

# 1 貨車の技術発達系統化調査

## A Systematic Survey of Technological Development of Wagons

荒井 貞夫  
Sadao Arai

### ■ 要旨

日本の鉄道による貨物輸送は明治 6 年（1873）9 月に開始された。それは新橋～横浜間に最初の鉄道が 28.8km 開通した 1 年後のことであった。貨物輸送に使われた機関車 4 両も貨車 75 両も、イギリスから輸入したものである。明治初期の貨車は 5～6 トン積の小型のもので、速度も 40～50km/h と遅かった。大正時代には 10 トン積から 15 トン積が実現し、ブレーキは真空ブレーキから自動空気ブレーキが導入されるようになった。連結器もそれまでの小型のネジリンク式から、強固な自動連結器に取り替えられた。戦後、昭和 20（1945）年代が終わるころには、2軸車の速度は 65km/h から 75km/h に向上した。昭和 30（1955）年代に入ると荷役の合理化に適した物資別適合貨車が開発され、ボギー車の荷重は 30～35 トン積に、速度も 85km/h～95km/h に向上した。今日の主役であるコンテナ輸送の時代になると 40～48 トン積に大型化され、速度は 110km/h に向上した。

貨車は速度を上げれば横揺れや蛇行動が発生し脱線する危険がある。車両の大きさや総重量、重心高さなどの制限がある中で、荷重を増やすには車体を軽量化しなければならない。貨車の大型化・高速化を実現したのは、鉄道は経験工学・安全工学の積み重ねといわれる中で、車体の軽量化のみならず走り装置やブレーキ装置、連結器装置など貨車を構成する基本装置技術の改良、開発が積み重ねられていったからである。

鉄道創業の翌年から今日まで、貨物輸送 135 年間の貨車技術発達の本質は何であったかを追及していくと、それは車両限界・軸重・車両総重量・重心高さ制限などの設計条件の範囲内で、1 トンでも多くの貨物を運ぶための荷重の増加、効率的な荷役に適した車両構造や速度向上であり、そして何よりも優先されるのは、安全走行性能の確保であったと言える。本稿は近代日本が歩んだ歴史を縦系に、近代日本の先駆けとなった鉄道輸送の歴史をたどりながら、その中の貨物輸送・貨車の技術発達を取り上げたものである。

鉄道は、一時は斜陽産業といわれ、中でも貨物輸送は国鉄赤字の元凶と責められた。しかし、近年、トラックから貨車による貨物輸送への転換は、二酸化炭素削減・地球環境保護対策の重要な解決策の一つとして見直されつつあり、貨車の重要性が評価されている。

1 トンの貨物を 1km 輸送する際に排出される二酸化炭素は、トラックで 153 グラム、内航海運で 38 グラム、それが鉄道では 21 グラムで、鉄道はトラックの 7 分の 1 という低さである。これが今日、鉄道が環境に適した輸送機関であると評価されつつある所以である。

新幹線電車やブルートレインなどいつも脚光を浴びている華やかなものは、多くの写真集、解説書や雑誌でとりあげられているが、地味な貨車について調査・研究した報告は少ない。多くの貨物列車は夜中や早朝に客電車のダイヤの間をぬって走っている。地味であるが私たちの暮らしや多くの産業を支える貨車は、旅客車と同じように重要な存在である。

本調査では貨車について次のテーマに焦点を当てて調査・研究した。

- \* 日本の鉄道による貨物輸送の始まりと貨車構造発達の歴史調査
- \* 日本の高度経済成長や重厚長大産業の発展を裏方で支えて活躍してきた貨車がどのように大型化され・速度向上を可能にしたのか
- \* 走り装置やブレーキ装置、連結器装置など貨車を構成する基本装置がどのように進化したのか
- \* ライバルメーカーとの技術競争、価格競争の結果生まれたフレームレス大型石油タンク車、マイナス 162℃ の LNG タンク車、48 個の車輪で支える 240 トン積大物車や鉄道車両業界が一丸となって開発した LP ガス

タンク車などの私有貨車がいかにして開発されたのか

\* 21 世紀に入って新幹線電車輸出を成し遂げた蔭には、多くの鉄道車両輸出や、現地国産化協力など海外市場開拓の足がかりとなった貨車の技術があった。貨車の輸出はどのようにして成功したのか

最後にそれらの調査結果を織り込んで貨車技術発達を系統化した。後世に残すべき登録作業では現存する価値ある貨車を候補資料に選定した。巻末には主要な貨車の開発系統図、貨車・貨物輸送 135 年の歴史などを付した。

## ■ Abstract

Railway freight transportation service in Japan was inaugurated in September 1873. It was just one year after the opening of passenger service on the 28.8 km route between Shimbashi station in Tokyo and Yokohama station. Four sets of steam locomotives and 75 freight wagons were imported from the United Kingdom. The loading capacity of the two-axle wagons was 5 to 6 tons and the running speed was only 40~50 km/h. Around 1914, loading capacity was increased to 10~15 tons.

An automatic air brake system for wagons instead of a vacuum brake system was introduced from 1919 to 1933. On 14 July 1925, the coupling devices of more than 60,000 wagons were changed from screw-buffer type to automatic coupler within just one day. After the Second World War, the running speed of two-axle wagons was increased from 65 km/h to 75 km/h by the adoption of a double-link suspension device in 1952. In the beginning of the 1960s, Japan's economy had annual growth rates of more than 10% and transport demand also grew very rapidly. Many purpose-built wagons were introduced and the loading capacity of bogie wagons was increased to 30~35 tons and the operation speed of freight trains were raised to 85~95 km/h. As for container transport, which has become a mainstream type of rail freight service, loading capacity of the wagons increased to 40~48 tons and operation speed rose to 110 km/h.

When the running speed of a freight train exceeds 65 km/h, it may be at risk for derailment because of the increase of rolling and hunting (a twisting side to side movement). To increase loading capacity, it is essential to reduce the tare weight of the car body, but there were many restricting design factors such as car body dimension, gross weight, and height of the center of gravity, which needed to be taken into consideration in design the wagons. Increased knowledge about empirical and safety engineering led to large car bodies and faster speeds of the wagons. The new technology enabled not only the development of light-weight car bodies but also of running gear, bogies, brake systems and coupling devices.

The key problem that spurred on technical development of wagons in the 136 years since the start of the railway industry in Japan have been demands for increased pay loads, higher running speeds, and the development of optimum car body design. Fulfilling these demands has meant coping with limiting conditions like loading gauge, axle load, gross weight, and center of gravity, all while keeping wagons running safety.

This report describes the history of the technological development of wagons and freight transportation that led to the industrialization of Japan in the context of Japan's history since the Meiji era.

It is said that railway transportation was a declining industry in the 1970s and that freight service caused the Japanese National Railways to operate at a deficit. However, recent years have seen a strong trend toward reevaluating the use of railways with the aim of decreasing carbon dioxide emission. Train transport is considered a global environmental solution because the change from truck service to railway service is one of very important way to reduce carbon dioxides (CO<sub>2</sub>) emissions. Freight service and wagons are recognized and evaluated highly as a possible environmental solution. For instance, to transportation one ton of cargo for one km, the CO<sub>2</sub> emission is 153 grams by truck or 38 grams by coastal ship; however, it is only 21 grams by railway. Railway transportation has a very low volume CO<sub>2</sub> emission. It creates only 1/7 the emissions of truck transport, which is why the railway is evaluated as the best mode of transportation for protecting the environment.

There are various books, literature and magazines spotlighting Shinkansen high speed trains, the "Blue Train" sleeping car express, and commuter trains. However, freight wagons get very little such attention. Most of freight trains and wagons operate in the middle of the night or early in the morning so as not to disturb for passenger trains. However, they are indispensable for our daily life and industries in Japan.

This survey research focuses on the following main points about wagons:

- The history of freight transportation and technological development of wagon construction in Japan
- The increase of both the loading capacity and operating speed of wagons during periods of fast growth of the economy and of heavy industry in Japan

- The development and progress of key elements of freight wagons, such as running gear, bogies, brake equipment, and coupling devices
- The development of privately owned wagons, such as large oil tank wagons, LNG tank wagons for transport of LNG at minus 162°C, and huge 48-wheeled, 240 ton payload wagon with severe price and technical competition between rolling stock manufactures. At the same time, the development of LP gas tank wagons which were made with collaboration among all rolling stock manufacturers
- The success of recent exports of high-speed trains to Taiwan, China, and the United Kingdom achieved based on wagon export experience and technical collaboration on domestic production of wagons in foreign countries from the late 1950s to the 1980s.

The appendix presents diagrams showing the history of technological developments of the major wagons types along with speed, loading capacity and key components.

## ■ Contents

1 はじめに	3
2 貨車一般	5
3 明治から現代までの貨車の歩み	9
4 主要な貨車の構造と技術発達	27
5 貨車の装置別技術発達	39
6 私有貨車の技術発達	51
7 貨車技術による国際貢献	65
8 貨車の技術系統化と今後の課題・あとがき・謝辞	69
付属資料	72
①貨車の技術開発系統図	
②貨車 135 年の歴史・代表車輛と技術車輛	
③貨車登録候補一覧（実在保存・使用中の貨車 9 件）	

# 2 産業用大型ガスタービンの技術系統化調査

Historical Development of Industrial Large Gas Turbine

池上 壽和  
Toshikazu Ikegami

## ■ 要旨

ジェームス・ワット（James Watt、イギリス）が最初の商用蒸気機関を開発してから 15 年後の 1791 年、同じイギリス人のジョン・バーバー（John Barber）によって考案されたガスタービンは、現代のガスタービンの本質的な特徴を含むものであった。しかし、当時の技術でこれを機関として実現することは困難であり、ガスタービンが有効出力を発生するまでには、それから約百年の歳月を要することとなる。20 世紀初頭、ようやく有効出力を発生できるレベルにまで達したガスタービンは、航空分野での高速流体力学の発達の恩恵を受け、急速に発展し、1939 年には世界初のガスタービン発電所が誕生した。

わが国におけるガスタービンの研究は、軍による航空機用ジェットエンジンの開発が先行していた。そして、1945 年 8 月には、国産ジェットエンジンによる初の推進飛行に成功した。しかし、その直後に終戦を迎えたため、ジェットエンジンの開発は中断を余儀なくされる。終戦により航空用ガスタービンの研究の道は閉ざされたが、航空用と共通部分の多い陸船用ガスタービンの研究は進められ、1949 年には 2,000 馬力ガスタービンの試験運転に成功した。

1950 年代前半、国内各社はこぞってガスタービンの開発を進め、様々な試作機が誕生した。これらの機種には、空気圧縮機やタービンの要素効率の不足をサイクル上の工夫で補い、ガスタービン総合熱効率の改善を図る努力がなされている。しかし、純国産ガスタービンは、1959（昭和 34）年、自家用ガスタービン発電所として認可された実例があるのみであった。1950 年代終盤から 1960 年代初めにかけ、国内各社は先行する欧米諸国のガスタービンメーカーと技術提携を結び、シンプルサイクルで性能的にも優れた商用ガスタービンの製造を開始し、本格的に市場に投入した。

1960 年前後、日本経済は飛躍的な成長を遂げた。電気製品が一般家庭にも急速に普及し、1965 年頃からは冷房の普及などによって、最大電力の夏季ピークはますます先鋭化した。火力発電所や原子力発電所に比べて、建設期間が短く、起動停止の容易なガスタービン発電所の建設が各地で行われ、最新鋭の大型ガスタービンが導入された。この時期は、無冷却のタービン翼を使用する「第一世代ガスタービン」から、強制空冷翼を使用する「第二世代ガスタービン」への移行期でもある。現在、第一線で活躍する高性能・高効率ガスタービンは、この時期に誕生した第二世代ガスタービンに改良が加えられ進化した機種が多い。

1980 年代になると、複合サイクル発電時代を迎える。複合サイクル発電とは、ガスタービンによる発電とその排熱を回収して発生させた蒸気を利用して蒸気タービンでさらに発電するシステムで、火力発電の主流であった汽力発電システムを大幅に上回る熱効率が達成され、複合サイクル発電所は一気にその数を増した。そして、大型ガスタービンは、蒸気タービンに代わって火力発電の主機の役割を担うこととなり、市場のニーズに応え、さらなる性能向上が図られていった。

1978 年にスタートした「高効率ガスタービン」プロジェクトでは、国立試験研究機関と民間企業 14 社が設立した高効率ガスタービン技術研究組合が、総合熱効率 55%LHV 以上を目指す 100MW 級ガスタービンの開発に挑んだ。10 年にわたるこのプロジェクトを通じて取得した各ガスタービンメーカーの高度な技術知識の蓄積は、その後、わが国独自の「第三世代ガスタービン」を生み出す原動力ともなった。

1990 年代に入り、1,300°C 級から 1,500°C 級「第四世代ガスタービン」へと急速に性能向上が図られた。その発展は、超耐熱合金の開発や結晶制御技術の適用による材料強度の向上、タービン翼に対する高度な冷却技術の適用、世界に先駆けて実用化に成功した予混合燃焼技術の継続的な改良などに支えられるところが大きい。そして、2007 年には、国産 1,500°C 級大型ガスタービンによる複合サイクル発電所が世界最高水準の熱効率 59%LHV を達成した。

巻末に、今回の系統化調査でリストアップしたエポックメイキングな技術、キーテクノロジー及び周辺技術が時代の流れの中で、相互にどのような関係にあり、一つの技術の源流となったものは何であったかを明らかにした技術の系譜を「産業用大型ガスタービン技術の系統図」として示した。さらに、巻末付録では、本編に採り上げることはできなかったが、技術史に足跡を残すガスタービンを紹介する。

## ■ Abstract

In 1791, fifteen years after James Watt introduced his first commercial steam engine, John Barber introduced a gas turbine that included the essential characteristics of a modern gas turbine. However, it was difficult to realize with the state of the art technologies at that time, and it took nearly a century to generate an available power output. In the beginning of the 20th century, as a result of rapid improvement in high-speed aeronautic fluid dynamics, gas turbine technology had reached a level that enabled the world's first gas turbine power plant to be built and to generate electricity in 1939.

Japan's gas turbine research was focused on developing a jet engine for aviation applications. In August 1945, Japan's first flight using a domestic jet engine succeeded. However, when World War II ended, jet engine research was terminated. Although jet engine research was discontinued, gas turbine research for land and sea applications continued. In 1949, Japan successfully test operated a 2,000-HP industrial gas turbine.

In the first half of 1950, many domestic manufacturers started to develop prototype gas turbines and various gas turbines were created. This work mainly focused on improving the gas turbine heat cycle to compensate for the lack of efficiency of compressors and turbines. In 1959, a wholly domestic gas turbine was accepted for use only in private power plants. From the late 1950s to the beginning of 1960, domestic gas turbine suppliers partnered with the U.S. and European countries to manufacture simple cycle industrial gas turbines for the market.

In the beginning of the 1960s, the Japanese economy made an extraordinary improvement. Electrical appliances became readily available in most standard homes, and, in 1965, the spread of air conditioners made electricity demand peak in the summer. Since the gas turbine power plant had a short construction period and was easy to start and shut down, many large, advanced gas turbine power plants were built as peak-savers. It was a transition period from first generation gas turbines that used a non-cooling turbine blade to second generation gas turbines that used as forced air cooling turbine blade. The high performance and high efficiency gas turbines now operating in the market are improved and refined versions of the second generation gas turbines.

In 1980, the combined cycle era began. A combined cycle power plant is a power plant system that produces electricity from gas turbines and uses its waste gas to generate steam to produce electricity from a steam turbine. Its efficiency exceeded that of the conventional power plants that were most popular at that time and the number of combined cycle power plants increased tremendously. Eventually large gas turbines begin to replace conventional steam turbine power plants and their efficiency increased in line with the market needs.

In 1978, the "Moonlight Project" started and the Engineering Research Association for Advanced Gas Turbines was formed by 6 national research institutes along with 14 companies striving to develop a 100-MW gas turbine that could achieve more than 55%LHV combined cycle efficiency. The combination of the advanced technologies of each gas turbine manufacturer throughout the 10-year project laid the foundation of Japan's unique third generation gas turbines.

In 1990, a fourth generation gas turbine improved performance rapidly with a firing temperature increased from 1,300 to 1,500°C. The improvements were made possible by an increase of material strength due to the development of super alloys and the adoption of crystal formation control, advanced turbine blade cooling technology, and continuing improvements of dry low-NOx combustor, which was the world's first proven premix fuel gas firing technology. In 2007, the world's highest efficiency combined cycle power plant of 59%LHV was achieved by a domestic 1,500°C-class gas turbine.

## ■ Contents

1. はじめに	79
2. ガスタービンの基本	81
3. 第一世代から第二世代へ：誕生から独り立ち	85
4. 複合サイクル発電時代	98
5. 第三世代：高性能・高効率ガスタービン	111
6. ガスタービンの発展を支える要素技術	122
7. 第四世代：更なる高効率化	134
8. まとめと考察	139
技術の系統化	
付録	

# 3 フェライト技術の系統化

Historical Development of Ferrite Technologies

一ノ瀬 昇  
Noboru Ichinose

## ■ 要旨

セラミックスは、古代からの天然原料を成形、焼成した陶磁器に代表される伝統的なセラミックスと近年開発された精選された原料を用い、細かく制御された製造方法により得られるファインセラミックスに大別される。ファインセラミックスは要求される機能に応じてますます高度化・高機能化され、エレクトロニクスセラミックスはその代表的なものである。

エレクトロニクスセラミックスは、セラミックスのもつ磁性、絶縁性、誘電性、圧電性、半導性が優れており、電子機器産業分野で幅広く活用されている。本調査ではこれらエレクトロニクスセラミックスの中から磁性を有するフェライトを取り上げ、電子機器製品に応用される基盤技術、エポックメイキング技術を中心に、当該技術発展の歴史をサーベイし、その技術の系統化を図ることを目的としている。

フェライトが本格的に工業化されてから約 75 年が過ぎようとしている。この間、1950 年から 1980 年迄の 30 年間は、フェライトの学問と工業が世界各国で飛躍的に発展したフェライトの黄金時代であった。現在でもフェライトの生産はそこそこ行われているが、生産量では中国、韓国、インドなどに追い抜かれつつあり、日本の優位性が脅かされている。日本発信のフェライトが今後ともその地位を維持するためには、産官学による一層のたゆまぬ開発努力が必要とされている。

## ■ Abstract

Usually ceramics are including two categories of traditional and fine ceramics. Traditional ceramics such as cement, porcelain, glass and refractory are prepared using natural resources. On the other hand, fine ceramics are obtained by highly refined raw material, rigorously controlled composition and strictly regulated forming and sintering.

Electronic ceramics are typical fine ceramics and defined as ceramics which display magnetic, insulating, dielectric, piezoelectric and semi-conducting properties which are useful in the production of electronic devices.

Among electronic ceramics, ferrites are chosen because they are invented in 1932 by two Japanese scientists and have fundamental and epoch making technologies in electronic device applications. This article provides a comprehensive survey of the historical development of the science and technology of ferrite materials as well as applications of the ferrites.

In 75 years since ferrites were developed, Japan could lead the world in production and technology. Especially, the public attention was thoroughly aroused as to the scientific and technological importance of ferrites after the 1950s to 1980s, because the new applications such as radio, television, carrier telephony, computer circuitry and microwave devices were rapidly expanding.

Recently, the production of ferrites in China, Korea and India are increasing year by year, so it may be difficult for Japanese companies to maintain their advantages in the ferrite industry. In order to keep them, further continuing and persistent efforts covering government, industry and academy are strongly required.

## ■ Contents

1. はじめに	149
2. フェライトの概要	150
3. フェライトの基礎	155
4. フェライトの製造法	158
5. 各種フェライト材料	164
6. フェライトの応用	169
7. フェライトの特殊な応用	176
8. フェライトの技術発展と高機能化	184
9. フェライト技術の系統化	205
10. 考察とまとめ	208
11. 登録資料候補一覧	209
付録 JIS 用語集 (JIS R 1600)	210

# 4 チタン製造技術の系統化

## Historical Development of Titanium Production Technologies

伊藤 喜昌  
Yoshimasa Ito

### ■ 要旨

チタンは元素として発見されたのは 19 世紀初頭ではあったが、天然に存在する酸化物を主体とする鉱石  $\text{TiFeO}_2$  からチタンを抽出するためには精錬のための化学的基礎データならびに高度な精錬技術とそれに関連する真空技術、不活性ガス精製技術、高圧容器製造などが完成される第二次世界大戦後を待つ必要があった。

チタンの鉱石は全世界に幅広く分布しており、日本にも古くは砂鉄を採取して玉鋼（日本刀の原料）を作っていた東北、鳥取地区などでは 30% 程度含有するものが戦前の鋼研究で有害な元素として認識されていた。チタンの精錬は 1930 年代ヨーロッパでクロール博士が基礎技術を開発し、アメリカに移って戦後工業化に成功していた。日本は第二次大戦後の混乱期にもかかわらずチタンの将来性をいち早く感じ取り、京都大学、大阪大学、神戸製鋼で共同研究が始められた。その後、通産省の行政指導もあり精錬については大阪チタニウム(株)を中心に進められ、次いで創業した東邦チタニウム(株)の二社に集約された。米クラーク博士の来日を受け、二社とも技術的先進性の先鞭を付けるきっかけとなった。昭和 26 年 (1951 年) より日本において金属チタンの原料であるスポンジチタンの製造が開始された。スポンジチタンは昭和 30 年 (1955 年) に初めてアメリカへ輸出され、年々ロットの大型化と省エネ化が進められ、世界で最も高純度でかつ低コスト生産が可能となった。近年は酸化チタンを直接還元する新精錬法も研究開発されつつあり、日本においても独自技術が開発されている。

スポンジチタンを溶解して鑄塊を作り、以下鍛造、圧延、押出し、鑄造などの展伸材製造は日本において 1955 年から開始された。溶解はアメリカで開発されたばかりのアーク溶解法が適用され、日本独自のサイドチャージ法も取入れられ、低コスト、大型化をリードした。アーク溶解法の他にプラズマアーク、電子ビームなども最終展伸材形状に対応した溶解法も開発された。

溶解に続く素形材製造では戦後の兵器関連の製造禁止令を受け、日本は化学工業に用いられる純チタン材製造に特化した。純チタン製造においては鍛造、圧延、管の各製造で鉄鋼製造設備がそのまま適用できたことから、鉄鋼の大型化の流れにのって、純チタン材製造も大型化がスムーズに進展した。チタン合金材を主体に進めていたアメリカやヨーロッパ諸国がチタン専用として小型設備でまともなものが出来なかったのは異なる点であった。

チタン板材の製造は日本のチタン製造を代表するもので、世界一に発展した大型鉄鋼製造設備にその製造を組入れることによって、最高品質かつ低コストの大型板材の供給が可能となり、現在では純チタン市場では世界の約半分のシェアを占めるに至った。

管材の製造はシームレス管においては戦後フランスで開発されたガラス潤滑押し技術をいち早く導入し、ステンレス鋼シームレス管に採用されていたものが純チタン管製造にも利用された。溶接管製造でもステンレス鋼設備が転用され、純チタン特有の成形特性をロール成形に反映させ、1970 年前後に開発された渦流探傷ならびに超音波探傷装置を組入れて材質の信頼性を向上させた。これらを絶対的な安全性が要求される火力・原子力発電所復水器へ適用することに成功し、純チタン溶接管の世界的供給基地となった。

鑄造は従来技術が適用できないため、溶解法、鑄型ともに新しく研究開発がされた。先行していたアメリカの製造技術に追随するも、1990 年前後に出現したゴルフのドライバーヘッドに代表される一般消費財への適用は 1960 年代とは異なる溶解法、鑄型材ならび鑄造法の開発となり、日本独自の開発が行われた。

本調査ではチタン元素の発見からひもとき、工業化への道のりを精錬、溶解そして各種形状の製品を製造するための素形材製造技術へと系統化を多面的視野から試みた。最後に今後の技術進展を展望するとともに、さらに民生化するための考察も行った。

### ■ Abstract

While titanium oxide was discovered in the early nineteenth century, vacuum technology, refining techniques using argon gas and manufacturing techniques using the high pressure chamber were needed to produce titanium metal as an industrial metal after the Second World War.



Titanium ore is distributed vastly worldwide. In Japan, Tohoku and San-in area are famous for Tamahagane, which is the raw material for producing traditional Japanese swords, but its TiO<sub>2</sub> content is less than 30 to 40 percent. The Japanese titanium industry imports ore with a higher TiO<sub>2</sub> content of more than 50 to 90 percent which exists in Australia, India, USA, China, Russia and other countries.

Dr. William J. Kroll developed the process for refining pure titanium in Belgium during the Second World War and escaped to the U.S.A before Hitler invaded Belgium. It was about ten years before the industrial production of titanium started. After the Second World War, the U.S. government recognized the importance of titanium as an aircraft material because U.S. jet fighters were inferior to Soviet ones in aerial combat during the Korean War. U.S. industry started sponge titanium production in 1949. Japanese industry had already started research on titanium in 1947, foreseeing the bright future of titanium.

There are two categories of titanium production: sponge titanium production for raw materials and titanium mill production for industrial materials. Osaka Titanium was established in 1951 for producing sponge titanium and Toho Titanium followed in 1953. In that year, the Japanese government invited Dr. Kroll to lecture on sponge titanium production. The two companies started to export sponge titanium to the U.S.A. in 1954. Mr. Henry Gilbert of the U.S. Bureau of Mines was also invited to teach about consumable electrode arc melting technology to Kobe Steel and Sumitomo Metals, and they started to melt sponge titanium into ingots in 1954.

Ingot making, forging and rolling of titanium started in 1955 in Japan. Titanium mill demand in the 1960's was so small that major steel companies such as Sumitomo Metals and Kobe Steel produced titanium mill products at a small scale and then were able to use their highest performance steel mills when the big demand for titanium mill products occurred in 1980's. Japanese titanium mill products, especially commercially pure titanium, have the high performance properties such as good gauge in thickness, the widest and longest, sheets and plates in the world and well controlled grain size and crystal texture for easy deforming or shaping. Nippon Steel joined in this field in 1984.

Japanese titanium sponge is also of high quality because of its controlled elemental content and very low impurities. This titanium sponge is the standard raw material for jet engine companies and aircraft companies around the world. Good quality titanium mill products in Japan are also based on this Japanese sponge titanium.

Now, the Japanese titanium industry supplies thirty percent of the sponge and twenty-five percent of the titanium mill products in the world.

In this report, I first introduce the discovery of the element titanium and the work done to refine titanium metal in the U.S.A. before the Second World War. Next, I introduce the development of the Japanese titanium industry for sponge titanium and titanium mill products. Last, I summarize the content and discuss future trends and the ways in which titanium might be used.

## ■ Contents

1. はじめに	213
2. 日本におけるチタン産業発展の推移	214
3. 金属チタンの誕生	216
4. 精錬技術の系譜	226
5. 溶解技術	235
6. 素形材製造技術	239
7. まとめと考察	258
8. チタン製造技術の系統化	260
9. あとがき、謝辞	262
付録	263

# 5

## 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、最初の本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って過言ではない。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次成長を起こし、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发点である。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機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)  $\mu$ 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.

## ■ Contents

1. はじめに	267
2. 日本の鉄鋼業	268
3. 鉄鋼のプロセスとその進歩	273
4. 鉄鋼制御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