

# 21世紀のエネルギー供給

芝浦工業大学システム工学部教授  
 東京大学名誉教授  
 広域天然ガスパイプライン研究会座長  
 日本コージェネレーション研究会会長  
 平田 賢

## 1. 日本のエネルギー需給

図1は米国の天然ガス開発を推進しているオクラホマのGHK社社長 Robert Hefner IIIが描く世界のエネルギー需給の将来像である。21世紀には固体燃料、液体燃料の時代は終わりを告げ、気体燃料の時代に入ると予測する。Hefnerの指摘のように、21世紀の終わりには、核融合や太陽電池によって作られた大量の電力や熱で水を電気分解して水素を作り、家庭や車に供給する水素の時代となるが、問題はそこまでのつなぎである。つまり21世紀前半のいわゆるエネルギーの谷間を、地球環境制約のもとで、どのようにして乗り切るかということである。

結局のところ天然ガスと核分裂型原子力に頼らざるを得ないというのが大方の意見であろう。化石燃料の中で天然ガスは、図2に示すように最もクリーンである。天然ガスはもともと硫黄分を含まないので燃焼させてもSO<sub>x</sub>は排出しない。気体燃料であるから大量の空気と予混合して希薄燃焼（リーンバーン）や触媒燃焼させればNO<sub>x</sub>もほとんど排出しない。天然ガスの主成分はメタンガスであるからCO<sub>2</sub>の生成も石炭の6割、石油の約7割である。天然ガスは世界中に広く分布しており、石油のように偏在していないし、賦存量も充分である。このような高級燃料を高効率のシステムで大切に使うことが解決策の一つであろう。

問題は原子力である。1995年末に起こった動力炉・核燃料開発事業団（動燃）の高速増殖炉原型炉「もんじゅ」のナトリウム漏れ事故、原子力発電所の建設

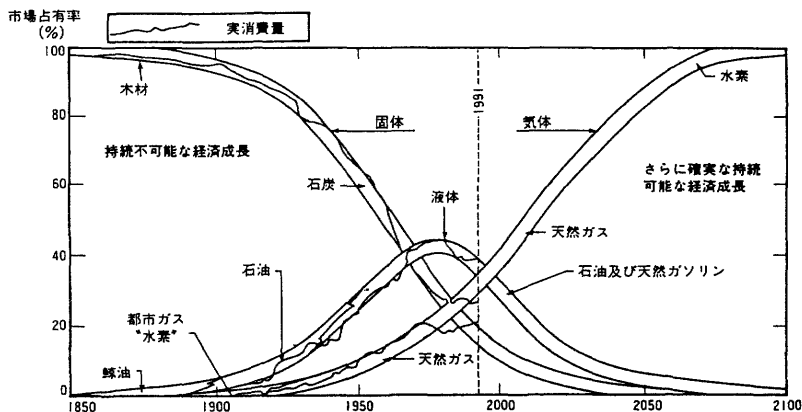
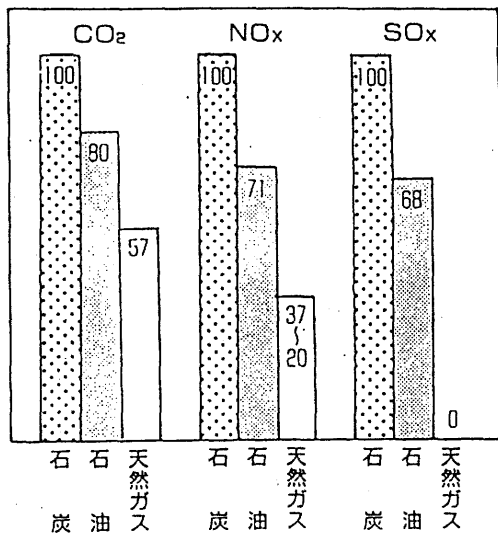


図1. 世界のエネルギー供給の変遷（米国GHK社）



出典：Natural Gas Prospect to 2010：IEA

図2. 天然ガスのクリーン性

計画をめぐって、1996年8月4日に新潟県巻町で行われた日本初の住民投票（投票率88.3%、反対60.9%、賛成38.6%）、加えて1997年3月11日に起こった同じ動燃の核燃料再処理工場爆発事故と虚偽報告、更に同4月14日に敦賀の新型転換炉原型炉「ふげん」で起きたトリチウム洩れと原子炉の原因不明の自動停止と続いた一連の事象は、今後の日本の原子力発電所新設計画に少なからぬ影響を及ぼし、エネルギー政策の抜本的な見直しをせまるものである。筆者は、原子力船「むつ」の設計研究に貢献した故をもって、原子力安全功労者として1992年度科学技術庁長官表彰を受けた原子力推進論者であるが、既に建設計画が確定しているものは別として、少なくとも日本では、原子力発電所の新規立地を求めることは極めて困難になったと考えている。

それでは、北朝鮮や中国ならば認められるべきだろうか。答えはやはり否であろう。核燃料の核分裂によって作り出される核種の半減期は10<sup>4</sup>年のオーダーである。つまり1万年後の子孫に至るまで我々の世代が責任を持つことは殆ど不可能である。このような高レベルの放射性廃棄物を無害にして処理する技術を現代の我々が持ち合わせていない以上、核分裂型原子炉を未来永劫動かす続けることは悪であり、背に腹は代えられぬつなぎのエネルギー源として今は眼をつぶって動かすとしても、やはりどこかの時点で先細りをさせ、やがて全廃するのが妥当であろう。その“時点”がどこかは叡智を絞って議論をつくすべきと考えている。

図3は、1994年6月に通商産業省総合エネルギー調査会が作成した日本の長期エネルギー需給見通しを筆者が図に表したものである。石油の輸入量を現状のままに抑える一方で、省エネルギーを徹底し需要の伸びを抑え、2010年までに原子力への依存量を現状（1992年度末で3440万kW、2230億kWh）の約2倍（7050万kW、4800億kWh）、天然ガスを約1.5倍（LNG換算4070万トン→5800万トン）まで伸ばして行く計画になっている。

1996年11月末現在で、日本全国に営業運転中の原子炉は50基、設備容量にして4,255万kWあるが、2010年までに残りの約2,800万kW（約25基分）を建設してゆくことは、先述の通り、もはや不可能に近いだろう。1996年11月末現在、建

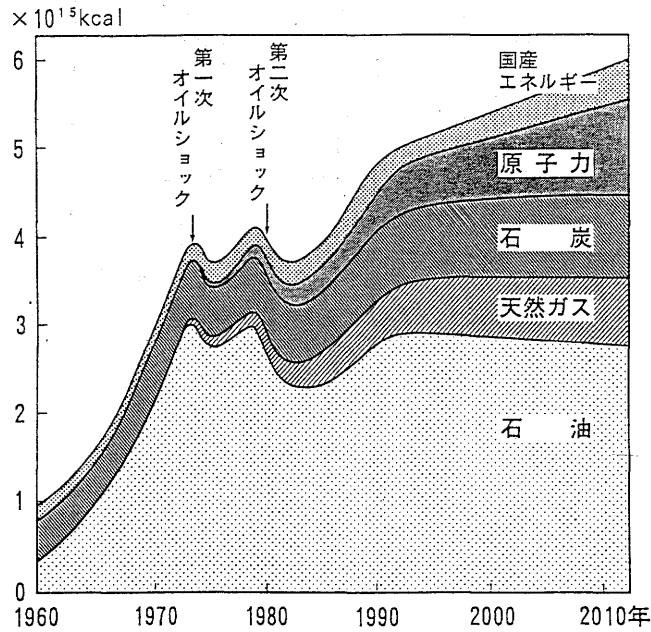


図3. 日本の長期エネルギー需給見通し

設中のものが2基，電調審決定分が2基あるが，1997年3月末に発表された電力10社の設備投資計画によれば，2006年までの10年間に11基，1,381万kWを建設する予定になっている。つまり，通産省の計画に対して2010年には原子炉10数基分，1,400万kW程度の電源設備の不足を生ずることとなる。

一方，バブルの崩壊によって，このところ数年エネルギー需要の伸びはやや鈍化した，景気が回復すれば1980年代後半の需要の伸びの延長線上に戻ることが予想される。この政府見通しが想定したような省エネルギーを実現するためには，格別の覚悟を以て規制緩和を進め，エネルギー供給構造を抜本的に変革しない限り，実現は不可能であろう。原子力発電所の建設は進まず，省エネルギーは実現困難となれば，このままの推移にまかせたときは，極めて重大な予測違いを犯すことになる。省エネルギーと電源確保の緊急性は極めて深刻なのである。

## 2. 構造的省エネルギーの実現に向けて

図4は，1975年度及び1992年度の日本のエネルギーフローである。わが国は，高価な代金を払って石油，石炭，LNG（液化天然ガス），核燃料など1次エネルギーの90%以上を輸入し，これをすべて“燃やして”しまい，1,500℃以上の高温の「熱」を発生させてから利用を始める。

熱力学の第1法則によれば，エネルギーは不滅であり，はじめ「化学エネルギー」や「核エネルギー」の形で保有されていた1次エネルギーが，「熱」に姿を変え，さらに「機械的工作（力学的エネルギー）」や「電気エネルギー」，「光・電磁波エネルギー」に形をかえて行くが，図4でわかるように，その総和は常に一定に保たれている。そして，人間にとって有用な仕事を終えたあと，図4の右端に示したように，すべてのエネルギーは“常温の熱”となって，大気や海水といった環境の中に入り，雲散霧消するが，その総量は最初に作り出

された熱の総量と等しい。

このようにエネルギーは、高温の熱に始まり常温の熱となってその一生を終えるまで、熱力学第2法則に基づき、温度の高いほうから低いほうへ一方向に、不可逆的に流れ、自分では決して元に戻らない。よく“再生可能”なエネルギーという言葉が使われるが、エネルギーは、“再生不能”なのである。

したがって、熱は生まれたときの高温から、墓場に到着する常温まで下がって来る間にしゃぶりつくさなければならない。わが国の場合、熱の総合的な利用率は図4でわかるように、投入された1次エネルギー総量の、3割程度で、最初に作り出された熱の6割以上は、なにも利用されずに環境中へ捨てられているのである。この効率の悪さの大半の原因は、高温の熱に始まって常温の熱で終わる「熱」の利用技術の“まずさ”による。熱の本質に対する理解の不足によって、熱を高温から常温まで系統的に使って来る事が行われていないことが主たる理由である。

図4において、1975年度と1992年度の対比を更に仔細に検討してみよう。まず、1次エネルギー供給の総量は、1975年度の  $3.6 \times 10^{15}$  kcal ( $1.5 \times 10^{16}$  kJ) から1992年度の  $4.9 \times 10^{15}$  kcal ( $2.0 \times 10^{16}$  kJ) へと、20年ほどの間に30%近く増加している。電力化率、即ち発電のために投入される1次エネルギー量の割合を見ると、1975年度の27.5%から、1992年度には40%と著しく増大しており、

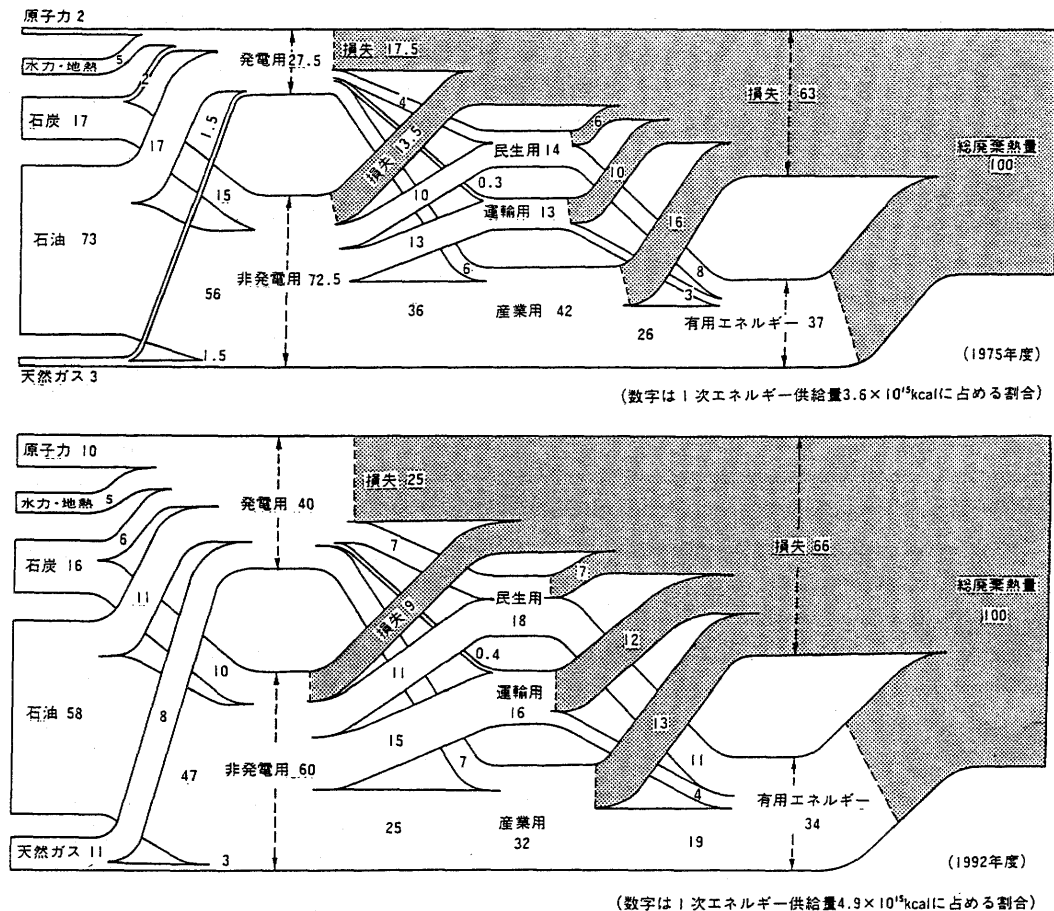


図4. 日本のエネルギーフロー

その絶対量は約2倍になっている。一方、国全体のエネルギー利用効率は、国を挙げての省エネルギー努力にも拘わらず、1975年度の37%から1992年度には34%と、3%程度悪化しているのである。この効率低下の主たる原因は、図でわかるように電力化率の増大によって、温排水損失が国全体のエネルギー損失に支配的な影響を及ぼすようになってきたことによる。

これまでの日本のエネルギー供給構造は、図4に示されているように、発電用と非発電用とが“並列”に流れる構造であり、前者は電気事業者、後者はガスおよび石油事業者がこれを担当してきた。電気事業者は電気の安定供給が使命であるから、発電だけを目的として燃料を焚き、排熱（温排水）は「たれ流し」であった。日本の高度経済成長期には、スケールメリットと称して発電所は巨大化の一途をたどり、福島、柏崎と辺境の地に立地して、消費地である都市まで延々と送電することが定着した。排熱を利用しようとしても、熱を消費地まで運ぶわけにはいかなかったのである。一方、熱を売ることがを商売とするガス及び石油事業者は、電気を作ることなど露ほども考えずに、FF暖房や石油ファンヒーターを売ってきた。両者は完全に独立で、相手の領域を侵すことなど全く念頭になかったのである。

情報化ならびにアメニティ社会の進展に伴って、電力需要の増大、つまり電力化率の増大は避けられないトレンドであろうが、そうなると、この“並列”のままのエネルギー供給構造では、国全体としての効率の悪化は避けられない。省エネルギーは本質的に実現不可能ということになる。これを抜本的に改革するためには、発想を転換して“直列”の構造を取り入れなければならない。次項で、直列とは何を意味するかを考えてみよう。

### 3. 熱のシステム利用

コレラのため37才の若さで夭折した熱力学の始祖サディ・カルノー（Sadi Carnot, 1796～1832）は、1824年に1つだけ論文を書いた。その中に「動力の発生をともしない熱の高温から低温への移動は、正味の損失と見なさなければならない」という言葉があるが、ここに彼の天才性が遺憾なく表れている。熱を売ることがを業としている“熱の専門家”たちはこれまで170年の間、このことにほとんど注意を払ってこなかった。ガスバーナーに火を点けて風呂をわかす。石油ファンヒーターに火を点けて暖房をする。バーナーやヒーターの火炎のところには1500℃以上の“高温の熱”が発生しているが、これをそのまま使って、46℃の風呂を沸かしたり、25℃の暖房をして何も不思議とは思わなかった。動力を発生することなしに、熱の温度を下げてしまうことを、極めてあたり前として来たのである。

山の上にダムを作り、水が海面まで流下してくる間に、川の流れに沿って高度の高いところから、黒部第4、黒部第3というように順々に水力発電所を仕掛け、水の落差を使いつくすことは誰でも考えることである。海面まで下りきってしまった水は、もはや使いものにならない。「覆水は盆に返らず」である。熱の場合の“落差”に相当するのが“温度差”であり、“海面”に相当するのが地球の“常温”である。燃料に火を点けて発生させた1,500℃以上の高温から、常温つまり15℃までの落差を使ってくるのが“熱の利用”である。常温まで下りきってしまった熱はもはや使いものにならないのであるが、不思議なことに熱のほうは水力発電のように温度の高いところから順々に使ってくるのがほ

とんど行われて来なかった。日本に於ける未利用エネルギーの最たるものは、1,500℃ から 500℃ 位までの「高温部の熱」なのである。

燃料に火をつけたら、天才カルノーの指摘した通り、熱機関を動かしてまず動力をとり出すことを考えなければならない。熱や蒸気が欲しいときにこれまではボイラを導入するのが普通であった。これからは熱が欲しかったら、まずエンジンやガスタービンを導入することを考えなければならない。高温の熱は熱機関で動力化し、温度を下げた熱機関から排出された熱を風呂や暖房に用いることが、「熱」の合理的な使い方の第1歩である。

高温の熱で電力を、低温の熱は熱として用いる“直列”型のシステムをコージェネレーション（熱電併給）という。これまでの日本のように、電気は電気、熱は熱、互いに独立で“並列”のままのエネルギー供給構造では、国全体としてのエネルギー利用効率は悪化してゆくばかりである。これを抜本的に改革するためには、電力会社とガス及び石油会社が緊密に協力して、高温の熱は熱機関で動力さらに電力に、熱機関から排出された熱を産業用のプロセス蒸気や民生用の暖冷房・給湯に用いるような、“直列”のシステムに改めない限り、省エネルギーは構造的に不可能なのである。

#### 4. 「システムエネルギー」を求めて

“直列”の原理を実現しようとすれば、燃料に火をつけたらまず、可能な限りの高温から熱機関を駆動して熱を動力化することに努め、技術的な無理をせずに熱機関が稼働できる温度領域の熱は可能な限り低温まで動力に変換する。そのあとの排熱を産業用プロセスや暖冷房・給湯に用いることになるが、熱機関としては我々の身近にある確立した技術を、それぞれの特性に応じて適切に使い分けることが重要である。まずオットーサイクルやディーゼルサイクルで代表されるピストン内燃機関は、燃料の燃焼が瞬間的・爆発的であり、ピストン頭や、ピストンリング、排気弁等が高温ガスにさらされる時間が短く、しかも一回一回新しい空気を吸入することによってそれらの部材が冷却され、加うるに空冷・水冷等を行うため、熱機関の中では作動ガスの最高温度を最も高くとることができる。ガスタービンは高温燃焼ガスの流れの中で連続的にタービンをまわさなければならないから、タービン翼の高温強度からガス温度に制限を受ける。一方、ボイラ・蒸気タービン機関は高い内圧のかかった蒸気過熱器の管材の強度でサイクルの最高温度が抑えられ、管内を流れる作動流体の蒸気の最高温度は現在650℃前後である。ヘリウム、水素などの作動流体を、高圧で加熱管内に流して外側から加熱するスターリング機関も事情は変わらない。使用する材料の許容温度を850℃程度の同一レベルに抑えても、ピストン内燃機関は本質的に“高温域”，ガスタービンは“中温域”，ボイラ・蒸気タービンおよびスターリング機関は比較的“低温域”の熱を動力化することを、それぞれの守備範囲とした熱機関ということになる。

このような現有の熱機関の熱効率は、単一の機関としては高いもので40%程度であり、そのままの形でこれをあと1%上昇させることは容易ではない。自動車用ガソリン機関や、ボイラ・蒸気タービン機関は長年の研究によって、もはや完成の域に達している。熱効率を高めるための具体性のある唯一の方法は、「コンバインド（複合）サイクル機関」の開発である。既存の熱機関を上述のような「高温型」，「中温型」，「低温型」のそれぞれの特徴を生かしてシス

テム化、複合化するのである。

ガスタービンもタービン入口ガス温度は上昇の一途を辿りつつあり、現在、フィルム冷却翼の採用により1,350°Cが実用化されている。今世紀中に1500°C、21世紀初頭には、蒸気冷却の採用、あるいはセラミックスなど超高温材料の進歩により、1700°Cも実現可能であろう。そうなるとガスタービンも、「高温型」の仲間に入り、トッピングとしての内燃機関は、ピストン機関でもタービン機関でもいづれでもよいことになる。ボトムングとして組み合わせる外燃機関は通過するガス量の大小によって選ぶことになり、ピストン機関はピストン機関同士、タービン機関はタービン機関同士を組み合わせることが現実的であろう。例えばディーゼルスターリング、ガスタービン-蒸気タービン複合機関などがその例であるが、排気ターボ過給機関などの例外もある。

これまでは省エネルギーというと、ガスタービンの高効率化であるとか、伝熱促進であるとか、個々の要素技術の性能向上を考えることが多かった。熱を高温から低温まで系統的に使うことによって構造的な省エネルギーを実現することが目標となれば、要素機器の効率はさておいて、システムとしての効率の向上を目指すことになる。システムとしての最高効率点、要素機器の最高効率点を組み合わせたものとならないケースはいくらでも存在する。

このような意味で、確立した既存の要素技術を組み合わせ、高効率のシステムを生み出すことで省エネルギーを実現することは、未利用エネルギーを有効に活用することに通じ、いわゆる“創エネルギー”の一種であり、これを「システムエネルギー」と名付けることにする。

## 5. 「システムエネルギー」の本命：コージェネレーション

図5はわが国のGNPの伸展とエネルギー需要の伸びを、第1次オイルショック時点を基準に指数で表したものである。GNPは順調に伸び続けているが、この日本経済の進歩を支えて来たわが国産業界のエネルギー消費は、省エネルギー技術の徹底により、1994年度にようやく第1次オイルショック時点の消費量まで戻った程度である。ところが、民生用と運輸用のエネルギー消費は、GNPの伸びに連動して伸び続けている。運輸用エネルギー消費の議論は本講では措き、民生用エネルギー消費の伸びについて考えてみる。民生用エネルギー需要はまず第1に、業務用のコンピュータの普及と、家庭用を含めた暖冷房需要の伸び、更に家庭用の朝シャンなど給湯需要の伸びに基づくものであろう。このような民生用の暖冷房、給湯の需要は、すべて120°C以下程度の比較的低温の熱であるが、そのような低温の熱の需要が伸びているのである。

先述のように、われわれの利用するエネルギーは、燃料を焚くことによって得られる“高温の熱”に始まって、動力や、電力や、光・電磁波などに姿を変えながら、最後はすべて“常温の熱”へ向かって流れ下りてくる。この流れ下りて来る熱を、途中の温度で集めて利用するシステムさえあれば、民生用の熱など、本来、あり余るほどの量であって、とても朝シャンなどでは使いきれない筈である。原子力発電所の温排水を思い浮かべれば、その量の膨大さは直ちに理解されよう。電気を作るときについて出てくる排熱を利用できるコージェネレーションさえ定着すれば、実は民生用の熱の大半は充分それでまかなわれる筈である。そのような民生用の熱を得るために、あらためて燃料を焚いたり、高級な電力を用いたりすることは誤りであると言わざるを得ない。

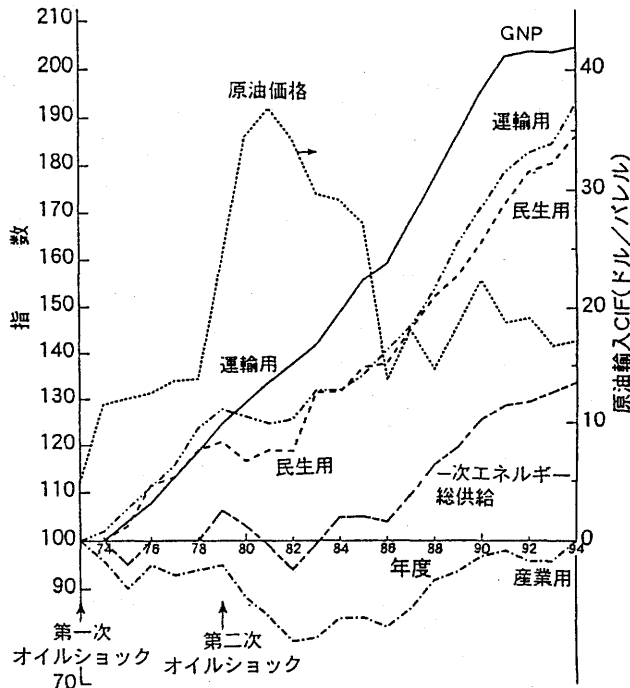


図5. 日本の用途別エネルギー消費の推移

1,000℃以上の高温の熱をきちんと動力に変換するためには、熱機関の中でもピストンエンジンやガスタービンなどの「高温型」熱機関、つまり内燃機関を用いなければならない。日本でも、ボイラー-蒸気タービンなどの「低温型」熱機関、即ち外燃機関で発電を行ったあとの蒸気を工場のプロセスに用いる方式のコージェネレーションは、産業界で古くから使われてきた。発電設備容量で約2,000万kWにのぼり、日本の全電源設備容量の10%程度を占めているが、それらのシステムは、蒸気温度がせいぜい500℃どまりであり、いわばクラシカルなコージェネレーションである。これに対して、内燃機関ベースの“モダン”なコージェネレーションは、1997年3月末現在で民生用1,314件、65万KW、産業用967件、320万kW、合計2,281件、385万kWとなっており、1年あたり40万kW程度ずつ増えている。熱力学の原理に忠実であるためには、クラシカルなコージェネレーションもガスタービンなどを追加設置して複合サイクル化し、その排熱で作った蒸気で既存の蒸気タービンを駆動するような改造を施すべきである。既存のボイラー-蒸気タービンシステムにガスタービンを追設して高出力化、高効率化を図る技術を「リパワリング(Repowering)」と呼んでいる。

1995年3月にベルリンで開かれた気候変動枠組条約の第1回締約国会議では、2000年における二酸化炭素排出量を、1990年レベルに対し、日本は2.3%増、アメリカは3.0%増など先進各国がいずれもプラスと回答したのに対し、オランダは3.7%減、デンマークは7.9%減と答えている。この両国の具体的な方策は、現在、全電源設備容量のそれぞれ約30%を占めているコージェネレーションを40%以上にまで普及させることによって実現すると約束しているのである。日本もこれらの国に見習って、コージェネレーションやリパワリングの普及に一層の努力を傾けなければなるまい。



## 6. スーパーゴミ発電との組み合わせ：都市エネルギーセンター

日本全国で1日に約14万トンの排出される一般都市ゴミの問題は、最近、社会問題ともなっている。現在その約74%が焼却処理されており、15%ほどが埋立て、残りがコンポストその他で処理されている。ゴミ処理施設は全国に約1,900箇所存在するが、そのうち、24時間連続焼却施設が約440施設で、総量13万トン/日の処理能力を有し、残りが准連続式またはバッチ処理式の中小焼却施設である。これらの中で、焼却熱を利用して発電している施設は1995年度末で153施設、発電設備容量56.8万kW、所内電力を差し引いて売電している施設は72施設に過ぎない。1日に焼却されている約10万トン/日(4,200トン/h)のゴミで、欧米なみに600kWh/ゴミトン程度の発電を行ったとすれば、それだけで250万kWの程度の設備容量となり、かなりの潜在発電能力である。大都市の住民が、原子力発電を他に押しつけて電力だけを楽しんでいる不公平に目覚め、廃棄物をベースにせめて電力需要の一部でも自らの手で作る姿勢を示すことが、電源不足解消の第一歩であろう。

加うるに、これまでゴミを焼却して二酸化炭素を放出するだけだったゴミ焼却場が、高効率の発電所に生まれ変わることになれば、その分だけ石油あるいは石炭火力発電を減らすことが出来、CO<sub>2</sub>削減のためには2重の貢献が期待できる筈である。

日本でゴミの焼却熱による発電が遅れているのには理由がある。日本の生ゴミには塩分が多く含まれているうえに、塩化ビニールなどが混入しており、これを焼却すると、燃焼ガス中の塩化水素の濃度が高くなる。このようなガスで蒸気を作るとき、通常のボイラー鋼管では管壁の温度が330℃を超えると急速に高温塩素腐食が進行するとされている。従って、蒸気の温度を300℃以上にとることが出来ず、そのような低い温度で蒸気タービンを駆動しても、発電端効率はせいぜい12%どまりであり、あまりメリットがなくこれまで発電が敬遠されて来たようである。

欧米では、都市ゴミ処理の主流は埋立であるが、ドイツやアメリカなどでは最近焼却処理の割合が増加しつつある。焼却熱で発電を行っているところが大半であるが、ドイツの場合には、これまで蒸気温度を350~450℃程度、アメリカも400~450℃程度と比較的高くとってきた。中には120気圧/520℃というものもある。ゴミ質が日本と異なり、塩化水素の濃度が低いことも考えられるが、彼等も高温腐食は経験しており、スーパーヒーターに高級耐腐食性材料を用いるとか、常に予備品を用意しておいて、年に1回程度交換するといった対策をとってきた。最近の新しいプラントは蒸気温度を下げる傾向にあり、400℃程度のものが多くなっている。

そこでリパワリングの原理を、ゴミ焼却について適用する。即ち、ボイラチューブが腐食しない程度の蒸気温度、つまり290℃程度の蒸気温度でも、別に燃料を焚いてガスタービンを駆動し、その排気ガスでこの蒸気をスーパーヒートして蒸気タービンを駆動すれば、コンバインドサイクル発電が可能となり高効率化が実現できる。(財)エネルギー総合工学研究所は、筆者が提案したこのリパワリング方式のコンバインドサイクルゴミ焼却発電を取り上げ、1991年度からそのフィージビリティスタディ<sup>(1)</sup>を行ってきた。また自治省は、このリパワリング方式のゴミ焼却発電に早くから着目し、1992年度に「地域エネルギーの事業推進に関する調査研究会」を設けて研究を行い、その有効性を結論<sup>(2)</sup>

づけ、事業の推進のため、地方自治体に対し起債を認めるなどのインセンティブを与えた。筆者はこれらの研究会の座長を務めたが、このような発電方式を「スーパーゴミ発電」と名付けたのは当時の自治省公営企業第2課課長補佐坂本森男氏である。

これらのFS試算の結果、ガスタービンを付加することによってシステムの熱効率は大きく増加するが、サイクル熱効率の上昇に与える効果は、ガスタービン容量の大小によってあまり大きく変化しない。また、発電原価もガスタービンの容量によってあまり変化がないことなどが明らかになった。つまり、ガスタービンの容量は、ゴミ焼却量の大小によって決められるのではなく、イニシャルコストに応じた資金量の多寡、天然ガスなど燃料供給上の制約、その地域の電源容量の余裕の有無など、他の要因によって決定されることになろう。

表1. 群馬県「高浜発電所」のスーパーゴミ発電計画諸元

事業主	群馬県企業局
期間	平成5年度～平成8年度
事業費	約60億円
都市ゴミ処理量	450トン/日 (150トン/日×3炉)
焼却炉からの蒸気受入量	28t/hr
ガスタービン	開放単純サイクル16000kW (燃料:天然ガス)
蒸気タービン	復水タービン9000kW
送電電力	23,730kW
効率	31.1% (ガス熱量規準 $\eta$ °フリンク°効率:48.6%)

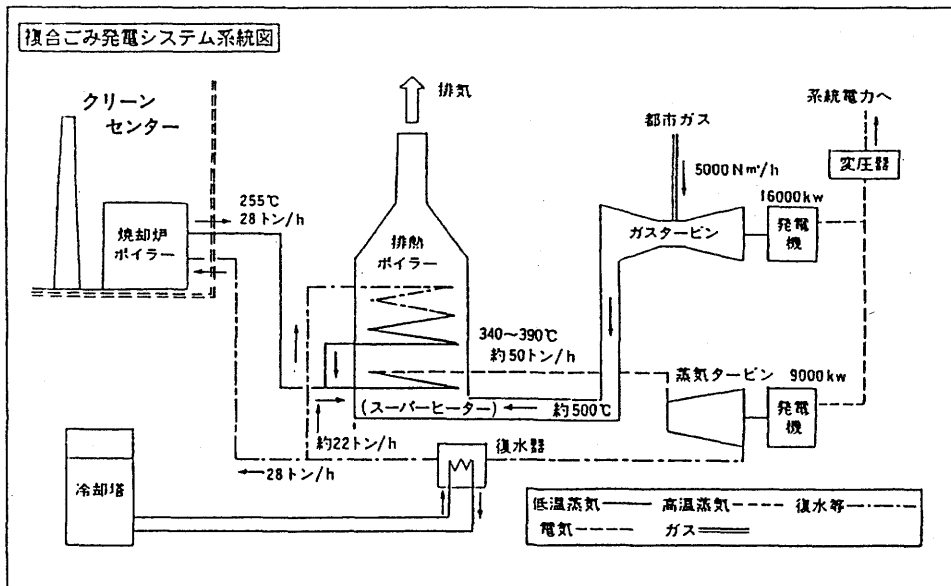


図6. 群馬県「高浜発電所」スーパーゴミ発電システム系統図<sup>(4)</sup>

表1は、日本における第1号スーパーゴミ発電プラントとして、1996年11月に営業運転を開始した、群馬県「高浜発電所」における計画諸元を示す。この発電所に隣接して発電所に蒸気を送る「高浜クリーンセンター」のゴミ焼却プラントは1988年6月に竣工したもので、150トン/日の能力を有する炉を3基持っている。通常は2基が稼働し300トン/日のゴミを処理しているが、これまでは1,300kWの蒸気タービン発電機で所内電力を賄うほか、余剰電力は東京電力(株)に売電してきた。表でわかるように、これをスーパーゴミ発電にした場合には、発電端出力25MW(ガスタービン出力16MW, 蒸気タービン出力9MW, 発電端効率の実績値は計画を上回り35%(LHV基準))が得られている。排熱は場内の冷暖房・給湯に用いているほか、隣接する町営老人福祉センターに給湯している。図6にシステムの系統図<sup>(3)</sup>を示す。スーパーゴミ発電は、このあと堺市、北九州市などに導入されることになっている。

ゴミ焼却場はそれなりに敷地面積を保有しているから、地下に灯油などの備蓄タンクを設置し、スーパーゴミ発電のガスタービンが消費する燃料の数日分を備蓄する。地震などの災害時には、ゴミも収集不能となって焼却炉は停止せざるを得ないが、復電までの間、ガスタービンだけは分離・駆動して防災センター、病院などの拠点に送電する。先の阪神・明石大震災ではガソリンスタンドの信頼性が立証された。周辺の大火災からの類焼もなく、地下タンクも全てひび割れすら生じなかったのである。この教訓を活かして、すべてのライフラインが途絶した場合にも生き残るライフスポットとしての機能を備えた、ゴミ焼却場を中心とした「都市エネルギーセンター」も検討に値しよう。

## 7. 電気事業法の改正とコージェネレーション

1995年12月1日には、制定以来31年ぶりと言われる電気事業法の大幅改正が施行された。電力の卸供給事業への参入の自由化、再開発地域等の特定地点に電気の供給を行うことを認める特定電気事業制度の創設、特定供給規制の更なる緩和、技術の進歩および自己責任原則を前提とした保安規制の合理化、などがその骨子となっている。図7に日本ガス協会がまとめた新しい電気事業の形態について示した。

まず、いわゆる特定供給については、同一地方公共団体の他部門間並びに自己の社宅への電力供給、一建物内の電力供給はいずれも自家発自家消費の扱いと同じく許可不要となったので、集合住宅や業務用ビルでテナントに電力を供給することが出来るようになった。例えば、集合住宅にコージェネレーションを導入し、電力を戸別に供給して電動ヒートポンプで暖冷房を行い、熱は給湯に用いるなどの方法が可能となった。欧米で事例が増えつつあるESCO(Energy Service Company)は、例えばメーカーがコージェネレーションを需要家側に設置して運転管理は全てメーカー側が行い、需要家は電気料金と燃料代を支払う。需要家は電力会社に払うよりも10%ほど安い電気料金で熱は無償、運転管理の煩わしさが無いというので、ホテルや自動車会社で採用例が増えているが、日本でも最近検討が行われている。

新設された特定電気事業は、複数の建物を含む地域熱供給で熱の供給先に電力も送る「ミニ電力会社」の設立が可能になったものである。海外にもあまり例を見ないこの特定電気事業は、省エネルギー及び環境保全の切札として育ててゆくべき先駆的なエネルギー供給システムとなろう。長野県の諏訪ガス(株)

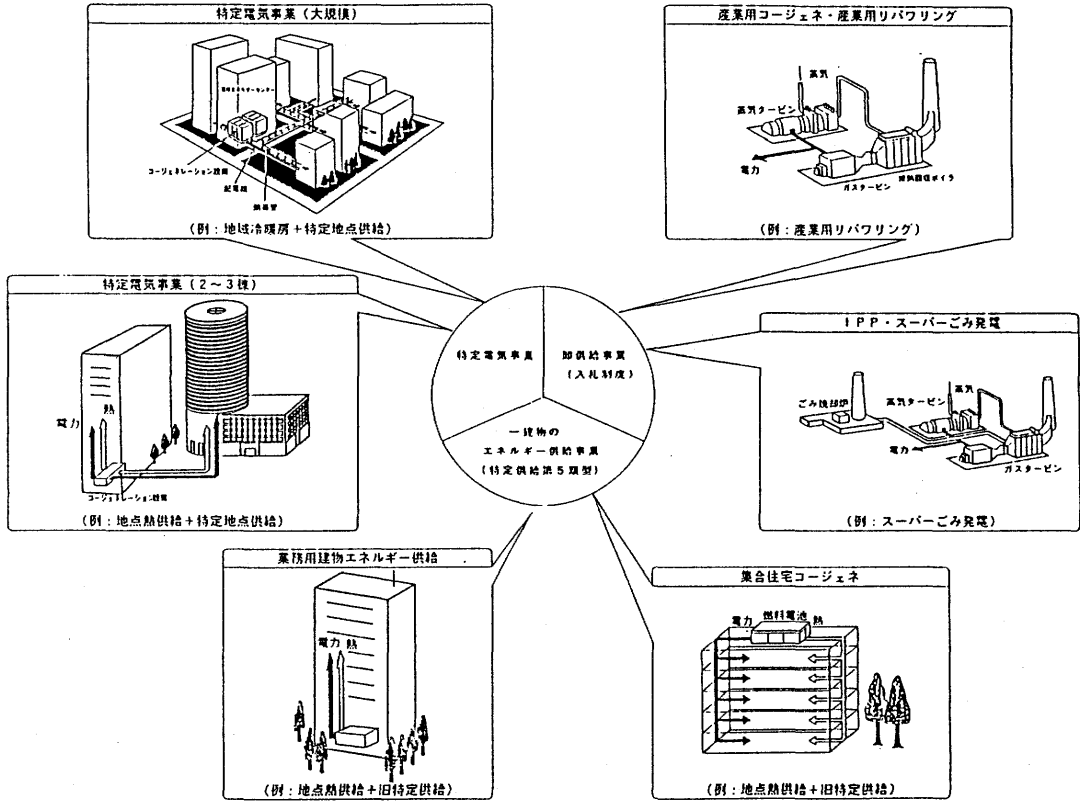


図7. 電気事業法改正に伴うコージェネレーション  
あるいはシステムエネルギー事業の新事業形態

は、(株)鹿島などと共同で新会社「諏訪エネルギーサービス」社を設立し、諏訪湖東岸約5ヘクタールの再開発地域に建設予定の病院と高齢者保健施設を対象に、LPGを燃料として設備容量 3,000kWの電気事業を手がけるといふ。1999年春にも日本第1号の事例が出現することになる。また、トヨタ自動車グループも愛知県刈谷市内に工場を持つグループ7社とトヨタ自動車が共同で事業化調査を始めたといえられる。先述のスーパーゴミ発電とコージェネレーションを組み合わせた都市エネルギーセンター構想も、この特定電気事業の一方式として考えるのがよいだろう。

電力の卸供給事業については、コージェネレーション、リパワリング、スーパーゴミ発電、天然ガス-石炭ハイブリッドコンバインドサイクル発電など、最新のシステムエネルギー技術をベースとした独立発電事業(IPP)に門戸を開いたものである。1995年11月に東京、関西、中部、九州、東北、北海道の6電力会社が卸供給事業者からの電力の購入条件を提示したが、1999~2002年度に供給開始となる購入量は、6社合計で265.5万kW、入札の上限価格は昼夜・季節の別なく安定に稼働するベース電源で9~11円/kWh程度であった。説明会にはのべ900社以上が参加したといわれたが、1996年8月には各社の入札募集が締め切られ、石油、鉄鋼、化学、紡績、商社など巾広い業界から募集量の4倍を超える

1,081万kWの応募があった。同年10月には15社20件の落札が決まり、設備容量総計は304.7万kWと募集量を上回った。1997年度には上記6社に中国電力も加わり275万kWの募集をするという。立地難に悩む電力業界に対し、自前の土地を持つ一般企業の卸供給事業参入希望がこれほど強いことは、冒頭に述べた電源不足に対する大きな救いであり、このムードを大切に育て上げなければならないだろう。

## 8. 「システムエネルギー」技術導入によるCO<sub>2</sub>削減可能量試算

1997年12月の国連気候変動枠組条約第3回締約国会議を京都で主催するわが国としては、二酸化炭素排出削減のための努力の一端を世界に示すべく、環境庁は、技術的なアプローチによってどこまでCO<sub>2</sub>の削減が見込めるかを具体的に算出することとし、1995年7月に「地球温暖化対策技術評価検討会」を設置して前後7回に及ぶ議論を行い、1996年5月に第1次報告書として2000年におけるCO<sub>2</sub>削減の可能性をまとめた。筆者はこの検討会の座長を務めているが、ここにその概要を紹介する。

今回の検討では、各種温室効果ガスのうち、CO<sub>2</sub>のみを対象とした。また通産省の長期エネルギー需給見通し策定の際に算定されたと考えられる技術は除外した。更に、コスト、時間、立地などの制約を考えても、あと5年ほどの間に実現可能と考えられる現実性のある技術に絞った。作業は各部門別に専門家のグループを設け、関連業界のヒアリングを中心に技術を洗い出し、検討会で定量的な評価を行った。同時に全都道府県・制令指定都市の協力を得て、全国の工場・事業場のうち一定規模のボイラーやモーター等を有するもの及びゴミ焼却場を対象に、「地球温暖化対策技術の導入可能性に関する調査」を実施した。

これらの結果をもとに、概ね2000年までに導入可能な技術を挙げると以下のようになる。

### (1) エネルギー転換部門

エネルギー転換部門は、CO<sub>2</sub>排出総量の3割以上を占め、その大半が電気事業である。概ね2000年までに導入可能な技術としては以下のようなものがある。

①高効率コンバインドサイクル発電、②超々臨界圧発電、③加圧流動床コンバインドサイクル発電、④既設火力のリパワリング、⑤原子力のパワーストレッチング、⑥高効率ゴミ発電、⑦RDFゴミ発電、⑧都市ガスの天然ガスへの転換。

### (2) 産業部門

①コージェネレーション、②自家発電のリパワリング、③自家発電のコンバインドサイクル化、④ボイラーの燃焼管理、⑤モーターのインバーター制御、⑥高効率モーター、⑦産業廃棄物焼却発電。

### (3) 民生部門

#### ○家庭部門

①ペアガラス等による既設住宅の開口部保温構造化、②新築住宅の保温構造強化、③ソーラーシステム、④パッシブソーラー住宅、⑤電力による多機能ヒートポンプ、⑥潜熱回収型温水器、⑦家電製品の待機電力の削減、⑧ヒートポンプエアコンの効率向上、⑨ヒートポンプエアコンの普及拡大、⑩コンパクト蛍光灯の普及、⑪集合住宅用コージェネレーション。

#### ○業務部門

①新設建物の省エネビル化、②Hfインバーター照明、高効率ルーバー、反射

板の導入, ③非常口誘導灯の高輝度誘導灯への転換, ④センサー付き連続調光蛍光灯導入, ⑤潜熱回収型温水ボイラーの導入, ⑥ヒートポンプエアコンの効率向上, ⑦蓄熱式ヒートポンプ。

(4) 運輸部門

①希薄燃焼ガソリンエンジン, ②筒内噴射ガソリンエンジン, ③ミラーサイクルエンジン, ④4バルブ化, ⑤バルブコントロール, ⑥電子制御燃料噴射, ⑦ローラーカムフォロワー, ⑧アイドル回転数低下, ⑨アイドルリングストップ装置, ⑩空気抵抗の低減, ⑪計量材料の採用, ⑫計量駆動構造, ⑬3ATの4AT, 5AT化, ⑭4MTの5MT, 6MT化, ⑮無段変速機, ⑯ロックアップ化, ⑰インタークーレーターボ, ⑱導風板, ⑲ハイブリッド自動車, 電気自動車, CNG自動車など低公害くるまの導入, ⑳トラック輸送の鉄道への転換など物流・交通流対策。

これらの技術を導入した場合のCO<sub>2</sub>削減効果の算定結果を表2に示す。ここでは原子力のパワーストレッチング(定期点検期間の短縮(2ヶ月を1.5ヶ月へ), 定期点検間隔の延長(12ヶ月を15ヶ月へ)により設備利用率を5%程度向上, 冬期に冷却水温度が下がり出力が増大するため二重定格を採用すれば年間出力が

表2. 2000年における部門別CO<sub>2</sub>削減可能性

部門	対策技術と削減効果(炭素換算万トン)	CO <sub>2</sub> 削減効果(炭素換算万トン)
エネルギー転換	高効率コバインドサイクル発電(20)、超々臨界圧発電及び加圧流動床コバインドサイクル発電(8)、LNGの優先的利用(72) 高効率ゴミ発電(60)、都市ガスの天然ガス転換(21)	180
産業	コージェネレーション(17)、リフリング(35)、コバインドサイクル発電(113)、モーターのインバーター制御(25)、ボイラー燃焼管理(6)、産廃発電(2)	198
民生(家庭)	住宅の保温構造化(24)、家電待機電力の削減(39)、ヒートポンプエアコンの効率向上・普及拡大(34)、コバインド蛍光灯の普及(40)、ソーラーシステムの普及(2)、その他(3)	143
民生(業務)	新設ビルの省エネ化(10)、ヒートポンプエアコンの効率向上(14)、高周波点灯型インバータ蛍光灯・高効率ルーバー・反射板等照明改善(8)、潜熱回収型温水ボイラーの普及(9)、その他(7)	48
運輸	リーンバーンエンジン、筒内噴射エンジン、車体の軽量化、空気抵抗低減、AT車のロックアップ化、ディーゼルバス・貨物のインタークーレーターボの採用等自動車単体対策(89)、電気・CNG・ハイブリッド等低公害車の導入(1)、トラックから鉄道輸送への転換(3)	92
合計		661

(注) 原子力発電のパワーストレッチング(二重定格の採用、定期点検期間の短縮、定期点検間隔の長期化)については上表に含んでいないが、安全性の確保や地域住民の理解などの課題が克服され、実現した場合には、削減効果として更に約290万トンを見込むことができる。

0.6%向上，初期のプラントにおけるタービン翼の長翼化あるいは高性能翼への改造により出力が0.8～2%向上，など）を除外しているが，これを含めれば約290万トン増となり，合計約950万トンとなる。つまり，一段の努力をすれば，2000年までに導入可能性のある技術によってほぼ1000万トン削減が可能となる。

表2でわかるように，削減可能と見込まれるCO<sub>2</sub>削減量は，エネルギー転換，産業，民生，運輸のそれぞれの部門の割合が，原子力のパワーストレッチングを含めた場合，5:2:2:1ということになり，エネルギー転換部門及び産業部門の努力の寄与率が，民生部門と運輸部門を加えたものの約2倍の効果を持つことがわかる。また，この講義で強調してきたシステムエネルギー技術の寄与率は，パワーストレッチングを除く全ての技術により見込める総削減量の半分を占めており，コージェネレーションやリパワリングなどを推進してゆくことがCO<sub>2</sub>削減の切り札であることが示された。

図8は日本の二酸化炭素排出量の推移である。1993年度は冷夏が幸いしてやや好転したが，1994年度は以前の傾向に戻り，既に約7%増となっており，このままではとても国際公約は果たせそうもない。本1997年12月の京都会議（COP3）に向けて，1997年4月15日までに地球温暖化防止条約事務局（本部ボン）あてに国別報告書を提出するため，この検討会は更に2000年以降についても試算を行った。その結果，2010年には，何も対策をとらなかった場合1990年レベルに対し約23～25%増加するが，上記の各種対策に真面目に取り組むことにより，6.5～8.1%削減可能という結論を得た。1997年4月13日付日経朝刊によれば，この結果に対して通産省の合意が得られず，政府は報告書の期限内提出を断念したという。EUは既に，2010年に域内のCO<sub>2</sub>排出量を90年レベルの15%削減で合意しており，議長国としては締約諸国，特に途上国に対して会わせる顔がない状況にある。いまや世界のなかで日本の果たすべき役割・責務は，我々が考えている以上に重いものになっている。覚悟を決めて，二酸化炭素排出削減に向けての努力を本気で強化せねばならないだろう。

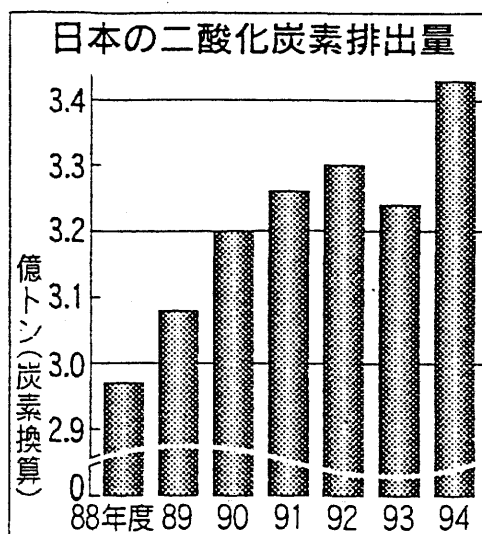


図8. 日本の二酸化炭素排出量の推移

## 9. インフラストラクチャーの建設

ここまで述べてきたシステムエネルギー技術の燃料としては、天然ガスを想定している。システムの立地点までガスが供給されることが大前提であるが、そのためには燃料供給のためのパイプラインなどのインフラが整備されなければならない。先の図3に示した通商産業省の見積もりによれば、2010年における天然ガス需要量はLNG（液化天然ガス）換算5,800万トンということになっているが、天然ガスが頼りとなるとこの値は過少に過ぎるだろう。8,000万トンから1億トンは必要となるだろうが、そのうち5,800万トンはLNGで手当が済んでいるものとして、残りの2,000～4,000万トンはパイプラインによる輸入を考えなければなるまい。

わが国のエネルギー需給の問題もさりながら、より以上に深刻なのがアジアである。年率10%を超える高度経済成長を続ける中国をはじめ、インド、ベトナムなどのエネルギー需要の伸びは、嘗て日本が経験した図3の1960年代における伸びのように、指数関数的なものとなろう。これを石炭を主体としてまかなうとすれば、地球環境上もゆゆしき大事となる。中国における石炭の燃焼によって発生するSO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>は、今や中国国内に留まらず、韓国、日本にもオレソージュースなみの酸性度の雨や雪を降らせている。中国政府関係者は一刻も早く石炭を天然ガスに転換したいという。

アジア・太平洋地域の諸国に、なるべく早く天然ガスを供給し、システムエネルギー技術を普及させるためには、アジア・太平洋地域を結ぶトランス・アジア天然ガスパイプライン網を早期に建設しなければならない。特に図9の概念図に示したように、中央アジア、極東・東シベリアなどに存在する天然ガスの供給元と、中国、韓国、日本などの需要国とを結ぶ北東アジア天然ガスパイプライン網の重要性は明らかである。

ヨーロッパには、天然ガスの主要供給元である北海、シベリア、アルジェリア、中近東からドイツ、フランスなどの需要地まで、幹線導管が網の目のように敷設されており、その全長は約800,000kmと言われる。因みに、ここまでガスパイプライン網が発達したのは第1次オイルショック以降のわずか20年ほどのことである。北米地域にも、440,000kmの幹線パイプライン網が存在する。

今や世界のガス資源は、争奪戦の様相を呈しており、アジア・太平洋地域の立ち後れは明白である。この地域は、あまりにもLNG（液化天然ガス）輸送に偏りすぎてきた。LNGによる輸送は、液化基地、輸送タンカー、受け入れ基地など一連のシステムの構築に莫大な投資を必要とし、その回収のために、20年以上の長期引き取り契約（Take or Pay）とならざるを得ず、天然ガス価格の硬直化を招く。また液化基地は、背後に巨大なガス田を持つ場合しか成立しないが、そのようなガス田で海岸に近い良質なものはこの地域に次第に少なくなっている。開発が決まったインドネシアのナツナガス田では、採取するガスの約70%がCO<sub>2</sub>で再度地中に戻す必要があると言われているが、パイプライン輸送の場合には、ルートに近い中小ガス田を拾って歩くことが可能となり、天然ガスのスポットマーケットが成立する可能性が生じ、価格に弾力性が生まれる。

この北東アジアパイプライン構想については、1996年4月25日の北京におけるエリツィン大統領と江沢民主席との会談において、イルクーツク州コピチンスコエ・ガス田を中心とした地域から年間200～250億m<sup>3</sup>を中国が輸入する計画に基本的な合意が成立している。日本の東京ガスの年間供給量（現在約75億m<sup>3</sup>）



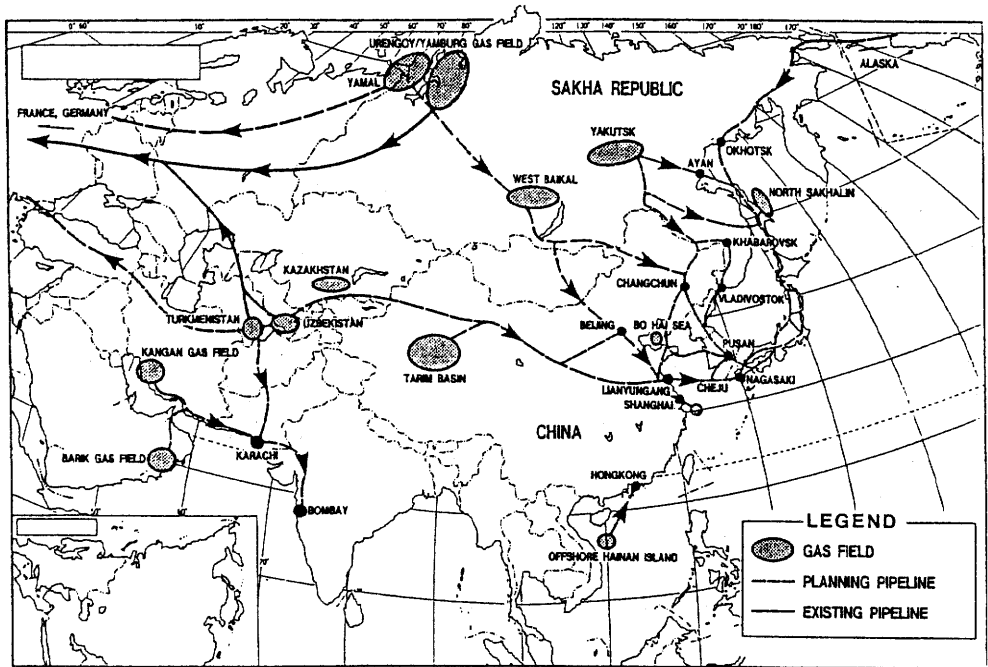


図9. 北東アジア天然ガスパイプライン網

の3倍の規模である。パイプラインはイルクーツクからモンゴルを縦断し北京、天津を経て山東省日照港に至る約 3,400km のルート（建設費約5,000億円）を考へており、完成予定は2004年という。中国側の構想では、この南北ラインを将来複数のパイプラインが通る「アジア大幹線」に育て上げ、シベリアのガスを全てイルクーツクに集結して南へ送り出すという。韓国及び日本も、政府レベルでこのプロジェクトに参加を申し入れている。1996年9月22日～24日、北京において、日本の広域天然ガスパイプライン研究会主催、中国石油天然気総公司、韓国汎アジア天然ガスパイプライン協会共催の第2回北東アジア天然ガスパイプライン国際会議が開催された。モンゴル、北朝鮮、イルクーツク、ヤクーツク、ロシアを含め13ヶ国から170名が参加し熱心な討議が行われた。多国間、二国間の討議を繰り返して次第に合意に近づける努力をしなければなるまい。

このように、北はサハリンから、南は中国や韓国からパイプラインで天然ガスの供給が行われるとなれば、日本の中に国土縦貫パイプラインが必要となることは自明である。図10に構想の基本的概念を示す。北海道から九州まで、サハリン、韓国とつながれたパイプラインで、既存もしくは新設のLNG基地を串刺しにして補給を受けながら、臨海部の大都市、大工業地帯を結んで行く。管径1m（40インチ）、圧力70気圧程度のパイプを想定するが、例えば、第2東名・名神高速道路（全長約500km）の中央分離帯の下部空間に埋設するとすれば、パイプラインの建設費は約6億円/kmと推定され、道路建設費250億円/kmの2%程度となる。一方、サハリン、韓国などから日本に輸入されるガスのルートとしては、図に示すように、日本海の海底に敷設して新潟、敦賀、鳥取などに陸揚

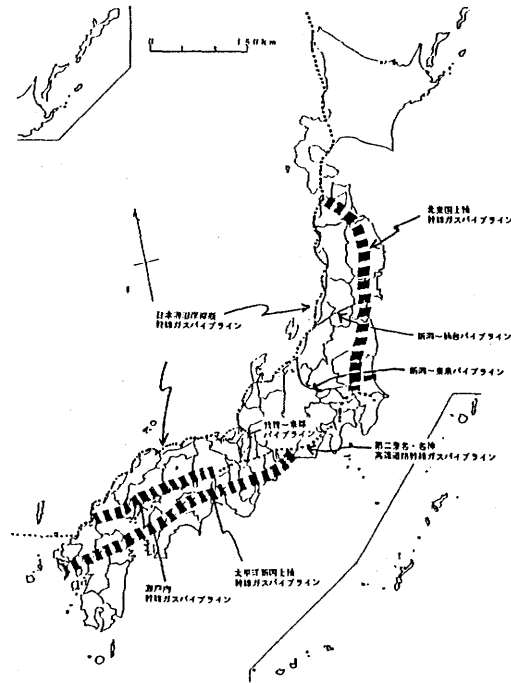


図10. 日本の幹線パイプラインプロジェクト

げし、これを既存の新潟－仙台、新潟－東京、あるいは新設の敦賀－大阪、鳥取－四国などの肋骨ラインにつないで需要地へ送る案も考えられる。日本の隅々まで天然ガスを送り、高効率のシステムエネルギー利用が分散して行われるためには、高速道路沿いのパイプラインは国の主導で、日本海海底パイプラインは民間主導で、併行して進められることが望ましい。いずれにしても、これを実現するためには、事業推進の主体や、その運営形態、資金の創出、利子補給や国家補助など公的なインセンティブのあり方など、現行の電気、ガス、熱の各種事業法や、道路、鉄道など管轄省庁の枠を超えた、横断的な「天然ガス高度利用促進法」といった新たな立法措置を講じて国民総意の下で推進すべき次元の問題であろう。

## 10. 結語

1995年11月、米国ワールドウォッチ研究所から出版された「エネルギー大潮流」<sup>(5)</sup>に注目すべき結論が導かれている。天然ガスを燃料とする高効率・分散型のコージェネレーションを普及させ、燃料を天然ガスから次第に水素へ転換してゆく。2020年頃には、天然ガスに15%程度まで水素を混入した Hythane と呼ぶ混合ガスをパイプラインで送る。太陽、風力、水力などの自然エネルギーを利用して水を電気分解し水素を作り出す。このような戦略をとれば、IPCC（気候変動に関する政府間パネル）を始めとする大方の予測に反して、大気中の二酸化炭素濃度は、図11に示すように、現状の360ppmから来世紀半ばまでに約450ppmで安定し、その後数十年間で徐々に下降するというのである。米国の

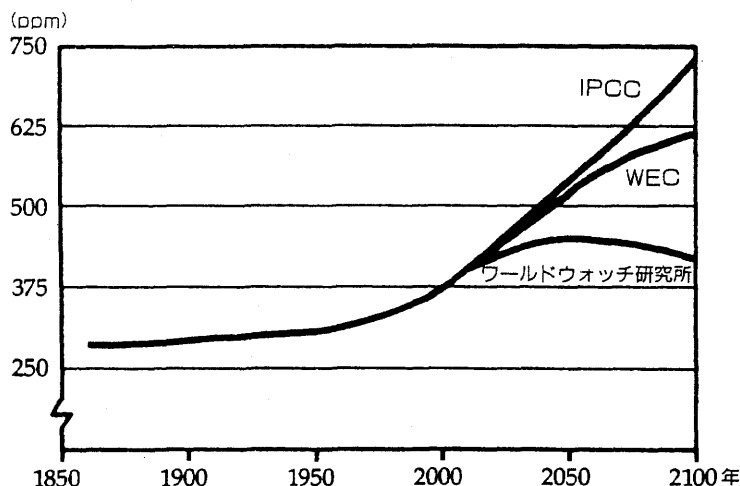


図11. ワールドウォッチ研究所による大気中二酸化炭素濃度の予測

中でも辛口で知られる同研究所がこのような予測を発表したことは、我々の積み重ねてきた努力の方向が誤りでなかったことを示してくれたもので心強い。天然ガスパイプラインは、一度埋設すれば半永久的な寿命を持つと言われるので、上述のような水素の時代にも有効な、重要な社会資本なのである。

水素を作るための自然エネルギーの中では、なんといっても水力が最も経済性が高いだろう。ロシアの潜在水力発電量は1兆～1.5兆kWhとされているが、その大部分がシベリア・極東に賦存している。ロシア科学アカデミー・シベリア支部によれば、アンガラ・エニセイ水系の経済的電力生産可能量は2,700億kWh（日本の全電力需要の約1/3）、出力合計6,000万kWとされている。この水系には、ブラーツク発電所（410万kW）、サヤン・シュシュンスコエ発電所（640万kW）など世界最大級の水力発電所が建設されているが、生産可能量のようやく1/3が開発されているに過ぎないという。さらに東のレナ、アムール水系まで含めれば膨大な未開発水力地帯である。言い換えれば、イルクーツク近辺は、天然ガスばかりでなく、水素製造にも適した地域なのである。これらの包蔵水力を開発し、水素に変えて「アジア大幹線」パイプラインで南へ輸送すれば、水素エネルギー時代の幕を開くことが出来よう。

本稿をまとめるにあたり、日本コージェネレーション研究会、広域天然ガスパイプライン研究会の研究成果に負うところが大きかったことを記し、深甚なる謝意を表す。

#### 〔文献〕

- (1) (財) エネルギー総合工学研究所：「石油活用型ガスタービン複合ごみ焼却発電システムの実用化調査報告書（第1～第3報）」（1992年3月～1994年3月）
- (2) 自治省公営企業第2課：「地域エネルギーの事業推進に関する調査研究会報告書」（1993年3月）
- (3) 鈴木善夫：「わが国初のスーパーごみ発電：群馬県高浜発電所いよいよ今秋運転開始」，日本工業新聞（1996年8月21日付）pp. 12-13.
- (4) 環境庁：「地球温暖化対策技術評価検討会報告書」（1996年5月）
- (5) C. フレイビン & N. レンセン：「エネルギー大潮流」（山梨晃一訳），ダイヤモンド社（1995），pp. 281. （以上）