

6. 10 エネルギー利用のリスク

現代の文明は、莫大なエネルギー利用によって支えられている。エネルギーを取り出して利用するということは、決して安全なことではなく、リスクはゼロではない。

6. 10. 1 発電に伴うリスク

2011年3月に発生した東京電力福島第一原子力発電所の事故は世界中に大きな衝撃を与え、日本のエネルギー政策にも大きな影響を与えた。

原子力、特に原子力発電所における事故は、その数が他のエネルギー産業に比べて圧倒的に少ない。しかし、ひとたび大きな事故が起こると、その影響が及ぶ範囲が広く、事故の処理に要する時間が長期に及ぶ。原子力発電の安全神話が崩れ、不信感、不安が大きくなり、安価で安定したエネルギーとはいえなくなってしまった。

あらゆる産業に危険や事故はつきものである。事故を限りなくゼロに近づける努力が行われても、事故のリスクをゼロとすることは不可能であり、大きな産業事故や災害が数多く発生している。また、事故や災害だけではなく、エネルギーを利用する過程で、莫大な量の石炭や石油の燃焼によって大気汚染や水質汚染などの公害がうまれている。

エネルギー利用の中で、発電は他のエネルギー利用とは異なる特徴を持つ。電気は一次エネルギーではなく、他の資源から作られる二次エネルギーである。資源としてのエネルギーは、雷くらいしかなく、これを有効利用する方法がないため、他のエネルギー資源を利用して電気がつくられている。電気エネルギーは、非常に使い勝手のよいエネルギーである。容易に運動エネルギー、熱エネルギーに変換ができるだけでなく、電子機器などの知的生産には電気エネルギーが欠かせない。エネルギー変換の中では、最も高品位のエネルギーである。

しかし、発電のためには、非常に多くの無駄が生じる。

石炭、石油、天然ガスなどを燃焼させて発電を行う方式では、莫大な量の熱エネルギーが空気や水（河川、海）に廃棄される。送電や変圧の過程でも多くのエネルギーが熱として捨てられる。熱エネルギーは、熱力学の第二法則から、エネルギーの墓場とも言われることがあるが、実際に人間がエネルギー利用する場合の最終過程であり、捨てられる熱エネルギーの回収は、非常に難しい。

発電所から出る温排水と燃焼排ガスの温度は、水温や気温よりも必ず高いため、この差に相当する熱エネルギー全てが廃棄されることになり、その量は莫大である。発電が地産地消型であれば、電気エネルギーと熱エネルギーの利用を行うことも可能であるが、大規模な発電所は消費地から一定の距離離れて置かれることが多くなっている。

現在の日本では、電力は重要なエネルギーであるにも関わらず、発電所は「迷惑施設」だと考えられており、電力消費地である人口密集地から離されて立地している。しかし、距離が離れていると、送電線の建設・保守コストが大きくなり、また送電ロスが多くなるため、発電所では、需要以上の発電量を供給しなければならない。

天然ガスでは、比較的長距離のパイプライン輸送が可能で、距離が2000kmまではガスパイプライン、それ以上になるとLNG輸送が有利になるとされている。しかし、電気の場合、そのような長距離送電はロスが大き過ぎて現在の技術では不可能である。遠く離れた「産ガス地」と「消費地」を高圧ガス配管でつなぐことはできるが、「発電地」と「電力消費地」を離すことはできず、たとえば、全ての発電所が北海道や九州にあって日本全土に電力を供給するということはできないので、発電所と電力消費地は、そこそこの距離離れている。

日照時間の長い地球のサンベルト地域の太陽熱発電や太陽光発電で作った電力を日本などの電力多消費地域まで長距離送電するという「サンベルト発電」構想というアイデアもあるが、長距離送電は未来技術である。

発電所は、消費地の中心にあるのが最も効率がよいため、最大の電力消費地である東京都には、浅草、千住、深川、渋谷、品川、新東京などの火力発電所があった。しかし、電力需要が大きくなり、都会の真ん中では、燃料の搬入・保有、排ガス、廃熱の処理が難しくなったため、大型発電所を千葉県、神奈川県、茨城県に置くようになった。現在、東京都内では、品川火力発電所、大井火力発電所の二ヶ所で都市ガス発電・天然ガス発電が行われている。東京電力では域外に多くの発電所を建設しており、福島県広野発電所、福島第一原子力（廃止された）、福島第二原子力、新潟県柏崎刈羽原子力、青森県東通原子力がある。

北欧やロシアでは、原子力発電所や天然ガス発電所で発電を行うだけでなく、そこで出される熱を有効利用する「熱電併給システム」が発達しているが、日本では、基本的に、発電所と消費地が離れているため、小規模の熱電併給システムに限られる。電気を作る場所と電気を使う場所が離れているということは、熱と送電のロスが大きいというだけでなく、消費地では、自分の庭先に発電所が無い

め、発電のリスク、公害や事故の危険に対する認識が低くなり、電気がどのようにして作られ、届けられているのかということへの意識が低下してしまう。

しかし2011年の福島第一原子力発電所の事故は、発電所から遠く離れた地域の人々にも大きな衝撃を与えた。発電所が立地しておらず、それまで発電のリスクについて全く無関心であった人々も広範囲の放射性物質の拡散には無関心ではいられなくなり、国全体で、電力の安全・安定供給について深く考えるきっかけとなった。事故を起こした東京電力だけでなく、日本全土の原子力発電所が停止し、国のエネルギー政策も大きな変更を余儀なくされた。

文明の発達にともなって、薪炭、石炭、石油、原子力、天然ガス、その他の自然エネルギー（水力、太陽光、風力）など、様々なエネルギー資源が利用されてきたが、これらを利用する時には、常に危険が伴い、実際に多くの事故が起こっている。事故だけでなく、エネルギーが原因となった大災害は少なくない。

科学技術は、多くの事故から学び、それを乗り越えて、より安全で安定したエネルギー利用を目指してきたが、現在の科学技術のレベルでは、全く安全で安心できるエネルギーを得ることは不可能である。

地球上には、既に60億人を越える人口があり、この文明を支えるには、大きなエネルギーとそれに伴うリスクと向き合うほかなく、エネルギーを利用することのリスクを正しく理解する必要がある。

エネルギー生産（資源採掘、輸送、転換）に関わる事故・災害リスクは非常に大きい。

石炭の利用は、かつては森林の消滅を回避し、産業革命を支えたが、現在では、最も安価な発電方式として世界の発電量のおよそ半分を供給している。

しかし、石炭採掘時の事故、石炭燃焼による大気汚染の犠牲者の数は、正確なデータが把握できないほど多い。

石油の事故は、石炭ほど深刻ではないが、油田の事故、海洋での流出事故が起これば極めて重大な災害、環境破壊を引き起こす。燃焼による大気汚染、酸性雨の発生などの環境被害も地球規模になる。

日本は、現在、ほとんどのエネルギー資源を輸入しているため資源採取のリスクがほとんどなく、国内における大気汚染・水質汚染などの公害対策が進んできたため、関心が低くなっているが、世界の多くの地域に大きなエネルギー災害リスクがある。日本で石炭や天然ガスの利用が増えるということは、それだけ産炭地、産ガス地における災害リスクは増大しているということである。

エネルギー資源が及ぼす被害を統計的に集めて評価することは非常に難しい。国連の機関などが大気汚染や事故、災害の調査を継続的に行っているが、世界の全ての国が正しい報告をしていないため、正確な統計が得られないようである。

エネルギーのバランスをどのようにするかは、国家的な経済戦略であり、発電燃料をどのように配分するかは、各エネルギーのメリットとリスク、国情によって決められる。また、そのエネルギー産業の盛衰が経済に与える影響は極めて大きいため、発電に対するリスクが明らかにされても、急激なエネルギー転換を行うことは不可能である。各エネルギーリスクの比較は、エネルギーの選択理由に重要な情報と思われるが、安全第一ですぐに変えることができないため、公式に具体的な数値が、明らかにされることはほとんどない。

次の図は、gCaptain 社（海洋開発関連企業）が示した「発電量あたりの死者数 Deadliest Natural Resource 2011」のデータをグラフに示したものである。

類似の確認できる資料が見当たらないため、数値の精度を比較することは難しいが、WHO による大気汚染の資料などに言及していることから、それなりの信憑性があり、現実に近い数値と考えることもできる。

図は、1TWh の発電量に対する犠牲者数である。

TWh という量は、ピンとこないが、1 年間 8600 時間で割ると約 12 万 kW になるので、80%ほどの稼働率の火力発電であれば 15~20 万 kW の発電所の発電量に相当する。

よく 100 万 kW の発電能力を、大型火力発電 1 基、原子力発電 1 基相当と報道されることがあるが、発電方式によって稼働率は大きく異なるため、発電の能力と実際の発電量は大きく異なる。1TWh（1 兆ワットアワー）は、発電量の単位として比較的良好に使われるが、慣れないと分かりにくい。

ここに示される数字は、1TWh の電力を作るのに、何人の貴重な人命が失われているのかを表している。理想的にはゼロであって欲しいと誰しもが思うが、ゼロにはならない。

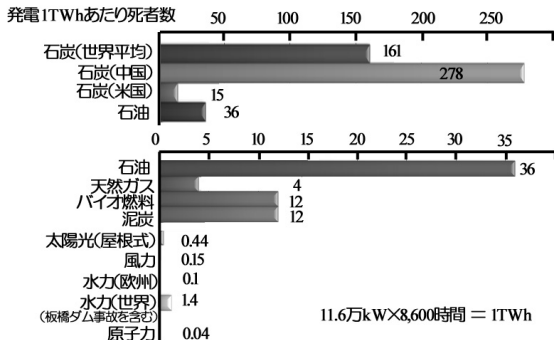


図 6-9-1-発電に伴うリスク（発電量当たりの死者数）
出典 gCaptain 社「Deadliest Natural Resource – Oil, Coal or Nuclear?」

この数字を具体的に評価することは難しい。

日本の年間発電量は、電力会社の慣習として kWh で表わされ、1975 年で約 3500 億 kWh、四半世紀後の 2000 年以降は約 1 兆 kWh で推移している。これを世界標準の単位に直すと、1 兆 kWh は 1000TWh (=1PW) であるから、この図の値を 1000 倍すると日本の 1 年間の発電に対するリスクが数値として読み取れる。また、絶対値以上に、エネルギー源の違いによる相対的リスクの違いが重要である。

世界のエネルギー源の 26%、発電の 50% が石炭発電である。世界の発電の主流は石炭である。最も多く使われている石炭発電が、発電量あたりでみても、最も死者数となっている。他のエネルギー源に比べて石炭だけが飛びぬけて値が大きいため、図は、上下のふたつのスケールに分けて表示した。

また、石炭発電の中でも、世界平均、中国と米国では非常に大きな差があることに注目できる。米国は世界平均の 10 分の 1 であり、中国は世界平均の 2 倍近い。

これは、石炭の採掘方法、安全管理や対策、大気汚染に対する対策などの技術的要因が国によって大きく異なるためである。世界の石炭の採掘のほとんどは、炭鉱事故の危険が大きい坑内掘りであり、これが石炭のリスクを大きくしている。石炭採掘の安全対策が遅れている中国では、さらに世界平均より状況が悪いとされている。米国の場合は、採掘法として危険の少ない露天掘りが多いこと、安全対策、環境対策が進んでいることから、世界平均に比べて非常に安全なエネルギーとなっている。産炭国であり、エネルギー多消費国である米国では、長期に渡って詳細な大気汚染の研究が行われており、近年では、浮遊物質 PM_{2.5} に着目した研究・対策が進んでいる。採掘から燃焼まで、本質的に危険が大きいと言われる石炭であるが、技術によって結果は大きく異なるということを示している。

石炭の次に発電に伴う犠牲が大きいのは、石油である。採掘、輸送、精製に伴うリスクは石炭よりも小さいが、石油の使用による大気汚染がある。石油発電は、先進国をはじめほとんどの国で縮小されており、多くが離島や小規模な特殊条件での使用となっている。石油発電そのものが高価な発電方式であり、発電全体に占める石油のリスクは小さくなっている。ただし、日本では、石油発電が 10% 以上残っている。

天然ガス発電は、採掘、輸送時のリスクは石炭より小さく、石油と同程度と思われるが、燃焼時の有害ガスが少ないことと発電の効率が高いことから、発電量当たりのリスクは、石油に比べて一桁も小さい。CO₂ の排出が少ないことから次世代のエネルギーとして期待が大きい天然ガスは、安全面でも評価が高い。

バイオマス・バイオ燃料は、石油の 3 分の 1、天然ガスの 3 倍というリスク評価である。バイオマスの場合は、大きな採掘リスクはないものの、石炭と同様の燃

焼を利用する。また、その規模が小さく高効率の発電ができないため、発電量あたりでは、低リスクの発電とはならない。北欧などで大規模に火力発電用燃料として使用される泥炭のリスクはバイオ燃料と同じと評価されている。

水力、太陽光、風力の自然エネルギーによる発電（再生可能エネルギー）のリスクはゼロではないが、非常に小さい。太陽光、風力の発電時のリスクは非常に小さく、建設やメンテナンスに関わる事故リスクを考えても他の方式に比べて極端に小さい。ただし、全エネルギーに占める寄与は太陽光が 0.1%以下、風力が 1%以下と非常に小さい。

水力発電の場合は、発電による被害はほとんど考えられないが、建設工事に伴うリスクやダム決壊などの事故リスクが数字として評価さる。欧州の水力発電に対して世界平均の水力発電が 10 倍も大きいのは、中国の板橋ダム(ばんきょうだむ) 事故の数値が含まれるためである。公式には発表されていないが、板橋ダム事故の犠牲者数は、世界の統計に影響を与えるほどの大規模災害と言われている。

原子力の場合は、ウラン鉱の採掘、燃料精製のリスクがあるが、発電所の数に比べると発電量が非常に大きいこと、運転時に大気汚染がないこと、事故の件数そのものが非常に少ないことなどから、発生電力量あたりでは、極めてリスクが小さいと評価されている。

この資料をまとめた gCaptain 社は、海事関連のニュースを発信する会社であり、石油タンカーに比べると石炭運搬船と核燃料運搬船の事故は極端に少ないといったことの評価を行っている。発電関連の会社ではないが、WHIO の大気汚染関連の研究や各産業における労働者の安全衛生関連の研究結果を参考にして、発電あたりの犠牲者数の統計まとめている。

どのエネルギー資源もリスクゼロとはならないが、やはり石炭の使用が最もリスクが高く、同じ石炭の中でも国によって大きく異なるという結果が示されている。

石炭は最も安価なエネルギー源であり、今後も世界の発電の中心である期間が長く続くと思われる。高効率発電、クリーンコール技術、さらに IGCC、IGCF などの最先端の技術による、よりクリーンで安全な石炭の利用が望まれている。

6. 10. 2 石炭利用のリスク

炭鉱（石炭鉱山）、特に世界の炭鉱の60%を占める坑内掘り（坑道掘り）には、大きな事故のリスクがある。①メタンガスのガス爆発の危険がある（ガス爆発）②溜まっているメタンガスが突出し、酸欠事故や爆発事故がある（ガス突出）、③石炭の浮遊粉塵に着火する爆発する（粉塵爆発）④一度火災が発生すると坑内火災は鎮火しにくい

⑤鉱区が海底にある場合、落盤によって海水が流入することがある（海水流入）。

日本では、戦前、大規模な事故が16件発生し、そのほとんどが北海道と福岡県に集中していた。戦後復興期には、10件の大事故が発生。

1963年の三井三池炭鉱の爆発事故の犠牲者は400人を越えた。1980年代になっても3件の大規模事故（北炭夕張新炭鉱、三井三池炭鉱有明坑、三菱南大夕張炭鉱）が発生している。日本の産業事故の中でも、炭鉱における事故の規模は非常に大きい。

表 6-10-1-日本で起こった主な炭鉱事故

発災年	炭鉱	事故と死者・行方不明者数	
		事故	死者・行方不明者数
1899年	豊国炭鉱(福岡県)	爆発	210
1907年	豊国炭鉱(福岡県)	爆発	365
1909年	大之浦炭鉱(福岡県)	爆発	243
1912年	北炭夕張炭鉱(北海道)	爆発	492
1913年	二瀬炭鉱(福岡県)	爆発	101
1914年	新夕張炭鉱(北海道)	爆発	423
1914年	方城炭鉱(福岡県)	爆発	687
1916年	東見初炭鉱(山口県)	海水流入	235
1918年	大之浦炭鉱(福岡県)	爆発	376
1920年	北炭夕張炭鉱(北海道)	爆発	209
1927年	内郷炭鉱(福島県)	坑内火災	136
1938年	北炭夕張炭鉱(北海道)	爆発	161
1941年	美唄炭鉱(北海道)	爆発	177
1943年	長生炭鉱(山口県)	海水流入	183
1944年	美唄炭鉱(北海道)	爆発	109
1958年	大鼻炭鉱(福岡県)	ガス爆発	14
1960年	豊州炭鉱(福岡県)	川の増水による落盤	67
1960年	北炭夕張炭鉱(北海道)	ガス爆発	42
1961年	上清炭鉱(福岡県)	坑内火災	71
	大辻炭鉱(福岡県)	坑内火災	26
1963年	三井三池炭鉱(福岡県)	爆発	458
1965年	北海道新炭鉱汽船夕張炭業所(北海道)	爆発	61
1965年	三井山野炭鉱(福岡県)	爆発事故	237
1970年	三井芦別炭鉱(北海道)	ガス爆発	5
1972年	石狩炭鉱石狩炭業所(北海道)	ガス爆発	31
1977年	三井芦別炭鉱(北海道)	ガス爆発	25
1981年	北炭夕張新炭鉱(北海道)	ガス突出・爆発	93
1984年	三井三池炭鉱有明坑(福岡県)	坑内火災	83
1985年	三菱南大夕張炭鉱(北海道)	爆発	62

現在、世界の主要産炭国の炭鉱事故の国際比較ができる資料は得られておらず、米国、豪州、南アフリカ以外の国では、正確な統計を得ることは難しいと言われている。

アジア地域の経済・エネルギーについて調査・研究を行っている（株）エイジアム研究所では「中国煤炭工業年鑑」「中国能源発展年鑑」「中国統計年鑑」などの公式資料を分析、中国における炭鉱事故について調査している。

この調査によると中国の炭鉱における死者数は、この10年間は、毎年5000～6000人とされている。産業事故ではないが、中国の交通事故死者数は、75572人（2011年）と発表されており（WHOによると中国の交通事故死は年間20万人を越える）、公式には交通事故の方が炭鉱事故よりも10倍以上多い。なお、人口が10分の1の日本の交通事故死は年間4117人（2015年）、過去最大は16725人（1970年）、現在操業中の炭鉱は北海道（釧路炭田、石狩炭田、留萌炭田）だけであり、事故は起こっていない。

統計のベースが異なるため、炭鉱事故の国際比較は簡単ではないようであるが、エイジアムのレポートでは、2000～2004年の5年間の石炭100万トン生産あたりの炭鉱事故死者数を求めており、最も低いオーストラリア（0.007人/100万トン）に対して、米国は3.4倍、南アフリカが11.2倍、インドが43.4倍、中国が375倍という数字が示されている。

中国政府は中国の炭鉱事故が多いことを認めており、改善は進んではいるが、他の国に比べて非常に高い水準であることは間違いないようである。

炭鉱では、大きな人身事故だけではなく、発火した炭鉱の鎮火ができなくなって地域経済そのものが消滅するという大きな災害も起きている。米国ペンシルベニア州セントラリアの炭鉱は、1962年に火し、現在も燃え続けている。セントラリアは良質な無煙炭を生産する炭鉱として19世紀後半から栄えた町であるが、坑内火災が発生したあと鎮火ができなくなった。地表面温度が80℃近くとなり、地下水が消失、地盤が沈下、空気中の一酸化炭素と二酸化炭素の濃度が上昇、人が住めない環境となってしまった。



図 6-9-2-セントラリアの坑内火災によって使えなくなった米国ペンシルベニア州の州道、出典 Wikipedia

鉄道や道路は通行止めとなり、2002年に、セントラリアの町は地図からも消滅した。自然に鎮火するには数百年かかるとも言われている。

セントラリアは、50年前に発火した比較的新しい事例であるが、炭鉱や炭層地域が燃え続けるという事例は世界各地に存在する。ドイツのブレンネダー・ベルク（燃える山）は、約350年前に地下に着火、現在も燃え続けている。日本の北炭夕張炭鉱の神通坑は1913年に発火、90年たった今も燃えている。オーストラリアの「燃える山（ウィンジェン山）」は、人為的の火災ではないが、6000年前に起こった自然の炭層火災であり、今も続いている。

6. 10. 3. 大気汚染

石炭をエネルギー資源として使用する時、石油・天然ガスに比べて環境負荷が、大きいことが大きな課題である。

特に、大気汚染の原因物質として石炭の影響が大きい。深冷空気分離装置は周囲の空気を原料とするため、空気中の不純物の監視が必要である。

水や二酸化炭素を除去する前処理装置で、かなりの量の不純物が除去されるが、もし空気中に大量の炭化水素があり、これを原料空気として取り込んでしまうと、低温の装置の中で濃縮、固化が起こり、熱交換器やその他の機器を閉塞させたり、あるいは酸素や酸素富化空気と反応して燃焼が起こったりといったトラブルが発生するおそれがあるからである。石油化学コンビナート地区では、突発的な空気中への炭化水素放出が起こることも想定すべきであり、装置内、特に液体酸素中の炭化水素濃度は常時監視する必要がある。

深冷空気分離装置は、比較的大気汚染が厳しい工業地域に立地することが多いため、周囲の空気の汚染に無関心ではいられないが、一般的に健康被害などで問題となっている大気汚染のレベルであれば、空気分離装置が大きな影響を受けることはない。

窒素、酸素、アルゴンの濃度はどこでも同じであり、蒸留塔で蒸留分離が行われる前の前処理で、ごみ、エアロソル、水蒸気や二酸化炭素は除去されるので、炭化水素濃度の監視を十分に行っていれば、特に大きな問題とはならないと考えられる。

(1) 石炭と大気汚染

近年、発展途上国で問題になっている大気汚染について、知識を整理しておく必要がある。大気と空気は定義が異なり、人間の生存圏は空気（対流圏）であるが、空気の汚染を議論する時は、より広く「大気汚染」という表現がなされている。

石炭には、原油と同様、硫黄分が多く含まれる。原油の場合、蒸留によって石油精製が行われるので、脱硫操作にコストをかければ、硫黄分の少ない燃料や化学原料を製造できる。しかし、石炭は固体であり、組成は石炭の品質に依存し、ガス化発電を除けば、石炭は固体のまま用いられるため、燃焼時に硫黄化合物が発生する。

そこで大規模な石炭火力では、燃焼後に発生する硫酸化物（SO_x）を脱硫装置で処理、投入された炭酸カルシウムがこれを吸収して、脱硫石膏を生産、通常は燃焼灰と合わせてセメントの原料となっている。

日本の石炭火力発電の多くが、排ガスの脱硫処理を行っており、クリーンなエネルギーとなっているが、欧米諸国や発展途上国の火力発電の排ガスには、日本とは比較にならないほど大量の硫酸化物が含まれている。世界の平均としては硫酸化物の多くが、石炭火力発電によって大気中に放出されている。家庭用石炭燃料であれば、ひとつずつの規模が小さいため、脱硫装置は困難である。家庭で石炭を燃やすと硫酸化物などはそのまま放出されてしまう。なお、天然ガスにはもともと硫黄が含まれていないが、都市ガスには、極微量の硫黄化合物の付臭剤が添加されている。小型の天然ガス発電装置（燃料電池）では、燃料電池を保護するための小型の脱硫装置が開発されている。

一般的には、石炭の直接燃焼で、硫黄化合物の排出を完全に無くすことは困難であり、最初に石炭による大規模な健康被害が起こったのは硫黄化合物による大気汚染であった。

1952年12月に「ロンドンスモッグ事件」が起こった。それ以前にもベルギーや米国の渓谷では、気温の逆転層による大気汚染事件が起こっていたが、ロンドンの事件は、歴史に残る大災害となった。

この時、逆転層に閉じ込められたスモッグの中には強酸性（pH2）の霧が発生した。足元が見えないほどの濃いスモッグは建物の中まで侵入し、肺炎や心臓病などの重篤な症状を引き起こし、1週間の過剰死亡数（この事故が原因で増えた死者数）は4千人にも上り、その後、数週間でスモッグによる犠牲者は1万2千人となった。"London Simg Disasters"と呼ばれる史上最悪の大気汚染公害・大惨事となった。

この時の汚染源の60%が家庭用石炭暖房であり、この他に火力発電所やディーゼルエンジンのバスなどの排ガスに含まれる亜硫酸ガス（SO₂）が原因となった。ロ

ンドン市では、それまでもたびたびスモッグ被害が生じていたため、ロンドン市役所は空気中の浮遊粉塵と SO_2 の測定を行っていた。その結果、様々な科学的検証が可能となり、この事件によって、大気汚染と健康影響に関する医学的研究が大きく進んだといわれている。

ロンドンではそれ以前に10回の大規模なスモッグが発生していたが、この1952年ロンドンスモッグ事件は、世界中に大気汚染の危険を知らせる最も大きなできごととなった。日本では、大気汚染や公害という、慢性疾患のようなものを思い浮かべるが、ロンドンスモッグ事件は、わずか6日間のスモッグがもたらした史上最悪の大気汚染公害事件である。英国では、すぐにロンドン市法と大気清浄法が制定され、煤の排出や石炭の使用が厳しく規制されるようになった。現在の英国南部の家屋にある煙突は、ダミーである。

この頃、日本では、大量の石炭利用、鉄鋼と石炭による「傾斜生産方式」によって戦後復興が進んでおり、1953年には、経済は戦前と同じ水準にまで復活した。しかし、石炭の燃焼によって排出される煤煙や大気汚染の問題が発生し始めた。

1958年には、四日市に石油コンビナートが建設され、石炭だけでなく石油による大気汚染も加わるようになり、1961年頃より「四日市喘息」が発生した。ロンドンスモッグと四日市喘息は、いずれも汚染物質の中心が SO_x であることが共通している。

1967年には、公害対策基本法（1993年に環境基本法に統合）、1968年には、大気汚染防止法が制定された。1970年には、公害国会（臨時国会）が開催され、日本にも環境庁（現：環境省）が設置された。

日本の空気は、高度経済成長（1955～1973年）の間に大きく汚染されたが、核保有国による大気圏内核実験によって大量の放射性物質が降下（フォールアウト）した時期とも重なっており、史上最も大気汚染が深刻化した時代となった。

日本では、1970年代から脱硫装置の設置が普及、大気中の SO_2 濃度が急速に減少した。大気圏内核実験も1980年以降は行われておらず、現在の日本の大気汚染は、煤煙や SO_2 のレベルは低下し、かつてほどの深刻さはなくなったが、 NO_x や VOC による汚染は減っていない。

(2) 大気中微小粒子状物質 PM

現在は、中国やインドの都会、工業地域における大気汚染が急速に深刻化しているが、その原因の多くが石炭の燃焼によるものと考えられている。

2013年初頭に中国で発生した深刻な大気汚染が日本でも大きく報じられた。

高い濃度の PM_{2.5} (大気中微小粒子状物質) が観測され、大きな社会的関心を集め、「ピーエむにてんご」という言葉が広く知られるようになった (PM_{2.5} は、下付き添え字で 2.5 と書くのが正しい表記である)。

PM_{2.5} は、極めて健康への影響が大きい物質とされているが、それまで、日本では、あまり注目されていなかった「微小粒子 PM」のひとつである。

PM とは、特に何かの物質を規定したものではなく、マイクロメートル (μm) の大きさの固体あるいは液体の微粒子を「大気汚染物質」として扱うときに呼ぶ「粒子状物質 PM (particulate matter)」である。

PM は大気中に浮遊し、しばしば、大都市圏の大気汚染源として注目されてきた。浮遊粒子となった PM の大気中 (空気中) の挙動は非常に複雑であり、十分に解明されていないが、主にヒトの呼吸器系に沈着して健康に影響を及ぼすことが分かっており、国際保健機関 WHO は、PM に起因する年間の死者数は全世界で 330 万人にのぼると推定している (2011 年)。

PM_{2.5} の 2.5 とは、 $2.5\mu\text{m}$ 以下という意味であるが、実際の粒子の径ではなく、空気力学的な大きさを表している。通常、微粒子は、形状や物性が特定できないので、それと終末速度 (終端速度、terminal velocity) が等しい球 (密度は $1\text{g}/\text{cm}^3$ と規定) の直径と等しい仮想の粒子で代表される質量基準中央径 (MMAD) と呼ばれるものである。定義がやや分かりにくい、実際に $2.5\mu\text{m}$ の粒子が存在するということではなく、このような大きさの球形の粒子と同じような空気中での動きをする粒子ということである。また、環境基準値は、フィルターで捕集した、径の異なる粒子のまとめから計量して求めた濃度であるため、平均値ではない。

PM の発生源は多岐にわたり、季節、場所などにより組成も濃度も異なっている。主な発生源は、次のようなものが考えられる。①燃焼で生じた煤②風で舞い上がった土壌粒子 (黄砂など) ③工場や建設現場で生じる粉塵④燃焼による排出ガスや石油からの揮発成分が大気中で変質してできる粒子。

PM には、最初から粒子として発生する一次粒子と別の原因物質から粒子に変化する二次粒子の 2 種類がある。

一次粒子は、火山、山火事、工場、自動車、船舶、野焼き、などから排出される。大気中の PM の大きさは、 $0.001\mu\text{m}$ ~ $100\mu\text{m}$ に分布するが、より健康被害の大き

い、小さな粒子としては、ディーゼル排ガス ($0.05\sim 1\ \mu\text{m}$)、タバコの煙 ($0.1\sim 1\ \mu\text{m}$)、海塩粒子 ($0.2\sim 1\ \mu\text{m}$)、土壌粒子 ($0.1\sim 20\ \mu\text{m}$) などが知られている。

二次粒子は、VOC (揮発性有機化合物)、 SO_x 、 NO_x などの排ガスが大気中の粒子と反応して発生する。VOC の発生源としては、ガソリン中のベンゼンの影響が大きいとされており、ベンゼンは有害物質としての対策が進められている。日本では 1993 年に日産がベンゼン 1%以下のガソリンを販売、1996 年には、ガソリン中のベンゼンの上限が 5%以下に規制され、さらに 2000 年には 1%にまで引き下げられた。

二次粒子の発生機構は、ある程度解明されてきている。 SO_x による硫酸系の PM は光化学反応によって夏場に多く、 NO_x は昼間に分解するため、 NO_x による硝酸系の PM は夜間や冬場に発生しやすい。また、 $2.5\ \mu\text{m}$ 以上の粒子は、機械的に発生するが、それ以下の粒子は、ガス状汚染物質から二次的に生成されることが多く、硫酸塩、硝酸塩、元素状炭素、有機化合物、金属化合物などの健康に直接有害な物質を多く含む。

PM に対する取り組みは、次のようになっている。

- ①1973 年：日本では、大気環境基準物質として浮遊粒子状物質 SPM (Suspended Particulate Matter) が設定された。日本の SPM は、 $10\ \mu\text{m}$ 以下の浮遊粒子状物質 (PM では $6.5\sim 7.0\ \mu\text{m}$ に相当) とされたため、当時、世界標準となっていた PM_{10} よりも小さく、より厳しい基準となっている。
- ②2008 年：自動車排気物質の低減、工場・発電所の煤煙低減などにより大気中の SPM 濃度は減少し、35 年かけて、全国のほぼ全ての測定点で SPM 環境基準が達成された。日本の大気汚染は、1960 年代、過去のことに思われることがあるが、SPM の基準が達成されたのは 21 世紀になってからのことであり、 $\text{PM}_{2.5}$ の研究も始まったばかりである。
- ③1997 年 7 月：米国では、日本よりも進んだ研究が行われていた。米国では、1987 年に制定された PM_{10} の環境基準目標が達成されても、呼吸器や循環器への健康影響が減らないことが判明したため、さらに詳細な研究が進められるようになった。その結果、 PM_{10} より粒径の小さい微小粒子の方が健康との相関性があるとして、環境基準 $\text{PM}_{2.5}$ が制定された。空気中の微粒子は、粗大粒子と微小粒子のふたつに分けられるが、最小質量粒子は $1\sim 3\ \mu\text{m}$ の間にあることから、US EPA (米環境庁) は、政策判断によって、サンプリング・カットポイント $2.5\ \mu\text{m}$ を選択し、 PM_{10} の微小部分である $\text{PM}_{2.5}$ を新たな基準として追加することが合理的であるとした。PM の濃度が高く、その粒子径が小さい方がより健康被害が大きいたことが報告され、米国で新たな基準が制定されたのに続いて WHO でも PM の

基準が制定された。

日本ではPM_{2.5}の規制を行ってこなかったが、米国から12年後の2009年に基準値を制定、中国では2012年に都市部において制定された。

報道では、中国やアジアの大都市でスモッグが発生して空気が霞んでいる様子が映し出されることが多くなったが、直接、目視できるのは30μmより大きい粒子（スギ花粉40μm、霧雨2~100μmなど）である。深刻な健康被害をもたらすSPM、PM₁₀、PM_{2.5}あるいはDEP（ディーゼル排ガスに含まれる、0.03~1μmの微粒子、Diesel Exhaust Particles）は、PM_{2.5}などは肉眼では見えないほど小さい。しかし、大気汚染が起きている現場では、目視できるほど大きな粒子も大量に発生していることが多く、これによって視界が妨げられている。肉眼ではとらえられないPM_{2.5}を霞んだ空気の映像で表現している。

現在、発展途上国の大気汚染は、大雑把には、先進国の3倍ほどであるといわれているが、WHOの基準値PM₁₀の排出量20μg/m³（年平均）に対して、中国の場合は、2012年に行われた規制強化値が、100→70μg/m³となっており、規制値そのものが大きい。経済発展に対して環境対策が追い付いていないようである。

中国の大気汚染で特に大きな問題となったのは、2013年1月10~14日の「北京の重汚染」である。この時、夜間に900μg/m³という記録的な値が出た。500μg/m³になると視界が妨げられ、外出や自動車の運転ができないといわれるが、それをはるかに超える高い濃度である。このようなデータは、主に米国大使館や領事館が、在留米国人保護のために設置した測定装置によって観測され発表されている。

中国科学院大気物理研究所の張仁健氏の研究チームが北京地区のPM_{2.5}の化学成分および汚染源を調査・研究し、報告したところによると（2013年12月31日、中国網（チャイナネット）日本語版）、大気汚染の発生源としては、二次無機煙霧質（VOC二次生成）26%、工業汚染25%、石炭燃焼18%、砂塵15%、バイオマス燃焼12%、自動車排ガスと焼却炉合わせて4%となっている。報道映像では、自動車排ガスの影響が大きいという印象を受けるが、数値で見るとVOC、石炭燃焼などの影響の方が大きく、政府が実施している主な対策は、石炭エネルギーの減少（天然ガスへの転換）、老朽化した製鉄所、セメント工場、アルミ精錬所の閉鎖などとなっている。

発生機構と健康影響に関しては、まだ研究途上のPM_{2.5}であるが、大気環境学会会長 若松伸司氏（愛媛大学大気環境科学教授）と国際環境経済研究所理事 松本真由美氏（東京大学客員准教授）の次の対談記事が参考になる。（出典：「ゼロからわかるPM_{2.5}のはなし」2013/9/20）」

- 2.5μm以下の小さな粒子になると肺の中まで入り、心臓系の病気や気管支

系の病気などに悪影響を与える。

- 1990年代、米ハーバード大の疫学調査研究から、PM_{2.5}の濃度に比例して死亡率が増えるという衝撃的な結果が出た。
- 瀬戸内海はPM_{2.5}の発生源が多いため、中国から越境してくる量の特定はできていない。北京の濃度と日本の濃度には相関関係はない。
- 空気には、国境がないので国際協力が重要である。
- PM_{2.5}の発生源であるVOCは、人間活動と同じくらいの量が植物からも出ている。森が霞んでいることがあるが、あれは、VOCが粒子になったもので、自然起源のPMもある。

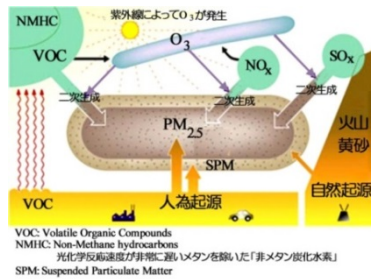


図 6-10-3-PM_{2.5} の生成メカニズム

出典：環境省のHPの図を参考に注釈など追加

産業ガス業界は、直接、石炭を取り扱うことはないが、産業ガス製造時の消費電力の削減、酸素吹きIGCCプロセスのための深冷空気分離装置、VOCの環境への排出抑制に寄与するガスアプリケーションなど、エネルギー利用の効率化、大気汚染防止に貢献できる案件がある。

(3) その他の大気汚染

産業革命以降の人工の大気汚染の主要な原因は石炭によるものが大きい、それ以外にもいくつかの原因やあるいは人工ではないもの、それらの複合汚染などがある。煤煙のように肉眼で見えるものから PM のように見えないものまで、様々な汚染物質があり、大気汚染に関する調査研究は、簡単ではない。現在も様々な研究が続けられている。いくつかの参考資料を示す。

①「フォールアウト」、(財)高度情報科学技術研究機構、原子力百科事典：ATMICA (09-01-01-05) (2004年2月)

1945 から 1980 年まで、核保有国が大気圏内核実験を行った。米国が 1945～62 年まで 193 回、ソ連が 1945～62 年まで 142 回、英国が 1952 年と 1953 年に 21 回、フランスが 1960～74 年に 45 回、中国が 1964～80 年に 22 回の大気圏内核実験を行っており、大量の放射性物質が大気を汚染、多くが地上に降下した。

日本では、閣議決定に基づいて放射能対策本部が設置され、1961 年から全国規模での環境放射能測定が行われている。都道府県ごとに「環境放射能水準調査」が続けられ、環境中の「人工放射能」の測定が行われるようになった。当初は 32 都道府県、チェルノブイル原子力発電所の事故を受けて、1990 年以降は 47 都道府県全てで実施されている。

1986 年のチェルノブイル原子力発電所の事故時に放出された放射性物質は、成層圏にまで届き、北半球全体に拡散したが、その時、日本に降下した放射性セシウムの量は、 $3.5\text{mCi}/\text{km}^2$ であった。これに対して核実験によって日本に降下した放射性セシウムの量は、最も多かった 1963 年には、 $52\text{mCi}/\text{km}^2$ であった。チェルノブイルの事故では莫大な量の放射性物質が大気圏内に放出されたが、大気圏内核実験では、日本にはその 10 倍以上の放射性物質が降下し、しかも核実験は 1963 年だけではなく、その前後に何年にもわたって行われている。

$1\text{mCi}=3.7\times 10^7\text{Bq}$ であるから、今の単位でいえば 1963 年には、1 平方 km あたり 19 億ベクレルの放射性セシウムが日本全土に降り注いでいたということになる。

核実験や原子力発電所の事故による大気汚染は、平時に比べると明らかに多く、核実験や、原子力事故による大気汚染は避けるべきものであるが、関係者・従事者ではない一般の公衆の場合、自然界から受ける放射線の量の方がはるかに多いため、人体への影響は明らかになっていない。

たとえば、チェルノブイル事故時の日本人の放射線の内部被曝量の増加は、年間 $2.1\mu\text{Sv}$ と推定されている。日常のカリウム 40 による被曝量は年間 $290\mu\text{Sv}$ 程度であり、自然界から受ける内部被曝量は、およそこの倍くらいであるから、チェルノブイル事故による日本に居住する人の被曝線量の増分は、自然界からの放射

線の0.5%ほどである。日本への実害は深刻なものではなかった。

②「ゼロからわかるPM_{2.5}のはなし」、NPO 法人国際環境経済研究所・PM25 実態研究委員会（2013年7月8日～2014年1月14日の連載記事）
近年、話題に上っているPM_{2.5}について分かりやすく解説している。

③「中国の都市大気汚染と健康影響」、国立環境研究所：環境儀 21（2006年7月31日）。

中国の都市部で深刻となっている大気汚染について、国際的な共同研究プロジェクトが行われている。

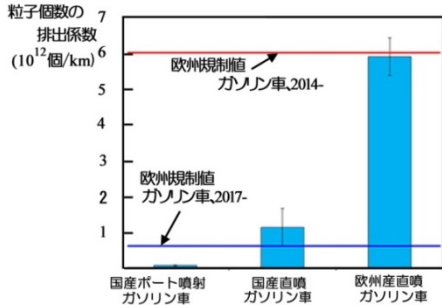
④「微小粒子の健康影響」国立環境研究所：環境儀 22（2006年10月31日）

DEP（Diesel Exhaust Particle、ディーゼル排気粒子）による健康影響の研究が行われている。DEPとPM_{2.5}との関係も研究されている。

⑤「ナノ粒子・ナノマテリアルの生体への影響」国立環境研究所：環境儀 46（2012年10月31日）

これから応用が広がると思われるナノ粒子の生体への影響、「ナノトキシコロジー」に関する解説。ナノマテリアルの安全性の評価を行っている研究者へのインタビューなどを掲載している。

⑥「最近の直噴ガソリン乗用車からの微粒子排出状況」国立環境研究所 地或環境研究センター：筑波研究学園都市記者会（2013年12月16日）：
直噴ガソリンエンジンのPM_{2.5}排出を調査。直噴ガソリンエンジンは、良好な



国立環境研究所報告：日本の排出規制に準じて測定
欧州規制の方法と測定法は異なる

図 6-10-4 直噴ガソリンエンジンの排ガス測定、出典：国立環境研究所

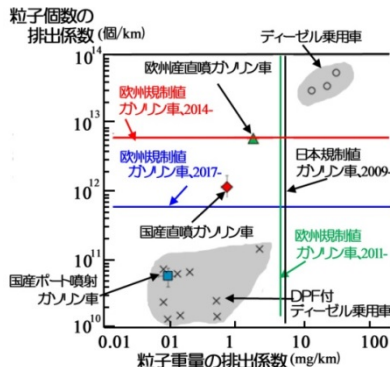


図 6-10-5 自動車排ガスの粒子、出典：国立環境研究所

燃費性能を示し、排気ガスもディーゼルエンジンで問題となっている 30nm 以下の微粒子（ナノ粒子）は少なかったが、元素状炭素の $PM_{2.5}$ 排出量が非常に多いことが判明した。

図 6-10-4 は、「国産直噴」の排出係数が、「国産ポート噴射」（従来車）の 10 倍以上、「欧州産ポート噴射車」ではさらにその 5 倍以上という大きな値となった。図は、環境研究所の報告書の図に少し注釈などを書き加えたものである。グラフにすると従来のポート噴射との違いが、非常に大きいことがよく分かる。

図 6-10-5 のグラフは、横軸が粒子個数の排出係数、縦軸が粒子重量の排出係数であり、規制値と実際の測定結果を示したもの（対数表示）である。

図の左下の方がクリーンな排ガス、右上がその逆ということになる。欧州車でも現時点での規制値をぎりぎり、クリアしているが、将来の規制値については国産車でもクリアしていない。元素状炭素（原子状炭素）の起源は、ガソリンと思われ、その排出抑制の対策を講じることが重要であると報告されている。自動車排ガスは NO_x 、HC の排出低減を中心にクリーン化が進められてきたが、ガソリン車についても今後 PM に注目しなければならないとしている。この実験は、日本の測定方法に従っているため国産車と欧州車を直接比較することは難しいが、燃費や出力を追求する直噴ガソリン方式が、従来のポート噴射方式に比べて排出粒子が多いことは間違いないようである。

6. 10. 4 石油流出事故

近年は、大型の原油タンカーによる海上輸送と海底油田が増えており、海洋における石油の流出事故がある。石油の流出事故が地球環境に与える影響は甚大である。

最大の事故は、2010年4月20日に起こった「2010年メキシコ湾原油流出事故」である。

メキシコ湾沖合 80km、水深 1,522m の地点の BP 社の石油掘削施設「ディープウォーター・ホライズン」において、掘削中の海底油田から逆流してきた天然ガスに引火し爆発した。この時、海底へ伸びる 5500m の掘削パイプが折れ、大量の原油がメキシコ湾へ流出した。事故の行方不明者 11 人、負傷者 17 人。原油の流出は 78 日間も続き、被害総額は数百億ドル以上に上るといわれる。参考資料：JOGMEC レポート「米国：掘削リグ「Deepwater Horizon」の暴発と沈没についての技術的考察」2010年6月14日、伊原賢。

事故現場から流出した原油は、広く海面上を覆い、ルイジアナ州ミシシッピ川河口付近にまで広がった。事故から 40 日後の汚染地域は図に示すように広がり、これを日本地図に重ねてみるとそ



図 6-10-6-炎上する「ディープウォーター・ホライズン」



図 6-10-7-メキシコ湾の汚染地域の地図 (5月30日)

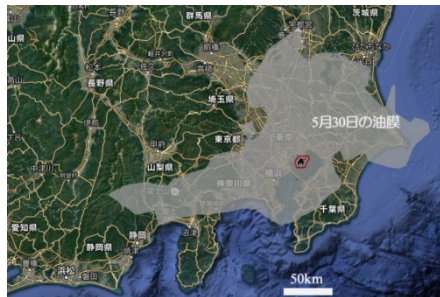


図 6-10-8-同じ時の流出地域を日本地図（東京湾）に重ねた様子。最も拡大した時は、若狭湾沖まで広がっていた

の影響の大きさが想像できる。

石油の流出事故の多くが海洋で起こっており、船舶による史上最大の海洋汚染は、1989年3月24日の「エクソンヴァルディーズ号原油流出事故」である。

エクソンヴァルディーズは、アラスカで原油を搭載、カリフォルニアに向かう途中、アラスカ州のプリンス・ウィリアム湾で座礁して原油を大量に流出させた。この事故により大規模な環境汚染が起こり、流出量は積載量の約20%、1080万USガロン（4088万L）、流出面積は、11,000平方マイル（28500km²）、原油の付着海岸線は、1,300マイル（2092km）と報告されている。この事故がきっかけとなって、石油運搬に関する多くの基準や法律が見直された。

石油の輸送中の事故は陸上でも起こっている。

2013年7月6日、カナダのケベック州で「ラック・メガンティック鉄道事故」が起こった。

原油を満載した73両編成の貨物列車が無人的まま暴走、ラック・メガンティックの市街地で脱線・転覆して爆発炎上し、町は炎に包まれた。

漏洩した原油は河川を汚染、火災は2日間も続き、死者・行方不明者50名という惨事となった。



図 6-10-9-カナダ・ラック・メガンティック
市街で脱線炎上する原油輸送列車
Wikipedia

6. 10. 5 天然ガスの事故

固体燃料である石炭は、燃えると鎮火が難しく、液体燃料である石油は、流出事故が大きな災害を引き起こす。これに対して、天然ガスは、漏洩した場合、空気中に拡散するため、温暖化係数の大きいガスであるメタンを大量に放出するという点では、影響は大きいですが、石油の流出のような直接的な大災害になりにくい。LNG のタンカーは、低温液化ガス専用の貯槽を持つため、石油タンカーのように船体が損傷して原油が流出するといった輸送中の大事故も起こりにくい。

しかし、産ガス地域における採掘に伴う事故は起きている。2006年5月29日、インドネシアで「シドアルジョ泥噴出事故」(「シドアルジョの泥火山」)が発生、天然ガス田から大量の泥が噴出した。

噴出する泥は、11万~17万 m^3 /日と莫大な量となり、周囲の田や道路、街が泥に埋まっていった。被災地の住民9000人が避難。工場20、学校18棟、家屋1600が泥に埋まり、周囲の高速道路や鉄道も不通となった。泥を防ぐために、高さ12mの堤防が作られたが、噴出事故から半年後にパイプラインのガス爆発事故が発生し崩落した。

事故の2日前に地震が発生しているため、人災説と天災説で争っているが、専門家の多くが人災であるとしている。

翌年2007年には、12の村に被害が広がり640ヘクタール、2008年には、728ヘクタールの地域に及んだ。2012年8月現在、避難者は6万人。8つの村が泥に沈んだ。

その後、噴出量は3万 m^3 /日まで減少したが、事故は収束しておらず、英国の大学の調査によると泥の噴出は2037年まで続く見込みである。立ち退き範囲外でも地盤沈下やメタンガスの発生が起こっている。参考資料：「インドネシア・東ジャワ州シドアルジョ県の泥噴出事故」JOGMEC、ジャカルタ事務所所長・高橋衛
石炭ほどではないが、天然ガスも発火して大規模に燃え続けているところがある。



図6-10-10-「シドアルジョの泥火山」によってどろの湖となったインドネシアの町

トルクメニスタンのアハル州「ダルヴァザ」では、1971年に旧ソ連によって天然ガスが発見された。その時、大きな落盤が起こり地上に直径100mほどの穴が開いた。地下から有毒ガスを含む大量のガスが噴出したため止む無くガスに点火したが、その後この巨大な穴は燃え続けている。この地域の天然ガスの埋蔵量が不明であり、鎮火する手段もないため、いつまで燃え続けるのかも分かっていない。



図 6-10-11-ダルヴァザの燃える穴 Wikipedia

6. 10. 6 原子力の事故

核開発に関わる事故が世界中で起こっている。事故の多くが、核兵器の工場や軍艦で起こっているため、詳細は秘密のベールに包まれている。原子力艦船は核兵器を搭載していることが多く、特にウラジオストック軍港の周辺では、数多くの原子力事故が発生したとされているが、事故そのものの存在が秘密とされ、詳細は明らかになっていない。

いくつかの大きな事故は、かなりの年数を経て公表されるようになった。

ソ連ウラルチェリャビンスク州で大規模な事故が発生し原子炉 6 基と再処理プラントが爆発した（ウラル核惨事 1957 年 9 月 29 日）。公表は 20 年後であり、現在は、レベル6と評価されている。汚染は未だ収束していない。

英国のウィンズケール（現在はセラフィールド）の原子炉火災（1957 年）は、事故の規模が大きいのが、軍用炉であるため、長年にわたって事故の内容が秘密にされていた。

ソ連のチェルノブイリ（現在はウクライナ）では、軍民両用発電所の事故が起こった（1986 年）。炉心は完全に破壊され、ほぼ北半球全域に放射性物質が拡散した。レベル7とされる。WHO などによる国際共同調査では、事故の犠牲者は 9000 人にのぼるとされる。

日本も参加する、国際協力によるチェルノブイリ研究所があり、現在も事故処理が続いている。チェルノブイリ発電所に残った 3 基の原子炉は、事故後も稼働を続けていたが、最近になって停止され、発電所そのものが閉鎖された。

この他の民間の原子力事故は、数は少ないが、過酷事故が起こると影響が大きく、米国スリーマイルアイランド（TMI）事故（1979年）と東京電力福島第一原子力発電所事故（福島第一事故、2011年）が知られている。

TMI事故では、PWR96万kWで炉心の冷却材喪失事故が起こり、炉心溶融が起こった。建設後わずか3ヶ月目の新プラントであったが、複数の要因が重なって冷却水の供給が止まり、原子炉が溶けた。周囲への影響が少なかったため、レベル5とされている。

表 6-10-2-主な原子力施設における事故

年	INES	国	施設	事故内容
1952	5	カナダ	チョークリバー研究所	原子炉爆発
1957	6	ソ連	キシテム	ウラル核惨事
	5	英国	ウィンズケール原発	原子炉火災、燃料溶融
1961	4	米国	アイダホ州フォールズ SL-1	爆発事故
1975	3	東ドイツ	グライフスヴァルト原発	火災事故
1977	4	チェコスロバキア	ボフニチェA1発電所	燃料溶融
1978		日本	東京電力福島第二原発	臨界事故
1979	5	米国	ペンシルベニア州スリーマイル島原発	部分的炉心溶融
1986	7	ソ連	ウクライナチェルノブイル原発	原子炉爆発
1987	5	ブラジル	ゴiania	大量被曝事故
1989	2	日本	東京電力福島第二	再循環ポンプ破損
1991	2	日本	関西電力美浜発電所	蒸気発生器伝熱管損傷
1993	4	ロシア	セヴェルスクコンビナート	貯蔵タンク爆発
1995	1	日本	もんじゅ	ナトリウム漏洩事故
1997	3	日本	動燃東海事業所アスファルト固化処理施設	火災爆発事故
1999	3	日本	北陸電力志賀原発	臨界事故
	4	日本	JCO	臨界事故
2005	3	英国	セラフィールド	放射性物質漏洩
2006	4	ベルギー	フルーリュス研究所	
2011	7	日本	東京電力福島第一原発	複数炉の炉心溶融
	3	日本	東京電力福島第二原発	冷却機能喪失
	2	日本	東北電力女川原発	原子炉補機冷却水ポンプ故障
2012	2	韓国	古里原発	全電源喪失
2013 2015		米国	マサチューセッツ州ピルグリム原発	大雪による停電ブラックアウト

福島第一事故では、GE製のBWRなど4基の原子炉が複数同時発災した。地震と津波をきっかけに電源を喪失、原子炉停止後の崩壊熱の除熱に失敗して炉心が溶融、また、水が分解して発生した水素が爆発し、原子炉建屋が破壊された。レベル7である。

複数の原子炉が同時に事故を起こした例はなく、世界の原子力発電の安全性に対する信頼を失わせる大きな事故となった。当初は、地震による天災、想定外の事故とも思われたが、同じ地震や津波に襲われた周辺地域の原子力発電所は全て安全に停止しており、現在では、人災であるという評価がなされている。

なお、福島第一発電所の事故があまりにも大きいため見逃されがちであるが、同じ地震では、福島第二原子力発電所も冷却機能喪失事故を起こしている。福島第二では、その後、冷却機能を回復し、過酷事故に至ることがなかったが、レベル3の事故と記録されている。

なお、事故レベル、国際原子力事象評価尺度（International Nuclear Event Scale, INES）とは、原子力事故・故障の評価の尺度であり。国際原子力機関（IAEA）と経済協力開発機構原子力機関（OECD/NEA）が策定し、1992年に各国に正式採用を勧告した。

表 6-10-3-原子力事故のレベル

レベル	事故の種類	事業所外	事業所内
レベル7	深刻な事故	放射性物質の重大な外部放出：ヨウ素131等価で数万テラベクレル以上の放射性物質の外部放出	原子炉や放射性物質障壁が壊滅、再建不能
レベル6	大事故	放射性物質のかなりの外部放出	原子炉や放射性物質障壁に致命的な被害
レベル5	事業所外へリスクを伴う事故	放射性物質の限定的な外部放出	原子炉の炉心や放射性物質障壁の重大な損傷
レベル4	事業所外への大きなリスクを伴わない事故	放射性物質の少量の外部放出	原子炉の炉心や放射性物質障壁のかなりの損傷
レベル3	重大な異常事象	放射性物質の極めて少量の外部放出	重大な放射性物質による汚染／急性の放射線障害を生じる従業員被曝
レベル2	異常事象		かなりの放射性物質による汚染
レベル1	逸脱		運転制限範囲からの逸脱
レベル0+	安全に影響を与え得る事象		
レベル0-	安全に影響を与えない事象		
評価対象外	安全性に関係しない事象		

6. 10. 7 再生可能エネルギーによる事故・災害

再生可能エネルギーは、基本的にエネルギー密度が小さく、大規模な産業災害を引き起こしにくい。しかし、大規模な水力発電に利用されるダム、人造湖は、大きな災害を引き起こす可能性がある。件数は少ないものの、ひとたび、ダムの決壊事故が起こると被害は甚大で広範となる。米国、フランス、中国、パキスタンなどで大規模なダムの決壊事故（ダム災害）が起こっている。

米国ペンシルバニア州のサウスフォークダム決壊事故(1889年5月31日)では、犠牲者数は2209人にも上る。

板橋・石漫灘ダム事故(中国・1975年)では62箇所のダムが連鎖的に決壊

した。台風によって、大小62のダムが決壊した。政府は30年後の2005年になって犠牲者2万6千人と発表したが、海外のメディアは、被害は十数万人以上と推定している。米国アイダホ州のティートンダム決壊事故(1976年6月5日)では、被害総額が20億ドルにも達し、ニューメキシコ州のユナイテッド・ニュークリア社のウラン鉱山鉱滓ダム決壊事故では放射性物質を含む大量の鉱滓や污泥が流出した(1979年)。

日本でも秋田県鹿角市の尾去沢鉱山鉱滓ダム決壊事故(1936年11月20日)では死傷者数が1000人を越え、大正池決壊事故(京都府・1953年)では105人の犠牲が出ている。最近では、東日本大震災によって、藤沼ダムの決壊事故(福島県・2011年)が起こっている。

また、巨大なダムが破壊されると、決壊によって甚大な被害が起こるため、ダムはテロや戦争の標的になることがある。第二次世界大戦中には、英国軍によってドイツの複数のダムが破壊され(1943年)、朝鮮戦争の時には、破壊には至らなかったものの、日本が日満州に建設した水豊ダムに対して米軍の空爆が行われた。第四次中東戦争ではイスラエル軍がエジプトのアスワン・ハイ・ダムに対して威嚇のペイント弾攻撃を行っている。また大型のダムには、ダム貯水による「ダム



図6-10-12-中国板橋ダム決壊事故(1975年)



図6-10-13-米国ティートンダム決壊事故(1976年)

誘発地震」がある。短期間に大量の貯水が行われるため、ひずみが発生、地殻変動による地震が誘発されると考えられており、中国や日本などで研究が行われている。治水（洪水調節・不特定利水）と利水（灌漑用水・上水道用水・工業用水の供給・水力発電）の両方を目的とする多目的ダムでは、発電以外にも様々な利点があるが、規模が大きいと、開発における環境破壊のリスクが大きく、事故が起こったときの被害も大きい。

大規模なダムを除くと、再生可能エネルギーには、大きな災害リスクが想定されない。ただし、小規模な事故はある。

風力発電には、火災リスクと破損リスクがある。火災の原因としては、落雷による過電流、過電圧による変圧器や制御盤からの出火が多い。機器のアーク、過回転による摩擦なども原因となる。風車のナセルは密閉されており、ナセル内部にある変圧器や発電機が出火した場合、損傷が全体に広がる。またナセルは地上 60～80m のところにあるため、出火すると消防車による外部からの消火方法がない。

火災が発生した場合、風車 1 基は完全に失われることになるが、火のついた破片、部品が飛散し、他の設備に被害を及ぼすこともある。

日本では、風力発電と人家との距離は 200～400m 以上離されるよう行政指導が行われているため、ブレードの回転が止まっていれば、類焼の可能性は低いと思われているが、火災発生のまま回転を続ければ、民家火災や森林火災のおそれもある。

風力発電が普及すると、自動消火装置の設置や定期的なメンテナンスの重要性が増すが、設置場所が山岳地や海上である場合もあり、コストがかかることになる。

図は、京都府太鼓山風力発電所の落下事故の様子である（経済産業省に提出された京都府・専門家会議による事故報告書）。タワーの高さは 46m、ブレードの直径は 50.5m、出力 750kW の風車が 6 基並



図 6-10-14-京都府太鼓山風力発電所 3 号機 ナセル落下事故（経済産業省・事故報告書）

ぶ風力発電所で 1 基の風車のナセル（ブレードと発電機を含む）が落下した。この事例では、突然の気象変化などを見当たらず、原因は、ボルトの亀裂・折損から溶接部における疲労亀裂が起こったとされており、今後は定期点検時に、ボルトの亀裂を早期に発見できるように超音波探傷やボルトの交換が必要とされた。

風力発電は、再生可能エネルギー、自然エネルギーであるが、発電事業である以上、産業事故のリスクはあり、事故を回避するための研究や改善が必要である。

6. 10. 8 エネルギーの供給リスク

エネルギー供給が停止すると文明社会はすぐに崩壊する。現代社会では、石油、石炭、天然ガスやこれらから作られる電力が完全に途絶えた状況を想像することすらできない。

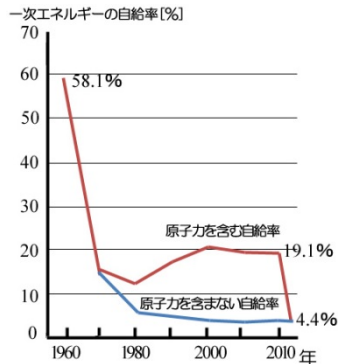
エネルギー資源に関する様々な情報があふれており、統計データ、報道、書籍とその議論がある。専門の国際機関、政府機関、学協会、エネルギー関連民間企業の研究機関、民間の調査会社などが莫大な情報を集め分析を行っている。政府が発行する「エネルギー白書」も毎年、書き換えられ、国内外の複雑で困難なエネルギー問題を分析し、評価・提言を行っている。

日本のように極端にエネルギー自給率が低く、エネルギーバランスが偏っている国では、安全で安心、さらに安価で安定したエネルギーを得ることは、ほぼ不可能であり、エネルギー資源の供給を確実なものとするためのエネルギー安全保障の議論や政策は重要な課題である。

図は、1960年から2015年までの国内一次エネルギーの自給率の推移を示している。(データはエネルギー白書2016に掲載されている2013年版のもの)

1960年には58%もあったエネルギー自給率は、1970年には15%まで急激に低下した。石炭から石油へのエネルギー転換政策が行われ、国内炭が減産され、輸入石炭と輸入石油(原油)が増えたためである。

1980年頃までには多くの炭鉱が閉山となり、日本は大半のエネルギーを輸入に頼ることになった。原子力は核燃料を輸入すると、数年にわたって発電が可能となるため、国際的なルールでは「準国産」エネルギーとして位置づけられる。したがって、統計的には、原子力を含む国産エネルギー(自給率)と含まない場合の国産エネルギーの両方が示されることがあり、図6-10-15にもふたつの線がある。



参考：エネルギー白書2016
【第211-4-1】日本のエネルギー国内供給構成および自給率の推移

図6-10-15-日本の一次エネルギーの自給率の推移

水力、地熱などの純国産エネルギーは、わずかであるが、1980年代に電力需要拡大に合わせて建設された原子力発電所のエネルギーを加えると自給率は20%近くまで回復した。

エネルギー自給率の低下は、国内石炭生産の縮小というエネルギー政策だけではなく、国内のエネルギー消費量が大きく増加し、エネルギーの構成比率が大きく変わったことにもよる。

図6-10-16は、1960年のエネルギー消費量を100とした時のその後のエネルギー消費量の推移と構成割合を示したものである。

1970～2000年にかけて、エネルギー消費は急速に増大し、石油、天然ガス、石炭（輸入）が急速に伸びた。1980年代からは原子力も増加したが、これは経済の拡大によるエネルギー消費の増加だけでなく、電力の大幅な増強が必要になったことも影響している。

電力の増強のために石炭や天然ガスの利用が増大すると、輸入の経済的負担が増え、自給率が低下することによってエネルギー供給が不安定になる。

そこで、エネルギーの安定化、自給率を向上させるために国策として原子力の導入が行われたが、2011年の事故によって原子力発電所の稼働率はほぼゼロになり、図6-10-15に示すように自給率は4.4%まで低下した。

日本のエネルギー自給率は、史上最も低い値となっている。

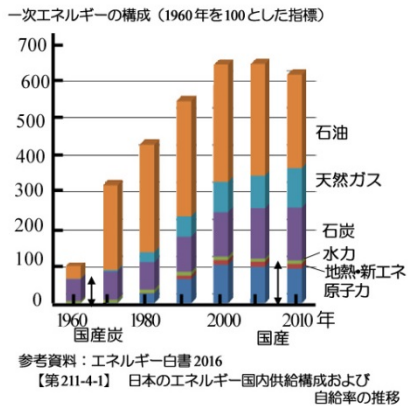


図6-10-16-日本の一次エネルギーの構成