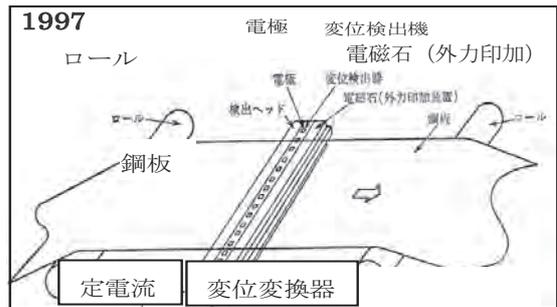
図 5.6.9 は UC ミルの片テーパ機構を活用したエッジドロップ制御の例であり、(b) (c) に示すような成果が得られている。⁵⁻⁶⁹⁾

5.6.5 評価

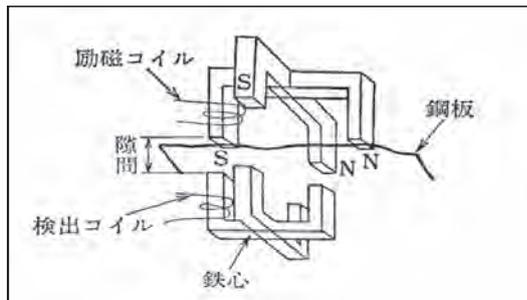
形状制御機能を持った圧延機の誕生の動機は、圧延機メーカーの技師が従来の逆クラウンワークロール方式



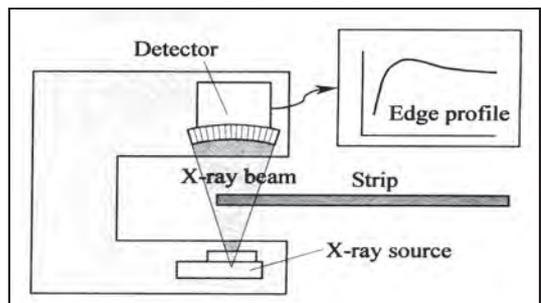
(a) ロードセル方式



(b) 変位法の実例



(c) 透磁率方式



(d) エッジドロップセンサ⁵⁻⁶⁵

図5.6.6 形状センサの代表例(圧延と直角方向)⁵⁻⁶⁴⁾⁵⁻⁶⁵⁾

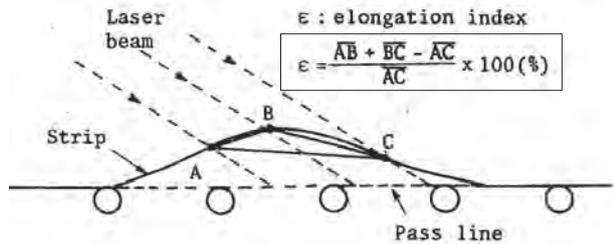
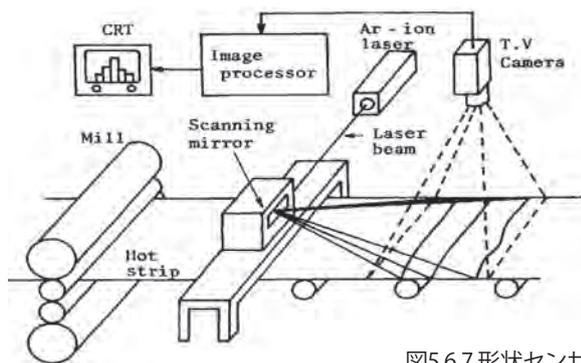
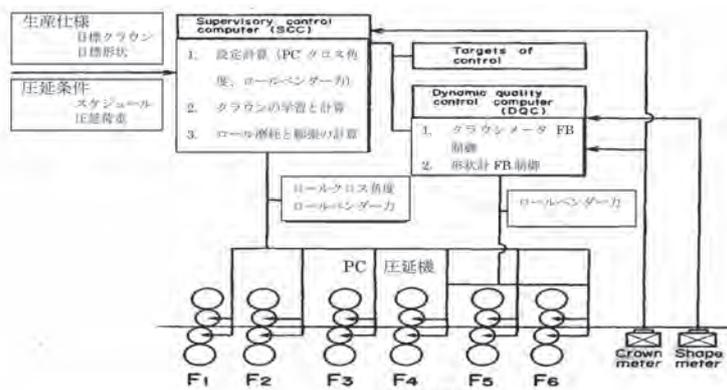
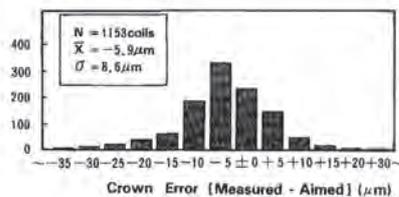


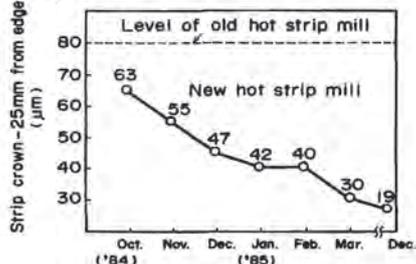
図5.6.7 形状センサの代表例(圧延方向)⁵⁻⁶⁶⁾



(a) 制御の構成



(b) クラウン量の制御の結果



(c) 板クラウン量の推移

図5.6.8 PCミルによる冷延形状制御の一例 新日鉄広畑⁵⁻⁶⁸⁾ 1987

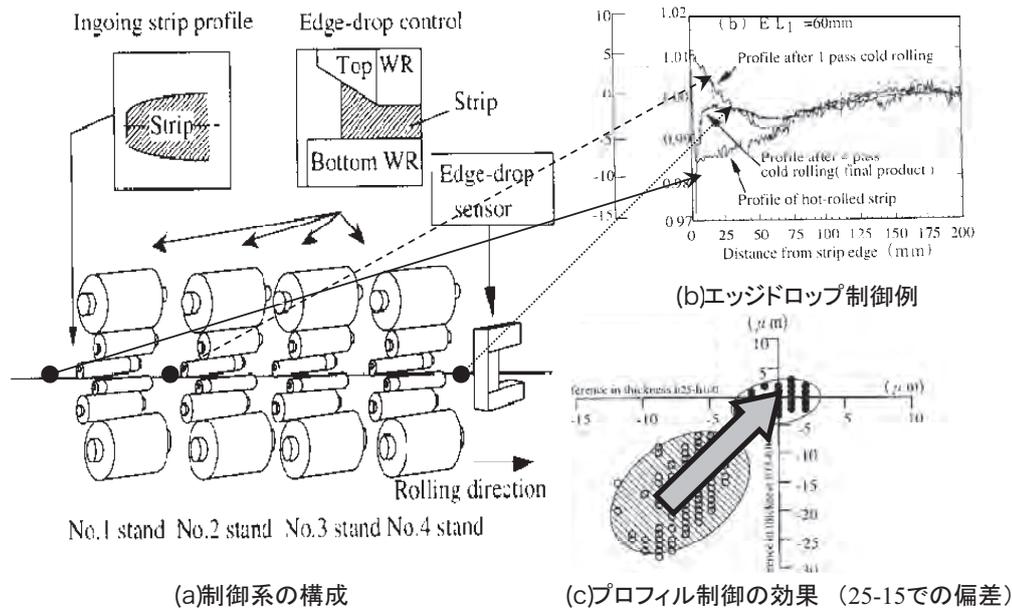


図5.6.9 UCミルによる冷延形状制御の一例(エッジドロップの制御)⁵⁻⁶⁹⁾ 1987

の非効率さを製鉄所の実操業で目視したことによると言う⁵⁻⁴³⁾。

HCミルに8年遅れて開発されたPCミルは、後発メーカーが先発メーカーに対抗して開発に取組んだ結果である⁵⁻⁶²⁾。それまで米国の壁を打ち破ることのできなかった日本メーカーが、完全に米国を凌駕するきっかけになった事例である。

いずれにせよメーカー主導で出発した技術が、日本のユーザの積極的な使い込みの展開により全世界に広がっている。

これらの形状制御技術は圧延操業に大きな自由度を与え、従来は板の圧延順序等に大きな規制があったが、現在はそれが小さいものになっている。

5.7 品質センサとプロセスの見える化

鉄鋼の製品品質に関するセンサは、品質管理に客観性をもたらすこと、およびそれに関わる要員の負荷軽減、あるいはその省力化が開発の動機であった。しかし最近では不良品を早期に見出すことによる上工程への早期フィードバック、すなわち「プロセスの見える化」の側面が注目されてきている。

本節では鋼板表面探傷にポイントをおいて、その発展の経緯と方向の転換について記述する。

5.7.1 鋼板表面傷検査

図5.7.1に戦後すぐのブリキラインでの目視検査の様子を示す。現在でも冷延鋼板は表面の美しさが厳し

く要求され、例えば自動車の外板に用いられるものは肉眼でも判断し難いレベルの検査が要求される。そのため従来は熟練者が1~20m/secで動く鋼帯を肉眼で監視し、厳格材の場合では一旦巻き取られたコイルを検査のため巻き戻し、ゆっくり板を流して欠陥の有無をチェックせざるを得ない状況であった。検査自体の客観性の強化と効率化、熟練作業の平準化、あるいは検査員自身の省力化といった観点から、これらの探傷作業の自動化・機械化は早い時期から計測技術者に課せられた課題であった。



図5.7.1 目視によるブリキの表面検査(1940年代)
八幡製鐵所50年史、p105、より

(1) レーザ光スキャン方式⁵⁻⁷⁰⁾⁵⁻⁷¹⁾

図5.7.2に初期の鋼板表面探傷装置の原理図を示す。1970年代にはブリキ材を対象に、光源に水銀灯を用い

たものが導入された⁵⁻⁷⁰⁾が、1980年代からレーザに変わっていく。当初は被検材表面からの反射光の強度を電気信号化し、その信号の急変から傷の有無を調べるものであった。ついで信号の特徴量から、傷種の弁別を行うようになった。さらに検査員の判断を参考に多変量解析を活用した弁別能の高度化を図っている⁵⁻⁷¹⁾が、油しみや高速ラインでの処理時間の制限、あるいはノイズ等から総合的な傷検出能は65～80%程度であった。

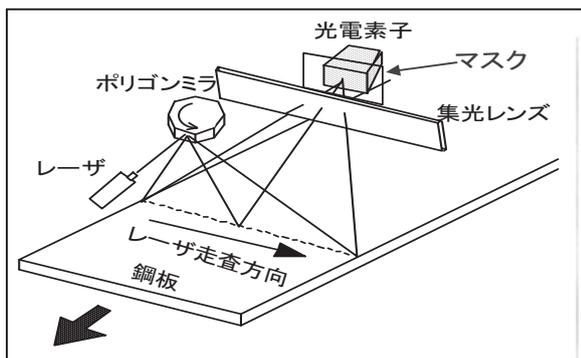


図5.7.2 鋼板表面探傷装置(レーザ方式)の測定原理⁵⁻⁷⁰⁾

(2) マスクによる検出能の改善と傷種の弁別⁵⁻⁷²⁾⁵⁻⁷³⁾

図5.7.2に示したマスクは検出能の改善のために導入されたものであり、(1)レーザ光の持つ回折現象を活用し、回折パターンにより特徴量を抽出する。(2)光電素子の前においたマスクにより、油しみや無害欠陥を取り除く、の2機能を待たしている。標準と無欠陥汚れのパターンをマスクの中に書き込み、これからはみだす

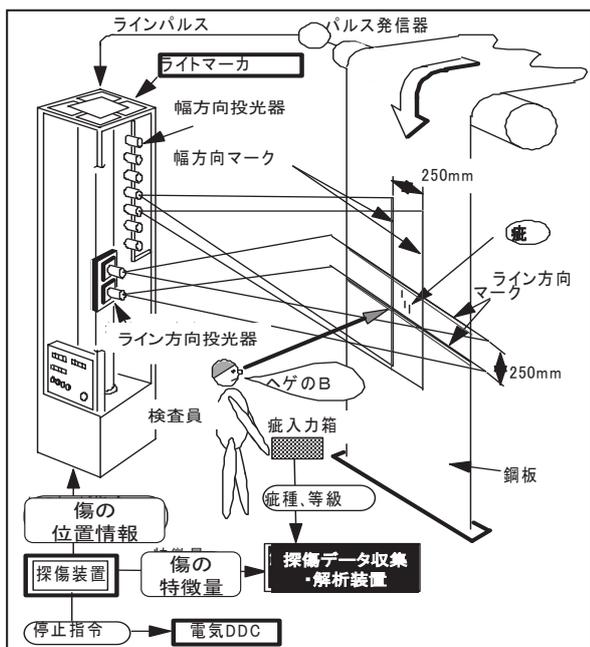


図5.7.3 オンライン表面探傷確性システム⁵⁻⁷⁴⁾

ものだけを有害欠陥情報として抽出する。このマスクを通り抜けた信号に種々の信号処理を行なうことにより、30種類の傷種について目視との一致率が約80%、傷等級判定での一致率は約90%であったと報告されている。ただし設置対象ごとに丁寧な確性が必要であった。

5.7.2 検査設備のオンライン確性⁵⁻⁷⁴⁾

基本的に検査員の判定を正としているため、探傷装置の判定結果を検査員のものと同一化するための確性試験が必要である。通常は探傷装置を通した鋼板を精整ラインで複数の熟練検査員が目視で検査を行い、両検査結果をつき合わせる。500以上になるサンプル材の用意や、10～15人月にもなる熟練検査員の貼付け作業、精整ラインの長期間占有等、非常に負担のかかる仕事である。

図5.7.3はそれを解消するために開発導入したオンライン確性装置である⁵⁻⁷⁴⁾。検査員の常駐する中央操作室に鋼板を垂直に通過させ、上流に設置した探傷装置が傷を見つけた場合、その鋼板上の位置をライトマーカで検査員に示し、傷種を検査員が入力する。傷が見難い場合はラインの減速や停止を指示することもできる。本装置により探傷装置の確性期間が従来の1/5程度までに短縮された。また本装置は確性試験後も、検査性能の日常チェックや向上活動にも使われ、さらに厳格材の探傷装置と検査員との二重チェックにも用いられている。

5.7.3 CCDの利用と情報化^{5-77)~79)}

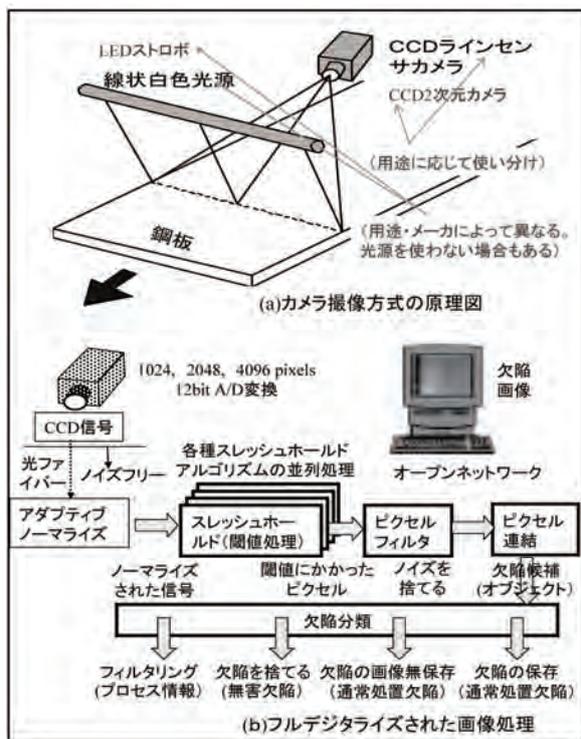


図5.7.4 CCD方式による鋼板表面探傷
(Cognex社カタログ⁵⁻⁸⁰⁾を元に作成)

最近では CCD (Charge Coupled Device) そのものの性能向上や画像処理技術の向上により、図 5.7.4 (a)

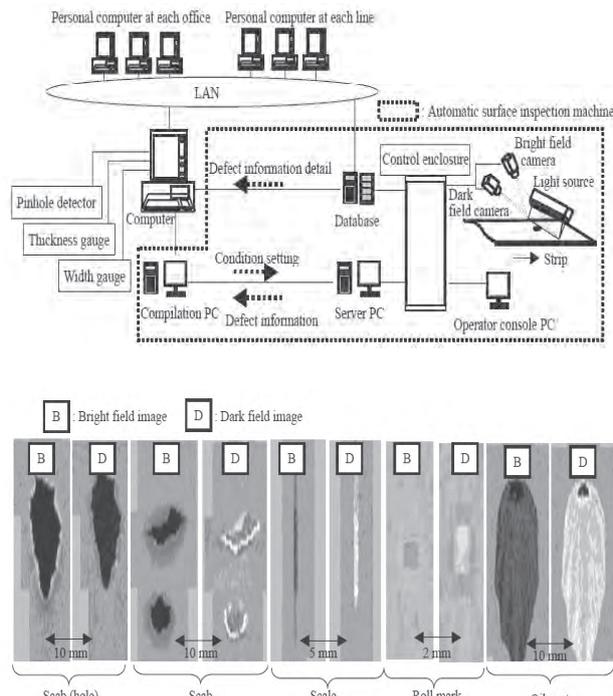


図5.7.5 CCDを用いたぶりき原板の表面検査装置⁵⁻⁷⁷⁾

に原理図を示す CCD カメラ使用の探傷装置が主流になってきている。CCD 方式は基本的に機械的可動部分が存在しないこと、画像信号の伝送に光ケーブルを使用し、ノイズフリーの環境となるため信号の感度を上げられること、(b) 図に示すように画像処理や統計処理等をデジタル化することにより、高速で木目細かい処理が可能となり、従来のアナログ方式に比して有利な点が多い^{5-75) 5-76)}。

図 5.7.5 は世界最高速の冷延ラインでのぶりき原板の CCD による探傷設備である。ライン速度が 1,400 m / 分を越えるため、目視での検査はとても無理であり、またこれらの傷情報のデータベースが品質管理ならびに操業の見える化に寄与しており、この装置の導入により客先でのクレームは 1/20 以下になった⁵⁻⁷⁷⁾。

また、CCD 方式の採用により、上流の工程である熱延や酸洗ラインで、熱間材を対象とした探傷に成功した報告も出てきている⁵⁻⁷⁵⁾。欧州や韓国に強い Parsytec 社の場合、2007 年時点で、熱延で 63、酸洗で 45 の納入実績 (鉄鋼全体で 176) がある⁵⁻⁷⁶⁾。上流の傷情報が安定して得られるようになることにより、図 5.7.6 に示すようなプロセスをまたいだ傷情報のデータベースを作ることができる。熱延加熱炉のシートバーを出発点として、製品コイル毎の表面傷 (Surface Inspection) を Key とした情報シートが作られる。親

コイルが溶接されたり、分割されたり、あるいはスリットされた場合は、親シートも同様に接続・分割され製品用シートをつくり、プロセス情報は継承される。

このシート (データベース) は製品品質保証に用いるだけではなく、軽微な欠陥情報を活用することにより貴重なプロセス情報となる。上流へのフィードバック (欠陥発生に対するアクション) 情報、あるいは下流へのフィードフォワード (欠陥情報に基づいた作業段取りや指示) 情報として使うことができる。

この傷情報の情報処理化により表面探傷技術は新世代に入ったとも言える。そのため画像処理や計算機処理、ならびにオープンシステムに強い 2 メーカーが急速に伸びており、特に海外ではその傾向が著しい。海外での実績は鋼板製品品質への要求レベルが異なるため、同じ土俵で評価できないが、日本においても今後は同じ傾向であるのは間違いない。汎用化技術である CCD に検査を任せ、その情報処理をより強化し、工程をまたぐ「プロセスの見える化」をターゲットとすることである。

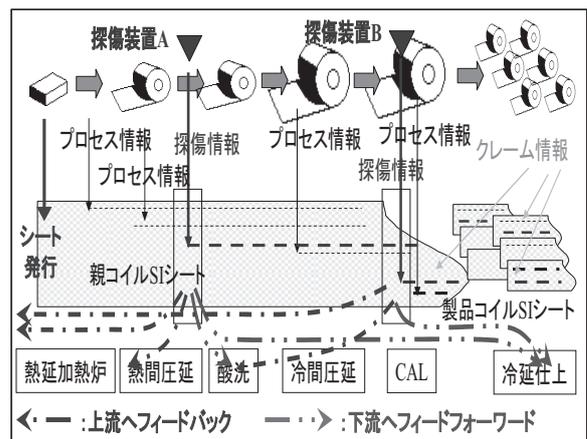


図5.7.6 工程をまたいだ表面傷コイルシートの作成と活用例 (Parsytec社HPビデオ⁵⁻⁷⁶⁾を元に作製)

5.7.4 微細表面特性の検査

耐食性だけでなく表面外観の優劣が厳しく問われるステンレス鋼板、あるいは冷延鋼板をめっきや塗装等により付加価値をさらに高める表面処理工程においては、光沢度、白色性、反射特性、あるいはめっき量や塗油量等、用途に応じて様々なかつ微細な表面特性の管理が必要となる。それらの管理の自動化には夫々の特徴量を抽出するために最適な物理原理の応用が必要となる。代表例⁵⁻⁷⁸⁾を紹介する。図 5.7.7 (a) は溶融亜鉛めっき鋼板の表面性状を正常部、欠陥部 (ロールで押しつぶされたもの)、油や処理液の残っているものの三つについてモデル化したものである。このモ

デルでは通常の反射光を使う方法ではその弁別が難しく、偏光反射を利用することで弁別のための特徴量を得ている。(b) 図は油しみ部、傷部、化学処理液しみ部の測定データを偏光パラメータ (Δ , Ψ) 平面にプロットしたものであるが、三つのグループが同平面上で(この場合は Δ 軸だけでも)弁別されることが判る。

これは傷部(金属表面反射)としみ模様部(誘導体表面反射)の偏光特性が異なることによる。(c) 図はこれらの知見をもとに実機化したものであり、光源は高輝度の直流点灯ランプの光をファイバーで導いて光源シートを形成し、干渉フィルターを通して鋼板表面を透写している。反射光は3チャンネル式の偏光解析装置で捉えて、 Δ - Ψ の偏光情報をオンラインで得ている。

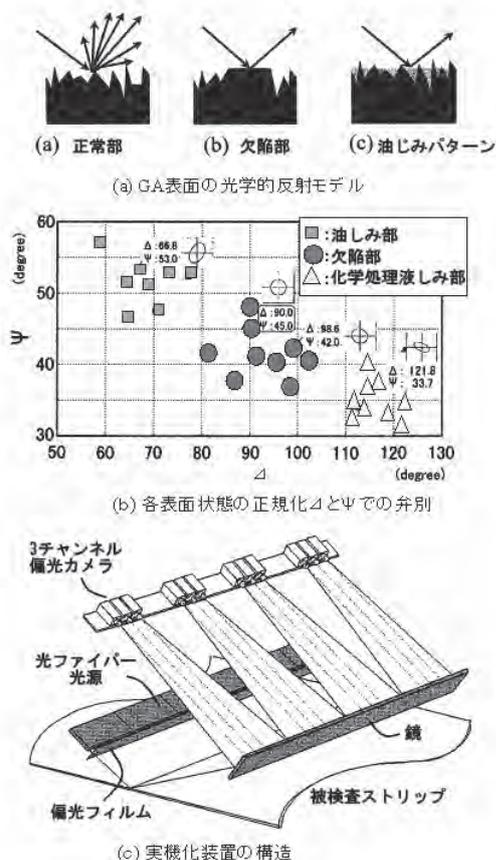


図5.7.7 偏光反射特性利用の微小傷の探傷⁽⁵⁻⁷⁸⁾

5.7.5 圧延工程における内部欠陥の検査

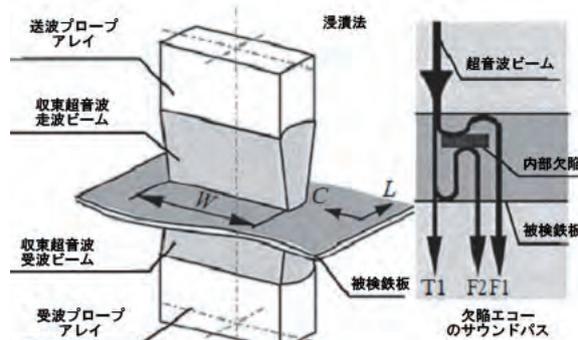
表面欠陥は最終製品の品質保証として必要なものであるが、非金属介在物等の内部欠陥も製品用途によっては重要な管理対象である。

例えば加工時に深絞りが行なわれる缶材では、その欠陥の存在が胴部割れの重大欠陥につながる。ここでは鋼板内部の微小欠陥 ($10^{-3} \sim 10^{-4} \text{mm}^3$ 程度) を管理するためのセンサと情報システムを紹介する。

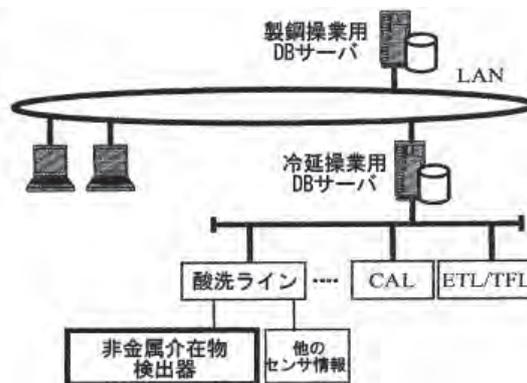
図 5.7.8 は深絞り食缶材の素材である TMBP (tin mill black plate) を冷間圧延の前工程である酸洗工程で検査し、製鋼工程により早いフィードバックを行なおうとするものであり、超音波ラインセンサを用いる⁽⁵⁻⁸¹⁾。図のようにリニアアレイプローブからなる送波プローブと受波プローブとを被検材を挟んで対向させる。送波プローブから 25Mhz の線収束超音波ビームを被検材に送波し、被検材の表面あるいは裏面で各一回反射した欠陥信号(図の F1, F2) を受波プローブで収集する。体積 $5 \times 10^{-4} \text{mm}^3$ 以上の欠陥を 10dB 以上の S/N 比で検出できる。

本装置は当初はサンプル板のオフライン探傷装置として出発したが、現在では酸洗ラインの搬送ラインに浸漬機構を付加して本装置を組み込み、欠陥部へのマーキング装置や (b) に示す情報管理システムを含めて介在物情報オンライン管理設備として工程化している。

介在物情報と前工程の転炉～連続鋳造の操業情報との突合せが各部署の品質担当者でできるようになっており、またラインの日常管理体制も確立されている。まさに介在物情報を媒体とした「プロセスの見える化」である。本システムの導入後、客先での介在物混入率が3年で1/3に改善されている。



(a) リニアアレイ超音波センサ



(b) 製鋼工程へのフィードバック

図5.7.8 酸洗ラインでの介在物探傷装置⁽⁵⁻⁷⁹⁾

5.7.6 評価

オンライン表面検査装置の開発で世界に先駆けしたのは1970年代の日本であったが、1990年代以降はドイツの Parsytec 社や米国の Cognex 社といった傷検査専

門メーカーが世界的に市場を席巻している感がある。初期の開発に関わった日本の鉄鋼人として聊か残念なことであるが、市場原理の至らしめる所として止むを得ない状況なのであろう。

品質センサの場合、一般論として検査対象や測定量に応じてそれぞれに専門性の高い原理が使われており、個々のセンサがそれぞれの世界で孤立しているような印象を受ける。そのため開発されたセンサも、開発者がいなくなると使われなくなるというような事例が散見される。またセンシングの結果がより客観性を持つためにも、同一原理ものが広く使われることが望ましい。研究所などを中心とする開発体制も大事であるが、開発されたものがより普及するためには、他の計装設備の保全担当者でも扱えるような一般化が大事である。表面探傷装置の CCD 化もそういった動きの好例ということもできる。

現在品質センサの体系化の動きがあると聞く。そのようになってはじめて製品の欠陥情報がマイナスの情報として使われるのではなく、「プロセスの見える化」として貴重なプロセス情報となり、製品品質の体系化に貢献するものと思われる。CCD による表面探傷や介在物センサにおける新しい動きに期待したい。

本章の参考文献：

5-1) 堀江、山本、深谷、永野：「計算制御の高炉への導入」、鉄と鋼、51-10、p1745-1747、1965

5-2) 羽田野、美坂、的場、大塚：「溶鉄温度制御のための高炉数式モデル」、鉄と鋼、67-3、p.518-527、1981

5-3) 岡部、福武、高橋、河合、岩村、崎村：「GO-STOP システムによる高炉の安定操業」、川崎製鉄技報、11-1、p.34-43、1979

5-4) 岩村忠昭：「プロセスの状況の分類 - 高炉の炉況診断を例として」、計測と制御、24-11、p.1025-1031、1985

5-5) 田宮、岩村、高橋、崎村、片桐、古内：「千葉第6高炉計装システム」、川崎製鉄技報、10-2・3、p.160-173、1978

5-6) 中島、炭箆、牧、脇元、橋本、酒井、桜井：「人工知能を応用した高炉操業管理エキスパートシステムの開発と応用」、鉄と鋼、73-15、p.2100-2107、1987

5-7) 大塚、田村、松田、小西、門口：「高炉内分布データのパターン認識におけるニューラルネットの応用」、鉄と鋼、77-1、p.79-84、1991

5-8) NIPPON STEEL MONTHLY、2006.5

5-9) 松崎、伊藤、内藤、柿内、磯部、佐々木、内田、大貝：「高炉操業の可視化方法の開発」、新日鉄技報、384、p.89-94、2006

5-10) 茂森、平田、南部：「Just-In-Time モデリングを用いた厚板の幅制御」、JFE 技報、15、p.1-6、2007

5-11) 松崎、西村、篠竹、国友、内藤、杉山：「高炉の数学モデル」、新日鉄技報、384、p.81-88、2006

5-12) 平野、軽部：「革新的な大型高炉改修技術による超短期改修の実現」、一橋ビジネスレビュー、55-2、2007

5-13) 柴田、堀江：「マイクロ波を用いた計測技術」、鉄と鋼、73-9、p.1096-1102、1987

5-14) R. V. William: "Application of Microwave Techniques in the Iron and Steel Industry" ISA Proc. 1967 National Conf. Inst. for Iron and Steel

5-15) 白岩、小林：「マイクロ波による存在検出」、鉄と鋼、56-11、pp.s531、1970

5-16) 曾我、南田、草鹿：「マイクロ波開端共振器による変位測定法」、鉄と鋼、56-11、1970

5-17) 白岩、小林：「マイクロ波による物体検出」、鉄と鋼、59-5、p.659-667、1973

5-18) 曾我、南田、草鹿：「マイクロ波共振器による厚み測定法」、鉄と鋼、59-5、p.629-641、1973

5-19) T. Iwamura, et al: "Improvement in Microwave Level Meter and its Further Applications to Blast Furnace" IMEKO 9TH World Congress, Paper No. 15.2, Berlin, p3-1/6, 1982

5-20) 岩村忠昭：「鉄鋼業の計測制御技術」、計測自動制御学会 CPD 教材シリーズ No.2：「産業界の計測と制御」I 章、p.3-24、2005

5-21) 川田、日下、井上、八谷、宮川、今田：「マイクロ波プロフィール計の開発」、鉄と鋼、'86-S 47、1986

5-22) 福田武幸：「製鉄・製鋼におけるセンサ」、鉄鋼界、60年7月号、1985

5-23) 今井孝：「製鉄・製鋼プロセスを対象としたマイクロ波レベル計の計測技術」、神戸製鋼月報、57-3、2007

5-24) 長棟、手塚：「M 系列信号変調方式マイクロ波レベル計」、計測自動制御学会論文集、27-11、p.1199-1205、1991

5-25) 長棟、手塚、佐藤、金田、菊池：「M 系列信号マイクロ波レベル計とその応用」、鉄と鋼、79-7、p.794-799、1993

5-26) 松本幸一、(株)ニレコ：日本鉄鋼協会技術部会 制御技術部会提出資料、2005年11月

5-27) 谷山巖：「カーボメーターの実験」、鉄と鋼、12、p.1039-1053、1926

5-28) 武隆志：「製鋼用の炭素迅速分析計（カーボメーター）」、計測、2-1、p.4-8、1952

5-29) 土田剛：「製鋼工場の自動化」、私信、1962

5-30) 板岡、斉藤、伊藤、田口：「純酸素転炉計算機制御の対象および装置について」、鉄と鋼、49-10、1963

5-31) 野坂、岩尾：「転炉計算制御と検出端」、鉄と鋼、59-5、p.584-598、1973

5-32) 古茂田、川崎、塩川、羽田：「転炉の新計算機制御システム」、川崎製鉄技報、2-2、p.291-305、1970

5-33) 飯田、江本、難波、武、土田、高橋、小川、中路、増田：「純酸素上吹転炉におけるダイナミックコントロール技術の開発」、川崎製鉄技報、10-4、p.314-327、1978

5-34) 山根、三崎、刀根、岩村、武、坪井：「上底吹転炉総合計装システム」、川崎製鉄技報、19-4、p.228-237、1987

5-35) 佐野、安藤、山田、石黒、中島、山田：「渦流式連铸モールド湯面計の開発と操業への適用」、日本鋼管技報、No.84、P.35-46、1980

5-36) 大矢、児玉、松永、橋本、山内：「連铸巾可変鑄型の操業実績について」、鉄と鋼、77-s 89、1977

- 5-37) 大森、大西、小島、山本：「スラブ連続機における鑄造中の鑄片巾変更について」、鉄と鋼、'77- s 90、1977
- 5-38) 天満、広浜、二宮、大橋、松下、堤：「高速幅変更システムと実施結果」、鉄と鋼、'85- s 149、1985
- 5-39) 浅野、加地、青木、茨木、森脇：「外乱オブザーバを用いた連続機内溶鋼レベル制御」計測自動制御学会論文集、30-7、P.836-844、1994
- 5-40) 松浦、三木、中尾、中井、村上、西田：「連続鑄造機の湯面レベル制御へのH ∞ 制御の適用」、鉄と鋼、81- T 5、1995
- 5-41) 茨木、山根：「製鋼工場における最新のプロセス制御とシステム化技術」、川崎製鉄技報、31-4・3、P.222-228、1999
- 5-42) 歳弘卓也：「寸法制御と精度向上に関する計測制御技術」、鉄と鋼、79-3、p.272-279、1992
- 5-43) 君嶋英彦：「鋼板における寸法制御と精度向上」、鉄と鋼、79-3、p.235-241、1993
- 5-44) 桑野博明：「圧延機圧下系の制御応答性の進展と現状の課題」、鉄と鋼、79-3、p.302-311、1992
- 5-45) 梶原利幸：「高性能冷間圧延機開発の動機について」、日本機械学会誌、84-750、p.486-491、1981
- 5-46) 一柳、木村、長島、赤坂、益田：「圧延機用高性能油圧圧下装置の開発」、日本機械学会誌、88-、1985
- 5-47) 梶原利幸：「高性能板材圧延機の開発と展開」、鉄と鋼、77-5、p.605-612、1991
- 5-48) ソニー マニファクチュアリング システム㈱、精密測定機器総合カタログ、2005
- 5-49) 柳沢、三芳、坪田、菊川、池谷、磯山、旭、馬場：「厚板圧延における新平面形状圧延方法(MAS圧延)」、川崎製鉄技報、11-2、p.159-181、1979
- 5-50) 平井、吉原、井上、吉清、北尾、馬場：「高応答・大流量型油圧圧下装置の操業技術の確立」、川崎製鉄技報、13-3、p.398-409、1981
- 5-51) 片山・他5名：材料とプロセス、74-2、P.512、1988
- 5-52) 片山・他4名：計測自動制御学会第27回学術講演大会、JS13-6、1993
- 5-53) 西田、奥村、上村：「川崎製鉄における圧延板製造プロセス技術の進歩」、川崎製鉄技報、30-3、1998
- 5-54) 木村、布川、本城、高橋：「ホットストリップミルにおけるスタンド間厚み計を用いた板厚制御システムの開発」、鉄と鋼、77-4、p.528-535、1991
- 5-55) 黒田、後藤、門野、花田：「水島No.1冷延タンデムにおける板厚精度向上対策」、鉄と鋼、79-3、p.366-372、1992
- 5-56) 伊勢居、本田、木村、焼田、武衛：「熱延仕上スタンド間鋼板速度計の開発」、鉄と鋼、90-11、p.902-908、2004
- 5-57) (財)省エネルギーセンター、平成14年度省エネルギー優秀事例全国大会、新日本製鐵㈱八幡製鐵所事例より http://www.eccj.or.jp/succase/02/b/c_15.html
- 5-58) 日本鉄鋼協会 共同研究会 圧延理論部会：「板圧延の理論と実際」、第12章、1984
- 5-59) 川崎製鉄・千葉：日本鉄鋼協会共同研究会、第117回制御技術部会、制技117-3-3、1997
- 5-60) 岡本、河野：「板厚延における形状制御」、鉄と鋼、56-11、p.644-648、1970
- 5-61) 中野恒夫：「最近の高機能形状制御圧延機」、鉄と鋼、79-3、p.312-317、1993
- 5-62) 松本、林、平石、小川：「熱延ベアクロスミルの開発とその実機化」、ふえらむ、10-5、p.50-56、2005
- 5-63) 富野、林、宇杉、芳村、橋本：「板クラウン・形状制御ミルの開発」、ふえらむ、10-11、p.22-31、2005
- 5-64) 日本鉄鋼協会編：「鉄鋼便覧 I基礎、III(1)圧延基礎・鋼板、III(2)条鋼・鋼管・圧延共通設備」、丸善、1981
- 5-65) 村上、小原：東芝レビュー、41-3、P.255、1986
- 5-66) 松井、橋：「熱間圧延用平坦度計の開発」、鉄と鋼、72-4、S399、1986
- 5-67) 鎌田征雄：「冷延における平坦度・エッジドロップ制御の実例検討」、日本塑性加工学会、第101回塑性加工工学講座、2006
- 5-68) 辻、島津、平石、福島、加藤、平世：「熱間圧延における高精度厚板・クラウン制御技術の開発」、鉄と鋼、74-3、P.77-84、1988
- 5-69) 蛭田、赤木、水島：「冷間タンデムミルにおける難圧延材の高精度プロフィール制御技術」、川崎製鉄技報、28-2、p.103-107、1996
- 5-70) 川鉄千葉：、日本鉄鋼協会共同研究会、第58回計測部会、1974
- 5-71) 益子羊了：「鉄鋼業における感覚計測の機械化」、計測と制御、23-3、P.317-321、1984
- 5-72) 長尾幸雄：「鋼板用表面検査装置」、テレビジョン学会画像処理・画像応用研究会、資料番号1PA58-4、1982
- 5-73) 深沢・他2名：計測自動制御学会第22回学術講演会、2802、1983
- 5-74) 福高他1名：CAMP-ISIJ、Vol.5、1992
- 5-75) Cognex社ホームページ：
<http://www.cognex.co.jp/vision/vision.asp>
- 5-76) Parsytec社ホームページ：
<http://www.parsytec.de/index.php?id=111>
- 5-77) 佐々木、高田、戸村：「ぶりき原板の表面自動検査装置」、JFE技報、12、2006、P13-16
- 5-78) 風間、杉浦、大重、猪俣、上杉、田口：「鋼板表面欠陥の偏光反射特性の解析とその高速検査技術への応用」、鉄と鋼、90-11、P. S 70-76、2004
- 5-79) 荒谷、戸村、高田：「東日本製鉄所(千葉地区)で構築した絞り再絞り缶(DRD缶)用ぶりき原板介在物検査システム」JFE技報、No.12、P.22-26、2006

6 | まとめと今後の課題

日本の鉄鋼業、および計測・制御を中心とした設備技術について、20世紀後半を中心に技術的な推移についてまとめた。非常に多くの技術の集大成であり、それを個々の技術で系統化するのには非常に難しいが、以下に経緯を単純化した上で試みる。また今後の課題についてはこの報文をまとめる上で感じたことを述べる。

6.1 技術の系統化について

6.1.1 鉄鋼プロセスにおける系統化

図6.1は日本の鉄鋼業の主な動きをこの半世紀における制御系設備技術の進歩との関連でまとめたものである。大型化、長寿命化、連続化そしてプロセスの見える化がKeyであり、そこに計測・制御・電気あるいは機械などの設備技術が大きく寄与している。時間的経緯も考慮した上での系統化は以下になる。

I 戦後の最も大きな転換は臨海一貫総合製鉄所を建設したことであり、原料に縛られることの無い、かつ世界の最新技術の設備を導入することにより、コスト面での国際競争力のある製鉄所ができた。それも鉄鋼6社が競って建設したため、最新技術での競争が展開された。

II 新しい技術としてもたらされたものは熱管理思想を携えた平炉とタンデム化された圧延技術であったが、早期に自分の技術として消化したのは平炉である。

III プロセスそのものの転換は、製鋼工程における「平炉から転炉へ」と「造塊・分塊から連続鑄造へ」の二つだけである。新たな建設機会に恵まれた結果でもあるが、この意義を早期に捉えて、的確な判断のもとに大転換を実行したことが日本の成功の大きな要因である。

IV 平炉を転炉化し、計算機制御やサブランスで近代的な装備を開発した転炉は、さらに複合吹錬を進展させることにより世界を圧倒することになる。併行して分塊・造塊を連続化し、モールドレベル制御や連続鑄対応、そして各種の介在物対応を行なうことにより、HCR、HDR技術に結びつけ、100%連続化に世界で最速に到達する。

V 最上工程である高炉は冷え込み等が頻発し、まだ安定したプロセスでなかったが、「高炉解体調査」や各種のセンサの開発によりプロセスの見える化が進み、ようやく1970年代になり安定化に向かう。

VI そして最後に圧延設備が近代化される。1960年代まではほとんどが米国からの輸入設備・技術に頼っていた状態であったが、ようやく全技術が国産化されるとともに、油圧圧下や形状制御など「日本発」の新しい技術が取り込まれていく。またこの頃高度化していた計算機技術と結びつくことにより日本が独壇場の優越状態を続けることができた。

VII 冷延においても連続焼鈍炉が早い時点に実用化されており、コイルを溶接でつなぐ完全連続圧延、圧延速度の高速化、さらにヘリカルターナ等を活用した完全連続冷延プロセスの相次ぐ誕生など「日本発」の新技术が多く誕生する。

これらの変革の中でプロセスの大型化、連続化、さらにはより連続の範囲を広げる「連続化」が徹底して行なわれているのが日本の特徴である。さらにセンサのIn situ化や操作端の改善による制御性の向上、「プロセスの見える化」に伴う制御方案の高度化、全操業を計算機に取り込む「操業の計算機化」等が実現している。

6.1.2 制御系設備技術における系統化

図6.2に鉄鋼制御系技術の系統図を示す。(b)はシーズ技術であるIT技術との関連を、(c)は海外や学協会の動きをまとめており、共に鉄の制御系技術をタイムリーにドライブしている。

I (d)に示すように海外からの熱管理技術に関する指導が日本の計測・制御技術のきっかけであり、さらに初期の段階においては大学等の公的機関や、共同研究組織の支援があった。大きな流れとしては、「海外からの熱管理思想の導入→官学民をあげた熱管理思想の普及→鉄鋼各社ならびに専門メーカーでの共同研究会を通じた相互啓発→日本発の技術の発信」ということができる。

II その結果として、日本の産業界で計測・制御を引っ張ったのは鉄鋼業である。国や大学においても鉄を現在育てるべき産業との認識のもとに、各種の共同研究を通じての協力や指導があった。また、各種の設備メーカーが自らの力を蓄積する目的での協力があった。

III 計測・制御のシーズ技術の中で最もインパクトの大きいのは、ミニコンのプロコン化による計算機への鉄鋼業ユーザの親近感の醸成である。ソフトウェア

の自社作成、操業そのものの計算機化、製鉄所内情報の細大漏らさない計算機化と膨大なデータベースの作成を早い段階から実現している。

Ⅳ 同じ程度にインパクトの大きかったものは1970年代におけるデジタル化とその延長におけるDCS、PLCの登場である。

それまでのハードウェアによる制御論理や順序制御の実現をソフトウェアおよび実配線を必要のない構成で可能とし、制御・計測上の多くのアイデアを非常に手軽に実現させた。

Ⅴ さらにパソコンの活用とそれによるHMIのシングルウィンドウ化、ならびにEICシステムのオープン化が新しい動きであり、早い実現がもたれるものである。

Ⅵ 新しい制御理論が学際側からの協力により、実際のプロセスに使用され、ロバスト制御などの成功により鉄鋼側に拒否反応が少なくなったことである。

Ⅶ 鉄鋼協会の下部共同研究組織である計測部会が大きく機能した。大学やメーカーも参画し、当初は計測・制御上の問題解決の場であり、やがては鉄鋼各社における開発競争の場となった。実学と言う意味においては学会に参加するよりはるかに有意義な存在であった。

Ⅷ 全体的に見て、計測・制御・電気の鉄鋼における進歩は5つの段階に分けて考えられる。

① 熱管理思想の工業計器による実現の延長であり、まだ構成機器の信頼性が低い時代。

② 1960年代の終わりに製鉄所における階層情報構造が完成するまでであり、E(FA)、I(PA)、C(P/C)がそれぞれに独立して発展している。

③ 1980年代に終わりにより高度な階層情報システムが完成するときまでであり、E、I、Cが有機的につながるようになってきている。

④ 現時点の姿であり、EICがその一体化やオープン化を通じて融合し、より高度化している。

⑤ 操業も計算機化が前提としたものになっている。今後オープン化を前提とした、より新しい階層構造が誕生するものと思われる。

6.2 今までの成功の要因は何か

これらを踏まえて日本の鉄鋼の成功要因を考えてみる。

(1) 一貫臨海製鉄所を基本としたこと。

(2) 常に大規模化を模索し、中途半端な規模の設備に満足しなかったこと。

(3) 欧米と言う良い教師が存在し、熱心かつ勤勉な生徒であり、また教師も全技術の開示を拒まなかった。

(4) 転炉化や連続化のプロセスの変革の意義を正しく捉え、迅速にそれらへの転換を図ったこと。

(5) オイルレス化によりコークス以外のエネルギーの購買を控え、エネルギー回収をはじめとする省エネルギーに取り組んだこと。

(6) 自動車などの鉄鋼ユーザからの強い要求もあり、ハイテンや表面処理鋼板など、高付加価値のある製品に取り組んだこと。

(7) 大学を初めとする公的機関が、鉄を現在育てるべき産業との認識のもとに、各種の共同研究を通じた協力や指導があったこと。

(8) 日本で鉄鋼が技術的高度化を先走る存在であり、各種の設備メーカーが自らの力を蓄積する目的での協力があったこと。

(9) 設備技術者の中で、メーカーとユーザの垣根を越えたコラボレーションがあったこと。

(10) 鉄鋼の中で操業担当と設備担当の間に相互に踏み込んだ強い連携があったこと。

(11) 各鉄鋼メーカーが専門性の強い設備技術集団を持ち、メーカーと互角に渡り合える力を持っていたこと。

(12) 鉄鋼各社の間に良い意味での強調と競争があり、それを深める共同研究会や部会などの組織が機能した。

設備技術者としてこの時期、鉄鋼業に従事していた筆者にとって、これらの事はまさに実感である。5章で説明した具体的課題の実現の中で、それらのいくつかを窺い知る事ができる。紙数の関係で取り上げなかったが、「冷延の連続圧延」でこんなことがある。

冷間圧延の全工程を時間的に1/1000に縮め、歩留まりが倍以上、そして労働生産性が3倍以上になったこの完全連続化は、15年以上の期間をかけた代表的な「日本発」の技術である。これまでに紹介した油圧圧下に始まる各種技術の集大成と言える。しかしその推進のきっかけとなった複数のコイルを溶接でつないで圧延する連続圧延は、入社したばかりの新人のアイデアだと聞く。冷延技術に関する新入社員教育の最後に「コイルの先後端部分に張力がかからず、板厚精度がどうしても悪くなるが良いアイデアはないか」との質問に対し、苦し紛れに「溶接でつなげば…」と答え、その答えを面白いと受け止めた先輩社員がメーカーに図って実現へ進めたということである。

また世界最初のエンドレス圧延は、20世紀最後に日本最新の熱間圧延設備を建設する以上、何らかの記念碑的なものを求めた経営者の熱意が出発点であり、その結果エンドレスのみならず全熱延ラインを僅か3名で操業するという大きな成果に結びついている。

また、1970年代後半の制御装置のDCS化は、我々ユーザにとっても全く従来と異なる技術を導入するわけであり、メーカーにとってもその後の経営を左右しかねない共に大冒険であった。共に今後のDCSの標準をここで作るというような意気込みであり、仕様の打合せが夜10～11時まで「デスマッチ」と称して、とにかく決定するまで続ける。そして驚いたことに、メーカーはそれで帰社してから、具体的設計に落とすメンバーと打合せを行なったと聞く。

6.3 今後の課題

鉄鋼の現場を離れて5年以上を経る筆者にとって、新しい情報も乏しく、大きなことを言える立場ではないが、今回の系統化のレポートを作成して感じたことは以下のとおりである。

(a) まずは昨今の「原料民族主義」を含めた原料の問題である。資源量こそ100年程度は大丈夫そうであるが、300年以上続いたコークス高炉法を見直す時が近いのかも知れない。

(b) 次は技術の飽和の問題である。21世紀に入ってから、これとは言う大規模な新しい技術が見当たらない。いくつかの新しい製造法は提案されているものの、量と言う面では現在の方法に勝る可能性のあるものは見当たらない。

(c) 同様な問題であるが、長寿命化に基づく、技術の陳腐化の問題である。高炉の寿命が短い時は、常に改修があり、それが技術的改革の機会であった。30

年近くも寿命がある場合、入社中に改修を経験できない場合も有りうる。また技術的進歩の機会が少なくなる。

(d) 現在は我が国で開発された技術により、世界的に有利な立場にあるが、その技術は陽に陰に流出しており、いつまでもそれにしがみついている訳にはいかない。実際に海外の鉄鋼技術者のレベルはこの10年で非常に向上しているのが実感である。

(e) 基本的技術に関する理解に若干の心配がある。例えば最近のセンサの信頼性は極めて高くなっている。それが故に計算機に入っている情報を全く疑いもせず操業や解析に用いてしまう傾向があると聞く。例えばオリフィスで流量を測定する場合、オリフィス部分に蓄積する液体があると、当然誤差が大きくなるが、それは差圧発信機の信頼性とは無関係である。

(f) センサや制御モデルは、より高度化するニーズに対応するため専門性の高いものとなる。それはそれで仕方がないが、中途半端な完成度である場合、それに深く携わっている人間でないと保全していけなくなる。専門性が高ければ高いほど完成度が高くなければならない。

(g) 今回の作業において、世の中に報文や論文のデータベースの充実していることは大きな助けであった。ある場合は戦前の論文まで全文閲覧することができる。しかし最近の情報が相対的に不足している印象を受ける。情報の開示が制限されているのかも知れない。適切な調整が必要であると思われる。

(h) 筆者の現役時代の実感として、業務を進める上で大切なのは“Know who”であった。鉄鋼や設備メーカーを問わず、誰と共同に仕事をすれば課題が解決するのかを知っていたし、また知ろうと努めた。効率的な仕事を求められる現在こそ、それがより以上に必要と思われる。

鉄鋼のプロセスおよびその制御系設備技術に関し、

●所在調査(鉄鋼計測・制御 候補): 1～5: 2008年登録済、6: 2009年登録予定

No	名称	資料形体	所在地	製作者	製作年	コメント
1	高炉炉頂用 マイクロ波レベル計 プロフィールメータ	設計図	(株)松島機械研究所	(株)松島機械研究所	1979	開発:川崎製鉄、安川電機。 (本文5.2参照方)
2	高炉炉頂用 マイクロ波レベル計 サウンディングメータ	設計図	(株)松島機械研究所	(株)松島機械研究所	1979	開発:川崎製鉄、安川電機。 (本文5.2参照方)
3	マイクロ波レベル計 溶銑・溶鋼レベル計測用	設計図	(株)松島機械研究所	(株)松島機械研究所	1981	開発:川崎製鉄、安川電機。 (本文5.2参照方)
4	渦流式溶鋼レベル計	量産品	(株)ニレコ	(株)ニレコ	1975	開発:日本鋼管。 (本文5.4参照方)
5	炉内鋼板位置検出器	試作品	(株)ニレコ	(株)ニレコ	2004	開発:ニレコ。 (本文5.2参照方)
6	ステップ漏洩検査装置	量産品	(株)JFEスチール	(株)横河電機	1980	開発:川崎製鉄、横河電機 (本文図4.7(c)参照方)

I 臨海一貫総合、II 平炉と熱管理、III 転炉への転換、IV 連続鑄造への転換、V 高炉の安定化、VI 圧延技術の進歩(油圧、形状等) VII 圧延設備の連続化

(4)鉄鋼プロセスの主な変革		製鉄	製鋼	圧延				
1900	1940	1950	1960	1970	1980	1990	2000	2010
(1)プロセスの転換 (1)大型化、高能力化	15→40年、炉壁補修	3.5→10年、中間補修技術	2000→6700 回炉代					
(2)大型化、高能力化 (1)炭化率率 2.5倍(以上)	15→40年、炉壁補修	3.5→10年、中間補修技術	2000→6700 回炉代					
(3)長寿命化	15→40年、炉壁補修	3.5→10年、中間補修技術	2000→6700 回炉代					
(4)連続化	15→40年、炉壁補修	3.5→10年、中間補修技術	2000→6700 回炉代					
(5)運々繰化	15→40年、炉壁補修	3.5→10年、中間補修技術	2000→6700 回炉代					
(6)高機能化	15→40年、炉壁補修	3.5→10年、中間補修技術	2000→6700 回炉代					
(7)プロセスの見える化	15→40年、炉壁補修	3.5→10年、中間補修技術	2000→6700 回炉代					
(8)制御高精度化	15→40年、炉壁補修	3.5→10年、中間補修技術	2000→6700 回炉代					
(9)操業の計算機化	15→40年、炉壁補修	3.5→10年、中間補修技術	2000→6700 回炉代					
その他	15→40年、炉壁補修	3.5→10年、中間補修技術	2000→6700 回炉代					

国内鉄鋼制御系設備技術力	計測	制御	計算機	電気	制御論	製鋼				圧延				
						1940	1950	1960	1970	1980	1990	2000	2010	
5.1	高炉プロセスの見える化													
5.2	μ波応用の計測システム													
5.3	溶鋼の温度・成分のオンライン測定と転炉終点制御													
5.4	連続鑄造溶鋼レベル測定と制御													
5.5	板厚制御精度の向上、油圧下、In situセンサー													
5.6	鋼板形状の制御													
5.7	品質センサーによる見える化													

図6.1 系統化図1 (鉄鋼プロセスの変革)

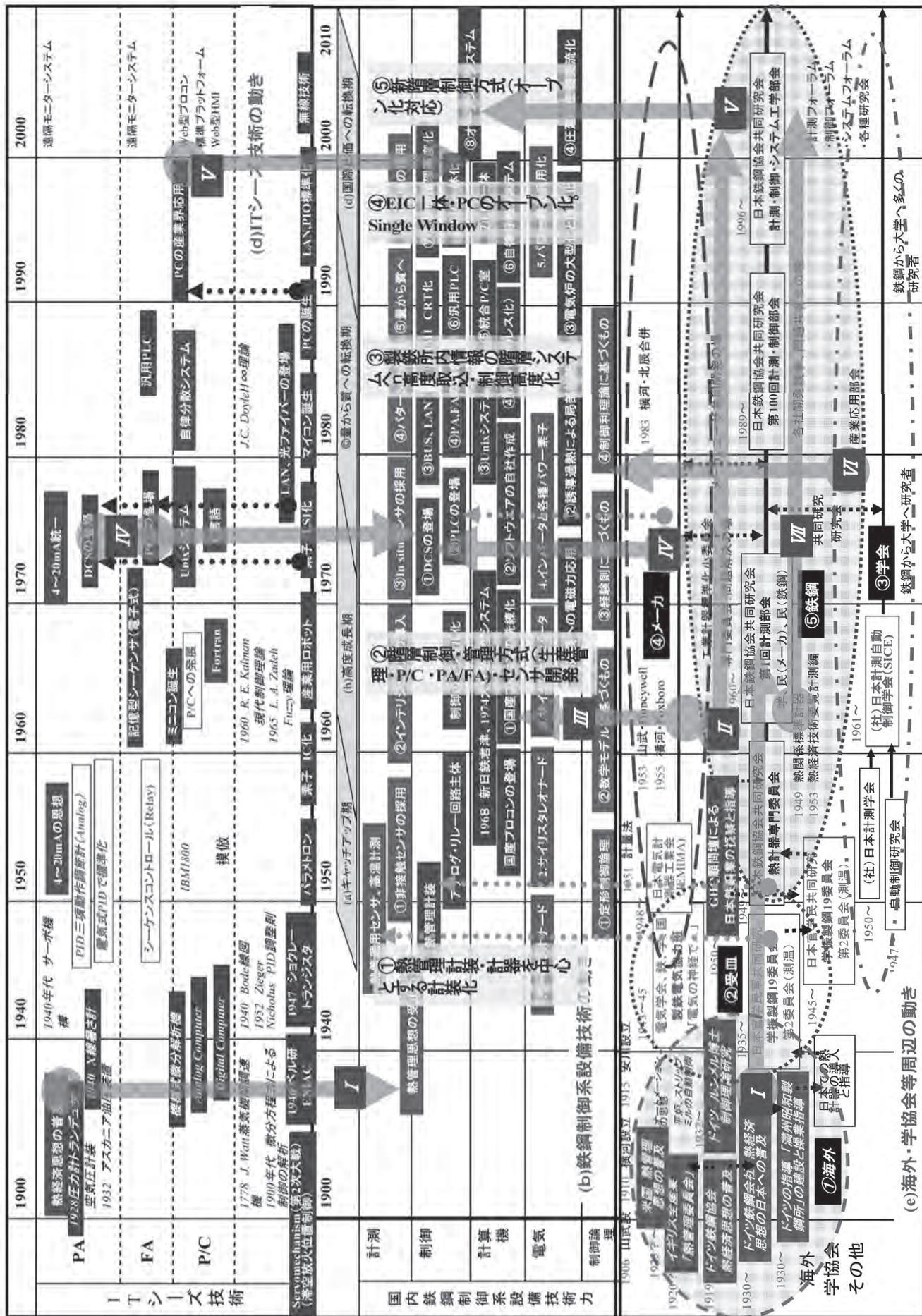


図6.2 系統化図2 (制御系を中心とする設備技術の変革)

7 | おわりに

技術の流れを振り返り、その系統化を試みた。当初は機械技術や熱流体技術にまで踏み込む積りであったが、時間的にも容量的にもとてもその余裕は無かった。計測・制御および電気が主体であり、それも「意あって力足らず」で、もっと紹介すべき技術は存在する。鉄の分野においても条鋼や鋼管、ステンレス鋼板や電磁鋼板、さらには表面処理鋼板などより高度な技術を必要とする部分を省略している。またセンサや制御論理

の開発例も紹介例を絞ってしまっている。別途機会があれば加筆したい。

「温故知新」、技術の経緯を整理し、それを体系的に継承していくことは極めて大事である。現在の鉄鋼の中にもその動きがあると聞く。本稿がいくばくかでもその動きに役立てば幸いである。

●謝辞 作成に当たってお世話になりました以下の方々に厚くお礼を申し上げます（敬称略）。

野坂康雄（元新日鉄株 元東海大学）、土田剛（元川崎製鉄株）、東山尚（元 GSK）、竹腰篤尚（元 NKK）、高橋亮一（大阪大学）、天辰正義（元 JFE 株）、大森克己（日本鉄鋼協会）、浅野一哉（JFE 株）、石川好蔵（JFE 株）、湯浅康弘（JFE 株）、中嶋耕二（株安川電機）、松本幸一（株ニレコ）、重枝浩孝（株松島機械研究所）

● ACRONYMS AND ABBREVIATIONS:

- ACC (Automatic Combustion Control) : 自動燃焼制御
- ACS (Advanced Control System) : IBM のビジコン (+ ミニコン) でプロセスを制御するシステム名
- AGC (Automatic Gauge Control) : 鋼板厚さ制御
- AI (Artificial Intelligence) : 人工知能
- BISRA (British Iron Steel Research Association) : 英国鉄鋼研究所
- CCD (Charge Coupled Device) : デジタルカメラなどの撮像素子
- CDQ (Coke Dry Quench) : コークスの乾式消化設備
- CPC (Center Position Control) : 鋼板の連続炉等における中心位置制御 (EPC は端面の位置制御)
- CAPL (Continuous Annealing and Processing Line) : 冷延鋼板連続焼鈍装置
- CRT (Cathode Ray Tube) : ブラウン管 最近は液晶ディスプレイ
- DB (Data Base) : 計算機に蓄えたデータ群
- DCS (Distributed Control System) : デジタル化された総合集中計装システム PA の主要制御装置
- DDC (Digital Direct Control) : 計算機等によるデジタル制御システム
- EIC (Electronic Instrumentation Computer) : 電気、計装、計算機
- Ethernet : コンピュータネットワークの規格のひとつ
- EMC (Electro Magnetic Casting) : 電磁鋳造技術
- EMB (Electro Magnetic) : 電磁式モールド鋼浴レベルセンサ
- EMBr (Electro-Magnetic Break) モールド内電磁ブレーキ
- EMS (In-mold Electro-Magnetic Stirrer) : 溶鋼攪拌装置
- ES (Expert System) : エキスパートシステム AI による推論システム
- EWS (Engineering Work Station) : DCS の全体管理システム
- FA (Factory Automation) : 工場の制御システム (順序制御主体)
- FIPL (Fully Integrated cold rolling Processing Line) : 完全連続冷薄製造設備
- FM-CW (Frequency Modulated- Continuous Wave) : μ 波による距離測定的方式 周波数変調連続波方式
- Fuzzy 論理 : メンバシップ関数による Fuzzy 推論を用いた ES の一つ。
- GTO (Gate Turn Off) : 電気インバータの大容量素子の一つ
- HC (High Crown control) ミル : 形状制御ミル (日立製作所製)
- HCR (Hot Charge Rolling) : 連铸から加熱炉に直接装入
- HDR (Hot Direct Rolling) : 連铸から加熱炉を経ず直接圧延
- HMI (Human Machine Interface) : 計測・制御装置と操業者・解析者とのインターフェース (最近は CRT が多い)

- IEGT (Injection Enhanced Gate Transistor) : 電気インバータの大容量素子の一つ (汎用化されている)
- IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) : 同上
- In situ 計測 : その場計測 目的計測
- IT (information technology) : 情報技術
- Just in Time : Data Base の処理方法
- LAN (Local Area Network) : 構内情報通信網 コンピュータネットワーク
- LD (Linz Donawitz) 転炉 : 純酸素上吹転炉
- MAS (Mizushima Automatic plan view pattern control System) 圧延 : 厚板の平面形状制御
- MPX : (多重処理) 計算機の OS の一つ
- OG 化 : 転炉の排ガスを燃焼させず回収する日本発の技術
- OS (Operating System) : 計算機の基本ソフト
- PA (Process Automation) : プロセスの制御システム (計測を含む)
- P/C (Process Computer) : プロセス制御用計算機
- PC (Personnel Computer) : パソコン パーソナルコンピュータ
- PC (Pair Cross) ミル : 形状制御ミルの一つ (三菱重工)
- PID (Proportional, Integral, Derivative) : 比例動作、積分動作、微分動作を組み合わせた PID 制御 (制御の基本形)
- PLC (Programmable Logic Controller) : 順序制御を内蔵したソフトウェアで制御する装置 最近はアナログ量も扱える FA の主要制御装置
- POL (Problem Oriented Language) : 計算機問題向き言語、Fill in the blank 方式が多い。
- PWM (Pulse Width Modulation) : 電気 パルスの幅を変調
- RADAR (Radio Detection And Ranging) : 電磁波を対象物に照射し、対象物の距離や方向を測定
- QDT (Quick Direct Tapping) : サブランス測定だけで判断し出鋼する転炉の操業方法。
- Q-Bop : 酸素底吹き転炉 US スティールで開発
- TMBP (Tin Mill Black Plate) : ぶりき原板
- TSX : (単一処理) 計算機の OS の一つ
- UC (Universal Crown control) ミル : 形状制御ミル (HC ミルの発展形)
- UHP (Ultra High Power) 操業 : 電気炉での超大電力操業
- μ -CPU (Micro Central Processing Unit) : マイクロコンピュータ
- Wäremestelle : 熱管理

国立科学博物館 技術の系統化調査報告 第13集

平成21(2009)年5月29日

- 編集 独立行政法人 国立科学博物館
産業技術史資料情報センター
(担当：コーディネイト・エディット 永田宇征、エディット 大倉敏彦・久保田稔男)
- 発行 独立行政法人 国立科学博物館
〒110-8718 東京都台東区上野公園 7-20
TEL：03-3822-0111
- デザイン・印刷 株式会社ジェイ・スパーク