



資料編

原子力発電所の主な事故

原子力発電所の主な事故

1. 県内

(1) 美浜発電所3号機2次系配管破損事故

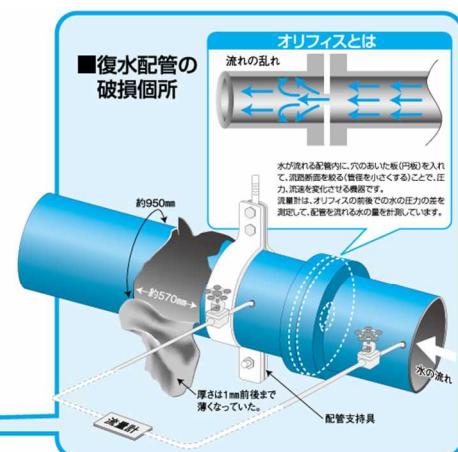
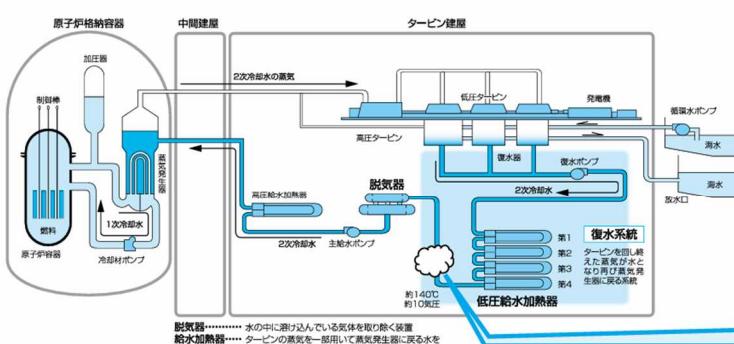
2004年8月9日、運転中の関西電力㈱美浜発電所3号機でタービン建屋の2階にある復水配管が破損、内部を流れる2次冷却水が蒸気となって噴出し、定期検査準備のため同建屋内で作業していた11人が死傷するという事故が発生した。

①事故の概要

2004年8月9日15時22分、定格熱出力で運転中の美浜発電所3号機において、中央制御室にある「火災報知器動作」等の警報が発信した。火災報知器の警報動作個所がタービン建屋2階であることを運転員が確認し、現場点検のため、タービン建屋3階の入口から建屋内に入ったところ、脱気器に隣接している区域に蒸気が充満していた。

このことから、2次系配管から蒸気または高温水が漏えいしている可能性が高いと判断し、15時26分から緊急負荷降下(負荷降下率5%/分)を開始、15時28分、「蒸気発生器への給水流動と蒸気流量の不一致」による警報が発信し、原子炉の自動停止に続き、タービンも自動停止した。この事故で蒸気として噴出した2次冷却水から放射能は検出されず、周辺環境への放射能の影響はなかったものの、破損した復水配管付近で作業していた作業員が流出した蒸気や高温水で被災し、5人が死亡、6人が負傷した。破損したのは、タービンを回し終えた蒸気が水となり再び蒸気発生器に戻る復水系統の配管で、低圧給水加熱器と脱気器の間にある流量測定用オリフィス下流部であった。この配管は直径約560mm、厚さ約10mmの炭素鋼製で、内部には温度約140度、圧力約10気圧の2次冷却水が流れている。

■美浜発電所3号機(PWR: 加圧水型軽水炉)のしくみ



■事故発生の状況

事故発生の状況		県の対応	
8月9日 15:22	定格熱出力一定運転中「火災報知器動作」の警報が発信	8月9日 15:30	美浜発電所3号機停止の第1報連絡を受ける
15:25	「タービン建屋火災発生」の構内放送	16:30	環境放射線監視テレメータシステムの測定データを確認し、発電所の周辺環境への放射能の影響がないことを確認(15:48頃)
15:26	運転員がタービン建屋で蒸気が充満していることを確認		県立病院、福井赤十字病院、福井大学医学部附属病院、公立小浜病院へ医師の派遣を要請
15:28	2次系配管から蒸気(または高温水)が漏えいしている可能性が高いと判断し、緊急に出力降下を開始		県警へり、防災ヘリの出動を要請
15:30	給水ポンプ自動停止、補助給水ポンプ自動起動		美浜原子力発電所事故対策本部を設置
15:40～16:00	「蒸気発生器への給水流動と蒸気流量の不一致」と「S/G水位低」による警報が発信し、原子炉が自動停止、引き続いてタービンが自動停止		
16:00	タービン建屋内の作業員に建屋外へ避難するよう、構内放送を1分ごとに繰り返し実施(15:30～15:45)		
	負傷者11名を確認(15:40～16:00)		
	救急車5台と消防署の車1台で負傷者を搬出(16:46)		
17:30	現地調査の結果、タービン建屋2階の天井付近にある復水配管に破口があることを確認		
19:00	タービン建屋、中間建屋内に、他に負傷者がいないことを確認		
8月10日 19:05	原子炉低温停止(1次冷却水温度93度以下)		

②県の対応

県は同日 15 時 30 分、事故発生の第 1 報を受け、福井大学医学部附属病院、福井赤十字病院、県立病院、公立小浜病院に対して、現地救急病院に医師を派遣するよう要請するとともに、県警ヘリ、防災ヘリの出動要請を行った。また、職員を現地に派遣して情報収集を行うとともに、県庁内に、西川知事を本部長とする美浜原子力発電所事故対策本部を設置した。

翌 10 日には知事が、美浜発電所 3 号機のタービン建屋内に立ち入り、配管破損部分を確認し、現地を訪れた経済産業大臣に対して、事故原因の徹底究明と再発防止対策などを強く要請した。

さらに知事は 8 月 27 日、首相官邸で内閣官房長官と会談し、内閣総理大臣宛の要請書を提出、事故の原因究明と再発防止対策の確立や 2 次系設備に対する国の関与の強化など、国として責任ある対応を行うよう強く求めた。

県は 8 月 13 日、関西電力㈱に対し、全原子力発電所について、運転を計画的に停止し、今回事故を起こした個所と類似する個所の配管を点検し、健全性を確認するよう要請した。

この要請を受け、関西電力㈱は同日、運転中の発電所を 3 グループに分けて順次停止して 2 次系配管の超音波検査（肉厚測定）を実施することとし、8 月から 12 月にかけて、定期検査中のプラントを含む 10 基について、事故発生部位と類似の部位である復水系統、給水系統のオリフィス下流部位等の 250 箇所と、原子力安全・保安院から追加点検指示があった 21 箇所の計 271 箇所の点検を行った。

点検の結果、美浜発電所 1、2 号機において、それぞれ 1 箇所ずつ、計算必要厚さを下回っていることが確認された。これらの部位と次回定期検査までに計算必要厚さを下回ると評価された美浜発電所 2 号機の 1 箇所、大飯発電所 1 号機の 1 箇所について配管の取替えを行った。

西川知事は 10 月 22 日、中川経済産業大臣に対し、高経年化対策の強化や安全管理システムの構築など 4 項目について要請した。

この要請を受け、高経年化対策の強化については、原子力安全・保安院に「高経年化対策室」を設置するとともに、高経年化対策の充実について検討するため、総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会に「高経年化対策検討委員会」を設置した。また、県内の原子力発電所の安全管理体制の強化として、2005 年 7 月 1 日に、敦賀・美浜・大飯・高浜の 4 つの原子力保安検査官事務所を統括する「地域原子力安全統括管理官（若狭地域担当）」を設置。2005 年 10 月 1 日には、（独）原子力安全基盤機構の福井事務所が開設された。

③事故の原因調査と再発防止対策

1) 美浜発電所 3 号機 2 次系配管破損事故調査委員会の設置

経済産業省は、事故発生当日の 2004 年 8 月 9 日 20 時 50 分に、美浜原子力保安検査官事務所内に現地事故対策本部を設置した。翌 10 日には、中川経済産業大臣が現地を視察するとともに、総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会のもとに「美浜発電所 3 号機 2 次系配管破損事故調査委員会」（以下「事故調査委員会」という）を設置した。

事故調査委員会は、8 月 11 日から事故原因の究明と再発防止対策の確立に向けて審議を開始した。9 月 27 日に開催された第 6 回委員会において、これまでの調査結果を整理するとともに、国や事業者等の当面の対応を示した中間取りまとめを行った。

その後も、審議は継続され、2005年3月30日に開催された第10回委員会で最終報告書が取りまとめられた。最終報告書では、特別な保安検査等を通じた関西電力㈱の再発防止策への厳格なフォローアップと、他事業者の保守管理・品質保証活動への水平展開を行うことを定めている。

2) 事故発生の原因

事故調査委員会によると、配管内を流れる水の機械的作用による浸食と化学的作用による腐食との相互作用によって起きる減肉現象（エロージョン／コロージョン）が進展し、配管の厚みが徐々に薄くなり、強度が不足し、内圧（約10気圧）により破損したものと推定された。

事故の直接的な原因は、事故のあった部位が点検リストから記載漏れしていたため、当該部位が減肉していたことを長年見落としていたことにあった。また、事業者の不十分な保守管理・品質保証の体制が事故の根本原因であることが判明したとされた。

3) 国の対応

事故調査委員会の中間取りまとめを受けて、経済産業省は9月27日、関西電力㈱に対し、文書による厳重注意を行うとともに、電気事業法に基づき、美浜発電所3号機の破損部位を含む主復水管について技術基準適合命令を発令し、当該電気工作物使用の一時停止を命じた。

また、原子力安全・保安院は2004年12月28日、電気事業法施行規則の一部を改正し、検査対象設備、検査方法等の明確化を図るとともに、当面の措置として、配管減肉管理における検査対象個所の選定、測定ポイントの設定、検査実施時期の設定、余寿命に応じて講ずるべき措置等を定め、2005年2月18日に各事業者に対して指示した。

4) 関西電力㈱の再発防止対策

関西電力㈱は、美浜発電所3号機2次系配管破損事故に関して再発防止策の行動計画を中心とした最終報告書を、2005年3月25日に経済産業省、県、美浜町等へ提出した。

また、原子力発電所に対する支援体制を強化し、安全で盤石な運営体制を早期に構築するため、発電所が立地する福井県に一層軸足を置くという観点から、原子力事業本部を若狭支社と統合し、7月25日、美浜町へ移転した。

再発防止対策の進捗状況については、社外委員を主体とする原子力保全改革検証委員会にて評価を行うとともに改善を図っている。関西電力㈱は2006年2月6日、実施状況について社長によるレビューを行い、再発防止対策は継続的改善が自律的に進む程度の段階に至ったと判断した。同年2月15日、同社は実施状況についての報告書を取りまとめ、原子力安全・保安院、県、美浜町等へ提出した。

原子力安全・保安院は、特別な保安検査によって再発防止対策の取り組み状況を確認しており、2005年度第3四半期の検査では、「すべての再発防止対策は実行段階にある」との評価を示した。2006年2月20日から3月10日にかけて第4四半期の特別な保安検査を施し、再発防止対策が組織全体に定着していることを確認した。

■再発防止対策（行動計画）

1.安全を最優先	3.保守管理を継続的に改善し、 メーカー・協力会社との協業体制を構築
①経営計画における「安全最優先」の明確化 ②経営層による現場第一線への経営計画の浸透 ③原子力事業本部運営計画策定についての対話 ④「安全の誓い」の石碑建立 8月9日「安全の誓い」の日設定 ⑤運転中プラント立入制限と定検前準備作業のあり方の検討 ⑥労働安全衛生マネジメントシステムの美浜発電所への導入、 水平展開 ⑦救急法救急員等の養成	⑮点検リストの整備等の実施 当社による主体的管理の実施 減肉管理規格策定作業への積極的な参画、当社の管理指針への反映 ⑯保守管理方針の明確化、基本的な考え方の徹底 ⑰役割分担、調達管理の基本計画を策定、実施、社内標準へ反映 ⑱業務のプロセス監査の継続実施および改善 ⑲品質・安全監査室の若狭地域への駐在 ⑳外部監査の実施 ㉑メーカー・協力会社との協業体制の構築とPWR電力間の協力体制の構築
2.積極的な資源の投入	4.地元の皆様からの信頼の回復
㉒発電所支援の強化と保守管理要員の増強および実施後の評価 ㉓技術アドバイザーの各発電所への配置 ㉔情報管理責任者の各発電所への配置 ㉕設備信頼性、労働安全の観点からの投資の充実 ㉖長期工事計画の見直し、継続的な計画の更新、フォロー ㉗積極的な投資に係る予算制度の改善等のしくみの構築 ㉘「安全最優先」の考え方にもとづく工程策定、変更のしくみの整備 ㉙2次系配管肉厚管理の重要性に関する教育 ㉚管理層へのマネジメント等の教育 ㉛法令、品質保証、保全指針などの教育の充実	㉕原子力事業本部の福井移転 ㉖原子力事業本部運営に係る社内諸制度の見直し ㉗地元とのコミュニケーションの充実 ㉘福井県エネルギー研究開発拠点化計画への協力
	5.安全への取り組みを客観的に評価し、広く広報
	㉙原子力保全改革委員会 原子力保全改革検証委員会 再発防止対策の実施状況の周知・広報

5) 配管取替工事

関西電力(株)は、技術基準適合命令を受けた主復水配管のうち、事故個所の配管を耐食性に優れたステンレス製配管に取り替えることとし、2005年8月4日、技術基準適合確認実施計画書を原子力安全・保安院に提出した。県と美浜町は、同院からこの計画書の技術基準適合性確認結果について説明を受け、9月8日、配管取替工事の着手を了承した。

関西電力(株)は9月9日から9月28日まで取替工事を実施し、取替配管の肉厚測定等を行った後、10月31日、原子力安全・保安院に工事結果を報告した。

この報告を受けた同院は11月10日、11日および12月5日、美浜発電所への立入検査を行い、12月5日、当該配管の技術基準適合と一時使用停止命令の解除を関西電力(株)に通知した。

一方、原子力安全・保安院は、当該配管取替工事に関する溶接安全管理審査の中で、製造段階で取替配管に刻印されている製造番号が不適切に書き換えられていたことを把握し、11月16日、工事発注者である関西電力(株)と受注者である三菱重工業(株)に対し厳重に注意するとともに、原因究明結果と再発防止対策を報告するよう指示した。両社は12月7日、原子力安全・保安院に報告書を提出し、原子力安全・保安院は同月14日に両者の報告は概ね妥当と評価した。県と県原子力安全専門委員会は、美浜発電所において、配管肉厚測定の立ち会いや工事検査記録の確認等を行うとともに、12月19日の県原子力安全専門委員会において、関西電力(株)、三菱重工業(株)および原子力安

全・保安院から、配管取替工事の技術基準適合性や不適切な刻印修正の問題について説明を受け、配管取替工事が計画通り実施され、健全な配管設備に復旧していることを確認した。

④運転再開

国は、四半期ごとに実施してきた特別な保安検査等により、関西電力㈱の品質保証システムが機能しているかを中心に、再発防止対策の定着状況を確認したうえで、2006年3月28日、「関西電力㈱の再発防止対策はP D C Aの一連の活動が自律的に行われつつある」と評価した。

県は、関西電力㈱が取り組んできた再発防止対策や配管の取替工事等について、県原子力安全専門委員会での審議や、発電所等への立入調査を行い、美浜町とともに慎重に確認してきた。

その結果、県としては、以下の事項を見極めたうえで、2006年5月10日に関西電力㈱から安全協定に基づき協議申し入れのあった美浜発電所3号機の運転再開について、同月26日に了承する判断を行った。

- 配管取替工事により事故個所の配管が技術基準に適合していることや、国が関西電力㈱の再発防止対策について「P D C Aの一連の活動が自律的に行われつつある」と判断していること
- 県としても、独自に事故個所の配管取替工事や再発防止対策の状況を確認し、配管が元の健全な状態に復旧していることや再発防止対策の成果や効果が現れていることを確認したこと
- 地元美浜町が運転再開を同意していること

- 関西電力㈱の森社長から「安全の確保や再発防止対策、地域共生の実現に向け継続的に取り組んでいく」との強い決意が確認されたこと

県および美浜町が運転再開を了承したことを受け、関西電力㈱は2006年9月21日、美浜発電所3号機が事故後、長期間停止していることを踏まえ、原子炉を起動し試験運転を行った。試運転では、プラント運転状態での点検を行うとともに、10月3日の原子炉停止後、10月19日にかけてプラント停止後の点検を実施し、プラント全体の設備健全性を確認した。

その後、2007年1月10日に原子炉を起動して調整運転を行い、国の総合負荷性能検査を経て、2月7日、事故から2年半ぶりに営業運転を再開した。

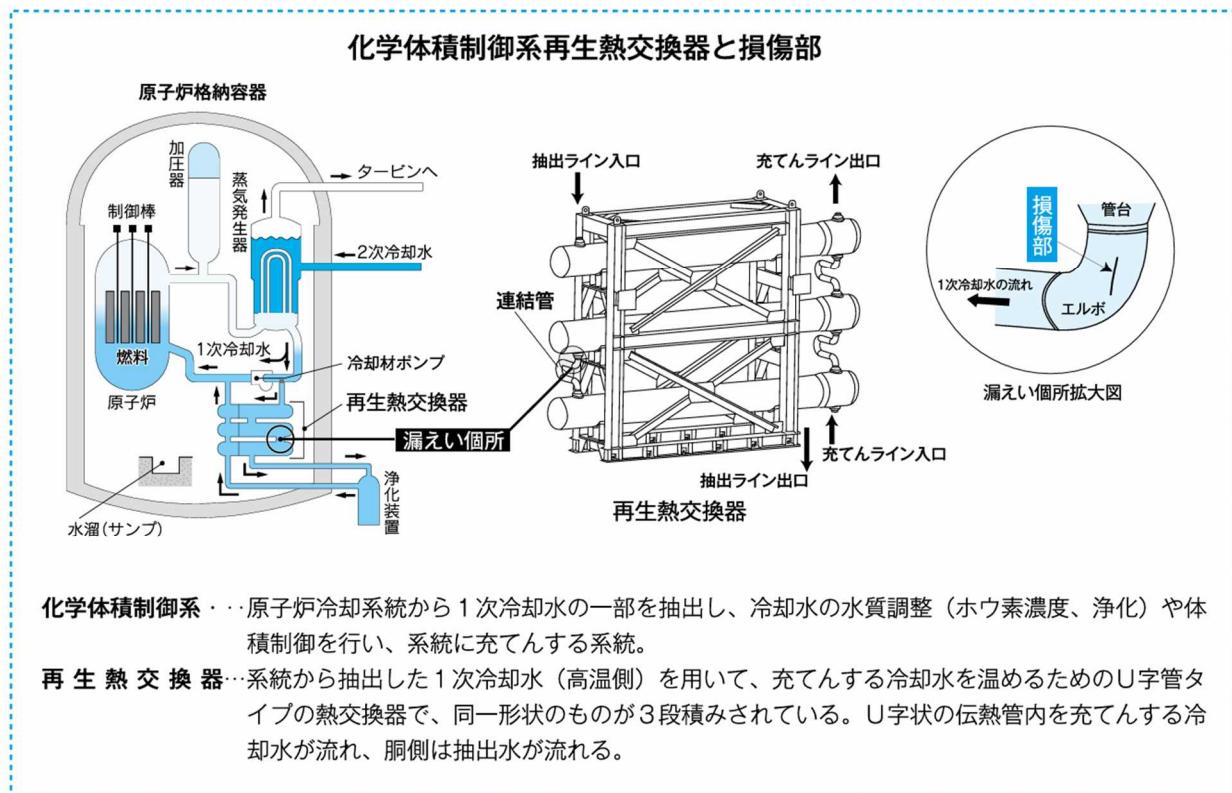
(2) 敦賀発電所 2号機 1次冷却水漏えい事故

1999年7月12日、敦賀発電所2号機の化学体積制御系にある再生熱交換器から1次冷却水が漏えいした事故は、外部環境への放射能の影響はなかったものの、1次冷却水約51トンが14時間にわたって漏えいした。

①事故の概要

1999年7月12日6時5分、定格電気出力で運転中のところ、原子炉格納容器内の火災報知器が発報するとともに、格納容器サンプ水位上昇率異常高警報等の発信および充てん流量の増加が確認されたことから1次冷却水が漏えいしていると判断した。このため6時24分から出力降下を開始、6時48分に原子炉を緊急停止した。原子炉停止後、1次冷却水の圧力と温度の降下操作を行い、格納容器内に立ち入り、化学体積制御系再生熱交換器の連絡配管の曲げ部において漏えいが確認されたことから、20時16分に漏えい個所の前後弁を閉止し漏えいを停止した。

この事故で1次冷却水約51トンが格納容器内部に漏えいしたが、環境への放射能の影響はなかった。



②事故の原因

連絡配管と熱交換器胴について、原因調査を実施した結果、連絡配管のエルボ部に貫通割れを含め12箇所、熱交換器胴の抽出水出口近傍に多数の割れを確認した。また、流動模擬試験（モックアップ試験）、応力解析等を実施し、損傷メカニズムを検証した。その結果、割れの原因是再生熱交換器の内部構造に起因し、熱交換器出口近傍で内筒を流れる低温水と内筒をバイパスして流れる高温水が周期的に変動することにより高サイクル熱疲労が発生したものと推定された。

再生熱交換器の損傷メカニズム

図1 上部にすき間が大きい場合

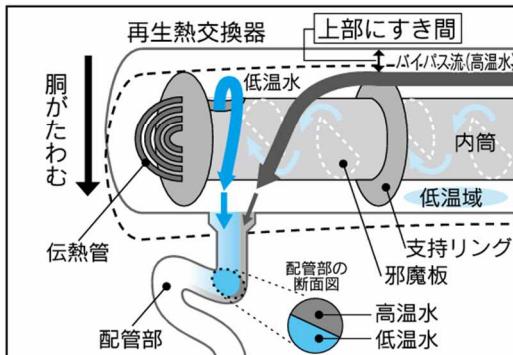


図2 下部にすき間が大きい場合

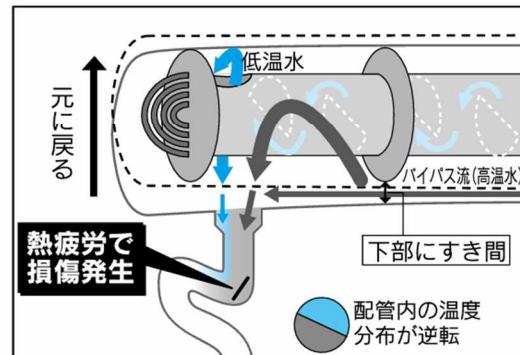


図1と図2の周期的繰り返し（推定）

- 本体胴と指示リングのすき間が上にある場合は、バイパス流は上部を流れるが、下部は流れなく低温となり本体胴が熱収縮して下向きにたわむ。(図1)
- これにより上のすき間が小さくなり、バイパス流は下部のすき間を流れる。このため上下の温度差がなくなり、たわみがもどに戻り、上のすき間が大きくなる。(図2)
- この変化が周期的に発生していたと推定。

③再発防止対策

資源エネルギー庁は1999年10月25日、定期検査の充実などの再発防止対策をまとめた報告書を原子力安全委員会に提出し、同委員会は同日、報告内容を妥当と認めた。

報告では、化学体積制御系再生熱交換器の連絡配管で発生した割れは、内筒型再生熱交換器の内部構造に起因した高サイクル熱疲労が原因と判明し、国は高サイクル熱疲労に対する設計審査の充実を図ることとした。

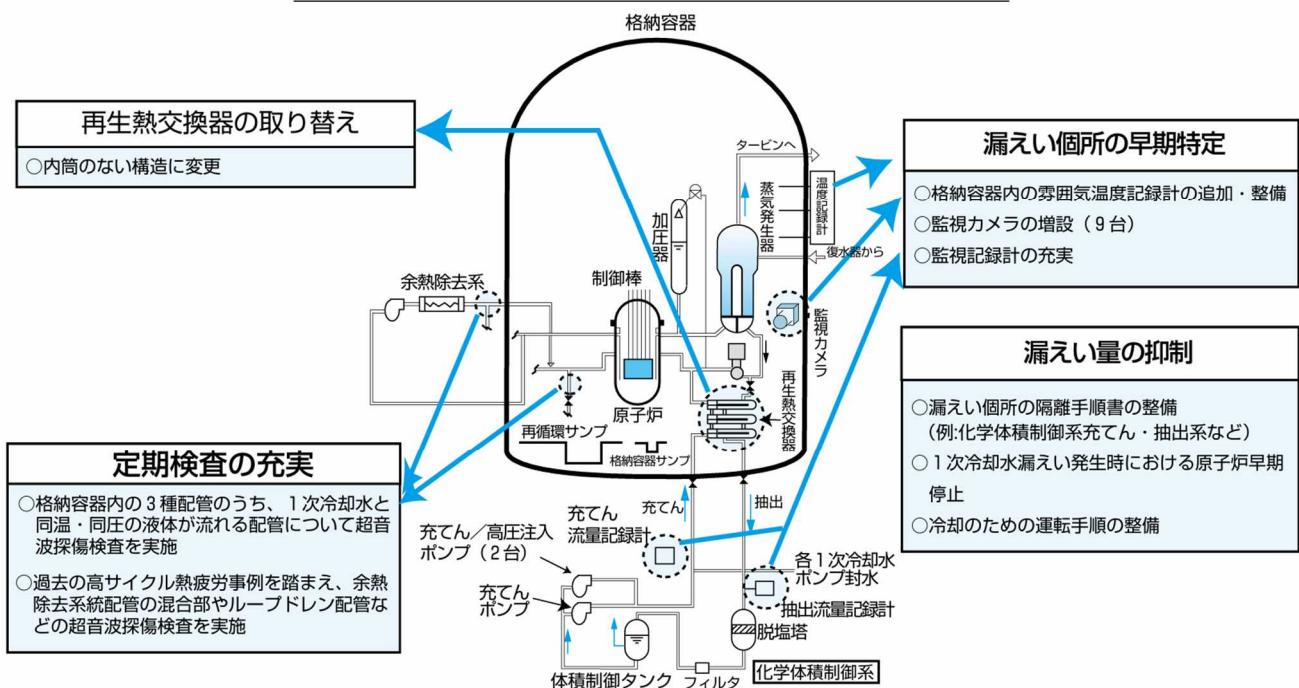
高浜発電所3、4号機など敦賀発電所2号機と類似の内筒型再生熱交換器を採用しているプラントについては、実機を模擬した流動試験やコンピュータシミュレーションなどの解析結果および実機での測定結果から、同様の損傷が発生することは考えられないとしたが、念のため至近の定期検査で再生熱交換器連絡配管の超音波探傷検査を実施し問題がないことを確認した。また、国内外での高サイクル熱疲労による損傷事例を踏まえ、高温水と低温水が合流する余熱除去系統配管の混合部などについても超音波探傷検査を実施するほか、格納容器内の第三種管のうち、第一種管（1次冷却系主配管など）と同様の温度と圧力の1次冷却水が流れている配管については、第一種管並みに超音波探傷検査を実施することとした。

これを受けて、日本原子力発電㈱は、1999年11月27日からの敦賀発電所2号機の第10回定期検査で、内筒のない再生熱交換器に一式取り替えるとともに、同機で該当する第三種管の溶接部について超音波探傷検査を実施した。また、格納容器内に監視カメラを9台増設して、漏えい個所の早期特定を図るほか、漏えい量を抑えるため、配管の隔離や原子炉の早期停止、早期冷却など、運転手順書を見直した。

これらの再発防止対策が終了したことから、2000年1月25日に原子炉を起動、1月28日に発電を再開し、2月21日に営業運転を再開した。

注) 第一種管とは、運転時に1次冷却系に加わる高い圧力を受け止める配管をいう。また、第三種管とは、原子炉を安全に停止させるなど、非常時に安全を確保するため使用する系統の配管をいう。

敦賀発電所 2号機 1次冷却水漏えい事故 再発防止対策の概要



(3) 高速増殖原型炉もんじゅナトリウム漏えい事故

1995年12月8日、高速増殖原型炉もんじゅで、2次主冷却系ナトリウム漏えい事故が発生した。この事故は、高速増殖炉の大きな技術的課題であるナトリウムの取り扱いに関するもので、その漏えい規模や影響範囲から見ても高速増殖炉の安全確保の根幹に関わる重大な事故であった。

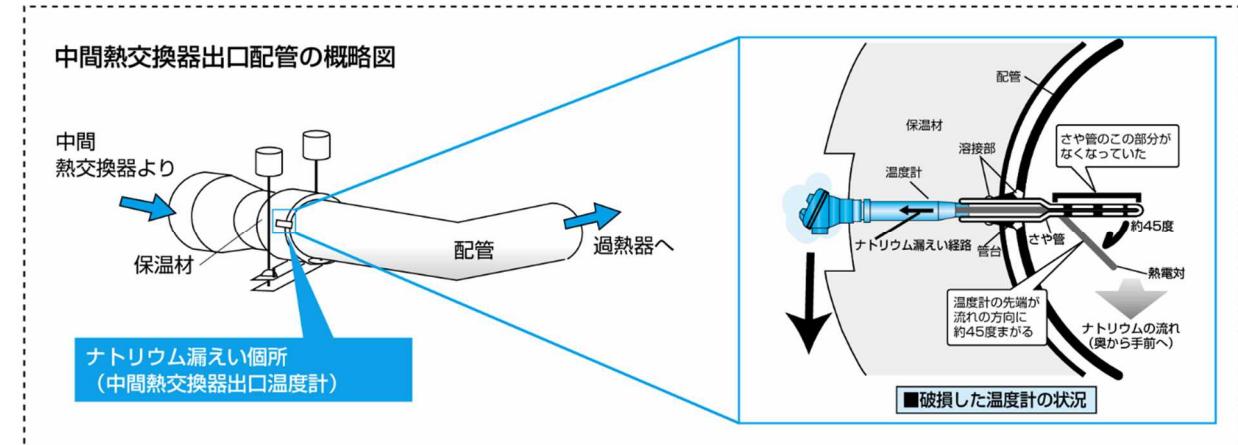
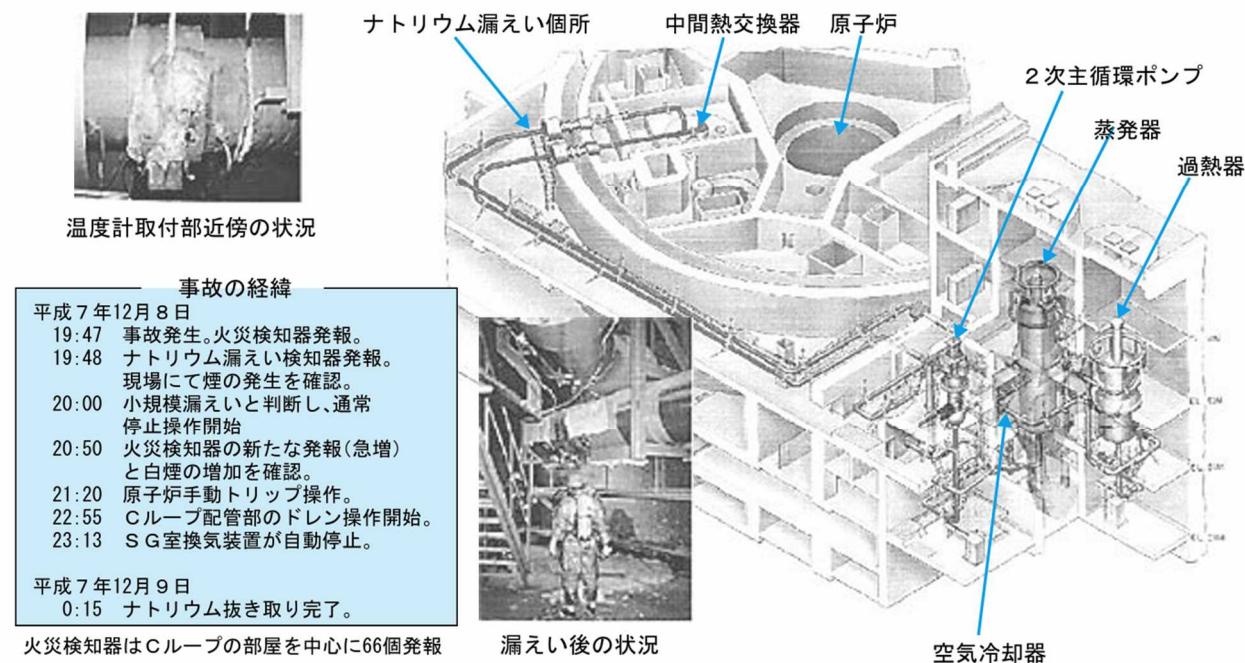
①事故の概要

高速増殖原型炉もんじゅ（以下「もんじゅ」という）は、1994年4月5日には初臨界を達成し、1995年8月29日には初送電を行った。電気出力約40%で試運転中の1995年12月8日19時47分、2次主冷却系Cループの中間熱交換器出口側配管に取り付けられている温度計のさや管段付部で折損し、ナトリウムが室内に漏えいした。これによりナトリウム漏えい検出器や火災報知器が動作し、現場で白煙の発生が確認されたことから、ナトリウム漏えいと判断し、原子炉を手動停止するとともにCループ配管内のナトリウムを抜き取り、漏えいを停止させた。

漏えいしたナトリウムは燃焼し、配管下にある換気ダクトや足場（グレーチング）を損傷させ、床上等に堆積するとともに、酸化ナトリウムを主成分とするナトリウムエアロゾルとして屋内に広く拡散し、一部が屋外に放出された。

なお、原子炉や1次冷却系への安全上の影響および周辺環境への影響はなかった。

2次主冷却系(Cループ)配管室ナトリウム漏えい部の状況



②事故の原因調査

漏えいした個所は、中間熱交換器出口 2 次側温度計で、約 640kg の 2 次系ナトリウムが配管室内に漏えいし燃焼した。漏えい直下部にはナトリウム堆積物があり、直下の排気ダクト、足場（グレーチング）は一部で欠損し、床ライナは一部変形、わずかな板厚減少が認められた。温度計さや管は段付き部で流力振動により折損し、さや細管部は過熱器内で回収された。漏えいしたナトリウムは化合物となって建屋内の同系統室に飛散した。

原因調査として、C ループの 2 次系温度計の一部を切り出し調査するとともに、A、B ループの 2 次系温度計については、漏えい検出器を取り付けた。排気ダクト、足場、床ライナについても、調査のため切断、搬出した。堆積物、化合物についてはすべて回収・清掃作業を完了し、各種機器等への影響がないことを確認した。

また、ナトリウム漏えい燃焼の影響を調査するため、大洗工学センターで、燃焼実験を行った。科学技術庁（現：文部科学省）は原子力安全局に「もんじゅナトリウム漏えい事故調査・検討タスクフォース」を設置し、事故原因の詳細調査に当たるとともに、原子力安全委員会は原子炉安全専門審査会に「高速増殖原型炉もんじゅナトリウム漏えいワーキンググループ」を設置し、独自の立場から原因究明および再発防止対策等について調査審議を行った。

事故原因等について、

- 1) 温度計さや部の破断は、ナトリウムの流れによる振動疲労で、段付き形状等に原因があり、設計管理に問題があった。
- 2) 漏えいしたナトリウムは燃焼し、高温での腐食反応により足場材等に破損が生じた。また、白煙が建屋内に拡散し、機器、天井、床等に付着したため、約 7 カ月をかけて清掃した。
- 3) 漏えいしたナトリウムによる影響として、高温腐食反応が新しい知見として分かり、安全審査では考慮されていなかった。

これらの原因究明および再発防止対策等について、科学技術庁は 1997 年 2 月 20 日に原子力安全委員会は 1998 年 4 月 20 日に最終的な調査結果を取りまとめた。

原子力安全委員会の最終報告書では、床ライナの腐食抑制対策等の目標は、腐食・熱膨張を考えても機能が維持されること、水素濃度が爆燃限界を下回ることとし、漏えいナトリウムによる「最高温度を低く抑える」「高温の持続時間を短く抑える」ことが対策の基本とした。核燃料サイクル開発機構（現：日本原子力研究開発機構）の改善策（火災検出システムと総合漏えい監視システムの新設・換気空調設備自動停止の強化・ナトリウムドレン機能の増強・消火のため窒素注入設備の新設・壁、天井の断熱構造の新設等）について、今後、国は安全規制の手続きでこれら改善策の妥当性を詳細に確認する必要があるとした。

③安全性総点検

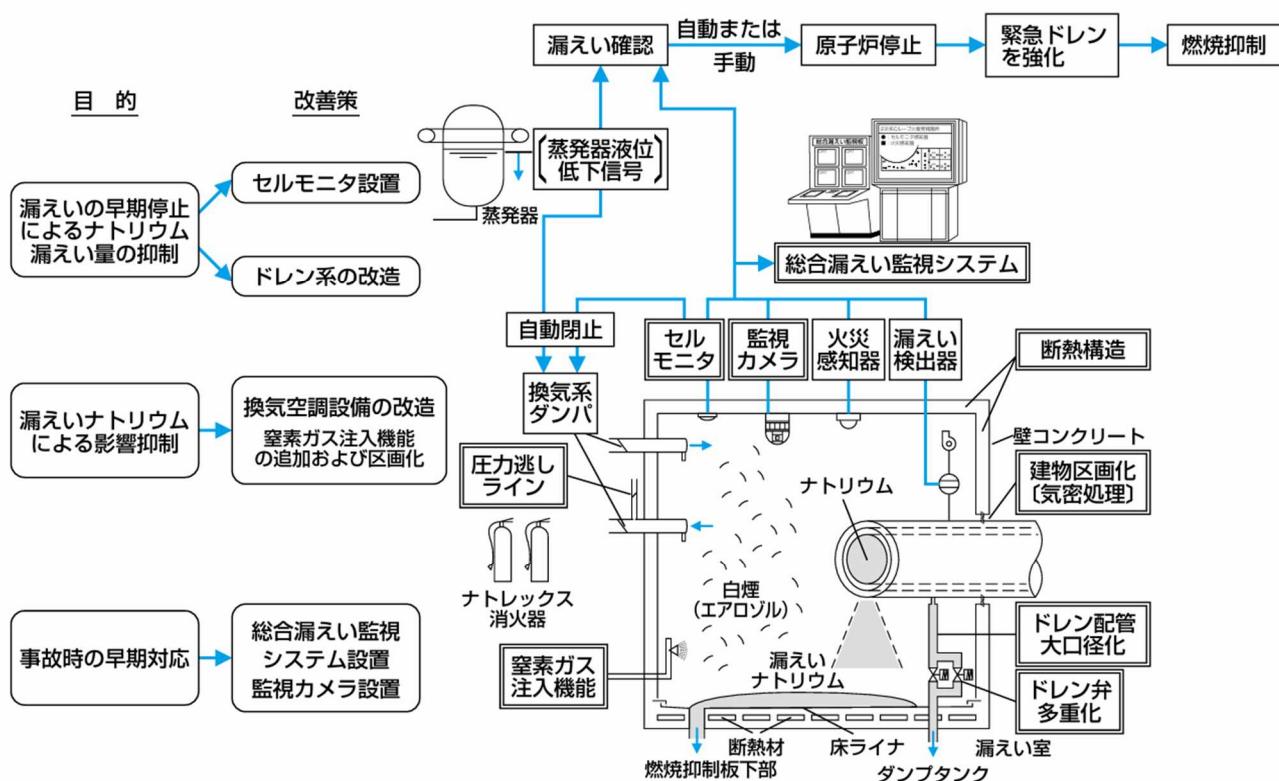
「もんじゅ」の安全性および信頼性の向上を図り、技術的信頼の回復を目的として、原因調査の結果明らかとなった問題点、反省点を基に、設備、手順書、教育訓練について、1996 年 12 月 18 日から安全総点検を実施した。

科学技術庁の安全性総点検チームは、安全性総点検結果について報告書を取りまとめ、1998 年 3 月 30 日に公表した。

報告書では、水・蒸気系に設置されている温度計さやの一部に流力振動の評価上問題があることが判明したが、その他の設備に安全性を損なうような問題は認められず、また現在考えている施設の改善策はナトリウム漏えいの拡大防止上有効なものと判断された。一方、マニュアル類や品質保証活動の点検では、具体的な運用、体制の構築等について問題点が摘出され、今後もんじゅで改善が図られこととなる内容について、確実に実行されることを国が確認をする必要があると指摘された。

科学技術庁としては、原子炉施設の安全管理に係る規制業務を着実に遂行することとし、特に報告書で今後の対応が必要であるとされた事項に対処するため、動力炉・核燃料開発事業団（現：日本原子力研究開発機構）の自主保安設備（特に冷却材のナトリウムに関連する施設）が改修される場合、その内容、重要性等により審査対象設備に変更する必要があるかどうかの検討、改訂または新たに制定するマニュアル類の妥当性の確認、改善する設備に関する周囲の設備への改善に伴う影響の確認、高速炉の研究開発成果の把握ともんじゅ設備等への所要の反映を図るなどの取組みを行うこととした。また、同庁の原子力安全技術顧問から構成されるもんじゅ担当グループを設け、安全規制業務の実施内容について意見を求め、適宜、原子力安全委員会に報告することとした。

動力炉・核燃料開発事業団は、安全総点検として、もんじゅのシステム・設備全体について設計段階にまで遡り、安全にかかる機能や設備の健全性を点検し、設備上の改善事項とともに、安全管理体制や品質保証体系などを点検し、改善事項を摘出した報告書を取りまとめ、1998年5月29日、県や敦賀市等に、安全協定に基づく異常時状況連絡書（第6報）として提出した。



2次ナトリウム漏えいに対する設備改善の概念

④原子力安全委員会の対応

1)研究開発段階の原子力施設の安全確保対策

原子力安全委員会は、高速増殖原型炉もんじゅナトリウム漏えい事故を契機として、1996年3月から研究開発段階施設の安全確保対策の検討を進め、1998年4月16日、報告書として取りまとめた。

報告書では、安全確保対策の基本的な考え方として

- ・新たな技術知見の設計や運転への反映、適切な規制
- ・新しい知見のデータベース化
- ・設置者責任や行政庁の設置許可後の安全規制内容の見直し
- ・もんじゅ改善措置に当たっての厳重な安全審査等を行うこととした。

2)ナトリウム漏えい燃焼での腐食の取扱い

原子力安全委員会は1998年2月5日、1980年に決定している「高速増殖炉の安全性の評価の考え方」に、ナトリウム腐食の考え方の検討を行うことを決定した。その後調査審議を行い2000年10月12日、安全性の評価において考慮すべき化学的因子について、界面反応にかかる知見への十分な考慮が必要であるとする解説を付与した。

3)もんじゅの安全性確認

事故後、原子力安全委員会決定等で指摘した事項に対し、科学技術庁および核燃料サイクル開発機構が適切に対応しているかどうか確認し、「もんじゅ」の安全性の確認に継続的に取り組んでいくため、1998年10月29日、原子力安全委員会に「もんじゅ安全性確認ワーキンググループ」を設置した。

現地調査を含め調査審議を行い2000年8月8日、「科学技術庁および核燃料サイクル開発機構の対応方針および対応状況は概ね妥当であることを確認した。ナトリウム漏えい対策関連事項については、今後、安全規制手続き等において最終的に確認されるべきものと考える」とする報告を取りまとめ、9月28日、原子力安全委員会に報告され了承された。

⑤安全性総点検での指摘事項に対する対応

2001年1月の省庁再編により、「もんじゅ」の安全規制が移管された原子力安全・保安院は同年6月、科学技術庁の安全性総点検において指摘された事項に対する対応計画を定めて実施すること、定めた対応計画と実施状況について報告することを核燃料サイクル開発機構に指示した。

この指示を受け、核燃料サイクル開発機構は同年6月、対応計画とそれまでの対応状況について原子力安全・保安院に報告した。その後、核燃料サイクル開発機構は、安全性総点検指摘事項の改善状況について、2001年7月から2008年2月にかけ、4回（3回目からは日本原子力研究開発機構）にわたって報告した。

2008年3月には、1次系の弁に設置された接触型ナトリウム漏えい検出器で警報が発信し、その際の対応や通報遅れがあったことから、原子力安全・保安院は、日本原子力研究開発機構に対し、漏えい検出器の点検、品質保証体制や安全文化の醸成活動等に関して、改善指示を行うとともに、特別な保安検査で改善状況をチェックすることとした。

この指示に対し、日本原子力研究開発機構は経営の現場への関与、品質保証体制、組織体制等の強化に加え、技術的専門家の意見の反映、業務の透明性の向上など、42項目の行動計画を定め、改善に取り組んだ。日本原子力研究開発機構は、この事象によって国から指示された事項や、特別保安検査での指摘事項への取組みなど、試運転再開に向けた取り組みを総括した安全性総点検第5回報告書を、2009年11月、原子力安全・保安院および県・敦賀市に提出した。

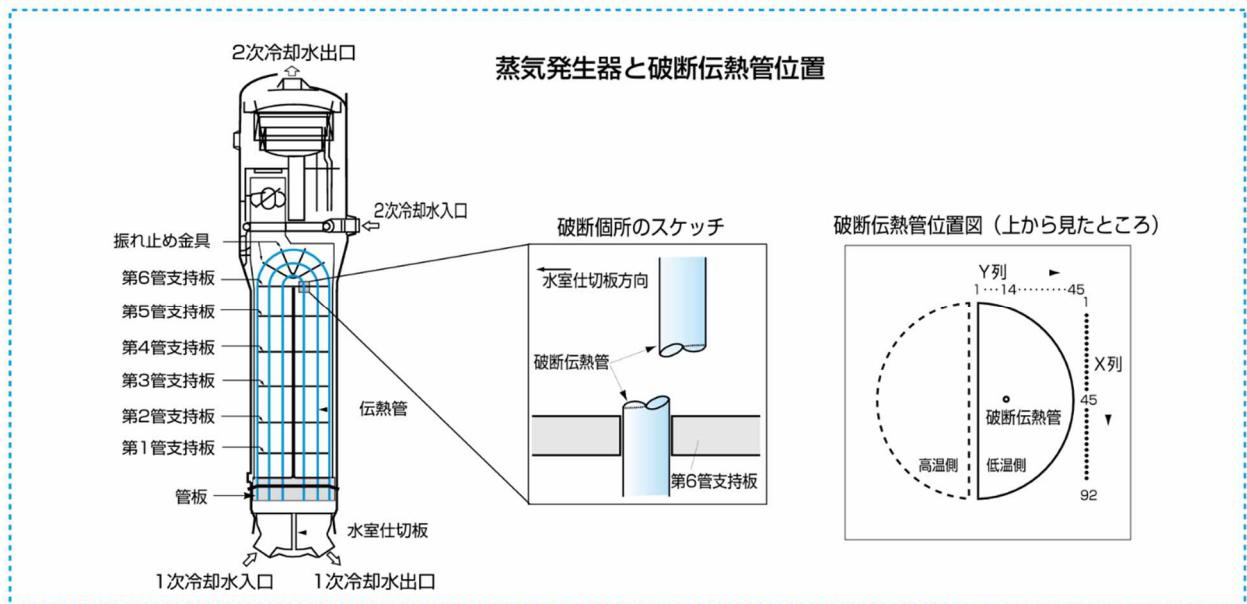
原子力安全・保安院は、「もんじゅ」の安全確保に関する事項について総合的に検証するため、2005年11月に設置した、総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会原子炉安全小委員会「もんじゅ安全性確認検討会」で、第5回報告書の内容を詳細に検討・審議し、2010年2月、「原子力機構は、試運転再開に当たって、安全確保を十分行い得る体制となっていると評価する。」と結論づけた。

(4) 美浜発電所 2号機蒸気発生器伝熱管破断事故

1991年2月9日、関西電力㈱美浜発電所2号機で起きた蒸気発生器伝熱管破断事故は、振れ止め金具が設計どおり取り付けられていなかったことが原因で、そのために伝熱管が破断し、我が国で初めて非常用炉心冷却装置（ECCS）が作動した大きな事故であった。

①事故の概要

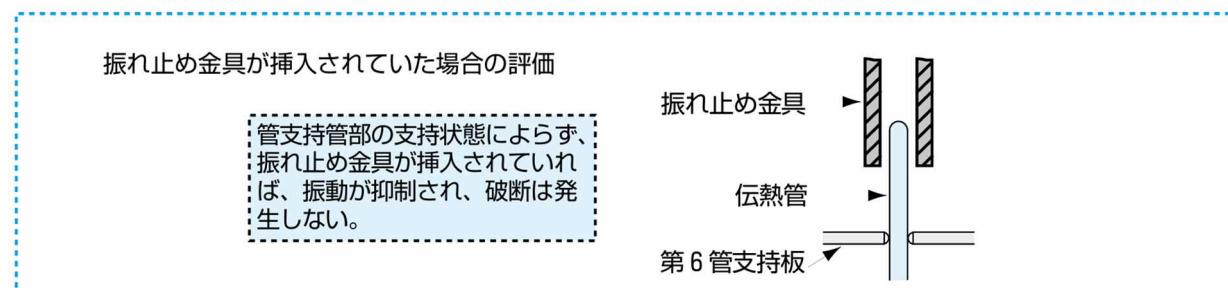
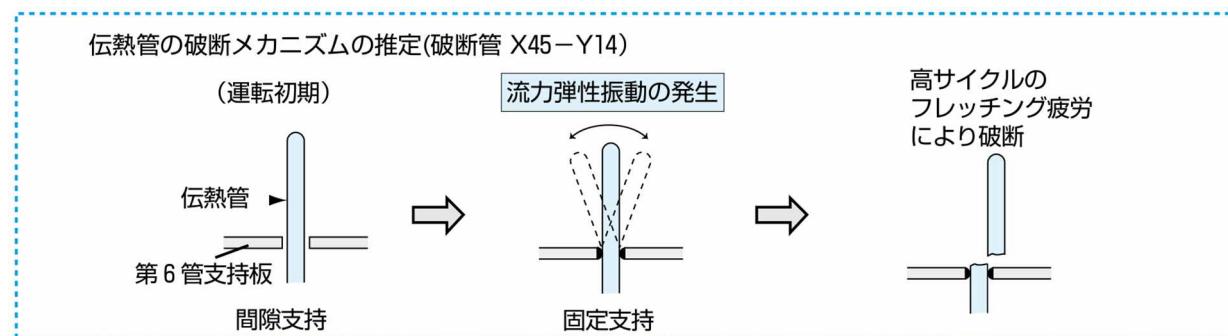
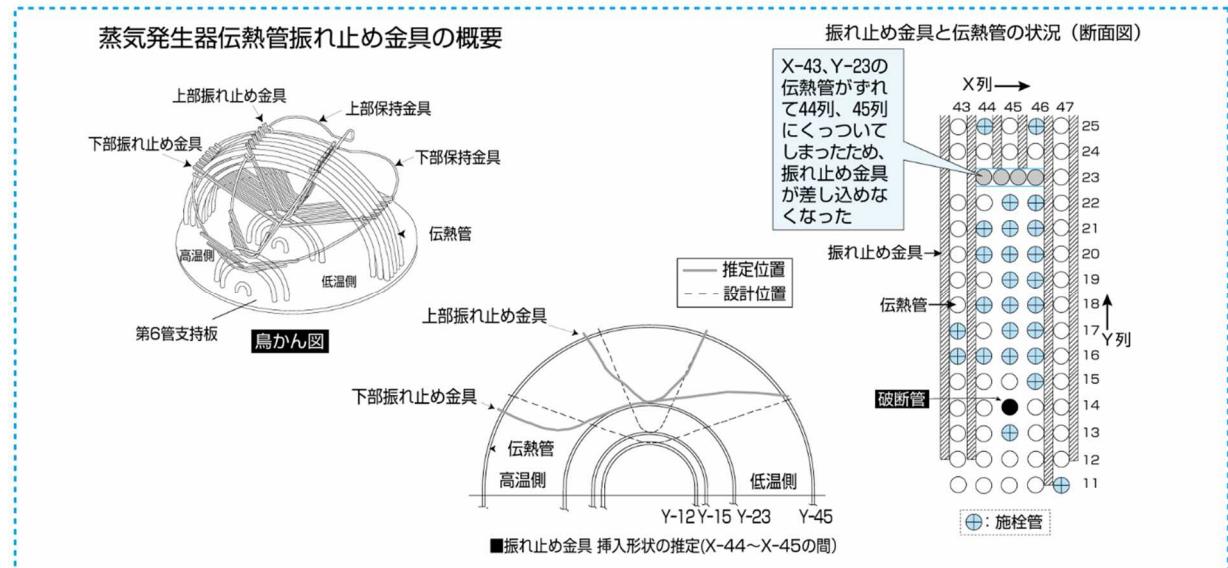
- 1) 1991年2月9日12時40分頃、蒸気発生器伝熱管の漏えいを監視している蒸気発生器プローダウン水モニタ（R-19）の指示値がわずかに上昇しているのを発見したため、13時頃蒸気発生器伝熱管の漏えいを確認する2次冷却水の放射能濃度分析を開始した。
- 2) 13時40分～45分、蒸気発生器伝熱管の漏えいを監視している復水器空気抽出器ガスモニタ（R-15）と蒸気発生器プローダウン水モニタ（R-19）の指示値が急上昇し、「注意警報」を発信。放射能放出系統を自動閉止した。
- 3) 13時45分、加圧器の圧力と水位が低下し始めた（蒸気発生器伝熱管が破断）ため、13時48分停止操作を開始した。
- 4) 13時50分、加圧器の圧力と水位が設定レベルまで低下したため「原子炉自動停止」。引き続きECCSが自動作動した。
- 5) A-蒸気発生器伝熱管の破損と判断し、A-蒸気発生器を隔離するため、主蒸気隔離弁を遠隔操作で閉止するが、完全に閉まらないため、手動で増締めした。[14時2分]
- 6) 原子炉が冷却されていることを確認し、1次冷却水の流出を停止させるため、加圧器逃がし弁の開動作を行なうが作動しないので、加圧器補助スプレーで1次側の圧力を下げ、2次系への流出を停止した。[14時48分]
- 7) 調査の結果、A-蒸気発生器の伝熱管（外径22.2mm、板厚1.27mm）1本が第6支持板部で円周方向に完全に破断していた。



②事故の原因

1991年2月、通商産業省（現：経済産業省）は、「美浜発電所2号機調査特別委員会」を設置し、あらゆる角度から詳細な原因調査、事故の影響評価検討を行った。

その結果、伝熱管が破断した原因是、伝熱管の振動を抑えるための「振れ止め金具」が設計どおりに取り付けられていなかったため、2次冷却水の流れによる振動（流力弹性振動）が破断箇所を支点として発生し、伝熱管に繰り返し力が加わり、高サイクル疲労により破断したものと判明した。また、「振れ止め金具」が設計どおり取り付けられていれば、伝熱管が破断しないことが判明した。



③事故の影響

1) 環境への放射能放出量とその影響評価

この事故では、復水器空気抽出器排気系統、主蒸気逃がし弁などから気体状の放射性物質が、蒸気発生器プローダウン水排出系統から液体状の放射性物質がごく微量放出された。

福井県では、事故発生後、直ちに「県環境放射線監視テレメータシステム」で環境放射線量の確認・評価を行うとともに、大気中、海水、海産食品などの環境試料中の放射能調査を強化し、環境への影響調査を実施した。また、美浜町も独自に臨時放射能調査を実施した。この結果、事故による影響は検出されず、環境安全上の問題がないことが確認された。

大気中に放出された放射性希ガスは約 0.6Ci (2.2×10^{10} Bq)、放射性ヨウ素は約 0.01Ci (3.7×10^8 Bq)、海へ放出された放射性物質は約 0.0002Ci (7.4×10^6 Bq) で、発電所の年間放出管理目標値を十分下回っていた。これによる人の受ける被ばく線量を評価すると、約 $0.02 \mu\text{Sv}$ となり、自然界からの放射線によって人が 1 年間に受ける量の約 10 万分の 1 であり影響を与えるものではなかった。

2) 炉心の健全性

蒸気発生器伝熱管の破断により、蒸気発生器 2 次側に流出した 1 次冷却水の量は各種記録および事故再現解析から約 55t と評価された。一方、ECCS は設計どおり作動し、ECCS などから原子炉へ注入された冷却水の量は約 61t と評価され、原子炉の燃料部分（炉心）は常に冠水状態にあった。

炉心部の冷却は、ECCS による冷却水の注入と健全側の蒸気発生器によって行われ、燃料は事故前の温度より高くなることはなく、炉心部分での沸騰もなく、燃料の健全性が確認された。

3) 原子炉容器などの健全性

ECCS などから、約 30°C の冷たい水が高温の原子炉などに注入されたことから、その影響を評価した結果、原子炉容器が脆性破壊（もろく壊れること）する可能性はなく、また、その他機器の健全性に与える影響もなく、今後の使用に問題がないことが確認された。

④事故の再発防止対策

通商産業省（現：経済産業省）は 1991 年 11 月 25 日、事故調査報告書を取りまとめ、再発防止対策や教訓事項に基づき、各事業者に改善対策などを指示した。

一方、福井県や美浜町でも事故発生後、国および関西電力㈱に対して、事故原因の徹底的調査、点検管理体制の再チェック、定期点検の見直し、通報連絡体制の確立、県民の信頼回復策などを申し入れ、安全確保対策の再徹底を要請した。通商産業省の指示、福井県および美浜町の要請に対し、関西電力㈱は 1991 年 11 月 29 日、改善対策などを回答し、以下の対策を実施した。

■設備等改善関係

1) 蒸気発生器の取替え

蒸気発生器全数（2 台）を撤去し、新型の蒸気発生器に取り替えた。

2) 高感度型主蒸気管モニタの設置

蒸気発生器伝熱管漏えいをより迅速かつ確実に検出することを目的として、1次冷却材中の窒素16（N-16）から放出される検出性に優れた高エネルギーの γ 線を検出する高感度型放射線モニタ（N-16モニタ：シンチレーション検出器）を各ループの主蒸気管に設置した。

3) 主蒸気管モニタの設置

蒸気発生器伝熱管漏えい時に主蒸気管を通り環境に放出される放射能量を把握するために、これを検出する放射線モニタ（電離箱検出器）を各ループの主蒸気管に設置した。

4) 原子炉水位計の設置

原子炉の冷却状況を監視するパラメータを多様化させるため、出力分布調整用制御棒クラスタ駆動軸の一部を撤去し、新たに温度計方式の原子炉水位計を設置した。

5) 主蒸気隔離弁の閉止機能向上

主蒸気隔離弁（全2台）の閉止機能向上を図るため、主蒸気隔離弁の閉止バネ力の増加および閉弁抵抗力を低減させるため弁棒摺動部のグランドパッキンリング数の減少を行った。また、念のため手動増締め装置を設置した。

6) 常用母線インターロック改造等

安全注入信号（非常用炉心冷却系作動信号）発信時の事故収束の多様化を図るため、外部電源が受電可能な場合は、常用母線に起動変圧器から受電できるように受電回路の一部を変更するとともに、インターロックを変更した。

7) プラント計算機の処理能力の向上

事故後監視計（PAM）トレンド記録に係るソフトウェアの改善、アラーム情報記憶容量の増強を行った。なお、改善に当たっては、計算機本体の取り替えを行い、保守性ならびに運転監視面での向上も合わせて改善を図った。

8) 加圧器逃がし弁計器用空気系統の増強

加圧器逃がし弁の信頼性をより向上させるため、計器用空気系統を1系統増設し、加圧器逃がし弁2台への作動空気を独立して供給できるように系統の分離を図った。

9) 計器用空気系統不要弁の撤去

計器用空気系統の信頼性向上のため、単一誤操作により安全機能を阻害する可能性のある手動弁のうち、隔離等に不要な弁6台を撤去した。

■品質保証活動の充実

品質監査担当役員を配置し、原子力部門とは独立した立場でチェックする「原子力監査プロジェクトチーム」を設置した。また、本店、福井原子力事務所（現：原子力事業本部）、各発電所の品質保証部門の体制を強化した。

■通報連絡の迅速・確実化

事故・トラブル発生時の迅速かつ適切な通報連絡を確実化するため、一斉通報ファクシミリ、ポケットベル、携帯電話を設置した。

■原子力安全システム研究所の設置

原子力発電の信頼性を一層向上させるため、1992年3月に原子力安全システム研究所を設置した。なお、原子力安全システム研究所は、1997年11月に京都府の「けいはんな」から美浜町毛ノ鼻工業団地に移転した。

■県民の信頼回復策

地域とのコミュニケーションの充実を図るため、組織体制を強化し、地域のイメージアップの積極的支援、地域振興への協力に取り組んでいく。

再発防止対策が完了したことから、関西電力㈱は1994年5月20日、美浜発電所2号機運転再開について申し入れた。これを受け、県および美浜町は1994年6月8日に立入調査を行い、再発防止対策が着実に行われたことを確認、1994年7月8日に運転再開について了承した。

その後、美浜発電所2号機は1994年8月16日に原子炉を起動、8月25日に調整運転を開始し、10月13日に営業運転を再開した。

(5) 敦賀発電所 1号機一般排水路放射能漏えい事故

1981年4月、日本原子力発電㈱敦賀発電所で起きた一般排水路への放射性廃液の漏えい事故は、原子炉施設の設計思想からは考えられない事故で、原子炉付属設備の設計、建設段階での詳細なチェックの必要性を再認識させるものであった。また、同時に日常の環境モニタリングの重要性が再認識された事故であった。

①事故の概要

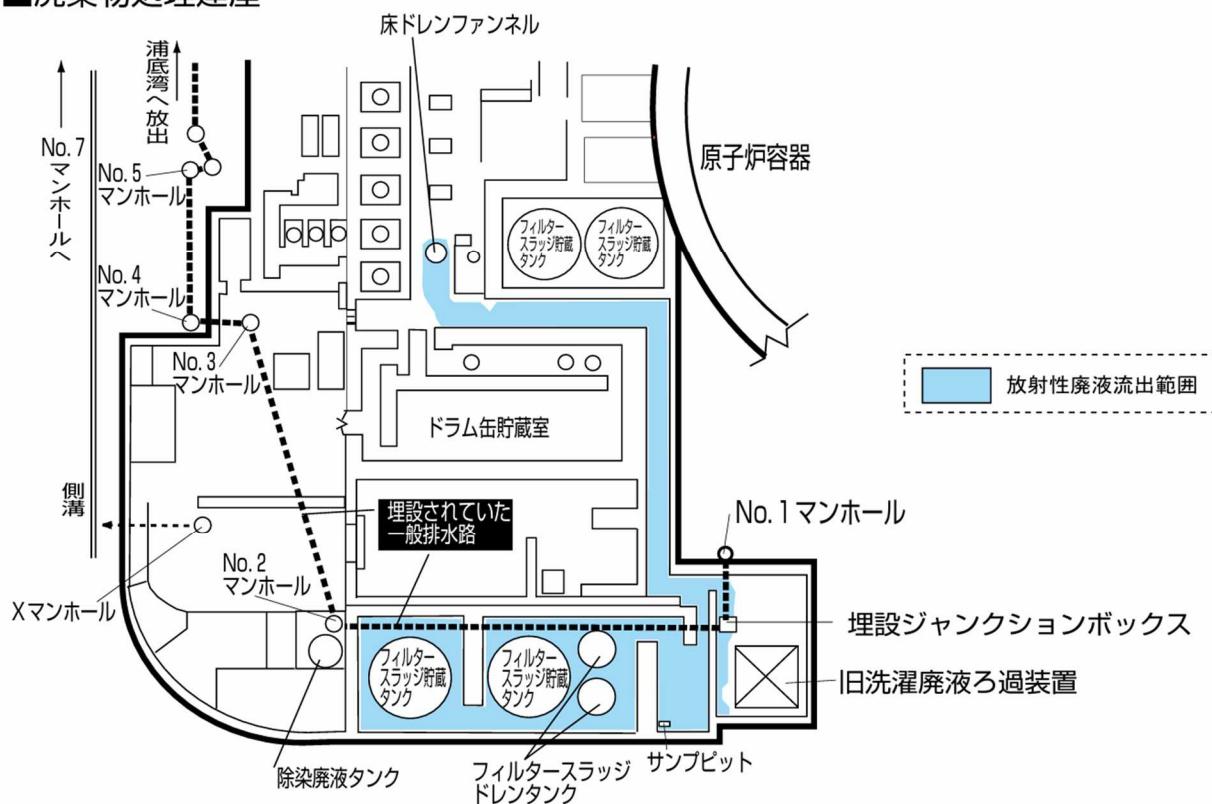
県衛生研究所が定期的に実施している環境放射能調査において、1981年4月8日に敦賀発電所前面海域である浦底湾で採取したホンダワラから、1980年～1981年の測定値と比較して1桁以上高いコバルト60、マンガン54が検出された。

発電所内外の調査を実施した結果、敦賀発電所の雨水などを流す一般排水路や浦底湾の海底土などから、発電所に由来する高濃度のコバルト60などが検出された。

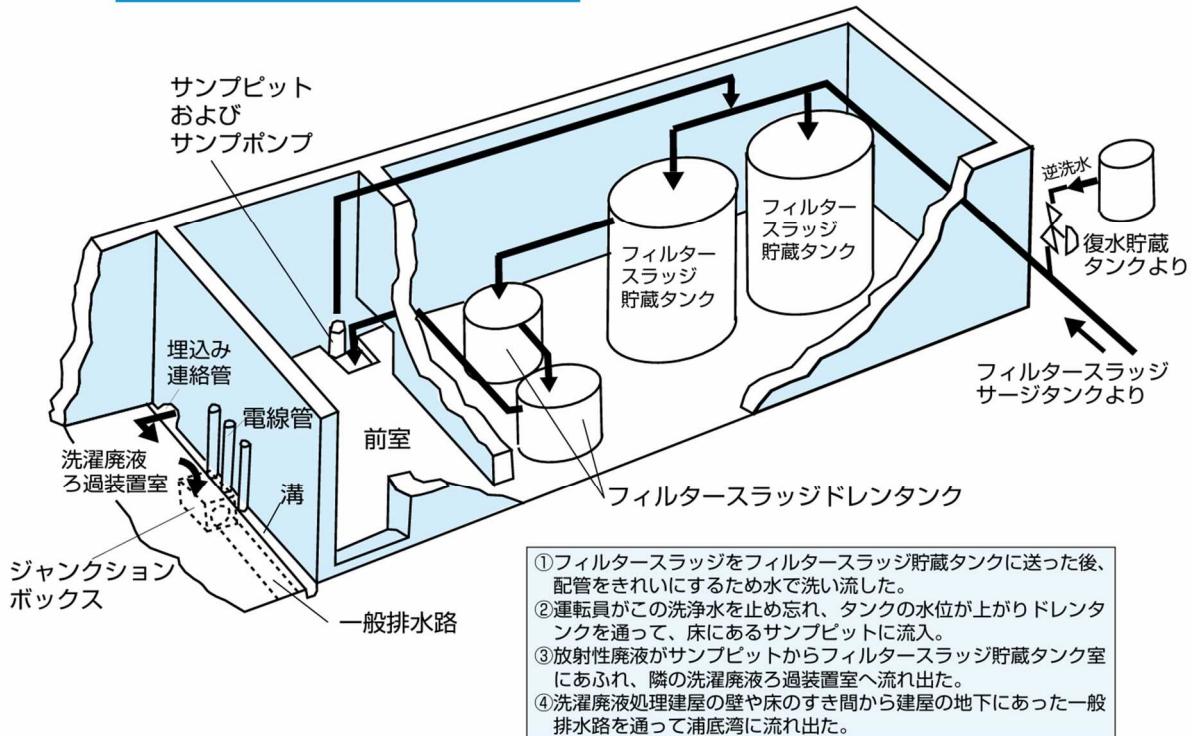
その後、一般排水路を閉鎖し、放射能の海への流出を防止するとともに、原因調査が国、県、敦賀市によって実施された。その結果、1981年3月8日に廃棄物処理建屋内で高放射能濃度廃液の床面への漏えいが発生し、その際、洗濯廃液処理建屋床面と壁とのすき間から、同建屋地下を通っていた一般排水路に廃液の一部が流入したことが原因と判明した。

一方、周辺海域での放射能調査は、県衛生研究所が中心となり科学技術庁（現：文部科学省）の協力を得て、魚介類、海藻、海水、海底土と多種多量の測定が速やかに行われ、魚介類などは全く安全であることが確認された。また、海底土の汚染も一般放水口のごく近くの狭い範囲に限られていることが確認され、これによる影響も無視できることが確認された。

■廃棄物処理建屋



一般排水路への放射性廃液漏れの状況



② 対策および事故の教訓

この事故の原因を分類すると次のようになる。

- 1) 一般排水路が放射性廃液を取り扱う建屋の下を通っていて、かつ開口部を有していたこと。
- 2) 洗濯廃液ろ過建屋の構造が不備で、床と壁の部分にすき間があったこと。
- 3) 運転員が弁を閉め忘れたため、フィルタースラッジ貯蔵タンクから廃液が漏えいし、さらに巡視点検をおろそかにしたため漏えいの発見が遅れたこと。
- 4) 漏えいなどの検知システムが不十分であったこと。

のことから、国では、液体放射性廃棄物処理施設の安全審査で考慮すべき事項を整備したほか、技術基準の改正を行い、漏えい防止堰および漏えい検知器の設置などが義務付けられた。また、県、立地市町では、この事故が発電所からの通報ではなく、周辺環境でのモニタリングにより発覚したものであり、安全協定に基づく連絡がなかったことを重視し、安全協定の改定を実施した。改定の主な内容は、①立ち入り調査を隨時実施できるようにしたこと、②事故・故障などの報告範囲を拡大したことである。

敦賀発電所では、

- ▼一般排水路を建屋外に付け替える
- ▼洗濯廃液ろ過建屋を新基準に従い新築する
- ▼漏えい防止堰および検出器を設置する
- ▼一般排水路の放射線のモニタを設置する
- ▼警報システムの中央制御室での集中管理化

などの設備面での改善を実施したほか、運転員などの教育システム、社内管理体制の強化が実施された。

2. 国内（県外）

(1) 東京電力株福島第一原子力発電所事故

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震（マグニチュード9.0）と津波により、東京電力福島第一原子力発電所において、原子炉が冷却できず炉心燃料が溶融する過酷事故が発生した。

これにより福島第一原子力発電所からは大量の放射性物質が放出され、多くの地域住民の避難を招くなど、極めて重大な事故となった。

この事故の国際事故評価尺度は旧ソ連チェルノブイリ原子力発電所の事故に並ぶレベル7とされている。

①事故炉の概要

・ 1号機

場 所	福島県双葉郡大熊町
炉 型	沸騰水型軽水炉（BWR-3）
電気出力	46.0万kW
運転開始	1971年（昭和46年）3月
事故発生日時	2011年（平成23年）3月11日14時46分

・ 2号機

場 所	福島県双葉郡大熊町
炉 型	沸騰水型軽水炉（BWR-4）
電気出力	78.4万kW
運転開始	1974年（昭和49年）7月
事故発生日時	2011年（平成23年）3月11日14時46分

・ 3号機

場 所	福島県双葉郡大熊町
炉 型	沸騰水型軽水炉（BWR-4）
電気出力	78.4万kW
運転開始	1976年（昭和51年）3月
事故発生日時	2011年（平成23年）3月11日14時46分

・ 4号機

場 所	福島県双葉郡大熊町
炉 型	沸騰水型軽水炉（BWR-4）
電気出力	78.4万kW
運転開始	1978年（昭和53年）10月
事故発生日時	2011年（平成23年）3月11日14時46分

・ 5号機

場 所	福島県双葉郡双葉町
炉 型	沸騰水型軽水炉（BWR-4）
電気出力	78.4万kW
運転開始	1978年（昭和53年）4月
事故発生日時	2011年（平成23年）3月11日14時46分

・ 6号機

場 所	福島県双葉郡双葉町
炉 型	沸騰水型軽水炉（BWR-5）
電気出力	110万kW
運転開始	1979年（昭和54年）10月
事故発生日時	2011年（平成23年）3月11日14時46分

②事故の概要

政府の事故調査報告書等によると、事故原因は次のとおりとされている。

○地震発生から津波到来までの状況

2011年3月11日14時46分、太平洋の三陸沖にて東北地方太平洋沖地震が発生した。

地震による主要機器への影響については、津波到来までのプラントデータの確認や、観測された実際の地震動による応力評価、現場調査の結果等から以下の知見が示された。

- ・津波到来までの間に記録していた各号機の原子炉圧力や水位等の挙動を分析すると、原子炉を冷却するために必要な安全機能は確保されており、機能が損なわれていたことを示唆するプラント挙動は得られていない
- ・水素爆発や放射能汚染等の影響がなく現場を確認できる状態の5号機で、健全性評価基準値を上回った地震動を受けたとされる原子炉隔離時冷却系配管等の支持構造物の調査を行った結果、安全機能を損なうような損傷がないことを確認した

なお、国会事故調においては、

- ・地震による1号機配管の微小な貫通亀裂からの小規模な冷却水喪失事故
- ・地震による1号機A系非常用交流電源の機能喪失

などが発生した可能性がある、との指摘に対しては、原子力規制委員会が設置した東京電力㈱福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会における調査により、

- ・地震発生から津波到達までの間には、原子炉冷却材や蒸気の漏えいが発生したことを示すデータは見いだせない
- ・1号機A系非常用交流電源の機能喪失は地震の影響によるものとは考え難く津波の浸水によるもの

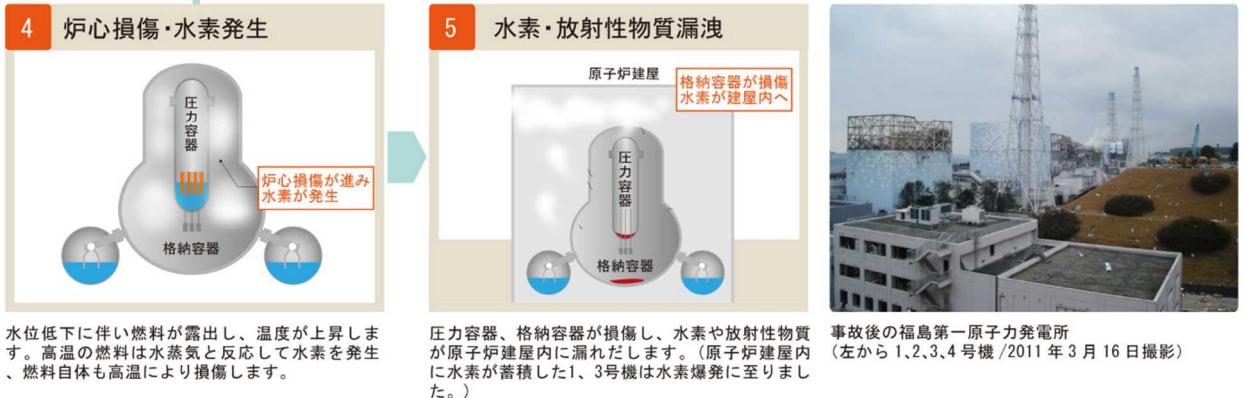
などとされている。

○津波到来後の状況

津波到来後の事故進展については、以下の知見が示された。

- ・津波の到来により、海側に設置されていたポンプ類がすべて機能を喪失した
- ・建屋への浸水により、地下階にあった非常用ディーゼル発電機、非常用蓄電池（直流電源）、1階および地下階にあった配電盤等が同時に水没・被水し、冷却に必要な機器や弁等が作動せず「冷やす機能」の多くが喪失した
- ・非常用蓄電池の機能が喪失したことにより、中央制御室の監視計器の機能も喪失し、プラント状況の監視ができなかった
- ・1号機は、非常用復水器が直流電源喪失等のため十分機能せず、早期に原子炉の水位が維持できない状況となつた
- ・2号機、3号機は、原子炉隔離時冷却系または高圧注入系が作動し水位が維持されていたが、直流電源の枯渇および制御用空気圧力の低下による弁の開操作不能等により機能喪失に至るとともに、原子炉の減圧ができず、消防ポンプによる代替注水にスムーズに移行できなかつた

- その結果、1号機、2号機、3号機いずれの原子炉も、時間差はあるものの原子炉の水位の低下により炉心が露出し、炉心損傷・溶融に至った
- 炉心が露出した際、過熱された燃料被覆管のジルコニウムと水が反応し、大量の水素が発生し、それが原子炉圧力容器から原子炉格納容器を経て原子炉建屋内に漏えいし、同建屋内上部で爆発するに至った
- 燃料棒内に閉じ込められていた放射性物質が建屋内から周辺環境に大量に放出された

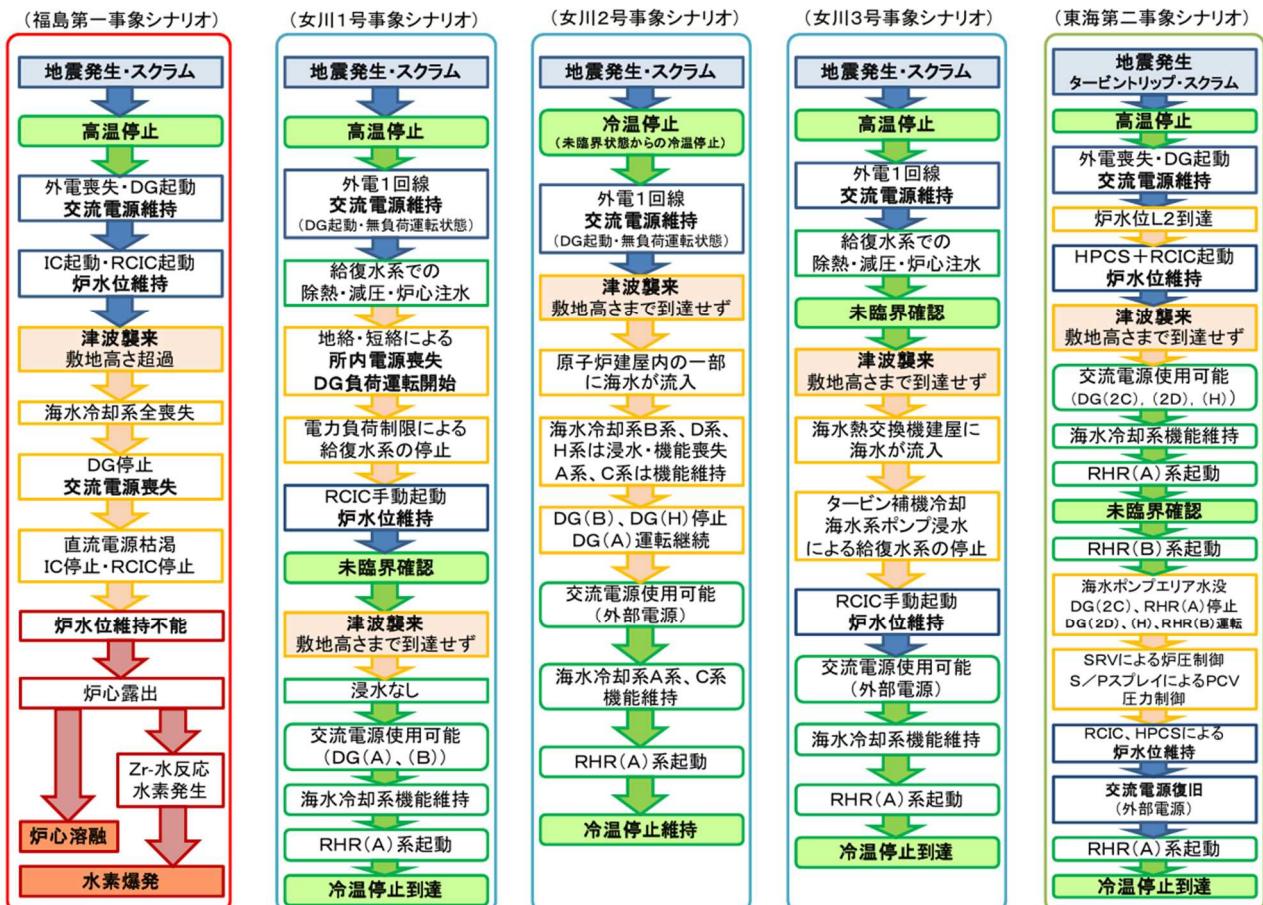


出典：東京電力ホールディングス㈱ホームページ

この地震・津波では、東京電力㈱福島第一原子力発電所（6基）以外にも、福島第二原子力発電所（4基）、東北電力㈱東通原子力発電所（1基）、女川原子力発電所（3基）、日本原子力発電㈱東海第二発電所（1基）の合計15基（いずれも沸騰水型原子炉）が影響を受けた。

15基のうち、地震発生時に運転中であったのは11基で、そのすべてが地震発生直後に自動停止した。

福島第二原子力発電所、女川原子力発電所および東海第二発電所では、想定を超える津波が来襲したものの、外部電源または非常用電源が確保され、海水ポンプの機能も確保されたことから、原子炉は冷温停止状態となり、過酷事故に進展しなかった。



出典：原子力安全・保安院作成資料

③行政機関による避難等の対応

2011年3月11日15時42分、福島第一原子力発電所1号機から5号機の全交流電源喪失により、事業者から原子力災害対策特別措置法（以下、「原災法」）第10条通報が原子力安全・保安院に通報された。同日16時36分、1号機および2号機の原子炉冷却機能喪失のため事業者は原災法第15条事象の発生を判断し、同日16時45分に通報した。

同日19時3分には、内閣総理大臣は原子力緊急事態宣言を発令し、原子力災害対策本部および現地災害対策本部を設置した。

同日20時50分、福島県知事は福島第一原子力発電所から半径2km圏内の居住者の避難を指示した。

同日21時23分には、政府が福島第一原子力発電所から半径3km圏内の居住者の避難および半径3kmから10km圏内の居住者の屋内退避を指示した。

その後、同年3月12日5時44分に、政府は福島第一原子力発電所から半径10km圏内の住民に対し避難指示を行った。

同日15時36分に1号機原子炉建屋で爆発が起き、対応が検討され、同日18時25分には福島第一原子力発電所から半径20km圏内の住民に避難指示を行った。

同年3月15日11時に原子力災害対策本部は、福島第一原子力発電所から半径20kmから30km圏内の居住者等の室内退避を指示した。

福島県の避難者は県内避難、県外避難を合わせて最大で約16万5千人に上り、事故から10年以上が経過し、除染作業が進んでもなお帰宅困難区域が残っており、現在も約2万5千人が避難している状況である。

④周辺環境への影響

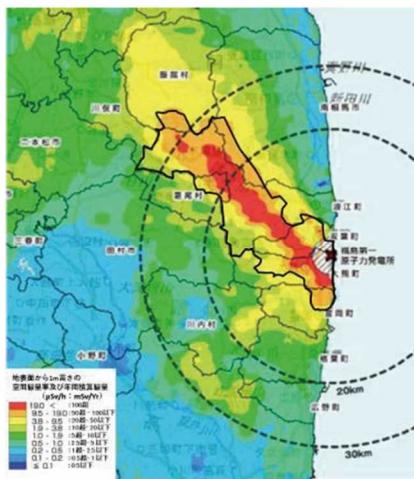
燃料が損傷・溶融するとともに、水素爆発による格納容器の損傷に伴い環境に放射性物質が放出された。

大気中への放射性物質の推定放出量および海洋への推定放出量を各機関が試算を行っている。

大気中への放出量は、ヨウ素131で約 $12 \times 10^{16} \sim 50 \times 10^{16}$ Bq、セシウム137で約 $8.2 \times 10^{15} \sim 10 \times 10^{15}$ Bqと評価され、広い範囲に放射性物質が放出された。

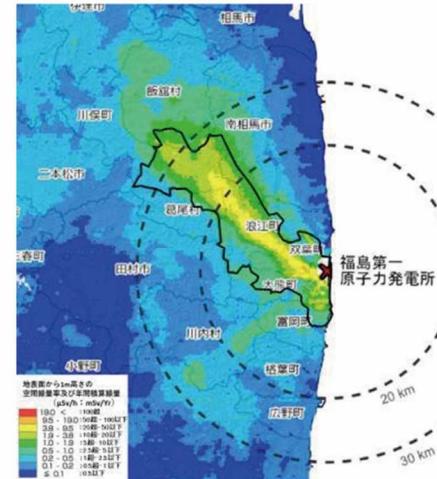
海洋への放出量は、(一財)電力中央研究所によればヨウ素131で約 1.1×10^{16} Bq、セシウム137で約 3.6×10^{15} Bqと推定された。

2011年11月時点の線量分布



13
年後

2024年12月時点の線量分布



注：黒枠囲いのエリアは避難指示区域の見直しが完了した2013年8月時点で帰還困難区域とされた範囲

出典：原子力委員会 原子力白書

⑤廃止措置にむけた取組み

福島第一原子力発電所は、廃炉・汚染水・処理水対策関係閣僚等会議で決定される「廃止措置等に向けた中長期ロードマップ」に基づいて廃炉作業が進められている。ロードマップでは、福島第一原子力発電所が冷温停止となった2011年12月を起点として30年から40年後の廃止措置完了を目指として、主に汚染水対策、使用済燃料プールからの燃料の取出し、燃料デブリの取出し、廃棄物対策について具体的な対策や工程等が策定されており、国が現場の作業と研究開発の進捗管理を一体的に進めていくために構築した廃炉対策推進会議等によって進捗管理が行われている。

中長期ロードマップの工程



中長期ロードマップにおけるマイルストーン（主要な目標工程）

分野	内容	時期	達成状況
1. 汚染水対策			
汚染水発生量	汚染水発生量を150m ³ /日程度に抑制	2020年内	達成済
	汚染水発生量を100m ³ /日程度に抑制	2025年内	達成済
滞留水処理完了	建屋内滞留水処理完了※1	2020年内	達成済
	原子炉建屋滞留水を2020年末の半分程度に低減	2022年度～2024年度	達成済
2. 使用済燃料プールからの燃料取り出し			
1～6号機燃料取り出しの完了		2031年内	－
1号機大型カバーの設置完了		2023年度頃	2025年度夏頃
1号機燃料取り出しの開始		2027年度～2028年度	－
2号機燃料取り出しの開始		2024年度～2026年度	－
3. 燃料デブリ取り出し			
初号機の燃料デブリ取り出しの開始 (2号機から着手。段階的に取り出し規模を拡大)		2021年内	2024年9月着手
4. 廃棄物対策			
処理・処分の方策とその安全性に関する技術的な見通し		2021年度頃	策定済
ガレキ等の屋外一時保管解消※2		2028年度内	－

✓ 540m³/日(2014年5月)⇒
80m³/日(2023年度)
✓ 新たな目標として、2028年度までに汚染水発生量を約50～70m³/日に低減

✓ 3号機：
2021年2月取り出し完了
✓ 4号機：
2014年12月取り出し完了

※1 1～3号機原子炉建屋、プロセス主建屋、高温焼却炉建屋を除く。

※2 水処理二次廃棄物及び再利用・再使用対象を除く。

出典：経済産業省ホームページ

(2) J C O ウラン加工施設の臨界事故

1999年9月30日、茨城県東海村の株ジェー・シー・オー（J C O）のウラン加工施設において日本で初めての臨界事故が発生した。臨界に伴い発生した放射線により、作業員、消防隊員を含め多数が被ばく（2人が死亡）するとともに、国の事故対策本部の設置、周辺住民の避難や屋内退避を招くなど、極めて重大な事故であった。

①事故の概要

1999年9月30日10時35分頃、J C O 東海事業所の転換試験棟で、作業員3人が濃縮度18.8%のウラン溶液を、沈殿槽に入れる作業中に臨界事故が発生した。翌10月1日早朝に沈殿槽周囲の冷却水を抜き取るまで臨界状態が約20時間続き、敷地周辺で強い放射線（主に中性子線）が観測された。この事故は、国際事故評価尺度で「レベル4」と評価された。

この事故で、作業員3人は重度の被ばくをし、専門の医療機関で治療を受けたが、翌年までに2人が亡くなった。

②国・茨城県・東海村などの対応

東海村は9月30日12時15分、災害対策本部を設置し、直ちに周辺住民の屋内退避の村内広報を実施し、15時には施設から350m圏内の住民に避難要請を行った。

国は14時30分、科学技術庁（現：文部科学省）災害対策本部を設置し、15時には科学技術庁政務次官を本部長とする現地の事故対策本部と内閣総理大臣を本部長とする政府事故対策本部の設置を決定した。

茨城県は、環境モニタリングや職員の現地派遣を行い、16時に災害対策本部を設置した。22時30分に10km圏内の屋内退避などを決定した。屋内退避措置は10月1日午後に解除され、周辺350m圏内の避難措置も2日午後に解除された。

原子力安全委員会は10月4日、政府対策本部の決定を受け、「ウラン加工工場臨界事故調査委員会」を設置した。

③放射線や放射性物質による影響

茨城県や関係機関が行った環境モニタリングの結果、一部の環境試料から、事故に起因すると考えられる放射性物質が検出された。しかし、これらのレベルは十分に低く、また、短時間に減衰してしまう核種であったこと、さらに、積算線量の結果からも、住民の健康や環境に影響を及ぼすものではないと判断された。

また、科学技術庁は、周辺環境の線量評価、行動調査・線量推定等を実施し、J C O 従業員等172人、周辺住民等207人、および個人線量計等の測定により線量が評価された防災業務関係者59人の線量評価結果を2000年1月31日に公表した。さらに、2000年10月13日には、臨界継続時に避難要請区域内に一時的に滞在していた周辺住民等28人、前記以外の防災業務関係者175人、および報道関係者26人の被ばく線量について、行動調査・線量推定の結果を公表した。

原子力安全委員会では、「健康管理検討委員会」を設置し、科学技術庁事故対策本部が公表した周辺住民等の個人の線量評価の結果を踏まえ、今回の事故による周辺住民等の放射線影響について

検討を行い、2000年3月27日、▼確定的影響については、影響が発生する線量レベルではない▼確率的影響については、放射線が原因となる影響が発生する可能性は極めて小さく、その影響を検出することはできないと報告した。

■ JCOウラン加工施設の臨界事故による線量評価の結果

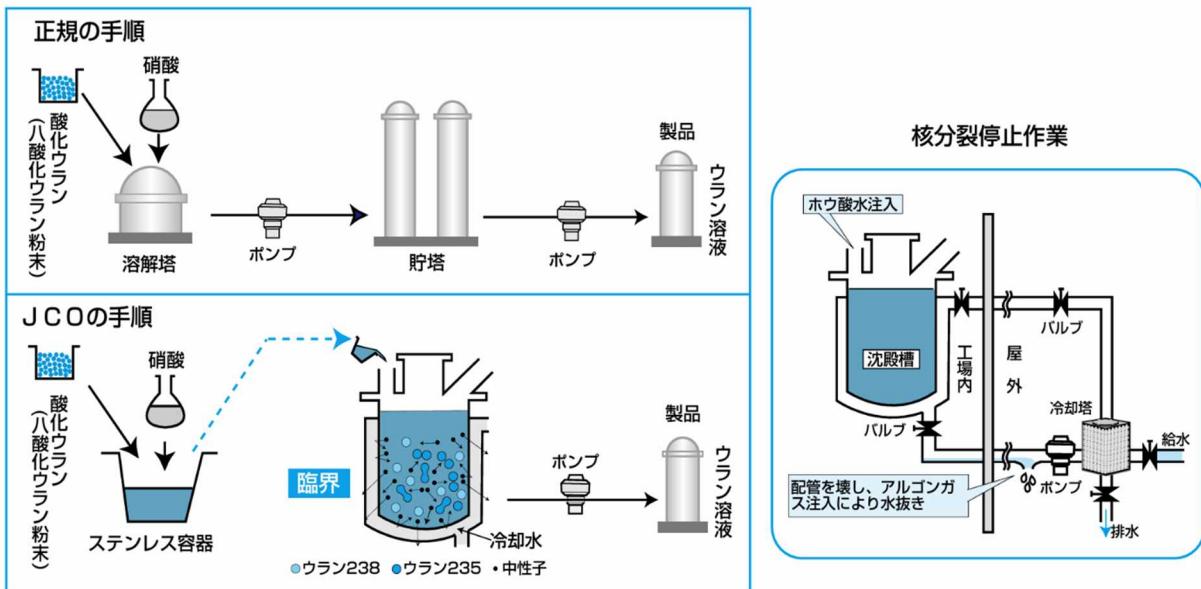
分類	人数	備考
JCO従業員等	172人	
実測で線量が評価された人	3人	16~20 GyEq ^{*1} 程度以上 (11/12/21に逝去) 6.0~10 GyEq 程度以上 (12/4/27に逝去) 1~4.5GyEq 程度以上 (11/12/20に放医研を退院)
水抜き作業等に従事した人	18人	ホールボディ・カウンタ、線量計等で検出。 その範囲は3.8~48mSv ^{*2}
ホウ酸水注入に従事した人	6人	線量計等で検出。その範囲は0.7~3.5mSv。
その他事故時に敷地内にいた人	49人	ホールボディ・カウンタ、フィルムバッチで検出。 その範囲は0.6~48mSv ^{*2}
推定で線量が評価された人	96人	敷地内の場の線量評価とJCOが実施した個人の行動調査から推定。 その範囲は0.06~17mSv。
防災業務関係者等	260人	
実測で線量が評価された人	56人	フィルムバッチ、TLDで測定した206人のうち、56人から検出。 その範囲は0.1~9.2mSv。
消防署員(事故発生時に救助に従事)	3人	ホールボディ・カウンタで検出。 その範囲は4.6~9.4mSv。
推定で線量が評価された人	167人	行動範囲に基づき推定。 その範囲は0.0002~7.2mSv。
国際機関(原研、サイクル機構(当時)の職員)	8人	行動調査に基づき推定。その範囲は0.49~2.1mSv。
報道関係者	26人	行動範囲に基づき推定。 その範囲は0.014~2.6mSv。
周辺住民等	235人	
実測で線量が評価された人	7人	ホールボディ・カウンタで検出。 その範囲は6.7~16mSv。
推定で線量が評価された人	200人	行動範囲に基づき推定。 その範囲は0.01~21mSv。
一時滞在者	28人	行動範囲に基づき推定。 その範囲は0.01~3.8mSv。

*1:グレイ・イクリバメント。高線量被ばくにおいて、放射線が人体に与える影響の大きさの目安となる線量の単位。

*2:ミリシーベルト。放射線が人体に与える影響の大きさも目安となる線量の単位。(実効線量当量)

④事故の直接的原因

今回の事故があった施設では、酸化ウランの粉末から不純物を取り除く作業を実施していた。正規の手順では、まず溶解塔で酸化ウランを溶解し、容量の小さな貯蔵槽で均一化した後、製品であるウラン溶液にする手順になっていた。しかし、実際の溶解作業では、溶解塔の代わりに10L入りのステンレス製バケツでウランを溶解した上、一度に処理しようと、容量の大きい沈殿槽に規定量の約7倍に当たる16.6kgのウランを含む溶液を注ぎ込んだため、ウランの核分裂が連続的に起きる「臨界」に至った。



⑤事故の教訓

事故調査委員会の報告書では、今後の取組みの在り方として、「今回の事故の底流には、臨界事象に対する危機認識の欠如・風化があった」と指摘し、「的確な危機認識は安全問題の原点となるもので、原子力に携わるすべての組織と個人が『絶対安全』から『リスクを基準とする安全の評価』への意識転回が必要」と強調している。

国に対しては、「加工事業にも定期検査を義務付け、保安規定の遵守状況の検査制度の導入を図るなど安全規制体制を再構築する必要がある」と提言。さらに、「今回の事故を契機に、原子力安全文化の定着と 21 世紀の安全社会システムの構築を目指し、そのシステム全体の総合設計は、原子力安全委員会を中心とした国が責任を持って果たしていくことが求められる」と総括している。

なお、今回の事故を踏まえ、原子力防災に関する「原子力災害対策特別措置法」および原子力施設に対する規制強化を盛り込んだ「原子炉等規制法の一部改正法」が 1999 年 12 月 13 日に国会で成立した。これにより核燃料加工施設にも原子力発電所同様の施設定期検査を義務付けるとともに、事業者の保安規定遵守状況に関する検査制度の創設（保安検査制度）、原子力保安検査官の配置、さらには、原子力防災における初期活動の迅速化、国と地方公共団体の連携の強化、国の緊急時対応体制の強化などが図られた。また、原子力産業界全体の安全意識の向上や安全文化の共有化およびレベルアップを目的として、原子力産業界の企業・研究機関からなる「ニュークリアセイフティーネットワーク（NS ネット）」が設立された。

(3) 動力炉・核燃料開発事業団（現：日本原子力研究開発機構）東海再処理施設の火災・爆発事故

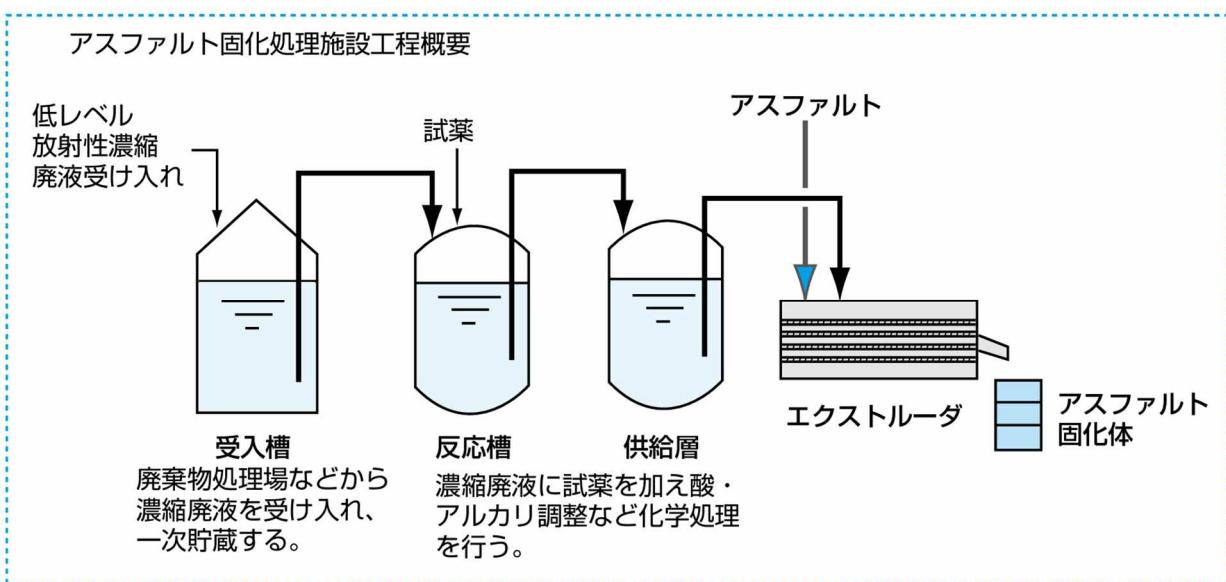
1997年3月11日、動力炉・核燃料開発事業団の東海再処理施設アスファルト固化処理施設において、廃液をアスファルトと混合しドラム缶に充てんする室内で、火災・爆発事故が発生した。この事故により建屋の一部が損壊したことから、環境への放射能の影響はなかったものの、管理されない放射性物質が放出された。

①事故の状況

1997年3月11日10時6分頃、東海再処理施設のアスファルト固化処理施設のアスファルト充てん室において、低レベル放射性濃縮廃液とアスファルトを混ぜて充てんしたドラム缶から火災が発生した。作業員はスプリンクラーによる消火活動を開始したが、1分程度後、室内に火が見えないことから作動を停止した。

事故発生10時間後の20時4分頃、同施設内で爆発が発生し、建屋の窓、シャッター等が破損し、黒煙、放射性物質が環境に放出されるとともに、同建屋内も大きく損壊した。この事故により、排気塔モニタの上昇が認められ、爆発後の20時40分頃には建屋周辺の敷地内環境モニタリングポストの指示値が一時的にわずかに上昇した。

この事故の国際事故評価尺度はレベル3とされている。



②周辺環境への影響等

事故後、周辺の環境への影響を確認するため、事業所周辺の海や陸の影響調査（海水、海底土、井戸水、雨水、土、野菜、牛乳、空気等）を実施した結果、健康や環境に影響を及ぼすレベルではなかった。

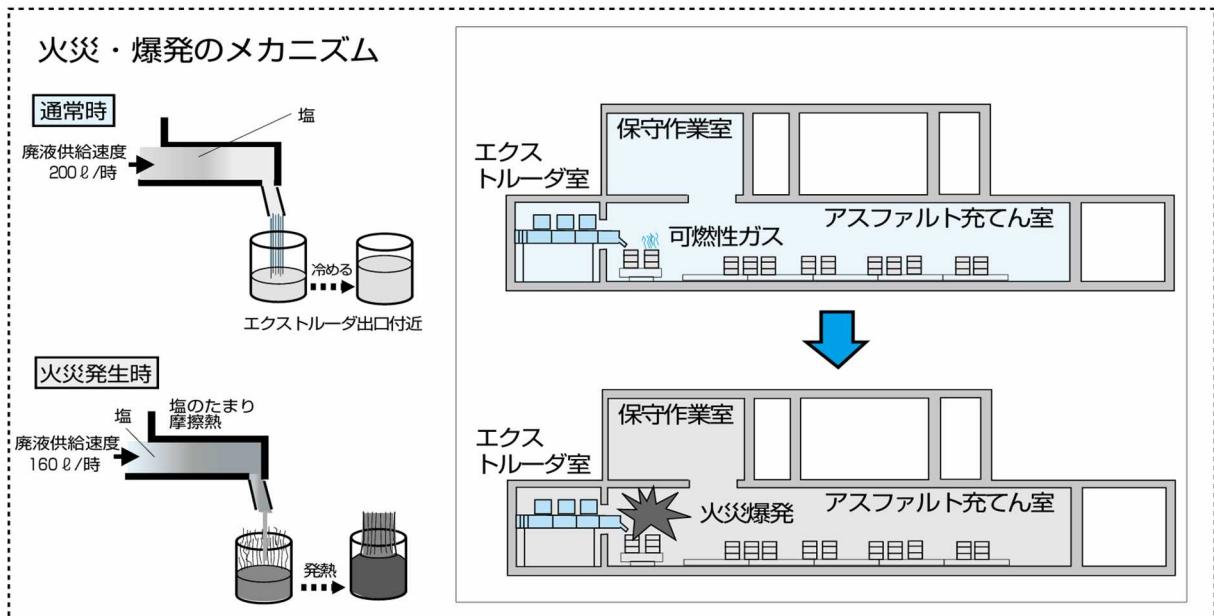
また、事故時に施設内および周辺の作業員129人について全身測定を実施した結果、37人に微量な放射性物質の吸入摂取による内部被ばくが検出されたが、最大に評価しても 1.6mSv で、法令に基づく従事者の線量当量限度(50mSv)を下回っていた。

なお、放射性物質の環境への放出量を総合的に評価した結果、セシウム137が $1\sim4\text{GBq}$ 放出されたと推定されたが、放出量をもとにした公衆の吸引摂取による内部被ばくの線量当量は約 0.02mSv 以下であり、法令に定める年間の限度 1mSv を十分下回っている。

③火災・爆発の原因

火災の原因是、通常と異なった運転条件（エクストルーダ装置への廃液供給量低下、廃液の攪拌直後の送液、リン酸廃液の受入）で行っていたため、ドラム缶内において遅い化学反応により蓄熱が進行し、アスファルト混合物の温度が局所的に上昇した。このため、アスファルトと硝酸化合物等との反応が急速に進み、火災が発生したものと推定された。

爆発の原因是、火災発生後の不十分な消火活動によってアスファルト固化体の燃焼が続き、また排気フィルターの目詰まりにより換気設備が運転停止したため、施設内の酸素濃度が低下し、アスファルト固化体の燃焼は不完全燃焼状態となった。このため、可燃性物質が継続的に放出され、アスファルト充てん室内等に充満し、可燃性物質が爆発する濃度となった。この状態で、アスファルト固化体が自己発火し、これが可燃性物質に引火したため、爆発が起きたものと推定された。



④対応

本施設を復旧する前の修復作業として、施設からの放射性物質の漏えい防止を目的に仮設換気設備を設置し、建屋からの放射性物質漏えいの防止を図り、1998年7月31日には、施設内の片付け、清掃、除染作業、充てんドラム缶の搬出、廃液の抜取り等が終了した。

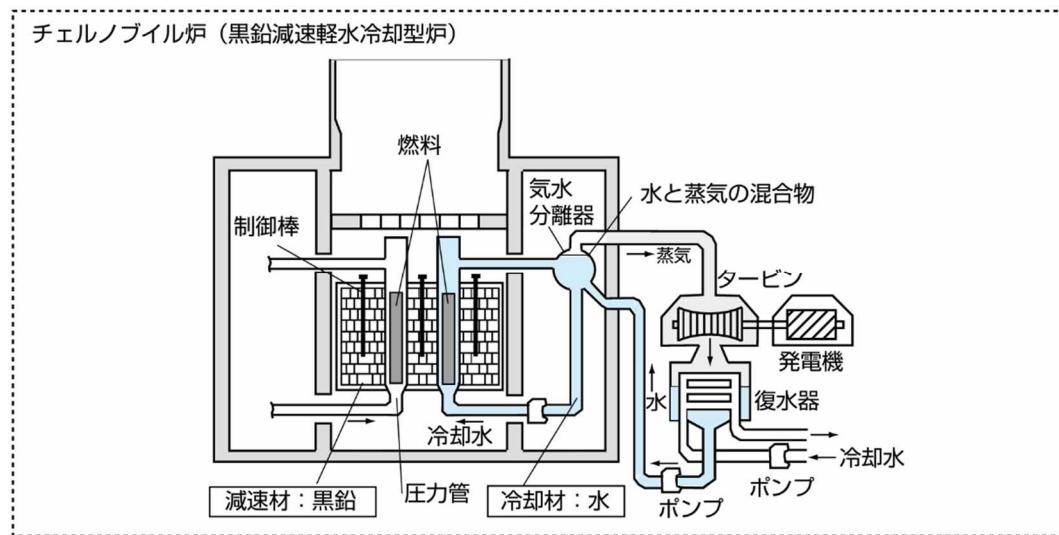
また、運転管理上の対応として、施設の安全性を高めるために再処理全施設を対象に必要な設備の改良や運転要領書などの改訂を行った。なお、事故以来アスファルト固化処理施設における固化処理運転は停止し、アスファルト固化処理施設に代わる新たな施設として低放射性廃棄物処理技術開発施設を建設している。

3. 国外

(1) 旧ソ連チェルノブイリ原子力発電所の事故

①事故炉の概要

場 所	旧ソ連ウクライナ共和国キエフ市北方約 130km
炉 型	黒鉛減速軽水冷却型炉 (R BMK-1000)
電 気 出 力	100 万 kW (熱出力 320 万 kW)
運 転 開 始	1984 年 (昭和 59 年) 3 月
事故発生日時	1986 年 (昭和 61 年) 4 月 26 日 1 時 23 分 (現地時間)



②事故のプロセス

事故は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るときに発生した。

この実験では十分な安全対策が考慮されておらず、また、この型式の原子炉に特有な低出力時の不安定性など基本設計の不備に加えて、運転員がいくつもの安全規則を無視した操作を行い、原子炉の緊急停止能力が失われ、また、ボイド (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、火災などに進んだものである。

③事故の影響

炉心の損傷状況は、すべ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。また、炉心の高温物質が吹き上げられ原子炉諸施設、機械室 (タービン室) などの屋根に落ち、30 を超える個所から火災が発生した。

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、欧洲諸国を中心に拡散した。また、我が国にも一部拡散した。

1989 年 10 月に原子力安全委員会ソ連調査団が、全ソ放射線医学研究所において聴取したところによると、急性放射線症と診断された者は 237 人で、うち 28 人が死亡し、生存している。209 人は

いずれも治癒状態にあるとのことであった。(1986年のソ連報告書では、火傷による死者、行方不明者、各々1人を含め、事故による死者は31人としている。)

環境に放出された放射性物質については、希ガス核種は、炉内存在量のほぼ100%に相当する約1.9EBq(5,000万Ci(5月6日時点に減衰補正した値))、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1.1~1.9EBq(3,000万~5,000万Ci(5月6日時点に減衰補正した値))が5月6日までの10日間に放出されたと推定されている。特にヨウ素は20%、テルル、セシウムは各々10~15%、その他の主要な核分裂生成物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の約3~4%の放射性物質が放出されたとしている。このため放射線防護の措置として事故直後発電所周辺30km圏内の住民の総計13万5千人が避難した。放射性核種は気象条件によってロシア共和国(当時)、白ロシア共和国(当時)、ウクライナ共和国(当時)に拡散した。1989年のソ連国家水理気象委員会の報告によると $190\text{GBq}/\text{km}^2$ (5Ci/km²)以上の放射能レベルの地域の面積は2万8千km²に達している。さらに避難、移住については、1990年4月のソ連邦最高会議が承認した計画では、1990年~1992年に18~20万人の移住を行う方針が盛り込まれている。

健康への影響については、1989年10月の原子力安全委員会ソ連調査団の報告などによれば、白血病やがんの発生数の増加はこれまでのところなく、異常出産、新生児の発生異常などの胎児被ばくの影響も認められていない。また、健康上特段の影響のない甲状腺の異常が地域の住民、主に小児で増えており、これが事故による放射線の影響かあるいは、各地に常在していた甲状腺機能異常症かの判別が必要とされている。さらに、種々の成人病の増加が認められるが、生活条件の変化、不十分な報道などにもとづく長期にわたるストレス、検査対象の絶対数の増加などの複合的な要因によるものと推定されている。

なお、我が国における事故による被ばく量は、平均 $5\mu\text{Sv}$ (成人)と推定され、これは自然放射線による被ばくに比して1,000分の1程度で、はるかに低いものであり、国民の健康への影響は無視し得る。

④事故への対応

原子力安全委員会では、旧ソ連チェルノブイリ原子力発電所の事故についても、原子炉事故はその形態によっては世界的に大きな影響を与えるものであるということを重視し、事故の直後にソ連原子力発電所事故調査特別委員会を設置し、IAEAなどから可能な限りの情報を収集し、これに独自の解析を加え調査、検討を行った。

ソ連原子力発電所事故調査特別委員会が1987年に公表した最終報告書では、事故を起こした黒鉛減速軽水冷却型原子炉は低出力における正の出力係数を有し、特殊な格納方式であるなど、我が国の原子炉とは設計方針が非常に異なったものであり、その上、この事故は運転員の故意の規則違反により起こった反応度事故であることから、我が国の原子炉では極めて考え難い事故であったと結論された。

従って、我が国の原子力発電所の安全確保上、直ちにとらなければならない対策は認められなかつた。

しかしながら、この事故についても、一層の安全性の向上を図るという見地から、改めて心に铭すべき事項として、安全意識の醸成、安全研究の推進や国際協力の推進などの7項目を抽出した。

(2) 米国スリーマイル島原子力発電所（TMI）の事故

①事故炉の概要

場 所	米国ペンシルバニア州ミドルタウン南4kmのスリーマイル島
事故原子炉	スリーマイル島原子力発電所2号機
炉 型	バブコック・アンド・ウイルコックス社製加圧水型軽水炉
電 気 出 力	95.9万kW
事故発生日時	1979年（昭和54年）3月28日4時（現地時間）

②事故のプロセス

事故は、定格の約97%出力で運転時に2次冷却水を循環させる主給水ポンプが停止したことが発端となり、ポンプ停止とほぼ同時にタービンが停止し、1次系の温度・圧力が上昇し、加圧器逃がし弁が開き、事故発生から8秒後には原子炉スクラムに至った。ここまでは、給水喪失事故であったものの、加圧器逃がし弁が故障し、開固着したままであったため、1次冷却水の流出が続き、小破断冷却材喪失事故（LOCA）の状態となった。このため非常用炉心冷却装置（ECCS）の高圧注入系が作動したが、1次冷却水が局所的に沸騰を起こし、発生した蒸気泡が加圧器内の冷却材を押し上げ、1次冷却水が増加しているかのごとき現象を呈したため、運転員が高圧注入系ポンプ1台を停止し、他の1台の流量を最小限に絞った。このため1次冷却水はますます減少し、1次冷却水が沸騰し、蒸気泡が増加することになった。これにより冷却水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、これを停止したため、1次冷却水の流れが止まり、蒸気と水が分離し、炉心の上部が露出して、露出した燃料の温度が急上昇、燃料が損傷、大量の放射性物質が1次系に放出したものである。

また、周辺環境への放射性気体の放出経路の最も大きいものは、補助建屋内の換気系からのものであったが、事故発生と同時に原子炉格納容器を隔離すれば、周辺環境への放出の一部は防ぎ得たものと考えられる。

このように、TMI事故は、発端は給水喪失事故であったものの、加圧器逃がし弁が開固着していることに運転員が長時間気付かずにいたこと、ECCSを運転員が停止したり、流量を絞ったりなどという、人的因子が決定的要因となり、事故を拡大させたものである。

③事故の影響

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TMI事故の会合における報告によると、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）が下部プレナムに落下し固まっていることが明らかになっている。

事故による作業従業員の被ばく量は、事故直後から同年9月までに全身被ばく線量が30mSvを超えた者は7名で、年間の線量限度50mSvを超えた者はいない。

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93PBq（約250万Ci）、放射性ヨウ素約560GBq（約15Ci）であると推定されている。

これは、炉内存在量のキセノン（放射性希ガス）では約100分の1、放射性ヨウ素では約40万分の1に相当する。液体状の放射性物質は、1次冷却水のサンプリングを行った際の廃液が汚染水

ドレンタンクからオーバーフローして、一般廃棄物処理系に流入したものがそのまま放出されたが、その量約 18GBq（約 4.8Ci）は微量であり問題となる量ではなかったと思われている。

この事故による個人の最大被ばく線量は約 0.7mSv、半径 80km 以内の住民約 216 万人の集団線量は約 20 人・Sv（個人平均約 0.01mSv）であると推定され、周辺公衆の健康に与えた影響は無視できるものであったことが明らかにされている。

④事故への対応

原子力安全委員会では、安全確保に反映すべき事項などについて幅広い調査検討を行った。その結果、我が国の原子力発電所の安全性を一層向上させる観点から、安全基準、安全審査、安全設計、運転管理、防災および安全研究という広い範囲にわたり検討すべき 52 項目を抽出し、関係の安全審査指針類に取り入れるなど、原子力安全確保対策に反映させている。

主要な対策例としては、①原子炉施設の機器・系統などを安全系と安全関連系およびその他に分ける重要度分類の確立②1 次冷却水の状態・量の監視方式の改良③緊急時中央司令所が、必要時に原子力発電所を開設できるようにすること④格納容器の可燃性ガス濃度対策⑤事故時に技術助言を行う緊急技術助言組織の設置⑥事故時の環境放射線線量の予測、通報システムの確立⑦日本原子力研究所（現：日本原子力研究開発機構）において ROSA-4 計画として PWR の小・中配管破断 LOCA における熱水力学的挙動についての研究の実施、また、BWR の小・中配管破断 LOC A については ROSA-3 計画のなかに追加・実施⑧人的因子に関する対策・研究の成果としての運転操作パネルデザインの変更や計算機による運転支援システム・異常診断システムなどの設置⑨事業者における運転員の教育・訓練の強化と運転員資格検定制度の確立⑩確率論的安全評価（PSA）、シビアアクシデント、ソースタームなどに関する安全研究の推進が挙げられる。

米国スリーマイル島原子力発電所事故を教訓とした指摘事項への対応

