

((((((((技術・行政情報))))))))

エネルギーと災害

— 発電システムによるリスクの大きさ —

1. 災害との戦い

人は何時かは死ぬ。問題は死ぬかどうかでなく、何時、どのように死ぬかである。人の死には、老衰や病、戦争や飢餓、殺人や自殺、そして災害によるものがある。病気による死は数でみると最も多い。病気の中でも伝染病は一度に多くの人々を死に追いやる恐れがある。中世のヨーロッパでは、伝染病による被害が大きかった。1919年のインフルエンザによる死者の数は、1914～18年の第一次世界大戦での戦死者数を上回っている。戦争は人が他人を殺戮する残虐さがあるが、伝染病による被害は数による悲惨さがある。

人口が少なく分散した古代の狩猟社会では、深刻な伝染病はめったにおこることはなかった。伝染病の蔓延には、ある一定の人口密度を必要とする。狩猟時代に人が運んできた寄生虫は、ゆっくりと広まったものの大量に人を殺すことはなかった。この時代、伝染病は最も大きい危険ではなかった。伝染病によるリスクが最初に重大になったのは、約10,000～20,000年前の農業が大規模に発展したときである。農耕社会は、空気や水を通して伝染病を蔓延するのに十分な人口規模と密度であった。農業の発達で食料が増え多くの人々が生きられる世の中になったが、新たな恐怖として伝染病が発生し人口増加を抑制した。定住して人口が増加するにつれ、軽いマラリアのように体を衰弱する病気が絶えず蔓延していた。歴史的にみて伝染病は戦争や飢餓よりも多くの犠牲者を出している。

産業革命以降の工業化は、それまでの農業社会以上に人々を都市に密集させることになった。工業化によって大量の物資と食料の生産が可能となり、人口も飛躍的に増加した。当然、伝染病は人々にとって最も恐るべき脅威であった。英国を例にみると、19世紀初期までの死亡原因のうち伝染病による被害が最も大きかった。伝染病にはコレラや天然痘 (smallpox) といった周期的に発生するものだけでなく、結核 (tubercul-

osis) や疫痢 (fly-borne infantile diarrhoea) などもあった。

しかし、伝染病の防止に向けて様々な対策がとられた。拡大する工業化の進展に伴って食料供給が改善され、その結果、貧者の中で発生していた風土病も抑制された。1800年頃、Jennerにより牛痘 (Cowpox) から得たリンパ液を使って天然痘を治療するワクチン注射が発見され、1849年にはSnowにより汚水から広がっていたコレラを防ぐ発見があって、コレラの伝染病を防ぐことも可能になった。多くの衛生技術者の活躍によって1880年代までに、英国の主要都市は効率的な下水道システムが完備した。バクテリアの空気感染に関しては時間がかかった。しかし、50年昔に、イオウ (sulphonamides) とペニシリン (penicillin)、それに他の抗生物質 (antibiotics) の開発で治療できることになった。急性灰白髄炎 (小児麻痺: poliomyelitis)、ジフテリア (diphtheria)、百日ぜき (whooping cough)、はしか (measles) の予防のために有効なワクチンが開発された。その結果、1979年には英国ではジフテリアや小児麻痺で死ぬ人は誰もいなくなった。

人間は昔から病と災害から身を守るため様々な工夫してきた。飛躍的に進歩を遂げたのは産業革命以降のことである。動力機関とエネルギーの利用は大量生産を可能にし、自然災害や伝染病から身を守る都市インフラや建物の構築を可能にした。エネルギーの利用は、それ以外に食料、衣料、住宅、医薬品の大量供給と肉體労働からの開放を可能にした。今日の人々の豊かさにはエネルギーによって支えられているといっても過言ではない。

人類が最初に筋力以外に利用したエネルギー源は火である。火が何時使われるようになったかは分らない。点火するのに林や草原の自然発火に頼ることから摩擦で火をおこすようになるまでには長い期間を要したと思われる。火は、敵から身を守ったり、暖を取ったり、食物を料理したり、様々なものに有用なものとして使

((((技術・行政情報))))

われてきた。しかし、火は本来的に危険なものである。その被害に関する古いデータはないが、19世紀初期のイギリスでは年間に約2,500人が火事で命を失っていた。現在でも、統計によると年間700人が死んでいる。日本では1992年に1,287人が火災事故で亡くなっている。

古くから動物は貴重な動力源であった。雄牛は人力に比べ力が強く、農耕や輸送手段として広く利用されてきた。雄牛は火を直接使わない安全なエネルギー源であった。しかし、その糞は、小児性下痢のように死に至る病の病原菌を蔓延させる原因でもあった。雄牛の動力を現代の発電所の動力と比較すると、100万kWの電力を連続して取り出す出力に等価な雄牛の数は500万～千万頭になる¹⁾。それだけの雄牛の食料を生産するためには、おそらく10,000平方マイルの良質な牧草地が必要となる。今の日本の総発電出力1億7,000万kWを雄牛で賄うには、日本人口の10倍位の雄牛と国土面積の10倍以上の牧草地を要することになる。もちろん発電所ならば、伝染病の原因となる糞を発生することもない。

大昔、例えばエジプト王朝のピラミッド建造には奴隷が動物と同じように使われていた。奴隷は、雄牛よりも力は弱く、より高価な食物を必要とし、労役として役に立つようになるには20年は必要であった（現代の発電所の建設期間は8～10年である）。もちろん雄牛に比べればはるかに精密な作業を行うことができる。奴隷の供給力を維持するには夫婦が同じ数だけ必要で、正味働ける時間は一日あるいは1年の30%以下であったといわれている。すなわち、100万kWの力を供給するには1億5,000万人かそれ以上の奴隷が必要になる¹⁾。時には苛酷な労働で奴隷を休みなく働かせ、それにより多くの人々が犠牲になったと考えられる。苛酷な労働による実際の死亡数は記録にないが、奴隷の主な死因は苛酷な労働よりはむしろ居住環境の悪さによる病気と考えられる。ペストなど伝染病による被害も大きく、その被害は奴隷だけでなく雇用主にも影響を与えたに違いない。いずれにせよ、現代の動力源である火力や原子力発電を家畜や奴隷に代替することは大変なことが分る。

これからのエネルギー源は何に頼っていったらよい

のだろうか。全く危険のない人間活動などは考えられない。人間の歴史は病気や災害との戦いであり、どのようにしたらそういったリスクを小さくできるか工夫して発展してきた。ここでは現代の技術社会がもたらしているリスクと社会に大量のエネルギーを供給する発電システムのリスクについて記述する。

2. 自然災害と人工災害

エネルギーは、いかに安全に、環境影響を小さく、安定に、かつ安価な値段で社会に供給できるかが重要である。そのためには、政策と技術面で様々な対策を立てておく必要がある。環境と安全に関しては、先進国では既に様々な対策が講じられている。

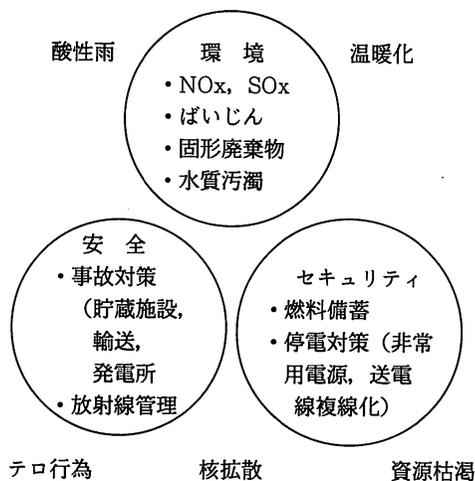


図-1 発電システムのリスク

図-1は発電システムについて社会に与えるリスクを整理し、既に対策が立てられている要因(丸の中)とまだ対策が不十分な要因(丸の外)とを示したものである。発電システムによる社会影響は大きく3つに分類できる。すなわち、①人々への健康影響、②生態系への環境影響、③社会経済影響、である。

人々への健康影響は複雑である。施設の事故は従業員の被害だけでなく、直接は関係のない住民にも被害を与えることもある。また、燃料や資材の輸送中の事故、放射線による被曝被害や生まれていない子供への遺伝的障害もある。さらに、客観的な評価は難しいが

((((技術・行政情報))))

精神的なストレスも健康影響に含まれる。生態系への影響には、汚染物質の放出による動植物や土、空気、水の汚染、さらに地球規模の気候変化による影響もある。3番目の社会経済的な要因は、人間活動への影響である。例えば発電所事故は、単に施設が持つ財産を損失するだけでなく、停電により産業の経済損失をもたらす。他の社会経済影響として、雇用問題、利益の配分、さらにテロや核拡散といったことも危惧される。

ここでは社会的リスクのうち人々への健康影響に関して、それも事故によって死亡する確率について調べた結果を報告する。図-2は世界の大規模災害を人工災害と自然災害を比較したものである。一回の事故で大勢の人々が死ぬ大規模な災害事故は確かにその場の被害状況は悲惨であり、二度と繰り返してはならないことである。大規模な人工災害をなくすことは産業社会の基本であり、安全確保に向けた弛まない努力が必要である。その対策には技術面だけでなく教育も大切である。歴史的に見れば対策により大規模災害の数と被害規模は次第に減少しつつある。大規模災害についての過去の統計データを図-2に示す図から次の点が明らかになる。

①大規模な人工災害による被害の大きさは、自然災害

よりも下に位置していることが分る。このことは人間の防災活動は人工災害を自然災害レベル以下にする努力をしていることになる。人工災害防止の基本は、自然災害のレベル以下にすれば人々も安心する。もちろん自然災害に関しても犠牲者の数を減らすための様々な対策が立てられており、それに伴って人工災害もより対策に厳しさを増している。

②災害規模が大きい人工災害ほど延べ被害者数は少ない(図の縦軸と横軸とを掛けた値)。逆に自然災害は規模が大きいほど延べ被害者数が大きい。

③原子力発電による被害(ラスムッセン報告の結果に現在稼働中の原子力発電容量3億4,390万kW [1993年6月現在]を乗じた数値)はかなり低いところに位置していることが分る。TMI事故の発生確率はラスムッセン報告に比べ1桁大きくなっている。

もしTMI事故の確率を現在の原子力発電の災害レベルと考えると、原子力発電所が現在の発電容量より100倍程度まで建設されると、その被害は現在の人工による大規模災害のレベルに近付くことになる。もちろん、技術の進歩があることから実際のリスクはそれよりも小さくなる可能性はある。

我が国でも自然災害による犠牲者の数は多く、特に1959年の伊勢湾台風では5,098人もの人々が亡くなっている。それまでは台風や豪雨、あるいは地震によって毎年1,000人近い人が死んだり行方不明になっていた。当時、それを越えるような大きな人工災害が毎年発生するようなことはなかった。もちろん、伊勢湾台風をきっかけにして台風と地震への防災対策が積極的に行われ、1960年以降の自然災害による被害は200人から100人以下にまで減少している。

小規模災害がその被害者総数で大規模災害に比べ大きくなっていることは我が国の不慮の事故による死亡者数からもわかる。1993年の不慮の事故による死亡者数は34,677人で、人数の多いものから順に交通事故が14,735人、不慮の墜落が4,598人、不慮の機械的窒息が4,197人、不慮の溺死が3,269人、火災事故が1,287人と続いている。これらはほとんどが一件当たりの死者数が一人ないし数人程度のものであるが、延べ死亡者数は毎年ほぼ同じ数である。それに対し、航空機事故を見ると最近の大きな事故は1985年の日航機事故が

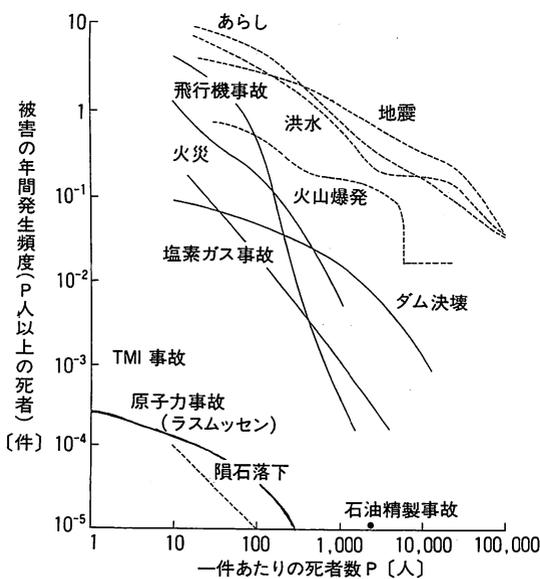


図-2 大規模災害の発生頻度と死者数

(((((技術・行政情報)))))

表1 発電システムの機器・建設資材量と化石燃料消費量

単位：g/kWhe（化石燃料：kcal/kWhe）

	原子力発電	石炭火力	太陽光発電
鉄	52	70	538
銅	0.044	0.23	57
アルミ	0.36	0.45	20
コンクリート	254	133	1,380
ガラス	N.S.	N.S.	83
シリコン	N.S.	N.S.	11
化石燃料	81	2,516	458

520人、1994年の中華航空機事故が264人である。大規模災害に比べ交通事故のような小規模な災害による犠牲者の総数が如何に多いかが分る。

3. 発電システムのリスク比較

発電システムが与える人間へのリスクを評価する研究は1970年代に米国を中心に進んできた。最初に対象となった技術は原子力発電である。次に石炭火力など化石燃料を利用する発電システム、そして再生可能エネルギーの発電技術へと発展した。発電システムのリスクは、化石燃料、原子力、再生可能エネルギーで特徴があり、3つに分類することができる。

①化石燃料による火力発電：多量の燃料の供給によるリスクが中心で、中でも燃料を採掘する時のリスクが最大である。そして燃料の輸送リスクも次に大きい。特に石炭のリスクは他の化石燃料に比べその値が大きい。また石炭は、発電時の燃焼に伴って発生するSO_x、NO_x、ばいじんが他の燃料よりも公衆に大きな健康影響を与えている。化石燃料の大量消費は、地球温暖化の原因といわれており、気候変動に伴う影響が我々の孫世代に大きなリスクとなっている。

②原子力発電：原子力発電の特徴は、燃料密度の高さにある。100万KWの発電プラントを1年間運転するに要する燃料は濃縮ウランで30トンであり、石炭火力の220万トンに比べ極めて僅かな量である。このことは燃料に起因するリスクは、kWh当たりの値でみると化石燃料にくらべ極めて僅かなものになる。採掘、輸送、加工、発電、あるいは再処理施設の事故で死亡する割合は放射性物質による死亡を除くと極めて少なくなる。問題は、放射線によるリスクである。それは、

施設の事故が原因で従業員に被曝したり、あるいは周辺環境へ放射性物質を拡散してしまうことである。また放射性物質の拡散は、人々や生態系に長期間にわたり被害を及ぼすことになる。TMI事故とチェルノブイリ事故は実際に発生した事故であるが、被害の疫学調査はまだ不十分であるが、現時点までの被害は死亡人数で見ると僅かである。

③再生可能エネルギーによる発電：水、太陽、風といった自然エネルギーを利用する発電技術である。発電時のリスクは化石燃料や原子力に比べ小さいことが特徴である。しかし、リスクが全くないわけではない。再生可能エネルギーには以下に示すようなリスクが考えられる。

地熱発電：硫化水素、ベンゾール（白血病）、アンモニアとラドン（肺がん）、ヒ素（皮膚がん）

太陽熱発電：資材・エネルギーの消費から間接的に発生

太陽光発電：ケイ素やカドミウムのセル製造

風力発電：材料製造、組立、建設、保守時の従業員の事故、騒音、電波障害

水力発電：大規模ダム建設時の現場事故、ダム決壊の恐れ（住民へのリスク）

バイオマス発電：木材の伐採と輸送時、燃料製造とプラント運転時、燃焼条件でベンツピレンなど芳香族炭化水素を放出（発癌性物質）

また水力、地熱、バイオマスを除く自然エネルギーは、エネルギーの密度が薄く、出力変動が大きいといったエネルギー源としての基本的な問題がある。従って

((((**技術・行政情報**))))

表2 各種発電システムのリスク比較²⁾ 単位：人/GW年

発電システム	従業員		公衆	
	事故	病気	事故	病気
石炭火力	0.41~3.2	0.13~1.1	0.1~1	2~6
石油火力	0.22~1.35	-	0.001~0.1	2~6
天然ガス火力	0.17~1.0	-	0.2	0.004~0.23
原子力発電	0.089~0.47	0.13~0.37	0.001~0.01	0.005~0.19
太陽熱発電	0.8~4	?	0.05~2	0.1~0.8
太陽光発電	0.6~4	?	0.2~2	0.8~2
風力発電	0.5~3	0.03	0.05~0.5	0.05~0.15
水力発電	0.2~2.8	?	?	?
バイオマス発電	1.1~1.3	事故に含む	?	?

必然的に建設資材と所要土地面積が大きくなってしまふ。表1は1kWhの電気を生産するのに必要な建設資材量を比較したものである。表の値は、原子力発電は採掘から精製、濃縮、加工、輸送、発電、再処理、廃棄物処理処分のすべての工程を、石炭火力は採掘、処理、輸送、発電、灰処理の工程を、太陽光発電は発電だけを対象に、設備の建設に必要な資材量と建設と運転に必要な化石燃料を足し合わせたものである。

表から太陽光発電の必要資材量は、原子力や石炭火力の10~100倍にもなっていることが分る。また化石燃料の消費量は、発電時に石炭を大量消費する石炭火力が最も大きく、太陽光発電の5.5倍、原子力発電の31倍にもなっている。太陽光発電は、原子力のような大規模な直接的災害に対する不安はない。しかし、機器や建設の資材量が多く、それに化石燃料消費も原子力に比べ5.6倍にもなっている。機器の製造と施設の建設と保守は労働集約的であり、それに伴った事故は多くなると考えられる。また化石燃料の消費量に比例して、事故や健康へのリスクも太陽光発電のほうが大きくなる。

表2は各種発電システムについて燃料サイクルも含めたトータルシステムのリスクの大きさを比較したものである²⁾。表の化石燃料と原子力は実績値をもとに推定した値であるが、再生可能エネルギーの値は実績が少ないため推定した値である。

鉱山での資源採掘や工場や建設現場における死亡事故を見てもその被害は大きなものになる。この点を見逃してはならない。太陽光など再生可能エネルギーの

ような希薄なエネルギーを利用するには大量の資材とエネルギーが必要となる。それらを採掘、製造、輸送、建設、廃棄物処分する工程で小規模な被害が数多く発生することになる。その結果は、一件当たりの被害は目立たないがそれらを足し合わせた被害の数で見ると大規模発電システムよりも大きくなってしまふ可能性がある。しかし多くの人々が再生可能エネルギーよりも原子力発電のほうが危険であると思っている。これは、既に前節で述べたように人間の識別の限界から、犠牲者の数が遥かに多い自動車事故より1度に死ぬ数が多い航空機事故のほうに人々の関心が高まる現象と同じと考えられる。

4. おわりに

エネルギーと技術に依存する現代社会では、安全性と環境性を重視しリスクを最小にしていけることが望まれる。しかし社会にはリスクを冷静に判断しようとしていない風潮もある。

マスコミと若者はリスクを定量的に評価しようとしていない。両者は、大きなリスクに対しては過敏で、たとえそれが全体からみれば僅かなものであっても受け入れられないという感情を持っている。交通事故や溺死による犠牲者は、航空機事故や台風による被害よりも圧倒的に数は大きい。ニュース性は後者のほうが遥かにあり重大と考えられている。若者は、死亡の確率について悩ますことはめったにない。リスクの大きさを気にも留めないことがある。交通事故はこの世代の最も大きなリスクである。モータバイクは最も死亡リス

(((((技術・行政情報)))))

クが大きい、多くの若者が乗ってしまう。冬山登山や岩登りをしなければリスクは避けられるが、多くの若者が出かけ毎年多くの犠牲者をだしている。15~25才の若者がそういったリスクを避ければ、若者の事故による死者は激減する。若者とマスコミは新しいリスクに対しても過敏である。たとえそれがリスクにおいて発生確率で低くても拒絶することがある。例えば新しい発電所の建設に対しては、定量的な評価をする前に反対行動にでる若者をしばしば見かける。

別の問題もある。人の感覚は限界効用逓減則に従う。月収が50,000円の人には1,000円は価値ある金額であるが、500万円の月収がある人にとっては大して気にならない額である。我々の感覚や脳は、環境における変化の差異があるレベルまでは検出できるように発達している。2つの物体の重量を比較する場合、私たちは10%の違いの判断は可能である。すなわち、1グラムと1.1グラム、1キログラムと1.1キログラムは判断できるが、1キログラムに0.1グラムを変化させてもおそらく違いは分からない。同じことが明りにもいえる。太陽の日差しと部屋のランプで10%の違いは識別できるが、太陽の日差しのもとでランプの明りの10%の違いは判断できない。

同じことはリスクについても言える。人口1億人の社会で10,000人の犠牲者がでる事故は大変な災害であるが、1~2人の事故であれば自分に関係していなければ気にもならない。もし1度に10,000人が死ぬ大災害が発生すれば、それは大変なニュースになりいつまでも語り継がれることになる。それが1年にあるいは10年に1回であれば、毎年15,000人も犠牲者がでる交通事故のほうが遥かに被害が大きい。しかし人々の関心は恐らく大災害のほうがより深刻な出来事として理

解されるであろう。人口1億人あたりに1~2人死ぬ事故は、違いがあまりにも小さいため、たとえそれが年間10,000件発生しても人間に与える影響は小さくなってしまふ。それは1kgの重さに0.1gの重さの変化を理解するのが難しい識別の限界と同じことである。

社会は、飢餓、伝染病、災害から人々の身を守るために基本的には発展してきた。それが今日の技術とエネルギーにより支えられた社会である。しかし新しく開発した技術とエネルギーによって新たなリスクが発生した。新たなリスクは昔のリスクに比べ大きくなっているのだろうか。本報告で述べたように定量的に判断するとそれは小さいことが分る。

現代社会は既に大量のエネルギー消費と多種多様な技術で成り立ち、それにより数多くの人々が生きている。もし発電技術が社会になかったなら電気の供給は停止され、産業活動は麻痺し人々の生活は混乱をきたす。生産活動の停止は、人々への食料供給を停止し多くの人々を餓死させる恐れがある。それを考えると、現代社会で最もリスクが大きいのは電力などエネルギーの供給が停止されることではないだろうか。

参 考 文 献

- 1) J. H. Fremlin, Power Production ; What are the Risks?, Oxford University Press (1987)
- 2) A. F. Fritsche, Gesundheitsrisiken von Energieversorgungssystemen ; Quantitative Vergleiche, in der Schriftreihe der Expertengruppe Energieszenarien (EGES) Nr. 21 (1988)

((財) 電力中央研究所 経済社会研究所
技術評価グループリーダー 兼エネルギー
システムグループリーダー 内山 洋司)