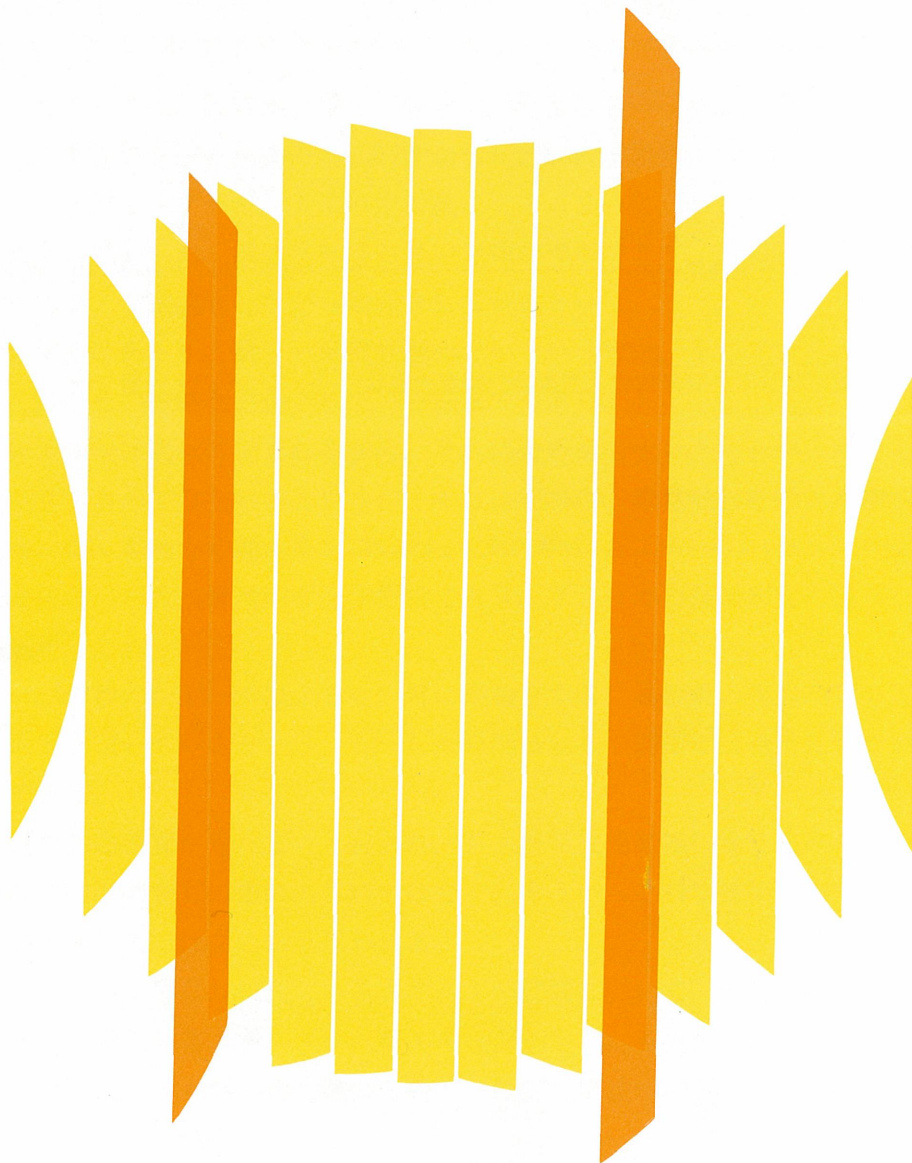


# 季報 エネルギー総合工学

Vol. 13 No. 3 1990. 10.



財団法人 エネルギー総合工学研究所  
THE INSTITUTE OF APPLIED ENERGY

# 目 次

エネルギー問題への関心を .....	理事・東京電力㈱ 常務取締役 三 井 恒 夫.....	1
化石燃料利用のための二酸化炭素排出量の定量的評価.....	重 田 潤.....	2
地球環境時代の石炭利用.....	片 山 優久雄.....	12
原子力発電プラントの経年劣化／長寿命化研究の現状.....	敷 地 明.....	28
第9回エネルギー総合工学シンポジウム		
現代社会とリスク——工学と社会の接点としてのリスク——.....	下 岡 浩.....	42
研究所のうごき.....		52

# エネルギー問題への関心を

理事・東京電力㈱ 常務取締役 三井恒夫

アメリカの大学の研究センターへ派遣されている当社の研究員から興味深いレポートが届いた。

そのセンターでは、計算機、哲学、論理学、心理学といった異分野の教授が各学科の教員を兼任しながら共通の基礎研究を行っている。

こうした研究センターが、大学の中に実にタイムリーに、しかもすばやく設立される柔軟さに感心した。設立当初はお互い意味が理解できず、戸惑いもあったが、今は分野を越えて議論をしながら研究をしているという。

私立大学ではあるが、新しい研究を進めたいという意欲、そして自らの責務を自覚して、常にその戦略が討議されている証左でもある。

新しいテーマは次々に生まれるから、それに合わせてセンターを作ったのでは大学もパンクするのではないかと思うが、そこは三年に一度見直しを行い、陳腐化したセンターは、容赦なく廃止をしている。

まさに企業ベースの合理的な大学経営であり、アメリカの基礎研究の強さを見せられた気がした。

もう一つの彼のレポートによると、常に議論をする。異分野の先生からもどんどんコメントを頂いているという。こうした風潮は私共の周辺には見当たらないものの一つである。

わが国の基礎研究が育たないと言われ、日米科学技術摩擦に取り上げられているが、それは両国の資質の差にあるのではなく、そういった科学技術を育てる環境による所が大きいのではないかと思われる。

話は変わるが、今日おかれているエネルギー問題について、国民生活とエネルギー、原子力、環境、省エネルギー、新エネルギーなど、本質的な問題について議論をし、異分野の人とも話し合う機会を得ていけば、解決への道も探し出せるのではないだろうか。

国民的な議論の輪を拡げ、御関心を持って頂くことを心から期待する。

(みつい つねお)

# 化石燃料利用のための 二酸化炭素排出量の定量的評価

重 田 潤

## はじめに

地球温暖化問題に係わる二酸化炭素排出量の削減或いは抑制が国際的議論の場に登場し、今秋にも各国の対策が調整されようとしている。温暖化への影響は不確実であるものの、この潮流は現在のエネルギー利用に再考を促しているともいえる。

化石燃料をエネルギーとして利用する場合安価で効率の高いものを選定することが経済発展に寄与してきたが、温暖化ガスの排出が問題視されてきた状況においては二酸化炭素排出原単位の低い化石燃料が好ましいと考えることは理にかなっている。

しかしながら、化石燃料の燃焼だけからの二酸化炭素排出原単位を基準にすべきではない。すなわち、エネルギー海外依存度の高い我が国では化石燃料を入手するまでの二酸化炭素排出量を加味して評価すべきである。

本報は、これらの観点から各種化石燃料を比較評価する機会を得たことから、各産業界においても利用できるデータベースを念頭に二酸化炭素排出量の定量的評価について展望する。

## 1. 化石燃料の採掘から輸入までのエネルギー消費の概要

我が国に於いて石油が中東、東南アジア、

中国等から、石炭が豪州、中国、カナダ、南アフリカ等から、天然ガスがLNGとして東南アジア、中東、豪州、アラスカ等から輸入されていることは周知である。

以下、石油、LNG、石炭等の採掘から我が国への輸入までの供給過程およびエネルギー消費等の概要について述べる。

### 1.1 石 油

油田のエネルギー消費は自噴した原油の脱塩処理と随伴ガスの処理等である。

随伴ガスはLPG（液化石油ガス）NGL（天然ガス液）が分離され天然ガスとして利用される。

随伴ガスには産地によって異なるが二酸化炭素が0～10%程度含まれ分離放出される。

また、油田への再注入、フレアー（利用できないガスを燃焼させる設備）での放出燃焼がなされる。

原油に対する随伴ガスの量は、ガス/油比（Standard Cubic Feet/Barrels=SCF/B）で表されるが、油田により異なり、軽質原油系油田で550SCF/B、重質原油系で250SCF/B程度である。

また、油田のフレアー率（フレアーで燃焼するガスの比率）は、約10%程度で、随伴ガス中の二酸化炭素含有量は約5%程度である。



原油がタンカーに積み込まれる迄に、以上のエネルギー消費と二酸化炭素の排出がある訳である。輸入石油製品は産油国等の製油所で生産され輸送されるがその消費エネルギーは我が国で精製される石油製品と等しいと見なせる。

### 1.2 天然ガス

天然ガスには、ガス井ガスと油田随伴ガスがある。ガス井の場合は、天然ガス主体であるが、LPG、NGLを副産する産地もある。

LNG（液化天然ガス）として輸入するには、ガス井からの粗天然ガスをメタン純度の高いガスにして、液化する必要がある。

我が国のLNGプロジェクトでは、液化設備とガス井とが直結されており、油田の場合にフレアされるガスはLNGの場合は液化設備の燃料として利用されている。

液化設備で燃料として消費されるガス量はプロジェクトによって差異はあるが概ね原料ガスの10～15%である。

粗天然ガス中の二酸化炭素含有量は産地によって異なるが二酸化炭素は液化前に吸収除去され大気放出される。

LNGの輸送はLNG専用船を用い航海中のボイルオフガスは燃料の一部として利用される。LNGを我が国で利用するまでに以上のエネルギー消費と二酸化炭素排出がある。

### 1.3 石炭

石炭の採掘には露天掘、坑内掘があり、採掘に当たっては産地により異なるが石油、石炭、電力を消費する。炭鉱で採掘された原炭は、選炭工程を経て製品炭となり、ハンドリング設備で鉄道等に積み込まれ積出港まで内陸輸

送される。積出港では一旦貯炭され、船積みされ石炭専用船で海上輸送される。石炭受入れにはコールセンターや消費地でハンドリング設備が稼働し貯炭した後、消費される。石炭を我が国で利用するまでに以上のエネルギー消費とそれによる二酸化炭素の排出がある。

以上述べた化石燃料の輸入までのエネルギー消費に起因する二酸化炭素排出量を把握する為には、我が国で輸入する化石燃料のルーツを調査し、各々の国に於けるエネルギー消費等を把握して、輸入量に応じて化石燃料単位量当たりの二酸化炭素を推定する方法が考えられる。

この方法では、推定した年での二酸化炭素排出量しか得られないが、現状把握としては、充分であると考えられる。

すなわち、我が国で入手する化石燃料が輸入されるまでに排出される二酸化炭素量は、産出国のエネルギー需給形態および輸入量の変化を修正していけば、概略の把握が将来とも可能であるし、輸入先の選定にも繋がるものと考えられる。

たとえば、二酸化炭素含有量の高いガス井の利用はLNGとしてではなく、メタノールや二酸化炭素を利用した炭化水素の製造等が考慮されることとなる。

我が国は他国と比較して石油依存度が高く、石油の利用割合を低減していく方向にあるが、その理由の一つはエネルギーの安定供給にあると考えられ、エネルギールーツの多様化が望まれている。二酸化炭素の少ないエネルギールーツの探索は今後のエネルギー選択の方向と考えられる。

## 2. 化石燃料の産地別構成比

我が国で消費する化石燃料の産地別構成とその比率をもとに産地でのエネルギー消費や輸送等で排出される二酸化炭素を推算することを前項に述べた。

採用する産地としては、すべての油田、ガス井、炭田の積み上げが理想であるが、本報告のベースは、油田については、地域別、即ち、中東、南方(東南アジア)、中国、その他とし、ガス井、炭田については、国単位とした。

表1～3に採用した石油、LNG、石炭の産地別構成比を示す。

表1 原油の産地別構成比

精製用	170,813千kl
中東	73.8%
南方	13.6
中国	5.7
その他	6.9
非精製用(電力)	15,475千kl
南方	62.7%
中国	30.1
その他	7.2

出典：昭和62年度エネルギー生産・需給統計年報

表2 LNGの産地別構成比

インドネシア	51.9%
マレーシア	19.7
ブルネイ	17.6
アブダビ	7.6
アラスカ	3.2
1987年度輸入量	29.67百万トン

出典：昭和62年度エネルギー生産・需給統計年報

表3 一般炭の産地別構成比

輸入炭	29,985千トン
オーストラリア	50.8%
中国	6.0
ソ連	5.2
南アフリカ	4.7
カナダ	3.3
アメリカ	1.8
インドネシア	0.6
コロンビア	0.2
国内炭	11,290千トン
	27.4%

出典：昭和63年度エネルギー生産・需給統計年報

表1の原油では輸入原油を国内の製油所で精製する精製用と輸入原油を直接消費する電力用に分けた。石油製品輸入は国内で生産されたものと同じの二酸化炭素排出と見なした。また、輸入LPGは国内生産のほぼ3倍の供給量と見なすこととする。

表2のLNGでは電力、都市ガス用としての全輸入量を対象とした。

表3では石炭を一般炭で代表させている。

本報告は以上の化石燃料の産地別構成比に依っているため、産地別構成比が変われば再度の統計調査が必要となる。

### 3. 石油の産地別二酸化炭素排出量

#### 3.1 油田

油田からの二酸化炭素排出は原油生産に伴うユーティリティ（付帯設備）によるもの、随伴ガスの一部が有効利用されずフレア一焼却されて発生するもの、および随伴ガス中の

二酸化炭素が吸収除去され大気放出されるものと考えられる。

油田に於ける原油生産に係わる消費エネルギーの正確なデータは無いが、中東油田の一例としてその規模30万B/Dのエネルギー消費は天然ガス5MSCF/D、脱塩装置2MSCF/Dを加算すると、油田のエネルギー消費は天然ガス23SCF/Bとなる。(本報告ではこの値を採用した。)

原油生産では天然ガスが随伴されることから、ガス/油比をどの様に考慮すべきかが問題となる。OPEC年報によるガス/油比は1987年では総計で約2000SCF/Bであるが、これは油田、ガス井の合計であり、原油の責任分とはし難い。

油田のガス/油比は産地により異なるが、中東油田では軽質原油系油田で550SCF/B、重質原油系で250SCF/B程度を採用し、我が国への輸入分として軽質原油60%、重質原油40%と仮定し中東、その他のガス/油比として430SCF/Bを採用した。また、南方及び中国はインドネシアの170SCF/Bを採用した。

原油1バレル当たりの随伴ガス量が設定されれば、フレアー焼却による二酸化炭素排出量を推算できる訳である。

そのフレアー率はOPEC年報(1987年)によれば、中東で11.6%、インドネシアで7.5%であることから、中東、その他に11.6%、南方、中国に7.5%の値を採用した。

次に油田随伴天然ガスの組成であるが、中東油田随伴天然ガス組成を加重平均し表4を得、この値をすべてに採用した。

以上の前提から油田に於ける二酸化炭素排出量を推算すると表5となる。

表4 油田随伴天然ガス組成

メタン	69.3%
エタン	13.2
プロパン	6.2
ブタン	2.4
ペンタン	0.85
ヘキサン+	0.37
窒素	0.56
硫化水素	1.32
二酸化炭素	5.8

表5 油田に於ける二酸化炭素排出量

		生産エネルギー	フレアー	油田計
精製用				
中東	73.8%	2.75C-kg/kl	6.0C-kg/kl	8.75C-kg/kl
南方	13.6	2.75	1.6	4.35
中国	5.7	2.75	1.6	4.35
その他	6.9	2.75	6.0	8.75
全平均	100	2.75	5.18	7.93
非精製用(電力)				
南方	62.7%	2.75C-kg/kl	1.6C-kg/kl	4.35C-kg/kl
中国	30.1	2.75	1.6	4.35
その他	7.2	2.75	6.0	8.75
全平均	100	2.75	1.92	4.66

表5から精製用原油は7.93C-kg/kl, 非精製用原油(電力)は4.66C-kg/klとなりその差は採用したフレア率によっている。

随伴天然ガス中の二酸化炭素の寄与は各々0.33C-kg/kl, 0.20C-kg/klで排出量の4.2%を占めている。

### 3.2 海上輸送による二酸化炭素排出量

海外から我が国への原油の輸送に伴う二酸化炭素排出量推算の前提として中東, その他からは25万<sup>ト</sup>型, 南方, 中国からは10万<sup>ト</sup>型タンカーによるものとし, 航海日数, 燃料使用量から表6の輸送原単位を採用した。

タンカーが使用する燃料重油の密度を0.96, 炭素分を87.5%とすると海外輸送からの二酸化炭素排出量(表7)を得る。

表6 原油の海上輸送原単位

産地	燃料重油消費量
中東, 他	8.3 l/kl
南方	9.0
中国	4.0

表7 原油の海上輸送による二酸化炭素排出量

精製用原油		二酸化炭素排出量
中東	73.8%	6.97C-kg/kl
南方	13.6	7.56
中国	5.7	3.36
その他	6.9	6.97
全平均	100	6.84
非精製用(電力)		二酸化炭素排出量
南方	62.7%	7.56C-kg/kl
中国	30.1	3.56
その他	7.2	6.97
全平均	100	6.31

化炭素排出量(表7)を得る。

## 4. 石油精製に伴う二酸化炭素排出量

昭和62年度の我が国の原油処理に消費した燃料量をエネルギー生産・需給統計年報から試算すると表8の結果が得られる。

全投入量は約2億kl, 購入電力は107C-g/kWhと仮定すると電力込みで25.8C-kg/klとなる。

石油製品は製油所での処理過程の相異から厳密には異なる二酸化炭素排出量であるが, 連産品であることから一律として良いと考えられる。また, 石油製品の国内に於ける輸送は多岐にわたるが, 目安として内航海運の原単位, 輸送距離100kmを仮定し, 2億klを輸送した場合の二酸化炭素排出量を算出すると海外輸送によるものの一割程度である。

表8 製油所に於ける二酸化炭素排出量

燃料消費	二酸化炭素排出量
揮発油・ナフサ	1.08C-kg/kl
灯油・軽油	0.02
重油	9.36
炭化水素油	0.23
LPG	0.57
石油ガス	11.18
LNG	0.02
都市ガス	0.00
購入電力	3.33
計	25.79C-kg/kl

## 5. LNGの産地別二酸化炭素排出量

### 5.1 ガス井

OPEC年報によればインドネシアの場合

天然ガスのグロスプロダクションに対するフレアー率は油田、ガス井併せて7.5%であり、液化設備全体の燃料ガス消費10～15%と比較すると無視出来ない量となるが、LNGプロジェクトの場合、ガス井と液化設備は一体と成っているためフレアーされる量は液化に消費されるガス量との比較で殆ど無視できるとの前提とする。

これは天然ガスのLNG利用により、フレアーを低減し、有効に利用しているとの考え方であるが、現状としては、液化設備で消費する量が若干フレアー量を上回っていると考えられる。

ガス井からの粗天然ガスは液化される前に酸性ガス、水分、重質炭化水素が除去されるが、粗天然ガス中の二酸化炭素は吸収除去後大気放出される。

従って、原料粗天然ガス中の二酸化炭素はその含有量に応じてすべて放出される。

二酸化炭素排出量の推算手順として、1987年に輸入されたLNG量を各産地毎の標準組成からガスに換算し、更に、各産地毎の粗天然ガス組成を考慮して原料粗天然ガス量を求めた。この原料粗天然ガス量をベースに各産地毎のエネルギー消費率および二酸化炭素含有量から二酸化炭素排出量を求めた。

その結果を表9に示す。LNG産地による差は二酸化炭素大気放出量および液化の設備効率の差に起因し、我が国へ輸入されているLNG平均では147.4C-kg/tonと推算された。尚、本報告では、豪州プロジェクトをいれていないが、粗天然ガス中の二酸化炭素の含有量及び液化設備効率向上を考慮すれば二酸化炭素の排出量は減少の方向にある。

表 9 液化設備に於ける二酸化炭素排出量

産ガス国	二酸化炭素排出量
インドネシア 51.9%	197.8C-kg/ton
マレーシア 19.7	91.5
ブルネイ 17.6	66.4
アブダビ 7.6	173.8
アラスカ 3.2	56.0
平均 100%	147.4

## 5.2 海上輸送からの二酸化炭素排出量

海外から我が国へのLNGの輸送に伴う二酸化炭素排出量推算の前提として、125,000m<sup>3</sup>のLNG専用船の燃料消費量（1往復分）を数プロジェクトの理論値の単純平均から求め、輸送距離を考慮して各産地毎に推算した燃料重油、ボイルオフガス消費量から二酸化炭素排出量を算出した。燃料重油の炭素分は87.5%としボイルオフガスの組成は産地毎のLNG標準品位によった。

算出結果を表10に示す。LNG輸送に伴う二酸化炭素排出量は、平均18.4C-kg/tonである。

表 10 海外輸送からの二酸化炭素排出量

産ガス国	二酸化炭素排出量
インドネシア 51.9%	17.5C-kg/ton
マレーシア 19.7	15.2
ブルネイ 17.6	14.7
アブダビ 7.6	41.3
アラスカ 3.2	19.3
全平均 100%	18.4

## 6. 石炭の産地別二酸化炭素排出量

### 6.1 国内炭田

昭和63年度エネルギー生産・需給統計年報により国内全炭鉱で消費した燃料および電力量をもとに石炭1トン当たりのエネルギー消費量を求め、これに伴う二酸化炭素排出量を推算し、表11に示した。

購入電力からの二酸化炭素排出量は、石油186C-g/kWh(24%)、天然ガス131C-g/kWh(22%)、石炭236C-g/kWh(14%)からkWh当たり107gを仮定した。後述する海外炭鉱の電力はこれらの値をベースに各国の電力構成比率に応じて電力からの二酸化炭素排出量を算出し採用している。

表11より国内炭1トン当たり31.9kgの二酸化炭素が排出される。尚、国内炭の炭素含有量は60%、炭層ガスはメタンとしている。

### 6.2 海外炭田

海外炭鉱のエネルギー消費からの二酸化炭素排出量推算の前提として、電力使用に伴う

二酸化炭素排出量を表12に示した。

炭鉱に於ける電力消費は表12をベースとし、石炭の炭素分は各国の平均値60Wt%を採用し、海外炭鉱に於ける二酸化炭素排出量を推定した(表13)。

一般炭の炭鉱に於ける二酸化炭素排出量は国内炭も含めて16.5C-kg/tonとなる。

表 11 国内炭鉱に於ける二酸化炭素排出量

燃料消費	二酸化炭素排出量
灯油・軽油	1.94C-kg/ton
重油	0.25
石炭	23.05
炭層ガス	5.02
購入電力	1.67
計	31.93C-kg/ton

表 12 各国の電力使用に伴う二酸化炭素排出量

オーストラリア	199 C-g/kWh
中国	183
南アフリカ	218
カナダ	43
日本	107

表 13 海外炭鉱に於ける二酸化炭素排出量

産炭国	燃料	電力	炭鉱計
オーストラリア 50.8%	2.3C-kg/ton	4.7C-kg/ton	7.0C-kg/ton
中国 6.0	41.5	5.0	46.5
ソ連 5.2	—	—	9.2*
南アフリカ 4.7	2.2	6.4	8.6
カナダ 3.3	6.6	2.6	9.2
アメリカ 1.8	—	—	9.2*
インドネシア 0.6	—	—	8.6*
コロンビア 0.2	—	—	8.6*
日本 27.4	30.3	1.7	32.0
全平均 100	7.3	12.4	16.5C-kg/ton

\* 仮定値

表 14 輸送に於ける二酸化炭素排出量

産 炭 国	陸上輸送	海上輸送	輸 送 計
オーストラリア 50.8%	5.2C-kg/ton	16.4C-kg/ton	21.6C-kg/ton
中 国 6.0	17.0	5.3	22.3
ソ 連 5.2	43.4	3.7	47.1
南アフリカ 4.7	8.9	32.7	41.6
カナダ 3.3	7.0	18.1	25.1
アメリカ 1.8	30.6	20.4	51.0
インドネシア 0.6	0.4	11.4	11.8
コロンビア 0.2	0.7	29.1	29.8
日 本 27.4	0.6	3.4	4.0
全平均 100	7.3	12.4	19.7C-kg/ton

### 6.3 輸送に於ける二酸化炭素排出量

国内炭の陸上、海上輸送及び海外炭の陸上、海上輸送に伴うエネルギー消費とそれに起因する二酸化炭素排出量の前提として、陸上輸送は全て電化された鉄道と仮定し、貨物輸送の原単位は我が国の118.8kcal/ton \* km(=0.138kWh/ton \* km)を各国にも適用した。

また、海外炭の海上輸送では5万トンの専用船を往復使用することとし、国内炭の海上輸送では6千トンの船を前提とした。

輸送に於ける二酸化炭素排出量を表14に示した。我が国で使用される一般炭の輸送に於ける二酸化炭素排出量は19.7C-kg/tonとなる。輸送距離が遠方である程排出量は大きい。

### 6.4 ハンドリングに於ける二酸化炭素排出量

積地港および揚地港での2回のハンドリングについて算出する。ハンドリングの消費電力は、一般的に積地・揚地とも大差がないので、苫小牧港での平均値(0.95kWh/ton)を用いて、各国にも適用した。結果を表15に示す。

二酸化炭素排出量の違いは各国の化石燃料依存度による。

表 15 ハンドリングに於ける二酸化炭素排出量

産 炭 国	二酸化炭素排出量
オーストラリア	0.38 C-kg/ton
中 国	0.35
ソ 連	0.25
南アフリカ	0.41
カナダ	0.09
アメリカ	0.30
インドネシア	0.32
コロンビア	0.07
日 本	0.20
全平均	0.31 C-kg/ton

### 7. メタノールの二酸化炭素排出量

燃料メタノールの利用が将来期待されているが、本報告では海外の産ガス国で製造し、我が国へ輸入する場合の二酸化炭素排出量を以下の前提条件で推定した。



### 7.1 生産に於ける二酸化炭素排出量

メタノール製造原単位として、製品1トン当たりの原料及び燃料に消費される天然ガスは、 $7.1 \times 10^6$  kcal (最新の原単位) を採用し、原料天然ガス組成を表16のように仮定した。

この原料天然ガスは製品1トンに対し830  $\text{m}^3$ 消費される。

$$(7.1 \times 10^6 \text{kcal/ton} \div 8,550 \text{kcal/m}^3)$$

炭素に着目すると原料天然ガス組成より481.5kgの炭素が消費された事になる。

一方、メタノール1トン当たりの炭素は375kgであることから、差引き106.5kgの炭素が消費された事になる。

この炭素が全て二酸化炭素として排出されるとすれば、メタノール生産における二酸化炭素排出量は106.5C-kg/tonとなる。

この内、原料天然ガスに含まれていた二酸化炭素に起因するものは20.4C-kg/tonである。将来、二酸化炭素の利用が生産に寄与できれば、排出量は低減すると考えられる。

表 16 原料天然ガス組成

組成：メタン	83.1%
エタン	7.3
プロパン	2.9
ブタン	1.7
二酸化炭素	5.0
真発熱量 (25°C)	8,550 kcal/ $\text{m}^3$

### 7.2 輸送に於ける二酸化炭素排出量

メタノールの産地および輸送形態を現状と仮定すれば、即ち、タンカー規模は4万 $\text{t}$ 級、2万 $\text{t}$ 級、産地はカナダ、サウジ、ニュージーランド、マレーシア、チリとし、且つ、現状の輸入割合を仮定すれば、輸送に伴う二酸

化炭素排出量は8.9C-kg/tonと推算される。

## 8. 化石燃料からの二酸化炭素排出量の定量的評価

第3章から7章までで詳述した推算値をもとに以下、化石燃料からの二酸化炭素排出量を比較する為に、単位発熱量当たりで表17~18に取り纏めた。

表17は非精製用原油、LNG、一般炭、メタノールの直接利用を比較したものである。非精製用原油では採掘・生産から輸送までの二酸化炭素排出量は、燃焼で排出される量の1.5%であるが、LNGでは21.7%、一般炭では6.0%、メタノールでは30.8%と成っている。その結果、採掘から燃焼までの二酸化炭素排出量の比率はLNG=1とすれば、原油1.10、一般炭1.44、メタノール1.27で、燃焼からの二酸化炭素排出量比率と比べて原油、一般炭はその差が縮まりメタノールは広がる。

次に、表18は石油製品について取り纏めたもので、製油所での処理過程を経るものである。石油製品の採掘・生産、輸送、製油所までの二酸化炭素排出量は、燃焼で排出される量の5~6.5%である。

採掘から燃焼までの二酸化炭素排出量の比率はLNG=1とすれば、LPG0.99、ガソリン1.12、灯油1.13、軽油1.14、重油1.22となる。

尚、LPGは国内生産の約3倍程製品輸入しており、天然ガスからのガス回収装置等のみの処理と仮定し輸入分は製油所を経ないとした。

また、石油製品輸入の海上輸送は原油と比較してタンカー規模が小さいし、LPGは専用船であるが、表18では考慮していない。

さらに、国内輸送では一律に海外輸送の一割としている。

以上の比較評価は単位発熱量当たりであり、各々の化石燃料利用効率を考慮していないが、

表 17 単位発熱量当たりの二酸化炭素排出量  
(直接利用の場合) (C-kg/10<sup>6</sup>kcal)

		原油	LNG	一般炭	メタノール
採掘・生産	フレア一燃焼	0.20	—	—	—
	随伴CO <sub>2</sub>	0.02	3.68	—	3.78
	生産	0.28	7.66	2.66	15.94
輸送	陸上	—	—	1.23*	—
	海上	0.68	1.42	2.00	1.65
燃焼		77.65	58.69	96.77	69.55
合計		78.83	71.45	102.66	90.92

注：発熱量は原油 9,250kcal/l, LNG13,000 kcal/kg, 一般炭6,200kcal/kg, メタノール5,400 kcal/kg  
燃料性状は、原油は密度0.85, 炭素分84.5Wt%, LNGは炭素分76.3Wt%, 一般炭は炭素分60.0 Wt%

\* ハンドリングを含む。

## むすび

本報告は我が国の火力発電所を対象に化石燃料からの二酸化炭素排出量を現状把握したものを他の産業にも適用できる様に修正したものであり、化石燃料供給国及び供給割合等で若干の差異があるが一般的なデータベースとして利用可能と考えられる。

この種の試算は調査不足などから思わぬ誤りが生じやすい。本報告に於いても御指摘があれば幸いである。

地球温暖化問題が投げかけた二酸化炭素排

本報告を化石燃料利用の為のデータベースとして御活用頂ければ幸いである。

表 18 単位発熱量当たりの二酸化炭素排出量  
(石油製品) (C-kg/10<sup>6</sup>kcal)

		LPG	ガソリン	灯油	軽油	重油
採掘・生産	フレア一燃焼	0.75	0.59	0.56	0.54	0.51
	随伴CO <sub>2</sub>	0.05	0.04	0.04	0.04	0.03
生産		0.40	0.31	0.29	0.28	0.27
輸送	海外	1.04	0.81	0.77	0.74	0.70
	国内	0.10	0.08	0.07	0.07	0.07
製油所		0.10*	3.07	2.90	2.80	2.63
燃焼		68.58	75.39	75.89	76.65	82.97
合計		71.02	80.29	80.52	81.12	87.18

注：発熱量はガソリン8,400kcal/l, 灯油8,900kcal/l, 軽油9,200kcal/l, 重油9,800kcal/l, LPG 12,000kcal/kg  
燃料性状は、ガソリンは密度0.745, 炭素分85.0 Wt%, 灯油は密度0.79, 炭素分85.5Wt%, 軽油は密度0.82, 炭素分86.0Wt%, 重油は密度0.94, 炭素分86.5Wt%, LPGは密度0.55, 炭素分82.3Wt%

\* LPGは国内製油所分25%とし、その他輸入分は随伴天然ガスからの副産品と仮定した。

出制約は省エネルギー、利用効率の向上に加え化石燃料の選択にもおよび、充分な検討なくして安易に対応すれば将来に禍根を残す恐れもある。

技術先進国、日本としては二酸化炭素抑制と併せて化石燃料資源を将来とも効率良く利用することが今後の課題と考えられる。

最後に上述の調査にあたり、多数の関係機関の御支援をいただいたことに、深く感謝の意を表する次第である。(しげた じゅん 主管研究員)

# 地球環境時代の石炭利用

片山 優久雄

## 1. はじめに

化石燃料の燃焼に伴って排出される炭酸ガスによる地球の温暖化問題が、1988年6月のトロント・サミットで国際政治の場に登場して以来、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）が設置され、3つのワーキンググループによる活動が開始し、炭酸ガス排出量の削減についての検討が行われている。

エネルギー消費に伴って排出される炭酸ガス削減の方策と言え、炭酸ガス排出量の少ない燃料もしくは原子力への切替えや自然再生エネルギーの導入等が考えられるが、高い技術レベルを要求される原子力や、エネルギー集積密度の低い自然再生エネルギーの積極利用で化石エネルギーを代替することは不可能と考えられる。また現在、世界の人口は年約2%近い増加率で増え続けており、2040年代には100億人を突破する勢いで、人口増加に伴ってエネルギー消費量も急増することは容易に推測できる。人口増加に伴って必然的に生ずるエネルギー消費量の急増を無視した炭酸ガス排出量削減策は、開発途上国による薪採取のための森林破壊を助長させ、緑地の砂漠化を進行させる結果を招く恐れを持っていると思われる。さらに、炭酸ガス排出量削減策によってもたらされるエネルギー価格の高

騰は、開発途上国の経済成長を鈍化させ、貧困・人口爆発等のマイナス要因がさらに助長されることとなろう。

そこで、現在の確認推定埋蔵量で全一次エネルギーの60%を占める石炭の効率的利用と開発途上国の産業発展の過程を考慮し、地球環境時代における石炭の利用可能性について探ってみた。

## 2. 一次エネルギー消費と資源量の現状

我が国を含む先進国は、ここ数年の石油安によって、過去の石油危機を忘れたかのよう  
にエネルギー資源の浪費を始めている。図1  
に示すように1985年より石油の需要増に支え  
られて石油生産量は増加の一途を辿っており、  
価格も需要増に伴って徐々に上昇する傾向  
にある。専門家の予測によれば、石油価格は  
5年後の1995年には26~34\$/バレルに  
なるとされている(図2参照)。現に、イラ  
クのクウェート侵攻によって始まったイラク  
ショックによって現在(1990年8月下旬)石  
油のスポット価格は30\$/バレルを上回っ  
ている。

石油を含む一次エネルギーの消費量も、図  
3に示すように1983年の逆オイルショックを  
境に増加しており、今後もこの傾向が続くと  
されている。このエネルギー消費の増大を省

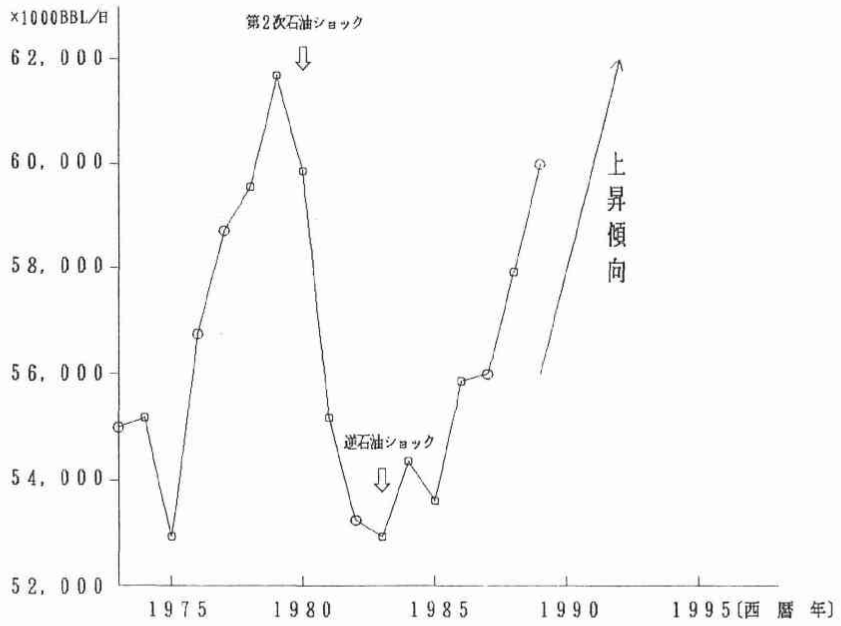


図1 石油生産量の推移

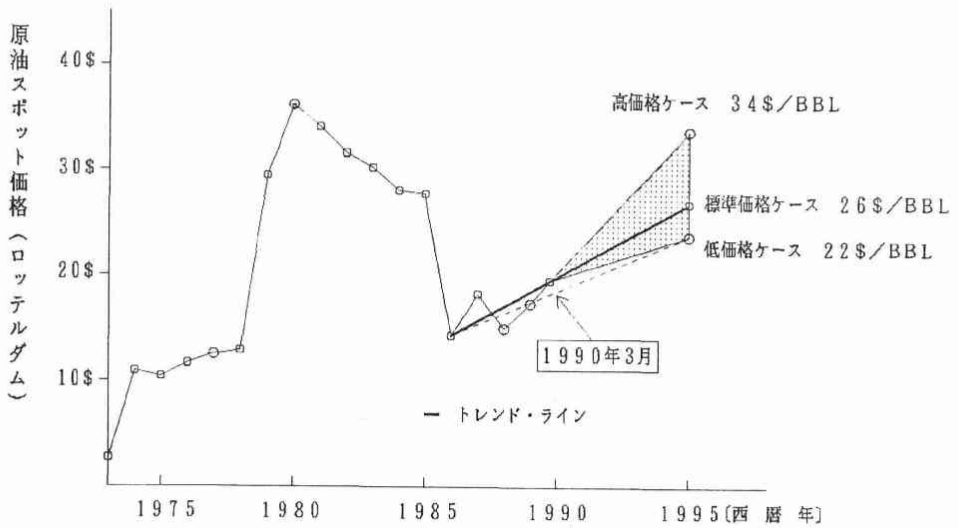


図2 原油価格変動

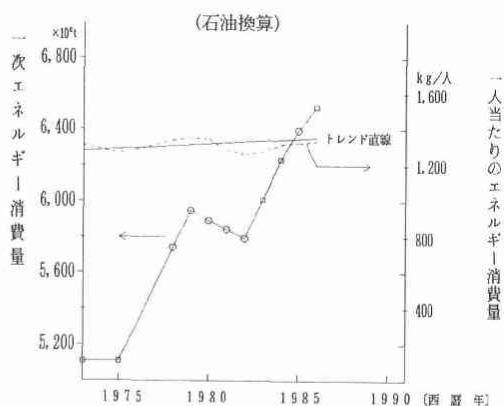


図3 世界の一次エネルギー消費量の推移

エネルギー技術やクリーンな自然再生エネルギーの積極導入によって食い止められるとしているのがIPCCの最近の動きであるが、エネルギー集積密度の低い自然再生エネルギーの利用のためには莫大な装置投資が必要であり、装置の制作等に消費されるエネルギー量は、装置の耐用期間内で捕集されるエネルギー量を越えるものもあり、画期的な技術変革がなされない限り抜本的な炭酸ガス対策となり得ないのが現状である。

そこで、一番有効的と考えられているのは

省エネルギー技術であるが、この技術の導入が可能なのは、経済的に余裕のある先進国のみで、開発途上国の導入は先進国の経済援助無しには行い難いものである。

更に、現在開発途上国は人口が急増しており、人口増に伴うエネルギー消費量の増大が国の経済を圧迫し開発の足枷となっている。

国連の人口推計によると、世界人口が100億を越える時期が前回の推計時期より早まって西暦2040年代になるとの見通しが出されている。その後も同じ増加率で増えるとすれば、2100年までに世界人口は150億人を突破することとなる。このような度を越した人口急増は、食料のみならずエネルギーの供給危機を招き、世界全体を巻き込む紛争の火種となる大きな危険性を孕んでいる。

1988年に集計された世界のエネルギー可採埋蔵量は表1に示すように石油換算で約1.2兆トン、来世紀中に核燃料サイクルが確立されると約2倍の2.3兆トンとなるとされているが有限な資源であることには変わりなく何れ枯渇することは免れない(図4参照)。

表1 エネルギー資源の確認埋蔵量(種別構成比)

	現状ベース		核燃料サイクル確立時	
	資源量 (石油換算:億t)	比率 (%)	資源量 (石油換算:億t)	比率 (%)
石油	1,313	10.8	1,313	5.7
天然ガス	1,189	9.7	1,189	5.2
超重油*	1,968	16.1	1,968	8.6
石炭	7,565	61.9	7,565	32.9
原子力	183	1.5	10,955	47.6
合計	12,218	100.0	22,990	100.0

注) \*: オイルサンド, オイルシェール等の重質油。

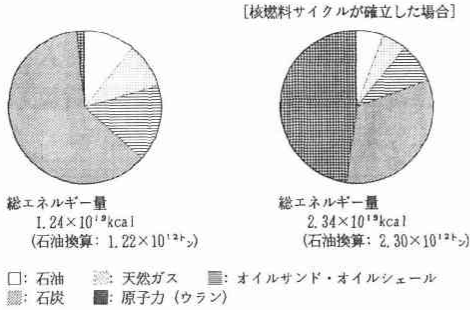


図4 地球上のエネルギー資源賦存量

### 3. 人口増加とエネルギー消費

20世紀の100年間で世界の人口は、約10倍に増え、今後も増え続け21世紀中には現在の人口の3倍の150億人を越える勢いで増え続けると予測されている。この人口の爆発的な増加は、アジア(中国、東南アジア、インド亜大陸)、アフリカの開発途上国で起きている。一方、先進国においては、人口増加にプレキが掛かってきており、一部の国では人口減少の兆しが見え始めている。

エネルギーの消費量は、文化のバロメーターとも言われており、先進諸国の事例を見れば明らかなように、生活レベルの向上に伴って生じる余暇は、人々に種々な活動機会を与え、余暇活動の増大に伴いエネルギー消費はさらに伸びる。このように生活レベルの向上に伴う余暇活動の増加に伴い、人々は手間の掛かる育児からの早期解放を願い、且つ高等教育の普及に伴う出産年令の高年令化に伴って、一家族当りの子供の数は減少の一途を辿るに到っている。

新田<sup>1)</sup>の国別一人当たりのエネルギー消費量と出生率の関連図(図5)は、国民一人当たりのエネルギー消費量(石油換算)が、2700kg/年を越える頃から人口増加率が0に近づくことを示している。このように個人のエネルギー消費量は、生活レベルとリンクしており、生活レベルの向上が出生率の低下につながっていることは、日本の現状を見ても明白であろう(図6参照)。

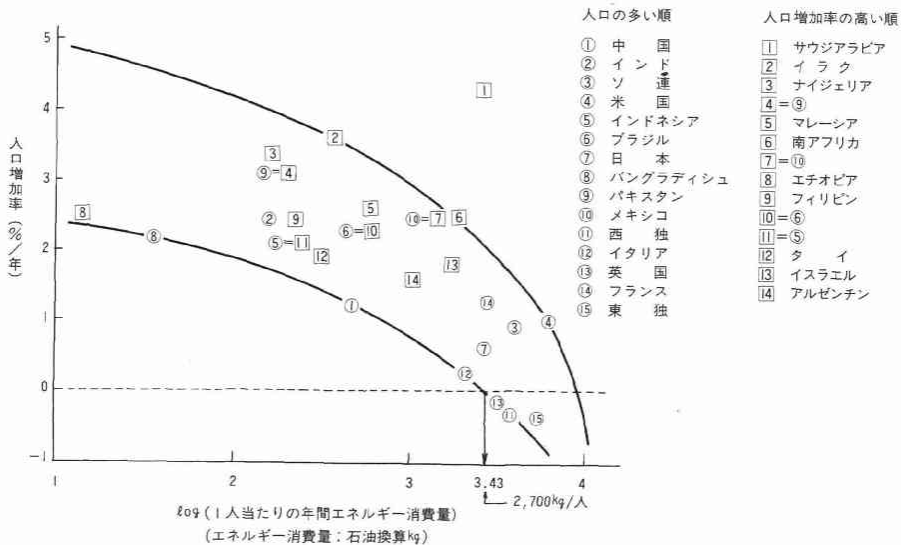


図5 一人当たりの年間エネルギー消費量と人口増加率の関係<sup>1)</sup>

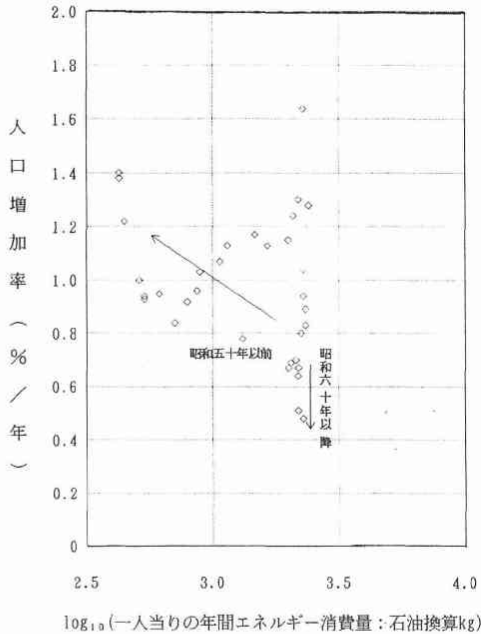


図6 わが国の人口増加率と一人当りエネルギー消費量との関係

今後の、全世界のエネルギー消費動向を把握するために、3種類のケースを想定し、表3のシナリオに示された数値と、表2の過去のエネルギー消費実態を元に、各年の人口と一人当りのエネルギー消費量の変化を求め、さらに世界のエネルギー消費量を計算によって求めた。各年の数値（人口や個人エネルギー消費量）間を結ぶ曲線式には下記の数式を当てはめた。

$$Y = A + B \cdot X + (\pm 1) \cdot C \cdot D^{X-1} \quad (1)$$

(A, B, C, D (2 > D > 1) は、定数)

(Yは人口もしくは個人エネルギー消費量,  
Xは年次)

と単純増加関数と指数関数を組み合わせた簡単な数式をベースとしたものである。

なお、A, B, C, Dの各定数は、表2の数値と各ケースの設定数値から求めた。

ここで、ケース1は、先進国諸国が地球環境を守るため開発途上国の経済発展に対する

援助を惜しまず、エネルギー及び技術供与等を積極的に実施するとした場合で、一人当りのエネルギー消費の伸びがトレンド直線とほぼ同じと仮定した。

ケース3は、現状推移型で先進国の開発途上国に対する援助は現状維持程度で、世界人口は21世紀末には150億人を突破すると仮定し、2050年における一人当りのエネルギー消費は現在の1.5倍と仮定した。

ケース2は、ケース1とケース3の中間に位置するものとした（各ケースのシナリオは表3に示している）。

推算結果を図7～図9、表4、表5に示した。図7～9から一人当りのエネルギー消費量の増加にも係わらず人口爆発が食い止められれば、ケース3の人口爆発ケースよりもトータルでは少なくなっていることが判る。

また、ケース1のエネルギー消費量の少ないケースにおいても2070年迄に現在のエネルギー資源の確認可採埋蔵量を全て消費してしまう結果となり、例え確認可採埋蔵量が倍増したとしても、どのケースにおいても21世紀末には使い尽くす計算となっている。これらの計算結果は、早期の核燃料サイクルの確立等追加のエネルギー源の確保を急がねばならないことを表していると共に、もし、石炭の使用が禁止ないしは制限された場合には21世紀半ばにはエネルギー欠乏状況に陥り、エネルギー価格の高騰を招くことを示している。尚、ここで用いたエネルギー資源量は現在の可採埋蔵量であって、エネルギー価格の上昇や採掘技術の進歩によって資源量は、2～3倍になる可能性を持っており、21世紀の末にエネルギーが完全に枯渇することはないと言える。



表2 先進国及び開発途上国の一次エネルギー消費動向

石油換算 [総量: ×10<sup>3</sup>t, 個人: kg/year]

		一次エネルギー消費量		人口 (億)			一次エネルギー消費量		人口 (億)		
		総量	個人				総量	個人			
一九七〇年	世界		4,433,464	1,212	36.57	世界		5,891,470	1,339	43.99	
		先進国					先進国				
		北アメリカ	1,720,682	5,408	3.18		北アメリカ	1,960,253	5,223	3.75	
		欧州(含東欧)	1,182,477	2,574	4.59		欧州(含東欧)	1,473,659	3,042	4.84	
		オセアニア	48,836	2,535	0.19		オセアニア	71,569	3,165	0.23	
		ソ連	686,871	2,829	2.43		ソ連	1,013,735	3,818	2.66	
	日本	226,213	2,181	1.04		日本	294,142	2,519	1.17		
			3,865,079	3,382	11.43			4,813,358	3,805	12.65	
	開発途上国	アフリカ	69,580	196	3.55	開発途上国	アフリカ	136,792	292	4.68	
		南アメリカ	97,721	525	1.86			南アメリカ	171,253	723	2.37
		アジア(除日本)	401,084	203	19.73			アジア(除日本)	770,067	317	24.29
			568,385	226	25.14			1,078,112	344	31.34	
一九七五年	世界		5,121,738	1,266	40.47	世界		6,399,630	1,319	48.51	
		先進国					先進国				
		北アメリカ	1,795,656	5,703	3.45		北アメリカ	1,903,395	4,750	4.01	
		欧州(含東欧)	1,307,933	2,760	4.74		欧州(含東欧)	1,519,748	3,090	4.92	
		オセアニア	60,807	2,859	0.23		オセアニア	84,634	3,435	0.25	
		ソ連	878,855	3,454	2.54		ソ連	1,201,253	4,311	2.79	
	日本	271,599	2,434	1.12		日本	322,171	2,668	1.21		
			4,314,850	3,572	12.08			5,031,201	3,817	13.18	
	開発途上国	アフリカ	93,635	232	4.04	開発途上国	アフリカ	161,229	291	5.54	
		南アメリカ	132,731	627	2.12			南アメリカ	181,518	678	2.68
		アジア(除日本)	580,522	261	22.23			アジア(除日本)	1,025,682	378	27.11
			806,888	284	28.39			1,368,429	387	35.33	

注) : 石油1 t = 10,180 × 10<sup>3</sup> kcal

表3 21世紀へのシナリオ

	エネルギー消費	人口
ケース1	<p>① 先進国の開発途上国に対する経済・技術援助がスムーズに進行し、途上国は経済成長と共にエネルギー消費も伸び、2050年で世界全体の一人当りのエネルギー消費量が、現在の約2倍の2800kg（トレンド曲線からの値と同じ）にまで増加するものと仮定。</p> <p>② エネルギーの転換・消費にさいしては、省エネルギー技術の導入が積極的に行われ、情報化や機械化の進展にも係わらず一人当りのエネルギー消費量の伸びは小さいと仮定した。</p>	<p>① 現在の先進国の事例から、エネルギー消費の伸びと出生率の関係を見た場合、一人当りのエネルギー消費量が、増加するに伴い生活・文化レベルも上昇し、出生率も徐々に低下してきている。発展途上国も先進国同様、エネルギー消費の伸びに伴い生活・文化レベルが上昇し、人口増加が鈍化すると仮定し、2050年の世界人口は75億人と現在の1.5倍となると推定した。</p>
ケース2	<p>① 先進国と開発途上国の関係は、ケース1程密接ではなく経済・技術援助も現状より少し良い程度ではあるが、NIESと中東中進国の成長のため、世界の一人当りのエネルギー消費量は、現在の日本レベルの2300kgに達すると仮定した。</p> <p>② 省エネルギー技術の進展導入は、先進国と中進国のみで開発途上国は、経済面から積極導入には至らないと仮定した。</p>	<p>① 2050年における一人当りのエネルギー消費量がケース1より低く設定されているため、生活や文化レベルの上昇の遅れが生じ、出生率低下速度が純り人口の伸びはケース1よりも大きくなるとし、2050年で90億人を越えると仮定した。</p>
ケース3	<p>① 先進国と開発途上国の関連は、現状推移としエネルギー消費の伸びは、環境問題によって石炭からの天然ガスや石油への需要のシフトによるエネルギー価格の高騰によって鈍化し現在の1.5倍程度の2100kgに抑えられると仮定した。</p> <p>② 開発途上国の人口爆発による環境破壊が進行し、熱帯・亜熱帯地域の砂漠化の進行が加速されるであろう。</p>	<p>① 世界人口はトレンド曲線と同じ増加傾向をとって増加し、2050年で105億人強、2100年には現人口の3倍の150億を突破する勢いで増加すると仮定した。</p> <p>② 2100年時点で3倍の人口は、世界の食料生産能力からみて養い難いものであると考えられ、且つ、種の成長の限界を越えるため実際には到達しない人口数と考えられ、2050年から2100年の間に飢餓や大規模な紛争等による大幅な人口減少が避けられない危険性を孕んでいる。</p>

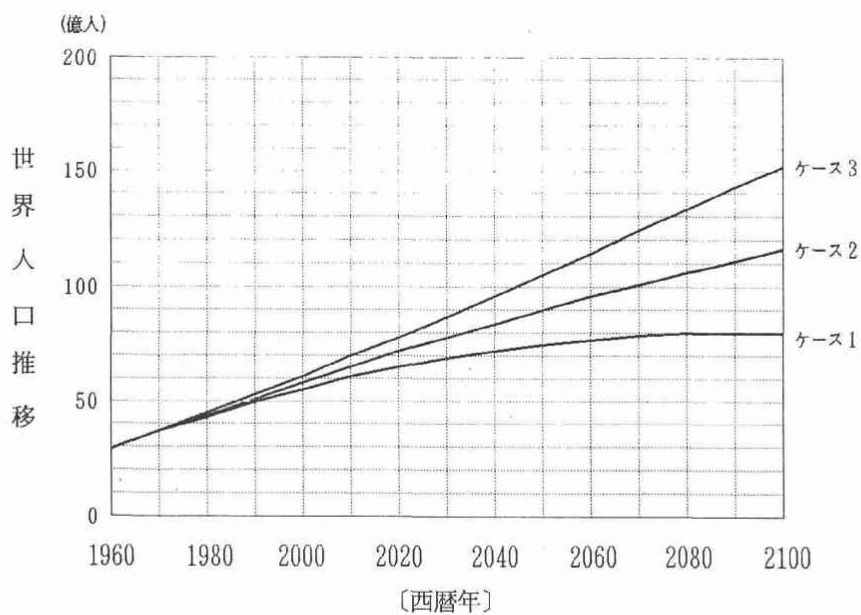


図7 世界人口の推移予測

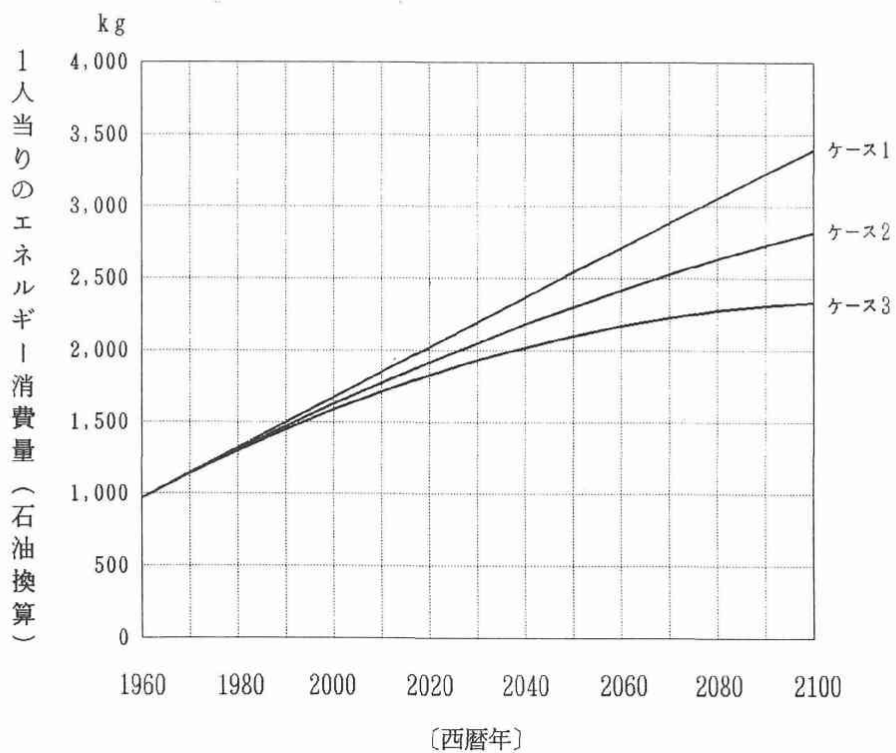


図8 一人当りのエネルギー消費量の推移動向予測 (世界全体)

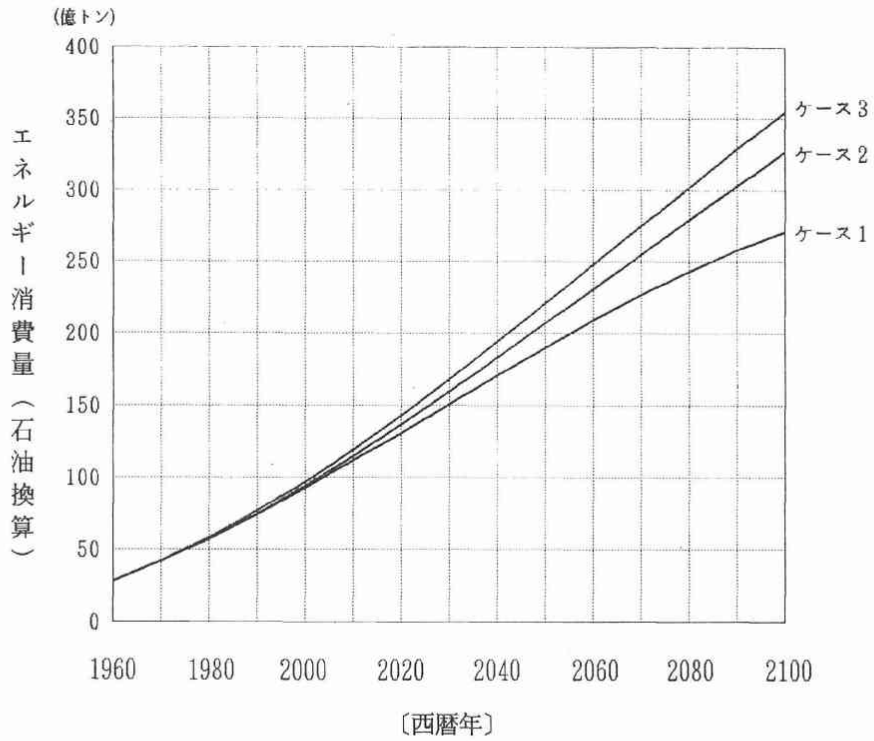


図9 世界の総エネルギー消費の動向予測

表4 世界の人口及びエネルギー消費の推移動向予測 (その1)

エネルギー消費量及び人口推移の推計結果 (ケース1)

西暦年	世界人口 (億)	エネルギー消費量 (石油換算)		
		1人当り (kg)	全世界 (百万トン)	積算値 (億トン)
1960	29.1	965	2,808	28
1970	36.6	1,142	4,176	382
1980	43.4	1,319	5,729	884
1990	49.7	1,495	7,432	1,550
2000	55.4	1,670	9,255	2,392
2010	60.5	1,845	11,165	3,422
2020	65.0	2,019	13,130	4,646
2030	68.9	2,193	15,118	6,069
2040	72.3	2,366	17,098	7,690
2050	75.0	2,539	19,039	9,507
2060	77.1	2,710	20,910	11,514
2070	78.7	2,882	22,679	13,703
2080	79.7	3,052	24,316	16,063
2090	80.0	3,223	25,790	18,577
2100	79.8	3,392	27,072	21,228

表5 世界の人口及びエネルギー消費の推移動向予測（その2）

エネルギー消費量及び人口推移の推計結果（ケース2）

西暦年	世界人口 (億)	エネルギー消費量（石油換算）		
		1人当り (kg)	全世界 (百万トン)	積算値 (億トン)
1960	29.1	965	2,808	28
1970	36.7	1,139	4,187	383
1980	44.2	1,307	5,774	887
1990	51.4	1,468	7,545	1,561
2000	58.4	1,623	9,475	2,420
2010	65.1	1,771	11,540	3,480
2020	71.7	1,913	13,716	4,753
2030	78.0	2,049	15,982	6,249
2040	84.1	2,178	18,317	7,975
2050	90.0	2,300	20,700	9,937
2060	95.7	2,416	23,111	12,140
2070	101.1	2,525	25,533	14,584
2080	106.3	2,628	27,946	17,270
2090	111.3	2,725	30,335	20,196
2100	116.1	2,815	32,682	23,359

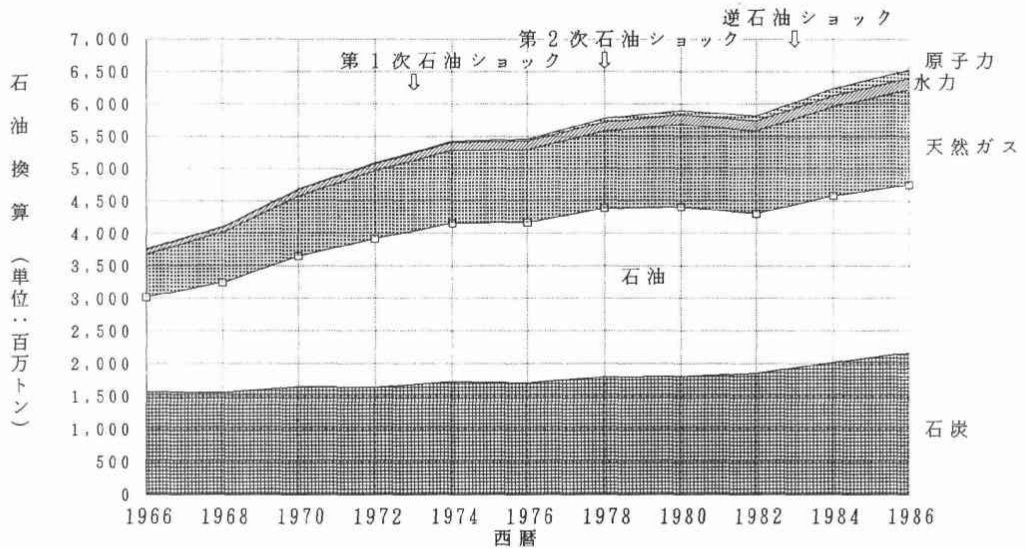
エネルギー消費量及び人口推移の推計結果（ケース3）

西暦年	世界人口 (億)	エネルギー消費量（石油換算）		
		1人当り (kg)	全世界 (百万トン)	積算値 (億トン)
1960	29.1	965	2,808	28
1970	36.9	1,137	4,199	383
1980	44.9	1,297	5,827	891
1990	53.1	1,446	7,672	1,573
2000	61.3	1,584	9,714	2,451
2010	69.8	1,710	11,929	3,543
2020	78.4	1,824	14,295	4,865
2030	87.1	1,928	16,788	6,431
2040	96.0	2,020	19,381	8,251
2050	105.0	2,100	22,050	10,336
2060	114.2	2,169	24,766	12,690
2070	123.5	2,227	27,501	15,317
2080	133.0	2,273	30,226	18,217
2090	142.6	2,308	32,911	21,388
2100	152.4	2,331	35,523	24,823

#### 4. 地球環境時代の石炭利用

現在世界の一次エネルギーにおける石炭の占める比率は、図10に示されているように約3割を占めている。この石炭の使用を制限もしくは禁止し、原子力や自然・再生エネルギー

一等の新エネルギーで代替させることは事実上不可能で、且つ図8に示されたように、今後開発途上国の工業化の進展に伴いエネルギー消費量は増大することは明らかであり、石炭の使用を制限したり禁止することはできない状況にある。



注) 総合エネルギー統計 (昭和52年版~昭和63年版) をもとに作成

図10 世界の一次エネルギー消費量の推移

##### 4.1 開発途上国のエネルギー事情

温暖化阻止の立場からは、炭酸ガス発生量の多い石炭の大量消費を避け、炭酸ガス発生量の比較的すくない良質 (含有炭酸ガス量の少ない) な天然ガス利用を進めたいところではあるが、現時点での確認埋蔵量は石油とほぼ同じで有限であり、且つ利用に際してパイプライン網の整備等社会資本の整備を伴うため、開発途上国における大量利用は望めない。

エネルギー消費が爆発的に増大している開発途上国の農漁村部は、昭和初期の我が国の状況と似ており、貧困のため自家消費するエネルギーは薪等の採集によって賄われており

エネルギー確保のため貴重な労働力が割かれているのが現状である。

現金収入の少ない彼らが高価なガス焔炉や石油焔炉を購入することは不可能な事であり薪採取や食料増産のための焼畑農業に伴う森林の荒廃を阻止するためには、彼らに現金収入の道を開拓させ定地農業を定着させることなどで、先進国の援助が必要とされる。

##### 4.2 開発途上国における石炭利用

開発途上国の人々が定住し、大きな集落を作り生活レベルの向上が計れるためには、炊事・暖房用燃料と移動用燃料の確保が急務と

なる。この人口爆発地域のアジア、インド亜大陸、アフリカは、石油資源には乏しいが質的に劣るが大量の石炭資源を有している。

この石炭資源を活用できれば地域内のエネルギー需給が可能となり、先進諸国の経済援助負担も軽減されることとなろう。そこで石炭を用いた輸送用燃料及び土で捏ねて作った

竈もしくは石や煉瓦で作った粗末な竈での使用が可能な低公害の固形燃料供給が行えるプロセスについて検討を行ったところ、石炭の低温乾留（450～600℃）と日本の豆炭製造技術との組み合わせが、最もエネルギー効率からも良いことが判った。表6に各石炭転換プロセスの熱効率を示してある。

表6 各種石炭転換プロセスの熱効率比較

(重量比)

	乾留液化プロセス (低温乾留)	NEDOR法液化プロセス (溶剤処理)	石炭ガス化メタノール合成 (フィッシャー)	石炭ガス化F-T合成 (フィッシャー)
原料 石炭	100	100	100	100
生成物:	60			
半生コークス *	—	23		
重油	8 **	21		9
ディーゼル油	6 **	—		13
ガソリン	1 **	—		5
LPG	(水素発生用)	—		
メタン 他 (メタノール)			(65)	
熱効率	～85%	～58%	～54%	～44%

注) \*: 固形燃料として使用, \*\*: 水素化精製済燃料油。

検討の結果対象プロセスとして選ばれたプロセスを、ここでは低温乾留液化プロセスと呼ぶこととする。プロセスの概略フローを図11に示した。このプロセスから得られる低温コークスは着火性がよく火持ちの良いもので、これに脱硫材を加え豆炭にして炊事用燃料として供給しようと言うものである。また、乾留タール留分もパラフィンに富んでおり、簡単な水素化処理によってガソリンや軽油が得られる。

この低温乾留液化プロセスの導入効果を評価するために、以下の条件設定を行った。

開発途上国の農漁村における竈の熱効率は低く20%弱と考えられるところから、一人当

りのエネルギー消費量を2000kcal/日と設定した。この種類の竈は、石炭系の固形燃料を燃焼効率良く且つ安全に使用するための土製の燃料皿・空気採入口・煙突を有する竈に改造することによって、容易に5割程度の燃焼効率の向上が計れることから、竈の改良を含めた石炭系固体燃料の利用と、従来の薪使用と炭酸ガス排出量についての比較を試みた。

試算結果は、表7に示すように、石炭系固形燃料の利用の方が、薪利用よりも炭酸ガス排出量において若干有利であり、且つ経済成長に不可欠な大量の輸送用エネルギーが確保出来ると言う利点を有していることが判る。



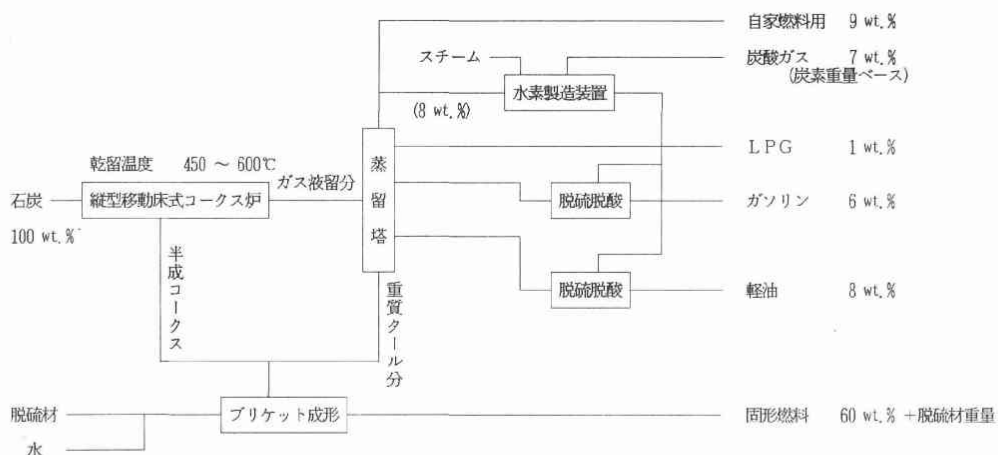


図 11 石炭の乾留液化プロセスの概要

表 7 薪から石炭系固形燃料への転換による炭酸ガス排出量の削減効果

	木材 (非乾燥)	石炭系固形燃料
① 一人当りの 1 週薪消費量	2,000kcal/日 (熱効率: ~20%) = 730,000 kcal/年	
② 世界の薪消費人口 (推定)	約 20 億人	
③ 燃料の発熱量	1,000 kcal/kg	6,800 kcal/kg
④ 燃料中の炭素含有率	~ 10 %	~ 73 %
⑤ 燃料消費量 (①×②/③)	14.6 億トン/年	2.15億トン/年
⑥ 年間炭酸ガス排出量 (④×⑤)	5.4 億トン/年	5.75億トン/年
⑦ 薪採取に伴う森林の消失面積 (=砂漠化)	約 25,000 km <sup>2</sup> /年 (四国とほぼ同じ面積)	—
⑧ 消失森林が炭酸ガスを固定する量	—	△0.4 億トン/年
⑨ 竈の改良による効率向上 (熱効率: ~30%)	—	△1.9 億トン/年
⑩ 燃料製造における炭酸ガス排出量	—	0.9 億トン/年
⑪ 輸送工程の炭酸ガス排出量 (平均輸送距離 400kmと仮定)	—	0.45億トン/年
実質炭酸ガス増加量	5.4 億トン/年	4.8 億トン/年

さらに、薪採取に伴う森林の破壊を食い止め、薪収集に係わってきた労働力を余剰労働力にできるなど二重のメリットを有している。

なお、表7中の森林による炭酸ガス固定量については新田の報告(表8)をベースとして求めた。

表8 森林によるCO<sub>2</sub>の吸収・固定に関する試算<sup>1)</sup>

—緑化の効果の推定—

生態系	面積 (1975年) (万km <sup>2</sup> )	緑化した場合の 炭素固定量原単位 (t/km <sup>2</sup> ・年)	緑化率 (%)	期待される 炭素固定量 (億t/年)
サバンナ	1500	400(亜寒帯と温帯の間)	10	6
温帯草原	900	500(温帯林の90%)	20	9
砂漠・半砂漠	1800	400(亜寒帯と温帯の間)	10	7
真の砂漠 (岩石, 砂, 氷)	2400	300(疎林の程度)	10	7
合計	6600	(平均390t/km <sup>2</sup> ・年)	750万km <sup>2</sup> (11.4%)	29 (≒30)

また前述のプラント規模については、開発途上国の薪消費人口を仮に20億人とした場合、固形燃料製造に要する石炭量は3.5億トン/年、得られる石油留分は0.53億トン/年と我

が国の昭和57年度のガソリン・灯油量に匹敵する量となる。また、この量は、1988年度の世界石油生産量の2%に相当するものである(表9参照)。

表9 民生用石炭系固形燃料及び輸送用燃料の製造

項目	諸元
石炭量	3.50 億トン/年
製品内訳:	
固形燃料	2.10 億トン/年
ディーゼル油	0.28 億トン/年
ガソリン	0.21 億トン/年
LPG	0.04 億トン/年

注) ディーゼル油+ガソリンの生産量は、我が国の昭和57年度の総生産量に匹敵。  
乾留処理で得られる石油留分は、昭和63年度の世界の石油生産量の2%に相当する。

なお、参考のために木材、石炭、石炭系固形燃料の概略組成を表10に示した。

3.5億トンの石炭を処理するプラントの数は、標準規模を通常の10,000トン/日とする

乾留炉	~300億円
水素化精製設備	~140億円
豆炭製造設備他	~10億円
計	~450億円

と推定でき、118基の総建設コストは5.3兆円となる。このプラントの償却費用を含む運転

経費率を25%とすると、年間1.4兆円ほどの資金が必要となる。この金額は、先進諸国のODA等の経済援助資金や世銀融資等で充分賄いきれるものと考えられ、先進国で検討が開始された炭酸ガス税をこの財源とすることができれば、プラントの建設が実現可能であると考えられる。

開発途上国にこのような基幹産業ともなり得るエネルギー獲得手段を供与することは、森林破壊を食い止めることのみならず人口爆発にも歯止めをかけることができ、且つ近代化を推進させるための原動力になり得ると考えられる。

表 10 各種固形燃料の組成

	木 材	石 炭	石炭系固形燃料
総発熱量	～ 1,000 kcal/kg	～ 6,400 kcal/kg	～ 6,800 kcal/kg
工業分析	(%)	(%)	(%)
(水 分)	(～ 80)	(～ 8)	-
揮発分	～ 75	～ 30	～ 14
固定炭素	～ 24	～ 59	～ 71
灰分	～ 1	～ 11	～ 15
元素分析	(%)	(%)	(%)
炭素分	～ 50	～ 64	～ 73
水素分	～ 6	～ 4	～ 4
酸素分	～ 42	～ 18	～ 5
窒素分	～ 1	～ 1	～ 2
硫黄分	-	～ 1	～ 1
灰 分	～ 1	～ 12	～ 15

#### 4.3 先進国における石炭利用

OECD全加盟国の1987年度の全エネルギー消費に占める石炭の比率は22%弱となっており、この内の7割強が発電用燃料として消費されている。我が国の石炭火力発電所は比較的新しく、プラント規模の大きいものが多く、平均的な熱効率（送電端効率）は約35%強となっている。一方、欧米の石炭火力は規模が小さく且つ古いプラントが多く、我が国と比べ2～3%効率が低下しているのが現状である。

しかし、現在実用化の段階に到達もしくはは到達過程にある超々臨界圧タービン並びにガス化複合発電システムや加圧流動床複合発電

システム等の導入によって5%以上の省エネルギー効果が期待できる（即ち炭酸ガス抑制効果がある）。経済的に余裕のある先進諸国については、これらの新技術の積極導入を計り、炭酸ガス排出量の削減を計ると共に原子力や自然再生エネルギーの導入を平行して進める事が望まれる。

#### 5. おわりに

炭酸ガスによる温暖化が取り沙汰されるようになって以来、化石燃料中一番炭酸ガス排出量の多い石炭を排除しようとする大きな動きがあるが、地球上のエネルギー資源量には限りがあり、且つ人口爆発問題を抱えている

現状を踏まえると、開発途上国抜きには地球環境の保全が計り得ないことは明白な事実であることに気付くであろう。

前節の試算でも明らかなように、人口増加並びに開発途上国の近代化によってエネルギー消費量は今後とも増加する傾向にあり、炭酸ガス排出量が多いと言うことで石炭の使用を禁止もしくは制限することは事実上不可能なことである。この炭酸ガス排出量の多い石炭も、その使い方如何によっては炭酸ガス抑制効果と森林破壊抑制効果とを合わせ持たせる事ができることを試算結果は示している。

現在、我々は、人類に22世紀が迎えらるよう、一時の感情に振り回されることなく冷静に何をなすべきか、何が効果的かを冷静に

考えなければならない重要な時期に立たされていることを忘れてはならない。

さらに、イラクショック（1990年8月）でまたも我が国のエネルギー政策の脆弱さが明らかにされたように、輸送用エネルギーの石油代替を含む石油需要量の削減策を早急に押し進めることも必要であろう。

（かたやま ゆくお 部長副主席研究員）

#### 引用文献

- 1) 新田義孝, 燃料協会誌, 第68巻, 第10号 867 (1989)

# 原子力発電プラントの経年劣化／ 長寿命化研究の現状

敷 地 明

## 1. はじめに

“米連邦航空局 老朽機に改善命令”（朝日新聞、平成2年3月7日），“原発寿命延長に動く、米電力業界、新設難しく”（日経新聞、平成元年11月21日）という記事をご覧になった方もあろう。前者は、1988年の米アロハ航空B-737型機の天井剝離・脱落事故の調査結果に基づく措置で、金属疲労への対処に加え、腐食に対する改善を義務付けたものであり、国内航空会社も運輸省航空局の対空改善通報を受け対処している。後者は、米国のニューヨーク電力が2009年に運転期限が切れるインディアンポイント3号機（運転開始1976年）の7年間延長申請を、米国原子力規制委員会（NRC）に提出したというものである。

材料・コンポーネント及び構造物の経年劣化は、普遍的に存在するものである。しかし、そのプロセスは一様ではない。

それは、

- ①コンポーネント及び構造物が、材料や設計によって異なり、
- ②コンポーネント及び構造物は、異なった利用環境下で運用され、機能しており、そして
- ③それらは異なったプラクティス、フィロソフィの下で維持、管理されている、

からである。

具体的に言うと、技術システムの材料や構造物は、

- ①運転中の自然の内的な化学的プロセスあるいは物理的プロセス、
- ②外的ストレス（例えば、酸化、放射線、湿度など）、
- ③運転の繰り返りに起因した損耗、
- ④過度の試験（例えば、頻繁な非常用発電機の試験）、
- ⑤不適切な設置、適用、保守、

によって経年的に劣化が累積し、その特性に変化が生じる。

このようなことから、原子力発電プラント、火力発電プラント、航空機、新幹線、化学プラントなど安全性の確保を優先的に考えねばならない技術システムにおいては、材料、コンポーネント及び構造物の経年劣化対策が現在重要な課題となっている。

本稿では、原子力発電プラントの経年劣化と安全確保に対する技術的問題の係わり、米国における代表的な研究開発プログラムであるNPAR（Nuclear Plant Aging Research）計画とPLEX（Plant Life Extension）計画の現状、経年劣化／長寿命化に関連する規制・基準類の現状について紹介する。

## 2. 経年劣化と技術的安全問題

原子力発電プラントにおける経年劣化要因としては、他の技術システムと同様に疲労、コロージョン、エロージョンがあるが、それに加えて特徴的なものとして放射線による劣化がある。

経年劣化が、原子力発電プラントの安全性及び技術的安全問題に与える潜在的インパクトとしては、『もし主要コンポーネントや構造物の劣化が、機能喪失前に検出されず、適切に矯正行為が取られなければ、プラントの安全性に影響を与え得る』ということであり、より具体的に言うと、以下のことが主要な問題点となる。

『安全系のシステム及びコンポーネントは、安全確保のため多重に用意されているが、これらが経年劣化することにより、カタストロフィックな故障に対する深層防護（防護の深さ）の厚みを減らすことにはならないか？あるいは事故に至るような共通要因故障の原因とはならないか？』

これに対して、具体的な技術的安全問題としては、以下の事項が考えられる。

- ①どの機器が経年劣化に影響されやすいか、またそれらの機器のうちどれが保守されており、それは交換が可能なのか？
- ②安全性に影響を与える経年劣化の過程としては、どんなものがあるのか？
- ③年数の経過している安全系のシステム、コンポーネント及び構造物の運転可能性（Operational Readiness）は、設計寿命中及び延長された寿命中どのようにして保証されるのか？

- ④現在の検査手法は妥当か、また改良するとするならばどのような点が必要か？
- ⑤余寿命を評価するための基準は、どのようなものか、またそれを判断するために必要な根拠は何か？
- ⑥総合的評価を実施するための対象機器は、どのようにして選ぶのか、またそれらの機器は何か？
- ⑦経年劣化を緩和するための現在の手法は有効か？
- ⑧経年劣化が生じたシステム及び機器において、運転可能性を保証するために必要な計画としては、どのようなものがあるのか？
- ⑨経年劣化を取り扱うために、規制上どのような変更が必要か、またそのスケジュールは、どのようにするのか？

以上のような問いに対して、我が国を始めとして欧米各国で、原子力発電所の経年劣化／長寿命化研究が積極的になされている。

## 3. 米国の動き

米国では1989年6月現在、111基1億393万7000kWの原子力発電所が稼働中であり、1988年における原子力発電の全発電電力量に占める割合は、19.5%となり、石炭火力(56.9%)に次ぐ第二の電源となっている。その経年状況を見てみると、運転許可から20年以上経過したプラントは3基、15～20年を経過したものは17基、10～15年を経過したものは40基、5～10年を経過したものは13基、5年以下のものは38基となっており、2000年にはYankee Rowe原子力発電所が、運転許可期間の満了を迎える。

一方、最近発表された米国エネルギー省／エネルギー情報局の2010年までの長期エネルギー予測によれば、電力需要の伸びが著しく、新規発電設備の建設が急がれるとしている。しかしながら、現在建設中の原子力発電所は僅か5基であり、これらは1995年までには、運転を開始することが計画されている。電力会社は、2000年以降、ベースロード電源の増設を必要としてはいるものの、現行許認可システムへの対応の負担や、新規プラント建設コスト高などの理由から、2010年までに運転を開始する発電所の新規発注は、今のところない。このことから、現行の40年という運転許可期間の満了によって、500万kWに相当する11基の原子力発電所が、2010年までに運転を停止せざるを得ないことから、運転寿命を20年間程度延長したいとの考えを持つ電力会社はかなりある。

このような背景から、1985年より米国ではエネルギー省(DOE)、原子力規制委員会(NRC)をはじめ、電気事業者、プラントメーカー等が参加して、原子力発電所の寿命延伸と許認可更新を図るための研究開発、ならびに規制・基準の整備が、積極的に実施されている。

### 3-1. NRCによるNPAR (Nuclear Plant Aging Research) 計画

#### 3-1-1. 概要と目的

米国NRCは、1983年安全性に関するプラント経年劣化の影響を系統的に評価することを提案し、1985年にNUREG-1144としてNPAR計画を発表した。

本計画は、寿命延長期間だけでなく運転許可期間内において、電気・機械的機器、安全

システム、支持システム、及び土木構造物の経年劣化に関連した技術的安全性問題を解決するためのもので、以下のことを目的としている。

- ①機器、システム、及び土木構造物の劣化を引き起こし、プラントの安全性を損なうような経年劣化の効果を解明し、特徴付けること、
- ②安全機能を失う前に機器、システム、及び土木構造物の経年劣化を検出するような検査、監視、モニター手法を確立して、余寿命を評価すること、
- ③経年劣化を緩和するための保管、保守、補修、及び交換の有効性を評価すること。

#### 3-1-2. NPAR計画の内容

NRCは、運転経験者および専門家の意見とリスク評価の結果に基づいて、表-1～3に示す経年劣化評価の対象となる機器等の初期選定を行い、それらについて図-1に示す研究計画戦略に基づいた研究が実施されている。研究は、以下に示す三つのフェーズから構成されている。

##### 〔フェーズI〕

経年劣化の影響、破損モード、その要因および機能の指標を含む性能パラメータの確認

##### 〔フェーズII〕

工学的試験研究の実施、現場測定に基づく経年劣化評価、実プラントの機器の経年劣化情報取得、検査・監視およびモニター法、あるいは余寿命評価手法の改良、および寿命延長に関する規制上の推奨案の作成

##### 〔フェーズIII〕

上記研究成果の応用



表-1 NPAR計画の経年劣化対象機器  
 (プラントの安全性に関して経年劣化が重要性を有する機器)

Group 1 [フェーズⅠの評価を終了し、フェーズⅡを実施中。]		
・電動弁	・逆止弁	・補助給水ポンプ
・モーター	・バッテリー	・充電器／インバーター
・スナバ	・遮断器／リレー	・非常用ディーゼル発電機
・電磁弁	・電動逃がし弁	
Group 2 [フェーズⅠを計画中であり、1988年に実施。]		
・電気用貫通部	・コネクタ	・ケーブル (電源、制御、計装)
・熱交換器	・圧縮機	・変圧器
・スイッチ		
Group 3 [研究対象としては推奨されるが、NPAR計画では計画に含まない。]		
・冷却ファン	・ベント弁	・安全系逃がし弁
・エア-作動弁	・機器冷却用ポンプ	・補助冷却系ポンプ
・蓄電池	・蒸気隔離弁	・復水分離器

表-2 NPAR計画の経年劣化対象システム  
 (事故の予防及び緩和に対して重要なシステム)

Group 1 [フェーズⅠ及びフェーズⅡを実施中。]	
・高圧緊急炉心冷却系	・低圧緊急炉心冷却系
・補機冷却系	・機器冷却系
・原子炉保護系	・余熱除去設備／補助除熱設備
・補助給水系	
Group 2 [1988年度実施予定。]	
・制御棒駆動機構	
Group 3 [NPAR計画では、計画に含まない。]	
・工学的安全施設駆動系	・再循環ポンプトリップ系
・原子炉隔離時冷却系	・ホウ酸水注入系
・格納容器冷却系	・計装、制御用空調システム

表-3 N P A R計画の経年劣化評価対象機器

(事故時の安全上重要であり、交換が簡単に行えない機器)

P W R〔加圧水型軽水炉〕	
① 原子炉圧力容器*	② 格納容器／ベースマット
③ 1次冷却材配管／緊急炉心冷却系配管*	④ 蒸気発生器*
⑤ 1次冷却材ポンプ本体	⑥ 加圧器
⑦ 制御棒駆動機構**	⑧ ケーブル／コネクタ**
⑨ 非常用ディーゼル発電機**	⑩ アクチュムレーター
⑪ 炉内構造物	⑫ 原子炉圧力容器サポート
⑬ 生体遮蔽	⑭ 加圧ライン
B W R〔沸騰水型軽水炉〕	
① 原子炉圧力容器*	② 格納容器／ベースマット
③ 再循環水配管／緊急炉心冷却系配管*	④ 再循環ポンプ本体
⑤ 制御棒駆動機構**	⑥ ケーブル／コネクタ**
⑦ 非常用ディーゼル発電機**	⑧ 炉内構造物
⑨ 原子炉圧力容器サポート	⑩ 生体遮蔽

注1) : 寿命評価研究は、1986年度に開始した。

注2) : P W R及びB W Rについては、研究の優先度順に列挙している。

\* : 圧力バウンダリー機器については、材料工学部門(MEB/DE)で実施中である。

\*\* : これらの機器は、N P A R計画で実施している。

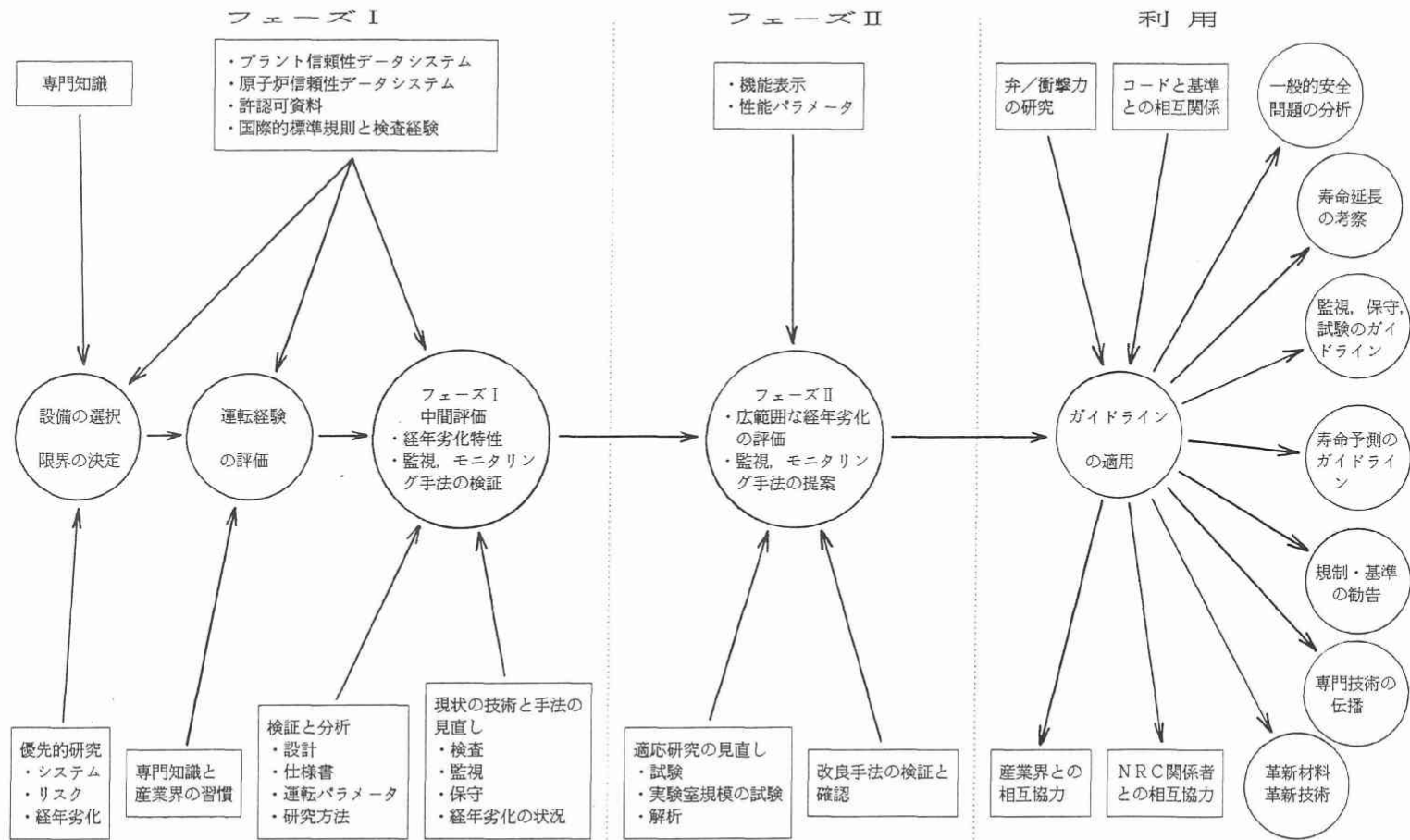


図-1 NPAR計画の活動方針

なお、本研究の成果に関しては、現行の原子力発電プラントの運転許可期間に対する安全評価に加えて、寿命延長に関連する効率的で且つ有効な規制のための技術ベースを提供するという観点から、非常に広い範囲に適用することができるとしている。その主なものとしては、以下の事項が挙げられている。

- ①コードおよび基準の改定のための推奨案の作成、
- ②経年劣化をモニターし、運転許可を更新するために必要となる監視試験や、保守方法の評価および推奨
- ③技術データの取得およびプラント性能指標確立のための推奨案の作成
- ④経年劣化した機器に適した供用期間中検査手法確立のための情報提供
- ⑤一般的安全性問題（G S I）を解決するためのN R R (Nuclear Reactor Regulation) / R E S (Nuclear Regulatory Research) への支援。

N P A R計画は、すべてのプラント要素に対する経年劣化や欠陥の特徴付け、および検査、監視、保守方法の工学的評価を実施するわけではなく、いくつかの選ばれた電気機器、機械的機器、および代表的なシステムを対象としたものである。

N P A R計画は、国内の五つの研究機関において実施されている。以下では、それら研究の一例として、O R N L (Oak Ridge National Laboratory) で行われているチェックバルブのモニタリング手法の評価について述べる。

チェックバルブは、安全系およびB O P (Balance of Plant) システムのあらゆる所で使用されている。このチェックバルブの故障

は、システム劣化の原因となり、時としてウオータハンマーや監視用機器に損傷を与える。

チェックバルブに対する現在のサーベイランス要求は、劣化のタイムリーな検出および傾向追跡としては不十分であることから、この研究ではアコースティックエミッション、超音波検査、磁気フラックス信号分析、その他（ラディオグラフィ、圧力雑音信号解析）によるモニタリング手法の評価を実施して、A S M E O & M Standards, N R C一般問題、S O E R 86-03に対する産業界の対応などへの反映を行っている。

前述した三つのモニタリング手法から得られる診断情報を表-4に示す。

表-4 チェックバルブのモニタリング手法診断結果

チェックバルブ 運転条件	検 出 感 度		
	アコースティック エミッション	超音波検査	磁気フラックス 信号分析
全 開	劣 る	優 秀	優 秀
半 開	有 望	優 秀	優 秀
タ ッ ピ ン グ	検 出	優 秀	良 好
	位 置	有 望	優 秀
漏 洩	優 秀	劣 る	劣 る

研究の中間的評価結果は、以下の通りである。

- ①現在、診断情報の全般的レベルが最も高いのはアコースティックエミッションであるが、他の手法と同様に限界はある。
- ②アコースティックエミッションに他のどちらかの手法を組み合わせたモニタリング手法は、全ての主要なチェックバルブ

の運転条件で検出感度が高い。

- ③三つの手法は、現在開発段階であり、今後あらゆる観点から試験、評価を実施して、改良していく必要がある。

### 3-2. E P R I / D O E による P L E X (Plant Life Extension) 計画

#### 3-2-1. 概要と目的

E P R I においては、軽水炉の長寿命化に関する研究を D O E との協力の下で進めており、具体的な活動としては軽水炉寿命延長(N U P L E X) 運営委員会と、D O E / E P R I プラント寿命延長(P L E X) 研究計画が実施されている。

前者は、20以上の電力会社を含んだ長寿命化研究の先導機関であり、ここではアプローチ及び研究プログラムの調整等が行われており、後者のP L E X計画もこのN U P L E X委員会の下で推進されている。

本研究プログラムの最終目標は、先行プラントの許認可更新をサポートし、将来のライセンス更新要求のためのガイドラインを作成することである。そのため当面の目標は、以下の項目の決定に必要な技術や情報を、電気事業者および規制側に提供することである。

- ①延長した期間内でも経済的で信頼性のある運転を行い、電力供給に役立つ、
- ②延長期間中でも従事者、公衆、環境に対して安全である、
- ③寿命延長期間の決定とその根拠。

#### 3-2-2. P L E X計画の内容

- (1). プラント長寿命化についての考え方とアプローチ

米国の原子力プラントには、他の発電プラントと同様に設計寿命というものは存在して

おらず、メンテナンス、取替え、運転等のコストが、原子力代替発電のコストを上回った時をプラントの寿命としている。

すなわち、ユニットの経済性寿命を決定することが長寿命化であり、米国では経済性寿命がライセンス寿命を上回ることが期待されている。

具体的な寿命延長のアプローチとしては、短期的方法から長期的方法まで、以下の三つの事項が考えられる。

- ①建設許可から運転許可までの期間を取り戻すためのライセンスの改良(～6年程度の寿命延長)、
- ②燃料交換やメンテナンスのための運転停止期間の回復(～8年程度の寿命延長)、
- ③寿命延長による運転とライセンスの更新(～20年程度の寿命延長)

#### (2). P L E X計画の内容

P L E X計画は、図-2に示すように3段階のステップから構成されている。また、プログラム全体としては、8つのプログラム要素からなっており、研究項目のソースは、

- ①E P R I / D O Eによるパイロット研究、
- ②A I F(米国原子力産業会議)/N E S P(National Environmental Study Project)による規制に関する研究

の二つである。

[フェーズI: 1985～1986]

フェーズIでは、①技術上、制度上の問題の評価、②プラントあるいは電気事業者ごとの方法と戦略の開発、③長寿命化のオプションを持続するために電気事業者がとるべき措置の決定、に焦点を当てた研究が実施された。

これらを実施する第一の目的としては、長寿命化をサポートするための戦略を決定することであり、また、第二の目的としては、現在の検査・記録・メンテナンスに関して、すぐに実施できる措置を決定することである。

パイロットプラントの長寿命化研究が1985年1月に工学的・運転上の手法、経済性の評価、様々なプロジェクトの管理等を含めた長寿命化の戦略を決定することを目的として開始された。

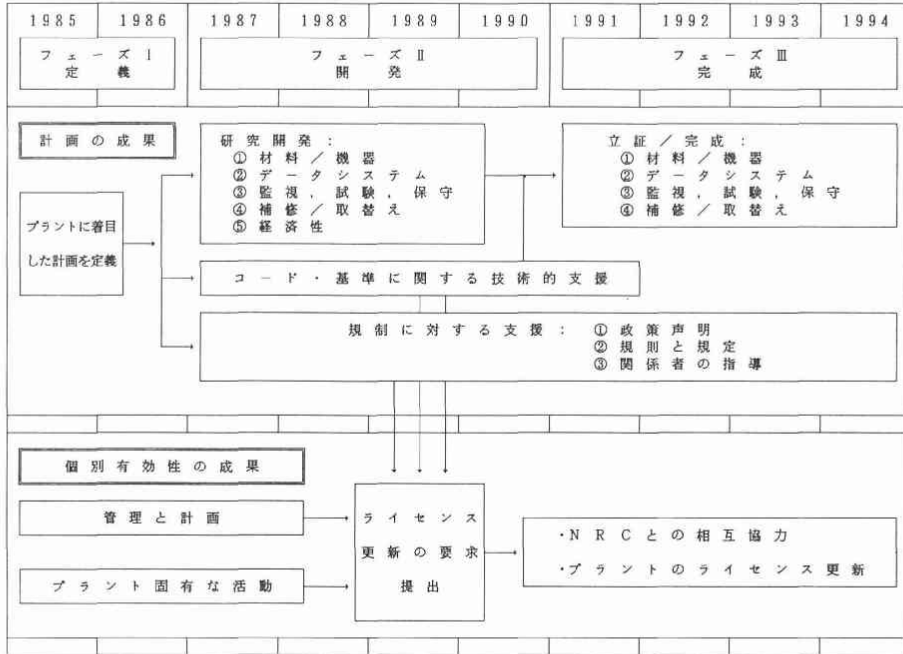


図-2 PLEX研究計画

〔フェーズⅡ：1989～1990〕

フェーズⅡでは、データ管理の必要性に鑑み、実データの収集・解析と、現在あるプラントの寿命延伸を保証するための、実際のプログラムの検討が実施される。このプログラムでは、材料や機器に関連した問題の解決を目的としており、この中には監視、試験、メンテナンスに必要な技術の採用、開発が含まれている。また、補修・取替えの可能性評価の確立や、クリティカルなプラントシステム、機器、構造物の継続運転を正当化するための研究も実施されている。なお、財政的な決定を行うためのツールを提供することも、目的

となっている。

さらに、このフェーズでは、電気事業者が長寿命化の要求を確立し、適切な技術的裏付けを与えることに関してイニシアティブをとり、長寿命化に適切な規制要求を連邦・州・地方機関に対して提出する予定としている。また、ここでは、ライセンス更新の規制の枠組みを定義するNRCの最終的な政策声明の承認や、コード・基準の改良も行われる。

〔フェーズⅢ：1991～1994〕

フェーズⅢでは、多くのプラントを対象として、長寿命化のプログラムと戦略の実施が検討される予定である。主な内容としては、①

クリティカル機器を継続使用することの妥当性評価、②補修、取替えのための経済性評価手法の確立、③改良された監視・試験・保守技術の実施、④コードや基準の改良等が実施される。

次に、PLEX計画の各プログラム要素における検討項目の概要について述べる。

#### 〔Program Definition〕

パイロットプラントの研究が、サリー発電所ユニット1やモンティセロ発電所を対象に実施されている。なお、研究は以下の二点を目的として実施されている。

- ①パイロットプラントの寿命延長のための技術的要求に関する詳細な評価
- ②実際のプラント固有な長寿命化プログラムの開発

#### 〔Materials/Components〕

現在の基準は、劣化機構の定性的な理解に基づくデザイン固有な基準であり、これには非常に大きなマージンが含まれている。このプログラム要素は、長期的な劣化機構に関するもので、デザイン固有な基準を、運転に即した (fitness for service) 評価に変更することを目的としている。

#### 〔Data System〕

長寿命化には、様々な情報が必要であり、そのためのデータシステムの必要性の明確化、寿命延長を支援するために必要なデータの要求事項、コンクリート及びReinforcing Steelの化学分析データベースの検討が実施されている。

#### 〔Serveillance, Testing and Maintenance〕

監視、モニタリング、試験、保守は、非常に重要な事項であり、具体的に信頼性をベースとしたクリティカル機器の評価、材料特性

の非破壊試験、遠隔検査手法の開発等が実施されている。

#### 〔Repair/Refurbishment〕

主要コンポーネントの取替え／改装、遠隔修理技術の開発、寿命延長のためのスペアパーツ戦略の開発、そしてコンクリートの修理手順の検討が実施されている。

#### 〔Economics〕

長寿命化研究では、電力供給戦略に影響を与える多くの因子を考慮する必要がある。経済性に関する決定は、国家、地域、各電気事業者の各レベルで行われる。経済性の研究は、プラントの寿命に影響するクリティカルな因子の決定と、財政的な意思決定のために利用可能な経済性モデルにおいて、これらの因子を説明するために必要となる。国家的なプランニングのためには、国家や地域の経済状態の調査が必要であり、また電気事業者の計画担当者には、他の手段による電力供給に対する長寿命化にかかるコストと便益の評価が必要となる。

#### 〔Regulatory〕

規制に関連するものとしては、プラント運転期間延長に対する規制当局の検討事項のフォロー、寿命延長に関する規制上の要求事項の影響評価、新しい及び未解決安全問題の解決の影響評価等が実施されている。

#### 〔Codes and Standards〕

ここでは、コード・基準に関する活動への技術的支援の継続、コード・基準の修正等が実施されている。

### 3-3. 規制・基準の動向

まず、最初に経年劣化／長寿命化に係る日米の原子力発電プラントに対する規制の相違

点について述べる。

米国と我が国の原子力発電プラントの法規制上の相違点は、原子力発電プラントの供用期間を規定しているか否かである。米国においては、技術的でないにしろ、通常の設備の経済的な運営を考えて、法律で供用期間が規定されている。米国における原子力発電プラントの供用期間については、当初建設許可から40年と規定されていたが、1982年から改善が図られ、現在は運転開始から40年と変更されている。

原子力発電プラントの運転継続の条件としては、我が国も米国も定期検査（米国の場合は供用期間中検査）に合格することにに基づいていると考えられる。なお、長寿命化に関連するものとしては、我が国の場合は使用前検査の状況と定期検査の結果が同一であることが必要であるが、米国の場合は建設時の技術基準と運開後の維持基準とを別に定めている。次に、米国の許認可更新の状況について述べる。

NRCは、1989年10月13日付け（54FR 41980）で、原子力発電プラントの許認可更新に関して、実質的な規制概念と規則案のアウトラインを明らかにする規則の事前通達を再公表した。

原子力発電プラントの許認可更新に関する事前通達は、1988年8月29日付けで一度公表されているが、この時は規則のオプションをまとめた報告書（NUREG-1317、1988年8月付け公表）に対するコメントを募集するのみのものであった。その後、NRCのスタッフは、コメント等を参考に規則作成の方向性の検討を行い、実質的な規制概念と規則案のアウトラインを示す事前通達を再公表し

た。以下では、事前通達の許認可更新に関する規制概念の概要（表-5参照）について述べることにする。

まず、規制の原則としては、あくまで現行の許認可ベースに基づいた規制であり、設置者の安全プログラムとNRCの規制監視活動によって、更新期間中の安全性の維持を図るものとされている。

次に許認可更新の条件としては、

- ①現行の許認可ベースを明確にするため、当該プラントの規制要件と義務（少なくとも最終安全解析書の情報は含む）を適切にまとめること、
- ②安全上重要な構造物、系統、及びコンポーネントの経年劣化メカニズム（疲労、浸食、熱および放射線による脆化、腐食、供用磨耗、化学効果）を管理するのに適切なプログラムを示すこと、
- ③IPE（Individual Plant Examination：個別プラント評価）と事故管理（Accident Management）プログラムを終了したプラントに限ること、

等が挙げられている。

次に、更新の手続きとしては、

- ①申請の受付は、許認可終了の20年前から3年前迄、
- ②更新期間は20年間迄、
- ③申請のレビュー期間は2～3年、
- ④環境評価報告書の内容によって、環境影響声明書（EIS）を作成する必要性が判断されること、
- ⑤バックフィット規則は適用されず、
- ⑥従来許認可終了の1年前迄に提出が求められていた使用済燃料の処分、及び廃炉措置の資金計画は、申請レビュー中の場



表一五 許認可更新に関する規則案の概要  
(54FR41980, 1989年10月13日付)

XX.1	目的とスコープ
XX.3	定義 (a) 現行の許認可ベース、(b) 劣化メカニズム、(c) 安全上重要な系統、構造物、コンポーネント、 (d) 原子力施設、(e) 更新期間、(f) その他
XX.5	許認可更新の申請 (a) 10CFR50, Sub. A, 2、50.3、50.4に従う。 (b) 現行の許認可期限の20年以上前に提出してはならない。 (c) 更新許認可の申請とその他の許認可の申請を合わせて提出しても良い。 (d) 現行の許認可の申請書、声明、報告書等を参考文献として明示する。 (e) 10CFR50, 33(j)に基づいて、機密データや防衛情報は、非機密データと分離させる。 (f) 現行の許認可期限の3年前までに提出しなければならない。
XX.7	申請書の内容 — 一般情報 (a) 10CFR50, 33(a)~(e), (h), (i)に示す事項を記載する。
XX.9	申請書の内容 — 技術情報 最終安全解析報告書(FSAR)を含むものとする。FSARには以下の情報を含む。 (a) 現行の許認可ベース (b) 現行の許認可ベースへの適合の証明 (c) 劣化評価 (1) 安全上重要な系統、構造物、コンポーネントの抽出 (2) 設計条件、運転時の環境条件(許容応力、許容負荷、温度、圧力、湿度、放射線、化学条件等) (3) (1)で抽出した系統、構造物、コンポーネントに対する以下の劣化メカニズムの影響 ① 疲労/振動、② 腐食、③ 浸食、④ 供用磨耗、⑤ 熱脆性、⑥ 照射脆性、 ⑦ 化学的および生物学的効果、⑧ クリーブ/収縮、⑨ 運転環境による劣化 (4) (1)で抽出した系統、構造物、コンポーネントが、許認可更新後も(2)の条件を維持できる証明 (5) (3)の抽出、評価、傾向分析プログラムの説明と技術的背景 (d) 苛酷事故関連の問題解決(IPEの終了とIPEで抽出された問題の対策実施状況・計画) (e) Tech. Spec. (リストと技術的背景、許認可更新による変更点)
XX.11	申請書の内容 — 環境情報 (a) 10CFR51, Sub. A に従い既存の環境報告書の追補を含むものとする。
XX.13	デコミッシング要件と使用済み燃料管理要件の延期 (a) 予備デコミッシング計画書の提出要件(10CFR50.75 (f))、通知と報告要件(10CFR50.54 (bb))、 許認可終了申請の提出要件(10CFR50.82)は、許認可更新申請のレビュー期間中は従来の許認可終了の 1年後まで延期する。 (b) 許認可更新申請が許可されなかった場合は、(a)で延期した文書を6ヶ月以内に提出する。
XX.15	ACRSの報告書 ACRSは許認可更新申請書をレビューし、機密部分を除いて公開可能な申請記録報告書を作成する。
XX.17	公聴会 公聴会の開催を官報で通知し、公衆の希望があれば公聴会を開催する。
XX.19	更新許認可の発効の基準 NRC は以下の条件の基に、XX.21 (b)の定める全期間にわたって、更新許認可を発効することができる。 (a) 現行の許認可ベースが適切に報告されている。 (b) 安全上重要な系統、構造物、コンポーネントが全て抽出されている。 (c) (b)の劣化メカニズムが全て抽出されている。 (d) (c)の対策が全て抽出されている。 (e) (c)の抽出、評価、傾向分析のための適切なプログラムが示されている。
XX.21	更新許認可の発効 (a) 更新許認可は現行の運転認可と同等の位置付けとなる。 (b) 更新許認可は許認可に記載された一定期間(発効の日付から40年を越えない)について有効である。 この期間は、更新申請承認時に残っている現行の許認可期間に、更新期間(20年以内)を加えたもの で、施設の寿命を越えない期間とする。 (c) 従来の許認可期間中でも、更新許認可取得後は更新許認可が当該プラントの許認可として発効する。 (d) 更新許認可には、更新にともなって必要な設計変更、運転制限、条件等を明記する。
XX.23	記録保存要件 設置者は、本項目で要求される文書を更新許認可期間中保存する。

合は従来の許認可終了の1年後迄、延期される、  
としている。

更新後の許認可の性格としては、従来の許認可期間内であったとしても、更新許認可取得後は更新許認可が、当該プラントの許認可として発効される (Supersession License)。

また、許認可更新規則に取り込まないものとしては、要員配置および訓練プログラム、組織構造、保健物理プログラム、安全プログラム、運転品質保証プログラム、緊急時計画、技術仕様書の定期的監視、供用期間中検査および試験プログラムでカバーされる機器等である。

なお、NRCは、前述したガイドラインに基づいて、1990年7月17日付けで、原子力発電プラントの許認可更新に関する規則案を公表した。今後は、申請に必要な技術的情報の抽出方法、安全上重要な系統、構造物、および機器の選定方法について、各々規制指針 (Regulatory Guide) が作成される予定となっている。

#### 4. おわりに

米国では、本稿で紹介したように安全性、経済性、技術的可能性の観点からNPAR計画とNUPLEX計画という二大研究開発プロジェクトが進められている。これらのプロジェクトでは、主要コンポーネントを対象としたハードウェア固有な研究に加え、プラント全体の安全性という観点から、経年劣化現象のプラントシステムへ与える影響を把握するため、プラント全体を対象としたシステム固有、およびリスク指向的な研究アプローチが並行して行われている。

一方、我が国においては、現在稼働中の軽水炉の良好な運転実績を背景に、想定寿命期間より更に長時間にわたって使用出来るならば、経済的メリットに加えて、次期発電炉選択と導入への時間的余裕、発電炉選択に対する柔軟性を与えることができるという視点から、現在以下に示す四つの経年劣化/長寿命化に関する研究開発プロジェクトが、着実に進められている。

- ①日本原子力研究所における経年劣化研究
- ②電力中央研究所における長寿命化研究
- ③発電設備技術検査協会における原子力プラント長寿命化技術開発
- ④電力会社における原子力発電所の供用期間延長に関する共同研究

今後、経年劣化/長寿命化の研究開発は、我が国のエネルギー問題への対応を考えればますます重要となってくる。

上記四つの研究開発が、着実に進展することが望まれるが、その推進にあたっては、

- ①経年劣化問題は、今後更に安全問題としてのみならず、プラント技術高度化においても重要な問題になると認識し、我が国が国際的に主導的役割を果たす方策を検討すること、
- ②現行の国内プログラムを、有機的連携を持つようにするための方策を検討すること。特に技術基準等を我が国の実情にあったものとするため、早急に国内の体制整備を行う、
- ③他産業分野においても、例えば予知保全 (Predictive maintenance) の方法論など、ハードウェア固有なアプローチではなく、システム固有あるいはリスク指向的なアプローチに関心があることから、

原子力分野ではこれらの方法論の研究を推進し、他産業分野へも貢献するという視点を持つこと、

- ④今後、安全に係る規制・基準と技術基準を検討していくにあたっては、その基本的考え方を明確にし整合性のとれたものとする事、

を考慮することが、重要であると考えられる。

(しきち あきら 主任研究員)

#### 参考文献

- (1) PNL-6848, Guide to Regulatory Instruments for LWR Reactor Pressure Vessels: Aging and Licence Renewal Considerations, March 1989, E. V. Werry (PNL)
- (2) PVP-Vol. 171, Life Assessment and Life Extension of Power Plant Components 1989, (presented at The 1989 ASME Pressure Vessels and Piping Conference) (ASME)
- (3) NUREG-1144-Rev. 1, Nuclear Plant Aging Research (NPAR) Program Plan, September 1987, (NRC)
- (4) EPRI NP-5461, Component Life Estimation: LWR Structural Materials Degradation Mechanisms, Prepared by Structural Integrity Associates, Inc. September 1987
- (5) AGING RESEARCH-NEEDS AND STATUS, D.F. Ross, Jr., (NRC/NRR), Proceedings of the Topical Meeting on NUCLEAR POWER PLANT LIFE EXTENSION July 31-August 3, 1988, Snowbird, Utah, USA.
- (6) NUREG-1266-Vol. 3, NRC Safety Research in Support of Regulation-1988, May 1989, (NRC)
- (7) Federal Register (Proposed Rules), vol. 54, No. 197, Friday, October 13, 1989, (NRC)
- (8) Federal Register (Proposed Rules), vol. 55, No. 137, Tuesday, July 17, 1990, (NRC)

第9回エネルギー総合工学シンポジウム  
現代社会とリスクー工学と社会の接点としてのリスクー

下 岡 浩

1. はじめに

第9回エネルギー総合工学シンポジウムが「現代社会とリスクー工学と社会の接点としてのリスクー」をテーマに平成2年7月18日(木)日本工業倶楽部で開催された。本文はこのシンポジウムの概要について報告するものである。

2. 開会の挨拶：山本理事長

さまざまなリスクの中で生命に係わるリスクが一番深刻なリスクであるが、近年、技術・工学の進歩によって巨大産業・巨大技術といったものが我々のまわりに現われ、人類は今までに経験しなかったようなリスクに直面するようになってきた。これらのリスクに対する個人個人の受け止め方には様々なものがあり、また社会にしてもかならずしも定まったものがあるわけではない。したがって、このシンポジウムではこのような課題についての講演や討論を期待したい。

3. 講演

3.1 工学と社会の接点としてのリスク：東京大学工学部原子力工学科／近藤駿介教授

本講演では、4つの項目について述べる。第1は工学システムとリスクの関係、第2は

そのリスクを推定する方法、第3はリスク推定の問題点、第4はリスクの受け入れ基準についてである。

第1の工学システムとリスクの関係であるが、工学システムを社会に持ち込む場合、定義はともかくとして絶対安全ということはありません。つまり、我々がある便益（ベネフィット）を求めて工学システムを社会に導入すると、そこに必然的にリスク（生命・財産への脅威）が発生する。この際、リスクが0にできるというのは不正直であり、これが存在するというのを関係者が認識しつつ、これが制御可能（又は管理可能）であることから、これの管理のあり方について合意を迫るべきである。

この際に、どれだけリスクが小さければ受け入れ可能といえるか（How safe is safe enough?）という問題は、リスクとベネフィットをにらみつつ最適なシステムを選択するという意志決定問題として解かれる。この結果としてどのようなリスクが受け入れられ、さらにどのようなシステムへの働きかけ（リスク管理）が妥当かが定まってくるのである。

上記の決定を行う際の最も大事な作業要素としてリスク推定がある。リスクの定義は様々ではないが、被害の大きさとその発生頻度を要素とする。その推定方法には、1. 専門家

による推定, 2. 災害統計による間接推定, 3. モデルによる合成法(確率論的安全評価)の3つがある。専門家による推定は、システム的设计段階ではよく使われている。多くの場合、こうした推定の繰り返しでシステム設計が進行している。この方法はそういうことで非常に重要なアプローチであるが、リスクの推定としては、推定の追試ができない、不確実性について言及しにくい、経験のないシステムには無力であるといった幾つかの問題点がある。第2の災害統計による間接推定はカナダのインヘイバー氏の開発したものであり、システムの各要素の災害統計を積み上げることによりリスクを推定する手法である。この手法はシステマティックであって、経験のないシステムにも適用できるが、災害統計に入っていないような希有事象によるリスクを評価しない可能性がある。モデルによる合成法は、PRA(Probabilistic Risk Assessment:確率論的リスク評価)又はPSA(Probabilistic Safety Assessment:確率論的安全評価)といわれるものであり、イベントツリーやフォールトツリー等を用いて、システムの災害の発生するシナリオを体系的に見いだし、そのシナリオの発生頻度とその被害の大きさを求める手法である。この手法では、論理的かつ包括的にリスク推定が可能であるが、こうした作業は人間が行うものであり、人間の作業は何事においても完全とはいえないことから、評価の完全性の証明が困難であり、また実際なかなか完全といえるものはない。

人間が複雑な物を作り出している時代背景を考えると、リスクアセスメントは必要で、かつ政治的議論に耐え得るものが求められて

おり、次第に直感的なものから合成的なもの、言い替えると定量的なものが必要になってきている。しばしばこうした推定に不確かさが伴うことが問題視されるが、未来を予測するのに不確かさはつきもので、それを見定めることができれば成功というべきで、その存在を踏まえての意志決定の方法論こそ模索すべきである。

なお、この様な体系的なリスク評価は、被害の大きさとかその発生頻度とともに安全設計や運転管理のありかた等、いわゆる安全に関する知見が多く得られることからPSAと呼ばれているが、こうした観点からもリスク論はおいてもこの種の分析は多くの産業分野で行なわれるべきだろう。

リスクの受け入れ基準については、実際には少なくとも自主的な形では従来から存在する。例えば、放射線に対する基準とか、ASMEや日本の通産省告示という形での製品に対する基準、建築基準法等も、これをリスク目標と言い替えても良いほどに背景に安全、言いかえればリスクに関する哲学を有している。欧米諸国の1部では定量的な安全目標が提案又は使用されるようになったのは、これまでそれぞれの専門分野がそれぞれの職業倫理に基づいて基準を定めてやってきているのに対して、そうした受入れ基準のあり方がパブリックドメインで争点になり政治の場に出てきた結果である。職業倫理としてのリスク論でよかった時代は、専門家の間だけで許容リスクの定義を議論をしていれば良かったが、政治的合意ということになると、さまざまな種類の参加者間でリスクの議論をしなければならず、リスクを推定する人々への信頼感を含めて新しい問題が生じてくる。特に、

非常に希ではあるが、大きな被害をもたらすシステムについては、そのベネフィットの享受すべき必然性が最大の争点になることを特に注意したい。

### 3.2 リスクマネジメントのありかた：埼玉工業大学／井上威恭名誉教授

リスクの定義については各分野でさまざまに定義されているが、私はMITの定義を基に「潜在危険性／安全防護対策×ヒューマンファクターズ」としてリスクを定義したい。特に、最近の大きな事故をみると尋常でないヒューマンエラーによって事故を起こしている。

今までの安全の考え方は災害を0にすることであったが、災害が起きるかもしれないということを前提にして安全対策をとるのが最近の安全の考え方である。災害事故は、許容されたリスクからでも事故になる、敢えて言えば、法規を守っていれば安全なのではなくそれでも事故は起きる可能性がある。

次に、事故例からの教訓を述べる。

コンビナート事故を例にとると、昭和48～50年までは事故の件数が増えており、これが国会等で問題になりコンビナート防災法とかコンビナート保安規則ができてからは事故が急激に減少した。コンビナートと直接関係のないボイラー事故も同様の傾向を示している。このように事故というのは、確率のみで評価できるものではなく、皆が努力して少なくしようと思えば少なくなるものである。つまり、安全意識の乏しい時は事故が多発し、それを意識している時には事故は減少するものである。

過去の事故統計によると、事故原因として

運転管理の不備による事故は全体の半数以上になっていることからみても、過去の統計から事故確率とかリスクを推測することは極めて危険なことといえる。

このように、ヒューマンエラーというものは主要な事故原因であるが、これは人間の煩惱がなくなる限りなくなるものであり、永遠に存在するものと考えている。人間の知見は自然現象のごく一部に限られているため、技術的ミスというものは皆無にすることはできないが、ヒューマンエラーはリスクマネジメントにより限りなく低減することが可能である。リスクマネジメントとは、[リスク検証、リスク制御、リスク評価、生産、労働者対策]といったものを全て行うことであり、経営そのものといえる。リスク管理者が命令を出す場合には、命令の出し放しではなく、管理者がその問題について深い関心を持っていることを示し、経過を見守り、可能な援助を現実的に行っていくことが要求されている。

すなわち、リスクは完全に除去することはできないが、リスクの存在を絶えず念頭におき安全管理をすることがリスクマネジメントであり、これによりリスクを限りなく低減することが可能である。

### 3.3 公衆のリスク感覚：学習院大学法学部／田中靖政教授

リスクの問題を考える場合、リスクの評価とは別に、人がどのようにそのリスクを感じるかという事を知る必要がある。その基本として、人はどうして怖いと感じるかということについて述べる。

[怖さ] というものは、人間に生まれつき

備わっている非常に正常な感情であり、その怖さをもたらす危険にたいして回避行動をとるというのはごく普通のことである。まさにそれがあるからこそ人間は生き残ってきたのである。したがって、何かを恐れるからといって、その恐れる人達を愚かというわけにはいかない。

我々が何かを怖いと感ずるのは、その怖さを直接的あるいは間接的な経験を通じて学習した結果である。そして、この学習は直接的に体験したものよりも、コミュニケーションにより間接的に学習されることが非常に多い。例えば、原子力のような話題性に富んだ問題については、それが危険であるということをも自分自身が直接的に経験するのではなくて、マスコミ等からのメッセージによって「怖い」と思うのが世の常である。したがって、かりに自分が原子力のことを怖くないと思っても、「怖い」と思う人を間違っていると非難するわけにはいかない。

また、「怖さ」はその危険に「身近い」かどうかの関数でもある。もし、チェルノブイリ事故により、輸入食品の中にその放射能を含んだものがなかったなら、最近の日本の反原子力発電運動はかなり異った様相を呈していたと考えられる。

このような「怖さ」に対して、ある程度の免疫を作ることとも心理学的に可能であるということが知られている。原子力発電の安全が続けば、その危険というのは杞憂になる。したがって、原子力発電にとって安全運転により事故を起こさないことが最大に重要であり、もし、事故が起きると今まで安全であると信じていた人も裏切られたという気持ちが強くなり、安全に対する信頼性を非常に減少

させるという事態になる。

「怖さ」は人間の感情であり、非常に主観的なものである。知覚されたりリスクとリスクそれ自体とは全く別のものである。したがって、専門家と素人大衆との間にリスクの認識の差がある場合、後者の方が圧倒的に数が多いため、専門家の意見がその社会の中で受け入れられないという非常に深刻な事態を引き起こしている。

しかし、科学技術の重要性を認識できるような情報を十分に流し、国民が十分な情報を与えられた上で選択をしやすくさせるという努力を地道にすることが、原子力発電等の「怖さ」を減ずることに役立つという調査結果もある。現在、原子力発電については盛んに対話ということが各所で行われてきているが、この対話に関しては、公衆を正当な仲間として認めて参加してもらおうという民主主義の原則が一番大事である。

### 3.4 原子力発電に関するアンケート結果の分析：下岡浩主任研究員

例えば朝日新聞のアンケート調査によると原子力発電に対する評価は年々悪くなっており、特にチェルノブイリ事故を契機に急激に悪くなっている。しかし、原子力発電に対する不安感だけは逆に減少している。

そこで、当研究所では公衆の原子力発電に対する認識の変化とその要因を探るために、約3年前から計3回にわたって20才以上の一般大衆の人々に対しアンケート調査を実施してきた。1回目の調査はチェルノブイリ事故の後の1987年1月、2回目の調査はいわゆる広瀬隆現象の後の1988年12月、3回目の調査は福島県の再循環ポンプ事故の後の1989年10月



に実施した。

2回目の調査では、マスコミ等で原子力発電に関する否定的な情報が多くなっていた時期であり、1回目の調査結果に比べ「利用すべき」「どちらかと言えば利用すべき」といった推進派は減少し、逆に廃止派は増加している。ただし、3回目の調査では以前ほどではないが若干肯定的になっている。「原子力発電が有用とおもうか無用と思うか」とその必要性を尋ねた調査結果では、推進—廃止の評価と同様の結果を示し、無用感が増加傾向にあるが、逆に「原子力発電を安心とおもうか不安とおもうか」を尋ねた調査結果では、年々不安と思う人の割合が減少している。

原子力発電の推進—廃止の態度決定に有用—無用、感覚的な安全感覚である安心—不安、具体的な安全認識である安全—危険の各評価がどの程度の要因になっているかを多変量解析で分析した結果、原子力発電の推進—廃止の態度決定要因として最も大きいのは有用感の有無であり、安全性の認識と不安感の有無は要因としては小さいことがわかった。特に、不安の認識は原子力発電を廃止すべきとの態度決定要因としては無用・危険の認識に比べて小さく、感覚的な不安感のみでは廃止派となる要因にはならないと言える。

以前に比べ原子力発電の廃止派が増えた主な原因は無用感の増大にあるとの結果がでたが、これは石油情勢の安定等によりエネルギー確保の要求が相対的に減少し、原子力発電に対する有用感が減少したものと思われる。このような原子力発電の有用性の認識が薄れている状況下において、チェルノブイリ事故の発生とそれによる食品汚染問題が発生し、これを契機に、新しい形の反対運動が生じ、

原子力発電に否定的な情報が氾濫した。相対的に、推進側の情報は少なくなり、以前からの推進側情報の特長である、分かりにくさ・情報提供の遅れ等から、推進側の情報公開や安全確保努力に対する疑念が生じ、「知る権利」とか「選択の自由」をないがしろにされたと感じた公衆は、推進体制や安全管理体制への不信感を増大させたと考えられる。第3回目の調査では不安感も制御不能との評価も減少しているが、その底流では推進体制や安全管理体制への不信感が広がっている。

次に、原子力発電の推進—廃止の直接的な態度決定要因としての「必要性」と「安全性」の認識に影響を及ぼす「社会的要因」について述べる。相対的に原子力発電に否定的なグループは「自然保護派」「主婦」「高学歴」「若い人」「女性」であり、これらのグループは同時に「自然保護」を重視する傾向も示し、生産者としての意識より消費者としての意識の方が強く、また市民としての意識も高い人々であるといえる。つまり、生活水準を維持向上させるために必要なものが量的にはある程度手にいれたので、それらは維持しつつ、さらに安全等の質的充足を求める社会的傾向の側面が現在の原子力発電問題に現われていると思われる。ただし、今のようなエネルギー大量消費により、現在の生活スタイルを維持することの是非を考える人達が現われはじめている事も注目すべきことと思われる。

原子力発電への疑問は「放射線・放射能はとにかくこわい」という感覚的な理由と「大事故時の被害が甚大である」と「放射性廃棄物の処理処分技術」に関するものであるが、「放射線・放射能はとにかくこわい」という感覚的な理由は推進派も廃止派も同様に持



っており、この理由は原子力発電の推進—廃止の態度決定に影響を及ぼしてはならず、「大事故時の被害」と「処理処分問題」に関する疑問が大きな要因といえる。

以上述べたアンケート結果の分析から公衆の態度決定構造をまとめると、チェルノブイリ事故後に起きた反原子力発電の動きの原因は単に漠然とした不安感によるものではなく、有用感の欠如と推進体制への不信感およびその底流にある基本的な生活意識の変化にあるといえる。従って、推進側にとっては、新しい価値観や判断基準を持つようになった公衆の要求に添った推進方針の見直しが必要になってきていると思われる。この新しい推進方針には、公衆が安全管理や推進計画等を確認でき、参加意識の得られるものであることが望まれる。つまり、我が国の当初からの自主・民主・公開の原則をあらためて再認識し、その徹底と具体化が必要とされてきている。

#### 4. パネルセッション

**近藤(司会)**：本パネルは、埼玉工業大学の井上名誉教授、学習院大学法学部の田中教授、東京大学医学部の草間助教授、(財)エネルギー総合工学研究所の大塚氏をパネリストにお迎えしています。最初に草間助教授と大塚氏より講演を載きたい。リスクを頻度の大小と被害の大小で分類すると、最近話題になっている低レベル放射線のリスクは頻度は低いが命にかかわるということで大被害に分類されると思うが、この点から問題提起をしてもらいたい。

##### 4.1 問題提起 (その1)

**草間**：たしかに低確率・高影響の事故というのが一番問題になる。一般の人達が心配していることは2つにしばられる。1つは、本当に原子力発電所は安全なのかということ、もう1つは、その事故とは関係なく放射線の影響はどうかということである。

事故が起こるかどうかについては、工学系の先生に答えていただかなくてはならない。もう一方の放射線の影響はどうかということについては、通常時も含めて放射線のリスクは「リスク」という言葉よりも「デトリメント」「損害」という言葉の方が良い。このデトリメントを評価する場合に不確実性が伴うが、これをどの程度許容するかは評価の目的による。

まず、放射線影響のリスク評価の目的は下記の5つに集約される。

- (1) 行為の正当化ないし最適化の判断をする目的。
- (2) 基準設定のため。
- (3) 異常事態あるいは事故等があった場合の介入措置、あるいは対策を導入する時の判断のため。
- (4) 実効線量等量を評価する場合、特に癌あるいは遺伝的影響に対する臓器・組織の感受性を算定するため。
- (5) 例えば、放射線作業に従事していた人が癌等で死亡した場合に放射線が原因としてどの程度関与していたかという原因確率の算定のため

このように、何のためにデトリメント評価をするかということを明確にした上で評価を行なうことが必要である。

次に、確率論的リスク評価における、放射線影響リスクの考え方を述べる。事象の発生

確率というのは工学的・技術的な判断であり主観確率といえるが、事象の結果は統計確率としてでてくるものである。この2つの確率は異質でしかも不確実性が異なるので、これを平行して考慮するのは大変困難である。従って、安全目標における確率論的リスクは工学系の専門家が使用することは可能と思うが、社会との接点としてPAの視点から使うことは多分不可能であろう。従って、放射線影響リスクと工学的な安全性についてはそれぞれの専門家が別々に答えるという形の方が受け入れられやすい。

3番目に、放射線影響リスクの問題点、すなわち分かっている事としては、生涯線量として200ミリシーベルト以下の放射線で癌が出るのかどうかということであり、もう1つは人に本当に放射線によって遺伝的影響が誘発されるのかどうかということ2点に集約される。

前者は、確率的影響に閾線量があるかないかという問題であるが、放射線安全という立場からも、1つの細胞に突然変異が起こったらそれが癌の原因になりうるという仮定をとる以上、閾線量がないという仮定は、メカニズムが分かるまでは取らざるを得ない仮定である。また、生涯リスクを予測するモデルの設定も大きな問題になっている。

最後に、今日のテーマである「社会と工学の接点」の観点から社会の方の立場で考えると、リスクマネジメントのために、また社会に対して安全性を分からせるために専門家はどれだけの努力をしているのかが問われている。推進派・反対派に分けられない専門家に対して社会がどれだけの信頼を持っているかということの中で、リスクコミュニケーション

が成立するのである。逆に、専門家は一般の公衆を正当なパートナーとして認め、分からせるための努力をし、相手の主張を傾聴する姿勢が絶対必要である。さらに、リスクのみではなく便益も積極的に理解してもらう努力も同じように重要である。

#### 4.2 問題提起（その2）

大塚：システムの安全性については、学識者の直感だけではなくキメ細かく系統的に分析することが非常に大切である。しかし、確率論的リスク評価をすると結果が数字になって出てくるので、この数字がどの程度信用されるかという問題になり、結局その分析をした人達を信用するかどうかの問題になる。また、世の中の人達がある物事を受け入れるかどうかの判断はリスクのみによって行っているわけではないということにも注意すべきである。

リスクを数字で表す習慣がつくと、許容されるリスクレベルという考えが出てくるが、当事者の間である基準を設け、それを目標にしてシステムを安全なものに築き上げるということは行うべきことであるけれども、自分達がここまで一生懸命やっているから世の中の人達は受け入れるべきであると思うところに大きな食い違いが出てくる。無条件に受け入れられるリスクレベルがあると思込むことや、種類の違うリスクを比較してそれが受け入れの基準になると錯覚してはならない。

この問題に関しては、人の気持ちというのが重要になるが、科学者というのは人の気持ちが分からない点では最右翼に近い。大多数の大衆の感覚を冷静に謙虚に受け止める気持ちを持つ必要がある。

### 4.3 パネル討論の主要点

**近藤：**「工学と社会の接点としてのリスク」というタイトルにあるようにリスク領域には2つの側面がある。1つは専門家のリスク評価とアクセプタンスのクライテリアの問題、もう1つは社会におけるリスクを伴う工学システムのアクセプタンスの問題である。これを全て工学者の課題とするのもおかしいし、全く別物と考えるのもおかしい。これがこのシンポジウムのタイトルの背景だ。

**井上：**各種のリスクを確率で表すと案外正直なところが出てくるが、この確率でもって住民を説得することはタブーである。

我々は、昔は災害を0にすることが安全管理であったが、今は、災害はどうしても0にならないので、そのことを念頭において管理をすることがリスクマネジメントであると思っている。ヒューマンエラーは絶対になくならないが、これをなくす努力を絶えず行なえば限りなく少なくすることができる。事故は必ず起きるが、その事故を大きくしないことがリスクマネジメントである。

**田中：**主観的な確率あるいは推定リスクというものは話題性の高いものにしないと素人大衆には伝わらない。素人大衆の啓蒙あるいは教育が職業上の責任の一端であるとお考えになるなら、データをいかに伝えるかということを含めて考慮すべきである。また、1度公表しただけでは不十分であり、リスクコミュニケーションというは何回でも繰り返し言わなければならないし、いろんなレベルの人達に合わせて納得のいくような表現方法で語らねばならない。そして、彼らに質問をもらいそれに答えることによって対話あるい

はフィードバックを設けることにより議論を深めるといふ工夫が必要である。一般大衆の安全に影響するような場合、もはや専門家だけの意志決定でなく、新しい現象として専門家は大衆とのコミュニケーションをせざるを得なくなったというのが実情である。

**近藤：**今日の一連の話のポイントの1つは、我々は、例えば居住地域を拡げるためにダムを作るように便益を求めてリスクのあるシステムを使うことがあるということで、リスク管理の問題が生じるが、これは専門家の職業倫理の問題としてこれまでも非常に重要な問題であったし、これから一層そうであり続けるということである。第2は、リスクの社会的評価の手続きがすっかり変わってきているという問題であり、パブリックドメインで専門家の判断とともに公衆の判断が大きな比重を占めるようになってきていることである。そこで、専門家は安全管理をする上で安全目標というものを持たざるを得ないが、それが政治的選択の場に出るといふ状況が生じている。つまり、専門家の決める安全目標なり基準というものに透明性といふかその論理構造を公衆に説明可能なものにする努力が非常に重要になってきている。ここで一番困難な問題はいわゆるロープロバビリティ・ハイコンシクエンスのシナリオに対する安全目標であるが、この答には全人類的な選択がからんでいてなかなか難しい。また、非常にリスクが小さければそれは無視できるという議論があるが、これにも専門家は判断の押し売りをしているのではないかという批難がある。これについては、専門家の判断だけの問題ではなく、社会倫理に立脚した説明を用意していくことが必要であろう。この際に、リスクに対

する工学者と公衆のパーセプションの違いが問題だといわれるがやや誤解がある。リスクに係わる社会的決定をどうするかが政治プロセスとして精緻化されていないということだろう。工学者の役割は専門家としてこの場へモデル・知識・情報を提供していくのが基本であろう。

**草間：**リスクを本当に「死亡」という形でとらえていいかどうかを検討する必要がある。チェルノブイリのあれだけの大きな事故でさえも、一般公衆でははっきりと放射能の影響で亡くなっている人はいない。従って、原子力事故の場合、癌と遺伝的影響以外の死亡はゼロにするというのは原則だと思う。要するに、「死」の質を考える必要があり、癌と遺伝的影響を死亡あるいは死亡率という形で表して良いかどうかである。この放射線影響を考える時は、デトリメント・損害という形で表す方が良い。すなわち、失われる寿命の期間・癌の発現分布・年齢分布等を考えていくことが大変重要である。

また、リスクとか危険の概念はいわゆるマスコミによって作られるというのを改めて認識し、専門家としてリスクコミュニケーションをどういう手段でやっていくのが一番適当かを考える必要がある。

**大塚：**最近、テレビが煙を出すという事故があったが、テレビメーカーの経営者は「今の社会にリスクのないものはない」などとは言わない。エネルギー産業に従事する人間には使命感があって然るべきでありたいが、自分達の産業を他の産業より一段上に置いた意識があるとすれば好ましいことではない。

**近藤：**そのことについては、そういわない経営者の方が不正直だという見方もある。その

問題の所在はテレビの専門家の間では常識だったし、マニュアルにも記してある。そこでも専門家は家庭のほこりの蓄積状況などを分析しながらある安全観に基づき安全設計を行なっている。それを言うか言わないかは別として。

**井上：**オランダは確率で安全日標を定め、今度イギリスも同様のことをするらしいが、日本では非常に難しいと思う。

**田中：**安全日標を設定する時には、専門家ではない政策担当者や社会人文科学の専門家が入っていたほうがよい。

**井上：**どのくらいで許容されるかという問題は、世間全体からみて決めるべきである。

**田中：**原子力のリスクというものは大衆にとって全く意味がない。だから、安全日標というものは大衆には意味がない。

**草間：**まさに、安全日標というのはいはり専門家のためのものであり、対公衆のものではない。対公衆を考えた時には、決定論的な説明が分りやすい。

**近藤：**放射線についていえば、ICRPの勧告値も私の解釈では安全日標である。これは専門家のものであるというのはいいが、これが国会などパブリックドメインで論じられるようになっているのが今日の風景である。

**大塚：**ICRPの専門家は勧告する前にその社会的影響の大きさを考えて社会科学の人々との間で検討してから勧告をすべきであると思う。

**草間：**ICRPの勧告は影響確率の評価において間違いはない。

**近藤：**今日は、安全性等については専門家が決めて、それがそのことによって公衆に納得

されて使われるという時代が変りつつあり、公衆に説明可能であり、しかも納得してもらわなければならないという状況の中で、社会と工学の接点に新しい問題が出てきているという事情をいろいろな立場からお話しをいただいたと思います。そして最後に国等における安全に係わる専門的な論議の場においても

公衆の構成員を意識したメンバーの構成を考えるべきであるという提案がされましたが、これはこの状況に応じた1つの方策を示したものと思います。

本日はありがとうございました。

(しもおか ひろし 主任研究員)

# 研究所のうごき

(平成2年7月1日～9月30日)

## ◇ 月例研究会

### 第72回月例研究会

日時：8月31日(金) 14:00～16:00

場所：航空会館(6階) 中ホール

議題：

1. 総合エネルギー調査会〔原子力部会〕の検討結果について  
(資源エネルギー庁 公益事業部原子力発電課総括班長 北川慎介氏)
2. 放射性廃棄物処分の研究開発動向  
——放射性廃棄物夏期セミナー報告を中心にして——(プロジェクト試験研究部主任研究員 蛭沢重信)

### 第73回月例研究会

日時：9月28日(金) 14:00～16:00

場所：航空会館(6階) 中ホール

議題：

1. サンシャイン計画の今後のあり方について  
(工業技術院サンシャイン計画推進本部技術班長 荒木由季子氏)
2. 分散型電源の系統連系問題について  
(プロジェクト試験研究部主任研究員 太田昭司)

## ◇ 主なできごと

- 7月2日(月) 第2回MTBE導入に関する調査・試験分科会
- 4日(水) 第1回火力発電所の大気影響評価技術実証調査委員会・モデル評価分科会  
第1回高度負荷集中制御システム検討委員会・拡大分科会  
第2回シミュレーション技術部会
- 5日(木) 第1回MTBE導入に関する調査・委員会
- 6日(金) 第1回業務用石油燃焼機器の低

NO<sub>x</sub>化技術に関する調査・燃料品質分科会

- 10日(火) 第1回火力発電所の大気影響評価技術実証調査委員会・開発技術評価分科会  
第1回実用発電用原子炉廃炉技術調査委員会
- 11日(水) 第1回業務用石油燃焼機器の低NO<sub>x</sub>化技術に関する調査・委員会
- 18日(水) 第2回エネルギー需要予測検討委員会
- 19日(木) 原子炉総合数値解析システム実用化調査準備会
- 20日(金) 第2回火力発電所の大気影響評価技術実証調査委員会・モデル評価分科会  
第1回実用発電用原子炉廃炉技術調査廃止措置物量等分科会
- 23日(月) 第1回業務用石油燃焼機器の低NO<sub>x</sub>化技術に関する調査・燃焼技術分科会
- 24日(火) 第36回企画委員会  
第2回火力発電所の大気影響評価技術実証調査委員会・開発技術評価分科会  
第5回高プルトニウム利用軽水炉検討委員会
- 25日(水) 第1回実用発電用原子炉廃炉技術調査廃止措置廃棄物再利用分科会
- 26日(木) 第2回MTBE導入に関する調査・調査分科会
- 27日(金) 第2回業務用石油燃焼機器の低NO<sub>x</sub>化技術に関する調査・燃料品質分科会  
第1回実用発電用原子炉廃炉技術調査廃止措置手続分科会
- 8月1日(水) 第1回分散型新発電技術実用化実証研究に関する調査委員会  
第3回シミュレーション技術部会  
第1回中小型軽水炉検討委員会
- 7日(水) 第1回FBR新技術フィージビリティ調査検討委員会及びシステム概念、基盤技術W/G分科

- 会
- 21日(火) 第6回高プルトニウム利用軽水炉検討委員会
- 28日(火) 第1回分散型新発電技術実用化実証研究に関する調査委員会・幹事会
- 30日(木) 第1回固体電解質型燃料電池発電システム調査委員会
- 9月3日(月) 原子炉総合数値解析システム実用化海外調査打ち合せ
- 5日(水) 第4回シミュレーション技術部会
- 第2回実用発電用原子炉廃炉技術調査廃止措置手続分科会
- 第1回構造材料の経年劣化特性に関する調査研究委員会
- 7日(金) 第3回MTBE導入に関する調査・試験分科会
- 12日(水) 第1回原子炉総合数値解析システム実用化調査委員会
- 13日(木) 第1回次世代ハウスエネルギー供給利用システム専門委員会
- 17日(月) 第2回中小型軽水炉検討委員会
- 18日(火) 第1回高度負荷集中制御システム検討委員会・制御システム分科会
- 19日(水) 第70回原子力プラント運転の信頼性に関する研究会
- 20日(木) 第1回高度負荷集中制御システム検討委員会・ロードマネジメント分科会
- 第1回家庭用電力最適運用機器システム検討委員会
- 21日(金) 第3回MTBE導入に関する調査・調査分科会
- 25日(火) 第3回業務用石油燃焼機器の低NO<sub>x</sub>化技術に関する調査・燃料品質分科会
- 第1回石油エネルギープラントの設備診断技術に関する調査委員会
- 26日(水) 第3回火力発電所の大气影響評価技術実証調査委員会・モデル評価分科会
- 第1回環境調和型ディーゼル燃料の開発に関する調査委員会

- 第2回FBR新技術F/S要素技術評価検討W/G分科会
- 27日(木) 第3回エネルギー需要予測検討委員会
- 第2回固体電解質型燃料電池発電システム調査委員会

#### ◇ 人事異動

- 7月1日付  
(退任)  
プロジェクト試験研究部 主任研究員  
大久保克彦 (出向解除)
- (採用)  
吉江照一 主管研究員に任命  
プロジェクト試験研究部に配属  
瓜生宏之 主任研究員に任命  
プロジェクト試験研究部に配属
- (異動)  
企画部・エネルギー情報センター・プロジェクト試験研究部  
副主席研究員 大河内一男 プロジェクト試験研究部に配属  
プロジェクト試験研究部  
主任研究員 白江孝俊 企画部・エネルギー情報センター・プロジェクト試験研究部兼務を任命
- 7月31日付  
(退任)  
総務部長副主席研究員 山口魏(定年退職)
- (採用)  
山口 魏 嘱託採用  
総務部長に任命  
(期間は平成3年7月31日迄)
- 9月30日付  
(退任)  
総務部 研究員 松本幸子 (依願退職)

#### ◇ その他

##### 海外出張

- (1) 松井一秋副主席研究員は、「新型炉国際シンポジウム'92」第11回プログラム委員会出席のため、8月11日から8月19日の間、アメリカへ出張した。

- (2) 重田潤主管研究員は、火力発電所の大気影響評価技術実証調査のため、9月2日から9月13日の間、イギリス、オランダ、西ドイツ、フランスへ出張した。
- (3) 村野徹専門役は、「Third European Community Conference on Radioactive Waste Management and Disposal」に出席するため、9月15日から9月23日の間ルクセンブルグへ出張した。
- (4) 三井英彦副主席研究員は、原子炉廃止措置に関する調査のため、9月22日から10月7日の間ヨーロッパ及びアメリカへ出張した。
- (5) 谷口武俊主任研究員は、「第1回国際安全科学会議」出席及び海外機関訪問のため、9月23日から10月6日の間ヨーロッパ及びアメリカへ出張した。



季報エネルギー総合工学 第13巻第3号

---

平成2年10月20日発行

編集発行

財団法人 エネルギー総合工学研究所

〒105 東京都港区西新橋1-14-2

新橋S Yビル(6F)

電話 (03) 508-8891

---

無断転載を禁じます。(印刷) 和光堂印刷株式会社