

<b>Title</b>	現代技術と人工物環境：「安全性をめぐるって」
<b>Author(s)</b>	標, 宣男
<b>Citation</b>	聖学院大学総合研究所紀要, No.18 : 275-303
<b>URL</b>	<a href="http://serve.seigakuin-univ.ac.jp/reps/modules/xoonips/detail.php?item_id=2632">http://serve.seigakuin-univ.ac.jp/reps/modules/xoonips/detail.php?item_id=2632</a>
<b>Rights</b>	

聖学院学術情報発信システム : SERVE

SEigakuin Repository for academic archiVE

## 現代技術と人工物環境

——「安全性をめぐつて」——

標 宣 男

一 はじめに —— 自然、科学・技術、原子力 ——

### (二) 自然の探求と技術

近代自然科学（以下近代科学と言う）は、西欧と言う特定の地域に十七世紀と言う特定の時代に成立した体系的自然についての知、すなわち一種の自然哲学であり、数学的合理性和実験による反証性をその方法論的特徴とする。この前者の数学的合理性は、古代ギリシャのピタゴラスからプラトンを経て伝えられる数学的自然観と、十二世紀に復活したアリストテレスの合理主義が結合した結果成立したものであり、この伝統は神学者や哲学者などの知識階級によつて守られてきた。これに対し、実験を支える「技術」を担ってきたのは、いわゆる西欧中世に発展した職人階級であると言われる。十七世紀は、この両階級を繋ぐ市民階級の成立を背景にこの哲学者の知と職人の技術が融合し、近代科学成立の歴史的環境が整った時代であつたと解釈されている。

この様な方法論的特徴を持った近代科学は、十七世紀の原子論の復興に伴う自然の機械論的・非人間化と、人間による自然の操作可能性と言う性質を内に持つものであるが、これらの二つの性質も又、「技術」と深く関係している。前者について言えば、「機械論的」と言うその表現の中に（神による）技術的産物としての自然と言う意味が籠められている。一方、後者については、「操作」と言う言葉が直接技術との関連を示している。さらに、科学史家伊東俊太郎がその著書「近代科学の源流」の中で、「……中世においては、ギリシャのように、自然は人間と同質のものとして内から直観され理解されるようなものではなく、まず未知なる第三者として経験に即して外から実験的に把握され、このことより自然は『解剖』されなくてはならない<sup>①</sup>」と述べている点に注目しなければならぬ。すなわち、中世以来自然の神秘は人間に対して隠された存在であり、それを明らかにする為には自然を「解剖台」の上に置きメスにより「解剖」しなければならぬ。ここで、解剖の道具としてのメス及び解剖行為によつて象徴されていることが、「技術」と関連すると考えられる。しかし、西欧において、技術により自然の神秘を解明しようと言う歴史は、この近代科学の成立を待つまでも無い。それは、古代より続き中世では文化の底流に生き残り、中世末期より近代初頭に大流行した錬金術の各種実験の中に見ることが出来る<sup>②③</sup>。たとえ現代において錬金術が「非科学的戯言」としてのけられ、さらに近代物理学においては数学的理論物理学が主流であり、実験物理学は脇役と思われ勝ちであったとしても、西欧の自然の探求の歴史における「技術」の役割は明白であった。

なお本論における「科学」とは、主として「物理学」を意味するものとする。

## (二) 近代科学の応用としての科学技術

十七世紀の科学革命は確かに近代科学の方向性を決定し、科学技術時代への扉を開いた。英語名の *applied physics* が明瞭に示すように、この科学技術は科学の応用としての技術を意味するというのが一般的理解である。もつとも、近代科学の成立がすぐさま応用科学としての科学技術へと結びついたわけではない。それどころか、マクロな現象を取り扱う物理学である熱力学は、産業革命を成立させた蒸気機関の効率の改善という純技術的動機から発生したものであり、ここには技術から近代科学へという構図が見て取れるのである。しかし、時代が十九世紀から二十世紀に入ると、流体力学、材料力学、更に物性物理、電磁気学、化学等「科学」の諸分野の研究が進み、それらが夫々飛行機や船舶の設計、各種材料の改良・開発、そして照明、通信手段、化学製品の開発等の「技術」へと繋がっていった。そして現在、技術の学である工学を学ぶ者の基礎は、科学を学ぶ者の基礎とほぼ重なると言われるほどになり、まさに *applied physics* としての科学技術の姿を示していると言えよう。そして、これら科学技術により自然物を改変して作られた製品（以下「人工物」と言う）に我々は取り囲まれているのである。今世紀の前半に「量子力学」の建設に活躍した W・ハイゼンベルグは、この自然・技術・人間の関係について「……技術は人間と環境を大幅に変え、世界の自然科学的側面を直接かつ不可避に、人間の前に置くことよって、人間と自然の中に深く進入する」と言う。科学技術とは、科学の文脈において人間と自然を繋ぎ、あるいはその間に介在するものと言うのが彼の主張であろう。ここに「自然の概念についての学際的研究」（略称「自然の研究」）における「技術」を位置付けたいと思う。

### (三) 科学技術における動力エネルギーの役割と原子力

これら科学的「人工物」製作の背景を成すのは、それ自身技術の成果であるエネルギー（動力エネルギー）の開発である。この動力エネルギーの開発こそ科学技術の発展を支えるものとして特に重要なものである。もともと、現代の科学技術の発展は、近代科学の成立としての科学革命と動力革命としての産業革命に端を発する。そしてこの産業革命における動力エネルギーが、古代ギリシャ以来の技術の意味を、「人間の手と密接に結びついた技芸」から、「科学の応用としての機械技術（テクノロジー）」に変えたと言う<sup>6)</sup>。この様な技術の在り方を変えたものとしての動力エネルギー歴史の中に、原子力エネルギーの開発が位置付けられているのである。原子力エネルギーの利用は、これこそ *applied physics* の典型的な例であろう。M・ハイデッガーは科学技術は自然を「立て上げる」ものだと言った<sup>7)</sup>が、原子力の利用は確かにそのようなものである。それは前記の言葉を使えば自然の「解剖」の結果と言うことになるが、単なる解剖よりもっと積極的な（自然の）「利用」を含蓄している。

自然現象としての原子力（核力）の解放は地球の歴史上皆無であったと言うわけではなく、かつて天然原子炉が稼動していた証拠がある<sup>8)</sup>。しかし、それは人間はもちろん如何なる高等生物の誕生よりずっと以前のことである。ウラニウムの核分裂による核力の解放と利用の特殊性について、技術史家S・リリーは一九六五年に刊行された著書（邦訳『人間と機械の歴史』）の中で次のように言っている。「自然力には三つの根本的に違った種類がある。重力、化学力もしくは電磁力、そして核力、この三つである。……技術の歴史は人間がいかにして重力と化学力に対する支配をよりよく利用することを習得したかと言う物語であった。……例えば人間は重力を利用して水車を動かすことを習得した。人間は化学力を利用して蒸気機関を動かすことを学び取った。……しかし今や——一九四二年の最初の原子炉以来——人間は

ついに、これらの力と根本的に違った、しかもはるかに強力な第三の力——原子核の粒子を結合する力——の支配に出發した<sup>⑨</sup>。そして今や、原子力エネルギーは日本の電力エネルギーの約三五%を、フランスにいたっては七〇%を越える量を占めるまでになった。

そのような原子力エネルギー関連施設である東海村JCOにおいて、一九九九年九月三十日、人的被害を伴った臨界事故が発生し、改めて原子力施設の「安全性」が問題になった。「安全性」は現代社会におけるキー・ワードである。「科学」の発達故に「安全性」の問題が生じたのか、あるいは「科学」がこれほど発達したのになぜ「安全」の問題が解決されないのか、この様な問いが聞かれそうである。

本論では、このJCO事故の検討を糸口に科学技術と言われる現代技術の特徴と限界について、安全工学研究の現場にいた者の立場から考えてみようと思う。

## 二 原子力と安全性 —— JCO事故を中心に ——

### (一) JCO事故とは何か

原子力発電所の燃料は、ウラニウムであるが、その原子核は中性子の衝突により分裂しその際巨大なエネルギーと中性子その他の放射線を放出する。放出された中性子も他のウラニウム原子核に次々に衝突し核分裂を持続することが出来るならば連続的にエネルギーを取り出すことが出来る。その常に一定の核分裂が持続する状態を「臨界」と言う。ちなみに、連続した核分裂が起こらない状態を「未臨界」と言い、核分裂が増大する状態が「超臨界」であり爆発を意

味する。なお、ウラニウムは幾つかの条件が整わないと臨界には達しない。そのうち最も重要な条件は、「ある『量』のウラニウムを、ある『形状』を持った限られた空間内に纏めること」である。原子炉はこの様な条件を技術的に作り出しており、臨界状態が常に持続し一定のエネルギーを連続的に取り出せるように制御しているシステムである。

原子力施設は、原子力発電所だけを意味しているわけではない。それらの内の主なものは、鉱山から採鉱されたウラニウム鉱石の精錬、濃縮、燃料成型、さらに原子炉で用いられた使用済み燃料を再処理する施設等である。この内、濃縮は核分裂を起こし易い種類のウラニウムの割合（濃縮度）を自然の割合（〇・七二〇％）より高める作業を言う<sup>⑩</sup>。現在、世界的に見て最も多く使われている形の原子炉（軽水型原子炉）では三〇程度の高濃縮ウラニウムを用いている。なお、濃縮度が高いほど臨界になるウラニウムの量は少なくて済む。また、これらのほか幾つかの工程とそれを受け持つ施設が必要であるが、JCOには濃縮工程と燃料成型工程との間の再転換と言う工程を受け持つ施設があり、そこではフッ素の化合物としたウラニウム（六フッ化ウラン）を酸化ウランに化学転換し、更にそれを硝酸に溶かした「硝酸ウラニル溶液」を製造していた。

JCO事故の直接原因は至極単純なものである。それは作業員が、形状管理（一杯になっても臨界にならないように「容量」と「形」を制限すること）していかない沈殿槽に臨界量以上のウラニウムの溶けた溶液を入れてしまった為に起こった事故である。この事故によつて、外部への放射能漏れは無いと言つて良いほど微量であった（汚染事故とは成らなかった）ものの、臨界に伴う中性子線の照射（照射事故）により施設内外に被曝者を出し、特に作業員の中から犠牲者を出してしまった。日本の原子力施設で犠牲者が出たのは、日本の原子力開発史上JCO事故が始めてであった。又、臨界が二〇時間と長時間続いた点もこの事故を重大なものとした<sup>⑪</sup>。

事故後、ジャーナリズムや専門家などから様々な意見が出されたが、その中には幾つかの通常聞きなれない専門用語が混じっていた。いわく、「多重防護」、「安全余裕」あるいは「保守的設計」、「想定事故」さらに「human error」など

である。これらは全て原子力施設の安全性に関わる用語であり、原子力施設にとって如何に安全性が重要と考えられてきたか示す用語である。以下に、原子力における安全とは何かを解説し、その後改めてJCO事故を考えてみる。

## (二) 原子力における安全性（「安全の論理」及び「safety culture」）

原子力施設の安全性は、原子力発電所について最も良く考えられてきた。それは原子炉の運転により多量の危険物質（放射能を持つ核分裂生成物、FP (Fission Product)）が生じ、それが原子炉の中に貯えられているからである。原子力発電所の設計が他のプラント設計と違う点<sup>13</sup>は、この危険物の存在についてその開発の当初から熟知しており、それに対する工学的対策を織り込んでいたことである。

原子力発電所の安全性で注意しなければならない点は、まず安全を確保しなければならない相手が「一般公衆」であると言うことである。この点が通常の工場などにおける工場関係者を対象とした安全と異なる。次に、安全とはその一般公衆から危険な物質（FP）を「隔離」することを意味する。原子力施設の設計思想は、一般に誤解されているように決して無事故であることを前提にしているわけではない。安全性の確保のために通常運転時は当然のこと、この事故時でさえ「隔離」の効果が発揮されねばならないことが要求されている。この「隔離」は「FP障壁」と呼ばれる何重かの人工的バリアーによって実現されており<sup>14</sup>、さらに原子力発電所は、住民の居住地区から離れた所に建設され空間的に「隔離」されている。

以上を述べた点を加え、原子力発電所の安全性を特異なものにしているのは、たとえ事故時においてもこの「多重FP障壁」の効果を有効ならしめる為の「安全の論理」が必要とされたことである。なぜ論理の必要性が強調とされるのか。佐藤一男はその著書「原子力安全の論理」の中で次のように言う。「幸か不幸か、原子炉の事故は、経験則だけ



で十分といえるほど多くなかったし、今後も多くなることは許されないのであろう。……将来に、あるいは起こるかもしれない無数の種類の事故に対して、万全の策を講じる為には……経験を踏まえ未経験な領域にまで我々の思考を延ばして行くこと、すなわち演繹が必要になる。……原子炉の場合、平常時と事故時の差が極めて大きいので、我々の思考の演繹の度合いもまた大きいものとならざるを得ない。この様な演繹を正しく行つて誤りの無い結論に達する為には、……思考の展開が誤り無く出来ることを保証する為の確固たる論理が必要なのである<sup>(15)</sup>。そしてこの論理に重要な骨格を与えるのが「多重防護」(defense in depth、深層防護とも言う)と云う考えである。

多重防護の原意は軍事用語にあり、防衛が最前線から後方まで及んでいることを意味する。原子力発電所において戦う相手はFPであり、多重防護はFPが人間社会への侵入(むしろ侵出と言ふべきか)を妨げる為にあるが、陣地のイメージからくるハードウェア的な「物」ではない。それは、発電所の立地から運転にいたるあらゆるフェイズを関連付ける安全性の「考え方」(戦略)であり、ハードウェア(安全系、前記のFP障壁もその一部を構成する)はその具體的実現である。ここでは佐藤一男の『原子力安全の論理<sup>(16)</sup>』を参考にして、設計の中に見られる多重防護の考えを概説する。

設計における多重防護は、三つのレベルからなる。第一のレベルは、当然のことながら最も重要な異常発生防止である。これにはシステム設計・構造物・系統・機器の高信頼性、フェイル・セイフ設計やインタロック<sup>(17)</sup>の設置などが入る。第二のレベルは、たとえ異常が発生してもその波及拡大を抑制することである。これには異常の早期発見と修復、あるいは急拡大防止が考えられている。その為、異常を検知するプラント監視装置や警報系、原子炉の運転を自動停止する原子炉停止系(安全保護系)等がある。

第三のレベルは、事故時の影響緩和である。第一、第二のレベルは原子力以外でも考え方としては存在している。それらの主たる動機は、安定な運転と設備等の財産保全である。原子力発電所の安全系の特徴はこの第三のレベルにあり、

安定な運転はおろか財産の保全もおぼつかなくなる大事故時ですらその安全対策（一般公衆に対する放射能・放射線対策）を十分講じる点が一般産業システムとは異なる。大事故時に公衆を放射線被曝の影響から防護するために成すべき事（安全防护の基本条件）は、原子炉停止、炉心冷却、放射能閉じこめの三つである。現在の原子炉で、この条件を満たす人工的手段が必要とされるのは、原子炉固有の特徴と事故中の自然現象だけではこの条件を満たす事は出来ないためである。その人工的手段を工学的安全系と言<sup>18</sup>い、これによつて放射線照射はもとより放射能による公衆の汚染を防護している。当然ながら原子力発電所の立地による空間的「隔離」そのものも、この第三のレベルの機能を果たすと考えられる。又、これらの安全機能が充分に働くかどうかを計算により検討する為に仮想的に設定された事故が「想定事故」である。「想定事故」の規模は原子力発電所の安全系の性能を測る指標となるものである。

設計上もう一つ重要なことは、材料強度、容器の容量、機器の性能に対し余裕を持った設計（保守的設計）が必要とされることである。この余裕を持った考え方が設計全体に考慮されていなければならない。これを「安全余裕」と言い、設計強度などを使用条件より大きくとり、その比を「安全係数」と言う数値により表している。

加えて、原子力発電所の安全性の確保は、これら設計上の考慮のみに依存することでは達成不可能であり、human errorを初めとする様々な（負の）human factor（以下「人的因子」と言う）への対策が重要である。それにはまず、組織として安全性の重要性を理解し、安全管理を上部から下部組織にいたるまで徹底させる。その上で、特に原子炉の運転者に対する正確慎重な運転を目指した教育・訓練、及び組織的入念な保守等が要求されなければならない。また、事故等の緊急時において運転員が適切に行動出来るような訓練もなされなければならない。この人的因子をどのように考えるか、それは施設全体の信頼性に大きく影響する問題である。国際原子力委員会（IAEA）は、チェルノブイリ事故の教訓から人的因子の重要性を再認識し、それから生ずる問題を回避しようとした。そこで、一九九一年「safety culture」を唱え、現代の「文化価値」としての「安全性」を世界的に広めるよう努力をしてきた。safety cultureとは、

「原子力安全問題に、その重要性に相応しい注意が必ず最優先で払われるようにするために、組織と個人が備えるべき一連の気風や気質」<sup>19)</sup>と定義されている。

### (三) JCO事故の検証(原子力安全の立場から)

前節で述べた安全性の考え方は、原子力発電所ばかりではなく全ての原子力施設に適應すべき考えである。もちろんJCOのような施設は発電所のような巨大システムとは比較にならないほど単純なシステムであり、そこで行われている作業も燃料として使用以前の(従ってFPを持つていない)ウラン化合物の粉末を溶かすだけ、と言う単純なものであった。しかしこの施設は原子力産業と言う特殊な産業の一部なのである。その特殊性は、第一にウラニウムの性質にある。それは前記のように、ある物理的条件が満たされれば多量のエネルギーを発する巨大な危険性を潜在させているものであり、しかもそれを取り扱う作業(この作業自体は身近な化学反応の領域のことである)状態がその条件からどの程度近いのか、作業者の五感では決して検知できず、ただそれは高度な物理学の計算により知られるようなものであると言う点である。臨界か未臨界かそれは、通常感覚では知覚も制御もできない非常に鋭い境界を形成するものである。第二に、原子力関連施設での事故は、それがどこで起ころうとも原子力産業全体の問題となると言う政治的特殊性を持ったものであると言うことである。それゆえJCOの事故は原子力関連施設と言う複雑な巨大システムの一部であると考えねばならず、それゆえ安全性の考えの厳密な適用が必要であり、何よりも一般公衆の安全が守られねばならなかった。

JCO事故は、六フッ化ウランの粉末を酸化ウランへ転換する工程がひとまず終了した後、再溶解した製品(硝酸ウランル溶液)の均一化作業中に起こった。又、この日の作業は通常の発電用原子炉に使う3%濃縮のウラニウムではな

く一八％と言う高濃縮のウラニウムを扱うものであった。実はこの高濃縮のウラニウムの取り扱いは、一九八六年から始まっているが時折しか行っておらず、事故を起こした作業が四回目にあたる。危険性は三％ウラニウムの時と比べ何倍にもなっていたのである。それではなぜこれまで事故が発生しなかったのか。実はこの均一化の作業は、監督官庁への許可申請書の中には記載されていない違法なものでもあったが、すぐにそれが危険と言うわけではなくやり方によっては、申請という形式的な問題はともかく危険性はなかったはずのものであった。それではなぜこの様なJCO事故が起ったか、またなぜ一般公衆の被曝という事態に至ったか。以下にそれを「安全の論理」特に、「多重防護」の三つのレベルに即して考えてみてみようと思う。

このウラニウムの転換工程における、安全の第一のレベルについてはどうなっていたであろうか。たしかに正常な工程上の重要な機器については形状管理がされていた。しかし、全ての設備に形状管理を施すことが出来ないとするれば、「運転員が仮に間違っても、ある量が入った所でインターロックが掛かって、もうそれ以上入らないようにするとか、ミスに対し二重のチェックが掛かるようにしなければならない」<sup>20</sup>。あるいは、誰にでも安全に操業できるフル・プールの設計にしなければならなかったのである。安全の第二のレベルに関して言えば、仮に何らかの手違いが起ってもそれが波及拡大することを防ぐ対策が何も取られていなかった。この様な施設で考えられる事故は唯一「臨界事故」であるが、事故が起った場合の適切な対策、例えば中性子を吸収する硼酸水を注入する様な対策が何も取られていなかった。すなわち、事故は起らないものと想定していた（「想定事故」を考えなかった）のである。従って、いわゆる最も重要な一般公衆の安全を守ると言う安全の第三のレベルの対策（例えば、施設の立地条件、施設周囲を放射線防壁の設置等）も取られていなかった。

またさらに大きな問題は、組織管理上の問題である。作業全体が申請書記載のものに違反していたことは既に述べた。注(11)の資料を見ると、回を重ねる毎にどのように危険へと近づいていったのか、いかに「安全余裕」を減らしてい

ったのが良く分かる。<sup>21</sup>それは、安全責任体制の不明確性など組織としての安全性への理解が足りなかつたことを示している。それは、いわゆる「バケツ」の使用などに象徴される安全管理の欠除、作業員への安全教育（すなわち「臨界への理解」及び「濃縮度三%と一八%の違いの重大性」等の教育）不履行へと繋がる問題であつた。<sup>22</sup>臨界への接近の度合いは通常の人間の感覚経験では感知できない。それは教育されなければ判らないものであつた。そこには作業効率を安全性に優先したと言ふことのみならず、安全と作業効率を両立させ得る装置の開発努力へ怠慢も見られる。JCO事故は所謂「うっかりミス」のような単純なものではない、もつと広い意味の「人的因子」に属する問題であつた。

JCO施設の安全設計は、世界中の原子力安全の関係者が営々と築いてきた「安全の論理」を全く考慮していないものであり、文化価値としての safety culture の定着にはほど遠い安全管理への意識の低さといふまで、起こるべくして起こつた事故であつたといえる。米国・エネルギー省のリチャードソン長官が派遣した専門家は記者会見で次のように語つた。「……この様な設備を使いながら、臨界事故の備えが無いのは、米国では考えられない」。<sup>23</sup>

次章では、科学技術が進歩した現在でも何故この様な事故が起こるのか。このJCO事故をきっかけに改めて現代技術の性質の中にその要因を探つてみたい。

### 三 現代技術とは何か ——「複雑系」・「人的因子」——

#### (一) 科学技術における科学の限界

JCOと言う原子力関連施設の作業は、核燃料という「現代科学の成果」と比較的単純な道具を用いた「人間の手作

業」と言う組み合わせによつて成り立っていた。その核燃料取り扱ひの誤りが事故を起こしたのである。これは原子力と言う特殊分野の事故ではあるが、そこには科学（「核燃料」で象徴）と技術（「人間の手作業」で象徴）より成り立っている現代技術が持つ問題が現れているように思う。

その問題を解明するためには、科学の応用としての技術という考えに対し、技術側からの反省がなされなければならない。それは、現代技術の科学に対する独自性の主張<sup>24</sup>でもある。そのためには、まず技術に應用してきた「科学」とは何であつたかを問うてみる必要がある。吉川弘之は工学（ここでは技術と技術の知の体系である工学とを区別しないで扱うものとする）の立場から「我々の技術体系が人工物に對処するものとして如何に未熟かということを知らされる<sup>25</sup>」という。それは決して現代自然科学についての非難ではない。元々科学と技術ではその目的が異なり、前者は世界を理解することを、後者は世界に對処することを目的とする（両者の相異を analysis と synthesis とする言ひ方もある）。吉川の議論は、目的の違う科学を用いてきた技術側の反省なのである。さらに、吉川は科学成立の場が持っている「無限性近似」が、工学が対象としている現実的な場の「有限性」にもはや適さないと主張し、次の様に言う。「アブダクション『仮説形成』により、現代学問領域の創始者達は基本法則を直感的に推論してしまふが、そのアブダクションを導くものはいわば美的直観と言う事になる。……私たちの学問とは、少数の優れた体系創出者たちの美的感覚に依拠しつつその全体系をはっていると言う事になる。現代の邪悪なるものが、過去において無限性近似が許されていた諸要因の有限性への全面的移行によつて、従来独立であつたものが交絡を始めてしまつた事を原因として生起しているのだとすれば、無限性環境における領域独立化を前提として体系内の整合性を誘導する美的感覚が現代においては必ずしも成立しない。すなわち、もはや美的ではない、と言う事であろう<sup>26</sup>」。吉川の説は、第一章において科学の成立が、人工的に制御された実験環境としての解剖台に自然を乗せることによつてなされたという考えにも関連している。科学の應用が小規模である間は無限性近似が有効であつたとしても、規模の拡大によつて周囲との干渉が発生し、様々

な問題が生ずると言うことになる。現在の地球環境問題及び本論文の巨大システムの安全性と言う問題発生の一因はここにあると考えられよう。もとよりこういった科学の現状に対し、科学の側からの反省も無いわけではない。現在の複雑性の科学、非線型科学の研究はその反省に立ったものであろう。その研究の進展は、近代科学は在りのままの自然を見失っているのではないかと言う反省の上に立つて、従来の分析的科学に対する補完的な役割を果たすと言う意味を持つと思われる。

## (二)「匠の業」としての技術

現代科学が複雑系として自然を理解しようと言う方向に向いていることは先に述べた。しかし、この方向が自然の説明体系としての科学に革新をもたらすかどうか、現在では未だはつきりしない。それゆえ、斎藤了文がその著書「(もろの造り)と複雑系」の中で、技術の対象となる人工物を、「二体問題のような決定論的な系」と「統計的に扱ひ得るランダムな系」との中間の、「組織化された複雑系」<sup>(27)</sup>と捉えろと言う時、それは、現代技術を科学の応用とのみ考えることでは充分ではないと言わんとしているように思う。技術の対象は、相互作用する「中ぐらいに複雑な系」なのである。「複雑系」であると言うことを認識することは、我々がそれに関係する全てを知ること出来ないと言うことを意味する。そのような状況において、技術には科学的知と別のものが要求される。特に技術の中心を成す「設計」においてこのことが妥当する。斎藤はこの別のものとして、ハーバート・A・サイモンの「限定された合理性」を考える。サイモンは「システムの科学・第三版」の中で、「限定された合理性」について『経済行動』では……合理性は全知ではありえないとき限定されている、と。そして全知性がないということとは、主として全ての代替案を知ると言うわけには行かないこと、外生的な事象については不確実があること、および結果を計算することが出来ないことを意味してい

た」。そして、この「限定された合理性」のその特徴を「探索」と「満足度」に置いた。<sup>28</sup> 我々が日常生活で行う理性的意思決定は、しばしばこの「限定された合理性」に基いて行われるものと考えられる。

更に「設計」について別の見方をしてみよう。例えば、「設計とは逆問題」を解くことに等しいと言うことが出来る。すなわち、設計とは結果（設計への要求）から初期条件（設計条件）の設定を決めることである。数学的に言えば逆問題は一義的には解けない。<sup>29</sup> すなわち、逆問題は解の多義性を意味し、設計者は複数の解、それも全てではなく、判る範囲の解の中から一つを選択しなければならぬ。サイモンは経済活動における解の選択の基準を「満足度」においたが、これも設計と言う多義問題を解く時の有力な方法であろう。また、吉川はこれを設計者のアブダクションとした。<sup>30</sup> しかしより分かり易く言えば、選択を可能とするのは結局のところ、設計する者の「健全な判断力と適合性や妥当性に対する直感的感覚」であり、通称、これを「engineering judgement」と言ふ。

近代の工学は、近代科学の成果を十分取り込みつつ、さらに技術の現場における経験的知を、例えば「設計学」の様な形で体系化してきた。しかし、技術の現場には前述のように「直感力」や「engineering judgement」な「学」として学ぶことが出来ないもの、現場経験に依らなければならぬものが存在する。それは、「匠の業」として、師から弟子へ伝えられていく技能に象徴されるものであろう。しばしば先端的科学技術製品の一部に手工業的町工場の技術が生かされているとの報道がされるのは、このことを意味するのであろう。そこでの技術の伝承はひとえに「on the job training」(OJT)による。OJTは技術の伝承方法としては優れた方法である。しかし、これは業の「skill」の習得には効果を発揮するが、しばしば教育内容に一貫性を欠いたり硬直化し、本質的状况の変化に対応しきれないことがある。前章のJCO事故の原因の一つはその様なものであった。<sup>31</sup>



(ii) 'man-machine system' の環境の安全性

これまで現代技術が単なる科学の応用とはなり得ないその理由を、技術の「場」の持つ「複雑性」及びその場で習得される「業」と言う点に求めてきた。ここで、特に後者の「業」の意味することが、技術における「人的因子」の一つであることに注目したい。ただ、元々現代技術は、中世技術以来の人間機能の分化と言う側面を持つ<sup>33</sup>（厳密には古代から始まっていると本論の筆者は考えている）と言うことを考えると、人的因子をとりわけ強調することすら可笑しなことなのかもしれない。しかし、我々現代人が科学技術としてのみ理解されがちな現代技術（以下「技術」と言う）を考える時、技術の中にあるこの人的因子を意識的に考えなければならぬ。

以下では、この点から、すなわち「人間」と人工物の関係としての「安全性」と言う点から技術について考えるが、その際目的に応じて技術を二種類に分ける方が考え易いように思う。それらは、「(機械装置を) 制御する技術」と「(人工物を) 製作する技術」である。これまで述べてきた技術の大半は、「設計」に代表される「製作する技術」に主として関係していた。現代技術環境における「安全性」は、原子力の場合と同様、その対象が「一般公衆」であり、これが現代社会における特徴となっている。それ故そのような「安全性」に直接関係する技術としてまず念頭に浮かぶのは「制御する技術」である。もとより「製作する技術」が関係しないわけではない。しかしこの場合、直接影響を受ける者の多くは隔離された製作現場の関係者としての人間であり、一般人としての「人間」ではない。むしろ、「製作する技術」は人工物を通して間接的に一般人に関係する。多量生産された食品による中毒や、地球環境問題を引き起こす多くの化学物質もこの中に入るであろう。なお、「製作する技術」に関連した「安全性」の別の面についても、ここで言及しておく、複雑系としての人工物の破壊や災害発生の子測不可能性<sup>34</sup>は、複雑系科学の分析手法である非線型数学

の示唆する所である。また、「設計された挙動以外の挙動を全く示さない人工物の設計は實際上困難である所から、結果として実現される人工物は、ほぼ必然的に本来の目的とは関係しない様々な副次的挙動を伴わざるを得ない」と言うことも同じことを意味するのであろうか。(人工物の極端な短寿命化<sup>37</sup>もこれらのことと関係しているかもしれない<sup>36</sup>)。もちろん、この問題に関し現代技術が手を拱いていたわけではない。徹底した品質管理をしてもなおかつ一定の故障率を持たざるを得ない多くの部品からなる人工衛星が、一定の高信頼度を保ち得るのは「冗長性」などの信頼性工学、あるいは保全 (main-tenance) 技術の発達による。更に、前述の原子力施設の設計における「安全の論理」もまた技術的に人工物の安全性高める為に、人間の能力の隙間を何とか論理的方法によつて埋めようと言う努力である。しかし、にもかかわらず、複雑系としての人工物の持つ究極的な意味での予測不可能性は、「製作の術」としての現代技術の限界である。

「制御する技術」と「安全性」の問題は、原子力発電所のような巨大システムの事故において顕著に現れる。<sup>38</sup>一九七九年のアメリカのTMI事故、一九八六年旧ソ連で起きたチェルノブイリ事故、また前章で扱ったJCO事故は、どれも(機械装置を)「制御する」と言う場面における人間の問題が直接関わっていた。これらの例において、夫々設計上の不具合と、安全管理の欠如のもとにおける規則違反・人間の誤判断さらに教育不足による過失が重なり、それが事故の起因や規模の拡大に結果している。原子力事故ばかりではない。一九八四年インドのボパール市で起こった農業工場における猛毒のイソシアン化メチルを流出させたガス爆発事故の原因も、作業者の無知が原因であった。旅客機のコックピット内での人間関係のトラブルを含んだ様々な人間の過失による事故あるいは危険状態への接近もまれなことではない。より身近にはしばしば運転手の信号の見落としによる電車の事故がある。更に日常的なこととして自動車事故が在り、その多くは運転者に起因している。(これらの事故については注(39)に掲げた文献類を参照)。このように我々の日常は様々な危険な環境に取り囲まれている。にもかかわらず、これらシステム特に巨大システムの信頼性向上には、

最終的に経験豊かな熟練者を必要とする。我々は、「制御する技術」から正にも負にも成りうる人的因子を完全に排除することは出来ない、すなわち完全な機械化は出来ないと思われる。

我々の周囲にある環境は「自然」と人工物で構成された環境である。その環境としての人工物の多くは、その機能の遂行に人間の介入を必要とするシステム、すなわち「man-machine system」（人間と機械との複合系）として存在している。そしてこの man と machine の境界において発生する負の事象の影響が、人工物と我々の生活環境との境界に現れる時それは「安全問題」として顕在化する。安全性は「境界問題」であると言われる所以である。これが安全問題に関連して「制御する技術」の意味する所である。

#### 四 終わりに — 結論としてのリスク論 —

##### (一) 安全問題に完全な解決は在るか

本論では、現代技術と近代科学との相違を、技術の対象が「複合系としての人工物」であること及びそこには「人的因子の介入」が不可欠であることに見てきた。「人工物が複合系であること」は、その挙動を我々人間は完全には把握できないことを意味し、「製作する技術」の限界がここにあることをも知った。そして人工物の多くが、単なる人工物ではなく人間と人工物（多くは機械）の複合系であり、「制御する技術」に関連した man-machine system として我々の環境を形作っている。この man と machine の境界において、人間は「人的因子」と呼ばれる問題を人工物との間で引き起こす危険性を持ち、設計及び教育上の考慮にもかかわらず、その負の影響を我々の技術から完全には排除出来

ないと言うことも本論の一つの結論である。なお、現代技術がその基礎としてきた現代科学、特にミクロな原子の世界から宇宙の果てまでを解明して来た現代物理学の発展が、これに対する答えを「近未来」に持っているかと言う問題に對して、現在のところ否定的意見が多いことを付記しておく。<sup>(4)</sup>

## (二) 人工物環境とリスクの許容

我々の生活が人工物に依存しているとすると、それは必然的に安全問題に曝されていることを意味する。これが、前節で示した結論であつた。言い方を変えるなら、我々は人工物環境からの「リスク」を負つて生活していることになる。ここで「リスク」と「安全性」とは表裏の関係にある概念である。完全に「危険」な場合には安全性はもとよりリスクも問題にはならない。もちろん完全に「安全」な場合には、リスクはもとより安全性も問題にはならない。リスク（又安全性）が問題になるのは危険が潜在的にある状態である。その危険事象の潜在性の度合い、あるいは起こり易さの度合をしばしば生起確率で表す。しかし、人間が「*human*」<sup>(4)</sup>と思うのは危険事象の起こり易さばかりではない。それは予想される被害の程度にも依存する。それゆえリスク論においては、リスクを事象の起り易さと被害の程度の間数（最も簡単には両者の積）で表す。

ここでは、リスク概念を用いて人工物環境の問題を考えようと思う。我々の人工物環境は完全に安全とは言えないがしかし完全に危険でもない、まさしくリスクをもつて表されるようなものである。我々はこのリスクをゼロのしようとする。前記の技術的また教育的努力等はその為である。しかし、本論で示したように人工物で囲まれた環境において、リスクを完全にゼロとすることは不可能であり、かつ多くの場合そのリスクの大きさを正確に認知することは大変難しく、しばしば過大あるいは過小のどちらかの評価に偏る（これをリスク認知のバイアスという）。そして極端に過

大評価した場合、我々は危険と思われる人工物を無条件に社会から排除することによってリスクゼロを実現しようと言う思いにかられる。しかし、その時改めて人工物とは何であったのかが問われることになる。人工物は人によって意図されたものであり、その中に社会的、経済的、政治的、歴史文化的な事情、あるいはしばしば個人の欲望や、時として人間の存在基盤にいたるまであらゆる要因をはらんで成立している存在物である。従ってその排除にはこれら要因（その多くは何らかの社会的便益）を満足させる代替案が必要となる。しかし、多くの場合代替案の採用は別の種類のリスク（「対抗リスク」）をもたらし、取り除こうとしているリスク（「目標リスク」）と「対抗リスク」の間の取り引きが生ずる（risk trade-off）<sup>(47)</sup>。ここに、我々がリスク問題を簡単には解決できない理由が存在する。原子力発電所の段階的廃止を決め、実行段階に入っているスエーデンが今陥っているジレンマはこの種のものである<sup>(48)</sup>。

リスク（あるいは安全性）とは本来的には極めて主観的な概念である。しかし、現実問題としてrisk trade-offが生ずる以上、リスクについての客観的評価尺度を必要としよう。現在のリスク論の目的は、リスクが問題となるような不確実な状況下において、この客観的尺度により合理的意思決定ができるよう、これを助けることである。しかし、この場合の合理性もサイモンの言う「限定された合理主義」でしかない。従って、いかなる決定もその中に曖昧な部分を含み、それ故最終的には人間的「決断」を必要とせざるを得ない。今後、如何に科学が進歩しようと、man-machine systemとしての人工物環境に囲まれて生じる我々は、全てのリスクを完全に回避することは決して出来ないだろう。限られた条件下で現実的に出来ることは、可能な限り正確にリスクを認知し、可能な限りリスクを減少させるよう努力する一方、相対的に小さいと思われるリスクを理性的に許容することだけである。

最後に「自然の概念の学際的研究」のテーマである「自然」に再度言及したいと思う。我々現代人は日常生活の中で自然を求め、都会人でもと言うより都会人であゆから一層、身の回りに小さくとも自然的なものを見つけようとする。

しかし、そのような自然の多くは「自然状態にある自然」ではなく、そこには必ず何らかの「技術」が介在し、人間の意図が込められている。そうであるならば、我々の周囲では「自然」ですら、何か人間的なものを表しているとみなせよう。それゆえ我々は、次のW・ハイゼンベルグの言葉を持って本論を締めくくろうと思う。

「人間は自分自身と向かい合っているだけであると言う警句は技術時代においても、ある広い意味で通用する。……日常生活の諸器具を取り扱おうと、機械で作った即席料理を採ろうと、あるいは人間によって変えられた風景を通り抜けようとして、いたるところ絶えず、人間によってもたらされた創作物に出会う。そして我々は、絶えず自分自身に出会うのである」<sup>44</sup>。

## 付 記

本論文は、聖学院大学総合研究所の「自然の概念についての学際的研究」の一環とし二〇〇〇年六月九日に発表したものを基に多少の変更を加えたものである。研究会に御出席いただいた方々から貴重なご意見をいただいた。

論文中で使用したJCO事故関連の資料を入手するにあたり、日本原子力研究所の主任研究員村松健氏にお世話になった。また、浅学の筆者はハイデガーなど全く不案内であったが、二〇〇〇年一月十日に開かれた雑誌『形成』発行三十周年記念の大木英夫先生による講演の中でハイデッガーの思想について知らされ、本論を書くにあたり大きな示唆を与えられた。さらに、ハイデガーの『技術論』を実際に参照するに当たり、聖学院大学総合研究所の深井智郎先生及び、滝野川教会の赤田直樹神学生のお手を煩わせた。これらの御助力に対しここに感謝の意を表す。

- (1) 伊東俊太郎『近代科学の源流』、三〇〇頁、中央公論社（昭和六十年）
- (2) セルジュ・ユンタ（有田忠郎訳）『錬金術』、一四〇〜一四一頁、白水社（一九九八）  
 「中世の大学が……中略……実験を全くと言っていいほどおこなうにしていたのに比べ、錬金術師達はあえて自ら手を汚し、自分自身で炉や蒸留装置をこしらえ、実験室内での作業を行ったのである。（本物であるにせよ偽者であるにせよ）達人達は、賢者の石を探索する過程で、アンチモン、硫酸、王水、燐など、重要な化学物質をたくさん発見した。彼らの装置や実験方法は今なお実験室で用いられている。……中略……要するに、現代科学は彼らヘルメスの弟子達に大きな恩恵を受けており、彼らの理論や実際がはなはだしい不信を買っているのは不等と言うべきである。それに、今日、放射能や原子力に関する研究の公準を成す理論である元素の変換の可能性を最初に予感したのも、錬金術師ではあるまいか」。
- (3) 村上陽一郎『科学史の逆遠近法——ルネッサンスの再評価——』中央公論社（昭和五十七年）  
 中世末期からルネッサンスにかけての錬金術、占星術及び魔術の流行とその意味についてはこの本に詳しい。
- (4) 斎藤了文『ものづくり』と『複雑系』講談社（一九九八）  
 この書の九三頁から九四頁にかけて、には次のような記述がある。  
 「基礎工学の方法には理学におけるほとんどすべての科学的手法が含まれる。……中略……七つの工学的基礎学問、「設計論」（機器設計の基本法則）、「システム工学」（システムの設計、最適化）、「情報論」（知識や信号などの整理・発生・変換・処理）、「材料科学」（物性論と材料合成の原理）、制御工学（自動制御の原理）、「移動速度論」（物質「質量」や熱量に関する法則）、「エネルギー論」（エネルギーの変換と伝達）。これらの学問の基礎に三つの応用数学（確率統計現象）、「線形集中定数系論」、「線形分布定数系論」と五つの基礎理学（「力学」、「固体力学」、「流体力学」、「熱力学（統計力学）」、工学全般についてのベル「技術の体系」、コンピュータの利用を見越した「数値計算」、「数理計画法」）が取り上げられてい

る。

これらは、岩波基礎講座「基礎工学」に取り上げられたもので、これが発刊された頃筆者らも研究室で仲間との輪講により学んだ。現代ではこれに、「集合論」と「量子力学」が必須なものとして加わらねばならぬであろう。

(5) W・ハイゼンベルグ(尾崎辰之助訳)『現代物理学の自然像』、一二頁、みすず書房(一九八七)

(6) 中村雄二郎(総論——なぜ今科学／技術科か)、三〇四頁、岡田節人他編、岩波講座 科学技術と人間 1『問われる科学技術』岩波書店(一九九九)所収

「……〔技術〕について言えば、元々ギリシャ語では、(テクネー)とは(アート)を意味した。……それが、人間の手と密接に結びついた技芸から、もっぱら科学の応用としての機械技術(テクノロジ)を意味するようになったのは、(産業革命)以後の事である。つまり動力エネルギーが手から切り離されて、蒸気機関や電動モーター、更に発電所などによって大幅に供給されるようになってからである。もちろん、その後原子力エネルギーの実用化がやってくる」。

(7) マルチン・ハイディッガー(小島威彦、アルムブルスター訳)『技術論』理想社(一九六五)六〇七頁

「今私たちは技術なるものをギリシャ語の「テクネー」——*techné*——の中に意味されている事から考えてみると、立上げること(ヘルシユテツレン)に精通していることなのです。この際「テクネー」は知のあり方の一つです。そして、立上げると言うことは、立上げる以前に未だその現存していなかったものを顕な、近寄り得る、処置し得るものへと立たせることなのです。このように立上げること、すなわち技術に固有な特質が、ヨーロッパの西欧の歴史の内部で、近代の数学的自然科学の展開を通じて、比類ないしかたで実現されています。……この近代技術によって、自然の中に閉ざされていたエネルギーがうち開かれ、その開発されたものが変形され、変形されたものが補強され、補強されたものが貯蔵され、貯蔵されたものが分配されるようになりました。自然のエネルギーが確保されるあり方が制御されるばかりでなく、その制御自身も確保されなければなりません。いたるところで、このように挑発し、確保し、計算するように自然を立たせることが、支配し統べているのです。そのみではなく、様々なエネルギーを手許に立上げると言うことが、あるがままの自然の内に決して現れてこないような要素や素材の生産にまで、拡大されてしまいました。」

(8) 藤井勲『天然原子炉』東京大学出版会(一九八八)

この文献によると、現在のアフリカ・ガボン共和国のオクロ地区のウラン鉱床中に今から二十億年前天然原子炉が稼動



していた確かな証拠がある。その当時天然ウランニウム中のウランニウム<sup>235</sup>の濃度は今より高く、四％（現在は〇・七二〇％）程度であった。

(9) S・リリー著（伊藤新一他訳）『人類と機械の歴史』、二三三〜三四頁、岩波書店（一九八八）

なお、核力の巨大さは、一キログラムの消費に対し、石油で一万キロカロリー、ウランニウムは二〇〇億キロカロリーの熱量を発生させることから判る。

(10) 現在、地球上に天然に存在するウランニウムは原子核の重さが少し異なる三種類の同位元素から為る。それらは、ウランニウム<sup>234</sup>、<sup>235</sup>、<sup>238</sup>と言われ、その存在割合は、それぞれ〇・〇〇五四、〇・七二〇、九九・二七五％である。これより、核分裂可能で原子炉の燃料であるウランニウム<sup>235</sup>の割合が非常に少ないのが分かる。九九％以上ある<sup>238</sup>は燃料とはならない。しかし、これを核分裂性のプルトニウム<sup>239</sup>に換えることにより燃料として用いようと言う原子炉が高速増殖炉である。

(11) 原子力安全委員会、ウラン加工工場臨界事故調査委員会『ウラン加工工場臨界事故調査委員会報告書』（平成十一年）

この報告書によると、燃料製造工程や再処理施設における臨界事故では、臨界直後の出力暴走時に発生した熱によりウランニウムが飛び散りすぐ未臨界になると考えられるが、JCO事故のような溶液系臨界事故では、臨界が長時間続く可能性があることは外国の過去の事故事例により明らかである。また、JCO事故の場合、周囲の冷却材が漏れて出た中性子を跳ね返す反射材の役目をしたと言われ、これが臨界の継続に大きな役割を果たしていたと言われる。

(12) 一〇〇万キロワットの原子力発電所を一年間運転するとその直後の核分裂生成物の出す放射線の強さは一グラムのラジウムを基準した単位で測り、一、七二五、〇〇〇万キュリーと言う。なお、一年後には約一〇〇分の一の強さに減衰する。

(13) 多くの工業プラントでは、公害と言う深刻な問題を引き起こした後、それを制御する装置の開発が行われた。例えば、大気汚染物質の内、石炭火力発電所から出る硫黄酸化物による害は、脱硫装置をつけることにより現在ほぼ完全に取り除かれるようになった。なお、ディーゼルエンジン等から出る窒素酸化物については原理的にはともかく、コストの面から排出規制が難航している。二酸化炭素をプラント等から排出制御する技術についてはより難しい問題がある。

(14) 多重FP障壁として次のような物が考えられている。まずFPの生ずる燃料を熱的に壊れ難い酸化ウランとする、その燃料をジルコニウム合金の管（被覆管）のなかにいれる。燃料の集合体である炉心を高温高压に耐える鋼鉄の容器（圧力容器）で覆う。さらにそれを気密性の高い格納容器（鋼鉄あるいは耐圧性のコンクリート構造を持つて）で覆い、最後に発

電機等も含めた原子力発電所全体がひとつの建物（原子炉建屋と言う）の中に入れられている。

(15) 佐藤一男『原子力安全の論理』、二九〇頁、日刊工業社（昭和五十九年）

平常時と事故時の放射線被曝量の差について、二二〇三頁に次のような記述が在る。

「敷地外のどの地点に公衆が住んでいても、その人に対する平常時の被曝量の増加分は、全身に対して年間五ミリレム以内、甲状腺に対して年間一五ミリレム以内によると言う目標が示され実際その様に運転されている。……これに対し、標準的な軽水炉一基が事故を起こしたとする。事故はピンからきりまでであるが、全く極端な場合まで考えると、短時間で致死量（数百レム程度）以上の全身被曝を受ける可能性はゼロではない。被曝量だけ見てもざつと五桁の差があり、時間当たりになると八桁から九桁もの差が生じる。最もこの様な事故が起こる可能性は極めて低いではあるが」

なお、天然の放射線による被曝総量は年間一〇〇ミリレム程度で、場所によって一〇ミリレムから二〇ミリレムは容易に変化する。

(16) 前注(15)の書、九四〇一〇六頁

なお多重防護の基本的考えは各レベルが最善を尽くさないと言効ではないと言う思想のもとに出来上がっている。言いかえると、譬えそれが非合理的に思われようと前レベルの機能破壊を前提にして、当該レベルの機能のみによって初期の目的をはたすように設計されるものである。

(17) フェイルセイフ機能とは微小な故障や誤操作が直ちに重大な異常にいたらない様な設計思想であり、日本やアメリカの原子炉の設計では、燃料の核特性にこのことが考慮され多少の出力上昇は自然に収まるように設計されている（固有の安全性）。また電源喪失などの異常が発生した時の原子炉停止系もこの考えで設計されている。なお、重要な機器を多重にする

考え（冗長性）も広い意味のフェイルセイフ設計である。インタロック設計とは故意あるいは誤って正常な行為と異なつた行為を成そうとしても、機械的にそのような行為ができないように防止する装置であり、例えば、原子炉を運転する制御棒の運動は一度に決まつた長さ以上動かないようになってゐる。

(18) 第三のレベルの三つの機能、①原子炉停止、②炉心冷却、③放射能閉じこめについて具体的には次のように考えられている。

①としてはレベル2で述べた原子炉停止系が設置されている。なお先に指摘したように原子炉は核的に固有の安全性も持つている。その上で中性子を吸収する硼酸水などの注入系も設置されている。②の炉心冷却に付いては、非常用炉心冷

却系（ECCS）が設置され、また③については放射性物質除去設備のついた格納容器が設けられている。チェルノブイリ原子炉にはこの格納容器が無く被害の拡大を招いたと言われる。

(19) 原子力安全委員会編『平成九年版原子力安全白書』大蔵省印刷局

(20) 高木仁三郎「東海村臨界事故とはどのような事故か」、『世界』、第六六九号（一九九九）

(21) 前注(11)の報告書、III―五四頁の図から次のことが明瞭に読み取れる。

すなわち、一九八六年の作業では全ての作業が安全の面で適切な機器（溶解塔、決められた小容器）を用いた。次の一九九三年の作業では酸化ウランの再溶解過程において、申請書上決められた容器ではないバケツ（二〇リットルステンレス容器）を用いた。その後の均一化の作業はこれも申請書には無い小バケツ（五リットルステンレス容器）を用いた。しかし、ここまでの二年間の作業においては、一回の作業におけるウラニウム量の取り扱いも決められた作業単位（一バツチと言ひ、溶液にして六・五リットル、二・四キログラムのウラニウム）を守っていた。一九九五年の作業では再溶解する過程のみならず、最初の六フツカウランの溶解過程においてもバケツを用い、また均一化の過程では貯塔を用いた。ここで、決められた作業単位を越える六く七バツチ分の処理を一度に行つた。貯塔（八〇リットル）は形状管理がしてあるので事故には至らなかつた（このやり方は申請には無いが社内のマニュアルとして決めてあつた）。そして事故を起こした一九九九年の作業においては、溶解過程と再溶解過程におけるバケツの使用に加えて均一化の過程で貯塔の代わりに形状管理がしていない攪拌機付きの沈殿槽（四二リットル）を用いた。事故は、三バツチの溶液を注入した時発生した。なお事故の前日、同じ装置を用い四バツチの溶液を注入しており、事故が発生しなかつたのは僥倖以外の何ものでもなかつた。

(22) 前注(11)の報告書によれば、組織全体としての安全意識や安全管理の欠如を示している事柄として、フィルムバツジを携帯しない者が多かつた、組織的責任体制の不明確性、又作業変更方法の無計画性などが上げられている。又教育については、III―一二頁に、「平成六年部課室」ごとの教育（転換試験棟メンバー）で『転換工程の臨界管理について』教育が行われたが、それ以後の教育では行われていないとのことである。転換試験棟に新しく配属された作業員に対して教育が行われておらず、臨界管理に関する知識が従業員の間には十分浸透していなかつた」とある。

(23) 中村政雄「核物質防護に甘い日本、国際事情と大きなズレ」『エネルギー・レビュー』、第一九卷一二号（平成十一年）

(24) 吉川弘之監修『新工学知』全三巻、東大出版界（一九九九）

(25) 吉川弘之『テクノグロープ』、三七頁、工業調査会（一九九三）

(26) 前注(25)の書、七六頁

(27) 齋藤了文『ものづくり』と複雑系、一五頁、講談社（一九九八）

(28) ハーバート・A・サイモン（稲葉元吉他訳）『システムの科学、第三版』、二八〇頁、パーソナルメヂア（一九九九）

(29) 逆問題の典型的な例は、拡散方程式を逆に解こうとする場合である。この様な問題は数学的に不適切問題 (ill-posed problem) と言われ、コンピュータにより無理に解こうと思うと解が発散してしまう。

(30) 前注(25)の書、八一頁

(31) E・S・ファীগソン（藤田良樹、砂田久吉訳）『技術屋の心眼』二四九頁、平凡社（一九九五）

(32) 前注(11)の報告書、III—一頁の「社内での作業管理と技術管理」の項に、JCOにおいて行われていた教育について、次のように書かれてある。「JCOでは作業者に対する教育・訓練はOJT (On the Job Training) に重点を置いていたと言え、OJTは作業現場で作業をやりながら教育を行うもので、一般の座学よりも有効である事が多い。しかし、その欠点は教育の内容が一貫性を欠き易いことで、しっかりとカリキュラムと教育指導のガイドの下で行われない場合、担当者任せになり、教えなければならぬ事項が欠落する危険が在る」。

(33) 前注(25)の書、二九頁

「中世人は次々と単能機を発明し改良を加えていった。織機、農耕機械、運搬装置、工作機械……ここには古代人には全く無かった人間機能の分化と言う思想がある。実はこの思想は現代技術の重要な柱である。……現代の生産技術が大量生産を単機能を要素とする巨大システムと言う形態で実現するための基礎は、中世の機能分化文化によつて既に作られていたと言える」。

(34) ここで技術の区別は、次に示すアリストテレスの「自然学」の記述がヒントになった。

アリストテレス（出隆、岩崎允胤訳）『自然学』岩波書店（一九九三）、一九四b—

「ところで、技術はその材料を支配し、これを認識するものであるが、この技術は「その二通りの目的に依じて」二種に分けられる。すなわち、使用する技術と、その製作を指導する棟梁の技術である。……棟梁の術は、制作の術として、その材料「質料」を認識している……」。

(35) 前注(24)の書、一九四頁

「タンクの爆発のような事故の対して、この文献の著者は「この爆発は圧力が上がってタンク壁に亀裂が生じ破壊にいたるといふ、その限りにおいては立派な『自然現象』であり、物理学の応用として材料強度学によって説明可能であり、制御可能である。しかし、どんなに物理学が精緻になつてもそれだけで爆発を完全に防止できると考えることは、どう見ても我々には出来ない」と言つてゐる。

(36) 小山照男「自然法則知識の体系化」一八四頁、前注(23)の書、第一巻「技術知の位相」所収

(37) 前注(25)の書三九頁に次の指摘がある。

「自然は寿命が長いと言ふより極めて安定で、人の手が入らなければ何万年も同じ状態に止まるのが普通である。人工的作品のピラミッドは数千年の寿命を持ち、中世の建築は数百年の寿命を持ち、産業革命の機関車は数十年の寿命を持つ。これに対し、現在の自動車の寿命は数年である。数千年の間に四桁も寿命を低下させたのは現代技術の極めて大きな特徴である。この様な技術が成熟して社会に深い影響を与えてくるようになると、この現代技術の不安定性は我々に大きな負担となつてくる」。

(38) 原子力発電所は「電力」を一種の製品として製作・製造する現場でありながら、「製作する技術」としての運転・制御の失敗は、現場の人間のみならず(発電所周辺という限定的ではあるが)一般公衆にも(電力という製品を通じて間接的なものではなく)直接被害が及ぶ。このような巨大エネルギーを集中的に発生あるいは使用する製造現場における技術は、本論でいう「製作する技術」でありながら、「制御する技術」と同様な「安全問題」を引き起こす。それ故、この場合の技術は「制御する技術」と考えることにする。「JCO」事故の場合も、「硝酸ウラニル溶液」という製品が被害をもたらしたものであるが、製品そのものよりもその取扱ひ方による事故ということを考え、この場合も「制御する技術」の問題と捉えた。

(39) 例えば、TMI事故に対しては、都甲泰正編『TMI原発事故』電力新報社(昭和五十四年)、チエルノブイリ原発事故に対しては、原子力安全委員会・ソ連原子力発電所事故調査特別委員会『ソ連原子力発電所事故調査報告書』(昭和六十二年)、JCO事故については前注(11)の報告書、なお、ジャンボ・ジェット機の事故については、二〇〇〇年三月十二日のNHKスペシャル「巨大旅客機墜落の謎」の報道、その他に対しては近藤次郎『巨大システムの安全性』講談社(昭和六十一年)、

H・W・ルイス (宮永一郎訳) 『科学技術のリスク』 昭和堂 (一九九七)、等。

(40) 前注(25)の書、一九四頁

「事故のみならず、……、環境破壊、資源枯渇、廃棄物過剰などは、夫々現象としては自然現象であるにもかかわらず、それは決して物理学によって説明や制御が出来ないことは自明のように思えるのである。物理学は、人類が自然資源を有用な人工物に変えていく場面では極めて有効であったし主役であった。しかしいま、環境から自然資源が消失し、人工物ばかりに囲まれることになるとしたら、我々は人工物を上手に制御する新しい人工物の為の『物理学』を開発しなければならぬのであろうか」。

(41) 「リスク」(risk) と「不確実性」(uncertainty) について両者を別々の概念として定義したのは、筆者の知る範囲内ではF・H・ナイトの著書(奥隅栄喜訳『危険・不確実性・利潤』文雅堂書店・昭和三十四年出版。なお原著は一九四八年刊)が最も古い。ここでは「測定し得る不確実性……あるいは『危険』なるものは、測定し得ないものとははるかに異なる。……したがって『不確実性』という言葉是非数量的型の場合にのみ限定するであらう」とし、「リスク」(訳書中の「危険」と「不確実性」を区別している。しかし現在のリスク科学の分野では必ずしも「リスク」と「不確実性」をこのようには考えない。まず「リスク」についていえば、日本リスク研究会(リスク事典編集委員会「リスク分析の考え方とその方法」日本リスク研究会誌第五巻第一号・一九九三年)は、それを「人間の生命や経済活動にとつて望ましくない事象の発生の不確実さの程度およびその結果の程度」と定義する。さらに「不確実性」について「リスクに付随する概念として不確実性があるが、その内容は確率的なもの、偶然的なもの、未解明なもの、予見不能なもの、交渉条件的なもの、などで区別される」とあり、確率的なものを含むより広い意味を持つ。また確率が直接計測出来ない場合でも、いわゆる主観確率により事象発生の不確実性を表わす時、確率によるリスクの表現はかなり広い応用範囲を持つと考えられる。

(42) John D. Graham 'Risk vs Risk' Harvard University Press. (一九九五)

(43) ウィリアム・D・ノートハウス(藤目和哉監訳)『原子力と環境の経済学(Swedish Nuclear Dilemma)』電力新報社(一九九九)。ここでいうジレンマとは、二酸化炭素排出による地球環境問題とエネルギー問題とのトレードオフを意味している。

(44) 前注(5)の書、一七頁