

# 我が国の長期エネルギー展望に関する検討

## A Study on Long-term Energy Perspective of Japan

日本原子力研究開発機構  
経営企画部戦略調査室  
室長 佐藤 治

近年、アジアを中心とした発展途上諸国の経済成長とエネルギー消費の増加が著しく、エネルギー安全保障と地球環境保全の両面からエネルギー需給の長期的なあり方について検討することが世界的に重要な課題となっている。そこで、我が国のエネルギー需給の長期展望と原子力エネルギー利用の潜在的可能性に関する検討を行った。この検討では、まず、我が国の今後の経済成長、エネルギー原単位の改善、各種エネルギーの価格と利用可能量等を想定した。次に、これらの前提条件に基づいて原子力エネルギー利用規模の異なる3ケースの長期エネルギーシナリオを作成し、その比較評価を通じて、今後の我が国におけるエネルギー需給のあり方を検討した。この検討の結果、長期的には天然ガスと原子力が重要なエネルギー源となり、また、原子力はエネルギーセキュリティの向上と地球環境保全にさらに大きな役割を果たす潜在的可能性がある、などの所見を得た。

### 1. はじめに

二度にわたる石油危機を経て、我が国は石油代替エネルギーの開発利用を進めるとともに、省エネルギーにも強力に取り組み、石油依存度の低減とエネルギー利用の効率化に成功してきた。しかし、円高等による輸入燃料価格の低下や景気回復の影響もあり、1980年代半ば以降はエネルギー消費が急増するとともに石油の消費が再び増加してきた。そして、いわゆるバブル景気の崩壊後もエネルギー消費はさらに増大し、最近になってやっと落ち着きをみせている。

この間、発電部門では原子力発電と天然ガス火力の導入で急速に増加する電力需要を賄うとともに、石油の消費量を低減してきた。しかし、近年は運輸部門における燃料油の消費増大などによって、石油消費量は概ね横ばいの状態であり、未だに一次エネルギーの約

半分を石油に依存している。さらに、アジア地域の石油需要の増大と輸出余力の低下に伴って、最近では中東からの輸入量が全輸入量の90%近くを占めるに至っている。

一方、巨大な人口を抱えるアジア地域では目覚ましい経済発展が続いており、エネルギー消費量が急速に増加しつつある。地球環境保全に率先して努めながら、エネルギー供給の安定性を確保していくことが、今や先進諸国に共通の重要課題となってきている。

こうした状況の下で、我が国におけるエネルギー需給の長期的なあり方を検討するとともに、原子力利用の可能性と意義を明確にするために、2050年に至るエネルギー需給の定量的な分析を行った。以下に、分析方法と前提条件、エネルギー需給分析結果の概要の順序で、検討内容をまとめる。

なお、この分析は(社)日本原子力産業会議

(現在の(社)日本原子力産業協会)原子炉開発利用委員会ビジョン・ワーキンググループの下で実施したものであり、主要な前提条件と分析ケースについてはビジョン・ワーキンググループ及びその幹事会での議論に基づいて設定を行っている。

## 2. 分析方法と前提条件

### 2.1 分析方法

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と生活様式、経済規模と産業構造などを想定してエネルギーサービスに対する長期的な需要の推移を設定し、一方、供給側では特性の異なる多様な選択肢（エネルギー源、エネルギー技術）の利用可能性を考慮に入れて、資源及び環境面からの制約、今後の技術進歩などを勘案しながら、最も低コストにこのエネルギーサービス需要を満足するための最適なシステムのあり方を検討した。

ここで、長期エネルギー需給シナリオの各ケースについて、一次エネルギーからエネルギーサービスに至るまでの各種エネルギーの需給バランスを確保し、かつエネルギーシステムのコストが最小になるようなエネルギー源、エネルギー技術の組み合わせを見つける手法として、MARKALモデルを使用した。

MARKALとは、IEA（国際エネルギー機関）の実施協定ETSAP（Energy Technology Systems Analysis Programme：エネルギー技術システム解析計画）で共同開発された長期エネルギー需給最適化モデルの枠組みである。分析に使用したMARKAL日本モデルは日本の固有のエネルギーシステム構造に基づき、かつ日本のエネルギー技術の特性をデータベースとして内蔵する日本版のMARKALモデルである<sup>(1)</sup>。

MARKALモデルでは、エネルギー需給に関連した将来見通し、エネルギーシステムの構造、エネルギー技術特性等の一連の入力情

報を与えることによって、例えば検討期間にわたる積算コストを最小化するようにエネルギーシステム構成が最適決定され、最適解に関する出力情報が得られる。この出力情報の内容を吟味し、例えばエネルギー設備の投入規模やエネルギー構成の変化などに非現実的な部分があれば、入力データを手直しして最適化計算を繰り返す。

このように、MARKALは各種エネルギー源と技術を構成要素として組み込み、その特性に応じてエネルギーシステムの最適化を行うモデルである。したがって、最終的に作成されたエネルギー需給シナリオは、モデルという分析ツールを用いて関係諸量間の整合性を確保しながら、実現可能であると分析者が判断して描いた一つ（又は一群）の未来の姿であり、決して、「モデルを使って予測した蓋然性の高い未来」ではないことに留意が必要である。この意味で、「見通し」ではなく「シナリオ」という言葉を使用している。

### 2.2 前提条件

#### (1) エネルギーサービス需要

分析の基本的な条件として、分析対象期間を1990年～2050年、長期割引率を年率3%、2000年以降の為替レートを110円/米国ドルで一定とした。また、一人当たり国内総生産（GDP）は今後増加を続けるものの、総人口が長期にわたって減少傾向を辿るために、GDPの総額は、図1に示すように2030年以降一定で推移するものと仮定した。総人口の将来動向に関しては、国立社会保障・人口問題研究所の平成9年推計<sup>(2)</sup>の中位推計を採用した。2000年から2050年までの期間の年平均GDP伸び率は0.5%である。

以上の前提に加えて、長期的な産業構造変化、産業分野ごとのエネルギー消費原単位の将来的な改善、国土開発と輸送のモーダルシフトの将来動向、エネルギー産業の規制緩和の影響などを考慮して、最終エネルギー消費

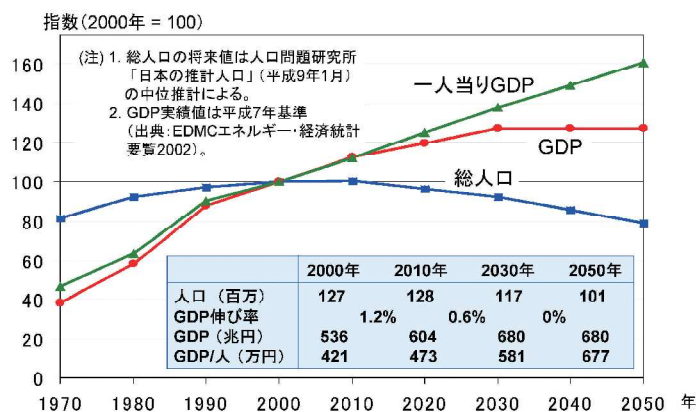


図1 社会経済の長期指標(エネルギーサービス需要設定の前提条件)

部門ごとに分析期間にわたるエネルギーサービス需要量を設定した。

なお、エネルギーサービスの定義として、素材産業では代表素材の生産量(トン)、輸送部門では輸送サービス量(人km、トンkm)、その他のエネルギー消費部門(素材産業以外の産業部門、及び民生部門)では有効エネルギー量(最終消費機器への投入エネルギーからエネルギー利用過程でのロス分を除いたもの、PJ( $10^{15}$ ジュール)で表示)と定義している。

各部門のエネルギーサービス需要は、部門ごとに設定されたエネルギー最終消費機器から供給される。エネルギー最終消費機器としては、既存の機器の他に、高効率の将来技術を適用した機器をモデルに組み込んでおり、供給側の制約、条件に応じて最適な機器が選択され、使用するエネルギー種の切替え、必要エネルギーの低減(省エネルギー化)が可能な仕組みになっている。

また、エネルギー供給側では化石燃料の将来価格、輸入可能量、エネルギー転換技術等(発電、熱供給、石油精製、石炭転換、燃料輸送、他)の特性(耐用年数、稼働率、効率、コスト、環境排出、他)と利用可能規模に対する制約を設定した。

## (2) エネルギーの輸入に関する条件

化石燃料等の輸入価格と輸入量の上限制約を表1に示した。原油の市場価格の長期動向はきわめて不確実性が大きく、的確に見通すのは困難であるが、2050年以前に在来石油の生産がピークとなり、非在来型資源の本格利用が始まるとの見通しが強いことを考慮し、2050年の価格(実質、以下同じ)は2000年の2倍に上昇するものと想定した。LNG価格は、資源量的にみて天然ガスの需給が石油ほどには逼迫しないものと考えて、2050年価格を2000年の1.5倍と想定した。

石炭と天然ウランの価格は、長期的には石油とLNGの価格動向の影響を受けて上昇していくものと思われるが、上昇率は石油やLNGに比べてかなり小さいと想定した。

石油(原油及び各種石油製品)の輸入可能量は長期的に小さくなっていくことを想定した。一方、LNGに関しては2030年以降、石炭に関しては2010年以降、それぞれ制約なく輸入できるものとした。

## 2.3 分析ケースの定義

この需給シナリオの検討では、原子力エネルギー利用規模の異なる3種類のケースを分析した。それらの定義は表2に示すとおりで

表1 輸入燃料に関する前提条件

## ① 輸入燃料価格

		2000年	2010年	2020年	2030年	2050年
原油	(\$/bbl)	20	26	30	34	40
原油	(\$/GJ)	3.54	4.59	5.30	6.00	7.06
LNG	(\$/GJ)	4.01	4.61	5.01	5.41	6.02
石炭	(\$/GJ)	2.00	2.15	2.25	2.35	2.50
天然ウラン	(\$/lbU <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	19.0	21.9	23.8	25.7	28.5

## ② 輸入量の上限制約

		2000年	2010年	2020年	2030年	2050年
原油・石油製品 *	億kIOE	3.04	2.90	2.55	2.18	1.90
LNG	億t	0.53	0.65	1.10	1.60	制約なし
石炭計	億t	1.37	2.02	制約なし		
うち液化油	億tCE			0.10	0.25	0.50

\* 計算モデルでは原油と各石油製品を個別に制約

表2 分析ケースの定義

条件 ケース	CO <sub>2</sub> 排出量 *1	原子力発電	原子力熱利用 *2
A (原子力標準)	2050年: 2010年値の 60%に抑制	2030年～: 70 GWe	2050年: 10 GWt
B *3 (フェーズアウト)		2010年以降新設なし (2005年までに建設の炉 は耐用年数40年で廃止)	なし
C (原子力拡大)		2050年: 90 GWe	2050年: 20 GWt

\*1 国際輸送の排出を含めて制約(2010年のCO<sub>2</sub>排出量(除国際輸送)は1990年水準に抑制)

\*2 原子力熱利用は2020年に実用化することを想定

\*3 ケースBでは、①自然エネルギー利用可能規模拡大、②CO<sub>2</sub>回収・投棄が可能と想定

ある。なお、原則として各ケースは共通条件の下で最適化を行ったが、原子力利用の段階的廃止(フェーズアウト)を想定したケースBでは、原子力利用ケースと同じ条件ではCO<sub>2</sub>排出量の上限制約を満足することができないので、自然エネルギー発電の利用可能規模をやや拡大した。また、火力発電所からのCO<sub>2</sub>回収と投棄(地下の帯水層への投棄)が可能であると想定した。

この検討において想定した、原子力エネルギー利用規模(発電及び熱利用の設備容量)に対する制約を図2に示した。ケースA(原子力標準)では、原子力発電設備が2030年以降一定で70GWe、熱利用炉が2050年に10GWt

になるものと想定した。ケースC(原子力拡大)では、原子力発電設備が2030年に80GWe、2050年に90GWe、また、熱利用炉が2050年に20GWtになるものと想定した。一方、ケースB(原子力フェーズアウト)では、2010年以降原子炉プラントの新設は行わず、2010年以前に建設した原子力発電設備は運転開始から40年経過した後に閉鎖するものと想定した。

以下に、まずケースA(原子力標準)に関して、エネルギー需給水準の長期的推移、エネルギー源構成、電源構成の変化等の概要をまとめた後、ケースB及びCとの比較を示す。

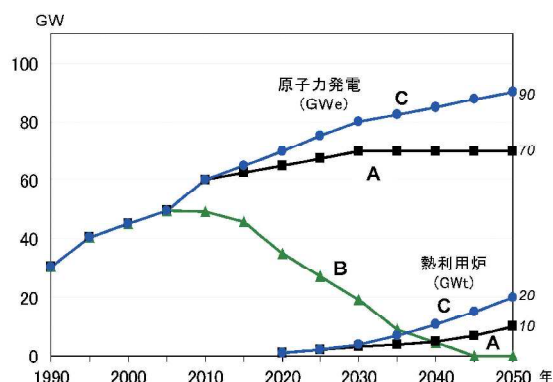


図2 原子力エネルギー利用規模に対する上限制約

### 3. エネルギー需給シナリオの概要

#### 3.1 原子力標準ケース

ケースA(原子力標準ケース)における最終エネルギー消費量(産業、輸送部、及び民生部門の合計)を図3に示した。(1 Exa Joule =  $10^{18}$  Joule = 0.26億トン石油換算)

最終エネルギー消費量全体としては、2030年頃まで横ばいで、その後低下していく。この低下の主な理由は、人口減少、燃料電池自動車等の急速な普及による輸送用燃料消費量の減少などである。2000年~2050年の平均でGDPは年率0.5%増加するが、最終エネルギー消費量は逆に年率0.3%減少し、エネルギー原単位(GDP当たりの最終エネルギー

消費量)は年率0.8%の割合で改善している。なお、もし燃料電池自動車等の高効率技術が利用されないとすると、エネルギー原単位の改善は年率0.6%程度に留る。

エネルギー種別にみると、クリーンで利便性の高い電気の消費が増大して、2050年には最終エネルギー全体の31%を占めている。また、新燃料である水素も2030年頃から本格的な利用が始まり、2050年には全体の1割程度を占めるに至っている。一方、石油製品の消費量は2020年頃まで緩やかに低下し、その後燃料電池自動車の急速な普及に伴う輸送用燃料需要の低減によって急速に減少する。ガス燃料(LPガスを含む)は、石油代替燃料とし

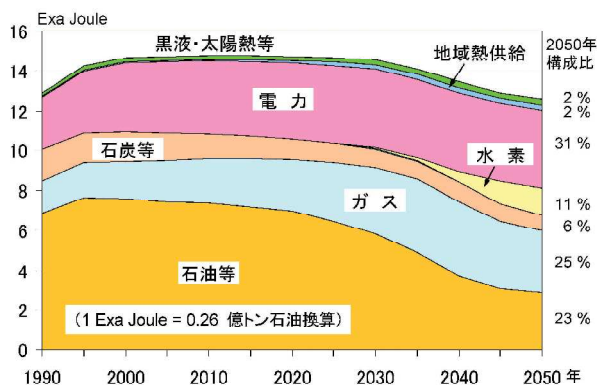


図3 最終エネルギー消費量(原子力標準ケース)

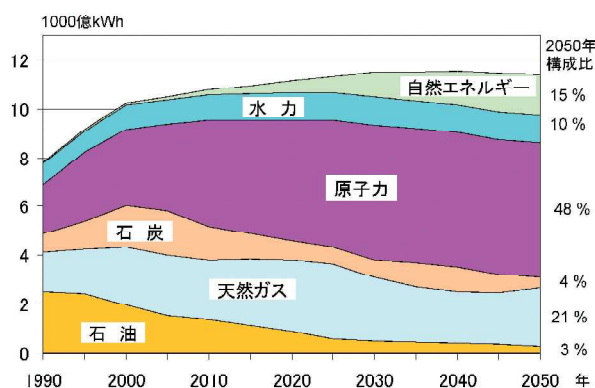


図4 発電電力量と電源構成（原子力標準ケース）

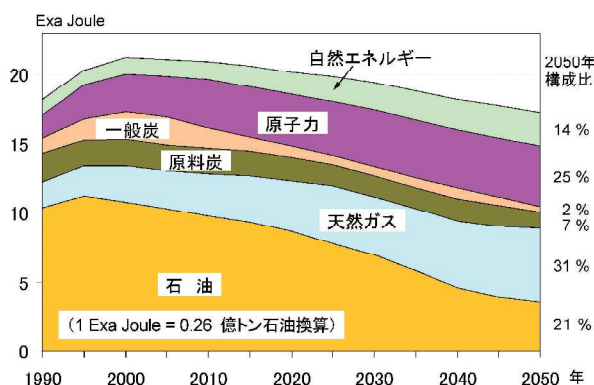


図5 一次エネルギー供給量（原子力標準ケース）

て利用が増加し、2050年には石油製品を上回る消費量となる。

上記のように、今後さらに最終エネルギーの電力シフトが進んでいくが、発電電力量とその電源別構成は図4のように推移する。発電量全体としては2050年に2000年より1割程度（一人当たりでは4割程度）増加している。電源別にみると、2050年には原子力発電が約半分、自然エネルギー（水力発電を含む）が約4分の1、天然ガスが約5分の1を賅っている。なお、2050年における主要な自然エネルギー発電技術の設備容量は、水力2600万kWe、太陽光7000万kWe、地熱200万kWe、風力1000万kWeである。

最終エネルギー消費と発電が上記のように推移する中で、一次エネルギー供給量は図5に示すように変化していく。総供給量で見ると、2050年には2000年に比べて2割弱低下する。このように最終エネルギー消費量に比べて一次エネルギー供給量がより大きく減少していくのは、発電効率の向上、コージェネレーションの利用増加などによって、一次エネルギーから最終エネルギーに変換する効率が向上するためである。ただし、一人当たりで見ると、2050年の供給量は2000年に比べてわずかに増加している。

エネルギー源の構成をみると、石油供給量が徐々に低下して2050年には全体の2割程度

となる。また、CO<sub>2</sub>排出量を厳しく制限しているため、石炭の構成比率も低下し、2050年には1割程度である。これらに代わって、天然ガスの利用が増加し、一次エネルギーに占める比率も2000年の13%から2050年には31%まで上昇していく。天然ガスは発電用燃料、都市ガス用原料のほか、水素製造の原料としても大量に使用されている。2050年の輸入量はLNG（液化天然ガス）換算1.1億トンで、現在の約2倍に増加する。

原子力エネルギーは、上記の前提条件の中で述べた規模で発電と水素製造に利用され、2050年には一次エネルギー全体の25%を占めている。水素製造には主に天然ガス改質法が使用されているが、天然ガス価格の上昇がこの検討での想定よりも大きくなれば、水の熱化学分解法も経済的競争力を持ち得る可能性がある。自然エネルギーは、現在水力発電を中心に一次エネルギーの約6%を賄っているが、長期的には太陽光発電、風力発電等の利用規模が増加し、2050年には構成比率も14%程度まで上昇している。

こうした非化石エネルギー利用の拡大により、化石燃料依存度は2000年の82%から、2050年には61%にまで低下している。また、現在

は一次エネルギー、最終エネルギーともに、約半分を石油に依存しているが、このケースにおける2050年のエネルギー構成は特定のエネルギーに過度に依存しない、バランスのより優れたものとなっている。他方、電源構成に関しては原子力発電が発電電力量の約半分を占めているので、安定的な電力供給を確保するためには、原子力発電の技術的信頼性を十分高める必要がある。

### 3.2 ケース間の比較

#### (1) エネルギー需給

各ケースの発電電力量と一次エネルギー供給量をそれぞれ図6と図7に比較した。なお、最終エネルギー消費はケース間の違いが小さいので、図を割愛した。

発電電力量の電源構成をみると、図6に示すように現在は各電源が満遍なく利用されているのに対して、将来的にはケースAとCで原子力が中心となり、ケースCでは2050年の原子力発電比率が6割に達する。一方、CO<sub>2</sub>排出量の制約が厳しいことを反映して、ケースBでは天然ガスが電源の中心となり、2050年には大雑把に電力の3分の2が天然ガス、残りの3分の1が自然エネルギーによって賄

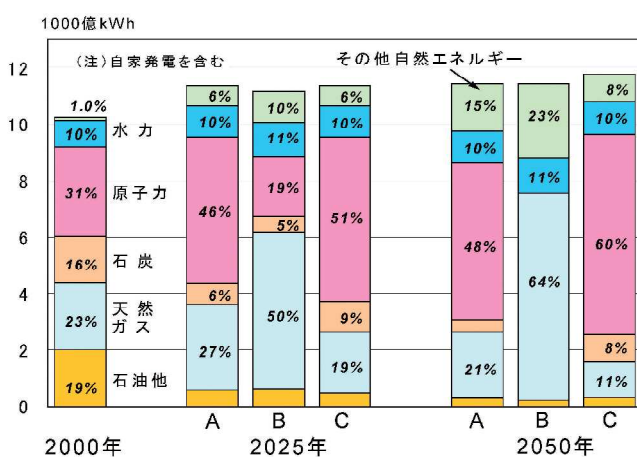


図6 発電電力量

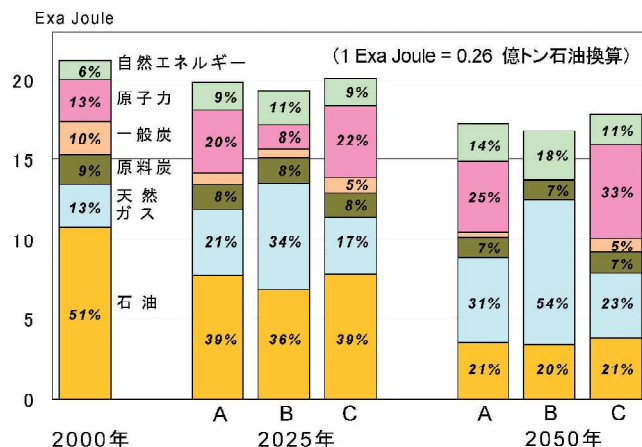


図7 一次エネルギー供給量

われる。

自然エネルギー発電技術の設備規模は表3に示すとおりである。標準ケースでは太陽光発電が2020～2030年に上限制約まで届いていないが、他の時期には上限まで導入されている。原子力フェーズアウトケースでは、各発電技術の上限制約を他ケースより大きく設定したが、それぞれ上限まで導入されている。一方、原子力拡大ケースでは太陽光発電の規模が2030年以降ほとんど拡大しないが、他の技術は上限まで導入されている。

一次エネルギー供給に関しては、図7に示すように、原子力フェーズアウトケースでは

天然ガスのシェアが増大し、2050年には総供給量の50%を超える。一方、原子力拡大ケースでは、原子力のシェアが33%まで高まり、天然ガスと自然エネルギーのシェアが標準ケースよりも低下する。なお、自然エネルギーは現在よりも大幅に増加しているが、原子力フェーズアウトケースでも2050年時点の一次エネルギーに占める比率は18%程度であり、エネルギー全体の中では補助的な役割に留まっている。

なお、化石燃料輸入量は現在よりかなり低減し、特に、原子力エネルギー利用を拡大するケースAとCで減少が著しい。燃料種別に

		(GWe)				
		2000年	2010年	2020年	2030年	2050年
標準ケース(A)	水力	22.2	24	25	26	26
	地熱	0.53	0.7	1.3	2	2
	太陽光	0.28	4.6	10	29	70
	風力	0	1	6	10	10
原子力フェーズアウトケース(B)	水力	22.2	26.5	28	28	28
	地熱	0.53	1	2	3	4
	太陽光	0.28	4.6	25	50	100
	風力	0	1	7	12	12
原子力拡大ケース(C)	水力	22.2	24	25	26	26
	地熱	0.53	0.7	1.3	2	2
	太陽光	0.28	2.5	10	22	26
	風力	0	1	6	10	10

表3 自然エネルギー発電の導入設備規模



は、石油(原油+石油製品)の輸入が大幅に減少し、また、CO<sub>2</sub>排出量の制約が比較的厳しいために、どのケースでも石炭(一般炭)は現在より減少傾向であるが、天然ガスは逆に現在よりも大幅に増大する。原子力フェーズアウトケースでは、2025年に1.35億トン(LNG換算)、2050年には1.85億トン(同)と、現在の約3.5倍の輸入量になる。

## (2) CO<sub>2</sub>排出量

各ケースにおけるCO<sub>2</sub>の総排出量、及び発電と熱供給施設からの排出量を図8に示した。この分析では、2010年の総排出量(国際輸送からの排出を除く)を1990年水準に抑制し、その後は2050年に2010年値の60%水準まで低減することを想定しており、どのケースでも概ねこの制約に沿って総排出量が低下している。

発電と熱供給施設からの排出をみると、2000年には約4億トン(CO<sub>2</sub>、以下同じ)の排出があるが、2050年には約1.3~1.4億トンの水準まで大幅に低下している。各ケースの排出量には大きな差がないが、ケースAとCでは原子力、天然ガス、及び自然エネルギーの利用規模の増加がこの大幅低減に寄与している。一方、原子力エネルギー利用を行わないケースBでは、火力発電の排ガスからCO<sub>2</sub>を

回収し、地下帯水層に投棄することを想定して排出量水準の目標が達成されている。この投棄量は2050年には約1億7000万トン(発電・熱供給施設からの総排出量の54%相当)に達する。

## (3) コスト

上記のエネルギー需給変化はエネルギー供給コストにも大きく影響している。エネルギー供給の年間総コスト(建設費を年経費化して表示した場合)を図9に示した。

ケースA(原子力標準)とケースC(原子力拡大)のコストはほぼ同程度である。ケースB(原子力フェーズアウト)では、建設費の高い自然エネルギー発電を大規模に利用するために資本費が大きくなるとともに、天然ガスの輸入量が増えるために燃料費も大きい。2050年時点では、燃料費のみでは2兆円強、エネルギー供給コスト全体では4兆円弱(18%)の増加となっている。この供給コストの差の大部分は発電部門で発生するので、2050年におけるケースAとケースBの発電コストを比較すると、原子力エネルギーを利用しないケースBではケースAに比べて発電コストが約36%大きい。

一般に、将来のコストには不確実性があるが、特に、輸入燃料の価格は今後の世界的な

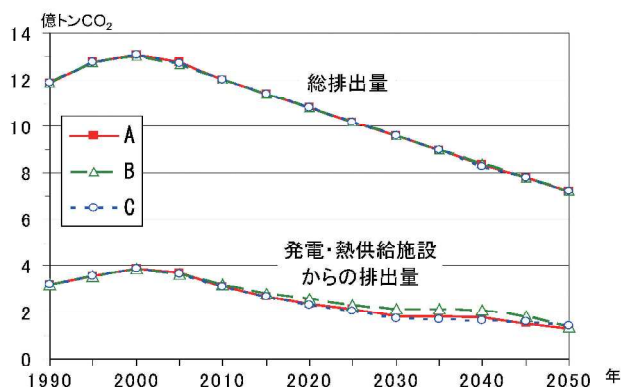


図8 CO<sub>2</sub>総排出量と発電・熱供給施設からの排出量

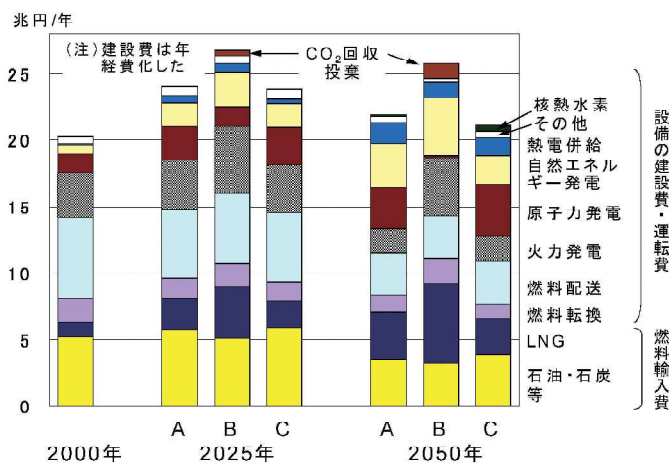


図9 エネルギー供給コスト

エネルギー需給の動向に大きく左右される。ここでは、天然ガス価格（実質）が2050年に2000年の1.5倍になると想定しているが、これをもっと低位で推移すれば上記の燃料費の増加幅は縮小し、逆に天然ガス需要が世界的に増加して価格が高騰すれば、ここで計算した以上に増加することになる。

#### 4. 検討結果のまとめと考察

我が国の今後の経済成長がきわめて緩やかであり、人口が徐々に減少し、また産業構造変化、技術革新などでエネルギー消費原単位が改善していくことを想定しても、2050年には現在よりやや少ない程度の量のエネルギーが必要である。そこで、地球環境の保全も十分に図りながら、このエネルギー需要をどのように満たしていくかが課題となる。

自然エネルギーは、輸入燃料依存度の軽減とCO<sub>2</sub>排出量の低減に有効であるが、国土面積が狭く、人口密度の高い我が国では利用可能な資源規模が限られていることに留意する必要がある。この検討では、原子力フェーズアウトケースで自然エネルギー利用の大幅な拡大を想定しているが、それでも2050年で一次エネルギーの2割弱、発電の3分の1程度

の貢献に留まり、長期的にみても補助的エネルギー源と位置づけるのが妥当である。

化石燃料の中では、資源量が大きく価格も安い石炭が魅力的であるが、先進諸国では将来的にCO<sub>2</sub>排出量を大きく減らしていくことが求められる可能性が強いことを考慮すると、石炭への依存を強めることは難しい。また、石油の消費も極力減らしていく必要があるので、長期的には、他の先進諸国と同様に天然ガスへのシフトが不可避であると考えられる。ただし、天然ガス利用の大幅な拡大のためには、国土幹線パイプラインの整備などの大きな課題が残されている。

地球温暖化防止の観点からは、天然ガス利用にシフトし、自然エネルギーを最大限に活用するだけでは、とても対応しきれない。もし、CO<sub>2</sub>排出量の厳しい抑制が必要になった場合には、CO<sub>2</sub>回収・投棄のような高コストの手段に頼らざるを得ないが、それが現実にとどの程度の規模で実施し得るかも不確かである。このように、我が国が地球環境保全を図りつつエネルギー安定供給を確保していくためには原子力という選択肢は欠かせない。

上記の分析によれば、原子力エネルギーに対する潜在需要は、今後半世紀程度を展望し

ても、現在の利用規模をはるかに上回っている。標準ケースでは、2050年に一次エネルギー供給の25%、発電の48%を原子力が賅っており、これによって化石燃料依存度が一次エネルギーでは61%に、発電では27%にまで下がっている。また、原子力を利用すれば低コストでCO<sub>2</sub>排出量を現在より大幅に低い水準に抑制することも可能となる。

なお、上記検討はあくまで原子力の潜在的役割を論じたものであることを強調したい。原子力を基幹エネルギーの一つと位置づけて利用していくためには、現実にはまだまだ多くの課題が残されている。原子力の利用率を今後さらに高めようとするれば、技術的信頼性の一層の向上、また、利用拡大に対する国民の支持が不可欠である。電力市場の自由化

とエネルギー安定供給や環境保全などの公益的目標とを両立させるための制度、措置の整備も重要である。さらに、長期にわたって持続可能な、かつ核拡散抵抗性の高い燃料リサイクルシステムの確立に向けて、関連技術の開発に拍車をかけるとともに、国が関係機関の協力を得てその実用化に明確な道筋をつけることも重要課題である。

#### 参考文献

- (1) 佐藤治, 下田誠, 立松研二, 田所啓弘: 我が国における二酸化炭素削減戦略と原子力の役割, JAERI-Research 99-015 (1999).
- (2) 国立社会保障・人口問題研究所編: 日本の将来推計人口—平成9年1月推計, 厚生統計協会 (1997).