

原子力発電の発展

井出野 栄 吉

1. 結 論

良質低廉なエネルギーを大量かつ安定的に供給することは、経済の持続的成長と豊かな国民生活を維持する上で重要な条件の一つと言えるものである。

世界の工業先進国は、二度にわたる石油危機の経験を踏まえ省エネルギーに努めるとともに、石油に対する依存度を低減するため、原子力発電をはじめとする石油代替エネルギーの開発に積極的に取り組んできた。とくに原子力発電については、その経済性、供給の安定性などの観点から多くの先進国がその開発を推進し、第一次石油危機当時においては世界全体のエネルギー供給の1%に満たなかったものが、1989年6月現在、26ヶ国で423基が運転中でありその発電設備容量は3億3293万kWまでに達している。また、原子力発電による1988年の発電電力量は総発電電力量の17%を占めるに至った。これは、世界全体の石油消費量の10%以上に当たる約4億3880万t相当の石油を節約していることになる。さらに、建設中のもの111基、計画中のもの88基となっており、世界的にみて原子力発電は着実に増加していることがわかり電力供給の重要な位置を確立し

ていると言えるのである。

一方、将来のエネルギー情勢を眺めると、今後、発展途上地域の人口増加と生活水準の向上により、世界のエネルギー需要は大幅に増加することが予想される。このことは、上記のようなエネルギー需要増に対して石油、石炭などの化石燃料の消費を大幅に増加させることで対応するとすれば、化石燃料の枯渇時期を早めることになるのみならず、酸性雨や二酸化炭素の濃度上昇による温室効果など地球規模での環境問題を惹きおこす恐れがある。

太陽光、風力、波力、地熱などの再生可能エネルギーは、自然条件や現在の研究開発状況から考えて近い将来において化石燃料の代替になるほどの大量供給性および経済性が達成されるとは考えられず、また景観の保護など自然環境保護の観点から立地制限を受ける可能性も考えられる。このように、上記の再生可能エネルギーは多くの問題点を抱えており、その実用化までには長い年月がかかるものと思われ、近い将来の基軸エネルギーとしては期待できない状況である。

エネルギーの利用は、その結果として社会の発展成長をもたらす反面、資源の枯渇とか廃棄物などによる環境への悪影響も発生させる。このため、国際原子力機関 (IAEA)、経済協力開発機構/国際エネルギー機関 (OECD/IEA) などにおいても地球環境問題に関する検討を行っており、1989年5月の IEA 閣僚理事会において採択されたコミュニケは、省エネルギーの推進、エネルギー利用効率の向上、新エネルギーの開発などの重要性をうたうとともに、原子力発電はその建設・運転および廃棄物処理における安全性の維持と向上を条件として温室効果などの地球規模の環境問題解決のための重要な選択肢の一つであるとしている。

さらに、1989年7月にパリで開催されたサミットの経済宣言においても環境問題が大きく取りあげられ、これに関連して、「原子力発電におい

原子力発電の発展

て最も高い安全基準を維持することおよび発電所の安全な操業と放射性廃棄物の管理に関する国際協力を強化することにより、原子力発電は温室効果ガス排出を制限する上で重要な役割を果たすことを認識する²⁾旨うたわれている。

このように、原子力発電は安全性の確保、放射性廃棄物対策の確立を前提に、世界的に重要な役割を果たす電力供給源であることが認められているのである。

本論文では、原子力発電の安全性向上への対応状況と放射性廃棄物処分対策の現状およびそれらの問題点を述べることとする。

2. スリーマイル島事故とチェルノブイリ事故

スリーマイル島事故は1979年3月28日、2号機が定格の約97%の出力で運転中に発生した。2次系の主給水ポンプの停止に始まったこの事象は、ほとんど同時にタービンの停止、1次系の温度・圧力の上昇、加圧器逃し弁の開放、原子炉のスクラムを引き起こした。これにより、1次系の圧力は急速に低下したが、加圧器逃し弁が故障して開いたまゝになったため1次冷却材の流出が続き、小破断冷却材喪失事故の状態となった。このため、非常用炉心冷却装置高圧注水系が2分後に自動起動した。しかし、1次冷却材が局所的に沸騰を起こし、発生した蒸気泡が冷却材を押し上げて1次冷却材の量が増加しているかのような現象を示したため、運転員は高圧注入系ポンプ1台を停止し、1台の流量を最低限に絞った。このため、1次冷却材はますます減少し、蒸気泡が増加することとなった。これにより、冷却材ポンプの振動が激しくなり、運転員はポンプの破損を恐れてこれを停止した。ポンプが停止されると冷却材の流れが止まり、蒸気と水が分離し炉心の上部が露出し始めた。約 $\frac{2}{3}$ が露出したと推定される。露出した

燃料は温度が急上昇し、重大な損傷が生じて大量の放射性物質が1次系内に放出された。

事故の発端は給水喪失事故であったが、この事象は設計で対応策が講じられていたものであり、事故が拡大した原因は加圧器逃し弁が開放していることに運転員が長時間気付かずにいたこと、非常用炉心冷却装置を運転員が停止したり、流量を絞ったりしたことなど、ヒューマンファクターが決定的要因であった。

スリーマイル島原子力発電所の炉心については、事故直後からかなりの損傷が推測されていたが、1988年10月に開催された米国原子力学会および欧州原子力学会の共催による会合の報告によると、これまで実施された炉心検査の結果、炉心構成物質の約47% (62t) が溶融し、このうち約20t が下部プレナムに移動したことが明らかになっている。

作業従事者の被曝状況は事故直後から9月までで全身被曝線量が30ミリシーベルト (3レム) を越えた者は7名で、年間の線量限度50ミリシーベルト (5レム) を越えた者はいない。

また、環境に放出された放射性物質の大部分は気体状の放射性物質であり、放射性希ガス約93ベタベクレル (約250万キュリー)、放射性ヨウ素約560ギガベクレル (約15キュリー) であると推定されている。すなわち、炉心から放出された放射性物質の大部分は開いたまゝの加圧器逃し弁から1次冷却材とともに原子炉建屋地階に放出され、また、一部の放射性物質は1次冷却材とともに補助建屋内の各種タンクに移行し、そのうち揮発性の高い希ガスとヨウ素はガス減衰タンクへ移送される途中のコンプレッサーから洩れ、補助建屋内に放出され、それらは補助建屋の換気系によって排気塔から環境に放出されたとみられ、いずれの経路においても放射性物質は1次冷却材あるいは各種タンクで水と接触してそれに捕集されたため、環境へ放出されたものはごく一部の揮発性放射性物質であった。こ

原子力発電の発展

れによる周辺公衆への影響は、半径 80 km 以内の住民約 216 万人の集団線量については約 20 人・シーベルト（約 2,000 人・レム）、個人平均で約 0.01 ミリシーベルト（約 1 ミリレム）であると推定される。

事故後、大統領府では「スリーマイル島事故に関する大統領委員会」を設置して事故原因の徹底調査を行い、1979 年 10 月にカーター大統領に対して報告書を提出した。本報告書では、事故の主要原因は運転員の不適切な操作にあるとしながらも、設備の欠陥、管理体制の不備など多くの要因も重なったものと指摘し、今後このような事故の再発を防止するためには米国原子力規制委員会 (NRC) および産業界において種々の改革が必要であるとした。これを受けて、NRC は組織を再編成しその管理責任体制の強化を図るとともに、原子力発電所の認可と検査機能の重点を運転におくことを図った。また、産業界においても原子力発電所の安全性の向上を図るため、原子力安全解析センター (NSAC)、原子力発電運転研究協会 (INPO) および原子力発電相互保険会社 (NEIL) を設立した。このうち、INPO は運転員の訓練、運転技術の改善など運転問題全般に互り中心的な役割を担うものである。

チェルノブイリ事故は 1986 年 4 月 26 日、4 号機が外部からの電力供給停止時にタービン発電機の慣性エネルギーを所内電力としてどの程度利用できるかを確認するための実験を行っていた時に発生した。

この実験では十分な安全対策が考慮されていなかった上、原子炉の低出力時の不安定性に加えて、運転員が安全規則の違反となる操作を行い、原子炉の緊急停止能力が失われてしまった。また、蒸気泡が発生し、出力が急上昇しやすい状態で実験が行われたため、原子炉出力が短時間のうちに異常に上昇し、燃料の過熱、激しい蒸気の発生、圧力管の破壊、原子炉と建屋の構造物の一部破壊などに進んだものである。この結果、燃料内に閉じ込められていた放射性物質が外部環境に放出され、更に国境を越えて欧

州諸国に拡散した。

全ての圧力管および原子炉上部の構造物が破壊されるとともに、燃料および黒鉛ブロックの一部が飛散した。炉心の高温物質は吹き上げられて原子炉施設、機械室（タービン室）などの屋根に落ち、30ヶ所以上から火災が発生した。

その後、4月27日から5月10日（大部分は4月28日から5月2日の5日間）にかけ、ヘリコプターによって原子炉にホウ素（40t、再臨界防止）、ドロマイト（800t、燃焼防止）、鉛（2400t、遮蔽および放出抑制）、粘土および砂（1800t、フィルター効果）の総計約5000tが投下され、その結果、5月6日までに放射性物質の放出はほとんどなくなった。

さらに、11月までに「サルコファク（石棺）と呼ばれる構造物が建造され、放射性物質の放出防止の確実化が図られるとともに、各種の測定装置が備え付けられ監視が行われた。

この事故により、発電所の作業員および消防士のうち、一人が火傷により死亡、一人が行方不明となった。また、148名の急性放射線障害患者が発生し、そのうち28名が死亡している。1986年8月21日のソ連の発表によれば、死亡者は31名で、いずれも発電所および事故処理関係者である。

環境に放出された放射性物質のうち、希ガス核種は炉内存在量のほぼ100%に相当する約1.9エクサベクレル（5000万キュリー、5月6日時点で減衰補正した値）が、希ガス以外の核種は放射線測定および空気試料の分析から評価して1.1~1.9エクサベクレル（3000万~5000万キュリー、5月6日時点で減衰補正した値）が4月26日~5月6日の10日間に放出されたと推定されている。特に、 ^{131}I は20%、Te、Csは10~15%、その他の主要な核種および超ウラン核種は約2~6%放出された。また、全体としては希ガスを除いて炉内存在量約 4×10^{19} ベクトル（ 10^9 キュリー）の約3~4%の放射性物質が放出されたとしている。

原子力発電の発展

1989年3月20日付プラウダ掲載論文によれば、事故直後 0.2 mR/h 以上の汚染面積は 20 万 km² におよんだとされている。また、事故1年目までに 11 万 6000 人 (186 居住区) が移住させられ、1988 年の調査でも、¹³⁷Cs による 15 キュリー /km² 以上の汚染状態の地域が約 1 万 km² もあり、23 万人 (640 居住区) の住民がこの区域内にいと報告されている。さらに、主要な都市の放射線レベルも報告されており、例えば、プリピャチ市 (5 km): 0.1~1.6 mR/h, チェルノブイリ市 (15 km): 0.04~0.17 mR/h, スラウーティチ市 (50 km): 0.015~0.03 mR/h であった。ただし、ソ連保健省が 1988 年 11 月に生涯線量限度を 0.35 シーベルト (35 レム) と決定したことに伴い、1989 年に白ロシア共和国で 20 村、ウクライナ共和国で 5 村が新たに移住するよう勧告される動きもあった。

住民の健康への影響については、1988 年秋までの集積個人線量は平均 0.053 シーベルト (5.3 レム) であり、放射線による疾病はいかなる形態においても検出されていないという。また、第 38 回 UNSCEAR に提出されたソ連試料によると、嚴重管理地域に 27 万人が住み、1989 年末までの平均集積個人線量は 0.06 シーベルト (6 レム) であり、そのうち 0.1 シーベルト (10 レム) 以上の人が約 12000 人含まれている。また、この地域で 4500 人の子供が生まれているが先天性奇形の頻度は特に増えていないとされている。

この事故は、設計における多重防護の適用の脆弱性を背景とし、多数の³⁾かつ重大な規則違反により起きたものであると考えられる。表 1 に事故経過の概要を示す。

表 1 事故経過の概要

時間	事故の経過	備考
4月25日 1:00' 13:05'	①全出力 3,200 MWt から出力低下開始 ②出力 1,600 MWt まで低下、第 7 タービン発電機解列、所内の必要電源を第 8 タービン負	試験条件の設定開始 主循環ポンプの電源 4 台: 第 8 タービン発

	荷発電機へ切り替え	電機 2台：外部電源 2台：待機
14:00'	③非常用炉心冷却系 (ECCS) の切り離し〔違反①〕	試験中の ECCS 動作防止のため
23:10'	④出力 1,600MWt より出力低下再開	出力 700~1,000MWt で運転するため
4月26日 0:28'	⑤局所出力自動制御系を平均出力自動制御系に切り替え, 出力 30MWt 以下に低下	自動制御系が動作しなかったため
1:00'	⑥出力を 200MWt に維持〔違反②〕	700MWt 以下の長時間運転は規則違反
1:03':07''	ゼノンの毒作用が進行し, 余剰反応度が低下. 200MWt 以上に上昇できず ⑦各グループ 4 台目の主循環ポンプを起動循環流量が規格値を超える. 〔違反③〕	主循環ポンプの稼働台数が 8 となる.
1:19'	⑧気水分離器水位低下, 圧力 5.1~6.1 kg/cm ² の低下 ⑨気水分離器水位および圧力による原子炉緊急停止信号をバイパス〔違反④〕 気水分離器への給水流量を増加	炉停止を避けるため 気水分離器の水位低下防止のため 炉心ポイド率減少
1:19':30''	⑩給水流量 3 倍になる. 自動制御棒が上限停止位置に到達 手動制御棒による調整開始	
1:19':58''	自動制御 1 グループが 1.8m にまで下降 ⑪タービンバイパス弁閉, 気水分離器圧力低下弱まる.	
1:22':10''	給水流量 4 倍になる. 気水分離器の水位上昇のための給水流量急減	水位を維持しようとした.
1:22':30''	⑫ボイド率増加, 正の反応度印加, 自動制御棒降下 ⑬反応度操作余裕が規定値を下回るがこれを無視〔違反⑤〕	
1:23':04''	200MWt で運転継続 タービン発電機停止に伴う原子炉緊急停止信号をバイパス〔違反⑥〕	原子炉を運転した状態で試験を繰り返すことを意図
1:23':31''	⑭第 8 タービン発電機主蒸気止め弁閉 主循環ポンプ 4 台コーストダウンにより循環流量減少, 圧力上昇 (0.06kg/cm ² sec)	試験開始 自動制御棒による出力制御
1:23':40''	⑮反応度増加, ゆるやかな出力上昇 ⑯緊急用制御棒挿入 (スクラム) 制御棒途中で停止, クラッチを切る	制御棒による出力制御困難 AZ-5 ボタンを押す
1:23':43''	⑰出力上昇	
1:23':44''	出力高及びベリオド減少によるアラーム ⑱出力が定格の約 100 倍	ソ連の解析による.

3. 原子力発電と環境への影響

エネルギー利用による環境汚染は最近再び世界的に注目されるようになってきた。

石炭、石油などの化石燃料はその燃焼の際にイオウ酸化物、窒素酸化物、二酸化炭素などの大気汚染物質を発生する。これらの放出量を削減するためには、排出源を確定し、これを規制することが必要である。火力発電所からの前二者の放出量削減に関しては各国において従来から公害防止機器が設置されると共に、必要な技術開発が行なわれてきた。しかし、排出源の増大に伴い、酸性雨による国境を越えた地球規模の環境汚染が欧米を中心として生ずるようになった。一方、二酸化炭素の放出を抑制することは現状の技術開発状況下では困難であり、排出量の増大に伴って大気中における濃度が上昇し、その結果、地上の気温を上昇させるいわゆる温室効果をもたらすとされることに関心が高まってきた。

これに対して原子力発電は、発電に当って前記のような大気汚染物質を発生はしない。しかし原子炉内でのウランの原子核反応により放射性物質が生ずるため、施設の安全確保、放射性廃棄物の処理処分などの放射性物質を安全に管理するという重要な問題を抱えている。

原子力発電の開発は当初から放射性物質の管理を中心とした安全性の確立を第一として進められてきたが、1979年3月28日に発生した米国スリーマイル島原子力発電所2号機の事故と1986年4月26日に発生したソ連チェルノブイリ原子力発電所4号機の事故は、原子力に対するそれまでの漠然とした不安感を表面化させた。特に後者の事故においては、放射性物質が大量に環境中に放出されると当該国のみならず国境を越えて広範囲に被害が生ずる可能性のあること全世界の人々に認識させこれを契機に世界

表2 セシウム 134 とセシウム 137 の降下量

	チェルノブイリ原子力発電所事故による セシウム134とセシウム137の合計降下量	核実験によるセシウム137の累積降下量
オーストリア	23 KBq/m ²	5.2 KBq/m ²
フィンランド	9.0	1.9
スウェーデン	8.2	—
イタリア	6.5	5.6
西 独	6.0	—
フ ラ ンス	1.9	—
デンマーク	1.7	2.6
英 国	1.4	4.1
日 本	0.13	3.1*
米 国	0.04	—
ス ペ イ ン	0.004	—
北半球(平均)	—	2.9
南半球(平均)	—	0.90

* 気象研究所 葛城の調査による。

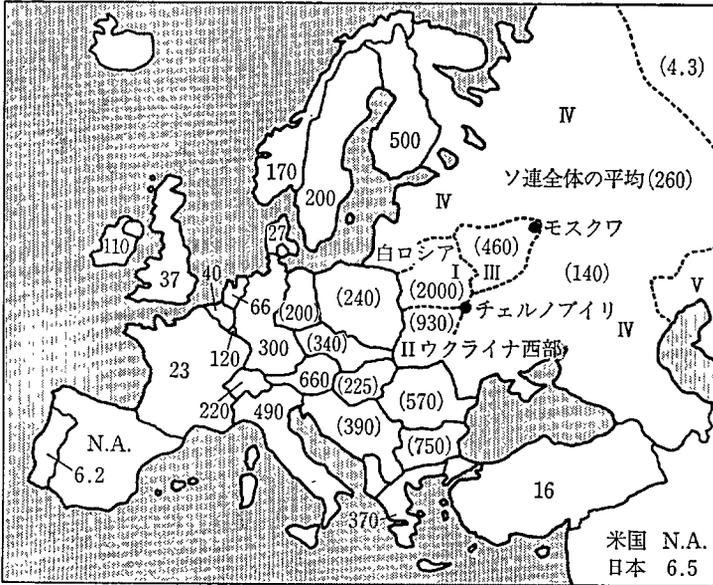
各国において原子力発電の安全性および環境への影響が改めて議論されるに至った。

このチェルノブイリ原子力発電所事故の環境への影響について、1988年1月に公表された経済協力開発機構原子力機関(OECD/NEA)の「OECD諸国におけるチェルノブイリ事故の放射線影響」報告書によると、放出された放射性核種の中で生体内にとりこまれ易いために問題となる¹³⁴Csと¹³⁷Csの各国への降下量は表2および図1のとおりであり、オーストリアおよび北欧諸国では核実験(1950年代後半から1960年代前半にかけて行なわれた大気圏核実験)による¹³⁷Csの累積降下量の場合の3~4倍、その他の国では核実験以下であった。

事故による影響で最も心配されたのは広範囲に降下した放射性物質により食物が汚染され、それを摂取することによって公衆の健康が影響を受けることである。各国政府は、環境放射能の監視体制を強化するとともに、

原子力発電の発展

図1 チェルノブイリ原子力発電所事故によるセシウム 134 とセシウム 137 の総降下量平均値 (KB_q/m²)



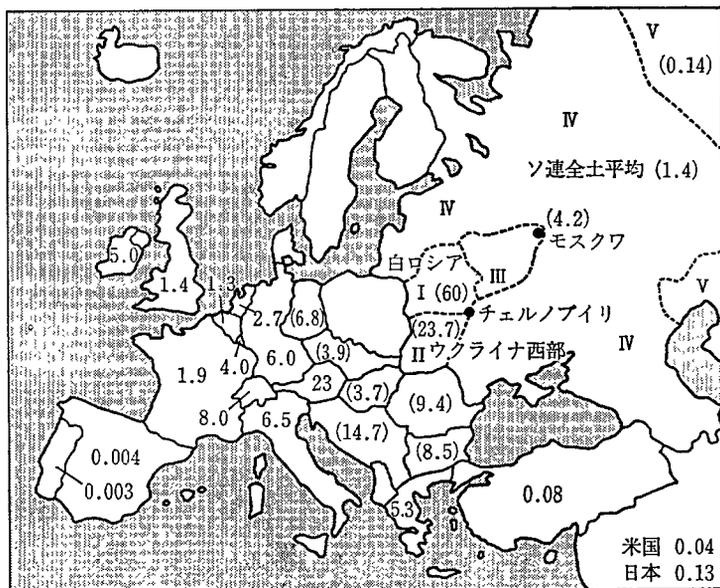
(出典) 「OECD 諸国におけるチェルノブイリ事故の放射線影響」
 ()内は第 37 回「放射線影響に関する国連科学委員会」報告書

食物などの摂取による公衆の被曝を最小限にとどめるため、雨水の飲用制限に関する勧告、食品の輸入規制、乳牛の屋外放牧禁止、食物の流通制限など各国の状況に応じた各種の放射線防護措置を実施した。

事故発生地点からかなり離れていた日本でも、事故発生から数日後に、事故によるものと思われる放射性物質がわずかながら測定されたが影響はなかったと考えられる。

さきの OECD/NEA の「OECD 諸国におけるチェルノブイリ事故の放射線影響」報告書ではまた、地上に降下した放射性物質や汚染された食品の摂取など、主な被曝の経路について討検し、事故の結果、事故後 1 年間

図2 チェルノブイリ原子力発電所事故による個人平均被ばく量
(マイクロシーベルト)



(出典) 「OECD 諸国におけるチェルノブイリ事故放射線影響」
() 内は第 37 回「放射線影響に関する国連科学委員会」報告書

に各国の公衆が受けた平均的な被曝量を求めている。それによると、OECD 諸国における公衆一人一人に対する生涯平均の放射線リスクはこの事故によって大きくは変化しないものとしており、また、集団に対するリスクについても自然発生する健康障害に対し検出可能であるほど有意な追加をもたらさないレベルとしている。

一方、1988年6月に開催された「放射線影響に関する国連科学委員会 (UNSCEAR)」では、ソ連を含めた東欧諸国の公衆の平均被曝線量を図2のように評価している。最も線量の高いソ連白ロシア地方では、2,000 マイクロシーベルト、ウクライナ西部で930 マイクロシーベルト、モスクワ周

原子力発電の発展

辺で 460 マイクロシーベルトとなっており、ソ連の一部の地域で自然放射線による被曝線量 2,400 マイクロシーベルトと同程度で、それ以外は自然放射線による被曝線量以下であったとしている。

上述のように、チェルノブイリ原子力発電所事故により放射性物質が環境へ放出されたが、その影響は同発電所近傍の人々については今後の詳細な調査や科学的評価を待つ必要があるものの、ECD 諸国および東欧諸国⁴⁾において人体などへの影響が有意な形で現われるとは専門家はみていない。

なお、1989年2月16日に、ソ連ウクライナ共和国ベトロフスキ農場で子豚と子牛に多くの奇形が生まれ、なかには頭や手足、目のないものがあったと報道されたが、その後のソ連専門家の調査に基づくソ連政府関係機関の見解では、チェルノブイリ事故との関係が否定されており、子豚の奇形の原因については近親交配、子牛の奇形については発生数の誤認とこの地方特有の微量元素不足などによるものとされている。⁵⁾

4. 安全性の向上

日本は諸外国に比して計画外原子炉停止回数が極めて低く、原子力発電所の良好な運転実績を示している。日本を例にとり、安全性向上の状況を述べてみよう。

西ドイツの KWU 社（クラフトベルクユニオン社）は原子炉開発に当り、日本と同様に GE、WH から原子力技術を導入して開発したにもかかわらず、創意工夫により、130万 kw の標準型原子力発電所を自主技術で完成し国外からも受注を得るようになった。

これが刺激となり、日本においても国産炉育成の気運が盛りあがった。

1975年、通産省は学識経験者、電力、メーカーなどの代表からなる「原子炉発電設備改良標準化調査委員会」を発足させ、日本人の手による

新しい軽水炉作りの具体的な一步に着手した。

現在までに、この改良標準化計画は1975年から3段階を経て1985年に終了した。第1次計画は1975～1977年、第2次計画は1978～1980年、第3次計画は1981～1985年にかけて実施された。

この3次にわたる改良標準化計画の実施で、発電設備は設計段階から日本人に使い易く、信頼性も高いものに作り変えられた。その後さらにハイテクノロジーを駆使した次世代型軽水炉の開発構想も現われ、1986年末には軽水炉技術高度化計画としてその概容が明らかにされ、安全性、信頼性の向上はもちろん、経済性、地域社会との調和の諸点にも注目した新時代の原子炉の姿が青写真として示された。

ここで、第1次から第3次までの改良標準化計画を眺めてみよう。

第1次計画では、格納容器の大型化などの改良によって従業員の被曝低減、作業能率の向上などがはかられた。改良標準化の対象にはBWR、PWRともそれぞれ80万kW級、110万kW級あわせて4種類が選ばれた。

BWRでは、格納容器の拡大や機器の配置計画の改善により作業スペースを確保し、PWRでも格納容器の拡大、110万kW級のプレストレストコンクリート格納容器の採用、耐震性などの強化をはかる検討が行なわれた。この結果、第1次標準プラントでは従来のタイプのものに比して約25%～35%の被曝低減化をほぼ実現し、設備利用率は70%以上が期待できる見込となった。BWRでは東京電力福島第二・2号(110万kW)、中部電力浜岡3号(80万kW)、PWRでは九州電力川内1号(80万kW)、原電敦賀2号(110万kW)など、1978年以降設計されたプラントにこの仕様が採用された。

第2次計画では、第1次計画の成果を踏まえて、さらに機器・システムの改良や耐震設計、プラント周辺部の標準化など、標準化範囲の拡大がは

かられた。

BWR では、応力腐食割れ対策、給水ノズルの熱応力低減対策、燃料および炉心設計などの改良が、また、PWR では、燃料の信頼性向上、蒸気発生器の信頼性向上、被曝低減のため配管自動 ISI 機器の大幅導入などが行われた。その結果、利用設備率は第1次計画の70%から75%に向上し、定期検査期間は85日から70日に短縮され、被曝量は従来の $\frac{1}{2}$ に減る見通しになった。BWR では現在建設中の柏崎刈羽2,5号(各110万kW)、PWR では同じく九州電力の玄海3,4号(各118万kW)の設計仕様に採用されている。

第3次計画は、これまで手がつけられていなかった炉心部の改良が目的であり、軽水炉の運転性、信頼性の向上、被曝低減、建設工期の短縮、許認可関連事項の標準化などがもりこまれている。この第3次計画の対象となり、改良型 BWR (ABWR) としての成果を取り入れて設計したのが東京電力柏崎刈羽6,7号である。この ABWR は、1) インターナルポンプの採用により、外部原子炉循環系配管がなくなって原子炉格納容器がコンパクトになり、耐震性および経済性が向上した、2) 改良型制御棒駆動機構の採用により、制御駆動源の多様化がはかられた、3) 鉄筋コンクリート製原子炉格納容器の採用により耐震性が向上した、4) 電気出力は135.6万kWと従来型に比して容量が大きくなった、5) 設備利用率86%、被曝線量0.4人・シーベルト/炉・年以下となり、建設単価は従来型に比し約20%減ったなどの特徴を有しており、安全性、信頼性、運転性、保守性などの点でいずれも従来型のものより大幅に向上している。

一方、APWR の総合特性は表3に示されており、従来型 PWR の運転および建設経験から得られた改良技術やユーザーのニーズを可能な限り取り入れて開発され、安全性、経済性を十分そなえている⁶⁾。

1986年、総合エネルギー調査会原子力部会は、軽水炉高度化に関して次

表3 APWR の総合特性

項 目	APWR	従来型 PWR (建設中 4 ループ PWR)
大容量化		
電気出力(MWe)	1,350	1,180
稼働率の向上	90%以上	85%
連続運転期間の延長 (燃焼度制限: 48,000 MWd/t)	15ヵ月(3バッチ)	13ヵ月(2.5バッチ)
定検期間の短縮	40 日	45 日
経済性の向上		
燃料費の低減	約 20 %	—
運転性の向上		
負荷追従性能 (100↔50%)	14-1-8-1 炉心寿命の 100% まで	14-1-8-1 炉心寿命の 80% まで
AFC, GFO 性能	±5% AFC } 同時可能 ±3% GFO }	± 3% APC/GFO
安全性の向上		
炉心損傷確率	約 1 桁向上	—
耐震性の向上	高震度対応	—
被曝の低減(人・Sv/炉・年)	0.33 以下	0.4 以下
廃棄物の低減	約 2/3 に低減	—

原子力発電の発展

のような報告をまとめた。それによると、将来の原子力発電の主流となる高速増殖炉の実用化時期は2010年以降になる見通しなどから、当面は軽水炉が主流であり、軽水炉の高度化はその経済性、エネルギー確保、地域社会との調和などの点から進めることが必要であるとし、次世代軽水炉の開発目標としては、ABWR、APWRなどの改良型軽水炉よりも更に10%以上のウラン節約、10%程度の発電コストの低減、時間稼働率の向上(90~95%)、作業者の受ける被曝線量の低減(0.5シーベルト/炉・年以下)、低レベル放射性廃棄物発生量の低減(100本/年・炉以下)などをあげ、その目標を達成するには、炉心の高機能化、燃料の高性能化、安全設計技術の高度化、ハイテクノロジー化、耐震技術の高度化による立地可能地点の大幅拡大などの技術開発課題を解決することが重要であると述べている。

特に、ハイテクノロジー化に際しては、関連先端技術を軽水炉に導入することが重要であるとし、たとえば自らの視覚機能、判断機能を備えた点検・保守も行える高信頼性の高機能ロボットの開発、コンピューターでプラントの作動事象を解析する高度自動運転システムの検討および廃炉措置の容易なプラントの検討、プラント簡素化技術の検討、高度計装制御技術の開発をめざしている。

この報告に基づいて1987年に発足した「軽水炉高度化推進委員会」は、新時代の軽水炉のあり方について評価、検討を行ない、1) 既存炉、改良型炉の改良、運転サイクル長期化および長寿命燃料の開発による経済性向上、2) 次世代炉の一環としての高転換炉、中小型炉および高度安全システム、3) 負荷追従対応燃料開発による負荷追従運転、4) マン・マシン・システムの開発など安全性、信頼性向上、5) 地域の実情に応じた適正炉(中小型炉)による国際協力推進などが取りあげられた。なお、次世代炉については、プルトニウム利用を進めるという観点から、プルスーマルの

推進および高転換炉，さらに今まであまり注目されていなかった中小型炉⁷⁾が採りあげられている。

スリーマイル島原子力発電所 2 号機の原子炉建屋および補助建屋内の機器，建物の汚染は表面のみならず内部にも浸透していたため，通常の方法ではその除去ができない状態であった。このため，内部の汚染除去にはコンクリート表層をはつる技術の開発が必要となってくる。また，高汚染地域には人の立入りが不可能であるので，除染作業に当っては遠隔作業技術が不可欠であり，ロボットが一部採用されている。

スリーマイル島 2 号機では，補給水浄化系脱塩塔周辺のような線量の高い個所あるいは地階のように作業員の立入りが不可能な個所に遠隔装置を用いて線量の測定，除染などを実施する方針がたてられ，各種のロボットが開発使用された。ロボット使用開始初期には SISI や FRED のような簡単な遠隔装置を用いて脱塩塔周辺の線量測定，補助建屋キュービクル内壁面の水ジェット洗浄などが実施された。これらのロボットの使用経験を基に開発されたロボット RRV は 1984 年 11 月に原子炉建屋地階の状況を，それに搭載したテレビカメラにより初めて明らかにした。その後，地階壁面のコンクリートコアサンプルの採取，地階床面のスラッジサンプルの採取，スラッジ回収，高圧水スプレーによるコンクリート表層はつりなどに用いられた。

その後開発されたロボットとしては，RWV, LOUIE-2 がある。RWV は地階除染用として精巧なマニピュレータを備えているが除染計画の変更により使用されなかった。LOUIE-2 は，補助建屋キュービクル内の床面はつり用に開発され，はつり作業を実施している。さらに，最近では，小型の潜水ロボットが加圧器底部からの燃料デブリ除去に用いられた。日本においても，ロボットは再処理施設や原子力発電所の点検および保守作業に使用され安全性の確保，施設の効率的な運転，コストの低減などに資

表4 TMI-2で開発されたロボット

ロボット名	仕様	TMI-2での使用実績
SISI	テレビカメラ, ステルカメラ, ミニマニピュ レータ搭載 クローラー式 重量: 11 kg	補強建屋補給水脱塔キュービクルの放射線 サーベイ
FRED	6輪, 車左右独立駆動 マニピュレータ搭載	補助建屋のキュービクル内を高圧ジェット洗浄
RRV	6輪車, 左右独立駆動 重量: 450 kg 各種機器搭載可能(コンクリート・コア採取 装置, 超高压水スプレー装置, スラッジ回 収装置)	原子炉建屋地階点検, 線量測定, スラッジおよび コンクリート・コア採取 グロスフラッシング, スラッジ除去およびコン クリートはつり
RWV	油圧駆動全方位型 4輪車 学習機能付マニピュレータ搭載 重量: 4,900 kg	原子炉建屋地階専用が開発. 計画変更に伴い 使用中止.
LOUIE	ベルト付 4輪車 テレビカメラ, マニピュレータ搭載 重量: 318 kg	シールインジェクションバルブ室のジェット 洗浄 補助建屋補給水脱塩塔キュービクルの放射線 サーベイ
LOUIE-2	はつり機を搭載 左右独立駆動 6輪車	シールインジェクションバルブ室のコンクリー ト床面表層はつり

8) している。表4にスリーマイル島事故で開発されたロボットを示す。

原子力発電所には通常運転時には1基当たり100人を越す人間が、さらに、定期検査ともなれば1000人を越す人間が様々な分野でその任務を遂行している。また、原子力発電所の運転開始までには、その計画段階から設計、建設段階を含めればさらに多くの人間が多くの仕事に関係している。これらの個人個人またはその集団が組織やシステムの中でのヒューマンファクターとなり、それぞれが原子力発電の安全性の確保に努力しているのである。しかし、ヒューマンエラーは完全に無くすることはできないことであるから、個人や集団の誤ちが原子力発電所の故障・トラブルなどの原因となる可能性を秘めていると言えるのである。

スリーマイル島事故においては、事故を拡大させた決定的要因が不適切な運転管理や人間工学的な配慮に欠けた設備、設計を背景とした運転員の誤判断であったことから、ヒューマンファクターの重要性が認識され、設備、設計や運転管理面での改善が行われてきた。

また、チェルノブイリ事故は設計における多重防護の観点からの脆弱性を背景として、運転員の幾つもの重大な規則違反が重なったことが要因となって発生したことから、さらにヒューマンファクター、マン・マシン・インターフェイスの研究の重要性が指摘された。

上記のような大きな事故に限らず、ヒューマンファクターが故障、トラブルなどの要因となったものは内外の事例でも見られている。

近年、日本で発生した故障・トラブルなどのうち、ヒューマンファクターが関与した事例の中から、設計、運転、保守の段階でそれぞれ発生したと推定されるものについて考察する。

(1) 設計段階においてヒューマンファクターが関与した事例

(状況) 1988年7月11日、中国電力島根原子力発電所2号炉において、試運転のため発電機出力を上昇させていたところ、保護継電器が作動し、

発電機およびタービンが自動停止した。

(故障・トラブルなどの原因)

発電機・主変圧器の比率作動継電器を含む計器用変流器 2 次側の接続回路についての作図が誤っており、現場で図面通りの回路構成が行われたため出力上昇段階で当該継電器が作動し、発電機およびタービンが自動停止した。

(ヒューマンファクターの観点からの要因)

自動停止に至った直接の原因は計器用変流器 2 次側の接続回路図作成時の誤りであり、またそのミスがチェックできなかったことである。このようなヒューマンファクターの面の要因を踏まえ、回路図作成時におけるダブルチェックの徹底など図面チェックの強化が図られた。また、このような設計段階におけるヒューマンファクター関連の改善に加え、発電機・主変圧器の比率作動継電器は実負荷状態でなければ最終機能確認が困難であるので、その機能確認は 20% 出力段階 (16 万 kW) で行われることになっていたが、今後、発電機併入段階 (最小出力段階, 5% 出力, 4 万 kW) で最終機能確認を行うよう手順書の見直しが図られた。

(2) 運転段階においてヒューマンファクターが関与した事例

1986 年 7 月 7 日、関西電力大飯発電所 1 号炉において、定格出力運転中、保護継電器が作動し発電機が自動停止し、続いてタービン、原子炉が自動停止した。

(故障・トラブルなどの原因)

原因は、3, 4 号炉の建設準備作業として屋外の開閉所と発電所保護継電器出力の間のケーブルの点検調査を実施していた際に、その作業が軽易であることから作業工具などが特に指定されておらず、作業上の都合もありバールが使用された。そのバールにより、誤って当該ケーブルが損傷を受けたため保護継電器が作動、発電機が自動停止し続いてタービン・原子炉

が自動停止したものである。

(ヒューマンファクターの観点からの要因)

自動停止に至った直接の原因は作業者の過失とも言えるが、そのような過失が生じたのは作業工具が指定されていなかったことなど、作業方法が明確でなかったためと考えられる。

このようなヒューマンファクターの面の要因を踏まえ、誤作業の再発防止に万全を期するため、作業規則の見直しとともに、関連作業も含めた作業管理方法の改善徹底が図られた。

(3) 保守段階においてヒューマンファクターが関与した事例

事例 1

1988年3月4日、日本原子力発電敦賀発電所2号炉において定期検査の最終段階である調整運転中、出力領域計測装置の校正を実施していたところ、「出力領域中性子束減少率高」の信号により原子炉が自動停止した。

(故障・トラブルなどの原因)

4回路ある出力領域計測装置の校正作業において、対象となる計装盤の前面のヒューズを取り外してこの回路をトリップ状態とした後、本来は当該盤の裏面で検出器の信号ケーブルを取り外すべきところを、誤って隣の盤の信号ケーブルを取り外したため、この回路もトリップ状態となり、「出力領域中性子減少率高」の信号が発信され原子炉が自動停止した。

(ヒューマンファクターの観点からの要因)

自動停止の直接の原因は、作業員の「うっかりミス」と推定される。何故作業員が「うっかりミス」を犯したかについては様々な因子が考えられ、それらの因子を特定するのは困難と言わざるを得ないが、仮に当該作業員が誤りを犯し易い状態であったとしても、指差呼称とダブルチェックが十分に行われていればエラーを未然に防ぐことができた可能性もあり、これが行われないまま作業が実施されていたことは管理上の問題とも言える。

原子力発電の発展

また、作業対象盤であることを明確にするための標識があれば作業員の誤認を容易に防ぐことができたとも考えられる。作業を実施する上での配慮の余地があったと思われる。

このようなヒューマンファクターの面の要因を踏まえ、次のような対策が講ぜられた。

① 誤認防止のため、作業手順書に指差呼称とダブルチェックを確実に実行することおよび作業対象盤のみを解錠することを明記した。また、作業対象盤であることを明確にするため、盤の前面および裏面に標識を取りつけた。

② 注意喚起のため、作業手順書に原子炉自動停止につながる恐れのある作業であることを明記した。

③ 類似作業に関して、原子炉自動停止につながる恐れのある作業について、誤認防止のための標識の明確化、主要な操作時の指差呼称とダブルチェックの徹底など、作業管理の強化や手順書の改善を図った。

事例 2

1988年8月13日、中部電力浜岡原子力発電所2号炉において、83.6万kWで運転中のところ、原子炉格納容器内にある床ドレンサンプおよび機器ドレンサンプへの流入水の増加が認められたため、原子炉を手動停止した。

(故障・トラブルなどの原因)

定期点検の最終段階において、原子炉再循環ポンプの軸封部を冷却する冷却器本体と機器冷却水配管を結ぶフレキシブルチューブの緩みチェックを行った際、締付け工具により過大な力をフレキシブルチューブのろう付け溶接部に加えたため、割れが発生しその後の運転における系統圧力の変動により、破断、貫通し漏洩に至ったものと推定される。

(ヒューマンファクターの観点からの要因)

当該溶接部が破断した直接の原因は、作業が不適切であったためと考えられる。本来、接続金具の結合部を締め付け工具で把んだ上でナットを締め付けるべきところを、誤ってブレード押さえを把んでしまったことから、ろう付け溶接部に割れが発生し、運転に伴い破断したものと推定される。

このようなトラブルが発生した背景には、接続金具の結合部に回転止め用の面取りがなされておらず、ブレード押さえも結合部も同一の円柱形状であったことから、誤ってブレード押さえを把んで締め付け作業を行ったためと考えられる。

このことから、今後の再発を防止するため、結合部を面取りを行い、作業時のヒューマンエラーが発生しにくい形状に改善するとともに、念のため、溶接構造をより強度の高いものに変更する措置が講ぜられた。

このほかにも発生したヒューマンエラーの経験は適切に運転管理や設計などに反映されてその再発防止に役立っている。その結果、IAEAの運転管理調査団(OSARI)が1988年10月に関西電力高浜発電所3号炉および4号炉の運転状況を調査した際の評価は高いものであった。⁹⁾

原子力発電事業者が相互に情報ネットワークを作り、有用な情報を交換しあって原子力発電の安全性と信頼性を向上させていこうという考えは以前から地域的に行なわれていた。この考えは1979年のスリーマイル島原子力発電所事故が契機となり、米国ジョージア州アトランタに本拠をおく米国原子力発電運転協会(INPO)が設立され、主として米国の原子力発電所を対象とした情報ネットワークが整備された。また、パリに本拠をおく国際発電事業者連盟(UNIPED)においても同様な情報ネットワークが作られた。

しかし、これらはいずれも西側の情報ネットワークであり、ソ連をはじめとする東側の発電所の情報は含まれていない。1986年のチェルノブイリ原子力発電所事故後、原子力関係者は東西の垣根を除去し全世界規模の情

原子力発電の発展

報交換組織が必要であることを感ずるに至った。英国中央電力庁(CEGB)総裁のマーシャルがこの動きを受け、全世界の原子力事業者が一体となって原子力発電所の安全性を確保するための組織作りにとりかかり、1987年10月、パリに全世界から130の原子力事業者が集まり世界原子力発電事業者協会(WANO)創設のための会議が開かれた。その後約1年半をかけて1989年5月、モスクワで設立総会が開かれ、原子力発電所を運転、建設、計画中の国から133の原子力事業者約400名が参集した。

WANOの構成員は原則として各原子力事業者であり、「国」の概念は持ちこまないのが原則である。複数の原子力事業者が連合体を作って加盟することは認められている。WANOの目的は、原子力事業者間で自由に情報を交換し、過去の過ちを繰り返さないようにするとともに、他のプラントにおける良好な運転経験を学ぶことによって、プラントの運転性能の向上をはかることにある。WANOには具体的な活動計画を立案し、指示命令する本部はなく、活動の中心は、パリ、モスクワ、アトランタ、東京の4ヶ所に置かれた地域センターである。WANOに加盟を希望する原子力事業者は必ず上記の地域センターの1つに所属しなければならないが、どの地域センターに属するかは自由に決められる。これは、現在の世界の原子力事業者は地理的な因子以外の要素で結ばれている場合があることを考慮した結果である。なお、全体方針の立案、地域間の問題調整などのため、ロンドンに調整センターが置かれている。

情報交換の手段としては、第1は通信回線を使ったオンラインの情報交換で、これは世界中の原子力事業者をコンピューターネットワークで結んで情報交換を行うものである。第2は直接対話による情報交換で、原子力事業者が互いの発電所を訪問し合ったり、セミナーやワークショップを開いたり、あるいは技術者や資料を交換し合うことによるものである。

反原子力発電運動が世界的な広がりを見せている中で、民間組織として

世界的に大同団結した WANO が原子力の安全性、信頼性向上に果たす役割は小さくないとみられるのである。

1989年3月、WANO 東京センターの設立総会が開かれ、アジア地域の15事業者が加盟した。日本からは9電力と日本原子力発電会社および電力中央研究所¹⁰⁾が参加している。

5. 放射性廃棄物の処理

原子力の利用に当って常に付随して生ずる放射性廃棄物の処理処分は、従来の工学的経験を上回る長期間の安全性が問題となるうえ、その内容が従来経験の少ない放射線に関わる特異なものであるので、原子炉の安全性と並んで強い関心が持たれている。放射性廃棄物に関する研究は、室内実験の面からはかなり研究が進んでいるが、室内実験の大部分は必然的に短期間の結果を与えるに過ぎないことから明らかなように今後さらに必要な研究を行わなければならない特定の分野であると同時に原子力の開発利用を進めていく上で、今日原子力先進国が直面している緊急課題の一つとなっている。

固体廃棄物の海洋投棄処分は、原子力開発の初期において各国により広く実施され、それによる海洋汚染防止のための国際的条約が結ばれ、また協議監視のための国際機構も作られたが、海洋環境汚染を懸念する多くの国により海洋投棄規制条約(ロンドン条約)締結国会議の場で1983年2月17日放射性廃棄物の海洋投棄は2年間の安全性検討終了まで中止する決議がなされ、その後どの国も海洋投棄を実施していない。

低レベル固体廃棄物は、各国とも浅地埋設による処分が行われている。

初期には、固体または固化体をドラム缶などの容器に入れ(あるいは入れず)、地下水位の低い不用の土地または半砂漠地に浅い壕を掘り、その

原子力発電の発展

中へ投入した後土砂で埋め戻していた。廃棄体は必ずしも整理して積みあげられてもいなかった。しかし、やがて廃棄物の放射能が規限度以下に減衰するまでの間、浸透してくる水や地下水により移動されないよう、また人間を含めた生物の侵入を防ぐため、密閉隔離されるようになってきた。処分場を効率的に使うために、形状や大きさの似た廃棄物は整然と積みあげられ、浸透水の水捌けをよくするためと放射能の捕捉をはかるため隙間に土砂が詰められ、外壁には不透水性の粘土層が設けられた。機械的強度を高めるために粘土層の代りにコンクリート壁も採用されるようになった。

1969年処分を開始したフランスのラ・マンシュ処分場ではこのような密閉隔離度の高い埋設処分方法を採用した。この方法が世界の主流となっており、地表上部には比較的放射能レベルの低い廃棄物を集積し、土砂を被せたのち不透水性の粘土層で覆い、さらに覆土して植生を施している。また、ラ・マンシュ処分場と同様の構造をもった第2の低レベル廃棄物処分場の建設がパリ東方のオーブで1987年7月から進められている。

英国では、低中レベル廃棄物は各原子力施設に貯蔵されているほか、低レベル廃棄物については英国原子燃料公社 (BNFL) のセラフィールド再処理工場に隣接するドリッグ処分場に埋設されるか、海洋投棄されていた。しかし、海洋投棄は1983年のロンドン条約により同年以降中止されている。一方、1982年設立された英国の低中レベル放射性廃棄物管理責任者である英国原子力産業放射性廃棄物会社 (UK NIREX) は、設立とともに当初、低レベル廃棄物と中レベル廃棄物の一部を浅層処分する陸上処分施設と、中レベル廃棄物を対象とした深層処分施設の建設を検討してきた。1986年、政府は低レベル廃棄物と一緒に浅層処分するはずであった中レベル廃棄物の一部をすべて中レベル廃棄物として一本化し、深層処分することを決定した。続く1987年5月には、低レベル廃棄物の浅層処分施設

建設計画を放棄した。この結果、UK NIREX は今後低中レベル廃棄物を一緒に処分する多目的深層処分施設の開発を進めることになり、1989年3月、候補地として、カンブリア州セラフィールドとスコットランド北端のドーンレイの2地点を政府に勧告した。立地が順調に進んでも実際に処分が始められるのは2005年以降となるという。このため、1959年10月に処分開始したドリッグ処分場を拡張して対処する以外に方法はないが、従来から行われてきた直接投入方式という単純埋設では拡張案は認められそうになかった。そのため、廃棄物の容器封入と圧縮減容を採り入れ、雨水の浸透と地下水の影響を制限するための粘土キャップ壁の設置を進めることとし、さらにトレンチをコンクリート壕に切り換えるとともに浸出排水系の更新を行う考えであることを明らかにした。かくて漸く世界の犬勢に従った埋設計画に改めることとして拡張工事を始め、1989年1月には計画の約 $\frac{1}{3}$ が完成し、廃棄物処分が続行されることになった。粘土とセメントを使った障壁を設け、容器につめた廃棄物を処分壕内に積みあげ、満杯後には埋め戻し粘土層で被い、覆土したのち植生するものである。

米国の主たる廃棄物関連法は、「1980年低レベル廃棄物政策法」と「1982年核廃棄物政策法」である。前者は、低レベル廃棄物の発生州・地域責任処分の原則を定め地域間協定の締結を促しており、後者は米国における高レベル放射性廃棄物対策の基本枠組が示されており、国庫が原子力発電電力量1kwhあたり0.1セントを電気事業者から徴収し、これを原資として高レベル廃棄物などを貯蔵する恒久貯蔵所の建設費などに充当するというのが基本の考えである。

1980年法は1985年に改正され、「廃棄物処分場を新設するための財務的インセンティブを州当局に与える。受益者である電気事業者は既設の3処分場を利用する見返りに、地元州に通常料金と追加料金を上乘せして支払う。これら地元州は発生州が独自に処分場を新設する年か、1993年の

原子力発電の発展

どちらか早い時期までの間、徴収した追加料金の 75% を保留する。残りの 25% は発生州が新設した場合は州当局に、また 1993 年までに新設されない場合には電気事業者へ返済される」という項目が追加された。現在、1993 年の期限に備えて、約 13 の州連合体にわかれてそれぞれ処分場を持つ準備を進めている。新処分場を持つとみられる州のうち、原子力規制委員会 (NRC) が基準を示している浅地理設をそのまま採用しているのは、砂漠地帯に立地を考えているカリフォルニア州だけであり、他の各州では地表面下への処分を州法で禁止し、処分方法として、地下水からの隔離を考え、近地表のコンクリートバンカーに廃棄物を収め、その上にも廃棄物を集積し (あるいはせずに) 覆土する土盛りコンクリートバンカーと呼ばれる形式のものが多く、また、多重の覆土層の間にさらに不透水性のプラスチック膜あるいは無機質の膜を 1 層あるいは 2 層挟むものもある。

1982 年法は、1987 年 12 月に成立した予算調整法によって一部修正された。米国エネルギー省 (DOE) が実施する恒久貯蔵所候補地点の調査を 3 地点からネバダ州ユッカマウンテンの 1 地点に限定するなどの内容が盛り込まれている。

西独は、アッセ II (岩塩坑) で 1967 年から 1978 年まで陸地処分を実施したが、その後許可手続の関係で中断している。処分の責任者である連邦物理技術院 (PTB) は新処分場をコンラッド廃鉄鉱山およびゴアレーベン地下岩塩塊に開設するため調査を進めている。

低レベル廃棄物はその量が多いので、いかに安く処理処分するかが重要になってくる。西独では従来、廃棄物を固化しドラム缶などの容器につめて岩塩層処分場へ運び埋設していたが、最近では岩塩層の地表で低レベル廃液、廃樹脂、焼却灰などをセメントと混じり、反応塔で 1~5 mm のグラニユールにし、そのままパイプで地下の岩塩空洞中に流し込む方法が開発された。現在、アッセ岩塩坑の地表に反応設備を作り実規模コールド試験が

表5 主要国における低レベル

	米 国	フ ラ ン ス
1. 陸地処分の方法	<ul style="list-style-type: none"> ・大きな素掘の穴を掘って、廃棄物のドラム缶等を埋設処分。 	<ul style="list-style-type: none"> ・コンクリートピットに廃棄物のドラム缶等を入れ、すき間をセメントで充填することにより埋設処分。
2. 陸地処分のための施設	<p>(商業用処分場)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ワシントン州リッチランド (1965年処分開始) ・サウスカロライナ州パーンウェル (1971年処分開始) ・ネバダ州ビティ (1962年処分開始) の3カ所が運転中。 <p>(DOE 処分場)</p> <p>DOE は、14カ所の処分施設を運営しており、主なものは下記のとおり。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ワシントン州ハンフォード ・アイダホ州アイダホフォールズ ・ニューメキシコ州ロスアラモス ・テネシー州オークリッジ ・サウスカロライナ州 サバンナリバー 	<p>(処分場)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ラ・マンシュ貯蔵センター (ANDRA) (1969年処分開始) <p>ズレーヌに第2サイトを準備中 (1991年に運開予定)</p>
3. 陸地処分の実績	<ul style="list-style-type: none"> ・商業用処分場 約120万m³ (1986年末) 	<ul style="list-style-type: none"> ・約30万m³ (1986年2月まで)
4. 陸地処分のための処理	<ul style="list-style-type: none"> ・放射能レベル等に応じ、所要の強度を有する容器に収納する。液体は、固化する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・セメント又はビチューメンで固化。雑固体も圧縮した後、コンクリート容器に入れ、セメントで固化。
5. 海洋処分	<ul style="list-style-type: none"> ・1946年～1970年 単独投棄 太平洋 水深約900～1,700m 大西洋 水深約3,000m ・経済的に成り立たないとして中止。 	<ul style="list-style-type: none"> ・1967年, 1969年投棄 (NEA 投棄) 大西洋 水深約5,000m ・陸地処分を主とし、現在中止。

原子力発電の発展

放射性廃棄物処分の状況

1989年8月現在

西 独	英 国
<ul style="list-style-type: none"> ・アッセでは、岩塩を掘り出した後の空洞中に廃棄物のドラム缶等を埋設処分。 	<ul style="list-style-type: none"> ・トレンチに廃棄物のドラム缶等を埋設処分。
<p>(処分場)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・Asse II 岩塩鉱山 (低レベルは1967年4月、中レベルは1972年処分開始) 1978年以降ライセンスが切れ、現在停止中。 ・現在、PTBは新処分場をコンラッド廃鉄鉱山(1990年操業開始予定)及びゴアレーベン地下岩塩塊(2000年操業開始予定)に開設するための調査を進めている。 	<p>(処分場)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ドリッグ処分場(BNFL) (1959年10月処分開始) ・現在、NIREXは新たな埋設処分場を建設する計画で、用地を選定中。
<ul style="list-style-type: none"> ・ドラム缶等約13万本(1978年まで) 	<ul style="list-style-type: none"> ・約60万m³(1984年まで)
<ul style="list-style-type: none"> ・固化処理。濃縮廃液やスラッジ等は、セメント又はピチューメンで固化。 	<ul style="list-style-type: none"> ・できるだけ圧縮減容処理をうえ、梱包する。
<ul style="list-style-type: none"> ・1967年投棄(NEA投棄) 大西洋 水深約5,000m ・陸地処分を主とし、現在中止。 	<ul style="list-style-type: none"> ・1967年以来1982年まで実施(NEA投棄。1967年以前にも単独投棄の実績あり。) 大西洋 水深約3,000~5,000m ・1983年以降はロンドン条約締約国協議会議の場における決議により休止。

順調に行われている。

主要国における低レベル放射性廃棄物処分の状況を表5に示す。

使用済燃料の再処理により分離された高レベル放射性廃棄物の特徴は、その発生量は少ないが極めて放射能濃度が高く発熱量が大きいこと、放射性物質は主として核分裂生成物および超ウラン元素で半減期の長い核種が多いことである。従って、この高レベル放射性廃棄物を長期に亘って安全に処分する技術を確立することが重要な課題となってきているのである。

高レベル廃棄物の処分には、日本やフランスに見られるように使用済燃料を再処理し、その時に生ずる高レベル廃液をガラス固化し深地下に処分しようとする国と、使用済燃料を再処理せずにそのまま廃棄物として深地下に処分する考を持っている国とがある。現在、多くの国において可能性のある岩体中に地下研究施設を作って必要な試験を行っているところである。

多くの国では 500~1000 m の深部の花崗岩などの硬岩を処分候補岩体を選んで研究と準備を進めている。核廃棄物（使用済燃料と高レベルガラス固化廃棄物）の処分について米国は 1987 年、ネバダ州ユッカマウンテンの凝灰岩体に絞り、更に数年間サイト特性調査を行い、問題がなければ安全審査を経て処分場に決定し着工することとしている。そのためのプロジェクト体制、議会・学会などによる助言体制も作られている。しかし、地元のネバダ州がこの計画に強く反対しており、サイト特性調査の実質的 first step である調査立坑の掘削に入れず、また、1987 年末の議会で成立した核廃棄物政策改正法によって作られることになっている調整機能を果たす核廃棄物折衝役の大統領発令もできないまゝの状態にある。

西独では、高レベル廃液は固化し貯蔵した後、ゴアレーベン（岩塩層）に地層処分する計画である。

蒸発性堆積岩の一種である岩塩は、熱的、機械的性質に優れ、さらに硬

原子力発電の発展

岩と異なりひび割れを自然に修復する可塑性を具えている。西独では早くからこの性質に注目し、処分場などの開発に取り組んできたが最近の原子力を取りまく厳しい環境、反対運動の高まりなどからその進展は思うにまかせない状況にある。現在、予定よりは遅れたがゴアレーベンにおいて2本の調査立坑が掘削されつつあり、順調に調査が進めば今世紀中に処分場着工ということも考えられる。

米国でも深部岩塩層中に処分を考えている。軍事生産活動から主として出される超ウラン元素を処分するための施設 Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) が1988年ニューメキシコ州カールスバッド近くの地下660mの岩塩層中に完成された。しかし、地元州と環境保護庁(EPA)が環境安全上問題ありとし、また主要集積地のアイダホホールからの輸送ルートおよび輸送容器上の問題の解決も遅れていることから、その操業開始は1991年以降となる見通しである。

使用済燃料はそのまゝでの処分(地層処分)が考えられているが、軍事用などの高レベル廃液については、ガラス固化し、貯蔵した後地層処分する計画である。

フランスでは高レベル廃液のガラス固化には力を注いできたが、その最終処分計画については各国より遅れ気味であり、現在はガラス固化体はマルクルの空冷コンクリートピットに一時貯蔵している状態である。1984年のキャスタン報告に続いて1987年にはゴギェル報告が出され、花崗岩、片岩、粘土とともに岩塩の4地域が選定され、予備調査の掘削が始められている。4岩種の中の優れた岩種については引続きサイト調査が進められていくことになった。

しかし、低レベル廃棄物の第2処分場がズレーヌに決まるまでに幾つかの波乱があったように、粘土質のサイト以外の3ヶ所では地元の反対が強くまだ掘削に入れないでいる状況である。

表6 各国における高レベル

	米 国	カ ナ ダ	フ ラ ン ス
高レベル放射性廃棄物の形態	民生：使用済燃料 軍事：ガラス固化体	使用済燃料の直接処分かガラス固化体の処分かは公的には未定	ガラス固化体
処分概念 (サイトがほぼ確定している米国、ベルギー以外は深度は概念設計レベル)	地下 300 m の岩体中に地層処分 軍事→WIPP (地下 660 m へ処分)	地下 500～1000 岩体中に地層処分	地下 300～1000 m に地層処分
候補地層	凝 灰 岩	花 崗 岩	粘土層、花崗岩、片岩、岩塩層
処分候補地	第一処分場最終候補地点をネバダ州 ユッカマウンテンに決定 [1987年放射性廃棄物政策修正法 (1987年12月22日成立)による]	未 定 但し、1993年以降にサイト選定作業開始予定	ヌヴィ・バン (花崗岩) セグレ (片 岩) タリンヌモンコルネ (粘土層) モンレベル (岩 塩) の4地点を処分場候補地として選定
技術開発方針	一法制化して推進 1982年放射性廃棄物法 (NWPA) 1983年 10CFR960 (DOE) 1983年 10CFR 60 (NRC) 1983年 40CFR191 (EPA) 1987年放射性廃棄物修正法 (NWPAA) 1998年サイトキャラクター化 プラン (ネバダサイト)	一研究開発をベース 一原子力発電を中心的に進めている オンタリオ州内に設置 一同州に分布する花崗岩層を研究対象	一政府の設置した委員会による研究開発方針決定 1983年 CEA 全体計画 1984年 キャスタン報告 1987年 ゴギユエル報告 1987年 ANDRA による候補地選定
スケジュール	～1984年 地層調査 1995年 サイト選定 2003年 処分場運開	～1993年 処分概念 評価書の政府承認	～1987年 候補地決定 2000～2010年 処分場運開

原子力発電の発展

放射性廃棄物処分の状況

1989年8月現在

西 独	ベルギー	ス イ ス	スウェーデン
使用済燃料の直接処分かガラス固化体の処分かは未定	ガラス固化体 (返還廃棄物)	ガラス固化体 (返還廃棄物)	使用済燃料 ガラス固化体 (返還廃棄物)
地層処分 (基本的には水が存在しないと考えられる地層)	地下 220m 地層処分	30~50年中間貯蔵後地下600-2500mの地層中に処分	使用済燃料中間貯蔵所で集中貯蔵(40年)後、自国内で地層処分(~500m)
岩 塩 層	粘 土 層	花 崗 岩 堆 積 岩	花 崗 岩
ニーダーザクセン州ゴアレーベンを暫定サイトに選定した(1977年)が1979年の公聴会における反対により計画は中断	モ ル	北部結晶質岩系サイト及び、レマン湖近接の堆積岩系サイトを候補地点として研究を行っている	オスカーシャムをスタディサイトとして研究を行っている
一岩塩層選定一	一粘土層選定一	1978年原子力法に対する連邦決議 1985年確証プロジェクト報告書 1988年6月3日上記報告を議会承認 現在堆積岩について研究中	1977年条件法(処分技術の実証の必要性) 1980年議会決定(2010年原子力発電所の供用終了) 1983年KBS-3作成(概念設計, 評価報告書) 1986年R&Dプログラム'86
1997年 サイト選定 1990年代末 処分場運開	~1990年 サイト選定 予定 ~2020年 処分場運開	~1987年 地層調査 ~2000年 サイト選定 2015~2020年 処分場運開	~1990年 サイト選定 ~2020年 処分場運開 ~2050年 処分場閉鎖

ベルギーでは、使用済燃料はフランスに再処理を委託し、その返還ガラス固化体を国内で地層処分する計画であり、可塑性を有する粘土に着目してモルの地下約 230 m に鉄・コンクリート型枠でまもられた坑道を作って試験が進められている。硬岩のように自立性の坑道を作ることはできないが、廃棄物の閉じこめ隔離には好都合である。

各国における高レベル放射性廃棄物処分の状況を表 6 に示す。

初期においては放射性廃棄物の処分は生活廃棄物に準じて比較的簡単に海洋へ投棄したりあるいは不用地に直接埋めたりする方法が採られたが、やがて、放射能が密閉隔離されなければ環境へ悪影響をおよぼす恐れのあることから諸種の改善が採られるようになっていった。しかし、その間、処分場を受入れる地元住民、環境保護関係団体らは長期間にわたる放射性物質管理の安全性を実証すること、地元住民の雇用促進、地域の活性化など、原子力廃棄物周辺の諸問題を取りあげてそれらに対する対策を求めた。一般大衆もこれを支持する傾向を強めていった。

高レベル廃棄物では低レベル廃棄物の場合と異って、長期に亙る処分について安全性を証明することは直接的にはできない。実験データにより検証された解析に基づいて間接的に評価することがこの場合の実証である。スウェーデンからは KBS 報告、スイスからは Gewähr-85 報告など、特定の処分サイトによらない総合的な安全評価報告が出されている。間接的評価を補うものには自然界の類似現象（ナチュラルアナログ）例があるが、その解釈類推は必ずしも容易ではない。

英国のドリッグ処分場は 21 世紀初めには満杯に達するので、前述のような当面の改善により、受入れが続行されている間に第 2 の処分場を準備しなければならない。UK NIREX は、当初処分場土地選定を進めるに当り多くの困難に遭遇し立地計画は成功しなかった。地域の住民に処分場建設計画に協力を求める際、十分な技術情報を提供すれば支持は得られる

原子力発電の発展

ものと考えてそれに対する努力をしたが効果はあがらなかった。地域の反対派の住民は、技術問題の議論は避け、地域選出の政治家に圧力をかけて立地計画をつぶしていったのである。

そこで、UK NIREX はそれまでの方策の根本的見直しを行い、低レベル廃棄物の浅地処分の考えを捨て、低レベル、中レベル廃棄物を合わせて深地下に処分することとした。また、地域の住民との接触も、一般的な情報配布によるのではなく、地域住民との定期的会合により地域安全性についての危惧の念を持つ人々と率直に会話するようにし、特に住民が方針決定に参加できるような仕組みをつくるようにした。

UK NIREX は、討議試料「The Way Forward」をまとめ、1987年以來計6万部を印刷し、国会議員、すべての郡議会のほか図書館、報道機関、この問題に関心を示している反対派を含む諸団体へ配布した。次にこれを使った説明と話し合いの会合を国会議員、地方自治体、学術団体、労働組合、環境保護団体、反対派団体などと約70回開いた。これに対し寄せられた約2500の意見は大学に委嘱して詳細な解析が行われた。

国会議員の40名から、また全国の $\frac{2}{3}$ の郡議会から意見が寄せられた。特に環境省の放射性廃棄物管理諮問委員会や郡参事会連合会などからはNIREX 提案への強い支持が表明されてきた。また、環境保護団体の「地球の友」(Friends of the Earth: FOE)を含むグループからも討議原則を歓迎する旨の意見が寄せられてきた。郡議会の多くは提案された計画を原則的に支持するものの、2地域(セラフィールドとドーンレイ)の郡議会以外は、自分達の地域に対する具体的提案を考慮する準備はできていない旨を表明してきた。

この社会的アプローチと並行して厳密な技術的立地選定作業が進められた。環境省の「陸地処分施設の環境保護の原則」(1984年)に基づき、国際原子力機関(IAEA)の安全シリーズ No. 59 の勧告に従って全国的な

広域調査が行われ、500以上の用地が選り出され、次第に絞られて19の地域が残った。これと「The Way Forward」による対話討議を通して選ばれたボランティア自治体を総合的に検討した結果、セラフィールドとドーンレイの二つの用地が候補として残された。

2自治体とはその後さらに協議を重ね、検討調査をはじめの合意が得られた段階でUK NIREXは政府の了承を取り、UK NIREXの役員がそれぞれ2自治体に出向いて1989年3月に合意についての共同発表が行われた。今後15年の予定で詳細な調査が行われ最終的に1ヶ所が選ばれることになる。低中レベル廃棄物処分場サイトの選定作業プロセスを表7に示す。

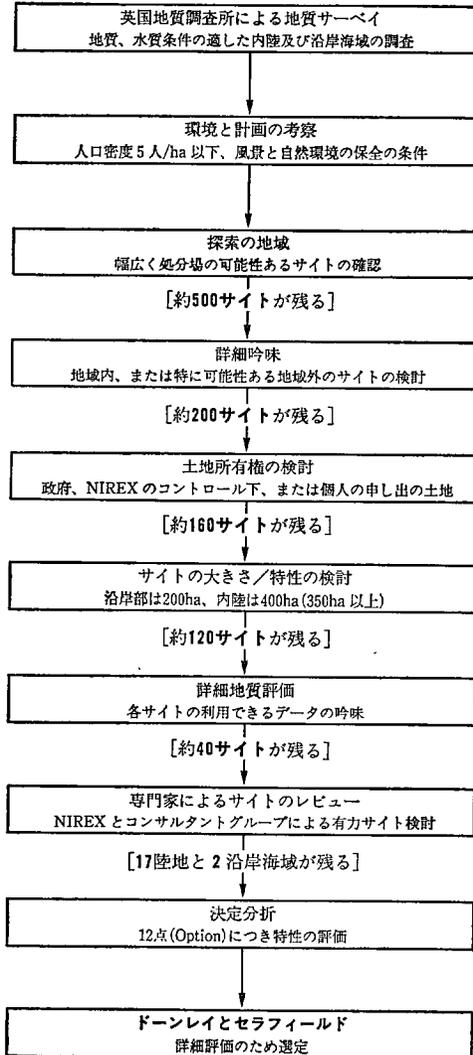
米国では1985年に改正された低レベル廃棄物政策法により、1992年末までに各州連合体（または州）ごとに処分場を準備し処分責任体制を確立しなければならないので、立地確保のためかなりの考慮を払った対策が採られそれなりの成果をあげている。

物理的条件に基づく一般的なスクリーニングのほかにボランティア制を併用して処分候補用地を絞りこんでいるものが多い。その他これまでは殆んど行われなかった地元子弟への奨学金制度や原子力施設の見学会の実施、処分予定地へ早期に係員を常駐させ地元民の疑問や要望に耳を傾けていくことなどが行われている。基本は、地元民に対してオープンで正直に対応すること、柔軟な姿勢をとること、迅速に反応することであると強調している。

また、1987年の改正政策法によって核廃棄物の処分候補地はネバダ州ユッカマウンテンに決まったが、処分対象となる使用済燃料の大部分は東部諸州で発生するものである。改正政策法では処分場を引受けた州へは毎年2000万ドルを交付するという異例の特典も同時に決められているものの、この決定は処分地を西部の貧しいネバダ州に押しつけたものであると

原子力発電の発展

表7 英国の低中レベル廃棄物処分場サイトの選定作業プロセス



して地元の反撥が強かった。

DOE は、改正法で決められた諸チェック機関のうち最後まで残されている核廃棄物折衝役を早急に発令してもらい、地元との協議を速やかに軌道に乗せたいと考えている。

地層処分の実施にあたっては、深部の地層を掘削し、そこに処分施設を建設し、人工バリアを施して廃棄物を安置した後確実に空洞を埋め戻す作業が行われるが、この処分の結果、廃棄物に含まれる放射性物質が長い期間に亘って環境に影響をおよぼさないことが明らかにされなければならない。

これには、地層中に安置された高レベル放射性廃棄物が、地下水を媒介として地層中を移動し、最終的に人間の生活圏に至るという過程の研究が必要となるが、これに関する研究事例は少なく、また、研究の助けになる自然界における類似現象は稀である。

このため、地層処分に係わる研究は従来の研究の枠を越えて処分研究に特徴的な考え方が導入されることとなる。すなわち、高レベル放射性廃棄物と人工構築物さらには地質環境が相互に影響をおよぼし合うという状況下での極めて長期に亘る反応を、現在獲得し得るデータと科学的知識を用いて解析していかなければならない。

換言すれば、原子力を発展推進させていくためには高レベル放射性廃棄物を安全に管理しうることを実証することが重要であるが、このような長期的な施策に対しては直接的な実証は不可能で間接的な実証にならざるを得ないということである。

将来長期間に亘って管理される放射性廃棄物の安全性を間接的な予測的解析で説明しようとする場合に、一般大衆はそれを理解するかどうかは今後問題となってくるものと思われる。

6. 結 言

スリーマイル島事故は、2次給水系の故障に端を発し、種々の故障、誤操作が重なって放射性物質が外部環境に異状に放出されるという事故であった。この事故は、それまでの原子力安全性研究に大きな影響を与えた。冷却材喪失事故研究ではそれまで冷却水配管の大破断時の研究が中心となっていたが、中小破断時の研究の重要性が認識されその対策が含められるようになった。同時に、原子炉の安全を確保する上で、原子炉の運転が極めて重要であることが実証されたことから、これと関連してヒューマンファクターの重要性が認識され、その研究の必要性が生じてきた。

チェルノブイリ事故では、その結果生じた放射性物質が国境を越えて拡散し、放射性物質による環境汚染の不安を世界の人々に与え、環境中の放射性物質の挙動とその影響に関する研究が一層加速されるようになった。

一般に、その当時において出現した新しい複雑な技術はその導入の初期段階では往々にして種々の不安から社会に受け入れられにくく、拒否反応を蒙ることが多いであろうがやがてそれは技術の進展に伴って徐々に解消されていくものと考えられる。原子力発電という新しい巨大技術においてもそれが本格的に商業的に使用されてきたがやがて事故をおこしたことから、不安感を主とする強い原子力発電拒否反応が現われた。各国はそれぞれの国情に即した独自の対応策を採ってその解決に当たっているものの政治的、社会的事情から原子力発電に関して十分な理解が得られていないと思われる。

原子力発電には、原子炉自身のリスクもあり、そこに生ずる放射性物質からの環境や人体に対する潜在的な危険が存在するなど、一般の人々にとっては既存のエネルギーを利用する場合は異った理解しにくい側面を有

している。原子力発電が社会に受け容れられるためには、技術的な面から安全性を一層向上させ、安全実績を積み重ねる一方、社会的な面からはエネルギー全般に亘って長期的視野から焦らずに安全実績を基にして原子力利用に関する不安を除去し安全性と経済性とを確立してその理解を得ることが大切であると思われる。

文 献

- 1) 原子力委員会編, 原子力白書, 平成元年版, 7頁, 大蔵省印刷局, 平成元年.
- 2) *ibid.*, 5頁.
- 3) 原子力安全委員会編, 原子力安全白書, 平成元年版, 300頁. 大蔵省印刷局, 平成元年.
- 4) 近藤次郎監修, [検証] エネルギーと地球異変データ集, 693頁, エネルギージャーナル社, 1989年.
- 5) 原子力安全委員会編, 原子力安全白書, 平成元年版, 264頁, 大蔵省印刷局, 平成元年.
- 6) 友野勝也 et al., 日本原子力学会誌, 32巻, 5号, 4頁, 1990.
平田公一 et al., *ibid.* 18頁, 1990.
- 7) 日本原子力産業会議編, 原子力年鑑, 平成元年版, 115頁, 日本原子力産業会議, 平成元年.
- 8) 渡会慎裕 et al., 日本原子力学会誌, 32巻, 4号, 12頁 1990.
「原子燃料サイクル」研究専門委員会, 原子燃料サイクルにおける新技術とその応用, 日本原子力学会, 7頁, 1990.
- 9) 原子力安全委員会編, 原子力安全白書, 平成元年版, 47頁, 大蔵省印刷局, 平成元年.
- 10) 坂入武彦, エネルギー, 22巻, 10号, 42頁, 1989.
- 11) 「原子燃料サイクル」研究専門委員会, 放射性廃棄物の管理と安全性, 日本原子力学会, 1990.
石原健彦, 原子力工業, 33巻, 9号, 61頁, 1987. 35巻, 8号, 32頁, 1989. 35巻, 9号, 56頁, 1989. 35巻, 10号, 62頁, 1989. 36巻, 9号, 59頁, 1990.

原子力発電の発展

日本原子力産業会議編，原子力年鑑，平成元年版，171頁，253頁，279頁，
日本原子力産業会議，平成元年。

平成2年度科学研究費補助金（一般研究 C）の一部によるものである。