

4. 21世紀の展望

田下 正宜・松井 一秋

4.1 現状

(1) 全般

9.11 テロ事件は不米ソのイデオロギー対立時代から新たな対立時代への移行を示唆する事件である。昨今の原油価格高騰は種々の要因があるが中国・インド等途上国の経済成長が底流には大きな要因である。これは 20 世紀が現在の先進国の経済成長の世紀であったのに対し 21 世紀は途上国の経済成長の時代である事を示唆しておりエネルギーが 20 世紀の戦略物資であると同様に 21 世紀のより厳しい対立の原因となる可能性を秘めている。一方で過去の化石燃料の使用による気候変動、温暖化の恐れが世界的な異常気象という形で現れてきた。この様に今、政治・経済・社会の転換期で、従来の一国主義、宗教との対立を引き起こす価値観と異なる新しい共存、持続性確保の価値観の時代への移行が求められている。

(2) エネルギーの現状

現在世界のエネルギー消費は大凡 9Gtoe (90 億トン・石油換算) でその約 80%は人口で約 18%の先進国 (OECD 加盟国) が占め、人口の大半を占める途上国 (非 OECD 加盟国) は近代文明の恩恵を受けていない。その結果一人当たりのエネルギー消費は先進国では年間 4.5toe で途上国の約 6 倍程度と大きな格差を生じている。

エネルギー供給は約 77%を化石燃料が占め、原子力は約 5%、水力発電が約 5%、その他約 12%であり、1973 年の石油危機以降省エネルギーの推進によりエネルギー消費はそれまでの年率 4%から 1.7%へと大幅に量的には減少したがエネルギー供給源は原子力が 7%程度入った以外は大半を化石燃料に依存する構図、石油から石炭、天然ガスへのシフトはあるが、は余り変わっていない。(図-1)

(3) 原子力エネルギー利用の現状

*原子力は 2004 年末約 434 基、379Gwe の発電能力で世界の発電の約 15%を賄っている。原子力エネルギーの 90%以上は発電用であり、極一部で地域暖房用に用いられている程度に止まっている。我が国では 45.7GWe が稼働中で電力の約 30%程度を供給している。

原子力エネルギー利用は世界 193 ヶ国中 31 ヶ国であるが其の大半は先進国である。

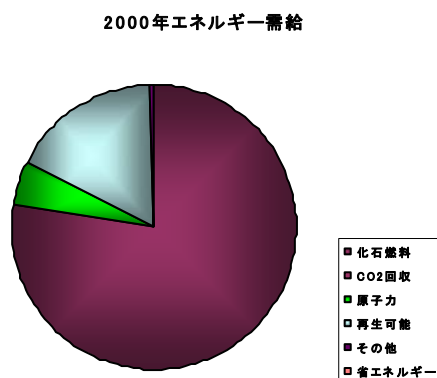


図-1 エネルギー供給構成 2000 年

- * 将来原子力利用の要となる再処理をして Pu 利用を民需用産業規模で実施して居る国は英仏露の 3 ヶ国で年間合計約 5500 トン U の能力がある。わが国が近い内に年間 800 トン U 規模での再処理事業が開始される予定である。なお米国は最近になり当面使用済み燃料の容量削減の方法として研究を本格化する方向にある。
 - * この 20 年程一般的にも核廃物処理問題が世界的にクローズアップされてきた。原子力エネルギー利用では当初より課題として認識され、技術的には地中埋設法で処分可能であるが場所の選定等の課題が残されている。
 - * 近時、殊に 9.11 同時多発テロ以降核テロを含めた核の不正使用に対する疑惑が大きな世界的問題となりその解決方法が強く求められている。
 - * わが国ではこの 10 年余り原子力トラブル・事故及び不祥事により社会的合意が大きな課題として浮かび上がった。他方米国では原子力発電所の 90% を越える稼働率により原子力に対して好意的雰囲気に加えて税制優遇策もあり新規プラントの建設計画が具体化している。
- アジアの中国・インドを初め途上国では経済の拡大、それに伴うエネルギーの安定供給の論点から大規模な原子力建設計画具体化しつつある。ヨーロッパではチェルノブイリ事故以降原子力反対の機運が高かったが昨今の温暖化問題とエネルギー状況から原子力エネルギー利用の見直し機運が高まってきた。
- しかし原子力が広く利用される為には安定な運転実績を示すと共に社会の信頼を得るように規範を正し、また社会とのコミュニケーションを図ることが必要である。

4.2 21 世紀の展望

(1) 全般

20 世紀が先進国の経済発展の時代であったのに対し、21 世紀は途上国の順次経済成長 (take off) が期待される世紀である。言うなれば 20 世紀に生じた南北問題 (格差) を如何に旨く縮小し世界の持続的平和を保つかが課題である。宗教、民族など多種多様の価値観の中で文化的活動、政治的活動が重要な役割を果たさなければならない。

しかしその基盤となる現実生活の安定・向上に密着したエネルギー供給の安定化・持続性確保は先進国以上に途上国において重要な課題である。一方には今世紀の新たな人類的課題である環境問題があり、環境と経済成長・エネルギー拡大のバランスある方策が必要とされ技術的・制度的解決策が求められている。

(2) 人口とエネルギー需要

国連の人口予測によれば、2300 年最大 300 億人、最小 30 億人であり中庸見通しでは 90 億人とされ 21 世紀後半から 90 億人程度で安定すると見込まれている。現在我国で少子化が顕在化しているが他の先進諸国でも人口は 21 世紀前半にピークを迎え、2100 年時点では減少すると考えられ、人口増加の大半はアジア、中東、アフリカ、中南米

等開発途上国である。

これらの地域は現在のエネルギー消費は平均 0.5toe/年程度で今後社会インフラの整備・生活レベルの向上に伴い鉄鋼・セメントなど産業用及び家電製品・自動車などの普及による民需用エネルギー需要の拡大が見込まれる。即ち 20 世紀の人口・エネルギー増加の大半が現在の先進国中心であったのに対し 21 世紀は途上国を中心に人口・エネルギー増加が進むと推定される。

この人口の推移に基づき幾つかのエネルギー需要予測の方法が考えられる。大きな推定では 20 世紀のエネルギー消費傾向を同一と想定したケースで 2100 年約 54Gtoe/年と見込まれ、小さな推定では 1973 年石油危機以降の傾向をから想定したケースで約 18Gtoe/年である。中程度の推定では先進国は今後エネルギー消費の伸びは小さいが途上国は適切な経済成長とエネルギー需要の増加を見込んだケースで大凡 32Gtoe 程度と見込まれる。世界的な推定例としては IPCC/WEC が高経済成長ケース（A シナリオ）で 60～70Gtoe、環境優先ケース（C シナリオ）で 20Gtoe、中庸ケース（B シナリオ）で 30Gtoe 程度と想定している。

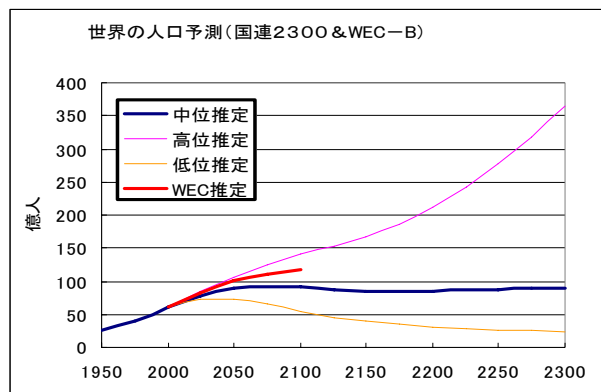


図-2 世界の人口予測 (by UN)

(3) 資源と環境制約

昨今の原油価格の高騰によりエネルギー供給・安全保障がクローズアップされている。世界的な好景気、中国の経済成長等実需の拡大がベースにある。加えて近年石油業界が市場経済重視の傾向から先行投資を控えた事も一因で加えて産油国の政情不安が価格の一層の高騰を招いた。

しかし従来型の石油埋蔵量はピークに近いとしてもカナダでの非在来型のオイルサンド等の実用化も展開されつつあり、また天然ガスの利用も LNG により利用地域が拡大される傾向にある。加えて石炭の世界埋蔵量は 21 世紀中の利用には十分な存在が確認されている。即ち短期的な需給のアンバランス、輸送用エネルギー源の過度な石油依存性をエネルギー源の多様化、燃料効率の改善等のエネルギー体系のルバスト化（改善）により中長期的に資源的に制約される事は余り考え難い。

寧ろ 1990 年代から持続性の観点から重視されている温暖化対策に伴う CO2 排出量制限が化石燃料利用の大きな制約要因となる可能性が高い。
現在 2100 年以降も気温上昇を 2℃程度に抑えることが概ねのコンセンサスに成りつつ

ある. 大気中 CO₂ 濃度を現在の 370ppm を 2100 年以降も 550ppm 以下で安定化させるか、更に厳しく 450ppm まで下げるかが議論されている. 温暖化問題は現在研究途上にあり因果関係が解明されている段階ではない. 過度な危険視は避けるべきではあるが CO₂ 排出した後、気温上昇傾向が顕在化する時定数が 100 年オーダー以上であり、現象で顕在化されてからでは遅すぎる可能性が高いことは十分留意する必要がある.

WRE の制限に拠れば、温暖化制約を守るとすると化石燃料の消費は 550ppm の制限では 21 世紀前半には現状程度か多少多い程度に押さえ、21 世紀後半は現状以下、450ppm の場合には現状の半分程度まで下げる必要がある.

いかなる方法を採用にせよ 100 年先の世界のエネルギーを予測する事は困難である. 上記方法で 20 世紀の傾向からの推定は大量消費の延長的色彩が強く過大見積となり、石油危機以降の傾向からの推定は今後のアジアを中心とする途上国の経済の発展を考えると低めに見積もりすぎる事を考慮すると概ね 30Gtoe 程度 (世界エネルギー会議 97 予測 35Gtoe、SRES-B 30Gtoe) と見込む事が現状では妥当と考えられる. この場合世界の一人当たりのエネルギー年間消費は 3.3toe で大凡現在の 2 倍である. これは石油危機頃の日本のエネルギー消費レベルに相当する.

(4) エネルギー供給バランスと原子力エネルギーに期待されること

環境制約から 21 世紀に於いては使用可能な化石燃料は大幅な制限を受ける. 従って先に記したエネルギー需要との差分は CO₂ を排出しない燃料の使用 (再生可能エネルギー、原子力)、省エネルギー及び化石燃料使用に伴う排出 CO₂ を回収・固定・処分 (CCS) により賄う必要がある.

以下簡単に各エネルギーの供給可能性に関して記す.

① 省エネルギー

石油危機後プロセスの合理化による省エネルギー技術開発は進んだ. 今後ともこの程度の省エネルギー技術は進展すると期待されるが、新たな省エネルギーとしては新製品の開発

による省エネルギーが求められている. 一例として現在輸送用機関は内燃機関中心であり今後ハイブリッドカー、電気自動車、燃料電池車等の実用化により熱効率が現在の 15% から 30%、45% と向上することが期待される. 輸送用エネルギー

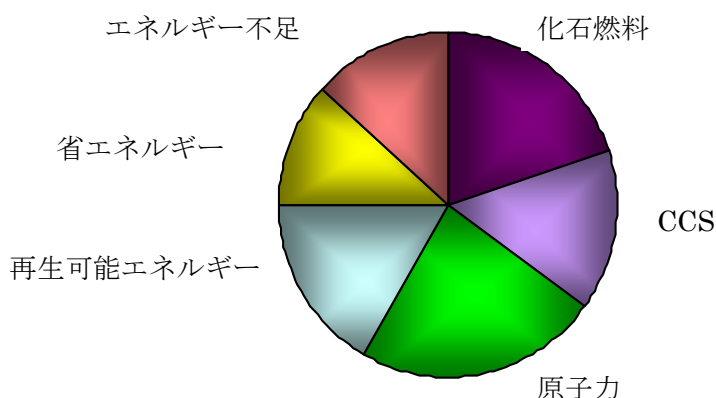


図-3 2100 年エネルギー供給予測例 (300 億トン)

の削減は 2100 年時点での省エネルギー効果としては約 3～5Gtoe 程度が見込まれる。今後このような省エネルギー技術の開発は重要な課題である。

① 化石燃料

上記に記した様に WRE 制約に従うと化石燃料の許容使用量は 2100 年時点で 550ppm では約 **7Gtoe**、450ppm では約 **3Gtoe** である。

② CO₂ 回収・固定・処分 (CCS)

地中貯留では 2 兆 t-CO₂ ポテンシャル (約 5700 億 t-c、570Gt-c) があると IPCC では報告されている。CCS の利用には CO₂ を回収・固定・地中貯留する為のエネルギーが必要であり現状では 25～40% 程度のエネルギーが必要と考えられている。従って今世紀中に全てのポテンシャルを利用し尽すとして概ね年間平均 **4.1～4.6Gtoe** 相当の化石燃料の使用である。

③ 再生可能エネルギー

水力、太陽光 (発電含む)、バイオマス等再生可能エネルギーは潜在量としては期待されるが、エネルギー密度が低いことから大量エネルギー供給システムとして実用化する上では課題が大きい。しかし地域特性を生かした利用は今後の技術開発により可能であるが、2100 年時点でも 3～9Gtoe 程度で現実的には最大見込んで 20～25% 程度と予測される。

④ 原子力エネルギー

原子力エネルギーは既に実用化されており今後とも CO₂ を排出せず且つある程度の経済性は確保され、大量にエネルギーを供給が見込まれる。しかし原子力エネルギーも元々の火種である U-235 は有限であり高速炉を利用した Pu 燃料体系の実用化により其の役割の拡大が見込まれ、2100 年時点では現状技術の延長で約 7Gtoe (約 5000GWe) 程度が期待される。

⑤ 以上を総合的に考えると 2100 年時点で、必要エネルギー需要の 30Gtoe に対し現状での供給可能量は**省エネルギー**により **3～5 Gtoe**、**化石燃料** **3～7Gtoe**、**CCS** **5Gtoe**、**再生可能エネルギー****3～7.5Gtoe**、**原子力** **7Gtoe** で合計約 21～31.5Gtoe である。**不足の約～9Gtoe** は省エネルギーと再生可能エネルギー、原子力エネルギーで補う必要がある。仮に等分すると原子力は**約 3Gtoe 程度 (約 2100GWe)** 程度増強することが期待される。

21 世紀全体を俯瞰した時、環境 (温暖化) 問題は現時点で全て解明されていないが、文明史上経験した事が無い新たな世界的課題として浮かび上がる可能性が高い。このような状況下で各種の課題はあるが確実にエネルギー供給が可能なエネルギーである原子力エネルギーは 2100 年時点で大型原子力発電所 (100 万 KWe 級) が 5000～7000 基程度期待されている。しかし原子力エネルギーが今後其の供給を現在の世界の 1 次エネルギーの 7% 程度から 25%～30% 程度まで上げられる為にはエネルギー供給

システムとしての多様性と安定供給を果たす為のルバスト性が求められる。

この様に原子力エネルギーは有力な 21 世紀のエネルギー源であるがそれを生かすためには単に事項に示す技術課題の解決だけではなく社会全体の理解を得る努力と世界的、特にアジアでの活用が重要であり、この為の概念構想を図 4－2 に示す。

4.3 原子力の方向性と課題

(1) 安全性（基本思想・技術と管理制度・風土）

基本思想・評価技術：

チェルノブイリ・JCO 事故の様な事故を生じない様従来からの深層防護の基本思想を今後の革新型炉等でも遵守することが必要である。さらに稼働総規模が現在の 10 倍程度に成ることから更なる安全性向上が望まれる。実用化段階では決定論的評価手法から実体を踏まえたリスク概念手法の導入により現実的なトラブル・故障を未然に防止による事により稼働率の向上及び過剰規制の適正化が望まれる。

制度・管理・風土：

組織内・間の意思疎通を良くするため管理の主旨・目的・判断基準・主旨の共有化と透明性確保を図ると共に規範の徹底を図る。また規模が 10 倍になる点から人材育成・教育も重要である。

(2) 持続性

i. 炉型と核燃料

・炉型

当面は現在実用化されている LWR が中心であるが 21 世紀中葉以降は高速増殖炉の本格的利用が不可欠である。その際冷却材など複数概念の研究を推進し開発に伴うリスクの低減及び実用化段階での原子力系の共通原因故障等に対するルバスト性確保が重要である。

・核燃料利用方法

現在核燃料利用は LWR・FBR 路線が有力な考え方であり実用化も視野に入っている。しかし LWR/FBR 路線は急速なエネルギー供給拡大には対応し難い点が示唆されている。また今後の利用規模の拡大・利用地域が途上国中心である事と考慮すると U235 をより有効・効率的活用が不可欠である。この様な観点から炉内で U235 を燃焼させると同時に生産される Pu を長期間に亘り順次燃焼させる革新的炉心概念（例えば Candle 炉概念）が核不拡散抵抗性、再処理負荷削減の点からも有力な構想であり、今後工学的研究の推進が強く望まれる。また LWR/FBR 路線に加えての様な体系の存在は原子力エネルギー供給体系の柔軟性確保、ルバスト性確保に寄与するものとして期待される。

・出力規模

現在の原子力発電所は 100 万 KWe 級以上の大型が主流である。今後もこの傾向は当面続くであろう。しかし原子力エネルギーが電力の 40~50%を超えるとすると電力網の完備していない地域への電力供給、および熱利用（地域熱供給、水素生産、海水脱塩等）への利用範囲の拡大を考えると中小規模のニーズは可成あると考えられる。

ii. 再処理・核燃料供給

再処理 :

現在実用化されている方式は当面順次増強し Pu 燃料体系への移行・実用化が進む物と考えられる。しかし LWR・FBR 路線で Pu 利用系への移行には世界で 6 ヶ所再処理工場相当規模で約 50 ヶ所程度必要である。本格的な Pu 利用となる 21 世紀中葉までにはより簡素で安全性・経済性の優れた方式の開発・実用化が望まれる。またより再処理量削減できる核燃料利用系が望まれる。

国際的核燃料供給構想 :

今後の原子力エネルギー利用の中心が途上国であり安定的な核燃料供給保証は重要課題である。且つ核不拡散を確かなものとする為、国際的な枠組みで公平な価格による核燃料供給 (U235、Pu、U233) を保障するシステムが必要である。途上国での原子力利用が本格化する 2030 年ごろまでに枠組みを国際的に合意し、21 世紀中葉には本格的稼動が望まれる。なお本構想には多面的な原子力利用に関する国際的協力機能を持たせ原子力利用の推進・安全確保・安定化を図る事が期待される。

iii. 原子力エネルギーの多目的利用（電力、熱利用・水素生産・脱塩等）

利用分野 :

従来原子力は電力生産のみであったが、CO₂ 排出しないエネルギー源として利用用途を地域暖房・水素生産・脱塩による水の生産等が考えられる。この為にこれら他産業との連携と原子力エネルギー供給の経済性向上が望まれる。

制度の整備

現在の原子力利用に関する制度は発電用が主力である事から発電用に限定されている。今後より多くの分野での利用に適した規制、核燃料利用体系への改定が必要である。

(3) 廃棄物

地中埋設処分 :

技術的には実用域に達している。課題は何処に処分地をするかである。なお今後各種規格・基準の世界的標準化が必要である。

MA・LLFP 消滅 :

廃棄物の約 0.1%を占める MA を廃棄物中から分離して核燃料として利用することは核燃料の約 10%増加に相当する。また廃棄物量中の放射能を 2%程度まで削減可能で、必要管理期間を 300~1000 年程度まで短縮が可能となる。また LLFP の分離・消滅により環境負荷は W%削減可能である。再処理が本格化する 21 世紀中葉ごろまでには実用化の目処を立てることが期待される。

(4) 核不拡散 (技術的進歩と制度の整備)

現在原子力エネルギー利用の拡大にブレーキを掛けている一つの大きな要素は核物質の兵器への転用であり、この為に核拡散防止条約 (NPT) が存在する。

一方このような核燃料であれば兵器への転用が困難であり平和利用に用いても良いという基準は現在無く、国連常任理事国 5 ヶ国以外で再処理が認められているのは日本だけである。今後原子力エネルギーを途上国含めて広く利用する為には核燃料の平和利用基準を制度の完備と共に作成することが望まれる。

技術的側面 :

基本的には核燃料物質の入手、濃縮技術・再処理技術のハード及び運用技術の 3 つが従来からの考え方である。加えて Pu に関しては兵器性能の大幅劣化、取り扱いの困難さの増大などによる方法が期待されている。

制度 :

途上国を中心とする国々が原子力を平和目的で利用したいと考えても核燃料の安定的供給がある程度保障されないと導入したくとも出来ず、結果的に石炭など化石燃料がコスト的に高い再生可能エネルギーを用いる事になり、南北問題は更に拡大する可能性がある。

この課題を解決する為には国連常任理事国 5 ヶ国と日本以外への核燃料供給を国際的な枠組みでの安定的核燃料供給の仕組みにより可能とすることが望まれる。

4.4 原子力の課題と COE-INES

原子力の課題の多くは現在国、国の研究機関、事業者、民間等で実施されている。

一方東工大は大学、アカデミアの立場から 21 世紀以降の世界に持続的発展への寄与及びより良い原子力エネルギーの利用の観点を見据えて研究を実施し成果を提示して来た。

今後よりとも大学の立場から社会的意義を考慮しつつ真理の探究による深化した研究および多角的な研究を通し科学・技術・社会の側面で世界・アジアのエネルギー供給の安定性確保と持続的発展に寄与する。

表－１ 社会と原子力の現状と将来像・目標

項目	2000 年	2030 年	2050 年	2100 年
世界全般：人口 ：必要エネルギー	60 億人 9Gtoe (90 億 toe)		80 億人 18Gtoe(180 億 toe)	90~110 億人 30Gtoe (300 億 toe)
環境制約：温度上昇 ：許容 CO2 排出量	7Gtc	12Gtc	1~1.5℃ 7~8Gtc	2~2.5℃ 3~5Gtc

原子力エネルギー

供給量 利用基数 (GWe) 利用範囲	0.68Gtoe (6%) 400 発電		10~15% 1000~2000 発電、熱利用	15~25% 2500~5000 発電、熱利用(水素生産等)
安全性：従来炉 ：革新型炉	リスク概念の適用 深層防護の適用	リスク概念の活用 深層防護＋リスク概念	リスク概念の活用 リスク概念の活用	リスク概念の適用 リスク概念の活用
炉型：既存炉 ：革新型炉 (Candle) 燃料供給：	LWR 工学的研究・開発・試験 濃縮 U：米英仏露	LWR＋FBR 初期商用炉 濃縮 U：米英仏露日＋？ Pu：国際供給機構開始	LWR＋FBR＋HTGR 商用炉 濃縮 U：米英仏露日＋？ Pu：国際供給機構	FBR＋LWR＋HTGR 商用炉 濃縮 U：米英仏露＋？ Pu：国際供給機構
再処理量・万トン(施設数)	1 (10 ケ所)		3~6.25 (30~60 ケ所)	3~6.25 (30~60 ケ所)
廃棄物：HLW (トン) MA+LLFP	400 (仮貯蔵) 40 (研究)	(工学的試験)	1000~2000 (地中埋設) 100~200 (有効利用開始)	2500~5000 (地中埋設) 250~500 (有効利用)
核不拡散性	(技術＋制度) 検討	(技術＋制度) 確立	(技術＋制度) 運用	(技術＋制度) 運用
原子力利用範囲	発電	発電	発電＋熱利用	発電＋熱利用

表 4-2：原子力利用拡大の課題（先進国と途上国別）

		2010～2030	2030～2050	2050～2070	2070～2090	東工大関連
先進国	利用規模 GWe	～300			1500～2000	
	炉型	LWR,	LWR,FBR	FBR,LWR,	FBR	
	インフラ	整備完	整備完	整備完	整備完	
	核燃料 物質 量	U235	U235&Pu △	Pu&U235 △	Pu ○	
	再処理	準備&整備	本格化	本格化	本格化	
	廃棄物処分	準備	整備	実施	実施	量削減 (MA 分離)
	社会的受容性	△	○	○	○	
共通	安全	○	○	○	○	従来規格とリスク 概念
	核不拡散	XX	XX	X	△	P3+INFSS
途上国	利用規模	50			3000～7000	
	炉型	LWR, Candle?	LWR, Candle?	FBR,LWR, Candle	FBR, Candle	炉型戦略
	インフラインフラ	準備	整備	整備完	整備完	人材教育、制度
	核燃料 物質 量	U235 X	U235&Pu XX	Pu&U235 XX	Pu X	INFSS
	再処理	準備	整備&本格化	本格化	本格化	
	廃棄物処分	準備	準備	整備	実施	量削減 (MA 分離)
	資金（融資）	X	X	X	?	
	社会的受容性	?	?	?	?	