

石炭・原子力発電から小型ガス・コジェネへ（上）

—電力自由化による新技術促進—

小林 健一

はじめに

拙著『米国の再生エネルギー革命』¹⁾の内容は以下の通り。先進諸国の石油消費の激増により石油危機が起き、その後、石油・天然ガス価格の規制撤廃などで価格上昇を導きエネルギー需要を抑制し、他方、コジェネレーション（熱電併給方式）と再生可能エネルギーを育成するカーター・エネルギー政策が実施された。その後、長期的に天然ガス供給が増え、さらにシェール・ガス・オイルも台頭した。電力分野ではガスタービン・コジェネ²⁾が躍進し、ガス発電は2002年までに発電能力で石炭火力を追い抜き最大の電源となった。高価格だった再生エネは政府支援によって第2位の電源となり、2010年以降最も成長率が高い。

この拙著の中で詳しく扱えなかった論点は少なくないが、まず、エネルギー・電力自由化に疑問を感じる方も多かもしれないので、今回は電力自由化の積極面を取り上げる。電力自由化は伝統的発電方式（石炭火力、原子力発電）とは別の、成長する潜在力を持っていたガスタービン・コジェネを育成し、事実、それは最大の電源になった。にもかかわらず、これを詳細に扱った文献は少ないのである³⁾。そこで、本研究ノートではガスタービン・コジェネについて詳細に明らかにし、電力自由化が小型ガスタービン・コジェネのような新技術を成長させ、分散型発電システムへ移行させつつあることを強調したい。ただし、電力自由化は、カリフォルニア電力危機のように電力市場の不安定化を招くこともあり⁴⁾、これについては別稿で取り扱いたい。

第1節 伝統的発電技術の発展と停滞

1. 電力産業の形成・発展期（1882-1929年）

エジソンの1882年のパール街発電所の成功以来、全国に発電・送配電事業が普及していった。電機産業の統合も進み、1892年にジェネラル・エレクトリック社（以下、GE）が設立された。その直後、同社副社長のサミュエル・インサル（Samuel Insull）が辞任し、小規模な電力会社シカゴ・エジソンの社長に就任した。インサル主導下のシカゴ・エジソン社は「消費促進・投資拡大」戦略（“grow-and-build” strategy）を発展させた。この「消費促

石炭・原子力発電から小型ガス・コージェネへ（上）

進・投資拡大」戦略とは、新発電技術はより効率的で（単位電力量当たり）より低コストになるはずという推定に基づき、電力会社は顧客の電力消費を促進しつつ、次世代の発電設備の大型化を急ぐべきだというものである。大型の新発電設備は、一般的に、熱効率も向上し、規模の経済によって発電コストの低下を達成し、電力消費を増加させるからである⁵⁾。

事実、シカゴ・エジソン社はインサルが社長になった直後に、近隣の電力会社2社を買収し、1894年にGEから6,400kWの発電設備を購入し、同社として2つ目の発電所となるハリソン街発電所を開所した。同社は1894-98年にシカゴの14の電力会社を買収し、同市の電力事業を独占しつつあった。しかも、しばしば自家発電をしている企業が集中する都心も攻略しつつあったが、そのためにはシカゴ・エジソン社の発電能力は不足していた。そこで、同社はGEに5,000kWのタービン14基を発注し、合計7万kWのフィスク街発電所を新設し、1903-10年に14基すべてが完成した。これによって生産コストは半分に低下し、電力料金も低下した。1892-1907年に同社の顧客数は4,000件から10万件になっていた。そして同社は他会社と統合した1907年にコモンウェルス・エジソン社と改称し、最大級の電力会社へと成長していった⁶⁾。

1900-20年に全国の多くの電力会社がインサルの「消費促進・投資拡大」戦略を見習い、新規の消費者を獲得し、発電能力を増加させていった。電力会社の「消費促進・投資拡大」戦略が成功するには、新しい発電設備の大型化が進むにつれて電力料金を一層低下させることが必須であった。なので、この戦略はGEやウェスチングハウス・エレクトリック社（以下、WH）に代表された電機メーカーの発電設備の開発・製造能力に全面的に依存したものであった⁷⁾。発電設備は主にボイラー、タービン、そして発電機から成り立っており、ボイラーにおいて燃料を燃やし水を熱蒸気に変え、その熱蒸気の動きがタービンを高速回転させ、発電機を回して発電する。

電機メーカーは、さまざまな電力会社の独自の要望に合わせた技術を開発する中で革新を導入した。設計プロセスは数年を要し、製造にも数年要した。新規発電設備が完成すると、実際の運転実績が、電力会社と電機メーカーによって観察された。電機メーカーはその運転の経験に基づいて、次の、その他の電力会社のために若干改善された発電設備を設計する。電機メーカーはうまく機能した最後の発電設備に似せて次世代を作った。電機メーカーは経験に基づいた開発ができるように、ゆっくりと小さな前進をしてきた⁸⁾。つまり、電機メーカーは第2次大戦の開始まで、発電設備を経験に基づいて慎重に開発・製造していったのである⁹⁾。

「消費促進・投資拡大」戦略の要である発電コストの削減のほとんどは、2つの領域、つまり、規模の経済と熱効率の改善によって実現された¹⁰⁾。まず、規模の経済について。インサルのシカゴ・エジソン社は新設する電設備の規模を次第に大型化していったが、インサルは当時から発電設備の規模の経済を理解していたからである。例えば、ボイラーの蒸気の

パイプの直径を 2 倍にすると、流れる蒸気量は 4 倍になり、タービンを、そして発電機を回す力は 4 倍に、発電量も 4 倍になる。しかも、経験則では、発電能力を 100% 増加させても、資本費は 60% しか上昇しない¹¹⁾。

こうした理由により、通常発電設備の規模は 1913 年に 2 万 kW を超え、次第に大型化していった。ただし、8 万 kW 以上の発電設備では、発電機は過熱するので冷却が必要になった。1937 年までに空冷方式で発電機の過熱を抑えるのが普通になった。第 2 次大戦後には水素ガスによって発電機の過熱を抑えると、タービンの回転速度が 3 倍にもなった。そうすると、同じ出力でもタービンの大きさを小さく軽量にすることができた¹²⁾。

しかし、当時、水素ガスによる冷却はまだ実現していなかったもので、電力会社が大出力の発電設備を導入するには、複数の小規模のタービン・発電機をつないだコンパウンド方式の発電設備を採用した。事実、1928 年にニューヨークの電力会社ユナイテッド電灯電力は、スイスの米国ブラウン・ボバリ社製の 16 万 kW のコンパウンド方式の発電設備を導入した。また、1929 年には当時としては巨大な GE 製の 20.8 万 kW の発電設備が導入されたが、それも 3 組のタービン・発電機からなるものであった¹³⁾。発電設備がさらに大規模になるには、第 2 次世界大戦後を待たねばならなかった¹⁴⁾。

次いで、発電設備の熱効率の改善も、燃料節約によるコスト削減をもたらす。熱効率とは燃料に含まれるエネルギーにたいする発電量の比率であり、最初の 1922 年パル街の石炭発電設備の熱効率はわずか 2.5% であったが、1940 年には 20% に上昇していた。また、熱効率は 1kWh を発電するのに必要な Btu (British thermal unit) で測られた燃料量というヒートレート (この値が低いほど熱効率がよい) で示されることもある¹⁵⁾。

熱効率の高さは、ボイラーがいかに効率よく燃料を蒸気にするか、蒸気の温度と圧力をどれほど高められるか、タービンが蒸気の高温・高圧に耐えられるか、などによって決まる。1903 年にインサルのシカゴ・エジソン社が発注した発電用ボイラーにおいて、蒸気の温度は 530°F、圧力は平方インチ当たり 180 ポンド (pounds per square inch, psi) であった。その後の技術革新には粉末にした石炭 (pulverizing coal) を燃焼させる方法があるが、これは燃料の表面積を大きくすることによって、激しい燃焼をもたらし、1920 年代中期に蒸気の温度を 750°F に上昇させた¹⁶⁾。

高温は発電設備の熱効率を高めたが、タービンの金属耐性の問題を引き起こした。含カーボン鋼は 825°F までは耐えられるが、それ以上高温だと変形してしまった。そこで、いろいろな合金が試され、含モリブデン鋼がより高温に耐えられると判明し、1930 年代末に 900°F を達成した。タービンの羽根の表面加工などに改善が加えられ、10% 以上の性能の改善が達成された¹⁷⁾。

こうして、1920 年代までに、電機メーカーの斬新的な技術革新によって、電力会社はそのお陰で、発電設備の規模拡大、熱効率向上を達成できた。ただし、大恐慌では、過剰設備

石炭・原子力発電から小型ガス・コージェネへ（上）

なので新規投資はなされず、再び次の発電設備の規模拡大が起きるのは、第2次大戦後であった。規模の経済、熱効率の向上によって発電コストは低下し、1892年にkWh当たり名目で22セント、1932年に5.6セント、つまり75%も低料金になった。斬新的な成長方式の勝利であった¹⁸⁾。

2. 電力産業の確立期（1930-1973年）

第2次大戦の勃発は、電力会社による電力消費の促進努力を中断させた。国防産業の拡張とそれによる経済の回復は、促進策がなくとも電力消費が伸長したからであり、電力会社は十分な電力供給に最善を尽くした。戦後になると1946-47年に電力消費は14%も急増し、電力会社の発電能力が不足し、予備発電能力は平均8%になった。翌1948年には5%に落ち込んだ¹⁹⁾。

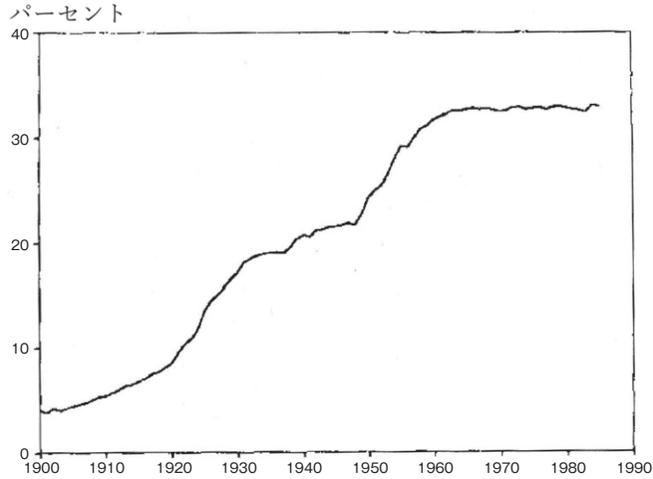
その後、電力会社は経営状態が正常な状態に復帰したと思われた1950年代に、電力消費促進活動を再開した。いわゆる「消費促進・投資拡大」戦略の復活である。ただし、第2次大戦以降は、冷戦という要因が影響し、アメリカは共産主義に対抗する自由社会を守る努力をしており、その基礎として電力は生産性を向上させ、より高い生活水準への要求を満たし、人口とマンパワーの増加よりも速く供給されねばならないと主張された²⁰⁾。

1940年代末から、住宅消費者が予想以上に多様な家電製品を使い始めた。そこで、電力会社は負荷率改善にそれほど寄与してこなかった住宅消費者の電力消費を促進することを追求した。まず、テレビは1949年半ばに100万台が家庭に普及し、5年以内にさらに1,500万台が普及すると予想された。平均的な家庭が年間1,700kWhの消費に止まっていた時代にテレビは1台で250 kWhの消費を追加した。エアコンは1947年の4.3万台から1958年の167.3万台に40倍も急増した。ラジオ、冷蔵庫、洗濯機、掃除機、そしてテレビなど多くの家電製品が1970年までにほとんどすべての家庭に普及し、電力会社に需要増加をもたらした。ただし、エアコンの場合は、夏季に電力需要がピークとなるが、その他の季節では電力需要がほとんどないので電力会社の負荷率を低める要因になる。そこで、電力会社は家庭のオール電化というキャンペーンを開始することになった²¹⁾。

「消費促進・投資拡大」戦略においては、電力消費が増加すれば、電力会社は効率のよいより大型の発電設備を導入しなければならなくなる。発電コストを低下させるには発電設備の熱効率を高めるか、規模の経済を追求するかであった。第2次大戦後は、発電設備の熱効率は図1に示すように32%から40%に上昇したが、図2の通り、発電設備の規模は約16万kWから100万kWに急速に大型化した²²⁾。どちらかという、熱効率の改善よりも、発電設備の大型化が追求されたことになる。

発電設備が急激に大型化したのは、第1に、戦後の電力消費の増加率が非常に高かったの、電力会社は大型発電設備の新設でそれに対応しようとしたからである。さまざまな家電

図 1 発電設備の平均熱効率の推移



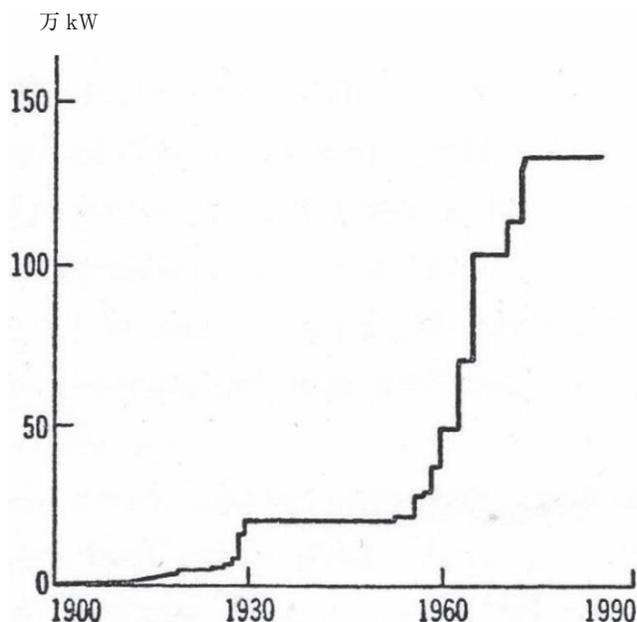
(出所) Robert H. Williams and Eric D. Larson, "Aeroderivative Turbines for Stationary Power," *Annual Review of Energy*, vol. 13, 1988, p. 438.

が普及し、戦後しばらく電力消費は年平均 10.8% の増加率であった。地域によっては電力消費の増加率がさらに高かった。また、1965 年北東部大停電のあとにはいくつかの地域で、電力会社が近隣の電力会社と電力融通を行う電力プールが作られた。電力プールにおいて数社が頻繁に電力融通するようになると、たとえば、ニューハンプシャー公益事業会社のような小規模の電力会社が、近隣数社と共同で大型発電所を建設・運営することができるようになっていた²³⁾。

第 2 に、1960 年代からは熱効率の上昇は見込めなくなったからである。火力発電設備で熱効率を上げるには蒸気を高温・高圧にしタービンの回転速度を上げなければならない。しかし、タービンなどが高温、高圧に耐えるようにするには特殊な合金が必要になり、コストがかなりかかり、熱効率の改善を打ち消してしまうようになった(後述)。そこで、電力会社の経営者たちは 1960 年代初期から、直前に完成・稼働した発電設備よりもはるかに規模の大きな発電設備を選び利益を引きだすようになった。この傾向は 1968 年までに明らかになった。『エレクトリカル・ワールド誌』が「巨大な発電設備が、低いバスバー・エネルギーコスト(発電所が送電網に電力を渡すときの卸売電力コストのこと)のカギである……発電設備の設計者は熱効率を改善する努力より、規模の経済を得ることに決めたように思われる」と述べている。また、建設コストが 1950 年代、60 年代、70 年代前半に非常に上昇していたので、発電設備の規模を大きくするしかなかったのである²⁴⁾。

第 3 に、発電設備を設置する良好な用地を見つけることが困難になったことである。環境問題への懸念が高まり、とくに人口の多い、あるいは自然の残っている地域に近い発電所用地に新規発電所を建設することは困難になった。だから、電力会社はもし良好な発電所用地

図2 発電設備の最大規模



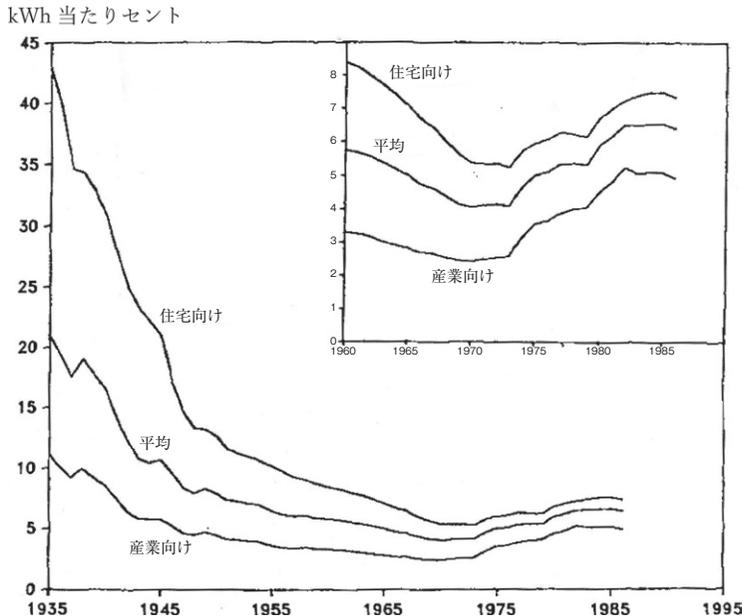
(出所) Robert H. Williams, "Industrial Cogeneration," *Annual Review of Energy*, vol. 3, 1978, p. 318.

を見つけたらできるだけ大型の発電所を建設すべきと考えるだろう²⁵⁾。

第4に、発展しつつある原子力産業から発電設備の巨大化への圧力があつた。1966-73年というわずか8年間で、GEが完成・稼働させた原子炉の規模は20万kWから100万kW以上に急拡大した。というのは、原子力発電は財務的に健全(viable)であると示すために、その規模を極端なほど拡大し、通常の火力発電所にたいしてコスト優位性を得ようとしたからである²⁶⁾。

電力消費の急激な増加、熱効率改善の限界、環境問題の激化、そして原子力発電設備の巨大化が、発電設備の急激な大型化を招いた。こうして第2次世界大戦後には、戦前の「消費促進・投資拡大」戦略が復活した。しかし、少なくともひとつ重要な相違があつた。戦前には新たに建設される発電設備について電機メーカーは、その直前に建設されたわずかに小さな規模の発電設備についての実践的知識を持ったうえで、設計することができた。つまり、「経験に基づく設計」が可能であつた。図2に示すように、戦前には発電設備の規模拡大がゆっくりと進行したからである。ところが、戦後は急激に規模拡大が進み、とくに1955-70年のわずか15年間に約20万kWから約130万kWへと急激に大型化している。新たに建設される発電設備の規模があまりにも急速に増大するために、電機メーカーは似たような規模の発電設備についての実践的知識なしに、「推定に基づく設計」をせざるをえなくなったのである²⁷⁾。

図 3 電力料金 (1986 年 1 月セント価値に換算)



(出所) Robert H. Williams and Eric D. Larson, "Aeroderivative Turbines for Stationary Power," *Annual Review of Energy*, vol. 13, 1988, p. 431.

原子力発電も急激に規模拡大した点で火力発電と同様である。1960年に17.5万kWの原子炉が建設されたが、わずか6年後の1966年には109万kWの原子炉が発注された。しかし、当時、電機メーカーには20万kWの原子炉についての実践的知識しかなかったのである²⁸⁾。経験の蓄積がないまま、巨大な原子炉の設計、製造が行われたのである。

それでも、1970年以前には発電設備の急激な規模拡大によって、電力産業の生産性は1953-57年、1957-60年、そして1960-66年にそれぞれ年率5.6%、4.3%、そして4.7%であった²⁹⁾。この生産性の上昇は、発電コストの低下をもたらした。図3に示すよう、住宅消費者の電力料金はkWh当たり1947年に22セント、そして1969年に9セントに低下した(1996年セント価値に換算、図3は1986年1月セント価値に換算)。電力料金の低下は需要を促進し、電力消費は1900-20年に年率12%で増加し、1920-73年に年率7%で増加した。電力産業は、エネルギー・環境問題の激化という難点はありつつも、企業や市民により安価な電気を届け、成長してきた³⁰⁾。電力産業は第2次大戦後から1970年まで、産業として成功を取めたといえよう。

3. 電力産業の停滞期 (1970年代)

成功してきた電力産業は1960年代末から、構造的な停滞期に入った。というのは第1に、

石炭・原子力発電から小型ガス・コージェネへ（上）

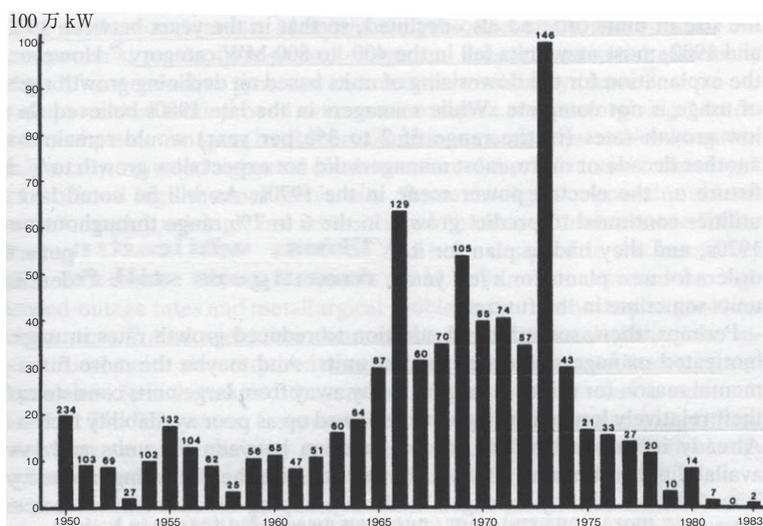
1960年代末、高度成長による電力需要が激増したが、電力産業は発電能力の不足を回避できなかったからである。1950年代と60年代を通じて、電力消費は毎年約7%増加し、10年ごとに2倍になった³¹⁾。そこで、電力会社は発電能力の増強のために、新規発電施設を大量に発注した。図4に示したように、1966-73年間のすべての年で3,000万kWを超える新規発電設備が発注された。ただし、発注された発電設備はすぐには完成・運転せず、とくに大型の発電設備の完成にはあまりにも長い期間を要したので、発電能力不足はすぐには解消されなかった³²⁾。この面からも、発電設備の大型化が疑問視されるようになった。

第2に、燃料価格が60年代末から高騰しはじめ、インフレも始まり、建設費、そして金利が暴騰した。電力会社の発電コストのなかで大きいのは、資本費と燃料費である。この2つのコストが高騰し、電力会社の財務を逼迫させた。労働と資材も1970年代に120%も上昇し、中規模の発電設備の建設期間は7年に伸び、そこに金利が暴騰したため資本費は著しく膨張した³³⁾。

第3に、1960-70年代にかけて厳しい環境保護規制が実施され、電力会社に追加的費用を負担させた。環境規制の強化によって、追加的費用は発電所全体の費用の10%以上を占めたという。また、北東部の電力会社は1970年代初期にその燃料を石炭から石油に転換したが、石油危機によって石油価格が暴騰し、これらの電力会社の経営を著しく悪化させた³⁴⁾。

第4に、これまで述べてきた新規発電設備の拡張、燃料費・金利の暴騰、そして環境保護規制の強化は、電力会社の発電コストの高騰を招き、電力会社は電力料金を引き上げた。全

図4 電力産業の発電設備発注（発電能力）



注) 縦のグラフの長さ、その年に発注された総発電能力を示しており、また、グラフの上の数字は、その年に発注された発電設備数を示している。

(出所) Richard F. Hirsh, *Technology and Transformation in the American Electric Utility Industry*, Cambridge Univ. Press, 1989, p. 95.

国の電力料金平均が上昇し始めたのは 1969 年であったが、それから 1972 年までに燃料費は 50% 上昇した。燃料費、建設費の高騰によって、電力会社の財務が悪化し、その経営者たちは 1974 年 8 月に上院の公聴会に集まり救済策を要請した。1972 年には電力会社 94 社が合計 8 億 2700 万ドルの電力料金の値上げを規制当局から認められたが、1975 年には 235 社が合計 31 億ドルの値上げを認められた³⁵⁾。電力料金の上昇は図 3 に示されている。

第 5 に、電力料金の高騰のため、あるいは景気の後退のため、石油禁輸後 1 年間で、電力需要が 0.1% とわずかながら減少した。1973-76 年の 3 年間の電力需要の増加は 8.6% で、1 年間では 2.87% と低成長となった³⁶⁾。電力産業ではそれでも強気の電力需要を予測する人々が多かったが、電力需要の低成長のため、大型発電所の建設はすべきではないという人々（デトロイト・エジソン社など）も現れた³⁷⁾。事実、図 4 に見られるように 1974 年以降、発電設備の発注は急激に落ち込むのである³⁸⁾。

第 6 に、商用原子炉は 1960 年代から 70 年代初期を中心に合計 256 基が発注され、133 基が完成したが、当初の楽観的予測と異なって建設費が膨張し 120 基がキャンセルされた。完成された原子炉もその後、かなり廃炉され（現在、運転している原子炉は 93 基）、最近では例外を除いてほとんど新規建設はない³⁹⁾。

さて、アメリカで民間電力会社が初めて原発建設を許可されたのは、1957 年、コモンウェルス・エジソン社のドレスデン 1 号機（20 万 kW、イリノイ州）とコンソリディテッド・エジソン社のインディアン・ポイント 1 号機（26.5 万 kW、ニューヨーク州）であった。次の画期は、ジャージー・セントラル電力電灯会社がオイスター・クリーク原発（65 万 W）を発注した 1963 年であった⁴⁰⁾。1966 年には 21 基の原子炉が発注され、60 年代には合計 87 基の原子炉が発注され、70 年代には 153 基の原子炉が発注された。1966 年から原子炉発注ラッシュが起きたのは、高度成長による電力需要の増加予測、環境保護規制の強化予測から石炭発電所より原発が選択され、多くの電力プールが形成され、地域内に大型発電所を建設して複数の電力会社で共同経営・利用しようとしたからである⁴¹⁾。

こうして多くの電力会社が原子炉建設になだれ込んだのは、もちろん、熱狂的な推進者が多かったからだが、実は、有力な批判者もいたのである。たとえば、連邦電力委員会の委員長ジョゼフ・スイドラー（Joseph Swidler）は 1963 年に原発だけに集中することに警告を発していた。また、同委員会の委員カール・バッジ（Carl Bagge）も 1970 年に電力会社の経営者たちが原発を電力産業の諸問題すべてを解決するものと無批判に受け入れているのを非難した。アメリカン電力会社の元経営責任者フィリップ・スポーン（Philip Sporn）は 1950 年代初めから 20 年にわたって、原発を重視しすぎるのを諫め、化石燃料発電の研究開発が 70 年代以降も重要だと主張した。なお、スポーンは先見性に富んでいて、1957 年に熱効率 40% の壁を超えるものとしてコンバインド・サイクルの重要性を主張しているが、注目されなかった⁴²⁾。また、スポーンは原発の経済性に、つまり価格競争力に深い疑問をも

表1 原発の建設費高騰，1980年代中期まで

原発（立地州）	計画当初の見積額	完成（途上）時の建設費	備考
ショーラム原発 ^{a)} （ニューヨーク州）	1968年 2.41 億ドル	1985年 40 億ドル	1989年 廃炉決定
ミッドランド原発 ^{b)} （ミシガン州）	1968年 3.49 億ドル	1985年 34 億ドル	1985年，完成途上
シーブルック原発 1, 2 号機 ^{c)} （ニューハンプシャー州）	約 11.6 億ドル	1984年 58 億ドル	1982年，2号機 廃炉決定，所有会社は破産
ジマー原発 ^{d)} （オハイオ州）	1969年 2.4 億ドル	1984年以降 18 億ドル	石炭発電所に転換
リマリック原発 1, 2 号機 ^{e)} （ペンシルバニア州）	14 億ドル	1984年 60 億ドル	2号機は建設中断
マーベルヒル原発 1, 2 号機 ^{f)} （インディアナ州）	1973年 10 億ドル	1983年 70 億ドル	建設中止
パイロン 1 号機 ^{g)} （イリノイ州）	n.a.	1984年完成 37 億ドル	運転，許可されず
WPPSS1-5 号機 ^{h)} （ワシントン州）	1972年 66.7 億ドル	1984年ごろ 239 億ドル	すべて建設されなかった

注) 所有会社は，a) ロングアイランド電灯会社，b) コンシューマーズ・パワー・カンパニー・オブ・ミシガン，c) ニューハンプシャー公益事業会社，d) シンシナチ・ガス電力会社，e) フィラデルフィア電力会社，f) インディアナ公益事業会社，g) コモンウェルス・エジソン社，h) ワシントン・パブリック・パワー・サプライ・システム（WPPSS）である。

（出所）Peter Stoler, *Decline and Fall: The Ailing Nuclear Power Industry*, Dodd, Mead & Co. 1985, ch. 9; 拙著『アメリカの電力自由化』日本経済評論社，2002年，93ページ，などより作成。

っていたが，電機メーカーも AEC（原子力委員会）もスポンサーの意見を拒絶した⁴³⁾。

ところで，原子炉発注ラッシュは1974年まで続くが，その後激減し，むしろ，1972年からキャンセルが出始め，1975-78年にはかなりのキャンセルが発生した。そして，1978年以降，原子炉の発注は全く途絶えたのである⁴⁴⁾。次いで，表1は1984-85年ごろに問題を抱えた原発建設（計画）の8事例を要約しているが，たとえば，ショーラム原発の様に当初の見積 2.41 億ドルは完成時には 40 億ドルと異常なまでの建設費の膨張がみられた。また，シーブルック原発 1, 2 号機のように見積額 11.8 億ドルが実際には 58 億ドルとなって，所有者のニューハンプシャー公益事業会社は破産した。それだけ建設費が膨張すると，それを回収するための電力料金引き上げが地域住民の不満を爆発させ，政治問題化した。それで，リマリック原発 2 号機のように建設中止になったり，ショーラム原発のように廃炉になったりした。このように，建設費の異常な膨張は，それまで行われてきた発電所建設費の総額をすべて回収するような電力料金の決定方式（総括原価方式）は，疑問視されるようになった。20世紀初頭から長く行われてきた電力産業にたいする州政府規制そのものにも改革の機運がで

てくるのである。

4. 戦略破綻の根本的原因

1960年代までに成功していた「消費促進・投資拡大」戦略は効果を上げることができなくなったのはなぜだろうか。それは発電所を新設しても熱効率を改善することができなくなり、発電設備の大型化によっても kWh 当たりの発電コスト削減ができなくなったからである。

まず、熱効率を向上させることができなくなったことについて。第2次大戦後、熱効率は1950年代に再び上昇したが、60年代には引き続いた進歩は起きなかった(図1参照)。1957年に熱効率40%を達成した発電設備が現れたが(アメリカン電力会社傘下のオハイオ電力会社の発電設備)、この発電設備の蒸気温度は1,150°Fであり、圧力は4,500psiであった⁴⁵⁾。

さらに高温、高圧にすると熱効率は高くなるが、高性能の合金を使わなくてはならなくなる。高性能の合金は、ニッケル、クローム、モリブデン、マンガン、アイロン、カーボンからなっており、通常の合金の3-4倍の費用がかかる。温度、圧力を少し上昇させるだけで、費用がかさむ。だから、経済的に意味をなさなくなるのである⁴⁶⁾。1976年に実施されたWHの調査では50万kWの発電設備について、蒸気の温度を1,000°Fから1,200°Fに上げると、熱効率は6%上昇するが、資本費は26%も上昇した。これは1950年代以降、実施されてきた多くの調査結果と一致していたという⁴⁷⁾。

1948年に21.7%であった熱効率は、1965年に発電設備の平均では32.7%となり、そして続く15年間には進歩がなく、1980年には32.8%であり、ほぼ改善なしの状態であった⁴⁸⁾。したがって、熱効率を上げることができなくなったのであり、それは高温・高圧に耐える合金の製造が高コストだからであり、それを克服する技術革新が停滞したからである⁴⁹⁾。

第2に、発電設備の規模の面でも技術の停滞は明らかで、規模の経済が枯渇したことである。それまで、発電設備は大規模化し続けてきたが、新規の発電設備の最大規模は1973年に130万kWに達し、75年までその規模が続いたが、その後は100万kWを下回るようになった。石炭火力よりも原子炉のほうが規模の経済が働くと考えられ、最大規模は130万kWになったが、石炭火力のほうは1970年代、80年代とおよそ60万kWであり続けた⁵⁰⁾。

また、1966-73年に発電設備の集中的な発注があった(図4参照)が、その後、発注が激減したのは、石油危機後、電力産業が電力需要を予測できなくなり、経営者たちは大型の発電設備の新設を遅らせ、小規模の発電設備だけを新設するようになったからである⁵¹⁾。しかし、より本質的な問題は、発電所の建設費が劇的に高騰し、電力料金が上昇するようになったからである。石油危機の10年前から、大規模な発電所は単位当たりの資本費を50%増加させることが知られていた。象徴的な事例は原子炉の建設費の高騰であった。1968-71年に稼働した11基の原子炉の資本費はkW当たり160ドルであったが、1987年に稼働した13基の原子炉の資本費はkW当たり3,800ドルであり、劇的な高騰であった。石炭火力発

石炭・原子力発電から小型ガス・コージェネへ（上）

電設備の資本費の膨張は原子炉ほどではないが、かなりのものであった⁵²⁾。

発電設備の規模の経済が建設過程で発揮された場合でも、その効果は信頼性（reliability）の低下によって相殺された。大規模発電設備の信頼性が低いとは、故障などで稼働率が低いことを指す。1960-72年の期間において、60万kW以上の火力発電設備の未稼働率は、10万kW級のそれらの5倍にもなった。また、1967-76年の期間において、20-30万kWの発電設備は稼働率が94%以上であったが、80万kW以上だと稼働率は84%以下であった⁵³⁾。

大型発電設備が低稼働率になるのは、それらがあまりに複雑だからである。火力であれ、原子炉であれ、大規模の発電設備は安全性を確保し、順調な運転を可能にするため膨大な数のパイプ、付属品、そして連結器などを必要とする。100万kWの原子炉には4万個のバルブがあるという。たとえ、これらの点検・保守がうまくゆき、順調に運転されても、定期的な点検があり、その時にはすべてを停止しなければならない。そこで、人手と時間を要し、規模の経済性は損なわれるのである⁵⁴⁾。

第3に、さらに、1960年代後半から、大型化した発電設備に大きな故障が目立って多くなり、品質上の問題が噴出したことである。ひとつには1966-73年に電力会社は需要の激増に対応し大量の大規模発電設備をGEやWHに発注した。通常であれば新規発注水準は毎年約1,500万kW程度であるが、1966年には約6,000万kWの新規発注があった（図4参照）。こうした発注水準が数年間続き、GEやWHは大量の受注残高を抱えることになった。とくにWHは一時期、9,000万kWの受注残高をもったという。当然に、丁寧な設計や製造、建設ができなくなった可能性が高く、大型の発電設備での不具合、修理が発生し、とくにWHの混乱はひどく電力会社から提訴されたほどだった⁵⁵⁾。

こうした諸問題の根本的原因は、発注される発電設備の大型化する速度が速すぎることから生じ、GE、WHなど電機メーカー側が、急激に大型化する発電設備について経験不足の状態ですべて「推定に基づく設計」を行ったことであった。1964年の連邦電力委員会が編集出版した『全国電力調査』（Federal Power Commission, *National Power Survey*, 1964）のための準備をしていた電力会社の経営者たちは、信頼性の低い大型発電設備が増えているのに気がついていた。かれらは巨大発電システムにおいて冶金上の問題が予想以上に起きており、電機メーカーがあまりにも早く大規模の発電設備の設計に着手しているからだと考えた⁵⁶⁾。その通りであった。何度か指摘したように、建設される原子炉は1960年代に急激に規模拡大したため、電機メーカーは経験がないので、推計によって大規模発電設備を設計するしかなかったのである⁵⁷⁾。

電力産業で進行し始めていた熱効率と規模の経済に関する技術的停滞によって、電力コストは低下しなくなった。そこに、燃料価格、発電設備の建設費の高騰が生じ、必然的に電力価格が高騰した（図3参照）。電力産業が一貫して追求してきた「消費促進・投資拡大」戦略の基礎にある新規大型化投資、技術革新、電力価格低下、そして電力消費増加という循環

が崩壊した。同戦略は行き詰まり、電力産業の停滞が明らかになった。そこで、新しい動きが 1970 年代中期から始まるのである。

5. 電力自由化に向けた新潮流

「消費促進・投資拡大」戦略は、新規発電所の大型化が熱効率向上も規模の経済性も達成できなくなり、むしろ、建設費が異常に高騰し、電力料金を大いに引き上げ、完全に破綻した。そこで、1970 年代中期から電力料金制度改革が始まり、電力産業内外でコジェネや再生エネなど新しい可能性が模索されるようになった。

巨大な発電所の建設期間はそれまでより大いに長くなり、そのため、発電能力の不足に直面する電力会社も出てきた。1969 年に、連邦電力委員会は 39 社の電力会社が 10% 以下の予備発電能力しかもっていないと警告したほどである。やや極端な例ではあるが、ニューヨーク市に給電するコンソリデイテッド・エジソン社は、揚水発電所建設計画を推進・申請したが規制当局に認められなかった。また、同社はその既存発電所の不具合によって深刻な発電能力不足に陥り、1969-71 年の夏に、電圧を下げて電灯制限を行ったほどであった⁵⁸⁾。

同社は石油価格の暴騰した 1973-74 年にかけて財務危機に陥った。というのは、州や自治体の環境規制が始まっており、同社はその石炭発電所の多くを石油発電所に転換しており、1974 年には石油発電は同社の電源構成の 75% も占めていた。そのため、石油価格の暴騰が同社の財務を危機に陥し入れた。1974 年 2 月に電力料金値上げを認められたが、同年 4 月に普通株を無配とした。さらに同年、同社は建設中の 2 つの発電所（インディアン・ポイント原発 3 号機、およびクイーンズ石油発電所）をニューヨーク州電力公社に売却したのであった⁵⁹⁾。

全国の多くの電力会社が電力料金値上げを規制当局に申請し、認められるケースが多かったので市民の不満が高まった。ニューヨーク州でも多くの電力会社が電力料金値上げを申請したが、同州の規制当局は単に値上げを認めるというのではなく、効果的な規制改革の姿勢を見せ始めた。そして、1974 年 7 月に、規制緩和を力説するコーネル大学の経済学教授アルフレッド・カーンがニューヨーク州公益事業委員会の委員長に就任し、同委員会は電力料金制度改革に乗り出していった。問題は電力消費が激増し、巨大発電所の建設が行われ、建設費用が暴騰し、その結果、電力料金の引き上げになったことである。だから、電力消費の激増を抑え、巨大発電所建設の必要性を減じるような電力料金制度として、ピークロード料金制度が支持されつつあった。ピークロード料金制度とは、ピーク時に電力料金を高くし、オフピーク時には電力料金を低くするものである⁶⁰⁾。

もし、ピーク時に使用される電力の価格が、オフピーク時に使用される電力の価格よりかなり高いなら、消費者はピーク時の電力使用を減らし、オフピーク時に電力使用を増やそうとするだろう。ピーク時の電力使用量とオフピーク時の電力使用量は接近する可能性がある。

石炭・原子力発電から小型ガス・コジェネへ（上）

そうであれば、それは負荷率を改善し、大型発電所建設の必要性を減少させるので、ピークロード料金制度の目的が達成されることになる⁶¹⁾。

1975年、ニューヨーク州において最初にピークロード料金制度に変えることを申請したのは、ロングアイランド電灯会社（LILCO）であった。同社は負荷率が45%と極端に低く、夏季のピーク時の電力需要が急激に高まっており、資本需要が大きく、社債利支払いができない状態にあった。ロングアイランド電灯会社のピークロード料金制度は認められ、オフピーク時の電力料金にたいしピーク時のそれは4倍の高さであった。そして、ピークロード料金は1977年から実施されることになった⁶²⁾。こうして、多くの州で電力産業の料金制度改革が始まり、それ以降、さまざまな規制改革のアイデアが提案された⁶³⁾。

また、石炭や原子力という伝統的な電源とは異なる非在来型電源、コジェネや再生可能エネルギーへの関心も高まった。ただし、コジェネは新しい技術ではない。20世紀初頭には製造工場では自家発電が支配的であり、その場合、通常、電気とともにその排熱も工場で利用されていたので、燃料節約的なコジェネが普及していたといえる。しかし、電力産業が確立し電力料金が低下するにしたがって、製造工場のコジェネはかなり減少してしまっていた。1912年に製造工場のコジェネの発電量は電力産業の総発電量より多かったが、1978年には総発電量のわずか3.5%に激減していた⁶⁴⁾。

この燃料節約的なコジェネを復活させようと全米科学財団が調査に乗り出した。1975年、同財団がダウ・ケミカル社に委託して行った調査研究の結果、コジェネは熱効率が高く燃料節約的であると同時に、電力産業の発電設備への投資を年20-50億ドル節約できることが判明した。この調査結果によって、調査に参加した人々、とくにウィリアム・G・ローゼンバーグ氏（ミシガン州公益事業委員会委員長）が注目され、連邦エネルギー庁（のちの連邦エネルギー省）の副長官（在任期間は1975-77年）となってコジェネ推進を行うことになった⁶⁵⁾。1977年には、コジェネの主な担い手の産業、化学、製紙・パルプ、そして鉄鋼業など6業種を取り上げたシンクタンクの報告書が、その発電能力を増加させるための諸政策を具体的に提案したのだった⁶⁶⁾。

さらに、再生エネについては、先駆的な諸企業が石油危機前後に創業され始めていた。表2にそれらの事例を示したが、早いものは1954年に創業された地熱開発のマグマ地熱会社であった。それは1963年に石油会社ピュア・オイル（のちに石油会社ユニオン、そしてユノカルに吸収された）と提携した。同社はカリフォルニア州で地熱発電事業に果敢に挑戦した⁶⁷⁾。1971年創業のホイーラボラター・フライ社は、ニューイングランド地方で、ごみ焼却発電やバイオマス発電事業を展開した⁶⁸⁾。また、1972-75年に太陽光セル製造分野において3つの新企業、ソーレック・インターナショナル社、ソーラレックス社、そしてソーラー・テクノロジー・インターナショナル社（STI）が設立された。ソーラレックス社については、1983年に石油大手アモコ（Amoco）が資本参加し、STI社は1977年に石油大手のア

表 2 再生可能エネルギーの初期の企業

創業年	会社名	事業分野	備考
1954	マグマ地熱会社 ¹⁾	地熱発電	カリフォルニア州で地熱開発。熱蒸気を電力会社に売り、この電力会社が1960年から地熱発電所を運営し始めた。
1971	ホイーラボラター・フライ社 ²⁾	ごみ焼却発電, バイオマス発電	1975年GE工場に熱蒸気を販売し、1985年には自治体のごみを焼却し、電力を地元電力会社に販売し始めた。
1972	ソーレック・インターナショナル社 ³⁾	太陽光セル製造	テクストロン社の太陽光セル製造部門の開発エンジニアが創業。
1973	ソーラレックス社 ⁴⁾	太陽光セル製造	コムサットの開発技術者2名が創業。1983年に石油大手 Amoco が資本参加した。
1975	ソーラー・テクノロジー・インターナショナル社 (STI) ⁵⁾	太陽光セル製造	テクストロン社の太陽光セル製造部門の開発エンジニアが創業。のち ARCO ソーラー社に、さらにシーメンスの子会社に。初期の太陽光セル製造のリーダー。
1976	US ウィンドパワー社 ⁶⁾	風力発電機製造, 風力発電	カリフォルニア州で事業を展開、初期の風力発電事業のリーダー。のちにケネテック社となるが、1996年倒産。
1980	ゾンド・システムズ社 ⁷⁾	ウィンド・ファーム開発事業, 風力発電機製造	主要な風力発電機製造企業の一つ。のちにエンロンに買収され、さらに2002年にGEウィンド社になった。

(出所) 1) 拙著『アメリカの電力自由化』日本経済評論社、2002年、62ページ; 2) Hirsh, *Power Loss*, pp. 83, 320; 3-6) John J. Berger, *Charging Ahead: The Business of Renewable Energy and What It Means for America*, Univ. of California Press, 1997, pp. 65-74, 75-88, 110-21, 141; 7) Ben Backwell, *Wind Power: The Struggle for Control of a New Global Industry*, Routledge, 2014, pp. 12-14, 26-7.

トランテック・リッチフィールド社 (ARCO) に買収された⁶⁹⁾。これらの事例から、多くの新興企業が資本不足に苦しみ、他方、石油企業がこれらの新興企業に資本提携したり、それらを買収し多角化を図ったことが伺える。さらに、1976年に創業されたUSウィンドパワー社は当初カリフォルニア州で風力発電事業に乗り出し、1980年代前半の風力発電ブームを盛り上げた⁷⁰⁾。また、ゾンド・システムズ社は1980年に創業され、優れたデンマーク製の風力発電機を用いたウィンド・ファーム開発事業者として成長した。同社は風力発電機も開発・製造するため1997年にエンロンに吸収される道を選び、エンロン破綻後にはGEウィンド社となって世界的リーダー企業となっている⁷¹⁾。

こうして、規制改革、コジェネ、そして再生エネという電力産業内外に大変革の新潮流が現れ始めたのである。

注

- 1) 拙著『米国の再生エネルギー革命』日本経済評論社，2021年2月。なお，その「はしがき」は各章の要約をしている。
- 2) ガスタービン・コージェネは高温の天然ガスに空気を吹き込み爆発させタービンを回転させ発電し，その排熱を利用して再び発電し，さらにその排熱を近隣の工場などで使用するため燃料を節約し，そして低コストとなる。
- 3) Richard F. Hirsh, *Power Loss: The Deregulation and Restructuring in the American Electric Utility System*, The MIT Press, 1999, ch.6 や，拙著『アメリカの電力自由化』日本経済評論社，2002年8月，第7章，拙著『米国の再生エネルギー革命』第3章，が触れているが，それほど詳細ではない。
- 4) 最近ではテキサス州の電力自由化の独特の方式が，電力不足をもたらしていると以前から懸念の声が上がっていた。事実，2021年2月の異常なまでの厳冬に卸売電力価格の暴騰が起きており，テキサス方式に何等かの変更が必要であろう。
- 5) Richard F. Hirsh, *Technology and Transformation in the American Electric Utility Industry*, Cambridge Univ. Press, 1989, p. 21.
- 6) Robert L. Bradley, Jr., *Edison to Enron: Energy Markets and Political Strategies*, Scrivener Publishing LLC & John Wiley & Sons, Inc., 2011, pp. 72-4, 89, 93-4, 99. 同社は1979年に全米第5位の電力会社であった。
- 7) Hirsh, *Technology and Transformation*, p. 37.
- 8) Hirsh, *Technology and Transformation*, p. 38.
- 9) Hirsh, *Technology and Transformation*, pp. 38-9.
- 10) Hirsh, *Technology and Transformation*, p. 36. この点，Robert H. Williams & Eric D. Larson, "Aeroderivative Turbines for Stationary Power," *Annual Review of Energy*, vol. 13, 1988, p. 438, も同様の指摘をしている。
- 11) Hirsh, *Technology and Transformation*, p. 41.
- 12) Hirsh, *Technology and Transformation*, pp. 41-2.
- 13) Hirsh, *Technology and Transformation*, pp. 42-3.
- 14) Hirsh, *Technology and Transformation*, p. 46.
- 15) Hirsh, *Technology and Transformation*, pp. 44-6.
- 16) Hirsh, *Technology and Transformation*, p. 45.
- 17) Hirsh, *Technology and Transformation*, pp. 45-6.
- 18) Hirsh, *Technology and Transformation*, p. 46.
- 19) Hirsh, *Technology and Transformation*, p. 48.
- 20) Hirsh, *Technology and Transformation*, pp. 49-50.
- 21) Hirsh, *Technology and Transformation*, p. 50.
- 22) Hirsh, *Technology and Transformation*, p. 56.
- 23) Hirsh, *Technology and Transformation*, pp. 56-8.
- 24) Hirsh, *Technology and Transformation*, pp. 58, 60, 93.
- 25) Hirsh, *Technology and Transformation*, p. 60.
- 26) Hirsh, *Technology and Transformation*, pp. 60, 69.

- 27) Hirsh, *Technology and Transformation*, pp. 62-8.
- 28) Hirsh, *Technology and Transformation*, p. 69.
- 29) Hirsh, *Power Loss*, pp. 47, 309.
- 30) Hirsh, *Power Loss*, pp. 47-8.
- 31) Richard Munson, *Power Makers: The Inside Story of America's Biggest Business...and Its Struggle to Control Tomorrow's Electricity*, Rodale Press, 1985, p. 21.
- 32) Hirsh, *Technology and Transformation*, p. 113. ただし, 1970 年代後半には発電設備は過剰になった (Munson, *Power Makers*, p. 5)。
- 33) Hirsh, *Technology and Transformation*, pp. 111-3, 127.
- 34) Hirsh, *Technology and Transformation*, p. 112.
- 35) Hirsh, *Technology and Transformation*, pp. 127, 140, 146.
- 36) Hirsh, *Technology and Transformation*, p. 128.
- 37) Munson, *Power Makers*, p. 126.
- 38) Hirsh, *Technology and Transformation*, p. 95; Williams and Larson, "Aeroderivative Turbines for Stationary Power," p. 432.
- 39) "Financial Challenges of Operating Nuclear Power Plants in the United States," Congressional Research Service (CRS), Dec. 2016, p. 6; "U.S. Nuclear Power Plants Shutdowns, State Interventions, and Policy Concerns," CRS, June 2021, p. 1.
- 40) Peter Stoler, *Decline and Fall: The Ailing Nuclear Power Industry*, Dodd, Mead & Co., 1985, pp. 37, 40-1.
- 41) Navigant Consulting, Inc., "Assessment of the Nuclear Power Industry - Final Report," June 2013, p. 25; "Financial Challenges of Operating Nuclear Power Plants," CRS, Dec. 2016, p. 6.
- 42) Hirsh, *Technology and Transformation*, pp. 141, 251.
- 43) Stoler, *Decline and Fall*, p. 45.
- 44) Navigant Consulting, Inc., "Assessment of the Nuclear Power Industry," p. 29. なお, ブッシュ (ジュニア) 政権の原子力リネサンスに触発され計画された 4 原子炉が 2013 年に着工され, うち 2 原子炉は建設中止となって, 残る 2 原子炉が現在, 完成に向かっている。
- 45) Hirsh, *Technology and Transformation*, p. 90.
- 46) 1957 年に, 熱効率を 38% から 39% に上げると kW 当たり 3 ドル, 39% から 40% に上げると kW 当たり 5 ドル, そして, 40% から 41% に上げると kW 当たり 12 ドルかかると計算された (Hirsh, *Technology and Transformation*, p. 93)。
- 47) Hirsh, *Technology and Transformation*, p. 231; Williams and Larson, "Aeroderivative Turbines for Stationary Power," p. 441.
- 48) Hirsh, *Technology and Transformation*, p. 90.
- 49) Hirsh, *Technology and Transformation*, p. 94.
- 50) Hirsh, *Technology and Transformation*, pp. 94-5.
- 51) Hirsh, *Technology and Transformation*, p. 95.
- 52) Williams and Larson, "Aeroderivative Turbines for Stationary Power," pp. 430-2.
- 53) Williams and Larson, "Aeroderivative Turbines for Stationary Power," pp. 438-9; Hirsh, *Technology and Transformation*, p. 96.

石炭・原子力発電から小型ガス・コージェネへ（上）

- 54) Hirsh, *Technology and Transformation*, pp. 96-8.
- 55) Hirsh, *Technology and Transformation*, pp. 95, 101-8.
- 56) Hirsh, *Technology and Transformation*, p. 105.
- 57) Hirsh, *Technology and Transformation*, pp. 68-70.
- 58) Hirsh, *Technology and Transformation*, p. 113; William Rodgers, *Brown-Out: The Power Crisis in America*, Stein and Day Publishers, 1972, p. 173.
- 59) Douglas D. Anderson, *Regulatory Politics and Electric Utilities: A Case Study in Political Economy*, Auburn House Publishing Co., 1981, pp. 71, 96; Munson, *Power Makers*, p. 126.
- 60) Anderson, *Regulatory Politics and Electric Utilities*, pp. 75-7, 128-30.
- 61) Anderson, *Regulatory Politics and Electric Utilities*, p. 104.
- 62) Anderson, *Regulatory Politics and Electric Utilities*, pp. 115, 128-30.
- 63) Hirsh, *Power Loss*, Chap. 11-12. 新アイデアは、需要サイド・マネジメント（DSM）、最小コスト・プランニング（LCP）、統合資源計画（IRP）などであった。
- 64) Hirsh, *Power Loss*, pp. 81-2.
- 65) “Double-Duty Steam Can Save Electricity, Study Finds,” *The New York Times*, Oct. 10, 1975.
- 66) 6業種のうちのその他は、食品、石油精製、そして繊維工業であった（Resource Planning Associates, Inc., “The Potential for Cogeneration Development in Six Major Industries by 1985, Exective Summary,” 1977, Exhibit 1-b）。
- 67) John J. Berger, *Charging Ahead: The Business of Renewable Energy and What It Means for America*, Univ. of California Press, 1997, pp. 224-33.
- 68) Hirsh, *Power Loss*, p. 83; “Wheelabrator/Frye/American Foundry Equipment” ([https:// historymuseumsb.org/wheelabratorfryeamerican-foundry-equipment/](https://historymuseumsb.org/wheelabratorfryeamerican-foundry-equipment/)2021年9月30日閲覧)
- 69) Berger, *Charging Ahead*, pp. 65-74, 75-88, 110-21.
- 70) Berger, *Charging Ahead*, p. 141.
- 71) Ben Backwell, *Wind Power: The Struggle for Control of a New Global Industry*, Routledge, 2014, pp. 12-14, 26-7.