

わが国の超長期エネルギー需給展望に関する分析

－「2100年原子力ビジョン」のエネルギー需給推計について－

Long-term Outlook of Energy Demand and Supply in Japan

- Estimation of Energy Demand and Supply

for "Nuclear Energy Vision 2100" of JAEA -

立松 研二 川崎 弘嗣 根本 正博 村上 正一

Kenji TATEMATSU, Hirotsugu KAWASAKI, Masahiro NEMOTO
and Masakazu MURAKAMI

経営企画部

Policy Planning and Administration Department

June 2009

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail: ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail: ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2009

わが国の超長期エネルギー需給展望に関する分析
ー「2100 年原子力ビジョン」のエネルギー需給推計についてー

日本原子力研究開発機構 経営企画部
立松 研二，川崎 弘嗣，根本 正博，村上 正一※

(2009 年 3 月 23 日受理)

「2100 年原子力ビジョン」は、二酸化炭素排出削減とエネルギー安定供給の両立を実現するための具体的かつ定量的な解決策を示し、我々の暮らしに密接している、エネルギー環境問題への国民議論を喚起することを目指して平成 20 年 10 月に公表された。本報告書では、本ビジョンを作成する際の土台となった、わが国の 2100 年に至るエネルギー需給推計に関する分析作業の詳細を述べる。分析においては、二酸化炭素排出削減およびエネルギー安定供給の実現を目標に、最終エネルギー消費量を推計し、そこから一次エネルギー供給量を算出した。その結果、一次エネルギー供給量に占める化石燃料の割合が約 1/3 に縮小する一方で、再生可能エネルギーおよび原子力の割合は現在の 15%から 70%に拡大するシナリオを得た。2100 年における二酸化炭素排出量は現在の 10%に削減され、要因別削減量の半分以上が原子力であることが明らかになった。本ビジョンで示した将来のエネルギー需給像はひとつのシナリオに過ぎないが、二酸化炭素排出削減とエネルギー安定供給の両立を目指した低炭素社会実現の可能性を示すものである。

Long-term Outlook of Energy Demand and Supply in Japan
— Estimation of Energy Demand and Supply
For “Nuclear Energy Vision 2100” of JAEA—

Kenji TATEMATSU, Hirotsugu KAWASAKI, Masahiro NEMOTO
and Masakazu MURAKAMI*

Policy Planning and Administration Department
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received March 23, 2009)

In this study, we showed an energy demand and supply scenario toward the year 2100 in Japan, which underlies JAEA’s “Nuclear Energy Vision 2100” published in October 2008. This energy demand and supply scenario aimed at the coexistence of the reduction of the carbon dioxide emission and the energy security through reduction of the fossil fuel usage, positive electrification and the nuclear energy usage. We reduced the ratio of the fossil fuel in the primary energy supply to about 1/3 and extend the share of renewable and nuclear energy to 70% from current 15%. As a result, the carbon dioxide emission was reduced to current 10%, and it developed that the half was the contribution of the nuclear energy.

Keywords: Energy Vision, CO₂ Emission, Nuclear Energy, Hydrogen, Electrification

※Research Staff on Loan

目 次

1. はじめに	1
2. 定量分析の方法	2
2.1 エネルギー需給分析の枠組み	2
2.2 将来社会における最終エネルギー消費像	2
2.3 エネルギー需給推計の手順	3
3. 最終エネルギー消費量の推計	5
3.1 初期条件を与えるパラメータ	5
3.2 民生分野	6
3.3 産業分野	8
3.4 運輸分野	10
3.5 最終エネルギー消費量	12
4. エネルギー供給システム像	13
4.1 主なエネルギー技術の導入計画の想定	13
4.1.1 軽水炉および高速増殖炉	13
4.1.2 高温ガス炉	14
4.1.3 核融合炉	14
4.1.4 新エネルギー発電	15
4.1.5 二酸化炭素の回収・貯蔵技術 (CCS)	18
4.2 一次エネルギー供給量の算出	18
4.2.1 発電部門	18
4.2.2 転換部門	19
4.2.3 一次エネルギー供給量	20
4.3 発電設備容量の算定	21
4.3.1 供給予備力の想定	21
4.3.2 将来社会における電力供給像	22
4.4 原子力エネルギー導入量	23
4.4.1 核分裂発電炉	23
4.4.2 高温ガス炉	24
4.4.3 核融合炉	25
5. 分析結果	26
5.1 エネルギー資源の消費量	26
5.1.1 化石燃料消費量	26
5.1.2 天然ウラン累積消費量	27
5.1.3 エネルギー自給率の推計	28
5.2 環境排出量	29
5.2.1 二酸化炭素排出量	29
5.2.2 放射性廃棄物	31
6. エネルギー需給の比較	33

6.1	他のエネルギー需給見通しとの比較	33
6.1.1	一次エネルギー供給の比較	33
6.1.2	発電電力量の比較	35
6.1.3	再生可能エネルギー供給量の比較	36
6.2	国のエネルギー政策との関係	37
7.	まとめ	40
	謝辞	40
	参考文献	41
	付録	43

CONTENTS

1. Introduction	1
2. Method of quantitative analysis	2
2.1 Framework of energy demand and supply analysis	2
2.2 Total final energy consumption in the future society	2
2.3 Procedure to estimate of energy supply and demand	3
3. Estimation of total final energy consumption	5
3.1 Parameters that give initial condition	5
3.2 Business and household sector	6
3.3 Industrial sector	8
3.4 Transportation sector	10
3.5 Total final energy consumption	12
4. Energy-supplying system	13
4.1 Deployment of energy technology	13
4.1.1 Light-water Reactor and Fast Breeder Reactor	13
4.1.2 High Temperature Gas Cooling Reactor	14
4.1.3 Nuclear Fusion Reactor	14
4.1.4 New energy power generation	15
4.1.5 Carbon dioxide Capture and Storage (CCS) system	18
4.2 Estimation of primary energy supply	18
4.2.1 Power generation	18
4.2.2 Energy conversion	19
4.2.3 Total primary energy supply	20
4.3 Power generation capacity	21
4.3.1 Assumption of reserve capacity	21
4.3.2 Power supply facilities	22
4.4 Nuclear energy deployment	23
4.4.1 Nuclear fission power generation reactor	23
4.4.2 High Temperature Gas Cooling Reactor	24
4.4.3 Nuclear Fusion Reactor	25
5. Results of analysis	26
5.1 Consumption on energy resource	26
5.1.1 Fossil fuel consumption	26
5.1.2 Natural uranium consumption	27
5.1.3 Estimation of self-sufficiency ratio in the energy supply	28
5.2 Environmental exhaust	29
5.2.1 CO ₂ emission	29
5.2.2 Radioactive waste	31
6. Comparison of energy supply and demand	33

6.1 Comparison with other energy supply and demand estimates	33
6.1.1 Comparison of primary energy supply	33
6.1.2 Comparison of production of electricity	35
6.1.3 Comparison of renewable resource energy supply	36
6.2 relevance to energy policy in Japan	37
7. Summary	40
Acknowledgment	40
References	41
Appendix	43

表リスト

表 3.1	GDP の推計における前提条件	5
表 3.2	民生分野の最終エネルギー需要推計における前提条件	6
表 3.3	家庭部門のエネルギー消費のシェアの想定	7
表 3.4	産業分野の最終エネルギー需要推計における前提条件	8
表 3.5	産業分野のエネルギー利用シナリオ	9
表 3.6	自動車の保有台数の推計における前提条件	11
表 4.1	高速増殖炉導入シナリオの想定	13
表 4.2	電源構成シナリオ	18

図リスト

図 2.1	エネルギー需給分析の枠組み	2
図 2.2	将来社会における最終エネルギー消費像	3
図 2.3	一次エネルギー需給の推計手順の流れ	4
図 3.1	国民総生産（GDP）の推計	5
図 3.2	民生分野のエネルギー需要推計	7
図 3.3	民生分野におけるエネルギー媒体別の最終エネルギー消費量	8
図 3.4	産業分野のエネルギー需要推計	9
図 3.5	産業分野におけるエネルギー媒体別の最終エネルギー消費量	10
図 3.6	自動車の輸送機関別の保有台数と最終エネルギー消費量の推計	11
図 3.7	運輸分野の最終エネルギー消費量	12
図 3.8	最終エネルギー消費量の推移	12
図 4.1	高温ガス炉の導入上限値	14
図 4.2	核融合炉の導入計画	15
図 4.3	新エネルギーの導入規模の想定	16
図 4.4	太陽光発電の導入規模の想定	17
図 4.5	風力発電の導入規模の想定	17
図 4.6	発電電力量の電源別構成	18
図 4.7	電源別発電電力量	19
図 4.8	転換部門の一次エネルギー消費量	20
図 4.9	一次エネルギー供給量	20
図 4.10	最大消費電力/平均消費電力の推移	21
図 4.11	発電電力量と発電設備容量	22
図 4.12	核分裂発電設備容量	23
図 4.13	核分裂炉の新規建設・廃止の推移	23
図 4.14	高温ガス炉の導入規模	24
図 4.15	核融合炉の導入規模	25
図 5.1	化石燃料消費量の推移	26
図 5.2	天然ウラン累積消費量の推移	27
図 5.3	エネルギー自給率の推計	28
図 5.4	二酸化炭素排出量の推移	29
図 5.5	二酸化炭素排出削減の要因別寄与度	30
図 5.6	使用済核燃料の再処理設備容量の推移	31
図 5.7	高レベル放射性廃物発生量の推移	32
図 6.1	他機関の検討事例との一次エネルギー供給量の比較	34
図 6.2	発電電力量のエネルギー源別の比較	35
図 6.3	一次エネルギー供給に対する再生可能エネルギーの供給量の比較	36
図 6.4	一次エネルギー供給に対する再生可能エネルギーの割合の比較	36
図 6.5	GDP 当たりエネルギー利用効率指数と推計値	37

図 6.6	わが国の石油依存度の推計	38
図 6.7	運輸分野における石油依存度の推計	38
図 6.8	わが国の原子力発電比率の推計	39

This is a blank page.

1. はじめに

京都議定書[1]で定められた第一約束期間(2008年～2012年)に入り、地球温暖化の議論が益々高まっている。国際エネルギー機関(IEA)は、2008年6月に「世界エネルギー技術展望2008」[2]を発表し、その中で2050年に世界の二酸化炭素排出量を50%削減するための技術オプションのロードマップを提示した。同年7月にわが国で開催されたG8北海道洞爺湖サミットでも気候変動問題が主要議題とされ、「2050年までに世界全体の温室効果ガス排出量の少なくとも50%の削減を達成する」との目標が合意された[3]。また、2050年の低炭素社会へ向けて温室効果ガス70%削減の可能性も示された[4]。内閣府の低炭素社会に関する世論調査によれば、9割は低炭素社会を実現すべきとし、過半数は日本が積極的に温室効果ガスの排出量を削減すべきとの回答が得られている[5]。これらの取り組みを背景に、我々の日常生活においても二酸化炭素に代表される温室効果ガスの排出削減への取り組みが身近なものとなり、否が応でも排出削減へ向けた意識が高められている。他方、資源ナショナリズムの台頭や原油を始めとする化石燃料価格の乱高下を背景にエネルギー安全保障の確保も近年益々その重要度を増している。将来社会におけるエネルギー源の選択は暮らしや社会のあり方そのものの選択に他ならず、エネルギー環境問題は自らの生活に密接した問題であることを認知し、国民一人ひとりが当事者意識を持って主体的に判断し、議論に参加することが望まれる。

そこで、日本原子力研究開発機構(以下「原子力機構」と称す)では、一般国民の議論への参加を促すためには、将来像を直観的で分り易い定量的な形で提示することが有効であると考え、わが国における将来のエネルギー需給のあるべき姿を考えるための出発点として、「2100年原子力ビジョン」を発表した[6]。

本ビジョンは、原子力機構が研究開発の成果として蓄積してきた技術や、現在実用化を目指して研究開発に取り組んでいる技術の実社会への適用によって、二酸化炭素排出削減と、化石燃料への依存の低減によるエネルギー安定供給とを両立させ得ることを示している。本ビジョンの検討にあたっては、原子力施設の立地場所の確保や高度な技術の確立など乗り越えなければならない多くの課題もあるため、原子力の分野別専門家の見解を踏まえるばかりでなく、政府の報告書類などに示された各技術の実現時期を踏襲する等、可能な限り客観的な推測に努めている。100年間という超長期での技術の進展などを取り扱うことに対して、我々の立場から研究開発成果に基づく将来像を描き出すことは重要ではあるが、本分析で最も重視すべきことは、「2100年原子力ビジョン」の土台として、わが国の2100年までのエネルギー需給を推計することにある。エネルギー需給推計の方法としては、エネルギー経済モデルを使用して経済性などを指標にエネルギー技術の選択を行う分析手法が一般的であるが、本ビジョンの検討では2100年における将来社会像を基にエネルギー需給がどうあるべきかを遡って描き出している。すなわち主に技術的な視点から、民生、産業および運輸の分野ごとにエネルギー消費を抑え、二酸化炭素排出を低減させるためにどのような技術の適用が有効であるかの可能性を定量的に検討したものである。

本報告書は、「2100年原子力ビジョン」の検討において実施したエネルギー需給の定量分析に関して、その手法、考え方およびその結果を中心に詳細を述べたものである。

2. 定量分析の方法

2.1 エネルギー需給分析の枠組み

分析に際して最終エネルギー需要からエネルギー変換を経て一次エネルギー供給に至るエネルギー需給分析の枠組みを構築した。図 2.1 に分析の枠組みを示す。エネルギー需給の長期動向には多様な因子が関係する。この分析では、需要側では将来人口、世帯数および一人あたり国内総生産（GDP/人）などを想定して長期的な最終エネルギー需要を推計した。他方、供給側では様々な一次エネルギー源やエネルギー技術の利用の可能性を考慮に入れて、化石燃料や天然ウランなどのエネルギー資源消費量および二酸化炭素や高レベル放射性廃棄物などの環境排出量に配慮しながら、エネルギー技術の選択およびその利用規模を決定した。その際、本分析では、化石燃料依存への低減、積極的な電化および原子力利用の推進を通じて、二酸化炭素排出削減およびエネルギー安定供給を両立させた持続可能な低炭素社会の実現を目指していることから、これらの両立に十分な配慮をした。

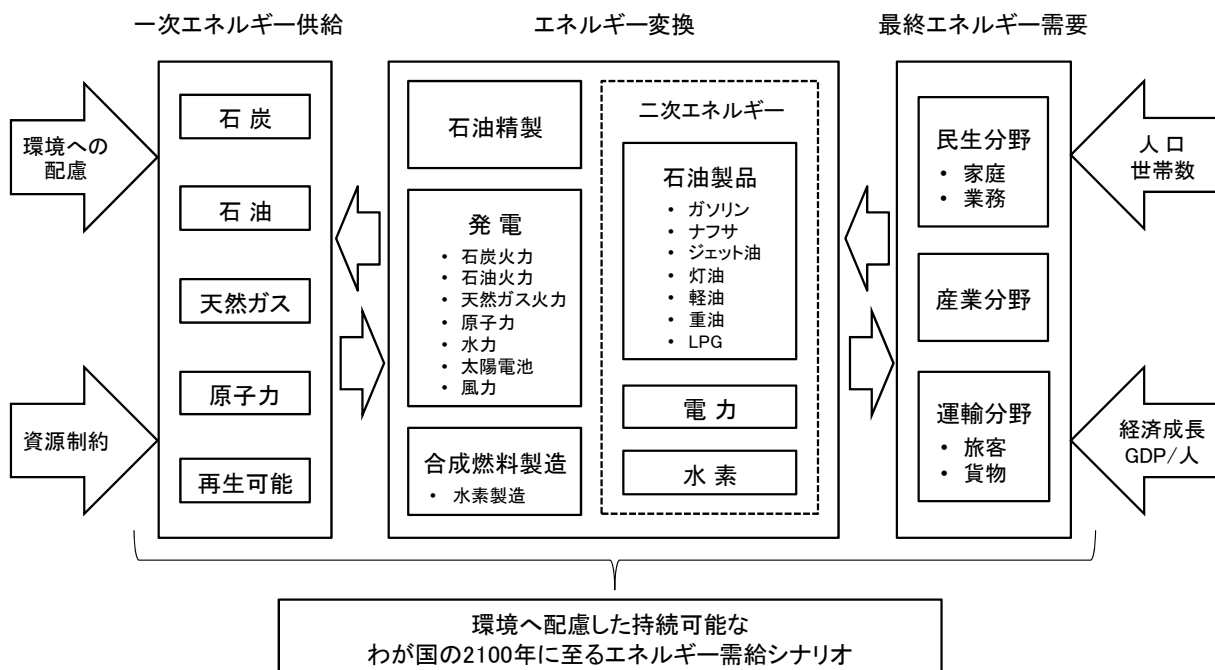


図 2.1 エネルギー需給分析の枠組み

2.2 将来社会における最終エネルギー消費像

2100 年までの将来社会像として本分析において想定した、民生、産業および運輸の各エネルギー消費分野において利用されるエネルギー技術やエネルギー媒体の変遷のイメージを図 2.2 にまとめた。各エネルギー消費分野とも基本的に化石燃料の直接燃焼の低減を目指し、積極的に電化や水素化を進めることとした。例えば、民生分野ではオール電化住宅の導入や太陽光エネルギー利用の推進、産業分野では製鉄で使用する還元剤コークスの水素代替、化学コンビナートにおける自家発電や蒸気供給の熱源として原子力の導入、石油に依存している原料用の石油製品を天然ガスや水素で代替、化石燃料への依存が極めて高い運輸分野では現在普及が進んでいるハイブリット車の利用を経て最終的には電気自動車や燃料電池車などの無公害車の利用を想定した。そし

て、水素化や電化にあたっては、再生可能エネルギーを取り入れつつ、主として原子力の利用を積極的に盛り込んだ。

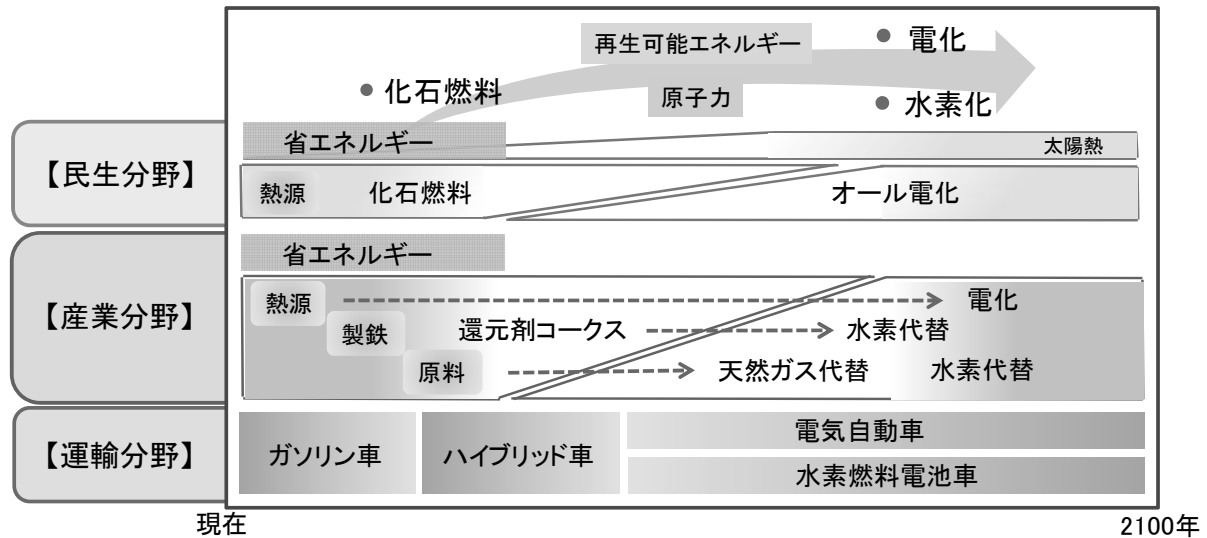


図 2.2 将来社会における最終エネルギー消費像

2.3 エネルギー需給推計の手順

図 2.1 に示したエネルギー需給分析の枠組みの下で、図 2.2 に示した最終エネルギー消費像を踏まえ、将来社会におけるエネルギー需給を推計した。その手順を図 2.3 に示す。エネルギー分析モデルは、最終エネルギー消費の計算部分と一次エネルギー供給算定のためのエネルギー変換の計算部分に大きく分けられる。

最終エネルギー消費の計算部分では、まず、将来推計人口などの統計資料や GDP 推移を基礎データとして、エネルギー消費分野ごとに最終エネルギー消費量（総量）を推計する。次に、想定した将来社会における最終エネルギー消費像を基に、用途やエネルギー媒体を明示した形で最終エネルギー消費量の内訳を算定する。最後に、民生、産業および運輸のエネルギー消費分野ごとに推計された最終エネルギー消費量をエネルギー媒体別に再構築する。

エネルギー変換の計算部分では、一次エネルギー供給量は、エネルギー媒体別に再構成した最終エネルギー消費量を入力データとしてエネルギー変換部門を通して算定される。エネルギー変換部門は、発電電力量を算定する発電部門と発電を除く石油精製や合成燃料製造を中心としたエネルギー転換部門とに分けられる。発電部門では、エネルギー源別の発電電力量および発電効率から一次エネルギー供給量を算定する。転換部門では、熱効率などを考慮してエネルギー源別に一次エネルギー供給量を算定する。

推計された一次エネルギー供給量から二酸化炭素排出量を算定し、原子力の設備容量と設備利用率から廃棄物発生量が算定される。当然ながら、エネルギー資源の需要量も算定される。このようにして得られた諸量を我々が提案するシナリオと照らして、必要があればフィードバックして再計算を行った。

なお、定量分析の道具立てであるエネルギー需給分析ツールの開発では、表計算ソフトを利用して数値処理プロセスを構築した。

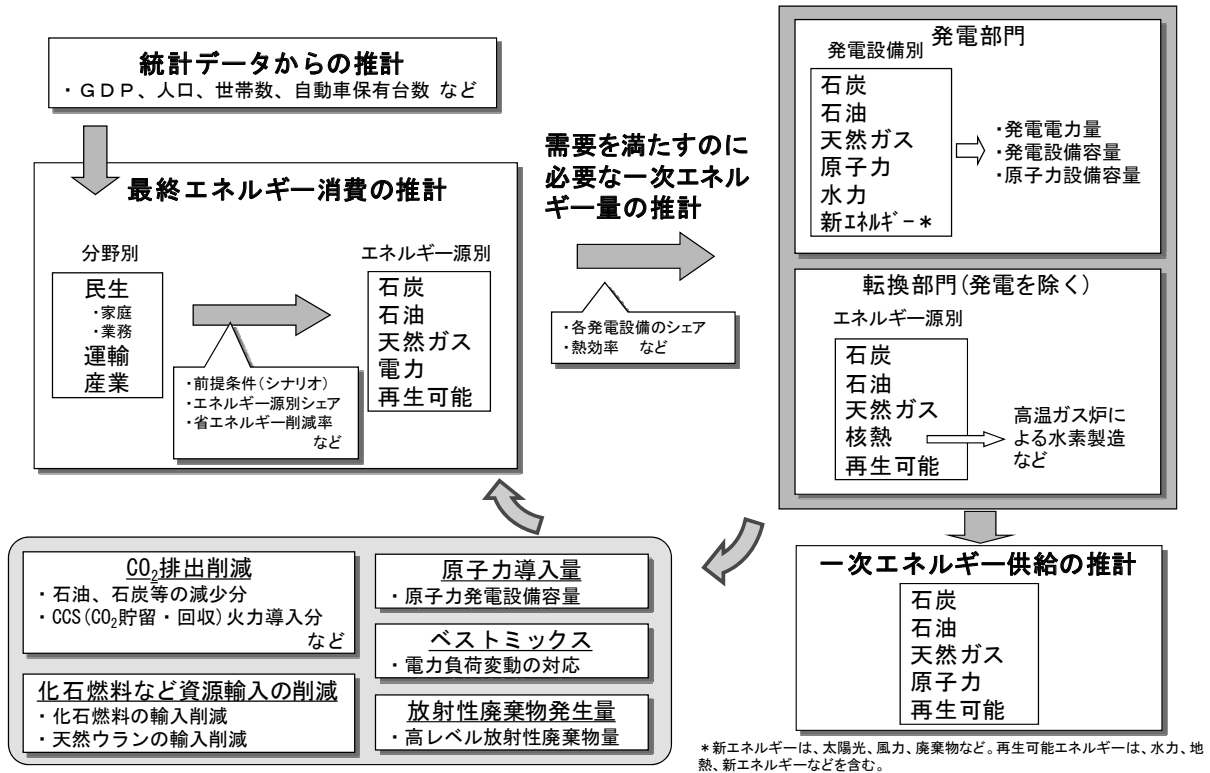


図 2.3 一次エネルギー需給の推計手順の流れ

3. 最終エネルギー消費量の推計

3.1 初期条件を与えるパラメータ

エネルギー需要の推計において、算定の基準となるパラメータには人口[7]、世帯数、国民総生産（GDP）[8]、床面積および車両保有台数などがある。このうち床面積と車両保有台数は、GDPや人口に比例するパラメータである。また、GDPは人口と国民一人あたりのGDP（GDP/人）を基に算定される。

表3.1にGDPの推計における前提条件を示す。総人口とGDP/人の推移およびこれらを基に算出したGDPの推移を図3.1に示す。将来人口については国立社会保障・人口問題研究所が公表している「日本の将来推計人口」[9]に参考値として示されている2100年までの推計人口のうち高位ケースを採用している。なお、本分析では将来のエネルギー需要の過小評価を避けるために高位ケースを採用したが、高位とは言え人口は減り続け2100年に約6400万人である。また経済活動については、将来の生活の豊かさを想像でき、かつ必要十分な産業基盤を維持し得る水準として、GDP/人を2050年で約1.5倍、2100年で約2倍と想定した[10]。その結果、総人口は長期間にわたり減少を続けるため、GDPは今世紀半ばまで増加した後減少に転じ、2100年で現在（2005年）と同じ水準となった。

なお、ここで推計したGDPは次節以降において、各エネルギー消費分野における最終エネルギー需要を推計する際に、民生分野の業務部門では床面積の将来推計に、産業分野では最終エネルギー需要の推計に、運輸分野ではトラック保有台数の将来推計およびトラックを除く貨物部門の最終エネルギー需要の推計にそれぞれ使用している。

表 3.1 GDP の推計における前提条件

	前提条件
GDP の推計	<ul style="list-style-type: none"> ● わが国の1人当たりのGDPは一定の割合で伸び続け、2100年で現在の2倍を想定 ● 将来人口は、人口問題研究所の高位ケースを使用

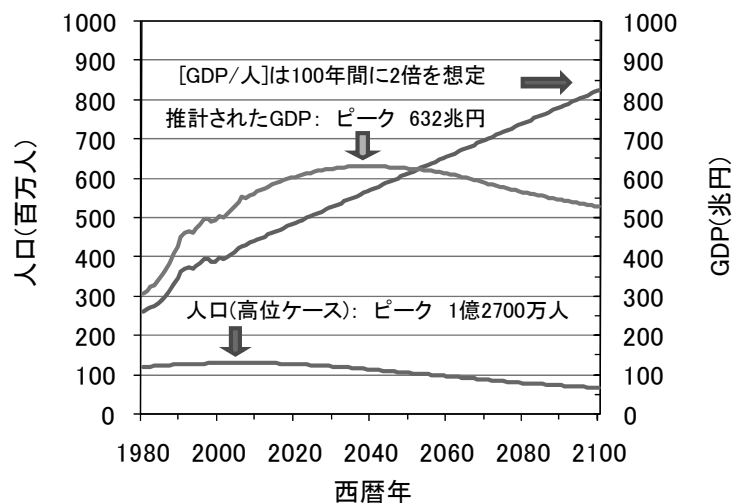


図 3.1 国民総生産（GDP）の推計

3.2 民生分野

民生分野は家庭部門と業務部門に細分される。最終エネルギー需要推計の前提条件を表 3.2 にまとめた。家庭部門では世帯数に、業務部門では床面積に最終エネルギー需要が比例すると考えた。

将来世帯数は、2030 年までは、国立社会保障・人口問題研究所が公表している「日本の世帯数の将来推計」[11]を使用した。2031 年以降の世帯数については、データが公表されている 2030 年までの世帯あたりの人数のトレンドから 2031 年以降の世帯あたりの人数を 2.4 人で一定と仮定し、将来推計人口との関係で将来世帯数を算定した。また、床面積は GDP に比例すると仮定してその推移を算出した。

省エネルギーの想定については、経済産業省・資源エネルギー庁が公表している長期エネルギー需給見通し[12]に準拠した省エネルギーを考慮しており、家庭部門では、2010 年の最終エネルギー需要を基準として 2020 年および 2030 年にそれぞれ 7%および 13%の低減を見込み、2031 年以降は、過度の省エネルギーによる需要の過小評価を避けるため、効率改善を見込まず世帯数に比例するとした。業務部門も同様に、2020 年および 2030 年にそれぞれ 10%および 15%の低減を見込み、2031 年から 2040 年まではエネルギー需要が横ばいで推移し、2041 年以降は効率改善を見込まず床面積に比例するとした。

表 3.2 民生分野の最終エネルギー需要推計における前提条件

	家庭部門	業務部門
前提条件	<ul style="list-style-type: none"> ● 家庭部門の最終エネルギー需要は、世帯数に比例 ● 2030 年までは、国立社会保障・人口問題研究所の「日本の世帯数の将来推計」を使用し、それ以降は、世帯人員のトレンドから推定し、2031 年以降は（平均 2.4 人/世帯）と仮定 	<ul style="list-style-type: none"> ● 業務部門の最終エネルギー消費量は、床面積に比例 ● 床面積は、GDP に比例
省エネルギーの想定	<ul style="list-style-type: none"> ● 省エネルギーなしの推計値の 2010 年の値を基準値として推計 ● 1 世帯当たりのエネルギー消費量を、2010 年比で 2020 年は 7%減、2030 年は 13%減 ● 2031 年以降は世帯当たりのエネルギー消費量は一定（原単位の改善なし） 	<ul style="list-style-type: none"> ● 省エネルギーなしの推計値の 2010 年の値を基準値として推計 ● 床面積当たりのエネルギー消費量を、2010 年比で 2020 年は 10%減、2030 年は 15%減 ● 2030～2040 年は、エネルギー消費量が一定値。（床面積は増加するので、原単位の改善は続く） ● 2041 年以降は床面積当たりのエネルギー消費量は一定（原単位の改善なし）

最終エネルギー需要の推計結果、および世帯数、床面積との関係を図 3.2 に示す。省エネルギーの推進、GDP や人口の減少と歩調を合わせるように、最終エネルギー需要は今後減少傾向にある。

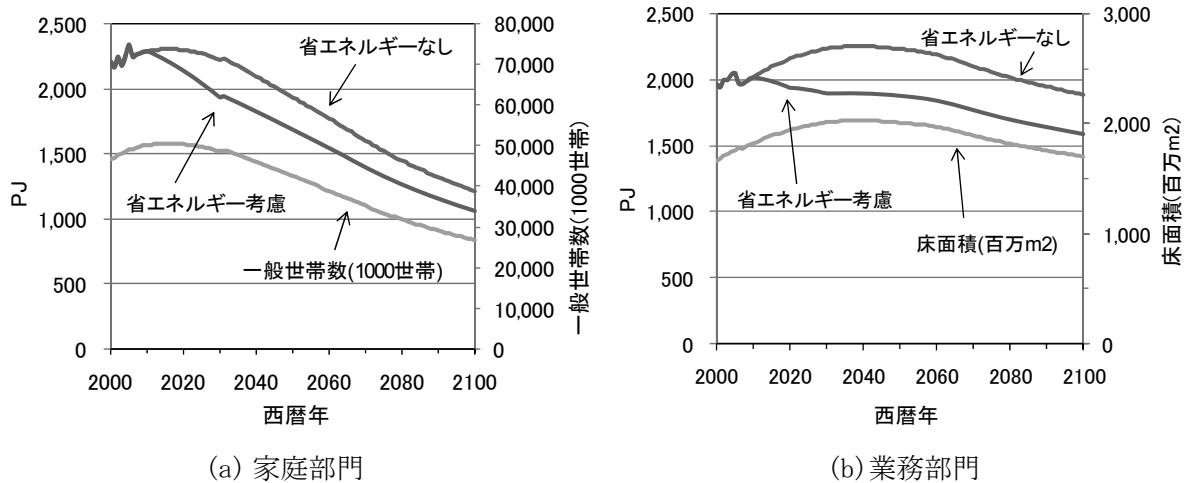


図 3.2 民生分野のエネルギー需要推計

家庭部門の最終エネルギー需要に対するエネルギー源別の内訳（エネルギー媒体別の最終エネルギー消費量）を算定するため、最終エネルギーの消費像(シナリオ)を踏まえ、表 3.3 に示すようなシェアを設定した。

表 3.3 家庭部門のエネルギー消費のシェアの想定

【家庭部門：シェア設定シナリオ】		【業務部門：シェア設定シナリオ】	
石炭	熱源利用（給湯、暖房など）のため、2100 年で 0%	石炭	熱源利用のため、2100 年で 0%
灯油	熱源利用のため、2075 年で 0%	石油	熱源利用のため、2075 年で 0%
LPG	2030 年まで 2005 年のシェア 13% を維持し、その後 2100 年までに 0%	ガス	2030 年まで 2005 年のシェア 21% を維持し、その後 2100 年までに 0%
都市ガス	2030 年まで 2005 年のシェア 18% を維持し、その後 2100 年までに 0%	電力	2100 年で「熱」以外の全てが電化
電力	2100 年で 95% のシェア	熱	2005 年の消費量のまま 2100 年まで一定
太陽熱	2100 年で 5% のシェア	※ 熱は、太陽熱、地熱を含む	

図 3.3 に民生分野のエネルギー媒体別の最終エネルギー消費量を示す。家庭部門、業務部門いずれも積極的な電化を進めることによって、2100 年において家庭部門では 95%、業務部門では 98%を電力が占める。家庭部門は中期的には省エネルギー効果、長期的には人口の減少に伴い最終エネルギー消費量が減少し、2100 年には現状の 55%減となる。他方、業務部門は 2100 年において現状の 23%減にとどまる。

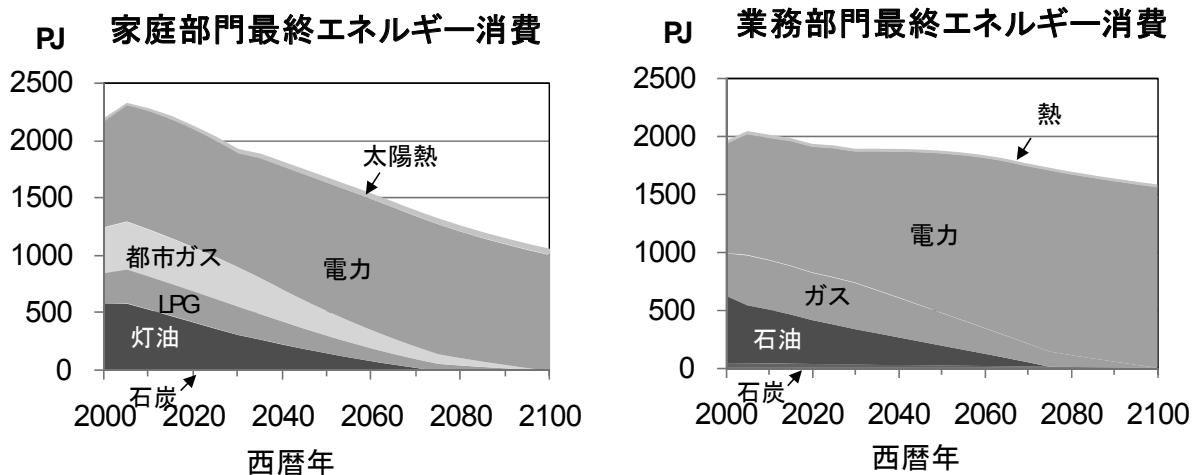


図 3.3 民生分野におけるエネルギー媒体別の最終エネルギー消費量

3.3 産業分野

産業分野の最終エネルギー需要推計の前提条件を表 3.4 に示す。最終エネルギー需要は GDP に比例するとした。省エネルギーの考慮については民生分野と同様にして、長期エネルギー需給見通し[12]に準拠し、2010 年の最終エネルギー需要を基準として 2020 年および 2030 年にそれぞれ 2%および 3%の低減を見込んだ。2031 年から 2040 年まではエネルギー需要が横ばいで推移し、2041 年以降は、過度の省エネルギーによる需要の過小評価を避けるため、効率改善を見込まず GDP に比例するとした。図 3.4 に産業分野のエネルギー需要推計を示す。

表 3.4 産業分野の最終エネルギー需要推計における前提条件

前提条件	<ul style="list-style-type: none"> ● 産業分野の最終エネルギー需要は GDP に比例
省エネルギーの想定	<ul style="list-style-type: none"> ● 省エネルギーなしの推計値における 2010 年の値を基準値として推計 ● 2010 年比で 2020 年は 2%減、2030 年は 3%減 ● 2030～2040 年は、エネルギー消費量が一定値。(GDP は増加するので、原単位の改善は続く) ● 2041 年以降は GDP 当たりのエネルギー消費量は一定 (原単位の改善なし)

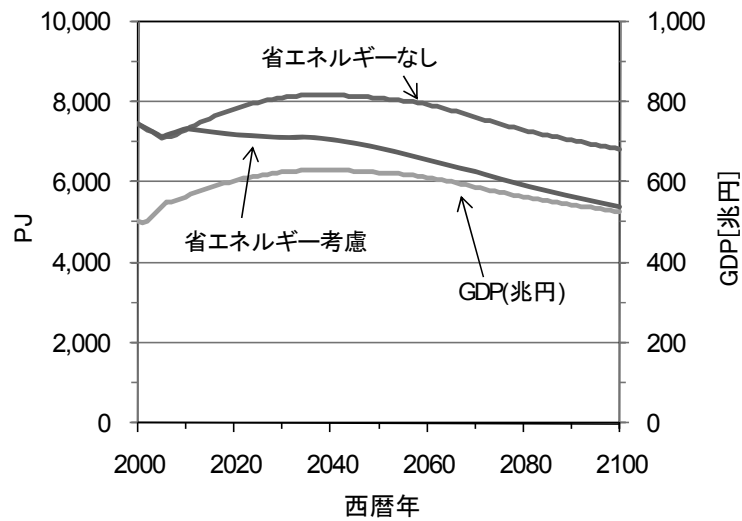


図 3.4 産業分野のエネルギー需要推計

産業分野の最終エネルギー需要に対するエネルギー媒体別の内訳を算定するため、最終エネルギーの消費像(シナリオ)を踏まえ、表 3.5 に示すようなシナリオを設定した。

表 3.5 産業分野のエネルギー利用シナリオ

エネルギー源	シナリオ
石炭	一般炭は、蒸気供給や自家発などの熱源として利用される。その消費量は年々減少し 2100 年でゼロになるとした。原料炭は、2100 年に製品のコークスが全て核熱水素に置き換わり 2100 年でゼロになるとした。
石油	重油などの燃料油については 2075 年で消費量がゼロになるとし、LPG やナフサなどの原料用の石油製品も天然ガスや核熱水素で代替することで消費量は年々減少し 2100 年でゼロになるとした。
天然ガス	LPG やナフサなどの石油製品を代替し消費量が拡大する。2050 年以降、電力に次ぐエネルギー源および工業原料となる。
電力	産業分野においても電化が進み、電力消費量が拡大するとした。
核熱	2040 年から高温ガス炉の導入開始。導入初期は化学コンビナートにおける蒸気と電力の供給向けの利用を始め、化学工業における原料用ナフサ、石油プラントにおける脱硫用水素および製鉄におけるコークスを核熱水素で代替する。2100 年にはコークスの全量を核熱水素で代替するとした。
その他	主に紙・パルプで使われる黒液を想定し、2005 年から 2100 年まで横ばいとした。

図 3.5 に産業分野のエネルギー媒体別の最終エネルギー消費量を示す。産業部門は中期的には省エネルギー効果、長期的には省エネ技術の導入に伴い最終エネルギー消費量が減少し、2100 年には現状の 24%減となる。

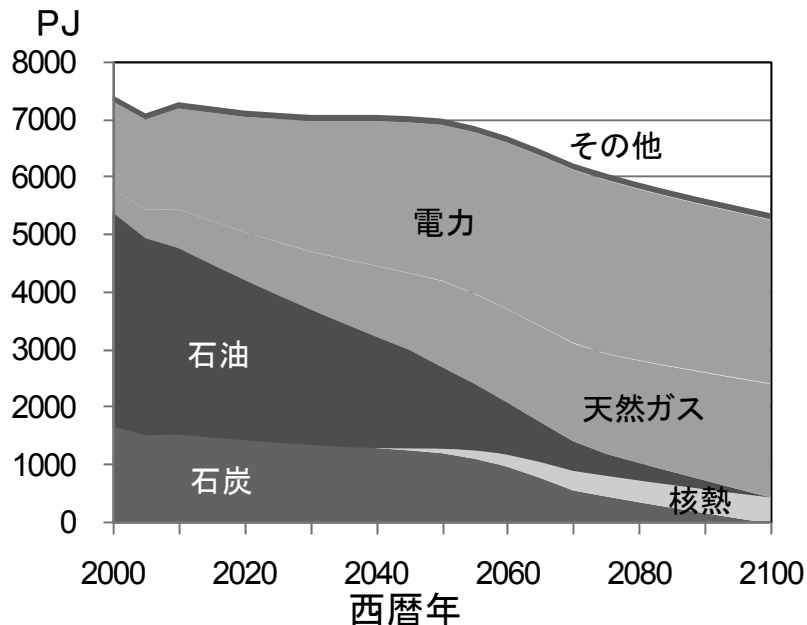


図 3.5 産業分野におけるエネルギー媒体別の最終エネルギー消費量

3.4 運輸分野

運輸分野の最終エネルギー消費量は、消費の約 9 割を占める自動車を中心に推計した。推計にあたり、表 3.6 に示すような前提条件を設定した。まず、自動車の保有台数が、現在の統計値を基準に人口や GDP に比例すると仮定し、輸送機関別（乗用車、バス等）に将来の保有台数を推計した。具体的には、乗用車およびバスはそれぞれ 15 歳以上人口および総人口に比例すると考え、トラックは総人口と GDP にそれぞれ比例させたものの平均値を使用した。また、車種別の将来構成シナリオ[13]を使ってガソリン車、ハイブリット車および無公害車の代表として燃料電池車についてそれぞれ保有台数を推計した。なお、無公害車のうち現在軽乗用車が使われている近距離用途には将来電気自動車が使用されると想定し、燃料電池車と電気自動車の導入比率を、小型乗用車と軽乗用車の比率と考え、無公害車の導入が始まる 2030 年から 6:4 の一定比率で導入する事とし、（現状の軽乗用車導入比率は約 30%で上昇傾向にある）近距離トラックのうち現状で軽トラックが利用されている部分については、充電式の電気軽トラックに置き換わることとした。電気自動車の利用拡大は、夜間における充電作業が大多数になると想定されることから深夜電力の需要確保につながり、電力需要の平準化に寄与することが期待できる。

次に、長期エネルギー需給見通しに準拠し、従来型車輛の燃費改善を今後 25 年間で 25%とし、保有台数から車種別の最終エネルギー消費量を計算した。長期的にはハイブリット車、電気自動車および燃料電池車などの低燃費車の導入が進み Tank to Wheel 効率[14]が改善されることによって最終エネルギー消費量が大幅に減少する。図 3.6 に自動車の保有台数と最終エネルギー消費量の推計を示す。

表 3.6 自動車の保有台数の推計における前提条件

	前提条件
共通	<ul style="list-style-type: none"> ● 自動車の保有台数が、現在の統計値を基準に人口や GDP に比例すると仮定し、輸送機関別（乗用車、バスおよびトラック）に将来の保有台数を推計。
旅客	<ul style="list-style-type: none"> ● 乗用車およびバスは、それぞれ 15 歳以上の人口および総人口に比例。 ● 乗用車については、車種別の将来構成シナリオを使い、ガソリン、ハイブリットおよび燃料電池について、それぞれの保有台数を推計。 ● 無公害車のうち近距離用として電気自動車を使用されることを想定し、燃料電池車と電気自動車の導入比率を、小型乗用車と軽乗用車の比率と考え、導入開始の 2030 年から 6:4 の一定比率で導入。
貨物	<ul style="list-style-type: none"> ● トラックは、総人口と GDP にそれぞれ比例させたものの平均値を使用。 ● 近距離トラックのうち現在の軽トラックに相当するものについては、充電式の電気軽トラックでの置き換えを想定

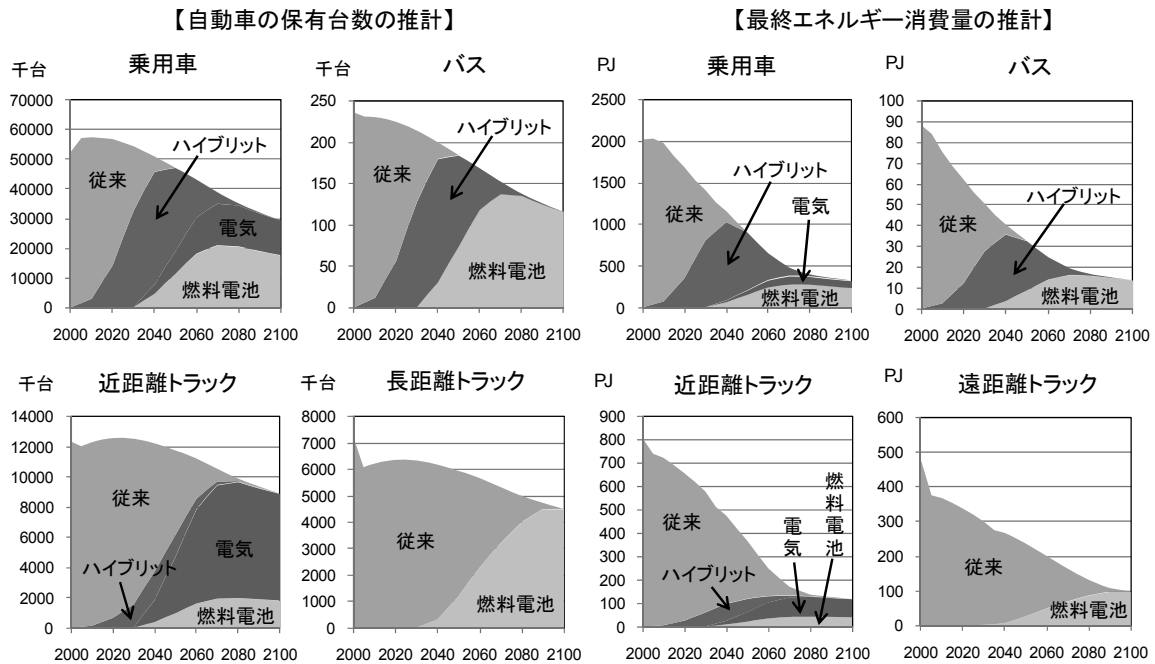


図 3.6 自動車の輸送機関別の保有台数と最終エネルギー消費量の推計

図 3.7 に運輸分野の最終エネルギー消費量を示す。運輸分野では自動車によるガソリンや軽油などの化石燃料の直接利用が電気や水素などの合成燃料の利用にエネルギー媒体の中心が移る。また、燃料電池車や電気自動車は Tank to Wheel 効率が極めて良いため、最終エネルギー消費量が著しく減少し、2100 年における最終エネルギー消費量は現状の 78% 減となる。なお、鉄道、船舶および航空のエネルギー消費量については、旅客は総人口のみに、貨物は総人口と GDP にそれぞれ比例するとした。

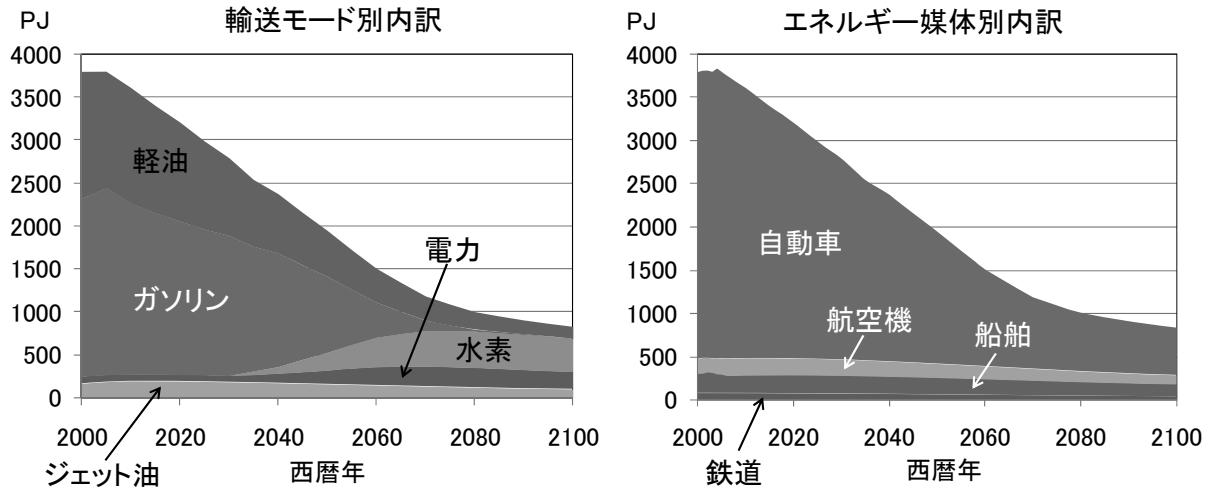


図 3.7 運輸分野の最終エネルギー消費量

3.5 最終エネルギー消費量

図 3.8 に 最終エネルギー消費量を示す。2100 年における最終エネルギー消費量は、省エネルギーに加え、運輸分野におけるエネルギー利用機器の進展や改善により、現在の 42% 減の水準になる。電化が大幅に進み、最終エネルギー消費に占める電力の割合は現在の 24% から 62% に大幅に増大する。水素は 2100 年において最終エネルギー消費の 8% を占める。

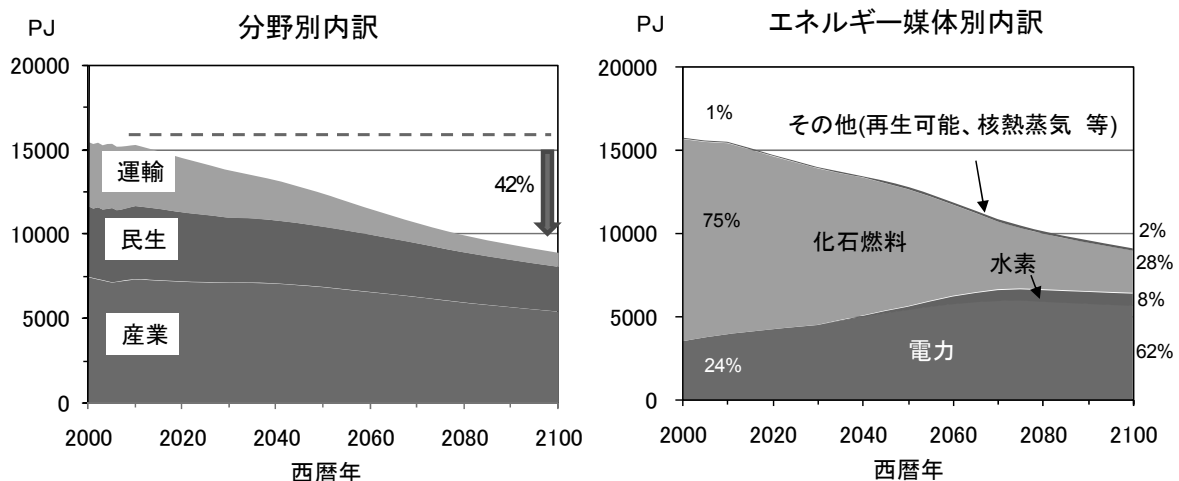


図 3.8 最終エネルギー消費量の推移

4. エネルギー供給システム像

4.1 主なエネルギー技術の導入計画の想定

4.1.1 軽水炉および高速増殖炉

最終エネルギー消費の電化が進む中で、軽水炉が長期間にわたり原子力による電力供給の中核を占めると考えられるが、長期的には高速増殖炉（FBR）が軽水炉に代わり電力供給の中核となることが期待されている。表 4.1 に軽水炉から高速増殖炉への移行シナリオに関する主な想定条件をまとめた。高速増殖炉の導入計画は、実証炉は 2025 年に運転開始とし、次いで商業利用となる実用炉は 2045 年[15]から導入開始とした。導入初期は増殖比 1.2 の高増殖炉心の導入により生産したプルトニウムを使用して、廃炉になった軽水炉を置き換えていく。その後プルトニウムバランスに応じて、経済性重視の増殖比 1.03 の炉心を導入する計画とした。なお、これら原子力発電設備の導入上限は特に設定せず、電力需要に応じて利用可能とした。ただし、年間の建設基数は過去の最大値を参考に過大になりすぎないように配慮した。原子炉の耐用年数は 60 年、設備利用率は 90%とした。軽水炉再処理は、耐用年数を 40～50 年とし 400～1200 トン HM/年の規模で、高速増殖炉再処理は耐用年数を 40 年とし 100～200 トン HM/年の規模で適宜増設できることとした。

表 4.1 高速増殖炉導入シナリオの想定

項 目		想定条件
原子力発電設備容量	全体規模及び核分裂炉容量	最終エネルギー需要の電化が進む中で、軽水炉が長期間にわたり原子力による電力供給の中核を占めるが、長期的にはFBRが軽水炉に代わり中核となる。 原子炉施設の導入上限は特に設定せず、電力需要に応じて利用可能とした。ただし、年間の建設基数は過去の最大値を参考に過大になりすぎないように配慮する。
軽水炉	平均燃焼度	2029年まで：BWR4.5万MWd/t、PWR4.9万MWd/t 2030年以降：6万MWd/tの高燃焼度炉心に一斉移行（既設分及び新設分の全てに対して）
	プルサーマル利用	FBRの本格導入直前に終了し、MOX燃料炉心からUOX燃料炉心に切り替える。
高速増殖炉（FBR）	実証炉	2025年運開、0.75GWe、ナトリウム冷却MOX炉心（増殖比1.2）
	実用炉	2045年導入開始、ナトリウム冷却MOX炉心（増殖比1.2、ただしプルトニウムバランスに応じて増殖比1.03の低増殖炉心に移行）
燃料サイクルシステム	軽水炉再処理	六ヶ所工場：2006年操業開始、2011年に800トン/年のフル稼働、2047年操業終了 第二再処理以降：プルトニウムバランスに応じて再処理規模や運開時期を設定する
	FBR再処理	FBR導入開始に併せてFBR再処理施設初号機を導入。導入初期の余剰力でLWR-MOX使用済燃料を再処理。 後続施設はFBR規模やFBR使用済燃料貯蔵量に応じて100～200tHM/年の規模で適宜増設。
耐用年数		原子炉施設：60年 再処理施設：40～50年

4.1.2 高温ガス炉

高温ガス炉は運輸分野および産業分野への水素供給を中心に、様々な用途およびエネルギー形態で利用することを想定した[16]。以下に示す基本方針に基づいて、年度ごとの導入可能な最大基数を設定した。図 4.1 に年度ごとの導入上限値を示す。なお、実際の導入基数は、本節で設定した最大基数を超えない範囲で、3 章で推計した最終エネルギー消費量を満たすために必要な基数が導入されることになる。本分析では高温ガス炉を主に水素製造に使用するため水素製造プラントの稼働率を加味し設備利用率は 85%とした。また、耐用年数は 60 年とした。

- ① 2040 年から商用ガス炉の供用を開始し[17]、導入基数は次第に増加させる。(2040～2050 年：2 基／年、2051～2060 年：3 基／年、2061 年～：4 基／年)
- ② 高温ガス炉の導入は、燃料電池車用の水素製造および化学コンビナートの自家発・熱供給から始め、順次、化学コンビナート用水素製造、製鉄用水素製造に導入していく[18]。
- ③ 1 業種への導入頻度は 1～2 基／年とする。これは、高温ガス炉を導入する場合、ある期間工場を停止することになることから、その影響を緩和するためである。

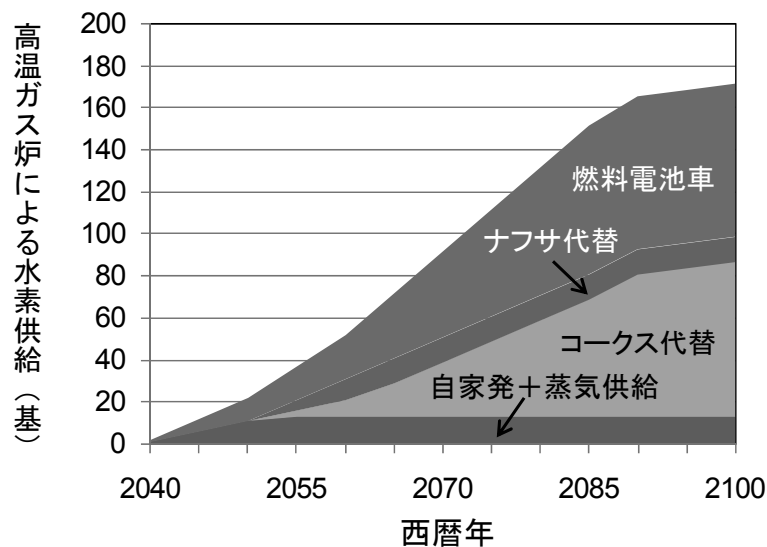


図 4.1 高温ガス炉の導入上限値

4.1.3 核融合炉

核融合炉の導入計画を、以下に示す基本条件に基づいて想定した。想定した年度ごとの導入基数の推移を図 4.2 に示す。ここで、核融合炉のメンテナンスは、分裂炉に比べて構造が複雑なため所要期間は相対的には長くならざるを得ないことから軽水炉と同等の設備利用率を仮定するのは難しいと考え、設備利用率を 85%とした。出力規模は、100 万 kW 級から設定可能である[19]ことを踏まえ、1 基あたり 1GWe とした。耐用年数は、16-60 年の幅の中で検討されており[20]、現状では耐用年数に関する合意はできていないと思われる。よって、本分析の 2100 年までの範囲で核融合炉の廃炉は想定していない。

- ① 原型炉[21]が 2036 年頃から運転されており、技術的成立性が確認されている。

- ② 実用 1 号炉は、原型炉から初期トリチウムの供給を受けるとした。この観点から原型炉の長期間運転実証（2048 年）から 5-6 年後に、実用 1 号炉の初期トリチウム装荷（2054 年）が可能とした。なお、調整運転時にも多少トリチウムが必要になる。
- ③ 今世紀前半には原型炉を中心とした実用化に向けた準備を完了する。②を踏まえ、実用 1 号炉の送電開始は初期トリチウムを装荷の 2 年後の 2056 年となる。なお、建設開始は 2046 年とした。
- ④ 周辺機器（特に起動系、非常系）を共有化するためペアー炉を仮定しており、実用 2 号炉の運転開始はトリチウム供給も考え、実用 1 号炉の 2 年後とした。したがって、実用 2 号炉の建設開始は 2048 年、送電開始は 2058 年とした。
- ⑤ 製造技術が成熟していないので、実用 3 号炉および実用 4 号炉は 6-7 年後に着工とした。
- ⑥ 次第に建設のペースを早め、2060 年代後半から毎年 1 基着工とした。2070 年代後半から 2090 年代にかけて毎年 1 基運開（1GWe/年）とした。

以上のプロセスを経て、製造技術を高め、諸外国に比べて輸出競争力の強化を目指す。

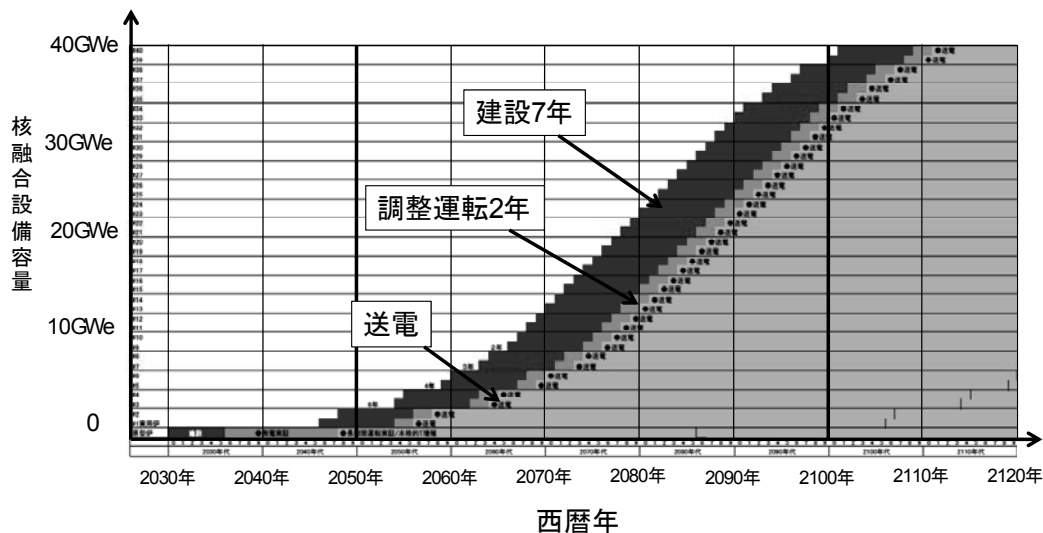


図 4.2 核融合炉の導入計画

4.1.4 新エネルギー発電

原子力と同様に、二酸化炭素排出抑制のために積極的な導入が期待されている新エネルギーの導入規模の想定を図 4.3 に示す。新エネルギーの範疇については、わが国独自の定義であって諸外国との比較において混乱を招く場合があることに注意を要する。本分析では、新エネルギーの構成要素技術として、太陽光発電および風力発電に加え、「その他」として地熱発電、黒液・廃材利用および廃棄物発電を想定した。

図 4.3 の発電設備容量のグラフにおいて、2000 年および 2005 年は実績値を示しているが、引用した電気事業便覧[22]が 1000kW 以上の発電出力の合計値であるため、3kWe 規模の家庭用の太陽光発電システムがここには含まれていない。また「その他」についても、2000 年および 2005 年は黒液・廃材利用および廃棄物発電が含まれておらず地熱発電のみとなっており、推計値である 2010 年以降とはデータの集計範囲に不整合がある。

図 4.3 に示す発電設備容量の推計において、2010 年以降については新エネルギーの構成要素に係る全ての実績データが存在するものの、2000 年および 2005 年については 1000kW 以上の発電出力の合計値データしかなく[22]、家庭用である 3kW 規模の小型太陽光発電システムの寄与分がこの推計には含まれていないことに注意を要する。また「その他」についても、2000 年および 2005 年は黒液・廃材利用および廃棄物発電が含まれておらず地熱発電のみとなっている[22]ことから、それら 3 発電による推計値である 2010 年以降データとの比較に注意を要する。

現状では図 4.3 中の「その他」に含まれる黒液・廃材の利用が大きく大半を占める[8]が、その利用規模は産業活動規模とリンクしていることから今後大幅な利用拡大は想定しない。また地熱発電および廃棄物発電についても同様に大幅な利用拡大は想定していない。以下では今後の利用拡大が期待される太陽光発電および風力発電について導入規模の想定を詳細に述べる。

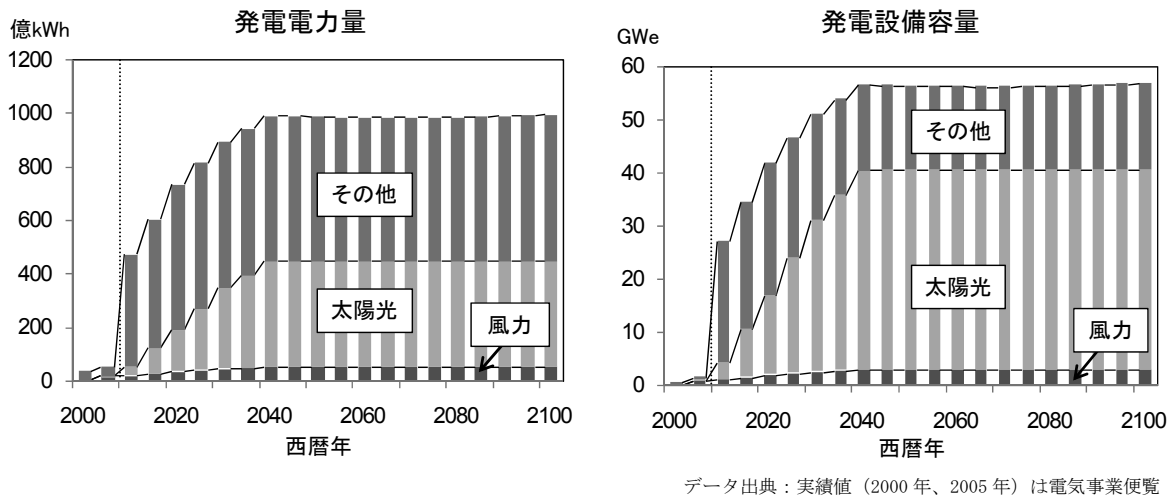


図 4.3 新エネルギーの導入規模の想定

図 4.4 に太陽光発電の導入規模の想定を示す。ここでは太陽光発電の設備利用率として 12% を使用している[23]。図中の棒グラフは本分析で想定した導入規模であり、赤丸印で示した設備規模は 3kW 規模の家庭用の太陽光発電システムを含めた導入実績および 2010 年度の導入目標を示している[24]。2040 年以降の導入設備規模 37.5GWe は、わが国の太陽光発電の物理的限界潜在量の約 4 分の 1 に相当する[25]。これは家庭用の 3kW 太陽光発電パネル 12.5 百万基に相当する設備規模であり、本分析で想定した 2100 年の総世帯数 26 百万世帯の約半数に設置される想定となる。

なお、以上の想定規模を最大で約 2 倍を上回る大幅な設備容量を導入することも不可能ではないが、わが国の自然・社会条件から見て現実的にはこの程度の規模が上限と考えた。さらに設備容量を増大させる場合には、太陽光発電による発電電力量の時間変動が大きいことから、送配電システムの安定性維持のため、本分析の推計（4.3 節参照）よりもはるかに大容量の蓄電設備が必要となることに注意を要する。

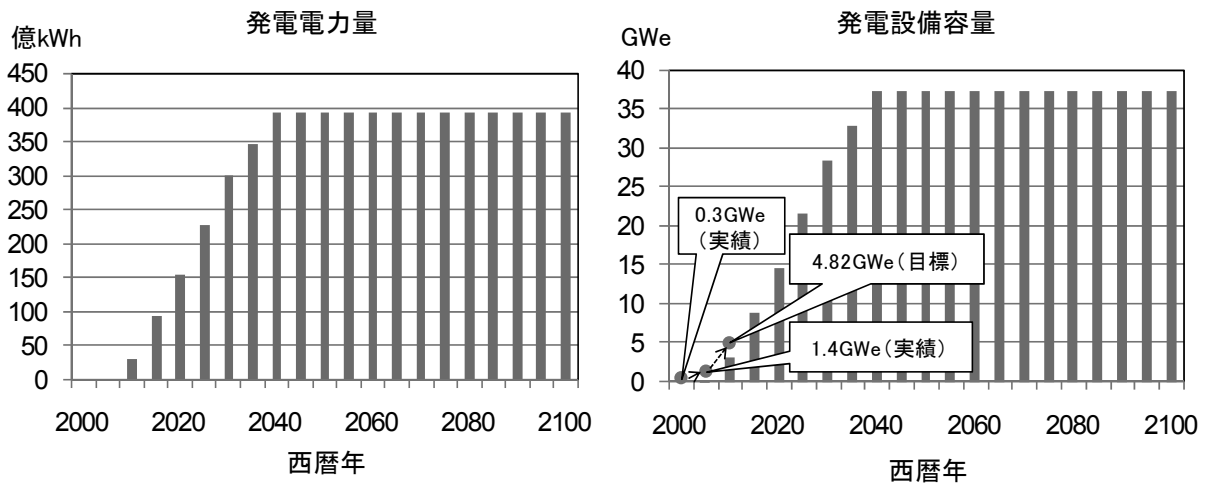


図 4.4 太陽光発電の導入規模の想定

図 4.5 に風力発電の導入規模の想定を示す。ここでは風力発電の設備利用率に 20% を使用している[23]。図中の棒グラフは本分析の検討で想定した導入規模であり、赤丸印で示した設備規模は導入実績および 2010 年度の導入目標を示している[24]。2100 年における設備規模 3.0 GWe は、現状における最大規模 1000 kWe の風車 3,000 基に相当する。これは、日本列島（本土）の脊梁山脈に沿って 1 列に設置するとした場合では約 600m に 1 基、また太平洋および日本海沿岸部に設置するとした場合では約 1.5km に 1 基の間隔で設置が必要な設備規模である。

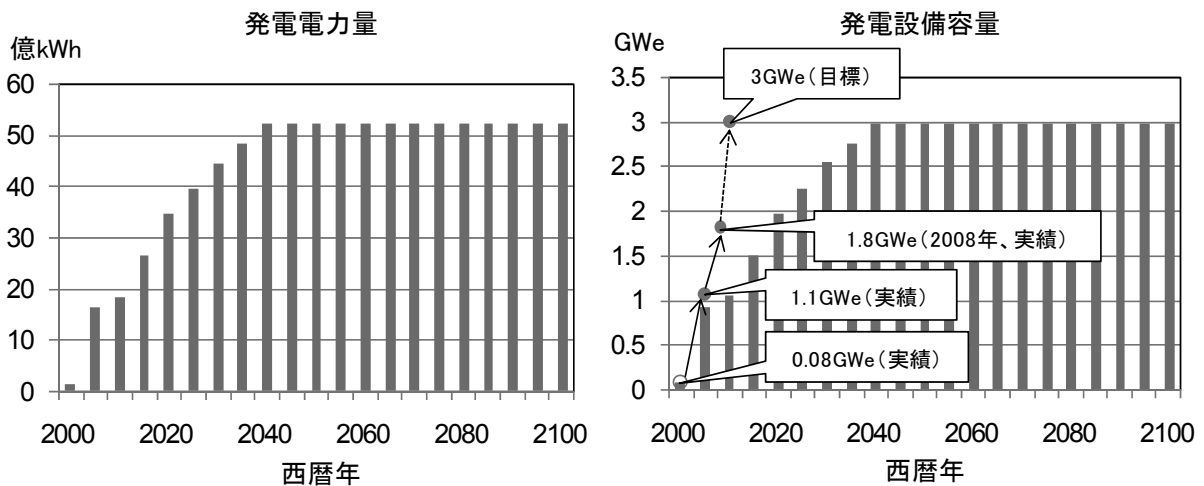


図 4.5 風力発電の導入規模の想定

太陽光発電および風力発電の更なる利用拡大の達成実現には、①日照条件および風況条件の悪い地点への立地の拡大（設備利用率の低下）、②需要変動への対応および供給安定性確保のための大規模蓄電設備の増強（経済性の低下）などの課題に取り組んでいく必要がある。

4.1.5 二酸化炭素の回収・貯蔵技術 CCS

本分析では石炭火力と天然ガス火力を対象に、回収した二酸化炭素を液化した後、船舶（重油燃料）でわが国から 5000km 程度離れた海域まで輸送し、海底下の帯水層へ貯留する二酸化炭素の回収・貯留システム CCS を想定した [26]。回収に必要な熱源として燃料の一部をそれぞれ消費するため発電システムの総エネルギー効率は悪化することになる。二酸化炭素の回収時に使用する熱源および輸送燃料からの二酸化炭素排出を考慮した、二酸化炭素の回収・貯留率は、石炭火力およびガス火力でそれぞれ約 70% および約 85% となる。導入規模は、石炭火力および天然ガス火力いずれも 2020 年から導入開始し、今世紀末までに 100% 導入することとした。

4.2 一次エネルギー供給量の算出

4.2.1 発電部門

本節ではエネルギー媒体別に積み上げた最終エネルギー消費量（図 3.8 参照）のうち電力について、電源別に一次エネルギー供給の詳細を算定する。なお、総発電電力量の算定において 10% の送電ロスを見込んでいる。

算定では、表 4.2 にまとめた各電源の長期的な電源構成シナリオに沿って、図 4.6 に示すような電源別の発電電力量のシェアを設定する。

表 4.2 電源構成シナリオ

エネルギー源	シナリオ
石油火力	今世紀中頃でフェーズアウト
石炭火力	CCS を導入し将来にわたり利用
ガス火力	負荷調整の主力として将来にわたり利用
新エネルギー	4.1.4 節で想定した規模で利用
原子力	電力供給の中核として最大限利用

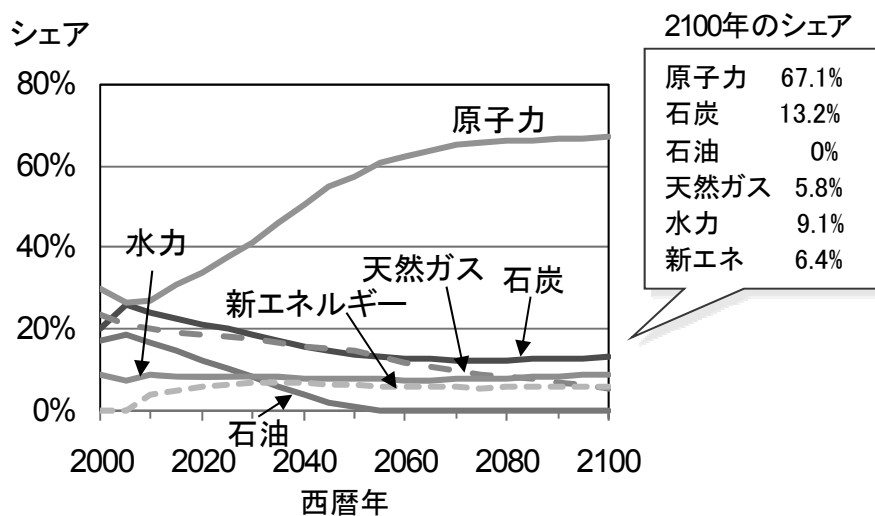


図 4.6 発電電力量の電源別構成

次に、図 4.6 に示す発電電力量の電源別構成に基づいて電源別の発電電力量を算出する。その結果得られたわが国の電源別発電電力量の推移を図 4.7 に示す。

わが国の総発電電力量が 2100 年において現在（2005 年）の 1.5 倍に拡大する中で、石炭、石油および天然ガスなどの化石燃料による発電の占有率は、現在の 66% から 2100 年において 19% へと縮小する。他方、原子力発電は、電力需要の増分を供給し、さらに化石燃料資源の有効利用の観点から石油火力の代替および負荷調整用電源として天然ガス火力を利用すること等により、高い利用率を維持しつつ現在の 26% から 2100 年において 67% に大幅に占有率を拡大する。なお、新エネルギーは 2100 年において総発電電力量の 6% を占める。これに水力発電分を含めると、再生可能エネルギー分は総発電電力量の 14% に達する。

原子力による電力供給が大幅に増加する中で、その供給形態は当面、核分裂炉である軽水炉が電力供給の主力となるが、今世紀中頃から今世紀末にかけてその主力が高速増殖炉に入れ替わる。また、今世紀中頃からは核融合炉も徐々に占有率を拡大する。

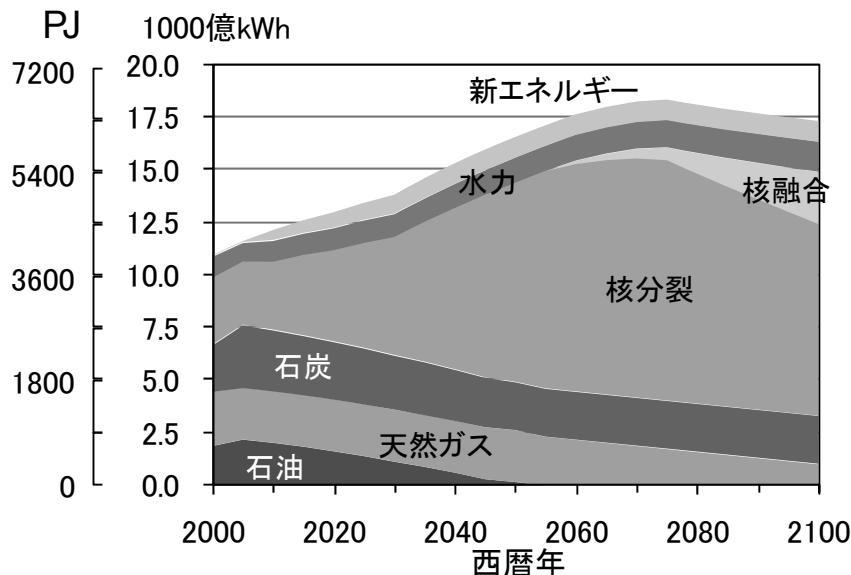


図 4.7 電源別発電電力量

4.2.2 転換部門

本節ではエネルギー媒体別に積み上げた最終エネルギー消費量（図 3.8 参照）のうち電力以外の化石燃料や合成燃料について一次エネルギー供給の詳細を算定する。エネルギー媒体ごとにそれぞれ設定した精製プロセス効率を用いて算出した、エネルギー源別の一次エネルギー供給量を図 4.8 に示す。

長期的には電化が進むことで最終エネルギー消費での石油製品の直接消費が大幅に減少する。ただし、天然ガスは長期的にはナフサを代替し化学工業における原料として使用されることとしたため、消費量は減少せず横ばいとなっている。また、2040 年以降に導入され、2100 年には転換部門の 36% を占める高温ガス炉のエネルギー供給先を以下に示す。核熱利用としての高温ガス炉の軸は水素の製造供給であるが、商用の電力系統には接続しないものの電力供給（自家発電）等も行っている。

【高温ガス炉の用途】

- 燃料電池車への水素燃料の供給
- 製鉄産業における還元剤であるコークスの代替および化学コンビナートにおける原料として水素を供給
- 化学コンビナートにおける自家発電および産業用蒸気供給の熱源

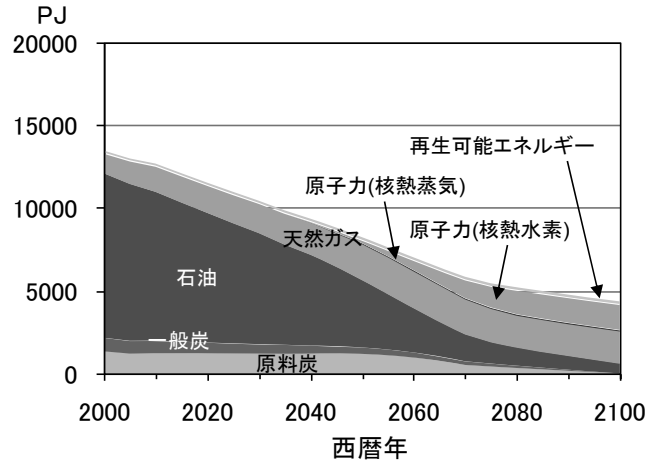


図 4.8 転換部門の一次エネルギー消費量

4.2.3 一次エネルギー供給量

エネルギー媒体ごとの発電効率を使用して算出した発電部門の一次エネルギー供給量と、図 4.8 に示した転換部門の一次エネルギー供給量を足し合わせたわが国の一次エネルギー供給量の推移を図 4.9 に示す。2100 年では一次エネルギー供給量に占める化石燃料の割合が現在の 85% から 30%に縮小する一方で、再生可能エネルギーおよび原子力の割合が現在の 15%から 70%に拡大する。原子力の利用拡大は大幅な電化に起因している。大幅に減少する石油の消費は、非エネルギー利用および運輸分野における航空機および船舶などの一部の利用に限られる。

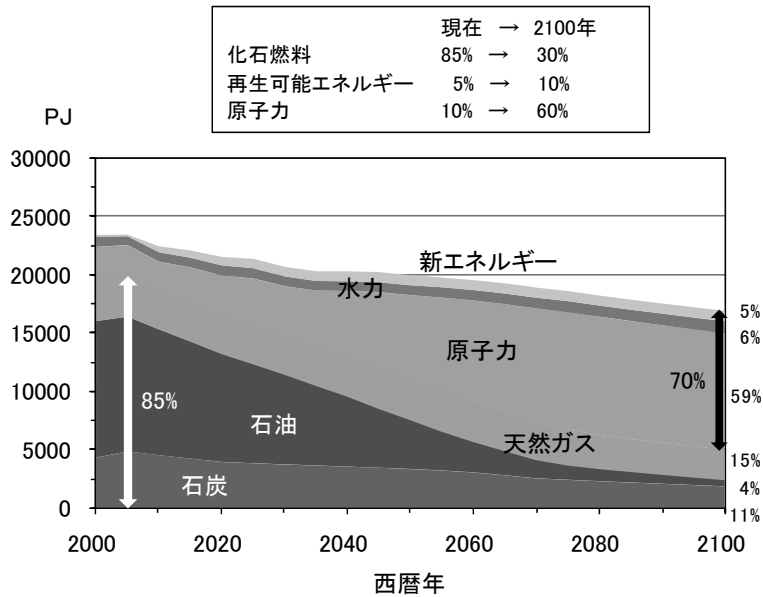


図 4.9 一次エネルギー供給量

4.3 発電設備容量の算定

4.3.1 供給予備力の想定

電力需要は季節・時間帯により絶えず変動している。これを時間積分して年間量にしたものが4.2.1節で算定した各年の発電電力量である。わが国では夏の昼間に電力需要のピーク（最大消費電力）があり、発電設備容量の算定においては、このピーク需要を満たすための供給予備力を見込む必要がある。そこで、統計データ[27]を基に確保すべき供給予備力の範囲を把握し、2100年までの各発電設備の役割分担を踏まえた電力供給シナリオを想定した。図4.10に最大消費電力/平均消費電力の推移を示す。冷夏、暖冬、暑夏および寒冬の様々な年があるので統計値には幅がある。最大消費電力は平均消費電力の1.57倍から1.75倍の範囲である。暑夏と寒冬が重なった2001年と2002年を除き近年は減少傾向である。ある程度の供給予備力は必要不可欠ではあるが過大な供給予備力は経済性の面からも好ましくない。本分析では現状は1.6倍程度の供給予備力を見込むこととし、長期的には充電式の電気自動車などの普及により昼夜の負荷変動は縮小されると考え、2100年では1.3倍の供給予備力を確保することとした。2100年においても現在と同様に石炭火力および原子力はベース電源として位置づけ、現在はピーク電源として使われている石油火力を今世紀中頃までにはフェーズアウトさせたため、将来的には天然ガス火力をピーク電源の主力に置いた。

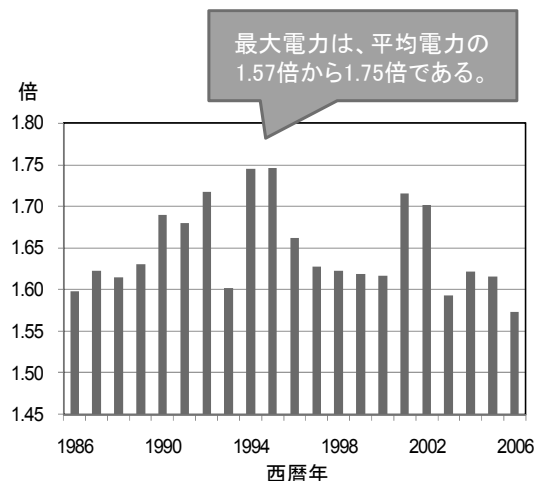


図 4.10 最大消費電力/平均消費電力の推移

4.3.2 将来社会における電力供給像

前節に記述した結果を踏まえ、想定した供給予備力に基づき発電設備容量を算定した。図 4.11 に発電電力量および発電設備容量を示す。新エネルギー発電や水力発電はその設備利用率が低いことから、発電設備容量は大きく確保することとなっている。

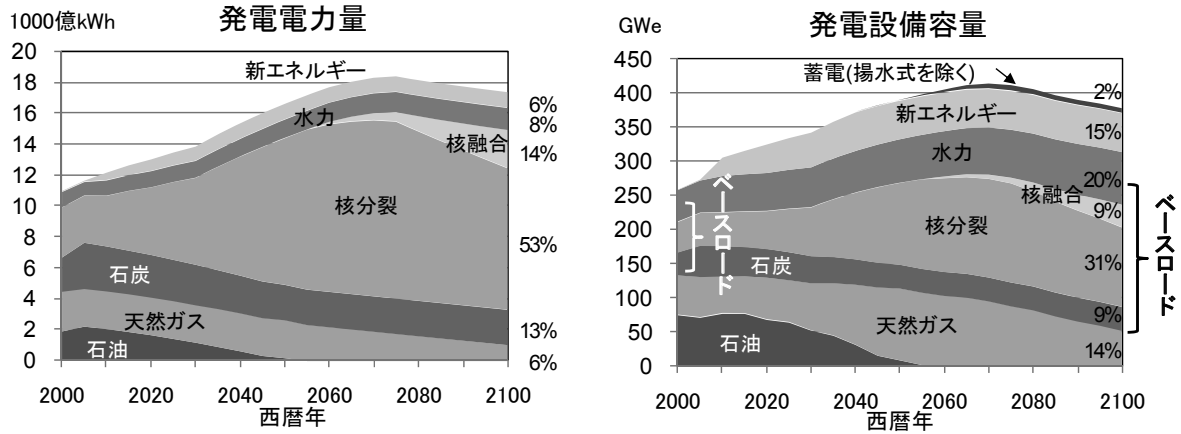


図 4.11 発電電力量と発電設備容量

将来社会の電力供給像を以下にまとめた。

- ・ 充電式電気自動車の普及などにより、長期的には、日負荷変動の幅は縮まる方向であるとし、2100 年では供給予備力を半減できるとした。(最大消費電力/平均消費電力が、現在では 1.6→2100 年では 1.3 とした)
- ・ 低負荷時間帯（夜間）の余剰電力貯蔵設備として、2050 年以降にベースロード電源の設備比率が約 8 割を超える場合には、揚水式の蓄電設備の増強に加え、将来技術による蓄電設備の導入を想定した。
- ・ さらに、これらの蓄電設備からの電力供給によっても賄えないようなピーク需要に対応するための供給予備力として天然ガス火力（CCS 設備付）を想定している。

4.4 原子力エネルギー導入量

4.4.1 核分裂発電炉

図 4.12 に核分裂発電炉の設備容量を示す。本分析では、核分裂発電炉は長期的には軽水炉から高速増殖炉へ移行していくことを念頭に置いている。4.1.1 節で述べたが、核分裂発電炉に関しては導入上限を設けず、電力需要に応じて新規建設が可能とした。ただし、高速増殖炉の導入量については諸量評価ツール「FAMILY」[28]を用い、核燃料サイクルにおけるプルトニウム収支を考慮して導入量を内生的に決定している。核分裂発電炉の最大設備規模は 2075 年で 145GWe、2100 年で 116GWe である。設備規模 145GWe は 1 基あたりの発電規模を 1.5GWe とした場合、現在わが国で運転中の原子炉の 2 倍である約 100 基分に相当する。なお、原子力エネルギーによる電力供給の多様化の観点から、今世紀後半の商用利用を想定している核融合炉でも高速増殖炉と同様に、軽水炉を置き換えることを想定しているため、核分裂炉全体の設備量は減少する。

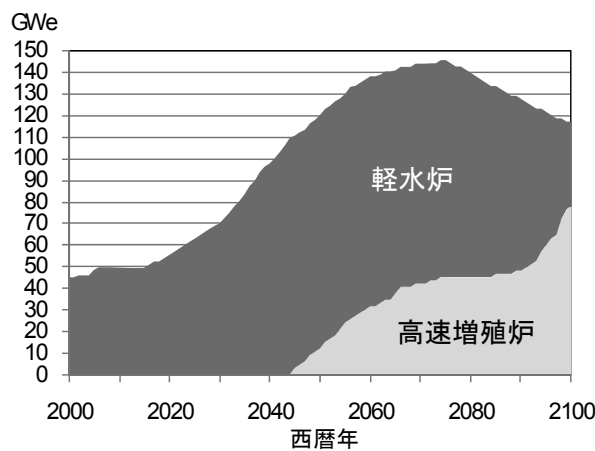


図 4.12 核分裂発電設備容量

図 4.13 に核分裂炉の新規建設・廃止の推移を示す。前述したが分析に際して、年間の建設基数は過去の最大値を参考に過大にならないように配慮して各年の新規建設を決定した。なお、日本の軽水炉の実績は平均 1.2GWe/年で、1970 年代から 1980 年代にかけて集中しており、最大は 4.8GWe/年である。[29]

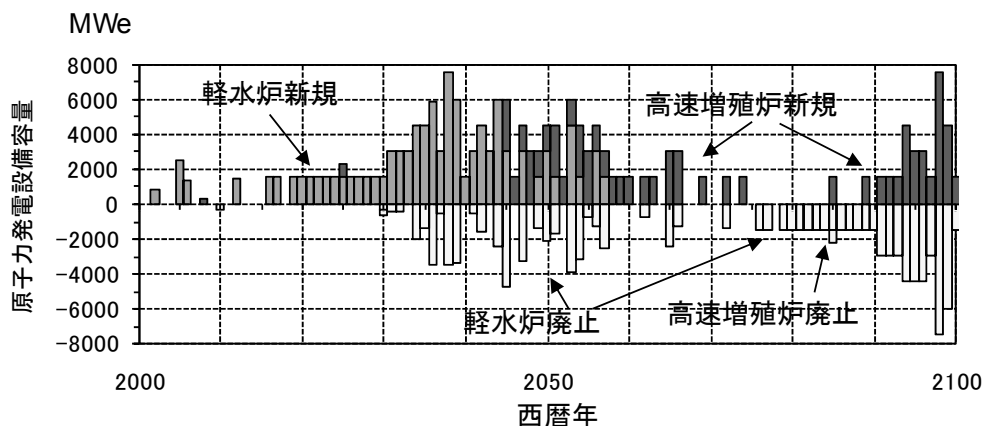


図 4.13 核分裂炉の新規建設・廃止の推移

4.4.2 高温ガス炉

4.1.2 節で想定した導入条件の下で、需要に応じて導入した高温ガス炉の設備規模を図 4.14 に示す。2060 年頃までは、需要量が供給量を上回っているため、導入可能な最大基数まで導入される。概ね 2060 年以降では導入可能な最大基数が需要量を上回るため、需要量に応じて適切な規模で増設が行われていく。燃料電池車や電気自動車などの無公害車の導入によるエネルギー効率の改善により、運輸分野におけるエネルギー需要が長期的には減少し、且つ人口減少などにより自動車の保有台数が減少するため燃料電池車用の水素供給は 2080 年以降で横ばいとなる。2100 年時点では、コークスは全て核熱水素で置き換えられ、燃料電池車用の水素燃料は全て高温ガス炉で供給され、化学工業の自家発電・蒸気供給の半分が高温ガス炉から供給される。また、高温ガス炉および後述する核融合炉の新設は、核分裂炉の新設が一段落した 2060 年以降が中心であり、今世紀中は原子力プラントの建設が途切れることがなく年間 2～6 基のペースで行われる。

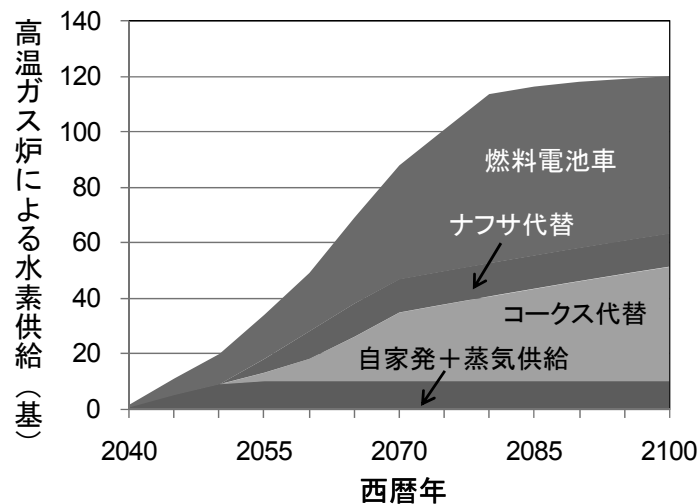


図 4.14 高温ガス炉の導入規模

4.4.3 核融合炉

核融合炉の設備容量は4.1.3節で想定した導入条件を使用して外生的に与えた。核融合炉の導入規模を図4.15に示す。核融合炉の導入により次のことが期待される。

- ① 核分裂炉との共存によるエネルギー安全保障の向上。
- ② 低い潜在的リスクと高い安全性の確保による立地制約の緩和。
- ③ 高温化技術開発による水素製造の可能性追求。

なお、日本の軽水炉の建設実績は、平均1.2GWe/年で、1970年代から1980年代にかけて集中しており、最大は4.8GWe/年であり、これを超えないように配慮した。[29]

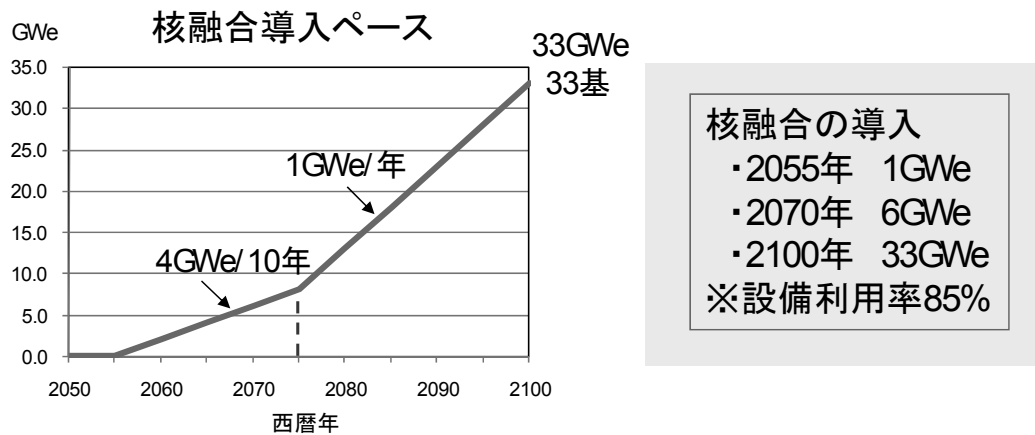


図 4.15 核融合炉の導入規模

5. 分析結果

5.1 エネルギー資源の消費量

5.1.1 化石燃料消費量

推計された一次エネルギー供給量から、エネルギー源別に化石燃料の消費量(輸入量)を算定した結果を図 5.1 に示す。化石燃料依存からの脱却を目指した本シナリオにより、現在から 2100 年までに石油の消費量を 9 割以上削減できた。石炭は安価で埋蔵資源量も多いため、CCS(二酸化炭素の回収・貯留システム)の利用を前提にある程度の消費を見込んではあるものの 6 割程度削減できる。天然ガスは、産業分野において化学工業用の原料として使用するナフサなどの石油製品の代替および電力需要の変動に対応するための発電設備(ピークロード電源)の燃料需要を見込んでいるものの、2 割程度削減できる。

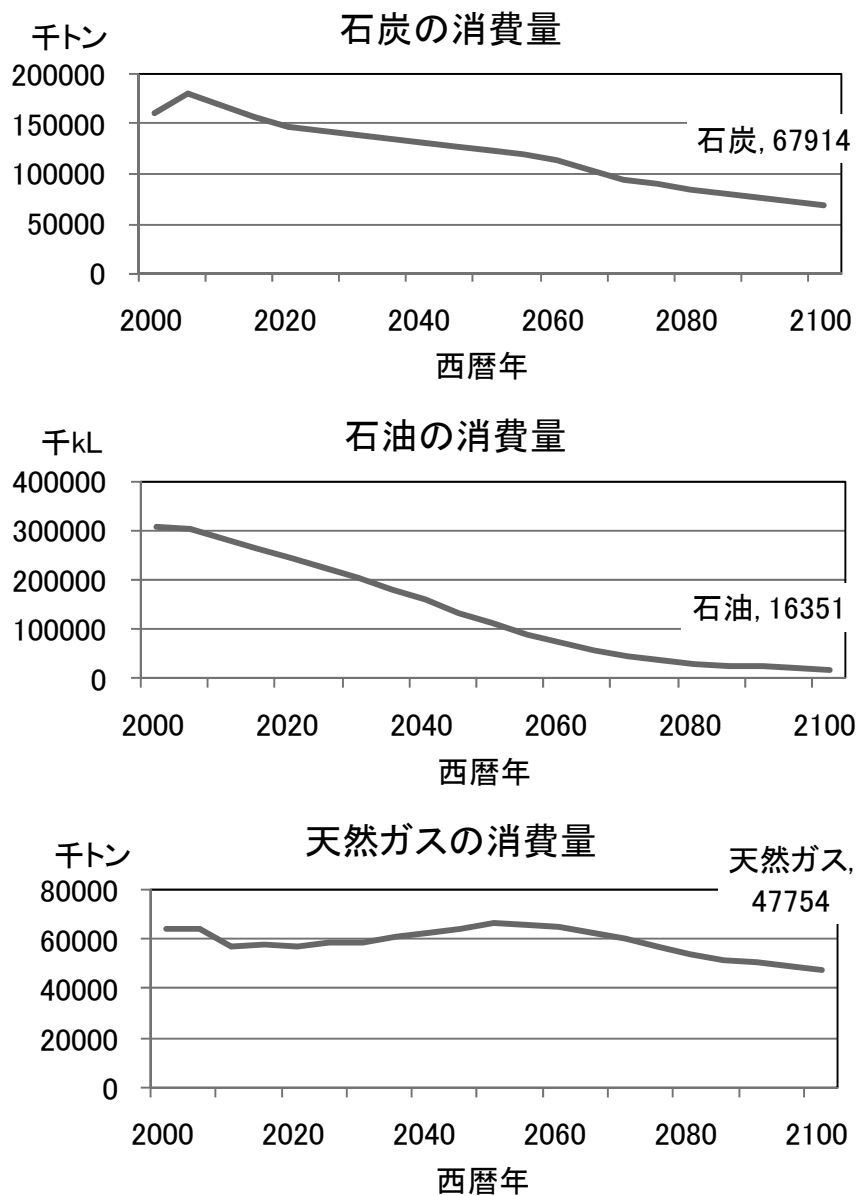


図 5.1 化石燃料消費量の推移

5.1.2 天然ウラン累積消費量

原子力を積極的に利用する本分析シナリオの天然ウラン累積消費量の推移を図 5.2 に示す。軽水炉による天然ウランの需要は、2045 年の高速増殖炉の導入開始とともに抑制されるが、2040 年から導入される高温ガス炉によって新たな天然ウラン需要が生じるため、ある程度の天然ウラン需要がある。しかし、高速増殖炉による軽水炉代替が進めば天然ウラン累積消費量は頭打ちとなり、さらに高温ガス炉に MOX 燃料を利用することで、わが国の天然ウラン究極消費量は在来型資源[30]の 10%までは増えないと考えられる。

また、天然ウランの需要増を通じてウラン市場の逼迫を招く可能性も否定できない。しかし、軽水炉、高速増殖炉および高温ガス炉は、ライフサイクルで見れば総コストに占める燃料費の割合が火力発電の 4～6 割程度に比べて 3 割程度と小さく[31]、また、燃料費に占めるウラン価格の割合も火力発電よりは小さいので、仮にウラン価格が相当程度上昇したとしても、十分な量のウランが確保できるならば、価格上昇自体はその利用においてそれほど大きな問題とはならない。さらに、海水中に約 45 億トンUのウランが溶存するとされており[32]、原子力機構では海水ウランの回収技術の開発に長年にわたり取り組んでおり、将来のウラン需給の状況によっては早期に商業化に結びつけられるよう研究開発を実施している[33]。

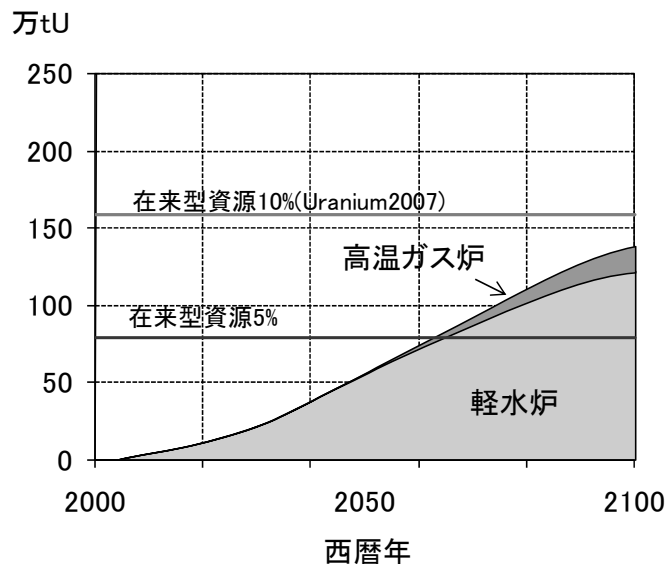


図 5.2 天然ウラン累積消費量の推移

5.1.3 エネルギー自給率の推計

エネルギー自給率は、国内生産量を一次エネルギー総供給量で除した値であり[35]、わが国のエネルギー自給率は約 4%と低い。ただし、原子力の燃料となるウランは、エネルギー密度が高く備蓄が容易であること、使用済燃料を再処理することで燃料として再利用(高速増殖炉や軽水炉でのプルサーマルによるプルトニウムの利用)できること等から、資源依存度が低いため、原子力を準国産エネルギーと考えればわが国のエネルギー自給率は約 16%に達する[34]。国内生産は、水力、地熱および新エネルギー等の再生可能エネルギーに加え準国産の原子力があり、ほとんどが輸入に頼っている石炭、原油、天然ガスの生産量が僅かにある。本分析から推計される一次エネルギー供給に対し、エネルギー自給率を算定した結果を図 5.3 に示す。ここで、僅かにある石炭および天然ガスの国内生産量は現在の生産量を 2100 年でも維持するものと仮定したが、国内での石油生産は 2075 年にフェーズアウトするものとした。

本分析で提示した需給シナリオは、原子力を積極的に導入しているため、原子力を国内生産に含めるか否かによって、自給率の推移(絶対値も)は大きく異なる。原子力を国内生産に含めない場合では 2100 年のエネルギー自給率は 10%程度であるが、原子力を国内生産に含める場合では 70%と高い自給率となる。高速増殖炉による軽水炉の代替が完了する来世紀には、原子力は完全な国内生産エネルギーとなり、わが国におけるエネルギー安定供給の確保に不可欠な技術となる。

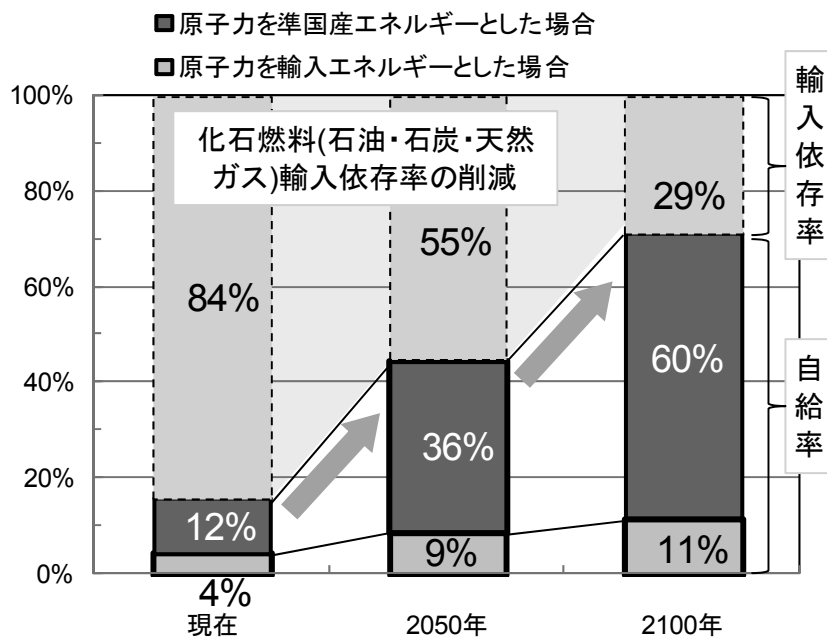


図 5.3 エネルギー自給率の推計

5.2 環境排出量

5.2.1 二酸化炭素排出量

本分析シナリオの二酸化炭素排出量の推移を図 5.4 に示す。

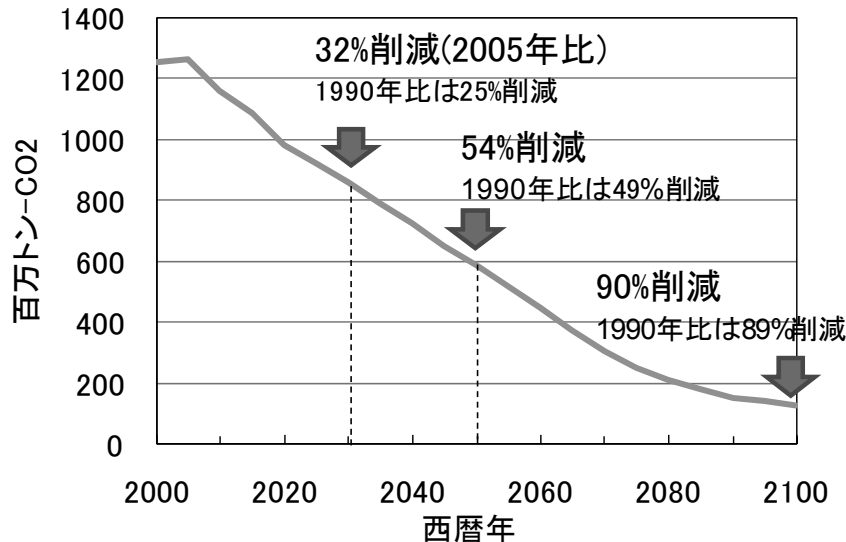


図 5.4 二酸化炭素排出量の推移

ここで、二酸化炭素排出量は、石炭火力と天然ガス火力に対して 2020 年から CCS 導入が徐々に進み、2100 年には 100%の火力に CCS が導入されるとし、完全導入による削減効果を盛り込んで算定した。ただし、二酸化炭素の回収に必要な熱源として燃料の一部をそれぞれ消費するため発電システムの総エネルギー効率は低下することが考慮されている。なお、CCS については、回収した二酸化炭素を液化した後、船舶(重油燃料)でわが国から 5000km 程度離れた海域まで輸送し、海底下の帯水層へ貯留することを想定した[26]。ここで、二酸化炭素の回収熱源や輸送燃料からの二酸化炭素排出を考慮した二酸化炭素の回収・貯留率は、石炭火力およびガス火力でそれぞれ約 70%および約 85%である。

また、本分析シナリオでは森林による二酸化炭素吸収の効果も盛り込んでいる。森林の追加整備を行い算入対象となる森林をさらに確保できるとし、わが国の森林吸収量の算入上限値(1300 万炭素トン[36])を 2012 年から 2100 年まで削減量として考慮した。

二酸化炭素の年間排出量は、2050 年では現状(2005 年)から 54%の削減を達成しており、2100 年の排出量は現状の約 1 割に抑えられている。また、京都議定書における二酸化炭素排出削減の基準年である 1990 年の排出量[37]–[38]と比べても、2050 年で 49%、2100 年で 89%の削減となる。2050 年までに世界全体の温室効果ガス排出量の少なくとも 50%を削減するというクールアース 50(環境エネルギー技術革新計画)[39]や G8 北海道洞爺湖サミットの合意目標において、わが国は予測される応分の負担をすることができるシナリオとなっている。今後、わが国が更なる削減目標を定めるのであれば、その達成のためには、本シナリオでは想定していない未開発の技術等による一段と強力な省エネルギー対策の実施や産業構造における製造業のシェア大幅減等、主としてエネルギー需要側での更なる対応が必要と考えられる。

二酸化炭素排出量に対する削減の技術要因別の寄与度を図 5.5 に示す。本シナリオによる排出量、つまり 2100 年ビジョンのケースは紫色の折れ線の下側領域で示されている。また、2100 年

ビジョンのケースと削減対策を施さないケースの排出量の差分については、排出抑制量を要因別（原子力、その他）に示している。2100 年では原子力発電による削減は 38%、高温ガス炉による削減は 13% となり、原子力の利用により 51% の削減が得られている。その他には、再生可能エネルギーの利用拡大、運輸分野での燃料電池車による水素化、省エネルギー、CCS 導入、森林吸収などの要因が含まれる。

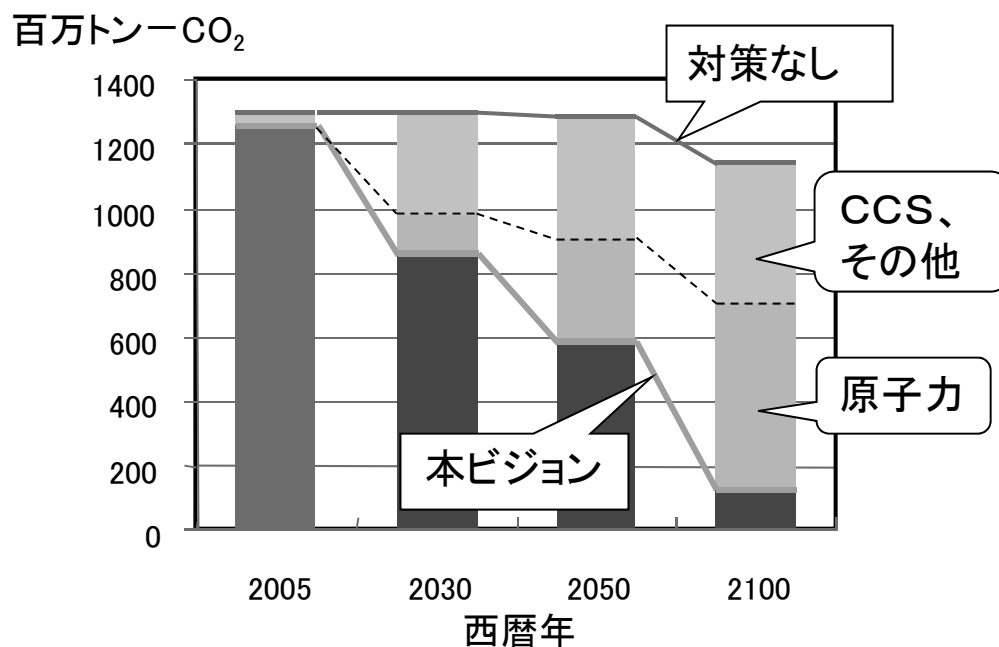


図 5.5 二酸化炭素排出削減の要因別寄与度

5.2.2 放射性廃棄物

本分析で提示したシナリオでは原子力を積極的に導入しており、それに伴い使用済燃料の発生量が増大することが懸念される。本節では、高レベル放射性廃棄物発生量およびその処理・処分についての試算について述べる。

使用済燃料の再処理設備容量の推移を図 5.6 に示す。軽水炉用再処理施設は、年間処理量 800tHM/年の六ヶ所再処理工場の稼働後、2030 年に 1200tHM/年の規模で第 2 再処理施設の導入を想定している。また 2047 年には、年間処理量 300tHM/年の規模で、高温ガス炉用再処理施設の導入を想定している。他方、高速増殖炉の使用済燃料の再処理施設は、数百トン HM/年の規模で適宜増設している。濃縮ウラン使用済燃料の再処理は、ピーク時で 2000tHM/年の規模の施設を確保できれば、十分処理可能であることを示している。なお、高温ガス炉の再処理については、燃料を被覆しているセラミックを削った後、燃焼により炭素成分を除去する、前処理工程を追加することで、現行の軽水炉用再処理施設の利用を可能にする技術的な検討が行われている。

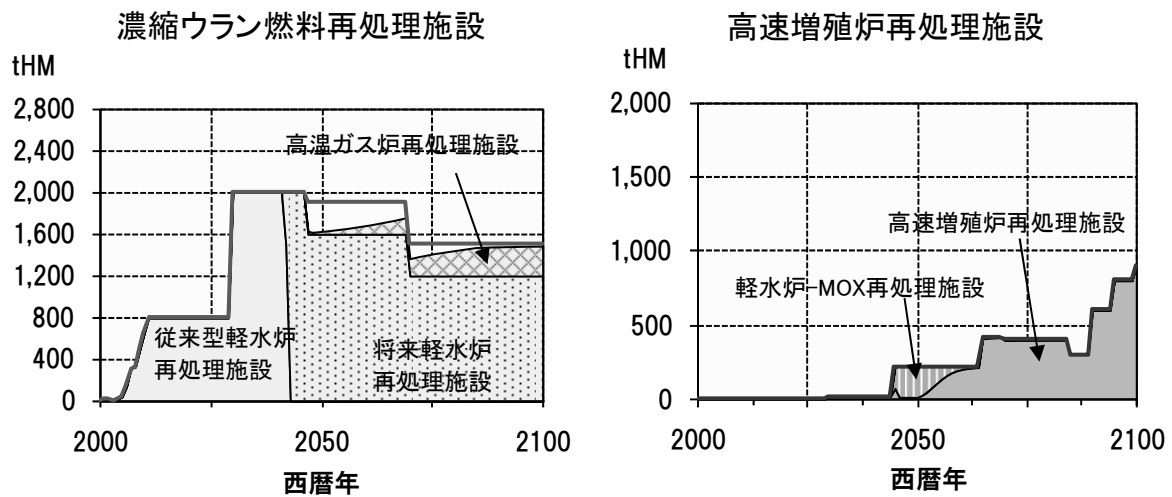


図 5.6 使用済核燃料の再処理設備容量の推移

次に、使用済燃料の再処理により発生する高レベル放射性廃棄物については、地層処分を想定し、その発生量(ガラス固化体本数)および、その最終処分に必要となる処分場面積の推移を図 5.7 に示す。なお、いずれも累積量を示している。

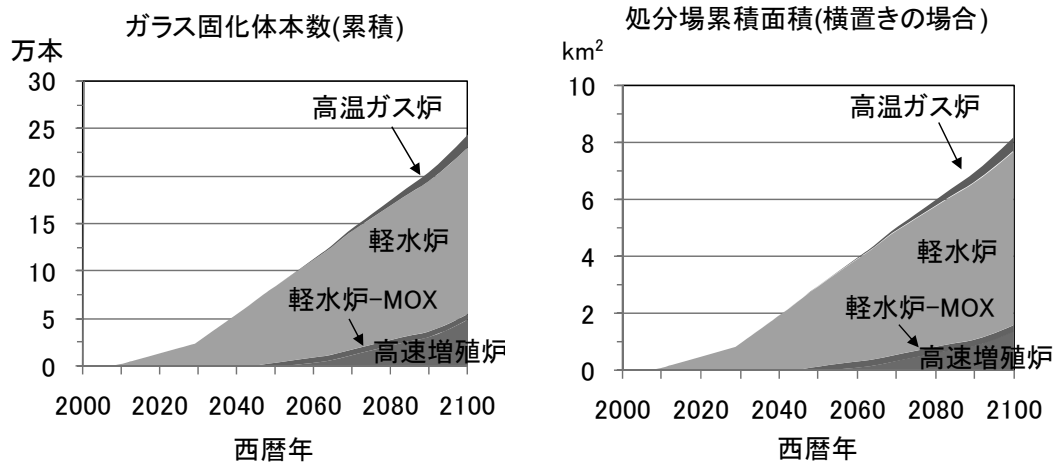


図 5.7 高レベル放射性廃物発生量の推移

※ガラス固化体製作後、例えば 50 年間地上で冷却してから地層処分するが、ここでは、ガラス固化体製作年での発生量を処分場面積に換算した場合を示している。

2100 年までのガラス固化体の累積本数は約 24 万本であり、この地層処分に必要な最終処分場の面積は約 8km² となる。例えば、羽田空港の面積が約 12km² であることから、本分析で想定した規模での原子力利用（核融合は除く）により発生する廃棄物の処分には羽田空港程度の処分場を確保すれば 100 年以上にわたって処分が可能である。ただし、原子力の利用に伴い発生する放射性廃棄物は高レベル放射性廃棄物ばかりでなく、原子力発電所の廃止に伴う建屋廃棄物や再処理工場で生じる長半減期放射性廃棄物等、低レベル放射性廃棄物も発生する。したがって、これら低レベル放射性廃棄物の処理・処分が持続的な原子力利用に支障をきたすことのないよう、処分施設の計画的整備を進めるとともに、クリアランス制度（放射能濃度が一定の基準を超えない廃棄物を通常の産業廃棄物として取り扱えるように認定する制度）の導入等により発生量の削減を図る必要がある。

6. エネルギー需給の比較

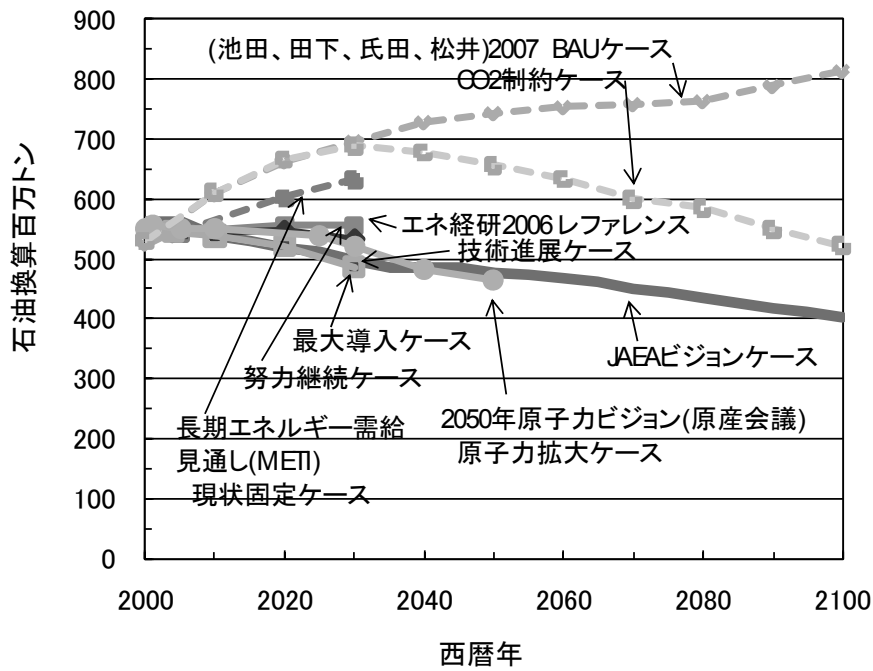
6.1 他のエネルギー需給見通しとの比較

6.1.1 一次エネルギー供給の比較

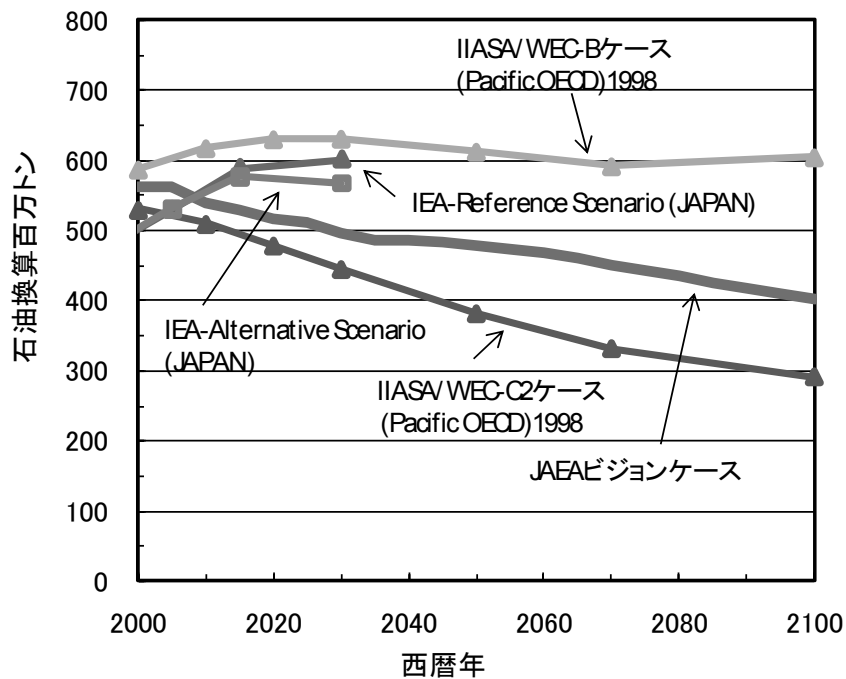
本分析の妥当性を検証するために、他機関で公表されたエネルギー需給の検討事例[12], [40]–[44]との比較を行った。他機関での検討事例で示されたエネルギー需給見通しは、その多くが30年や50年先までの推計であり、100年先までのエネルギー需給推計を示した事例は極めて少ない。数少ない100年間の推計事例については、日本のエネルギー需給像の抽出が不可能であったり推計事例の作成年度が古かったりするため、本分析との厳密な比較は難しい。しかしながら、それらの推計事例で示された推計値の幅において本ビジョンでの推計値がどの位置取りになるのかを確認・概観することは十分意味のあることである。

一次エネルギー供給量について他機関による検討事例との比較結果を図6.1に示す。概括すれば、経済性を優先するケース（BAU、レファレンス、現状固定などと呼ばれる図中の破線で示されているケース）では、二酸化炭素の排出抑制などの環境対策が特に施されないため、一次エネルギー供給量が年々増加する傾向となる。一方、環境対策ありのケース（CO₂制約、技術進展、最大導入、努力継続、原子力拡大などと呼ばれる図中の実線で示されているケース）では、省エネルギー、環境技術および原子力などの導入が進むことでエネルギー利用の効率化が進み一次エネルギー供給量を低減できる見通しが示されている。

本分析における一次エネルギー供給の推計では、省エネルギーや電化、水素化を推し進め、それらの供給エネルギー源としての原子力を積極的に導入していることから、他機関の「対策あり」のケースと本分析との間には、現在から2030年もしくは2050年の範囲で見ると、大きな相違はない。



(a) 国内機関との比較



(b) 海外機関との比較

図 6.1 他機関の検討事例との一次エネルギー供給量の比較

6.1.2 発電電力量の比較

本節ではエネルギー源別の発電電力量について、資源エネルギー庁の「長期エネルギー需給見通し」[12]および日本原子力産業会議の「2050年の原子力ビジョンとロードマップ」[41]を対象に本分析との比較を行った。前者は2030年まで、後者は2050年までを分析の対象期間としており、本分析に比べて分析の対象期間は短いが比較的详细な分析結果が公開されている。両者の複数ある分析ケースのうち省エネルギー、環境技術および原子力などの導入が進むいわゆる「対策あり」の分析ケースと本分析の比較を図6.2に示す。

本分析(JAEA)では、化石燃料の消費をできる限り削減し電化を進めるとしたので、総発電電力量は他機関の推計より数割程度大きくなっているが、各エネルギー源のシェアで見れば概ね同程度となっている。電化を進めるにあたって積極的導入を図った原子力のシェアは、2030年で約4割、2050年で約6割となり、資源エネルギー庁の「長期エネルギー需給見通し」や日本原子力産業会議の「2050年の原子力ビジョンとロードマップ」の結果とほぼ同程度である。

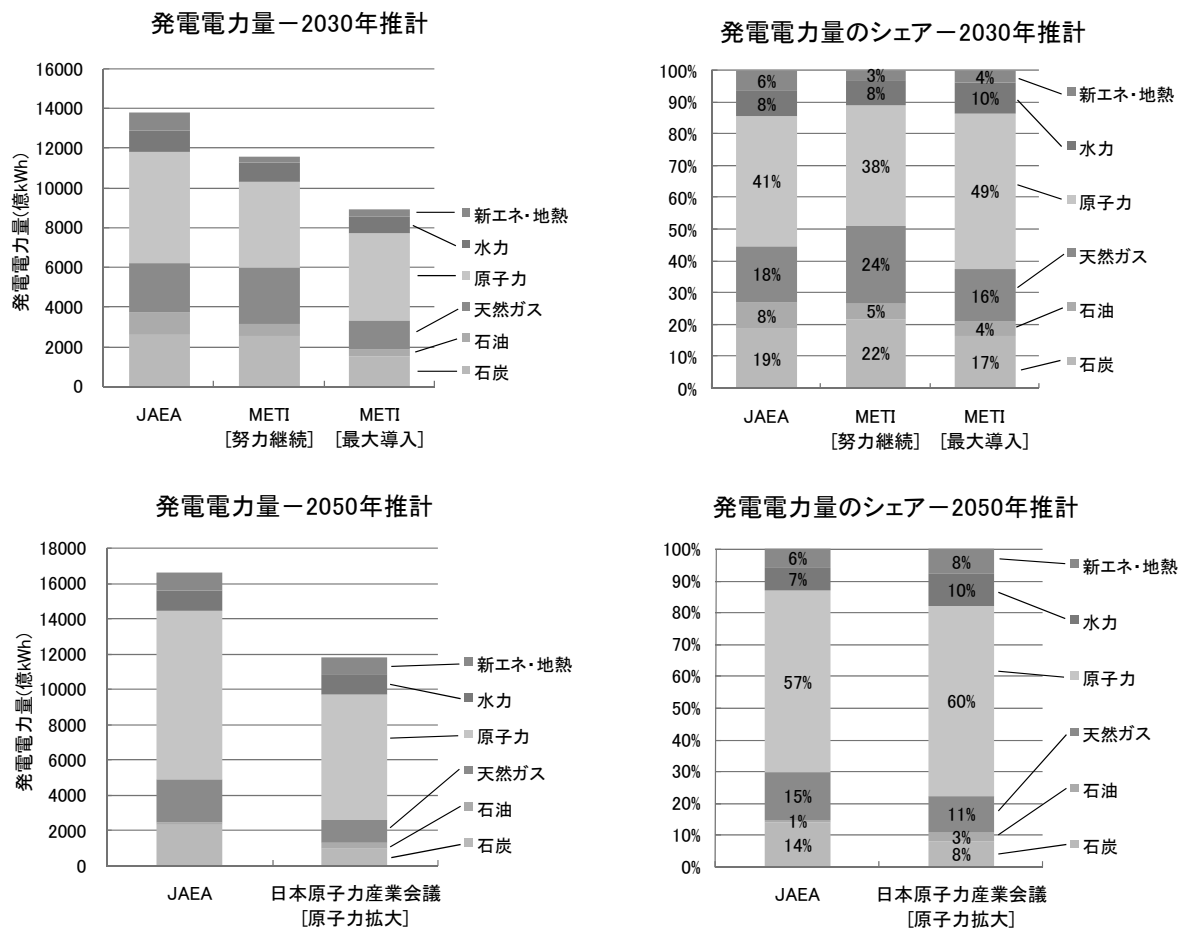


図 6.2 発電電力量のエネルギー源別の比較

6.1.3 再生可能エネルギー供給量の比較

一次エネルギー供給における再生可能エネルギー供給量について、資源エネルギー庁の「長期エネルギー需給見通し」[12]と比較した結果を図 6.3 に示す。2030 年までの範囲ではあるが、本分析の再生可能エネルギー供給量は、長期エネルギー需給見通しの「努力継続ケース」に近い。一方、一次エネルギー供給に対する再生可能エネルギーの供給割合で見ると、本分析は長期エネルギー需給見通しの最大導入ケースおよび努力継続ケースの両シナリオの間に位置している（図 6.4）。本分析は、長期エネルギー需給見通しの「努力継続ケース」の再生可能エネルギーの利用規模に近い想定となっている。

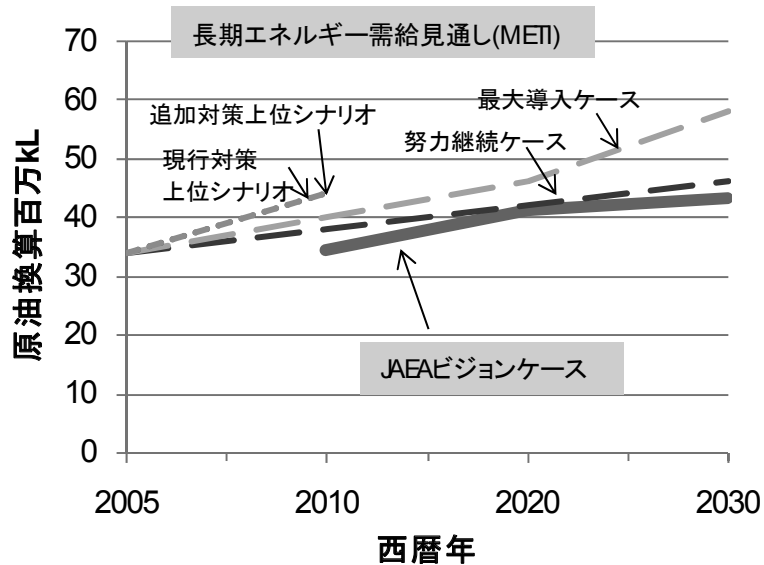


図 6.3 一次エネルギー供給に対する再生可能エネルギーの供給量の比較

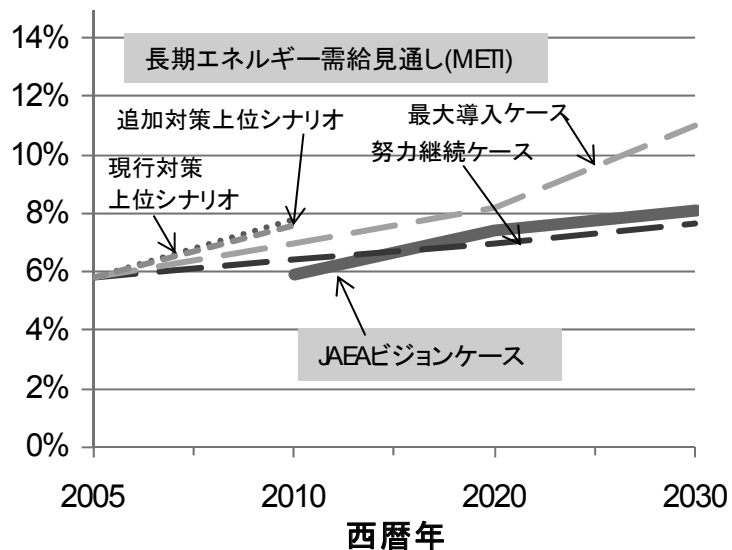


図 6.4 一次エネルギー供給に対する再生可能エネルギーの割合の比較

6.2 国のエネルギー政策との関係

わが国のエネルギー政策に関する資料において、定量的な数値目標を設定したものに資源エネルギー庁がとりまとめた「新・国家エネルギー戦略」（2006 年 5 月）[45]がある。その中で、次のような数値目標が記載されている。

- ①省エネルギー目標「2030 年までに更に少なくとも 30%の効率改善を目指す」
- ②石油依存度目標「2030 年までに 40%を下回る水準を目指す」
- ③運輸部門の石油依存度目標「2030 年までに、80%程度とすることを旨とする」
- ④原子力発電目標「2030 年以降においても、発電電力量に占める原子力発電の比率を 30～40%程度以上にすることを旨とする」

これらの数値目標を本分析の推計結果と対比すると、図 6.5～図 6.8 のようになる。まず、省エネルギー目標である「2030 年までに更に少なくとも 30%の効率改善を目指す」については、本分析では 2003 年の GDP あたりの最終エネルギー消費に対する 2030 年の指数を算定した。その結果、指数は 75 であり、エネルギー効率改善率は約 25%の向上となる。本分析は、省エネルギーの設定として、新・国家エネルギー戦略を具体化した長期エネルギー需給見通しに準拠しているが、本分析の 2030 年の GDP の推定値が長期エネルギー需給見通しよりもやや低いために効率改善率に相違がみられた。

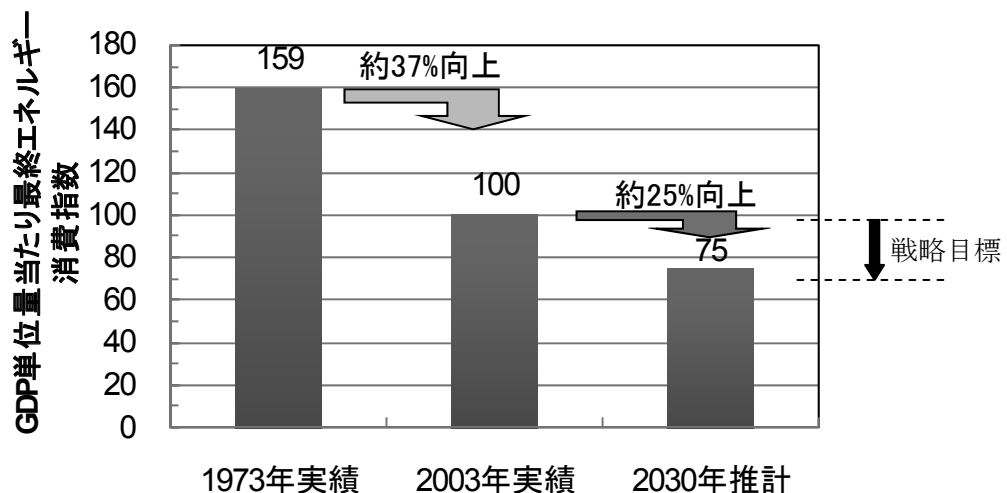


図 6.5 GDP 当たりエネルギー利用効率指数と推計値

次に、石油依存度目標である「2030 年までに 40%を下回る水準を目指す」 については、本分析の推計結果は、運輸や産業分野における固定型需要の脱石油を先に進めたこともあり、一次エネルギー供給全体に占める石油は 2030 年で 37%である。

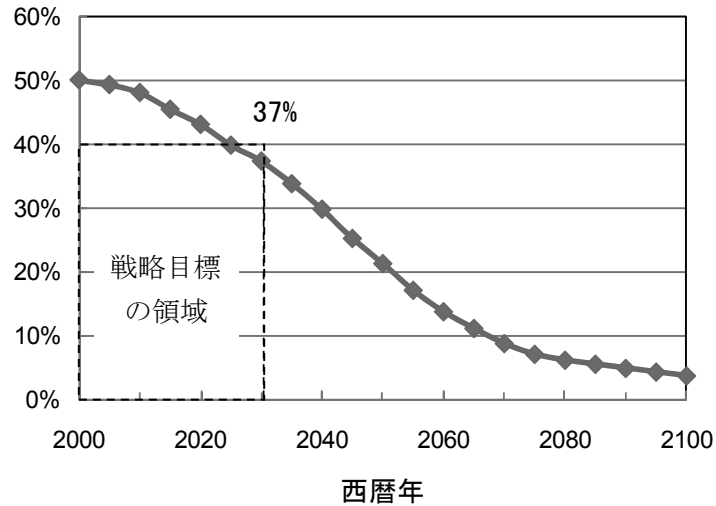


図 6.6 わが国の石油依存度の推計

運輸部門の石油依存度を「2030 年までに、80%程度とすることを旨とする」石油依存度低減目標について、石油依存度の算定は、次世代自動車導入されなかった場合の運輸全体の燃料消費量のうち、石油系燃料(ガソリン、軽油など)消費量の割合である。ただし、燃費改善の効果は見込むものとしている。本分析の推計結果は、図 6.8 に示すように、運輸分野の 2030 年時点での石油依存度は 90%である。本分析で依然として 2030 年時点での石油依存度が高いのは、自動車の技術革新として、従来のガソリン車からハイブリット車に置き換わっていくものの、2030 年頃から水素を利用した燃料電池車が導入されるというシナリオのため、2030 年ではまだ化石燃料が主流となっていることによる。その後燃料電池車が普及し始める 2040 年頃には、石油依存度は 80%まで低減してくる。

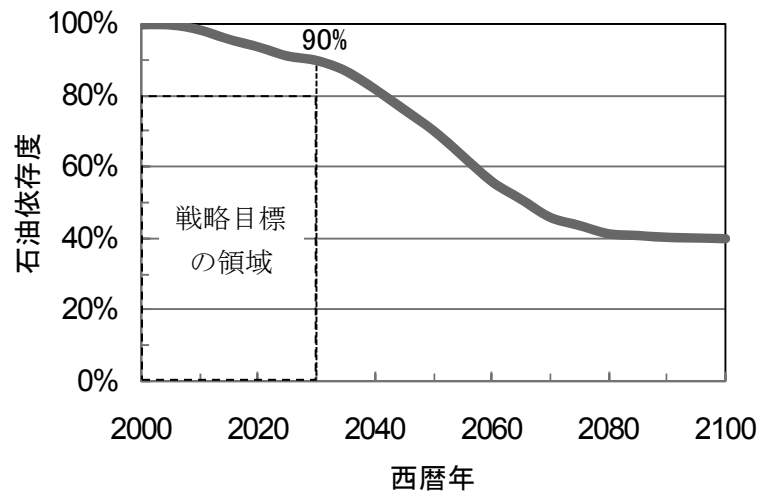


図 6.7 運輸分野における石油依存度の推計

原子力発電の目標である「2030 年以降においても、発電電力量に占める原子力発電の比率を 30～40%程度以上にすることを旨とする」については、本分析結果は2030 年で41%のシェアである。その後も 2050 年で 57%、2100 年で 67%までシェアを伸ばす算定結果となっている。原子力のシェアの大幅な拡大により、二酸化炭素排出削減に大きく貢献できることは、既に 5.2.1 で述べたとおりである。

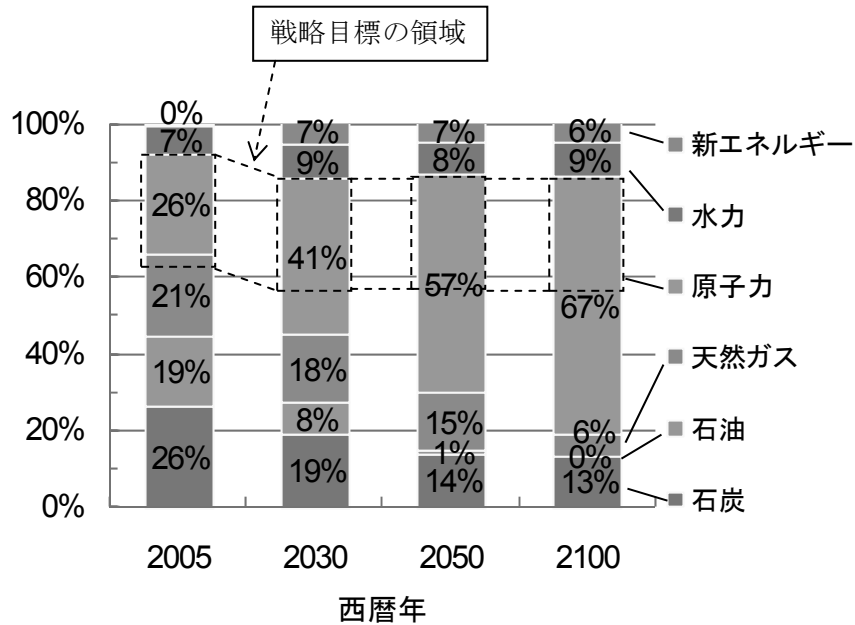


図 6.8 わが国の原子力発電比率の推計

7. まとめ

本報告書は、2100 年原子力ビジョンを作成する際に実施したエネルギー需給分析についてまとめたものである。本分析で提示した原子力ビジョンシナリオは、化石燃料依存の低減、積極的な電化および原子力利用の推進を通じて、二酸化炭素排出削減およびエネルギー安定供給の両立を目指したものである。以下に分析結果をまとめた。

- 一次エネルギー供給量に占める化石燃料の割合が現在の 85%から 30%に縮小する一方で、再生可能エネルギーおよび原子力の割合は現在の 15%から 70%に拡大する。
- 原子力を国産エネルギーとすれば、2100 年のエネルギー自給率は約 70%に達する。
- 2100 年における二酸化炭素排出量を現在（2005 年）の 10%まで低減可能である。2100 年における技術別の削減量は、その半分が原子力に起因する。
- 石炭、石油および天然ガスの消費量を、それぞれ現在（2005 年）の 38%、5%および 74%まで削減可能である。他方、天然ウランの累積消費量は、2100 年で在来型資源の 9%程度である。
- 原子力の拡大利用により、軽水炉等の濃縮ウラン使用済燃料の再処理施設はピーク時で年間 2000 トンの処理規模、FBR-MOX 燃料の再処理施設は 2100 年で年間 1000 トンの処理規模が必要となる。
- 2100 年までに発生する高レベル放射性廃棄物の最終処分には、約 8km² 相当の最終処分場が必要となる。

本分析で示した将来のエネルギー需給像は一つのシナリオに過ぎないが、二酸化炭素排出削減およびエネルギー安定供給の両立を目指した低炭素社会実現の可能性を示すものである。

今後は、制度的枠組みによる開発・導入の誘導や費用対効果を含めたシナリオ分析等により、将来のエネルギー需給像を提案していくことが必要であると考え。また、国内外の機関による他のスタディとさらに広く比較検討することも必要であると考え。

謝辞

本分析は、日本原子力研究開発機構が 2008 年 10 月 16 日にプレス発表した「2100 年原子力ビジョン」の作成に際し実施したものである。分析に必要な技術データの提供や主要な前提条件の設定において貴重なご提案、ご意見およびご助言を頂いた 2100 年原子力ビジョン検討会メンバーである稲垣嘉之氏、大井川宏之氏、菊池満氏、田中拓氏、飛田健次氏、中塚亨氏、三浦幸俊氏、および高速増殖炉導入に関する諸量評価結果を提供頂いた次世代原子力システム研究開発部門サイクル解析グループの小野清氏、大滝明氏、塩谷洋樹氏、そして本ビジョン検討に際しご協力頂いた全ての方々に心からお礼を申し上げます。

参考文献

- [1] 環境省、“気候変動枠組条約・京都議定書”、<http://www.env.go.jp/earth/ondanka/cop.html>
- [2] OECD/ IEA エネルギー技術展望 2008 年版 (Energy Technology Perspective 2008)
- [3] G8 北海道洞爺湖サミットの概要、平成 20 年 7 月
- [4] 環境省、“2050 年日本低炭素社会シナリオ：温室効果ガス 70%削減可能性検討”、2007 年 6 月
- [5] 内閣府、“低炭素社会に関する特別世論調査”の概要”、平成 20 年 7 月
- [6] 日本原子力研究開発機構、“戦略調査室、2100 年原子力ビジョンー低炭素社会への提言ー”、平成 20 年 10 月 16 日プレス発表
- [7] 総務省統計局、<http://www.stat.go.jp/>
- [8] EDMC、“エネルギー・経済統計要覧 2008”、(2008)
- [9] 国立社会保障・人口問題研究所、「日本の将来推計人口 平成 18 年 12 月推計」、平成 18 年 12 月
- [10] 日本エネルギー総合工学研究所、「平成 17 年度エネルギー環境総合戦略調査 超長期エネルギー技術ロードマップ報告書」、平成 18 年 3 月
- [11] 国立社会保障・人口問題研究所、「日本の世帯数の将来推計(全国推計) 平成 20 年 3 月推計」、平成 20 年 3 月
- [12] 経済産業省資源エネルギー庁 総合資源エネルギー調査会 需給部会、“長期エネルギー需給見通し”、平成 20 年 5 月
- [13] 蓮池 宏、「自動車用エネルギーアウトLOOK」、エネルギー総合工学、Vol29 No. 4、2007. 1
- [14] 国土交通省総合政策局情報管理部、「交通関係エネルギー要覧 平成 19 年版」、2007 年
- [15] 原子力委員会、“「高速増殖炉サイクルの研究開発方針について」科学技術・学術審議会原子力分野の研究開発に関する委員会”、第 52 回原子力委員会、2006 年 12 月
- [16] 関本、塩沢、小川、土江、西郷、“なぜ、いま原子力の熱利用なのか”、ENERGY、2006. 6
- [17] 原子力委員会、“地球温暖化対策に貢献する原子力の革新的技術ロードマップ”、平成 20 年 7 月
- [18] 日本原子力産業協会、“高温ガス炉の導入シナリオおよび研究開発ロードマップの検討ー高温ガス炉将来展開検討会 WG2 報告書ー”、平成 19 年 3 月
- [19] 原子力委員会核融合会議開発戦略検討分科会、“核融合エネルギーの技術的実現性計画の拡がりと裾野としての基礎研究に関する報告書”、平成 12 年 5 月 17 日
- [20] 原子力委員会核融合専門部会基本問題検討会、“資料検第 5-2-1 号(2) トカマク型核融合炉の設計とそれに向けた開発戦略”、平成 15 年 7 月 25 日
- [21] 核融合エネルギーフォーラム ITER・BA 技術推進委員会報告書、“核融合エネルギー実用化に向けたロードマップと技術戦略”、2008 年 6 月
- [22] 経済産業省資源エネルギー庁電力・ガス事業部、“電気事業便覧 平成 20 年版”、(2008)
- [23] 資源エネルギー庁、“核燃料サイクルのエネルギー政策上の必要性”、平成 13 年 11 月
- [24] 総合エネルギー調査会新エネルギー部会、“新エネルギー部会報告書～今後の新エネルギー対策のあり方について～”、2001 年 6 月
- [25] 通商産業省 総合エネルギー調査会・新エネルギー部会資料、“新エネルギーの潜在性と経済性”、平成 12 年 1 月

- [26] 後藤純孝、佐藤治、田所啓弘、“我が国の長期エネルギーシステムのモデル化”、JAERI-Research 99-046、(1999)
- [27] EDMC データバンク、<http://www.ieej.or.jp/edmc/>
- [28] 牧、堀内、“サイクル諸量解析コードの機能拡張”、JNC TJ9400 2002-006、(2002.1)
- [29] 原子力ポケットブック、電気新聞
- [30] OECD/NEA IAEA、“Uranium 2007”、(2007)
- [31] OECD/NEA、“発電コスト予測(上)1998 年版”、日本原子力産業会議、(1998)
- [32] 加藤他、“海水ウラン回収プラントの概念設計”、火力原子力発電 1999 年 5 月号
- [33] 玉田正男、他、“モール状捕集システムによる海水ウラン捕集コスト試算”、日本原子力学会和文論文誌、vol. 5、no. 4、2006
- [34] 戒能 一成、“2006年度より適用される新たな総合エネルギー統計についての解説 —総合エネルギー統計の解説/ 2006年度改訂版—”、経済産業研究所、2008年4月
- [35] 資源エネルギー庁、“平成19年度エネルギーに関する年次報告書”、2008年5月
- [36] 林野庁ホームページ、“我が国の森林吸収目標”、
<http://www.rinya.maff.go.jp/seisaku/sesakusyoukai/ondanka/a-3.html>
- [37] 日本国、“京都議定書第3条7及び8に準拠した日本国の割当量に関する報告書”、2007 年 3 月
- [38] 温室効果ガスインベントリオフィス、“日本の温室効果ガス排出量データ (1990～2006 年度)”、2008 年 7 月
- [39] 総合科学技術会議、「環境エネルギー技術革新計画」、平成 20 年 5 月
- [40] 伊藤浩吉、“わが国の長期エネルギー需給展望”、日本エネルギー経済研究所、2006 年 6 月
(<http://www.jaea.go.jp/03/senryaku/seminar/06-8.pdf>)
- [41] 日本原子力産業会議、“2050 年の原子力ビジョンとロードマップ”、2004 年 11 月
- [42] 池田、田下、氏田、松井、“環境、経済、エネルギーの持続的発展のための原子力の役割”、日本原子力学会誌、Vol. 49, No. 5, 2007
- [43] IIASA/WEC：“GLOBAL ENERGY PERSPECTIVES”，(1998)
- [44] OECD/IEA：“World Energy Outlook 2007”，(2007)
- [45] 経済産業省、“新・国家エネルギー戦略”、2006年5月

付録：主要な分析結果の数表

(1) 発電電力量

[千億kWh/年]

西暦年	2000	2005	2010	2020	2030	2050	2100
石炭	2.2	3.0	2.9	2.8	2.6	2.3	2.3
石油	1.9	2.2	2.0	1.6	1.1	0.2	0.0
天然ガス	2.6	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	1.0
原子力	3.2	3.1	3.3	4.4	5.6	9.5	11.6
水力	1.0	0.9	1.0	1.0	1.1	1.2	1.4
新エネルギー	0.0	0.0	0.5	0.7	0.9	1.0	1.0
合計	10.9	11.6	12.1	13.0	13.8	16.5	17.3

(2) 発電設備容量

[GWe]

西暦年	2000	2005	2010	2020	2030	2050	2100
石炭	34	46	44	42	40	35	35
石油	75	71	77	68	52	7	0
天然ガス	58	59	54	61	69	106	52
核分裂	45	48	50	56	72	120	116
核融合	0	0	0	0	0	0	33
水力	46	47	53	56	59	64	78
新エネルギー	1	1	27	42	51	56	57
蓄電	0	0	0	0	0	0	6
合計	258	273	305	324	342	389	377

(3)最終エネルギー消費量

[PJ]

西暦年		2000	2005	2010	2020	2030	2050	2100
電力	実数	3480	3705	3922	4199	4467	5396	5654
	構成比	22%	24%	25%	29%	32%	42%	62%
水素	実数	0	0	0	0	0	207	751
	構成比	0%	0%	0%	0%	0%	2%	8%
化石燃料	実数	12183	11790	11498	10436	9430	7042	2546
	構成比	77%	76%	74%	71%	68%	55%	28%
その他	実数	60	53	57	61	65	135	139
	構成比	0%	0%	0%	0%	0%	1%	2%
合計		15724	15548	15477	14696	13962	12780	9090

(4)一次エネルギー供給量

[PJ]

西暦年		2000	2005	2010	2020	2030	2050	2100
石炭	実数	4267	4814	4485	3895	3691	3296	1807
	構成比	18%	20%	20%	18%	18%	16%	11%
石油	実数	11742	11582	10806	9300	7739	4249	625
	構成比	50%	49%	48%	43%	37%	21%	4%
天然ガス	実数	3502	3508	3122	3128	3213	3637	2603
	構成比	15%	15%	14%	14%	15%	18%	15%
原子力	実数	2924	2682	2746	3669	4421	7115	10012
	構成比	12%	11%	12%	17%	21%	36%	59%
水力	実数	879	760	819	861	844	847	1027
	構成比	4%	3%	4%	4%	4%	4%	6%
新エネルギー	実数	152	149	511	738	830	859	874
	構成比	1%	1%	2%	3%	4%	4%	5%
合計		23466	23495	22489	21590	20738	20003	16947

(5) 二酸化炭素排出量

[百万トン-CO₂/年]

西暦年	2000	2005	2010	2020	2030	2050	2100
二酸化炭素排出量	1251	1261	1155	978	856	585	124
削減率(1990年基準)	-9%	-10%	-1%	15%	25%	49%	89%
削減率(2005年基準)	—	0%	8%	22%	32%	54%	90%

(6) 要因別二酸化炭素削減量

[百万トン-CO₂/年]

西暦年			2005	2030	2050	2100
排出量	対策なし		1294	1295	1283	1141
	ビジョン	実数	1258	856	585	124
		構成比	97%	66%	46%	11%
削減量	原子力	実数	0	122	324	581
		構成比	0%	9%	25%	51%
	その他	実数	36	317	375	436
		構成比	3%	25%	29%	38%

(7)分野別最終エネルギー消費量

[PJ]

西暦年		2000	2005	2010	2020	2030	2050	2100
民生分野	家庭	石炭	4	3	3	2	1	0
		灯油	582	580	528	417	149	0
		LPG	264	297	290	271	152	0
		都市ガス	397	416	407	380	214	0
		電力	925	1016	1031	1028	1115	1003
		太陽熱	33	23	27	35	49	53
		小計	2206	2335	2286	2133	1680	1056
	業務	石炭	39	40	37	32	19	0
		石油	586	502	469	382	173	0
		ガス	370	435	428	411	285	0
		電力	943	1044	1056	1088	1135	1564
		熱	28	30	30	27	25	25
		小計	1966	2051	2019	1940	1880	1589
	合計		4172	4386	4306	4073	3828	2645
産業分野	石炭	1690	1540	1549	1452	1373	1212	0
	核熱	0	0	0	0	0	96	466
	石油	3717	3423	3243	2787	2357	1420	0
	天然ガス	406	500	674	832	1006	1497	1969
	電力	1534	1567	1759	2008	2269	2713	2846
	その他	107	108	108	108	108	108	108
	合計	7454	7138	7333	7186	7113	7047	5390
運輸分野	ジェット油	169	188	200	196	188	163	105
	電力	78	78	77	75	72	155	199
	水素	0	0	0	0	0	207	388
	ガソリン	2071	2176	1989	1785	1628	886	0
	軽油	1480	1358	1347	1155	907	535	138
	合計	3798	3800	3612	3210	2795	1947	830

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質량	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速さ, 速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の)	1
比透磁率 ^(b)	(数字の)	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。

(b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス度 ^(e)	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光強度	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
放射線量の放射能 ^(f)	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
吸収線量, ビエエネルギー分与, カーマ	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活力性	カタール	kat		s ⁻¹ mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。

(b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。

(c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。

(d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。

(e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。

(f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。

(g) 単位シーベルト (PV,2002,70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m ³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ³ m ⁻² kg s ⁻³ =m ² kg s ⁻³
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ⁻³ s ⁻¹ mol

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼンタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60 s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	′	1′=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	″	1″=(1/60)′=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1 MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=100 pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852 m
バイン	b	1 b=100 fm ² =(10 ⁻¹² cm ²)/2=10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600) m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベベル	B	
デジベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ボアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1 cd cm ⁻² =10 ⁻⁴ cd m ⁻²
フォト	ph	1 ph=1 cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1 cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁶ Wb
ガウス	G	1 G=1 Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe= (10 ³ /4π) A m ⁻¹

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 \cdot 」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1 cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フエルミ	f	1 フエルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1メートル系カラット=200 mg=2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリー	cal	1 cal=4.1858 J (「15°C」カロリー), 4.1868 J (「IT」カロリー) 4.184 J (「熱化学」カロリー)
マイクロン	μ	1 μ=1 μm=10 ⁻⁶ m

