

JAERI-M
6632

わが国の核エネルギー開発計画の
現状と長期戦略

1976年7月

村田 浩・林 敏和・桂木 學

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

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問合せは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

わが国の核エネルギー開発計画の現状と長期戦略

日本原子力研究所

村田 浩・林 敏和⁺⁾・桂木 学^{+)†}

(1976年6月28日受理)

日本のエネルギー政策、原子力開発利用長期計画の現状及び、エネルギー政策上の特殊性について概観し、それをもとにクリーンエネルギーを供給する将来の核エネルギー産業を完成するための政策策定に際して考慮すべき諸点について述べる。ついで、そのために最も有効と考えられる戦略についてその方向と、将来のヴィジョンの核心にふれ、今後の核エネルギー開発の目標とプログラムについて述べる。

^{+)†} 日本原子力研究所企画室

JAERI-M 6632

The Status and Long Term Strategies of Nuclear Energy Development
Programme in Japan

Hiroshi MURATA, Toshikazu HAYASHI⁺⁾ and Satoru KATSURAGI^{+)}}

Japan Atomic Energy Research Institute

(Received June 28, 1976)

Japan's energy policy, present status of development and utilization of nuclear energy and their characteristic features are described in outline.

Based on the above review, considerations are given for important strategic key points so as to attain the future maturised nuclear energy industry.

In the last, the authors intend to clarify more explicitly lines and essence of the strategy for efficient research and development programme in Japan.

+) Office of Planning, JAERI

目 次

I まえがき	1
II わが国における原子力研究開発を考察する際の基礎事項	1
1. 短期エネルギー戦略の全体的見通し	1
2. 新型転換炉（A T R）	2
3. 高速増殖炉（F B R）	2
4. 多目的高温ガス炉（V H T R）	3
III 原子力開発の現状	4
1 商業用原子力発電の現状	4
2 A T RとF B Rの研究開発計画	5
3 V H T Rの研究開発計画	5
4 プラズマ物理と核融合の研究開発	5
IV 核燃料サイクルの開発の現状	6
1 ウラン資源の確保	6
2 濃縮ウランのための方策	6
3 再処理プラントの建設と運転	7
4 環境保護のための開発	7
V 長期戦略の基本的考え方	8
1 日本の現状に固有の問題	8
2 主要な因子に関する考慮	8
3 研究開発の割当てのための方法論	11
VI 日本における核エネルギー戦略	12
1 核エネルギー戦略の全体的見通し	12
2 想定される総合システム	13
VII 結 び	14
(付 記)	15

I まえがき

わが国の1960年代までの「原子力開発利用長期計画」は、低コストの石油を用いた在来の発電プラントとの比較の上に策定されてきた戦略にもとづいたものであり、低コストの一次エネルギー資源が豊富に入手できることを仮定した、当時の国のエネルギー政策にのっとり、エネルギーコストと核燃料物質の消費を低減することに重点を置いたものであった。¹⁾

1973年の国際的な石油危機は、世界最大の石油輸入国であり、一次エネルギーのおよそ75%を石油に依存しているわが国に強い打撃を与えた。世界の経済および石油情勢の急激な変化はわが国のエネルギー政策の土台をゆるがし、将来の経済成長についての不安を増大することになった。

他方、環境へのじょう乱に反対する声が、地域共同体、特に漁業および農業関係団体のなかから起ってきた。それは原子力の場合には特に強いものだった。最初の原子力船「むつ」において経験された不幸な事件もまたこの傾向に拍車をかけることとなった。

エネルギー情勢のこのような急激な変動に直面して、政府は国のエネルギー政策の全般的な見直しに着手した。この目的のために通産省の総合エネルギー調査会が1975年8月に今後10年間のエネルギー政策の基本に関する答申を行った。²⁾この動きに答えて、原子力委員会は「原子力開発利用長期計画」と行政組織を改定する作業に着手し、ATR、FBRおよびHTRの研究開発に関する検討を行うために、新型動力炉開発専門部会を設立した。この部会はこれらの原子炉についての長期戦略を検討し、報告をまとめつつある。

一方、日本原子力産業会議（JAIF）は原子力関係の広範囲の分野からのメンバーをあつめ、原子力発電開発規模検討委員会を組織し、原子力開発の目標規模の改定に関する報告を行った。³⁾

これらの動きに対して、石油の補助的エネルギー資源として太陽エネルギー、石炭のガス化および液化、地熱ならびに水素エネルギーの開発を行うサンシャイン計画が通産省の指導のもとに1974年から実施されている。⁴⁾

以下に書かれている長期核エネルギー戦略は、上に述べた検討と報告を参考にしている。しかしながら、この論文において著者らは、クリーンエネルギーを供給する未来の成熟した核エネルギー産業を完成するための最も有効な戦略について、著者らが抱いているヴィジョンの核心と枠組みとをより明確に表現することを意図している。

II わが国における原子力研究開発を考察する際の基礎事項

1 短期エネルギー戦略の全体的見通し

1960年代の10年間にわが国のエネルギー多消費型産業は急速に拡大し、1961年から1972年までの12年間を通じてのエネルギー消費量年間増加率は、同じ期間における世界の平均増加率のおよそ2倍であった。この期間のわが国のエネルギー政策は、豊富で低コストの一次エネルギーが世界中の需要に応じて入手でき、且つ一次エネルギー市場は消費国の思いのままになるといった仮定にもとづいた特異なものであった。しかしながら、石油危機によってわが国の一次エネルギー供給が不

I まえがき

わが国の1960年代までの「原子力開発利用長期計画」は、低コストの石油を用いた在来の発電プラントとの比較の上に策定されてきた戦略にもとづいたものであり、低コストの一次エネルギー資源が豊富に入手できることを仮定した、当時の国のエネルギー政策にのっとり、エネルギーコストと核燃料物質の消費を低減することに重点を置いたものであった。¹⁾

1973年の国際的な石油危機は、世界最大の石油輸入国であり、一次エネルギーのおよそ75%を石油に依存しているわが国に強い打撃を与えた。世界の経済および石油情勢の急激な変化はわが国のエネルギー政策の土台をゆるがし、将来の経済成長についての不安を増大することになった。

他方、環境へのじょう乱に反対する声が、地域共同体、特に漁業および農業関係団体のなかから起ってきた。それは原子力の場合には特に強いものだった。最初の原子力船「むつ」において経験された不幸な事件もまたこの傾向に拍車をかけることとなった。

エネルギー情勢のこのような急激な変動に直面して、政府は国のエネルギー政策の全般的な見直しに着手した。この目的のために通産省の総合エネルギー調査会が1975年8月に今後10年間のエネルギー政策の基本に関する答申を行った。²⁾この動きに答えて、原子力委員会は「原子力開発利用長期計画」と行政組織を改定する作業に着手し、ATR、FBRおよびHTRの研究開発に関する検討を行うために、新型動力炉開発専門部会を設立した。この部会はこれらの原子炉についての長期戦略を検討し、報告をまとめつつある。

一方、日本原子力産業会議（JAIF）は原子力関係の広範囲の分野からのメンバーをあつめ、原子力発電開発規模検討委員会を組織し、原子力開発の目標規模の改定に関する報告を行った。³⁾

これらの動きに対して、石油の補助的エネルギー資源として太陽エネルギー、石炭のガス化および液化、地熱ならびに水素エネルギーの開発を行うサンシャイン計画が通産省の指導のもとに1974年から実施されている。⁴⁾

以下に書かれている長期核エネルギー戦略は、上に述べた検討と報告を参考にしている。しかしながら、この論文において著者らは、クリーンエネルギーを供給する未来の成熟した核エネルギー産業を完成するための最も有効な戦略について、著者らが抱いているヴィジョンの核心と枠組みとをより明確に表現することを意図している。

II わが国における原子力研究開発を考察する際の基礎事項

1 短期エネルギー戦略の全体的見通し

1960年代の10年間にわが国のエネルギー多消費型産業は急速に拡大し、1961年から1972年までの12年間を通じてのエネルギー消費量年間増加率は、同じ期間における世界の平均増加率のおよそ2倍であった。この期間のわが国のエネルギー政策は、豊富で低コストの一次エネルギーが世界中の需要に応じて入手でき、且つ一次エネルギー市場は消費国の思いのままになるといった仮定にもとづいた特異なものであった。しかしながら、石油危機によってわが国的一次エネルギー供給が不

安定になるだろうということが明らかになった。わが国の今後10年間(1976~1985年)のエネルギー政策の基本が、昨年総合エネルギー調査会によって通産大臣に答申された。この基本の最終的な目標はわが国健全な経済的、文化的活動に対して長期にわたって十分な量のエネルギーが供給されることを保障することにある。この最終目標に向けて安定的エネルギー供給を確保する方向での努力がなされねばならない。GNPの年間増加率を6.6%と仮定すると、今後10年間にわたってエネルギー需要は年6.2%の割合で増大するものと予想されるが、これは過去10年間の半分の数字である。9.4%のエネルギー節約が果された場合、上の仮定から1985会計年度における一次エネルギーの需要は石油換算で7.6億kℓとなる。安定的エネルギー供給のために不可欠な点は、表1に示されているように日本のエネルギー供給の特徴となっている輸入石油への依存を減らすことである。この目標を達成するには、水力、石炭、その他の国内で入手しうるエネルギー資源および準国産エネルギー資源としての核エネルギーのような多様なエネルギー資源を利用するための大きな努力がなされねばならない。表1に示すように、この努力によって、わが国の輸入石油への依存度は77%から63%まで減らされるだろう。同表に示す提案されたエネルギー需給計画においては、石油の代替として核エネルギーが最も有望なエネルギー源であると考えられている。その理由としては、燃料供給の一時的な滞りによる影響が小さいこと、発電コストが燃料コストの上昇にあまり影響されないことがあげられる。したがって、一次エネルギー源としては核エネルギーにもっと依存すべきである。わが国における電力供給に着目すると、表2に示すように1985年には原子力は、おそらく在来の火力に次ぐ2番目の位置を占めるだろう。

しかしながら一次エネルギー需要のうち電力用需要は全需要のおよそ30~40%でしかない。もし他の何らかの方策が講じられないならば、1985年以後の次の10年間には巨大な量になると思われるわが国の需要の残りの部分を相変らず石油に依存しなければならない。この需要の大部分は民生用、地域暖房、輸送および産業用のプロセスヒートのための燃料から成っているから、石油の相当量が核エネルギーで置き換えられるはずである。言いかえれば、一次エネルギーのうちのこのような非電力需要への対応にもまた努力が向けられるべきである。以下に核エネルギーの利用に関するさまざまな研究開発計画を述べる。

2 新型転換炉（ATR）

核燃料の有効利用によって一次エネルギーの安定供給を確保し、また原子力発電所の利点の実証を目標として、動力炉・核燃料開発事業団は新型転換炉（ATR）の開発に取組んでいる。

現在開発中のATRは重水減速、沸騰軽水冷却型の原子炉である。中性子経済がすぐれているために、この原子炉は軽水炉に較べてずっと少量の濃縮ウラン・インベントリーで運転可能である。加えてこの原子炉は微濃縮のウラン燃料のほかプルトニウム富化燃料を用いることができるため、ウランおよびその貿易価格変動のような核燃料サイクルに関する海外情勢の影響との関係において、かなり融通性を持つものと言えよう。

3 高速増殖炉（FBR）

LMFBRの必要性は、現在一次エネルギーのおよそ30%が発電に用いられており、そのための燃料所要量が多大にのぼるという問題から明白である。これまで発電のための需要の大部分が表1に示すように、輸入石油に依存している。世界の工業国ではこの理由のために、原子力発電所の開発を

推進している。在来の発電プラントから原子力発電プラントへの転換はきわめて急速に進むだろうと予想されるが、その場合ウランがLWRのような熱中性子転換炉だけで用いられるるとすると、低コストのウラン鉱石は1990年代に枯渇してしまうだろう。その時期には世界全体にわたる大々的な探査活動が行われたとしても、ウランの価格はきわめて高いものになっていると思われる。

資源保護のためには、短期的にも保存のための努力をすることが非常に重要である。核エネルギーを用いた研究活動が開始された初期の時代から周知のように、高速増殖炉は核分裂性物質を増殖するという貴重な能力を有する点に注目されている。すなわちFBRは消費した以上の燃料を作り出すことが可能である。LWRはウランのほんの数%を利用するにすぎないが、FBRはウランの60~80%を利用し、ウランの潜在エネルギーを最大限に引出す能力を持っており、それによって発電コストとウランの消費率を下げることができる。

他方、燃料サイクルの観点からは、FBRは濃縮ウランを用いずに運転することができる。したがって、FBRが発電システムに組入れられれば、濃縮ウランの需要を大幅に減らすことになる。

商業用高速炉は、建設コストがLWRに較べてわずかに高いと予想されている。しかしながら、燃料コストはLWRより低廉になる。というのは、FBRの増殖能力が天然ウランの使用量を低く抑えるからである。将来においては技術の進歩、発電容量の増大および大量生産によって、建設コストの方も下げられるものと思われる。これに対し、濃縮ウランを用いる熱中性子炉では、天然ウランと濃縮役務のコスト上昇が、燃料コストの上昇をもたらすだろう。これらの点を考慮に入れると、商業用高速増殖炉は2000年代には、LWRおよび在来発電プラントに競合しうるものと結論される。しかしながら、予測しがたい多くの要素が残っており、上記の結論はむしろ当該時点までに達成すべき目標を示したものと言うべきであろう。

同時に、FBRは安全性と生活環境への採り入れやすさに関して、よりすぐれた特質を持っており、成熟した原子力発電システムに組み入れられることになると予想されている。したがって、開発の段階にあるうちに、エネルギー分野で高い成熟度を示すことが要求される。

4 多目的高温ガス炉（VHTR）

現在のところ、ほとんどすべての核エネルギーが発電のために用いられている。わが国では、全需要のうちで発電用の需要の占める割合はおよそ30%である。残りの3分の2の需要は、民生用、輸送用および産業、特に製鉄および化学工業におけるプロセスヒート用に用いられている。

エネルギー供給の安定化のためには、輸入化石燃料にこのように過度に依存することは望ましくない。というのは、資源の輸送や環境の汚染のように、資源を十分に入手するうえで多くの難問が予想されるからである。したがって、もし核エネルギーが化石燃料のこの需要の大部分を代替し得るならば、核エネルギーは全エネルギー消費量に対する現在の化石燃料と同じ程度に、その可能性と重みとを増大させることになるだろう。上記の目標を達成するためには、核エネルギーを多様な目的に熱源として直接利用することが必要である。このようにして、一方では化学工業の燃料および原料として、水素、還元ガス、合成ガスが核熱を用いて製造され、他方では高温原子炉からの熱がプロセスヒートとして利用される。核熱を利用したこれらの方法を結びつければ、エネルギー多消費型産業である製鉄および化学工業の石炭・石油への依存からの脱却が可能になる。同時に、もし水素が核エネルギーを利用した何らかの熱化学反応によって、水から低廉に生産できれば、これまで国内市場で使われ

てきた種々のガスに取って代ることも可能である。このような方法で製造された水素は、さらに輸送機関にも利用されることだろう。

この可能性を実証するための実験炉が1970年代末に建設される予定である。この多目的高温ガス実験炉の主な目的は以下のとくである。

- (1) 製鉄に利用される還元ガスの生産によって核熱の多目的利用を実証すること。
- (2) 多目的高温ガス炉で用いられるすぐれた性能を持った燃料と燃料要素を試験し開発すること。
- (3) 原子炉と在来の非核設備とから成るこのような核エネルギー・プラントシステムの安全性を実証すること。

III 原子力開発の現状

1 商業用原子力発電の現状

日本原子力研究所の動力試験炉（J P D.R）による初めての原子力発電は、1963年10月、2.4 MWe の出力レベルでその最初の試験運転に成功した。その後、1965年11月に日本原子力発電株式会社の東海1号炉（166 MWe、マグノックス型原子炉）によって商業的な原子力発電がなされ、この原子炉は平均稼動率およそ68%でなお順調に運転が続けられている。

それ以後は、世界で最も普遍的で経済的な炉型であることから、LWRプラントの建設が電力会社によって推進されてきた。

図1および表2に示すように1976年3月現在、日本においては全発電容量5,818 MWeを持つ11基の原子力発電プラントが運転に入っており、一方、13基1,317 MWeが建設中で、4基3,656 MWeが計画中である。⁵⁾

しかしながら、これらの数字は「長期計画」の中で設定された以前の目標、すなわち1980年までに32,000 MWe、1985年までに60,000 MWeを達成することが不可能になったことを明示している。電力会社は、原子力発電容量の拡大、投資の増加、燃料物質の確保および新たなプラントサイトの獲得に努力してきたが、この間各所にみられた原子力施設の環境上および安全上の問題が国民の間の反原子力感情を高めることとなつた。

この困難な状況を開拓するために、原子力委員会は安全性の研究開発を再評価する目的で、国立研究機関、大学および原子力産業から専門家を集め原子炉施設等安全研究専門部会を設けた。この部会は1975年6月に中間報告を作成し、各分野においてなされるべき安全性研究項目の中の優先順位と予算の大きさと期間とについての勧告をおこなった。⁶⁾他方、政府はLWRの工学的安全性研究のための特別会計を設けた。こうした動きと平行して、科学技術庁は安全性の問題を処理する機能を持つ新しい組織として原子力安全局を設置した。

今日、長期目標の達成、特に今後の新たなLWRの建設は、国民的合意をもとに政府とエネルギーの生産者と消費者を含めた民間とが協力しあって努力することにより、はじめて可能になるということが強調されている。

てきた種々のガスに取って代ることも可能である。このような方法で製造された水素は、さらに輸送機関にも利用されることだろう。

この可能性を実証するための実験炉が1970年代末に建設される予定である。この多目的高温ガス実験炉の主な目的は以下のとくである。

- (1) 製鉄に利用される還元ガスの生産によって核熱の多目的利用を実証すること。
- (2) 多目的高温ガス炉で用いられるすぐれた性能を持った燃料と燃料要素を試験し開発すること。
- (3) 原子炉と在来の非核設備とから成るこのような核エネルギー・プラントシステムの安全性を実証すること。

III 原子力開発の現状

1 商業用原子力発電の現状

日本原子力研究所の動力試験炉（J P D.R）による初めての原子力発電は、1963年10月、2.4 MWe の出力レベルでその最初の試験運転に成功した。その後、1965年11月に日本原子力発電株式会社の東海1号炉（166 MWe、マグノックス型原子炉）によって商業的な原子力発電がなされ、この原子炉は平均稼動率およそ68%でなお順調に運転が続けられている。

それ以後は、世界で最も普遍的で経済的な炉型であることから、LWRプラントの建設が電力会社によって推進されてきた。

図1および表2に示すように1976年3月現在、日本においては全発電容量5,818 MWeを持つ11基の原子力発電プラントが運転に入っており、一方、13基1,317 MWeが建設中で、4基3,656 MWeが計画中である。⁵⁾

しかしながら、これらの数字は「長期計画」の中で設定された以前の目標、すなわち1980年までに32,000 MWe、1985年までに60,000 MWeを達成することが不可能になったことを明示している。電力会社は、原子力発電容量の拡大、投資の増加、燃料物質の確保および新たなプラントサイトの獲得に努力してきたが、この間各所にみられた原子力施設の環境上および安全上の問題が国民の間の反原子力感情を高めるととなつた。

この困難な状況を開拓するために、原子力委員会は安全性の研究開発を再評価する目的で、国立研究機関、大学および原子力産業から専門家を集め原子炉施設等安全研究専門部会を設けた。この部会は1975年6月に中間報告を作成し、各分野においてなされるべき安全性研究項目の中の優先順位と予算の大きさと期間についての勧告をおこなった。⁶⁾他方、政府はLWRの工学的安全性研究のための特別会計を設けた。こうした動きと平行して、科学技術庁は安全性の問題を処理する機能を持つ新しい組織として原子力安全局を設置した。

今日、長期目標の達成、特に今後の新たなLWRの建設は、国民的合意をもとに政府とエネルギーの生産者と消費者を含めた民間とが協力しあって努力することにより、はじめて可能になるということが強調されている。

2 ATRとFBRの研究開発計画

ATRとFBRの研究開発計画は国のプロジェクトとして、動力炉・核燃料開発事業団を中心にして1967年以来実施されてきており、ATRについては1980年代の中頃、FBRについては1990年代の中頃までに実用化することを目標としている。

この計画にしたがって1970年から敦賀に建設されている165MWeのATR原型炉「ふげん」は、1977年に臨界に達する予定である。100MWt（第一段階は50MWt）のナトリウム冷却FBR実験炉「常陽」は1969年から大洗に建設されており、1976年に臨界に達する予定である。大洗工学センターではこれに関連した研究開発が行なわれており、その中にはナトリウム技術、蒸気発生器、燃料と材料および原子炉の安全性が含まれている。「常陽」の建設と運転の過程で得られた経験は次の段階のFBR原型炉「もんじゅ」に反映され、また「常陽」は燃料照射炉としても重要な役割を果たすものと期待されている。⁷⁾

3 多目的高温ガス炉の研究開発計画

原研は1969年以来、一次冷却材出口温度1000°Cの多目的高温ガス炉システムの研究開発に取組んできた。これは、図2に示す高温プラント、例えば製鉄、石炭ガス化および他の化学工業に、図3に示すようなカスケードシステムを用いて応用することができる。現在、原研は出力50MWtの実験炉を1984年までに建設する計画をたてている。⁸⁾

原研の計画と平行して、通産省では1973年以来大型プロジェクト「高温還元ガスを用いた直接還元製鉄の研究開発」に取組んでいる。VHTRを用いた直接還元製鉄プロセスの工業的利用は、1990年代に実現するだろうと予想されている。⁹⁾そのシステムは図4に示されている。

VHTRが商業プラントとして開発されれば、次の段階のクリーンエネルギー資源の1つとして期待されている水素を製造するために、VHTRを高温熱源として利用することも可能である。¹⁰⁾

4 プラズマ物理と核融合の研究開発

人類にとって究極的なエネルギー源と考えられている核融合の研究は、いくつかの国において国家的事業の形で遂行されてきた。天然のエネルギー資源に恵まれていない日本では、その研究開発を推進する必要性が特に強く叫ばれている。このため原子力委員会は1968年7月に「核融合研究開発基本計画」をたて、これに基づいて行なわれた研究の第一段階が1975年3月に完了した。計画の第一段階における中心目標は、摂氏数百万度のプラズマの安定閉じ込めを実現することであり、この仕事は日本原子力研究所、理化学研究所および電子技術総合研究所の間で分担されると共に、相互に密接に協力し合いながら進められた。

この期間に原研は、中性粒子入射による加熱実験のためのJFT-1とJFT-2、磁気リミターとダイバータを用いたプラズマの平衡実験のためのJFT-2aをつくり、一方電総研は高ベータトロイダルピンチ実験のためのTPE-1および小型の高ベータスクリューピンチ実験のためのTPE-1aを建設した。これらの施設は、世界的に最も有望と考えられている「トカマク」型核融合炉に関連したものである。

この間、「特定総合研究」の1つとして特別に割り当てられた資金を主たる財源として、基礎的な研究が名古屋、京都および大阪の名大学で行なわれた。大阪大学のレーザー工学研究施設においては、

レーザー一プラズマ反応と高出力レーザーシステムに関する研究が進められてきた。

この第一段階の成果にもとづき、1975～80年にわたる第二段階の研究活動が、これからナルプロジェクトとして強力に推進されようとしている。第二段階の主なプロジェクトは、水素あるいは重水素プラズマの臨界条件の試験のための大型トカマクを持つ臨界プラズマ試験装置JT-60、現在予備設計の段階にある非円形トカマクJT-4の建設である。

研究開発の第二段階においては、無論、核融合炉心技術、特に臨界プラズマ条件の達成のための研究が最も重視されている。エネルギーバランスとプラズマの安定性等に関する基礎研究がJFT-2によって、また非円形断面がプラズマ安定に与える効果とプラズマ不純物を除去するうえでのダイバータの効果に関してはJFT-2aによって、いずれも原研において行なわれている。

これらの活動と連携して、電子技術総合研究所においては高ベータプラズマの研究開発が、理化学研究所においてはプラズマ診断および真空技術の基礎研究が、金属材料技術研究所においては核融合炉の材料に関する基礎研究が、それぞれ第二段階に行なわれることになっている。¹¹⁾

IV 核燃料サイクルの開発の現状

1 ウラン資源の確保

ある予測によると日本におけるウラン資源の需要は、1980年には9,000ショートトンU₃O₈（積算48,000ショートトンU₃O₈）、1985年には14,000ショートトンU₃O₈（積算109,000ショートトンU₃O₈）、1990年には21,000ショートトンU₃O₈（積算200,000ショートトンU₃O₈）に達する。日本の電力会社はすでに、短期あるいは長期の購入契約によって全部で140,000ショートトンのU₃O₈を確保したが、これは約1985年までの積算需要に匹敵するものである。このことは、1980年代末以後の需要を満たすためには、新たな購入契約が必要とされることを意味している。したがって、安定供給を確保するために「開発し輸入する」システムが導入されねばならないだろう。1971年以来、海外のウラン資源の探査のために民間のプロジェクトがいくつか進められているが、現在のところ、ただ1つ成功したのはニジェール・プロジェクトでこれは1979年に生産を開始し、年間およそ1,100ショートトンのU₃O₈を日本に供給することになるだろう。

2 濃縮ウランのための方策

日本の原子力発電計画は、圧倒的に軽水炉から成っており、1980～90年にはその建設が急激に増加するものと予想されている。したがって濃縮ウランに対する需要も急激に増大するだろう。日本原子力産業会議のレポートによれば、予想される需要は1980年には4,000～5,000トンSWU／年、1985年には8,000～10,000トンSWU／年、1990年には11,000～15,000トンSWU／年になるだろうと述べている。しかし、合衆国政府から保証された供給は、1985年9月末までに初期燃料装荷を行なう予定のものを含めて、58基の原子炉のもつ全容量51,000MWeをカバーすることができるし、また1980年から1989年の間に10,000トンSWUをフランスのユーロディフから購入する予定である。将来の需要を満すためには国際的な協力のもとに、濃縮役務の安定した供給者を確保することが必要であると考えられている。

レーザー-プラズマ反応と高出力レーザーシステムに関する研究が進められてきた。

この第一段階の成果にもとづき、1975～80年にわたる第二段階の研究活動が、これからナルプロジェクトとして強力に推進されようとしている。第二段階の主なプロジェクトは、水素あるいは重水素プラズマの臨界条件の試験のための大型トカマクを持つ臨界プラズマ試験装置JT-60、現在予備設計の段階にある非円形トカマクJT-4の建設である。

研究開発の第二段階においては、無論、核融合炉心技術、特に臨界プラズマ条件の達成のための研究が最も重視されている。エネルギーバランスとプラズマの安定性等に関する基礎研究がJFT-2によって、また非円形断面がプラズマ安定に与える効果とプラズマ不純物を除去するうえでのダイバータの効果に関してはJFT-2aによって、いずれも原研において行なわれている。

これらの活動と連携して、電子技術総合研究所においては高ベータプラズマの研究開発が、理化学研究所においてはプラズマ診断および真空技術の基礎研究が、金属材料技術研究所においては核融合炉の材料に関する基礎研究が、それぞれ第二段階に行なわれることになっている。¹¹⁾

IV 核燃料サイクルの開発の現状

1 ウラン資源の確保

ある予測によると日本におけるウラン資源の需要は、1980年には9,000ショートトンU₃O₈（積算48,000ショートトンU₃O₈）、1985年には14,000ショートトンU₃O₈（積算109,000ショートトンU₃O₈）、1990年には21,000ショートトンU₃O₈（積算200,000ショートトンU₃O₈）に達する。日本の電力会社はすでに、短期あるいは長期の購入契約によって全部で140,000ショートトンのU₃O₈を確保したが、これは約1985年までの積算需要に匹敵するものである。このことは、1980年代末以後の需要を満たすためには、新たな購入契約が必要とされることを意味している。したがって、安定供給を確保するために「開発し輸入する」システムが導入されねばならないだろう。1971年以来、海外のウラン資源の探査のために民間のプロジェクトがいくつか進められているが、現在のところ、ただ1つ成功したのはニジェール・プロジェクトでこれは1979年に生産を開始し、年間およそ1,100ショートトンのU₃O₈を日本に供給することになるだろう。

2 濃縮ウランのための方策

日本の原子力発電計画は、圧倒的に軽水炉から成っており、1980～90年にはその建設が急激に増加するものと予想されている。したがって濃縮ウランに対する需要も急激に増大するだろう。日本原子力産業会議のレポートによれば、予想される需要は1980年には4,000～5,000トンSWU／年、1985年には8,000～10,000トンSWU／年、1990年には11,000～15,000トンSWU／年になるだろうと述べている。しかし、合衆国政府から保証された供給は、1985年9月末までに初期燃料装荷を行なう予定のものを含めて、58基の原子炉のもつ全容量51,000MWeをカバーすることができるし、また1980年から1989年の間に10,000トンSWUをフランスのユーロディフから購入する予定である。将来の需要を満すためには国際的な協力のもとに、濃縮役務の安定した供給者を確保することが必要であると考えられている。

原子力委員会は1972年8月、遠心分離法によるウラン濃縮の開発を、1985年までにプラント運転にすることを目標に、ナショナルプロジェクトとして動力炉・核燃料開発事業団に推進させることを決定した。同事業団は、1977年までに10000台の遠心分離機のカスケードをもったパイロットプラントを建設する予定である。¹²⁾

3 再処理プラントの建設と運転

日本における原子力発電容量が1982年までに32000MWeに達すると仮定すると、それから取出される使用済燃料の量はウラン730トンに達するだろう。動燃事業団によって1971年以来東海村に建設されていた最初の再処理プラントが最近完成し、試験運転に入ろうとしている。このプラントは、年間金属ウラン210トン相当をピューレックス法によって再処理することができる。1985年には使用済燃料は、1700トン/年になるものと予測して、最近関係者の間に第2の再処理プラントを建設するための合意が得られ、政府援助のもとに民間企業が実施する見込みである。

4 環境保護のための開発

わが国における原子力発電所からの低レベル放射性廃棄物の総量は、1975年3月には25000ドラム(200ℓ/ドラム)に達する。現在のところ、これらの廃棄物は各原子力発電所に貯蔵されている。しかしこれらの放射性廃棄物は生活環境とは完全に隔離して、適当な場所で処分しなければならない。原子力委員会はその「長期計画」の中で、低レベル固体廃棄物は深海に棄てるか、地下深くに埋めるべきであると述べている。この計画に関しては、深海投棄の予備的な調査研究がIAEAの勧告にしたがって、政府の指導のもとに進められている。1975年6月には、このような廃棄物処分の安全性の評価と実施のためのガイドラインを設けるために、放射性廃棄物対策技術専門部会が組織された。方策を実施に移すために、放射性廃棄物処理センター(仮称)の設立準備打合せ会が1976年3月に設けられ、その活動を開始した。

放射線の防護に関しては、原子力発電プラントの敷地周辺の住民に対する許容被曝線量率は規則によって500ミリレム/年を越えてはならないときめられている。しかし原子力委員会はALAPの精神にしたがって、許容被曝線量は5ミリレム/年以下が望ましいとするガイドラインを採用した。この目標となっている線量率は、ICRP勧告ならびに日本の自然放射能のバックグラウンドのわずか100分の1である。

温排水の処理は、原子力プラントと在来の動力プラントとの共通の問題である。しかしながら、気象学的ならびに生態学的な変化を通じて温排水が自然環境へ与える影響は、まだ十分に明らかにはされていない。環境庁は温排水に対するガイドラインを設けるためのさまざまな研究を行なってきた。科学技術庁もまた、動力炉からの温排水の影響とその利用法についての研究をおこなうために、最近「海洋生物環境研究所」(MERI)を設立した。

上述のごときさまざまな問題があるので、海洋学、気象学および生態学のようないろいろな分野における科学・技術の連携した取り組みが行なわれて始めてわが国の核燃料サイクルは完成したものになると言えよう。

V 長期戦略の基本的考え方

1 日本の現状に固有の問題

天然資源に恵まれないわが国では燃料、原材料および食料等に対する根本的な要求を満すために、輸入に大きく依存しなければならない。この輸入への過度の依存性は、狭い国土、高い人口密度そして重要な因子として石油危機の時に議論されたことであるが、不安定なエネルギー供給のもたらすリスクについての関心の低さに由来するものである。

1950年代初めからの年間およそ10%に及ぶ日本の爆発的な経済成長の背後にある主な因子をふり返ってみると、住宅・社会福祉・環境の質に対する政策の位置づけの低さと、輸出の有利性を大きくするための比較的低い賃金率があげられる。産業設備への資本投下と大きな人口にもとづく豊富な労働力もまた経済の急速な拡大の要因である。今日では再検討がなされているが、何よりもまず、輸入石油を使えばよいという安易な方策が日本の産業活動を支える基本的なエネルギー政策であった。

しかしながら、未曾有の経済拡大の時代が終り、国際石油危機ととりわけOPECによる石油価格の劇的な引上げを通して、日本はエネルギー供給に関するいっそう痛手を受けやすくなつたように思われる。

したがって以下に示すような特に重要な因子を考慮に入れて、早急にわが国のエネルギー政策の全体を見直さなければならない。

- (1) 天然資源の不足
- (2) 狹い国土にもとづく高い人口密度
- (3) 大都市ベルト地帯（メガロポリス）への人口集中の傾向
- (4) エネルギー消費の構造、換言すれば産業の、約60%に及ぶエネルギー消費
- (5) 大エネルギー消費地域の偏在
- (6) 動力プラントの立地と豊富な海水を利用できる長い海岸線
- (7) 原子爆弾による最初の被曝国であるという事実に由来する、核物質に対するアレルギー感覚

2 主要な因子に関する考慮

戦略的なキーポイントと考えられている前述の研究開発計画は、将来のエネルギー戦略を考えるうえに反映されねばならない。また、テクノスフェアがソシオスフェアとエコスフェアに強く与えるさまざまなインパクトを無視して開発をおこなった結果、今日の石油に依存したエネルギー系統が築き上げられたのだが、これに対して全核エネルギー系統を組織化するためにも前述の計画が利用されねばならない。ところで世界中の参画した人々のたいへんな努力にもかかわらず、これらのキーポイントのうちのどれ1つを見ても実際の核エネルギー系統に適用するうえで十分に完成していない。このように複雑で不可解なシステムを開発することに敵意を抱いているか、あるいは保守的な人々は公衆に対して、現在の不幸な事態についての大規模な宣伝を行うことだろう。しかしながら、いかなる技術的システムも完成するには長い期間を必要とするものなのである。例をあげれば、輸送システムがわが国で使われて成功している現在の超特急新幹線に到達するには100年以上かかっているし、現在の航空機に至るまでには半世紀以上費やされている。これら2つの機械は保守的な人々

にも十分満足感をもって利用されている。大規模に利用される場合には、ソシオおよびエコシステムに関連しないような技術システムもまた存在しない。

これとは反対に、現状はわれわれにとってきわめて有利にも思われる。というのは核エネルギー・サブシステムには、成熟した商業的核エネルギー産業へと順化させるうえで多くの融通性が残されているからである。国の活動のよりどころとなっている化石燃料の不足を考慮すると、この10年間は各種の核エネルギー・サブシステムに適当な研究開発を割り当てるための完全な戦略的検討をするうえでの千載一遇の機会であるように思われる。ひとたび現状の有利さを生かしそこなえば、日本の節度ある工業化は終りを告げ、公衆の期待に反して生活条件は最悪になるおそれがある。

日本の特徴を考慮すると、日本の核エネルギー戦略に反映さるべき主要因子は以下のようなものだと思われる。

2.1 資源の保存

保存のための努力は急を要している。なぜなら、資源ナショナリズムと予期された輸送上の問題によってひきおこされた輸入石油の不足および価格の激しい高騰が、われわれが現在予想している以上の大きな影響をわが国に及ぼすと思われるからである。故に短期的な核エネルギー戦略で最も重要なのは、LWRのような現在利用できる原子炉をより完成させることである。しかしこのような能率の悪い原子炉だけに依存し続けると、ウラン資源の不足にみまわれることになる。中期的な核エネルギー戦略においては、ウラン資源の保存のためにFBRを大幅に採り入れねばならない。しかしながら、これら2つの炉型は化石燃料と核燃料の両者を保存するためには、十分なものとは言えない。なぜなら、これら2つの炉型は原理的に冷却材炉心出口温度がかなり低く、その結果熱効率が低いという欠点をもっているからである。またこれらの原子炉は大部分が発電用に使われる予定である。故に輸入石油のうち発電用以外の部分を節減するためには、そのことを主たる目的とした新しい型の原子炉が必要である。前2者に較べてすぐれた性能を特ったVHTRは、この目的にかなうものと思われる。VHTRは発電用に利用することもまた可能であって、VHTRがFBRとともに利用されれば、一方ではエネルギー多消費型産業用のプロセスヒート源として、他方では電気の生産はもちろん、電気の負荷変動に対する調整用として役立たせることができる。VHTRのもう1つの利点は、種々の異なる燃料を燃やすことができることである。特にVHTRでは設計変更なしにU-233・トリウムサイクルが可能であり、そうなれば豊富な燃料資源が得られることになり、VHTRが将来の核エネルギー戦略の中心に来ることになるだろう。したがって、将来はFBRとともにVHTRを導入しなければならないという結論に達する。

長期戦略においては核融合の装置が、特にD-D反応による燃焼が実用化されれば、非常に重要なものになることは明白である。天然エネルギー資源としては、まだ太陽熱や地熱のようなものもある。これらはある程度までエネルギー源として利用できるだろう。しかしこういった天然エネルギー資源は、一定の努力（コスト、費される物質と時間で測られる）を投入して得られるエネルギー密度が極めて低い。核分裂および核融合の燃料の場合には、化石燃料に較べると大きな比エネルギー密度をもっている。

最後にわれわれは、核エネルギー産業において使用される工業資源もまた保存しなければならないということに留意すべきである。

2.2 資本の保存

過去の経験から、原子力産業は資本集約型であることがいよいよ明らかとなってきた。事実、現在のすべての開発計画は石油危機によるコストの急騰の後に特に事業規模拡張の資金不足の影響をこうむっている。日本は海外に売るべき十分な天然資源は何もない、生き残っていくための資源のすべてを買うために資源保有国にいろいろな工業製品を売らなければならない。原子力プラントにあてがわれる資金は3つのカテゴリーに分類される。すなわち開発資金・建設資金および運転資金である。このうちで、開発のコストは大規模な商業用原子炉が用いられるようになれば、重要でなくなると思われる。しかし建設資金は各プラントに対するものである。だから建設されたプラントが長期間運転できれば、この部分は重要でなくなるだろう。読者は、テクノフュアとエコスフェアとの間に相互作用があることに留意すべきである。プラントが良い性能を持っていれば大規模に用いられるから、開発コストは容易に得られることになる。プラントの寿命が現在のLWRよりも長くなれば、原子力プラントによるエネルギーのコストは著しく低いものとなろう。上記の点は単に資本についての検討だけでなく、戦略を検討するときにも思起す必要がある。

2.3 環境の保全

環境劣化の進行はすべて、何らかのサブシステムが外界に与える影響を無視することによって起るものである。設計者、建設者および運転者は、サブシステムにとって最良と思うことをおこなっている。世界が無限の大きさを持っているか、サブシステムの大きさが小さいか、あるいは世界にあるサブシステムが数少なければ、環境の問題は起らないだろう。この問題はこのようなサブシステムの集積の結果であると特徴づけられる。換言すれば、エコスフェアは常に何らかのサブシステムによって損なわれているが、サブシステムが大規模に集積するまでは、必ずもとの状態に回復するわけである。環境問題のもう1つの特徴は、問題の認識が人それぞれに異なっていることである。これは環境へのインパクトが、その影響が分らないほど低いレベルに規制されている時に、特にそうである。ゆえに、もし環境を回復させることのできる適切な方法を見つけることができれば、この問題を処理できることになるが、それまでは、環境へのインパクトを実用的に低く制限すること（ALAP）が必要である。そのためには技術と環境との間の相互関係を徹底的に分析し、環境劣化をもたらすメカニズムを十分理解しなければならない。

核エネルギー戦略に関連して予想される主な環境問題には、放射性廃棄物の処理、核分裂生成物の管理、超ウラン元素、温排水を含む熱公害、放射能および特殊核物質の物的防護対策があげられる。

2.4 社会的アクセプタンス

すでに述べたように、日本は現在のところ短期計画に対する理解を得ることにもっぱら努力している。将来の核エネルギーシステムは、VHTRのように原子力と在来のコンポーネントから成るきわめて複雑な構造になるだろう。このシステムは必然的にいろいろな分野と結びつくがその分野としては、資源、あらゆる種類の産業、地域社会、経済活動および外来の技術がある。システムの中での相互の結びつきはたいへん複雑になるものと予想されるので、将来の社会的目標に適合させるために、あらかじめ社会的アクセプタンスを獲得するための努力をしなければならない。この目的のためには、技術的チェックの繰返し、大衆の啓蒙、大衆向けの環境および安全性に関する情報システムの設立および世論形成に関する社会ダイナミックスを理解することが重要に思われる。

3 研究開発の割当てのための方法論

核エネルギー・システムがひじょうにこみ入ったシステムであることは前に述べた通りで、あらゆるスフェアがこれによって大きなインパクトを受ける。この複雑さがR & Dの段階で完全な最適化をおこなうことをほとんど不可能にしている。というのは異なった尺度をもつひじょうにたくさんの目標があるからである。われわれには定量化できない目標さえいくつかある。単純な解析法はこの理由から核エネルギー・システムに適用することができない。だがこの問題の特徴を想い起せば、適當な方法に気がつく。

まず第1に、核エネルギー・システムは開発の段階にあり、さまざまな技術革新の集積である。第2にR & Dの割当てのためには、市場への浸透あるいは経済的効果に関する分析が不可欠である。最後にわれわれはインパクトの最終段階、すなわちソシオおよびエコスフェアに対するものを取扱わねばならない。これに対し、テクノスフェアからソシオスフェアへ移行する技術のもっと幅広い範囲を取扱えるような分析の方法があればなお好都合である。

上記のことを考慮してわれわれは、形態学的解析、関連樹木法、線型計画法のようなオペレーションズ・リサーチの方法、シナリオ・ライティング、デルフィ法およびそれに関連する解析法をあげることができる。以下に述べるように、これらのうちのいくつかはすでに開発されている。

開発された線型計画法（L P）のプログラムは、V H T Rの導入による影響を解析するために利用されている。採用されたエネルギー・システムモデルは図5に示されている。この解析には17の制約条件を考慮している。また4つのタイプの目的関数を順に取扱うことができる。その中味は、累積投資、累積資源、全排出量および必要な分離作業か要求される敷地面積である。ホフマンのモデルプログラム¹⁸⁾も整備されたが、適用すべきデータが整っていないのでまだ用いられていない。

これらのプログラムに関連して、設備をモジュラー化しそれをもって構成される核エネルギー・モデルにもとづき、核エネルギー・コストと燃料サイクル・コストを予測するための計算コードを開発中である。

このコードは、他の尺度であらわされるインパクトを含むように改良される予定であり、また将来の核エネルギー戦略に利用するためにL Pプログラムと組合わされる予定である。

V H T Rに対する公衆のアクセプタンスを得るうえでの基本的な問題を研究するためと、V H T Rに対する公衆の感情を理解するために、デルフィ法を用いた研究がおこなわれている。その結果はV H T Rの特徴を理解するに役立っている。

短期戦略の中の主要な課題は、燃料サイクルにおけるR & Dの考え方を確立することである。状況を明らかにするために原研では、生産から回収までに至るプルトニウムに関する基礎データの予備調査（P T A - 1）がおこなわれた。プルトニウムを取扱ううえでの考え方は今年中に確立されるであろう。形態学的解析、関連樹木法およびO R法がまとめて使われる予定である。

VI 日本における核エネルギー戦略

1. 核エネルギー戦略の全体的見通し

核融合炉は、エネルギーを生産する究極的な手段であると考えられており、また核融合炉が市場に浸透する時間は約50年と予想されている。したがって、われわれは長期エネルギー戦略を考える際に必要な時間スケールとして50年を採用し、最終的な目標を核融合炉の商業化ないし核融合炉の導入による核エネルギー・システムの再編成に置いている。こういった長い期間は戦略の一貫性を維持するうえで有利であるし、結果を明確に表現するのにも有効である。むしろこうしなければ、われわれはプログラム毎の相互関係を理解することができない。さらに、プログラムのチェックと検討と改訂、およびプログラムに融通性をもたせておくことに注意すべきである。

前に述べた議論をもとにして、燃料サイクルを含む原子力発電の工業化のためのタイムスケールとして10年、また核融合炉を除く原子力産業の完成のためのタイムスケールとして30年を採用した。長期戦略の中で考慮すべき大きな項目は7つあり、LWR, ATR, FBR, VHTR, 核融合炉、燃料サイクルおよび人工敷地である。LWRはほぼ商業化されており、開発すべき大きな問題は残っていない。もし安全性が確立されれば、LWRはおそらく1980年までに完全に商業化できるだろう。しかしながらLWRを大規模に利用するためには、LWR用の燃料サイクル-1を完成させなければならない。これが完成するのは1985年と予想されている。その時点にはATRが商業化していることだろう。

第1期には、VHTR実験炉の建設と運転をおこなう。ここで高温技術と耐熱材料が開発される。FBR原型炉は、ちょうど運転段階に入ったところである。それ以前に実験炉「常陽」を用いて、高い照射量に耐える材料の開発をおこなう。したがって主な短期目標として、(1)LWR用の燃料サイクル-1の確立、(2)FBRの開発、(3)VHTRの開発があげられる。

中期(10~30年)の開発目標として、(1)多目的利用について在来機器の実証試験の後にVHTRを商業化すること、(2)FBR原型炉に引続いてFBRを商業化すること、(3)VHTRとFBRを用いた産業化されたエネルギー・システムに対する燃料サイクル-2をつくりあげること、があげられる。

最終期としては、核融合原型炉を経て核融合炉の商業化に第1の優先順位を置き、核融合炉のための燃料サイクル-3を第2とする。今述べた全体的な関係が表3に示されている。この長期戦略の中には3つの画期的な時期が含まれている。 第1はLWRの完全な産業化(1980年末)であり、第2はFBRとVHTRを導入したとの複合的核エネルギー産業の始まりである。第3は、核融合を含む、より複合的でおそらくは究極的であろうと思われる核エネルギー産業の始まりである。この理由で最終期にはFBR、VHTRおよび核融合炉からなる総合核エネルギー・システムに対して、R&Dを割当てることになるだろう。

海上原子力エネルギー基地とか原子力公園のような人工敷地には、まったく新規な開発努力というようなものは何ら必要がない。その商業化が必要になるのは、立地問題が原子力産業の拡大にとって現実的な障害となつたときである。

このように研究開発計画を割当て、優先順位を上述のごとく決定すれば、すでに開発された技術をあとに続くプログラムに沿った開発作業に利用でき資本の節約を期することができる。他方、先行するR&Dの成否は後に続くプロジェクトに影響を与えることになる。

2. 想定される総合システム

2.1 海上原子力エネルギー基地¹⁴⁾

すでに述べたように、エネルギー需要が極度に増大する将来においては、敷地の問題が日本にとって最も困難なものになる恐れがある。とすれば、海岸線付近の敷地に代って、浮上式プラットフォームから成る海上原子力エネルギー基地がFBR, VHTR, 燃料製造および再処理施設等のようなさまざまな施設を設置するためのよりすぐれた条件をもった敷地を提供してくれるだろう。こういった海上原子力エネルギー基地は、核物質の輸送の容易さ、貯蔵が簡単なこと、安全性と核物質保安対策の便宜とを含めた環境保護の処置に関して、注目すべき利点をもっている。この基地は、6基のVHTRと2基のFBRとから成り、全体で24,000MWtを供給することになっている(図6)。原子炉や他の施設をのせるプラットフォームの間には、一定の距離が保たれており、台風のような災害時に衝突しないように連結機構が施されている。基地の周辺には防波堤も設けられている。これは大きな波と基地の周りを航行する船舶が衝突するのを防ぐように設計されている。この防波堤は数十米の長さに区分されたものを多数結合してできており、潮汐と風に対して柔軟性を持っている。基地の中の連絡はモーター・ポートでおこなわれる。陸地への連絡と輸送には水素製造と核燃料のための原材料の搬入、液化水素生産物の搬出、さらに交替要員の輸送のために、外航用船舶が使われる。基地でつくられた電気は海底ケーブルで陸地へ送られる。製造された水素は、パイプラインによっても陸地輸送されるだろう。基地で必要な純水は、基地の中に建設される海水脱塩プラントで製造される。

このプラットフォームには、プラントを安定化するためのバラスト水の出し入れをする設備、バラストタンクおよび組立てのための諸設備が設けられている。廃棄物貯蔵施設は基地の下の海底につくられる(図7)。

2.2 VHTR-FBR総合核エネルギーシステム

資源戦略の観点からは、液体金属冷却高速増殖炉はウラン濃縮プラントなしで、U-238(またはTh-232)を供給してPu-239(またはU-233)による自給自足が可能である。余剰のPu-239(またはU-233)が他の型式の炉で消費されなければ、FBRの数は増大するだろう。FBRが供給する加熱液体ナトリウムはおよそ600°Cなのでエネルギー効率、さらにはエネルギー戦略的にLWRよりもすぐれている。他方、FBRの中で蓄積されたPu-239(またはU-233)を効率的に利用するために、多目的高温ガス炉(VHTR)がFBRに組合わされる。Th-232のFBRにおける増殖比とVHTRにおける転換比とを、それぞれ1.1および0.8とする。FBRはU-238からつくられるPu-239で自給自足しており、同時にプランケット領域では絶えずTh-232をU-233に転換している。VHTRには内部で転換されたU-233に合せて、高速増殖炉からのU-233も供給されている。結果として、1,500MWeのFBRを運転すれば、1,500MWtのVHTRの運転を可能にするに十分な量のU-233を蓄積することになる。この総合システム(図8)では、エネルギーは温度がそれぞれ、およそ600°Cと1000°Cの加熱流体の形で得られる。したがってこのシステムは600°Cのナトリウムによってより効率的に発電をおこない、300°Cの水を用いる場合よりも熱公害を少なくできる。さらに1000°Cのヘリウムからの熱はプロセスヒートはもちろんのこと、水から効率よく水素を製造することにも用いられる。このシステムにはまた、蒸気タービン・システムよりも効率の高い発電用直接閉サイクル・ガスタービンシステムが取付けられることになるだろう。

2.3 VHTR-FFHR総合核エネルギー・システム¹⁵⁾

このシステムでは、FBRが核融合-核分裂ハイブリッド原子炉(FFHR)で置換えられている。しかし、プランケット領域で親物質から核燃料物質を増殖するという点ではほとんど同じ性能を持っている。FFHRのプランケット領域の転換比が0.5であるとすると、このプランケットでつくられるU-233は、大ざっぱに言って、0.8の転換比をもつ10,000MWtのVHTRを維持するに必要な量に等しくなると推定される。このシステムはしたがって約600°Cで5,000MWt、約1,000°Cで10,000MWtの熱エネルギーを供給することができる。これらの熱源から得られる熱は、電気や水素のような何らかの適当な形態の2次エネルギーに変換されることになる。

海水に含まれる資源はかなりの量が利用されると思われる。この目的のために採られる最初のプロセスはウランとリシウムを含んでいる海水の脱塩である。

脱塩プロセスのための熱エネルギーはもちろん、このシステムからの熱公害を最小にするようにして決められた十分な温度のヘリウムによって供給される予定である。こうして得られた水はVHTRの熱エネルギーを用いて、水素製造の熱化学プロセスとD₂Oの濃縮プロセスの両方に利用される。

ここで得られたD₂Oは電気分解されて重水素が取出され、それがさらにFFHRに燃料として供給されることになる。海水脱塩プロセスの残留物から化学的に分離されるリシウムもまたFFHRに供給される。トリウムは海外から輸入されて、FFHRのプランケット領域とVHTRの炉心に装荷され、そこでともにU-233に転換される。

FFHRの中でD-T反応によってつくられたヘリウムもまた冷却ガスの一部としてVHTRに供給できるが、リークなどのような損失によるヘリウム消費を補なうには十分ではない。他方、海水脱塩プロセスの残留物から分離される小量のウランはVHTRに装荷される。VHTRによってつくられる10,000MWの熱エネルギーは、図9に示すようにこのシステムにおいて最適化された熱効率で、3種の化学反応プロセスに供給される。このシステムの発電用の熱出力は7,000MWである。熱化学反応によって製造される水素の量は、3000トン/日の程度になるものと推定される。海水はこのシステムで、13,000トン/日の割合で処理される。無論、このシステム全体から放出される廃棄熱による熱公害は最小限に抑えられねばならない。

結論として、ここで提唱された2基の原子炉と1基の化学処理プラントとを総合したエネルギー・システムによって、電気および水素の形態をとる良質の2次エネルギーを供給することが可能となるのである。

VII 結 び

わが国の核エネルギー開発戦略策定に際して考察すべき諸点と、最適と考えられる戦略の大筋について述べてきた。クリーンエネルギー開発が国の重要課題として認識されている今日、そのために日本原子力研究所が果すべき役割もますますその比重をましてきている。ここに記述した事柄が、今後のエネルギー戦略策定とそのための分析に際して参考となることを期待する。

2.3 VHTR-FFHR総合核エネルギー・システム¹⁵⁾

このシステムでは、FBRが核融合-核分裂ハイブリッド原子炉(FFHR)で置換えられている。しかし、プランケット領域で親物質から核燃料物質を増殖するという点ではほとんど同じ性能を持っている。FFHRのプランケット領域の転換比が0.5であるとすると、このプランケットでつくられるU-233は、大ざっぱに言って、0.8の転換比をもつ10,000MWtのVHTRを維持するに必要な量に等しくなると推定される。このシステムはしたがって約600°Cで5,000MWt、約1,000°Cで10,000MWtの熱エネルギーを供給することができる。これらの熱源から得られる熱は、電気や水素のような何らかの適当な形態の2次エネルギーに変換されることになる。

海水に含まれる資源はかなりの量が利用されると思われる。この目的のために採られる最初のプロセスはウランとリシウムを含んでいる海水の脱塩である。

脱塩プロセスのための熱エネルギーはもちろん、このシステムからの熱公害を最小にするようにして決められた十分な温度のヘリウムによって供給される予定である。こうして得られた水はVHTRの熱エネルギーを用いて、水素製造の熱化学プロセスとD₂Oの濃縮プロセスの両方に利用される。

ここで得られたD₂Oは電気分解されて重水素が取出され、それがさらにFFHRに燃料として供給されることになる。海水脱塩プロセスの残留物から化学的に分離されるリシウムもまたFFHRに供給される。トリウムは海外から輸入されて、FFHRのプランケット領域とVHTRの炉心に装荷され、そこでともにU-233に転換される。

FFHRの中でD-T反応によってつくられたヘリウムもまた冷却ガスの一部としてVHTRに供給できるが、リークなどのような損失によるヘリウム消費を補なうには十分ではない。他方、海水脱塩プロセスの残留物から分離される小量のウランはVHTRに装荷される。VHTRによってつくられる10,000MWの熱エネルギーは、図9に示すようにこのシステムにおいて最適化された熱効率で、3種の化学反応プロセスに供給される。このシステムの発電用の熱出力は7,000MWである。熱化学反応によって製造される水素の量は、3000トン/日の程度になるものと推定される。海水はこのシステムで、13,000トン/日の割合で処理される。無論、このシステム全体から放出される廃棄熱による熱公害は最小限に抑えられねばならない。

結論として、ここで提唱された2基の原子炉と1基の化学処理プラントとを総合したエネルギー・システムによって、電気および水素の形態をとる良質の2次エネルギーを供給することが可能となるのである。

VII 結 び

わが国の核エネルギー開発戦略策定に際して考察すべき諸点と、最適と考えられる戦略の大筋について述べてきた。クリーンエネルギー開発が国の重要課題として認識されている今日、そのために日本原子力研究所が果すべき役割もますますその比重をましてきている。ここに記述した事柄が、今後のエネルギー戦略策定とそのための分析に際して参考となることを期待する。

〔付記〕

本論文は1976年4月7～10日メキシコ市において開催されたThe 4th Participants Meeting of Workshop on Alternative Energy Strategy (WAES)に筆者等の責任において提出した英文論文を、邦訳したものである。

なお原論文作成とりまとめに当っては企画室および、動力炉開発・安全性研究管理部の関係者に種々協力を得た。また邦訳については佐藤治研究員をわざらわせた。ここに記して謝意を表する。

(村田記)

参考文献

- 1) 原子力委員会：原子力開発利用長期計画（1972年6月1日）
- 2) 通商産業省総合エネルギー調査会：日本の長期エネルギー需給計画（1975年8月）
- 3) Japan Atomic Industrial Forum, Inc.: Target Scale of Nuclear Power Generation, March 1976.
- 4) 通商産業省：サンシャイン計画（1974年4月）
- 5) 日本原子力産業会議：世界の原子力発電所（1975年6月）
- 6) Advisory Committee on Safety Research of Nuclear Power Reactors and Related Facilities: Research Program Plan (Draft), July 1975.
- 7) 動力炉・核燃料開発事業団：日本におけるナトリウム冷却高速増殖炉開発の概要
- 8) H. Murata, H. Ishikawa, K. Taketani: Status and Outlook of the HTR Programme in Japan, IAEA-SM-200/86.
- 9) 通商産業省：わが国の研究開発計画
- 10) C. Marchetti: Hydrogen and Energy, Chemical Economy & Engineering Review, January 1973, Vol. 15, No. 7, P.P. 7 - 25.
- 11) 原子力委員会：第2期核融合特別研究開発基本計画（1975年7月）
- 12) 原子力委員会：原子力白書（昭和50年度版）
- 13) K. C. Hoffman: A System Approach to Energy Resource Planning, BNL-19113-R.
- 14) H. Murata: Present and Future of Nuclear Energy Development and Utilization in Japan, 1975.
- 15) H. Murata: Foundations of A Long-Term Strategy for Nuclear Power Development in Japan, Annals of Nuclear Energy, Vol. 2, P.P. 495 - 501, 1975.

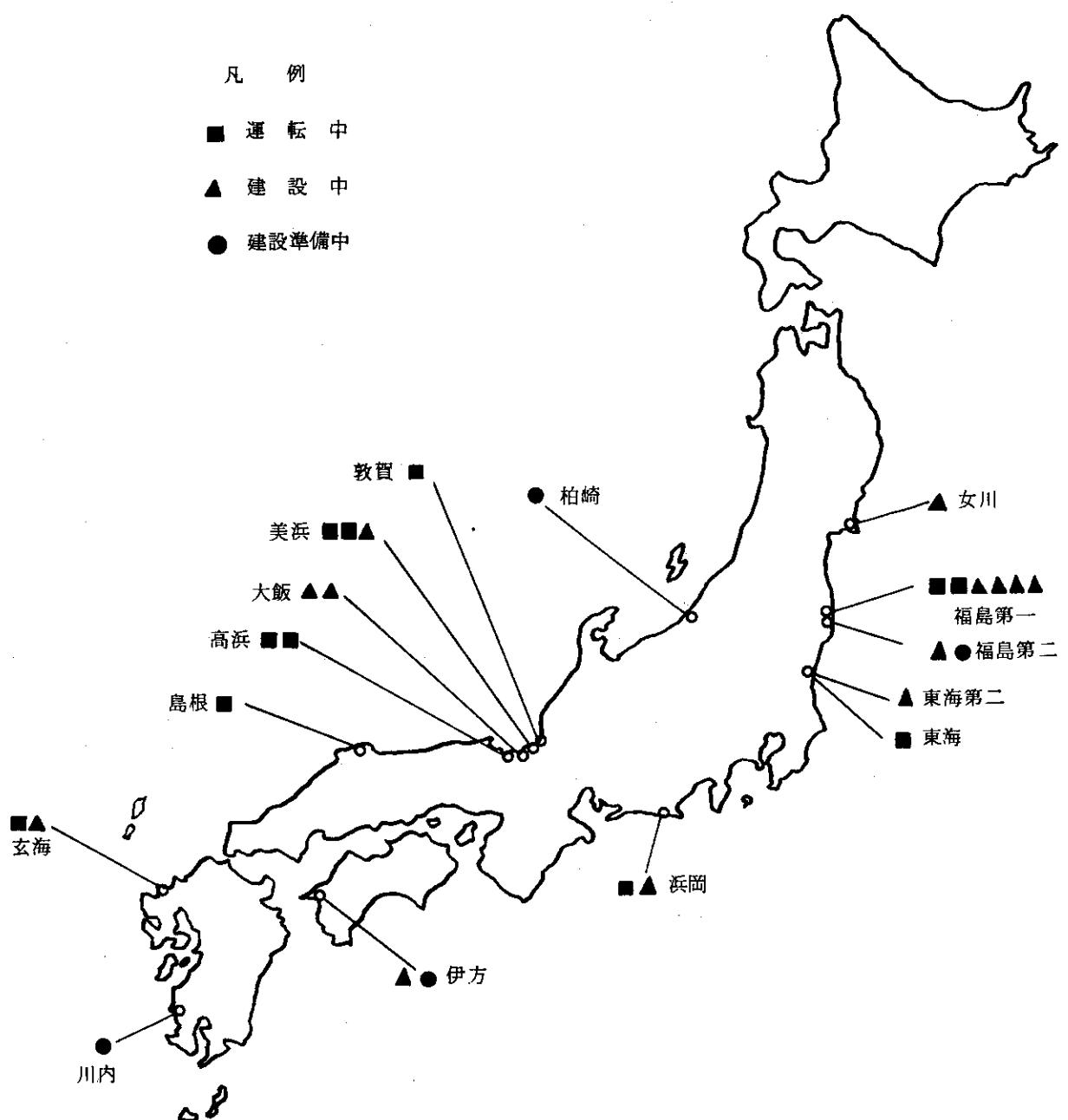


図 1 わが国の原子力発電所分布図

(1976 年 3 月現在)

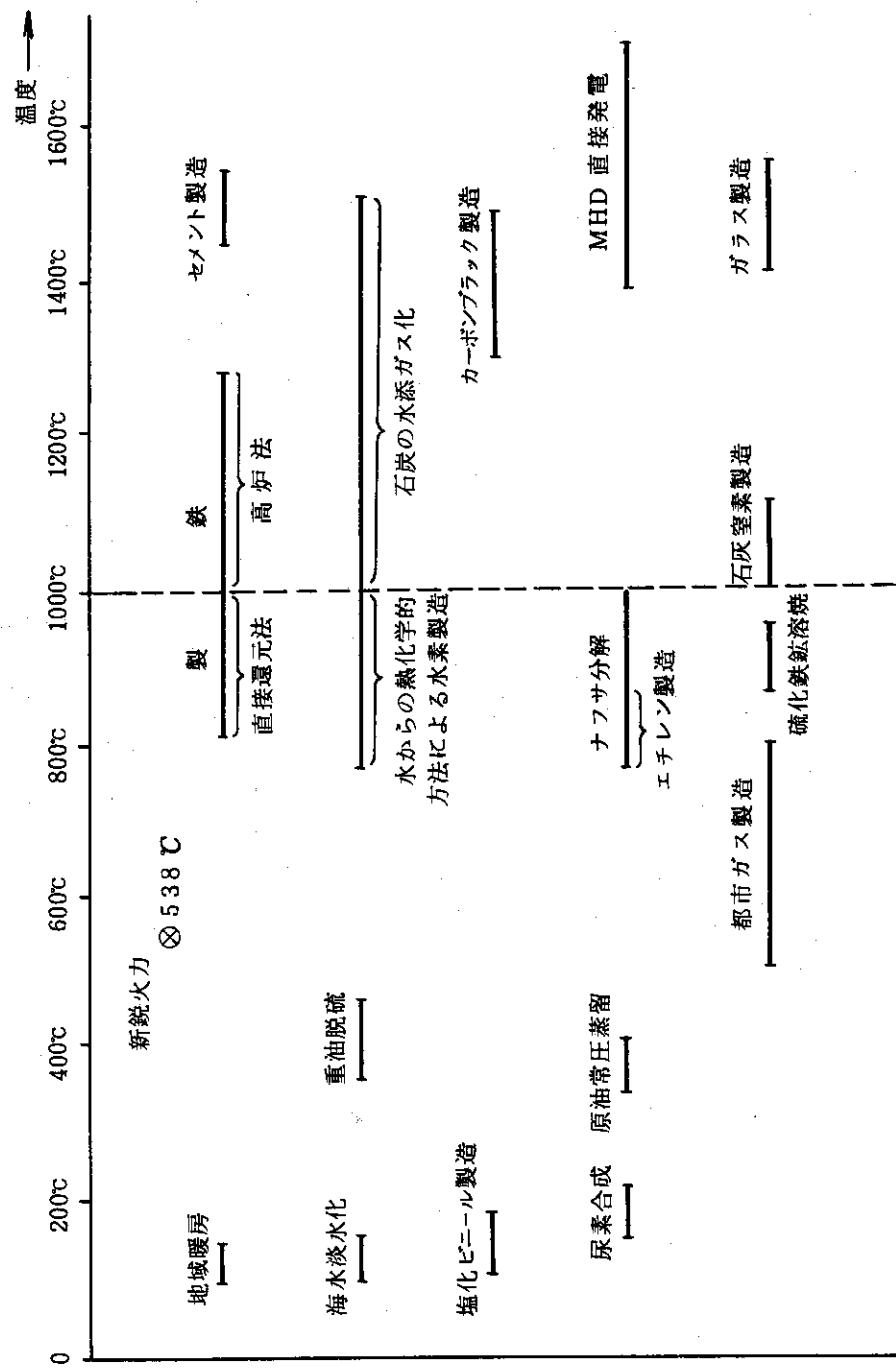


図2 各種産業において必要とされる温度領域

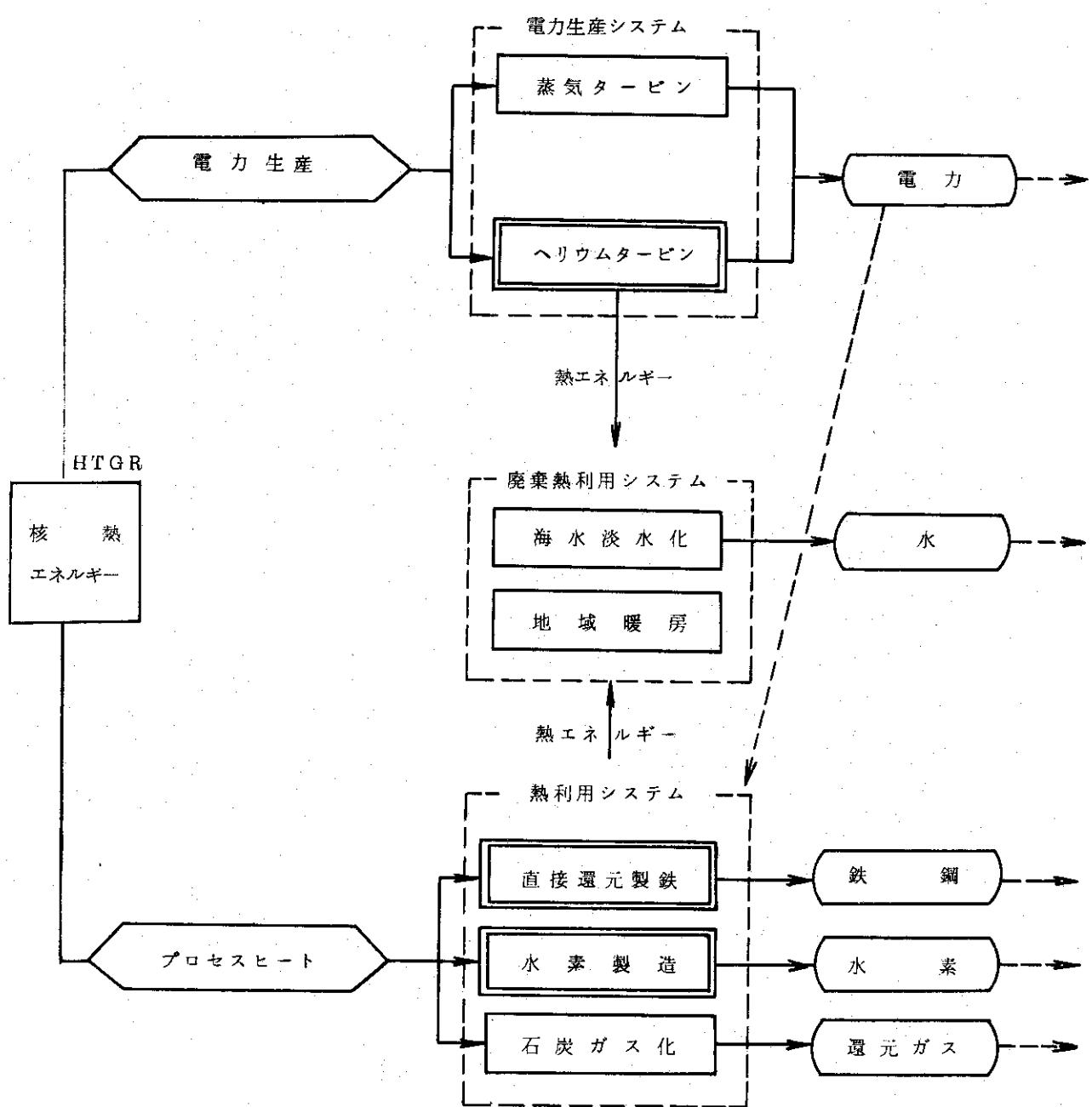


図3 多目的 VHTR システムのブロック図

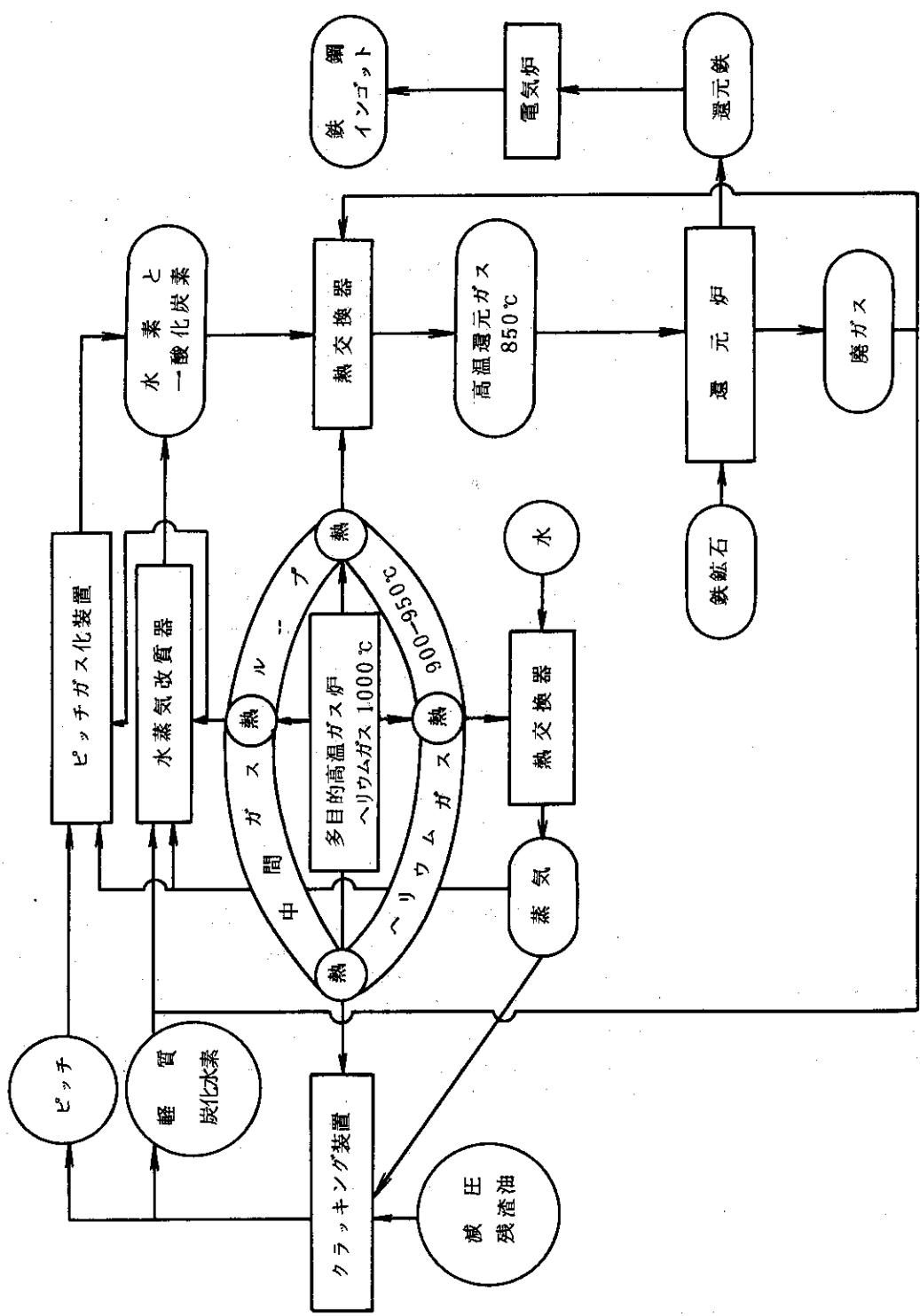


図4 原子力製鐵システム

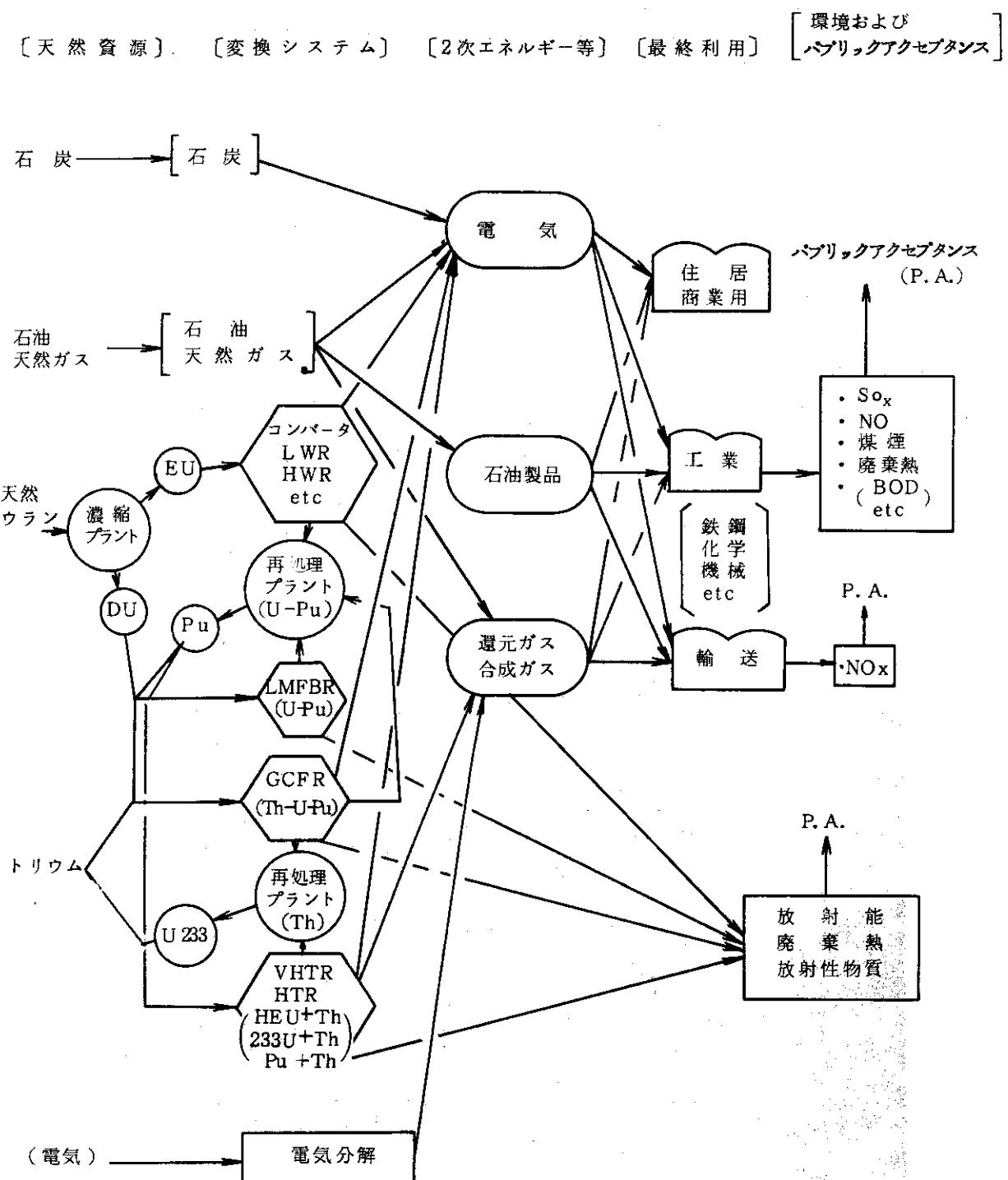


図5 エネルギーシステムの模式図

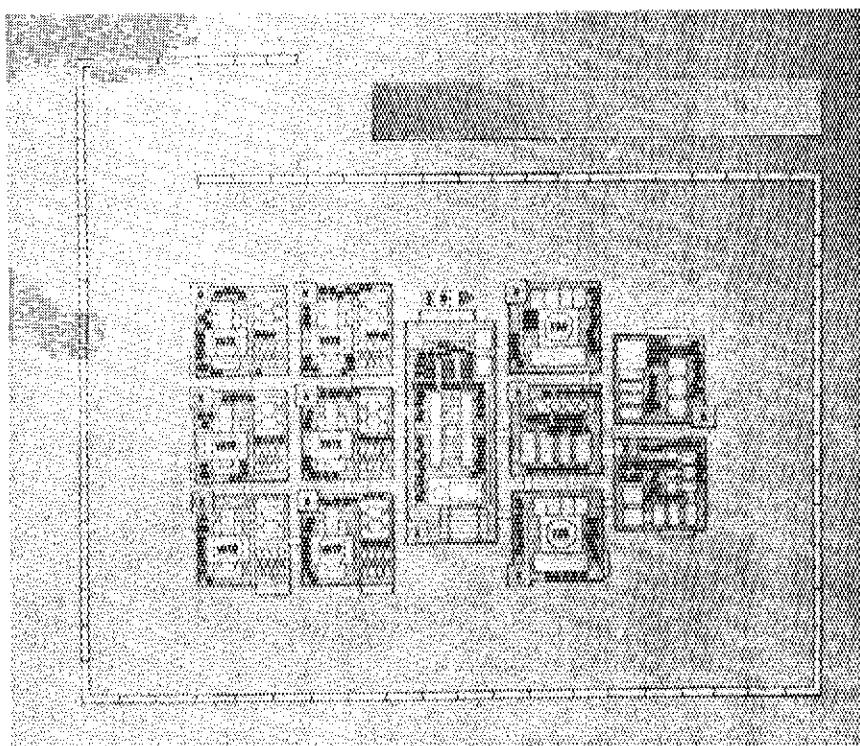


図6. 海上原子力エネルギー基地の諸施設の配置

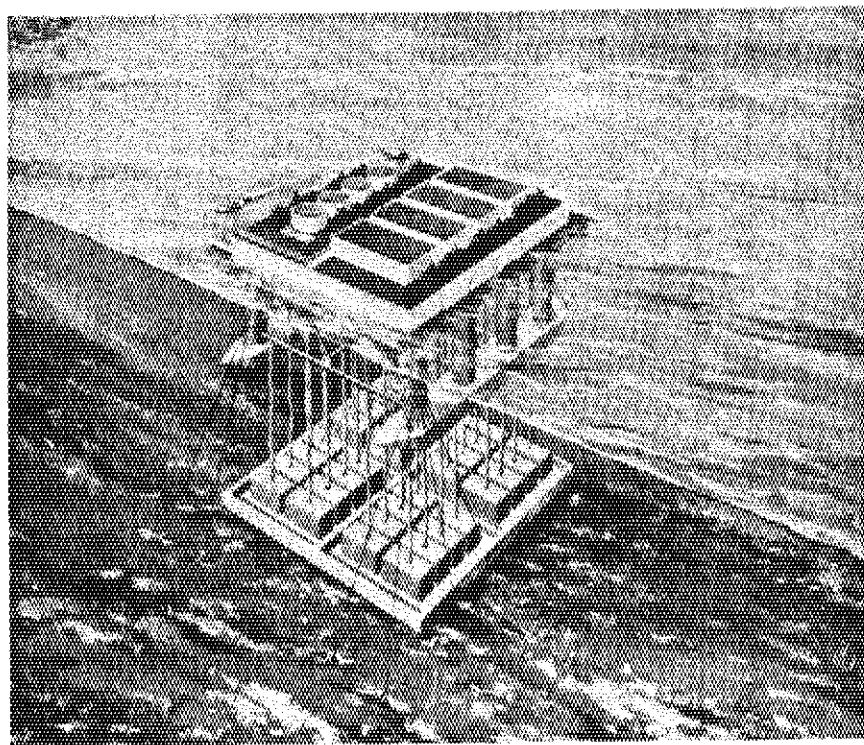


図7. 海上原子力エネルギー基地の鳥観図

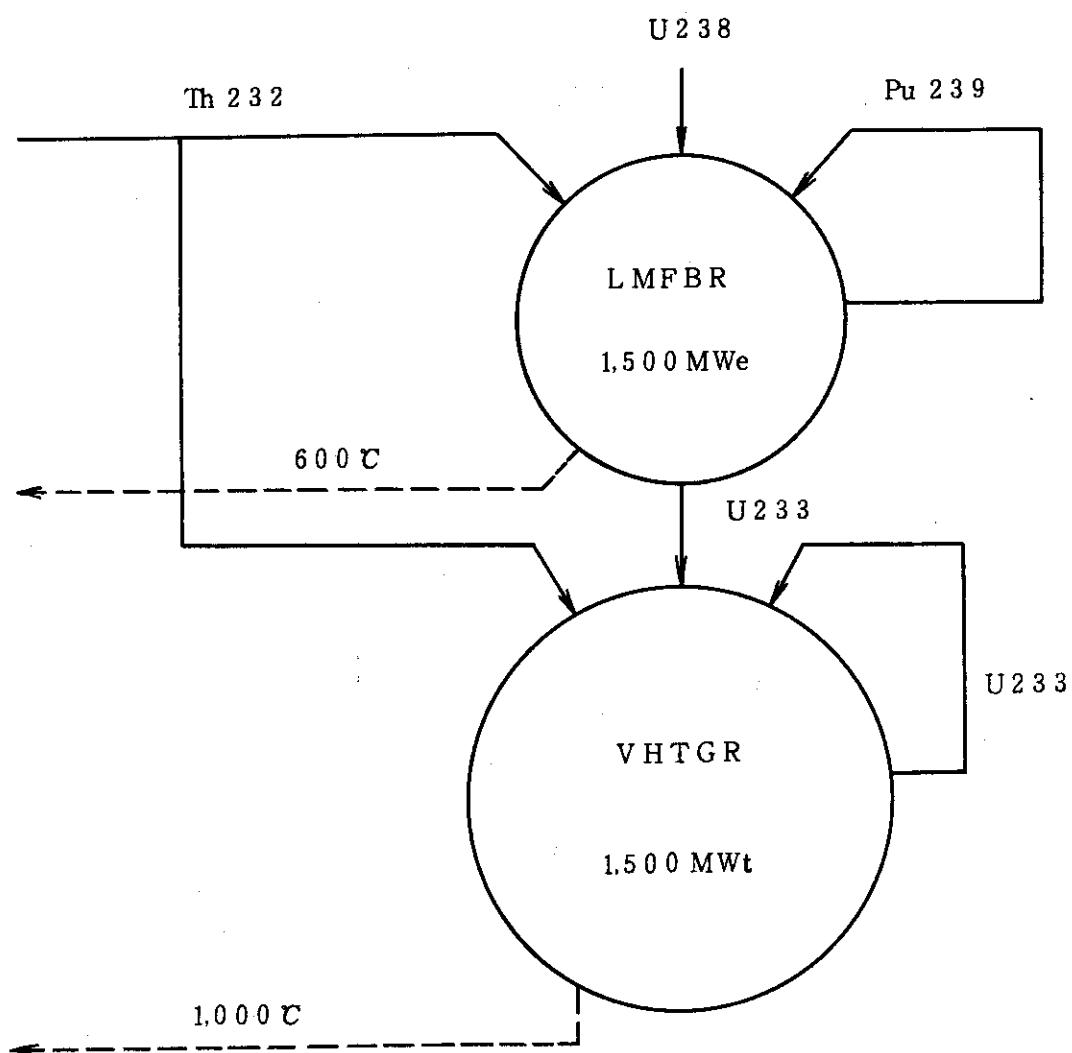


図8 VHTR-FBR 総合核エネルギー・システム

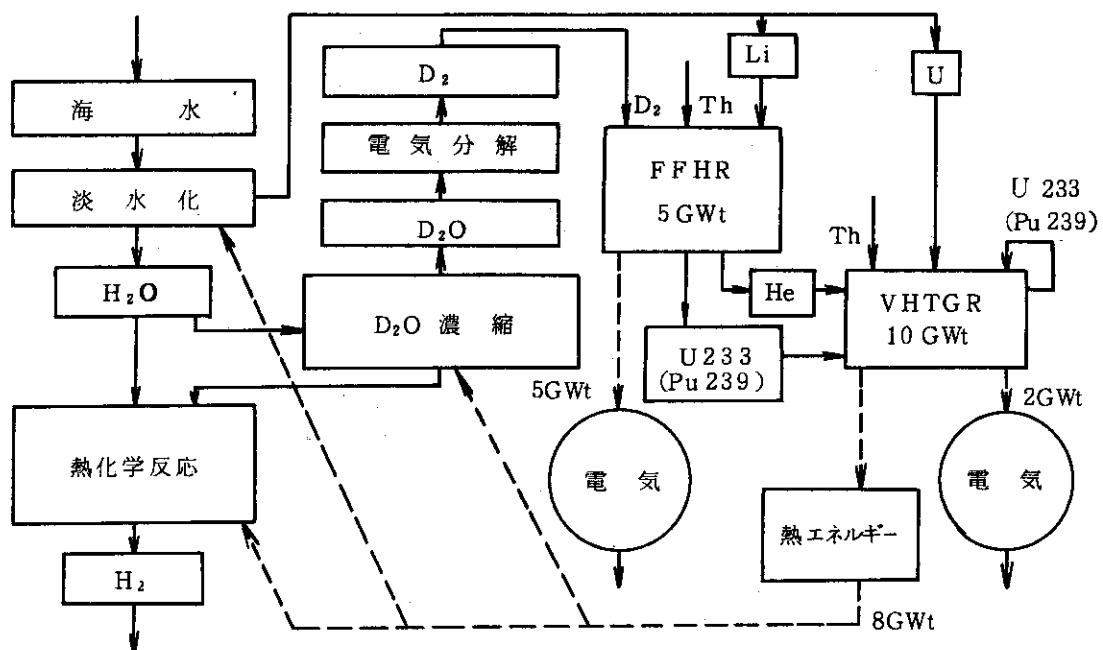


図9. VHTR - FFHR 総合核エネルギー システム

表1. 長期エネルギー需給計画総括表 (エネ調中間答申より) (()内数値は換算値: 10¹³ kcal)

年 度	1973 年度 (実績)		1980 年度		1985 年度		* 73~85 年度 年平均伸び	
省エネルギー前の需要	566(10 ¹³ Kcal) [6.0億KJ]		784(10 ¹³ Kcal) [8.3億KJ]		6.2			
省エネルギー率	383(10 ¹³ Kcal) [4.1億KJ]		6.4%		9.4%			
省エネルギー後の需要	530(10 ¹³ Kcal) [5.6億KJ]		710(10 ¹³ Kcal) [7.6億KJ]		5.3			
区分 エネルギー種別	実 数	構成比 (%)	実 数	構成比 (%)	実 数	構成比 (%)		
国 産 工 本 ネ ル ギ 1	水 力 揚 水	2,120万KW 140万KW (18)	4.6	2,350万KW 680万KW (22)	4.2	2,830万KW 1,410万KW (26)	3.7	3.4
地 熱	3万KW (0.06)	0.0	30万KW (0.6)	0.1	210万KW (3.6)	0.5	39.7	
国 内 石 炭	370万t (3.5)	0.9	640万t (6.0)	1.2	1,400万t (13.3)	1.8	10.8	
国 产 計	2,168万t (15)	3.8	2,000万t (13.4)	2.5	2,000万t (13.3)	1.9	0.8	
原 子 力	230万KW (2.4)	0.6	1,660万KW (23)	4.4	4,900万KW (68)	9.6	32.3	
国 产 計	(39)	10.1	(67)	12.5	(125)	17.6	10.2	
L N G	237万t (3.2)	0.8	2,060万t (27)	5.2	4,200万t (56)	7.9	27.1	
石 炭	5,800万t (45)	11.7	9,200万t (71)	13.4	10,240万t (80)	11.2	4.8	
石 油	3億1,800万KJ (296)	77.4	3億9,300万KJ (365)	68.9	4億8,500万KJ (449)	63.3	3.5	
輸 入 計	(344)	89.9	(463)	87.5	(585)	82.4	4.5	
一次エネルギー 合 計	(383)	100.0	(530)	100.0	(710)	100.0	5.3	
一次エネルギー石油換算	4.1億KJ		5.6億KJ		7.6億KJ		5.3	
(参考) 電 力	(総発電電力量) (4,701億KWh (115.2))	30.0	(6,744億KWh (165.2))		9,220億KWh (225.9)	31.8	5.8	
(参考) 電 力	(総需要電力量) (4,218億KWh)		(6,011億KWh)		(8,154億KWh)		5.6	

〔備考〕総需給計画は、政府の政策努力とエネルギーの生産者および消費者を含む国民の努力と協力を前提として達成されるべき長期的努力目標値を示すものである。

〔注〕1. 石油換算は9,400Kcal/lによる。2. 国産計は薪、木炭、亜炭を含む。3. 輸入石油は輸入LPGを含む。

4. 一般水力は混合揚水を含む。5. 各計欄の合計は四捨五入の関係で合計欄の数値に一致しないことがある。

表2 日本の原子力発電所一覧

(1976年3月現在)

事業主体	原子炉名	原子炉型式	発電所出力 (MWe)	運転開始年
運転中のもの				
日本原子力発電(株)	原電東海	GCR	166	1966
日本原子力発電(株)	原電敦賀	BWR	357	1970
東京電力(株)	福島1号	BWR	460	1971
東京電力(株)	福島2号	BWR	784	1974
中部電力(株)	浜岡1号	BWR	540	1976
関西電力(株)	美浜1号	PWR	340	1970
関西電力(株)	美浜2号	PWR	500	1972
関西電力(株)	高浜1号	PWR	826	1974
関西電力(株)	高浜2号	PWR	826	1975
中国電力(株)	島根1号	BWR	460	1974
九州電力(株)	玄海1号	PWR	559	1975
合計	(11基)		5,818	
建設中のもの				
日本原子力発電(株)	原電東海第二	BWR	1,100	1977
東北電力(株)	女川1号	BWR	524	1979
東京電力(株)	福島3号	BWR	784	1976
東京電力(株)	福島4号	BWR	784	1978
東京電力(株)	福島5号	BWR	784	1977
東京電力(株)	福島6号	BWR	1,100	1979
東京電力(株)	福島第二・1号	BWR	1,100	1981
中部電力(株)	浜岡2号	BWR	840	1978
関西電力(株)	美浜3号	PWR	826	1976
関西電力(株)	大飯1号	PWR	1,175	1977
関西電力(株)	大飯2号	PWR	1,175	1978
四国電力(株)	伊方1号	PWR	566	1977
九州電力(株)	玄海2号	PWR	559	1980
合計	(13基)		11,317	
建設準備中のもの				
東京電力(株)	柏崎刈羽1号	BWR	1,100	1983
東京電力(株)	福島第二・2号	BWR	1,100	1982
四国電力(株)	伊方2号	PWR	566	1980
九州電力(株)	川内1号	PWR	890	1983
合計	(4基)		3,656	
総計	(28基)		20,791	

注) GCR = ガス冷却炉

BWR = 沸騰水型軽水炉

PWR = 加圧水型軽水炉

表3 日本における研究開発のスケジュール

期 間	短 期				中 期				長 期					
	年 度	1975	'80	'85	'90	'95	2000	'5	'10	'15	'20	'25	'30	
軽水炉 (LWR)			C											
燃料サイクル1					C									
新型転換炉 (ATR)		P		C										
原子力公園				C										
海上原子力センター					C									
液体金属 高速増殖炉 (LMFBR)	E		P		C									
多目的 高温ガス炉 (VHTR)	E		P		C									
燃料サイクル2		O			C									
核融合炉			1		E					P		C		
燃料サイクル3						O					P		C	
R & D の 優先順位	第 1	燃料サイクル1	多目的高温ガス炉の商業化				核 融 合 炉							
	第 2	液体金属高速増殖炉	液体金属高速増殖炉の商業化				燃料サイクル3							
	第 3	多目的高温ガス炉	燃料サイクル2				総合システム							

注) (1) 燃料サイクル1 : LWRとATRを対象とする

(2) 燃料サイクル2 : LWR, ATR, LMFBRおよびVHTRを対象とする

(3) 燃料サイクル3 : 核分裂と核融合を対象とする

(4) E : 実験炉の運転

(5) P : 原型炉の運転

(6) C : 完全に商業化された原子炉の導入