

○竹下寿英 (テクノバ)

1. はじめに

技術開発は一般に経済的・社会的なインステイテューションの枠組み＝制度の下で進められている。ここで制度とは、国家と市場の間、そして企業を始めとする社会的な様々の組織や共同体 (association) のあいだを結び、特定の方法で関係づけている規則の束である (ref. 1)。つまり、人と組織が共同して、あるいは競争の下に技術開発を進める上での関係性を規定する諸ルールであり、法律や規則のように固定的なものと、習慣や規範のように暗黙的あるいはインフォーマルにルール化されているものがある。

技術の進化は、この様々の制度の場において探索、学習をし、多様なアイデアから varieties を形成し、経済・社会および国際的な相互作用の下での選択のプロセスを経て、技術の経路、technology path を作り出してゆくプロセスである。技術開発を進める上での制度には3つの役割、機能がある。第1に、技術開発は常に将来的に不安定で不確実な成果を追求しているが、制度の場を持つことによって対象領域を限定し、技術経路をたどることによって不確実性を制御・縮減する事が出来る。第2に、個人の許容量をはるかに超える情報、知識と関係性に対して、制度は知識・情報の分散的な蓄積と相互交換をすることによって複雑性を小さくすることが出来る。第3に、協力の関係あるいは機能的な分担を課することによって負担を免除する事が出来る。しかし一方、結果的に技術開発にとって厳しい制約となる制度に対しては、その改変が行われ、技術と制度との共進化が生まれる。

ここでは、原子力開発が直面している新しい現実と初期の多様な varieties の形成が進化する状況、典型例として ABWR (advanced boiling water reactor)、そして将来の進化を考える上でのエネルギー・シナリオ予測の役割を検討する。

2. 原子力開発が直面する新しい現実

現在世界には、432基、3億6千万 kW の原子力プラントがあり、電力供給の17%をまかなっている。その潜在的ポテンシャルにもかかわらず、21世紀におけるその将来見通しには大きく拡大するシナリオと縮退してゆくシナリオと、様々に描かれている。その不確実性をもたらしている4つの基本的な要因がある(図表1)。

第1に、欧州、米国を先導として世界的に電気事業の規制緩和が進んでいる。その中でも発電事業の自由化の進展が早く、カリフォルニアのように需要家が自由に供給者を選ぶことが可能となると、発電事業者にとって長期的な将来需要の見通しはたてがたくなる。したがって、複合サイクルガスタービン発電のように、資本費が安く短期的に投資回収でき、需要にフレキシブルに対応できる規模のプラント

が求められ、原子力のような大規模投資はさけられる可能性が高くなる。

第2に、21世紀中葉には石油・天然ガスの継続的な供給拡大は壁にぶつかる
とみられ、エネルギーセキュリティー上も又CO2を放出しないことによる地球環境
問題への対応としても原子力発電の有利性は評価されている。しかしこれら長期的
な課題への対応策を市場メカニズムに乗せることの困難は大きく、国の継続的な役
割が問われるが、それを左右するのは国民的にその認識が受け入れられるかどうか
によっている。

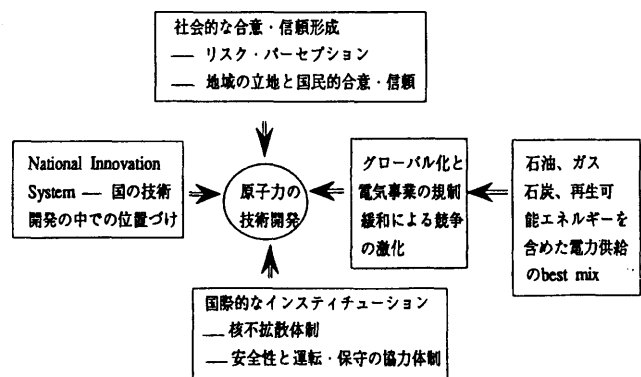
第3に、原子力開発に伴う国際的な課題としては、グローバルな不拡散体制と
特にアジア地域などエネルギー需要の伸びる地域での原子力利用の普及・拡大をは
かるための協力体制の構築である。1995年には核不拡散条約は無期限に延長さ
れ、米国・ロシアの核兵器解体も具体的に進み出しているが、依然としてこの条約
に参加していない核保有するとみられる国があり、又秘密裡の核開発危険性は払拭
出来ず、不拡散の体制づくりは継続的な課題となっている。その一方、急速に経済
発展を続ける国々で、エネルギーセキュリティー上も原子力開発を目指す開発途上
国が増えてきている。そのため、国際的に合意された安全の枠組みを作り、安全の
ための原則を確認する安全条約を各国が批准することを求めるとともに、先発国は
プラント輸出に当たっては、運転・保守の安全性を含めた「ワンセット供給」とし、
安全性の共同研究をも充実することが求められる(ref.2)。

第4に技術に対する社会的な受容性の課題がある。社会が複雑に、そして技術
が高度化するに伴って、社会の技術に対する見方は厳しくなっている。たとえば放
射線、電磁波、化学物質などリスクに対する計測精度はどんどん向上するが、その
健康被害への程度とその評価は、量が少なくなるのに応じて困難度を増している。
それに加えて、人々が豊かになるとともに、低いリスクにも過敏になっていること
があげられる (ref.3)。各種発電技術の環境、健康リスクについてその影響評価が
EU, 米国 DOE で詳細な調査が進められている。その結果は、炉心損傷の事故の影
響を考慮に入れても原子力発電は、石油、天然ガス火力と同等レベルで石炭火力よ
りも大幅にそのリスクは小さい。

しかし社会的なリスク意識では原子力の方がはるかに高い (ref.4)。
情報公開や円卓会議など、リスクコミュニケーションをはかっても、この
実体と意識のギャップを埋めることに現状では困難とみられる。意思
決定主体と国民の間での信頼をどう高めるかが課題となっている。

これらいずれもが、技術開発が直面している制度上の課題であり、
技術と制度が共進化しなければならない関係にあることを示している。

図表1 原子力開発の直面している新しい現実



3. 技術進化のプロセス

進化とは対象の変化をもたらすパターン、あるいはその原則という意味で使われるが、R. Nelson は社会—経済—技術の進化プロセスに対する3つの原則と1つの仮説をあげている (ref.5)。原則の1は知識の蓄積・増大とその移転、2は新規性の創生との結果としての多様性と varieties の形成、更新、3は代替の間での選択である。さらに仮説として、選択は環境との相互作用により行われ、全体的な最適性という指標ではなく、局所的な命題である、としている。

原子力技術の変化プロセスは、複雑な技術システムが社会、政治、経済と共進化するというこの技術進化の概念で理解を進めることが出来る。

1950年代に始まった発電を中心とした原子力開発では、初期、あらゆる種類の炉型の開発がなされた。米国では、原子力潜水艦用に開発されたタイプ、イギリスでは軍事と民生の両用をかねて開発されたタイプ、カナダでは戦時欧州から逃れた研究者が重水の専門家であったことなど、歴史性と地域性が鮮明に出たタイプの開発が競い合い、生き残ったが、その他を含め図表2に代表的な varieties をあげている。生存を果たしたタイプは21世紀にかけて更に進化、分化することによっていくつもの新しい varieties をもたらししていく路線が見える。又、材料の進歩、廃棄物の消滅などの要請、資源情勢の変化などによって、21世紀には再び爆発的に新しい種の生まれることも考えられる。これまでの技術変化の特質を以下にみる。

第1に、初期の varieties の形成では国家が中心となり、企業と大学の知識・技術を集約していった。そのどれもが技術のブレークスルーと市場は予測のつかないもので、learning by doing であり、原子力航空機や土木工事に原爆を利用するなど bounded rationality であった。

第2に、開発力は、知識、技能、人工物として体化しているが、それらは1955年の国際会議以来、積極的な移転と教育により国際共有され、自主開発力に転化した。その一方、核爆発の開発への転用のリスクが高まり、様々の国際的な規制、条約などを成立させた。

図表2 原子力開発でのvarietiesと新しい展開

初期のvarieties (1950~60年代)	新しい展開 (1990年代~21世紀中葉)
<p>熱中性子炉</p> <ul style="list-style-type: none"> 軽水炉 <ul style="list-style-type: none"> 加圧水型炉 (PWR) 沸騰水型炉 (BWR) 黒鉛減速軽水冷却炉 (RBMK) 重水減速 <ul style="list-style-type: none"> 加圧水型炉 (CANDU - PHW) 沸騰水型炉 (SGHWR) ガス炉 <ul style="list-style-type: none"> 炭酸ガス冷却 (マグノックス炉、AGR) ヘリウム冷却 (高温ガス炉) 溶融塩炉 	<p>APWR、次世代 PWR、EPR (ヨーロッパ)</p> <p>中小型炉 (AP-600)、(Pu 燃料利用を含む)</p> <p>ABWR、次世代 BWR、</p> <p>中小型炉 (SBWR)、(Pu 燃料利用を含む)</p> <p>—</p> <p>CANDU-4、CANDU-3、(Pu 燃料利用を含む)</p> <p>—</p> <p>—</p> <p>高温工学試験研究炉 (原研)、Pu処理用高温ガス炉、</p> <p>モジュラー型高温ガス炉</p> <p>消滅処理用溶融塩動力炉</p>
<p>高速増殖炉</p> <ul style="list-style-type: none"> Na 冷却 (混合酸化物燃料) Na 冷却 (金属燃料) ヘリウム冷却 (GCFBR) 鉛冷却 	<p>高速増殖炉 (混合酸化物燃料)、消滅処理用高速炉</p> <p>高速増殖炉 (金属燃料)</p> <p>—</p> <p>鉛冷却酸化物燃料高速炉</p>

第3に、市場における選択のプロセスは、規模の経済と学習機会の差異をもたらし、ポジティブ・フィードバックで、3つの technology path を成立させた。すなわち、PWR, BWR, CANDU である。1970年までは、ガス冷却黒鉛炉がリードしていた。

第4に、わが国は1970年代に試練の開発の時代となった。この時期、プラントの稼働率は40～50%台が7年間続いた。それは、PWRでは蒸気発生器の細管が腐食によって漏洩し、又BWRでは高温と低温の切り返しによる応力腐食割れが配管に起こったためである。これらの問題は自主技術の重要性を再確認させ、図表3に示す、国による「軽水炉の改良標準化計画」と電力の共同研究制度が1976年に発足し、信頼性、安全性そして稼働率の向上を図る技術開発が全面的に進められた。結果として改良の積み重ねの可否が進化を左右している。

第5に、技術と社会との共進化は、原子力への反対運動そして政府規制の対応の中にみられる。1970年代、米国での温排水による熱汚染と非常用炉心冷却装置の性能について全国規模での論争があり、前者では冷却等を設置し、後者は試験で性能を確認したが、技術変化と社会との相互関係のあり方を示している。規制の問題では、TMI事故後の段階的な規制の強化と行き過ぎの部分に見直しのなかったことが、結果的にプラントごとに大きな経済的パフォーマンスの差をもたらし、今日の回収できない投資の一因を作っている。

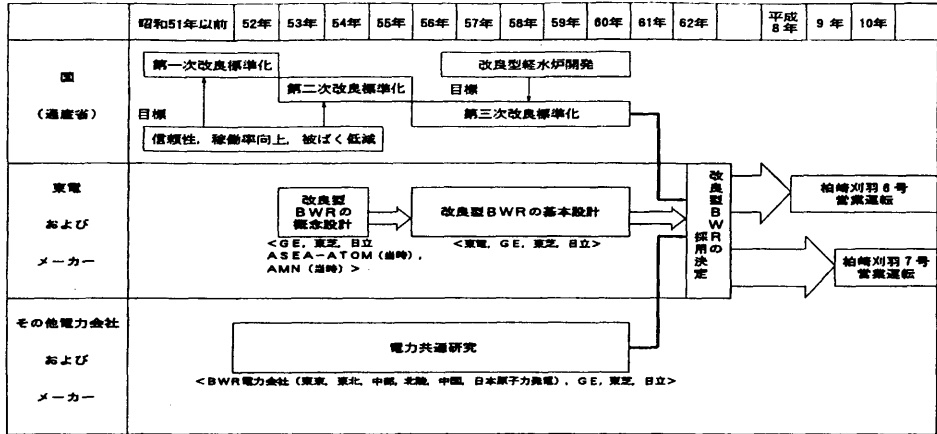
4 進化のメルクマール／ABWRの開発

技術開発の共進化の一例として1996年運開したABWRがあげられるが、その開発にはいくつかの幸運な条件がそろっていた。第1に、米国、欧州、及び日本のBWRメーカーとユーザである電力が、それまでの初期トラブルを克服して、理想的なプラントの設計を目指す環境があり、日本の電力のリードに対して協力して独創的技術を結集することが出来た。第2には、国が第3次軽水炉改良標準化計画の主要項目としてとりあげ、1981年から85年まで、目標設定、機器システム等の改良プログラム、及び標準化プログラムを策定し、民間での実施を機器の実証試験などで支援した。第3には、米国では1980年代後半からDOEとEPRIがALWRの開発の支援のため、その設計証明(design certification)の取得、及び第一号基への設計補助を行っており、上記プログラムを側面から支援するものとなっている。

市場競争の激しい中で、このような協力体制が可能となったのは、この時期、米国でも欧州でも原子力産業が苦境に立たされていた上に、80年代半ばまでは、高い石油価格の下で日本における原子力発電の経済的優位性は維持されていたことがあげられる。

ユーザである電力会社は、プラントの開発をリードし、パフォーマンスのターゲットを作り、utility requirements としてベンダーに提示した。これは技術進化での新しい様相の一つであり、科学計測機器や半導体技術開発にみられるユーザーが開発のイニシアティブをとると同様の例である(ref.5)。またスタートから商業導入まで20年の期間開発を継続することは、ユーザーの主導性があったことによる。この開発経緯を図表3に示す。

図表3 ABWRの開発プロセス



このABWRで採用される新しい技術のうち、わが国で経験のなかったもので、特に重要な要素技術については国の委託により実機相当の試作品もしくは縮小モデル等を用いて各種開発試験が行われている。又これに次ぐABWRプラントでは、標準化をし設計費をなくし、海外からも安い資材・機器を採用することにより、30%の大幅コスト削減をはかる方針がとられていることから、今後さまざまな協力体制が構築されていくものと期待される。

市場がどの炉タイプを採用するかということが、現在の開発の路線を大きく左右するとみられるのは、その学習と継続性によるポジティブ・フィードバックの経済・技術効果である。

5. エネルギー技術システムの進化と将来展望

21世紀のエネルギー・システムは、現状の傾向が続いて化石燃料（石油、天然ガスから石炭へ移行）が中心で進むか、自然エネルギーのシェアが大きくなるか、あるいは原子力の役割が拡大するか、大きくはこの3つの可能性をもっており、各シナリオが作成される。

長期にはどの技術経路をたどると考えるかが、技術開発の計画化を方向付けるが、そのため各経路の多面的な検討を行うためのシミュレーションが有効である。

各シナリオは、資源のアベイラビリティ、リスクのレベル、セキュリティの確保などの基本的な評価事項での差異が、利用される技術システムの特性を反映して生じる。本検討では2100年における各シナリオの電力供給に対する燃料源別構成を次のように考え、世界エネルギーLCAモデル（LCA=ライフサイクルアセスメント）を利用した（ref.6）。

2100年の世界人口は115億人、1人当たりのエネルギー消費は2.4トン（石油換算）/人で、合計278億トン（石油換算）、電力化率を60%と設定した。また、電力以外のエネルギー消費も、シナリオに対応して資源構成を変えている。化石燃料として30ドル以下の採掘コストの石油の究極可採量を3兆バレル、天然ガスを2.9兆バレル（石油換算）とし、ロジスティックス曲線（S字の形）で供給されていくものと考えた。（図表4）

評価の対象は以下の4項目である。

○エネルギー収支；電力供給のライフサイクル面からみた電源の建設や運用に伴

う 間 接 エ ネ ル ギ ー 消 費 量

○ 環 境 特 性 ; 地 球 温 暖 化 負 荷 と し て の 炭 酸 ガ ス の 総 排 出 量 及 び 電 源 の 排 出 量

○ 健 康 リ ス ク ; 電 力 供 給 の ラ イ フ サ イ ク ル (建 設 、 運 転 、 廃 棄) ベ ー ス の 公 衆 及 び 職 業 人 に 対 す る 死 亡 リ ス ク

○ 経 済 性 ; 累 積 資 源 需 要 に 対 す る 資 源 の 供 給 可 能 量 と 限 界 生 産 コ ス ト 、 各 発 電 施 設 の 新 設 / 更 新 に 必 要 な 建 設 投 資 コ ス ト

そ の シ ミ ュ レ ー シ ョ ン 結 果 は 、 図 表 5 の ご と く な る 。

こ の 結 果 か ら 分 か る こ と は 、 化 石 燃 料 シ ナ リ オ で は 炭 酸 ガ ス の 排 出 の 大 き さ と 死 亡 リ ス ク の 点 で 、 問 題 が 大 き い こ と 、 自 然 エ ネ ル ギ ー シ ナ リ オ で は 、 予 想 さ れ る 投 資 コ ス ト と 建 設 な ど に 伴 う 間 接 エ ネ ル ギ ー の 大 き い こ と が 示 さ れ る 。 こ れ ら の 点 で 原 子 力 重 視 シ ナ リ オ は 優 位 性 が あ る が 、 社 会 的 ・ 政 治 的 な 受 容 性 が そ の 普 及 上 の 大 き な 制 約 要 因 と な っ て い る 。 チ ェ ル ノ ブ イ リ 型 の 事 故 は 欧 米 の タ イ プ の 炉 で は 起 こ ら ない こ と 、 及 び 他 の エ ネ ル ギ ー 利 用 に 係 わ る リ ス ク が 比 較 の 上 で 十 分 考 慮 ・ 評 価 さ れ る べ き こ と 、 ま た 廃 棄 物 に つ い て も 石 炭 な ど に 伴 う も の 同 様 、 取 り 扱 い は 技 術 上 可 能 で あ る こ と を 国 際 的 な レ ベ ル で 議 論 し 、 社 会 的 受 容 性 を 高 め る 必 要 が あ る 。

こ れ ら の 課 題 に 対 し 予 想 を 超 え る 技 術 変 化 、 制 度 的 に 大 き な 改 変 、 資 源 や 自 然 の 課 す る 条 件 変 化 が あ る と シ ミ ュ レ ー シ ョ ン の 枠 組 み は 変 わ っ て く る 。

図表4 2100年の電力供給構成

	化石燃料	自然エネルギー	原子力エネルギー
(1)化石燃料シナリオ	67%	18%	15%
(2)自然エネルギー重視シナリオ	25%	50%	25%
(3)原子力重視シナリオ	25%	25%	50%

図表5 世界のエネルギー/電力供給シナリオの比較

	化石燃料 炭酸ガス 排 出 量 (GT/年)	電力供給に 伴う死亡リ ス ク (千人/年)	電力供給 間接エネ ル ギ ー 比 率 (%)	電源建設 投 資 額 (兆円/年)
1990年	22.5	1.7~8.3	6.9	0.22
2100年				
化石燃料シナリオ	75.0	13.1~66.5	6.0	1.60
自然エネルギー重視シナリオ	22.5	5.4~25.1	7.4	2.25
原子力重視シナリオ	22.5	3.9~20.8	5.8	1.79

6. ま と め

技 術 進 化 の 具 体 的 な 事 例 研 究 は 、 コ ン ピ ュ ー タ ・ ソ フ ト 、 情 報 シ ス テ ム な ど で 実 施 さ れ て い る が 、 さ ら な る 積 み 上 げ と そ こ か ら の 理 論 化 が 求 め ら れ る 。 ま た 進 化 は 制 度 と 社 会 的 な 意 識 変 化 と と も に 分 析 を 深 め て ゆ く 必 要 が あ る と 考 え ら れ る 。

参 考 文 献

- (1) G.Hodgson(1988), Economics and Institutions, Oxford, Polity Press
- (2) T.Takeshita et al(1997), Asia Seminar by the Atlantic Council
- (3) P.Slovic(1997), Risk Perception and Trust, CRC Press Inc
- (4) European Commission(1995), ExternE--Externalities of Energy
- (5) R.Nelson(1995), J. of Economic Literature 33 p48
- (6) J.Howells(1997), Research Policy 25 p1209
- (7) T.Takeshita et al(1997), IIASA/Int.Energy Workshop (to be published)