福島第一原子力発電所事故

事務局長報告書

IAEA
International Atomic Energy Agency

国際原子力機関

福島第一原子力発電所事故

事務局長報告書

The following States are Members of the International Atomic Energy Agency:

AFGHANISTAN
ALBANIA
ALGERIA
ANGOLA
ARGENTINA
ARMENIA
AUSTRALIA
AUSTRIA
AZERBAIJAN
BAHAMAS
BAHRAIN
BANGLADESH
BELARUS
BELGIUM
BELIZE
BENIN
BOLIVIA, PLURINATIONAL STATE OF
BOSNIA AND HERZEGOVINA
BOTSWANA
BRAZIL
BRUNEI DARUSSALAM
BULGARIA
BURKINA FASO
BURUNDI
CAMBODIA
CAMEROON
CANADA
CENTRAL AFRICAN REPUBLIC
CHAD
CHILE
CHINA
COLOMBIA
CONGO
COSTA RICA
CÔTE D'IVOIRE
CROATIA
CUBA
CYPRUS
CZECH REPUBLIC
DEMOCRATIC REPUBLIC OF THE CONGO
DENMARK
DJIBOUTI
DOMINICA
DOMINICAN REPUBLIC
ECUADOR
EGYPT
EL SALVADOR
ERITREA
ESTONIA
ETHIOPIA
FIJI
FINLAND
FRANCE
GABON
GEORGIA
GERMANY
GHANA
GREECE
GUATEMALA
GUYANA
HAITI
HOLY SEE
HONDURAS
HUNGARY
ICELAND
INDIA
INDONESIA
IRAN, ISLAMIC REPUBLIC OF
IRAQ
IRELAND
ISRAEL
ITALY
JAMAICA
JAPAN
JORDAN
KAZAKHSTAN
KENYA
KOREA, REPUBLIC OF
KUWAIT
KYRGYZSTAN
LAO PEOPLE'S DEMOCRATIC REPUBLIC
LATVIA
LEBANON
LESOTHO
LIBERIA
LIBYA
LIECHTENSTEIN
LITHUANIA
LUXEMBOURG
MADAGASCAR
MALAWI
MALAYSIA
MALI
MALTA
MARSHALL ISLANDS
MAURITANIA
MAURITIUS
MEXICO
MONACO
MONGOLIA
MONTENEGRO
MOROCCO
MOZAMBIQUE
MYANMAR
NAMIBIA
NEPAL
NETHERLANDS
NEW ZEALAND
NICARAGUA
NIGER
NIGERIA
NORWAY
OMAN
PAKISTAN
PALAU
PANAMA
PAPUA NEW GUINEA
PARAGUAY
PERU
PHILIPPINES
POLAND
PORTUGAL
QATAR
REPUBLIC OF MOLDOVA
ROMANIA
RUSSIAN FEDERATION
RWANDA
SAN MARINO
SAUDI ARABIA
SENEGAL
SERBIA
SEYCHELLES
SIERRA LEONE
SINGAPORE
SLOVAKIA
SLOVENIA
SOUTH AFRICA
SPAIN
SRI LANKA
SUDAN
SWAZILAND
SWEDEN
SWITZERLAND
SYRIAN ARAB REPUBLIC
TAJIKISTAN
THAILAND
THE FORMER YUGOSLAV REPUBLIC OF MACEDONIA
TOGO
TRINIDAD AND TOBAGO
TUNISIA
TURKEY
UGANDA
UKRAINE
UNITED ARAB EMIRATES
UNITED KINGDOM OF GREAT BRITAIN AND NORTHERN IRELAND
UNITED REPUBLIC OF TANZANIA
UNITED STATES OF AMERICA
URUGUAY
UZBEKISTAN
VENEZUELA, BOLIVARIAN REPUBLIC OF
VIET NAM
YEMEN
ZAMBIA
ZIMBABWE

The Agency's Statute was approved on 23 October 1956 by the Conference on the Statute of the IAEA held at United Nations Headquarters, New York; it entered into force on 29 July 1957. The Headquarters of the Agency are situated in Vienna. Its principal objective is "to accelerate and enlarge the contribution of atomic energy to peace, health and prosperity throughout the world".

福島第一原子力発電所事故

事務局長報告書

巻頭言

事務局長　天野之弥

本報告書は、日本の福島第一原子力発電所において 2011 年 3 月 11 日に始まった事故の原因と結果についての評価を提示するものである。大地震に続く巨大津波により引き起こされたこの事故は、1986 年のチェルノブイリ事故以来最悪の原子力発電所における事故となった。

本報告書は、世界中の政府、規制当局及び原子力発電所事業者が、必要な教訓に基づいて行動をとれるようにするため、人的、組織的及び技術的要因を考慮し、何が、なぜ起こったのかについての理解を提供することを目指している。事故を受けて日本において及び国際的に講じられた措置についても検討されている。

福島第一原子力発電所事故の甚大な人的影響は、忘れられてはならない。放射性核種が環境に放出されたために、10 万人以上の人々が避難することとなった。2015 年の本報告書作成時点でも、その多くが依然として帰還できずにいる。

私は、事故の数か月後に福島第一原子力発電所を訪れ、津波の強力で破壊的な影響を自ら目にした。衝撃的で身の引き締まる経験であった。

一方で、津波が襲来した後も現場にとどまり、壮絶な状況の中で、被災した原子炉を何とか制御しようと懸命に努力した作業員や管理者の勇気と献身に、私は深い感銘を受けた。これらの人々は、訓練でも経験しておらず、しばしば適切な機材も不足する状況の中で、臨機応変な対応を迫られた。彼らは我々の敬意と賞賛に値する。

事故につながった大きな要因のひとつは、日本の原子力発電所は非常に安全であり、これほどの規模の事故は全く考えられないという、日本で広く受け入れられていた想定であった。この想定は原子力発電所事業者により受け入れられ、規制当局によっても政府によっても疑問を呈されてなかった。その結果、日本は 2011 年 3 月には重大な原子力事故への備えが十分ではなかった。

福島第一原子力発電所事故によって、日本の規制の枠組みにおける幾つかの弱点が明らかになった。責任がいくつもの機関に分散しており、権限の所在が必ずしも明らかでなかった。

また、発電所の設計、緊急時への備えと対応の制度、重大な事故への対策の計画などの点でも幾つかの弱点があった。原子力発電所においては、ごく短時間を超えた全電源喪失はあり得ないと想定されていた。同一施設で複数の原子炉が同時に危機に陥る可能性は想定されていなかった。また、大規模な自然災害と同時に原子力事故が発生する可能性に対する備えも不十分であった。

事故以降、日本は従来以上に国際基準に合致すべく規制制度を改革した。規制当局にはより明確な責任と大きな権限が付与された。日本の新しい規制の枠組みは、IAEA の統合規制評価サービス（IRRS）ミッションを通じ、国際的専門家のレビューを受けることになっている。緊急時への準備・対応の制度も強化された。

他の国々も、事故を受けて、施設特有の極限的な自然ハザードに対する原子力発電所の設計を再評価する「ストレステスト」の実施や、追加的なバックアップ電源と水源の設置、極端な外部事象に対する発電所の防護対策の強化などの措置を講じた。

原子力安全は各国の責任であるが、原子力事故は国境を越えて影響を及ぼし得る。福島第一原子力発電所事故は、効果的な国際協力の重要性を強調することとなった。このような国際協

力のほとんどは、IAEAにおいて実施されている。世界的に原子力安全を向上させるため、IAEA加盟国は事故の数か月後に「IAEA 原子力安全行動計画」を採択し、同計画に基づく広範な取組を実施してきている。

IAEA は、事故後、日本に技術的支援と専門知識を提供し、進展する危機に関する情報を世界に発信した。また、原子力緊急事態に対応するための IAEA 自身の体制について、検討と改善を行った。原子力緊急事態時における IAEA の役割は、あり得る影響の分析を提供し、危機の推移について予測シナリオを提示することを含むように拡大された。

IAEA 安全基準は、何が高水準の安全を構成するかについての国際的なコンセンサスを反映している。この安全基準も事故後、安全基準委員会によって検討が行われ、幾つかの改正が提案され、採択された。私は、全ての国に対して、IAEA安全基準を完全に実施するよう奨励する。

IAEA ピアレビューは、各国が一流の国際専門家から、IAEA 安全基準という共通の参考となる枠組みに基づいて独立性の高い見解を得る機会を提供し、世界の原子力安全にとって鍵となる役割を果たしている。ピアレビューでは、原子力発電所の運転安全性、原子力規制当局の実効性、特定のハザードに対する原子力発電所サイトの設計などの問題を取り扱う。我々は、福島第一原子力発電所事故を受けて、自らのピアレビューのプログラムを強化し、今後も強化を続けていく。

私は、福島第一原子力発電所事故を受けて、世界各地で原子力安全により強い関心が集まると確信している。私が訪れた全ての原子力発電所で、安全措置・手順が改善されていることを目にしてきた。このような事故が二度と起きないようにするために、人知の限りを尽くさなくてはならないという認識が広がっている。今後数十年にわたり、原子力発電の利用が世界的に拡大し続けると見込まれる中で、このような認識は一層重要である。

いかなる国においても、原子力安全について自己満足に浸る理由はない。福島第一原子力発電所事故につながった要因の幾つかは、日本に特有であったわけではない。常に疑問を持ち、経験から学ぶ開かれた姿勢が安全文化への鍵であり、原子力発電に携わる全ての人々にとって必要不可欠である。安全は常に最優先でなければならない。

本報告書の作成に貢献した多くの国及び国際機関の専門家、並びに本報告書の起案及び検討に携わったIAEA職員に感謝の意を表する。本報告書と付属の技術文書が、原子力発電を利用する国や今後利用を計画している全ての国にとって、安全を向上させるための継続的な取組に有益であることを期待する。

謝辞

カナダ、日本、ロシア連邦、英国及びアメリカ合衆国より財政的支援を受けた。

アルゼンチン、オーストラリア、ベラルーシ、ブラジル、カナダ、中国、キューバ、チェコ共和国、フィンランド、フランス、ドイツ、ガーナ、アイスランド、インド、インドネシア、イスラエル、イタリア、日本、韓国、マレーシア、メキシコ、モロッコ、オランダ、ニュージーランド、ノルウェー、パキスタン、フィリピン、ポーランド、ロシア連邦、スロバキア、南アフリカ、スペイン、スウェーデン、スイス、シリア・アラブ共和国、トルコ、ウクライナ、アラブ首長国連邦、英国、タンザニア及びアメリカ合衆国より現物支援を得た。欧州委員会、国際連合食糧農業機関、国際放射線防護委員会、国際労働機関、国際原子力安全グループ、経済協力開発機構原子力機関、原子放射線の影響に関する国連科学委員会、世界原子力発電事業者協会及び世界気象機関からも現物支援を得た。

日本政府は、相当量の情報を利用可能とし、日本の専門家が報告書に関する作業を支援できるよう手配するとともに、日本国内での二者会合の手配を支援するなど、貴重な支援を行った。

原子放射線の影響に関する国連科学委員会は、同委員会の 2013 年報告書から参考資料の関連データベースを共有し、同報告書からの情報及び図の転載を許可することによって、IAEA を支援した。

IAEA は、本報告書に関与した多数の専門家に感謝する。本報告書は、多くの人々の献身的な努力の結果である。本報告書の末尾に掲載した全ての参加者が貴重な貢献をしたが、特に作業部会の共同議長とコーディネーターは重責を担った。国際技術諮問グループのメンバーを含め、レビューを行った多くの専門家の努力にも深く感謝する。

目次

福島第一原子力発電所事故

要約

東日本大震災は、2011 年 3 月 11 日に発生した。この地震は、太平洋プレートが北米プレートの下に潜り込む境界における突然のエネルギー放出によって生じた。長さ約 500 km、幅 200 km と推定される地殻の一部が裂け、マグニチュード 9.0 の巨大地震と、数波が 10 メートルを超える高さに達した東北部沿岸を含め、日本沿岸の広い地域を襲った津波が発生した。地震と津波により、日本では多大な人命の損失と広範囲に及ぶ惨害が生じた。1 万 5,000 名以上が死亡、6,000 名以上が負傷し、本報告書作成時点で[1]、約 2,500 名がいまだ行方不明と報じられている。とりわけ日本の東北部沿岸では、建物とインフラに相当な損害が生じた。

東京電力が運転する福島第一原子力発電所では、地震がサイトへの電力供給ラインに損害をもたらし、津波がサイトの操業と安全のためのインフラに重大な破壊をもたらした。これらの複合的影響は、サイト内外の電源喪失につながった。これは、運転中であった 3 基の原子炉[2]と使用済燃料プールの冷却機能の喪失をもたらした。沿岸に立地する他の 4 つの原子力発電所[3]も、程度の差はあるが、地震と津波の影響を受けた。しかし、これらの発電所の運転中の原子炉は、全て安全に停止した。

制御を維持するための福島第一原子力発電所の運転員の努力にもかかわらず、1～3 号機の炉心は過熱し、核燃料が溶け、3 基の格納容器が破損した。水素が原子炉圧力容器から放出され、1、3 及び 4 号機の原子炉建屋内での爆発を招き、構造物と設備が損害を受け、人員が負傷した。放射性核種が発電所から大気に放出され、地表と海洋表面に沈着した。海への直接放出もあった。

サイトから半径 20 km 以内、及び他の指定区域の住民は避難し、半径 20～30 km 以内の住民は屋内退避の指示を受けた後、自主避難を勧告された。食品の流通と消費、及び飲料水の消費の制限が設けられた。本報告書作成時点で、いまだ多くの住民が避難元の地域の外で暮らしている。

福島第一原子力発電所の原子炉の状態の安定[4]を受け、その最終的な廃止措置を準備する作業が始まった。環境修復並びに地域社会及びインフラの再生を含む、事故の影響を受けた地域の復旧に向けた作業は、2011 年に始まった。

事故の直後、IAEA はその緊急時対応の役割を果たした。IAEA は事故・緊急システムを発動し、諸機関の対応を調整し、加盟国及びメディアへの一連のブリーフィングを開始した。

事務局長は直ちに日本を訪れ、また、IAEA は国際調査ミッション、廃止措置並びに環境修復に関するピアレビューミッションを含む数次のミッションを日本に派遣した。

IAEA は、2011 年 6 月に原子力安全に関する国際閣僚会議を開催し、同会議は原子力安全に関する閣僚宣言を発出した。同宣言は、世界中で原子力安全、緊急時への備え及び人と環境の放射線防護を更に向上させるための数多くの措置の概要を示した。また、同宣言は、こうした措置が確実に講じられるようにするとの IAEA 加盟国の確固たる誓約も表明した。

---

[1] 2015 年 3 月。幾つかの場合には 2015 年 6 月までの情報も利用可能であり、可能な限り含められた。

[2] 福島第一原子力発電所の原子炉 6 基のうち、1、2 及び 3 号機は事故当時は運転中であった。4、5 及び 6 号機は計画停止中であった。

[3] 東通、女川、福島第二、及び東海第二の各原子力発電所。

[4] 2011 年 12 月 16 日、政府・東京電力統合対策室は、1～3 号機で「冷温停止状態」が達成されたと発表した。「冷温停止状態」の用語は特に福島第一原子力発電所のために当時の日本政府によって定義された。その定義は IAEA 等が使用する用語とは異なる。

閣僚宣言はまた、事務局長に対し、加盟国と協議しつつ IAEA 原子力安全行動計画（以下「行動計画」）[5]案を作成することを要請した。行動計画は、世界的な原子力安全の枠組みを強化するための作業計画を定めたものであり、2011 年の第 55 回 IAEA 総会において満場一致で承認された。

IAEA は、福島県との間の協力覚書を通じて福島での協力活動も実施した。この覚書は、放射線モニタリングと環境修復、人の健康及び緊急時への備えと対応に関する協力の基礎となった。

IAEA はまた、加盟国及び原子力安全条約締約国の国際会議と会合を数多く開催した。これらの活動の多くは行動計画の下で実施された。

福島第一原子力発電所の事故以降、IAEA 加盟国及び国際機関、並びに原子力安全条約をはじめとする国際原子力安全関連条約締約国によって、事故の原因と影響に関する多くの分析や、原子力安全に与える影響の詳細な検討が行われてきた。2012 年 8 月には、事故の初期分析と条約の実効性を検討し議論するために、原子力安全条約の締約国特別会合が開催された。

原子力安全条約の締約国は、2014 年 3～4 月に開催された第 6 回検討会合において、長期の電源と冷却の喪失に耐える追加設備の導入、信頼性向上のための電源系統強化、サイト特有の外部の自然ハザードと複数ユニット事象の再評価、極端な外部事象と放射線ハザードからの防護を確保するためのサイト内外緊急時対策所の改善、格納容器の健全性を維持するための対策の強化、及びシビアアクシデント関連規定と指針の改善を含む、安全性向上策の実施について報告した。

2015 年 2 月、原子力安全条約の締約国は、IAEA 事務局長が招集した外交会議において、放射線による影響を伴う事故を未然に防ぎ、仮に事故が発生した場合には影響を緩和するという同条約の第 3 の目的の実施のための原則を含む原子力安全ウィーン宣言を採択した。

福島第一原子力発電所事故に関する報告書

2012 年 9 月の IAEA 総会において、事務局長は、IAEA が福島第一原子力発電所事故に関する報告書を作成すると表明した。事務局長は後に、報告書は「事故の原因と影響及び教訓に取り組み、権威があり、事実に基づき、バランスのとれた評価」を行うものになると述べた。

福島第一原子力発電所の事故に関する報告書は、42 の加盟国（原子力発電計画を有する国及び有しない国）及び幾つかの国際機関からの約 180 名の専門家からなる 5 つの作業部会を含む、広範な国際的協力の結果である。これにより幅広い経験と知見が代表されることを確保することができた。国際技術諮問グループは、技術的及び科学的問題につき助言を行った。報告書の作業を監督し、調整とレビューを促進するため、IAEA の上級幹部からなるコアグループが設置された。追加的な内部及び外部のレビューメカニズムも設けられた。

この事務局長報告書は、要約と概要報告書によって構成される。本報告書は、国際専門家が作成した 5 巻の詳細な技術文書及び関連の多くの専門家と国際機関の貢献に基づいている。本報告書は、行動計画の実施として行われた活動の結果を含め、2015 年 3 月までに利用可能であった数多くの情報源からのデータと情報の評価を基に、事故とその原因、進展及び結果を説明し、主な所見と教訓を取り上げている。相当量のデータが日本政府及び日本の他の組織から提供された。

[5] 行動計画は、世界的な原子力安全の枠組みを強化するための作業計画を定めた。行動計画は、安全評価、IAEA ピアレビュー、緊急時への備えと対応、国内規制当局、運転組織、IAEA 安全基準、国際的な法的枠組み、原子力発電計画の開始を計画する加盟国、能力構築、電離放射線からの人と環境の防護、コミュニケーション及び情報提供、研究開発の 12 の主要な行動分野からなる。更なる詳細については、セクション 6.1 参照。

原子力安全の考慮

外部事象に対する発電所の脆弱性

2011 年 3 月 11 日の地震は、発電所の構造物、系統及び機器を揺り動かす地盤の振動を生じた。地震後に一連の津波が発生し、その一波によってサイトが浸水した。記録された地盤の振動と津波の高さは、いずれも発電所が当初設計された時になされたハザードの仮定を大幅に上回った。地震とそれに伴う津波は、福島第一原子力発電所の複数のユニットに影響を与えた。

当初の設計で考慮された地震ハザードと津波は、主に日本の歴史上の地震記録と最近の津波の痕跡を基にして評価された。この当初の評価は、構造地質学の基準を十分に考慮しておらず、そうした基準を使用する再評価は実施されなかった。

同地震以前には、日本海溝はマグニチュード 8 クラスの地震が頻発する沈み込み帯に分類されていた。福島県沖におけるマグニチュード 9.0 の地震は、日本の科学者によっては確度が高いとは考えられていなかった。しかし、過去数十年間に、類似する地質構造環境の異なる地域で同程度又はより高いマグニチュードが記録されていた。

発電所の主要な安全施設が 2011 年 3 月 11 日の地震によって引き起こされた地盤振動の影響を受けたことを示す兆候はない。これは、日本における原子力発電所の耐震設計と建設に対する保守的なアプローチにより、発電所が十分な安全裕度を備えていたためであった。しかし、当初の設計上の考慮は、津波のような極端な外部洪水事象に対しては同等の安全裕度を設けていなかった。

外部ハザードに対する福島第一原子力発電所の脆弱性は、その供用期間中に体系的で総合的な再評価を受けていなかった。事故当時、日本にはそうした再評価に関する規制要件がなく、国内及び国際的な運転経験は、既存の規則及び指針において適切に考慮されていなかった。津波のような地震に伴う事象の影響を取り扱う方法に関する日本の規制指針は、一般的で簡潔なものであり、具体的な基準や詳細なガイダンスは含まれていなかった。

事故以前に、事業者は、2002 年に日本で策定された合意に基づく手法を使用して極限的な津波洪水レベルに関する幾つかの再評価を実施し、当初の設計基準見積りより高い数値が出ていた。これらの結果に基づいて幾つかの補完措置が講じられたが、これらは不十分であったことが事故時に示された。

さらに、事故以前に、合意に基づく手法を上回る波源モデルや手法を使用した幾つかの試算が事業者によって実施された。日本の地震調査研究推進本部が 2002 年に提案した波源モデルを使用した試算は、最新の情報を使用し、シナリオについて異なるアプローチをとり、当初の設計及びそれ以前の再評価において出された見積りより相当に大きな津波を予想した。事故当時、更なる評価が実施されていたが、その間、追加の補完措置は実施されなかった。推定値は、2011 年 3 月に記録された洪水レベルと同程度であった。

世界の運転経験は、自然ハザードが原子力発電所の設計基準を超える事例を示してきた。特に、こうした幾つかの事象からの経験は、洪水に対する安全系の脆弱性を示した。

— 自然ハザードの評価は、十分に保守的である必要がある。原子力発電所の設計基準の設定において、主として歴史上のデータを考慮することは、極限的な自然ハザードのリスクを特徴づける上で十分ではない。包括的なデータが利用可能な場合でも、観察期間が比較的短いため、自然ハザードの予測には大きな不確定性が残る。

— 原子力発電所の安全は、知見の進歩を考慮して定期的に再評価する必要があり、必要な是正措置又は補完措置が速やかに実施される必要がある。

— 自然ハザードの評価は、それらが同時又は連続的に組み合わされて発生する可能性、及び原子力発電所に対するその複合的影響を考慮する必要がある。自然ハザードの評価は、原子力発電所の複数ユニットへの影響も考慮する必要がある。

— 運転経験プログラムは、国内及び国際の双方の情報源からの経験を含める必要がある。運転経験プログラムを通じて特定された安全の向上は、速やかに実施される必要がある。運転経験の利用は、定期的にかつ独立して評価される必要がある。

深層防護概念の適用

深層防護は、原子力発電開発の当初から原子力施設の安全を確保するために適用されてきた概念である。その目的は、複数のレベルの防護手段によって潜在的な人的過誤と設備故障を補うことである。防護は各レベルにおける複数の独立した防護手段によって提供される。

福島第一原子力発電所の設計は、(1) 信頼できる通常運転を行うことを目的とする設備、(2) 異常な事象の発生後に発電所を安全な状態に戻すことを目的とする設備、(3) 事故状態に対応することを目的とする安全系、という最初の 3 つのレベルの深層防護のための設備と系統を備えていた。設計基準は、一連の想定ハザードを使用して導かれた。しかし、津波のような外部ハザードは十分には取り扱われなかった。その結果、津波によって生じた洪水は、深層防護の最初の 3 つの防護レベルに同時に影響し、3 つのレベルそれぞれで設備と系統の共通原因故障をもたらした。

複数の安全系の共通原因故障は、設計で想定されなかった発電所の状態をもたらした。その結果、第 4 のレベルの深層防護、すなわち、シビアアクシデントの進行の防止とその影響の緩和を行うこと、を目的とする防護の手段は、原子炉の冷却を回復させ、格納容器の健全性を維持するために利用できなかった。電源の完全な喪失、必要な計器が利用できないための関連する安全パラメータについての情報の欠如、制御装置の喪失及び運転手順の不十分さのために、事故の進行を止め、その影響を抑えることは不可能であった。

深層防護の各レベルで十分な防護手段を提供できなかったことが、1、2 及び 3 号機の原子炉の重大な損傷とこれらのユニットからの大規模な放射性物質の放出をもたらした。

— 深層防護の概念は引き続き有効であるが、この概念の実施は、内部及び外部のハザードに対する適切な独立性、冗長性、多様性及び防護によって、全てのレベルで強化される必要がある。事故の防止のみならず、緩和措置の改善にも焦点を当てる必要がある。

— 設計基準を超える事故の際に必要な計装制御系は、発電所の必須の安全パラメータを監視し、発電所の運転を容易とするため、動作可能な状態を維持する必要がある。

基本安全機能を果たすことができなかったことの評価

安全を確保するために重要な 3 つの基本安全機能は、核燃料の反応度の制御、炉心と使用済燃料プールからの熱の除去、及び放射性物質の閉じ込めである。地震の後、最初の基本安全機能 — 反応度の制御 — は、福島第一原子力発電所の 6 基全てで達成された。

第 2 の基本安全機能、— 炉心と使用済燃料プールからの熱の除去 — は、交流及び直流の電源系統のほとんどを喪失した結果、運転員が 1、2 及び 3 号機の原子炉と使用済燃料プールに対するほとんど全ての制御手段を奪われたため、維持することができなかった。第 2 の基本安全機能の喪失は、ひとつには原子炉圧力容器の減圧の遅れのために代替注水が実施できなかったことが原因であった。冷却の喪失が原子炉内の燃料の過熱と溶融につながった。

閉じ込め機能は、交流及び直流電源の喪失により、冷却系が使用できなくなり、運転員が格納容器ベント系を使用することが困難となった結果として失われた。格納容器のベントは、圧力を緩和し格納容器の破損を防ぐために必要であった。運転員は、1 号機と 3 号機のベントを行って原子炉格納容器の圧力を下げることができた。しかしこれは、環境への放射性物質の放出をもたらした。1 号機と 3 号機の格納容器ベントは開いたが、1 号機と 3 号機の原子炉格納容器は結局は破損した。2 号機の格納容器のベントは成功せず、格納容器が破損し、放射性物質の放出をもたらした。

— 設計基準状態及び設計基準を超える状態の双方で機能できる、頑強で信頼できる冷却系を残留熱の除去のために設ける必要がある。

— 環境への放射性物質の大規模放出を防ぐため、設計基準を超える事故に対する信頼できる閉じ込め機能を確保する必要がある。

設計基準を超える事故とアクシデントマネジメントの評価

福島第一原子力発電所の許認可プロセスとその運転中に実施された安全解析は、炉心の重大な損傷につながるおそれがある事象が複雑に連鎖する可能性を十分には取り扱わなかった。特に、安全解析は、洪水に対する発電所の脆弱性や、運転手順とアクシデントマネジメント指針の弱点を特定できなかった。確率論的安全評価は、内部溢水の可能性を取り扱わず、アクシデントマネジメントにおける人的パフォーマンスに関する想定は楽観的であった。さらに、規制当局は、事業者がシビアアクシデントの可能性を考慮するための限定的な要件を課したのみであった。

運転員には、津波によって生じる複数ユニットの電源喪失と冷却の喪失に対する十分な備えがなかった。東京電力はシビアアクシデントマネジメント指針を作成していたが、このような確率が低い事象の組合せは取り扱っていなかった。したがって、運転員は適切な訓練を受けておらず、関連するシビアアクシデント演習に参加したことがなく、運転員が利用できる設備は劣化した発電所の状態では適切でなかった。

2012 年 9 月、原子力規制委員会が設置された。原子力規制委員会は、人と環境を防護するために原子力発電所のための新たな規制を制定し、同規制は 2013 年に施行された。同規制は、地震及び津波等の外部事象の影響の再評価を含め、共通原因による全ての安全機能の同時喪失を防止するための対策を強化した。炉心損傷、格納容器損傷及び放射性物質の拡散に対する新たなシビアアクシデント対策も導入された。

— 発電所が該当する設計基準を超える事故に耐える能力を確認し、発電所の設計の頑強性に高度の信頼を与えるため、包括的な確率論的及び決定論的安全解析が実施される必要がある。

— アクシデントマネジメント規定は、包括的で十分に計画され、最新のものである必要がある。同規定は、起因事象と発電所の状態の包括的な組合せを基に導かれる必要があり、複数ユニットの発電所では複数のユニットに影響する事故にも備える必要がある。

— 訓練、演習及び実地訓練は、運転員が可能な限り十分な備えができるよう、想定されるシビアアクシデント状態を含める必要がある。これらの訓練は、シビアアクシデントマネジメントにおいて配備されるであろう実際の設備の模擬使用を含む必要がある。

規制の実効性の評価

事故当時の日本における原子力安全の規制は、異なる役割と責任を有し相互関係が複雑な多くの組織によって実施されていた。安全上の問題に遅滞なく対応する方法につき拘束力のある指示を出す責任と権限がどの組織にあるのか十分に明確ではなかった。

規制上の検査プログラムは厳格に構成されており、規制当局が適時に安全を検証し潜在的な新しい安全上の問題を特定する能力が弱められた。

事故当時にあった規則、指針及び手順書は、幾つかの重要な分野、特に定期安全レビュー、ハザードの再評価、シビアアクシデントマネジメント及び安全文化に関して国際的慣行に完全に沿うものではなかった。

— 原子力施設の安全の実効的な規制監督を確保するためには、規制当局が独立しており、法的権限、技術的能力及び強い安全文化を有することが不可欠である。

人的及び組織的要因の評価

事故以前、日本には、原子力発電所の設計と実施されている安全対策は、確率が低く影響が大きい外部事象に耐えるために十分に頑強であるという基本的な想定があった。

日本の原子力発電所は安全であるとの基本的想定のために、組織とその人員が安全のレベルに疑問を提起しない傾向があった。原子力発電所の技術設計の頑強性に関する利害関係者間で強化された基本的想定は、安全上の改善が迅速に導入されない状況をもたらした。

福島第一原子力発電所の事故は、発電所の脆弱性をよりよく特定するためには、人、組織及び技術の複雑な相互作用を考慮する統合的なアプローチをとることが必要であることを示した。

— 安全文化を推進し強化するためには、個人と組織が原子力安全に関する一般的な想定、及び原子力安全に影響する可能性がある決定と行動の意味に絶えず疑問を提起し、再検討する必要がある。

— 安全に対する体系的なアプローチは、人的、組織的及び技術的要因の間の相互作用を考慮する必要がある。このアプローチは、原子力施設の供用期間全体を通じてとられる必要がある。

緊急時への備えと対応

日本における事故への初期対応

事故当時、国と地方レベルで原子力緊急事態と自然災害に対応するための別々の体制がとられていた。原子力緊急事態と自然災害との同時発生に対応するための調整された体制はなかった。

原子力緊急事態に対応する体制は、原子力発電所において関連の有害な状況（例えば、5 分以上の全交流電源の喪失、あるいは原子炉を冷却するための全ての機能の喪失）が検知された場合、原子力発電所から地元自治体及び国に通報がなされることになっていた。その場合、国はその事象を評価し、「原子力緊急事態」[6]に該当するか否かを判断することになっていた。事象が原子力緊急事態に該当する場合、その旨の宣言が国レベルで発出され、線量予測に基づいて必要な防護対策に関する決定が行われることとされていた。

福島第一原子力発電所からの報告に基づき、総理大臣は 3 月 11 日夜に原子力緊急事態を宣言し、公衆のための防護措置に関する指示を発出した。国レベルの対応は、東京の総理大臣官邸において総理大臣と上級幹部によって主導された。

[6]「原子力災害対策特別措置法」（平成 11 年法律第 156 号。平成 18 年法律第 118 号までの改正を反映）。以下「原災法」という。

地震と津波の影響及び放射線レベルの上昇により、サイト内の対応は極めて困難となった。直流及び交流電源の喪失、サイト内の対応を阻む膨大な量の瓦礫の存在、余震、更なる津波の警報と放射線レベルの上昇により、多くの緩和措置が適時に実施できなかった。国はサイト内の緩和対策に関する決定に関与した。

福島第一原子力発電所から 5 km に位置する緊急時オフサイトセンターの活動開始は、地震と津波によって生じた甚大なインフラの損害のため、困難であった。事故発生から数日内に、放射線状況の悪化のため、オフサイトセンターからの避難が必要となった。

— 起こり得る原子力緊急事態への対応を準備する際には、自然災害と同時に起こり得る、複数ユニット発電所における複数のユニットに関するものを含め、炉心の核燃料やサイト内にある使用済燃料の重大な損傷を伴う可能性がある緊急事態を考慮する必要がある。

— 原子力緊急事態への対応のための緊急時管理体制は、事業者、地方自治体及び国の当局について明確に定められた役割と責任を含む必要がある。この体制は、事業者と当局との間の相互の関係を含め、定期的に訓練で試される必要がある。

緊急作業者の防護

事故当時、日本の国内法令と指針は、緊急作業者の防護のために講じるべき措置を定めていたが、一般的な記述のみで、十分詳細ではなかった。

緊急時対応を支援するために、様々な業種の緊急作業者が多く必要であった。緊急作業者は、様々な組織や公的機関から派遣された。しかし、事故以前に指定されていなかった緊急作業者を対応に組み入れるための体制はなかった。

緊急作業者を放射線被ばくから防護する体制の実施は、サイト内の極限的な状況により重大な影響を受けた。サイト内の緊急作業者のために容認できるレベルの防護を維持するため、一連の臨時措置が実施された。必要な緩和対策を継続できるよう、特定の作業に従事する緊急作業者の線量限度が一時的に引き上げられた。緊急作業者の医療管理も重大な影響を受け、サイト内の緊急作業者のニーズを満たすため、多大な努力が必要であった。

「ヘルパー」と呼ばれる一般の人々が、サイト外の緊急時対応への支援を自発的に行った。国の当局は、ヘルパーが実施できる活動の種類とその防護のために講じるべき措置に関するガイダンスを発出した。

— 緊急作業者は、所属する組織にかかわらず指定を受け、明確に定められた職責を割り当てられ、適切な訓練を受け、緊急時には適切に防護される必要がある。緊急事態の発生以前に指定されていなかった緊急作業者及び緊急時対応への支援を自発的に行うヘルパーを対応に組み入れる体制を整備する必要がある。

公衆の防護

事故当時の国の緊急時体制においては、防護対策に関する決定が必要な場合には、線量予測モデル — 緊急時迅速放射能影響予測ネットワークシステム（SPEEDI）— を使用して計算される公衆の予測線量の見積りに基づいて行われることになっていた。この体制では、公衆に対する緊急防護対策の決定を事前に定められた特定の発電所の状態に基づいて行うことは想定していなかった。しかし、事故対応では、防護対策に関する初期の決定は、発電所の状態に基づいて行われた。サイト内の電源喪失のため、SPEEDI に入力するソースタームの見積りを提供することができなかった。

事故以前の体制では、屋内退避、避難及びヨウ素剤による甲状腺ブロックの基準が予測線量

に関して定められていたが、測定可能な量としては決められていなかった。移転に関する基準はなかった。

事故時に実施された公衆の防護対策は、避難、屋内退避、ヨウ素剤による甲状腺ブロック（安定ヨウ素の投与による）、食品と飲料水の摂取制限、移転及び情報提供を含んでいた。

福島第一原子力発電所の近隣からの住民の避難は、2011 年 3 月 11 日の夜に始まり、避難対象区域は、発電所から半径 2 km、3 km、その後 10 km へと徐々に拡大された。3 月 12 日の夜までには、避難対象区域は 20 km まで拡大された。同様に、住民が屋内退避を指示された区域は、事故直後の発電所から 3～10 km 以内から、3 月 15 日までには 20～30 km 以内に拡大された。原子力発電所から半径 20～30 km 以内の区域では、住民は 3 月 25 日まで屋内退避を指示され、同日、国は自主避難を勧告した。ヨウ素剤による甲状腺ブロックのための安定ヨウ素剤の投与は、主として詳細な制度がなかったことにより、一律には実施されなかった。

地震と津波による被害、及びこれに伴う通信や輸送の問題のため、避難には困難が伴った。20 km の避難区域内にある病院と介護施設から患者を避難させる際にも大きな困難が伴った。

4 月 22 日、既存の 20 km の避難区域は、再立入が管理される「警戒区域」に指定された。「警戒区域」外で移転のための特定の線量基準を超える可能性がある場所においては、「計画的避難区域」が指定された。

放射性核種が環境中で検出されると、農地における防護対策、食品の摂取と出荷及び飲料水の摂取に対する制限に関する制度が設けられた。さらに、輸出用の食品と製品のための認証システムが設けられた。

緊急時に公衆に常時情報を伝え人々の懸念に対応するため、テレビ、ラジオ、インターネット及び電話ホットラインを含む複数の方法が用いられた。ホットラインとカウンセリングサービスを通じて公衆から得たフィードバックにより、容易に理解できる情報と裏付けとなる資料の必要性が明らかになった。

— 事前に決められた公衆への緊急防護対策の実施を、あらかじめ定められた発電所の状態に基づいて決定することができるよう、体制を整備しておく必要がある。

— 緊急防護対策を、進展する発電所の状態やモニタリングの結果に応じて拡大若しくは変更できるよう、体制を整備しておく必要がある。早期の防護対策を、モニタリング結果に基づいて開始できるようにするための体制も必要である。

— 原子力緊急事態における防護対策及び他の対応措置が害を与える以上に利益をもたらすよう、体制を整備しておく必要がある。このバランスを実現するため、意思決定についての包括的なアプローチが整備されていることが必要である。

— 防護対策に関して情報を得た上で決定できるよう、意思決定者、公衆及びその他（例えば医療スタッフ）が原子力緊急事態の放射線による健康被害に関する理解を得られるよう支援する体制を整備しておく必要がある。地方、国及び国際レベルで、公衆の懸念に対応する体制も整備しておく必要がある。

緊急時段階から復旧段階への移行、対応の分析

緊急時段階から復旧段階への移行のための具体的な政策、指針、基準及び体制は、福島第一原子力発電所事故後まで定められていなかった。こうした体制を整備するにあたり、日本の当局は、国際放射線防護委員会（ICRP）の最新の勧告を適用した。

事故及び緊急時対応の分析が行われ、政府、事業者（東京電力）、政府と国会がそれぞれ設立した2つの調査委員会によるものを含め、報告書の形で提出された。

事故後、日本における国の緊急時への備えと対応の体制は、これらの分析の結果や、緊急時への備えと対応の分野に関連するIAEAの安全基準を考慮して、多くの点で改訂された。

— 緊急時への備えの段階において、防護対策及び他の対応措置の終了、並びに復旧段階への移行についても体制を整備する必要がある。

— 緊急事態及びこれへの対応を適時に分析し、教訓を導き可能な改善策を特定することは、緊急時の体制を強化する。

緊急時への備えと対応に関する国際的枠組みにおける対応

国際的な法的文書、IAEA の安全基準及び実施時の取決めを含む緊急時への備えと対応のための広範囲な国際的枠組みが、事故当時に存在した[7]。

事故の発生当時、IAEA には原子力又は放射線の緊急事態への対応において、(1)公式に指定された連絡窓口経由での公式情報の通知と交換、(2)明確で理解できる情報の適時の提供、(3)要請に応じた国際的支援の提供と促進、及び(4)国際機関の対応の調整という4つの役割があった。

事故への国際的対応には、多くの国と国際機関が関与した。

IAEA は、日本の公式窓口と連絡を取り、緊急事態の進展に合わせて情報を共有し、各国、関連国際機関及び公衆に常時情報を提供した。緊急時対応の早期においては、日本の公式窓口とのコミュニケーションは困難であった。IAEA 事務局長の日本訪問及びこれに続いて東京に連絡職員を配置することにより、IAEA と連絡窓口とのコミュニケーションが改善された。IAEA はまた、専門家ミッションを日本に派遣し、関連国際機関の対応を調整した。

様々な国[8]が、事故に対応して、日本に滞在する自国民のために様々な防護対策を講じ、あるいは勧告した。こうした相違は、一般に公衆に十分説明されず、時に混乱と懸念を招いた。

放射線及び原子力緊急事態に関する国際機関間委員会に参加している機関は定期的に情報を交換した。共同プレスリリースも発出された。

— 通報と支援に関する国際的体制の実施が強化される必要がある。

— 防護対策及び他の対応措置に関して、各国間の協議と情報共有を改善する必要がある。

放射線の影響

環境中の放射能

事故は、環境への放射性核種の放出をもたらした。放出の評価が、多くの機関によって様々なモデルを使用して実施された。大気への放出のほとんどは、卓越風の風向に従って東の方向

[7] 主たる国際的な法的文書は、原子力事故の早期通報に関する条約と、原子力事故又は放射線緊急事態の場合における援助に関する条約である。事故当時の緊急時の備えと対応の分野に関する国際安全基準は、IAEA 安全基準シリーズ No. GS-R-2 及び No. GS-G-2.1 であった。安全シリーズ No. 115 にも、緊急時における準備と対応に関する事項が含まれていた。国際的な実施の取決めには、緊急事態通報・援助技術運営マニュアル（ENATOM）、IAEA 緊急時対応援助ネットワーク（RANET）及び国際機関の共同放射線緊急時管理計画（JPLAN）が含まれていた。

[8] 原子力又は放射線緊急事態への備えと対応に関する主たる責任は、人命、健康、財産及び環境の防護に対する主たる責任と同様に、国にある。

に飛ばされ、北太平洋に沈着し、拡散した。放射性物質の量と組成の推定における不確かさは、大気への放出の海への沈着に関するモニタリングデータの不足などの理由により、解決が困難であった。

風向の変化は、大気への放出の比較的小さな部分が陸上、多くは福島第一原子力発電所から北西方向に沈着したことを意味した。陸上環境に沈着した放射性核種の存在と放射能濃度は、モニターされ、特性が明らかにされた。放射性核種の放射能測定値は、物理的崩壊、環境輸送プロセス及び除染活動のため、時間を追って減少する。

大気からの沈着により海に入る放射性核種に加えて、福島第一原子力発電所からサイトの場所の海への直接の液体の流出と放出があった。海洋での放射性核種の正確な動向は測定のみでは評価が困難であるが、海洋拡散を推定するために多くの海洋輸送モデルが使用された。

ヨウ素 131、セシウム 134 及びセシウム 137 などの放射核種が放出され、飲料水、食品及び幾つかの非食用品目で検出された。これらの製品の消費を防ぐための制限が、事故への対応として日本の当局によって定められた。

— 事故による放射性物質の環境への放出の場合、放出量及びその組成の迅速な定量化及び特性評価が必要である。大規模な放出については、地元、地域及び地球規模での環境への放射線影響の性質と範囲を特定するため、包括的で調整された長期的環境モニタリング計画が必要である。

放射線被ばくに対する人の防護

事故を受け、日本の当局は、最近の ICRP の勧告[9]に含まれる線量の保守的な参考レベルを適用した。幾つかの防護措置と対応の適用は、実施する当局にとって困難であり、影響を受ける人々にとって非常に厳しいものであることが明らかとなった。

緊急時段階が過ぎた後、事故の長期的余波における飲料水、食品及び非食用消費財を管理するための国内及び国際的な基準とガイダンスに、幾つかの相違があった。

— 関連する国際機関は、放射線防護の原則及び基準の適用を意思決定者と公衆にとってより明確なものとするため、専門家以外の人々に理解しやすい説明を整備する必要がある。幾つかの長期にわたる防護措置は影響を受ける人々にとって攪乱的であったため、そうした措置と対応が正当とされる理由を、公衆を含む全ての利害関係者に伝えるため、より良いコミュニケーション戦略が必要である。

— 消費財の放射能及び放射能濃度並びに沈着した放射能に関する保守的な決定により、長期の制限及びそれに伴う問題が生じた。長期被ばくの状況では、国際基準の間及び国際基準と国内基準の間に一貫性があることは、特に飲料水、食品、非食用消費財及び陸上での降下物の放射能濃度に関して有益である。

放射線被ばく

短期的には、公衆の被ばくの最大の要因は、(1)プルームに含まれ地表に沈着した放射性核種からの外部被ばく、(2)ヨウ素 131 の取込みによる甲状腺の内部被ばく、及び主としてセシウム

[9] 放射線防護に関する国際勧告は、ICRP によって発出される。これらの勧告は、幾つかの国際機関によって策定・設定され、IAEA の後援を受けて発出される放射線防護基準（電離放射線からの防護と放射線源の安全のための国際基本安全基準（基本安全基準、すなわち BSS））を含む国際安全基準の設定において考慮される。BSS は、世界中で、電離放射線の被ばくの潜在的に有害な影響からの人と環境の防護のための国内規制整備に使用されている。2007 年の ICRP の勧告は、放射線防護の枠組みの改訂をもたらした。これには防護戦略への参考レベルの導入が含まれた。事故当時、BSS は、これらの勧告を反映させる等のために改訂中であった。

134 とセシウム 137 の取込みによる他の臓器と組織の内部被ばくであった。長期的には、公衆の被ばくの最も重要な要因は、沈着したセシウム 137 からの外部放射線である。

放射線量の初期の評価は、環境モニタリングと線量推定モデルを使用し、その結果、幾らかの過大評価が生じた。本報告書の推定では、実際に受けた個人線量とそれらの分布に関するより強固な情報を提供するため、地方当局から提供された個人モニタリングデータも含められた。これらの推定は、公衆の構成員の受けた実効線量が低く、自然バックグラウンド放射線の世界的なレベルにより受ける実効線量の範囲と一般に匹敵することを示している。

ヨウ素 131 の放出と子供によるその取込みを伴う原子力事故の後には、彼らの甲状腺への取込みとその後の線量が特に懸念される。福島第一原子力発電所事故の後、飲料水及び葉物野菜と生乳を含む食品に制限が課されたこともあり、ヨウ素 131 の取込みが限定されたため、報告された子供の甲状腺等価線量は低かった。事故直後のヨウ素の取込みに関しては、同期間の信頼できる個人放射線モニタリングデータが不足しているため、不確かさがある。

2011 年 12 月までに、約 2 万 3,000 名の緊急作業者が緊急作業に従事した。彼らの大多数が受けた実効線量は、日本における職業上の線量限度を下回った。総数のうち、174 名は緊急作業者に対する本来の基準を超え、6 名は日本の当局が定めた一時的に改訂された緊急時における実効線量基準を超えた。緊急作業者の放射線量の早期モニタリングと記録を含む職業上の放射線防護要件の実施、幾つかの防護用装備の利用可能性及び使用、並びに関連する訓練において、幾つかの不十分な点が発生した。

— 公衆の構成員の代表的集団の個人放射線モニタリングは、放射線量の信頼できる推定にとって貴重な情報をもたらし、環境測定値及び適切な線量推定モデルとともに公衆線量を評価するために使用される必要がある。

— 乳製品は、日本における放射性ヨウ素の摂取の主な経路ではなかったものの、特に子供への甲状腺線量を制限する最も重要な方法は、草を食べる乳牛からの生乳の消費を制限することであるのが明らかである。

— 全ての関連する経路を通じて、特にシビアアクシデントマネジメント活動の際に作業者が受ける可能性のある内部被ばくによる職業上の放射線量をモニターし、記録する強固なシステムが必要である。緊急時対応活動中は、作業者の被ばくを制限するための適切で十分な個人防護用装備が利用可能で、作業者がその使用法に関する訓練を十分受けていることが不可欠である。

健康影響

作業者又は公衆の構成員の間で、事故に起因し得ると考えられる放射線による早期健康影響は観察されなかった。

遅発性放射線健康影響の潜伏期間は数十年に及ぶ場合があり、このため被ばくから数年後の観察によって、被ばく集団にそうした影響が発生する可能性を無視することはできない。しかし、公衆の構成員の間で報告された低い線量レベルに鑑み、本報告書の結論は、原子放射線の影響に関する国連科学委員会（UNSCEAR）の国連総会に対する報告の結論[10]と一致している。UNSCEAR は「被ばくした公衆の構成員とその子孫の間で、放射線関連の健康影響の発生率について識別可能な上昇は予測されない」と確認した（これは「2011 年の東日本大震災の後の原子力事故による放射線被ばくのレベルと影響」に関する健康影響の文脈で報告された）[11]。100 mSv な

[10] 国連、原子放射線の影響に関する国連科学委員会報告書、A/68/46、国連、ニューヨーク（2013 年）
[11] 世界保健機関（WHO）も予備的な推定線量をもとに 2013 年に健康リスク評価を発表した。結果は本報告書において示されている。

いしそれ以上の実効線量を受けた作業者の集団に関しては、UNSCEAR は、「がんのリスクの増大が将来予想されよう。しかし、このような小さい発生率を発がん率の通常の統計的ばらつきに対して確認することが困難であるため、この集団における発がん率上昇は識別できないであろうと予想される」と結論づけた[12]。

影響を受けた福島県民の健康をモニターするため、福島県民健康管理調査が実施された。この調査は、疾病の早期発見と治療及び生活習慣病の予防を目的としている。本報告書作成時点で、子供の甲状腺の集中的なスクリーニングが調査の一環として行われている。感度が高い装置が使用されており、調査を受けた子供のうちの相当数で無症候性の（臨床的手段によっては検出できない）甲状腺異常を検知している。調査で特定された異常が事故による放射線被ばくと関連づけられる可能性は低く、この年齢の子供における甲状腺異常の自然な発生を示している可能性が最も高い。子供の甲状腺がんの発生は、相当な放射性ヨウ素の放出を伴う事故後に最も可能性が高い健康影響である。本件事故に起因する報告された甲状腺線量は一般的に低く、事故に起因する子供の甲状腺がんの増加は可能性が低い。しかし、事故の直後に子供が受けた甲状腺等価線量に関する不確かさは残った。

出生前放射線影響は観察されておらず、報告された線量はこれらの影響が発生する可能性があるしきい値を大きく下回っていることから、発生は予想されない。放射線の状況に起因する希望しない妊娠中絶は、報告されていない。親の被ばくがその子孫に遺伝性影響を生じる可能性に関しては、UNSCEAR は一般的に、「動物の調査では示されているものの、人間の集団における遺伝性影響の発生率の増加は、現時点で放射線被ばくに起因すると考えることはできない」と結論づけた[13]。

原子力事故の影響を受けた住民の間で、幾つかの心理状態が報告された。こうした人々の多くは、大地震と破壊的な津波及び事故の複合的影響を被ったため、こうした影響がどの程度原子力事故のみに起因するかを評価することは困難である。福島県民健康管理調査の精神的健康・生活習慣調査は、影響を受けた住民のうち幾つかの脆弱な集団の中で、不安感と心的外傷後ストレス障害の増加など、関連する心理学的問題を示している。UNSCEAR は、「（事故からの）最も重要な健康影響は、地震、津波及び原子力事故の甚大な影響と電離放射線被ばくリスクに対する恐怖や屈辱感によって影響を受けた精神的及び社会的福利厚生である」と推定した[14]。

— 被ばくのレベルが放射線の世界的なバックグラウンドレベルと同様の場合には、集団におけるいかなる健康影響の事象の増加も放射線被ばくに起因するとはいえないことを明確にし、放射線被ばくのリスクと健康影響の放射線からの起因を、ステークホルダーに対してはっきりと示す必要がある。

— 原子力事故後には、健康調査は非常に重要で有益であるが、疫学調査と解釈されるべきでない。そうした健康調査の結果は、影響を受けた住民への医療支援を支えるための情報を提供することが目的である。

— 放射線事故後に影響を受けた住民の心理的影響に取り組む放射線防護ガイダンスが必要である。**ICRP** の作業部会は、「放射線事故から生じる深刻な心理的影響を緩和するための戦略が求められる」と勧告した[15]。

---

[12] 脚注 10 参照。

[13]国連、原子放射線の影響に関する国連科学委員会の報告書、A/67/46、ニューヨーク（2012 年）

[14]国連、電離放射線の線源、影響及びリスク、UNSCEAR 2013 年報告書、第 I 巻、科学附属書 A：2011 年の東日本大地震と津波後の原子力事故による放射線被ばくのレベルと影響、原子放射線の影響に関する国連科学委員会（UNSCEAR）、国連、ニューヨーク（2014 年）

[15] 国際放射線防護委員会、ICRP の放射線防護システムと比較しての日本の原子力発電所事故からの初期の教訓に関する ICRP 作業部会 84 の報告書、ICRP（2012 年）

— 放射線影響に関する事実に基づく情報は、防護戦略に関する個人の理解を高め、その懸念を軽減し、自らの防護イニシアチブを支援するために、影響を受けた地域の個人に理解しやすい形で適時に伝えられる必要がある。

人間以外の生物相に対する放射線の影響

限定的な観察調査が事故直後の期間に実施されたが、直接放射線によって誘発される植物と動物への影響の観察は報告されていない。放射線影響を評価するために利用できる手法には限りがあるが、過去の経験と環境中に存在する放射性核種のレベルに基づけば、事故の結果として、生物相の集団や生態系に重要な放射線影響が生じる可能性は低い。

— 緊急時段階では、人の防護に主眼を置かなければならない。生物相への線量は管理することができず、個別には潜在的に大きい可能性がある。人間以外の生物相に対する放射線被ばくの影響に関する知見は、放射線によって誘起される生物相の集団と生態系への影響の評価手法と理解を改善することによって強化される必要がある。環境への放射性核種の大規模放出の後には、農業、林業、漁業及び観光業の持続可能性と、天然資源の利用を確実にするために、統合的な視点が採用される必要がある。

事故後の復旧

事故の影響を受けたサイト外の地域の環境修復

事故後の復旧[16]の長期的目標は、影響を受けた地域において完全に機能する社会のための受け入れられる基盤を再確立することである。採用された参考レベルに合致するよう放射線量を低減させるため、事故の影響を受けた地域の環境修復[17]が考慮される必要がある。避難者の帰還準備に当たっては、インフラの復旧及び地域社会の生存と持続可能な経済活動などの要素が考慮される必要がある。

福島第一原子力発電所の事故以前には、日本には事故後の環境修復に関する政策と戦略はなく、事故後にそれらを策定することが必要となった。環境修復にかかる政策は、2011 年 8 月に日本政府によって制定された[18]。これは、国と地方自治体、事業者及び公衆に責任を割り当て、調整された作業の実施のために必要となる制度を整備した。

環境修復戦略が策定され実施が始まった。この戦略では、外部被ばくの低減を重視し、環境修復の優先地域は、建物と庭、農地、道路及びインフラを含む住居地域であることを明記している。

地面などの表面に沈着した放射性核種からの外部線量が、被ばくの主要な経路である。したがって、環境修復戦略は、優先地域に存在する放射性セシウムのレベルを下げることによって、そのような被ばくの可能性を低減する除染活動に主眼を置いている。内部線量は、食品に対する制限や農地の環境修復活動を通じて、引き続き制御されている。

事故を受け、日本の当局は、全体的な環境修復戦略の目標線量レベルとして「参考レベル」を採用した。このレベルは国際的なガイダンスで特定されている範囲の下限と一致していた。

---

[16] 事故後の復旧には、事故の影響を受けた地域の環境修復、損傷したサイト内施設の安定化及び廃止措置の準備、これらの活動から生じる放射性物質による汚染物と放射性廃棄物の管理、並びに地域社会の再生及び利害関係者の参加が含まれる。

[17] 環境修復は、汚染自体（線源）又は人への被ばく経路に適用される対策を通じて、土地の汚染からの放射線被ばくを低減するために実施され得る全ての措置と定義される。

[18] 環境省、「平成二十三年三月十一日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う原子力発電所の事故により放出された放射性物質による環境の汚染への対処に関する特別措置法」（平成 23 年法律第 110 号）

低い参考レベルの適用は、環境修復活動により発生する放射性物質による汚染物の量を増やす効果を持つので、費用や限られた資源への需要を増すことになる。日本で得られた経験は、事故後の復旧状況における国際安全基準の適用に関する実際的なガイダンスの策定に活用できるであろう。

2011 年の秋に見積もられた年間推定追加線量をもとに、2 つの種類の汚染地域が定められた。福島第一原子力発電所から半径 20 km 以内及び土地の汚染から生じる追加の年間線量が事故後の最初の 1 年間に 20 mSv を超えると予測された地域からなる第 1 の地域（「除染特別地域」）において環境修復計画を策定し実施するのは、国の責任となった。市町村は、追加の年間線量が 1 mSv を超えるが 20 mSv を下回ると予想されたその他の地域（「汚染状況重点調査地域」）で、修復活動を実施する責任を与えられた。1 mSv 以下の追加年間線量を達成するという長期目標を含む、具体的な線量低減目標が設定された。

— 事故直後の重圧の下で行う意思決定を改善するため、事故後の復旧に関して事故以前に計画立案を行うことが必要である。原子力事故が発生した場合に効果的で適切な全体的復旧計画を実現するため、事故後の復旧のための国家戦略と措置が事前に準備される必要がある。これらの戦略と措置は、法律と規制の枠組み、残留放射線量と汚染レベルに関する一般的な環境修復戦略と基準、損傷した原子力施設の安定化と廃止措置の計画、及び大量の放射性物質による汚染物と放射性廃棄物を管理するための一般的戦略の設定を含む必要がある。

— 環境修復戦略は、個々の措置の実効性と実行可能性、及び環境修復において発生する放射性物質による汚染物の量を考慮する必要がある。

— 環境修復戦略の一環として、食品の厳格な検査実施と制限が摂取線量の防止と最少化に必要である。

— 事故後の復旧の状況における放射線防護のための安全基準の実際的な適用に関して、更なる国際ガイダンスが必要である。

サイト内の安定化と廃止措置に向けた準備

損傷した原子力発電所の安定化と廃止措置に関する包括的で高いレベルの戦略的計画が、東京電力及び関連する日本政府の省庁によって共同で策定された。この計画は 2011 年 12 月に初めて発表され、その後、損傷した原子力発電所の状態や将来の課題に関して得られた経験や理解の向上を反映して改訂された。この戦略的計画は、サイト内の作業の複雑さに言及し、安全確保のアプローチ、廃止措置に向けた措置、作業促進のための制度及び環境、及び研究開発の必要を含んでいる。

本報告書作成時点では、安全機能が回復され、安定した状態を確実に維持するための構造物・系統・機器が設置されていた。しかし、損傷し汚染された原子炉建屋への地下水の浸入の制御が継続的に必要であった。発生した汚染水は、放射性核種を可能な限り除去するために処理した上で、800 基を超えるタンクに貯蔵されていた。海洋への管理された放出の再開の可能性を含む、全てのオプションを考慮した上で、より持続可能な解決策が必要である。最終的な意思決定には、利害関係者の関与が必要であり、その協議過程において社会経済的条件を考慮するとともに、包括的なモニタリング計画を実施することが必要となるであろう。

使用済燃料と燃料デブリの管理に関する計画が策定され、使用済燃料プールからの燃料の取出しが始まった[19]。デブリの位置と性状の目視確認を含む、多くの必要な予備的段階を考慮した、燃料デブリを取り出すための将来計画の概念モデルが開発された。損傷した原子炉における高い放射線量レベルのため、本報告書作成時点ではそうした確認は可能ではなかった。

[19] 4 号機の使用済燃料プールからの燃料の取出しは、2014 年 12 月に完了した。

日本の当局は、廃止措置活動の完了までには 30～40 年程度を要する可能性があると見積もっている。発電所と敷地の最終的な状態に関する決定には、更なる分析及び議論が必要となる。

— 事故後には、長期的な安定状態を維持するため、また、事故によって損傷した施設の廃止措置のための戦略計画が、サイト内の復旧に不可欠である。計画は、変化する状態と新たな情報に、柔軟かつ容易に適応できる必要がある。

— 破損燃料の回収や燃料デブリの特性評価と取出しには、事故に特有の解決策が必要であり、特別な手法と工具の開発が必要となる可能性がある。

放射性物質による汚染物と放射性廃棄物の管理

損傷した原子力発電所の安定化、及びサイト内の除染と周辺地域での環境修復作業からは、大量の放射性物質による汚染物と放射性廃棄物が発生する。サイト内においては、様々な復旧活動を通じて、放射性物質に汚染された固体物及び液体物並びに放射性廃棄物が大量に発生している[20]。様々な物理的、化学的及び放射能特性を有する、そうした物質の管理は複雑であり、多大な努力を要する。

また、福島第一原子力発電所の事故後、サイト外の環境修復活動から生じた大量の放射性物質による汚染物の保管場所を確保することに困難が生じた。本報告書作成時点では、数百の仮置き場が地方自治体に設置され、中間貯蔵施設を設置するための努力が継続されている。

— 事故後の復旧のための国家戦略と措置は、放出、貯蔵及び処分に関する一般的な安全評価に支えられた、放射性物質に汚染された液体及び固体物並びに放射性廃棄物を管理するための、一般的戦略の策定を含む必要がある。

地域社会の再生と利害関係者の関与

原子力事故及び緊急時段階と事故後の復旧段階の双方で導入された放射線防護の対策は、影響を受けた住民の生活に多大な影響を及ぼした。避難と移転の措置や食品の制限は、影響を受けた住民の苦難を伴った。福島県で導入された再生と再建のプロジェクトは、事故の社会経済的影響の理解に基づいて策定された。これらのプロジェクトは、インフラの再建、地域社会の再生、並びに支援と補償などの問題に取り組んでいる。

信頼を構築するためには、復旧活動に関する公衆とのコミュニケーションが不可欠である。効果的に意思疎通するためには、影響を受けた住民の必要とする情報を専門家が理解し、適切な手段によって、わかりやすい情報を提供することが必要である。コミュニケーションは、事故後に改善され、影響を受けた住民は、次第に意思決定と環境修復活動に関与するようになった。

— 原子力事故及びその後の防護措置の社会経済的影響を認識し、インフラの再建、地域社会の再生及び補償などの問題に取り組む、再生と再建のプロジェクトを策定することが必要である。

— 利害関係者による支持は、事故後の復旧の全ての側面で不可欠である。特に、影響を受けた住民が意思決定プロセスに関与することは、復旧の成功、受容及び実効性、並びに地域社会の再生に必要である。効果的な復旧プログラムには、影響を受けた住民の信頼と関与が必要である。復旧措置の実施に対する信頼は、対話のプロセス、一貫した明確で適時の情報の提供、及び影響を受けた住民への支援を通じて構築される必要がある。

[20] 放射性物質による汚染物と放射性廃棄物は、当該物に含まれる放射性核種及び放射能濃度によって区別される。

福島第一原子力発電所事故

概要報告書

1. はじめに

東日本大震災は、2011 年 3 月 11 日に発生した。この地震は、太平洋プレートが北米プレートの下に潜り込む境界における突然のエネルギー放出によって生じた。長さ約 500 km、幅 200 km と推定される地殻の一部が裂け、マグニチュード 9.0 の巨大地震と、数波が 10 メートルを超える高さに達した東北部沿岸を含め、日本沿岸の広い地域を襲った津波が発生した。地震と津波により、日本では多大な人命の損失と広範囲に及ぶ惨害が生じた。1 万 5,000 名以上が死亡、6,000 名以上が負傷し、本報告書作成時点で[21]、約 2,500 名がいまだ行方不明と報じられている [1]。とりわけ日本の東北部沿岸では、建物とインフラに相当な損害が生じた。

東京電力（TEPCO）が運転する福島第一原子力発電所では、地震がサイトへの電力供給ラインを破損し、津波がサイトの操業と安全のためのインフラを相当に破壊した。これらの複合的影響は、サイト内外の電源の喪失につながった。これは、運転中であった 3 基の原子炉[22]と使用済燃料プールの冷却機能の喪失をもたらした。沿岸に立地する他の原子力発電所[23] 4 カ所も、程度の差はあるが、地震と津波の影響を受けた。しかし、これらの発電所の運転中の原子炉は、全て安全に停止した。

制御を維持するための福島第一原子力発電所の運転員の努力にもかかわらず、1～3 号機の炉心は過熱し、核燃料が溶け、3 基の格納容器が破損した。水素が原子炉圧力容器から放出され、1、3 及び 4 号機の原子炉建屋内での爆発を招き、構造物と設備が損害を受け、人員が負傷した。放射性核種が発電所から大気に放出され、地表と海洋表面に沈着した。海への直接放出もあった。

サイトから半径 20 km 以内、及び他の指定区域の住民は避難し、半径 20～30 km 以内の住民は屋内退避の指示を受けた後、自主避難を勧告された。食品の流通と消費、及び飲料水の消費の制限が設けられた。本報告書作成時点で、いまだ多くの住民が避難元の地域の外で暮らしている。

福島第一原子力発電所の原子炉の状態の安定[24]を受け、その最終的な廃止措置を準備する作業が始まった。環境修復並びに地域社会及びインフラの再生を含む、事故の影響を受けた地域の復旧に向けた作業は、2011 年に始まった。

1.1. 福島第一原子力発電所事故に関する報告書

2012 年 9 月の IAEA 総会において、事務局長は、IAEA が福島第一原子力発電所事故に関する報告書を作成すると表明した。事務局長は後に、本報告書は「事故の原因と影響及び教訓に取り組み、権威があり、事実に基づき、バランスのとれた評価」を行うものになると述べた[2]。

福島第一原子力発電所の事故に関する報告書は、42 の加盟国（原子力発電計画を有する国及び有しない国）及び幾つかの国際機関からの約 180 名の専門家からなる 5 つの作業部会を含む、

---

[21] 2015 年 3 月。幾つかの場合には 2015 年 6 月までの情報も利用可能であり、可能な限り含められた。

[22] 福島第一原子力発電所の原子炉 6 基のうち、1、2 及び 3 号機は事故当時に運転中であった。4、5 及び 6 号機は計画停止中であった。

[23] 東通、女川、福島第二、及び東海第二の各原子力発電所。

[24] 2011 年 12 月 16 日、政府・東京電力統合対策室は、1～3 号機で「冷温停止状態」が達成されたと発表した。「冷温停止状態」の用語は特に福島第一原子力発電所のために当時の日本政府によって定義された。その定義は IAEA 等が使用する用語とは異なる。

広範な国際的協力の結果である。これにより幅広い経験と知見を確保することができた。国際技術諮問グループは、技術的及び科学的問題につき助言を行った。報告書の作業を監督し、調整と検討を促進するため、IAEA の上級幹部からなるコアグループが設置された。内部及び外部による追加的な検討メカニズムも設けられた（図 1.1 に表示）。

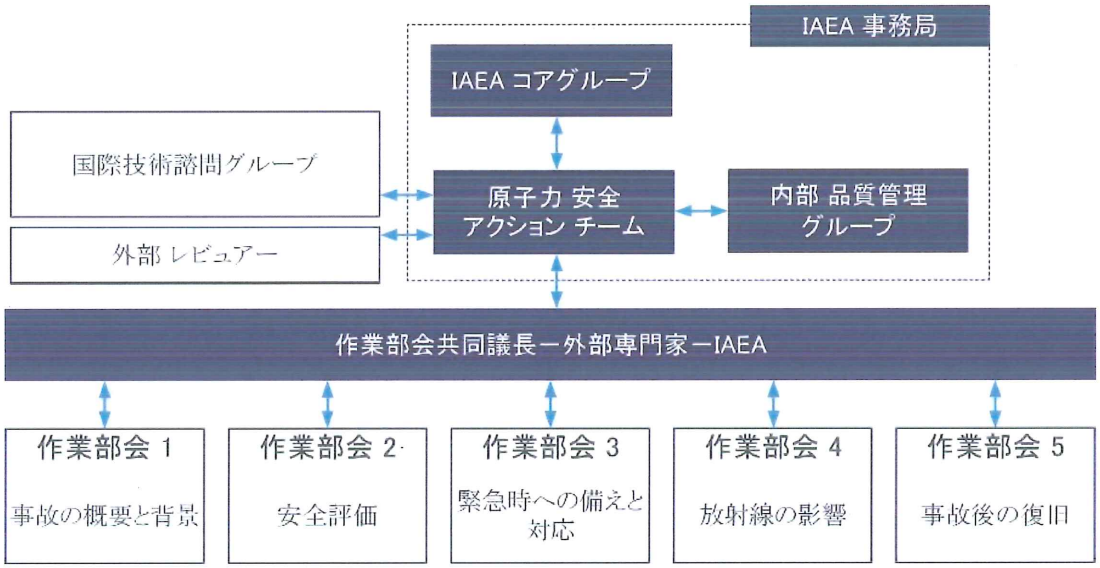


図 1.1.　福島第一原子力発電所事故に関する報告書作成のための IAEA の組織構造

この事務局長報告書は、要約と概要報告書によって構成される。本報告書は、国際専門家が作成した 5 巻の詳細な技術文書及び関連の多くの専門家と国際機関の貢献に基づいている。本報告書は、IAEA 原子力安全行動計画（以下「行動計画」）[25]の実施として行われた活動の結果を含め、2015 年 3 月までに利用可能であった数多くの情報源からのデータと情報の評価を基に、事故とその原因、進展及び結果を説明し、主な所見と教訓を取り上げている。相当量のデータが日本政府及び日本の他の組織から提供された。

5 巻の技術文書は、IAEA 加盟国の関連当局、国際機関、原子力規制機関、原子力発電所事業者、原子力施設の設計者及びその他の原子力発電に関連する事項の専門家を含む技術的読者向けとなっている。

この事務局長報告書は、以下の 6 つのセクションからなる。

— セクション1：はじめに
— セクション2：事故とその原因。事象の時系列的記述及び異常自然事象がどのように重大な原子力事故につながったかの評価を含む。
— セクション3：緊急時への備えと対応。緊急作業者及び公衆の保護のための体制、及び事故当時及び発生直後におけるこれらの体制の実施を含む。

[25] 2011 年の第 55 回 IAEA 総会で満場一致で承認された行動計画は、世界的な原子力安全の枠組を強化するための作業計画を定めた。行動計画は、安全評価、IAEA ピアレビュー、緊急時への備えと対応、国内規制当局、運転組織、IAEA 安全基準、国際的な法的枠組、原子力発電計画の開始を計画する加盟国、能力構築、電離放射線からの人と環境の防護、コミュニケーション及び情報提供、研究開発の 12 の主要な行動分野からなる。更なる詳細については、セクション 6.1 参照。

— セクション4：事故の放射線影響。作業者・公衆の放射線被ばく、及び健康影響と環境影響を含む。
— セクション5：事故後の復旧活動。発電所の廃止措置、影響を受けたサイト外区域の環境修復戦略、廃棄物管理及び復興戦略を含む。
— セクション6：事故に対応したIAEA及び原子力安全条約締約国の活動の概要

事故の具体的特徴から生じた主要な所見及び教訓が、セクション 2～5 に記載されている。事務局長報告書と技術文書の内容の関係は、図 1.2 のとおり。

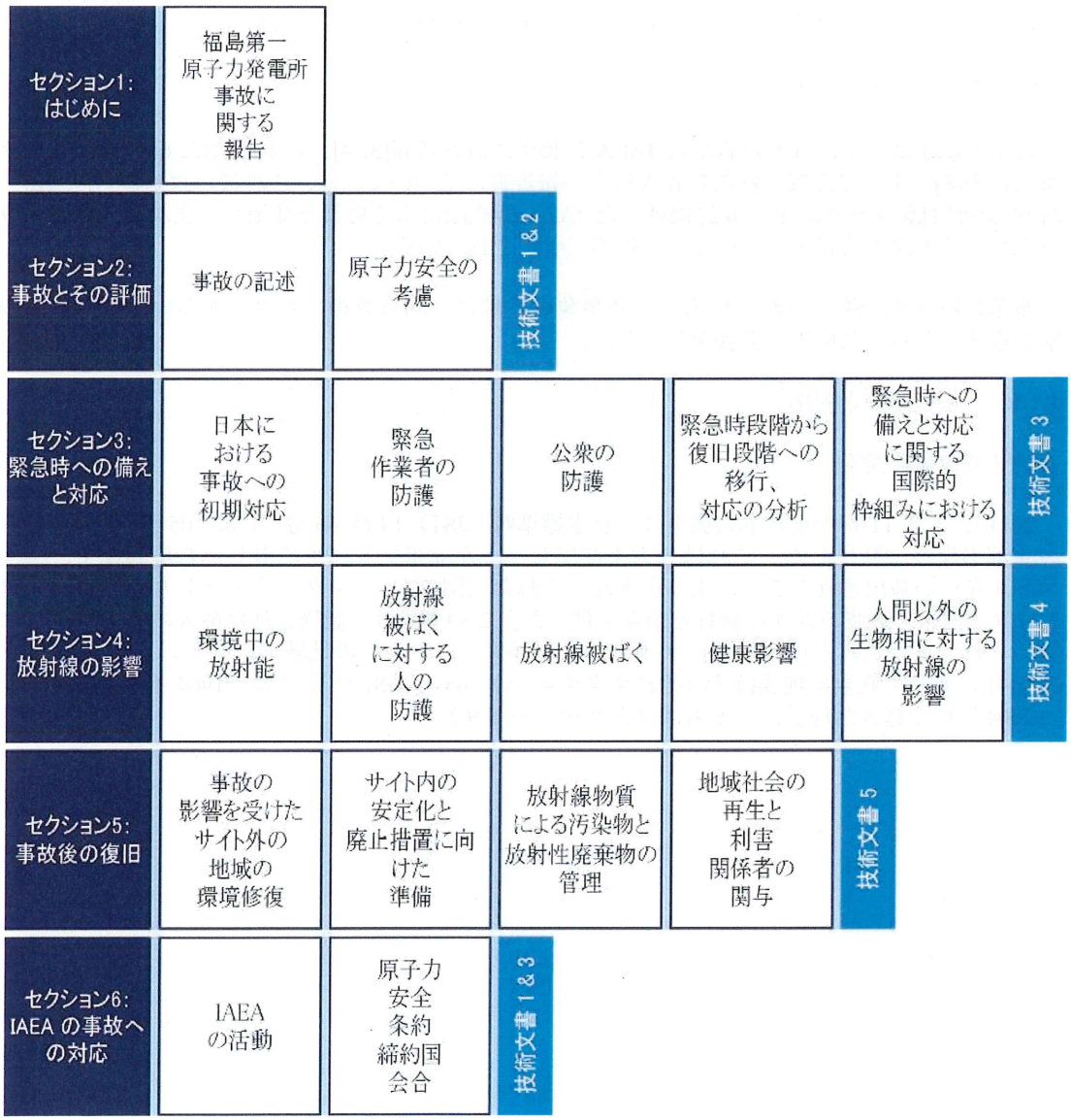


図 1.2.　概要報告書の構成及び同報告書と技術文書の内容との関係

2. 事故とその評価

このセクションでは、福島第一原子力発電所事故を簡潔に記述した後、事故の原因と結果に寄与したとみなされる要因の評価を行う。

セクション 2.1 では、地震・津波及びその後の事象の影響を含め、主要事象を時系列で記述する。

セクション 2.2 では、事故の原因を評価する。まず福島第一原子力発電所の外部ハザードに対する脆弱性の評価、次いで同発電所の設計、事故の進行、基本安全機能を維持するための運転員の努力、及び彼らが取った行動を取り扱う。このセクションではまた、日本の規制枠組みの実効性と、人的及び組織的考慮が原子力安全に与える影響についても考察する。

2.1. 事故の記述

以下の記述は、主に日本政府から IAEA に提供された情報[3, 4]、日本政府[5, 6]、国会[7]及び東京電力[8]によって設置された調査委員会の報告書に基づいており、これには東京電力[9, 10]、規制当局[11]及びセクション 6 に掲載した IAEA 調査団による更新と補足が含まれる。情報を取り入れたその他の情報源については、個別に引用されている。

事象は時系列で提示されている。主要事象の一部は、同時並行で起き、あるいはサイト内の別の場所でとられた措置に影響を及ぼした。

2.1.1. 起因事象と対応

地震と外部電源喪失

2011 年 3 月 11 日の東日本大震災は、日本標準時（JST）14 時 46 分、UTC[26]05 時 46 分、日本の東部沿岸沖で発生した。これは、太平洋プレートが北米プレートに潜り込む境界面で、突然エネルギーが放出されたことにより引き起こされた（図 2.1）。マグニチュード 9.0[12]の主震は 2 分以上続き、数波の大きな揺れと余震を伴った。この事象は、記録された最大の地震の 1 つに数えられ、またこれらの大地震の大半は、太平洋プレート沿いの地域で起きている：1960 年と 2010 年にチリで起きた地震はそれぞれマグチュード 9.5 と 8.8、アラスカ（1964 年）とスマトラ（2004 年）で起きた地震は、ともにマグニチュード 9.2。

[26] 協定世界時。JST より 9 時間遅い。特記のない限り、本報告書では全ての時刻に JST を使用する。

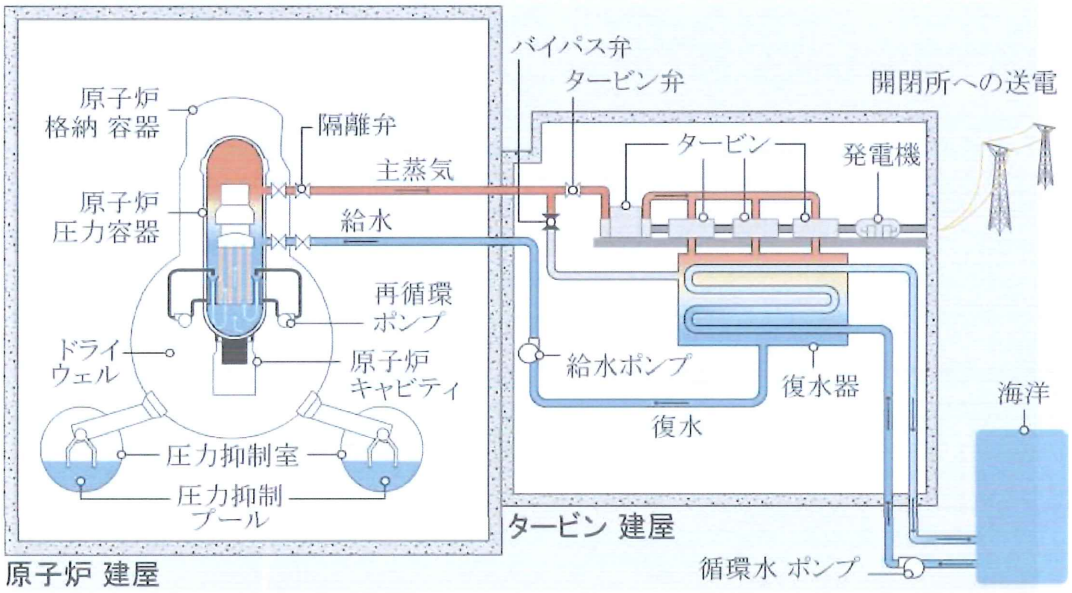
図 2.1.　東日本大震災の震央と近辺の原子力発電所

地震が起きた時、福島第一原子力発電所[13]の沸騰水型原子炉（囲み 2.1）6 基のうち、3 基は定格出力で運転しており、他の 3 基は燃料交換と保守のため停止していた。1～3 号機の運転中の原子炉は、発電所のセンサーが地震動を検知し、設計に従って原子炉保護系が作動した際、自動的に停止した。この自動的操作によって反応度の制御を達成した。

原子炉が停止した時、炉心は引き続き（崩壊熱と呼ばれる）熱を発生していた。核燃料の過熱を防止するため、主に電力により作動あるいは制御される冷却系によってこの熱が除去される必要があった。地震は、サイト内の開閉所設備、サイト外の変電所設備、及び発電所に外部交流電源を供給する送電線に損傷を引き起こし、全外部電源の喪失につながった。このような外部電源喪失状況に対処するように設計されたサイト内の代替発電施設である非常用ディーゼル発電機が、全 6 基の交流電源を回復させるために自動的に起動した。

囲み 2.1.　沸騰水型原子炉

沸騰水型原子炉は、下記の概念図に示すとおり、閉ループの直接蒸気サイクルを使用する。作動流体は水であり、水は熱除去のための冷却材として使用されるとともに、反応度制御のための減速材として使用される。冷却水は、炉心内で約 7 MPa の圧力で沸騰し、発生した蒸気がタービンを駆動させて発電するために使用される。タービンを通過した後、蒸気はヒートシンク（例えば、海洋）から取られた冷水で満たされた復水器管で冷却されることによって、凝縮され水に戻る。凝縮で生じた水は給水としてポンプで原子炉に戻される。



1～3 号機は、電源途絶により自動的にタービン系統から隔離されたため、崩壊熱により原子炉の温度及び圧力が上昇した。隔離後のこれら原子炉の冷却は、以下の設計・運転条件を用いて達成された（囲み 2.2）。

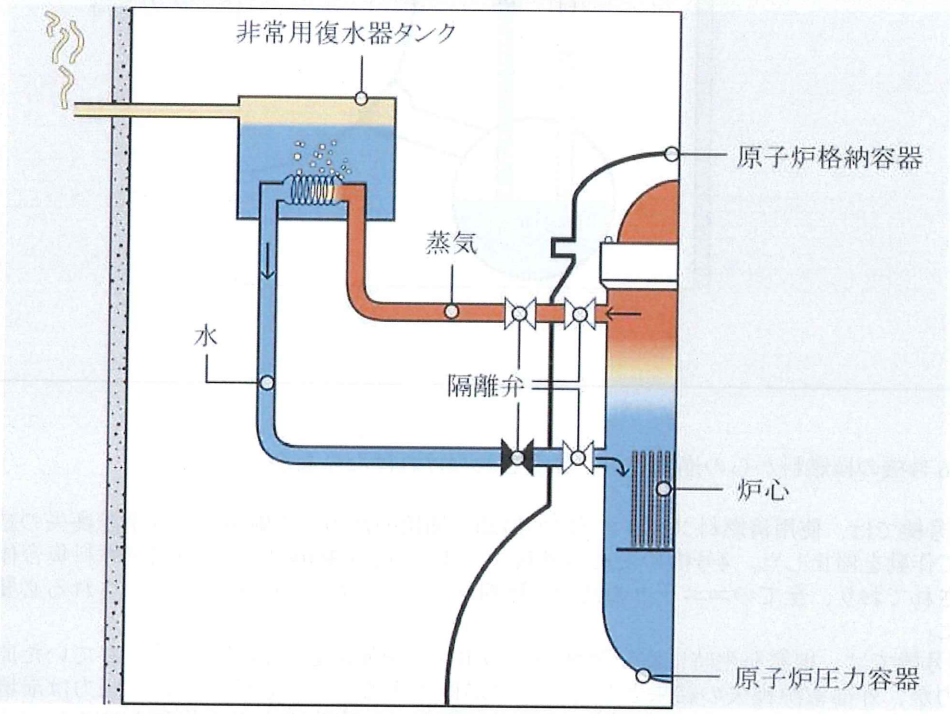
— 1号機では、原子炉圧力が高まるにつれ、非常用復水器系の両方のループが自動的に起動し、原子炉を冷却し続けた。非常用復水器の両ループの作動によって原子炉の圧力と温度が非常に急速に低下したため、運転員は、原子炉圧力容器の熱応力を防止するため、手順に従ってこれらのループを手動で停止した。その後、運転員は一方のループだけを使用して、手順に規定された範囲内で冷却速度を制御した[27]。
— 2号機と3号機では、蒸気を原子炉容器から原子炉格納容器の圧力抑制プール部分に放出することによって、原子炉を過圧から防護するように設計されている逃し安全弁が、原子炉圧力の増加により自動的に作動した。これによって原子炉の水位が低下した。運転員は、原子炉隔離時冷却系を手順に従って手動で作動させた。

[27] 沸騰水型原子炉では、冷却速度は、原子炉温度の低下に相当する原子炉圧力の低下によって監視及び制御される。

囲み 2.2.　原子炉がタービンから隔離された時に炉心を冷却するための系統

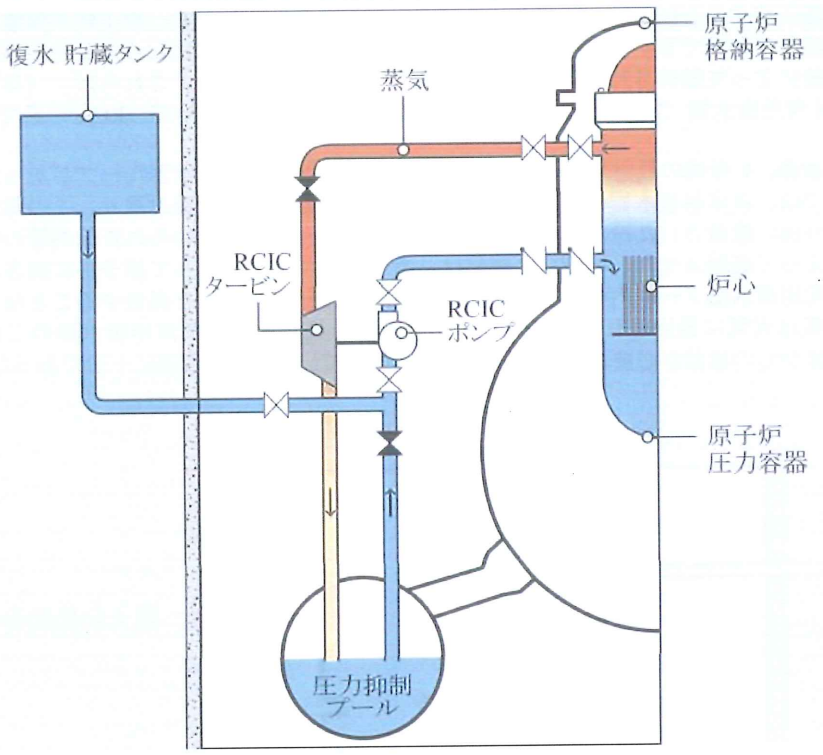
沸騰水型原子炉の高い原子炉圧力での通常の停止時冷却は、蒸気を原子炉からタービンを迂回させて主復水器に流すことによって達成される（囲み 2.1 参照）。しかし、原子炉が隔離されている時にはこの経路は利用できず、炉心冷却は、原子炉停止後の高圧状態における原子炉隔離時用に設計された系統によって提供される。福島第一原子力発電所の設計では、これらは、（早期設計の）1 号機では非常用復水器（IC）系であり、2～6 号機では原子炉隔離時冷却（RCIC）系であった。

非常用復水器。 1 号機の設計では、2 系統の独立し冗長な非常用復水器ループがあった。これらの閉ループでは、非常用復水器の一次側は、原子炉で発生した蒸気を受け取り、この蒸気を原子炉格納容器の外部に設置された冷水タンク（非常用復水器プール）に沈められた伝熱管の内部で冷却することによって凝縮させた。凝縮した蒸気は、冷水として重力によって原子炉に戻された（下図参照）。非常用復水器プール内の二次側の水は、放射性の一次側の水と混合することなく沸騰し、蒸発した蒸気は大気に放出され、ヒートシンクの役割を果たした。非常用復水器の二次側の水量は、専用水源からの補給が必要になるまで（両系列併せて）8 時間の冷却に十分であった。



原子炉隔離時冷却。 2～6 号機の設計には、原子炉系に水を追加するための水源を必要とする開放サイクルの冷却系があった。原子炉隔離時冷却系では、原子炉からの蒸気が小型タービンを駆動し、タービンはポンプを作動させて水を高圧の原子炉に注入した。タービンの動力となった蒸気は、排熱を吸収するためのヒートシンクの役割を果たす原子炉格納容器の圧力抑制プール部分に放出され、蓄積された。原子炉から失われた水は、復水貯蔵タンクから淡水を取り入れることによって補給された（下図参照）。タンクが空になるか、又は圧力抑制プールが満杯になると、圧力抑制プールに蓄積された水を使用することができるので、この系統は実質的に閉ループサイクルになる。原子炉隔離時冷却は、少なくとも 4 時間運転できるように設計されていた。

囲み 2.2.　原子炉がタービンから隔離された時に炉心を冷却するための系統



4～6 号機の核燃料からの崩壊熱も、除去されなければならなかった。

— 4号機では、使用済燃料プールの水[28]の冷却と補給のための設備が、外部電源喪失の結果として作動を停止した。4号機の使用済燃料プールには、1,300体以上の使用済燃料集合体が収容されており、全てのユニットの使用済燃料プール中で最大の崩壊熱が除去される必要があった。
— 5号機では、地震発生時に耐圧試験のためポンプを使用して高圧に維持されていた原子炉圧力が、外部電源喪失の結果としてポンプが停止すると、当初低下した。圧力は崩壊熱によって上昇し始めたが、2号機及び3号機とは異なり、逃し安全弁を作動させるレベルを相当に下回っていた。
— 6号機では、原子炉は、炉心に燃料が装荷された状態で大気圧と室温に近く、崩壊熱は低かった。

外部電源喪失によって冷却機能と補給機能を喪失した全てのユニットの使用済燃料プールと使用済燃料共用プール[29]では、プールの水の温度は崩壊熱によって上昇し始めた。

---

[28] 使用済と新規の燃料集合体を貯蔵する使用済燃料プールは、放射線遮蔽と貯蔵された核燃料からの熱の除去を行う水で満たされている。しかし、冷却されない場合、プールの水は加熱し、最終的に蒸発が始まる。補給をせずにこの状況が続く場合、水位が低下して燃料が露出すると、燃料の冷却は停止する。過熱と露出が、燃料の損傷と放射性核種の放出を引き起こす。

[29] ユニット間の共用補助施設として、4 号機近辺の独立建屋に設置された使用済燃料共用プールは、6,000 体以上の使用済燃料集合体を貯蔵し、その全てが崩壊熱を除去する必要があった。

地震と外部電源喪失に対応して、運転員は、6 基のユニットの 3 つの中央制御室[30]全てにおいて「事象ベースの」異常時操作手順を始動させた。免震重要棟[31]内に設置された所内緊急時対策室で、地震緊急時対応チームが立ち上げられた。発電所長が、東京電力の所内緊急時対策室長として、サイト対応の指示について、また、サイト内及び外部組織との調整についての責任者となった。各中央制御室の 3 名の当直長が、発電所長の指揮下でそれぞれのユニットでの活動を指示する責任を担った。

福島第一原子力発電所の各ユニットは、（余震によって制限された、若しくは遅延した一部の運転員活動を除き）設計者の意図どおり、かつ操作手順に規定されたとおり、地震及び同時に起きた外部電源喪失という起因事象に対応した（図 2.2）。

[30] それぞれ 1 対のユニット（すなわち、1 号機と 2 号機、3 号機と 4 号機、及び 5 号機と 6 号機）が共用の中央制御室を使用していた。

[31] 免震重要棟は、2007 年の新潟中越沖地震の柏崎刈羽原子力発電所における影響から得た経験の結果として建設され、2010 年 7 月に運用を開始した。同棟は地震に耐えるように設計され、予備電源を装備していた。放射能防護のため、フィルタ付き換気と遮蔽が装備されていた。

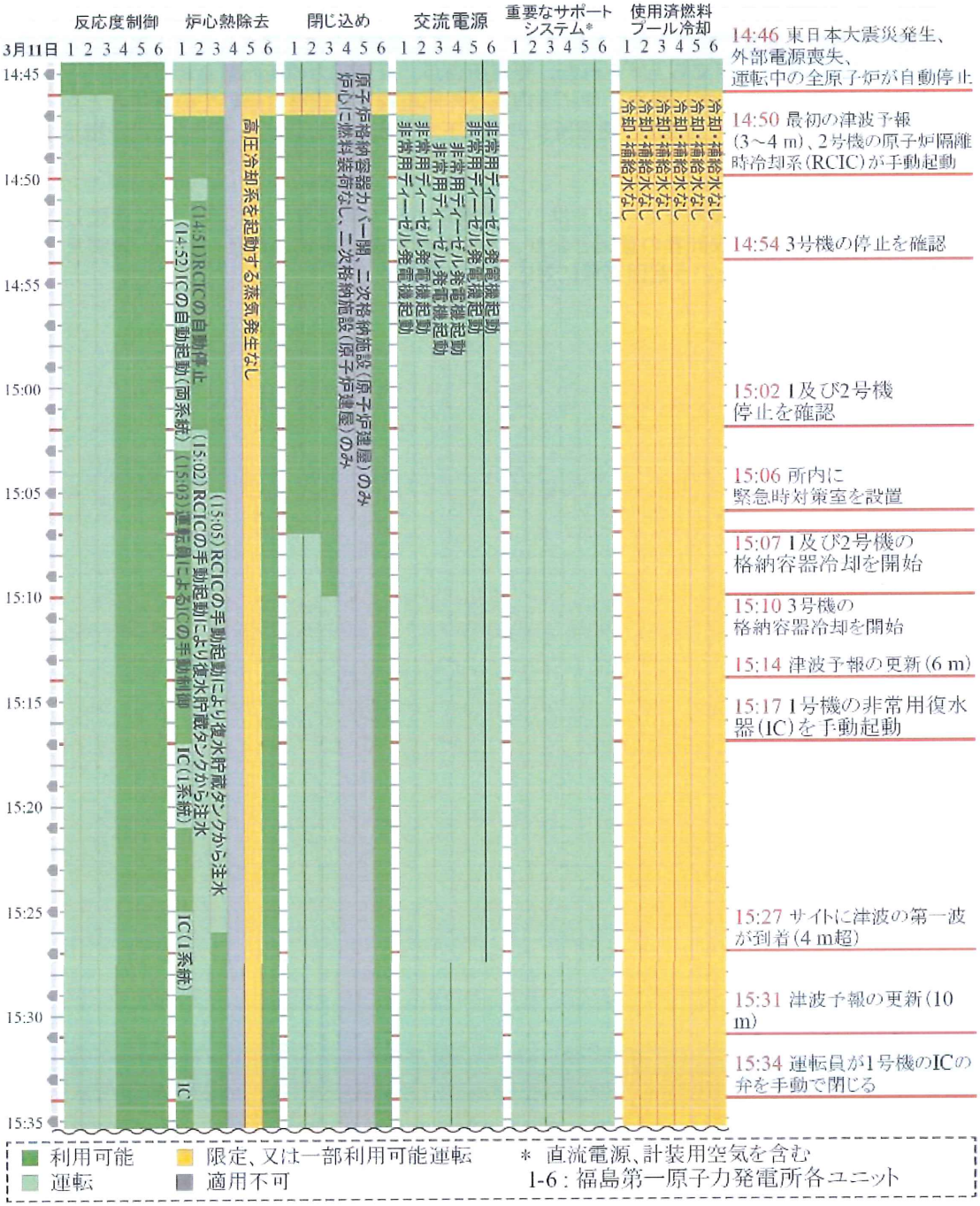


図 2.2.　地震と外部電源喪失に対する福島第一原子力発電所の対応

津波と全交流電源喪失

地震は、強い地盤の揺れを引き起こしたことに加え、大量の水を変位させ、一連の大きな津波を引き起こした[14]。これらの津波は沿岸に到達した際、広域にわたって壊滅的な影響を及ぼした（図 2.3）。

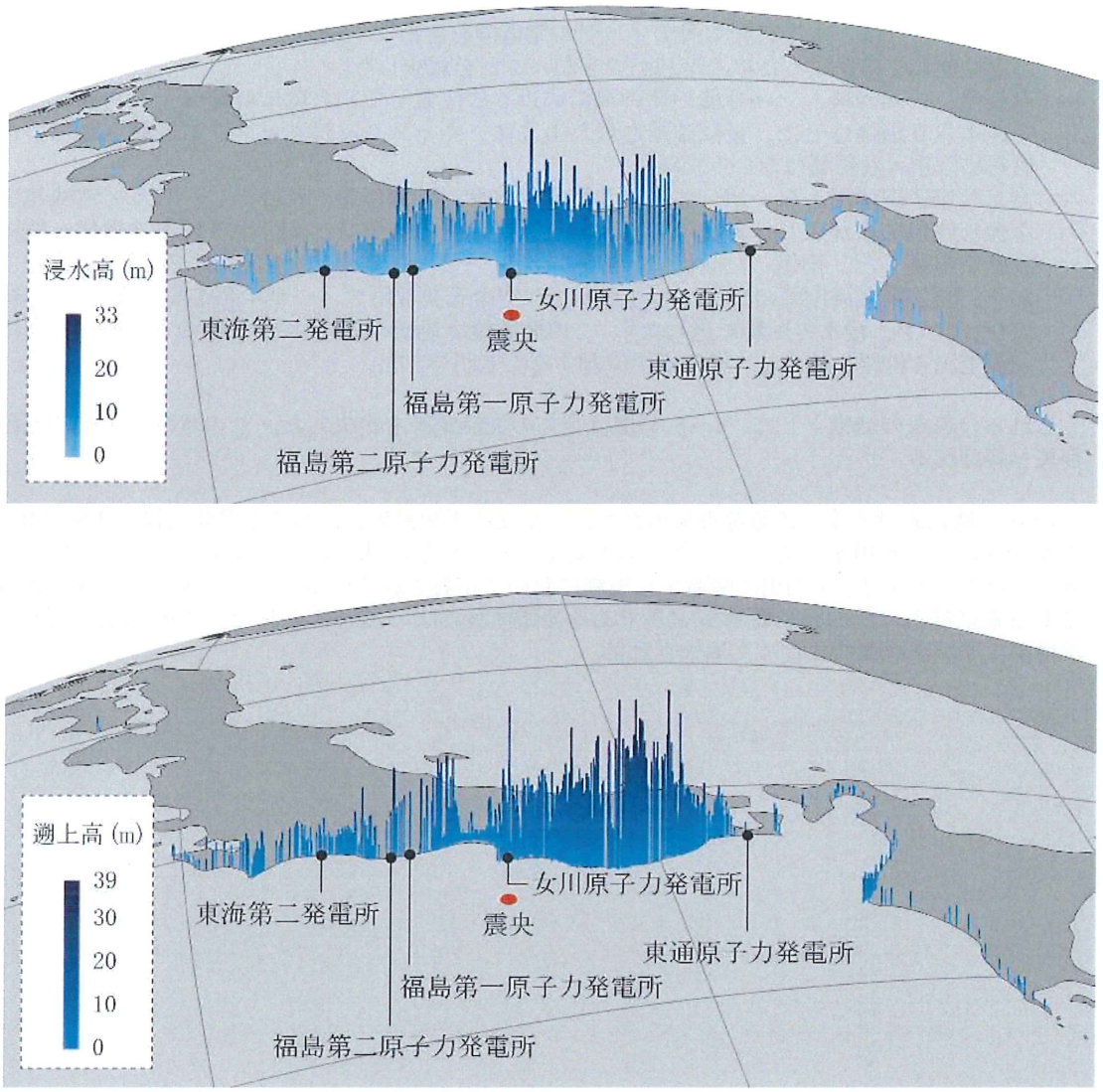


図 2.3.　沿岸の地理と地形に基づいた津波影響の変動、浸水高（上）と遡上高（下）[32][15]

津波は、地震から約 40 分後に福島第一原子力発電所に到達し始めた。サイトは、最大高さ 5.5 m の津波から防護するように設計された津波障壁堤防によって[16]、遡上高が 4～5 m の第一波からは防護された。しかし、第一波から約 10 分後、遡上高が 14～15 m の最も大きい第二波が堤防を乗り越え、サイトは浸水した。第二波は、海沿いに配置されていた全ての構造物及び設備だけでなく、より高い位置[33]にあった主要建屋（原子炉建屋、タービン建屋及びサービス建屋を含む）をのみ込み（図 2.4）、以下の一連の事象を引き起こした。

[32] 遡上（ランアップ）高は陸地の最も遠い地点での波の高さ、浸水高は海面と比較した場合の波の頂上の高さ。
[33] 事務建屋と所内緊急時対策室が設置される免震重要棟は、高さ約 35 m（建設期間中にユニットを配置するためにサイト区域が掘削される前の本来の地形上のサイトの高さ）の崖の上にあった。

— 津波は、海岸線の海水取水場所に置かれていた屋外の海水ポンプとモータを浸水させ損傷させた。これは、水冷式非常用ディーゼル発電機を含め[34]、主要なプラントの系統及び機器の継続運転を確保するための冷却ができないことを意味した。
— 津波は、1～4号機と5～6号機の間の海沿い近くに位置していた乾式貯蔵キャスク保管建屋を浸水させ損傷させた。後に確認されたように、キャスク及びキャスクに貯蔵されていた燃料には重大な影響はなかった[17]。
— 全ての原子炉建屋とタービン建屋、共用使用済燃料貯蔵建屋、及びディーゼル発電機建屋を含む建屋に水が入り込み浸水した。建屋及び屋内の地表レベルと地下にある電気・機械設備が損傷した。損傷した設備は、非常用ディーゼル発電機又は関連した配電盤を含んでおり、非常用交流電源の喪失につながった。空冷式非常用ディーゼル発電機のうち、6号機の1台だけが、浸水の影響を逃れた[35]。この発電機は運転を継続し、6号機の安全系に非常用交流電源を供給し続けて、原子炉を冷却することができた。

これらの事象の結果として、1～5 号機は全ての交流電源を喪失した。この状況は全交流電源喪失と呼ばれる。

1～5 号機における全交流電源喪失のため、「全交流電源喪失」に関する緊急時操作手順[18]が開始された。「利用不可能になった一部の安全系」の状態に基づいて、原子力災害対策特別措置法（以下「原災法」）[19]に関連する規制において定義されている「特定事象」が、運転組織である東京電力の所内緊急時対策室長である発電所長によって宣言された。この結果、関連外部機関は原災法の要件に従って通知された。

[34] 各ユニットは 1 対の非常用ディーゼル発電機を備えており、6 号機には更に 1 台の発電機があった。これらの 13 台の非常用ディーゼル発電機のうち、2 号機、4 号機、及び 6 号機はそれぞれ 1 台が空冷式であった。これらの発電機は空冷式のため、その操作性は海水ポンプの損傷によって引き起こされた冷却水喪失の影響を直接には受けなかった。

[35] 2 号機と 4 号機の空冷式非常用ディーゼル発電機（共用使用済燃料建屋の 1 階に設置されていた）及び 6 号機の空冷式非常用ディーゼル発電機（より高い標高に建てられた別棟ディーゼル発電機建屋の 1 階に設置されていた）は、浸水による影響は受けなかったようであった。しかし、2 号機と 4 号機の空冷式非常用ディーゼル発電機の機器（すなわち、開閉装置、パワーセンター、制御盤等）は、共用使用済燃料建屋の地下に設置されており、水の被害を受けた。

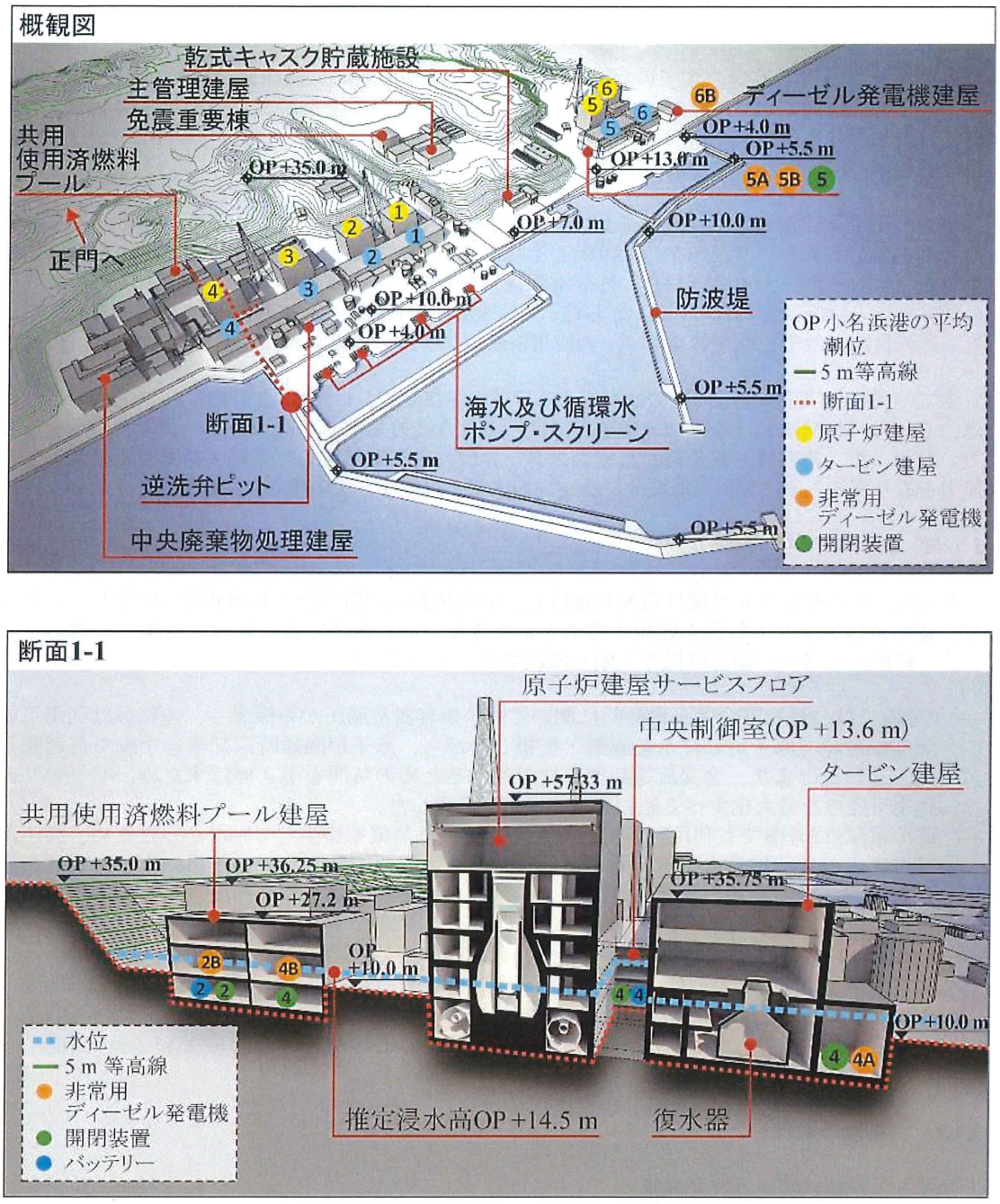


図 2.4.　福島第一原子力発電所の構造物と機器の高度と位置[20]

福島第一原子力発電所の各ユニットは、同年代の他の発電所と同様に、原子炉ユニットのバッテリ容量に基づいて、8 時間の全交流電源喪失に耐えるように設計されていた[36]。

[36] 原子力発電所は一般に、4～72 時間の限定的期間全交流電源喪失に耐えるように、所内直流電源と追加的な予備交流電源（すなわち、ガスタービン発電機又はディーゼル発電機）を装備している。対処期間の決定は、主に原子力発電所への交流電源の復旧に要する時間及び利用可能な措置の能力に基づいて下される。この期間中、バ

1 号機、2 号機及び4 号機の直流電源喪失

福島第一原子力発電所の全てのユニットは、非常用電源として所内直流電源を装備していたが、1 号機、2 号機及び 4 号機では、バッテリ、電源盤又は電源接続部が浸水し、洪水がこの機器にも影響を与えた。その結果、1 号機、2 号機及び 4 号機では、洪水の最初の 10～15 分間に直流電源が徐々に失われ、全交流電源喪失に対処することが難しくなった。

全ての交流及び直流電源の喪失により、1 号機と 2 号機の運転員は、原子炉圧力や原子炉水位などの主要プラントパラメータ、又は炉心冷却に使用する重要な系統及び機器の状態をもはや監視できなくなった。上述のとおり、外部電源喪失を受けて、全てのユニットの使用済燃料プールの熱除去能力は既に失われていた。1 号機、2 号機及び 4 号機においては、更に直流電源喪失により、運転員はもはやこれらのユニットの使用済燃料プールの水温と水位を監視できなくなった。

全ての交流及び直流電源の喪失に対処する手順は存在せず、1 号機、2 号機及び 4 号機の運転員は、これらの状況における全交流電源喪失にどのように対処するかについての具体的指示を有していなかった。運転員と緊急時対策室のスタッフは、電源を回復して発電所を監視及び制御する能力を取り戻すために利用可能なオプションの検討と可能な方法の確立を開始した。

3 号機、5 号機及び6 号機の対応

3 号機、5 号機及び 6 号機は電源を維持し、中央制御室の指示計と制御装置が機能していたので、運転員はプラント状況を監視することができた。このため、運転員は、事象への対応として、「徴候ベースの」緊急時操作手順を継続することができた。

— 3号機では、逃し安全弁が自動的に開いて原子炉容器を過圧から保護し、運転員は利用可能な直流電源で原子炉の注水を制御・監視しながら、原子炉隔離時冷却系を手動で再起動した。運転員はまた、全交流電源喪失に対処するための時間を引き伸ばすため、バッテリの利用可能性を最大化すべく他の非重要機器を停止した。
— 直流電源は5号機でも利用可能であった。原子炉は蒸気を発生していなかったため、高圧冷却系による残留熱除去は不可能であった。原子炉容器を減圧して低圧系による冷却材の注入を可能にするための代替オプションが試みられたが成功せず、加圧された満水状態の原子炉容器は、昇温・昇圧し続けた。
— 6号機は、1台の稼働中の非常用ディーゼル発電機から交流電源が利用可能であったため、全交流電源喪失にならなかった。ここでは、外部電源喪失への対応として基本安全機能を維持することに努力が集中された。原子炉は大気圧にあったため、低圧系を利用して冷却水を注入することが可能であった。しかし、これらの低圧系の必要機器の一部が洪水によって損傷し、修復が必要であった。

2.1.2. 事故の進行

1 号機と 2 号機の原子力緊急事態

1 号機と 2 号機では、全ての電源が失われたため、基本安全機能を維持するために、安全系が正しく動作しているか、又は一体動作しているかどうかを運転員が判断するために利用可能な指示計がなくなった[37]。原子炉の水位と冷却系の動作状況を判断できなくなったため、プラント運転員は、炉心冷却の基本安全機能が失われたと宣言した。その結果、所内緊急時対策室は、

ッテリ、インバータ、及びその他の二次的予備交流電源（例えば、ガスタービン発電機又はディーゼル発電機）が使用される。

[37] 反応度制御の基本安全機能は、全交流電源喪失の前に、制御棒が挿入され核分裂反応が停止したことを示す指示によって確認されていた。

規制に定められたとおり[21]、「非常用炉心冷却装置注水不能」に基づき、1 号機と 2 号機が原子力緊急事態にあることを、サイト外組織、東京電力本店及び関連政府当局に報告した。

シビアアクシデントマネジメント戦略の策定

所内緊急時対策室のスタッフは、既定のシビアアクシデントマネジメント指針に従い始め、1、2 号機の中央制御室の運転員は、シビアアクシデント運転操作手順を開始した。炉心冷却が損なわれたと見られたことから、アクシデントマネジメント戦略は、核燃料の潜在的損傷を防止若しくは緩和するため原子炉に注水することに集中した。原子炉に注水するための 2 つのオプションが特定された。

— 高圧でも原子炉に直接水を注入できる系統の使用。これは交流電源の回復を必要とした。
— 低圧で注水が可能な移動式消防車及び固定式ディーゼル駆動消火ポンプなど、代替機器の使用。これは、原子炉の減圧と炉心に注水するための消火ラインの配備が必要であった[38]。

所内緊急時対策室は、臨時電源に接続することに加えて、固定式のディーゼル駆動消火ポンプと消防車を使用して消火系を介して原子炉に注水する炉心冷却戦略を採択した。

この事故戦略は、1 号機と 2 号機に関しては最上位の優先順位を与えられ、一部を変更して他の全てのユニットにも適用可能であった。例えば、5 号機では、アクシデントマネジメントは、6 号機の稼働中の非常用ディーゼル発電機への利用可能な相互接続ライン[39]を使用して、交流電源を復旧させることであった。

1 号機と 2 号機の炉心冷却の状況

津波が来襲する直前、1 号機の非常用復水器は、原子炉冷却速度を制御するための既定の運転操作手順に従って運転員によって停止された。この停止は、（囲み 2.2 に示すとおり、原子炉格納容器の外部に設置され、直流電源で作動する）弁を閉じることによって達成された。指示計の喪失から約 2.5 時間後の 3 月 11 日 18 時 18 分、これらの弁の状態ランプの一部が機能していることがわかり、制御弁は閉じていることが確認された。運転員は、これらの弁を開くことによって非常用復水器を起動させようと試みた。しかし、非常用復水器は機能せず、これは原子炉格納容器内部の交流電源で作動する隔離弁が閉じていたことを示している[40]。こうして、1 号機の炉心冷却の基本安全機能は、津波の直前に非常用復水器が運転員により停止された時に失われ、その時点から 1 号機の炉心は加熱していった。

さらに、20 時 07 分の（原子炉建屋内での）現場測定から、原子炉はいまだ運転圧力 70 bar（7 MPa）に近いことが示され、これは 8 bar（0.8 MPa）未満でのみ可能な代替方法による注水を妨げた。

所内緊急時対策室から 1 号機及びその他のユニットの状況に関する幾つかの報告を受け取った後、総理大臣の承認を経て、3 月 11 日 19 時 03 分に日本政府は原子力緊急事態を宣言した[41]。

---

[38] 消火系は、原子炉への注水ではなく、主に火災抑制と格納容器の冠水のために設計された。
[39] アクシデントマネジメントのための設計強化として、福島第一原子力発電所では 10 年近く前に相互接続ラインが設置された。これらの相互接続は、一対のユニット間、すなわち、1 号機と 2 号機、3 号機と 4 号機、及び 5 号機と 6 号機の間でのみ設置されていたため、6 号機で機能していた非常用電源の共有は 5 号機でのみ可能であった。
[40] 隔離弁の状態を決定する各タイプの電源喪失のタイミングと時系列がはっきりしないため、弁の位置は運転員には明確でなかった。交流電源が失われた時には非常用復水器の全ての弁はそれぞれの位置を維持するが、交流電源を動力とする隔離弁は、制御電源（すなわち、直流電源）が失われた場合、設計上閉じることになっている。
[41] 同時に、原子力災害対策本部が総理官邸に設置され、総理大臣は本部長に就き、政府の原子力緊急時対応を指示した。

2 号機も、炉心冷却系の動作と炉心の圧力・温度に関する指示計を喪失し、運転員は、原子炉隔離時冷却系が作動しておらず 2 号機の炉心が加熱しているという最悪ケースのシナリオを想定した。21 時 01 分、所内緊急時対策室は政府当局に、2 号機の炉心は冷却なしでは 21 時 40 分頃に露出状態になると予想されることを通知した。この予想を受けて、総理大臣は、原子力災害対策本部の本部長として、3 月 11 日 21 時 23 分に、サイトから 3 km 以内の公衆の避難と 3～10 km 以内の屋内退避に関する命令を出した[42]。

非常用復水器の作動状態を確認するために 21 時 51 分に派遣されたチームが、1 号機の原子炉建屋内で高い放射線レベルを経験し、1 号機の炉心が露出していることが示唆された[43]。これは 1 号機の原子炉の状態の重大さと炉心損傷の可能性を示すものであった。

1 号機の閉じ込め機能の劣化

1 号機の炉心冷却喪失が確認された後、3 月 11 日 23 時 50 分に格納容器圧力の最初の読み取りが可能になり、別の基本安全機能である閉じ込め機能に対する更なる脅威が明らかになった。格納容器圧力は設計で考慮された最大圧力を超過し、この情報をきっかけに、発電所長は 1 号機格納容器のベントの準備を命じた。この状況はまた、原災法[19]に関連する規制の中で定義される「原子炉格納容器圧力異常上昇」に基づく緊急時通報を必要とするものであった。

1 号機の格納容器圧力の測定では、3 月 12 日の 02 時 30 分と 02 時 45 分に最大値を記録した。

2 号機の状況確認と 1 号機の安全機能回復への集中

3 月 12 日 02 時 10 分、1 チームが、2 号機の原子炉隔離時冷却系の機器が置かれている部屋に入ることができ、系統の状況を判断するためのパラメータを読み取ることができた。3 月 12 日 02 時 55 分に、運転状況が所内緊急時対策室に伝達され、中央制御室での監視喪失から約 11 時間後、それまで未知であった 2 号機の炉心冷却の状態を明確にする上で役立った。2 号機の炉心冷却の確認、及び 1 号機の閉じ込め機能の深刻な問題に伴い、発電所長は、1 号機のベント作業にアクシデントマネジメントを集中することを決定した。

ベント計画の策定が進められる一方、注水に消火ポンプを使用して 1 号機の炉心冷却を回復するアクシデントマネジメント戦略は、3 月 12 日 01 時 48 分にポンプが動作不能であることが判明したため、実行不可能であることがわかった。そこで、新潟中越沖地震の経験に基づいた火災防護措置として前年に設置されていたタービン建屋の注入口に消防車を接続して使用する代替策が実行に移された。

5 号機の加熱と交流電源の回復

ほぼ同じ頃、5 号機の原子炉圧力が開放設定値に達したため、同機の逃し安全弁は 3 月 12 日 01 時 40 分、全交流電源喪失から約 10 時間後に初めて自動的に開いた。5 号機の原子炉は熱除去手段がなく加熱し続けていたため、設計が定めた範囲内に圧力を維持するよう、弁は数回ほど自動的に開閉した。

逃し安全弁は、圧力を制限するために自動的に作動したが、弁の大半は事故以前に実施された試験のために減圧機能が使用できなくなっていたため、圧力の低減には使用できなかった。原子炉圧力容器の小型弁（原子炉圧力容器頂部のベント弁）を開いて圧力を低減することが、この目的で直流電源が利用可能であったため、代替策として検討された。その後、3 月 12 日 06 時 06 分、全交流電源喪失から約 14.5 時間後に、原子炉圧力容器頂部のベント弁が遠隔操作で開

[42] これより早い 20 時 50 分に、福島県は、政府の原子力緊急事態宣言を考慮し、原子力発電所の状況に関する不確実性を東京電力社員と話し合った後、発電所から 2 km 以内の住民に対して避難命令を出していた。
[43] チームの個人線量計は、約 10 秒の建屋内の滞在で 0.8 mSv もの高いレベルを記録した。

かれ、水で満たされた原子炉容器を減圧するため開いたままで維持された。さらに、5 号機と、6 号機で稼働中の非常用ディーゼル発電機との電源接続が、全交流電源喪失から約 16.5 時間後に完了し、一部の交流電源を 5 号機の原子炉熱除去に必要なポンプ及び弁などの設備に接続することができた。

1 号機炉心の代替冷却

この間、1 号機の原子炉圧力は代替注水が可能になるのに十分な程低くなった[44]。代替冷却方法、すなわち炉心冷却を回復するための消防車から 1 号機の原子炉への淡水注入が、3 月 12 日 04 時 00 分、全交流電源喪失から約 12.5 時間後に開始された。トラックを定期的に防火水槽に戻して淡水を補給しなければならなかったため、1 台の 1 トントラックからの注水が約 5.5 時間にわたって間欠的に継続した。同時に、タンクからの直接ラインを確立する作業も継続した。後に、全交流電源喪失から 17.5 時間を少し過ぎた時、1 号機への継続的な淡水注入が水槽から直接開始された。

1 号機格納容器のベント

3 月 12 日 04 時 19 分の 1 号機の格納容器圧力の測定は、格納容器の圧力が、運転員の操作及び確立されたベント経路なしに、（02 時 45 分の）最後の測定以降に減少したことを示した。これは未知の経路を通じて、何らかの意図せぬ格納容器圧力開放が起きたことを示唆している。さらに、その後まもなく正門で測定された放射線レベルは増加を示した[45]。これも、原子炉格納容器からの何らかの制御されない放射性物質の放出、すなわち閉じ込め機能の劣化を示唆するものであった。サイトの放射線状況の悪化に、1 号機の格納容器圧力の増加が重なったため、政府は 3 月 12 日 05 時 44 分に避難区域を 10 km に拡大した。

1 号機の格納容器のベントを構成する活動は、3 月 12 日 09 時 00 分に開始することとされた。09 時 02 分に福島県当局から大熊町の避難完了の確認を受け取るとすぐに[46]、1 号機格納容器のベント経路を設定するため弁の操作を開始すべく、複数のチームが立ち上げられた。5.5 時間の努力の後、3 月 12 日 14 時 00 分頃に経路の最後の弁が開かれ、ベント経路（囲み 2.3）が確立された。ベント操作の成功は、14 時 30 分に測定された格納容器圧力の減少によって確認され[47]、関連政府当局に報告された。サイト境界内の放射線測定に直ちに重大な変化は見られなかったが、約 1 時間後、1 号機北西のサイト境界付近に設置されたサイトモニターの 1 つで 15 時 29 分に約 1 mSv/h の線量率の読み取り値が記録された[48]。

3 号機の通常炉心冷却の喪失と非常用炉心冷却の開始

1 号機の格納容器ベントが確立されつつあった中、3 号機の全交流電源喪失に対する対応は、3 月 12 日 11 時 36 分に原子炉隔離時冷却系が約 20.5 時間の連続運転の後に作動を停止したため、修正する必要が生じた。運転員はこの系統を数回再起動しようとしたが成功せず、したがって原子炉の水は沸騰蒸発し続け、原子炉の水位は低下し続けた。

---

[44] 原子炉の減圧は、運転員の操作又はプラント系統の動作なしで起きたが、これは未知の経路が減圧を引き起こしたことを示している。

[45] 約 10 倍の増加（04 時 00 分の測定値 0.000 069 mSv/h に対して、04 時 23 分は 0.000 59 mSv/h）。

[46] 避難完了後にベントを開始することは、福島県当局と合意されていた。

[47] 全体で、発電所長の命令（午前零時頃）からベント開始まで 14.5 時間を要した。これは、弁を手動で操作しなければならない圧力抑制室付近の高い放射線レベルと、弁操作のための圧縮空気供給が不足していた結果であった。

[48] 16 時 17 分、緊急時対策室は、15 時 31 分に正門付近で測定された放射線が 0.569 mSv/h であったことに気付いた。この値は 0.5 mSv/h の法定報告基準を超えていたため、16 時 27 分に当局に通知された。この通知は、15 時 29 分、すなわち 1 号機のベント開始後（しかし 1 号機の爆発の前）に測定された放射線レベルが 1.015 mSv/h であったことが判明した 16 時 53 分に修正された。

12 時 35 分に高圧注水系（非常用炉心冷却系の一系統）が自動的に作動するレベルに水位が達すると、この冷却系は自動的に原子炉水位を事前に定められた範囲に維持した。しかし、運転員は全交流電源喪失対応手順に従って、直流電源をより長時間維持するため、自動的な起動停止の反復を回避すべく手動で制御を行った。

1 号機の海水注入と電源ラインアップ

1 号機の炉心への約 11 時間の注水後、防火水槽の淡水がほぼ完全に枯渇した。その結果、3 月 12 日 14 時 53 分に 1 号機への淡水注入は停止された。そこで発電所長は、この時点で唯一の利用可能な水源であったため、津波の後に海水が残っていた 3 号機の逆洗弁ピットから、1 号機の原子炉に海水を注水することを決定した。海水注水の準備は、わずか 30 分余りで完了した。

同じ頃、2 号機の損傷していない変圧器を使用して移動型電圧電源[49]を 1 号機と 2 号機に接続する作業が完了し、3 月 12 日 15 時 30 分に 1 号機への交流電源供給のための低圧グリッドが通電された。

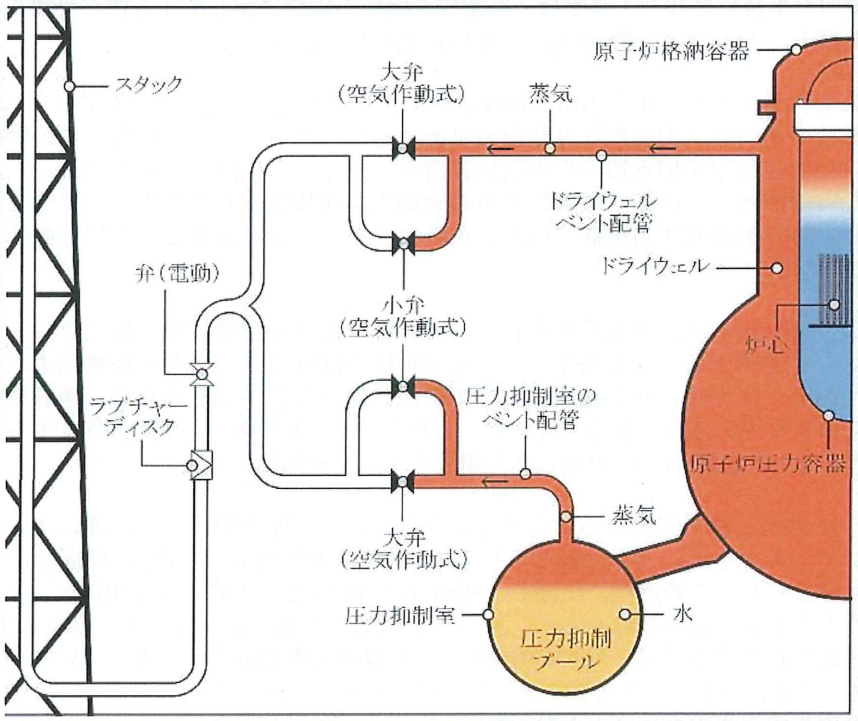
全交流電源喪失から約 24 時間後、海水注水と交流電源が 1 号機に接続された。しかし、接続から数分以内に、1 号機の原子炉建屋での爆発がこれらの構成を使用できる前に損傷した。

[49] 3 月 11 日の全交流電源喪失から約 1 時間後、福島第一原子力発電所と福島第二原子力発電所に移動型電源装置（低圧及び高圧電源車両）が派遣された。最初の車両は、東北電力からで、3 月 11 日 22 時 00 分頃、すなわち全交流電源喪失から約 6 時間後に到着した。他の東京電力と東北電力の施設、及び自衛隊から、更に多くの車両が夜間を通じてサイトに到着した。3 月 12 日 10 時 15 分までに、全部で 23 台の車両がサイトにあった。

囲み 2.3.　格納容器ベント

福島第一原子力発電所の各ユニットでは、1990 年代に規制の決定を受けて[22, 23]、シビアアクシデントに対処する能力を改善するための措置として、「耐圧強化ベント(hardened vents)」（すなわち、比較的肉厚の放出配管を取り付けた圧力開放装置）が設置された。その目的は、ベントを可能にすることによって、原子炉格納容器の過圧を防止することであった（下図参照）。ベントの優先的経路は、プールの水による放射性同位体の除去を利用するため圧力抑制室からのものであったが、ベント経路にはドライウェルからの別のルートも含まれた。どちらの経路も、中央制御室から弁を操作することによって調整することができ、一対のユニットで共有するスタックを通じて放出の量と持続時間を制御することができた。

福島第一原子力発電所では、ベントラインには格納容器圧力が設定圧力を越えると破裂するように設定されたラプチャーディスクも組み込まれており、これにより過早なベントは防止された。日本の基本的思想は、環境への放射性物質の直接的放出を遅延若しくは防止するため、原子炉格納容器の健全性を維持するための最後の手段として、不可避の状況になるまでベントしないというものであった。



1 号機の原子炉建屋の爆発

3 月 12 日 15 時 36 分、1 号機原子炉建屋のサービスフロアで爆発が起き、上部建屋構造が損傷し、作業者が負傷した。爆発は、原子炉格納容器を損傷したとは見られなかったが、二次格納容器（原子炉建屋）に広範な損害が生じた。爆発の原因は、発電所スタッフには分からなかったが、水素が炉心から放出され、未知の経路を介して原子炉格納容器から漏出したことが疑われた。したがって、所内緊急時対策室は、最上位 3 レベルのスタッフを除き、2 つの中央制御室を含めて、1～4 号機の内部と周辺の区域からのスタッフ避難を要請した。

1 号機の爆発から約 3 時間後（1 号機格納容器のベントから 4 時間後）の 3 月 12 日 18 時 25 分、政府は避難区域を 20 km に拡大した。

1 号機への海水の注入

1 号機の爆発は、海水注入ラインと臨時電源ラインの構成に深刻な損傷を引き起こしただけでなく、サイトのあちこちへの瓦礫（がれき）の散乱及び汚染した瓦礫からの局地的な高線量率のために、これらのラインの補修を妨げた。約 2 時間続いた避難の後、各チームは損傷した機器の補修又は交換のため現場に戻った。

損傷した機器の補修と交換の後、消防車と 3 号機の逆洗弁ピットからの海水を使用して、1 号機原子炉への注水が 3 月 12 日 19 時 04 分に開始し、その後継続した[50]。後に、反応度制御の基本安全機能を確保するため、再臨界の懸念に対処すべくホウ酸が添加された。全体で、淡水注入終了から海水注入開始までの間、1 号機の炉心は 4 時間近く冷却されなかった。

3 号機の炉心冷却喪失

地震・津波発生後の最初の 1 日半は、基本安全機能の維持に関して 1 号機が最優先とされたが、3 月 13 日日曜日の朝には 3 号機の炉心冷却状況が懸念の元となった。

14 時間にわたる非常用高圧注水系の継続運転後、3 号機の運転員は、注入ポンプに動力を供給している系統のタービンの信頼性と故障の可能性を懸念するようになった。この懸念は、タービン損傷の可能性と原子炉容器からの放出経路ができることに関するものであった。これは、原子炉格納容器の外部に直接、放射性蒸気の制御不能な放出をもたらすことになる。原子炉圧力がタービンの自動遮断圧力未満に低下した時に、タービンが設計どおりに自動停止しなかったため、この懸念は高まった。

その結果、運転員は高圧注水系を停止し、代わりに低圧の代替注水手段（ディーゼル駆動の消火ポンプ）を使用することを決定した。原子炉圧力は既にディーゼル駆動消火ポンプの圧力を下回っており、圧力逃し弁の使用によって低圧に保つことができるため、運転員は、これが炉心冷却を中断せずに達成できると考えた。したがって、3 号機の非常用高圧炉心注水系は運転員により停止され、運転員は圧力逃し弁を開放する試みを開始した。

しかし、圧力逃し弁を開放するあらゆる試みは失敗し、原子炉圧力は急速にディーゼル駆動消火ポンプで注入できるレベルを超えて上昇し、全交流電源喪失から約 35 時間後に 3 号機の炉心の冷却は停止した。この逆境に直面し、運転員は 45 分近くの間、非常用高圧注水系による注水に戻ろうとしたが、成功しなかった。原子炉を冷却する能力がなくなり、原災法[19]に関連する規制で定義されている「原子炉冷却機能喪失」に関する緊急報告が、3 月 13 日 05 時 10 分に 3 号機に関して発出された。3 号機の炉心は、その後何時間も冷却なしの状態が続き、3 号機は炉心冷却を喪失する次のユニットとなった。

冷却を喪失した後、05 時 15 分に発電所長から消防車を利用して 3 号機の炉心を冷却する代替注水方法が命じられた。悪化する状況に鑑み、発電所長は 3 号機の格納容器ベント経路を準備することも命じた。

3 号機の代替炉心冷却と格納容器のベント

消防車が 5～6 号機から 3 号機に派遣され、3 号機逆洗弁ピットから消火ラインを通じて、3 号機炉心に海水を注入するためのラインを確立する作業が 3 月 13 日 05 時 21 分に開始された。06

[50] 調査によると[7]、ある時、総理大臣官邸で東京電力を代表していた同社幹部が、電話で発電所長に 1 号機の海水注入を停止するよう求めた。この指令は従われることはなく、海水注入は中断されなかった。

時 30 分に柏崎刈羽原子力発電所から追加の消防車が到着した。海水注入ラインは 1 時間以内に完成した。しかし、東京電力本店から連絡を受けて、海水注入ラインの使用は発電所長により延期された[51]。その結果、注入ラインは、消防車を使用する消火ラインを通じたホウ酸淡水源に再び変更された。

注水を維持するために、原子炉圧力を消火ポンプの圧力未満に低減する作業は、圧力逃し弁の作動を必要とした。これは、3 号機と 4 号機の中央制御室に集められた自動車のバッテリの使用によって達成された。

一方、3 号機のベントラインの構成も、3 月 13 日 08 時 41 分に 3 時間余りで完成したが、格納容器圧力は依然として格納容器設計圧力を下回っており、ラプチャーディスクの破裂を設計どおりに引き起こすのに十分な高さでなかった。逃し安全弁を開くことによって原子炉圧力を低下させる作業が続く中、制御室の運転員は、09 時 08 分に 3 号機の原子炉圧力の低下を観察したが、弁の状態表示は、弁が開位置にあるのかどうかをはっきりと示さなかった。この原子炉容器の減圧とともに、原子炉格納容器の圧力の急激な上昇が見られ、原子炉容器から格納容器への放出が示された。結局、3 月 13 日 09 時 20 分に格納容器圧力は格納容器の最大設計圧力を超過し、その後に格納容器圧力は急速に低下した。これはラプチャーディスクの破裂の結果として 3 号機格納容器のベントが起きたことを示している。

追加の逃し安全弁を開くことによって原子炉減圧が達成された後、原子炉圧力は消火ポンプの圧力未満に低下し、冷却なしで 4 時間以上を経た後に、3 号機原子炉へのホウ酸淡水注入が 09 時 25 分に開始された。

3 号機の格納容器ベントは、空気供給が不足して弁を開状態に維持できなかったため、ベントラインの弁が閉じて、短い時間で終わった[52]。6.5 時間の取組の後、移動式圧縮機を使用して弁は再度開いた。

2 号機の基本安全機能のための予防措置

3 月 13 日 10 時 15 分頃、1 号機と 3 号機の関連基本安全機能を維持するための条件がより困難になったため、発電所長は、2 号機の格納容器ベント経路を予防的に確立するよう命じた。これは、他のユニット及びサイト全体の傾向[53]に比べて依然有利な放射線状況を利用して、弁が操作される 2 号機の原子炉建屋で作業を実施することを目的としていた。作業は 45 分で完了したが、2 号機格納容器の内部の圧力がラプチャーディスクを破裂させるに十分な高さでなかったため、ベントは起こらなかった。

12 時 05 分頃、発電所長はまた、2 号機で稼働中の冷却系が故障した場合のために、同号機への海水注入に関する予防的準備を命じた。この目的のため、必要であれば 3 号機の逆洗弁ピットから注水できるよう、消防車を 2 号機の消火ラインに接続することとなった。

3 号機への海水注入と放射線レベルの上昇

防火水槽の淡水が 3 月 13 日 12 時 20 分に枯渇したため、発電所長は、3 号機原子炉に海水を注入することを決定した。消防車が再配置され、3 号機の逆洗弁ピットからの海水注入が約 1 時間後の 13 時 12 分に開始された。

---

[51] これ以前に総理大臣官邸での会合に出席した東京電力本店の緊急時対策室の部長が、電話で発電所長に淡水が利用可能かどうかを尋ねた。部長は発電所長に、可能な限り淡水注入を継続したいと考えているとの会合参加者の見解を知らせた。発電所長はこの連絡を、淡水が利用可能な限り海水を注入しないようにとの指令と解釈した。

[52] 2 時間後に発見されたとおり。

[53] 3 月 13 日 05 時 30 分から 10 時 50 分の間に、正門近辺の 1～4 号機の原子炉建屋から約 1 km 離れた地点で中性子が検出された。これは格納容器が破損した可能性を示すが、中性子の線源は未知であった。

3 月 13 日 14 時 15 分、サイト境界付近で高放射線量率（1mSv/h 近く）が測定され、関連政府機関は 14 時 23 分に、原災法[19]に関連する規制の中で定義された「敷地境界放射線量異常上昇」の通知を受けた。15 分後、放射線量率は、3 号機の原子炉建屋の入口扉で 100～300 mSv/h を超えた。3 号機と 4 号機の中央制御室の 3 号機側で測定された線量率が 12 mSv/h を超えたため、当直は 4 号機側に移動した。

所内緊急時対策室は、これらの線量レベルから、放射性ガスが 3 号機原子炉から漏出したと推測し、それは水素も漏出したことを意味した。1 号機と同様の水素爆発の可能性を考慮して、発電所長は 14 時 45 分、3、4 号機の中央制御室及び 3 号機の近隣区域から作業者を一時的に避難させることを決定した。

避難区域には 3 号機の逆洗弁ピット区域も含まれていたため、注水のための活動は中止された。避難命令は 17 時 00 分に解除され、作業者は注水及びベントのための活動を続行するため、3 号機の逆洗弁ピット区域に戻った。

5 号機の炉心冷却の確立

一方、3 月 13 日 20 時 48 分に、6 号機の非常用ディーゼル発電機からの電力が 5 号機の通常の低圧熱除去系のポンプに接続され、20 時 54 分に作動された。2 つの残留熱除去系の 1 つを通じて 5 号機の原子炉への原子炉注水ラインが整備され、全交流電源喪失から 53 時間後に復水補給水系への相互接続配管の弁が開いた。しかし、原子炉圧力が徐々に上昇し、注水圧力を超えていたため、注水は起こらなかった。これに応じて、利用可能な直流電源と窒素供給を活用して逃し安全弁が開けられた。これによって原子炉圧力容器の圧力を低下させることに成功し、3 月 14 日 05 時 30 分に 5 号機原子炉への注水が可能になり、その後継続した[54]。

1 号機と 3 号機の海水冷却の喪失

3 号機の逆洗弁ピットから 1 号機と 3 号機への海水の注入が、3 月 14 日月曜日まで続く中、ピットの水が非常に低位まで低下し、注入を 01 時 10 分に中止しなければならなかった。取水ホースをピット内のより深くに下げた後、残りのピット水は 3 号機への注入に使うこととされ、2 時間後に注水を再開した。1 号機の炉心冷却はピットの水を補給できるまで延期された。

その後数時間の間に、3 号機の格納容器圧力が増加していることが判明し、原子炉の水位指示計は低下し続けた。3 号機の原子炉水位は、3 月 14 日 06 時 20 分にオフスケールになり、運転員に炉心が露出した可能性を示した。発電所長は、3 号機の水素爆発の可能性を懸念して全作業者の避難を命じ、ピットへの水の補給活動は停止された。

3 号機の格納容器圧力は、07 時 00 分に最大に達したが、07 時 20 分には若干下がったことが分かった。その後は最大設計圧力未満で安定した。そこで発電所長は、逆洗弁ピットに海から水を補給するためのラインを確立する作業を再開することを決定した。これに続く 2～4 時間の間に全てのユニットへの海水注入ラインが再度確立され、また、追加の 2 台の消防車が海から水を汲み上げ、10 時 26 分にサイトに到着した自衛隊の給水車がピットに水を運搬して、ピットへの水の補給が始まった。

1 号機への海水注入の再開の準備が整った時、3 号機での爆発のため、3 号機原子炉で行われていた海水注入を含め、全ての活動を停止しなければならなかった。この爆発で 3 号機逆洗弁ピット周辺のホースと消防車が損傷し、屋外区域からの作業者の一時的避難が必要となった。

---

[54] さらに、原子炉建屋の圧力を制御する系統を操作するための交流電源が、6 号機の非常用ディーゼル発電機から供給された。全交流電源喪失から 2 日余り後に、原子炉建屋の圧力が大気圧を下回り、二次閉じ込め機能が確保された。

3 号機原子炉建屋の爆発

3 月 14 日 11 時 01 分、3 号機原子炉建屋の上部で爆発が起き、サービスフロアの上方の構造物が破壊され、作業者が負傷した。爆発の結果として、代替注水の構成が破壊されたことに加え、以前に設置された 2 号機の格納容器ベント経路に爆発が影響を及ぼしたため、2 号機の格納容器ベント機能も失われた。爆発の後、2 号機ベントラインの隔離弁が閉じているのが発見され、再び開くことはできなかった。

1 号機と 3 号機の海水冷却の再開

今度は海から直接取り込む海水注入ラインを再確立する作業が、2 時間の中断後に再開された。注入ラインの復旧後、3 月 14 日の午後に最初に 3 号機で、夜に 1 号機で海水注入が再開された。3 号機では 5 時間、1 号機では 18 時間、炉心への冷却水注入が行われなかった。

2 号機の冷却喪失と海水注入

3 月 14 日 13 時 00 分頃、今度は 2 号機が炉心冷却機能を喪失し、測定から原子炉水位が低下し、原子炉圧力が上昇していることがわかった。これは、ユニット運転員と所内緊急時対策室が推測したように、2 号機の原子炉隔離時冷却系が故障した可能性を示していた。その結果、原災法[19]に関連する規制の中で定義された「原子炉冷却機能喪失」報告が 2 号機に関して報告された。

原子炉隔離時冷却系が故障した後、13 時 05 分に消火系を通じた海水注入が試みられたが、消防車ポンプを使用するには原子炉圧力が高すぎた。注水がなければ、炉心はほどなく露出する可能性が高いと見られた。したがって、原子炉から格納容器への蒸気放出の結果として、閉じ込めに悪影響を及ぼす可能性があることを認識しつつも[55]、低圧で注水ができるようにするため、逃し弁を使用して原子炉を減圧することが決定された。

原子炉容器の減圧と消防車の燃料補給後、最初は 1 台の消防車で、その後直ちに 2 台の消防車で、消火系を通じた 2 号機への海水注入が 3 月 14 日 20 時 00 分少し前に開始された。

2 号機の閉じ込め機能の劣化

3 月 14 日 21 時 55 分頃、少し前に復旧した格納容器内にある放射線モニタリング機器は、2 号機格納容器内の放射線レベルが、8 時間前に行われた前回測定以降かなり上昇していることを示した[56]。また、原子炉圧力と格納容器圧力はともに、3 月 14 日 22 時 30 以降増加傾向を示した。格納容器圧力は 22 時 50 分に設計圧力を超え、原災法[19]に関連する規制に従って、2 号機に関する「格納容器圧力異常上昇」の非常事態宣言が発出された。この状況は、23 時 39 分に関連政府当局に報告された。2 号機原子炉に注水できるようにするため、その後 3〜4 時間にわたって、原子炉圧力を低下させるべく更に多くの逃し弁が開かれた。その結果、格納容器圧力が更に上昇する一方、格納容器圧力を開放するためのベントラインの確立に取り組んでいたユニット運転チームは、ベント弁を開くことができなかった。所内及び所外の緊急時対策室の東京電力スタッフは、閉じ込め機能を保護し、できるだけ早くベントを可能にするため、環境への放射性物質の放出を増加させることを認識しつつも、ドライウェルからの直接ベントを行うことに合意した。しかし、ドライウェルベントの弁を開くこともできず、2 号機のベントは達成できなかった。

3 月 15 日火曜日 04 時 17 分、関連政府機関は、2 号機格納容器と原子炉の減圧が有効でなく、格納容器圧力が引き続き上昇しているとの通知を受けた。

---

[55]原子炉格納容器の圧力抑制室の部分は、既にほぼ飽和状態に達していた。

[56] 格納容器内雰囲気の放射線レベルは 5000 倍の増加（1.08 mSv/h から 5360 mSv/h へ）、格納容器の圧力抑制プール部分の放射線レベルは 40 倍の増加（10.3 mSv/h から 383 mSv/h へ）。さらに、3 月 14 日 21 時 00 分から 3 月 15 日 01 時 40 分の間、正門付近で再び中性子が検出されていた。東京電力は、中性子は 3 基の原子炉の 1 つで炉心損傷の後に放出されたアクチニドの自発核分裂から生じたものと考えた。

2 号機と 4 号機の事象及びその後のサイト避難

3 月 15 日 06 時 14 分、サイトで爆発音が聞こえ、1、2 号機の中央制御室で振動が感じられた。これに続いて 2 号機格納容器（圧力抑制室）の圧力測定値が低下した。中央制御室のスタッフは当初、2 号機圧力抑制室の圧力が大気圧近くまで低下したと所内緊急時対策室に報告したが[57]、これは閉じ込め機能の潜在的喪失を示すものであった。

この情報は、格納容器の破損の可能性及び 2 号機からの制御不能な放出の可能性を示した。これに基づき、所内緊急時対策室は、全てのユニットの要員全員に、所内緊急時対策室が所在する免震重要棟に一時的に避難するよう命じた。2 号機圧力抑制室に関連する事象とほぼ同じ頃、4 号機原子炉建屋の上部の爆発が避難中の人員によって報告された。

2 号機と 4 号機の事象を受けて、モニタリングと緊急時対応に必要な要員を除く全ての人員が、放射線に関して安全な場所に移るよう発電所長から指示された。約 650 人がこの命令をサイト避難と理解し、福島第二原子力発電所に避難した。発電所長を含めて、推定 50～70 人のスタッフ[58]が福島第一原子力発電所サイトに残った。関連政府機関は、3 月 15 日 07 時 00 分に所内緊急時対策室から避難を知らされた。

約 2 時間後、2 号機原子炉建屋の 5 階付近から白煙（又は蒸気）が放出されているのが観察された。3 月 15 日 09 時 00 分に正門で 12 mSv/h 近くの放射線量率測定値が記録され、これは事故開始以来最も高い測定値であった。高い放射線レベルのため、2 時間後の 11 時 00 分に政府当局から、福島第一原子力発電所の半径 20～30 km 以内に居住する全ての住民に屋内退避が指示された。

この一連の事象の発生中に、1～3 号機の基本安全機能は失われたか、若しくは大きく低下し（図 2.5）、取組の焦点は、損傷評価とこれらの機能の回復及び安定化に置かれた。

[57] 測定値を再チェックした後、2 号機では圧力抑制室の圧力は計器の測定限界を下回ったが、ドライウェル部分の圧力は大きく低下してはいなかったことが確認された。
[58] 様々な調査報告書で言及されたとおり、スタッフの正確な数ははっきりしない[6, 8]。また、福島第二原子力発電所に避難したスタッフは、同日中にサイトに戻り始めたことも言及されている。

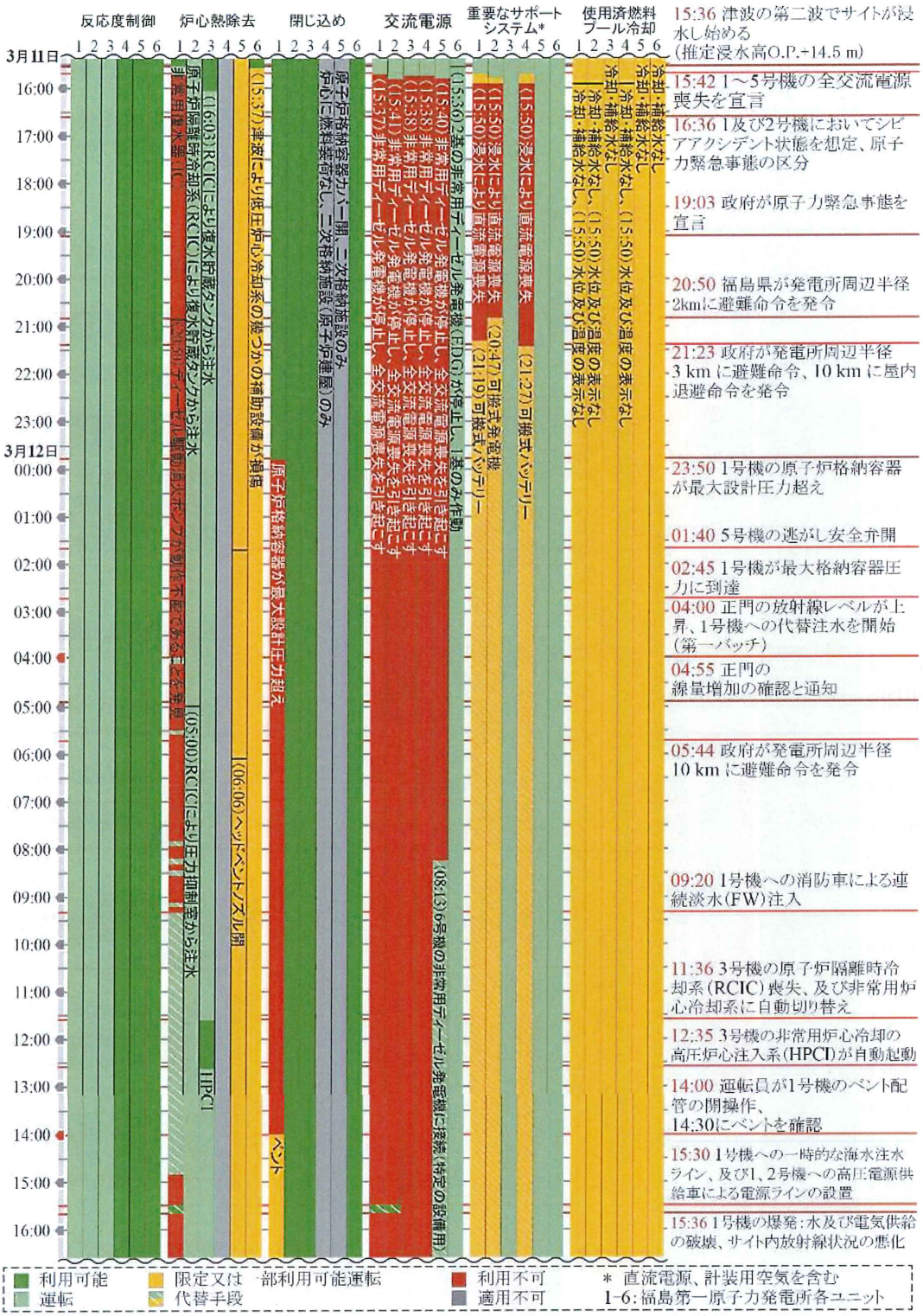


図 2.5.　福島第一原子力発電所の事故対応における基本安全機能と補助安全機能（2011 年 3 月 11～15 日）

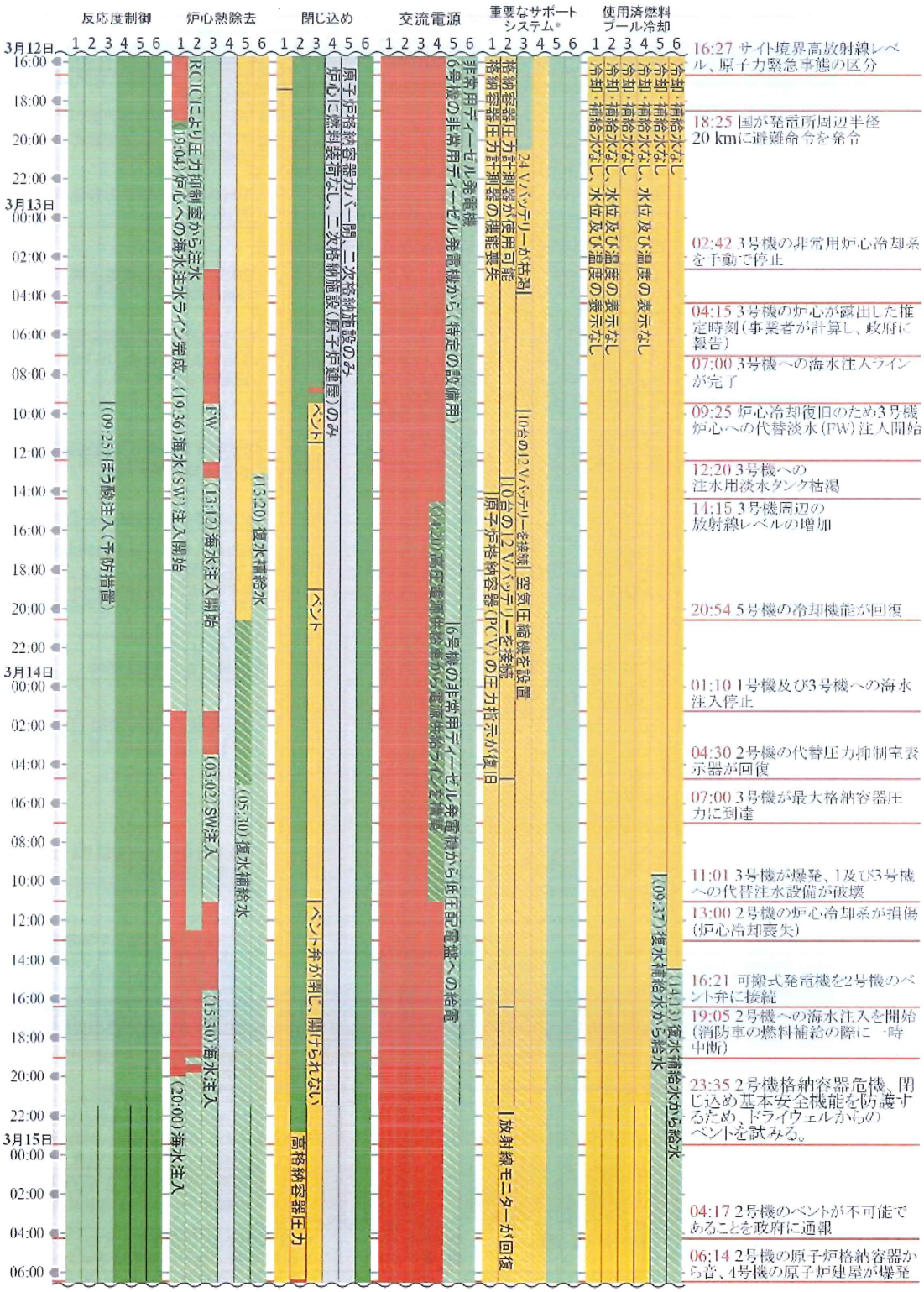


図 2.5.　福島第一原子力発電所の事故対応における基本安全機能と補助安全機能（2011 年 3 月 11～15 日）（続き）

2.1.3. 安定化の取組

3、4 号機の使用済燃料プールへの水補給

3 月 16 日水曜日の午後、3、4 号機の使用済燃料プールの状況に関する懸念に対処するため、ヘリコプターからの遠隔目視調査が実施された。この調査から、4 号機の使用済燃料プールには燃料集合体を覆うに十分な水があることが確認された。しかし、3 号機の使用済燃料プールに関する観察は決定的なものではなく、同プールへの水の補給が高い優先事項とされた。

3 号機使用済燃料プールへの最初の水供給は、3 月 17 日 09 時 30 分から 10 時 00 分にかけて行われ、ヘリコプターが海水を投下した。同日 19 時 05 分から 20 時 07 分の間、放水車で淡水が放水された。3 月 20 日以降、4 号機の使用済燃料プールに海水又は淡水が放水された[59]。

使用済燃料が露出しないことを確保するため、放水車、消防車又はコンクリートポンプ車を使用したプールへの放水作業が 3 月の間断続的に継続された。2011 年 4 月及び 5 月には、燃料プール冷却浄化系も利用された。

電源の回復と全交流電源喪失の終了

3 月 17 日から 20 日の間、1、2 号機に仮設電力ケーブルを敷設する作業が実施された。全交流電源喪失からほぼ 9 日後の 3 月 20 日日曜日 15 時 46 分、この仮設交流電源系を通じて 1、2 号機の外部電源が回復し、1、2 号機の全交流電源喪失は終了した。

6 号機では、稼働中の空冷非常用ディーゼル発電機に接続した電源ラインを通じて、2 台目の水冷非常用ディーゼル発電機の冷却系への電源が回復した。この水冷非常用ディーゼル発電機は、3 月 19 日 04 時 22 分に再び運転を開始し、5、6 号機に交流電源を供給した。

3、4 号機の全交流電源喪失は、14 日以上続いた後、これら 2 つのユニットへの仮設外部電源が 3 月 26 日に回復した時点で終了した。

安定状態の達成

5 号機は、3 月 20 日 12 時 25 分に通常残留熱除去系が起動し、冷温停止モードに到達する最初のユニットとなった。原子炉温度は約 2 時間で 100°C 未満に下がり、5 号機は 2011 年 3 月 20 日 14 時 30 分、事故開始から 9 日近く後に冷温停止モードとなった。

6 号機の通常残留熱除去系は、同日 18 時 48 分に、5 号機とほぼ同じ方法で運転を再開した。原子炉温度は 1 時間足らずで 100°C 未満に下がり、6 号機は 3 月 20 日 19 時 27 分に冷温停止モードとなった（図 2.6）。

[59] 1 号機の使用済燃料プールに水を追加する際にも同じ方法が取られた。2 号機原子炉建屋は、引き続き 2 号機使用済燃料プールを覆っていたため、2 号機には放水法は使用できなかった。

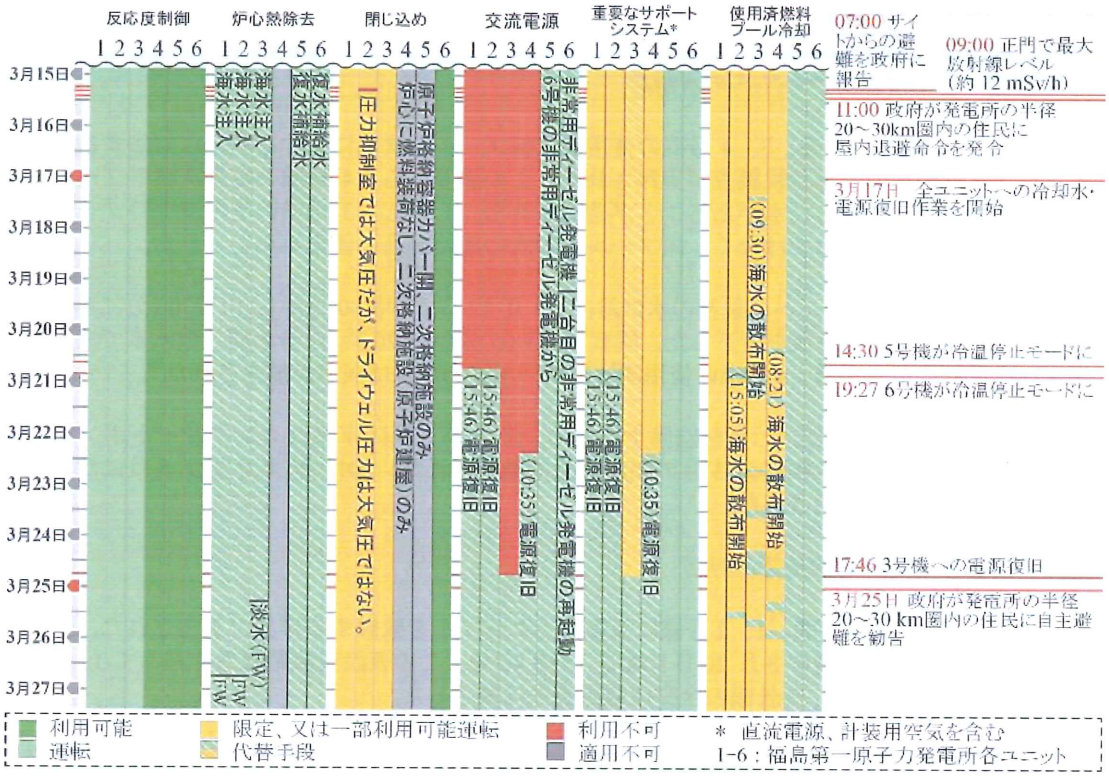


図 2.6.　福島第一原子力発電所の基本安全機能の暫定的回復

1～3 号機に関し、東京電力は、2011 年 4 月 17 日に行動計画「東京電力福島第一原子力発電所・事故の収束に向けた道筋」[24]を発表した。このロードマップには、原子炉及び使用済燃料の安定した冷却の確立、放射性物質放出の削減とモニタリング、水素蓄積の管理、及び臨界復帰の防止に関して取るべき措置が組み込まれた。これらの行動は、事故後 9 カ月の間に実施された。

ロードマップでは、事故状態の終了、又は「冷温停止状態」[60]を定義する 2 つの条件を設定した。すなわち、放射性物質放出の大幅抑制の達成と放射線量率の着実な低下、及びロードマップに規定された一定のプラントパラメータの目標値の達成である。政府と東京電力は 7 月 19 日、1～3 号機で第一の条件が達成されたと発表し、2011 年 12 月 16 日にこれらのユニットで第二の条件が達成されたと発表した。この発表は、福島第一原子力発電所の事象の「事故」段階を公式に終結するものであった[61]。

しかし、幾つかの不安定なプラントの状態は継続した。例えば、計装の故障によると説明された温度の変動、又は核分裂生成物の測定値の変動などである。2012 年 3 月から 4 月の間に、より安定したプラントパラメータが達成されたが、事故後の対策は継続した。さらに、建屋への地下水浸入による放射性物質を含む水の蓄積などの廃棄物管理、及び時々起こる機器の故障などの課題が継続した。本報告書作成時点で、日本政府は、福島第一原子力発電所を「事故サイトとしての特定施設」と見なしている[62]。

---

[60] 「冷温停止状態」という用語は、当時、特に福島第一原子力発電所の原子炉のために日本政府によって定義された。その定義は IAEA 等が使用する用語とは異なる。
[61] 当時の日本政府が設定した基準による。
[62] 現在の規制当局である原子力規制委員会（NRA）が 2012 年 11 月 7 日に設定した「特定原子力施設」の定義、すなわち、指定核物質の安全性又は物的防護のための特別措置を必要とする施設、による。

2.2. 原子力安全の考慮

2.2.1. 外部事象に対する発電所の脆弱性

2011 年 3 月 11 日の地震は、発電所の構造物、系統及び機器を揺り動かす地盤の振動を生じた。地震後に一連の津波が発生し、その一波によってサイトが浸水した。記録された地盤の振動と津波の高さは、いずれも発電所が当初設計された時になされたハザードの仮定を大幅に上回った。地震とそれに伴う津波は、福島第一原子力発電所の複数のユニットに影響を与えた。

当初の設計で考慮された地震ハザードと津波は、主に日本の歴史上の地震記録と最近の津波の痕跡を基にして評価された。この当初の評価は、構造地質学の基準を十分に考慮しておらず、そうした基準を使用する再評価は実施されなかった。

同地震以前には、日本海溝はマグニチュード 8 クラスの地震が頻発する沈み込み帯に分類されていた。福島県沖におけるマグニチュード 9.0 の地震は、日本の科学者によっては確度が高いとは考えられていなかった。しかし、過去数十年間に、類似する地質構造環境の異なる地域で同程度又はより高いマグニチュードが記録されていた。

発電所の主要な安全施設が 2011 年 3 月 11 日の地震によって引き起こされた地盤振動の影響を受けたことを示す兆候はない。これは、日本における原子力発電所の耐震設計と建設に対する保守的なアプローチにより、発電所が十分な安全裕度を備えていたためであった。しかし、当初の設計上の考慮は、津波のような極端な外部洪水事象に対しては同等の安全裕度を設けていなかった。

外部ハザードに対する福島第一原子力発電所の脆弱性は、その供用期間中に体系的で総合的な再評価を受けていなかった。事故当時、日本にはそうした再評価に関する規制要件がなく、国内及び国際的な運転経験は、既存の規則及び指針において適切に考慮されていなかった。津波のような地震に伴う事象の影響を取り扱う方法に関する日本の規制指針は、一般的で簡潔なものであり、具体的な基準や詳細なガイダンスは含まれていなかった。

事故以前に、事業者は、2002 年に日本で策定された合意に基づく手法を使用して極限的な津波洪水レベルに関する幾つかの再評価を実施し、当初の設計基準見積りより高い数値が出ていた。これらの結果に基づいて幾つかの補完措置が講じられたが、これらは不十分であったことが事故時に示された。

さらに、事故以前に、合意に基づく手法を上回る波源モデルや手法を使用した幾つかの試算が事業者によって実施された。日本の地震調査研究推進本部が 2002 年に提案した波源モデルを使用した試算は、最新の情報を使用し、シナリオについて異なるアプローチをとり、当初の設計及びそれ以前の再評価において出された見積りより相当に大きな津波を予想した。事故当時、更なる評価が実施されていたが、その間、追加の補完措置は実施されなかった。推定値は、2011 年 3 月に記録された洪水レベルと同程度であった。

世界の運転経験は、自然ハザードが原子力発電所の設計基準を超える事例を示してきた。特に、こうした幾つかの事象からの経験は、洪水に対する安全系の脆弱性を示した。

囲み 2.4.　津波[25]

津波－日本語で港湾（「津」）の波（「波」）を意味する－は、海底（又は、一般的に水底）の変形又は擾乱によって発生する、長波長（例えば、数 km から数百 km）及び長周期（例えば、数分から数十分、例外的に数時間）の一連の進行波である。津波は、地震、火山現象、水中及び沿岸の地滑り、落盤、又は崖崩れで発生することがある。津波は、世界のあらゆる外洋域及び海盆で起こる可能性があり、フィヨルドや大きな湖でも起こることがある。

津波は、発生区域からあらゆる方向に外側へ伝播し、エネルギー伝播の主な方向は、発生源の規模と方向性によって決まる。深水での津波の伝播時には、津波は普通の重力波として進行し、速度は水深によって異なる。例えば、深海では、速度は 800 km/h を超えることがあり、波高は一般に数十 cm 未満であり、地震が震源の場合には、波長は 100 km を超えることが多い。伝播時には、海底地形が津波の速度と高さに影響を与える。屈折、海山又はその山脈（群島）からの反射、及び回折は、深海での津波の伝播に影響を及ぼす重要な要因である。

津波は、水深が減少すると波の速さが減速され、波長が短くなるため、浅水域に近づくにつれて急勾配になり、高さを増す。沿岸域では、半島や海底峡谷などの局所地形と海底地形が波高の追加的増加を引き起こすことがあり、波高は、津波が上陸するにつれ、湾岸、河口、港湾、又は潟の漏斗状地形の存在によって増幅されることもある。数回の大型波が発生することがあり、第一波が最も大きいとは限らない。第一波の前、及び各連続的洪水の間に、海の後退が起こることもある。津波は、波長が非常に長いために波面の背後に大量の水のかたまりが続くことから、内陸洪水を引き起こすことがある。これは破壊的影響を及ぼす場合がある。

事故当時に有効であった IAEA 安全基準は、原子力発電所の建設前に、地震や津波などのサイト特有の外部ハザードを特定する必要があること、及びサイトの包括的かつ全般的な特性評価の一環として、これらのハザードが原子力発電所に及ぼす影響を評価する必要があることを求めていた[26]。原子力発電所の供用期間にわたって十分な安全裕度を提供するために、適正な設計基準を設定することが要求された[27]。これらの安全裕度は、外部事象の評価に付随する高レベルの不確実性に対処できるように十分に大きいことが必要である。プラントの供用期間中に新たな情報・知見が得られた結果としての変更の必要性を特定するため、サイト関連ハザードも定期的に再評価する必要がある[26]。

1960 年代及び 1970 年代には、地震及びこれに伴う（例えば津波）ハザードを評価する方法を適用する際に、歴史上の記録を利用することが共通の国際慣行であった。この共通の慣行には、サイト地域で歴史上記録された最大の地震強度又はマグニチュードを増加させ、また、このような事象がサイトから最も近い距離で起こると想定することによって、安全裕度を増すことが含まれた[28]。これは、地震強度又はマグニチュードの観測の不確かさを勘案し、また、強固なハザード評価のためには典型的には先史時代のデータを含む必要がある中で、比較的短期の観測では潜在的最大値が得られないかもしれないという事実を補完するために行われた。しかし、福島第一原子力発電所の 1 号機と 2 号機の設計に対する地震ハザード評価は、主として地域の歴史上の地震データに基づいて実施され、上記の安全裕度の増大は含まれなかった。後発ユニットの建設許可を取得するプロセスでは、歴史上の地震情報と地形学的断層規模を併用する新たな手法が適用された[16, 29]。

「内陸」断層に関する情報は、公的な情報源及び事業者が実施した個別の調査から取得され、あり得る地震のマグニチュードを予測する分析では保守的なパラメータが想定された。日本海溝については、(i)十分な地質構造ベースでの正当性及び(ii)世界的な類似性の使用なしに、主として観察された歴史上のデータに基づいて、マグニチュード 8 クラスの地震が最大の事象と当初推定された。

マグニチュードの大きい大地震（M9）は、太平洋の「環太平洋火山帯」に沿って起きており、例えば、1960 年にチリで、1964 年にアラスカで発生したが、これは福島第一原子力発電所 1 号機の建設許可が与えられる少し前であった。これらの地震は、日本の地震学者の間で、太平洋プレートの他の区域で地震が発生した地質構造環境に類似した環境にある日本の海岸付近で、このような事象が起こり得るというコンセンサスを導くことにはならなかった。

発電所の「設置許可」に使用された外部洪水ハザードの当初の評価では、プラント設計者は当時日本で普及していた手法と基準を適用したが、これは地震・津波の歴史上の記録の調査と解釈に基づいたものであった。1960 年にチリで起きた世界最大の既知の地震の 1 つの後に生じた遠隔津波が、外部洪水に対する設計目的として用いられた事象であった。この事象によって福島県の小名浜港で観測された津波の高さは、海抜 3.1m であった。

東部海岸沖の日本海溝に位置する津波の発生源については、福島第一原子力発電所サイトの立地での津波洪水レベルに関する歴史上の記録がなく、また、サイトの沖合区域での地震発生の証拠もなかった。近辺の津波発生源に関するデータの欠如は、設計目的で 3.1m の最大洪水レベルを採択することを支持した。東京電力は、他の地域で起きたマグニチュードの大きい大地震を考慮せず、これらの地震を日本海溝での局部的な津波発生源とは想定しなかった。

日本では、地震ハザードと津波ハザードの再評価を実施する規制要件がなかったにもかかわらず、東京電力は福島第一原子力発電所の供用期間にわたって数回の再評価を実施した[30]。東京電力と日本のその他の事業者は、日本土木学会が開発し 2002 年に発行された手法を使用して津波洪水レベルを再評価した[31]。この手法は、歴史上のデータに基づいて、近辺又は地元の津波に関して標準発生源モデルを使用したが、津波を発生する地震が福島第一原子力発電所サイトの沖合の日本海溝に沿って起こることは想定されていなかった。上述の標準発生源モデルの想定は、この手法を使用して行われた全ての評価で適用された。

日本の原子力安全委員会（NSC）の 2006 年の指針[32]は、直下型地殻内地震のみでなくプレート間地震についても考慮するよう求めた。これらの地震安全及び関連事象に関する指針は、地震ハザードの評価に使用されたが、津波ハザードに関する指針には、一般的で簡潔な記述しか含まれておらず、具体的な要件、基準又は手法は提示されなかった。これらの地震は、原子力安全･保安院（NISA）が要求した地震安全の「事後点検」で、東京電力によってマグニチュード 8 クラスと見なされた。しかし、これらのプレート間地震からのサイトの距離のため、このアプローチでは、この地質構造に対応するハザード値は、直下型地震発生源と比較してより小さいものとなった。したがって、これが地震動ハザードに与える影響は考慮されなかった。事故当時、東京電力は地震・津波に対するプラントの脆弱性の再評価を完了していなかった。

2009 年に東京電力は、最新の海底地形データと潮位データを使用して、最大津波高さとして 6.1 m の値を評価した。この新たな評価値の結果として、福島第一原子力発電所では一部の設計変更が行われ、特に残留熱除去に使用するポンプのモータを高くした。事故時に、この措置だけでは不十分なことが判明した。非常用ディーゼル発電機の浸水を回避する措置など、洪水防護を強化するためのその他の安全措置は実施されていなかった。

日本土木学会の手法を取り入れた再評価に加え、事故以前に東京電力によって津波洪水レベルの試算が行われた。これらの試算[30]の 1 つでは、地震調査研究推進本部が提案した、最新の情報を使用し、様々なシナリオを検討した発生源モデルを適用した[30, 33]。このアプローチでは、福島県の沿岸沖合の日本海溝が津波を引き起こす潜在性を検討した。これは、地質構造沈み込み帯のこの部分に関する津波の歴史上の記録のみに頼ったものではなかった。

2007～2009 年の間に適用された新しいアプローチは、福島県の沿岸沖合でマグニチュード 8.3 の地震が起こることを想定した。このような地震は、福島第一原子力発電所において（2011 年 3 月 11 日の実際の津波高さと同様の）約 15m の津波遡上波につながる可能性があり、その場合主要建屋は浸水することとなる。この新たな分析に基づき、東京電力、原子力安全・保安院及び国

内のその他の組織は、更なる調査研究が必要であると考えた。東京電力とその他の電力会社は、日本土木学会に津波発生源モデルの適切性を再検討するよう要請した。これらの取組は、2011 年 3 月には進行中であった。

東京電力は、これらの津波高さの予想値増加に対応した暫定的補償措置を取らず、原子力安全・保安院も東京電力にこれらの結果に迅速に対処するよう求めなかった[30]。

地震ハザード評価につきまとう困難と不確実性にもかかわらず、福島第一原子力発電所で起きた事象は、地震による地盤振動に対して日本の原子力発電所が頑強であることを実証した。2011 年 3 月 11 日、福島第一原子力発電所の 1～5 号機の原子炉建屋のベースマットで記録された最大加速度は、発電所の設計時に予想されていたものより大幅に大きかった。しかし、地震動が安全関連の構造物、系統及び機器に顕著な損傷を引き起こしたという兆候はなかった[34]。しかし、津波が誘発する洪水に対する防護は、福島第一原子力発電所の設計で使用された値よりはるかに大きい津波高さに対しては不十分であることが示された。極端な自然ハザードが同時に関与し、複数のユニットに影響を及ぼすシナリオは、福島第一原子力発電所の設計では考慮されていなかった。福島第一原子力発電所においてシビアアクシデントマネジメントを実施するための適時の資源供給は、地震と津波により引き起こされたインフラの広範囲の損傷によるサイト外の地域レベルでの破壊により、損なわれた。

事故に先立つ 12 年間の日本及び他の地域での原子力発電所の運転経験は、洪水から重大な影響を受ける可能性を示していた。関連する運転経験には、1999 年にフランスのブレイエ原子力発電所の 2 基の原子炉で洪水を引き起こした高潮、インドのマドラス原子力発電所の海水ポンプが浸水した 2004 年のインド洋津波、及び 2007 年の日本の新潟中越沖地震が含まれる。後者は、東京電力の柏崎刈羽原子力発電所に影響を及ぼし、地下の外部消火配管の破損により、1 号機の原子炉建屋の浸水を引き起こした[35-38]。

2.2.2. 深層防護概念の適用

深層防護は、原子力発電開発の当初から原子力施設の安全を確保するために適用されてきた概念である。その目的は、複数のレベルの防護手段によって潜在的な人的過誤と設備故障を補うことである。防護は各レベルにおける複数の独立した防護手段によって提供される。

*福島第一原子力発電所の設計は、**(1)** 信頼できる通常運転を行うことを目的とする設備、**(2)** 異常な事象の発生後に発電所を安全な状態に戻すことを目的とする設備、**(3)** 事故状態に対応することを目的とする安全系、という最初の **3** つのレベルの深層防護のための設備と系統を備えていた。設計基準は、一連の想定ハザードを使用して導かれた。しかし、津波のような外部ハザードは十分には取り扱われなかった。その結果、津波によって生じた洪水は、深層防護の最初の **3** つの防護レベルに同時に影響し、**3** つのレベルそれぞれで設備と系統の共通原因故障をもたらした。*

*複数の安全系の共通原因故障は、設計で想定されなかった発電所の状態をもたらした。その結果、第 **4** のレベルの深層防護、すなわち、シビアアクシデントの進行の防止とその影響の緩和を行うこと、を目的とする防護の手段は、原子炉の冷却を回復させ、格納容器の健全性を維持するために利用できなかった。電源の完全な喪失、必要な計器が利用できないための関連する安全パラメータについての情報の欠如、制御装置の喪失及び運転手順の不十分さのために、事故の進行を止め、その影響を抑えることは不可能であった。*

*深層防護の各レベルで十分な防護手段を提供できなかったことが、**1**、**2** 及び **3** 号機の原子炉の重大な損傷とこれらのユニットからの大規模な放射性物質の放出をもたらした。*

2011 年 3 月 11 日の地震は、外部送電網から福島第一原子力発電所への接続の喪失を含めて、地域のインフラに甚大な損害を引き起こした。このため、発電所の通常運転からの逸脱が生じ

た（深層防護レベル 1）。地震の後、電源は所内電源から成功裏に提供され、深層防護レベル 3 の全ての安全系は設計どおりに機能し続けた。これは、安全系と設備が地震ハザードに耐えたことを示している[8]。

発電所は海面に近い高度で建設され、洪水のリスクが適切に評価されなかったため、洪水ハザードに対する防護は十分ではなかった[27]。主要安全設備は、防水区画内で防護されず、高位置に設置することによる洪水からの防護もなかった。このため、深層防護レベル 1、2 及び 3 における残留熱除去と格納容器冷却のための対策が失われた。

洪水は、非常用電源系統の故障、計測制御装置に直流電源を提供する系統のほぼ完全な喪失、及び発電所に海水冷却を提供する構造物及び機器の破壊の共通原因であった。

深層防護レベル 4 の目的は、事故の進行の防止とシビアアクシデント影響の緩和である。レベル 4 における行動のためには、運転員は適切な残留熱除去を確保するために原子炉に水を供給する利用可能な全ての手段を使用する必要があった。これには、主要安全パラメータに関する信頼できる情報を提供する機器、及び原子炉の減圧のための単純かつ信頼できる手段が利用可能であることが必要であった。さらに、運転員は明確なガイダンスを必要とし、アクシデントマネジメントを開始できるように訓練されていなければならなかった[41]。

事故が進行するにつれ、運転員は、重要な安全パラメータを制御室から信頼できる形で測定する能力を失った。この情報は、原子炉の状況を評価するために、また原子炉冷却のため通常と異なる措置と方法に関して十分に情報を得た上で決定を下すために必要であった。それでもなお、運転員は原子炉冷却に高い優先順位を与え、利用可能な低圧ポンプを使用して原子炉に冷却材を注入することを目指し、水供給ラインを迅速に準備することを達成した。しかし、原子炉圧力を開放する試みは、完全な電源喪失の後にこの機能を実行する対策が取られていなかったため、失敗した。炉心損傷の防止に間に合うように、必要な制御電源を回復することはできなかった[8]。

深層防護のレベル 4 に組み込まれた最後の物理的障壁は、原子炉格納容器である。その目的は、原子炉損傷後の放射性物質の環境への大量放出を防止することによって、事故の影響を緩和することである。格納容器の健全性に脅威となる可能性がある炉心損傷事故に関連する物理的現象から格納容器を保護するため、格納容器のタイプに応じて、様々な系統又は種々の設備が必要になる。福島第一原子力発電所の各ユニットには、原子炉冷却経路からの蒸気の漏洩によって引き起こされる可能性がある過圧を開放するために、格納容器の制御式ベントの手段が組み込まれていた。さらに、格納容器内部の雰囲気は、水素の燃焼を排除し、発生しうる爆発を防止するため、不活性の窒素で充填されていた。

事故時に行われた測定によれば、1、2 及び 3 号機の格納容器圧力は一時期、それぞれの格納容器の設計圧力に近いか、又はこれを超えるレベルまで増加したことが示される。この圧力増加は、格納容器冷却系の喪失と過熱した炉心による蒸気の発生によるものであった。一部の格納容器ベント系は成功裏に開かれたが、1、2 及び 3 号機の格納容器が破損し、放射性物質と水素の放出につながった兆候が示されている。格納容器内部の窒素雰囲気は、この閉じ込められた空間で水素の燃焼と爆発が起こることを有効に防いでいた。しかし、水素が格納容器から原子炉建屋に漏出したため、1、3 及び 4 号機で水素爆発が起きた[8]。

囲み 2.5.　事故時に適用される深層防護概念[27]

組織、行動又は設計関連を問わず、全ての安全活動に適用される深層防護概念は、安全活動が必ず重複対策を受けるようにし、失敗が起きた場合に、それが検出され、補償され又は適切な措置によって是正されるようにする。この概念は、1988 年以降更に練り上げられてきた[39, 40]。設計及び運転の全期間を通じる深層防護概念の適用は、プラント内の設備故障又は人的行為から生じたもの、及びプラント外部で発生した事象を含めて、広範囲の過渡変化、予期される運転時の異常事象及び事故に対する段階的防護を提供する。

プラントの設計に対する深層防護概念の適用は、事故の防止と事故防止が失敗した場合の適切な防護を確保することを目標として、一連のレベルの防護（固有の特徴、設備及び手順）を提供する。

(1) 第1レベルの防護の目標は、通常の運転からの逸脱を防ぐこと、及び系統の故障を防止することである。これは、適切な品質レベルと冗長性、独立性及び多様性の適用などの工学的慣行に従って、プラントが適切かつ保守的に設計、建設、保守及び運転されることという要件につながる。この目的を達成するため、適切な設計コード及び材料の選択、並びに機器製造及びプラント建設の管理に細心の注意が払われる。内部ハザードの可能性の低減（例えば、想定起因事象への対応の管理）、所定の想定起因事象の影響の低減、又は事故シーケンス後に放出される可能性が高いソースタームの低減に貢献できる設計オプションが、このレベルの防護で貢献する。設計、製造、建設及び供用期間中プラント検査、保守及び試験に関与する手順、これらの活動へのアクセスのしやすさ、プラントが運転される方法、並びに運転経験の利用の仕方にも注意が払われる。この全プロセスは、詳細分析によって裏付けられ、それによってプラントの運転・保守要件が決まる。
(2) 第2レベルの防護の目標は、予期される運転時の異常事象が事故状態に拡大するのを防止するため、通常の運転状態からの逸脱を検出し、阻止することである。これは、防止に努めていても、一部の想定起因事象が原子力発電所の供用期間中に起こる可能性があるという事実を認識するものである。このレベルでは、安全解析で決定された特定の系統を準備すること、及びこのような想定起因事象からの損害を防止若しくは最小限に抑えるための運転手順を定めることが必要になる。
(3) 第3レベルの防護の場合、可能性は非常に低いが、ある種の予期される運転時の異常事象又は想定起因事象の拡大を前のレベルで止めることができず、より深刻な事象が展開することを想定する。これらの可能性が低い事象は、プラントの設計基準において予想され、その影響を制御し、これらの事象が起きた後に安定した許容可能なプラント状態を達成するために、固有の安全施設、フェイルセーフ設計、追加的設備及び手順が提供される。これは、まずプラントを制御された状態に、その後に安全停止状態に持ち込む能力を有するとともに、放射性物質の閉じ込めのために少なくとも1つの障壁を維持することができる工学的安全施設を提供しなければならないという要件につながる。
(4) 第4レベルの防護の目標は、設計基準を超えることがあるシビアアクシデントに対処すること、及び放射性物質放出が実行可能な限り低く保たれるようにすることである。このレベルの最も重要な目的は、閉じ込め機能の保護である。これは、事故の進行を防ぐための補完的措置及び手順によって、また、アクシデントマネジメント手順に加えて選択的なシビアアクシデントの影響を緩和することによって達成することができる。閉じ込めによって提供される保護は、最確推定法を使用して実証することができる。
(5) 第5かつ最終レベルの防護の目標は、事故状態から生じることがある放射性物質の潜在的放出の放射線影響を緩和することである。これは適切に装備された緊急時管理の対策を必要とする（セクション3「緊急時への備えと対応」参照）。

深層防護の実施の一側面は、特定の場所で放射性物質を閉じ込めるための一連の物理的障壁を設計において提供することである。必要となる物理的障壁の数は、潜在的内部・外部ハザード、及び破損の潜在的影響によって異なる。障壁は、水冷却原子炉においては通常、燃料マトリックス、燃料被覆、原子炉冷却系圧力バウンダリ及び格納容器の形をとる。

福島第一原子力発電所事故は、極端な自然ハザードには複数レベルの深層防護を無効にする、又は減じる潜在力があることを示した[42, 43]。したがって、外部ハザードの系統的な特定と評価、及びこれらのハザードに対する頑強な防護が、全レベルの深層防護に関して検討される必要がある。さらに、この事故は、たとえ原子炉を事故から防護するために設計された全ての主要安全系が失われた場合でも、代替設計対策とアクシデントマネジメント能力が、原子炉への冷却水の供給を依然確保できることを示した。しかし、これらの対策を適時に使用するには、主要安全パラメータに関する信頼できる情報を提供できる計装、及び原子炉に冷却水を供給するためにあらゆる手段を使用できるように、原子炉の圧力を開放するための単純かつ信頼できる手段が必要になる。

2.2.3. 基本安全機能を果たすことができなかったことの評価

安全を確保するために重要な 3 つの基本安全機能は、核燃料の反応度の制御、炉心と使用済燃料プールからの熱の除去、及び放射性物質の閉じ込めである。地震の後、最初の基本安全機能—反応度の制御—は、福島第一原子力発電所の 6 基全てで達成された。

第 2 の基本安全機能、—炉心と使用済燃料プールからの熱の除去 — は、交流及び直流の電源系統のほとんどを喪失した結果、運転員が 1、2 及び 3 号機の原子炉と使用済燃料プールに対するほとんど全ての制御手段を奪われたため、維持することができなかった。第 2 の基本安全機能の喪失は、ひとつには原子炉圧力容器の減圧の遅れのために代替注水が実施できなかったことが原因であった。冷却の喪失が原子炉内の燃料の過熱と溶融につながった。

閉じ込め機能は、交流及び直流電源の喪失により、冷却系が使用できなくなり、運転員が格納容器ベント系を使用することが困難となった結果として失われた。格納容器のベントは、圧力を緩和し格納容器の破損を防ぐために必要であった。運転員は、1 号機と 3 号機のベントを行って原子炉格納容器の圧力を下げることができた。しかしこれは、環境への放射性物質の放出をもたらした。1 号機と 3 号機の格納容器ベントは開いたが、1 号機と 3 号機の原子炉格納容器は結局は破損した。2 号機の格納容器のベントは成功せず、格納容器が破損し、放射性物質の放出をもたらした。

囲み 2.6. 基本安全機能

3 つの基本安全機能は次のとおりである。

(1) 反応度の制御

(2) 熱除去

(3) 放射性物質の閉じ込め

福島第一原子力発電所の事故以前に、1 つ又は複数の基本安全機能を維持することに失敗した事故が 2 件あった。1979 年に米国で起きたスリーマイル島原子力発電所の事故は、これらの安全機能の 2 番目を喪失した結果として起きたが、環境への放射性物質の放出は、3 番目の機能である格納容器による放射性物質の閉じ込めによって成功裏に防止された。1986 年に旧ソ連で起きたチェルノブイリ原子力発電所の事故は、これらの安全機能の 1 番目が喪失した結果として起きた。この発電所には格納容器がなかった。したがって、チェルノブイリ事故では、非常に大量の放射性物質が環境に放出された。福島第一原子力発電所事故は、極端な外部事象の複合的発生を受けてこれらの安全機能の 2 番目と 3 番目を喪失したために起きた。

炉心の核燃料の反応度制御

炉心の核燃料の反応度を制御するための安全系は、原子炉保護系と制御棒駆動系である。地震発生前には、福島第一原子力発電所の 1～3 号機は運転中であった。4～6 号機は保守のため停止していた。1～3 号機の原子炉は、地震事象モニタリング設備によって作動した原子炉保護系によって自動的に停止した。制御棒駆動系による原子炉制御棒の挿入によって核燃料の核分裂連鎖反応は終了し、原子炉は停止状態となった。

核燃料からの熱除去

1～3 号機の停止後、燃料に含まれている放射性物質崩壊の進行によって生成した残留熱は、原子炉冷却系によって除去された。これは 2 番目の基本安全機能を維持した。これらの冷却系は、海水に熱を伝える閉じた循環ループと、高圧及び低圧で炉心に注水してこの残留熱を除去する様々な手段からなっていた（セクション 2.1 参照）。

これらの系統の多くは、動作に交流電源を必要とし、その全ては操作の制御に直流電源を必要とした。事故の過程で大半の電源は失われた。報告書のこの部分では、この電源喪失の影響に焦点を置く。

1 号機

原子炉容器圧力高信号が発信された結果として、1 号機を冷却するための非常用復水器（囲み 2.2 参照）が自動的に起動した。地震を受けて原子炉が停止した時点で、非常用復水器は復水戻りラインの隔離弁を開いた（同ラインのその他の隔離弁は通常運転時に開いていた）。原子炉の冷却が速過ぎて熱応力が原子炉圧力容器の設計値を超えるのを防止するために、操作手順に定められたとおり、非常用復水器系の停止と再起動が運転員により数回繰り返された。これは、復水戻りラインの隔離弁を開閉することによって行われた[8]。

津波がサイトを浸水させ、電源が失われた時、運転員は原子炉格納容器外部の復水戻りラインの弁を閉じて、非常用復水器系を停止したところであった。運転員には、非常用復水器の弁位置に関する入手可能な情報がなく、約 3 時間後に初めて非常用復水器を手動で再起動しようと試みた。運転員は、これらの状況で弁がどのように作動するかについて理解するよう十分に訓練されていなかった。運転員は結局、外側の隔離弁を開いて非常用復水器を再起動させようと制御室から 2 回試みたが成功しなかった。運転員は、非常用復水器を手動で操作する手順を有していなかった。本報告書作成時点で、非常用復水器系の全ての弁の正確な位置はわかっていないが、非常用復水器は津波の後に機能しなかったことが兆候により示されている[8]

蒸気タービンで作動する高圧注水系は、直流電源が失われたために利用不可能であった。

非常用復水器系と高圧注水系が喪失したことを受け、消火ポンプ又は消防車で供給されるような低圧設備を利用して原子炉圧力容器に注水する代替手段が必要であった。運転員は、やがて注水経路を準備したが、低圧で注水できるようにするためには、逃し安全弁を使用して原子炉圧力容器内圧を低減することも必要であった。これらの弁は、制御電源と高圧空気の喪失のために開くことができなかった。格納容器のベントと原子炉圧力容器の減圧なしには、原子炉容器と格納容器の圧力は、燃料冷却のために十分な水を注入するにはいずれも高すぎた。このため、代替の低圧注水系は、原子炉圧力容器に注水することができなかった。

原子炉容器内の圧力は、炉心が激しく損傷するまで高い状態であった。圧力開放の最も可能性の高い原因は、溶融による原子炉圧力容器の破損であった[44]。圧力開放が破損によって引き起こされたという想定は、重大な炉心損傷の兆候が受け取られた数時間後に生じた格納容器の圧力増加によって支持される。その結果生じた圧力の減少によって、津波から約 12 時間後に原子炉

圧力容器への最初の注水の条件が整った。しかし、この時までに、既に重大な燃料損傷が起きていた[8]。

津波から約 4～5 時間後に炉心損傷が発生し、津波から約 6～8 時間後に溶融した炉心が原子炉容器の底部を破損したと推定されている。環境への放射性物質放出の最初の兆候は津波から約 12 時間後に観察され、津波から約 23 時間後、高圧による破損を防止するため 1 号機格納容器がベントされた際に、大量の放出が行われた。燃料被覆と水の化学反応によって大量の水素が発生し、原子炉圧力容器から原子炉格納容器へ通過し、更に原子炉建屋に漏出した[8]。

2 号機

2 号機は、炉心からの残留熱を除去するための設計が異なっていた。原子炉隔離時冷却系（囲み 2.2 参照）は、原子炉圧力容器からの蒸気を使用して、水を原子炉容器に注入するタービンを駆動した。2 号機の原子炉隔離時冷却系は、外部電源を喪失した後に手動で起動された。この系統を遠隔操作するには直流電源が必要であり、系統は少なくとも 4 時間作動するように設計されていた。しかし、系統は直流電源なしに、運転員の介入もなく、約 68 時間、過酷な状況で動作し続けた[8]。この系統は、原子炉圧力容器の水位を燃料より上方に維持することに成功し、冷却機能を確保した。

約 68 時間後に原子炉隔離時冷却系は故障した兆候がある。原子炉圧力容器は高圧であったため、原子炉圧力容器にはもはや注水することができなくなった。原子炉圧力容器内の水位は、原子炉隔離時冷却系が機能を停止してから数時間後に炉心頂部まで低下すると推定された。運転員は、1 号機で利用可能であったものに類似した低圧注水のための代替設備に頼った。当初若干の困難を経た後、運転員は逃し安全弁を使用して原子炉圧力容器の圧力を低減することに成功したが、燃料の急速な加熱と炉心の損傷を防ぐためには注水は遅すぎた。

2 号機の格納容器ベント系は、圧力を逃すことに失敗した。この失敗は、ラプチャーディスクが破裂しなかったために起きたと想定される。2 号機の炉心は、津波から約 76 時間後に溶融を開始したと推定される。放射性物質の放出は、格納容器圧力の急速な低下が示すように、格納容器バウンダリ破損に続き、津波から約 89 時間後に始まった[45]。

3 号機

3 号機では、1、2 号機の状況とは異なり、直流電源が約 2 日間利用可能であった。これは、原子炉隔離時冷却系と蒸気駆動ポンプを使用する高圧注水系が利用可能であったことを意味する。当初、運転員は、原子炉隔離時冷却系で注水することによって、炉心の水位を維持することができた。運転員は、原子炉隔離時冷却系に利用可能なバッテリ寿命を最大限にするための手順に従った[8]。

さらに、原子炉圧力容器から圧力抑制室への蒸気放出が可能であり、圧力抑制室の圧力は、消火ポンプから提供されるスプレイ水を使用して制御することができた。この状況は、原子炉隔離時冷却系が停止し、再起動できなくなるまで、20 時間続いた。高圧注水系が自動的に起動し、水位を維持するために原子炉圧力容器に注水した。

高圧注水系は、原子炉冷却系に漏洩が生じた際に、原子炉圧力容器に迅速に水を補給することを目的とする。この系統は、原子炉圧力容器の圧力を低減する上で非常に効果的であった。しかし、これはポンプタービンへの入口蒸気圧がポンプの仕様未満に低下する状況を生み、ポンプの効率が著しく低下した。運転員は、系統が故障して放射性物質が格納容器の外部に漏出し始める可能性について懸念したため、約 14 時間後に系統を停止する決定を下した。

高圧注水系が停止した後、運転員は原子炉容器への注水ラインを準備し、原子炉容器に海水を注入する準備を整えた。しかし、原子炉圧力が高いため、原子炉を減圧するまで海水を注入することはできなかった。したがって、原子炉容器への海水の注入が遅れたため、水位は燃料の頂部

近辺まで低下し続けた。運転員がより制御された方法で逃し安全弁を開くことができる前に、過誤と疑われる自動信号によって、逃し安全弁による自動高速減圧が引き起こされたと推定される[46]。この減圧、及び圧力容器が低水位であったことにより、炉心に残る水が蒸気に変わったため、適切な炉心冷却が喪失したと推定される。その後の炉心冷却の喪失につながった一連の事象は、2 号機の場合と同様であった。

炉心は過熱し始め、原子炉圧力容器から格納容器圧力抑制室への大量の蒸気放出によって、圧力がベントラインのラプチャーディスクの破裂を引き起こすレベルまで上昇し、環境への放出経路が開いた[8]。3 号機の炉心溶融は、津波から約 43 時間後に開始したと推定される。津波から約 47 時間後に放射性物質の大量放出が始まった[8]。

4 号機

4 号機は、定期検査中であり、事故以前に停止していた。事故当時、4 号機の全ての燃料は使用済燃料プールに貯蔵されていた。したがって、4 号機炉心の冷却は必要なかった。使用済燃料プールの冷却は、電源喪失のために可能ではなく、その結果、プール温度は上昇し始めた。

使用済燃料プール

津波発生から最初の数日間、運転員は使用済燃料プールには十分な水があり、燃料の過熱は当面の問題ではないと考えた。この見解は、4 号機の原子炉建屋が爆発した 3 月 15 日に変更された。当時、爆発の原因は水素であると考えられ、4 号機で可能な唯一の水素発生源は、水の喪失により露出した使用済燃料プールの過熱した燃料からと考えられた。これは直ちに、プールにどれ位の水が残っているかについての懸念を生み、使用済燃料プールの水位を特定するための取組がなされた。

3 月 16 日、目視調査から 4 号機のプールにはまだ水があることが示された。しかし、3 号機の状況に関して懸念が生じ、ヘリコプターから水を投下することを含めて、様々な緩和の努力がなされることになった。その後の分析と検査から、3 号機と 4 号機の使用済燃料プールの水位はいずれも使用済燃料のレベルまで低下しなかったことが判明した。これらの検査から、4 号機の爆発は水素が原因であり、水素の発生源は 4 号機使用済燃料プールの燃料ではなく、共通の排気系を介した 3 号機から 4 号機への水素の移動であることが確認された。しかし、事故の最中には、使用済燃料プールの実際の状況に関する知識が、計装の喪失により欠如していたため、プールに水を追加する取組を行うことになった。使用済燃料プール事象の詳細はセクション 2.1 に記載されている。

5 号機と 6 号機

5 号機と 6 号機も津波の影響を受けたが、事故以前にかなりの期間停止していたため、原子炉が発生する残留熱は少なかった。さらに、6 号機の非常用ディーゼル発電機のうちの 1 台は洪水を乗り切り、動作可能であった。したがって、運転員には対応する時間がより長くあり、両機の冷却系は 1 台の残存した非常用ディーゼル発電機によって電力を供給された。この電力供給は、炉心の冷却を維持し、後には 5、6 号機の使用済燃料プールへの冷却を提供するために使用され、両機とも安全状態まで冷却することに成功した[8]。

放射性物質の閉じ込めと放射性物質放出の管理

1～3 号機炉心損傷の結果として、大量の蒸気と水素が原子炉圧力容器から漏出した。それが今度は原子炉格納容器を加圧し、加熱した。これらの格納容器は破損し、蒸気、水素、及びその他のガスが放射性物質とともに原子炉建屋へ放出され、その後環境に放出された。

原子炉格納容器は、シビアアクシデントで発生することがある圧力に耐えるようには設計されていなかった。このため、事故が起きた場合に格納容器の圧力を制限できるように 1990 年代にベント系が設置された[22, 23]。1～3 号機の原子炉格納容器は、事故の進行の様々な段階で破損した兆候がある。これは、ベントを実施できるようになる前に、原子炉格納容器の圧力と温度が設計能力をはるかに超えたレベルまで上昇した結果であった（セクション 2.1 参照）。炉心からの放射性物質の漏洩は、原子炉圧力容器から放出された放射性核種の一部を保持した圧力抑制プールによって部分的に緩和された。

2.2.4. 設計基準を超える事故とアクシデントマネジメントの評価

福島第一原子力発電所の許認可プロセスとその運転中に実施された安全解析は、炉心の重大な損傷につながるおそれがある事象が複雑に連鎖する可能性を十分には取り扱わなかった。特に、安全解析は、洪水に対する発電所の脆弱性や、運転手順とアクシデントマネジメント指針の弱点を特定できなかった。確率論的安全評価は、内部溢水の可能性を取り扱わず、アクシデントマネジメントにおける人的パフォーマンスに関する想定は楽観的であった。さらに、規制当局は、事業者がシビアアクシデントの可能性を考慮するための限定的な要件を課したのみであった。

運転員には、津波によって生じる複数ユニットの電源喪失と冷却の喪失に対する十分な備えがなかった。東京電力はシビアアクシデントマネジメント指針を作成していたが、このような確率が低い事象の組合せは取り扱っていなかった。したがって、運転員は適切な訓練を受けておらず、関連するシビアアクシデント演習に参加したことがなく、運転員が利用できる設備は劣化した発電所の状態では適切でなかった。

***2012** 年 **9** 月、原子力規制委員会が設置された。原子力規制委員会は、人と環境を防護するために原子力発電所のための新たな規制を制定し、同規制は **2013** 年に施行された。同規制は、地震及び津波等の外部事象の影響の再評価を含め、共通原因による全ての安全機能の同時喪失を防止するための対策を強化した。炉心損傷、格納容器損傷及び放射性物質の拡散に対する新たなシビアアクシデント対策も導入された。*

事故当時に有効であった IAEA 安全基準は、全ての通常運転モード、事故状態、及びシビアアクシデントを含む設計基準を超える事故の場合に安全機能を遂行できるかどうかを判断するため、評価を実施することを求めていた。確率論的手法、決定論的手法、及び適切な工学的判断を併用して、シビアアクシデントにつながる可能性がある重要事象シーケンスを特定する必要がある[27]。さらに、事故対策を改善するために使用できる想定事故シナリオを研究するため、設計基準を超える事故の具体的・決定論的分析を実施する必要がある[41]。したがって、設計基準を超える事故の状態で安全機能が遂行できるかどうかを判断することが必要である。

東京電力は、1990 年代初めに、確率論的安全評価の実施を開始するとともに、より重大な事故シーケンスの決定論的安全解析も開始した。当時の IAEA 加盟国の慣行に従って、これらの確率論的安全評価は、単一ユニットの原子力発電所での事象に限定された。福島第一原子力発電所は、津波が起こり得る地域に立地されていたが、これらの解析には洪水又は広範囲の電源喪失によって引き起こされる共通原因故障は含まれなかった[8]。福島第一原子力発電所に関する確率論的安全評価研究でも、内部溢水又は火災を考慮しておらず、運転員の行動に関連する想定は楽観的であった。

囲み 2.7.　決定論的安全評価と確率論的安全評価 [47,48]

安全解析とは、原子力発電所で起こる物理的現象の分析的評価である。原子力発電所の決定論的安全解析では、想定起因事象への対応を予測する。特定の一連の規則及び許容基準が適用される。通常、これらの規則・基準は、中性子、熱水力学、放射線、熱機械及び構造の諸側面に焦点を合わせる必要があり、これらは様々な計算ツールで解析されることが多い。

予期される運転時の異常事象と設計基準事故による過渡変化の後に、プラントの通常運転状態を回復する目的で策定された戦略を確認するため、最も確からしい決定論的安全解析が実施されるべきである。これらの戦略は、このような事象の際に取るべき措置を定める緊急時運転手順に反映されている。決定論的安全解析は、一部の事故に対応して取るべき運転員の措置を特定するために要する情報を提供する上で必要であり、解析は、アクシデントマネジメント戦略をレビューする重要な要素であるべきである。回復戦略の策定において、運転員が有効な対策を取るための時間を設定するため、運転員が必要な対策をとるタイミングについて感度計算を実施する必要があり、これらの計算を使用して手順を最適化することができる。

決定論的安全解析はまた、緊急時運転手順でシビアアクシデントの発生を防止できなかった場合に、運転員が従うべき戦略の策定を補助するためにも用いられるべきである。事故の進行中にどのような脅威が生じると予想され得るか、及びどのような現象が起きるかを特定するために、同解析が用いられるべきである。アクシデントマネジメントとその影響の緩和に関する一連の指針を策定する基盤を示すために、同解析が使用されるべきである。

決定論的解析は、許容基準が満たされていることを検証するために使用することができるが、確率論的安全評価（PSA）は、各障壁の損傷の確率を決定するために使用することができる。このように、PSA は、障壁の損傷につながる低頻度シーケンスから生じるリスクを評価するための適切なツールになり得るのに対し、決定論的解析は、より高頻度の事象に対して適切である。

決定論的安全解析は、事故シナリオが核分裂生成物障壁の破損につながるかどうかに関する情報を提供するので、PSA の実施において重要な役割を果たす。PSA のフォールトツリーは、系統の利用可能性に関する決定論的計算において広く一般になされる想定を確認するために使用できる強力なツールである。

PSA の目的は、施設又は活動から生じる放射線リスクへの全ての重要な寄与因子を決定すること、及び全体的設計がどの程度よくバランスがとれており、確率論的安全基準が定められている場合どの程度この基準を満たしているかを評価することである。原子力安全の分野では、PSA は、包括的かつ構造的アプローチを使用して失敗シナリオを特定する。PSA はリスクの数値評価値を導出するための概念的及び数学的ツールから成る。確率論的アプローチは、可能な限り現実的想定を使用し、多くの不確実性に明示的に対処するための枠組みを提供する。確率論的アプローチは、システム性能信頼性、設計における相互作用と弱点、深層防護の適用、及びリスクに関する知見を提供することができ、これは決定論的解析から得ることができない場合がある。

安全解析の全体的アプローチを改善することによって、決定論的アプローチと確率論的アプローチをより良く統合することが可能になった。モデルとデータの品質の向上とともに、より現実的な決定論的解析を開発することができるようになり、事故シナリオの選定に確率論的情報を利用できるようになった。決定論的安全基準との適合をどのように実証するかを、例えば、信頼区間、及び安全裕度が指定される方法を明記することによって、確率論的に規定することに、ますます重点が置かれている。

PSA の実施には複数の手法を使用することができる。通常のアプローチは、イベントツリーとフォールトツリーを併用することである。イベントツリーとフォールトツリーの相対的サイズ（複雑性）は、おおむね解析の選好の問題であり、使用するソフトウェアの特徴にも左右される。

囲み 2.7.　決定論的安全評価と確率論的安全評価[47,48] (続き)

イベントツリーは、起因事象から始まり、緩和安全系及び安全関連系の成功又は失敗に応じて、首尾良い結果、又は炉心損傷、又は（レベル 2 PSA で規定されている）プラント損傷状態の 1 つにつながる事故シーケンスの大まかな特徴を概説する。フォールトツリーは、安全系及び補助系の安全機能遂行の失敗をモデル化する場合に使用される。

フォールトツリーは、イベントツリーの解析で特定された安全系の故障状況に対する論理的失敗モデルを提示するように策定されるべきである。各安全系機能のフォールトツリーの最上位事象を提示する故障基準は、事故シーケンス成功基準の論理的逆であるべきである。フォールトツリーでモデル化された基本事象は、機器故障に関する入手可能なデータと一致することが望ましい。フォールトツリーのモデルは、個別機器（ポンプ、弁、ディーゼル発電機など）の重要故障モード及び個別の人的過誤のレベルまで開発されるべきであり、直接的に又は他の基本事象との組合せにより、フォールトツリーの最上位事象につながる可能性がある全ての基本事象を組み込むべきである。

非常用ディーゼル発電機や電気開閉装置など、枢要プラント系統の浸水に対する脆弱性を強調するには、内部溢水シーケンスを含めて、包括的な確率論的安全評価が必要である。1991 年には、福島第一原子力発電所の 1 号機で、腐食した配管から 20m^3/h の速度で水が漏洩し、扉とケーブル貫通部を通じて原子炉の非常用電源系統のある部屋に浸入した。この事象は、地下の非常用ディーゼル発電機及び電気開閉装置の配置場所に関する浸水への脆弱性を示した。

福島第一原子力発電所では、限定的な範囲の確率論的安全評価研究を通じて、アクシデントマネジメントガイダンスも評価されていた。例えば、これらの評価には、格納容器ベント系の使用が含まれており、フォールトツリー方式を適用して、手動操作に対する人的過誤の確率により、機器の故障をシミュレートした。しかし、プラント人員に提供された限定的訓練及びガイダンスを含めて、シビアアクシデントマネジメントにおける脅威に関する徹底的な評価は行われなかった。故障の確率に関する想定が過度に楽観的であるとは認識されず、研究が手順及びガイダンスの改善につながることはなかった[47]（アクシデントマネジメントについては、囲み 2.8 参照）。

福島第一原子力発電所には、IAEA 安全基準が勧告しているような確率論的安全評価では完全に評価されていない弱点があった[47, 49]。その例には、非常用ディーゼル発電機、バッテリ室及び開閉装置の洪水に対する保護の不足、並びに、シビアアクシデントに関する限られたガイダンス、プラント人員の訓練及び知識を考慮した場合の、シビアアクシデントの進行を止める低い成功確率が挙げられる。設計基準を超える事故が十分に考慮されておらず、これは炉心の冷却を維持する能力、重要な安全パラメータを監視する運転員の能力、及びシビアアクシデント状態の管理に影響を及ぼした（図 2.7 参照）。

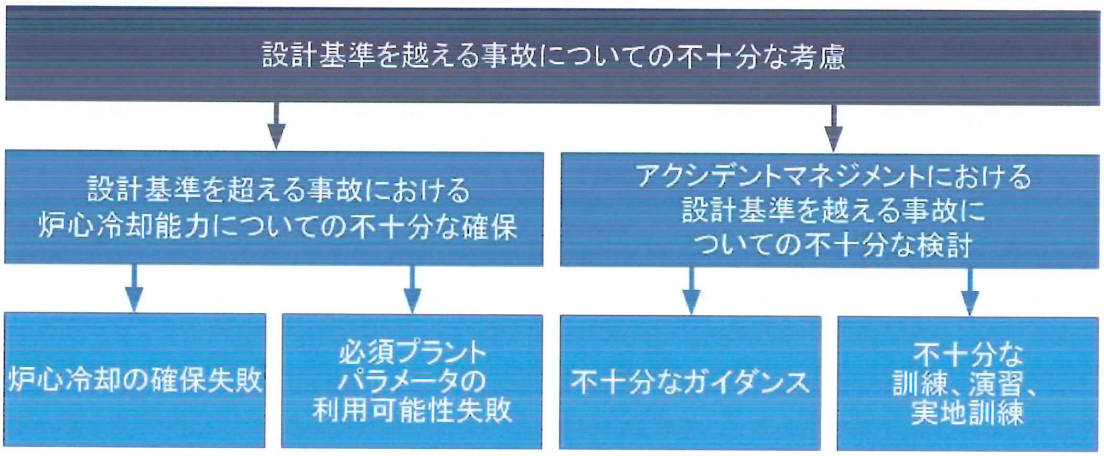


図 2.7.　設計基準を超える事故について十分な考慮がなされていなかったことは、炉心の冷却を維持する能力、重要な安全パラメータを監視する運転員の能力、及びシビアアクシデント状態の管理に影響を及ぼした[27, 50]。

囲み 2.8.　アクシデントマネジメント [41]

アクシデントマネジメントプログラムは、計算された全炉心損傷頻度及び核分裂生成物放出頻度にかかわらず、全ての発電所で策定されるべきである。アクシデントマネジメントガイダンスの策定に当たっては、構造的トップダウン方式がとられるべきである。このアプローチは、目的と戦略から始まり、手順と指針につながり、予防的領域と緩和的領域の双方を取り扱うべきである。

最上位レベルでは、アクシデントマネジメントの目的は次のように定義される：重大な炉心損傷の防止、開始した炉心損傷の進行を止めること、可能な限り長く格納容器の健全性を維持すること、放射性物質の放出を最小限に抑えること、長期的な安全状態を達成すること。これらの目的を達成するため、複数の戦略が策定されるべきである。

戦略から、アクシデントマネジメントのための適切かつ有効な措置が特定されるべきである。これらの措置には、設計基準を超える事故とシビアアクシデントを管理するために重要とみなされる場合には、プラント改造が含まれ、また、人員上の対策も含まれる。これらの措置には、故障機器の補修が含まれる。アクシデントマネジメントの措置を実行する責任者のために、手順及び指針の形で適切なガイダンスを策定する必要がある。

アクシデントマネジメントに関するガイダンスを作成する際には、安全系と非安全系を使用し、当初の意図された機能と想定運転状態を超え、おそらく設計基準の範囲外で一部の系統を使用する可能性も含め、発電所の全設計能力を考慮するべきである。予防領域から緩和領域へ責任と権限の移行が行われる時点が特定されるべきであり、正しく定義され、文書化された基準に基づくべきである。

プラント構成を変更する場合、又は物理的現象に関する研究の新しい結果が入手可能になった場合には、アクシデントマネジメントガイダンスへの影響を確認し、必要であれば、アクシデントマネジメントガイダンスの改定を行うべきである。

設計基準を超える事故に関する規制当局の要件の範囲が限定的であったことは、事業者による関連リスクへの適切な考慮が不足していたことにつながった。これは 2007 年 6 月の IAEA 総合規制評価サービス（IRRS）ミッションで強調され、IRRS は「日本の発電所は、予防措置によって確保されているとおり十分に安全であるとみなされているため、設計基準を超える［事故］

の考慮に関する法的規制はない」と結論づけた[51]。例えば、日本の定期安全レビュープロセスでは、運転組織に対し、最新の手法を利用して解析を更新することを要求していなかった[52]。

東京電力のアクシデントマネジメントプログラムは、福島第一原子力発電所では交流電源が迅速に回復されると想定していた。東京電力はまた、直流電源及び高圧空気など、その他の主要なユーティリティが、計装に電力を供給し、弁の操作を行うために常時利用可能であると想定した。プログラムと指針は、シビアアクシデントが複数の原子炉に同時に影響を及ぼす可能性、又はサイト外のインフラが激しく破壊されたために外部からの支援を受けることが難しいことについては取り扱わなかった。このアプローチは、当時の典型的な国際的慣行に一致していた。事故は、設計基準を超える状態に置かれたある種の系統の操作は、基本安全機能を維持するためには、運転員の側で例外的に高いスキルを必要とすることを示した。

福島第一原子力発電所で実施されていたアクシデントマネジメントガイダンスは、緊急時操作手順及びシビアアクシデントマネジメント指針を含めて、運転員が使用するための一連の文書からなっていた。アクシデントマネジメント指針は、緊急時対応組織内の東京電力技術支援スタッフにとって利用可能であった。これらの文書は、全体として、シビアクシデントを含め、設計基準事故と設計基準を超える事故への対応を取り扱っていた。電源の欠如とプラント状況に関する十分な情報の不足によって、運転員は展開していく事象に有効に対応することが困難であった。アクシデントマネジメント指針は、運転員が原子力発電所の状況を判定するための主要パラメータ表示に必要な計装の喪失という不測事態を取り扱っていなかった。さらに、指針は、全ての安全関連配電系統、及びその後多くの従属安全系が動作不能になった場合に、事故に対処するための勧告を含んでいなかった。

人員は、長期的全交流電源喪失の状態で、又は情報が限られているか、あるいは情報がない状態で、アクシデントマネジメント措置を実施するように訓練されていなかった。それにもかかわらず、運転スタッフは、事故が生み出した過酷な状況下で活動を適切に遂行した。しかし、プラントの状況に関する基本的情報が得られなかったこと、及び緩和措置をその場しのぎで実施しなければならなかったことにより、対応が妨げられた。規制枠組みにシビアアクシデントマネジメント要件が含まれていなかったことも、東京電力の準備不足につながっていた。原子力安全委員会は、1992 年にアクシデントマネジメントに関する指針を発出し[23]、同年には通商産業省（MITI）がアクシデントマネジメントのロードマップを発表した。通産省はまた、原子力運転組織に対し、当初の設計で考慮していたものより重大な事故に対処するための措置を取るよう求めた。しかし、これは義務的要件ではなく、事業者による限られた自主的活動にとどまった。2007 年の日本への IAEA の IRRS ミッションは、設計基準を超える事故に関する規制要件の必要性を提案し、原子力安全・保安院がこれらの事象の考慮に対する系統的アプローチを開発し続けること、及び確率論的安全評価とシビアアクシデントマネジメントの補完的使用について提案した[51]。同ミッションの提案は、この分野における更なる努力を喚起することにはつながらなかった。

2.2.5. 規制の実効性の評価

事故当時の日本における原子力安全の規制は、異なる役割と責任を有し相互関係が複雑な多くの組織によって実施されていた。安全上の問題に遅滞なく対応する方法につき拘束力のある指示を出す責任と権限がどの組織にあるのか十分に明確ではなかった。

規制上の検査プログラムは厳格に構成されており、規制当局が適時に安全を検証し潜在的な新しい安全上の問題を特定する能力が弱められた。

事故当時にあった規則、指針及び手順書は、幾つかの重要な分野、特に定期安全レビュー、ハザードの再評価、シビアアクシデントマネジメント及び安全文化に関して国際的慣行に完全に沿うものではなかった。

事故当時日本で適用されていた原子力安全の法的枠組みの中で、政府は主要法を制定し、これらの法律は下位法と省令及び規則によって補足されていた。事故当時の法的及び規制枠組みの一般構造を図 2.8 と図 2.9 に示す。事故当時の日本の規制構造は、多数の政府省庁及びその他の原子力安全に対する責任を負う組織からなっていた。この構造は、1974 年の原子力船むつの放射線漏れ事故と、1999 年の東海村の JCO 施設での臨界事故を受けて 2 回改訂されたが、役割と責任の明確性に関連する幾つかの根本的な問題は解決されなかった[53, 54]。2007 年に IAEA の IRRS ミッションは、設計基準を超える事故の処理に関する規制、及び日本の規制制度における原子力安全・保安院と原子力安全委員会の役割と責任の明確化など、多数の規制面を改善、改良及び明確化する必要性を提案した[51]。

経済産業省（METI）が、原子力開発及び利用に関する政策、並びに商業原子力施設の規制に対する責任を担っていた。経産省内で、資源エネルギー庁（ANRE）が、原子力推進を含めて、国内エネルギー供給を監督する責任を担っていた。原子力安全・保安院は、2001 年に資源エネルギー庁に付属する特別機関として設置され、原子力安全規制当局としての責任を与えられた。法律は、安全と推進の間で矛盾が起きた場合は、経産大臣は安全を優先すべきであると求めた。経産省はこの優先順位に基づいて国家戦略計画を策定し、IAEA の IRRS ミッションは 2007 年、原子力安全･保安院は規制に関する意思決定において資源エネルギー庁から事実上独立していると結論づけた。しかし、同ミッションはまた、経産省からの原子力安全･保安院の独立性を法律により明確に反映させることを提案した。

文部科学省（MEXT）も、原子力発電所、研究炉及びある種の原子力発電研究開発施設における放射線防護と核物質保障措置の監督を含め、規制責任を負っていた。同省は、放射線医学総合研究所（NIRS）と日本原子力研究開発機構（JAEA）の監督官庁でもあった。

内閣府に置かれ、総理大臣に直属する原子力安全委員会は、原子力規制の枠組みにおいて諮問と監督の両方の役割を担う独立機関であった。原子力安全委員会は、原子力安全･保安院が規制作業の中で使用する原子力安全関連の政策文書及び規制指針を策定及び発行していた。原子力安全委員会は、原子力安全･保安院に報告書の提出を要求する権限を法により与えられており、原子力安全･保安院の作業を監督した。原子力安全委員会には、原子力発電所の許認可申請の独立審査及び評価を実施し、原子力安全･保安院が下した結論を再確認するための独自スタッフもいた。IAEA の IRRS ミッションは 2007 年、原子力安全委員会に対する規制当局としての原子力安全･保安院の役割を明確にする必要があることを提案した。

原子力安全･保安院は、2002 年に承認された法律の下で 2003 年に設立された原子力安全基盤機構（JNES）によって補佐されていた[51]。原子力安全基盤機構の主要機能は、原子力施設の検査の実施、許認可取得者の定期検査の審査、原子力緊急時対応支援の提供、及び安全関連研究プロジェクトの調整からなっていた。規制当局がプラント安全問題を独立して特定できるようにするためには、包括的な検査プログラムが必要である。事故当時の日本では、原子力安全･保安院の努力にもかかわらず[56]、検査は厳格に構造化されており、種類と頻度は法律によって特定されていた。2011 年、原子力安全条約に対する日本の報告書は、事業者の安全管理活動は、原子力安全･保安院が承認した保安検査によって管理されていると述べた。原子力安全･保安院は、四半期ごとに検査を実施して、事業者の定期安全検査遵守を確認した。また、原子力発電所の構造物、系統及び機器に対する事業者の保守に焦点を当てて、13 カ月を超えない間隔で原子力安全･保安院と原子力安全基盤機構によって定期検査が実施された。この定期検査は、例えば、原子炉停止系、原子炉冷却材圧力バウンダリ、残留熱除去系、並びに格納容器系に属する安全上重要な構造物、系統及び機器に集中した。これらの規制手順は、事業者自身の原子力施設の巡回点検と保守管理、定期安全評価、及び原子力発電所の経年変化に関連する技術評価に加えて行われた。原子力安全･保安院が法的に定められた範囲を超えて検査を拡張する能力は限られており、原子力安全･保安院が欠陥及び逸脱を特定すること、及び教訓が得られるようにする能力は限られていた[51]。このアプローチは、規制検査の実効性を、安全問題を特定すること、並びに許認可取得者の活動の安全性及び要件遵守を検証することに制限した。

図 2.8.　事故当時の日本の原子力施設安全の法的及び規制枠組み[55]

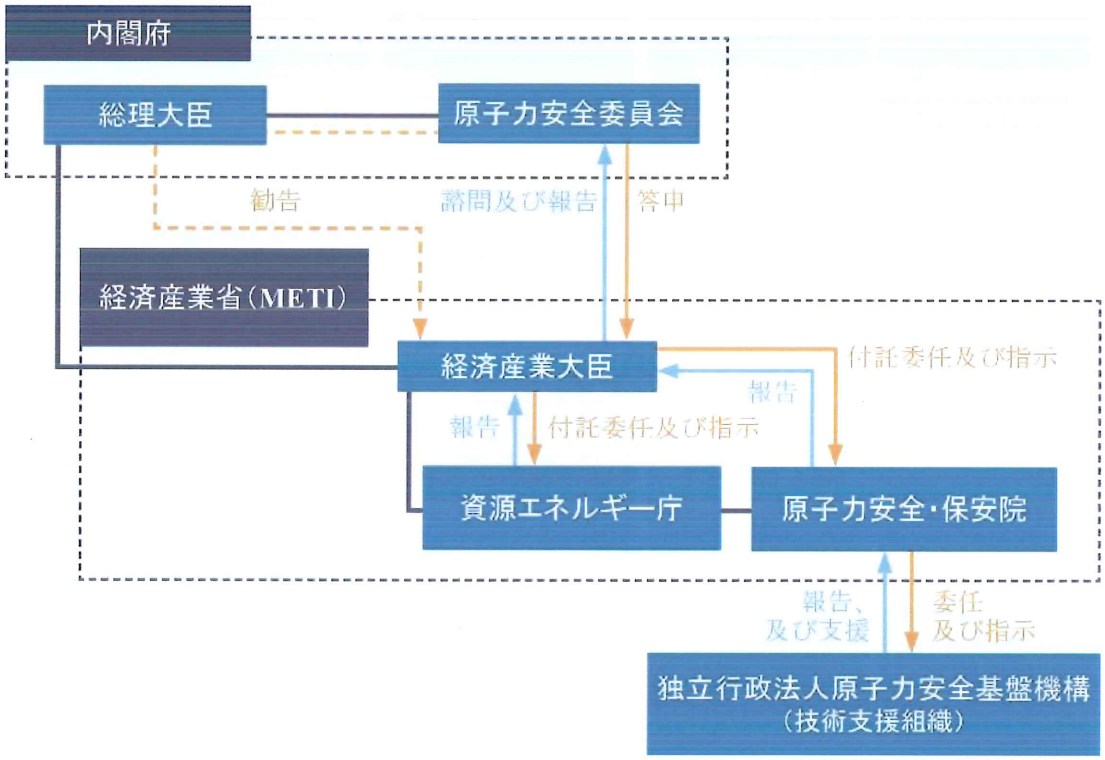


図 2.9.　日本政府における原子力安全・保安院の位置

一連の指針は、原子力安全委員会によって発行され、実際には要件と見なされた[34]。これらの指針は、専門家・学術団体が発表した合意基準によって補足された。しかし、一部の主要分野の規制と指針は、事故当時の国際的慣行に完全には一致していなかった。最も顕著な相違は、定期安全レビュー、ハザードの再評価、シビアアクシデントマネジメント及び安全文化に関連していた[52, 57, 58]。

定期安全レビューは、許認可取得者と規制当局が新しい情報と現行の基準及び技術に照らして、設計と外部ハザードを再検討する公式メカニズムである[52]。日本では、2003 年に発行された規制により、10 年間隔の定期安全レビューが要求されたが[51]、対象範囲が限られており、また、外部ハザードの再検討を要求していなかったことから、国際的慣行と完全に一致するものではなかった[51, 52, 58]。

IAEA の IRRS ミッションは 2007 年、原子力安全･保安院が安全規制の策定に主要な貢献をする立場にあるべきと提案した。また同ミッションは、原子力安全･保安院には検査プログラムを柔軟に変更して実効性と焦点を最適化する能力、及び自由裁量で選んだ場所と時間に安全検査を実施できる能力が必要であると提案した[51]。IAEA の IRRS ミッションはまた、規制上の懸念を幹部レベルに直接伝達するため、原子力安全･保安院が原子力産業界及び事業者と率直で開かれた関係を築くことを提案した。

新しい規制当局の設置

2012 年 9 月、原子力規制委員会（NRA）が設置された[59]。原子力規制委員会は、人と環境を防護するための新しい規制を策定することを目指して、安全指針及び規制要件の検討を実施した。2013 年、原子力発電所に関する新しい規制要件が施行された。深層防護概念に基づき、第 3 レベルと第 4 レベル及び共通原因による全ての安全機能の同時喪失の防止に重点が置かれた。地震、

津波、及び火山噴火・竜巻・森林火災などその他の外部事象の影響に関するこれまでの想定が再評価され、これらの外部事象に対する原子力安全のための対策が検討された。内部火災及び内部溢水に対する対策、及び全交流電源喪失の可能性に対処するための所内及び外部電源の信頼性の強化についても検討された。

さらに、炉心損傷、格納容器の損傷、及び放射性物質の拡散に対するシビアアクシデント対応のための対策、使用済燃料プールへの注水のための措置強化、航空機墜落に対する対策、及び緊急時対応建屋の設置も求められた。

福島第一原子力発電所の事故を踏まえた新しい規制要件の例には以下が含まれる。(1)耐震／耐津波の要件強化、(2)設計基準の要件強化又は新要件の導入、及び(3)シビアアクシデント対策に関する新要件の導入[60]。

従来様々な政府組織に割り当てられていた役割と責任は、原子力規制委員会に統合された。原子力規制委員会は、放射線医学総合研究所と日本原子力研究開発機構の活動の一部に対する管轄権を保有する。主要な原子力安全技術支援組織である原子力安全基盤機構は、2014 年 3 月 1 日に原子力規制委員会に統合された。

原子力規制委員会は、2013 年 12 月に強化された IAEA 安全基準に沿った定期安全レビューを採用した。同制度は、許認可取得者が原子炉の安全を包括的に評価し、定期検査の終了から 6 か月以内に以下を含む結果を原子力規制委員会に提出することを求めている。

— 規制要件の遵守
— 自発的に安全を改善するための手段
— 改善のための安全裕度の評価及び検討、及び確率論的リスク評価
— 上記の結果に基づく包括的な再評価及び安全改善のための行動計画

日本は継続的、透明、かつ開かれた学習プロセスを通じて、原子力安全の強化及び原子力規制委員会の独立した原子力規制当局としての能力強化を目指して、2015 年の末頃に IRRS ミッションを実施するよう IAEA に要請した。

2.2.6. 人的及び組織的要因の評価

事故以前、日本には、原子力発電所の設計と実施されている安全対策は、確率が低く影響が大きい外部事象に耐えるために十分に頑強であるという基本的な想定があった。

日本の原子力発電所は安全であるとの基本的想定のために、組織とその人員が安全のレベルに疑問を提起しない傾向があった。原子力発電所の技術設計の頑強性に関する利害関係者間で強化された基本的想定は、安全上の改善が迅速に導入されない状況をもたらした。

福島第一原子力発電所の事故は、発電所の脆弱性をよりよく特定するためには、人、組織及び技術の複雑な相互作用を考慮する統合的なアプローチをとることが必要であることを示した。

事故の前には、気付かれていない低確率・高影響の外部事象について十分な考慮が払われていなかった。その一因は、原子力発電所の技術的設計の頑強性は、仮想リスクに対して十分な防護を与えているという日本での基本的想定が、長年にわたって補強されてきたことにあった。したがって、福島第一原子力発電所の事故につながった事象は、事業者、規制当局、及び政府の基本的想定の外にあった。これらの基本的想定は、原子力発電所の運転と規制に直接関わる者にとどまらず、広範囲の利害関係者の決定と行動に影響を与えた。

囲み 2.9.　安全文化

国際原子力安全グループ（INSAG）の出版物である INSAG-4 の中で、安全文化は次のように定義された。「最高の優先度をもって、原子力発電所の安全問題がその重要性にふさわしい注目を受けることを確立する、組織及び個人の特性と姿勢を集約したもの」[61]。

IAEA 安全基準シリーズ No.GS-G-3.5[62]と安全報告書シリーズ No.11[63]では、安全文化はそれ自体が組織全体の文化の一部であり、後者は当該組織に特性を与える、共有する価値観、姿勢及び行動パターンの混合からなることを明確にしている。

組織は通常、安全文化を発展させ強化する過程で、幾つかの段階を経る。IAEA 安全報告書シリーズ No.11 は、次の 3 つの段階を特定している。

(1) 安全はコンプライアンス主導であり、主に規則及び規制に基づいている。この段階では、安全は技術問題として見られ、外部から課せられた規則及び規制の遵守が安全にとって十分であると見なされる。

(2) 良好な安全実績が組織の目標となり、主として安全目標の観点から取り扱われる。

(3) 安全は、誰もが貢献できる改善の継続的プロセスと見なされる。

実際には、この 3 つの段階は区別されておらず、どの組織においても安全文化強化の過程で、ある部分が他の部分より先行することがある。

基本的想定は、原子力安全･保安院が十分な権力を行使しないことに影響を及ぼし、このため、原子力安全･保安院は原子力安全に関するその他の想定に疑問を唱えることができなかった。原子力安全･保安院は、適切な規制枠組みの欠如によって、また明示的な法的制約によって、監視の役割を果たすことが妨げられていた[6, 51]。例えば、IAEA の IRRS ミッションは 2007 年、原子力安全･保安院の検査官が許認可取得者の施設に自由にアクセスして検査を行うことができず、一定の時期だけ検査の実施が許されていることを見出した。技術的設計の頑強性が仮想リスクに対する十分な保護を与えるという基本的想定により、原子力安全･保安院は概してあまり統合的ではなく、より受動的な態度で業務に取り組み、時として短期的活動に集中し、IAEA の安全基準の考察と適用のようなより根本的かつ長期的な問題に取り組まなかった。原子力発電所は基本的想定に反して安全ではないという印象を公衆に与えかねないという懸念のため、規制が更新されなかったり、複雑な緊急時演習が実施されなかったりすることもあった[5]。

原子力発電所は安全であるという同様の基本的想定は、東京電力の対策にも影響を及ぼし、シビアアクシデントを回避するための同社の発電所の技術的特性の能力に自信を与えることになった。これは、東京電力が 2011 年 3 月の事故を緩和するために十分準備できていなかったことを意味する[6, 7, 65]。原子力事故を引き起こす洪水のリスクは基本的想定の枠外にあったため、シビアアクシデントマネジメントに関する最新の国際指針には必ずしも従っていなかった[66]。基本的想定は、複数ユニットの全交流電源喪失につながり得る共通原因故障の可能性も除外していた。

囲み 2.10.　基本的想定 [64]

安全文化を全体として理解するためには、安全に適用される場合の文化概念の 3 つのレベルを形成するアーチファクト（人工物）、支持される価値観及び基本的想定が特定されなければならない。3 レベル式モデルを特定の組織に適用した場合、当該組織の独自性を反映し、アーチファクト、支持される価値観及び基本的想定の間で論理的関連性を築くことができる。下記の実例は特定の組織から得られたものではないため、論理的関連性は明白ではない。

アーチファクトは、観察するのは最も簡単であるが、その意味を解釈するのは最も難しい。支持される価値観に関する知識は意味の解釈に役立つが、アーチファクトのレベルで構成要素の意味が明白になるのは、基本的想定が理解された時に限られる。

アーチファクトと行動：アーキテクチャ、挨拶儀礼、服装、敬称－可視である。

支持される価値観：戦略、目標、哲学－引き出すことができる。

基本的想定：人間性、人が尊敬される基盤－無意識に抱かれ、通常は暗黙的である。

基本的想定は文化の最も深いレベルにある。基本的想定は、非常に当然と考えられ、ある文化グループのほとんど人々が意識的にではなく受け入れている基本的信条である。いかなる文化も、理解するためには、こうした働いている基本的想定を掘り起こすことが必要である。組織の場合、基本的想定は、組織の歴史、並びに設立者及び組織を成功に導いた主要指導者の価値観、信条及び想定も反映する。基本的想定は、議論されたり対立されたりすることが殆どなく、変更が極めて難しい。

囲み 2.11.　安全への体系的取組 [67]

安全への体系的取組は、体系の全ての関連要因内及び要因間—個人的要因（例えば、知識、思考、決定、行動）、技術的要因（例えば、技術、ツール、機器）、及び組織的要因（例えば、マネジメントシステム、組織構造、統治、資源）—の動的相互作用を考慮することによって、体系全体を取り扱う。

安全への体系的取組は、この複雑な相互作用の体系を全体として取り扱うことによって機能する。例えば、原子力発電所においてこれらの相互作用の中で考慮すべき重要な要因として、知識、決定、思考、感情及び行動などの個人に関連するものが挙げられる。技術的要因には、原子力発電所の物理的側面と運転に使用する一連の技術的ツール及び機器が含まれる。組織的要因には、マネジメントシステム、組織構造、発電所の統治、及び人的資源と財源が含まれる。全ての個人的、技術的及び組織的要因の相互作用を考慮すると、原子力発電所の運転の複雑性と非線形性が明らかになる。積極的にリスクを低減又は排除するためには、これらの全ての要因の弱点と強みが互いに影響を及ぼす方法をより良く検討する必要がある。

関連組織及びそのスタッフが原子力安全に関する基本的想定に疑問を唱えなかった、又は再検討しなかったという事実は、安全文化の不足を示している。囲み 2.9 で特定したように、安全文化プログラムの 3 番目の段階は、継続的な改善のプロセスを持つ必要性を特定しており、これには原子力安全の妥当性の定期的再検討が含まれるべきである。基本的想定に疑問を呈する 1 つの手段は、原子力安全への体系的アプローチを採択し、人的、組織的及び技術的要因の全範囲の相互作用の複雑性を理解することである。これらの相互作用に十分に取り組まなかったことが、事故の寄与因子の 1 つとなった。基本的想定が気付かれないままでいたからである。

利害関係者の大多数が発電所の既存の安全施設の妥当性に疑問を唱えないという傾向が、発電所の技術設計の頑強性と既存の安全対策は発電所を防護する上で十分であるという想定を強めた。これは、必要な安全性向上が積極的かつ迅速に行われないことにつながった[5-7]。

事故の早期段階で直接対応した運転員は、極限的な状況でこうした対応を行った。運転員の行動に付随する不安とストレスは、家族の安全又は自宅の状況に関する情報がしばしば得られないという事実によって更に悪化した。サイトにいた人達は、事故がどのように進行するのか分からず、それが重大な不確実性を生んだ。それにもかかわらず、現場の職員達は人と環境を防護するためにできる全てのことを行った。運転員が直面した状況は、インフラが重大に損傷した国家的危機の時に、複数ユニットの事故に対処するという前例のないものであった。これは物理的及び心理学的観点から見て極めて困難な作業環境であった。

全ての利害関係者の組織を横断し、及び各組織内部の様々なレベルの間における人的、組織的、及び技術的要因の相互作用は、組織の安全文化のより広い範囲内で起こり、こうして組織の安全文化を反映する。人的、組織的及び技術的要因を分析する安全への体系的取組により、組織は予想外の事象に対してより良く準備することができる。原子力安全は、人々の姿勢及び行動にもよる[67]。安全に関する基本的想定に疑問を唱えないことにつながる人的及び組織的要因は、組織と個人が原子力安全を不注意に損なうような決定を下し、行動を起こすことを招くかもしれない。このような基本的想定に留意し、それが原子力安全に与える影響を理解しようと努めることが重要である。

2.3. 所見と教訓

事故についての原子力安全の考慮の評価結果として、幾つかの所見と教訓がまとめられた。

— 自然ハザードの評価は、十分に保守的である必要がある。原子力発電所の設計基準の設定において、主として歴史上のデータを考慮することは、極限的な自然ハザードのリスクを特徴づける上で十分ではない。包括的なデータが利用可能な場合でも、観察期間が比較的短いため、自然ハザードの予測には大きな不確定性が残る。

  発生が非常に低確率の極端な自然事象は、重大な影響を生じることがあり、また、極端な自然ハザードの予測は、不確実性が存在するために依然難しく、論争を招く。さらに、このような予測は、より多くの情報が入手可能になり、解析方法が改善されるにつれ、原子力発電所の供用期間中に変化することがある。したがって、信頼できるハザードの予測を確保するため国内及び国外の入手可能な全ての関連データを使用すること、異常自然事象に対する信頼できる現実的な設計基準を定めること、及び十分な安全裕度をもって原子力発電所を設計することが必要である。

— 原子力発電所の安全は、知見の進歩を考慮して定期的に再評価する必要があり、必要な是正措置又は補完措置が速やかに実施される必要がある。

  福島第一原子力発電所の定期安全レビュープログラムは、規制要件に基づいた安全性向上につながらなかった。東京電力は、新しい情報とデータを含めて、知識の進歩を考慮しながら、自主的に再評価を行った。以前の予測を超えるハザードの修正予想値に直面した時には、修正値の精度を評価する一方で、新たなハザード予想値に対して暫定的是正措置を実施することによって、施設の安全性を確保することが重要である。新しいハザード予想値の精度が確認された場合、事業者と規制当局は、プラント安全を確保するため、このような高いハザードに対処する方法に迅速に取り組むためのスケジュールと包括的行動計画に合意する必要がある。

— 自然ハザードの評価は、それらが同時又は連続的に組み合わされて発生する可能性、及び原子力発電所に対するその複合的影響を考慮する必要がある。自然ハザードの評価は、原子力発電所の複数ユニットへの影響も考慮する必要がある。

  福島第一原子力発電所事故は、原子力発電所の複数ユニットに影響を及ぼす自然ハザードの複合の可能性を十分に研究する必要性を示した。事故緩和措置と回復措置を検討する

際には、自然ハザードが複合して発生することから生じる複雑なシナリオを考慮する必要がある。

— 運転経験プログラムは、国内及び国際の双方の情報源からの経験を含める必要がある。運転経験プログラムを通じて特定された安全の向上は、速やかに実施される必要がある。運転経験の利用は、定期的にかつ独立して評価される必要がある。

福島第一原子力発電所の運転経験評価プログラムは、国内又は国外の洪水が関与する経験を考慮した設計変更にはつながらなかった。IAEA 及び OECD 原子力機関の事象報告システムのような関連情報源を考慮しながら、運転経験の検討がプラント監視プロセスの標準的な一部になる必要がある。規制当局は、運転組織が安全性向上のために具体的行動をとっていることを確認するため、国内及び国外の運転経験の独立した検討を実施する必要がある。

— 深層防護の概念は引き続き有効であるが、この概念の実施は、内部及び外部のハザードに対する適切な独立性、冗長性、多様性及び防護によって、全てのレベルで強化される必要がある。事故の防止のみならず、緩和措置の改善にも焦点を当てる必要がある。

津波から生じた洪水が深層防護の最初の 3 つの防護レベルに同時に脅威を与え、設備・系統の共通原因故障を引き起こした。この状況に直面した際にも、運転員は、遅延はしたが効果的な緩和戦略を適用することができた。事故の防止と緩和に関連する深層防護の全ての層を、十分な独立性、冗長性、多様性及び防護によって強化し、外部又は内部ハザードから同時に脅威を受けないようにし、共通原因故障に陥らないようにする必要がある。深層防護概念の適用は、外部事象に対する脆弱性のいかなる変化も理解され、適切な設計変更が行われ、実施されることを確実にするために、原子力発電所の供用期間にわたって定期的に再検討される必要がある。極端な外部ハザードは、深層防護の複数のレベルを同時に危うくすることがある共通原因故障を引き起こす可能性があり、定期安全レビューにおいて取り上げられる必要がある。

— 設計基準を超える事故の際に必要な計装制御系は、発電所の必須の安全パラメータを監視し、発電所の運転を容易とするため、動作可能な状態を維持する必要がある。

福島第一原子力発電所の事故では、計装制御系の喪失により、運転員には実際のプラント状況についての指示がほとんどなかった。計装制御系の喪失は、シビアアクシデントの防止又はその影響の緩和の取組に深刻な影響を及ぼした。必要な計装制御系の範囲と種類は、使用済燃料プールを含めて、発電所の設計の特徴に従って、注意深く定める必要がある。系統は必要時に利用可能であることを確実にするために防護される必要がある。これは枢要設備の手動制御を可能にするよう戦略を改善する必要があることも示した。

— 設計基準状態及び設計基準を超える状態の双方で機能できる、頑強で信頼できる冷却系を残留熱の除去のために設ける必要がある。

福島第一原子力発電所では、運転員は最終的に、幾らかの遅延の後に、原子炉に注水するため可搬式設備を展開することができた。据付設備又は可搬式設備のいずれに基づく冷却系も、認定と試験を受けて機能することを確認し、必要な時に運転員によって展開できるようにしておく必要がある。

— 環境への放射性物質の大規模放出を防ぐため、設計基準を超える事故に対する信頼できる閉じ込め機能を確保する必要がある。

福島第一原子力発電所では、格納容器ベントの失敗、及びその後の水素爆発による原子炉建屋の破損が、環境への放射性物質の大量放出につながった。閉じ込め系の健全性を維持することを目的とする設備の設計において全ての可能なハザードが考慮されることを確実にするよう、閉じ込め機能が評価される必要がある。

— 発電所が該当する設計基準を超える事故に耐える能力を確認し、発電所の設計の頑強性に高度の信頼を与えるため、包括的な確率論的及び決定論的安全解析が実施される必要がある。

安全解析は、設計基準を超える事故への対応戦略を評価し策定するために使用することができ、決定論的手法と確率論的手法の両方の使用を含み得る。福島第一原子力発電所に関して実施された確率論的安全評価研究は対象範囲が限られており、内部又は外部の発生源からの溢水の可能性を考慮しなかった。これらの研究が限定されていたことが、運転員に利用可能なアクシデントマネジメント手順の対象範囲が限られることにつながった。

— アクシデントマネジメント規定は、包括的で十分に計画され、最新のものである必要がある。同規定は、起因事象と発電所の状態の包括的な組合せを基に導かれる必要があり、複数ユニットの発電所では複数のユニットに影響する事故にも備える必要がある。

福島第一原子力発電所の運転員に利用可能なアクシデントマネジメント手順は、複数のユニットでの事故の可能性を考慮しておらず、完全な電源喪失に関するガイダンスも備えていなかった。アクシデントマネジメント規定は、決定論的手法と確率論的手法を併用して実施されたプラント固有の解析に基づくことが必要である。アクシデントマネジメントガイダンス及び手順は、複数のユニットで同時に、及び使用済燃料プールで起こる事象の可能性を考慮する必要がある。これらはまた、通信、輸送及びユーティリティの深刻な欠損を含め、地域インフラ崩壊の可能性も考慮に入れる必要がある。アクシデントマネジメント規定は、国際社会からの利用可能な最良のガイダンスも考慮し、新しい情報を考慮するため定期的に更新されるべきである。

— 訓練、演習及び実地訓練は、運転員が可能な限り十分な備えができるよう、想定されるシビアアクシデント状態を含める必要がある。これらの訓練は、シビアアクシデントマネジメントにおいて配備されるであろう実際の設備の模擬使用を含む必要がある。

福島第一原子力発電所の運転員は、1 号機の非常用復水器や低圧注水の代替水源としての消防車などのシステムを、手動で操作する方法について特別に訓練を受けていなかった。プラント状況に関する情報が限られ、重要な安全パラメータに関する情報が全くない、長期的な全電源喪失の状況下で、行動をとるための人員訓練に特別な注意が払われる必要がある。スタッフの訓練、演習及び実地訓練は、同一サイトの複数のユニットで事故が同時発生する場合を含めて、シビアアクシデントの進行を現実的にシミュレートする必要がある。訓練、演習及び実地訓練には、サイト内のアクシデントマネジメント要員のみでなく、事業者、地元、地域及び全国レベルの全てのサイト外の対応者も参加する必要がある。

— 原子力施設の安全の実効的な規制監督を確保するためには、規制当局が独立しており、法的権限、技術的能力及び強い安全文化を有することが不可欠である。

原子力安全・保安院は、規制対象施設での検査を含めて、必要な措置を取るための十分な権限を持っていなかった。規制当局は、施設の供用期間にわたって、安全に関する独立した決定を下せることが不可欠である。このような独立した意思決定を確保するため、規制当局は能力があり、十分な人的資源、適切な法的権限（運転を一時停止する権利及び／又は運転組織に安全改善を課する権利を含め）及び適切な財源を所有しなければならない。規制当局は、新しい安全情報を踏まえて検査プログラムを適合させる権限を持つ必要がある。規制当局はまた、原子力施設の安全性を評価するための国内規制要件及び対応する指針が、科学技術の発展、運転経験、並びに国際基準及び慣行に従って、定期的に改正されることを確保できなければならない。

— 安全文化を推進し強化するためには、個人と組織が原子力安全に関する一般的な想定、及び原子力安全に影響する可能性がある決定と行動の意味に絶えず疑問を提起し、再検討する必要がある。

これは、個人と組織が、原子力安全に関して共有する想定の性質、境界及び潜在的脅威を特定するために、疑問を持つ姿勢を抱くことによって達成できる。原子力安全に関連する問題、並びにそれが決定及び行動に及ぼす重要性と影響に関して、組織内及び様々な組織間で継続的対話を制度化することが不可欠である。安全文化の定期的評価は、基本的想定に関する考察と対話を促進することに役立ち得る。

— 安全に対する体系的なアプローチは、人的、組織的及び技術的要因の間の相互作用を考慮する必要がある。このアプローチは、原子力施設の供用期間全体を通じてとられる必要がある。

福島第一原子力発電所の事故は、原子力安全に関する基本的想定が気付かれないままでいる可能性があるため、人間、組織及び技術の複雑な相互作用が関与するシステムの脆弱性を特定するのは難しいことを示した。通常運転と事故状態の双方において、全体的システムの構成要素がどのように機能し、相互作用するかを理解するためには、人的、技術的及び組織的考慮を含む体系的アプローチが必要である。

3. 緊急時への備えと対応

このセクションでは、2011 年 3 月 11 日の事故発生当初からの主な事象と対応措置について記す。事故以前に日本で整備されていた国内の緊急時への備えと対応システム、また、緊急時への備えと対応のための国際的な枠組みについても考察する。

事故以前に存在していた原子力緊急事態への対応準備に関する主な国際的要件を囲み 3.1 にまとめる。

囲み 3.1. 事故以前の IAEA 安全基準における原子力緊急事態への対応準備のための主な要件

事故以前に有効であった IAEA 安全基準[68,69]で要求されていたのは以下の事項である。

(1)備えと対応体制[63]の整備に当たっては、全てのハザードを考慮したアプローチをとる。(2)観測可能な条件及び測定可能な基準（緊急対策のレベル）に基づく緊急事態の分類システムを策定し、事業者による緊急事態の分類に続いて速やかに、あらかじめ定められた公衆の緊急防護対策を（事前に画定された区域内において）開始する。(3)確率の低いものを含め、考えられる全ての範囲の緊急事態のための緊急時区域を策定する。(4)緊急時区域内、及び必要に応じてそれ以遠における防護対策実施のための体制を確立する。(5)公衆の防護対策（避難、屋内退避、ヨウ素剤による甲状腺ブロック、移転、食品及び飲料水の摂取及び流通の制限、公衆モニタリング及び除染）に関する決定のための国内基準を、様々な要因（財政的及び社会的側面など）を考慮しつつ、線量と計測可能な量（実用上の介入レベル）として定める。(6)新たなハザードを迅速に特定し、対応するために戦略を改良すべく、放射線モニタリング及び環境サンプリング・評価を行うための体制を整える。(7)緊急時への備えの段階において、特別な手配が必要となる緊急時区域内の特定住民グループ（障がい者、入院患者など）を特定する。(8)緊急作業者の任務の内容に応じた線量基準の指定、緊急作業者の指定とその防護の確保、線量の管理、制御及び記録のためのガイダンスの設立、専用の防護装備、手順及び訓練の提供など、緊急作業者のための体制を整える。(9)緊急時段階から長期復旧作業及び通常の社会・経済活動の再開への移行に向けて、明確な責任分担、情報の共有及び伝達、緊急事態の結果の評価、緊急時に課された制限やその他の措置の解除に関する決定のための正式手続きの策定、これらに関連する原則及び基準の策定と公衆との協議などについての計画を立てる。(10)緊急時対応計画の一環として、緊急時への備えと対応のための役割、責任及び権限の割当てをあらゆるレベルで明確化する。(11)事業者と対応措置に取り組む組織の間で、組織間の関係及び接触を確立し、あらゆるレベルで緊急時対応を調整するための行動規約を用意する。(12)ハザード評価に基づいて、あらゆるレベルで緊急時計画及び手順を策定・調整する。(13)機材、計測器、備品、装置、通信システム、特定の機能を有する設備及び関連文書の提供を通じるロジスティクス支援を準備する。これは、緊急対応時における放射線、作業及び環境に関して想定される条件の下でのこれら物資及び設備の動作可能性及び利用可能性に関する事前確認を含む。(14)訓練、実地訓練及び演習を計画し、実施する。(15)全ての備品、装置、通信システム、設備、関連文書等が常に最新のものに保たれ、利用可能であり、緊急時の使用に際して機能を果たすことを確保するための品質保証プログラムを策定する。

原子力緊急事態における防護対策の種類を囲み 3.2 にまとめる。

[63] 「体制」ー原子力又は放射線緊急時への対応に必要と特定される機能又は任務を果たすための能力を提供するために必要とされる基盤的要素の総体。これらの要素には、権限と責任、組織、調整、人員、手順、施設、機材及び訓練が含まれ得る。

囲み 3.2.　原子力緊急事態における防護対策の種類 [48, 69]

「緩和対策」は、サイト内外で緊急対策が必要となる放射性物質の放出又は被ばくをもたらすことになる事態が進展する可能性を減じるため、又は、サイト内外で緊急対策が必要となる放射性物質の放出又は被ばくをもたらす可能性のあるプラントの状態を緩和するために直ちに講じられる対策である。

「緊急防護対策」は、有効であるためには速やかに（通常は数時間以内に）講じられなければならない対策である。原子力緊急事態における最も一般的な緊急防護対策は、避難、屋内退避、ヨウ素剤による甲状腺ブロック、汚染されている可能性のある食品の摂取制限及び個人の除染である。

「早期防護対策」は、有効であるためには数日又は数週間以内に講じられなければならない対策である。この対策は、緊急事態の終息後も、長期にわたるものとなる可能性がある。緊急防護対策とは異なり、この対策は一般に、放射性物質放出の特性や環境中への拡散を考慮して行われたモニタリングの結果に基づくことが可能である。早期防護対策の例としては、移転、食品及び飲料水に関する摂取制限、農業に係る管理が挙げられる。

3.1.　日本における事故への初期対応

事故当時、国と地方レベルで原子力緊急事態と自然災害に対応するための別々の体制がとられていた。原子力緊急事態と自然災害との同時発生に対応するための調整された体制はなかった。

*原子力緊急事態に対応する体制は、原子力発電所において関連の有害な状況（例えば、**5** 分以上の全交流電源の喪失、あるいは原子炉を冷却するための全ての機能の喪失）が検知された場合、原子力発電所から地元自治体及び国に通報がなされることになっていた。その場合、国はその事象を評価し、「原子力緊急事態」[64]に該当するか否かを判断することになっていた。事象が原子力緊急事態に該当する場合、その旨の宣言が国レベルで発出され、線量予測に基づいて必要な防護対策に関する決定が行われることとされていた。*

*福島第一原子力発電所からの報告に基づき、総理大臣は **3** 月 **11** 日夜に原子力緊急事態を宣言し、公衆のための防護措置に関する指示を発出した。国レベルの対応は、東京の総理大臣官邸において総理大臣と上級幹部によって主導された。*

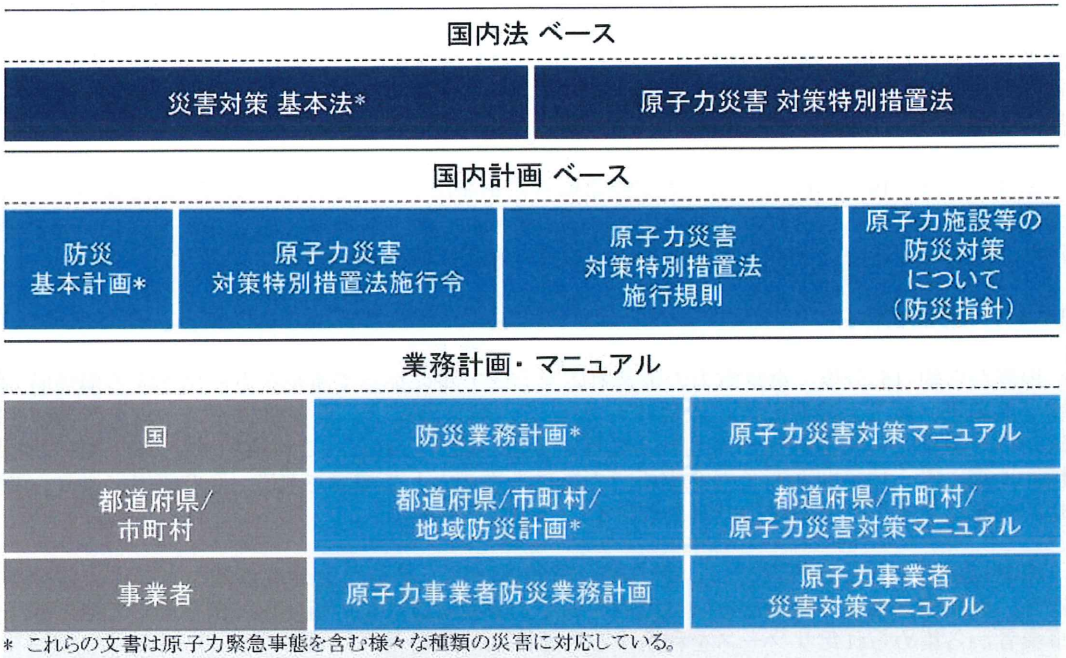
地震と津波の影響及び放射線レベルの上昇により、サイト内の対応は極めて困難となった。直流及び交流電源の喪失、サイト内の対応を阻む膨大な量の瓦礫の存在、余震、更なる津波の警報と放射線レベルの上昇により、多くの緩和措置が適時に実施できなかった。国はサイト内の緩和対策に関する決定に関与した。

*福島第一原子力発電所から **5 km** に位置する緊急時オフサイトセンターの活動開始は、地震と津波によって生じた甚大なインフラの損害のため、困難であった。事故発生から数日内に、放射線状況の悪化のため、オフサイトセンターからの避難が必要となった。*

日本における国の緊急時への備えと対応システムの主な法的根拠は、災害対策基本法[70]と原子力災害対策特別措置法[19]で定められていた（囲み 3.3）。

[64]「原子力災害対策特別措置法」（平成 11 年法律第 156 号。平成 18 年法律第 118 号までの改正を反映）。以下「原災法」という。

囲み 3.3.　事故当時日本において原子力緊急事態に対する国の緊急時への備えと対応システムを定めていた主要文書



* これらの文書は原子力緊急事態を含む様々な種類の災害に対応している。

3.1.1.　通報

原災法[19]第 10 条では、5 分以上にわたる全交流電源喪失など、あらかじめ定められた「特定事象」が発生した場合[55]には、原子力発電所が地元自治体及び国に通報を行うことが求められていた。原災法第 15 条に基づき、原子炉の冷却機能の全面喪失など、あらかじめ定められた一定の基準が満たされた時、又はそれを超えた時には、「原子力緊急事態」に関する報告が出されることとなる[21, 71]。

第 15 条に基づく事象の報告は、第 10 条に基づく事象の通報に続くことが想定されていた[72]。通報を受けて、国は当該事象が「原子力緊急事態」に該当するか否かについて評価及び判断を行う。該当すると判断された場合には、総理大臣に対して状況説明が行われ、「原子力緊急事態」の宣言案が示される。総理大臣は、「原子力緊急事態」の宣言を決定し、国民に対する防護対策に関する命令[65]及び／又は勧告を発令する責任を負う[73]。

事象が原災法第 10 条及び／又は第 15 条に該当する場合に講じられるべき主な対策を図 3.1 にまとめる[19, 70, 73-75]。

福島第一原子力発電所を浸水させた津波が到達したのは 2011 年 3 月 11 日 15 時 36 分であった[10]。1 号機から 5 号機についての、原災法[19]第 10 条に基づく発電所による「特定事象」の通報は、3 月 11 日 15 時 42 分に国及び地元自治体に対して送付され、16 時 45 分に、1 号機と 2 号

[65] 原災法[19]及び災害対策基本法[70]は、防護対策を発令する場合に「指示」及び「勧告」という表現を使っている。「指示」は強制的なものであり、国民はそれに従うことが要求される。「勧告」はあくまで提案であり、したがって強制力は持たない。この報告書では、明確を期すため、「指示」と等価であるものとして「命令」という表現を使う。

機における事象が同法第 15 条に基づく「原子力緊急事態」にあたるとの報告が続いた[3, 8, 76, 77]。

第 10 条に基づいて通報された「特定事象」の内容は、1 号機から 5 号機までの「全交流電源喪失」であった[76]。第 15 条に基づいて「原子力緊急事態」として報告された事象の内容は、当初、1 号機と 2 号機の「非常用炉心冷却系の注水不能」であった[77]。国は、通報を受領した後、状況について評価し、それが「原子力緊急事態」であると判断した[6]。

総理大臣は、19 時 03 分に原子力緊急事態宣言を発出した。これは、第 15 条に基づく「原子力緊急事態」であるとされた 1 号機と 2 号機の事象について福島第一原子力発電所から通報を受けた 2 時間以上後で、サイト外関係者による長い協議に続くものであった[3]。

3.1.2. 緩和対策

地震から約 15 分後、東京電力の災害対応マニュアルに従って所長をトップとする緊急時対策室が福島第一原子力発電所内に設置された[6, 8]。同対策室は、自家電源やフィルタ装置付き換気システムなどの特別設備が施された免震重要棟に設けられた。この建屋は、2007 年の新潟中越沖地震に伴う柏崎刈羽原子力発電所での経験を教訓として建設され[66]、その使用により、事故対応の間、サイト内での緩和措置を続けることができた[8]。

事故以前に存在した体制では、所内緊急時対応室は、必要な場合東京電力本社に支援要請を送り、東京電力自身の能力あるいは国内の原子力事業者間の協力協定[8, 75]を通じて他の原子力事業者から集められたリソースを利用することになっていた。

福島第一原子力発電所からの要請を受けて、サイト内での緊急時対応を支援するために、国内の他の原子力発電所（東京電力以外）から追加のスタッフと機材が集められた。しかし、事前計画の不十分さに加え、地震と津波により輸送インフラに生じた甚大な被害のため、支援の実効性が損なわれた。例えば、機材の要請において、必要とされるものについて適切な仕様が含まれていなかった場合、（取付け部やコネクタが合わない等）発電所の設備に適合しない機材の調達につながった[8]。

[66] この建屋の建設は 2009 年 3 月に始まり、2010 年 7 月から運用が開始された。

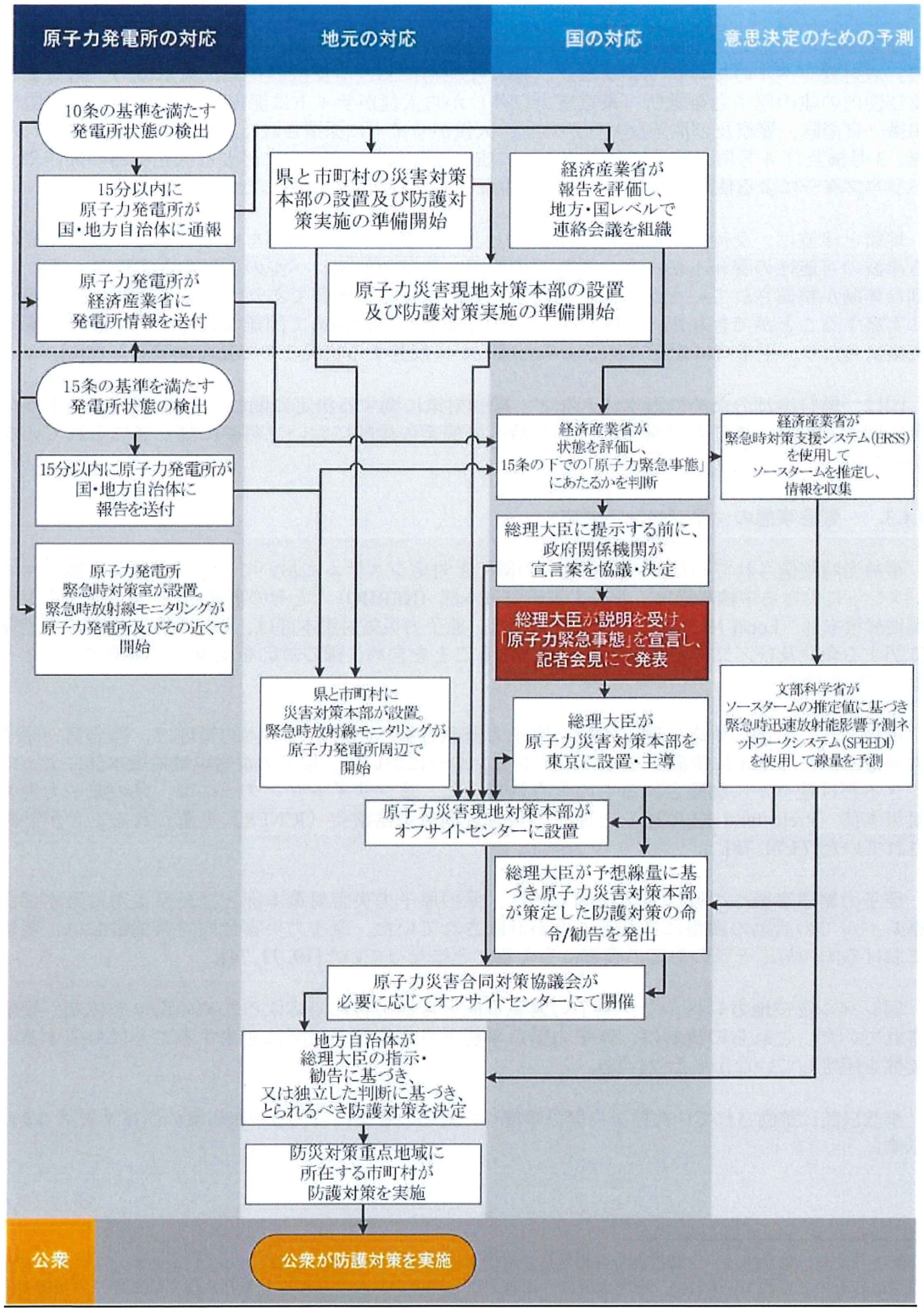


図 3.1.　事故以前に計画されていた原災法第 10 条及び／又は第 15 条に事象が該当する場合の主な対策（文献[19,70,73-75]による）

緊急事態に対応して、電源やモニタリング機器の復旧、原子炉への冷却水の注入、瓦礫の撤去、放射線レベルのモニタリングなど、様々な任務における支援のため、東京電力、請負業者及び国内の他の原子力発電所（東京電力以外）から人員がサイトに派遣された[8]。行政機関や組織—自衛隊、警察及び消防など—からも、人員がサイトに派遣された。これらの人員は、1 号機、3 号機及び 4 号機の使用済燃料プールに注水や散水を行うために必要な大型機器の操作や、ヘリコプターによる使用済燃料プールの監視などを含む活動を支援した[3, 6, 8]。

地震と津波は、交流及び直流電源の喪失とともに膨大な量の瓦礫をもたらした。余震や更なる津波の可能性の警報もあった。これらの要因、及び放射線レベルの上昇や水素爆発、更に詳細な体制が整備されていなかったことから、対応は極めて困難であり、多くの緩和対策は適時に実施することができなかった[8]。サイトの作業者たちは極めて困難な条件の下で緩和対策の実施に当たり、平常時に想定されるよりもはるかに疲弊する状況の中で長時間勤務した[8]。

国は、燃料冷却のための海水注入など、緩和対策に関する決定に関わった[6, 7]。このような点に関する役割、責任及び権限は、緊急時への備えの段階において明確に割り当てられていなかった。

3.1.3. 緊急事態のマネジメント対応

事故当時整備されていた国の緊急時への備えと対応システムにおいて、原子力緊急事態のマネジメントにおける中核組織は、原子力災害対策本部（NERHQ）[67]とその事務局[68]、及び原子力災害現地対策本部（Local NERHQ）[69]とされていた。原子力災害対策本部は、地元自治体に対する避難に関する命令及び／又は勧告を作成・発出することを含め、国の対応を主導し、調整することとなっていた[19]。

現地における国の対応に関しては、原子力緊急事態への対応の全体的管理は、福島第一原子力発電所から 5 km に位置するオフサイトセンターにおいて、原子力災害現地対策本部によってできるだけ速やかに調整されるものとされていた。オフサイトセンターには、県の原子力災害対策本部（Prefectural NERHQ）と原子力災害合同対策協議会（JCNER）も置かれることが計画されていた[73,74, 78]。

原子力緊急事態への県の対応に関しては、県の原子力災害対策本部と福島県災害対策本部が県レベルでの活動の調整に当たることが計画されていた。原子力災害合同対策協議会は、現地における国の対応と県の対応の調整に当たることになっていた[19, 73, 74]。

国レベル及び地方レベルで、原子力緊急事態と自然災害に対応するための別々の体制が整備されていた。これらの体制は、原子力緊急事態と自然災害が同時に発生することに対応する必要性を想定していなかった[74, 78]。

事故以前に整備されていた原子力緊急事態への対応の管理に当たる中核組織の所在地を図 3.2 に示す。

---

[67] 原子力災害対策本部は、内閣官房及び指定行政機関の職員の中から総理大臣によって任命された者によって構成されるものとされていた[19]。総理大臣は、総理大臣官邸の中に設けられるものとされていた原子力災害対策本部の本部長を務めることになっていた（図 3.2 参照）。

[68] 事務局は、主要機関の代表がそのスタッフとなり、経済産業省（METI）の一部であった原子力安全・保安院（NISA）の院長がそのトップを務めるものとされていた。これは、経産省ビルの経産省／保安院緊急事態対応センターの中に設けられることになっていた（図 3.2 参照）。

[69] 原子力災害 現地対策本部は、関係する全ての機関からのスタッフで構成され、経産副大臣が本部長を務めるものとされていた。これは、オフサイトセンター内に設置されることになっていた（図 3.2 参照）。

図 3.2　原子力緊急事態対応の管理に当たる中核組織の位置関係[70]

2011 年 3 月 11 日 14 時 50 分、内閣危機管理監によって総理大臣官邸内に地震対応のための緊急対策室が設置された。15 時 14 分、政府は、総理大臣を本部長とする緊急災害対策本部を東京の総理大臣官邸内に設置した。16 時 36 分、内閣危機管理監は、総理大臣官邸に原子力事故のための緊急対策室を設置した[6]。

2011 年 3 月 11 日 19 時 03 分、政府は、原子力緊急事態宣言を発出するとともに、原子力災害対策本部を設置した[3]。

事故の進展が非常に速かったため、原子力災害対策本部の会議で詳しい議論を行う時間はなかった。緊急時対応のための中核グループは総理大臣と幹部職員となり、総理大臣官邸におかれた。総理大臣は、原子力災害対策本部事務局の関与なしに地元自治体に対して避難命令を発出した[7]。

[70] 文献 [7, 8, 73, 74, 79-91]による。

2011 年 3 月 15 日、国レベルで適時の情報共有を図るため、東京所在の東京電力本社[6]に政府と東京電力の統合対策室—事業者と政府対応組織の統合本部—が設置された。

現地においては、地震と津波によってもたらされた甚大な被害のため、オフサイトセンターにおける業務開始に支障が生じた[92]。その結果、オフサイトセンターにおいて活動することが想定されていた原子力災害現地対策本部やその他の組織（原子力災害合同対策協議会及び県の原子力災害対策本部）は、その役割を果たせなかった。2011 年 3 月 15 日、放射線状況の悪化のため[71]、オフサイトセンターからの避難が必要となり、福島第一原子力発電所からおよそ 60 km の距離にある福島県自治会館に移転することになった[6, 92]。しかし、同建物はオフサイトセンターに匹敵する能力を備えておらず、関係当局者間でのリアルタイムの情報共有等に困難を生じた。

県による対応に関しては、地震と津波への対応のために設置された機構の一部として、福島県の災害対策本部内に県レベルの活動の調整を目的とした新たな「原子力班」[72]が組織された[7]。

3.2. 緊急作業者の防護

事故当時、日本の国内法令と指針は、緊急作業者[73]の防護のために講じるべき措置を定めていたが、一般的な記述のみで、十分詳細ではなかった。

緊急時対応を支援するために、様々な業種の緊急作業者が多く必要であった。緊急作業者は、様々な組織や公的機関から派遣された。しかし、事故以前に指定されていなかった緊急作業者を対応に組み入れるための体制はなかった。

緊急作業者を放射線被ばくから防護する体制の実施は、サイト内の極限的な状況により重大な影響を受けた。サイト内の緊急作業者のために容認できるレベルの防護を維持するため、一連の臨時措置が実施された。必要な緩和対策を継続できるよう、特定の作業に従事する緊急作業者の線量限度が一時的に引き上げられた。緊急作業者の医療管理も重大な影響を受け、サイト内の緊急作業者のニーズを満たすため、多大な努力が必要であった。

「ヘルパー」と呼ばれる一般の人々が、サイト外の緊急時対応への支援を自発的に行った。国の当局は、ヘルパーが実施できる活動の種類とその防護のために講じるべき措置に関するガイダンスを発出した。

3.2.1. 地震及び津波後のプラント従業員の防護

津波警報が出された後、プラント従業員（およそ 6000 名）を予想される津波の影響から護るための努力が払われた。従業員に対し、サイトの構内放送設備を通して津波警報が伝えられ、高台の指定場所に避難することが促された。この努力はほとんどの場合功を奏したが、全員が

---

[71] オフサイトセンターは、上昇する放射線レベルに耐えるようには設計されていなかった。

[72] 新たな原子力班が組織されたのは、福島県災害対策計画[74]で定められている従来からの 9 つの作業班が地震と津波への対応で手一杯となったためである[7]。

[73] IAEA では、「緊急作業者」という用語を、緊急事態を受けて作業者としての特定の任務を帯びた者（フルタイムであれパートタイムであれ、又は一時雇用であれ、雇用主のために作業し、職業上の放射線防護に関連した認められた権利及び義務を有している者）であって、登録事業者及び認可事業者によって直接であれ、間接的であれ雇用された作業者のほか、警察官、消防士、医療従事者等の対応組織の職員、更には避難車両の運転者及び乗組員を含めて指すものとして使用している。日本では、「防災要員」という用語が、原子力緊急時に「国民への情報伝達及び周辺住民への指示、周辺住民の避難誘導、交通管制、放射線モニタリング、医療提供、事態が原子力施設災害に発展するのを防ぐための活動」などの緊急対応活動を行なう者、更に「放射能汚染物質の除去など、災害復旧活動に当たる者」全てを指すものとして使用されている[93]。

津波警報と避難命令を受け取ったわけではなかった[7, 8]。4号機のタービン建屋の地下で地震後の設備点検を行っていた作業者2名が津波による浸水によって溺死した[8]。

津波による影響からの従業員の防護が成功したのは、2007年の新潟中越沖地震に伴う柏崎刈羽原子力発電所での経験による教訓と、その後に非常時の脱出手順作成のために払われた努力によるところが大きい[8]。

2011年3月11日から14日にかけて、不可欠でないと判断されたプラント従業員ー女性労働者及び下請業者社員の大半を含むーがサイトから避難した。3月15日朝、サイトの状況が悪化しため、追加的なプラント従業員の避難が行われた。サイトには推定50〜70名が残り、約650名がバス又は個人の車で一時的に福島第二原子力発電所に避難した。これらの人々は同日昼以降、福島第一原子力発電所に戻り始めた[8]。

3.2.2. 緊急作業者の防護対策

事故当時の日本の国内法令や指針では、緊急作業者の防護のために講じられるべき対策が規定されていた。しかし、所内計画など、用意されていた体制では、その要件が一般的に扱われていたのみで、十分に詳細ではなかった。例えば、所内計画で扱われていたのは、責任の範囲、緊急時への備えと対応における一般的な義務の割当て、利用可能な計装機器（サーベイメータ、電子線量計など）の在庫一覧などの分野であった[75]。

緊急作業者に対する線量限度は、被ばくを最小化するための努力が要求される一方、人命救助や破滅的状況への進展を阻止するための活動の場合における100 mSvを上限に、それぞれの任務に応じて定められていた[93, 94]。

事故の間、極端な条件の下にあるサイト内の緊急作業者の防護が許容されるレベルに保たれるようにするため、一連の臨時の措置がとられた。サイト内にあった個人線量計の大半が津波後に使用不能となったため、個人線量計の不足が生じた。そのため、サイト内緊急作業者が受ける個人線量の追跡には臨時的な措置を取る必要があった[8]。例えば、同様の条件の下で作業することが予想される緊急作業者は、グループ毎に1つの電子個人線量計を使用するよう指示が出された。免震重要棟内の緊急作業者については、区域内線量率のモニタリングとそれぞれの区域で作業者が過ごした時間によって線量が計測され、制御された。この状況は、他の原子力発電所から十分な数の線量計が届けられた2011年3月末まで続いた[6, 8]。

2011年3月14日、サイト内及び福島第一原子力発電所から半径30 km以内で必要とされる活動を続けられるようにするため、特定の緊急作業を実施する緊急作業者に対する線量限度が暫定的に250 mSvまで引き上げられた[95]。人命救助に当たる消防の緊急作業者については、100 mSvの線量限度が維持された[6]。250 mSvまでの線量限度の暫定的な引上げ措置は、2011年11月1日に同日以降に作業を始めるサイト内緊急作業者について廃止され、2011年12月16日には、残る緊急作業者の大半について廃止され、2012年4月30日には、専門的な知識と経験を有する少数の緊急作業者のグループについても廃止された[96, 97]。

サイト内の大半の緊急作業者の被ばく線量は250 mSv未満であった[8]。緊急作業者の被ばくが250 mSvの線量基準を超えたケースは6件あり、最高線量は678 mSv（内590 mSvは体内被ばくによる）であった。

体内被ばくは、過酷な作業条件と防護対策の不適切な実施（呼吸用保護具や甲状腺被ばく防止のためのヨウ素剤の不適切な使用、放射性核種の不注意な摂取をもたらした行動など）により、主に訓練が不足又は効果的でなかったことが原因であった[5]。

東京電力は、サイト内の緊急作業者の福利厚生を確保すること、例えば、然るべき施設や環境（休憩、睡眠、食事、衛生等）を提供することに関しても課題に直面した[98-101]。

事故対応の間、被災地及び日本各地から、多数の非政府組織を含め、「ヘルパー」と呼ばれる人々が、食料、水及び生活必需品の提供、後には除染やモニタリング作業などの活動に自発的に参加した。国の当局は、ヘルパーが行ってよい活動の種類や、防護のために取るべき対策に関するガイダンスを発出した[102-104]。

3.2.3. 緊急作業者の指定

サイトの内外における緊急時対応を支えるために様々な種類の緊急作業者が多数必要であった。サイト内の緊急作業者は、東京電力による直接雇用者又は下請けを含む発電所従業員、及びサイトの緊急作業に従事した自衛隊員、消防隊員、警察官などであった[8]。サイト外の緊急作業者は、様々な（政府系、非政府系の）組織やサービス機関の人員を含んでいた。これらの緊急作業者の任務には、住民や特定施設の避難、避難者に対する支援、医療活動、モニタリング及びサンプリングの実施が含まれた[6, 97, 105, 106]。

全ての緊急作業者が緊急事態以前にその指定を受けていたわけではなく（例えば一部の東京電力の社員や下請業者の社員）、彼らが緊急作業者に指定された後に対応活動に組み入れるための段取りも用意されていなかった。さらに、緊急事態以前に指定されていなかった者の多くは、原子力緊急事態の状態の下で作業を行うための訓練を受けていなかった。例えば、放射線防護の側面に関する訓練を受けておらず、放射線被ばくによる潜在的健康リスクについて知らされておらず、呼吸用保護具の使用法や放射性物質で汚染されている可能性のある患者への対処法についての訓練も受けていなかった[107]。そのため、対応初期における緩和対策の実施に幾らかの遅れを生じる結果となった[6]。

3.2.4. 緊急作業者の医学的管理

避難や屋内退避により幾つかの病院が閉鎖され、一部の病院は放射性物質で汚染されている可能性のある患者を治療する準備がなかったため、放射線以外の負傷をした緊急作業者が必要な治療を受けることは難しかった[107, 108]。サイト内で一次医療を提供できるようになるまでの間、放射線以外で負傷した緊急作業者は、手当のため現地の 2 つの病院のうちの 1 つに搬送された[108]。

地震からおよそ 17 時間後、放射線医学総合研究所は、緊急作業者の汚染評価及び除染を行うため、医師、看護師及び放射線管理要員から成る緊急被ばく医療支援チーム（REMAT）を原子力災害現地対策本部（オフサイトセンター内）に派遣した[107]。

事故発生から 8 日後、免震重要棟内の緊急時対策室で、産業医によるサイト内の緊急作業者のための一次医療の提供が始まった。その後、サイト内と「J ヴィレッジ」[74]内に 1 カ所ずつ、合計 2 カ所のトリアージセンターが設けられた[3, 8, 108]。

2011 年 7 月 1 日に、福島第一原子力発電所内に緊急治療施設が設けられた。この施設のために、放射線緊急事態に対処するための訓練を受けた医療スタッフが全国から採用された[8, 108]。

3.3. 公衆の防護

*事故当時の国の緊急時体制においては、防護対策に関する決定が必要な場合には、線量予測モデル—緊急時迅速放射能影響予測ネットワークシステム（**SPEEDI**）—を使用して計算される公衆の予測線量の見積りに基づいて行われるこにとなっていた。この体制では、公衆に対する緊急防*

[74] J ヴィレッジは福島第一原子力発電所の南約 20 km のところに所在する。事故以前、ここはサッカーの練習施設であった。事故後は、作業者が仕事の準備を行い、仕事を終えた後の作業者のモニタリング及び除染を必要に応じて行い、トリアージを行う等、全般的な後方支援基地として利用された[3]。

*護対策の決定を事前に定められた特定の発電所の状態に基づいて行うことは想定していなかった。しかし、事故対応では、防護対策に関する初期の決定は、発電所の状態に基づいて行われた。サイト内の電源喪失のため、**SPEEDI** に入力するソースタームの見積りを提供することができなかった。*

事故以前の体制では、屋内退避、避難及びヨウ素剤による甲状腺ブロックの基準が予測線量に関して定められていたが、測定可能な量としては決められていなかった。移転に関する基準はなかった。

事故時に実施された公衆の防護対策は、避難、屋内退避、ヨウ素剤による甲状腺ブロック（安定ヨウ素の投与による）、食品と飲料水の摂取制限、移転及び情報提供を含んでいた。

*福島第一原子力発電所の近隣からの住民の避難は、**2011** 年 **3** 月 **11** 日の夜に始まり、避難対象区域は、発電所から半径 **2 km**、**3 km**、その後 **10 km** へと徐々に拡大された。**3** 月 **12** 日の夜までには、避難対象区域は **20 km** まで拡大された。同様に、住民が屋内退避を指示された区域は、事故直後の発電所から **3～10 km** 以内から、**3** 月 **15** 日までには **20～30 km** 以内に拡大された。原子力発電所から半径 **20～30 km** 以内の区域では、住民は **3** 月 **25** 日まで屋内退避を指示され、同日、国は自主避難を勧告した。ヨウ素剤による甲状腺ブロックのための安定ヨウ素剤の投与は、主として詳細な制度がなかったことにより、一律には実施されなかった。*

*地震と津波による被害、及びこれに伴う通信や輸送の問題のため、避難には困難が伴った。**20 km** の避難区域内にある病院と介護施設から患者を避難させる際にも大きな困難が伴った。*

*4 月 22 日、既存の **20 km** の避難区域は、再立入が管理される「警戒区域」に指定された。「警戒区域」外で移転のための特定の線量基準を超える可能性がある場所においては、「計画的避難区域」が指定された。*

放射性核種が環境中で検出されると、農地における防護対策、食品の摂取と出荷及び飲料水の摂取に対する制限に関する制度が設けられた。さらに、輸出用の食品と製品のための認証システムが設けられた。

緊急時に公衆に常時情報を伝え人々の懸念に対応するため、テレビ、ラジオ、インターネット及び電話ホットラインを含む複数の方法が用いられた。ホットラインとカウンセリングサービスを通じて公衆から得たフィードバックにより、容易に理解できる情報と裏付けとなる資料の必要性が明らかになった。

3.3.1. 緊急防護対策と移転

事故以前には、緊急時への備えが大幅に強化される必要があるとされる 10 km 圏の緊急時計画区域が福島第一及び福島第二原子力発電所の周囲に設定されていた（図 3.3 参照）。これらの区域内で防護対策を実施するための計画があった[74]。

緊急時対応計画では、防護対策に関する決定は、決定が必要となった時点で行われる線量予測に基づくことが想定されていた。事故発生後、SPEEDI によって線量予測が行われ、それをあらかじめ定められた線量基準と比較して、どのような防護措置をどこで講じる必要があるかが決定されることになっていた[73, 93]。このアプローチは、公衆のための緊急防護対策に関する初期の決定は発電所の状態に基づく必要があるとする IAEA の安全基準に沿ったものではなかった[68, 69]。

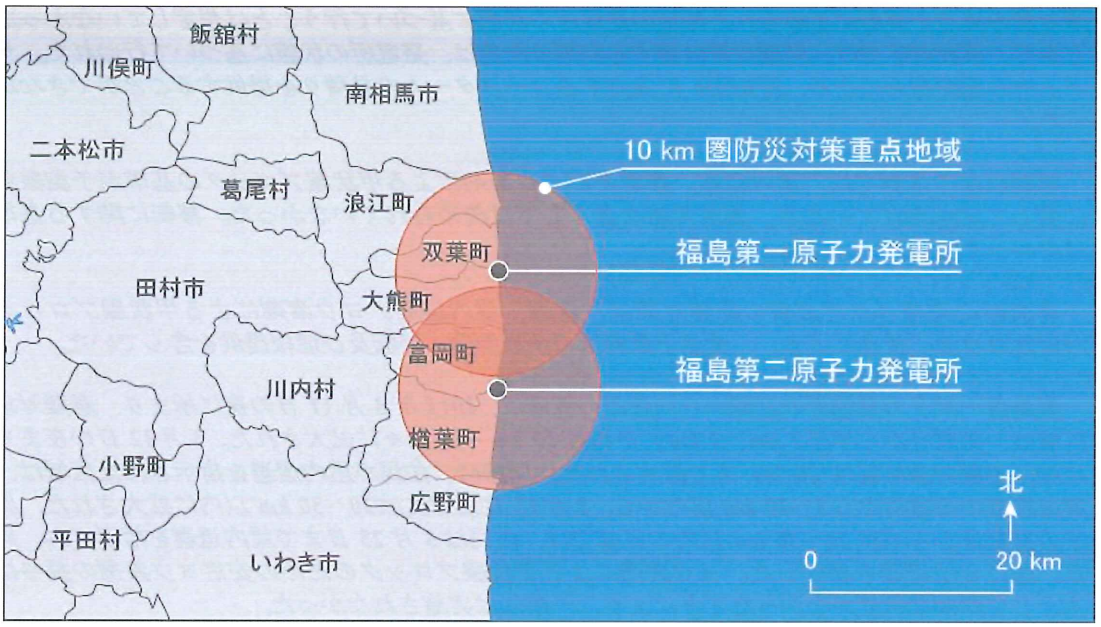


図 3.3　事故以前に設定されていた福島第一及び福島第二原子力発電所の緊急時計画区域（参考文献[74]による）

屋内退避[75]、避難[76]、ヨウ素剤による甲状腺ブロック[77]に関してあらかじめ線量基準が定められていたが測定可能な量に関してではなかった。移転[78]に関してはあらかじめ定められた基準（すなわち、線量に関する一般的基準や、測定可能な量に関する実用的な基準）はなかった[93]。

事故対応の間、サイト内電力が失われていたために緊急時対応支援システム（ERSS）による「ソースターム」推定を SPEEDI[79]のための入力情報として提供することができなかった。避難及び屋内退避に関する決定は、計画されていたような線量予測ではなく、発電所の状態（すなわち炉心冷却喪失）に基づいて行われた[3, 7]。

防護対策に関する国と自治体の決定は必ずしも調整ができていなかった。これは主として厳しい通信事情、及び一部はオフサイトセンターの活動開始が困難であったためである[92]。2011 年 3 月 11 日 20 時 50 分、福島県は、東京電力から直接受け取った情報をもとに、福島第一原子力発電所から半径 2 km 以内の住民に対して避難命令を出した[3, 6, 7, 70]。

21 時 23 分、政府は発電所から半径 3 km 以内の地域に避難命令、及び半径 3 km から 10 km 以内の地域に屋内退避命令を発出した。2011 年 3 月 12 日 5 時 44 分、政府は半径 3 km から 10 km

---

[75] 「屋内退避」とは、空中プルーム及び／又は沈着した放射性物質からの防護を目的とした構造物の短期利用をいう[48]。

[76] 「避難」とは、緊急時の短期的な放射線被ばくを避ける、又は減らすために一定区域から急遽一時的に人々を移動させることをいう。避難は、発電所の状況に基づいて予防的措置として行うことができる[48]。

[77] 「ヨウ素剤による甲状腺ブロック」は、放射性ヨウ素が関係する緊急事態において講じられる緊急防護措置である。ヨウ素剤による甲状腺ブロックでは、安定ヨウ素（通常はヨウ化カリウム）配合剤の投与によって甲状腺によるヨウ素の放射性同位体の取込みを防止又は低減する[48]。

[78] 「移転」とは、沈着した放射性物質による比較的長期（例えば 1 年以内）の被ばくを避けるための緊急でない住人の移動をいう[48]。

[79] それ以外の前提を用いた幾つかの線量予測が行われたが、そうした予測は緊急防護措置の決定のための根拠としては利用されなかった[4, 7]。

の地域に避難命令を出し、18 時 25 分にはその範囲は発電所から半径 20 km 以内の地域にまで拡大された[80][3, 7]。

公衆に対する避難命令の情報伝達は、地域防災無線網、広報車、警察車両及び戸別訪問を通じて手配された。発電所の状況、調整の難しさ、及び事前計画の不十分さのため、避難及び屋内退避の命令は、24 時間の間に数度変更され、最終的には半径 20 km 以内、約 7 万 8000 人に対して避難が命じられた[7]。

地震と津波によってもたらされたインフラの被害や通信及び輸送の問題により、避難には困難が伴った。20 km の避難対象区域内の病院や介護施設からの患者の避難も大きな困難（医療設備のある適切な輸送手段や避難所の提供など）に遭遇した。医療的な支援を必要としないほとんどの住民は、道路の損傷や交通渋滞にもかかわらず、避難命令が出されてから数時間のうちに避難対象区域を離れ始めた[7]。

福島第一原子力発電所から半径 20～30 km 以内の区域の住民に対する屋内退避命令は 3 月 15 日に出され、3 月 25 日までその状態が続いた[3, 7]。長期にわたる屋内退避の期間、及び地域のインフラ途絶により、人々の生活に深刻な断絶がもたらされた[7]。2011 年 3 月 25 日、半径 20～30 km 地域の住民に対して政府から自主避難勧告が出された[3, 7]。しかし、多くの住民は既に自主的にその区域を離れていた。

ヨウ素剤による甲状腺ブロックは、主として事前計画の段取りが適切でなかったため、一律には実施されなかった。安定ヨウ素剤を配付したが服用を助言しなかった自治体もあった一方、錠剤を配付し服用を助言した自治体もあり、政府の指示を待っていた自治体もあった[6]。

一部の住民は、2011 年 3 月末までに全面的な立入り制限が定められる前に、所有物を持ち出すため避難区域内の自宅に戻った[6]。4 月 22 日、地元自治体との協議に基づき、福島第一原子力発電所の周囲 20 km の既存の避難区域は、再立入りが制限され、一時帰宅に条件が付けられる「警戒区域」に指定された。2011 年 5 月、具体的な指示と汚染モニタリングを含む段取りが整えられた上で、短時間の一時帰宅が許可された[6, 104, 109]。

2011 年 3 月 12 日に避難者のモニタリングが現地レベルで開始された。除染の必要性に関する判断は、事故以前に定められていた運用基準に基づいて行われた。数日後、実際の条件（低い気温、不十分な水供給など）に対応するため基準が引き上げられた[5]。

事故後の環境モニタリングは、困難かつ危険な状況の下、限られた機材とスタッフによって行われた。例えば、地震と津波によって既設の現地モニタリング機器は大半が使用不能となった。福島第一原子力発電所から半径 20 km 以内におけるモニタリングは 3 月 12 日に始まり、この区域の避難が完了した 3 月 14 日に終了した。20 km の避難区域以遠の幾つかの場所では、3 月 15 日以降、数百マイクロシーベルト毎時（μSv/h）単位の線量率が計測された[3, 6]。

2011 年 4 月 11 日、国は、事故の日から 1 年間に被ばくすると予測される線量 20 mSv の基準が、20 km の避難地域以遠で人の移転[81]が必要となる可能性がある区域を決定する際に使用されると発表した[3]。4 月 22 日、この 20 mSv の予測線量基準を超える可能性のある区域を含めるた

[80] 福島第二原子力発電所に関しては、発電所から半径 3 km 以内の市民に対する避難命令と半径 3～10 km の範囲の屋内退避命令が 2011 年 3 月 12 日 7 時 45 分に出された[6]。福島第一原子力発電所 1 号機の水素爆発（3 月 12 日 15 時 36 分）を受けて、3 月 12 日 17 時 39 分、福島第二原子力発電所で同様の水素爆発が起きた場合への予防的措置として、同発電所から半径 10 km 圏の市民を避難させる決定が行われた[6]。この 10 km 圏は福島第一原子力発電所の周囲 20 km の避難区域に入っていたため、福島第二原子力発電所に関して新たな防護措置が必要となることはなかった。

[81] 福島第一原子力発電所事故への対応について記した日本の公式文書の多くは「移転」という表現を用いておらず、人々の移動については「避難」という言い方をしている。

め、20 km の避難区域以遠に「計画的避難区域」が設定された。国は、この地域からの人の移転がおよそ 1 か月以内に実施されるべきであるとの命令を出した[3]。

2011 年 4 月 22 日には、「計画的避難区域」に加え、「緊急時避難準備区域」も設定された（図 3.4 参照）。「緊急時避難準備区域」の住民は、福島第一原子力発電所をめぐって新たな懸念が生じた場合には屋内退避するか、又は自らの手段で避難することが助言された。「緊急時避難準備区域」の指定は 2011 年 9 月 30 日に解除された[6]。

「警戒区域」（すなわち 20 km の避難区域）及び「計画的避難区域」以遠で行われたモニタリングの結果、住民の予測線量が事故発生から 1 年以内に 20 mSv を超える具体的な場所が特定された。6 月 16 日、国は、それらの場所を「特定避難勧奨地点」として指定すべきであるとする指針を発表した。国は、移転を行うべき場所の指定を 6 月 30 日から開始した[6, 7]。

2011 年 9 月 30 日までに防護対策が命令又は勧告された区域及び場所を図 3.4 に示す。

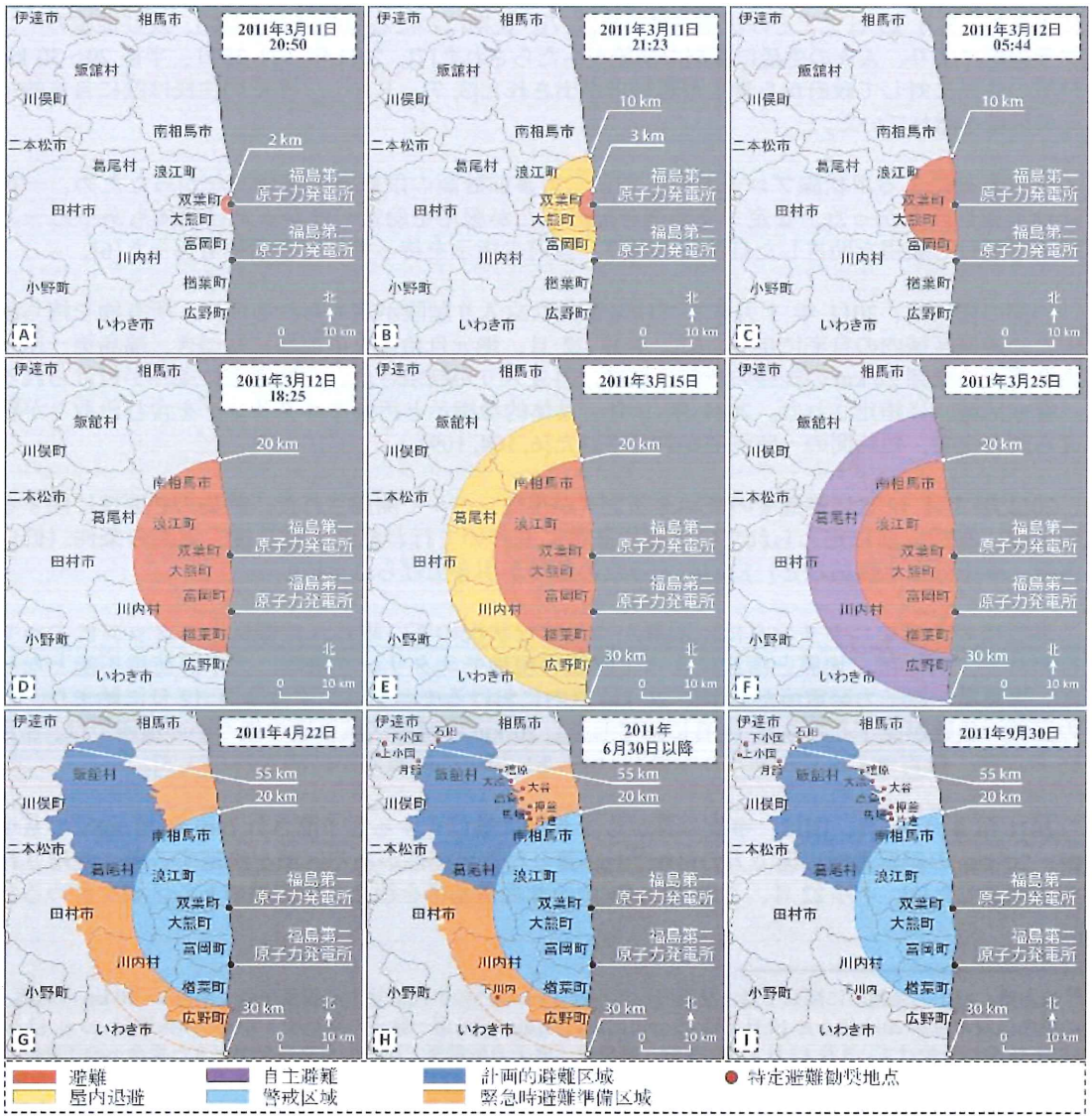


図 3.4.　2011 年 9 月 30 日まで防護対策が命令又は勧告された区域及び場所（参考文献 [3, 6, 7, 104] による）

地元自治体関係者はまた、学校を再開するか、どのような状況の下で行うかを早い段階で決めなければならなかった。当初、2011 年 4 月 19 日に年間 20 mSv という線量基準がこの目的のために定められた。5 月 27 日、国民の不安に応える形で、近い将来に年間 1 mSv の線量に引き下げるという目標を示す日本政府からの通知が出された[7]。

3.3.2. 食品、飲料水及び農業に関する防護対策

原子力緊急事態が発生した際に国内で生産される食品及び飲料水に対する制限のために使用する特定の放射性核種の放射能濃度の基準は、事故以前に策定されていた[93]。しかし、これらの値は、緊急時に具体的な規制限度として使用するために採用されてはいなかった[82] [6, 7]。2011 年 3 月 17 日、これらの基準が食品衛生法に基づく食品及び飲料水中の放射性核種レベルの暫定規制値として定められた[110]。

環境中で放射性物質が検出されたことを受けて、食品及び飲料水を管理するための体制が整えられた。この体制に含まれたのは、(1)食品及び飲料水に含まれる放射性セシウム及び放射性ヨウ素の放射性核種濃度レベルを、それを超えた場合に食品及び飲料水が制限される食品衛生法による暫定規制値として定めること、並びに(2)食品及び飲料水のサンプル中の放射性核種濃度の測定を行うことであった。数週間以内に、放射性ヨウ素（^{131}I）のレベルは半減期が短い（約 8 日）ため大幅に低下し、中長期的な食品制限は放射性セシウムの濃度のみに基づくこととなった[110]。

2011 年 3 月 21 日、国は、特定の食品の流通への制限を発出し始め[111]、その対象は事態の推移に伴って変わっていった。食品制限は、どの食品が基準を超えているかを特定する食品サンプルのモニタリング結果に基づいて決められ、影響を受けた地理的場所を特定した[112, 113]。

食品及び飲料水に関する防護対策をめぐっては幾つかの課題に直面した。すなわち、(1)食品管理のベースとして用いることのできる基準（放射性核種の放射能濃度）の規定、(2)それぞれの地理的場所でどの食品がその基準を超えるレベルの影響を被っており、又は被る可能性があるかの特定、(3)サンプリング及び解析のための基盤及びリソースの不足への対処、(4)サンプリング及び解析を実施することに対する一部地元自治体の懸念への対応などである。

2011 年 4 月 4 日、県境によって画定される区域のみでなく、適切な場合にはそれより狭い地理的区域（市町村など）でも食品制限を課すことができるとの政策が設けられた。この政策では、様々な食料品に対する制限を設け、あるいは解除するための手続が定められた。食品のモニタリング結果が毎週のモニタリング検査で 3 回連続して暫定規制値を下回ることを条件に、県が制限の修正を申請することが認められた[7]。

2011 年 4 月 5 日、魚のサンプルで測定された ^{131}I 濃度に基づいて、水産品における放射性ヨウ素の放射能濃度に関する暫定規制値が追加された[114]。

2011 年 4 月 8 日、放射性セシウムのレベルが所定の基準を超える農地でのコメ栽培の制限に関する政策が発出された[6]。

2011 年 4 月 14 日、飼料に含まれる放射性セシウム及び放射性ヨウ素の放射性核種濃度レベルが暫定許容値として定められた。飼料への制限にもかかわらず、一部の牛肉サンプルが暫定規制値を超えた（2011 年 7 月）。そのような食肉が消費者に流通することを防止するための管理制度が設けられた[6]。

---

[82] 日本に輸入される食品に関する基準（放射性セシウム－^{134}Cs 及び ^{137}Cs－370 Bq/kg）は 1986 年の旧ソ連のチェルノブイリ原子力発電所の事故後に規制限度として定められた[7]。

2012年4月1日、暫定規制値に代わって新たな基準値が施行された。この基準値は、年1 mSvの実効線量に基づき（暫定規制値では年 5 mSv の基準がベースとして用いられていた）、事故時に放出された一連の放射性核種による線量への寄与を考慮に入れながら、食品及び飲料水中の放射性核種の放射能濃度を定めたものである。その結果、これらの値はそれまでの暫定規制値よりもはるかに低いものとなった[115]。

3.3.3. 公衆に対する情報提供

公衆に対する情報提供のための体制は、事故以前から存在していた。国レベルでは、公衆に対する情報提供に関して、発表の内容、タイミング及び方法を含め、関係対応組織の間で調整を行うことの必要性を認める段取りがあった[73]。福島県の防災計画にも住民への情報提供のための段取りが含まれていた[74]。

規制当局の原子力安全・保安院は、地震から30分後の2011年3月11日15時16分に「モバイル保安院」を通して原子力施設に対する地震の影響に関する最初のメッセージを出した。原子力緊急事態宣言は19時03分に総理大臣によって発出され、19時45分に記者会見で発表された。その後、21時52分には避難命令に関する政府記者会見が行われた[6, 7]。

政府、原子力安全・保安院、地元の緊急対応機関、地元自治体、及び東京電力は、それぞれ独自に記者会見を開き、その状態が4月25日まで続いた。内閣官房長官は1日2回の定例記者会見、及び臨時の記者会見を開いて、事故に関する情報と政府の見解を公衆に伝えた。2011年3月11日から5月31日までの間に、原子力安全・保安院によって150件以上のプレスリリースが出され、182回の記者会見が開かれた[3]。環境モニタリングの結果は、文部科学省の記者会見及びプレスブリーフィングで公表された。

原子力安全委員会（NSC）は、2011年3月25日から4月24日まで毎日記者会見を開き、2011年4月25日から5月19日までには8回の記者会見を開いた[3]。

2011年4月25日からは対応に当たる各種機関による合同記者会見が開かれるようになった。これは、提供される情報の一貫性に貢献した[6]。原子力災害現地対策本部は2011年4月以降、ニュースレターを発行し、それを避難場所に配布した。関連情報は、地元ラジオ局を通しても定期的に放送された[3]。

公衆からの問合せに答えるためのホットラインが設けられた。例えば、2011年3月11日には原子力安全・保安院が緊急事態の推移と放射線安全に関する問合せに応じるためのホットラインを開設し、2011年3月17日から5月31日までの間におよそ1万5000本の電話を受けた[3]。3月13日には放射線医学総合研究所のホットラインが開設され、4月11日までに約6500本の電話に応えた[116]。2011年3月17日には文部科学省と日本原子力研究開発機構がホットラインを開設し、2011年5月18日までに合計1万7500本の電話を受けた[3]。福島県は、放射線の様々な面に関する住民からの質問に答えるための相談サービスを用意した。ホットラインや相談サービスを通して得られた公衆によるフィードバックからは、わかりやすい情報や裏付けとなる材料に対するニーズがあることが特定された[3]。

2011年3月12日から、政府は、関連省庁のウェブサイトに英語、中国語及び韓国語による情報を掲載するようになった[117]。在京外交団に対して、2011年3月13日から5月18日まで毎日、5月19日以降は週3回、政府による定期的なブリーフィングにより情報が提供された[6]。外交団に対するファクス及びEメールによる通報チャンネルも設けられた。日本の在外公館による駐在国への情報提供が行われ、その内容は合計29言語でウェブサイトに掲載された[3]。

2011年3月13日から、外国の報道媒体向けの関係省庁による合同記者会見がほぼ毎日行われた[6]。

国際社会への情報提供で直面した課題は主に、資料を翻訳し情報要請に電話で応対する人材への需要に関するものであった[117]。

福島第一原子力発電所の事故を受けて、国際原子力放射線事象評価尺度（INES）による評価が日本から報告された。INES 評価は、同じサイト内のそれぞれの原子炉について個別に適用された。評価は 1 か月のうちに何度かより高いレベルに改められた。INES 評価のより高いレベルへの見直しは、公衆に対しても報道媒体に対しても大きな懸念をもたらす原因となった。

3.3.4. 国際貿易

様々な活動や対策が、(1)公衆、産業界及び諸外国に対して日本の製品の安全性について安心感を与えること、(2)日本製品の国際貿易を円滑化し、流通に遅れが生じないようにすること、並びに(3)特に福島県の企業及び産業界に対して助言や指導を提供することを目的として、開始された[98, 99 118, 119]。

輸入国の多くは、日本製品に対して制限措置を導入した。多くの国々が既存の輸入管理を強化したり、日本政府による証明書を要求したりした。一部の国は、日本又は日本の特定地域からの産品（大半は農業製品）の輸入を一定期間禁止する措置をとった。2011 年 6 月、日本は輸出用の食料品に対する認証制度を設けた。これは、公衆や関係者に管理体制が敷かれているという安心感を与えるのに役立った。この制度は、2011 年 9 月には、輸送コンテナ及び一定の輸出用の工業製品に拡大された[120]。

3.3.5. 緊急時における廃棄物管理

事故以前に日本で定められていた放射性廃棄物管理のための体制は、原子力発電所などの施設で発生する廃棄物を対象としており、公共区域内で発生した放射性廃棄物は含まれていなかった[121]。事故後、放射性廃棄物管理のための詳細な戦略、指針及び指示が策定された。

2011 年 6 月 3 日、原子力安全委員会から「東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故の影響を受けた廃棄物の処理処分等に関する安全確保の当面の考え方について」が発出された。この文書では、リサイクル物質、物質の処理に当たる作業者の防護、処理施設周辺における公衆の防護、処分場周辺における公衆の防護のそれぞれに関して線量ベースの基準が示された。原子力安全委員会は、事故の影響を受けた物質ーすなわち、瓦礫、水及び下水の処理によって発生した汚泥、焼却灰、除染作業による樹木、植物、土ーについては、適切な管理の下で処分することとし、一部の物質については再利用が検討され得るとした。そうして再利用された物質から作られた製品については、汚染がないか調べ、市場に流通させる前に適切に取り扱こととされる。適切な防護対策により、作業者及び公衆の放射線被ばくは合理的に達成可能な限り低い水準に保つことができるとされた[122]。

2011 年 8 月 26 日、「平成 23 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う原子力発電所の事故により放出された放射性物質による環境の汚染への対処に関する特別措置法」が全面的に施行されるまでの暫定措置として、「除染に関する緊急実施基本方針」[123]が原子力災害対策本部によって定められた。法律は 2011 年 8 月 26 日に成立し、2011 年 8 月 30 日に公布されて、一部は即日施行され、2012 年 1 月に全面的に施行された[124]。同法は、汚染地域の管理の概要を示し、国、地元自治体、事業者及び国民の間の責任分担を含んだ。これにより、緊急時被ばく状況から現存被ばく状況への移行が促進された。また、環境モニタリング、除染措置、並びに放射性物質で汚染された土や廃棄物の指定、処理、貯蔵及び処分に関する長期的な管理体制が公式なものとなった。

3.4. 緊急時段階から復旧段階への移行、対応の分析

*緊急時段階から復旧段階への移行のための具体的な政策、指針、基準及び体制は、福島第一原子力発電所事故後まで定められていなかった。こうした体制を整備するにあたり、日本の当局は、国際放射線防護委員会（**ICRP**）の最新の勧告を適用した。*

*事故及び緊急時対応の分析が行われ、政府、事業者（東京電力）、政府と国会がそれぞれ設立した **2** つの調査委員会によるものを含め、報告書の形で提出された[83]。*

*事故後、日本における国の緊急時への備えと対応の体制は、これらの分析の結果や、緊急時への備えと対応の分野に関連する **IAEA** の安全基準を考慮して、多くの点で改訂された。*

3.4.1. 緊急時段階から復旧段階への移行

事故後、緊急時段階から復旧段階への移行のための体制を定めるに当たって、日本の当局は、ICRP による最新の勧告[127-129]を適用することを決めた。緊急時段階から復旧段階への移行のための特定の政策、指針及び基準の策定、並びに全体的な体制作りは、事故後に行われた[130]。このプロセスには、緊急時対応の早い段階で講じられた防護対策や体制を調整することや、影響を受けた地域の状況について得られた情報（主に包括的なモニタリングにより得られたもの）を考慮することなどが含まれた[131, 132]。必要な長期的復旧作業の検討も含まれた。

これらの対策や体制は、主として移行過程で生じる当面のニーズを対象としたものであった。作業者の防護のための規定は、実施される作業に応じて徐々に変更された[6, 96]。

2011 年 4 月 17 日、東京電力は、サイトでの復旧に向けたステップの概要を示したロードマップ（冷却、影響の緩和、並びにモニタリング及び除染の分野における基本方針、目標及び直近の措置）を発出した[24]。

2011 年 5 月 17 日、経産省は、「原子力被災者への対応に関する当面の取組のロードマップ」[130]を発出した。これには、9 つのグループに分類された対策が、東京電力のロードマップと関連づけた各期間に実施される予定のステップに分けて掲げられていた。ステップ 1 は 7 月中旬が目標とされており、ステップ 2 はステップ 1 の終了から 3～6 か月間、ステップ 3 は中期的な期間が目標とされていた。このロードマップは、長期的な復旧作業への移行と通常の社会経済活動の再開のための情報伝達と準備を促進することを意図していた。ロードマップはまた、責任分担及び移行プロセスのそれ以外の組織的側面や、緊急時段階の終了の目的と条件も示した。

3.4.2. 対応の分析

事故及び緊急時対応について、教訓を特定し、日本の緊急時への備えと対応体制などの分野を強化することを目的に、様々な機関によって分析が行われた。その結果、そうした体制における幾つかの改善点が特定された。

例えば、日本政府から 2011 年 6 月の IAEA 閣僚会議に提出された報告書[3]では、緊急時への備えと対応で重要な分野として、(1)自然災害と原子力緊急事態の複合、(2)環境モニタリング、(3)中央と地方それぞれの組織の間の役割分担、(4)緊急時の情報伝達、(5)他国からの援助への対応及び国際社会とのコミュニケーション、(6)放射性物質放出のモデル化、及び(7)原子力緊急事態における避難基準及び放射線防護ガイドライン[84]の分野における教訓が示された。

---

[83] 学会や民間部門からも報告書が出された（日本原子力学会や財団法人日本再建イニシアティブによるものなど）[125, 126]。

[84] 2011 年 9 月に IAEA に追加報告書が提出された[4]。この報告書では、2011 年 6 月に出された最初の報告書で特定された教訓に対する取組に関する新たな展開と進捗に関する情報が示された。

政府が設置した東京電力福島第一原子力発電所事故調査委員会は、日本が国際社会からの教訓を考慮に入れること、及び IAEA によって策定された基準など、国際基準を国のガイドラインに採り入れることが必要であると指摘した[5]。

東京電力の福島原子力事故調査報告書[8]では、緊急時対応組織、情報伝達、機材の輸送及び放射線防護など、緊急事態に対応する中で明らかになった問題が強調された。

国会によって設けられた東京電力福島原子力発電所事故調査委員会の報告書には、緊急時における政府、地元自治体、事業者のそれぞれの役割と責任の明確化を含め、国の緊急時への備えと対応体制の改革を求める勧告が盛り込まれた[7]。

こうした分析結果や特定された教訓に基づき、緊急時への備えと対応体制を強化するための是正対策が講じられた[133, 134]。原子力緊急時対応の政策が政府により実施され、推進されるようにするため、内閣に原子力防災会議が設置された[134]。原子力規制委員会が、緊急時への備えと対応の分野における IAEA 安全基準も考慮に入れながら、原子力災害対策指針[85] [136]を策定した。

3.5. 緊急時への備えと対応に関する国際的枠組みにおける対応

*国際的な法的文書、**IAEA** の安全基準及び実施時の取決めを含む緊急時への備えと対応のための広範囲な国際的枠組みが、事故当時に存在した[86]。*

*事故の発生当時、**IAEA** には原子力又は放射線の緊急事態への対応において、**(1)**公式に指定された連絡窓口経由での公式情報の通知と交換、**(2)**明確で理解できる情報の適時の提供、**(3)**要請に応じた国際的支援の提供と促進、及び**(4)**国際機関の対応の調整という **4** つの役割があった。*

事故への国際的対応には、多くの国と国際機関が関与した。

***IAEA** は、日本の公式窓口と連絡を取り、緊急事態の進展に合わせて情報を共有し、各国、関連国際機関及び公衆に常時情報を提供した。緊急時対応の早期においては、日本の公式窓口とのコミュニケーションは困難であった。**IAEA** 事務局長の日本訪問及びこれに続いて東京に連絡職員を配置することにより、**IAEA** と連絡窓口とのコミュニケーションが改善された。**IAEA** はまた、専門家ミッションを日本に派遣し、関連国際機関の対応を調整した。*

様々な国[87]が、事故に対応して、日本に滞在する自国民のために様々な防護対策を講じ、あるいは勧告した。こうした相違は、一般に公衆に十分説明されず、時に混乱と懸念を招いた。

放射線及び原子力緊急事態に関する国際機関間委員会に参加している機関は定期的に情報を交換した。共同プレスリリースも発出された。

IAEA はその緊急時体制を通して、日本における公式連絡窓口であった原子力安全・保安院と直接連絡を取った[143]。日本は早期通報条約第 3 条に従って情報を提供した。

---

[85] 原子力災害対策指針は、2012 年に発出された原子力施設の緊急時準備に関する規制ガイド [93]の改訂に関する中間報告[135]に基づいている。

[86] 主たる国際的な法的文書は、原子力事故の早期通報に関する条約と、原子力事故又は放射線緊急事態の場合における援助に関する条約である。事故当時の緊急時の備えと対応の分野に関する国際安全基準は、IAEA 安全基準シリーズ No. GS-R-2 及び No. GS-G-2.1 であった。安全シリーズ No. 115 にも、緊急時への備えと対応に関する事項が含まれていた。国際的な実施の取決めには、緊急事態通報・援助技術運営マニュアル（ENATOM）、IAEA 緊急時対応援助ネットワーク（RANET）及び国際機関の共同放射線緊急時管理計画（JPLAN）が含まれていた。

[87] 原子力又は放射線緊急事態への備えと対応に関する主たる責任は、人命、健康、財産及び環境の防護に対する主たる責任と同様に、国にある。

IAEA 事務局は、緊急事態の進展に従って情報を共有し、加盟国、関係国際機関及び一般向けに情報提供し続けた[143]。

当時の IAEA の役割には、事故の展開に関する予測や想定される影響についての評価を行うことは含まれていなかった。原子力発電所の緊急事態への対応における IAEA の役割は、IAEA 原子力安全行動計画[144]の採択により拡大された。これにより、IAEA は、原子力緊急事態の際、入手可能な情報の分析や、証拠・科学的知見・加盟国の能力に基づくあり得るシナリオの予測を含め、事態の潜在的な影響について、加盟国、国際機関及び一般公衆に対して、適時に明瞭、正確、客観的で、わかりやすい情報を提供することが求められることになった。

囲み 3.4.　事故当時の原子力又は放射線緊急事態に対する緊急時への備えと対応の国際的枠組み

原子力または放射線緊急事態に対する緊急時への備えと対応に対する主たる責任は、人命、健康、財産及び環境の保護に対する主たる責任と同様、国にある。国には、緊急時への備えと対応の体制が中央、地方、地元及び事業者／施設のレベルで整備されることを確保する責任がある。適切な場合には、国は、国内の緊急時への備えと対応体制について、自国が加盟しているか、またはそれ以外で（二国間及び／多国間の合意を通じて）当事国となっている関連の国際体制との間で調整を図る責任を有する。

事故当時の国際的な枠組みとしては、国際的な法的文書、IAEA 安全基準及び運用の取決めがあった。

原子力事故の早期通報に関する条約（早期通報条約）、及び原子力事故又は放射線緊急事態の場合における援助に関する条約（援助条約）では、IAEA 及び締約国に対して具体的な対応の役割と責任が割り当てられている。各種国際機関は、その法令上の役割又は関連する法的文書により、緊急時への備えと対応の様々な側面を包含する役割と責任を有している[138, 139]。

事故当時の緊急時への備えと対応の分野における IAEA の安全基準としては、IAEA 安全基準シリーズ No. GS-R-2（7 つの国際機関の共同提案）と IAEA 安全基準シリーズ No. GS-G-2.1（6 つの国際機関による共同提案）があった[68, 69]。電離放射線の防護と放射線源の安全のための国際基本安全基準（IAEA 安全シリーズ No.115）にも緊急時への備えと対応に関連した部分があった[137]。

国際的な運用の取決めには、緊急事態通報・援助技術運営マニュアル（ENATOM）、IAEA の緊急時対応援助ネットワーク（RANET）、国際機関の共同放射線緊急時管理計画（JPLAN）があった[140-142]。

ENATOM は、早期通報条約及び援助条約の条項のうち、通報及び情報交換に関する規定や、早期通報条約及び援助条約で特定されている連絡窓口のための通信規約（24 時間態勢で応答可能なファクス、電話回線、E メール、保護されたセキュアなウェブサイトを介したメッセージによる）など、その性質上運用に関する条項の実施を円滑にするものであった。こうした措置は、様々な複雑さのレベルで行われる定期的な演習（条約演習（ConvEx）と呼ばれる。）の対象とされた。

RANET は、要請を受けた国際援助が援助条約に基づき円滑に提供されるように設けられた。このシステムは、ネットワークに登録された各国の能力を活用し、様々な技術的分野で援助を提供するための運用のメカニズムである。

JPLAN は、原子力又は放射線緊急事態への対応活動で、また準備体制の構築でそれぞれの組織がどのように活動するかについての共通理解を文書化している。JPLAN は調整のためのメカニズムを提供し、参加国際機関の役割と能力を明確にしている。JPLAN は放射線及び原子力緊急事態に関する国際機関間委員会（IACRNE）により維持されており、IAEA はその事務局を務めている。事故当時、IACRNE には 15 の国際的な政府間組織が参加していた。

緊急時対応の初期段階での日本の公式窓口とのコミュニケーションは困難であった。2011年3月17日から19日までのIAEA事務局長の訪日と、それに続く連絡職員の東京への配置により、IAEAと連絡窓口とのコミュニケーションは改善した[143]。

一部の国は、日本国内の自国民保護のための助言や特別指示を発出した。日本にいる自国民に対して、緊急事態を受けて日本の当局が出した命令や勧告に従うよう助言する国がある一方、日本の当局や他国が出したものとは異なる助言を行う国もあった[145]。各国間の勧告内容の相違は、変化する状況に関する情報の不足を含め、様々な要因によるものであった。これらの相違は、概して公衆によく説明されず、時として混乱や懸念をもたらした。

IAEAは、日本に専門家ミッションを派遣し、加盟国からの対日本支援の申入れの調整に当たった。援助条約は発動されず、RANET[88]は利用されなかった。各国は日本に対して直接援助を提供した。こうした援助は、地震と津波による影響と併せて国の対応能力を試練にさらした原子力緊急事態に日本政府が対応する上で助けとなった。初期段階での国際援助の受入れに際しての困難のひとつは、そうした援助の受け入れ体制が国内になかったことであった[5, 143]。

IAEA事務局は、その責任に基づいてJPLANを速やかに発動し、国際機関間の対応の調整を開始した。IACRNEの参加国際機関は、事故後の状況についての共通理解を得ること、及び公衆に対し継続的に情報を提供するための取組を調整することに焦点を置いて、情報交換を行った。定期的なテレビ会議が2011年7月まで行われた。合同のプレスリリースも発出された。

国際機関事務局間における相互協定の一環として、国際的な対応の効果的な調整を図るため、国連食糧農業機関（FAO）、世界保健機関（WHO）及び世界気象機関（WMO）からIAEAに連絡職員が派遣された。

3.6. 所見と教訓

事故に対する緊急時への備えと対応をめぐる評価の結果、幾つかの所見と教訓がまとめられた。事故への対応は過去の緊急事態からの教訓を強調するとともに、緊急時対応に適切に備えることの重要性を確認するものとなった。

— 起こり得る原子力緊急事態への対応を準備する際には、自然災害と同時に起こり得る、複数ユニット発電所における複数のユニットに関するものを含め、炉心の核燃料やサイト内にある使用済燃料の重大な損傷を伴う可能性がある緊急事態を考慮する必要がある。
  原因にかかわらず、サイト内にある複数の原子炉が関わり、それが自然災害と同時に発生し、サイトの混乱と地域インフラの途絶をもたらし得る、過酷な原子力事故の可能性について検討する必要がある。サイト内、サイト外双方の対応に不可欠な情報を提供するシステム、通信手段及びモニタリング機材は、そうした状況の下でも機能できることが必要である。
  対応を管理する施設（サイト内及びサイト外の緊急時対応センターなど）は、あらゆる緊急時の（放射線、作業、環境それぞれの）状況のもとで運用可能であるように選定され、又は設計されるとともに、そうした状況の下で運用可能性及び居住可能性が確保されるように適切に配置され、かつ／又は保護される必要がある。
— 原子力緊急事態への対応のための緊急時管理体制は、事業者、地方自治体及び国の当局について明確に定められた役割と責任を含む必要がある。この体制は、事業者と当局との間の相互の関係を含め、定期的に訓練で試される必要がある。
  原子力緊急事態への対応を自然災害や人災（地震、洪水及び火災など）への対応と統合する体制が必要である。

[88] IAEA事務局は、RANETに登録している加盟国とともに、福島第一原子力発電所事故の経験に基づいてこのネットワークの強化を続けている。

サイト内対応は、プラント及び状況に関する知識を有するサイト内の人員によって管理される必要がある。サイト内外の対応はあらかじめ計画された段取りに基づいて調整される必要がある。

— 緊急作業者は、所属する組織にかかわらず指定を受け、明確に定められた職責を割り当てられ、適切な訓練を受け、緊急時には適切に防護される必要がある。緊急事態の発生以前に指定されていなかった緊急作業者及び緊急時対応への支援を自発的に行うヘルパーを対応に組み入れる体制を整備する必要がある。

緊急作業者の防護のための実務的な段取りは、関連の計画及び手順の中で一貫性をもって適切な詳細さで取り上げられる必要がある。準備段階で緊急作業者として指定されていなかった者についても考慮に入れる必要がある。緊急作業者の線量基準は事前に設定し、割り当てられる緊急時の任務に対して一貫性をもって適用される必要がある。緊急作業者の福利厚生（家族との接触を含め）を確保するための段取りも整える必要がある。

更に、自発的に対応活動を手伝う一般公衆（「ヘルパー」と呼ばれる人々）が緊急時対応組織の中に統合され、適切なレベルの放射線防護を受けられるようにするための体制があらかじめ計画される必要がある。

— 事前に決められた公衆への緊急防護対策の実施を、あらかじめ定められた発電所の状態に基づいて決定することができるよう、体制を整備しておく必要がある。

コンピュータモデルを利用するものを含め、意思決定支援システムは、放射性物質の放出（「ソースターム」）の規模やタイミング、プルームの移動、沈着レベル又はそれによる線量について、緊急時において初期の緊急防護対策を決定するための唯一のベースを提供するのに十分なほど迅速かつ正確には予想できない可能性があるため、このような体制が必要となる。

観測可能な状況と測定可能な基準（緊急時活動レベル）に基づいて、緊急事態区分システムを準備段階で策定しておく必要がある。このシステムは、実際の、又は予想される燃料損傷を示す発電所の状態が検出された後すぐに緊急事態の宣言の発出を、また、事業者による緊急事態の区分後速やかに（あらかじめ定められた地域の）公衆のためのあらかじめ定められた緊急防護対策の開始を可能とする。この緊急事態区分システムは、あらゆる異常な発電所の状態をカバーする必要がある。

— 緊急防護対策を、進展する発電所の状態やモニタリングの結果に応じて拡大若しくは変更できるよう、体制を整備しておく必要がある。早期の防護対策を、モニタリング結果に基づいて開始できるようにするための体制も必要である。

準備段階で、以下を含む活動のための体制を整備しておく必要がある。(1)緊急時計画区域及び地域を画定する、(2)緊急時区域内の特別な住民集団（病院の患者等）の扱いを含む緊急防護対策及びその他の対応措置を講じるための線量基準及び運用上の判断基準（測定可能な量のレベル）を定める、(3)放射性物質の放出前又は直後に緊急防護対策を講じることができるようにする、(4)緊急防護対策が講じられた地域への立入り制限を速やかに確立できるようにする、(5)必要に応じて設定済みの緊急時計画区域及び地域の外に防護対策を広げる、(6)早期防護対策及び、放射線の影響や、経済的、社会的、心理的影響を含めた放射線以外の影響など、様々な要因を考慮に入れた上で正当とされ最適化されたその他の対応措置（移転や食品制限など）を講じるための線量基準及び運用上の判断基準を策定する、(7)支配的状況に基づいて早期防護対策を講じるため運用上の判断基準を見直す場合の段取りを定める。

— 原子力緊急事態における防護対策及び他の対応措置が害を与える以上に利益をもたらすよう、体制を整備しておく必要がある。このバランスを実現するため、意思決定についての包括的なアプローチが整備されていることが必要である。

こうした体制は、原子力緊急事態において生じる可能性のあるあらゆる健康被害と、放射線及び防護対策による放射線以外の潜在的影響について明確に理解した上で整備される必要がある。

防護対策は、考えられる不利な条件（悪天候やインフラの被害など）を考慮に入れ、適時かつ安全に講じられる必要がある。病院や介護施設などの特定施設からの安全な避難を

確保するためには、事前の準備が必要である。必要とする人々に対しては、継続的な看護又は観察が提供されなければならない。

— 防護対策に関して情報を得た上で決定できるよう、意思決定者、公衆及びその他（例えば医療スタッフ）が原子力緊急事態の放射線による健康被害に関する理解を得られるよう支援する体制を整備しておく必要がある。地方、国及び国際レベルで、公衆の懸念に対応する体制も整備しておく必要がある。

原子力緊急事態においては、公衆の懸念に有効に対処する必要がある。これには、意思決定者（及び公衆）が防護対策について情報を得た上で判断できるよう、測定可能な量（線量率など）や予測線量を、放射線健康被害と関連付けるための手段が含まれる。公衆の懸念に対処することは、緊急事態の放射線及び放射線以外の影響を緩和するのに役立つ。

国際的な懸念に対しては、輸出用産品が国際基準を満たしていることを示し、輸入国とその国民に安心感を与える認証システムによってある程度対処することができる。

— 緊急時への備えの段階において、防護対策及び他の対応措置の終了、並びに復旧段階への移行についても体制を整備する必要がある。

準備段階で、緊急期から長期復旧期への移行のため、及び通常の社会・経済活動の再開のために計画を立てる必要がある。この体制は、(1)防護対策及びその他の対応措置の終了を決定するための正式手続を定めること、(2)明確に責任を割り当てること、(3)防護対策及びその他の対応措置の終了のための基準を定めること、(4)公衆と協議するための戦略及び手続を提供することなどができなければならない。

— 緊急事態及びこれへの対応を適時に分析し、教訓を導き可能な改善策を特定することは、緊急時の体制を強化する。

そうした分析には、国内法令及び規則、権限及び責任の割当て、緊急時対応の計画及び手順、施設、機材、訓練及び演習など、関連するあらゆる体制についての検討が含まれる必要がある。分析は、必要に応じて体制の見直しのための基盤を提供する。見直された緊急時体制の妥当性は、演習を通じて実証される必要がある。

— 通報と支援に関する国際的体制の実施が強化される必要がある。

原子力・放射線緊急時における通報及び援助のための国際体制や既存の運用メカニズムについて、通報及び情報交換、国際援助の要請及び提供などに関するメカニズムや手順を含め、認識を高める必要がある。早期通報条約及び援助条約の運用面に関する訓練や演習を強化する必要がある。

援助条約に基づく国際援助の提供のための既存のメカニズムへの参加は、国の緊急時への備えの取組における不可分の一部とされる必要がある。原子力又は放射線緊急時に（二国間協定又は援助条約に基づいて）援助を要請し、受け入れるための体制が備えの段階で用意される必要がある。

早期通報条約と援助条約で求められている正式な指定連絡窓口のリストは、IAEA からの即時情報提供要請に応じることができるように常時更新され、準備される必要がある。

緊急時への備えと対応に関する IAEA 安全基準の各国レベルでの適用は、緊急時への備えと対応を改善し、緊急時の情報伝達を円滑にするとともに、防護対策やその他の対応措置に関する国内基準の調和に資するものである。

— 防護対策及び他の対応措置に関して、各国間の協議と情報共有を改善する必要がある。

緊急時における防護対策及びその他の対応措置に関する加盟国間の協議と情報共有は、措置が一貫して講じられることを確保するのに役立つ。また、防護対策及びその他の対応措置に関する決定の技術的基盤に関する明確で理解できる説明は、国内的にも国際的にも人々の理解と受容を高める上で決定的に重要である。

4. 放射線の影響

セクション4では、福島第一原子力発電所における事故の人と環境への放射線影響について検討する。事故の放射線影響は、幾つかの国際機関と組織によって取り扱われてきた。WHOは、放射線量の予備的な推定を発表し[146]、その後、事故に起因するリスクを評価した[147]。より最近、UNSCEARが放射線のレベルと影響を推定した[148]。放射線防護の教訓がICRPによってまとめられた[149, 150]。他の国際機関、特にFAOとWMOも関連情報を提供した。これらの国際的な活動の一部を、囲み4.1で説明する。

囲み 4.1. 福島第一原子力発電所における事故の放射線影響に関する国際的な活動

IAEAに加え、他の国際組織も福島第一原子力発電所における事故の放射線影響に関する課題に積極的に取り組んでいる。

— 公衆衛生に関わる国連の専門機関である世界保健機関（WHO）は、事故によって発生した放射線量の予備的推定[146]、次いで健康リスク評価[147]を発表した。
— 国連総会に報告を行う原子放射線の影響に関する国連科学委員会（UNSCEAR）は、環境放射能と放射線量に関する相当量のデータを含む、事故に起因し得る放射線被ばくのレベルと影響の推定を報告した[148]。
— 放射線防護に関して幅広く利用される勧告を発出する非政府専門家国際組織である国際放射線防護委員会（ICRP）は、国際的な放射線防護システムの向上を目的として、事故時及び事故後の放射線防護問題の検討結果を発表した[149, 150]。
— 全ての人が十分な栄養と食品の安全を確保することを目指し農業、林業及び漁業の実務に関与する国連の専門機関である国連食糧農業機関（FAO）は、放射線及び原子力緊急事態に関係する国際機関間委員会（IACRNE）を通じて、食品、農業、林業、漁業に影響する原子力又は放射線緊急事態への備えと対応にIAEAと提携して取り組み、事故による食品中の放射性核種濃度に関する大規模なデータベースをまとめた[151]。
— 気象、実務的水文学及び関連する地球科学に関する国連の専門機関である世界気象機関（WMO）は、事故からの放射性核種の拡散と沈着に関する気象分析の評価を発表した[152]。
— 経済協力開発機構原子力機関（OECD/NEA）は、原子力安全の対応と事故の教訓を報告した[153]。
— これらの国際組織並びに国連環境計画（UNEP）、国際労働機関（ILO）、全米保健機構（PAHO）及び欧州委員会（EC）が、IAEAの下で発行される国際安全基準を協賛している。WHOは、飲料水中の放射能に関するパラメータを含め、現存被ばく状況で使用すべき飲料水質ガイドラインを定めている[154]。FAOとWHOの食品規格委員会は、食品規格を定めている。これは消費者の健康を保護し、国際食品取引における公正な慣行を確保するための国際的に調和の取れた食品基準の集積であり、食品中の放射性核種の存在に関する基準も含まれる[155]。

日本を含む多くの国の公的組織が、福島第一原子力発電所における事故の放射線影響に関する数多くの評価を実施した（例えば、参考文献[5]）。日本及び他の国々の放射線防護の専門機関が、放射線防護に関する重要な教訓を明らかにした（例えば、参考文献[156]）。福島県は、2011年6月に福島県民健康管理調査[157]を開始した[158]。囲み4.2で説明されるこの調査は、福島の国際専門家シンポジウムで議論された[159, 160]。

囲み 4.2.　福島県民健康管理調査

福島県民健康管理調査は、福島県民の健康状況に関する全般的な検査・調査である[157]。この調査は、一連のアンケートを基にし、「(1)住民の放射線量を評価し、(2)疾病の予防、早期発見及び早期治療につながる住民の健康状態のモニタリングを行い、それによって(3)住民の将来の健康を維持し、促進する」ことを目的としている[161]。

アンケートへの回答が得られた後、回答者の移動記録を基に、関連する放射線レベルの理解との組み合わせにより、事故後の 4 カ月に住民が受けた外部被ばくによる実効線量が放射線医学総合研究所によって推定された。さらに、詳細調査が実施された。これには、以下が含まれる：(1)甲状腺の超音波検査で、原子力事故当時年齢が 0 歳から 18 歳であった約 37 万人の住民を対象とするもの（初期スクリーニングは事故後 3 年以内に実施され、その後、2014 年以降に本格的な甲状腺検査とそれ以後の住民の定期モニタリングが実施される）、(2)疾病の早期発見と治療、及び生活習慣病の予防を目的とする総合的な健康診断で、生活習慣が事故後に劇的に変化した避難区域の 21 万人の元住民を主な対象とするもの（職場における、あるいは地方自治体による全般的健康診断に含まれる定期検査とは別に、白血球数の変化などの追加検査が実施されている）、(3)「こころの健康度・生活習慣の調査」で、主として心的外傷後ストレス障害、不安及びストレスなどの精神衛生上の問題を発生するリスクが高い避難者に適切な医療を提供することを目的とするもの、及び(4) 妊娠と出産の調査で、2010 年 8 月 1 日から 2011 年 7 月 31 日までに母子健康手帳の交付を受けた母親及びその子供に適切な医療と支援を提供するためのもの。（この調査は、特に妊娠と出産に関する新しいデータを反映させるために毎年更新されている[162]。）

福島県立医科大学は、福島県から健康調査の実施を委任され、外部線量推定の基本調査と 4 つの詳細調査を実施するため、放射線医学県民健康管理センターを立ち上げた。この調査とその結果は、福島県民健康管理調査検討委員会によって定期的に評価されている。

本セクションは、国際的及び国内のデータ、及び新しい情報、特にこの報告書のために日本の当局から IAEA に提供された情報を活用した評価及び推定に基づいている。様々な国際的及び国内の報告書の推定は、異なる時期に異なるレベルの情報を使用して実施されたことに留意すべきである。したがって、様々な結果について幾つかの直接的な比較を行うことができるものの、調査のデータ、手法及び日付の間の相違のため、詳細な比較は困難である。

量と単位

事故の放射線データのモニタリングと報告には、特定の国際的な量[89]と単位[90][163,164]が使用された。この報告書で使用される基本的な国際放射線防護に係る量と単位について、囲み 4.3 で概略する。

[89] 量という用語は、本報告書の中では、放射能や放射線という現象について、測定可能な特性という科学的な意味で用いられている。
[90] 量の単位は、このような量のうち、測定の際に基準として使用される特定の量のことである。

囲み 4.3.　本報告書で使用される基本的な放射線防護に係る量と単位

放射能を表すために使用される量は*放射能*と呼ばれ、その測定単位は*ベクレル*（Bq）である。1 ベクレルは、極めて小さいレベルの放射能の強さを表す。例えば、人体には約 5,000 Bq の自然放射性カリウム 40 が含まれる（体重 70 kg の人の場合、身体に 140 g のカリウムがある。）。したがって、事故による大量の放射性核種の放出を測定するためには、例えばペタ（P）のような適切な接頭語が本報告書で使用される。1 ペタベクレル（PBq）は 10^{15} Bq に相当する。

放射性物質の放出は、放射能が身体の外部にあった時には*外部被ばく*を通じて、放射性核種が人体に取り込まれた時は（例えば、経口摂取や吸入、あるいは皮膚経由）*内部被ばく*によって、電離放射線への人の被ばくをもたらした。臓器と組織が受ける平均放射線被ばくを表す量は*吸収線量*と呼ばれ、その測定単位は*グレイ*（Gy）と呼ばれ 1 キログラムあたり 1 ジュールであり、しばしば 1,000 分の 1 Gy である*ミリグレイ*（mGy）が用いられる。

異なる種類の放射線が害を及ぼすレベルには違いがあり、また、臓器や組織が異なれば放射線被ばくへの感受性が異なるため、放射線防護の目的では、吸収線量に加重値を加えなければならない。臓器と組織の吸収線量に*放射線加重係数*を適用して求められる量は*等価線量*と呼ばれ、その単位は*シーベルト*（Sv）であり、通常は Sv の 1,000 分の 1、すなわち、*ミリシーベルト*（mSv）で表される。報告書では、mSv の更に 1,000 分の 1、すなわちマイクロシーベルト（μSv）も使用される。*組織加重係数*の適用によって求められる量は*実効線量*と呼ばれ、これも mSv 単位で評価される。特定の被ばくの効果には個人間で差異があるが、放射線防護の目的では、個人差を考慮することは実行可能ではないため、線量はあらかじめ定義された理想的な標準的個人が放射線を受けたものとして評価される。

*吸収線量*と*等価線量*は、組織と臓器が受ける線量に使用される。関連する放射線の種類に基づけば、事故による全ての放射線被ばく（中性子線は有意でないので除外される。）において、報告された吸収線量は対応する等価線量と数値的に等しく、その逆も真であった。*実効線量*は、全身への影響を評価するために使用される。内部被ばくは、吸収または経口摂取された放射性物質が体内に残る限り続く。この継続的被ばくによって生じる*預託線量*は、被ばくした人の生涯にわたって予想される線量として計算される。

一般に受ける次の実効線量の推定を、参考値として示す[165]。

— 地球上の自然バックグラウンド放射線は年間平均実効線量として 2.4 mSv であり、典型的な範囲は 1～13 mSv で、大きな人口集団として最大で 10～20 mSv に及ぶ場合もあり、極端な事例では最大約 100 mSv に及ぶ。
— 放射線診断による世界の平均年間実効線量は 0.6 mSv であり、1 回のコンピュータ断層撮影検査は約 10 mSv の実効線量を与える場合がある（医療被ばくは通常は身体の一部に集中するものであること、すなわち、身体に均一に分配されるわけでないことに留意すべきである）。

実際に使用される他の量は、基本的な放射線防護に係る量から導かれる。囲み 4.4 では、こうして導かれる量の幾つかと、これらに関連する幾つかの問題について説明する。多くの量と単位は、事故の直後には公衆から容易に理解されなかった。ICRP は、事故当時及びその後に生じた放射線防護問題の評価で、「防護の量と単位に関する混乱が解決される」ことを確実なものとするために、将来国際的な対策が講じられるべきであると結論付けた[149]。

囲み 4.4.　測定量と実用上の用語

防護量である*等価線量*と*実効線量*は、直接測定することができない。したがって、人間が受ける、あるいは環境（又は周辺）中の存在による外部被ばくを測定するための機器は、それぞれ*個人線量当量*及び*周辺線量当量*と呼ばれる実用量を基準に較正される。これらは防護量の*代替*として、対象とする量を推定するために用いられる測定量であり、これも mSv 単位で測定される。これらの実用量は事故後のモニタリングに使用され、本報告書でモニタリング値を指すのに使用されている。

被ばく管理の概念を説明するため、被ばく状況の種類に応じて以下のような特定の用語が使用される。

— *計画被ばく状況*[1]では、計画的作業によって追加されることが想定される*追加線量*が使用される。こうした状況では、関連する個人線量の制約が*線量限度*として知られている。線量限度とは、計画被ばく状況から予想される個人に対する追加の実効線量又は追加の等価線量の値で、超えてはならないものである。線量限度は、特定の期間における外部被ばくからの追加の個人線量に加えて、その期間中の放射性核種の取込みによる追加の個人線量預託に適用される。
— *緊急時被ばく状況*[2]においては、(1)*予測線量*（防護措置が講じられない場合に受けると予想される線量）、(2)*回避線量*（防護措置が講じられると回避できる線量）、及び(3)*残存線量*（防護対策が終了された後に残る*現存被ばく状況*[3]で受けると予想される線量）という 3 つの線量の概念が使用される。参考*レベル*が防護を最適化するためのガイダンスレベルとして残存線量に適用される。参考レベルは、「これを上回る被ばくの発生を許す計画は不適切であると判断され、これを下回る線量範囲では防護の最適化が実施されるべき」線量レベルを表す[129]。

例えば地表の放射能や公共消費財中の放射能といった環境中の放射能の存在に関する量など、*放射能*から派生する量もある。これらに由来する関連の量は、*単位面積あたりの放射能を表す沈着密度*（通常 Bq/m^2 で表される）、*単位質量又は重量あたりの放射能を表す比放射能*（Bq/kg）、あるいは*単位体積あたりの放射能を表す放射能濃度*（Bq/L）である。これらの量は、通常は*汚染*と呼ばれる。この用語は国際基準で、(1)表面又は固体、液体あるいは気体中（人体を含む）における放射性核種の*存在*で、存在が意図されていないか望ましくないもの、又は(2)こうした場所における存在を生じさせる*プロセス*、と正式に定義されており、いずれの場合も関連するハザードの大きさを示すものではない。しかし、*汚染*という用語には、存在又はプロセスといった正式な意味では意図されない不純物や危険という含意がある。

---

[1] *計画被ばく状況*は、計画的な放射線源の運用（例えば、福島第一原子力発電所の通常運転）、あるいは線源からの被ばくをもたらす計画された運用から生じる。防護と安全のための備えは事前に行うことができるため、被ばくは当初より制限することができる。計画被ばく状況では、一定レベルの被ばくが生じることが予想される。
[2] *緊急時被ばく状況*には、事故の結果として発生し、悪影響を回避若しくは緩和するために速やかな対策が必要な被ばくの状況が含まれる。
[3] *現存被ばく状況*とは、制御の必要性に関する決定を下す必要がある時に既に存在する被ばくの状況であり、これには緊急事態の被ばく状況が終結したと宣言された後に、原子力又は放射線の緊急事態から生じる残留放射性物質による被ばくが含まれる。

不確かさ

事故の放射線影響の推定は多くの不確かさを伴い、しばしば当該量の推定値の範囲として表される。こうした不確かさの中には、該当する変数の統計分析後に、例えば外部被ばくによる個人線量率の推定などで、既に計上されているものもあるが、全ての不確かさが解決されているわけではない。放射線被ばくによるリスクは他の作用因子への被ばくのリスクより理解が進

んでいるものの、該当する不確かさが適切に対応され、また伝達されることが重要である[166, 167]。

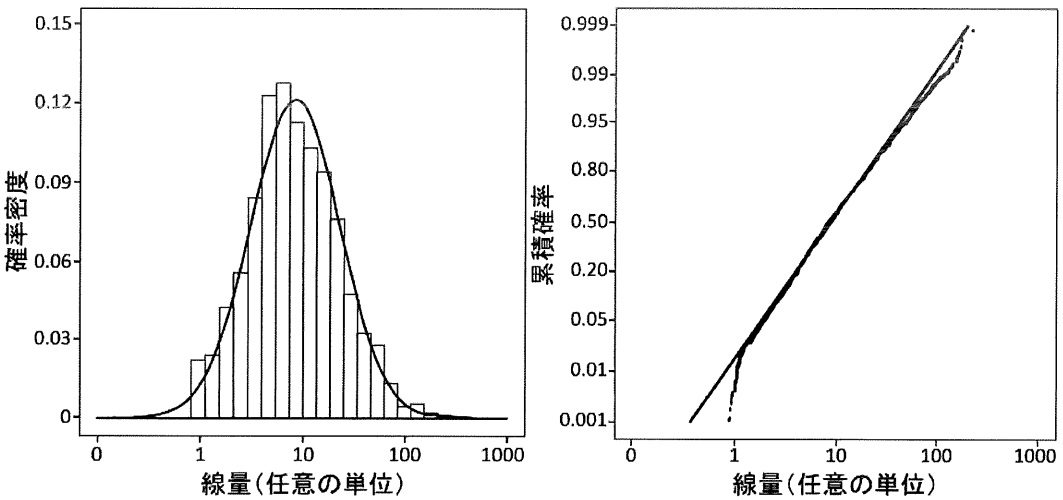
統計分析

不確かさに対応するために、関連する幾つかの変数データの統計分析が行われた。変数には食品中の比放射能や特に個人放射線量が含まれる。放射線量の分析は、アンケートと周辺及び環境放射線データの使用に基づく推定、及び個人線量計と取り込まれた放射能のホールボディカウンタによる個人モニタリングに基づく評価等を対象とした。統計分析の基礎は囲み 4.5 で要約されており、データの確率分布、特に分析に使用された*対数正規確率分布*について説明している。環境量の測定値を含む複数の測定データは、近似の対数正規確率分布に従って統計的に分布することが多い。被ばくした集団が受けた線量の統計分布に大量のデータが利用可能であり、その分布は近似的な対数正規分布を示す。関連する証拠は、UNSCEAR の職業線量推定[168]、及び 1986 年のチェルノブイリ原子力発電所事故による公衆線量の分析[169]からもたらされた。しかし、対数正規分布に基づいた分析で幾つかの問題点が提示され、その一部が囲み 4.6 で要約されている。

*囲み **4.5.** 推定データと実測データの統計分析*

本報告書で用いられた幾つかの関連データ—とりわけ人が受けた線量や、食品中の放射能—は、統計学的に分析された。変数量の数値（放射能や線量の数値など）は、度数分布に応じて分類された。このため、データは全体の範囲を*階級分け*、すなわち、*階級*ごとにあるいは数値の一連の小区間ごとにグループ分けし、データが分析のためにそれらの中に整理された。各階級のデータは、階級を表す長方形から成るダイアグラムである*ヒストグラム*に隣り合わせで図示された。その横軸が対応する量の数値を示し、その縦軸が各階級のデータ数を表している。その上でヒストグラムは、それぞれの長方形の数値に長方形の面積の合計を 1 とする係数をかけて正規化された。データの数が十分にあり、またデータ範囲の間隔が極めて小さくなれば、ヒストグラムは当該量（例えば、食品中の放射能や人が受ける線量）がその値をとる可能性を表す*確率密度関数*と呼ばれる滑らかな曲線に近づく。

最も普通に見られる分布は、最大確率を中心として対称的な釣鐘型の分布を示す*正規*分布（ガウス分布）であるが、本報告書の目的にとって最も関係があるのは、*対数的正規分布*又は*対数正規分布*である。対数正規分布は、放射能や線量のようなある量の確率分布であって、その対数が正規分布に従うような分布である。したがって、対数正規確率密度関数は、量の対数の関数として描かれたときにのみ、最大値に対して対称となる。そのような対数正規確率分布の一例が下図の左側に、理想化されたヒストグラムと確率密度関数として描かれている。



確率密度関数は*積分*することができる、つまり、正規化されたヒストグラムの階級値を、小さな

方から大きな方へ向かって足し合わせることができる。このように足し合わせた結果は、量の関数として*累積確率関数*と呼ばれ、ある確率分布を持った量が、特定の数値、あるいはそれよりも小さな数値を持つ確率を示す。

*対数正規累積確率関数*は、量の値（線量など）の対数を横軸とし、*正規*分布の累積確率を縦軸とする座標平面上に、直線としてプロットすることができる。そのような例が上の右側の図である。ここでは、左図の階級の実際の実験データの積分が、直線と対応して描かれている。

囲み 4.6.　対数正規分布の問題点

一群のデータを階級分けすると、通常は比較的滑らかな階級レベルの分布を示すが、提供されたデータ群の中にはそうならないものもあった。そのようなデータ群の場合、通常は多くのデータが単一の階級に集中するために分布がゆがんでいるように見える。例えば、値の大きな部分については正常に分布しているにもかかわらず、検出限界近くの全てのデータが一つの（最初の）階級に集中していた場合がある。統計学的な分析においては、このような誤解を与えるようなデータの集積を、実際のデータから（平均値や標準偏差などの関連統計量を利用して）導出された確率密度分布によって分散させるようにし、これに基づき、より多くの階級を含む、推測による無作為に作られた分布を確立させた。結果は、現実のデータの統計的数値に基づいた、かつ滑らかな確率密度分布曲線が当てはまるようなヒストグラムであった。この確率密度関数は、データが十分に詳細かつ判別されている場合に、理想的な分布がどうあるべきかを示すものであり、本報告書の関連図の中では、累積確率関数とともに示されている。１つの図では、階級の実際の分布が比較のために示されている。

データの範囲全体にわたって対数正規分布に正確に従うことは観察され得ないかもしれないが、そのずれ、特に累積確率の直線からの逸脱は、通常説明することができ、分析の重要な部分を成す。直線からの逸脱の原因は、測定そのものの不確かさと、サンプリングの過程における統計学的特徴の不確かさの両方に原因がある。人が受けた線量の分析に関わる、事故状況で典型的な特別な問題点は、被ばくした人々の集団が非均一的な性質を持っている可能性があることにあった。その他の原因としては、データの分布が制限されていたことがある。例えば、高線量の領域でデータが予想した累積確率よりも高い（高い線量を受ける人が予想よりも少ない）場合、最もあり得る解釈は、線量制限が成功裏に適用されたということである。もし低い線量領域でデータが予想した累積確率よりも高い（予想よりも多くの人が低い線量を受けた）としたら、あり得る解釈は、検出限界に等しい線量がこれらのレベルよりも低い線量を持つ全ての人に（誤って）割り当てられたということであり、逆に、予想よりも低ければ、検出限界レベル以下の人々にゼロ線量が（これも誤って）割り振られたということである。時に地域データの中で高度な不一致により、直線からのずれが明らかとなった。例えば、避難した人々とある地域に残った住民といった二つの異なる人口集団が混合したときには、それぞれの地域で受けた線量が反映され、それぞれのセクターに応じた累積確率分布の傾きに変化があるであろう。時には、情報の入手に時間がかかったことが、データをゆがめることがある。例えば、時間の経過とともに放射性物質が崩壊するなどである。対数正規累積確率曲線の直線からのずれは、基礎となるデータについてのあり得る推定を導くために利用することができる。

4.1.　環境中の放射能

事故は、環境への放射性核種の放出をもたらした。放出の評価が、多くの機関によって様々なモデルを使用して実施された。大気への放出のほとんどは、卓越風の風向に従って東の方向に飛ばされ、北太平洋に沈着し、拡散した。放射性物質の量と組成の推定における不確かさは、大気への放出の海への沈着に関するモニタリングデータの不足などの理由により、解決が困難であった。

風向の変化は、大気への放出の比較的小さな部分が陸上、多くは福島第一原子力発電所から北西方向に沈着したことを意味した。陸上環境に沈着した放射性核種の存在と放射能濃度がモニターされ、特性が明らかにされた。放射性核種の放射能測定値は、物理的崩壊、環境輸送プロセス及び除染活動のため、時間を追って減少する。

大気からの沈着により海に入る放射性核種に加えて、福島第一原子力発電所からサイトの場所の海への直接の液体の流出と放出があった。海洋での放射性核種の正確な動向は測定のみでは評価が困難であるが、海洋拡散を推定するために多くの海洋輸送モデルが使用された。

*ヨウ素 **131**、セシウム **134** 及びセシウム **137** などの放射核種が放出され、飲料水、食品及び幾つかの非食用品目で検出された。これらの製品の消費を防ぐための制限が、事故への対応として日本の当局によって定められた。*

4.1.1. 放出

福島第一原子力発電所の事故による放射性核種の放出に関する多くの評価が、確立された数学モデルや手法及び関連するコンピュータコードを使用して実施された（参考文献[170-177]を参照）。

事故の早期段階で、半減期がそれぞれ 10.76 年と 5.25 日の希ガス ^{85}Kr と ^{133}Xe が、大気放出物のプルームからの外部被ばくに寄与した。半減期が 8.02 日の短寿命の ^{131}I が、経口摂取あるいは吸入された場合には甲状腺への等価線量に寄与した。半減期がそれぞれ 2.06 年と 30.17 年のより長寿命の ^{134}Cs と ^{137}Cs は、外部被ばくと内部被ばくを通じて、等価線量と実効線量の双方に寄与した。^{131}I は比較的速く崩壊するが、甲状腺に比較的高い等価線量を与える可能性がある。幾つかの地域では、^{137}Cs は環境中に存在し続ける可能性があり、環境修復が行われなければ、個人に対する実効線量の要因になり続ける可能性がある。

ストロンチウム、ルテニウム及び幾つかのアクチニド（例えばプルトニウム）の放射性核種も、様々な量で放出された。セクション 2.1 で示されたように、中性子が 3 月 13 日の 05 時 30 分から 10 時 50 分までの間に発電所の正門付近（1～3 号機から約 1 km 離れている）で検出された。中性子は、炉心損傷の結果として放出された可能性がある放射性核種の自然核分裂に由来したものと推定される。そのような現象は予測できたことであり、比較的低レベルでのこれらの放射性核種の存在が報告されている。

大気への放出

希ガスは、福島第一原子力発電所からの初期放出の重要な部分であった。約 6000～12 000 PBq の ^{133}Xe が放出されたと推定されている（初期推定が評価に含まれる場合は 500～15 000 PBq）。放出された ^{131}I の平均全放射能は約 100～400 PBq であり、^{137}Cs については約 7～20 PBq であった（初期推定が含まれる場合は各々90～700 PBq 及び 7～50 PBq）。事故による放出量は、1986 年のチェルノブイリ原子力発電所事故による放出量の約 10 分の 1 と推定されている[169, 178, 179]。放出量の大半は、北太平洋に拡散した。その結果、放出された物質の量と同位体組成（ソースターム）は、放射性核種沈着物の環境測定値によって再確認することができなかった[177]。

海洋への放出

大気に放出され北太平洋へ拡散したほとんどの放射性物質は海洋表層に降下した。福島第一原子力発電所のトレンチからの高濃度放射能汚染水を主な源とする、サイトにおける海への直接の放出と流出もあった。放射性物質放出のピークは、2011 年 4 月初旬に観察された。^{131}I の海への直接放出・流出量は、10～20 PBq と推定された。^{137}Cs の直接放出・流出量はほとんどの分析

によって 1～6 PBq の範囲であると推定されたが、幾つかの評価は 2.3～26.9 PBq の推定を報告した[175]。

4.1.2. 拡散

多くの理論モデルが拡散パターンを推定するために使用された。大気、土壌、海水、堆積物及び生物相を含む環境中の ^{131}I、^{134}Cs 及び ^{137}Cs の放射能濃度の大規模な測定が実施され、放出物の拡散を推定するためにも使用された。

大気拡散

大気放出された放射性物質の輸送は、卓越風の向きに従って主として日本から東及び北の方向に向かい、その後地球を回った。図 4.1 は、様々な放射性核種の大気輸送とその沈着パターンを推定するために使用された多くの大気輸送モデルの一例を示し、^{137}Cs の地球規模の拡散のモデルによる分析結果を説明している[180]。この図は、色の度合いの小さな変化が放射能濃度の一桁の変化に対応する、参考文献の原典の色のコードを使用することにより、大気中の放射能濃度を示している。この図は、大気中の放射能濃度が福島第一原子力発電所からの距離に比例して顕著に低下したとする結論を裏付けることを目的とする。

極めて感度が高い放射能モニタリングネットワークが、事故が原因と考えられる極めて低レベルの放射能を欧州及び北米まで離れた場所で検出した。しかし、これらの放出が地球の環境バックグラウンド放射能に及ぼす影響は無視してよいものであった。

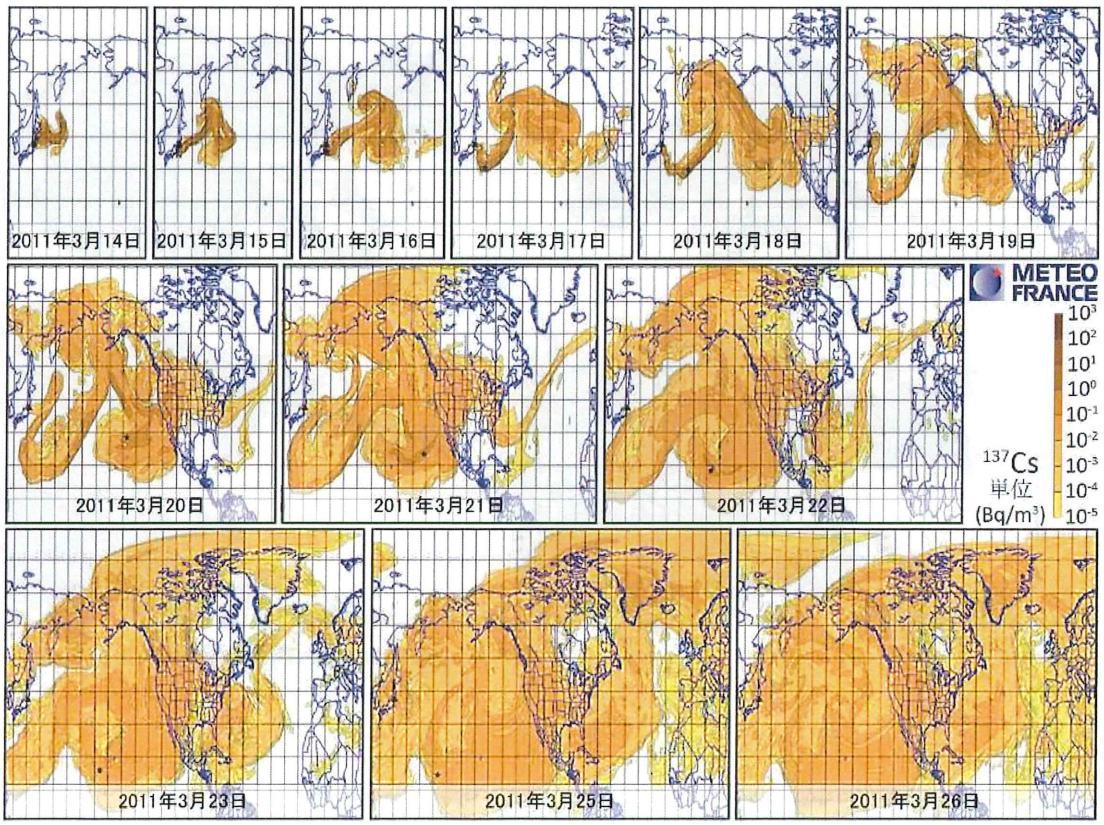


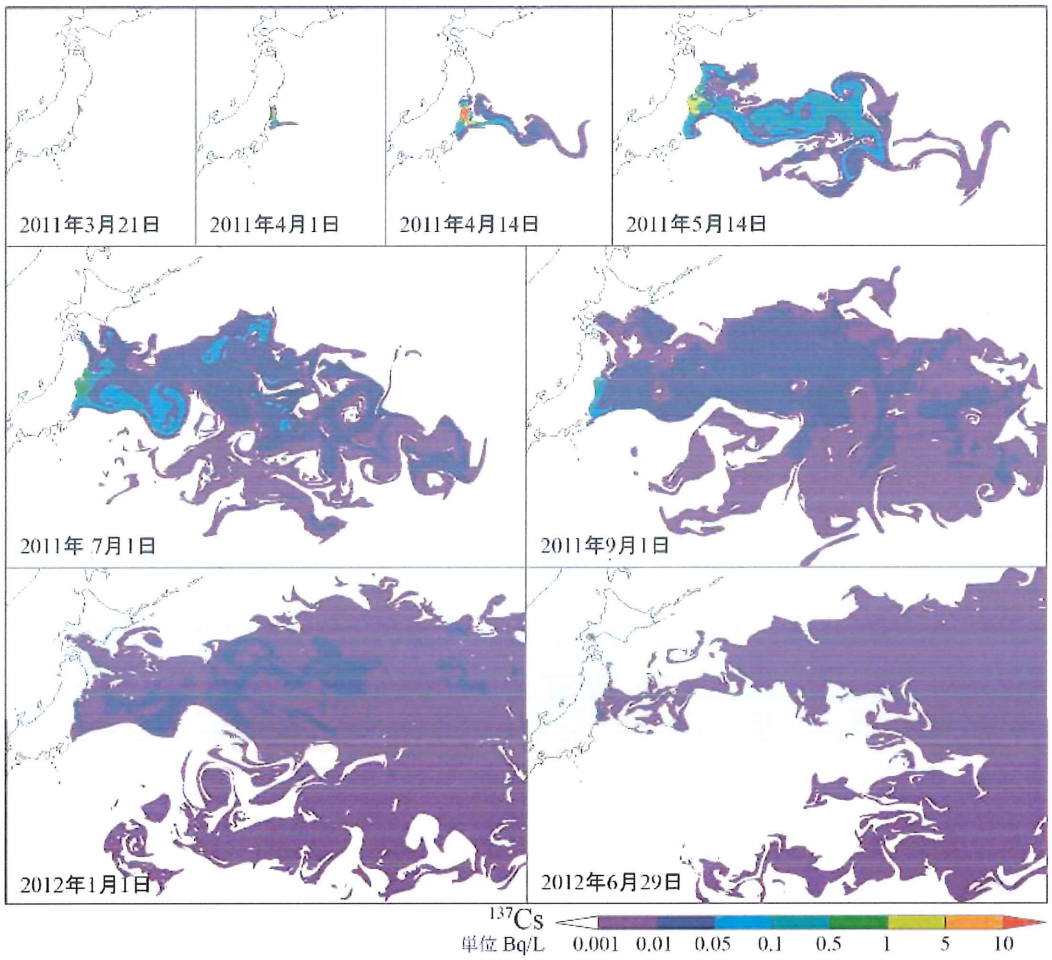
図 4.1. 原典の色コードで表示される ^{137}Cs の大気拡散の地球規模モデルの 1 つの結果（詳細については参考文献[180]参照）（出典：フランス気象庁）

サイトにおける海洋への直接放出・流出の海洋拡散

サイトにおいて海に入った放出・流出した大半の放射性核種は、黒潮[91]によって東の方向へ流され、北太平洋環流[92]を経由して長い距離を輸送され、海水によって高度に希釈された[181]。放射能は海洋を長距離にわたって拡散し、時にはクロマグロのような海洋生物相を経由する経路を通って、事故から遠く離れた場所で極めて少量が検出された[182]。

海洋における放射性核種の正確な移動は測定だけでは評価が困難であるが、それらの拡散パターンを評価するために幾つかの海洋輸送モデルが使用された。図 4.2 は、北太平洋における ^{137}Cs の拡散を説明するこれらのモデルの例を示す。この図は、各参考文献で用いられている原典の色コードを使用している。大気拡散の場合と同様に、色の度合い、すなわち色調の小さい変化が放射能濃度の一桁の変化に対応する。この図は、海洋中の放射能が福島第一原子力発電所からの距離に比例して顕著に低下したとする結論を裏付けることが目的である。全てのモデルは、海洋における ^{137}Cs の放射能が非常に低いことを示している。

(a)



[91]黒潮は、福島第一原子力発電所の前を流れる、北太平洋の西側を北に向かって流れる海流である。
[92]北太平洋環流は、５つの主要海洋環流の一つであり、北太平洋の大半に及んでいる。同環流は、時計回りの円形パターンを描き、北側で北太平洋海流、東側でカリフォルニア海流、南側で北赤道海流、西側で黒潮によって形成されている。

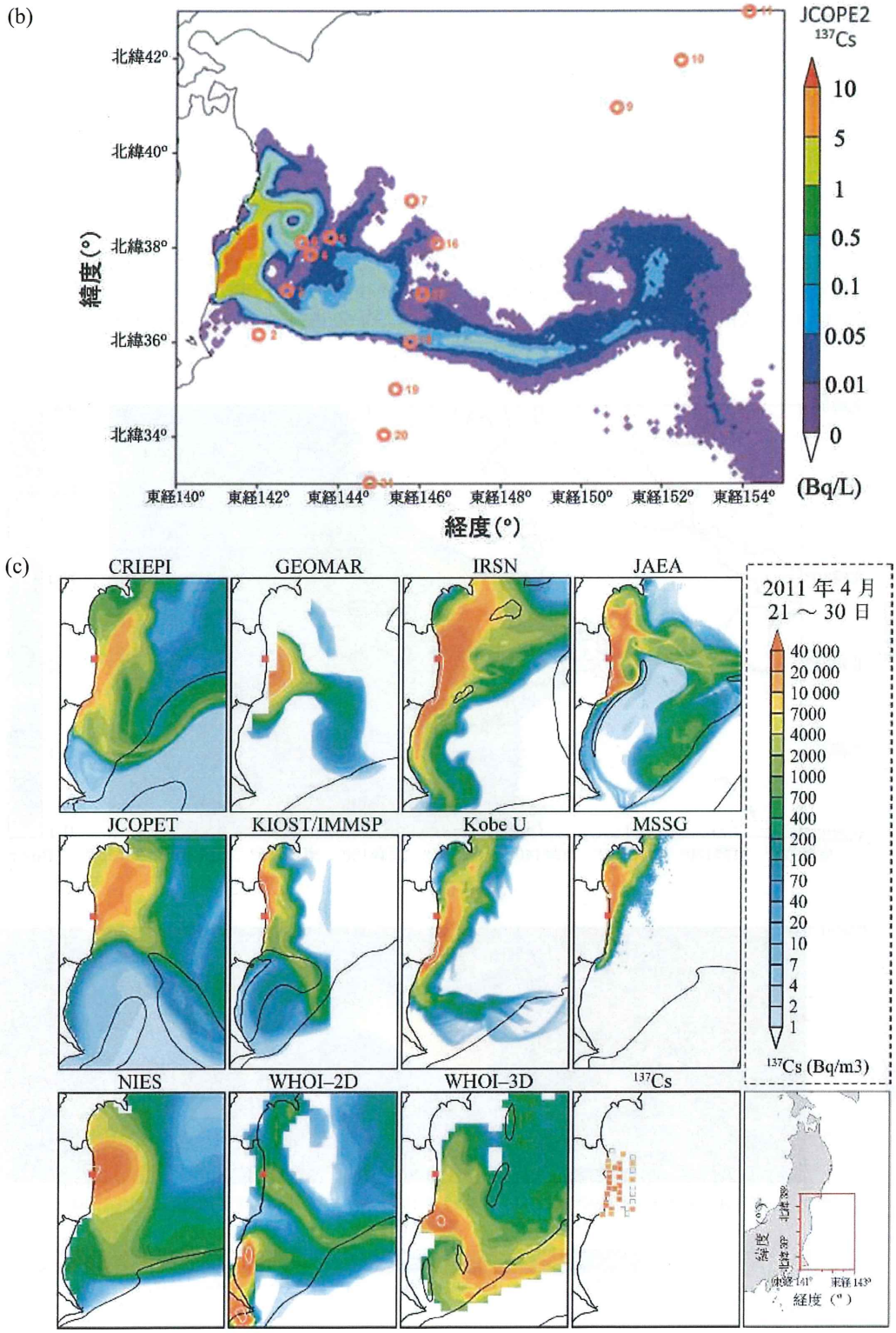


図 4.2.　海水中の ^{137}Cs の放射能濃度変動を推定するために用いられた様々な海洋モデル（使用されている色コードと単位はそれぞれの参考文献で用いられているもの）：(a) 2011 年 3 月 21 日から 2012 年 6 月 29 日までの汚染水モデル化の一例 [183, 184]、(b) 2011 年 4 月 14 日から 26 日までの表面水における ^{137}Cs の水平分布のシミュレーション [185]、(c) 2011 年 4 月 21 日から 30 日までの 10 日間平均の ^{137}Cs 濃度の水平分布であり、モデル名が各パネル上に示されている[175]。

4.1.3. 沈着

地球の表面に沈着する放射能は沈着密度として定量化され、単位面積あたりの放射能として測定され、通常は Bq/m^2 単位で表される。沈着が陸上であれば、通常は土壌「汚染」と呼ばれる。

海洋沈着

海洋への ^{137}Cs の沈着が様々なモデルを使用して研究された（図 4.3 参照）。

大気に放出され、海面に沈着した ^{137}Cs の量を正確に推定することは困難である[186]。参考として、1970 年時点の ^{137}Cs の地球全体の事故以前の沈着量は 290 ± 30 PBq と推定され、北太平洋における ^{137}Cs の代表的な（バックグラウンド）レベルは約 69 PBq であった[187, 188]。

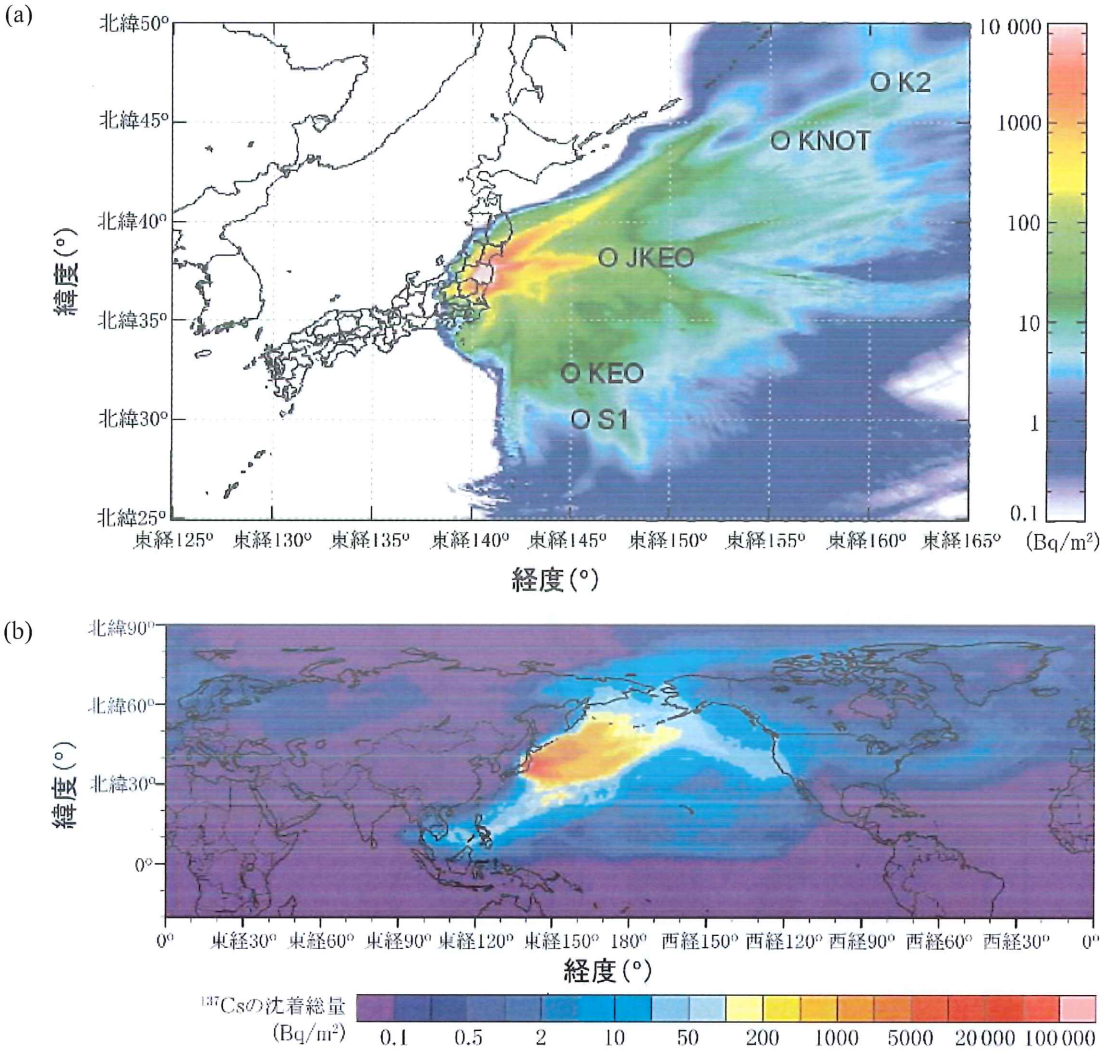


図 4.3. ^{137}Cs の海洋沈着密度を推定するために用いられた様々なモデル（単位は Bq/m^2）。(a) 2011 年 4 月 1 日までの大気からの沈着の総量（積算量）を推定するためのモデル[185]、及び(b) アンサンブル平均 ^{137}Cs の沈着の例（2011 年 3 月 11～31 日）[175]。

陸上沈着

ほとんどの大気放出は東の方向に拡散されたが、3 月 12 日、14 日及び 15 日に発生した放出は陸地に飛ばされ、関係する放射性核種、特に ^{131}I、^{134}Cs 及び ^{137}Cs が地上に沈着した。沈着パターンは雨、降雪、及び地形や土地利用などの他の局地的又は地域的条件の影響を受けて大きく異なった。陸上環境での沈着パターンに影響したもう一つの要素は、ヨウ素とセシウムの異なる物理的及び化学的特性であった。

長半減期の ^{137}Cs の最大の沈着は福島第一原子力発電所の北西方向で確認され、日本の地表における全沈着量はおよそ 2-3PBq であったと推定された[188]。沈着密度は、物理的及び環境的な崩壊で時とともに低下する。セシウムは、その化合物の溶解性のために比較的容易に環境中を移動し得る。風や雨のような風化作用、その他の環境影響によって環境中のセシウムが減少する可能性がある。これら全ての影響により、^{137}Cs はその物理的半減期より短時間で減少する。影響を受けた地域の多くでは、除染その他の環境修復の取組によって ^{137}Cs は更に減少している。

図 4.4 では、事故の生じたサイトから北西方向において空中で測定された周辺線量当量とその時を追った変化を、詳細なマップで示す。
（図 4.2 (c)も参照）。

事故による陸上環境中の ^{137}Cs の存在は、自然バックグラウンド放射線レベルから通常受ける被ばくに加えて、個人の長期の被ばくをもたらす可能性がある。主として過去の核実験による降下物に起因する ^{137}Cs の沈着密度の世界的なバックグラウンドレベルがある。世界的なバックグラウンドレベルは、UNSCEAR によって 1960 年代半ばに北半球の緯度 40～50° で約 4,000 Bq/m^2 の高さであったと推定され、当時の最低の世界的な値は、南半球の緯度 60～70° で約数百 Bq/m^2 であったと推定された[190]。幾つかの研究が局地的条件の影響を分析し、蓄積バックグラウンド沈着が約 10,000 Bq/m^2 あるいはそれ以上であった可能性があると結論づけた（例えば、参考文献[187]参照）。世界的な沈着レベルは 1960 年代以降に低下した。2000 年の場合、最高値は約 2,000 Bq/m^2 であると UNSCEAR によって推定された[190]。

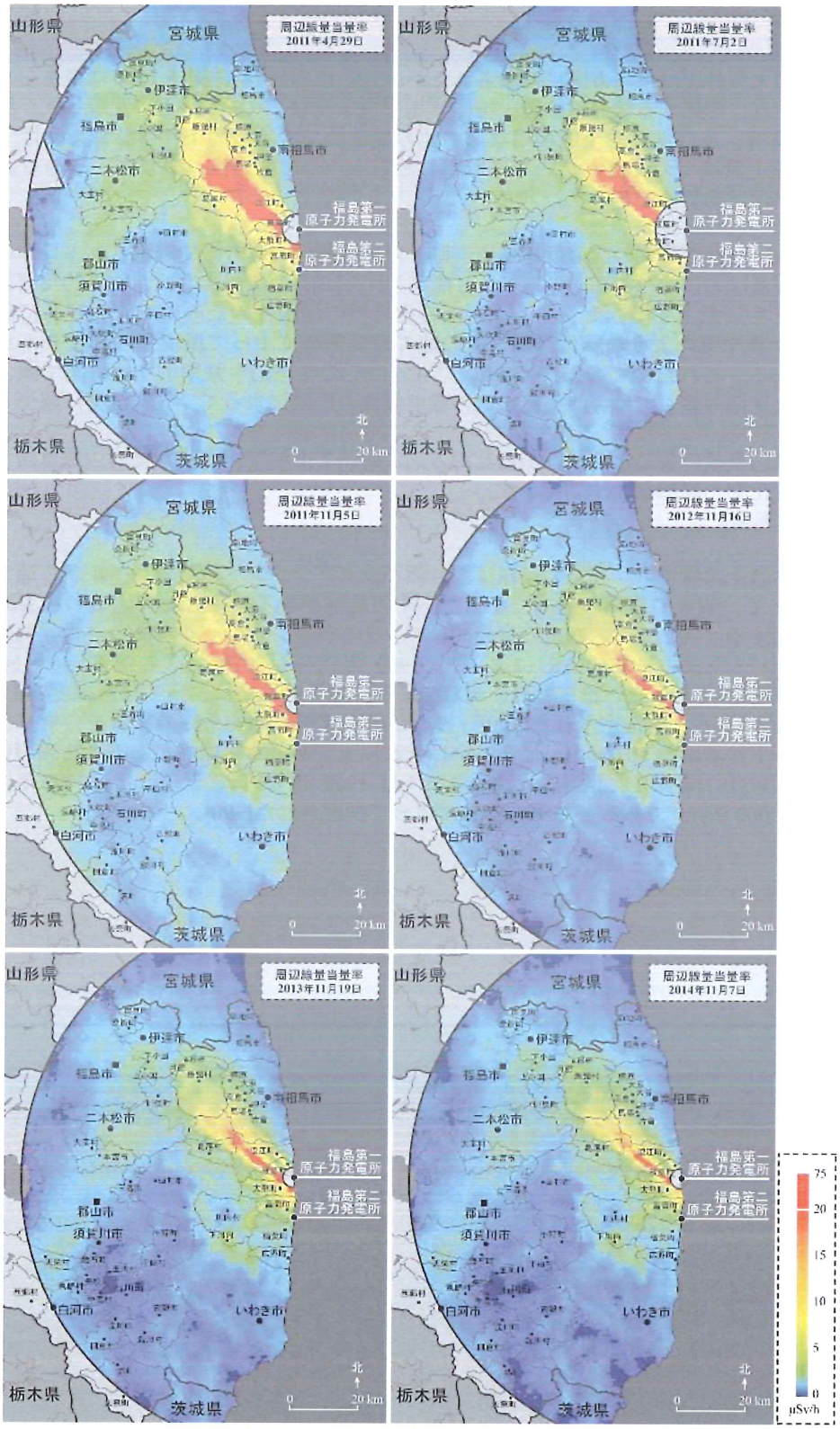


図 4.4.　発電所の北西地域に広がった放出物の沈着物に起因する空中周辺線量当量率（μSv/h）[189]

福島第一原子力発電所の北西の地域では、かなり高い沈着密度の ^{137}Cs が測定された。規模の桁として、最も影響を受けた地域では約 10,000,000 Bq/m^2、多くの地域では約 1,000,000 Bq/m^2 のレベルであった。福島県内の影響を受けた地域における沈着物の分布は均質でなく、福島県の最も影響を受けた区域のすぐ外側でのレベルは約 10,000 Bq/m^2 であった。日本の他の地域の中には高い沈着レベルを示す地域もあるが、日本の大半で事故に起因するレベルは一般に 1,000 Bq/m^2 より低かった[191, 192]。

沈着した ^{131}I の最高レベルは、事故直後に約 3,000,000 Bq/m^2 を超えたが、^{131}I の半減期が短いためレベルは急速に低下し、もはや計測不可能である。

4.1.4. 消費財

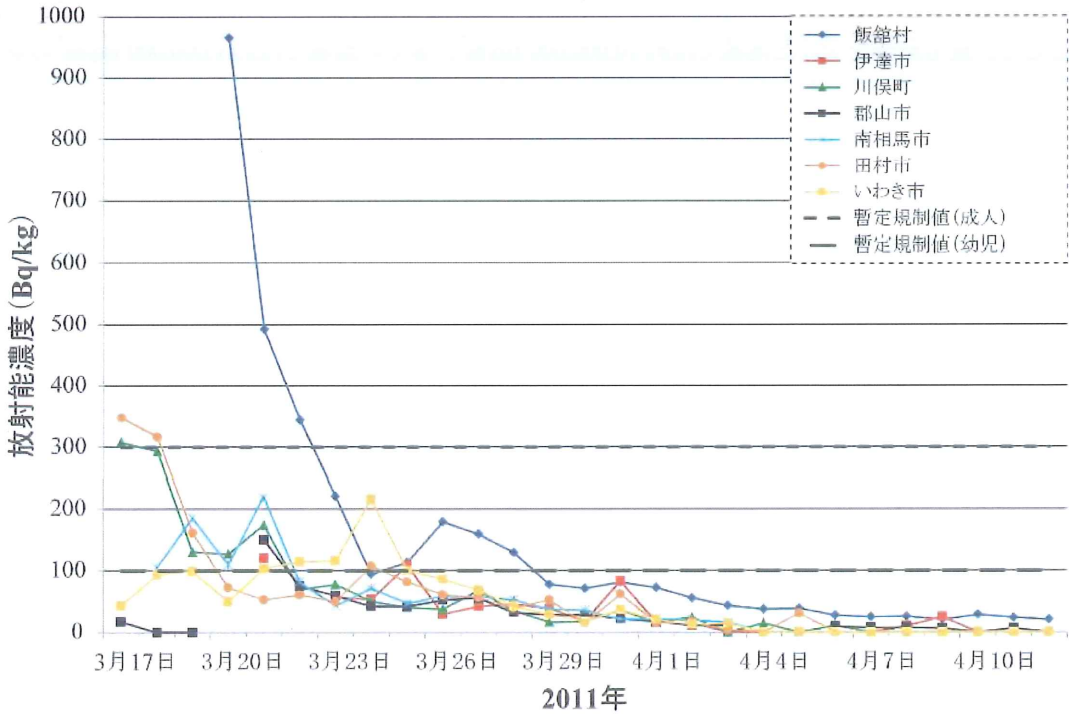
影響を受けた地域では、^{131}I、^{134}Cs 及び ^{137}Cs などの放射性核種が、食品、飲料水及び幾つかの非食用製品など、個人と家庭が日常的に使用する幾つかの消費財その他の品目で検出された。

事故後の 3 月 21 日、暫定規制値より高いレベルの放射性核種を含む飲料水と食品の消費を防ぐための制限が日本の当局によって設けられた（セクション 3 参照）。

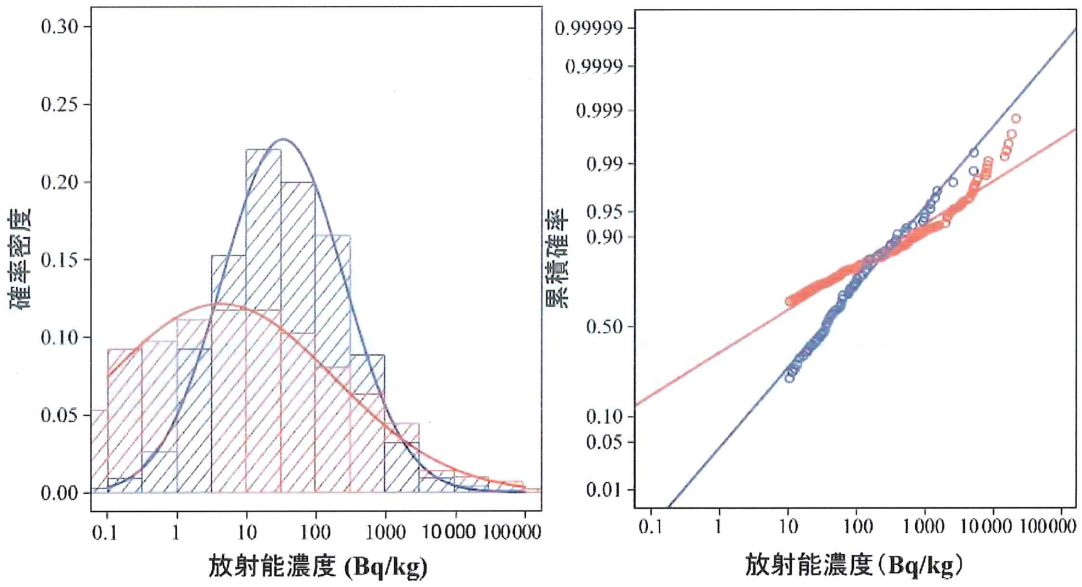
飲料水中の放射性核種の許容レベルに関する WHO のガイダンス値は、通常の状況を想定している（囲み 4.1.参照）。2012 年 4 月以降、日本の全ての飲料水は、WHO のガイダンス値を下回った[193]。

まれな例外を除いて、市場で入手できる食品中の放射性核種のレベルは、国際貿易に適用される食品規格で定められたレベルを超えなかった（囲み 4.1 参照）。イノシシの肉、野生のキノコ、シダを含む野生植物など、野生の食品で高いレベルの放射性核種が発見された事例があった[194]。野生の食品を食べることは日本では一般的でない。野生の植物は、ほとんどの場合、限られた数の人々によって、春の限られた期間に食される。農民による野生のキノコや植物の直接販売は非常にまれである。栽培されたキノコは、放射能濃度レベルが規制値を下回る場合に市場に出される。

飲料水の放射能濃度と食品中の比放射能の幾つかの例が図 4.5 に示される。福島県の様々な場所について、飲料水供給で測定された ^{131}I の放射能濃度の時間的推移が、日本の当局によって発出された暫定規則で定められたレベルと比較して示されている[195]。対数正規確率密度と累積確率分布が、事故発生から最初の 1 か月間の牛乳、及び事故発生後 3 か月間の葉物野菜の ^{131}I の比放射能について評価された。キノコの ^{134}Cs と ^{137}Cs の比放射能（主として露地物の栽培種のキノコを含む。）については、事故発生から 12 か月間評価された。これらの評価は、FAO が集めたデータの統計解析に基づくものであり[151]、数値が食品規格の 1,000 Bq/kg のレベルを下回る確率が約 90%であることを示している（日本の当局が定めたレベルは当初 500 Bq/kg であり、その後 100 Bq/kg に引き下げられた[193]。）。この慎重なアプローチは、生産者と消費者に困難をもたらした。

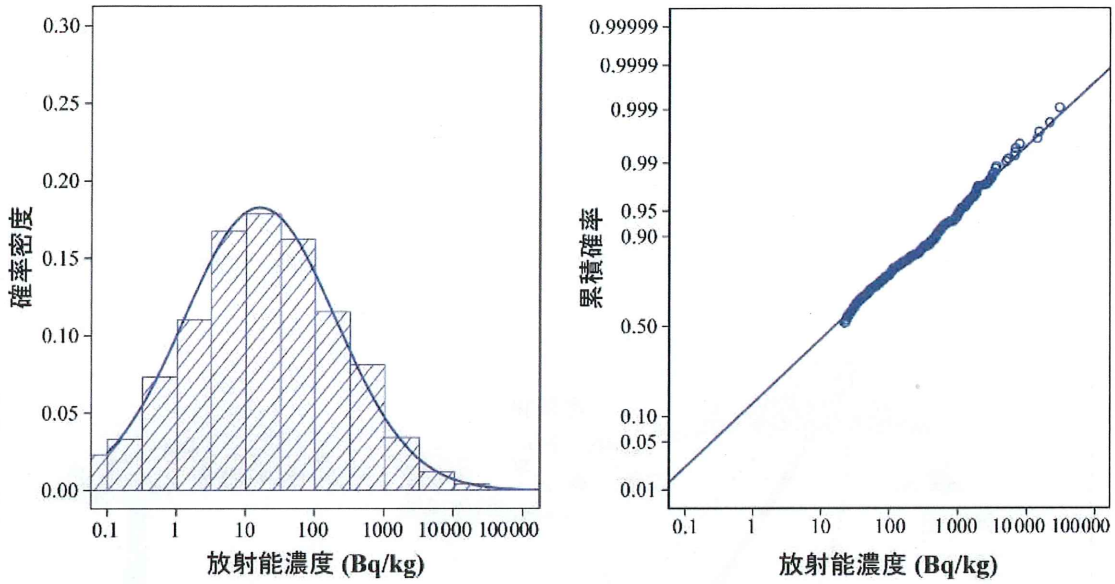


(a)



^{131}I：牛乳－最初の1カ月：平均＝34 Bq/kg、95%信頼区間＝(0.65、1800) Bq/kg
^{131}I：葉菜類－最初の3カ月：平均＝4.3 Bq/kg、95%信頼区間＝(0.0025、7300) Bq/kg

(b)



^{134}Cs及び^{137}Cs: 平均＝16 Bq/kg、95%信頼区間＝(0.11、2200) Bq/kg

(c)

図 4.5. 飲料水と食品中の放射能の例。(a)福島県の様々な場所の飲料水供給で測定された ^{131}I の放射能濃度の推移[195]。(b)事故発生から最初の 1 か月間の牛乳、及び事故発生後 3 か月間の葉物野菜の ^{131}I の放射能濃度の対数正規確率分布。(c)事故発生後 12 か月間のキノコの ^{134}Cs + ^{137}Cs の放射能濃度の対数正規確率分布[151]。（図(b)と(c)は正規化された理想的な確率密度分布（囲み 4.6 参照）と累積確率分布を示す。食品中の放射能濃度には 10 Bq/kg の名目上の検出限界が使用された。）。

4.2. 放射線被ばくに対する人の防護

*事故を受け、日本の当局は、最近の **ICRP** の勧告[93]に含まれる線量の保守的な参考レベルを適用した。幾つかの防護措置と対応の適用は、実施する当局にとって困難であり、影響を受ける人々にとって非常に厳しいものであることが明らかとなった。*

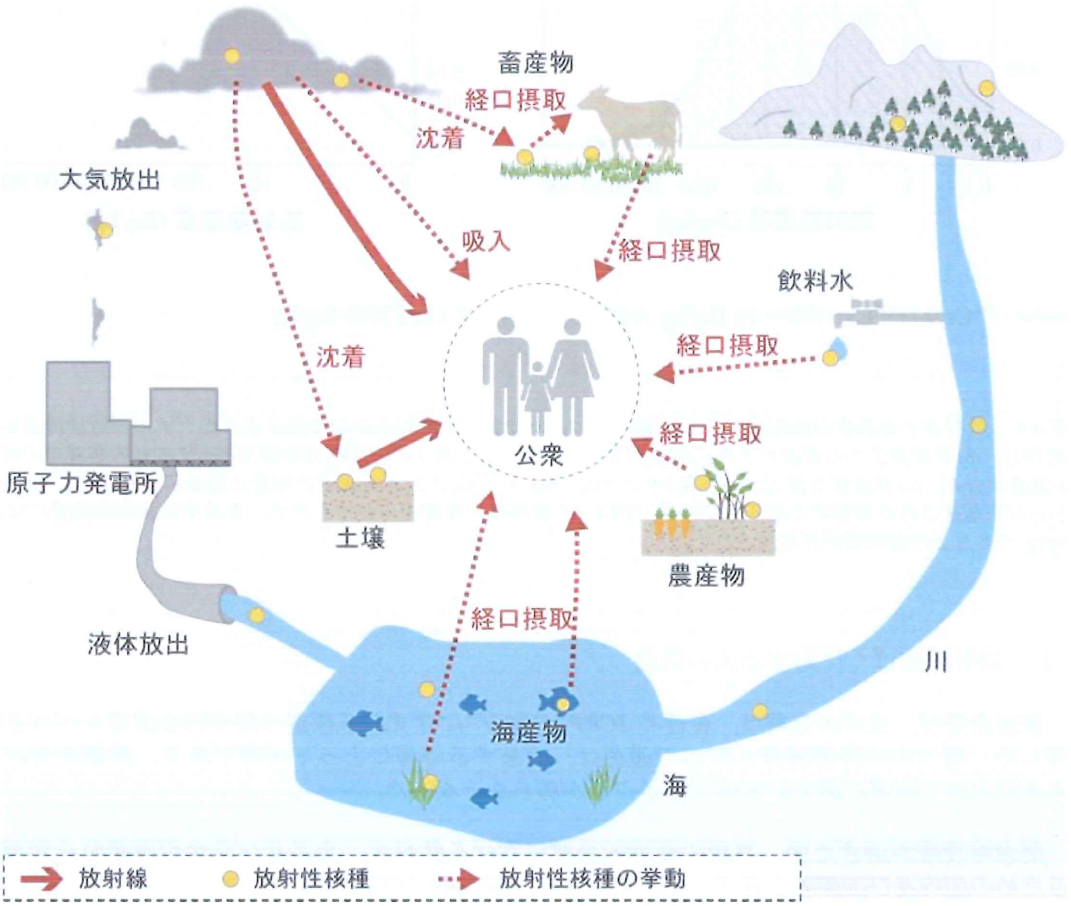
緊急時段階が過ぎた後、事故の長期的余波における飲料水、食品及び非食用消費財を管理するための国内及び国際的な基準とガイダンスに、幾つかの相違があった。

人々は、被ばく経路と呼ばれる幾つかの異なるルートを通じて事故に起因する放射線に被ばくした。これらについては囲み 4.7 で論じられる。人が受けた放射線量は、様々な被ばく経路によるモデル化及び/又は環境・個人測定によって推定された。こうした推定と測定値は、人の被ばくを抑え、人の防護を確実にするために用いられた。

[93] 放射線防護に関する国際勧告は、ICRP によって発出される。これらの勧告は、幾つかの国際機関によって策定・設定され、IAEA の後援を受けて発出される放射線防護基準（電離放射線からの防護と放射線源の安全のための国際基本安全基準（基本安全基準、すなわち BSS））を含む国際安全基準の設定において考慮される。BSS は、世界中で、電離放射線の被ばくの潜在的に有害な影響からの人と環境の防護のための国内規制整備に使用されている。2007 年の ICRP の勧告は、放射線防護の枠組みの改訂をもたらした。これには防護戦略への参考レベルの導入が含まれた。事故当時、BSS は、これらの勧告を反映させる等のために改訂中であった。

囲み 4.7.　被ばく経路

被ばく経路とは、放射性物質が環境中を移動して、最終的に人々を放射線量にさらすに至る過程を構成する道筋、変化の連鎖又は事象である。被ばく経路は多くの側面によって特徴づけられ、それらには物質が環境に到達するプロセス、物質が線源から移動する媒体、人が放射線の影響を受ける被ばく部位、外部放射線に人が被ばくする方法と放射性物質が人体に入る方法（例えば、飲食による、あるいは皮膚を経由する。）を説明する被ばく経路、及び潜在的に被ばくする可能性がある住民が含まれる。下図は、福島第一原子力発電所事故からの被ばく経路の単純化された概要を示す。



4.2.1.　公衆被ばくの制限

事故当時に適用可能であった基本安全基準（BSS）の版は 1996 年に発行されたもので[137]、1990 年に発行された ICRP 勧告[196]に基づいていた。この版には、予想される予測線量と回避線量の潜在的減少を考慮した事故時の介入レベルに対する要件が含まれていた。事故当時、1996 年版 BSS は、2007 年に発行された ICRP 勧告[129]を反映させるために改訂作業中であった（囲み 4.8 参照）。この勧告は、緊急事態に対処する異なるアプローチ、特に個人の防護対策の基準として作成されていた介入レベルの概念の見直し、及び防護戦略の決定に使用されることを目的とした参考レベルの概念の導入（一般的基準が個人の防護対策に取組むための安全基準に含まれるという前提で）が含まれていた。

囲み 4.8.　事故当時に有効であった基本安全基準の改訂：参考レベル

事故当時に有効であった放射線防護に関する国際安全基準は、「電離放射線の防護と放射線源の安全に関する 1996 年の国際基本安全基準」、すなわち 1996 BSS[137]であった。この基準は、個人が計画的で規制対象の行為から受ける追加の実効線量を年間 1 mSv に制限することを求めた（特別な事情の下では、連続する 5 年間の平均実効線量が年間 1 mSv を超えないことを条件として、最大で 5 mSv の実効線量を適用することができる。）。1996 BSS は、これらの線量限度は、予測線量と回避線量、及び最終的な残存線量の潜在的な削減を考慮しなければならない事故の場合に、介入を行うかどうか、及びどのように介入するかに関する決定とは、関係ないことを強調した。特に緊急事態に関する 1996 BSS の要件は、屋内待避、避難、ヨウ素剤による甲状腺ブロックなど、介入の実施が緊急事態において予期される一般介入レベルと、食品に対する一般対策レベルを示した。

さらに、IAEA は 2002 年、屋内退避、避難及びヨウ素剤による甲状腺ブロックなどの防護対策の実施に関する線量基準を含む、原子力又は放射線緊急時への備えと対応に関する特定の要件を含む安全基準[69]を発出した。この基準は、緊急事態が発生した場合にその影響を最小限に抑えることを目的として、原子力又は放射線緊急時への備えと対応の適切なレベルに関する要件を定めた（詳細についてはセクション 3 参照）。

事故当時、1996 BSS は、2007 年に発行された新しい一般 ICRP 勧告[129]も踏まえて改訂されているところであった。事故の直前に、ICRP は、緊急時被ばく状況での人の防護[127]、及び原子力事故又は放射線緊急事態後に長期汚染区域に居住する住民の防護[197]へのその新しい勧告の適用に関する具体的勧告を発出していた。

2007 年の ICRP の勧告は、防護戦略に使用すべき参考レベルの概念を含む、緊急事態の被ばく状況に対処するためのアプローチを改訂した。勧告された参考レベルは、実効線量が（急性又は年間で）20 mSv を上回り得るが 100 mSv を超え得ないというものであった。これは実効線量が 100 mSv に近づくとほとんど常に防護対策が正当化されるとの了解の下で、被ばく低減のための対策が攪乱をもたらすような例外的で極限的な場合において、個人の防護対策に対する一般的基準として適用されるものである。事故後の復旧段階の場合、参考レベルは 1 mSv を上回り得るが 20 mSv を超え得ない。新しい勧告は更に、参考レベルに選定される数値は、当該被ばくの支配的な状況によると強調した。

新しいアプローチは、2014 年に発行された改訂 BSS に IAEA 安全基準シリーズ GSR パート 3、放射線防護・放射線源安全：国際基本安全基準として導入された[198]。

2007 年の ICRP 勧告は、緊急事態を含む全ての被ばく状況に関する例を含む参考レベルの枠組みを示した。勧告は、放射線緊急事態による最高計画残存線量の例として、急性又は年間で 20 mSv を上回り得るが 100 mSv を超え得ない参考レベルを勧告した。同勧告は、線量の削減を検討すべきこと、線量が 100 mSv に近づくにつれて線量を削減するためさらなる努力が行われるべきこと、放射線のリスクと線量を下げる措置に関する情報を個人が受け取るべきであること、及び個人線量の評価を実施すべきであることも勧告した。日本の規制機関である原子力安全・保安院は、最も低いレベルである 20 mSv を公衆防護の参考レベルに適用することを選んだ。

子供の防護

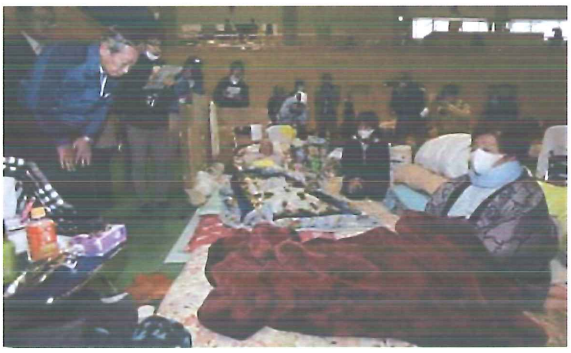
子供の防護は、事故の影響を受けた地域で、親にとって特別の懸念事項であった。現在の ICRP 勧告は、防護の目的で、子供を含む住民全体に対して成人の住民に対するよりも（約 30%）高い名目リスク係数を使用している。この相違は、国際的な放射線防護勧告と基準に反映されている。

公衆を防護するために講じられた放射線防護措置と対策の影響

公共施設の適切なインフラは、原子力又は放射線緊急事態の後に公衆被ばくを制限するための措置を支える上で不可欠である[199]。地震、津波及び事故の影響に対して、現地のインフラが崩壊した状況において対処しなければならなかった。地震と津波のために、多くの公共施設、家屋及び商業が破壊されるか、損害を受けた。電話とインターネットへのアクセス、電気、ガス及び飲料水の供給、公共輸送、並びに食品、ガソリン及び灯油の流通は、いずれも深刻な打撃を受けた。外気温は低く、降雨と降雪があり、暖房は不十分であった。これは多くの住民が暖かい衣服とコートがなければ避難所に長期間滞在することができないことを意味した。

こうした困難な状態は、住民を放射線被ばくから防護するために必要な防護措置の実施に影響した。例えば、ほとんどの避難所で水が配給制になり飲用に取っておくこととされため、避難した住民は体を洗って除染することができなかった。

幾つかの防護対策は当局にとって非常に困難で、影響を受けた個人と地域社会にとって極めて厳しいものであった[200, 201]。屋内退避と避難は、地域社会から隔離され、日常のニーズを満たすための限られた供給へのアクセスしか有しなくなった約 16 万人の住民にとって、特に撹乱的であった（図 4.6(a)）。住民は最終的に移転したが、住民の通常の生活状態は深刻な影響を受けた（図 4.6(b)）。雇用と地域社会の活動への参加は限定された。住民の将来の見通しは不確かで、将来の計画を立てることは非常に困難であった。



(a)

(b)

図 4.6.　初期の避難は避難所での混雑した状態をもたらした。(a)東京電力の幹部役員が 2011 年 3 月 22 日に避難所にいる避難者に謝罪する模様（photograph courtesy of Koichi Nakamura/AP Images/picturedesk.com）；(b)移転した住民の通常の生活条件は大きな影響を受けた（photograph courtesy of Dr Yujiro Kuroda/Fukushima Medical University)。

地震と津波の影響を既に受けていた住民は、屋内退避、避難及び移転によって生じた更なる身体的及び心理的ストレスも受けた。公衆の消費財に対する制限は重要かつ必要であったが、地元生産者に経済的、風評上又は社会的な損害を与えた。

4.2.2.　緊急作業者の被ばくを含む職業被ばくの制限

日本は ILO の下で採択された 1960 年放射線防護条約（第 115 号）の締約国である[164]。職業被ばくに関する日本の規則は、職業防護に関する国際的な勧告と基準に沿っていた。これらの規則は、5 年平均で年間 20 mSv、1 年間に 50 mSv の実効線量として職業被ばくの線量限度を定めていた[137]。「人の健康及び*安全*、生活の質、財産並びに環境に対する*緊急事態*の影響を緩和するための対策を実施中に職業被ばくの*線量限度*を超えて被ばくする可能性がある労働者」[48]である緊急作業者の場合、100 mSv の実効線量限度の基準が存在していた。この基準は、

2011 年 12 月 16 日まで福島第一原子力発電所から 30 km 以内にいた緊急作業者について、日本の当局により一時的に線量限度 250 mSv に引き上げられなければならなかった（セクション 3.2 参照）。

事故当時、国際基準（1996 BSS）によって定められていた「特別な事情」における職業被ばくの線量限度は 100 mSv であった[137]。ICRP によって国際的に勧告された参考レベルの上限も 100 mSv であったが[129]、この勧告は、例外的な状況では、情報を得た自主的な作業者は、人命救助、放射線によって誘起される深刻な健康影響の防止、あるいは大災害の進展の防止のためには、このレベルを上回る線量を受ける可能性があることを示している。250 mSv の数値を設定するにあたり、日本の当局は、ICRP による以前の勧告[196, 202]、及び原子力事故の更なる悪化を防ぐことを目的とする緊急活動や緊急作業に従事する者に対して 500 mSv のガイダンス値を示した IAEA の安全基準の要件を考慮した。緊急作業者に対する改訂線量限度は、当局による緊急事態宣言から 3 日後に厚生労働省の特例に関する省令で実施された（2011 年 3 月 14 日）。同省令は 2011 年 12 月 16 日に廃止された[203]。

4.3. 放射線被ばく

*短期的には、公衆の被ばくの最大の要因は、**(1)** プルームに含まれ地表に沈着した放射性核種からの外部被ばく、**(2)** ヨウ素 **131** の取込みによる甲状腺の内部被ばく、及び主としてセシウム **134** とセシウム **137** の取込みによる他の臓器と組織の内部被ばくであった。長期的には、公衆の被ばくの最も重要な要因は、沈着したセシウム **137** からの外部放射線である。*

放射線量の初期の評価は、環境モニタリングと線量推定モデルを使用し、その結果、幾らかの過大評価が生じた。本報告書の推定では、実際に受けた個人線量とそれらの分布に関するより強固な情報を提供するため、地方当局から提供された個人モニタリングデータも含められた。これらの推定は、公衆の構成員の受けた実効線量が低く、自然バックグラウンド放射線の世界的なレベルにより受ける実効線量の範囲と一般に匹敵することを示している。

*ヨウ素 **131** の放出と子供によるその取込みを伴う原子力事故の後には、彼らの甲状腺への取込みとその後の線量が特に懸念される。福島第一原子力発電所事故の後、飲料水及び葉物野菜と生乳を含む食品に制限が課されたこともあり、ヨウ素 **131** の取込みが限定されたため、報告された子供の甲状腺等価線量は低かった。事故直後のヨウ素の取込みに関しては、同期間の信頼できる個人放射線モニタリングデータが不足しているため、不確かさがある。*

***2011** 年 **12** 月までに、約 **2** 万 **3,000** 名の緊急作業者が緊急作業に従事した。彼らの大多数が受けた実効線量は、日本における職業上の線量限度を下回った。総数のうち、**174** 名は緊急作業者に対する本来の基準を超え、**6** 名は日本の当局が定めた一時的に改訂された緊急時における実効線量基準を超えた。緊急作業者の放射線量の早期モニタリングと記録を含む職業上の放射線防護要件の実施、幾つかの防護用装備の利用可能性及び使用、並びに関連する訓練において、幾つかの不十分な点が発生した。*

本報告書の線量推定は、囲み 4.9 に示すように、WHO と UNSCEAR による国際的な線量推定を基礎として用いた。本報告書はまた、利用可能な追加のデータ、特に福島県民健康管理調査のデータ、及び人や環境中の線量の直接測定データを得ることができた。これらのデータは専門家、研究所、地元自治体及び日本政府、及び東京電力から提供され、統計分析の対象となった。

囲み 4.9.　2012 年の WHO による線量推定[146]及び 2014 年の UNSCEAR による線量推定[148]

2012 年、世界保健機関（WHO）は、事故による放射線被ばくの早期評価を発表し、政府機関によって公表された情報や 2011 年 9 月までに収集した情報に対してモデル化手法を適用し、特徴的な公衆構成員の被ばく線量の初期推定を示した。当時、完全な評価に必要なデータは入手できなかったか十分ではなかった。幾つかの慎重な想定が用いられたため、一部の線量が過大評価された可能性がある。例えば、防護措置と食品の消費に関して、将来の健康リスクを過小評価する可能性を最小限に抑えるために、慎重な想定が用いられた。それにもかかわらず、同評価は、事故後の最初の 1 年間に福島県内の被ばく量が比較的高い 2 つの場所で公衆構成員が典型的に受けた総実効線量が 10～50 mSv の範囲であったことを示した。これらの最も影響を受けた場所では、外部被ばくが実効線量の主な要因であった。福島県の他の地域では、実効線量は 1～10 mSv の範囲内であると推定された。日本のほとんどの地域における実効線量は 0.1～1 mSv の範囲内と推定され、世界の他の地域では、実効線量は全て 0.01 mSv を下回り、通常はこのレベルをはるかに下回っていた。

2014 年、原子放射線の影響に関する国連科学委員会（UNSCEAR）は、作業者と公衆構成員の線量評価を含む事故に関する報告書を発表した。公衆構成員の外部被ばくによる実効線量の推定は、時間の関数として得られる様々な区域における ^{137}Cs の沈着密度に関して得られた情報、及び住民の滞在場所と移動パターンに基づいていた。UNSCEAR の推定は、最も高い平均線量推定の避難区域において、避難前と避難中に成人が受けた実効線量が平均で 10 mSv を下回り、早期に避難した場合はその約半分であったことを示した。福島市に居住する成人は、事故後の最初の 1 年間に平均で約 4 mSv の実効線量を受けたと推定された。1 歳の乳児の実効線量はその約 2 倍と推定された。

福島県内の他の地域及び隣接する県に住む住民が受けた実効線量は、これと同等若しくはこれより低いと推定された。日本の他の地域で受けた実効線量は、更に低いと推定された。福島県に住み続ける人の事故に起因する生涯実効線量は、UNSCEAR によって、平均 10 mSv をわずかに上回ると推定された。近隣諸国及び世界の他の地域において同事故に起因し得る放射線被ばくは、日本で受けた被ばくをはるかに下回り、実効線量は 0.01 mSv 未満であった。しかし、UNSCEAR は、この数値に関しては居住場所と消費する食品による個人差がかなり大きいことを強調した。

注：囲み 4.3 で示されるように、UNSCEAR によって報告された世界的な自然バックグランド線量は年間平均で 2.4 mSv であり（これは約 170 mSv の総累積生涯線量を意味する）、典型的なな範囲は 1～13 mSv であるが、10～20 mSv の自然バックグラウンド線量を受けるかなり大きな人口集団もある。

様々な推定は、異なる時期や異なる手法によって行われたため、異なっている。WHO の推定は一般に UNSCEAR の推定より高かったが、これは主として前者が事故後の非常に限られたデータに基づく早期の線量予測であったためである。WHO と UNSCEAR による公衆の線量推定は、個人線量を直接測定したデータが限られていたことにより制約を受け、主として環境中の放射線量に基づく線量推定モデルを使用した。こうした相違のために詳細な比較は困難であるが、本報告書の推定と WHO 及び UNSCEAR の推定は、線量が一般に国際的勧告と基準で定められた参考レベルを下回ったことを示す点でおおむね一致している。

4.3.1.　公衆被ばく

外部被ばく

外部被ばくによる公衆の実効線量を推定するための初期のアプローチは、主に周辺線量当量率の環境測定値のデータ、及び場所と個人の行動の計算・調査に基づくものであった。使用されたデータは、車載計器の使用を含む周辺線量当量の大規模な測定を含んでいた。

放射線医学総合研究所は、福島県民健康管理調査アンケートの回答者が原子力事故以降の 4 カ月間に受けた外部被ばくによる実効線量を推定した[204]。同推定は、住民が申告した移動経路と地元の環境における放射線レベルに基づくものであった。

最初の 4 カ月の外部被ばくによる個人実効線量に関して幾つかの推定が発表された[205-208]。例えば、相双地域[94]（「避難区域」と「計画的避難区域」を含む）では、住民の 98.7%で 5 mSv を下回った（最高実効線量は 25 mSv）。福島県全体では、避難区域と計画的避難区域を含め、線量は調査対象の住民の 99.4%で 3 mSv を下回った[208]。

本報告書では、2011 年 3 月 11 日から 7 月 11 日までの期間の福島県民健康管理調査のデータを使用して放射線医学総合研究所が推定した、福島県内の様々な自治体における外部放射線による個人実効線量の統計分析を行った（自然バックグラウンド放射線による外部被ばくは除外された。）。この分析の結果が、半径 20 km 以内の区域に位置する自治体とこの区域外の自治体に関して図 4.7 に示されている。この図は、最初の 4 カ月間の外部被ばく線量が、20 km 区域の早期避難の結果として、20 km 区域内の住民の方がこの区域外の住民よりも平均で低かったことを示している。20 km 区域内の結果は、区域外よりも広い分布を示す傾向がある。これは同じ地域社会の構成員が異なる場所に避難し、しばしば更に移動することにより、受けた線量が異なるに至ったためである。この複雑なパターンが放射線医学総合研究所によって 18 の避難シナリオを使用してモデル化された。

住民との面談、公衆線量を評価するための環境測定及び線量推定モデルには、不確かさが伴う。したがって、公衆の個人放射線モニタリングは、被ばく線量の信頼し得る再構築に極めて重要である。

外部放射線による個人線量をより確実にする情報が、個人線量計を使用した個人モニタリングのデータによってもたらされた。個人モニタリングデータが得られるようになると、受けた実効線量を推定するために、人の生活習慣とモデルについて仮定を用いるアプローチと、実際に受けた個人線量当量をモニターするアプローチという２つの異なるアプローチを比較することが可能になった[95]。

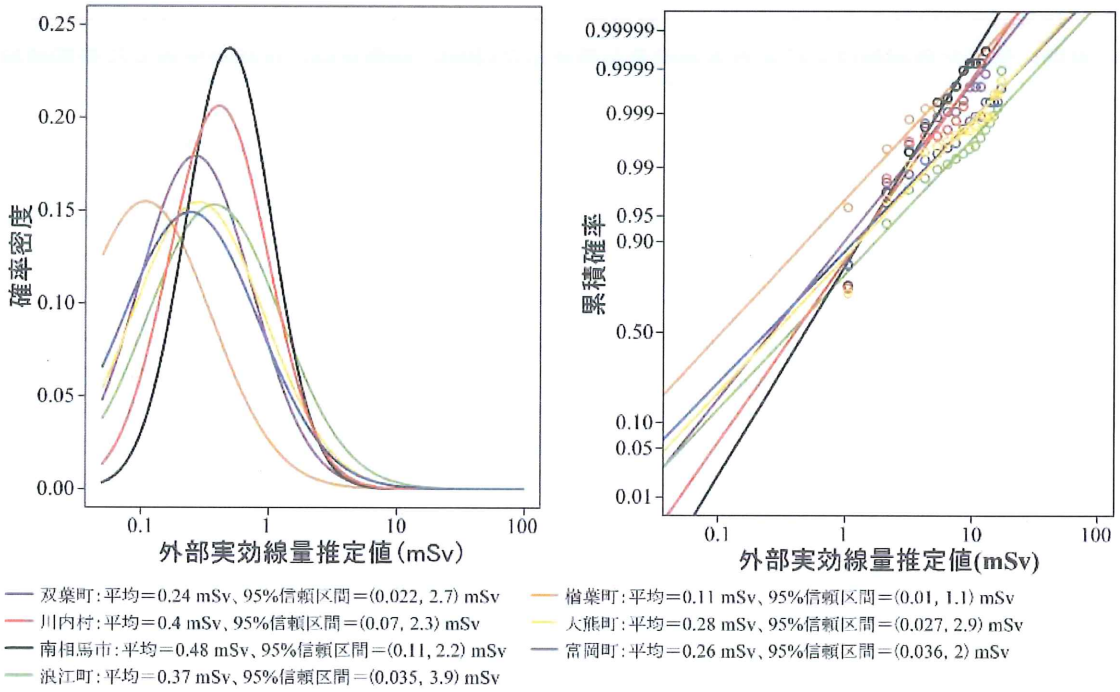
結果として、個人モニタリングによって測定された実際に受けた線量は、アンケートとモデル化から推定された線量より一般に低いことが示された。地方自治体によって実施されたこの比較の一例が図 4.8 に示されている。これはモデルによって推定された線量が、実際に受けた線量と比較して通常過大評価されていることを示している（これはチェルノブイリ事故後の線量評価の際にも観察された[169]）。

日本から IAEA に提供された大量の情報の中には、個人線量当量に関するデータとホールボディカウンタによる測定結果が含まれていた。

この情報は、異なる時期、期間にわたって、異なる測定手法を使用して記録されたものであり、全てではないが多くの影響を受けた地域で測定された。これらのデータに共通するのは、全ての個人線量当量が低いという事実であり（ホールボディカウンタから推定された預託実効線量は無視することができる。以下参照）、結果として、実効線量のレベルは典型的なバックグラウンド実効線量のレベルに匹敵している。

---

[94] 相馬市、南相馬市、広野町、楢葉町、富岡町、川内村、大熊町、双葉町、葛尾村、浪江町、新地町、飯舘村で構成され、その多くが「避難区域」又は「計画的避難区域」に指定された福島県東部の地域。
[95] 個人モニタリングに使用される量、すなわち個人線量当量は、実効線量の量の代替として用いられる。



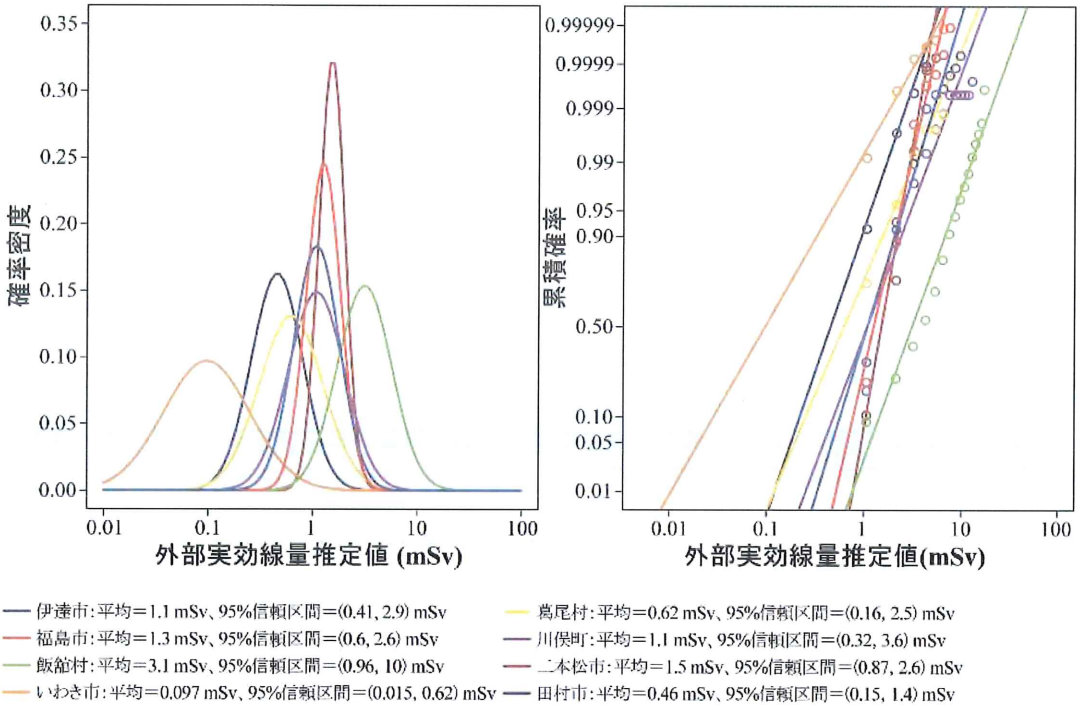


図 4.7.　福島県民健康管理調査のデータに基づく事故後 4 カ月間の福島県内の様々な市町村において推定された外部被ばくによる実効線量の対数正規確率密度と累積確率分布。上の 2 つの図は半径 20 km 以内の区域に位置する自治体の分析結果を示し（セクション 3 参照）、下の 2 つの図は半径 20km の外側の自治体での分析結果を示す。図の下の凡例に、これらの自治体における平均線量と 95%信頼区間を示す。元データでは、1 mSv 未満の線量が全て 1 mSv の階級に蓄積された。

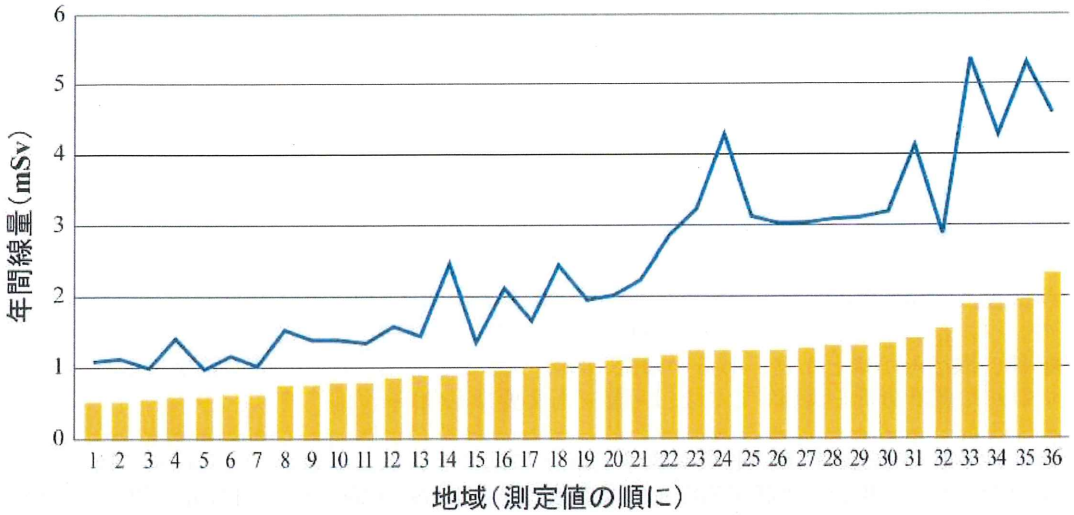


図 4.8.　2012 年 7 月から 2013 年 6 月までの間、事故の影響を受けた代表的自治体について推定された外部被ばくによる個人線量と実測値の比較。実効線量は 1 日当たりの屋内滞在時間を 16 時間、屋外滞在時間を 8 時間と仮定して評価された（実線）。実測値は、自治体の様々な地区で個人線量当量の個人モニタリングによって評価された（棒グラフ。地域は番号化）[209]。

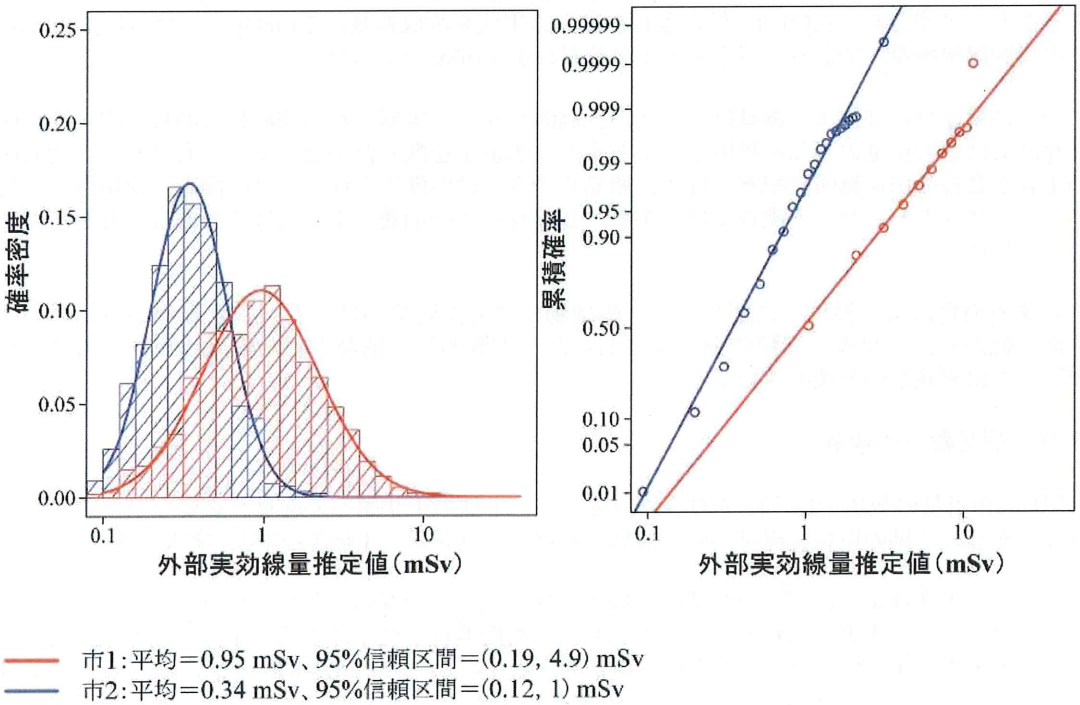


図 4.9.　日本政府が年間線量に換算できるデータが入手できた 2 つの市に関して提供した 2011 年の公衆の個人線量当量のモニタリング値の確率分布。市 1 については、正規確率密度分布が赤色で示されている。市 2 については、正規確率密度が青色で示されている。両方の市について、累積確率分布が示されている（囲み 4.6 を参照）。この分布は、個人線量当量が低く、平均は年間 1 mSv を下回ることを示し、95 %信頼区間で 5 mSv 未満であったことを示す。

図 4.9 は、年間線量に換算できる情報が入手可能であった、影響を受けた地域内の 2 つの自治体についての分析結果を示す。分析結果は、平均実効線量が年間 1 mSv 未満、95%信頼限界で個人の受けた線量が 5 mSv 未満であり、年間個人線量当量が低いことを改めて確認した。

内部被ばく

ホールボディカウンタを使用した放射性核種の取込みの測定が、放射線医学総合研究所、日本原子力研究開発機構その他の日本の機関によって実施された。

事故後に、福島県内の様々な場所において 20 万人を超える住民のモニタリングが実施された。そのレベルはおおむねホールボディカウンタの非常に低い検出限界よりも低く、人体への放射性核種の取込みがほとんど、あるいは全くなかったことが示された。その結果、これらのデータの詳細な統計分析を実施することは可能でも必要でもなかった。

放射性物質の取込み時期と性質に関する仮定に基づき、取込み量から実効線量に換算することが可能であった場合、預託実効線量は大多数の場合 1 mSv 未満であった[210]。^{134}Cs と ^{137}Cs のホールボディカウンタからの実効線量預託は、住民の 99%で約 1 mSv より低いと報告された[206]。

多くのホールボディカウンタによる測定が事故の数カ月後に実施され[211, 212]、^{131}I の半減期が短いため、しばしば ^{134}Cs と ^{137}Cs のみに適用可能であった。事故後 1 か月間における吸入と経口摂取の双方による ^{131}I の取込みの重要性に鑑み、これは、内部被ばくに関する判断を困難なものとした。しかし、長崎大学で実施された避難者と福島県への短期訪問者の測定では ^{131}I を検出することが可能であった[213]。推定された最大の甲状腺吸収線量は 20 mGy（すなわち、20 mSv の甲状腺等価線量）であり、対応する実効線量は約 1 mSv であった。

初期に受けた内部被ばく線量は、人々が、制限が完全に実施される前の最初の数日間に地元産の食品又は他の産地の食品を摂取したかどうか、水道水を飲んだかどうかに左右された。地元産の牛乳と食料品が避難所に配布されず、瓶詰めの水だけが飲用と粉ミルクの調乳に使用されたため、マーケットバスケット調査では、牛乳、食品及び水の消費による被ばくは非常に低かったことを示した。

野菜の消費による被ばくに関しては、露地物の地元産野菜がほとんど食されなかったため、非常に低かった。早春で栽培時期の前であった。実質的に、消費された地元産野菜は汚染されなかった温室栽培の野菜のみであった。

子供の甲状腺への線量

^{131}I の相当量の放出を伴う原子力事故の後には、子供の甲状腺への線量が重要な公衆衛生上の懸念である。子供の甲状腺線量への主要潜在経路は、通常は ^{131}I を含む牛乳の摂取である。

しかし、牛乳経由での ^{131}I の典型的な取込みは、幾つかの要因のため事故後は非常に少なかった。一般的に牛を牛舎に入れるなど日本における酪農慣行が乳牛による ^{131}I の経口摂取を防いだ。牛乳経由での ^{131}I の取込みは、幼児の食事に対する牛乳の寄与が比較的少ないこと、及び事故後に当局が課した牛乳の消費に対する厳しい制限によっても限定された。特に放出後の非常に早い時期には、葉物野菜や飲料水の消費など、^{131}I の経口摂取の別の経路もあったが、飲料水と食品に対する迅速な制限によってこうした経路による取込みも限定された。

こうした要因の結果、子供による ^{131}I の取込みは少なかった可能性が高く、主として吸入によるものと考えられる。しかし、事故後の最初の数日間の子供の ^{131}I の取込みと甲状腺等価線量の推定には不確かさが伴った。

子供への甲状腺等価線量は、甲状腺における ^{131}I の体外計測によって推定された。これらのレベルは、甲状腺線量が高いと予測された地域の子供の甲状腺に近い皮膚で測定された。事故後の数週間について、限られた数のこうした直接測定値が報告された。2011 年 3 月 26～30 日の期間にいわき市、川俣町及び飯舘村の 1～15 歳の子供について行われた 1,080 件の測定結果が図 4.10 に要約されている[214]。

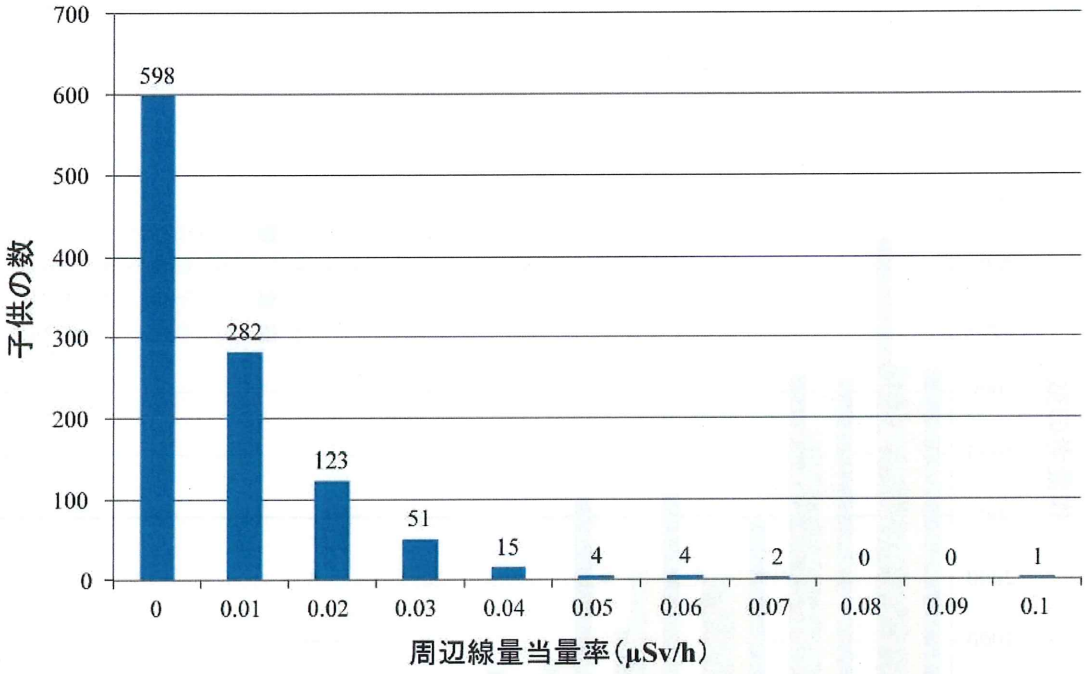


図 4.10.　0～15 歳の 1,080 人の子供の読み取り値[214]からバックグランド値を差し引くことによって推定された甲状腺での測定線量率の正味値、すなわち、甲状腺での正味周辺等価線量率の分布。検査を受けた子供の 99%では、甲状腺の近くで測定された周辺線量当量率は毎時 0.00004 mSv 以下であり、これは約 20 mSv 以下の甲状腺等価線量に相当する。

1 歳児の甲状腺の近くで測定された周辺線量当量の最大値は毎時 0.0001 mSv であり、約 50 mGy の甲状腺の吸収線量（50 mSv の甲状腺等価線量）に相当するものであった。2011 年 3 月に避難区域と「計画的避難区域」の子供に対して NaI（Ti）シンチレーション式サーベイメータを使用して決定された甲状腺等価線量は、子供の 95.7%で約 10 mSv を下回ったことが報告された（最大値は 43 mSv）[214]。全ての線量は、1996BSS[137]で定められた、ヨウ素剤服用に係る最適化された一般的介入レベルである、甲状腺における放射性ヨウ素による被ばくの回避預託線量 100mGy を下回っていた可能性が高い。線量はまた、確率的影響のリスクを減少するための緊急時被ばく状況における防護対策その他の対応措置に対する一般的基準として、改訂 BSS[198]で定められた、ヨウ素剤による甲状腺ブロックについての最初の 7 日間の予測線量 50 mSv より低かった。これと比較して、チェルノブイリ事故後の子供の甲状腺による吸収線量は数千 mGy に上り[169, 178]、100～1,000 倍近く高かった。

4.3.2. 職業被ばく

事故後、サイト内緊急作業者は、原子炉の安定化に努めるなか、直ちに非常に過酷な作業条件と非常に高い放射線レベルにさらされた。2011 年 3 月から 2012 年 3 月までの期間に、サイト内の約 2 万 3000 名の作業者のうち 174 名が緊急時における元の実効線量基準 100 mSv を超え、そのうち 6 名は 250 mSv の緊急時における（一時的に改訂された）実効線量基準を超えた。その後の年に 100 mSv の実効線量を超えた作業者はいなかった。1 人の作業者[96]は 2012 年 4 月から 2013 年 3 月までの期間に 50 mSv の職業被ばくの年間実効線量限度を超えた[203]。図 4.11 は、2011 年 3 月から 2014 年 10 月までに福島第一原子力発電所の緊急作業者が受けた実効線量を示す。

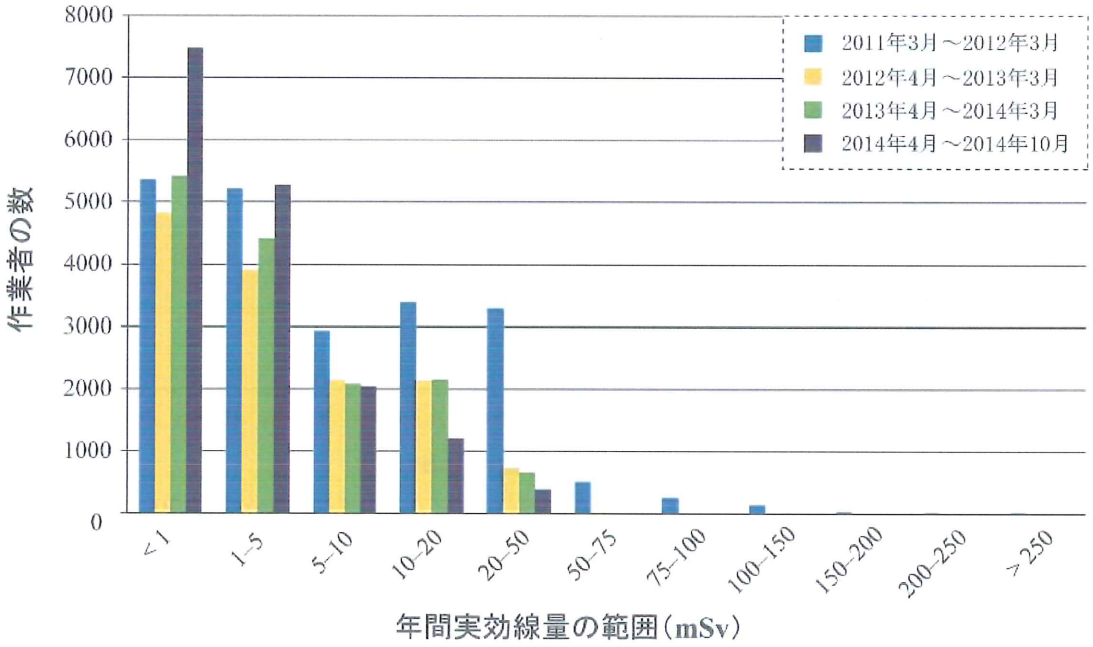


図 4.11. 2011 年 3 月から 2014 年 10 月までの福島第一原子力発電所の緊急作業者の実効線量の比較（東京電力の従業員と下請け）。高い実効線量が生じたのは事故から 1 年の間であった。2012 年までには、作業者の実効線量は低くなり、通常運転における実効線量と同等になった[215]。

東京電力の従業員と下請けの従業員の双方の個人線量当量値が東京電力から提出され、統計的に分析された。その結果を図 4.12 で示す。

[96] この作業者は、年間 50 mSv の職業線量限度ではなく 100 mSv の緊急時線量限度の対象になっていたと分類された。

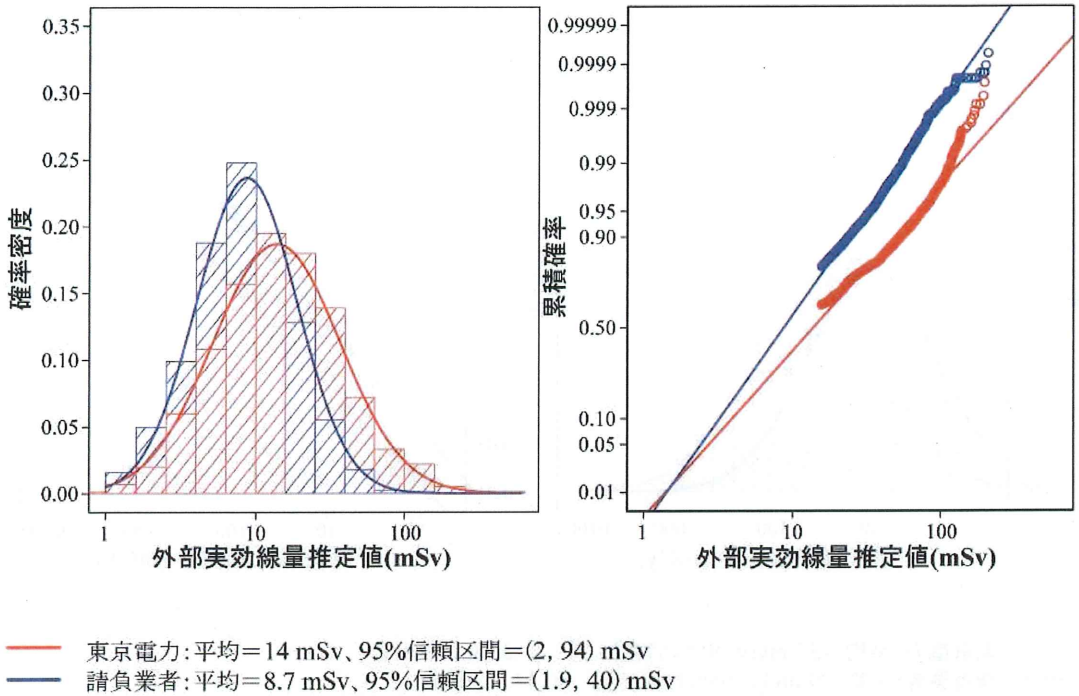


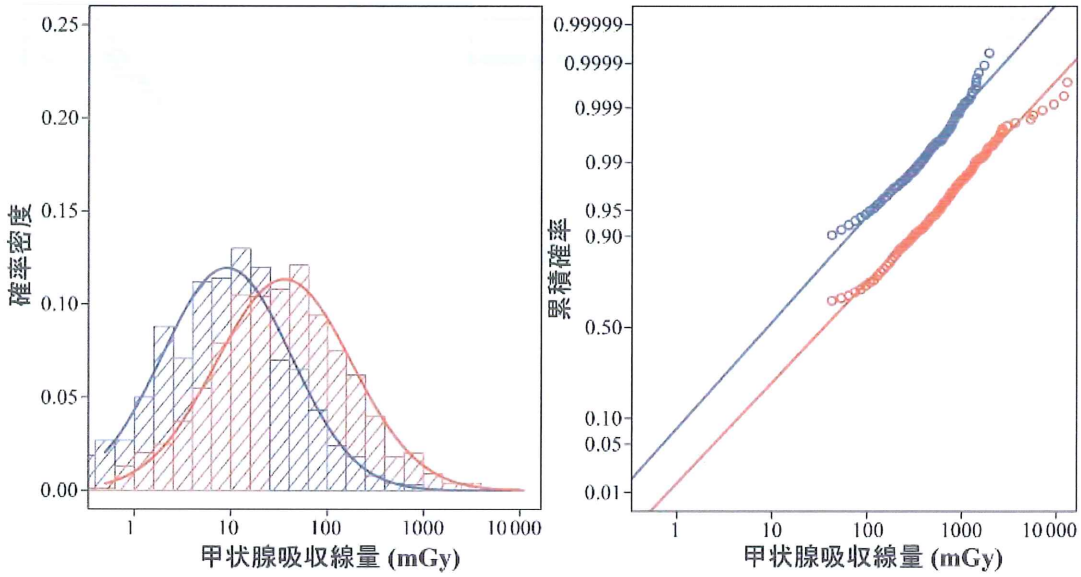
図 4.12. 2011 年の東京電力作業者と下請け作業者でモニタリングされた個人線量当量の正規確率密度分布と累積確率（囲み 4.6 参照）。東京電力の従業員はより高い線量区域で働いていたため、東京電力の従業員の線量は一般に下請け従業員の線量よりも高かった[215]。

早期の段階では、実効線量、特に緊急作業者に対する一時的に改訂された線量基準を超えた6名のサイト内の緊急作業者が受けた線量の主たる要因は、放射性核種の取込みによる内部被ばくであった。これは過酷な緊急時作業状態、防護マスクの不適切な使用、及び不十分な訓練に関係する課題が原因であった。

内部被ばく線量は、ほとんどが吸入された ^{131}I による甲状腺等価線量であった。福島第一原子力発電所の大半の作業者が受けた甲状腺等価線量は 100 mSv 未満であったが、1,757 名の作業者はこのレベルを超える甲状腺等価線量を受け、17 名の作業者は 2,000 mSv を、2 名は 12,000 mSv を超える甲状腺等価線量を受けた[216]。

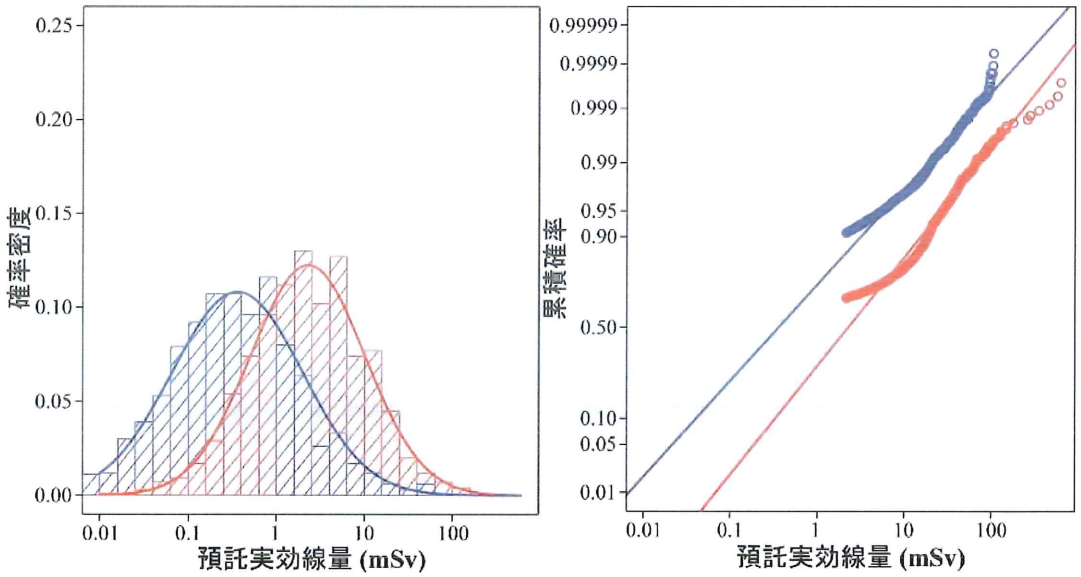
内部被ばくによる作業者の放射線線量の推定、特に甲状腺等価線量には幾つかの不確かさが伴う。例えば、人体への放射性核種の取込みについて仮定されたシナリオ（例えば、時期）は、内部線量の推定にとって極めて重要である。緊急時作業と事故後の一般的な状況のため、甲状腺の測定の実施にはタイムラグもあった。厚生労働省は緊急作業者の預託実効線量の再評価を実施した。同省は、線量の過小推定を合理的に達成可能な限り防止するため、内部線量の慎重な評価の手法の標準化を推進した[217]。

報告された甲状腺吸収線量と内部被ばくによる預託実効線量の分布の統計分析を図 4.13 で示す。



東京電力：平均＝35 mGy、95%信頼区間＝(1.5, 850) mGy
請負業者：平均＝9 mGy、95%信頼区間＝(0.44, 180) mGy

(a)



東京電力：平均＝2.3 mSv、95%信頼区間＝(0.12, 43) mSv
請負業者：平均＝0.36 mSv、95%信頼区間＝(0.013, 10) mSv

(b)

図 4.13.　内部被ばく線量の対数正規確率密度分布と累積確率分布（囲み 4.6 参照）。(a) 甲状腺吸収線量及び(b) 結果として評価された預託実効線量。低い線量で分布が予想より高くなっているのは、放射性物質が検出されなかった全ての人に検出限界に相当する線量が割り当てられたことを示唆している可能性がある[215]。

サイト内の作業者の職業被ばくは、UNSCEAR の所見と一致する。UNSCEAR の報告書の発出後に入手できるようになった東京電力の作業者と下請け業者の線量の再評価が本報告書における線量の統計分析に使用され、不確かさを低減させた。短寿命放射性核種からの線量、初期のホールボディカウンタ計測における高いバックグラウンド放射線の影響、甲状腺測定の遅れ、バイオアッセイ情報の十分さに関して、幾らかの不確かさが残っている。日本の機関は、作業者の線量評価、特に内部被ばく評価における不確かさを更に低減するよう作業を行っている（例えば、参考文献[218]）

消防、警察及び自衛隊の職員も一連のサイト内緊急時活動に関与した（セクション 3 参照）。このグループの中で 100 mSv を超える実効線量を受けた者はおらず、大半の者が受けた実効線量は 10 mSv 未満であった。サイト外で働き、線量に関する情報が入手できた 8,000 人を超える人員のうち、5 名が 10 mSv を超えるが 20 mSv を下回る実効線量を受けた。サイト外で作業を行った警察官で記録された実効線量の最大値は約 5 mSv であった。

外国からの人員が緊急事態対応を支援した。利用可能なデータは、福島地域で環境モニタリングを支援又は実施した米国の職員の実効線量の最大値は、米軍職員で 0.12 mSv、米国エネルギー省の職員で 0.068 mSv であり[219]、いずれも規制限度を下回っていた。環境モニタリングに参加し、防護と安全に関する助言を行った IAEA 職員の中では、外部被ばくにより約 2.5 mSv の実効線量を受けた者が 1 人いたが、平均としては約 0.5 mSv であった。

4.4. 健康影響

作業者又は公衆の構成員の間で、事故に起因し得ると考えられる放射線による早期健康影響は観察されなかった。

*遅発性放射線健康影響の潜伏期間は数十年に及ぶ場合があり、このため被ばくから数年後の観察によって、被ばく集団にそうした影響が発生する可能性を無視することはできない。しかし、公衆の構成員の間で報告された低い線量レベルに鑑み、本報告書の結論は、原子放射線の影響に関する国連科学委員会（**UNSCEAR**）の国連総会に対する報告の結論と一致している。**UNSCEAR** は「被ばくした公衆の構成員とその子孫の間で、放射線関連の健康影響の発生率について識別可能な上昇は予測されない」と確認した（これは「**2011** 年の東日本大震災の後の原子力事故による放射線被ばくのレベルと影響」に関する健康影響の文脈で報告された）**[148]**。**100 mSv** ないしそれ以上の実効線量を受けた作業者の集団に関しては、**UNSCEAR** は、「がんのリスクの増大が将来予想されよう。しかし、このような小さい発生率を発がん率の通常の統計的ばらつきに対して確認することが困難であるため、この集団における発がん率上昇は識別できないであろうと予想される」**[148]** と結論づけた。*

影響を受けた福島県民の健康をモニターするため、福島県民健康管理調査が実施された。この調査は、疾病の早期発見と治療及び生活習慣病の予防を目的としている。本報告書作成時点で、子供の甲状腺の集中的なスクリーニングが調査の一環として行われている。感度が高い装置が使用されており、調査を受けた子供のうちの相当数で無症候性の（臨床的手段によっては検出できない）甲状腺異常を検知している。調査で特定された異常が事故による放射線被ばくと関連づけられる可能性は低く、この年齢の子供における甲状腺異常の自然な発生を示している可能性が最も高い。子供の甲状腺がんの発生は、相当な放射性ヨウ素の放出を伴う事故後に最も可能性が高い健康影響である。本件事故に起因する報告された甲状腺線量は一般的に低く、事故に起因する子供の甲状腺がんの増加は可能性が低い。しかし、事故の直後に子供が受けた甲状腺等価線量に関する不確かさは残った。

出生前放射線影響は観察されておらず、報告された線量はこれらの影響が発生する可能性があるしきい値を大きく下回っていることから、発生は予想されない。放射線の状況に起因する希望しない妊娠中絶は、報告されていない。親の被ばくがその子孫に遺伝性影響を生じる可能

*性に関しては、**UNSCEAR** は一般的に、「動物の調査では示されているものの、人間の集団における遺伝性影響の発生率の増加は、現時点で放射線被ばくに起因すると考えることはできない」**[167]** と結論づけた。*

*原子力事故の影響を受けた住民の間で、幾つかの心理状態が報告された。こうした人々の多くは、大地震と破壊的な津波及び事故の複合的影響を被ったため、こうした影響がどの程度原子力事故のみに起因するかを評価することは困難である。福島県民健康管理調査の精神的健康・生活習慣調査は、影響を受けた住民のうち幾つかの脆弱な集団の中で、不安感と心的外傷後ストレス障害の増加など、関連する心理学的問題を示している。**UNSCEAR** は、「（事故からの）最も重要な健康影響は、地震、津波及び原子力事故の甚大な影響と電離放射線被ばくリスクに対する恐怖や屈辱感によって影響を受けた精神的及び社会的福利厚生である」**[148]** と推定した。*

囲み 4.2 で説明された福島県民健康管理調査を通じて、影響を受けた住民の総合的な健康診断が実施されている。このプログラムは、疾病の早期発見と治療、及び生活習慣病の予防を目的としている。職場や地方自治体による定期総合健康診断に加えて、白血球分画などの追加検査が実施されている[220]。

4.4.1. 放射線誘発早期健康影響

放射線被ばくは、細胞の破壊によって生じる健康影響を誘発する可能性がある。こうした影響の重大さは線量とともに増加し、皮膚の損傷から重要な組織の破壊にまで及ぶ可能性がある。これらの影響のほとんどは、それぞれの潜在的影響に関して知られているしきい値レベルを超える線量を受けた後、早期に発生する。利用可能な情報によれば、事故の結果として急性放射線影響を生じるしきい値レベル以上の線量を受けた個人がいないことが示されている。2 名の作業者がタービン室の汚染水により足を被ばくした。これらの作業者の皮膚の等価線量は、確定的影響の推定しきい値[97][81]及び適用される国際限度[98][222]より低いと報告された。

UNSCEAR は既に、「放射線に関連する死亡と急性疾患は、福島第一原子力発電所事故による放射線に被ばくした作業者と一般公衆の間では観察されていない」と述べた[223]。

4.4.2. 潜在的な遅発性放射線誘発健康影響

事故の過酷な状況と状態の下、緊急時作業に関与した約 2 万 3000 人の作業者のうち、100 mSv の線量を超えた人数は 174 名であった。UNSCEAR は、この集団に「発がんリスクの増加が将来予想されよう。しかし、この集団におけるがんの発生率の増加は、発がん率の通常の統計的変動に対してそうした小さい発生率を確認することが困難なため、識別できないと予想される」と結論づけた[223]。

---

[97] 皮膚の被ばくに関する ICRP の推定は、被ばく部位が比較的大きい場合、早期一過性紅斑などの早期の反応は 2,000 mGy を超える線量の後の数時間で見られる、というものである。ICRP はまた、おおよそのしきい値線量を以下のとおりと見積もっている。早期一過性紅斑 2,000 mGy、主紅斑反応 6,000 mGy、一過性脱毛 3,000 mGy、永久脱毛 7,000 mGy、乾性落屑 14,000 mGy、湿性落屑 18,000 mGy、二次潰瘍 24,000 mGy、晩発性紅斑 15,000 mGy、虚血性真皮壊死 18,000 mGy、皮膚萎縮（初期）10,000 mGy、毛細管拡張症 10,000 mGy、及び真皮壊死（後期）15,000 mGy 超[221]。

[98] 計画被ばく状況における皮膚の職業線量限度は、被ばく部位にかかわらず皮膚面積 1 cm^2 あたりの平均で年間 500 mSv の等価線量と勧告されている（参考文献[129]の表 6、及び参考文献[198]の別表 III 参照）。深刻な決定論的影響を回避若しくは最小化するため、いかなる状況下でも防護対策と他の対応措置の実施が期待される、皮膚の急性線量について定められた一般基準は、100 cm^2 の皮膚が受ける量として 10,000 mGy である（皮膚表面の下の深さ 40 mg/cm^2（0.4 mm）での皮膚組織）（参考文献[198]の表 IV.1 参照）。

[99] 当時利用可能であった限られた情報に鑑み、評価には幾つかの保守的な想定が含まれた。WHO は、「線量の過小評価を回避するためにあらゆる努力が払われ」、「幾つかのあり得べき線量の過大評価が起きたかもしれない」と示唆した[146]。

公衆の構成員に対する潜在的な遅発性の影響に関して、国際的な推定が本報告書の前に発表された（囲み 4.1 参照）。WHO は、WHO の予備的な線量推定[99]に基づいて、最も高い線量率の場所の住民について白血病、乳がん、甲状腺がん及び全ての固形がんのベースライン発生率に対する追加の生涯リスクの仮想的な推定[100]を発出した[146, 147]。

UNSCEAR は新たな線量推定に続き、次のように報告した。

> 「一般公衆に対する線量は、最初の 1 年間に受けた線量もその生涯に推定される線量も、おおむね低いか、非常に低い。被ばくした公衆の構成員やその子孫に放射線関連健康影響の識別できる発生率の増加は予想されない」[223]。

事故に関する報告を行う前に、UNSCEAR は「人々における健康影響の発生率の増加は、典型的な世界平均バックグラウンドレベルの放射線への慢性被ばくに確実に起因するとすることはできない」と国連総会に報告していた[167]。入手できる情報によれば、公衆の構成員が典型的な放射線のバックグラウンドレベルによる年間線量よりも高くない年間線量を受けたことが示されている。これは UNSCEAR の推定と同じく、被ばくした公衆の構成員又はその子孫に放射線関連の健康影響の認識できる発生率増加が予想されないことを示す。

この推定は、成人甲状腺がんの特別なケースにもおおむね適用できる。成人の場合、このリスクは幼年期の放射線被ばくによるリスクよりずっと低い（子供の甲状腺への影響に関する以下の議論を参照）。報告されている甲状腺への放射線等価線量を考えると、成人の集団に認識できる発がん率の増加が生じる可能性は低い。

高い甲状腺等価線量を受けた数少ない作業者の場合（セクション 4.3.2 参照）、甲状腺障害が発生するリスクの増加が推論できる。これらの甲状腺等価線量レベルは、甲状腺機能不全が起きる程度にまで甲状腺の機能を弱める可能性がある。甲状腺機能亢進症については、報告された甲状腺等価線量はそうした影響が起き得る約 15,000 mSv 超のレベルを下回るため、予想されない。緊急作業者が受けた範囲の線量に典型的な低・中甲状腺等価線量の影響は定量化することが難しく、影響の可能性とその大きさは依然として明らかでない。

4.4.3. 子供への放射線影響

子供への放射線影響の可能性は特別な関心事である。放射線防護に関する国際勧告と基準は、被ばくした集団の中の子供を考慮している。防護の目的で、これらの勧告と基準は、集団全体、すなわち子供[101]を含む集団に対する潜在的名目放射線リスクとして、成人の集団の想定リスクより約 30%高い値を想定している（そうした名目リスクは、高い放射線量に被ばくした集団の疫学調査に基づいて推定された。）[129, 224]。

---

[100] WHO の健康リスク評価は、「福島県内で最も影響が大きかった 2 つの場所において、最初の 1 年間の予備的な推定放射線実効線量は 12 mSv から 25 mSv の範囲であった」、またこの推定に基づき、「リスクの過小評価を回避するために方法論的オプションが意識的に選択されたため、線量が最も高い場所では、白血病、乳がん、甲状腺がん、及び全ての固形がんの発生のベースライン発生率に対する推定追加生涯リスクは、リスクの上限を表す可能性が高い。白血病に関しては、生涯リスクは幼児の時に被ばくした男性でベースライン発がん率から最大約 7%増加すると予測される。乳がんについては、推定生涯リスクは幼児の時に被ばくした女性の場合にベースライン発生率より最大約 6%増加する。全ての固形がんに関しては、推定生涯リスクは幼児の時に被ばくした女性の場合にベースライン発生率より最大約 4%増加する。そして甲状腺がんについては、幼児の時に被ばくした女性の場合、推定生涯リスクはベースライン発生率より最大で約 70%増加する。これらの割合は、ベースライン発生率に対する推定相対増加率を表し、これらのがんの発生に関する推定絶対リスクではない」と見積もった[147]。

[101] 「子供」という用語には幼児、子供及び青年時に被ばくする人が含まれる。

子供の甲状腺への影響

甲状腺がんについては、子供は成人より放射線の影響を受けやすい。一定の放射性ヨウ素の取込みに対し、幼児の甲状腺への線量は成人への線量より 8 倍ないし 9 倍多い。環境中に相当量の ^{131}I が存在することは、子供の甲状腺がんにつながる可能性がある。子供における幾つかの種類の甲状腺がんの通常の発生率は低く、放射線に対する子供の甲状腺の感受性は高い。この高い感受性のため、事故後には、この種のがんの発生率のいかなる潜在的増加も早期に検知するために継続スクリーニングを実施することが重要であった[225]。

福島県民健康管理調査で実施された 3 年間の甲状腺超音波検査の結果が報告された[226]。スクリーニングは、事故当時年齢が 0～18 歳であった約 37 万人の子供を対象とした。この初期スクリーニングに続いて、2014 年以降に本格的な甲状腺検査が実施され、住民はその後定期的にモニターされる予定である。

検査は、甲状腺をスクリーニングするための高感度の超音波診断装置を使用する。このスクリーニングにより、標準的な装置で無症候の子供をスクリーニングすることでは検知されなかったであろう無症候の[102]甲状腺異常 — 結節、嚢腫、及びがん — が検出された。同じスクリーニングが事故の影響を受けた区域から遠く離れたところに住んでいる子供に実施され、同様な結果が得られた[227]。本報告書作成時では事故から 4 年が経過しているが、放射線誘発甲状腺がんの潜伏期間はこれよりも長い。多くの場合、甲状腺がんは 10 代後半の子供で発見されているが、最も脆弱な集団である、2011 年 3 月 11 日に 5 歳未満であった子供の間では、全く症例が発見されなかった。疑わしい、あるいは悪性の症例は、2011～2013 年に実施された初期スクリーニングでは、福島県の地域間でほぼ同じであった[228]。これらの要素は、調査で検出された甲状腺異常が事故による放射線被ばくの影響とは考えにくいことを示唆している。

甲状腺の放射能による外部線量当量の間接測定により得られたデータによれば（図 4.10 参照）、子供の甲状腺等価線量は低かったと見られる、報告された線量レベルについては、子供の甲状腺がんの増加が放射線被ばくの影響とは考えにくいであろう。

4.4.4. 出生前放射線誘発健康影響

「被ばくの出生前（あるいは、出産前）影響」とは、胎芽と胎児に対する放射線の影響を指すために使用される用語である。100 mGy 未満の吸収線量では、胎芽の着床前期間における照射の致死的影響は非常にまれであると考えられ、他の影響の誘発については、吸収線量で約 100 mGy のしきい値がある[229-231]。事故に起因し得ると考えられる胎芽と胎児の吸収線量は、これらの影響の発生に対するしきい値の吸収線量よりはるかに低かった。

福島県民健康管理調査の一環として実施された妊娠調査（囲み 4.2 参照）は、2010 年 8 月 1 日から 2011 年 7 月 31 日までの間に母子健康手帳の交付を受けた母親とその子供の適切な医療と支援の提供に役立った。この調査は、特に妊娠と出生に関する新しいデータを考慮して毎年更新されている[162]。その目的は、産科と出生前の医療を改善し得るデータを収集し、事故後に福島県で妊娠又は出産した女性を支援することであった。調査結果によると、著しく有害な結果はなく、死産、早産、低出生時体重及び先天性異常の発生率は日本の他の地域と同様であることがわかった[232]。

UNSCEAR は国連総会に対し、「動物調査では実証されたが、人間集団における遺伝性影響の発生増加は現時点で放射線によるものか結論づけられない」と報告した[167]。したがって、本報告書の結果は、事故による遺伝性影響は結論づけられないことを示している。

---

[102] 無症候の影響とはまったく症状がない影響である。すなわち、疾病の状態を示すものが何もなく、特に子供、その親、あるいは医師にさえ明らかではない。

重大な放射線被ばくの可能性を伴う事故の場合には、一部の妊婦は中絶すべきか否かに関して医師の助言を求める。福島第一原子力発電所事故の場合、福島県立医科大学産婦人科による調査は、そうした選択的中絶が同事故を受けて行われたということはなかったと報告した[232, 233]。

4.4.5. 心理的影響

放射線被ばくの影響に直接結論づけられないものの、心理的影響が本報告書で検討された。UNSCEAR は次のように報告した。

> 「...最も重要な健康影響は、地震、津波及び原子力事故の莫大な影響に関連する精神的、社会的福利厚生、及び電離放射線への被ばくのリスクの認識に関連する恐怖心と屈辱感にかかるものである。うつ病や外傷後ストレス症候群などの影響がすでに報告されている」。[148]

福島第一原子力発電所事故後の心理状態について幾つかの調査が実施された。これらの調査は、主として妊婦と幼児の母、救助隊員と除染作業者、及び避難者を対象とした。影響を受けた集団では、幾つかの心理的影響が検出された[234-244][103]。これらの調査によると、早期段階と事故の進展中におけるコミュニケーションと公衆への正確な情報の伝達が、望ましくない心理的反応の緩和に貢献した[150]。

最大の調査は、福島県民健康管理調査の一環として実施された「こころの健康度・生活習慣の調査」[248]であり、これは主として外傷後ストレス障害、不安及びストレスなどの精神的健康の問題を発生するリスクがより高い避難者に適切な医療を提供することを目的としている。アンケートには、外傷後ストレス障害と心理的苦痛（不安）の症状の標準的判定のほか、放射線被ばくや、地震と津波から生じた困難（例えば、家族や親類の死、家屋の損傷、雇用喪失、収入の減少、福島県内あるいは県外への移転）に関する懸念についての質問が含まれていた。

「こころの健康度・生活習慣の調査」の結果が公表された[236]。この結果により、影響を受けた人々が相当な悩みと外傷後ストレス障害の兆候を経験していることが確認された。調査は「社会人口学的データは、多くの避難者の世帯が災害後に引き離され、数回転居しなければならなかった」ことを示し、これが心理状態のひとつの原因であることを示した。

成人の避難者の精神的健康状態を評価するため、他に 2 つの方法が使用され[249, 250]、アルコール依存症を評価するために追加の調査が実施された[251]。これらの調査により、精神的健康の症状が一般集団の調査で予想されるものより相当に悪いことが示された[237]。子供の精神的健康状態は別のアンケート調査によって評価され[252, 253]、対象となった子供の心理的な困難を示すものであったが、年々、相対的に改善を示している。

影響を受けた作業者に関する調査も実施された。2011 年 4 月から 6 月まで福島第一原子力発電所と福島第二原子力発電所の作業者を比較した調査により、福島第一原子力発電所の作業者の間で、一般的な心理的苦悩と外傷後ストレス反応の症状が相当に多いことが見出だされた（図 4.14 参照）。双方の作業者の集団において、差別及び中傷の経験とこれら両方の状態の症状の間に統計的に顕著な関連もあった。

---

[103] 心理的影響は他の外傷性の状況で検知されてきたが、これには欝病、外傷後ストレス応答、慢性不安、睡眠障害、激しい頭痛、及び喫煙と飲酒の増加のほか、怒り、絶望感、健康に関する極端な不安、屈辱感及び差別されているという感情などの機能障害行動が含まれる場合がある。チェルノブイリ事故などの過去の事故の後に示されたように、影響を受けた人々の大半は概して心理状態からの回復が早いが、幾つかの調査では例外が報告されている[169, 245-247]。

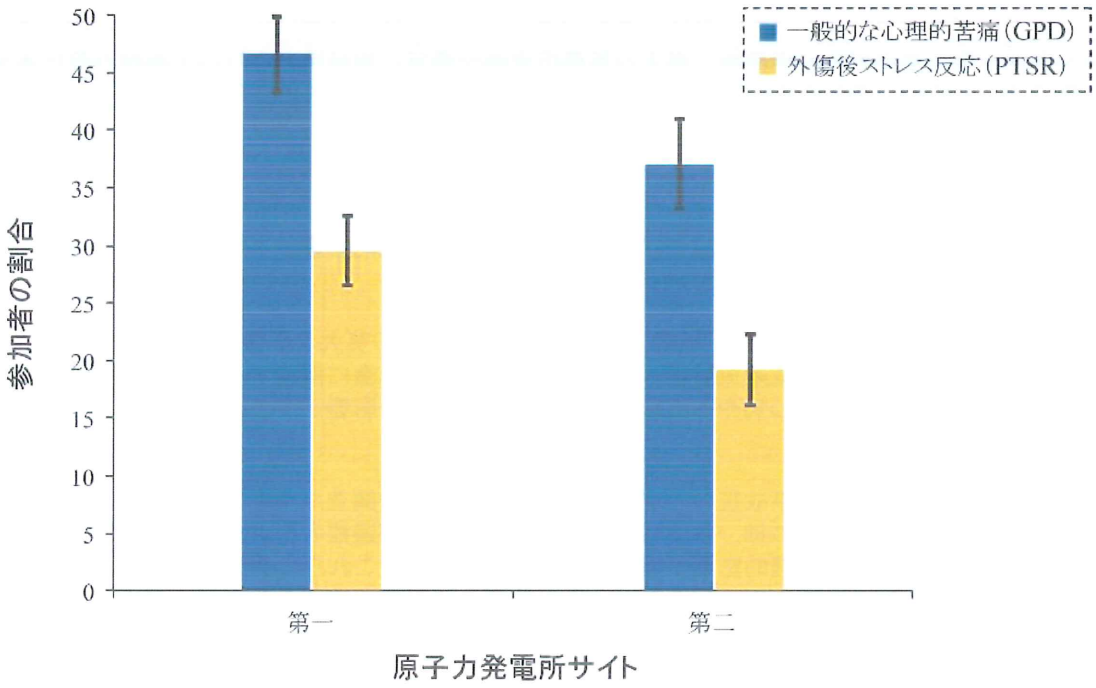


図 4.14.　心理的苦悩を報告した福島第一原子力発電所と福島第二原子力発電所の作業者の割合、2011 年 4 月[242]。

4.5.　人間以外の生物相に対する放射線の影響

限定的な観察調査が事故直後の期間に実施されたが、直接放射線によって誘発される植物と動物への影響の観察は報告されていない。放射線影響を評価するために利用できる手法には限りがあるが、過去の経験と環境中に存在する放射性核種のレベルに基づけば、事故の結果として、生物相の集団や生態系に重要な放射線影響が生じる可能性は低い。

環境の保護[104]には、「動物と植物の双方の人間以外の種とその生物多様性、環境物品・サービスの保護と保存が含まれる。この用語には、食品と飼料の生産、農業、林業、漁業及び観光に使用される資源、宗教、文化及び娯楽活動に使用されるもの、土・水及び空気などの媒体、並びに、炭素・窒素及び水のサイクルなどの自然のプロセスも含まれる」[198]。地震と津波は、本州の東北沿岸の陸域と海域の環境に相当な環境ストレスを引き起こした[250, 255][105]。

事故後の緊急の優先事項は、被ばくの制御が容易ではない環境中の種ではなく、人の防護であった。発電所から半径 20 km 以内の住民は放射線被ばくを軽減するために避難したが、これらの区域に生息する人間以外の生物の被ばくは避けられなかった。本報告書で人間以外の生物に対する事故の潜在的放射線影響の評価に使用されたアプローチは、ICRP によって勧告されたものであった[224, 257]。推定された被ばくは、その後文献で発表された様々な種類の植物と動物に対する被ばくの影響に関する情報と比較された（参考文献[258, 259]参照）。

[104] 本報告書では、「環境」という用語は「人間、動物及び植物が生存するか生長し、全ての生命と成長を持続させる条件、特に人間の活動により影響を受ける条件」を指す[198]。
[105] 津波が生態系に及ぼす影響に関する他の報告書は[256]にある。

この評価で適用された種類のモデルに伴う全体的な不確かさは、特に環境移行に関する想定が関わる場合に大きい[260]。こうした評価手法は、単純な想定に基づくことが多く、不確かさは通常、保守的な想定を使用することによって考慮される。計算された線量を放射線影響と関連づけるために使用された指標は、主として急性被ばくよりも慢性被ばく、生物集団や生態系よりも限られた範囲の個々の生物に関係するものである。現行の手法は、生態系の構成要素間の相互作用や、放射線とその他の環境ストレッサーとの複合的影響は考慮されていない。評価手法と生態系への放射線誘発影響の理解の双方が改善される必要がある。

推定吸収線量は事故後の最初の 1 週間に植物で最も高かったが、急性影響が予想されるレベルを下回った。事故後の初期段階では、幾つかの陸上の標準生物（マツ、イネ科草本、シカ、及びラット）で該当する参考レベルを超えた。しかし、これらの生物の集団や生態系への全体的影響は観察されていない。

UNSCEAR による以前の出版物[261, 262]は、1.2 Gy 未満の線量で軽微な影響が針葉樹に発生する可能性があり、10～20 Gy の範囲の線量で、枯死に至る、より重大な損傷が発生する可能性があると報告した。イネ科植物は放射線耐性が高いため、評価された線量においてはイネ科植物に対する直接の致死的影響の可能性は低いと推察することができる。陸上の動物に関しては、初期段階での推定線量率は、繁殖障害の可能性が低いことを示した。

線量率は事故の早期段階で幾つかの参考値を超えたが、動物と植物の個体群や生態系に対する影響は予想されない。推定短期線量は一般に、高度に有害な急性影響が予想されるレベルを大きく下回り、線量率が事故後に比較的早く低下したため、長期的影響も予想されない。

4.6. 所見と教訓

事故の放射線影響を評価した結果、幾つかの所見と教訓が見いだされた。

— 事故による放射性物質の環境への放出の場合、放出量及びその組成の迅速な定量化及び特性評価が必要である。大規模な放出については、地元、地域及び地球規模での環境への放射線影響の性質と範囲を特定するため、包括的で調整された長期的環境モニタリング計画が必要である。

  福島第一原子力発電所事故のソースタームの定量化と特性評価は困難であった。迅速な環境モニタリングは、放射性核種のレベルの確認に役立ち、人の防護のための最初の基礎となる。その結果は、公衆への情報提供と対応・復旧活動のための戦略の策定に使用することができる。放射性核種の更なる相当量の放出がないことを検証するため、また放射性核種の環境中での長期的な再分布の可能性に関する情報を意思決定者や他の利害関係者に提供するため、環境モニタリングを継続することも重要である。

— 関連する国際機関は、放射線防護の原則及び基準の適用を意思決定者と公衆にとってより明確なものとするため、専門家以外の人々に理解しやすい説明を整備する必要がある。幾つかの長期にわたる防護措置は影響を受ける人々にとって攪乱的であったため、そうした措置と対応が正当とされる理由を、公衆を含む全ての利害関係者に伝えるため、より良いコミュニケーション戦略が必要である。

  以下の事項を含む、幾つかの放射線防護の問題に関して簡潔な説明を行う必要性が認識されている。

  - 線量限度と参考レベルの概念の相違、及びその根拠
  - とりわけ通常の生活に相当の攪乱がもたらされる場合、長期的に放射線量を低減させるための防護措置と対策を正当とするための基準
  - 緊急作業者の放射線防護に関する具体的な状況

  放射線防護の原則は、科学のみでなく、倫理的原則にも基づく。状況によっては、防護措置と対策は長期の社会的攪乱を伴う。このような状況では、放射線量を回避することの潜在的利

益が防護措置と対策自体によって生じる個人と社会への不利益を上回らなくてはならない。長期の放射線防護措置と対策が正当とされる理由を利害関係者に説明することが重要である。

— 消費財の比放射能及び放射能濃度並びに沈着した放射能に関する保守的な決定により、長期の制限及びそれに伴う問題が生じた。長期被ばくの状況では、国際基準の間及び国際基準と国内基準の間に一貫性があることは、特に飲料水、食品、非食用消費財及び陸上での降下物の放射能濃度に関して有益である。

日本の当局は、消費財中の放射性核種の存在を管理するための措置を定めたが、これは一般に利用可能な国際ガイダンスより厳しいものであった。消費財中の放射能を管理するための現行の国際システムは、例えば、国際貿易における食品（瓶詰めの水を含む）には食品規格、緊急時に使用する食品と飲料水には IAEA 安全基準、現存被ばく状況での飲料水には WHO のガイドライン、そして免除の目的での非食用消費財には IAEA 安全基準のように、別々のガイダンスによって規定されている。規制当局による適用と公衆による理解を促進するため、公共消費財における放射能の許容レベルに対する各国際基準が一貫している必要性がある。国の基準は、実行可能な場合には国際基準に沿う必要がある。さらに、地上での放射性核種の長期的存在に対応するための基準が必要である。

— 公衆の構成員の代表的集団の個人放射線モニタリングは、放射線量の信頼できる推定にとって貴重な情報をもたらし、環境測定値及び適切な線量推定モデルとともに公衆線量を評価するために使用される必要がある。

線量の早期の推定は環境放射線レベルの測定とモデル化に基づいて行われたため、被ばく線量と予測線量に関して保守的な想定をもたらした。

子供の甲状腺の ^{131}I のモニタリングは、この放射性核種の半減期が短いため、その環境への放出後、可能な限り早く実施する必要がある。長寿命放射性核種（例えば、^{137}Cs）の外部及び内部被ばくに関する個人モニタリングは、実行可能な限り早く実施し、適切な場合には長期間にわたって継続する必要がある。

個人モニタリングの結果がない場合、個人の被ばく線量を推定するためには、環境データと周辺空間データのモデル化が必要となる可能性がある。こうした場合、特に、これらの推定結果が防護措置・対策に関する意思決定への情報として、及び放射線誘発健康影響の可能性を推定するために使用される場合には、モデルに使用された仮定に伴う不確かさを明確に説明する必要がある。

— 乳製品は、日本における放射性ヨウ素の摂取の主な経路ではなかったものの、特に子供への甲状腺線量を制限する最も重要な方法は、草を食べる乳牛からの生乳の消費を制限することであるのが明らかである。

事故後の子供への甲状腺線量の推定値は低かった。これは時期（栽培季節前）、日本における農業慣行、幼児による牛乳の消費量の低さ、及び牛乳消費に対する管理が直ちに導入されたことなどの要素の組み合わせの結果であった。これらの要素は ^{131}I の取込みが低いレベルであることに寄与した。

— 全ての関連する経路を通じて、特にシビアアクシデントマネジメント活動の際に作業者が受ける可能性のある内部被ばくによる職業上の放射線量をモニターし、記録する強固なシステムが必要である。緊急時対応活動中は、作業者の被ばくを制限するための適切で十分な個人防護用装備が利用可能で、作業者がその使用法に関する訓練を十分受けていることが不可欠である。

放射線被ばくと緊急作業者によって取り込まれた放射性核種のレベルの早期かつ継続的な直接測定は、放射線リスクと潜在的健康影響を推定し、防護を最適化する情報を入手するための最も貴重なアプローチである。個人線量計と測定値の強固なシステムを通じて、職業被ばくによる線量をモニタリングし記録する必要がある。甲状腺における ^{131}I のモニタリングは、可能な限り早く実施する必要がある。

福島第一原子力発電所事故の直後には、作業者の被ばくを制限するための個人防護用装備の提供とモニタリングは困難であった。

— 被ばくのレベルが放射線の世界的なバックグラウンドレベルと同様の場合には、集団におけるいかなる健康影響の事象の増加も放射線被ばくに起因するとはいえないことを明確にし、

放射線被ばくのリスクと健康影響の放射線からの起因を、利害関係者に対してはっきりと示す必要がある。

福島第一原子力発電所事故の場合、公衆構成員への線量は低く、典型的な世界の平均バックグラウンド線量に匹敵する同程度であった。被ばくした公衆の構成員とその子孫における放射線関連健康影響の認識可能な発生率の増加は、事故の結果として予想されないことを、公衆、特に影響を受けた人々に明確に知らせる必要がある。

放射線とその健康影響の可能性に関する理解は、緊急事態に関与する全ての人、特に医師、看護師、放射線技術者及び医療救急隊員にとって重要である。これは、放射能、放射線及び放射線被ばくに伴う健康影響のテーマに関する医療専門家の適切な教育と訓練を通じて確保される必要がある。

— 原子力事故後には、健康調査は非常に重要で有益であるが、疫学調査と解釈されるべきでない。そうした健康調査の結果は、影響を受けた住民への医療支援を支えるための情報を提供することが目的である。

福島県民健康管理調査は、地域社会にとって貴重な健康情報をもたらし、健康影響が素早く検出され、住民の健康を防護するために適切な対策が講じられることに役立っている。健康診断の全体的結果は重要な情報をもたらす可能性があるが、疫学評価の結果と誤解されるべきではない。

— 放射線事故後に影響を受けた住民の心理的影響に取り組む放射線防護ガイダンスが必要である。**ICRP** の作業部会は、「放射線事故から生じる深刻な心理的影響を緩和するための戦略が求められる」と勧告した。

事故の結果としての心理的状態が報告されている。これは放射線被ばくを伴う事故の後に繰り返されてきた問題である。その重要性にもかかわらず、これらの影響は放射線防護に関する国際勧告や基準では認識されてこなかった。

— 放射線影響に関する事実に基づく情報は、防護戦略に関する個人の理解を高め、その懸念を軽減し、自らの防護イニシアチブを支援するために、影響を受けた地域の個人に理解しやすい形で適時に伝えられる必要がある。

放射線影響を伴う事故によって影響を受ける可能性のある公衆に理解されやすい形で情報を共有するための制度が、国と地方レベルで整備される必要がある。この制度では、個人が説明を求め、懸念を表明できるよう、個人対個人の対話が可能である必要がある。こうした制度では、影響を受ける個人と地域社会を支援し、助言を与えるための関連当局、専門家及び職業人による協調した努力が必要となる。個人自身のイニシアチブへの支援を含め、これらの個人を防護するための決定を伝えるに当たっては、情報の共有が重要である。

— 緊急時段階では、人の防護に主眼を置かなければならない。生物相への線量は管理することができず、個別には潜在的に大きい可能性がある。人間以外の生物相に対する放射線被ばくの影響に関する知見は、放射線によって誘起される生物相の集団と生態系への影響の評価手法と理解を改善することによって強化される必要がある。環境への放射性核種の大規模放出の後には、農業、林業、漁業及び観光業の持続可能性と、天然資源の利用を確実にするために、統合的な視点が採用される必要がある。

人間以外の生物相に対する線量を大幅に引き下げることは、対応策の導入が実行可能でないため、困難である可能性がある。福島第一原子力発電所のような事故後の植物と動物に関する影響評価には、多くの潜在的ストレッサーの検討が必要であり、放射線被ばくは多くのうちの 1 つである。環境中での長寿命放射性核種の集積と蓄積の可能性、及びこれが複数の世代にわたってどのように植物と動物に影響する可能性があるかも検討される必要がある。

5. 事故後の復旧

福島第一原子力発電所事故の直後には、プラントの状態の安定化、並びに影響を受けた地域における住民の屋内退避と避難及び食品[106]・飲料水の摂取制限を含む対策による公衆の防護が優先された。作業が進み、サイトの状態が安定するに伴って、地域社会とインフラの再生を含む事故からの復旧により重点が置かれるようになった。

本セクションでは、2015 年 3 月までの事故後の復旧の進捗及び将来に向けた計画について検討する。本セクションは、主として緊急段階に続く現存被ばく状況を検討する。

5.1. 事故の影響を受けたサイト外の地域の環境修復

事故後の復旧[107]の長期的目標は、影響を受けた地域において完全に機能する社会のための受け入れられる基盤を再確立することである。採用された参考レベルに合致するよう放射線量を低減させるため、事故の影響を受けた地域の環境修復[108]が考慮される必要がある。避難者の帰還準備に当たっては、インフラの復旧及び地域社会の生存と持続可能な経済活動などの要素が考慮される必要がある。

*福島第一原子力発電所の事故以前には、日本には事故後の環境修復に関する政策と戦略はなく、事故後にそれらを策定することが必要となった。環境修復にかかる政策は、**2011** 年 **8** 月に日本政府によって制定された[109]。これは、国と地方自治体、事業者及び公衆に責任を割り当て、調整された作業の実施のために必要となる制度を整備した。*

環境修復戦略が策定され実施が始まった。この戦略では、外部被ばくの低減を重視し、環境修復の優先地域は、建物と庭、農地、道路及びインフラを含む住居地域であることを明記している。

地面などの表面に沈着した放射性核種からの外部線量が、被ばくの主要な経路である。したがって、環境修復戦略は、優先地域に存在する放射性セシウムのレベルを下げることによって、そのような被ばくの可能性を低減する除染活動に主眼を置いている。内部線量は、食品に対する制限や農地の環境修復活動を通じて、引き続き制御されている。

事故を受け、日本の当局は、全体的な環境修復戦略の目標線量レベルとして「参考レベル」を採用した。このレベルは国際的なガイダンスで特定されている範囲の下限と一致していた。低い参考レベルの適用は、環境修復活動により発生する放射性物質による汚染物の量を増やす効果を持つので、費用や限られた資源への需要を増すことになる。日本で得られた経験は、事故後の復旧状況における国際安全基準の適用に関する実際的なガイダンスの策定に活用できるであろう。

***2011** 年の秋に見積もられた年間推定追加線量をもとに、**2** つの種類の汚染地域が定められた。福島第一原子力発電所から半径 **20 km** 以内及び土地の汚染から生じる追加の年間線量が事故後の最初の **1** 年間に **20 mSv** を超えると予測された地域からなる第 **1** の地域（「除染特別地域」）において環境修復計画を策定し実施するのは、国の責任となった。市町村は、追加の年間線量が **1 mSv** を超えるが **20 mSv** を下回ると予想されたその他の地域（「汚染状況重点調査地域」）*

---

[106] 食品の流通と販売、農地の利用、及び野生食品の採集に対する制限を含む（セクション 3.3 参照）。

[107] 事故後の復旧には、事故の影響を受けた地域の環境修復、損傷したサイト内施設の安定化と廃止措置の準備、これらの活動から生じる放射性物質による汚染物と放射性廃棄物の管理、及び地域社会の再生と利害関係者の参加が含まれる。

[108] 環境修復は、汚染自体（線源）又は人への被ばく経路に適用される対策を通じて、土地の汚染からの放射線被ばくを低減するために実施され得る全ての措置と定義される。

[109] 環境省、「平成二十三年三月十一日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う原子力発電所の事故により放出された放射性物質による環境の汚染への対処に関する特別措置法」（平成 23 年法律第 110 号）。

*で、修復活動を実施する責任を与えられた。**1 mSv** 以下の追加年間線量を達成するという長期目標を含む、具体的な線量低減目標が設定された。*

5.1.1. 環境修復のための法律と規制の枠組みの確立

事故後、復旧と環境修復に関する政策が、2011 年 8 月の「平成二十三年三月十一日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う原子力発電所の事故により放出された放射性物質による環境の汚染への対処に関する特別措置法」の制定を通じて日本政府によって策定された[124]。この法律には、環境修復すべき箇所の優先順位の決定、環境修復作業を実施するための資金の割当て、及びプロセス全体における利害関係者の関与に関する規定が含まれる。

環境修復プログラムを策定する際の最初のステップは、適切な参考レベルの定義、及び求められる公衆の放射線被ばくの低減を実現するための環境修復戦略の策定である。国際ガイダンスは、実際の支配的な状況に応じて、参考レベルが追加の年間線量 1～20 mSv の範囲から選択されることを勧告している（囲み 5.1）[129, 198, 263][110]。

この範囲内で参考レベルを設定するに当たっては、求められる安全目標を危うくする可能性があるような、あまりに高いレベルとしないこと、又は、限られた資源の最適に満たない利用につながり得るような、あまりに低いレベルとしないことが重要である。日本における 2011 年の環境修復の初期段階では、日本政府は、参考レベルを意図的に低く設定し[264, 265]、環境修復後の住民に対する長期目標として、追加の年間線量 1 mSv 以下が採用された [266]。これは国際ガイダンスで示される範囲の中で最も低い値である（囲み 5.1）。

人への線量を推定する際に使用されたアプローチにおける高いレベルの保守性が、UNSCEAR による評価で示された[148]。推定線量は、放射線崩壊による放射能の低下、表面からの風化作用による放射能の喪失、及び木造家屋に特有の遮蔽係数を考慮した、^{134}Cs と ^{137}Cs の単位面積あたりの放射能濃度に基づく。UNSCEAR が使用したのと同じ手法[148, 267]を使用してこの報告書のために実施された計算によれば、汚染状況重点調査地域の大部分における 2012 年の平均追加放射線量（セクション 5.1.2 参照）は年間線量 1 mSv をかなり下回るものと考えられた。

*囲み **5.1.** 環境修復のための参考レベル*

「参考レベル」は、全体的な環境修復戦略のための目標線量であるが、線量限度ではない。国際ガイダンス[129, 263]は、支配的な状況に応じて、「現存被ばく状況」における公衆の年間の追加被ばく線量について 1～20 mSv までの範囲の参考レベルを勧告している。

参考レベルは、政府、規制機関又は他の関連当局によって、国内の規制枠組みの中の段取りに従って定められる。事故後の状況における参考レベルは、環境修復のための最適な戦略を策定するために使用される。こうした戦略は、環境修復が、影響を受けた地域社会の防護において最善の成果を達成するために、利用可能な人的、技術的及び財政的資源の効率的活用を通じて実施されることを確実にする。

環境汚染と住民への放射線量を低減するために適用される具体的対策は、一般に、導き出された「環境修復行動レベル」によって主導される。これは通常、空間ガンマ線量率（μSv/h）や単位面積あたりの沈着放射能濃度（Bq/m^2）などの測定が容易な単位によって示され、住民の生活習慣と環境中での放射性核種の挙動に関するモデル及び仮定を用いて、参考レベルから導き出される。

[110] 国際基本安全基準の出版前の暫定版が事故当時に入手可能であった[263]。IAEA 安全基準シリーズ No. GSR パート 3 [198]が、その後 2014 年に出版された。

5.1.2. 採用された環境修復戦略

環境修復戦略は、事故後の内部被ばくが食品と飲料水の摂取制限によって大部分回避されたという事実に影響された。その結果、ここで説明する環境修復戦略は、主に外部被ばく線量を低減させるための除染活動に関するものとなった。

日本政府の環境修復戦略は、住宅区域、農地、及び住宅区域と農地に隣接する森林地域の環境修復を優先して、放射線量の迅速な低減に向けたアプローチを設定した[124, 266]。これを促進するために、2011 年 8 月、日本政府は環境修復される土地を以下のとおり分類した。

— *除染特別地域*（図 5.1、左）。この地域は以前の「警戒区域」、すなわち、福島第一原子力発電所から半径 20 km 以内の避難区域、及び同発電所から半径 20 km 以遠に位置し、個人の追加の年間線量が事故後 1 年間に 20 mSv を超える可能性がある以前の「計画的避難区域」と重複する。除染特別地域内では、政府が環境修復計画を策定し、実施する責任を負う。
— *汚染状況重点調査地域*（図 5.1、右）。この区域には、最初の 1 年間の追加放射線量が自治体の一部の区域で、個人に対して 1～20 mSv の間であると見積もられた自治体が含まれる[111]。自治体が、政府の財政的・技術的支援を受けながら、除染を必要とする区域を特定するためのモニタリング調査を実施し、また、これらの区域で環境修復活動を実施する。

2012 年及び 2013 年に、避難命令が発令された区域は、区域に居住する住民がいる場合の住民に対する推定年間総線量に基づいて、さらに以下の 3 つの区分に細分された（図 5.1、左）[268, 269]。

— *区域 1（緑）*。避難命令が解除される準備ができていた区域。推定年間線量は 20 mSv 以下と予想された。
— *区域 2（橙）*。住民が未だ居住を許可されていなかった区域。推定年間線量は 20 mSv を超えると予想された。
— *区域 3（赤）*。住民が長期間帰還できないと予想された区域。推定年間線量は 50 mSv を超え、事故から 6 年の平均年間線量は 20 mSv を超えると予想された。

[111] 0.23μSv/h の空間線量率がこの地域の放射線基準に使用された。この線量率は、保守的に見積もられた 1 年間の追加実効線量 1 mSv に相当する。

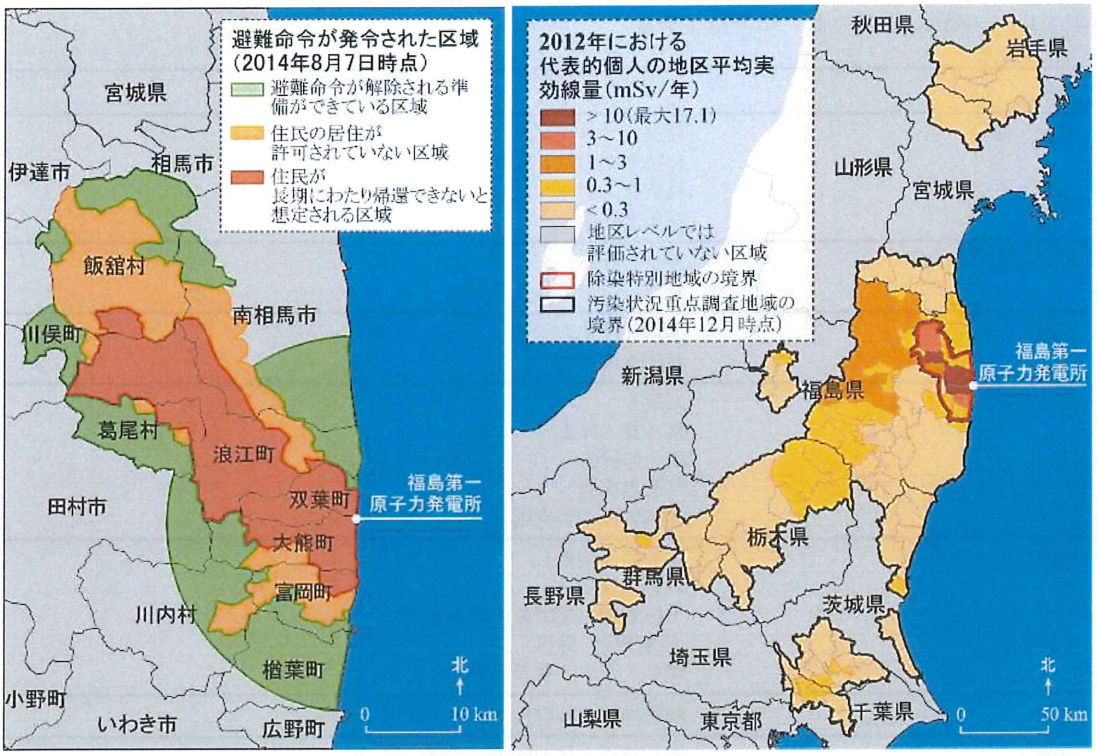


図 5.1.　左の地図は 2013 年 8 月 7 日現在の避難区域の細分を示す[270]。右側の地図は「除染特別地域」と「汚染状況重点調査地域」の指定（2014 年 12 月現在）を示し、2012 年の推定追加放射線量を示す。

5.1.3.　環境修復の進捗

幾つかのパイロット事業が 2011 年に実施された。日本原子力研究開発機構は当初、様々な種類の表面（例えば、通り、屋根、壁、及び芝生）の線量率の低減を達成するための除染の実効性を評価するため、避難区域外の 2 箇所で一連の小規模な調査を実施した[271]。その後の研究は、避難区域内のより広い面積の除染の実施可能性を検討し、空間ガンマ線量率の低減に対するこれらの措置の実効性を評価し、作業者の安全と廃棄物管理に対する影響を調べた。

これらのパイロット研究は、環境修復戦略の策定と実施に重要な役割を果たした。これは、除染手法の実効性と適用可能性に関する情報をもたらし、作業者の放射線防護に関する手続きを定めることに役立った[272]。

福島第一原子力発電所事故後、一般的に実施された環境修復措置の手法を表 5.1 に記載する。大量の廃棄物を発生させる表土の除去が、環境修復の初期に広く使用された。

表 5.1.　一般的に実施された環境修復措置

対象	環境修復方法
家屋、建屋	屋根、ベランダ及び雨樋からの沈着物の除去 屋根や壁の拭き取り 真空サンディング 高圧水洗浄
校庭、庭及び公園	表土の除去 雑草・芝生・牧草の除去
道路	溝の沈着物の除去 高圧水洗浄
庭、樹木	刈取り 落ち葉の除去 表土の除去 高圧水洗浄 樹木表面の粗皮削り
農場	耕地の天地返し 表土の除去 土壌処理（施肥量の増加など） 土壌硬化、除去 雑草・芝生・牧草の除去
家畜	動物飼料の放射性セシウム濃度の管理
森林	落ち葉や小枝の除去 剪定

環境修復戦略は、後に、汚染状況重点調査地域と除染特別地域の双方で実施され、相当な進捗が見られた。2015 年 3 月末までに、福島県外の汚染状況重点調査地域のほとんどの部分で除染がほぼ完了した（自治体の約 80%）。福島県内の汚染状況重点調査地域では、公共施設の約 90%、住宅の 60%、及び道路の 50%で除染が行われた[273]。

除染特別地域の中では、2015 年 3 月に 4 つの自治体（田村市、川内村、楢葉町、大熊町）で除染計画が完了した。さらに 2 つの自治体（葛尾村及び川俣町）で住宅地域の除染が完了し、飯舘村でもほぼ完了した[273]。福島県内の除染地域 1 と 2 の双方におけるほとんどの除染計画は、2016 年 3 月末までに完了する予定であったが、一部は 2017 年まで続く予定である（図 5.2）。

田村市と楢葉町の住宅区域で実施された調査は、空間ガンマ線量率が、各々平均で 36%と 46%引き下げられたことを示した。ガンマ線量率（囲み 5.1 参照）は、環境修復活動の前後に除染面から 1 m の距離で空間線量率を測定することによって求められた。これら 2 つの自治体の農地、森林及び道路での環境修復作業後の平均線量率の低下は、21%と 44%の間であった [273]。

これらのデータは、空間ガンマ線量率の低下が、初期に線量率が高かった区域でより大きいことを示している。環境修復後は、ガンマ線量率は風化作用と放射性崩壊の自然プロセスによって低下を続ける。

政府が直接管理する除染特別地域における除染の単位費用は、約 1,100 円/m^2（森林）から約 5,500 円/m^2（公園）の範囲であった[274]。

図 5.2.　2014 年 12 月までの除染特別地域での環境修復の進捗[273]

環境修復の例を図 5.3 で示す。

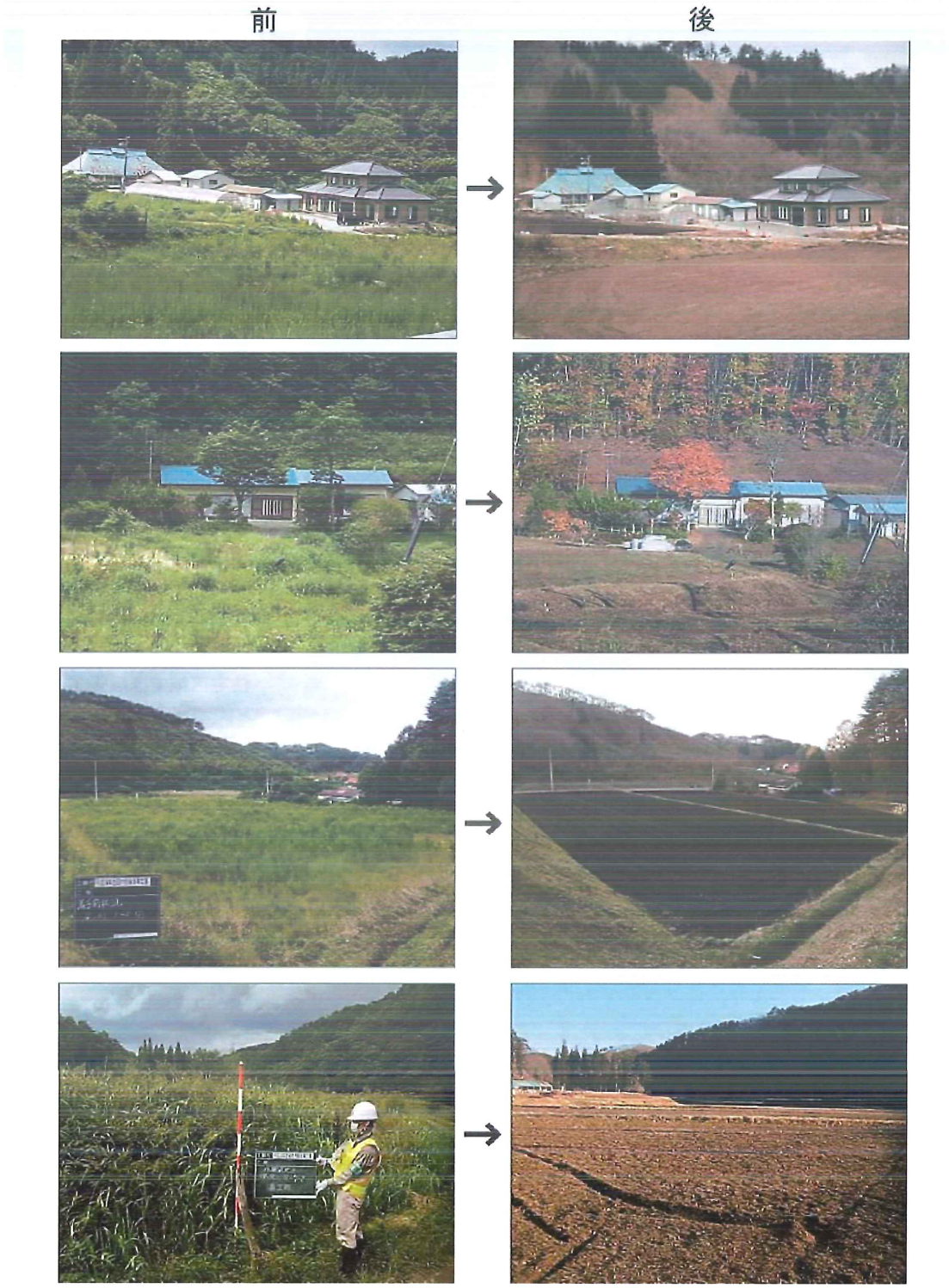


図 5.3.　田村市での環境修復前後の風景（写真は環境省提供）

5.2. サイト内の安定化と廃止措置に向けた準備

*損傷した原子力発電所の安定化と廃止措置に関する包括的で高いレベルの戦略的計画が、東京電力及び関連する日本政府の省庁によって共同で策定された。この計画は **2011** 年 **12** 月に初めて発表され、その後、損傷した原子力発電所の状態や将来の課題に関して得られた経験や理解の向上を反映して改訂された。この戦略的計画は、サイト内の作業の複雑さに言及し、安全確保のアプローチ、廃止措置に向けた措置、作業促進のための制度及び環境、及び研究開発の必要を含んでいる。*

*本報告書作成時点では、安全機能が回復され、安定した状態を確実に維持するための構造物・系統・機器が設置されていた。しかし、損傷し汚染された原子炉建屋への地下水の浸入の制御が継続的に必要であった。発生した汚染水は、放射性核種を可能な限り除去するために処理した上で、**800** 基を超えるタンクに貯蔵されていた。海洋への管理された放出の再開の可能性を含む、全てのオプションを考慮した上で、より持続可能な解決策が必要である。最終的な意思決定には、利害関係者の関与が必要であり、その協議過程において社会経済的条件を考慮するとともに、包括的なモニタリング計画を実施することが必要となるであろう。*

使用済燃料と燃料デブリの管理に関する計画が策定され、使用済燃料プールからの燃料の取出しが始まった[112]。デブリの位置と性状の目視確認を含む、多くの必要な予備的段階を考慮した、燃料デブリを取り出すための将来計画の概念モデルが開発された。損傷した原子炉における高い放射線量レベルのため、本報告書作成時点ではそうした確認は可能ではなかった。

*日本の当局は、廃止措置活動の完了までには **30～40** 年程度を要する可能性があると見積もっている。発電所と敷地の最終的な状態に関する決定には、更なる分析及び議論が必要となる。*

*囲み **5.2.** 安定化と事故後の廃止措置*

「廃止措置」という用語は、施設の規制上の管理を一部又は全て解除できるようにするために講じられる行政上及び技術上の措置を指す。

実際には、廃止措置は、施設の構造物・設備・機器を漸進的に撤去するものである。通常の状態では、原子力発電所の廃止措置は計画的な活動であり、運転終了の決定が下された後に開始される。事故後の廃止措置は、通常とは異なる課題が伴う。施設の状態及び燃料とプラント機器の状況を最初に確認したうえで、進むべき道を決定する必要がある。これは、新しい技術と手法の開発を必要とすることもある。

原子炉の停止が事故の結果である場合には、承認された最終廃止措置計画が実施される前に、施設を安全な状態（安定化）に移行させる必要がある。安定化には、発電所の構造物（損傷した原子炉を収容する建屋など）、設備（電源供給設備など）及び機器（ポンプ及び電動機など）が安定的な状態に置かれ、必要なだけの期間運転できることを確実にするために必要な措置が含まれる。

5.2.1. 戦略的計画

緊急時段階に続き、東京電力と政府関係機関は、安定化と廃止措置活動のための戦略的計画「東京電力福島第一原子力発電所・事故の収束に向けた道筋」を定めた[275]。この計画は 2011 年 12 月に初めて発表され、その後、経験の蓄積とサイト内の状態に対する理解の改善を考慮し

[112] 4 号機の使用済燃料プールからの燃料の取出しは、2014 年 12 月に完了した。

て改訂された [276][113]。これは、復旧を監督する者にとっての総合的かつ高レベルの戦略的計画である。日本の当局の見積りによれば、廃止措置は、30～40 年の期間で完了する予定である。

同計画は、以下の作業分野についての戦略的取組を記載している。

— 安全確保への取組。これにはリスクを低減し、燃料と燃料デブリの取出しを最適に行うための戦略目標が含まれる。
— 廃止措置に向けた中長期的措置。これには各原子炉からの燃料と燃料デブリの取出しに関する計画が含まれる。これらの計画は、燃料と燃料デブリの取出しのプロセスで得られる情報が増えるにつれて明らかになるであろう幅広い状況に対応できるよう十分な柔軟性を持っている。
— 作業を促進するための系統と環境。このため東京電力は、作業者の健康と放射線被ばくに対する集中監視のための組織を設置した。作業者の放射線防護を改善するための活動は継続され、廃止措置プロセス全体を通じて訓練された労働力を管理・確保するための方策が立案された。
— 研究開発。これは、福島第一原子力発電所で達成すべき作業の多くが、その種のものとしては初めてであり、これまで開発されていないか、又は大規模な形では使用されていない機器や技術を要するために、必要となる。原子力廃止措置の技術を開発し、原子力廃止措置に関する国際機関及び国内機関の協力を促進し、研究開発の人材を育成するため、国際廃炉研究開発機構が設立された。

5.2.2. 廃止措置準備

原子力規制委員会は、設立後間もなく[278]、さらなる事故を防ぎ、核セキュリティを確保するための特別な措置を必要とする、いわゆる災害経験施設の規制に関する新たな規制の枠組みを策定した。2012 年 11 月 7 日、原子力規制委員会は、福島第一原子力発電所を、原子力事故が発生し、施設の状態に見合った特別な規制が規定される施設である「特定原子力施設」に指定した。

この指定により、原子力規制委員会は戦略的計画[275]に記載された対策を実施するための計画を策定するよう東京電力に要求することが可能となった。東京電力の実施計画は、2012 年 12 月に提出され[279]、その後承認された。東京電力には実施計画で特定された活動を実施する責任がある。これらの活動の実施は、原子力規制委員会の審査を受ける。

さらに、原子力規制委員会は、2014 年 2 月に敷地境界における追加的実効線量を管理する規制要件を設定し、2015 年 2 月には「東京電力株式会社福島第一原子力発電所の中期的リスクの低減目標マップ」における活動を特定した[280]。

東京電力は、防護と安全を維持し、廃止措置に向けた進展を可能とするため、サイトの安定状態を 確立した[275]。通常電源と予備電源などの重要維持機能が再構築、高度化された。基本安全機能も再構築された。安定状態の長期信頼性を確保するための措置には次のものが含まれる。

— プラント状態の監視
— 燃料と燃料デブリの冷却
— 未臨界の維持
— 水素レベルの管理
— 原子炉建屋の構造的安定性の確保

[113]変化する状態や新たな情報に対応して計画が適合されることにより、「道筋」の更なる改訂が予想される。「道筋」の 3 度目の改訂版は、本報告書の作成最終段階の間に発表された（2015 年 6 月）。この改訂版では、燃料と燃料デブリの取出しに関する予定とアプローチが変更され、また、リスク低減、地域の利害関係者とのコミュニケーション、作業者の放射線被ばくの低減、研究開発の管理に関するアプローチが改良されている[277]。

— 原子炉建屋への水の浸入の管理と環境への漏洩防止
— 主要電源の確保
— 長期的な基本安全機能確保の保証

例えば、常設の設備を補強するため、多重バックアップ設備を設置し、移動式設備や仮設設備を交換及び／又は高性能化することにより、重要な安全機能が再確立、高度化された。サイトでの状況は引き続き複雑であり、継続的な安定状態を確保するため注意深い監視と管理が必要である。

5.2.3. 汚染水の管理

損傷した原子炉建屋に入る水は汚染され、関係する量が多いため特に困難な問題を引き起こす。本報告書作成時点では、水は、炉心冷却のための注水と地下水の浸入という 2 つの経路で福島第一原子力発電所の原子炉建屋に入り続けていた。この水の特性評価と管理が引き続き必要であった（図 5.4）。

事故以前には、山側から福島第一原子力発電所の裏手に流れてきた地下水は、地下水位を管理するために、1～4 号機の建屋の周囲にあるサブドレンから、約 850 m^3/日の割合で汲み上げられていた。事故の結果、以前は建屋の浮力を抑え、建屋への地下水の流入を防ぐ役割を担っていたサブドレンとポンプが運転を停止した[281]。

事故後、約 400 m^3/日の汚染されていない地下水が建屋に流入した。約 400 m^3/日の水が冷却のために 1～3 号機で循環されている。建屋に入った地下水は、原子炉冷却に使用される循環水と混ざり、管理が必要な汚染水の総量は約 800 m^3/日となる。この水のうち約 400 m^3/日は、燃料と燃料デブリを冷却するために原子炉に再注入され、残りの 400 m^3/日は、汚染水貯蔵タンクで貯蔵されている[276]。

水は、除去できないトリチウム以外の放射性核種を取り除くために処理される[282]。処理された水は、サイトの 826 基のタンクで貯蔵されている（2015 年 2 月 12 日現在）[283]。

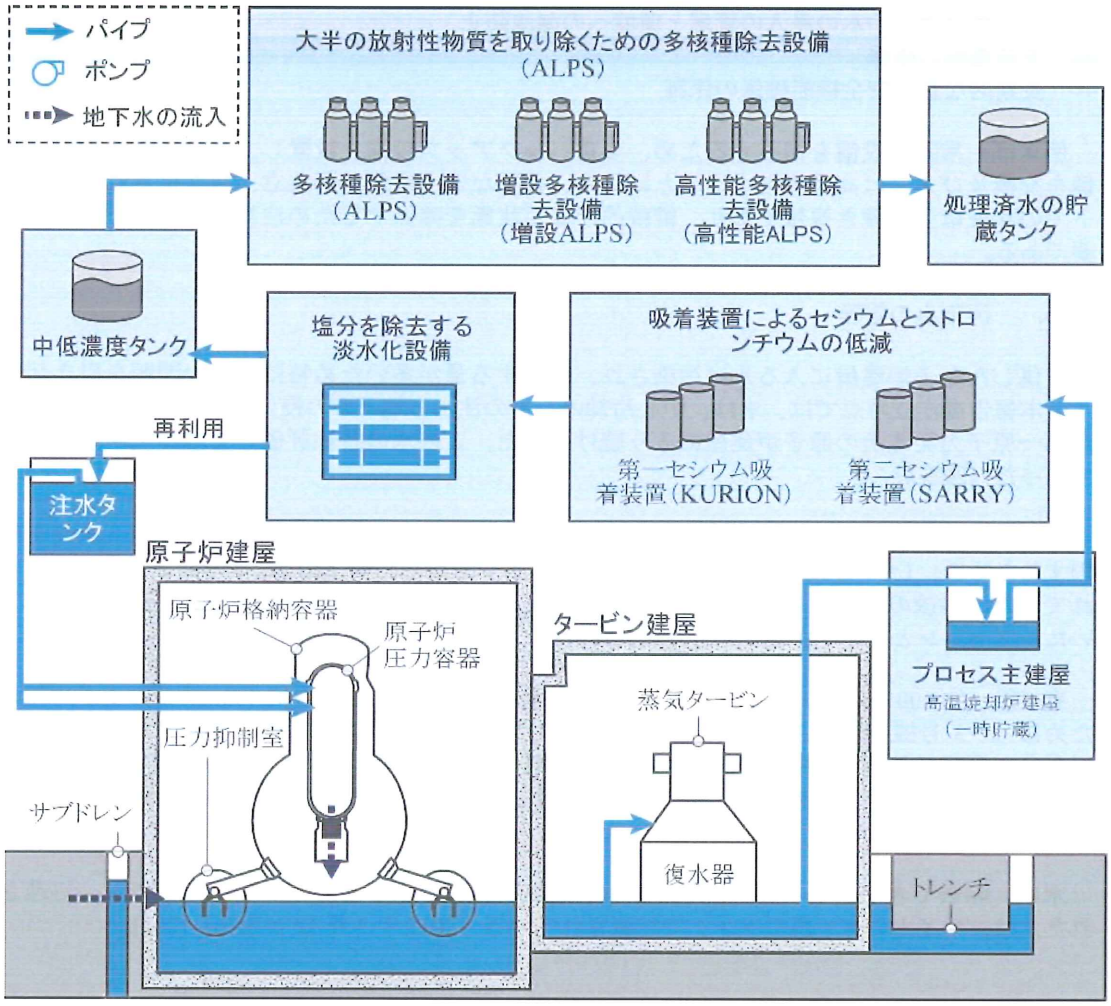


図 5.4.　サイトでの汚染水の管理[284]。

追加の処理設備と貯蔵タンクの改善と設置、サブドレン設備の復旧、及び海側遮水壁の設置などの様々な水の管理手法が採用され、あるいは計画されていた。損傷した施設の山側からの汚染されていない地下水は、施設の周囲をバイパスして海に放出されている（図 5.5）[285]。さらに、水の更なる浸入を防ぐため、原子炉建屋の山側に極低温の「凍土」壁が建設中であった。原子炉建屋の海側の極低温壁も計画されていた。

原子力規制委員会の承認、及び福島県と漁業界を含む関連の利害関係者の受け入れを得て、東京電力は 2014 年 5 月、バイパスされた汚染されていない地下水の海への直接放出を開始した [285]。この措置により処理を要する水の量が減った。

サイトにある大量の汚染水は、様々なリスクをもたらす。タンク、配管及び弁の不具合のため、あるいは大雨の際、機器からの放射能汚染水の漏洩が観察された。幾つかの事例では、漏洩が海への放射性核種の放出を招いた。そうした漏洩が発見されたために、サイト内と海洋環境の双方でより集中的なモニタリングが実施されることとなった[287]。漏洩を止め、あるいは減らすための措置が実施されていたが、海への管理された放出の再開の可能性を含む全てのオプションを考慮した、より持続可能な解決策が必要である。IAEA の評価ミッション[288, 289]の結果として、東京電力はトリチウム及び他の残留放射性核種を含む水の海への放出に関する潜

在的放射線影響の評価を実施するよう助言を受けた。最終的な意思決定には、東京電力、原子力規制委員会、政府、福島県及び地元自治体その他を含む全ての利害関係者を関与させることが必要となり、協議プロセスで社会経済的状況を考慮し、人の健康と環境に対する悪影響がないようにするため、総合的モニタリングプログラムを実施する必要があることも認識された[288, 289]。これに関連して、事故後の状況での放出に関する国際ガイダンスの適用に関する更なるガイダンスが有益であろう。

図 5.5.　水管理活動の図解。汚染水の貯蔵タンクが左側に示されている[286]。

5.2.4.　使用済燃料と燃料デブリの取出し

事故で損傷した施設の廃止措置の準備には、損傷した原子炉建屋の内部にある貯蔵プールからの使用済燃料と未使用の燃料集合体の取出しが含まれる。東京電力は 2013 年 11 月、4 号機の

原子炉建屋内の貯蔵プールから燃料共用プールへの燃料の搬出を開始した。この作業は 2014 年 12 月に完了した[290]。

1～3 号機の貯蔵プールから使用済燃料と未使用の燃料集合体を取り出すには、数年を要する予定である。必要期間のより正確な見積りは、爆発で生じたデブリの撤去、アクセスのための 1 ～3 号機の上部構造物の準備、撤去用の機器や構造物の支持部材の準備などの措置の進捗にかかっている。使用済燃料は、共用プールに一時的に貯蔵される予定である。

炉心の溶融燃料デブリの除去と管理は、更に複雑な課題である。事故によって発生した損傷燃料（「燃料デブリ」）の構成と組成の目視確認は、損傷した原子炉での高い放射線量レベルのために不可能な状況にある。利用可能な分析は、1 号機では燃料の大半が溶け、一部が原子炉圧力容器の底を貫通して格納容器に到達しているのに対し、2 号機と 3 号機でも燃料は溶けたが、より多くの割合が原子炉圧力容器内にとどまっていることを示唆している[9]。

本報告書作成時点では、燃料デブリにアクセスし取り出す方法に関する概念調査を日本政府が支援している[276, 291]。燃料デブリの取出しに向けた将来の活動に関する概念モデルが、以下の項目を含む多くの予備的手順を考慮して構築された。

(1) **原子炉建屋における放射線レベルの引下げ。**高い線量、及び原子炉建屋内部に散乱する瓦礫と汚染された粉塵のため、原子炉建屋内部の空間への作業者の立入りは困難である。アクセスを可能とするためには、多くの場合遠隔操作装置を利用した除染が必要となる。
(2) **水が滞留した格納容器の修理。**格納容器からの水の漏洩を止めるための調査を行い、必要な装置を開発する。その後、これに続く作業のために必要に応じて水位を監視・維持する。
(3) **格納容器内の状態の特性評価。**燃料デブリの撤去には、燃料デブリの断片の正確な位置の特定が必要である。格納容器内部の状態を調べるための装置を開発し、燃料デブリの断片の位置、分布及び形状などの必要な情報を取得する。
(4) **原子炉圧力容器内の状態の特性評価。**本項目には燃料デブリの分布、放射能レベル、及び損傷した圧力容器の物理的形態が含まれる。
(5) **燃料デブリ撤去のための技術の開発。**燃料デブリ撤去に当たっての前提を明確にし、原子炉の開放、原子炉圧力容器内の障害物の撤去、燃料デブリ取り出しのための技術と装置の開発につなげる。
(6) **水管理。**燃料デブリの撤去に対する取組が進むにつれて、冷却とホウ素制御のほか、慎重な水管理が必要となる。例えば、撤去作業の結果として水中に浮遊するようになる粒子状物質の除去に追加の手段が必要となる。
(7) **燃料デブリのパッケージング、移送及び貯蔵。**デブリは、原子炉圧力容器と格納容器から取り出されると、遮蔽容器に入れる必要がある。容器は原子炉建屋から運び出し、その最終措置に関する決定が下されるまで福島第一原子力発電所サイト内の中間貯蔵施設において保管する必要がある。
(8) **燃料デブリの核臨界の防止。**デブリ内でのいかなる核臨界の可能性も除外するため、評価を実施し、モニタリング手法を確立する。
(9) **燃料デブリ内の核物質の計量管理。**日本と IAEA との保障措置協定並びに日本の国内法に基づき、核分裂性物質の計量管理が必要である。標準的な計量管理方法は、燃料デブリには適用できないため、燃料デブリが原子炉から取り出される前に、計量管理手法を構築する。

燃料デブリは遮蔽及び大気中への放射性物質の放出を最小限に抑えるために水没させた状態で取り出される。放射線と汚染のレベルが高いこと、及び燃料デブリの分布と性状が不明であることは、作業の多くを遠隔操作装置を使用して実施する必要があることを意味する。燃料デブリの取り出しのための戦略は、適切な機器の設計・製作の計画とともに、燃料と燃料デブリの状態に関するデータが明らかになるに従い補正される必要が生じるであろう。

5.2.5. サイトの廃止措置の最終状態

通常の（事故以外の）状況では、原子力発電所の最終状態は、認可申請とその補足文書において定義、記載される。一般的には、即時解体、及び時に安全貯蔵とも呼ばれる遅延解体という、2 つの方策が発電所の最終状態を達成するために使用され得る。例えば原子力事故後のような例外的な状況では、密閉管理も検討される場合がある[292]。

原子力事故が起こると、新たな廃止措置計画を策定する前に構造物・設備・機器を安定化させる必要があるなどの理由により、以前の廃止措置計画が無効になる場合がある。廃止措置計画、燃料デブリの取り出し、及びサイトの最終状態に関するオプションは、事故の性質に左右され、これには、施設内に残る放射性残渣、粒子及び放射性物質、貯蔵中の使用済燃料と燃料デブリ、及び貯蔵中の固体放射性廃棄物と処理水の状態の考慮が含まれる[293]。例えば適切な公開協議プロセスを通じて得られる利害関係者の関心も、廃止措置の計画と実行に影響する。

福島第一原子力発電所の最終状態を予測することは、現時点では不可能である[291]。過去の事故で最も重大な燃料損傷を生じた世界の他の地域の 3 つの発電所の中で、完全な廃止措置のための最終状態に達した発電所は未だ 1 つもないことは留意される[293]（囲み 5.3）。

囲み 5.3. 損傷した原子力施設の廃止措置の状況

過去の事故で最も重大な燃料損傷を生じた他の 3 つの施設は、ウィンズケール（英国）、スリーマイル島（米国）及びチェルノブイリ（旧ソ連）である。本報告書作成時点でのこれらの状態は以下のとおりであった。

1957 年の事故で損傷したウィンズケール・パイルは管理・保守の状態にある。今後数年間で安全貯蔵に移行し、最終的な廃止措置は 2050 年頃実施する計画である。

1979 年にスリーマイル島原子力発電所で損傷した原子炉は安全貯蔵中であり、今後 20 年以内に完全な解体とサイトの環境修復を行う計画である。

1986 年の事故で激しく損傷したチェルノブイリ 4 号機は安全貯蔵に置かれる過程にあり、最終的な廃止措置は 2050 年頃に計画されている。

福島第一原子力発電所サイトで達成すべき最終状態に関する最終決定に当たっては、将来の土地利用、廃止措置作業者への考えられる被ばく線量、発生する廃棄物、及び廃棄物の処理と処分を含む多くの要素を検討する必要がある。

5.3. 放射性物質による汚染物と放射性廃棄物の管理

損傷した原子力発電所の安定化、及びサイト内の除染と周辺地域での環境修復作業からは、大量の放射性物質による汚染物と放射性廃棄物が発生する。サイト内においては、様々な復旧活動を通じて、放射性物質に汚染された固体物及び液体物並びに放射性廃棄物が大量に発生している[114]。様々な物理的、化学的及び放射能特性を有する、そうした物質の管理は複雑であり、多大な努力を要する。

[114] 放射性物質による汚染物と放射性廃棄物は、当該物に含まれる放射性核種及び放射能濃度によって区別される。

また、福島第一原子力発電所の事故後、サイト外の環境修復活動から生じた大量の放射性物質による汚染物の保管場所を確保することに困難が生じた。本報告書作成時点では、数百の仮置き場が地方自治体に設置され、中間貯蔵施設を設置するための努力が継続されている。

5.3.1. 廃棄物の管理

大量の廃棄物（「災害廃棄物」として知られる。）が地震と津波によって発生し、その一部は福島第一原子力発電所からの放出の結果、（主として ^{134}Cs と ^{137}Cs によって）汚染された。サイト内の安定化活動によって、管理を必要とする放射性物質による汚染物や固体及び液体の放射性廃棄物の保有量が増加し、また、サイト外の環境修復活動によって放射性物質による汚染物の量が増加した。

囲み 5.4. 放射性廃棄物

放射性廃棄物は、基準値を超える量または濃度の放射性核種を含み、それ以後の利用が想定されない物質である。処分は、放射性廃棄物の管理における国際的に認められた終着点である。しかし、一部の放射性廃棄物については、処分施設が設置されるまでの間、数十年にわたる貯蔵が必要になることがしばしばある。特定の種類の放射性廃棄物（低レベル放射性廃棄物）は、「浅地中」廃棄物処分施設で処分することができる。

物理的、化学的及び放射性物質に関する性状が異なる大量の廃棄物の管理（すなわち、前処理、処理、コンディショニング、輸送、貯蔵及び将来の処分）は容易ではない。地震と津波によってインフラが失われたことにより、また高い放射線レベルにより、更に困難となった状況で、装置、活動及び施設を開発・改造しなければならなくなった。廃棄物管理に対する法律や国の取組も修正が必要になった[124, 266, 278, 294]。

5.3.2. サイト外における活動

外部被ばくを減少させるため、サイト外における環境修復が開始された。環境修復活動には、表土と植生の除去、及び公共・居住区域の除染が含まれた。環境修復が必要な区域の広さは、適用する放射線の基準値と対応レベルによって影響され、これは管理が必要になる放射性物質による汚染物の量にも影響した。

一般に、参考レベルが低いと、発生する放射性物質による汚染物の量が増える。事故後の環境修復活動で発生した土壌とその他の放射性物質による汚染物の量は、植物と樹木を焼却によって減量した後、約 1,600 万～2,200 万 m^3 になると推定される[273]。

福島県で行われている廃棄物管理プロセスを図 5.6 に示す。環境修復活動で発生した廃棄物の管理には、除染場所近くの仮置き場への収集が伴う。数百カ所の仮置き場が建設された。仮置きの後、この廃棄物は、中間貯蔵施設に輸送される。放射性物質による汚染物の一部は、市町村のごみ処分のための既存の施設（市町村の焼却施設やごみ処分場など）が利用できる程度に低い汚染レベルである。しかし、サイト外で発生した放射性物質による汚染物を減量するために既存の焼却炉を使用することについて市町村の同意を得ることは困難を伴った。

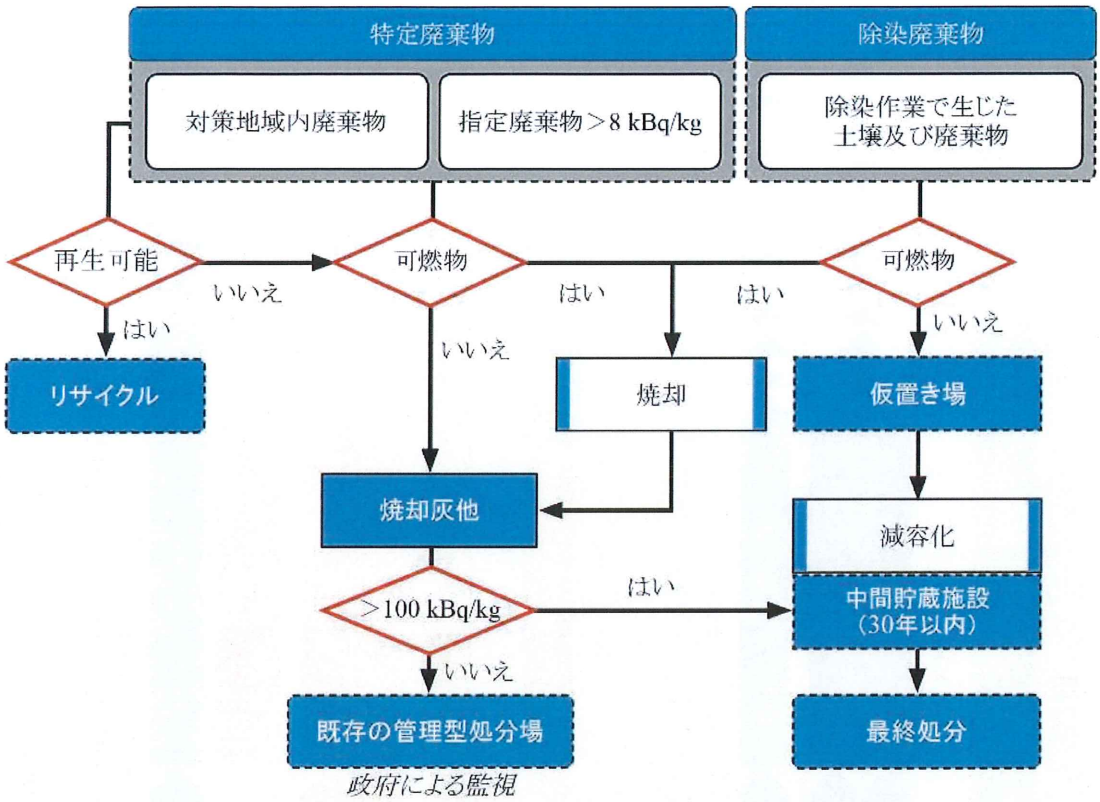


図 5.6.　福島県における指定廃棄物と除染廃棄物の管理のフローチャート[295]。

仮置き場及び中間貯蔵施設のサイト選定には遅れが見られた。地元住民の同意を得ることが立地の遅れにつながる要因であった。しかし、政府及び地方自治体当局者と、地元住民及び地主との協議を経て、中間貯蔵施設を建設する計画が 2014 年 12 月に大熊町で、2015 年 1 月に双葉町で受け入れられた。2015 年 1 月に、環境省が 2015 年 3 月からの汚染土の中間貯蔵施設へのパイロット規模の輸送に関する計画と段取りを確認し [273]、試験目的でのこれらの輸送は、2015 年 3 月 13 日に始まった。

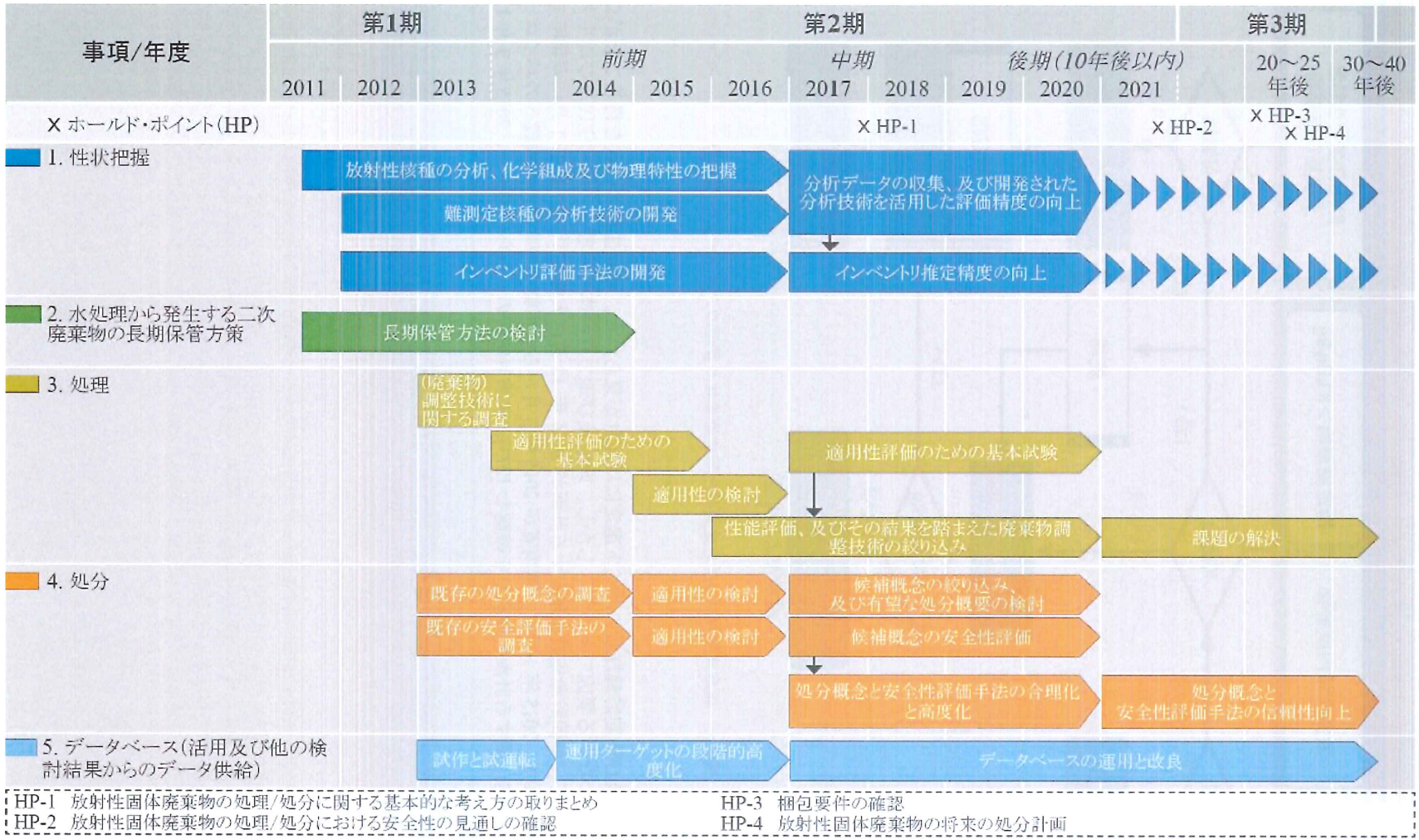


図 5.7.　サイト内廃棄物管理の戦略の一部[291]。

5.3.3. サイト内における活動

福島第一原子力発電所では、大量の放射性物質に汚染された固体物液体物並びに放射性廃棄物が様々な復旧活動に伴って発生した。例えば、2014 年 11 月 30 日現在、131,900 m^3 のデブリと 79,700 m^3 の樹木がサイトで貯蔵されていた[296, 297]。こうした大量の放射性物質による汚染物と放射性廃棄物の発生は、廃棄物管理に関する実効的な戦略の構築を必要とした。特に、数十万立方メートルの汚染水・処理水の処理と貯蔵、及び処理プロセスと広い面積の土地の除染により生じた固体廃棄物管理のための施設を開発する必要があった。水の処理、貯蔵のための施設を含むサイト内の廃棄物管理に関する戦略の一部を図 5.7 に示す。

様々な種類の固体及び液体廃棄物ストリームに対応する貯蔵能力を確保することが引き続き必要である（図 5.8）。したがって、例えば、廃棄物の発生回避、焼却炉の設置、及び物資の再利用やリサイクルなどを通じた廃棄物量の減量がサイト内廃棄物の管理において重要な要素となっている。また、原子力発電所の廃止措置から追加の廃棄物が想定される[298]。廃棄物の種類と量は採用される方策に左右される。

図 5.8. 貯水タンクを示すサイト内の航空写真[301]。

境界での線量率を 1 mSv/y 未満に抑えるために、放射性廃棄物をサイト境界から移動させる活動が実施されている。サイト境界には公衆が居ないため、これらの活動は公衆被ばくに何ら影響しない[299]。

サイト内での廃棄物の管理は多くの複雑な課題を提起し、更なる研究と開発が必要である。新しい能力が得られるに従って、サイト内廃棄物の最終処分に関する方策を検討する必要があり、これには短期及び長期の双方に関する判断が必要となる[300]。

5.4. 地域社会の再生と利害関係者の関与

原子力事故及び緊急時段階と事故後の復旧段階の双方で導入された放射線防護の対策は、影響を受けた住民の生活に多大な影響を及ぼした。避難と移転の措置や食品の制限は、影響を受けた住民の苦難を伴った。福島県で導入された再生と再建のプロジェクトは、事故の社会経済的影響の理解に基づいて策定された。これらのプロジェクトは、インフラの再建、地域社会の再生、並びに支援と補償などの問題に取り組んでいる。

信頼を構築するためには、復旧活動に関する公衆とのコミュニケーションが不可欠である。効果的に意思疎通するためには、影響を受けた住民の必要とする情報を専門家が理解し、適切な手段によって、わかりやすい情報を提供することが必要である。コミュニケーションは、事故後に改善され、影響を受けた住民は、次第に意思決定と環境修復活動に関与するようになった。

事故及び緊急時段階と復旧段階の双方で導入された防護対策は、影響を受けた地域の住民の生活に影響を及ぼした。2012 年 6 月のピーク時の避難者約 16 万 4, 000 人に対し、2015 年 1 月 30 日までに、この数は約 11 万 9, 000 人になった。避難、移転及び食品の制限に伴う苦難は相当なものである[268, 269]。

地震、津波及び事故は、インフラ（学校、病院及び企業を含む）の破壊、劣化あるいは廃止をもたらし、事業と貿易に影響を及ぼし、多数の人々の避難を通じて人口の変化をもたらした。若い家族はより避難を続ける傾向があり、高齢者はより家に戻る傾向があると報告された[302]。国レベルと地方レベルの復旧と再生の計画は、物理的及び社会経済的再建の重要性を認識し、インフラの再建、地域社会の支援及び補償などの問題を取り上げている[269]。

仮設住宅に住む人々にとっての特別な課題には、高い失業率と仮設住宅の不便さに伴う一般的な肉体的及び精神的福利厚生に関わる一連の問題が含まれる[239]。地震、津波及び原子力事故の結果として、仮設住宅に居住する避難者の総数は正確にはわかっていないが、2013 年 6 月までに、1 万 6,800 戸の仮設住宅が建設され、2 万 4,000 近くの世帯が、県が賃貸する住居に居住していた[269]。さらに、2015 年までに地震と津波の影響を受けた人々のために 2,586 戸の恒久的な公営住宅を建設する計画があった。事故に対応して避難した人々のためには、4,890 戸の恒久的な公営住宅が計画された[283]。

5.4.1. 社会経済的影響

避難は、農地と事業の喪失を招いた。漁業は、サイトから 30 km 以内の海域で停止した（2011 年 9 月末に 20 km まで狭められた）。農業及び他の商業活動は、除染特別地域外の約 700 km^2 の地域で停止した[269, 303, 304]。

農業部門及び他の事業に対する社会経済的影響は、除染特別地域と汚染状況重点調査地域の外でも見られた。影響を受けた人々の雇用と生計手段の喪失に加えて、食品の制限、食品と消費財に関わる輸出の喪失、放射能基準の遵守を証明するためのモニタリングの費用、及び影響を受けた人々への補償の支払いも影響があった。間接的な社会経済的影響には、食品のみならず、影響

を受けた地域からの商品と当該区域の事業に対する消費者の信頼の喪失によって生じる影響も含まれる[269, 303, 305]。

地震、津波及び原子力事故の複合は、日本経済に直接的な影響を与えた。輸出は、2011 年 4 月に前年同月比で 2.4%減少した。同時に、輸入、特に燃料、化学製品及び食品の輸入が増加し、2011 年 4 月と 5 月には貿易収支の赤字を招いた[303]。化石燃料の輸入は、本報告書作成時点で、高いレベルが続いていた[306]。

事故当時、日本は原子力損害の民事責任に関するいずれの条約の締約国でもなかったが（日本は 2015 年 1 月 15 日に原子力損害に関する補完的補償に関する条約（CSC）に参加した）、1961 年に制定された法律は、それらの条約が具現化する原子力賠償責任の基本原理と整合していた。この法律に基づき、東京電力は、福島第一原子力発電所事故によって生じた原子力損害に対して排他的責任を負った[307]。その責任は金額が無限であった。原子力損害の賠償に関する法律で定められた重大な自然災害に関する免除条項は、この場合には適用されないとの前提に基づき、東京電力は、事故後に政府と国会から責任の免除を認められなかった。東京電力が事故の被害者に対する義務を果たすことができるようにするため、緊急措置としての仮払補償金の支払い、原子力損害賠償・廃炉等支援機構（NDF）による東京電力への財政支援の提供、及び原子力損害賠償・廃炉等支援機構が東京電力の支配株主になることを含め、様々な手段が実施されてきた。さらに、原子力損害賠償紛争審査会の創設及び法的拘束力のない指針の発表が、原子力損害の補償に関する迅速な法廷外の解決のメカニズムを提供した。

制定された補償政策は、避難を命じられた人々に適用され、また、生計手段と生活様式への影響、制限措置及び消費者による信頼の喪失による逸失利益、並びに地域に残る人々にとってのインフラの変化も対象となっている。さらに、若い家族の両親と妊婦に対する特別な規定もある[308]。

2011 年 12 月に定められた指針によると、避難対象の住民は、1 人、1 か月あたり 10 万円の規模の補償を受け取った。1 人あたり約 90 万円の追加補償金が、避難命令が解除されてから 1 年以内に影響を受けた地域に戻って生活する人々に支払われる[309]。

5.4.2. 再生

福島県の再生を活性化するための幾つもの施策が、国と地元の支援を受けて実施されている。これにはインフラ、住宅及び輸送の再建が含まれる。活動の中には、地元の誇りを高め、観光を促進しつつ、製品に対する消費者の信頼を回復することに焦点を当てるものがある。仕事と雇用があることも住民の帰還（あるいは、新しい住民の定住）の原動力であることを認識し、他のイニシアチブは、事業の再建及び新たな商業機会の創設に主眼を置いている。

再生イニシアチブと復旧に関連する再建活動は、国レベルのものから、非政府組織や地方自治体によるイニシアチブにまで広がっている。政府は、復興庁を設置した。福島県は、環境創造センターの設置を含む様々な活動を開始した[234, 269]。そして、2013 年に福島復興本社が東京電力により設置された。全てのプロジェクトは、放射線防護対策を、インフラの再生及び公衆の関与、並びに福島復興本社の場合には補償など、より幅広い社会的側面と組み合わせることを目的としている[310]。

福島県内においては、しばしば地元の指導者の関与及び地域内の異なる課題のため、活動は様々である。成功している再生イニシアチブの例として、福島県で生産される食品に対する公衆の信頼を回復するための、桃栽培農家、流通業者及び食品産業の協力が挙げられる[269, 311]。

5.4.3. 利害関係者の関与とコミュニケーション

環境修復と復旧対策が進むにつれ、利害関係者の関与が増え、協議と参加の戦略が改善していった。事故への対応では、影響を受けた住民を、協議と対話から環境修復活動までの復旧のための活動（いわゆる自助活動）に関与させることの利点を示す多くの例が見られる。

公衆との開かれた効果的なコミュニケーションは、再生の不可欠な一部である。除染に関する地域の情報拠点（除染情報プラザ）が、福島県と環境省の共同プロジェクトとして 2012 年 1 月に福島市に開設された[312]。

地方レベルでの他のコミュニケーション活動には、専門家と公衆の対話、及び自助活動のための具体的助言が含まれる。こうした活動は、福島の住民とのコミュニケーションの回復と信頼の再構築に役立った。

環境修復及びそれに伴う利害関係者との相互作用の実施プロセスのフローチャートを図 5.9 に示す。計画の策定とその実施における全ての段階に、利害関係者の参加と協議が含まれた。私有地の環境修復の場合、いかなる環境修復活動も、開始する前には土地所有者による合意が必要である。

原子力事故では、従来型と新しい形式の両方のメディアが、公衆とのコミュニケーションに重要な役割を果たす。福島第一原子力発電所事故は、インターネット、ソーシャルメディア、及び初期段階では継続的なテレビとラジオの放送を通じた、高いレベルのメディア報道に特徴付けられた。事故の報道は数カ月間続き、主に事故現場に関連する問題に焦点を当てたが、日本の当局が講じた防護対策も報じられた。ソーシャルメディアは、事象の報道及び個人や非政府組織の見解の流布を強化した。質と信頼性のレベルが異なる、相当な量の情報が入手可能であった[310]。

放射線安全の専門家は、公衆がどのような種類の情報を求めているのかを知り、それを理解しやすい形で提供する必要があった。影響を受けた地域とメディアが問うた重要な質問は、どのレベルの放射線が「安全」であるかに焦点を当てた[314]。

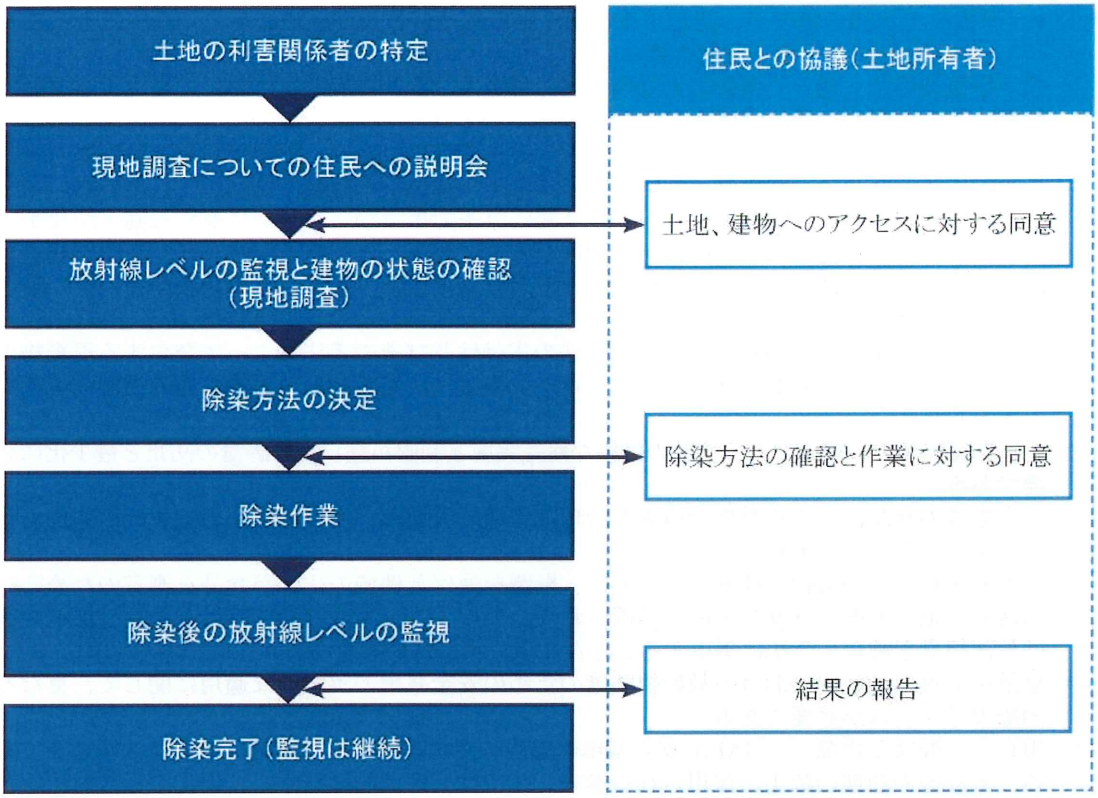


図 5.9.　環境修復及び住民との協議に関するプロセスのフローチャート[313]。

5.5.　所見と教訓

事故後の活動に関する評価の結果、幾つかの所見と教訓がまとめられた。

— 事故直後の重圧の下で行う意思決定を改善するため、事故後の復旧に関して事故以前に計画立案を行うことが必要である。原子力事故が発生した場合に効果的で適切な全体的復旧計画を実現するため、事故後の復旧のための国家戦略と措置が事前に準備される必要がある。これらの戦略と措置は、法律と規制の枠組み、残留放射線量と汚染レベルに関する一般的な環境修復戦略と基準、損傷した原子力施設の安定化と廃止措置の計画、及び大量の放射性物質による汚染物と放射性廃棄物を管理するための一般的戦略の設定を含む必要がある。

こうした戦略と措置は、以下を含む必要がある。

- 関与すべき各種機関の役割と責任を特定する法的及び規制上の枠組みの制定。この枠組みは、サイト外の環境修復、サイト内の安定化・廃止措置の準備、放射性物質による汚染物と放射性廃棄物の管理、及び地域社会の再生と利害関係者の関与を取り扱う必要がある。
- 残存線量及び汚染レベルを考慮した、環境修復の一般的な戦略と規準（参考レベルとこれから導出される対策レベル）。
- 損傷した原子力施設のサイト内の安定化とその廃止措置の準備のための計画。
- 貯蔵・処分施設に関する一般的な安全評価に裏付けられた、大量の放射性物質による汚染物と放射性廃棄物の管理に関する一般的な戦略の策定。

- 事故後の状態の管理が、変化する状態、得られた情報及び経験に応じて適応できることを確実なものとする十分な柔軟性。

— 環境修復戦略は、個々の措置の実効性と実行可能性、及び環境修復において発生する放射性物質による汚染物の量を考慮する必要がある。

残留放射線量と汚染レベルに対する参考レベルを定めた後は、管理が必要な廃棄物の量を最小限にするために、環境修復戦略の実施によって発生する放射性物質による汚染物の量を注意深く管理することが不可欠である。日本に原子力事故からの復旧に対する備えがなかったことは、当初、汚染の可能性がある物質が大量に発生したことを意味した。時間が経過し、計画が立案されるにつれて、環境修復の方策が最適化され、管理が必要な廃棄物の量の管理が改善された。

パイロット事業は、特定の環境修復手法の実効性及びその手法によって発生する廃棄物の量を確認する上で、有益であった。パイロット事業は、作業者の放射線防護の手順の確立にも寄与した。

— 環境修復戦略の一環として、食品の厳格な検査実施と制限が経口摂取線量の防止と最少化に必要である。

事故後の食品に対する厳格な検査と管理の体系的実施は、摂取線量を低いレベルに抑えることができることを示した。

地元産食品への信頼を確立するために、影響を受けた地域の住民が食品を測定のために持ち込める地元のモニタリング所が設置された。このような摂取線量の制御により、環境修復は外部線量を減らす手法に集中することができ、復旧が簡素化された。

— 事故後の復旧の状況における放射線防護のための安全基準の実際的な適用に関して、更なる国際ガイダンスが必要である。

現存する被ばく状況への IAEA 安全基準の適用に関する更なる実用的ガイダンスが必要である。事故後の初期の数年に採用される参考レベルは、定期的に見直し、変化する放射線状況に応じて適宜変更される必要がある。このガイダンスは、事象及びサイトに特有の参考レベルの選択について、線量及びその関連数値としての設定方法を含む必要があり、また、一貫し透明性が高く全体に受容された意思決定プロセスを確立するため、科学技術に基づく助言と他の社会的要因を統合するメカニズムを含む必要がある。

— 事故後には、長期的な安定状態を維持するため、また、事故によって損傷した施設の廃止措置のための戦略計画が、サイト内の復旧に不可欠である。計画は、変化する状態と新たな情報に、柔軟かつ容易に適応できる必要がある。

事故で損傷した施設の廃止措置の準備では、まず、構造物・設備・機器がその機能が不要となるまで、長期間安定した状態を確実に維持できることを確保するための安定化が必要となる。事故後の廃止措置の準備には数十年を要する。この期間全体を通して、必要な専門知識と労働力を維持する方策が必要となる。

廃止措置の途中段階、及びサイトと損傷した原子炉の最終状態に関する意思決定には、利害関係者との対話を含む必要がある。廃止措置に関する意思決定は、損傷した原子炉、燃料及びデブリの状態に左右され、これらは事故直後の期間には確定することができない。意思決定に際して考慮されるべき要素には、廃止措置における作業者の被ばく量、発生する廃棄物の量と種類、及び廃棄物処理に必要な活動などが含まれる。除染活動の初期段階では、発電所サイトの最終状態を予測することは非現実的であるが、土地に関する将来像と利用計画が意思決定プロセスの中で考慮される必要がある。

— 破損燃料の回収や燃料デブリの特性評価と取出しには、事故に特有の解決策が必要であり、特別な手法と工具の開発が必要となる可能性がある。

核燃料の破損を伴う原子炉事故は、その事故特有の炉内状態をもたらす。損傷燃料の破片や溶融燃料デブリの取り出しと管理は複雑な作業である。デブリは、多くの場合高い放射線レベルを伴う困難な条件下で、特性評価、取り出し、容器への収納、及び処分までの間の保管が行われる必要がある。

— 事故後の復旧のための国家戦略と措置は、放出、貯蔵及び処分に関する一般的な安全評価に支えられた、放射性物質に汚染された液体及び固体物並びに放射性廃棄物を管理するための、一般的戦略の策定を含む必要がある。

事故で発生した放射性物質による汚染物と放射性廃棄物の処分前管理（例えば、取り扱い、処理、コンディショニング及び貯蔵）の実施のため、廃棄物管理の戦略が必要である。また、それらの処分にむけた適切な道筋も定める必要がある。廃棄物管理の戦略には、焼却炉や管理型処分場などの既存の処理、貯蔵及び処分のための施設の利用が含まれることもある。しかし、発生する廃棄物の量と特性によっては、他の取組が必要な場合もある。そうした戦略の立案には、一般的セーフティケースの作成が役立つかもしれない。

環境への管理された放出の検討を含む、事故後の大量の汚染水の管理のための戦略も必要である。原子力施設の通常運転中の放出に関しては国際的ガイダンスがあるが、事故後の状況への適用についてのさらなるガイダンスが必要である。

— 原子力事故及びその後の防護措置の社会経済的影響を認識し、インフラの再建、地域社会の再生及び補償などの問題に取り組む、再生と再建のプロジェクトを策定することが必要である。

原子力事故、及び線量の低減を目的として緊急時段階と事故後復旧段階で導入された防護・環境修復活動は、影響を受けた人々の生活様式に広範囲の影響を及ぼす。環境修復と復旧の過程の様々な段階における利害関係者の関与が不可欠である。

— 利害関係者による支持は、事故後の復旧の全ての側面で不可欠である。特に、影響を受けた住民が意思決定プロセスに関与することは、復旧の成功、受容及び実効性、並びに地域社会の再生に必要である。効果的な復旧プログラムには、影響を受けた住民の信頼と関与が必要である。復旧措置の実施に対する信頼は、対話のプロセス、一貫した明確で適時の情報の提供、及び影響を受けた住民への支援を通じて構築される必要がある。

政府は、復旧計画に関する現実的な説明を、一貫し、明確かつ適時に公衆に提供する必要がある。全ての利害関係のある集団に情報を伝えるため、ソーシャルメディアを含む様々な情報チャンネルを利用する必要がある。

放射線リスクの認識と「安全な」放射線レベルに関する質問への回答は、科学的、社会的及び倫理的な側面を含む様々な側面を有する。これらの答えは、理想的には事故が発生する前に、教育プログラムを通じて関連するコミュニティーに明確に伝えることが必要である。

影響を受けた住民が地元の復旧活動に対する支援を受けることが重要である。環境修復に関係する自助活動や事業の再建への支援は、影響を受けた住民の復旧プログラムへの関与を増やし、これらの人々の信頼の醸成にも寄与することができる。

6. IAEA の事故への対応

本セクションでは、福島第一原子力発電所事故後の即応段階時及びより長期的な IAEA の主要な活動を概説する。これには初期活動、日本への IAEA ミッション派遣、原子力安全に関する閣僚会議及び IAEA 行動計画が含まれる。

IAEA は、原子力安全条約の寄託者であり、その役割は、会議の招集、準備及び役務の提供を行うことにより会議の事務局機能を提供すること、及び関連情報を締約国に送付することである。福島第一原子力発電所事故後の原子力安全条約締約国の会議に関する活動も本セクションで紹介される。

6.1. IAEA の活動

6.1.1. 初期活動

原子力又は放射線緊急時への対応並びに作業者、公衆及び環境の防護の責任は、関連施設レベルでは事業者に、地方、地域及び国レベルでは影響を受けた国にある。

IAEA は、緊急時への備えと対応に関する国際的枠組[115]において中心的役割を有する。この役割には、(1)公式に指定された連絡窓口経由での通報と公式な情報の交換、(2)明確で理解できる情報の適時の提供、(3)要請に応じた国際支援の提供と促進、及び(4)関係する国際機関の対応の調整[116]が含まれる。

IAEA は、事故・緊急システム（IES）を通じてこの役割を果たす。このシステムには、24 時間の連絡窓口及び運営上の中心となる事故・緊急センター（IEC）が含まれる。

2011 年 3 月 11 日、UTC[117]06 時 42 分、IAEA は、同機関内の国際耐震安全センターからの通報を受けて事故・緊急システムを発動した。この通報は、地震の発生、日本の東北部沿岸にある 4 カ所の原子力発電所[118]における損害の可能性及び津波のリスクを示した[143]。UTC07 時 21 分、IAEA は、早期通報条約及び援助条約に基づいて日本が指定した公式連絡窓口との最初の通信を確立した。

事故の初期数日間に、福島第一原子力発電所の原子炉と使用済燃料プール内の燃料に重大な損傷のリスクがあることが明らかになった。そのため IAEA は、主要な原子力及び放射線の安全の問題を評価するためにチームを設立した。IAEA の研究所[119]は、日本の当局が提供した海洋環境のモニタリングに関する環境データを検討し、独立した分析のために陸上の環境サンプルを受け取った。

IAEA 事務局長は、国際社会の連帯と、地震・津波及び原子力事故の影響への対処に関する日本への全面的支援を表明し、十数カ国からの支援の申出を伝えるため、3 月 17～19 日までハイ

---

[115] 事故当時における緊急時への備えと対応に関する国際的な枠組みは、(a)国際的な法的文書と協定、特に原子力事故の早期通報に関する条約（早期通報条約）及び原子力事故又は放射線緊急事態の場合における援助に関する条約（援助条約）、(b)緊急時への備えと対応の分野に関する IAEA 安全基準及び技術ガイダンス、及び(c)国際的な実施の取決めとツール、特に緊急事態通報・援助技術運営マニュアル（ENATOM）、IAEA 緊急時対応援助ネットワーク（RANET）及び国際機関の共同放射線緊急時管理計画(JPALN)から成っていた。

[116] 原子力及び放射線緊急時のための主たる調整組織は、放射線及び原子力緊急事態に関る国際機関間委員会（IACRNE）である。この組織は 1986 年のチェルノブイリ事故の後に設立され、現在は 18 の国際機関を含む。IACRNE の主な役割の 1 つは、国際機関の共同放射線緊急時管理計画（事故時は JPALN 2010）の作成と維持である。

[117] 協定世界時。日本標準時より 9 時間遅い。

[118] 東京電力の福島第一及び福島第二、女川（東北電力）並びに東海（日本原子力発電）。

[119] オーストリアのサイバースドルフとモナコにある IAEA 研究所は、それぞれ陸上環境と海洋環境のサンプルの評価を専門としている。

レベル協議のために東京を訪問した。事務局長は、IAEA が専門家ミッションや事実調査団など、特定の種類の支援を提供又は調整する可能性についても議論し、日本による公式情報の透明性と適時の提供の重要性を強調した。

3 月 28 日、IAEA 加盟国への事故に関する特別ブリーフィングにおいて、事務局長は、原子力安全に関するハイレベルの IAEA 会議を夏前にウィーンで開催すると発表した。事務局長は、「世界中で原子力安全を強化するために、3 月 11 日及びそれ以降に起きたことから正しい教訓を学ぶことが極めて重要である」と述べた[315]。

IAEA は、日本の要請に応じて日本の当局が採取したより広範囲の測定結果の妥当性を確認する支援を行うため、3 月 18 日から 4 月 18 日までの間に 4 つの放射線モニタリングチームを日本に派遣した。これらのチームは、福島第一原子力発電所の周囲 20 km の避難区域の内外及び東京近郊の幾つかの地点で計測を実施した。IAEA の関連活動を調整し、加盟国からの支援の申し出を日本の当局へ伝えるために IAEA 上級職員が日本に派遣された。当時は原子力安全・保安院であった日本の規制機関とのコミュニケーションを促進し改善するため、IAEA の連絡職員が東京に派遣された。

3 月 26 日から 31 日まで IAEA と FAO の合同食品安全評価チームが日本を訪れた。このチームは、食品安全と農業対策に係る技術的問題について、国及び地方レベルの当局に助言と支援を提供した。影響を受けた地域における食品汚染の程度について信頼できる継続的な情報更新が提供されるようにするため、サンプリングと分析の戦略及びモニタリングデータの解釈に関して助言が行われた。これらのデータは、日本の当局による緩和・環境修復戦略の作成のために用いられた。

4 月 3 日に沸騰水型原子炉の IAEA 専門家チームが日本に派遣され、4 月 12 日まで活動を行った。同チームは、福島第一と福島第二の両方の発電所を訪れ、事故、その時点までに講じられた緩和措置及び主要な決定の根拠に関する理解を深めるために、発電所職員と会合した。チームは東京において幾つかの政府部局の職員とも会合し東京電力及び原子力安全・保安院と詳細な技術協議を行った。

事故に関する IAEA の最初の声明は、3 月 11 日の地震から 3 時間以内に公表された。その後同日中に 5 つの追加的な声明が発表され、日本から得られた情報を伝達した。2011 年 4 月 22 日までに 120 回を超える情報更新が行われた。IAEA は、事務局長の日本訪問中に行われた記者会見に加えて、2011 年 3 月 14 日から 6 月 2 日までの間に 16 回の記者会見を行った。IAEA の広報活動には、数千件の電話への対応とマスコミからの数百件の問い合わせに対する詳細な技術的回答も含まれる。

IAEA は、公開ウェブサイトを通じて、加盟国と公衆に向けて毎日のブリーフィングを公表した。これらのブリーフィングには、福島第一原子力発電所 1～6 号機の状態、^{131}I、^{134}Cs 及び ^{137}Cs などの放射性核種の放射線モニタリングデータ、食品の放射線モニタリング結果、食品及び飲料水の流通・消費制限に関する情報、並びに海洋環境のモニタリングに関するデータが含まれた。IAEA は、ウィーンの IAEA 加盟国代表部に対する事故に関するブリーフィングも行った。

6.1.2. 日本への IAEA ミッション

2011 年 5 月 24 日から 6 月 2 日まで、日本政府との合意に基づき、IAEA と加盟国の専門家による国際事故調査団が派遣された。調査団は、福島第一原子力発電所事故について予備的評価を行うため、また、他のサイト（福島第二と東海第二）における事象について、情報を収集した。さらに、IAEA 安全基準に基づく更なる検討や評価が必要となる、自然事象に伴う一般的な安全問題が特定された。

同調査団の調査対象には、自然由来の外部事象、発電所の安全評価と深層防護の適用、地震と津波後の発電所の対応、シビアアクシデントマネジメント、激しく劣化した施設における使用済燃料の管理、緊急時への備えと対応及び放射線影響が含まれた。調査団の所見[34]には、15 の結論と 16 の教訓が含まれ、2011 年 6 月の原子力安全に関する IAEA 閣僚会議に報告された。

他の日本への IAEA ミッションは、表 6.1 のとおり。

表 6.1. 日本への IAEA ミッション

日程	ミッション	目的
2011 年 10 月 7 日～15 日	福島第一原子力発電所外の広範囲に汚染された地域の除染に関する IAEA 国際ミッション[316]	事故によって広範囲に汚染された地域を環境修復するための日本の計画を支援する。 日本が行っている汚染のマッピングを含む環境修復戦略、計画及び活動をレビューする。 事故からの教訓を周知するため、調査結果を国際社会と共有する。
2012 年 1 月 23 日～31 日	「既設の発電用原子炉施設の安全性に関する総合評価」についての 原子力安全・保安院 のアプローチをレビューするための IAEA ミッション[317]	（日本政府の要請に基づき）原子力安全・保安院による「既設の発電用原子炉施設の安全性に関する総合評価」及び事業者による評価結果をレビューする。
2012 年 7 月 30 日～8 月 11 日	女川原子力発電所における東日本大震災及び津波の後の系統、構造物及び設備の性能を調査するための IAEA ミッション[318]	地震と津波後の系統、構造物及び設備の性能を調査する。
2013 年 4 月 15 日～22 日	東京電力福島第一原子力発電所 1～4 号機の廃止措置等に向けた中長期ロードマップに関する国際ピアレビュー（第 1 回）[319]	「廃炉ロードマップ」、課題、原子炉の状態、廃棄物の管理、作業員の防護、並びに原子炉建屋及び他の構造物の構造的健全性をレビューする。
2013 年 10 月 14 日～21 日	福島第一原子力発電所外の広範囲に汚染された地域の環境回復に関する IAEA 国際フォローアップミッション[265]	日本で行われている環境修復作業の進捗状況を評価し、環境修復における課題に対応するための助言を提供する。
2013 年 11 月 6 日～12 日	海洋モニタリングに関する専門家派遣	福島において海水の採取やデータ分析の様子を観察し（2013 年 11 月 7 日～8 日）、また、「海域モニタリング計画」に基づき、日本によって実施されている海洋モニタリングに関する情報を収集するため、東京で日本の関係当局と会合を行う。
2013 年 11 月 25 日～12 月 4 日	東京電力福島第一原子力発電所 1～4 号機の廃止措置等に向けた中長期ロードマップに関する国際ピアレビュー（第 2 回）[288]	改訂された「廃炉ロードマップ」、貯蔵プールからの使用済燃料の取出し、汚染水の管理、廃棄物の管理、及び海洋モニタリングについてレビューする。
2014 年 9 月 10 日～16 日、同年 11 月 4 日～14 日	海洋モニタリングにおける信頼性向上とデータの質の確保に関する専門家ミッション	海洋モニタリング結果の利用可能性に焦点を当てる。
2015 年 2 月 8 日～15 日	東京電力福島第一原子力発電所 1～4 号機の廃止措置等に向けた中長期ロードマップに関する国際ピアレビュー（第 3 回）[289]	「廃炉ロードマップ」の実施、汚染水の管理、地下水浸入、使用済燃料及び燃料デブリの取出し、並びに制度的及び組織的問題についてレビューする。

第 2 回廃炉ミッションの勧告を受け、日本による海洋環境モニタリングの透明性を高め、独立した評価を行うためのプロジェクトが開始された。モナコの IAEA 環境研究所で、参加研究機関

のパフォーマンスと分析能力をモニターするための技能検査が実施された。海洋モニタリングプログラムの結果はIAEAのウェブサイトで定期的に更新されている。

6.1.3. 原子力安全に関するIAEA閣僚会議

2011年6月、事故の教訓を得ることにより原子力安全を強化することを目的として、原子力安全に関する閣僚会議がIAEA事務局長によってIAEA本部にて招集された。この会議は、閣僚レベル及び上級技術レベルにおいて、事故の予備的評価を行う機会を提供した。会議は、安全向上のための行動、緊急時への備えと対応に関する問題、及び世界の原子力安全の枠組みへの影響についても検討を行った。

その成果が原子力安全に関する閣僚宣言[320]であり、これは世界の原子力安全、緊急時への備え、及び人と環境の放射線防護をさらに向上させるための数多くの措置の概要を示した。同宣言はまた、こうした措置が確実に講じられるようにするとのIAEA加盟国の確固たる誓約も表明した。主要な措置は、IAEA安全基準を強化すること、IAEAの専門家ピアレビュープログラムを拡大することを含め全ての原子力発電所の安全を体系的にレビューすること、各国の原子力規制機関の実効性を高め、その独立性を確保すること、世界の緊急時への備えと対応制度を強化すること、及び、情報の入手と発信におけるIAEAの役割を拡大することであった。閣僚宣言はまた、事務局長に対し、加盟国と協議しつつIAEA原子力安全行動計画案を作成することを要請した。

6.1.4. IAEA原子力安全行動計画

IAEA原子力安全行動計画案は、2011年9月に理事会で承認された。行動計画はその後、2011年のIAEA総会定例会合に提出され、加盟国により満場一致で支持された[144]。その後、総会は、IAEA事務局と加盟国に対し、同行動を最重要優先事項として包括的かつ協調的に実施するよう要請した[321]。

行動計画の下での活動は、その採択直後から開始された。この計画の活動が完全かつ実効的に実施されるには、IAEA事務局、加盟国及び他の利害関係者による共同の努力と完全なコミットメントが必要であった。

行動計画の採択以降、幾つかの主要な分野で相当の進展が見られた。これらの分野には、原子力発電所の安全上の脆弱性の評価、IAEAのピアレビューサービスの強化、関連するIAEA安全基準の必要に応じた見直しと改訂、緊急時への備えと対応能力の向上、キャパシティ・ビルディング、加盟国・国際機関及び公衆とのコミュニケーションと情報共有の強化などが含まれる。定期的な進捗報告がIAEA理事会とIAEA総会に提出された[322-324]。

行動計画を採択した決議の中で、原子力緊急事態への対応におけるIAEAの役割が拡大され、原子力緊急事態の潜在的影響に関して、加盟国、国際機関及び一般公衆に対して、適時に明瞭、正確、客観的、かつわかりやすい情報を提供することが含まれるようになった。これには入手可能な情報の分析や、証拠・科学的知見・加盟国の能力に基づきあり得るシナリオを予測することが含まれる。

技術的側面を分析し、福島第一原子力発電所事故から教訓を学ぶために、様々な安全分野において幾つもの国際専門家会合（IEM）が開催された。IAEAは、IEMの結果を含む、これらの主要安全分野に関する報告書を公表した（表6.2参照）。

表 6.2.　国際専門家会合（IEM）

日程	タイトル	焦点
2012 年 3 月 19 日～22 日	IEM 1: 福島第一原子力発電所事故を踏まえた原子炉及び使用済燃料の安全 [42]	技術的側面の分析、根本的原因の理解、事故からの教訓の共有を行う。
2012 年 6 月 18 日～20 日	IEM 2:原子力又は放射線の緊急事態における透明性及びコミュニケーションの実効性の向上 [314]	事故からの教訓を特定・分析し、情報提供の改善のための最善の事例について議論する。
2012 年 9 月 4 日～7 日	IEM 3: 福島第一原子力発電所事故を踏まえた巨大地震及び津波に対する防護 [325]	地震及び津波のハザード評価、特定の浸水対策、ハザード評価に関連する不確かさ、設計値の設定に関するアプローチ、設計基準を超える事象への対応、地震及び津波に対する安全、について教訓の共有と情報交換、及び更に調査すべき問題の特定を行う。
2013 年 1 月 28 日～2 月 1 日	IEM 4: 原子力事故後の廃止措置及び環境修復 [293	事故によって損傷した施設の廃止措置、原子力事故により発生した放射性廃棄物の管理、サイト外の環境修復のための短期・長期的問題を検討する。
2013 年 5 月 21 日～24 日	IEM 5: 福島第一原子力発電所事故を踏まえた原子力安全における人的及び組織的要因 [67]	事業者や規制組織を含む幅広い主要諸機関において原子力安全文化を向上させる方法を探る。
2014 年 2 月 17 日～21 日	IEM 6: 福島第一原子力発電所事故後の放射線防護：信頼と理解の促進 [326]	福島第一原子力発電所事故により強調された放射線防護に関する問題と、これらの問題への国内及び国際レベルでの対応の仕方に焦点を当てる。
2014 年 3 月 17 日～20 日	IEM 7: 福島第一原子力発電所事故を踏まえたシビアアクシデントマネジメント	シビアアクシデントマネジメントに関して、福島第一原子力発電所事故を踏まえて得られた知識や経験を収集し共有するとともに、教訓や最善の事例を特定する。
2015 年 2 月 16 日～20 日	IEM 8: 福島第一原子力発電所事故を踏まえた研究開発の実効性の強化	使用済燃料プールに影響するものを含め、原子力発電所におけるシビアアクシデントに対処する IAEA 加盟国、経済協力開発機構原子力機関（OECD/NEA）その他の国際機関による新たな研究開発活動から生じる情報の交換を促進し、加盟国と国際機関間の国際協力を一層強化する。
2015 年 4 月 20 日～24 日	IEM 9: 原子力又は放射線の緊急事態への対応における評価及び予測	原子力又は放射線の緊急事態において、入手可能な情報の分析や、証拠・科学的知見・加盟国の能力に基づくあり得るシナリオの予測を含む事態の潜在的な影響について、適時、明瞭、正確、客観的、かつわかりやすい情報の交換を促進する。

2013 年には、以下の主題に関して追加的な報告書が作成された。

— 2012 年から 2013 年に開催された一連の技術会合に基づく、福島第一原子力発電所事故を踏まえた原子力又は放射線緊急時への備えと対応[327]。
— 2013 年にカナダ・オタワにおいて開催された実効的な原子力規制システムに関する国際会議の結果に基づく、福島第一原子力発電所事故を踏まえた規制の実効性の強化[328]

6.1.5. 福島県との協力

2012 年 12 月、IAEA と福島県との協力に関する覚書が署名された[329]。この覚書に基づき、放射線モニタリングと除染[330]、人の健康[331]及び緊急時への備えと対応[332]の分野における協力に関する実施取決めが、福島県、福島県立医科大学及び日本外務省との間でそれぞれ署名された。

2013 年 5 月、IAEA 緊急時対応援助ネットワーク（RANET）能力研修センターが福島市で指定された。同センターは、日本及び世界において、緊急時への備えと対応の能力強化を目的とする IAEA の一連の活動のために使用されている。原子力及び放射線緊急時におけるモニタリング、通報、報告及び支援要請、並びに緊急時への備えと対応を取り扱う幾つもの訓練ワークショップがセンターで開催された。

6.1.6. 原子力安全に関する福島閣僚会議

2012 年 12 月、日本政府は IAEA との共催により、世界における原子力安全の強化に貢献することを目的とする閣僚会議を福島県で開催した[333]。同会議は、事故から得られた更なる知見及び教訓を国際社会と共有し、行動計画の実施の進捗を含め、原子力安全の強化に関する国際社会の様々な取組の進捗状況を議論する機会となった。

同会議では、福島第一原子力発電所における放射線レベル、廃炉と除染に関する事故後の課題、及び発電所周辺地域の損傷と復旧の状況などが議論された。同会議は、原子力又は放射線緊急事態の際には科学的で事実に即した情報に基づき対応することの重要性、及びに国際協力を強化することの重要性を強調した。

6.2. 原子力安全条約締約国会合

囲み 6.1. 原子力安全条約

原子力安全条約は、1994 年 6 月 17 日にウィーンで採択された[334]。これは原子力施設（陸上の民間原子力発電所）の安全を扱う最初の法的拘束力のある国際条約である。その目的は、世界中で高水準の原子力安全を達成し維持すること、個人・社会及び環境を防護するために潜在的な放射線ハザードに対する効果的な防護を確立し維持すること、放射線による影響を伴う事故を防止し、そのような事故が発生した場合には、その影響を緩和することである。同条約は 1996 年 10 月 24 日に発効した。2015 年 3 月現在、77 カ国が締約国である。

締約国の義務は、おおむね現在 IAEA の基本安全原則（SF-1）に含まれている原則に基づく[335]。これらの義務には、とりわけ、原子力施設の立地、設計、建設及び運転、法令及び規制の枠組の確立と維持、適切な権限と能力及び財源・人的資源を有する規制組織の設置、原子力施設の安全を支えるための適切な財源及び人的資源が利用可能性であること、安全の評価と検証、品質保証及び緊急時への備えが含まれる。

締約国は、同条約に基づく義務を履行するためにとった措置に関する報告を提出しなければならない。こうした報告は、IAEA の下で 3 年おきに開催される締約国の検討会合で検討される。

6.2.1. 原子力安全条約締約国特別会合

2011 年 4 月 4 日から 14 日まで開催された第 5 回原子力安全条約締約国検討会合で、締約国は、同条約の目的へのコミットメントを再確認することなどを含む声明を採択した。締約国は、事故の初期的な分析と条約の実効性について検討し、議論するために特別会合を開催することに合意した。

特別会合は、2012年8月27日から31日までウィーンのIAEA本部にて招集された。締約国は、外部事象、設計の問題、シビアアクシデントマネジメントと復旧（サイト内）、国内組織、緊急時への備えと対応、事故後のマネジメント（サイト外）及び国際協力について議論した。

締約国は、ピアレビュープロセスの実効性を強化するため、幾つかの具体的対策につき全会一致で合意した。レビュープロセスの透明性を高め、締約国がその国別報告でIAEA安全基準に言及するよう奨励し、定期的な安全レビュー又は代替手法を通じて安全の定期的再評価を実施することにより継続的な向上のための取組を強化するために、条約の3つの基本ガイダンス文書が改定された[120]。

原子力安全条約を強化するための更なる措置、及び必要な場合に同条約を改正するための提案について第6回締約国検討会合に報告を行うため、実効性及び透明性に関する作業部会が設置された。締約国は、原子力安全の強化に向けた行動指向の目的リストも検討し、同リストは特別会合の概要報告書に添付された[339]。

6.2.2. 第6回原子力安全条約締約国検討会合

2014年3月24日から4月4日まで第6回原子力安全条約締約国検討会合が開催された。同会合の特別セッションで締約国は、福島第一発電所原子力事故を踏まえて実施された対策について報告した。原子力安全及び緊急時への備えと対応の体制は向上したが、更なる取組が必要であることが留意された。国内の安全の枠組は、規制機関の実効的な独立性の確立や、規則を更新するための措置により、更に強化されつつあった。国際協力も強化され、ピアレビューや情報交換への参加が増加した[340]。

原子力安全条約の締約国は、長期の電源と冷却の喪失に耐える追加設備の導入、信頼性向上のための電源系統強化、サイト特有の外部の自然ハザードと複数ユニット事象の再評価、極端な外部事象と放射線ハザードからの防護を確保するためのサイト内外緊急時対策所の改善、格納容器の健全性を維持するための措置の強化、及びシビアアクシデントマネジメント関連規定と指針の改善を含む、安全性向上策の実施について報告した。

締約国はまた、条約の基本ガイダンス文書を更に改定する提案を採択し、IAEA事務局、締約国及び他の組織による行動について勧告を行った。

最後に締約国は、新規及び既存の原子力発電所の設計と建設に関する条約第18条を改正するスイスの提案を検討するため、1年以内に外交会議を招集することを投票によって決定した。

6.2.3. 外交会議及び原子力安全に関するウィーン宣言

2015年2月9日、外交会議が事務局長によってIAEA本部で招集され、71カ国の締約国が参加した。締約国は原子力安全に関するウィーン宣言を全会一致で採択した。同宣言には、放射線による影響を伴う事故を未然に防ぎ、仮に事故が発生した場合には影響を緩和するという条約の第3の目的の実施のため、以下の原則が含まれた。

「1. 新規原子力発電所は、試運転と運転の際に事故を防止し、万一事故が発生した場合には、長期にわたるサイト外汚染を生じる放射性核種のあり得る放出を緩和し、放射性物質の早期放出や、長期的な防護措置と対策が必要になるような放射性物質の大量放出を防ぐという目的に沿って、設計、立地、建設されるべきである。

[120] 手続規則及び財務規則[336]、検討プロセスに関する指針[337]、及び国別報告に関する指針[338]。

2. 上記の目的を満たすことに適した安全向上策を特定するために、供用期間を通じて既存施設の包括的で体系的な安全評価が定期的かつ規則的に実施されるべきである。合理的に実行可能又は達成可能な安全向上は適時に実施されるべきである。

3. 原子力発電所の供用期間を通じて、この目的に対応するための国内的な要件と規則は、関連する IAEA 安全基準、及び、適切な場合には、原子力安全条約検討会合等で特定された他の良い事例を考慮すべきである」。[341]

ウィーン宣言は、福島第一原子力発電所事故以降に世界中で原子力安全を向上させるために国際、国内及び地域レベルで実施された相当数の取組とイニシアチブを考慮した。

参考文献

[1] NATIONAL POLICE AGENCY, Damage Situation and Police Countermeasures Associated with the 2011Tohoku District–off the Pacific Ocean Earthquake (2015), https://www.npa.go.jp/archive/keibi/biki/higaijokyo_e.pdf

[2] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Introductory Statement to Board of Governors (2013), https://www.iaea.org/newscenter/statements/introductory-statement-board-governors-3

[3] GOVERNMENT OF JAPAN, NUCLEAR EMERGENCY RESPONSE HEADQUARTERS, Report of the Japanese Government to the IAEA Ministerial Conference on Nuclear Safety: The Accident at TEPCO's Fukushima Nuclear Power Stations (2011), http://www.iaea.org/newscenter/focus/fukushima/japan-report

[4] GOVERNMENT OF JAPAN, NUCLEAR EMERGENCY RESPONSE HEADQUARTERS, Additional Report of the Japanese Government to the IAEA: The Accident at TEPCO's Fukushima Nuclear Power Stations, Second Report (2011), http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/iaea/iaea_110911.html

[5] INVESTIGATION COMMITTEE ON THE ACCIDENT AT THE FUKUSHIMA NUCLEAR POWER STATIONS OF TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Final Report, Cabinet Secretariat of the Government of Japan (2012), http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/icanps/eng/final-report.html

[6] INVESTIGATION COMMITTEE ON THE ACCIDENT AT THE FUKUSHIMA NUCLEAR POWER STATIONS OF TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Interim Report, Cabinet Secretariat of the Government of Japan (2011), http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/icanps/eng/interim-report.html

[7] NATIONAL DIET OF JAPAN FUKUSHIMA NUCLEAR ACCIDENT INDEPENDENT INVESTIGATION COMMISSION, The Official Report of the Fukushima Nuclear Accident Independent Investigation Commission, National Diet of Japan, Tokyo (2012).

[8] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Fukushima Nuclear Accident Analysis Report, TEPCO, Tokyo (2012).

[9] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Evaluation of the Situation of Cores and Containment Vessels of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Units-1 to 3 and Examination into Unsolved Issues in the Accident Progression, TEPCO, Tokyo (2013).

[10] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Report on the Investigation and Study of Unconfirmed/Unclear Matters in the Fukushima Nuclear Accident, Progress Rep. No. 2, TEPCO, Tokyo (2014).

[11] NUCLEAR REGULATION AUTHORITY, Analysis of the TEPCO Fukushima Daiichi NPS Accident, Interim Rep. (2014), https://www.iaea.org/sites/default/files/anaylysis_nra1014.pdf

[12] JAPAN METEOROLOGICAL AGENCY, Information on the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (2015), http://www.jma.go.jp/jma/en/2011_Earthquake/Information_on_2011_Earthquake.html

[13] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA Power Reactor Information System (PRIS) (2015), http://www.iaea.org/pris/

[14] JAPAN METEOROLOGICAL AGENCY, Tsunami Information (Estimated Tsunami Arrival Time and Height) (2011), http://www.jma.go.jp/en/tsunami/info_04_20110311145026.html

[15] COASTAL ENGINEERING COMMITTEE OF JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS, The 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake Tsunami Information (2013), http://www.coastal.jp/tsunami2011/index.php?Field%20survey%20results

[16] NUCLEAR AND INDUSTRIAL SAFETY AGENCY, Fukushima Daiichi Unit 1 Establishment Permit, NISA (1966) (in Japanese).

[17] MINISTRY OF ECONOMY, TRADE AND INDUSTRY, Dry Storage Cask Leak Test Results Reported to METI (2013) (in Japanese), http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/20130530_03.html
[18] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Operation Manuals of TEPCO Fukushima Daiichi NPP in Case of Accident (2011) (in Japanese), http://www.nsr.go.jp/archive/nisa/earthquake/manual/manual_index.html
[19] Act on Special Measures Concerning Nuclear Emergency Preparedness, Act No. 156 of 1999, as last amended by Act No. 118 of 2006 (Japan), http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/hourei/data/ASMCNEP.pdf
[20] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Building diagrams for 1F ground level and cross section of Unit 4 and the common spent fuel pool, official communication (2014).
[21] Order for Enforcement of the Act on Special Measures Concerning Nuclear Emergency Preparedness No. 195 of April 5, 2000 (Japan) (in Japanese), http://law.e-gov.go.jp/htmldata/H12/H12SE195.html
[22] NUCLEAR SAFETY COMMISSION, Accident Management: Measures against Severe Accidents at Light Water Nuclear Power Reactor Facilities (1992) (in Japanese), http://www.mext.go.jp/b_menu/hakusho/nc/t19920528001/t19920528001.html
[23] NUCLEAR SAFETY COMMISSION, Accident Management for Severe Accidents at Light Water Power Reactor Installations, NSCRG: L-AM-II.01, NSC, Tokyo (1997).
[24] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Roadmap towards Restoration from the Accident at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (2011), http://www.meti.go.jp/english/speeches/pdf/20110417_a.pdf
[25] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, Meteorological and Hydrological Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations, IAEA Safety Standards Series No. SSG-18, IAEA, Vienna (2011).
[26] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Site Evaluation for Nuclear Installations, IAEA Safety Standards Series No. NS-R-3, IAEA, Vienna (2003).
[27] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Safety of Nuclear Power Plants: Design, IAEA Safety Standards Series No. NS-R-1, IAEA, Vienna (2000). (This publication is superseded by SSR-2/1 (2012)).
[28] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Earthquakes and Associated Topics in Relation to Nuclear Power Plant Siting, Safety Series No. 50-SG-S1, IAEA, Vienna (1979). (This publication is superseded by SSG-9 (2010)).
[29] Nuclear Reactor Establishment Change Permit Application, Nuclear Industry Report to the Government No. 5–11 (1993).
[30] SAKAI, T., TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, "Past tsunami assessments and tsunami on 11 March 2011", paper presented at 5th Meeting of Working Group 2, Vienna, 2014.
[31] JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS, Tsunami Assessment Method for Nuclear Power Plants in Japan (2002) (in Japanese), http://committees.jsce.or.jp/ceofnp/node/5
[32] NUCLEAR SAFETY COMMISSION, Regulatory Guide for Reviewing Seismic Design of Nuclear Power Reactor Facilities, NSC, Tokyo (2006).
[33] HEADQUARTERS FOR EARTHQUAKE RESEARCH PROMOTION, On the Long-term Evaluation of Seismic Activity off Eastern Japan between the Sanriku Coast and the Boso Peninsula (2002) (in Japanese), http://www.jishin.go.jp/main/chousa/kaikou_pdf/sanriku_boso.pdf
[34] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA International Fact Finding Expert Mission of the Fukushima Dai-ichi NPP Accident Following the Great East Japan Earthquake and Tsunami (2011), http://www-pub.iaea.org/MTCD/meetings/PDFplus/2011/cn200/documentation/cn200_Final-Fukushima-Mission_Report.pdf
[35] GOVERNMENT OF INDIA, Actions Taken for Indian NPPs Subsequent to Fukushima Nuclear Accident. National Report to the Convention on Nuclear Safety (2012), http://www.aerb.gov.in/AERBPortal/pages/English/t/documents/CNS2012.pdf
[36] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Extreme External Events in the Design and Assessment of Nuclear Power Plants, IAEA-TECDOC-1341, IAEA, Vienna (2003).

[37] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, International Reporting System for Operating Experience (2014) (unpublished).
[38] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Follow-up IAEA Mission in Relation to the Findings and Lessons Learned from the 16 July 2007 Earthquake at Kashiwazaki-Kariwa NPP, IAEA, Vienna (2009).
[39] INTERNATIONAL NUCLEAR SAFETY ADVISORY GROUP, Defence in Depth in Nuclear Safety, INSAG-10, IAEA, Vienna (1996).
[40] INTERNATIONAL NUCLEAR SAFETY ADVISORY GROUP, Basic Safety Principles for Nuclear Power Plants: 75-INSAG-3 Rev. 1, INSAG-12, IAEA, Vienna (1999).
[41] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Severe Accident Management Programmes for Nuclear Power Plants, IAEA Safety Standards Series No. NS-G-2.15, IAEA, Vienna (2009).
[42] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA Report on Reactor and Spent Fuel Safety in the Light of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, IAEA, Vienna (2012).
[43] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Topical Issues in Nuclear Installation Safety: Defence in Depth — Advances and Challenges for Nuclear Installation Safety, IAEA-TECDOC-CD-1749, IAEA, Vienna (2014).
[44] SANDIA NATIONAL LABORATORIES, Fukushima Daiichi Accident Study (Status as of April 2012) SAND2012-6173, SNL, Albuquerque, NM (2012).
[45] ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, Fukushima Technical Evaluation, Phase 1 — MAAP5 Analysis, EPRI, Palo Alto (2013).
[46] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Report on the Investigation and Study of Unconfirmed/Unclear Matters in the Fukushima Nuclear Accident. Progress Rep. No. 2 (2014), http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/betu14_e/images/140806e0101.pdf
[47] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Development and Application of Level 1 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants, IAEA Safety Standards Series No. SSG-3, IAEA, Vienna (2010).
[48] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA Safety Glossary: Terminology Used in Nuclear Safety and Radiation Protection: 2007 Edition, IAEA, Vienna (2007).
[49] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Development and Application of Level 2 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants, IAEA Safety Standards Series No. SSG-4, IAEA, Vienna (2010).
[50] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Safety of Nuclear Power Plants: Operation, IAEA Safety Standards Series No. NS-R-2, IAEA, Vienna (2000). (This publication is superseded by SSR-2/2 (2011)).
[51] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Integrated Regulatory Review Service (IRRS) to Japan, IAEA-NSNI-IRRS-2007/01, IAEA, Vienna (2007).
[52] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Periodic Safety Review of Nuclear Power Plants, IAEA Safety Standards Series No. NS-G-2.10, IAEA, Vienna (2003). (This publication is superseded by SSG-25 (2013)).
[53] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Lessons Learned from the JCO Nuclear Criticality Accident in Japan in 1999 (2009), http://www-ns.iaea.org/downloads/iec/tokaimura-report.pdf
[54] SHIROYAMA, H., "Regulatory failures of nuclear safety in Japan — the case of Fukushima accident", paper presented at Earth System Governance Tokyo Conf.: Complex Architectures, Multiple Agents, Tokyo (2013), http://tokyo2013.earthsystemgovernance.org/wp-content/uploads/2013/01/0202-SHIROYAMA_Hideaki-.pdf
[55] GOVERNMENT OF JAPAN, Convention on Nuclear Safety National Report of Japan for the Fifth Review Meeting (2010), http://www.nsr.go.jp/archive/nsc/NSCenglish/documents/conventions/2011.pdf
[56] KATO, S., "Recent development in safety regulation of nuclear fuel cycle activities", Proc. Int. Conf. on Topical Issues in Nuclear Safety, Vienna, 2001, IAEA, Vienna (2002).
[57] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Governmental, Legal and Regulatory Framework for Safety, IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 1, IAEA, Vienna (2010).

[58] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Periodic Safety Review of Nuclear Power Plants: Experience of Member States, IAEA-TECDOC-1643, IAEA, Vienna (2010).
[59] NUCLEAR REGULATION AUTHORITY, FY2012 Annual Report, NRA, Tokyo (2012).
[60] NUCLEAR REGULATION AUTHORITY, Enforcement of the New Regulatory Requirements for Commercial Nuclear Power Reactors (2013), http://www.nsr.go.jp/data/000067212.pdf
[61] INTERNATIONAL NUCLEAR SAFETY ADVISORY GROUP, Safety Culture, Safety Series No. 75-INSAG-4, IAEA, Vienna (1991).
[62] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The Management System for Nuclear Installations, IAEA Safety Standards Series No. GS-G-3.5, IAEA, Vienna (2009).
[63] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Developing Safety Culture in Nuclear Activities: Practical Suggestions to Assist Progress, Safety Reports Series No. 11, IAEA, Vienna (1998).
[64] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Safety Culture in Nuclear Installations, IAEA-TECDOC-1329, IAEA, Vienna (2002).
[65] INSTITUTE OF NUCLEAR POWER OPERATIONS, Lessons Learned from the Nuclear Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, INPO 11-005 Addendum, INPO, Atlanta (2012).
[66] NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, A Comparison of US and Japanese Regulatory Requirements in Effect at the Time of the Fukushima Accident, NRC, Washington, DC (2013).
[67] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA Report on Human and Organizational Factors in Nuclear Safety in the Light of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, IAEA, Vienna (2014).
[68] FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, INTERNATIONAL LABOUR ORGANIZATION, PAN AMERICAN HEALTH ORGANIZATION, UNITED NATIONS OFFICE FOR THE COORDINATION OF HUMANITARIAN AFFAIRS, WORLD HEALTH ORGANIZATION, Arrangements for Preparedness for a Nuclear or Radiological Emergency, IAEA Safety Standards Series No. GS-G-2.1, IAEA, Vienna (2007).
[69] FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, INTERNATIONAL LABOUR ORGANIZATION, OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY, PAN AMERICAN HEALTH ORGANIZATION, UNITED NATIONS OFFICE FOR THE COORDINATION OF HUMANITARIAN AFFAIRS, WORLD HEALTH ORGANIZATION, Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency, IAEA Safety Standards Series No. GS-R-2, IAEA, Vienna (2002).
[70] Disaster Countermeasures Basic Act, Act No. 223 of 15 November 1961, as last amended in 1997 (Japan), http://www.adrc.asia/documents/law/DisasterCountermeasuresBasicAct.pdf
[71] Ordinance for Enforcement of the Act on Special Measures Concerning Nuclear Emergency Preparedness No. 2 of April 5, 2000 (Japan) (in Japanese), http://law.e-gov.go.jp/haishi/H12F03103016002.html
[72] NUCLEAR REGULATION AUTHORITY, Comment received on Section 3.1 on Technical Volume 3, official communication (23 July 2014).
[73] GOVERNMENT OF JAPAN, Nuclear Emergency Response Manual, Government of Japan (2010) (in Japanese).
[74] FUKUSHIMA PREFECTURE, Fukushima Prefecture Disaster Management Plan (2009) (in Japanese).
[75] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Nuclear Operator Emergency Action Plan for the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station, TEPCO, Tokyo (2010).
[76] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Specific Event Report, Fax No. 0042 (11 March 2011).
[77] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Report from Nuclear Power Plant Management of TEPCO to Minister of Economy, Trade and Industry, Fax No. 1560 (11 March 2011).
[78] GOVERNMENT OF JAPAN, CENTRAL DISASTER MANAGEMENT COUNCIL, The Basic Disaster Management Plan, Government of Japan, Tokyo (2008).
[79] GOVERNMENT OF JAPAN, Official web site of the Prime Minister of Japan and His Cabinet (2015), http://japan.kantei.go.jp/index.html
[80] NUCLEAR REGULATION AUTHORITY, About NISA (2015), http://www.nsr.go.jp/archive/nisa/english/aboutnisa/contact.html

[81] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, TEPCO at a Glance (2015), http://www.tepco.co.jp/en/corpinfo/overview/p-glance-e.html
[82] NUCLEAR REGULATION AUTHORITY, About the Nuclear Safety Commission (2015), http://www.nsr.go.jp/archive/nsc/NSCenglish/aboutus/overview/overview.htm
[83] NUCLEAR REGULATION AUTHORITY, About JNES (2015), http://www.nsr.go.jp/archive/jnes/english/index.html
[84] MINISTRY OF EDUCATION, CULTURE, SPORTS, SCIENCE AND TECHNOLOGY, Home page of the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (2015), http://www.mext.go.jp/english/
[85] MINISTRY OF HEALTH, LABOUR AND WELFARE, Home page of the Ministry of Health, Labour and Welfare (2015), http://www.mhlw.go.jp/english/
[86] MINISTRY OF AGRICULTURE, FORESTRY AND FISHERIES, Home page of the Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries (2015), http://www.maff.go.jp/e/
[87] MINISTRY OF THE ENVIRONMENT, Home page of the Ministry of Environment (2015), http://www.env.go.jp/en/
[88] MINISTRY OF DEFENSE, Home page of the Ministry of Defense of Japan (2015), http://www.mod.go.jp/e/index.html
[89] JAPAN METEOROLOGICAL AGENCY, Home page of the Japan Meteorological Agency (2015), http://www.jma.go.jp/jma/indexe.html
[90] JAPAN ATOMIC ENERGY AGENCY, Home page of the Japan Atomic Energy Agency (2015), http://www.jaea.go.jp/english/index.html
[91] NATIONAL INSTITUTE OF RADIOLOGICAL SCIENCES, Home page of National Institute of Radiological Sciences (2015), http://www.nirs.go.jp/ENG/index.shtml
[92] JAPAN NUCLEAR ENERGY SAFETY ORGANIZATION, Initial Operations in the Local Nuclear Emergency Response Headquarters (2013), https://www.nsr.go.jp/archive/jnes/content/000124530.pdf
[93] NUCLEAR SAFETY COMMISSION, Regulatory Guide: Emergency Preparedness for Nuclear Facilities, NSC, Tokyo (1980).
[94] Ordinance on Prevention of Ionizing Radiation Hazards, Ordinance of the Ministry of Labour No. 41 of September 30, 1972, as last amended by Ordinance No. 172 of July 16, 2001 (Japan) (in Japanese), http://law.e-gov.go.jp/htmldata/S47/S47F04101000041.html
[95] MINISTRY OF HEALTH, LABOUR AND WELFARE, Enforcement of the Ministerial Ordinance on Exemption of the Ordinance on Prevention of Ionizing Radiation Hazards in Response to the Situation Resulting from the Tohoku–Pacific Ocean Earthquake in 2011 (2011), http://www.mhlw.go.jp/english/topics/2011eq/workers/tepco/rp/ri_0315_07.html
[96] MINISTRY OF HEALTH, LABOUR AND WELFARE, Consultation with and Recommendation from the Labor Policy Council on "the Outline of the Draft Ministerial Ordinance for Abolishment of Exemption in the Ordinance on Prevention of Ionizing Radiation Hazards in Response to the Situation Resulting from the Tohoku–Pacific Ocean Earthquake in 2011" (2011), http://www.mhlw.go.jp/english/topics/2011eq/workers/tepco/rp/pr_111121.html
[97] MINISTRY OF HEALTH, LABOUR AND WELFARE, Response and Action Taken by the MHLW of Japan on Radiation Protection for Workers Involved in the TEPCO Fukushima Daiichi NPP Accident, MHLW, Tokyo (2013).
[98] NUCLEAR EMERGENCY RESPONSE HEADQUARTERS, Progress of the "Roadmap for Immediate Actions for the Assistance of Residents Affected by the Nuclear Incident" (2011). http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/roadmap/pdf/110719_assistance_03.pdf
[99] NUCLEAR EMERGENCY RESPONSE HEADQUARTERS, Progress of the "Roadmap for Immediate Actions for the Assistance of Residents Affected by the Nuclear Incident" (2011). http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/roadmap/pdf/110617roadmap_assistance_report.pdf
[100] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Status of Improvement on Working Environment of workers in Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (Attachment 2: About Cool Vest) (2011), http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/11061013-e.html

[101] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Progress Status of Cooling (Reactors) (2011), http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/betu11_e/images/110517e5.pdf
[102] MINISTRY OF HEALTH, LABOUR AND WELFARE, Occupational Safety and Health Department Notification (2011), http://www.mhlw.go.jp/english/topics/2011eq/workers/dr/dr/ri_0909_01.html
[103] MINISTRY OF HEALTH, LABOUR AND WELFARE, Guidelines on Prevention of Radiation Hazards for Workers Engaged in Decontamination Works (2011), http://www.mhlw.go.jp/english/topics/2011eq/workers/dr/dr/pr_120615_a03.pdf
[104] NUCLEAR REGULATION AUTHORITY, WG3 question 4, 1st submission, official communication (2013).
[105] GOVERNMENT OF JAPAN, WG3 question 5, 6th submission, official communication (2014).
[106] WATANABE, Y., "Relief activities conducted by the Japanese Red Cross Society after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident and the challenges for the future", IAEA Report on Severe Accident Management in the Light of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, IAEA, Vienna (2015).
[107] TOMINAGA, T., HACHIYA, M., AKASHI, M., Lessons learned from response to the accident at the TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant: from the viewpoint of radiation emergency medicine and combined disaster, Radiat. Emergency Med. **1** 1–2 (2012) 56–61.
[108] TANIGAWA, K., HASEGAWA, A., "Medical perspective", Radiation Disaster Medicine (TANIGAWA, K., CHHEM, R. K., Eds), Springer, Heidelberg (2014).
[109] NUCLEAR REGULATION AUTHORITY, WG3 question 7, 1st submission, official communication (2013).
[110] MINISTRY OF HEALTH, LABOUR AND WELFARE, Handling of Food Contaminated by Radioactivity (2011), http://www.mhlw.go.jp/english/topics/foodsafety/dl/food-110317.pdf
[111] MINISTRY OF HEALTH, LABOUR AND WELFARE, Issuance of Instruction to Restrict Distribution of Foods Concerned, in Relation to the Accident at Fukushima Nuclear Power Plant (2011), http://www.mhlw.go.jp/english/topics/2011eq/dl/food-110321.pdf
[112] MINISTRY OF HEALTH, LABOUR AND WELFARE, Restriction of Distribution and/or Consumption of Foods Concerned in Fukushima and Ibaraki Prefectures (2011), http://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/2r98520000015wun-att/2r98520000015xym.pdf
[113] MINISTRY OF HEALTH, LABOUR AND WELFARE, Monitoring of Radioactive Contaminants for Agricultural and Livestock Products (2011), http://www.mhlw.go.jp/english/topics/2011eq/dl/food-110323.pdf
[114] MINISTRY OF HEALTH, LABOUR AND WELFARE, Handling of Provisional Regulation Values for Radioactive Iodine in Fishery Products (2011), http://www.mhlw.go.jp/english/topics/2011eq/dl/food-110405.pdf
[115] MINISTRY OF HEALTH, LABOUR AND WELFARE, New Standard Limits for Radionuclides in Foods (2012), http://www.mhlw.go.jp/english/topics/2011eq/dl/new_standard.pdf
[116] NATIONAL INSTITUTE OF RADIOLOGICAL SCIENCES, Telephone Consultations on Radiation Exposure: Report on Tabulated Results from the Year Following the TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Disaster (2014), http://www.nirs.go.jp/publication/irregular/pdf/nirs_m_265en.pdf
[117] MINISTRY OF ECONOMY, TRADE AND INDUSTRY, Issues in Public Communications Activities and Future Efforts Related to the Accident at the TEPCO's Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station, NISA, Tokyo (2012) (in Japanese).
[118] NUCLEAR EMERGENCY RESPONSE HEADQUARTERS, Progress of the "Roadmap for Immediate Actions for the Assistance of Residents Affected by the Nuclear Incident" (2011), http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/roadmap/pdf/110817_assistance_02.pdf
[119] NUCLEAR EMERGENCY RESPONSE HEADQUARTERS, Progress of the "Roadmap for Immediate Actions for the Assistance of Residents Affected by the Nuclear Incident" (2011), http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/roadmap/pdf/110920_assistance_02.pdf

[120] JAPAN EXTERNAL TRADE ORGANIZATION, Great East Japan Earthquake Influence on International Business (2014) (in Japanese), www.jetro.go.jp/world/shinsai/20110318_11.html
[121] GOVERNMENT OF JAPAN, National Report of Japan to the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management (2011), http://www.nsr.go.jp/english/cooperation/conventions/data/jc_4th.pdf
[122] NUCLEAR SAFETY COMMISSION, Near-term Policy to Ensure the Safety in Treating and Disposing Contaminated Waste around the Site of Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plants, NSC, Tokyo (2011).
[123] NUCLEAR EMERGENCY RESPONSE HEADQUARTERS, Basic Policy for Emergency Response on Decontamination Work (2011), http://www.kantei.go.jp/jp/singi/genshiryoku/dai19/19_03_gensai.pdf
[124] MINISTRY OF THE ENVIRONMENT, Act on Special Measures Concerning the Handling of Environmental Pollution by Radioactive Materials Discharged by the Nuclear Power Station Accident Associated with the Tohoku District — Off the Pacific Ocean Earthquake that Occurred on March 11, 2011, Act No. 110 as of 2011 (Japan).
[125] ATOMIC ENERGY SOCIETY OF JAPAN, Final Report of the AESJ Investigation Committee (Announcement) (2014), http://www.aesj.or.jp/en/announcement/finalreport20141119.pdf
[126] INDEPENDENT INVESTIGATION COMMISSION ON THE FUKUSHIMA NUCLEAR ACCIDENT, The Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Disaster: Investigating the Myth and Reality, Routledge, London and New York (2014).
[127] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Application of the Commission's Recommendations for the Protection of People in Emergency Exposure Situations, Publication 109, Pergamon Press, Oxford and New York (2009).
[128] NUCLEAR SAFETY COMMISSION, Basic Policy of the Nuclear Safety Commission of Japan on Radiation Protection for Termination of Evacuation and Reconstruction (2011), http://www.nsr.go.jp/archive/nsc/NSCenglish/geje/20110719suggest_4.pdf
[129] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, Publication 103, Elsevier, Oxford (2007).
[130] MINISTRY OF ECONOMY, TRADE AND INDUSTRY, Roadmap for Immediate Actions for the Assistance of Nuclear Sufferers (2011), http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/roadmap/pdf/110517roadmap_assistance.pdf
[131] MINISTRY OF EDUCATION, CULTURE, SPORTS, SCIENCE AND TECHNOLOGY, Plan to Conduct Detailed Monitoring in Restricted Area and Planned Evacuation Zone (2011), http://www.mext.go.jp/component/english/__icsFiles/afieldfile/2011/06/29/1304084_0613.pdf
[132] MINISTRY OF ECONOMY, TRADE AND INDUSTRY, Lifting the Evacuation-Prepared Area in Case of Emergency Designation (2011), http://www.reconstruction.go.jp/topics/41gennshiryoku.pdf
[133] NUCLEAR EMERGENCY PREPAREDNESS COMMISSION, Nuclear Emergency Response Manual (2012) (in Japanese), http://www.kantei.go.jp/jp/singi/genshiryoku_bousai/pdf/taisaku_manual.pdf
[134] NUCLEAR REGULATION AUTHORITY, National Report to the 6th Review Meeting of the Convention on Nuclear Safety (2013), http://www.nsr.go.jp/english/cooperation/conventions/data/cns_6th.pdf
[135] NUCLEAR SAFETY COMMISSION, Interim Report for Reviewing "Regulatory Guide: Emergency Preparedness for Nuclear Facilities" (2012) (in Japanese), http://www.nsr.go.jp/archive/nsc/NSCenglish/geje/20120322review_3.pdf
[136] NUCLEAR REGULATION AUTHORITY, Nuclear Emergency Response Guidelines (2012) (in Japanese), http://www.nsr.go.jp/activity/bousai/data/130905_saitaishishin.pdf

[137] FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, INTERNATIONAL LABOUR ORGANIZATION, OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY, PAN AMERICAN HEALTH ORGANIZATION, WORLD HEALTH ORGANIZATION, International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources, Safety Series No. 115, IAEA, Vienna (1996). (This publication is superseded by GSR Part 3 (2014)).
[138] Convention on Early Notification of a Nuclear Accident, INFCIRC/335, IAEA, Vienna (1986).
[139] Convention on Assistance in the Case of a Nuclear Accident or Radiological Emergency, INFCIRC/336, IAEA, Vienna (1986).
[140] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Joint Radiation Emergency Management Plan of the International Organizations, EPR-JPLAN, IAEA, Vienna (2010).
[141] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Emergency Notification and Assistance Technical Operations Manual, EPR-ENATOM (2007), IAEA, Vienna (2007).
[142] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA Response and Assistance Network (2010), http://www-ns.iaea.org/downloads/iec/info-brochures/13-27031-ranet.pdf
[143] IAEA Activities in Response to the Fukushima Accident, GOV/INF/2011/8, IAEA, Vienna (2011).
[144] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA Action Plan on Nuclear Safety (2011), http://www.iaea.org/sites/default/files/actionplanns.pdf
[145] OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY, Patterns in Governmental Decisions and Recommendations (GDR) Information Exchange during the Fukushima NPP Accident, NEA/CRPPH(2012)3, OECD, Paris (2012).
[146] WORLD HEALTH ORGANIZATION, Preliminary Dose Estimation from the Nuclear Accident after the 2011 Great East Japan Earthquake and Tsunami, WHO, Geneva (2012).
[147] WORLD HEALTH ORGANIZATION, Health Risk Assessment from the Nuclear Accident after the 2011 Great East Japan Earthquake and Tsunami, Based on a Preliminary Dose Estimation, WHO, Geneva (2013).
[148] UNITED NATIONS, Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation (Report to the General Assembly), UNSCEAR 2013 Report, Vol. I, Scientific Annex A: Levels and Effects of Radiation Exposure Due to the Nuclear Accident after the 2011 Great East-Japan Earthquake and Tsunami, Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), UN, New York (2014).
[149] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Report of ICRP Task Group 84 on Initial Lessons Learned from the Nuclear Power Plant Accident in Japan vis-à-vis the ICRP System of Radiological Protection, ICRP, Ottawa (2012).
[150] GONZÁLEZ, A.J., AKASHI, M., BOICE, J.D., Jr., CHINO, M., HOMMA, T., ISHIGURE, N., KAI, M., KUSUMI, S., LEE, J.-K., MENZEL, H.-G., NIWA, O., SAKAI, K., WEISS, W., YAMASHITA, S., YONEKURA, Y., Radiological protection issues arising during and after the Fukushima nuclear reactor accident, J. Radiol. Prot. **33** 3 (2013) 497–571.
[151] UNITED NATIONS, FAO/IAEA Food Database, UNSCEAR 2013 Report, Attachment C-8 of Annex A:, Levels and Effects of Radiation Exposure Due to the Nuclear Accident After the 2011 Great East-Japan Earthquake and Tsunami, Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), UN, New York (2014).
[152] WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, Evaluation of Meteorological Analyses for the Radionuclide Dispersion and Deposition from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident, WMO, Geneva (2013).
[153] OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY, The Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident, OECD, Paris (2013).
[154] WORLD HEALTH ORGANIZATION, Guidelines for Drinking-water Quality, 3rd edn, WHO, Geneva (2008).
[155] General Standard for Contaminants and Toxins in Food and Feed of 1995, as last amended 2013, Codex Alimentarius Commission, http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/agns/pdf/CXS_193e.pdf
[156] JAPAN HEALTH PHYSICS SOCIETY, Issues Associated with Radiation Protection after Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Disaster: Responses of and Recommendations from Japan Health Physics Society, JHPS (2012).

[157] YASUMURA, S., "Overview of Fukushima Health Management Survey", paper presented at 3rd Int. Expert Symp. on Beyond Radiation and Health Risk: Toward Resilience and Recovery, Fukushima (2014),
http://www.fmu.ac.jp/radiationhealth/symposium201409/media/5_S2_Yasumura_FINAL(0909).pdf
[158] FUKUSHIMA PREFECTURE, Agenda, 3rd Meeting of the Oversight Committee for the Fukushima Health Management Survey (2011) (in Japanese),
http://www.pref.fukushima.lg.jp/uploaded/attachment/6497.pdf
[159] SASAKAWA, Y., International Expert Symposium in Fukushima, September 2011, J. Radiol. Prot. **32** 1 (2012) E7–E8.
[160] Conclusions and recommendations of the International Expert Symposium in Fukushima: Radiation and Health Risks, J. Radiol. Prot. **31** 4 (2011) 381–384.
[161] FUKUSHIMA PREFECTURE, Terms of Reference of the Committee for the Fukushima Health Management Survey (2011) (in Japanese),
http://www.pref.fukushima.lg.jp/uploaded/attachment/65128.pdf
[162] FUKUSHIMA MEDICAL UNIVERSITY, Basic Survey (Radiation Dose Estimates), 19th Prefectural Oversight Committee Meeting for Fukushima Health Management Survey, Fukushima, Japan, (2015),
http://www.fmu.ac.jp/radiationhealth/results/media/19-1_Basic_Survey.pdf
[163] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS, Radiation Quantities and Units, ICRU Rep. 33, Bethesda, MD (1980).
[164] INTERNATIONAL LABOUR ORGANIZATION, Convention Concerning the Protection of Workers against Ionising Radiations, No. 115, ILO, Geneva (1960).
[165] UNITED NATIONS, Sources and Effects of Ionizing Radiation (Report to the General Assembly), UNSCEAR 2008 Report, Vol. I, Annexes A and B, Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), UN, New York (2010).
[166] NATIONAL COUNCIL ON RADIATION PROTECTION MEASUREMENTS, Uncertainties in Fatal Cancer Risk Estimates Used in Radiation Protection, NCRP Rep. No. 126, NCRP, Bethesda, MA (1997).
[167] UNITED NATIONS, Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, A/67/46, UN, New York (2012).
[168] UNITED NATIONS, Sources and Effects of Ionizing Radiation (Report to the General Assembly), UNSCEAR 1977 Report, Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), UN, New York (1977).
[169] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The International Chernobyl Project: Technical Report, IAEA, Vienna (1991).
[170] ESLINGER, P.W., et al., Source term estimation of radioxenon released from the Fukushima Dai-ichi nuclear reactors using measured air concentrations and atmospheric transport modeling, J. Environ. Radioact. **127** (2014) 127–132.
[171] STOHL, A., et al., Xenon-133 and caesium-137 releases into the atmosphere from the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant: Determination of the source term, atmospheric dispersion, and deposition, Atmos. Chem. Phys. **12** 5 (2012) 2313–2343.
[172] BOWYER, T. W., et al., Elevated radioxenon detected remotely following the Fukushima Nuclear accident, J. Environ. Radioact. **102** 7 (2011) 681–687.
[173] SCHÖPPNER, M., et al., Estimation of the time-dependent radioactive source-term from the Fukushima nuclear power plant accident using atmospheric transport modelling, J. Environ. Radioact. **114** (2012) 10–14.
[174] TERADA, H., KATATA, G., CHINO, M., NAGAI, H., Atmospheric discharge and dispersion of radionuclides during the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident. Part II: Verification of the source term and analysis of regional-scale atmospheric dispersion, J. Environ. Radioact. **112** (2012) 141–154.
[175] SCIENCE COUNCIL OF JAPAN, A Review of the Model Comparison of Transportation and Deposition of Radioactive Materials Released to the Environment as a Result of the Tokyo Electric Power Company's Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident (2014),
http://www.jpgu.org/scj/report/20140902scj_report_e.pdf
[176] CHINO, M., et al., Preliminary estimation of release amounts of ^{131}I and ^{137}Cs accidentally discharged from the Fukushima Daiichi nuclear power plant into the atmosphere, J. Nucl. Sci. Technol. **48** 7 (2011) 1129–1134.

[177] BUESSELER, K., AOYAMA, M., FUKASAWA, M., Impacts of the Fukushima nuclear power plants on marine radioactivity, Environ. Sci. Technol. **45** 23 (2011) 9931–9935.
[178] EUROPEAN COMMISSION, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, WORLD HEALTH ORGANIZATION, One Decade after Chernobyl: Summing up the Consequences of the Accident, IAEA, Vienna (1996).
[179] Chernobyl: Looking Back to Go Forward (Proc. Int. Conf Vienna, 2005), IAEA, Vienna (2005).
[180] INSTITUT DE RADIOPROTECTION ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE, Accident de la Centrale de Fukushima Daiichi: Modélisation de la Dispersion des Rejets Radioactifs dans l'Atmosphère à l'Échelle Mondiale (2011), http://www.irsn.fr/FR/popup/Pages/irsn-meteo-france_30mars.aspx
[181] Exploring the Impacts of the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant on the Ocean (Proc. Fukushima Ocean Impacts Symp. Tokyo, 2012), Woods Hole Oceanographic Institution, Woods Hole, MA (2012).
[182] MADIGAN, D.J., BAUMANN, Z., FISHER, N.S., Pacific bluefin tuna transport Fukushima-derived radionuclides from Japan to California, Proceedings of the National Academy of Sciences **109** 24 (2012) 9483-9486.
[183] MASUMOTO, Y., "Ocean models: How far/fast does Fukushima contamination travel?", Exploring the Impacts of the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plants on the Ocean (Proc. Fukushima Ocean Impacts Symp.Tokyo, 2012), Woods Hole Oceanographic Institution, Woods Hole, MA (2012).
[184] MASUMOTO, Y., et al., Oceanic dispersion simulations of ^{137}Cs released from the Fukushima Daiichi nuclear power plant, Elements **8** 3 (2012) 207–212.
[185] HONDA, M.C., AONO, T., AOYAMA, M., Dispersion of artificial caesium-134 and -137 in the Western North Pacific one month after the Fukushima accident, Geochem. J. **46** 6 (2012) e1–9.
[186] RYPINA, I.I., et al., Short-term dispersal of Fukushima-derived radionuclides off Japan: modeling efforts and model-data intercomparison, Biogeosciences **10** 1 (2013) 4973–4990.
[187] AOYAMA, M., HIROSE, K., IGARASHI, Y., Re-construction and updating our understanding on the global weapons tests ^{137}Cs fallout, J. Environ. Monitor. **8** 4 (2006) 431–438.
[188] BUESSELER, K., AOYAMA, M., "Fukushima results", Exploring the impacts of the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plants on the Ocean (Proc. Fukushima Ocean Impacts Symp. Tokyo, 2012), Woods Hole Oceanographic Institution, Woods Hole, MA (2012).
[189] NUCLEAR REGULATION AUTHORITY, Radiation Monitoring Information. Monitoring Information of Environmental Radioactivity Level, NRA (2015) (in Japanese), http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/list/191/list-1.html
[190] UNITED NATIONS, Sources and Effects of Ionizing Radiation (Report to the General Assembly), UNSCEAR 2000 Report, Vol. I, Sources, Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), UN, New York (2000).
[191] NUCLEAR REGULATION AUTHORITY, Reading of Radioactivity Level in Fallout by Prefecture (2011-2015), http://radioactivity.nsr.go.jp/en/list/194/list-1.html
[192] NUCLEAR REGULATION AUTHORITY, Airborne Monitoring, http://radioactivity.nsr.go.jp/en/list/278/list-1.html
[193] MINISTRY OF HEALTH, LABOUR AND WELFARE, Notice No. 0315 Article 1 of the Department of Food Safety (2012), http://www.mhlw.go.jp/english/topics/2011eq/dl/food-120821_1.pdf
[194] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Mission Report: Project NSRW 9/13 Assistance in the Use of Radiation Monitoring Data to Develop Maps to be Made Available to the Public, Fukushima Prefecture, 16–19 December 2013 (unpublished).
[195] MINISTRY OF HEALTH, LABOUR AND WELFARE, The Survey Results of Radioactive Materials in Tap Water, MHLW, Tokyo (2011).
[196] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, Publication 60, Pergamon Press, Oxford and New York (1991).
[197] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Application of the Commission's Recommendations to the Protection of People Living in Long-term Contaminated Areas After a Nuclear Accident or a Radiation Emergency, Publication 111, Elsevier, Oxford (2009).

[198] EUROPEAN COMMISSION, FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, INTERNATIONAL LABOUR ORGANIZATION, OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY, PAN AMERICAN HEALTH ORGANIZATION, UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME, WORLD HEALTH ORGANIZATION, Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards, IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3, IAEA, Vienna (2014).

[199] AKASHI, M., TOMINAGA, T., HACHIYA, M., TATSUZAKI, H., "Medical management of the consequences of the Fukushima nuclear plant incident", Medical Basis for Radiation Accident Preparedness (Proc. 5th Int. REAC/TS Symp. Oak Ridge, 2013), Oak Ridge, TN (2013).

[200] YASUMURA, S., GOTO, A., YAMAZAKI, S., REICH, M.R., Excess mortality among relocated institutionalized elderly after the Fukushima nuclear disaster, Public Health **127** 2 (2013) 186–188.

[201] NOMURA, S., et al., Mortality risk amongst nursing home residents evacuated after the Fukushima Nuclear accident: A retrospective cohort study, PLoS ONE **8** 3 (2013) e60192.

[202] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Principles for Intervention for Protection of the Public in a Radiological Emergency, Publication 63, Pergamon Press, Oxford and New York (1993).

[203] MINISTRY OF HEALTH, LABOUR AND WELFARE, Publication and Enforcement of "the Ministerial Ordinance for Abolishment of Exemption in the Ordinance on Prevention of Ionizing Radiation Hazards in Response to the Situation Resulting from the Tohoku–Pacific Ocean Earthquake in 2011" (2011), http://www.mhlw.go.jp/english/topics/2011eq/workers/tepco/rp/pr_111216.html

[204] AKAHANE, K., et al., NIRS external dose estimation system for Fukushima residents after the Fukushima Dai-ichi NPP accident, Sci. Rep. **3** (2013) 1670.

[205] ISHIKAWA, T., "The basic survey: Estimation of external doses to residents in Fukushima Prefecture", paper presented at 3rd Int. Expert Symp. on Beyond Radiation and Health Risk: Toward Resilience and Recovery, Fukushima, 2014, http://www.fmu.ac.jp/radiationhealth/symposium201409/media/6_S2_Ishikawa.pdf

[206] NAGATAKI, S., TAKAMURA, N., KAMIYA, K., AKASHI, M., Measurements of individual radiation doses in residents living around the Fukushima nuclear power plant, Radiat. Res. **180** 5 (2013) 439–447.

[207] FUKUSHIMA MEDICAL UNIVERSITY, "Response rates to the basic survey by district. Data as of 31 December 2014" (Proc. 18th Prefectural Oversight Committee Meeting for Fukushima Health Management Survey Fukushima, 2015), https://www.fmu.ac.jp/radiationhealth/results/media/18-1_Basic_Survey_Appendix.pdf

[208] FUKUSHIMA MEDICAL UNIVERSITY, "Basic survey (radiation dose estimates)" (Proc. 18th Prefectural Oversight Committee Meeting for Fukushima Health Management Survey Fukushima, 2015) (2015), http://www.fmu.ac.jp/radiationhealth/results/media/18-1_Basic_Survey.pdf

[209] DATE CITY, Newsletter on Recovery and Revival in Date City No. 8: Analyses on Measurement of Annual Dose from External Exposure (2013) (in Japanese), http://www.city.date.fukushima.jp/uploaded/attachment/10035.pdf

[210] TSUBOKURA, M., et al., Absence of internal radiation contamination by radioactive cesium among children affected by the Fukushima Daiichi nuclear power plant disaster, Health Phys **108** 1 (2015) 39–43.

[211] HAYANO, R.S., et al., Whole-body counter survey results 4 months after the Fukushima Dai-ichi NPP accident in Minamisoma City, Fukushima, J. Radiol. Prot. **34** 4 (2014) 787.

[212] HAYANO, R. S., et al., Internal radiocesium contamination of adults and children in Fukushima 7 to 20 months after the Fukushima NPP accident as measured by extensive whole-body-counter surveys, Proc. Jpn Acad. Ser. B Phys. Biol. Sci. **89** 4 (2013) 157–163.

[213] MATSUDA, N., et al., Assessment of internal exposure doses in Fukushima by a whole body counter within one month after the nuclear power plant accident, J. Radiat. Res. **179** 6 (2013) 663–668.

[214] KIM, E., et al., "Screening survey on thyroid exposure for children after the Fukushima Daiichi nuclear power station accident", Reconstruction of Early Internal Dose in the TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident (Proc. 1st NIRS Symp.) (KURIHARA, O., AKAHANE, K., FUKUDA, S., MIYAHARA, N., YONAI, S., Eds), National Institute of Radiological Sciences, Chiba (2012) 59–66.

[215] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Updated worker doses, official communication (2015).

[216] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Evaluation of the Exposure Dose of Workers at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station. Attachment: Distribution of Thyroid Equivalent Doses (2015), http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/2015/1248073_6844.html
[217] MINISTRY OF HEALTH, LABOUR AND WELFARE, Re-evaluation Results of Committed Doses for Emergency Workers at the TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant (2013), http://www.mhlw.go.jp/english/topics/2011eq/workers/tepco/rp/pr_130705_a02.pdf
[218] YASUI, S., Governmental re-evaluation of the committed effective dose received by emergency workers at the TEPCO Fukushima Daiichi NPP accident, J. Occupat. Environ. Hyg. **12** 5 (2015) D60–D70.
[219] DEFENSE THREAT REDUCTION AGENCY, Radiation Dose Assessments for Shore-based Individuals in Operation Tomodachi, DTRA-TR-12-001, DTRA, Fort Belvoir, VA (2012).
[220] HASHIMOTO, S., et al., "First two-year result of the comprehensive health check as one facet of the Fukushima Health Management Survey" paper presented at 3rd Int. Expert Symp. on Beyond Radiation and Health Risk: Toward Resilience and Recovery, Fukushima, 2014, http://www.fmu.ac.jp/radiationhealth/symposium201409/media/7_S2_Hashimoto_FINAL(0909).pdf
[221] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, ICRP Statement on Tissue Reactions/Early and Late Effects of Radiation in Normal Tissues and Organs: Threshold Doses for Tissue Reactions in a Radiation Protection Context, Publication 118, Elsevier, Oxford (2012).
[222] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Result of the Investigation on Exposure to Radiation of Workers from Cooperative Companies at Unit 3 in Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (2011), http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/11032503-e.html
[223] UNITED NATIONS, Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, A/68/46, UN, New York (2013).
[224] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Low-dose Extrapolation of Radiation-related Cancer Risk, Publication 99, Elsevier, Oxford (2005).
[225] UNITED NATIONS, Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, A/63/46, UN, New York (2008).
[226] SUZUKI, S., et al., "Three-Year Results and Future Scope of the Fukushima Thyroid Ultrasound Examination after the Fukushima NPP Accident", paper presented at 3rd Int. Expert Symp. on Beyond Radiation and Health Risk: Toward Resilience and Recovery, Fukushima (2014), http://www.fmu.ac.jp/radiationhealth/symposium201409/media/9_S2_Suzuki_FINAL(0909).pdf
[227] HAYASHIDA, N., et al., Thyroid ultrasound findings in a follow-up survey of children from three Japanese Prefectures: Aomori, Yamanashi, and Nagasaki, Sci. Rep. **5** (2015).
[228] FUKUSHIMA PREFECTURE, Proc. 18th Prefectural Oversight Committee Meeting for Fukushima Health Management Survey (2015), http://www.fmu.ac.jp/radiationhealth/results/20150212_Thyroid_Ultrasound_Examination.html
[229] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Pregnancy and Medical Radiation, Publication 84, Pergamon Press, Oxford and New York (2000).
[230] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Doses to the Embryo and Foetus from Intakes of Radionuclides by the Mother, Publication 88, Pergamon Press, Oxford and New York (2001).
[231] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Biological Effects after Prenatal Irradiation (Embryo and Foetus), Publication 90, Pergamon Press, Oxford and New York (2003).
[232] NOMURA, Y., "Pregnancy and birth survey (by the Radiation Medical Science Center for the Fukushima Health Management Survey)", paper presented at 3rd Int. Expert Symp. on Beyond Radiation and Health Risk: Toward Resilience and Recovery, Fukushima, 2014, http://www.fmu.ac.jp/radiationhealth/symposium201409/media/10_S2_Nomura_FINAL(0909).pdf
[233] NOMURA, Y., FUJIMORI, K., Survey of pregnant women in Fukushima Prefecture and future issues, Fukushima J. Med. Sci. **60** 2 (2014) 213.
[234] YASUMURA, S., et al., Study protocol for the Fukushima Health Management Survey, J. Epidemiol. **22** 5 (2012) 375–383.
[235] KAWAKAMI, N., Mental Health of Residents Living in Shelters, Japanese Association of Epidemiology, Tokyo (2014).

[236] YABE, H., et al., Psychological distress after the Great East Japan Earthquake and Fukushima Daiichi nuclear power plant accident: results of a Mental Health and Lifestyle Survey through the Fukushima Health Management Survey in FY2011 and FY2012, Fukushima J. Med. Sci. **60** 1 (2014) 57–67.
[237] KAWAKAMI, N., TSUCHIYA, M., UMEDA, M., KOENEN, K.C., KESSLER, R.C., Trauma and posttraumatic stress disorder in Japan: results from the World Mental Health Japan Survey, J. Psychiatr. Res. **53** (2014) 157–165.
[238] IWADARE, Y., et al., Posttraumatic symptoms in elementary and junior high school children after the 2011 Japan earthquake and tsunami: Symptom severity and recovery vary by age and sex, J. Pediatrics **164** 4 (2014) 917–921.
[239] BROMET, E.J., Emotional consequences of nuclear power plant disasters, Health Phys. **106** 2 (2014) 206–210.
[240] GOTO, A., et al., Maternal confidence of Fukushima mothers before and after the nuclear power plant disaster in Northeast Japan: analyses of municipal health records, J. Commun. Healthcare **7** 2 (2014) 106–116.
[241] BROMET, E. J., et al., Cross-national epidemiology of DSM-IV major depressive episode, BMC Med. **9** 1 (2011) 90.
[242] SHIGEMURA, J., TANIGAWA, T., SAITO, I., NOMURA, S., Psychological distress in workers at the Fukushima nuclear power plants, JAMA **308** 7 (2012) 667–669.
[243] SHIGEMURA, J., et al., Associations between disaster exposures, peritraumatic distress, and posttraumatic stress responses in Fukushima nuclear plant workers following the 2011 nuclear accident: the Fukushima NEWS project study, PLoS One **9** 2 (2014) e87516.
[244] MATSUOKA, Y., et al., Concern over radiation exposure and psychological distress among rescue workers following the Great East Japan Earthquake, BMC Public Health **12** (2012) 249.
[245] BROMET, E.J., Mental health consequences of the Chernobyl disaster, J Radiol Prot **32** 1 (2012) N71–75.
[246] BROMET, E.J., HAVENAAR, J. M., Psychological and perceived health effects of the Chernobyl disaster: A 20-year review, Health Phys **93** 5 (2007) 516–521.
[247] BROMET, E.J., HAVENAAR, J. M., GUEY, L. T., A 25 year retrospective review of the psychological consequences of the Chernobyl accident, Clin. Oncol. **23** 4 (2011) 297–305.
[248] MAEDA, M., et al., "Psychological effects on people in Fukushima: Results of a mental health and lifestyle survey", paper presented at 3rd Int. Expert Symp. on Beyond Radiation and Health Risk: Toward Resilience and Recovery, Fukushima, 2014, http://www.fmu.ac.jp/radiationhealth/symposium201409/media/8_S2_Maeda_FINAL(0909).pdf
[249] KESSLER, R.C., et al., Screening for serious mental illness in the general population, Arch. Gen. Psychiat. **60** 2 (2003) 184–189.
[250] BLANCHARD, E.B., JONES-ALEXANDER, J., BUCKLEY, T.C., FORNERIS, C.A., Psychometric properties of the PTSD checklist (PCL), Behav. Res. Ther. **34** 8 (1996) 669–673.
[251] EWING, J.A., Detecting alcoholism. The CAGE questionnaire, JAMA **252** 14 (1984) 1905–1907.
[252] GOODMAN, R., Psychometric properties of the strengths and difficulties questionnaire, J. Am. Acad. Child Adolesc. Psychiatry **40** 11 (2001) 1337–1345.
[253] MATSUISHI, T., et al., Scale properties of the Japanese version of the strengths and difficulties questionnaire (SDQ): A study of infant and school children in community samples, Brain Dev. **30** 6 (2008) 410–415.
[254] OGURI, K., et al., Hadal disturbance in the Japan Trench induced by the 2011 Tohoku–Oki earthquake, Sci. Rep. **3** (2013).
[255] BIODIVERSITY CENTER OF JAPAN, Official web site about the effect of the earthquake and the tsunami (in Japanese), http://www.shiokaze.biodic.go.jp
[256] NAKAJIMA, H., KOARAI, M., Assessment of tsunami flood situation from the Great East Japan Earthquake, Bull. Geosp. Inf. Auth. Jpn. **59** (2011) 55–66.
[257] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, A Framework for Assessing the Impact of Ionising Radiation on Non-human Species, Publication 91, Pergamon Press, Oxford and New York (2003).

[258] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Protection of the Environment Under Different Exposure Situations, Publication 124, Pergamon Press, Oxford and New York (2014).
[259] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Environmental Protection: Transfer Parameters for Reference Animals and Plants, Publication 114, Elsevier, Oxford (2009).
[260] LINKOV, I., BURMISTROV, D., Model uncertainty and choices made by modelers: Lessons learned from the International Atomic Energy Agency model intercomparisons, Risk Anal. **23** 6 (2003) 1297–1308.
[261] UNITED NATIONS, Sources and Effects of Ionizing Radiation (Report to the General Assembly), UNSCEAR 2008 Report, Vol. II, Scientific Annexes C, D and E, Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), UN, New York (2011).
[262] UNITED NATIONS, Sources and Effects of Ionizing Radiation (Report to the General Assembly), UNSCEAR 1996 Report, Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), UN, New York (1996).
[263] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards (Interim Edition), IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3 (Interim), IAEA, Vienna (2011). (This publication is superseded by GSR Part 3 (2014)).
[264] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Summary Report of the Preliminary Findings of the IAEA Mission on Remediation of Large Contaminated Areas Off-site the Fukushima Dai-ichi NPP (2011),
https://www.iaea.org/sites/default/files/preliminaryfindings2011.pdf
[265] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The Follow-up IAEA International Mission on Remediation of Large Contaminated Areas Off-Site of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant (2013),
https://www.iaea.org/sites/default/files/final_report230114.pdf
[266] MINISTRY OF THE ENVIRONMENT, Basic Principles of the Act on Special Measures Concerning the Handling of Environment Pollution by Radioactive Materials Discharged from the Nuclear Power Station Accident Associated with the Tohoku District—Off the Pacific Ocean Earthquake that Occurred on March 11, 2011 (2011),
http://josen.env.go.jp/en/framework/pdf/basic_principles.pdf
[267] GOLIKOV, V., et al., Evaluation of conversion coefficients from measurable to risk quantities for external exposure over contaminated soil by use of physical human phantoms, Radiat. Environ. Biophys **46** 4 (2007) 375–382.
[268] CABINET OFFICE, "Designating and rearranging the areas of evacuation", paper presented at Follow-up IAEA International Mission on Remediation of Large Contaminated Areas Off-Site the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, Tokyo and Fukushima Prefecture, 2013.
[269] FUKUSHIMA PREFECTURE, Steps for Revitalization in Fukushima (2014),
http://www.pref.fukushima.lg.jp.e.od.hp.transer.com/sec/11015b/fukkoukeikaku1081.html
[270] MINISTRY OF ECONOMY, TRADE AND INDUSTRY, Areas to which Evacuation Orders have been Issued (2013),
http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/roadmap/pdf/20130807_01.pdf
[271] JAPAN ATOMIC ENERGY AGENCY, Use of Knowledge and Experience Gained from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident to Establish the Technical Basis for Strategic Off-Site Response (2015),
http://jolissrch-inter.tokai-sc.jaea.go.jp/search/servlet/search?5049878
[272] JAPAN ATOMIC ENERGY AGENCY, Remediation of Contaminated Areas in the Aftermath of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station: Overview, Analysis and Lessons Learned, Part 1: A Report on the "Decontamination Pilot Project", JAEA-Review 2014-051, JAEA, Tokyo (2015).
[273] MINISTRY OF THE ENVIRONMENT, Progress on Off-site Clean-up Efforts in Japan (2015),
http://josen.env.go.jp/en/pdf/progressseet_progress_on_cleanup_efforts.pdf?150113
[274] MINISTRY OF THE ENVIRONMENT, Unit prices for decontamination in the SDAs directly controlled by the national government, official communication (2015).
[275] NUCLEAR EMERGENCY RESPONSE HEADQUARTERS, Mid-and-Long-Term Roadmap towards the Decommissioning of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Units 1-4, TEPCO (2011),
http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/decommissioning/pdf/111221_02.pdf

[276] NUCLEAR EMERGENCY RESPONSE HEADQUARTERS, Revised Mid-and-Long-Term Roadmap towards the Decommissioning of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Units 1-4 (2013), http://josen.env.go.jp/en/documents/pdf/workshop_july_17-18_2013_02.pdf
[277] INTER-MINISTERIAL COUNCIL FOR CONTAMINATED WATER AND DECOMMISSIONING ISSUES, Mid-and-Long-Term Roadmap towards the Decommissioning of TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (2015).
[278] Act for Establishment of the Nuclear Regulation Authority, Act No. 47, 27 June, 2012, as amended by Act No. 82 of 2013 (Japan), https://www.nsr.go.jp/data/000067231.pdf
[279] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Implementation Plan of the Measures to be taken at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Designated as a Specified Reactor Facility (Outline) (2012), http://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/images/handouts_12120701-e.pdf
[280] NUCLEAR REGULATION AUTHORITY, Measures for Mid-Term Risk Reduction at TEPCO's Fukushima Daiichi NPS (2015), http://www.nsr.go.jp/data/000098679.pdf
[281] CONTAMINATED WATER TREATMENT MEASURES COMMITTEE, Measures for the Prevention of Groundwater Inflow, TEPCO (2012).
[282] GOVERNMENT OF JAPAN, TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Progress Status and Future Challenges of Mid-to-Long-Term Roadmap towards the Decommissioning of Units 1–4 of TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant (2012), http://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/roadmap/images/m121203-e.pdf
[283] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Comments received on Section 5, official communication (2 March 2015).
[284] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Contaminated Water Treatment (2015), http://www.tepco.co.jp/en/decommision/planaction/alps/index-e.html
[285] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Fukushima Daiichi NPS Prompt Report 2014: Bypass of Clean Groundwater to Ocean Starts (2014), http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/2014/1236566_5892.html
[286] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, "Measures to stop or reduce ingress of groundwater into reactor and turbine buildings", paper presented at IAEA International Peer Review Mission on Mid-and-Long-Term Roadmap Towards the Decommissioning of TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Units 1-4 (Second Mission), Tokyo and Fukushima Prefecture, 2013.
[287] MINISTRY OF ECONOMY, TRADE AND INDUSTRY, Fact Sheet: Overview of Contaminated Water Issue at TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, Agency for Natural Resources and Energy (2013), http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/decommissioning/pdf/20130822_01.pdf
[288] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA International Peer Review Mission on Mid-and-Long-Term Roadmap towards the Decommissioning of TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Units 1–4 (Second Mission) (2014), http://www.meti.go.jp/press/2013/02/20140213003/20140213003-2.pdf
[289] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA International Peer Review Mission on Mid-and-Long-Term Roadmap towards the Decommissioning of TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Units 1–4 (Third Mission) (2015), https://www.iaea.org/sites/default/files/missionreport170215.pdf
[290] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Fuel Removal of the Unit 4 Spent Fuel Pool of the Fukushima Daiichi NPP Completed (2014) (in Japanese), http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/handouts/2014/images/handouts_141222_04-j.pdf
[291] NUCLEAR EMERGENCY RESPONSE HEADQUARTERS, Mid-and-Long-Term Roadmap Towards the Decommissioning of TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Units 1–4 (2013), http://www.meti.go.jp/english/press/2013/pdf/0627_01.pdf
[292] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Decommissioning of Facilities Using Radioactive Material, IAEA Safety Standards Series No. WS-R-5, IAEA, Vienna (2006). (This publication is superseded by GSR Part 6 (2014)).
[293] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA Report on Decommissioning and Remediation after a Nuclear Accident, IAEA, Vienna (2013).

[294] OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY, Nucl. Law Bull. **90** 2 (2012).
[295] GOVERNMENT OF JAPAN, Flow chart of specified waste and contaminated soil management in other prefectures, official communication (2015).
[296] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Mid-and-Long-Term Plans for Solid Waste Storage of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (Draft) (2014) (in Japanese), http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/roadmap/images/l140407_05-j.pdf
[297] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Installation of Facilities for Temporary Storage Dry Casks (2014) (in Japanese), http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/120625/120625_02cc.pdf
[298] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, A Mid-and-long-term plan for storage of solid wastes in Fukushima Daiichi NPS, official communication (2014).
[299] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, "Radioactive Waste Management — Toward the decommissioning of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Units 1–4", paper presented at IAEA International Peer Review Mission on Mid-and-Long-Term Roadmap Towards the Decommissioning of TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Units 1–4 (Second Mission), Tokyo and Fukushima Prefecture, 2013.
[300] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Progress Status of Mid-and-Long-Term Roadmap Towards the Decommissioning of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Units 1–4 (2012), http://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/roadmap/images/m120730-e.pdf
[301] SECRETARIAT OF THE TEAM FOR COUNTERMEASURES FOR DECOMMISSIONING AND CONTAMINATED WATER TREATMENT, Summary of Decommissioning and Contaminated Water Management (2014), http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/decommissioning/pdf/20140529-e.pdf
[302] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Reports from ICRP Dialogue Initiatives (2014), http://www.icrp.org/page.asp?id=189
[303] JAPAN EXTERNAL TRADE ORGANIZATION, 2011 JETRO Global Trade and Investment Report: International Business as a Catalyst for Japan's Reconstruction, JETRO, Tokyo (2011).
[304] FISHERIES AGENCY, The Leakage of Contaminated Water at TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station and the Safety of Fishery Products (2015).
[305] FOOD STANDARDS AGENCY, Import of Feed and Food Originating in or Consigned from Japan (2012), http://www.food.gov.uk/business-industry/imports/banned_restricted/japan#.UKS7deQ0V8E
[306] JAPAN EXTERNAL TRADE ORGANIZATION, JETRO Global Trade and Investment Report — Overview (2014), http://www.jetro.go.jp/en/reports/white_paper/trade_invest_2014.pdf
[307] Act on Compensation for Nuclear Damage, 1961, Act. Nr. 147, as amended by Act Nr. 19 in 2009.
[308] MINISTRY OF EDUCATION, CULTURE, SPORTS, SCIENCE AND TECHNOLOGY, DISPUTE RECONCILIATION COMMITTEE FOR NUCLEAR DAMAGE COMPENSATION, Interim Guidelines On Determination of the Scope of Nuclear Damage Resulting from the Accident at The Tokyo Electric Power Company Fukushima Daiichi and Daini Nuclear Power Plants (2011) (in Japanese), http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/kaihatu/016/houkoku/__icsFiles/afieldfile/2011/08/17/1309452_1_2.pdf
[309] TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY, Compensation for Additional Costs Resulting from Early Return after the Evacuation Order is Lifted (2014) (in Japanese), http://www.tepco.co.jp/cc/press/2014/1235026_5851.html
[310] PERKO, T., VALUCH, J., NAGY, A., LAMMERS, P., MAYS, C., Overview of Mass and New Media Treatment of Ionizing Radiation Topics: The Case of Fukushima, EAGLE Coordination Project (2013), http://eagle.sckcen.be/en/Deliverables
[311] FUKUSHIMA PREFECTURE, Steps for Revitalization in Fukushima, Fukushima Prefecture (2013).
[312] MINISTRY OF THE ENVIRONMENT, FUKUSHIMA PREFECTURE, Decontamination Information Plaza (2013).
[313] MINISTRY OF THE ENVIRONMENT, "Stakeholder communication overview for decontamination", paper presented at Follow-up IAEA International Mission on Remediation of Large Contaminated Areas Off-site of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, Tokyo and Fukushima Prefecture, 2013.

[314] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA Report on Enhancing Transparency and Communication Effectiveness in the Event of a Nuclear or Radiological Emergency, IAEA, Vienna (2012).
[315] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA Director General Calls for High Level Conference to Strengthen Nuclear Safety (2011), https://www.iaea.org/newscenter/news/iaea-director-general-calls-high-level-conference-strengthen-nuclear-safety
[316] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Final Report of the International Mission on Remediation of Large Contaminated Areas Off-site the Fukushima Dai-ichi NPP (2011), http://www.mofa.go.jp/mofaj/saigai/pdfs/iaea_mission_1110_en.pdf
[317] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA Mission to Review NISA's Approach to the Comprehensive Assessments for the Safety of Existing Power Reactor Facilities Conducted in Japan (2012), https://www.iaea.org/sites/default/files/nisamissionreport2012.pdf
[318] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA Mission to Onagawa Nuclear Power Station to Examine the Performance of Systems, Structures and Components Following the Great East Japanese Earthquake and Tsunami (2012).
[319] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA International Peer Review Mission on Mid-and-Long-Term Roadmap towards the Decommissioning of TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Units 1–4 (2013), http://www.iaea.org/sites/default/files/missionreport220513.pdf
[320] Declaration by the IAEA Ministerial Conference on Nuclear Safety in Vienna on 20 June 2011 INFCIRC/821, IAEA, Vienna (2011).
[321] Measures to Strengthen International Cooperation in Nuclear, Radiation, Transport and Waste Safety, Resolution GOV/2013/32-GC(57)/RES/9, IAEA, Vienna (2013).
[322] Progress in the Implementation of the IAEA Action Plan on Nuclear Safety, GOV/INF/2012/11-GC(56)/INF/5, IAEA, Vienna (2012).
[323] Progress in the Implementation of the IAEA Action Plan on Nuclear Safety, GOV/INF/2013/8-GC(57)/INF/5, IAEA, Vienna (2013).
[324] Progress in the Implementation of the IAEA Action Plan on Nuclear Safety, GOV/INF/2014/15-GC(58)/INF/7, IAEA, Vienna (2014).
[325] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA Report on Protection against Extreme Earthquakes and Tsunamis in the Light of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, IAEA, Vienna (2012).
[326] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA Report on Radiation Protection After the Fukushima Daiichi Accident: Promoting Confidence and Understanding, IAEA, Vienna (2014).
[327] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA Report on Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency in the Light of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, IAEA, Vienna (2013).
[328] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA Report on Strengthening Nuclear Regulatory Effectiveness in the Light of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, IAEA, Vienna (2013).
[329] Memorandum of Cooperation between Fukushima Prefecture and the International Atomic Energy Agency Following the Accident at TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (2012), http://www.mofa.go.jp/policy/energy/fukushima_2012/pdfs/fukushima_iaea_en_04.pdf
[330] Practical Arrangements between Fukushima Prefecture and the International Atomic Energy Agency on Cooperation in the Area of Radiation Monitoring and Remediation (2012), http://www.mofa.go.jp/policy/energy/fukushima_2012/pdfs/fukushima_iaea_en_05.pdf
[331] Practical Arrangements between Fukushima Medical University and the International Atomic Energy Agency on Cooperation in the Area of Human Health (2012), http://www.mofa.go.jp/policy/energy/fukushima_2012/pdfs/fukushima_iaea_en_06.pdf
[332] Practical Arrangements between the Ministry of Foreign Affairs of Japan and the International Atomic Energy Agency on Cooperation in the Area of Emergency Preparedness and Response (2012), http://www.mofa.go.jp/policy/energy/fukushima_2012/pdfs/fukushima_iaea_en_07.pdf

[333] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA and Japan Host Fukushima Ministerial Conference on Nuclear Safety (2012), https://www.iaea.org/newscenter/news/iaea-and-japan-host-fukushima-ministerial-conference-nuclear-safety
[334] Convention on Nuclear Safety, INFCIRC/449, IAEA, Vienna (1994).
[335] EUROPEAN ATOMIC ENERGY COMMUNITY, FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, INTERNATIONAL LABOUR ORGANIZATION, INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION, OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY, PAN AMERICAN HEALTH ORGANIZATION, UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME, WORLD HEALTH ORGANIZATION, Fundamental Safety Principles, IAEA Safety Standards Series No. SF-1, IAEA, Vienna (2006).
[336] Convention on Nuclear Safety, Rules of Procedure and Financial Rules, INFCIRC/573/Rev.6, IAEA, Vienna (2015).
[337] Guidelines Regarding the Review Process under the Convention on Nuclear Safety, INFCIRC/571/Rev.7, IAEA, Vienna (2015).
[338] Guidelines Regarding National Reports under the Convention on Nuclear Safety, INFCIRC/572/Rev.5, IAEA, Vienna (2015).
[339] 2nd Extraordinary Meeting of the Contracting Parties to the Convention on Nuclear Safety: Final Summary Report, CNS/ExM/2012/04/Rev.2 (2012), http://www.iaea.org/sites/default/files/cns-summaryreport310812.pdf
[340] 6th Review Meeting of the Contracting Parties to the Convention on Nuclear Safety: Summary Report, CNS/6RM/2014/11_Final (2014), http://www-ns.iaea.org/downloads/ni/safety_convention/2014-cns-summary-report-w-annexes-signed.pdf
[341] Summary Report and Vienna Declaration on Nuclear Safety, CNS/DC/2015/3/Rev.2 (2015), https://www.iaea.org/sites/default/files/cns_summary090215.pdf

略語

μGy	microgray
μSv	microsievert
AC	alternating current
ALPS	Advanced Liquid Processing Systems
ANRE	Agency for Natural Resources and Energy
Bq	becquerel
BSS	Basic Safety Standards
CI	confidence interval
ConvEx	Convention Exercises
CRIEPI	Central Research Institute of the Electric Power Industry
CSC	Convention on Supplementary Compensation for Nuclear Damage
DC	direct current
EC	European Commission
EDG	emergency diesel generator
ENATOM	Emergency Notification and Assistance Technical Operations Manual
EPZ	emergency planning zone
ERSS	Emergency Response Support System
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
FW	fresh water
GPD	general psychological distress
Gy	gray
HP	hold point
HPCI	high pressure coolant injection
IACRNE	Inter-Agency Committee on Radiological and Nuclear Emergencies
IC	isolation condenser
ICRP	International Commission on Radiological Protection
IEC	Incident and Emergency Centre
IEM	International Experts Meeting
IES	Incident and Emergency System
IGP	Institute of Geodesy and Photogrammetry
ILO	International Labour Organization
IMMSP	Institute of Mathematical Machines and Systems Problems
INES	International Nuclear and Radiological Event Scale
INPO	Institute of Nuclear Power Operations
INSAG	International Nuclear Safety Group
IRRS	Integrated Regulatory Review Service
IRSN	Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (Institute for Radiological Protection and Nuclear Safety)
JAEA	Japan Atomic Energy Agency
JAMSTEC	Japan Agency for Marine–Earth Science and Technology
JCNER	Joint Council for Nuclear Emergency Response
JCO	Japan Nuclear Fuels Conversion Company
JCOPET	Tide-resolving regional nested subsystem of Japan Coastal Ocean Predictability Experiment
JKEO	JAMSTEC Kuroshio Extension Observatory
JMA	Japan Meteorological Agency
JNES	Japan Nuclear Energy Safety Organization
JPLAN	Joint Radiation Emergency Management Plan of the International Organizations
JST	Japan Standard Time
KEO	Kuroshio Extension Observatory
KIOST	Korea Institute of Ocean Science and Technology
KNOT	Kyodo North Pacific Ocean Time-series

Kobe U	Kobe University
Local NERHQ	Local Nuclear Emergency Response Headquarters
MAFF	Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries
METI	Ministry of Economy, Trade and Industry
MEXT	Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology
mGy	milligray
MHLW	Ministry of Health, Labour and Welfare
MITI	Ministry for International Trade and Industry
MO	motor operated
MOD (SDF)	Ministry of Defense (Self-Defense Forces)
MOE	Ministry of the Environment
MPa	megapascal
MSSG	Multi-Scale Simulator for the Geoenvironment
mSv	millisievert
NDF	Nuclear Damage Compensation and Decommissioning Facilitation Corporation
NERHQ	Nuclear Emergency Response Headquarters
NIES	National Institute for Environmental Studies
NIRS	National Institute of Radiological Sciences
NISA	Nuclear and Industrial Safety Agency
NPP	nuclear power plant
NPP-ERC	Fukushima Daiichi Emergency Response Centre at the NPP
NPS	Nuclear Power Station
NRA	Nuclear Regulation Authority
NSC	Nuclear Safety Commission
OECD/NEA	OECD Nuclear Energy Agency
OP	Onahama Port
PAHO	Pan American Health Organization
PBq	petabecquerel
PCV	primary containment vessel
PSA	probabilistic safety assessment
PTSR	post-traumatic stress response
RANET	Response and Assistance Network
RAPs	reference animals and plants
RCIC	reactor core isolation cooling
R&D	research and development
REMAT	Radiation Emergency Medical Assistance Team
SPEEDI	System for Prediction of Environmental Emergency Dose Information
Sv	sievert
SW	sea water
TEPCO	Tokyo Electric Power Company
TEPCO HQ-ERC	Emergency Response Centre at TEPCO Headquarters
UNEP	United Nations Environment Programme
UNSCEAR	United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation
USDA	United States Department of Agriculture
USGS	United States Geological Survey
UTC	Universal Time Coordinated
WHO	World Health Organization
WHOI	Woods Hole Oceanographic Institution
WMO	World Meteorological Organization

作成及びレビューの協力者

IAEA Secretariat

Project management

Project manager
Caruso, G.

Analytical project managers
Bevington, L. (Senior Safety Officer)
Boreta, B.
Massegg, V.

Graphics and data coordinator
Zimmermann, M.

Graphic designer
Kasper, M.

Implementation assistant
Gutierrez Flores, S.

Team assistant
Fitzpatrick, L.

Technical writers and editors
Boemeke, M.
Delves, D.
Harbison, S.
McDonald, A.
Ramesh, G.V.
Robinson, C.

Scientific Secretary of the Co-Chairs meetings
Webster, P.

External reviewers

Alonso, A., Spain
Gray, R., United Kingdom
Robinson, I., United Kingdom
Simmonds, J., United Kingdom
Webster, P., Canada

WORKING GROUP 1 (WG1): DESCRIPTION AND CONTEXT OF THE ACCIDENT

Co-Chairs

Jammal, R.
Canadian Nuclear Safety Commission
Canada

Vincze, P.
Department of Nuclear Energy
IAEA

Scientific Secretary

Heitsch, M. (until August 2014)
Department of Nuclear Safety and Security
IAEA

Members

Dobrzyński, L.
National Centre for Nuclear Research
Poland

Dolganov, K.
Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences
Russian Federation

Duspiva, J.
UJV Řež, a.s.
Czech Republic

Grant, I.
Federal Authority for Nuclear Regulation United Arab Emirates

Guerpinar, A.
Senior Consultant
Turkey

Hirano, M.
Nuclear Regulation Authority
Japan

Khouaja, H.
Canadian Nuclear Safety Commission
Canada

Kim, H.T.
KHNP — Central Research Institute
Republic of Korea

Krijger, H.
N.V. Electriciteits-Productiemaatschappij Zuid-Nederland
Netherlands

Lequerica, I.
ENDESA
Spain

Noel, M.
European Commission Joint Research Centre

Orders, W.
Nuclear Regulatory Commission
USA

Urzua, G.
AREVA
France

Volkholz, P.
AREVA
France

Weidenbrück, K.
Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Building and Nuclear Safety
Germany

Weiss, S.
Global Research for Safety (Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH)
Germany

Zheng, M.G.
Shanghai Nuclear Engineering Research and Design Institute
China

Invited experts

Dodo, T.
Japan Nuclear Safety Institute
Japan

Ihara, T.
Tokyo Electric Power Company
Japan

Kanno, M.
Nuclear Regulation Authority
Japan

Kawano, A. (until August 2013)
Tokyo Electric Power Company
Japan

Muftuoglu, K.
GE Hitachi Nuclear Energy
USA

Taira, J.
Tokyo Electric Power Company
Japan

Yamamoto, M. (August 2013 onwards)
Tokyo Electric Power Company
Japan

IAEA Secretariat staff supporting WG1

Kang, K.-S.
Kilic, N.
Pagannone, B.
Yamada, K.
Yoshimoto, Y.

WORKING GROUP 2 (WG2): SAFETY ASSESSMENT

Co-Chairs

Chande, S.
Atomic Energy Regulatory Board
India

Hughes, P. (until August 2014)
Department of Nuclear Safety and Security
IAEA

Ulses, A. (August 2014 onwards)
Department of Nuclear Safety and Security
IAEA

Scientific Secretary

Aparkin, F.
Department of Nuclear Safety and Security
IAEA

Members

Alonso, J.R.
Nuclear Safety Council
Spain

Ayub, M.
Pakistan Nuclear Regulatory Authority
Pakistan

Bucalossi, A.
European Commission Joint Research Centre

Chaikiat, P.
Swedish Radiation Safety Authority
Sweden

Dermarkar, F.
CANDU Owners Group
Canada

Foucher, L.
French Nuclear Safety Authority
France

Gauntt, R.
Sandia National Laboratories
USA

Giannelli, I.A.
Slovenské Elektrárne, a.s. (subsidiary of Enel)
Italy

Godoy, A.R.
James J. Johnson and Associates
Argentina

Gonzalez, V.
Nuclear Safety and Safeguards National Commission
Mexico

Harrison, S.
Office for Nuclear Regulation
United Kingdom

Heppell-Masys, K.
Canadian Nuclear Safety Commission
Canada

Hoshi, H.
Nuclear Regulation Authority
Japan

Kajimoto, M.
Nuclear Regulation Authority
Japan

Kuivalainen, H.
Radiation and Nuclear Safety Authority Finland

Lankin, M.
Federal Environmental, Industrial and Nuclear Supervision Service of Russia
Russian Federation

de L'Epinois, B.
AREVA
France

Macchi, L.
Dédale
France

Mildenberger, O.
Global Research for Safety (Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH)
Germany

Misak, J.
UJV Řež a.s.
Czech Republic

Perryman, L.
Eskom
South Africa

Ryser, C.
Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate
Switzerland

Song, J.H.
Korea Atomic Energy Research Institute
Republic of Korea

Weidenbrück, K.
Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Building and Nuclear Safety
Germany

Invited experts and contact points

Donges, A.
Institute of Nuclear Power Operation
USA

Haber, S.
Human Performance Analysis, Corp.
USA

Harter, R.
Boiling Water Reactors Owners Group
USA

Hatamura, Y.
University of Tokyo
Japan

Ihara, T.
Tokyo Electric Power Company
Japan

Iino, K.
SYDROSE
Japan

Kunito, S.
Tokyo Electric Power Company
Japan

Nakagawa, Y.
Tokyo Electric Power Company
Japan

Takizawa, S.
Tokyo Electric Power Company
Japan

Watford, G.
GE Hitachi Nuclear Energy
USA

Yamanaka, Y.
Tokyo Electric Power Company
Japan

IAEA Secretariat staff supporting WG2

Beltran, F.
Earle, K.
Haage, M.
Haber, S.
Roveti, B.
Rycraft, H.
Skarbo, B.
Yllera, J.
Yoshimoto, Y.

WORKING GROUP 3 (WG3): EMERGENCY PREPAREDNESS AND RESPONSE

Co-Chairs

Drábová, D.
State Office for Nuclear Safety
Czech Republic

Buglova, E.
Department of Nuclear Safety and Security
IAEA

Scientific Secretary

Shiraga, K.
Department of Nuclear Safety and Security
IAEA

Members

Aaltonen, H.
Radiation and Nuclear Safety Authority
Finland

Ahier, B.
Radiation Protection Bureau
Canada

Bardelay, J.
Institute for Radiological Protection and Nuclear Safety
France

Blackburn, C.
FAO

Byron, D.†
FAO

Chen, P. (until June 2014)
World Meteorological Organization

Chugunov, V.
State Atomic Energy Corporation 'Rosatom'
Russian Federation

Cortes Carmona, A.
Nuclear Safety and Safeguards National Commission
Mexico

Dela Rosa, A.
Philippine Nuclear Research Institute
Philippines

Harou, A. (June 2014 onwards)
World Meteorological Organization

Hernández, D.
Nuclear Regulatory Authority
Argentina

Homma, T.
Japan Atomic Energy Agency
Japan

Hubbard, L.
Swedish Radiation Safety Authority
Sweden

Kelly, N.
Senior Consultant
United Kingdom

Kenigsberg, J.†
National Commission of Radiation Protection
Belarus

Maree, M.
Eskom
South Africa

McClelland, V.
Department of Energy
USA

Molina, G.
Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares
Mexico

Pascal, G.
European Commission Joint Research Centre

† Deceased

Sigouin, L.
Canadian Nuclear Safety Commission
Canada

Soufi, I.
National Energy Center of Sciences and Nuclear Techniques
Morocco

Sumargo, D.E.
Nuclear Energy Regulatory Agency
Indonesia

Takahara, S.
Japan Atomic Energy Agency
Japan

de la Vega, R.
Nuclear Safety Council
Spain

Invited experts and contact points

Taminami, T.
Tokyo Electric Power Company
Japan

Tanigawa, K.
Hiroshima University
Japan

Tominaga, T.
National Institute of Radiological Sciences
Japan

Wiley, A.
REAC/TS–WHO Collaborating Center
USA

Yamashita, S.
Nagasaki University
Japan

IAEA Secretariat staff supporting WG3

Callen, J.
Chaput, J.
Kaiser, P.
Martincic, R.
McKenna, T.
Mutluer, A.
Nestoroska Madjunarova, S.
Vilar Welter, P.
Yoshimoto, Y

WORKING GROUP 4 (WG4): RADIOLOGICAL CONSEQUENCES

Co-Chairs

González, A.
Nuclear Regulatory Authority
Argentina

Chhem, R. (until August 2014)
Department of Nuclear Sciences and Applications
IAEA

Meghzifene, A. (September 2014 onwards)
Department of Nuclear Sciences and Applications
IAEA

Pinak, M.
Department of Nuclear Safety and Security
IAEA

Scientific Secretary

Müskens, P. (until August 2013)
Department of Nuclear Safety and Security
IAEA

Bevington, L. (September 2013 onwards)
Department of Nuclear Safety and Security
IAEA

Members

Akashi, M.
National Institute of Radiological Sciences
Japan

Betancourt, A.
Agencia de Energía Nuclear y Tecnologías de Avanzada
Cuba

Blumenthal, D.
National Nuclear Security Administration
Department of Energy
USA

Bromet, E.J.
State University of New York at Stony Brook
USA

Brown, J.
Norwegian Radiation Protection Authority
Norway

Coleman, C.N.
National Cancer Institute
USA

Demidchik, Y.
Belarusian Academy of Science and Belarusian Medical Academy of Post-Graduate Education
Belarus

Dobrzyński, L.
National Centre for Nuclear Research
Poland

Gallego, E.
Universidad Politécnica de Madrid
Spain

Haquin, G.
Soreq Nuclear Research Center
Israel

Jones, C.G.
Permanent Mission of the United States of America to the IAEA in Vienna and Nuclear Regulatory Commission
USA

Lee, J.K.
Hanyang University
Republic of Korea

Magnusson, S.
Icelandic Radiation Safety Authority
Iceland

Mason, C.
BHP Billiton
Australia

McEwan, A.C.
Senior Consultant
New Zealand

McGinnity, P.A.
Environmental Protection Agency
Ireland

Ng, K.H.
University of Malaya
Malaysia

Niwa, O.
Kyoto University, and Fukushima Medical University
Japan

Pentreath, R.J.
University of Reading
United Kingdom

Perrin, M.L.
Nuclear Safety Authority
France

Rochedo, E.
Coordination of Nuclear Installations
Brazil

Shinkarev, S.
Federal Medical Biological Agency
Russian Federation

Sundell-Bergman, S.
Swedish University of Agricultural Sciences
Sweden

Thomas, G.
Imperial College London
United Kingdom

Valentin, J.
Jack Valentin Radiological Protection
Sweden

Invited experts and contact points

Brenner, A.
National Cancer Institute
USA

Chino, M.
Japan Atomic Energy Agency
Japan

Fukui, T.
Nuclear Regulation Authority
Japan

Ivanov, V.
National Radiation and Epidemiological Registry
Russian Federation

Makihira, A.
Tokyo Electric Power Company
Japan

Nagataki, S.
Nagasaki University
Japan

Ohtsuru, A.
Fukushima Medical University
Japan

IAEA Secretariat staff supporting WG4

Harms, A.V.
McGinnity, P.A.
Nies, H.
Osvath, I.
Sakai, K.
Yonehara, H.

WORKING GROUP 5 (WG5): POST-ACCIDENT RECOVERY

Co-Chairs

Williams, G.
Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency
Australia

Mele, I.
Department of Nuclear Energy
IAEA

Proehl, G.
Department of Nuclear Safety and Security
IAEA

Scientific Secretary

Delaunay, N.
Department of Nuclear Safety and Security
IAEA

Members

Al-Masri, M.S.
Atomic Energy Commission of Syria
Syrian Arab Republic

Balonov, M.
Institute of Radiation Hygiene
Russian Federation

Bassanelli, A.
Sogin — Società Gestione Impianti Nucleari
Italy

Brennecke, P.
Senior Consultant
Germany

Darko, E.O.
Ghana Atomic Energy Commission
Ghana

Gallay, F.
Nuclear Safety Authority
France

Howard, B.J.
Centre for Ecology and Hydrology
United Kingdom

Inoue, T.
Central Research Institute of Electric Power Industry
Japan

Kifanga, L.D.
Tanzania Atomic Energy Commission
United Republic of Tanzania

Nakayama, S.
Japan Atomic Energy Agency
Japan

Oughton, D.H.
Norwegian University of Life Sciences
Norway

Rowan, D.
Atomic Energy of Canada Limited
Canada

Seitz, R.
Savannah River National Laboratory
USA

Tokarevsky, V.
Institute for Chernobyl Problems
Ukraine

Zeleznik, N.
Regional Environmental Center
Slovenia

Invited experts and contact points

Belencan, H.
Senior Consultant
USA

Negin, C.
Project Enhancement Corporation
USA

Takizawa, S.
Tokyo Electric Power Company
Japan

IAEA Secretariat staff supporting WG5

Izumo, A.
Fesenko, S.
Kumano, Y.
Monken-Fernandes, H.
Sakai, K.
Walker, J.
Yankovich, T.
Yonehara, H.

国際技術諮問グループ

Chairman

Meserve, R.
International Nuclear Safety Group

Scientific Secretary

Bevington, L.
Department of Nuclear Safety and Security
IAEA

Members

Asmolov, V.G.
JSC Concern Rosenergoatom

Carrière, J.M.
World Meteorological Organization

Clement, C.
International Commission on Radiological Protection

Cousins, C.
International Commission on Radiological Protection

De Boeck, B.
International Nuclear Safety Group

Echávarri, L.E. (until April 2014)
OECD Nuclear Energy Agency

Ellis, K.
World Association of Nuclear Operators

Fuketa, T.
International Nuclear Safety Group

Jamet, P.
International Nuclear Safety Group

Kim, M.
International Nuclear Safety Group

Laaksonen, J.
International Nuclear Safety Group

Le, C.D.
International Nuclear Safety Group

Liang, Q.
Food and Agriculture Organization of the United Nations

Magwood, W. (September 2014 onwards)
OECD Nuclear Energy Agency

Mohammad Jais, A.
International Nuclear Safety Group

Niu, S.
International Labour Organization

Sharma, S.K.†
International Nuclear Safety Group

Torgerson, D.
International Nuclear Safety Group

Weightman, M.
International Nuclear Safety Group

Weiss, W.
United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation

Wiroth, P.
International Nuclear Safety Group

Ziqiang, P.
International Commission on Radiological Protection

会合

Working Group (WG) meetings

18 March 2013
Initial meeting of the WG Co-Chairs, Vienna

21–22 March 2013
1st meeting of all WGs, Vienna

12–14 June 2013
2nd meeting of all WGs, Vienna

12–13 September 2013
3rd meeting of WGs 1 and 2, Vienna

7–9 October 2013
3rd meeting of WGs 3, 4 and 5, Vienna

9–13 December 2013
4th meeting of all WGs, Vienna

10–14 February 2014
5th meeting of all WGs, Vienna

14–17 April 2014
6th meeting of WGs 1, 2 and 3, Vienna

5–9 May 2014
6th meeting of WG 4, Vienna

26–30 May 2014
6th meeting of WG 5, Vienna

International Technical Advisory Group (ITAG) meetings

21–22 March 2013
1st ITAG meeting, Vienna

10 June 2013
1st Joint ITAG/Co-Chairs meeting, Vienna

11 June 2013
2nd ITAG meeting, Vienna

6 December 2013
2nd Joint ITAG/Co-Chairs meeting, Vienna

7 May 2014
3rd Joint ITAG/Co-Chairs meeting, Vienna

23–24 October 2014
4th Joint ITAG/Co-Chairs meeting, Vienna

23–24 February 2015
5th Joint ITAG/Co-Chairs meeting, Vienna

Consultants services (CS) meetings

6–7 August 2013
CS on Source Term, Vienna

29–31 October 2013
CS on Human and Organizational Factors and Safety Culture, Vienna

17–21 November 2013
CS on Human and Organizational Factors and Safety Culture, Atlanta

13–17 January 2014
CS on Human and Organizational Factors and Safety Culture, Vienna

17–21 March 2014
CS on Human and Organizational Factors and Safety Culture, Ottawa

24–26 March 2014
CS on Radioactivity in the Environment, Monaco

20–21 May 2014
CS on Radiation and Log-Normal Distributions, Vienna

23–27 June 2014
CS on Radiation and Log-Normal Distributions, Vienna

Bilateral meetings in Japan

14–21 October 2013
Bilateral Discussions on Issues Related to the IAEA Report in the Area of Remediation

25–27 November 2013
CS to Discuss Issues Related to Radiological Consequences in Connection with the Preparation of Chapter 4 (Radiological Consequences) and Chapter 5 (Post-accident Recovery)

25 November–4 December 2013
Bilateral Discussions on Issues Related to the IAEA Report in the Area of Decommissioning

20–24 January 2014
CS to Discuss Issues Related to Regulatory Activities, Operating Experience and Waste Management Topics in Connection with the Preparation of the IAEA Report

23 January 2014
Meetings with Reconstruction Agency and Team in Charge of Assisting the Lives of Disaster Victims — Cabinet Office

24 January 2014
Meetings with the Institute of Energy Economics of Japan

著作権表示

Marketing and Sales Unit, Publishing Section
International Atomic Energy Agency
Vienna International Centre
PO Box 100
1400 Vienna, Austria
Fax: +43 1 2600 29302
Tel.: +43 1 2600 22417
Email: sales.publications@iaea.org
http://www.iaea.org/books

Printed by the IAEA in Austria

August 2015

STI/PUB/1710

IAEA Library Cataloguing in Publication Data

The Fukushima Daiichi accident — Vienna : International Atomic Energy Agency, 2015.
v. ; 30 cm.
STI/PUB/1710
ISBN 978–92–0–107015–9 (set)
Includes bibliographical references.

1. Nuclear reactor accidents — Analysis. 2. Nuclear power plants — Accidents — Analysis. 3. Nuclear reactor accidents — Japan — Fukushima-ken. 4. Radioactive pollution — Health aspects — Japan — Fukushima-ken. 5. Radioactive waste management. 6. Emergency management. I. International Atomic Energy Agency.

IAEAL 15–00988

編集注記

本事務局長報告書は、技術文書において提供される詳細な情報を基に作成された。その内容は、技術文書作成のための作業部会に専門家を指名した IAEA 加盟国又は機関の見解を必ずしも反映するものではない。

本報告書に含まれる情報の正確性を維持するために多大な注意が払われた。しかし、IAEA も同加盟国も、本報告書の使用から生じうる結果に何ら責任を負うものではなく、また、本報告書の関連でいかなる種類の保証も行われるものではない。

本報告書は、いかなる個人又は主体による作為又は不作為についても、法的又はその他を問わず、責任の問題を扱うことを意図するものではない。

出典を明記することを条件に、本報告書の抜粋は他所で自由に使用することができる。本報告書において、情報（写真、図表を含む）が IAEA 以外の情報源又はサイトからの出典であることが示されている場合、同出典元より再利用の許可を求めなければならない。

国又は領土の特定名称の使用は、これらの国又は領土、それらの境界線の画定、あるいはそれらの権限及び法的地位に関する IAEA のいかなる判断も示唆するものではない。

特定の企業又は製品の名称への言及は、それが登録商標と示されているか否かにかかわらず、財産権を侵害するいかなる意図も示唆するものではなく、IAEA による承認又は勧告と解釈されるべきでもない。

IAEA は、本報告書で言及される外部又は第三者のインターネットウェブサイト URL の正確性又は継続的な存在について何ら責任を負うものではなく、これらのウェブサイトのいかなる内容も現在又は将来正確又は適切であることについて保証するものではない。

15-33238

IAEA
International Atomic Energy Agency

PO Box 100, Vienna International Centre
1400 Vienna, Austria

Printed in Austria