

第6章 リスク論

神里達博

1. 発端は「原子力」

「リスク」という言葉は、17世紀ころに欧州に現れる、比較的新しい「危険」である。その後、数学や統計学、また経済学の発展のなかで、確率論と結び付けて議論されるようになる。実に射程が広く、さまざまな観点から議論が可能な、現代社会の重要なキーワードとなっている。

このリスクという考え方が、科学技術と社会に関わる課題と本格的に結び付くことになるのは、20世紀に現れた2つの問題においてであった。1つは、ある物理現象の健康影響の評価であり、もう1つは巨大なプラントの安全性についてである。

そして奇しくも、というべきか、当然ながら、というべきか、その2つはいずれも「原子力」という、優れて20世紀的なテクノロジーをマネジメントするうえでの必要性から生じた課題であったのである。

実のところ、リスクと科学技術について語るべきイシューは現在、非常に多様であるものの、その原点をたどれば、原子力に関する2つのリスクの問題に突きあたるといえる¹⁾。いや、むしろ、原子力という問題と社会が向き合うことで生じる大きな、いわば「摩擦熱」が、学際的分野であるSTSやリスク論が発展していく原動力の一部になったと理解すべきかもしれない。

そこで本章では、まず、リスクという概念が西洋世界で生まれた経緯と、それと深く関係する確率論の出現について簡単に確認する。これらが、典型的に「近代的なるもの」であることをおさえておこう。そのうえで、放射線

の人体への影響評価と、原子力発電所の安全性の評価において、それぞれ、どのような経緯でリスク概念が導入されていったのかを、順に検討していくこととしたい。これらの作業により、STSにおいてリスクを考えるうえでの、基本的なケーススタディを経験することになるだろう²⁾。

2. 「リスク」と「確率」

2.1 “risk”の淵源

英語における“risk”という語の起源は比較的新しい。たとえば、似た意味をもつ“danger”という語が少なくとも13世紀にさかのぼることができるのに対して、“risk”は、17世紀に英語の語彙に組み入れられたと考えられている。では、この言葉はどこからやってきたのか。直接的にはフランス語の“risqué”であるが、さかのほればイタリア古語の“risco”に至る。さらなるルーツについては諸説あるが、現在もトスカーナ地方で使われるイタリア語の方言「敢えて～する」という“risicare”という言葉の近縁とされ、これは元々「断崖をぬって船を操る」という意味があったという（寺澤1997, 1191）。

さて、“risk”と“danger”のもっとも大きな意味の違いは、危険に対する態度が、能動的であるか受動的であるかという点にある。船を操る航海は、現代でも決して簡単なことではない。ましてや「大航海時代」においては、文字通りの意味で冒険だったと言える。敢えて危険を冒すことで、何らかの価値を手に入れようとする近代的な精神に目覚めたヨーロッパの人びとが、“risk”という言葉 sought のは自然な成り行きであったと考えられるのだ。

一方で“danger”という言葉は、封建時代の領主が領民等に対してもつ「権力」を意味する俗ラテン語の“dominiarum”を語源とする。権力者からもたらされる受け身の“danger”から、自らの行動に伴う近代的な“risk”へと、人びとが経験する危険の質的な変化がおきたと考えれば理解しやすい。

ではそもそも、近代的精神とはいかなるものか。合理性や客観性の重視、人間中心主義、コスモポリタニズムなど、さまざまなとらえ方が可能だろうが、西洋近代の立ち上がりにおいてもっとも重要な事件とは、「神の支配か

らの脱却」であると言えるだろう。つまり、運命や超越的なものに自らを委ねるのではなく、人びとが自分の判断と責任の名のもとに未来を切り開いていく態度こそが、まさに近代の本質ではないか。能動への傾きをもつリスクという概念は、深く近代的精神と結び付いていると言うべきなのだ(神里2002)。

2.2 確率論のはじまり

リスク概念は現代社会の非常に多くの領域と関わっているが、そのような広範囲の射程を得たことの大きな理由として、確率論と結び付くことでリスクが計量可能なものとしてとらえられるようになったことを指摘できるだろう。実際、現代語におけるリスクは、「不確実性の定量化」という意味が広く浸透しており、とくに日本語の言語空間では、「能動性」よりも、「定量性」が前景化しているとも考えられる³⁾。

では、そもそも人類はいつごろから確率的な観念をもっていたのだろうか。「サイコロ」の歴史は古く、5000年前のモヘンジョダロの遺跡からも、数字が書かれた立方体が発掘されている。また賭博は、世界中のさまざまな文明圏において古くから行われていた記録がある⁴⁾。

しかし、ルネサンス以前のヨーロッパで、確率の定量的な検討がなされた証拠は、基本的にはみつからない。その原因の1つには、キリスト教の影響があったと言われている。すなわち、世界のあらゆるできごとは神の意志を反映しているのであって、そもそも偶然なるものはこの世にない、という考え方が定着していたというのだ。実のところ中世ヨーロッパにおけるギャンブルは、異教徒のものとされていたのだ(David 1962, 36)。

さて、近代的な確率論の研究は、「リスク」という言葉が現れたのと同じ17世紀、パスカル(Blaise Pascal, 1623-62)とフェルマー(Pierre de Fermat, 1607-65)の間で交わされた、賭けの分配に関する往復書簡に端を発するとされてきた。しかし科学哲学者のハッキング(Ian Hacking, 1936-)は、天才パスカルのひらめきによって確率論がはじまった、というような見方に対して疑問を投げかけた。というのも、同じころ、オランダのホイヘンス(Christiaan Huygens, 1629-95)やライプニッツ(Gottfried Wilhelm Leibniz,

1646-1716)も同種の思考にたどり着いており、またロンドンの商人グラント(John Graunt, 1620-74)は死因の統計的分析を開始していたからである。

これを説明するうえで、ハッキングは以下のように考えた。すなわち、17世紀に確率という概念に光があたるようになったのは、「確からしさ(probability)」の「根拠」についての考え方が変わったためだ、というのである。

それ以前は、確からしさという概念は「臆見(opinion)」についての性質を指す言葉であった。それが正しいものとされるためには、権威のお墨付きが必要であったのだ。まさにそれが“probable”という単語の意味するところだった。しかし17世紀になると、たとえば、サイコロを実際に転がし、その頻度を観察することで「確からしさの根拠」とみなすという、新しい考え方への転換がおきたのである。これにより、私たちの知っている「確率(probability)」という概念が立ち上がったとハッキングは説明する。17世紀に、人びとの物事の見方が大きく変わり、それに伴って新しい概念が生じたというのである⁵⁾。

ここで、同じ17世紀に、リスクと確率の概念が生まれたことは、強調しておいてよい。いわゆる「科学革命」とも重なるこの時代に、私たちのモダニティを規定する非常に基本的な考え方が始動したのである。これらは、まさに近代の嫡子ともいえるべき、重要な概念であるということを、改めて確認しておきたい。

2.3 確率とリスクの多義性

その後、確率論は、フランスのド・モアブル(Abraham de Moivre, 1667-1754)、ラプラス(Pierre-Simon Laplace, 1749-1827)、スイスのヤコブ・ベルヌーイ(Jakob Bernoulli, 1654-1705)、ドイツのガウス(Johann Carl Friedrich Gauss, 1777-1855)などにより深く研究され、数学的に精緻なものへと発展していく。20世紀に入ると、統計学と結び付くことで、さらに大きく展開していった。そこではピアソン(Karl Pearson, 1857-1936)やフィッシャー(Sir Ronald Aylmer Fisher, 1890-1962)といった英国の研究者の貢献が大きい。一方で、この時代の統計学が優生学と結び付いていたことも忘れてはなるまい。実際、この2人の統計学者は強く優生学を信奉していたこ

とで知られている。ダーウィン (Charles Robert Darwin, 1809-82) の示した進化論的な世界観が急速に社会に浸透していくなかで、人類を含めた生物集団を対象とする統計学も形を整えていったのである。

また同じころ、経済学者のナイト (Frank Hyneman Knight, 1885-1972) が、『リスク、不確実性および利潤』(1921) を著し、リスクの意味に関する重要な指摘を行っている。彼は「測定可能性 (measurability)」という観点によって、不確実性とリスクを区別し、広義の不確実性のうち測定可能であるものを「本来のリスク (risk proper)」, そうでないものを「真の不確実性 (true uncertainty)」と呼ぶことを提案した (Knight 1921, 20)。

さらに彼は議論を進め、リスクを基礎付ける「確率」は「先験的 (*a priori*)」なものとして「統計的 (statistical)」なものに分かれる、とした。前者は、サイコロの目のように、実際に調べなくても、数学的にあらかじめ結果がわかっているとされるものである。後者は、一国の死亡統計のように、実際にデータを集めて計算することではじめて明らかになる確率である。そしてナイトは、そのいずれでもない「真の不確実性」に相当するのが、さまざまな推定 (estimates) や判断 (judgments) であり、しかしそれらはビジネス上の決定のみならず、ほとんどの人間の行為に関係するものだ、と述べている (Knight 1921, 197-232)。これは後に「ナイトの不確実性」と呼ばれることになる⁶⁾。

さしあたり、私たちにとって重要なのは、彼が「測定可能性」に注目した点であろう。「不確実性」や「リスク」といった用語の意味するところについては、現在も分野によってばらつきがあり、しばしば議論が混乱する原因でもあるのだが⁷⁾、この「ナイトの不確実性」は、先ほど言及した、17世紀に確率論が立ち上がる以前の「確からしさ (probability)」の概念に近いとも考えられる。

このように、元々の“probability”という言葉は、非常に多義的で、さまざまなタイプの「見込み」のごときものを含んでいたが、時代を経るに従って、定量可能性や客観性といった観点から整理が進んでいったのだ。

ちなみに、確率と主観性という点、「ベイズ」を想起する方も多いだろう。ベイズ理論によれば、主観的な判断を数量的に扱うことができるわけだが、

フィッシャーやピアソンなど、統計学の泰斗たちは、これを蛇蝎の如く嫌った。1950年代くらいからベイズ理論は再評価が進み、近年は、コンピュータが普及したこともあって、さまざまな問題解決にベイズ統計が使われている (マグレイン 2013)。一度は統計・確率の世界が、頻度主義に基づく「客観性の帝国」に席卷されなかったが、再び、かつてもっていた主観性の含意が戻ってきたともいえるのではないか。少なくとも「確からしさ」という概念には、元々、主観的な側面があったということは強調しておいてよい。

そして、先ほど検討した“risk”の概念が、能動的に冒す危険という主観的な意味合いと、客観的に測定できる量的な危険性という、本質的にはかなり異なる2つの意味を併せもつに至ったことも、“risk”と関わり深い“probability”概念自体が、元々多義的なものであったことを踏まえると、理解しやすいかもしれない。偶然を支配する神から離れ、人間が主役になると同時に、自然法則を理解して活用するという近代のありようと、ちょうど“risk”のもつ意味が重なるということだ。

しかしそのことが、人間の価値判断と、自然法則から導出される事実を、どう線引きするかという新しい課題を出来させることになる。その典型例がまさに「リスク評価」ということになるわけだが、次節以降では、この問題を具体的な事例からみていくこととしよう。

3. 放射線の健康影響とリスク

冒頭で少し触れたように、リスク概念が、STS 的課題と最初に結び付くことになったのは、放射線の健康影響評価においてである。本節では、放射線の危険性の発見について確認した後、その規制の仕組みがつくられていくなかで、リスク概念が組み込まれていくありようを追うこととする。

3.1 放射線・放射能の発見

1895年秋、ドイツのレントゲン (Wilhelm Conrad Röntgen, 1845-1923) が放電管の研究をしている際に、X線を発見した。これに触発されたフランスのベクレル (Antoine Henri Becquerel, 1852-1908) はその3カ月後、ウラン

塩が写真乾板を露光させることを偶然みつける。その後、ピエール・キュリー（Pierre Curie, 1859-1906）とマリー・キュリー（Maria Salomea Skłodowska-Curie, 1867-1934）夫妻は、ベクレルの研究を引き継ぎ、この現象を「放射能」と命名した。こうして、原子核物理学が本格的に動き出すことになる（Jones 2005）。

これらの新しい発見はメディアにも頻繁に取り上げられ、人びとを魅了した。当時の多くの新聞や雑誌は、ラジウムが関節炎・癌の治療薬や、肥料として有用であると報じている。また、夜でも時計の文字盤がみえるように、ラジウムを塗料に使うことも行われるようになった。あのエジソン（Thomas Alva Edison, 1847-1931）がX線の性質に強い関心を抱き、「透視装置」の開発を進めたことも知られている。この研究のために、後に彼は有能な助手を失うことになるのだが、ともかく、20世紀の初頭には、一種の「放射能ブーム」がおきたのだ（Gagliardi 1991）。

しかし放射線が健康に悪影響を及ぼすことが、徐々に明らかになる。まず、X線は発見の直後に、手に皮膚炎を生じさせることがわかった。また、やけど、脱毛などが確認されていく。さらに、ベクレルとレントゲンの発見の6年後の1902年には、放射線によって癌が起こることも明らかになった（Kathren 2002）。1910年までには、ラジウム製剤およびX線装置を扱う多くの医師や技師が、皮膚への刺激作用および潰瘍を発症し、最終的に皮膚癌に至ったことが報告されている。エジソンの助手、クラレンス・ダリー（Clarence Dally, 1865-1904）もX線の過剰被曝が原因と考えられる縦隔癌で亡くなっており、「放射線の実験で最初に犠牲となったアメリカ人」とも言われている（Jones 2005; Gagliardi 1991）。

放射線の健康影響を重くみた欧米各国の学会は、専門の委員会をつくった。そして、それらが国際的に連携し、1928年、国際X線ラジウム防護委員会（International X-ray and Radium Protection Committee: ICRP）が設立される。こうして、ようやく1929年に米国医師会は、体毛を取り除くためのX線の使用を非難する決議をし、またその3年後に、内服薬として承認された治療法のリストからラジウムを除外したのである（Jones 2005）。

3.2 確定的影響とLNT

このように放射線の危険性について専門家が明確に認め、禁止などの措置が動き出すまでには意外に長い時間がかかっている。しかも、時を追うに従って、より深刻な影響が判明し、放射線の規制基準は、徐々に厳しくなっていくという経過をたどっていった。そうなった理由としては、やはり放射線が直接目にみえないものであり、またその健康影響についてもわかり難かったことが大きいだろう。

当初、放射線の影響に関する医学的な診断は、目にみえる皮膚炎「紅斑」が発生するかどうかで判断されていた。これは急性の症状であり、基本的に被ばく直後、遅くとも数十日以内に現れる、一種のやけどである。また浴びた放射線の量が多ければ多いほど重篤になり、一定量以上では必ず影響が出る。このような放射線の影響は、現在では「確定的影響」と呼ばれているが、発症する放射線の量には「閾値」＝「これ以下であれば反応が出ない量」があることもわかってきた。つまり、一定量以下の被ばくであれば、このような急性症状はみられなかったのである⁸⁾。

そこで、米国の物理学者マチュラー（Arthur Mutscheller, 1886-1950）は、紅斑が生じる最小の放射線量（＝閾値）の100分の1を、1カ月あたりの被ばく可能な量の上限、「耐容線量（tolerance dose）」と定め、放射線被ばくの規制基準にすることを提案した（Mutscheller 1925）。これによれば、有害な放射線の強さには下限があるということになる。この考え方を放射線の規制に用いることは、当時の医学と整合的であったし、それで万事、上手くいくように思われた。そして、放射線がもし、この確定的影響だけであったなら、「リスク」という概念を導入する必然性はなかったかもしれない⁹⁾。

ところが同じころ、より深刻な放射線の影響を示唆する研究結果が、遺伝学の領域から出てきた。米国の遺伝学者ハーマン・マラー（Hermann Joseph Muller, 1890-1967）は、1927年、ショウジョウバエを用いた実験で、X線による曝露が遺伝的な突然変異を引き起こすことを示した。そして、その突然変異率が曝露量に比例することを見出したのである。その後、この現象は植物でも観察され、X線の変異原性は種に依存しない一般的な現象であるこ

とがわかった。しかも、これには閾値が存在せず、また単位時間あたりで吸収される放射線の量にも関係がなく¹⁰⁾、影響は吸収された放射線の総量に比例し、生涯にわたってその個体に蓄積されることが明らかになったのである (Kathren 2002)。

すなわち、放射線の影響は、先ほどの「確定的影響」だけではなく、長い時間を経過してから、一定の確率で現れるタイプのものがあるということが、わかってきたのである。どの個体で発症するかは予測ができない確率的な現象であることから、現在では、先ほどの「確定的影響」に対して、放射線の「確率的影响」と呼ばれている。これにより、放射線による障害が、「線形閾値なし (Linear Non-Threshold: LNT)」のモデルで理解すべき現象であることが、最初に示唆されたことになる¹¹⁾。

実際、十年単位での時間が経過してから発症することもまれではなかった。楽観的な「放射能ブーム」の時代が去り、被ばく者の発病例が増えていったことが、放射線への人びとの不安を大いに高めたことは想像に難くない。

問題は、線量と発症の具体的な関係である。しかしこれは、直接観察することが困難であるため、高レベルでの放射線の影響から外挿して計算するよりない¹²⁾。直接測れないがゆえに、当時の専門家には、低レベルの放射線の影響には実際には閾値があるのではと楽観的に考える者もいた。

とはいえ、種によって低レベル放射線の作用に差がないことが遺伝学者から示された以上、人間への影響も同様に閾値がないと考えるのが科学的には妥当である。それはLNT、つまり放射線はどこまで少ない被ばくであっても、それ相応の作用はあるのであって、決して健康への悪影響はゼロにはならないということを意味している。こうして、放射線は、確率的な危険性、「リスク」として扱うよりないということが明らかになってきたのである。

3.3 「許容しうる」リスク

あらたな知見が明らかになるなか、放射線から人を防護するための、新しい考え方を構築する必要性に迫られた米国は、第二次大戦が終了するとすぐ、英国、カナダの関係者ととともに、オンタリオ州チョークリバーにおいて議論を行った (NCRP 1954)。1950年にはIXRPCは国際放射線防護委員会 (Inter-

national Commission on Radiological Protection: ICRP) と名称を変え、日本に投下された原子爆弾の影響についての調査結果も取り込みながら、さまざまな最新の研究を整理していった。こうして生まれたのが、「許容しうるリスク (permissible risk)」という考え方である。これは1954年のICRP勧告に記されることになった。その原文を少しみてみよう。

「本報告書の勧告は、職業上電離放射線に曝露された成人に適用され、現在入手可能な情報に基づいている。永久的なものとみなすべきではない。このような理由から、また一般的な理由から、放射線への被ばくはすべての場合において実行可能な限り低いレベルに維持されることが強く勧告されている。(中略) 人間が進化してきた環境条件からの重大な逸脱は有害な影響のリスクを伴うことは明らかである。したがって、厳密に言えば、地球や宇宙線の自然放射能による線量率よりも高い線量率で電離放射線に長期間継続して被ばくすることは、ある程度のリスクを伴うと考えなければならぬ。自然のバックグラウンドより高い放射線レベルは絶対的に“安全”とみなすことができないので、問題は、現在の知識に照らして、無視できるリスクに相当する、実務的なレベルを選択することである。これは“許容しうる”レベルと呼ぶのが適切であり、便宜上、許容線量(毎週)として表現される。」(ICRP 1955)

ここでは、放射線のリスクには閾値がなく、したがってできる限り被ばくを小さくすべきであることが基本原則として語られている。正確には、もはや、マチュエラーが提案した「耐容線量」を定めることは放棄したということなのだ。しかし、ならばあらたな「許容できるリスク」の量はどのようにやって決めるのだろうか。

同様の論点については、米国政府の国家放射線防護委員会 (National Council of Radiation Protection and Measurements: NCRP) の報告書にもみられるが、こちらの方がより明確に、いかなる意味で「許容」されるかが、述べられている。

「今日、実用的に設定される被ばく線量限界においては、危害を及ぼす

可能性のあるリスクを伴うと考える必要がある。そこでの問題は、このリスクを十分に小さくして、平均的な個人が容易に受け入れられるようにすることである。すなわち、リスクを放射線被ばくを伴わない通常の職業と、本質的に同じにすることである。(中略)このリスクは、起こりうる有害な影響が晩年になってはじめて現れるだろうという点で、他のリスクよりもはるかに許容できるものであると指摘できる。」(NCRP 1954)

本当に癌を発症するのが晩年なのかという点も大いに気になるところだが、少なくともこの論理を使うならば、「平均的な個人」なる存在が、実際にどの程度のリスクを引き受けながら生活しているのかわからなければ、放射線被ばくの「許容量」も決められないだろう。このような要請から、自動車、飛行機、天災、スポーツ、喫煙など、人びとが日常においてどの程度のリスクを被っているのかを調べる研究群が、動き出す。これらは、人びとのリスク認知の構造に関する研究へとつながり、「リスク心理学」を生み出す契機にもなった¹³⁾。また後には、放射線のリスク管理で使われたのと同じ手法が、化学物質の毒性のアセスメントや規制体系にも使われるようになった。

しかしもっとも重要なのは、LNTが前提である限り、「そのリスク事象によって、社会がどれだけの『リスク』=『犠牲者の数』を引き受けるか」という値を決めなければ、「許容量」つまり規制基準は決まらない、という点である。これは言葉通りの意味で「政治の問題」だが、このような重要なパラメータも、専門家の手によって知らないうちに決められることがほとんどである。この論点については、本章の最後にもう一度考えてみたい。

4. 原子力発電所のリスク評価

次に、もう1つの「リスク論」、原子力発電所のリスク評価を通じて発展し、後には他の大型プラントや輸送システムなどの分析にも応用されていくことになる、確率論的リスク評価(Probabilistic Risk Assessment: PRA)を取り上げよう。その歴史的経緯を確認した上で、PRAの限界について、概略的に考察してみたい。

4.1 確率論的リスク評価¹⁴⁾

リスクの概念が最初に実務的な領域で使われたのは、保険の分野、とくに海上貿易においてである。そのため、金銭的価値の定量という観点から、保険・金融の世界では独自にリスク評価が発展した。一方で20世紀半ば以降、技術の生み出す危険性に注目が集まったことで、テクノロジーアセスメント(technology assessment)の概念が1960年代に登場する。さらに、それらの危険性を評価するという方向性に進み、リスク評価の考え方が、技術の世界に入ってきた。とはいえ、当初はかなり定性的な議論が多かったという(辛島 1998)。

技術の現場において、はじめて本格的に定量的なリスクが検討されるようになったのは、戦後の米国における原子力プラントに関する「確率論的リスク評価」においてである¹⁵⁾。

1960年代初頭、ベル研究所では、空軍の大陸間弾道弾ミサイル「ミニットマン」の信頼性を高めるため、その適切な評価方法が模索されていた。その結果、開発されたのが、フォールト・ツリー分析(Fault Tree Analysis: FTA)である。これは、システムにおける望ましくない状態を、その原因となる事象群の因果関係の結び付きを明らかにすることで解析する手法である¹⁶⁾。加えて、イベント・ツリー分析(Event Tree Analysis: ETA)¹⁷⁾と呼ばれる方法を組み合わせることで、原子力発電所をはじめとする、複雑な工学システムの安全性評価を行う体系として発展したのが、この確率論的リスク評価であった¹⁸⁾。

それ以前の安全性評価は基本的に、現在は「決定論的安全評価(Deterministic Safety Analysis: DSA)」と呼ばれている考え方に基づいていた。そこでは、安全システムが設計上の意図に合致しているかどうか、また合致していない場合はどのような現象が起こり得るか、そして好ましくない影響が許容範囲にとどまるかどうかを、想定される事故のおこりやすさにかかわらず、評価することになる(IAEA 2011)。

これに対してPRAでは、何がおこりうるのか(シナリオ)、その頻度はどのくらいか、そしてその結果、どのような影響がおこりうるのかを、確率

的に評価していくことを目指すものである。当然、不確実性がそこには伴うことになる。適切なデータがない場合もあるだろう。それでも、ある種の確率分布を想定し、全体としてのリスクを見積もることは有益であるという合意が徐々にできていく。

4.2 ラスムッセン報告と TMI-2 事故

さて、1970 年代の米国は、100 万キロワット級の原子力発電所が次つぎと建設され、国民の不安も高まっていた。そこで、事故の可能性について確率論的に定量し、自然災害などの確率と比べることで、原発の安全性を公衆に理解してもらおうというアイデアが生まれる。

最初の包括的な PRA は、MIT の教授であったノーマン・ラスムッセン (Norman Carl Rasmussen, 1927-2003) が主査となって、原子力規制委員会 (Nuclear Regulatory Commission: NRC) に提出した “Reactor Safety Study (WASH-1400)”, 通称「ラスムッセン報告」である。この報告書では、当時存在した米国の 68 施設・100 基の原発を対象に、先述の FTA や ETA 等の分析手法を用いて、炉心溶融事故がおこる確率や、その際の放射性物質の漏洩量を推計している。加えて、事故によって人びとが放射線に被ばくすることによる急性の死亡や疾患がおきるリスク、また潜在的な（晩発的な）癌による死亡リスク、さらに財産の損害の検討を行っている。

事故確率に関する結果は、縦軸に発生確率を、横軸に事故の規模を死者数で表したグラフで示されている。それによれば、航空機事故やダムの決壊などの人為的事故、また竜巻や地震などの自然災害と比べても、おおむね 3 桁以上小さい¹⁹⁾。たとえば、炉心溶融事故は、1 基あたり 2 万年に 1 度と計算されており、原発事故のリスクは他の事故のリスクと比べて総じて非常に低いと見積もられていた (U. S. NRC 1975)。

しかし、このレポートによって、人びとの「誤解」が解けることはなく、むしろ原子力発電に対する懷疑が拡大する結果となった。さまざまな角度から批判が加えられたが、そのうちのいくつかを取り上げておこう。

そもそも、原子力技術を担う専門家の間でも、最初から確率論的な評価という考え方に対する賛同が得られていたわけではなかった。実際、NRC の

なかにも懐疑的な人びとがいた。そのため NRC は、議会の要請もあり、外部のレビューを受けることにした (UCLA and CRIEPI 2017, 30)。

その任を引き受けたのは、カリフォルニア大学サンタバーバラ校の物理学者、ハロルド・ルイス (Harold Warren Lewis, 1923-2011) 教授である。彼はその報告書において、PRA という考え方自体は有用ではあるが、計算されたリスクは相対的な値である可能性が高く、事故の真の発生率を正確に予測できていないと主張した。また、緊急炉心冷却装置 (ECCS) の正確な評価のための定量的根拠はなく、さらに、長期的な健康への影響はおそらく計算されたよりも大きい、とも述べている (Lewis *et al.* 1975)。

より厳しい批判を加えたのは、「憂慮する科学者同盟 (Unions of Concerned Scientists: UCS)」である。まず、分析において想定されていた事故のツリーが不完全であり、機器の信頼性に関するデータも同様に問題があることを指摘した。また、この調査では設計上の欠陥や経年変化、地震、テロなどの破壊行為、さらにストロンチウム 90 による地下水汚染を見過ごしており、長期的に生じる癌についても過小評価している、とした。以上の理由から UCS は、レポート全体の撤回や、原子力発電の拡大計画の再評価などを NRC に求めたのである (Perkins 2014)。

多くの批判を受けたことで、結局 NRC は、1979 年 1 月、ラスムッセン報告に対する支持を撤回した。奇しくもその 2 カ月後、スリーマイル島 (Three Mile Island, reactor number 2: TMI-2) 事故がおこるのである。これは周知の通り、米国において最悪の原発事故として記憶されている。

100 基の原発に対して、200 年に 1 度しか起きないはずの炉心溶融事故が現実におきてしまったのだから、WASH-1400 も信頼を失っただろうと考えるのが普通だろうが、驚くべきことに、TMI-2 事故は現実には PRA の信頼性を高める結果をもたらした。

というのも、この事故の原因が、WASH-1400 において予測されていた「人的過誤を伴う小破断 LOCA (Loss-Of-Coolant Accident = 冷却材喪失事故)」であったからである。それ以前の規制では、「大破断 LOCA」に注意が払われていたこともあり、NRC は PRA の予測能力を再評価し、その後、積極的に規制システムに PRA を取り入れることになった。これを契機として、

PRA は世界中の原発の安全性評価に使われるようになっていったのである (UCLA and CRIEPI 2017, 31-2).

4.3 PRA の問題点

さまざまな論点について議論できるだろうが、まず、当時の WASH-1400 には、USC やルイス委員会が指摘したような欠陥があったことは間違いないだろう。実際、計算された「事故発生頻度」は TMI-2 の発生によって、あてにならないものであることがはっきりしてしまった。その後もチェルノブイリ原発事故、そして東京電力福島第一原子力発電所の事故を経験した私たちは、この「計算」が、少なくともその後の歴史と大きく乖離していることを知っている。

他にもさまざまな角度から問題を指摘できるだろうし、実際になされてきたが、ここでは特に FTA と ETA という、PRA の中心的な技術体系について考えてみたい。

そもそも FTA は、最初にどんな事故を想定するかによって、結果のすべてが決まってしまう。いくら精密な計算を重ねたとしても、最初の想定に入らなかったタイプの事故については、当然、計算の対象外になる。また ETA についても FTA と同様、いかなる事故イベントを想定するかが分析の限界となるし、特定のイベントからはじまる事故の解析には向いているものの、システム全体の堅牢性を考えるには不向きという弱点もある。

では、そのような「事故の姿」を最初に想定するのは誰の役割なのだろうか。エンジニアは、プラント自体には責任をもつが、プラントの外部でおこる現象についての専門家ではない。したがって、もし本気でフォールト・ツリーの最初の「事故の姿」を考えようとするならば、およそ、全国の、いや全世界の智慧を集め、「おこっては困る事故」のパターンの徹底的な洗い出しをする必要があるだろう²⁰⁾。

その意味で本来は、設計段階の最も初期において、できるだけ社会の多くのメンバーを巻き込みながらテクノロジーアセスメントを行うという、“upstream TA” が求められるケースであるといえるかもしれない (Wilsdon and Willis 2004)。しかし現実の原発は、非常に限られた、むしろ「密室」と言う

べき狭い領域の専門家によって、基本的な設計がなされてきたと考えられる。

また、現実には PRA を行おうとしても、物理的に適切なデータが得られないとか、シナリオの設定がそもそも困難ということも多い。とりわけ、外部要因に関する PRA は、内部要因に比べて不確実性が高く、設計に反映させるのが困難であると言われている。そのため、外部要因については、もっぱら決定論的な手法で評価がされる場合が多いようだ²¹⁾。

ともかく、仮にシナリオ通りのハザードがおこるとしても、この方法論を用いる限り、必ずどこかで、「これ以上、低確率のことについては、諦める」という境界線を決めなければならない。これもまた、本質的に政治的な作業である。そして地震のリスクのように、そもそも、その確率の値がよくわからないことも多いのだ。

5. おわりに

以上、放射線の健康影響と、原子力プラントの確率論的リスク評価の、歴史的経緯と中味の概要について早足に確認してきたが、このように原子力技術の登場によって召喚された「リスク」は、その後、科学や技術の負の側面について考慮するうえでの、基本的なツールとして、幅広く活用されていくことになる。それは今や、公衆衛生や医療、環境問題、さらに情報技術など、多様な領域に広がっている。原子力は、さまざまな意味で 20 世紀を象徴する技術だが、近代というプロジェクトの、1 つの極限のような存在であったことが、このリスクをめぐる議論からも透けてみえる。

本来、リスク評価とは、科学の領域と政治の領域を切り分けるために行っていると考えられる。しかし現実には、それは決して容易なことではない。リスク評価は、それがはじまってからは科学の体裁をとることができても、前提条件が決まるシーンでは、常に政治性が関わってくるからだ。

たとえば、放射線の影響においては、「平均的な個人」なるものが想定されていた。しかしそれは誰のことなのだろう。子供、老人、妊婦、さまざまな人びとが私たちの社会には暮らしている。そのような、平均から離れたリスク感受性をもつ可能性のある個人のリスク評価を、適切に行えているのか

どうか。そして、その範囲を誰がどう、決めているのか。

測るべきリスクの種類についても、知らないうちに専門家によって「自明の前提」が立てられていることも多い。これは、異なる立場の専門家から見ると、恣意的なリスク評価にみえる場合もあるだろう²²⁾。

このように、リスク評価の対象や方法を決める際には、その決定の政治性をどうしても排除できないのである。

また、現代においては、さまざまな分野で別々にリスク評価が行われているが、それらの整合性についても、議論すべきことは多い。紙幅も残り少ないので一例だけ紹介するが、以前筆者は、日本における人為的に生じる放射線のリスク基準と、環境中のベンゼンのリスク基準を比較してみたことがある。いずれも、発がんリスクであり、基本的にLNTを前提としたリスク評価がなされている。ところが、前者の基準は後者の1000倍甘いものに設定されていることがわかったのである(神里2013)。

いろいろな条件が違うので、単純比較は確かに難しい。だが、理論的には、人工放射線による犠牲者が、ベンゼンによる犠牲者の1000倍の確率で生じうたことを、この社会が制度上、容認していることになるのだ。また、実は放射線の安全基準と、化学物質のそれは、所掌する行政機関も、対応する専門家群も異なっている。では、このような2つの基準のギャップについて考えるべき「専門家」とは、いったい誰なのかということも、重要な論点ではないだろうか。

このように、仮に「定量的なリスク評価に基づく規制」を承認したとしても、まだまだ考えなければならないことが沢山あることがわかる。それらは結局のところ、専門主義と民主主義の関係という、STSの中心的なテーマにつながってくるはずだ。そして以上のような議論は、リスク管理の仕組みや、審議会のあり方²³⁾、さらには議会の科学技術に関する審査能力の強化といった、具体的な制度設計に関する問いを、必然的に惹起することになるが、これらについてはまた別の機会に譲りたい。いずれにせよ、リスクは、今後も間違いなく、STS的課題の中心的位置を占めていくことになるだろう。

註

- 1) ノボトニー (Helga Nowotny, 1936-) は1977年、原子力のリスク評価についての論考を発表したが、これはSTS的な視点からのリスク論に対するもっとも早期の批評の1つであろう。ここで彼女は、原子力に関わるリスク評価は、本質的に政治と不可分であるため、科学の政治に対するいわば「純潔性」を揺るがすものとなると指摘した (Nowotny 1977)。これ以降、さまざまな科学・技術・医療・環境等の領域におけるリスク問題が、STSの文脈で盛んに議論されるようになっていく。
- 2) 近年のSTS領域におけるリスクについての議論では、ベック (Ulrich Beck, 1944-2015) やルーマン (Niklas Luhmann, 1927-1998) のリスク社会論を引用しつつ検討することが多い。決してベックらの議論の重要性を軽視するものではないが、紙幅の都合もあり、本章ではリスク社会論に基づく議論については割愛することとした。STS的課題との関係については、たとえば神里 (2017) などを参照されたい。
- 3) “risk” は日本語でしばしば「危険性」と訳されるが、そこには能動性のニュアンスは脱色されている。また中国語でも、「風險」と訳されており、ここでも能動性よりも不確実性が前に出ている。このような、日本をはじめとする非西洋圏における risk 概念のとらえられ方については神里 (2017) を参照されたい。
- 4) 同じく「危険」を意味する “hazard” という言葉は、アラビア語の「サイコロ」から派生したとされる。
- 5) くわしくは、ハッキング (2013) の3章から6章を参照のこと。
- 6) ナイトがこのような確率の性格付けに関する議論を行ったのは、不確実性こそが完全競争下で企業経営者に利潤が生じる根拠であるということを示すためであった (酒井2015)。
- 7) たとえば「リスク」と「不確実性」のどちらがより大きい集合かという点でも、分野によって流儀が違う。つまり「広義のリスク」と「広義の不確実性」のどちらを出発点として考えるかの違いがある。経済学系では最近前者を基礎とし、また社会学系では不確実性概念をより広くとることが多い。また、物理学と工学では、同じ “uncertainty” を明らかに異なる意味で使っており、物理学では「不確定性」、また工学では「不確かさ」などと訳し分ける場合もある。このような混乱を踏まえ、近年、不確実性の整理がいくつかSTSの研究者から提案されている (吉澤ほか2012など)。
- 8) 基本的に確定的影響は早期に症状が出るが、白内障については例外的に時間がかかる (小佐古2013, 50-51)。
- 9) これは、無作用量の限界を測定して、安全率をかけるという、現在も化学物質の規制などで行われている安全基準の決め方でもある。当然、この方法が使えるのは閾値があるものだけである。
- 10) 後の研究では、線量の積算が同じであっても、単位時間あたりの線量が異なると、生物への影響が変わる「線量率効果」の存在も明らかになっている。
- 11) ちなみに、この研究が行われていた時点では、まだDNAは見付かっていない。また、マラーは1946年にノーベル医学・生理学賞を受賞している。
- 12) 確率の影響は、放射線の電離作用で遺伝子が損傷することによって生じる健康影響である。DNAには修復作用があり、また損傷の箇所によって影響の現れ方は大きく違ってくる。したがって、同じように放射線を浴びても、影響の程度は個体によって大き

- く異なる。また、線量が低いと、影響が出る確率も比例して小さくなるため、その確率の値を動物実験で測定しようとする、大量の実験動物が必要になってくる。かつて米国では、100万匹のオーダーのマウスを用いて実験がされたことがあるが、それでもまだ、必要な精度のデータが得られたとは言えない。このように、低線量放射線のリスクを実験科学的に実証することは困難なのである。
- 13) この分野の嚆矢と言える研究は、Starr (1969) であろう。これによれば、さまざまなリスク事象を金銭的価値で測り、同時に単位時間あたりの死亡確率と比較することで、リスクとベネフィットの関係を数量的に表すことを試みた。また能動的なリスクと受動的なリスクでは、人びとが引き受けるレベルが1000倍も異なるという、有名な仮説が示されている。
- 14) この4.1節の記述は、神里 (2015) を元に再構成した。
- 15) とくに原子力分野では「確率論的安全性評価 (Probabilistic Safety Assessment: PSA)」と呼ぶことが多いが、本質的にこれはPRAと同じことを意味している。
- 16) 「自転車のブレーキ事故」を例にFTAを説明しよう。この事故に至る「中間事象」としては、「前輪ブレーキの故障」と「後輪ブレーキの故障」が考えられる。またその原因となる「基本事象」としては「ブレーキ・パッドの摩耗」や「ブレーキ・ワイヤーの断裂」などがある。ここでは、前と後ろのブレーキが同時に故障した場合に、事故がおこると仮定しよう。すると、それぞれの発生確率が与えられれば、ブール代数等を用いて事故がおこる確率が計算できる。これを図示したものを「フォールト・ツリー・ダイアグラム (Fault Tree Diagram)」と呼ぶ。このように、避けるべき重大なハザード事象を中心として、その原因となる事象群をブール代数の記号等を用いて因果関係で結び付けることで、複雑な事故の確率と、それぞれのイベントの関係性を明らかにするのがFTAである (神里 2015)。
- 17) ETAは、事故の要因になりうる最初のイベントが、時間的経過のなかで次つぎとあらたなイベントを引きおこす様子を図示することで、最終的な大事故に至る道筋と確率を分析する方法である。たとえば、「たばこの火の放置」が最初の事象だとすると、これに対して「誰かが見付けて消す」というアクションが成功すれば問題は解決する。だがそうでない場合、「自然に消える」、「スプリンクラーが動作する」といったイベントが、それぞれの成功・不成功に応じて分岐しながら連鎖していく。そしていずれの対策も「失敗」の道をたどると、「火災発生」という大事故につながることになる (神里 2015)。
- 18) FTAとETAを比べると、前者は、事故がおこる前の設計段階において問題を除去し、またリスクを低減する上で有効な手法であるのに対し、後者は、いったん事故がおこってしまった場合に、どのようにその拡大を防ぐか、といったフェイズで役立つ。実際にはFTAとETAを上手に組み合わせ、システムの評価を行うことになる (神里 2015)。
- 19) そもそも、自然災害や他の人為的事故の確率は、ナイトの言い方に倣えば、データに基づいた「統計的確率」に属するものだ。しかし、原発事故の可能性の数値は、経験や実験に基づいているものではなく、要するにシミュレーションに過ぎない。そのような資格の異なる数字を比較することの限界についても、検討が求められるだろう。
- 20) これは、リスク分析における「フレーミング」の問題の一種とも考えられる。この論点に関するSTS的な検討については、平川 (2002) を参照されたい。

- 21) たとえば、福島第一原発の事故調査で明らかになったように、津波のリスクについては、「これ以上高い津波はこない」という線をあらかじめ想定したうえで安全性評価をしており、それをを超える高さの津波がきた場合については、そもそも考慮していなかったことが明らかになっている (国会事故調 2012, 499-501)。
- 22) たとえば、低線量被ばくのリスクには、癌以外にもさまざまな影響が含まれる可能性を指摘する専門家もいる (欧州放射線リスク委員会 2011, 249-63)。
- 23) Millstone らは、英国におけるBSE問題の分析の結果として、新しいリスク行政の仕組みを提案している。それは、リスク評価の上流において、何のリスクを誰がどのようにアセスメントすべきかを、社会経済的な検討を含めて考える、リスクの「フレーミング」の機能を設けるというものである (Millstone and Zwanenberg 2001)。

文献

- David, F. N. 1962: *Games, Gods and Gambling: The origins and history of probability and statistical ideas from the earliest times to the Newtonian era*, Hanfner Publishing Company.
- Gagliardi, R. A. 1991: "Clarence Dally: An American Pioneer," *American Journal of Roentgenology*, 157(5), 922.
- ハッキング 2013: 広田すみれ, 森元良太訳『確率の出現』慶應義塾大学出版会; Hacking, I. *The Emergence of Probability: A Philosophical Study of Early Ideas about Probability, Induction and Statistical Inference*, Cambridge University Press, 1975, 2nd ed., 2006.
- 平川秀幸 2002: 「リスクの政治学: 遺伝子組換え作物論争のフレーミング分析」, 小林傳司編『公共のための科学技術』玉川大学出版部, 109-38.
- IAEA 2011: *A Framework for an Integrated Risk Informed Decision Making Process INSAG-25*.
- ICRP 1955: "Recommendations of the International Commission on Radiological Protection" (Revised December, 1954), *British Journal of Radiology*, Suppl.6.
- Jones, C. G. 2005: "A review of the history of U. S. radiation protection regulations, recommendations, and standards," *Health Physics*, 88(6), 105-124.
- 神里達博 2002: 「社会はリスクをどう捉えるか」『科学』72(10), 1015-21.
- 神里達博 2013: 「放射線とベンゼンを例にみる規制と科学観: 社会的受忍レベルの裂け目」『科学』83(11), 1256-8.
- 神里達博 2015: 「確率論的リスク評価」, 直江清隆・盛永審一郎編『理系のための科学技術者倫理 JABEE 基準対応』丸善出版.
- 神里達博 2017: 「日本型リスク社会」, 中島秀人編『岩波講座現代2 ポスト冷戦時代の科学/技術』岩波書店.
- 辛島恵美子 1998: 「リスク概念の変遷とその現代的意味」『国際交通安全学会誌』24(2), 127-36.
- Kathren, R. L. 2002: "Historical Development of the Linear Nonthreshold Dose-Response Model as Applied to Radiation," *The University of New Hampshire Law Review*, 1 Pierce L. Rev. 5.
- Knight, F. H. 1921: *Risk, Uncertainty and Profit*, Houghton Mifflin Company.

国会事故調 2012:『調査報告書・本編』国会。
 小佐古敏荘編著 2013:『放射線安全学』オーム社。
 Lewis, W. H. *et al.* 1975: "Report to the American Physical Society by the study group on light-water reactor safety," *Reviews of Modern Physics*, 47 (Supplement 1), S1-S124.
 マグレイン, シャロン・バーチュ 2013: 富永星訳『異端の統計学 ベイズ』草思社; McGrayne, S. B. *The Theory That Would Not Die: How Bayes' Rule Cracked the Enigma Code, Hunted Down Russian Submarines, and Emerged Triumphant from Two Centuries of Controversy*, Yale University Press, 2011.
 Millstone, E. and Zwanenberg, P. van 2001: "Politics of expert advice: Lessons from the early history of the BSE saga," *Science and Public Policy*, 28(2), 99-112.
 Mutscheller, A. 1925: "Physical Standards of Protection Against Roentgen Ray Dangers," *American Journal of Roentgenology and Radium Therapy*, 13, 65-9.
 NCRP 1954: Permissible Dose From External Sources of Ionizing Radiation, Recommendations of the NCRP, No.59.
 Nowotny, H. 1977: "Scientific Purity and Nuclear Danger: The Case of Risk-Assessment," *The Social Production of Scientific Knowledge*, Kluwer Academic Publishes.
 欧州放射線リスク委員会 2011: 山内知也監訳『放射線被ばくによる健康影響とリスク評価: 欧州放射線リスク委員会 (ECRR) 2010 年勧告』明石書店; European Committee on Radiation Risk (ECRR) *2010 Recommendations of the ECRR*, Green Audit Press, 2010.
 Perkins, J. H. 2014: "Development of risk assessment for nuclear power: insights from history," *Journal of Environmental Studies and Sciences*, 4, 273-87.
 酒井泰弘 2015:『ケインズ対フランク・ナイト』ミネルヴァ書房。
 Starr, C. 1969: "Social benefit versus technological risk," *Science*, 165(3899), 1232-8.
 寺澤芳雄編集主幹 1997:『英語語源辞典』研究社。
 UCLA and CRIEPI 2017: *Risk-Informed Decision Making, A Survey of United States Experience*, https://criepi.denken.or.jp/jp/nrrc/pdf/ridm_report_en.pdf
 U. S. NRC (Nuclear Regulatory Commission) 1975: Reactor Safety Study: an assessment of accident risks in U. S. commercial nuclear power plants, UREG-75/014.
 Wilsdon, J. and Willis, R. 2004: *See Through Science: Why Public Engagement Needs to Move Upstream*, Demos.
 吉澤剛, 中島貴子, 本堂毅 2012:「科学技術の不定性と社会的意思決定」『科学』82(7), 788-95.

第7章 テクノロジーアセスメント

三上直之

1. TA とは何か

20 世紀, 科学技術は豊かな物質文明をもたらす一方, 核兵器の開発と使用, 地球規模に拡大する環境破壊をはじめとして, その負の側面が一举に現れた。そしてバイオテクノロジーによる生命の人工的な操作がはらむ倫理的な問題や, 情報通信技術の発展に伴う新たな犯罪やプライバシーの侵害, 産業構造と社会システムの激変など, 科学技術の開発と利用は, 新しいタイプの社会的影響をつねに生み出し続けている。

科学技術の負の社会的影響に備える制度をつくらうという議論が本格的にはじまったのは, 1960 年代の米国である。議論の結果, 生まれたのが, テクノロジーアセスメント (technology assessment: TA) であった。当時, 戦後の「高度経済成長」期にあった日本では, 水俣病をはじめとする公害の被害が各地で発生していたが, 世界的にみても, 1962 年にレイチェル・カーソンの『沈黙の春』が農業による生態系の破壊に警鐘を鳴らし, 環境保全が喫緊の課題であることを人びとに印象づけていた。

TA とは, 科学技術の開発や利用に関する社会的意思決定を支援するため, 科学技術の社会的影響を多面的に予測し評価する活動や, そのための制度である。ここで社会的意思決定というのは, 典型的には, 新たな科学技術の開発や利用に関する種々の政策決定である。具体的な決定は, 国民の代表である立法機関や, 専門の行政機関が, 科学技術の推進や規制のために法令や計画を定めたり, 予算配分を決めたりといった形で行われる。そうした意思決