

■ 展望・解説 ■

地球温暖化対策技術と天然ガスパイプラインの展望

Prospects on Natural Gas Pipeline Network in Asia to Distribute Highly Efficient Power Generation Systems to Reduce CO₂ Emission

平 田 賢*

Masaru Hirata



1. 2010年における二酸化炭素削減可能量試算と発電技術改善の重要性

京都議定書（COP 3）が終わり、日本は2008年から2012年までの第1約束期間に、二酸化炭素（CO₂、化石燃料の燃焼に起因）、メタン（CH₄、家畜、稲作などに起因）、亜酸化窒素（N₂O、燃焼プロセスなどに起因）、ハイドロフルオロカーボン（HFC、スプレー噴射剤、カーエアコンなどに起因）、パーフルオロカーボン（PFC、半導体加工プロセスなどに起因）、六フッ化硫黄（SF₆、変圧器や遮断器の絶縁剤などに起因）の6種類の温室効果ガスについて、二酸化炭素換算による合計排出量を1990年水準から6%削減するという目標値が定められた。二酸化炭素以外の温室効果ガスについてはIPCC（気候変動に関する政府間パネル）が定めた温暖化係数を用いて二酸化炭素等価量に換算するが、日本の場合その寄与率は合計量の約8.5%程度と見積もられている。二酸化炭素以外のガスの排出削減にはかなりの困難が伴うと予想されるので、その分を二酸化炭素削減で補うものとすれば、二酸化炭素については7%程度の排出削減を目標にしなければならぬ。日本の二酸化炭素排出総量は1996年度において炭素換算3.32億トンであり、1990年度の排出総量3.07億トンに対し既に約9.5%増となっている。このまま推移すれば2010年には20%を超える増となることが予想されるので、差し引き27%減程度を目標に置かねばならないだろう。よほどの覚悟で、本気で取り組まない限り実現はおぼつかない数字である。

環境庁は実現可能な技術によってどこまでCO₂の削減が見込めるかを具体的に算出するため、1995年7月に「地球温暖化対策技術評価検討会」を設置した。筆者はこの検討会の座長を務めたが、表1はこの検討会

で試算した2010年における削減可能見込み量について、個別・具体の技術ごとに削減可能見込み総量に対する寄与率で表した総括表である。試算にあたっては、二酸化炭素のみを対象とした。また、コスト、時間、立地などの制約を考慮して、あと10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等を行って可能性のある技術を洗い出し、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。これらのベースデータをもとに算出した2010年における削減可能見込み総量は、個々の技術の普及率の見込みによって変わるが、普及率を極めて固く見積もった場合でも1990年レベルの20%程度の値が得られており、信念を持って格段の努力を傾注すれば、かなり大きい削減総量を実現することも技術的には可能と考えられる。

1990年レベルに対し何%の削減が可能かという数字は、2010年までのエネルギー需要量の伸びをどのように見込むかによって変わるので一概にいうことは出来ないが、ライフスタイルの転換とか、省エネ意識の徹底といったような定量的に算定困難な提案よりも、努力をすれば技術的には実現可能ということは将来を明るくする。表1でわかるように削減可能と見込まれる二酸化炭素総量に対する寄与率は、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、概ね5:3:1:1ということになり、エネルギー転換部門の努力の寄与率が約半分を占め最大である。エネルギー転換部門とは大半が発電に関する技術である。ここで、原子力発電の出力増（パワーストレッチング）とは、安全性を損なわない範囲で、①定期点検期間を短縮

* 芝浦工業大学システム工学部教授・東京大学名誉教授
〒330-0003 大宮市深作307

第19回総会記念特別講演会（1998.4.15）にて講演。

表1 2010年における部門別二酸化炭素削減可能性（環境庁試算）

部門	対策技術と削減効果（構成比%）	CO ₂ 削減効果（構成比%）
エネルギー 転換	需要電力減少による電力原単位の低減（11）、原子力発電の出力増（10）、超々臨界圧・加圧流動床・ガス化コンバインドサイクル・リパワリングなど石炭火力の高効率化（5）、石油火力のリパワリング（2）、ACC・リパワリングなど天然ガス火力の高効率化（2）、天然ガスの優先利用（8）、送配電ロス削減（3）、高効率ゴミ発電（3）、石油精製量の減少（2）、都市ガスの天然ガス転換（0.5）、自然エネルギー利用（0.5）	47
産業	プロセスの改善（鉄鋼（9）、セメント（4）、紙・パルプ（2）、石化（1））、コージェネレーションの導入（4）、コンバインドサイクルの導入（1）、インバータ・高効率モーターの導入（2）、工業炉・ボイラの高効率化（3）、太陽光発電の導入（1）、リサイクル（2）	29
民生 （家庭）	住宅の気密・断熱化（2）、家電待機電力の削減（2）、ヒートポンプエアコンの効率向上（1）、コンパクト蛍光灯の普及（0.5）、太陽光発電の普及（0.5）、その他（1）	7
民生 （業務）	コージェネレーションの普及（2）、新設ビルの省エネルギー化（1）、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（1）、潜熱回収温水ボイラーの普及（0.5）、太陽光発電の普及（0.5）、その他（0.5）	5
運輸	リーンバーン・筒内噴射・車体軽量化・空気抵抗低減・AT車のロックアップ化・インタークーラーターボの採用など燃費向上（3）、電気・天然ガス・ハイブリッド車など低公害自動車の導入（2）、貨物自動車から鉄道・船舶へのモーダルシフト（2）、乗用車から公共交通機関へのシフト（2）、平均車速の向上（1）、その他（2）	12
合 計		100

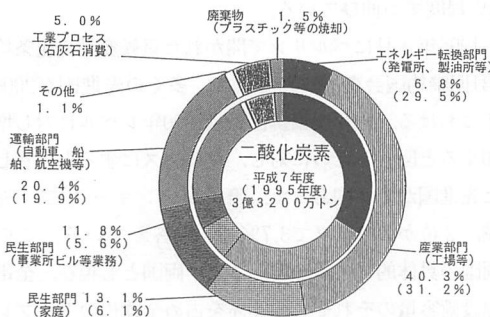


図-1 二酸化炭素排出量の部門別内訳（1995年度）

（2ヶ月を1.5ヶ月へ）及び定期点検間隔を延長（12ヶ月を15ヶ月へ）することにより設備利用率を5%程度向上、②冬期に冷却水温度が下がり出力が増大するため定格を二重に設定すれば年間出力が0.6%向上、③初期のプラントに於てタービン翼を長翼化あるいは高性能翼へ改造することにより出力を0.8~2%向上させることなどを意味する。また、コンバインドサイクルやリパワリング、コージェネレーション、スーパーゴミ発電など確立した既存の要素技術をシステムに組み上げることによって高効率化を図る「システムエネルギー」技術の寄与率が20%以上を占め、大きな効果を持つことがわかる。この計算では後述する原子炉のリパワリングは含まれていないが、これを含まれば「システムエネルギー」技術の寄与率は更に増大し、京都会議で割り当てられた日本の目標値「6%削減」は達成可能であろう。

このようにエネルギー転換部門、特に発電に拘わる技術改善の二酸化炭素削減に及ぼす寄与率が高いことにもっと着目すべきであったにも拘わらず、今回のCOP3を通じて、そのような議論はついに聞かれなかった。家電品の待機電力の削減とか、森林の吸収といったようなマイナーな議論に終始したのである。巧みな誘導により当局が意図的に議論を避けたのではなかったか。誘導とは以下のようなことを意味する。図-1は1995年度における二酸化炭素排出量の部門別内訳であるが、外側の円グラフは発電に伴う二酸化炭素排出量を産業、民生、運輸の各部門に割り振った比率を示しており、この外側の円にとらわれれば需要サイドの省エネルギー努力しか浮き上がってこない。電力を割り振られた側が、仮に電力の二酸化炭素原単位を改善しようと思っても発電技術にまで遡って改善するわけにいかないのは当然である。表1に示したような具体的な技術の貢献度を個別に浮き彫りにするためには、発電に伴う二酸化炭素排出量をエネルギー転換部門として独立させた内側の円グラフで議論しなければならないが、COP3の直前から何故か外側の円による議論に終始してしまった。視覚的にもエネルギー転換部門の寄与率は一見小さく見え、産業、民生、運輸などの需要サイドの削減努力に責任が押しつけられてしまったのである。意図的と言わざるを得ない。発電を中心とするエネルギー転換部門の二酸化炭素排出削減努力が最も重要、且つ効果が大きいことを国民全てがもっと認識し、電気事業者のみに責任を押しつけるのでは

なく、国を挙げて削減努力に取り組まねばなるまい。以下に「6%削減」の鍵を握る「システムエネルギー」技術について展望する。

2. 「システムエネルギー」技術の基本概念と事例

熱力学の始祖と崇められるサディ・カルノー (Sadi Carnot, 1796~1832) は、コレラのため37才の若さで夭折したが、その短い生涯の中で1824年に1つだけ論文を書いた。その中に「動力の発生をとまなわ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ぬ」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。一般の人々は勿論、熱を売ること業としている「熱の専門家」たちでさえ、カルノー以降170年もの間、このことにほとんど気づかなかった。ガスに火を点けて風呂をわかす。石油に火を点けて暖房をする。ガスや石油の火炎のところには1,500°C以上の“高温の熱”が発生しているが、これを熱交換して、46°Cのシャワーのお湯を作ったり、25°Cの温風を送り出して部屋の暖房をしても誰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、極めてあたり前のこと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。熱の場合には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°C以上の高温から、常温つまり15°Cまでの温度の落差を使ってくるのが“熱の利用”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殆ど行われて来なかった。

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。その熱機関も、ピストン内燃機関が最も高温領域の熱を動力化することができる。ピストン機関の排気でターボを回す。つまりガスタービンはピストン機関よりもやや低い温度領域の熱を動力化するのに適している。ガスタービンの排気を排熱ボイラに入れて蒸気を発生し蒸気タービンを回す。さらに排気ガスやエンジン冷却水など最後の排熱を暖房や給湯など熱としての用途に用いれば、熱を高温から低温まで

しゃぶり尽くすことができる。このように確立された既存の要素技術を組み合わせて熱を利用しつつす技術を「システムエネルギー」技術と呼ぶ。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、温度を下げて熱機関から排出された熱を熱としての用途に用いるシステムがコージェネレーション(熱電併給)であり「熱」の合理的な使い方の第1歩である。以下に「システムエネルギー」技術のいくつかの事例を示す。

(1) コージェネレーション (Cogeneration)

「システムエネルギー」技術の本命がコージェネレーションである。日本のコージェネレーションは、1998年3月末現在で民生用1,488件(2,450台)、79万kW、産業用1,051件(1,752台)、351万kW、合計2,539件(4,202台)、430万kWとなっており、1年あたり40万kW程度ずつ伸びている。

1995年3月にベルリンで開かれた気候変動枠組条約第1回締約国会議(COP1)で、多くの先進国が2000年における二酸化炭素排出量は1990年レベルに対し増加すると回答したのに対し、マイナスにすると回答した先進国が6ヶ国あった。筆頭がデンマークで7.9%減、2位がオランダで3.7%減、と答えている。この両国の具体的な方策を調べると、両国とも現在、全電源設備容量のそれぞれ約30%を占め全欧州のトップレベルにあるコージェネレーションの普及率を、2000年に40%、2010年には50%を超えるまで高めることによって実現すると約束しているのである。日本の普及率は2%程度であるが、日本もこれらの国に見習って、コージェネレーションの普及に一層の努力を傾けねばなるまい。

(2) リパワリング (Repowering)

熱を可能な限りの高温から動力化することが熱力学の原理とすれば、ボイラ・蒸気タービン程度の低温の熱機関で満足すべきでなく、高温の熱機関を持ち込んでコンバインドサイクルとし高効率化すべきである。既存のボイラ・蒸気タービンシステムにガスタービンなどを追加設置して高効率・高出力化する技術をリパワリング (Repowering) という。

同様の発想を原子力発電にも適用する。原子力発電の場合には、原子炉圧力容器の強度で系の最高圧力が抑えられ、その圧力に対応した飽和温度で熱機関としての最高温度が決められてしまうので、340°C前後が

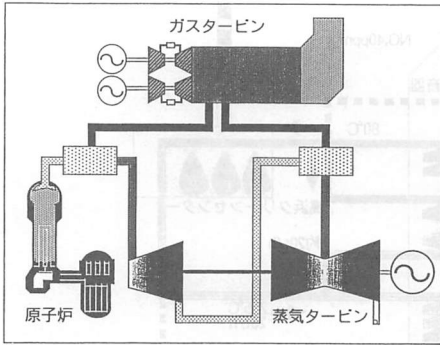


図-2 Battelle Memorial Institute提案の原子炉リパワリング

蒸気サイクル温度の上限である。そこで天然ガス焼き高温ガスタービンを原子力発電所のサイトの中に持ち込んでリパワリングを行う。ある試算によれば100万kW級のPWR炉でガスタービンが120万kW、蒸気タービンが150万kW、合計270万kW程度の熱バランスになるという。つまり2.7倍に出力が増えることになる。このような主張をしていたところ、米国の著名なシンクタンクBattelle Memorial Instituteが全く同様の発想で日本の電力各社に売り込みを図っているという。同社の提案図を図-2に示す。日本には現在52基、4,500万kWの原子炉が稼働しているが、これらの一部でもリパワリングすれば、その二酸化炭素削減効果は莫大である。

(3) スーパーゴミ発電

日本全国で1日に約14万トン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、残りが準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1997年末で178施設、発電設備容量73.4万kW、所内電力を差し引いて売電している施設は87施設に過ぎない。1日に焼却されている約10万トン/日のゴミで、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程度 of 設備容量となり、かなりの潜在発電能力である。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になれば、その分だけ石油あるいは

は石炭火力発電を減らすことが出来、二酸化炭素削減のために二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。このような燃焼ガスで蒸気を作ろうとすると、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。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、発電端効率はいずれも12%どまりであり、あまりメリットがないということでこれまで発電が敬遠されて来たようである。

そこでリパワリングの原理を、ゴミ焼却発電に適用する。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℃程度の蒸気を生産させ、別に燃料を焚いてガスタービンを駆動し、その排熱でこの蒸気をスーパーヒート（過熱）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期待できる。

筆者の提案に基づいて建設された日本における第1号スーパーゴミ発電プラントは群馬県の「高浜発電所」で、1996年11月に営業運転に入った。この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年に竣工したもので150トン/日の焼却能力を持つ炉3基から成るが、通常はそのうち2基を稼働して300トン/日のゴミを処理し、1,300kWの蒸気タービンで発電してきた。このプラントに隣接した建屋に、新たに16MWのガスタービンと9MWの蒸気タービンを設置したもので、発電端効率の実績値は計画を上回り35%（LHV基準）となっている。注目すべき点は、電気出力の増加分（25MW-1.3MW=23.7MW）を追加投入する天然ガスの発熱量で除した効率（これをリパワリング効率という）が50%を上回ることである。このリパワリング効率は追加投入された天然ガスの有効性を示す指標であり、25MW級の小型発電所でも大型の天然ガス焼きコンバインドサイクル発電所に匹敵する天然ガスの利用効果を挙げることが出来るということは、このスーパーゴミ発電の有用性を示すポイントである。プラントの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-3にシステムの系統図を示す。スーパーゴミ発電は、第2号が堺市、第3号が北九州市、第4号が千葉市と続いている。

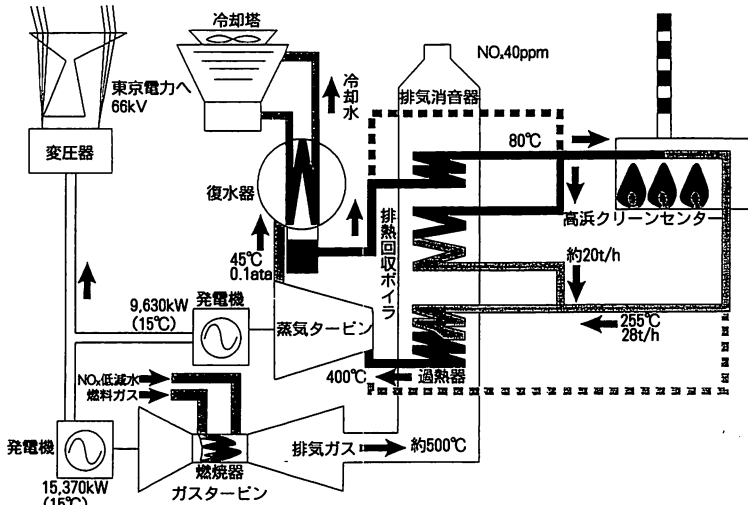


図-3 群馬県「高浜発電所」スーパーゴミ発電システム系統図

3. 21世紀の基幹インフラ：天然ガスパイプライン

「システムエネルギー」技術の普及拡大を図るためには、燃料である天然ガスの供給が確保されなければならない。そのためにはパイプライン網の充実が不可欠である。因みにメタンを主成分とする天然ガスは、同じ発熱量を得るのに石炭に較べて二酸化炭素の発生量が50%、石油に較べて35%減となる。

アジアはあまりにも液化天然ガス（LNG）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のため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ものはこの地域に次第に少なくなっている。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、価格に弾力性が生れる。

日本の1995年度のLNG輸入量は4,363万トンであるが、通産省はこれを2010年に5,800万トンと見ている。「システムエネルギー」技術の普及が頼りとなれば日本の天然ガス需要はこの見積もりではとても不足であろう。筆者が座長を務める「広域天然ガスパイプライン研究会」の予測では、2010年には少なくとも9,000万トンは必要と考えている。つまりこの時点で、5,800

万トンはLNG輸入の手当がついているものとして、残りの3,000万トン（420億 m^3 ）強をパイプラインその他で輸入しなければならない。この時点では、韓国、中国も共に天然ガス輸入国となり、現在のままのLNG輸入体制を持続すると、再びカタール、オマーンなど中東諸国への依存が高まり、マラッカ海峡など海上輸送路の安全保障が東アジア諸国の共通の課題となろう。

現在、世界最大の天然ガス埋蔵量はロシアにあり56兆 m^3 という。日本の現在の輸入量に換算して約1,000年分の量に相当する。ヨーロッパには、天然ガスの主要供給元である北海、西シベリア、アルジェリア、中近東、中央アジアから中心部へ向けて、40気圧以上の高圧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。欧州でこのように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が建設されている。アジアにはこのような幹線パイプラインはゼロである。

他方、年率10%を超える経済成長を続ける中国のエネルギー需要は指数関数的に増加するだろう。この需要を中国は石炭で賄っているが、石炭燃焼に伴って発生する地域環境汚染や二酸化炭素の生成は深刻の度を増す一方である。中国で発生した SO_x や NO_x は西風に乗って日本や韓国の上に酸性雨や雪を降らせている。中国を一日も早く天然ガス化することに協力することが日本の使命であろう。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、

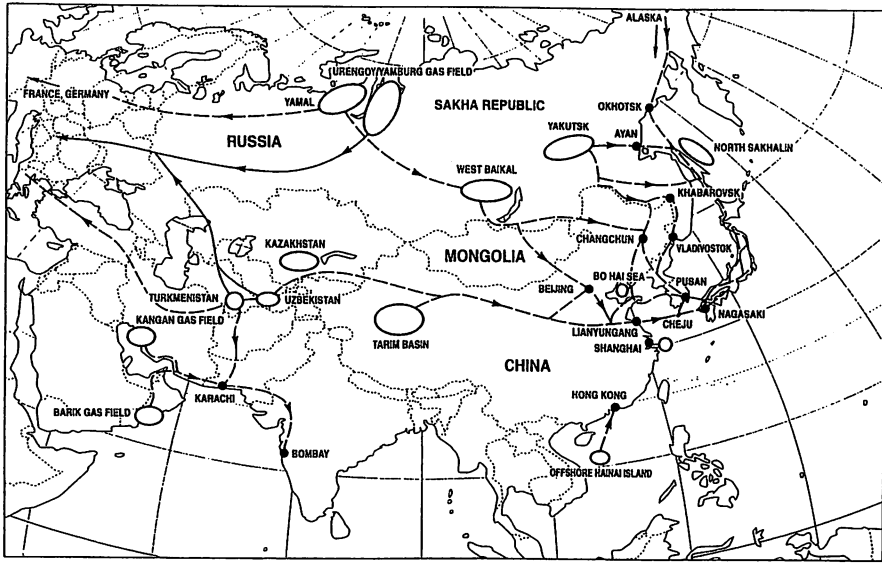


図-4 北東アジア天然ガスパイプライン網

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を建設することの重要性・緊急性は明らかである。図-4に構想の概念図を示す。

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・江沢民会談において、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^3 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^3 ）の約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）を考えており、完成予定は2004年という。

日本の橋本総理大臣は、1997年7月24日の講演で、対ロシア外交の新方針を打ち出し、信頼、相互利益、長期的視点の3原則に基づき従来の「政経不可分」から脱却して、関係改善に取り組むことを明らかにした。具体的施策としては、シベリア・極東地域のエネルギー開発、特にサハリンやイルクーツク、ヤクーツクなどでの石油・天然ガス開発やパイプライン建設への経済・技術両面での支援に言及した。更に1997年11月のシベリア・クラスノヤルスク及び1998年4月の川奈における橋本・エリツィン会談においても話題となった。事態は急速に進展しつつあり、1989年に筆者が設立して座長を務めてきた「広域天然ガスパイプライン研究会」は国際的な活動を分離・独立させ、1997年10月21日に

（株）東芝佐藤文夫会長を会長に迎えて「アジアパイプライン研究会」を設立した。他方、文部省の1996年度私学振興・ハイテクリサーチセンター補助事業予算で芝浦工業大学に「アジアパイプライン研究センター」の設立が認められ大宮キャンパス内に建物が完成、永久凍土、長距離海底パイプライン、ハイタンのパイプライン輸送などの基礎研究に着手した。更に政界では1997年11月11日、中山太郎前外務大臣を中心に「アジ

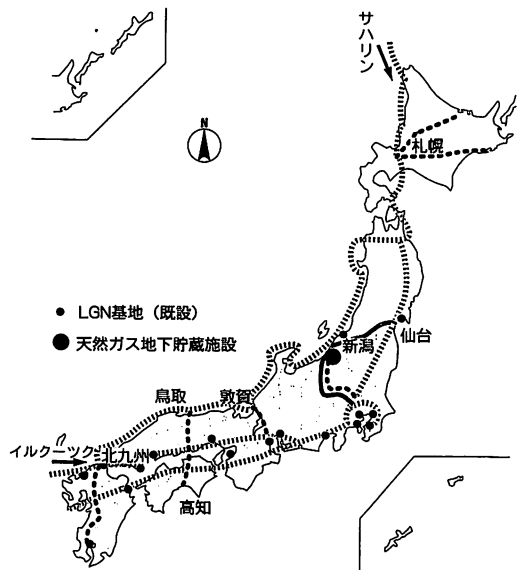


図-5 日本の天然ガス幹線パイプライン構想

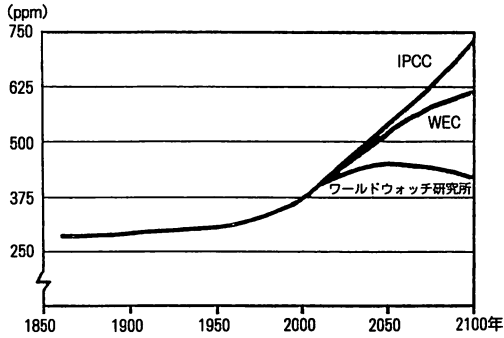


図-6 ワールドウォッチ研究所による大気中二酸化炭素濃度の予測

ア・エネルギー共同体推進機構」が設立され、政・官・学・財界の足並みが揃い、21世紀のアジアの持続的発展に向けて日本がイニシアティブをとるべき基礎が固まったと考えている。

翻って日本の中には未だ幹線パイプラインと呼べるものは存在せず、世界的にも、韓国・台湾にすらも遅れをとっている。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-5に構想の概念図を示す。

1995年11月、米国ワールドウォッチ研究所から出版された「Power Surge (邦訳：エネルギー大潮流、ダイヤモンド社)」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ハイタン (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造り出す。このような戦略をとれば図-6に示すように、大気中の二酸化炭素濃度は現状の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。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。シベリア・極東には天然ガスだけでなく膨大な未開発包蔵水力が賦存している。シベリアには風力も豊富である。これらを用いて水素を作り天然ガスに混ぜてパイプラインで南へ輸送すれば、地球を救う水素エネルギー時代の幕を開くことが出来よう。

協賛行事ごあんない

「超高温材料国際シンポジウム'98inたじみ」

1. 主催

超高温材料国際シンポジウム実行委員会

2. 日時

第1部 平成10年9月10日(木) 13:00~17:50

第2部 平成10年9月11日(金) 9:30~20:00

3. 場所

多治見市文化会館(岐阜県多治見市十九田町)

4. 参加費 10,000円

5. 問い合わせ先

(株)超高温材料研究所 岐阜研究所

総務部 田原充

岐阜県多治見市東町3-1-8

TEL 0572-25-5380 FAX 0572-21-1045