

JAERI - M
86-073

将来のエネルギーシステムにおける高温
ガス炉と核熱利用の役割に関する研究
(エネルギー・経済・環境システムの過去と現在)

1986年5月

安川 茂・萬金 修一・佐藤 治
山口 和夫・上野 精一・原 昌雄

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

JAERI-M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。
入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。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。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division
Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-
mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1986

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 燃高野高速印刷

将来のエネルギーシステムにおける高温ガス炉
と核熱利用の役割に関する研究
(エネルギー・経済・環境システムの過去と現在)

日本原子力研究所動力炉開発・安全性研究管理部

安川 茂・萬金 修一・佐藤 治

山口 和夫・上野 精一・原 昌雄⁺

(1986年4月11日受理)

本報告書には、高温核熱利用が必要になってくる背景認識、核熱需給推計及び供給技術のアセスメントのための基準エネルギーシステム並びに解析モデルとデータベースの開発状況、過去と現在の代表年における我が国のエネルギー経済活動、環境排出の実態を説明した。

この報告書は、本年1月17日～18日に台北市において開催された IES (Integrated Energy System) 連合体の研究会で発表した論文の日本語版であり、MIT協力研究に関する進捗報告の第2報である。

+ ラジオアイソトープ原子炉研修所

The Study on the Role of Very High Temperature Reactor
and Nuclear Process Heat Utilization in
Future Energy Systems

Review of Energy-Economy-Environment
System in Past and Present Years

Shigeru YASUKAWA, Shuichi MANKIN, Osamu SATO
Kazuo YAMAGUCHI, Seiichi UENO
and Masao HARA⁺

Department of Power Reactor Projects
Japan Atomic Energy Research Institute

(Received April 11, 1986)

Here in this, the background recognitions of the necessity of high temperature nuclear heat utilization are explained first, and then, the recent research activities in modelling the reference energy system for analysis of nuclear heat supply and demand as well as of analytical method and data base for making assessments of various supply technologies are described. And also, the national energy-economy activities and the movements of environmental effluent control in past and present years are reviewed.

Keywords: Systems, Analysis, VHTR, Review, Energy Economy, Environment

This report, being prepared for distribution to participants at the Integrated Energy System Consortium Meeting held in Taipei on January 17-18, 1986, is the second progress report of the cooperative research program between the Japan Atomic Energy Research Institute and the Massachusetts Institute of Technology.

+ Radioisotope and Nuclear Engineering School

目 次

1. まえがき	1
2. 背景認識	1
3. エネルギーシステムのモデル化と解析手法	3
3.1 基準エネルギーシステム	3
3.2 解析モデルとデータベース	4
4. 基準年システム	5
4.1 経済発展	5
4.2 エネルギー需給	7
4.3 環境排出	9
5. あとがき	10
謝 辞	10
参考文献	11
付 録	12

Contents

1. Introduction	1
2. Background Recognition	1
3. Energy System Modelling and Analytical Method	3
3.1 Reference Energy System	3
3.2 Analytical Models and Data Bases	4
4. Energy-Economy-Environment Characteristics in Reference System	5
4.1 Progress in National Economy	5
4.2 Energy Supply and Demand	7
4.3 Environmental Pollution	9
5. Conclusion	10
Acknowledgement	10
References	11
Appendix	12

1. ま え が き

IES (Integrated Energy Systems) の先の 2 回の会合 (Washington と Vienna.) で、我々は「無排出をめざした将来のエネルギーシステムにおける高温核熱の役割」分析に関する研究の作業プランと研究の進め方を報告した。^{(1), (2)}

その報告のなかで、我々の解析研究には、(i)社会経済発展シナリオフレームの作成、(ii)エネルギーシステムのモデル化と長期エネルギー需給予測、(iii)国民経済、環境への影響と効果分析、(iv)エネルギー技術の競争力評価、(v)高温核熱供給利用技術の選択経路の分析、からなる作業項目のあることを示してきた。また、解析のアプローチとしては、我々は総合エネルギー・経済・環境モデルシステム⁽³⁾を使い、分析課題を系統的に解析してゆくことを表明した。

今回の報告は Vienna 会合以降の研究活動を次の 3 点：(i)解析手法とデータベース開発の現状、(ii)社会経済発展シナリオフレームの作成、(iii)基準エネルギーシステムの現状認識、に焦点をあて、報告する。なお、今回報告する研究成果のうちの上記(ii)については本レポートの姉妹編⁽⁴⁾としてまとめられているので、それを参照されたい。

2. 背 景 認 識

「無排出をめざしての将来のエネルギーシステムにおいて、高温核熱の供給と利用とがどのような役割を果たすか」との問題に取り組んで以来既に 15 ヶ月間を経過した。この問題の解析を手がける発端は、米国マサチューセッツ工科大学 (MIT) が国際的な協力のもとで “Integrated Energy Systems” に関する解析研究を我々に呼びかけてきたこと⁽⁵⁾にあった。

この解析研究に着手するすこし前までの高温核熱に対する我々の理解は、核熱を炭化水素性物質、例えば石炭やシェールオイル、タールサンドに与えて合成ガスや合成油に改質すること、あるいはまた還元ガスを作り鉄鉱石の還元を使うこと、を主要な用途と考えていた。そしてこれらのいずれの用途においても、化学反応の中間段階において水素ガスが改質や還元反応の中核媒体であるので、それを如何にして高効率、且つ低費用で製造しうるかに技術上の核心のあることを知った。現に、水素の製造方法に対してはメタンの水蒸気改質、高温水の電気分解、高温熱化学分解、等が精力的に研究されている。

問題の核心を把み、技術開発の第 2 段階を躍進させようとしていた矢先に、エネルギーをとりまく環境は大きな変革を起してしまった。それを一口に云えば、エネルギー多消費産業が軒並に構造変革や省エネ、燃料代替を遂行し、石油危機以降の 10 年の間に小康をいってしまったので、エネルギーの供給保証が必ずしも緊要な課題にならなくなった事実、ならびに経済成長が減速し低成長型に落着いてしまったことである。

鉄鋼業においてはオイルレス、成型コークス、炉頂発電が進行し今や原料問題はなく、原子力製鉄への期待が遠のいた。アルミ産業においては Al 地金の国内生産が急激に減退して、この産業は加工組立を中心に行う産業へと変貌した。セメント工業の大半は石炭利用に切替え、紙・パルプ産業に

1. ま え が き

IES (Integrated Energy Systems) の先の2回の会合 (Washington と Vienna.) で、我々は「無排出をめざした将来のエネルギーシステムにおける高温核熱の役割」分析に関する研究の作業プランと研究の進め方を報告した。^(1, 2)

その報告のなかで、我々の解析研究には、(i)社会経済発展シナリオフレームの作成、(ii)エネルギーシステムのモデル化と長期エネルギー需給予測、(iii)国民経済、環境への影響と効果分析、(iv)エネルギー技術の競争力評価、(v)高温核熱供給利用技術の選択経路の分析、からなる作業項目のあることを示してきた。また、解析のアプローチとしては、我々は総合エネルギー・経済・環境モデルシステム⁽³⁾を使い、分析課題を系統的に解析してゆくことを表明した。

今回の報告は Vienna 会合以降の研究活動を次の3点：(i)解析手法とデータベース開発の現状、(ii)社会経済発展シナリオフレームの作成、(iii)基準エネルギーシステムの現状認識、に焦点をあて、報告する。なお、今回報告する研究成果のうちの上記(ii)については本レポートの姉妹編⁽⁴⁾としてまとめられているので、それを参照されたい。

2. 背 景 認 識

「無排出をめざしての将来のエネルギーシステムにおいて、高温核熱の供給と利用とがどのような役割を果たすか」との問題に取り組んで以来既に15ヶ月間を経過した。この問題の解析を手がける発端は、米国マサチューセッツ工科大学 (MIT) が国際的な協力のもとで “Integrated Energy Systems” に関する解析研究を我々に呼びかけてきたこと⁽⁵⁾にあった。

この解析研究に着手するすこし前までの高温核熱に対する我々の理解は、核熱を炭化水素性物質、例えば石炭やシェールオイル、タールサンドに与えて合成ガスや合成油に改質すること、あるいはまた還元ガスを作り鉄鉱石の還元を使うこと、を主要な用途と考えていた。そしてこれらのいずれの用途においても、化学反応の中間段階において水素ガスが改質や還元反応の中核媒体であるので、それを如何にして高効率、且つ低費用で製造しうるかに技術上の核心のあることを知った。現に、水素の製造方法に対してはメタンの水蒸気改質、高温水の電気分解、高温熱化学分解、等が精力的に研究されている。

問題の核心を把み、技術開発の第2段階を躍進させようとしていた矢先に、エネルギーをとりまく環境は大きな変革を起してしまった。それを一口に云えば、エネルギー多消費産業が軒並に構造変革や省エネ、燃料代替を遂行し、石油危機以降の10年の間に小康をいってしまったので、エネルギーの供給保証が必ずしも緊要な課題にならなくなった事実、ならびに経済成長が減速し低成長型に落ちてしまったことである。

鉄鋼業においてはオイルレス、成型コークス、炉頂発電が進行し今や原料問題はなく、原子力製鉄への期待が遠のいた。アルミ産業においてはAl地金の国内生産が急激に減退して、この産業は加工組立を中心に行う産業へと変貌した。セメント工業の大半は石炭利用に切替え、紙・パルプ産業に

においても同様の燃料転換をしえ終えた。また、化学工業、特に石油化学においては、乱立気味の過剰生産設備は一扫されてしまった。電力部門においては、特に石油危機以降、火力発電による電力供給が伸びなやみ代って原子力発電が増加し続けている。

一時の石炭液化、ガス化による合成油、合成ガスの研究開発ブームは姿を消し、最近の油価の下落が更にこれらの研究開発に追いつけようとしている。現下のこの変化は太陽、地熱、等の自然エネルギーの研究開発へも影響を及ぼしていることは論を待たない。また、同じ原子力分野であっても、高温核熱の技術の如き高度複合技術に属し且つまた既存化石燃料との経済競争が強いられる技術もまた同様の影響を受けている。

このようなさなかで欧州からひとつの重要な理念が起ってきた。それは、たんにエネルギー資源の有効利用のみならず環境への影響の軽減化の観点からもエネルギー変換と最終需要の両部門において“material recycle use”を行うことの問題提起であった。Hafele 教授の提唱になる“horizontal energy system”と“vertical energy system”の構想⁽⁶⁾はこの問題提起を真正面から取り上げており、我々に強い刺激と研究開発の目標を与えようとしている。

その“material recycle use”には3つの基本プロセスが含まれていると思う。第1プロセスは低質の化石燃料に高温核熱を与えて分解しCOやH₂の基礎物質を作る。その際、不純物物質であるSO_xやNO_x及び他の金属性、非金属性の不純物を取り除く。第2プロセスはCOやH₂から発熱量が高く且つ使用に便利な合成ガスや合成油を合成する。第3プロセスは空気をO₂、CO₂、N₂に分離したり、あるいはCO₂をシフト反応を通じCOとO₂とに分離するプロセスである。このような反応プロセスを合理的に組み合わせることにより、低質の炭化水素物質を高質の炭化水素物質へ変換することができ、クリーンで且つ使いよいエネルギーキャリアを再生できる。若し、燃焼によって排出されるCO₂をも上記の分子組み換え反応を経て再循環利用できるものならば、我々は過度の炭素性物質を地下より掘り起す必要がなくなるであろう。

勿論、エネルギーの生産と消費の活動において“material recycle use”を行うということは「分子組み換え反応」を前提とすることにはかならないから、従ってこのような活動は必ずやエネルギー消費を増加させることになる。しかし、大切なポイントはたとえ我々のエネルギーシステムが若干増エネルギーのシステムになったとしても、我々はクリーンで且つ便利なエネルギーを得ることができ、且つまた、若しこの増分エネルギーを核エネルギーでまかなうことが可能になれば、我々は莫大なエネルギーを手得したことになるので有意義な活動だと判断される。このような観点にくみすれば、高温核熱の供給利用はいまひとつの重要な拠点をつかんだことになる。

しかし、このような構想を実現しうるものにするにはいくつかのハードルを通過せざるをえない。第1のハードルは、この構想、即ち“material recycle use”を目ざすエネルギーシステム、あるいはまた“無排出を目ざしたエネルギーシステム”が科学技術に十分に裏付けされており、特に燃料の再循環生産に対してのエネルギー効率がエネルギー資源的にみて、また環境制約上からみて許容できるものでなければならない。第2のハードルは、この構想が設計、試作、試験等の過程を経てひとつのエネルギー施設あるいは機器として工学的な実現性をデモンストレーションできるものでなければならない。そのデモンストレーションの過程においては基幹技術の研究開発や関連要素技術の選択が重要な課題になってくる可能性がある。第3のハードルは、たとえこの構想が工学的に可能であったとしても、エネルギー市場において経済的に競争しうるものであるかどうかの見極めが必要になる。この構想が市場導入を行ないうるものになる為には投資家を魅了し、それによるエネルギー活

動が利用者にベネフィットを与えるものでなければならない。

我々は、今行っている作業でこれらのことを全て解析し、明確にしようと欲しているわけではない。むしろ、この作業を通じてこの構想の潜在力を把み、同時にまた技術的問題点を摘出し、多様な技術上の選択の経路を整理してみたいと考えている。そして、若し高温ガス炉と核熱利用の意義が浮び上がってくれば我々はこの意義の源泉を探ぐり、その定量化を試みるつもりである。

3. エネルギーシステムのモデル化と解析手法

3.1 基準エネルギーシステム

基準エネルギーシステムは現在から長期的将来に至るエネルギーシステムの発展を総括的に表現するものであり、現存する若くは将来利用されうるすべてのエネルギー技術及びすべてのエネルギーキャリアによって組立てられている。本研究のために構築した基準エネルギーシステムについてはすでに詳細な報告を行った⁽²⁾。ここでは、Fig. 1 (本報告書に入っている英文報告書の Fig. と同一) に示されるその基本構造に関して簡略な説明を行うことにする。

1次エネルギー源は、一般に原子力、再生可能エネルギー、及び化石エネルギーに大別される。このうち原子力と再生可能エネルギーは、現在のところ主として発電に利用されている。一方化石エネルギーのなかでは、現代のエネルギーの主役である石油が、発電用のみならず産業用ボイラー及び加熱炉燃料、輸送用燃料、家庭における暖房用燃料として幅広く用いられている。天然ガス (LNG) は、発電のほか都市ガス製造に用いられている。石炭は、主としてコークス製造及び産業加熱用に利用されている。現在のエネルギーシステムで用いられている代表的なエネルギー変換技術としては、軽水炉発電、水力発電、重油火力発電、LNG火力発電、石油精製、重質油水素化分解、コークス炉などが挙げられる。

将来のエネルギーシステムは、まず第1に化石エネルギーの内部的転換、すなわち希少で高価な石油から他の炭化水素資源への遷移によって特徴づけられる。そこでは、現在エネルギー市場に浸透している石油系燃料を直接代替しうる合成燃料の製造技術が大きな役割を担うものと考えられる。石炭のガス化及び液化はその中心的な技術であり、本基準エネルギーシステムにおいては直接液化法の SRC-II プロセス、間接液化法の Fischer-Tropsch プロセス、水性ガス化プロセス、及び水添ガス化プロセスが組込まれている。

しかしながら炭化水素資源は本質的に枯渇性であり、またわが国にとっては程度の差はあれ輸入エネルギーに他ならない。加えて、炭化水素燃料の今後の消費増大によって地球規模の深刻な気候変化が生じるとの懸念が、近年増々強まってきている。こうしたエネルギーシステムの長期的懸念に対応すべく、本基準エネルギーシステムにはひとつの試みとして二酸化炭素の回収・再利用を中心とした分子組換えシステムが組込まれている。その中核となるのが高温ガス炉及び高温核熱利用系であり、概略 Fig. 1 の下半部に示すような構成となっている。

高温核熱の利用系は、メタン、メタノール、ガソリンなどの合成技術、メタン改質、電解水素製造、熱化学式水素製造、CO転化などの改質技術、及びCO-H₂分離、空気分離などの分離技術によって構成されている。このシステムはメタン (天然ガス)、二酸化炭素、及び水を主原料とし、これら

動が利用者にベネフィットを与えるものでなければならない。

我々は、今行っている作業でこれらのことを全て解析し、明確にしようと欲しているわけではない。むしろ、この作業を通じてこの構想の潜在力を把み、同時にまた技術的問題点を摘出し、多様な技術上の選択の経路を整理してみたいと考えている。そして、若し高温ガス炉と核熱利用の意義が浮び上がってくれば我々はこの意義の源泉を探ぐり、その定量化を試みるつもりである。

3. エネルギーシステムのモデル化と解析手法

3.1 基準エネルギーシステム

基準エネルギーシステムは現在から長期的将来に至るエネルギーシステムの発展を総括的に表現するものであり、現存する若くは将来利用されうるすべてのエネルギー技術及びすべてのエネルギーキャリアによって組立てられている。本研究のために構築した基準エネルギーシステムについてはすでに詳細な報告を行った⁽²⁾。ここでは、Fig. 1（本報告書に入っている英文報告書の Fig. と同一）に示されるその基本構造に関して簡略な説明を行うことにする。

1次エネルギー源は、一般に原子力、再生可能エネルギー、及び化石エネルギーに大別される。このうち原子力と再生可能エネルギーは、現在のところ主として発電に利用されている。一方化石エネルギーのなかでは、現代のエネルギーの主役である石油が、発電用のみならず産業用ボイラー及び加熱炉燃料、輸送用燃料、家庭における暖房用燃料として幅広く用いられている。天然ガス（LNG）は、発電のほか都市ガス製造に用いられている。石炭は、主としてコークス製造及び産業加熱用に利用されている。現在のエネルギーシステムで用いられている代表的なエネルギー変換技術としては、軽水炉発電、水力発電、重油火力発電、LNG火力発電、石油精製、重質油水素化分解、コークス炉などが挙げられる。

将来のエネルギーシステムは、まず第1に化石エネルギーの内部的転換、すなわち希少で高価な石油から他の炭化水素資源への遷移によって特徴づけられる。そこでは、現在エネルギー市場に浸透している石油系燃料を直接代替しうる合成燃料の製造技術が大きな役割を担うものと考えられる。石炭のガス化及び液化はその中心的な技術であり、本基準エネルギーシステムにおいては直接液化法の SRC-II プロセス、間接液化法の Fischer-Tropsch プロセス、水性ガス化プロセス、及び水添ガス化プロセスが組込まれている。

しかしながら炭化水素資源は本質的に枯渇性であり、またわが国にとっては程度の差はあれ輸入エネルギーに他ならない。加えて、炭化水素燃料の今後の消費増大によって地球規模の深刻な気候変化が生じるとの懸念が、近年増々強まってきている。こうしたエネルギーシステムの長期的懸念に対応すべく、本基準エネルギーシステムにはひとつの試みとして二酸化炭素の回収・再利用を中心とした分子組換えシステムが組込まれている。その中核となるのが高温ガス炉及び高温核熱利用系であり、概略 Fig. 1 の下半部に示すような構成となっている。

高温核熱の利用系は、メタン、メタノール、ガソリンなどの合成技術、メタン改質、電解水素製造、熱化学式水素製造、CO転化などの改質技術、及びCO-H₂分離、空気分離などの分離技術によって構成されている。このシステムはメタン（天然ガス）、二酸化炭素、及び水を主原料とし、これら

を高温核熱で変換して合成ガス、メタノール、水素などのクリーンで利便性の高い燃料を生産するとともに産業用のプロセスヒートを供給する。ここで生産された合成ガスは、産業用ボイラー及び加熱装置の燃料として用いられる。メタノールはボイラー燃料のほか輸送用の燃料としても用いられる。水素は化学工業原料、輸送用燃料、さらに石炭のガス化及び液化にも使用される。

設定した基準エネルギーシステムは、最終需要技術を含め200以上のエネルギー技術によって構成されている。解析に先立ってまず、個々のエネルギー技術に関する特性データを整備する必要がある。現在それらの収集、整理を進めている。

3.2 解析モデルとデータベース

本研究に用いる解析手法を Fig. 2 に示した。これは日本原子力研究所において開発・整備された「エネルギー—経済統合モデルシステム」であり、⁽³⁾ 機能的に4個のブロックによって構成されている。以下に各ブロックの役割と、そこに含まれる主要な解析モデルの開発状況を概説する。

第1ブロックは、マクロなエネルギー及び経済システムの長期発展シナリオを創出することを目的としており、 E^2 -MVAR, LTMEMO, ENERGYSD, エネルギー・経済SDモデルを含んでいる。このうちLTMEMOは中期ないしは長期の経済展開を予測するマクロ計量経済モデルである。基本的なモデル開発は完了しており、現在2030年に至る経済発展シナリオを創出するために利用されている。ENERGYSDは、所与の経済状況のもとでのエネルギーシステムの長期的展開を動的に予測するシステム・ダイナミクス(SD)モデルである。開発は完了し、現在2030年に向けてのエネルギーシナリオを創出するために使用されている。エネルギー・経済SDモデルは、エネルギー技術システムの構造的変遷プロセス、及び大規模な経済的変動によってもたらされるインパクトに関する定量的情報を与えるモデルである。現在開発の途上にある。

第2ブロックは、所与の将来発展シナリオのもとでエネルギー及び経済システムの構造解析を行うことを目的としており、長期多部門エネルギー・経済連関モデル、エネルギーシステム最適市場配分モデル MARKAL などで構成されている。長期多部門エネルギー・経済連関モデルは、エネルギー技術の今後の技術的進歩を踏えた上でエネルギーと他の投入要素との間の代替性及び補完性を定量的に明らかにするとともに、経済システムの動向がエネルギー技術に与えるインパクトを分析するために開発された。モデルは2つの構成要素、すなわちTRANS-I/OとE(MATRIX)から成っている。TRANS-I/Oは、可変技術係数型の投入—産出解析手法を基盤とした多部門経済モデルである。一方E(MATRIX)は、エネルギーマトリックス分析のフレームワークを持つエネルギー部門サブモデルである。計算プログラムの開発は完了しており、基準年データベースの整備を現在進めている。

第3ブロックは、原子炉及び関連核燃料サイクルシステムの長期的開発に関する戦略解析をその目的としており、長期核燃料サイクルの最適化モデル JALTES-II 及び JALTES-III を含んでいる。JALTES-II は開発の完了したモデルであり、これまでに新型転換炉の役割、プルトニウム有効利用戦略の検討などに使用されてきた。JALTES-III は、核燃料サイクルシステムの記述ならびにコストの計量に関して抜本的な改良を施し、JALTES-II に較べて解析能力及び精度を大幅に高めたモデルである。計算プログラムの基本的な開発を終え、検証段階に至っている。

第4ブロックは、個別のエネルギー技術若しくは技術システムのコスト—ベネフィット—リスク・ア

セスメントを行うことを目的としており、地域社会・経済・環境モデル、コストアセスメントモデル、原子力産業財務モデルを含んでいる。地域社会・経済・環境モデルは、SD手法を用いて、大規模なエネルギー施設が地域社会、経済、及び環境に与えるインパクトを定量的に求めるモデルである。開発は完了している。コストアセスメントモデルは、年均等化コスト計算法によって単一発電プラントの発電原価を算出するモデルである。これもすでに開発を終えている。原子力産業財務モデルは、原子力産業の財務的検討を行うとともに個々の核燃料サイクル工程の処理コスト若くは生産コストを算出するモデルである。現在プログラム開発の途上にある。

以上の解析手法の開発と併行して、エネルギー技術特性ならびにエネルギー需要構造に関するデータベースの整備を進めてきた。エネルギー技術特性に関しては、これまで特に技術的性能及びコストデータを中心に収集、整理を行った。現在は環境データベース、すなわち環境放出データ及び環境保護技術の特性データの整備に努めている。一方エネルギー需要構造に関しては、エネルギー消費と経済活動量に関するデータを整備し、エネルギー利用構造の変化を踏えて将来のエネルギー需要を推定することを目的とした産業プロセスモデルの開発に取り組んでおり、現在エネルギー多消費産業の1つである紙・パルプ産業を対象としてパイロットモデルの開発を進めている。

4. 基準年システム

我々は、これからの解析作業で現時点から50年先の長い期間を対象に我が国のエネルギーシステムを展望してみようとしている。この展望を行うには、少くとも先ず第1に我々は現在おかれている我々のエネルギー経済システムの状況の把握からはじめねばならない。勿論、この把握は基準年次1年のみを対象とするのではなく、過去の発展の推移が読みとれる期間に対してなされねばならないであろう。そうすることによって、我々は将来への発展への鍵と条件を探ることができよう。

4.1 経済発展

日本経済は戦後10年を経て、1955年によく戦前の水準に達しえた。Fig. 3には日本経済の復興を終えた1955年代から最近までの経済活動の足どりを経済成長率、常用雇用者指数、ならびに消費者物価指数の3指標を使って大つかみに示した。この間の経済活動は大凡次の3期間：
1955-1970年、1971-1978年、1979年-今日に分けてとらへることができよう。

[技術革新と消費革命]

第1の期間(1955-1970年)は、技術革新と消費革命に支えられて高度成長の道をひたむきに走り続けた年代であった。経済復興を終えた1955年の翌年には、はやくも技術革新への投資や耐久消費財への需要の急増により一時の好景気(神武景気)を見たが、しかし急速な投資は輸入増加を起し国際収支の赤字をきたした。この為、1957-58年にかけては抑制政策をとらざるをえず“なべ底不況”へ転落した。

しかし、この不況はつかの間を終り、耐久消費財への需要、新技術・設備の大型化へ向けての投資活動が回復して1958年下期からは再び好況(岩戸景気)に転じた。

セスメントを行うことを目的としており、地域社会・経済・環境モデル、コストアセスメントモデル、原子力産業財務モデルを含んでいる。地域社会・経済・環境モデルは、SD手法を用いて、大規模なエネルギー施設が地域社会、経済、及び環境に与えるインパクトを定量的に求めるモデルである。開発は完了している。コストアセスメントモデルは、年均等化コスト計算法によって単一発電プラントの発電原価を算出するモデルである。これもすでに開発を終えている。原子力産業財務モデルは、原子力産業の財務的検討を行うとともに個々の核燃料サイクル工程の処理コスト若くは生産コストを算出するモデルである。現在プログラム開発の途上にある。

以上の解析手法の開発と併行して、エネルギー技術特性ならびにエネルギー需要構造に関するデータベースの整備を進めてきた。エネルギー技術特性に関しては、これまで特に技術的性能及びコストデータを中心に収集、整理を行った。現在は環境データベース、すなわち環境放出データ及び環境保護技術の特性データの整備に努めている。一方エネルギー需要構造に関しては、エネルギー消費と経済活動量に関するデータを整備し、エネルギー利用構造の変化を踏えて将来のエネルギー需要を推定することを目的とした産業プロセスモデルの開発に取り組んでおり、現在エネルギー多消費産業の1つである紙・パルプ産業を対象としてパイロットモデルの開発を進めている。

4. 基準年システム

我々は、これからの解析作業で現時点から50年先の長い期間を対象に我が国のエネルギーシステムを展望してみようとしている。この展望を行うには、少くとも先ず第1に我々は現在おかれている我々のエネルギー経済システムの状況の把握からはじめねばならない。勿論、この把握は基準年次1年のみを対象とするのではなく、過去の発展の推移が読みとれる期間に対してなされねばならないであろう。そうすることによって、我々は将来への発展への鍵と条件を探ることができよう。

4.1 経済発展

日本経済は戦後10年を経て、1955年によく戦前の水準に達しえた。Fig. 3には日本経済の復興を終えた1955年代から最近までの経済活動の足どりを経済成長率、常用雇用者指数、ならびに消費者物価指数の3指標を使って大つかみに示した。この間の経済活動は大凡次の3期間：
1955-1970年、1971-1978年、1979年-今日に分けてとらへることができよう。

〔技術革新と消費革命〕

第1の期間（1955-1970年）は、技術革新と消費革命に支えられて高度成長の道をひたむきに走り続けた年代であった。経済復興を終えた1955年の翌年には、はやくも技術革新への投資や耐久消費財への需要の急増により一時の好景気（神武景気）を見たが、しかし急速な投資は輸入増加を起し国際収支の赤字をきたした。この為、1957-58年にかけては抑制政策をとらざるをえず“なべ底不況”へ転落した。

しかし、この不況はつかの間を終り、耐久消費財への需要、新技術・設備の大型化へ向けての投資活動が回復して1958年下期からは再び好況（岩戸景気）に転じた。

この期間（1955-1974年）の経済の高度成長の真の源泉は1960年12月に発表になった「国民所得倍增計画」であったろう。この計画は1970年までの間の10年間に国民所得を2倍にしようとするもので、産業構造を高度化し（即ち、従来の民生機器の生産型から重化学工業重視型へ転換させ）、新生産技術の活用、人的資源の開発を重視し、併せて国際経済協力と貿易の振興をうたっていた。

1960年代の日本経済の発展は将にこの計画の推進のたまものであり、その成果も、その後「黄金の60年代」と呼ばれるものにふさわしい内容であった。即ち、1959-61年にかけては外資の活用をも行ないながら民間設備投資を急激に伸ばし〔実質成長率で38.8%（1950-60年）、24.4%（1960-61年）〕、革新技術を取り込みながら重化学工業化への足固めを急いだ。この足固めの過程で、製造業部門における人手不足は賃金と物価のスパイラル的上昇を引起したもので、第3次産業をも含めての経営技術の近代化、合理化を誘発させ、後の「流通革命」の基礎をも並行して築いてゆくことになった。

他方、日本経済が1964年に開放体制へ移行した事（IFM8条国移行、及びOECDへの加盟）は日本経済に活力を与えるいまひとつの機会でもあった。それは生産が内需のみならず外需の目標を得たからである。工業生産は毎年10%以上の成長率を維持し、日本のGNPはGWPの7~10%レベルに達していった。また、1966年頃からはじまった好景気（いざなぎ景気）は輸出の急増によるもので、日本経済の世界経済へ与えるインパクトが議論を呼ぶようになった。

しかし、急速に展開した高い経済成長には必ず代償を伴うものである。経済が大きくなったにもかかわらず、国民の間には「豊かさの実感」が乏しかった。その理由は、ひとつには工業化に伴って都市へ人口が集中してきたにもかかわらず住宅対策が立遅れていたこと、運輸部門の活動量が増えたにもかかわらず道路事情が改善されなかったこと、更に生産増加に伴って大気汚染、水質汚濁、日照権、騒音、振動、等の公害が目立ってきたことである。

〔公共部門の立遅れ及び外部不経済の調整〕

第2の期間（1971-78年）は、“公害の追放”，“公共部門の立遅れの改善”，そして何よりも“真の豊かさ”の追求へのり出した年代であった。公害に関してみれば、有機塩素系農薬（BHC, DDT），ヘドロ，Cd汚染，イタイイタイ病，大気汚染によるゼンソク，光化学スモッグ，水質汚濁，水俣病，サリドマイドやスモン病，騒音（新幹線／航空機），地下水吸上げによる地盤沈下…と数多くの問題が顕在化し「集積の利益」があらためて見直され「外部不経済」への対応が問題となった。

公共部門の立遅れに関しては、先ず第1に学校、病院等の公共施設の不備、第2に土地価格と住宅難、上下水道の整備の必要、第3に道路、交通事情の悪化が一段と厳しくなり都市部の再開発、工業再配置が大いに議論になった。真の豊かさに関しては“変化への不適応”，“新しい社会管理のあり方”，“高福祉経済（マクシミン原理に裏付けされた）”が政策課題となり“インフレのない繁栄”が強く望まれた。

日本経済がこのような目標の達成に向けて進み出してゆく為には、経済運営が第1期にみた民間設備投資主導型から代って公共部門投資主導型へと変化してゆかねばならなかった。経済のこの変革の時期（1971-72年）は不況（そうはいつでも実質成長率5.7%もあり今日からみれば高い）の時期でもあったので、国債の発行によって不況の乗りきりが行なわれた。その後、1975年頃まで

の間に多量に国債が発行されて公共投資、福祉対策が図られ、財政政策が経済運営の重きをなした。第2期は特に公共部門主導型（又は財政主導型）の高度成長の年代であった。

この期間は、日本経済が国際的な転換を図った時期でもあった。一方では海外資源を求め、他方では輸出の急増を経験し「いざなぎ景気」を享受した。この間、日本の国際収支は大巾な黒字になって行ったが、また、海外のインフレの進行の影響をも受け物価は上昇し続け、遂に1970-71年には物価高の景気後退（即ちスタグフレーション）に見まわれた。そして、日本経済は3つのジレンマと3つのギャップ（即ち、物価高の景気低迷、国内需給の不均衡と大巾な国際収支の黒字、成長と福祉のアンバランス）に直面するのである。

〔福祉社会建設に向けて〕

新基準為替レートの設定（1971年）から変動相場制への移行（1978年）、新しい福祉社会の建設のスタート、都市再開発、工業再配置、狂乱物価…と矢つぎ速やの社会経済変動のなかで、日本経済は第3の期間（1973年-今日）に突入してゆくのである。この突入の始まりは石油危機の1973年であった。

石油危機はエネルギーのように根源的な経済資源の供給制約が如何に大きな力を持つものであったかを示すことになった。石油危機の翌年（1974年）にはマイナス成長を経験し「福祉社会建設」への意気込み、「物価安定と所得政策」に対してはやくも水をさすことになった。しかし石油に弱い日本経済の体質を反映してか、或いはまた日本製品の質の良さを反映してか、円安が輸出を急増させ、石油価格の急騰にもかかわらず日本経済は不況を乗り切り小康を得た。

しかし、産業部門においては省エネルギー、エネルギー源の多様化の推進が必須であったし、企業の減量経営と企業体質（金融費用高と人件費高）の改善をよぎなくされた。これを機に、日本の産業は素材産業から組立産業や知識集約型産業へと構造転換を行ない、日本経済は減速し安定低成長型に変遷しつつある（Fig. 3参照）。

現下の日本経済は、概して海外需要依存型で、国際収支も黒字基調が続き、貿易摩擦が一段と深刻化している。また、国内では業種間の景気の破行性が目立ち、公共部門においては小さな政府、財政再建へ向けて苦慮している。さらに、高齢化が一段と進んでゆくなかで、福祉社会の建設と所得政策が当初の期待通りには進んではいない。今後の日本経済は安定成長を基本にこのような残された問題の解決にあたってゆかねばならないものとみられている。勿論、生命工学とかメガトロニクス、或いは新素材等の技術を普及させ経済のハード面とソフト面とを相互補完させながら新たなる技術革新の力を借りて「福祉社会建設」へ向けての成長もありうる。その際、エネルギーの如き経済の根源的要素ならびに我々を取りまく自然環境の如き直接間接に健康に係ってくる要素に対しては何時如何なる処においてもその保全に万全を機さねばならない。

4.2 エネルギー需給

〔一次エネルギー供給構造〕

経済復興期のエネルギーの主役は水力と石炭であった。しかし経済が高度成長期に入ってから石油が増大していった。Fig. 7には経済復興後10年を経た時点1965年から最近までの一次エネルギーの供給構造が示されている。1973年の石油危機に至るまでの間に石油は経済成長に合わせて

急速な伸びを示したことがわかる。しかし、石油危機の翌年及び翌々年には供給量がかなり下がり、1976年からは若干の増加をみたものの、省エネルギー、燃料の多様化、産業構造の転換努力が効いて1980年に入ってからには需要はさらに下り、1984年の供給量は1971年レベルになっている。Fig. 8に1980年のエネルギーシステムをフローダイアグラムにして示した。

高度経済成長期には原料炭の需要も大きく伸びたことが Fig. 7 からわかっていよう。しかし、1973年を境にして鉄鋼生産量が1億トンに留まっていることから原料炭の供給量は増えていない。

一般炭は経済復興期に主役を荷なったエネルギー源で、発電用に、ボイラー用燃料に、セメント焼成用に……、そして輸送用にも使われた。しかし、エネルギーの流体革命化に伴ない需要量は減少して行った。このことは Fig. 7 によく表われている。しかし、石油危機以降、一般炭の利用が復活してきた。それは、一部は電力部門へ、一部は製造業部門における燃料としての利用である。

天然ガスについては、都市ガス利用、都市近郊における火力発電の燃料としての利用が行なわれている。石油危機以降は代替エネルギーとしての役割も高くその需要が高まった。

原子力については、現在は全て発電利用に限られているが、石油危機以降は代替エネルギーとしての役割をも十分に発揮している。現在、原子力は一次エネルギー全供給量のほぼ8.6%を占めている。他方、自然エネルギーについては水力の寄与が最も多く（一次エネルギーシェアの4.9%）、地熱や太陽熱の直接利用も行なわれている。

[電力需給]

電力は高価なエネルギーではあるが、クリーンで且つ使いよい。一次エネルギーに占める電力比率は年々増加し、1984年時点では32%に達している。電力部門も流体革命に乗り石油危機の年に至るまでに石油火力が急増した。しかし、1974年以降は原子力、天然ガスが増加している。また、1980年以降からは石炭火力も増加しつつある（Fig. 9）。

電力の需要構造を1981年を例にとり Fig. 10 に示した。総需要量の59%が産業部門で、38%が民生部門で、3%が輸送部門での消費となっている。電力需要に占める自家発電の比率は13.4%（1973年）から8.9%（1983年）へと低下している。

[エネルギー利用効率]

石油危機の1973年をはさんで、その前の1970年とその後の1980年の2時点での産業部門におけるエネルギー利用効率を Fig. 11 に示した。農林水産業とその他製造業を除いた他の全ての産業のエネルギー利用効率は改善されていることがわかる。ここに示したエネルギー利用効率は経済単位で測った効率であるが、物理単位で測った効率（例えば鉄鋼部門であれば粗鋼1 ton の生産当りのエネルギー消費量）も同様に改善されている。なかでも、エネルギー多消費産業（鉄鋼、非鉄金属、化学、窯業・土石、紙パルプ）のエネルギー利用効率の改善が大きい。

経済全体からすればエネルギーの経済的価値は決して大きなものでないことが Fig. 12 から読みとれよう。これは、各産業に対して、全投入量に占めるエネルギーの投入量の比率がわかるように図示したものである。既述のエネルギー多消費産業といえどもエネルギーの投入比率は4～10%である。

〔用途別エネルギー需要〕

産業や民生、輸送部門で需要されたエネルギーの用途別構成を1980年を例にとり Fig. 13に示した。投入エネルギーの過半はボイラーとか工業炉用の熱エネルギー源として使用されていることがわかる。

熱エネルギー利用としてのみの需要エネルギー量を取り出し、その温度帯域別構成を示したのが Fig. 14～Fig. 16である。この需要構成は、(i)0～300℃、(ii)300～600℃、(iii)600～900℃、(iv)900℃以上の4温度領域に分けてとらえてみるることができる。第(i)の領域は主に民生用熱源と産業用プロセス蒸気を含む低・中温熱領域を、第(ii)領域は自家発電を含む産業用プロセス熱源として、第(iii)領域はセメント焼成やその他工業炉、その他の熱源として、第(iv)領域は鉄鋼高炉を主体とする熱源である。使用燃料としては、石油製品（重油、灯油）、石炭製品（コークス）が大半を占めている。

エネルギー需給のこの実績から、核熱の役割を探ってみると、それは既に第2章で説明した用途の裏付けがなされよう。要は、このような用途が資源的に、経済的に、且つ環境インパクトの観点を組み入れて何時から如何ほどの量が投入されるものであるかを知ることであろう。その為の前提条件を定量的に把握することがシステムズ解析を行う所以でもある。

4.3 環境排出

エネルギー使用に伴って発生する環境への影響では、化石燃料の燃焼に伴って発生する SO_x 、 NO_x の影響が大きい。我が国では1970年代半頃から環境保全の為の努力が払われ、大気、水、土壤等の保全に目ざましい改善がなされた。1980年の個々のエネルギー利用部門が排出した SO_x 、 NO_x の概数を Fig. 17～18に示した。Fig. 17が示すように、 SO_x 排出量の1/4は電気事業からであり、この部門は多量のエネルギーを変換している。同図は、エネルギー多消費産業もまた排出量の多いことを示している。他方、 NO_x に関しては Fig. 18が示す如く輸送部門が大きなシェアを示している。また、個々の産業毎の NO_x の排出は SO_x 以上にばらついている。

産業部門における SO_x 、 NO_x 排出量を産業プロセス別に示したのが Fig. 19～20である。Fig. 19から明らかなおとおり、 SO_x 排出の多い産業プロセスは発電用ボイラー、プロセス蒸気生産の為のボイラーである。Fig. 20に示す如く、セメント生産用のキルンから多量の NO_x が排出されている。

SO_x 、 NO_x の排出原単位、即ち単位エネルギー利用当りの排出量をエネルギー需要セクター別に Fig. 21に示した。排出原単位からみて、セクターは3グループに分けてとらえることができる。第1グループ、即ち SO_x 排出原単位の高いグループは化学工業、紙パルプ、非鉄金属等の比較的石油製品依存度の高い産業である。第2グループ、即ち NO_x 排出原単位の高いグループは窯業や輸送部門等高温燃焼機器を使用する部門である。第3グループは SO_x 、 NO_x とも排出原単位が低いことが特徴で、鉄鋼、電力、機械等の産業部門及び民生部門がここに含まれている。第3グループの排出原単位が低い理由はひとつには環境排出抑制対策の努力がなされていること、ひとつには都市ガスや灯油などクリーンな燃料が使われていることにある。

SO_x の排出に関しては既存技術の活用のもとでもさらに低減化が出来、又は低硫黄燃料の利用に切換えることによって低減化が可能である。しかし、 NO_x は燃料内の窒素分（燃料 NO_x ）のみな

らず空気中の窒素分（燃焼 NO_x ）が含まれるので、両方の NO_x の低減化は今後は重要な課題になるう。

酸性雨による環境破壊については我が国でもいくつかの機関が調査を行っている。しかし、現状におけるダメージは欧州におけるものに較べはるかに小さく、こゝではこれ以上の考察はしない。大気中の炭酸ガスに関しては日本はその濃度を測定している程度の活動である。長期的な視点に立っての環境保全からも、このような問題の系統的なアセスメントが強く望まれよう。

5. あ と が き

エネルギー・経済・環境問題に対してのシステムズ解析は一般的にみて巾広い問題を取り扱うから、したがって解析手法、データベース、種々のシナリオの創出からその評価に至る個々の要素もまた深い考察が不可欠である。この認識を踏まえて我々は我々の研究を進めてゆくつもりである。この意味からも、次の段階ではエネルギー・経済・環境システムの構造解析を開始すべきものと考えている。高温核熱の導入の意義をこのような点から掘り起して分析してゆく方針であり、その準備を行っている。次回にはその分析結果を報告するつもりである。

謝 辞

本研究の実施にあたり、特に環境排出に係るデータベースの作成にあたっては（株）三菱総合研究所の佐々木俊治氏ならびに石川正道氏からの多くの助言と協力を得たことを記し、こゝに深く謝意を表します。

らず空気中の窒素分（燃焼 NO_x ）が含まれるので、両方の NO_x の低減化は今後は重要な課題になるう。

酸性雨による環境破壊については我が国でもいくつかの機関が調査を行っている。しかし、現状におけるダメージは欧州におけるものに較べはるかに小さく、こゝではこれ以上の考察はしない。大気中の炭酸ガスに関しては日本はその濃度を測定している程度の活動である。長期的な視点に立っての環境保全からも、このような問題の系統的なアセスメントが強く望まれよう。

5. あ と が き

エネルギー・経済・環境問題に対してのシステムズ解析は一般的にみて中広い問題を取り扱うから、したがって解析手法、データベース、種々のシナリオの創出からその評価に至る個々の要素もまた深い考察が不可欠である。この認識を踏まえて我々は我々の研究を進めてゆくつもりである。この意味からも、次の段階ではエネルギー・経済・環境システムの構造解析を開始すべきものと考えている。高温核熱の導入の意義をこのような点から掘り起して分析してゆく方針であり、その準備を行っている。次回にはその分析結果を報告するつもりである。

謝 辞

本研究の実施にあたり、特に環境排出に係るデータベースの作成にあたっては（株）三菱総合研究所の佐々木俊治氏ならびに石川正道氏からの多くの助言と協力を得たことを記し、こゝに深く謝意を表します。

らず空気中の窒素分（燃焼 NO_x ）が含まれるので、両方の NO_x の低減化は今後は重要な課題になるう。

酸性雨による環境破壊については我が国でもいくつかの機関が調査を行っている。しかし、現状におけるダメージは欧州におけるものに較べはるかに小さく、こゝではこれ以上の考察はしない。大気中の炭酸ガスに関しては日本はその濃度を測定している程度の活動である。長期的な視点に立っての環境保全からも、このような問題の系統的なアセスメントが強く望まれよう。

5. あ と が き

エネルギー・経済・環境問題に対してのシステムズ解析は一般的にみて巾広い問題を取り扱うから、したがって解析手法、データベース、種々のシナリオの創出からその評価に至る個々の要素もまた深い考察が不可欠である。この認識を踏まえて我々は我々の研究を進めてゆくつもりである。この意味からも、次の段階ではエネルギー・経済・環境システムの構造解析を開始すべきものと考えている。高温核熱の導入の意義をこのような点から掘り起して分析してゆく方針であり、その準備を行っている。次回にはその分析結果を報告するつもりである。

謝 辞

本研究の実施にあたり、特に環境排出に係るデータベースの作成にあたっては（株）三菱総合研究所の佐々木俊治氏ならびに石川正道氏からの多くの助言と協力を得たことを記し、こゝに深く謝意を表します。

参 考 文 献

- (1) Masao Hara, Shigeru Yasukawa, Yoshihiro Tadokoro, Shuichi Mankin, Osamu Sato, Kazuo Yamaguchi, "Work Plan for the Study on the Role of Very High Temperature Reactor and Nuclear Process Heat Utilization in Future Energy Systems", Preprint for distribution to participants at IES meeting held at National Academy of Engineering in Washington D.C. on October 4~5 in 1984.
- (2) Masao Hara, Shigeru Yasukawa, Shuichi Mankin, Osamu Sato, Kazuo Yamaguchi", The Study on the Role of Very High Temperature Reactor and Nuclear Process Heat Utilization in Future Energy Systems [Progress Report No. 1]", Preprint for distribution to participants at IES meeting held at IIASA on April 15-16, 1985.
- (3) Shigeru Yasukawa, Shuichi Mankin, Osamu Sato, Kazuo Yamaguchi, Seiichi Ueno, "Recent Progress in Energy Technology Systems Analysis at JAERI", Preprint for distribution to participants at OECD/IEA/ETSAP meeting held at KFA Jülich on November 25-29, 1985.
- (4) Shuichi Mankin, Shigeru Yasukawa, Osamu Sato, Kazuo Yamaguchi, Seiichi Ueno, Masao Hara, "The Study on the Role of Very High Temperature Reactor and Nuclear Process Heat Utilization in Future Energy Systems- Macro-Economic and Energy Supply Scenarios for Japan through the long-term", Preprint for distribution to participants at IES meeting held at TAIPEI on January 16-18, 1986.
- (5) 「将来のエネルギーシステムにおける高温ガス炉と核熱利用の役割に関する研究協力プログラムに関するマサチューセッツ工科大学と日本原子力研究所との間の協定」(昭和60年1月).
- (6) W. Häfele, H. Barnert, S. Messner, M. Strubegger, "Novel Horizontally Integrated Energy Systems, The Case of Zero Emission", Preprint for distribution to IES member, December 1, 1983.

付 録

The Study on the Role of Very High Temperature Reactor
and Nuclear Process Heat Utilization in Future
Energy Systems*

Review of Energy-Economy-Environment
System in Past and Present Years

January 17, 1986

Shigeru Yasukawa	Shuichi Mankin
Osamu Sato	Kazuo Yamaguchi
Seiichi Ueno	Masao Hara

{ * Preprint for distribution to participants at
IES meeting held in Taipei on January 16-18. }

1. Introduction

The work plan and the analytical procedure for the systems analysis on high-temperature nuclear heat utilization have been reported at twice IES meetings held in Washington, D.C. and Vienna.

In those reportings, we explained our five tasks, i.e. (i) the scenario generation for socio-economic development in the future years, (ii) modelling a reference energy system and making a long-term energy demand-supply projection, (iii) impact analysis of the future energy system on national economy and environment, (iv) evaluation of technical and economical competition of the associated energy technologies, (v) finding the optimal path for deploying high-temperature nuclear heat utilization in the future energy system. Also we showed our ideas that the Integrated Energy-Economy-Environment Model System would be utilized as an analytical tool and the beforementioned tasks would be systematically analyzed.

In this report we will present the recent research progresses especially focussing on the following three items: (i) progress in the development of the analytical method and data base, (ii) generation of the scenario frame for the long-term socio-economic development, (iii) the characteristics of the past and present energy-economy systems. As for the item (ii), it will be explained in a separate paper.

2. Background Recognition

It has past already fifteen months since we started the present study on utilization of the high-temperature nuclear heat, which is to serve as a central energy in realizing zero-emission in our future energy system through material recycle use. The beginning of this study was the call from the MIT requested us to participate in the cooperative research programme on the "Integrated Energy System".

Our understanding on the utilization of high-temperature nuclear heat before initiation of this IES study stood just about on such idea that the high-temperature nuclear heat can be utilized for reforming low grade fossil fuels, for instance, coal, shale-oil, tar-sand, into a synthetic gas and/or a synthetic oil, and also producing a reducing gas utilized for iron-making. In each application, the essential intermediate material is a hydrogen gas which serves as a strong agent in reforming and reducing processes, and we knew that how efficiently and how economically hydrogen can be produced is a central issue in those energy productions. Actually, various technologies for hydrogen production including methane reforming, high-temperature electrolysis, thermochemical splitting are now widely under-developing.

Just as this central issue has been recognized and in the course of promoting the second stage of the technology development, the environment surrounding energy sector has greatly changed. That is, almost all of energy intensive industries in Japan have accomplished the goals of energy conservation and fuel switching and also their structural changes so that during those ten years after the first oil embargo the constitution of those industries became more flexible in their fuel uses. Declining economic growth experienced in the past ten years also relieved the industries from the burdens.

Many blast furnaces already attained an oil-less iron-reducing and they are now paving the way to utilize a forged coke. They also employed a reactor top autogeneration. From these reasons, such subject as exploiting coking coal is not urgent, and the expectation to nuclear steel making goes far off. At the non-ferrous metal industry, especially in aluminium industry, the indigenous production of Al metal has been greatly reduced and the shape of its industry did undergo a complete change to such industry as oriented in fabrication-assembly goods. In the cement industry, the fuel for rotary-kilns has been completely switched from heavy distilled oil to steam coal, and in the pulp and paper industry both fuel switching and recycle use of wastes have been greatly progressing. In the chemical industry, especially in the oil refinery sector, the idle capacity has almost completely swept away. In the electric power generation sector, nuclear power generation has been increasing its share largely especially after the oil embargo instead of expanding such steam power plant as utilizing oil.

The boom of the research and development on synthetic gas and oil production by coal gasification and liquefaction technologies at one time has now been greatly faded away, and the recent glut of oil is pursuing its R & D fund furthermore. Such present tendency is more or less equally confronted for the R & D activities on new energy technologies; for instance, for renewable energy or high-temperature nuclear heat, even though they are categorized as noble energy sources and many expectations are stressed on them.

In those circumstances, one important idea emerged from the Europe.

It is an idea of "material recycle use", which should be implemented in various energy activities. It seems to us that this idea will aim not only at rational use of energy resources but also at mitigation of environmental influences. The recent KFA's research work on "the Horizontal Energy System" and "the Vertical Energy System", firstly proposed by Professor Häfele, rightly reflected this idea, and this gave a strong impetus for us to settle a target for a long-term energy R & D programme.

We consider that there exists three fundamental processes behind "material recycle use" in energy activities. The first one is a reforming process, by which hydrocarbon material is resolved into CO and H₂ by utilizing high-temperature heat, and the various impurities, such as sulphur, nitrogen, heavy metals, are removed from the products at the same time. The second is a synthetic process, by which SNG and/or synthetic oil are produced. The third one is a separation and/or shift process, by which air is separated into O₂, CO₂, N₂ as one example and CO₂ is splitted into CO and O₂ as another example. By rational use of these processes, we can convert low grade fossil fuels to more convenient clean fuels. If we can efficiently convert CO₂ into some kind of fuel material, for instance methanol, with the utilization of the above processes, and if we can attain the recycle use of CO₂ economically, we may have no more necessity to exploit excess carbon from the underground.

As material recycle use always stands on the principle of molecular reforming, the energy conversion process employing this may inevitably increase energy consumption. Yet there exists one important point that even though our energy system may become a little un-efficient system from thermo-dynamic point of view, we can get a clean and convenient energy carrier, and if this excess energy demand can be satisfied by supplying nuclear energy, we have a huge amount of convenient and clean energy. Recognizing these points of view, the utilization of high-temperature nuclear heat has now another important objective.

The above conception has several hurdles to overcome, however, before it becomes a really practical option for the future. As the first hurdle, this conception "the energy system aiming at material recycle uses", or in other words "the energy system toward zero emission", should be fully supported by science and technology. Especially the overall energy efficiency in recycle uses of energy should be within an acceptable level from viewpoints of energy resource conservation and environmental protection. As the second hurdle, engineering feasibility of the conception should be demonstrated for each of equipments and facilities through processes of designing, trial manufacturing, testing, and so on. In the course of these demonstrations, the research and development on the key technologies and the selection of related technology components would be important subjects. As the third hurdle, marketability of the conception should be also demonstrated, even if it is feasible from the engineering point of view. The conception should give an incentive for investment and at the same time benefits to its users in order to penetrate into the real market.

It is not our intention to analyze and clarify all of the above issues within this study. Rather, we intend to evaluate the potential of this conception, extract the technical problems, and rearrange the paths for selecting various technological options through this study. And if some benefit of utilizing VHTR and its high temperature heat in future energy systems comes out, we will investigate the grounds behind the benefit and try to quantify them.

3. Energy System Modelling and Analytical Method

3.1 Reference Energy System

The reference energy system is a comprehensive representation of energy systems developing from present to the long-term future. It comprises all energy technologies and energy carriers existing now or possibly in future. We have already presented the detailed diagram of our reference energy system. Here we describe briefly its basic structure as shown in Fig. 1.

Primary energy sources are divided into nuclear, renewable, and fossil. At present, nuclear energy and renewable energy are used mainly to generate electricity. While, as for fossil energy, oil is widely used as a fuel for industrial boilers and for transportation, as well as to generate electricity. Natural gas (LNG) is used for town gas production in addition to electricity generation. Coal is mainly utilized for coke production and industrial heating. The representative energy technologies employed in the existing energy system are the light water reactors, hydropower plants, oil-fired electric power plants, LNG-fired electric power plants, oil refinery, hydro-cracking of heavy fuel oil, coke ovens, and so on.

The future energy system will be characterized, first of all, by the transition of fossil energy sources from expensive and scarce oil to other hydrocarbon resources. Here coal gasification and liquefaction technologies will take an important role to produce synthetic fuels as substitutes for oil products. The reference energy system involves the SRC-II process, the Fischer-Tropsch process, the steam-gasification process, and the hydro-gasification process.

The hydrocarbon resources, however, are inherently exhaustible, and in case of Japan they are more or less imported energy. In addition, serious meteorological changes are expected with increased uses of hydrocarbon fuels. Thus the recycle use of carbon dioxide is given special emphasis in the reference energy system. The lower half of Fig. 1 represents the utilization system of high temperature nuclear heat structured in this context.

The utilization system of high temperature nuclear heat comprises synthesis technologies for methanol and methane production, reforming technologies such as methane reforming, electrolysis, thermochemical water splitting, CO₂ shifting, and technologies for CO-H₂ separation and for air separation. The system produces industrial process heat and clean and convenient fuels such as methanol, hydrogen, synthetic gas by utilizing high temperature heat, methane, recycle CO₂, and water. Methanol will be used as a boiler fuel and a transportation fuel. Synthetic gas will be used for industrial boilers and heating devices. Hydrogen will be used as a raw material for chemical industry, a transportation fuel, and also as agent for coal gasification and liquefaction.

The reference energy system consists of more than 200 energy technologies including end-use technologies. Before carrying out the systems analyses, characteristic data on technical performances, economical performances, and environmental emissions must be established for each of these technologies. The works to investigate and compile the characteristic data are now in progress.

3.2 Analytical Models and Data Bases

The analytical models to be applied for this study are schematically presented in Fig. 2. The figure shows the Integrated Energy-Economy-Environment Model System being developed in JAERI. The system consists of four blocks. Followings are brief reviews on the present status of the development.

The first block, for generating scenarios of long-term macro energy and economy development, involves analytical models such as E²-MVAR, LTMEMO, ENERGYSD, and the macro energy-economy SD model.

LTMEMO is a macro econometric model to forecast mid-term or long-term development of national economy. The development of the model frame has completed. It is now being applied for generating economic scenarios until the year 2030.

ENERGYSD is a model to forecast dynamic behaviors of long-term energy systems under the given economic scenarios. It is a simulation model using the system dynamics modelling technique. The development has completed. The model is now being utilized for generating energy scenarios toward the year 2030.

The macro energy-economy SD model is also a system dynamics simulation model designed to give a scope of structural transition processes of energy technologies and to give quantitative information on the impacts caused by large economic depression or inflation. The model is still under development.

The second block, for structural analysis on energy and economy systems under the given scenarios, includes the multi-sectoral energy-economy interaction model and the energy system market allocation model MARKAL.

The multi-sectoral energy-economy interaction model has been developed to quantify the degree of substitutability and complementarity among energy and other factor inputs taking into account technical progresses of energy technologies, and also to estimate the impact being brought upon the energy technology from the rest of an economy system. The model consists of two parts, i.e. TRANS-I/O and E(MATRIX). TRANS-I/O is a multi-sectoral economy model based on the input-output method with variable I/O coefficients. E(MATRIX) is an energy submodel having a framework of energy matrix analysis. The computer program for the models has completed and preparation of the reference year data base is underway.

The third block, for strategy analysis on the development of nuclear power reactors and related nuclear fuel cycle systems, involves linear programming models JALTES-II and JALTES-III.

JALTES-II is a completed model and has been utilized for such studies as on the role of the advanced thermal reactor, effective utilization of plutonium, and so on. JALTES-III, being developed now, has larger flexibility and higher accuracy compared with JALTES-II through fundamental modifications on description of the nuclear fuel cycle system. The computer program has completed and its verification is in progress.

The fourth block, for cost-benefit-risk analysis on an energy technology or a technology system, involves the regional socio-economic-environment model, the cost assessment model, and the nuclear industry financial model. The first two models are completed, while the third under development.

The regional socio-economic-environmental model is a system dynamics

model to evaluate quantitatively the impacts of a large scale energy facility on the regional society, economy, and environment. The cost assessment model gives generating costs of electricity for a single-unit power plant by using a levelized cost calculation method. The nuclear industry financial model is being developed to evaluate economy in nuclear industries and to calculate processing or production cost in each of nuclear fuel cycle industries.

The data bases on energy technologies and on energy demand structures are being developed in parallel with modelling activities described above. Technical and economical performances of individual energy technologies have been so far intensively investigated. The major efforts are now directed to the development of the environmental data bases which contain emission data and also technical data on environmental protection technologies.

The process model of the pulp and paper industry is being developed, as an example, to compile the data on energy consumption and economic production, and to estimate future demand for energy taking into account the structural changes of energy utilization inside this industry.

4. Energy-Economy-Environment Characteristics in Reference System

Hereafter, we are going to make a long-term energy projection and visualize a future energy system beyond 50 years from now on. To make such projection, it needs, first of all, to investigate the existing energy system. Of course, this investigation should be made not only for a single year but for some time intervals in which we can trace the progresses happen in the energy-economy system. This approach may help us to extract the conditions and the key factors which will affect the future energy system.

4.1 Progress in National Economy

Japanese national economy recovered to the pre-war level in 1955. It took ten years since the end of World War II to reach this level. In Fig. 3, we show the progress of the Japanese economy since 1955 in terms of the GNP growth rate, and the consumer good price index. As can be seen from this figure, the progress of the Japanese economy may be characterized in three time periods, i.e. 1955~1970 supported by technology innovation and consumption revolution, 1971~1978 led by public investment and revealing external diseconomy, 1979~1985 aiming for welfare-oriented economy.

The first time period, which began in 1955 and ended in 1970, is the years that our national economy was eagerly running on the main road of the high growth supported by innovated technologies and explosive demands for consumer goods. Immediately after the year 1955, we had a short run business boom (which is called the "Jinmu" boom) originated from the investment increase on innovated technologies and the increasing demand for durable consumer goods. However, the rapid increase of the investment stimulated the import of capital and it pushed the balance of payment soon to the red-mark. For this reason, the government was compelled to take a restrictive measure in 1957-1958 and the short time boom turned over to the "pan-bottom" slump. But the slump soon ended and the economic condition recovered again to the boom (in later year it was called the "Iwato" boom) from late 1958, supported by the increasing demands for durable consumer goods, and the increasing investments on new technologies and for the enlargement of industrial equipments.

It has long been recognized that the real motive force, which led so high economic growth during the time period of 1955-1974, came from the "so-called" national economy doubling plan released by the Japanese government in December 1960. This plan aimed at doubling the national income till 1970 through transferring the industrial structure from the type imposing on the production of durable consumer goods to the type oriented to the heavy industries as well as utilizing new production technologies and developing human resources, and at the same time promoting the international trade activities.

The high growth of the Japanese economy in 1960's owed really to this government plan, and its achievement was so remarkable that it was called as "the golden age of 1960's" in the later years. That is, from 1959 to 1961 the private investment on plant and equipment grew rapidly utilizing the foreign capital (38.8 % of real growth rate in 1959~1960, 29.4 % in 1960~1961), and adopting the various innovated technologies the industry sector ran in a hurry toward the heavy industrialization. In those processes, the most manufacturing industries faced the labor

force shortage, and this induced the spiral increase of wages and commodity prices as shown in Fig. 4. However, such cost-pushed and price-induced inflation gave us a chance to learn how the business management technique should be modernized and rationalized, and the management experience piled up in those years built the basis for the revolution in the distribution sector.

Such accomplishment as shifting to open economy system, i.e. becoming a member country both to Article VIII nation of the IMF and to the OECD in 1964, made another opportunity to give a vital force to the Japanese economy. It helped the industries to formulate their production targets not only for domestic demand but for foreign demand. The industrial production recorded more than 10 % growth rate in each year, and the share of the Japanese GNP in the GWP was gradually increasing until about 7~10 % level in the years near to the end of this time period. Especially, the prosperity beginning in 1966, which is called the "Izanagi" boom, was due to the rapid increase of the export, and this rose many disputes on the Japanese economy which gave some impacts to the foreign economy.

It was a quite obvious matter of course that the high economic growth achieved so rapidly always followed undesirable results and/or some compensations. Even though the scale of the economy became large, the feeling becoming wealthy was scanty among people's mind. The reasons are that in spite of the concentration of the population in urban areas by industrialization the policy measures for housing problem were so behind, despite the increase of transportation activities the traffic condition was not improved, and in proportion to rising the industrial production level the pollutions such as in air and water, noise and oscillation problems, and calls for the right to sun-shine were conspicuously marked.

The second time period (1971-1978) was really the beginning of such age that the economy management started out for pursuing the real welfare economy, expelling environmental pollution and improving the delay of public works. As for the environmental pollution, many problems, i.e. agricultural chemicals such as BHC, DDT, sludge, Cd poisoning, Itai-itai disease, asthma by air pollution, photochemical smog, Minamata (hatter's) disease by water pollution, thalidomide, SMON disease, noise pollution, land subsidence by drawing ground water, were revealed, and "economies of concentration" was reconsidered. And at the same time a lot of countermeasures for resolving "external diseconomy" were taken. As for the delay of improving the public sector, it appeared a lot of discussions and working plans to reconstruct urban-areas and to redistribute industrial sites in such situation that, first of all, the public facilities, such as schools, hospitals, were becoming short, secondly, the housing problem under the increasing land price was emerging and the consolidations of both water works and sewerage system were becoming inevitable, and the traffic conditions were worsening much. Concerning on the construction of a really wealthy society, people argued about the policy measures on "inability to adapt a change", "new ideal for social management", "highly welfare society (supported by max-mini principle)", and people desired the full prosperity without inflation.

In order to guide the Japanese economy for solving those problems, its management style was necessary to be changed from the one, led by private investment on plant and equipment as being experienced in the

first time period, to the one led by public sector. As this time (1971~1972) of economic reforming just overlapped the time of business recession, government bond was timely used to overcome this recession. Hereafter till 1975, a large amount of government bond was floated to obtain financial resources, and utilizing it the government pushed the economic policy to the type led by public sector. From this reason, fiscal policy had a great influence. The high economic growth experienced in the second time period was certainly owed to the public investment.

This time period was also the age that the Japanese economy attained the international development. Importing the foreign energy and material resources and exporting the industrial fabricates, the Japanese economy enjoyed the "Izanagi" boom. During this boom, the balance of payments turned to large black figures on one hand, but commodity prices were rising on the other hand reflecting the progress of foreign inflation. And, at last in 1970~1971 the economy situation turned to a recession under high commodity prices (i.e. stagflation in another word, that is, a mixture of economic stagnation and inflation). From this time on, the Japanese economy fell into three kinds of economic dilemma and economic gaps (i.e. stagflation, large trade surplus, unbalance between economic growth and economic welfare).

In the midst of such rapid changes of economic backgrounds as being the introduction of the floating system for the yen (in 1971), a new economy plan for realizing welfare society (in 1970), plans for urban area development and industrial site reallocation, rampant inflation, ..., the Japanese economy entered into the third time period (1973~present time). The real start of it was in 1973, the year of the oil embargo.

The oil crisis indicated us how strongly the supply restriction of such fundamental economical resources as energy has influential force. Immediately after the oil embargo, the economy situation fell swiftly into a negative growth, and it poured water into the plans of "realization of a welfare society" and "price stabilization and incomes policy". However, being supported by the increasing export of commercial goods, which could be led by the lower exchange rate of yen (reflecting the weak constitution of the Japanese economy against oil as shown in Fig. 5) on one hand and also led by the marketability of the Japanese goods on other hand, the Japanese economy could almost overcome this business recession even though the oil price hiked so rapidly.

The industrial sector, however, was compelled to promote energy conservation and fuel switching urgently, as well as to make reduce over capacity and improve the enterprise constitution (i.e. suppressions of financial costs and personnel expenses). From this time, the most of the Japanese industries has been shifting from the type characterized by primary material production to the one of assembly oriented and knowledge-intensive industries (as shown in Fig. 6), and the Japanese economy was entering in a reduced but stable growth.

The present economic growth is depending still heavily on export, and the balance of payments is continueing to be in a surplus state and this is becoming a source of the international trade frictions. In the domestic sector, there is a growing problem of an uneven rise in activity between different lines of industry, also growing is a problem of recovering the financial situation through the reconsideration of the public sector in which the reform of the administrative structure is included. Furthermore, despite aging of the population, both welfare

society and income policy are not in sufficient progress as was expected in the past. It is perceived that the future Japanese economy should grapple with such remaining problems on the basis of stable growth. Of course, there still exists the possibility of the growth toward "construction of welfare society" based on technology innovations in spreading technologies such as on bio-engineering and on mechatronics, and compensating the hard and soft sides of the economy to each other. In that case, enough measures should be taken at any time and place to secure the essential factors of an economy such as energy, and the factors affecting our health either directly or indirectly such as natural environment.

4.2 Energy Supply and Demand

Coal and hydropower played the leading role in the energy supply during the period of post-war economic recovery, but oil had increased its role with beginning of the period of the high economic growth. Fig. 7 shows the structure of primary energy supply since 1965, ten years after the recovery of the economy. The supply of oil had increased rapidly in accordance with the high economic growth until the oil crisis in 1973. But it had decreased in the two successive years after the oil crisis. Though it had increased slightly in the next two years, the demand for oil has substantially reduced after 1980 reflecting the efforts on energy conservation, diversification of fuels and structural changes in industries. As a result, the amount of oil supply in 1984 returned to the level in 1971.

The supply of coking coal had also increased much in the period of the economic high growth as shown in Fig. 7. However, as the production of crude steel remains at about 100×10^6 tons after 1973, it has not increased since that year.

Steam coal was the leading energy in the period of the post-war economic recovery, and had been used for electric power generation, in boilers, in cement kilns, ..., and for transportation. With the energy revolution into liquid fuels, however, the steam coal demand had declined as shown apparently in Fig. 7. But after the oil crisis, steam coal came back for the use as a fuel for electric power generation and for manufacturing.

As for natural gas, it is being used as consumer gas and also as a fuel for the suburban electric power stations. After the oil crisis, the demand for natural gas grew for its good property as an alternative energy.

Nuclear energy is presently only used for electric power generation. After the oil crisis, however, it has played the important role as an alternative energy. At present (1984), nuclear energy shares about 8.6 % of the total primary energy supply. On the other hand, among renewable energy sources, hydropower contributes largest (4.9 % of the total primary energy supply), though the direct use of geothermal and solar heat is increasing. Fig. 8 shows the energy system at 1980 in the flow diagram.

Electricity is expensive but clean and convenient energy. The share of energy for electricity generation in the primary energy supply has grown year by year and reaches 32 % in 1984. Also in electric power generation, oil-fired electric power generation had grown rapidly until the oil crisis, according to the energy revolution into liquid fuels.

Since 1974, however, nuclear energy and natural gas have increased their roles. Coal-fired electric power generation has also been growing since 1980 (Fig. 9).

Fig. 10 shows the structure of electricity consumption in 1981. Percentages on the total consumption are 59 % for the industrial sector, 38 % for the residential and commercial sector and 3 % for the transportation sector. Percentage of auto-generation declined gradually year by year from 13.4 % in 1973 to 8.9 % in 1983.

The specific energy consumption in each industry sector is shown in Fig. 11 at two time points of 1970 and 1980, i.e. before and after the oil crisis.

This figure shows that the specific energy consumption was improved in almost all industries except for agriculture forestry and fishery, and other manufacturing. The specific energy consumption here represents the energy efficiency expressed in terms of the economical unit. The value expressed in terms of the physical unit (energy consumption per a ton of crude steel produced in the case of the iron and steel industry) is also improved. Especially, the improvements are large in energy intensive industries (iron and steel, non-ferrous metals, chemicals, ceramics, pulp and paper).

The economic value of energy is not large within a total economy as indicated in Fig. 12. This figure illustrates the composition of inputs to each economic sector. Even in the energy intensive industries mentioned above, the share of energy inputs in total economy is as low as 4~10 %.

The structure of energy consumption in industry, residential and commercial, and transportation sectors are presented in Fig. 13 for the year 1980. This figure shows that major part of energy consumed in industries is utilized as a heat source for boilers and heating devices.

The part of energy consumed as thermal energy was extracted from 1980 final energy consumption, and then divided according to the temperature levels it was used. The results are shown in Fig. 14 ~ Fig. 16. The temperature distribution of thermal energy consumption can be properly characterized at the four temperature ranges, i.e. (i) 0-300 °C, (ii) 300-600 °C, (iii) 600-900 °C, (iv) 900 °C-. The range (i) is used for residential and commercial heating and for industrial process steam supply. The range (ii) is used for a variety of industrial process heat supply including steam raising for auto-generation. The range (iii) is used at cement kilns, various industrial furnaces, and other heating devices. The range (iv) is used mainly at blast furnaces for iron making. The fuels utilized to produce thermal energy are primarily oil products such as heavy fuel oils and kerosene, and coal products such as coke and bi-product gases.

The present circumstances in energy demand and supply as outlined above verify the description in Chapter 2 on the probable roles of the high temperature nuclear heat. The essential point now is to analyze when and to what extent the high temperature nuclear heat can be introduced to such markets from viewpoints of energy resources, economics, and also from environmental considerations. Identifying quantitatively the required conditions would be just a purpose of systems analysis.

4.3 Environmental Pollution

The environmental effects of energy utilization are at present mainly caused by emissions of SO_x and NO_x generated from the combustion

of fossil fuels. The efforts to protect the environment have been strengthened in Japan since the mid 1970's, and made the remarkable improvements in the quality of atmosphere, water, soil, and so on. The gross amounts of SO_x and NO_x emitted by individual energy utilization sectors in the fiscal year 1980 are shown in Fig. 17 and Fig. 18, respectively. Fig. 17 indicates that one-fourth of SO_x was emitted in electric power generation reflecting high dependency on fossil fuels and large amount of energy converted in this field. This figure also indicates relatively high shares of so-called energy intensive industries. On the other hand, Fig. 18 shows that the transportation sector took an extremely large share in the NO_x emission. It is also shown in this figure that the differences in shares of individual industries are large compared in the case of the SO_x emission.

The amounts of SO_x and NO_x emitted by the industry sectors are shown in Fig. 19 and Fig. 20, respectively, according to the devices utilized. As is shown in Fig. 19, the major part of SO_x was emitted from boilers for electric power generation and process steam production. While, kilns for cement production also took a large share in the NO_x emission as indicated in Fig. 20.

The specific emissions of SO_x and NO_x , i.e. the amounts of emission per unit of energy utilization, are shown in Fig. 21 for individual energy utilization sectors. This figure indicates that the sectors can be divided into three groups based on the characteristics on the environmental emission. The first group, with a relatively large emission of SO_x , represents oil-intensive industries such as chemicals, pulp and paper, non-ferrous metals. The second group, with a relatively large emission of NO_x , represents the sectors using high temperature combustion devices such as ceramics and cement, transportation. The third group, with low specific emission of SO_x and NO_x , consists of such sectors as iron and steel, electricity supply, machinery, residential and commercial. The low specific emissions in this group are based on either the adequate efforts on environmental protection or the use of relatively clean fuels such as town gas or kerosene.

The emission of SO_x can be, if required, further reduced by applying conventional technologies and/or utilizing low sulfur fuels. On the other hand, NO_x emitted to the atmosphere is generated from nitrogen not only in fuels (fuel NO_x) but also in the air (thermal NO_x). The development of technologies to reduce efficiently the generation of thermal NO_x as well as to remove NO_x from flue gas will be an important subject in near future.

The damages of the environment by acid rain are being investigated in several organizations in Japan. Since the damages are so far rather small compared with the European countries, we don't go into detail here. As for carbon dioxide in the atmosphere, Japan is still in the beginning of measuring its concentration. The systematic assessments on these issues are strongly desired to protect the environment in the long-term.

5. Conclusion

The systems analysis on energy-economy-environment problem treats generally a very wide-range of problems, so that every element, i.e. from methodologies and data bases to various scenario generations and their evaluations, has to have a deep consideration.

From this sense, we will proceed our study. It is conceived for us that as next step the structural analysis on the energy-economy-environment system should be initiated.

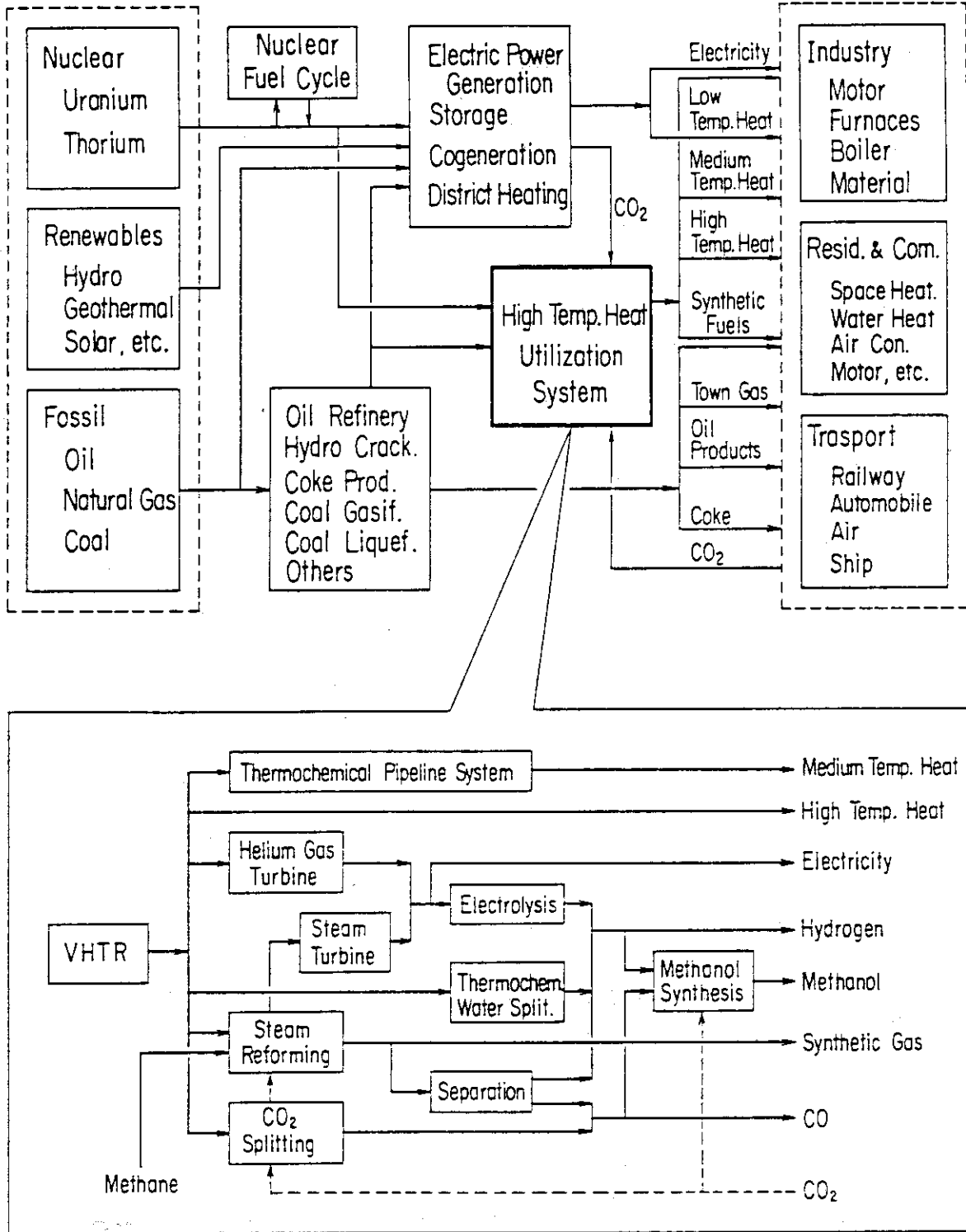


Fig.1 Basic Structure of Reference Energy System

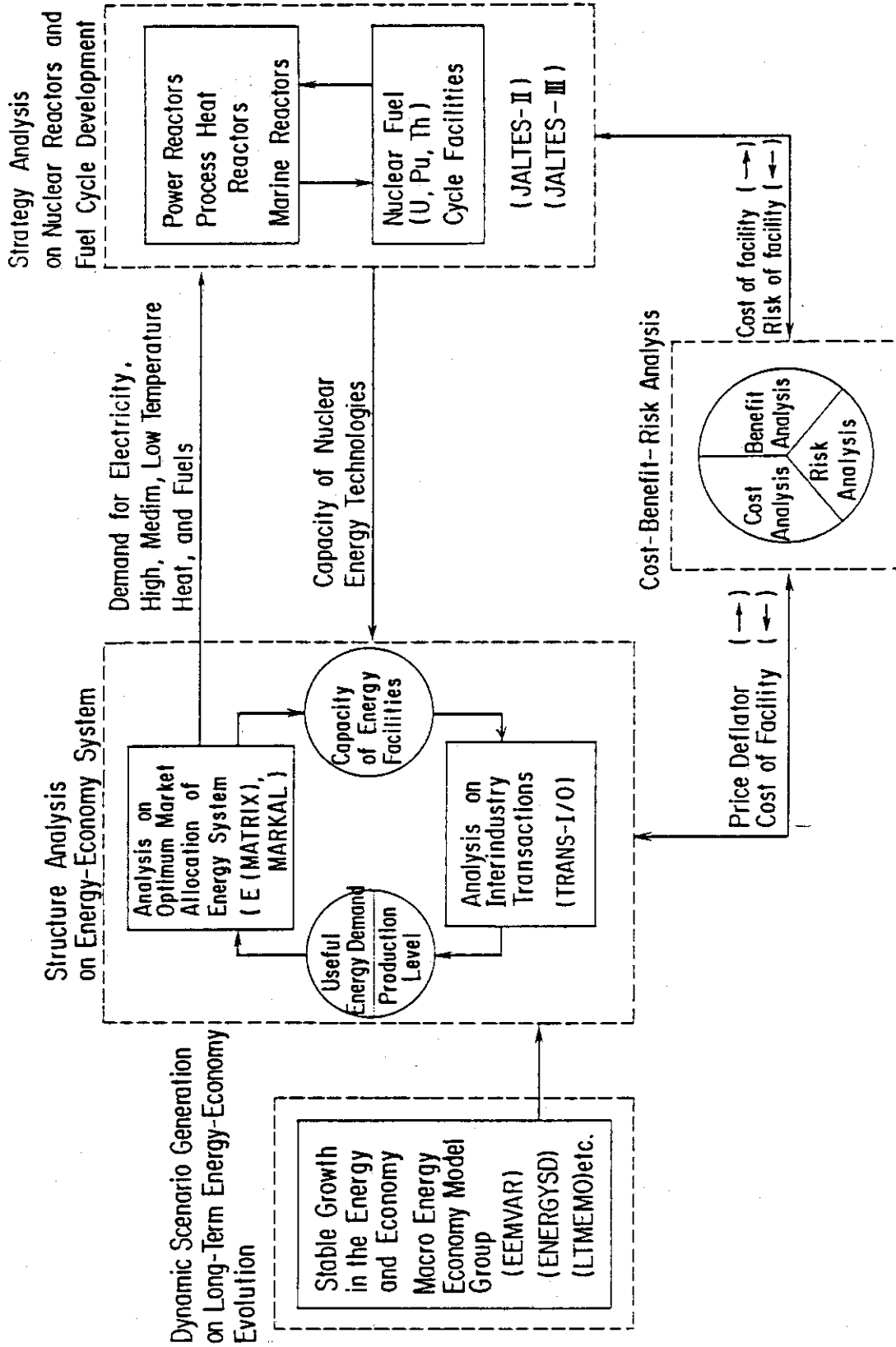
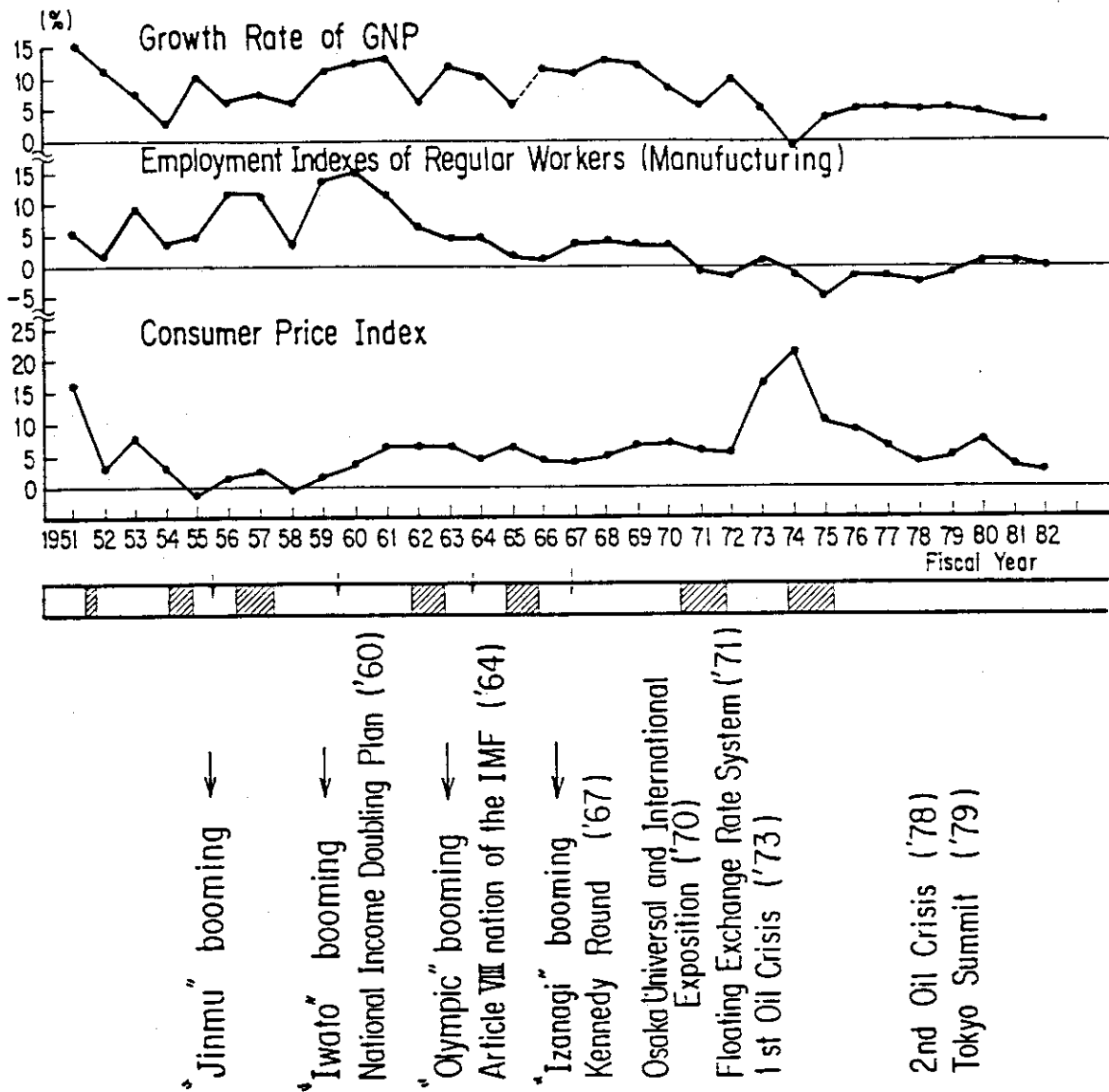
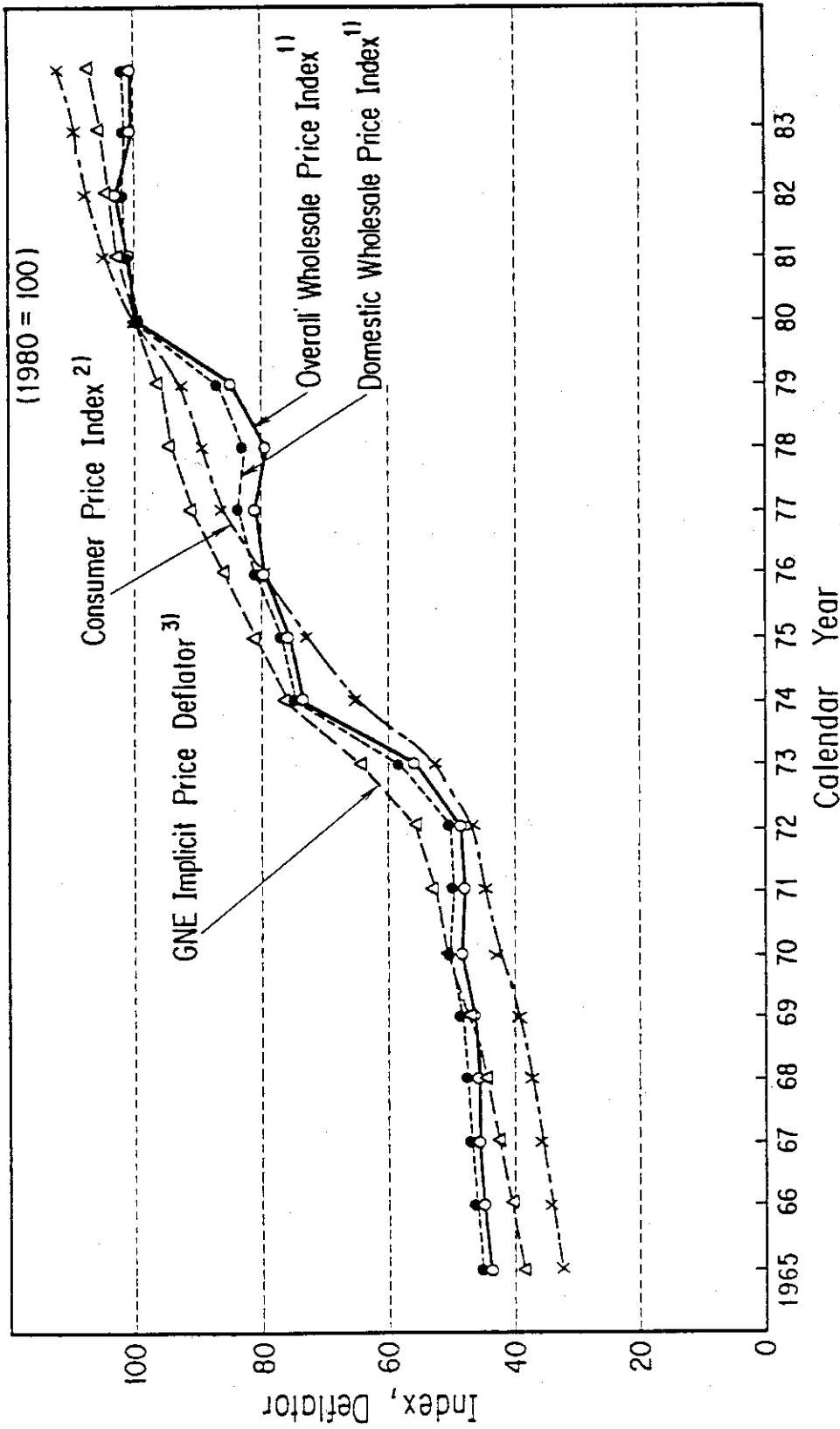


Fig. 2 Integrated Energy-Economy-Environment Model System



(Source : Economic Planning Agency)

Fig.3 Time Trend of Major Economic Performance Indices



(Source : 1) The Bank of Japan, 2) Statistics Bureau, Management and Coordination Agency, 3) Economic Planning Agency)

Fig.4 Price Indexes and Deflators

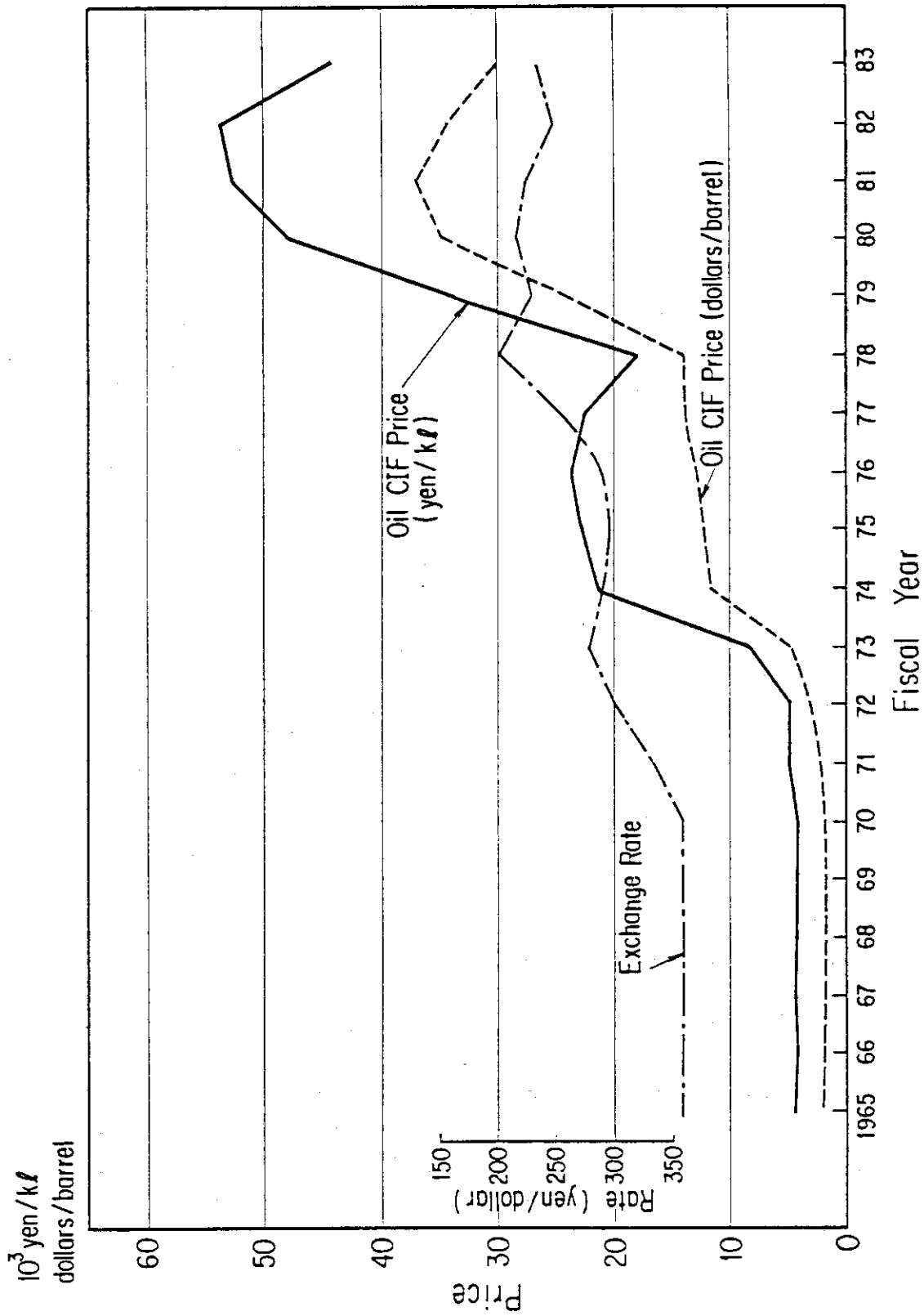
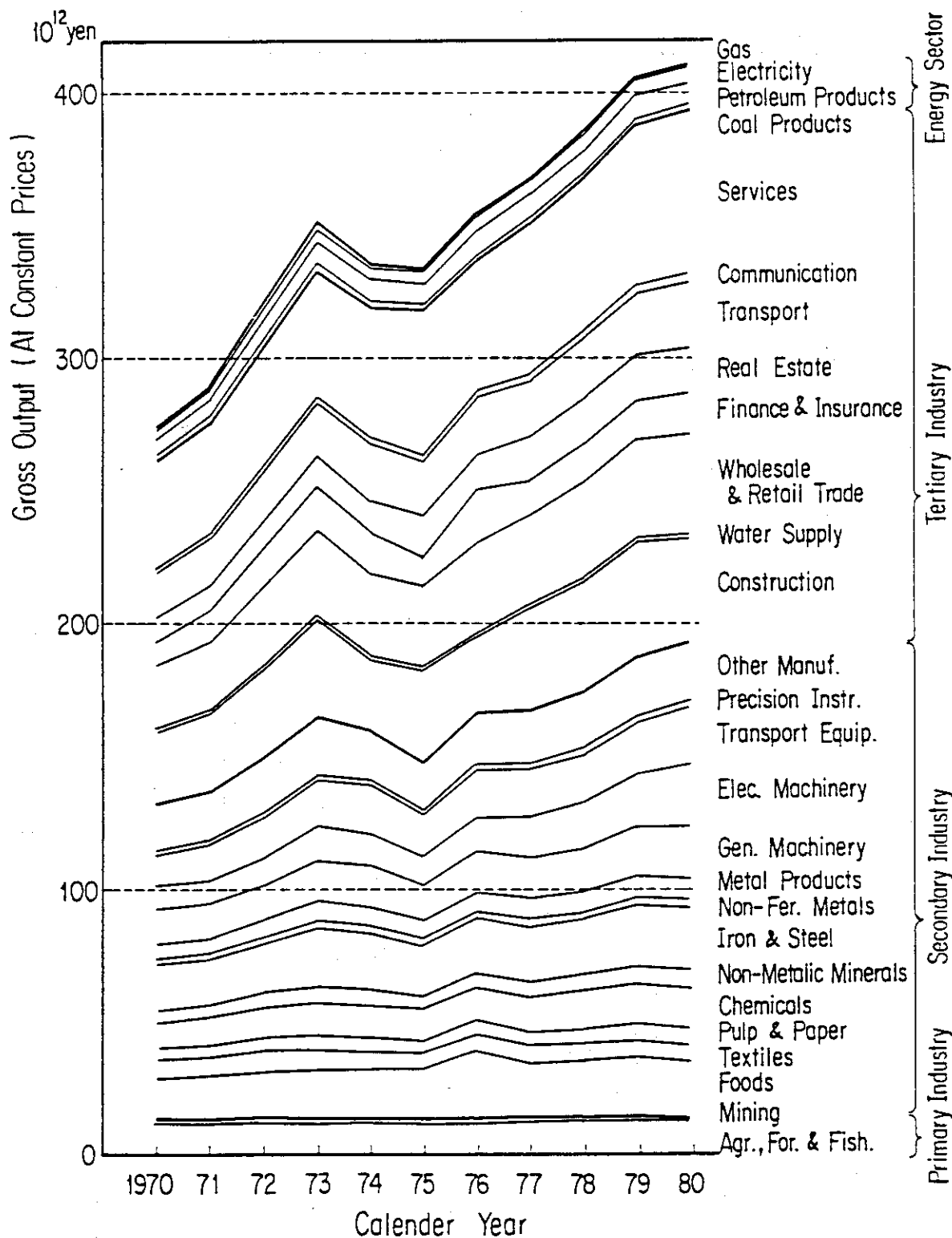
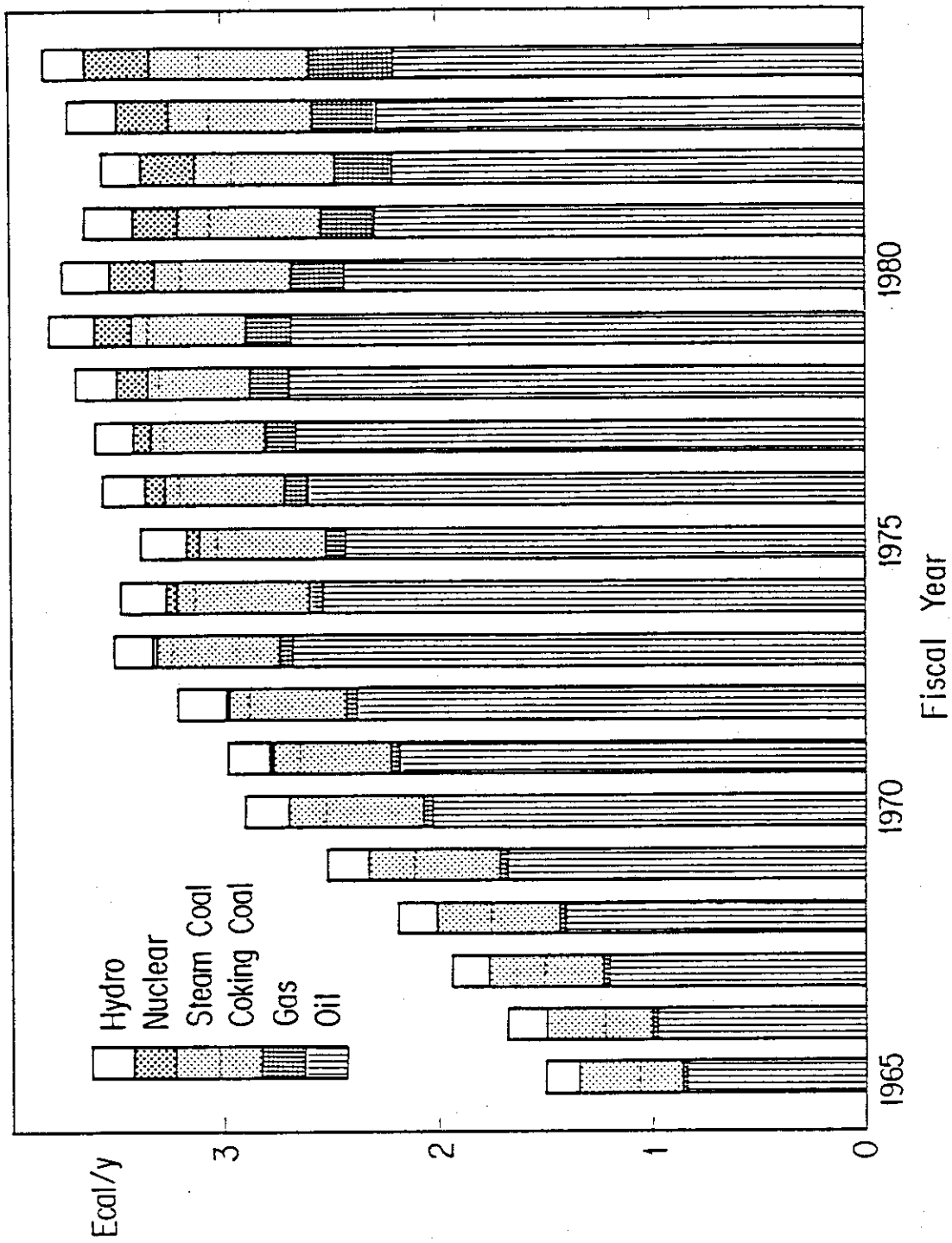


Fig.5 Imported Oil CIF Price (Source : Ministry of Finance)



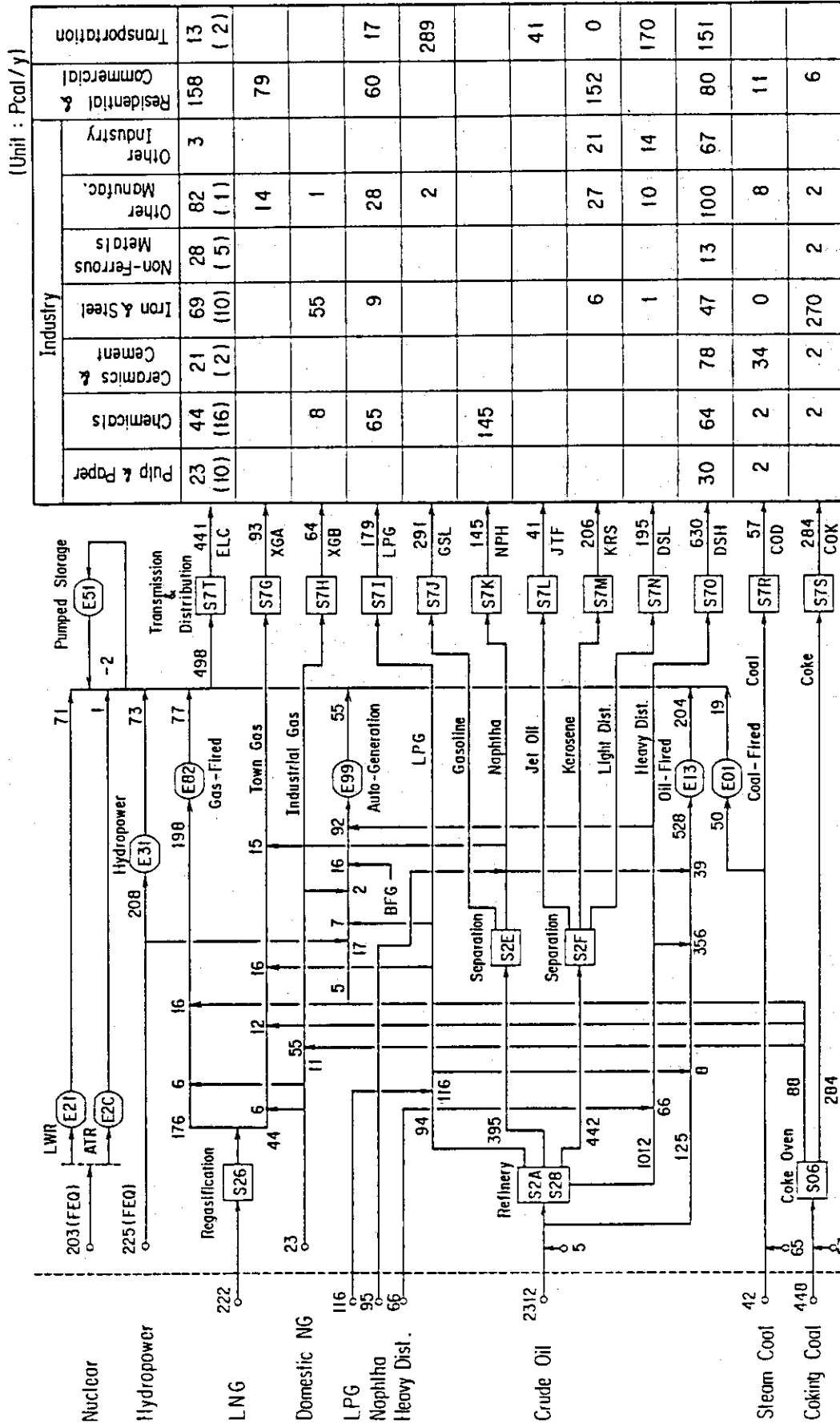
(Source: Input-Output Tables, Management and Coordination Agency)

Fig.6 Gross Output at Producers' Value by Kind of Economic Activity (At Constant Prices in C.Y. of 1975)



(Source : Energy Balances in Japan, The Institute of Energy Economics)

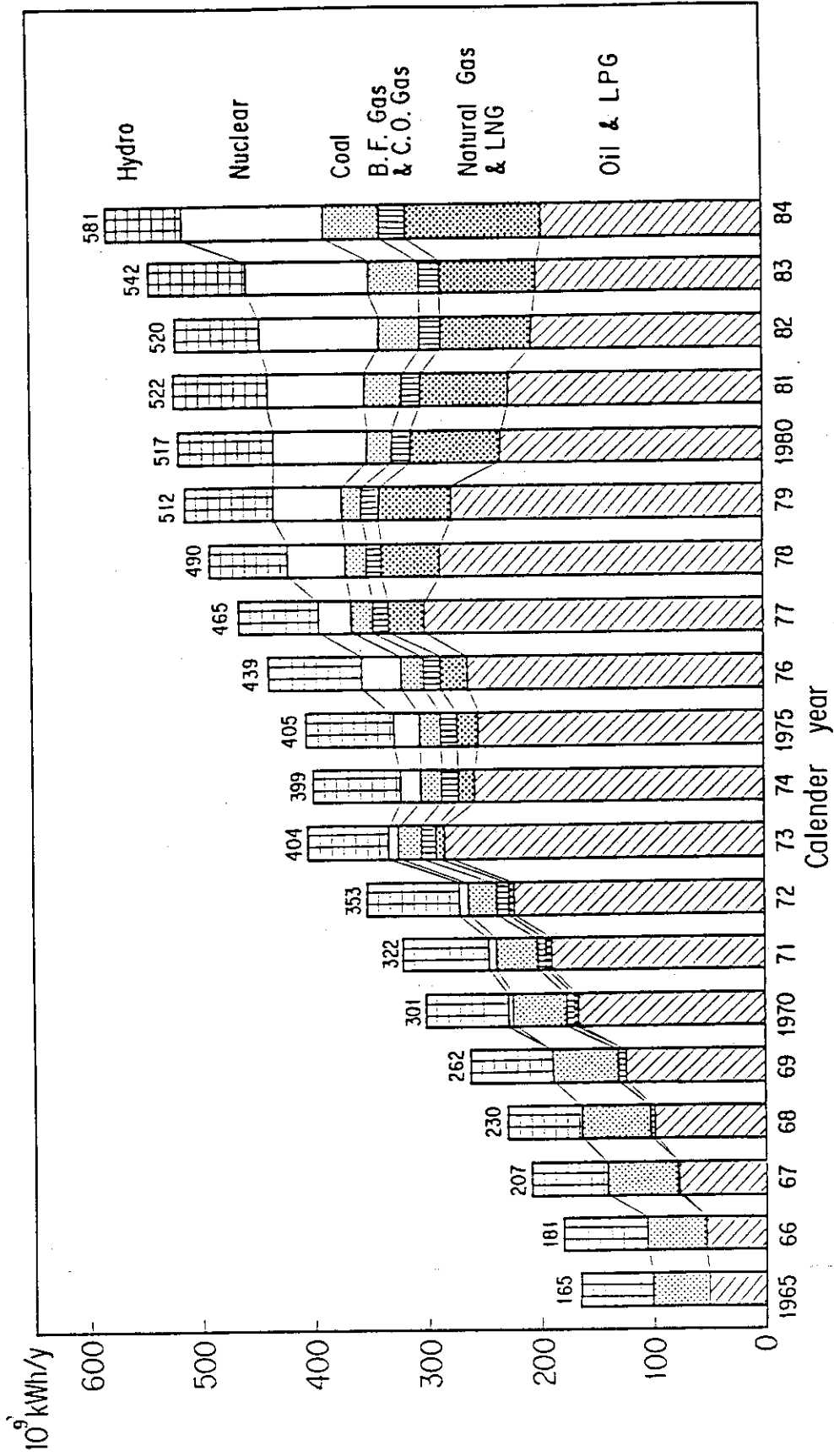
Fig. 7 Primary Energy Supply



Note : Parentheses indicate consumption of electricity produced by auto-generation.

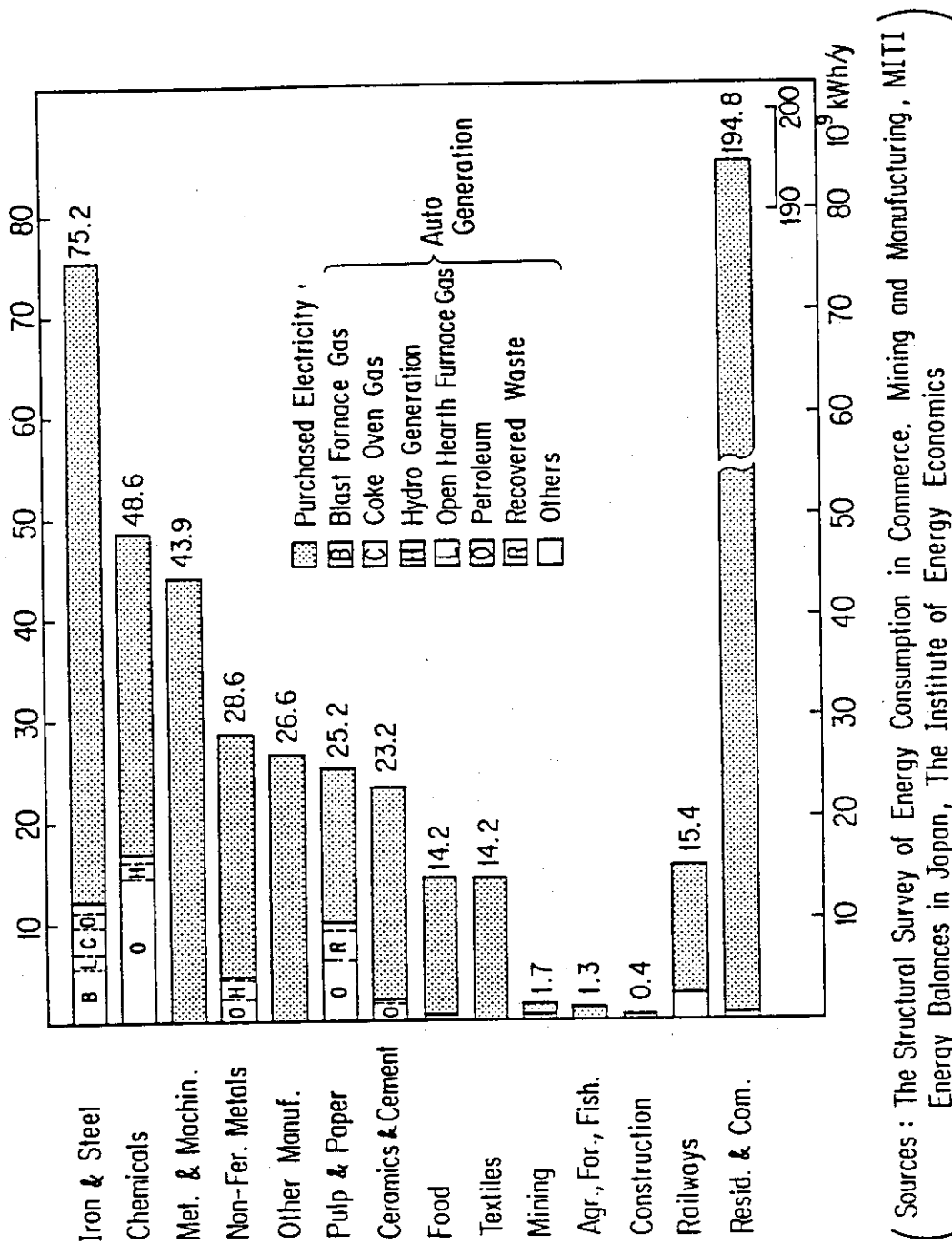
(Source : Energy Balances in Japan, The Institute of Energy Economics)

Fig. 8 Energy Supply, Conversion, and Consumption in 1980



(Source : Energy Balances in Japan , The Institute of Energy Economics)

Fig.9 Electric Power Generation by Utilities



(Sources : The Structural Survey of Energy Consumption in Commerce, Mining and Manufacturing, MITI)
 Energy Balances in Japan, The Institute of Energy Economics)

Fig.10 Electricity Consumption in 1981

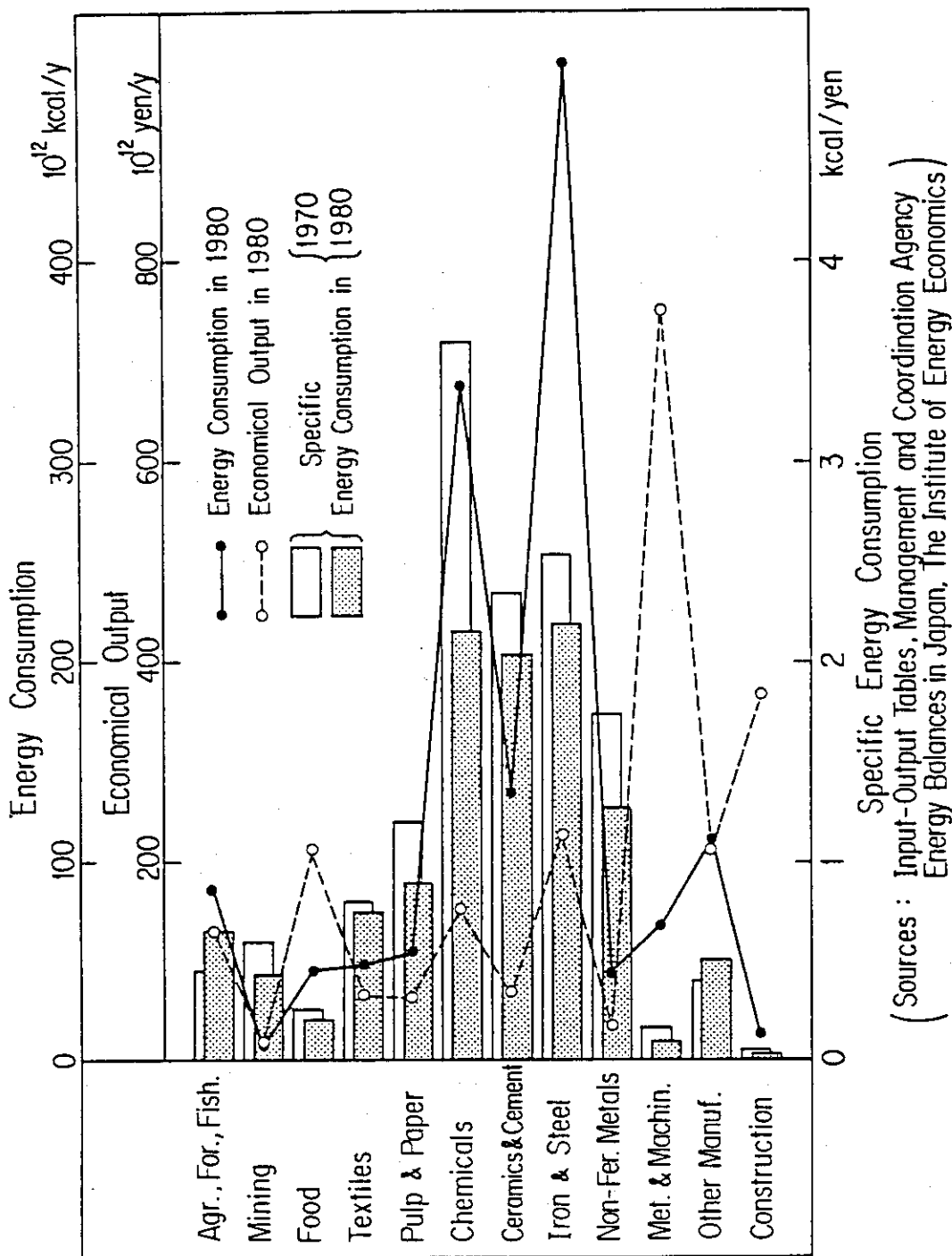
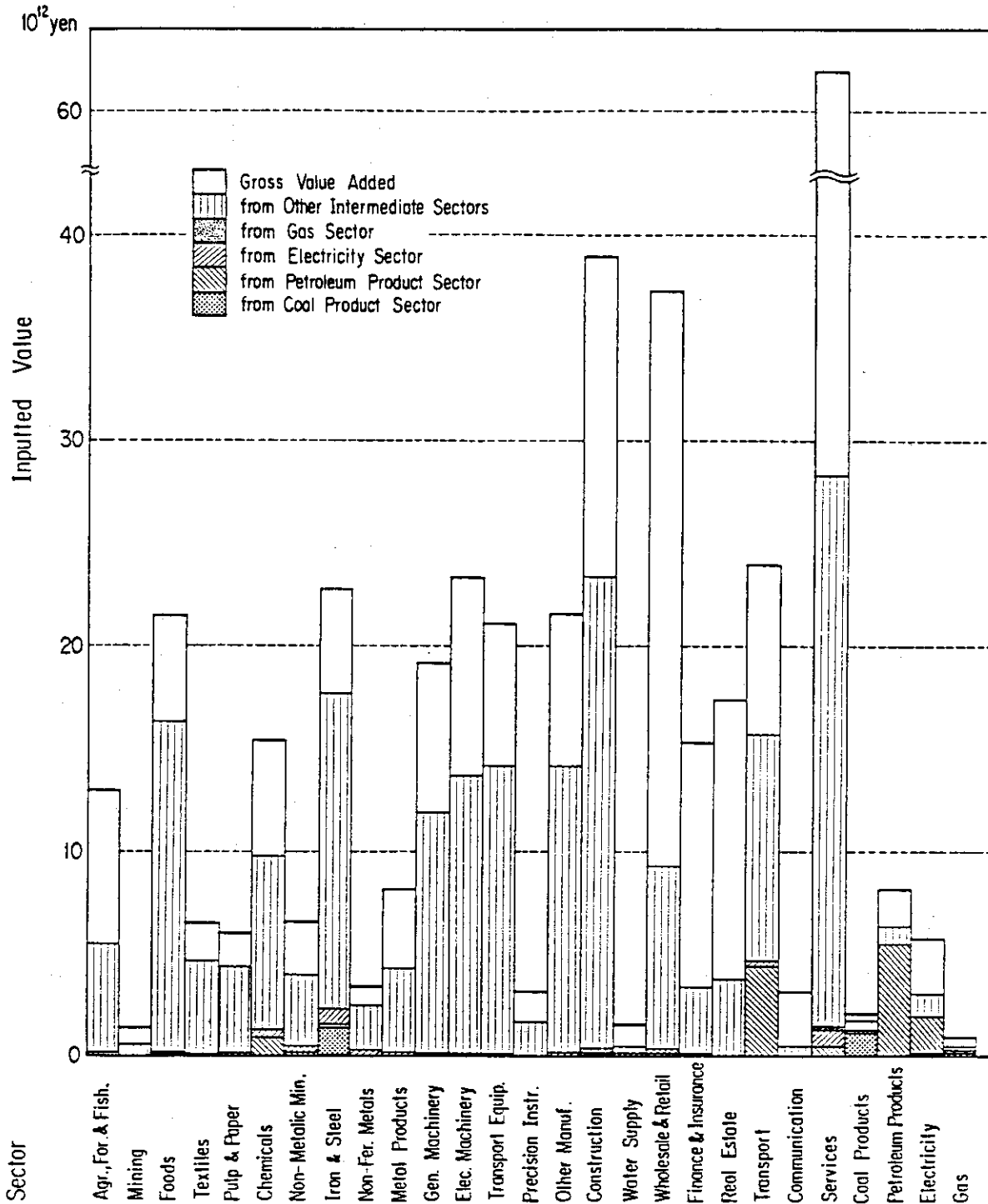


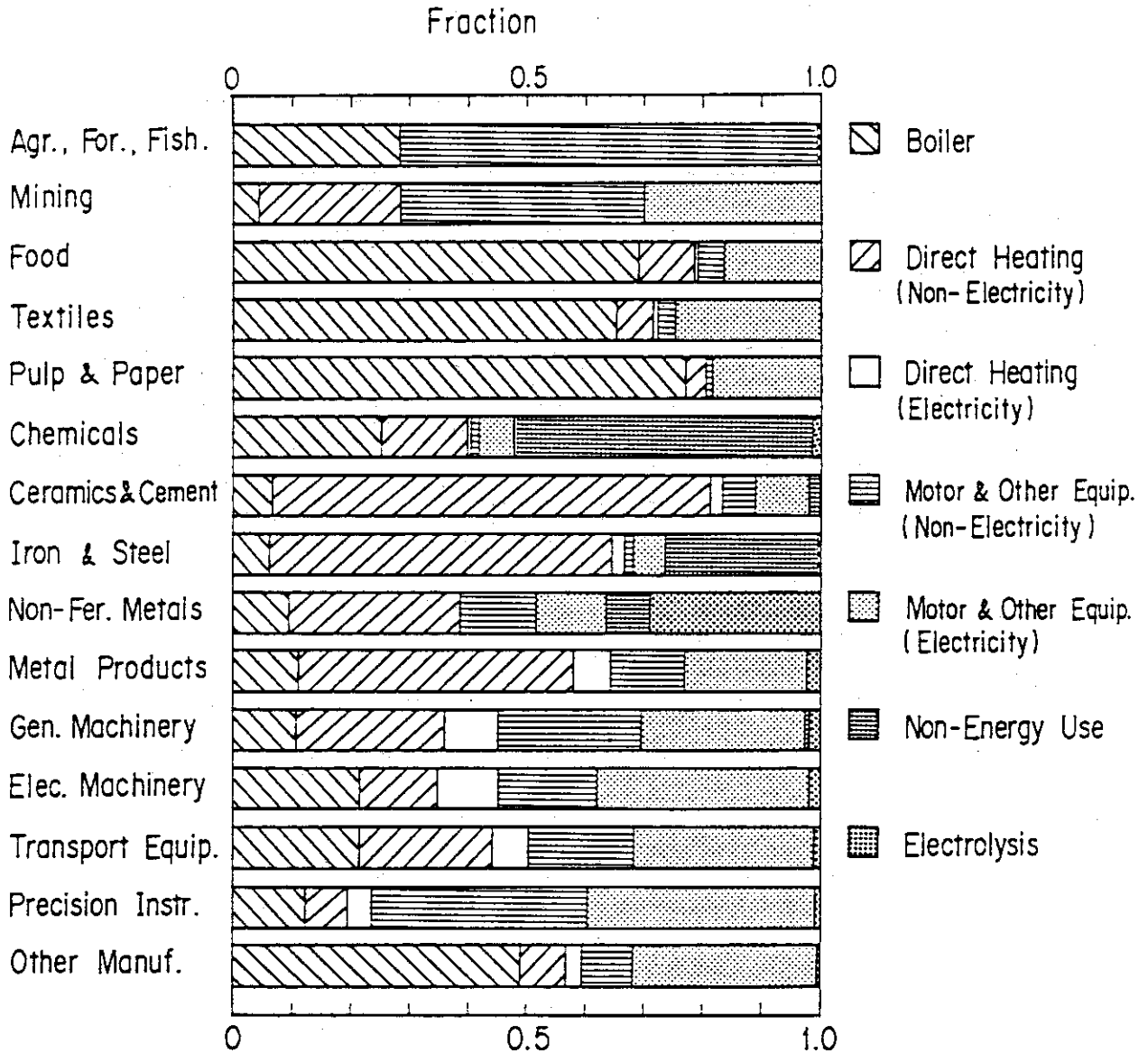
Fig.11 Energy Consumption, Economical Output, and Specific Energy Consumption

(Sources : Input-Output Tables, Management and Coordination Agency
Energy Balances in Japan, The Institute of Energy Economics)



(Source: Input-Output Tables for C.Y. of 1980 at Constant Prices in C.Y. of 1975, Management and Coordination Agency)

Fig.12 Share of Energy Sectors in The Input Structure



(Source : The Structural Survey of Energy Consumption in Commerce, Mining) and Manufacturing MITI

Fig.13 Demand Structure of 1980 Final Energy Consumption

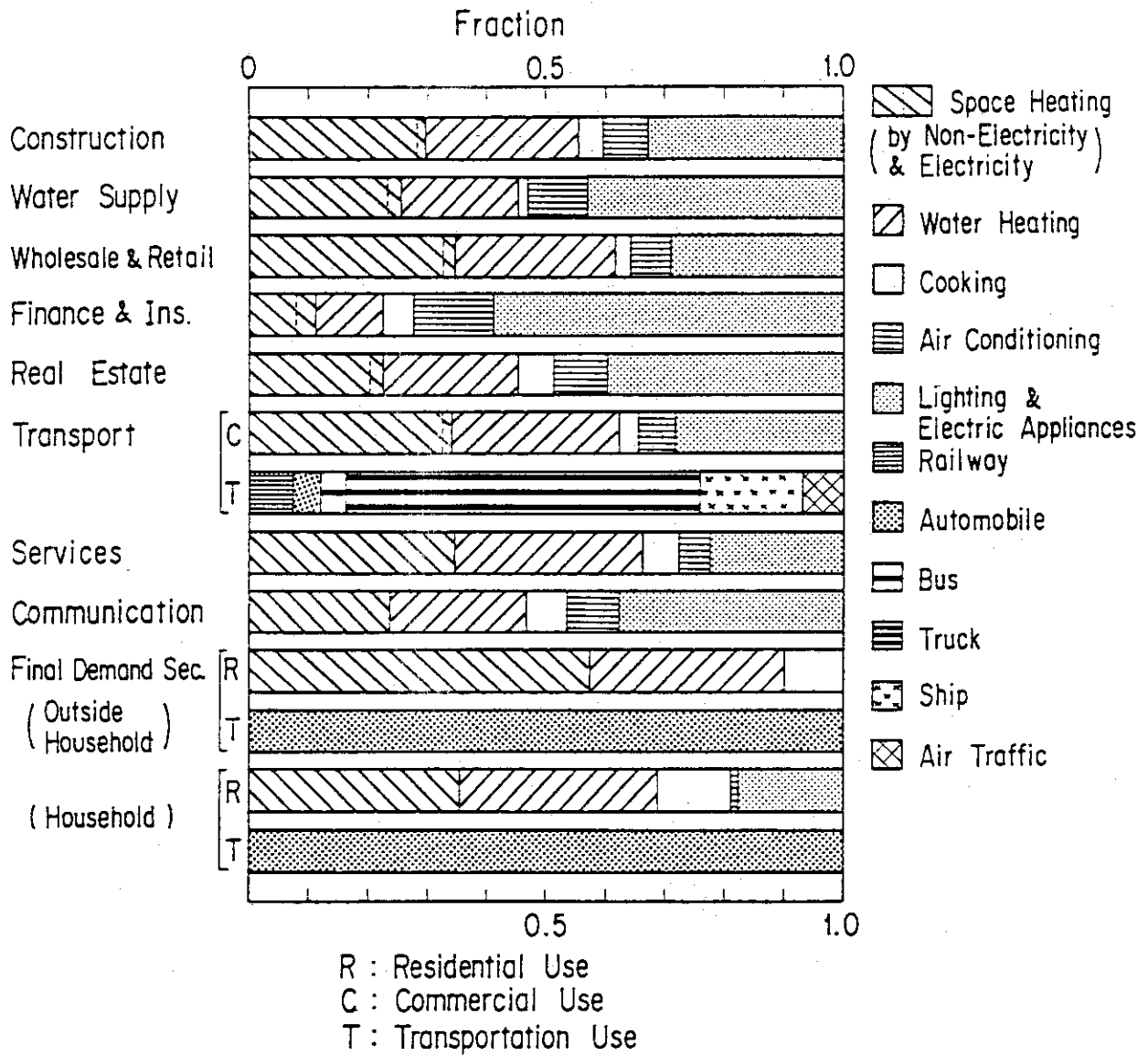
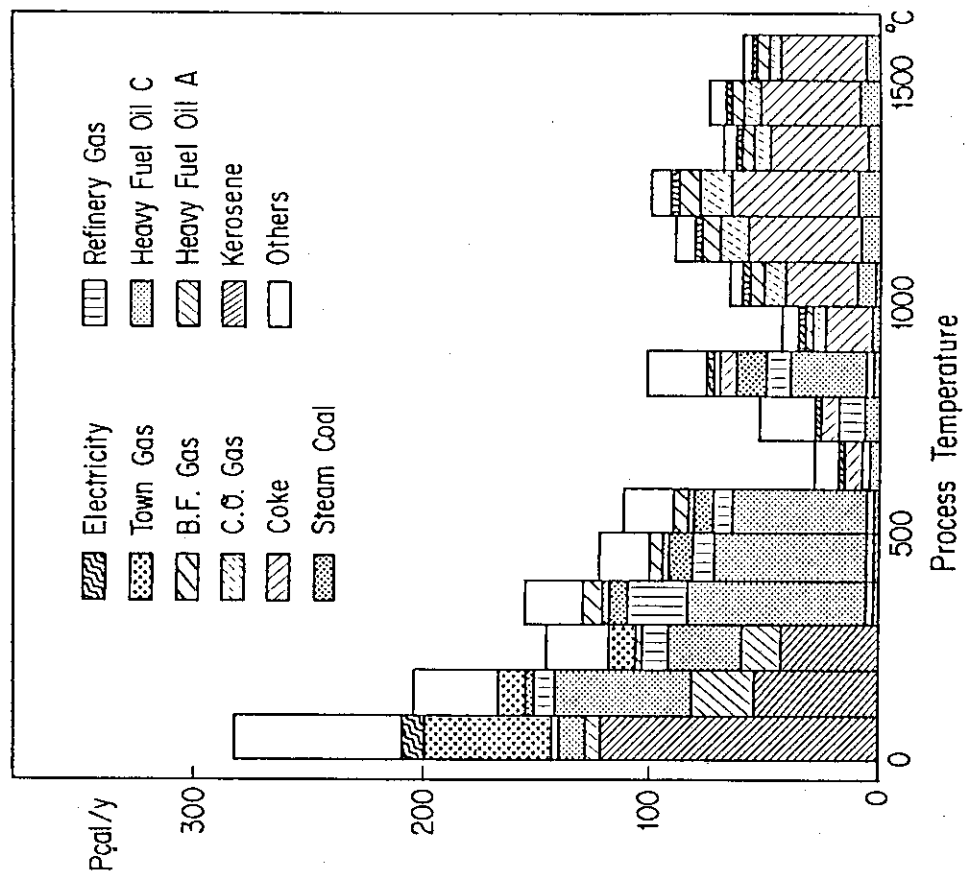
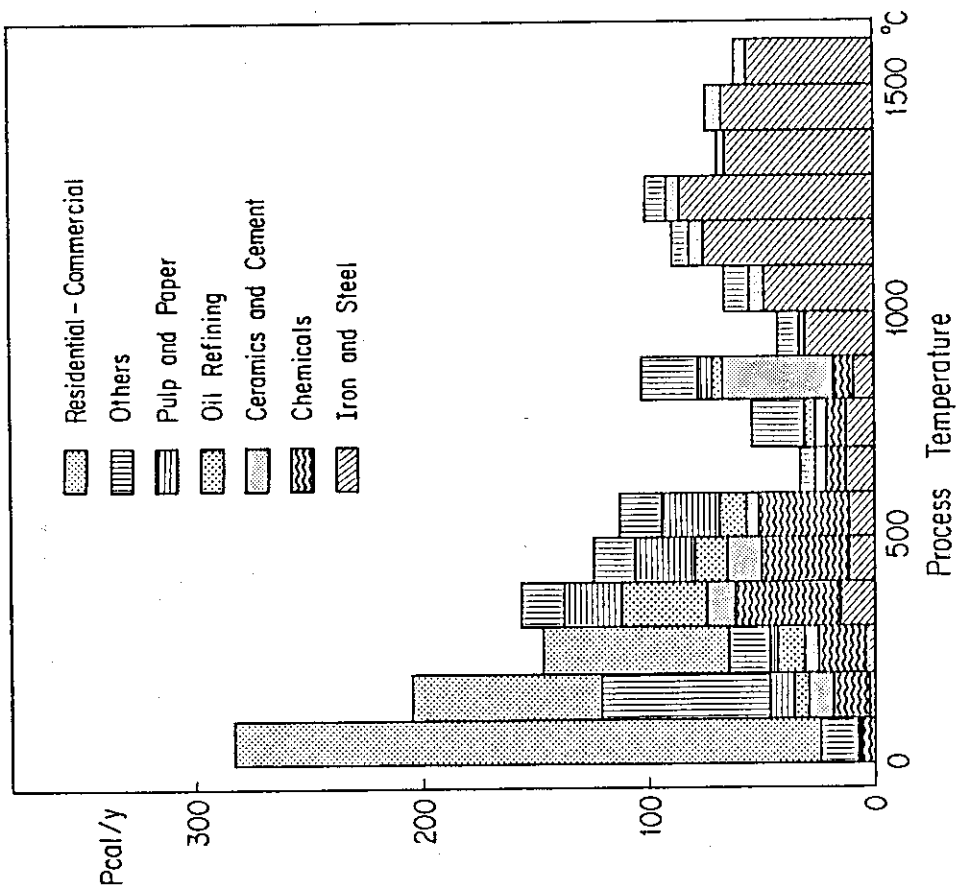


Fig. 13 (Continued)



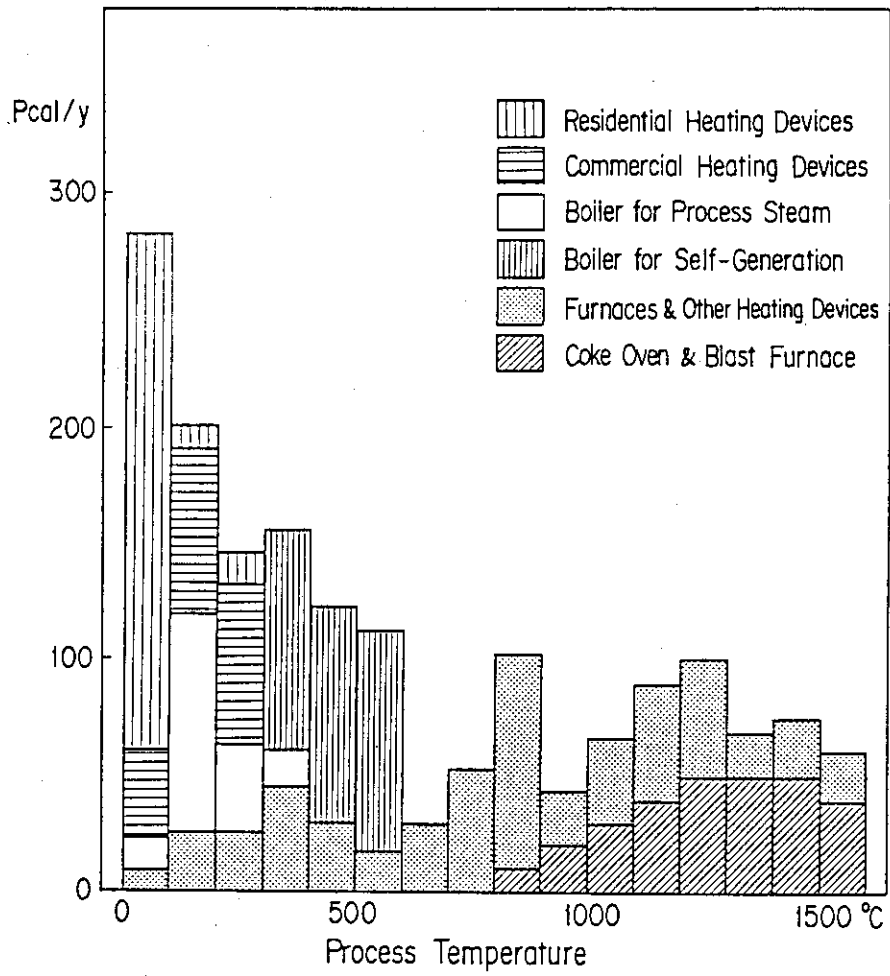
(Source : MRI Report prepared for JAERI)



(Source : MRI Report prepared for JAERI)

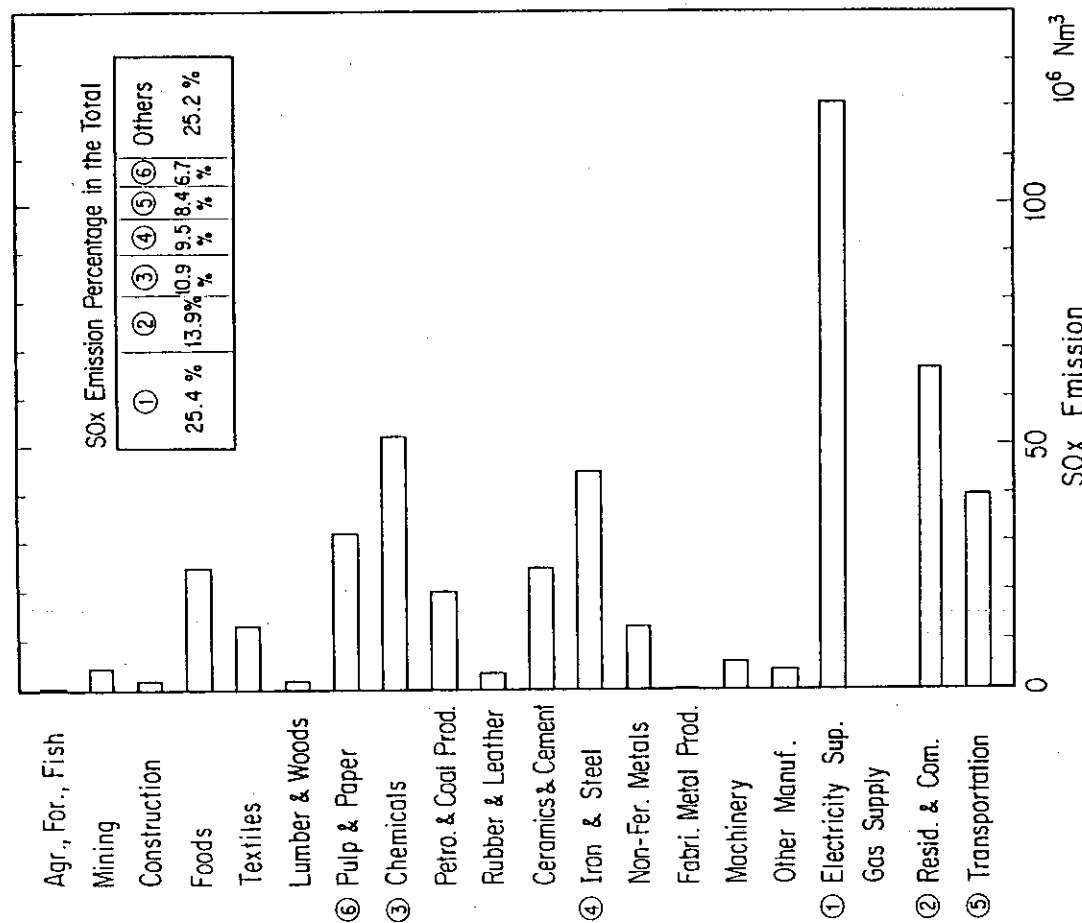
Fig.15 Temperature Distribution of Thermal Energy Consumed in 1980

Fig.14 Temperature Distribution of Thermal Energy Consumed in 1980



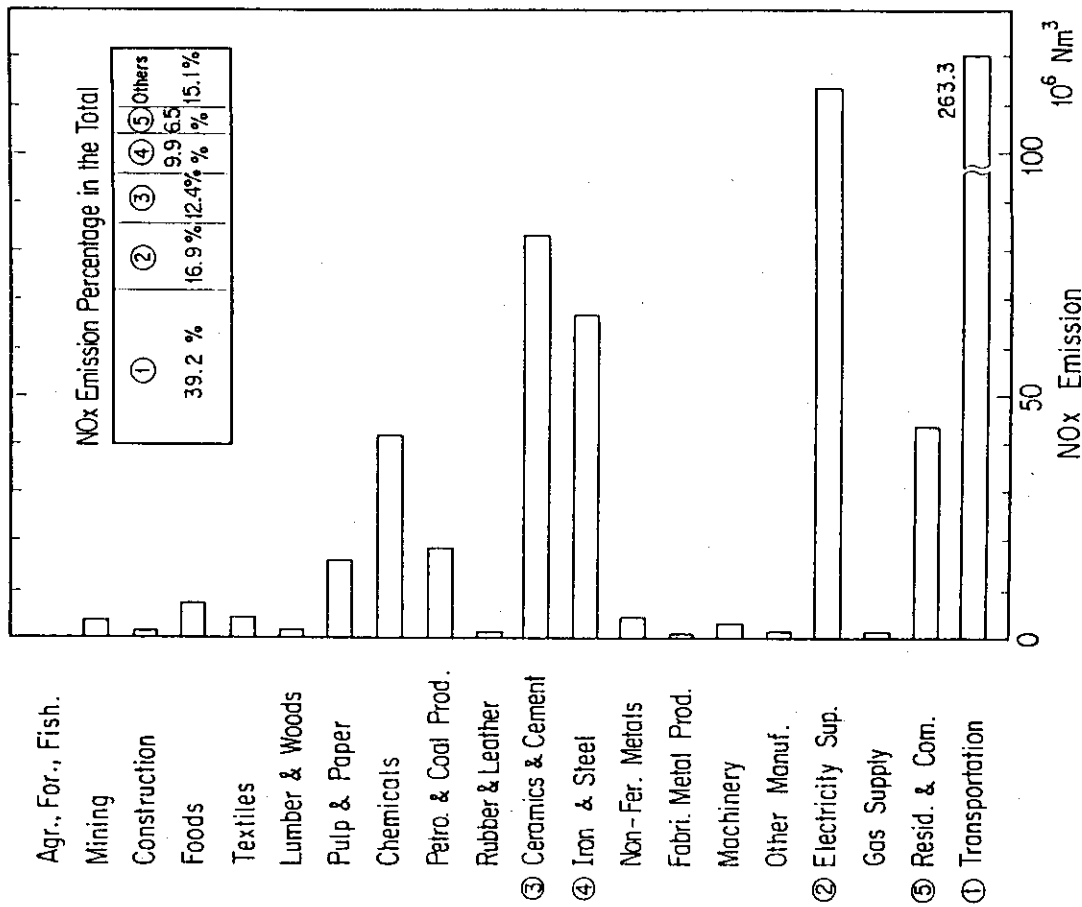
(Source : MRI Report prepared for JAERI)

Fig.16 Temperature Distribution of Thermal Energy Consumed in 1980



(Source : MRI Report prepared for JAERI)

Fig.17 SOx Emission by Industry (at F.Y. of 1980)



(Source : MRI Report prepared for JAERI)

Fig.18 NOx Emission by Industry (at F.Y. of 1980)

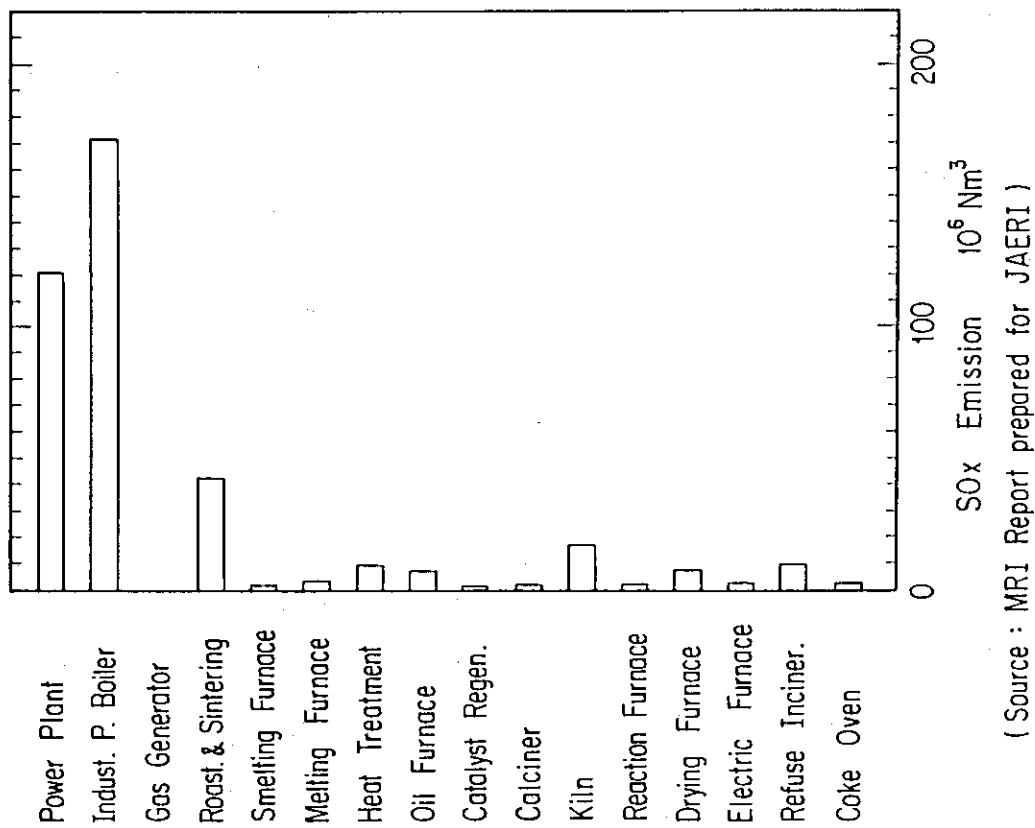


Fig.19 SOx Emission by Industrial Heat Facility
(at F.Y. of 1980)

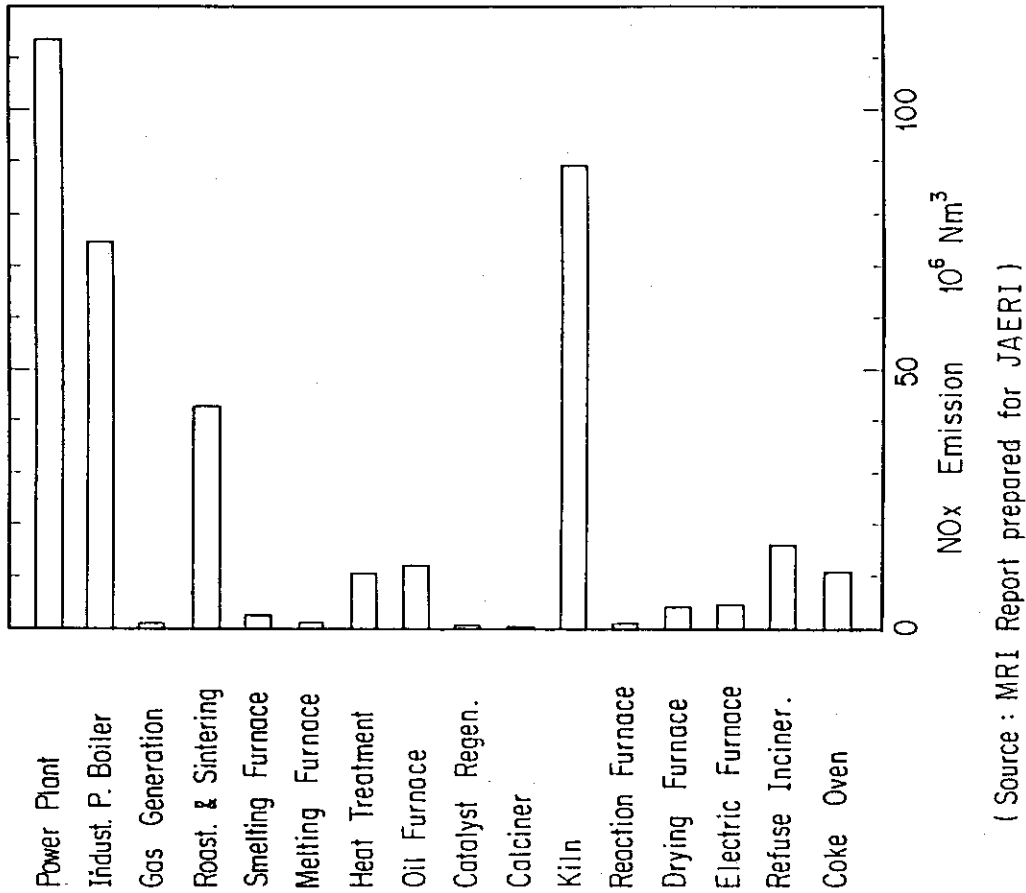
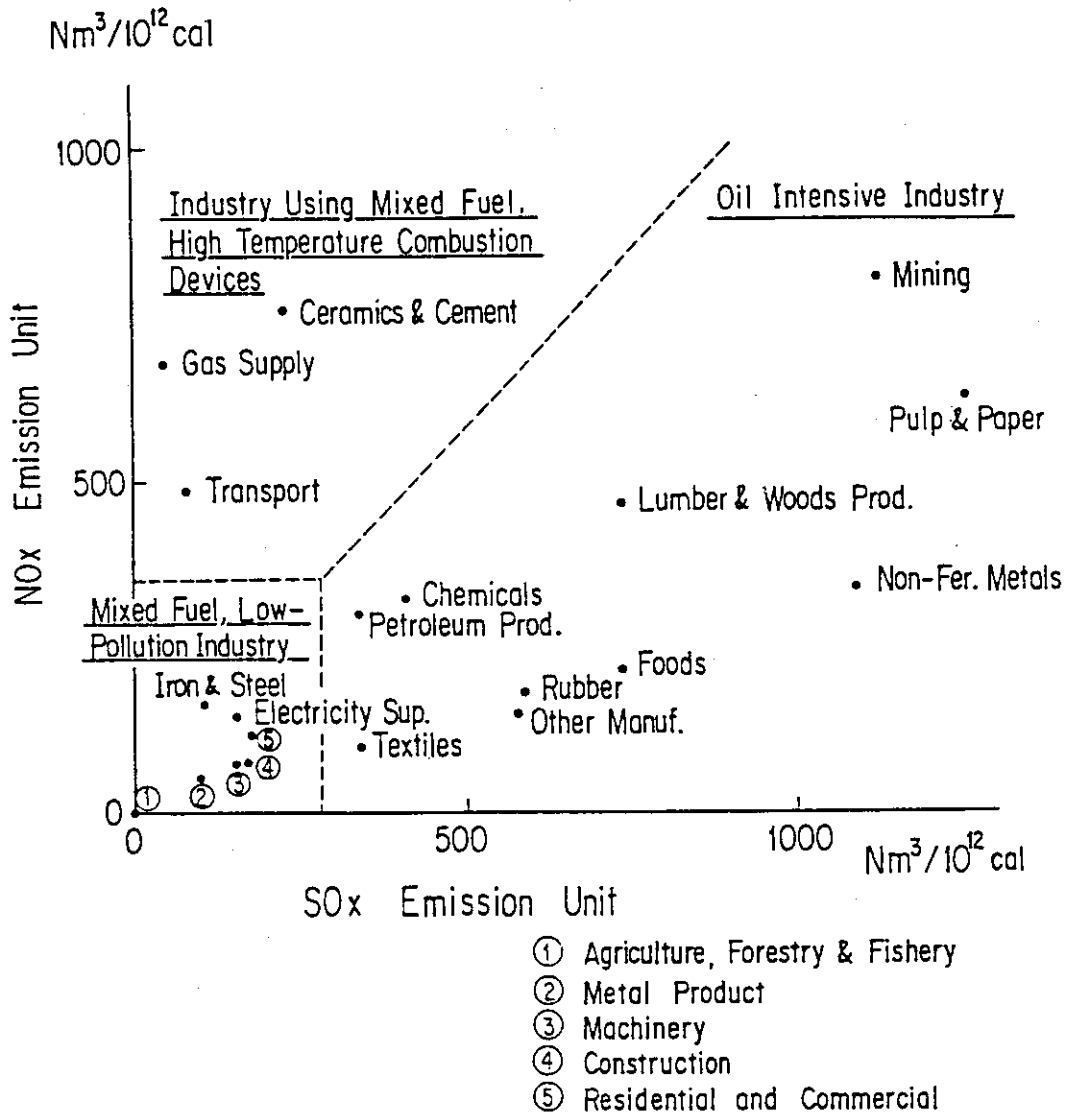


Fig.20 NOx Emission by Industrial Heat Facility
(at F.Y. of 1980)



(Source : MRI Report prepared for JAERI)

Fig.21 SOx. NOx Emission Unit by Industry
 (at F.Y. of 1980)