

火力用タービン発電機の発展の軸となった技術の推定

菅原 玲¹・田里 誠²・岩田修一^{1,3}・田辺義一^{1,*}

¹ 国立科学博物館理工学研究部 〒169-0073 東京都新宿区百人町3-23-1

² 国立科学博物館産業技術史資料情報センター 〒103-0022 東京都中央区日本橋室町2-1-1

³ 東京大学大学院新領域創成科学研究科 〒277-8561 千葉県柏市柏の葉5-1-5 基盤棟

An Identification of the Key Technology for Development of Turbine Generators

Akira SUGAWARA¹, Makoto TARI², Shuichi IWATA^{1,3}, Yoshikazu TANABE^{1,*}

¹ Department of Science and Engineering, National Museum of Nature and Science,
3-23-1 Hyakunin-cho, Shinjuku-ku, Tokyo 169-0073, Japan

² Center of the History of Japanese Industrial Technology, National Museum of Nature and Science,
2-1-1 Nihonbashi Muromachi, Chuo-ku, Tokyo 103-0022, Japan

³ Graduate School of Frontier Science, The University of Tokyo,
Kiban-to, 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa-city, Chiba 277-8561, Japan

Abstract The history of Japanese turbine generators started with introducing the Western knowledge and technologies after Meiji Restoration, and improved mainly by referring to the Western manufacturers, especially in the initial stage. And now the Japanese technology reaches the world highest level. The Tari's research showed that an advance of generator performance has something to do with improvements of background technologies such as an ability to make greater steel ingot, and there likely should be a linkage relations among them. This paper shows the correlation graphically and the strong correlation between the unit capacity of generator and the size of turbine rotor by making a multiple-regression analysis for quantitative evaluation.

Key words: turbine generator, development of technology, generation capacity, thermal efficiency, turbine rotor, steel ingot, background technology, multiple-regression analysis

1. はじめに

現在、国内における全電力量の50%以上は火力発電が担っている(図1参照)。その高い熱効率や環境保全技術は、日本の持つ世界最高水準の技術の一つである。環境問題に対して関心の高まる昨今において、この火力発電技術のアジア各国への移転といった国際的な枠組み作りも進められている。しかし、今や世界に誇る日本の火力発電所も、その歴史を遡れば、1887年(明治20年)に東京電燈会社が南茅場町に最初の火力発電所(125V, 200Aのエジソン式直流発電機)を建設し、架空電線による一般電灯への給電を開始した

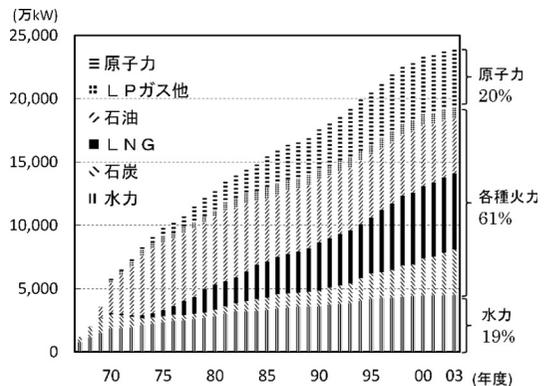


図1 エネルギー別発電電力構成比¹⁾

* Correspondence author. E-mail: tanabe-y@kahaku.go.jp.

時、発電機器はすべて輸入機であった²⁾。その後、特に明治時代後期から大正時代において欧米の電機製造会社と技術提携を結ぶことにより先端技術と知識を受け入れ、また自主的な開発を続けることで火力発電の技術は目覚ましい発展を遂げた。そして、大正時代初めから昭和30年代後半までの水主火従乃至は水火併用時代を除き、火力発電は現在に至るまで、常に電力需要を中心的に支えてきた。

田里は日本の火力発電技術の発展を調査し、“電力用タービン発電機技術発展の系統化調査”³⁾にまとめた。発電機容量を決める因子として、ステータ（固定子）鉄心内径（回転子外径で表示）、鉄心長、ギャップ磁束密度（磁気装荷）、電機子アンペア導体数（電気装荷）、回転速度があるが、これらの因子には各々課題がある。具体的には、ロータ（回転子）外径の増大には遠心力に対する強度の問題、鉄心長には軸振動の問題、磁気装荷には磁気飽和の問題がある。（回転速度は一定）電気装荷は大きくできるが発熱の問題があり、これが冷却方式の進歩が図られた所以である。田里は増大する電力需要を満たすために必要な単機出力の大容量化に大きく影響した因子として、ロータ軸径の大型化、エンドリング径の大型化、ロータやステータの冷却方式の改善による出力係数の増大を挙げ、個々の因子毎に詳細に議論している。図2はそれらの因子の推移をまとめて表したものである⁴⁾。また、個々の技術の変遷も同時にまとめている。これより、火力発電機の大容量化とそれに関連する各技術レベルの向上との間には、相関関係があることがわかる。更に、ロータ軸径とエンドリング径の増大に関連して鉄鋼の鍛造技術、特に日本で製造可能な最大鋼塊重量の推移をあわせて示している。図で見ると、単機出力は最大鋼塊重量と強い相関があるように見える。

以上のデータには、火力発電機の発展に影響を与えたと考えられるタービン入口における蒸気条件が含まれていない。また、図2では戦前の単機出力の推移が小さいため、何が大きな要因かを考えることが難しい。

そこで、本報告では、戦前・戦後におけるタービン発電機出力とそれに対応するタービン入口蒸気条件の関係を表し、図2を補完する。その上で火力発電機の出力・熱効率向上と、それぞれに対応する技術レベルの発展との関係について、“技術発展の軸”ということに着目し分析・考察をお

こなった。定量的に分析するため、重回帰分析を用いた。

2. 火力発電機の発展の軸となった技術

戦前におけるタービン発電機出力と対応するタービン入口蒸気温度・蒸気圧力の関係を図示したものが、図3である。データは日本電機工業史から抜粋した⁵⁾。本データから、出力と蒸気温度・圧力条件それぞれとの間の相関係数を算出すると、出力-蒸気温度：0.960 出力-蒸気圧力：0.969 と、強い相関があることがわかった。つまり、蒸気条件の向上によりタービン・発電機出力が増大したといえる。この結果から、戦前においては主にタービン入口の蒸気温度・圧力条件の改善をおこなうことで、タービン、その結果として発電機の性能向上を成し遂げていたということがわかる。

そこで次に、日本の火力発電技術発展の歴史において軸となった技術を推定するために、戦前と戦後におけるデータをまとめた。発電機性能を表わす基準としては、単機容量、熱効率等の複数の要素が挙げられるが、定量的な評価が可能であるということから、“発電機出力”と“熱効率”を火力発電機の性能を表わす指標として選択する。ここでいう熱効率とは、(発電電力量)×(1kWh当たりの換算熱量)/(投入総熱量)×100 (%) である。発電機の出力だけでなく、ここで新たに熱効率に関して言及するのは、火力発電機の発展の軸ということを考えるにあたって、その軸となる技術は発電機のもつ複数の性能に対して同じように有効であるというよりも、むしろ各々の性能、たとえば出力と熱効率に対して、その有効性が異なってくるのではないかと考えたからである。20世紀における出力と熱効率向上の過程を表したものが図4である。データは、田里 誠「電力用タービン発電機技術発展の系統化調査」,「日本電機工業史」,「電気事業50年の統計」による^{3),5),6)}。そして、対応する技術レベルを示す指標として、同時期において達成されているタービン蒸気温度・圧力・最大鋼塊重量をプロットしたものが図5、図6である。

図4を見ると、最も顕著な特徴の一つとして、第2次大戦後の急成長が挙げられる。これに対し、戦前においてはあまり大きな技術発展がなかったように見えるが、主要材料（ロータ軸材、電磁材

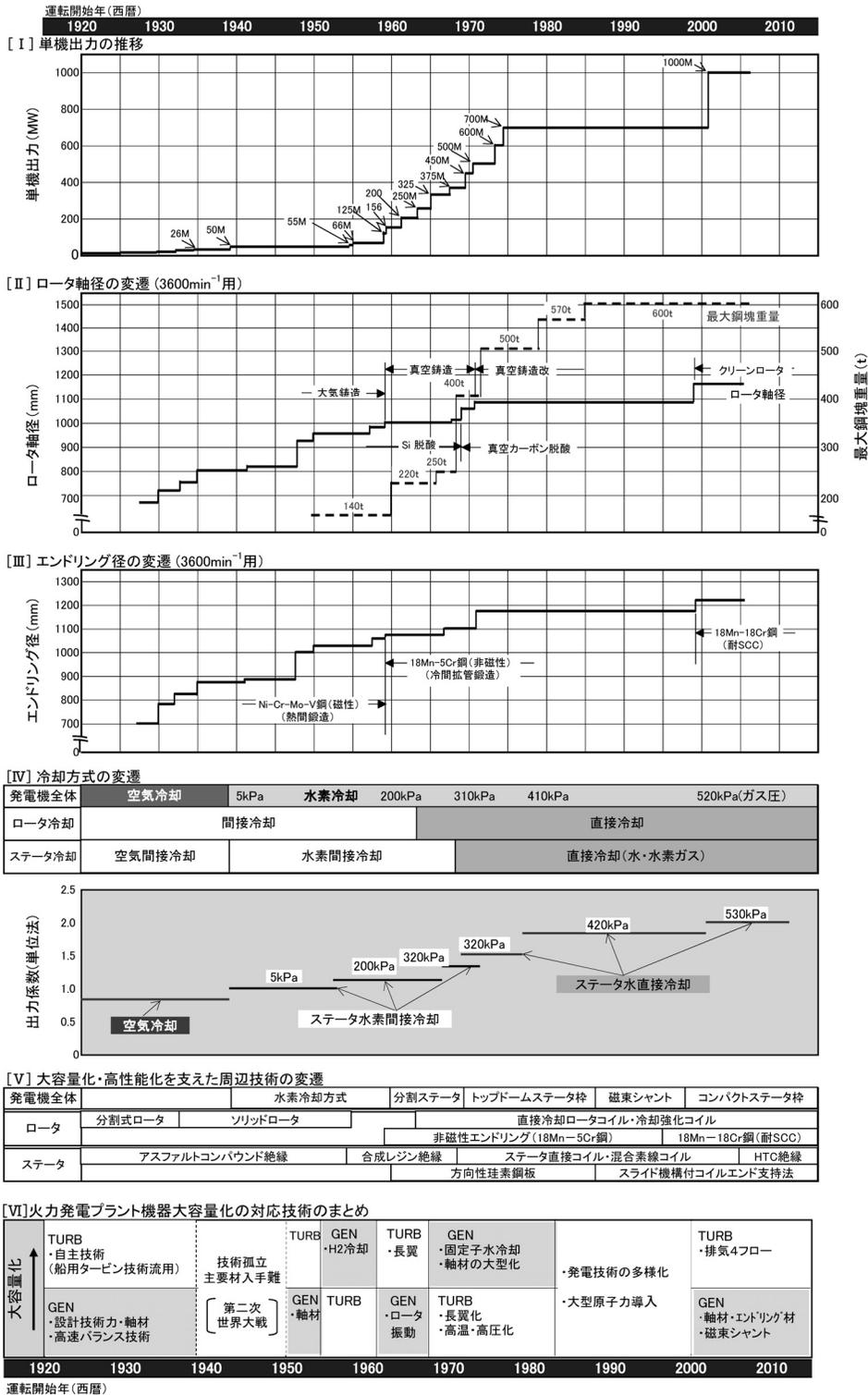


図2 火力用タービン発電機の大容量化の推移と対応技術⁴⁾

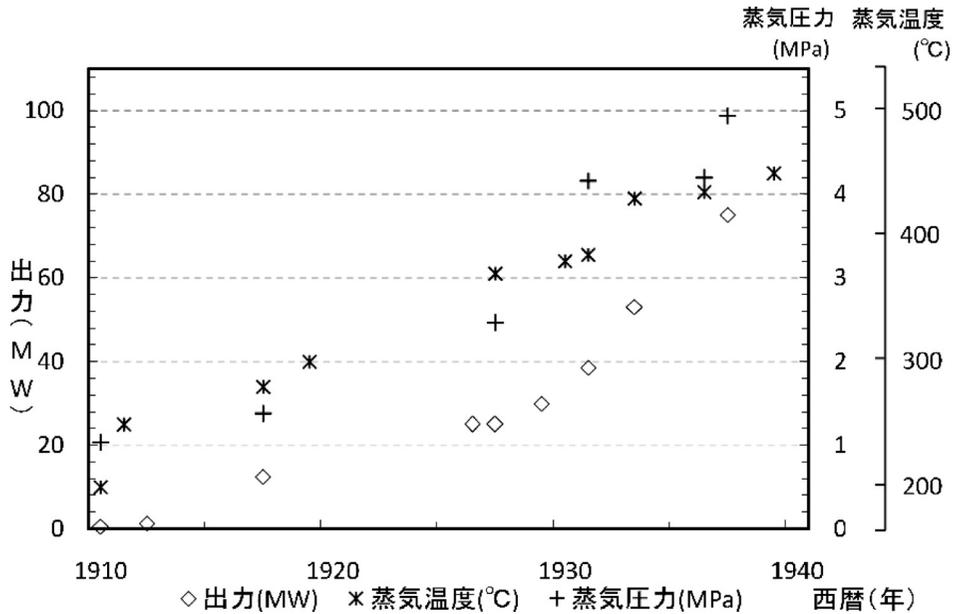


図3 戦前における火力用タービン発電機の出力と蒸気条件の推移³⁾

料、絶縁材料、導電材料等)の不足や機械設備の不備など周辺技術・環境が不十分な状況下でありながら、代替技術の考案や“名工の技”により、世界レベルの実績を残している³⁾。にも拘わらず歴史を通してその発展のレベルを数値データに基づいて並べると、戦前における発展は微々たるものとなってしまふ。戦後におけるこれ程の急成長の要因としては、大戦による欧米諸国からの大幅な遅れを取り戻す為の技術提携や、水素冷却技術等新技术の導入、また社会的に電力需要が急増したことに對する必死の対応努力などが挙げられる。その中でも、特に周辺の技術レベルという点に着目すると、ロータ軸材の基となる巨大な鋼塊を製造可能になり、その大きさが飛躍的に伸び出した影響が大きいということが図5より確認できる。戦前には蒸気条件の向上に注力されており、材料不足などから鋼塊製造レベルの向上はあまり見られなかった。これが戦前と戦後の発展の大きな違いであり、戦後の火力発電機出力向上の軸となった技術的因子は、鋼塊製造技術であったという仮説を立てることができる。次節でこれを定量的に分析する。また、熱効率に関しても同様に解析を行う。

3. 数値解析による検証

火力発電技術の発展において重要であった因子を同定するために、図5、図6の関係に対して重回帰分析をおこなった。目的変数としては、実現されている火力発電機の性能を表わす指標である“発電機出力”と、“熱効率”をとった。また、説明変数として、同時期において達成されている技術レベルを表わす指標である“タービンの蒸気温度”・“蒸気圧力”・“ロータ鋼塊重量”をとり、その相互関係を調べた。ただし、今回は利用できる最大鋼塊重量のデータが戦後のみ⁴⁾であるため、戦後のデータのみに対して分析をおこなった。

出力、熱効率それぞれの重回帰式は、

$$C=1.55x_1+0.197x_2+1.56x_3-899 \quad (1)$$

$$E=0.128x_1+0.0294x_2+0.00344x_3-43.2 \quad (2)$$

となった。ただし、 C :出力、 E :熱効率、 x_1 :蒸気温度、 x_2 :蒸気圧力、 x_3 :最大鋼塊重量である。このとき、各々の重相関係数は、

$$\text{出力(1)式: } R_C=0.966 \quad (3)$$

$$\text{熱効率(2)式: } R_E=0.965 \quad (4)$$

(i) おそらく戦前にはあまり注目されていなかった、或いは材料等も含めてその環境が整っていなかったためだと考えられる。

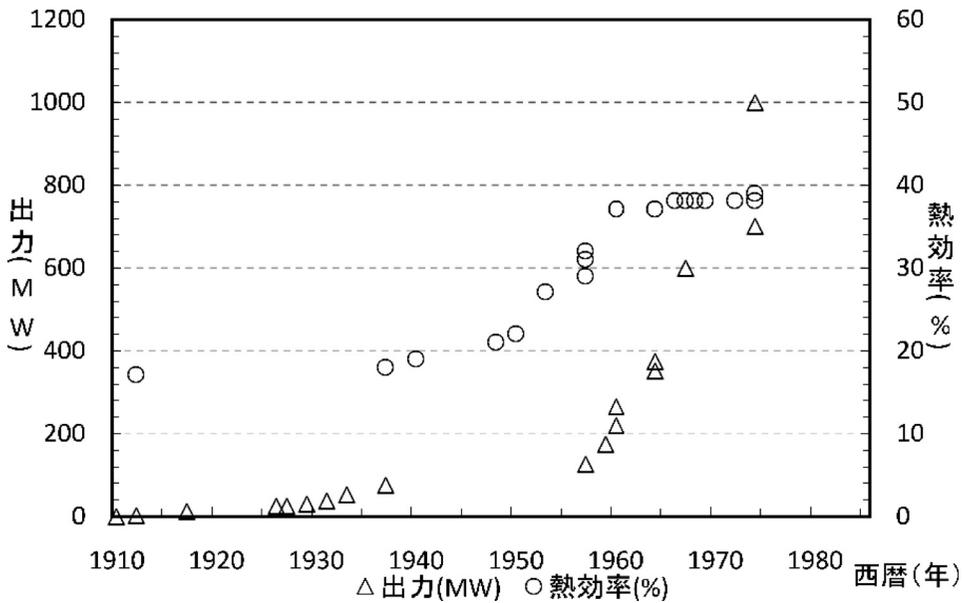


図4 火力発電機出力と熱効率の推移^{3),5),6)}

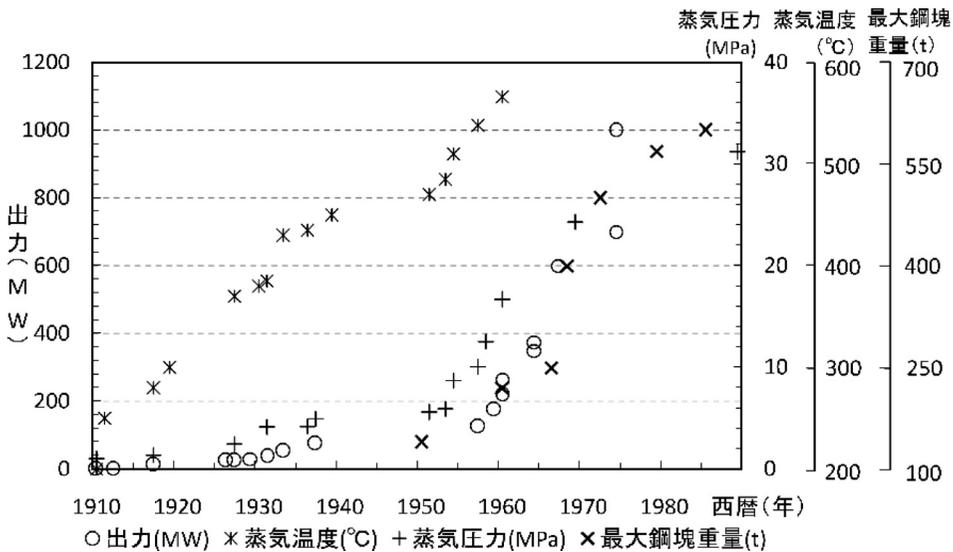


図5 火力発電機出力と対応技術レベルの推移

である。また、回帰式の有効性を示すために、母相関係数を ρ_C 、 ρ_E として(1)、(2)両式の無相関検定をおこなったところ、検定統計量は、

$$\text{出力(1)式: } F_C = 110.8 \quad (5)$$

$$\text{熱効率(2)式: } F_E = 106.9 \quad (6)$$

となった。このとき、自由度(3,24)のF分布において有意水準 $\alpha = 0.005$ で $F = 5.52$ であることから、

$$F_C > F_{3,24}(0.005) \quad (7)$$

$$F_E > F_{3,24}(0.005) \quad (8)$$

より、帰無仮説： $\rho_C = 0$ 、 $\rho_E = 0$ を共に棄却するので、(1)、(2)式はともに十分に有効であるといえる。また、両式の標準偏回帰係数は、

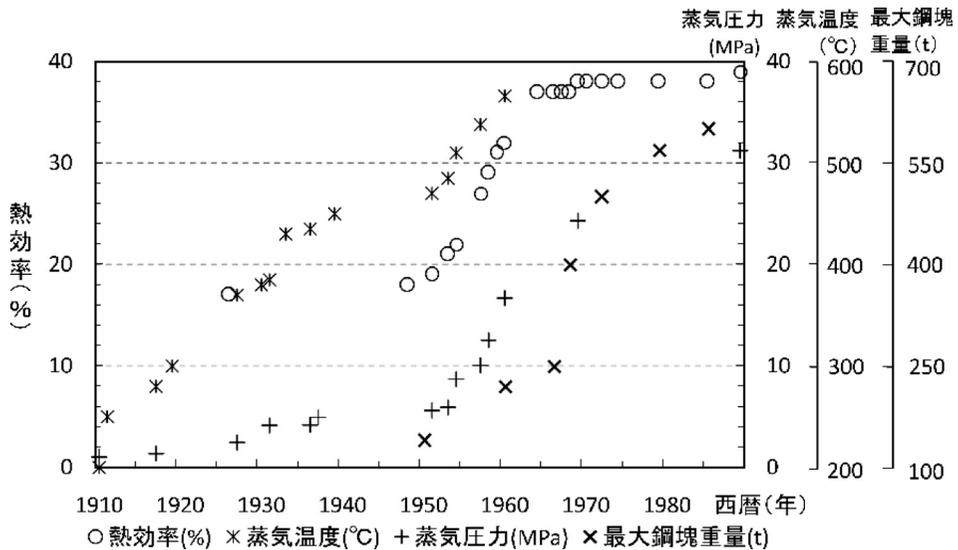


図6 火力発電機熱効率と対応技術レベルの推移

$$\begin{aligned} C_1 &= 0.161 \\ C_2 &= 0.0444 \\ C_3 &= 0.825 \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} E_1 &= 0.631 \\ E_2 &= 0.317 \\ E_3 &= 0.0868 \end{aligned} \quad (10)$$

ただし、(9)式は(1)式に、(10)式は(2)式にそれぞれ対応しており、 C_1 、 C_2 、 C_3 は順に、蒸気温度、蒸気圧力、最大鋼塊重量が出力に与える影響、そして E_1 、 E_2 、 E_3 は各変数が熱効率に与える影響の大きさを示している。また、(1)式、(2)式における偏回帰係数の有効性を調べるために検定統計量を計算したところ、

$$\begin{aligned} F_{C_1} &= 2.34 \\ F_{C_2} &= 0.0490 \\ F_{C_3} &= 30.9 \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} F_{E_1} &= 35.0 \\ F_{E_2} &= 2.41 \\ F_{E_3} &= 0.330 \end{aligned} \quad (12)$$

となり、自由度(1,24)のF分布において有意水準 $\alpha=0.05$ で $F=4.26$ 、また $\alpha=0.005$ で $F=9.55$ であることから、

$$F_{C_3} > F_{1,24}(0.005) \quad (13)$$

$$F_{E_1} > F_{1,24}(0.005) \quad (14)$$

より、 x_3 (最大鋼塊質量)はC(出力)に、そし

て x_1 (蒸気温度)はE(熱効率)に対し、それぞれ大きな影響を与える変数であるといえる。このことは、偏相関係数が、

$$\begin{aligned} R_{1C} &= 0.298 \\ R_{2C} &= 0.0452 \\ R_{3C} &= 0.750 \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} R_{1E} &= 0.770 \\ R_{2E} &= 0.302 \\ R_{3E} &= 0.116 \end{aligned} \quad (16)$$

となることから確認できた。

以上、数値解析結果をまとめると、発電機出力の向上に最も大きな影響を及ぼした因子は最大鋼塊重量であり、熱効率の向上に対してはタービン入口蒸気温度であった⁽ⁱⁱ⁾ということがわかった。

4. 議 論

戦後特に1950年後半から火力発電機出力が飛躍的に向上したが、その軸となった技術的因子は、鋼塊製造技術であることが定量的にも明らかになった。この原因は、戦中を含む昭和時代前半に軍事として培われた鍛造技術と鋼塊製造技術の民需への移転のためである。

(ii) 個々のプラント内における関係ではなく、全体としての技術レベルに関して。

明治から戦前の時代において、製鉄技術や大型の鋼塊製造技術といった技術は軍需の面から重視されたが、国産技術として形成されるにはまだ不十分であった。国策会社として八幡製鉄所が設立され操業が軌道にのるのは1904年（明治37年）頃である⁸⁾。1913年（大正2年）完成の軍艦「金剛」は英国Vickers社製であるが、そのとき同時にVickers社へ技術者を派遣して学ばせながら、国産への力の蓄積を図っていく。そのような努力を積み重ねながら国内での建造へ移っていく。しかし、その建造に不可欠なプレス機や圧延機、工作機械といった機械類は外国からの輸入に頼らざるをえなかった。これは終戦まで変わらず、重工業の民生での需要が弱く、民間を含めた産業の裾野の広がりが極めて弱い日本の産業構造を反映していた。

1937年（昭和12年）には、戦艦「大和」や「武蔵」建造のために、当時の海軍呉工廠で製鋼設備の増設（200トン鋼塊製造）や15,000トン水圧プレスの購入（独国Hydraulik社）を行い、またその後（株）日本製鋼所室蘭製作所に、昭和15年に10,000トン水圧プレス（Hydraulik社）、昭和16年に3万馬力4重式圧延機（独国Demag社）の購入を行っている。これらの設備のうち、旧海軍呉工廠の15,000トン水圧プレスは戦後米軍により撤去させられたが⁹⁾、日本製鋼所の設備は残り、戦後の産業機械類生産に活躍した⁷⁾。特に発電機の大型化に伴い、タービン軸材の大型化、そしてディスク焼嵌めから一体型に発展したため、ますます大型鍛造品製造の需要が高まり、その持てる技術力が生かされることになった。（株）日立製作所や日本鑄鍛鋼（株）、神戸製鋼（株）（後に中止）等でも同様の大型鍛造品製作が行われている。

一方、タービン発電機の技術力が今日の域に達するためには、国内外で多くの事故、そして多くの犠牲者を出すという経験を経なければならなかった。1953年から56年にかけて、米国では材料の白点性欠陥や応力腐食割れ、靱性不足といった理由で、発電機関連ロータの事故が多発した¹⁰⁾。これらの事故を教訓に、水素による脆化を避けるため、当時行われていた大気中で溶鋼を注ぎ込む大気造塊から、真空中で注ぎ込む真空造塊に変わり、日本にも導入された。

このような経験の中で、材料中に存在するクラックやボイドといった欠陥により、応力集中が起こり、破壊応力が極端に小さくなり、回転の遠

心力に耐えられず破損するということから、初期欠陥をすくなくするための高純度化や均質化等材料製造技術が進歩した。更にそれらの破壊機構の解明から破壊力学が長足の進歩を遂げた^{11),12)}。

1970年10月、三菱重工業（株）長崎造船所で、スペインへ輸出する出力33万kWの蒸気タービンが試運転中に破断し、死者4名、重軽傷者数十名を出す大惨事を引き起こした。タービンは50トンの重量であったが、10トン程度の破断片が1-2km離れた近くの山頂や海底にまで吹き飛ばされた。振動調整するため高速回転試験を始めた矢先であった。遠心力のためにタービン軸材の脆性破壊が生じたことが原因であった。3.5 NiCrMoV材で真空造塊されたものであったが、偏析や不純物によりマイクロポロシティ等の欠陥が発生、応力集中に耐えられず、脆性破壊を起こしたものと考えられた。当時の超音波検査技術では検出が難しい1.6mm程度の微小な欠陥の集合構造が影響したことであること、製品の材料試験片の採取の部位が適当でなかったこと等、改善すべき点は徹底的に調べられた^{10),13)-15)}。

当時でも既に鉄の精錬工程において真空度を上げる必要性が認識され、真空流滴脱ガス装置にスチームイジェクターが導入された。これにより真空度は数Torr（メカニカルブースター使用）から0.1-0.3 Torr程度に改善された。その後1980年前後からは二重脱ガス法により、0.06Torr程度の高真空下で精錬されている¹⁷⁾。この高真空化により、Siによる脱酸素ではなく、鋼中の炭素と酸素を反応させてCO或いはCO₂として排出させることが可能になった。これにより残留Siの量が0.4 wt%程度から0.02 wt%程度に激減し、また炭素Cの濃度偏析を抑制する効果が現れている²¹⁾。これらの技術により凝固組織が緻密化し、大型鋼塊中に見られるマクロ偏析が抑制され、そして焼き戻し脆化感受性が低減された^{17),19),21)}。この技術は、低Si-真空カーボン脱酸法（Vacuum Carbon Deoxidation, 低Si-VCD）と呼ばれている^{7),16)-21)}。最近の二重脱ガス法を用いて0.06 Torrといった高真空状態で製鋼すると、十分な清浄度を持つ大型鋼塊を製造することができる。P, S, As, Sn更にはHといった不純物が格段に少なくなることが報告されている¹⁹⁾。

1970年以降、原子力発電において同様の技術が用いられているが、発電機ロータそのものに大きな事故はなく、発電機の技術としては恒常ないし

は定常の域に達していると考えられている。

一方、熱効率の発展に寄与した技術的因子は、タービンの蒸気温度・圧力である。これらの結果より、一つのシステムの発展においても、着目する性能が異なれば軸となる技術も異なるということがわかった。また、熱効率の向上に関しては鋼塊重量増大の影響が小さいことから、単一の技術レベルが必ずしもそのシステムの総合的な能力を向上させるわけではない、ということがいえる。熱効率の向上に関してはタービンロータ大型化の寄与は小さく、同時に熱効率向上の軸となる蒸気温度の向上は出力の向上に対してはそれほど大きな影響力がなく、総電力量の増加を目的とする場合には能率的ではない。この結果は特に、高度成長期の発展において熱効率にほとんど変化がないのに対し出力は最大鋼塊重量の増大とともに大きく増加しているという傾向にみられる。20世紀、重厚長大の時代においては、火力発電技術発展の歴史は出力向上の歴史であり、それは主にタービン・発電機ロータ巨大化の歴史であったともいえる。今後、省エネルギー問題、環境問題などが注目される時代では、たとえば発電機出力の向上よりも熱効率の向上が優先されるように、時代の節目においてトレンドが替わるのに合わせて、注力する技術を変えてゆく必要があるだろう。

5. ま と め

火力発電の発展を顧みると、1950年頃を転機として、大容量化が目覚ましい発展を遂げてきたことがわかる。ここで、持続的に向上する技術の中でも鋼塊製造技術の急激な発達によるところが大きい、つまり火力発電発展の軸となった技術であるということを定量的に示すことができた。また、熱効率の発展に寄与した技術的因子は、タービンの蒸気温度・圧力である。

この発展を推し進めた外的要因としては、電力需要の増加という社会的ニーズも挙げられる。原子力発電が益々普及し、エネルギー問題や環境問題についてしばしば言及される昨今では、省資源の観点から再び高効率化が求められるなど、新たな転換期を迎えている。技術が発展してゆく過程においては、社会のニーズを把握し、それを満たすために大きな影響力を持つ技術的因子を見極め、育成していくことが求められる。

謝 辞

福田征孜元三菱重工業（株）取締役長崎造船所長にはスペイン向けロータに関する貴重な資料の提供を、（株）日本製鋼所室蘭製作所には多くの文献の提供をして頂きました。感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 経済産業省資源エネルギー庁, エネルギー白書, 2005.
- 2) 東京電力（株）, 2002. 「関東の電気事業と東京電力—電気事業の創始から東京電力50年への軌跡—」.
- 3) 田里 誠, 2005. 「電力用タービン発電機技術発展の系統化調査」, 技術の系統化調査報告書 5巻, 69-186.
- 4) 田里 誠, 2007. 「火力・原子力用タービン発電機設備の技術開発の歩みと今後の展望」. 電気評論, 9号, 22-37.
- 5) 日本電機工業会編, 1956. 「日本電機工業史」.
- 6) 電気事業連合会編, 2002. 「電気事業50年の統計」.
- 7) (株)日本製鋼所, 1968. 「日本製鋼所社史資料—創業より50年間の歩み—」.
- 8) 飯田賢一, 1969. 「日本鉄鋼技術史」. 東洋経済新報社.
- 9) 佐々川清, 1967. 「装甲板製造についての回顧録」. 鉄と鋼, 第53年(9), 1119-1129.
- 10) 福田征孜, 私信.
- 11) 岡村弘之, 1975. 「破壊力学と材料強度講座1 線形破壊力学入門」. 培風館.
- 12) 横堀武夫, 1974. 岩波全書「材料強度学 第2版」. 岩波書店.
- 13) 久谷與四郎, 福田征孜, 2006. 「タービンローター破裂—破片が語る「事故の戒め」—」, e-Bookland.
- 14) 相川賢太郎, 2004. 「三菱重工・長崎造船所史料館・夜話」. <http://home.j04.itscokm.net/fukuda/engineer/shiryoukannyawa.pdf>
- 15) 畑村洋太郎編, 実際の設計研究会著, 1996. 「続々・実際の設計—失敗に学ぶ—」. 日刊工業新聞社.
- 16) S. Kawaguchi, R. Homma, K. Takahashi and T. Jin, 1972. "Forgings from gigantic ingot with 3,550 mm (140 inch) diameter and 400 metric ton (881,000 lbs) weight". Part 1: Production and Metallurgical Developments. Proceeding of the 6th International Forgemasters Meeting, Part 1, Cherry Hill / USA, 1-66.
- 17) S. Sawada and S. Kawaguchi, 1979. "Beneficial effect of

- vacuum carbon deoxidation on rotor forging properties”. Workshop Proceeding “Rotor Forgings for Turbines and Generators”, EPRI WS-79-235, 5-1-5-14.
- 18) 管野勳崇, 神 健夫, 大橋健夫. 1983. 「570トン鋼塊から作られる超大型一体低圧ロータ軸材の性能」. 火力原子力発電, 36(6), 617-623.
- 19) 竹之内朋夫, 1992. 「高品質大型鍛造鋼塊の製造技術開発」. 日本製鋼所技報, No. 46, 108-124.
- 20) 柳本龍三, 神 健夫, 池田保美, 大橋健夫, 管野勳崇, 1986. 「大容量発電所用超大型一体型低圧タービンロータ軸材」. 日本製鋼所技報, No. 42, 111-118.
- 21) 田中泰彦, 石黒 徹, 岩館忠雄, 1998. 「エネルギー産業用大型鍛鋼品の歩み」. 日本製鋼所技報, No. 54, 1-19.