

ビジョン、エネルギー、人材育成

〔開かれた協働と技術革新〕

東京大学 笠木 伸英

21世紀の時代軸

表1は、米国工学アカデミーが選んだ、20世紀の20大技術革新のリストである¹⁾。これらの技術は、この100年間に開発され、大半は先進国社会の人々が容易に手にすることが出来るほど広く普及している。挙げられた個別技術の選択には任意性があるろうが、地球上の生命誕生から38億年、そして400万年といわれる人類史上、20世紀が科学技術の開発・普及、その結果生じた社会変化の速度の面では極めて異例な世紀であったことがわかる。この100年間に、地球上の人口は約16.5億人から61億人（3.7倍）へ、年間消費エネルギーの総量は石油換算で5億トンから90億トン（19倍）へ膨張し、大気中二酸化炭素濃度は300ppmから370ppmへと増加した。人の寿命も飛躍的に長くなり、例えばアメリカの平均寿命は47歳から77歳へ、日本でも45歳から81歳へと倍近くに延びている。

表1 20世紀の20大技術革新（米国工学アカデミーによる）

① 電力・電化	⑪ 高速道路
② 自動車	⑫ 宇宙船
③ 航空機	⑬ インターネット
④ 上下水道	⑭ 画像技術
⑤ 電子技術	⑮ 家庭用電化製品
⑥ ラジオ・テレビ	⑯ 医療健康技術
⑦ 農業機械化	⑰ 石油・石油化学
⑧ コンピュータ	⑱ レーザー・光ファイバー技術
⑨ 電話・通信	⑲ 原子力技術
⑩ 空調・冷凍	⑳ 高性能・高機能材料

このように、20世紀における技術の目覚ましい進展と普及は、災害や事故を防ぎ、産業を支え、人々の生活に豊かな物資を供給し、日々のストレスを軽減し、健康を促進し、病気を克服して長寿を可能にしてきた。技術は、間違いなく社会の要請に応じてきたといえる。この間、技術と工学は細分化と深化を通じて発展する一方、均質大量生産を目指す企業組織や集団においては、個の相対的な埋没が進んだ。また前世紀の特徴の一つは、自然を克服し利用することこそ、人間の主体性の発露と自由の拡大に他ならないとする、人間中心の自然観であった。

このような20世紀の単なる延長として新世紀を展望できないことは、多くの識者がすでに指摘するところである。すなわち、新世紀を迎え、人類社会の目標は、肥大化した人間圏を地球と共生し得る持続的なシステムとして再構築すると共に、多様な価値観を有する人々に、健康で快適な生活と安全で安心な社会を保障することではないだろうか。そして、技術と工学の果たすべき役割は、新たな知の創造と活用を通じて、人々の生活の真の豊かさに貢献することであろう。

新世紀のキーワードは技術革新、グローバルゼーション、規制緩和であろう。科学技術の開発は、バイオ、ナノテク、情報技術を始めとして急速に進展すると予想され、人々の生活や意識、そして産業構造や社会制度の変革も進むに

違わない。情報化、ネットワーク化、高速輸送網整備が進んで、人、もの、情報の移動に対する国家、国境の障壁は一層低下し、経済や文化など人類の活動は一層のグローバルゼーションに向かう。ボーダレス化した国際関係は質的な変化を余儀なくされ、地域間や文化間の齟齬も表面化するかもしれない。一方で、人類は、地球規模で解決すべき環境や資源エネルギー枯渇の問題の深刻化とともに、文化的生活、福祉、倫理、個人の尊厳などをいかに担保するかについても解決を迫られている。

我が国は、戦後の困窮の時代から回復して既に先進国の仲間入りを果たし、その国土の狭さとは裏腹に、世界の政治経済の中で主要なプレゼンスを示す位置にある。日本のGDPは約500兆円で、世界の1割強といわれる。少なくともその規模と影響力ではトップランナーの仲間入りを果たしたのである。しかし、日本が世界の文化文明、そして平和に貢献するためには、長期的な国家ビジョンをもって新世紀の国造りを進める必要がある。2000年の第2期科学技術基本計画では、「知の創造と活用により世界に貢献できる国」、「国際競争力があり持続的発展ができる国」、「安心・安全で質の高い生活のできる国」の3つの基本理念を掲げている。明確なビジョンに基づく国造りがようやく始まったと言える。

縮小社会としての国造り

我が国の人口は昨年末で1億2,800万人弱、人口統計史上初めて減少に向かい始めたが、この傾向は今後も続き2050年には1億人程度となると予想されている。産業を支える生産年齢人口(15~64歳)は戦後一貫して増加を続けたが、1995年の8,700万人のピーク後、2030年には7,000万人弱、2050年には5,400万人弱(現在より15ポイント低い、対人口比53%程度)と予想される。少子高齢化は、産業労働力の減少、経済の低調、そして世代間負担のバランスの急速な崩れにつ

ながるので、憂慮すべき事態といえる。国や経済界がその対策を検討中である。労働人口が毎年0.5%で減少する中、生産性の1%の向上が達成できれば人口減を補うことが十分可能で、2%を達成できれば経済成長も可能といわれる。そのためには、何と云っても、技術革新、そして女性や外国人を含めて優れた人材の確保が鍵となる。

こうした縮小社会にも、明るい夢を描くことが可能である。狭い日本は広くなるだろうし、環境負荷低減に向かうはずである。経済規模だけが国際的に尊敬を集める要素ではない。技術における我が国の活躍は、すでに優れた工業製品を世界に供給してきた実績に裏付けられており、日本製品の省物資、省エネルギー、安全性、製造コストなどでの優位性は世界に比類無い。今後は、さらに節約技術、回復技術、文化融合技術など、日本独特の文化と感性に根ざした技術²⁾による貢献に期待がかかる。日本独特の細やかな省エネルギー技術がよい例で、技術移転によって、どれだけ世界の環境にも経済にも貢献できるか計り知れない。今後先進各国でも予想される人口減少、高齢化、環境・エネルギーの課題を我が国が率先して克服し、豊かな国家社会を造る模範を示す良い機会と捉えるべきであろう。最近では、日本の伝統文化や環境との調和を重視する思潮が、世界の多くの人々の共感を得ていると聞くことも多い。

エネルギービジョン

ビジョンと目標に基づき、技術革新と人材育成によって、国際的に尊敬される文化文明国家を目指すことが重要と述べたが、人々の生活や産業の要であるエネルギー需給についても、白紙に絵を描くつもりでビジョン造りを急がねばならない。表2は、過去30年の我が国でのエネルギー関連技術の推移を概観したものである。30年という時間の長さがどれだけの変革を可能にしたのか、おおよそ理解できる。この間、2

表2 日本のエネルギー技術の30年

日本のDGP	1975年255兆円、2001年532兆円 (2.1倍)
1次エネルギー消費	1975年271百万kL、2001年397百万kL (1.46倍)。(産業部門は1.15倍、民生1.99倍、運輸部門1.96倍。民生家庭部門は2.04倍、運輸旅客部門は2.47倍。)
1次エネルギー供給	脱石油が進行。1975年73.4%から50.4%に減少、原子力、石炭、天然ガスが増加。天然ガスは2.5%から13.3%に増加。
エネルギー自給率	1975年7.7%から、2001年17.5%と10ポイント増加。
化石燃料依存率	1975年92.3%から、現在82.5%へ10ポイント減少。
発電効率	継続的な改善。例えば、GT-STコンバインドプラントの効率は、1980年の40%強から、53%に。
軽水炉	1975年7基339万kWから現在の52基4,574kWへ。1次エネルギー供給の1.5%から12.8%へ、11ポイント増加。
再生エネルギー	太陽パネル(世界一)、太陽温水パネルが市場進出。90年代後半から、風力発電が市場進出。
分散システム	オンサイト発電、コージェネレーションは、80年代の1%未満から着実に増加、700万kW(約2.7%)へ。80年代は、DE、GT、GEが、90年代後半に小型のGE、マイクロGTが市場導入、2000年以降に燃料電池の開発が進行中。
自由化	2000年以降、電力、ガス市場の自由化が急激に進行。2007年電力市場は完全自由化の見込み。90年代後半から、IPP、ESCO事業が進出。
自動車用エンジン	効率改善、排ガス浄化は、80年代から継続的に達成。2000年以降、ハイブリッド技術が実現、ディーゼルハイブリッドの市場導入が近い。燃料電池の開発が90年代後半から急ピッチ。高性能バッテリー電気自動車も。
家庭電化	テレビ、冷蔵庫、エアコン、洗濯機などの浸透。90年代以降高効率化指向。90年代後半からトップランナー方式、機器改善。住宅の断熱化。

度のオイルショックを経験しながら石油依存率
低減、原子力導入を目指したのではあるが、長
期ビジョンと達成目標が十分であったかどう
かは判断が分かれるところであろう。今後、新
世紀の海原に漕ぎ出すために、我々はビジョ
ンを掲げ、過去30年以上のイノベーションの
達成を覚悟する必要があると言える。その際
、現状から将来を外挿する先行き調整型の手
法では心許ない。20年、30年先を見越した
エネルギー専門家たちの意思をビジョンとし
て凝縮する必要がある。

東京大学は重電重機企業4社(石播、東芝、
日立、三菱重工)と連携して、2004年春に
持続型社会研究協議会を設置し、その成果と
して2030年エネルギービジョン³⁾を提案し
ている。2030年までに、世界あるいは日本
の永続性を揺るがす、資源の枯渇や地球環
境システム変動などが急激に顕在化するとは
予測しにくい。しかし、使い易い化石資源が
現在のエネルギー利用や産業を成立させて
いる構造を変革するには多大の労力と時間
を要するから、将来必要とされる関

連技術の開発と普及を早期に達成し、持続
型社会へのソフトランディングを図る必要が
ある。また、日本経済の国際競争力を維持
するためには、必要な最終エネルギーを許
容コストで供給し、短中期的なリスク要因
に対する安定性を確立することが重要にな
る。

上記の認識から、長期的な持続型社会へ
の移行と短中期的なリスク回避を可能とし
るシナリ

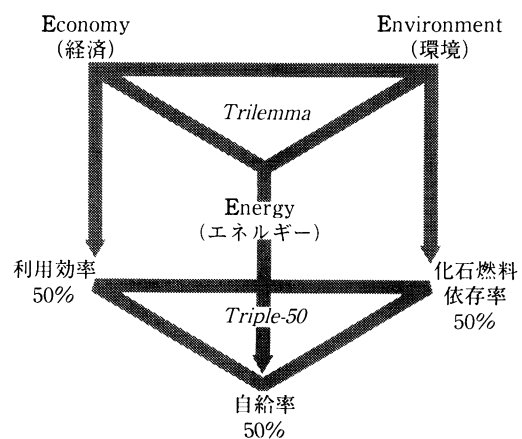


図1 エネルギー・ビジョン：トリプル50
(出典：持続型社会研究協議会)

オを、日本を含む東アジア圏を視野に入れて、経済、エネルギー、環境のトリレンマを解決するための技術開発目標、“トリプル50”（図1）として設定した。具体的には、2030年の我が国のエネルギー需給のマイルストーンとして、以下を掲げている。

- ① 化石燃料依存率50%（現在80%）：次期温暖化防止枠組み交渉では、日本が高い目標を掲げて世界をリードすべき。再生可能エネルギー技術等による海外でのエネルギー生産、日本への輸送も想定。

- ② 自給率50%（現在19%）：将来為替レート150円、原油価格\$35/バレル時に貿易収支黒字確保に必要。
- ③ エネルギー利用効率50%（現在35%、平田賢による定義⁴⁾）：化石資源価格上昇傾向を考慮し、有効利用効率を年率1.5%で高める。

表3に示すように、原子力と再生可能エネルギーを大幅導入し、結果として炭酸ガス排出削減も達成する。このような目標の達成のためのロードマップ作成作業が進行中であるが、例えば表4に示す技術課題が抽出されている。

表3 日本のエネルギー供給のビジョン

	2000年	2030年	2050年	21XX年
化石燃料	81%	50%	33%	0%
原子力	13%	25%	33%	50%
再生可能	6%	25%	33%	50%
CO ₂ 削減	0%	-57%	-70%	-100%

（出典：持続型社会研究協議会）

国を支える技術者の育成

日本は、乏しい資源しか持たず、狭い国土に高い人口密度を抱え、世界の中では特殊な言語を話す国とあって良い。そのため、まず、知育、徳育、体育によって人材国家を目指さねばならない。そして、我が国は、少子高齢化、エネル

表4 2030年エネルギービジョン達成のための主要技術課題

再生可能エネルギー大規模導入のためのシステムデザイン	太陽光、風力の系統連系、負荷調整／蓄電・蓄熱／新燃料製造システム等による大規模な利用量拡大のためのネットワークシステム
	電力系統連系、地域分散（マイクログリッドなど）、完全自立型（二次電池を組み込んだシステム）、新燃料製造システム →設備量6,000万kW、総エネルギー供給の8%
	バイオマス・廃棄物発電の農業・林業再生策とともに利用を拡大するための社会システム →同上2,000万kW、総エネルギー供給の9%
	輸入バイオマス
原子力エネルギー利用の拡大	原子力発電の負荷変動と稼働率の調和
	燃料サイクルと高速増殖炉導入による持続可能性の確保
	核熱利用と熱供給システム
	大規模温排水利用によるコージェネレーション化 →2050年1/3分担への着実な歩み
天然ガス・石炭ガス化による高効率火力発電と新燃料製造	燃料電池などを組み合わせたトリプル・サイクル発電 →発電効率60～70%の達成による化石燃料の量的削減
	化石燃料から新燃料製造・貯蔵運搬システム（天然ガスパイプラインによる水素時代へ向けてのガス・インフラストラクチャ）
大幅な省エネルギー	産業分野におけるコプロダクションシステムによる省エネルギー →鉄鋼業、化学産業、紙パ産業における省エネプロセスの導入
	民生分野：エネルギー×環境×防災の両立 →小地域ネットワーク、EM →断熱、蓄熱、ヒートポンプ
	運輸分野における燃料電池、電気自動車、バイオマス燃料の導入と供給システム

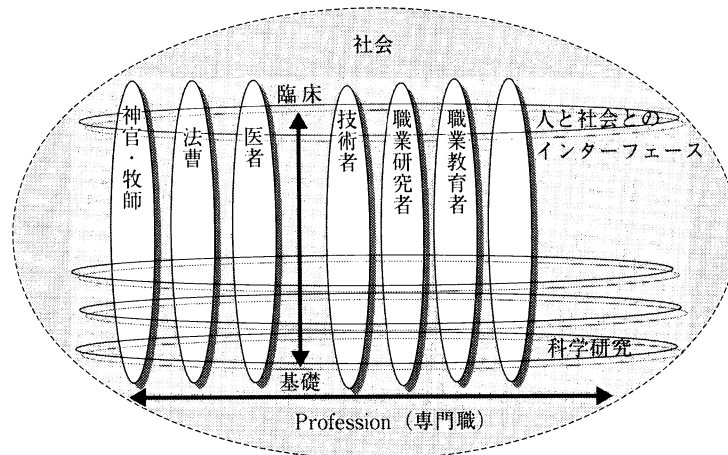


図2 専門職に支えられる知識基盤社会

ギー資源制約、環境制約の下で、いかにして個人を基軸とする活力ある社会、国家創りをせねばならないかという課題を背負っている。東アジアの近代化と共に、生産活動の量的な優位さだけでは生き残りを果たせない。価値作り、ものづくりのノウハウ、先進的な知識によって価値を追求する、知を基盤とする成熟した市民社会を構築することが必要である。そのような知識基盤社会では、政治、経済、産業、国土、交通、医療、教育など、高度化複雑化した社会システムを創造し、健全に運営、経営する人材としての専門職業人*が必要である。なかでも技術者は、建築構造物、エネルギーシステム、交通輸送機器、情報通信システムなどを支える、高度な科学技術専門知識と豊富な経験を有する専門職業人として位置付けられるといえる。

技術系人材育成は欧米でも主要目標となっているが、我が国の第3期科学技術基本計画でも、インフラ整備などの「モノ」から、競争力の根源である「人」に着目して投資する方向性が強

※専門職 (profession) とは、高度な知的訓練と技能に基づいて独占的なサービスを提供するとともに、独自の倫理規程に基づいた自律機能を備えている職業とされ、医師、弁護士、会計士、技術士などは世界的にみても専門職と認知されている。

調されている。経団連、JABEE、技術系学会においても、熱心な議論が継続している。少子高齢化と理工系離れによる技術者の“数の問題”と、新時代のイノベーションを可能とする人材の育成の“質の問題”が存在する。

日本の高等工学教育を経た技術者人口は、約240万人といわれる。その中には、約60万人の研究者、5万人の技術士が含まれる。毎年11万人の理工系の卒業生が輩出されるが、そのうち7割は大学学部、3割は大学院という。そして今後は大学院進学率が上昇する傾向にある。技術者人材の数の問題は、少子化と共に若者の理工系離れにより加速する。ものと情報に溢れた環境で不自由なく育つ現代の若者には、一見難しそうな数学や理科を要し、厳しい競争に曝されながら相応に報われない姿に映る技術者像が、自分の人生の有力な選択肢となりにくいことが問題であろう。欧米諸国でも、医者、弁護士、事業家などに比べて技術者の社会的地位は高いとは言えないが、技術によってのみ国を支えることが可能な我が国では、この事態を看過できない。特に幼少期の学校や家庭での教育の改善と共に、技術業が魅力ある職業となるような産業界や行政の努力が必要である。

工学教育の質の問題は、新世紀のグローバル

社会における技術者に求められる資質の変化に起因している。すなわち、専門知識やスキルの教育に留まらず、社会・経済・環境に関わる文脈の中で形成される、21世紀型の工学教育体系の構築が望まれており、特にディシプリン境界型、横断型教育による俯瞰的な視野の付与の必要性、そして専門知識を使いこなしてプロジェクトを遂行するためのマネジメント力、チームワーキング力、リーダーシップなど、技術者としてのコンピテンシーの付与が必要である。大学教育改革はこれまでも継続的に行われてきたが、その効果が十分でなかった主たる原因は、改革の議論が教員だけで行われてきたことであろう。全てのステークホルダーが同じ目線の高さでオープンに議論を進め、ビジョンと目標に対する理解を共有する必要がある。すなわち、教員に加えて、産業界、そして学生・大学院生の参加による継続的な議論の存否が鍵と言える。

特に、大学院教育の改革は喫緊の課題といえる。学部は技術者としての基礎固め、つまりPre-engineering、大学院はProfessional SchoolあるいはResearch Schoolと明確に位置付け、それぞれの具体的な教育目標を各教育機関が設定すべきである。また、相互の役割分担の理解を共有する、息の長い産学連携は、大学を強化し、基盤知識を豊富にする。そのような環境で育つ人材が産業界でも教育研究機関でも未来の牽引力になるはずである。基礎研究分野では、ものづくりを追いかけた経験知・解明知から、ものづくりを創造する先導知を目指さねばならない。

表5 基礎研究の4象限分類¹⁾

研究の動機付け		成果の応用?	
		No	Yes
原理的な理解の 必要性?	Yes	純粋基礎研究 (ボア型)	応用指向型 基礎研究 (パスツール型)
	No		純粋応用研究 (エジソン型)

そのためには具体的な出口を意識したパスツール型研究(表5)¹⁾の推進が必要であり、そのような場での若者の鍛錬が重要である。

開かれた協働と革新へ向けて

国造りのビジョン、特にエネルギーセキュリティ、人材育成について、私見を述べた。最近、団塊の世代が定年を迎える2007年問題が取りざたされる。筆者もその主役の一人である。我々、戦後生まれが見てきた半世紀は、今日よりは明日、明日よりは明後日への継続的な成長と拡大の道程であり、恵まれた時代を生きてきたといえる。しかし、最近の日本の世情には心配事も多い。犯罪の増加、事故や災害の増加は、意思疎通と思いやりの欠落、正義感や責任感の低下、自律と自制の後退などによるところが大きい。特に、技術に関わる人間やシステムの欠陥が露呈して起きた昨今のトラブルは重大で、これらを繰り返さない技術者の職業人としての決意が必須である。今改めて技術の責任を自覚し、技術を通じて国造りに寄与せねばならない。まず、技術者倫理は出発点であろう。そして、美しい国土に育った伝統と歴史を有する日本人として、元来の高邁な精神性を取り戻し、環境制約の中でのエネルギー需給、産業、技術者育成の日本的方法論、そして国や社会を支えるビジョンと目標の構築が急務である。

技術革新そして人材育成の両者において、クローズド・イノベーションからオープン・イノベーション²⁾への方向転換が有効ではないだろうか。1970年代の米国大企業は自らの基礎研究部門でシーズを生みだし、その製品化までの一連の研究開発プロセスを組織内で達成していた。しかし、その後組織内の知のストックが増すにつれ、それらは人と共に流出して、1990年代には組織の外に多くのイノベーションを創出する結果となった。つまり、組織内の垂直統合型リニアモデルから、水平分業ネットワーク型モデルへと変わっていったのである。こういったオ

オープン・イノベーション、オープンアライアンスは、今後の産学の改革のヒントとなり得るものではないだろうか。産業でいえば部署、企業、業界、教育機関で言えば研究室、学科専攻、大学を超えて協働しつつ、新技術を創出し、人材を、そして国士を育てることである。また、大学の基礎研究や企業の応用研究の相互作用を促進し、パスツール型の基礎研究をビジョンに基づいて力強く推進することも望まれる。人材育成においても、人の出会いを可能とする柔軟な組織や予算の制度が幅広く導入される必要がある。若者は、多くの人と価値観との出会いによってこそ、新しい経験と知識を創造し、人生観、自然観、世界観を拓けることができるのである。

<参考文献>

1) National Academy of Engineering. "Greatest Engineering Achievements of the 20th Century."
<http://www.nae.edu/>.

2) 月尾嘉男：“縮小文明の展望 千年の彼方を目指して”、東京大学出版会、2003
 3) 持続型社会研究協議会：“持続型社会へ向かうエネルギービジョン”（改訂版）、東京大学、2005
<http://rmo.iis.u-tokyo.ac.jp/jizoku.index.html>
 4) 平田賢：“省エネルギー論”、テクノライフ選書、オーム社、1994
 5) D.E.Stokes：“Pasteur’s Quadrant: Basic Science and Technological Innovation.” Brookings Institution Press, 1997
 6) H.Chesbrough（大前訳）：“Open Innovation”、産業能率大学出版部、2004

【筆者紹介】

笠木伸英

東京大学大学院 工学系研究科 機械工学専攻 教授
 日本学術会議会員
 〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1
 工学部 新2号館61D1号室
 E-mail : kasagi@thtlab.tu-tokyo.ac.jp

流れがもたらす材料劣化現象／知っておきたい流れが配管・機器に及ぼす影響

エロージョン・コロージョン入門

編著：松村昌信・磯本良則・矢吹彰広 A5判 224頁 定価¥2,415円（本体2,300円）

配管機器内の流れは流体の種類とその状態、形状運転状況、等により様々な流れの状態が形成されます。それらの流れが時として配管機器に致命的なダメージを与えることもあります。このような状況をおこさないようにするために流れがもたらす材料劣化、流れが配管、機器にどのような影響を与えるかを知っておくことが重要です。本書は問題解決のために体系的に解説された初めての解説書です。

■内容

第1章 エロージョン・コロージョン概論／第2章 コロージョン（腐食）工学の基礎／第3章 いわゆるエロージョン・コロージョン／第4章 外力を受けた金属材料の挙動／第5章 キャビテーション エロージョン／第6章 固体粒子衝突エロージョン／第7章 コロージョンとエロージョンの重畳

■お申し込みは当社ホームページまたは下記販売課まで

日本工業出版株式会社 販売課

〒113-8610 東京都文京区本駒込6-3-26 <http://www.nikko-pb.co.jp>

TEL03-3944-8001 FAX03-3944-6826 e-mail : sale@nikko-pb.co.jp