

巨大システム技術の継承に関する理論的考察

—高速炉開発への応用—

Theoretical Discussion on Maintaining Technological Capability of Large Complex System
- Its Application to Fast Reactor Development -

キーワード: 技術継承、巨大システム技術、高速炉、研究開発

鈴木 達 治 郎

高速増殖炉(Fast Breeder Reactor:FBR)のような巨大システム技術の研究開発は、長期のリードタイムが必要であり、しかも商業化の時期が不確実なため、次世代への技術継承が大きな課題となっている。しかしながら、技術継承に必要な条件(規模、費用、内容など)は、これまであまり明確にされてこなかった。本論文は、技術継承の概念とその条件を、技術移転や技術進歩の理論、ならびに原子力以外の巨大技術開発例から明確化し、今後の高速炉開発戦略構築に貢献することを目的としたものである。本論文では、技術継承を「知識(ノウハウ)の継承」「技術革新能力の継承」「生産基盤の継承」の3段階に分類して定義し、各段階での技術継承の条件を明らかにした。まず「知識の継承」では「暗黙知(tacit knowledge)」の役割が極めて重要であることがわかった。つぎに、「技術革新能力の継承」では「技術選択枝」を生み出す能力として「技術準備能力」という概念を定義し、その確保のためには「古くなった知識の放棄(unlearning)」も重要であることを明らかにした。最後に、「生産基盤の確保」では必要な開発コストが極めて大きくなるため、コストとのトレードオフの重要性を指摘し、「プロトタイプ・プラス」という概念が有効であるとの結論に達した。これらの分析結果を踏まえて、高速炉開発については、「多重技術選択枝開発戦略」を提案。巨大な設備投資を最小化し、さらに将来の選択枝をできるだけ広く確保する形で、次世代への技術継承を確実にする方法を明らかにした。

- はじめに
- 問題提起と研究アプローチ
- 技術継承の理論的考察
 - 技術継承の定義:3段階に分類
 - 知識の継承:暗黙知の重要性
 - 技術革新能力の継承:R&D インフラの重要性
 - 生産基盤の継承:コストとのトレードオフ
 - 技術継承の総合戦略
- 高速炉への応用:多重技術選択枝開発戦略の提案
 - 主要国の高速炉技術継承に対する考え方
 - 高速炉開発の条件:柔軟性、革新性、コスト効率
 - 多重技術選択枝開発戦略の提案
- おわりに:今後の課題

1. はじめに

高速増殖炉(Fast Breeder Reactor:FBR)、核融合、超音速航空機などの巨大システム技術¹の開発には、莫大な投資と長期のリードタイムが必要である。したがって、従来はこうした技術開発の多くが、国家プロジェクトとして推進されてきた。その

背景には、(1)冷戦構造の中での「科学技術リーダーシップの争い」、(2)国家の威信、(3)世界的な高度経済成長、といった1950—70年代の特徴があった。しかし、80年代から90年代にかけて、こういった特徴が徐々に崩れていき、巨大システム技術の開発を巡る環境は、非常に厳しいものとなった²。だからといって、将来に向けて

¹ ここでの「巨大システム技術」の定義は「巨大な投資とリードタイムを要し、無数ともいってよい多数の部品・要素からなるシステム技術」のことを指す。多くの場合、国家予算の関与が不可欠であり、国家プロジェクトとして位置づけられる。

² 政府財政構造改革会議の企画委員会(座長:加藤紘一自民党幹事長)の報告書案によると、「もんじゅ」の凍結、国際熱核融合炉(ITER)の日本誘致凍結、等が含まれているという。(産経新聞、1996年5月14日)。

人類にとって潜在的価値の高いこのような巨大システム技術の開発をすべて放棄するのも賢明ではない。長期的なエネルギー資源・環境問題を考えるとき、FBRのような潜在的価値の高い巨大システム技術を、次世代に継承していくことが、現世代に課せられた責務ともいえるだろう。本論文は、そのような問題意識のもとで、巨大システム技術の継承について理論的な考察を加え、とくに原子力発電分野で究極の目標とされるFBR開発への応用を検討し、今後の開発戦略構築に資することを目的としたものである。

2. 問題提起と研究アプローチ

本研究の問題提起は以下の3点に絞られる。

- (1) 技術の継承をどう定義するか。
- (2) その実現のための条件は何か。
- (3) 高速炉開発にとっての意味は何か。

こういった問題に答えるため、まず技術の継承や技術進歩に関する文献調査を行った。次に、巨大システム技術で、原子力以外の分野で、似たような課題を抱えているケースを探し、その実態を文献ならびにインタビューで探ることとした。具体的に取り上げたものは、超音速旅客機(SST)、核融合、スペースステーション、軍事産業技術基盤、などである。最後に、高速炉については、米国、フランス、英国、ドイツ、ロシア、日本の高速炉専門家に直接インタビューを行い、技術継承についての意見をまとめることにした。

このようなアプローチをとったのは、技術継承に関して、(1)未だに確固とした研究枠組みがなかったこと、(2)なるべく現実の技術開発の状況を反映するよう努めたこと、(3)高速炉だけではなく、この問題を広く応用できるアプローチを確立すること、などの理由による。本研究では約一年半をかけて、6カ国にわたり政府、学界、産業界における約80名の専門家にインタビューを行った。その専門分野も原子力のみならず、科学技術政策、

技術進歩、技術移転など多岐にわたる。本小論は、そのような文献調査とインタビューに基づいて、現実の計画立案に役立つような基本的考え方の確立に狙いを絞ったものである。以下、まず技術継承の理論的考察からはじめ、後半はその高速炉開発への応用について議論することとする。

3. 技術継承の理論的考察

3.1 技術継承の定義: 3段階に分類

まず第一の問題提起であるが、「技術継承」という言葉の定義自体が曖昧であり、研究者、産業界、政策担当者など、その立場により大きく異なることが明らかになった。たとえば、科学技術者の立場からは、「技術ノウハウ(知識や経験)の継承」という意味合いが強いが、産業界になると「生産能力や競争力の確保」という意味合いもでてくる。一方、政策立案の立場からだと、「技術選択肢の確保」といった意味が重要となる。また、技術継承というと、ブレークスルーをねらう研究開発とは矛盾するととられる可能性も指摘された。事実、技術革新を重んじる研究者からは、古い知識を維持するより、常に新たな知識を生み出す能力の継承が重要、との考え方も提示された。

実は、技術継承の考え方についての研究は、あまりなされておらず、文献調査からも有意義な論文は見つけることができなかった。そこで、技術継承を「世代間の技術移転」と考えることにより、技術移転の理論と研究成果が、本研究にも大きく役立つことがわかった。さらに、上記のような立場の違いによる定義の違いをふまえて、本研究では、「技術継承」を次の3段階に分けて定義することとした。

- (1) 過去蓄積してきた技術ノウハウを次世代が利用可能なように確保すること(知識の継承)
- (2) 今後も継続的に革新技術を生み出していく能力を確保すること(技術革新能力の確保)
- (3) 必要な時期に、商業生産がタイムリーに立ち

あげられる条件を確保しておくこと(生産基盤の継承)

このように3段階に分けて定義を分けることにより、異なった立場からの「技術継承」の条件を、それぞれ明らかにすることができるようになった。以下、それぞれについて条件を探ってみる。

3.2. 知識の継承: 暗黙知(tacit knowledge)の重要性

知識の継承(世代間の移転)の条件を考える上で、まず「科学技術における知識」とその役割を明らかにする必要がある。科学技術における知識というものは、通常「数式や言葉で表現する事ができる合理的なもの」と理解されている³。しかしながら、科学技術者の知識の中には、それ以外の「数式や言葉で表現できない知識」、いわゆる「暗黙知(tacit knowledge)」が極めて重要な役割を果たしている、という研究成果が、古くは Kuhn(1962)[1]、最近では Ferguson(1992)[2]、Senker(1993)[3]、Nonaka&Takeuchi(1995)[4] 等により明らかにされている。

Kuhn(1962)はその著名な“The Structure of Scientific Revolutions”のなかで、「科学進歩の要件として、必ずしも明確な規則や前提が必要なわけではない」とし、その説明として Polanyi(1958)[5]の「科学の成功は暗黙知に依存している」との説を紹介している。ここでの Polanyi の定義は「暗黙知とは実地体験を通じて得られる知識で明確には説明できないもの」としている。同様に、Ferguson(1992)も、「工学分野の図面は、性格で曖昧なところがないもののように見えるけれども、その厳密さの背後には、多くの公式にのらない選択や言葉では表せない判断が隠されている。」と述べており、工学の世界にも暗黙知が重要な点を指摘している。

³ たとえば、航空力学者の Vincenti(1990)[6]は「工学の知識は何よりも、技術分野の設計者の必要に応ずべく発展させられ公式化されてきた」と論じている。

では、暗黙知というのは、公式化、言語化が全く不可能なのだろうか。答えはノーである。たとえば、Kuhn(1962)は暗黙知とは「単なる直感ではなく、成功した科学者の中で十分試され、かつ共有されている知識であり、必ずしも分析不可能なものではない」と述べている。すなわち、科学の進歩に重要な暗黙知は「グループで共有でき、かつ分析可能」と指摘しており、本人自ら暗黙知の公式化に挑んでいる。暗黙知の一部を「公式化」あるいは「言葉」に変えていく努力を惜しむべきでない、という Senker(1993)や Nonaka&Takeuchi(1995)に通じるものである。

例えば、Nonaka&Takeuchi(1995)は、日本企業における技術革新の成功の秘訣の一つが、この暗黙知を移転が容易な「形式知(explicit knowledge)」に転換しうる能力にある、と説明している⁴。技術移転ならびに技術進歩をより効率的に行うためには、暗黙知をどれだけ「公式化」できるか、にかかっているといても良いだろう⁵。その代表的な例としてあげられるのが、いわゆる「人工知能(Artificial Intelligence)」の開発であろう。しかし、いくら情報技術の進展が進んでも、公式化できない知識はどうしても残る。技術継承を考える上で、暗黙知の継承をどう実現するかは避けては通れない課題なのである。

そこで参考になるのが、暗黙知をあえて形式知に変えないで技術を継承している伝統工芸の継承例である。風見(1995)[7]は、その典型的な例として「伊勢神宮の式年遷宮」⁶をあげている。世界に名だたる神殿のなかで、今も新鮮な姿を維持しているのは、この伊勢神宮だけであり、その秘訣がこの周期的に行われる「式年遷宮」にある、

⁴ ホンダ自動車の「シティ」開発成功をその典型的なものとして紹介している。

⁵ Senkerも遺伝子工学や、新材料といった先端科学分野のケースを研究した結果、暗黙知の「コード化」の成功が効率的な開発を生む、と結論づけている。

⁶ 伊勢神宮の式年遷宮は天武天皇の発案で、690年に持統天皇の手で1回目が行われてから、1300年もの歴史を持つ。最近では1993年に行われ、約20年周期で実施される。

と風見は説明している。その方法で注目すべき点として風見は次の3点を上げている。

まず第一に「マニュアルがない」という点だ。マニュアルがあっても、マニュアルどおりにやればうまく行くか、というとそうではない。上記に述べたように、マニュアルだけでは「暗黙知」は移転できないのである。風見によれば、伝統職人の世界では、親方のやり方を見習う「見まね法」が、本物の技術を確実に伝承するベストの方法になっている、という。

第二に「スクラップ・アンド・ビルト」方式をとる、という点だ。マニュアルもないまま、すべてをスクラップしてしまうことに不安を感じないわけではないが、風見はこれも「日本の自動車モデルチェンジを頻繁に行って、技術進歩を遂げたことに通じる」とし、「スクラップ・アンド・ビルト方式は、技術を伝承させるばかりでなく、革新の機会を提供し、技術を前進させる面も持っている」という指摘を行っている。これは、技術継承の第(2)の定義「技術革新能力の継承」に通じるものであり、ただ既存の知識を引き継ぐだけでなく、新しい知識を生み出すことの重要性を指摘したものである。この考え方は、「新しい知識を吸収するのと同じくらい、古くなった(失敗につながる)知識を捨て去ることも重要である」という Hedberg(1981)[8]の指摘に通じる。

第三に、20年周期で行う、という点だ。これにはいくつかの説があるというが、そのひとつが「親から子へ技術伝承するのにベストタイミングだ」という説だという。これは、現在も技術者の世代交代のタイミングにほぼ近い。

以上の3点から、世界でも貴重なこの「式典遷宮」は、特に「暗黙知」を形式知に転換しない場合の継承例として参考になるものと考えられる。

一方、形式知化が非常に進んでいる最先端の巨大システム技術(例えば核兵器製造技術)についても、暗黙知の重要性が MacKenzie(1996)[9]により検証されている。MacKenzie は核兵器製造

に携わった科学者への直接面談や過去の核兵器開発の歴史を詳細に分析した結果、「核兵器製造技術には、公表されている知識や、シミュレーションでは補えない暗黙知が重要な役割を果たしている」との結論を導いている。さらに、今後核実験が禁止された場合、「科学者にとって、将来は核兵器の開発者ではなく、保護管理者としての役割だけが残される。その場合、核兵器製造の暗黙知が失われる可能性がある」と述べており、「果たしてそのノウハウを維持すべきかどうか、どの程度維持すべきかは今後の政策課題」という問題提起を行っている。この議論の中でも、「20年」という科学技術者のサイクルや、いったんスクラップしてからの新しい(時代にあった)核兵器開発の可能性等が、「暗黙知の継承」の重要な条件として提起されている。

以上をふまえて、知識の継承について要点をまとめておこう。

[1]科学技術の進歩および移転にとって、公式化や言語化が不可能な、体験を通じてのみ獲得することのできる「暗黙知」が重要な役割を果たす。

[2]効率的な技術進歩ならびに移転のためには、暗黙知を公式化・言語化する努力が必要である。

[3]暗黙知の伝承には、マニュアルだけでは不十分であり、スクラップ・アンド・ビルトによる技術進歩の可能性の確保、一定期間による伝承の機会の確保、等が重要である。

3.3 技術革新能力の継承: 研究開発インフラの重要性

次に考えるべきは、いかに将来に向けて新たな技術選択肢を生み出す能力を確保していくか、という課題である。これには、[1]既存の知識を継承するだけでなく、新たな知識を生み出す能力、[2]その知識を現実の選択肢にまで発展させる能力(技術力、あるいは開発能力)を維持すること、

の2点が必要となる。とくに[2]の点に関して言えば、基礎研究から開発研究へ、また科学技術者個人のレベルから組織や制度(研究インフラ)のレベルへと、課題が移ることになる。

まず[1]の課題であるが、技術進歩に重要な条件として形式知と暗黙知の相互作用をあげることができる(野中(1990)[10], Argote(1996)[11])。工学分野で言えば、既存の知識と現実の体験に基づき、新しい経験をフィードバックさせて新たなノウハウを獲得する。このいわゆる「フィードバックプロセス」が極めて重要であるという考え方である。

特に野中(1990)は、個人レベルの知識創造から組織レベルへの組織創造へのプロセスに注目し、中でも暗黙知の共有化が、今後最も重要であるとしている。Argote(1996)は、蓄積された知識も、製造の継続が途絶えたり、技術が現実利用できなくなると、その知識は確実に衰退していくことを、現実の産業技術で例証している。

一方、知識の喪失を恐れるあまり、かえって技術進歩の可能性を阻害する可能性も指摘されている。これが、前項で指摘された、「(古くなった)知識の放棄」(unlearning)の必要性である。例えば、前述した Hedberg にくわえ、最近では Starbuck(1996)[12]がいくつかの事例研究に基づき、次の三つの結論を導いている。第一に、新たな学習はまず古い知識の放棄がなければ始まらない。古い知識に依存しすぎると、既存の概念にとらわれ、新しい考えや事実を見つけることが困難になる。Starbuck(1996)によれば、技術者にこの傾向が最も強いという。合理的な人間ほど、自らの考えを変えることが難しい、というわけである。第二は、そういうこともあるため、ある程度「異常な出来事」や「環境の変化」に出会うときに古い知識の放棄を行うことができるという点だ。最も顕著な例が、事故や失敗であり、深刻な事故が起きたときほど、新しい知識獲得の機会である、と考えられる。第三は、個人で知識の放棄が困難なとき、組織の中で意志決定者の変更を行うことによ

り、そのような機会をつくることことができる。これらは、すべて知識継承が静的と言うより、動的なプロセスであることを意味している。

逆に、いったん失われた知識を取り戻すことは果たして不可能なのだろうか。過去「いったん失われた技術の復活」例があるだろうか。科学技術史の分野では、この「技術復活」についてもいくつかの事例研究がなされており、復活例が例証されている。たとえば、Hale(1996)[13]は古代ギリシャ時代(B.C. 5C)におけるボートの漕法が、19世紀になって復活した経緯を詳細に報告している。また、エネルギー分野では、Smith(1995)[14]が太陽熱発電技術、Stranges(1991)[15]が石炭液化技術について、同様に「技術復活」例を検証している⁷。これらの例から共通していえることは(1)技術は時代を越えて復活することが可能である(2)しかし、そのためには過去のノウハウが何らかの形で残されていることが必要である(3)ルーツは同じでも、復活した技術は時代に即した新しい技術が活用されていること、の3点であり、これらも知識継承のプロセスの複雑さをよく示している。

つぎに[2]の「知識を現実の選択肢まで発展させる能力」についてであるが、ここで重要なのは、「技術力(あるいは開発能力)」と「生産能力」を明確に区別すべきだ、という点である。Bell & Pavitt(1993)[16]によると、技術力とは、常に新しい技術選択肢を生み出しうる能力であり、生産能力とは特定の技術に基づいて、経済合理性を持つ商業生産を行うことができる能力である。ただし、生産能力はそれ自体では、新しい技術選択肢を生むことはできず、常に外部からの入力が必要とな

⁷ 例えば、パラボナアンテナを用いる太陽熱発電技術のルーツとなる技術は、1861年にフランスの科学者 Auguste Mouchout が発明したとされている。その後、スウェーデンや英国で開発が続けられたが一時中断し、1900-1910年にかけて、技術開発が復活した。その後再び、開発が中断したが、1970年代末から80年代にコンピューターによる制御技術を採用して再復活。ハイテクを駆使しているものの、その中心となる技術は Mouchout の発明による発電システムと基本的に同一といわれている(Smith[14])。

る点に留意する必要がある。日本の産業技術力は、卓越した生産能力に大きく依存してきており、本来の科学技術力とも言うべき、新しい知識や技術選択肢をうみだす能力が比較的弱かったと考えられるのである。ただし、これらの能力は、相互に関連しあっており、卓越した生産能力からのフィードバックが、科学技術力の進歩にとっても重要であるとの指摘が、Bell&Pavitt 等によりされている。

この技術力の定義をより明確に理解する上で参考になる考え方が、米国議会技術評価局 (Office of Technology Assessment:OTA) (1980)[17]により示されている。当時、超音速旅客機 (SST) 開発継続の是非を巡り議論が分かれていたが、OTAは「将来の産業生産に導くことができる最先端の技術開発能力」として「技術準備能力 (technological readiness)」という概念を定義し、その能力継承を提唱した。これは、産業生産能力は持たないが、「要素技術の研究開発 (generic R&D)」を継続的に行うことにより、最先端の技術力を維持する、というものである。工学的に言えば、いわゆる「プロトタイプ能力」ともいえるものである。この考え方を採用した米国は、SST の実証プロジェクトをキャンセルした20年後の今でも、必要ならば最先端の SST を開発できる能力を維持していると、考えられている⁸。

では、この技術準備能力を確保しておくためには、どのような条件が必要なのだろうか。さきほどの OTA の報告、ならびに筆者が米国の高速炉 (とくに金属燃料サイクル技術) について行った研究に基づくと、次のような条件が必要である (Suzuki (1989) [20])。まず、コアになる技術ノウハウを持った技術者グループの維持である。その際、

これまでの知識を蓄積したいわゆる旧世代の技術者と、これから新しい知識を生み出そうとする次世代の技術者が、ミックスされていることが望ましい⁹。次に、多様なニーズに応えられる研究開発施設である。商業化の時期が不透明な状況では研究開発のニーズも多様化する。将来に向けて新しい技術選択肢を生み出していく為には、様々な要素技術の開発を行う必要がある。そのためには、特定技術の実証というより、ブレークスルーが期待される技術に焦点を当てていく方が望ましい。さらに、巨大システムの場合には、一定期間内にシステム・インテグレーション技術の獲得のために、施設の建設が行われる事が必要と考えられる。ただし、その規模は、商業規模である必要はない¹⁰。従って、最大でもプロトタイプ施設程度の規模で十分だと考えられる。この点が、次項の「生産基盤の継承」と大きく異なる点である。

ここで、技術革新能力の継承についてまとめておこう。

[1]既存の知識の継承に加え、新たな知識を生み出す能力を確保するためには、形式知と暗黙知の相互作用や古い知識の放棄が重要である。

[2]新たな知識を現実の選択肢に発展できる能力を確保するためには、「技術準備能力」と呼ばれる概念が有効で、ある一定の技術者集団、柔軟性のある研究開発施設などが重要だが、その規模は最大でもプロトタイプ程度で十分である。

3.4 生産基盤の継承:コストとのトレードオフが重要

最後の技術継承は、産業レベルの生産技術に

⁸ 米国では SST は70年代はじめにキャンセルされたが、その後も研究開発は継続され、80年のこの報告は、SST 実証機計画の復活の是非を巡る議論の中で提出されたものである。結果は、実証機建設が見送られ、現在に至っている。現在も開発能力が存在するとの主張については、Rosen&Williams (1993) [18]ならびに Gordon (1996) [19]を参照のこと。

⁹ NASA における面談調査による。1996年5月。NASA ではスペースプレーンのプロジェクトの際、旧世代の技術者をリーダーに持ってきたところ、新世代の技術者からのアイデアが極めて通りにかかったという経験からの反省で、これからはチーム構成のメンバーに気をつけるという。

¹⁰ 大量生産形式の技術では、商業規模もそれほどリスクをかけずに生産することができ、また生産のリードタイムも短い場合が多いので、考え方も異なってくる。

ついてである。この課題は、主に安全保障の面から、将来にわたり産業競争力を確保することを目的に最低限の産業活動を確保する、という観点で議論されることが多い。

ここでの議論の重要な分かれ目は、産業規模の生産技術を維持確保することにかかる費用が、安全保障コストとして見合うかどうか、また果たしてそのような産業基盤の維持が将来の技術進歩にどれほど貢献するか、という2点に絞られる。巨大システムゆえに、投資リスクもまた政治社会的リスクも大きくなるため、政策的にも最も判断が困難な課題と考えられる。

たとえば、米国における造船産業の維持について、レーガン大統領は連邦政府のコスト負担軽減を理由に造船産業への援助を廃止した¹¹。これに対し Whitehurst (1986) [21]は、「造船ドックの閉鎖が続き、米国の安全保障の危機につながる恐れがある」との警告を発したが、一方米国議会 OTA (1983) [22]は「産業競争力を回復するためには、現在の市場で競争しようとするのではなく、最先端の技術開発力をつけるべきだ。」と提案している。いいかえれば、現在の生産基盤の維持よりも、革新技術能力をベースにした先端産業としての造船産業を育成する方が賢明である、との結論であった。

同様の議論が、軍事産業を巡っても繰り広げられている。Gansler (1986) [23]は、軍事産業への発注額が極めて巨大になりすぎている要因として、「実証や生産能力の開発」と称する予算が多すぎること指摘し、そのような「巨大開発予算」よりも「最先端の技術革新に必要な分野に予算をより多く振り向けるべき」と主張している¹²。

さらに、市場ニーズが不確実な段階で産業生産基盤をいったん確立してしまうと、その維持コストが膨大なものとなり、先端技術開発への投資にかえって障害となるリスクを覚悟しておく必要がある。英国やフランスで開発され商業化された超音速旅客機 (SST) はその良い例である。商業化以降採算が合わず、そのコスト負担は増加するため、研究開発への投資がほとんど凍結状態にせざるを得なかったという¹³。

しかし、革新技術力の継承だけであると、製造能力の確保、メンテナンス技術の確保、部品メーカーなどの請負企業群の確保、等の面で不安が残る。だからといって、これら産業の維持だけを目的にした発注継続はコストが高くつきすぎる。コストと製造ノウハウの維持のバランスをどうはかるか。こういった課題に対し、OTA (1993) [26]は軍事産業基盤の再構築戦略に関する報告書の中で、「プロトタイプ・プラス」という概念を提唱している。これは、プロトタイプ施設の建設だけでは不安、という分野について、必要不可欠な分野においてのみ、ある一定規模内での製造を認める、という考え方である。OTA による、この戦略の要点は以下のようにまとめられる。

- [1] 設計チームを維持し、常にその技術レベルを向上させて、最先端の技術能力を確保する
- [2] 将来の商業生産に不可欠な製造ノウハウの維持・継承に努める
- [3] プロトタイプから商業生産への移行を円滑に行える体制を整備しておく
- [4] 他産業では得られない部品メーカーや下請け企業群の維持確保に努める
- [5] コストをできるだけ抑える努力をする。

¹¹ 米国では 1920 年ジョーンズ法と呼ばれる造船 (海洋) 産業保護を目的とした法律にもとづき、造船ドック維持コストの 50% までを政府が援助する政策が維持されてきたが、レーガン大統領が 1981 年にこの援助を全面廃止している。また、最近では、シーウルフ原子力潜水艦の生産産業維持のため、今後も発注継続を行う予算が議会でも承認され、論議を呼んでいる。

¹² 実証開発予算は必ずしも最先端技術の進歩には貢献しない、という議論は、全米科学アカデミーなどの報告 (1995) [24] でも

指摘されている。この報告書では、連邦政府の研究開発予算から、いわゆる「実証開発予算」を別枠とし、科学技術の進歩に真に貢献する予算として「科学技術 (S&T) 予算」という枠を設けるべきと提案している。

¹³ 英国議会におけるコンコルド開発に関する公聴会 (1981) [25]において、メーカー (ロールスロイス社) 技術担当重役が、「現在どれほど研究開発を行っているか」との問いに「ほとんど行っていない」と答えている。

表-1 技術継承の理論的考察 まとめ

	定義	必要条件	コスト	商業化 までの リードタイム	技術例
知識の継承 (基礎科学・知識)	・過去蓄積した技術ノウハウ の次世代への移転 (個人レベル)	・暗黙知の重要性認識 ・暗黙知から形式知への転換 ・新知識獲得の機会確保 ・一定期間内の移転機会確保	小	長	・伝統技術の継承 ・伊勢神宮式年遷宮 ・古代ポート漕法
技術革新能力の 継承 (研究開発インフラ)	・継続的に革新技術を生み 出していく能力の継承 (組織レベルの「技術準備能 力」の確保)	・暗黙知と形式知の相互作用(現 実体験とのフィードバック) ・組織としての暗黙知共有化 ・古い知識の放棄(unlearning) ・システム・インテグレーション機会 の確保(最大プロトタイプ)	中	中	・次世代 SST(超音速旅 客機) ・高速炉金属燃料サイ クル ・次世代船舶技術 ・核融合(?) ・スペースステーション
生産基盤の継承 (製造能力インフラ)	・商業生産がタイムリーに立 ちあげられる製造能力の 継承 (産業レベルの「プロトタイプ・ プラス」能力の確保)	・設計チームの維持継承 ・商業生産に必要な製造ノウ ハウの維持継承 ・必要不可欠な部品メーカー、下 請け企業群の維持確保 ・プロトタイプから商業規模生産へ の移行体制の整備 ・コストの最小化	大	短	・米国原子力潜水艦 ・軍事産業基盤 ・米国造船産業

この戦略を採ることにより、コストの最小限化をはかりながら、最低限の産業基盤を維持・継承することができる。OTA はさらに、プロトタイプから商業生産への移行をタイムリーに行うために、開発のリードタイムの短縮、そのためのシミュレーター技術の開発などを提唱している。

3.5 技術継承の総合戦略

これまでの分析をまとめて整理してみよう。表-1 は3段階に分類した技術継承の定義とその必要条件、ならびにコスト、リードタイム、具体的技術例をまとめたものである。それぞれの特徴をまとめることにより、対象となる技術のニーズに応じて、技術継承戦略を立てることになる。

その中で、やはり鍵になるのが、コストとリードタイムの関係である。図-1 は、時間と開発費用の関係を、各技術段階に応じて概念的に描いたものである。基礎研究は、実験室レベルで、ほぼ一定の研究費が必要となる。次に、要素技術開発に入ると、パイロットスケールの研究規模となり、時

間とともに、開発コストも上昇。ある時点(例えば A1)で、次のプロトタイプ段階に移るかどうかを決定する。プロトタイプの開発が進むと、コストもさらに上昇。再びプロトタイプ施設開発のある時点(A2)で、実証段階に移行するかどうかを決定する。もし、この時点で実証開発に移行する必要がない、言い換えれば商業化には時期尚早と判断されれば、新たな要素技術開発(B)に重点を移し、A の運転経験をフィードバックする。これを継続することにより、技術 A-B-Cと革新技術能力は継承されることになる。生産基盤を維持するためには、A3 レベル(実証、商業規模)が必要となるが、コストは膨大なものとなり、新たな技術革新へのフィードバックも困難となる。前述の「プロトタイプ・プラス」方式は、この A2 と A3 の中間をとったものと考えられる。また、要素技術カーブの立ちあげ、プロトタイプ施設の建設は一定期間(T1,T2)内に機会を持つことが必要と考えられる。ここで、T1 は要素技術開発カーブの期間、T2 はプロトタイプ開発の期間を指す。

図-1 技術レベルと R & D 費用の関係

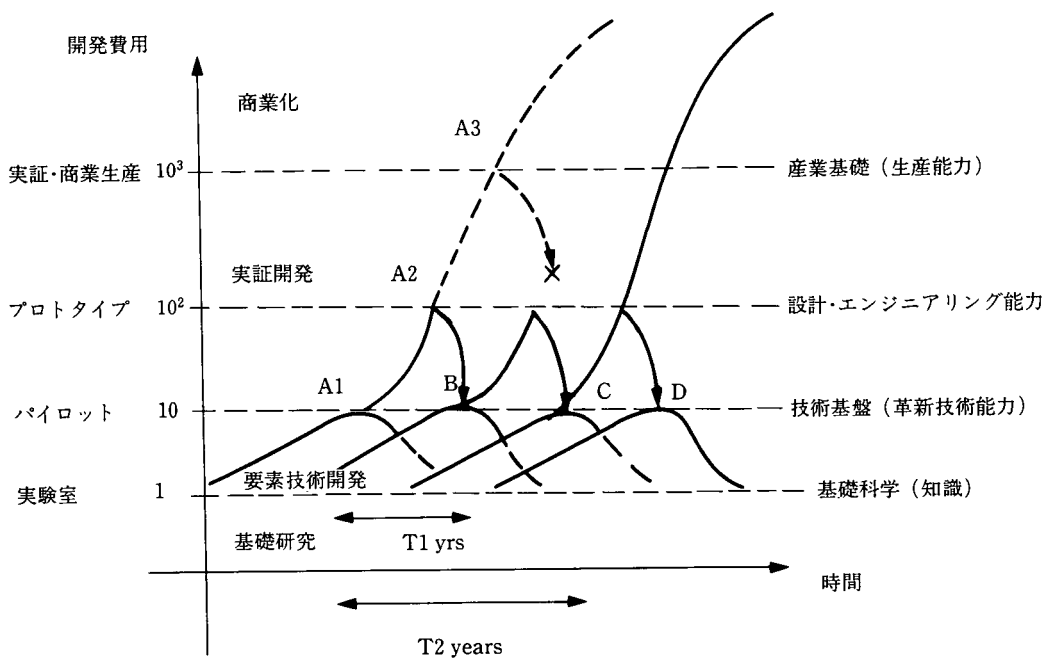
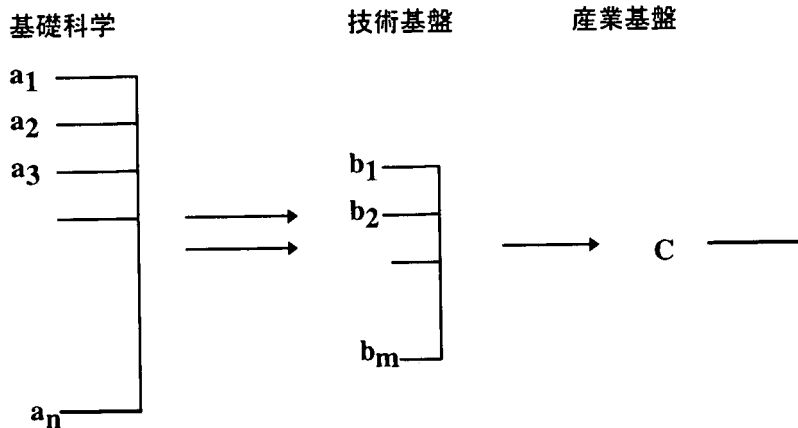


図-2 技術開発過程と選択枝の関係



さらに、図-2 は技術開発過程と選択枝の関係を表したものである。これは、基礎科学から産業基盤へと技術開発が移るにつれ、技術としての選択枝の数は、当然のことながら少なくなっていくことを示している。言い換えれば、技術や市場の不確実性が大きければ大きいほど、継承すべき技術レベルは技術革新能力や基礎科学程度にとどめておく(将来の選択枝を広げておく)べき、と言

うことを意味している¹⁴。選択枝がせばまるだけでなく、時期尚早な商業化は技術的にもリスクが大きい。市場のニーズに必ずしもあっていない、あるいは最適化が十分でない時点での市場導入は、その後の技術進歩を大きく停滞させるか、あるいは新技術の参入を阻害する。これは「技術のロック・イン効果」と呼ばれるもので、経済学的

¹⁴ 最近では、米国エネルギー省において、核融合研究開発予算が、「核融合科学予算」と名称変更され、その中身もプラズマ科学の進歩によりウエイトを置いたものとなっている。

には「経路依存性(path dependence)」で説明される現象である¹⁵。

最後に重要な課題として、官民の役割分担、言い換えれば国家としてどこまでコミットすべきか、産業界が自ら行うべき分野はどこまでか、という問題がある。基礎科学や技術革新能力については、国としての支援も比較的正当化しやすいが、生産基盤の継承については、コスト負担も大きいため、国家の役割については安全保障論議と密接に関係してこざるを得ない。

このように、現実には技術継承戦略を構築する場合には、様々なトレードオフがあることを認識しておく必要がある。それぞれの技術の持つ特性、市場の状況、研究開発資金の制約等を、総合的に考慮した上で、意志決定を行っていく必要がある。

4. 高速炉への応用：多重技術選択肢開発戦略の提案

4.1 主要国の高速炉技術継承に対する考え方

以上のような考察に基づき、高速炉の技術継承について考えてみよう。ここでは、まず主要先進国(米国、ロシア、フランス、英国、ドイツ)における高速炉ならびにプルトニウム関連技術(以下「高速炉関連技術」)の専門家との面談調査により、高速炉の技術継承について、主要国がどのような考えを持ち、かつどのような対策をとっているかを整理する。具体的には、以下の3点について課題を整理した。

(1) 高速炉関連技術でユニークな技術ノウハウは何か。継承すべき技術・ノウハウは何か。

¹⁵ 具体例としてよくあげられるのが、「QWERTY」と呼ばれるタイプライターのキーボードの配列である。ユーザーにとっては必ずしも最適でない配列は、当時のタイプライターの機械的故障を避けるために決定された。その後、幾度も最適化の努力がなされて発表されているが、結局 QWERTY 配列が支配して現在に至っている。この、QWERTY についての研究では、David (1985) [27] が有名。経路依存性の研究では Arther (1994) [28] を参照のこと。技術のロックイン効果については、MS-DOS と Apple、VHS と Beta、等が例としてあげられている (Passel (1996) [29])。

(2) 高速炉関連技術維持継承のために最低必要な規模、コストはどの程度か。

(3) 現在高速炉関連技術の継承対策としてどのようなものを考え、すでに実行しているか。

まず(1)の課題については、高速炉関連技術を大きく「高速炉」と「燃料サイクル」に分けて、それぞれの分野でどのノウハウが最も重要でかつユニークかをそれぞれの専門家に聞いてみた。

高速炉分野では、多くの専門家が「ナトリウム技術」を「維持・継承すべき最も重要なノウハウ」とした。これだけのナトリウムを扱う産業技術は他にない、というのがその理由である。一方で、ナトリウム技術は各国で十分な経験を積んでおり、その問題点も明らかになっているので、むしろ次世代に向けては、ナトリウム以外の冷却材も再検討すべきだ、という意見もあった¹⁶。

燃料サイクル技術は炉とかなり異なって、化学プロセス技術であり、大型化についてはそれほど重要でない、との指摘があった。むしろ、プルトニウム含有量、その「クリーン度 (Pu239 の組成比率)」の違いによるハンドリングのノウハウが重要、との指摘があった。

再処理、燃料加工両技術において、既存の技術が果たして最適なものか疑問であり、次世代に向けて革新的なプロセスを必要としているのではないか、といった指摘が多くなされた。また、将来の技術進歩を柔軟に組み入れていく方法として、「モジュール化」の採用が効果的である、との指摘が成された。

第(2)の課題である技術維持・継承に必要な規模については、意見が分かれた。特に大型高速炉の持つ技術的特性を考えると(特に安全性; ボイド係数の問題など)、大型高速炉の経験を積むことが重要、との指摘が成された。しかし、一方で

¹⁶ 例えばロシアでは、「鉛-ビスマス」冷却高速炉についての経験が豊富(潜水艦用)であり、鉛-ビスマスの特性を利用した、新たな「固有安全、再処理不要の増殖炉」概念を検討中である(1995年12月面談調査より)。

軽水炉の設計、建設、運転が行われている限り、その程度のノウハウは十分に維持できる、との指摘もあった。むしろ、大型化をさけて小型高速炉の検討もすべき、という指摘もあった。極端な意見として、維持継承のためにだけコスト負担をする意味はない、との指摘もあった。これは、技術革新能力の確保も、将来の市場が不透明な段階では事実上正当化しにくい、という視点も含めての意見であった。

第(3)については、産業レベルの活動が行われているフランスを除き、英国(高速炉)、ドイツ、ロシアにおいては、既に「ノウハウ保存のためのプロジェクト」が進められており、引退間近な科学者、技術者が自分たちのノウハウ、これまでの研究開発成果を保存する方法について、検討を始めている。これは、暗黙知をできる限り「形式知」に転換しておきたい、という考え方であろう。フランスでは、スーパーフェニックスの運転を継続すること¹⁷、欧州共同高速炉の建設計画を維持すること等により、「生産基盤」の継承を意図しているようであったが、コスト負担の問題、ならびに革新技術への投資とのトレードオフが、将来の課題となりつつある。

一方、わが国における高速炉の状況を考えると、開発段階としては主要国より多少遅れており、過去の蓄積ノウハウもまだ少ない、という意見が多かった。したがって、生産基盤を確立しておきたい、という意見が強かったが、「もんじゅ」の事故以降、技術革新能力を強化すべきである、という意見も強かった。わが国では、高速炉やプルトニウム関連技術についてのノウハウが必ずしも効率的に集積されてきているとはいえず、特に産業界と動燃事業団の間の技術移転について懸念を表す意見が強かった。

総合的に言えば、戦略的にこの問題を考えている国はまだ存在せず、このままでは世界レベルでこれまで蓄積してきた高速炉関連技術が、喪失されていく危険性が高い。さらに、各国のニーズが異なることも、共通の戦略を構築することを困難にしている。

ただ、共通して指摘された点は次の3点である。
 [1] 高速炉を開発する最大の理由は「ウラン資源枯渇に対する保険」であり、増殖性能が高速炉の最大の特徴である、という点だ。したがって、この目標を達成できる技術を継承しておく必要がある。
 [2] 「資源枯渇への保険」という観点からは、高速炉の必要性が明らかになる時期、言い換えれば商業化の時期は早くても30年—50年先であり、技術継承といっても、かなり未来を見据えた革新技術を開発目標に置く必要がある。特に、燃料サイクル技術の革新が、既存の軽水炉システムと異なる点として重要である。
 [3] そういった前提のもと、高速炉関連技術の中で、いったいどの技術が不可欠なもので継承の対象となるのか、どの技術は放棄しても良いのか、その見極めをしていく必要がある。

4.2 高速炉開発に必要な条件:柔軟性、革新性、コスト効率

面談調査からだけでは高速炉関連技術にとっての、最適な技術継承戦略を答えを得ることはできなかった。また、わが国にとっての戦略とグローバルな視点からの考え方でも、計画の立て方は変わってくるだろう。しかし、いずれの場合にせよ必要と思われる条件を整理できる。そのためには、高速炉のおかれている状況をもう一度明らかにしておく必要がある。

まず第一のポイントは、高速炉の市場ニーズが非常に不透明である、という点である。こういった状況では、商業化に向けて特定の技術を立ちあげていくにはリスクが大きすぎる。これは、SSTの例でも明らかである。言い換えれば、生産能力を

¹⁷ プルトニウムとマイナー・アクチノイド消滅処理の技術開発を目的とする CAPRA プロジェクトは、まさに技術継承を大きな目的としていたが(Zaleski(1995)[30]参照)、97年6月の総選挙後、新政権がスーパーフェニックス閉鎖を政策として打ち出しており、その将来が不確実となっている。

立ちあげるには時期尚早ということになる。

第二のポイントが、開発コストへの削減圧力がさらに高くなっている、という状況である。原子力のみならず、国家巨大プロジェクトへのコスト削減圧力は高まりこそすれ、低下することは当面期待できない。さらに、電力業界の規制緩和によるコスト削減圧力もますます強まってこよう。

第三のポイントは、ブレイクスルーの必要性である。高速炉関連技術は、既存の技術体系では競争力を持つ可能性が少なく、ナトリウム技術、再処理技術等といった主要な技術面でブレイクスルーが求められている。

このような状況の下での技術継承戦略を考えると、次の3要件が必要不十分な条件としてあげられる。

(1)柔軟性:まず第一の要件は、技術継承の条件を満たすからといって、技術開発路線を固定化しないことである。従来の開発戦略は、早期商業化をめざして、開発路線を絞ってここまで進められてきた。しかし、高速炉といっても技術の選択幅は広い。不透明な市場ニーズに答えるためには、技術開発にも柔軟性が求められる。そのためには、選択肢を広げていけるような開発戦略が求められる。

(2)革新性:技術継承とはいっても、ブレイクスルーが生み出されなければ、開発の意味はない。本論でも、「技術革新能力」として議論したように、技術の継承はまさに、革新的技術を生み出す能力を維持することでもあり、現在の高速炉関連技術開発に、最も必要なものと考えられる。

(3)コスト効率:技術継承に必要なコストは、将来の不確実性に対処するための「保険」として考えられる。保険と考えるのであれば、保険料としての限界を越えない範囲で、開発を続けなければいけない。これは開発予算の規模に制約がかかることを意味する。だとすれば、生産基盤の確保が無条件で許容される状況下ではないことを意味している。

4.3 多重技術選択肢開発戦略の提案

以上のような要件を考えると、高速炉についての具体的戦略として、「多重技術選択肢開発戦略(multi-technology option strategy)」を提案したい。その内容をまとめると以下のようになる(Suzuki (1997))[31]。

(1)蓄積したノウハウの維持・確保:まず知識の継承の条件である、これまでに蓄積されたノウハウを集積し、その形式化の努力を促進する。このコストは比較的少額であり、かつその価値は高い。わが国で言えば、開発の中心となってきた動力炉・核燃料開発事業団、メーカーなどに分散しているノウハウを早急に集中させておく必要がある。一方で、高速炉開発における暗黙知の特定と、その継承について、国際的にも、また世代毎にも、早急に研究者間の交流をはかる時期にきている。まず何よりも、ここから取り組むことが最大の優先事項である。

(2)技術革新能力の確保:新規の高速炉建設計画が事実上不透明な今、この能力の確保が今後問われることになる。わが国をはじめ、欧米には未だに活用しうる研究開発インフラが存在しているものの、米国をはじめ寿命を迎えはじめている施設が多い。幸い、わが国は比較的新しい施設を有しているという面で、この分野でリーダーシップをとれる位置にある、と考えられる。その際、技術の選択肢を従来より広げ、将来に向けて多様な選択肢を準備できる開発プログラムに変更していく必要がある。

(3)生産基盤の継承:現在の高速炉関連生産基盤のうち、軽水炉産業でカバーできない分野を確定し、そういった分野の製造ノウハウについては、部品・下請け企業を含めて、一定期間内に最小限必要な範囲で製造の機会を与えることを考えるべきだろう。ただし、この場合、そのコストが大きくなる可能性が高いので、十分なコスト効果分析と、効率的な発注体制の確立が必要不十分な条件となる。

以上を総合すると、まず(1)と(2)を核にした技術継承戦略を早急に構築すべきだと判断される。(3)については、今後官民の負担も考慮した幅広い議論が必要であろう。こういった戦略を採ることにより、従来考えられていた実証炉開発を中心とした開発プログラムとは、大きく異なることが予想されるが、より柔軟で、選択肢もひろがった開発戦略とすることができ、かつ開発コスト負担も軽減される、と期待される。

5. おわりに: 今後の課題

本小論は、これまで明らかにされていなかった技術継承の条件を、「次世代への技術移転」と考えることで明確化することを試みた。しかし、ここでは、あくまでも理論的考察にとどまっており、データでの実証や、具体的開発内容にまで踏み込んだ分析には至らなかった。今後はそのような定量的分析が必要である。

高速炉関連技術について言えば、「もんじゅ」や東海再処理工場の事故以降、技術開発への風当たりはますます強くなっており、早急に研究開発全体の再構築を図る必要が出てきている。特に、これまで開発の中心となってきた動燃事業団の解体・改組の論議が進んでいる今、次世代への技術継承を考慮した開発戦略の構築が望まれる。

そういった観点から、今後の研究課題としては：(1)わが国と主要国の技術蓄積の比較分析と国際協力の役割(2)継承すべきノウハウと放棄すべき知識の分析(3)必要な投資規模、開発体制と官民の役割分担の分析(4)高速炉以外の原子力技術についての分析、等が考えられる。

謝辞:

本論文は主に平成7年9月から1年間、安倍基金フェローとして研究を行った成果、ならびにその後の電力中央研究所における研究成果に基づいており、その間、多くの研究者、産業界、政府の方々及び機関にご意見、コメント、ご協力をいただいた。この機会に改めて謝意を表したいが、本論文の内容についての責任はすべて筆者にある。

【参考引用文献】

- [1] Kuhn, T.S., "The Structure of Scientific Revolutions," The University of Chicago Press, 1962, (third edition, 1996).
- [2] Ferguson, E.S., "Engineering and The Mind's Eye," The MIT Press, 1992, (邦訳「技術者の心眼」、藤原良樹、砂田久吉訳、平凡社、1995。)
- [3] Senker, J., "The Contribution of Tacit Knowledge to Innovation," *AI & Society*, vol. 7, 1993, pp. 208-224.
- [4] Nonaka, I., Takeuchi, H., "The Knowledge-Creating Company," Oxford University Press, 1995.
- [5] Polanyi, M., "Personal Knowledge," Chicago, 1958 (quoted in Kuhn(1962)).
- [6] Vincenti, W.G., "What Engineers Know and How They Know It: Analytical Studies from Aerouautical Engineering," Baltimore, 1990.
- [7] 風見 明、「技と日本人: 伝統に根ざすテクノロジー」、工業調査会、1995。
- [8] Hedberg, B., "How Organizations Learn and Unlearn," in P. Nystrom and W. Starbucks Eds, *Handbook of Organizational Design*, 1, Oxford University Press, 1981.
- [9] MacKenzie, D., "Tacit Knowledge and Uninvention of Nuclear Weapons," (with Graham Spinardi), in MacKenzie, "Knowing Machine," MIT Press, 1996, pp. 215-260.
- [10] 野中郁次郎、「知識創造の経営」、日本経済新聞社、1990。
- [11] Argote, L., "Organizational learning curve: persistence, transfer and turnover," *International Journal of Technology Management, Special Publication on Unlearning and Learning*, Vol. 11, Nos 7/8, 1996, pp.759-769.

- [12] Starbuck, W., "Unlearning ineffective or obsolete technologies," *International Journal of Technology Management, Special Publication on Unlearning and Learning*, Vol. 11, Nos 7/8, 1996, pp. 725-737.
- [13] Hale, J. R., "The Lost Technology of Ancient Greek Rowing," *Scientific American*, May 1996, pp. 82-85.
- [14] Smith, C., "Revisiting Solar Power's Past," *Technology Review*, July 1995, pp. 37-47.
- [15] Stranges, A. N., "Canada's Mines Branch and Its Synthetic Fuel Program for Energy Independence," *Technology and Culture*, July 1991, pp.521-554.
- [16] Bell, M., Pavitt, K., "Technological Accumulation and Industrial Growth: Contrasts between Developed and Developing Countries," *Industrial and Corporate Change*, Vol. 2, No. 2, 1993, pp. 157-210.
- [17] US Congress Office of Technology Assessment, "Impact of Advanced Air Transport Technology," April 1980.
- [18] Rosen, B, and Williams, L.J., "The Rebirth of Supersonic Transport," *Technology Review*, February/March 1993, pp. 23-29.
- [19] Gordon, M., "U.S. and Russia Join in Supersonic Jet Study," *The New York Times*, March 18, 1996.
- [20] Suzuki, T., "The Analysis of U.S. FBR R&D Program Dynamics to Maintain the Technological Capability," *IFAC/IFORS/IAEE Symposium, Energy Systems, Management and Economics*, Tokyo, 25-17, October 1989. pp. 429-434.
- [21] Whitehurst, C.H., "The U.S. Shipbuilding Industry: Past, Present and Future," *Naval Institute of Press*, 1986.
- [22] US Congress Office of Technology Assessment, "An Assessment of Maritime Trade and Technology," 1983.
- [23] Gansler, J.S., "The Defense Industry," *The MIT Press*, 1986.
- [24] National Academy of Science, "Allocating Resources for Federal Science and Technology," November 1995.
- [25] UK House of Commons, Second Report from the Industry and Trade Committee, Session 1980-1981, "CONCORDE," 1 April 1981.
- [26] US Congress Office of Technology Assessment, "Building Future Security: Strategies for Restructuring the Defense Technology and Industrial Base," 1993.
- [27] David, P., "Clio and the Economics of QWERTY," *Amer. Econ. Rev. Proc.*, 75, 1985, pp. 332-337.
- [28] Arther, B., "Increasing Returns and Path Dependence in the Economy," *The University of Michigan Press*, 1994.
- [29] Passel, P, "Why the Best Doesn't Always Win," *The New York Times Magazine*, May 5, 1996, pp. 60-61.
- [30] Zaleski, C.P., "Fast Neutron Reactors: Development in Future Decades," February 1995.
- [31] Suzuki, T., "Multi-Technology Option Strategy for Long Term R&D Programs on Plutonium Technologies-Minimizing Proliferation Risks and Preparing for Uncertain Future," *International Conference on Future Nuclear Systems*, October 5-10, 1997, Yokohama (forthcoming).

（すずき たつじろう
電力中央研究所経済社会研究所）