

電力用タービン発電機技術発展の系統化調査

2

Historical Development of Turbine Generators for Fossil and Geothermal Power Plants

田里 誠

Makoto Tari

■ 要旨

明治維新直後に日本に入ってきた電気の利用は電気通信に始まり、照明、動力へとその利便性から急速に普及していった。そして、急増する電力需要に応えるため輸入機器による小規模火力・水力発電所が相次いで建設された。わが国の産業基盤として電動力が位置付けられるにしたがい国産化の要求が高まり、明治時代後期に始まった技術導入により国産タービン発電機が製作されはじめた。輸入技術の短時間での咀嚼により国産タービン発電機の大容量化は急速に進み、とくに第二次世界大戦前の国際情勢悪化により孤立するなかで、2極一60Hz機の世界最大級機を相次いで完成している。

第二次世界大戦による欧米諸国との大幅な遅れを早急に取り戻し、戦後復興の急速な電力需要に応えるため再び海外電機製造会社と技術提携し、1号機輸入、2号機以降は輸入図面により国産化する中で多くの新鋭火力発電プラントが建設された。

戦前の確立技術の継承、輸入図面・製品に含まれた要素技術の咀嚼と自力による設計法の確立により技術力は短時間で向上し、昭和30年代後半から自主技術による最大単機容量は年々更新され、大容量化時代の後半には世界最大級の700MW、1,000MW機が完成している。この様な目覚ましい国産機の大容量化実現には、要求仕様の明確化と国産技術を自ら評価し、その結果として記録的容量機の“製造の場”の提供を英断した電力会社の存在が大きい。

その後の経済情勢、エネルギー事情、そして環境問題など電力事業を取り巻く環境は大きく変わり、その結果火力発電プラント、タービン発電機に対する要求も多様化してきた。

しかし、それまでの大容量化対応の中で確立された技術力、特に計算機応用による解析力の著しい向上と疲労設計・材料疲労データ蓄積により多様化ニーズへの対応に特に大きな技術課題はなかった。

一方、電力需要は着実に伸長しているが昨今の伸び率は低く国内市場は縮小段階にあり、さらに規制緩和による競争激化・低価格化など新たな問題が生じている。輸出競争力や価格競争力の強化から「技術のローエンド化」が進み、大容量空冷発電機、大容量水素間接冷却発電機が注目され、それら実現のための特徴ある技術が日本でも開発され世界レベルで普及しつつある。

これらの火力発電システム、火力・地熱用タービン発電機の技術の発展の歴史を辿り、そこに見られる技術進展の経緯と革新的な技術・製品について黎明期から今日までを概観する。

■ Abstract

Electricity was introduced into Japan just after the Meiji Restoration and initially applied to telegraph systems, electric lighting, and electric motor driving systems because of its good availability. The rapidly increasing demand for electricity led to the construction of a large number of small thermal and hydro electric power generating stations using imported equipment. While the growing use of electric motor driving system was becoming a major driving system for various kinds of industries, the demand for domestic products was getting stronger. The manufacturing of steam turbines and generators began with the technical assistance of foreign companies contracted at the end of the Meiji period. In a relatively short period of time, the imported technology was well studied and understood, resulting in a rapid increase in unit capacity. In particular, the world's largest two-pole, 60Hz turbine generators were manufactured even though there was an international quarantine due to the worsened international circumstances.

To facilitate catching up with the West, which had advanced remarkably during the Second World War, and to meet the rapidly increasing demand for electricity due to recovery efforts following the War, most domestic turbine generator manufacturers again contracted for technical assistance from more advanced manufacturers in the West. The first unit was imported from the West, and the second unit that was the same size as the first was manufactured by a domestic manufacturer under contract for technical assistance. These closer relationships with Western manufacturers enabled the construction of a large number of advanced thermal power plants.

The technical abilities of domestic industries rapidly improved on the basis of established technologies before the War, and new design technologies derived from imported products and technical documents were established after the War. Record-making larger turbine generators were manufactured yearly during the last 30 years of the Showa period by applying home-grown technologies, culminating with the manufacture of the world's largest 700 and 1000MW turbine generators. The rapid increase in the unit capacity of domestic generators was due to closer collaboration with potential electric power companies that could provide technical specifications and improve the manufacturer's ability to evaluate the application of proposed technologies. Finally, domestic manufacturers received orders from power companies to produce large capacity generators.

The drastic changes in the circumstances of the power business (economic conditions, energy shortages, environmental concerns, etc.) have led to widely diversified requirements for power stations and turbine generators. The technical potential established in the course of increasing unit capacity, the remarkable progress in analytical technology by the application of computers, and the accumulation of material fatigue data have made it possible to fully meet these diversified requirements, so that no further development of technologies seems necessary.

While the demand for electricity in Japan is still growing, the yearly growth rate in electricity consumption is very low, resulting in a smaller market. This, combined with deregulation, has led to increasing competition and falling prices. These difficult business conditions have led to new design concepts like low-end technologies aimed at improving price competitiveness, functionality, reliability, etc. Example products include larger air-cooled generators and larger indirectly hydrogen cooled generators. To design and manufacture such low-cost, high-quality generators, domestic manufacturers are developing technologies that are being applied worldwide.

This paper discusses the historical developments related to thermal and geothermal power plant generators and summarizes the technical trends and innovative technologies of the entire turbine generator history, starting from the earliest stage.

■ Profile

田里 誠

Makoto Tari

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38年3月	京都大学工学部電気工学科卒業
昭和38年4月	東京芝浦電気株式会社（現 株式会社東芝）入社 以後、タービン発電機の開発・設計に従事 同社、発電機部長、エネルギー事業本部電気担当 技師長、京浜事業所技監を歴任
平成11年3月	同社退職
平成11年4月	東芝テクノコンサルティング株式会社入社 火力事業部技監、東京電機大学非常勤講師
平成12年4月	新潟大学非常勤講師
平成14年3月	東芝テクノコンサルティング株式会社退職 この間、電気学会電気規格調査会理事、CIGRE （高電圧大電力国際会議）SC11（回転機）日本代表
現在	独立行政法人 国立科学博物館 主任調査員 VonRoll Isola社特別顧問

会員他

CIGRE会員、CIGRE Distinguished Member（平成16年）、電気学会進歩賞（昭和49年、平成3年、平成14年）、IEEE-IMDC '98最優秀論文賞（平成10年）、CIGRE Technical Committee Award受賞（平成14年）、日本CIGRE最優秀論文賞受賞（平成14年）

著書 「超電導発電機」オーム社 執筆幹事（平成16年）

■ Contents

1.はじめに	71
2.発電技術の推移	72
3.電力事業の推移	85
4.時代のニーズに応えた発電機技術の変遷	103
5.ニーズに応え・実現した主要発電機技術	122
6.発電機技術の発達を支えるサポート技術	144
7.考察	170
8.まとめ	174
謝辞	175

1 はじめに

日本における電力用発電機の歴史は、明治時代中期の輸入機器による往復蒸気機関（蒸気エンジン）駆動発電機に始まった。爾来今日に至るまで、大正時代初期から昭和30年代後半までの『水主火従時代』を除き、増加し続ける電力需要に対し火力発電が中心的に応えてきた。

本調査では火力発電および地熱発電用タービン発電機技術発展の系統化を主に明治時代中期に始まる黎明期から今日までを概観する。しかし、タービン発電機は発電所における最後のエネルギー変換を担う重要機器ではあるが、その技術発展は一次エネルギーの燃料事情、原動機であるタービンの熱効率の最大化、環境問題や運転性から選択される原動機の種類、限られた建設用地の最大利用、初期コスト（建設費）や運転コストなどの経済性追求、そして電力系統運用等からの要求に対して発電システムとしての最適化と協調をはかり、その個別の要求に応える形で技術発展してきた。

したがって、第2章で「海外における発電・電力応用の推移」および海外の影響を色濃く受けて発展してきた「日本における発電技術の推移」を概観する。そして第3章「電力事業の推移」では各時代の社会ニーズに電力事業がいかに応えてきたかを社会情勢や周辺環境の背景と照らしあわせて述べる。

黎明期から第二次世界大戦までは、近代国家としての工業生産力の増強、度重なる戦争や富国強兵策による軍需産業の急進などが電源開発の推進力であり、その急速な電力需要の伸びに対応するため欧米先進電機製造会社から導入した技術をベースに国産化が進んでいった。主に欧米の標準機が導入され設計図書は提供

されたが、主要材料の入手難、汎用機だけの機械加工設備、そして製造経験不足などの困難な状況下で師と仰ぐ欧米の先進電機製造会社を超える世界最大級高速タービン発電機を相次いで完成した。その陰に優秀な職工“名工”の存在があり、そして技術の検証が十分でなく信頼性に不安が残る国産機器の採用の場に当時の植民地が多く選ばれたことは興味深い。

さらに、戦後復興のための電力需要急増に再び輸入機器と海外技術の導入が必要であったが、1号輸入機、2号以降は輸入図面による国産化の時代からいち早く脱却し、自主技術による記録的大容量機を相次ぎ製作できた背景に、要求仕様を明確にし、国内電機製造会社の適用技術を自ら評価し、国内電機製造会社に“場”を提供した電力会社の存在を忘れることはできない。これら戦前・戦後発展期に見られた興味深い点についても出来るかぎり調査・考察を試みる。第4章では「時代のニーズに応えた発電機技術の変遷」を概観し、第5章では「ニーズに応え・実現した主要発電機技術」について詳述する。第6章ではタービン発電機の進展を支え、発電機の大容量化、高性能化、高信頼性などの多くの問題を解決したロータ軸材、エンドリング材、絶縁材料、電磁鋼板、高速バランス技術、そして励磁方式などの「発電機技術の発達を支えるサポート技術」についても述べる。

最後に、黎明期から今日までのタービン発電機技術の発展過程で得られた知識、経験、そして確立技術に基づき、大容量化を主とした将来の技術動向と発電システムの課題を第7章で考察する。

2 | 発電技術の推移

2.1 海外における発電・電力応用の推移¹

電気は、最も身近なところにあり、しかも最も使い勝手の良いエネルギー形態であり、現代に生きる私たちに不可欠である。しかし、電磁気学の歴史を振り返ってみる時、ここに到るまでの道は決して平坦ではなく、多くの時間とここに関わった研究者、技術者、そして技能者の多大な貢献を要した。

しかし、日本における電気応用は明治時代以降であり、しかも初期はすべて欧米からの輸入機器に頼らざるを得なかった。日本における電力事業を概観する前に、欧米諸国で電気機器がどの様に発展・実用されてきたかを見てみる。

電気現象は、既に紀元前のギリシャ時代にAmber（琥珀）を手で擦ると軽いものを吸引することで知られていたし、アジア産のMagnesia鉱石は杖の先端の鉄片を引き付けることが知られていた。夫々、Amberはギリシャ語でElectronと呼ばれElectricity（電気）の語源、またMagnesiaはMagnetism（磁気）の語源になっている。

この様に静電気現象は早くから知られていたが、電磁気によるエネルギー利用が始まったのは19世紀初頭であり、それ以降今日まで200年の経過の中で電気、磁気、そして電磁気の利用技術は著しい発展を遂げた。

特に、A.Volta（伊）が蛙の脚の実験にヒントを得て1799年に電池（Volta Pile）を発明してから電磁気学が急速に発展したと言われている。1824年G.Arago（仏）により『誘導電動機の原理』とも言われる永久磁石を使った回転円板の実験が発表された。1826年G.Ohm（独）が『オームの法則』を発表し、1831年M. Faraday（英）は電流により磁気が発生するなら、逆に磁気により電気を発生できるという着想から電磁誘導現象を発見し（図2.1参照）、これが『変圧器の原理』となった。Faradayの電磁誘導現象の発見を切っ掛けとして、その後多くの研究者によって変圧器、直流機、誘導機、同期機など各種の電磁機器が開発された。

2-1-1 発電機の発明

1808年H. Davy（英）はVolta電池短絡時のアーク閃



図2.1 M.Faradayの電磁誘導の実験²

光を発見し、これがヒントとなってアーク灯の出現となった。さらに、Faradayの電磁誘導の発見がVolta電池に代わる電源の研究を促し、発電機の開発に結びついたと言われる。

最初の発電機はイギリスで発明され（発明者不明）、4個のU字形磁石を手回しするものであった。その後、1832年A.H. Pixii（仏）が回転永久磁石方式による交流発電機を発明し、これに整流子を取付けて直流発電機とした。1835年頃にF. Clarke、W. Ritchie（共に英）が電機子回転式直流発電機を開発した。この頃、保守に手間が掛る石油ランプに代わる灯台照明用光源として直流電源によるアーク灯照明が検討され、蒸気機関駆動の永久磁石式回転電機子形直流発電機を開発し、1857年英国ドーバー海峡近くの灯台に設置した。

その後、1867年にW. Siemens（独）は永久磁石を使用しない画期的な自励式直巻励磁形、複T形電機子直流発電機を発明した（図2.2参照）。これ以前は励磁に永久磁石または電磁石を用いた他励式であったが、鉄

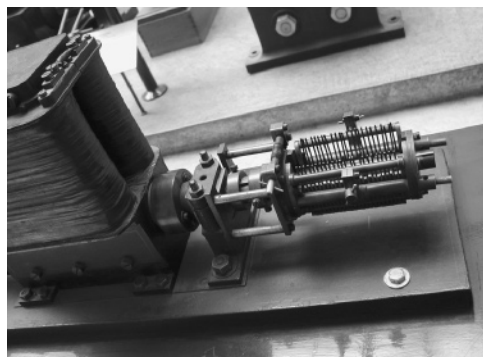


図2.2 W.Siemensが考案した複T電機子形発電機

¹ 川口 芳弘「あらすじ電磁気学史」国士舘大学工学部紀要 第33,34号

² [解説] 水銀を満たした壺2つに直列に直流を流す。左壺では固定した中心導体の周りを棒磁石が回転し、右壺では固定した磁石の周りを導体が回転する。

心残留磁束を利用し自立的に電圧を発生する自励式³に代えた。

1876年にSiemens社の職工長であったF. Alteneck (独) は、これをさらに改良したドラム形電機子直流発電機を開発し、今日の巻線構造に近い発電機を実現した。T. A. Edison (米) がドラム形分巻直流機⁴を製作したのは1882年で、電機子鉄心に薄い銅板を使用することにより鉄損の低減を図った。この年にEdisonは白熱電灯を発明し、その数年前にA. G. Bell (米) が電話機を発明しており、これらの発明を機に電気応用が急速に進み、電力需要が増加した。

2-1-2 直流から交流へ

電力需要増大に対し従来の分散形独立電源から、都市近郊や遠隔地の発電所から送電線により高電圧・大電流の電気を消費地に送る長距離送電方式が一般化してきた。

直流送電は、その電源である直流発電機に特有の整流子問題⁵により長距離送電に必要な高電圧発電機の製作が困難なこと、さらに送電途中での電圧降下などの問題により長距離送電には不向きであった (図2.3に直流、交流発電機の構造を示す)。

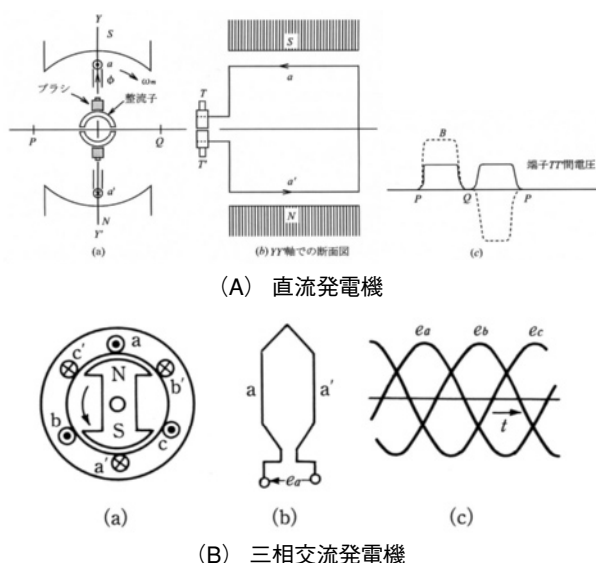


図2.3 直流発電機と交流発電機の構造

この様な状況下で、1870年後半に交流が世に出てきて英仏では従来の照明器具に交流電源を接続する試みがあり、1835年にはGanz社が変圧器を発明したこともあり交流送電の可能性が一段と高まった。

送電電力網構築上から交流は適しているが、交流普及の最大課題は電動機であり、特に交流電動機の開発であった。1885年にG. Ferraris (伊) が、偶然二相交流による回転磁界の発生に成功し、1887年にはF. Haselwander (独) が三相交流による回転磁界の有用性を発表した。同じ年N. Tesla (米) が90度位相の異なる二相誘導電動機を発明し、同時に多相交流発電機、多相送電、多相交流電動機などを考案しそれらの基本特許を取得した。これらのTeslaの特許をG. Westinghouse (米) が取得し交流事業を始めた。

しかし、交流電動機は一定速度運転となるが、直流電動機は電源電圧の調整だけで容易に速度制御ができることから交・直流にはそれぞれ一長一短があり、Edisonを筆頭とする直流支持者と交流支持者間で大論争が巻き起こった。

1889年M. O. Dolivo-Dobrowolsky (独AEG社) は、Teslaの発明した二相交流電動機の回転トルクが不整同になる欠点を改善した三相交流電源による三相かご形誘導電動機⁶を発明した。この交流電動機応用機器の出現により交流電源から動力を得るという課題が一気に解決した。

しかし、交流電動機は速度制御が出来ないという問題が依然として未解決であり、直流・交流論争はその後も続いた。その後、交流電動機は速度制御問題は減速ギヤーや駆動ベルトなどの速度調整法により解決され、三相交流電動機はトルク変動がなく、そして三相三線方式の方が二相三線方式⁷よりも送電電力量が大きくなることが明らかにされた。1891年にドイツで三相交流送電に成功したことで、交流の優位性が明らかになった。これらの理由から次第に交流が広く採用されるようになり、消費地から離れた地での大容量三相交流発電と高電圧・長距離送電からなる送電電力網が主流を占めるようになった。

- [解説] 磁極の鉄心を一度磁化すると弱い永久磁石になり、この残留磁束で電圧が発生するので自立的に発電状態に入ることを自励 (自己励磁の略) と呼ぶ。
- [解説] 中央部に軸への取付けの穴を打ち抜いた円盤状鉄板を積層して電機子鉄心とし、コイルはその外周にのみ施す構造。
- [解説] 交流を直流に変換する整流子片 (コミュテータ) は、多数の銅片を円形に配置し、その間をマイカ板で絶縁した構造で、遠心力・高電圧への耐力が低い。
- [解説] ロータ内の二次巻線がスロット中に収められた棒状の導体と鉄心の両側でこれらを短絡する端絡環とからなる誘導電動機。
- [解説] 120度 (電気角) の位相差で発電された三相交流を3本線で送電する三相三線式に対し、三相交流巻線の内1相分が無く、残り2相と中性点の3本で送電する方式を二相三線式と呼ぶ。

一方、1882年にイギリスで世界初の白熱灯による電気供給事業をはじめたEdisonは、余りにも直流に固執するあまり、電気事業の表舞台からやがて姿を消すことになった。

2-1-3 蒸気タービンの歴史と原理

タービン発電機駆動機であるタービンの技術は本調査の対象外であるが、発電機技術の進展との関わりが深いことからその歴史を簡単に記述する。

蒸気タービンの原理は紀元前120年アレキサンドリアのHeronにより考案された。中空回転円球、すなわち中空の軸内より蒸気を球内に導入し、球に設けられた曲管ノズルより噴出し、その反動で球を回転させるもので、原理上は反動タービン（Reaction-Turbine）と見なせる。

さらに、1800年後の1692年Giovanni de Branca（伊）が、蒸気の噴流を直接翼車に噴射して回転軸（ロータ）を回転させる方式を考案し、これは衝動タービン（Impulse-Turbine）の始まりと云える。その後、18世紀になってJames Wattにより往復動の蒸気機関が発明され実用に供された後、1883年に更に出力の大きな蒸気タービンとして衝動式タービンがG.de Laval（スウェーデン）によって発明され、1884年にはC.A.Parsons（英）によって多段（各15段の複流）の反動タービンが開発され、これが現在一般的に採用されているタービンの原形となった。

なお、蒸気タービンの理論体系はA.Stodola（チェコスロバキア）により確立され、その後の蒸気タービンの発展に大きく貢献した。

この他、衝動式タービンではRateau（仏）、Zoelly（スイス）、Curtis（米）などにより、反動式タービンではLjungstrom兄弟（スイス）による複流式反動タービンの改良・創案がされ、より高性能、大容量化が実現された。

2.2 日本における発電・電力応用技術の推移

日本に電気が紹介され電気利用が始まったのは明治時代初期で、欧米先進国に遅れること30年以上であった。発電技術も明治時代初期に欧米の発電機器や技術が導入されたことに始まる。文明開化の風潮が盛んな当時、日本にも文化の灯をともしことに大きな意義があり、個々の需要家に小形ダイナモ（直流発電機）を設置し電灯を灯した。

明治時代中期より紡績などの工業用動力源として電動力が使われ始めてから、現在の送配電網の原形ともいべき集中電源から多くの需要家に配電する方式がとられ、電気事業として経済性、安定供給が求められていった。

輸入機器や導入技術を起源とする日本の発電技術は電気事業の発展と共に、各時代のエネルギー事情や社会・経済情勢を強く反映しながら今日まで長足の進歩をとげてきたが、それぞれの時代によって技術発展分野やその進捗速度に特徴が見られる。

たとえば、日中戦争の勃発とともに物情騒然とした中であって精神的に極めて高い充実感に満ち長足の進歩を遂げた時代、戦後の苦難期をやっと克服し新生日本の著しい進歩と希望による誇らしい数々の技術成果を勝ち得た時代、そして近年のハイテクノロジーの本流としてその地歩はますます高まり、あらゆる科学技術の基盤に電気工学が浸透し、すべてのシステムが電気技術なしには成立しない現在へと繋がってきている。

以下に、黎明期から現在に至る日本の電気事業の進展を、主に一次エネルギーを電力に変換する発電機器の主流をなすタービン発電機技術の流れから概観する。

2-2-1 黎明期の電力—日本人と電気の出会

日本に最初に電気現象が伝わったのは江戸中期で、本草家後藤梨春（1696～1771）著『紅毛談』が日本で最初の電気に関わる文献と言われている。この書に記述されている『えれきてる』を読んだ平賀源内は長崎で壊れた『摩擦起電機』を入手、修理して1776年に完成した装置を『エレキテル』と名づけた。平賀源内は本草学を研究し、初めて『エレキテル』を治療に応用した。病人の体から火を出して治療すると宣伝し、製造販売も手がけた。時は江戸時代中期、日本で初めて電気を利用した人物と言われている。しかし、平賀源内が開いた電気学は、真の学問技術として定着せず消滅していった。

19世紀初頭に欧米で始まった電気・磁気・電磁気などを応用した電気機器が日本に紹介され始めたのは明治維新以降であり、電気通信分野から始まった。

後に電気学会初代会長（1888年）となった榎本武揚がオランダ留学中に『電信機』の発明を知り、モールス通信機2台をはじめ、江戸—横浜間32kmの電信敷設に必要な部品を持ち帰り、1869（明治2）年に開通させた⁸。この時、小形電灯や電動機も初めて日本にもたらし、日本の電気工業の先駆者として果たした役割は大きい。

⁸ 電気学会「電気学会100年史」 p 295

電信事業は急速に広まり、翌年には神戸－大阪間、翌々年には長崎－上海間に海底電信線が敷設された。これらはすべて輸入機器で、その製作・修理のために工部省電信寮に製機掛を発足させ、田中久重が招かれヘンリ電信機10台の試作に成功、引続きモールス通信機50台を製作した。1875（明治8）年に日本最初の電信機工場である田中製造所を設立し、東京芝浦電気の発祥となった⁹。

その次の電気工学との関わりは光である。1877（明治10）年開成校の卒業式にブンゼン電池を使って『アーク灯』が点灯され、さらに翌1878年3月25日、電信中央局開業祝賀会が東京・虎ノ門の工部大学校で開催された時にイギリス人教師W.R.Ayrtonの指導のもとでグローブ電池を用いてデュボスク式アーク灯（仏製）が点灯された（この日が後に『電気記念日』に制定された）。

1882（明治15）年に、東京電燈が明治7年から銀座の街を照らしてきたガス灯に加えてアーク灯を点灯し、日本で初めて電灯が一般市民の目に触れた。図2.4に示す『東京銀座通電気燈建設之図』は、アーク灯点灯の様子を描いたものである。



図2.4 『東京銀座通電気燈建設之図』
東京電力株式会社〔電気の史料館〕所蔵

アーク灯について白熱灯が点ぜられた。1884（明治17）年上野～高崎間鉄道開通記念式典の際、上野駅へ行幸された両陛下に熱燭灯24個とその中央にアーク灯1個が取付けられた照明をご覧にいらした。これが日本での最初の白熱電灯である。翌1885（明治18）年東京銀行集会所の落成記念式典の会場に40個の白熱電灯が点灯された。白熱電灯はすべて輸入品であったが、電源は工部大学助教授藤岡市助の設計・監督で三吉電機工場が製作した日本初の5kW白熱電灯用分捲発電機（直流発電機）であった。

やがて見世物的な照明から、工場照明へと実用的に

使われ始めた。特に、1886（明治19）年に大阪紡績は近代的設備を備えた紡績工場に白熱電灯を導入し人々を驚かせた。昼夜を問わぬ操業により生産量を大幅に増やし短期間で輸出するまでに成長した。

2-2-2 火力発電による電力供給網（直流）の誕生と発展（明治時代中期～）

1882（明治16）年に創立された東京電燈が、1887（明治20）年東京・茅場町に建設した日本初の営業用火力発電所である東京電燈 第二電灯局（現在の発電所）から、日本初の架空電線による一般電灯への給電を開始した。発電機器はすべて輸入機で、往復蒸気機関駆動エジソン式25kW直流発電機で発電した電気を直流三線式210Vで送電した。図2.5にその時の発電機と同型機を示す。

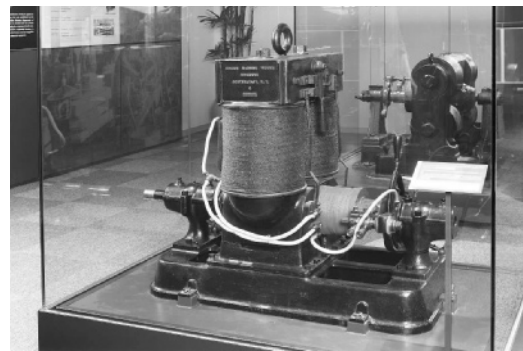


図2.5 17kW－110Vエジソン式直流発電機
東京電力株式会社〔電気の史料館〕展示

その後、東京市内に火力発電所が相次いで建設され、電灯利用者数もようやく増えるようになった。そして、この年に名古屋電燈、神戸電燈が、翌年には大阪電燈、京都電燈が創立し、他の都市にも電燈会社が続々と生まれた。

東京電燈は、米国エジソン会社が採用した火力発電による低圧直流発電方式を採用したが、1889（明治22）年に開業した大阪電燈は、最初から米国トムソン・ハウストン社製交流発電機を導入し交流電力を配電した。この他、関東地区の横浜共同電燈、品川電燈、深川電燈なども交流式を採用した¹⁰。

東京電燈が一般電灯への給電を開始してから5年間で管内の電灯取付け数は1万個になっていた。白熱電灯の普及、さらに1890（明治23）年の電話交換事業の開始などともなあって、それまでの需要地毎の分散形独立電源から架空送電方式による電力供給網へと移行してきた。しかし、1987（明治20）年頃から10数年間

⁹ 東京芝浦電気株式会社「東京芝浦電気株式会社八十五年史」p46（1963）

¹⁰ 東京電力株式会社「関東の電気事業と東京電力」p4（2002）

は市内配電時代で、送電電圧も最高3,000Vであった。

ところが、電燈会社は創立したものの、肝心の電球はすべて輸入に依存した。国産電球製造の機運の盛り上がりに応じて渡米した藤岡市助はEdisonが発明した白熱電球に触れ、帰国後は教職を投げ打って東京電燈の技師長に専任し、国産化に取組んだ。その後東京電燈を離れ、1890（明治23）年に白熱電球の製造販売を目的とする白熱舎を創設した。これが日本初の白熱電球製造所であり、東京電気（後に芝浦製作所と合併し東京芝浦電気となる）の始まりである。

2-2-3 水力発電の始まりと電力供給網（直流・交流混在）の構築

電気の優れた利便性により、この頃電灯以外に動力源としての電気利用が進み、電力需要の伸びにともない電源開発が必要になった。1891（明治24）年に日本初の営業用水力発電所である京都水利事務所 京都蹴上発電所が落成した。翌年送電を開始した1号機は80kW-500V直流発電機（輸入品）であり、日本における初の営業用水力発電である。最終的に19台設置されたが、その大半が輸入機器であった。その中で、1895（明治28）年に完成した15号（運転開始7台目）二相-60kVA-2,000V交流発電機は国産水車発電機1号機である。これらの発電機は、1台の水車ランナーの回転軸により複数台がベルト掛け駆動される用途別専用発電機であり、それぞれ専用送電線によって消費地まで送電された。その中には1895（明治28）年営業運転を開始した京都市電気鉄道（市電）に電気を供給する専用発電機もあった。

この様に水力発電の基礎技術が確立されると、当時日本には水資源が豊富であったこともあり水力電源開発が進み、15~80kW級の小水力発電所の建設が急増した。

しかし、発電の主力は依然として火力発電であり、1895（明治28）年に建設された東京電燈 浅草発電所に、当時日本のみならず世界的にも最大級の国産大容量機である二相-200kW-2,000V-100Hz交流発電機（石川島造船所製）が1号機として設置された。しかし、世界的大容量機の設計・製造技術があったことは注目に値するが、完成品の運転効率は低く、故障も多発したことから、2号機は輸入機となり三相-265kW-3,000V-50Hz交流発電機が導入され、後の関東地方における50Hz標準サイクルの起源となった。これが50Hz交流送電のはじまりである。また、当時レン

ガ造りが一般であった発電所用煙突に、周辺住民の煤煙公害による建設反対運動対策から口径2.7m、高さ60mの当時日本最大の鋼製耐震煙突（芝浦製作所製）が採用された（図2.6参照）。

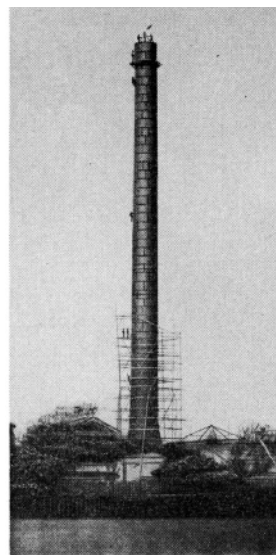


図2.6 東京電燈浅草発電所に建設中の鋼製耐震煙突

関東地方で浅草発電所に先立ち交流発電を採用したのは横浜共同電燈 常磐町火力で1890（明治23）年ブラッシュ式单相-60kW-2,000V-133Hz交流発電機（輸入機）であり、交流発電としては1889（明治22）年の大阪電燈に続き国内2番目であった¹¹。

2-2-4 産業基盤としての電力普及（交流、長距離・高電圧送電）

1892（明治25）年頃には紡績をはじめとして各種産業が創立され、電気事業も盛んになるにつれ電気機器の需要はすこぶる将来性に富んだものとなった。日本初の電機工場として主に通信機器を製作し、その後は海軍の“水雷国防”に呼応して水雷製造で飛躍的に事業拡大してきた田中製造所は芝浦製作所と改称、電気機械製造を事業の柱とし、後の重電機専門製造業者としての基礎を築いたのはこの頃であった。

1894（明治27）年に勃発した日清戦争終結後に1年余の好景気、そして一時的な不況を経験した後、1897（明治30）年頃から再び活気を呈した。大容量機や特殊製品が多数製作され、あたかも新興電気工業の発達期にあたり、この時期に多くの電気機器製造会社が創立された。

1904~05（明治37~38）年の日露戦争は日本の勝利に終わったが、国力・工業力強化から戦後に各種企業の勃興機運にあった。しかし、工業の発展にとって欠

¹¹ 東京電力株式会社「関東の電気事業と東京電力」 p 44,53（2002）

くことのできないものは動力源であり、当時日本でも電力への転換が盛んに進められており、当時はもっぱら小規模火力発電に頼っていた。

もともと水力資源の豊富な日本が、これを放置して火力発電にのみ依存するのは不合理であり、水力発電の開発こそ日本の工業を隆盛させ国家を繁栄に導く根本であるとの一部識者の提唱に呼応して、多くの会社が水力発電の開発に着手した。

しかし、当時運転中の営業用水力発電設備は、その1号機である京都蹴上発電所をはじめとして15～80kWの小規模水力で、その大半が輸入機器であった。しかし、1899（明治32）年に郡山絹糸紡績と広島水力電気の水力発電所で、最長26km－10kV送電に成功し、以後各地に特別高圧送電の計画が進んだ。

特別高圧送電に必要な特別高圧の変圧器や碍子、そして変圧器絶縁鉱油の国産化に成功したこともあり、1907（明治40）年頃には各地の発電所に大規模水力発電設備が続出した。

東京電燈 駒橋発電所（出力15,000kW）は、1907（明治40）年完成と同時に日本初の55kV送電電圧による東京・早稲田まで76kmの送電を開始した。次いで1914（大正3）年までの間に、各地の発電所が、55kV、66kV、77kVと漸次高電圧の送電を開始し、猪苗代水力 第一発電所（福島県）の35,000kW一部完成、115kVという画期的な高電圧を採用して1915（大正4）年に東京・田端変電所まで当時世界第3位という226kmの長距離送電を開始した。

この様な大規模水力の電源開発と長距離・高電圧送電により、1912（明治45）年には、それまで電力の主流をしめていた小規模火力発電を超えて水力発電が主となり、所謂「水主火従」の時代に入り戦後10年頃まで続いた。

2-2-5 電力応用拡大による国産化の進展（輸入技術）

1897（明治30）年から10年間、電気事業は着実に成長を遂げていった。これは、紡績、製糸、織物などの軽工業の発達による産業革命、軍事産業の拡大、電気鉄道の発展により電力需要が急増し、一方電気技術面ではこれに対応して、郊外型大規模火力発電所の出現と長距離・高電圧送電技術の進歩による大規模水力発電所を含めた電源開発が盛んに行われたためである。

しかし、これらの火力発電所や大規模水力発電所に

据付けられた原動機や発電機の大半は欧米からの輸入機器であった。

日本で優れた電機工場をつくる際に問題となったのは、資本よりもむしろ技術であった。当時の電機製造会社には、自主技術確立に必要な研究開発体制を構築するための時間的、資金的な余裕がなかったことから、世界有数の海外電機製造会社と技術提携して、その知識と経験を吸収する方が得策と考え、なんとしても外国技術を導入する必要性が生じてきた。その結果、当時の主な国内電機製造会社の多くは欧米電機製造会社と技術提携を結んだ。これにより発電技術のみならず多くの電動応用技術も導入され、『第一次技術導入時代』とも呼べる時代が到来した。

輸入機器と導入技術により目覚ましい発展を遂げる水力発電の陰で、火力発電は依然として輸入機器に全面的に依存しており、明治時代後期のタービン発電機最大容量は3,000kW、大正時代初期には5,000kWまで大形化した。

この頃、火力発電プラントとして新技術が導入された。1905（明治38）年に送電開始した東京電燈 千住火力発電所で原動機として1,500馬力パーソン横置蒸気タービン¹²（ウエスチングハウス社製）が導入され、それまでの往復蒸気機関と比べて効率が良かった上に、運転中の騒音と振動が少ないことから機関の大形化に適していた。1900年前後には世界的にこのパーソン蒸気タービンを用いた大容量火力発電所の建設が相次ぎ、東京電燈でも従来の都市型発電所に代わって、郊外に蒸気タービン数基による大規模火力発電所を建設して需要の増加に対応する狙いがあった。この頃になって住民の建設反対運動が起きはじめ「市内の人口は漸く稠密の度を加え市内に火力発電所を存在することが許されない情勢」となっていた¹³。

また、この時期は炭価が戦争の影響を受け不安定であったことから、電源構成を従来の火力偏重から水力開発も注目され始め、一部火力発電所建設が見直し・縮小された時期であった。

国産タービン発電機は、1895（明治28）年に石川島造船所が東京電燈 浅草発電所向けに製作した単相－200kW－2,000V－100Hzタービン発電機以降特に進展は見られなかった。1908（明治41）年に三菱造船所長崎造船所がパーソン社（英）との技術提携により三菱佐渡鉱山625kVA機を製作した。本機は、国産大容

¹² [解説] これ以前の原動機は蒸気エンジンで往復機関であり、蒸気タービンは蒸気エンジンと比較して回転が非常にスムーズである。

¹³ 東京電力株式会社「関東の電気事業と東京電力」p104,105（2002）

量タービン発電機1号機であり（図2.7参照）、その原動機も初の国産蒸気タービンであった。その後、1918（明治45）年に当時電力用タービン発電機として国産最大容量の大阪電燈 春日出第一火力発電所4極－12,500kVA機が完成した。

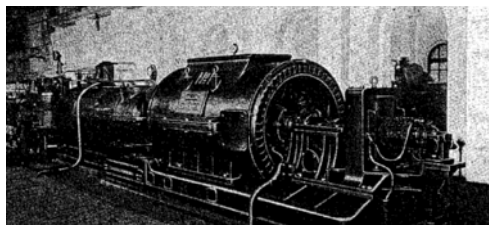


図2.7 国産第1号機625kVAタービン発電機
2極-625kVA-3,500V-2,400min⁻¹-40Hz-0.8pf

1914（大正3）年に勃発した第一次欧州大戦が日本の産業界に大きな影響を与え『大戦景気』と呼ばれる好況をもたらし、電気機械工業にも大きな刺激を与えた。大戦勃発後、同盟国であったイギリス、そしてフランス、ロシアからの軍隊派遣要請を「わが国の軍隊の唯一の目的は国防にあり」とすべて断り、連合国からの軍需品・日用品を大量受注し、1914（大正4）年頃から輸出が急増し、『第二期産業革命』と呼ばれた。それらの影響で日本の重化学工業は大きく進展し、国内では工場設備の電化などによって電気機器に対する需要は激増した。また、それまでの電気機器輸出国であった敵対国ドイツ他からの輸入が中止したこともあり、国産機器の需要がそれだけ増大した。

戦時景気の後、1920（大正9）年に財界を襲った世界経済恐慌にも電気業界はそれほど影響を受けることなく順調に推移していった。さらに、1923（大正12）年9月1日に関東大震災が発生し関東一円の一般家庭、生産設備、そして電力設備に大打撃を与えた。しかし、復興過程では電動機の普及を早める結果となり電動力応用時代への移行を加速した。

しかし、東京・芝に主力工場を持つ芝浦製作所は、二次的に発生した火災により、この地に工場建設してから40年間、営々と築き上げてきた工場が完全消失した。なかでも約100万枚に達する設計図面と多数の技術関係書類が全焼したことは取返しのつかない痛恨事であった。そして、当時全国電機製品生産の60～70%を占めていた工場が機能停止したため、その影響するところは極めて大きかった。

一方、蒸気タービンは明治時代後期に発電機技術と一緒に技術導入され、輸入1号機の図面によるリピート機として国産化されていった。あるいは、造船会社

が、単独に欧米のタービン会社と技術提携した例もある。大正時代に入り海軍力増強が緊急課題となり、軍艦推進用高性能・大容量蒸気タービンが必要となった。八・八艦隊による強力な艦隊編成を織り込んだ『大建艦計画』承認後、蒸気タービン製造会社も製造設備を増強し対応していたが、主力艦の削減を意図したワシントン軍縮会議により大打撃を受けた。その結果、船舶関係の需要が激減し、生産の主力を陸用タービンに移さざるをえなかった。

このような経緯から発電用蒸気タービンは早くから国産技術として育ち、独自設計により次々と大容量化を実現した。大正時代後期から昭和時代初期には、タービン発電機の製作可能最大容量をはるかに超える75,000kW級まで製作可能な国産技術を確立し、世界的にもトップレベルにあった¹⁴。図2.8に1930（昭和5）年に製作された八幡製鉄 西田発電所納25,000kW－1,500min⁻¹タービンの低压ロータを示す。その後の大容量タービン製造技術の基礎となった。



図2.8 八幡製鉄 西田発電所国産25,000kWタービン低压ロータ
(株)東芝 京浜事業所所蔵

一方、タービン発電機はロータ軸材の制約、高信頼ロータ絶縁材料技術の未達などにより高速・大容量化が困難で、発電機が“後追い”の時代であった。その結果、わずかな家用小規模火力発電設備が輸入機器の模倣や輸入技術によって国産されたが、営業用火力発電設備は依然として欧米からの輸入機器に依存し、大正時代末期で43,750kVA機まで大容量化していった。

1926（大正15）年に完成した“お化け煙突”で有名であった東京電燈 千住火力発電所は、当初浅草発電所の建て替えとして浅草に建てられる予定だったが、関東大震災で市街地が壊滅状態にあり郊外の千住に変更になったものである。

1期工事として25,000kW、そして2、3期も同型機で、すべてイギリスから輸入された12缶のボイラと3台の

¹⁴ 東京芝浦電気株式会社「蒸気タービン発電機設計製作の今昔」東芝レビュー第9巻第6号（1954）

タービン・発電機を備えた郊外型大規模発電所であった。これは、同時に「水火併用時代」の到来を告げるものでもあった。それは、大正時代後期では日本全体で見た電気事業の電源構成は水力が圧倒的に多く、60～65%を占めており、所謂「水主火従時代」であったが、渇水期などの水力の発電力減少を大規模火力で補完する「水火併用時代」に入ったことを意味していた。

2-2-6 輸入技術咀嚼と自主技術による大容量化

大正時代に国産化の多くの取組みがあったが、国産火力発電機器は技術力・製造経験不足などにより利用側の信頼がなかなか得られず、国産化は思うように進まなかった。輸入機器に過度に依存した結果として債務超過になり、特にタービン・発電機の輸入総額は、年間数百万円（当時）を優に超した。この状況は昭和時代に入っても変わらなかったが、国際情勢の悪化などにより漸次英米から発電機器が輸入できなくなった。この様な時代背景から機器の信頼性、高性能など技術的問題以前に、とにかく「国産機器を使う」、「輸入品は使わない」という時代であった。英米からの輸入タービン発電機は、1932（昭和7）年の山陽中央水電 飾磨第三43,750kVA機を最後に第二次世界大戦後まで途絶えた。僅か同盟国ドイツのAEG社から東京電燈鶴見火力62,500kVA機が1936（昭和11）年に輸入された。

この様な社会情勢下で、電機製造会社にとっては「需要があれば作る機会が必ず得られる」、「作ればそれだけ経験がどんどん増え、技術も向上し、製作もうまくなる」という時代の到来であった。勿論、電機製造会社の努力はあったが、やはり時勢がそうさせたと言わざるを得ない。このような経緯により経験を積んでゆくなかで輸入品を凌ぐものが製造され始めた。

社会情勢の追い風で国産化は加速度的に進んだが、基本的にはすべての主要基本技術は輸入技術であったことは否めない。大正時代後期から昭和時代初期に導入された欧米の標準設計機がベースになっており、輸入技術（第一次技術導入）を咀嚼し、製造実績を積重ねるなかで急速に力をつけていった。図2.9に技術提携により供与された海外電機製造会社のデザインシートを示す。

1933（昭和8）年には当時高速機として世界的記録機の2極-22,500kVA-18,000kW-3,600min⁻¹機を完成した。さらに、2極-30,000kW-3,600min⁻¹機、4極-75,000kW-1800min⁻¹機をアメリカと競うように記録機を相次いで完成させた。戦前の最盛期であり、単機最大容量では世界的水準を行くものであった。この様

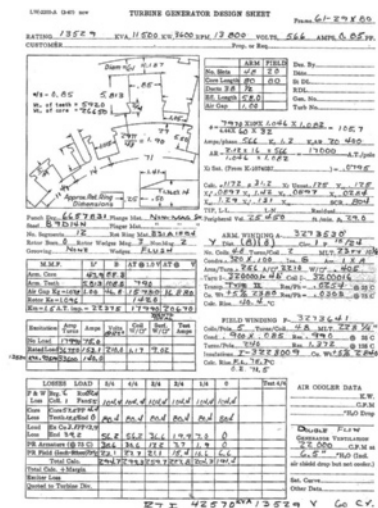


図2.9 技術提携により供与された標準機的设计シート

に短期間で目覚ましい技術的進展を遂げた理由は、大形ロータ軸材の製造技術の進歩、アスベストベークライトモールド絶縁物の実用化などのロータ用絶縁材料の進歩がある。

2-2-7 孤立による先進技術・重要資源の入手難

国際関係の悪化による輸入中止、第二次世界大戦への突入で技術的にも孤立し、自主技術に一層頼らざるを得なくなった。技術基盤の軟弱さに加え、主要材料の入手難、発電プラントの苛酷な運転による新たな問題が生じ対応に苦慮した。

一方、1931（昭和6）年の満州事変を契機に、軍需産業の躍進があり、電力需要も増加したが、それ以前の確立技術を駆使して逼迫する電力需要に対応した。

資材不足の中で戦時規格（Z規格）を制定し、電気機器に必要な主要材料も代用品によって製造や保守が行われた。もの不足による緊急的な処置ではあったが、反面、この時代の節約、知恵と工夫による応用の精神が、ある意味では戦後の大きな技術進歩に結びついている。

『国家総動員法』により、各電機製造会社が保有している技術を公開し、同業他社に技術移転することにより国レベルでの総合力向上が図られた。

2-2-8 空白時代後の輸入技術による回復と自立 (戦後、火力勃興時代)

第二次世界大戦前および戦中において、欧米では電力需要の急増に支えられ、発電機器の順調な製造が続いた。特に、アメリカは今日の発電技術の基礎となった研究に戦前より取り組み、タービンでは高温・高圧・大容量化技術を蓄積し、タービン発電機も既に戦前に66MVA水素冷却機を製作し、戦時中も着実な技術進歩があった。

1950（昭和25）年に政府電力調査団が訪米し、目覚ましい技術進歩や大規模製造設備を見聞する機会を得た。既に2極-100MW級-3,600min⁻¹タービン発電機、1,050F（566℃）-2,000psig（14.6MPa）蒸気タービンが実用されていた。

翌年電力再編成があり、これと前後してすべての国内電機製造会社は、『空白時代』の大幅な遅れを取戻すべく欧米電機製造会社と技術提携（第二次技術導入）した。1955（昭和30）年頃から始まった高度経済成長に伴う電力需要の急増と経済的水力資源の減少、火力発電設備の信頼性と経済性の向上などにより、戦前までの水力中心の電源開発が火力（特に汽力発電）主体となり、1962（昭和37）年には「火主水従」の電源構成へと移行していった。

始めは急増する電力需要に応じる形で海外から新鋭大容量機が次々と導入され、その後は国産技術の育成と保守の両面から1号機輸入、2号機以降は導入図面により同型機を国産するケースが次第に増えていった。

初の75MW再熱プラント¹⁵が輸入され、引続き国産75MW、125MW再熱プラントが建設されたのはこの頃である。この時期、逼迫する電力需要対応が急がれ建設期間短縮から初号機より国産機器が採用され、自主技術による55MW水素冷却機が製作されており、戦前からの製造経験の蓄積と技術力のあらわれであり特筆に値する。図2.10に国産初の水素冷却67MVAタービン発電機を示す。

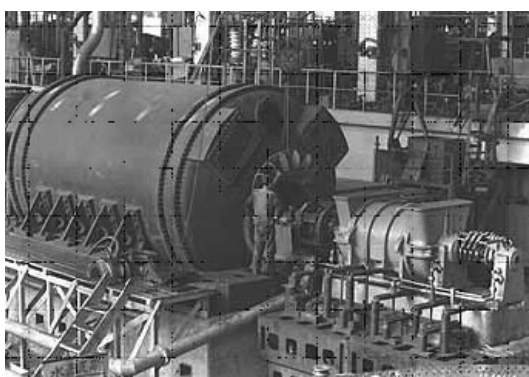


図2.10 国産初の水素冷却67MVAタービン発電機

大容量化時代の幕開けで、1980（昭和55）年頃にかけて75MW、220MW、375MW、500MW機と平均35MW／年のペースで単機容量が増大した。

技術提携で入手した図面には大容量化の多くの新技術が包含されていた。現在設計・製作されている大容量・高性能のタービン・発電機の基本技術の大半はこの時期に導入された。これらの技術の消化、主要材料の国産化を図る中で技術を蓄積していった。

2-2-9 国産化時代・大容量化時代

1970（昭和45）年頃より一時的にジョイント設計（Joint Design）の時代に入った。客先要求に沿って決定した機器仕様に基づき基本計画図を作成した後、技術提携先のチェック&レビューを受けてから製作した時代で、主にタービン機器が対象であった。このような方法で450MW級機を製作した。

これらの経緯を経て、主要基本技術は導入技術であるが、自主設計によって500MW、600MW、700MW機を次々と製作し、平均10万kW／年のハイペースで単機容量が増大していった。これらの集大成としての700MW-3600min⁻¹機が完成した。当時、世界的に見て738MW機が据付中、750MW機が製作中であったことを考えると世界最大級機であった。

1980年頃からは更なる大容量化、性能向上指向の時代で、1軸形のタンデムコンパウンド形プラント¹⁶に代り、1蒸気発生源-2軸タービン・発電機で構成されるクロスコンパウンド形1,000MWプラント¹⁷が完成したのもこの頃である（図2.11参照）。

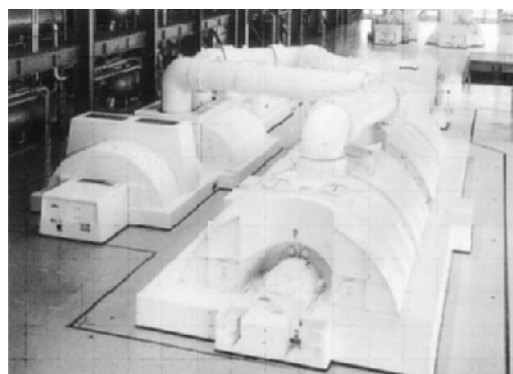


図2.11 1,000MWクロスコンパウンド形汽力発電プラント

2-2-10 技術多様化時代

1973（昭和48）年および1979（昭和54）年の2度の石油危機を経てエネルギー情勢は激変し、火力発電は脱石油を目指した燃料多様化が求められた。これ以降

15 [解説] タービン車室でロータに回転力を与え圧力・温度が低下した蒸気を抽気してボイラで加熱した後、再びタービン車室に戻し回転力をえるシステム。

16 [解説] 複数のタービン車室・ロータと発電機・ロータを直結し串形に機器配置した発電プラント（3-10-1参照）。

17 [解説] 蒸気発生装置からの蒸気をプライマリー、セカンダリー2軸のタービン車室・ロータに導入し夫々の発電機を駆動する発電プラント（3-10-1参照）。

30年間弱、プラントおよび発電機器の大容量指向は停滞し、単機容量記録が更新されることはなかった。

この様な状況下で、一層の高効率化、負荷調整能力の拡大、小形・軽量化などの要求があり、従来にも増して高い技術対応力が必要となってきた。タービンでは、熱サイクル、蒸気条件、および翼形などの改善による内部効率やプラント効率の向上、発電機でも低損失化、小形・軽量化などの技術による高性能化が図られた。

この結果、火力発電設備の熱効率、蒸気条件の高温・高圧化、システムの改善などにより年々向上が図られてきた。近年の例としては、一層の熱効率向上と負荷追従性の改善のため火力発電システムでは超臨界圧変圧運転方式¹⁸、新発電システムとしてコンバインドサイクル発電方式（3-10-3参照）の導入が進められた。特に、ガスタービンを基軸とした発電システムは環境問題の観点からも注目され、コンバインドサイクル発電が広く採用されてきている。

ガスタービンの高温化により高効率・大容量化が図られ、複数台の1軸形発電システム（単位機、軸と呼ぶ）、あるいは複数のガスタービン駆動発電システムとその排熱ガスの熱回収で発生した蒸気による蒸気タービン駆動発電システムを組み合わせシステムなどによるプラント容量の大容量化が著しい（3-10-3参照）。

この発電システムに組込まれる発電機は、簡単な構造、容易な運転性、高信頼性、低価格、そして短納期などの要求から「技術のローエンド化」が望まれる。たとえば、空気冷却機の適用容量の拡大で300MVA級機が実用され、500MVA級の技術が開発されている。また、1軸形発電システムでは発電機容量が大きくなることから、従来ステータコイル水直接冷却機で製作していた容量範囲をステータコイル水素間接冷却機で実現するもので、600MVA級機は既に実用されており、750MVA級までの対応技術は確立済である。プラントの大容量化要求に対しては、構成機器を増やし複数台設置する方法で対応でき、1系列¹⁹で1,400MW級のプラントが実現されている。

現時点における最新鋭火力発電所の発電端熱効率²⁰は40%強程度でほぼ頭打ちの状態となっているが、最新鋭コンバインドサイクル発電プラントでは55%程度の高効率が実現されており、さらに高効率化を目指し

た次世代コンバインドサイクルの開発が着実に進んでいる。

一方、石炭を燃料とする通常火力発電所は、近年減少しつつある電源立地点の最大活用に加え、石炭火力の経済性追求などの要求から再び大容量火力プラントの要求が高まり、これらに応じて世界最大級の2極-60Hz、1,000MWタンデムコンパウンド形機が完成している（図2.12参照）。

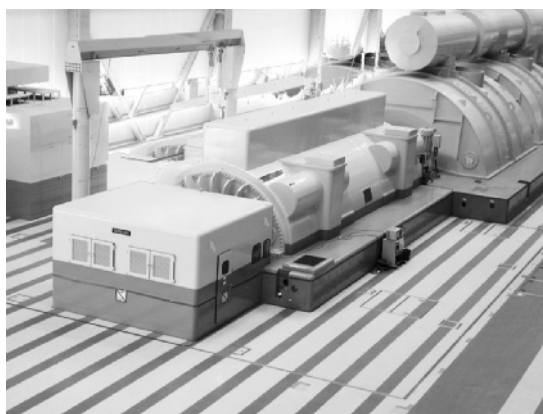


図2.12 世界最大2極-60Hzタンデムコンパウンド形1,000MW火力発電プラント

以上、わが国における火力発電プラント、タービン発電機の黎明期から現在までの大容量化の推移を概観したが、そのプラントの大容量化はタービンと発電機が交互に制限要因となり、例えばタービンが制限要因となり新しい対応技術で解決すると、次は発電機が制限すると言った歴史の繰り返しであった。

図2.13に2極-60Hz機を例に火力発電プラント機器大容量化の推移と対応技術の変遷を示す。

以上、日本における電力用タービン発電機の技術について各時代背景との関連でどのように変遷してきたかを表2.1にまとめる。

18 [解説] 高温高圧蒸気を用いプラント効率の向上を図るため水の臨界点（K点）22.1MPa、374℃を超えた蒸気を使用するタービンプラントによる負荷調整運転。

19 [解説] 複数台の発電ユニット（軸と呼ぶ）より構成される発電システムを系列と呼び、運用上は1台の発電システムとして運転する。

20 [解説] 一次エネルギー100に対し実際電気エネルギー（kW）に変換できる割合。

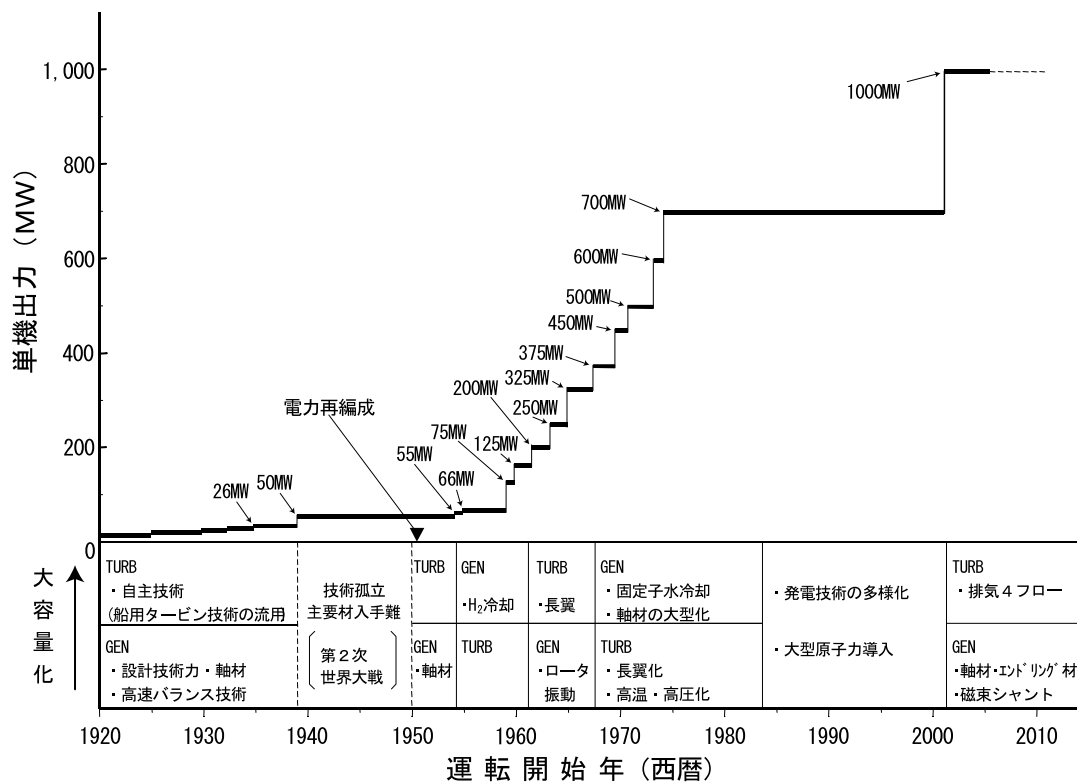


図2.13 火力発電プラント機器大容量化の推移と対応技術（2極-60Hz機）

表2.1 電力用タービン発電機技術の変遷 黎明期～第二次世界大戦

年 代	明治初期	明治中期	明治後期～大正初期	大正～昭和初期	戦前・戦中
時 代	機器輸入	模倣／製造国産化	輸入技術／製造国産化	自主技術	技術孤立化
時代の特徴	・主に照明用電源 ・全機器輸入	・電力利用の分野が広まる ・輸入機器模倣による製造国産化の始まり	・輸入技術（第一次技術提携）による製造国産化 ・家庭および一般産業における電力利用の普及	・導入技術に基づく自主技術確立による水力・火力大容量化 ・船用技術によるタービン技術先行（軍縮により陸用へ）	・国際情勢悪化による技術情報・主用資材の入手難 ・戦時体制下での軍需増による電力需要増
	・需要地または隣接の分散形独立電源（直流） ・発電機と需要家間の専用回線による送電	・輸入機器による小規模火力発電（蒸気エンジン駆動）が主（DC→AC） ・集中電源・市内架空配電	・大容量水力発電・高圧長距離送電が主（水主火従） ・三相交流発電が主流 ・蒸気タービン駆動火力（国産機器）による集中電源・高圧送電	・都市近郊型大規模火力電源（水火併用時代） ・高速蒸気タービン駆動の大容量火力・高電圧送電	・需要増に応える世界的大容量水力・火力プラント急増 ・植民地への記録的大容量機器輸出 ・世界最大級高速大容量火力機の相次ぐ完成 ・戦後の約50年間は空白時代
発電プラントの特徴	・運転に関する知識習得	・設計、製造技術基盤の構築	・設計、製造技術の確立と共有化（一部技術者が占有） ・主要材料の入手難（軸材、絶縁材料、接着剤他）	・製造経験不足の国産大容量機に対する信頼性確認の場 ・高強度・大形一体塊状軸材の入手難 ・高耐熱、高信頼、高強度絶縁材料不足 ・高速バランス技術不足	・技術孤立による次世代大容量・高性能技術の準備 ・主要資材（Ni、Mn鋼、アスファルト、アスベストモールド材）入手難 ・戦時下での過酷な運転
技術課題	・修理に関する知識習得	・先駆者的技術者と卓越した「名工」の存在	・電機製造会社の創立 ・欧米先進電機機製造会社との技術提携	・低速機（4極機）による大容量化（組立てロータの採用） ・海外標準設計機の導入（火力機） ・卓越した技能者依存の製造（合わせ加工組立て） ・駐在外国人技術者による指導	・導入蓄積技術による増産・大容量化対応 ・備蓄資材による世界的記録機器の完成 ・Z規格（戦時下で要求性能・品質のレベルダウン） ・各電機製造会社が保有する設計・製造技術公開
対応策・技術					

表2.1 電力用タービン発電機技術の変遷 終戦後～現在

年 代	戦後(昭和25年以降)	昭和40年代	昭和50年代	昭和50年以降	昭和55年以降～現在
時 代	輸入技術／製造国産化	自主技術／大容量化	独自技術/輸出	技術多様化	低価格競争
時代の特徴	- 戦後復興の需要増による電力不足に火力が対応 - 欧米先進メーカーとの第二次技術提携	- 輸入技術咀嚼による自主技術確立 - 輸入要素技術ベースの自主設計による急速な大容量化	- 海外市場への進出(国内市場のかげり) - 海外メーカー保有特許回避の独自技術開発	低成長下での燃料事情、プラント運用、発電システムの変化と多様化	- 国内外市場の縮小による機器低廉化 - 規制緩和 - ライフサイクルコスト低減の重視
発電プラントの特徴	1号輸入、2号以降国産 - 大容量・高効率の新鋭火力プラント建設相次ぐ - 水素冷却発電機の採用 - 火主水従始まる	- 高度成長下の急速需要増への火力プラント増設 - 急速な大容量化(最大容量機の伸び10万kW/年) - 石炭→重油 焚きプラント - 遠隔地大容量火力プラント増設(ベース負荷運転)	- 輸送制限緩和技術による内陸発電所建設(含海外) - 発電プラント運転の自動化(CPU導入)	- 脱石油→燃料多様化(LNG・石炭) - 新規プラント建設→既設プラントの延命・余寿命予測 - 省エネ・環境問題→高効率化・複合発電システム - 原子力増→火力発電の負荷調整運転(DSS、WSS、多頻度起動停止) - 運転最適化省人化のプラント自動化	- 大容量複合発電システムが主流(燃料効率改善・環境問題対応) - ガスタービン高温化による高効率・大容量化(600MVA級コンバインドサイクル発電プラント) - 火力発電の蒸気条件改善(高温・高圧化)による効率改善 - 原子力発電プラントの大容量化(立地問題、環境問題)
技術課題	- 大容量・高性能プラント機器の設計・製造技術不足 - 主要高性能資材の不足	- 大電流・高電圧ステータコイル設計・製造技術 - 大口径・高強度軸材、エンドリング材 - バランス技術 - 解析技術(大容量化、高性能化) - 大容量電力の送電安定化	- 輸入技術特許回避のための独自技術開発 - 輸出先運転レベルに適したプラント機器設計技術力 - 新技術(独自技術)の信頼性検証	- 解析技術の高度化(電気・機械解析) - 疲労設計(調整運転による繰返応力) - 余寿命推定技術 - サーマルバランス技術 - 運転技術(特に、負荷調整運転プラント、コンバインドサイクルプラント) - 大容量電力の送電安定化	- 世界レベルでの資材調達による製造コスト低減(情報・交渉力) - 海外生産のための技術ドキュメント整備と技術指導 - 限界設計のための技術力 - グローバル技術力 - 技術のローエンズ化(製造コストの低減) - 製造合理化(含む製造自動機の適用拡大) - 世界レベルでの資材調達 - ボーダーレス下での製造拠点化(製造の国際化) - ローエント設計技術の確立(間接冷却機の限界容量拡大、大容量空冷機) - 標準設計・パッケージ化 - 製造工期短縮
対応策・技術	- 欧米メーカーとの技術提携(契約形態:包括、個別) - 火力機初号機輸入と輸入図面による2号機以降の製造国産化 - 駐在員制度による技術習得の加速 - 主要資材の輸入(金属材料、電磁鋼板、レジンなど)	- 直接冷却技術開発(ロータ:ガス直接冷却、ステータ:水/油) - 軸材鍛造技術の著しい進歩(高強度ロータ/エンドリング) - 輸入図面・機器に学び設計法の確立と自主設計 - 失敗に学ぶ(事故例) - 送電安定化の発電機励磁制御方式	- 新技術開発と採用 - 新技術の信頼性評価技術の確立 - 電磁/機械解析への計算機応用(差分法・FEM)始まる	- 差分法、FEMの設計への適用 - 疲労データの整備(劣化要因別の寿命消費データ) - サーマルバランス装置・バランス技術の確立 - プラント制御の自動化率アップ(広範なCPU適用)→運転員削減・運転最適化 - 励磁制御システムの高速応度化(サイリスタ直接励磁の導入)/再閉路運転 - 逆相電流耐量強化技術(送電線燃焼省略、インバータ機器の普及への対応)	

3 | 電力事業の推移

3.1 電気事業の創業期（明治初期～後期）^{21,22,23}

日本における電気の利用は、明治維新後の文明開化の波によって怒涛の如く押し寄せた多くの欧米文化の中で持ち込まれた電気応用機器の使用に始まった。まず、電源に電池を使用した電気通信に始まり、1869（明治2）年に開通した江戸－横浜間、翌年には神戸－大阪間、そして1871（明治4）年には長崎－上海間に海底電信線が敷設されている。比較的短期間で、国内の主要都市間を結ぶ通信網が出来上がっていった。

その次は照明である。1878年3月25日、電信中央局開業祝賀会でグローブ電池を用いてアーク灯を点灯したのが最初である。その後、1882（明治15）年11月1日に銀座2丁目にあった東京電燈銀座仮事務所前で2,000燭光のアーク灯を点灯し、連夜点灯され銀座名物となり、見物人で大混雑となったと言われている（図2.4参照）。アーク灯について1884（明治17）年に白熱灯が点ぜられた。

このような電気利用は、電池を電源としており、しかも“見世物”的な性格を持っていた。

当時の日本は、ようやく行灯から石油ランプへの移行段階で、電燈による照明など想像も出来なかったことだが、電源として発電機を用いるようになってその実用価値が認められた。

白熱灯はT.W.Swan（英）とT.A.Edison（米）により実用化され、1878（明治11）年、1879（明治12）年にそれぞれの方式で炭素電球を完成した。これを機に欧米の電灯事業は急速に発展し、まもなく日本にも光の文化が輸入された。

このような世情の中で、電灯事業の有望なことを先見した当時東京貯蔵銀行頭取の矢嶋作朗らが東京都知事に『電燈会社創立願い』を出願し、工部大学校助教授藤岡市助の奔走などもあって、1886（明治19）年日本初の電気事業者『東京電燈会社』が開業し、翌年12月に直流低電圧配電方式により一般供給を行った。そして、西南戦役後の好景気なども反映して、各地に相次いで電燈会社が設立され、1892（明治25）年末には事業者数11、電灯需要家数7,136に達した。これら創

業期の発電は、都市内に設置した小規模火力発電所により供給する市内配電方式である。水力発電は火力に遅れ、初の営業用水力発電として1891（明治24）年5月に京都蹴上発電所が運転開始し、1894（明治27）年から一般電灯供給が行われた。

しかし、当時電灯はすべて外国製品であった。国産電球の強い要望に応え、東京電燈に移った藤岡市助は国産化に注力し、さらに独立事業化を経営幹部に提訴して、当時日本最初の電気機器製造業の三吉電機工場を経営していた三吉正一らと日本初の白熱電球製造所である白熱社を創立した。日本に電灯事業が誕生してから僅か8年、早くも国産電球の製造が開始された。図3.1に創立間もない電燈会社の電灯取付け数を示す。

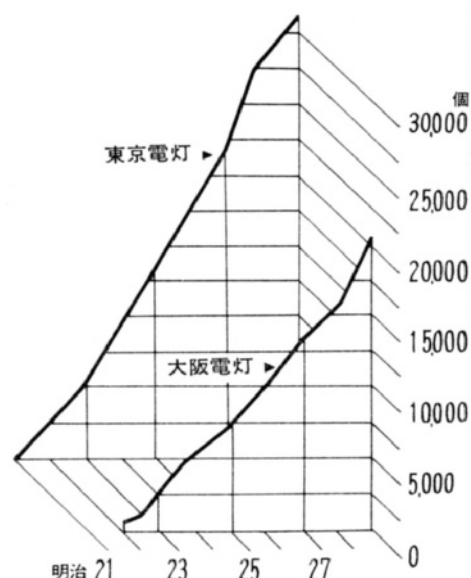


図3.1 電燈会社の電灯取付け数（明治時代中期）

さらに1897（明治30）年から約10年間で電気事業は着実に成長を遂げていった。これは、紡績、製糸、織物などの軽工業の発達による産業革命、軍需産業の隆盛、電気鉄道の発展により電力需要が急増し、これらに対応して、従来の需要別分散形独立電源から集中火力発電所の出現、長距離・高圧送電技術による水力発電所を含めた建設が急増し、電力供給回路網が構築され、架空送電・配電方式へと移行した。

²¹ 東京芝浦電気株式会社「東京芝浦電気株式会社八十五年史」p3～8（1963）

²² 電気学会「電気学会100年史」p419～422（1988）

²³ 電気学会「電気工学ハンドブック第6版」p941（2001）

3.2 電気事業の飛躍期(明治後期～大正時代)

明治時代後期からは、日露戦争後の急速な経済拡大とその後の長期にわたる不況、そして第一次世界大戦による爆発的な活況、戦後の恐慌など景気変動の激しい時代であった。

このような情勢下で、電気事業では電灯用電力需要が増大していったが、戦時下での火力発電用燃料炭の高騰、そして日本の豊富な水力資源開発こそ工業を隆盛させ国家を繁栄に導くとの声に呼応して水力電源の積極的な開発がおこなわれた。高圧送電、長距離送電技術の著しい発展により大規模な水力開発が促進され、水力発電の優位性が増大した。

膨大な資本投資による積極的な電源開発と送電電力網の整備により、電気事業は公益事業としての性格を強め、国民経済上で重要な地位を占めてきた。これらにともない電気事業の基本法制定の必要性が高まり、1911（明治44）年に事業開業の許可および工事着工の認可制、そして電気料金は原則認可不要を織込んだ『電気事業法』が公布され、この時期に供給義務なども含めた電気事業令の体系が整備された。

この間、1907（明治40）年から1914（大正3）年頃にかけて、電気の普及を目指す政府により供給区域の重複許可行われた結果、需要家の争奪による過当競争となり、第一次世界大戦後の戦後不況なども重なり、経営困難となる電気事業者が多かった。そのため、政府は企業合同促進の方針により合併集中を図った。

需要面では、火力発電から水力発電への移行による料金の低減などもあり、電灯需要の普及率は1907（明治40）年は2%だったものが、1922（大正11）年には70%と急増している。

また、1923（大正12）年の関東大震災は電力設備にも大打撃を与えたが、復興の過程では電動機の普及を早める結果となり電動力時代への移行を促進した。

3.3 電気事業の競争・統制期(大正後期～昭和初期)

大正時代後期には、世界的不況下で需要が停滞するなど事業環境の悪化により企業統合が行われ、5大電力会社（東京電燈、東邦電力、大同電力、宇治川電気、日本電力）に集約された。

当時は経済不況が長期化したこともあって供給過剰をきたし、各電力会社は市場拡張競争を余儀なくされた。この市場競争は1932（昭和7）年4月19日電力連盟の結成による自主的統制に乗り出すまで続いた。この

間、料金の低下と電気普及という効果を生んだが、反面設備投資の重複などから一層の業績悪化を招いた。

これにより電力統制論が大正末期から国家的大問題として論議され、この結果全文改正した『新電気事業法』が1932（昭和7）年12月に施行され、統制政策へ移行した。この法改正で、料金認可制、供給義務の明確化、設備合理化命令などが法律化された。供給区域の独占は法的に規制されなかったが、行政方針として確立され、過当競争の弊害が除去された。

3.4 電気事業の国家管理(昭和初期～第二次大戦後)

1931（昭和6）年の満州事変を契機とした軍需産業の躍進などがあり、電力需要は急増した。日本の経済が徐々に軍需生産に傾斜するにつれて、電力国営論が盛んに論じられるようになり、電力国策を強力に推進するため『電力国家管理要綱』が閣議決定され、これに電気事業者は猛反対したが、1938（昭和13）年『電力管理法案』『日本発送電株式会社法案』『電気事業改正法律案』が国会を通過し、電力国家管理に進んでいった。これらは、翌年には実施された。

『国家総動員法』制定により国家による配電管理も進んだ。1941（昭和16）年に配電統制令に基づいて9地区（北海道、東北、関東、中部、北陸、関西、中国、四国、九州）に主要な配電事業を指定して第一次の統合を実施させ、翌年には全国に9配電会社を設立させ、日本の電気事業は発送配電部門を通じ完全に国家管理体制にはいった。この体制は、戦後1951（昭和26）年の電力再編成にともなう9電力発足まで続いた。

3.5 電気事業の再編成(戦後～昭和30年初期)

第二次世界大戦後、連合軍の占領政策の一環として施行された『過度経済力集中排除法』の指定を受け、1948（昭和23）年日本発送電会社と9配電会社は解散され、1951（昭和26）年には従来の配電会社の供給区域をそのまま9ブロックに発送配電一貫経営の民間電力会社が設立された。

電力再編成後の1951（昭和26）年秋に異常渇水となり、それまで推進してきた大規模電源開発の資金調達に困難になる経営危機に直面した。これを契機に政府資金による電源開発を推進する法案が成立し、1952（昭和27）年に『電源開発株式会社』が設立され、一般電気事業への卸売りを開始した。これは、その後の日本の電力拡充政策、特に大規模水力発電所建設を飛躍的に推進する契機になった。

3.6 経済成長期の電気事業（昭和30年初期～昭和40年後期）

3-6-1 経済成長と需要増加

日本の経済は昭和30年代初めから高度成長期を迎

え、40年代後半の石油危機まで続いた。1955（昭和30）年から1973（昭和48）年までの実質経済成長率は平均9.5%/年と海外にも例を見ない位の極めて高い成長をとげ、電力需要も平均12.4%/年と大幅な伸びを続けた。図3.2に発電電力量の推移を示す。

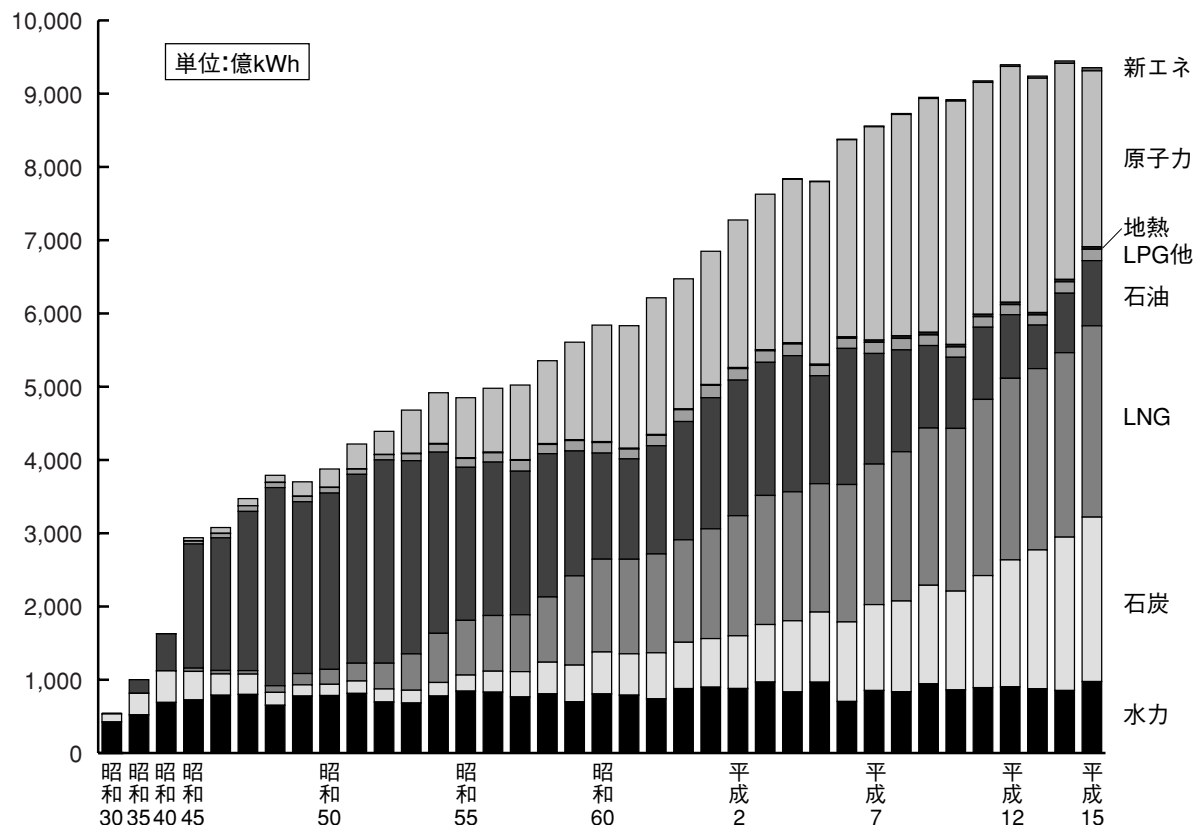


図3-2 発電電力量の推移（電気事業連合会資料）

特に、電灯、業務用など民生需要の伸びが大きく、さらに冷房設備の普及により負荷率²⁴が低下傾向をたどった。電源開発の新規着工規模も増大したが40年代後半になると公害、環境問題がクローズアップされ、電源立地の困難化とNOx規制による火力抑制などにより需要が逼迫し、各社は節電要請や負荷平準化などの対策に努力した。

3-6-2 エネルギー政策の転換

一次エネルギーとしてこれまで石炭が大部分を占めていたが、昭和30年代中頃から中東地域の大油田開発によって石油の経済性が急速に高まり、石油依存へとエネルギー源の大きな転換をみるようになった。

発電燃料についても政府による石炭保護政策はあったが、需要の増大に対し、技術進歩が著しく、また経済性の優れた大容量重油火力を中心に電源開発が進められ

た。その結果、1963（昭和38）年末には火力設備が水力設備を上回り、「火主水従」へと転換することになった。

また、この時期には重化学工業の成長が著しく、電力多消費型の企業と一般電気事業との共同出資による共同火力発電所の建設も増大し、また製鉄所などで共同火力建設が推進された。

3-6-3 原子力発電の胎動

原子力発電については、既に1954（昭和29）年頃から次世代電気エネルギー源として検討が開始され、1955（昭和30）年12月『原子力基本法』、『原子力委員会設置法』、および『総理府設置法の一部を改正する法律』の所謂『原子力三法』が成立した。次いで9電力会社、電源開発、産業界の共同出資による日本原子力発電（株）が設立された。

同社はイギリスのコールドーホール改良形原子炉を

²⁴ [解説] 実際に使用された負荷（kW）のある期間（例えば年）における平均の最大電力に対する比率をいう。

採用し、1960（昭和35）年1月東海村で建設に着手し、1967（昭和42）年7月16日166MWの全出力運転に入り、日本の原子力開発史の一頁を飾った。

3-6-4 広域運営の発足・展開

1957（昭和32）年東北・北陸電力の料金値上げ申請に端を発して、電気事業の再々編成問題がクローズアップされた。『電気事業の基本対策』が審議され、これに対応して9電力会社は1958（昭和33）年に広域運営推進整備を図った。

初期の広域運営は、既設設備を広域的に運営して各電力会社間の不均衡を是正する需給調整融通が多用され、超高圧による地域間連系や50－60Hz間周波数変換所などにより全国版での広域運営が可能となった。

3-6-5 新電気事業法の制定

昭和30年代後半に入り、電気事業の経営基盤の整備に伴い、単なる供給力の量的確保のみならず、電圧・周波数規定値維持などの質的サービスの向上や広域運営による経済合理性の一層の追求などが課題となってきた。

このような状況のなかで、1964（昭和39）年に『新電気事業法』が公布され、①広域運営 ②需要家へのサービス向上 ③電気施設の保安規制の整備 ④事業規制の簡素化、合理化などの諸規定が盛り込まれた。

3.7 低成長期の電気事業（昭和40年後期～）

3-7-1 電気事業経営の動向

高度経済成長期に入り、大気汚染問題、『公害対策基本法』の制定、『大気汚染防止法』の公布、立地反対運動など電気事業を取り巻く事業環境は一段と厳しさを増し、地域・環境との調和が要求されるようになった。

このような事業環境下で1973（昭和48）年秋に第一次石油危機が発生した。この石油危機を契機として日本経済は低成長時代に入り、電気事業者は設備の効率化・自動化、業務の機械化など経営の減量化・効率化に努力したが、石油価格の高騰が続くなかで、脱石油、電源多様化要請に伴う原子力発電の本格化、LNG導入の電源開発や環境安全対策などによる設備投資の巨額化と相まって発電コスト急増により、1974（昭和49）年と1976（昭和51）年に9社一斉の料金改定を余儀なくされた。さらに、1979（昭和54）年のイラン革命に端を発した第二石油危機を迎えることになり、翌年再度の料金改定があった。

3-7-2 電源開発の推進

昭和40年代における電源開発の中心は、ベース負荷をまかなう大容量・高効率火力発電所の建設と夏季ピーク負荷の調整機能を持つ大容量揚水発電所、将来の電源構成の主体と目される原子力発電所の建設であった。この電源開発の大規模・遠隔化、さらには需要の高密度化に対応して500kV長距離送電線、超高圧地中送電線の都心導入などの建設が主体に進められた。

しかし、昭和40年代後半になってこのような大規模電源開発に対して大気汚染問題がクローズアップされ、1967（昭和42）年に『公害対策基本法』が制定され、翌年には『大気汚染防止法』が公布された。また、1969（昭和45）年には硫黄酸化物に関する環境基準が設定され、その後も強化された。

さらに、大気汚染問題に端を発した立地反対運動により電源開発調整審議会（電調審）で着工決定できない発電所がではじめ年々その数が増え、さらに着工決定しても建設できない発電所もでてきた。

このような事態に直面し、電源開発促進のための方策を模索するなかで、1973（昭和48）年秋に第一次石油危機が発生した。発電電力量の約75%を占めていた火力の燃料確保が困難となり、使用制限が実施された。この石油危機を契機として、電力需要も省エネルギーと脱石油電源の開発へと大きく転換することとなった。

原子力発電の積極的開発の必要性が増大したこととあいまって、電源開発を円滑に進めることを目的として、1974（昭和49）年に『発電用施設周辺地域整備法』、ほか2法のいわゆる『電源三法』が制定された。

一方、石油代替エネルギーの開発、導入を積極的に進めるため、1980（昭和55）年『石油代替エネルギーの開発および導入促進に関する法律』が制定され、1990（平成2）年度には石油依存度を約50%に低減する『石油エネルギー供給目標』を発表した。

その後の電力需要動向を反映して1986（昭和61）年の電力長期計画では、10年間で発電電力量の構成比を、石油火力16%、原子力32%、石炭火力12%、LNG火力23%とする目標設定した。このように2度の石油危機を経た日本の電源開発は、電源の最適構成（ベストミックス）を目指し、「原油主従時代」へ向けた路線変更を行った。図3.3に電源別設備構成比の推移を示す。

特に、1966（昭和41）年東海原子力発電所で日本初の営業用原子力発電が始まり、その後2度の石油危機を経て開発が促進され、今日では総発電電力量の35%を占めるに至っている。1980（昭和55）年代の後半以降、地球規模の環境問題の高まりのなかで、設備利用率の向上、省エネルギーの推進など温室効果ガスの抑

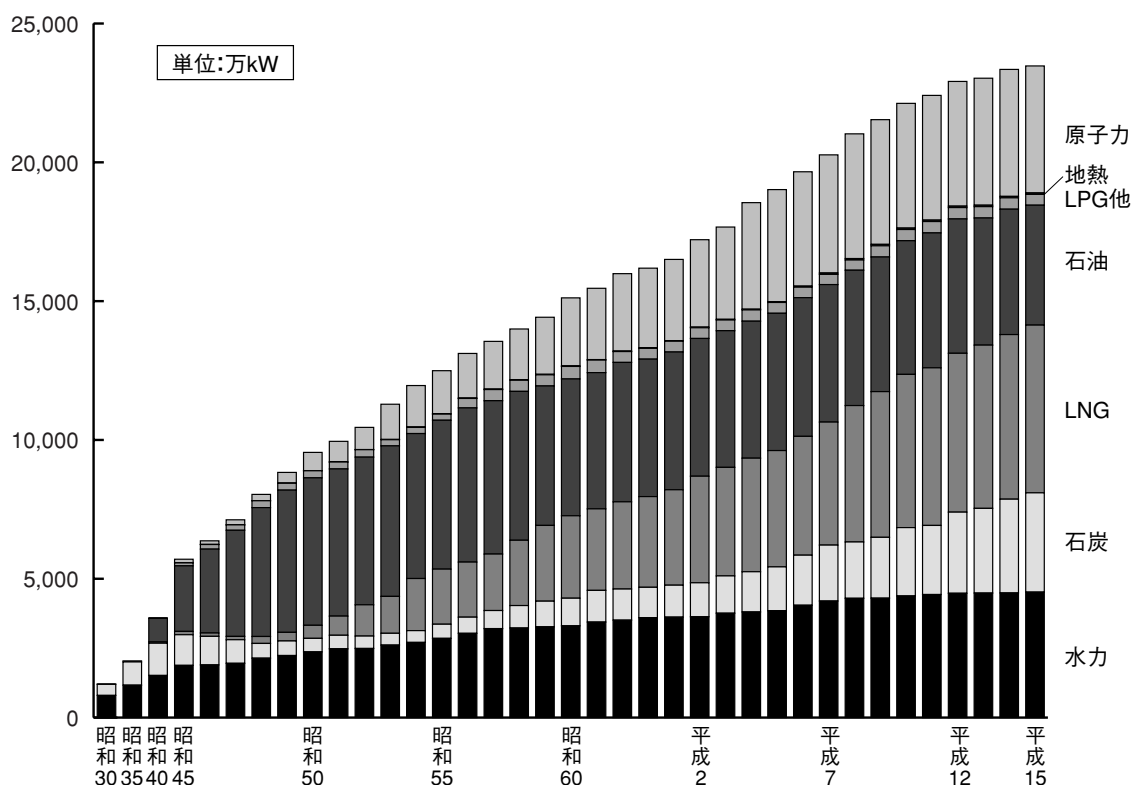


図3.3 電源別設備構成比の推移（電気事業連合会資料）

制が電気事業にとっても重要な課題となってきたが、温室効果ガスを発生させない原子力発電は地球規模の環境問題解決のための重要な手段として位置づけられるようになってきている。

3-7-3 広域運営の新展開

電気事業は石油危機以降の非常事態に対し①電源の共同立地 ②原子力の共同開発 ③電力融通強化のための連系線の拡充運営 ④機器の標準化を推進するため新たに『広域運営の拡大』策を決定した。この結果、原子力をはじめとして電力会社間で共同による電源開発、系統連系設備の拡充強化が図られた。

3.8 電気事業の課題

3-8-1 コスト低減と料金の長期安定

不安定な石油情勢のもとで電源の多様化、料金の長期安定を図るため、需要面では蓄熱式ヒートポンプシステムなどの普及、料金制度面の充実による需要の平準化への取組みが重要である。

また、供給面では、ベース供給力である原子力の安全性を基本とした一層のコスト低減努力とともに、水力・石炭火力など各種電源の経済性・セキュリティを配慮した最適構成（ベストミックス）の開発を進めることが求められる。

3-8-2 需要開発

高度成長から低成長への転換、エネルギー間競合のもとでは効率的な電気利用拡大についての諸方策の具体的展開が重要となっている。

3-8-3 エネルギー間の競合

コージェネレーションシステムの技術開発・適用に代表されるように石油、ガスなどの他エネルギーとの競合を生じている。

電力会社としても研究開発が進められている燃料電池、太陽電池など競合環境にある新種分散電源の評価位置づけなどについて、現在の電力供給システムの中で検討を進め、先見性的に対応することが重要である。

3-8-4 自主的原子力燃料サイクルの確立

エネルギー資源の乏しい日本としては、コストの優位性からも原子力の開発を積極的に進めているが、このセキュリティを一層強固にするため、自主的な原子力燃料サイクルが急務である。

この確立のため、現在進めている各施設の具体化と共に、濃縮・再処理コストの低減、再処理の核不拡散政策との調整や技術面での改良、稼働率の向上など官民協力として事業推進に当たっていかなければならない。

3-8-5 技術開発の推進

以上のようにエネルギーの安定供給、コスト低減や社会情勢の変化に対応した総合政策を推進するため、次のような技術開発に取組み、自主技術の向上を目指す必要がある。

- (1) エネルギーの安定供給と経済性確保への技術開発
 - 原子力利用技術
 - 石炭利用技術
- (2) コスト増抑制のための技術開発
 - 原子力発電コストの低減
 - 負荷平準化策
 - 高効率発電方式
 - 建設コストの低減
 - 既設設備の高度利用
- (3) 社会状況変化に適応するための技術開発
 - 情報社会への対応
 - 需要開発技術
 - 分散形電源導入のための技術
 - 環境対策技術

1990年代に入ると世界的な電力自由化の潮流のなかで、日本の『電気事業法』も1995年に改正され、新規電源の調達に際して競争入札(卸供給入札)が採用された。さらに、1999年の『電気事業法』の改正により2,000kW以上の需要家に小売託送が認められるようになり、日本の電気事業は本格的な競争時代を迎えつつある。

3.9 発電システムの変遷

古代から、人類は森を燃料として使ってきた。18世紀頃の産業革命を境として、化石燃料を使う文明へと移行した。このエネルギー供給によって、現在の巨大な人口へと人類は増えることができた。エネルギー需給への最大の問題は、昔から人口圧力であったようである。また、文明の在り方もエネルギーによって大きく変わってきた。今人類の巨大な人口は、主として石油、天然ガス、石炭、ウランなどの非再生エネルギーで賄われている。これらの経済性は高いが、自然が地質年代をかけてつくった有限な資源である。今地球環境保護のため、再生的なエネルギーを使うべきとの意見が強くなってきているが、これらが主流になるのは現実的に難しい。したがって、人類は今後かなり長い間、今のエネルギー源に頼らざるをえないが、限りあるエネルギーを如何に効率的に使うかは、現在も未

だ解を見出せない課題である。

発電に利用されるエネルギーもその一部であり、今日まで発電システムは利用可能エネルギーと密接な関係にあったし、今後もその後新たに追加された課題解決を含めた効率的エネルギー利用による発電システムの開発が必須である。

3-9-1 エネルギー資源の分類²⁵

世界のエネルギー消費は、石油換算で97.41億t(2003年現在)、そのうち88%を石油、石炭、天然ガスなどの化石燃料で供給している。化石燃料は、ウランなどの原子燃料と同じで枯渇性燃料と呼ばれており、いずれはなくなる資源である。

エネルギー資源は、化石燃料や原子燃料の枯渇性資源と太陽光やバイオマスなどの再生可能エネルギーに大きく分類できる。化石燃料や原子燃料の枯渇性資源に対して、再生可能エネルギーは繰り返し利用できるエネルギー源である。地熱は利用によって失われてしまうエネルギーであるが、その貯蔵量は利用量に比べて膨大であることから再生可能エネルギーとみなされている。

エネルギー資源を利用可能な資源と定義すれば、一般廃棄物や可燃性の産業廃棄物は、工場や地下鉄の排熱、河川や海水の温度差エネルギーといった未利用エネルギーもエネルギー資源に含まれることになる。通常、一次エネルギーの変換によって新たに生み出されたエネルギーを二次エネルギーと呼んでいるが、廃棄物や排熱はエネルギーを主目的に産出されたものでないため二次エネルギーとみなすことの難しさがある。

エネルギー資源は、また貯蔵形と非貯蔵形とに分類することもできる。貯蔵形エネルギー資源とは、地下に貯蓄された鉱物資源である化石燃料やウラン、あるいは貯水池などに蓄えられた水力エネルギーをいい、その特徴はエネルギー需要の変化に合わせて供給を調整できる点にある。それに対して非貯蔵形のエネルギー資源である太陽光や風力などは、天候や時間によって出力が変動する間欠的なエネルギーである。貯蔵形のエネルギー資源は、そのエネルギー量がどれだけあるかはあらかじめ計量できるが、非貯蔵形のエネルギーは出力が自然任せであるために正確な計量は難しい。

水力エネルギーは、すべてが貯蔵形のエネルギーとは限らない。ダムに水を蓄えて発電する貯水池式水力発電は貯蔵形であるが、川の流れを利用して発電する自流式は非貯蔵形になる。同様にバイオマスと未利用

²⁵ 電気学会「電気工学ハンドブック第6版」p931 (2001)

エネルギーについても、貯蔵形として扱えるものとそうで無いものがあり、再生可能エネルギーを貯蔵形

と非貯蔵形とに正確に区分することは難しい。表3.1に利用可能エネルギー資源の分類を示す。

表3.1 利用可能エネルギー資源の分類

	枯渇性資源	再生可能資源
貯蔵形	化石燃料 原子燃料 (廃棄物) (地熱)	地熱 水力(ダム式) (植物) ←未利用エネルギー→ (河川水などの回収熱)
非貯蔵形		水力(自流式) 太陽エネルギー 潮汐エネルギー

(備考) 化石燃料：石油、天然ガス、石炭、重質油、オイルシェール、タールサンド、メタンハイドレード

原子燃料：ウラン、トリウム、核融合燃料（トリチウム/重水素）

バイオマス：森林バイオマス、農業バイオマス、水産バイオマス、ごみ・廃棄物

未利用エネルギー：発電所・工場排熱、都市排熱、河川水・海水温度差エネルギー

太陽エネルギー：太陽熱、太陽光、風力、波力、海洋温度差、濃度差

3-9-2 汽力発電システムに利用されるエネルギーと発電システム

各種エネルギー資源の内、汽力発電に利用されるエネルギーは、化石燃料、原子燃料、および地熱である。化石燃料の燃焼、原子燃料の核反応により発生した蒸気を、そして自然界に熱水または蒸気の形で存在する地熱からえられる蒸気を利用して原動機（タービン）で回転エネルギーに変換し、その機械的エネルギーをタービン発電機により電気エネルギーに変換するシステムを汽力発電システムと呼んでいる。

発電システムは、初期には一次エネルギーを単に電

気エネルギーに変換することを主目的としていたが、その後の技術発展により一次エネルギーを効率良く電気エネルギーに変換するシステムが開発され、さらに使用燃料の多様化に伴い最適システム・変換機器が開発されてきた。以下に国産機を主に日本における火力、原子力、地熱発電システムその変遷を示す。各種発電システムは、多くの要素技術で特徴付けられるが、それらの中で比較的重要な技術要素である原動機、燃料、発電機、送電・配電、および主な負荷についてその変遷を以下に整理する。矢印（↓）は、それらの要素技術の内システム上の大きな変化を示す。

3-9-2-1 電気事業の創業期（明治初期～後期）

原動機	燃料	発電機	送電・配電	主な負荷・備考
蒸気機関 (1885年)	石炭	直流	需要別分散形独立電源	白熱灯
↓				
蒸気機関 (1887年)	石炭	直流	集中電源・市内架空配電	白熱灯・動力(紡績など)・電話・電気鉄道
↓				
蒸気機関 (1889年)	石炭	交流(単相)	集中電源・市内配電	一般産業・照明・軍需産業
↓				

(参)小容量水力発電

3-9-2-2 電気事業の飛躍期（明治後期～大正時代）

(参) 大容量水力発電・長距離・高電圧送電（水主火従時代始まる）

蒸気タービン (1905年)	石炭	交流 (空冷・三相)	需要別分散形独立 電源	蒸気タービン駆動発電機初号機 (輸入機)
蒸気タービン (1908年)	石炭	交流 (空冷・三相)	需要別分散形独立 電源	国産タービン発電機1号機
低速蒸気タービン (1918年)	石炭	交流 (空冷・三相)	集中電源・長距離高 電圧送電	当時国産最大容量機 4極-12,500kW

3-9-2-3 電気事業の競争・統制期（大正後期～昭和初期）

低速蒸気タービン (1918年)	石炭	交流 (空冷・三相)	都市近郊型大規模 電源	25MW×3台(輸入機) 水火併用時代
高速蒸気タービン (1933年)	石炭	交流 (空冷・三相)	都市近郊型電源・ 高電圧送電	当時世界的高速大容量機 2極-18MW-60Hz

3-9-2-4 電気事業の国家管理（昭和初期～第二次大戦後）

大容量蒸気 タービン	石炭	交流 (空冷・三相)	都市近郊型電源・ 高電圧送電	需要増対応高速(2極)、 低速(4極)機の大容量化
---------------	----	---------------	-------------------	------------------------------

(タンデムコンバウンド形機)

3-9-2-5 経済成長期の電気事業（昭和30年初期～昭和40年後期）

(参) 第二次世界大戦後半～昭和30年頃までは孤立による先進技術・重要資源の入手難で技術的進展なし

蒸気タービン (1953年)	石炭	交流 (水素・三相)	集中電源・長距離 高電圧送電	国産初の営業用水素冷却機、 55MW級
再熱蒸気タービン (1957年)	石炭	交流 (水素・三相)	集中電源・長距離 高電圧送電	100MW超水素冷却機 160MVA機
再熱蒸気タービン (1959年)	石炭	交流 (水素・三相)	集中電源・長距離 高電圧送電	ロータ直接水素冷却機 208.7MVA機

(タンデムコンバウンド形機)

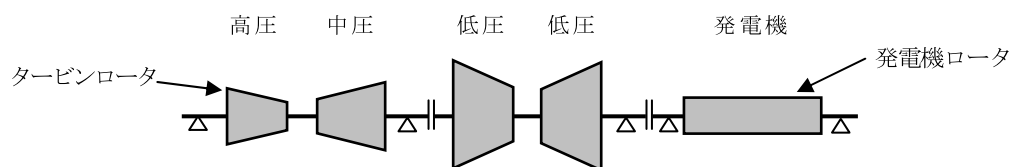


図3.4 タンデムコンパウンド (T/C) 形ロータ配列
(3ロータ3軸受けの例) (3-10-1参照)

蒸気タービン (1961年)	石油	交流 (水素・三相)	集中電源・長距離 高電圧送電	クロスコンパウンド機1号機 169.6MVA×2台
-------------------	----	---------------	-------------------	------------------------------

(クロスコンパウンド形機)

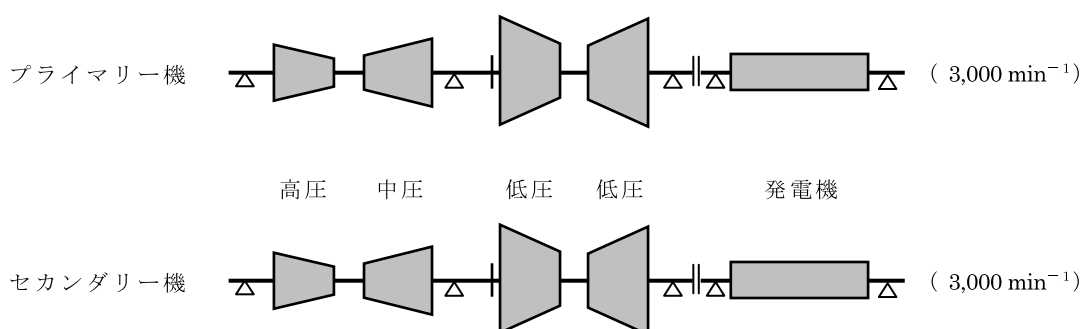


図3.5 クロスコンパウンド (C/C) 形ロータ配列 (3-10-1参照)

(参)新鋭大容量火力発電の急増(火主水従時代始まる)

蒸気タービン (1964年)	石油 石炭	交流 (水素・三相)	集中電源・長距離 高電圧送電	ステータ直冷 油:300MVA 水:442MVA 水素:396MVA
-------------------	----------	---------------	-------------------	---------------------------------------

3-9-2-6 原子力・地熱発電の胎動 (昭和40年初期～)

蒸気タービン (1966年)	原子力 (実証炉)	交流 (水素・三相)	——	東海発電所1号炉(コールド ホール形) 166MW機
-------------------	--------------	---------------	----	-------------------------------

蒸気タービン (1968年)	原子力 (大容量)	交流 (水素・三相)	集中電源・長距離 高電圧送電	当時原子力国内最大 美浜原子力400MVA機
-------------------	--------------	---------------	-------------------	---------------------------

蒸気タービン (1959年)	地熱	交流 (空気・三相)	需要別分散形独立 電源	自家用40kVA藤田観光 日本初の地熱プラント
-------------------	----	---------------	----------------	----------------------------

蒸気タービン (1966年)	地熱	交流 (空気・三相)	長距離送電	大容量地熱1号機 松川地熱23.5MVA機
-------------------	----	---------------	-------	--------------------------

3-9-2-7 超大容量石油火力発電（昭和40年代中期～）

T/C蒸気タービン (1972年)	石油	交流 (水素・三相)	集中電源・長距離 高電圧送電	当時世界最大級火力 知多T/C形 700MW機
----------------------	----	---------------	-------------------	----------------------------

(タンデムコンパウンド形機)

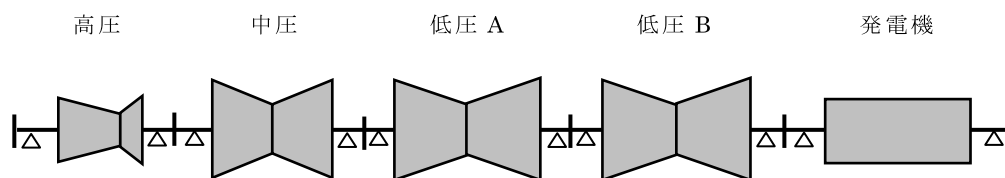


図3.6 タンデムコンパウンド形700MW機ロータ配列 (3,600 min⁻¹)

C/C蒸気タービン (1974年)	石油	交流 (水素・三相)	集中電源・長距離 高電圧送電	当時世界最大級火力 袖ヶ浦1,000MW機
----------------------	----	---------------	-------------------	--------------------------

(クロスコンパウンド形機)

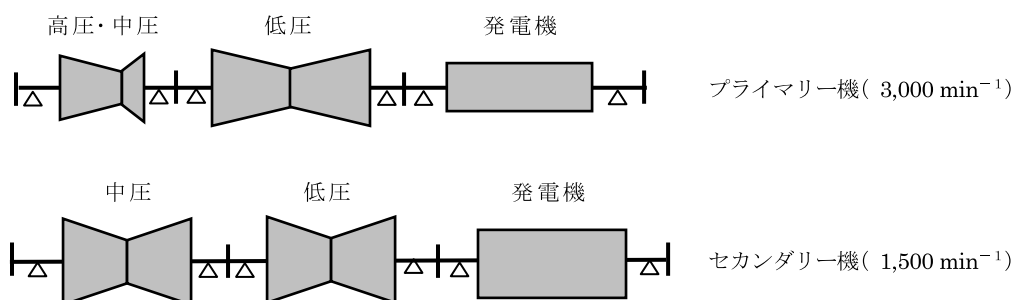


図3.7 2軸2速クロスコンパウンド形ロータ配列

3-9-2-8 電力用ガスタービン駆動発電（昭和40年代中期～）

ガスタービン (1969年)	LNG	交流 (三相)	集中電源・長距離 高電圧送電	日本初複合発電プラント 坂出36MVA 機
-------------------	-----	------------	-------------------	--------------------------

(汽力発電プラント燃料としてLNG初導入)

大形ガスタービン (1984年)	LNG	交流 (水素・三相)	集中電源・長距離 高電圧送電	日本初1,000MW複合発電 プラント 東新潟
---------------------	-----	---------------	-------------------	----------------------------

3-9-2-9 超大容量原子力発電（昭和50年代中期～）

蒸気タービン (1979年)	原子力 (大容量)	交流 (水素・三相)	集中電源・長距離 高電圧送電	原子力国内最大(PWR) 大飯原子力1,180MW
蒸気タービン (1982年)	原子力 (大容量)	交流 (水素・三相)	集中電源・長距離 高電圧送電	原子力国内最大級(BWR) 福島二1,100 MW
蒸気タービン (1987年)	原子力 (大容量)	交流 (水素・三相)	集中電源・長距離 高電圧送電	原子力国内最大級(BWR) 浜岡1,137 MW

3-9-2-10 超大容量石炭火力発電（平成初期～）

T/C蒸気タービン (2001年)	石炭	交流 (水素・三相)	集中電源・長距離 高電圧送電	3,600min ⁻¹ 世界最大級火力 碧南1,000MW機
----------------------	----	---------------	-------------------	--

3-9-2-11 大容量ガスタービン発電

大形ガスタービン (1992年)	LNG	交流 (空気・三相)	集中電源・長距離 高電圧送電	空気冷却記録機 横須賀160MVA機
大形ガスタービン (2003年)	LNG	交流 (水素・三相)	集中電源・長距離 高電圧送電	世界最大間接水素冷 却機620MVA (HTC)

3.10 各種発電システムの特徴と課題

日本の電力は、明治時代の初期に文明開化の名のもとに文明の灯をともしることから始まり、その後明治時代中期から工業用電力として利用され始め、既にこの時期に現在の原形ともいえる集中電源、架空電線による送配電網方式が確立した。爾来今日まで、電力事業の課題は、

- 経済性の確保
- 安定的供給

が求め続けられ、発電技術はこれらの基本的な課題解決と実現のための取組みであった。その主な課題として以下がある。

- 大容量化・・・需要増対応、発電所建設・運転コストの低減、限られた用地の有効活用
- 燃料対応・・・安定的・低価格供給可能燃料の利用
- 高品質化・・・電力の電圧・周波数変動の極小化、安定供給（無停電）
- 高信頼性・・・機器の高信頼化、安定した運転、特に低ロータ軸振動化、長寿命化
- 高効率化・・・発電コストの低減、限りある資源の効率的活用、環境問題
- 運転性・・・負荷調整運転性の向上、自動化による省人化
- 保守性・・・ライフサイクルコストの低減
- 対環境性・・・有害排ガスの低減、温排水問題の軽減、低騒音化

これらに昨今の市場環境、規制緩和によりクローズアップしてきた次の課題がある。

- 機器コスト低減・・・構造簡略化（構成機器のイン

テグレーション）、技術のローエンド化（発電機：水素冷却→空気冷却、直接冷却→間接冷却）、輸出・国際競争力の強化

- 国際化・・・海外生産、技術供与

以下に、火力発電、地熱発電、およびガスタービン基軸発電の変遷と解決された課題について述べる。

発電システムは、技術的な面からのみ論じられるものではなく、それぞれの時代におけるエネルギー事情や社会・経済情勢の影響を強く受けることは既に述べてきたとおりであるが、本項では主な革新技術や新技術により解決された課題について記述する。

3-10-1 火力発電（火力発電）システム

明治時代初期の黎明期には、原動機として産業革命の牽引力となった往復蒸気機関（蒸気エンジン）が採用され、燃料として国内で採掘された石炭が使用された。しかし、蒸気エンジンはその構造上の理由により回転トルクが不均一であり、騒音・振動レベルも高いという欠点があった。

その後、豊富な水資源を利用した小水力発電の建設、長距離・高電圧送電技術の発達による大規模水力発電の飛躍的発展により、都市型小規模火力の発電コストは水力に比較して高いなどの理由もあり水主火従時代に移行した。

この時代、発電プラント規模の拡大による建設、発電コストの低減の考え方が既にあり、発電プラント、ひいては原動機・発電機の大容量化は重要な課題となった。

1908（明治41）年三菱造船所 長崎造船所がパーソン

社(英)技術により製作した2極-625kVA-2,400 min⁻¹-40Hz タービン発電機駆動用タービンが、日本における国産蒸気タービンの1号機である。当時は毎分回転数2,400、3,600、1,500、1,800回転のタービン・発電機が製作され、中には2極-25,000kVA-1,500 min⁻¹-25Hz機もあった。

以下に、タービン・発電機の主要仕様の変遷を述べる。
回転数

タービン・発電機の大容量化が進んだ大正時代以降、第二次世界大戦までは、ロータ軸用大形高強度軸材の入手難により4極低速機が火力発電プラントの主力であった。

比較的大容量機：1,500 min⁻¹、1,800 min⁻¹

小容量機：3,000 min⁻¹、3,600 min⁻¹

1935(昭和10)年頃からロータの機械的強度、振動バランス面から製作が困難な2極-3,600 min⁻¹機の大容量化が進み、世界的にも最大級機が相次いで完成した。

タービン形式

背圧タービンに始まった蒸気タービンは、その後使用目的や熱エネルギーの有効利用のためいろいろな形式が開発・実用された。

- ・復水タービン・・・発電を主な目的とした形式である。タービン効率をよくするため、復水器を備え、ボイラからの蒸気をごく低圧(高真空)まで膨張させて熱エネルギーを十分利用するものである。熱効率の向上のために再生式を採用するが、これはタービンの膨張途中から一部の蒸気抽気し、ボイラ給水を加熱し、復水器で冷却水に放出する熱量を減ずるものである。
- ・抽気復水タービン・・・タービン中間段から工場蒸気を抽出するものである。もし、工場蒸気が2種類またはそれ以上必要である場合、抽気点を2段またはそれ以上にすることができ、これを二段抽気復水形または多段抽気復水形という。
- ・背圧タービン・・・タービン排気がある圧力で工場蒸気および所要箇所へ直接送気する形で、復水器の設備はない。小容量の地熱発電用タービンに適用されることもある。
- ・抽気背圧タービン・・・前記の背圧タービンで2種類またはそれ以上の圧力の蒸気を必要とする場合、抽気復水形と同じようにタービンの中間段からも蒸気

を抽気できるようにしたものである。

- ・飽和蒸気タービン・・・一般にタービン入口蒸気はかなりの過熱度をもっているが、原子力プラントや地熱発電用タービンではほぼ飽和蒸気が使われる。このような過熱度がゼロに近い入口蒸気を使用するものを飽和蒸気タービンと呼ぶ。入口蒸気は飽和蒸気であるため、タービン内の膨張過程で蒸気の湿り度が大幅に増加していく。この湿分の増大でタービン内にドレンが多量に発生するので対策が必要である。

プラント熱効率の向上

発電プラントの効率はタービンでほぼ決まることから、タービン形式や使用蒸気条件の向上により飛躍的に改善・向上した。

戦前に使用された低温・低圧蒸気条件に比較し、戦後に導入された新鋭火力プラントでは再熱タービンの採用に伴い12.5MPa-538℃が採用され、1960年代は亜臨界圧²⁶、1970年代前半は超臨界圧、その後に超々臨界圧条件が採用され、31.6MPa-566℃まで上昇している。

蒸気条件の他に、タービン熱効率向上に有効なタービン最終段翼(羽根)の長翼化の取組みがあった。これら効率向上の取組みの結果、通常火力発電プラントの熱効率は漸次向上してきた。

タービン発電機の高効率化の積極的な取組みもあり、定格出力で99.00%以上に改善されている。図3.8に通常汽力発電プラントの熱効率の推移を示す。

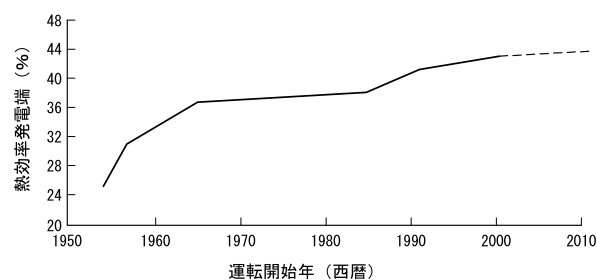


図3.8 通常汽力発電プラントの熱効率の推移

クロスコンパウンド形

タービンは複数の軸から構成されており、タービン車室/ロータ軸配列を工夫することで高効率化が図れる。

蒸気発生装置(ボイラ)により発生した高圧・高温蒸気は、最初高圧タービン車室²⁷に導入され、そこで回転力をロータに与えた後、中圧タービン車室、そし

²⁶ [解説] 高温高圧蒸気を用いプラント効率の向上を図るため水の臨界点(K点) 22.1MPa, 374℃を超えた蒸気を超臨界圧、これより低い16.6 MPa, 566℃級を亜臨界圧、35MPa, 650℃級を超々臨界圧と呼ぶ。

²⁷ [解説] タービンロータとそれを取り囲むケーシングから構成される。ロータには複数のディスクがありそれぞれの外周面には動翼(羽根)が取付けられ、蒸気が翼を通過するとき回転力を発生する。ケーシング(静止部)側にはロータ翼に蒸気が効率よく流れるようなガイド(ノズル)が取付けられている。

て最後は低圧タービン車室で同様にロータ回転力を発生する。この様に各タービン車室通過時に仕事をする間に漸次圧力・温度が低下し、最下流では蒸気量（体積）が増大し水分量が増える。したがって、各タービ

ンは蒸気の流れと共に変化する蒸気の性状に応じタービン翼の長さ・形状・取付け径を変えた設計をし、上流では翼長が短く、取付け径が小さく、最終段では翼長が長く、取付け径が大きくなる。

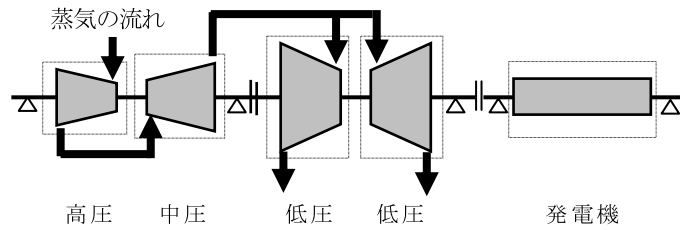


図3.9 タンデムコンパウンド（T/C）形タービン車室の配置

通常の火力発電プラントで採用されているタービン・発電機は、ロータを直結し串状に配置したタンデムコンパウンド形機が一般的であり、蒸気は高圧より順次各車室を流れてゆく（図3.9参照）。

これに対し、プライマリー機とセカンダリー機の2軸のタービン・発電機により発電するクロスコンパウンド形機が開発された（図3.5、3.7参照）。本方式は、蒸気の流れを大きく上流の高圧・高温部と下流の低圧・低温部とに分け、それぞれの蒸気条件に適したタービン車室／ロータ構成にすることによりタービンの高効率化が図れる。大容量クロスコンパウンド機ではプライマリー機を高速機、セカンダリー機を低速機で構成する。

両方式にはそれぞれ長所短所があり、大容量化の観点からは次の差異がある。タンデムコンパウンド形機では、タービン発電機の製作可否がプラント出力の制限要因となる。すなわち、複数ロータより構成される

タービンは、その合計出力によりプラント出力に相当するトルクを発生するが、発電機は全伝達トルクを1軸で電気エネルギーに変換するため、大容量発電機的设计・製作が困難になる。また、全ロータを串形に直結するためロータ全長が長くなり、軸受け数の増加、全タービントルクを発電機に伝えるタービン-発電機間直結軸の大口径化などから振動問題が発生しやすく、バランス調整が難しくなる。

これに対し、プラント出力をプライマリー機とセカンダリー機で50：50または55：45の比率で分担するクロスコンパウンド形機では、各軸の発電機容量はタンデムコンパウンド形機の約半分と小さくなり、1軸のタンデムコンパウンド形機より大容量化技術として有利である。

表3.2にタンデムコンパウンド形機とクロスコンパウンド形機の得失を比較する。

表3.2 タンデムコンパウンド形機とクロスコンパウンド形機の比較

プラントの形式	プラントの効率	運転性	機器製作の難易度		発電所敷地面積	建設コスト (含機器分)
			タービン	発電機		
タンデムコンパウンド	並	普通	並	難	並	並
クロスコンパウンド	高	難 (2軸同期)	並	高	増 (約30%増)	増

負荷調整運転

火力発電プラントの課題は、原子力発電プラントの総発電電力量に占める比率の増加にともない、大規模火力プラントも含めた火力プラントでの負荷調整運転が必須である。原子力プラントでは出力一定運転され、このため、週、日の時間単位で変化する電力の要求に

対し主として火力発電所が対応することになり、多頻度起動停止を含む負荷調整運転が強いられるようになった。この様な運転を担う火力タービン発電機では、遠心力および熱による繰返し応力に起因する疲労強度の向上が必要で、これは金属材料のみならず、絶縁材料も含まれる。

3-10-2 地熱発電システム²⁸

地下の高温の地層中に熱水や蒸気として貯留されている熱エネルギーを鉱井によって地上に取り出し、発電に利用する。地上に取り出した地熱流体（蒸気や熱水）から蒸気を分離し、この蒸気によりタービン・発電機で電気を得る発電システムである。図3.10に一般的な地熱発電の熱サイクルを示す。

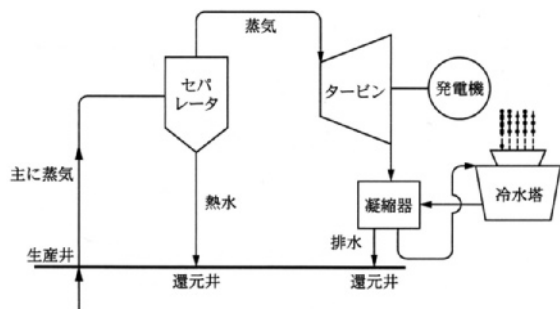


図3.10 地熱発電プラントの熱サイクル

日本で地熱発電が初めて発電に利用されたのは1959（昭和34）年に藤田観光 箱根の40kVA発電プラントである。地熱発電が本格化したのは1966（昭和41）年松川地熱23,500kVAが最初で、その後は漸次容量増加し最大容量機は1995（平成7）年に運転開始した柳津西山65,000kVAである。特に、1975年ころの2度の石油危機を契機に開発が急速に進んだが、現実的な問題として日本には多くの利用可能な地熱があるが、電源開発地点の制限が厳しく、今後の新規地熱発電所建設は楽観できない。海外プラント用では100MVA超機も多数製作されており、図3.11にインドネシアWayang Windu地熱137MVA機を示す。本機は空気冷却機で地熱用空冷機としては世界最大容量機である。

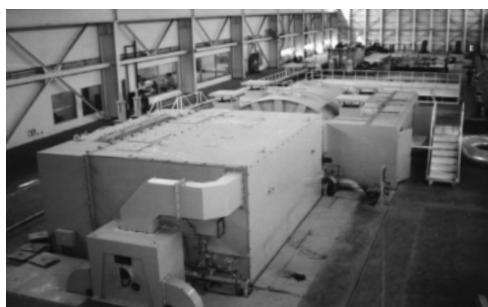


図3.11 地熱発電用空冷137.5MVAタービン発電機

日本における地熱発電プラントの大幅な増加が困難な理由は、化石燃料による火力発電に比べると二酸化炭素排出量が少ないクリーンエネルギーであるが、一方利用可能な地熱蒸気の大半は200℃以下と温度が低く、発電プラントの熱効率率は低い。したがって、多量の蒸気を必要とし、10MWhの発電に毎時約100トンの

蒸気が必要となる。

さらに、日本には利用可能な地熱の多くが国立公園や既存温泉街近傍にあるため規制・制限が多く電源開発は容易ではない。

世界的に見た場合、総地熱発電設備容量は828万kW（2001年末時点）で、最大はアメリカ223万kW、日本は5位で58万kWである。

初期には、使用済蒸気を大気放出する発電所もあったが、現在は地中に再び戻す還元井方式が一般的であり、環境問題や自然環境保護に配慮されている。特に還元井方式は、地熱蒸気に含まれる各種物質の大気放出による環境・健康問題防止上からも好ましい。

発電所建設地点によって利用できる蒸気条件はすべて異なるため、より効率的な利用から種々の方式が開発・実用されている。新規の地熱電源開発のため、単に地層中に貯留された天然の蒸気や熱水を利用するだけでなく、人工的に水を循環して高温の岩盤が保有する熱エネルギーを積極的に取り出す高温岩体発電技術の開発が進められている。

地熱発電所の構成機器の課題は、各種の物質を含む自然蒸気によるタービン翼の腐食問題であり、各地点での蒸気の性状・成分に応じた対策が要求される。また、地熱蒸気に含まれる硫黄成分による電気機器の腐食問題である。発電機では導電部に銅材を多用しており、発電機内の冷媒として空気を使用する場合、外気との密閉が不十分で硫黄成分を含んだ空気が機内に入るとコイルや導体接合部の腐食の原因となることから対策が不可欠である。特に、ロータコイルの接合に銀ロー付けを採用している場合、銀ロー材と化学的反応して機械的強度が低下し破断に至ることがある。

また、制御盤内に取付けられたリレーの接点、電気リード、そして接続部などの防食対策は欠かせない。外気に含まれる有害ガスの成分・濃度によって対策は異なり耐食性に優れた材料による対策が基本であるが、コストアップ要因となる。したがって、一般的にはメッキ、防食塗料、導電性塗料（接続部）など表面防食処理によることが多い。

以上のようなタービン発電機やその他電気機器の腐食問題はあるが、それ以上に地熱蒸気に直接晒されるタービン翼の腐食問題が最も深刻な問題であり、その対策が最重要課題である。

3-10-3 ガスタービン基軸発電システム

ガスタービン発電システムは、ガスタービンを原動

²⁸ 電気学会「電気工学ハンドブック第6版」p1397（2001）

機として発電機を駆動し発電する方式である。ガスタービンは、空気および燃焼ガスを作動流体とする熱機械で、標準的なガスタービンサイクルは、圧縮→加熱（燃焼）→膨張→放熱の4過程よりなる等圧燃焼サイクルである。このサイクルでは、まず大気を吸い込み、圧縮機（コンプレッサ）で圧縮した高圧空気を燃焼器内で燃料と混合して燃焼させ、発生した高温燃焼ガスでタービンを直接駆動するものである。

日本で発電用ガスタービンの開発が始まったのは1950（昭和25）年頃で、1,000～2,000kW級機が製作され、燃料は軽油、重油、その後坑内ガスなどが使用された。そして、1957（昭和32）年天然ガス利用ガスタービン駆動豊富2,500kVA機が完成した。しかし、ガスタービンの長期信頼性に対する不安感などにより電力用発電システムへの採用には長い時間を要した。

その後、ガスタービン出力は漸次増大し、燃焼温度が高温化されるにしたがって排ガス温度も上昇したことから、排ガス熱回収装置（排熱回収ボイラ、HRSG）で発生した蒸気により駆動される蒸気タービンと組合せた複合発電システム（コンバインドサイクル発電）が採用されるようになった。

ガスタービンは、タービン出力の50%強を圧縮機駆動力として消費しているため、発電に利用できる有効出力は約50%であり、熱効率も30～35%程度と大容量汽力発電と比べてかなり低い。

しかし、短い製造期間、低い建設費、短時間での起動・停止運転、優れた負荷応答性などの多くの長所を有し、一般産業用や非常用電源の発電機駆動機として利用されてきた。

その後、航空機用エンジンの技術を導入することにより発電用ガスタービンの高温化技術が進歩し、耐熱材料・表面処理技術、そして翼冷却技術の著しい進歩により高温ガスタービンが実現した。さらに、圧縮機や燃焼器技術の進歩により大流量高压化が図られ高効率化と大容量化が達成されている。このような技術進歩と運転実績の積み重ねにより信頼性も飛躍的に向上し、信頼性・安定供給を重視する発電システムにおける確固たる地位を獲得している。

ガスタービン、そしてガスタービンを組込んだプラント効率の向上に大きく貢献するガスタービン入口温度の変遷を図3.12に示す。

発電用として既に1,450℃、1,500℃が開発され、プロトタイプ機による信頼性・性能試験を完了し既に実用段階にある。同時に、ガスタービン出力も大容量化していった（図3.13参照）。

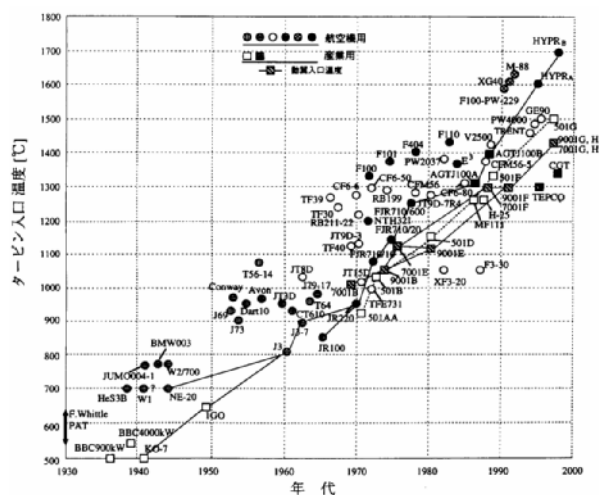


図3.12 ガスタービン入口温度の変遷

（注）図中の記号は世界各国メーカーの型式名を表す。

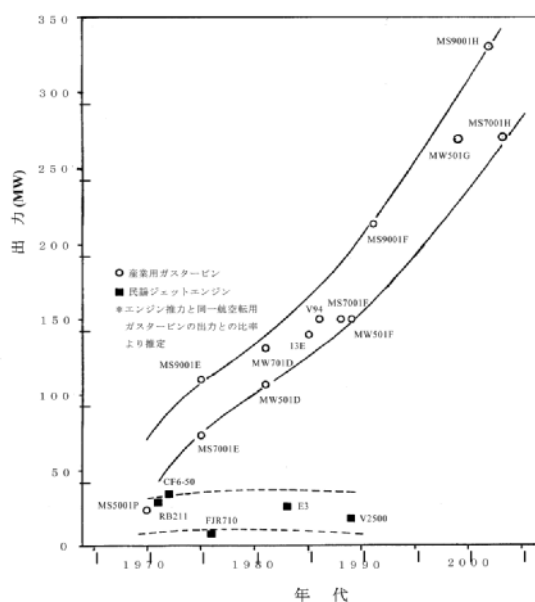


図3.13 ガスタービン出力の変遷

コンバインドサイクル発電システム

ガスタービン駆動発電システムには、発電用としてガスタービン単体で採用される所謂シングルサイクル発電システムも多いが、省エネルギー、高効率化の観点からコンバインドサイクル発電システムに組込まれることが一般的になってきている。日本で最初にコンバインドサイクル発電が電力用プラントで採用されたのは1969（昭和43）年坂出火力36,000kVAプラントで、当時はガスタービンの信頼性からコンバインドサイクル発電に対する評価は賛否両論であった。

コンバインドサイクル発電システムは、高温ガスタービンの出現にともない、高温域と低温域で作動する異なるサイクルを組合せて熱効率の向上を図る発電方式である。すなわち、ガスタービンサイクルと蒸気タービンサイクルとを排熱回収ボイラを介して組合せ、ガスタービン排ガスの排熱を回収し、発生した蒸気を

蒸気タービンに導き動力を回収し、ガスタービンの動力と合わせて熱効率向上を図るシステムである。図

3.14にコンバインドサイクルの構成とT-Sを示す。

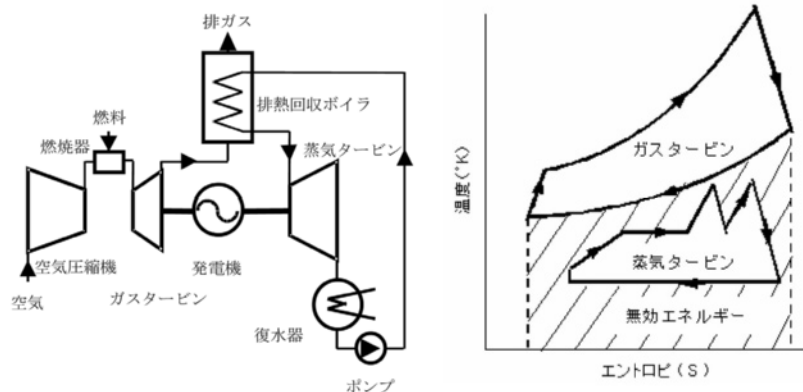


図3.14 コンバインド発電サイクルの構成とT-S線図

ガスタービンの高温化と共に、排ガス温度も上昇し、蒸気サイクルも1段再熱サイクルが可能となり蒸気タービンでの回収動力も増え、ガスタービンの効率向上に重畳され、1,300℃級でも50%を超える高いプラント効率を得られる。

図3.15にガスタービン、蒸気タービン、および発電機がタンデム形に直結される1軸形コンバインドサイクル発電プラントの概念図を示す。

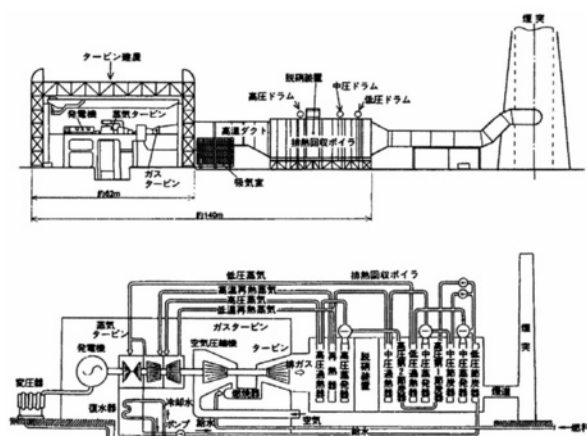


図3.15 1軸形コンバインドサイクル発電プラント

1,300℃級コンバインドサイクル発電熱精算図

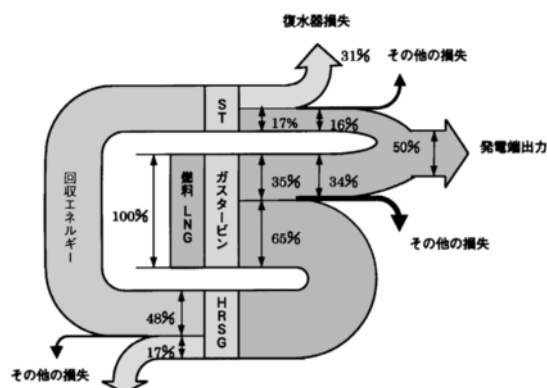


図3.16 コンバインドサイクル発電と大容量火力発電の熱効率比較

また、図3.16に1,300℃級ガスタービンを例に、コンバインドサイクル発電システムの熱精算図を示す。本発電システムの優れたプラント効率を他システムと比較するため、図中に新鋭大容量火力発電システムの熱精算図を示す。

現在運用されている国内の発電用ガスタービンは、以下である。

<タービン入口温度> <タービン単機容量>

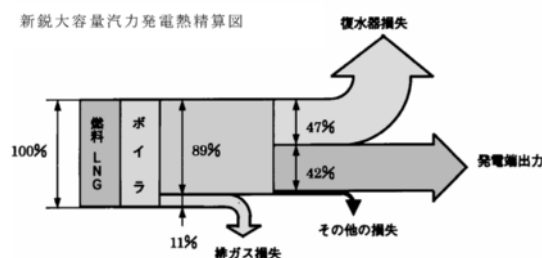
1,100℃級	約120MW
1,300℃級	約230MW
1,450℃級	約270MW
1,500℃級	約300MW

コンバインドサイクル発電の場合も発電所容量増大の要求は強く、この要求に対して1軸形発電システム（単位機）を複数軸設置するのが一般的である。運転中および建設中の代表的なプラント例を次に示す。

<総出力> <単位機> <発電機容量>

A発電所	1,440MW	360MW×4軸	412MVA
B発電所	1,140MW	380MW×3軸	437.65MVA
C発電所	1,520MW	380MW×4軸	441.3MVA

新鋭大容量火力発電熱精算図



1,500℃級コンバインドサイクル発電の場合の1軸の出力、発電機容量は次のようになる。

<ガスタービン>		<発電機容量>
50Hz	325MW	620MVA - 0.85pf - 527MW
60Hz	265MW	455MVA - 0.85pf - 386.75MW

なお、このような単位機（軸と呼ぶ）を複数配置する大容量コンバインドサイクル発電システムの特徴を整理すると次のとおりである。

①高い熱効率：

新鋭大容量汽力発電を大幅に上回る熱効率が得られる。

②高い部分負荷熱効率：

複数軸構成コンバインドサイクル発電の場合、1軸単位で運転／停止ができるので、部分負荷運転でも高い熱効率が維持できる。

ユニット出力1,000MW級プラントについてコンバインドサイクル発電（4軸構成）と汽力発電で熱効率を比較した例を図3.17に示す。この比較例におけるタービン発電機の効率のみの比較例を図3.18に示す。発電

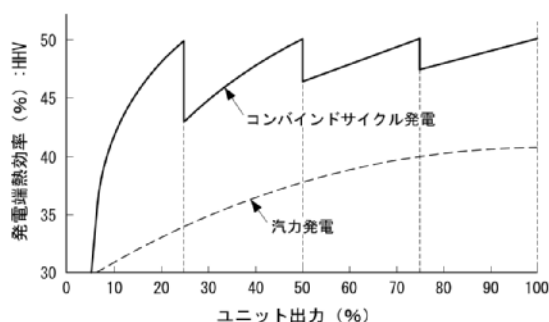


図3.17 ユニット出力1,000MW級プラントの発電システムによるプラント効率比較

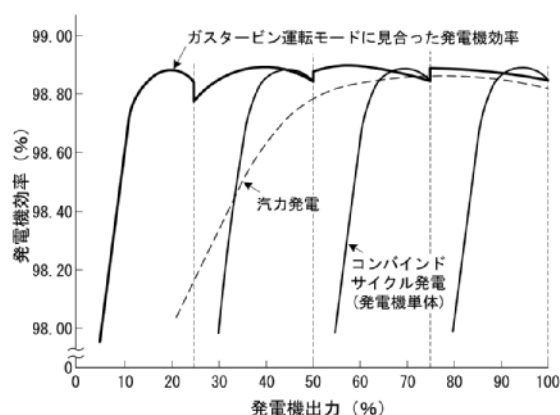


図3.18 ユニット出力1,000MW級プラントの発電システムによる発電機効率比較

機単体で見た部分負荷の効率は低いが、ガスタービンの通常運転モードに合せ、運転中の各軸が同一出力で運転される場合（図中の太線）には部分負荷運転時にも高い発電機効率が維持される。

3.11 今後の主要発電システム

前項までで述べたニーズ、事業環境、および達成技術レベルの考察に基づき「今後の柱となる発電システム」を推察する。主要な要求項目別に見た最適発電システムを整理すると次のようになる。

（I）電力需要増対応

経済性、負荷調整運転能力（MW、MVAR、 Δf 、 ΔV ²⁹）、および環境・発電所立地などから考えられる電力構成は、次のようになる。

原子力：ベース負荷（一定出力運転）

火力：負荷調整

水力：ピークカット

この他の小規模発電システムは、電気・ガス供給を合わせて検討する「ハイブリッド電気・ガス供給システム」の中で位置づける必要がある。

したがって、長期電源開発計画から見た総発電電力量増加への対応は、原子力発電と化石燃料火力発電などの大規模発電システムに依存することになる。

しかし、原子力の立地問題は「永遠の課題」で、この観点で見ると将来的にも必ずしも見通しは明るくなく、低レベルながら堅調な電力需要の伸びに対し火力発電が主力にならざるをえない。

水力発電は未利用水資源から考えて揚水発電のみで、ピークカットと原子力発電との組合せで負荷平準化として夜間電力吸収を担う。可変速揚水発電³⁰は単にピーク出力運転（MW）のみではなく、周波数変動（ Δf ）・電圧変動（ ΔV ）に対する調整能力にも優れており、改めて水車発電機特有の大きな慣性を有するロータに蓄積された回転エネルギーの放出・再蓄積による調整機能、しかも時間的持続性のある調整機能の利点が認識される。しかし、総発電設備容量に占める水力発電の比率は小さく、全体の約60%を占める火力発電、特に大規模火力発電との抱き合せによる負荷調整運転のニーズは高い。

しかし、総発電電力量に対するベース負荷を担う原

29 [解説] MW：有効電力の調整、MVAR：無効電力の調整、 Δf ：周波数変動の調整、 ΔV ：電圧変動の調整。

30 [解説] 水車発電機ロータコイルを巻線形誘導電動機と同じ構造にし、発電運転や電動機運転（揚水）時に効率等から最適回転数で運転し、系統周波数との周波数のズレ分をロータコイル励磁電流の周波数で調整する発電／電動機。

子力発電電力比率が現状の約35%から、将来さらに増加した場合の負荷調整問題は今後の課題である。

また、現状で総発電設備容量の60%を占める火力発電では、経年火力プラントの増加に関わる深刻な問題がある。経年火力プラントの構成を見ると、運転時間10～15万時間約30%、15万時間以上45%強で、10万時間以上経過プラントの割合は75%以上である。これら経年火力プラントを含めた火力発電プラントの設備容量確保は、需要増に基づく新規プラントとは別課題であり、延命対策の実施、あるいは既設とは異なる火力発電システムとのリブレースなど発電所設置点の置かれている状況・制限下での解決が求められる。

(II) 環境対応

ゼロエミッションの観点から原子力発電、水力発電が望ましいが、他のマイナス要因が大きな障害となるので、ガスタービンを基軸とした発電システム、特に高いプラント効率が達成できるコンバインドサイクル発電（LNG複合発電）が主力となる。

また、地熱発電も化石燃料による火力発電に比べると二酸化炭素排出量が少ないクリーンエネルギーであるが、地熱液体に含まれる各種物質内の有害成分の調査と環境・機器に必要な対策が必須である。また、日本には利用可能な地熱は多いが、現実的には立地点の規制・制限があり発電に利用できる地熱は少なく、総発電電力量に対する割合は極めて小さい。

(III) 高い運転性対応

コンバインドサイクル発電、可変速揚水発電

(IV) 電力安定供給対応

燃料多様化による安全保証の観点から天然ガス（LNG）は限りある燃料（欧州：有限な資源、石炭ガス化技術の将来動向により変る）、廃棄放射性物質に対する課題の多い原子力燃料（燃料サイクル技術の将来動向により変る。）、排出ガスの課題はあるが埋蔵量としては無尽蔵とも言える石炭（産炭地による品質および価格差が大きく、海外依存度は高いが、安定的供

給は見込める。）などそれぞれ課題はあるが、将来的にも安定供給が可能な石炭火力は不可欠である。

以上4つの視点から考察した現時点で推察される中心的な発電システムは2つであり、環境問題の利点から原子力発電、そして環境対応技術に著しく進歩を見せ、省エネルギー、高効率化技術が確立済の大容量火力発電プラントである。その中で大容量火力発電プラントは「二極化」し、

①1,000MW級以上石炭火力プラント

②500MW級1軸形単位機複数台より構成される

1,500MW大容量コンバインドサイクル発電プラントと考えられる。

しかし、昨今のIPP（独立電力製造業）や規制緩和などの国内的な競争激化、そしてグローバル、ボーダーレス下での国際競争の熾烈化などによる“低価格”という現実的で、新たな課題が出てきている。

発電機器の低コスト、発電所建設費の低減、低価格な発電システム、運転コストの低減、保守コストの低減、燃料コスト・発電コストの低減、廃棄コストの低減、そしてトータルライフコストの低減と言うキーワードが追加された時、最適発電システムの解は異なると思われる。

次章以降では、火力発電システムの主要構成機器であるタービン発電機の技術の系統化について述べる。

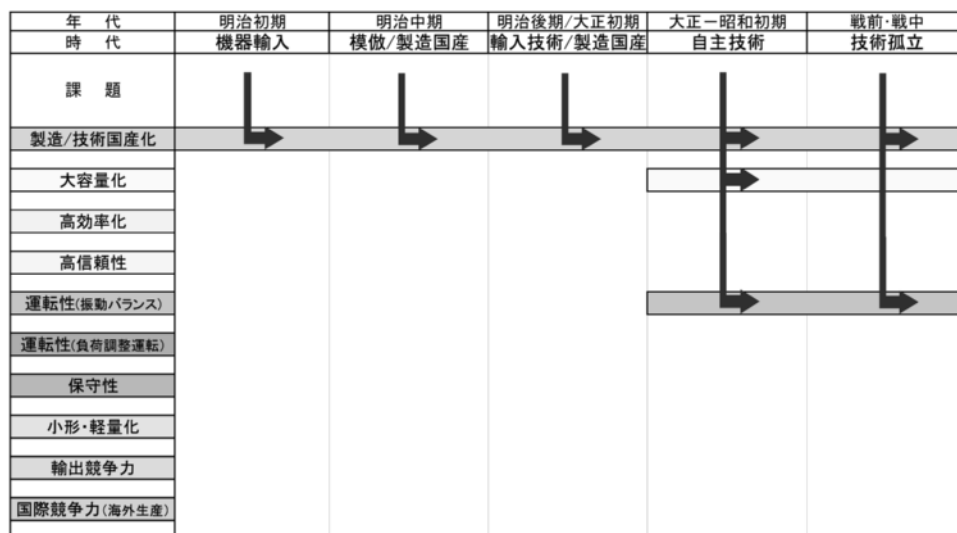
なお、地熱用タービン発電機に関しては、そのクリーンエネルギーとしての利点があり、環境問題から積極的な開発が望まれるが、開発地点の厳しい制限から将来的には、新規建設発電所数およびプラント容量の両面から主要発電システムとはなりえない。

また、タービン発電機の設計・製造技術面からは他発電システム用発電機の技術で十分カバーでき、地熱発電プラント特有の腐食対策についても既に確立済であり、未解決課題はない。

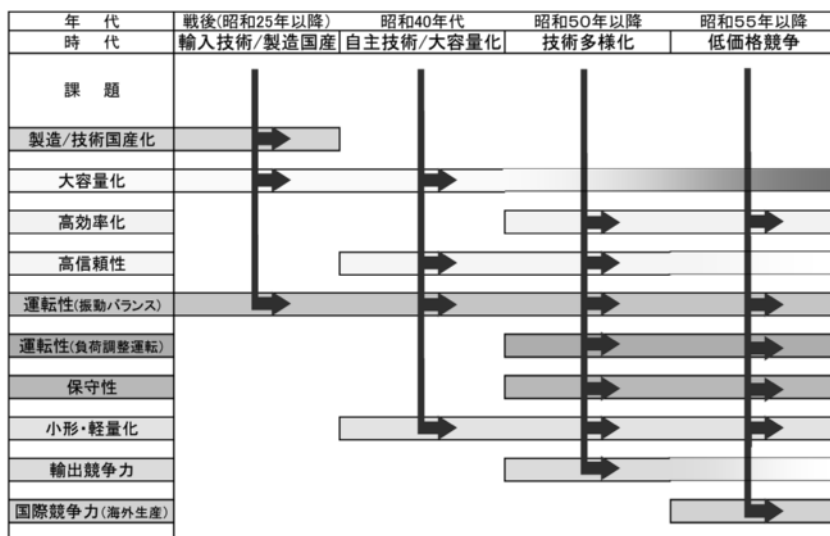
4 時代のニーズに応えた発電機技術の変遷

前章迄で発電技術の推移、その背景・原動力となった電力事業の推移について概観してきた。その発展の歴史の中で、それぞれの時代の置かれている社会・経済情勢などの影響を強く受けながら電気事業、そして

タービン発電機技術は変遷してきた。これらタービン発電機技術発展の各時代のニーズと課題を図4.1に示す。これらの課題に対してどの様に対応してきたか、主に技術の国産化、大容量化の視点で整理する。



(黎明期～第二次世界大戦)



(戦後～現在)

図4.1 タービン発電機技術発展の各時代のニーズと課題

4.1 黎明期(輸入機器、模倣/製造国産化)

明治維新後の日本は、経済制度の近代化と共に急速な工業発展が始まったが、その頂点には明治政府が殖産興業政策で導入した西欧の技術による近代的鉱工業があり、裾野には在来技術に依存する小規模工業が広

がっていった。1868(明治元)年の電信業、1870(明治3)年の鉄道建設を始めと当時発足した工部省の指導のもと「お雇い外国人」が大量に採用されて、鉱山、製鉄所、灯台などで近代的設備や工場の建設が開始された。アーク灯の点灯もこの様な官営事業であった。

日本の発電技術、電気利用技術を語るとき、電気事業の創始期における藤岡市助³¹の電気との関わりを見

³¹ 東京電力株式会社「関東の電気事業と東京電力」p6(2002)

てみるのは、大変興味深いことである(2.2.1、3.1参照)。

1875(明治8)年に工学寮(のちの工部大学、現東京大学電気工学部)に入学し、イギリス人W.R.Ayrton教授に師事した。1884(明治17)年に日本人初の教授となった。既に在学中から発電機模型と白熱電灯を試作したと言われている。

1884(明治17)年にフィラデルフィア万国電気展覧会に派遣され、その後訪問したエジソン会社で高声電話と白熱灯を見学し、その精巧さに感嘆した。帰国後は白熱電灯の研究に傾倒し、その宣伝に努めた。1885(明治18)年にエジソンから工部大学に電話機1台と白熱電球36個が寄贈され、その白熱電球を見本に国産電球が試作された。

欧米で発電機による電灯の点灯に成功したことを知った藤岡は電気事業創設を熱心に勧説した。しかし、既に始まっていたアーク灯とはまったく違う別の新事業に賛同する実業家は容易に見つからず、自ら『東京電気会社仮規則』を起草して出資者を募集した。最初に署名したのは沖商会沖牙太郎で、さらに工部卿山岡庸三は、ただちに東京貯蔵銀行頭取で大阪紡績発起人のひとりであった矢島作朗を紹介し、矢嶋はその将来性を見抜き他の賛同者と東京電燈を創設した。日本初の電気事業は、このように藤岡の熱意によって生み出された。

さらに、白熱電灯国産化が電気普及に欠かせないとの思いから教職を投げ打って東京電燈に移り、自ら白熱電灯の開発に取組み、その普及に白熱電灯の製造販売を目的とした白熱舎を創設した。その他、藤岡は電源である発電機の国産化にも関与している。

ここに、日本における海外先進技術の導入、その普及、そして国産化に導く重要なポイントを見出せる。

日本における国産発電機は、1885(明治18)年三吉電機工場製5kW白熱電灯用分捲直流発電機である。これは、外人教師に師事して知識を習得し、外国製品を直接見る機会があった藤岡市助の設計・監督によるものであった。これらから、黎明期における国産化はつぎの経緯を辿っている。

基本的な認識：黎明期から大正時代末期の急増する電力需要対応はほとんど輸入機器に依存、ごく一部の発電機器が国産化された。

1. 輸入機器の組立・運転(外国人技師の指導)



2. 輸入機器の模倣による製造・運転



3. 輸入機器の基本技術・構造を適用した自主設計による製造



4. 国産機器の性能不足、信頼性不足による機器故障への対応力不足



5. 主要発電機器の輸入、周辺機器の国産化

火力発電機器の大半を輸入機器に依存し、外国人技師の指導のもと据付け・運転することで急増する電力需要に対応してきた。その遂行過程で、輸入機器や外国人技師の据付け・運転指導を通して入手した技術情報・知識・経験により国産化のための技術は蓄積されていった。

そのような輸入機器全盛時代にあって限られた先駆者の技術者と卓越した「名工」により国産化の取組みがなされた。特に、主要材料(ロータ軸材、電磁材料、絶縁材料、導電材料など)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、それらの代替技術の考案や設備不足を補って余りある“名工の技”により機器製造国産化は進んでいったものと思われる。さらに、単なる輸入機器の模倣・製作の段階を過ぎて、輸入機器の基本要素技術・構造を咀嚼して自主設計による機器製造へと進んでいったが、1895(明治28)年頃までは火力用発電機では記録的なものはなかった。

電気事業者の根強い輸入機器依存に起因する輸入債務の増大、日清戦争による物価騰貴などにより経営困難に陥る電力会社もでてきた。たとえば、東京電燈浅草火力は建設資金不足のため国産推奨の世論もあって1期工事の全発電機器の国産化を決定し、石川島造船所に発注した。汽缶の他、蒸気機関330馬力・6台、発電機200kW・4台を製作し、1896(明治29)年運転を開始した。当時、単相交流式200kW・2,000V・100Hz発電機は世界的にも最大級機であった。

しかし、汽缶・汽機の遅れによる工事遅延で需要急増に間に合わず、その上運転開始すると能率が悪く、故障が多発し、欠陥の取り扱いでも大変な困難があったことなど不評をかった。このため、東京電燈は2期分全機器を輸入に切り替えざるをえなかった。輸入発電機は三相・265kW・3,000V・50Hz機で、本機がその後の関東地区における標準周波数50Hzの始まりとなった。

このように火力発電機器国産化の取組みは最初の段階で躓いてしまったがその原因は、設計・製造技術基盤の軟弱、主要材料の不足、関連周辺工業の未成熟によるものと考えられる。

また、当時輸入機器による15~80kWの小水力発電が急増してきたが、発電の主力は依然として輸入機器による火力発電であった。しかし、1900(明治33)年

頃から始まった大規模水力の電源開発と長距離・高電圧送電により水力発電が主流を占めるようになった。特に、水力の発電コストと比較して火力発電コストは高く、日清戦争による石炭価格の高騰（前4.5→後9.16円／トン）により電力料金の差は広がる一方で、水力発電による電力料金は火力の25%～40%と極端に差がつき、これも火力機器国産化技術の発展を阻害した一つの要因であった。

このような経緯で、やっと盛り上がりを見せた火力発電機器の国産化機運は弱まり、再び主要機器は輸入が主流となった。煙突など周辺機器のみが国産化され、このような機器製作分担は大正時代末まで続いた。

一方、電気利用はどのように発展してきたかを概観する。電気応用機器の代替国産化に取り組む原動力となったのは西洋・近代文明への好奇心であり、その情熱は官営事業から始まって民間工業へと急速に広まっていた。すなわち、政府主導形の近代工業の裾野に在来技術に依存する小規模な工業が広がっていった。製糸、織物業、そして紡績業などでは、在来技術の基礎の上に近代技術の導入が進められた。さらに、機械、器具工業、金属工業、造船業などに「企業勃興」が波及していった。民間工業の成長を反映して工場や鉱山などにおける自家発電が活発化し、紡績、織維などでは照明、鉱山ではポンプ、捲揚機械、そして照明に利用された。

日清戦争から日露戦争までの間の急激な工業化進展の中で原動機を使用する工場は約3倍となり、その半数以上で蒸気機関以外の原動機が導入された。この時期に電気機器の使用が急増したが、全体的には工場動力源の大半は依然として蒸気機関であり、電力は未だ一般的な動力源ではなかった。

発電技術でみると、明治時代中期から交流が主流となり始めた。1889（明治22）年に開業した大阪電燈は、最初からトムソン・ハウストン社製交流発電機を導入した。この時期、東京電燈は直流が主流で、日本でも東京電燈と大阪電燈間で直流発電方式と交流発電方式の優劣をめぐって、いわゆる直流・交流論争が繰り返された。東京電燈でも浅草発電所以降はすべて交流発電となった。1894（明治27）年浅草発電所の建設に着工したのを機に、交流の発電技術ばかりでなく、交流発電機の知識も獲得して、それを三吉電機工場の製造技術に生かした。

しかし、輸入国、製造者、機種にそれぞれ固有な発電周波数を有する発電機器を輸入した結果、電力会社や発電所、そして同一発電所内で号数によっても周波数は異なり、25、40、50、60、100、および133Hzなどの周

波数を有する交流電気が発電・送配電され、現在のようにより地域や電力会社による周波数の統一はなかった。1889（明治22）年に開業した大阪電燈は、アメリカから輸入したトムソン・ハウストン社製発電機の60Hzを、そして東京電燈は浅草火力で第1期と第2期で採用したアルゲマイネ社製三相-265kW-3,000V発電機の50Hzが、後に関西地区および関東地区の標準サイクルの起源となった。

4.2 輸入技術／製造国産化

明治時代後期から大正時代にかけて電力需要は着実に伸び、火力発電プラントも従来の需要別分散形独立電源から集中火力発電方式へと移行していった。

このような電力供給回路網の出現に、火力発電プラントも大形化が進んだが、技術基盤の軟弱や電気機器製造会社の経営基盤の弱体などからニーズの高い大形火力発電機器製作のための自主技術確立は困難であった。

基本的な認識：電気事業の飛躍期で火力発電プラント大容量化ニーズは高いが、依然輸入機器に依存。高まる国産化機運に欧米電機製造会社と技術提携し製造国産。

当時の主な発電機器製造者は長崎造船所、石川島造船所、大阪鉄工所であり、タービン発電機など電気機器も製造していた。三菱造船所、長崎造船所に電気工場ができたのはこの頃であった。また、重電機器製造会社が相次いで創設された。

これらの会社の多くは、技術確立を急ぐため世界有数の海外電機製造会社と技術提携し技術基盤の確立を図った。

1. 海外電機製造会社と技術提携



2. 1号機輸入、機器の据付け・運転
（外国人技師の指導）



3. 1号輸入機器の図面による製造・据付け
（駐在外国人技師の指導）



4. 駐在外国人による生産管理、製造の指導
（包括的提携）



5. 提携先に技師、職工を派遣し技術・技能の習得



6. 製造経験の積重ねによる製造Know-Howの蓄積

技術提携

海外先進電機製造会社では、既にこの時期現用タービンの原形機を完成しており、これらの最新鋭機の技術が輸入機器や導入図面により日本に紹介された。

当時の技術移転の経緯をより良く理解するため三菱造船所 長崎造船所とパーソン社、その後三菱電機創立に伴うウエスチングハウス社との技術提携について詳述する。

1908（明治41）年三菱造船所 長崎造船所電気工場がパーソン社（英）との技術提携により製作した三菱佐渡鉱山2極-625kVA-3,500V-2,400min⁻¹-40Hz-0.8pf機は国産大容量タービン発電機1号機である。この前年にパーソン社より日本最古のタービン発電機である同一定格機を購入し長崎造船所に設備しており、このタービン発電機と全く同一構造ものを国産した。

その後、同社は約20年後の1926（大正15）年には満州電気 大連濱町2極-6,250kVA-3,300V-3,000min⁻¹-50Hz機を完成し、さらに本機と同一寸法機で60Hz機を製作した。

同社は契約締結後、技師、職工をパーソン社に派遣し、設計や工作法を研究・習得させると共に、社内でも研究開発を進めた。

その後、1921（大正10）年三菱電機創立にともない1923（大正12）年にアメリカ ウエスチングハウス社と技術提携し、契約形態は一段と包括的内容に変わっていった。

- (1) タービン発電機の図面、工作法、経験、材料など機器製作に必要な資料の閲覧
- (2) 技術習得のための技師、職工の派遣
- (3) 技術者招聘による設計、工作、設備の指導・改良
- (4) 日本の製造環境に適合さすための設計、工作、材料などの研究・変更
- (5) 理論的考察力の向上（上記4項の検討のため）

その他の国内電機製造会社の技術契約もほぼ同様な内容であったと推察される。日本の電機製造会社との技術格差が余りにも大きく、海外先進電機製造会社からは競合相手と見る必要はなく、自然と大らかな対応となったものと推察される。

卓越した技能

設計・製造技術は技術導入によりある程度確立できるが、ものづくりは一朝一夕にできあがるものではなく、製造経験を積み重ねるなかで習得される。旧式の機械設備を使いこなした高精度加工、部品精度不足を補う合わせ加工による組立、卓越した職工（技能者）の“腕（技量）”に依存した発電機特有のコイルなど非機械加工部品の製造・組立など個人に帰属した熟練

技能なくしては製造不可能であった。短期間での製造国産化の実現には、このような数々の“名工”の存在があったことを忘れてはならない。

主要材料不足

タービンや発電機など発電プラントの主要機器の国産化には、解決しなければならない多くの課題があることは既に述べてきたが、重要課題の一つは主要材料の入手である。これら周辺技術の遅れにより材料入手難の問題に直面することは多い。

タービン発電機にとって重要な周辺技術として、つぎの材料が挙げられる。

- (1) 高強度・大形一体塊状ロータ軸材
- (2) 電磁鋼板
- (3) 高電圧絶縁材料（マイカ絶縁テープ、接着剤、締結材、スペーサー材）

（ロータ軸材）

高速回転体であるタービン・発電機ロータ用の一体塊状大形・高強度軸材の入手は、タービン発電機製造の歴史で常に重要課題であった。

初期の国産タービン発電機は、当時日本の産業界の牽引的存在であった造船会社によって主に製造された。造船会社は、船体は勿論、推進機関、推進装置、制御装置、そして電気機器に至る広範囲な機器を製造していた。当然、鍛造材料も内作していたものと思われるが、この他一部国内鍛造会社でも製作された。しかし、昭和時代初期の高速大容量機では国内鍛造会社が製造を引受けず輸入品を使用した。しかし、軸材の大形化、高強度化は困難を極め、タービン発電機設計は“入手可能な軸材”を如何に利用して大容量化を図るかの工夫を強いられてきた。主として4極機に採用されたロータで複数の小形鍛造軸をボルト締めにより一体化する分割形ロータ（Westinghouse社：WH、General Electric社：GE）、鍛造軸の外周にプリズムと呼ばれる薄板より構成した部品を組立てるロータ（AEG社）、そして円盤状の150～200mm厚鍛鋼板を中心軸に組立てたロータ（WH）などが実用された。

しかし、日本のように50、60Hzの2種類の周波数を使っている国では、60Hz系の機器で、しかも様々な経験を経て発達してきた技術でないと使用者に受け入れられ難いという事情で一体塊状ロータ（ソリッドロータ）が主流となっていた。

高強度大形軸材の製造は、戦後国内製鋼鍛造会社における開発・製造技術の長足の進歩により大幅に改善されたが、依然として現在にも至る課題である（第5章5.1.2、第6章6.1参照）。

(電磁鋼板)

回転電気機械、特に交流機では損失、励磁電流の低減から高性能電磁鋼板は不可欠である。しかし、国産電磁鋼板は、回転電機や変圧器の国産化取組みから大幅に遅れ、1924（大正13）年に製造が始まった。

それは、電気機器に使用される鉄心は不純物の少ない純鉄に近いものほど磁気特性に優れていることは既に分かっていたが、この様な低炭素鋼の製造は日本の製鋼技術では大正時代後期まで不可能であった。したがって、欧米からの輸入に全面的に頼らざるを得なかった。日本における高性能電磁鋼板の採用は1910（明治43）年でイギリスから輸入した3.5%珪素を含む電磁鋼板を柱上変圧器に採用したのが最初である。

海外、特にアメリカからの技術導入により国内製鉄会社は、変圧器用電磁鋼板の高性能化を主に国産化、そして高性能化に取り組み、その成果を回転電気機械用材料に反映してきた。特に、終戦後の電磁鋼板技術の長足の進歩によりタービン発電機の小形・軽量化、高性能化が実現できた（第6章6.2参照）。

(高電圧絶縁材料)

タービン発電機用絶縁材料は、使用箇所によって要求特性が異なる。

ロータ：高機械強度、高耐熱性

ステータ：高電気絶縁特性、高耐熱性、優れた接着力

当時利用できた主な絶縁材料は、はがしマイカ³²であり、これを基材にした絶縁材料が多用された。優れた電気絶縁特性を有するマイカは、機械強度面では劣り、それをカバーする補強材料との組合せにより解決してきた。

タービン発電機国産化の初期の発電機電圧は数kVと低く、大正時代になって11kVが採用された。当時は、耐熱クラスが低い（クラスA）、発電機鉄心長（ステータコイル直線部長に相当）が比較的短い、発電機の負荷変動（ステータコイル電流変化）が少ないなどの好条件により、はがしマイカ片を使用したマイカテープによるコイル絶縁で対応できた。しかし、問題は巻回したマイカテープの層間を接着し一体化する接着剤で、初期にはシェラックワニス（虫の分泌物）が使用され、その後はアスファルトコンパウンドを加圧含浸する方法が採用された。しかし、大容量化に伴い長大コイルを処理するコンパウンド処理タンクが間に合わず、コンパウンド圧入しないコイルで製作した発電機で、運転後に絶縁破壊事故を発生したこともあ

ってアスファルトコンパウンド方式が主流になった。

大容量化に伴い発電機電圧の高電圧化が進むにしたがって良質マイカ原石およびアスファルトコンパウンドが不可欠であったが、全面的に輸入に頼らなければならず、不安定な国際情勢下での確保が常に問題であった。例えば、第二次世界大戦前、それまでの主要輸入先であったインド産のマイカが入らなくなり、朝鮮産を使用せざるをえなかった。

マイカテープの国産化は1910（明治43）年に始まり、タービン発電機の国産化の始まりとほぼ同時期であった。その後、昭和時代初期までに数社が創立した。一般的に、国内マイカ絶縁物製造会社は小規模で開発・評価の技術力も十分でなかったことから単なる製造工場の位置づけであり、しかもコイル絶縁は発電機の信頼性、寿命に大きく影響をあたえる最重要部品の一つであることから、電機製造会社が主導的に開発・評価・改良を進めた。特に、発電機の機器寿命として一般的に考えられる25～30年の運転に耐えるコイル絶縁寿命を開発段階である程度予測する評価技術の確立は電機製造会社の重要な課題であった。このような背景から、電機製造会社が実施したマイカテープや絶縁システムの研究開発に基づいて作成された材料仕様に基づき、緊密な関係にあるマイカ絶縁物製造会社が製造を担当する組合せが一般的であった。

したがって、高信頼性・長寿命絶縁システムの確立は、電機製造会社の技術レベルを表す一つの指標であり、各社とも開発体制の整備と技術力の向上に注力してきた（第6章6.3参照）。

4.3 自主技術

明治時代後期から大正時代の海外先進電機製造会社との技術提携により入手した技術図書、外国人技師による指導、技師・職工の海外研修などにより技術レベルは次第に向上していった。

標準機の輸入図面による製造国産化が依然として国産タービン発電機の主流であったが、導入基本技術を使用した自主設計が漸次増加してきた。

国際情勢の悪化、日本の政治的孤立などの外的な要因もあって、自主技術による機器製造は著しく進展し、短期間で海外先進電機製造会社に追いつき、世界的にも記録的な発電機が第二次世界大戦前、そして戦時中にも相次ぎ製作されたことは注目に値する。

³² [解説] 雲母層よりなるマイカ原石を機械的に剥離した薄箔マイカ片を貼着して一定厚さにしたもの。

基本的な認識：輸入技術を咀嚼し、導入主要基本技術を使った自主設計により、世界的記録品を多数製作した。その背景に国際情勢悪化があり、国産化加速。

輸入図面による製造国産タービン発電機は、電力需要の増加や発電コスト低減などから大容量化が急速に進んだ。多くの記録的大容量機が関西地区、西日本に偏っていることは興味深い。

関東地区では1926（大正15）年に完成した東京電燈 千住火力はボイラ、タービン、発電機などすべての主要機器はイギリスからの輸入機器であった。その真の理由は知る由もないが、電力安定供給責務を負う電気事業者として高信頼度のプラント機器を迫及する基本的な姿勢を伺うことができる。換言すれば、輸入設計図による国産機器への信頼の欠如のあらわれとも言える。

一方、高速回転機として設計・製造・運転などの面からより難しい1,800、3,600min⁻¹運転される60Hz地域、即ち関西地区、西日本で国産機器が積極的に採用された。その理由の解明は今後に委ねるとして、電力需要の逼迫度の差、輸入機器による発電所建設費増大による経営上の問題解決、あるいは基幹産業である発電機器国産化の必要性から国内電機製造会社の育成という電気事業者の高邁な判断などが考えられる。

納入実績面では国産機器採用に対する地域差はあるが、自主技術による国産発電機器の採用にユーザである電気事業者から相当の抵抗があったであろうとの推測は難くない。

ここで興味深い点は、当時日本が進出・統治していた大陸や近隣諸国に水力発電も含め自主設計機器が多数据付けられた事実である。しかも、それらの中に世界的記録容量機が含まれていることである。統治政策からの緊急的インフラ整備の必要性によるものと推測できるが、電機製造会社には自主技術による記録的機器採用の“場の提供”と“運転実績作り”という意義は非常に大きい。

このような電気事業を取巻く内外の情勢下で、国産発電機器は次第に実績を積み、戦前に実績面では世界レベルに到達していたこともあって、既に輸入品と競合できる段階にきていた。例えば、関西共同火力 尼ヶ崎第一発電所の場合は自由経済による機会均等から輸入機も1台導入されたが、第二発電所は全数国産機採用が決定された。当時、記録的大容量機が名誉では

なくむしろ当然のことであり、外国品を考えるのが珍しいくらいまでに状況は変わっていた。

この時期に製作された国産タービン発電機の回転数と最大容量を以下に示す。

〈周波数〉	〈回転数〉(min ⁻¹)	〈最大容量〉
50Hz	3,000	62,500kVA－50,000kW
	1,500	62,500kVA－50,000kW
60Hz	3,600	37,500kVA－30,000kW
	1,800	93,750kVA－75,000kW

この時期、輸入技術を基盤とした自主技術、主要資材の輸入依存、国際情勢悪化による技術的孤立など厳しい環境下で、検証・確立済み技術の先を行く大容量化要求に应运えてきたタービン発電機の対応技術を概観する。

低速4極大容量機

一次エネルギーの効率的活用から、蒸気条件については、主蒸気圧力・温度が高いほど熱効率はよくなる³²。この様な高温・高圧蒸気によるタービンは高速タービンが適しており、タービン発電機も小形化が実現できる（5.1.1に詳述）。

しかし、蒸気条件の高温・高圧化およびタービン・発電機の高速化には解決しなければならない問題が多く、汽缶、蒸気タービン、タービン発電機などの主要機器は勿論のこと、高温・高圧熱サイクルと必要付属機器、蒸気系の制御、高精度タービン速度制御、タービン・発電機軸の振動計測・高速バランス技術などの周辺技術にも及んだ。したがって、蒸気条件の選定は、材料の高温強度などの技術的制約要因と経済性を評価したうえで、プラント計画に最も適した条件を選定しなければならない。

タービン・発電機本体に限定した最大課題は高信頼ロータである。タービン側では高温特性に優れた高強度軸材とタービン翼、発電機側では高強度・大形一体塊状軸材、エンドリング材、そして高強度ロータ絶縁材料である。

これらの課題は当時欧米先進国でも研究・開発の途上にあり、急増する電力需要対応に大容量化が比較的容易な4極－1,500min⁻¹、1,800min⁻¹機に依存せざるをえなかった。国産4極タービン発電機の大形化は急速に進み、火力発電の主力となった。記録的は単機容量を以下に示す。また、図4.2に当時東洋最大容量機であった尼ヶ崎第二93,750kVA機を示す。

³² [解説] Frank-Mitchellにより蒸気条件と熱消費率の関係が理論的に解明済。

1918(大正7)年	春日出第一火力	12,500kVA
	安治川東	12,500kVA
1924(大正13)年	八幡製鉄	25,000kVA(2極-1,500min ⁻¹ -25Hz)
1933(昭和8)年	尼ヶ崎第一	62,500kVA(当時東洋最大容量)
1936(昭和11)年	鶴見火力	62,500kVA
1937(昭和12)年	尼ヶ崎第二	93,750kVA(当時東洋最大容量)

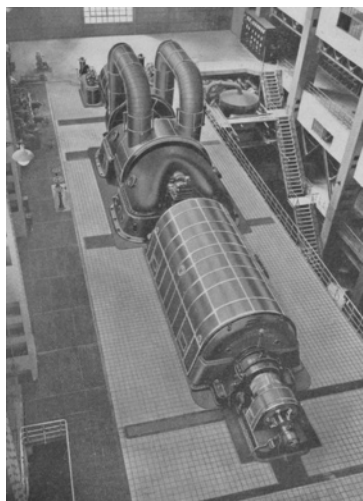


図4.2 4極-93,750kVA-60Hzタービン発電機

しかし、同一容量の2極機に対して4極機のロータ重量は約2倍となり、当時の製鋼・鍛造技術、設備容量では大容量発電機用の大形一体塊状軸材の製作は困難であった。したがって、複数の小形ブロックにより構成される分割ロータ方式（組立て式ロータ）などの設計・製造技術で対応せざるをえなかった（第5章5.1.2参照）。

また、この様な大形ロータ加工は大形・高精度専用機がないため困難を極め、特にコイルスロット加工は汎用機により加工せざるをえなかった。

2極-3,600min⁻¹-60Hz機への飽くなき挑戦

昭和時代初期には、技術・主要材料の制約により大容量機は4極機、小容量機は2極機というような棲み分けが自然とできた。2極機ロータ構造は、高強度軸材の入手難と高精度機械加工の困難（特にロータコイルスロット加工）から、小部品を組立て円筒構造にする特殊設計ロータも採用された。

タービン熱効率の向上、機器小形化など高速タービン・発電機の利点は多く、その大容量化は電力事業者にとってもメリットは大きい。また、製造会社にとってもユーザーズへの対応技術として積極的にチャレンジしたい課題であった。大正時代中期から後期にかけて各社は導入技術により600~1,000kVA級機を製作し、最大6,250kVA-3,000min⁻¹機も完成している。

タービン・発電機の2極・高速化にはそれぞれに課題はあったが、大正時代末期から昭和時代初期にはタービン技術が先行していた。それは、大正時代初期に

始まった海軍力増強のために軍艦推進用高性能・大容量蒸気タービンの必要に迫られ、パーソン形（パーソン社）、ブラームカーチス形、ツェリー形（エッシャー・ウイス社）タービンなどの導入技術により国産され、当時の軍拡熱により増産された。しかし、その後に軍縮会議がまとまり需要が大幅に減少し、折角習得したタービン技術をそのまま捨てるのは惜しいとの関係者の思いから陸用タービンに活路を見出そうとした。船用タービンには不必要であったが、発電用には欠くことの出来ない出力・速度制御装置（ガバナ）などの新規課題も自主技術で解決し、船用タービンで蓄積された技術をベースに短期間で高い技術レベルを達成した。したがって、発電用タービンは新たな導入技術なしに独自設計により75,000kW機まで完成した。

このため、全体的にはタービン発電機が2極・高速化を制限することになった。たとえば、発電機駆動機としての適用に先立ち、独自技術で設計・製作された400kVA-3,000min⁻¹-20,000Hzアレキサンダーソン高周波発電機の原動機として採用された。この高周波発電機は火花式無線通信設備として1919（大正8）年に完成し、日米海底通信用電源として原ノ町通信所（福島県）に設置された。図4.3に同形機の写真を示す。

大正年間の導入技術の咀嚼と導入図面に基づく製造



図4.3 アレキサンダーソン高周波発電機
125kVA-3,000min⁻¹-12,000Hz
(株)東芝 京浜事業所蔵

国産化により蓄積された技術・技能により2極タービン発電機製作の自主技術は逐次確立されていったが、初期の段階では運転実績不足などに起因する国産機器への不信感から植民地や僅かな国内ユーザを除き“実践の場”が得られなかった。

そこに、国際関係の悪化により同盟国ドイツを除き米英からの輸入が途絶える事態が発生し、軍勢力増強のための軍需産業の拡大などによる電力需要急増から国産機器に頼らざるを得ない状況が生じた。これを“追い風”として自主設計による国産発電機器は著しく発展した。満を持したように世界的記録機を含む大容量2極高速タービン発電機が相次いで製作され、特

に製造、運転が難しい $3,600\text{min}^{-1}$ 機で見ると以下の発電機が製作された。図4.4に電力用タービン発電機単機容量の推移を示す。

1922(大正11)年	神岡鉱業	937.5kVA
1926(昭和元)年	南海電鉄	3,125kVA
1927(昭和2)年	崎戸鉱業所	3,750kVA
1930(昭和5)年	三井鉱山 大浦	11,250kVA

1932(昭和7)年	宇部曹達	12,500kVA
1933(昭和8)年	宇部	22,500kVA(当時世界最大級)
1935(昭和10)年	広島電気 坂	31,250kVA(当時世界最大級)
1939(昭和14)年	相之浦	37,500kVA(当時世界最大)
1942(昭和17)年	清水火力	37,500kVA
1951(昭和26)年	築上火力	43,750kVA(戦後,当時国内最大)

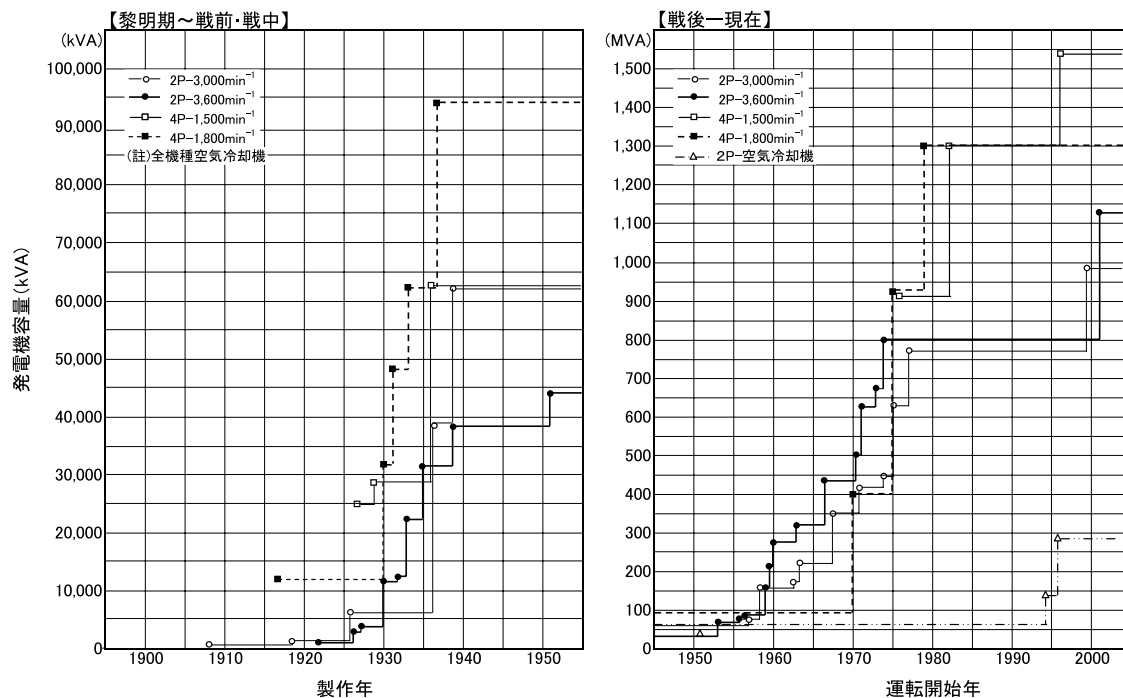


図4.4 電力用タービン発電機単機容量の推移

第二次世界大戦へ突入し、基礎的な生産部門の対応力不足、主要資材の入手難、軍需工業最優先などにより芽生えかけた国産大容量発電機器の黄金時代もかけり、1931(昭和16)年をピークに下降線を辿っていった。

4.4 技術孤立下での技術

1931(昭和6)年の満州事変を契機に国際情勢は急速に悪化してきたが、一部の電機製造会社では1935(昭和10)年頃も新規技術提携の話合いがもたれ技術者の往来があった。しかし、1937(昭和12)年に勃発した日華事変後は技術提携により派遣されていた外国人経営幹部・技術者は、同盟国ドイツを除いて退去していった。当然、技術的にも孤立し、当時欧米で進められていた研究開発や技術動向に関する情報入手は困難になった。

一方、既にこの時期 $3,600\text{min}^{-1}$ および $3,000\text{min}^{-1}$ でそれぞれ30,000kW、50,000kW機などの2極高速機で世界的記録容量機が国産化されていたこともあり、空冷冷却2極タービン発電機は時勢の影響もあって新設計

の時間的余裕もなく進展は見られなかった。全体的には、一部記録的機器が製作されたが、技術的には停滞・衰退状態にあったと言わざるをえない。

戦時体制下で、緊急的処置として戦時規格「Z規格」が導入された。通常発電機器などに要求される高性能、高品質、高信頼性を保証するための技術的要求を、戦時下での緊急的発電設備拡大のためにレベルダウンしたものであり、それ以前の発電設備の酷使などと併せ、設備稼働率低下の原因となった。

基本的な認識：1900年代始めに開発された発電技術を習得、実績面ではトップレベルに。旧方式に固執し、既に次世代技術開発に専心した欧米との格差大。

この間、アメリカでは戦時体制下での急増する電力需要に対応するため大容量・高性能火力発電システムの研究開発が著しく進展し、当時の研究により現用汽力発電システムとその機器技術が確立され、巨大工場で大増産されていた。

第二次世界大戦前の日本は、欧米で1900年代始めに

開発された発電技術を導入・咀嚼し、そして自主技術として利用することで数々の世界的記録品を製作するところまで成長し、部分的ではあるが世界トップレベルに到達していた。しかし、戦後になって高度に発達した欧米の発電技術に触れた時、戦争による技術空白の間に再び大きな技術格差が生じている事実を知ることになった。

“借りもの技術”に固執し、導入基本要素技術の線上で“外挿法”的に応用することで国産発電機的设计・製造に取組み、ただ「追いつき、追い越す」ことに専心し、将来技術の研究・開発に基礎技術力や時間・資金的余裕が無かった日本と、既に次世代発電技術の研究・開発に着手していた先進国との基本姿勢の違いが如実に現れた時代である。

しかし、日本にも次世代技術開発の動きは皆無ではなかった。結果的には、周辺技術や環境などが整わなかったことなどの理由で実用レベルに到達できなかったが、戦後に実用された技術があった。それらの例を紹介する。

水素冷却タービン発電機

国産タービン発電機は空気冷却方式によって世界水準まで進歩してきたが、一層の単機容量増大はロータ軸材で制限された。この問題解決に冷却性能の改善が不可欠であり、アメリカでは早くから研究着手し1938（昭和13）年にゼネラルエレクトリック社が水素冷却1号機31,250kVA機を完成した。

日本では、これに先立ち1918（大正7）年に日立製作所が独自設計により1,000kVA水素冷却タービン発電機を製作し、工場試験を実施した（工場試験後、空冷機として出荷）。

その後、1937（昭和12）年頃より研究着手した三菱電機が1942（昭和17）年に三菱鉱業 崎戸鉱業所 8,750kVA - 3,600min⁻¹機を製作し、工場にて0.05kg/cm²水素ガスを封入し11,000kVA機として試験した。単なる試験機ではなく実用機として必要な補機一式を備えた本格的な発電機であった。しかし、このような新しいコンセプト機の普及には周辺産業の同時発展が不可欠であるが、当時の日本ではまだそのような状況にはなく実用段階への進展は戦後まで待たざるをえなかった。

なお、当時アメリカでは既に水素冷却機が開発・実用されており、空気冷却機の容量範囲は25,000kWまでとし、それ以上は水素冷却を標準とするところまで完成度が上がっていた。

図4.5に純日本式設計による国産水素冷却タービン発電機を示す。

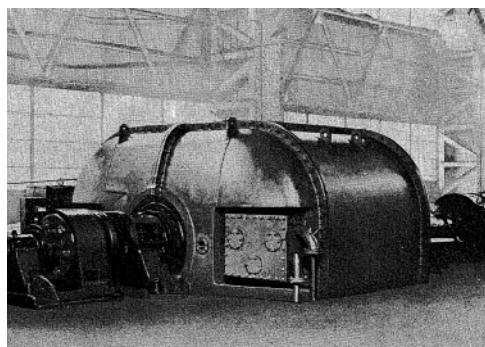


図4.5 純国産技術による水素冷却タービン発電機

戦時下の国産材料

戦時下で国産材料を使用せざるをえなくなり、代替材料の開発に苦勞した時代であった。

特にタービン・発電機の高強度・均質のロータ軸材が問題であった。化学成分として機械強度メンバーであり、また熱処理時の均質化に寄与するニッケルが入手不可となり、代替品としてクローム・モリブデン鋼を検討したが大形軸材の製作は困難で、発電機容量で10,000kVA級が限界であった。

一方、タービン側は従来3%ニッケル・モリブデン鋼を使用していたが、早くからニッケルを低くした1%ニッケル鋼に変更していたこと、また比較的小さな鍛造品で構成できることから深刻な問題にはならなかった。

発電機はインド産マイカが使用できなくなり朝鮮産マイカを使用した。さらに高電圧絶縁に不可欠なアスファルトコンパウンドも全面的に輸入に依存していたが、国内品に切替えざるをえなかった。しかし、国内品は温度特性が悪く、アスファルトコンパウンド処理なし絶縁の研究に注力し、実機に適用した。

このような材料事情により、12,500kW、25,000kWなどの標準機を量産して需要に対応した。

4.5 輸入技術による製造国産化

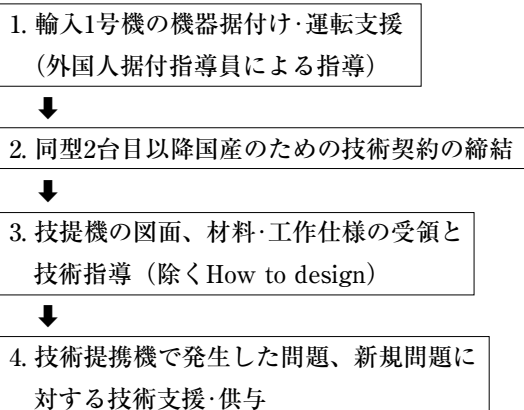
終戦から5年弱の間は、技術的に見るべきものは全くなかったと言っても過言ではない。生産設備の壊滅状態、技術者・技能者不足、技術資料の消失、資材不足などにより新規発電設備は皆無で、電源確保のため僅かに残った発電設備の修理などが主であった。たとえば、60Hz地域への電源供給のために50Hzタービン発電機を移設して使用するため、遠心力増に対する安全率確保の面から従来の銅材に代え比重の小さいアルミニウム材を使用したコイル巻き替えなども行われた。1950（昭和25）年になって戦後1号機となった沖縄牧港火力13,529kVA機が完成し、翌年には空気冷却

タービン発電機として記録的大容量機であった築上火力2極-43,750kVA機が完成したのは、戦前からの蓄積技術によるものであった。

基本的な認識：戦前からの空白時代の欧米先進電機製造会社との技術格差解消のための輸入技術、特に新鋭火力技術の導入。第二次技術導入時代の始まり。

1950（昭和25）年連合国総司令部（GHQ）の斡旋により技術者16名も参加した政府電力調査団が欧米を訪問し、特にアメリカでは巨大工場で10万kW級発電設備が製作されていることを知り、技術格差の大きさを認識させられた。これを機に、発電機器製造各社は技術提携し、第二次技術提携時代が始まった。

技術導入の経緯は、戦前の技術提携（第一次技術提携）と大差はなく、すでにある程度の技術の蓄積と製作実績があったことから、新技術の吸収は非常に速かった。技術提携の形態・内容は各社によって異なるが、以下に個別契約の一般的な技術導入プロセスを紹介する。



戦後復興のための発電電力量の確保と戦後間もない鉱工業生産の増加による電力需要の増加などにより電力供給力不足が問題になり、新鋭火力発電所の建設が盛んになった。

「新鋭火力」とは、第二次世界大戦中にアメリカで進展した一連の火力技術、すなわち高温・高圧機器や自動燃焼制御装置などの開発による運転の自動化、熱効率の向上による燃料の節減、信頼度の向上などで特徴付けられ、この高効率、大容量を実現した新鋭火力の登場によって火力発電の経済性は著しく向上した。日本では三重火力発電所、多奈川発電所、荻田発電所で先陣をきって採用された

1953（昭和28）年に導入された55MW級発電プラントから始まる輸入技術による大容量機は、急増する電力需要に対応していった。

大容量化が最大課題であり、その主な技術を以下に述べる。

水素冷却機

日本においても戦前に水素冷却タービン発電機が開発され工場試験されたが、実用機としての実績はなかった。1953（昭和28）年に日本初の水素冷却55MW級機が相次いで完成した。同時期、アメリカでは1953（昭和28）年に217MVA水素間接冷却機および125MVAロータ直接冷却機が製作されていた。

しかし、逼迫した電力需給を一刻も早く解消することを最優先とした結果、輸入機器の採用では時間的に困難なため、1955（昭和30）年潮田火力に国産水素冷却66MW、引き続き1956（昭和31）年に75MWタービン発電機を初号機より採用し、短期間で成功裡に完成したことは注目に値する。

1952（昭和27）年以降、アメリカからの外資借款付で最新鋭の大形火力機器を導入する動きが相次ぎ、1号機輸入、そして技術提携による同型機2号機以降国産という傾向にあったものの、火力発電設備の増勢にしたがい単機容量増大のテンポが著しく早まった。

1957（昭和32）年に当時日本最大で、初めて単機容量が100MVAを超えた千葉火力160MVA-3,000min⁻¹機が運転開始した（図4.6参照）。ユニット出力が従来の約2倍という大容量を実現しただけでなく、蒸気条件、熱効率とも従来機をはるかに超える高効率ユニットで、熱効率37.2%を実現した。

しかし、本機は水素間接冷却機で、単機容量増大にはさらに冷却技術の改善が必要であった。



図4.6 日本初の100MVAを超えた160MVAタービン・発電機ロータ
東京電力株式会社「電気の史料館」展示

ロータ直接冷却

ロータコイルを水素ガスで直接冷却する方式が開発され、単機容量の飛躍的な増大を可能にした。国産初

のロータ直接冷却機として1959（昭和34）年に大阪火力208,096kVA-3,600min⁻¹機が完成した。本機はステータコイルもガス直接冷却した内部冷却タービン発電機の1号機である（図4.7参照）。1960（昭和35）年新名古屋火力281,600kVA-3,600min⁻¹機が製作され、ステータとロータ間の空隙（エアギャップ）から取込んだ冷媒ガスを、導体冷却後に再び空隙に排気するエアギャップピックアップ方式が採用された。

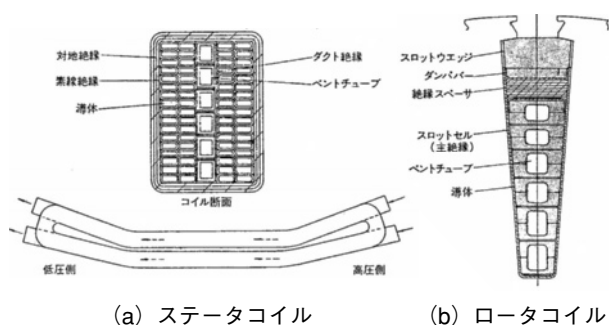


図4.7 日本初の内部冷却機 208,096kVA機のコイル断面

ステータ直接冷却

ガス内部冷却ステータコイル（図4.7参照）の他に液体冷却の技術開発も行われ、1963（昭和38）年堺港発電所に国産初のステータコイル油冷却300MVA-3,600min⁻¹機が完成し、1965（昭和40）年には知多火力にステータコイル水冷却国産1号機である442MVA-3,600min⁻¹機が完成した。

このような経過を経て、ステータ・ロータ直接冷却が大容量機の標準冷却方式となった。水素ガス直接冷却方式では、ガス圧増加により効果的に冷却性能を改善できることから定格水素ガス圧を高く選ぶことにより単機容量が飛躍的に増加した。

合成レジン絶縁

戦前よりはがしマイカを基材とした絶縁材料が、ロータ、ステータコイル絶縁として使われてきたが、第二次技術提携によりマイカペーパー³⁴、接着剤としての合成レジン、そしてガラス繊維を基材とした絶縁材料が導入された。ステータコイル絶縁は、はがしマイカやマイカペーパーとガラス繊維（裏打材）を接着剤（合成レジン）で貼合せたマイカテープを導体に巻回後、合成レジン接着剤により一体化した高電圧絶縁システムとなり、30kV級までの絶縁が可能となった。また、ロータコイル絶縁はガラス繊維を合成レジンで一体化した積層版（FRP）を機械加工した絶縁部品が採用され、その優れた機械的特性によりロータの大口径化が

可能となった。耐熱性・機械的特性に優れた合成レジン、そして高い機械的強度を有するガラス繊維の導入により絶縁システムや絶縁物の耐熱性、電気・機械特性は飛躍的に向上した。この結果、設計の自由度、発電機の長期信頼性向上などの多くの利点を得られた。

クロスコンパウンド形機（3.9.2.5、3.9.2.7、3.10.1参照）

それまでのタービン・発電機はタンデムコンパウンド形機で、タービン、発電機のロータを直結して串形に配置していたが、2軸構成のクロスコンパウンド形機が導入され、特に50Hz地域で多く採用された。265、350、600、1,000MWと大容量化していったが、これらの1号機はすべて輸入機であった。本方式は、プラント効率の改善、大容量化に適しているが、構成機器数の増加、発電所敷地面積の増加など建設費の増大要因もある（表3.2参照）。

国産クロスコンパウンド形機1号機は、導入図面により1962（昭和37）年に製作した横須賀火力265MWプラントである。高圧（プライマリー機）と低圧（セカンダリー機）タービンにそれぞれ169MVA-3,000min⁻¹発電機が直結される構成であった。

その後、クロスコンパウンド形機は50Hz系の大容量プラント技術として採用されていった。1974（昭和49）年袖ヶ浦火力1,000MWプラントが完成し、本方式での最大容量機となっている。プライマリー機550MW-3,000min⁻¹機、セカンダリー機450MW-1,500min⁻¹機により構成されている。

スライド機構付ステータコイルエンド支持方式

単機容量が増大するにつれてステータコイル長が増大し、運転時の熱膨張伸び量が増える。一方、大容量化によりコイル電流は増加し、定常運転時や事故時の過渡突入電流は大きくなるためコイルに働く電磁力に対しコイルエンドを強固に固定しなければならない。しかし、ガラス繊維や合成レジンガラス積層板を使用してコイルエンド部を強固に締結した場合、コイル熱伸びを制限するためコイルに内部応力が発生し、その繰返しにより固定部分の緩み、コイル絶縁損傷の原因となる。このため、熱伸び方向には移動でき、その他の方向は強固に固定するコイルエンド支持方式が採用され、長期信頼性の向上に貢献した。図4.8にスライド機構付コイルエンド支持構造（レジンコーン式）の一例を示す。

³⁴ [解説] 雲母層よりなるマイカ原石を機械的あるいは焼成により粉碎した後に水中に浮遊させて作る均一厚のシート状マイカで、集成マイカとも呼ばれる。

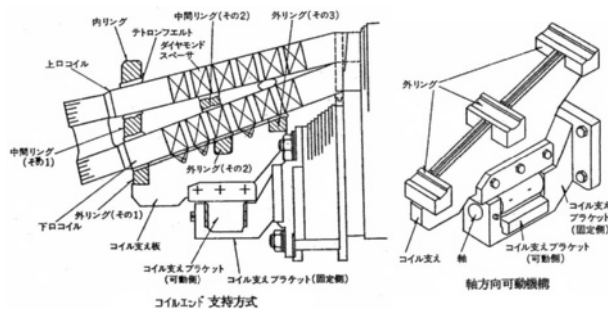


図4.8 スライド機構付コイルエンド支持構造図

4.6 自主技術による大容量化

一般に、技術契約にHow to designは含まれていなかった。導入機に適用されている基本要素技術を導入図面や技術研修・交流により習得し、当時かなり高度化した解析技術を駆使して、設計法を確立していった。

基本的な認識：導入技術の設計法の独自開発による多様な個別要求への対応力確立、電気事業者の国産品採用の場の提供により相次ぐ記録的大容量機を完成。

これらの経過を経て確立された自主技術により国内向け機や輸出機を設計製作した。第二次技術提携時代は、戦前の第一次技術提携時代と大きく異なる。第一次当時は、海外または提携先電気製造会社の標準機を導入し、数少ないケースを除き大半の国産機は導入図面通りに製作された（インチ→センチへの換算）。しかし、戦後の技術導入では国内電機製造会社による導入技術の咀嚼が速く、短時間で自主技術として確立され、戦前の蓄積技術と併せて自由自在に設計・製作できる体制ができあがった。

さらに、電気事業者もそれぞれの発電所建設地点、電力系統運用に最適な技術仕様を作成し、機器発注するようになってきた。多様化する要求仕様に基づき自主設計された国産大容量機が製作され始めた。その単機容量の増加は著しく、450、500、600MW機が短期間に製作され、1973（昭和48）年製作された知多火力800MVA（700MW）-3,600min⁻¹機は当時世界最大級機であった（図4.9参照）。

特に、輸出機は、立地条件、燃料事情、そして電力系統などの違いにより国内電力の要求仕様と異なることが多く、これら特殊仕様に対応するなかで自主技術はさらに高度化された。ある意味では、受注契約の形態が国内とは異なる海外ユーザ向け発電機器の製造は、新規開発技術の“実践の場”であり、製作・運転

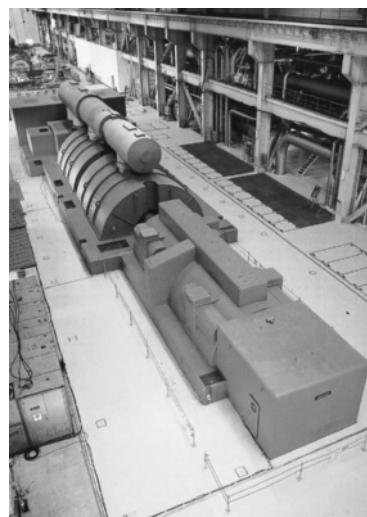


図4.9 世界最大級800MVA-3,600min⁻¹タービン発電機

実績を積みなかで完成度が上がっていった。

しかし、これら隆盛期に製作された発電機は、その後に採用された負荷調整運転、夜間進相運転など当初の設計仕様とは異なる運転方式での運用により、低サイクル疲労、局部過熱などに起因する重大事故が何例か発生している。結果論ではあるが、急速な単機容量の増加について行けなかった技術力不足は否めない。これらの重大問題の解決を図るなかで、基礎的な技術力が見直され、高度化されたことにより技術の成熟度は増していった。

4.7 独自技術による輸出

1975（昭和50）年頃から発電プラントの輸出が増加してきた。国内市場の低迷、開発途上国のインフラ整備のための電力需要の増大などの他、先進諸国における建設費低減のための輸入機器採用、特定電機製造会社による独占的機器供給の弊害回避など様々な理由が挙げられる。

基本的な認識：一層の高度化と輸出競争力強化から導入基本要素技術をベースとした自主技術からの脱却と独自技術の確立。

これらのニーズに応える形で輸出機器は急増してきたが、国内電機製造会社が保有する自主技術は、その基本要素技術の大半が提携先からの導入技術であり、その回避技術は輸出拡大に不可欠であった。

一方、海外電機製造会社にとって大きく成長してきた日本の電機製造会社は競合相手となってきた。そのため、新規開発技術の供与に慎重になり、既供与技術は工業所有権により海外市場での適用が規制されていることもあって独自技術の開発が急務となった。この

時期、特許回避のための技術、一層の高性能化のための技術などが開発され実用された。

特に、輸出機では内陸に位置する発電所への輸送費の増大、重量物輸送手段の未整備による厳しい輸送制限、国際競争力強化のための小形・軽量化／低価格などの課題を解決できる新技術が要求された。

これらの要求への対応技術の開発が推進され、特に新しい冷却技術の開発では様々な取組みがあった。その一例としてロータコイル冷却性能の改善を目的として、水の蒸発潜熱を利用した蒸発冷却ロータがある(図4.10参照)。

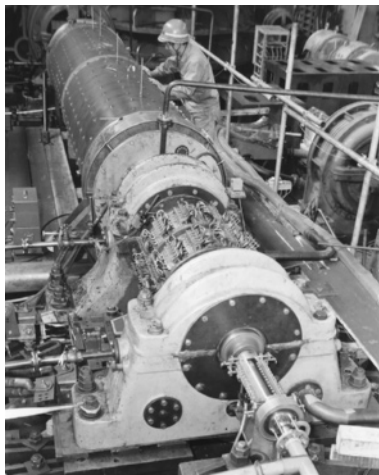


図4.10 ノズル式蒸発冷却ロータモデル

また、現地工事環境の悪い建設地点での据付け工事の簡略化、期間短縮などから船上に発電設備も含めてプラントを組立、現地まで曳航した後固定するバージ船プラントが製作された(図4.11参照)。



図4.11 世界初船上パルププラント

4.8 多様化ニーズへの対応技術

高度経済成長に伴う電力需要増の後に襲った2度の石油危機を契機に1975(昭和50)年頃から始まった低成長時代には、電力事業者の置かれている事業環境は大き

な転換期を迎え、それまでの大容量化にやや偏ったニーズは方向転換を強いられた。低成長期にあっても電力需要の増加率は鈍化したものの増加傾向にあり、小規模ながら発電設備容量の維持・拡大ニーズはあった。

基本的な認識：低成長電力需要、立地難、厳しさを増す環境規制下で、僅かな新設・巨大プラントと既設機改修で対応し、要求仕様は多様、高レベル化の一途。

ニーズは多様化し、要求レベルは高度化してきたが、それ以前の急速な大容量化の過程で培われた技術力により対応できた。同時に、低成長・要求の多様化時代は技術の一層の高度化にも好機であったと考えられる。

増産期の機器で生じた初期的な不具合、またその後の負荷調整に伴う運転モード変更による急速な機器劣化などへの対策・解決は、それまでひたすら大容量化に向って突っ走ってきた技術、必ずしも十分に検証されなかった技術を、立止まって見直し、完成度をアップするのに有効であった。また、当時造船分野では既に実用されていたコンピュータ利用による有限要素法、それに差分法などの解析技術が電磁解析に応用され始め、その後の三次元有限要素解析(3D-FEM)の著しい進歩と材料疲労データの蓄積で疲労設計が可能となったことも技術対応力の向上に大きく貢献した。おもな対応技術を以下に述べる。

高効率化技術

1973(昭和48)年の石油危機以来、省資源対策が最優先とされ機器の高効率化が要請されてきた。発電機の損失は、機械損、鉄損、負荷損失に分類できる。タービン発電機は本来高効率の機械であるが、一層の向上を図るために各種解析、実験、実機測定などに基づき、対策・検討し低減を図ってきた。その検討は全損失発生部を対象とし、特に軸受け、通風・冷却、鉄心材料・構造、ステータコイルにおける損失低減が大きい。その結果、定格負荷時の保証効率99.00%を実現している。

高効率化による発電コストの低減など電気事業者にメリットをもたらすことから、それらを予め決められた評価方式により初期価格に換算して評価することが海外では、特に水力発電プラントでは一般化している。しかし、日本では未だこの様な評価方式の適用は稀である。

大容量ガスタービン基軸発電システム

全体的には、低成長期にあつて電力需要の伸びは鈍化したが生産電力量の伸びは依然増加傾向にある。

その需要増加に対応した発電システムの中で、数限

られた建設地点で経済性の追求と国のエネルギー政策に合致したプラント建設が望まれ、結果的には大規模火力発電プラントの選択となる。

その一つとして大規模コンバインドサイクル発電があり、原動機のカスタビンの高性能・大容量化により1,500MW級のプラントが建設され、1軸（単位機）で600MW級の技術も確立済である。プラント効率は、保証値で50%以上、実測でも約55%を実現している。

本発電システムは、高効率による発電コスト低減からは有利であるが、通常火力発電プラントに較べ広い敷地面積、構成機器が多いことによる高い建設費、ガスタービンを組込むことと複数単位機より構成されることによる高い保守費など解決しなければならない課題も残っている。

また、本発電システムの中核をなすガスタービンの技術動向が支配的であり、技術およびビジネスの主導権を持つ原動機製造会社との緊密な関係によるニーズ対応が必須である。特に、起動より短時間で全負荷運転まで到達する運転モードに対応できる発電機の運転性改善、標準機の量産が一般的であるガスタービンの製造期間にマッチした発電機製造期間の短縮などが主要課題であり、その対応としてより簡単な構造、補機の省略・減少などの実現技術が必要である。

大容量石炭火力発電

通常の火力発電システムは、プラント効率ではコンバインドサイクル発電より低い、建設費、保守・運転、燃料の長期的安定供給などの利点が多い。

蒸気条件の高温・高圧化、タービン羽根の長翼化などにより熱効率43%級が実現している。1,200MW級タンデムコンパウンド形プラントの技術は確立済であり、既に1,000MWプラントも運転されている。

中間負荷運転対応技術

日間起動・停止運転（DSS；Daily Start and Stop）など多頻度起動・停止、頻繁な負荷調整を伴う中間負荷運転をする発電機は、熱膨張・収縮および遠心力の繰返しが発生するので、設計に際しコイル絶縁の疲労、構成部品の疲労に起因する機器故障の回避、長寿命化を図っている。

また、タービン・発電機の起動・停止時の昇速・降速過程における軸振動、負荷変動に伴うロータコイル熱伸びに起因するサーマルアンバランス（熱的不平衡）による振動変化などに対する軸安定化に設計・製造上

で配慮している。一部電機製造会社では、工場におけるロータバランス調整時に定格負荷運転時に相当するコイル温度まで上昇し、振動変化や振動値を確認するロータサーマルバランス技術³⁵を確立し実用することにより、現地における振動問題の解決や振動調整期間の短縮を図っている。

さらに、電力送電安定化のため、高速・多頻度の系統切替運用（再閉路運用³⁵）や高速度励磁制御などが実施され、これらの運転に伴う軸のねじり振動挙動の把握と軸材疲労寿命の推定、そして絶縁強度の確保などの対応技術が開発され、機器耐力の向上が図られている。

ロータバランスと振動調整技術

タービン発電機の長大ロータはフレキシブルな弾性ロータであり、大形機では定格回転数が二次と三次の危険速度³⁶の間にある。したがって、起動・停止毎に危険速度を通過するため設計・製造上の考慮は勿論、工場完成時のバランス調整は慎重に実施しなければならない。高速ロータバランスは、高度の現場技術を要する。また、ロータ振動には軸受や潤滑油の状態、ロータ構成部品の状態、基礎や据付状態のなど種々の要因が影響するので、経験とデータの蓄積が重要である。調整は当初“勘”に頼ることが多かったが、現在は豊富な蓄積データと計算機を使用した高度な測定・解析・調整技術により調整を行える。特に、現地ではタービン、発電機のロータが直結された多軸ロータの複雑な振動調整となるためこのような振動解析装置適用の必要性は増している。

予防保全および検査・診断・監視技術

高効率大容量火力発電設備が実現するなかで、既設機は運転開始後15年以上経過しているものが75%以上にもなり、経年劣化が問題となってきた。

また、原子力発電比率の増加に伴い、それまでのベース負荷から中間負荷への移行が図られたため、使用条件が過酷になった。そこで、重大事故の未然防止を図り運転の信頼性向上をはかるための予防保全技術が1975（昭和50）年頃から重要視されるようになり、急速に進歩してきた。発電機構成部品の経年劣化のメカニズム解明をもとに、最新のセンサやエレクトロニクス技術を活用した各種検査・診断技術が開発されている。また、運転中における異常を早期発見し、機器故障損失を最小限にする保護・監視システム、あるいは発電機にとって最も信頼性を要求されるロータ、ステー

35 [解説] 送電線に発生する故障は、かなりの部分がフラッシュオーバーであるため故障回路（相）を遮断し、アーク消滅後に故障遮断を行った遮断器をある一定時間後に自動的に再投入する運用。

36 [解説] 主に回転軸の形状で決まるロータの固有振動数（回転数）で、不平衡要因による振動応答感度が高くなる。複数の危険速度があり振動モードが異なる。

タコイル絶縁の余寿命診断技術も確立されつつある。

これらの取組みにより、定期点検期間の短縮、停止間隔の延長などが実現し、プラント利用率向上に貢献している。

また、長期間運転後の改修では、単に元の状態を復元するのではなく、最新技術を適用したリニューアル（アップグレード、アップレーティング）による高性能化が一般化している。本来の長寿命化の他に、高効率、運転性向上などの高性能化、定格容量の増加などが実現される。

火力発電所の高度情報システム

発電機の運転条件の多様化、運転効率の向上、異常監視と故障予知、異常発生時の情報処理と判断など、複雑多岐かつ多量のデータを扱う状況になってきている。一方、運転員の負担を軽減しつつ運転操作性を向上させることも必要である。これらに対し、各種支援システムが開発され、運転の信頼性向上に寄与している。

原子力、ガスタービン、そして水力では、規模・レベルの違いはあるが既に実用されているリモート監視・診断が将来的に火力発電分野でも採用される公算は大きい。高信頼性センサ技術と通信回線を活用し、電機製造会社あるいは運転サポート／サービス会社による監視・診断システムであり、それぞれが保有している知識・経験を活用した機器診断であり、高信頼性診断のためのデータ蓄積・整備、診断理論の確立が急務である。

また、一部海外では実施済である30分、10分単位での発電入札制度への対応に高度情報システムは不可欠であり、この分野での先進国であるイギリスとの技術格差は大きい。入札システムに関わる課題の他に、多頻度・短時間の負荷変動に対応できる機器の運転性の改善と運転システム検討が必須である。

4.9 ボーダーレス／規制緩和時代の低価格競争

国内需要の低迷を補う輸出の増加、工業製品の国際競争力強化策としてのエネルギーコスト低減のための電力料金引下げと規制緩和後のIPP（独立電力製造業）参入に伴う競争激化による機器・建設コストの低減要求など世界レベルでの価格競争力強化が重要課題になってきた。

基本的な認識：発電機器の低価格時代に、設計技術としての低コスト化技術が必須であり、標準化、技術のローエンド化など一層の技術対応が要求される。

製造コスト低減に、製造合理化、世界規模での資材調達、そして海外生産などの多くの取組みが始まった。また、熟練技能者不足を補い、高品質を維持するための“技能の定量化”と生産性向上から製造自動化設備が積極的に導入されている。図4.12に一例として自動ステータ導線レーベル転位装置を示す。



図4.12 自動ステータ導線レーベル転位装置

また、発電機製造現場にも革新的な生産管理システムが導入され、10～30分単位での作業管理が実施されている。このような、製造面での改善による生産性向上の他に一層のコスト低減のため設計技術からの対応技が必須である。以下にその主要対応技術の例を紹介する。

設計標準化

機器の標準化は、単に設計のみならず、資材調達、製造、試験、現地工事など多くのメリットがあり、発電プラント建設費の低減に有効である。

その典型例として、ガスタービン駆動発電機用のパッケージ形発電機がある。原動機が標準化されており、基本的にはその型式に対応した標準発電機となる。しかし、建設地点の外気条件などの違いによりガスタービン出力が変化するので発電機定格も異なるが、想定される運転条件範囲に同一設計発電機で対応できるような設計を指向することで解決できる。

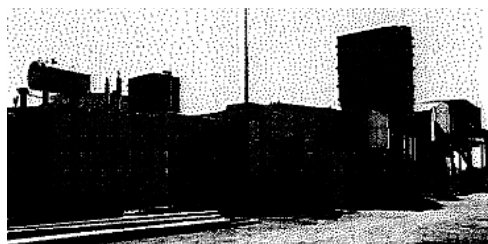
工場内で鉄製ベース上に発電機やその補機類を一式組立て出荷することにより現地では据え置き形となり工期短縮が図れる。図4.13にその1例を示す。

このような標準機の考えは通常の火力用発電機にも適用でき、既に一部実施されている。さらに、発展的に発電プラントレベルでの標準化が指向されるとさらにその効果が増してくる。

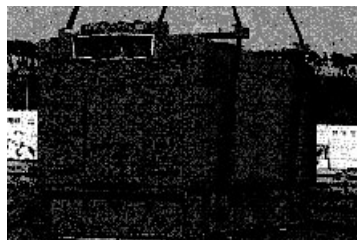
小形・軽量化

小形軽量化は、製造コストの観点からも使用資材重量、加工時間、輸送費、現地基礎台、建屋クレーン容量（発電機ステータが最大重量物）低減などの利点が多く、その改良技術確立のための多くの取組みがある。

ロータ・ステータコイルの冷却強化、コイル損失低減による冷媒流量・流路断面寸法の減少、低損失化と



写真左から トランス・発電機・ガスタービン



発電機部写真

図4.13 パッケージ形タービン発電機

最適通風設計による冷媒ガス流量の最少化の結果としての通風断面の減少、ステータフレームの柔構造設計による外形寸法の低減などの技術が開発・実用されている。

この結果、同一定格機で比較して総重量が20～30%低減できた。また、限られた比較例ではあるが世界レベルでみると、最高レベルの効率を維持しながら、最軽量のタービン発電機を製造している。

技術のローエンド化（大容量空気冷却機、大容量水素間接冷却機）

過去の大容量化過程では高性能技術の適用により製作可能限界の拡大を図ってきた。反面、構造の複雑化による部品点数の増加、組立工数の増加、さらに補機装置の新規追加による製造コストの上昇は避けられなかった。

たとえば、ステータコイルの冷却は、初期にはコイル損失・発生熱を対地絶縁、鉄心を介して冷媒ガスに伝達する間接冷却方式が広く採用され、その後の部分的改善により300MVA級機まで製作できた。その後、液体や水素ガスによる直接冷却方式が開発され大容量機に採用されてきた。これらの高性能冷却方式では、冷媒流路確保のため複雑構造となり、冷媒ガス供給のための高圧ガス発生多段ファン（ブローア）、液体冷媒供給のための補機装置が必要となった。

また、従来は機内循環冷媒ガスとして空気が使用されてきたが、優れた冷却特性を有する水素ガスが採用され、その後冷却性能向上のため高圧ガスが採用され

大容量化に寄与した。しかし、水素を密閉封入するためのステータフレーム構造の複雑化、水素ガス容器としての機械強度の確保から使用材料の増加、回転部（ロータ）と静止部（ステータ、軸受け部）の摺動箇所の複雑な水素ガスシール構造³⁷、さらに水素ガス供給および水素ガス密封のための潤滑油処理などの補機装置が必要となった。勿論、水素冷却の採用により大容量化と高効率化は実現できた。

このように大容量化、高効率化のため高性能技術として水素冷却、直接冷却を導入してきたが、製造コスト低減重視の視点で見ると、この過去の技術の流れの見直しが必要な時期にきている。以下に、具体的な取り組みを紹介する。

（大容量空気冷却タービン発電機）

大容量空気冷却機が開発・製造されはじめ、既に286MVA-60Hz機が製作済みであり、従来の製作限界である50MVA級からみると飛躍の拡大である。既に、国内電機製造会社も世界的にトップレベルにあり、世界レベルでの最終目標と考えられる500MVA級空気冷却タービン発電機の開発レースに参加している。大容量空気冷却タービン発電機の要求は主にヨーロッパに多く、一方アメリカでは依然として水素ガス冷却タービン発電機に固執しており、国際会議などの場で空気・水素論争が度々繰り返され、それぞれのメリットを主張しているが未だ結論は得られていない。

なお、一般に空気冷却機の効率は水素冷却機より低くなるが、最近のコンピュータ利用による解析技術を駆使した設計では、高精度の損失計算と低減対策により水素冷却機と同程度の効率を実現している。

図4.14に国産最大空気冷却機である三菱重工 高砂286MVA-3,600min⁻¹タービン発電機を示す。

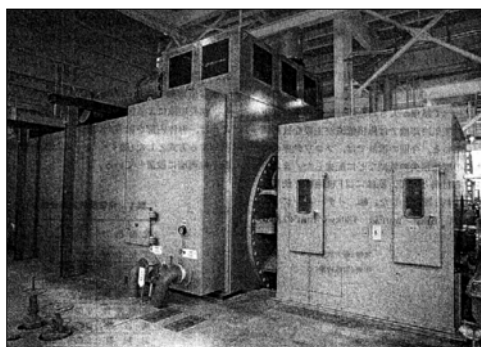


図4.14 国産最大容量空気冷却286MVAタービン発電機

（大容量水素間接冷却タービン発電機）

水素間接冷却機は、間接冷却ステータを基本とし、発

³⁷ [解説] 機内密封水素ガス圧より高い圧力の潤滑油を摺動部に供給することにより水素ガスの外部流出を防止する構造。

電機出力によって間接または直接冷却ロータと組合せる。したがって、その製作限界はステータコイルの電流量で決まる。その制限要素は対地絶縁の高い熱抵抗であり、以下に示す設計コンセプトが提案されている。

- ・高ストレス化・絶縁厚の低減による熱抵抗の減少
- ・高耐熱化・耐熱クラスHの採用
- ・全含浸絶縁（GVPI³⁸）・コイル・鉄心の一体含浸に

による熱伝導面積の増加

- ・高熱伝導絶縁（HTC³⁹）・対地絶縁の熱伝導率改善
- これらが世界各国で採用されているが、それぞれに長短がある。最終的にどの設計コンセプトを採用するかを決定するのはユーザであり、その評価には今暫く時間が必要と考えられる。表4.1に間接冷却ステータコイル大電流化の各種コンセプトの比較を示す。

表4.1 間接水素冷却ステータコイル大電流化の各種コンセプトの比較

基本コンセプト	容量増加インパクト	予想されるリスク	最大発電機容量 (MVA)	最大容量の制限要因
高ストレス絶縁（絶縁厚低減）	5%（*1）	・絶縁寿命の短縮	400	・間接冷却の性能限界 ・熱抵抗の低減効果小
GVPI絶縁（全含浸絶縁）	10%	・長期信頼性の維持困難 ・スロット内コロナ放電による劣化	350	・含浸設備の寸法制限 ・鉄心/コイルの相対的熱伸び量（可能最大長4 m?）
高耐熱クラス絶縁（Hクラス絶縁）	15%（*2）	・熱サイクルによる機械的絶縁劣化 ・コイル締結・固定の劣化	500	・導体/絶縁/鉄心間の熱伸び差に起因する絶縁劣化
高熱伝導絶縁（HTC絶縁）	15~20%（*3）	・従来絶縁並	600~750	・間接冷却の性能限界

（注）（*1）電界ストレス20%増として算出

（*2）F種/B種温度上昇→H種/F種温度上昇として算出

（*3）熱伝導率を従来の2倍として算出

日本国内でも電機製造会社によってそれぞれの設計コンセプトが選択され、必要技術が開発されている。

この内、日本が先進的に進めている技術として高熱伝導化があり、高熱伝導絶縁（HTC）と呼ばれている。HTC絶縁は、絶縁特性は従来並に維持しながら熱伝導率を改善するもので、水素間接冷却機の製作可能限界は飛躍的に拡大され750MVA級までは可能と考えられ、既にコンパインドサイクル発電用620MVA機が完成している。

世界レベルでみて電機製造会社の大半は、300~400 MVA超機に水直接冷却ステータコイルを採用してきた。しかし、原因はそれぞれ異なるが経年的にコイル内で冷却水が漏洩する問題が発生した。その数は年々増加する傾向にあり、中には絶縁層に浸透した漏水による絶縁劣化が発生し世界的な問題となり、代替技術を熱望している背景もあった。

また、ガスタービン駆動発電プラント向け発電機では短時間での回転上昇と全負荷運転が一般的であり、ここに使用されるタービン発電機はより簡単な構造、より操作性に優れた発電機が要求され、間接冷却機は

そのニーズに応えることができる。

海外生産

国内外向けタービン発電機の国内生産の歴史は長く、優秀な技能者、高い品質マインドと高品質機器、合理化設備などより良い環境で製造されてきた。しかし、ボーダーレス世界での国際競争力強化や輸出先の技術国産化政策による現地生産など海外生産が恒常化してきている。

かつての日本が、黎明期、第一次、第二次技術提携時代に経験した輸入技術による製造を、時代と相手国が違って立場が全く逆になり、技術提供あるいは個別契約により提供した技術図書によって海外提携先で製造する時代に入っている。

極論すれば、海外の提携先が提供された技術図書を使用して自力で製造する、あるいは製造できるレベルまでに提供技術図書類の整備が必要となっている。長い時間と多くの製造経験を通して確立・蓄積された技術・技能を、どれだけ定量化し、ドキュメント化できるかが問われる時である。このような内なる一層の国際化が課題であり、既にそれが実行され充実されつつある。

38 [解説] Global Vacuum Pressure-rise Impregnation の略称で、導体にマイカテープを巻回し鉄心に組込んだ後合成レジンで真空中で含浸する方式で、全含浸絶縁方式（Totally vacuum impregnation insulation system）とも呼ぶ。

39 [解説] High Thermal Conductingの略称。

4.10 技術移転と自主技術確立に見る共通点・時代は変われど！

日本における技術国産化と発展について黎明期に始まり戦前・戦後と概観する時、時代は変わり、時代背

景と発電システム／発電機器に対するニーズに変化は見られるが、技術移転と自主技術確立の面からみると多くの共通点が見られ興味深い。これを整理すると次のようになる（表4.2参照）。

表4.2 戦前・戦後の技術移転と自主技術確立の経緯比較

番号	黎明期・第二次世界大戦前	第二次世界大戦後
1	見る→運転してみる	——
2	据付・修理を学ぶ→構造を知る	——
3	模倣品を作る→工夫が出てくる	——
4	国産化ニーズ大	←
5	基礎技術力不足、国産品への不信感	技術格差大きく、蓄積技術の出番なし
6	自主技術開発の時間と資金力の不足	←
7	電気事業者主導による急増する電力需要対応として外国標準機の輸入依存	←
8	技術提携（外国標準機）による図面導入・製造指導（来日、研修出張） （How to designなし）	←
9	2台目以降製造国産化・提携先技術者による直接指導	←
10	導入技術の咀嚼、設計法の自主的確立・習得	←
11	導入基本技術を使った自主設計による設計・製作	←
12	製造・運転実績不足、信頼性検証不足による国産機への不信感	←
13	大容量国産機の製造・運転など“実践の場”なし	緩やかな大容量化による製造・運転実績の蓄積、輸出機による記録機の実績作り
14	技術以外の国産化加速要因（戦争、輸入超過による経営的問題）による場の提供（植民地、国内の電力逼迫地）	電力会社による要求仕様の作成と技術評価に基づく国産品採用の決定・場の提供（電力会社とメーカーの協同による国産化推進）
15	世界最大級を含む記録的国産機の実現	←
16	限られた場における製造・運転実績による国産機の認知	相次ぐ記録機の完成と順調な運転による急増する電力需要への対応
17	製造・運転の積重ねによる技術力向上と戦時下での国策による国産機採用	CPUによる解析力向上、記録機での運転後発生不具合の解決による基礎技術力向上
18	自主技術確立、独自技術開発の兆し（水素冷却機）、輸入材料代替品の開発	多様化ニーズへの対応力アップ
19	戦争勃発による技術の停滞・後退	国際競争力強化による競争激化への対応

戦後の技術移転・自主技術確立は、戦前と比べて短期間で実現できた。その理由の一つは、戦中の技術空

白時代で一度は停滞・後退したが戦前の蓄積技術が引継がれ戦後復興期に利用できたことによる。特に、2

例と少なく小規模であったが、将来の大容量化技術として水素冷却タービン発電機を独自技術により設計・製作し、工場にて試験した貴重な経験が、戦後の主流となった水素冷却機への技術対応力のベースになったものと思われる。

また、戦前・戦後を通じて共通的な問題は、自主技術による国産発電機を設計・製作する機会の獲得で、国産品に対する電気事業者からの不信感から“実践の場”がなかなか得られなかったことである。

黎明期には折角与えられた貴重な機会に技術力不足から十分な対応ができず、再度輸入機器依存時代へと戻っていった。戦前には、度重なる戦争による軍需産業の隆盛で急増した電力需要への対応、また植民地におけるインフラ整備による電源開発などから記録的大容量機器を製作・運転する機会を得、そこで検証された機器が国内で多用され、世界的記録機を製作できるまで自主技術が向上した。

戦後は、電力会社主導により1号機輸入、同型の2号機以降を導入図面により国内電機製造会社が製作する方法がとられ、戦後復興で急増する電力需要に合わせるかのように相次いで大容量新鋭火力機が輸入され、多くの新技術が導入された。技術提携には含まれないHow to designをこれらの導入図面や入手情報から自力で確立し、やや緩やかではあったが自主設計による大容量化を実現していった。一方、電力会社も機器輸入に際し海外先進電機製造会社と技術交渉を繰り返す中で技術力を高め、自ら要求仕様を作成し、提案される設計・技術の評価力を備えていった。これらの電力会社の高い技術力により記録的大容量機の国産化を自ら評価し決断した。電力会社の大英断に対して、電機製造会社としても確かに応えていかなければならず、将に経営トップまで含めユーザ、メーカーは運命共同体との意識で取り組んでいった。勿論、設計・製作過程におけ

る電力会社技術者による実務レベルでの指導はあり、特に高レベル品質の要求は強く、これらに応じて行くなかで高品質化・高信頼化が達成できた。不幸にして、運転後に発生した重大機器故障には、電力会社主導で大学・公的研究所なども参加した調査・対策委員会を発足させ、広く英知を結集して早期解決を図った。

また、大容量化は勿論、多様化ニーズへの対応には技術の精緻化が必須であり、コンピュータ利用による解析技術の著しい発達がある。特に、タービン発電機のような大形機器は、完成品を評価した結果により発注を決定するのではなく、ある意味ではその会社の総合技術力、ひいては関与する技術者への信頼で決定され、発注者から十分な理解を得ることが重要であり、コンピュータ利用によるシミュレーションは有効であった。さらに、応力解析、電磁界解析は勿論、冷却設計、疲労設計、そして動的挙動解析にも活用され、その成果としての高性能、小形・軽量化などでは世界的にもトップレベルにある。

昨今は、グローバル化に伴い低製造コストの追求から海外生産が一般化しており、結果的に製造・試験が設計拠点から離れた現場で行われることが多くなっている。この様なフォーメーションによる機器製造は、現場で発生した問題や試験データの設計へのフィードバックが減り、製造・製品に即した情報量が限定されたところでの改善・改良は望めない。欧米先進電機製造会社がこのようなグローバル化に走るなかで、国内電機製造会社は頑ななほど内作に拘り続けてきた結果、新規設計へのフィードバックがタイムリーにでき、高性能化・高信頼化が達成できた。先人が、「設計者は、最低一日に一回は現場を見ろ」「設計は、出来るだけ製造現場に近いところ、出来れば工場の一角におけ」と口癖のように言っていたことの真意を理解しなければならない。

5 ニーズに応え・実現した主要発電機技術

第4章で対応技術の変遷を概観したが、それらの課題解決に寄与した主要実現技術について本章で詳述する。

5.1 大容量化

タービン発電機の発展過程において信頼できる最大のロータ軸材が常にその時代の容量を制限する一つの要因となってきた。タービン用軸材は蒸気条件によって直接影響を受けるため高温特性が要求されるが、発電プラント出力を複数ロータで分担するため夫々の軸材重量・寸法は比較的小さくなる。一方、発電機はタービン総出力を1軸で電気エネルギーに変換することから、そのロータは重量・寸法で最大一体塊状軸となることから発電機がプラント最大製作限界の制限要因と言える。

タービン発電機ロータ軸材は、厳密な仕様、受入れ検査、そして製造過程における溶解、精練、熱処理などに細心注意を払って製造される大形鍛造品の中でも最高級のものであり、徐々にではあるが強度、靱性を改善しつつ大口径・長尺化が進んできた。

しかし、常に軸材進歩の先を行く発電機大容量化の要求は、黎明期から今日まで基本的には状況は何ら変わっていない。すなわち、その時代に得られる最大軸径と軸長の制限の下で容量増加に比例して必要となる発電に寄与する体積（厳密には、ステータ鉄心内径と鉄心長で決まる容積）の増加未達分を出力密度（出力係数とも呼ぶ、次項参照）の増大で補うことになる。

タービン発電機の技術進歩の過程で、発電機内の発生損失を除去する冷媒として従来の空気に代わって戦後に導入された水素ガスによる間接冷却、そして直接冷却が飛躍的な単機容量の増大を可能とした。今後の大形化、小形・軽量化には出力係数の一層の増大に見合う冷却技術の改善が必要である。

5-1-1 タービン発電機の基本設計

タービン発電機も他の電気機器と同様、その主要部分は電気回路であり、この部分の基本設計によって電気的な部分の主要寸法は決まる。

電気機器の容量の一般式は、次式で表される⁴⁰。

$$\text{kVA} = K_0 \cdot P \cdot A \cdot \Phi \times 10^{-11}$$

ここで、P：継鉄の足の数⁴¹

K_0 ：直流機 $2 \times 2 = 4.0$

交流機 $2.1 \times 2 = 4.2$

変圧器 4.44

A：電気装荷⁴²

Φ ：磁気装荷⁴³

これより、機器の容量は、電気装荷と磁気装荷の相乗積である。言換えれば、電気機器設計の基本は、この二つの回路（電路、磁路）に含まれる電気装荷と磁気装荷とを如何に割振るかである。

これより、タービン発電機の基本式は、一般に次のように表せる。

$$P = kD^2 \cdot L \cdot B \cdot A \cdot n$$

ここで、P：発電機容量

D：ステータ鉄心内径（図5.1参照）

L：鉄心長（図5.1参照）

B：ギャップ磁束密度（磁気装荷）

A：電機子アンペア導体数/m（電気装荷）

n：回転速度（min⁻¹）

この式の中で $k \cdot B \cdot A$ は出力係数（OPCと称す）と呼ばれ、次の式で表す。

$$\text{OPC} = k \cdot B \cdot A = \frac{P}{D^2 L \cdot n}$$

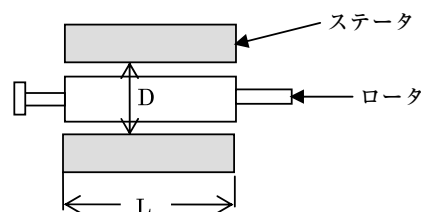


図5.1 発電機の主要寸法

これより、出力係数は、発電部分体積（ $\propto D^2 L$ ）、回転速度 n のそれぞれの単位あたりの発電機出力であり、主に冷却方式によって変わる。図5.2に発電機容量（MVA）と出力係数の関係を示す。これより、水素冷却と直接冷却の導入が、出力密度の増大に大きく寄与していることがわかる。

40 竹内壽太郎「電気機器設計学」p32,35 オーム社

41 [解説] 積層鉄心などで構成される磁気回路の数で、回転機の場合極数となる。

42 [解説] 回転機の場合、ステータ内径の単位周長あたりのステータ電流（実効値）の総和で、コイル総本数とその電流との積をステータ内面の周長で割った値。

43 [解説] 回転機の場合、ステータとロータ間の空隙（エアギャップ）の磁束密度。

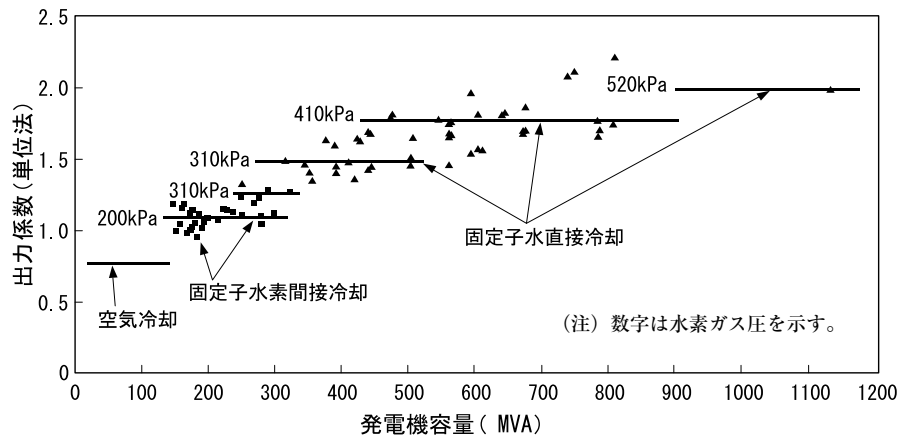


図5.2 発電機容量と出力係数の関係

水素冷却機ではガス圧を高くすることで冷却性能が改善でき、特に直接冷却コイルでは改善効果が大きい。ガス直接冷却方式では発生損失と冷媒が直接熱交換するためガス圧（絶対圧）比の約0.8乗に比例して冷却性能が向上する。したがって、ロータ界磁電流の増加は大略ガス圧（絶対値）比の0.4乗に比例する。図5.3に出力係数と水素ガス圧力の関係を示す。

$$I_2 \propto \left(\frac{P_2 + 1}{P_1 + 1} \right)^{0.4} \times I_1$$

ここで、 I_1 ：ガス圧 P_1 における最大界磁電流

I_2 ：ガス圧 P_2 における最大界磁電流

大容量化は、基本的には容量の増加に比例して発電機の体格（D²L）を大きくすることであるが、あわせて出力係数の増加を図り、その分体格の増加を極力抑えるということである。

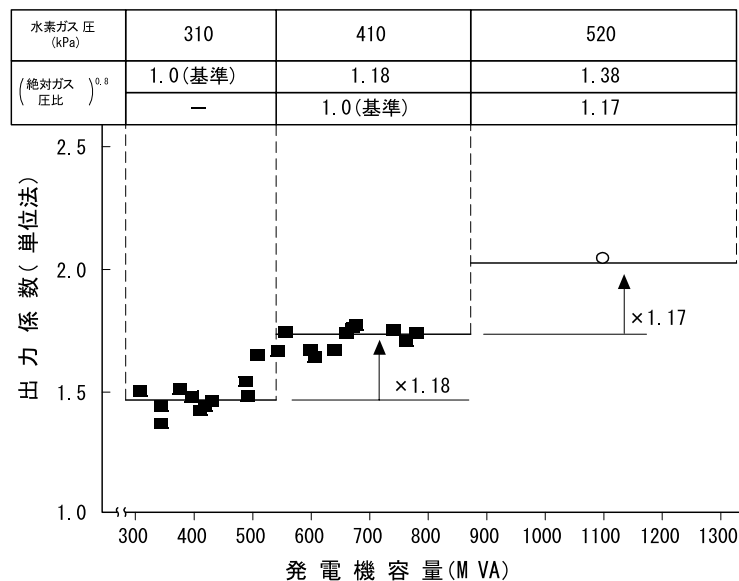


図5.3 出力係数と水素ガス圧力の関係

したがって、出力係数が最注目課題である。その主要な要素である磁気装荷は、使用磁性材料（ロータ軸、電磁鋼板など）の磁気特性がほぼ限界にあることから大幅な増大は期待できず、他の要素である電気装荷の増大とそれを可能にする冷却性能の改善、ステータ電流容量の増大とこれに起因するステータ端部漂遊損の低減が課題となる。

実際の設計に際は、この他に考慮しなければならない制限要因と問題点があり（図5.4参照）、少なくとも

もここで挙げた点を考慮し、バランスある設計を行わなければならない。

タービン発電機の大容量化に必要な主要課題を以下に挙げ、それぞれについて詳述する。

- (i) 大口径・長尺ロータ部材の開発
- (ii) 高性能ロータ冷却方式の開発
- (iii) 高性能ステータコイルの開発
- (iv) 高性能ステータ鉄心端構造の開発
- (v) 発電機通風冷却方式の改善

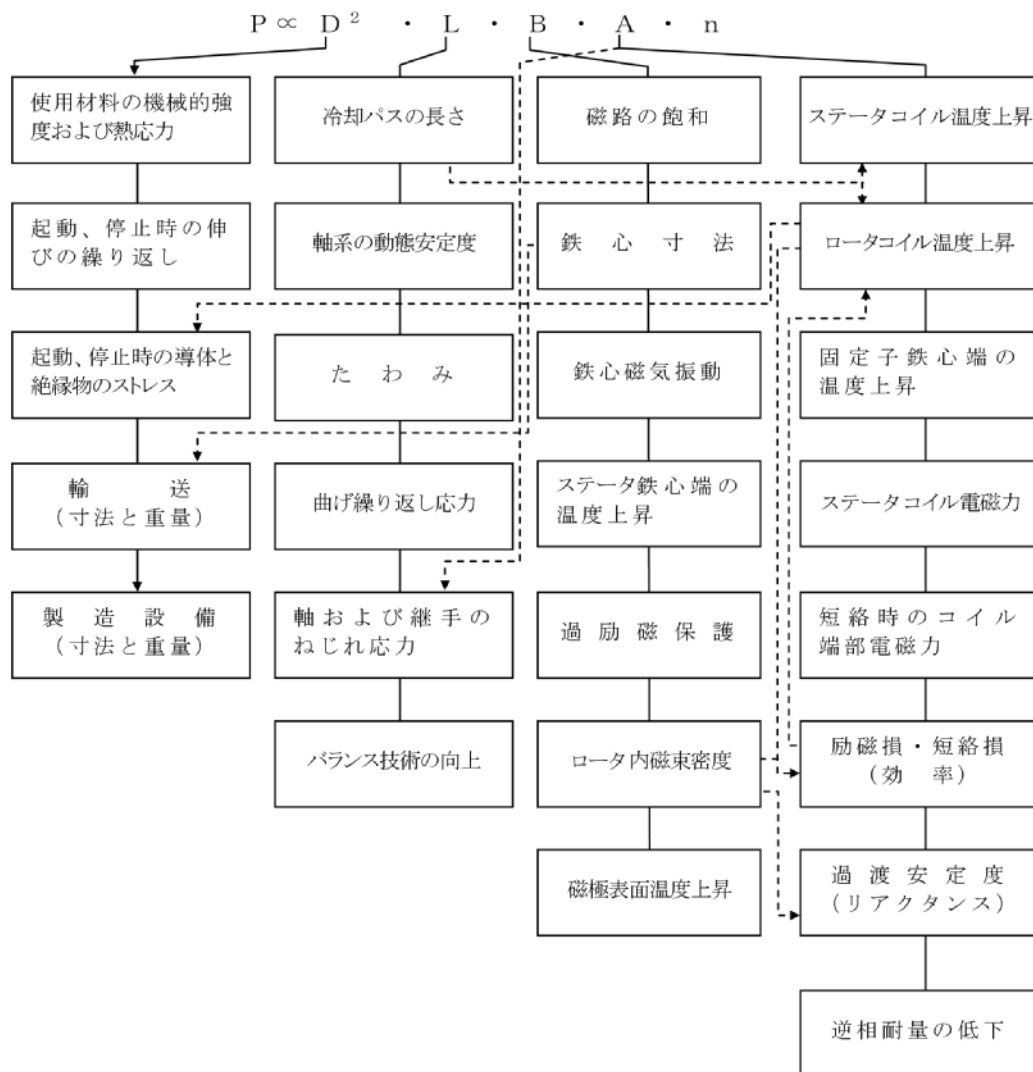


図5.4 発電機容量の制限要因と問題点

5-1-2 ロータ軸材とロータ構造（第6章6.1参照）

日本における国産タービン発電機の製造は、大正年間に始まったが、均質で大形の高強度一体塊材の製造が困難であったため、2極機は小容量機に、そして急増する電力需要に対応した中・大容量機は主に4極機であった。

2極機の場合も、小部品を組立て円筒形ロータとする構造が採用されたが、その大半は現在では使用されていない。それらの代表的な例を示す。

厚鋼板組立式

厚さ50mm程度の円形鋼板の中心に軸穴を明け、軸上に積重ねた後に、その外周にコイルスロット加工した構造で、現在も一部の会社で小容量機に使用されている。同様な構造で、厚さ1.5mmの鋼板にスロットおよび軸穴を打抜き積層する薄鋼板組立式もある。

プリズム組立式

鍛造軸の外周面に軸方向にダブテール溝（Dove tail slot）を加工しておき、別に2～4mm厚の特殊鋼板を歯

形に打抜いたものを50～75mm積重ねてリベット締めしたプリズム形状の歯を作り、これを軸のスロットに植込む構造で小径軸を工夫して使用した（図5.5参照）。

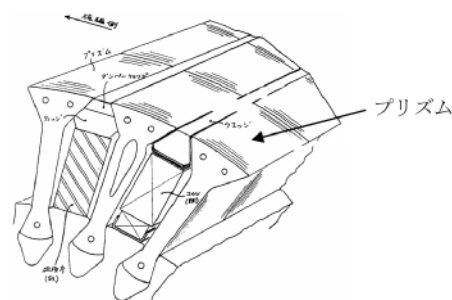


図5.5 プリズム組立式ロータ

鍛鋼板組立式

高強度軸材の入手難に加え、高速タービン技術や高速バランス技術の未成熟などから第二次世界大戦前の中大容量機は4極機が多用された。同一容量の2極機に比べ、4極機では大形軸材が必要であり、一体塊状化は困難であった。したがって、ロータ鉄心中央部には

円盤形の150～200mm厚の鍛鋼板を積み、両端にフランジ付軸を当てて強力な通しボルトで締付けた組立式ロータである。通し締付けボルトの配置上、4極機に採用された。

4極－62,500kVA機に本ロータ構造が採用されたが、会社によっては同一容量機を一体塊状ロータで製作した。

3分割式

当時入手可能な最大軸材を加工した後に、両端フランジ付軸と中央部軸を強力な通しボルトにより締付け一体化したロータを使用した（図5.6参照）。

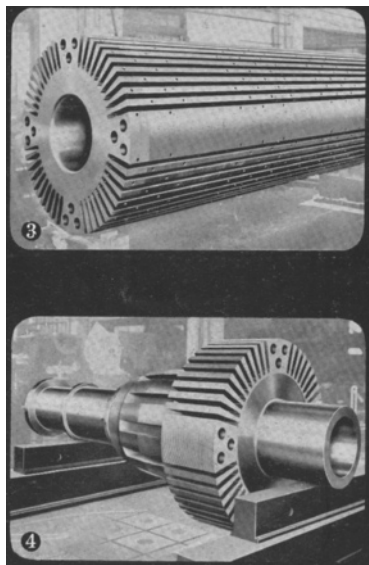


図5.6 発電機3分割ロータ軸

3分割ロータは4極－93,750kVA機に採用されたが、その構造を工場用試験発電機に採用し、信頼性検証後に実機に採用した。この様に、当時は試作に大掛かりなものを相当の英断をもって実施した。ゼネラルエレクトリック社では本構造を200,000kVA機まで適用した。

戦前におけるロータ軸材の最大径は、2極機用では $3,600\text{min}^{-1}$ －800mm、 $3,000\text{min}^{-1}$ －1,000mm、4極機用1,400mmであった。

第二次世界大戦後に技術導入された新鋭火力は2極機が中心となり、大容量化に伴い大口径・高強度軸材が必要となった。戦後、製鋼、造塊、鍛造技術も急速に進歩してき、特に1960（昭和35）年以降の真空鑄造法⁴⁴や1970（昭和45）年以降の真空カーボン脱酸法³¹の採用、焼入れ後の冷却法の進歩、化学成分の改善、そして非破壊検査技術の進歩により品質は飛躍的に向上した。

化学成分は機械的強度および靱性の向上、遷移温度⁴⁵の低下の面から検討された。それ以前に一般的に使わ

れていたNi-Mo-V鋼に1.5～2.5%Crを添加したNi-Cr-Mo-V鋼が1950（昭和25）年頃より採用され始めた（図5.7参照）。切削性はやや落ちるものの機械強度および他の特性は改善され、懸念された磁気特性の低下もほとんどなく従来材料と同等であった。

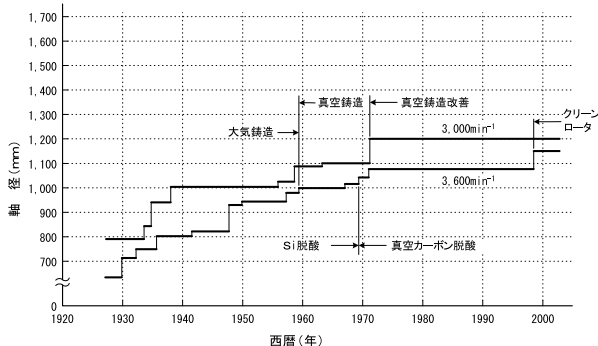


図5.7 2極タービン発電機ロータ軸径の変遷

5-1-3 エンドリング材（第6章6.1参照）

エンドリングはロータコイル端部の強大な遠心力を保持するため高い応力を受け、主軸と共に発電機単機容量を制限する一つの要因である。特に、大口径ロータでは主軸よりも製造が困難となる。図5.8にエンドリング外径の変遷を示す。

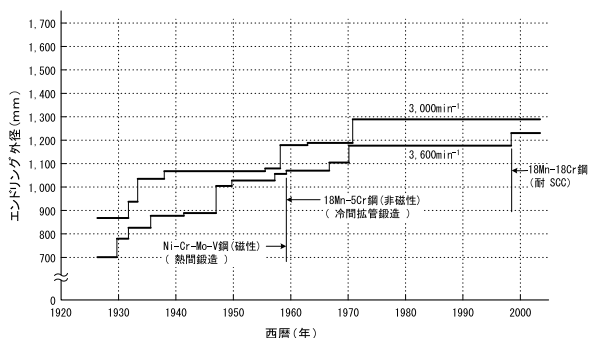


図5.8 2極タービン発電機エンドリング外径の変遷

磁性エンドリングが黎明期より永年使用されてきたが、磁性材として磁気回路を構成するためロータ鉄心端やロータコイル端部から近傍構造物への磁気抵抗が減少する。その結果、ロータコイル端部からの漏洩磁束が増加し、ステータコイル端部漏洩磁束と合算された多量のステータ鉄心端漏洩磁束が端部鉄心に侵入し過熱する。一般に大容量化に伴い端部漏洩磁束量が増加する傾向にあり、端部鉄心温度が高くなるため電気基本設計上の制限要素となる。

1960（昭和35）年頃に直接冷却方式が導入され、単機容量が急速に増大していったが、直接冷却ロータと

⁴⁴ [解説] 溶融金属を鑄造して銅塊を作る造塊や溶融金属を作る製鋼段階で不純物の浸入防止や除去により純度を上げるための方法。

⁴⁵ [解説] 各種温度で衝撃試験を実施し、破断面に現れる脆性破面と靱性破面の割合が50%となる温度で、温度が低い程軸材の脆性破壊が起き難い。

の組合せで非磁性材エンドリングが使用され始めた。非磁性の場合、漏洩磁束に対する磁気抵抗が増すことにより端部漏洩磁束が減り、端部鉄心の過熱を軽減できる。

非磁性エンドリング材として18Mn-5Cr鋼が使用された。塩基性電炉⁴⁶、さらに最近ではESR⁴⁶により高純度化された鋼塊は熱間鍛造によりリング状に鍛造される。その後、機械的特性を高めるため特殊な方法で冷間拡管加工⁴⁷される。

しかし、ヨーロッパで18Mn-5Cr鋼エンドリングを装着したタービン発電機が運転中や保管中にエンドリング破損により損壊する事故が数件発生した（図5.9参照）。調査の結果、ロータ装着（焼嵌め）時に生じる内部応力が残存した状態で湿分を含んだ雰囲気さらされた時に応力腐食割れ（SCC）を起こし、残存応力レベルが高い程SCCは発生しやすくなることが判明した。

機内を循環する冷媒の湿分量管理や停止・開放時の防湿対策強化などにより既設発電機を運転継続する一方で、1987（昭和62）年頃より耐SCC性に優れた18Mn-18Cr鋼が開発・実用された。新材料は、新設機への採用や既設機の交換などにより急速に広まり、現在では標準的に採用されている。

大容量化に伴いエンドリングの大口径・高強度化が必要となった。その対応として、成分と加工法の見直しが必要となり、強度メンバーとしての窒素Nの増量や拡管時の冷間加工率アップなどにより対処している。

日本で製造されるエンドリング材は、強度、品質面で世界的にもトップレベルにあり、既に2極-3,600min⁻¹機として世界最大容量機である1,000MWタービン発電機用のエンドリング材が製作済で、問題なく使用されている。

このような重要部位のサポート技術の進歩がなければタービン発電機の大容量化は不可能であることが痛感され、往時の技術者の苦勞が偲ばれる。

5-1-4 冷却方式

発電機ロータ軸材の最大外径と軸振動特性から決まる最大長の制限の中で、単機容量増大は冷却方式の改良・進歩により実現されてきた。換言すれば、タービン発電機の大容量化は冷却技術の進歩とも言える。

発電機の冷媒として空気が一般的であったが、1955（昭和30）年頃から冷却性能に優れた水素ガスが採用さ

れ始め、当時の空気冷却機の限界容量であった50MVAを超える発電機が相次いで製作され、1957（昭和32）年に国内初の100MVAを超える千葉火力160MVA機が、そして1959（昭和34）年には224MVA機が完成し短期間で単機容量が急速に増大していった。

冷却性能の一層の改善のため、間接冷却に代り導体内に冷媒流路を形成して直接的に冷却する技術が開発された。1959（昭和34）年に日本初のロータ・ステータ水素ガス直接冷却208.096MVA機が完成し、1960（昭和35）年に281.6MVA機、1964（昭和39）年にステータ油冷却300MVA機、そして1965（昭和40）年にステータ水直接冷却442MVA機と相次いで記録的な大容量機が完成した。このように直接冷却技術の導入により大容量化は飛躍的に進んでいった。

ロータコイルの冷媒として冷却効果に優れた水を使用するロータ水直接冷却方式がドイツ、スウェーデン、ソビエト（当時）で大容量化技術として開発され、特にドイツでは原子力用4極機で多用され、また中国やソビエト他などの一部の国では各地に分散している発電所への水素ガス供給が困難との理由からロータ水冷却方式が2極-200MVA級機にも標準的に採用された。

日本でも超大容量化と内陸に位置する大容量発電プラントへの輸送制限緩和の技術として2極-2,000MVA-3,600min⁻¹級までを狙った完全水冷却試験機（図5.9参照）が製作・試験され、その実現可能性は確認できた。しかし、回転遠心力による高い静水圧（2極-60Hz機で約20MPa）に耐え、コイル熱膨張・収縮への追従と電気絶縁強度を確保するコイルへの給排水構造、中空銅帯などの高信頼接合技術などに係る問題と長期信頼性検証が実用化に不可欠であり、残された課題であった。

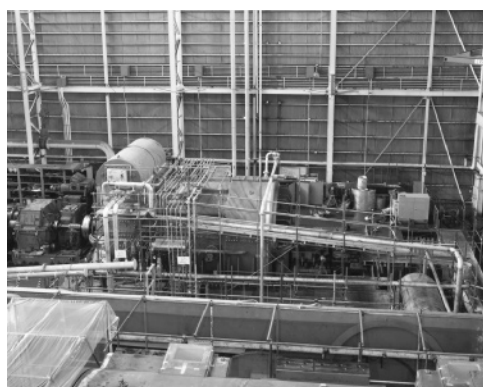


図5.9 工場試験中の完全水冷却タービン発電機モデル

46 [解説] エンドリング材料の高純度化のための処理方法。ESRはElectro Slug Remeltingの略で、エンドリング材料を電極として溶融した金属を液中に滴下する過程で不純物を除去する方法。

47 [解説] 通常の鍛造は加熱した鉄に外力を加えるが、冷間で特殊な方法によって外力を加えた場合は加工硬化により機械強度が増すことを利用した加工方法。

これらの水冷ロータはパイプ式構造で水の吸収熱を利用した方式であったが、さらに蒸発潜熱を利用して冷却性能を高めることを狙った蒸発冷却回転子モデル（図4.10参照）が製作・試験された。しかし、発生蒸気に起因するエンドリングなど構造部材の腐食問題から実用に至らなかった。

これら冷却技術の開発・検証により発電機の大容量化の可能性は確認できたが、大容量化・経済性のみを追求した結果、必ずしも電力系統運用面からみて優れた運転性を備えているとは言えなかった。

相反する大容量化と運転性の課題解決のための新しい設計コンセプトとして超電導発電機の開発が1970（昭和45）年代から世界各国で始まった⁴⁸。日本においても民間資金や国家プロジェクトによってモデル機が開発され、原理検証や基本特性確認がなされた。1987（昭和25）年『ニューサンシャイン計画』の一環として『超電導発電関連機器・材料技術研究組合』が組織され、産官学の英知を結集して70MW級超電導発電機の開発に着手し、世界に先駆けて、最高79MWの発電出力、1,500時間の長期連続運転、および70kV実系統への連系運転を達成した（図5.10参照）。アメリカ、ドイツ、ソ連（当時）などでも大容量機開発モデルが製作着手されたが諸般の事情で中断・延期されるなか、日本の研究開発成果は超電導発電機のもつ優位性を世界の関係者に認識してもらうのに有効であった。単に大容量化技術としてのみでなく系統運用面からも多くの利点を有するが、現用機と比較した経済性など今後解決しなければならない課題解決が実用化に不可欠である。

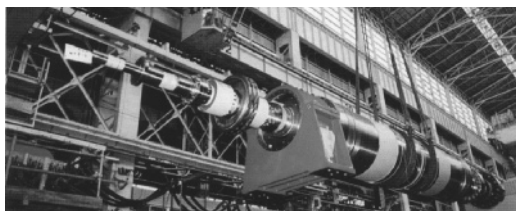


図5.10 70MW級超電導タービン発電機ロータ

（I）ロータコイルの直接冷却

各種のロータ直接冷却技術が考案され研究されたが、実用された方式はガス冷却と水冷却の2方式のみであった。しかし、水冷却ロータは冷却流路接合部などからの漏水による絶縁耐力や冷却性能の低下問題が発生したが、それ以上に深刻な問題として18Mn-5Cr

銅エンドリングのクラック発生や運転中の破損であった。漏水による湿分に起因するSCCが主要原因であり、高速機故に高速心力が働く2極機で発生した重大事故がきっかけとなり次第に採用されなくなった。

実用されているガス直接冷却ロータコイル断面の代表例を図5.11に示す。これらを大きく分類するとコイルへの冷媒供給方式は次の3種類となる。

- (a) エンドフィード形⁴⁹
- (b) サブスロット形⁵⁰
- (c) エアギャップピックアップ形⁵¹

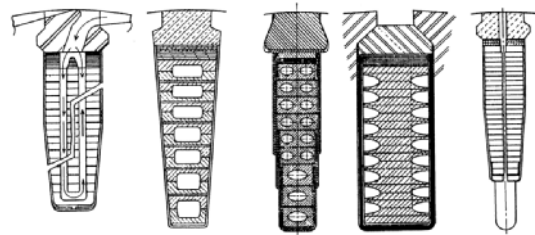


図5.11 直接冷却ロータコイル断面の例

また、導体内の冷媒通路により大別すると次の3種類となる。

- (a) アキシアルフロー形・冷媒が導体内流路を軸方向に流れる方式でエンドフィード形と組合せられ使用される。
- (b) ラジアルフロー形・冷媒が導体内流路を半径方向に流れる方式でサブスロット形と組合せられ使用される。
- (c) ダイアゴナルフロー形・冷媒が導体内に傾斜して設けた流路をスロット底方向に流れ、再び同様の流路を外周側に流れる方式でエアギャップ形と組合せられ使用される（図5.12参照）。

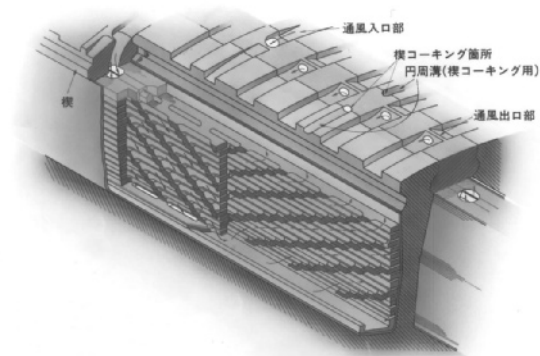


図5.12 ダイアゴナルフロー形直接冷却方式ロータ

48 上之菌 博「超電導発電機」p7 オーム社（2003）

49 [解説] コイルエンド部に設けた吸入孔から冷媒を導体内流路に取込む方式。

50 [解説] スロット下部の溝（サブスロット）からコイルに冷媒を供給する方式。

51 [解説] エアギャップから冷媒をロータ内に取込み、コイル内流路を流れた冷媒（高温ガス）を再びエアギャップ内に放出する方式。

供給方式と冷却通路の組合せで多数の直接冷却方式が実用されており、各方式にはそれぞれ得失がある。

直線部の冷媒流路構造やその流路長により冷却効果は異なる。図5.13に各種冷却方式による冷却効果の比較例を示す。

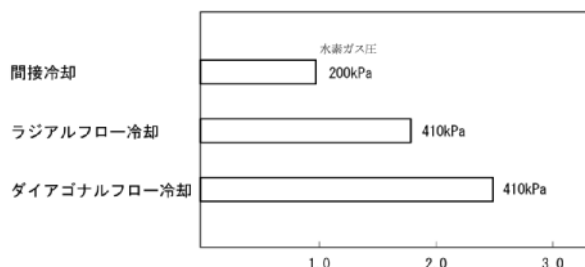


図5.13 各種ロータ冷却方式の冷却効果の比較

エンド部の冷却効果の改善も重要課題である。エンドリング下にはU字形にコイルエンドが複数配置されるため、エンドリング下に入ってきた冷媒が各コイルエンドまで到達しにくい構造になっている。したがって、間接冷却方式ではコイルスロット間に冷媒流路（サイドスロット）を設ける方式やエンドリングに排気孔を加工し冷媒を排出する方式が一般に採用されている。直接冷却方式では、エンド部導体に冷媒吸入孔と流路を設け直線部流路に導く方式が一般的に採用されている。

2極大容量機に適用する冷却方式決定の際の留意点は、サーマルアンバランス（熱的不平衡）に対する軸振動安定性である。ロータスロット（総数20～30）内に巻回されたコイルの熱伸び量が各スロット間の摩擦拘束力や温度上昇の違いなどにより不均一になりやすい。このためロータ軸に熱曲りが生じ、軸振動（1次振動モード）値が変化する。一般に、導体最高温度／平均温度の比に比例して振動が大きくなり、しかも発電機出力によって振動変化するために運転に支障をきたす場合もある。世界的に日本の振動制限値は厳しく、特に負荷調整のため起動停止・負荷変動の多いプラント用発電機は、スロット間の導体熱伸び均一化のため、熱的不平衡要因の排除、コイル熱伸び拘束の軽減・均一化のためコイルに隣接する部品の摺動面の摩擦係数の管理強化、高精度バランス調整が必須である。現地におけるバランス調整時間の短縮や振動問題の排除から、一部の電機製造会社では、工場にて発電機定格出力時のロータ温度を模擬できる特殊試験装置を使用して振動確認後に出荷する方法を採用している。

サーマルアンバランス問題回避から望ましい冷却方式は、以下である

- ①冷媒流路長の最小化・流路通過中の冷媒ガス温度上昇の低減

- ②各導体内冷媒流路の風量均一化・冷媒流路間の温度上昇差の低減

エアギャップピックアップ形、ラジアルフロー形（半径方向通風）が比較的熱安定性の高いロータを実現できる。

(II)ステータコイルの直接冷却

間接冷却コイルでは導体内の発生熱は主絶縁を介して鉄心に伝達され、最終的に鉄心表面から機内循環冷媒ガスへ放散される。戦前のアスファルトコンパウンド絶縁に代わって戦後導入された合成レジン絶縁は電氣的・機械的特性に優れ、高耐熱化、高電界ストレス化、高電圧化に大きく貢献した。

しかし、合成レジン絶縁の熱伝導率は低く（通常0.2～0.25W/mK）、コイル電流容量増大の大きな障壁である。一般に、電流の増加に比例して導体断面を増やすことで、電流密度は一定で直流損の損失密度も一定となる。しかし、交流損の損失密度は一定とならず、スロットが深くなると増大するため、その分を直流損低減で補おうとしても全損失を効果的に低減できない。特に、スロット深さが250mmを超えると全損失の低減は難しく、ステータ間接冷却機大容量化の制限要因となる。基本的には冷却性能の改善で解決しなければならない。初期の空気冷却機は主としてロータ軸材により単機容量が制限され、その解決に低圧（数kPa）の水素ガスが採用され、その後200kPaが一般的となった。水素の優れた冷却能力とロータ軸材の進歩、そしてロータ直接冷却により300MVA級まで製作可能となった。それ以上の大容量化は、高い熱抵抗の主絶縁によるステータ電流容量により制限され、ガス、油、または水による導体直接冷却技術が不可欠となった。特に、水直接冷却ステータコイルの適用により単機容量が飛躍的に増大した。図5.14に各種冷却方式による導体電流密度レベルの比較を示す。

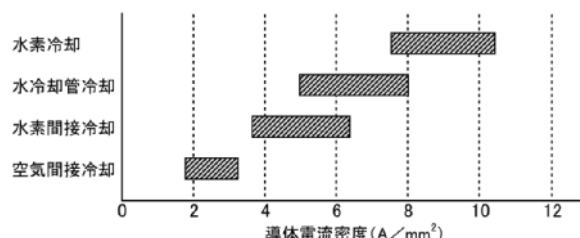


図5.14 冷却方式によるステータコイル電流密度レベルの比較

冷却技術の進歩によりコイル電流容量は著しく増加し、水直接冷却コイル1本当りの電流容量は、空気冷却の場合の10倍以上となった。

冷媒としてガス、または液体のいずれを採用するか

は各電機製造会社の設計コンセプトにより決まる。ほぼ同時期に開発は始まったが、液体冷却は技術的に種々の困難を伴うので、初めは水素ガス直接冷却方式が一般的に採用された。

コイル端部のガス吸入部よりコイル内に導入された冷媒がコイル内流路（一般にはベントチューブと呼ぶ）を流れ反対側に放出される構造で、冷媒ガス流量の増加による冷却性能改善のため別置高圧送風機やロータ軸上に取付けた多段ブロワ（冷媒ガスの高圧化のため複数段に配置した循環ファン）により高圧化していった。ガス直接冷却方式は、高電圧絶縁を施したステータコイルの一部に冷媒ガス取入れのための開口部を設ける構造、高圧ガス使用による風損の増加など高信頼化、高性能化のため解決しなければならない課題がある。

一方、液体直接冷却方式はコイル全長に亘って対地絶縁が施されている。初期の液体冷却には変圧器油が使用されたが、現在は比熱が大きくかつ対流における熱伝達率が大きく、入手が容易な純水が一般的である。

図5.15に直接冷却ステータコイル断面の例を示す。また、図5.16に水直接冷却ステータコイルの各種設計例を示す。

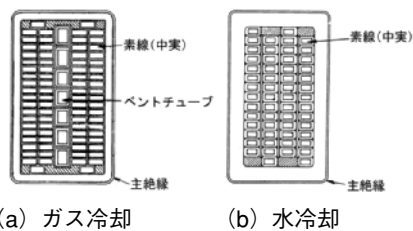


図5.15 直接冷却ステータコイル断面の例

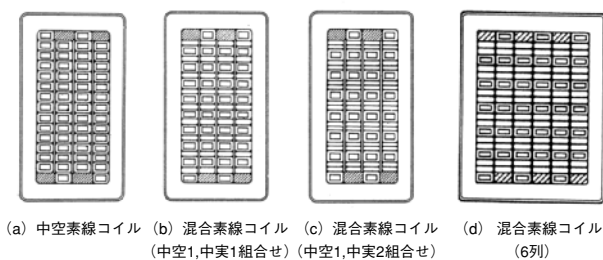


図5.16 水直接冷却ステータコイルの各種設計例

大電流化と共に素線（導体を構成する銅線）の横並び数が2, 4, 6列となり、またコイル高さの増加を出来るだけ抑えながら低損失化を図るため中実素線と中空素線を組合せた混合素線コイル設計が実用されている。また、同一スロット内の上下コイルの損失を比較すると一般に上コイルの方が大きく、その分熱伸び量

が大きくなる。このような上下コイル間の温度差は、長期間運転でスロット内コイル固定のゆるみの原因となり絶縁損傷を来す。直接冷却コイルの場合、コイル断面形状と冷媒流量を自由に選べることから上下コイル温度を等しくなるように設計できる。このようなコイルを不等断面コイルと呼び、コイル温度変化の多い発電機の信頼性改善に有効である。

しかし、水は冷媒として優れているが、コイル内流路からの漏水が絶縁層に浸透するような事態が発生すると絶縁劣化の原因となり、絶縁破壊による線間短絡事故など二次的な損壊を引起す場合もある。また、冷却水の水質管理が不十分な場合、中空銅線内壁の剥離や孔食が発生する。したがって、長期信頼性から水直接冷却方式に代わる冷却方式の検討が必要である。

5-1-5 合成レジンステータ絶縁（第6章6.3参照）

タービン発電機ステータコイルは、「長尺」、「大電流」、「高電圧」で特徴付けられ、運転時の電氣的・機械的ストレスは高く厳しい使用条件下にある。

ステータ絶縁として戦前まではアスファルトコンパウンド絶縁が主流で、一部電機製造会社では戦後も使用していたが、1945（昭和20）年代後半に合成レジン絶縁が使用され始めた。ドライマイカテープ（接着剤を塗布しないマイカテープ）を導体に巻回した後に低粘度ポリエステルレジンマイカ層間に真空加圧含浸し、加熱硬化する真空加圧含浸（VPI）絶縁方式が実用された。1960（昭和35）年頃には合成レジンとしてエポキシレジンが使用され始めた。

1963（昭和38）年頃よりエポキシレジン塗布しながらマイカテープを導体に巻回した後に加熱硬化処理するレジンリッチ絶縁方式が導入された。

アスファルトコンパウンド絶縁は耐熱性や機械特性に劣り、部分放電劣化⁵²やガースクラック⁵³などの問題が経年的に発生し易かった。後者は、コイル直線部長さが約4mを超える発電機において長年のコイル熱膨張収縮により主絶縁全周に亘ってクラック（ガースクラック）が発生する劣化である。

合成レジン絶縁は、使用レジン自身の優れた諸特性に加え、製造上でも絶縁層内に残留する空隙（ボイド）が少ないため優れた電氣的・機械的特性を有する。信頼性の著しい向上の他に、設計の自由度が大幅に改善された。耐熱クラスは従来のB（許容最高温度130℃）

⁵² [解説] 絶縁層内に空隙が存在する時、そこで電位傾度が大きく変化し放電現象が起きる。この時の放電により周辺絶縁層が漸次損傷する劣化現象。

⁵³ [解説] 経年的にステータ鉄心出口部近傍の絶縁層に全周に亘って環状クラック（Girth Crack）が発生する劣化現象。6-3-3参照

からF (155℃) に、また電界ストレス (設計レベル) はアスファルトコンパウンド絶縁で約1.5kV/mmが、合成レジン絶縁では2.5~3.5kV/mmと大幅に向上した。

合成レジン絶縁の採用は、温度上昇値の増加、高電界ストレス化による絶縁厚低減にともなう導体占積率アップや熱抵抗減少などによりコイル電流量が増大できるため大容量化技術として不可欠である。

近年、コンバインドサイクル発電が急速に普及しており、その発電機は高い運転性・保守性が要求されるため簡単構造のステータ間接冷却機が要求される。その大容量化は、主に間接冷却ステータコイルの電流量で制限されることから耐熱クラスH (許容最高温度155℃) の適用や主絶縁の熱抵抗低減などの設計コンセプトが検討され、既に実用されている。5.7および6-3-3に詳述する。

5-1-6 スライド機構付きステータコイル端支持方式

ステータコイル電流量の増加に伴い、必然的に通常運転時および短絡過渡時にコイルに働く電磁力は増加する。発電機容量とステータコイル電流の関係を図5.17に示す。また、発電機容量とコイル端部に働く電磁力の関係を図5.18に示す。いずれも容量増加とともに電流・電磁力とも増加している。また、火力発電プラントでも単相再閉路運用が実施され、その遮断・再投入時に過渡的な電磁力が働くことなどからコイルの支持・固定は強固にする必要がある。

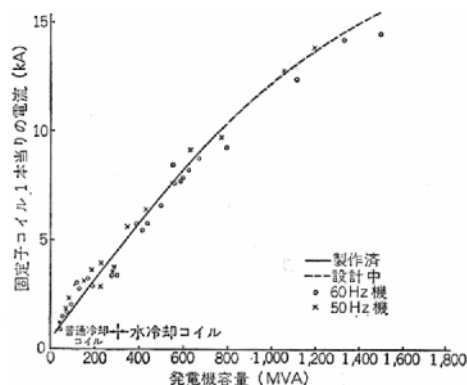
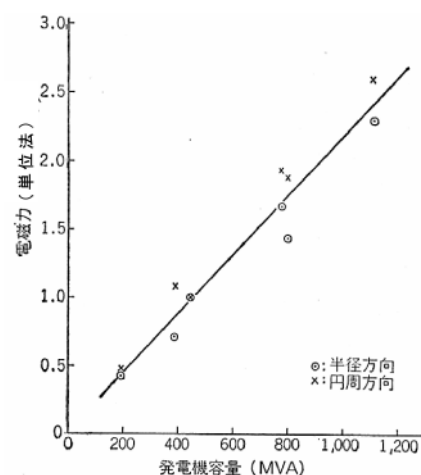


図5.17 2極タービン発電機の容量とステータコイル電流の関係

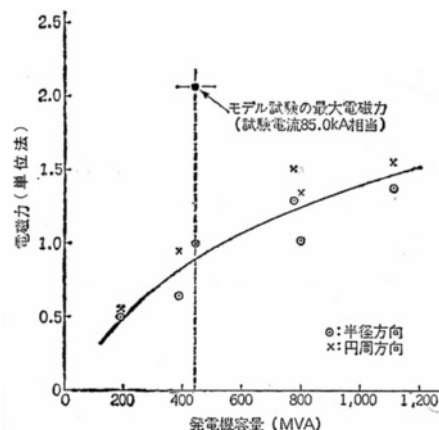
特に2極機では、互いに接続されるコイルが離れているため鉄心外のコイル端部が長くなるのでコイル端部の支持を一層強固にしなければならない。

戦前はコイル固定・締結に麻ひも、木、アスベスト積層品、木綿繊維フェノール積層品などが使用されたが、機械的強度や長期的な形状安定性に劣り、経年的な緩みの発生・拡大によるコイル振動過大に起因する問題が発生した。

戦後になってガラス繊維積層品、ガラスコード、合



(a) 通常運転時



(b) 三相突発短絡時

図5.18 発電機容量とコイル端部電磁力レベル

成レジン接着剤が使用されるようになった。近年は、支持構造物とコイルとの間隙を最少化するためコイル組立時には柔らかく、熱硬化後は十分な機械強度を有するスペーサを使用し、レジンを含浸したガラス繊維 (ガラスロービング) で縛り、熱硬化後は強固に固定する方式、あるいは強化繊維入り合成レジン積層板 (FRP) 製の一体支持構造物上にコイルを組立、コイル間に高粘度レジン注入して硬化・固定する方法が実用されコイル端部支持方法の信頼性は大幅に改善された。

このような支持・固定方法は、コイル電流が大きくコイル相互間に働く電磁力が大きい直接冷却コイルでは有効であるが、反面、コイル熱伸びを強く拘束した場合、主絶縁と導体間の接着面の剥離、絶縁層内の剥離 (デラミネーション) が生じ、絶縁劣化要因となる。このようなコイル内に発生する熱応力を軽減し、かつ大きな電磁力によるコイル振動を抑制するため、軸方向にのみスライドでき、その他の方向は強固に固定するスライド機構付きステータコイル端支持方式が開発された。

一方、間接冷却ステータコイルの場合、コイル電流は直接冷却コイルより小さいがコイル温度が一般に高

くなる。たとえば、水直接冷却コイルでは水の沸点より低い温度（通常85℃以下）で設計される。しかし、間接冷却コイルでは一般に使用絶縁材料の許容温度限界内の高温で設計され、特にコイル直線部が長く、導体断面が大きい間接冷却ステータコイルを組込んだ発電機の場合、

- ・熱伸び量は温度（100℃以上）とコイル長に比例して大きくなり、これを拘束した場合にコイルに発生する熱応力は大きい。
- ・熱伸びによりコイルに働く力はコイル断面積に比例し、熱伸びを拘束した場合にコイルに発生する力は大きい。

などコイル使用条件は厳しくなる。このため、ステータコイル間接冷却発電機の場合にもスライド機構付きステータコイル端支持構造は不可欠である。すでに、発電機容量、電磁力レベル、コイル直線部長さ、運転温度などに応じた簡易形支持方式が開発され、実機に適用されている。

5-1-7 低損失ステータ鉄心端構造

発電機容量の増大につれステータ端部鉄心へ侵入する漏洩磁束が増加するため鉄心端部温度が高くなり、この温度上昇が大容量機の電気基本設計における制限要素の一つになる。図5.19に発電機容量と端部磁束レベルの関係を示す。したがって、大容量化とそれに伴う出力係数、電気装荷の増加に対しステータ鉄心端部の漏洩磁束による漂遊負荷損の低減対策と冷却強化が重要である。

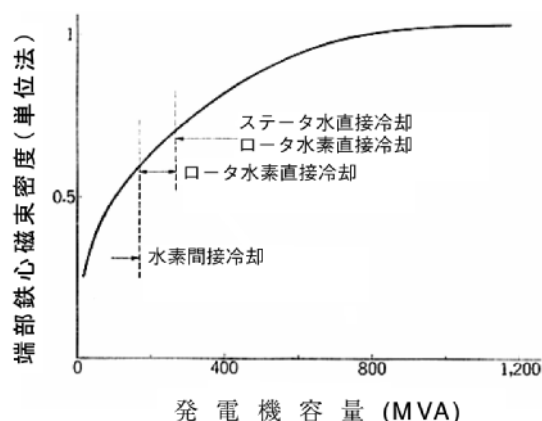


図5.19 発電機容量と端部漏洩磁束のレベル

また、タービン発電機運用面から夜間の送電電圧上昇抑制のため火力発電所において無効電力調整運転（進相運転）が一般化しており、進相無効電力容量の

確保が必須となっている。それは、電力大口需要の工場などで昼間の誘導性負荷を補償する容量性無効電力調整装置（コンデンサー）を設置しており、夜間軽負荷時に全系統容量に占める容量性無効電力調整容量の割合が増すため発電機は容量性負荷（進相負荷）運転となる。このような進相運転時にはステータ鉄心端部の漏洩磁束量が増加し⁵⁴、端部鉄心温度上昇が大きくなることから対策が必要である。

基本対策として、ステータおよびロータコイル端部からの漏洩磁束に対する磁気抵抗の増加、端部鉄心の磁束集中の緩和がある。以下に示すような具体的対策が、発電機容量や電気基本設計に応じ適宜組合されて適用される。

- ・端部鉄心ティース部の段落し（ステップバック）およびスリット加工
- ・非磁性材の使用
- ・ステータ鉄心押え板シールド板、強制冷却シールド板
- ・磁束シャント（磁束分路）

大容量機では、端部鉄心ティース部の段落しにより磁束集中を緩和する方法、端部構造物に非磁性材料を使用して漏洩磁束を低減すると共に、押え板を良電導性のシールド板（銅板）で覆い渦電流損を減少する方法が一般的に採用されてきた。これらの対策により700MWクラス機迄は鉄心端部温度を規定温度上昇限度内に納めることは可能であった。図5.20に代表的なステータ鉄心端部構造を示す。

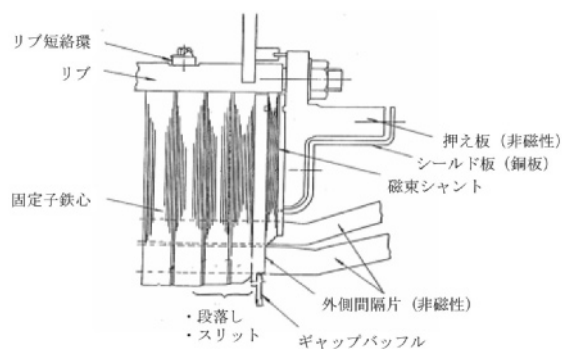


図5.20 ステータ鉄心端部構造

さらなる大容量化、あるいは一層の小形・軽量化を図る場合に電気装荷の増加は避けられず、高性能ステータ鉄心端部構造が必要となる。その基本的な考え方は、端部鉄心に軸方向に侵入する漏洩磁束をその手前に設けた磁束分路に導くことにより結果的に端部鉄心侵入磁束を低減する方法で、磁束シャント方式と呼ばれる。従来のステータ鉄心端面の外側、押え板と外側間隔片の間に磁

⁵⁴ [解説] 進相運転時、ロータ端部漏洩磁束とステータ端部漏洩磁束が同一方向に流れるためステータ端部鉄心に侵入する磁束が増加する。増磁作用と呼ぶ。

束分路を設け、漏洩磁束を積極的に短絡することにより鉄心端部の過熱を防止する（図5.21参照）。

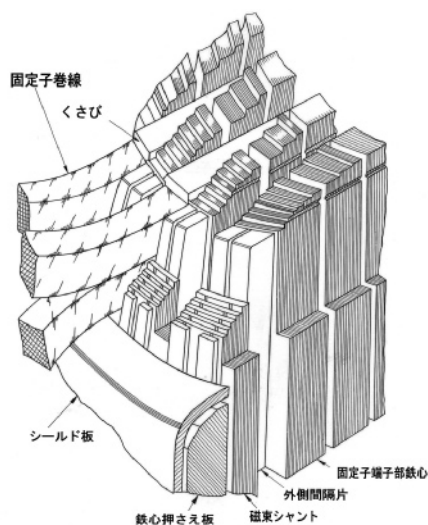


図5.21 磁束シャント付ステータ鉄心端部構造

磁束分路の過飽和回避、ステータ鉄心端温度、ステータ積層鉄心の適正圧力の確保、および鉄心出口部におけるステータコイル支持剛性の確保とコロナ抑制など多面的に検討し最適化しなければならない。このための3D-FEMなどによる各種解析技術が確立済みであり、日本の技術レベルは世界的にもトップレベルにある。それは、単なる解析手法の確立に終わることなく、より高精度化するため実機における現地試験データを取得し、解析条件にフィードバックする地道な努力の積重ねによるものである。

5.2 高効率化

タービン発電機は、構造的に高速回転部（ロータ）を有しているわりには効率の高いエネルギー変換機器であり、容量・冷却方式などによって差違はあるが定格出力における効率は大略98.00～99.00%である。しかし、発電機効率の一層の改善は例え僅かであっても、長期間に亘る運転コスト低減から今後とも取組まなければならない課題である。

発電機の損失内訳は以下のとおりである。



図5.22にステータ水冷却タービン発電機の損失内訳の例を示す。これらの損失のうち、低減効果が大きい損失について低減技術を紹介する。

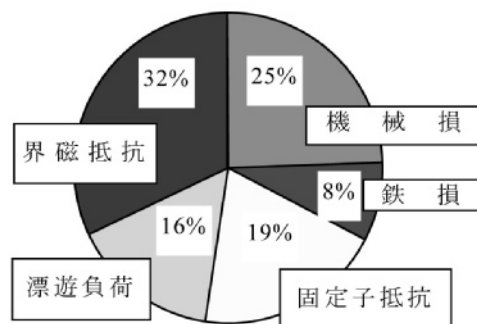


図5.22 タービン発電機の損失内訳の例

5-2-1 鉄 損（第6章6.2参照）

タービン発電機に使用される磁性材料は、ロータ軸材とステータ鉄心電磁鋼板である。ロータ軸材は機械的特性を主に改善されてきたが、磁気特性向上の積極的な取組みはなかった。時として機械的特性改善の添加成分が磁気特性低下をもたらすこともあったが、最高級レベルの軸材も含め磁気特性は従来と変わっていない（最高設計磁束密度は2.0 T以下）。電磁鋼板は、方向性と無方向性珪素鋼板の2種類（6.2参照）が実用されており、化学成分および製法の進歩により磁気特性・損失特性とも高性能化し、特にわが国の製品は世界トップレベルにある。

ステータ鉄心の磁気回路は、大きくティース部（コイルスロット間の鉄心）とコア部（スロット底から鉄心外径までの範囲）からなり、電磁鋼板の高性能化により損失低減に寄与した。低減損失の1つは鉄損であり、他は磁化特性⁵⁵の改善による発電機界磁電流の減少で結果的には励磁損を低減できる。

優れた磁気特性を有する方向性珪素鋼板の採用により設計自由度は著しく改善され、発電機高性能化に大きく寄与した。方向性珪素鋼板の特性改善は鋼帯製造時の圧延方向に顕著であり、鉄心コア部の円周方向磁路と圧延方向を一致させるように形成された鉄心部分では、励磁電流（起磁力）および鉄損を効果的に低減できる。しかし、圧延直角方向の特性は低下傾向にあり、それは鉄心ティース部の磁路方向と一致するため励磁電流および鉄損は改善されず、むしろ増加傾向にある。特に、間接冷却ステータコイルの場合にはコイル内発生熱の伝導経路に位置するため阻害要因となり設計上の考慮が必要である。その解決策として高性能

55 [解説] 電磁鋼板内の磁束と励磁電流の関係を表し、磁束の通り易さを示す。

無方向性珪素鋼板の採用があり、損失分布の均一化を図ることができる。

以上はステータ鉄心中央部の鉄損低減について述べたが、この他に鉄心端部における漏洩磁束による損失がある。その対策は、低損失ステータ鉄心端構造（5-1-7参照）の採用により効果的に低減できる。

5-2-2 ステータコイル損失（第5章5-1-4（Ⅱ）参照）

ステータコイル内で発生する損失は、抵抗損と交流損（渦電流損）からなる。前者は、抵抗損でありコイル形状や発電機効率から最適化するように必要断面積を選べる。後者は、交流電流が流れた時に生じる素線内の電流分布の偏りによるもので、素線厚（高さ）を小さく選ぶことによって効果的に低減できる。しかし、コイル製造やコスト面からの制約があり、全体コスト低減から最適化する必要がある。このような設計の考え方は、主に間接冷却コイルに適用される。

直接冷却コイルにはコイル内に冷媒流路があるため、極論すれば電氣的回路と冷却回路は個別に設計できコイルの設計自由度は高い。損失密度が高く冷却能力を高くする設計、損失密度を比較的低く抑えそれに見合った最小必要限の冷却能力で設計する考えがあるが、当然高効率化には後者の設計が望ましい。

水冷却コイルを例にとると、従来は中空素線のみで構成されるコイルが使用されたが、現在は中空素線と中実素線で構成した混合素線コイルが広く採用されるようになった。内部に冷媒流路を有する中空素線は製造上の制約から一般に素線厚が大きくなり、その分交流損が大きい素線になる。一方、素線厚を小さく選べることから交流損の小さい中実素線を多用することにより効果的に損失を低減し、必要最小限の冷却能力を中空素線により確保することでコイル外形寸法を極力抑えながら損失低減ができる。なお、中空素線と中実素線の上下面が接触するような配置により中実素線の発生熱を効率よく冷媒に伝導でき、その時の冷媒と中実素線間の温度差は微小である。なお、中実素線は中空素線と比較して価格的にも有利であることから多用される傾向にあり、中空素線1本に対し中実素線1～6本を組合わせたコイルも実用されている。

5-2-3 ロータコイル損失（第5章5-1-4（Ⅰ）参照）

大容量化の過程で軸材の制限からより高性能なロータコイル冷却方式を追求してきた。そのような設計では高電流密度化し、冷却強化のため冷媒流量が増加するため効率面から見れば励磁損および風損の増加を招く結果となる。

軸材の進歩により大口径ロータの入手が可能となり、またコンピュータ利用による解析技術の進歩によりロータ設計の自由度は大幅に改善された。

ロータ断面設計において磁路断面積と機械強度を確保しながらロータスロット断面積の最大化を図ることでスロット内の導体断面積を増加できる。このような設計を指向することで、高効率設計面から発生損失と必要冷却能力とのトレードオフで最適冷却方式が選択できる。これらの検討項目に製造コストの低減を加えることにより最適化は容易になる。基本的な設計コンセプト、製造経験など電機製造会社によってそれぞれ異なるため画一的な解はない。しかし、高効率設計の観点から考察したロータ冷却方式は次の視点から決定できる。

- ・低い冷却性能の冷却方式
- ・短い冷媒通路（パス）の冷却方式
- ・簡単な冷媒通路形状と冷媒パス構造を有する冷却方式
- ・導体断面積に占める通風断面積の比率が小さい冷却方式
- ・通風孔・通風パスの数が少ない冷却方式

これらから、サブスロット形とラジアルフロー形を組合わせる通風方式が最適である。

5-2-4 低減通風

発電機内通風設計の考え方は、冷却能力の向上から多量の冷媒を循環させ風速を高めることで発熱体からの熱放散を高めるという考え方が一般的であった。しかし、循環冷媒は風損を発生し、特に空気冷却機では冷媒の特性から風損は大きくなる。風損は発電機内の各部で発生するが、特にロータ軸に取付けられた通風循環ファンで発生する損失は大きく、その下流の発熱部に到達する前に冷媒温度が上昇し冷却能力が低下する。このような傾向は空気冷却機で顕著であるため、冷却器を循環ファンの下流に設置することにより低温の冷媒を発熱部に供給する通風システムが開発され、実用されている。

多数の並列パスを有する複雑な機内通風計算にコンピュータを適用することで通風解析の精度が飛躍的に改善され、必要最小限の冷媒量を発熱部に配分する設計が可能となった。結果として総循環風量が低減でき、効果的に風損を低減できる。このような通風方式を低減通風（リデュースドフロー）方式と呼び、発電機高効率化に大きく寄与できる。

電氣的損失の低減に伴う必要風量の低減に加え、低減通風方式を採用することにより従来設計の60～70%の風量に低減できる。風損を大幅に低減できることは

勿論、冷媒通路の断面積も減少できることから発電機ステータ枠の小形・軽量化にも寄与する。

一方、通風循環ファンの設計からは低風量－高ヘッド⁵⁶特性が要求され、低風量域にある動作点での特性安定化が必要であり、ファン形状の最適化およびファン周辺の流れの整流化など高度の通風設計技術が要求される。

5.3 高信頼性

タービン発電機の信頼性検証は黎明期から重要課題であり、特に国産化の推進には越えねばならない大きな障壁で、常に大容量化における課題であった。

完成品を評価して購入決定する発注が一般的でないタービン・発電機では、海外の先進電機製作会社の実績機や海外標準設計機の採用などリピータ機を選定などにより信頼性問題に対処してきた。

しかし、日本では全国版での営業用標準発電プラントはなく、各電力会社が立地点、自社電力網などからの最適仕様の決定が一般的で、結果的に各発電機器の設計は異なり信頼性検証の有効な解決手段とはならなかった。

その後、数は少なかったが記録的大容量機も含め製作機会が与えられ、その運転実績が次ステップへと繋がっていくなかで国産品への信頼が得られ、また技術対応力も向上した。その背景に設計へのコンピュータ利用の普及がある。

初期のコンピュータ利用解析は、利用者が解析コードの開発から取組まなければならず、その利便性にも拘らず設計への適用は必ずしも多くなかった。その後、汎用解析ソフトが市販され、多くの優れた解析コードが容易に入手できるようになった。しかも、目覚ましい計算機の進歩により大形から分散形時代へと移行しEWS（Engineering Work Station）などが設計者の身近なツールとなり環境が整ったことも大きい。

コンピュータ利用による解析技術の高度化により、その適用範囲は電磁界、応力、流体、騒音、振動など多岐にわたり設計ツールとして欠くことができないところまで浸透し、初期欠陥的な不適合は大幅に減少してきている。

昨今は、大容量火力発電機でも負荷調整運転が要求され多頻度起動・停止や負荷変化による熱サイクルの繰返ししが日常化している。また、急増しつつあるガスタービン駆動発電機では短時間での昇速と負荷運転が要求され、急激な温度変化による繰返し熱応力が生じる。

このような繰返し応力に対する疲労設計が今後の信頼性向上の重要課題である。すでに、主要材料の疲労データの整備、熱サイクル劣化を受け易いステータコイル絶縁の要因別劣化データの採集、熱応力・遠心力などの影響を受け難い構造の開発などにより低サイクル疲労に対する高耐力設計機が実用されている。たとえば、タービン発電機の設計機器寿命（通常25～30年）の間で約1万回の起動停止を要求仕様とした発電機を製作済である。

このような疲労設計技術の確立は、既存タービン発電機の残存寿命の推定と延命のための改修の提案・実施にも適用され、予防保全に寄与している。

5.4 高運転性

タービン発電機の高性能化・大容量化に際し、設置、使用および運転環境に係る条件・要求が一層強くなるにしたがい解決すべき課題は増えてきたが、対応技術力の確立により応えることで運転性も改善されてきた。

高運転性に係わる他の課題は発電機の電気的主要仕様であり、この選定は大容量化・経済性の改善などへも影響することから電機製造会社の一方的な考えだけではなく利用者側との十分な協議で決定しなければならない。本項では、特に発電機設計への影響が大きい短絡比と定格力率を始めとし主要項目について記述する。

5-4-1 短絡比

タービン発電機をはじめ同期機の特性を表す短絡比は定格速度・無負荷定格電圧の発生に必要な界磁電流 I_{f0} と、全端子短絡で定格ステータ電流を流すに必要な界磁電流 I_{fs} の比である。短絡比の大きさは発電機の安定度に関係するとともに発電機の大きさに関係し、短

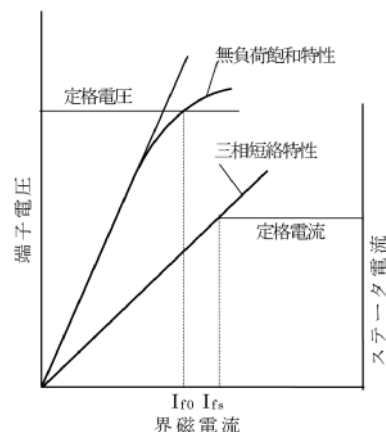


図5.23 タービン発電機飽和特性曲線

⁵⁶ [解説] 損失水頭とも呼び、流体が流路内を流れるときの圧力損失を表す。

絡比が大きくなると安定度が大であるとともに寸法・重量も大きいいわゆる鉄機械と称せられるもので、短絡比の小さいものは逆の関係であり、相対的に銅機械となる（表5.1参照）。また、短絡比は発電機の進相無効電力容量を決定し、低短絡比では容量が小さくなる。短絡比の逆数は同期インピーダンスと称し、一種の発電機の内部交流抵抗を表す。

表5.1 銅機械と鉄機械⁵⁷

		鉄 機 械	銅 機 械
電気装荷		小	大
磁束密度		大	小
重 量	銅	小	大
	鉄	大	小
損 失	銅 損	小	大
	鉄 損	大	小
過渡リアクタンス		小	大
短絡電流		大	小
最大トルク		大	小

タービン発電機の短絡比も初期には水車発電機並に大きく1.0を指定されたが経年的に小さくなる傾向にあり、戦後の大容量水素冷却機では0.64が標準値となり、現在は0.58、0.6が一般的に採用されている。日本におけるタービン発電機短絡比の変遷を図5.24に示す。

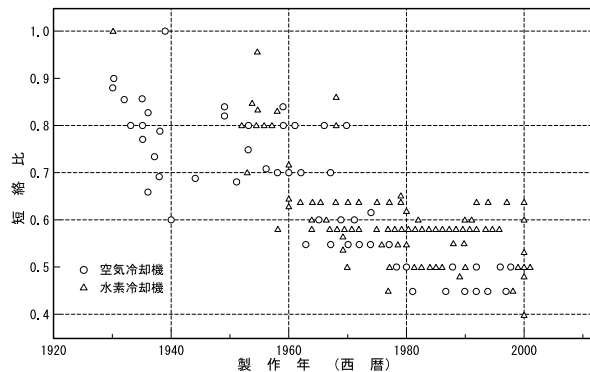


図5.24 日本におけるタービン発電機短絡比の変遷

海外では送電距離が短い、小形・軽量化による内陸に位置する発電所への輸送コスト低減などの理由から0.5、0.4、あるいは0.35が採用されることもある。

本来、短絡比は電力系統運用面、例えば系統安定度や進相運転容量などから選定される主要仕様であり、発電機設計サイドから決定すべきではない。しかし、タービン発電機設計・製作の歴史を振り返ってみると、製作可能限界容量の拡大、製作可能容量範囲内で

の小形・軽量化による経済性追求のために低短絡比を採用してきたことは否めない。低短絡比を指定された発電機（銅機械）の設計では電気装荷を大きく選ぶことができ、限界容量の拡大、小形・軽量化が図れる。図5.25に500MW級タービン発電機について短絡比を変化した場合の発電機重量の変化の例を示すが、体格への影響が大きいことが分る。

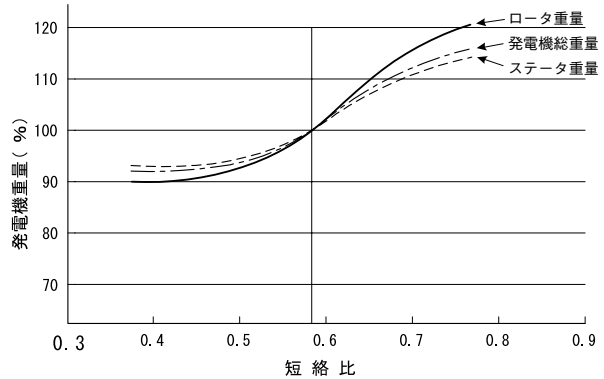


図5.25 短絡比と発電機重量の関係
2極-500MW-60Hzステータ水直接冷却機の例

一方、短絡比の逆数である同期リアクタンスは、短絡比を小さく選ぶと大きくなり、発電機に出力変動があった場合などの電圧変動の増大、送電電力系統の安定度の低下、そして進相運転領域の縮小など電力系統運用面からは新たな課題をもたらした。しかし、リレー技術と優れた系統運用技術によって安定的に電力系統は運用されてきたが、本質的課題解決は今後に残されていると考えられる。

5-4-2 定格力率

発電プラントが電力供給する電力系統の負荷の性質を考慮してタービン発電機の定格力率は決定される。すなわち、交流電流の場合には負荷の性質により電圧と電流の間に時間的なズレが生じる（位相差）。このズレ角 θ の余弦 $\cos\theta$ を力率と呼び、有効電力（kW）は次式で表される。

$$P = EI \cos \theta$$

ここで、P：有効電力(kW) EI：皮相電力 (kVA)

$$\cos \theta : \text{力率} \quad \cos \theta = EI / P, 100 \cos \theta (\%)$$

$$Q = -EI \sin \theta : \text{無効電力 (kVAR)}$$

発電機定格力率の変遷を見ると、初期には0.8が一般的に採用されていたが、次第に高力率化し現在では0.9が広く採用されている。図5.26に日本におけるタービン発電機の定格力率の変遷を示す。

これより低力率（ $\cos\theta$ が小さい）では、同じ電圧・電流を送っても有効出力は小さくなり、kWhで売電す

57 森安正司「実用電気機器学」p 79 森北出版株式会社（2000）

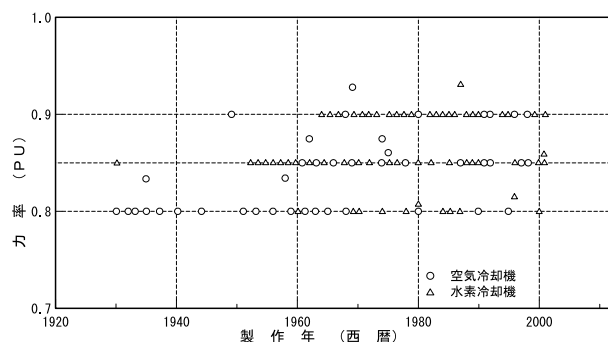


図5.26 日本におけるタービン発電機定格力率の変遷

る発電事業者からみれば不利になる。

発電機的设计から見れば、同一出力 (kW) に対し高力率を選択すれば皮相容量 (kVA) を低減でき、さらに電圧発生に必要な起磁力⁵⁸と電機子電流を流すのに必要な起磁力のベクトル和で求まる発電機定格出力時の界磁電流は減少する。これは同一寸法、一定界磁電流の制限下での発電機出力 (kW) は高力率機の方が大きくなることを意味し、製作可能限界容量の拡大に寄与する。図5.27に力率と発電機重量の関係を示す。

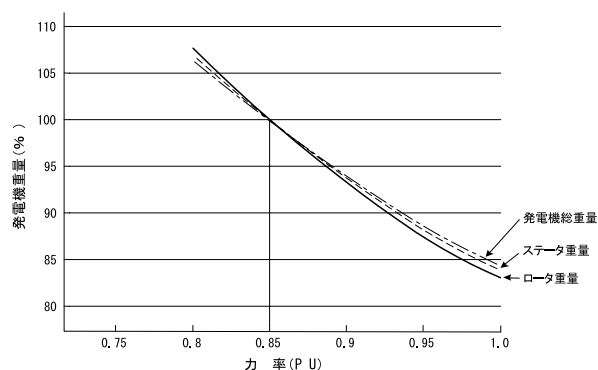


図5.27 力率と発電機重量の関係
2極-500MW-60Hzステータ水直接冷却機の例

高力率機は大容量化には効果的であり発電機設計サイドからは望ましいが、皮相容量 (kVA) の減少、さらに定格出力 (kW) における無効電力容量 (kVAR) の減少の両面から遅相および進相無効電力供給能力が低下する。したがって、力率の決定に際しては系統運用面も十分考慮し総合的に検討しなければならない。

5-4-3 逆相耐量

電気炉や列車・電車などの単相負荷の増加により近傍のタービン発電機に不平衡負荷が要求されることが多くなった。また、送電線では架空電線と大地間に静電容量があり3相電線の地面に対する配置が長距離で同じ場合、

3相電線の交流抵抗 (インピーダンス) が不均一になるため、従来はその位置を変える燃架を実施していたが、最近は省略されることが多くなり、結果的に不平衡電流が流れる。また、発電機外部における短絡事故などにより、過渡的に不平衡電流が流れることがある。

このように3相を流れるステータ電流が不均一になる場合、逆相電流が流れる。逆相電流はロータ回転方向とは逆方向に回る磁束を発生するためロータ表面に2倍周波数の電流が流れ、ロータ表面全体の温度を高め、過大逆相電流が流れた場合には重大な損傷を与える。

それに昨今の半導体電力変換装置を使用した一般産業や家電の機器の急激な増加で変換装置からでる高調波電流が増加の一途にあり、逆相電流と同じような影響を与える。送電線、タービン発電機電流に含まれる定常的な高調波成分は、これに周波数の重み係数を乗じて求めた等価的な逆相電流として扱っている。

逆相電流はその流れる時間によって、連続逆相と短時間逆相に分類する。逆相電流は、タービン発電機にとって決して好ましくはないが、電力系統運用上から要求される逆相電流がタービン発電機に機器耐量として要求される。発電機外部で生じた系統事故時に電力系統や発電機保護の処置に要する一定時間内では損傷なく持ち堪える耐量 (短時間逆相耐量)、送電系統に含まれる連続的な逆相電流や高調波電流に損傷なく持ち堪える耐量 (連続逆相耐量) である。

直接冷却方式の適用により高出力密度化を図った発電機では、以下に示すように、

- ・通常運転時のロータ表面損のレベルが高く、温度上昇値が大きい。
 - ・過渡電流によりステータ側からロータに侵入する磁束レベルが高く、渦流損が大きくなる。
 - ・高出力密度設計により小形化している分、熱容量が小さいため過渡的な温度上昇値が大きくなる。
 - ・ロータ楔材料としてアルミ合金などを使用すると熱履歴により材料強度が低下する。
- などの理由から逆相耐量が低下する。

逆相耐量を増加するためには、以下の対策がある。

- ・ダンパ⁵⁹構造の高性能化 (部分ダンパ、全長ダンパ、完全全長ダンパ)
- ・低抵抗楔材
- ・高熱安定性楔材
- ・接触抵抗の低減対策

⁵⁸ [解説] 界磁アンペアターンとも呼ばれ、磁束を発生させる力で、磁界の強さを線積分したもの。

⁵⁹ [解説] ロータ表面に近い部位に、良電導性材料により渦電流を流す回路を形成し、他のロータ部位を保護するための電気回路を言う。その回路構成の程度により、部分、全長および完全全長ダンパがある。

・狭隘な渦電流パスの解消（FEM解析技術の確立）

以上の過渡的な短時間逆相耐量の他に、連続逆相電流に対する検討も重要であるが、この対策は基本的には短時間の場合と同じである。

コンピュータ利用により渦電流および損失分布の高精度解析が可能となり、この解析結果に基づく上記の対策が実施されている。

5-4-4 ロータ軸振動の安定性

ロータ軸径（ D_R ）の制約下での大容量化要求に対してロータ軸長（ L ）を長くする必要がある。軸長は、軸たわみによる危険速度、軸剛性の低下による振動応答性などから制限される。軸たわみは軸受間距離の約3乗に比例して大きくなり、また軸の固有振動数は約1.5乗に比例して低下する。これらより一定軸径の下で許容される軸長は軸剛性に深く係る。軸剛性を概略 L/D_R で表した場合に危険速度比（危険速度／定格回転速度）との関係を図5.28に示す。

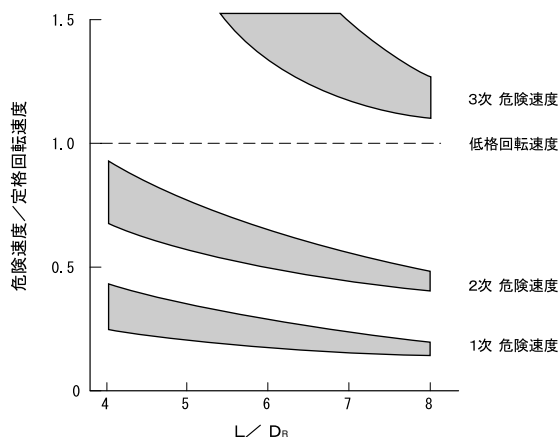


図5.28 ロータ胴部（ L/D_R ）と危険速度の関係
2極-3,600min⁻¹の例

発電機の大容量化に際し、現実的にはロータ軸材および冷却性能の改善が大容量化要求に追いつけず、軸長を長くすることによりこれをカバーせざるをえないことがある。すなわち、 L/D_R を大きく選ぶことになり、定格回転速度および過速度領域が危険速度に接近することになる。このため振動問題の回避に、設計段階でのアンバランス要因の排除に加えバランス技術の向上が不可欠である。

実績ベースでみると図5.29に示すように発電機容量の増大に伴ない危険速度は低下し、2次と3次危険速度の間に定格回転速度がくる。

設計、製造上でアンバランス量を極力少なくすることは当然である。しかし、未だ不確定要素のある振動

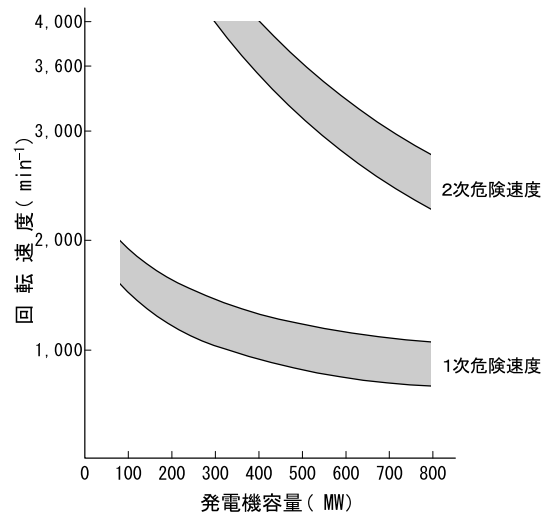


図5.29 発電機容量と危険速度の関係

応答性について運転実績と解析に基づき、軸剛性のレベルを決定しなければならない。既に運転実績面では L/D_R が約7.0の発電機は多数あり、設計、製造（特に、ロータ部品の摺動面の機械加工精度向上）に負うところが大きい、それ以上にバランス技術の著しい進歩によるものと考えられる。

今後、関連技術の精緻化などの条件が整うならば最大7.3程度までは適用可能であり、製作限界容量の拡大が図れる。しかし、長尺・低剛性軸は危険速度の数が多いこと、振動応答感度⁶⁰が高くなることは避けられず、起動・停止にともなう回転上昇・降下過程における危険速度通過時に振動問題を誘発する可能性は高い。したがって、製作限界容量以内での多頻度起動停止を仕様化されたタービン発電機の設計では、口径が大きく、鉄心長が短い、いわゆる“太短”ロータを指向することにより運転性の向上が図れる。既に、このようなコンセプトにより設計した中間負荷運転仕様の500MW級タービン発電機は、従来機では経験しない多頻度起動停止運転を実施し、数年間運転後の精密点検で何ら異状は見られなかった。

5.5 高保守性

従来のプラントや構成機器の初期コスト・価格偏重の考え方から、ライフサイクルコスト重視の考え方がタービン発電機にも要求され始め、電機製造会社側でもその対応に取り組み始めた。

従来は、発注仕様などで要求された機器寿命（目標値）を充たすことを前提条件として初期コスト・価格を低減する技術を追求する傾向にあり、製造側の論理

60 [解説] アンバランス、危険速度領域でのアンバランスに対する振動感受性。

が優先してきた。機器引渡し後の保守・運転を担う利用者側にとって、このような設計コンセプトに基づき設計・製作された機器の運転性・保守性は必ずしも満足できるレベルにはなかった。

昨今は、利用者側の要求の明確化によって電機製造会社対応がされるようになってきているが、必ずしも十分な理解に基づく合意はされていない。

従来の保守性の考えは、即高信頼性、長寿命化と言っても過言ではなく、運転開始後の経年劣化による補修回数、箇所の軽減、故障発生頻度の低減レベルであった。昨今の利用者側の真剣な取組みに対し、今後の課題としての新しい取組みが要求される分野である。

高信頼性に関わる課題として最近の運転パターンに対応できる疲労設計が主要な課題である。以下にその重要ポイントを示す。

- ・熱変形の吸収
- ・高遠心力下での絶縁物、銅部品の強度検証による成立構造
- ・高電磁力下での成立構造、特に、絶縁物、銅部品の強度検証
- ・熱変位への吸収構造、電気機械特有の銅材料の熱伸び、特に設計温度の上昇、大形化による変位量の増加に対する吸収構造

一方、ハードを主とした保守面からは、保守点検頻度の低減、停止間隔の延長、および停止期間の短縮が主要な課題である。以下に示す技術の確立が急務である。

- ・カセット方式⁶¹
- ・現地工事期間短縮技術
- ・工事の現地化⁶²

アセットマネージメント

ハード面での高保守性の改善に加え、情報システム活用によるアセットマネージメントの導入が検討され、一部実施段階にある。プラント製造者の機器に関する豊富な製品知識と監視・診断知識を活用して利用者の資産である発電プラントを利益リソースとして効率的運用する支援システムである。そのための計測・監視・診断装置の開発・運用と診断ベースデータの充実などがより効率的な運用に必須である。

このようなビジネス形態が一般化してきている背景に、利用側の保守運転員の減少などによる運転・保守技術力の低下があり、プラントの安全運転の確保と発電プラントの資産価値の最大化というニーズがある。

ストックビジネス

さらに、昨今の低成長市場で新規プラント建設が著しく減少しているため、既設プラントを対象にしたストックビジネス（保守ビジネス）が注力され、この分野でも市場競争原理が適用される時代に突入している。換言すれば、オリジナルメーカにその後の補修ビジネスを独占的に担当できないことである。このような状況下では他社製品の補修を手掛けることになり、当然製作図面などの技術図書は手元になく、しかも競い合うような短い工事期間での遂行が可能な対応技術力の確立が必要である。現在は海外市場で一般化しているビジネス形態であるが、国内市場への移行は時間の問題である。

アップグレード・アップレーティング

ストックビジネスにおいて、経年劣化部分の交換による原形通りの復旧もあるが、建設時以降に著しく進歩した最新技術を適用することで高性能化（アップグレーディング：Upgrading）や出力増加（アップレーティング：Up rating）が一般化してきている。既設機設計の制約・制限が多い機器に新技術を適用することは、時として新規設計よりも難度は高く、しかも改修完了後の運転再開時の調整期間が短いことから確度高く完遂することが必須で高い技術対応力が要求される。

しかも、製造側からの提案形ビジネスであり利用側にとって如何に魅力的な技術内容が提案出来るかが重要なポイントである。それは、アップグレードの技術のみならず、現地工事のやり易さ、現地工事期間の短縮などの実現技術も含まれる。

5.6 小形・軽量化

小形・軽量化の考え方は、大容量化と全く同義語である。いろいろな制約下でいかに大容量化を実現するかを追及してゆけば、結果的には出力密度を高くする技術開発になる。この成果は、単に製作限界容量の拡大のみではなく、それ以下の容量範囲で従来技術により対応できる発電機に適用することにより小形・軽量化が可能となる（5.1参照）。

大容量化技術の開発成果が小形・軽量化に寄与した具体例を以下に挙げる。

1. 輸送制限

日本では大半の火力発電所が海岸線近くに設置され

⁶¹ [解説] 一定期間で補修を必要とする部分の予備を一式準備し、交換する方法。

⁶² [解説] 製造会社からの作業員派遣ベースの補修工事に代わり、指導員（スーパーバイザー）のみの派遣で現地人を使った工事の遂行。

るため海上輸送による重量物の搬送が可能であるが、海外などの内陸に位置する発電所への輸送は深刻な問題であり輸送費が機器価格を上回ることも珍しくない。一方、このような厳しい輸送制限解決のための技術開発の原動力になったことも事実である。

従来、最大重量物である発電機ステータの寸法・重量制限（輸送制限、発電所建屋内制限、天井走行クレーン容量）の緩和には、以下に示すような分割ステータ方式が一般的に採用されていた。

- ・インナーケージ形…鉄心部分とフレームを分割し、現地にて一体化する。
- ・2分割インナーケージ形…最大重量物である鉄心部分を水平位置で分割し現地にて一体化する。日本では実施例はないが、ドイツでは採用された。
- ・複数分割アウターフレーム形…最大寸法部分であるアウターフレームを3～4分割し、現地にて溶接などにより一体化する。

これらの方式は、分割構造となるため構造が複雑となり、製造コストや輸送費の増加要因となる。特に、発電周波数の2倍の周波数⁶³で振動するステータ鉄心のバネ支持構造（一般に、たてバネを使用）は、設計・製造および組立てに高度の技術が要求される。

一体構造を基本として、寸法・重量制限を緩和し、製造コストを低減する技術開発の取り組みがあり、柔構造ステータフレーム（コンパクトフレーム）⁶⁴が実現した。この成果は、寸法・重量制限の緩和だけではなく、発電所の基礎台の寸法低減にも寄与し波及効果は大きい。

柔構造ステータフレームは、輸送制限から決まる最大許容外径寸法と鉄心外径間のスペースを、必要機能を維持しながら最小化する設計コンセプトである。すなわち、機内循環冷媒の通風断面積の確保、冷媒ガス容器としてのステータ枠の機械的強度、ステータ枠と加振周波数（発電周波数の2倍）との共振回避などである。これらの実現のために解決しなければならなかった主要課題を以下に示す。

- ・ステータコイル寸法、特にコイル高さ寸法の低減→混合素線コイル、高ストレス絶縁によるコイル寸法低減（5-1-4（Ⅱ）、5-1-5参照）
- ・損失低減による循環風量の低減→リデュースドフロー→低風量・高ヘッドファンの開発（5-2-4参照）

- ・鉄心外径の低減→コイル高さの低減、鉄心の軸方向占積率⁶⁵の向上、鉄心固有振動数の共振回避→鉄心内の通風路面積の低減→リデュースドフロー
- ・ステータ枠の剛性低下→ステータ枠の柔構造化→固有振動数設計値の変更（従来 $Nf > 2f \rightarrow 2f > Nf > f$ 、 f ：発電周波数、 Nf ：ステータ枠の固有振動数）

2極タービン発電機ステータ枠は、鉄心が発電周波数の2倍の周波数（ $2f$ ）で加振されるためにフレーム枠の固有振動数が加振周波数よりも十分高くなるように設計されてきた。高剛性フレームから低剛性化するにあたり3D-FEMによる動的な挙動解析が有効であり、固有振動数を $2f$ と f の両周波数から離調する最適設計が実現できた。さらに、水素冷却機の場合には水素ガス容器としての十分な強度、特に爆発圧力に耐える強度が要求されることから強度解析に加え、モデル試験により信頼性確認を実施している。

2. 大電流ステータコイル

直接冷却コイルでは低損失化を図りながらコイル外形寸法を低減する方法として混合素線コイル、特に中実素線比率の増加と冷媒流量の最少化が確立済みであり、スロット深さ寸法の縮小、ひいては鉄心外径の低減に寄与している。

間接冷却コイルでは高ストレス化による熱抵抗低減、GVPI（6-3-2参照）による熱伝導面積増加、高耐熱絶縁の採用、そして高熱伝達絶縁の適用などによりコイル外形寸法の低減が図られている。

3. 機内循環風量

低損失・高効率化にともなう必要循環風量の低減と流量配分の最適化によるリデュースドフロー技術が確立され、通風断面積の低減、ひいてはフレーム外径の低減に寄与している。

4. 高出力密度と高効率の両立

温度上昇一定の下、発生損失と冷却の最適化により高効率を維持しながら出力密度を上げることによるコンパクト化。

5. 共振現象の回避

ステータフレームの静的・動的挙動解析技術、使用材料、特に積層鉄心の物性値把握、鉄心振動の許容振幅値と離調の程度、ステータコイルエンド支持・固定材料のばね定数の温度特性把握などによりコンパクト

⁶³ [解説] 2極機では強力な電磁石であるロータの磁気吸引力でステータ鉄心が吸引され横に扁平な楕円形に変形し、90度回転した時は縦に扁平な鉄心変形を生じ、1回転でこの様な変形（4節モード）を2回生じる。即ち $2f$ 振動となる。

⁶⁴ H.Ito,M.Tari et al.「Dynamic Characteristics and Design Technology of Turbine Generator Stator Frame」p420 IEEE Trans. EC,Vol.3,No.2(1998)

⁶⁵ [解説] 磁束を流す鉄心長と見かけ上の鉄心長の比率。 $2f$ 振動となる。

設計の実現。

6. 高遠心力下での成立構造

ロータコイルの高電流密度化、高温化にともなう信頼性、耐力の低下を最小化する材料、構造設計技術の確立、特に絶縁物、銅部品の強度検証による設計の最適化とコンパクト化。

7. 高電磁力下での成立構造

ステータコイルの高電流密度化、高温化にともなう信頼性、剛性の低下を最小化する材料、構造設計技術の確立、特に絶縁物、銅部品の強度検証による設計の最適化とコンパクト化。

8. 熱変位の吸収構造

コイルの高電流密度化、高温化にともなう銅材料の熱伸び増加に対する吸収構造の適用による信頼性の維持とコンパクト化の両立。

これらの技術的課題の解決技術の適用による小形・軽量化が実現された。

5.7 輸出競争力

発電機器の総需要の低迷、特定地域・国での一過性とも思える急激な電源開発など、競争激化による一層の低価格時代に突入している。

確立済の技術による資材、製造面での改善努力による製造コスト低減も現実的な対応ではあるが、長期継続は容易でなく限界があり、新たな対応を迫られる。

差別化技術、しかもユーザ、社会ニーズに応える“マーケットプル”技術の確立による対応が強く望まれる。もちろん、その開発技術の適用による製造コストの低減、機器競争力強化は言うまでもない。このような新規な競争力強化技術の出現が今ほど強く望まれる時代は、過去に経験したことはない。

低成長下で需要が期待できる市場としてガスタービン基軸発電システムがあり、リブレースや短期間での新規電源開発としての適用が見込める。この発電システム用タービン発電機は、

- ・ 簡単な構造
- ・ 容易な運転
- ・ 高信頼性（特に多頻度・急速起動／停止運転に対し）
- ・ 低価格
- ・ 短い製造期間

などのキーワードで代表されるような特殊な要求がある。これらの要求に応える発電機は、「下位技術の製作限界容量の拡大」であり、技術のローエンド化である。対応技術として空気冷却機や水素ステータ間接冷却機の大容量化であり、国内の電機製造会社により世

界的にトップレベルの発電機が製造されている。すなわち、従来技術では水素冷却機で対応していた容量範囲（概略50MVA以上）を空気冷却機で最大限カバーすること、ステータ直接冷却機で対応していた容量範囲（概略300MVA以上）を水素ステータ間接冷却機で最大限カバーすることである。

ヨーロッパでは空気冷却機、アメリカでは水素冷却機が採用される傾向にある。国際会議の場で空気・水素論争が何回か持たれたが、依然平行線のままである。ヨーロッパ側は、ガスタービンは冷却水を必要としないことからタービン発電機も冷却水を必要としない空気冷却機が適していると主張し、アメリカ側はプラント効率の改善から効率の高い水素冷却機が最適であると主張している。しかし、現実的には冷却器を内蔵した空気冷却機が多用されており、外気温度で変化するガスタービン出力とのマッチングをとっている。したがって、最終的に空気、水素のいずれを選ぶかは使用側の問題であり、電機製造会社としてはこれらいずれの要求にも応じられる特徴ある技術を準備し備えるべきである。

世界レベルで見ると、空気冷却機は300MVA級機まで実用されており、要素技術としては耐熱クラスHの適用で500MVA級機まで確立済である。日本の製作実績も世界最大級である。これらは主に50Hz機であり、大口径軸の採用、風損を含む損失の低減が容易など60Hz機に比べ条件的に有利であり、大容量化や高効率化が比較的容易であると考えられる。

水素ステータ間接冷却機は、種々の設計コンセプトにより大容量化が検討されている。最大容量機の制限要因はステータコイル電流容量で、高ストレス化による熱抵抗低減、GVPI（6-3-2参照）による熱伝導面積増加、高耐熱絶縁の採用、そして高熱伝達絶縁の適用などが実用されている（6.3参照）。日本の製作実績はステータ間接冷却機として世界最大である620MVA機であり、750MVA級機までの製作可能性が確認されている。これらは、コンバインドサイクル発電プラント用発電機として輸出されている。

空気冷却300MVA級、水素間接冷却600MVA級発電機に係る主要な技術課題を抽出すると次のようになる。

大容量化に対する基本的な考えは他の発電機と同様で、電気装荷の増大による出力密度の増加である。

- ・ 大電流間接冷却ステータコイルの開発
- ・ 短時間昇速・全負荷運転に対するロータの振動安定性の改善
- ・ 発電機通風冷却方式の改善
- ・ 長尺ステータのコイル端部支持法の開発（特に熱伸

びに対し)

- ・高効率化（空気冷却機も）
- ・高い製造性を追求した構造

一例として、コンバインドサイクル発電用2極－50Hz－500MW級タービン発電機について紹介する。

通常火力発電用として既に開発済発電機の容量範囲内にあり、ステータ直接冷却発電機が一般には採用される。しかし、コンバインドサイクル用発電機としての要求から、新しい設計コンセプトに基づく発電機の開発が要求され、ローエンド技術として水素ステータ間接冷却機の開発に着手した。その実現のための最大課題は大容量ステータコイルであり、長期信頼性の観点から高熱伝導絶縁の適用による実現を目指した。通風・冷却改善との組合せで出力密度を従来設計機より約20%増大でき、大口径ロータ軸の採用などによる発電機体格の増大で750MVA級機までの製作可能性を確認している。既に620MVA機まで製作済である。冷媒流路を構成する複雑構造の直接冷却機と比較して簡単構造となっており、製造コストの低減は適用技術のローエンド化により容易になってきている(図5.30参照)。

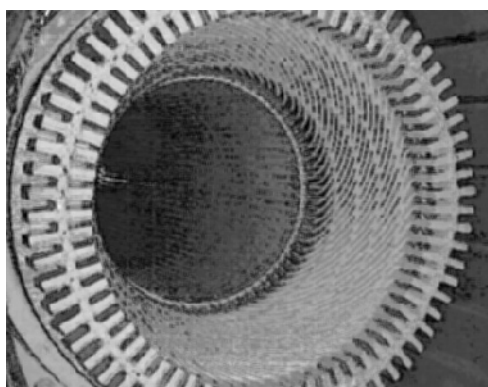


図5.30 高熱伝導絶縁を採用したタービン発電機ステータ

ますます激化する価格競争、そして低労働コストなど好条件の海外の後発電機製造会社の追い上げなど日本にとって輸出競争力の改善は極めて困難な状況にある。“生き残り”のための諸施策が検討されているが、技術面からは“差別化技術”“特徴ある技術”の開発のための一層の取り組みが要求される。

5.8 国際競争力

ボーダーレス、グローバルに時代あって、拡大の見込めない国内市場から海外への進出はすでに始まっており、今後益々電力事業の中心になる。しかし、発電

機器、プラントの輸出は今に始まったことでなく、戦前では植民地や占領国へのインフラ整備として記録的製品も含め多台数が設置された。これは、技術的な側面からみると自主技術検証と実績づくりの貴重な場の提供と言う意義が大きい。

戦後の復興期は、戦前・戦中の技術空白時代の後遺症による大幅な技術の遅れにより国際競争力は完全喪失状態で、むしろ海外電機製造会社の格好の市場であった。海外先進技術の導入、機器輸入に膨大な対価を支払い、導入技術を咀嚼しそれを基礎とて自主技術を確認していった。戦後、輸出が再開されたのは1965（昭和40）年頃であった。当時、国内需要の急増で必ずしも海外市場への進出に注力する必要性はなかった。また、欧米戦勝国でも同じような状況であり国内あるいは隣接諸国への対応で手一杯であった。そのような谷間で緊急的な電源開発を迫られた東南アジア、中近東、中・南米などの発展途上国からの注文に応じて輸出した。コンサルタント会社と契約して作成した要求項目を事細かく記載した部厚い購入仕様書、納期遅れや要求性能未達に対するペナルティー条項などの契約重視の商習慣に必ずしも精通していなかった日本の電機製造会社にとって、予期しないペナルティー負担を強いられるなど苦い経験も多かった時代であった。その背景には、発注はしたものの日本製機器に対する信頼感の欠如、自己防衛上から詳述した仕様・契約条項の読解力不足があったものと思われる。

また、一部の国を除き発注者側にプラントエンジニアリング力が不足しているため、単に機器供給のみではなくプラント全体の発注も一般化しており、所謂「フルターンキープラント⁶⁶」が多かった。これらの輸出の初期に経験したことが後の輸出隆盛時代に大いに生かされたことは勿論である。

その後、自主技術・特徴ある技術・差別化技術の確立、優れた生産システムや卓越した製造技術による生産性の改善、高い品質マインドとシステムによる高品質製品の製造などにより日本の国際競争力は次第に向上してきた。

一方、昨今の世界規模で見た電力ビジネスは多様化しており、輸出競争力にも多くの視点がある。以下に、その主要点を述べる。

1. プラント受注形態

- ・主要機器の供給（現状は、高速回転機のためタービンと発電機は一括発注が一般的である。）

⁶⁶ [解説] Full turn key job plantと呼び、キーを押せば発電できるところまでを契約範囲とするプラント一式の発注形態。

- ・主要機器の供給とプラント全体のエンジニアリング
- ・フルターンキー（システムエンジニアリング力）

2. プラント据付・調整・運転

- ・据付・調整・運転指導・コミッショニング（引渡し試験）
- ・据付指導員（スーパーバイザー）派遣による現地工事会社作業員の据付指導
- ・運転マニュアル作成と運転指導
- ・プラント運転請負
- ・保護・監視システムの提案・受注
- ・プラントアセットマネジメント

3. プラント保守

- ・機器診断・余寿命診断
- ・機器診断・プラント履歴から予防保全の推奨（Up rating, Upgrading）
- ・保守・改修の受注（ストックビジネス）

4. 現地生産

- ・海外電機製造会社／技術者との共同開発と製造
- ・技術提携／供与と製造に関する指導
- ・技術提携／供与による製造委託
- ・主契約者として重要機器・部品は国内生産し、一部を現地生産（受注条件となる場合もある）
- ・2台目以降の全体または高い比率の現地生産（図面など技術図書提供と指導、技術移転の目論み）
- ・製造コスト低減を目的とした全体または一部の海外生産（第三者が運用できる技術図書の整備）

5. 製造受託

- ・欧米電機製造会社からの製造受託（低価格の追求や製造能力を超える膨大な受注量消化）
- ・欧米および電力逼迫国の電機製造会社からの部分的製造受託（機械加工、コイル製造など高い技術力、製造能力による対応）

6. 海外資材調達

- ・世界レベルの資材調達（海外標準材料を使いこなせる技術力）
- ・完成品または部品レベルの海外調達

このように多様化した世界市場での競争力維持と発

展には、未だ解決しなければならない課題は山積している。特に

- (1) 第三者が運用できるレベルの技術図書の整備（内なる国際化の加速）
- (2) 製造環境が国内と異なる製造拠点にマッチした技術の準備
- (3) 運転環境が国内とは異なる海外プラントにマッチした機器・システム設計技術力
- (4) 自ら製造する機会が減少する環境下での競争力ある設計・製造技術の改善能力
- (5) 少人数派遣と現地人化を推進できる指導能力
- (6) 語学力、現地文化を理解し融和できる国際人の育成

などの課題が顕在化してきている。

さらに、日本製品輸出の初期に海外の利用者からの信頼獲得に苦勞し、一度運転してみて高信頼性、高品質を実感してくれるなかで長い時間を掛けて確立した日本ブランド、さらに欧米先進電機製造会社が自国標準品や製造側論理を利用側に押し付けるビジネススタイルに固執する中で個別要求に誠実・丁寧に対応し、しかも確実に応えるなかで日本製品の評価を高めていった地道な取組みを肝に銘じなければならない。昨今、効率最優先の考えで欧米電機製造会社の後追いのビジネスマナーが一般化しつつあるが、「何が日本の国際競争力か？」を原点に立ち戻って考えて見ることも今後の発展に必要と考える。かつて、日本が通ってきた道を現在は立場が代わり「供与する側」になっているだけに何が大切なかがより良く理解できるはずである。

さらに、国際競争力とは日本から海外の市場に出て行くことを前提として考えるならば一考を要する。海外からの日本市場への参入のケースも視野に入れた対策も考える必要がある。「グローバリゼーション（Globalization）」とは、「自由（Free）」「公正（Fair）」「グローバル（Global）」であり、正しく理解し実行動に反映する基本動作こそ国際競争力の強化に不可欠である。

以上、主要対応技術について大容量化を始めとした個々の技術課題の解決技術を詳述してきたが、それぞれは決して単独の命題として与えられるものではなく、相互に密接に関係しながら進展し、その成果は時として複数の課題解決に寄与することも珍しくはな

い。したがって、外部のメーカーをも巻き込んだ総合技術力が要求される。

図5.31に「タービン発電機技術の流れ」を大容量化を主に図示する。

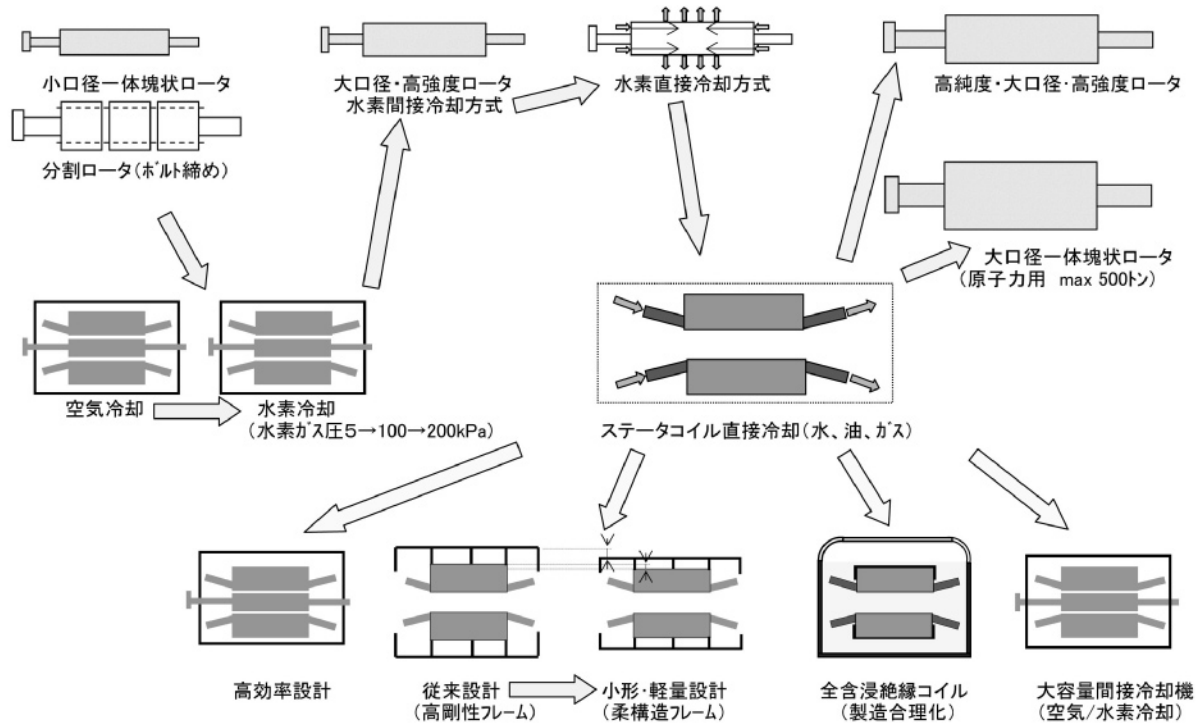


図5.31 タービン発電機技術の流れ

6 | 発電機技術の発達を支えるサポート技術

6.1 タービン発電機用ロータ軸材・エンドリング材

6-1-1 ロータ軸材

火力・地熱発電用タービン発電機では一般に2極機が採用され、そのロータは毎分3,000回転（50Hz機）または3,600回転（60Hz機）し、ロータ軸およびエンドリングには大きな遠心力が働くため高強度材が必要となる。

発電機の大容量化は、ロータの大口径化、長尺化により実現できる。しかし、大口径軸材の製作は関係者の努力にも拘らず急速な進展は見られず、それぞれの時代に入手可能な軸材を工夫して大容量化に取り組んできた。

以下に海外・国内におけるロータ軸材と構造の変遷を概観する。

世界的に見たロータ軸材と構造の変遷

欧米先進国において、現在のような火力発電所建設が始まったのは1900年頃である。一体塊状高強度軸材の製造が困難で、1,500、1,800 min^{-1} の低速回転で運転する4極機が一般的であり、構造上の工夫で解決を図ってきた。

■ 1900－1912年

GE社（米）：比較的低速な堅軸形タービン駆動による突極形発電機⁶⁷

WH社（米）：横軸形タービン発電機、4極機が主で10万kW級まで製作可能、平行溝円筒形ロータ⁶⁸

BBC社（スイス）：ラジアルスロット円筒形ロータ⁶⁹

Bullock社（米）：現用のラジアルスロット円筒形ロータ、Ni-Cr鋼製エンドリング使用（1901年）、1,000kW－1,500 min^{-1} 機完成（1904年）

■ 1913－1923年

現用のラジアルスロット円筒形ロータ構造が主流となる。

■ 1923－1927年

WH社：1923年に当時世界最大4極－43,700kVA－1,800 min^{-1} 機完成

GE社：1924年に4極－62,500kVA－1,800 min^{-1} 機完成

1926年に4極－94,000kVA－1,800 min^{-1} 機完成

この時期、製鋼技術の目覚ましい進歩があり、1,800 min^{-1} 機用ロータとして1924年に最大径1,295mm（51"）、1927年には1,380～1,420mm（55～56"）が実用された。

■ 1927－1937年

製鋼技術の発達により大鋼塊の信頼性が向上し、2または複数の軸からなる分割形ロータ、あるいは多数の円形厚板鍛鋼板を中心軸に積重ね両端から締め付けるロータなどが採用された。これらにより大形化が進み、水素冷却機が採用されるまでこのロータ構造が主流であった。

■ 1938年－

GE社が1938年に水素冷却初号機31,250kVA機を完成してから水素冷却機が広く採用され大形化が急速に進んだ。しかし、軸材の信頼性に関わる問題は未解決であり、米国でも1954年以降に運転中の発電機でロータ破壊事故が数件発生した⁷⁰。その解決に軸材製造会社と電機製造会社で構成された共同研究機関によって徹底的に究明され多くの成果が得られ、発電機ロータ軸材の製造技術は飛躍的に進歩した。

日本におけるロータ軸材の変遷

日本における高強度鍛造軸の技術の原点は、日露戦争（1904～1905年）時代に日英同盟の一環としてイギリスより供与された鍛造技術にある。国力充実のために海軍力の増強が先決と考えて製鋼所設立の声が高まり、兵器の独立を目指して主に大口径砲身の製造に適用されたが、後に高強度ロータ軸材製造に活かされた。この時の技術供与先は日本製鋼所であり、その主力工場である室蘭工場は自然の良港に隣接し岩盤強固で鍛造に適する地であった。工場建物、製造設備はすべてイギリスからの輸入であったが、これらの新鋭設備を使いこなせる優れた技能者の早期育成が大きな課題であった。「技能は技術を基にはしている。しかし、単なる技術の理論ではない。技能はあくまで技能である。」との考えにより「理論を超越した芸術とも言える」技能の確立に取り組んできた⁷¹。

67 [解説] 界磁極（ロータの磁極）が継鉄からギャップに突き出している電気機械。

68 [解説] ロータコイルスロットが互いに平行になるように配置されたロータ。

69 [解説] 軸中心に対し、放射線状にロータコイルスロットを配置したロータ。

70 「最近の大型火力発電用軸材の製造について」日本製鋼技報 No.1 p9～16（1961）

71 「岩のともしび」（日鋼室蘭史話－新訂版）

日本における本格的タービン発電機の製造は1908（明治41）年の三菱造船所製625kVA機に始まったが、タービン発電機用の均質で大形の一体塊状高強度材の製造・入手は困難であった。当時、電気利用の拡大に伴う電力需要増に応じて製造され発電機には主に4極機が採用され、アメリカなどからの輸入技術により分割形ロータ構造で対応していた。一方、2極機には一体塊状ロータを採用し、主に小容量機を製造した。

第二次世界大戦前および戦中は技術的にも孤立したが、自主技術により3,000min⁻¹機用1,000mm、3,600min⁻¹機用900mm級の軸材を製造し、発電機容量でも世界最大級の高速タービン発電機を完成した。

戦後復興の急激な電力需要の増加に対して導入された新鋭火力発電所向け大容量タービン発電機に使用する高信頼・大口径軸材の要求に応じて製鋼、造塊、および鍛造技術は急速に進歩した。

1958（昭和33）年に、日本製鋼所は当時の製鋼技術確認のために75トン鋼塊を製作し不純物成分の一つである硫黄の分布をサルファープリント法⁷²により調査した。その結果を図6.1に示す。



図6.1 75トン鋼塊全断面でのサルファープリント
日本製鋼所 室蘭製作所蔵

硫黄濃化部が、凝固過程における最終凝固部に多く見られ、濃縮部分は鋼塊の品質に悪影響を及ぼすことから製鋼・造塊過程における清浄度の改善は大きな課題であった。

また、製作したロータ軸材の性能確認は軸材各部から採集した小形試験片による特性試験が一般的である

が、試験目的で製作したロータ軸材の胴部（コアー部）から切り出した円盤に実機と同じスロット加工を施し、破壊に至るまで高速回転試験（スピントテスト）を実施した。その結果、実機の回転遠心力に対する破壊強度を確認することができ、その後の製品設計に大きく貢献した（図6.2参照）。

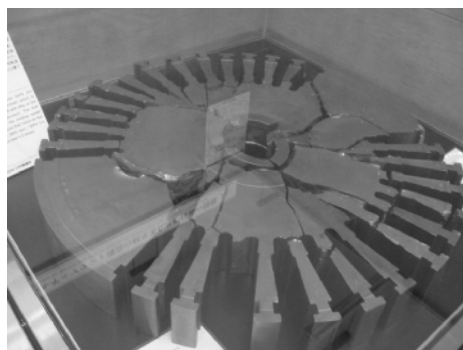


図6.2 回転試験により破壊したタービン発電機ロータモデル
日本製鋼所 室蘭製作所蔵

発電機用軸材は、磁気回路の一部を構成するため以下の特性が要求される。

- ・機械特性・材料強度、靱性・脆性、熱安定性、軸製造性・加工性など
- ・磁気特性・励磁特性（B-H特性）

これらの要求諸特性の達成は、材料強度改善にとり得る手段を限定している。このような制限下で軸材化学成分として炭素鋼→ニッケル添加→モリブデン添加→バナジウム添加→クロム添加されたことにより大形鍛造品の焼入れ性⁷³が改善され、一方炭素量は低減する方向で改良されてきた。不純物成分（硫黄、リンなど）を極力少なくする製鋼技術の進歩も材料特性を向上させている⁷⁴。

1960（昭和35）年以降の真空鋳造法や1970（昭和45）年以降の真空カーボン脱酸法⁷⁵の採用、焼入れ後の冷却法の進歩、化学成分の改良、そして非破壊検査技術の進歩により品質は飛躍的に向上した⁷⁶。特に、製鋼、造塊工程における新技術導入で清浄度は大幅に改善され、特性改善、信頼性向上に大きく寄与した。

軸材の更なる高信頼性・高性能化のための開発は進み、機械的強度および靱性の向上、遷移温度の低下⁷⁷の面から化学成分が検討された。それ以前に一般的に

72 [解説] 鋼塊中に含まれる不純物成分の硫黄を化学処理によって可視化し分布状態をみる試験方法。

73 [解説] 軸材強度を高めるために鍛造過程で急激な温度変化を与える熱処理。

74 小崎久光 電気学会技術報告Ⅱ-85、(1987)

75 [解説] 軸材特性の改善のため酸素成分量を低減する製鋼法。

76 「最近の大型火力発電用軸材の製造について」日本製鋼技報No.1 p9～(1961)

77 [解説] 軸材が特定温度（遷移温度）より低い状態で遠心力を受けると機械強度が低下する。このため、回転上昇前に暖気運転（ウォーミング）することもある。

使われていたNi-Mo-V鋼に1.5～2.5%Crを添加したNi-Cr-Mo-V鋼が1950（昭和25）年頃より採用され始めた。切削性はやや落ちるものの機械強度他の特性が改善され、懸念された磁気特性の低下もほとんどなく従来の軸材と同等であった。図6.3に代表的な軸材の特性比較例を示す。

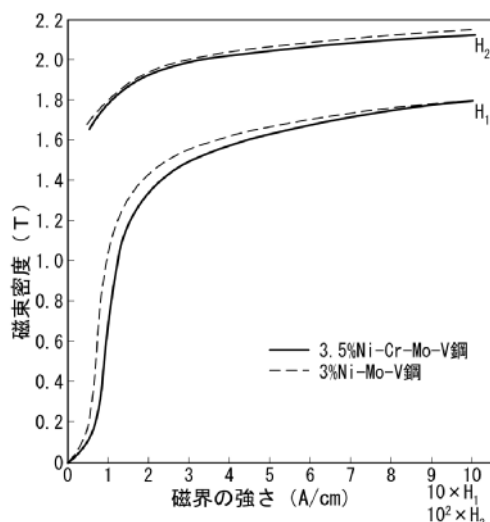


図6.3 タービン発電機ロータ軸材の直流磁化特性の例

タービン発電機の国産が本格化した昭和初期から現在まで2極タービン発電機用ロータ軸径は漸次増加していった（図5.7参照）。

1970年頃より本格導入され始めた原子力発電プラントは、原子炉で多量に発生する蒸気の性質が比較的低温・低圧であり、そして多湿であることからタービン翼の腐食問題を考慮して低速回転が選ばれ、 $1,500\text{min}^{-1}$ (50Hz) または $1,800\text{min}^{-1}$ (60Hz) が採用され、タービン発電機は4極機となる。発電所建設用地の確保や経済性追及からプラント容量は急速に増大し、発電機単機容量も大きくなるため一体塊状大形軸材が必要となった。国内最大容量機である1,300MW級発電機軸材の鋼塊重量は約600トン、外径は約1.8mにもなる。この様な大形鋼塊を造るためには約1,000トンのインゴットを造る巨大製造設備、均質化のための優れた技術が不可欠である。これはタービン発電機だけでなく、原動機であるタービンロータ軸も同じ状況にあった。世界で唯一、日本だけがこの様な大形一体塊状鋼塊を製造でき、国内はもちろん世界的にも原子力プラントの大形化、高信頼性化に貢献している。

今や、最大製造可能重量、性能、および品質において日本の製鋼・鍛造技術は世界トップレベルにあり、タービン・発電機にとって不可欠である重要部材の世界的トップレベルの技術が国内に存在することが、結果的には国内で機器製造会社によるタービン・発電機の大容量化・高性能化に大きく寄与していることをタ

ービン・発電機の設計・製造に関する関係者は認識しなければならない。たとえば、大形一体塊状鋼塊が入手し難い一部の海外機器製造会社では最近まで溶接により一体化したタービン・発電機ロータ、またタービン翼を組立てるディスク状の大口径鍛造厚板を中心軸上に焼き嵌めするロータを採用していた。さらに、入手可能な発電機ロータ軸材の制約下で大容量化要求に応えるため高い冷却性能を有する水直接冷却ロータを採用していた。大容量化要求に必要な主要材料が入手困難であったことが、溶接タイプ軸材の高信頼性接合技術や高精度非破壊検査技術、そして冷却技術の高性能化などの研究開発の推進力となったことも事実であるが、現在これらの構造・技術を採用した機器が新規に製造されることはほとんどなく、日本をはじめとする高品質・大形一体塊状ロータの実現によりそれらの技術の評価が低下していった結果であると思われる。

日本における最大容量と最大鋼塊重量の変遷を図6.4に示す。

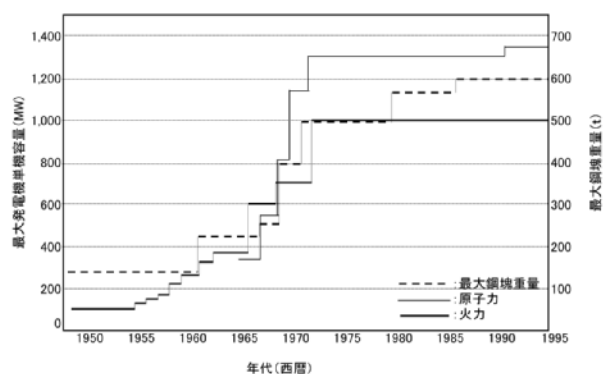


図6.4 最大ユニット容量と最大鋼塊重量の変遷

日本の製鋼・鍛造技術の到達レベルの具体例として2極- $3,600\text{min}^{-1}$ 機として世界最大容量機である1,000MW機のロータ軸材の開発例を紹介する。

2極-60Hz機として最大級であり、この軸材の開発はエンドリング材と共に1,000MWタービン発電機を実現する上で最重要の課題の1つであった。ロータ軸材の信頼性評価は難しく、軸材の大形化に伴いその難度は一層高くなる。したがって、軸材の開発にあたり運転実績を重視し、できるだけ運転実績のある化学成分を採用し、製造方法の改善により機械的諸特性の最大化を図ることを基本方針として開発に取り組んだ。表6.1にロータ軸の試験結果を示す。

運転中の高遠心力に対する十分な安全率を確保するために引張強さで1,000MPa級の高強度が必要である。一般に、高強度化するにつれ靱性は低下するので靱性を低下することなく高強度化を図ることが課題となる。

開発軸材に近い引張強さ950～1,000MPaの使用実績

表6.1 大容量タービン発電機用ロータ軸材の仕様および試験結果

【化学成分】

	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	V
仕 様	0.28 max	0.03 max	0.40 max	3.25 /4.00	1.50 /2.00	0.25 /0.45	0.09 /0.15
試験値 (レドール 分析)	0.27	0.02	0.27	3.87	1.74	0.41	0.14

【機械的特性】

		0.02% 耐力 (MPa)	引張 強さ (MPa)	伸 び (%)	絞 り (%)	FATT (℃)
中心孔 軸方向	仕 様	805 min	981 min	15 min	35 min	-5 max
	試験値	842 /856	1,054 /1,072	18.6 /20.6	59.6 /63.1	-11 min
胴部表面 半径方向	仕 様	800 min	1,000 min	16 min	45 min	-10 max
	試験値	842 /848	1,029 /1,040	20.2 /21.0	66.5 /67.3	-20 min

【磁気特性】

磁束密度(T)			
仕 様	2.12min	試 験 値	2.19

(100,000A/mにて)

のある発電機や低圧タービン軸材をベースとして化学成分の異なる11種類の小形インゴットを作り、シミュレーション試験⁷⁸により要求材料仕様を満足する化学成分、熱処理を調査した。化学成分と熱処理の最適化により機械的強度は増し、Niの増量と不純分元素の除去により高靱性化が図れるので、これらのシミュレーション試験の結果からNi、C、Mn量の最適化と2段調質により高強度化と降伏比の改善を図り、また高純度素材を厳選して使用し、さらに真空カーボン脱酸や塩基性電弧炉による精練で偏析や焼戻脆性の主因となる不純物を除去することにより清浄度と靱性の高い鋼を得ることができた。

これらの調査、開発により機械強度、化学成分が均質な1,000MW機用ロータ軸材の製造に成功した。

6-1-2 エンドリング材

エンドリングはロータコイル端部に働く強大な遠心力を保持するため高い応力を受け、主軸と共に発電機単機容量を制限する重要部位の一つで、特に大口径ロ

ータでは主軸よりも製造難度が高くなる。発電機の大容量化と共にエンドリング外径も大口径化してきた(図5.8参照)

タービン発電機製造の初期には高強度炭素鋼を熱間でリング状に鍛造した材料が使用された。その後、アメリカ、ドイツなどからの輸入技術として冷間鍛造エンドリングが導入された。一説には、エンドリングの冷間鍛造技術はヨーロッパのサーベルの製造技術に端を発すると言われており、冷間で鍛造した時の加工硬化により強度が高まることを利用した加工法である。

従来、磁性エンドリングが一般的に使用されてきたが、1960年に直接冷却ロータが製作された時に非磁性エンドリングが日本でも採用され始まった。磁性鋼の場合、ロータ磁極間の磁束を通し界磁漏洩磁束の増加をきたすこととなる。また、大容量化するにつれて電気装荷が大きくなるため、ステータ鉄心端部の漏洩磁束量が増加し端部鉄心および近傍構造物の過熱の原因となる。このため、端部漏洩磁束の一部となるロータ端面やコイル端部からの漏洩磁束量を低減する目的で磁性材に代えて非磁性材を使用することでステータ鉄心端部への磁気抵抗が増加し漏洩磁束を効果的に低減できる。直接冷却形発電機には非磁性エンドリングの採用は不可欠である。

しかし、高強度の非磁性エンドリングの製作は困難であり、機械的に信頼性のある高強度エンドリングを得ることは発電機製造会社の長年の念願であった。

非磁性エンドリングはNiを主体とするものとMnを主体とするものとの2種類があるが、1960年頃までは大形タービン発電機用として信頼性のあるものを製作できたのは、世界中で西ドイツ(当時)のBöchumar社だけであった。国産が始まったのは1960年代からでMnを主体とするもので、既に引張強さ1,200MPa級(仕様>1,080MPa)できわめて靱性に富んだ優秀なものであった。

非磁性鋼は界磁電流の低減(小形機では定格界磁電流で5~8%減)や損失(鉄損、漂遊損)の低減効果は著しく、小形・軽量化にも寄与できる。しかし、当時では非磁性エンドリングは高価なため他の材料低減では補い切れず、全面採用には至らなかった。

その後自主技術の確立と独自技術の開発が進み、塩基性電炉、ESR(Electro Slug Remelting)による鋼塊の高純度化、特殊工法を採用した冷間拡管加工などにより高信頼・高品質の高強度エンドリングが安定的

⁷⁸ [解説] 化学成分を種々変えた小形インゴットを作り、鍛造・調質・熱処理条件をパラメータとして試験片を製作・試験し、成分や製造の最適化をする方法。

に製造されるようになった。18Mn-5Cr系オーステナイト鋼を使用し、冷間加工率45%以上の適用などにより高強度化が図られた。

しかし、18Mn-5Cr鋼がある条件下で応力腐食割れ(SCC)が発生することが判明し、ヨーロッパで運転中や保管中に破断する事故が発生し(図6.5参照)、新材料の開発が進んだ。その結果、1987年頃より耐SCC性に優れた18Mn-18Cr鋼が採用され始め、現在では新設機は勿論、既設機の交換にも広く適用されている。エンドリング製造過程における高品質化・高強度化技術に加え、完成品の高精度欠陥検出の技術開発も平行的に進められた。この技術は、既に多数の既設発電機に使用されている18Mn-5Crエンドリングの健全性確認に適用され、事故の予防保全とタイムリーな新材料への交換時期の判断に活用されている。



図6.5 運転中の発電機のエンドリング破壊事故例(欧州)

日本は高信頼性・高強度非磁性エンドリング製造でも世界トップレベルにあり、その具体例として2極-3,600min⁻¹機として世界最大容量機である1,000MW機のエンドリング材の開発例を紹介する。

ロータ軸の大口径化に伴い回転遠心力による高い応力に対し十分な安全率を確保するため引張強さ1,300MPa級の材料が必要であり、発電機と軸材製造会社が共同で開発に取り組んだ。

オーステナイト鋼を使用するため冷間加工によって強度の向上を図るが、さらに高強度化するためには素材の性状の向上、化学成分の見直し、および冷間加工率アップなどが必要である。ESRによって鋼塊の性状向上を図り、冷間加工率増と化学成分の強度メンバーである窒素Nの増量により機械強度の増大を図った。

この最適化のため、小形鋼塊による調査の結果を基に1,000MW機用エンドリングと同径の2種類の実機大エンドリングを試作し評価した。1つは高冷間加工率リング(リングA)で、他は高窒素リング(リングB)である(図6.6参照)。これらの事前の調査、評価結果を踏まえ、1,000MW機用エンドリング材の製造に成功した。表6.2に試作エンドリングの試験結果を示す。

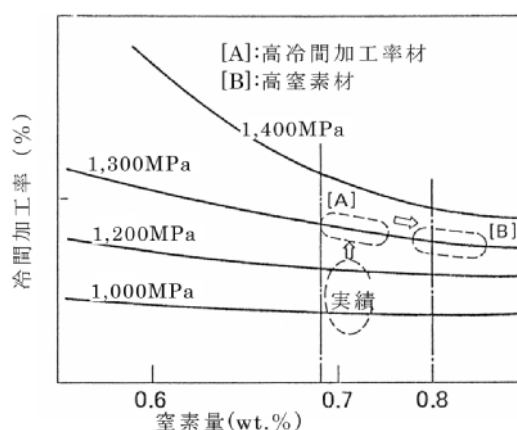


図6.6 エンドリング冷間加工率、窒素量の耐力向上に与える影響

表6.2 大容量タービン発電機用試作エンドリングの仕様および試験結果

【化学成分】

	C	Si	Mn	Cr	N
仕 様	0.13 max	0.60 max	17.5 /20.0	17.5 /20.0	0.73 /0.78
リングA	0.048	0.41	19.70	19.42	0.76
リングB	0.048	0.41	19.70	19.42	0.76

【機械的特性】

	0.02% 耐力 (MPa)	引張 強さ (MPa)	伸 び (%)	絞 り (%)
仕 様	1,250	1,280	14	40
リングA	1,341 /1,379	1,372 /1,409	21.6 /23.8	55.9 /58.7
リングB	1,342 /1,357	1,388 /1,392	19.6 /25.0	58.7

【磁気特性】

	透磁率
仕 様	1.02max
リングA	1.001
リングB	1.001

(800A/mにて)

6.2 タービン発電機用電磁鋼板

6-2-1 電気機器と電磁鋼板の歴史

日本における回転電機の製造は1884年の白熱電灯用5kW直流発電機(三吉電機工場)に始まった。

Hadfield(英)が鉄心用薄鋼板に珪素(シリコン; Si)を添加することにより鉄損を低減できることに注目して珪素鋼板を発明したのが1900年であるから、日本の電気機器製造は珪素鋼板の発明以前にスタートしていた。不純物の少ない純鉄に近い材料が磁気特性に

日本では1924年に珪素鋼板の生産が始まり、1928年以降は国産化が進み次第に輸入品にとって代った。昭和時代初期の技術導入を契機として世界最先端レベルの技術をキャッチアップし、その後の新技術追求と独創的な研究活動により1960年代には世界トップの技術確立し、現在もその座を守りながら高品質な材料を

以下に、これらの時代における電磁鋼板の発展を概観する。



80 新日本製鐵株式会社 電磁鋼板技術部「わかる電磁鋼板」(1985)(注:最新データ追加)

技術導入と国産化開始の時代（～昭和20年）

八幡製鉄所が1924年にB級熱延珪素鋼板（無方向性）⁸¹を製造したのが珪素鋼板国産化の始まりで、その後C級、D級→T-135→T-90へと著しく特性が向上した。1929年にはT級珪素鋼板が市場に出て変圧器を主に使用が拡大し、次第に高グレード品が国産化されるようになった。これらの珪素鋼板は、熱間圧延により製造された。

輸入品との特性差は低グレード材より順次なくなり、昭和時代初期にはT級とD級が主に輸入品で、B級、C級は国産品と使い分けられていた。そして1935（昭和10）年になると全グレードが国産品に切り替えられている。この背景に、国際情勢悪化による孤立で欧米からの輸入が困難になってきたことがある。なお、日本ではA級鋼板はほとんど使用されなかった。

自主技術確立の時代（昭和20年～30年代）

戦前に始まる第二次世界大戦終結までの国際的な孤立は、技術情報、主要材料の入手難など技術的にも孤立状態をもたらした。この間、欧米では軍需による産業の隆盛、電力需要の急増など電気機器は長足の進歩を遂げ、日本は欧米とくに米国に大きく立ち遅れた。電気機器の鉄心材料である珪素鋼板についても同様であった。

大幅な遅れを取り戻し、アメリカと同レベルの性能・品質の製品を作る必要に迫られアメリカから技術導入し先進技術を吸収していった。そして、HowからWhyと問いを変えた自主技術確立の時代へと移っていった。電磁鋼板の開発側から電気機器のニーズ、機器設計へのインパクトを想定した開発に取り組み、自主技術の確立により実現していった。

例えば、変圧器用鉄心材料を見ると1950（昭和25）年頃より珪素鋼板の特性改善の取組みが再開され、T級珪素鋼板の低損失化の研究が本格化した。その結果、T級材料の高性能化がはかられT-95、T-90⁸²が商品化された。当時の鉄心材料の著しい進歩は短期間で実現し、T（T-145相当、1952年頃まで）→T-135（1952年頃）→T-120（1954年頃）→T-95、T-90（1956年頃、特に低損失を必要とする時）と高性能化していった。

戦後の珪素鋼板の進歩は熱間圧延材の改良に留まらず、方向性珪素鋼板⁸³の国産化へと進んでいった。その経緯を次に示す。

1955年頃 八幡製鉄所がY-5製造。鉄損W15/50の

値が1.85W/kg以下

1955年 川崎製鉄所が無方向性珪素鋼板RMの製造開始

1956年 八幡製鉄所が無方向性電磁鋼板ハイライトコアの製造開始

1958年 八幡製鉄所がアームコ社（米）との技術提携により方向性珪素鋼板の製造開始

1958年頃 八幡製鉄所製方向性珪素鋼板（Z）のグレード：Z-11～Z-17

当時、製品の特性は安定せず、良いものは輸入品と同等であったが、全体的には特性のバラツキは極めて大きかった。バラツキは年々小さくなり、1962（昭和37）年頃にはZ-10あるいはZ-11の特性が安定的に得られるようになった。

方向性珪素鋼板の国産化により主に変圧器に使用されていたT級熱延鋼板は方向性珪素鋼板にとって代られ、1967（昭和42）年に生産を中止した。

電磁鋼板は、その使用量から主として変圧器の要求に応じて技術的進歩や改善がなされてきたが、その成果は回転電機的设计・製造にも生かされた。1950（昭和25）年頃までは、次に示すような回転機への適用であった。

- ・中小容量機……………B、C級（熱延珪素鋼板）
- ・発電機など大容量機……D級（熱延珪素鋼板）

ただし、大容量水車発電機などには変圧器用のT級が採用されている。

Si添加量の多いT級鋼板は低鉄損の電磁鋼板であるが、機械的には脆く繰返し曲げ回数が0回のももあり取扱いが困難であった。しかし、鉄心打抜きや組立てなどの製造技術の進歩により積層鉄板が問題なく行われるようになり多用されるようになった。

タービン発電機の鉄心材料は主としてT級材料が使用されてきた。戦後、海外電機製造会社との技術提携により新鋭火力発電プラントが導入され、100MVA超機が相次いで製造されるようになった。タービン発電機も高効率化が要求されM6X、M7Xなどの輸入方向性珪素鋼板材が使用されるようになった。1959年に製作された姫路火力160MVA機に国産発電機として初めて輸入方向性珪素鋼板が採用された。

1962年頃から輸入材に代わって国産のZ-11が採用された。国産方向性珪素鋼板のタービン発電機への採用

81 [解説] 無方向性電磁鋼板 鋼板の特定方向に偏った磁気特性を示さないように、各結晶軸方向を出来るかぎりランダムに配置させたもの。

82 [解説] 数字は、鉄損W10/50が0.95あるいは0.90W/kg以下の保証を示す。

83 [解説] 方向性珪素鋼板 結晶の磁化容易軸を出来るかぎり圧延方向に揃えたものであり、鋼板の圧延方向にすぐれた磁気特性を示す。

表6.3 日本における電磁鋼板の歴史

西暦	(年号)	国 内	海 外
1900	明33		ハドフィールド(英)電磁鋼板発見
1903	明36		米・独工業生産着手
1905	明38		米国にて電磁鋼板商品化
1924	大13	B級電磁鋼板の製造開始(八幡製鉄所)	
1931	昭 6	B級電磁鋼板製造開始(川崎重工)	
1934	昭 9		ゴス(米)「方向性電磁鋼板」発明
1935	昭10		米国「方向性電磁鋼板」工業生産
1953	昭28	T級電磁鋼板製造開始(八幡製鉄所)	
1955	昭30	無方向性電磁鋼板RM製造開始(川鉄)	
1956	昭31	無方向性電磁鋼板ハイライトコア 製造開始(新日鐵)	
1958	昭33	方向性電磁鋼板製造開始(新日鐵)	
1983	昭58	無方向性電磁鋼板H6製造開始(新日鐵) レーザー照射極低鉄損方向性電磁鋼板製造	

が変圧器に比較して遅れたのは、回転電機特有の鉄心内磁束の流れ方（回転磁界）による鉄損増加から輸入材と同等のものを必要としたからである。川崎製鉄製RG-11が生産され始めると輸入品と併せて採用された。

タービン発電機の鉄心材料の変遷をまとめると次のようである。また、表6.3に日本における電磁鋼板の歴史を示す。

1957年頃まで T-120、T-95、T-90

1957年頃～ M6X、M7X（輸入材）

1962年頃～ Z-11、RG-11

電磁鋼板の特性改善のほかに、製造上の課題解決も図られた。鋼帯から必要形状にプレスにより打抜き後、積層後の抜き板間の導通（相間短絡）による短絡循環電流や渦電流を防止する目的で表面に絶縁ワニス焼き付ける。珪素鋼板は、一般に積層後に締め付け圧力を増すと鉄損は増加傾向を示すが、逆に方向性珪素鋼では圧延直角方向の損失は減少する。このような現象は層間電気抵抗の低下だけでは説明できず、鋼板の平坦度に起因すると推察された。

鋼板表面には僅かの凹凸があり、積層後の締め付け時に押圧され面内方向の圧縮および引張り応力を生ずる。この内部応力が鉄損増加の原因となるため、珪素鋼板の平坦度の改善が必須である。このような観点から国産珪素鋼板は、極めて良好な平坦度を確保するように改善されてきた。また、電機製造会社も鉄心締め付け構造、作業法の改善を図り、素材特性とほとんど同等の鉄損特性を引き出せるまでになった。

高度成長と機器大容量化の時代（昭和40年代）

昭和40年代の高度経済成長期には、急激な電力需要

の増加に対応して機器の高電圧・大容量化が進展した。1968年に変圧器用材料として高配向性珪素鋼板（Hi-B）が開発され、日本の珪素鋼板の性能は世界のトップレベルとなった。

特に、オイルショック後に省エネルギーの必要性が広く認識され、多くの国々で損失評価制度が採用されるようになると高性能珪素鋼板の重要性は一段と高まった。

図6.8に電磁鋼板の種類による損失の比較、図6.9に無方向性・方向性電磁鋼板の磁束密度と損失の比較例を示す。

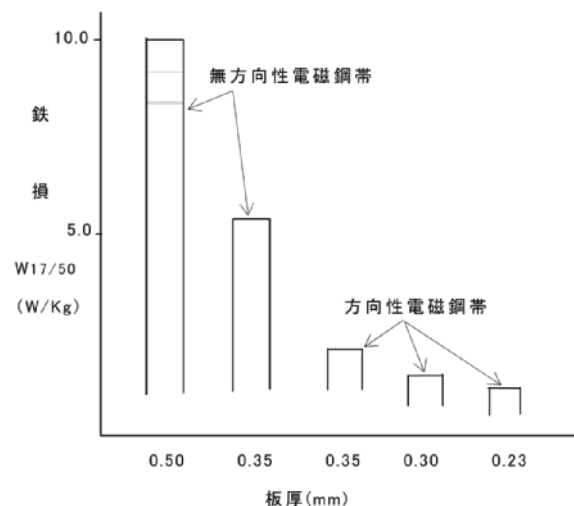


図6.8 電磁鋼板の種類による鉄損の比較

省エネルギーと損失低減の時代（昭和50年代～）

省エネルギー化の要求は大形回転機用の高グレード無方向性珪素鋼板の開発を促し、低損失材が開発された。また、方向性珪素鋼板も高性能化されZ-11、RG-

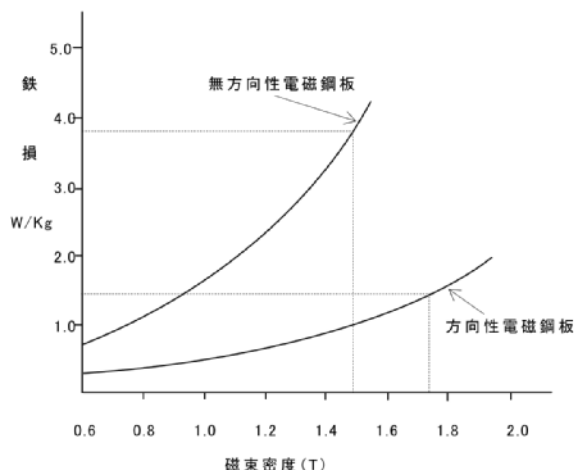


図6.9 無方向性・方向性電磁鋼板の磁束密度と損失の比較例

11よりも低損失はグレードが安定的に製造できるようになった。

また、昭和50年代は石油危機を契機に省エネルギーの重要性が広く認識されるようになった時期でもある。そして電気機器の課題も高信頼化・小形軽量化主要となり、低損失化が強く叫ばれた。

高性能化した無方向性・方向性珪素鋼板のいずれにより鉄損低減を図るかは電気製造会社の伝統的な設計コンセプトがあるため一概に決めることはできない。しかし、小形軽量化と高効率化の二つの課題の解決には方向性珪素鋼板の方が有利である。特に、ステータ直接冷却の場合はスロット深さ寸法を比較的小さく出来るためティース部鉄心体積が少なくなることから、特性の低い圧延直角方向に磁束の流れるティース部の鉄損を低く抑えることができる。

しかし、ステータコイル間接冷却の場合にはコイル内発生熱がティース部に伝達された後に冷媒ガスと熱交換されるため、その熱伝達パスであるティース部の損失は極力抑える必要から高性能無方向性電磁鋼板の方が適している。いずれにせよ、高性能電磁鋼板使用による“掛ける費用”と“得られるメリット”とのトレードオフで材料選択することになる。その得られるメリットとして損失評価 (Loss Evaluation) 制度がある。

発電機の損失を初期価格に換算する評価方法で水力発電を始めとして世界の電機製造会社は効率競争に突入した。機器の初期価格が多少安くとも損失が大きければランニングコスト (運転コスト) が高くなり、耐用期間におけるトータルコストはかえって高くなってしまふ。つまり、損失評価制度とは損失1kW当りの評価金額を予め決め、初期価格との合計が低い機器を選ぶシステムである。しかし、火力発電ではタービンの熱効率が低くプラント効率をほぼ決定し、発電機効率は元来高効率であることから水力発電ほど損失評価は

採用されず、特に日本では損失評価制度は一般化しなかった。しかし、発電機設計技術者の高効率化への取り組みと使用側の理解により評価金額は低いが一部で採用されはじめた。

鉄損は発電機出力に関係なくほぼ一定となる所謂固定損であり、その低減の効率改善効果は大きい。鉄損は、設計・製造上の改善と低鉄損材料の採用により低減できる。前者の最適化に加え、高性能電磁鋼板の採用が一般的である。すなわち、低磁束密度化は単位体積当りの鉄損は低い鉄心体積も増大するため効果的に鉄損が低減できないので低鉄損材料を採用することになる。

このような高性能電磁鋼板の採用と他の損失低減技術との組合せで定格出力において99.00%以上の保証効率を実現し、しかも重量・寸法も大幅に低減した世界的にも最高レベルの効率と小形・軽量化された発電機を実現している。

6-2-3 今後の電磁鋼板の高性能化

今後の低損失・高性能電磁材料としてアモルファス磁性合金が将来的に考えられる。溶融した母材を超急冷することにより作られる厚さ20~30 μm のアモルファス磁性合金は、方向性珪素鋼板の1/3~1/5という極めて低鉄損失の材料で、その出現は製造側および使用側に大きなインパクトを与えた。

現行の珪素鋼板を用いて、磁束密度を下げることで鉄損を1/3程度にすることは、現実的に極めて困難である。このような観点からも、アモルファス磁性合金は鉄損低減を強く要求される用途に適した材料と言える。

しかし、アモルファス磁性合金は珪素鋼板の80%程度の飽和磁束密度であることから、これを用いた電気

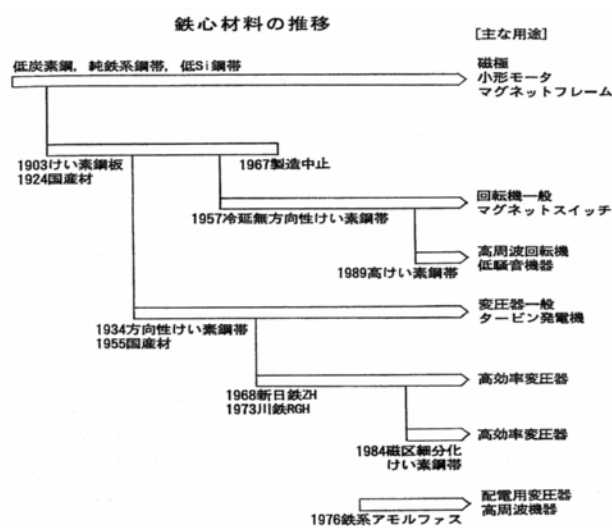


図6.10 鉄心材料の推移と主な用途

機械はどうしても寸法が大きくなる傾向となる。したがって、銅損よりも鉄損低減が重要なファクターを占める機器にその適用が適している。また、発電機のような回転電気機械では電磁鋼板を使用する部位は機械的強度を要求されることからアモルファス磁性合金による構造成立性が解決しなければならない課題である。

このようなアモルファス磁性合金の影響を受け、方向性珪素鋼板の低損失化に対する研究も加速された。板厚を薄くした高透磁率珪素鋼板、磁区細分化した珪素鋼板などの出現はこの一例であろう。

鉄心材料の推移と主な用途を図6.10にまとめて示す。

6-2-4 珪素鋼板がタービン発電機設計・製造に与えた影響

電磁鋼板の高性能化はタービン発電機の設計・製造ならびに運転面の多くのメリットをもたらした。タービン発電機へのメリットは、

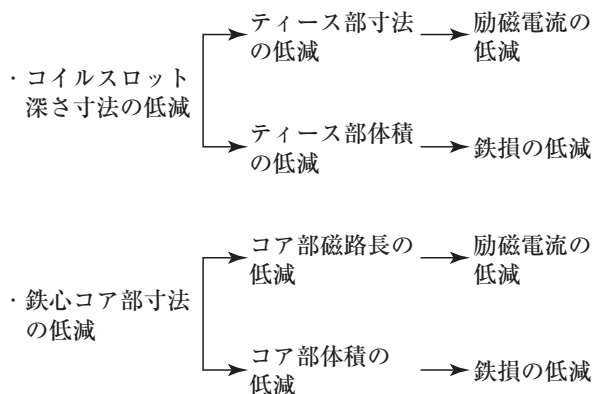
- ・小形・軽量化
- ・大容量化
- ・高効率化
- ・信頼性の向上
- ・製造性の改善

などが挙げられる。

電磁鋼板に関する多くの革新技術の中で、特に戦前の珪素鋼板と戦後の方向性珪素鋼板の実用はタービン発電機の大容量化、高効率化、および高信頼化に大きく寄与した。以下に、電磁鋼板側から見た主なメリットについて詳述する。

小形・軽量化

タービン発電機の小形・軽量化の設計的な実現方法は種々あるが、電磁鋼板の高磁束密度化は有効な手段である。高磁束密度・低損失な電磁鋼板の採用による発電機基本設計上の変化は以下になる。



方向性電磁鋼板を使用する場合、優れた磁気特性を有する圧延方向と鉄心コア部の磁束の流れる方向が一致するように扇形に打ち抜き、積層するために高磁束

密度化が可能となり、鉄心コア部寸法が低減でき、結果的には鉄心外径を小さく出来る。一方、ティース部は必然的に圧延直角方向となり、その磁気特性は従来の無方向性珪素鋼板並みとなるため、ティース幅の低減は期待できない。この場合、ステータコイルの高密度設計などの合理的設計によりコイル寸法の縮小を図り、結果的にスロット寸法縮小に伴うティース部長や体積を低減する方法との組合せが必須である。

一方、高性能無方向性珪素鋼板を使用する場合、鋼板の特定方向に偏った磁気特性を持たないためティース部、鉄心コア部の高磁束密度化が可能となり、両部における鉄損、励磁電流の低減をバランス良く実現できる。しかし、その磁気特性は、方向性電磁鋼板の圧延方向磁気特性と比較すると劣るため鉄心外径の低減効果は小さくなる。

図6.11に日本の電磁鋼板の消費量（国内向け）と発電電力量の推移を示す⁸⁰。日本の「電磁鋼板の消費量」と「発電電力量」の推移はよく類似している。電磁鋼板の需要量は電力エネルギーの総使用量に比例し、国民総生産にもほぼ比例すると考えられる。しかし、最近のデータでは電磁鋼板消費量の“減”に対して発電量の“増”の現象が見られるのは省エネルギーの徹底化と、電磁鋼板の高性能化によって電力機器が小形化していること等が考えられる。

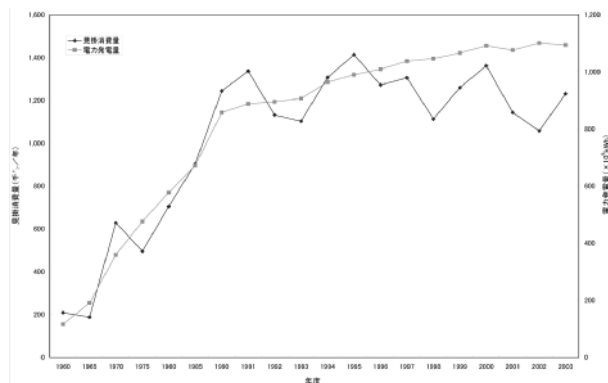


図6.11 電磁鋼板の消費量（国内向け）と発電電力量の推移

大容量化

前項で高性能電磁鋼板の採用による小形・軽量化について述べたが、換言すれば高性能電磁鋼板の採用はタービン発電機の製作可能限界容量の拡大に寄与する。大容量タービン発電機の限界容量を制限する要因は多々あるが、ステータの設計・製造もそのひとつである。主な課題として以下がある。

- ・最大重量の低減による輸送制限の解決
- ・必要機内循環冷却風量の低減による機内冷却システムの成立

記録的な大容量タービン発電機の設計・製造は、そ

の最大輸送重量物であるステータの外形寸法・重量を輸送制限内に収めるかの検討から始まる。

その解決法は幾つかあるが、高密度コイル設計と高磁束密度化によるステータ鉄心外径寸法・重量の軽減が不可欠である。特に、高性能電磁鋼板による鉄心のコンパクト化効果は大きい。

信頼性の向上

タービン発電機の信頼性に影響を与える要因は多々あるが、それらの中でステータ鉄心に関わる課題も多い。しかも、これら鉄心に関わる要因は一度問題が発生すると大事故に発展する可能性が大である。主要要因を下記する。

- ・鉄心抜き板間の層間短絡による循環電流・溶損
- ・積層鉄心の電磁振動による過大振動・騒音

ステータ積層鉄心は、運転時の電磁力による電磁振動を受ける。このために、鉄心積層時に十分な面圧が確保できるように押圧される。もし、残存面圧が不足した場合には振動振幅が増大し、抜き板間での相対的変位により鉄心絶縁が摩損し層間短絡を生じる。また、鉄心の局所的な過熱、特に鉄心端部近傍の軸方向漏れ磁束による過熱などにより鉄心絶縁が熱劣化した場合も同様な問題を生じる。

抜き板間絶縁として紙絶縁が用いられたこともあったが、一般には打ち抜き後の抜き板表面に耐熱性絶縁ワニス焼き付けの方法が採用されてきた。この鉄心絶縁ワニスにシリコン微粒子を入れ、ワニス熱的に消失してもシリコン微粒子により間隙ができ層間絶縁を確保できるように工夫されている。

これとは別に、電磁鋼板製造の熱処理過程における製造上の理由もあって絶縁皮膜が施されている。抜き板製造時の適切な処理に加え、電磁鋼板製造時の絶縁皮膜の改良により抜き板間の層間絶縁の信頼性は大幅に改善された。

ただし、過度の絶縁皮膜は鉄心占積率の低下⁸⁴を招くため最適化が必要であり、この要求にも十分応えるように解決されている。

電磁鋼板表面の絶縁皮膜がプレス打ち抜き性を損ない易く、切断面のバリの発生や打ち抜き型の短時間摩損の原因になるため、製造性向上の面からの改善が望まれる。冷間圧延無方向性珪素鋼板では、これらの問題はほぼ解決されているが、方向性電磁鋼板では一層の改善が望まれる。

磁気振動に関わる問題も重要な課題である。特に、2極タービン発電機ではその鉄心振動モードから振動振幅が大きく設計・製造上の対策が必要である。

すなわち、ステータ鉄心はロータの回転に伴い4節振動⁸⁵が発生する。ステータ鉄心は打ち抜き鉄心を厚肉円管状に積層した構造であり、高性能電磁鋼板の採用により鉄心コア部寸法が低減し薄肉化した場合には積層鉄心の固有振動数が低下する。固有振動数が電磁振動の加振周波数に近接すると共振現象により過大な鉄心振動・騒音を生じる。特に、大容量機の場合にはステータ鉄心径の増加、鉄心重量の増加、そして積層鉄心の剛性不足などにより固有振動数が低下傾向にあり、設計・製造上の細心の注意が必要である。固有振動数が加振周波数から十分離調さない場合には抜き板の相対的変位による鉄心絶縁の摩損で経年的に鉄心短絡、場合によっては鉄心溶損などの重大事故に至る。

使用側の解決に加え、電磁鋼板自身でも絶縁皮膜の改良など製造側での改良もなされてきたが、さらなる取り組みが望まれる。

6-2-5 電磁鋼板の高性能化に取り組むメーカーの取り組み⁸⁶

電磁鋼板製造会社は世界的にもトップの座を確保した現状に満足することなくさらに使用者の視点に立ち技術力向上に取り組んでいる。以下に、その主要点を紹介する。

(1) 利用技術の提案力

「商品開発力」「製造技術力」に加えた利用技術の確立と提供の取り組みである。

鋼板を加工し電気機器に利用する段階で、結果的に特性低下させ損失増加を招くことがある。例えば、鋼板を加工し組立てるまでの鉄損悪化要因は複雑であり、鉄心の構造、鋼板の打ち抜き方法、積層方法、固定方法など様々な要因によって鉄損悪化の程度が大きく左右される。これらの悪化要因を定量的に把握することは一般的に難しく、経験とノウハウに頼っている。電磁鋼板が使用される条件における材料特性を織り込み、設計の効率化、高度化を可能とする技術を提供している。電磁鋼板に精通した製造側が、材料開発に加え材料の機能を最大限発揮する利用技術の利用者への提案である。

(2) 特殊用途に適合する電磁鋼板の開発

高度に発達した対応技術力により従来ややもすれば相反する特性要求で実現が困難であった材料要求

⁸⁴ [解説] 見掛け上の積層鉄心長に対する磁束通路となる鉄心部分の比。

⁸⁵ [解説] ロータの磁気吸引力によりステータ鉄心は変形し、ロータが1回転する間に回転周波数の2倍で振動する時の振動モード。

⁸⁶ 「Nippon Steel Monthly」p1～8 新日本製鐵株式会社 2004年8・9月号

に呼応した新規性のある材料開発に取り組んでいる。例えば、電磁鋼板の市場として飛躍的な伸びが期待できる分野のひとつとして自動車分野（ハイブリッドカー）がある。ハイブリッドカーでは、低速域から高速域まで幅広い条件で使用する、低速時には高いトルク（回転力）が、高速時には低損失が要求される。

通常、鉄損の低減には珪素を添加するが、一方では磁束密度の低下を招き、さらに機械的強度も低下することがある。自動車用モータ電磁鋼板は、低損失かつ高磁束密度、さらに高速回転時の遠心力に対する高い機械的強度が要求されるが、従来技術では高強度化することにより鉄損が増大した。これら相反する課題を解決した「高強度電磁鋼板」を開発され、今後環境問題や省エネからますますニーズが高まるハイブリッドカーの普及に寄与している。

なお、この技術は一般産業電動機分野においても増加の一途にある交流可変速電動機においても、従来の高磁束密度指向の電磁鋼板から広周波数帯域における低損失化にも適用できる。

従来ややもすれば特定ユーザからの強い要望に応えた開発、あるいは電磁鋼板製造側の電磁鋼板の視点のみでの製品開発から脱却し大きく変身した電磁鋼板製造会社の研究開発が背景にあり、結果的には電磁鋼板の進化を加速した。

高い素材特性を実現する材料技術に加え、その素材がどのような構造、用途、環境で使用されるか常に常に意識した開発をすることで、高度で多様なニーズに対応した電磁鋼板を提供し続けられる。

昨今、ややもすると高度に専門化し分野別の研究機関が一般化しているが、総合研究所に製綱・圧延をはじめとする一貫製造プロセス、計測制御や数値解析シミュレーション、加工技術、解析技術、新材料開発などの関連研究部門が一箇所に集結し、迅速な連携・交流が図れる体制を構築して研究の効率化を図っている。

さらに、生産現場である製鉄所にワークスラボを配置し、現場に直結した研究を行うことにより、圧延工程や焼鈍工程に始まる全製造工程の最適条件出しが迅速かつ的確に行えることから製品特性の向上が図れる。換言すれば、新商品の実用化に際し自ら現場に立ち、現場スタッフとの綿密な連携により生産ラインでの課題解決に取り組む基本動作を遵守している。

脈々と受け継がれてきた技術の蓄積をベースとし、研究開発のスパイラル効果により電磁鋼板技術の向上に取り組んでいる。

6.3 タービン発電機の絶縁材料・絶縁技術

6-3-1 マイカ材料

固体絶縁の主要材であるマイカは、無機化合物のひとつで、Si-Oを骨格に持つ珪酸塩類で高分子固体構造を形成し、化学的に安定した耐熱性絶縁材料として広く使用されてきた。

マイカは岩石として自然界に存在しており、珪素四面体（Si-O₄）が層状に配列し、この層間にAlやMgなどが入ってサンドイッチ状の雲母層をつくり、この雲母層間にKが入った構造をした板状結晶で、薄片にはがれやすい。電気絶縁性、耐熱性、機械的強度に優れ、かつ耐部分放電性、耐トラッキング性がよいなど電気絶縁材料として優れた点が多く、回転電気機械のコイル絶縁、特に高電圧が印加されるステータコイルの絶縁材料として古くから使用されてきた。

世界的に見るとイゾラ社（スイス）が1903年に世界で始めてはがしマイカを使用したマイカテープを開発・製造している。そして、1909年には接着ワニスの製造を開始し、今日広く使用されているコイル絶縁方式の基礎ができあがった。

マイカは、当初原産地で手作業により竹べらなどを使ってはがした薄箔状マイカ、所謂“はがしマイカ”として出荷され、マイカ箔だけを貼り合わせたマイカシート（マイカナイトと呼ぶ）や繊維を基材としてマイカ箔を接着ワニスにより貼着したマイカテープに加工して使用された。また、良質のマイカ原石が豊富で、不純物・異物の少ない大判のマイカ片（ゴールデンマイカと呼ぶ）が入手できた頃は、マイカ片のみを貼着したマイカ積層板を絶縁構造部材として使用することもあった。初期においては、このようなマイカ貼着作業はすべて手作業で行われた。

その後、良質マイカ資源が次第に枯渇し低品質マイカ資源の活用法が研究された。それは、異物を含んだ原石や小片の原石などの所謂“くずマイカ”を粉碎し良質部分を取り出し利用する方法である。マイカ片を高圧水により機械的に粉碎する方法や焼却して雲母中の結晶水を除去した後に粉碎する方法により微細化したマイカ鱗片を水中に浮遊させ「紙抄き」の要領で連続的に薄膜状にした集成マイカ（マイカペーパー）が実用化された。

回転電機用高圧絶縁システムの歴史は、マイカ材料を接着剤により一体化し、絶縁システムとして以下に示すような諸特性を実現するかの変遷である。



6-3-2 ステータコイル絶縁

日本で最初の回転電機は1884年に製造されたが、当時は回転電機に必要な軸材、電磁鋼板、絶縁銅線、そして絶縁材料など全てが不足していた。1887年には国産初の営業用火力発電所向け200kW交流発電機が製造された。1908年に国産1号タービン発電機である三菱佐渡鉱山向け625kVA機が製造された。

当時は、ステータコイルは絹巻き絶縁銅線を導体とし、対地絶縁としてはがしマイカを使用しシェラックワニスで接着した。

1910年代後半には単機容量で1,000kVAから数万kVA級発電機が製造されるようになったが、これらは海外電機製造会社との技術提携によるもので、絶縁技術や絶縁材料も輸入された。

大容量化に伴い発電機定格電圧は次第に高くなり、優れた電気絶縁特性のコイル絶縁技術が必要となった。さらに、大容量化、小形軽量化に伴い増大してきた熱、電界、機械的ストレスなどに耐えるように高電圧回転機の絶縁技術⁸⁷⁾は大幅な技術革新が図られてきた。

高電圧が印加されるステータコイルでは黎明期を除き一貫して耐電圧特性に優れたマイカを使用し、緻密な絶縁層を形成する努力が払われてきた。大正時代中期頃から製作され始めた11kV級絶縁では、はがしマイカをシェラックなどの天然ワニスで貼り付けた絶縁方式が用いられていた。

1935（昭和10）年頃までに、熱可塑性で耐電圧の高いアスファルト系コンパウンドをはがしマイカ層に真空加圧含浸することで絶縁層内ポイドを少なくし、絶縁性能、熱伝導性やコイルの熱膨張に対する順応性にも優れた絶縁方式を完成し、一時期を画した。

しかし、第二次世界大戦直後の逼迫した電力事情により発電機を過負荷で運転したこともあって、絶縁破壊事故が続出した。さらに、一層の大容量化に対処するために高性能な絶縁方式の開発を必要とした。

これに対して、大戦後の合成樹脂化学の著しい発展に伴い多くの新しい絶縁材料が登場してきた。アメリ

カで不飽和ポリエステルレジンをはがしマイカ層に真空含浸、加熱硬化した優れた絶縁方式を完成したのが契機となり、国内でも 1955～58年頃には各社とも不飽和ポリエステルレジンをはじめとする、無溶剤レジン⁸⁸⁾の絶縁方式を大形機に適用した。

引き続いて、さらに接着力、耐熱性に優れたエポキシレジンを用いた絶縁方式を昭和30年代後半より導入し始め、現在ではほぼ全面的にエポキシレジン方式となっている。

マイカも昭和30年頃に開発された集成マイカが量産性、均質性に優れていることからはがしマイカと共に広く使用されるようになった。この間、コイル単独の真空加圧含浸法、レジンリッチ法やステータ巻線の全含浸法などの絶縁処理方式が開発され、無溶剤レジン⁸⁸⁾の使用を可能にした。

一方、絶縁の信頼性評価についても、絶縁試験法の確立、反応速度論⁸⁹⁾を取り入れた耐熱性評価、部分放電劣化現象とV-t特性によるその評価、熱サイクル、繰り返し曲げ荷重による劣化現象の解析などの進歩があり、絶縁劣化診断や複合劣化についての研究が進みつつある。

昭和時代初期に始まり終戦後までは耐熱クラスBのアスファルト系コンパウンド絶縁が使用されてきたが、現在ではHクラス絶縁も開発・実用された。この高性能絶縁では、運転電界も従来絶縁の2.5倍近くにもなり、定格電圧は実用レベルで25～30kV、技術開発は30kV超絶まで確立されており、ほぼ完成の域に達した感もある。

しかし、燃料や原動機運転特性などによる発電プラント運用パターンの変化、ライフサイクルコストの削減、超電導発電機のような新コンセプト機の出現、そして環境問題への対応などの要求から、さらに過酷で、特殊な環境下での使用に対し耐力のある絶縁システムが必要であり、その開発課題は多い。

さらに、戦後に建設された新鋭火力発電プラントや火力勃興時代に建設された多数の大容量発電プラントが設計機器寿命に近づいており、これらの保守が重要課題である。経年劣化しやすい部位の一つが絶縁であり、特に運転の安全性確保からステータ絶縁が重要である。その後の運転の安全性を左右する絶縁の健全性判断のための評価試験方法、それらの測定データに基づく高精度の余寿命推定技術の確立が緊急的な課題

⁸⁷⁾ 電気学会「電気学会100年史」p222（1988）

⁸⁸⁾ [解説] 絶縁の長期間の熱劣化特性を評価する試験法で、通常運転時より高温で一種の熱加速劣化試験を行い、その結果で通常運転における寿命を推定する。

である。これらの余寿命推定技術は安全な運転継続期間の推定、あるいは延命のための補修に関する的確な情報を提供できる。特に、要因別の劣化速度データの蓄積により、その後の運転モードが変更される場合の使用可能時間に関する情報も提供可能でありタイムリーな補修計画に寄与する。

日本は電機製造会社と利用者との情報授受が比較的多く、その分運転経過後の発電機絶縁状態に関するデータ量が多く、劣化理論と実際の対比が容易であることから日本の余寿命推定技術は世界的にもトップレベルにある。

最近では、運転中のコロナ放電データをPCレベルでパターン認識し、その特徴から絶縁状態を診断する方法が一般化しており、多くの取り組みがある。

これらの面からも余寿命推定技術の確立と精度向上は緊急的な課題である。

6-3-3 ステータコイル絶縁の事故例と解決技術

新発絶縁システムの長期信頼性を開発段階で評価する方法は、一部加速試験法などが確立されているが、運転中の複数の劣化要因を複合的に考慮した高精度の試験法の確立は困難を極めている。したがって、不幸にして運転中の発電機に絶縁事故が発生した場合、その解決やさらなる信頼性向上などの検討過程で革新的な技術が創出されることも多い。このように「負の資産」を「正の資産」にした過去の重要な絶縁事故と解決を以下に紹介する。

ガースクラック (Girth Cracking)

一般に大容量化と共に鉄心長(コイル直線部長)も長くなってくる。アスファルトコンパウンド絶縁の場合、経年的にステータ鉄心端出口部近傍の絶縁層に全周に亘って環状クラックが発生する(図6.12参照)。鉄心長が略4 m超の発電機に発生しやすいことから、コイル導体と絶縁層間の熱伸び差に起因する繰り返しの応力、コイル直線部の熱伸びがエンド部の締結により拘束されるためその中間点に位置する出口部近傍の応力



図6.12 アスファルトコンパウンド絶縁のガースクラックの例

集中などが考えられる。しかし、基本的な問題としてアスファルトコンパウンド絶縁の機械的強度不足がある。この他に直線部熱伸びに応じコイル端部が軸方向に移動するスライド機構付ステータコイル端支持方式の適用が必須である(5-1-6参照)。

熱劣化による絶縁層の膨張・内部ボイド

アスファルトコンパウンド絶縁は、導体に巻回したマイカ層に熱可塑性のアスファルト系コンパウンドを真空加圧含浸し一体化した絶縁で、絶縁性能、熱伝導性やコイル熱膨張に対する順応性にも優れており、15kV級までの絶縁を可能とした。しかし、アスファルト系コンパウンドの耐熱性、接着力不足により経年的に内部ボイドが発生し絶縁層が膨張する。絶縁層の膨張によりスロット内のギャップが減少しコイルの電磁振動が抑制されるが、絶縁特性の低下は否めない。戦後に開発された高耐熱クラス合成レジン絶縁では、これらの問題はなく次第にとって代わった。

なお、戦後開発されたレジンリッチ絶縁方式は、テープ巻き回作業中に合成レジンに接着剤として塗布するか、あるいは予めテープに塗布したマイカテープを導体に巻回した後、硬化処理タンク内に液送された高温アスファルト系コンパウンドにより液圧硬化する方式であり、アスファルトコンパウンド絶縁で培われた技術と設備が引き継がれている。

昨今の環境問題からアスファルトコンパウンドに代わる低溶融材料が採用することもある。

合成レジン絶縁コイルの電磁振動による機械的損傷(摩損、接地事故)

戦後に導入された重要輸入技術の一つである合成レジン絶縁は、耐熱性、機械特性、そして電気絶縁特性に優れている。したがって、部分放電などの電氣的劣化要因よりも機械的劣化要因の方が機器寿命を左右する。

その一つにコイルの電磁振動による絶縁層の摩損がある。合成レジン絶縁は形状安定性にも優れているため、製造時のコイル絶縁寸法は経年的に変化することではなく、スロット内へのコイル組立性を考慮して設けたスロット側壁との間隙に対する対策が必要となる。特に、ステータ電流が大きい大容量機などにおいて間隙をそのまま放置した場合、コイルに働く電磁力による振動で絶縁層が比較的短時間で摩損し、摩損が進行すると接地事故や相間短絡事故に至り、さらに鉄心熔損などの重大事故に拡大する。摩損の速度は、大略振動振幅値の二乗に比例して大きくなるため初期のコイル振動防止対策が非常に重要である。

コイル振動防止対策として広く採用されている方法は、間隙に打込んだ導電性波形積層板(サイドリップ

ルスプリング)のスプリング力によりコイルを反対側スロット側壁に押圧し、その摩擦拘束力で振動を抑制する。また、組立後のコイルをスロット開口部に打込んだ楔により固定する。また、コイル上面と楔間に波形積層板(トップリップスプリング)を組立て、コイル振動を抑制する方式も実用されており、経年的に楔に弛みが発生した場合でもスプリング効果により確実に固定できる。

このような技術の積み重ねにより、タービン発電機の最重要部位の一つであるステーターコイルの信頼性確保は実現された。

大容量タービン発電機全含浸(GVPI)ステータのコロナ放電

接着剤を塗布しないマイカテープ(ドライテープ)を導体に巻回したコイルをスロット内に組立てた後、ステーター式をレジン含浸タンク内にセットし、予熱→真空引き→低粘度レジン加圧含浸→乾燥/硬化のプロセスを経て完成する方法、所謂全真空加圧含浸(GVPI)絶縁が実用されている。

元々、中小形電動機で広く採用されてきた方式であり、その高い生産性と信頼性から設備大型化が進み、中容量タービン発電機にも適用されるようになった。本方式により空気冷却タービン発電機では300MVA級、水素冷却機では400MVA級まで製作されている。

コイル組立後にマイカ絶縁層内に合成レジンを含浸・硬化するため、コイル側面がスロットに密着し、コイル内の発生熱(損失)はコイル両側面から鉄心に伝達され、効率よく冷媒ガスにより除去される。

しかし、大容量化に伴い鉄心長が長くなり、特に高耐熱クラス絶縁の適用によりコイル温度が高くなるとコイル熱伸びが増大する。その結果、鉄心とコイル導体間に働く熱応力が大きくなり、熱膨張収縮の繰り返しにより剥離・ギャップが生じると部分放電が発生する可能性が高くなる。

海外の例ではあるが、ガスタービン駆動発電機で運転開始後1年以内に部分放電問題が高い確率で発生し大問題となり抜本的な対策を迫られている。

生産性とコイル熱放散から優れた絶縁構造ではあるが、同時に高い運転信頼性確保の観点からコイル設計温度の最適化、コイル表面処理法などの設計上の工夫が必須である。海外電機製造会社の例ではあるが、コイル膨張・収縮に追従し易いコイル表面処理法の開発・実用により解決している。

鉄心端部のコロナ防止とアスベスト問題

スロット部に位置するコイル絶縁表面に導電性保護テープを巻回し、コイル表面を接地することにより鉄

心との間のコロナ放電発生を防止している。鉄心端部近傍のゼロ電位からコイルエンド部に向ってコイル表面電位が上昇し、最終的には導体と同電位になるような絶縁設計が要求される。出口部近傍のコイル表面電位の急激な変化はコロナ放電の原因となることから、従来はアスベストテープを巻回し、その長さ、層数を調整することにより表面抵抗を最適化しコロナ放電を抑制してきた。また、アスベストテープの優れた耐摩耗性からスロット直線部の保護巻きテープとして使用されてきた。

その後、アスベスト公害問題がクローズアップし全面禁止となり、その代替品の開発が急務となった。正直、アスベスト並みの幾つかの優れた特性を兼ね備えた材料の開発は非常に困難であった。

タービン発電機製造の歴史を振り返ってみる時、アスベスト基材の構造材料、電気絶縁材料との関係は深く、その採用は幾つかの重要な技術的課題を解決し大容量化に貢献してきた。その代表的な材料として、次の材料があった。

ロータ関係：

- ・エンドリング内面のアスベストベースベークライト製絶縁物
- ・ロータスロット絶縁(マイカナイトをアスベスト布によりサンドイッチ状に接着・押圧した積層品)

ステータ関係：

- ・中空コイル銅線素線絶縁
- ・コロナ防止テープなど

その後、構造材料の大半は合成レジン繊維積層板により代替され、素線絶縁はポリエステル・ガラス繊維の溶着が一般的になった。しかし、コロナ防止は最も困難な課題であり、その解決には多くの時間を要したが、SiC(シリコンカーバイド)入りレジンでコイル表面に塗布、またはテープ状にしたコロナ防止テープの巻回により解決した。

水冷却コイルの漏水による湿熱劣化

300MVA超のタービン発電機に直接冷却ステータコイルが採用され、冷媒として油(絶縁油)、水素ガス、そして純水が使用された。

純水を使用する水冷却コイルでは、コイル両端に水室(ウォーターボックス)をロー付けし、その部位に接続したテフロンチューブなどの絶縁接続管により冷却水を給排する。

何らかの理由によりコイル内の冷媒通路から漏水した場合、マイカ絶縁層内に浸透した漏水により絶縁層が湿熱劣化し、電気絶縁特性が急速に低下する。図6.13に、20年以上運転経過した発電機で湿熱劣化が発

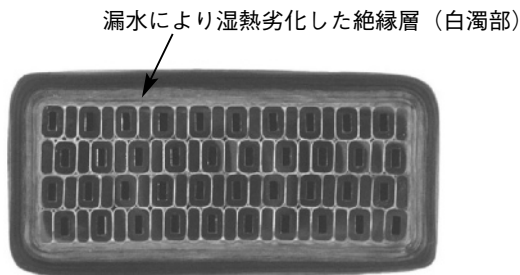


図6.13 20数年運転経過後に漏水が発見された水冷却コイル断面
見されたコイル断面を示す。

本問題の解決は、高信頼性製造法の確立であることは言うまでもないが、本質的な解決には冷媒としての水の排除であり、ガス直接冷却への移行も一つの解決法である。例えば、シーメンス社（独）は、ステータおよびロータの水直接冷却タービン発電機を開発・製造してきたが、既にガス直接冷却に切替えており、世界的にも水冷却の代替技術が熱望されている。しかし、ガス冷却方式への移行には、ガス冷却基盤技術の保有、またコイル内に冷媒を給排するための開口部を有することに関わる課題の適切な解決技術無くしては高信頼ガス冷コイルの実現は困難である。

他の解決法として、間接冷却適用の容量範囲の拡大がある。その実現技術として、従来技術の延長線上にある以下の設計コンセプトがある。

- (1) 高ストレス化 ……絶縁厚を低減することによる熱抵抗の軽減およびスロット内の導体占積率アップ
- (2) 高耐熱クラス絶縁 …Hクラス絶縁の採用
- (3) 全含浸絶縁方式 ……設備増強による大容量機への適用拡大

これらの他に、

- (4) 高熱伝導絶縁
がある^{89,90,91}。

従来、絶縁研究者・技術者は、絶縁システムの電気絶縁特性と熱伝導特性の改善の両立は困難と考え、その開発・改善は、極論すれば電気絶縁特性と一部機械的特性の向上のみに注力してきた。その結果、絶縁層の熱伝導特性の積極的な改善への取り組みはなかった。

絶縁マイカテープの構成材料の中で、合成レジンの高熱伝導率が最も低いことに注目し、合成レジンに高熱

伝導フィラー粉末を混合することによりマイカテープの熱伝導率を従来絶縁の約2倍に向上し、 $0.5\text{W/m}\cdot\text{K}$ が実現できた。発電機機内の冷却通風方式の改善と併せた設計により間接冷却ステータ方式タービン発電機の最大容量を700MVAクラスまで拡大できた。

6-3-4 ロータコイル絶縁

ロータコイル絶縁はステータと比較して印加電圧が低く、電気絶縁特性よりも高遠心力に耐える機械的強度に優れた材料が要求される。

タービン発電機製造の初期において、はがしマイカシートを天然の接着剤で貼り付けた対地絶縁物（スロットアーマ）をスロット内にU字形に挿入し、その中にコイルを組立てた後にコイルを包むように折り曲げ、その上に遠心力に十分耐える強度を有するロータ楔を組み立てる。

ロータコイルの層間には、導体幅に合わせてストリップ状に切断したマイカシートを導体表面に接着する方法が一般的であった。このようなロータ絶縁はソフトアーマ方式と呼ばれた。

その後、アスベスト布が使用され始め、マイカシートを中にして両側からサンドイッチ状に接着した対地絶縁物が使用された。アスベスト布の優れた機械的強度により絶縁物の長期信頼性は飛躍的に向上した。

対地絶縁物のほかに高遠心力に耐えるエンドリング内面絶縁物（絶縁筒）が、単機容量の増大のネックであった。初期にはマイカシート積層品が使用されていたが、機械的強度不足に起因する問題でロータ軸の大口径化が制約された。その後の輸入技術によりアスベストバークライトモールド絶縁物の製造が始まり、そのエンドリング絶縁筒への適用が大口径ロータの設計・製造に大きく寄与した。具体的には、マイカ積層品では1,300mm（51インチ）径ロータが限界であり、遠心力によりエンドリング絶縁筒にかかる面圧は21MPaとなる。アスベストバークライトモールド絶縁筒の適用により1,422mm（56インチ）径ロータまで製作可能となり、面圧28MPaにも十分耐えられる圧縮強度を有していた。

戦後の技術導入により、ロータコイル直接冷却技術が導入された。ロータスロット内の導体に設けられた

⁸⁹ M.Tari et al. "A High Voltage Insulating System with Increased Thermal Conductivity for Turbo Generators" CWIEME 2001 p49 (2001)

⁹⁰ M.Tari et al. "HTC Insulation Technology Drives Rapid Progress of Indirect-Cooled Turbo Generator Unit Capacity" IEEE PES 01SM234 (2001)

⁹¹ M.Tari et al. "IMPACTS ON TURBINE GENERATOR DESIGN BY THE APPLICATION OF INCREASED THERMAL CONDUCTING STATOR INSULATION" CIGRE Session-2002, 11-105 (2002)

通風パスに冷媒ガスを流し、直接的に熱交換することにより効率的に冷却する方式である。この冷媒ガス給排のために対地絶縁物を貫通する通風孔の加工が必要となった。マイカ積層材では、機械強度と加工性から複雑な通風孔の形成が困難であったため合成レジン繊維積層板（FRP）が採用された。特に、エポキシレジン積層板は優れた耐熱性と高い機械強度などから多用されている。その材料の特性から機械加工により絶縁部品としスロット内に組立て、適切な沿面距離の選定により運転上必要な絶縁耐力を確保する。このようなロータ絶縁をハードアーマ絶縁と呼ぶ。

しかし、合成レジン繊維積層板のプラスチック性により組立時の衝撃や過度の曲げなどで損傷を受け易いため、柔軟性のあるシート材（例えば強化ナイロン）と貼り合せた複合材にして使用することもある。

アスベストベークライトモールド製エンドリング絶縁筒は、スロット絶縁がハードアーマ方式に変わった後もその優れた特性により使用されてきたが、アスベストの全面禁止により代替品への切り替えを余儀なくされた。薄板の合成レジン繊維積層板を複数枚重ねて構成することにより適度の柔軟性を確保するような積層構造が採用されている。

近年、タービン発電機の小形・軽量化、製作限界容量の拡大などの理由から高耐熱クラス絶縁が採用される傾向にあり、耐熱クラスFやHの大容量空気冷却タービン発電機も製作されているが、これらの合成レジン繊維積層板や複合材の寄与が大きい。

6-3-5 ロータコイル絶縁の事故例と解決技術

ロータ軸の大口径化とともにその絶縁物に働く遠心力に関わる問題が顕在化し、さらに鉄心の長尺化とコイル設計温度の高温化に伴い導体熱膨張が増加（大容量機では、軸方向移動量2mm以上）することによる絶縁物の損傷が発生した。この他に、発電プラント運用に関わる問題が新たに発生している。以下に、これらの主な問題と解決技術について述べる。

マイカアスベスト製対地絶縁物の機械的劣化

遠心力による拘束状態でのコイル熱膨張収縮の繰り返しや高温状態での長期運転に起因するマイカシートの剥れやアスベスト布の損傷などソフトアーマ絶縁の弱点は、タービン発電機の長期信頼性を低下させ、その解決には長期間を要した。特に、コイル外周側に位置する対地絶縁物はコイルに働く遠心力を内荷重として受け、ロータ楔の下面に押圧された状態での圧縮荷重、そして導体の熱膨張に起因する引張り荷重を受けるため機械的損傷が激しく、絶縁特性の劣化速度は速

い。反面、絶縁物の機械的強度不足はコイル熱伸びの拘束緩和となり、導体内部の熱応力に起因するロータ振動問題が軽減される。しかし、コイル直線部が比較的自由に熱伸びするため、そのしわ寄せとしてコイル端部の変位が増加するが、エンドリング下に組立てられた絶縁間隔ブロックにより拘束される。その結果、長期運転での熱伸び・収縮の繰り返しにより導体が塑性変形し、コイル間短絡や接地事故の原因となる。アスベスト積層品は、使用温度が上昇すると適度の柔軟性を有し、熱膨張により導体に働く内部応力を吸収・緩和し、またエンドリング下のアスベストベークライト製絶縁筒の表面は滑らかでコイル熱伸びの拘束を軽減するなどの多くの利点があった。

総じて、マイカアスベスト絶縁材料は短所も多いが、同時に利点も多い材料であった。そのため、間接冷却ロータにはその後も長く使用されてきたが、直接冷却ロータ構造への適用の難しさ、良質マイカ箔の枯渇、機械的強度不足による大口径・長尺ロータへの適用制限、そして補強材であるアスベスト材の全面使用禁止により次第にハードアーマ絶縁に取って代わった。

余談であるが、ハードアーマ絶縁を採用した間接冷却ロータで出力増加にともないロータ振動が急増する熱的不平衡（サーマルアンバランス）振動問題が多発した。この原因は、コイル上部に位置しその遠心力を全面的に受ける合成レジン繊維積層板製の絶縁ブロック（クリページブロック）表面の摩擦拘束力が強く、各スロットのコイル伸び量の違いによりロータ熱曲がりを生じたことが原因であった。絶縁ブロック表面粗さの改善により解決はしたが、優れた一面のみに注力し、その陰にある短所を見落としたことは否めない。

ターニング運転の長時間化による銅の凝着・銅粉発生

大容量火力プラントも含めた負荷調整運転の恒常化により運転停止時や待機時にタービン・発電機ロータを毎分数回転で回転させ、ロータの熱曲がり防止する、所謂ターニング運転が頻度・累積時間とも著しく増加してきた。この結果、タービン発電機ロータは遠心力による拘束が無い状態で回転するため、スロット内でロータコイルが回転に伴って自重で移動し、スロット出口近傍の対地絶縁物の内表面に沿って摺動した際に絶縁物の摩損や銅の凝着を発生する。この状態で運転を続行した場合、接地事故や層間短絡の原因となる。

低速回転時、スロット内でのコイルの自重による移動を防止することは、一つの対策であるが、元々スロット内のギャップはコイル組立時の絶縁部品の損傷防止と組立性から設計・製造上設けたものである。した

がって、一般的な対策としては絶縁物への対策が主で、対地絶縁内側に摩擦係数の低いシート材を貼り付けることによる摩損防止などがある。

この他、水素冷却発電機特有の問題としてターニング運転時のコイル銅帯間同士の摺動により鱗片状銅片（銅粉）が発生し、その長期間運転での累積銅粉により接地事故や層間短絡が生じる可能性があった。これは、酸素がない状況下で、コイル自重による極低面圧で銅帯同士が摺動した場合に銅帯表面における凝着・剥離により生成される極めてまれな現象である。銅帯間の直接接触の防止や相対的な移動の防止による対策で解決された。

6-3-6 今後の課題

将来の絶縁システム設計の基本コンセプト

タービン発電機の出力密度の向上による小形・軽量化は、多くのニーズからさらなる改善に向け取り組まなければならない課題である。

ロータは、軸材の高強度・大口径化と導体直接冷却方式により単機容量の飛躍的な大容量化が可能となった。それに、昨今の高耐熱絶縁材料の開発により耐熱クラスHの発電機も製作されるようになった。この場合、コイル温度の高温化によるサーマルアンバランスに起因する振動問題の解決が必要である。

一方、ステータコイルは、ガス、液体直接冷却で飛躍的に大電流化出来たが、より簡単な構造による実現が課題である。間接冷却方式コイルの大電流化の設計コンセプトには、

高ストレス化

高耐熱クラス

GVPI

高熱伝導化

などがある（表4.1参照）。それぞれに得失があり、運転性、長期信頼性、そしてトータルライフコストなど使用側の要求に確かに応える技術の確立が今後とも取り組まなければならない課題である。

マイカ資源の枯渇

自然界に存在し100年以上の使用実績があり、そして最も優れた高電圧絶縁材料であるマイカは、初期に実用された大判の良質のはがしマイカが次第に入手難となったが、鱗片状に微細化した後でマイカペーパーにする技術の開発で解決してきた。しかし、将来のマイカ資源の枯渇は避けられず、代替技術の開発が課題である。既に水素ガス絶縁、レジン絶縁などの取組みが紹介されているが、電気絶縁特性や長期信頼性の向上が望まれる。

また、国内外で人造マイカが製造されているが、天然マイカが有するマイカ片の“濡れ性”の不足やマイカ鱗片サイズの微細などによりマイカペーパーへの製造性が劣り、実用にはこれらの克服が必須である。

製造コストの低減、特にステータコイル絶縁

電源開発は社会インフラ整備に不可欠な基幹的産業の一つではあるが、反面一般産業のエネルギーコストの主要部分を占め、製品競争力強化の観点から運転コストは勿論、その初期コスト低減も強く望まれる。

全体コストの半分近くを占める材料コストの低減、製造合理化による加工費の低減などの製造コスト低減の取組みは既に多くなされている。これらに加え、新設計コンセプト導入による施策が必要である。それらの中で、“技術のローエンド化”が効果的である。補機装置と水素シール構造を必要とすると水素冷却機より空気冷却機、コイル冷媒の補機装置と複雑冷媒通路構造の直接冷却コイルより間接冷却機である。勿論、ローエンド機の最大製作可能限界は直接冷却機と比較すると劣るが、新技術の導入による適用容量範囲の拡大が必須である。

高熱伝導絶縁の適用とその効果を最大化する機内通風方式の改善により、従来の間接水素冷却機の限界400MVA級から750MVA級まで拡大できる技術が確立されている。

ステータコイル絶縁の高熱伝導化

従来のエポキシレジンマイカ絶縁の熱伝導率 $0.2 \sim 0.25 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ に対し、既に $0.5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ は実現している。この設計コンセプトは、比較的ユーザに受入れられ易くその限界容量の拡大は今後の課題である。添加フィラー価格と小形・軽量化による発電機コストとのトレードオフにより高熱伝導フィラーの種類は選択すべきである。既に、実用的な高い熱伝導率を有するフィラー材は開発済みであり、これらの適用により現状達成レベル以上の高熱伝導絶縁システム開発が望まれる。

高電界ストレス化（ $>4 \text{ kV/mm}$ ）

合成レジンマイカ絶縁の実用により電界ストレスと機械的特性は従来のアスファルトコンパウンド絶縁と比較して飛躍的に向上し、大容量化に大きく貢献した。従来絶縁の $1.5 \sim 2 \text{ kV/mm}$ レベルに対し現状は $2 \sim 2.5$ 倍で設計されている。絶縁厚の低減による熱抵抗の減少、スロット内導体占積率改善なども発電機高密度化に有効である。

経験的にコイルコーナー部の電界集中が高いことから、その均一化のためのコーナー絶縁形状の改善や内部シールドの採用などによる電界ストレスの緩和が図れる。その最適化の取組みが望まれる。

環境問題

コイル製造時の環境問題への取組みは勿論であるが、経年劣化などによるコイル絶縁更新、または廃却時の環境問題への配慮も望まれる。

新絶縁システム開発時の環境性への一層の配慮が望まれる。また、コイル製造時に発生するガスの適正な処理、使用材料取り扱い時の管理の強化や無公害材料への代替も必要である。既に、多用されたアスベスト製品のコイル絶縁更新・分解時の作業環境への対策の取組みはなされているが、今後さらに高レベルでの対策が必要である。

将来のタービン発電機廃却に際し、環境問題の申し送り事項なしを基本とした現在の真摯な取組みが望まれる。

6.4 高速バランス技術

タービン発電機製造の歴史を振り返って見ると、今日までの道程で直面した多くの技術的問題をひとつひとつ解決し乗り越えてきた。

数ある重要な課題の一つに高速バランス技術がある。特に、高速回転機である2極タービン発電機では、より高度なバランス技術が必要であり、この高速バランス技術なくして今日の世界トップレベルをゆく国産の高性能・大容量タービン発電機は実現できなかったといっても過言ではない。

プラントの大容量化に伴いタービン・発電機用の複数ロータを直結した回転部の全長は最大級プラントでは約70mにも及び、直結により一体化された回転軸として振動特性面でも相互に影響し合うこれらのロータの振動レベルを5/100mm（最大振動振幅値）以下に納めることが要求される。この国内ユーザからの要求値は、世界的に見ても最も厳しい振動レベルであり、これらに応えるなかで日本のバランス技術は高度に発達した。その実現のためには、個々のロータ軸設計におけるアンバランス要因の排除、これらの製造、そしてロータ軸材の製造段階での均質性を確保するための熱処理や鍛造まで逆上った製造と品質管理が必要である。例えば、比較的低温で運転されるタービン発電機用ロータ軸材でも、完成検査としてHIT試験⁹²を実施し熱安定性を確認している。タービン発電機は一本のロータ軸としては最大寸法、最大径であり、構造設計上もアンバランス要因を完全に排除できない特殊性も

あって、設計・製造上でも最も難しいロータ軸である。

大容量化に伴い軸に働く遠心力は増大の一途をたどり、その信頼度が振動問題により大きく左右されるようになった。また、国の内外において過大振動に起因したと思われる大容量タービン発電機の破壊事故もあり、振動問題がタービン・発電機の利用者、電機製造会社を問わず、より重要な要素として関心を集め、慎重な取組みを迫られた。

6-4-1 戦前から第二次世界大戦直後のバランス調整

戦前のバランス調整は、現在のような振動理論に裏付けられた技術ではなく、将に“職人芸”そのもので勘と経験だけに頼った技であり、工場や現地におけるバランス調整に長期間を要することも珍しくなく、なかには年単位となることもあった。

勿論、今日のような高性能な振動計や測定器はなく、ましてやそのデータ処理のためのコンピュータ利用など想像さえできない時代であった。

一例として、振動計測に手製の測定器が使われた。空き缶の中に吊るした振り子の振動をダイヤルゲージで読むものであった（図6.14参照）。また、ロータにアンバランスがあると、ロータは必ずある方向に偏って回転するので、高速回転するロータの傍に立ち、赤鉛筆をロータ表面にぎりぎりまで近づけロータ上の接点でアンバランス方向を検出した（ペンシルマーク法）。さらに、その出来上がり具合をチェックするために軸受け台の上に白銅硬貨を立てその転倒の有無を確認した。

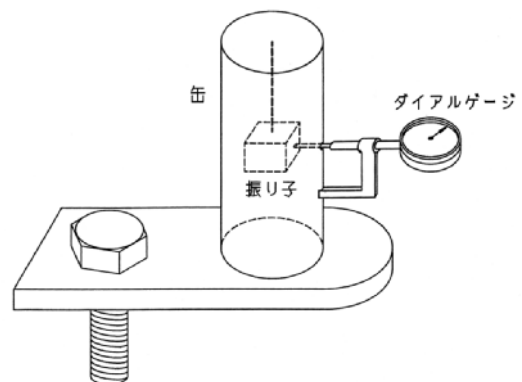


図6.14 手製のロータ振動計測器

6-4-2 戦後・現在のバランス技術

第二次世界大戦後の技術契約により製造・試験に関わる技術者も海外電機製造会社に派遣され、最先端の技術を習得する機会を得、その中にはバランス技術者

⁹² [解説] Heat Indication Testの略で、完成後のロータ軸材を発電機運転温度相当まで加熱し、軸曲がり量を計測する試験法。

も含まれた。彼らは実際に工場に入り提携先の技術者と一緒にバランス調整作業をする中でロータバランス法を学んだ。経験的な要素が多い分野であるが、同時に回転軸の力学的な性質、振動計測と分析など振動理論も学ぶことができこれらを持ち帰った。これらの主な技術を以下に述べる。

振動計測

バランス調整にはロータ振動を正確に知る必要があり、そのため最もロータ振動が顕著に現れる場所で計測しなければならない。

ロータにアンバランスがある場合、ロータ振動は計測可能な個所では軸受け部（ジャーナル部）に現れ、潤滑油膜を介して軸受け台に、そして基礎台へ伝達される。したがって、一般にロータ振動は軸受け台上で計測された（オンペダスタル計測）。軸受け部の振動は基礎に伝わる力を表わす。この力は構造物や基礎の強度設計の対象となるので、回転体の中で最も振動値が小さいにも拘らず軸受け部で振動することは意義がある。しかし、軸受け台上で計測されたロータ振動は、潤滑油膜の特性や軸受け台の剛性の影響を受けた振動値となりロータ振動そのものではない。

その後、より正確にロータの振動挙動を知ることでバランス調整の精度を上げる目的から、ロータ軸受け部のジャーナルに検出プローブを直接当て計測するようになった（オンシャフト計測）。これにより軸の動きと静止部分の動きに生じる振幅値や位相の差に影響されることない計測データに基づく高精度のバランス調整が可能となった。勿論、ジャーナル部の表面状態・粗さなどによる検出プローブ自身の振動を検出するためこの部位の表面状態の改善と計測データの適正な処理が必要である。

振動検出器

振動検出に次に示すような検出器が使用される。

- ・圧電形ピックアップ
- ・ひずみゲージ形ピックアップ
- ・振動変位計ピックアップ
- ・動電形ピックアップ

高精度の振動検出のため、以下の点が計測器に要求される。

- ・検出部が大きすぎ、被測定系に影響を与えないこと。
- ・測定される振動の周波数を満足していること。（例えば、高サイクル振動）
- ・測定しようとする振動に対して十分な感度を有していること。
- ・測定しようとする振動に対して十分耐えること。（大振動時に計測可能）

- ・使用する周囲の雰囲気に影響されない特性を有すること。（温度・磁界）

振動分析器

検出プローブの出力は振動分析器に入力される。振動分析器に入った信号は周波数分析され、軸の固有振動成分、同期成分、整数倍成分などの振動分離に利用され、振動対策などに有効に活用される。

最近の振動分析

上記でロータバランスを主目的にした振動計測器について記述したが、大容量化やコイル温度上昇の増大などによる複雑な振動の解析には特殊な分析が必要である。その主なものは、

- ・リアルタイム周波数分析
- ・回転数比分析
- ・回転次数比分析
- ・伝達関数測定
- ・3D分析
- ・各種FFT
- ・軸受特性分析
- ・軸芯軌跡分析
- ・振動モード計測

などがあり、既に汎用解析ソフトが開発され実用されている。タービン軸も含めた多数の計測データを高速で処理するため、大型コンピュータが導入された。振動解析の他に振動シミュレーションにも適用され、またミニコンピュータを利用したワンショットバランスなどが実用されている。

6-4-3 大容量化時代のバランス技術、振動問題

戦後の急速な大容量化により高度なバランス技術が要求された。その中で経験し、解決されてきた主な振動問題や対応バランス技術について記述する。

直接冷却ロータの通風アンバランスによる振動問題

ロータ直接冷却には種々の方式があり（5-1-4参照）、ロータ・導体内への冷媒の流入、冷媒パス内の流れ方、冷媒パスの数、そして冷媒パスの長短などが異なる。

設計により潜在的に存在する冷媒パス間の温度分布の差、最高温度と平均温度の比が大きい冷却構造があり、この様な設計ではサーマルアンバランスによる振動問題を誘起しやすい。したがって、各冷媒パスを流れる冷媒量が極力均一化するように設計されている。しかし、製造・組立て上の誤差の集積などにより流量が異なる場合、結果的には各冷媒パス近傍の導体温度に差が生じ、サーマルアンバランスの原因となる。例えば、初期のエアギャップピックアップ方式ロータで

は、ロータ表面の冷媒吸入孔の僅かな組立て上の誤差により流量アンバランスが生じサーマルアンバランスによる過大振動を経験している。この種の問題回避に、製造・組立て段階における寸法精度管理を強化することで温度分布の均一化が図れる。既に多くの製造・運転実績から得られたデータの蓄積により許容限界が明確になり、管理に反映されている。

さらに、冷媒パスによる流量のアンバランスの有無を回転試験開始前にチェックする方法として、静止状態で外部より強制的に空気を流し、各冷媒出口で流量（風速）測定する試験方法が実用されている。

コイル剛性を考慮した軸剛性の均一化

良好なロータバランス状態を実現するため製作完了したロータのバランス調整を実施することは当然であるが、設計段階においても構造上のアンバランス要因を極力なくするような構造にしなければならない。しかし、構造上の理由から回避できないアンバランス要因が残ってしまう。その一つにロータの磁極中心方向と直角方向の軸剛性の違いがあり、主にコイルスロットの有無によるものである。このため、磁極部に剛性調整のための特殊溝（クロススロット）加工し両軸方向の剛性均一化を図っている。しかし、スロット内のコイルは遠心力下で剛性に寄与し、しかも回転数により変化するため、その定量化が困難である。したがって、固定形状のクロススロット加工により両軸方向剛性を精度良く均一化することは非常に困難である。バランス調整や振動計測から得られる豊富な実績データの蓄積・分析により計算結果を補正することで推定精度が向上し、現在ではほぼ完成の域にある。新規ロータの設計時も含めバランスの取れた設計が可能となった。

バランスウエイトの取付け

バランス調整作業は、振動計測・分析の結果としてアンバランスに対しカウンターウエイト（バランスウエイト）をロータに取り付ける。しかし、その取付け位置の最適化は重要である。ロータ単体でのバランス調整時は、必要に応じロータにアクセスでき、主に磁極表面に加工されたバランスウエイト取付け孔を使ってウエイト調整が可能である。しかし、ステータ内に組立て後は磁極表面へのアクセスが困難となり、ロータエンドリング端面や冷却ファンの取付け用ボス部、そしてステータ枠外に出ているロータ部分にのみバランスウエイト取り付けが可能である。

これまでの製造、バランス調整経験から最適バランスウエイト取付け位置が明確になり、設計に反映されている。

通電バランス装置

工場出荷に先立ちロータバランス調整は綿密に実施される。しかし現実問題として現地で振動問題が発生し、その調整に時間を必要であるばかりではなく、調整確認のための回転上昇、あるいは調整のための頻繁な起動停止による燃料消費は大きな損失となるので、工場出荷前により完成度の高いバランス調整が必要である。

その振動原因のひとつにサーマルアンバランスがある。工場組立て試験に先立ち実施されるロータ単体バランスは空気中で実施されることから、水素冷却機の場合は実際の運転条件と違うため、調整時のロータ温度分布が異なる。さらに、発注者との契約仕様に適合しているかを出荷前に確認するため実施する工場試験では、発電機定格出力に相当する励磁電流まで流せないため、ロータコイル温度が低い状態での振動確認になる。

この様な工場と現地の運転・試験条件の違いを極力解消し、現地に近い温度条件で試験する方法としてロータ単体バランス時に電流を流す通電バランス法が検討され、一部実施されている。

ステータが無い状態でロータに通電するため、強力な電磁石であるロータの回転にともない周辺の導電性構造物を過熱する。漏洩磁束の遮蔽のためロータを良電導性材で構成されたシールド装置により覆う方法が採用された。

この様な試験装置は、昨今のグローバル化でロータとステータが別の工場で作製され、現地で初めて組合せられる場合が多くなっているが、通電バランスの適用によりロータ単体でのバランス確認が可能となる。

コンピュータシステムによる工場・現地バランス調整

最近では、電力の安定供給と事故の回避の必要性が高まり良好なバランス調整や運転中の振動監視が非常に重要視されてきた。その結果、コンピュータによる振動解析や高精度のバランス調整が不可欠になっている。既に電機製造会社では、この様なコンピュータシステムは開発・実用されている。

現地においてもバランス調整や振動問題の解析に専用コンピュータを使用した現地振動解析処理装置が多用されている。本システムは、試運転期間や定期検査後の調整期間を短縮し、省エネルギーの要求に適したシステムとして注目をあびている。

6-4-5 今後の課題

バランス調整作業へのコンピュータ利用などによりバランス技術は著しく進歩し、タービン発電機の大容量化に寄与している。

しかし、利用側からのロータ振動に関する要求は、厳しい振動要求レベルに留まらず、バランス調整期間の短縮などプラント利用率の改善からの要求も強くなっている。

これらに応えるため、ワンショットバランス調整技術の確立が急務である。計測、分析データに基づき、振動バランス理論を駆使して最適位置に必要なバランスウエイトを最少の調整回数で取付ける必要がある。従来に比べ調整作業の精度はかなり改善されてきているが、実状は試行錯誤的な複数回のバランスウエイト取付けが必要である。

バランス調整期間の短縮、調整回数の低減の要求は依然強く、出来れば一回の調整作業で目標振動レベルの達成が望まれる。この様なワンショットバランス(One shot balance)実現の課題は、ウエイト効果である。すなわち、ロータ軸剛性やバランスウエイト取付け位置などが個々のロータにより異なることからバランスウエイトの効き方、すなわちウエイト効果が一樣でなく、現状はトライアル的なウエイト取付けで効果を確認しながら最適化を図っている。したがって、複数回のバランス調整が必須となる。

現状は同一断面形状のロータなどの実績から経験的に決定しているウエイト効果を設計データなどにより推定できる技術の確立が急務である。

6.5 タービン発電機の励磁方式

6-5-1 タービン発電機の大容量化と励磁装置

発電機ロータ軸に加工されたスロット内に巻回された界磁コイルに、外部より励磁電流(直流電流)を供給することにより強力な電磁石ができる。ロータが原動機(蒸気タービン、ガスタービンなど)により駆動されて高速回転する時、ロータから発生した界磁磁束が空隙を通り、ステータコイルと鎖交しステータコイルに誘導起電力を発生する。そして、ステータコイルに電流(交流電流)が流れる時に交番磁束が発生し、ロータとステータが電磁氣的に結合する。換言すれば、原動機から伝達された回転エネルギーが、発電機内で電気エネルギーに変換される。

この電磁氣的結合(電磁カップリング)の強さが発電機出力となる。また、運転中の発電機の電磁カップリングの強さを制御することにより、発電機で発生した電力を送電系統に安定的に供給できる(系統安定度と呼ぶ)。

発電所から消費地に向け、有効電力(kW)と一緒に無効電力(kVAR)が送電線により送られている。消費地側で再びエネルギー変換し実際利用されるのは有効電力であるが、無効電力は消費地の負荷(電気応用装置)の種類や安定的な電力送電のための要求により必要とされるものである。

発電機ロータコイルに励磁電流を供給し、電力を安定的に送電するように発電機励磁電流を制御する装置を励磁装置と呼ぶ。励磁装置に要求される機能とその効果を以下に示す。

【通常運転時】

- ・電圧・無効電力制御…進相運転領域の拡大

【緊急運転時】

- ・負荷遮断時の電圧応答性…負荷遮断時の発電機電圧上昇抑制効果大
- ・電圧対策…無効電力の供給能力増大

【安定化対策】

- ・過渡安定度…送電電力増大
- ・電力動揺抑制…電力動揺の抑制効果大

6-5-2 励磁方式の変遷

歴史的にタービン発電機用励磁方式には種々の方式がある。以下にその代表的な方式を示す⁹³。

1. 直流励磁機方式－軸端直結

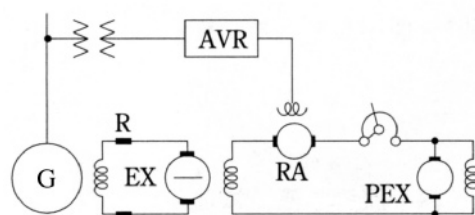
発電機ロータコイルに供給される電力は直流であり、原動機と直結される発電機ロータ軸端の反対側に直結した直流機により電力を発生し、ロータコイルに供給する方式である。

励磁機を発電機軸端に直結することにより、発電機ロータが回転している限り励磁電力を確保できるため励磁システムの信頼性向上が図れる。しかし、直流機はロータに整流子片を有し、その複雑な構造から、電氣的にも、機械的にも調整・保守が困難である。

発電機の大容量化にともない励磁機容量も大きくなるため $3,000\text{min}^{-1}$ 、 $3,600\text{min}^{-1}$ の高速回転に耐える直流機的设计・製作が困難になった。このため、発電機・励磁機ロータ間に減速ギヤを設け、発電機より低い回転数で駆動する方式も採用されたが、減速ギヤの信頼性や回転体の質量(マス)数の増加などにより軸系全体の信頼性低下やバランス調整の困難などの問題があり次第に採用されなくなった。

図6.15に直流励磁機方式の励磁回路構成図を示す。

93 電気学会 電気規格調査会標準規格「同期機」JEC-2130－2000



ただし、AVR：自動電圧調整装置
EX：励磁機
IVR：誘導電圧調整機
PEX：副励磁機
R：スリップリング
RA：回転増幅器
SR：飽和リアクトル
X：リアクトル
PPT：励磁用変圧器
PCT：励磁用変流器

図6.15 直流励磁機方式

2. 直流励磁機方式－別置

発電機軸端に励磁機を直結・駆動する方法が励磁電源の信頼性からは最適であるが、高速回転による容量制限が厳しくなる。このため、駆動用電動機と直流励磁機の組合せを別置きとし、その発生電力を発電機ロータコイルに供給する方式が実用された。回転数が自由に選べるなど設計上の制約が大幅に解消されるため比較的大容量機まで適用されたが、直流機固有の整流子片の保守問題は解消されず、交流電源と半導体電力変換器を組合せた励磁方式の出現などもあり広く採用されなかった。

直流励磁機に共通の問題として、その構造上の制約から頂上電圧⁹⁴を高く設計することが困難である。このことは励磁装置としての性能の限界を意味し、系統運用が困難な送電系統につながるタービン発電機への採用には制限がある。一般に、直流励磁機方式の励磁系電圧速度⁹⁵は、0.5程度である。

3. 交流励磁機方式

タービン発電機の反直結側軸端に直結された励磁用交流発電機（同期発電機）を励磁装置の電源とし、半導体電力変換器と組合せて構成される方式である。この励磁用同期発電機を交流励磁機という。中容量から大容量タービン発電機まで広範に採用された。

励磁機で発生した交流電力を静止型半導体電力変換器により直流変換し、ブラシを介し発電機ロータに供給される。図6.16に交流励磁機方式の励磁回路構成を示す。

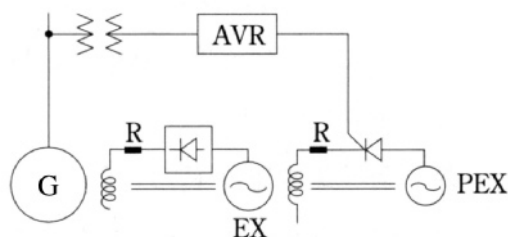


図6.16 交流励磁機方式

励磁機容量や頂上電圧などの制限は少なく広く採用されたが、軸系の長大化や直結ロータ軸数の増加による振動問題、さらに交流励磁機の励磁用電源の高信頼性化など解決すべき課題もあり、大容量タービン発電機への適用にはより慎重な設計検討が要求される。

図6.17に日本で最初に電力用タービン発電機に採用された富山火力280MVAタービン発電機（1969年製作）の交流励磁機との工場組合せ試験の状況を示す。

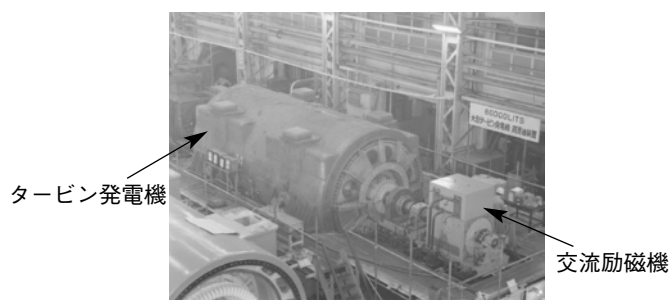


図6.17 交流励磁方式タービン発電機の工場試験

火力発電プラントの大容量化にともない、タービン軸と発電機軸を直結した全長が500MW級プラントで約50m、700MW級で70m弱と長大化し、ロータバランス調整が困難になることなどの理由で大容量機では次第に採用はされなくなった。

また、原子力用タービン発電機への採用は、2極機に較べ定格回転速度が低いこともあり交流励磁機設計上の制約は少ないが設計・製作および保守上で解決しなければならない2つの課題がある。

一つは、発電機本体と励磁機の直結部の2つの軸径の大きな違いによる課題である。2つの軸剛性の差が大きく、発電機ロータ軸振動の影響を励磁機ロータが直接的に受けるため振動絶縁装置（フォークカップリングと呼ぶ）を介して直結しなければならない。フォークカップリングの信頼性やその煩雑な保守点検などの課題がある。

二つめは、原子力発電プラントが消費地より遠隔地に

⁹⁴ [解説] 定義された条件において励磁装置がその端子から供給可能な最大直流電圧。

⁹⁵ [解説] 発電機が定格負荷状態運転しているとき、発電機の端子電圧が突然変化するのと等価な変化を自動電圧調整装置に与え、変化を与えた瞬間から0.5秒間に得られる励磁装置の等価電圧変化の割合を定格状態における電圧で割った値（単位法で表す）。

建設されることに起因する課題である。安定的に長距離送電するために、送配電網の外乱（故障や電力消費量の急激な変化など）に対し発電機は瞬時に対応しなければならない。このため高い励磁系電圧速度や励磁機速度⁹⁶が必要となり、このような高性能励磁システムに使用される励磁機には高い頂上電圧が不可欠である。高い頂上電圧を発生する交流励磁機は、通常運転時の磁気回路磁束密度を低く抑え、頂上電圧発生時の過飽和状態を避けるように設計しなければならない。このような交流励磁機は外形寸法が大きくなり、コストアップや損失の増大を招くことになるので他の励磁システムとの比較でトータルメリット面から採否を判断しなければならない。各発電プラントによって運用条件は異なるため画一的に論じることはできないが、昨今の傾向としてより高性能励磁システムが要求されており、静止形励磁方式（本項5参照）がより多く採用されている。

4. ブラシレス励磁方式

タービン発電機と同一回転軸上に回転電機子形同期発電機と半導体電力変換器を取り付け、発電機界磁コイルに直接発生電力を供給する方式を通称ブラシレス励磁方式という。

静止側から回転軸上の集電環に電気を送るブラシが不要となるため保守が容易となり、広く採用されている。特に、小・中容量タービン発電機では一般的に採用されている。

励磁機のロータ側で交流電力を発生するため、ロータ鉄心は円形に打抜かれた電磁鋼板を積層して構成されるため機械強度面から外径寸法が制限される。したがって、ロータ鉄心として使用される電磁鋼板量に限りがあり、換言すれば鉄心内の総磁束量が制限されるため発生可能な高電圧が制限される。そのため、高い頂上電圧を有する励磁機の設計製作が困難で、高い励磁速度が要求される大容量タービン発電機への適用は難しかった。しかし、その後の改善により高電圧・大容量励磁機の設計製作が可能となり、本来ブラシレス方式が有する優れた保守性などから広く採用されるようになった。電力用タービン発電機として最初に大分発電所278MVA機（1968年製作）に採用された（図6.18参照）。図6.19にブラシレス励磁方式の励磁回路構成を示す。

5. 静止形励磁方式

励磁装置が励磁用変圧器や励磁用変流器などと半導体電力変換器とで構成される方式である。半導体電力変換器にサイリスタを使用して励磁装置が構成される

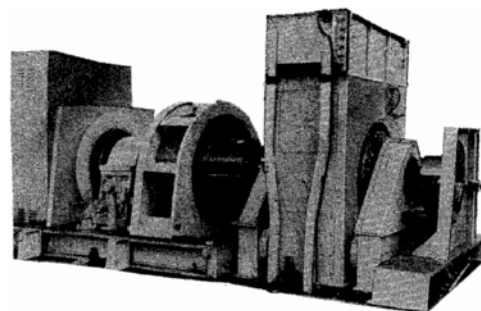
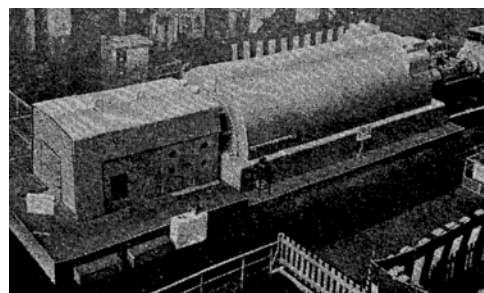


図6.18 ブラシレス励磁方式278MVAタービン発電機

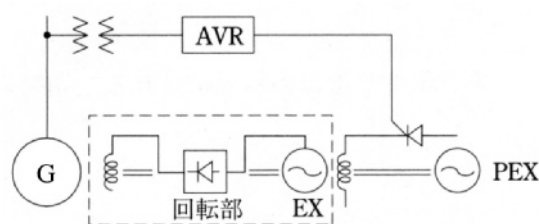


図6.19 ブラシレス励磁方式

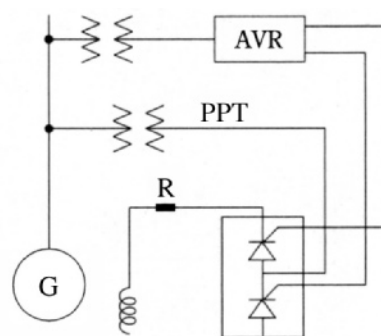


図6.20 サイリスタ励磁方式（均一ブリッジ形）

方式を通称サイリスタ励磁方式という。図6.20にその励磁回路構成を示す。

サイリスタ励磁方式は使用される変換器の構成によりさらに、均一ブリッジ形と混合ブリッジ形に分類される。均一ブリッジ形はサイリスタだけで構成され、混合ブリッジ形はサイリスタとダイオードを組み合わせサイリスタ特有の出力側電圧波形に関わる問題の軽減を図るものである。

交流発電機を励磁システムの電源として使用する励

⁹⁶ [解説] 励磁機に急しゅんな電圧の変化が要求されたときに、単位時間に増減する励磁機の電圧の割合。

磁方式の場合、一般に励磁系電圧速度や励磁機速度は低い。それは、発電機界磁コイル電流の増減要求に対してまず励磁機の励磁電圧を制御して電流値を調整するため、励磁機界磁コイル、励磁機ステータコイル、および発電機界磁コイルなど複数回路の時間的な遅れが重畳された結果、システム全体としての応答が遅くなる欠点がある。これに対し静止形励磁方式の場合、変換前の交流電源は頂上電圧発生時に必要な電圧・電流・容量を有し、通常運転時は変換器を制御してその出力、すなわち発電機界磁電圧・電流を必要量だけ供給する。外乱発生などの緊急時には、変換器のゲート（制御角）を制御して界磁電流を増減する。このように変換器のゲート制御により界磁電流を制御できるため励磁システムの応答性は格段に向上する。従来の励磁系では0.5秒程度の時定数であったものが一気に1/10の50msのオーダーにまで小さくなっている。

直結励磁機の排除による軸系に関わる問題の緩和、制御回路数の低減や変換器のゲート制御などによる応答性の改善など多くの長所があり、大容量・遠隔地発電プラントなど系統運用が難しいプラントで多用されている。

頂上電圧値として既に1,500V～2,000V（直流）級が大容量発電プラントで実用されている。一般に、高い頂上電圧を有する励磁システムほど送電系統の過渡安定度に貢献する度合いが大きい。

しかし、その最高許容電圧は励磁回路の絶縁強度面、特に長期絶縁寿命から制限される。それは、電力変換器特有の新たな問題があり、採用に際してはこれらの課題解決を図らなければならない。

その主なものは、サイリスタ採用時に見られる出力側（直流側）の電圧波形に起因する問題である。以下に、主な課題と解決をのべる。

高い頂上電圧に対する絶縁設計およびスパイキー電圧による絶縁劣化^{97,98,99}

従来方式の定格励磁電圧は500～700Vクラスで頂上電圧も750～1,000Vであったが、サイリスタ励磁方式の導入により頂上電圧はさらに高電圧化の傾向にあり、1,500～2,000V級まで実用されている。したがって、励磁システムの電源電圧は2,500～3,500V（交流）となる。頂上電圧発生時（フォーシングと呼ぶ）に最大電圧が発生し、この出力電圧はサイリスタ転流時のサー

ジ電圧が重畳された高電圧（スパイキー電圧と呼ぶ）となるため対地電圧はさらに高くなる。通常運転時は、サイリスタのゲート（制御角）を制御して発電機の負荷状態に応じた励磁電圧・電流を供給する。このような運転状態でも、発電機界磁コイル他の励磁回路にはノコギリ状波形のスパイキー電圧が印加され、その電圧振幅（変動幅）はフォーシング時の対地間電圧と同等になる（図6.21参照）。発電機機器寿命の点から見れば、フォーシング運転の回数・時間とも比較的少なく、通常運転時の積算時間の方がはるかに長くなり、こちらの方が寿命時間の支配的要因となる。

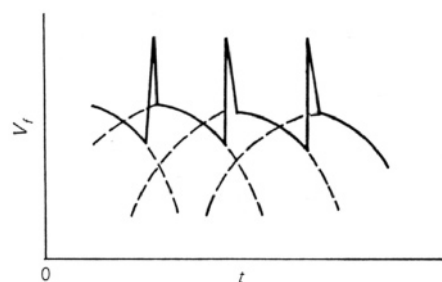


図6.21 定格出力運転時のサイリスタ出力電圧波形の例

タービン発電機ロータコイル絶縁は、回転遠心力を考慮して機械的強度の高い繊維入り合成レジン積層板（FRP）により構成されており機械的要因による劣化は少ない。FRPの電氣的要因による絶縁劣化特性に関するデータは必ずしも十分ではないが、使用材料の印加電圧—放電電荷量の関係を把握した絶縁設計により高信頼ロータ絶縁は実現可能である。

スパイキー電圧による軸電圧

サイリスタ励磁方式の出力電圧波形は直流電圧に高調波電圧が重畳されており、ロータ絶縁が健全な場合でも高調波成分が交流電圧と同様の働きをしてロータ軸（接地側）に電圧・電流を発生する。このため、発電機軸およびタービン軸に電圧（軸電圧と呼ぶ）が発生し、適切な対策を施さない場合には軸受け部の潤滑油膜を放電破壊し軸受けメタル（ロータ軸摺動面）を損傷することになる。

軸受け部近傍の軸表面に直に当たる低抵抗接地ブラシ（金属性ブラシまたは銅網線）を設置する対策が必須である。この対策は、軸電圧をゼロレベルまで下げることにより軸受けメタル部の放電を解消および低抵抗バイパス回路として軸の電荷の放電が狙いである。

97 「大容量タービン発電機の超速励磁方式」東芝レビュー30巻4号（1975年）

98 "Evaluation of field insulation of turbine-generators with higher thyristor excitation" IEEE 85SM 342-1(1985)

99 "Reliability study on field insulation of turbine-generators with higher response excitation" CIGRE 1986 Session 11-06 (1986)

タービン軸も含めた接地点数、ブラシ接触抵抗、および接地回路の抵抗を最適化することにより効果的に軸受け損傷問題は回避できる。

6-5-3 励磁方式のまとめ

励磁方式は、歴史的に、そして系統安定化などの電力系統運用上の要求などから今日まで種々の変遷があった。表6.4に日本で実用された励磁方式の分類を示す。

励磁機構造の改善や励磁システム諸性能の高度化により、機器の信頼性、経済性、保守性などの改善、そして系統運用面での安定度向上、送電線容量・回線数の増強なしでの送電電力量の増大、および長距離送電の実現など多くの問題解決が図れる。

本来、発電機の電気基本設計は、系統運用面からの要求を満たすように発電機特性を選定しなければならない。しかし、発電機の設計・製造の歴史を振り返ってみると、発電機側の要求を重視した発電機の主要特性（定格力率、短絡比、同期リアクタンスなど）を選定してきた感は免れない。すなわち、製作可能限界容量の拡大の他、それ以下の容量範囲では機器の小形・軽量化による発電機製造コストの低減、発電プラント機器の中で最大重量・寸法となる発電機ステータの輸送限界の解消や輸送費の低減、そして発電機建屋・基礎台の建設費低減などから発電機特性を選定してきた（第5章5-4-1、5-4-2、5-4-3参照）。

結果的には、電力系統運用側からは『使い勝手の悪い』発電機を提供してきたことになるが、発電機励磁制御システムを始めとして系統運用技術やリレー技術がこれらを補完し、電力安定供給を実現する技術として長足の進歩を遂げてきた。これらの技術は、総発電電力量の大半を占める火力・原子力電力プラントの大容量化を実現する重要なサポート技術である。

特に、最近の新設発電所は、立地問題から需要地から離れた遠隔地に建設されることが多く、大電力・長距離送電となるため系統運用は一層困難さを増し、高性能な励磁システムは不可欠となっている。

発電機容量、系統運用条件、運転環境（運転員レベル、設置条件）、経済性、および機器寿命など多面的に考慮して各種励磁方式の中から最適システムの選択する必要がある。

特に、励磁システム設計者は、昨今の利用可能な高性能ハード、ソフトの多さから励磁システムの高性能化のみを注目したシステム設計を指向しがちであり、ややもすると発電機に過酷な運転を強いる結果となる。万一、不具合が生じた場合、発電機本体が修復に最も多くの時間と費用を必要とすることを肝に銘じ、励磁システムの最適化に取組まなければならない。

表6.4 励磁方式の分類

励磁方式	励磁装置の主要構成機器			略称 (通称)	代表的 構成図
	電源機器とその分類		バルブデバイス		
直流励磁機方式	直流発電機			—	図6.15
交流励磁機方式	同期 発電機	回転電機子形	他励	ダイオード	ブラシレス 励磁方式
		回転界磁形	他励		他励交流 励磁機方式
			分巻		分巻交流 励磁機方式
静止形 励磁方式	変圧器		サイリスタ	(均一ブリッジ形) サイリスタ励磁方式	図6.20
			サイリスタ ダイオード	(混合ブリッジ形) サイリスタ励磁方式	
	変圧器と変流器		サイリスタ または ダイオード	(自励) 複巻サイリスタ 励磁方式	

7 | 考 察

タービン発電機の最大技術課題のひとつである国産大容量機の製造は戦後の新鋭火力発電プラントに端を発しているが、敢えて黎明期からの足跡を追ってみたのは昭和時代初期から第二次世界大戦勃発までの間に軍需産業の隆盛といった背景はあったが、技術的には著しいタービン発電機の技術発展を見出せたからである。技術基盤、主要資材などが不足する厳しい状況下で世界最大級の2極タービン発電機を相次いで完成している。

その実現には幾つかの要因が推測されるが、その中で「技術に挑戦する精神」、「製品への限りない愛着心」、そして「職人気質とも言える製造現場のパワー」に注目したい。そして、必ずしも十分に検証されない国産の記録的大容量機の製造・運転の場を戦前は植民地に求め、戦後はその機会の提供を英断した利用者、電力会社の存在が大きかった。優れた、特徴ある技術に裏付けられた製品が社会に受け入れられることは、すべての工業製品に共通的に言えることであるが、タービン発電機などのような機器の場合、発注前に完成品に實際手を触れ、使って見てその性能・品質を判断することは困難で、製造・運転の実績、そして電機製造会社の保有する技術対応力や関与する技術者への信頼感などを総合的に評価して発注されるところが大きな違いであり、「技術実践の場」の獲得は困難であった。

この課題は、社会インフラ的な役割を担う発電事業、そして主要機器であるタービン発電機の設計・製造では、時代と環境が変わっても本質的には今後とも変化はないと考えられる。

技術に対する信頼感に加え、近年はコンピュータ利用による解析技術の高度化、そして製造現場へ活用した『技術の定量化』による製造技術の維持・継承などによる総合技術力の涵養が必須である。

以下に、黎明期から今日までの変わらぬ課題であり、やや鈍化しているが今後とも課題の一つである大容量化について将来動向・課題面から考察する

7.1 各種冷却方式による製作限界容量と将来動向に関する考察

タービン発電機の設計、製造技術面から見た単機容量の製作限界を考察する。タービン発電機大容量化の歴史は、信頼できる最大ロータ軸材が常にその時代の容量を制限し、現在も基本的にその状況は変わっていない。特に、高出力密度化のための電気装荷の増大に伴うステータ電流容量の拡大やステータ鉄心端過熱など

の課題が、高性能コイル設計技術の確立および高性能鉄心端部構造の開発により解決された現時点では、再びロータの大形化・高性能化が最大課題である。

現用の大容量タービン発電機は、水直接冷却ステータコイル、水素ガス直接冷却ロータコイルの組合せが一般的であり、多くの製作・運転実績がある。この他、大容量化、コンパクト化、あるいは発電機特性改善などの対応技術として水冷却ロータ、超電導ロータなどが研究・開発されている。これらの将来技術も含め2極-3,600min⁻¹機について製作限界を推察する。なお、2極-3,000min⁻¹の限界容量は3,600min⁻¹機の約1.2倍程度になる。

(1) 汽力発電用タービン発電機

現用機冷却方式における限界容量

2極-60Hz、1,120MVA-1,000MW機で採用した引張強さ1,000MPa級の軸材をベースとした最大容量は1,250MVA程度が限界であり、水素ガス圧力を630kPaに上昇しても約1,350MVAである。軸材の引張強さを1,050MPaとした場合、ロータ軸径を大きくでき、仮に1,200mmとした場合の単機容量の限界を図7.1に示す。なお、引張強さ1,050MPaは軸材大形化に伴い解決すべき課題はあるが、実現性の高い強度レベルであると考えられる。

鉄心長は軸剛性により支配的に決まり、軸振動応答感度など運転性から慎重に検討しなければならない。軸剛性はロータ鉄心長と直径の比で概略表わせることからL/Dレベルを種々変え、その時の発電機最大容量を算出した。軸安定性は多分に経験的な問題で、設計、製造上の検討のみで解明できない点が多い。経験的な数値であるがL/Dの上限は7.3と言われている。この条件での最大単機容量は約1,450MVA-水素ガス圧力520kPaとなり、水素ガス圧力を630kPa (90psig)とした場合1,580MVAとなる。「上限」と「実績最大値」の中間的な値の「実用最大」で算出した場合、1,500MVA-水素ガス圧力630kPaとなり現用機冷却方式における限界容量と考える。

現用技術および今後の改良技術をベースに1,670MVA-1,500MW機の実現可否を検討した。その実現には、

- ・ 軸剛性L/D：7.3
- ・ 水素ガス圧力：630kPa
- ・ 短絡比：0.5

などの条件が不可欠であり、特に軸剛性に係る主要課題の解決が必要となる。なお、この場合にも低短絡比による基本設計上の制限はない。

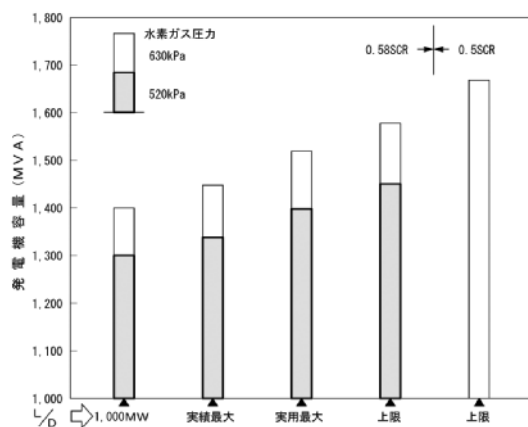


図7.1 現用機冷却方式における限界容量 (2極-60Hz、0.9pf)

その他の冷却方式における限界容量

高圧水素ガスによる直接冷却ロータよりも優れた冷却性能を有する冷却方式として幾つかの新しい方式が提案されているが、これらの中で実現性が比較的高く、実用化の見込める技術として

- ・水冷却ロータ (従来形ステータとの組合せ、完全

水冷却機)

- ・超電導ロータ (従来形ステータ、空隙巻線ステータとの組合せ)

の2種類がある。

超電導発電機については多くの場で検討されてきているのでここでの説明は省略するが、大容量化技術として多くの可能性があり、その優れた発電機特性の系統運用面そして発電機運用面でのメリットや発電機製作における経済性を考慮すれば、従来機と比較して将来的にその優位性を確保できると考える。

図7.2に各種冷却方式による最大容量と技術課題を示す。各冷却方式について、技術の完成度により現用機最大容量、技術改良機最大容量、そして技術の大幅改良後の最大容量に分けて表わす。参考までにタービンも同様に表示する。タービン発電機が1軸で総出力を発生するのに対し、タービンは複数軸で同じ総出力を発生するので、大容量化対応は発電機の場合より容易である。

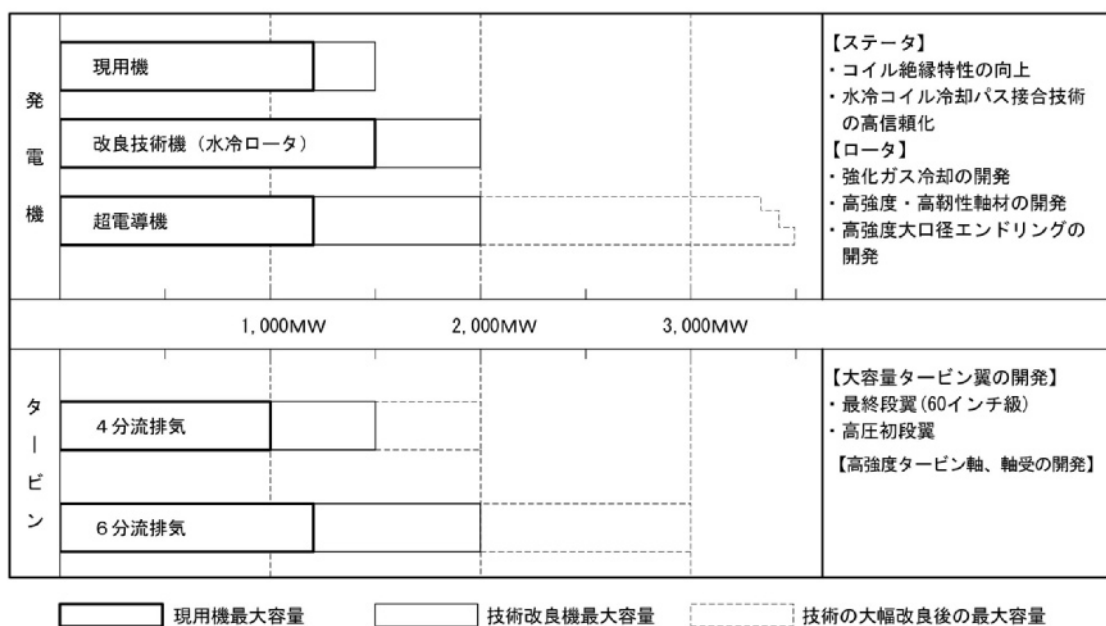


図7.2 タービン・発電機の大容量化の可能性と技術課題

(2) コンバインドサイクル用タービン発電機

コンバインドサイクル発電システムにおける原動機の大容量化の可能性、市場ニーズとは切り離し、ステータ間接冷却タービン発電機としての大容量化の可能性について検討する。これは、汽力発電用タービン発電機の限界容量の拡大とは多少狙いが異なり、現用機技術の容量範囲をどこまでローエンド技術で置換できるかという課題である。したがって、この成果は必ず

しもコンバインドサイクル発電用タービン発電機に限定する必要はなく、汽力発電用としてニーズに応じ適用することは問題なく、経済的メリットが期待できる。

ステータ間接冷却タービン発電機の大容量化はロータ軸など回転体からの制限はなく、ロータ設計は製造コストとその発電機容量に見合った必要界磁アンペアターン数¹⁰⁰の兼合で最適冷却方式を選択することにより十分対応可能で、設計の自由度はある。

100 [解説] ロータ性能を表し、コイルの総ターン数／極に励磁電流を乗じた値。

ステータコイル大電流量化要求に対し複数の設計コンセプトがあるが、この課題を解決する技術として絶縁の熱伝導率をさらに改善した改良HTC絶縁の開発と考える。

図7.3に主絶縁の高熱伝導化による出力密度増大の基本コンセプトを示す。ステップⅠは既に達成され実用されており、今後の高出力密度化に対し主絶縁の熱伝導率をさらに2倍（従来絶縁の4倍）にした場合を示している。改良HTC絶縁の適用によりステップⅠに対し約8%の出力密度増が見込め、最大容量は800MVA超となると思われる。

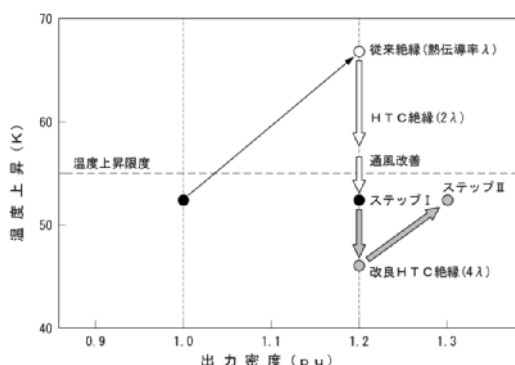


図7.3 主絶縁の高熱伝導化による出力増加インパクト

改良HTC絶縁システム（従来絶縁熱伝導率の4倍）の開発は、基本的には開発済技術の延長線上で可能と考えられる。高熱伝導フィラーの改良、添加量、添加部位などの最適化、見直しが必要となる。なお、熱伝導率の改善と発電機設計・製作上のメリットとの兼合で技術開発の必要の是非を慎重に判断することは申すまでもない。

7.2 タービン発電機の将来の課題に対する考察

タービン発電機は、発電システムを構成する重要機器の一つであるが、その将来の技術動向はタービン発電機単独で論ずることは正確さを欠く恐れがあり、発電システム全体の将来動向の中に位置づけて洞察しなければならない。はじめに、発電プラント全体としての将来の技術動向を概観する。

21世紀における発電プラントのあり方は、

- －エネルギーの枯渇
- －経済成長の維持
- －地球環境の悪化

など相互に相反するトリレンマの問題を如何に克服してゆくか、世界レベルで多くの関係者が取り組み中である。

図7.4に21世紀の発電技術の予測を示す。これは燃料別に対象となる発電システムとその内容が盛り込ま



図7.4 21世紀の発電プラント技術予測
WECヒューストン大会の議論より

れている。この図からも明らかなように蒸気タービン駆動発電が共通的な基幹技術であり、汽力発電、コンバインドサイクル発電、原子力発電などのシステムの発展に参与しており、今後の発電システムを構成する主要機器としてさらなる技術発展が期待されている。わが国のエネルギー供給システムの今後の動向を見ると、従来の電気供給システムとガス供給システムの独立・分離形態からハイブリッド電気・ガス供給システムへ移行しつつあり、特に電力とガスの分散型供給システムが現実化し、小規模発電システムの実用化の確度は高いと予想される。しかし、近年鈍化しつつあるが依然として堅調な伸びを示す電力需要の増加およびスクラップ&ビルトに対しては、基本的に大規模、中規模発電システムがその任を担うものと予想される。

これらより蒸気タービン、タービン発電機などの機器単体での進化のみならず、各機器を組合せてより高い経済性、環境性を有するシステム技術が重要となる。これには、個々の機器の特性を引き出す優れたシステム結合技術の実用化が必要である。

以上、発電システムの今後の技術動向を概観したが、これを受けたタービン発電機の将来の技術課題を推察する。「発電コストの低減」、「CO₂排出量削減」の2大課題を受けて、「コンパクト化」「システム簡素化」「高効率化」が必須で、新技術と合理的設計法による実現が望まれる。特に、機器コストの低減技術に関し、この課題は「物のつくり方」や「材料の買い方」などとは異なり、技術の問題であるとの認識で取組まなければならない。コンパクト化と高効率化の両立、技術のローエンド化による簡素化、ライフサイクルコストの追求から劣化加速要因を極力排除・緩和する設計コンセプトを基本としなければならない。

一部重複する点もあるが実務レベルで見たタービン発電機に係る最近の情勢、要求を挙げる（表7.1参照）。

これらの情勢、ニーズから抽出できる課題として、厳しい運転条件、長寿命化から疲労設計があげられる。

表7.1 タービン発電機のおかれている環境

情 勢、ニーズ	背 景
・多頻度・急速な負荷調整運転 ・進相無効電力の要求増 ・高調波電流の増加 ・異常状態下での運転継続 ・既設プラントのUp rating ・既設プラントの長寿命化 ・運転技術レベルの低下 ・定検間隔期間の延長 ・自動監視・診断装置重視 ・保守技術・技能レベル低下	- 大容量火力プラントも含め増加の一途 - 地下ケーブルの増加、系統安定化ほか - インバータ付機器の普及 - 運転の誤操作、異常発見の遅れ - 最少投資による容量増加（10～20％） - 従来25～30年から50年間運転 - 自動化への依存、異常時の判断力欠如 - コンディションベースへ移行 - 省人化を補う装置の導入拡大 - 技術、技能継承システム不備

タービン発電機のような電気機械の劣化要因は、大きくみると（1）電気的劣化と（2）機械的劣化に分類される。最近の絶縁材料の進歩により電気的要因による劣化問題はほとんど解決され、後者の機械的劣化要因が支配的である。

一般に、電気機械の劣化加速要因はタービンなどと比較して1回の運転履歴による劣化レベルが低く、消

費寿命の算出は困難である。しかし、運転モードは多頻度・急速起動停止、負荷調整運転に代表されるように厳しくなる一方である。

技術的に極力劣化要因の緩和をはかり、またそのような厳しい劣化を惹起する設計コンセプトの排除により高耐力を有する高信頼性を合理的技術レベルで実現することが必要である。

8 | まとめ

日本における火力・地熱発電所用タービン発電機を主に黎明期から今日までの進化・発展の足跡を追い、そこに潜む原動力と実現のための日本人の知恵を探求してきた。

そして、その技術的な流れの中で、その後の技術革新や発展の起爆剤となった技術の証しを整理し、その意義付けと併せて取り纏めた。

現在、日本のタービン発電機に関する設計・製造技

術の達成レベルは世界的に見てもトップレベルにあり、明治維新直後の輸入機器による電気利用、発電事業、そして国産発電機の製造へと変遷した140年弱の“温故”は、グローバル化、ボーダーレス、そしてニーズ多様化などの急速でドラスティックな環境変化の時代での生き残りの“知新”を与えてくれるもの確信する。

■ 謝辞

今回実施した「電力用タービン発電機技術発展の系統化調査」に関しては多くの方々にお手数をお掛けし、ご協力頂きましたことに深く感謝致します。

本報告書のベースになっていますタービン発電機の技術データについては株式会社日立製作所、富士電機システムズ株式会社、株式会社東芝、三菱電機株式会社、そしてタービン発電機の主要材料について株式会社日本製鋼所の絶大なるご協力を得ました。特にデータ作成にあたり次の方々には調査にご協力を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

株式会社日立製作所

富士電機システムズ株式会社

株式会社東芝

三菱電機株式会社

株式会社日本製鋼所

塩原亮一氏、佐藤浩之氏

村岡政義氏

宮池 潔氏

鈴木一市氏、前田 進氏

田中泰彦氏、池田保美氏、吉田 一氏

また、東京電力株式会社 電気の史料館 沖健志郎氏、坂本幸治氏、川崎隆司氏、本社総務部 渋谷哲央氏には初期の輸入発電機ならびに戦後の記録的新鋭火力などに関する貴重な資料の提供を受けました。

電気事業連合会 広報部 小林弘明氏には発電電力量・設備容量に関する統計資料を提供頂きました。

九州大学名誉教授 成田賢仁氏には電磁鋼板の技術発展史に関する貴重な資料を提供頂き、また新日本製鐵株式会社 坂井田晃氏、中村吉男氏にも資料提供頂きました。さらに、元新日本製鐵株式会社 興石弘道氏には貴重なアドバイスを頂きました。

元国士舘大学 川口芳弘氏から海外博物館などで展示されている初期の電気機械に関する貴重な資料・写真の提供を受けました。

参考資料1 電力用タービン発電機の技術史年表

年	日本における電力状況	タービン・発電機関係開発新技術	主要タービン発電機製品	社会情勢、海外の電気関係・発電機の状況他
1831				Faraday電磁誘導現象発見
1837				
1856				
1866				Siemens(独)Dynamo(ダイナモ)発明
1869	江戸・築地ー横浜間に電信が開通			東京遷都 スエズ運河の開通
1875	日本最初の電信機工場の田中機械製造場設立(後の田中製造所)			
1876				Altenack鼓形回転子発電機発明(今日の直流機の原型) Bell電話機の発明
1878	日本初のアーク灯点る 発電機・電灯を装着した英国製軍艦 「金剛」他を回航			Edison白熱電灯発明
1879				Edisonニューヨークで電力事業開始
1880				
1881				
1882	銀座にアーク灯点る 田中製造所(後の芝浦製作所)創立			GaulardとGibbs交流配電方式による照明考案 Edison電燈会社世界初の発電所運転開始(ロンドン)
1883	三吉工場設立(初の強電機器工場)			Stanley逆起電力の考え発見
1884	日本初の白熱灯点る 国産初白熱電灯用 5kW発電機製作			C.A.Parsons(英)反動蒸気タービン発明(現用蒸気タービンの原点)
1885				Ganz社(ハンガリー)交流変圧器開発
1886	東京電燈会社開業、電球製造開始			交流支持者・直流支持者の大論争
1887	初の営業用火力 東京電燈第二電灯局直流発・送電開始(輸入 25kW機)			Tesla二相電動機の実験成功 Westinghouse社設立
1888	日本電気学会創立(会長榎本武揚)			
1889	大阪電燈 トムソン・ハウストン式30kW-1,155V-125Hz発電機で交流配電開始			AEG社がご型誘導電動機発明
1890	白熱舎(現東芝)国産電球製造開始 足尾銅山の水力発電所運転開始			東京ー横浜間の市外電話が開通

1891	初の営業用水力 京都蹴上発電所竣工 80kW-500V(輸入・DC)				フランクフルト電気博覧会 三相交流発電成功(独)
1892	箱根水力発電 国産20kW水車・直流発電機設置 電気試験所設立				General Electric社創立(米)
1893	国産初変圧器製作(三吉電機工場) 田中製造所が芝浦製作所と改称し 国産初単相 30kW-2,000V水車発電機				
1894					日清戦争(~05)
1895	京都電気鉄道開業 蹴上発電所国産1号60kVA-2,000V二相交流発電機	浅草火力 I 期完成(全国産化を狙う)国産330馬力縦型船用蒸気汽機、国産200kW発電機			
1896	東京電燈 浅草火力完成、50Hz送電開始(50Hzの端緒)	浅草発電所、3相-265kW-3000V-50Hz発電機(AEG製)			ナイアガラ水力発電所建設(二相、パツファローまで送電)
1897	大阪電燈 GE製150kW-60Hz発電機設置(60Hzの端緒) 明電舎創立				
1898	三菱造船長崎に電機工場設置				
1899	郡山絹糸沼上(300kW-24km)・広島水力電気(750kW-26km)が11kV-三相交流送電開始(全輸入)				Elborteld火力発電所 1,000kW機(英、現用火力発電所の第1号)
1900					Steinmetz交流理論確立 Hadfield(英)珪素鋼板発明
1901				回転界磁形150kW三相交流発電機(芝浦製作所)	Bullock社(米)円筒型回転子(ラジアルスロット構造)開発 官営八幡製鉄所第1号高炉火入れ
1902					Armco社4%珪素入り鋼板発明 日英同盟
1903				回転界磁形200kW三相交流発電機(芝浦製作所)	
1904	水力発電所建設機運高まる(全輸入) 三菱造船C.A.Parsons社と技術提携	横浜共同電灯 葛高島町火力500kW-60Hz2相交流発電機(GE製 カーチスタービン駆動)			日露戦争(~05)
1905		東京電燈 千住火力 パーソン500kWタービン発電機4基(WH製 初の蒸気タービン駆動) 東京市街鉄道1,500kWタービン発電機(GE製 壁形カーチスタービン駆動)			G.Einstein相対性理論発表
1906	東京電燈 千住発電所4,500kW完成、交流屋間電力供給開始				

1907	駒橋水力(15,000kW)-早稲田間 76km-55kV高電圧長距離送電開 始	三菱造船長崎バーソンズタービン駆動500kW (輸入)	三菱造船長崎バーソンズタービン駆動500kW		
1908	久原鉱業所日立鉱山に電気機械修 理工場設置(日立製作所の前身) 金谷ホテル 自家用水力発電設備	三菱造船長崎バーソンズタービン国産化	三菱造船長崎バーソンズタービン国産化	三菱造船長崎バーソンズタービン国産化	三菱造船長崎バーソンズタービン国産化
1909	日立鉱山 5馬力誘導電動機製作				
1910	芝浦製作所-General Electric社技 術提携				
1911	日立製作所創立 大阪電燈安治川竣工(当時東洋一)				Onnes超電導現象発見
1912	「水主火従時代」始まる				
1913	王子製紙千歳 国産6,250kVA水車発 電機(当時国産最大)				
1914					第一次世界大戦 パナマ運河の開通
1915	猪苗代第一水力-東京間 226km- 115kV高圧長距離送電(世界記録) 安川電機創立				
1916	電気炉製鋼開始 3500馬力誘導電動 機(大同特殊鋼)				
1917					
1918	松下電気器具製作所創立	独自技術による水素冷却1,000kVAタービン発 電機工場試験(H)	大阪電燈春日出 4極-12,500kVA-1,800min ⁻¹ 機(三菱造船長崎製、当時国産最大)	野上鉱業 2極-1,000kVA-3.5kV-50Hz機 (エッシャーウイス社製蒸気タービン駆動)(H)	対米無線通信開始
1919	ダム式水力発電開始(野花南)				
1920	日本初の給電所(東京電灯 麹町)				世界経済恐慌
1921	三菱電機創立				軍拡熱で船用タービンの需要増、タービン技術の急速な進 歩 対米通信用に初の国産蒸気タービン駆動高周波発電機採 用(T:アレキサンダーソン高周波発電機)
1922					
1923	富士電機製造創立(古河とSiemen sの提携) 三菱電機-Westinghouse社技術提携	(75,000kW級タービンまでの国産技術確立)	神岡鉱業 2極-937.5kVA-2.2kV-60Hz機(大阪 鉄工所製ユングストロームタービン駆動)(H)		関東大震災
1924	電気機関車の製造開始		沖縄電気 2極-625kVA-60Hz機(M1号機)		軍縮会議による船用タービン需要減少、陸用タービンへ転換

1925	東京一熱海間電化				ラジオ放送開始	
1926	東京電燈 千住火力発電所竣工 国産初 300kW-600V水銀整流器 (盛岡電燈)	日本初の蒸気タービン駆動営業用火力発電 所稼動(英製、千住火力)	満州電気 2極-6,250kVA-3.3kV-3,000min ⁻¹ 機(三菱造船 長崎製) 南海電鉄 2極-3,125kVA-11kV-60Hz機 (H、大阪鉄工所製ユングストロームタービン駆 動)			
1927			八幡製鉄 2極-25,000kVA-3.5kV-1,500min ⁻¹ -25Hz機(M, 当時国内最大) 崎戸鉱業所 2極-3,750kVA-3.5kV-60Hz機(M)		昭和の金融恐慌 日本最初の地下鉄が上野-浅草間に開通	
1928	国産最大 15,000kVA水車発電機完 成	尼ヶ崎火力発電所140MW完成(当時東洋 一)	台湾製糖 2極-700kVA-60Hz機(T1号機 薄 鋼板積層口一タ)			
1929		国産初の復水タービン駆動 7,500kVA機(T)	鐵道省 4極-29,000kVA-6.6kV-50Hz機(M)			
1930			三井鉱山 大浦 2極-11,250kVA機(T) 4極-31,250kVA-1,800min ⁻¹ 機(M)	世界金融大恐慌 テレビ実験放送成功 電気冷蔵庫・電気洗濯機製造開始		
1931	日立製作所-AEG社技術提携		4極-48,000kVA-1,800min ⁻¹ 機(M)	満州事変、軍需生産の増大		
1932	「電気事業法施行令」		宇部曹達 2極-12,500kVA-60Hz機(M、ユン グストロームタービン駆動)			
1933		関西共同火力 尼ヶ崎第一 4極-62,500kVA- 1,800min ⁻¹ -13.2kV機(M、T、分割ロータ、当 時東洋最大容量)	宇部発電所 2極-60Hz-22,500kVA機(M、ユ ングストロームタービン駆動、3600min ⁻¹ 機とし て当時世界最大級)(T)			
1934	初の揚水発電開始			Goss(米)方向性珪素鋼板開発		
1935			広島電気 坂出 2極-31,250kVA-11kV機(M, ツエリ-タービン駆動、3600min ⁻¹ 機として世界 最大級)	湯川秀樹 中性子理論発見		
1936	石川島蒸気タービン創立(GE社と技 術提携) 「電力管理法」公布	東京電燈 鶴見火力第一 4極-62,500kVA- 11kV-50Hz機(M、ディスク形ロータ)	八幡製鉄所西田 2極-50Hz-31,250/37,500 kVA機(3,000min ⁻¹ 機として国内最大)(H)			
1937		関西共同火力 尼ヶ崎第二 4極-93,750kVA 機(M、T:13.2kV, 当時東洋最大容量)	満州鉱山 2極-8,750kVA-3000min ⁻¹ 機(F1号 機)	日華事変		
1938		九州共同火力 戸畑火力 2極-62,500kVA機 -3,000min ⁻¹ 機(T、3,000min ⁻¹ 機として当時 東洋最大)	満州2極-62,500kVA-3,000min ⁻¹ 機(3,000 min ⁻¹ 機として東洋最大)	水素冷却初号機 31,250kVAタービン発電機製作(米・GE) Hahn, Strassman(独)ウラン核分裂発見		
1939	日本発送電創立 東京芝浦電気創立 鴨緑江水電水豊100MVA-150min ⁻¹ 16.5kV水車発電機(当時世界一)		相之浦 2極-37,500kVA-60Hz機(M、 3600min ⁻¹ 機として日本最大容量) 戸畑火力 4極-62,000kVA機(T)	第二次世界大戦始まる(～45)		
1940						
1941				米英に対する日本宣戦布告		

1942		独自技術による水素冷却機 三菱重工業 崎戸 鋳業所 2極-11,000kVA-H ₂ 圧 5kPa機 (M、 空冷8,750kVAとして出荷)	清水火力 2極-60Hz-37,500kVA機(ロータ軸・エ ンドリング材にNi-Cr鋼使用) 河北電業 2極-12,500kVA機(ユングストローム タービン駆動) (M、当時東洋最大)	Enrico Fermi(米)史上初の核分裂連鎖反応達成
1943	満州向け大形電気機器続々と完成			
1944				
1945	日本規格協会の設立			第二次世界大戦終結
1946	「電気事業法」の改正			
1947			姫島製塩 750kVA (M、戦後1号機)	国際標準化機構 (ISO) の設置
1948				トランジスタ発明(米・ベル研究所)
1949	GHQ水力発電所の開発許可			360円/1ドルのレート決定
1950			沖縄・牧港火力 13,529kVA機 (T、戦後1号機)	朝鮮戦争
1951	電力再編成 (9電力会社) 東芝-GE社技術提携 三菱電機-WH社技術提携		築上火力 空冷2極-43,750kVA機 (M、2極空 冷機として記録機)	初の原子力発電(米) 単相250V/3MVA (米・WH) サンフランシスコ平和条約 175MVA、200MVA水素ガス直接冷却発電機開発 (WH)
1952	電源開発発足 日立製作所-GE社技術提携			
1953	富士電機-Escher-Wiss社ガスター ビン技術提携	国産技術による水素冷却 瀬田火力 67,000kVA-11kV機 (H、当時最大水素冷 却) 55MW級水素冷却機完成 (T、M、H)	名港火力 64,700kVA機 (T、独自設計による水 素冷却初号機) 築上火力 66,650kVA機 (M)	125MVA-3600min ⁻¹ ロータ直接冷却機 (GE, エアギャップ ピックアップ方式ロータ)
1954		砂川火力 41.2MVA機 (国産初のインナー ケーシング形式タービン採用機)	名港火力 81,176kVA機 (T) 鶴見火力 81,000kVA機 (M、国産技術) 姫路火力 88,235kVA機 (M)	40MW水素ガス直接冷却機 (英・AC)
1955	「原子力基本法」制定 富士電機-Siemens社技術提携			
1956			三重火力 96,000kVA機 (T)	初の商業用原子炉運転開始(英・コールダーホールNPS) 日本国連加盟 260MVAステータコイル油冷却機 (GE)
1957	日本原子力発電創立 原研 第1号実験原子炉点火	初の天然ガス利用ガスタービン発電設備完 成 豊富発電所 2,500kVA (クローズドサイクルガ スタービン駆動発電機1号機) (F)	千葉火力 160MVA機 (T、国産初の100MVA超 機)	米商業用原子力発電運転開始 (PWR型)
1958				265MVAステータコイル水冷却機 (GE)

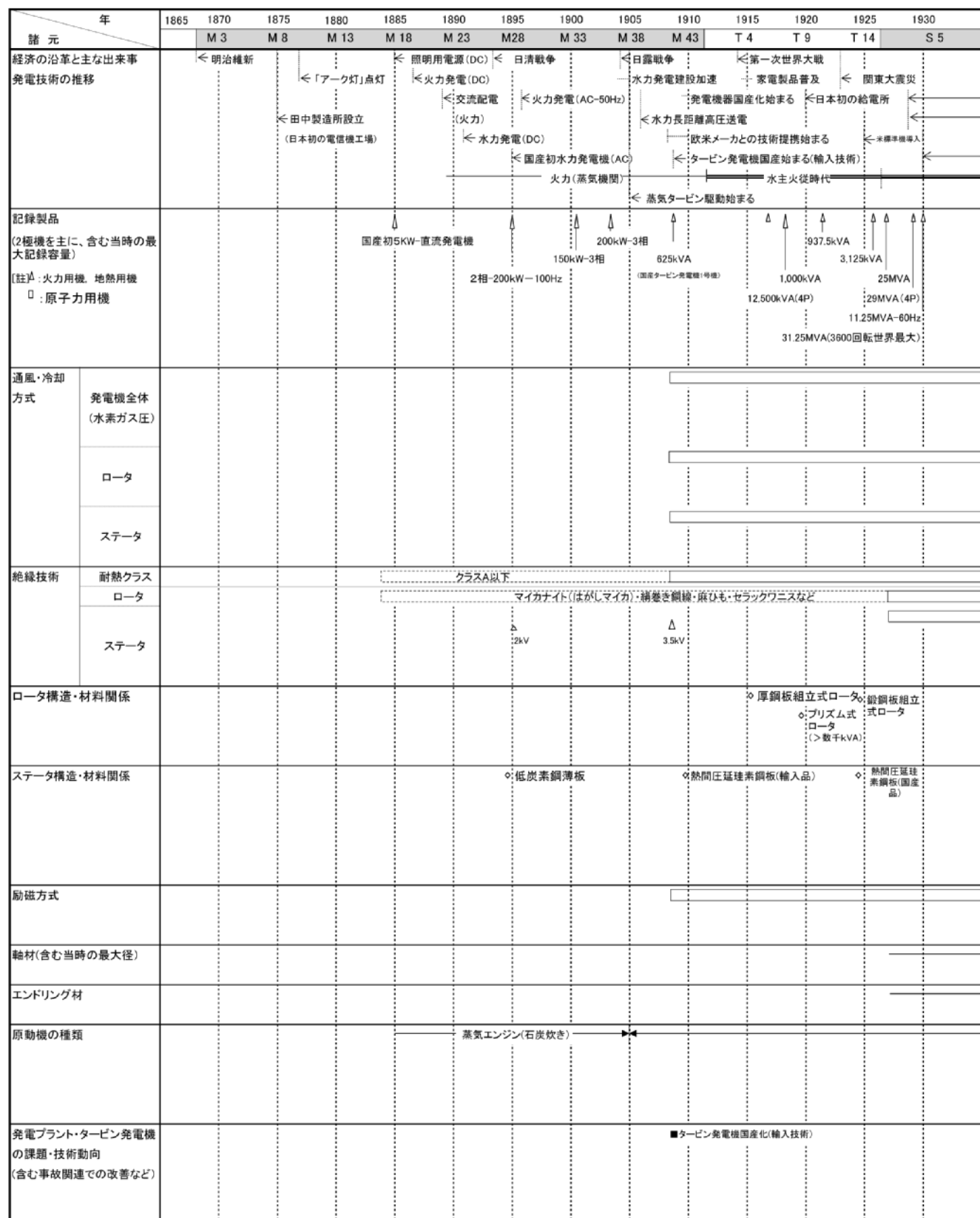
1959	初の地熱発電開始 藤田観光 箱根 40kVA機	大阪火力 208.696MVA機 (M、日本最初の水素ガス直接冷却機) 方向性珪素鋼板初適用 (姫路火力160 MVA機、米アーラム公社製)	仙台火力 224MVA機 (H、間接冷却機として最大、ステータ結線Yx4)	
1960		新名古屋火力281.6MVA機 (T、H、エアギャップピックアップ方式ロータ直接冷却1号機、非磁性エンドリング・ボディマウント方式初採用)	川崎火力 224MVA機 (T) 新名古屋火力 281.6MVA機 (T、H、インナーケーシングステータ)	120MWステータコイル水冷却機 (スイス、BBC)
1961	「火主水従時代」の訪れ		新小倉火力 192MVA機 (T) 日本鋼管 ガスタービン駆動 12,000kVA機 (F)	
1962		横須賀火力 265.6MW機 (クロスコンパウンド形1号機、合成レジンステータ絶縁)	横須賀火力 339.2MVA機 (T、169.6MVA X2台)	
1963	日本原子力研究所動力試験炉 (JP DR) で日本初の原子力発電 2,400kW (12,500kW)			IEEE発足 (AIEEとIREが合併)
1964	「電気事業法」の公布	堺港 300MVAkVA機 (H、ステータ油直接冷却1号機)	姫路火力 396MVA (M、当時国内最大、当時内都冷却機として東洋最大)	東海道新幹線開通 (256km/h) 東京オリンピック開催
1965	電源開発 佐久間周波数変換所の運転開始 (50、60Hzの連系)	知多火力 442MVA機 (T、ステータ水直接冷却1号機、ダイアゴナルフロー形冷却) 横須賀火力 350MW (クロスコンパウンド形機)	横須賀火力 448MVA機 (T、224MVA X2台)	ニューヨーク大停電
1966	東海発電所1号炉125MW運転開始 (コールド・ホール改良型、1966-1998)	松川地熱23,500kVA機 (T、大容量地熱1号機) パッケージ型発電設備1号機 日本石油化学 6,500kVA機 (H)		
1967	動力炉核燃料開発事業団発足		高岡火力 67,500kVA機 (F 水素冷却1号機) 川崎火力 224MVA機 (F、Siemens技術導入)	中東戦争の勃発
1968	美浜原子力 400,000kVA機 (M、大容量1号機)	テトラロックス式コイル端部支持構造初適用 (T) 事業用火力機ブラシレス励磁初適用 (M) F5型G/T駆動パッケージ形発電機開発 (H)	姉ヶ崎火力700MVA機 (T、350MVA X2台) 大分火力 278MVA機 昭和電工 鶴崎他 F5型ガスタービン発電機 (H)	
1969	日本原電敦賀357MW (BWR) 運転開始	初の大容量複合サイクル発電 (M、G/T駆動、LNG導入) 事業用火力機交流励磁機初採用 (T) ノズル式蒸発ロータモデル試験 (T)	坂出火力 36,000kVA機 (M) 富山火力 280MVA機 (T) 秋田火力 408MVA機 (H)	アポロ月面着陸 新日本製鐵誕生
1970	敦賀原子力375MW (日本初のBWR形) 運転開始 美浜原子力340MW (PWR) 運転開始	南横浜火力350MW機 (T、世界最初のLNG専焼火力)	渥美火力 625MVA機 (T、当時国内最大) 米・ガイザース地熱 66,000kVA機 (T、当時地熱世界最大)	大阪万国博覧会
1971	福島原子力第一460MW機運転開始	大井火力 350MVA機 (国内初の変圧運転火力)	海南火力 670MVA機 (T、当時国内最大)	
1972	美浜原子力 560,000kVA機 (M、当時原子力国内最大) 高浜原子力 920,000kVA機 (M、当時原子力国内最大)	知多火力 800MVA機 (T、3600min ⁻¹ 機として世界最大級) 軸振動管理値の省令による義務づけ	八戸火力 290MVA - 50Hz機 (F)	ニューヨークの大停電

1973	福島原子力第一 911MVA機 (T)	回転子サーマルバランス技術初適用 (H, 多奈川 670MVA) 非対称ロータ初適用 (M, 玄海原子力 559MVA)	カイザーズ発電所 132MVA機 (T, 当時地熱世界最大)	第1次石油ショック
1974		軸ヶ浦火力 1,000MWクロスコンパウンド機	軸ヶ浦火力 1,153.9MVA機 (T, 2極-634MVA+4極-519.9MVA)	
1975		F種エボキシレジンVPI絶縁 (T:153MVA機)	豪・ペールスポイント 776MVA機 (T, 当時50Hz機として世界最大級)	
1976	大飯原子力 1,300MVA機 (M, 国産原子力最大)	F7型G/T駆動パッケージ形発電機開発 (H, 坂出火力)	世界初船上バブルブプラント (T, 64.71MVA機)	
1977	動燃事業団日本初の高速増殖実験炉「常陽」臨界			ニューヨーク大停電
1978	動燃事業団新型転換炉「ふげん」臨界			
1979	北海道一本州直流送電連系(300/600MW)運転開始 大飯原子力 1175MW運転開始	全含浸絶縁システム適用初号機 7,500kVA機 (F:地熱発電)		スリーマイル島原子力発電所事故 第2次石油ショック
1980	福島第二原子力 1,300MVA機 (T, BWR用国内最大)	ステータ鉄心磁束シャント初適用 (T:1300MVA機) F9型G/T駆動発電機開発 (H, 国鉄川崎火力)		
1981				
1982	国産燃料電池30kW運転開始	2,000MVA級完全水冷却発電機モデル試験		
1983				
1984	福島第二原子力 1,100MW機運転開始(改良標準型初号機)	LNG複合発電 東新潟火力 1,000MWプラント	苫東厚真 670MVA (H, 50Hz機として国内最大)	
1985	「もんじゅ」280MW (FBR) 着工 浜岡原子力 1,280MVA機 (H, 60Hz - BWR用当時国内最大)			つくば科学万国博覧会開催
1986				チェルノブイリ原子力発電所事故
1987	首都圏の大停電発生 可変速揚水発電システム開発 (H)	世界初の大容量超々臨界圧プラント (川越火力 700MW, 18Mn-18Crエンドリング初適用)		本四架橋完成 国鉄民営化
1988	100KVA速応励磁型超電導発電機実系統連系試験 (T)	高頻度起動停止運転機 (DSS機) 技術開発 (F)	宮津エネルギー研究所2号 420MVA機 (F, DSS機)	青函トンネル開通
1989		F種エボキシレジン絶縁開発 (F) 新ステータコイル支持法初適用 (M, レジコン方式)		バブル崩壊
1990	大飯原子力 1,310MVA機 (M, 国産原子力最大)			湾岸戦争勃発

1991				能代火力1号 670MVA機 (F、50Hz機として当時国内最大級)	
1992			三菱重工 横浜186.9MVAG/T駆動発電機 (M、空冷 サイリスタ起動国内初適用)		
1993			全含浸絶縁システム開発 (空冷冷却機 240MVA級まで) (F)	台湾FCFC空冷全含浸絶縁126,000kVA機 (F) 横須賀火力160MVA機 (M、空冷記録機、G/T駆動)	
1994					
1995		「電気事業法」改正 規制緩和		台湾 FPC 706MVA-60Hz機 (F)	阪神淡路大震災
1996	柏崎刈羽原子力 1,380MW機 (A-BWR) 運転開始		三菱重工 高砂 空冷286MVA機 (M、国産空冷最大、世界最大級、1,500°C/G/T駆動、サイリスタ起動)		
1997	COP3 (京都)				
1998	「省エネルギー法」改定		高熱伝導絶縁システムの開発 (T) カイザーズ発電所137.8MVA機 (T、当時地熱世界最大)	タイ・ラチャブリ発電所 990MVA機 (M、50Hz機として世界最大級) インドネシア137MVA機 (F:空冷世界最大地熱用発電機)	
1999					
2000	電力小売自由化始る			東亜燃料 空冷216.7MVA機 (H)	
2001	台湾・龍門原子力 1,600MVA (M、原子力世界最大級)		碧南火力 1,120MVA機 (T、3600min ⁻¹ 機として世界最大) ステータコイルレール転位自動機開発 (F)	輸出 空冷冷却280MVA-60Hz機 (F)	
2002			多関節ロボット式コイルエンド成形自動装置 (F)	苫東厚真 778MVA機 (H:50Hz機として国内最大)	ニューヨーク同時テロ
2003					イラク戦争

(註) M:三菱電機 T:東芝 H:日立製作所 F:富士電機システムズ GE:General Electric WH:Westinghouse G/T:ガスタービン

参考資料2 電力用タービン発電機技術の系統図



電力用タービン発電機登録候補一覧

番号	名称	資料形態	所在地	製作者	製作年	コメント(プラント、発電機単体としての特徴など)
1	エンジン式4号発電機	実体	東京電力 電気の史料館	Edison Machine Works Builders	1890	Edisonが製作販売した照明電源用の直流発電機で紡績工場で使用されていたもの。
2	アレキサンダーソン高周波発電機	実体	東芝 京浜事業所	芝浦製作所	1926	国産初の蒸気タービン駆動高周波発電機
3	電気計算書(8750kVAタービン発電機)	実体	富士電機システムズ	富士電機	1937	富士電機システムズ初の蒸気タービン駆動発電機
4	中部電力名港4号 64,700kVA発電機	実体	東芝 京浜事業所	東芝	1953	GEからの技術導入水素冷却初号機、実機ロータを保存
5	千葉火力発電所1号タービン・発電機	実体	東京電力 電気の史料館	General Electric Co.	1956	GE社から輸入した大容量新鋭火力の1号機で、わが国初の100MVA超プラントである。
6	中部電力知多1号 442,000kVA発電機	実体	中部電力	東芝	1964	日本初のステータタ水冷却機
7	日本重化学工業松川 23,500kVA発電機	実体	日本重化学工業松川	東芝	1966	日本初の本格的な地熱発電初号機
8	中部電力知多4号 800,000kVA発電機	実体	中部電力	東芝	1972	当時2極-60Hz国内最大容量、世界最大級
9	東京電力袖ヶ浦2号 1057,000kVA発電機	実体	東京電力	東芝	1974	当時国内最大容量クロスコンパウンド機
10	東北電力 能代火力1号 670MVA	実体	東北電力	富士電機	1991	当時50Hzとしては国内最大容量機(タンデムコンパウンド機)
11	三菱重工 高砂 286,000kVA発電機	実体	三菱重工	三菱電機	1996	空冷 国産記録品、世界最大級
12	中部電力碧南4号 1,120,000kVA発電機	実体	中部電力	東芝	2001	2極-60Hz世界最大容量機
13	全含浸絶縁システム(GII)用全浸装置の導入	実体	富士電機システムズ	富士電機	1993	中大容量タービン発電機用全含浸絶縁設備
14	東芝3,000kVA超電導発電機	実体	東芝 京浜事業所	東芝	1985	東芝自社開発超電導発電機
15	関西電力/京大 100kVA超電導発電機	実体	関西電力 総合研究所	東芝	1988	世界初実系統導入超電導発電機、速応励磁型
16	発電機用ロータ軸全断面でのサルファープリント	実体	日本製鋼所 室蘭製作所	日本製鋼所	1952	実機大ロータ全断面の硫黄分布を調査、鍛錬効果を確認でき以降の鍛錬技術開発の基礎となった。
17	回転試験により破壊した試験ロータ	実体	日本製鋼所 室蘭製作所	日本製鋼所	1953	実機大発電機軸と同一形状の円盤型ロータを破壊までスピニングし、破壊強度を確認したもので、その後の製品設計に寄与

国立科学博物館 技術の系統化調査報告 第5集

平成17(2005)年3月31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 永田 宇征、エディット 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