

JAERI-Tech

96-017



核熱利用システムの構築に関する研究

1996年5月

稲葉良知・小川益郎・菱田 誠

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-11 茨城県那珂郡
東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター
(〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内)で複写による実費頒布をおこなって
おります。

This report is issued irregularly.
Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research
Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy
Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1996

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 日立高速印刷株式会社

核熱利用システムの構築に関する研究

日本原子力研究所東海研究所高温工学部

稻葉 良知・小川 益郎⁺・菱田 誠

(1996年4月1日受理)

核熱利用システムを「原子力の熱エネルギーを利用するため、色々な構成要素（プロセス）－発電プロセス、熱交換プロセス、メタン製造プロセス、水素製造プロセス、淡水化プロセス、エネルギー貯蔵プロセスなど－を有機的に組み上げた1つの組織・集合体」と定義する。このような核熱利用システムにおいて、「個々のプロセスの修正・改新、新たなプロセスの創出、プロセスの組み合わせ方」などを考える。また「構築したシステムの提案理由を明確にすること」を本研究課題とする。本報告では、核熱利用システムの構築に関する研究について、過去の研究例と、本研究の動機、手段・方法、内容の概略、計画などを述べる。また、核熱利用システムに関連して、エネルギー貯蔵、エネルギー輸送、エネルギー変換技術の現状についても概観すると共に、環境保全に対する価値判断において、エクセルギー及び環境の内部化経済の観点から探る。

Study on Development of Nuclear-heat Utilization System

Yoshitomo INABA, Masuro OGAWA⁺ and Makoto HISHIDA

Department of High Temperature Engineering
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received April 1, 1996)

A nuclear-heat utilization system is defined as an organization or an assembly which consists of various elements(processes) such as an electric-generation process, a heat-exchange process, an energy-storage process, a methane-production process, a hydrogen-production process, a desalination process, and so on. Modification and improvement of available processes, construction of innovative processes, and combination of these processes are performed in the present study to develop a nuclear-heat utilization system. We write a scenario of the nuclear-heat utilization system developed, that is, we propose a catch-phrase of the nuclear-heat utilization system. Review of other nuclear-heat utilization systems, the motivation of the present study, the means and method, the content, and the plan are presented in the report. In addition, the present status of technologies of energy storage, transport, and conversion are also surveyed. The estimation of values of the environment conservation is described from the view point of exergy and internalization of environment into economy.

Keywords : Nuclear-heat Utilization System, Methods of Nuclear-heat Utilization, Energy Storage, Energy Transport, Energy Conversion, Environment Conservation, Exergy, Internalization of Environment into Economy

+ Office of Planning

目 次

1. 序	1
2. これまでの核熱利用	4
2.1 核熱利用の過去の実例	4
2.2 核熱利用システムの検討例	5
3. 核熱利用システムの構築に関する研究	8
3.1 核熱利用における問題点	8
3.2 本研究の動機と目標	10
3.3 手段・方法	13
3.4 研究の概略	14
4. エネルギー技術の現状	18
4.1 エネルギー貯蔵	18
4.2 エネルギー輸送	22
4.3 エネルギー変換	23
5. 環境保全の指標	26
5.1 エクセルギー	26
5.2 環境の内部経済化	28
6. まとめ	30
参考文献	31

Contents

1. Introduction	1
2. Other Nuclear-heat Utilization Systems	4
2.1 Examples of Practical Nuclear-heat Utilization Systems	4
2.2 Examples of Design Plans of Nuclear-heat Utilization Systems	5
3. Development of Nuclear-heat Utilization System	8
3.1 Problems in Nuclear-heat Utilization	8
3.2 Motivations and Targets	10
3.3 Means and Methods	13
3.4 Outline of the Study	14
4. Present Status of Energy Technologies	18
4.1 Energy Storage	18
4.2 Energy transport	22
4.3 Energy Conversion	23
5. Index of Environment Conservation	26
5.1 Exergy	26
5.2 Internalization of Environment into Economy	28
6. Concluding Remarks	30
References	31

1. 序

エネルギー利用における現在までの変遷については、例えば、「人類とエネルギー」⁽¹⁾や「エネルギーと文明」⁽²⁾といった対比の中で、エネルギー供給・利用の発展の歴史が紹介されている。ここではまず、第二次世界大戦後の日本におけるエネルギーの変遷を概観する^(1~4)。

日本では、1954年から1971年までの高度成長時代には、石炭から石油への「エネルギー流体革命」によって燃料転換が急速に進展した。併せて、原子力の平和利用に関する研究・開発が大いに進められ、原子力関連産業は飛躍的に発展した。さらに、1973年10月の第四次中東戦争勃発を契機とした第一次石油危機、1979年2月のイラン革命に端を発した第二次石油危機が生じ、これら2回の石油危機は、省エネルギーと石油代替エネルギー源としてエネルギーの安定確保の名のもとに原子力の開発を促進させた。しかしながら、2度の原子炉の大きな事故、即ち1979年のスリーマイルアイランド（TMI）事故と1986年の切尔ノブリ事故、1980年代の石油の供給過剰及び経済の低成長時代の到来などによって、原子力発電所の新規立地は、1970年代に11ヶ所、1980年代に5ヶ所、1990年代には1ヶ所と減少の一途をたどった。それでも1991年の日本の原子力発電による電力量は、総発電電力量の24.1%を占めており、42基の原子力発電所が2,123億kWhの電力（発電設備容量は3,324万kW）を供給した。

世界でも1991年の原子力発電電力比（総発電電力量に占める原子力発電電力量の割合）は、フランスの72.7%を筆頭に14ヶ国で20%を超えており。ちなみに1991年末で、世界で422基の原子力発電所が運転されており、3億4,300万kWの発電設備容量を持つに至った。これらの数字だけからは、原子力発電は不動の地位を獲得したかのようであるが、例えば、原子力発電電力量比が52.4%もあるスウェーデンでは、代替エネルギーの開発を前提に2010年までに原子力発電所を全廃、とりあえず1995年と1996年に1基づつ原子力発電所を廃止することを1988年に決めた（しかし、1991年には、廃止を見送る決議をしている⁽⁵⁾）。イタリアでは、1987年11月の国民投票により原子力発電の5年間の停止（モラトリアム）を決めた⁽⁵⁾。スイスでも、1990年の国民投票によって、今後10年間原子力発電所を建設しないことを決めた。（ただし、既存の原子力発電所の廃止は否決され、現在も運転が続けられている⁽⁵⁾）。また、ドイツ、アメリカでも、新規の原子炉建設・開発から後退している。このように、原子力をすべてなくそうという方向ではないが、世界的に原子力に対する風当たりは強い。

もし、原子力エネルギーを今後とも使い続けるなら、銘記すべきことがある。それは、廃炉に関してである。例えば日本では、1995年に運転年数が30年となる原子炉が1基（日本原子力発電（株）の東海発電所、1966年7月運転開始）、1999年から毎年このような原子炉（日本原子力発電（株）の敦賀1号、1970年3月運転開始、関西電力（株）の美浜1号、1970年11月運転開始、東京電力（株）の福島第一原発1号、1971年3月運転開始、など）が増加し、2005年には、運転年数が30年を超える原子炉が全部で12基となる。原子炉の寿命延長、廃止措置、廃炉分の新規建設が必要となる。世界的には日本と同様にほとんどの国で、

原子炉の高経年化（運転期間が30～40年となる原子炉）はそれほど進んでいないが、アメリカでは、3分の2近くの原子炉が運転年数30年を超える原子炉である。アメリカ同様、イギリスでも原子炉の高経年化が進んでいる。

このようなエネルギー・経済状況の中に置かれた原子力において、核熱利用システムの構築に関する研究で行うべきことを本報告で考えて行く。即ち、熱利用システムの構築に関する研究に関して、研究の動機、目標、方法・手段、内容の概略、計画などについて、本報告で述べる。

その前に、熱利用システムの構築に関する研究の対象及び範囲を明確にしておく。

「システム」という単語がかなり漠然とした意味合いを含んでおり、対象の明確さを損ねているようである。そこで、「システム」なる単語の通常使われている意味を調べると、広辞苑では、「システム」は、組織、制度、系統、体系と記されている。“systematics”なる単語（系統学、分類学）から類推されるように、システムという単語は、さらに、系統学的に、分類学的に、組織学的に、整然と組織化された・分類された・系統立てられた物、もしくはその方式といった意味合いを持つ。以下に典型的な使用例を挙げ、括弧内にその意味を記す。

- ・ファイリングシステム（方式）
- ・配管システム（ネットワーク、系統）
- ・車の製造システム（組織、集合体）
- ・教育システム（制度）
- ・消化システム（系統、集合体）
- ・ローマ字システム（規則的にまとめられた集合体、体系）
- ・サウンドシステム（より強力な機能が附加されたもの）

「システム」なる単語は、様々な使い方をされるゆえに、わかりにくい、何にでも使える、という2面性を持つ。したがって、「システム」を付けると、漠然とそのものに関係あるものを指すことができ、しかも、組織的、系統的、分類学的な整然とした感を受けるため、良く使われているわけである。「システム工学」なる教科書^(6,7)も良く見受けられ、そこには⁽⁶⁾、システムとは、「多数の構成要素が有機的な秩序を持ち、同一目的に向かって行動するもの」と限定的に書かれており、システム工学とは、「システムの目的を最も良く達成するために、対象となるシステムの構成要素、組織構造、情報の流れ、制御機構、などを分析し設計する技術」と定義されている。

以上のように、「システム」という言葉は、一般に様々なに使われている。一方、「システム工学」は、システムを構築するための汎用的方法論に関する基礎的工学として大方の一貫をみている。熱利用システムの構築に関する本研究では、システム工学で定義されているシステムと同様のある特殊な目的を持つ限定的なシステムを作ることが課題である。即ち、熱利用システムを、

「原子力の熱エネルギーを利用するため、色々な構成要素（プロセス）－発電プロセス、熱交換プロセス、エネルギー変換プロセス、エネルギー貯蔵プロセス、エネルギー

輸送プロセス、メタン製造プロセスなど一を有機的に組み上げた1つの組織・集合体」と定義し、熱利用システムの構築に関する研究では、

「個々のプロセスの修正・改新、新たなプロセスの創出、プロセスの組み合わせかた、などを考えると共に、構築したシステムの提案理由、簡単に言えば、売り文句を明確にする」

ことを研究対象とする。尚、後者のシステムの提案理由の明確化の過程を、ここでは「シナリオ作成」と呼ぶ。また、システムの構成要素をサブシステムと呼ぶこともあるが、ここでは「プロセス」と呼ぶことにする。熱利用システムの構築に関する研究の範囲は、システムの構築、シナリオ作成、構築したシステムの簡易評価、選択した幾つかのシステムの詳細設計までである。尚、システムの詳細評価まで行うが、これについては、所内関連課室と協力して行う。

以下の章において、「第2章 これまでの核熱利用」では、今までに行われた研究・開発・商用化された例、その成果・現況の捉え方、認識について、「第3章 核熱利用システムの構築に関する研究」では、問題点、既に多くの研究・開発がなされ問題を解決すべく取り組んできたにもかかわらず、今、この研究を始める動機、目標（本研究成果を適用し得られるもの）、手段・方法、本研究内容の概略について、「第4章 エネルギー技術の現状」では、エネルギーの貯蔵・輸送・変換における技術の現状について、「第5章 環境保全の指標」では、環境保全の指標として提案されているエクセルギー、経済分野における環境の内部経済化について述べ、「第6章 まとめ」では、以上を簡単にまとめる。

2. これまでの核熱利用

これまでに行われた核熱利用について、時期、場所、国名、対象、利用方法、利用状況、認識・評価、などについて述べる。

2.1 核熱利用の過去の実例

以下に過去の核熱利用の主な実例を列挙する^(1,8~11)。

- ・1962年 ハルデン炉（ノルウェー）；紙パルプ工場へ蒸気供給（15トン/毎時）。
- ・1962年 コールダーホール原子力発電所（英国）；ワインズケール工場へ蒸気供給。
- ・1964年 オゲスタ重水炉（スウェーデン）；団地へ温水供給（9,000戸、75~120°C）。軽水炉への炉型変更と石油に対する経済性の低さのため中止。現地の担当者は、石油危機の折に温水供給を続けておけば良かったと語った。
- ・1972年 ダグラスピント発電所、ブルース発電所（カナダ）；重水製造プラントへ蒸気供給。
- ・1972年 東海発電所 日本原子力発電（株）（日本）；養魚に温排水供給。1982年までに、他6ヶ所の国内原子力発電所で漁業用に温排水供給。継続中。
- ・1973年 BN-350ナトリウム冷却高速炉（旧ソ連）；1989年から海水淡水化（80,000m³/日の水）と発電（80MW）。
- ・1975年 セント・ローレン原子力発電所（フランス）；温室栽培用温排水供給。1989年までに、他6ヶ所の原子力発電所の農業への温排水供給。継続中。
- ・1979年 ゲスゲン原子力発電所（スウェーデン）；ニーダーゲスゲン段ボール工場への蒸気供給（81トン/毎時）、継続中。
- ・1979年 高浜原子力発電所（日本）；ガラス温室へ温排水を供給。
- ・1980年代（ドイツ）；ザリーネの製塩工場へ蒸気供給。
- ・1985年 ベツナウ原子力発電所（スイス）；温水供給（2,000戸、80~125°C）。レフェーナ計画と呼ばれ、原子力発電をめぐり国民投票がしばしば行われる一方で、発電所が地域社会との間に新しい関係を作ることができたものであり、原子力発電所との共存が実施された意義は大きい。
- ・ピカリング原子力発電所（カナダ）；鱒養殖へ温排水（45,000トン/日）。
- ・ブルース原子力発電所（カナダ）；農業利用（180°Cの蒸気100トン/毎時）。

以上の核熱利用における状況を以下にまとめると。

（1）産業用利用では、安定供給及び安定需要が供給・需要両者にとって大きな問題である。安定供給については、核熱利用側では、突然の原子炉停止に備えての補助熱源が必要となるが、上記の産業利用では、それまで化石燃料を熱源として操業していた工場であり、核熱利用に切り替え旧来の化石燃料熱源を補助熱源として利用する、とい

った利用方法であり、まったく新たに補助熱源設備を作り核熱利用を行う際には、補助熱源への設備投資が利用側の負担となる。安定需要については、原子炉プラント側では、突然の核熱利用側の操業停止に備えた熱利用補助設備（除熱設備）が必要となる。上記の産業利用では、例えば、全核熱のわずか1%を利用しているに過ぎない場合など、原子力プラント側で十分対処できる範囲内である。しかしながら、原子炉の熱出力のかなりの割合を利用する場合には、核熱利用側の緊急操業停止に伴う原子炉の緊急停止や補助除熱設備が必要となるであろう。

- (2) 民家用熱利用については、核熱利用のための社会的基盤が整備されていることが第1条件であり、スイスのように暖房利用に公的補助が行われ、かつ、暖房利用期間が長いこと、環境規準が厳しく、河川への冷却水放出温度が（河川温度+1°C）と制限されており排熱利用が有効であること、などが核熱利用の成功の秘訣と言えそうである。
- (3) 農業、漁業における原子力発電所の温排水の利用は、今後の立地促進の点からも有効な利用法である。

量的（1基の原子力プラントの発熱量に占める熱利用量、全原子力プラント数に占める核熱利用原子力プラント数）に未だ本格的な核熱利用が、日本も含めて世界的に行われているとは言い難い。

2.2 核熱利用システムの検討例

次に、今までに検討された種々の核熱利用例を示す^(1,4,11)。

- ・ 化学プラント（メタノール、アンモニア、エチレン製造など）における熱利用
- ・ 石油化学コンビナート、石油精製における熱利用
- ・ アルミニウム製造における熱利用
- ・ 粗鋼製造、製鉄における熱利用
- ・ 紙・パルプ工場における熱利用
- ・ 石炭の液化・ガス化における熱利用
- ・ 海水淡水化
- ・ 水素製造における熱利用
- ・ 热電併給、その他の蒸気供給

以上、核熱利用の検討例を羅列した。核熱を利用する場合には、大量に需要があることが必要であり、また、熱利用技術を新たに開発しなければならないものもある。そこでまず、世界における大量の熱需要先を選びだし、次にその中で、現在の技術でほぼ実施可能なもの（a）、近い将来可能なものを（b）、まだ研究・開発段階で課題が多いものを（c）、という3種類に分類された化学産業及び関連産業における核熱の利用分野の例を示す⁽¹²⁾。表1の（世界総生産量）/（原子炉1基による生産量）なる値が大きいほど、核熱利用にとって望ましい。

このように様々な核熱利用が検討されたが、実現されていない理由を以下に列挙する。

(1) 热利用側の要請の変化

例えば、アメリカのダウ・ケミカル社とミッドランド電力が始めたプロジェクトでは、化学工業自体の変質による蒸気需要の減少、さらに発電所建設の遅れなどから核熱利用に至らなかった⁽¹⁾。

(2) 社会状況の変化

例えば、日本の原子力製鉄では、1968年から1980年まで精力的に原子力製鉄について検討されたが、日本経済が石油危機以降成長経済へ移行し、研究開発の牽引役であった鉄鉱業界からの需要が減退した⁽⁴⁾。

(3) 経済性

一時の石油危機から脱し、1980年代の石油の供給過剰状態による石油価格の暴落のため、原子力プラントの新たな開発への投資が減少した。即ち、他のエネルギー源とのコスト競争である。

1990年時点において、核熱のコストが約4~5円/Mcalである。化石燃料だけでは、重油が約1.9円/Mcal、LNGが2.3円/Mcal、石炭が1円/Mcal（IEA資料より）であり、これらにボイラーコストを上積みすると、重油と石炭が4円/Mcal未満、LNGが4円/Mcal強となり、化石燃料利用コストは核熱コストに比べ安い程度である。

熱利用の社会基盤が整っていないことや、原子炉が緊急停止した時のための補助熱源が核熱利用者側に必要となる場合も経済性を悪化させる要因となる。

尚、核熱や化石燃料のコストについては評価が難しいため、以下に電力コスト^(13,14)から核熱コストを大雑把に推定した別の結果を示す。

1kWh当たりの耐用年発電原価^(13,14)（送電端）は、図1に示すように、

原子力	9 円	（燃料費の割合； 2割）
石油火力	11 円	（燃料費の割合； 6割）
LNG火力	10 円	（燃料費の割合； 5割）
石炭火力	10 円	（燃料費の割合； 4割）

とされている。但し、為替レートは、144円/ドルであり、原子力の発電原価には、原子力発電所の廃止措置費用を含む。また、法定耐用年数は、化石燃料発電では15年、原子力発電では、16年である。ここで、原子力の発電効率を33%とし、電力の100/33倍の核熱が電力と同じ9円で手に入るとすれば、核熱のコストは、3円/kWhとなる。これは、約3.5円/Mcalに等しい。但し、これは、カスケード利用などにより核熱を100%使いきった場合である。原子力熱出力の70%を利用した場合には、4.9円/Mcalとなる。石炭火力、石油火力、LNG火力の発電効率を40%とすると、同様にして、石炭とLNGは約4.6円/Mcal、石油は約5.1円/Mcalとなる。

しかしながら鈴木⁽¹⁵⁾は、「もともと、原子力は自らの技術進歩によるコストダウンを通じて火力に対する競争力を高めてきたというよりは、火力の側の原価上昇によって相対的な低廉性を維持してきたのが実態であり、現在の原子力と火力の発電原価の接近は化石燃料価

格が低位に安定している局面では当然の結果とができる。」と解説している。また、原子力と石炭火力の経済性評価では、評価方式（均等化原価方式、初年度原価方式）や使用するデータ（燃料価格の予想値など）などによって、どちらが経済的かが入れ代わることを示している。

2000年もしくは2000年代初頭に商業利用を開始することができる石炭（微粉炭、石炭流動床）火力発電所、LNG火力発電所、原子力発電所に焦点をあてた発電コストの見通しが国際原子力機関（IAEA）と国際発送配電事業者連合により報告されている⁽¹⁶⁾。実質金利年率5%の場合には、データが提供された15ヶ国の中13ヶ国で、原子力発電は優先度が高いオプションである。例えば、原子力発電の発電コストは、

国名	石炭火力	LNG火力
日本	85%	69%
イギリス	102%	111%
ドイツ	66~79%	—
フランス	65%	60%
アメリカ	85~119%	86~90%
カナダ	88%	57%

一方、実質年利が10%の場合には、原子力発電が優位を保てるのは5ヶ国（常に原子力発電が優位に立っているのは日本とフランスの2ヶ国だけである）であり、3ヶ国で火力発電と原子力発電が均衡、他の5ヶ国では、石炭火力が優位となっている。

以上のように、現時点では、評価方式や使用するデータの不確定性、さらに、化石燃料保有国とそうでない国などを考慮すると、一概にどちらが経済的かについては明確ではないことがわかる。

（4）原子力発電所の事故の影響

TMI、 Chernobylにおける事故による一連の原子力モラトリアム、原子力反対運動の活発化。

（5）原子力発電システムの工学的未完結性

放射性廃棄物の処理処分問題、燃料再処理問題。

などが考えられる。

3. 核熱利用システムの構築に関する研究

3.1 核熱利用における問題点

前章に記したことから、現時点において、核熱利用が産業、運輸、民生分野において本格的に商用化されていない大きな問題点として、以下の点が挙げられる。

- (1) 常に大容量の熱が供給され、この熱を利用して何か製品を作ると、大量の製品ができるがゆえに、製品の大きな需要がなければならない。
- (2) 原子力プラントの突然の核熱供給停止及び核熱の利用停止に備えた設備が必要となり、このため経済性を悪化させる。
- (3) 原子炉の建設におけるリードタイムが長くなり、この間に、社会情勢や熱利用者側の情勢の変化により核熱利用が中止される。
- (4) 民生利用では、地域固有の問題（暖房、冷・暖房、など）や季節利用があり、核熱利用の汎用化・定常的利用が困難である。
- (5) 現時点において、核熱のコストが化石燃料のそれに比べて安いとは言えない。
- (6) 原子炉そのものの問題
 - ・大きな二つの事故による原子炉の安全性に関する公衆の理解、即ち、パブリック・アクセプタンス（PA）が必要である。
 - ・廃棄物処理、処分に関して、工学的に完結していないと考えられている。
- (7) 価値判断基準が多様化、変化しており、エネルギー論、経済論、文明論、などにおいて、様々な観点から議論され、意志統一が非常に困難である。
- (8) 核熱利用のニーズ、必要性の議論が沸き起こらない（原子力は発電だけでいいではないか、という考えがある）。
- (9) 核熱のカスケード利用では、一地域に様々な産業・民生利用が集結していることが望ましいが、新規のコンビナート開発はなかなか困難である。
- (10) 原子力プラントが工業地域と離れている。
- (11) 原子力プラント側は、需要側の必要なエネルギー形態に必ずしも対応していない。

以上の核熱利用における問題点をまとめると、技術的問題と社会的問題に分けられ、以下の項目に分類できる。

(I) 技術的問題

- ①核熱の需要側と供給側との間における、時間的・空間的・質的・量的・觀念的な不一致
- ②工学的未完結性

(II) 社会的問題

- ①相反する（トレードオフの関係にある）判断基準、例えば、経済性と安全性、経済性と環境保全性、などを如何に融和させるか？（価値判断基準の多様化）

- ②過去に起きた2つの大きな事故、TMI事故とチェルノブイリ事故による原子力に対する逆風を如何に克服するか？原子炉建設に対するパブリック・アクセプタンス（PA）を如何に形成するか？原子炉の立地促進を如何に促進するか？即ち、多様な価値判断基準の中で、如何に合意を形成するか？
- ③核熱利用のニーズ（現在、ほとんどない）を如何にして作り出すか？（価値判断基準の変化）

（I-①）について、簡単に記す。

成田⁽¹⁷⁾は、民生利用におけるエネルギー・リサイクル・システムにおいて解決すべき3つのミス・マッチを指摘している。温度条件ミス・マッチ、空間的ミス・マッチ、時間的ミス・マッチである。これを核熱の供給と需要にあてはめると、時間的・空間的・質的・量的・観念的ミス・マッチ（以後、ミス・マッチを不一致と記す。）が挙げられる。時間的・空間的・量的な点は、原子力の特徴であり、逆に欠点でもある。

時間的不一致、即ち、定量供給については、原子力発電所のように、燃料費が発電原価の約2割を占め、設備費が約8割であるような場合（化石燃料による発電では、燃料費の割合は、石油火力で6割程度、LNG火力で5割程度、石炭火力で4割程度であり、原子力の2～3倍と高い。）^(13,14)には、発電原価を下げるために、設備利用率を高めることが要求され、負荷変動運転には向いていない。原子力発電所の負荷変動運転を考えるより、定量供給を活かす、もしくは、エネルギー貯蔵などにより補うことを考えるべきであろう。しかしながら、中・小型原子炉の概念検討はこれまでにも多くなされてきた。また、原子炉の出力調整運転も一部で行われている。また、このような既に供給が行われている時の時間的不一致のみならず、エネルギー供給設備の建設に要する時間が長くなってしまっており、需要側の要求に迅速に対応できないという時間的不一致もある。

空間的不一致、即ち、核エネルギー供給側と需要側が遠く離れている点については、電力輸送網という社会基盤が整っている日本では、大きな問題ではないが、原子力の熱を利用する場合には、熱輸送網が整備されていない日本では大きな問題である。このような社会基盤の整備の状況については、他の国々においても同じことが言える。

量的不一致、即ち、大量・高密度の核エネルギーを供給できるが、需要側において電力以外、つまり熱の形の大量のエネルギーを必要とするケースが多くはないことが問題である。特に、核熱による化学製品の製造において、原子力プラント1基でその国の化学製品の全量もしくはそれ以上作ることになってしまう場合がある。したがって、核熱で生産する物の需要が大きいことと需要が伸びていることが必要である。大量のエネルギーを供給する側からは、表1に示したように石油精製などが有望である。

質的不一致、即ち、原子力で供給できるエネルギー形態が、現時点ではほとんど電気であるのに対して、需要側では、熱や電気以外の二次エネルギーを必要としている場合もある。また、（I-②）において、工学的未完結性とは、放射性廃棄物の処理・処分を行う施設が完備されていないということである。このため、一部に観念的不一致が誘発される。

以上の技術的・社会的問題を表形式にまとめると、表2のようになる。

3.2 本研究の動機と目標

核熱利用に関して、既に多くの研究・開発がなされ、多くの研究者が表2に挙げたような技術的・社会的問題を解決すべく取り組んできた。にもかかわらず、今なぜ、新たにこの研究をするのか？について、簡単に言えば、

- (1) 技術情勢の変化
- (2) 社会情勢の変化

があった故に、今一度、核熱利用システムを見直してみよう、ということである。即ち、本研究では、1960年代から研究・開発されてきた核熱利用について、近年の飛躍的な技術革新・進歩を受けて、また、地球環境保全という経済性と相い反する観点から見方を変えて、核熱利用システムの修正もしくは創出の可能性を探ろうとするものである。

第1章では、20世紀中葉からのエネルギーの歴史の中での原子力について簡単に述べた。核熱利用システムを考えるうえで、将来のエネルギー情勢について展望することも重要であるので、ここで、我々を取り巻くエネルギー情勢とその今後について概観しておく。

人類が、経済成長、エネルギー・資源、環境の三者の間のトレード・オフに遭遇している現況は、21世紀問題として「トリレンマ」⁽¹⁸⁾と呼ばれている。我々は、環境を保全しつつ、エネルギー・資源・食料を確保しつつ、持続可能な経済成長を成し遂げなければならない状況にある。これが非常に困難であると考えられる最大の理由は、世界人口の爆発的増加、つまり現時点で約56.6億の人口が、21世紀中葉にはほぼ2倍の100億に達するということに依る。図2に1870年から現在までの世界の人口、エネルギー消費量、並びに平均気温の上昇の程度を示す。この図から人口増加に伴い、エネルギーの消費が大きく伸びていることがわかる。そして、エネルギー消費の伸びについて、二酸化炭素などによる地球温暖化のため気温が上昇していることもわかる。このように、人口増加に起因する地球規模の環境問題、例えば、地球温暖化、酸性雨、海洋・河川汚染、オゾン層破壊、砂漠化などが昨今大きく取り上げられている。日本では、工場排水や自動車の排気ガスなどに対し、公害として以前から対策が施してきた。このような公害、環境問題の原因は、もちろん、公害、環境汚染を生じさせる有害物質の排出・廃棄であることに何等疑問の余地はない。しかしながら、人類が火を使いだした時には、環境問題はなかった、認識されていなかっただけかもしれないが、少なくとも光化学スモッグなど、人々の健康を害するような事態は起こらなかった。とすれば、公害、環境問題の原因は、有害物質の排出・廃棄の絶対量ということになる。地球環境が持つ自浄能力以上に有害物質を排出・廃棄すると、環境問題を引き起こすのである。人類と地球環境との共生なしに、人類社会の持続可能な発展を成し遂げることはできない。したがって我々は、まずできる限りエネルギー消費を抑え、それでも利用しなければならないエネルギーに対して、エネルギーの高効率利用や有害物質の環境への排出・廃棄の抑制などを行いつつ、持続可能な発展を成し遂げなければならない。このとてつもなく大きな問題に一刻も早く取り組み、21世紀の危機を回避しなければならない。

エネルギーの利用については、省エネ、効率化、最適利用、有効利用、代替エネルギーの開発など、様々な捉えかたで対処されている。また、一口に省エネと言っても、効率化や有効利用などの色々な意味を含んでいる。これらを、図3に示すようなエネルギーフロー概略図の中で考えると、

- (1) 化石燃料やウランなどの一次エネルギー源の使用量を極力減らす
- (2) 化石燃料の代替となるエネルギーを利用する、即ち、再生可能エネルギー（太陽、水力、地熱、風力、潮力など）を利用する
- (3) 一次エネルギーから製品や二次エネルギーを製造する時に、同じエネルギー量で多く製造する（効率化）、もしくは、同じ製造量を少ないエネルギーで賄う
- (4) 廃棄している余剰エネルギーの有効利用、再利用を図る
- (5) 有害物質等は移出抑制、もしくは、再利用を図る
- (6) 製造した物品の再利用を図る

などによって、限りある資源を、限りある地球環境下で利用しなければならない。

上記のような様々な努力をしなければならないが、人口の爆発的増加により、化石燃料を全く使わないではいられないだろう。現在、先進国においても化石燃料の一次エネルギーに占める割合は、ほとんどの国で5割以上である。図4に海外事業統計による1991年の発電における一次エネルギー源の割合を示す⁽¹⁷⁾。化石燃料の確認可採埋蔵量は、毎年変わっているが、石油、天然ガスは、それぞれほぼ半世紀ほどと言われている。また図5⁽¹⁴⁾に示すように、約2世紀以上にわたってあると言われる石炭は、世界に均等に分布していることもあり、今後使用量が増加すると予測されている。図6は、将来の世界におけるエネルギー消費量を見たものである⁽¹⁸⁾。図6からわかるように、2050年には世界のエネルギー消費量は現在のほぼ2倍になる。一方、1991年における1人1年当たりのエネルギー消費量（石油換算）は、

日本	: 3.54 トン/人年
アメリカ	: 7.65 トン/人年
ドイツ	: 4.35 トン/人年
イギリス	: 3.80 トン/人年
フランス	: 4.07 トン/人年

であり⁽¹⁴⁾、先進国の平均が約5トン/人年、発展途上国の平均値が約0.5トン/人年と言われていて⁽¹⁸⁾。2050年（人口100億人）に、すべての国が日本程度のエネルギーを消費すれば、354億トン/年のエネルギーが必要となる。これは、1990年の世界のエネルギー総使用量80億トン/年の4.4倍である。もちろん、すべての国が日本のように工業国ではないので、この354億トン/年というエネルギー消費量は大きすぎる予測値かもしれない。尚、日本は、1960年から1990年の約30年間で、エネルギー消費量が5.06倍に伸びた⁽¹⁴⁾。発展途上国のエネルギー消費量が、2025年までに1990年の約5倍になり、省エネを勧めれば約3倍に抑えられるという試算もある。いずれにしろ、2050年に人口が100億人になればエネルギー消費量は現在の少なくとも2倍（160億トン/年）にはなりそうである。1991年から2050年までに、90億トン/年から160億トン/年に直線的にエネルギー消費量が伸びるとすると、7,200億トン（石油換

算) のエネルギーが必要となる。1992年における石油、石炭、天然ガスの確認埋蔵量の合計が約7,400億トン(石油換算)であるから、もし自然エネルギー及び原子力エネルギーを使わなければ、2050年にはほぼ化石燃料を使い切ることになる。2050年に現在の4倍の320億トン/年のエネルギーを消費し、しかも、石炭、石油、天然ガスだけでこのエネルギー消費量を賄おうとすれば、これらの化石燃料(確認埋蔵量)は、2030年でなくなってしまう。但し、残存究極可採量は、確認埋蔵量の10倍とも言われているので、化石燃料が完全になくなるわけではない。しかしながら、確認埋蔵量を超える量については、採掘が困難になるため、その経済性の悪化という問題があり、それが技術的に克服できたとしても、化石燃料の大量消費に起因する環境問題を避けて通ることはできない。したがって、原子力エネルギーと自然エネルギーの利用は、必要欠くべからざるものである。特に、工業用のエネルギー源として、現在既に使用されている水力、地熱といった自然エネルギー以外のエネルギー：太陽、波力、潮流などは、後述するように、エネルギー密度、安定供給性、二酸化炭素排出量、エネルギー収支などの点において、原子力エネルギーに大きく劣っている。

1994年6月、新しい「長期エネルギー需給見通し」(日本の総合エネルギー政策の指針となるものであり、政府と民間が最大限の努力を行うことで達成されるべき目標として、日本のエネルギー需給構造を示したもの)が総合エネルギー調査会(通商産業大臣の諮問機関)から発表された。1990年に発表された前回の長期エネルギー需給見通しと併せて、原子力について、表3と表4に簡単に示す。表3に示したように、今回の長期エネルギー需給見通しにおける原子力発電所の年度末設備容量は、2000年で440万kW、2010年で150万kW、1990年と比べて下方修正されている。しかしながら、今回の長期エネルギー需給見通しにおける年間発電電力量ベースでは、1990年と比べて、原子力発電所による電力量は、2010年で60億kWh増産の予定になっている。

本研究は、上記のような将来の原子力に対する期待の中、エネルギー供給側から、エネルギー需要側とも密に連携しつつ、経済発展・エネルギー確保・環境保全の並立的成立を目指し、この問題解決の一助となるような核熱利用システムを構築しようとするものである。さらに、

- (1) 核熱利用への道を開くことのできるシステム
- (2) 原子力需要を新たに作り出すことのできるシステム
- (3) エネルギー変換・輸送・貯蔵に関する技術の研究・開発の意義・目標・必要性を与えることのできるシステム

などを構築することを本研究の目標とし、さらに、

- (4) 核熱利用に適した新たな原子炉の必要性
- なども提言できれば良いと考えている。

3.3 手段・方法

前節の動機により、表2の問題点を解決すべく核熱利用システムを構築しようとするのであるが、例えば、核熱利用システムの構築において日本を対象国とした場合、日本が将来目指す道、例えば、従来通り一次エネルギー源及び原材料を海外に依存し、原材料を加工して輸出する技術立国の道、アジアにおける国単位・産業単位の分業制の道、また、反対に全くの自給自足制の道、などによって、構築するシステムが変わりうる。したがって、もちろん対象を変えれば全くシステムが変わりうる。ところが、地球環境に関連するエネルギー問題は、世界的視野で捉えなければならない。また、その解決策として、何か1つポンとやれば済むものではなく、局所的な取り組みがいくつも寄り集まってはじめて効果（実際に効果があるかどうか、未だ明確でないものもある。）を挙げるものである。まさに、“Think globally, act locally！”である。したがって、同じ捉え方から生まれた核熱利用システムでも、それを日本に適用する場合と、他国で実施する場合では全く異なりうる。日本ではそのシステムが成立しても、他国では成立しない場合さえありうる。今後、日本が世界をリードするべきであることを考えれば、日本は、自国だけの環境保全を成し遂げればよいというわけにはいかない。むしろ、もっと積極的に、各国（特に、発展途上国）のレベルに合わせた環境保全に対する多様な取り組み方及び予想される効果を提示し、世界の発展に寄与すべきであろう。これらのために、そのほんの一部かもしれないが、核熱利用システムで何ができるか、考えようとするものである。

環境問題における以上のような一種の多様性・不確定性に対処する道は、

- (1) 価値判断規準の共通化
- (2) 融通の利くシステムの構築
- (3) どのような状況・問題に対しても共通的、基本的であるベースプロセスの構築とそのシステム化による対応

などが考えられる。いずれにしろ、1つのシステムを構築すれば済むものでないことは明らかである。そこで、上記の(1)～(3)などを念頭に置きながら、幾つかのシステムを構築し、提案することにする。

さて、需給間の不一致という以下の技術的問題に対しては、次のような分野で対応可能である。

- | | | |
|--------|---|----------------------------|
| 時間的不一致 | : | エネルギー貯蔵 |
| 空間的不一致 | : | エネルギー輸送 |
| 質的不一致 | : | エネルギー変換 |
| 観念的不一致 | : | 原子力工学 |
| 量的不一致 | : | エネルギー貯蔵・輸送・変換、産業・運輸・民生の各業種 |

本研究では、原子力エネルギーの利用に関して、技術開発により問題を解決しようするのではなく、ソフト的に対応する。また、社会的問題に対しては、評価の基準・指標を新たに示す道具を提供し、社会的問題の解決に資する。

以上、問題点、動機、目標、などを述べてきたが、最も難しいのは、問題解決の手段である。なぜなら、核熱利用が定着していないという問題には、原因がただ1つではなく、幾つかの要因が複雑に組み合わさっており、しかも技術的要因ばかりではなく、社会的要因も含まれているからである。今のところ、このような複雑な問題をこうすれば解決できるだろうという確たる方法が見当たらない。本研究では、問題点を直接的に解決する方法を探すのではなく、動機のところで述べた社会情勢の変化、特に環境保全に対する世界的気運の高まり、これを受けて、経済性という従来1つだけであった評価規準に相反する環境保全という別の評価規準を導入し核熱利用を見直すことによって、問題に対処、軽減もしくはなくそうとするものである。そこで、次の3つの観点から研究を展開する。

(1) 原子力の長所を活かすことのできるシステムを構築する

- ◎大容量・高密度エネルギーの安定供給（自給）
- ◎二酸化炭素排出量が極めて少ない

(2) 原子力の短所を補うことのできるシステムを構築する

- ◎時間的・空間的・質的・量的なエネルギー需給間の不一致の解消

(3) 値値判断基準の変革

- ◎観念的不一致、社会的問題点の解消

これらを表5にまとめる。

3.4 研究の概略

本研究では、表5の中にまだ開発されていないシステムがあれば構築していく。以下には、簡単に各システムの概略を述べる。尚、表5の右欄のシステムの詳細については、別報で報告する。

- ・原研システムA：化石燃料を使用する前に、水素と炭素系に分離し、水素のみを使う。
- ・原研システムB：化石燃料をC1燃料（メタン、メタノール）に改質する。
- ・原研システムC：二酸化炭素を原料として、化学製品（エチレンなど）を製造する。
- ・原研システムD：二酸化炭素を原料として、化学肥料（尿素など）を製造する。
- ・原研システムE：夜間の電力もしくは核熱を貯蔵する。
- ・原研システムF：原子力プラントを中心とした産業都市を作る。
- ・原研システムG：原子力プラントの民生、農業、水産業、林業における利用を図る。
- ・原研システムH：需要が多くかつ増加傾向にある製品を作る。
- ・原研システムI：コ・ジェネレーションなどによって未利用熱の排出を抑制する。
未利用熱をさらに利用するか、環境に影響のない程度まで保存する。

長所活用システムでは、原子炉の炉形を決めれば、それぞれの原子炉の長所が加わり、さらに、それらの長所を活かすことを考えなければならないのは当然である。ここでは、個々のシステムを決めた時、各システムに応じた炉形を選定し、そのシステムのシナリオを作る時に原子炉の長所を繰り込むことにする。

長所活用システムでの、例えば二酸化炭素を、

- (i) 出さない : 化石燃料 (C_mH_n) を使う前に炭素を分離・処理し、化石燃料の残りの水素を使う。
- (ii) 出すのを抑制する : 化石燃料に核熱や水素を加えて改質し、単位エネルギー発生量当たりの生成炭素量を減らす。
- (iii) 出したら処理する : 二酸化炭素が発生したら、これを再利用もしくは固定し、大気中に排出しない。

と言うことに対しては、上記の右側に記したような具体策が考えられる。図7に示すように、(i)と(ii)は共に、化石燃料を使う前において、化石燃料中に含まれる有害物質・不要物質(二酸化炭素、硫化物、窒化物、灰、タール、など)を予め除去しようというものであり、(i)と(ii)の違いは、最初に完全にクリーンなもの(水素)だけにするか、有害物質・不要物質の量を減らすにとどめるか、の違いただけである。水素に次いで炭素含有量が少ない物質は、いわゆるC1燃料(化学式上、炭素が1個しかないもの)と呼ばれるメタン(CH_4)やメタノール(CH_3OH)である。これらの(i)や(ii)は、(iii)の化石燃料の直接燃焼の後に排出物を処理するという事後対策に比べ、エネルギー効率的に、経済的に、環境保全的に、どの程度優れているのか評価されなければならない。

原子力プラントでも、その燃料採掘や建設時などに二酸化炭素を排出する(後述)ため、全く二酸化炭素などを出さないようにすることは現実的ではない。二酸化炭素などの有害物質の排出を抑制するには、上記以外の対策もあるであろう。例えば、1番簡単な話は、原子力や再生可能エネルギーの利用を拡大すれば良い。上記以外の対策についても考えて行く。また、二酸化炭素だけではなく、原子力プラントから排出される温排水も、もちろん、抑制・処理・再利用を検討しなければならない。原子力プラントにおけるコ・ジェネレーションは、温排水問題解決の具体策の1つである。

参考までに、原子力プラントが本当に環境問題の解決に寄与できるのか、即ち例えば、原子力プラントは、総じて、二酸化炭素の排出量が化石燃料火力発電プラントなどに比べて小さいのか、という点をみておく。再生可能エネルギー(自然エネルギー)や原子力エネルギーを電気エネルギーに変換するときに、化石燃料と違って二酸化炭素を出すことはない。しかしながら、プラントの建設時、運転時などに、エネルギーを消費しており、間接的に二酸化炭素を排出していることになる。このような間接的な二酸化炭素の排出も含めて、各プラントの二酸化炭素排出量を見てみる。図8に各種発電プラントにおける単位発電量当たりの二酸化炭素排出量⁽¹⁸⁾(1kWhの電力を得るのに排出する二酸化炭素を炭素の質量に換算した値)を示す。この図から、原子力、水力、地熱発電の二酸化炭素排出原単位は、石炭、石油、LNG火力発電のそれに比べかなり小さいのがわかる。また、自然エネルギーによる発

電も二酸化炭素の排出が少ない。（日本における現在の電源構成全体から求められた電力の1kWh当たりの平均の二酸化炭素排出原単位は、128gである⁽¹⁸⁾。）また、この図から、火力発電では燃料燃焼時に、自然エネルギー発電では、設備建設時に、原子力発電では運用時に、それぞれ、二酸化炭素の排出が多くなることがわかる。

新田・内山⁽¹⁸⁾は、投入エネルギーと産出エネルギーについても興味ある結果を報告している。図9は、彼等の各種発電プラントにおけるエネルギー収支比（＝（産出エネルギー）/（投入エネルギー））を示した図である。産出エネルギーは、そのプラントのライフサイクル期間中に発電する電力量であり、投入エネルギーは、化石燃料やウランの持つエネルギーを除いた、燃料採掘、輸送、加工、発電、廃棄などに必要なすべてのエネルギー量である。この図から、水力のエネルギー収支比が飛びぬけて大きく、火力（石油、石炭）、地熱、原子力が次に並び、水力と地熱以外の自然エネルギーのエネルギー収支比が最も小さいことがわかる。図10は、同様に、発電プラントの設備容量をすべて100万kWにして、正味どれだけのエネルギーを供給できるかをエネルギー収支（＝（産出エネルギー量）－（投入エネルギー量））⁽¹⁸⁾で示しており、原子力と火力が自然エネルギーに比べ多くの電力を供給できるのがわかる。

また、二酸化炭素の環境への放出と同様に、原子力プラント自身の未利用排出熱についても、

- (i) 出さない : 熱のカスケード利用による徹底利用
- (ii) 出すのを抑制する : コ・ジェネレーション
- (iii) 出したら処理する : 温排水を池に溜めて、外界との温度差がなくなるまで保持
排出しても環境に影響のない程度まで、未利用熱を利用

であり、放射性廃棄物についても同様の取り組みが施されるべく研究開発が進められている。

以上では、主に核熱利用について述べてきたが、原子力エネルギーの利用形態は、核熱利用に限る必要はない。原子力エネルギーの利用分野を概観すると、以下のようになる。

原子力エネルギー

☆ 放射線利用

- 医療利用
- 物質改質
- 放射線源の製造
- その他

☆ 核熱利用

- 核熱直接利用
 - ・ 物の製造（工業製品、農・林・水産業、淡水、）
 - ・ 冷暖房、融雪

- ・その他
- 二次エネルギーの製造
 - ・電力
 - ・水素
 - ・都市ガス
 - ・ガソリン、灯油、軽油
 - ・メタノール、ガスなど

本研究では、上記の核熱利用のうち電力を除く利用分野にとどめず、全ての原子力エネルギーの利用分野を念頭に置くこととする。

本研究では、1992年から5年間で、幾つかの核熱利用システムを具体化し、経済社会も含めた総合評価を関連課室と協力して行う。

4. エネルギー技術の現状

さて、技術情勢の変化が如何なるものであるかについて、以下に記す。

原子力エネルギーを貯蔵、輸送、変換する場合に必要な能力の大略値と、現時点における技術レベルでのエネルギーの貯蔵能力、輸送能力、変換能力の大略値を示す。

4.1 エネルギー貯蔵

3.1節で述べたが、原子力発電所のように、燃料費が発電原価の約2割を占め、設備費が約8割であるような場合には、発電原価を下げるために、設備利用率を高めることが要求され、休止を含めたような負荷変動運転は向いていない。原子力発電所では、原子炉の負荷変動運転を考えるより、定量供給を活かして、一般水力発電とともにベースロード供給の役目を担っているのが現状である（水力発電の場合には、一般水力発電と揚水発電によって、一種の負荷変動運転に対応している。）。しかしながら、長期エネルギー需給見通しで設定された2010年における原子力と一般水力の合計の設備電源容量の達成目標値は、1992年の値から予測される2010年のベースロード電力量を超てしまいそうである。以下に、これを見てみる。

図1-1に、1年間の月別電力消費の推移を示す⁽¹⁹⁾。この図に示した最大電力を貯えるように電気事業者は、設備投資を行っている。図1-2には、最大電力消費量となった夏場のある日の時刻別の電力消費量を示す⁽²⁰⁾。図1-1からわかるように、1年のうち月別では大体8月に最高の電力消費を示し、4月が最低となっている。また、1日のうちでは、明け方の4～6時頃が最低であり、日中の2～3時頃に最高となっている。冬場の1日では、電力の消費が朝食と夕食の時間帯において多くなる傾向がある。1日の平均電力消費量に対して、最低の電力値は約60%であり、冬場の方が夏場に比べて平滑化する傾向にある。1992年の最低電力量として4月の値（1億500万kW）を用い、1日の最低を平均値の60%として、6,300万kWというベースロード電力量を得る。1992年の原子力発電所と一般水力発電所の年度末電源設備容量は、それぞれ、3,442万kWと1,962万kWであり、その合計は、5,404万kWであった。したがって、原子力と一般水力でも、1992年のベースロード電力量を貯えなかった訳である。この状態なら、原子力発電所の電力貯蔵や負荷変動運転は必要ない。一方、2010年ではどうであろうか。ベースロード電力の消費が主に産業であるとして、2010年までの産業における電力需要の伸びの平均年率は、約0.7%と報告されている⁽¹³⁾ので、2010年におけるベースロード電力は、約7,140万kWと推定される。前述の2010年における長期エネルギー需給見通しにおける値から、原子力発電所と一般水力発電所の年度末電源設備容量は、それぞれ7,050万kWと2,500万kWであり、その合計は9,550万kWとなる。表6に、1992年と2010年における必要なベースロード電力と原子力発電及び一般水力発電で供給可能な電力を示す。このように2010年では、原子力と一般水力による供給可能な電力が必要なベースロード電力を上回ってしまう。即ち、2,410万kW（=9,550万kW-7,140万kW）分の電力については、1日も

しくは1年の電力変動に対応した供給を行わなければならなくなる。

原子力プラントは、本来、負荷変動運転に向きであるので、エネルギー貯蔵によって需要側の電力変動に対処することは重要である。1年の間の電力変動は、例えば、1992年では、最高値は9月4日の1億5,300万kW、最低は4月の1億500万kWであり、最低値は平均値の約75%である。一方、1日の電力変動では、最低値は平均値の約60%である。電力変動にエネルギー貯蔵で対応するには、1年の長期変動に対しては、10月から5月までぐらいの夏場以外の期間、つまり7~8ヶ月の間、平均値に対して余るエネルギー一分、例えば電気出力100万kWの原子力発電所では、その25%である25万kWを貯蔵する。1日の短期変動に対しては、21時~翌朝8時頃までの12時間の間、100万kWの内の約40%である40万kWを貯蔵すればよいことになる。(表7参照。)

以下では、エネルギー貯蔵技術に関して述べる。揚水発電、水蓄熱式ヒートポンプは、既に実用化されている。今世紀中の実用化もしくは導入を目指しているものに、圧縮空気貯蔵ガスタービン発電、海水揚水発電などがある。また、将来、新型電池、フライホイール、スーパーヒートポンプ・エネルギー集積システム、超電導電力貯蔵などの技術が期待されている。これらをエネルギー的に分類すると次のようになる。

- (1) 熱エネルギー貯蔵 (顕熱、潜熱)
- (2) 化学エネルギー貯蔵 (ケミカルヒートポンプなど)
- (3) 位置エネルギー貯蔵 (揚水、圧縮空気など)
- (4) 運動エネルギー貯蔵 (フライホイール、潮流など)
- (5) 電磁気エネルギー貯蔵 (超電導、電池など)
- (7) 物質貯蔵 (水素、化石燃料、濃度差など)

エネルギー貯蔵、特に蓄熱においては、蓄熱効率、温度効率、出力密度、断熱性能、熱交換率、エネルギー密度が重要な因子となる。各種のエネルギー貯蔵法における単位体積当たりのエネルギー密度を図13⁽²¹⁾に示す。原子核が変換するとき質量当たりに放出されるエネルギーは、通常の化学反応の場合の約10万倍である。このような高密度の原子力エネルギーをウラン量(100万kWの原子力発電所1基を1年間運転するのに必要なウランの量が約30トン(トラック3台分)である。)と同じ体積に貯蔵するには、核反応の全く逆のエネルギー→物質変換を行うしかない。しかしながら、原子力発電所建家と同程度の体積に貯蔵するなら、図13の最下行のようになる。即ち、100万kWの電力の12時間(夜間、半日)分を50m立方内に貯蔵する場合、もしくは40万kW(100万kWの40%)の12時間分を20m立方内に貯蔵する場合($\approx 3.5 \times 10^5 \text{ kJ/m}^3$)から、300万kWの熱出力の12時間分を10m立方内に貯蔵する場合、もしくは120万kWの12時間分を4m立方内に貯蔵する場合($\approx 1.3 \times 10^8 \text{ kJ/m}^3$)までのエネルギー密度を示したものである。尚、図中の「+」で示したエネルギー密度の位置は、高温工学試験研究炉(HTTR)の炉心平均発熱量(体積発熱密度 25 MW/m^3)が12時間発生する場合の体積エネルギー密度($\approx 1.1 \times 10^8 \text{ kJ/m}^3$)を示している。

図13の揚水貯蔵の高いエネルギー密度から、揚水発電(1990年、1,700万kWの設備容量:全水力発電設備容量の約45%)による電力貯蔵が実用化されている理由がうなづける。

揚水貯蔵の欠点は、応答性が遅いことである。一方、超電導磁気エネルギーによる電力貯蔵では、応答性も良く、大容量化も可能であるが、体積エネルギー密度が低く、10GWhの電力（100万kWの電力を10時間分）を貯蔵するのに外径約670m、内径約500m、地下深さ約45mといった大きなものになる⁽²²⁾。応答性が良く大容量化が可能で長時間貯蔵でき、しかも高密度の貯蔵方式は現時点では有力な候補がなく、大容量化が解決されれば、将来的には応答性、貯蔵時間、体積エネルギー密度の観点から、金属水素貯蔵法などが有望である。しかしながら、水素の需要については、日本における水素の年間の生産量は250億Nm³程度あるが、その大半は、自家生産、自家消費されており、1989年では、推定約1.6億Nm³程度が取り引きされているに過ぎない。

現時点におけるエネルギー貯蔵の代表例を挙げる^(21,22)。

(1) 頸熱蓄熱装置

(i) 蒸気アキュムレーター（建材工場）

形状；直径3.4m、長さ18.4m、水平円筒容器

容量；約 3×10^{10} J（約 2×10^5 kJ/m³）

（200世帯の一般家庭の1日分に相当）

尚、1世帯1日当たり約 1.5×10^8 J（約42kWh）

(ii) 碎石蓄熱（10MW太陽発電システム用）

形状；直径19m、高さ約14m、垂直円筒容器

容量；約 6.5×10^8 J（約 1.7×10^5 kJ/m³）

(2) 潜熱蓄熱

(i) 低温潜熱蓄熱（実験用）

形状；直径0.5m、高さ1m、垂直円筒容器

容量； 3×10^7 J（約 1.5×10^5 kJ/m³）、融点30°C

(ii) ポリエチレン潜熱蓄熱

形状；直径0.6m、高さ2m、垂直円筒容器

容量； 5.4×10^7 J（約 0.95×10^5 kJ/m³）

(3) 化学蓄熱

(i) SALAMOシステム（提案）

約1GWの沸騰水型原子力発電所から100km以内の400世帯の暖房用に熱を貯蔵し、貨車で1日1回移送するもの。

容量； 1×10^{11} J

方式；CaCl₂-NH₃系

(ii) プロトタイプ蓄熱（太陽蓄熱用）

形状；直径0.6m、高さ2m、垂直円筒容器

容量； 1.1×10^8 J（約 1.9×10^5 kJ/m³）

(4) 電池電力貯蔵

ナトリウム/硫黄電池； 3.6×10^8 J

亜鉛/塩素電池	; 3.4×10^8 J
亜鉛/臭素電池	; 2.9×10^8 J
レドックスフロー電池	; 3.0×10^8 J
改良型鉛蓄電池	; 1.5×10^{10} J (国内商用試験中) ; 1.5×10^{11} J (南カリフォルニア・エジソンの Chinoプラントプロジェクト)

(5) 圧縮空気電力貯蔵

(i) アメリカのマッキントッシュ発電所圧縮空気電力貯蔵(検討中)

形状 ; 67万m³ (直径70m、高さ175mに相当(推定))

× 4基

容量 ; 8GWh (80万kWの電力を10時間)

圧力 ; 84気圧

(ii) ドイツのフントルフ発電所圧縮空気電力貯蔵(稼動中)

形状 ; 15万m³ (直径50m、高さ76mに相当(推定)) × 2基

容量 ; 0.58GWh (29万kWの電力を2時間)

圧力 ; 62気圧

(6) 超電導磁気電力貯蔵

(i) スイスのCERNの超電導磁気電力貯蔵(稼動中)

容量 ; 0.222MWh (8.0×10^8 J)

(ii) 関西電力超電導磁気電力貯蔵(概念設計)

形状 ; 外形670m、内径500m、高さ45m(地中)のリング

容量 ; 10GWh (100万kWの電力を10時間貯蔵するのに相当)

(7) フライホール電力貯蔵

(i) フライホール電力貯蔵(国内鉄道会社で使用)

容量 ; 2.7×10^7 J

(ii) フライホール電力貯蔵(カナダの鉄道会社の計画)

容量 ; 2.6×10^7 J (最大出力1万kW) (約7,200kW)

(iii) フライホール電力貯蔵(臨界プラズマ試験装置JT-60用)

容量 ; 4.8×10^9 J (最大出力16万kW (160MW)、30秒)

形状 ; フライホイール直径約6.6m、厚さ0.4m、6枚重ね、

高さ ; 約15m(発電機含む)

フライホイール重量 ; 約1,000トン

(8) 水素貯蔵

(i) 夜間電力貯蔵型金属水素化物式蓄熱・蓄冷プラント(実用)

発生出力が小さく、あまり経済的ではない。

(ii) 国内外における金属水素化物によるエネルギー貯蔵の例⁽²⁰⁾

・化学計測機器用

形状 ; 約20×33×27cm、約9kg

容量 ; 0.1m^3 (0°C、1気圧)

(燃焼熱換算 $1.2 \times 10^6\text{J}$)

発生水素圧力 ; 7気圧

- ・コンテナ型

形状 ; 約 $140 \times 70 \times 60\text{cm}$ 、約 730kg

容量 ; 70m^3 (燃焼熱換算 $8.4 \times 10^8\text{J}$)

- ・ドイツHWT社の水素容器（販売品）

形状 ; ボンベ型、

容量 ; $1 \sim 100\text{m}^3$ 以上 (燃焼熱換算 $1.2 \times 10^{7 \sim 9}\text{J}$)

エネルギー貯蔵について、各種の方式に対し、主に、エネルギー密度と規模（大きさ）の観点から見てきた。しかしながら、原子力エネルギーの貯蔵において、原子力プラント1基分のエネルギーを丸ごと貯蔵する必要があるかどうかはさておいて、原子炉1基分のエネルギーを貯蔵するような

- ・大容量 ($10\text{GWh} = 3.6 \times 10^{13}\text{J}$: 100万kW (1,000MW) の電力を10時間)
- ・高密度エネルギー ($10^{6 \sim 8}\text{kJ/m}^3$)
- ・高応答性 (少なくとも、 2MW/m^2 程度の熱伝達速度)
- ・長期・短期貯蔵 (7~8ヶ月、もしくは少なくとも10時間程度)

ができるような革新的エネルギー貯蔵技術は、現時点では、見られないようと思える。もちろん、これ以外に、変換効率、耐久性、経済性などが重要であるのは言うまでもない。原子力プラントでのエネルギー貯蔵では、前述のように、例えば、短期貯蔵では、100万kWの内40万kW貯蔵すればよく、2010年時点での7,050万kWの内2,500万kWをすべての原子炉プラントで割り振って貯蔵するなら、プラント総数を約70基として1基当たりでは、36万kWを貯蔵すればよい。しかも、貯蔵設備の大きさは、原子力プラント建家1基と同じ程度でよいとするなら、現状技術の延長上に原子力エネルギー貯蔵の可能性を見ることができるように思える。エネルギー貯蔵に関する技術の現状と動向について、詳細なデータベースの一層の整備が望まれる。

4.2 エネルギー輸送

エネルギー輸送方式としては、パイプライン輸送（流体による輸送）、交通輸送（船舶、鉄道、車などによる輸送）、電線輸送（送電）、マイクロ波輸送、ヒートパイプ、などがある。これらを表8に示す⁽²⁴⁾。原子力におけるエネルギー輸送は、原子力エネルギーの貯蔵と同様に、大容量・高密度であることが要求される。

エネルギー輸送における技術の進歩は⁽²⁴⁾、

(1) スーパータンカー (10~50万トン級) の出現

- (2) 極低温液化による天然ガス輸送
- (3) 濃縮ウランによる核燃料の大量輸送
- (4) 電力輸送における高電圧化、大電流化、低損失化
- (5) 電力輸送におけるコンピューター制御による安定供給

などが挙げられている。各方式におけるコストを表9に示す⁽²⁴⁾。

今後の課題⁽²⁴⁾は、パイプライン輸送においては、その安全性であり、例えば、石油のパイプラインが破裂すると、土地、河川、地下水の汚染など大きな被害が予想される。電線輸送では高密度・大容量・長距離・架空送電が必要となろう。現在、日本における最高送電電圧は50kVであるが、空気絶縁の限界と言われている1,000kVにする計画がある。海外では既に750kV、800kV(直流)送電が行われている。交通輸送では、やはり事故時の対策がこれからも一層望まれており、さらに、超過密状態を如何に克服するかということになろう。ヒートパイプでは、粘性限界、音速限界、毛細管限界、飛散限界、沸騰限界の5つの限界を拡張することである。マイクロ波では、高効率のマイクロ波増幅器や受信システムの開発である。

エネルギー輸送密度の概算結果を図14に示す。図14によれば、原子力発電所(PWR)のエネルギー輸送において、送電線のエネルギー密度は十分であり、世界最大級のガスのパイプラインもPWRのエネルギーを輸送できるエネルギー密度を有している。マイクロ波は、その安全規制上、エネルギー密度を大きくする事ができない。

尚、世界最大級のガスパイプラインは、約 $48 \times 10^9 \text{kcal}/\text{日}$ であり、配管直径を1mとすれば、約 $3 \text{GW}/\text{m}^2$ となる。LNGと水素ガスのパイプラインは、直径0.6mで50kmの距離を、それぞれ、 $6,500 \text{Mcal}/\text{時間}$ 、 $5,100 \text{Mcal}/\text{時間}$ 輸送する場合で、 $27 \text{MW}/\text{m}^2$ と $21 \text{MW}/\text{m}^2$ である。PWRの場合は、 $3,300 \text{MW}$ ($1,000 \text{MW}$ の電気出力)の熱出力が4系統の一次冷却配管(配管直径が0.7m)で輸送され、HTTRでは 30MW の熱出力が一次冷却配管(配管直径が約0.6m)で輸送される場合であり、それぞれ約 $2 \text{GW}/\text{m}^2$ と $100 \text{MW}/\text{m}^2$ である。高速増殖炉のもんじゅ(280MWの電気出力)やその実証炉(1,000MWの電気出力)では、配管径がそれぞれ0.813m(32インチ)、約1m(40~42インチ)であるので、共に発電効率を簡単に35%、ループ数を4ループとして、 $390 \text{MW}/\text{m}^2$ と $910 \text{MW}/\text{m}^2$ である。世界最大級の送電線は、約 $413 \times 10^9 \text{kcal}/\text{日}$ を $1,520 \text{cm}^2$ の4本の導体で送電(500kV)する場合であり、 $3.3 \text{TW}/\text{cm}^2$ である。マイクロ波の場合には、安全規準値が $1 \text{mW}/\text{cm}^2$ (日本では、一般に $5 \text{mW}/\text{cm}^2$ 、住宅地で $1 \text{mW}/\text{cm}^2$)~ $10 \text{mW}/\text{cm}^2$ (西欧諸国の規準値)と定められており、 $10 \sim 100 \text{W}/\text{cm}^2$ である。

4.3 エネルギー変換

エネルギー変換については、種々の変換方式があるが、エネルギーを一次エネルギーと二次エネルギーとに分類し、一次エネルギーから二次エネルギーへの変換プロセスの中まと

められている。図15にエネルギー形態によるエネルギー変換を示す⁽²⁵⁾。図15の一次エネルギーは、

- (1) 核燃料
- (2) 化石燃料
- (3) 自然エネルギー（水力、地熱、太陽熱、太陽光、風力、潮力など）

といった分類もよく行われる。一次エネルギーから二次エネルギーに変換される時、幾つかのエネルギー形態を経る場合もある。例えば、電気への変換では、一次エネルギーと二次エネルギーの間にさらに熱エネルギー、運動エネルギーという中間のエネルギー形態を経て電気となる。核燃料から核-熱変換による電気の製造、化石燃料から化学変化-熱による電気の製造でも、運動エネルギーを経て電気エネルギーとなっており、このように変換される間にエネルギー総合変換効率が50%未満となってしまう。一方、変換プロセスの数を減らしても、現在実用化されている熱電発電や熱電子発電のような熱-電気直接変換では、10%程度とまだまだ変換効率が良くない⁽²⁶⁾。熱-電気直接変換以外にも、化学-電気（燃料電池、濃度差発電）、運動-電気（電磁流体力学（MHD）発電、電気流体力学（EHD）発電）、光-電気（太陽電池、光化学発電）、核-電気などの直接変換方式があるが、まだ、経済性、耐久性などの点で開発段階である⁽²⁶⁾。二次エネルギーのうち電気以外は、いわゆる物質、形あるものとなっており、必要な時、必要な所で再度燃焼によって熱に変換され利用される。場合によっては、さらに電気に変換される事もあるが、電気以外の二次エネルギー源は、ほぼ熱源と考えられる。

エネルギー変換における最近の技術の進展は^(14,27)、以下の分野で著しい。

(1) 燃料電池

1965年ジェミニ5号の室内電源として固体高分子形燃料電池が使用された事から一躍脚光を浴びた。実用化の段階を迎えている。1988年までの導入実績は、約2万kWである。国内最大規模の燃料電池プラントは、LNGを燃料とした東京電力の五井火力発電所の11,000kWのもので、1991年から運転されている。日本では、1992年燃料電池による電気のコストは、40円/kWh程度と言われており、2000年に20円/kWhを目指している。

(2) 太陽電池（太陽光発電）

1974年、太陽電池の2万円/Wであったコストが、現在650～2,000円/W（130～400円/kWh）と一桁以上の低コスト化が達成された。100～200円/W（20～40円/kWh）が目標である。1990年、1.7万kW生産された。民生用ソーラーシステムが累計35万台、住宅用太陽熱温水器が約400万台普及した。

(3) 火力発電の高効率化

日本において、1951年の火力発電の効率は18.9%であり、1965年には36.9%と約1.3%/年で急激に伸び続け、さらに、1990年には38.6%まで約0.07%/年で着実に向上した。

将来、ガスタービンと蒸気タービンの組み合わせで48%を、MHD発電と組み合わせ

て50~60%を目指している。

(4) 石炭利用

石炭の利用技術は、世界的エネルギー需要の増加が見込まれる中で、埋蔵量の豊富さかつ一様な産地分布によって石炭が見直され、以下の5つの開発が行われてきた。何れも、石炭の持つ化学エネルギーを変換しやすくする、前処理技術である。

- (i) 流動床燃焼技術などの熱効率向上技術
- (ii) 乾式同時脱硫・脱硝技術などの酸性雨対策技術
- (iii) CWM(石炭・水混合燃料)やCCS(コールカートリッジシステム)などの石炭ハンドリング技術
- (iv) 石炭ガス化、液化技術
- (v) 石炭灰有効利用技術

(5) 地熱発電

現在日本では、浅部の高温热水系発電において、10地点で約27万kWの設備容量がある。

(6) ガスタービン

日本のムーンライト計画において、10万kWのパイロットプラント試験が行われた。また、蒸気タービンとの複合発電により総合効率55%を達成できる見通しが得られている。

(7) バイオマス(生物体)技術

バイオマスのエネルギー利用法として、直接燃焼、熱分解・部分酸化によるガス化、微生物を利用した発酵によるメタン化・エタノール化、直接液化などの方法が研究開発されている。

(8) 超電導

1986年、これまでの臨界温度(超電導現象を示す温度)を大きく上回るセラミックス高温超電導物質が発見され、この分野の研究が急速に進んだ。高効率超電導発電機、送電ロスのない超電導送電、大規模の超電導電力貯蔵など、革新的な経済性の向上と利用拡大が予想されている。

以上のような新技術とともに、夢の技術として、未確認エネルギー変換技術、竜巻コンバーター、水燃料化装置、希ガスエンジン、常温核融合、生体内原子転換、超高効率太陽発電、回転型静電誘導発電機、真空のエネルギー論などが文献(28)に紹介されている。

5. 環境保全の指標

5.1 エクセルギー

社会情勢の変化の中で1番大きな変化は、価値観の多様化であろう。従来のように経済性という判断規準だけでは、地球環境を保全する事ができないと考えられるようになり、経済性と環境保全性という相反する2つの判断規準が重要視されるようになった。この2つの重要な判断規準以外にも、幾つかの判断規準があり、それらも無視する事はできなくなってきた。エネルギー供給・利用における判断基準を思いつく限り挙げると、

経済性、安定性、有効性、利便性、一貫性、安全性、倫理性、環境性、平易性、
資源性、完結性、

などがある。

問題は、こんなに多くの判断規準を如何にうまく満たすか、どうして満たすか、である。すべての判断規準の尺度が同一なら、事は幾分簡単であろうが、尺度が異なり、何を尺度とすればよいかも不確定な判断規準さえある。1つの解決方法は、システムを構築する時様々な観点から考え、とりあえず2つぐらいの判断規準でシステムを評価し、出来上がったシステムが他の判断規準を満足しているかどうか吟味し、必要なら手直しするというのが最も簡単であろう。そして、2つの判断規準として、経済性と環境保全性が選ばれるであろう。経済性は、コストで表せるが、環境保全性の単位は何にすればよいのであろうか。前述のように環境保全の最善策は、有害物質を出さない事である、即ち、エネルギーの場合には使いきればよいのである。この観点から、土方は、環境問題を論じる際に、エクセルギーによる評価を提案している⁽²⁹⁾。エクセルギー自体の考え方には、1824年カルノーの論文の中にその芽生えを見る事ができる、その名は、1953年ラントによって提唱され、有効エネルギーの名でも知られている⁽³⁰⁾。また、一般に、エネルギーと区別して、エクセルギーをもっと使うべきであると主張しているのは土方⁽²⁹⁾や押田⁽³⁰⁾だけに留まらないであろう。なぜ、エネルギーではなくエクセルギーかについては、よく次の質問が浴びせかけられる^(29,30)。

「保存されるエネルギーが消費されるという事はどういう事か？」

この消費される、使えば減るエネルギーをエクセルギーとして区別するのである。エクセルギーは、システム構築の際に重要な規準となるため、以下にエクセルギーでよく引用される説明を記す⁽³⁰⁾。（図16参照。）

80°C1リットルのお湯と20°C1リットルの水とを混ぜると、50°C2リットルのお湯ができる、エネルギーは保存されている。しかし、もはやこの50°Cのお湯から80°Cのお湯を、エネルギーを加えることなく作る事はできない。エネルギーが消費されたのである。正確には、エクセルギーが消費されたのである。環境温度を20°Cとすると、80°C1リットルのお湯が持つエクセルギーは、22.7kJ、50°C2リットルのお湯では、12.0kJ、50°C1リットルのお湯では6.0kJとなり、80°Cの場合の約1/4である。もちろん、環境温度が20°Cの場合には、20°Cの水が持つエクセルギーは零である。エクセルギーがエネルギーの質を表すと言われる所以である。

このエクセルギー観点から発電を見てみよう⁽³⁰⁾。火力発電所の発電効率は約40%であり、残り60%の熱が捨てられており、これが温排水問題となっている。しかしながら、この温排水のエクセルギーを計算してみると、

$$\begin{aligned}\text{エクセルギー} &= mC_p(T_1 - T_0 - T_0 \ln(T_1/T_0)) \\ &= (30\text{kg/s}) \times (4,187\text{J/kgK}) \times \{ (7 - 298 \times \ln(305/298)) \text{ K} \} \\ &= 10\text{kW}\end{aligned}$$

となる。ここで m 、 C_p 、 T は、それぞれ質量流量、定圧比熱、絶対温度である。（1,000kW当たりの冷却水流量が平均30kg/s、排出される冷却水温度は環境温度より7°C高い、というデータを用い、環境温度を25°Cとして計算。）つまり、1,000kWの電力に対して、たったの1%が捨てられているに過ぎない。石炭火力であるとすると、この10kWのエクセルギーは、石炭がはじめに持っていたエクセルギーの0.5%に過ぎない。発電所では、かなりエクセルギーを使い切っていると言えそうである。

もう1つ、システム構築の観点から興味あるエクセルギー計算の例を見てみる⁽²⁹⁾。その前に、エクセルギー率（有効比とも呼ばれる。）を物質の持つエクセルギーのエネルギーに対する割合と定義し、エネルギー変換効率に対応する値を、エネルギー変換前後のエクセルギー率の比率で表す⁽²⁹⁾。図1-7にエクセルギー率の温度依存性を示す。化学反応のエクセルギー変化を考える。例えば、メタンの燃焼（ $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ ）では、そのエクセルギー率は、92%である。燃焼温度の上限はほぼ2,000°Cであるから、空気の2,000°Cのエクセルギー率は約70%であり、化学エネルギーを燃焼という形で使うと22%のエクセルギーを失ってしまうことになる。高品質の化学エネルギーを、ただ低質の熱エネルギーにしているわけである。化学エネルギーを使いきるという観点からは、土方⁽²⁹⁾は次のような提案をしている。燃焼反応の中でエクセルギー率が低いのは、水素の燃焼反応であり、そのエクセルギー率は83%である。そこで、メタンを水蒸気改質（ $\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 4\text{H}_2$ ）によって水素に転換し、その後、水素を燃焼させようというのである。このメタンの改質のエクセルギー率は約52%と低質である。つまり、メタンをそのまま燃焼させるのではなく、外部から低質な熱エネルギーを導入し、メタンのエクセルギー率を92%から水素のエクセルギー率83%まで下げてしまうが、熱エネルギーの52%という低エクセルギー率（この52%のエクセルギー率は約800°Cに相当し、実際メタンの改質はもう少し高い温度で可能である。）を水素のエクセルギー率83%まで増大させ、しかも、水素の燃焼ではエクセルギー率の損失（83% - 70% = 13%、メタンの直接燃焼では、エクセルギー率の損失が22%）をかなり抑えることができる、というわけである。メタンの水蒸気改質をもっと低い温度で行えれば、それにこした事はない。

以上のように、エクセルギー（エネルギー）の消費においては、使いきることが重要であり、この事は熱のカスケード利用として以前から言われていることでもある。さて、従来の経験から、0.5kJ/kg以下のエクセルギーを回収すると採算が合わない、と言われている。しかし、現在のところ、エネルギー原料の価格は、それが持つエクセルギー⁽²⁷⁾（熱力学の第2法則）によって決まっているわけではなく、エネルギー保存則である熱力学第1法則によっ

て決まっていると指摘されている⁽³¹⁾。上記の火力発電の場合には、エクセルギーが0.33kJ/kgであるから、この温排水の回収は、経済的に成りたたないことになり、確かに現時点で温排水からの熱回収は行われていない。0.5kJ/kgという値は、経済的判断規準であり、環境保全の判断規準は、まだ明確ではない。スイスのように環境温度との差を1°C以内に抑えなければならない場合、1,000kWの電力に対して、同様に冷却水のエクセルギーを計算すると、約1.5kWとなり、0.007kJ/kgとなる。1°C以内に抑えれば環境が保全されるとするなら、冷却水のエクセルギーが0.007kJ/kg程度となるように最初から冷却系の設計を行うか、7°Cで排出した冷却水から熱を回収し、0.007kJ/kgまでエクセルギーを減らすかである。いずれにしろ、追加設備分電気の価格が上昇することになる。

5.2 環境の内部経済化

一般には、外部経済要因であるこのような環境保全のための費用をはじめから市場経済に取り込み、構成要素に組み入れようという考えが提唱されている。この動きは、「環境の内部経済化」と呼ばれている⁽³²⁾。有害物質排出後、環境保全のために必要となる費用（事後費用）は、昭和30年代からの深刻な日本の公害を例にとっても、環境保全を予め行うための事前費用に比べ、100倍にもなる場合があると試算されている⁽³²⁾。四日市の硫黄酸化物による大気汚染では、事後費用が211億円、事前費用が148億円、また日本全体においては、事後費用が6兆円、事前費用が5,000億円で、事後費用は、事前費用の約10倍以上となっている。水俣の水銀化合物による水質汚染では、事後費用126億円は、事前費用1.3億円の100倍近くにもなっている。神通川のカドミウムによる土壤汚染では、事後費用25億円に対して、事前費用は6億円で済むとされている⁽³²⁾。いずれも、環境保全対策を予め行いながら経済を発展させる方（予測による未然防止）が、環境の事を考えない経済運営（事後の補償対策）に比べ、経済的に優っていることがわかる。それでも、「総論賛成、各論実現困難」というのが現状のようである。全世界で流通している資源量70億トン/年の内、17億トンが日本で使用されており、そのうちの約2億トン強が廃棄物として蓄積されている⁽³²⁾。そして、一度その影響が環境に現れると、対策を具体化し汚染除去が始るまでに10年、その効果出るまでに10年、経済の中で汚染問題が解決されるまでに10年、都合30年の年月がかかる。事後対策は、費用だけでなく時間もかかるので、一刻も早く環境保全型、リサイクル型、省エネ型社会を確立しなければならない。

「各論実現困難」な理由の1つは、事前費用が事後費用に比べかなり小さなものであるにもかかわらず、環境保全にかかる費用の、そのものの価格に占める割合の許容程度が比較的小さいということである。日本における電気、上・下水、ゴミでは、環境維持のための費用は、それぞれ、電力単価（約20円/kWh）の6%、家庭の年収（800万円）の1%、住民税の4%程度と大雑把に評価されている⁽³³⁾。横浜市で計画されたスターダスト'80計画のような技術的には理想的と考えられるゴミ処理計画では、その環境対策費用が住民税の60%を超えていたがため、実現されなかった⁽³³⁾。これだけのデータではまだ不十分であるが、現時点で価

格に占める環境保全費用の割合が10%以内と決して大きくないことがわかる。このような環境保全費用に対する価値観を変えうる判断規準の提示が、核熱利用システムの構築における社会的問題の解決に向けての1つの課題である。

6. まとめ

従来実現されている核熱利用システム、もしくは、検討された核熱利用システムを概観し、核熱利用システムがいまだ大規模に展開されていない理由、問題点を検討した。これらの問題は、技術的なものと社会的なものに分類される。しかしながら、これらの問題点はお互いに複雑に絡み合っており、また、各年代、各地域において異なっていて、どれか1つの問題を解決すればすむという単純なものでもない。それでも、これらに対して、ドイツ、アメリカ、日本などで、今までに様々な取り組みがなされてきた。しかし、顕著な成果を得るに至っていないのが現状である。

そこで、本研究では、近年の技術の飛躍的進歩と、社会的に大きな問題として取り上げられている環境問題の観点から、もう1度、核熱利用システムを見直してみることにした。

このような核熱利用システムの構築に関する研究を体系的に行うため、次の3つの観点から核熱利用システムについて検討することにした。

- (1) 原子力の長所活用システム
- (2) 原子力の短所補填システム
- (3) 価値判断規準の変革

核熱利用システムについて検討する際、近年の技術の進歩について、エネルギー貯蔵、輸送、変換技術を概観した。また、社会的情勢について、特に環境問題に関連して、評価指標としてのエクセルギー、また従来、外部経済項目である環境保全費用を、経済の内部に取り込もうとする内部経済化についても概観した。

本研究は、1992年から始めており、既に2～3の核熱利用システムについて検討した。さらに、1996年までに幾つかの核熱利用システムの候補を構築する予定である。各候補システムについては、別報で報告する。

参考文献

- (1) 近藤駿介、エネルギーIA、電力新報社（1992）
- (2) 21世紀の技術とエネルギー委員会編集、2050年への挑戦、電力新報社（1993）
- (3) 矢野恒太記念会編集、世界国勢図絵1990-91年版、国勢社（1989）
- (4) 村田浩、原子力と産業社会：朝日市民教室「日本と核時代」第4巻、朝日新聞社（1969）
- (5) NUPEC広報企画室、地球にやさしいエネルギーがわかる本、電力新報社（1993）
- (6) 近藤次郎、システム工学、丸善株式会社（1981）
- (7) L.A.Zadeh and E.Polak 著、国井利泰、森正武、中村宏樹訳、一般システム理論、共立出版社（1976）
- (8) 萩原義和、温排水の農業利用、エネルギーレビュー7（1984）、pp.8-12
- (9) 黒田竹弥、温排水の漁業への利用、エネルギーレビュー7（1984）、pp.13-18
- (10) 尾本彰、軽水炉からの熱供給、エネルギーレビュー5（1984）、pp.40-45
- (11) 日本原子力産業会議、原子力の発電分野以外への利用の現状調査及び将来展望（1992）
- (12) M.Schad, U.Didas, F.Ebeling, G.Kreutzkamp and H.Renner, Project Study HTR Process Heat Supply, Utilization of Process Heat from the HTR in the Chemical and Related Industries, Lurgi GmbH Internal report (1988)
- (13) 資源エネルギー庁、資源エネルギーデータ集1994年版、電力新報社（1994）
- (14) 通商産業省、エネルギー'93、電力新報社（1993）
- (15) 鈴木岑二、経済性評価、エネルギー・資源10-3（1989）、pp.236-240
- (16) 経済協力開発機構(OECD)/原子力機関(NEA)、発電コストの見通し(1992現在)
(原子力資料、原子力産業会議、276号、(1994)、pp.1-88による)
- (17) 成田勝彦、未利用エネルギーの活用、動力、7月号（1991）、pp.17-24
- (18) 新田義孝、内山洋司、破局からの脱出、電力新報社（1993）
- (19) 朝日新聞、1994年8月4日付け日刊紙、(電力事業連合会まとめによる)（1994）
- (20) 電気事業連合会 広報部、コンセンサス'93、(1993)
- (21) 蓄熱・増熱技術編集委員会編、蓄熱・増熱技術、(1985)、pp.1-12
- (22) 日本機械学会、機械工学便覧 C7エネルギー機器・システム、(1988)、pp.209-228
- (23) 秋葉悦男、金属水素化物の形態での輸送、エネルギー・資源13[6]（1992）、pp.546-552
- (24) 堀米孝、エネルギーの長距離輸送 総論、エネルギー・資源13[6]（1992）、pp.515-521
- (25) 秋山守、原子力工学シリーズ6 原子力熱工学、東京大学出版会（1978）
- (26) 西川兼康、長谷川修、エネルギー変換工学(訂正第1版)（1992）

- (27) 戸田三朗、これからのエネルギー変換技術、日本機械学会誌、95[886] (1992) 、 pp.773
- (28) 横田俊一、未確認エネルギー変換技術、日本機械学会誌、95[886] (1992) 、 pp.821—824
- (29) 土方邦夫、熱力学の第2法則とエクセルギー、伝熱研究、33[128] (1994) 、 pp.37—41
- (30) 押田勇雄、エクセルギーのすすめ、講談社 (1988)
- (31) 棚沢一郎、不可逆性について考える、伝熱研究、33[128] (1994) 、 pp.2—6
- (32) 西嶋洋一、持続性のある開発のための環境内部経済化——硫黄酸化物対策の歴史から学ぶ——、化学経済4月号 (1992) 、 pp.2—12
- (33) 柳岡洋、環境問題における技術の経済性、化学経済3月号 (1993) 、 pp.46—50

表1 化学産業及び関連産業における核熱の利用分野⁽¹²⁾

	業種	世界総生産量	備考
		原子炉1基による生産量	
(a)	(1) 重油生産	40	700°C以下
	(2) 石油精製	850	同上
	(3) オイルサンド、 オイルシェルの乾溜	40	同上
	(4) 海水淡水化	—	~300°C
	(5) 酸化アルミ生産	104	950°C(開発要)
(b)	(1) メタノール生産	50	原子炉1基の生産量は、 西欧の1国の消費量と同 等、もしくはそれ以上。
	(2) アンモニア生産	270	
	(3) 石油化学	—	
(c)	(1) セメント	450	何れも1,000°C以上必要。
	(2) 鉄鉱石焼結	80	900°C以上での熱輸送が必 要。鉄鉱産業は減退。
	(3) 鉄鉱石ペレット化	47	
	(4) 石炭ガス化	—	
	(5) 粗セラミックス	—	

表2 核熱利用における技術的・社会的問題

技術的問題	需給間の不一致	時間的：定量供給である（負荷変動型ではない）
		空間的：工業地域、大都市などから遠い
		質的：電力供給だけである
		量的：大量・高密度供給である
		観念的：・放射線が付きまとう危険な供給源である ・核拡散問題がある ・安心感、身近さ、理解しやすさがない
社会的問題	工学的未完結性	廃棄物処理・処分など
	PAの形成	観念的問題、安全性、核拡散
	相反事象の融和	経済性と安全性、経済性と環境保全性など
	核熱利用のニーズ の発掘	核熱利用の必要性

表3 長期エネルギー需給見通し（年度末設備容量；万kW）⁽¹³⁾

	1992年		2000年		2010年	
	原子力	総 計	原子力	総 計	原子力	総 計
1990年	3,442	18,384	5,000	22,770	7,200	26,700
1994年			4,560		7,050	

表4 長期エネルギー需給見通し（年間発電電力量；億kWh）⁽¹³⁾

	1992年		2000年		2010年	
	原子力	総 計	原子力	総 計	原子力	総 計
1990年	2,223	7,883	3,300	9,460	4,740	11,090
1994年			3,100		4,800	

表5 核熱利用システムの構築の方向

	問題点	対処	具体策	システム例
長所活用 システム	環境保全	出さない	使用前に化石燃料のH ₂ とC(CO ₂)への分離	・原研システムA
		抑制	CO ₂ などの排出抑制	・GEシステム、 原研システムB
		処理	排出されたCO ₂ の再利用	・三菱重工システム、 原研システムC
			排出されたCO ₂ の固定	・原研システムD
短所補充 システム	時間的不一致	貯蔵	夜間電力・核熱の貯蔵	・原研システムE
	空間的不一致	輸送	地方での原子力コンビナート 未来型都市での核熱利用	・原研システムF ・秋山システム、 原研システムG
	質的不一致	変換	水素製造	・大洗システム、 原研システムA
			メタノール製造	・大洗システム、 原研システムB
価値判断規準 の変革	・社会的問題 ・観念的不一致	新たな評価 規準・指標 の作成	エネルギー多消費産業 での利用 未利用熱の排出抑制・ 処理	・ルルギシステム、 原研システムH ・原研システムI
			エクセルギー率の導入	

表6 必要となるベースロード電力と原子力及び一般水力発電による供給可能な電力

		1992年	2010年
必要なベースロード電力	(万kW) :	6,300	7,140
供給可能な電力	(万kW) :	5,404	9,550
(原子力発電所	(万kW) :	3,442	7,050)
(一般水力発電所	(万kW) :	1,962	2,500)

表7 原子力発電電力の貯蔵

	貯蔵量	貯蔵期間
長期貯蔵	25万kWe	7~8ヶ月間
短期貯蔵	40万kWe	12時間
(100万kWeのプラントに対して)		

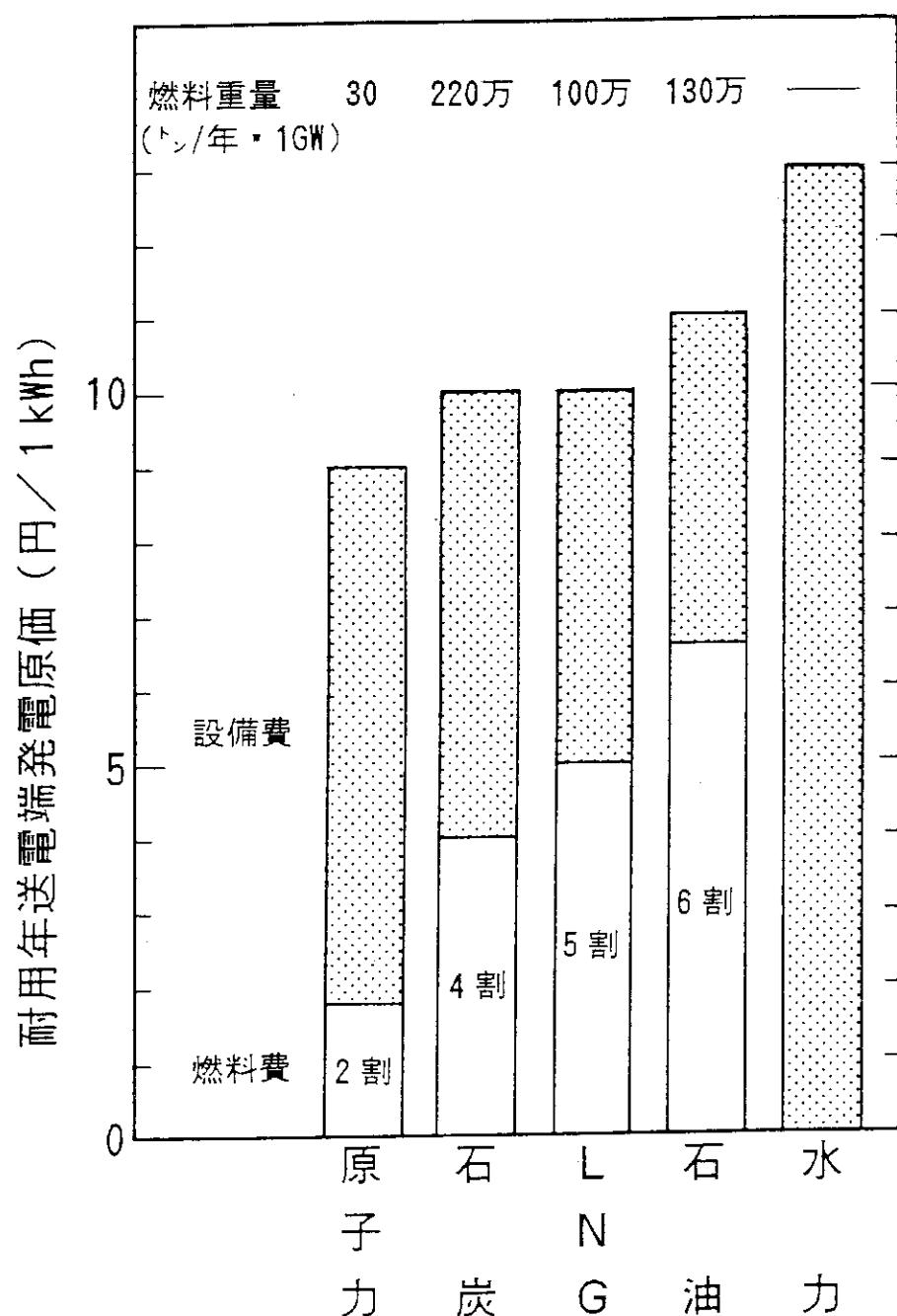
表8 エネルギー輸送技術一覧⁽²⁴⁾

技術の形態	一次エネルギー				二次エネルギー		
	石油	石炭	天然ガス	核燃料	電気	水素	熱
パイプライン	原油、 精製油	スラリー	気体、液体	--	--	液体	流体
交 通	船舶 鉄道 車	同上	原炭 液体	酸化ウラン	電池	液体 もしくは 金属	
電線	--	--	--	--	地上・地下	--	--
マイクロ波	--	--	--	--	アンテナ	--	--
ヒートパイプ	--	--	--	--	--	--	流体

表9 エネルギー輸送コストの比較⁽²⁴⁾

エネルギー	輸送形態	輸送コスト（石油タンカー=1）
石 油	タンカー	1
	スーパータンカー	0.5
	鉄道タンク車	4
	タンクローリ	15~20
	パイプライン	2
天 然 ガ ス	タンカー（極低温液体）	4
	パイプライン	5
石 炭	貨物船	5
	鉄道貨車	6~10
	パイプライン（スラリー）	6
電 力	交流架空線（500kV）	30
	直流ケーブル（500kV）	50

(原油1リッターを100km輸送する時のコストを1としている。石油以外のものについては、これと等価(約900万cal)を同一距離輸送する場合のコストである。)

図1 発電プラントにおける発電原価^(13, 14)

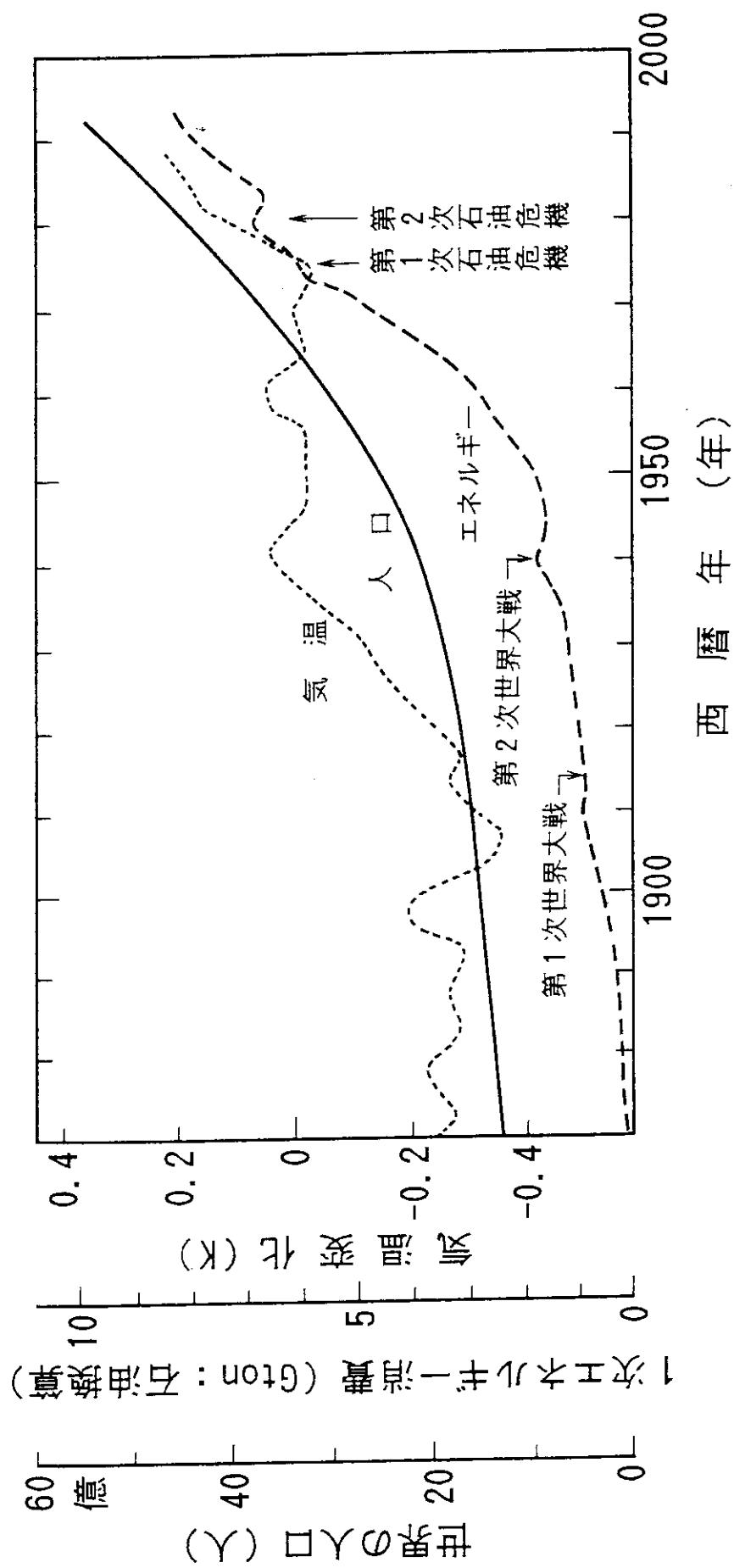


図2 世界の人口、エネルギー、気温の増加 (13,14,18)

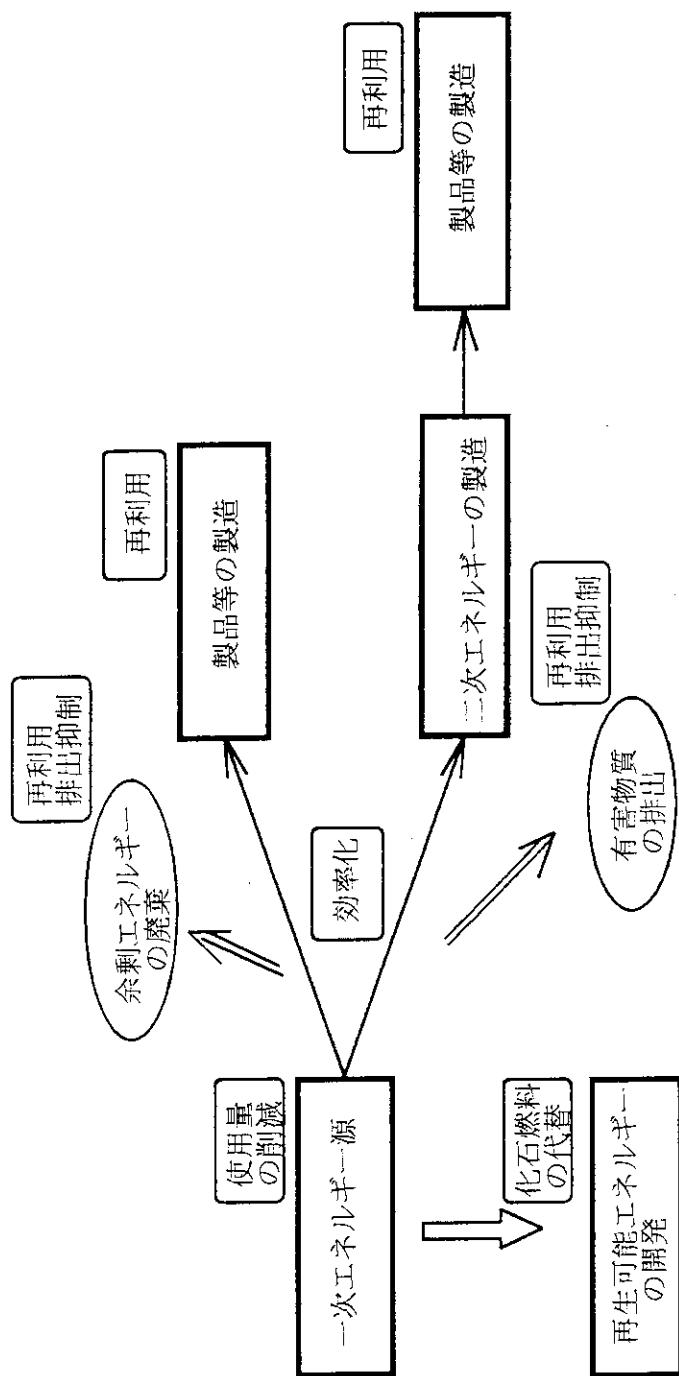


図3 エネルギーフロー図

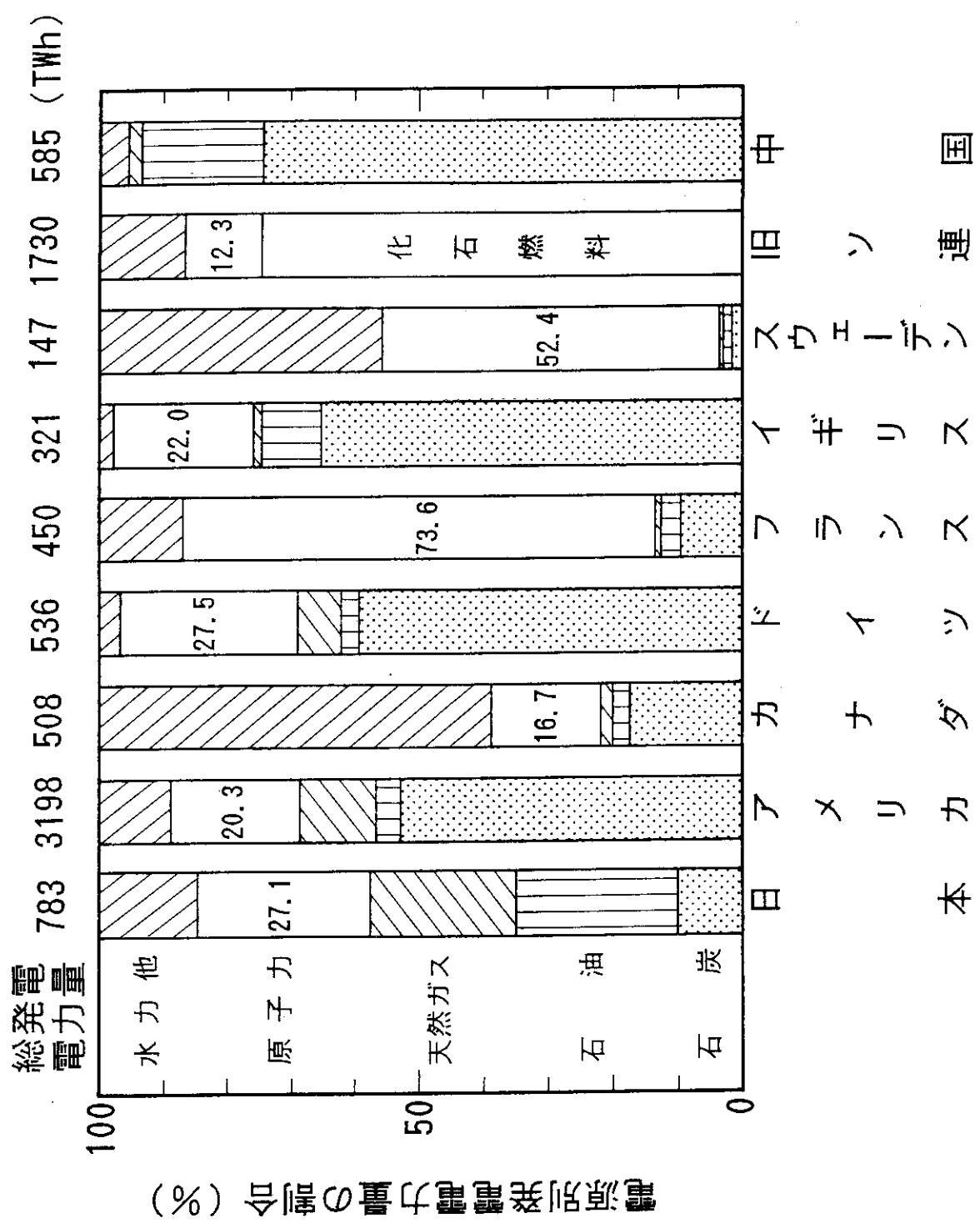
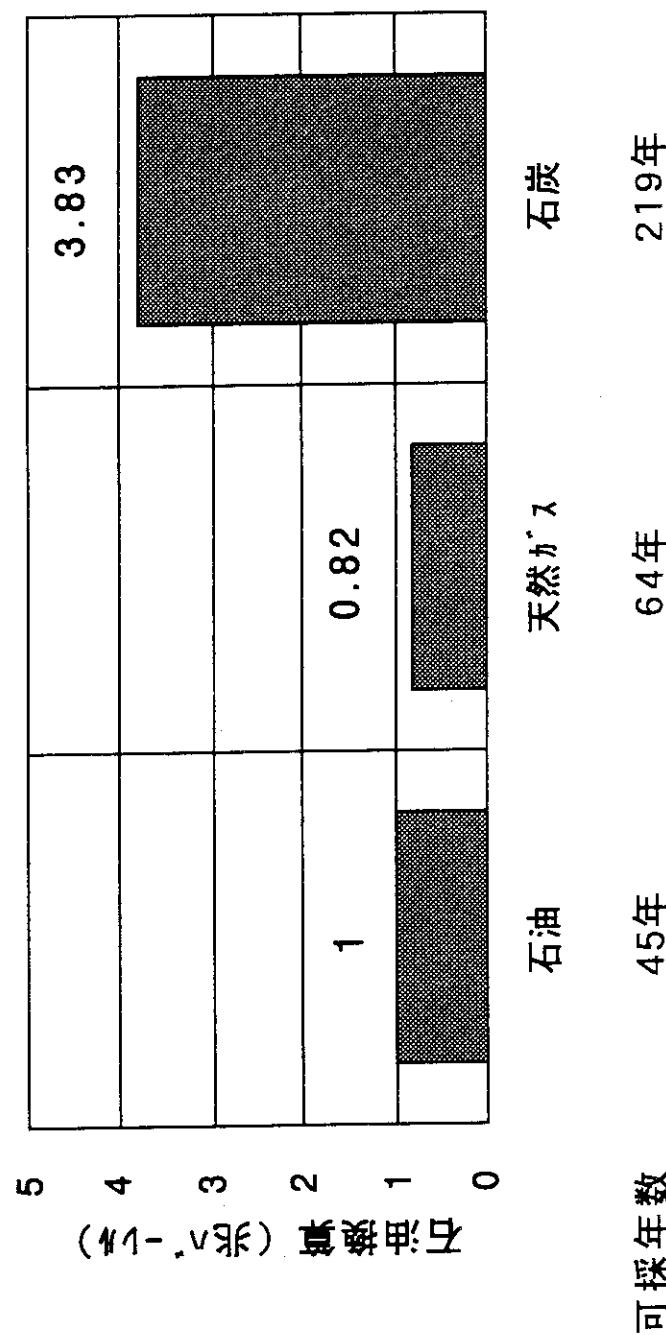


図4 先進国における一次エネルギーの割合（海外事業統計 1991）

図5 化石燃料の確認埋蔵量⁽¹⁴⁾

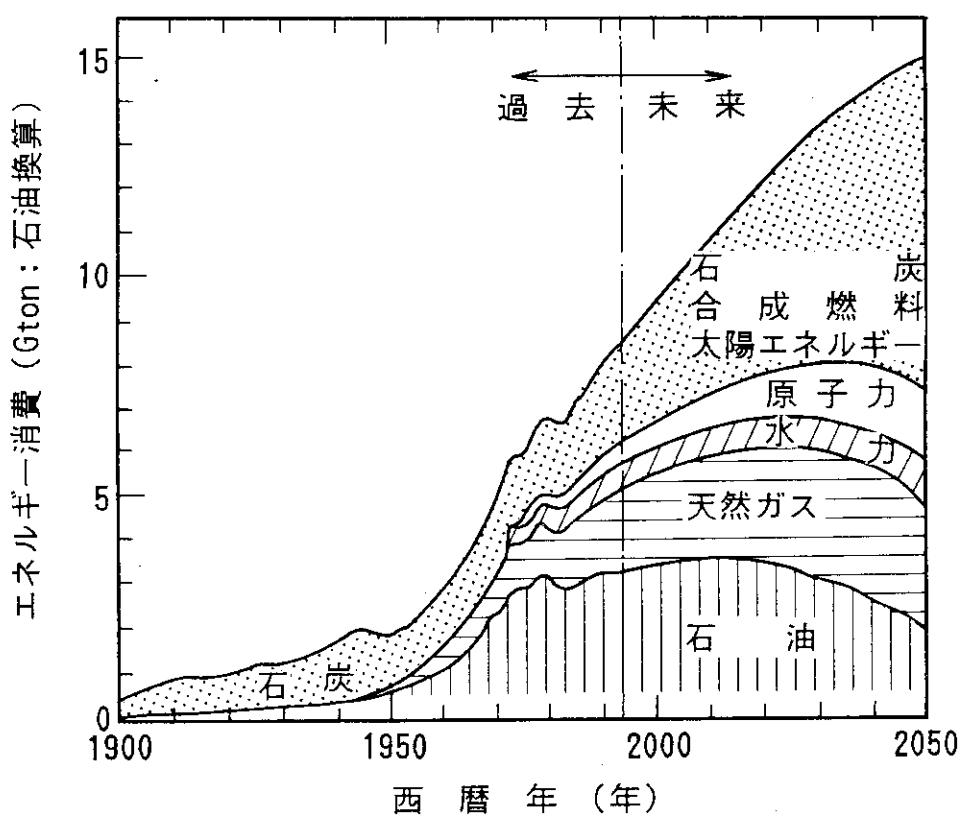
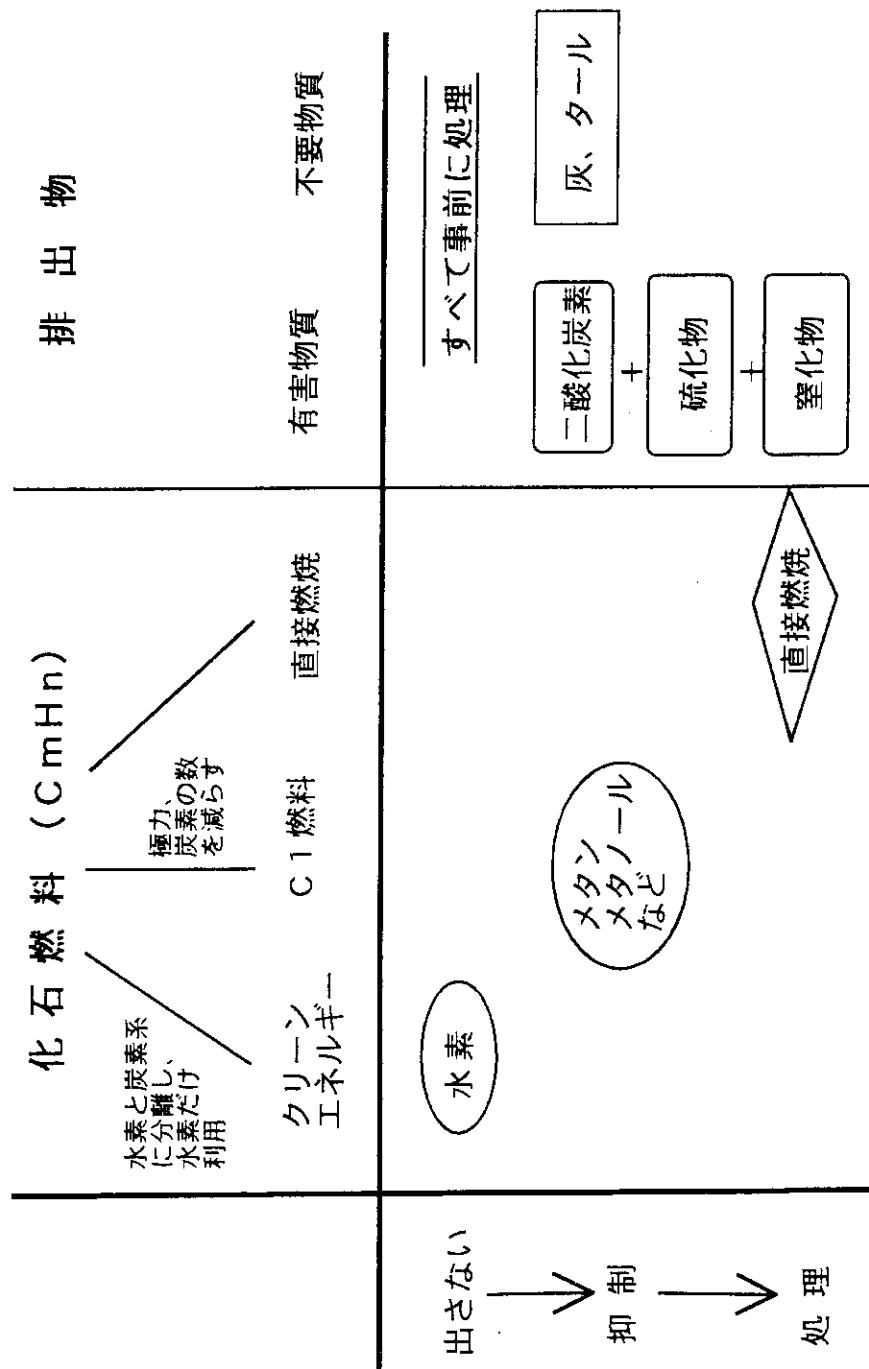
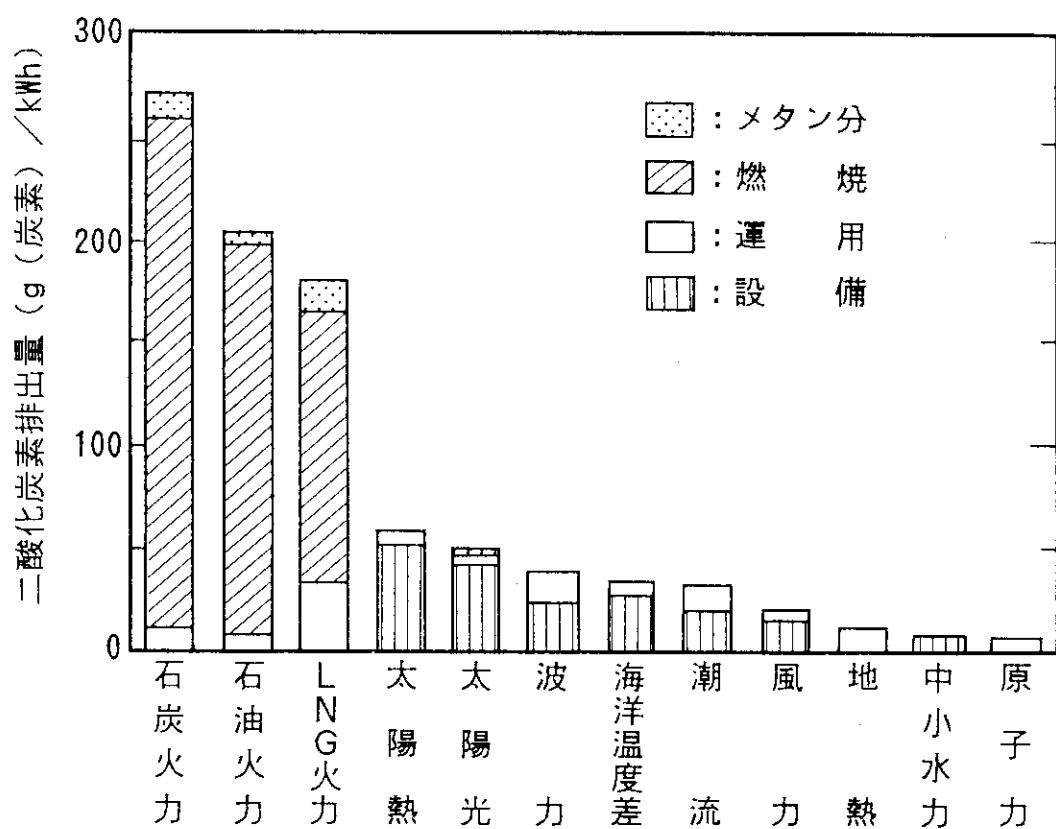
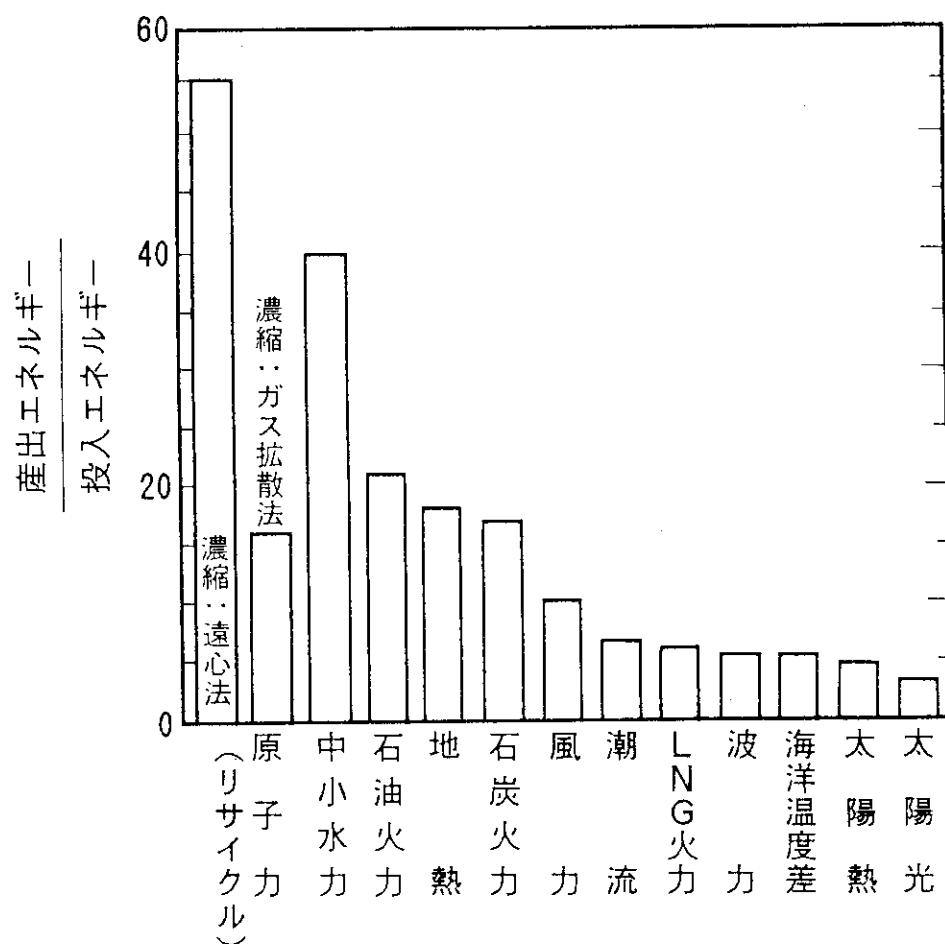
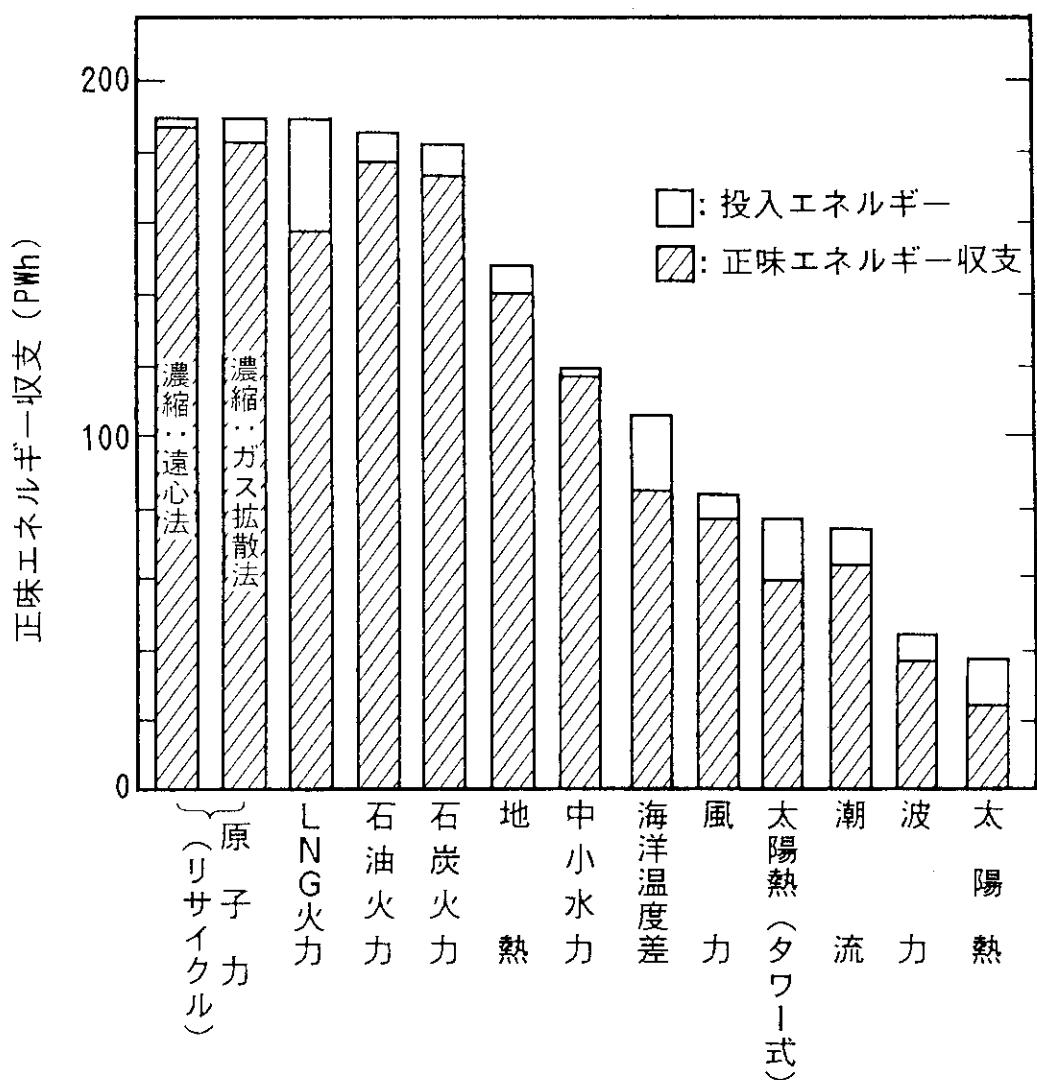


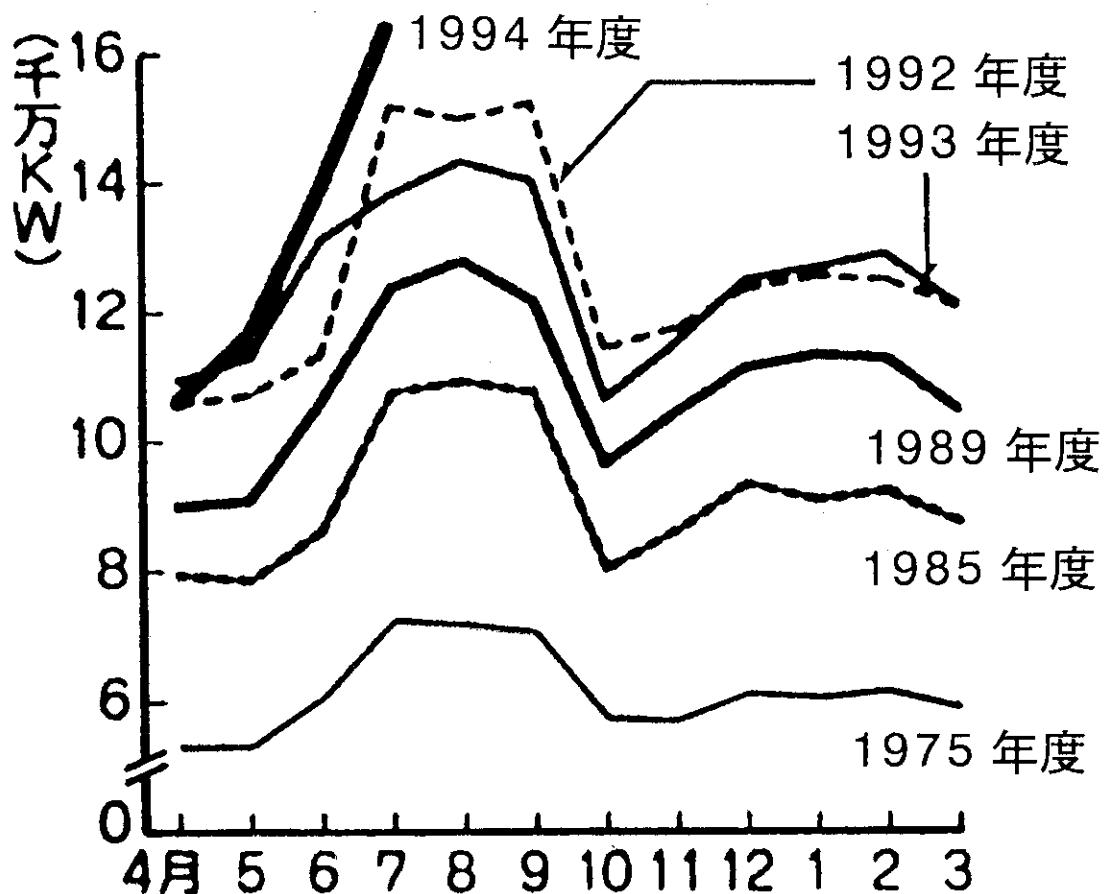
図6 将来の世界のエネルギー消費量⁽¹⁸⁾



図8 各発電プラントにおける二酸化炭素排出量⁽¹⁸⁾

図9 各種発電プラントのエネルギー収支比⁽¹⁸⁾

図10 各種発電プラントの正味エネルギー収支⁽¹⁸⁾

図 11 1年間の月別電力消費の推移⁽¹⁹⁾

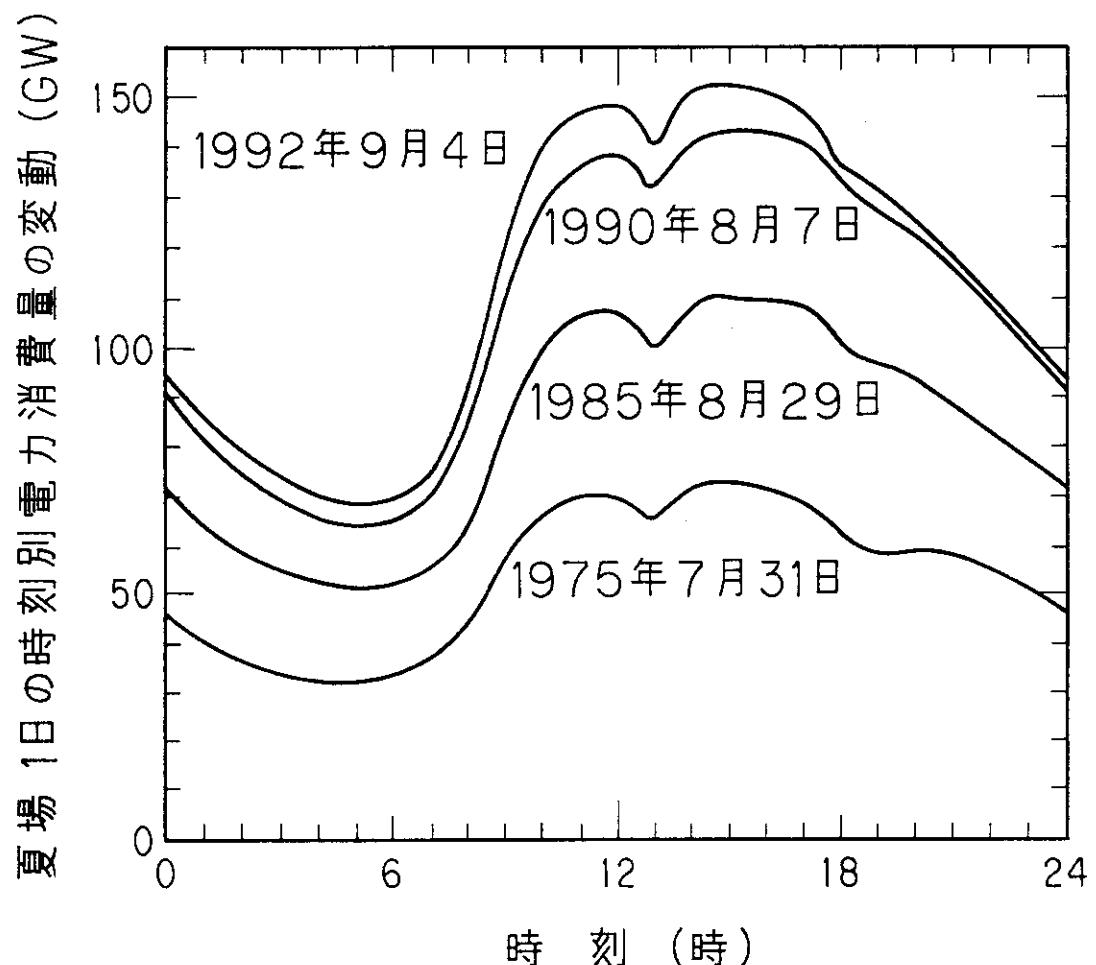


図1.2 最大電力消費量を示した夏場のある日の時刻別の電力消費量⁽²⁰⁾

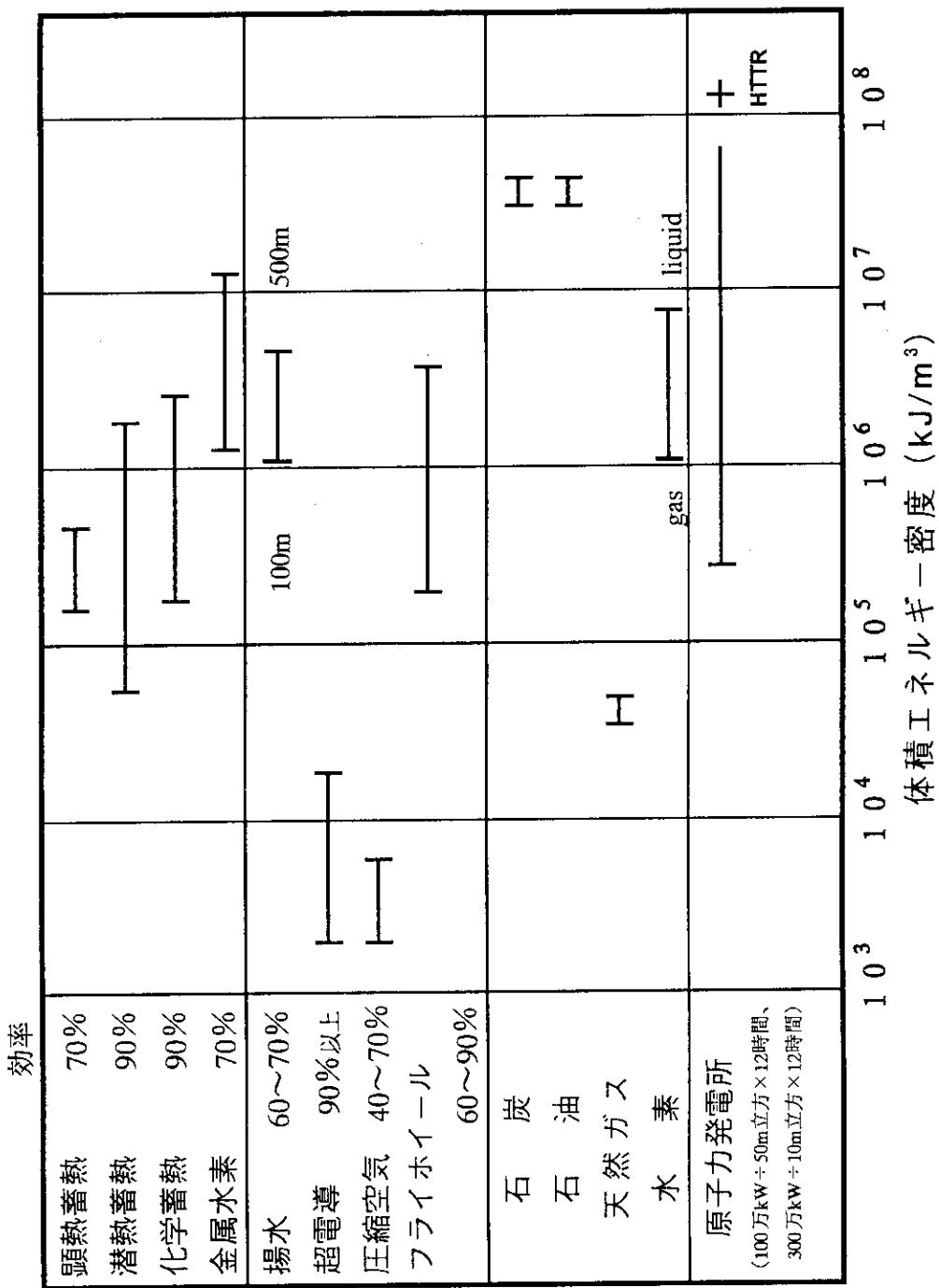


図13 エネルギー貯蔵における体積エネルギー密度 (21)

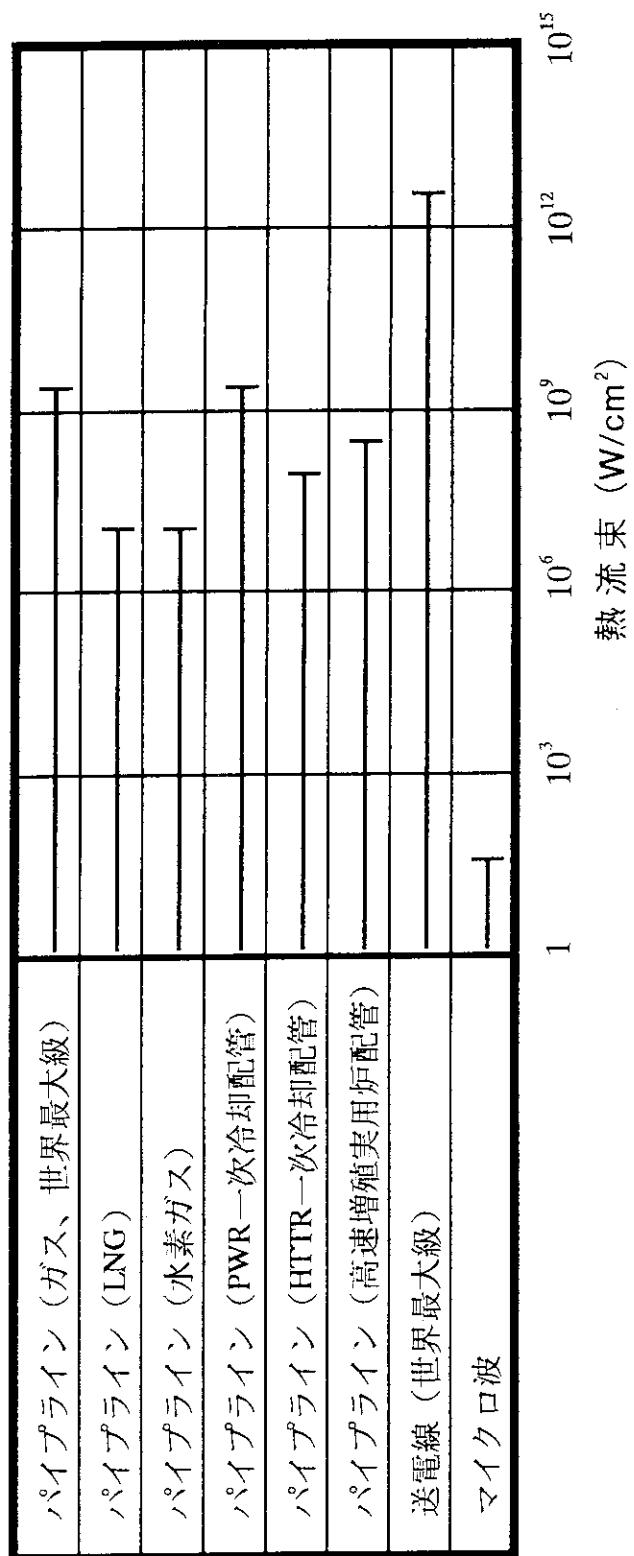


図14 エネルギー輸送密度

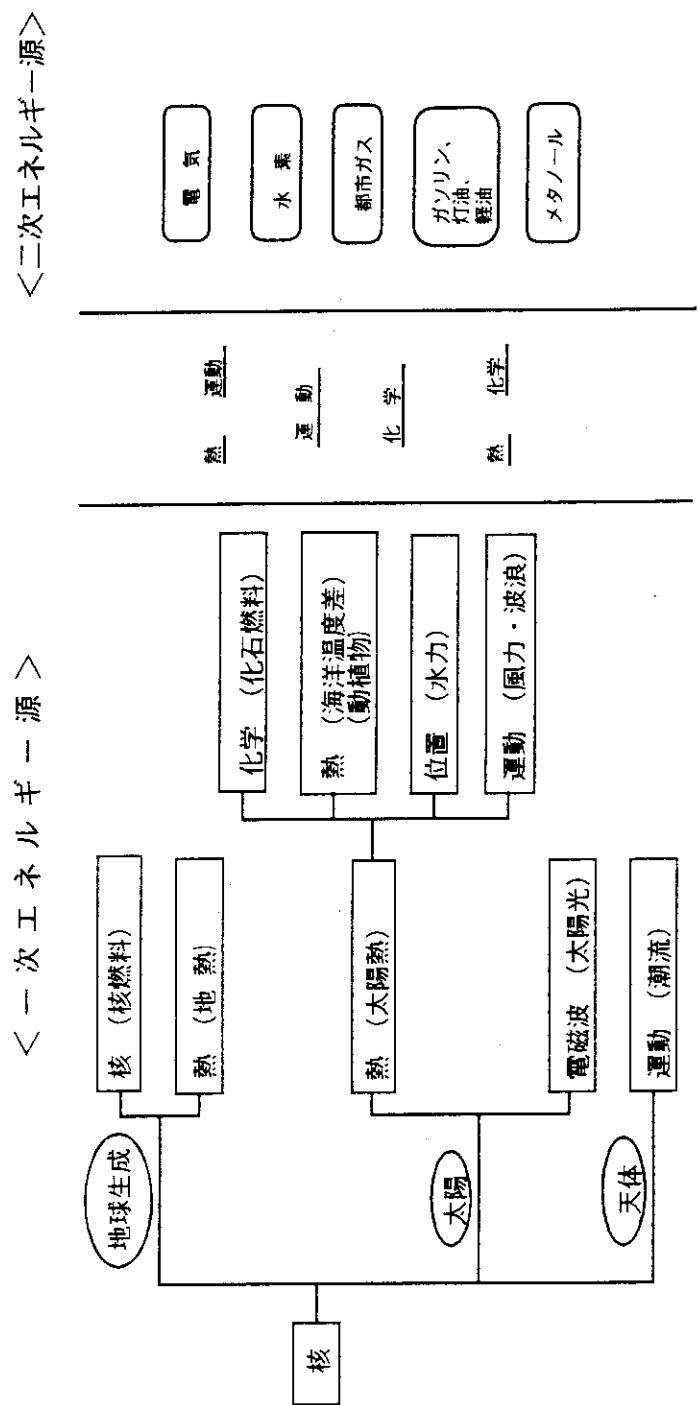


図15 エネルギー変換



図16 水とお湯の混合におけるエクセルギーの変化

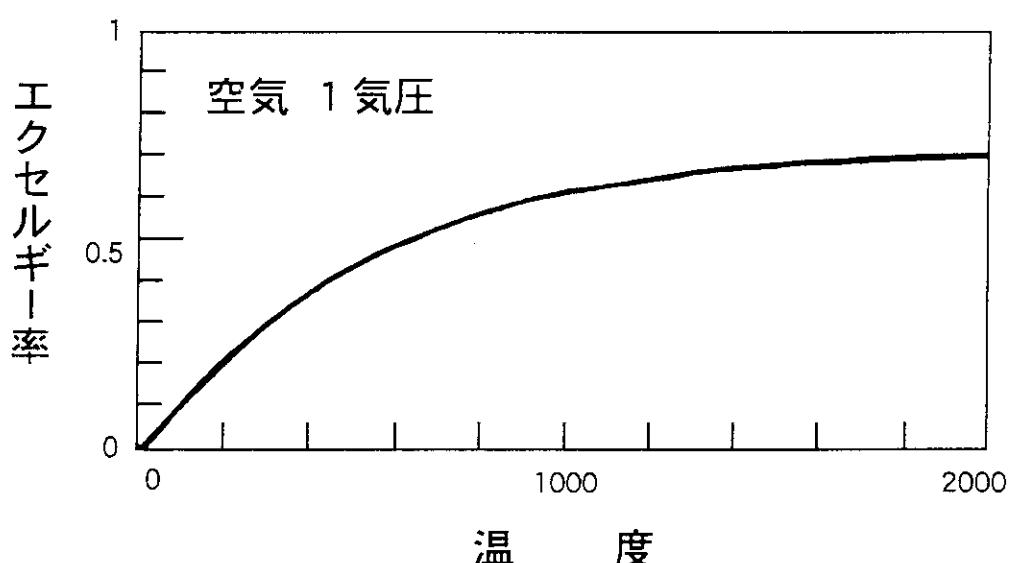


図17 エクセルギー率の温度依存性