

## 2030 年、2100 年に向けた世界の原子力発電、ウラン需給の超長期シナリオ

小宮山 涼一\* 柿木 達朗\*

### 【要約】

#### 2030 年までの原子力発電設備の長期シナリオ

2030 年までの世界の原子力発電設備量を展望すると、2005 年の 3 億 8,500 万 kW から、2030 年には約 5 億 kW ~ 5 億 7,000 万 kW に増加する。またアジアでは、2005 年の 8,200 万 kW から 2030 年には約 1 億 9,000 万 kW ~ 2 億 2,000 万 kW へ増加する。なかでも電力需要の急増が見込まれる中国の原子力発電設備は、2005 年の 700 万 kW から、2030 年には約 5,000 万 kW ~ 5,300 万 kW、同様にインドでは、300 万 kW から 3,200 万 kW ~ 4,000 万 kW へ拡大する。この結果、世界の原子力発電設備量は、2030 年に向けて、1 億 1,400 万 kW ~ 1 億 8,300 万 kW 増加し、アジアではその大半を占める 1 億 900 万 kW ~ 1 億 3,600 万 kW 増加するため、アジアを中心に世界の原子力発電設備の導入が拡大する。

#### 2030 年までのウラン需給の長期シナリオ

世界的な原子力発電の導入増加に伴い、世界のウラン需要も 2004 年の 6.7 万 tU(ウラン換算トン)から、2030 年には 8.7 万 tU ~ 10.0 万 tU へ拡大する。一方、世界のウラン供給能力は、2004 年の 4 万 tU から、2030 年には 6.5 万 tU ~ 8.7 万 tU へ増加する。この結果、2004 年現在、世界のウランの需給バランスは、2.6 万 tU の供給不足であるが(不足分は核兵器解体ウラン等の二次供給により充足)、確定中のウラン探鉱・開発プロジェクトが今後順調に進めば、世界のウラン供給能力は 2030 年のウラン需要とほぼ均衡する。一方、当該プロジェクトの進展が停滞する場合、最大で 3.6 万 tU の供給不足が発生し、世界のウラン需要と供給は 2030 年にむけてタイト化する可能性があり、二次的供給源(核兵器解体ウランや民間在庫など)が不可欠になる可能性が高い。ウラン資源の可採年数は約 70 年で、資源面での制約は 2030 年まで顕在化しないが、ウラン資源開発には 10 年前後の長期の開発期間が必要なため、開発投資がタイムリーに進まなければ、ウラン供給不足を招き、ウラン価格高騰を助長する可能性がある。現在計画中のカザフスタン、オーストラリア、カナダ、アメリカ等でのウラン探鉱・開発プロジェクトが今後着実に進展するかどうか重要なポイントになる。

#### 2100 年までの原子力発電、ウラン需給の超長期シナリオ

2100 年という超長期的タイムスパンで、地球温暖化対策の強化や、それに伴うエネルギー源の多様化が国際的に進めば、世界の発電構成は、21 世紀後期にかけて CO<sub>2</sub> 排出原単位の大い石炭火力が大幅に減少し、原子力の導入が着実に拡大する。そのなかで、可採年数約 70 年のウラン資源を燃料とする軽水炉は、2080 年までは導入が拡大するが、2080 年以降、ウラン資源の制約が働くため、設備量、発電量は減少に転じる。一方で、核燃料サイクル技術によるプルトニウムの持続的な利用により、2050 年以降にプルトニウムを燃料とする高速増殖炉が導入され、2100 年にかけて、資源面での制約を受ける軽水炉にかわり高速増殖炉の導入が進み、発電構成に占める原子力の持続的な拡大が期待される。この結果、2100 年における電源の中で原子力は最大のシェアを占める。

軽水炉で消費されるウラン資源は可採年数約 70 年の有限な枯渇資源であり、超長期的に原子力を利用するには、高速増殖炉による本格的なプルトニウム利用が重要となる。このため、プルトニウムの利用や、ウランのリサイクル利用により原子力の資源価値を大幅に引き上げるとい核燃料サイクルの意義を理解し、グローバルな視点から超長期的視野でバックエンド技術、高速増殖炉開発を進める必要がある。とくに日本は、国際的に優位性を持つ原子力先進国として培った技術・ノウハウなど開発支援・安全/運用管理、周辺機器・設備の供給等も含めて、さらに発展させ、国際的な原子力技術開発を主導する積極的な役割を担うことが期待される。

\* (財)日本エネルギー経済研究所 計量分析ユニット 研究員

## 1. はじめに

経済のグローバル化を背景に、アジア途上国の工業化、都市化が急速に進むなか、世界のエネルギー消費は増え続け、エネルギー供給面での世界的な量的不足や脆弱性の高まり、地球環境問題の深刻化が一層懸念されてきている。この背景には、中国、米国を中心とする石油などエネルギー需要の大幅な伸び、国際石油市場における原油生産および石油精製設備の供給余力の低下、イラク、サウジアラビア、ナイジェリア等におけるテロ、紛争による供給支障の懸念などが挙げられる。このように国際エネルギー市場の不安定性が増す中、エネルギー需給の安定確保が、より重要な課題として位置づけられている。また、地球環境問題に関しては、ロシアの批准によって京都議定書が 2005 年 2 月に発効し、議定書附属書 B 国は温暖化ガス排出抑制義務が正式に課せられた。さらに、第 1 約束期間(2008 年～2012 年)、それ以降の期間を含めた長期的視点に立った地球温暖化対策の強化が、先進国のみならず発展途上国を含めて、国際エネルギー安全保障体制を考える上で重要な課題となっている。

こうした国際エネルギー市場の不安定化、地球環境問題に対処するエネルギー供給オプションとして、現在、原子力が脚光を浴びている。とくに、エネルギー安定供給の確保、地球温暖化対策の強化の観点から、原子力発電の新設が約 30 年間無い米国や、脱原子力政策を進めてきた欧州各国に原子力を再評価する動きが出始めつつある。わが国においても、新・国家エネルギー戦略において発電量に占める原子力シェアの長期目標を 3 割～4 割以上に定めるなど、原子力を基幹的なエネルギー供給源として位置づけており、各国の原子力政策動向が、国際エネルギー需給に及ぼす影響が徐々に拡大するとみられる。なかでも、旺盛な経済成長を背景に、電力消費が急増している中国、インドをはじめとするアジア諸国は、原子力開発が最も活発な地域のひとつであり、今後の動向に注目が集まる。

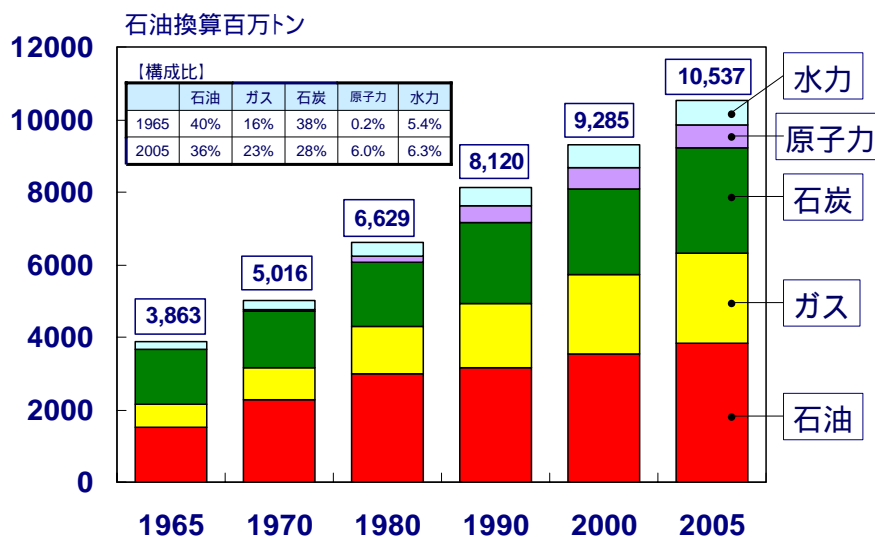
そこで本研究では、最近の世界各国の原子力政策、開発動向を踏まえ、2030 年、さらには、までの原子力導入量、ウラン需給を予測し、これに基づき、長期的に原子力が国際エネルギー需給構造に与えるインパクトを定量的に分析する。

## 2. 原子力開発の動向

### 2-1 原子力(一次エネルギー供給)

世界の一次エネルギー消費は、着実な経済成長を背景に、アジア途上国を中心として増加を続けており、1965 年の 39 億石油換算トン(TOE)から、年平均 2.5%で増加し続け、2005 年には 105 億 TOE に達している(図 2-1)。

図2-1 一次エネルギー供給の推移



(出所) BP"BP Statistical Review of World Energy 2006"より(財)日本エネルギー経済研究所作成

そしてこの堅調な世界のエネルギー消費の拡大に対し、供給面では石油が現在まで一次エネルギー供給の中心にある。石油は、発電部門での燃料転換により供給が減少基調で推移したが、堅調な交通部門での需要に支えられ、1965年から2005年の年平均増加率は一次エネルギー消費の増加率と同じ2.5%であり、2005年時点でもエネルギー消費全体の36.4%を占め、世界のエネルギー供給の中核的な燃料源となっている。そしてこの間、2度の石油危機を契機として石油代替エネルギーの導入が進んだが、その中で最も顕著な増加を示したのが原子力であり、1965年から2005年までの年平均増加率は12.4%に達している(石油2.5%、ガス3.5%、石炭1.7%)。その結果、原子力が一次エネルギーに占めるシェアは1965年から2005年にかけて0.2%から6.0%へ増大している。1951年、世界初の原子力発電がアメリカで開始されて以来、2度の石油危機を経て、世界各国で原子力発電の開発が積極的に進められてきたが、1980年代後半以降のエネルギー価格の低迷を受けて、世界的に原子力発電設備容量の伸びが低くなった。しかし、アジア地域に限定して見ると、着実に原子力発電設備容量が増加している。

## 2-2 原子力設備容量

世界の原子力発電設備容量は、2005年12月末現在、運転中の設備で439基、3億8,505万kWに達する(表2-1)。建設・計画中(75基、計7,147万kW)の原子力発電設備を含めると計514基、4億5,652万kWへ拡大している。エネルギー安定供給の確保、地球温暖化対策の強化の観点から、原子力発電を再評価する動きに後押しされ、原子力設備容量は着実に増加している。

表2-1 世界の原子力開発の動向(2005年12月末現在)

|        | 運転中    |      |     | 建設中・計画中 |      |    | 合計     |      |     |
|--------|--------|------|-----|---------|------|----|--------|------|-----|
|        | 出力     | 構成比  | 基数  | 出力      | 構成比  | 基数 | 出力     | 構成比  | 基数  |
| アジア    | 8,185  | 21%  | 106 | 4,648   | 65%  | 46 | 12,833 | 28%  | 152 |
| 中国     | 700    | 2%   | 9   | 930     | 13%  | 10 | 1,630  | 4%   | 19  |
| 韓国     | 1,772  | 5%   | 20  | 960     | 13%  | 8  | 2,732  | 6%   | 28  |
| 日本     | 4,822  | 13%  | 54  | 1,666   | 23%  | 13 | 6,488  | 14%  | 67  |
| 台湾     | 514    | 1%   | 6   | 270     | 4%   | 2  | 784    | 2%   | 8   |
| インド    | 331    | 1%   | 15  | 392     | 5%   | 8  | 723    | 2%   | 23  |
| 他アジア   | 46     | 0%   | 2   | 430     | 6%   | 5  | 476    | 1%   | 7   |
| 北米     | 11,617 | 30%  | 121 | 0       | 0%   | 0  | 11,617 | 25%  | 121 |
| アメリカ   | 10,275 | 27%  | 103 | 0       | 0%   | 0  | 10,275 | 23%  | 103 |
| 西欧     | 13,890 | 36%  | 152 | 330     | 5%   | 2  | 14,220 | 31%  | 154 |
| フランス   | 6,602  | 17%  | 59  | 160     | 2%   | 1  | 6,762  | 15%  | 60  |
| ドイツ    | 2,137  | 6%   | 17  | 0       | 0%   | 0  | 2,137  | 5%   | 17  |
| イギリス   | 1,279  | 3%   | 23  | 0       | 0%   | 0  | 1,279  | 3%   | 23  |
| ロシア・東欧 | 4,187  | 11%  | 52  | 1,381   | 19%  | 17 | 5,568  | 12%  | 69  |
| ロシア    | 2,356  | 6%   | 31  | 407     | 6%   | 5  | 2,763  | 6%   | 36  |
| その他    | 627    | 2%   | 8   | 787     | 11%  | 10 | 1,414  | 3%   | 18  |
| 世界計    | 38,505 | 100% | 439 | 7,147   | 100% | 75 | 45,652 | 100% | 514 |

(出所) (社)日本原子力産業協会“世界の原子力発電開発の動向”より(財)日本エネルギー経済研究所作成

アジア地域では、現在、日本、韓国、中国、台湾、インド、パキスタン、インドネシアの7か国で原子力発電所の運転、建設、計画が進められている。アジアでは、2005年12月末現在、運転中の原子力発電所の設備容量は8,185万kW、106基であり、世界全体の設備容量(3億8,505万kW)の21%を占める。また、アジア各国では原子力発電開発に活発な動きを示しており、現在建設・計画中の原子炉は46基、合計出力4,648万kWで世界の建設・計画中の設備量(7,147万kW)の65%を占め、アジアが世界の原子力開発の中心になっている。活発化したアジア地域の原子力発電開発は、今後、電力需要の大幅な増加が予測される中国とインドを中心に、さらに加速化すると見込まれる。

北米で、建設・計画中の原子力発電所は存在しないが、運転中設備は 121 基、発電設備容量は 1 億 1,617 万 kW で、世界全体の 30% を占める。アメリカでは、原子力発電所の運転期間の延長が進む一方、近年、原子炉の新規建設を目指す動きが顕著になり、カナダでも原子炉の建設計画が具体化しつつある。北米での原子力発電再評価の背景には、増大する電力需要への対処を迫られた州や連邦政府が積極的に原子炉建設を支援していることが挙げられる。

西欧では、2005 年 12 月末現在、西欧全体で運転中の原子力発電設備は 152 基、1 億 3,890 万 kW に達し、西欧全体の電力供給の約 3 割を担う。欧州では、国際的な送電網が発達し、電力の国際取引も盛んに行われており、特にフランスが原子力による発電電力を西欧諸国に供給している。欧州各国は、1970 年代の石油危機を契機に、石油代替電源として大規模な原子力発電開発を行ってきた。また、1990 年代に入り、地球温暖化への対応策としても、原子力発電は温室効果ガスを排出しない電源として、その重要性が再び注目されている。1979 年の米国でのスリーマイルアイランド原子力発電所事故、1986 年のチェルノブイリ事故は、イタリア、スウェーデン、ドイツなどの国々を脱原子力政策に踏み切らせ、再生可能エネルギー発電の導入が積極的に進められてきた。しかし、エネルギーの安定供給や、地球温暖化への対策として、原子力政策の見直しも再び視野に入ってきている。脱原子力政策を推進してきたドイツ、スウェーデンでは政策の転換が示唆され、イタリアでもフランスの欧州型炉建設計画への参加など、再評価の動きが出始めている。

ロシア・東欧では、運転中の原子力設備は、52 基、合計出力 4,187 万 kW で、世界全体の設備の 11% を占める。ロシアでは、2030 年までに原子力シェアを 25% まで高めることを目標に、新規発電所 40 基の建設が検討され、2005 年には、海上浮遊型原子力発電所が計画されるなど、原子力開発に積極的な動きが見られている。東欧州諸国は全般的にエネルギー資源に乏しく、化石燃料、核燃料とも輸入に依存している。そのため、旧ソ連時代から、エネルギー供給の中心として原子力発電所が建設され、ソ連崩壊後も燃料供給、技術指導など、ロシアが積極的に支援してきた。しかし、これらの国々が欧州連合 (EU) 加盟実現に向けて歩みだしたことにより、老朽化した旧ソ連製原子炉の閉鎖や近代化が求められ、原子力事業は大きな転換期を迎えている。ウクライナはロシアからの天然ガス供給停止に直面し、新規原子力発電所の建設計画が浮上し、2008 年から 100 ~ 150 万 kW 級の発電所新設に着手するほか、炉型の選定などで国際入札を実施することが示唆されている。

### 3. 主要国における原子力政策の動向<sup>文献(2)-(11)等参照</sup>

#### 3-1 欧米の動向

##### 3-1-1 アメリカ

アメリカでは 1979 年のスリーマイル島事故以後、原子力発電の新規建設を凍結していたが、近年の原油価格の高騰、地球温暖化対策の強化を背景に、原子力建設再開へ向け政策を転換している。近年では、原子力安全規制の規制緩和、合理化を背景に、減価償却を終えた原子力が存在感を高めており、基数で見ると 1990 年 111 基から 2005 年 103 基へ減少しているが、発電電力量は 1990 年を上回る状況にある(原子力発電量: 1990 年 607TWh、2005 年 822TWh)。

アメリカでは、1990 年代初頭、卸電力市場の自由化により、電力販売に競争原理が導入された。その際、ガス価格が当時安定的に推移していたこと、ガス導管の許認可権限が連邦政府へ一元化され導管建設が容易になったことなどが後押し、石炭火力、水力、原子力などの主要電源に対して、天然ガス火力の建設が大幅に増加した。1990 年代、発電電力の伸びの約 9 割がガス火力となっている。しかし、石油価格高騰に連動したガス価格高騰により、ガス火力の発電原価の経済的な優位性は低下した。こうした中、固定費の割合が高く、燃料費の割合が低い原子力の経済的優位性が明らかになり、ブッシュ政権は、2001 年 5 月、原子力の新設を盛り込んだ「国家エネルギー政策」(NEP) を発表し、原子力の拡大方針を明言した。さらに、米国エネルギー省 (EIA/DOE) は 2002 年、2010 年までに新規原子力発電所を建設、運転を開始することを目的とした「原子力 2010 (Nuclear Power 2010)」プログラムを発表するとともに、「第 4 世代原子力システム (Generation-IV)」(ナトリウム冷却高速炉、超高温ガス炉、ガス冷却高速炉、超臨界圧水冷却炉、鉛冷却高速炉、溶融塩炉の 6 つの炉型) の開発を提唱し、2005 年 2 月に、日本、カナダ、フランス、イギリス及びアメリカの間で、研究・開発協力の国際協定が締結された。その

後、2005年8月に、石油依存度低減、温暖化ガス排出抑制の手段の1つとして原子力発電の開発促進を織り込んだ包括エネルギー法案(EPACT2005)が成立し、政府は、建設遅延の際の費用増を政府が保証する制度、新設炉の発電電力への税制優遇措置を設定している。

バックエンド政策の動向に関しては、高レベル放射性廃棄物の処分場をネバダ州ユッカマウンテンに建設することが2002年7月に決定された。さらに2006年2月には、米国エネルギー省は再処理再開の方針を示し、新しい再処理技術の開発と、国際的な核燃料サイクルの枠組みを「Global Nuclear Energy Partnership(GNEP)」で提示し、カーター政権以来約30年間続いていた使用済み燃料の直接処分路線を放棄し、再処理路線への転換を決定した。そこでは、核不拡散体制を強化するために、原子力発電用の燃料・技術を「提供する国」と「提供を受ける国」に区分けし、開発途上国を含め世界規模での原子力発電の利用を提案している。再処理技術の開発を進め、2011年頃実証試験を行い、その後、年間2,000トン規模の再処理工場を運転する意向である。

### 3-1-2 イギリス

イギリスにおいてもアメリカと同様、90年代の電力自由化の影響で、初期投資の大きい原子力開発が停滞し、経済優位性があり、かつ、環境問題への配慮から、ガス火力発電が大きく拡大した。イギリスでは1986年のチェルノブイリ原発事故後、脱原発路線を選択し、2005年4月には原子力廃止措置機関「NDA」が発足し、以後の同国における原子力発電所の新規建設の動きは無くなりつつあった。これによりイギリスの発電量に占める原子力のシェアは、1990年代には30%台で推移していたが2005年には20%まで低下している。また、現在稼働中のプラントの大半が、1950～70年代に建設されたマグノックス炉<sup>1</sup>であるため、老朽化が進み、順次、閉鎖することを政府は決定し、閉鎖分を再生可能エネルギーにより電力供給を行う方針を示していた。今後原子力発電所の新規建設や寿命延長が行なわれなければ、長期的に発電シェアは10%以下まで低下する見込みである。

しかし、ブレア政権は2006年7月、今後の長期エネルギー政策として、原子力発電所の新規建設を盛り込み、これまでの原子力政策を転換する動きを示した。2006年7月発表の「The Energy Challenge Energy Review Report 2006」では、地球温暖化防止に向けた2015年までの石炭火力の閉鎖、及び2023年までの1,000万kW相当分の原子力発電所閉鎖などから、2025年までに2,500万kWの新規電源が必要になるとの分析結果が報告され、エネルギー安定供給確保およびCO<sub>2</sub>排出抑制の観点から原子力プラント新規建設に非常に前向きな姿勢を打ち出し、将来の電源構成の中で一定の役割を果たすと評価され、プラント新設の必要性が明記されている。同書では、原子力発電所の新設についての具体的な計画は盛り込まれなかったが、将来において検討する可能性は排除しないと報告されている。

### 3-1-3 ドイツ

ドイツでは、1998年の総選挙で、社会民主党(CDN)が、キリスト教民主同盟(SPD)を破り、緑の党との連立政権が樹立され、シュレーダー内閣が誕生した。その後、連邦政府は電力業界を始めとする産業界と、段階的な原子力発電の閉鎖について協議を行い、2001年6月に、連邦政府は2020年までには19基全ての原子力発電所を順次閉鎖する方針を示した。原子力発電所の運転期間については、送電開始から基本的に32年とした上で、この規定の発電量に達した原子力発電所から順次、閉鎖されることとなっており、2003年11月にはじめての原子力発電所(シュターデ発電所、PWR)の閉鎖が行われ、2005年にはオブリッヒハイム発電所(PWR)が閉鎖された。2005年9月の総選挙の結果誕生した CDN と SPD による連立政権においては、原子力政策に関する両党の見解が一致しなかったため、前政権の脱原子力政策が継続されている。しかし現実には、脱原子力政策をとる一方、軽水炉でのMOX燃料の利用を進め、フランスからの電力輸入が大きく、実態は原子力への依存度が高い。

前政権は再生可能エネルギーの拡充と省エネに力を注いだ。再生可能エネルギーのコストは電気料金上昇の一因となった。ドイツの電力価格は、再生可能エネルギー法の施行などを背景として上昇しており、2001～2004年の3年間で、家庭部門の電力価格は01年12セント/kWhから04年に20セント/kWhへ、産業部門では4セン

<sup>1</sup> マグノックス炉は、原子力開発初期段階(1950年～1960年代)に開発された炭酸ガス冷却炉で、英国原子燃料会社(BNFL)の所有であったが、軽水炉に比べ経済性が低く、老朽化が目立つため、NDAに移管された。

ト/kWh から 8 セント/kWh へ上昇している。このため、ドイツ産業連盟などの産業界は産業の競争力低下を恐れ脱原発見直しの声も上がっている。現在、ドイツの電力消費量は微増傾向にあり、代替電源である天然ガス火力は、燃料の約 30% をロシアから輸入している。しかし、2005 年にはロシア - ウクライナ間に天然ガス問題が発生し、末端のガス輸入国であるドイツも大きく影響をうけている。このため、エネルギー安定供給確保の観点からも、原子力再評価の動きが同国では活発化しつつある。

### 3-1-4 フランス

原子力発電設備量はアメリカに次ぐ第 2 位を誇り(2005 年末現在、アメリカ:1 億 275 万 kW、フランス 6,602 万 kW)、総発電電力量に占める原子力の割合は 2005 年現在、79% となっている。周辺各国のイタリア、イギリス、ドイツなどに総発電電力量の約 1 割の電力を輸出している。フランスでは、使用済燃料を再処理して得られるプルトニウムを MOX 燃料に加工して軽水炉で使用するプルサーマルが 1980 年代後半から行われている。また原子力プラント開発では、1989 年には仏フラマトム社と独ジーメンス社の共同で EPR (欧州加圧水型炉) の開発に着手した。

1997 年発足された連立政権(社会党、共産党、緑の党)が反原子力政策を提唱し、1998 年のスーパーフェニックス炉の廃止など原子力政策が大きく変更する可能性が指摘されたが、2002 年 5 月の大統領選挙で原子力推進派のシラク大統領が再選され、今後も原子力推進の方針が継続される見込みである。フランスの現政権は、2005 年 7 月に制定されたエネルギー政策法で、エネルギー安定供給の確保、エネルギー価格競争力の確保、温室効果ガスの削減などが政策目標として掲げられ、将来にわたる原子力発電の継続を明確に示している。現在、フランス電力公社(EDF)は 2012 年にフラマンビル 1 号機 (EPR、160 万 kW) の運開計画を掲げているほか、2006 年 1 月、シラク大統領は 2020 年までに第四世代の原型炉を運転開始すると発表し、フランスは第四世代国際フォーラム(GIF)のメンバー国の 1 つとなっている。EDF は 2040 年頃から第 IV 世代と呼ばれる次世代原子炉を段階的に導入する方針である。2009 年に高速炉「フェニックス」が閉鎖予定であるが、プルトニウムを有効な資源として位置づける姿勢に変化は無い。

### 3-1-5 ロシア

ロシア政府は原子力を重要なエネルギー供給源として位置付け、原子力省を中心に積極的な開発を続けている。ロシアでは、運転中 31 基の原子力発電所のうち 6 割が老朽化しているといわれており、既存原子炉のリプレースが重要な課題となっている。ロシア政府は、2003 年に 2020 年までのエネルギー戦略を策定し、その中で原子力発電推進により、電源構成の多様化を図ることを目標に掲げている。また、バックエンド政策に関しては、ロシアでは海外の使用済燃料受け入れを禁じていたが、プーチン大統領は 2001 年 7 月、海外からの使用済燃料の輸入を解禁する関連法案に署名し、同法が成立した。2003 年 7 月、カミヤノフ首相が使用済燃料輸入の条件と手続きを定めた政令に署名したことにより、国外から持ち込まれた使用済燃料の中間貯蔵が可能となっている。原子力省は、今後 10 ~ 20 年間に、外国からの使用済燃料を最大 2 万トン受け入れることにより、少なくとも 200 億米ドルの収入が得られると試算している。また、原子力開発に関しては、ロスエネゴアトム社は世界初の海上浮遊型原子力発電所の建設を提唱し、2010 年秋の運開を予定している。

## 3-2 アジアの動向

### 3-2-1 中国

中国で稼働中の原子力発電所は、2005 年末現在 9 基、計 700 万 kW である。2005 年の総発電電力量約 2.5 兆 kWh の 2% となる 503 億 kWh を原子力が供給している。建設中、計画中の原子力発電所は計 10 基、930 万 kW である。経済発展に伴い、中国の電力消費は一次エネルギー消費以上に大幅な伸びを示している。このため、中国の多くの地域で電力需給が逼迫し、輪番停電などの電力供給制限が実施された。こうした状況を打開するため、電力設備の増強が重要なエネルギー政策の課題として位置付けられている。

現在、中国の電源構成において最も大きな割合を占めるのは、石炭火力である。ここ数年、多くの石炭火力発電所が建設・拡充されている一方、石炭の需給が逼迫し、発電用の石炭価格が上昇しており、その結果、発電企業はコスト増から減益を余儀なくされている。また環境汚染や炭鉱事故の多発、非効率な操業を行う中小炭坑、石炭輸送のボトルネックなど多くの問題を抱えている。こうした問題を受け、石炭火力への依存の低減が唱えられており、原子力、天然ガス火力、再生可能エネルギーなどといった環境への負荷が低い電源の開発が、石炭火力と並行して積極的に進められている。2004 年 3 月に発表した国家電力網会社の「第 11 次電力産業 5 年計画」では、2020 年時点の総発電設備容量を、9 億 5,100 万 kW（水力：2 億 3,000 万 kW（シェア 24.2%）、石炭：6 億 500 万 kW（同 66.1%）、天然ガス：6,000 万 kW（同 6.6%）、原子力：3,600 万（同 3.8%）、再生可能エネルギー他：2,000 万 kW（同 2.1%））とすることを目標に掲げている。

2006 年 3 月、第 10 期全国人民代表大会において、中国政府は、第 11 次 5 年計画を定め、「原子力発電については適切に発展させる」という表現にとどまった前回の第 10 次 5 年計画よりも明確に積極推進政策への姿勢を打ち出した。具体的には 100 万 kW 級原子炉、改良炉、高温ガス炉の商業化などを盛り込んでいる。2020 年に中国の発電設備は現在の約 2 倍となる約 10 億 kW に達する見込みであり、そのなかで安定供給、環境負荷の小さい原子力発電を 2020 年に 4,000 万 kW とする建設計画を立てている。2020 年までに年間平均 3,000 万 kW の発電設備が増設される見込みであるが、それでも 2020 年の原子力発電シェアは 4～5% 程度にとどまる見通しである。

### 3-2-2 日本

日本は原油価格の高騰など世界の緊迫したエネルギー情勢を踏まえ、平成 18 年 5 月 31 日、「新・国家エネルギー戦略」を発表した。その中で原子力発電については供給安定性にすぐれ、運転中の二酸化炭素排出が極めて低いとし、2030 年には総発電電力量の 30～40% 程度以上にすることを掲げている。また核燃料サイクルの早期確立、高速増殖炉早期実用化、国際的な原子力の平和利用の推進に取り組み、原子力立国として確固たる地位を形成するとしている。2006 年 3 月 30 日公表の平成 18 年度電力供給計画（経済産業省）をみると、建設中・計画中合わせて今後 13 基 1,723 万 kW の開発計画が掲げられている。

### 3-2-3 台湾

台湾では、電力需要の増加に伴い新たな電源確保が重要な課題となっている。台湾は日本と同様、エネルギー自給率が低いと、エネルギー安定供給確保の観点から原子力の平和利用を推進しており、現在 6 基の原子力発電所が運転されており、2005 年現在、総発電量に占める原子力の比率は 18% であるが、1994 年以降の原子力の構成比は 30% を下回る状態が続いている。

同国で 7、8 基目となる建設中の原子力発電所、龍門 1,2 号機（Lungmen、ABWR、各 135 万 kW）は、2000 年 5 月に反原子力を掲げる陳水扁総統が就任したため状況が大きく変わり、行政院は同 10 月に同発電所の建設を中止した。同発電所は、1980 年に行政院の建設承認が得られた後、政府内での協議が長期化し、1999 年に原子能委員会が龍門原子力発電所の建設を承認していた。その後 2001 年 4 月に行政院が「エネルギー不足を生じさせないことを前提とする将来的な脱原子力」を最終的な目標とすることを条件に建設継続が決定し、2003 年 11 月には本格的な建設が再開された。一方、政府に「脱原子力国家推進委員会」が設置され、原子力発電の段階的廃止を含む「脱原子力国家推進基本法案」が起草され、2003 年 5 月に行政院で可決され、2004 年 3 月に選挙が行われ、陳水扁現総統が辛勝し、現政策を維持している。しかし、2005 年 10 月に台湾電力公社は原油価格の高騰と国内経済の低迷を理由に、同発電所の営業運転開始を 2009 年 7 月と 2010 年 7 月に延期した。工事の進捗状況は、大幅に遅れているが、LNG 火力を運転することで不足電力を補う予定である。

### 3-2-4 韓国

韓国では、2005 年現在 20 基、1,772 万 kW の原子力が稼働しており、原子力発電が総発電電力量に占める割合は 45% となっている。2005 年 4 月に蔚珍 6 号機（PWR、100 万 kW）が営業運転を開始した。同機は、韓国の 100

万 kW 級国産 PWR (OPR - 1000) である韓国標準型炉 (KSNP) として、6 番機となる。

建設中の原子力発電所は、2010 年 12 月と 2011 年 12 月に運転開始の予定である新古里 1、2 号機 (PWR、各 100 万 kW) と、2011 年 10 月と 2012 年 10 月に運転開始の予定である新月城 1、2 号機 (PWR、各 100 万 kW) の計 4 基となっている。また、韓国産業資源部は 2005 年に、初の改良型韓国標準炉 (KSNP+) となる新古里 3、4 号機 (APWR、各 140 万 kW) と新蔚珍 1、2 号機 (同) の計 4 基の建設を承認し、2012 年 6 月から順次営業運転を開始する予定である。以上、計 8 基の原子力発電が、韓国では建設、計画段階にある。韓国の次世代原子炉開発は、1992 年に韓国政府と韓国電力公社 (KEPCO) により開始され、130 万 kW 級標準化改良型軽水炉となる韓国次世代炉 (KNGR) の開発を目標とした。2001 年 3 月に、安全性・経済性を向上させた出力 140 万 kW 級の改良型加圧水型炉 (APR - 1400) を開発した。

### 3-2-5 インドネシア

インドネシアでは 1970 年代に原子力発電建設が計画されたが、1986 年のチェルノブイリ事故を契機に中止となった。その後 1990 年代のスハルト政権の下、再び原子力開発が計画されたが、反原発運動、政情不安と国民の不信感が加わり、再び計画は中断された。しかし、法整備の面では、新原子力法が 1997 年 4 月に成立している。これにより、1998 年 5 月に新原子力規制庁 (BAPETEN) が発足した。

そして近年では電力安定供給を確保する重要なオプションとして、原子力に対する注目が高まりつつある。インドネシア原子力庁 (BATAN) は 2008 年にも初号機 (100 万 kW 級 PWR) の国際入札を実施し、2010 年に着工、2016 年の運転開始を目指している。ムリア半島のサイトには 2020 年までに 100 万 kW 級 PWR・4 基が、半島以外のサイトで 2 基の建設が計画されている。

### 3-2-6 インド

インドの稼働中の原子力発電設備は、2005 年 9 月にタラプール 4 号機 (54 万 kW) の運転開始により、計 15 基、331 万 kW となった。建設、計画中の原子力発電は計 8 基、392 万 kW である。インドは、高速増殖炉 (FBR) の開発を進めており、1997 年には FBR の実験炉の運転を開始した。そして 2011 年までに、高速増殖炉の原型炉の完成を目標としている。さらには、世界で唯一、ウラン 233 を利用したトリウムサイクルを国産技術で推進し、新型重水炉 (AHWR) の実現を目指している。

電力需要の急増が見込まれるインドでは、国内に豊富にあるトリウムおよびウラン資源を利用した自国のエネルギー源確保を長期目標とし、核エネルギー省 (DAE) は「DAE 長期ビジョン」において、2020 年に 2,000 万 kW の設備建設を計画している。2005 年 7 月、米国はインドへの原子力技術供与を認める共同声明を発表し、また 2006 年の米印原子力協力合意を受け、政府やインド電力公社からは 2020 年までに 4,000 万 kW の原子力発電建設が実現される可能性も指摘されている。

### 3-2-7 ベトナム

ベトナムでは現在、原子力発電所導入に対する検討が進められている。ベトナムの原子力発電計画は 1996 年に着手した「ベトナムへの原子力発電の導入に関する総合調査プロジェクト」により開始され、1998 年 10 月に最終報告書草案が取りまとめられた。草案では、2010～2020 年にかけて初号機の運転開始をめざし、早急に原子力発電所建設に向けた政策を策定するよう勧告している。

その後、ベトナム政府は予備的調査を行い、建設地を 6 つのサイトに絞り込んだ。これを受け、「原子力発電導入に関する運営委員会」が設置され、「原子力発電所の初号機建設に関する予備的実行可能調査 (PFS)」の実施が承認された。2005 年 8 月、国家原子力発電開発運営委員会は、PFS の報告書を首相府へ提出した。報告書では、2017 年～2020 年の間に 200 万 kW～400 万 kW 相当の原子力発電設備 (100 万 kW×2 基～4 基) を建設するとしている。



## 4. 2030 年までの原子力発電、ウラン需給の展望

## 4-1 原子力発電の展望

1950 年代から原子力発電の導入は先進国を中心に拡大し、1970 年代の 2 度の石油危機以降、石油代替エネルギーとして急速に拡大し、2005 年現在、世界の原子力設備容量は 3 億 8,500 万 kW に達し、世界の発電量の 16%、一次エネルギー消費で 6% を占めるまで増加した。

表4-1 アジア/世界の原子力設備量の展望

| GW      | 実績   | レファレンス |      |      | 原子力進展 |      |      |
|---------|------|--------|------|------|-------|------|------|
|         | 2005 | 2010   | 2020 | 2030 | 2010  | 2020 | 2030 |
| 北米      | 116  | 114    | 123  | 124  | 114   | 123  | 135  |
| アメリカ    | 103  | 101    | 109  | 109  | 101   | 109  | 118  |
| 中南米     | 4    | 6      | 6    | 7    | 6     | 6    | 8    |
| 欧州OECD  | 138  | 132    | 112  | 108  | 132   | 123  | 126  |
| イギリス    | 13   | 11     | 6    | 4    | 11    | 6    | 7    |
| ドイツ     | 21   | 16     | 3    | 0    | 16    | 8    | 8    |
| フランス    | 66   | 66     | 68   | 68   | 66    | 68   | 69   |
| 欧州非OECD | 43   | 45     | 63   | 64   | 45    | 66   | 71   |
| ロシア     | 24   | 26     | 40   | 40   | 26    | 40   | 44   |
| アフリカ    | 2    | 2      | 3    | 3    | 2     | 3    | 4    |
| 中東      | 0    | 2      | 2    | 2    | 2     | 4    | 5    |
| アジア     | 82   | 101    | 146  | 191  | 101   | 157  | 218  |
| 中国      | 7    | 15     | 31   | 50   | 15    | 33   | 53   |
| 日本      | 48   | 50     | 59   | 66   | 50    | 59   | 66   |
| 韓国      | 18   | 19     | 27   | 30   | 19    | 27   | 32   |
| インド     | 3    | 9      | 20   | 32   | 9     | 20   | 40   |
| 台湾      | 5    | 8      | 7    | 5    | 8     | 8    | 8    |
| インドネシア  | 0    | 0      | 2    | 4    | 0     | 4    | 6    |
| ベトナム    | 0    | 0      | 0    | 2    | 0     | 2    | 4    |
| オセアニア   | 0    | 0      | 0    | 0    | 0     | 0    | 0    |
| 世界計     | 385  | 402    | 456  | 499  | 402   | 482  | 568  |

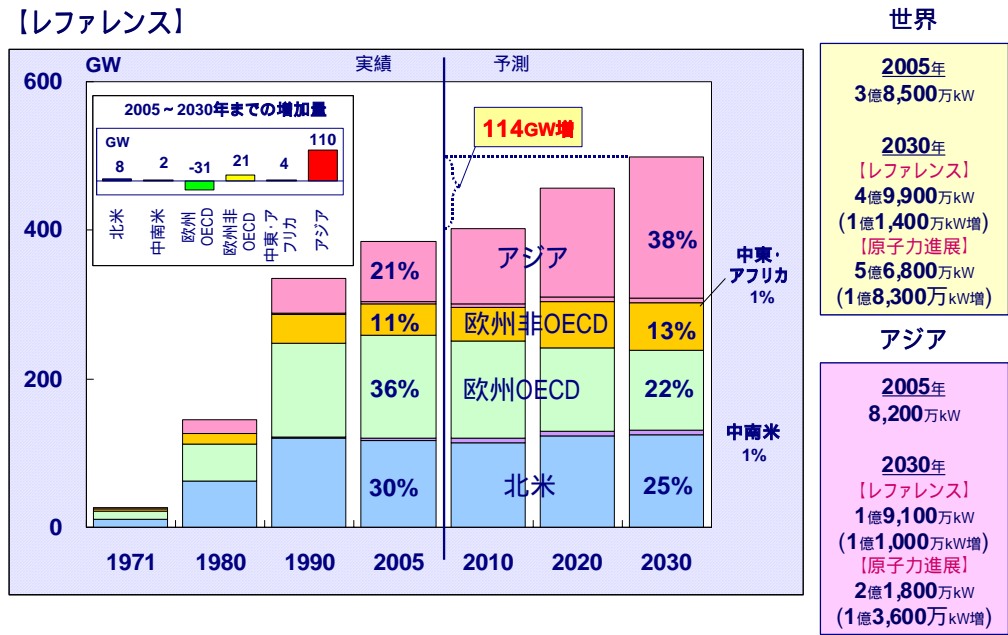
(出所) 実績値は日本原子力産業協会「世界の原子力発電開発の動向」、予測値は(財)日本エネルギー経済研究所

本節では、各国の現実的な原子力建設計画を考慮に入れた予測(レファレンスシナリオ<sup>2</sup>)、ならびに、世界各国がより一層のエネルギー安定供給確保や地球温暖化対策の強化を目的に原子力を推進した場合の予測(原子力進展シナリオ)を行った(表 4-1、図 4-1 ~ 4-4)。予測期間は 2030 年までである。

レファレンスシナリオでは、今後、世界の原子力設備容量は、2005 年の 3 億 8,500 万 kW から 2030 年には 4 億 9,900 万 kW へ、1 億 1,400 万 kW 増加するとともに、発電量では 2 兆 8,170 億 kWh(石油換算 7 億 3,500 万トン)から 3 兆 5,310 億 kWh(石油換算 9 億 2,000 万トン)へ年率 0.9% で増加する。また原子力進展シナリオでは、世界の原子力設備容量は、2030 年には 5 億 6,800 万 kW へ、1 億 8,300 万 kW 増加し、発電量は 4 兆 550 億 kWh(石油換算 10 億 5,700 万トン)へ年率 1.4% で増加する。

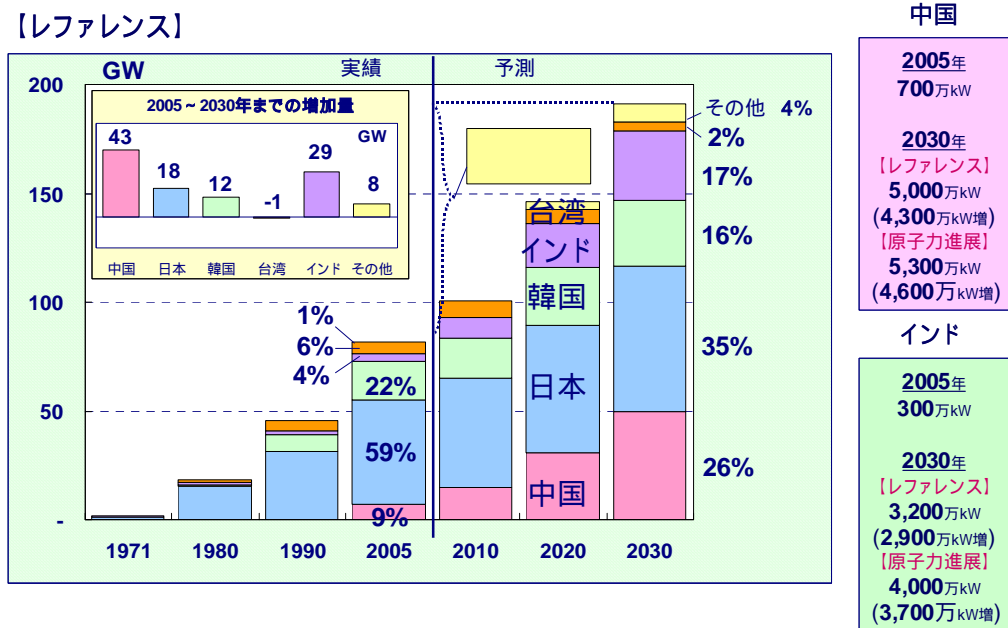
<sup>2</sup> レファレンスシナリオは、伊藤、森田、小宮山「アジア/世界エネルギーアウトルック 2006」、第 395 回定例研究報告会、2006 年 9 月と同一のシナリオである。

図4-1 原子力設備容量(世界)



(出所) 実績は日本原子力産業協会「世界の原子力発電開発の動向」、レファレンスシナリオは、伊藤、森田、小宮山「アジア/世界エネルギーアウトック2006」、第395回定例研究報告会、2006年9月を参照。

図4-2 原子力設備容量(アジア、レファレンス)

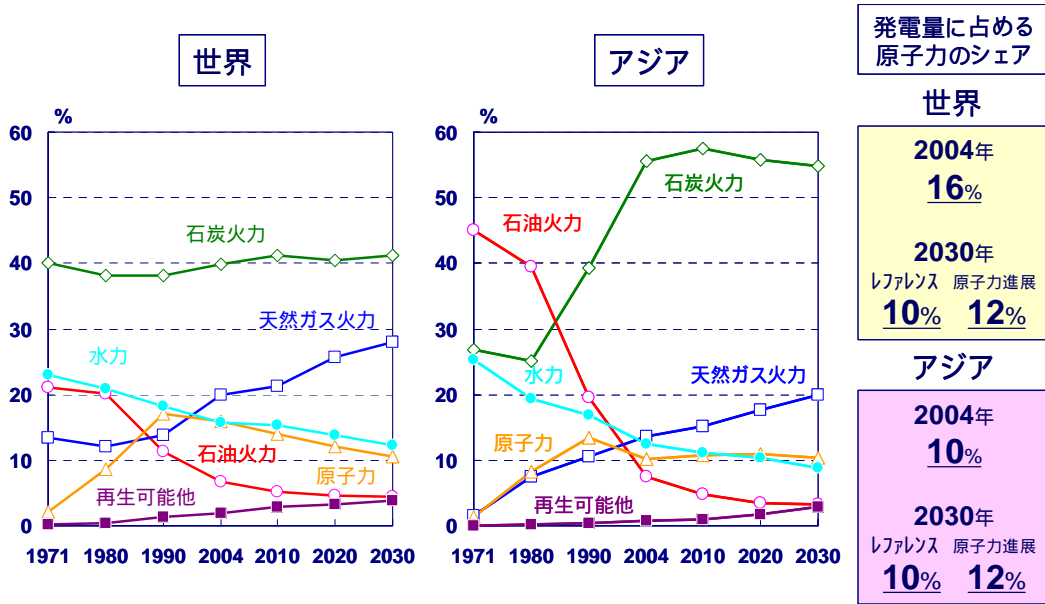


(出所) 実績は日本原子力産業協会「世界の原子力発電開発の動向」、レファレンスシナリオは、伊藤、森田、小宮山「アジア/世界エネルギーアウトック2006」、第395回定例研究報告会、2006年9月を参照。

レファレンスシナリオでは、2030年にかけて世界の設備容量は1億1,400万kW増加するが、そのうち、中国、インド、日本、韓国などアジアにおいて1億1,000万kW増加する。このため、アジアが将来に向けて原子力の投資、開発拠点となる見通しであり、国内資源の乏しい日本、韓国、台湾、さらには電力需要が急増する中国等の東アジア地域では、今後とも原子力がエネルギー供給において果たす役割は大きい。しかし、欧米をはじめとした先進諸国では、発電部門における天然ガス利用が飛躍的に拡大し、電力需要の伸びに対する原子力発電所の

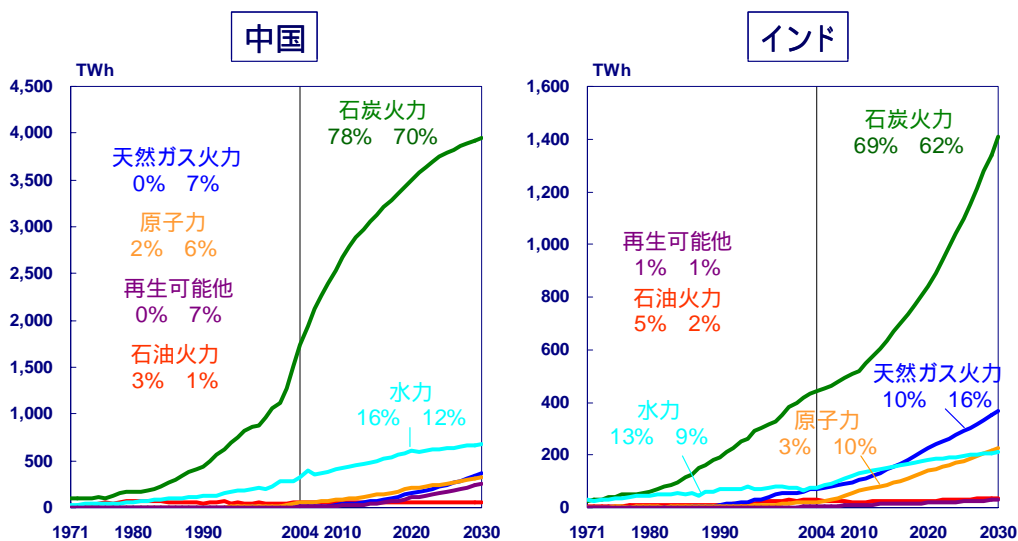
新規建設は限定的であることから、世界の一次エネルギー消費に占める原子力のシェアは2004年の7.2%(発電量に占めるシェアは16%)から2030年の5.8%(同10%)へ減少する。アジアでは現在、インド、パキスタン、中国、韓国、日本において原子力発電が実現しており、ベトナム、インドネシアなどが、エネルギー戦略の中で原子力発電所の新規建設を検討している。今後世界の原子力開発の中心となるアジアの原子力設備容量は、2004年の8,100万kWから2030年には1億9,100万kWへ1億1,000万kW増加し、発電量では2004年の5,230億kWh(石油換算1億3,600万トン)から2030年で1兆3,690億kWh(同3億5,700万トン)へ年率3.8%で拡大し、天然ガスに次ぐペースで増加する。

図4-3 発電量構成 (世界、アジア: レファレンス)



(出所) レファレンスシナリオは、伊藤、森田、小宮山「アジア/世界エネルギーアウトルック 2006」、第395回定例研究報告会、2006年9月を参照。

図4-4 発電量構成 (中国、インド: レファレンス)



(出所) レファレンスシナリオは、伊藤、森田、小宮山「アジア/世界エネルギーアウトルック 2006」、第395回定例研究報告会、2006年9月を参照。

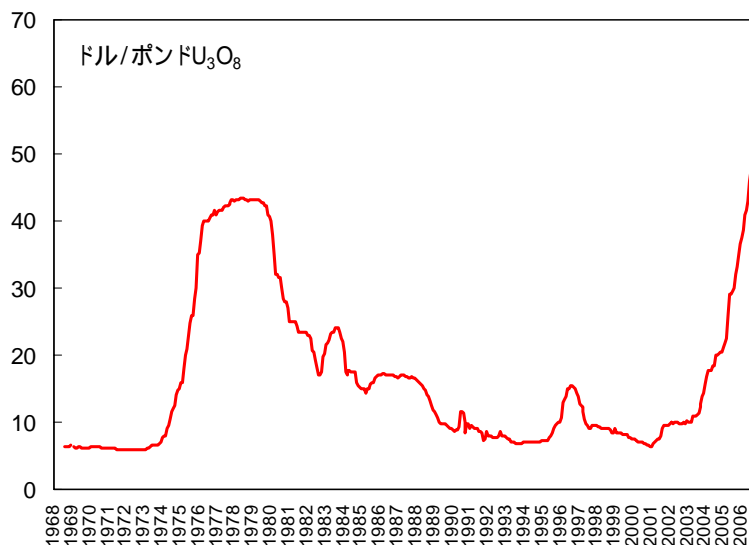
設備容量で見ると中国において 2004 年の 700 万 kW から 2030 年の 5,000 万 kW へ、アジアのなかでは最大の 4,300 万 kW 増加し、同国の発電量に占めるシェアは 2004 年の 2% から 2030 年には 6% まで拡大する。中国の原子力発電所は 1991 年に 1 号機が完成し、その後、フランス、カナダの技術支援により建設が進展した。中国は石炭資源が豊富であるが、西部に偏在しており、北京、上海などの経済発展拠点となっている沿海部への輸送コストが高く、インフラ能力のボトルネックが石炭火力導入の制約要因となっている。したがって原子力発電所は東・南部の沿岸部に設置され、主要な電力消費地域に供給されている。インドにおいても 300 万 kW から 3,200 万 kW へ中国に次ぐ規模である 2,900 万 kW 増加する見込みであり、発電量に占めるシェアは 2004 年 3% から 2030 年には 10% まで増加する見通しである。中国、インド両国ともに石炭火力が主力電源となる一方、天然ガス、原子力のシェアが徐々に拡大し、電源構成の多様化が進展する。

## 4-2 ウラン需給の展望

### 4-2-1 ウラン価格

軽水炉の燃料であるウランの価格が高騰している(図 4-5)。現在、国際ウラン需給はひっ迫傾向にあり、ウラン(八酸化三ウラン)のスポット価格は 1 ポンド当たり、2000 年冬の 7 ドル台から、現在 70 ドル台まで上昇している。ウラン価格は、70 年代の石油危機の際に高騰後、低迷を続けていた。その結果、採算性の問題から、ウランの探鉱開発活動が停滞し、1990 年代から 2000 年初頭にかけて低迷していた(2000 年 11 月、12 月に 7.1 ドル/U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> ポンド)。しかし、2003 年以降、ウランのスポット価格が上昇し、とくに 2006 年に入り更に高騰しており、2007 年 1 月現在、72 ドル/U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> ポンドに達している(名目ベースでは 1979 年スリーマイル事故の際のウラン価格を大きく上回る高値となっている)。

図4-5 ウランスポット価格の推移



(出所) The Ux Consulting Company, LLC のスポット価格

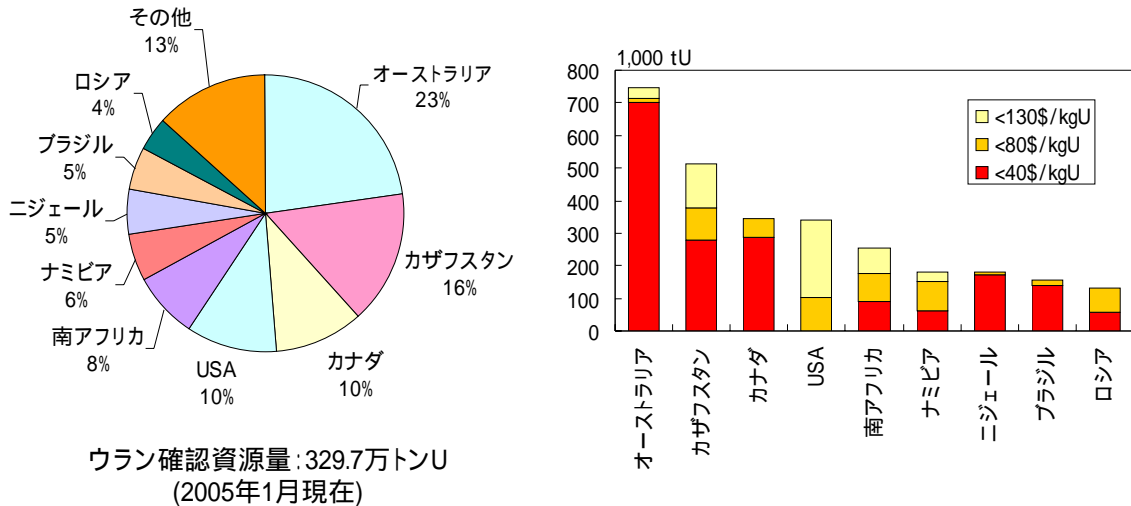
### 4-2-2 ウラン資源、生産量

OECD/NEA・IAEA の共同報告書「URANIUM2005」によると、2004 年現在の世界のウラン確認埋蔵量は、\$ 130/kgU 以下のコストで回収可能な資源量(Reasonably Assured Resources:RAR)が約 330 万 tU である(図 4-6)。また 2004 年の世界のウラン生産量は、40,263 tU となっている(図 4-7)。

最大のウラン資源国はオーストラリアで、世界の確認埋蔵量の 23% (130 米 \$ /kgU 以下で回収可能な資源量で 747 千 tU) を保有している。これに、カザフスタン 16% (514 千 tU)、カナダ 10% (345 千 tU)、米国 10% (342 千 tU)、南アフリカ 8% (256 千 tU)、ナミビア 6% (183 千 tU)、ニジェール 5% (181 千 tU)、ブラジル 5% (158

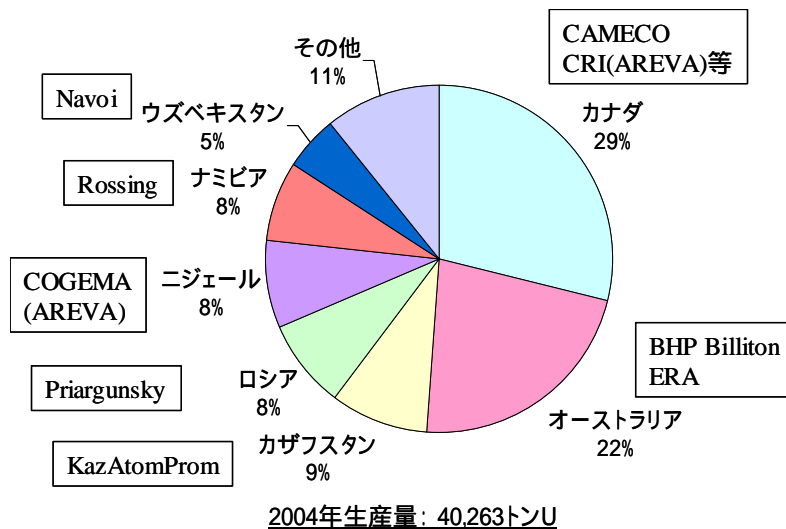
千 tU) ロシア 4% (132 千 tU) となる。これら 9 ヶ国で世界のウラン資源量の約 87%を占めている。回収コスト \$ 130/kgU 以下の資源量は、現在の世界の原子炉必要量の約 70 年分に相当する。

図4-6 ウラン確認埋蔵量(Reasonably Assured Resources:RAR)



(出所) OECD/NEA "Uranium 2005: Resources, Productions and Demand" より (財)日本エネルギー経済研究所作成

図4-7 ウラン生産量(国別、2004 年)

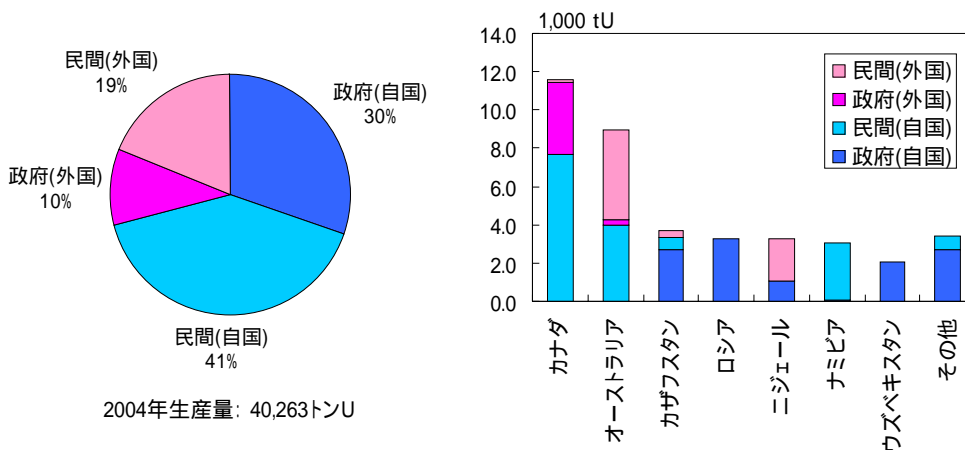


(出所) OECD/NEA "Uranium 2005: Resources, Productions and Demand" より (財)日本エネルギー経済研究所作成

2004 年のウラン生産量は 40,263 tU で、間接的な影響により主要生産施設での生産が減少した 2003 年の 35,492tU に比べ増加した。2003 年にスペインが生産を中止したため、2004 年の生産国は 19 ヶ国となっている。また、2004 年世界のウラン生産量 (40,263tU) は世界の原子炉必要量 (67,450tU) の約 60%を供給し、残りは民間余剰在庫、高濃縮ウラン型核弾頭から抽出される低濃縮ウラン、減損ウランの再濃縮、使用済燃料の再処理など、二次的な供給源により満たされている。

また保有形態別に見ると、世界のウラン生産量の約 40%が政府・国有企業保有、約 60%が民間企業保有となっている(図 4-8)。

図4-8 ウラン生産量(保有形態別、2004 年)

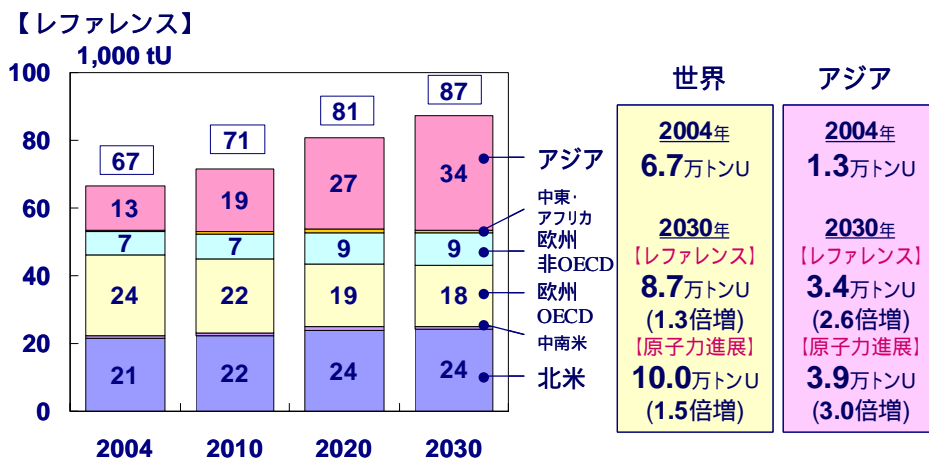


(出所) OECD/NEA "Uranium2005:Resources, Productions and Demand"より(財)日本エネルギー経済研究所作成

### 4-3 ウラン需給の展望

今後のウラン消費量の見通しについては、長期的に大きな伸びが予測される<sup>3</sup>。世界の原子力の設備量は 2005 年の 3.9 億 kW から 2030 年にレファレンスシナリオで約 5.0 億 kW、原子力進展シナリオで 5.7 億 kW まで増加する結果、世界のウラン需要も 2004 年の 6.7 万 tU から、レファレンスシナリオで 2030 年に 8.7 万 tU、原子力進展シナリオで 10.0 万 tU へ拡大する(図 4-9)。今後急速な原子力の導入推進が予測されるアジアでは、2004 年の 1.3 万 tU から、2030 年にレファレンスで 2.6 倍増の 3.4 万 tU、原子力進展シナリオで 3.0 倍増の 3.9 万 tU まで増加すると予測される。

図4-9 ウラン消費量の展望

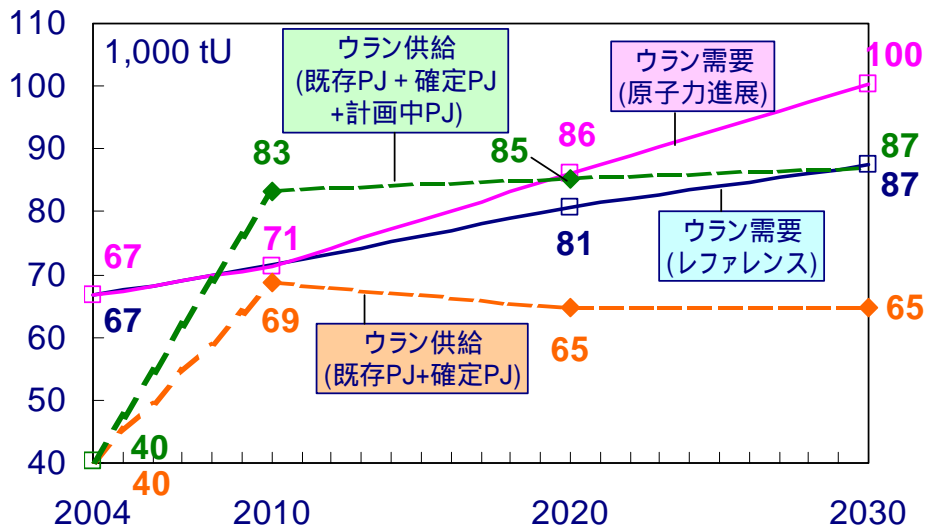


(出所) 実績値、予測値ともに(財)日本エネルギー経済研究所作成

またウランの一次生産能力は、OECDの予測(Uranium2005)では、現行の計画中のウラン探鉱・開発が順調に進展しない場合、2010年に約7万tUへ増加後ピークアウトし、以降、生産量は停滞し、2025年には6.5万tUまで減少する見通しである(図4-10)。一方、現在計画中的のカザフスタン、オーストラリア、カナダ、アメリカ、南アフリカ等におけるウラン開発が進展すれば、ウラン生産能力は2010年には8.3万tU、2020年には8.5万tU、2025年には8.7万tUまで着実に拡大する見込みである。

<sup>3</sup> ウラン消費の試算に関しては、ウラン濃度(濃縮ウラン 3.6%、テイルウラン 0.3%)、燃焼度 42GWd/t、発電効率 34%を前提に試算している。

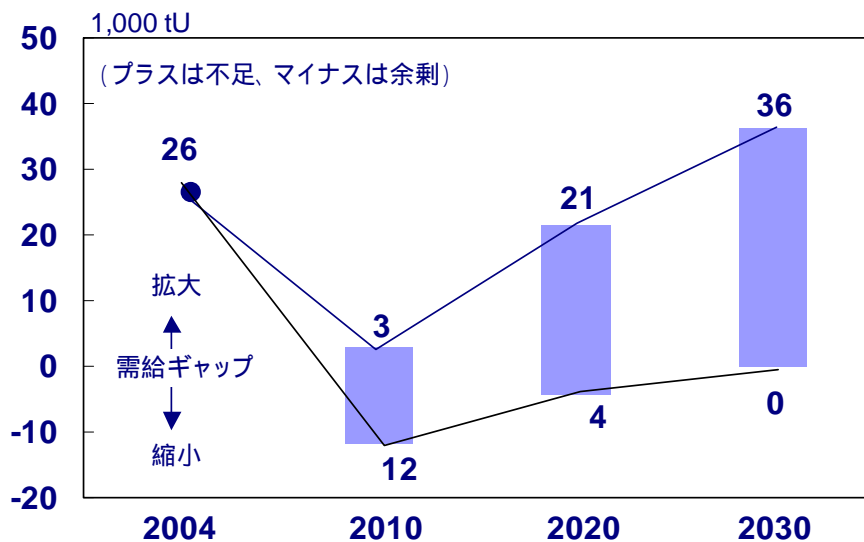
図4-10 ウラン需給バランスの展望



(出所) ウラン需要の見通しは(財)日本エネルギー経済研究所が作成、ウラン供給の見通しは OECD/NEA "Uranium 2005: Resources, Productions and Demand" より(財)日本エネルギー経済研究所が作成

国際ウラン需給は、1990 年以降、需要が生産を上回り、現在、ウラン鉱山からの生産量(一次供給)は 4 万 tU で、世界のウラン需要 7 万 tU の約 6 割しか賅えていない。90 年代の価格低迷によりウラン鉱山の探鉱投資が停滞し、鉱山の統廃合が進み、ウラン生産量は 90 年代初頭の約 6 万 tU から現在 4 万 tU まで低下した。この結果、供給の不足分は、ロシア等の核兵器の高濃縮ウランや、民間余剰在庫の取崩し等の 2 次供給により満たされている。しかし、近年の国際的な原子力再評価の動きに伴う旺盛なウラン需要と、将来のウラン需給タイト化を見越した投機的資金の流入が、ウラン価格の上昇圧力として作用している。

図4-11 ウラン需給ギャップ(供給不足、供給余剰)の見通し



(出所) 実績、予測ともに(財)日本エネルギー経済研究所が作成

この結果、2004 年現在、ウラン需要とウランの一次供給との間には、2.6 万 tU の需給ギャップ(供給不足)が存在するが、最大で、2010 年には 3,000tU、2020 年 2.1 万 tU、2030 年には 3.6 万 tU まで供給不足が拡大する可能

性がある(図 4-10, 図 4-11)。一方、ウラン供給が需要の伸びに比較して大幅に拡大する場合、2010 年で 1.2 万 tU、2020 年で 4000tU のウラン生産余剰能力が生じ、2030 年に需給が均衡する見込みとなる。

生産能力の拡大が現行計画通りに進展すれば、2010 年までは世界のウラン需給はほぼ均衡する見通しである。しかし、確定中のプロジェクトが順調に進展しない場合を考えると、引き続き解体核など二次的な供給源が必要となる。ただし、2010 年以降、需給ギャップが拡大する見込みであり、二次的供給源が不可欠になる可能性が高い。また、解体核や民間在庫などの二次供給も、今後 10 年程度で供給余力が低下する可能性が指摘されている(OECD/NEA "Uranium 2005: Resources, Productions and Demand")。ウラン資源の可採年数は約 70 年で、資源面での制約は当面顕在化しないが、ウラン資源開発には 10 年前後の長期の開発期間が必要なため、開発投資がタイムリーに進まなければ、ウラン供給不足を招き、ウラン価格高騰を助長する可能性がある。

## 5. 2100 年までの原子力発電、ウラン需給の展望

原油価格高騰に代表される国際エネルギー安全保障問題や、CO<sub>2</sub>をはじめとした温室効果ガスに起因する地球温暖化問題は、今後さらに重要な社会問題として認識されると考えられる。主に中国、インドなどアジア途上地域におけるエネルギー需要の急激な増加が予想されることから、化石エネルギーに比べ CO<sub>2</sub> 排出原単位が小さく、大規模で安定的なエネルギー供給が可能な原子力の役割が脚光を浴び、長期的に見てもアジアならびに世界的に導入量が拡大する可能性が存在する。また、原子力を基幹電源とするエネルギー戦略を策定する上でも、2050 年、2100 年という超長期的視点から見たエネルギー需給の評価が重要になると考えられる。

そこで本節では、世界エネルギーシステムモデル<sup>4</sup>を用いることにより、2100 年までの超長期における原子力の導入量、役割を評価する。

### 5-1 核燃料サイクル

長期エネルギーシステムにおけるバックエンド技術を中心とした核燃料サイクルの挙動を詳細に検討するため、図 5-1 のような核燃料サイクルモデルを考慮している<sup>5</sup>。発電設備は軽水炉(LWR)、高速増殖炉(FBR)を想定する。軽水炉平衡装荷取出、廃止取出で発生する使用済み燃料は原子炉内、炉外で貯蔵され、必要に応じて再処理、または直接処分される。再処理によりウランとプルトニウムが回収され、プルトニウムは高速増殖炉に利用されるとしている。

核燃料サイクルモジュールの定式化では以下の点に留意している。プラント新設・廃止に伴う核燃料の初装荷及び廃止取出は、それぞれプラントの新設量・廃止量に比例して期間内に一定量発生し、プラント運転に伴う核燃料の平衡装荷・平衡取出は、プラント稼働量に比例して発生するとした。

<sup>4</sup> 長期世界エネルギーモデルとして、工学技術を詳細に扱っている DNE21 (Dynamic New Earth 21) モデルの非線形関数(省エネルギー関数、再生エネルギー供給関数)を線形化した LDNE(Linearized Dynamic New Earth 21)モデルに、さらに後述する核燃料サイクルモジュールを結合したモデルを採用する(文献(15)~(18)参照)。本モデルでは、化石エネルギー、再生可能エネルギー、原子力などで一次エネルギー供給を行い、各種化学プラント、発電プラントを通して一次エネルギーを転換することにより二次エネルギーを生産し、4 種類の最終エネルギー需要(固体需要、液体需要、ガス需要、電力需要)を満たす。

このモデルは、割引率を考慮した対象期間内のシステム総コストを最小化する最適化モデルである。対象期間として 2000 年から 2100 年までの 110 年間(1 期 10 年、11 期)を評価しているが、終端効果を取り除くため、計算自体は 2150 年まで行っている。対象地域は以下に示す世界 10 地域である。

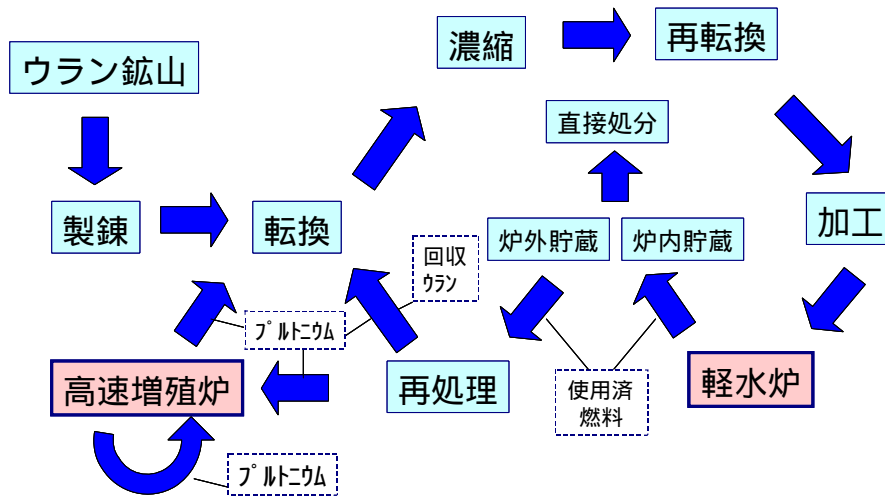
1)北米、2)西欧、3)日本、4)オセアニア、5)計画経済圏アジア、6)その他アジア、7)中東・北アフリカ、8)サブサハラアフリカ、9)ラテンアメリカ、10)旧ソ連・東欧

なお結果の表示については各期の中央年について表示する。エネルギー消費の設定については、2030 年までは(財)日本エネルギー経済研究所「アジア/世界エネルギーアウトック 2006」を用い、2030 年以降は、IPCC の需要シナリオの 1 つである IS92a(BAU シナリオ)シナリオを用いた。

<sup>5</sup> コストデータに関しては、軽水炉建設コスト 2,000\$/kW、高速増殖炉建設コスト 3,000\$/kW、原子力最大設備利用率(LWR,FBR)80%、年経費率 19%、ウラン濃縮コスト 110\$/kg-SWU、酸化ウラン(UO<sub>2</sub>)燃料加工コスト 275\$/kg-U、使用済み燃料再処理コスト 750\$/kg-HM、VHLW 最終処分コスト 90 \$/kg-HM、使用済み燃料直接処分コスト 350\$/kg-HM、使用済み燃料貯蔵コスト 80\$/kg-HM/10 年



図5-1 核燃料サイクルのモデル化



(出所) (財)日本エネルギー経済研究所作成

## 5-2 2100 年までの原子力の超長期展望

2100 年という超長期のエネルギー需給を見る際、今後、国際的なエネルギー供給面での量的不足や、地球環境問題の深刻化を背景に、世界的にエネルギー安定供給の確保や、地球温暖化へ対応が進むものと考えられる。その中で、CO<sub>2</sub> 排出原単位が小さく、大規模なエネルギー供給が可能な原子力の役割が超長期的にも重要な役割を担うものと考えられる。そこで本論文では、世界各国がより一層の地球温暖化対策の強化に資する一連のエネルギー・環境政策を採用した場合の原子力の超長期的な導入可能性について、2100 年まで予測を行った<sup>6</sup>。

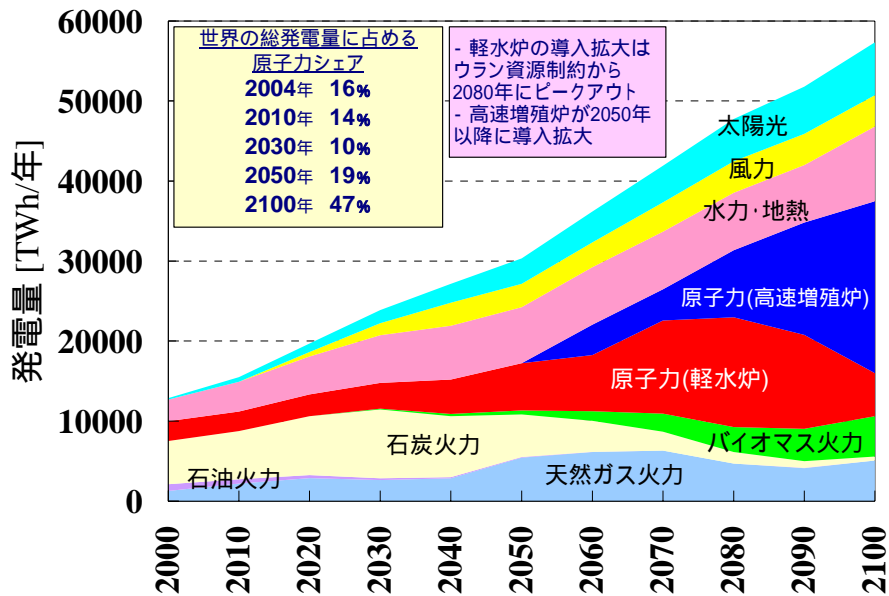
### 5-2-1 原子力発電の展望

世界の電源構成(発電量構成)の結果を図 5-2 に示す。世界的にエネルギー安定供給の確保や地球温暖化対策の超長期的な展開の中で、21 世紀後期にかけて CO<sub>2</sub> 排出原単位の大きい石炭火力は大幅に減少し、原子力(軽水炉、高速増殖炉)、バイオマス火力、水力・地熱、風力、太陽光が導入される。原子力発電に関しては、21 世紀後期(2080 年)において、可採年数約 70 年のウラン資源が枯渇し、ウラン資源の制約が顕在化し始めるため、軽水炉の導入拡大に歯止めがかかる。しかし同時に、21 世紀後期にかけて、高速増殖炉などバックエンド技術による核燃料の持続的な利用が可能となるため、軽水炉にかわり高速増殖炉の導入が 2050 年以降に拡大するため、発電構成に占める原子力は着実に拡大する。世界の総発電量に占める原子力のシェアは 2004 年 16%、2010 年 14%、2030 年 10%、2050 年 19%、2100 年 47% となり、2100 年において電源の中で原子力は最大のシェアを占める。

図 5-3 に 2100 年までの原子力設備容量を示す。世界の原子力設備容量は、2005 年 3.9 億 kW、2010 年 4.0 億 kW、2030 年 5.0 億 kW、2050 年 8.4 億 kW、2100 年 38 億 kW に増加する。そのなかで、軽水炉は、2080 年に 20 億 kW まで拡大するが、2080 年以降、ウラン資源制約から拡大が抑制される。代わりに、2050 年以降、ウラン資源を有効活用する高速増殖炉が増加し、2100 年には 31 億 kW へ拡大し、2100 年の原子力の中核的技術としての役割を担う。高速増殖炉を活用できれば、ウラン資源の資源制約を克服し、2100 年にかけて原子力設備は着実に増加することが可能となる。

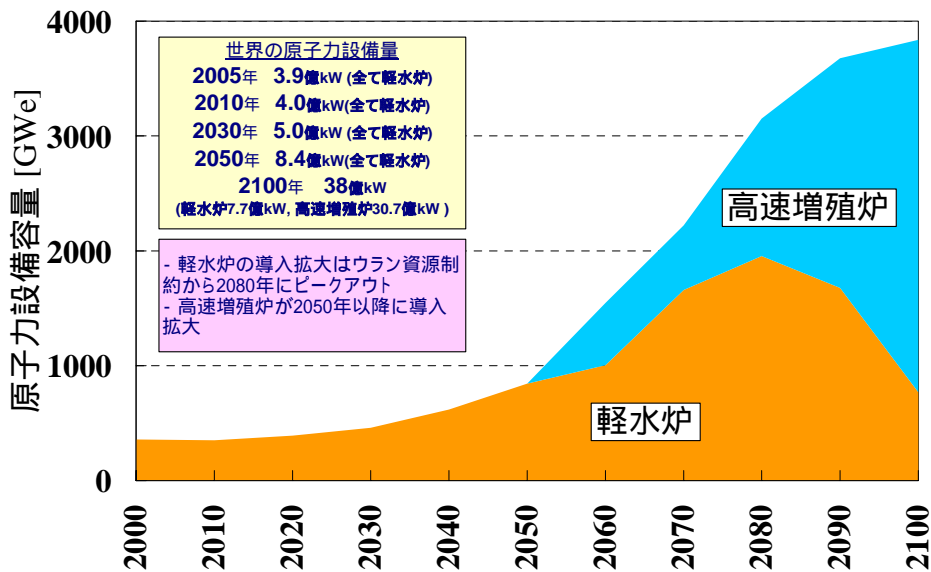
<sup>6</sup> 具体的には、2100 年、そして 2100 年以降の大気中 CO<sub>2</sub> 濃度を 550ppm (産業革命前の大気中 CO<sub>2</sub> 濃度の 2 倍) に規制するシナリオの下で試算を行った。また、予測計算の前提条件となる電力消費などのエネルギー消費の見通しについては、2030 年までのエネルギー消費は(財)日本エネルギー経済研究所「アジア/世界エネルギーアウトック 2006」の需要シナリオを用い、2030 年以降 2100 年までは、IPCC IS92a シナリオのエネルギー消費を前提としている。これを元に、2100 年までの原子力の導入量を、他の電源との競合関係や費用対効果を考慮に入れ、計算している。

図5-2 発電量の展望(世界)



(出所) (財)日本エネルギー経済研究所作成

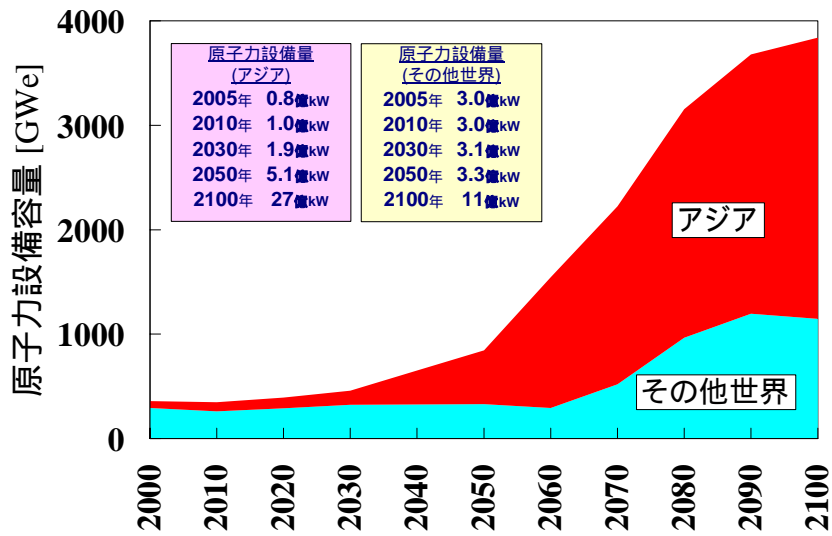
図5-3 原子力設備容量の展望(世界)



(出所) (財)日本エネルギー経済研究所作成

図5-4に地域別の原子力設備容量を示す。アジアでは、2005年0.8億kW、2010年1.0億kW、2030年1.9億kW、2050年5.1億kW、2100年27億kWに増加する。一方、アジア以外の地域では、2005年3.0億kW、2010年3.0億kW、2030年3.1億kW、2050年3.3億kW、2100年11億kWに増加する。超長期的に見ても、エネルギー消費の増加が著しいアジア地域において原子力導入が進展する見込みである。2100年におけるアジアの原子力の内訳は、軽水炉が5.8億kW、高速増殖炉が21.1億kW、その他世界では、軽水炉が1.9億kW、高速増殖炉が9.6億kWとなる。

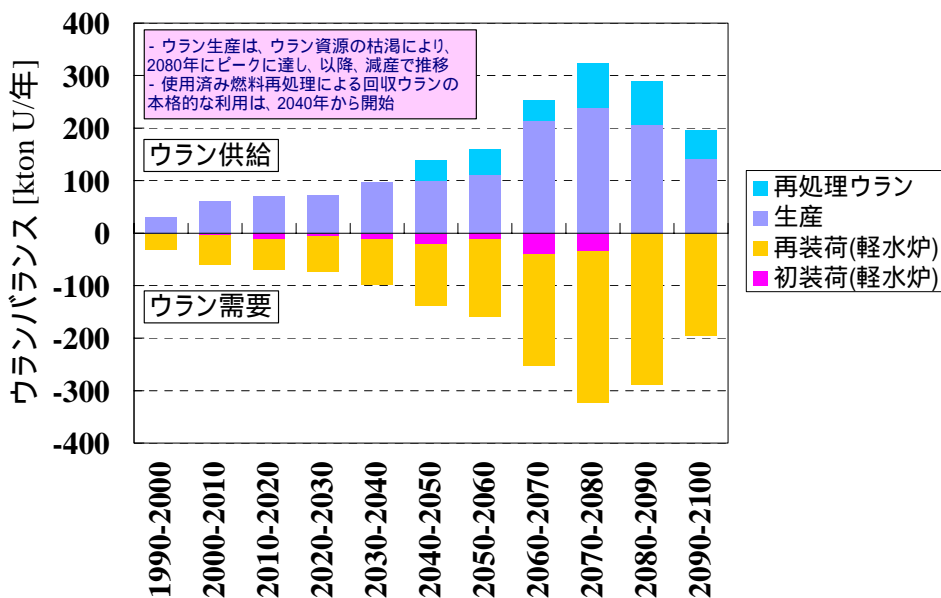
図5-4 原子力設備容量の展望(世界地域別)



(出所) (財)日本エネルギー経済研究所作成

図 5-5 に世界のウラン需給の展望を示す。21 世紀後期以降もウラン需給が行われるが、ウラン資源の制約から、枯渇が顕在化し、ウラン生産は 2080 年にピークに達し、その後、減産で推移する。そのため、ウラン資源を有効利用する高速増殖炉の導入が飛躍的に拡大する。また、2050 年から高速増殖炉導入とあいまって、再処理に伴う回収ウランの本格的な利用が開始され、ウラン資源の有効利用が行われていることがわかる。

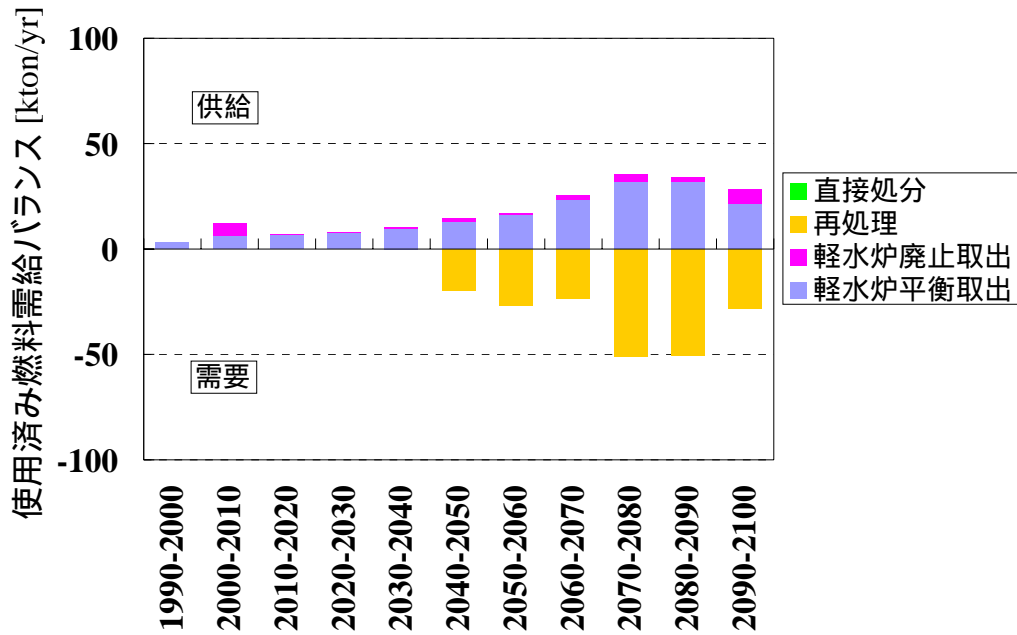
図5-5 ウラン需給の展望(世界)



(出所) (財)日本エネルギー経済研究所作成

図 5-6 に世界の使用済み燃料バランスを示す。平衡装荷取り出し燃料、廃止取り出し燃料需給が見られるとともに、核燃料サイクルにより 2040 年から使用済み燃料が再処理に利用され始めていることが分かる。

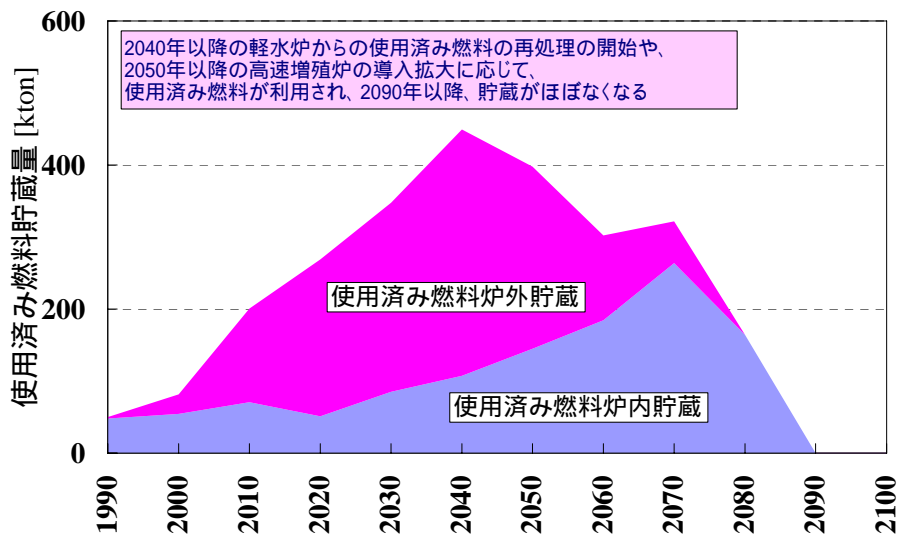
図5-6 使用済み燃料バランス(世界)



(出所) (財)日本エネルギー経済研究所作成

図 5-7 に世界の使用済み燃料貯蔵量を示す。当初貯蔵コストのかからない施設内貯蔵量が多いが、寿命による既存の軽水炉の廃止に伴い、施設外貯蔵に移される。軽水炉の着実な拡大に伴い、21 世紀中頃までは使用済み燃料貯蔵量が大きく増加する。しかし、2040 年以降の軽水炉からの使用済み燃料の再処理の開始や、2050 年以降の高速増殖炉の導入拡大に応じて、大部分の貯蔵されていた使用済み燃料が利用され、2090 年以降貯蔵量がほとんどなくなる。

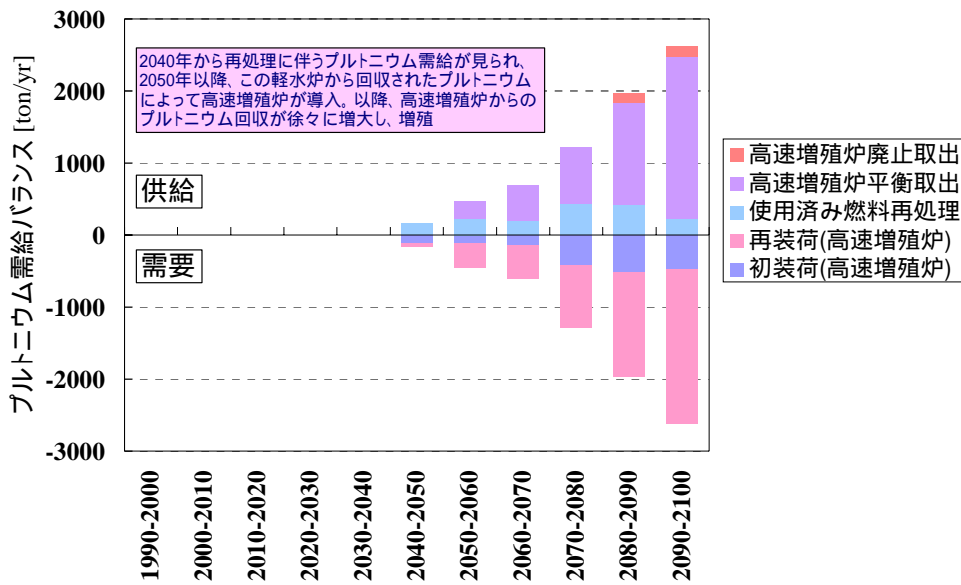
図5-7 使用済み燃料貯蔵量(世界)



(出所) (財)日本エネルギー経済研究所作成

図 5-8 にプルトニウム需給バランスを示す。軽水炉の使用済み燃料の再処理にともない、2040 年からプルトニウム需給が見られる。そして、2050 年以降、この軽水炉から回収されたプルトニウムによって高速増殖炉が導入され、その後、飛躍的に導入が拡大する高速増殖炉からのプルトニウム回収が徐々に増大し、増殖していることが分かる。

図5-8 プルトニウム需給バランス(世界)



(出所) (財)日本エネルギー経済研究所作成

## 6. おわりに

本報告では、世界の2030年、2100年までの原子力設備量、ウラン需給について予測を行った。

### 【2030年までの原子力発電設備量の展望】

2030年までの世界の原子力発電設備量を展望すると、2005年の3億8,500万kWから、2030年には約5億kW～5億7,000万kWに増加する見通しである。また今後、世界の原子力開発拠点になることが見込まれるアジアでは、2005年の8,200万kWから2030年には約1億9,000万kW～2億2,000万kWへ増加する見込みである。なかでも電力需要の急増が見込まれる中国の原子力発電設備は、2005年の700万kWから、2030年には約5,000万kW～5,300万kW、同様にインドでは、300万kWから3,200万kW～4,000万kWへ拡大する。この結果、世界の原子力発電設備量は、2030年に向けて、1億1,400万kW～1億8,300万kW増加し、アジアではその大半を占める1億900万kW～1億3,600万kW増加するため、アジアを中心に世界の原子力は拡大する見通しである。

### 【2030年までのウラン需給の展望】

国際的な原子力発電の導入増加に伴い、世界のウラン需要も2004年の6.7万tU(ウラン換算トン)から、2030年には8.7万tU～10.0万tUへ拡大する見通しである。今後急速な原子力の導入推進が予測されるアジアでは、2004年の1.3万tUから、2030年には3.4万tU～3.9万tUまで増加すると予測される。一方、世界のウラン供給能力は、2004年の約4万tUから、2030年には6.5万tU～8.7tUへ増加する。この結果、世界のウランの需給バランスは、2004年の2.6万tUの供給不足から、2030年には、需給が均衡する状態、もしくは最大で3.6万tUの供給不足が発生すると見込まれる。現在世界各地において、ウラン探鉱・開発プロジェクトが計画されているが、確定中のプロジェクトが順調に進めば、世界のウラン供給能力は2030年のウラン需要とほぼ均衡する見通しである。一方、当該プロジェクトの進展が停滞する場合には、世界のウラン需要と供給は2030年にむけて、タイト化する可能性があり、二次的供給源(核兵器解体ウランや民間在庫など)が不可欠になる可能性が高い。しかし二次供給も、今後10年程度で供給余力が低下する可能性が指摘されている。ウラン資源の可採年数は約70年で、資源面での制約は当面顕在化しないが、ウラン資源開発には10年前後の長期の開発期間が必要なため、開発投資がタイムリーに進まなければ、ウラン供給不足を招き、ウラン価格高騰を助長する可能性がある。今後、現在計画中のカザフスタン、オーストラリア、カナダ、アメリカ、南アフリカ等でのウラン探鉱・開発プロジェクトが着実に開発さ

れるかどうか重要なポイントになると考えられる。

#### 【2100 年までの原子力発電、ウラン需給の展望】

今後 2100 年という超長期に向けて、世界的に地球温暖化対策の強化や、それに伴うエネルギー源の多様化などが進めば、世界の発電構成は、21 世紀後期にかけて CO<sub>2</sub> 排出原単位の大きい石炭火力は大幅に減少し、原子力の導入が着実に拡大する。そのなかで、2080 年頃に、可採年数約 70 年のウラン資源が枯渇し、ウラン資源の制約が働くため、ウラン資源に頼る軽水炉の導入拡大がピークアウトする。一方で、核燃料サイクルなどバックエンド技術により、プルトニウムなど核燃料の持続的な利用が可能になるため、2050 年以降に高速増殖炉が導入され、2100 年にかけて、軽水炉にかわり高速増殖炉の導入が進み、発電構成に占める原子力の持続的な拡大が期待される。この結果、世界の総発電量に占める原子力のシェアは 2004 年 16%、2010 年 14%、2030 年 10%、2050 年 19%、2100 年 47% となり、2100 年における電源の中で原子力は最大のシェアを占める。また、世界の原子力設備量は、2005 年 3.9 億 kW、2010 年 4.0 億 kW、2030 年 5.0 億 kW、2050 年 8.4 億 kW、2100 年 38 億 kW に増加する。そのなかで、軽水炉は、2080 年に 20 億 kW まで拡大するが、2080 年以降、ウラン資源制約から拡大が抑制され、代わりに、2050 年以降、ウラン資源の経済価値を高め、有効活用する高速増殖炉が導入され、2100 年には 31 億 kW へ拡大し、2100 年の原子力の中核的技術としての役割を担う。高速増殖炉を活用できれば、ウラン資源の資源制約を克服し、2100 年にかけて原子力設備は着実に増加することが可能となる。

#### 【インプリケーション】

近年の国際的な原子力再評価の動きに伴う旺盛なウラン需要と、将来のウラン需給タイト化を見越した投機的資金の流入が、ウラン価格の上昇圧力として作用している。また、本予測結果によると、2010 年以降、国際的にウランの需給ギャップは拡大基調で推移する可能性が高いため、今後、長期的にはウラン価格は上昇基調で推移する可能性がある。これを見越して、2020 年までに約 30 基の原発建設を計画する中国では、最近、アフリカのニジェールやオーストラリアでウラン鉱区開発権を取得し、ウラン権益獲得に向けた資源外交を本格化している。中国政府は 2006 年 4 月以降、胡錦濤・国家主席が自ら世界第 2 位のウラン埋蔵量を持つオーストラリアや同 3 位のカザフタンを訪問するなど、積極的な資源外交を展開し、オーストラリア政府と軍事転用をしない条件付きで、中国のウラン輸入で合意するなど、積極的な動きを見せている。

わが国は新・国家エネルギー戦略をはじめとするエネルギー戦略のなかで、原子力を基幹電源として位置づけているが、国際ウラン需給が将来ひっ迫する可能性がある中、ウラン資源を輸入に依存しており、ウランの供給セキュリティ確保も重要な課題となる。エネルギー自由化の時代に原子力という選択肢を維持するには、原子力の経済性をさらに高め、原子力発電の競争力強化を図ることが必要となる一方、ウラン鉱山の自主開発支援や、ウラン資源を有効利用するプルサーマル推進、超長期的視点からウランの資源経済価値を向上させる高速増殖炉の研究開発が今後より一層重要になると考えられる。

原子力(軽水炉)で消費されるウラン資源は可採年数約 70 年の有限な枯渇資源であり、超長期的に原子力を利用するには、高速増殖炉による本格的なプルトニウム利用が不可欠である。このためには現在まで形成された貴重な技術資源を継承し、グローバルな視点から長期的に増殖炉開発を進める必要がある。プルトニウムやウランのリサイクル利用によって原子力の資源価値を大幅に引き上げるとい核燃料サイクルの意義を理解することが必要であり、長期的に実現すべき地球規模での公益的課題となる。よって、国際動向を踏まえ、アジアにおける使用済み燃料を再処理する体制の整備を検討するべきであり、この分野における地域協力が重要となる。とくに日本は、国際的に優位性を持つ原子力先進国として培った技術・ノウハウなど開発支援・安全運用管理、周辺機器・設備の供給等も含めて、さらに発展させ、地域協力を主導する積極的な役割を担うことが期待される。

#### 参考文献

- (1) BP "BP Statistical Review of World Energy 2006", 2006 年
- (2) (社)日本原子力産業協会 "世界の原子力発電開発の動向", 2006 年
- (3) (社)日本原子力産業協会, "原子力年鑑 2006", 2006 年
- (4) 独立行政法人科学技術振興機構, "原子力図書館", <http://sta-atm.jst.go.jp/>

- (5) DOE/EIA, “Annual Energy Outlook 2006”, 2006 年
- (6) イギリス貿易産業省 ( DTI ), “The Energy Challenge Energy Review Report 2006”, 2006 年
- (7) 李、伊藤、小宮山 : 「中国 2030 年エネルギー需給展望と北東アジアエネルギー共同体の検討 - 存在感増す中国の自動車戦略と原子力戦略 - 」, 日本エネルギー経済研究所、2005 年 4 月
- (8) 経済産業省, “平成 18 年度電力供給計画”, 2006 年
- (9) 台湾源能委員会 HP([http://www.moeaec.gov.tw/English/english\\_index.asp](http://www.moeaec.gov.tw/English/english_index.asp))
- (10) KEPCO, “The 2nd Basic Plan of Long Term Electricity Supply & Demand 2004-2017”
- (11) インド核エネルギー省 ( DAE ), “DAE 長期ビジョン”, <http://www.dae.gov.in/publ/vision.pdf>
- (12) 伊藤、森田、小宮山, “アジア/世界エネルギーアウトルック 2006”, 第 395 回定例研究報告会, 2006 年 9 月
- (13) The Ux Consulting Company ホームページ(<http://www.uxc.com/>)
- (14) OECD/NEA, “Uranium2005:Resources, Productions and Demand”, 2005 年
- (15) 小宮山, 山地, 藤井, “長期世界エネルギーモデルによる海水ウラン利用可能性評価”(社)日本原子力学会「2002 年秋の大会」, いわき、9/14-16, H7, pp.189, 2002 年
- (16) Fujii, Y., Yamaji, K.: Assessment of technological options in the global energy system for limiting the atmospheric CO2 concentration, Environmental Economics and Policy Studies, 1, 113 , 1998 年
- (17) Yamaji, K., Fujino, J., Osada, K.: Global energy system to maintain atmospheric CO2 concentration at 550 ppm, Environmental Economics and Policy Studies, 3, 159 , 2000 年
- (18) 山地, 長野: 燃料サイクル最適化モデルの開発 -高速増殖炉実用化条件の解析-, 電中研報告 Y88002 ,1988 年
- (19) OECD/NEA: Projected Cost of Generation Electricity Update 1998 ,1998 年
- (20) OECD: Uranium 1995 Resources, Production and Demand ,1996 年
- (21) 米田: わが国における FBR 導入のシナリオ, 原子力工業, 40, 53 ,1994 年
- (22) OECD/NEA: The Economics of the Nuclear Fuel Cycle ,1994 年
- (23) World Nuclear Association, “The Global Nuclear Fuel Market, Supply and Demand 2005-2030”, 2005 年

お問い合わせ先: [report@tky.ieej.or.jp](mailto:report@tky.ieej.or.jp)