

原子力発電の可能性とリスク

98K123 吉田 武 紘

はじめに

今、地球環境に対する関心が、高まってきている。特に、エネルギーの問題に関しては、石油に変わるエネルギーの確保が、科学者たちの間で議論される。しかし、さしあたって今重要なのは、原子力発電に関することだと思われる。電気の恩恵は、計り知れないものがある。電気の供給源として、今原子力によるものが大きい。原子力発電は、火力発電よりは遥にクリーンであるし、水力発電や風力発電に比べても、電気の供給量は圧倒的に多い。しかし、原子力発電には安全性の問題がある。1979年にアメリカのスリーマイル島原発で、または1986年には旧ソ連のチェルノブイリ原発で、大事故がおきた。最近では、茨城県東海村で、大きな臨界事故が起こった。そのため原子力の安全性について大きな不安が持たれるようになった。

はたして原子力発電というものは、本当に人間に対してメリットになりうるものなのであるか？本論文では、原子力発電について、さまざまな視点から分析し、その恩恵とリスクについて検証していきたい。そのため、第1章では原子力発電の仕組みおよびその必要性についてまとめる。次いで第2章では、よく心配されるような原子力発電の安全性について検証する。さらに第3章では、原子力発電を行うと同時に必ず出てくる核燃料サイクルについて調べる。最後に、「おわりに」において、本論文の議論を総括しながら、自分の考えをまとめる。

第1章 原子力発電の必要性

1. 原子力発電所における電気の起こし方

すべての物質の原子核は陽子と中性子からできている。特に陽子と中性子の数の多い原子核のうち、たとえばウランやプルトニウムなどは核分裂を起こしやすい性質を持っている。このような性質の原子核に外から中性子が飛び込むと、核分裂が起きて2つ以上の小さい原子核に分裂し、同時に大きな熱エネルギーを発生する。この熱エネルギーを発電に利用したのが原子力発電である⁽¹⁾。

核分裂が起きて発生した熱エネルギーを利用するためには、核分裂の反応が連続して起こる必要がある。通常1回の核分裂から2～3個の中性子が発生する。この中性子が、別のウランにあたるとさらに核分裂を起こす。このように次から次へと核分裂が起こることを連鎖反応といい、この連鎖反応が同じ割合で持続している状態を臨界という。なお、ウランが核分裂を起こすことは、1938年にドイツ人のハーンとシュトラスマンによって発見された。また、連鎖反応を利用する原子炉の構想は、フランス人のペリーなどによって提案されたと言われている。

(1) わが国の原子炉の設備について

原子炉にはいろいろな種類があるが、現在世界あるいはわが国でもっとも多く運転・建設されている原子炉は、減速材と冷却材として普通の水（軽水）を使っている軽水炉である。軽水炉のうち、沸騰水型の原子炉を使っている原子力発電所を沸騰水型原子力発電所（BWR～BOILING・WATER・REACTOR）と言う。また、加圧水型の原子炉を使っている原子力発電所を加圧水型原子力発電所（PWR－PRESSURIZED・WATER・REACTOR）と言う。

(2) 沸騰水型原子力発電所 (BWR)

BWRでは、ウラン燃料から発生する熱エネルギーによって冷却水が加熱され、約70気圧、約280度の蒸気を原子炉の中で発生させる。BWRは、原子炉で発生した蒸気によって直接タービン・発電機を回転させて発電させる方式である。わが国では、2000年3月31日現在28機のBWRが運転中のほか、6機が建設中あるいは建設準備中である。

(3) 加圧水型原子力発電所 (PWR)

加圧水型原子力発電所 (PWR) では、原子炉容器の中の水 (一次冷却水) は沸騰しないように約160気圧に加圧されており、ウラン燃料から発生する熱エネルギーによって約320度の高圧の水になる。この時温水を蒸気発生器に送り、伝熱管と呼ばれる細い管の中を通すと、伝熱管の周りの水はこの高温高圧水を熱源として加熱され蒸気となる。この蒸気をタービンに送り、発電機を回して発電する。わが国では、2000年3月31日現在23機のPWRが運転中である。

(4) 燃料の取り扱いと貯蔵設備、中央制御室

わが国の商業用原子力発電所で使っている燃料のウランは、セラミック上に焼き固めたペレットと呼ばれるものである。このペレットを金属製の細長い管に詰めたものを燃料棒といい、この燃料棒を正方形格子状に配列して組み立てたものを燃料集合体と言う。

原子力発電所では約1年に1回定期的に発電所を停止して、危機・設備の点検などを実施する。この停止機関を利用して、原子炉内の4分の1～3分の1の燃料を新しい燃料と交換する。原子炉に燃料を装荷するとき、また原子炉から燃料を取り出す時は、専用の設備を使って燃料集合体を1本ずつ取り扱っている。原子炉から取り出した使用済み核燃料は放射能が強く熱も発生しているので、水を張った使用済み核燃料貯蔵ピットに貯蔵し、ある期間冷却管理する。

また、原子力発電所では、必要な電気を安全に家庭や工場に送電できるよう、発生電力量を安定に保つ必要がある。このため制御棒の操作などによってウラン燃料の核反応および発生する蒸気の量を制御することにより、タービン発電機からの発生電力量を調整している。このような操作は原子力発電所の中央制御室から運転員が行っている。

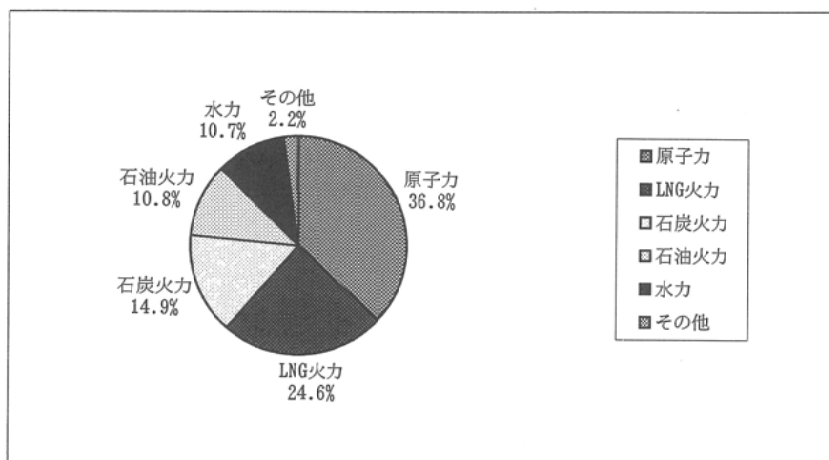
2. 世界のエネルギー事情と原発の必要性

人類は、知恵と技術革新によって豊かな現代文明の基礎を築いた。人類とエネルギーのかかわりは、数十万年前の「火」の利用から始まった。そして長い期間、「火」や「水」などの自然エネルギーを有効に活用して生活してきた。その後、18世紀になって蒸気機関が、さらには、19世紀には内燃機関や発電機が発明され、これらが動力や照明になって以来、エネルギー消費量は飛躍的に増加した。そして20世紀にはいとエレクトロニクス技術や生命工学の進展、さらに、核分裂によるエネルギーを誕生させるなど、人類は知恵と技術革新によって豊かな現代社会の基礎となる技術を構築してきた。

ただ、そのめざましい技術革新と正比例する形で、エネルギーの消費量も増えつづけている。そして、人類がいまだにエネルギーを確保する時に、「石油」という化石燃料に頼っているのが現状である。そのため、二度の石油危機は、わが国のみならず、世界規模でエネルギー需要に対する意識を転換する機会となった。石油価格は一気に高騰し、国際市場での石油開発機構 (OPEC) の支配力が高まった結果、石油供給の不安定性が強く認識されることとなり、エネルギー消費国は省エネルギーやエネルギー源多様化の取り組みをいっそう強化するようになった。また、1990年の湾岸危機による石油価格の高騰も、OPEC諸国の石油増産、高水準の石油

の在庫および一部消費国の需要減などが重なって、エネルギー需要のトレンドに大きな影響は見られなかった。1998年に国際エネルギー機関（IEA）は2020年までの世界のエネルギー需給見通しを発表した。それによると、世界のエネルギー需要は、経済成長率を年率3.1%と仮定すると、2020年には1995年比で65%伸びる見込みとなっている⁽²⁾。

図1 日本の発電量に占める原子力発電の割合



出典：2001年資源エネルギー庁ホームページの資料により作成。

このように、世界のエネルギー消費量は、近年各国で省エネルギーへの取り組みが進展しているものの、依然として増加傾向にある。地域別に見た場合、特にアジアを中心とする発展途上国などにおいて、人口の増大と経済成長に伴い、大幅に増加するものと考えられる。1980年から1992年にかけて、世界のエネルギー需要の伸び率は、平均年率1.7%であるのに対して、これらの国では年率5.5%である。

わが国も、その潮流の中にあるといえるだろう。大きな油田を持たない日本は、エネルギー源の8割強を輸入に頼っている。省エネルギーを実施するだけでは、エネルギー資源不足の問題が改善できない。何とかして、「自前」の、しかも効率的なエネルギー源を確保する必要がある。そこで、「原発をいかに活用するか」が大きな課題になってくる。発電量の3割を原発に依存している日本は、自前でエネルギーを供給できないため、この比率をさらに増やさざるを得ないだろう（図1）。2000年3月31までに、51基（電気出力総計4491.7万KW）の商業用原子力発電所が運転されているとみられる。

3. 日本の原子力発電の現況

(1) 運転中プラントと廃止措置プラント

日本は、原子力発電の開発に早くから取り組み、1963年10月に日本原子力研究所動力試験炉（JPDR）が初めて原子力発電を行い、1966年7月には日本原子力発電（株）東海発電所（電気出力16.6万KW）が日本で初めての商業用原子力発電所として営業運転を開始した。その後、原子力発電は着実な伸びを示し、最近では1996年11月および1997年7月に、世界最初の改良

型沸騰水型原子力発電所（ABWR）である東京電力（株）柏崎刈羽原子力発電所6、7号機（電気出力各135.6万KW）が、運転を開始した。一方、1998年3月31日に日本原子力発電（株）東海発電所が臨界事故の発生により、31年8ヶ月に渡る営業運転を終えた。

（2）建設中プラント

建設中の商業用原子力発電所は、東北電力（株）女川原子力発電所3号機（BWR、電気出力82.5万KW）、東通原子力発電所1号機（BWR、電気出力110万KW）、中部電力（株）浜岡原子力発電所5号機（ABWR、電気出力138万KW）、および北陸電力（株）志賀原子力発電所2号機（ABWR、電気出力135.8万KE）の4基となっている。

（3）建設準備中プラント

建設準備中の原子力発電所は、東北電力（株）巻原子力発電所1号機、電源開発（株）大間原子力発電所、と中国電力（株）島根原子力発電所3号機の3基である。大間原子力発電所は、炉心全体にウラン・プルトニウム混合酸化物（MOX）燃料を層化する日本発のフルMOX・ABWRを目指している。

（4）設備利用率とトラブル件数の推移

1975年頃、沸騰水型原子力発電所（BWR）における廃管（管が老朽化して壊れること）などの応力腐食われ問題、また加圧水型原子力発電所（PWR）における蒸気発生器伝熱管の減肉（管が長年使われることにより、すりへること）や応力腐食われの問題が発生し、原子力発電所の設備利用率は40%まで落ち込んだ。このため軽水炉改良標準化計画（1975～1985年度）を進め、材質の変更、原子炉の水質管理などの改善を図った結果、1983年度の設備利用率は70%にまで回復した。その後、作業の効率化による定期検査期間の短縮などにより、1995年には80%に達し、1998年度には過去最高の84.2%を記録した。

また、機器の信頼性向上、作業員・運転員などの人的ミス防止のためのヒューマンファクター研究の進展、プラント予防診断技術などの開発により、わが国の原子力発電所のトラブル件数は1989年以降、原子炉一基あたり一件以下に推移している。また、原子炉の停止回数も国外のプラントと比較しても非常に少なく、わが国の原子力発電所の信頼性と安全性は高い水準にあるといえる⁽³⁾。

4. 原子力発電の経済性

原子力発電は、火力や水力などの電源と比較しても遜色のない経済性を有している。また、発電原価に占める燃料費の割合が低く、その価格変動の影響を受けにくいことも大きな特徴である。

また、原子力発電の発電コストは、さまざまな変動要因の影響を受けにくいことが大きな特徴である。

たとえば、石油火力などの場合は発電原価に占める燃料費の割合が高いため（約6割）、燃料の石油が値上がりすれば直ちに発電原価が上がってしまう。過去に、石油価格は時々の国際情勢によって大きく変動しており、今後も変動する可能性があるのは否めないのである。さらに、石油のほとんどを輸入に頼っている日本は、もし何らかの形で石油の輸入がストップしてしまうと、火力発電はまったく使い物にならなくなってしまうのである。第一次石油危機では、灯油などが極端に値上がりしただけでなく、トイレトペーパーを買うために行列ができるなど、社会がパニック状態に陥った。石油の輸入における、「脱中東」が叫ばれているにもかかわらず、

日本は現実にはますます中東への依存が高まっている。これでは、火力発電の先行きが暗いのは明らかである⁽⁴⁾。

これに対して原子力発電の場合、燃料のウランは、わが国はウラン資源が乏しいため、先進国との長期購入契約などにより安定的に供給される体制が確保されている。ウランは世界の比較的広い地域に分布し、しかもその地域には政治状況の安定している国が多く、安定供給が可能である。わが国では、ウランの安定供給という観点から、カナダ、オーストラリア、イギリス、アメリカなどの輸入相手国を多様化するとともに、これらの国々と長期契約を結んでいる。さらに、発電原価に占める燃料費の割合が低いため（約3割）、石油火力などよりも安定した価格で電力の供給を行うことが可能である。

資源エネルギー庁は、1999年12月16日に開かれた総合エネルギー調査会原子力部会の第70回会合で、原子力発電、火力発電および水力発電による発電原価の試算結果を発表した。

資源エネルギー庁はこれまでも幾度か発電原価の試算を行っており、最近では1994年に電気事業審議会需給部会で試算結果を発表した。それによると、各電源の1kwh（1時間で1キロワット生産）あたりの発電原価は原子力とLNG（Liquefied Natural Gas：液化天然ガス）火力が9円、石炭火力と石油火力が10円、水力が13円程度であり、化石燃料が低価格で推移する中でも原子力発電の経済性はほかの電源に比べて遜色がないとの評価が下された。

今回の試算はその後の状況変化、すなわち、国内電気事業者のデータを用いたより現状に近い燃料費の試算が最近行われたこと、設備利用率の実績が以前の試算の前提から剥離してきていること、金利や為替レートなどの経済性指標が変化したことを踏まえて、実状に即したコスト試算を行うことを目的としている。総合エネルギー調査会原子力部会によると、設備利用率は、1994年度は、原子力が76.6%、石炭火力が74.3%、石油火力が36.4%、LNG火力が58.9%であったのに対し、平成10年では、原子力が84.2%、石炭火力が70.2%、石油火力が18.7%、LNG火力が49.8%になっている。このように、設備利用率は、原子力が上昇したのに対し、他の電源は軒並み下降している。

標準的条件として、1998年度平均の為替レート（128.02円/\$）、割引率3%、初年度燃料費に1998年度平均の燃料価格を用いた場合の発電原価が試算され、1kwhの発電を行うためのコストは原子力が5.9円、LNG火力が6.4円、石炭火力が6.5円、石油火力が10.2円、水力が13.6円となった（表1）。

表1 発電源別の発電原価

(単位：円/KWh)

	原子力発電	LNG火力	石炭火力	石油火力	水 力
発 電 原 価	5.9	6.4	6.5	10.2	13.6

出典：原子力産業会議、通産省編『原子力年間2000～2001年版』、1999年。

原子力の発電原価は、1kwhあたりの総費用5.9円のうち、資本費が2.3円、運転維持費が1.9円、燃料費が1.7円であり、燃料費が全体の28%を占めている。また、燃料費の内訳は、フ

ロントエンド（ウラン鉱石調達から燃料成型加工まで）が0.74円、再処理が0.63円、バックエンド（使用済み燃料中間貯蔵と廃棄物処理・処分）が0.29円であり、再処理費が燃料費の38%を占めている。

1973年と1978年の2度にわたる石油危機を経て化石燃料の価格が急騰し、火力発電のコストは原子力に比べてきわめて高くなった。その後、1980年代半ばに需給緩和に伴う石油価格の低下と急激な円高によって化石燃料の国内価格が下落し、火力と原子力は同程度のコストになったが、最近では設備利用率の改善などで原子力の発電単価は徐々に低下し、火力よりもおおむね低い水準で推移している。

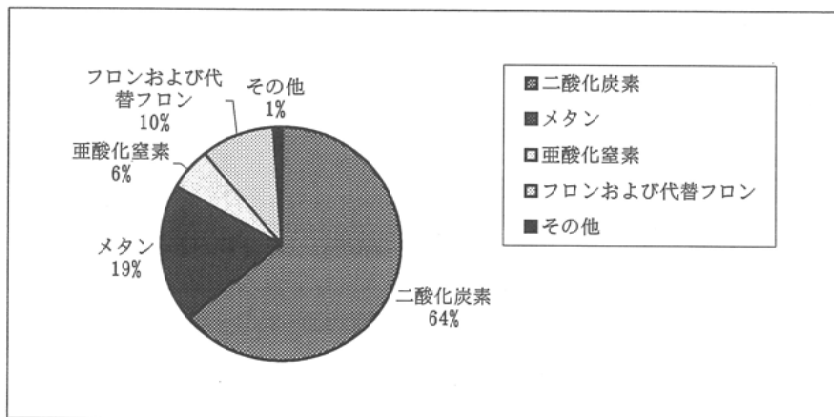
資源エネルギー庁は、原子力およびほかの電源の発電原価に関する今回の試算結果から、原子力発電の経済性は平成6年に試算した際の結論と同様に、引き続き、他の電源との比較において遜色がないと考えられるとの結論を示した。

5. 原子力発電の環境面から見た優位性

原子力発電は、放射性廃棄物の問題はあるものの、環境にやさしい発電であることは否めない。水力発電は、ダムを作って電気を作るため、狭い国内ではこれ以上作れないし、ダムの建設は、森林伐採や、生態系の破壊などの環境破壊につながる。2001年2月、長野県の田中知事は「脱ダム」宣言を行い、ダムに頼らない方針を掲げた。この宣言には、巨額に出費を削減するということのほかに森林伐採と、それによる生態系の破壊を防ぐと言う考えも盛り込まれている。また、高知県では橋本知事が、日本最後の清流と形容され、ダムのない川と言われた四万十川の本流を70年間に渡って分断してきた家地川ダムを持つ、四国電力の水利権を更新することに同意した。そのため、多くの流域住民のダム撤去要求にもかかわらずダムは存続し、四万十川本流は元の姿を取り戻せなくなった。ダム完成以来の四万十川の水量は激減したままで、河川生態系の変化によって川の浄化能力が薄れ、水質の悪化や魚類などの減少が続いている。

また、火力発電は天然ガスや石油を燃やして電気を作るが、石油が入ってこなくなると機能しなくなり、何より、火力発電によって排出される二酸化炭素が地球温暖化の原因となると言う問題がある。

図2 温暖化への温室効果ガスの寄与率



出典：2001年資源エネルギー庁ホームページの資料により作成。

地球温暖化は、世界各地で自然生態系を変化させるだけでなく、農産物の生産に影響を与え、海面水位の上昇を招くなど、自然環境や社会環境に大きな影響を与える。二酸化炭素、メタン、フロンなどの温室効果ガスのうち、温室効果にもっとも大きな影響を与えているのは二酸化炭素で、石油、石炭などの化石燃料の燃焼が二酸化炭素増加の大きな要因となっている。二酸化炭素は、地球温暖化への寄与率が全体の64パーセントである(図2)。

大気中の二酸化炭素濃度は、イギリスに始まる産業革命(18世紀後半)以前には、280ppmであったと推定されるが、その後の化石燃料の使用量増加に伴い上昇を続け、現在では340ppmを超えている。

日本における温室効果ガスの排出量の約9割は二酸化炭素が占め、そのうちエネルギー起源の二酸化炭素排出量が9割以上を占めている。エネルギー起源の二酸化炭素排出量は、需要面における産業部門のエネルギー消費量の減少や、供給面における原子力発電所の設備利用率の上昇などに伴う電力供給量の増加などの要因により、最近では2年連続で減少したのである。

また、IPOC(気候変動に関する政府間パネル)の地球温暖化レポートによれば、2100年には約2度の平均気温の上昇、約50センチメートルの海面水位の上昇、極端な高温などの気象変動の極端化が予想されている。

また、経団連は2001年5月22日、エネルギーの安定供給を基調にして、経済合理性と環境問題の調和をテーマとした「エネルギー政策の重点課題に関する見解」と題した意見書をまとめた。環境問題への取り組みとして、原子力発電の役割を改めて強調し、エネルギーの安定供給の観点から、推進の立場を明確にした。

このように、環境面から見ても、二酸化炭素を排出しない原子力発電は、ほかの発電源より優位性を持つのである。

原子力発電の仕組みと優位性は、以上の通りである。簡単にまとめてみると、原子力の運転状況などの、原子力の基礎知識と、経済性と環境の保全と言う観点から、原子力発電は必要であることが明らかになっている。第2章では、原子力発電の安全性について考えていこう。

第2章 原子力発電の安全性

原子炉の内部には放射性物質がたくさん閉じ込められているので、これらが外に放出されることがあってはならない。原子力発電所では、どのような場合にも放射性物質の危険から周辺の人々の安全を確保することを大前提にしている。このために、「多重防護」による何重もの安全対策をとっている。

また、日本は世界有数の地震国であるため、原子力発電所では、たとえ大きな地震が起きても、周辺環境に放射性物質による影響を及ぼすことのないよう、設計の段階から実際の建設、運転にいたるまで十分な地震対策を施さなければならない。

原子力発電の安全性を考察するために、「多重防護」と「地震対策」という、二つのキーワードを掘り下げていくとともに、原子力発電所の設置・運転に関する国の規制についても触れていく。

1. 事故時の多重防護

多重防護と言う言葉はもともと軍事用語で、もし敵に第1線を突破されても、その後に第2、第3の防護線を強いて敵の侵入を食い止めることである。原発においても政府や電力会社は「万が一事故が発生しても何重もの壁で閉じ込めているから、放射能が外に漏れて周辺公衆に被害を与えることはない」といっている。つまり多重防護とは厚みを持った安全防護を行うことで、深層防護ともいい、その壁とは、

第1の壁……………事故発生防止

第2の壁……………事故の波及、拡大防止

第3の壁……………事故の影響の緩和、抑制

という三つであると言われている。これら、三つの壁の目的は、放射能の環境への放出防止にあり、これらによって確保される安全性を一般に炉工学的安全性と呼んでいる。

(1) 第1の壁、事故発生防止

原発から出る放射能の発生源はいうまでもなくウラン燃料である。その核分裂で生じる放射能を燃料棒から出さないことが、まず実施すべき事故の防止法である。その手段として燃料ペレットと燃料被覆管という二つが挙げられる⁽⁵⁾。

(2) 第2の壁、事故の波及・拡大防止

万が一第1の壁が破られ、燃料棒被覆管が破損して核分裂生成物が冷却材中に放出されると、これは環境汚染を生ずる可能性があるため、ただちに原子炉を止めて点検修理しなくてはならない。また、もっとも危険なのは燃料棒が健全でも、冷却材の配管が破損または破断して、冷却材が大量に漏れ（冷却材喪失）、炉がいわゆる「空焚き」になり炉心が溶ける事故である。このような事故の波及・拡大を防ぐためには、まず原子炉の停止が先決の問題となる。ところが原子炉の停止は、火力発電所のボイラーの停止よりはるかに厄介である。というのは核分裂連鎖反応が止まっても、炉心中に大量の核分裂生成物の崩壊熱は、原子炉停止直後ではそれまでの出力の2～3パーセントも発生し、それ以降は時間がたつにつれて減少する。停止直後の100万キロワットの原発では、2万～3万キロワット分の熱が出るので、このままだと炉心温度は次第に上昇し、炉心溶融という最悪の事態にもなりかねないのである。それを防ぐために原子炉停止後も、炉心を冷却して崩壊熱を除去しなければならないのである。これら「停める、冷やす」および「閉じ込める」のために、原子炉の緊急停止、崩壊熱除去装置と冷却材圧力バウンダリーのような手段、措置が必要となる。

(3) 第3の壁、事故の影響の緩和・抑制

第2の壁の冷却材圧力バウンダリーが破れると、前述の冷却材喪失事故の発生、その放射能による環境汚染という最悪の影響が生じかねない。それを防ぐために第3の壁として緊急炉心冷却装置（ECCS）と原子炉格納容器という装置が役立つのである⁽⁶⁾。

2. 原子力発電所の地震対策

(1) 世界1 厳しい設計基準

原子力発電所は、万が一地震にみまわれた場合でも、原子炉の安全性をそこうことなく、放射線による環境への影響がでないように耐震設計に細心の配慮がなされている。原子力発電所の耐震設計で考慮する地震の規模は、敷地周辺の古文書、お寺や旧家の資料などから、過去のすべての地震をくまなく調査し空中写真や海底調査などにより活断層や直下型地震まで考慮し

て決めている。

これをさらに詳しく見ると、日本の原子力発電所の耐震設計は、2段階で大きな地震を考慮する体制をとっている。

第1段の地震は、「最強地震」である。これは原子力発電所の敷地周辺の地質、断層、過去の地震履歴などを詳しく調べて、その敷地で将来起こることが想定されるいくつかの地震動の中で最強値を考え、これをS1地振動と呼んでいる。これは、たとえば関東大震災をも上回るもので、人間は立ってられない。そのような地震がきても、発電所の構造物や機器の振動状態は弾性範囲内にあって、地震が終われば元に戻るという安全上十分余裕のある耐震設計をしている。

第2段の地震は「限界地震」である。これは地震学的には起こることが否定できないような、限界的ないくつかの地震動の中で最強値を考え、これをS2地振動と呼んでいる。これはS1地振動をさらに上回る巨大な破壊的地振動である。このS2地振動がきて、万が一発電所内の構造物や機器のある部分が弾性範囲を超えて、永久変形を生ずることがあっても、その機能が維持でき、制御棒が完全に挿入されて、原子炉が安全に停止するように入念な耐震設計を行っている。

また、日本の原子力発電所だけあって外国のものにないものに、原子力トリップ地震計がある。これは、ある程度の振動を受けても事故にならないように、S1地振動より小さな地震レベルで、プラントが自動的に安全停止する装置である。

また原子力発電所は、地震による津波も想定し、津波に対して十分余裕のある高さに建設されている。敷地周辺で発生した過去の地震およびそれに伴う津波の大きさを十分調査することにより津波に対する安全性を確認している。また、実際の海底の地形、海岸の地形、護岸や防波堤を考慮したモデルを作成し、高性能コンピューターを使った解析などで発電所敷地周辺における津波の高さを計算し、津波の最大高さに満潮時の水面高さを加えた最大水位が発電所の敷地の高さより十分低くなることを確認している。

(2) 信頼性に対する実証

原子力発電所の地震に対する安全性・信頼性を広く一般の人に理解してもらうために、実物大またはそれに近い大きさの機器・設備を製作して国（資源エネルギー庁）は実証試験を行っている。このため6年もの歳月をかけて1982年に建設されたのが、香川県多度津にある（財）原子力発電技術機構の世界最大の高性能振動台設備「多度津工学実験所」である。この設備の試験体を載せるテーブルは、縦横それぞれ15メートルの広さがあり、最大1000トンの試験体を載せ、揺ることができる。

振動は水平と垂直の2方向へ、同時に、実際の地振動と同じように、地震波で揺ることができる。その揺る力は、水平方向が3000トン、垂直方向が3300トンという巨大なものである。この耐震信頼性実証試験は、重要度の高い機器・設備に対して次々に行われている。

また、1995年1月17日5時46分、兵庫県南部地震が発生し、阪神地方に5000人を超える犠牲者が出たことをはじめ、高速道路やビル・家屋に多大な被害をもたらした。しかしこの大地震においても関西電力(株)の美浜、大飯、高浜発電所や四国電力(株)の伊方発電所などは運転を停めることなく、安全に電気を送りつづけたのである。これはひとえに、原子力発電所の設計・建設時に最善の事前予防をした賜物であると思われる。さらに事後予防として、原子力安全委員会は、原子力施設の安全性の確認に万全を期すという観点から、1995年1月19日に

「平成7年兵庫県南部地震を踏まえた原子力施設耐震安全検討会」を設置し、この地震から得られた知見に照らし合わせて、原子力施設の耐震性確保に関する考え方（耐震設計に関する指針類）に問題はないか詳細に検討した結果、「原子力施設の耐震設計に関する現行の関連指針類は今回の地震を踏まえてもその妥当性が損なわれるものではない」との結論を得た。

3. 原子力発電所の設置・運転に関する国の規制

原子力発電所については、法令などにに基づき、地点選定の段階から設計、建設の段階、また運転を開始した後も、行政庁による厳しい審査、検査が行われる。さらに、原子力発電所の基本設計に関しては、行政庁の行った審査の内容を原子力委員会および原子力安全委員会がダブルチェックしている。

(1) 地点選定段階

原子力発電所の建設地点の選定にあたっては、環境影響評価および電気事業法に基づき、環境影響評価を行わなくてはならない。

環境影響評価の手続きは、環境影響評価の項目ならびに調査、予測および評価の手法などを記載した環境影響評価方法書（方法書）の作成および審査、環境影響評価の結果を記載した環境影響評価準備書（準備書）の作成および審査、さらに準備書に対する住民や関係都道府県知事の意見、経済環境大臣の勧告を踏まえ、検討を加えた環境影響評価書（評価書）の作成および審査の3段階で行われる。

経済産業省は、各段階で住民や関係都道府県知事の意見などを踏まえて環境審査を実施するとともに、必要に応じて勧告（評価書の場合は確定通知または変更命令）を行い、環境の保全に万全を図ることとしている。

なお、規制とは別に、経済産業省は、地元住民の理解と協力を得るために公開ヒアリング（第1次公開ヒアリング）を主催している。公開ヒアリングでは、原子力発電所の設置にかかわる諸問題について広く地元住民から意見を聞くとともに、電気事業者による説明が行われる。

また、第1次公開ヒアリングが終了すると、経済産業大臣は国の関係行政機関の長に協議し、かつ総合資源エネルギー調査会の意見を聞いて、電源開発基本政策を策定する。

(2) 建設準備段階

電源開発基本計画に組み入れられた原子力発電所については、その後、電気事業者から原子炉設置許可申請が経済産業大臣に対して行われる。経済産業省は、申請の内容について原子力発電所の構造などが災害防止上支障がないものであること、設置者が原子力発電所の設置および運転に必要な技術的能力を有していることなど、原子炉等規正法に掲げられた許可の基準への適合性について審査を行う。

審査にあたっては、通常運転時よりもより万が一の事故を想定した場合にも一般公衆の安全が確保されるように、所要の安全設計がなされているかどうかについて、専門家の意見も聞きつつ確認を行うことになっている。

さらに、その審査結果については、原子力安全委員会および原子力委員会に意見を求めるため、両委員会に諮問を行うこととなっており、両委員会はそれぞれダブルチェックを行い、経済産業大臣に答申を行うことになっている。

なお、原子力安全委員会は、原子力発電所の新增設にかかるダブルチェックの際には、その施設固有の安全性について地元住民の意見などを公開ヒアリング（第2次公開ヒアリング）によ

り聴取することとしている。

原子力委員会および原子力安全委員会の答申後、経済産業大臣は、内閣総理大臣の同意を得て原子炉の設置を許可する。

電気事業者は、原子炉設置許可を得たあと、原子力発電所の詳細設計について記載された工事計画認可の申請を経済産業大臣に行うのである。経済産業省は、電気事業法に基づき、国が定めた各種の技術基準などに照らしながら、その内容を審査し安全上問題がないことを確認した後許可を出すのである。

(3) 建設段階

原子力発電所の建設が始まったあとも、工事の施工が設計どおりに行われているかどうか、予定どおりの性能が発揮できるかどうかの検査が行われている。

検査は、国の定めた技術基準に基づいて、原子炉の基礎や建物、原子炉設備、放射性廃棄物処理設備、タービン、発電所の各設備および燃料体についての工事の工程ごとに厳重な検査が行われる。また、発電所のそれぞれの機械、機器の溶接部については、事業者がみずから自主検査を行い、それが確実にされているか確認するため、国が安全管理審査を行っている。

また、電気事業者は、運転開始に先立って、原子力発電所の組織、運転上の制限および条件、核燃料管理、放射性廃棄物管理、放射線管理、保守管理など、安全運転上重要な事項を記載した保安規定を作成し、経済産業大臣の認可を受けなければならないことになっている。さらに、原子力発電所の運転に関して保安の監督を行わせるために、国が定める免状（原子炉主任技術者免状）を有するもののうちから原子炉主任技術者を選任しなくてはならないことになっている。

(4) 運転段階

運転開始後においては、電気事業法に基づき運転期間約1年ごとに定期検査が行われている。定期検査は、次の定期検査までの間、原子力発電所が安全に運転を継続できることを確認するために経済産業省が実施する検査で、設備の機能別、検査内容別に約60項目（発電所の設備の差により、若干の差はある）にわたる検査が行われる。

また、1999年9月30日に起きた東海村のウラン加工工場における臨界事故の対策として、国は、2000年6月に原子力保安検査官制度を発足させた。原子力保安検査官は各原子力発電所に常駐して、原子力発電所の運転管理が国の認可した保安規定に違反していないかの検査を行う。

4. ヒューマンファクター

原子力発電所では、ヒューマンエラー（人間のミス）を防止するため、またミスを犯しても原子炉の安全性を損なうことのないよう設計面および運用管理面においていろいろな対策を講じており、日本の原子力発電所においてヒューマンエラーがあったとしても大事故が起こることは考えにくい。また、ヒューマンエラーによるトラブルを減らすための研究、開発を官民にて進めている。

原子力発電所は、設置の許可、工事計画の認可および工事着手後から、運転開始後まで厳重な法律の規制を受け、安全確保を図るように義務付けられていることは先に述べた。運転開始後もほぼ1年に1回定期的に検査することにより、その安全性が確かめられることになっている。

設計面の対策としては、運転員が原子力発電所の運転操作について定めた手順書を逸脱した

運転操作を行った場合でも、原子力発電所の安全性に大きな影響を与えるものに関しては、原子炉が自動停止するなどの機器が安全に動作するフェイルセーフシステムがある。また、規則に逸脱した行為があっても、それを受け付けないインターロックシステムを数多く採用している。

かりに操作ミスにより異常が発生した場合、警告によって異常を知らせるとともに、制御棒が自動的に原子炉に入れられ、原子炉が安全に停止するよう設計されている。

原子力発電所における制御版は、長年の火力発電所などでの運転経験を生かし、人間工学的設計を行い、運転員のミスや操作ミスの防止を図っている。

例えば、運転員の監視や操作がしやすい計器やスイッチの配列、警報の重要度に応じた色、音等の識別、制御版の寸法形状など、設計上の配慮を行っている。

また運転員が容易にプラントの状況を把握でき、的確に操作できるように、プラント情報の集約表示、異常時、事故時の主要情報の優先表示などコンピューター技術を積極的に取り入れている。

運用管理面の対策としては、法律に基づき、発電所ごとに原子炉主任技術者を選任し、保安上必要な措置について指導・助言することを義務付けている。運転責任者については国の資格認定制度により十分な資格を持った人を従事させている。運転員・補修員については訓練管理センターなどを活用してシミュレーターなどによって繰り返し教育・訓練を行い、常に技術の向上をはかっている。運転、保修の手順書、要領書については、ミスが起こりやすいところには注意事項を明記するなど、その整備に努めている。

運転員のミスを防止し、発電所を安全に運転するためには、優秀な運転員を確保し、資質の維持向上をはかることが重要である。そのため、運転員は、日常の運転監視業務や事故想定訓練時などを通じての教育訓練をはじめ、運転訓練センターなどの教育訓練施設によって、通常時の運転操作はもとより、緊急時の操作訓練も計画的に実施し、運転技術能力の維持向上に努め、ミスの防止を図っている。

このようにヒューマンエラーに対するいろいろな対策を講じており、大事故につながる可能性はないと考えられている。原子力発電の信頼性をよりいっそう向上させ、ヒューマンエラーによるトラブルを減らすために人間工学、心理学、教育学、医学などの広い分野からのアプローチによって、人間のミスを防止する研究を国においても任官においても実施している。

現在、これらの研究については、国側では、日本原子力研究所の人的因子研究室と、原子力発電技術機構のヒューマンファクターセンター、電気事業側では、電力中央研究所のヒューマンファクターセンターが、ヒューマンエラーの原因メカニズム等の研究を実施中である。

このように、日本の原子力発電は、多重防護により放射性物質を外に出さず、徹底した安全設計により地震や津波などの自然対策にも屈せず、国の厳しい審査を受けて、さらにヒューマンファクターの徹底を推進しているため、安全性は世界1といっても差し支えはない。わらわれが安心して原子力発電に頼れるのは、国がこのような徹底した規制を敷いてくれるおかげなのである。

次章では原子力発電について考察する時に欠かすことのできない、核燃料サイクルについて、考察していきたい。

第3章 核燃料サイクルの仕組み

最近の原子力発電の問題を議論する時に、必ず出てくる言葉として「核燃料サイクル」というものがある。果たして、「核燃料サイクル」とは、どういったものなのだろうか。第3章では、原子力発電とともに核燃料サイクルの重要性およびプロセス、さらに最終段階において、放射性廃棄物の処理について考察する。

1. 核燃料サイクルの概念

原子力発電所の燃料になるウランは、地下にあるウラン鉱石を掘り出して製造される。

まず、精錬という工程がある。これは、ウラン鉱石から不純物を取り除きイエローケーキ（ウラン精鉱）を作ることである。ウラン鉱石中には通常0.7%くらいしかウランが含まれていない⁽⁷⁾。このため、まず採掘されたウラン鉱石を細かく粉砕し、硫酸か炭酸アルカリ溶液につけてウランを溶かし出し、貴液と呼ばれるウラン溶液にする。このウラン溶液からイオン交換法、または溶媒抽出法によってウランの純度を高めた後、アンモニア、苛性ソーダまたは酸化マグネシウムを加えてウランを沈殿させ、それをろ過、乾燥して、イエローケーキと呼ばれる黄色のウラン化合物の粉末を生産する。この工程により、ウランの純度が高まるのである。

イエローケーキ（ウラン精鉱）から六フッ化ウランを製造する工程を転換という。フッ化ウランを作るのは、後のウラン濃縮の工程でガス状の化合物が必要なためである。

次に濃縮という工程がある。0.7%しか含まれていないウラン235の比率を3-4%までに高める作業である。これを燃料棒に加工する。ウランには2種類あり、燃えにくい、いわゆる核分裂しにくいウラン238と、核分裂しやすいウラン235がある。ウラン濃縮の工程で、日本は遠心分離法という方法を利用している。遠心分離法とは、高速で回転する円筒の中に気体状の六フッ化ウランを入れ、遠心力によってウラン235とそれよりわずかに重いウラン238を分離する方法である。

濃縮されたウラン（六フッ化ウラン）を原子力発電所で使えるように、まず粉末状の酸化物（二酸化ウラン）にする。この工程を再転換という。二酸化ウランは融点が2750度（金属ウランは1132度）で、高温になっても変形が少ないこと、また水や被覆材料と接触した時の科学的安定性が大きいこと、および中性子照射による変形が少ないことなどの特徴がある。これらの特徴があるため、二酸化ウランは原子力発電所の燃料として非常に適しており、世界の原子力発電所の燃料として使われている。

その後、この二酸化ウラン粉末を、ペレットと呼ばれる直径、高さが約1センチ程度の円筒状に焼き固め、これを被覆管（金属のさや）に入れ、両端を溶接して燃料棒にする⁽⁸⁾。

原子炉の中で核分裂を起こし、ウラン235の量はだんだん減っていく。しかし逆に、プルトニウムが生まれ出されてくる。燃料棒は原子炉の中で約4年間使われ、それを再処理して燃え残りのウランと、プルトニウムを回収する⁽⁹⁾。プルトニウムはウランより核分裂を起こしやすい物質なのでエネルギー効率もよく、ウランを燃やしてできた副産物からできるメリットもある。これをもとに、また燃料として加工するのである。

もちろん、使用済み燃料を再処理しないで捨ててしまうという選択もある。捨てるといっても、当然ゴミ捨て場に捨てるのではなく、使用済み燃料は強い放射線を持っているので、それなりの処分方法が必要になる。ただこの方法だと、まだ使えるウランやプルトニウムを捨てることになり、省エネの観点からもったいないだけでなく、再処理をするのに比べて放射性廃棄

物の量が格段に多くなるという問題もある。

日本が再処理をするのは、あくまで核燃料サイクルを確立するためである。すなわち、燃え残りのウランと、純国産燃料であるプルトニウムを取り出して再利用するわけで、これにより、核燃料の安定供給と資源の有効利用がはかれるのである。資源小国日本は、まさにプルトニウム再利用にエネルギー政策の未来をかけているのである。

このように、自然の恵みであるウランを原子炉で使い、そこからまた燃料を取り出して原子炉に入れる、という「環」をえがくところから、このシステムを「核燃料サイクル」というのである。ウランを再利用する方法は、現在ある原子力発電所（軽水炉）で使う方法（「プルサーマル」と呼ばれている）と、ウラン238からプルトニウム239への転換効率に優れた高速増殖炉（FBR）を使う二つの方法がある。

2. プルサーマルの仕組みおよび経済性

プルサーマルとは、現在の原子力発電所（軽水炉）で、ウラン燃料にプルトニウムを混ぜて利用することである。現在の原子力発電所で使われているウラン燃料はウラン235の割合を3～5%高めたものである。プルサーマルは、このウラン235の代わりに再処理によって分離・回収されたプルトニウムを使ってウランの資源の有効利用を図るものである。

このような燃料は、ウランの酸化物とプルトニウムの酸化物を混ぜて燃料を作ることから、混合酸化物燃料（MOX燃料）と呼ばれている⁽¹⁰⁾。

国内の軽水炉に装荷予定のMOX燃料に関しては、当面の間、海外で再処理委託契約に基づいて回収されたプルトニウムを、ベルギー、フランスなどでMOX燃料に加工組み立てものを使う予定である。将来的には、青森県六ヶ所村の再処理工場が2005年に操業を開始する予定であることを踏まえて、年間100トン弱程度の国内事業化をはかることとしている⁽¹¹⁾。

表2 MOX燃料とウラン燃料の経済性比較

(単位：1987年米ドル価額ベース、\$)

[/kg]	ウラン燃料	M O X 燃 料		
		3倍	4倍	5倍
ウラン鉱石の取得	509	65	65	65
転換	58	7	7	7
濃縮	552			
加工	275	825	1100	1375
合計	1394	897	1172	1447

註：MOX燃料の倍数は、ウラン燃料の加工費と比較したMOX燃料の加工費の割合。NEA (Nuclear Energy Agency) のレポートは、4倍を標準ケースとし、3倍と5倍で感度分析している。

出典：2001年度資源エネルギー庁ホームページの資料より

MOX燃料を使う場合、その加工費用がウラン燃料に比べて割高と思われる。但し、表2が示すように、OECD/NEA (OECD：経済協力開発機構・NEA：Nuclear Energy Agency - 原子力機関) の報告 (1994年) では、ウラン燃料加工費の3～5倍程度と評価されている。一

方、MOX燃料の利点は、通常、ウラン燃料取得費（ウラン採鉱、転換、濃縮から燃料集合体加工までの費用）の大半を占めるウラン採鉱から濃縮までの費用が基本的に発生しないことである。つまり、MOX燃料とウラン燃料の取得費は同程度とみられている。また、プルサーマルが本格化しているヨーロッパでは、今後のMOX燃料市場の拡大、量産加工技術の進歩等により、MOX燃料の経済性向上の余地は大きいとみられている。

3. 高速増殖炉の仕組みおよび経済性

高速増殖炉（FBR：Fast Breeder Reactor）は、発電しながら、消費した以上の燃料を生み出すこと（増殖）のできる原子炉であり、現在の軽水炉などに比べて、ウラン資源の利用効率を飛躍的に高めることができる。

エネルギー資源に乏しい日本では、高速増殖炉を非化石エネルギー源の一つの有効な選択肢として、研究開発を進めることとしているのである。

前に述べたように、天然に存在するウランの中にはウラン235はわずか0.7%しか含まれておらず、残りはウラン238である。しかしこのウラン238は、中性子を吸収することにより、核分裂しやすいプルトニウム239に変わるという性質を持っている。また、ウラン235やプルトニウム239に中性子があたって核分裂する時、当たる中性子のスピードが速いほど、新たに飛び出す中性子の数は多くなる。この二つをうまく利用することによって、消費されるよりも多くの燃料を生み出すことができる。

現在の原子力発電所（軽水炉）でも、ウラン238からプルトニウム239が作られているが、スピードの遅い中性子（熱中性子）を使っているため、消費される燃料（主にウラン235）と、新たに生み出される燃料（プルトニウム239）の割合（転換比という）は大きくない。

これに対し、高速増殖炉では、速いスピードの中性子（高速中性子）で核分裂を起こさせるので、核分裂によって発生する中性子の数を多くできる。また、冷却水には水に比べて中性子の吸収が少ないナトリウムを使うことにより、無駄になる中性子に数を減らしている。その結果、ウラン238からプルトニウム239に変わる割合が大きくなり、消費する燃料（高速増殖炉の場合、主にプルトニウム239が最初から使われる）よりも多い燃料を生み出すことが可能になるのである。

高速増殖炉では、冷却材として中性子を減速・吸収しにくく、熱を伝えやすいナトリウムが用いられている。ナトリウムは、熱伝導性がよい、比重が小さい（0.97で水より軽い）、また沸点が高いことから、原子炉容器内をほぼ常圧（1気圧）とすることができるなど、冷却材として非常に優れた性質がある。しかし、ナトリウムと水は激しく反応するという性質がある。このため、蒸気発生器の水が、原子炉内を流れている放射能を帯びたナトリウム（一次ナトリウム冷却系）と直接反応しないように、二次ナトリウム冷却系を設けている。

このため、炉心で発生した熱は、中間熱交換器を介して、いったん、一次ナトリウム冷却系から二次ナトリウム冷却系に伝えられる。そして二次ナトリウム冷却系にある蒸気発生器で、熱を伝えられた水が蒸気になり、この蒸気がタービンを回して電気を起こすのである。

日本では、高速増殖炉について、

- 基本的なシステムの検証、技術的経験の蓄積などを目的とする小型の実験炉
- 発電プラントとしての性能の実証、データの取得などを目的とする中型の原型炉
- 大型の発電プラント技術の習熟、大型の実証炉

という三つのステップを踏んで、着実に開発を進めている。

最初のステップである実験炉「常陽」(熱出力10万キロワット)は、茨城県大洗町で、動力炉・核燃料開発事業団(現核燃料サイクル開発機構)により開発され、1977年4月に初臨界に達した。その後順調な運転を続け、高速増殖炉の開発に必要な技術データや運転経験を着実に積み重ねてきた。現在、高速増殖炉の燃料・材料の開発に必要なデータを取得できるようにするための高度化計画が進められている。

「常陽」に続く高速増殖原型炉「もんじゅ」(電気出力28万キロワット)は、同じく動力炉・核燃料開発事業団(現核燃料サイクル開発機構)により、福井県敦賀市で1985年9月に着工され、1991年5月に完成、1994年4月に初臨界を経て、1995年8月には初送電を行った。しかし、同じ年の12月8日、二次系のナトリウム漏えい事故が発生したために原子炉を停止した。この事故により、従業者・環境への放射性物質による影響はなかったものの、国内ではじめてナトリウム漏えいが発生したこと、さらに事故後の情報公開をめぐる不適切な対応から原子力に対する不安感・不信感が国民の間で高まった。

こうした状況をかんがみ、科学技術庁と原子力委員会において同事故の原因究明および再発防止対策に関する徹底的な調査、審議が行われた。科学技術庁による徹底した安全総点検も行われた。現在、核燃料サイクル開発機構によって、これまでの調査結果などから得られた教訓を踏まえて適切な対策を実施するなど、運転再開に向けた努力が進められている。

さらに、同事故を踏まえて、原子力委員会に高速増殖炉懇談会が設置され、今後の高速増殖炉開発のあり方について幅広い検討が行われた。その結果、高速増殖炉は非化石エネルギー源の一つの有効な選択肢として、安全確保・地元の理解などを前提に研究開発を進めることは妥当であると判断された。

高速増殖炉の実用化にとって、安全性と信頼性を保ちつつ経済性の向上をはかることが重要である。このため、実用化時点において軽水炉並みの経済性を達成することを最終目標として開発が進められている。

高速増殖炉は、軽水炉に比べて、長時間使用できる燃料が可能であることなど軽水炉に勝る経済性を達成できる可能性を有している。しかし一方で、ナトリウムを冷却材に使用するため、二次ナトリウム系など軽水炉にない設備があること、ステンレス形の高価な材料の使用が多いことなど軽水炉に比べて高くなる要因もある。長所を最大限に生かし、短所を克服することで経済性を向上させる見通しである。

今後、プラントの大容量化、電磁ポンプによる熱交換器とポンプの一体化によって軽水炉並みの経済性が達成される見通しである。さらに、免震による機器の軽量化と設計の標準化、二次ナトリウム系の削除等により、更なる経済性の向上が期待されており、その現実に向けての研究が進められている。

4. 低レベル放射性廃棄物の処理

核燃料サイクルは、資源を最大限に使う、あるいは資源をリサイクルする、といった視点から計画されている。しかし、どうしてもリサイクルできないものがでてくる。それが、放射性廃棄物である。

原子力発電所からは、その運転・解体に伴ってさまざまな低レベル放射性廃棄物が発生する。これらは、含まれている放射性物質の濃度に応じて、現行の政令濃度上限値を超えるもの(高

β γ 放射性廃棄物)、現行の政令濃度上限値以下のもの(低レベル放射性廃棄物)、放射性物質の濃度が極めて低いもの(極低レベル放射性廃棄物)の三つに区分され、それぞれ適切な方法で処分する。

(1) 高 β γ 放射性廃棄物⁽¹²⁾

この廃棄物の処分については、原子力委員会バックエンド対策(廃棄物処理・原子力発電所解体事業の総称)専門部会が1998年10月に取りまとめた報告書「現行の政令濃度上限値を超える低レベル放射性廃棄物処分の基本的な考え方について」に基づき、一般の地下利用に対して十分余裕を持った深い地下(地下50~100メートル程度)へ処分することとし、現在、関係法令の整備へ向けた検討が行われている。

運転に伴って発生したものについては、現在、それぞれの原子力発電所において適切に保管されている。

(2) 低レベル放射性廃棄物⁽¹³⁾

これらの処分については、すでに関係法令の整備も終わっており、運転中に発生したものの一部については、原子力発電所から青森県六ヶ所村にある日本原燃(株)の低レベル放射性廃棄物埋蔵センターに送られ、埋設処分が行われている。

埋設に際しては、ドラム缶を鉄筋コンクリート製ピットに収納し、セメント形の充てん材を入れることにより一体的に固めるとともに、ピットの周囲に水を通しにくいベントナイトを混ぜた土で覆うなど、ピット内へ地下水が浸入しないようにしている。

また、埋設後30年間は、地下水への放射性物質の漏れの有無を監視するのに加えて、約300年間(放射性物質の濃度が自然のレベルに戻るまでの期間)にわたって、掘削を制限するなどの管理を行うこととしている。

(3) 極低レベル放射性廃棄物

重荷、原子炉から離れたところにあるものを解体した時に生ずる金属やコンクリートなどで、放射性物質の濃度が極めて低いことから、コンクリートピットなどの人口バリアを設ける必要はなく、トレンチ(素掘りのみぞ)に廃棄物を定置して処理する。

現在、コンクリートの廃棄物に関しては関係法令上の整備が終わっているが、金属などに関しては、一部未整理などもあり、原子力安全委員会で処分の基準値などの検討が行われている。

5. 高レベル放射性廃棄物の処理

(1) 高レベル放射性廃棄物とは

高レベル放射性廃棄物とは、再処理施設で使用済み燃料からウランやプルトニウムを分離・回収した後に残る、放射性物質の濃度が高い廃棄物のことである。

高レベル放射性廃棄物は、低レベル放射性廃棄物に比べてその発生量自体は少ないのだが、放射線の管理にわたりいっそうの注意が必要な半減期の長い核種も比較的多く含まれている。このため、長期間に渡り、私たちが住む環境から隔離する必要がある。

このため、高レベル放射性廃棄物は、ガラスと混ぜて溶かし、「キャニスター」と呼ばれるステンレス製の容器に注入したあと、冷やして固める(これを「ガラス固化体」という)。このガラス固化体は熱を出すので、冷却のため30~50年間一時貯蔵し、最終的に地下300メートル以上の深い安定した地層中に処分する。

(2) なぜ地層処分するのか

高レベル放射性廃棄物の処分方法については、長年各国および国際機関でさまざまな可能性が検討されてきた。人間の生活環境から隔離するために、宇宙空間への処分、南極大陸などの氷床への処分、海洋底または海洋底堆積物への処分、新地層への処分などが考えられてきた。

しかしながら、宇宙空間への処分は、事故がおきた場合へのリスクが大きなものとなり、それを防ぐのが困難だ。また、南極の氷床への処分、海洋底への処分は、それぞれ国際条約（南極条約、ロンドン条約）によって禁止されている。

また、地表において廃棄物を長期間管理するという考え方もあるが、これについては、将来世代に管理責任を任せなければならず、また、戦争や革命などの人間による災害にも脆弱であるという問題が考えられている。

一方で、地下1000メートル程度までの振地層には、石油や石炭、鉄などの有用金属の鉱床が何百万年、何千万年という長期間にわたって安定した状態で保存されてきた。酸素濃度はほぼゼロであり、地下水の動きもきわめて遅い（1年間で数センチメートル程度）ので、鉱床中の金属がさびることもない。つまり、地下は物を閉じ込めるのに適した場所といえるのである。このようなことから、もっとも好ましい方策としては、新地層処分が適していると思われる。

(3) ガラス固化の必要性とは

ガラスは水に非常に溶けにくく、長期間にわたり変質しにくいという性質がある。また、主成分であるケイ素とホウ素が酸素を介して網目構造を形成するので、多種類の放射性物質が網目のなかに入り、均質で安定な種類の物質になる。高レベルの放射性廃液をガラスにより安定な形態に固化すると、放射性廃棄物中の元素はガラスと混ざるのでなく、色ガラスと同じように、ガラスと一体化したものになる。

このようなガラスの優れた性質を生かして、高レベル放射性廃棄物を含む廃液を、ガラスと一緒に溶かし混ぜ合わせて、腐食に強いステンレス製の容器（キャニスター）に入れて固めて、ガラス固化体にする。

(4) 高レベル放射性廃棄物の一時貯蔵

ガラス固化体は、その中に含まれる放射性物質が出す放射線の影響で発熱する。このため、地層処分を行う前に30年から50年程度、冷却のための専用の施設で一時貯蔵する。30年から50年間冷却（空冷）することにより、発熱量は約3分の1から5分の1に減少し、安全な処分ができるようになる。

日本では、すでに青森県六ヶ所村にある日本原燃（株）の高レベル放射性廃棄物貯蔵管理センターにおいて、貯蔵されている。

(5) 高レベル放射性廃棄物の深地層処分

ガラス固化された高レベル放射性廃棄物は、最終的には地下300メートル以上の深地層に処分し、人間生活から隔離する。

深地層は、地下水の動きが遅く、その量も少ないことも分かっている。しかし、高レベル放射性廃棄物の処分に当たっては、ガラス固化体、オーバーパック、緩衝材といった人工のバリア（障壁）と安定した岩盤という天然のバリアを組み合わせた何重ものバリア（「多重バリアシステム」）を設けることによって、万が一にも地下水を介して人間の生活環境に影響を及ぼすことのないようにしている。ガラス固化体は、放射性物質を安定なガラスと混ぜて一体化したもので、ガラスは放射性物質が地下水に溶かし出されるのを防ぐ。

また、オーバーパック、緩衝材および安定した岩盤を構成する岩石なども、放射性物質を吸着することができることによって、万が一、放射性物質が漏れたとしても、その移動を遅くする効果がある。

おわりに

以上、原子力の可能性とリスクについて考察してきた。第1章では、原子力発電の基本について整理し、そこから、なぜ原子力発電がわれわれに必要なのかを議論してきた。人類は、産業革命以降、石油や石炭などの化石燃料の恩恵を多大に受けてきた。しかし、使いっぱなしではいずれ化石燃料は枯渇し、未来世代の人類は、化石燃料の恩恵をまったく受けられなくなってしまう。そこで、化石燃料に頼らないエネルギー源、原子力発電の必要性が大きくなっていくということなのである。

また、原子力発電の必要性を考察する時に、経済性および環境面から見ると他の電源に対する優位性を明らかにした。原子力発電の発電コストは、他の電源に比べて、価格の変動が少なく、資源エネルギー庁が行った最新の発電原価の試算でも、原子力発電は1kwhあたり5.9円と、一番安価であるという結果が出た。また、環境面では、森林伐採をせず、二酸化炭素を空气中に排出しない原子力発電は、もちろん他の電源に比べて優位性があるといえる。

第2章では、原子力発電の安全性について考察した。原子力発電は、発電の際に放射性物質を取り扱うので、万が一事故が起こったら、大変な惨事になる。そこで、原子力発電所では、事故時の多重防護として、もし事故が起こったとしても、何重もの壁を用いて放射性物質が外界に出ないようにしている。

さらに、日本は地震が多い国なので、原子力発電所では、世界1厳しい設計基準を定めて、原子力発電所の設置・運転そのものに対して、国が厳しい規制を行っている。つまり、原子力発電のリスクについては、国の規制と多重防護や耐震設計との事前予防により、完璧に回避できるようにされている。

第3章では、核燃料サイクルの必要性と、放射性廃棄物の処理について考察した。核燃料サイクルは、プルサーマルと、高速増殖炉の実現による、原子力発電の燃料であるウランの再利用のことである。これが実現すれば、最小の犠牲で最大のエネルギーを得ることができる。また、核燃料サイクルで再利用できない放射性廃棄物は、最善の注意を払って貯蔵・処理することになっている。

これまで述べてきた原子力発電の可能性とリスクについての考察を受けて、私は、原子力発電はやはり必要であると考えます。

原子力発電は、第1章で述べたように他の電源に対して経済的にも遜色がなく、環境面ではとてもクリーンである。さらに、第2章で述べたように、安全面でも最善の注意を払い、国の規制もしっかり行き届いている。また、第3章で触れたように、プルサーマルや高速増殖炉の開発によって、近い未来には、原子力発電所は、今よりもさらに廃棄物を出さないクリーンな発電源になる可能性を残している。

また、第1章であげた火力、水力などの電源の他にも、太陽発電や風力発電などがあるが、どれも原子力発電を脅かすには、説得力に欠けるものがある。

立地条件や自然に大きく左右される太陽光発電、風力発電による電力供給は不安定であり、エネルギー密度が小さく、かつ単位発電量あたりの設備費が高いため、現在のところ風況のよ

い地点で、風力発電や住宅などにおける自家需要をまかなう太陽光発電が使われ始めた段階である。

国内では石油はほとんど出ない。天然ガスも石炭も、国内では底をつき始めた。それにもかかわらず、太陽光発電や風力発電はまだ本格的な実用化には至っていない。

これらのことからみて、我が国は、現在さらに将来にわたって、原子力発電に頼らざるを得ない。危険性の問題があるといっても、多重防護と国による規制のおかげで、日本の原子力発電所のトラブル件数、停止件数は他国と比較してもかなり低い数値に落ち着いている。さらに、発電原価が他の発電方法に比べて安く、地球温暖化の元凶である二酸化炭素の排出量はもちろん少ない。再処理で燃料がリサイクルできるという利点もある。もちろん、原子力発電よりも安価で発電でき、危険性もなく、環境にも影響がでず、さらに燃料が安定供給できるような、そんな夢のような発電方法があれば、原子力発電には頼らなくてもよいだろう。しかし、現状では、最も経済性に優れていて、なおかつ環境に影響がでない発電方法は、やはり原子力発電しかないのである。

以上のことから私は、次世代の人々に化石燃料を残すことができ、経済的かつクリーンで、さらにまだまだ向上の可能性を秘めた原子力発電を、必要であると考えている。

註

- (1) 資源エネルギー庁作成のホームページより。
- (2) 資源エネルギー庁作成のホームページより。
- (3) 資源エネルギー庁作成のホームページによると、主要国の原子力発電所の平均停止回数は、アメリカが3.5回、フランスが3.8回、ロシアとカナダが2.6回、ドイツが1.9回であるのに対し、日本は1回であり、格段に低い。
- (4) 長沢光男・井田企画『手にとるようにエネルギー問題が分かる本』（かんき出版）によると、1990年に日本の石油地域別輸入比率のうち、70%が中東からの輸入であるとされる。
- (5) 燃料ペレットの内容は以下のようになっている。二酸化ウラン粉末に結合剤を加えて、高圧で加圧成型し高温焼結した直径約1センチ、長さ約1.5センチの小円柱の核燃料要素で、1本の燃料棒には約200個のペレットが入っている。ペレットは核分裂生成物の保持能力が優れていて、たとえ燃料被覆管に損傷が生じて、大部分の核分裂生成物はペレット内に保持される。
また、燃料被覆管の主な目的は二つある。第1は内部の放射性物質を確実に閉じ込める壁となること、第2は内部で発生する熱をできるだけ効率よく外の冷却水に伝えることである。
- (6) 放射能の流出などの事態の発生を防ぐために、炉心に冷却水を大量に流し込んで空焚きを防ぐなど、注水して炉心を冷却するための装置である。
- (7) 長沢光男・井田企画、前掲書、F98による。
- (8) この燃料棒数十本から二百数十本を直方体に束ねて燃料集合体が作られる。この工程を生成加工という。
- (9) 再処理とは、使用済みの燃料原子炉から取り出して化学処理し、燃え残りのウランと新たにできたプルトニウムを取り出し、かつ放射性廃棄物を分離して処分することである。再処理の工程は、貯蔵プールで使用済み核燃料を冷却しておくところから始まる。次に、これをせん断して細かくし、硝酸を満たした溶解層に入れ、中身の燃料（ペレット）を溶かす。そして、まず有機溶媒を使って、この中から核生成物などを科学的に分離させる。さらに、ウランとプルトニウムを分離させ、回収する。
- (10) MOX燃料：Mixed Oxide Fuel MOX燃料の大きさや形は、現在原子力発電所で使われているウラン燃料とまったく同じであり、ウラン燃料の一部をそのままMOX燃料に入れ替えるだけで使用可能である。生成工程も、最初に粉末状の二酸化ウランと二酸化プルトニウムを混合する工程が加わるだけで、あとは同じである。
- (11) 原子力安全委員会では、MOX燃料の安全性について検討した報告書を1995年6月にまとめており、原子炉中でのMOX燃料の振る舞いはウラン燃料と大きな差はなく、MOX燃料の装荷割合が炉心全体の3分の1までの範囲においては、現在と同じ安全設計、評価手法が可能であると結論している。また、同委員会では、1995年8月に、全炉心MOX燃料装荷を目指すABWR（改良型BWR）についても、その基本仕様の変更を伴うことなく実施可能との技術的見通しを明らかにしている。
- (12) 高 $\beta\gamma$ 放射性廃棄物とは、使用済みの制御棒や使用済みの樹脂などのほか、掻いた意地が発生する炉内構造物の一部で、核分裂反応に直接・間接に接触し、放射性物質の濃度が政令で定める上限値を超えるものをいう。
- (13) 使用済みの作業着、ペーパータオルなどを焼却処分して、先浄水を蒸気濃縮したあと残滓（ざんじ）をセメントなどで容器（ドラム缶）に固化した物である。また、一次系配管など、原子炉周りの配管、機器などを解体したものもこの区分に入る。

参考文献

- 長沢光男・井田企画 『手にとるようにエネルギー問題が分かる本』 かんき出版、1994年。
- 赤塚夏樹 『日本の原発は安全か』 大月出版、1992年。
- 長沢光男 『エネルギーの仕組みと不思議』 日本文芸社、1998年。
- 藤田祐幸 『脱原発のエネルギー計画』 高文社、1996年。
- 資源エネルギー庁 『エネルギー2000』 電力新報社、1999年。
- 広瀬隆・藤田祐幸 『原子力発電で本当に私たちが知りたい基礎知識』 東京書籍株式会社、2000年。
- 三菱重工工業株式会社・原子力事業本部原子力P A推進センター 『素顔の原子力発電 モノづくりの視点から』 株式会社風日社、1995年。

(卒業論文指導教員 房 文慧)