新たな原子力安全概念の構築を目指して

Forging a New Nuclear Safety Construct

ASME Presidential Task Force on Response to Japan Nuclear Power Plant Events

June 2012

訳：日本機械学会

新たな原子力安全概念の構築を目指して

Forging a New Nuclear Safety Construct

福島第一発電所の事故を受けて設置された ASME 会長直属のタスクフォース（主査：Nils Diaz 元 NRC 委員長，副主査：Regis Matzie 元 Westinghouse 上級副社長）による原子力発電の安全と活用に関するこの報告書を，機械学会会員を始めとする関係者に広く読んで頂けるよう，学会有志によって和訳版を作成したものです.

ボランタリな作業による和訳であり，その正確性などについては保証できません．また，分担による和訳のため，訳者による訳語の相違がある場合もあります．読者は必要に応じて適宜原文を参照してください.

なお, 本和訳版の公開にあたっては下記のように ASME の許諾を得ています.

JSME has translated the ASME Presidential Task Force on Response to Japan Nuclear Power Plant Events report copyright 2012 by The American Society of Mechanical Engineers with the prior written consent of ASME. ASME has licensed JSME to make this translation and takes no responsibility for any syntax errors or conflicts in understanding that arise from the report being referenced out of context. No additional translation or reproduction may be made of this material without the prior written consent of the ASME.

日本機械学会(JSME)は米国機械学会の書面による事前の同意を得たうえで，日本の原子力発電所事故への対応に関する ASME 会長直属のタスクフォースの報告書の和訳版を作成した．ASME は JSME がこの和訳版を作成することを許可するが，翻訳によって生じる文章上の誤りあるいは文意の矛盾については責任を有しない．また，ASME の事前の文書による同意なしに，この和訳版を更に翻訳し，あるいは複製してはならない.

＊ オリジナルは下記 URL からダウンロード出来ます.

http://files.asme.org/asmeorg/Publications/32419.pdf

目　次

要 旨 vi
1. 背景，スコープ，及び今後の方向性 1
1.1. はじめに 1
1.2. 日本の原子力発電所の事象に関する ASME のタスクフォース 2
1.3. 福島第一原発事故 2
1.4. 事故の結果 2
1.5. 重点課題と焦点 3
1.6. 原子力の安全概念 4
2. 原子力安全の歴史を振り返って 7
2.1. はじめに 7
2.2. 複雑な技術のライフサイクル 7
2.3. 半世紀の間に原子力発電が経験したこと 10
2.4. 原子力プラントの安全性 10
2.5. 原子力事故から学んだ教訓に基づく行動 16
2.6. まとめ 17
3. 設計基準を超えて 18
3.1. はじめに 18
3.2. 現在までにどのような設計が確立されてきたか 19
3.2.1. 設計基準 19
3.2.2. 深層防護 23
3.2.3. 深層防護を達成する決定論的手法 24
3.2.4. 深層防護を達成するための確率論的アプローチ 25
3.3. 福島第一から学ぶべき教訓を反映して設計をどう変えるか —安全概念の誕生— 28
3.4. 新しい原子力発電プラントの設計 30
3.5. まとめ 30
4. 事故の防止と炉心冷却： 主要な安全戦略と優先すべき安全機能 32
4.1. はじめに 32
4.2. 最優先すべき安全機能としての炉心冷却への認識の高まり 32
4.3. 1957 年の原子炉安全研究における炉心冷却に関する考察 36
4.4. TMI-2 事故における炉心冷却に関する考察 36
4.5. 2001 年 9 月 11 日の出来事における炉心冷却に関する考察 37
4.6. 福島事故における炉心冷却に関する考察 37
4.7. 稀ではあるが起こりえる事象からの防護 38
4.8. まとめのコメント 38
5. 想定外への対処－人的能力 40
5.1. はじめに 40
5.1.1. 人的能力の伝統的なアプローチ 40
5.1.2. 危機における意思決定に際しての責任，説明責任と権威 41
5.1.3. 組織面における人的能力 41
5.1.4. 組織的な失敗 42
5.2. 原子力プラントの事故における人的能力 43

5.3. 福島からの人的能力に関する教訓 44
5.4. まとめ 45
6. 全てのリスクの管理 47
6.1. はじめに 47
6.2. アクシデントマネジメントの定義 47
6.3. アクシデントマネジメントの歴史 48
6.4. 福島におけるアクシデントマネジメント 49
6.4.1. 多相災害 49
6.4.2. 苛酷津波に対する事故対策 50
6.5. 福島から学ぶアクシデントマネジメント 50
6.6. 福島後の世界の対応 51
6.7. 現状の対応を超える措置 52
6.8. まとめ 53
7. 緊急事態への備え 54
7.1. はじめに 54
7.2. 福島第一事故から学習される EP 関連事項 55
7.3. 新安全概念における EP 関連の教訓 56
7.3.1. インフラ設備の改善 56
7.3.2. より現実味のある演習と訓練 57
7.3.3. 長期間の居住規準(帰還規準) 58
7.3.4. 公衆の信頼の構築 59
7.3.5. EPZ サイズの更新根拠 59
7.4. EP に対するリスク情報活用，性能ベースアプローチ 62
7.5. まとめ 62
8. 原子力安全概念の強化 64
8.1. はじめに 64
8.2. 通常の事象における地域支援 64
8.3. 危機コミュニケーション：何が起きていて，それはなぜか 65
8.3.1. EP（緊急事態への備え）の指示系統，及び意思決定の権威 66
8.4. 公衆の信頼の獲得 67
8.5. まとめ 69
9. 新しい原子力安全概念の構築 71
9.1. はじめに 71
9.2. 進化する原子力安全概念 71
9.3. 事故の教訓 73
9.4. 新たな原子力安全概念 74
9.5. 新たな原子力安全概念の原則 74
9.6. 新たな原子力安全概念に関するその他の結論 75
9.6.1. 拡張設計基準 75
9.6.2. リスク情報に基づく深層防護概念 75
9.6.3. 人的能力の管理 （Human Performance Management） 76
9.6.4. アクシデントマネジメント 76
9.6.5. 緊急事態への対応管理 （Emergency Preparedness Management） 76

9.6.6. コミュニケーションと公衆の信頼の問題 76
9.7. 新たな原子力安全概念の構築に向けた次のステップに関する推奨 77
9.7.1. 新しい原子力安全概念構築のためのワークショップ 77
9.7.2. 原子力規格基準の改訂と拡張 78
9.7.3. 結論と推奨事項の周知 78
9.8. まとめと結論 79
REFERENCES 80
付録 A 社会に対する原子力発電の影響 85
A.1 はじめに 85
A.2 主な原子炉事故の経済的並びに社会的政治的影響 85
A.2.1 福島第一事故の影響 85
A.2.2 チェルノブィル事故の影響 86
A.2.3 スリーマイルアイランド 2 号機事故の影響 87
A.3 米国における現在及び将来の原子力発電の価値 88
A.4 原子力発電の信頼性 89
A.5 価格の安定性とエネルギーセキュリティ 89
A.6 温室効果ガスの排出 90
A.7 各種電源の相対的な健康リスク 91

ASME PRESIDENTIAL TASK FORCE MEMBERS

Chairman – Nils J. Diaz
Vice Chairman – Regis A. Matzie

Kenneth R. Balkey
John D. Bendo
John C. Devine Jr.
Romney B. Duffey
Robert W. Evans
Thomas R. Hafera
James A. Lake
David E. W. Leaver
Robert Lutz, Jr.
Roger J. Mattson
Richard R. Schultz
J. Robert Sims
Douglas E. True
John M. Tuohy Jr.

和 訳

大島 まり	東京大学大学院
金子 成彦	東京大学大学院
酒井 信介	東京大学大学院
榊原 安英	日本原子力研究開発機構
堂崎 浩二	日本原子力発電
森下 正樹	日本原子力研究開発機構
山田 浩二	中部電力

要 旨

2011年3月の東日本大震災と津波によって膨大な数の生命と多大な財産が失われた. 地震の強い揺れと津波は福島第一発電所の過酷事故と放射性物質の放散につながった. 福島の事故を受け, ASME 会長ビクトリア ロックウェルは直ちに会長直属のタスクフォースを設置し, 事故とその影響の調査に取り掛かった.

福島での前代未聞のこの事故から, 原子力発電所が極めて過酷な外部事象に対して脆弱性を抱えているという新たな知見が得られ, 適切な改善の必要性が明らかとなった. 福島における多号機事故は依然として日本及び世界において社会的政治的に, 経済的に, そしてエネルギー問題について深刻な影響を与え続けている. タスクフォースは米国及び国際社会において積重ねられつつある事故とその影響に関する評価等に基づいた検討を行うことと, 福島事故を半世紀にわたる原子炉の運転から得られてきた幅広い教訓の文脈の中で捉えた検討を行うことを選択した. 事故シナリオに含まれる重要な要素を評価検討したうえで, タスクフォースは原子力発電所の継続的な安全運転のためのまとまった枠組みを提案している.

福島第一 – 状況 –

福島事故に関する膨大な考察, 分析, 或いは報告の中で, 長期的影響の評価において着目すべき最も重要な要素には以下がある.

- 福島第一は 50 年を超える原子力発電所の運転の歴史において, カタストロフィックな外部事象によって炉心損傷を生じた世界で最初の原子力発電所であり, 多号機の同時事故を起こした最初の発電所であり, 大規模な放射性物質の環境中への放出に至った最初の軽水炉である.
- 福島第一の 4 ユニットが著しい損傷を受けたのは何故か, そのうち 3 ユニットで炉心溶融が生じてしまったのは何故か, そして同様に地震と津波の影響を受けた地域の他の 10 基の原子炉が無事であったのは何故か, といった点に対する答は明快でまぎれが無い. それは既に認識されているように津波, 洪水, 並びにアクシデントマネジメントに関する不適切な設計にある.
- 福島第一の事故によって原子炉技術に致命的欠陥が見出された訳ではない. 勿論, 得られた教訓にもとづいて世界中の原子力発電所で安全性向上のための種々の取組みが行われてはいるが.
- 福島第一の事故では放射線影響による死者は一人のも出ておらず, また今後も公衆の健康へ著しい遅発性の影響は無いだろうとの予測がある. 福島第一事故による, この比較的軽微な放射線影響は, 放射能の効果に関する実際の経験と一致している.
- 公衆の健康と安全を放射性物質の放散から保護することは, これまでも原子炉安全の第一の焦点であったし今後もそうあり続ける. しかしながら, 過去の経験と今回の経験が示しているのは, **原子炉の過酷事故が引き起こす最も深刻な影響は社会に巨大なコストを負わせる社会的政治的及び経済的な崩壊である**, という事実である. 本稿を書いている, 2011年3月から15ケ月が経過した時点において, 約9万人の住民が除染を待って帰還出来ずにいる. 2012年5月の時点で54基全ての原子炉が停止し, 国家はエネルギー供給の不足と苦闘している. 福島第一事故による経済的損失は 5000 億ドルのオーダーに達すると見積もられている.

*福島事故後に日本が経験したような社会的政治的，経済的な影響は，それが極端に過酷な自然災害によるものではあっても，決して**受入れることは出来ない．***

詳細に吟味すると，このような影響は（極端で，ある意味で前例のない過酷な自然災害により引起されたものであるにせよ）防止することは可能であったし，受け容れることは出来ないものであると言える．そして，これらは経済的に成立し社会に受け容れられる原子力エネルギー利用とは全く相容れないものである．

原子炉安全の第一の目標は公衆の健康と安全の保護にあったしこれからもそうあり続ける．しかしながら，福島第一の事故によって放射性物質の放散による社会的政治的，経済的な影響という潜在的なリスクを減ずるために更なる段階の対処が必要とされることが明らかとなった．この考えに基づき，タスクフォースはこのような改善を実現するための新たな原子力安全概念を提案するに至った．

新たな原子力安全概念

原子力発電所の設計，建設，運転，及び管理が事故時の放射性物質の放出による大規模な社会の崩壊を確実に防止出来るよう計画的に策定され，全体として調和のとれた体系的な取組みで，全てのリスクに対処するもの．

新たな原子力安全概念の重要要素

- **それは，既存の原子力安全概念に立脚している．** 新たな概念は発展しつつある安全の枠組みを拡張するものであり，公衆の健康と安全の保護を超え，過酷事故からの社会的政治的，経済的影響を防止するものである．
- **それは設計基準を拡張して全てのリスクを考慮し，稀ではあるが起こりえる事象も含む．**タスクフォースは新たな原子力安全概念を“全リスクアプローチ”に基づいて構築することを提案する．これは，内部ハザードと外部ハザードを含む，全てのプラント運転モードにおける原子力発電所の安全に対する幅広い脅威に対するリスク情報を利用した取組みである．“クリフエッジ”効果（条件が少しでも厳しくなると結果が突然厳しくなる効果）を持つ事象を見出し，その緩和手段を取入れるべきである．潜在的に厳しい結果となり得る稀有事象に対処する目的は，全体としてのリスクをゼロにすることは不可能であることを知りつつ，これまでは十分考慮されてこなかった考え得る事象に対して合理的で現実的な手段を用意することにある．
- **それは規制要求を超えている．**タスクフォースは，人々と財産の保護に関する説明責任が規制要求を超えて設計者，製造者，所有者，並びに運転者に求められるものであると考える．
- **それは世界で遍く受け容れられるべきもの．**タスクフォースはどのような標準であれそれを規制制度や文化の相違を超えて当てはめることの難しさを認識している．しかし，現実問題として（福島第一の事故がいみじくも示したように）原子力エネルギーは全世界的な要請であるし，安全原則は全てのプラントに適用されるものである．

*安全原則は普遍的に通用する －**グローバルな**安全概念が求められている．*

課 題

ASME タスクフォースは新たな原子力安全概念を創出し，適用し，その実現を支援するという野心的な目的を設定しているが，それは大変な難題である．最も苦労するのはその原則について国際的なコンセンサスを形成し，詳細を作り上げ，実現するところにあるだろう．

世界の原子力発電所の所有者，運転者，規制当局にとっては，それぞれ文化，規制の枠組み，技術の洗練程度，政府の取組み，経済，環境，政治，その他の相違がある．ASME タスクフォースはこれら

の相違を認識しており，また，どのようなレベル，性格の極端な事象からプラント，人々及び財産を守るべきか，という点について合意を形成するという実際の作業にこれらの相違が影響するであろうことを認識している．それでもなおかつ，共通見解を見出し，原子力安全に関する世界的な連携を実現するために協働することが必要である．

将来福島事故のような影響を防ぐことが出来れば原子力エネルギーは経済的に発展しえるものである.

このような取組みは原子力発電の経済的成立性を狭めることになる要求を付加えるだけと見られるかもしれない．そうではなくて，意図は安全な原子力発電の可能性を包括的に支えていくことにある．ASME タスクフォースは 福島の教訓から明らかになった安全上の課題を解決するための合理的で明快な規定を備えた新たな原子力安全概念の開発は可能であると確信している．たとえそれが過酷な自然現象によるものであったとしても，日本が経験したような事故とその後の推移を回避することが出来なければ，原子力発電は社会から受容れられないだろうし，長い目で見れば経済的にも成立しないだろう．社会の信頼を築きあげることは，原子力発電所の事故による社会的政治的，経済的な悪影響を防ぐ上で必要不可欠な要素である．

次のステップ

合意を形成し，新たな原子力安全概念の細部を具体化し，様々なステークホルダーの役割を決め，そしてこの概念を採用して広く実現していくという実際の仕事はここから始まる．タスクフォースの報告書ではこれについて次になすべき幾つかのアクションを提案している．特に， ASME の経験，知名度及び能力を利用して世界中の産業界，規制，学会，政府機関並びに産業界組織が一同に介するワークショップを主催することを推奨する．

1. 背景，スコープ，及び今後の方向性

1.1. はじめに

東日本大震災は多くの命を奪い，国家の財産を破壊し，また多大な環境破壊も引き起こした．緊急時対応に追われ，その能力，体制はたびたび圧倒された．さらに，東日本の海岸側で発生した常識を超えるような自然界の力によって，福島第一原子力発電所の3つの原子炉では冷却機能を失うに至った．1～3号機の炉心の冷却機能損失によって炉心損傷，燃料溶融に至った．さらに，冷却機能損失が続いたことで，原子炉冷却材圧力バウンダリの破損，格納容器の破損，ジルコニウム製燃料被覆管と水の反応により発生した水素の爆発を引き起こし，3基とも大量の放射能を放出することになってしまった．放射能汚染に対する住民の避難区域は原子力発電所から 30km ほぼ 19mile に及んだ．

現在および将来にわたる放射能による明らかな健康被害は無いであろうから，放射能に対する公衆の健康と安全の防備は日本において有効であったように思われる．しかしながら，福島原発の事故は日本だけでなく世界的にも社会，経済，エネルギー関連問題に大きな影響を与え，世界中の多くの政府，メディアの注目を集めている．この事故によって，原発によってもたらされる燃料の多様性，気候変動のイニシアティブ，電力コストの安定性といった重要性に対する認識が歪められ，エネルギーポートフォリオにも影響を与えている．

日本の原子力発電への対応に関する ASME 会長付のタスクフォースの結論としては，福島第一原発の事故によって生じた問題に対して，世界を視野に入れた深い思慮にもとづく解決策は，原発の恩恵をこれからも受け，その利用を拡大し，危機的な環境およびエネルギー問題を解決していくことである．ASME のタスクフォースは，外的および内的事象に対する安全性と事故対応能力を強化し，現存する原発の安全設備を系統的に補完，改善することによって生まれる拡張した安全概念を提案している．この改善案は，大きな事故によって放射能が放出された場合に生じる人々の健康，環境，社会経済への影響を防ぐ又は最小に抑えることを目指している．これらの目標を達成するために，この報告書にあるように，原発の新たな安全概念を構築することを ASME タスクフォースはサポートする．この新たな安全概念は全リスク アプローチによって既存の安全概念を強化したものである．

ここで“概念”(construct) という語は，要素の結合を意味し，協調によって所望の結果を達成する．原発に対しては，安全概念はプラント設計，物理的なシステム，構造，要素，安全規則，品質保証，プラントの操作および保守の手順と訓練，危機管理と緊急時の準備を含む一連の要素を連携させ進化していく．

この報告書で使われている全リスクという語は，確率的なリスク評価(PRAs)の構築時，深層防護の評価時，危機管理戦略構築時において想定されるすべてのハザードを考慮することを意味するものである．リスクとは不運な事象が生じる確率とその重大性の組み合わせである．人々の健康と安全，環境の保護が原発の安全性に関しては今後も最重要事項であろう．現在の安全概念に補完すべきものは，人々の健康と安全保護の更なる強化である．新たな安全概念で新たに加えるべき重要事項は環境へ放出される放射能が広範囲に拡散することを抑止することである．

“全リスク”では，まず起きることがないと思えるが原発の安全性を脅かす可能性のある事象や，潜在的な事故シナリオも考慮すべきである．事故シナリオは，プラントのいかなる運転モードにおいても自然界又は人的原因からくる内的又は外的な様々な要因によって始まる．

稀ではあるが生じ得る事象であってその帰結が極めて厳しくなる事象への対処はリスクの適切な考慮によって限定的に行うべきである．この点において，法に依拠することは重要であり，裁判所が原子力安全について受容可能であると判断した考え方に準拠することになるだろう．それは，“*十分なレベ*

ルの防護とはゼロリスクである必要はなく，また恐らくゼロリスクとはならないであろう”

ありえない事象は考慮する必要はない．一方で，起こる可能性の極めて低い事象，たとえば甚大な洪水，巨大な竜巻，その他自然現象は，予測不可能ではあるがその発生が考えられるものについては考慮すべきであるというのが ASME タスクフォースの意図するところである．特に関心のある事項は，積み重なることによって重要性が急激に増加することで甚大な被害を誘発する初期の事象である．このようなケースにおいては，とにかく炉心を冷却出来るよう，放射能を多く飛散させないように，システムや予定された行動が整備されておく必要がある．

1.2. 日本の原子力発電所の事象に関する ASME のタスクフォース

ASME 会長 Victoria Rockwell は会長付の，福島事故の余波によって引き起こされた学際問題を扱う社会の役割を明確にし，原発事故の被害を最小限にするために世界が取るべき行動を促すタスクフォースを設置した．ASME のタスクフォースでは，福島第一の事故の詳細な評価は自分達自身では行わなかった．その代わりに，ASME タスクフォースは日本政府，大学や専門機関，IAEA，NEA，OECD，NRC，INPO，EPRI，NEI，ANS などの調査結果を用いた．

ASME タスクフォースは，他の重大な原発事故を顧みながら，まずは今回事故につながった技術的な側面に注目，次に福島を教訓に新たな対策の検討に専念した．社会経済への影響を最小限に留め，また人々の健康と安全を守る新たなアプローチをこの報告書で示している．

1.3. 福島第一原発事故

福島第一は最悪な外部の事象によって，世界で初めて炉心損傷を起こし，大気に多くの放射能を放出することとなった軽水炉である．さらに，福島での事故は原発史上で初めての複数台の事故であり，非常に複雑な対応が要求されるものとなった．スリーマイル島の軽水炉の事故では，一部炉心溶融を起こしたが，放射能を閉じ込めることができたので大気に大量に放出されることはなかった．一方で反応が暴走した黒鉛減速沸騰軽水圧力管型原子炉のチェルノブイリの場合には，水蒸気爆発が生じ炉心の黒鉛が燃え，閉じ込める術がなくなってしまい，ウラン燃料の放射能含有物を大気放出するに至ってしまった．この報告書ではスリーマイル，チェルノブイリ，福島事故の共通点を調査している．このような経験は，事故の発生前又は最中に炉心冷却の維持が他の事故管理行動よりも優先されるべきであることを示している．

福島第一の事故の引き金となった地震や津波といった外部の事象はプラント設計時の設定をはるかに超えており，結果的に交流，直流電源を完全に喪失し，最終的に冷却できない状態に至った．炉の操作員は炉心を冷却する術をなくし，原発の安全機能の内で最も重要な機能を稼働させることができなくなってしまった．6 基中 3 基の炉心および格納容器が損傷し，放射能を閉じ込める術がなくなり大気に放出する結果となってしまった．この放射能の放出は，外部の事象に対するより堅牢な保護機能，炉心での燃料溶融や格納容器が損傷するに至る前に冷却系統を復帰するオンサイト，オフサイトによる支援があれば避けることができたものである．

1.4. 事故の結果

福島第一の原発事故での放射能による健康被害に関しては，致命的なことには至っておらず，後々にも大きな被害はないと予想されている．しかしながら，放射能物質が日本の人口集中地域の広範囲に放出されたこと，放射能被害を避けるために 10 万人以上の人々が移住したこと，汚染地域で経済的な生産力が低下したこと，日本全体での原子力発電量の縮小，経済インパクトなどを含めて，事は重大である．さらにこの事故に伴い，今後の原発利用も含め，世界の経済，エネルギー戦略が厳しい

ものとなっている.

福島の事故に関連する経済損失は, 社会的なインパクトや政治影響よりは定量的に評価出来るが, 正確に計算することは難しい. 福島原発事故で日本が負うことになる全コストの概算は, 現在のところ大雑把に 5000 億ドルと見積もられているが, 今後長い間発電に原発を使わず他の方法を使っていくと, 大幅に増加することになるであろう. 付録 A には福島, チェルノブイリ, スリーマイル事故の影響の概算がまとめられている.

福島第一事故の経済的な負担は, 25 年で 2500 から 5000 億ドルと見積もられたチェルノブイリのものを参考にしている. チェルノブイリの事故から, 事故の社会政・治的な帰結が住民や国々への影響の大部分を占めることが明らかになった.

スリーマイルの直接的な経済のインパクトは, 数十億ドルと見積もられていた. しかし, 社会政治的インパクトはどれほどのものかわからない. おそらく, スリーマイル事故の影響を最も受けたものは, アメリカの電力ポートフォリオである. 例としては, 経済的なものや他の理由もあるが, 原発建設が中止となり, 約 30 年あまりの間, 原発の成長は限られたものとなった. 原子力の展開は今再び始まったばかりで, 近いうちジョージアと南カリフォルニアに建設予定である.

毎日の原発の運転は, 他のエネルギー資源を使うよりもはるかに健康被害は少なく安全性が高く, 多大なメリットがある. 原発は環境にはやさしく, 安い生産コストで大量の電気を生み出すことが出来る. 原発は, 福島のような甚大な事故の発生を考慮に入れても他の多くの複雑な技術よりも生涯の健康被害は少ない. しかし, チェルノブイリや福島のように多くの放射能の放出は, 原発以外の産業から発生し, たいていはよりローカルであるリスクとは異なる. 放射能を放出するような原子炉の事故の重大性は, 広範囲に長期に様々な影響が及び, 実際には危険は伴わないようなわずかな被ばくに対しても恐怖を感じてしまうことが起こってしまうことである. さらに, メディアの報道, 一般人は原発に依存しない産業で起こるリスクが分かっておらず, 社会への影響を悪化させる.

福島の事故が広範囲に及んだ事態が, ASME のタスクフォースの現存および新設する原発の安全性と信頼出来る運転を確保する行動提案の中心にある. 放射能からの人々の健康と安全を守ることが原発の安全性を考える上で最優先事項であり, 今後もその考えを継続する. 重大な事故の教訓も含めると, この考えを維持することの重要性を説くとともに新たになすべき重要なことも見えてくる. 甚大な原発事故によって生じる社会政治的および経済的混乱は社会へ多大な負担を与えることとなる. 言い換えれば, 原発事故の放射能による健康被害がなくとも, 放射能の放出によって生じる社会経済構造の目に見える混乱や潜在的な混乱は受け入れがたい結果である. そえゆえ, 原発産業に対する新たな安全概念を構築する必要があり, その中身については 1.6 に示す.

1.5. 重点課題と焦点

ASME タスクフォースはこの報告書を, 放射能影響を及ぼした原子炉事故および安全上極めて重要な意味合いを持つその他の事象について, これらの事故や事象から生み出された安全性の改善点とともに歴史的にふり返るところから始めている. これらの歴史において共通して現れる, 鍵となる問題は福島事故以前, 事故中, そして事故後にも当てはまるものである. その問題には, 炉心冷却, 冷却システム, 格納容器, 核分裂によって生成する物質の封じ込めと捕集, 反応制御, 人の行動, 安全装置と制御, コミュニケーション, 指令と制御, 緊急事態への準備などがある.

福島第一の事故で最も顕著な問題となったのは設計基準を大幅に超えた壊滅的な外的事象に対する十分な予防の必要性である. それゆえ, シビアアクシデントマネジメントは, 先に示した“設計基準を超えた”事象を考慮しなければならない. これは, めったに起こりえないことを発端として放射能放出に

まで至ってしまった安全システムに対する挑戦を意味する. この報告書では, シビアアクシデントマネジメントと確立された設計基準について, “適切な防護を合理的に確実に実施する”ための米国の法的要求に照らして再検討している. 安全系の完全な破損あるいはこれに対する脅威に対処する能力について, 事故防止, 破損への移行(事故進展の阻止), 並びに事故影響の緩和の観点から検討する. 深層防護やリスク情報に基づく洞察, またこれらを相互に補完する方法の重要性について, 最初に炉心冷却を話題とした際に議論された. 甚大な事故もカバー出来るような設計基準の拡大時に新たに追加すべき策について議論が行われ, そこでは深層防護と確率リスク評価を組み合わせて用いることが有効であると述べられている.

安全システムの実行の観点からみると, 福島第一の事故初期段階での原子炉の冷却システムや安全システムの時系列の動作が完全にはわかっていないとしても, その事故の教訓は大いに役立つ. この緊急時の事例では, 非常に厳しい外部からの力よって停電を伴い安全機能が稼働できなくなるような場合に対して, システム, 構造, 要素の安全性能を確保すること, 十分な放熱を維持出来ることが必要であるということを学んだ. 原発を持つ国々も同様に, NRC は事故の包括的な評価を行ってきており, 教訓に学ぶことを行い, 米国での安全性の向上を目指した改善案を提案してきた. [5] 米国は 2001 年 9 月のテロ以降, 既に, “大火災と爆発”後に安全機能を稼働させるための補完的な機能を B.5.b.requirement として発行され 10CFR Part 50.54 (hh) として成文化されている暫定補償措置のもとで確立している. これらの措置は安全システムへの脅威に対する防御のために現在適用されており, 活動はそれらの改善に繋がっている. オンサイトのシステム, オフサイトの移動可能機器, その他の事故管理機能の相互関係, 甚大な事故の管理インフラが極めて重要になっており, 全リスクアプローチが原子力の安全概念に取り込まれるようになると, それらは今後さらに重要なものとなる.

ヒューマンパフォーマンスや意思決定の重要性もまた, 福島第一事故から明らかである. この報告書では安全文化および安全管理の重要な分野について, 通常運転時並びにアクシデントマネジメント時におけるこれらの重要性を含めて論じている. 報告書では, 最後に放射線防護の観点から緊急時計画(Emergency Preparedness)の果たすべき役割並びに社会的政治的影響における公衆の信頼の重要性について分析している.

本報告の一連の推奨事項は, 第一に公衆の健康と安全の適切な保護を確かなものとする点は維持したうえで, その次に事故時の放射性物質の放散による社会への壊滅的な影響を信頼性を持って防止, あるいは最小化するために原子力産業界がなすべき事項を中心に据えている.

1.6. 原子力の安全概念

福島第一での複数の原子炉の事故は, 防護措置, 比較的ゆっくりと放射能放出, 3週間ほどの海方向の風などがあったおかげで, 放射能による健康被害がでるには至っていない. これらの事実が重なったことによって, 事故が甚大で管理が難しかったにもかかわらず放射能から人々を守ることができた. しかしながら, 3 つの原子炉の炉心は溶融し, 格納容器は失われ, 制御できない放射能が周囲に放出された. 燃料が溶融していない, 放射能の放出がないことを前提に作られた安全性基準はこの条件には合わなかった. さらに, 拡大した安全性のアプローチにおいては, すべての保護が必要で, 世界の原発の社会政治的な認可が必要である. この報告書に書かれているそのような手法は, 現実的で達成可能な原子炉および放射能からの環境保護策の改善という点で一致している. そのアプローチは, 既存の安全概念の上に成り立ち, 新たな安全概念を作り出すために世界基準の多機関からのサポートを実現することに焦点を当てており, これによってよりよい社会を築く.

原発の安全概念は安全性および信頼性を 50 年以上進化させ続けてきた. ASME タスクフォースは, 今日ある安全性の構造は, より網羅された安全性の構築のよい土台になると信じている. 次に示す新

たな安全概念で注目する点は，内的および外的な脅威，自然界からのもの人的なもの含め，すべてのリスク基準を考慮すること，そしてさらに人々の健康，安全および環境の保護をサポートすることである．

新しい原子力安全の概念

All-risk アプローチを使い，事故によって放出される放射能が原因となる社会混乱を防ぐための原発の設計，建設，操作，管理を確実なものとする計画，協調する実行力のあるシステム

新たな安全概念は，これまでのものを凌ぎ，放射能からの健康，安全，環境保護に焦点を当てている．それは，めったに起きることはないが起こりえる事象を全リスクアプローチに加えることによって包括的な安全性を確立でき，新たな安全概念をより強固なものとし，福島第一の事故を教訓に世界的な原発産業の発展に繋げるものである．

新しい安全性構造の必須項目は以下の通りである．

- 設計基準を超えるような事象を扱う機能
- めったに起こりえないような事象を考慮した設計基準
- 全リスクアプローチの利用，事故進行のいかなる過程でも炉心冷却を補償する
- 人の行動，阻止的なインフラ，指示，制御，事故管理，緊急時に対する準備の改善

（事故の）防止と影響緩和の能力強化がこの概念の基本である．新たな安全概念の確立において規制による要求の重要性を理解しながらも，ASME タスクフォースでは，その構造が規制以上のものとなるよう産業界には求めていく．産業界は安全を確保すべく，新たな安全概念の構築を産業界が引っ張っていくべきである．さらに，世界の核を保有する軍や規制当局のそれぞれの役割を理解しながらも，ASME タスクフォースは，現存の原発と新規の原発の間にある違いを考慮しつつ，新たな原子力の安全概念に述べられている原則が世界的に適応されるべきであると考える．

図1は既存の安全概念にどのように新たな原発の安全概念を構築するかを示したものである．設計基準を頼りにはするが，一方でめったに起きない事象に対応する追加策を講じる必要があり，これを成し遂げるために全リスクアプローチを使う．図は安全対策の発展を示している．設計基準に始まり，911（2001 年 9 月 11 日）以降に追加された防止対策と事故管理の改善，それに新しい原子炉の固有の安全性を追加，福島後の国際的な規制により安全性を向上させ，最終的には社会の混乱を回避するような協調したシステムになる．効果的な安全概念の構築に向けて取り組むべき課題の一つは，規制当局が福島以後の新たな安全基準を設け，産業界が社会を守ることを目標として，そこに更なる安全性を付加していくことである．このためには，産業界が指導力を発揮して規制当局，プラント所有者，運転会社，投資家を協調させていく必要がある．

ASME タスクフォースは，世界の原発産業が時期を逸することなく現在社会が望んでいる形態にあう新たな原発安全性を構築することを期待する．また新たな原発の安全概念には，法統治を強いるべきではなく，既存，追加の設計および事故管理機能の綿密な分析に基づくものであるべきと考える．この報告書の結論，提案が世界の原子力産業の意思決定者の対応の指針となり，また規制当局を支援し，規制当局から支持されるものとなることが ASME タスクフォースの目指すところである．

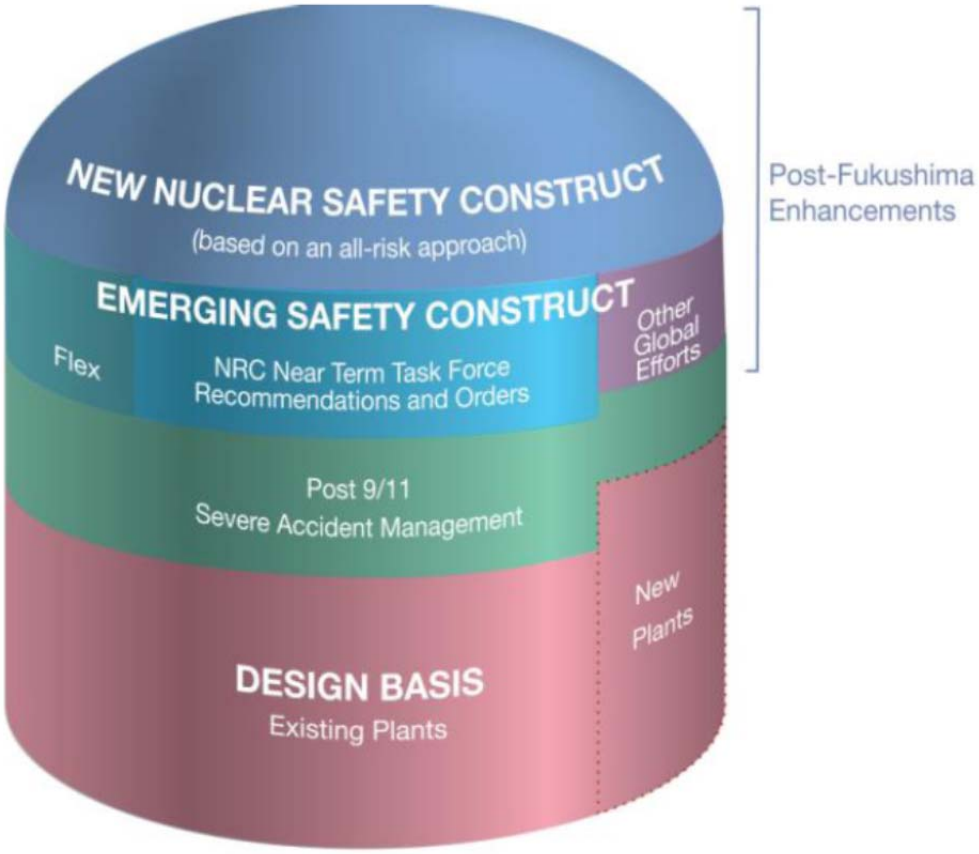

Figure 1 – Forging a New Nuclear Safety Construct

2. 原子力安全の歴史を振り返って

2.1. はじめに

原子核分裂は世界中で伸び続ける電力需要を賄うための重要な位置を占める成熟した技術である. 2012 年 3 月 30 日現在, 436 基の原子力発電所が 31 か国で運転されおり, 全電力使用量の約 13%を供給している. 多くの国では原子力発電で作られた電気に高い割合で依存している. ほとんどの場合には, 原子力発電所は経済的に, 高い信頼性で, 環境を汚染することなく, かつ安全に運転されている.

それにもかかわらず, 原子力は意見の分かれる技術である. 2011 年の東日本大震災と津波に対する一般的見解ー夥しい人名が失われ多くの家屋が破壊されたことは福島第一からの放射性物質の放出とは全く関係ないにもかかわらずそれが原子力災害と見なされたことーはその典型例である.

歴史的にみると, 人類は技術を受け入れて進化させる様々な機会に直面してきた. その発展形態は一貫しており, 予測可能である. 最初は大きな期待が寄せられ, 初期の失敗が続き, そこから学習し, 継続的な改善によって高いレベルの性能と安全性が達成されてきた. 幾つかの技術は予想を超えているが, 多くは下回っている. 同様に, 幾つかの技術は, 幅広く支持を受け長期にわたって社会のニーズに応えているが, その他は次世代新技術に置き換わられてゆく.

雑誌エコノミストの最近の記事は言っている,「問題なのは技術の持つ本質的要素ではなく, 技術が今日の社会, 政治, 経済的状況に合わせられるかどうかである. もし, 技術が永遠の成長をもたらす形で人間社会に適合していたら, 技術のパイオニア達が描いた夢以上の成功をもたらしているであろう.」[7]

過去 50 年に亘る原子力技術の応用分野の広がりは, 複数の小さな事故や少数の重大事故があったにも係らず成功事例のように見える. これらの事故は, 理解を促進させ, 事故から学んだ教訓は運転中のプラントの安全性や信頼性を高めることや新しいプラントの設計に貢献してきている.

なお, ここで述べている歴史的認識では, 公衆衛生と公共資産を守るために行われた偶発的な放射能物質の放出による被害の抑制や緩和を含むより高いレベルの安全性を求めることを急がなくてもよいと言っているわけではない. むしろこの報告書では, 偶発的な放射性物質の大規模放出の防止のためのより強力な手段を提唱している.

2.2. 複雑な技術のライフサイクル

今日までに社会的に貢献し幅広く受け入れられ成熟した他の技術のライフサイクルについて調べることは, たとえその初期に著しい困難があったとしても原子力にとっても参考となるものである. [8]

2.2.1. 教科書にある事例:ボイラーと圧力容器の歴史 [9][10]

ボイラーは 19 世紀の産業の発展を可能にした革新的な技術であった. それは, 船や機関車を駆動するための蒸気動力と製鉄所, 各種工場や木工所における原動力を提供した. 1800 年代の半ばから終わりにかけては, ボイラーの応用先は広がり, その容量も急速に大きくなった. 1890 年までには, 米国だけでも約 10 万台の商用ボイラーが使われていた. 当時は, ボイラーの設計, 製造, 運転に関する規定や指針が存在せず, 事故は頻繁に起こっていた.

1865 年 4 月 27 日に起きた蒸気船サルタナ号のボイラー事故は米国史上最大の船舶の事故の一つとして記録に残されている. 乗員乗客併せて 1500 名以上が亡くなった. これはタイタニック号の沈没で亡くなった犠牲者の人数にほぼ匹敵する.

この事故の後，数十年の間に生命や財産に危険を及ぼすほどの夥しい数のボイラー事故が発生した．1911 年，新たに選ばれた ASME 会長 Colonel E.D. Meier のリーダーシップの下，このような容認しがたい状況を改善するための実行可能な試みがなされた．Colonel Meier は，ASME という評価の高い独立した組織でしかも幅広い科学に関心を持った技術者の集団によって策定された専門的裏付けのある技術的要求は広く採用され，実施に移され得るものと考えた．このような考えの下，産業界出身のボランティア委員によって構成された小さな委員会によって最初の ASME ボイラー規格：「定置型ボイラーの建設および許容圧力に関する規則」が定められた．この規格はその後原子炉建設規格のもとになり，今日世界中で広く使われている．

1914 年に発行されたこの出版物は，ASME ボイラー及び圧力容器規格 (BPVC) へと発展した．今日では工業用および住宅用ボイラー，原子炉機器（1963 年より），輸送用タンクや種々の圧力容器の建設に使われている．何十年にも亘り BPVC は ASME の代名詞として存在し，ASME をして国際標準を定める組織に発展させることに貢献してきた．BPTC は米国内の 50 の州，カナダの各州，世界の 100 か国で法律に組み込まれている．

ASME の指針が実施された後は，ボイラーの運転圧力は急に上昇したものの事故の発生件数は漸次減少した（図 2）．本件は，20世紀のエンジニアリングが成した成功例トップ 10 の中に加えられている．これら一連の仕事は，多くの人命を救い，世界的な標準を生み出し，工学の幅広い応用分野における安全性を向上することを通じて社会に貢献した．

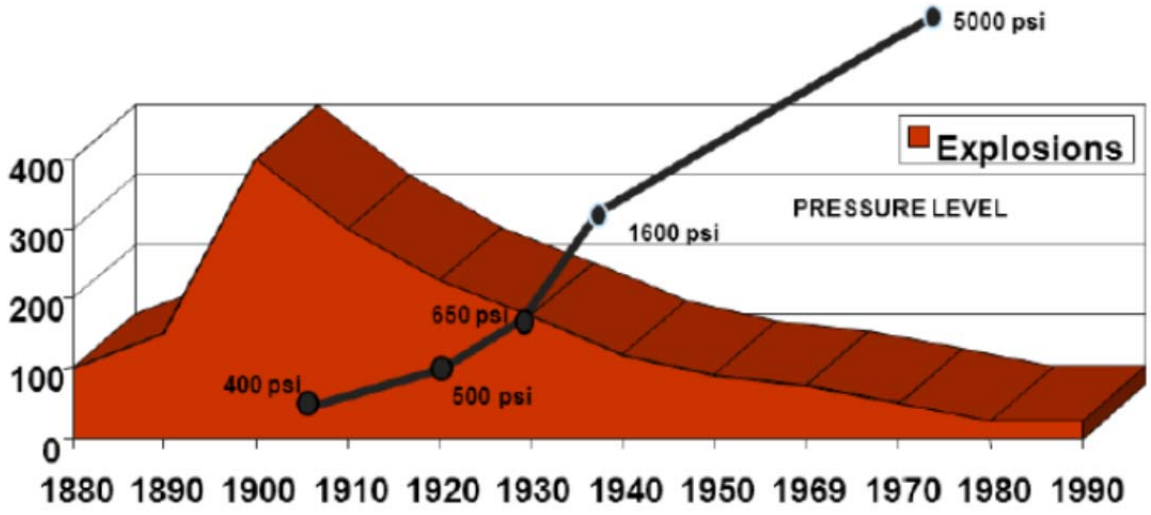

図 2　　米国におけるボイラー爆発事故の推移[1]

2.2.2.　他の非原子力分野の例

技術が自然に熟成してゆく過程は原子力以外の現代の工学の幅の広い分野における実例を通じて見ることが出来る．建築構造物や橋梁，発電と通信，航空・鉄道・自動車の分野での失敗も含めた様々な運用経験を通じて，成熟してゆく過程には共通点があることがわかる．

一例をあげると，商用飛行の安全性確保は，挑戦の歴史であった．未成熟の科学や技術の適用，政府による規制，戦時の軍事利用は発達を加速させることもあれば，乱用を招くこともあり，その結果，市民の疑念を呼ぶこともあった．このような問題に素早く対応することと同時に，性能の向上をめざした活

[1] 米国ボイラー圧力容器検査協会 (National Board of Boiler & Pressure Vessel Inspectors) 提供の統計による

動が続けられてきた. それは, 飛行速度や航続距離の向上やプロペラからジェットへの推進方式の進化などである. これらは, 可能性を高めることに貢献したが, しばしば事故を招いた. 他の技術と同様に, 航空機事故は最初, 増加するもののやがて収束し, 安全な飛行機に繋がり, 事故は減ってゆく. これは, 事故の教訓が設計や運行管理体制に反映されるからである.

航空機そのものに関する技術の発展に並行した航空管制システムの改善は, 図3[11]に示すように安全運航に大きく貢献した. しかし, 発生頻度はかなり低いものの致命的な事故は今でも発生している. なお, このような優れた状況が実現できていることの背景には 2001 年 9 月 11 日に発生したテロリストによる襲撃事件の教訓を反映させたこともある.

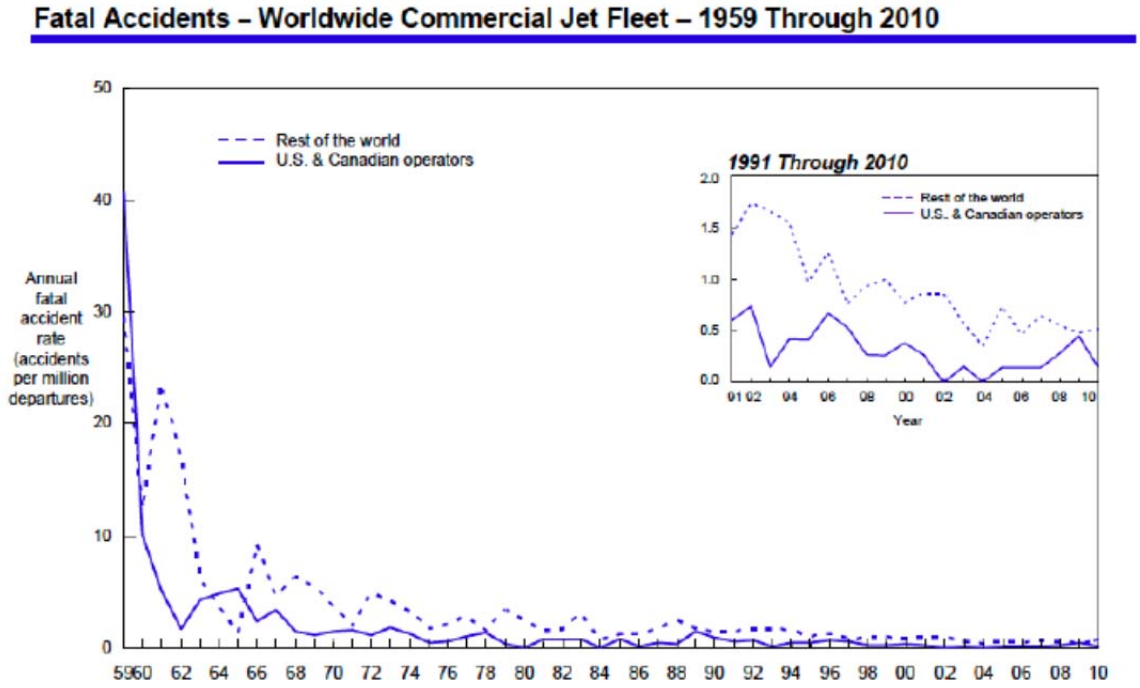

図 3　　民間航空機事故の記録

航空機の例と同じように, 主要なエネルギー変換技術分野においても, 性能向上や生産性向上を求める動きが絶えずあり, 重大事故を含む事故から学び改善するというサイクルが存在する. この学習サイクルは継続的なもので, 既存技術であれ新しい技術であれ, 成功と失敗の両面を持っていて, その両方が改善に貢献すると考えられている. 最近の事故の中には 11 人の死亡者が発生し, メキシコ湾および沿岸に広範な被害を出した Deep Water Horizon の事故と 8 名の命を奪い 38 件の家屋を壊したカリフォルニア州北部の San Bruno ガスパイプラインの爆発事故が含まれる. 特に, メキシコ湾の原油流出事故対策費用は嵩み, 社会経済的インパクトも大きく, 政治へも悪影響をもたらした.

世界中で伸びているエネルギー需要の増加に応えるためには, さらに進んだ技術と低コスト化技術の開発が求められる. それ以外に答えはない. 歴史は, このような技術は経験と協調努力によって得られることと, その結果更なる安全と信頼がもたらされることを語っている.

付録 A は, プラント稼働率, 発電コスト, 並びに他の性能要因を含めて関係する他のファクターを含めて原子力発電所の運転成績の経緯を示したものである.

2.3. 半世紀の間に原子力発電が経験したこと

上述の事例を通じて明らかになったように，新しい技術にも成熟技術にも，最も重要なものは経験であるということである．原子力技術にとっては，この半世紀の間に最も改善されたものは，安全に稼働させることである．これは世界中の運転中のプラントを安全に，高い信頼性で高効率にかつ経済的に運転するための日々の努力の結果である．もちろん，原子炉重大事故発生後には安全性に関する見直しが行われてきた．また，事故の教訓は，原子力のシステム設計やプロセス設計にフィードバックされてきた．

プラントの運転に対する産業界の関心とその結果としてもたらされた運転実績の改善は，原子炉重大事故の発生頻度が相対的に低くかったことの帰結である．しかし，それ自身，安全性の指標となっているだけでなく，経験から学習して改善できた結果の限界を示すことにもなっている．原子力の安全性はこの報告書の主目的である．事故から学ぶ教訓はとても大きい．それらについては後程紹介する．安全性向上と運転経験は深い関連性を持っており，原子力プラントの運転技術を成熟させることが重要である．それは，原子力技術の強さにつながる．

アメリカの大型原子力商用プラントの最初の 10 年間の運転実績は下記の様々な点からみて褒められるものではなかった．多くのプラントでは，建設コストと建設計画，プラント容量，運転コスト，運転停止期間，プラント内部での放射線コントロールは予定していたレベルに達していなかった．初めての大型商用原子力プラントの事故であった 1979 年に発生した TMI-2 の事故は原子力産業界に衝撃を与えた．

TMI-2 の事故を受けて，アメリカ国内のすべての原子力プラントの事業者と運転者はプラント運転の安全性，信頼性向上の必要性を述べ，その実現に向けて産業界組織を立ち上げた．INPO はアメリカ全土にある原子力プラントの運転状況を調査することを許可された．その目的は，優良事例について調査しこれを普及すること，運転状況改善のカギを握る問題点の把握と新たな運転性能改善の目標となる指標の提案であった．

事業者の団体である NEI や研究機関である EPRI 等の他の関連団体とも協調したこのような動きは原子力事業者に喜ばれており，結果として運転実績と安全性指標は着実に向上している．これとは独立した同時並行的な動きとして，NRC は 1990 年以降のプラントの運転上の安全性確保の動きに注目している．

図 4 に，幾つかの資料をもとに編集したアメリカ国内の原子力発電所のデータを示す．このデータは，プラント利用率（1 は 100%に相当）の改善と安全性の向上（1プラント1年当たりの安全上需要な事象の発生件数）が同時に達成されていることを示している．

産業界の努力と原子力技術の成熟によって達成されたこの数字が示すように，過去 30 年間の稼働率の平均が 60-70%であるのに対して，目下，アメリカ全土で稼働中の 104 基の原子力発電施設の最近 10 年間の稼働率は 90%に達している．

2.4. 原子力プラントの安全性

図 4 に示すように，原子力産業界は安全性に係る事故を減らすことに成功したことがわかる．保有量の上昇と重大事故の割合の低減は偶然同時に起きているわけではない．運転の詳細や規格基準に注意が払われたことや，産業界が事故の教訓や優良事例の情報を共有するように改善されたことが相まって安全性が継続的に改善しているのである．

船舶の推進，発電，核燃料サイクル，核兵器などを含む 60 年にもわたる原子力技術の大型プラントへ

の適用過程においては，多くの小規模事故は発生したものの大気中に夥しい量の放射性物質を放出させるような事故は少数であった．この好ましい結果は，逆に解析対象となる事故例が少ないことを意味している．それぞれの事故は，プラントをさらに安全にするための教訓と改善の手掛かりを与えてくれる機会でもある．

最近発生した福島第一の事故並びに地震と津波による炉心損傷を免れた近隣の原子力発電所での経験は，アクシデントマネジメント，教訓，対応について検討の機会を提供している．

表 1 は，1950 年以降に発生した主要な原子力プラント事故を纏めたものである．それぞれについて，事故の事象，原因と結果，事故から学んだ教訓が記されている．取り上げた事故は，原子力の安全性の立場から見て重要なものである．これらは，原因と結果が多岐にわたり，過去 50 年間に得られた代表的な教訓を含むものである．

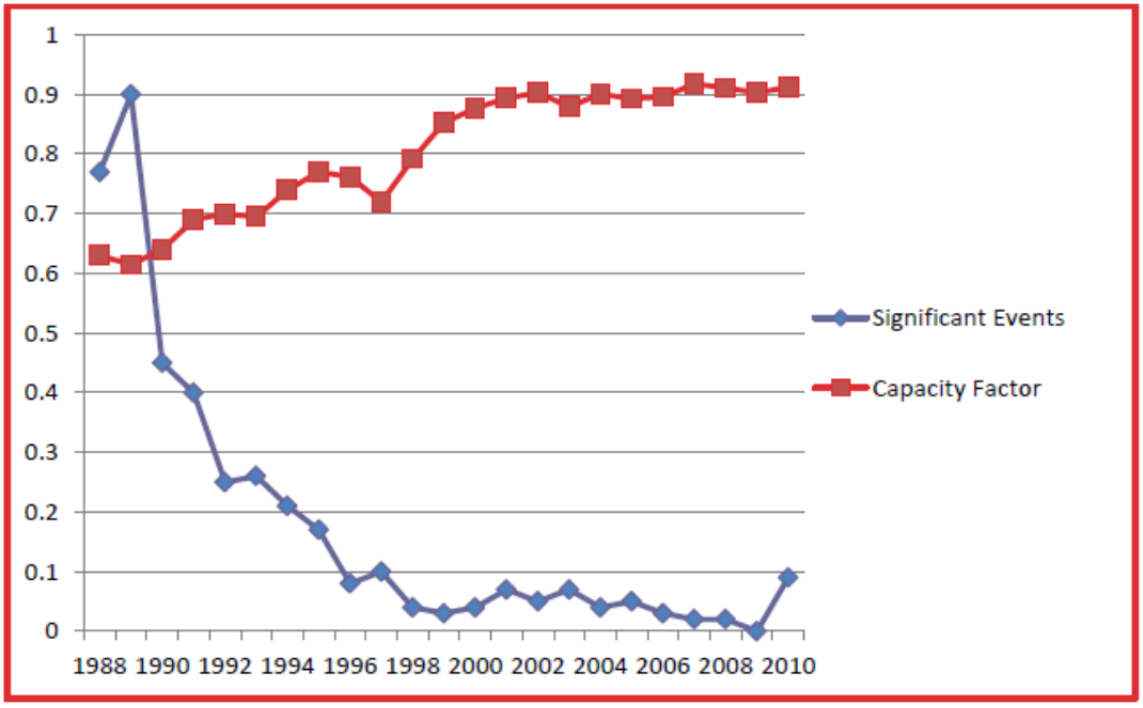

図 4　　安全上重要な事象とプランと利用率の推移

表１　　世界の原子力使用経験において特筆すべき出来事

日　時	事　象	原因と事象推移	重要な所産
1957年10月	**ウインドスケールの火災** 英国の核兵器物質生産炉	原因：　決められた安全領域を外れた運転と物理現象に関する理解不足，格納容器なし. 事象推移：　施設の破壊，敷地外の著しい放射能汚染.	安全文化と原子炉格納施設の改善
1961年1月	**U.S. Army SL-1における即発臨界と爆発** 米国の実験炉	原因：　運転員の過誤と注意不足，原子炉停止系の設計の誤り. 事象推移：　施設内の死亡3名；原子炉の破壊；敷地外の局所的な放射能汚染.	安全文化と原子炉停止系の改善
1975年3月	**ブラウンズフェリー発電所1号機の電気ケーブル火災** 米国	原因：　防火壁の空気漏れを点検しようとしたメンテナンス要員が持っていた火のついたロウソクによりケーブル展開室のフォームシーラントに着火. 事象推移：　ひとつの火災がいくつかの電気系統と安全系を全滅させた；原子炉出力モニタと非常用炉心冷却系が喪失；プラント制御系の重大な損傷．敷地内外における放射性物質の放出と人的傷害はなし.	建設工事の品質保証と検査方法の改善； 新しい連邦規制（10 CFR 50, Appendix R）による防火システムの改良高度化,
1979年3月	**スリーマイルアイランド2号機における冷却材喪失事故と部分的炉心溶融** 米国	原因：　リリーフ弁の故障が検知されず，そこにプラント状態の判断を誤り非常用炉心冷却系を停止するという運転員の誤操作が重なって冷却材喪失，炉心の過熱と部分的溶融に至った. 事象推移：　放射性物質の限定的なし基地外への放出（主に希ガス類）；負傷や健康被害なし；原子力に対する公衆の信頼，政治的な信用度が著しく損なわれた；施設の永久的な喪失；他の原子力発電所施設の運転，建設の許認可への壊滅的な影響，何十基という新規発注のキャンセルの要因.	訓練，緊急時対応手順，人間工学的側面，制御室の設計，計装，規制による監視，緊急避難計画などの広範かつ全面的な変更 米国の原子炉運転におけるエクセレンス達成のためのINPO (Institute of Nuclear Power Operation）の設立

表１　　世界の原子力使用経験において特筆すべき出来事

日　時	事　象	原因と事象推移	重要な所産
1983年2月	**セーラム発電所1号機での2つの原子炉トリップ用ブレーカーの故障** 米国	原因：　設備設計とメンテナンスに問題. 事象推移：　マニュアル操作による原子炉トリップ，損傷なし.	産業界全体を巻込んだメンテナンスの改善と規制強化（10 CFR 50.65)；下位機器の安全上の重要度分類の追加；トリップ後の点検と緊急時運転手順の強化
1986年4月	**チェルノビル4号機における即発臨界と爆発，炉心崩壊並びに火災** ソビエト連邦，ウクライナ	原因：　RBMK型原子炉の炉心設計の欠陥（正のボイド反応度を含む）；安全装置を外してプラントの設計基準領域外で試験を行うという運転員の過誤；格納容器の不在；緊急時対応の拙さ. 事象推移：　火災と放射線被曝による作業員の死亡；施設は破壊され，石棺で覆われる；欧州やベラルーシまでに及ぶ，制御されない放射能汚染．汚染地域からの336,000人[13]を超える人々の避難と移住.	RBMK型原子炉の設計変更；IAEAによるINSAG-3”安全原則”の発行. 原子炉停止系と格納施設の役割について規定. 独立した原子力安全規制機関が設置された国もある. 世界中の原子炉運転における整合のとれた標準とエクセレンスを促進するためにWANOを設立.
1999年12月	**ブレーズ(Blayais)発電所における洪水** フランス	原因：　激しい嵐と高波により防波堤を超えて水が敷地内に浸入，プラント内の電気設備と安全系が設置されたエリアが冠水. 事象推移：　外部電源，重要な給水系と緊急炉心冷却系の一部のみならずいくつかの安全系への電源供給が喪失；非常に深刻なニアミス事象.	EdFの全発電所の洪水に対する防護設計の見直し，システム全体を見渡した施設の改善.
2001年9月	**ワールドトレードセンター及びペンタゴンへのテロ攻撃** 米国	原因：　米国のインフラストラクチャへのテロ攻撃. 事象推移：　原子炉施設は明示的な攻撃目標ではなかったが，2001年9月11日の出来事は原子炉の安全にインパクトを与える可能性のある外的要因や外的事象に対する関心を高めた.	米国の原子力発電所における大規模な外部火災，爆発および他の外部自主への対処に関するNRC要求.

表１　　世界の原子力使用経験において特筆すべき出来事

日　時	事　象	原因と事象推移	重要な所産
2002年3月	**デービスベッセにおける原子炉容器上鏡の腐食** 米国	原因：　制御棒駆動機構のき裂からの長期間にわたるホウ酸水の漏えい；不適切な検査とメンテナンス. 事象推移：　原子炉圧力容器上鏡を貫通する直前の大きな欠損；最小限の耐圧機能しか残っていなかった.	産業界全体での安全文化の改善；数多くの原子炉容器上鏡の交換.
2003年4月	**パクス(PAKS)２号機での燃料要素破損** ハンガリー	原因：　使用済み燃料プールの皮膜除去（de-scaling）のために用意された特別容器内に臨時に置かれた使用済み燃料集合体の不適切な冷却. 事象推移：　燃料の過熱による被覆管の著しい損傷，特別容器の破断，核分裂生成物のプラント内での放出と敷地外への僅かな放出．敷地外への重大な影響は認められず.	プラントスタッフの適正さを欠いた技術知識と機器供給業者の不適切な業務が認識された.

表１　　世界の原子力使用経験において特筆すべき出来事

日　時	事　象	原因と事象推移	重要な所産
2011年3月	**福島第一発電所1~4号機において全電源喪失，炉心冷却喪失，及び複数号機における炉心溶融をもたらした外部事象** 日本	原因:　マグニチュード9.0の地震による津波でプラントが冠水し完全な全電源喪失に至る；耐津波設計の基準の不適切さ（重要機器の耐水性に関する問題，非常用可搬機器が即座に接続出来なかった問題など）. 事象推移：　１～３号機における炉心溶融；水素爆発；圧力容器と格納容器の破損；放射性物質の敷地外への制御されない大規模な放出（歴史上最大規模の希ガス類の放出，Cs137の放出はチェルノビルの1/4から1/2と推定される）[14]；約11万人の緊急避難；施設の破壊；汚染土壌の除染と清掃を含む大規模な除染と施設解体；長引く原発の停止；世界中で生じた政治的な悪影響と公衆の信頼の喪失.	世界中の産業界，政府機関，規制当局によるいくつもの調査；産業界，規制による広範な安全向上の取組み；ASMEレポートにおける新しい原子力安全概念の提案.
2011年3月	**東日本大震災の地震と津波による他の10基の原子力発電所の被害** 日本	原因：　福島第一5, 6号機，福島第二1~4号機，東海第二，および女川1~3号機において，程度の差はあれ上述の地震と津波による外部電源喪失，施設の浸水，および機器の破損損傷が生じた. 事象推移：　これら10プラントは全て安全を確保したが，緊急時の能力と安全余裕をある程度失った；完全な回復は地域のインフラ壊滅により妨げられている.	上述の広範かつ詳細な評価. 教訓を更に活かす機会. 日本の全てのプラントは現在冷温停止中, 運転再開に関する政府の決定待ち.

2.5. 原子力事故から学んだ教訓に基づく行動

個別に見ても集合的に見ても表 1 に取り上げた事故は，原子力工学とその安全性に関する理解の促進，プラントや機器の設計，マンマシンインターフェイス，運転員の訓練と実行手順，規制，緊急時対策等の改善に繋がってきた．また，事故の教訓は，「安全文化」という広い傘のもとにある安全に係る目には見えないものや，さらに高い次元のプラントの安全性基準に影響を与えてきた．

教訓を得る対象は原子力分野に限定されたものではないことに注目したい．一例を挙げると，ニアミスに分類されているいくつかの事例がそれである．また，2001 年 9 月 11 日に発生したテロリストによる襲撃は原子力施設とは全く関係していない．しかしながらこれらの事象によって，広範囲に亘る影響をもたらす可能性のある異常な或いは極端な事象に対して原子炉が脆弱性を有している可能性について規制者やオーナーは注目するようになり，結果として，更なる安全性の向上に繋がっている．

一方，運用経験を通じて得られた教訓は原子力プラントの設計と運転すべてに関係する．以下のような領域において，特に重要である．

反応度制御: 原子炉は比較的小さな容積を持つ空間の中で大量のエネルギーを操作しているもので，出力レベルが急速に上昇する可能性を秘めている．したがって，高い信頼性を持った応答性の早い計測制御系が必要である．SL-1 事故と Salem でのニアミスは，両方とも反応度制御に関する事故である．Chernobyl の臨界事故は不適切な反応度制御の結果がもたらした極端なケースである．

炉心冷却: 運転中の原子炉は大量の熱を発生させる．発熱量は徐々に減少するものの，炉が完全停止されるまでは0になることはない．残留熱除去システムと緊急炉心冷却システム（ECCS）は炉が停止したあとも炉心損傷を避けるために使われる．TMI-2 と福島第一の事故は，原因は違っているものの両方とも炉心冷却システムに関係した事故である．内的外的要因によらず，置かれた様々な状況下でも，安全を守る機能を維持することが将来の原子力事故を防ぐことに繋がっている．

放射性物質を炉内に閉じ込めること: 放射性物質の炉外への放出を未然に食い止める ECCS など安全性を守る仕組みがあるとはいえ，事故は市民や環境を守るための頑健な容器を必要とするレベルにまで進展する恐れがある．TMI-2 事故では，放射能を閉じ込める仕組みはうまく機能して，炉心溶融が発生していたものの，発電所の外に重大な影響を及ぼすことはなかった．これまでに，Chernobyl ほどの放射能による大規模汚染を引き起こした例はない．福島第一でうまく機能しなかった放射能を閉じ込める仕組みは大量の放射能の放出を許してしまい，その結果，重大な放射能汚染を引き起こした．

アクシデントマネジメント: 正常な運転とはかけ離れた状況下でのタイムリーかつ適切なオペレーターの行動は，炉心損傷を食い止めるにあたり大変重要である．有効なアクシデントマネジメントの実現には，すべての重要な過去の事故の経験から学んだ訓練と手順の習得が鍵を握っている．アクシデントマネジメントは，すべての主要な原子炉事故の要因となっている．

人間の行動: 人間は，原子力の安全性にとって常に関係する因子である．一覧表に挙げられた事故事例は，良い意味でも悪い意味でもプラント操作者や支援要員の資質，訓練，熟練，手順，判断，安全意識の影響を受けている．

緊急時対応: 重大事故においては，プラント運転関係者による事前準備及び実行と市町村関係者の関与が市民を守るための鍵を握っている．TMI-2 事故はこの点において欠陥があった．福島第一の地震と津波後のアクシデントマネジメントでは，意志決定に関する日本の階層構造が前例のないアクシデントマネジメントに対する障害となった．福島第一事故の結末は，極めて困難な状況に直面した場合でも有効な緊急時対応をとることの重要性を教えている．

2.6. まとめ

大きく発展を遂げた他の新技術と同様に，長年にわたり原子力は更なる安全と信頼性を目指してきた．多くの場合，原子力の運転という成熟したプロセスの中では，経験は事故やニアミスを含む実例を通じて蓄積されてきた．

福島における土地の汚染に繋がる放射能物質の周囲への放出と現在進行中の除染と回復は，これまでには認識されていなかった原子力安全に対する新たな視点をもたらしている．それは，社会政治学的，経済学的インパクトである．

他の成熟した主要技術と同様に，稼働中のプラントでの経験を通して学んだ内容は今後の原子力プラントの設計において深い意味を持つ．多年にわたり原子力産業に係る団体は次世代原子炉の設計要件や設計概念に関与してきた．NRC は既に次世代炉の設計を認証しており，目下，米国を始め世界中での半世紀にわたる原子炉の運転経験をもとにしたほかの設計について検討を行っている．

既存のものに対しても新規のものについても，正常運転状態と事故状態の両方について原子力プラント設計，規制，運転の観点から継続的な安全性強化が必要である．今後の安全性向上の方向は，重大事故の可能性の更なる低減と事故の影響緩和の可能性を追求することである．

3. 設計基準を超えて

3.1. はじめに

福島第一原子力発電プラントの事故を取り巻く規制に関する技術的な議論の中で最も重要な部分のひとつは，原子力発電プラントに関する設計基準および法規の下で適切な安全防護を保証するという役割である．議論の焦点は，複数の原子力発電施設のための設計基準（それは津波に耐えられるようにするには不適当だったものではあるが，）を超えるような条件を作り出した東日本大震災と津波によって作成された事象を，設計基準として位置づけるために何がなされるべきことかということである．[16][17][18] 本章は，原子力発電プラントの安全設計を保証するための現在のアプローチの主要な特徴をレビューする．設計要求条件には歴史的に重要な遷移もあったが，それらの多くは原子炉の事故あるいは他の重要な出来事から学んだ教訓を活かしたものである．さらに，福島第一の事故の結果，他のものによって提案された設計基準を拡張するための変更に関する他の（NRC 以外の）提案も挙げている．設計要求事項と設計基準の重要性に注目した米国のアプローチ法に焦点を当てているが，本章は，世界中のほとんどの原子炉施設に適用可能である．何故ならば，世界中の大多数の軽水炉にはいわゆる「設置国独自(country of origin)」と呼ばれる規制要件が用いられているが，それらは NRC の枠組みの許認可に基づくかあるいは同様のものだからである．米国の安全保証へのアプローチと，欧州で使用されている方法には重要な差がある．欧州では，原子力発電プラントはそれらの安全条件が継続・維持されていることを保証するために，10 年毎に調査・審査される．NRC の枠組みは，原子炉の運転のための条件として，プラントが継続的に安全要求事項を満足していることが運転のための条件である，という前提に基づいている．

原子力発電事業は，米国議会が平和目的に限って「原子力の開発と利用」に参加者を幅広く募って促進させ，「共同防護と安全保障」及び「一般公衆の健康と安全」に従って拡張された「原子力エネルギー法【AEA】」方針に修正され 1954 年に発行された．[19] 後に，この活動のもうひとつの変更は，原子力の産業利用に関連した損害・危害から公衆衛生，安全，環境の防護の保障のための責任を原子力エネルギー委員会【AEC】（今は AEC に代わって NRC が担わされた．大衆の健康と安全分野における委員会の責任に関して制定された法の解説は，AEA の 161b に書かれている．つまり任務は，「共同防護と保障を促進するか又は生命又は財産に対する危険を最小にすることが望ましいので，特別な核材料，原材料，および副産物材料の所有と使用に関する管理を行うための基準と指針を規則と規制命令によって確立する．」ことである．従来の規制と規制活動は，一般的には，「適正な防護」の枠組みの中にある．つまり，委員会の活動は，「共通防護安全保障に従うものであり，公衆の健康と安全を適切に防護する．NRC の規則と規制は，「適切な防護の合理的な保証」という意味において，又は「公衆の健康と安全への過度の危険」はなく，又は，「公衆の健康と安全の切迫したリスク」の下で一般に制定される．[20]

適切な防護の問題は，議会，委員会，と多彩な組織と関係者，並びに裁判所によってレビューされた．1987 年に，コロンビア特別巡回控訴裁判所によって画期的な裁定が出された．それは，「適切な防護のレベルは，ゼロリスクのレベルである必要はない．ゼロリスクのレベルが達成されることは殆ど考えられない．」というものであった．その裁定の中で控訴裁判所は，法において「適切」という語を使うことによって NRC の側にある程度の自由裁量を認めることを示唆した．法廷はまた，「適切な防護」とは，原子力エネルギーが完全にリスクゼロであるべきという意味ではない，むしろ一定程度のリスクは受容される，と述べた．この裁定はまた，リスクがゼロであるような物はない，原子力を含めて全ての技術に関してあるレベルまでのリスクは社会に受け入れられる，といった現実に即したものであった． [1]

原子力は，政府と産業の間の権威と責任を明確したうえで，種々の点で他の工学技術の規制制度を遥かに凌ぐ厳格な規制を受けるエネルギー生産方式になっていると言える．政府全体（議会と NRC）は産業界における原子力の安全性に対する期待値を設定し，一方で産業界（プラント製造メーカ，所有者，運転会社）は，原子力プラントの設計と運転における安全確保について一義的な責任を負う．

この枠組みの中で，政府と事業者は放射性物質の環境への放出事故を防ぎ，事故拡大を防止するという両方を行うために，原子力プラントの設計における特徴を改善することで，放射線被ばくリスクを管理してきた．長年にわたって設計改善が行われ，進歩した技術を適用し，社会―政治的要素において新しいプラントに対する安全性のレベルを高め，運転経験を蓄積してきた．改善は科学的進歩，運転経験及び公共政策と調和して継続された．

3.2. 現在までにどのような設計が確立されてきたか

3.2.1. 設計基準

米国の原子力発電プラントの設計を規制している基本的な安全要求条件は，10CFR50 の付録 A「原子力発電プラントの一般設計判断基準」に規定されている．一般設計判断基準において具体化されている安全原則は，世界中の原子力発電プラントで広く見倣われている．10CFR50 の他の章では，一般設計判断基準を満たすための，より具体的な判断基準が与えられている．

原子力発電プラントに対する設計基準は，各プラントの運転認可の根拠となる「安全解析報告書(Safety Analysis Report, SAR)」に記載されている．この報告書に含まれている技術的な情報は，「そのサイトおよびその周りの領域に起こった歴史的に報告された自然現象の最も厳しいものへの適切な配慮及び歴史的データが蓄積されている限られた精度，質と時間への十分な安全裕度を考慮して」プラントサイトにおける地震学，気象学，水理学及び地質学的な特性を含んでいる．SAR にはまた，包絡的な設計条件を決める，予め決められた条件の下でのプラント性能に関する安全評価の結果が含まれている．これらの安全評価によって，原子炉炉心が冷却可能な形状に保たれること及び原子炉冷却系あるいは原子炉格納施設に放出される放射性核分裂生成物質の核種の漏れが限定的であることを示すことが要求されている．加えて，サイト特性，人口統計学的及びプラント設計の組合せが，原子炉冷却系から原子炉格納容器へ放射性物質のある程度の漏れが生じるような事象において個々の敷地外に対するある程度の放射線に晒される判断基準に合致することが示されねばならない．

SAR に記載される設計条件は以下に代表される条件（構造物にかかる荷重，温度，圧力，寿命予測，放射能レベルなど）である．

- 通常運転（例えば，出力運転，原子炉停止，燃料交換）
- 予測される運転事象（例えば，原子炉トリップ，水撃）
- 発生頻度の低の事象又は過渡事象（例えば，外部電源喪失，給水喪失）
- 設計基準事象（例えば，洪水，地震，テロ行為による損傷）
- 設計基準事故（例えば，冷却材喪失，大きな反応度変化）

設計基準には，それぞれの原子力発電プラントに対して，決められた範囲の事象に対する事故の防止と事故の緩和に関する要求が含まれる．全ての設計基準事象に対して，核分裂反応過程の停止が可能であること，原子炉を未臨界状態に維持すること，炉心冷却が可能であり炉心形状が維持されること，必要に応じて冷却材の補給が可能であること，並びに炉心損傷を伴う事故時に環境への放射性物質の放出が限定されるよう，炉心から放出される核分裂生成物質を格納構造内で管理出来ること，

が要求される. ある設備又は建物の設計基準事象に関する情報には, 例えば, 達成すべき特定の機能と, その設計の上下限を決める特別な値あるいは値の範囲が含まれる. これらの条件は, 設計上想定すべき事象の進展(前述のリストを含む)を予測するために工学的な解析又は実験から求められたものである. 数十年間にわたる原子力発電プラントの運転経験の教訓として重要な点は, 設計条件の維持を担保するために厳格な形状(輪郭)管理がプラントの運転寿命を通して適用されることである.

TMI-2 で事故によってもたらされた変化のひとつに, それまでは完全には探究されていなかった設計基準の別の一断面, 即ち「事故(の進展)阻止」が認識されたことがある. この用語, 「(進展)阻止」は, 設計基準内の緊急状態から, 設計基準外のより厳しい状態, 即ち燃料の過熱, 被覆管の膨張と破裂, 及び自己触媒作用による被覆管の酸化, といった過程を通じた核分裂生成物の放出と炉心溶融につながる事故シナリオの進展を止めることを意味している. TMI-2(また福島第一)では, 炉心損傷防止のための安全装置の破損時点と炉心損傷による放射性物質放散の緩和が必要になる時点との間に比較的長い期間(数時間から数日)があった. もし運転員が事故の進展阻止のために他の設計上の特性を使う訓練を受けており, そして事故の進展の間にこの設計上の特性が利用可能であれば, この期間に全炉心溶融及び 1 次冷却系の破断の寸前まで行った事故を阻止することが可能だっただろう. この手法で事故の進展阻止を図れる可能性は, TMI-2 から学べる重要な教材であり, 第 6 章で議論する「アクシデントマネジメント」として知られるようになった.

福島第一の事象推移が明らかになるまでは, 放射性物質が発電所外に大量に放出される前に炉心損傷を止めるために, 利用可能な装置をーそれがいかなる状態であってもー最大限に利用するというのが普通の前提条件であった. 不幸なことに, 全電源喪失にまでに至ったために, 福島第一では据え付けられた(電源)装置のほとんどが使用不能になった. しかしながら, これらの事象は, 福島では顧みられなかったが, 2001 年 9 月 11 日のテロ攻撃の後に米国の原子力発電プラントでなされた安全対策が潜在的に有効であることを明らかにした. この対策は, 電源喪失を含む究極の状態にあってさえも, 事故の進展を阻止するために特別に誂えられた設計上の特性(具体的には代替設備)を追加することであった. 福島第一で明らかになったように水素の発生やプラント内の放射線レベルが高くなるといった複雑な要因があるので, 大規模な炉心損傷への進展を阻止する防止策は, 深層防護としての炉心損傷の結果の緩和とともに最も優先順位が高い. この観点において, 炉心損傷の阻止は, 炉心損傷の防止とその結果の緩和との間の遷移領域で生じる.

NRC は, 原子力発電プラントが, 適切な防御が合理的に保証された下で運転されるよう, 規制制定し安全計画を実行させる権限を与えられている. NRC の適切な防護基準は, 主として運転経験に基づき, 実用的に適用されてきた. 適切な防護に関する工学的基礎は, 「施設・設備は, 公衆の健康と安全への過度なリスクなしに運転されることが出来る」と, 10 CFR 50 の付録 A の諸言で述べられている. また, その諸言はまた, 付録 A に含まれている一般設計判断基準は「未だ完成していない」と述べている. 付録 A の不完全な部分のいくつかは, TMI-2 と福島第一で起こった事故(いわゆる共通原因破損と事象の組合せ)に関連したものであるから, この状況は是正されるべきである. これらの要因のいくつかに着目した改定は, 後述するように NRC と原子力産業界が検討している. リスク情報活用に関連する判断基準を含めて, 付録 A を完成させるために必要と思われる事項についての取組みも必要である.

これまで, NRC は安全上の理由と欠陥を修正するために設計基準を拡張してきた. また, 科学と技術によって不必要な保守性が低減する機会が提供されてきた. 新しい知識と経験は組み合わさって変更の説明根拠を与える. さらに, 規制対象外の領域において, 施設への適用を NRC が認めた産業界の自発的なプログラムによって改良が行われることもある. 最初に設計基準外と判断され, 後に NRC による規制の対象とされた事象の例として, スクラム失敗時に予期される過渡事象 (ATWS), 全交流

電源喪失(ステーションブラックアウト), 水素抑制のための設計上の特性の喪失, 大規模な火災あるいは爆発に対する対処する能力の喪失等がある. 以下で議論されるように, 福島第一で明らかとなった出来事は, 設計基準を拡張するための候補として, いくつかの設計対応の必要性が示唆している. これらの設計対応のいくつかは, 既に新しい第 III+世代の軽水冷炉の設計に反映されている. そのうち, 設計認可のための規制審査が完了し, ウエスチィングハウス社製 **AP1000**®[2] PWR の設計証明書を参照して認可が下り建設が米国内の 2 サイトを含む 4 つのサイトで始まっているものがある. [21]

過去において, 設計基準を超えると判断された事象には様々な名称が与えられてきた. TMI-2 における事故の前では, それらの事象は, クラス 9 事故と呼ばれ, 新設プラントの許認可に伴う環境影響評価書の枠外と判断されていた. それは, そのような事故の発生確率が小さすぎると考えられたからである. TMI-2 で起こった部分的な炉心溶融の後, NRC はクラス 9 事故の用語を放棄し, 環境影響評価書の中で過酷事故の結果(放射線の影響など)を考慮し始めた. 同時期に NRC は第 III 世代炉と III+世代炉を含め, まだ机上の設計段階の原子炉設計における過酷事故の考慮を要求し始めた. NRC が, 規制手続きの他の領域でリスクに対する洞察を持ち出すようになって, 設計基準の対象範囲の変更は続いた. その領域は例えば, 運転中のプラントの"リスク情報に基づく"保全プログラムに対する要求である. 3.2.4 節でより深く議論されているように, 今や設計基準を超える事故は確率論的リスク評価 (PRA) の主題となってきた.

1980 年代に NRC が設計基準を超える事故への考慮を拡張する一方で, 原子力プラントにおける十分な安全とはどの程度の安全かを定義するといった, 受入れ可能なリスクを決定する努力も進めてきた. それは困難な取組みであった. 何故なら, 社会が受け入れ可能なリスクが何で構成されているかを測る普遍的な尺度を持ち合わせていないからである. むしろ, リスクの受容は, その活動の重要性の認識, そのリスクを負うことが任意かそうでないか, 歴史的経緯, 技術及び技術者に対する信頼度, 並びに規制と法的枠組みに等によって変化する. リスクの受容に関するこの変動性は良く知られていることであり, おそらくこれからも変わらないだろう. [22] かくして人々はいくつかの日常的リスク(交通事故)は受入れ, 他(大地震又は洪水に弱い地域に住む)を無視し, いくつかの自由意思でリスク(喫煙)を取り, そして他のもの(崖から飛び降りる)を拒絶する. 福島第一の事故事象や他の大災害への現代社会に生きることの任意でないリスクに対して, 一般公衆はそれらがもはや安全であると考えられない, あるいは環境上受入れられないと見做されるまでは寛容である, という反応を示すものであり, それらのリスクが有する実際の害の可能性とは関係しない場合がある.

原子力発電プラントに対するリスクの許容レベルを定義する以前の試みは, 早期の死亡被害リスク又は晩発性「がん」の発生リスクのような潜在的な健康被害に基づくものであった. 相対的リスクも許容度の尺度として提案されてきた. 例えば, 落雷による死と放射線誘発「がん」による死を比較する, 或いはリスクの指標としての発生確率と結果の積を比較するようなものである. しかしながら, ヒューマンエラーが不可避であり自然には固有の予測不可能性があるために, 予測を上回る事象は稀には生じる. 小さいが有限(ゼロでない)の発生確率を持ち高い影響を及ぼす稀な事象の不確かさに適用出来るような方法で許容可能なリスクを定義することはとても難しい仕事である.

このような困難にもかかわらず, TMI-2とチェルノブイリ事故の後の1988年, NRCは, 何が原子力発電プラントに対する許容可能なリスクを構成するものであるか, についての判断の一助とすべく安全目標に関する「政策宣言」を公表した. [23] この宣言に示されている2つの目標は, 他の原因によるリスクとの比較に基づいて個人と社会に対する健康リスクを位置付けている. 即ち, 原子力発電プラントの運転による公衆健康被害は, 他の要因によってもたらされる同様の健康被害の千分の一とすべきであり,

[2] AP1000 は Westinghouse Electric Company LLC, 系列会社の登録商標であるので, 不正使用は禁止である.

原子炉事故による環境への放射性物質の大規模漏えいの全平均頻度は，10^{-6}／炉年以下とすべきであるとしている．NRC はまた，「それらの健康と安全の被害は別として，過酷な炉心損傷事故は原子力の安全性に関する公衆の信頼を損ね，原子力産業界に対する更なる不安定と予測不可能性をもたらし得る」と述べている．

10 年後に，IAEA は既存のプラントに対しての過酷炉心損傷発生の目標頻度を 10^{-4}／年以下とすることを含めて，原子力に対する安全目標を確立するように進めた．[24] IAEA はアクシデントマネジメントと緩和策がサイト外への大規模放出の確率を少なくとも 1/10 は低減出来ると期待している旨を述べている．IAEA はさらに，将来プラントでは過酷な炉心損傷事故の発生確率を 10^{-5}／年未満とする改善目標を達成出来ると期待し，従って「放射性物質の早期大規模放出に繋がる事故シーケンス」を現実的には除外出来る，としている．

EPRI は多くの国の代表者と共同で新型軽水炉用の「使用者要求条件書」を策定したが，これが現在展開されている安全な新型炉の設計に繋がっている．[25] EPRI のプログラムは，投資保護と呼ぶ概念を用い，炉心損傷事故を 10^{-5}／年以下，大規模放出の可能性を 10^{-6}／年以下としている．このプログラムは，受動的安全性の特性を備えた第 III+世代が備えるべき能力を規定している．例えば，少なくとも 72 時間は，交流電源無し，運転員の操作無しでも適切な炉心の冷却が可能であることなどである．

世界中の原子力の運転者は（福島第一の事象を含み），公衆の健康と安全性の観点からそのような安全目標を達成するか，あるいはそれを超える産業界の能力を示した．しかしながら，環境への放射性物質の大規模放出を伴う過酷事故を防止し，事故によってもたらされる莫大な社会的，政治的及び経済的コストの発生を防止する，という観点からはまだなすべきことが残っている．このような結果を回避することが原子力の社会的な受容性に関して極めて重要であることが示された．例えば，福島第一の事故後数週間のうちに各国の上級の原子力安全専門家の特別国際チームが IAEA の事務局長に対して「人々の健康と安全及び環境への脅威となることを回避出来る原子力発電のみが社会に受け入れられる．」と助言した．この目標を達成するためには，原子力産業が，チェルノブイリと福島のような，大量の放射性物質が敷地外に放出されるような事故がこれ以上起きないことを保証する努力を倍増することが必要である．[26]

過酷な外部事象に対して原子力発電プラントの更なる能力の改善を行うことについては幅広い所見がある中で，設計やアクシデントマネジメントへの変化のためのあるべき基準とは何かというような重要な疑問が出てくる．1988 年に，新しい規制の発効に対する制限を確立するために，NRC はどのような条件の下で「系統，構造，機器又は施設の設計の改良又は追加（つまり設計基準の改良を要求）」を要求するかを示すバックフィット規則 (10CFR50.109) を発行した．[27]バックフィット規則は，委員会が適切な防護のために何が求められるか，また「安全性の向上」を構成するものは何か，といった点を委員会がどのようにして決定するかを示している．バックフィット解析の中で考慮すべき事故の被害は NRC と産業界のガイダンス文書に記載されているがそこでは，健康被害だけでなく敷地外の土壌汚染，「経済の効率的な機能性」への悪影響に着目することの必要性が議論されている．[28]

このレポートで提案している新しい安全概念は，NRC の規制下で公衆の健康と安全の適切な防護のために何が必要か，検討されている規則の変更が NRC のバックフィットルール下で正当化され得るものかどうかという近視眼的な議論の上を行くものである．むしろ，現在及び将来の一般社会による受容を確かなものとするために原子力産業界が手にしている安全対策の全体に対して，新しい安全概念が明確な目的の下で期待通りの成果を与えるという構図が描かれる．その意図は，全リスクアプローチの枠組みを透明性のある方法で提供することにある．すなわち，目的を明確にし，社会的リスクをきっ

ちりと説明し，安全対策の全体的，統合的な効果を正しく理解出来るものにすることにある．ASME のタスクフォースはそのような枠組みを創りあげて実現するためのコストは，次の2つの観点から小さいと考えている．すなわち，(1) 広範囲の環境への放射性物資汚染という，社会的，政治的及び経済的に受け入れ難い事故のコストとの関係において，(2) 既存のプラントの運転と産業界の成長が社会の受容性と公衆の信頼の失墜によって強い影響を受ける場合に失われ得る経済的便益との関連において．

3.2.2. 深層防護

3.2.1 節に述べているように，原子力発電プラントに要求される設計基準は世界中の原子力安全性の基準のもとになった 10CFR 50, Appendix A（付録 A）においてほとんど具体化されている．付録 A に記載されている構造物，系統及び機器の品質要求項目は，「原子力プラントと燃料再処理プラントに対する品質保証基準」という 10CFR50 付録 B に記載されている．設計基準に加えて，付録 A 及び B に含まれているもう一つの基本的安全原理が深層防護である．

深層防護の概念は 1960 年代の初期の実証炉の頃から原子力発電プラントの設計基準の中で適用されてきが，実は深層防護の法的な定義はない．むしろ，それ自体は「規制要求ではなく，概念，アプローチ，原理あるいは哲学である」と考えられている．[29] 単純に言うと，深層防護の原理は以下に示す公衆の健康と安全を守るための 4 つのレベルを備えることを求めている．

1. 原子力プラントは，極端な自然現象及び人的災害を含め，運転寿命中に経験すると考えられる通常及び異常状態の範囲では故障や破損しないよう設計されていること．
2. 起因事象や初期破損を検知出来，設計基準内事象に引続く燃料破損が生じる前に原子炉を停止出来るよう，冗長性と多様性を有するサポート系が装備されていること．
3. もし最初の 2 つの防護レベルが失敗しても環境への放射性物質の放出を制限し，それにより事故の影響を緩和するよう，緊急炉心冷却系及び原子炉格納システムを含め，冗長性と多様性を有する緊急装置が装備されていること．
4. 大量の放射性物質の放出を含め破滅的な事象の公衆への影響を限定するために，原子炉は遠く離れた場所に設置し，緊急時計画を前もって用意しておき，地域及び地方自治体と一緒に訓練を行なっておくこと．

深層防護について別の見方をするとそれは4本足の椅子に似ている．原子力発電プラントが運転されているときは常に上述の4本の足が全て適切に用意されていなければならない． 1本の足が欠けても，プラントは 4 本の足が全て揃うまで停めなければならない．NRC は以下に示すように，深層防護が設計基準を超える事象に対する対策を含んでいることを認めてきた．[30]

> 「深層防護の概念は，（原子力産業界及び規制側の）公衆の健康と安全を保障するという道筋の中心部分であり，それは個々の装置を超えて考えるべきものである．とりわけ，高品質の設計，製作，建設，検査及び試験が求められる；加えて核分裂生成物の放出に対する多重の障壁；冗長性，多様性を有する安全設備；更に（事故対策の）方策と戦略；最後に，地方自治体と連携した，避難，退避及び予防薬（例えばヨウ化カリウム錠）の管理を含む緊急対策準備，このようなアプローチによって予期される事態と予期出来ない事態に対処する；実際には失敗の可能性も考慮している．NRC の深層防護は近年，リスク情報の活用と性能ベースの意思決定といったダイナミクスにより強化されてきた．」

数値化されたリスク評価に基づく洞察が深層防護の原理に追加されたことによって，設計基準に対する決定論的手法を補強している．このリスクに対する洞察は PRA を通して得られる．原子力産業界に

よる過去 30 年にわたる検討の基本的な結論は，深層防護は必要であるが，適切な防護を保証するには十分ではないということである．つまり， PRA の結果を反映した設計でなければそれが適切であると判断することは出来ない．福島第一の事象に照らして，この結論をもう一段階進めるために，ASME タスクフォースはセクション 3.2.4 節に述べるように，フルスコープの PRA の使用を含めて，シビアアクシデントの社会的，政治的および経済的損害の回避を可能出来るよう全リスクアプローチを実現することが基本的に必要であると考える．

3.2.3. 深層防護を達成する決定論的手法

決定論的手法において，原子力プラントの（構造物，系統或いは機器の）特性に対する設計基準は，（事故を）制御或いは緩和することを意図した条件に対する有効性の分析によって決められる．設計に際して考慮すべき条件，解析手法，及び許容基準は，安全系（例えば，緊急炉停止，原子炉の冷却等）については規制当局により前以て決められている．また，非安全系設備に対しては，プラントの所有者によって決められる．米国においては，規制当局と所有者の守備範囲に関するこれまでの区別は，10CFR52 の要求条件に従って行われた第 III 世代及び III+世代炉の設計において曖昧になっている．

現在運転中のプラントの設計において決定論的手法により決められた設計基準事故と事象には，一般に次がある．

- 単一起因事象
- 保守的な仮定とモデル
- 単一故障と外部電源喪失
- 過酷な炉心損傷は想定しない

この一般的な手法の例外としては，いくつかの事故と過酷な自然現象との組み合わせ（例えば，冷却材喪失事故 (LOCA) という設計基準と設計基準地震とを組み合わせる），現象の理解を助けるため行われる現実的な条件による解析等がある．設計基準事故に対する許容クライテリアは，限定された燃料破損あるいは燃料破損しないことを要求しているので，現在運転中のプラントの格納容器は設計基準事故の結果と無関係に決定論的に設計されている．かくして，福島第一の格納容器の設計においては，

- 設計基準 LOCA の影響緩和が成功した場合の条件と関連した設計圧力，
- 炉心の核分裂生成物質のかなりの割合が格納容器内へ放出されるとの仮定に基づく耐漏えい要求，
- 崩壊熱およびその他熱源の除去によって決まるベント能力；

原子炉容器を貫通するような熔融炉心を想定した設計はなされていなかった．10CFR52 の下で認可された新しい設計では，過酷な炉心溶融と炉心溶融物質（コリウム）が炉容器を貫通する可能性に対処する方策が求められている．典型的には4つの対策がある．

1. コリウムを薄く広げて冠水させることにより冷却する（或いは，炉容器の外側冷却による溶融燃料の容器内保持機能により，溶融炉心物質を原子炉圧力容器内に保持する）
2. 水素が発生したらそれを燃焼させる
3. ガスを発生させて格納施設の圧力上昇をもたらす炉心―コンクリート反応を最小化する

4. 溶融コリウムが格納施設の上部に広がってホットスポットが生じ，局所的な過負荷が生じることを防止する

エンジニアは，橋とか飛行機のような他の分野でも設計裕度を設定するように，原子力発電プラント設計においても決定論的手法により設計裕度を用意している．設計裕度は，荷重又は他の条件に関する包絡的な予測値と，その条件によって破損が生じる可能性が無視できなくなる点との距離である．設計裕度は原子力安全の議論においては安全裕度と呼ばれるが，摩耗とか破断（例えば腐食，配管の繰り返し疲労）と同様に，不確実さと未知の現象を考慮する場合に役に立つ．

決定論的手法による原子力発電プラントの設計においては，設計手法，設計クライテリア，規格規準，並びに運転制限の選択において安全裕度が含まれている．運転状態が，制限値の設定とプラント運転条件の計測に含まれる不確かさも含めて制限値内に保たれることも，同様に重要である．

これまでの運転経験から，特に共通原因故障とヒューマンエラーの領域において，設計基準の設定に関する決定論的手法に限界があることが明らかになっている．一つの例は，TMI-2 の設計における決定論的手法の失敗である．TMI-2 では，加圧器における漏えい高を検知するためのレベル計の読取り値を運転員が誤って解釈したことによって，緊急炉心冷却を時期尚早に停止してしまったが，このようなヒューマンエラーに対する設計上の考慮が十分ではなかった．決定論的設計手法において広く使われている単一故障基準が，セーレム原子力発電プラントの原子炉停止系の共通原因故障につながった補修ミスのリスクを予測出来なかったこともう一つの例である．

決定論的手法のもう一つの限界は，設計基準事故の進展過程と影響の保守的解析に大きく依存している点にある．過度に保守的な解析は，過程で生じる現象を隠してしまうようなところまで，事故進展の予測を単純化しがちである．例えば，NRC と原子力産業界による事故後の調査によると，LOCA と高圧炉心溶融シーケンスに関するより現実的な解析を行い，そのような解析の結果の解釈の訓練を行なっていれば，プラントで起こっている事故の診断に際しての TMI-2 の運転員に対する助けになっていたはずであり，事故が炉心溶融に至るのを阻止し，或いは少なくとも炉心溶融の拡大を限定する機会を与えていたはずだった，ということが明らかになった．[31]

3.2.4. 深層防護を達成するための確率論的アプローチ

1970 年代に原子力産業界が運転経験を獲得するにつれて，原子力発電プラント数の増加によるリスクを評価する必要が生じた．AEC は，当時運転していた2つの代表プラントの安全性に関する確率論的研究を進めた．これらの代表プラントによるリスクと，他の技術や自然現象によって社会にもたらされるリスクを比較するという考えだった．その研究は原子炉安全研究として良く知られていた．[32] それは原子力発電プラントの最初の PRA 研究を含んでおり，決定論的手法による設計の重要な強みと弱点を明らかにした．

- 原子力発電のリスクへの最も重要な寄与要因は，現在運転中のプラントの大半のほとんどの安全系の設計要求のベースになっている大規模 LOCA ではない．むしろ，リスクへの主要な寄与因子は，例えば同時に或いは連続して生じる複数の機器又はシステムの破損損傷を伴う小規模 LOCA と外部電源喪失など，より生じやすいと考えられる事象の組合せである．ある意味でこの結果は決定論的設計手法を担保することになった．その反面，この結果は単に限られた事象に焦点を絞ることは適切な安全性を保障するものではない事を示していた．

- 原子炉安全研究においては運転員の行動の重要な役割，特に運転員の時間的にクリティカルな行動にも光が当てられた.
- 単一の原因によって生じる多重故障，すなわち共通原因故障によるリスクへの実質的な影響がある. これは既存プラントの設計では考慮されておらず，計画的な管理を通して決定論的フレームワークで対処されているに過ぎない.

PRA は現在米国で運転中の原子力発電所の設計当時には使用されなかったものの，これらのプラントの許認可変更やプラント改善のための意思決定には用いられるようになった. これには設計基準を超える事故を防止し，進展を阻止し，そして影響を緩和するための設計や運転の改善がある. 3.4 節で議論するように，PRA は脆弱性を探求し，設計変更によってそれを修正し，設計基準を超える事故のへの応答を評価し，そして達成された安全性のレベルを明らかにするという，第 III 世代と第 III+世代炉の設計プロセスの必須の部分である.

原子炉安全研究とその後の研究における PRA においては，安全評価に際して決定論的手法とは根本的に異なるアプローチが採用されている. その核心において，PRA はプラントの建設されている状態及び運転されている状態に関する統合的なモデルの開発（新型炉の設計も対象である）を通じて，どのような不具合が生じ得るか?それはどの程度発生しそうか？その結果どのような影響があり得るか？という3つの基本的な質問に回答する事を試みるものである.

PRA 手法は Table2 に概観するように，事故シナリオ，システムと人間との失敗の原因，そして不確実性の扱いの観点において決定論的手法よりも包括的である. [33]

表 2－安全評価のための決定論的と確率論的アプローチの比較」

考慮すべき事項	決定論的アプローチ	確率論的アプローチ
事象解析の範囲	・ 事前に定義された事象の組 ・ 設計基準事象が他を包絡すると仮定	・ 事前に決められた規則に縛られない
含まれる失敗シナリオ	・ 発生を仮定する最悪の単一故障・損傷	・ 確率論的に考えられる無制限の故障・損傷
共通要因故障	・ 特別な扱いの要求により排除されるという仮定	・ 経験に基づいて全ての機器を確率論的に考慮する
人為的活動	・ 手順化されている場合は有効に働くと仮定	・ 肯定的（成功），否定的（失敗）人為活動の両方を確率論的に考慮する
不確実性の取扱い	・ 包絡性の仮定に依存する	・ 平均的（現実的な）の推定及び不確実性の定量的評価に焦点を当てる

PRA の評価は上がったり下がったりしてきたが（例えば，1980 年に原子炉安全研究において TMI-2 の事故シーケンスが支配的リスク寄与因子の一つであることが示されるまでは，議会は NRC による許認可手続きにおける適用を許していなかった），今では PRA は決定論的手法に対する価値ある補完的手段となっている. 1980 年代を通して NRC は PRA を用いて TMI-2 事故から派生した種々の問題を研究し，1988 年には個別プラント検査(IPE)プログラムの下で全てのプラントに対してプラント特有の

PRA を行うように要請した. [34]

産業と NRC は IPE から安全に関する重要な考察を得, 1990 年代の中頃までには運転及び許認可の判断に際しての PRA の使用は全く一般的となった. 1995 年に, NRC は深層防護の原則, 設計基準に対する決定論的手法, 及び PRA の使用を組合せた政策声明文書を出した. それによれば, [35]

> 「PRA 技術の使用は, 最新の PRA 手法とデータによって可能な全ての規制事項にまで拡大すべきであり, NRC の決定論的アプローチを補完し, NRC の伝統的な深層防護の哲学を支えるようにすべきである. 」

いわゆる「リスク情報の活用」と呼ばれている規制の意思決定方法は, NRC の規制ガイド 1.174 で具体化されており, 今では以下のように規制活動の中の多くの局面で使用されるようになっている. [36]

- 保守のために機器設備を使用停止にすることに関連した運転上の意思決定
- 供用期間中検査と試験プログラムの最適化
- NRC と許認可活動の優先順位の決定
- 許認可修正案の作成と承認
- プラント運転を統括する技術仕様書の精緻化
- NRC によって摘出された安全性能上の欠陥の重要性の評価

リスク評価は, 今では異常状態及び極端な状態も下でのプラントの性能予測に基づいた安全に関する意思決定における不確かさを確認し対処するために利用可能な最良の手法と認められている. さらに, NRC の規制ガイド 1.174 と IAEA の安全ガイド INSAG-25[37]に記載されているように, 決定論的深層防護に基づく考察と PRA の結果を統合することによって, 安全に関するより強健な意思決定を可能とする. 過去の事故を振返り, 他の稀な事象の結果を予測した PRA の適用例を見て, ASME のタスクフォースは, レベル3(影響評価)解析を含めて全ての運転モード, 全てのリスクを対象とするフルスコープのリスク評価と決定論的手法を組合せた上で, 全ての原子力発電プラントについてより深化した深層防護を達成することが必要であると考えている. コミッショナーのジョージ・アポストラキスが主導する NRC のリスク・マネジメント・タスクフォースからも最近同様の提案がなされている. それは, フルスコープの PRA は, 安全性を測定するための好ましいツールであり, 実際的である限りどこでも適用すべきである, というものである. [38] さらに, ASME タスクフォースは原子力発電プラントの設計に対する決定論的な深層防護のアプローチとリスク評価と統合する方法の改善について国際的努力の継続が必要であると考えている. 最近の ASME と ANS による共同努力はその方向に沿った大事な第一歩である. [39]

加えて, 最新のリスク評価の改良を最大限利用して炉心損傷事故の確率を下げ放射性物質の環境への放出を限定するという目的のために, ASME タスクフォースは新設プラントに対する総括的で高いレベルの安全目標が国際的に合意されるべきと考える. しかし PRA で全てを理解出来るわけではない. それ故に, 全リスクアプローチは, 炉心冷却を確保し, 稀にしか起きないが生じ得る事象に対する放射性物質の大漏えいを防止するために, 技術者がシステムと活動を用意出来るよう常に問いかけをしていく必要がある. 東日本大震災の 1 周年の挨拶の中で野田佳彦首相は,「危機管理は我々に, '想定の外にあるもの'を想像することを要請している」[40] このような考えが新しい安全概念を構築するためには重要である.

福島第一の事故得られた深層防護の確率論的観点に関して, 新しい安全概念に関連する2つの重

要な考察がある. 第一に設計基準を超える事象は起こり得るということ. プラントを設計基準に従って設計し運転することが事故を回避してくれると考えるのは不十分である. 不確実性が大きい場合には, 事故の進展阻止と影響緩和の追加的な可能な方策を用意しておくべきである. いわゆるクリフエッジ効果の可能性を秘めた特別な事象に対しては特にそうである.

第二に, PRA は設計基準を超えるプラント特有の条件に対する対応策を見出して策定するための効果的な道具であるという点である. 例えば特定のサイトに対する PRA によって大地震と津波のような稀ではあるが生じ得る自然事象のリスクを個別或いは組合せて評価出来る. このような評価が, 稀ではあるが生じ得る事象に対する防御対策の適否に関する決定論的評価と組合せて行われて初めて, これらの潜在的な事象がサイトに対する主要なリスク要因になり得るか否かの判断に繋がる. さらに, このような評価によって考え得る炉心損傷シナリオの同定と前以て計画しておくべきアクシデントマネジメントと事故進展阻止対策を決めることが出来る. そのような事前措置によって可能性は低いが厳しい結果を生む事象の推移を基本的に変え, それによって原子炉燃料の損傷を防止し, その後に起こり得る環境への放射性物質の放出を防止する事が出来る. このアプローチは既に多くの国で採用されているが, 伝統的な決定論的手法によるプラントリスクの評価が完全ではないことによる深層防護のギャップを認識するためには全ての国で採用されるべきである.

3.3. 福島第一から学ぶべき教訓を反映して設計をどう変えるか —安全概念の誕生—

東日本大震災の発生によって福島第一の 1～4 号機で明らかになった安全機能の欠陥は, 固定或いは可搬型機器という相違はあるにせよ現在運転している原子力発電プラントにおいて適切な設計対応が有益であることを示している. このような設計変更の総合的な目標は, 極端な外部事象によるリスクを減らし, 設計基準を超える事故に対処する能力を改善することである. すなわち過酷な外部事象の潜在的が大きな影響を及ぼし得ることについての我々の理解と解析能力を考えると, 原子力発電プラントのこれまでの安全概念は改善されるべきである.

福島の出来事から学んだ重要な教訓の一つは, 稀な自然現象の可能性と厳しさを予想することは難しいという点である. 従って, 燃料の破損と放射性物質の敷地外への大規模放出を防ぐ手段として, 単に従来の設計基準を見直すだけでは十分ではない. 地震や洪水のような自然現象の規模と頻度を予測する能力は向上してはいるが, 不確実さは常に残っている. 過酷な自然現象による設計基準を超える事象に対処するための段階をもう一つ追加することによって安全性は向上する.

欧州と日本では, 個々の新設及び既設計プラント及び使用済み燃料貯蔵施設を対象として, 厳しい外部事象によるリスクを減少するための設計変更が評価されている. そのためにこれらのプラントの設計基準において考慮されている事象, 特性および事故過程の再評価が行われている. この再評価は「ストレステスト」と呼ばれており, 欧州では完了し日本では進行中である. 米国では, NRC の福島事故に関する短期対応タスクフォースの推奨と産業界による福島対応の改善努力に基づいて, NRC と産業界が同様の道を辿りつつある. [5] NRC は, とりわけ次のことを見出した.

> 「最新の確率論的リスク評価技術によって基盤を与えられ, かつ必要に応じて修正されてきた長年にわたる委員会の深層防護の思想は, 規制の枠組みを体系化する主要な原理として役割を果たし続けるべきである. NRC のタスクフォースは, 設計基準を超える事象に対する明示的な要求を含めることによって深層防護の哲学の適用性が強化され得ると結論している. NRC のタスクフォースは, 高品質又は特例扱い(special treatment)の標準の適切な組を伴った, “拡張された設計基準”の要求事項を確立すべきであると結論付けている.

福島第一事故に応じて NRC がとった設計に関する対応には, 正式な規則策定の手続きを経ない命

令という形をとった短期的変更命令と規則策定の手順を踏んだ長期的な規則発行がある. これらの変更は表 3 に列挙しているように, 運転中及び新設プラントに対する設計に関連した改良を考慮したものである. [41]

表 3ー福島の事象によって提案された改良項目ー緊急的安全概念

事故防止対策	進展阻止対策	影響緩和対策
地震と津波の組合せに対する設計	全交流電源喪失に対するより良い対処能力	多様な格納設計に対応した強化ベント
大津波と他の極端な外部洪水に対する設計	インフラ喪失の可能性への配慮(輸送, コミュニケーション等)	格納施設内外における水素燃焼
使用済燃料冷却の改良	大規模火災と爆発に対応出来る設備機器	汚染水の貯蔵
内部溢水に対する設計の改良	代替炉心冷却経路	指揮命令管理センターの改善
地震＋火災及び地震＋洪水に対する設計	代替電源接続手段	緊急時データの取得と伝達の改善
最終除熱源の改善	代替ポンプ能力と給水源	格納容器ベントのフィルター或いは等価な対策

2011 年 12 月 15 日に, NRC コミッショナーは「福島の教訓に応じてなすべき施策の優先順位付け」に関する検討をスタッフに指示した. [42] 委員会は, 適切な防護基準に関するそれまでの解釈を調整するのではなく, バックフィット規則の下でいくつかの新しい要求を考えていくことを選んだ. 恐らく, バックフィット規則をこのように適用する背後には, 事故の進展阻止と影響緩和対策のコストと便益のバランスが正当化出来るか否かの判断に際しての放射性物質の外部への漏えいによって生じる全コストの考慮がある. 主として敷地外への放射性物質の放出による社会的に深刻な被害の防止のために体系立った考慮が求められるとするならば, 新しい安全概念としてここで提案しているように, 追加した設計に関する完全な評価に際して個々の原子力発電プラントにおける全モード, 全リスク, レベル3を含むフルスコープの PRA の実施の必要性を認識することが重要である.

2012 年 2 月 17 日, NRC スタッフは福島第一の事故によって明らかになった短期的に必要な安全性の増強策に関する命令を委員会に提案した. [43] 2012 年 2 月末に過半数の委員がこれらの命令を承認した.

これと並行して, 米国産業界は運転中の全てのプラントに追加的なアクシデントマネジメント機能を備える提案をした. それは「FLEX」と呼ばれ, 6.6 節に記載されている.

福島第一の事故を反映した変更を加えるというNRCと産業界のこのような努力は, 1 章で述べた「新たな安全概念」の重要な柱になるものである. しかし, 委員会は「深層防護とリスク考慮のバランスを適切に保つ防護のための論理的, 系統的で, 首尾一貫した規制の枠組みを確立するべき」という NRC の短期課題タスクフォースの推奨にはまだ対応していない. NRC の運転管理部門の部長は, 如何にこの推奨に沿った向上策を実現するかについて, 2013 年 3 月までに NRC スタッフから委員会に対して選択肢と推奨事項を提示すると発言している. [44] このように, このレポートの執筆時点においても,

福島第一の事故の結果としての安全に関する完全な枠組みは出ていない. しかし, NRC と米国産業界の努力は, 現存する安全の枠組みをしっかりと補い, 事故によって出て来た多くの問題を解決するためのより良いアプローチを提供している. 本レポートにおいて提案している新しい安全概念が提供するように, 粘り強さ, 協調性, 完璧さがこのような改善の圧倒的に重要な目的として加えられるべきである.

3.4. 新しい原子力発電プラントの設計

新型炉の設計者は, 交流電源が無い場合の炉心冷却の信頼性向上など福島第一の事故から学んだ教訓の幾つかに対応する安全性の改善策を既に取り入れている. 運転中のプラントについて, 多重故障や設計基準を超える事故に対する検討も深めている. 加えて, 全ての新型炉の設計において運転枠組み, プラント配置, プラント設計, 安全系の能力及び過酷事故に対する緩和特性を知るために, 設計過程のひとつとしての PRA の実施が要求される. 全ての新設プラントは燃料装荷前にサイト特有の自然現象と内部ハザードに関するプラント固有の包括的な PRA を実施するよう要求されることになるだろう. 新設プラントは, 事故防止のための設計対策を改善し(例えば, 共通原因故障の可能性を減少させ, 複雑さを縮小し, 検査性と保守性を増し, 受動的安全特性をより多く使用し, マンマシンインターフェイスを改善し, 情報技術の使用を拡張する), 放射性物質の外部漏えいの可能性と影響を減少させるための設計特性(例えば可燃性ガス制御システム, 原子炉キャビティへの拡散と冠水の対策, 原子炉冷却系の減圧). を備えることになる. 新設プラントの運転開始後にはこのような革新的設計の有効性を改善するために運転経験のフィードバックが必要である.

TMI-で事故の後, 新設炉に対する NRC の規制要求は過酷事故に対してより完全な対応を要求するために修正された. 現在 NRC は設計承認の申請に際して設計承認環境報告書 (DCER, Design Certification Environmental Report) の提出を求めている. [45] NRC は DCER に「承認申請する設計における過酷事故の緩和対策に関する代替設計(SAMDAs) のコストと便益の評価, 及びその代替設計を採用しない理由」を記述する事を求めている. [46]

将来のプラントについては, この論文で描いた拡張された設計基準の形をとり, 第 III+世代プラントの設計において既にある程度と実現されているように, 同種のプラントの設計基準を維持するためにこれまで以上のことがなされるだろう. 世界原子力協会 (WNA) の CORDEL (Cooperation in Reactor Design Evaluation and Licensing) プログラムはこの目的等のために新型炉に適用される原子力規格基準の国際的調和の達成を目指した活動を行なっている. [47] このような活動は, 航空機産業のように, 各国の設計者, 規制当局, 及びその他の組織の役割に関する国際的な合意形成に繋がる可能性がある.

3.5. まとめ

運転中の原子力発電プラントの設計基準は公衆の健康と安全の観点から原子力産業に役立ってきた. 運転中のプラントの設計基準は, 原子力産業にとって公衆の健康と安全に関する基本的な戦略そのものだったが, 現在までに世界中で積まれた何千炉年という運転経験は設計基準を超える安全性を改善する機会を提供している. そして, そうすることで新しい安全概念の方向に発展する. 確かに, 設計基準を超え著しい放射性物質が環境への放出に繋がるような, 巨大な社会的, 政治的及び経済的な損害を与える可能性がある事象は稀ではあるが起こり得る. 既存及び新設の原子力プラントに対して, 福島第一の経験に基づいた全体を俯瞰する新しい安全概念は未だに明らかになっていない. 必要なのは, 全リスクアプローチを用いた, 炉心溶融と広範囲にわたる外部汚染を防止又は最小化するための過酷事故を防止し, 事故進展を阻止し, 影響を緩和するための客観的な基準であろう. そのよ

うな基準は，深層防護のレベルを上げ，かつリスクを減らすための追加的な安全対策で補強された歴史上受入れられる設計基準の上に構築されるべきである．

たとえ新設プラントの安全性が進化したとしても，研究開発によってその安全性を改善していくという機会は追求し続けるべきである．そのような研究には，燃料設計の改善；防護障壁の強化；受動的，能動的安全系の信頼性向上と適用可能性の拡大；並びに過酷事故シナリオ時の燃料，原子炉，及び格納施設の挙動のモデル化がある．5 章から 8 章において議論している問題に対して重要な社会科学的課題（緊急事態における民間及び政府機関の機能と人の信頼性の改善など）は，自然科学の課題（洪水や地震のような自然現象による災害など）と同様に更なる研究に値する．

4. 事故の防止と炉心冷却: 主要な安全戦略と優先すべき安全機能

4.1. はじめに

3 章で述べたように原子力発電所の安全は事故の発生を防止し，可能であれば事故の進展を阻止し，最後の手段として核分裂生成物の放出を最小化するという事故の緩和からなる深層防護の考え方に依拠している. この 3 層のうち事故の防止は中心的な戦略であった. それ故，炉心冷却は圧倒的に重要な安全機能である.

この事は繰返し言及するに値する. 原子力発電所において最も重要な安全機能は原子炉炉心の冷却である. この機能は原子炉がどのような状態であれ（通常運転，燃料取替のための計画停止，通常運転時の異常，事故からの回復，或いは炉心溶融状態等）確保されなければならない. 原子炉炉心がどのような状態であれ，運転員はいかなる手段を使ってでも躊躇することなく炉心の冷却を続けなければならない.

この章では，軽水炉の炉心冷却の手段とその歴史的に重要な転換（中には原子炉事故やその他の重要な事象からの教訓によるものもある）を振り返る. 福島第一事故を受けた炉心冷却機能の改善に関する提案も含まれている. この後の議論では軽水炉に焦点を当てることになるが，炉心冷却の重要性は全ての炉型にあてはまる.

原子炉炉心は原子炉圧力容器の中に位置し，圧力容器は原子炉冷却系（一次冷却系とも呼ばれる）の一部を構成している. 炉心には燃料集合体があり，運転中にここで核分裂連鎖反応が生じて熱を発生する. 典型的な軽水炉の燃料集合体は，低濃縮ウラン酸化物ペレットをジルコニウム合金の被覆管に収めた長さ数メートルの燃料棒から構成されている. また炉心は，必要なときには原子炉を緊急停止させ，また，出力を増加・減少させるための制御棒，燃料と制御棒・燃料棒への冷却材の流れのガイドを保持する種々の構造材を含んでいる. また炉心は種々の計装系の一部である検出器（例えば熱電対や中性子検出器）を装備している.

軽水炉の中ではウラン原子（主に U235）の核分裂によって高放射性の核分裂生成物が出来る. 核分裂生成物の中には原子炉の運転中に崩壊するものがあり，崩壊の際に放出される熱エネルギーは核分裂過程によって発生する熱とともに炉心から持ち去られる. 停止の際に原子炉内にある核分裂生成物は崩壊を続け，熱エネルギーを放出し続ける. 原子炉停止直後の崩壊熱は原子炉が停止の前に運転されていた出力レベルの約7%である. 従って 3,200 MWt で運転されていた原子炉の停止直後の崩壊熱は 224 MWt となる. 崩壊熱は停止後指数関数的に減少し，停止後の最初の1時間以内に停止前の出力レベルの約 2%となり，1日以内に 1%そして36時間後には 0.5%となる. それでも崩壊熱は炉心冷却の観点からは数週間以上は非常に重要である. 停止後の燃料冷却の失敗は燃料過熱に至り，その後の燃料溶融に至り，そして蒸気中での酸素と燃料被覆管のジルコニウムとの接触による大量の水素ガスの発生をもたらす.

4.2. 最優先すべき安全機能としての炉心冷却への認識の高まり

この項に要約されている歴史的情報は，ASME タスクフォースメンバーの経験と AEC の初期の多くの安全専門家を輩出した NRC の原子炉セーフガードのアドバイザリーコミッティ(ACRS)の長年のメンバーであったロサンゼルスカリフォルニア大学のデイビッドオクレント機械工学教授の影響力のある出版物とに基づいている. [48]

最重要の安全機能としての炉心冷却の出現に関する事実関係の歴史的な再整理は新情報，新技術そして運転経験から成る原子力発電プラントの設計ベースが時間とともにどのように進化してきかを再

度示すこととなる. 深層防護を備えた設計特性の進化を理解するために有益な別のレファレンスはマサチューセッツ工科大学で発展した. 安全系は, 原子炉・格納容器設計のタイプ, 通常時運転系, 工学的安全特性そして特別な設計特性により, 深層防護に対する寄与に応じて体系化される. 世界中に設置されている西洋設計の運転中軽水炉はこのように対処されている. [49]

1950年代初期の発電用原子炉の安全性をみたとき, 設計者は制御されない反応度の逸脱を含む事故に特にとらわれていた. このような事象は燃料溶融, 炉心構造の損傷そして原子炉1次系圧力バウンダリの破損に至り得る原子炉出力の突然の上昇の原因となる. ;原子炉冷却材バウンダリの喪失は炉心溶融に至る. 原子炉停止後の核分裂生成物の放射性崩壊に伴う熱の不十分な除去によって生じる炉心過熱・溶融に対しても配慮がなされた. この頃の早期時代では, サボタージュもシビアアクシデントの原因の可能性として考慮されていた. 従って, 1978年に10 CFR 73.55の序章とともに発電プラントに対して防護手段の伏線が加えられ, 2001年9月11日の出来事の後に追加的防護手段が制定された. [50]

最初の発電用原子炉は何らかの原因で燃料溶融が発生したとしても住民への危害は数マイルの限定的な距離で防げるほどに十分に小さく, 原子炉は従来型の建物に設置されていた. しかしながら, 原子炉サイズの増大とともにサイトを電力需要のある人口密集地の近くとするニーズが高まり, 公衆安全を確実にするためには距離だけでは不十分となった. これらの事情により, 燃料溶融事故が起きた場合でも放射性核分裂生成物を閉じ込めるに十分に強固な格納建屋の導入に至った. 強固な格納建屋に施設された最初の発電用原子炉は, 原型的な潜水艦を進化させた原子炉で, ニューヨーク州ウェストミルトン近くの大きな鋼製球殻の中に施設された.

最初の商業用原子力発電プラントはペンシルバニア州のシッピングポート原子力発電所である. それは加圧水型原子炉(PWR)で, 原子力エネルギー委員会によって建設され, ドゥーケン電燈会社によって運転された. シッピングポートと民間により建設された最初の3基の原子力発電プラント(ドレスデン1号機, インディアンポイント1号機, フェルミ1号機)の格納容器は同一設計である. これらのプラントの熱出力レベルは約200から700MW未満であった.

1956年, ペンシルバニア州のバークヒッケンルーパー上院議員は, シッピングポートプラントの安全性についてAECに質問した. 臨時のAEC委員長ウィラードFリビー博士の答弁の一部を示す. 我々の規制下では原子炉を発想し, 設計した科学者及び技術者によって特定の原子炉についてあらゆるハザードの可能性に対して完全な評価がなされず, サイズ及び目的用途が考慮されていないいかなる原子炉の運転に対して許可は発行されない. そして, 安全でない量の放射性物質を周囲に放出させるに至る事故の発生の可能性を最小化するための設計・運転手順が段階毎に適切に確保されていない場合も同様である. 投資を抑えるためにあらゆる措置を講じ, 同様に公衆に与える不利益のポテンシャルを減少させるための原子炉所有者の財務上のインセンティブと, 放射能による過度の被ばくから公衆を保護することに対する委員会の法律的, 道徳的責任とは, 備えに対する考え方・評価の徹底さに特徴付けられる体系に帰着し, 産業史上特有である. AEC委員長の答弁はその後AECの安全哲学の3要素となった. すなわち, 起こり得るあらゆる事故を認識し, それらの事故を許容最小限の確率に抑え, それらの事故が起きた際には格納と隔離の組合せによって事故の影響から公衆を保護する. [51] これら3要素の2番目は事故防止として知られるようになった.

原子炉サイズの増大に伴い, 工学的設計の取組は, 炉心溶融事故時の核分裂生成物の環境への放出を十分に防護する格納容器の性能向上であることが明らかとなってきた. 低漏えいの格納容器への工学的変更を含め, 格納容器スプレイ系, 格納容器雰囲気浄化系, それらは全て工学的安全施設と呼ばれた. 当時の安全哲学は事故を防止すること, そして, それにもかかわらず事故が起きたならば,

炉心溶融事故時に放出される核分裂生成物を閉じ込め隔離することであった．これらの対策は公衆の健康と安全を保護するうえで，たとえ当時提案されていたサイトでそのサイズの原子炉炉心が完全に溶融したとしても十分であるとAECは判断していた．しかしながらその時代は間もなく終わった．

1963年，AEC規制スタッフは，南カリフォルニアのサンオノフレ原子力発電所1号機として建設提案がなされていた1347MWtの原子炉に対して，燃料の100%メルトダウン時に原子炉格納容器の漏えい率から算出される炉心からの核分裂生成物の全放出量が，AECが新たに制定した立地基準（10 CFR 100）を超えることから容認できないとの結論を下した．代わりに，スタッフは，いかなる炉心溶融をも6%に制限するために，原子炉に対して非常用炉心冷却系を備える必要があると述べた．同様に，1964年，1473MWtのコネチカットヤンキーの発電用原子炉の設計に対して，10 CFR 100への適合を確証するべく炉心溶融割合を制限するための安全注入系を追加する要求がなされた．その後間もなく，AECの要求に対する対応として，ACRSは1964年11月18日のレターを発行した．そのレターでは立地規制との一致を確実にするために，格納容器圧力を減少させるための工学的安全施設の種々の方法が扱われた．それは，炉心冷却と立地評価で考慮される炉心溶融割合の制限のための炉心スプレイと安全注入系に関係していた．ACRSレターではそれら炉心冷却系の有効性が評価され，技術上の条件設定が示された．[52]

1964年7月，ACRSはロサンゼルス近郊のマリブをサイトとして提案されたPWR原子力発電プラントのレビューについて報告した．ACRSレターでは次のように述べられている．巨大地震後の津波の影響に耐え得る能力について申請者と議論している．この地域で津波が発生した際の津波高さについてコンサルタント間での合意は得られなかった．申請者は格納容器の構造は，平均海面より50フィート（約15m）の高さまでの浸水では正常な機能が損なわれることはないであろうとの声明を出している．非常用所内電源の健全性についても，適切な高さに設置することと無停電電源系に対しては防水技術を用いることから確実であるとしている．非常用電源は容量的にも格納容器のスプレイ系と循環冷却系とを同時に運転するのに十分である．常用電源が全て喪失した状態下で停止時炉心熱を除去する能力は確保される．これらの対策が行われるのであればプラントは十分に防護されるであろうと委員会は確信する．[53] このACRSレビューにおける炉心冷却能力に関する言及は，非常用ホウ酸水注入系のみであった．マリブプラントはロサンゼルスに近過ぎることに対する住民の反対によって最終的には取り消された．

1965年以前，原子炉圧力容器破損の可能性は考えられないこととして考慮されず，原子力発電プラントに対する安全解析において考慮されなかった．炉心溶融に至ること，格納容器の喪失，そして放射能の制御されない放出が考えられていたにもかかわらずこのような破損に対する防護は準備されていなかった．商業用原子炉の大型化に伴い，安全保障におけるこのギャップは容認され得ないこととして広く認識されていった．1965年11月，ACRSはAEC委員長グレンTシーボーグ博士に対して原子炉圧力容器破損に対する十分な防護を確実にするための3つの実施可能な方法を提案した．①圧力容器破損によるミサイルに耐える格納容器設計，②圧力容器破損時に確実に機能する十分な炉心冷却又はフラッディングの備え，③防ぐことができない格納容器破損の際に環境への制御されない大量の放射能の放出を防止する方法の準備．[54] 重要な公衆討論の後に，AECは原子炉容器破損に対する懸念事項への取組として品質管理と破損防護の組合せを選んだ．品質管理の特徴は，ASME圧力容器規格に原子力の圧力容器を加えることと原子炉圧力容器の高度な供用期間中検査を加えることであった．破損防護の特徴は，いわゆる非常用炉心冷却系（ECCS）の基準であった．これらの懸念事項はニューヨーク市近郊のインディアンポイント原子力発電所2号機とシカゴ近郊のドレスデン原子力発電所3号機のAECによる使用許可において解消された．

1966年，インディアンポイント2，3号機は当時の最高出力（3000MWt超）のPWRで，ニューヨーク市か

ら30マイル未満のところに位置していた．同年，AEC規制スタッフとブルックヘブン国立研究所（BNL）は，シビアアクシデントの進展に関する研究であるWASH-740を作成した．BNLの業績からのひとつの結論は，3,200MWtの原子炉内炉心溶融は，原子炉圧力容器からの溶出のみでなく，格納容器床コンクリートへの溶出，さらに，熱を取り除くに十分な物質がなければ地球にまで達するというものであった．炉心溶融と格納容器破損が対で起きるという結論は，原子力発電プラントの安全哲学において大転換となった．高出力原子炉の炉心メルトダウンは格納容器を貫通するという認識が加わったことは，炉心メルトダウンの進行中に，格納容器の健全性に対して劇的な影響をもたらすに十分な量の水素が，金属－水反応によって発生するということが具現化されたことである．規制スタッフ，ACRS，理事，そして原子力産業界の間では，建設許可に対してレビューが行われる大型原子炉の炉心メルトダウン発生確率を減少させるための工学的安全施設との組合せが含まれた，非常用炉心冷却系を形成させるための次の議論が始められた．当時，炉心メルトダウンの最大の発生原因としてLOCAを位置付けることが重要視され始めた．[55]

大型原子炉における炉心メルトダウンは格納容器破損に至るという懸念は，1966年中頃には頂点に達し，ACRSのメンバーがドレスデン3号機の委員会レビュー中に，同僚メンバーに対して，溶融炉心が格納容器の底を貫通しないように原子炉の出力レベルを十分に下げさせるか，若しくは現存するいかなるものよりも信頼性のあるECCSを装備させるように推奨した．追加された状態は要求事項を満足させるに充分であった．設計出力で冷却材喪失事故後の炉心メルトダウンを防ぐという観点で，相対的に低出力の原子炉に対する従来型格納容器の信頼性と同程度の保証があった．最後に，インディアンポイントとドレスデンの両ユニットともに，新たでより効果的な非常用炉心冷却系を所有者が運転許可の申請を行う前に設計基準に追加するという対策をもって建設許可を受けた．オクレント博士が25年後に当時の状況を要約したように，1966年夏の間にひとつの方法が開発された，本質的に軽水炉に対する工学的安全要求における大きな転換と軽水炉の安全上の新たな道が作られた．炉心溶融の発生確率を以前よりも低くすることが重要となった．インディアンポイント2号機及びドレスデン3号機の原子炉に関して採られた最初の二つの大きな段階は，(1)冷却材喪失事故の発生確率を低減するために一次系の品質をより向上させる要求，すなわち，より多くの検査とより多く漏えいを検出することの要求，(2)LOCAが炉心溶融に至る可能性を低減するために非常用炉心冷却系をより向上させる要求であった．これは，炉心溶融へ至る起因事象として考えられる原因に対して絶え間なく拡張する指示に見られる継続した一連の努力の始まりであり，そのような事象の発生確率を減少させるための手段が探し求められた．[56]

オクレントが言及した新たな道筋は，設計基準へのECCSの追加であった．すなわち，炉心溶融を緩和することよりも炉心溶融を防止すること（良い設計，良い検査そして良いECCS）の方が優れていた．それ故に，防止が主要な戦略であり続けた．

1966年10月，AECはタスクフォースを設立し，充実したメルトダウン防止のためのECCS設計とECCSが失敗した際に燃料溶解物に対処する手段の向上に取り組んだ．タスクフォースは後にタスクフォースのリーダーとなったオークリッジ国立研究所のウィリアムエルゲンにちなんでエルゲン委員会と呼ばれるようになった．エルゲン委員会は他の事項も扱っている，既存の系統のタイプの枠組み，冷却材喪失後の非常用炉心冷却の信頼性，充実したメルトダウン防止のための追加的な保障を与えるための追加的な取組みなど．[56]　ECCS設計の向上と足並みをそろえて，委員会は一次系の健全性の保証を高めることを推奨した．（言い換えれば事故防止における絶え間なき努力）委員会はまた格納容器機能を保持する方法として初めてフィルタードベント及び長期炉心冷却の研究を提言した．翌年，AECの軽水炉に対する安全概念は，原子炉冷却材系統の品質管理と高性能なECCSを通じての事故防止であることが強調された．

1974年，AECはECCS性能に対する許容基準とLOCAの設計基準に対する解析手法を確立するために長期にわたる公衆ヒアリングを含めて2年をかけてルールを完成させた．[57] LOCA回避と，LOCAが起きた際の炉心冷却維持を強調したこの安全パラダイムは，1979年にスリーマイルアイランドでの炉心溶融事故まで続いた．

4.3. 1957 年の原子炉安全研究における炉心冷却に関する考察

原子炉安全研究からの最初の教訓が第 3 章に示されている．原子力発電リスクに対する最も重要な要因は，現在運転中のプラントにおいて最も重要な安全系設計要求となっている大 LOCA ではないという見解が含まれている．むしろ，リスクに対して支配的な要因は，例えば，複数の機器又は系統の同時あるいは次々に起こる故障とともに生じる小 LOCA と電源喪失との組合せである．言い換えれば，炉心冷却は，大 LOCA に対してだけではなく，緩和されなければ炉心溶融に至り得る他の起因事象のレンジに対しても確実になされなければならないということである．例えば，外部電源喪失と非常用所内電源の故障との組合せは，最終的には一次系からの崩壊熱除去能力の喪失に至り，一次系の圧力上昇と水位低下により炉心溶融に至る．TMI 2 号機において類似の高圧炉心溶融事故が起きたが，別の理由であった．運転員の過誤であった．炉心溶融を起こすに十分に長い時間炉心冷却機能が阻害された．

4.4. TMI-2 事故における炉心冷却に関する考察

この項の情報は，事故の復旧に参加したASMEタスクフォースのメンバーの経験とTMI-2 号機事故に対する NRC の教訓タスクフォース報告に基づいている．[58] TMI 2 号機での事故は，炉心溶融に対するいくつかの防護の脆弱性を明らかにした．最も重要なものは人間のパフォーマンスであった．事故は給水喪失によって始まった．運転員は，メンテナンスエラーが起きて蒸気駆動補助給水ポンプの蒸気入口弁が開位置を要求されているにもかかわらず閉位置にあるということはすぐに分かった．そのとき，運転員に弁の位置を直接的に示す指示は何もなかったため，加圧器頂部のパイロット操作の逃し弁（PORV）が開固着していることに気付くことができなかった．PORV から原子炉冷却材が高流量で流出したため加圧器内の水位は上昇し，制御室のレベル計に指示された．満水状態での過圧から原子炉冷却材系を防護するために，運転員は給水喪失によって自動起動したECCSを停止した．PORV の開固着により水は原子炉から流出し続け，冷却のために炉心に水を送り続けていた主冷却材ポンプは，一次系内に大量の蒸気が溜まったことによりキャビテーションを起こし始めた．ECCS による原子炉への注水を再確立させるのではなく，再度満水にならないように運転員は主冷却材ポンプをトリップさせた．原子炉容器への注水が失われたことにより相は別れた．そのときまでに一次系は十分な水量を失い，別れた水の相のレベルは原子炉の炉心を覆うほどに高くはなく，炉心は過熱し溶融していった．

このイベントシーケンスは炉心冷却の信頼性を確保する上でのヒューマンパフォーマンスの重要性を示している．運転員はその事故の間，炉心冷却を維持するための能力においてハンディキャップを負っていた．技能，訓練，技術的支援，非常時運転手順，制御室の設計，そして原子炉計装が不十分であった．

事故の進行に伴い，過熱された炉心内で大きな影響を与える金属－水反応が大量の水素ガスを遊離させ，水素ガスは一次冷却材系内での自然循環を阻害し，一部の水素ガスは格納容器へ漏れ，事故の初日に水素燃焼が起きた．

溶融炉心からのデブリは原子炉冷却材系内に溜まり，原子炉冷却材に降下した．幸いにも，一次系において強制循環が再度確立されたことにより，格納容器の外側にデブリを帯びた冷却材を循環させる

ために炉心冷却としてECCSを使用しなければならないということにはならなかった. 炉心冷却のこのモードでは熱は二次系へ移送され, そこから最終ヒートシンクへ移送される. その間炉心デブリの大半は原子炉冷却材系に留まった. これらの状況は炉心メルトダウンの間に炉心冷却を再度確立することの難しさを論証している.

やがては, 事故のほぼ半日後, 事業者とNRCのオフサイトマネージャーは炉心の不安定な冷却状態を認識し, プラント職員に指示して原子炉冷却材系を再度満たし, 原子炉冷却材系に流れを再度確立するために主冷却材ポンプを再起動させた. 主冷却材ポンプが再起動し, 原子炉容器内で溶けた炉心材料の塊を浸水させ冷却し始めたことを損傷した原子炉計装から解釈するのにさらに36時間を要した. 溶けた材料は約4日後には完全に冷却された. 炉心の自然循環冷却は約1ヶ月後に再確立された. これらの状況は運転員に知識と手段が備わっていれば, 炉心冷却及び炉心溶融への進展を阻むことは可能であったことを示している.

TMI 2号機事故からの教訓は, 設計者に対して炉心と格納容器冷却を確実にするための性能向上を行うことを可能にさせた. 例えば, ジェネレーションIII+のプラントが現在建設されているが, これは運転員の介在がなくとも最短72時間の炉心冷却を備える静的系統が組み入れられており, 不確定期間のステーションブラックアウトのケースでさえも設計基準事象としている. この重要機能は, 利用出来る機器と水源から非常に簡単な運転員操作によって無期限に維持され得る. 同様に, 格納容器の健全性は, 静的な対流による空冷によって無期限に維持されることが可能である. 炉心が過熱し溶けたら原子炉キャビティを浸水させるといった静的な特徴の設計も組み入れられている. このように原子炉圧力容器の破損確率は著しく低減され, ありそうもない原子炉圧力容器破損時にも格納容器ライナーとベースマットは防護される.

4.5. 2001 年 9 月 11 日の出来事における炉心冷却に関する考察

2001年9月11日の出来事は, 包括的かつプラント固有に原子力発電プラントへの対象を絞り込んだ大規模爆発・火災のような悪意に対する感受性を解析させた. 3章で述べたように, 原子力産業界は2001年9月11日後, そのような出来事においても炉心冷却の継続を確実にするために重要な対策を講じた. そして福島後において, これらの能力を強化することを約束した.

4.6. 福島事故における炉心冷却に関する考察

福島での出来事が示すことは, 運転員の最優先事項は炉心冷却を提供し維持し, 本質的に漠然と進行している事態に対していかなる系統・可能な手段を用いてでもこの努力を成し遂げるということである. 設計基準を超える事故のいかなる段階においても炉心溶融を防止し, 炉心損傷を回避あるいは炉心溶融を緩和するためになすべき最も重要なことは炉心を冷却することである. 一旦は福島の運転員は津波が通常の炉心冷却手段を駄目にしたことを理解し, 炉心冷却のためのさまざまな方法を試みた. 3 ユニットの炉心がひどく損傷し再循環冷却が不可能であることを認識した後, 炉心を冷却するために海水を注入し後に淡水を注入した. さらにその後も, 水を注入し格納容器のベースマット上に落下した炉心デブリの溶解物を浸水させ冷却した. [15][16][17] [40] これらの出来事は設計基準を超える事故の進行中に炉心を冷却するための追加的な機器が必要であることを証明した. 例えば代替電源と冷却材供給系, 水源, 汚染水の貯蔵, 最終ヒートシンクへのアクセス, そして浄水系統. 事故はまた改善された訓練, 手順, コミュニケーション, そしてシビアアクシデントの進行中に炉心の状態を理解し炉心冷却の再確立と維持を助けるための計装が必要であることを示した.

4.7. 稀ではあるが起こりえる事象からの防護

福島第一事故の一つの洞察は，電源供給系のような重要なプラント安全系を津波，洪水による損傷ポテンシャルから防護することが不十分であったということである．世界の他の地域では大きな津波は稀な例であったとしても，起こり得る事象であるならばクリフエッジ効果のために原子力発電プラントに対して厳しい挑戦を引き起こすポテンシャルを有している．とはいえ，津波とは異なる原因の洪水に対しても取り組む必要がある．

人間性が，個人では容易に・歴史的経験からは広く知られている稀ではあるが起こり得る事象に対する過酷さを判断する．例えば，カリフォルニア及び西海岸は米国のその他大半の地域より地震が起こりやすいということは広く知られている．しかしながら，この経験は，米国東部のプラントに対して厳しい地震を免除出来るということを意味しないが，大西洋岸若しくはメキシコ湾においては単純に観測経験に基づけば津波はない．同様に，2，3百年の経験では暴風雨によって極端な河川洪水となったこともないが，原子力発電プラントの設計において考慮が限定されるべきではない．データの不足は技術的な取組みは十分であるとの判断をさせてしまうのである．

定義上，発生に関するデータがほとんどないことで稀ではあるが起こり得ることということになる．設計基準を超える故障の組合せを上手く考慮させる確率論的技術でさえも，稀ではあるが起こり得る事象，特に稀な自然現象に対する確率／結果を推定するためのデータの欠如によって産業界は制約を受けている．稀ではあるが起こり得る事象の発生確率の算定において，不確かさが非常に大きいため，特にクリフエッジな取組みが必要な事象に対して，設計的決定を行うための平均値に頼る伝統的な技法は十分ではない．

3章で述べたように，原子力発電プラントの設計における固有のマージンは，既存の安全構築の重要な要素となっている．福島第一事故は現在の設計における固有のマージンを再考することに対して正当性を与えている．このような再考は継続中で，全世界的に行われている．ほとんどのケースでは，これらのマージンは機器と構築物が設計要求を超えて機能することをいくばくか保証する．このことは，例えば，地震と強風に対しては重要なマージンを有することを意味する．これに反して，内的あるいは外的原因による広範な洪水事象に対するマージンは，注意を要する．何故ならば，福島に示されるように，壊滅的な洪水がもたらすポテンシャルは広範囲の機器の故障をもたらす．

新たな安全構築において，共通原因故障に対するポテンシャルは，事象の過酷さに関する不確実性と防護特性とを組み合わせ，そのような事象に対して払われるべき特別な考慮事項である．さらに言えば，決定論的設計基準においては単独では常には重要とはならないようなハザードに関連する不確実性に対して，設計を確立するための方法として確率論的推定を用いる際には十分な注意が払われなければならないということである．設計基準を超えたとしても炉心冷却能力を防護するために，事象を防ぐ他の方法が必要となると判断される．

4.8. まとめのコメント

事故防止は依然として新たな原子力安全概念の主要な戦略であり続けるべきである．このことは設計基準を徹底的に再調査し，稀ではあるが起こり得る出来事に対する適切な扱いと共通モード故障を含む内的故障との適切な組合せに対して確実に対処することを求めている．加えて，新たな安全構築において全てに優先されるべき安全機能は炉心冷却の維持である．すなわち，通常運転あるいは停止時の状態からシビアアクシデントからの回復のためのあらゆる方法を用いて炉心冷却のために水を供給する．このように，原子炉冷却材系の破損箇所から水が流出しようとも，運転員は系統に新たな水を供給し続けなければならない．炉心が溶けて原子炉圧力容器若しくは格納容器の健全性が危うくな

れば，溶融炉心を浸水させ冷やすためにより多くの水が利用できなければならない．

福島第一事故は幅広い出来事に対して炉心冷却を維持するといった積年の安全原則を補強した．何故ならば炉心冷却は地域に潜在的，社会的そして経済的な影響をもたらす深刻な放射能放出を防止する最も有効な方法であるからである．

福島第一事故は，これからは，従来の設計基準事象からの防護を与える通常及び後備の炉心冷却の喪失の原因となる大規模火災・爆発，極端な自然現象，継続時間が定まらないステーションブラックアウトそして内的故障の組合せといった事象に対しても防護される必要があることを示した．この論理的思考は，新たな原子力安全構築においてあらゆるリスクに取り組むことにつながる．

5. 想定外への対処－人的能力

5.1. はじめに

最大の努力をしても，内的或いは外的な要因によって有限の確率で深刻な原子炉事故が起こり，その結果として周囲の環境に放射性物質を放出する可能性はあり得る．原子力がそうであるように，他の領域で人類が行う試みにおいてこのような事故が極めて稀ではあるが起こり得ることは事実である．予期せぬ制御不能に陥る，極めて考えにくい事故の例は，近年に限っても多く挙げることが出来る．そこでは，人間の行動や判断が受け入れ難い結末の一因となり，あるいは直接的な原因であった．最近の例では，例えばメキシコ湾における Deepwater Horizon の火災，爆発，そして石油流出，ハリケーン・カトリーナによるニューオリンズの洪水，スペースシャトルコロンビアやコンコルド機の墜落，2011 年 9 月 11 日のテロリスト襲撃後のワールドトレードセンタービルの崩壊などが挙げられる．これらの事故を現段階で予測することは可能ではなく，さらに情報があったとしてもこのような事故の予測は大きな不確かさを伴う．事故の起こる頻度が小さくなるほど，その事故を予測して制御することはますます難しくなる．さらに，人間は，自ら意図しないリスク，特に十分に安全基準をクリアしていると宣言している現代技術の失敗によるリスクに対する寛容性は低くなる．

一方，周到に準備され立派に遂行された人間の判断は，工学的なシステムの故障によって生じる結果を防止あるいは緩和するための重要な管理体制を形成する．危機下では，平常時や設計で想定した過渡状態や事故を対象として開発された手順に従う手法を超える判断と決定が要求される場合がある．厳格な訓練とそれらの強化と組み合わせたうえで事前に決められた手順，制御やプロセス等に頼ることによって，過誤の可能性を下げることが出来るだろう;しかし，事故が想定の範囲を超え，例えば，極端な外的事象に起因するような場合には，これらの用心は副次的な事故や誤りを完全に防ぐことは出来ない．

人間に起因する結果の可能性を制御することは動的な学習過程の一部として上手く表現される．[59] 個人と組織の両方が持つ知識や技能を蓄積していくことにより，操作や運転が向上し，リスクを下げることにつながる．しかし，誤りを完全に排除することは出来ないので，タイムリーな（事故の）進展阻止や前線での危機管理が必要となる．人的能力のこれらの側面は，東大日本地震と津波の後に福島第一で起こったことをよりよく理解するための枠組みを形成することになるだろう．

5.1.1. 人的能力の伝統的なアプローチ

人的能力の評価や管理には人的要因（ヒューマンファクター）の分析，訓練，監督，独立した点検，兆候に応じた処置や確率分析を含めて，様々な切口や方法がある．近年，“人の信頼性”は，事象シーケンスを用いる確率論的リスク評価において採用されているように，仕事毎，事柄毎，そして状況毎の人間の過誤を分析結果に基づいて評価されてきた．このような分析では，正しい或いは正しくない行動の確率は，想定した事故進展における重要なステップや分岐点のそれぞれにおいて割り振られる．行動の確率は，ストレス，環境や時間的な圧迫を表す状況毎の係数を用いて表現され，重みづけあるいは調整される．各個人及び集合としての人間の意思決定の背景にある細かいニュアンス，順序あるいは可能性を表すことは現実的には不可能であるから，人間と技術からなるシステムは統合されたシステムとして扱う必要がある．

原子力発電所のように現代の複雑なシステムの安全性や信頼性を抜本的に向上し，過誤の傾向，率，そして機会を減らすためには，意思決定に関する人的能力に焦点を当てることも重要である，というのが基本的なポイントである．

5.1.2. 危機における意思決定に際しての責任，説明責任と権威

稀ではあるが起こりえる事故においては，明確かつ権威ある意思決定が効果的な危機管理とリスクの緩和のために極めて重要である．危機における決定にあたっては，客観的な証拠と主観的なリスク評価の両方を考慮しなければならない．

意思決定のいかなる場面においても，明確に確立された説明責任と権威を持つ必要がある．一般的な法則として，正しい決定が下されることを確実なものにするためには，連続的な司令を通じて情報が（現場から）上がってくるようにしなければならない．一方，危機の近くで状況を最も知っている現場の人々に対して権限を移譲して適切な行動をとれるようにしなければならない．目標は，得られる情報をもとに知識を持った人々が適切な判断を下し，それを的確な時期に実行することである．

原子力事故の最中或いは事故後の意思決定が幅広い放射線放射能汚染，人々の避難，土地の使用制限など，社会政治的および経済的に大きな影響を与える場合がある．他方，原子炉の更なる損傷やシステムの放棄あるいは保存の可能性に対するプラントの回復力を最大化するために，意図的に環境に放射性物質を放出するなどのプラント安全に関する決定もあり得る（例えば，格納設備のベント，制限地域からの避難，ヨウ化カリウム剤の配布など）．これらの全ての決定に際しては，前述した広い影響を包括的に考慮する必要がある．どのような決定も，財政的，政治的な帰結を陽に陰に考慮したものであるし，外圧が危機に際しては外圧が意思決定に影響を与えるからである．かくして，例えば，知識を持った人々や権限を有する人々の間の，制限区域の大きさ，放射性物質の管理された放出の必要性や時期，避難命令などに関する混乱や意見の相違は，危機のさなかにおける不信感や非効率性を生み出すことになる．

5.1.3. 組織面における人的能力

原子力プラント（他の危険な産業も同様であるが）の安全性と信頼出来る運転には4つのレベルの組織が寄与していることが知られており，その各レベルは，人的能力と意思決定の影響を受けている．これらのレベルは，放射線の環境への放出に対する非物理的な障壁と見做すことが出来る．[60] 第一のレベルは作業者又は作業者の集団，2番目は管理者又は監督者，3番目は独立した内部監査関係者，そして4番目は外部監査で構成される．図 5 は組織的な視点からの深層防護のレベルと障壁を示している．

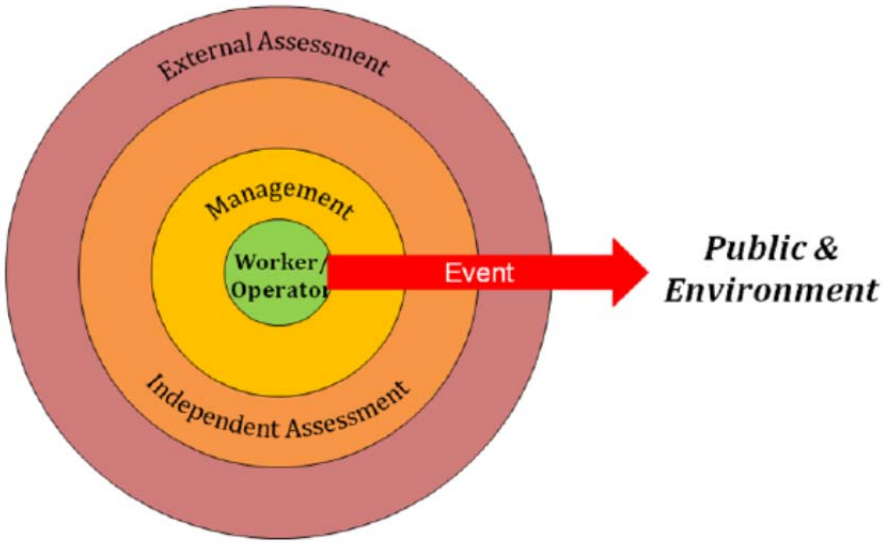

Figure 5 – Organizational Levels/Barriers of Defense-In-Depth

深層防護のこれらの組織レベルは，環境への放射性物質の環境への放出を防ぐために原子力で用いられてきた防護策の重要な一部である物理的な深層防護（図 6 を参照）を補完している．これらは古典的な物理障壁であり，容易に理解出来るように原子力産業の深層防護の重要な要素である．原子力における物理的な深層防護は燃料被覆，原子力冷却系の圧力障壁と格納施設である．TMI-2 と福島第一の両方の事故から分かるように，それまではよく理解されていない原因によりこれらの物理的な障壁のバイパスが生じたり破損したりすることがある．福島第一では，サイトの場所や高度，堤防の高さ，重要な機器に対する洪水対策，格納容器のベントシステム，共通原因故障に対する感受性等の問題が挙げられる．

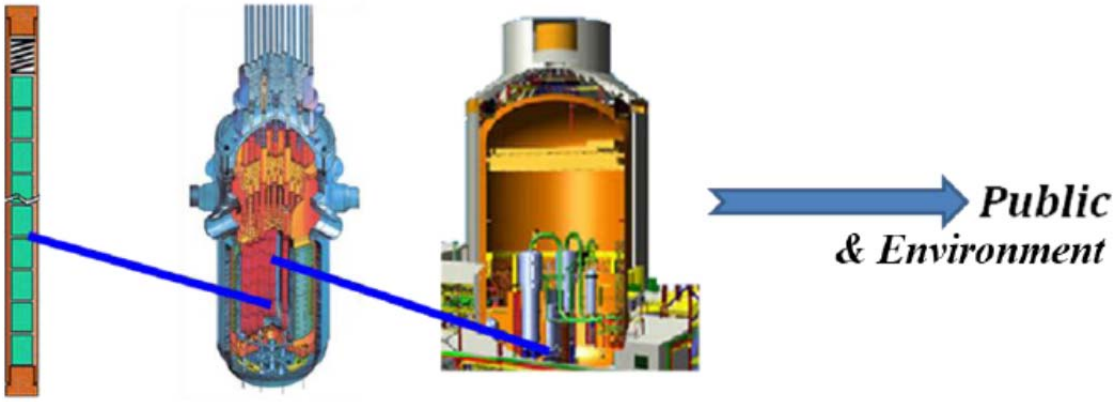

Figure 6 – Physical Barriers of Defense-In-Depth

深層防護の組織や物理的な障壁に加えて，品質と安全性が技術に対する人々の信頼を確保するうえでの影響因子である．規制当局は安全文化を原子力産業界の組織内に浸透させるための政策を設定している．原子力事業者は学習，自己報告，誤りを正す行動を促進するような人的能力の向上プログラムを持っている．米国では，INPO が訓練プログラムを監査，認定しており，NRC が原子炉監視プロセス (Reactor Oversight Process, ROP）の一環として，（プラントの安全運転の）実績が悪い場合の安全上の重要度を考慮するためにリスク情報に基づく基本的な検査を行なっている．これらの試みはおしなべて事故を防ぐための人的能力における重要な点である．

5.1.4. 組織的な失敗

他産業における大事故から明らかとなっている組織的な失敗の典型例はよく知られており，[61]それには以下がある．

1. コスト削減，必要な投資を行わない，そして安全性を阻害するような生産性に対する圧力
2. 安全文化や事故防止の主要プログラムに関する効果的な監督を行わない幹部
3. 安全性に関する真の全体像や安全文化の健全性について示すのではなく，怪我の発生率が低いことを安全性の指針として信じてしまう態度
4. 安全上重要な機器を“運転すると破損”の状態にしてしまうような機器の健全性管理プログラムの欠陥
5. 基準を満たさない場合でも安全政策や手順の要求に対してただ書類をチェックして埋めていく欄を埋める心理
6. スタッフが安全上の問題の報告を奨励されず報復を恐れ，事故やニアミスからの教訓を学んで行動できなくなるような，報告や学習の文化の欠如

7. プロセスの安全性や安全関連のシステムの管理よりも，安全性の尺度や労働者の態度の改善に焦点を当てた安全キャンペーン，安全目標性，報酬など．
8. 現場調査，研究，及び監査により見出された事項に対する不適切な管理者の対応
9. 安全性に影響を与える可能性のある人事や政策，組織の変更に対する管理者の不適切な評価

5.2. 原子力プラントの事故における人的能力

通常，原子力プラントは何事も無く安定して運転，管理出来る機械である．何年にもわたり日常的にほとんど変化の無い運転によって大量の電気を産み出してくれる．しかし，運転時の平衡状態が乱され，或いは機能不全が起こると，運転状態を予測可能な範囲に維持するよう，全ての組織が動員される．それが不可能な場合には，運転員は状況を修正するために適切な行動をとらなければならない．運転員は次に，プラントを安全な状態に維持するための一連の操作や行動を決めるために，プラント状態やプラントが示している兆候を診断しなければならない．必要であれば，緊急管理あるいはサポートチームが事故の程度や予想される進展を判断し，市民の健康と安全を確保することに重点を置いて，事態の進展を食止めるあるいは緩和する措置を決め，できれば他の機関に対する推薦事項を提示する必要がある．

非常時や事故時における人的能力に対する期待は平常時のそれとはと大きく異なる．平常時においては，指揮統制はそれほど厳格ではない．人々は責任を共有でき，コミュニケーションも整然とストレスなく行われ，情報伝達も決まった手順で行われる．しかし，非常時には指揮統制はトップダウン方式に移る．それは，複雑さを増す状況に対処するためにはチームとして相互に協力しあうチームワークが必要とされるからである．さらに緊急時対応のフェーズに移ると，この構造は運転スタッフに対しても維持される．オフサイト組織を含めた緊急時対応組織や管理層が加わるにつれて，コミュニケーションや相互の関係はさらに複雑になる．このような状況においては，“拡大”事故対応チームが緊急事態の状況や進展の情報を把握し続けることが出来るよう，現場の人々の知識，技術，判断能力に大きく依存することになる．さらに，事故が進行すると現場の人々は迅速かつ柔軟にトップダウンの組織からの指示を遂行する能力が必要になる．これまでの経験は多大なストレス，不適切なデータ，大きな危険への直面，時間の圧力，複雑な事故の進行，矛盾する安全管理体制などに対して人々が対処出来るようにするための手順の改善やより効果的な訓練へともつながってきた．ある組織から別の組織への責任の移行は複雑であり，危機の環境では困難である．

プラントの全体シミュレータは，運転員及び事故対策担当者が過渡事象や事故に対処する訓練に非常に効果的であることが示されている．シミュレータ訓練によって，運転チームの全員が炉管理担当者とともにプラント状態の急速な変化に対応出来るようになる．現実的な状況下で操作手順，情報伝達，意思決定等をテストすることが出来る．シミュレータは運転員に機器や計装の不具合の想定外の組合せを挑戦させることも出来る．しかしながら，今日，シミュレータは炉心溶融シナリオなどの過酷事故の進展に関する訓練に限られている．

まとめると，複雑な工学システムでは労働者や公衆を保護するための通常の手段として物理的な防御が用いられているが，人間の判断はそのようなシステムの破損を防ぐための重要な運転上及び管理上の防護を構成している．プロセス，処置，制御，そして良好な事例等に基づく運転上及び管理上の防御は物理的な防御に対して補完的な深層防護を提供する．

5.3. 福島からの人的能力に関する教訓

福島第一の事故は，6つのうち3つの原子炉において深層防護の物理的障壁が崩壊したことによる．それと同時に，組織レベルの深層防護も厳しい挑戦にさらされた．[16]原子炉，近隣地区，そして日本と他国の政府組織において，人的能力は事故にあたって重要な役割を果たした．これは，TMI-2 とチェルノブイリでもそうであった．

これまでにない物理的に極めて過酷な状況が生じ，それが人間の行動能力に様々な影響を与えた．その結果，サイトの内外において英雄的な行動も見られた．運転員や支援スタッフは余震で落下してくるがれきの中を移動しながら真っ暗なプラントで作業し，津波によってカバーが飛ばされ口が開いたマンホールを避け，高い放射性レベルを感知してそれを回避し，劇的に危険な水素爆発に対処し，放射線で汚染された水の溢れる空間で作業したが，その間制御室に滞在することも出来ず，彼らの管理者や仲間との連絡も満足に取れない状況であった．事故は，プラントの緊急対策手順の範囲を超え（全交流及び直流電源の喪失，サイト内外でのインフラの甚大な破壊，高放射線や困難な環境要因その他の結果としてそうなった），人々を事前に確立されたガイダンスがない状況に追いやった．彼らは，刻々と状況が変化するなか，リアルタイムで応急の行動計画や対策をとって行く以外に選択の余地はなかった．事故は複数ユニットで同時に生じ，ユニット間の相互作用も生じた．サイト外の市民に対する避難勧告や保護対策については，十分なプラントの情報や十分な時間がなく，大変厳しい状況下であったことを考えると，全体として適切な対応が取られたと言えるだろう．現場の作業員に対する放射線被ばく管理は，線量計が破損し，電源がないためコンピュータデータベースが使用できず，放射線サーベイ機器やデータが足りない中，良好な対応がなされたと言えるであろう．

にもかかわらず，日本政府の報告書は人的能力について，事故の進展を悪化させた容認できない事例があったと報告している．[15]これらの人的能力の欠如は地震や津波が起こるはるか以前から始まっていたと言える．

40 年以上前に端を発する不適切な人的能力が福島第一の事故の主要因と言われている．それは，津波高さに関して適切な設計がなされていなかった点である．津波に対する元の設計が適切ではなかった点，それを事前に修正する機会が失われたことについては，今後も議論の余地があるだろう．[15][16][18] サイト選定と準備，対津波設計，津波被害に対する事象推移の予測，事故分析，規制，国際社会の助言に対する適切でない注意，などに誤りが見てとられる．

主要因（堤防の高さが適正でなかった）を別に求めるような最新の情報もあるが，これらの情報が適切な短期的あったかどうかは明確でない．言い換えれば，より高い堤防が必要であるという新しい情報はあったものの，それによって今回経験された津波の被害を軽減するに十分な高さに堤防の高さを増やすに至ったかどうかは何とも言えない．

地震と津波の後の不適切な人的能力は，日本の安全専門家等の間でも認知されている．[1][15][62][63][64][65] 特に，国の政府レベルにおいて，“組織が複雑になると緊急な意思決定が遅くなる”ことを学んだ．[62][64] この教訓の詳細は，文献にまとめられているのでここでは繰り返さない．全ての国が，今回の辛い経験から得られた人的能力に対する洞察を吟味することによって得るものがあるだろう．さらに，組織や行動に関連する文化的な差異は，福島第一の事故の深刻さをもたらした背景原因を理解するうえで重要な要因である．

福島第一での事故時の極端な条件を考えると，事故の進行に直面した人々の行動について人的能力を判断するのは困難であり，恐らく公正ではない．3つの炉に著しい炉心溶融が生じたが，市民の健康と安全は守られた．しかし，事故対応にあたった組織は炉心溶融に至る前に事故の進展を阻止することが出来ず，また放射線の外部への放散を阻止，緩和することが出来なかったため，敷地外の

汚染が起こってしまった. 現場のスタッフは厳しい自然と“予想外の”現象に作業を妨げられた. これらの全ては炉心溶融から始まっており, どこで原子炉を運転しようとも許されるものでない. そして, これらが今後の新しい原子力安全概念を追求する主たる動機である.

しかしながら, 特定の人的能力の欠陥が権威ある組織による福島第一事故の調査において示されており, これらは今後改善されるべきものである. これらの問題点には, 初期及びその後の工学的な評価, プラントと施設の管理, 並びに政府の意思決定がある.

- 津波の歴史データに関する不適切な技術的評価と安全管理. 東日本大震災と津波以前の安全評価は地震のみに着目し, 津波などの随伴事象との組合せが考慮されていなかった. [62][63]
- 深刻な事故, 想定すべき全ての外部事象を考慮した上で過酷事故への備えをしていなかったこと [62][63]
- 日本のアクシデントマネジメントガイドライン(SAMGs) は軽水炉 (BWR) の所有者グループからの助言を多く含んでいたにも関わらず, 例えば所内外電源の喪失や最終的な除熱源の喪失等の複数のユニットにまたがる事象について適切な対応がなされていなかったこと[62]
- 複数の責任ある組織が重要な情報を適切に管理し, 土壌汚染の長期的な管理について公衆に周知することが出来ず, 結果として地域の農業地帯や都市部の公的機関に対する市民の信頼を失ったこと[15][62]
- リスク情報を把握する安全文化, 安全について常に疑問を持つ姿勢, 決定論と確率論を組合せた深層防護等が経営において適切に認識されていなかったこと[62][63][65]
- 極めて稀ではあるが起こりえる外部事象に対する適切な防護策が撮られていなかったこと, 例えば, 大規模火災や爆発へのより強力な対処能力の必要性に関する他者からの情報に対して適切な注意が払えなかったこと[62]
- 事故の間に敷地外への影響を限定出来なかったこと. これは, 格納容器のベントシステムの作動不良とベントシステムを構成する機器の設計が適切でなかったことによるものである [62]
- 複数の責任ある組織が避難の必要性とその社会的・政治的な影響及び放射線被曝の影響を的確に評価できなかったこと [15]

このリストから, 複数の責任ある組織によって適切な監督が出来なかったこと, 稀ではあるが起こり得る事象に対して適切な対処が出来なかったこと, 即ち, 設計想定を超える稀有な事象が生じる可能性に対する認識と事前の準備が出来なかったこと, といった複合的な構図が浮び上ってくる. 原子力産業においては, 市民の健康と安全を確保するだけでなく経済と社会の土台守るためにも, このような姿勢ではシビアアクシデントの進展を防止し事故の影響を緩和するための適切な準備が出来ないことを理解する必要がある.

過ちの傾向, 発生率, 及び機会を減らし, 現代の複雑なシステムの安全性を向上しリスクを減らすためにも, 稀ではあるが起こり得る事象の前, 最中, そしてその後における意思決定における人的能力の側面に焦点を当てることが重要である.

5.4. まとめ

NRC の短期課題に関するタスクフォースの報告書[5], NEI の“The Way Forward”報告書[66], NEI の”FLEX”における福島第一事故から得られた教訓に対する概念的な対応, 並びに Emergency

Management Excellence に関する INPO の新たな取組みは等では，公衆市民の健康と安全を適切に守るために必要な既存の要求事項に付随する人的能力に関連した幾つもの事項に言及している．詳細については文献を参照のこと．

新しい原子力安全概念の構築を支えて行く上で，炉心冷却能力を確保し，放射性物質の大規模放出を確実に防止するための行動，意思決定，及び実効性を最優先事項として強調する必要がある．放射性物質の大規模放出による社会の混乱を回避するためには，福島第一の事故から何が分かったかを理解した上で，プラント内の電源系統を回復し炉心及び他の重要機器への冷却機能を必要な時間確保するための物理的及び操作上の能力を実現する意思決定と行動が，実効的な人的能力に関して必要とされる．

6. 全てのリスクの管理

6.1. はじめに

広義のアクシデントマネジメントはプラントの異常状態に繋がる起因事象に対してとる対策行動をいい，システム，設備，職員の対策の全てが含まれる．1979 年の TMI-2 事故後，原子力産業界は放射性物質の環境中への放出に繋がりかねない事故の防止と緩和，ひいては公衆の健康と安全を守るためのアクシデントマネジメントにかなりの重点を置いてきた．第 3 章で論じたように，アクシデントマネジメントは事故の影響を限定的なものとするために事故事象の進展を阻止しようとするものである．事故を管理し放射性物質をプラント内に留めるために，運転員には燃料被覆管，原子炉冷却材圧力バウンダリ，及び格納施設（の健全性）を確保するための訓練がなされ，装備が提供される．アクシデントマネジメントには放射性物質の環境への放出の緩和も含まれる．このように，アクシデントマネジメントは，原子力発電プラントの設計における深層防護を強化するための防護の厚みを提供している．

6.2. アクシデントマネジメントの定義

原子力発電プラントのアクシデントマネジメントには，図 7 に示すように少なくとも 3 つの事故進展段階がある．

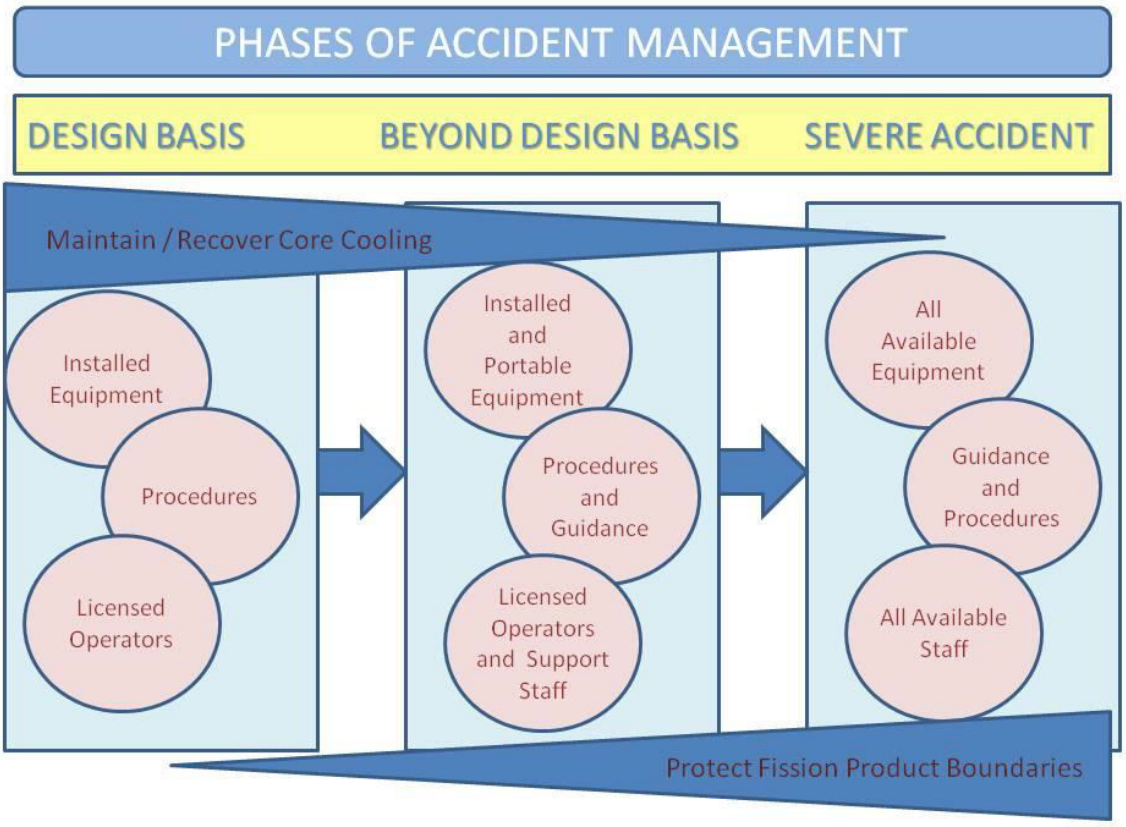

図 7 アクシデントマネジメントの段階

第一段階のところに示すように，アクシデントマネジメントはプラントの設計，建造，運転に用いられる設計基準内の事象を対象としている．第二段階では，第 3 章で用語を定義した設計基準外事象の範囲を取り扱う．第三段階では炉心溶融至るシビアアクシデントを対象とする．アクシデントマネジメントには，事象緩和に必要な装置やシステムに加えて状態診断のための計装と人員，及び必要な安全機能を発揮するための装置の起動などが含まれる．アクシデントマネジメント能力を維持するためには，設備機器を必要な時に利用出来るよう適切に点検保守しておかなければならない．また要員はそれらの手順やガイダンスを活用出来るように適切に訓練を受けていることが求められる．

アクシデントマネジメントは，プラント運転員やエンジニアリングスタッフが非定常もしくは事故状態の際に従うべき手順と手引きの形で提示される．アクシデントマネジメント手順と手引きは，単一システムに関する対策を示す異常時運転手順 (AOP)，炉心冷却機能の維持及び，原子炉トリップ或いは安全系の起動に繋がる事象からの回復に関係する緊急運転手順 (EOP)，並びに炉心損傷事故の際にプラントにおける放射性核分裂物質の障壁の防護に関する SAMG から構成されている．

アクシデントマネジメントの手順と手引きは兆候ベースである．即ち，プラント運転スタッフは，計測機器を通じて観察されるプラント挙動に対応する行動が求められるのであって，そのプラント挙動をもたらしたステップを再構成するのではない．従って，アクシデントマネジメントは外的事象（例えば地震，外部からの浸水，強風）に対しても内的事象（例えば配管破断，内部溢水，制御棒の誤操作）に対しても，全く同等に適用可能である．

6.3. アクシデントマネジメントの歴史

実効的なアクシデントマネジメントの必要性は 1979 年 3 月の TMI-2 の後に認識された．この事故の初期段階において，運転操作員，プラント技術スタッフ，オフサイトの当局関係者の間で，プラント状態と状況を制御するために必要な対策に関して混乱があった．類似のプラントにおいて，TMI-2 の前兆となる事例が生じており，事象進展を予測する解析がなされていたにもかかわらず，この情報がプラントスタッフ間で共有されておらず，運転員が機能的に状況判断したり炉心損傷が起きる前にプラントを制御下に置くための適切な行動をとることが出来なかった．運転員に要求される行動が手順化されていなかったので，そのときに存在していたリスクに関し正しくない判断をしてしまい，それに基づいて兆候に反応してしまった．圧力レベルの上昇指示に反応し，運転員は炉心への注水の減少と停止，つまり，ECCS を停止してしまった．そのため，安全弁開放の結果一次系からの冷却水の枯渇が発生し，不十分な炉心冷却，炉心の一部の燃料溶融へと進んだ．運転員は，むしろ炉心冷却系の水位が溢れることを心配してしまい，冷却維持より圧力制御の喪失の方を気にかけていた．

TMI-2 事故以後，アクシデントマネジメントに関する大きな進展があり，設計基準事象及び設計基準外事象について，炉心冷却と格納容器健全性維持のための兆候ベースの EOP の開発が行われた．この進展により，炉心損傷事象における放出障壁の維持のための SAMG やプラントからの放射性物質放出時の公衆の健康と安全の防護のためのオフサイト緊急計画が進んだ．新しいアクシデントマネジメントツールを補うために，プラントスタッフの事故時の診断，応答を助けるためにプラントや機器の変更もまた行われた．最後に，TMI-2 事故以降，アクシデントマネジメント能力がさらに改善されるか否かを判断するために，事故予兆の検証を重点的に行ってきた．格納容器は核分裂生成物質の最終障壁であって，その健全性の確保と維持の重要性は TMI-2 事故以後のアクシデントマネジメントの基本要素となった．

1986 年の放射性物質放出の制御が困難となったチェルノブイリ事故における社会政治的，経済的影響の結果，最終障壁の確保のためには格納容器が何にも増して重要であることが示された．チェルノブイリ事故によって，欧州ではアクシデントマネジメント能力に著しい改善がもたらされ，環境への放射

性物質の大量放出の可能性は低下した. 多くのプラントでフィルタードベントや水素制御機器などが大きく改善された. さらに, 設計基準外の外的事象やテロ活動の際に炉心冷却機能を維持するために特別の, 多様性を有するバックアップシステムを構造強化した施設に設置した国もあった. 欧州のプラントと比較して, 米国のプラントはチェルノブイリ後に比較的小さな変更しか行われなかった. その理由は, 米国の電力会社は TMI-2 の事故の後に既に大きな変更を実施しており, 十分な頑健性を持ち, シビアアクシデントの影響に対する防御となると信じていたためである.

2000 年台初期の高品質なプラント毎の PRA もアクシデントマネジメントの進展に寄与した. プラント固有の弱点や高リスクな状況が同定され, 設計変更あるいは手順書や手引書の作成を通して改善された. 機器構成(コンフィギュレーション)リスクマネジメントプログラム (CRMP) も, アクシデントマネジメントに大いに貢献した. CRMP は米国内の全原発に導入され, 高リスクの機器構成を確実に抽出し, プラント安全系の保守や試験の期間中に対処することに役立った. CRPM は, プラント運転のどのようなモードから発生した事故事象においても炉心冷却機能と格納施設の健全性を維持するための緩和系機器が使用可能であるよう, 適正な深層防護のレベルを確保するために援用される.

2001 年 9 月のワールドトレードセンターへのテロ攻撃以降, 米国では更なるアクシデントマネジメント能力の向上が図られた. プラント内の広い範囲で既設機器や電源設備が損傷している事態の後にも, 主要機器に接続可能な可搬型ポンプや発電機の配備によってプラントの制御を維持することが可能になった. 重大損傷緩和ガイドライン(EDMG)が作成され, 運転員スタッフに新規装置を使用するための適切な手順を提供した. このように, EDMG はアクシデントマネジメントの重要な手段となった. しかし, このようなアクシデントマネジメント機能の向上は, ほとんど米国内に限られていた.

アクシデントマネジメントについてこのように概観してみると, 良い経験悪い経験から学びつつ, 体系的で継続的な改善の過程を通じた実践があったことがわかる. 装置, 手順, 手引書, 個人の訓練と能力などに関する今日のアクシデントマネジメント能力は, 過去の事例から学んだ教訓の反映を意図している. 福島第一で生じた事故を受け, 現在は対処されていない, 稀ではあるが生じえる事象に対処するために更なるアクシデントマネジメントの機能向上が必要であることは明らかである.

6.4. 福島におけるアクシデントマネジメント

福島において事故の苛酷さにつながった二つのアクシデントマネジメントの重要な脆弱性を二件指摘出来る. 第一に, 事故の初期の数時間の間, プラントがオフサイトの支援から完全に遮断される可能性を考慮していなかった. 次に, 津波によってプラントが深刻な損傷を受ける可能性を考慮していなかった. [15][16][17][18][62][64][65] さらに正確に言うなら, サイトの 6 ユニットのインフラや安全系がこのように同時の深刻な損傷を受ける場合に対処するための効果的な計画や機器を保有していなかった. さらに, 地震と津波の組合せに起因する破滅的な状況下で, タイムリーにオフサイトから効果的な支援をする計画が存在しなかった. [15] これらの点について, 以下, より詳細に検証する.

6.4.1. 多相災害

複数ユニットと周辺環境の両者を壊滅させる事象に対する緊急対応の基盤は, 日本において整備されていなかった. 従って, アクシデントマネジメントの際に使われる機器が津波によって破損したとき, オフサイトから直ちに支援出来る機能はごく限られたものであった. さらに, 敷地内外はがれきで覆われ, アクシデントマネジメント機能の活用が可能となった段階ですら直ちに利用するための障害となった. 事故の影響緩和に用いることが可能であったはずの可搬型機器は津波か水素爆発のいずれかによって破壊されたか, あるいは後手に回った意思決定等, いくつか要因によってタイムリーな利用に至らなかった. [63][64][65]

6.4.2. 苛酷津波に対する事故対策

福島第一は，東日本大震災と津波による苛酷な影響に耐えられるだけの防御もオフサイトの支援能力も十分に備えていなかった．この大きさの津波が歴史的に記録されており，また 5m の防護壁を越える津波の存在も確認されていたにもかかわらず，津波対策の強化が行われていなかった．[64][65] また，4 プラントの炉心冷却に必要な海岸沿いの重要な機器を防護するための十分な溢水対策も施されていなかった．さらには，このような事象の影響に対処するための体系的な手順からなる戦略も存在していなかった．例えば，サイトの可搬型ポンプシステム（消防車）は利用可能だったのであり，プラントの系統に接続するための応急措置がとられたが，これらの対策を遂行するための手順が確立されていなかった．プラントの所有者は，他のプラントの所有者と同様，安全上重要な配電系統やプラント安全系が一つの事象によって使用不能となる可能性に対する準備を怠っていた．また，長時間にわたる交流電源の喪失とその結果として起きるバッテリーの枯渇の可能性（つまり全ての直流電源）についても，アクシデントマネジメントにおいて考慮されていなかった．

さらに，今回のような苛酷な事象に対処出来るだけのシビアアクシデント対策が存在しなかったことに加え，アクシデントマネジメント対策を実施するための権限と責任もはっきりとは決められていなかった．また，中央政府からの指示の取り扱い手順も決められておらず，理解もされていなかった．

6.4.3. プラント状態

緩和機器の設計において，アクシデントマネジメント対策に必要となるサポートが完全喪失してしまうという不慮の事態が発生することを想定していなかった．交流電源の長期にわたる喪失が，津波による初期の影響と組み合わさって直流電源の喪失に至り，結果として制御室のプラント状態のモニタができない事態につながった．運転員もまた機器の遠隔操作が出来なくなった．さらに，冷却系とドライウェルベント経路の操作に必要な弁のいくつかは電磁弁であって制御用電源を失った状態で手動による操作が容易に出来るものではなかった．設計は，これらの弁を炉心損傷後の放射線環境下の現場で操作しなければならない可能性を考慮していなかった．つまり，高温，高放射線環境下におけるこれらの電磁弁の操作は著しく遅れ，作業員の放射線被曝が起きた．

6.5. 福島から学ぶアクシデントマネジメント

福島事故以前の典型的なリスク研究では，大規模な放射性物質の放出に至る事故の確率は十分に低く，アクシデントマネジメント対策の追加は必要ないとされていた．米国においては，アクシデントマネジメントの基準が改善され，シビアアクシデント緩和代替対策(SAMA)の検討がライセンス更新の条件として NRC から要求されることになった．SAMA の実施の限度を決める際に，サイト固有のコスト-便益に関する閾値が用いられた．より重要な点は，認可を受ける側は高経年化に直接関係しない改善を先延ばしにすることがあった点である．それは，高経年化がライセンス更新決定の主要課題だったからである．米国におけるこれらの限界は重要なハードウェアの変更とシビアアクシデント管理の強化の妨げとなってしまった．

福島第一の事故で示されたように，このアプローチには弱点があった．SAMA の解析に用いられる PRA は想定範囲が限定的だったので，極端な外的起因事象による設計基準外事象は内的起因事象によって発生する事象に対して採用しているほど詳細には解析されなかった．スコープ解析の結果，アクシデントマネジメント能力を越えるような設計基準外の外部事象は極めて考えにくく，公衆の健康と安全に関する適性レベルを保持するために必要な追加機能は必要ないとされた．これらのスコープ解析には全ての外部ハザードが含まれておらず，極端な外部ハザードを十分に考慮していなかった．[2][15][16][64] このように，稀ではあるが生じ得る外部事象によって生じる受入れられない結末に対

する防護の厚みが実現されることはなかった. その結果, これらの設計基準外の外部ハザードに対する深層防護は苛酷な炉心損傷を防止するためには不十分であったと考えられる. 全リスクアプローチを用いるべきというASMEタスクフォースの提案の根底にはこのような考察がある.

原子炉の運転員や他のプラントスタッフはEOPの範囲を超えるプラント状態に対する訓練を受けている. このような訓練の技術的内容や頻度は様々である. 福島第一の運転スタッフの間には, 計器が使えず判断に必要な兆候も認められなかったのでEOPからSAMG等の他の手順に移行することについて混乱が生じていた. [15][17][63]後述するように, 福島後の世界的な反応によれば, 米国において2001年9月11日以後に実施されているSAMGやEDMGのような既存の戦略は福島で経験したような極端な事象に対処するには不十分であるという懸念がある.

福島第一の運転員は, 利用可能なアクシデントマネジメント手順書の利用にあたってハンディを背負っていたともいえる. 何故なら, 現行の日本や各国のEOP, SAMGは何らかの交流電源が利用可能であるか直ちに復帰することを前提としており, 計器の継続運転のために直流電源は常時利用出来ることを想定しているからである. [67] 重要なプラントパラメータを示す計器なしには, EOP, SAMGの利用はいっそう困難となるか, 全く役に立たなくなる可能性もある. 多くの米国プラントのEOPはNRCの全電源停止ルール (10CFR50.63) に従って交流電源復帰を前提として開発されており, この場合の対処時間は相対的に短い時間(例えば 8 時間まで) を想定している. 交流電源が全く利用できない場合のEOPは準備されておらず, 長時間の全電源喪失は考慮していない.

アクシデントマネジメントの手順書, 装置, 計装が不十分であったために福島第一プラントのスタッフに混乱が生じ, 炉心冷却について適切な対応をとることが出来なかった. 例えば, プラントスタッフはSAMG 装置の使用やシビアアクシデントに関する制御室シミュレータの訓練を十分積んでいなかった. 彼らは使用済み燃料プールの冷却の対応も求められ, その損傷の可能性にも気を使わなければならなかった. これらの要因と他の外的要因によって, スタッフは原子炉の安全にとって圧倒的に重要な炉心冷却の維持に集中出来なくなった. [2]

6.6. 福島後の世界の対応

福島第一事故の後, 各国の事業者と規制当局は電源供給系の長期喪失に対するアクシデントマネジメント対策を評価する検討に取組み始めた. これらの評価の目的は, INPO IER 11-1 の事故評価ガイドやNRC TI 2515/183とTI 2515/184の検査プロセスにおいて論じられている設計基準外事象に対するプラントの備えを判断するものであった. [68][69]

一般に, アクシデントマネジメント機能(装置と手順)は, 炉心あるいは格納施設の防護にとって重要とであり, 福島第一で経験されたような条件下において環境への放射の管理されない放出を防ぐことが出来るはずだったと考えられていた. 特に, 既設の機器と EOP に依存するアクシデントマネジメント機能は, 少なくとも米国ではいざという時に直ぐに発動出来るよう維持されていた. 一方, 重要な機器の損傷に至るような炉心損傷事故や苛酷事象を扱うアクシデントマネジメントの追加機能は, 同様の高いレベルには維持されていなかった. 例えば, 福島後に米国の設備に対して実施された評価において, 可搬型ポンプは想定通りに利用可能であったもののポンプとプラントの系統を接続するホースや接続器具が準備されていないプラントがあった. アクシデントマネジメント活動を遂行するためのプラントスタッフの訓練が適切ではなく, 対策が上手く行きそうにないというケースもあった. 西欧州での苛酷な外部事象への各プラントの耐性を評価するためにストレステストが実施され完了しているが, その結果によれば参加したプラント間でアクシデントマネジメント機能に対する著しい差異が存在している. [70]

福島第一事故の後多くの国でストレステストが行われ，設計基準を超える外部事象に対するプラントの安全裕度が評価された．他の国では，設計時に想定している喪失時間を超える全交流電源喪失に対する安全裕度の検証を実施しているところもある．これらの検証によりアクシデントマネジメントが信頼出来るものであればプラントの設計基準を上回る大きな安全裕度があることが明らかになった．これらの評価によって極端な外部事象に対する弱点とアクシデントマネジメントの改善点も分かってきた．ストレステストで更に明らかとなったことは，使用可能な機器が無くなり，或いはプラント運転スタッフが状況判断と必要な行動をとれなくなることで現行のアクシデントマネジメント戦略が有効でなくなる極端な事象のレベルが存在することである．これらは全リスクアプローチの適用によって改善出来るものである．[70]

米国では，原子力産業が自己診断に基づいて福島の教訓を見出して対応するためのシステムを開発した．”The Way Forward” [66] には FLEX と呼ばれる産業界のアプローチが示されているが，これは福島の教訓に基づいてアクシデントマネジメント機能を強化するものである．[71] FLEX は多様で柔軟な事故対応機能を提供するものであり，苛酷な自然現象（地震，洪水，強風のような）の後に使用不可となり得る恒設機器のバックアップを提供するものであり，また，誤動作に対して利用可能となっている機器を補助するものである．[72] FLEX のアプローチは，炉心冷却，格納施設の健全性，及び使用済み燃料プールの冷却等の重要な安全機能を維持するために必要となる電源と水を確保するための多重の手段を提供する設計対策も含んでいる．

FLEX アプローチには，苛酷な外部事象による長期の全交流電源喪失に耐えるだけのプラント機能を改善する新たなアクシデントマネジメント技術の開発も含まれている．その中には，脅威に対応するための機器，手順と手順書，機器の即応性と貯蔵，搬送，訓練なども含まれる．追加される機器には固定設備，サイト内に配備される可搬型機器，地域や国のセンターに配備される可搬型機器などがある．このアプローチは，敷地内外のインフラ設備が苛酷な損傷を受けた際のアクシデントマネジメント機能の提供の必要性を考えたものである．FLEX アプローチは段階的に進めるものであって，まず炉心冷却と格納施設の健全性を維持するために直ちに必要となるものを検討し，次に長期間これらの能力を維持することが必要となる可能性を検討している．

FLEX アプローチは歴史上の苛酷事象を上回る事象が起きる可能性を想定している．米国のプラントは近年苛酷なハリケーン（例えば Turkey Point, 1992 年），洪水（例えば Browns Ferry, 2011 年），地震 (North Anna, 2011 年）などの脅威に晒されてきた．これらの事象によって炉心冷却や格納施設の健全性が脅かされることはなかったが，さらに深刻な事象が安全を脅かす事も考えられる．であるから，深刻な影響を与える事態にいたり得る，稀ではあるが生じ得る事象に対して FLEX アプローチを準備しておくことが重要なのである．この FLEX アプローチは，発生確率を考慮するよりはむしろ稀ではあるが重大な事象に対する多層防護，つまり設計基準事象に対する防護対策が働かなった場合のプラントの炉心冷却の喪失を防ぎ，格納施設の健全性を維持し，影響度を緩和する機能に着目している点で正しい方向性であると言えよう．

6.7. 現状の対応を超える措置

福島第一事故から学んだことは，プラントや周辺の社会のインフラ設備に損傷を及ぼすような，ごくまれではあっても重大な事象を検討しておくことの必要性である．その損傷の程度は，支援状況に依存して大きく変わる．しかし，アクシデントマネジメントに関してこの事故から学んだ重要なことは，受け入れがたいレベルの社会政治的，経済的影響を伴うような社会の破綻に至るような大規模な放射性物質の放出を防ぐことの必要性である．この問題を解決出来る唯一の合理的方法は，全リスクアプロー

チの適用である. 社会政治的, 経済的損害は地理的な意味での政治境界の中に留めることができないので, このアプローチは世界規模で採用されるべきであろう.

このレポートで提案しているアクシデントマネジメントに対する全リスクアプローチは, 事象の発生確率, 付随する不確実性, 潜在的な影響度, クリフエッジ効果などを適切に考慮しながら, 全てのプラント運転モードにおける内的ハザード, 外的ハザード, セキュリティへの脅威も対象として, 原子力発電炉と使用済燃料施設の安全に対する広範囲な脅威に対処するものである. この脅威は, 設計基準事象とそれを超過する, 稀ではあるが生じ得る事象に対してリスク情報活用しながら対応することになる. 全てのリスクによる脅威とその影響に対する緩和能力の有効性が考慮すべき適切な強化策を特定する際に重要である. このアプローチによれば, 先に図 7 で示したように, 機器, 手順, 訓練, 人的能力等を含むアクシデントマネジメントのあらゆる段階での変更が必要になると考えられる. 最後に, プラント, プラント従業員, 一般公衆を保護するべき極端な外部事象のレベルの定義など, アクシデントマネジメント能力に関する優れた世界標準を作る必要性がる. つまり, アクシデントマネジメント対策は設計基準の一環として, また稀ではあるが生じ得る事象への対応能力の一環として, 用意され維持されて万全となっていることが求められる.

6.8. まとめ

福島第一事故により現行のアクシデントマネジメント機能には弱点があり改善が必要であることが示された. 世界の原子力産業界と規制当局はこれらの弱点に対処すべく努力している. アクシデントマネジメント機能の強化は, 多くの場合設計基準事象と設計基準外事象に対処するためのよりロバストな機能を求めることに終わりがちである. アクシデントマネジメントの改善は各国毎（地域毎の場合もある）に検討されており, 間違いなく世界の中で異なるレベルの改善提案が出てくるであろう.

原子力の将来は, ある一つのプラントにおける設計基準外事象に対応する能力に依存している. 従って, 高いレベルのアクシデントマネジメント能力を策定し維持することを世界規模で統一的に行なっていくことの必要性が強く存在している.

7. 緊急事態への備え

7.1. はじめに

緊急事態への備え(EP)は原子力発電プラントの設計，建設，運転の全体に適用される深層防護思想の中心となるものである．NRC の EP に対する要求は 10 CFR 50.47 [73] と 10 CRF 50, Appendix E [74] に記載されている．この要求はプラントライセンス保有者に対して適用されるものであり，緊急計画区域 (EPZ) の範囲に加えて，オンサイト機能をカバーする 16 の計画要素を含んでいる．この中には組織，装置，訓練，オフサイト組織とのインターフェースなどが含まれている．米国におけるオフサイト規制は連邦緊急対策局 (Federal Emergency Management Agency, FEMA) の管轄であって，FEMA 基準の中に記載されている．

EP 計画の要素は放射線に関連する緊急事態の際に採用される公衆の健康安全のための防護対策となるように設計されている．EP について以下でとりあげる理由は，次のとおりである．(1)新たな安全概念は，EP から派生したものである全リスクアプローチによる安全の実現を意図していること，(2)過酷事故による社会政治的，経済的影響の大きさを喚起することに加えて，新しい安全概念には，公衆を放射能の影響から防護する必要性も含まれていること，(3)EP 機能とアクシデントマネジメント機能との間には，多くの共通性があること，等である．オンサイトの緊急対応組織(ERO)が放射能緊急時に緊急対応とアクシデントマネジメントの両者を監督していることも看過出来ない．

ASME タスクフォースの EP に対する視点は世界規模のものであるが，米国国内の状況が色濃く反映している．[3] この視点の中には，福島第一事故の教訓のリストアップと，それらの教訓を考慮に入れた EP 領域に関する議論や，ASME タスクフォースが新しい安全概念を検討する際に推奨する事項と現行方式などがある．

TMI-2 の後，各原子力プラントサイトと，EPZ に含まれる州や地方政府当局の公式の緊急対応計画とともに，しっかりとした EP プログラムを確立することに大きな注目が集まった．2011 年の米国における 9.11 テロ攻撃の後に，更に多くの変更がなされた．これらの尽力によって，有効で成熟した計画が出来上がっている．福島第一事故を受けて，EP を更に改善出来るかどうかを検討することは適切なことであろう．いかなる EP 改善のイニシアティブ，つまりどのような潜在的なプラント改善であっても，対象とするものではあるが，その提案されたイニシアティブが，意図した便益を生みだし，他の深層防護の要素に悪影響を及ぼさないことを確実に検証するために，客観的で，構造化され，総括的なレビューを受けたものでなければならない．そのようなイニシアティブを実行に移す前にもそれが明確で，定量的に示される安全上の便益を生み出すものであることを確認する必要がある．さらに考慮することとして，その発議に必要となる全体的コストが，得られる安全上の便益と比較して，妥当なものであるかどうかを検討しなければならない．EP に関係することには，なるべく広範囲の利害関係者の関与が求められる．それは，実施される改善策が投資に見合い，安全の改善の目的にかなうものであることを検証するために必要なことである．

[3] 緊急時対応計画は，世界的に原子力プラントの要求事項となっている．EPZ のサイズ，EP 要求事項，その原理，実行内容は国々でまちまちで，ここでは言及しないこととする．IAEA は，潜在的なリスクの特性や大きさに基づいて緊急時対応機能を開発するためのガイダンスやアドバイスを記載した数多くの文書を発行している．[76]

7.2. 福島第一事故から学習される EP 関連事項

福島第一事故から学ぶべき EP に関する教訓は多い. このうち, ASME タスクフォースが最も重要と考えるものを, NUREG-0654（原子力発電プラントにおける放射能緊急対応計画と準備の評価の判断規準）の該当部分とともに示す.

表 4 福島第一事故における EP 関連の重要な教訓事項のリスト

福島第一事故の教訓	NUREG-0654 標準計画における該当部分
地域のインフラを破壊し得る極端な外的事象を含む複数ユニット事象のための要員	B
複数ユニット事象の間の緊急時対応者のための防護手段と装置	H, K
複数ユニット事象時の指揮命令系統	A, B
複数ユニット事象時の放射線被ばく評価能力	I
(インターネットやサテライトを通じた)交流電源とは独立のリアルタイム機能を有するオンサイト, オフサイトの最先端の放射線モニタリング機能の必要性	I
長期にわたる全電源喪失 (SBO) の間のコミュニケーション装置の有効度	F, H
正確で自動化されたプラント状態に関するリアルタイムデータの必要性	該当部分なし
切迫した事故条件下での演習と訓練	N, O
長期の SBO と複数ユニット事故時の EP 設備機器の妥当性	H
オンサイト, オフサイのトインフラ設備の破壊を想定した緊急時対応資材の強化の必要性	C
EPZ を越える被ばく, 復帰, 再立ち上げなどの対応の拡大を含む EP 意思決定の仕組みの強化の必要性	A, B
放射線と放射線安全に関する公衆の認識のギャップ	G
低レベル放射線影響などの帰宅規準に関するよりよい科学的根拠の必要性	該当部分なし
過去 10 年のソーシャルメディア発展を認識したうえでの危機コミュニケーションシステムの改善の必要性	該当部分なし
原子力安全に関する透明性と公衆からの信頼の構築の必要性	該当部分なし
EPZ サイズに関する最新の知識基盤の必要性	該当部分なし
EP に対するリスク情報活用, 性能規定アプローチの必要性	該当部分なし

これらの多くの教訓は他の組織，例えば NRC[75], NEI[71], IAEA 等の国際グループ[76]などでも認識されてきた．優先順位については関係者の間で議論が行われているところであるが，これらの教訓の中の多くは既に公表されている．それ以外のもの，特に表 4 の灰色に示す下 5 行については，おそらくあまり認識されていないものであり，NUREG-0654 でも取り上げられていないが，それでも ASME タスクフォースの見解としては，重要なものである．第 7.3 節ではこれらの教訓に関する ASME タスクフォースの見解を示すが，これらは本レポートで提案する新しい安全概念においてきわめて重要なものと考えられる．

本章の緒言で述べた通り，EP のプロセスと関係する福島の教訓から派生する変更については総体として評価されなければならない．このような評価によって，公衆の健康，安全に対する防護要求の増大に答えるために改善がなされるべきか，またどの程度なされるべきかを決断でき，またこれを越えて社会-政治的，経済的影響に答えるために追加の改善がなされるべきかどうかの決断が可能となるのであり，これこそが，新たな安全概念の中心となる視点である．このような評価で重要な要素は，利害関係者が費用対効果の妥当性に確信を持った上で実行出来ることである．

7.3. 新安全概念における EP 関連の教訓

本節では，表 4 に示す EP に関係する教訓に中に含まれる 6 つの EP の分野について取り上げ，現行の EP の実践状況と ASME タスクフォースが新安全概念の中で推奨することとの相違点について述べる．この 6 つの領域とは，インフラ設備，演習と訓練，長期にわたる居住，危機コミュニケーション，EPZ 範囲の更新方針，EP に対するリスク情報活用，性能ベースアプローチの開発である．公衆からの信頼の構築については，他の横断事項とともに 8 章にて取り扱われる．表 4 に示す教訓の全てについて全世界の原子力コミュニティーで検討されるべきであり，下記に示すことと 8 章で述べることが新安全概念においてことさらに重要である．

7.3.1. インフラ設備の改善

新安全概念では，EP 改善で最も優先順位が高いのは，稀ではあるが重大な事象を起点とする苛酷原子炉事故が起きた際に実施すべき緊急対応機能を実現し，可能とするために必要となるインフラ設備(装置，機器，情報設備) であり，これらは全リスクアプローチから特定されるものである．

何十年にわたる運転経験や PRA に基づく洞察をもってしても，原子力プラントの安全を脅かし得る，もしくは事故に至り得る全ての可能な事象や事象の組合せを想定することは，原子力コミュニティーにとって困難なことである．これは他のいかなる複雑なシステム技術によってもそうである．そのため，最新の技術を活用した，多様で柔軟性がある緊急対応プログラムが必要なのであり，そのようなプログラムが存在し，事故の初期に起きうる極度の予測不能の条件下で，機能することが保障されている必要がある．[4] セキュリティに関する事象に加えて，低確率，高影響度事象，例えば全交流，直流電源の喪失による全電源喪失(SBO)や，損傷を受けたサイト環境や周辺状況，長期に及ぶ地上アクセス困難などの事象によってもたらされる条件をも想定するなどの柔軟性を持つものでなければならない．

予期せぬ条件下で，要求機能を実現するために強化されたプログラム能力を提供する EP インフラ設備の改善候補としては以下のようなことが考えられる．

- サイトの EP プログラムは，(SBO，複数ユニット事象，外的事象のような) シビアアクシデント条件の範囲において，必要な範囲で相当の長期間に亘って自己完結したものでなければ

[4] 多様で柔軟性のある緊急対応プログラムで，最も決定的で重要な部分は，重要安全機能(炉心冷却，格納健全性，使用済燃料冷却)の維持である．これらの重要機能はオンサイト，オフサイト EP において，調和を保ちつつ統合されていなければならない．緊急対応の中での重要安全機能の維持に関しては，本レポートの 6 章で言及されている．

ならない. その期間とは, 必要な支援が十分にサイトから得られることが保障されるまでの十分に長い時間のことをいう. その中には, 緊急対応人員がその間放射能の被ばくから防護されること, 水, 食物, 公衆衛生, 睡眠環境が容易に得られること, 緊急対応機器, 設備が極限状態においても機能していることなどが含まれる.

- 広範囲で長期にわたる停電条件下にあって, EPZ 内のオフサイト防護措置の有効性が確認されていなければならない.
- 長期間に亘り, 事故条件, サイト条件において, オンサイト, オフサイトのコミュニケーションインフラ設備が機能していること. 考慮しなければならないコミュニケーションインフラ設備の例は, 第 8 章の中で取り扱われる.
- EP 機能を実現するために必要となる設備は長期化した SBO のような事故, サイト条件下において動作する能力を保有するように, 信頼出来る電源で強化されなければならない. この中には, サイト内や周辺の放射能レベルのモニタリングに使用する装置, 気象条件のモニタリング装置, 放射線量予測やプルーム解析*に利用されるコンピュータ装置とソフトウェア, サイトからオフサイトの意思決定者に正確で, リアルタイムデータを自動的に伝達することを保障するための装置などが含まれる.
- オンサイトと周辺の放射能モニタリングのための最新のネットワークについて注意を払うべきである(例えば, 緊急時用の WiFi 機能を有するγチャンバタイプの検出器など). この結果, 長期化した SBO 条件下でも放射能モニタリング機能が保障され, より広域の拡張モニタリングの潜在的必要性に答えることができ, 意思決定者や利害関係者に対してモニタリング結果のより迅速なコミュニケーションを実現する.
- 地域支援機材供給センターを検討するべきである. このセンターは, オフサイトから協定で決められた処理時間, 例えば 48 から 72 時間以内に必要に応じて支援を提供出来るように移動されるものである.
- 緊急時の EP 指揮命令と意思決定の権限保有者のレビューを実施しておくべきである. 本件に関する事項は 8.3.1 で取扱う.

7.3.2. より現実味のある演習と訓練

効率的にオンサイト, オフサイトの EP プログラムを実施するためには, 緊急状態下で役割を果たすために, プログラム実行にあたり緊急時の役割がよく整理されていなければならない. オンサイトの ERO 人員及び, オフサイトの対応者, 地方と州の当局者はその責任を果たすための徹底的な訓練を受ける必要があり, その責任を果たすための演習を行う機会を与えられる必要がある. その演習はプラントの運転に影響を与えない範囲で真の事故状態を模擬するものでなければならない.

TMI-2 事故の後, 米国原子力産業は ERO のサイトとオフサイト担当者が緊急時対応に十分に慣れておくよう難易度の高い訓練や演習のプログラムを実施してきた. 過去数年に亘り, 火災や爆発による広領域の機能不全の可能性に対応するために演習内容の改訂を積み重ねてきた. 福島第一事故の観点からは, 原子力産業界は更なる改善を確実にするための 3 つの重要な領域での既存の訓練や演習を厳しく見直す必要があろう. 3 つの重要な領域とは (1)サイトでの複数ユニット健全性を脅かす事象, (2)これまでのドリルや演習で想定してきた時間よりも長期にわたって展開される事象, (3)事象への対応を支援するためのインフラ設備, サイトへのアクセスなどが致命的事態に結び付くような苛酷外的事象や SBO などの事象, である.

* 訳者註:プルーム解析とは, 汚染濃度分布解析のことをいう

3 つの重要領域について言及するに当たり，考慮するべきトレーニング，ドリル，演習について，特別に変更するべき事項としては以下のものが挙げられる．

- ドリルの中には外的事象や全電源喪失のような多重事象にさらされ，オンサイト，オフサイトのインフラ設備が致命傷を負う事態のときの事故シナリオを考慮しておく必要がある．
- ドリルは，長期に亘るオンサイト，オフサイト緊急対応が必要になる放射能放出がより遅いペースで進む事故シナリオも扱うべきである．福島事故の経験や，NRC の最先端原子炉影響度解析 (SOARCA) のような近年の過酷事故解析結果によれば，ドリルや演習で考慮されてきたような事態よりは，もう少し遅いペースで事故が進行することが示されている．[77]
- 米国の産業界が地域に支援物資や機器の供給のための拠点を追加設置することを検討中であるならば，演習プログラムには，これらの機器の配備訓練も入れて置かなければならない．この訓練では，当該の区域へのアクセスを阻害する可能性のある，例えば高い空間線量率，瓦礫の存在，その他の障害等の不利な条件の下でこれらの機器を接続することも必要である．
- どのような事故や緊急事態にせよ，公衆に対してタイムリーに，正確で容易に理解出来るように説明することが，ことさらに重要であるとするならば，クライシスコミュニケーションの再考が求められる．例えば，放射能の緊急事態における緊急状況の説明者が招集出来ることを保障するために，今まで以上の努力が求められる．このことは，さらに第 8 章で取り扱われる．

これらの変更は，頻繁な内的な演習や訓練を通じて達成出来るものであり，外部の演習を拡大して実施したり頻繁に実施するだけでは，達成することは期待できない．

7.3.3. 長期間の居住規準(帰還規準)

NRC の EP に対する 16 の計画要素の一つが，回復と帰還であり，退避領域の再居住を許容するために防護対策を緩和するための意思決定や手順について記載している．州ごとに多少の差はあるものの，ほとんどの州と米国環境保護局(EPA)は，長期の居住（つまり，自宅への復帰）のために年間 500 ミリレム（5 ミリシーベルト）の制限を採用している．このことは，10 マイル EPZ の内側から退避した人，10 マイル EPZ の外側で転居している人は，もし，年間の放射線被ばくが 500 ミリレム（5 ミリシーベルト）以下であれば，一般に自宅に戻ること，仕事に復帰することが許容されることを意味する．国際放射線防護委員会 (ICRP) は，年間 100 から 2000 ミリレム，（1 から 20 ミリシーベルト)を居住移転の規準としている．日本政府は，避難エリアへの復帰の許容値を 2000 ミリレム（20 ミリシーベルト）以下とするガイドラインを採用したが，これは，現状での評価値ではあるが，ICRP 推奨値の最大値である．

復帰のための許容値は土壌汚染の長期に亘る経済的インパクトを左右する重要な要素である．後発性癌死リスクのモデルは長期居住制限や他の低被ばく目標・制限が設定される際に中心となっているが，その多くが高レベル被ばくで観察された影響の外挿を行う手法のデータに基づいており，全く影響が観察されない低レベルの被ばくに対して同一の線形関係の成立性を仮定している．このような研究は何十年に亘るものであり，広島，長崎の被ばく生存者の癌発生の評価が継続して行われている．

結局のところ，低レベルの放射線からの健康リスクは明確でなく，説明が困難である．この健康リスクに関する意見は様々あり，全ての放射線レベルにおいてリスクは線形に変化すると仮定し癌リスクに閾値は存在しない，とするものから，自然界のバックグラウンドの放射線と医療関係で被ばくする平均量の総和[年間 620 ミリレム（6.2 ミリシーベルト）以下であれば癌リスクはないとするもの，健康物理学会 (HPS) のように年間 5 レム（50 ミリシーベルト）で，生涯 10 レム（100 ミリシーベルト）までは癌リスクは

ないとするもの [77] など様々である. 実際には被ばく量と影響との間に線形関係は成立しないとする知見が集約されつつある. [5]

福島第一から20キロ圏内で避難した住人が復帰するスケジュールと関係して, 長期に亘る居住性(自宅への復帰)の制限が日本政府の重要な課題となりつつある. 日本にとって, 低レベル放射線のリスクの不確実性にいかにして答えるか, ということは科学的であるとともに倫理的な問題である. つまり, この科学的リスクが過度の洗浄という社会-経済的負担, もしくは避難者が日常生活に復帰することを許容しないことによる負担とのトレードオフの関係となっている.

低レベル放射線被ばくの長期に亘る健康被害に関するより良い科学的研究の必要性が極めて高くなっている. これに対応するべく, ASME タスクフォースは, 世界の原子力産業界, 健康物理や放射線生物学的影響の分野の人達により行われる低レベル放射線の影響に関する研究を強く推奨し, 福島事故のデータを収集するとともに, そのデータを利用し, 低レベル放射線リスクの科学的知見が改善されることを望むものである. それとともに, 長期に亘る居住性と, 自宅復帰に関する国際的な意思決定のための枠組みと標準を開発することが望まれる.

7.3.4. 公衆の信頼の構築

福島第一事故の後世界の原子力産業界は特異な状況に置かれ, 安全で確実な発電手段としての原子力に対する公衆の信頼を改善することが急務となった. 原子力プラントにおいて, 周辺コミュニティーにおいてしばしば EP は重要な公衆への顔, と見られている. 広範囲に亘り, しかも EP の観点から公衆の信頼を構築することについては, 第 8 章で論じる.

7.3.5. EPZ サイズの更新根拠

ここでは, 米国における現行のEPZの範囲の技術的根拠と本来のEPZの範囲の裕度と保守性について概観する. それとともに, EPZ の範囲に対する技術的根拠を見直すための世界規模の努力の必要性についても議論する.

7.3.5.1. 現行の EPZ サイズ根拠

米国において体外被ばくの EPZ 距離の技術的基盤は現行では 10 マイル(16km)であり, 体内被ばくについての EPZ 距離は 50 マイル(90km)であって, これらは NRC-EPA 合同タスクフォースによって 1978 年に出版された NUREG-0396 [78] に記載されている.

10 マイルの外部被ばく EPZ の推奨を決定するに当たり, NUREG-0396 では 4 つの事項が検討されている. これらの検討事項は, オンサイト, オフサイトの EP アクションの手引きに関する FEMA-NRC の合同文書である NUREG-0654[79]において, 再度検討されている.

a. 設計基準事故 (DBA) において予想される被ばく線量は, 防護アクションガイド (PAG) レベル, つまりEPZの外では全実効線量当量 (Total Effective Dose Equivalent, TEDE) 1から5remを越えることはない

b. それほど苛酷でない炉心溶融事故(多くの場合そうであるが), 被ばく線量は EPZ の外では PAG レベルを越えることはない

[5] 近年米国エネルギー庁(DOE)のローレンスバークレー国立研究所の研究者が, 癌リスクが被爆量に直接比例するわけではない証拠を見出した. そのデータによると, 低レベルの放射線下では, 高レベルでの被爆のときよりも, よりDNAの回復メカニズムが機能している. この非線形のDNA損傷応答は, 放射線がわずかであっても有害であり, 加算されるとする一般によく用いられる仮定に疑問を投げかけている. ローレンスバークレーや他の研究の成果で重要なことは, 被爆制限が放射線の危険性の健全な理解に基づいて決定されるべく, 基盤ができつつあるという喜ばしい兆候を示している.

c. より苛酷な炉心溶融事故（最悪のケース）の場合にも EPZ の外では直ちに生命を脅かすレベルに到達することはない

d. 処置が必要と判明した事象に対して，10 マイル以内の詳細計画が，対応するべき作業の強化に対する重要な知見を提供する

被ばくレベルとその確率の評価については，NUREG-0396 で用いられている過酷事故の頻度と影響度に関して，主要な部分は原子炉安全研究(WASH-1400)[32]を参照している．約 40 年前に出版されたこのレポートにおいて，米国内の原子力プラント PRA が初めて取り上げられ，1970 年代初期に存在していた過酷事故に関する展望と最先端の知見を反映したものとなっていた．WASH-1400 には，ソースタームが含まれていた（例えば，放射能放出強度や事故からのタイミングなど）．しかし，今日ではこれらのものは非現実的なものであることがわかっている（例えば，今日予測されるものより放出規模がより大きく，また放出速度がより早いものであった）．

内部被ばく EPZ は，牛/牛乳由来の潜在的な甲状腺被ばくに基づいている．NUREG-0396 は，牛乳摂取に基づく外部被曝距離として，10 マイルの外部被ばく距離にほぼ対応する値として 50 マイルを推奨している．つまり，炉心溶融事故が起きたとして，10 マイルの外部被ばく EPZ において 1 レム，TEDE PAG を越える可能性は約 30%であり，50 マイル内部被ばく EPZ における 1.5 レム牛乳由来の PAG を越える可能性は 50%である．

7.3.5.2. EPZ サイズの保守性

より現実的で最新のソースターム情報を用いて EPZ サイズを再評価したところ，米国の典型的な稼働プラントに対しては，10 マイル外部被ばく EPZ には，過剰な裕度と保守性が含まれることが明らかになった．[80] 表 5 に，1 レム，5 レム，50 レム，200 レムを超過する条件付き確率を示す．第2列は，2 から 3 マイル（3.2 キロから 4.8 キロ）の距離における最新のソースタームに対するものであり，第 3 列は，NUREG-0396 の図 I-11 に示されているものであり，WASH-1400 に基づき，10 マイル（16 キロ）に対する結果である．表 5 は，10 マイル外部被ばく EPZ に存在する過剰な裕度と保守性を明確に示している．50 マイル内部被ばく EPZ についても，同様に裕度が存在している．これらの情報をもとに，米国内の稼働中のプラントについて，既存の EPZ サイズは公衆の健康，安全防護ガイドラインに十分に適合するようになることが望まれる．米国内と世界で建設が始まっている第 III+世代の原子力発電については，さらに大きな保守性が存在しているものと思われる．

表 5 最新のソースタームと NUREG-0396 におけるプラントの外部被ばく超過確率

被ばく量	被ばく超過の条件付き確率	
	最新の過酷事故ソースターム情報での典型的な米国稼働プラント(2-3 マイル，3.2-4.8km)	NUREG-0396,図 I-11 (10 マイル，16km)
10 ミリシーベルト(1レム)	0.1	0.3
50 ミリシーベルト(5 レム)	0.07	0.25
500 ミリシーベルト(50 レム)	0.02	0.1
2 シーベルト(200 レム)	<0.001	0.001-0.01

7.3.5.3. EPZ サイズの技術的根拠の見直しの必要性

NUREG-0396 は，過酷事故に関する 1970 年代当時の最先端の知見と普及していた見解を反映したものではあったが，以下に理由を述べる通り，EPZ サイズの技術基盤の見直しを行うことが適当である．このことは必ずしも，EPZ サイズの縮小の必要性を訴えるものではなく，むしろ，EPZ サイズの合理性を

示すために過酷事故に対する最新技術とソースターム手法を適用することを推奨するものである.

見直しの主たる動機は, 既存の EP 技術基盤が NUREG-0396 で開発されてから 30 年以上が経過しており, その間に世界の原子力コミュニティーは過酷事故に関して多くの運転経験, 重要な実験データ, 解析結果を蓄積してきていることである. NUREG-0396 の根拠となっている WASH-1400 のような初期の研究では, 相対的に速度が速く, 大量の放出物があり, 見積もられる過酷事故リスクが過度に悲観的なものとなっていた. EPZ の根拠として最先端の科学的情報を利用することが, ここで提案する新しい安全概念と整合性を持つものである.

EPZ サイズの根拠見直しの必要性の第二の要素として, アクシデントマネジメントを通じて過酷事故を防止し, 影響を緩和するための運転員の能力が PRA では担保されていなかったことが挙げられる. SOARCA 研究[77]で示されたように, 効果的なアクシデントマネジメントによって, 事故シナリオの範囲を制御する能力は飛躍的に向上し, 過酷事故時の炉心溶融や放射能放出のリスクを飛躍的に減少することが可能となる.

最後に, EPZ の根拠となる手法の見直しは, 原子力安全と EP に対する公衆の信頼を強化することにつながるであろう. NUREG-0396 で採用されている既存の EPZ の根拠は原子力プラント事故によるリスクを過大評価しており, その結果公衆の放射線からの防護にとって好ましくない不適切なアクションに繋がりかねない. 適正に策定されれば, アプローチを見直すことによって, 事故とリスクの情報は結果の誤用を防ぐような形で活用され, 文書化されなければならないという NRC が過去 10 年間に勧告してきた意見を実現する事が出来るだろう. 公衆の健康に災害を及ぼすかの如くの計算やその公表, 過度に不適切な物質放出, 非現実的な事態の発表は何の役にも立たず, ゴミ以外の何物でもなく, しばしば根拠のない恐怖心を煽ることにつながる.

福島第一事故を受けても, EPZ サイズの根拠を見直すアプローチに対する必要性はいささかも変わるものではない. EP は, 公衆の健康と安全に取組むことを意図している. 福島第一事故はプラントに対しては重大な損傷を及ぼし, 広領域にわたる汚染と住居, 学校, 職場の移動などのオフサイトにおける経済的被害はあったものの, 放射能から受ける公衆の健康や安全に対する影響は, 小さく物質の放出速度は速くはなく, 防護対策によって処理することが出来るものであった.

EPZ の技術的根拠を見直すことの必要性について議論を積み重ねることは米国主体のものであるが, 新原子力安全概念の原理と整合性を持つ, つまり, 世界中の原子力プラントの安全で信頼出来る運転を継続し拡張していくためのプラットフォームを提供するためには, ここで考えるような EPZ の根拠の見直しが世界規模の活動として行われるべきである.

新規の原子力プラントのための EPZ を設定するための根拠についても, そのプラントの安全性に対する要求が高くなっていることに配慮した上で決定する必要がある. 新設プラントについては, 全体の炉心溶融頻度の計算値は, 現行の運転プラントに対して 2 桁は小さいものとなる. 新プラントの設計の中には, 交流電源に依存しない受動的安全性をもつものがあり, 最低72時間の間, 事故を管理するための運転操作を求めないもある. 潜在的な事故対応に割くことの出来る長いリードタイムと, 設計の受動的特性による安全性の向上があるので, それらのプラントについては EPZ サイズの見直しをするだけの技術的根拠があると考えてよい.

さらに, NRC と産業界では, 小型モジュラー炉 (SMR) の設計に対する EP の検討も進んでいる. NRC は SECY-11-0152[81]を発行済みであり, 炉型に依存せず(technology-neutral), 被ばく線量ベースの, 影響度評価を指向した SMR 用の EP の枠組みを開発する意向を述べている. そこでは種々の設計, モジュラー性, コロケーション, EPZ サイズなどを考慮している. 産業界では, SMR 用の EP と EPZ サイズに対する段階的アプローチ(graded approach)の枠組みについても開発中である. [82][83]

7.4. EP に対するリスク情報活用，性能ベースアプローチ

要求事項の定義や規制監視をする際にリスク情報活用や性能ベースアプローチをより多く活用することによって EP が有用なものとなる．これは特に新規原子力プラントに対して有効であるが稼働中のプラントに対しても有効である．このことは，30 年前 TMI-2 後に開発された米国の現行の決定論的アプローチと対照的である．当時は計画の際の要素の値を明確に決める方法がなく，計画要素に追加したり変更したりする方法も明確ではなかった．更に，現行の決定論的アプローチでは，あるサイトに他のサイトと大きな相違点があっても，またあるプラントの設計が他の設計と異なっていても，またこれらの両者が異なる場合であっても，EP 要求の実施に関しては認可申請者にはあまり柔軟性が与えられていない．NRC はリスク情報活用による EP の規制監視の実現可能性と方向性を決定するための活動に着手している．[84] SOARCA プロジェクトもまた EP の改定を考えるための基盤を提供する．EP の費用対効果を改善し，認可申請者への柔軟性を増すリスク情報活用と性能ベースアプローチの開発は，米国連邦政府の規制は利用可能な最新の科学技術に基づくべきであり，予測可能性を増して不確定性を減少し，規制目的の達成のために最適で最先端かつ，最小限の負担で済むツールを特定した上で使用し，費用と便益の定量的，定性的な特性を考慮することである，とする最近の大統領令及び関連するガイダンス文書とも整合するものである．[85]

リスク情報活用，性能ベースアプローチの要求事項は認可申請者に一連の規準や目標を守らせるという形になろう．つまり，関連するモニタ指標を用いてその規準や目標に合致していることを確認することとなる．例えば，EPZ と付随する緊急計画が事前に定義された緊急行動レベル(EALs)や，連動する防護行動とともに準備されていること，等が考えられる．EP プログラムとして他に考えられる要素は，リスク情報活用や性能ベースシステムを用いてサイトに固有の規準として特定出来るであろう．リスク情報活用，性能ベース規準，もしくは目標はプラントの事故時にその程度を緩和するように設計され，公衆を一連の過酷事故から十分に防護することである．深層防護は，決定論的原理において不確定性の取り扱いがあるために用いられるが，リスク情報活用や性能ベースシステムでの開発にあっても要求事項の基本の一部であり，EPZ，EALs，防護的アクションが存在するべきということ，検討している一連の事故に対するソースタームが十分な裕度を持っているべきという，課題を満足しなければならない．更に，新しい安全概念の提案とも符合するために，十分な防護規準を越えて，大規模な社会政治的，経済的影響を回避するという原理に基づき追加的措置をとるべきかどうかを決定する必要がある．

米国における EP へのリスク情報活用，性能ベースアプローチは，永年の努力が必要であるが，適切な NRC の新政策と産業界，利害関係者の協力のもと，最終的に整合性のある一連のリスク情報活用規制へと結び付く．しかし，炉心損傷進行，放散物質移送，アクシデントマネジメント，オフサイト影響，緊急対応などの統合化された取り扱いなどの原子力プラント過酷事故解析を行うことが可能な最先端技術は，リスク情報活用 EP を行うだけの技術能力をもつ程度にまで成熟した段階にある．その結果，放射能緊急時に，EP 資源のよりよい提供を行いながら，適切な防護手段を提供することが可能であるというより大きな保障を与えている．

7.5. まとめ

要約すると，ASME タスクフォースは，緊急事態への備えについて以下の見解を持っている．これと関係した結論を 9 章にまとめている．

1. 全交流，直流電源喪失や，サイト周辺被害，サイトアクセスの一時的困難を伴う長期 SBO のような事象によってもたらされる状態のように，事故の初期に起き得る想定外の状態で機能するような EP 関連システムを高度に保障出来るように，オンサイト，オフサイトの EP インフラ

設備がより堅牢かつ柔軟性を持つよう近代化しておかなければならない.

2. EP の演習や訓練はより現実味を帯び, 遅い進行性の事故シナリオに基づき, 複数ユニット事故や長期 SBO 事故のような事故状態に基づくものでなければならない.
3. より科学的な自宅復帰規準の根拠を開発し, 適用しなければならない. 特に, 低レベル放射線の影響を, 土壌汚染の影響とともに取り扱う必要がある.
4. 原子力産業界と規制者は, 福島事故の後, 原子力発電に対する公衆の信頼を改善するための機会を設けなければならない. EP に関しては, 事故後の公衆の反応を見ると, 低レベル放射線リスクを理解するための科学と, 公衆の理解を改善する必要性が大いにあることを示している.
5. 米国における現行の EPZ サイズは過度の裕度と保守性をもっている. ASME タスクフォースは, 典型的な米国の稼働プラントに対して, 現行の EPZ サイズは, 公衆の健康・安全防護ガイドラインを十分に満足していると考えている. しかし, 米国における現行の EPZ サイズの技術的根拠は過酷事故の時代遅れの理解と記述に基づいており, 過去 40 年にわたる研究とプラント運転から学んだことを反映するよう見直しを行わなければならない. 例えば, 事故時の低レベル, 遅い放散物質拡散などの情報である. また, 新しい原子力プラント設計の安全性向上も反映する必要があろう. このような見直しが世界レベルで歩調を合わせて実施する必要があろう.
6. EP は, 要求事項の定義や, 規制監視の実施のために, リスク情報活用や性能ベースアプローチをより多く活用することによって恩恵に浴することとなろう.

8. 原子力安全概念の強化

8.1. はじめに

本節では原子力技術を一般大衆がどのように認識するか，という点と事故の社会的・政治的影響にどのように影響するか，という点でコミュニケーションが果たす重要な役割について焦点を当てて論じる．

地域社会への情報発信 (outreach) は原子力技術の普及において重要な要素であり，一般の人々の信頼を得，他の利害関係者の支持を取り付ける上で必要なステップである． 利害関係者に適切に対応するためには，情報発信プログラムの中身が充実していて，かつ継続的であることが必要である．全世代の市民が小学，中学，高校といった教育制度で教育を受けるなかでその対象となるべきであり，それは成人になっても継続すべきである．

地域支援には2つの異なるコミュニケーションの要素がある：技術に関する日常会話で事情に通じた利害関係者を育てることと，非常時に備えたリスクコミュニケーションである．前者は 8.2 節，後者は 8.3 節でそれぞれ論じる．これらのコミュニケーションは，一般市民に対する情報発信が長期に亘って行われていれば一層有効になる．**原子力技術に対する知識と理解は社会の最大の関心事のひとつである．** 8.3 節でも，緊急時に役に立つと思われるオンサイト/オフサイトのコミュニケーションインフラについて述べる．緊急事態において人々に見通しを与えるための行政および社会一般に対する教育プログラムの重要性に加え，オフサイトサポートおよび全国，地方，地元の行政とのコミュニケーション手段についても論じる．

8.2. 通常の事象における地域支援

技術情報について透明で分かり易くコミュニケート出来ることは一つの能力であるが，その重要性はしばしば過小評価されがちである．この能力はメディアの専門家や特定のスポークスマンにだけあるというものではないし，それでいいはずもない．逆に，複雑な技術の詳細について一般の人に伝えようとするのであるからエンジニアや専門家にとって特に重要な能力である．このことは，題材がしばしば技術的かつ政治的である原子力産業にとって特に困難な課題である．対象の多様な側面から違いを際立たせ，簡単で分かり易い言葉で事実を利害関係者に明確に説明することを継続的に行わなければならない．

知らない物への恐怖は人間のよく知られた反応である．放射能に対する恐怖は，医療目的で使われる場合さえ，見えない脅威というカテゴリに当てはまる．この恐怖は，この技術の開発が初期には核兵器計画として始まったという事実と，発性ガン等の長期的な健康への悪影響との関連に由来している．原子力科学技術の真髄に触れるコミュニケーションプロジェクトを立案，実行することによって一般の人々や利害関係者が知識を得ると，人々はこの技術の展開に関してより深い判断が出来るようになる．いかなる技術の便益であれ社会にもたらされるに当たっては，公衆の理解が必要欠くべからざる要件であって，このことは特に原子力関連技術にとって当てはまるものである．

健全な経済，エネルギー，環境政策は，どの国にとっても重要である．これらのいずれの分野に関する科学は複雑にからみあっている．多様な意見が出て，メディアも一般の人々も，誰の言うことが信用出来，どの方向を目指すべきかという判断が難しい．結果として，継続中のコミュニケーションにおいて最も重要な事は，一般市民と主要な利害関係者に原子力技術に関する初歩的な理解以上の何かを習得してもらう事だと言える．

原子力技術を理解する専門家にとって，一般の人々に情報を提供することは義務である． ASME，

ANS, HPS といった専門家組織は，公的なサービスとして，それぞれの会員に対して一般市民やメディアへの情報発信を推奨し，またそれに備えるべきである．加えて，K-12 教育（高校卒業まで）を科学と工学において強化すべきである．複合技術にますます依存する社会において学生を活かすため，事実に忠実な教科書に裏付けられたカリキュラムで講義するにふさわしい資格を持つ教師が科学の健全な基礎を作るはずである．さらに，科学，技術および数学においてキャリアを積むことを学生に奨励すべきである．

ASME タスクフォースは，原子力について殆ど，或いは全く知識の無い人々は往々にして原子力のリスクを実態より過大に受け止めがちであることから，事故が起こる前に，あるいは事故が無い場合でも，一般の人々に原子力をもっとよく理解してもらうことが通常時の運転に対する公衆の支持を得るために極めて重要であるとの結論に達した．一般市民のこの根拠のないリスク感覚はしばしば当人だけの心配を超えて家族への，特に子供たちへの心配へと拡大するものである．

一般市民とのコミュニケーションのためのスポークスマンを用意することが特に危機状態の最中には不可欠である．特に事故の最中の複雑な問題に関するコミュニケーションは，冷静さを保ち，心理的なトラウマを回避することにより，事故の社会的政治的影響を相当に左右するものである．適正なスポークスマンを抜擢するに当たって重要なことは，その人が一般市民やメディアとの間に信頼関係を生み出せるかどうかである．この意味で，スポークスマンは博識で，歯切れがよく，信頼できそうな人でなければならない．

8.3. 危機コミュニケーション：何が起きていて，それはなぜか

緊急時あるいは危機が勃発した状況において，現代のメディアはまさにリアルタイムの伝達手段を提供することが出来る．現代のニュースコミュニケーションのアクセス性とそのスピードは過去数十年間で劇的に進歩した．矢継ぎ早に展開する現実に対し，極僅かのメディアの支局しか責任ある対応ができなかった時代と比較すると，メディアの形態，内容，経営系列も劇的に変化した．連続的にニュースだけを流すテレビやラジオのチャネルがあるが，それらの内容にはチェックの時間がなく，吟味されていないことがよくある．こうしたチャネルの目的は，アクセス出来るあらゆる情報源から一般の人々へ情報を届けることであり，彼らは速報で競合他社を「出し抜く」よう動機付けられている．その上，チャットルーム，電子掲示板，その他の個人的なメッセージルートに比べれば，かっちりしたインタビュー，プレス会合，正式なプレスリリースといった従来の手段，方法は速報性において劣って見えてしまう．情報は今や「無料」で手に入るが，そのかわり管理されていないといえよう．

1979 年の TMI-2 の事故の間，有線電話やインタビューに代表されるコミュニケーションは容易ではなかった．情報のサイクルは 8 時間又は 24 時間毎というように，主要放送局のニュース番組のスケジュールに依っていた．福島第一事故の間，情報は誰彼となく，それに接することが出来た人によって絶えず流され，しばしばテレビを見た素人からも発信された．これらの情報は種々のソーシャルネットワークを通じてインターネットで世界中に流された．ASME タスクフォースが見るところ，ほとんどの素材は検討も吟味もされておらず，見るものの解釈に委ねられている．見る人はコミュニケーションについて教育されている訳でもなく，何が起きているかについてのコメントに関して技術的な資格を持っているわけでもなかった．絶え間なく放映されるテレビニュースはビデオ映像，インタビュー，いわゆる「専門家」の解説を毎日 24 時間，何百万という視聴者に送り続けた．

産業界内部でも一般の人々に対しても，福島第一で事象が発展する間のコミュニケーションは相当に不足していた．コミュニケーション不足のため，メディアの発信する内容は不正確かつ過剰反応的となり，全体として一般の人々の原子力産業への信頼を相当に損ねることになった．放射線被ばくの線量レベルについての情報をやりとりしようと試みるときでさえ，その単位がメディアにも多くの一般市民に

とって理解の出来ない，何か恐ろしい感じのする数で表現されがちであった．しかし，こうしたコミュニケーションの問題は，原子力産業が事故の教訓を踏まえた改善を行っていくことにより解消されるに違いない．

メディアコミュニケーションにおけるこの新しい「これからの」パラダイムを実現し，一貫していて効果的，継続的かつ戦略的なプログラムによって，無数の多様な情報源から有効な情報を抜き出し，妥当な結論を引き出すことが出来る有識市民というべき世代を育むことが必要である．これは一夜にして出来ることではない．K-12 教育を始め，一般の人々に対する支援プログラム，メディアとの関係構築，及び政策立案者との交流と，これらを 4 本の柱とする複数世代にわたる努力が必要である．

危機の最中に適切にコミュニケートするためには，役割と責任についてあらかじめ合意し，手続きと知識の流通手段を開発しておき，公式，非公式いずれのチャネルとも前もって確立しておかなければならなかった．危機に即応して動く責任を持つ人たちが，日頃からこれらすべてのことを訓練しておかなければならない．現代ではどの組織も非常時管理体制を持ち訓練もしているであろうが，普通は火事，洪水，地震といった主要災害対応を主眼とするものである．規制当局により訓練の頻度に関する要求も定められているが，それが必ずしも現実に即していなかったり，参加者の能力や手順の確認を行えるほど幅広くなかったりするものである．危機コミュニケーションが必要になる前に適切に初動のメッセージを発信することを覚えなければならない．これは適切な訓練をしないと実際のときにはできないものである．たとえどれほど有効と期待されようとも，当該問題の専門家とメディア担当者は危機の際には脚本なしに状況に適応し，決定し，議論しなければならない．地に足をつけて考え，間違った答えをせず，適切な専門家にコンタクトし，正確なデータを集め，洞察力に富んだ分析を行い，明確に伝達する．これらのことは全て，より包括的で外部と連携した，いわば基本的に「作戦本部」，「メディアセンター」，「緊急対策室」の仮想的な組合せのチームとしての努力が必要である．

福島第一で起きたような広域災害では，外部，内部のコミュニケーションが混乱を来たす．これは，通常必要になる物理的インフラ（補給品，道路，鉄道，電力系統，電話，橋，計装，ポンプ等）および社会インフラ（スタッフ配置，専門家アドバイス，オフサイトサポート，規制当局，メッセージング，管理手続および管理ガイド等）が機能不全に陥るか壊れてしまうからである．設備も人もこうした厳しい条件の下で有効に働かねばならない．肝心なことは，設備もスタッフも，災害の間働けるためには，通信リンクの両端において自活でき，十分に活動を維持出来る（例えばバッテリー容量やスタミナなど）ようにしておかなければならないということである．もちろん，緊急時においてもサイトへのアクセスが得られる限りは，追加設備を「空輸する」ことは可能である．そうした場合にも，このような支援と補給が到着するまでコミュニケーションを確保・維持するために十分な現場の機器設備の機能維持と要員配置　が図られていなければならない．

8.3.1. EP（緊急事態への備え）の指示系統，及び意思決定の権威

本報告書を通じて述べている対策は，設計の改善，訓練，補助的な資源へのアクセス等によって，原子炉の運転員や他のプラントの職員が事故原因を排除し，発生を防止し，影響を緩和出来るようにするものでなければならない．こうした機能の向上は，それらの手段を有効かつタイムリーに，またよく調整したやり方で適切なアクションを起こして初めて価値を持つといえる．これが指示命令系統を確立し決裁ルートを明確に定義する緊急時準備(EP)の役割である．

緊急時にプラントの職員は呼び出され，非常に強いストレスを受け決断を迫られる状況に置かれる．ルーチン業務と非常状態とでそれぞれ技術的能力およびリーダーシップ能力を持つ職員を選別することが重要である．選ばれた人たちは，的確な言動と判断を身につけることに加えて，予期せぬ事態にも対応出来るように訓練する必要がある．事故時の手順，連絡体制，組織体制，決裁ルートについ

て整備し，運転員およびサポート要員とともに自治体およびその首長にも理解しておいてもらう必要がある．

「緊急時対策」はこれらの必要なことがらを満たし，原子炉事故に有効に対応するための基礎を固める活動について定めるものである．以下の推奨事項を実行することで，課題となる事象を有効なやり方で管理することが出来るようになる．

福島第一事故の教訓により，指示命令系統の戦略と構造に関する改善強化の必要性が多くの分野において明らかになった．例えば：

- 既設の計装の指示値など，プラントからの情報の必要性．計器が使用不能あるいは信頼性が無い場合の，可搬型計器と計算機による支援等の代替手段の必要性．
- 緊急時運転手順書 (Emergency Operating Procedure: EOP) からシビアアクシデントマネジメントガイドライン (Severe Accident Management Guideline: SAMG) 及び拡張設計状態マネジメントガイドライン (Extended Design Management Guideline: EDMG) への移行に対する明確なアプローチの必要性
- 例えば制御室の配置（共通の制御室か個々の制御室か）や各ユニット間の離隔距離（例えば米国で言うと，Palo Verde では遠隔配置，Indian Point では近接配置）といった影響の理解を含む，複数ユニット事象における判断
- 限られた資源の優先順位付けに対する要求と管理
- 意思決定の場所（制御室，プラント，技術支援センター (Technical Support Center: TSC)，緊急時運転施設 (Emergency Operations Facility: EOF)，その他）
- 大規模な異常事象及び設計基準外事象に対して事前に計画されたものではあるが同時に，予期せぬ事象と条件においてはその場の対応も考慮された，緊急時の指示命令系統，責任の所在，決裁ルート等の整理の必要性

これらのうちいくつかの分野については既に対応がなされたものもある．例えば米国では，NRC が「現場での緊急時対応能力」に関する規制作成予告[86]を出していることや，それに対する NRC と産業界との間の意見交換がなされている．IAEA からは国際的な大局に基づく安全ガイド NS-G-2.15[87] が発行されている．ASME タスクフォースはこうした取組みをサポートし，国際協力と要求管理戦略に関する進歩の世界標準作りを奨励するものである．

8.4. 公衆の信頼の獲得

原子力が社会的，政治的な受容性を獲得し維持しようとするならば，国民の信頼と信用は欠かせない．福島第一事故以前には，米国では原子力発電所の信頼出来る安全な運転を 25 年以上続けてきた結果，継続運転への国民の支持はこれまでの最高に達していた．2010 年末にはこの国民の支持はギャラップ世論調査で 62%にも達していた．世界的に「原子力ルネサンス」が到来しつつあると言われ，原子力発電プラントは新たな計画の時期にあった．

福島第一事故の推移を見守っていた頃，米国政府の慎重な反応と米国内のプラントは安全であるとの NRC の保証により，原子力に肯定的な国民は 47%，否定的な国民は 44%と，原子力の安全について国民の概ね肯定的な意見を保つことが出来た．この数字は事故前の肯定的 53%，否定的 37%と比べてそれほど変化はない．[88] しかしながら，他国においてはードイツとイタリアで顕著であるー国民の不信と政治的配慮によって，既設の原子力発電所の段階的廃止や電源としての新規プラント建設の取り止めという政治的判断が現れてきた．欧州では，全ての既設原子力発電所に対してストレス

テスト(元々は経済用語である)の実施が義務付けられた. 日本では政府の指示によって福島第一事故の直後に何基かの原子力発電所が停止させられ, 2012 年 5 月 5 日の時点において, 54 基のうち運転しているプラントは無い状況である. これらのプラントは安全評価(ストレステスト), 津波, 地震及び電源喪失に対する新たな防護基準に対応するためのプラントとサイトの設備対策の実施, 並びに時間がかかりがちな地元自治体の承認が得られるまで, 長期に亘って停止したままになると見られる. 日本における原子力発電に対する国民の信頼の状態と電力不足に伴う経済的困難とのどちらを優先するかによるが, 停止中のプラントの多くが, 最悪の場合全てが二度と稼働しないままということもあり得る.

米国でも原子力への国民の信頼を強化する必要がある. もし重大な環境影響を伴う別な大きな事故が起きて信頼がこれ以上低下したりすると, 既設プラントの運転継続および新規プラント建設への支持は危うくなるだろう.

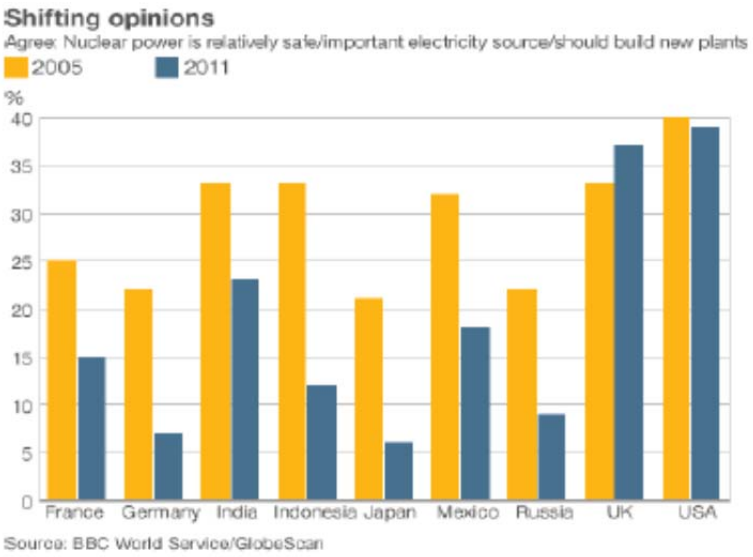

図 8 福島前後における原子力に対する公衆の意見

図 8 は 2005 年および 2011 年, 即ち福島第一事故のかなり以前と事故直後の BBC ワールドサービス／グローブスキャンの世論調査の結果を示している. 米国と英国の調査結果の変化の無さは原子力に対する肯定的な意見の相当な低下が起きている他国と比べるとはっきりと異なっている. この世論調査ではさらに, 原子力発電所の相対的な安全性のみならず, 電源としての原子力の重要性や原子力発電所を新規建設すべきか否かについても質問している.

基本的に, 信頼の創造は権力, 資源, 知識に関して均等でないグループの間で相互の価値を創造するプロセスといえる. [89] このプロセスには次のことが含まれる.

- 利害関係者間で相互に共有出来る価値の創造(例えばクリーンエネルギーへのニーズを満足する, 原子力産業に関わる組織の社会的責任を果たす行動など)
- リスクと機会が一定程度共有される力のバランス(例えば電気料金の感覚的な公平さ, 組織が公開性, 統合性および透明性を維持しているなど)
- 脆弱性を制限し, あるグループがその意思を強制したり他のグループの利益を抑圧したりすることを防止する規制および安全防護制度の存在

過去に行われて来たような，原子力技術より良くより安全にし，市民教育をするだけでは国民の信頼を確保することはできない．むしろ，国民の信頼は，原子力設備の設計，建設，運転及び規制を行う組織と人々に対する信頼から発せられることを認識しなければ．MIT のマイケル・ゴーレイ教授は原子力の社会的受容は次の基礎の上にあると正しく指摘している．[90]

- 技術自体が高い信頼性と安全性を発揮しなければならない．
- 技術はお互いの利益に適うとの確信を社会が共有する．
- 設計，建設，運転，及び規制を行う人々の誠実さ，力量，及び能力に対する信頼

最初の点について言えば，米国の原子力産業界は電力会社を中心に，1979 年の TMI2 号機の事故以来数十年にわたり運転記録を劇的に改善してきた（2 章参照．図4に過去 20 年間のプラント利用率と主要な事象を示してある）．

確かに，より安全な原子力技術に対する役割（例えばマンマシンシステムが改善され受動安全性を備えたプラントなど）は継続して果たすべきであるが，上に挙げたようなプロセスは基本的に事故の発生可能性や発生時の過酷さを低減させるものである．国民の信頼向上にとって新たな技術は重要ではあるが，それだけでは十分ではない．

運転中の原子力発電所の近くに住む人々は，技術はお互いにとって有益であり，施設を運転する人たちがそもそも信用に足るという確信を共有しているものである．教育やそれに類する価値ある活動への投資はこうした発電所が立地している地元社会の生活の質を高めている．さらに，電力会社やその他のプラントで働く人々は友人であり，隣人であって，遠くに住む顔の見えない企業代表者ではない．

原子力の設計，建設，運転，及び規制に関わる組織および人々に対する信頼が重要であることははっきりしている．より堅牢な国民の信頼を築いてそれを維持するためには段階を踏まなければならない－それはあらゆる技術が経験する浮き沈みを乗り切ることが出来る基礎になるものである．信頼を打ち立てる活動に向かう新しい道を作っていかなければならないし，古い道はより良くしなければならない．そのためには，原子力産業界のあらゆる部分からのアプローチが必要である．また，実際の原子力産業を構成する会社や組織の新しい世代のエンジニアや専門家を育てる大学教授によるアプローチも必要である．

国民の信頼を維持するための確固とした基礎を作り上げるためには，発電所が立地する地元社会の内外で，あらゆる利害関係者が一人一人のやり方で力量，透明性，誠実性，及びおよび社会的責任を示すことに取り組んで行かなければならない．

ASME のような専門家の集りは，その専門性，教育活動，並びに利益相反から比較的独立しているというイメージによって，既に高い国民の信頼を獲得している．そこで，ASME 及び ANS や HPS 等の他学会には，偏向していない情報の提供元として国民教育により積極的に取組むことや，会員が専門家としての責任，倫理的責任を果たすために国民の信頼形成に向けた活動を活発に行うことを推奨することが求められている．原子力に反対，賛成双方の人々やグループを含むより幅広く国民の意見を聞くための機会を作るなど，学会の中立的な集会活動を活発にすることは，コミュニケーションと理解を深めることに役立つ．最後に，ASME が社会的政治的指導者やメディアと定期的に接触している実績があるので，原子力の問題がニュースになる時には ASME は信頼出来る技術的な情報源として位置付けられるだろう．

8.5. まとめ

ASMEタスクフォースは，原子炉の事故の社会的政治的影響はプラントで起こる物理的事象以外の要

因に左右されることを強調しておく. 社会的政治的影響はまさしく, 施設の周辺に住み働く個人個人の健康と福祉に対して事故がもたらす脅威の感じ方と, クライシスコミュニケーションの方法次第で決まる.

国民が技術の核心に通じるようになり, 潜在的な危険とそれがもたらすリスクについて正確に理解することを確実にするためには, 協調した, 継続的な情報発信が欠かせない. この教育的な情報発信は技術の核心に関する国民の不安を解消し, 事象の全体像を捉える用意をさせてくれる.

最後に, コミュニケーションを行うグループ間に一定の信頼が存在するならば, コミュニケーションはより素直に受け入れられるだろう. 信頼は獲得しなければならない. それは忍耐を要するプロセスであり, 失うときは一瞬である. 結局, 施設の運転における人の誠実さと, 力量あるスタッフがより良い状態を求め続けることにより, 国民の間に信用と信頼を生みだすに違いない.

9. 新しい原子力安全概念の構築

9.1. はじめに

タスクフォースは 2011 年 9 月に福島事故とその広範な影響に関する調査検討活動を開始した. その時点で, 事故に関する膨大な情報が入手可能であり, 事故後 1 年を経過した後も情報の流れは続いている. タスクフォースは基本的に日本の各機関や国際機関から公表された情報に基づいて調査検討を行った. これらの情報源は文献リストに示してある. 未だ完結していないものもあるが, これまで報告された情報は概ね整合しており事故原因や事故から学ぶべき事柄が示されている.

福島第一は世界で初めてカタストロフィックな外部事象による炉心損傷を経験した原子炉であり, 複数号機の事故により大規模な放射性物質の環境への放出に至った最初の軽水炉である. 原子力発電のこれまでの安全運転の実績, 並びに燃料の多様性, エネルギーセキュリティ, 気候変動対策, 及び電力コストの安定といった点への有効性にも拘らず, 福島第一における過酷事故によって原子力発電に対する認識は歪められ, 世界のエネルギー構成に影響を及ぼすことになるだろう. そこで, タスクフォースは炉心損傷の進展の把握, その社会へのインパクト, 緊急即応体制の改良の可能性, アクシデントマネジメント, 並びに事故対策, に焦点を当てた. タスクフォースはまた, 包括的な評価を行なって世界の懸念に対する提言をまとめるために, これまでの事故から得られた知見と福島事故から得られつつある知見を活用するよう努めた. 全体としてのタスクフォースの意図は, 福島事故に対応する原子力の安全向上に焦点を当てたうえで, 社会に有益であり, かつ世界の原子力産業界が事故への対応を進めるに当たって役立つような結論を得ることにあった.

福島事故で事故後何ヶ月にもわたって最も深刻な憂慮の対象となったのは, 放射線に対する公衆の健康と安全性であった. この懸念は日本が全精力を使って取組み, 世界が支援の対象とするに値するものである. しかし, 放射線影響の観点からは, 福島第一の事故では一人の死者も出ず, また今後も公衆の健康への著しい影響は無いだろうとの予測がある. [3][6][15] この公衆の健康に関する好ましい帰結には, 緊急保護活動(の成功), 放射性物質を海に運んだ風向き, 原子炉事故における本質的にゆっくりとした放射性物質の放散等の要因が考えられる. 事故の報道に接する世界の何百万の人々にとって, 放射能による健康被害が無いという継続的な事実は原子力事故の災害と影響に関する議論における重要な論点として認識されるべきである.

公衆の健康と安全は依然として最も重要な原子力安全の判断基準であり続けるが, 他にも真剣な注目に値する原子炉の事故の影響がある. 本報告はそこに焦点を当てている. 福島第一事故の場合, それは人が住む広い地域の放射能汚染, 10 万人を超える人々の初期の強制避難, 日本人の間に広まった心理的ストレス, 汚染された地域における, 状況が改善され安全と見なされるまでの間の経済的生産性の損失, 日本全体での原子力発電の縮減とそれに伴う日本及びその他の国々での著しい経済的影響などである. タスクフォースは, 福島第一の事故による放射線健康被害は無いが社会的なインパクトは甚大であるというコントラストに着目し, これを新たな原子力安全概念の構築の提案に繋げた.

9.2. 進化する原子力安全概念

核物質の民生使用に当たって, その当初から公衆と労働者の放射線障害から保護するための安全概念が作られてきた. 安全概念は, 期待する成果を生み出すために必須の機能を効果的に実現するのに必要な産業及び規制の全ての枠組みを実現するものであり, 期待する成果によって定義される. 原子力発電のインフラが複雑であるが故に, 独立した規制制度を含む, 同様に複雑な安全概念が必要

とされた.

原子力発電所の安全に関する既存の概念は国によって細かな点は異なるが，次のような特徴を有している. 即ち;

- 設計基準事象に対して設計される構造物，系統，機器を対象としている,
- 安全機能をサポートする付加的な設備を対象としている,
- 公衆の健康と安全並，環境及びセキュリティの保護のための強力な規制制度である,
- 国及び地方の法制度及び技術的支援組織を有している,
- プラントの設計，建設，運転及び保全に必要な技術的並びにアクシデントマネジメントのための構造を有している

等である.

安全な運転経験の蓄積に基づいて少しずつ変わってきてはいるものの，安全概念の重要な変化は事故から学んだ結果によるものであった. TMI-2 の過酷事故から学ぶことによって原子力産業界が本質的な体質転換を図った事例はその良い例である. それは規制要求の変更と，INPO の自主的な設立を通じて良好な安全運転の実績を達成しようとする産業界の機運の変化の両者によってもたらされたものである. TMI-2 から学んだ結果，米国及び世界において相当な安全設備が追加され，アクシデントマネジメントは改善され，緊急時対応も改善された. チェルノビルの事故も欧州で同様の影響をもたらした. 一方米国での影響はそれほど大きくなかった. それは，米国において TMI-2 事故を受けた改革が進んでいたこと，また米国と欧州のインフラに大きな違いがあったことなどによる. 福島第一の事故は，それが多くの点で既存の安全概念の本質的な改革につながるであろう，という点におおいて以前の事故とは異なっている.

福島第一事故への世界中の規制当局と原子力産業界の対応はまさに迅速で徹底したものであったし，現在でも懸命な取組みが続いている. その理由には，福島第一事故が多くの観点で他の事故との重要な相違がある，という点がある. 勿論類似点も多いが. 極端な外部事象に対する脆弱性を防止，事象の進展阻止，或いは影響を緩和するためには過去の原子炉事故との相違と類似性を検討する必要がある. 最も重要な相違点は，炉心冷却機能の喪失と格納施設の健全性の喪失につながる広範囲の外部電源喪失，全電源喪失，及び／又はサイト内の配電系統と最終ヒートシンクの著しい損傷，等をもたらす非常に稀ではあるが起こりうる外部事象に対する認識である. このレポートで説明したように，福島第一には 複数の炉心溶融と放射性物質の環境への放出をもたらした複数の相互に関連する問題がある. それは，設計基準，アクシデントマネジメント，緊急時対応などである. また，使用済燃料プールの損傷と誤認された兆候による混乱もあり，これはプールの状態監視と性能評価のためにより綿密な計装が必要であるとの認識をもたらした. しかしながら，福島第一はサイトを襲った地震と津波の複合事象に対して適切な設計がなされておらず，対応（準備）もされていなかったという根本的な問題が残る. それ故に，重大な帰結をもたらす極端な外部事象の重要性は日本で起こった出来事から何を学びそれをどう活かすかという検討に際して最初に取り組むべき点であった.

福島事故の評価と分析は世界中で行われ，特に米国においても福島事故から学ぶべき事項への対処の検討が行われている. その中で，原因に拘らず原子炉の安全を脅かす可能性のある，希ではあるが起こり得る事象に対する防護を強化するための安全概念を確立するための努力は既に始められている. この取組みにおけるタスクフォースの手法は，これらの重要な学ぶべき事項によって，次節で述べる新しい安全概念の提案に関する方向性を提示するというものである.

9.3. 事故の教訓

このレポートで述べているように，既に福島第一事故から学んだ多くの重要な教訓があり，これらは原子力安全を考える上で焦点を当てるべきものである．この事実にも拘らず，タスクフォースは東日本大地震と津波によって引き起こされた事故とその帰結に応じてなすべき系統的なアクションの必要性を考える上で重要かつ包括的な教訓を得ることに焦点を当てた．それは，

包括的な教訓

放射性物質の放散から公衆の健康と安全を守ることは原子力安全の第一の目的であったしこれからもそうであり続ける．この目的の重要性はこれまでの過酷事故から学んだ教訓を含む現在の知識の総体において最も重要な事項で在り続けるものの，以下の事実にも注目しなければならない．すなわち，

原子炉の過酷事故が引き起こす最も深刻な影響は，社会に巨大なコストを負わせる社会的―政治的，経済的な崩壊である．

上述のように，福島における複数号機の事故において住民への著しい放射線影響は生じなかった．このことから放射線影響からの公衆の保護という究極の安全目標は達成されたと言えそうである．しかしながら，これは視野の狭すぎる結論かもしれない；3機の原子炉において著しい炉心溶融が起こり，放射性物質の，制御されない大規模な環境中への放散につながった．したがって，最も重要な安全基準（炉心溶融を起こさず制御されない放射性物質の放散を生じさせない）は満足されておらず，これは受け入れることの出来ない結末である．さらに，福島第一事故の帰結として生じた他の社会的影響（1.3節と付録A.2において部分的に触れている）は注意深く考察するに値するものである．TMI-2，チェルノブイリ，そして今回の福島第一の事故の社会的政治的，経済的側面における帰結はエネルギー分野と政治状況に多大な影響を与えた．更に重要なことは，職場や家庭から離れることを余儀なくされた人々への直接的な被害と社会全体のコストを考えると，原子炉事故を確実に防止，その進展を阻止し，影響を緩和するための，より包括的で全体として調和のとれた手段が求められているという点にある．社会の崩壊を防ぐことは，原子力発電に対する公衆の信頼を獲る上で最も重要である．

ASMEタスクフォースは原子炉の所有者と運転者に加え，公衆の健康と安全並びに環境を保護するための規制当局の努力や有効性をよく知っている．安全運転の実績はこれまで長く続いてきたが，福島第一後はその意味も見直されるだろう．規制当局には安全設計基準の拡張によって公衆と環境の保護をより一層強化するための規制制度の改善が期待されている．新たなレベルの規制要求は現在検討が進められているが，それは法に基づいた適切な規制要求を目指すものになるだろう．

規制要求の改善に加えて，安全及び財産と環境の保護に最終的な責任を有する所有者，運転者もプラントとその運転手順等の更なる改善に向けた努力をしている．それでも，原子力産業界は，社会的経済的秩序を守るための一層努力をすべきであり，それは新たな規制要求がなくてもそうすべきである，というのがタスクフォースの見解である．主として原子力発電に活動の重点を置く産業界の複数の関係機関によって，放射性物質の大規模な放出による社会への深刻な影響を防止或いは最小化するよう，全てのリスクを考慮した上で過酷事故を防止，進展を阻止，或いは影響を緩和するための客観的なグローバル・スタンダードが確立されるべきである．これは，原子力産業の責任に関して何も新しい結論という訳ではない．TMI-2事故の後にも同様の結論となり，産業界によるINPOの設立に結びついた． TMI-2事故を受けたNRCのタスクフォースの報告書から言葉を借りると，「公衆の安全に対する基本的な責任が民間，即ち商用炉の個々の認可を受けた者の手にあり続けるとすれば．．．」，彼

らは規制要求を超えて新しい原子力安全概念を示す決意を示さねばならない. [91]

9.4. 新たな原子力安全概念

タスクフォースは社会により良く奉仕し, 世界中の原子力発電の安全運転を継続しかつ増強していくための土台を提供するために, 新しい原子力安全概念を構築することを提案する.

新たな原子力安全概念

原子力発電所の設計, 建設, 運転, 及び管理が事故時の放射性物質の放出による大規模な社会の崩壊を確実に防止出来るよう計画的に策定され, 全体として調和のとれた体系的な取組みで, 全てのリスクに対処するもの.

標準的な原子力用語においては, ここで提案している新しい原子力安全概念は既存の概念や生まれつつある概念を包絡するものである. その上で, この概念は公衆の健康の保護に関する要求や産業界で確立されているベストプラクティスを超えるものである. その目標は所有者と運転者が過酷事故による社会的政治的, 経済的な帰結から社会を守る能力を確実に実現し, 維持する仕組みを提供することにある. **新しい原子力安全概念は, 全リスクを考慮に入れた上で事故と放射性物質の大規模な放出を防止, その進展を阻止, 影響を緩和するという目標を達成することを意図している. それは設計基準, 設計基準を超える事象, 並びにアクシデントマネジメントの段階で期待される安全機能と調和し, 目的の達成と完全さを保証したうえで実現されなければならない.**

米国の原子力産業界は他の多くの組織と同様に, "*いかなる原因に対しても*"原子炉の安全運転を確保するための取組みに着手している. 新しい原子力安全概念の提案はこれと並行して, 原子力発電所の安全への脅威となり得る幅広い事象に対して全リスクを考慮する手法に基づいて対処しようとするものである.

(原子炉の安全に対する)これらの脅威に対しては必須の要素である深層防護とともにリスク情報の活用手法を用い, 設計基準事象及びそれを超える稀ではあるが生じ得る事象を含めて対応しておかなければならない. その際, 事象推移の緩和についての認識が重要である. とりわけ, 起こり得る事象とその(事故)シナリオに関するクリフエッジ効果をよく検討し, 必要な緩和方策を実現することが重要である.

9.5. 新たな原子力安全概念の原則

タスクフォースは TMI-2, チェルノブイリ, 及び福島第一の事故に関する詳細かつ広範な分析を参照することが出来たので, 更なるレビューは行わないことにした. むしろ, 新しい安全概念の鍵となる観点を見出すこととした. タスクフォースはまた, 安全概念の実現は原子力発電所の個々の設計やサイト特性, 並びに各国の規制と他の制度に依存していることも認識している. 換言すれば, 安全概念の機能面に関する詳細情報を収集し実現していくといった作業はこの報告が終了して初めて着手出来るのである.

この概念の鍵となる要素には以下がある: 設計基準事象及びこれを超える事象において事故を防止, 進展を阻止し, 影響を緩和するために直接必要な構造物, 系統, 機器(固定機器か可動式か, サイト内かオフサイトかに関わらず); 人的能力の管理; アクシデントマネジメント; コミュニケーション; 及び公衆の信頼の問題, 等である. 本報告ではこれらの観点について以下に示す原則に則ってそれなりの詳細さ, 具体性をもって述べている.

- タスクフォースは耐震と耐津波，全電源喪失，最終ヒートシンクの確保などに必要な個別具体的な機器，系統に関する検討は行なっていない．これらは他の適切な機関によって行われるであろう．
- 設備の能力は，得られた教訓の全体像をしっかり理解していれば，米国産業界のFLEX，関連するNRCの要求，あるいは欧州の地下設備 (bunkered system) などで検討されているものでこれから決めていくことになる新たな安全概念の具体要素を満足出来るだろう．
- タスクフォースには人的能力と意思決定，アクシデントマネジメント，並びに緊急時への備え等を適切に補完することによって稀ではあるが生じ得る過酷な事象に対する防護を拡張することについて，具体的な推奨事項がある．これらは9.6節に列挙してある．
- 原子炉の安全に対する究極的な責任は，世界のどこにおいても所有者と運転者に帰属する．福島第一事故によって，稀ではあるが起こり得る事象であってその影響が極めて大きい事象に対する安全レベルを設定，実現する点において，規制当局には限られた能力しかないという事実が改めて明らかになった．それ故，所有者，運転者，及びその支援組織には規制要求を超えた適切な安全対策の実現に力を注ぐ姿勢と能力が求められる．
- 新たな安全概念は所有者と運転者が規制の枠組みを超えて効率的に安全対策に取り組めるという事実に依拠している．TMI-2,チェルノビル，福島第一で起こった深刻な帰結を回避することによって，新たな安全概念は社会，並びに所有者と運転者にとって有益なものになるだろう．
- 新たな原子力安全概念の構築のためには，既に存在する安全概念に土台を置き，それを改善する，ということも含め，現実的で達成可能な原子炉の安全と放射線防護の改善と整合するアプローチをとる必要がある．
- そのアプローチとして，本報告で概説した原則をより具体化することが出来，新たな原子力安全概念の構築に貢献出来る産業界の多くの関連組織からの支援を取付けることに焦点を当てるべきである．これらの組織には，所有者と運転者，所有者のグループ，原子炉製造メーカー，建築及びエンジニアリング会社，各国の及び国際的なエキスパート組織，並びに原子力規格基準策定団体等が含まれるべきである．

9.6. 新たな原子力安全概念に関するその他の結論

安全概念に関するその他の結論を以下に示す．

9.6.1. 拡張設計基準

10 CFR 50 付録 A の一般設計基準では TM-2 及び福島事故に関連する部分（共通原因故障と事象の組合せ）で未完結の部分があることが知られている．これらの改訂は現在 NRC 及び原子力産業界によって検討されている．付録 A の他の部分についても，必要に応じてリスク情報に基づくクライテリアを用いるなどの取組みが期待される．一般設計基準の更新によって運転中及び新規プラントの安全向上につながる，より良い設計の基盤が確立されるだろう．

9.6.2. リスク情報に基づく深層防護概念

安全概念はプラントの全ての運転モード，全てのリスク，レベル 3PRA を含むフルスコープのリスクアセスメント等に根拠を置くものでなくてはならない．これらを決定論的手法と合わせることで，全ての原子力発電所の深層防護をより一層レベルの高いものにすることが出来る．所有者と運転者はどの戦略が有効であるかを見極めるうえでこのようなツールの恩恵を受けることが出来る．フルスコープのリスクア

セスメントに依拠した改善効果を最大化するためには，新設プラントの高いレベルでの包括的な安全目標について国際的な合意形成が必要である．“リスクマネジメントによる規制の枠組みの提案”がNRC コミッショナーのジョージ アポストラキスが主導するタスクからつい最近発表された．ここには多くの価値ある指摘が記載されており，リスク情報に基づく深層防護の概念の本質的な要素として考慮されるべきものである．タスクフォースは“リスクアセスメントは適切な深層防護の手段に関する意思決定に有効な情報を提供出来る”という点に賛同する．[38]

9.6.3. 人的能力の管理 （Human Performance Management）

人的過誤（ヒューマンエラー）の性向，発生率，及びその機会を減らし，現代の複雑なシステムの故障によるリスクを減少して安全性向上に繋げるためには稀ではあるが起こりえる事象の発生の以前，最中，発生後における意思決定とそのマネジメントの観点から人的能力にもっと焦点を当てるべきである．

9.6.4. アクシデントマネジメント

極端な外部事象からの確実な防護のための世界的に統一された標準（それはプラントの事故防止，進展阻止，影響緩和能力に変更を求めるものになる可能性もある）にはアクシデントマネジメント能力を含むべきである．世界の原子力界は，プラント，労働者，及び一般公衆を保護すべき極端に厳しい外部事象のレベルを決めるべきである．ここで，“保護”の用語の意味には，設計基準の一部として，或いは一定レベルの外部事象に対して前以て決められた対処能力であるかは別にして，地域特性を考慮した信頼出来るアクシデントマネジメント対策を用意しておくことを含めている．

9.6.5. 緊急事態への対応管理 （Emergency Preparedness Management）

発電所内及びオフサイトにおける緊急時対応 (Emergency Preparedness, EP) はもっと堅牢で柔軟性に富むよう改善し，EP 関連のシステムが例えば複数ユニットの事故や長期に亘る全電源喪失など，予期しない状況下においても確実に機能するようにしておかなければならない．加えて，緊急避難訓練は複数ユニットの事故や長期間の全電源喪失などで生じる，より現実的かつより緩慢に推移する事故シナリオと条件に基づいて行うべきである．現在の EPZ（緊急避難領域）の大きさの技術的根拠は過酷事故に関する時代遅れの理解にもとづいており，更新しなければならない；その更新は世界的な協調のもとで行われるべきものである．緊急避難に関する規定は，要求事項を決めて規制による監督を行ううえで，リスク情報活用と性能規定化の方向に進むことでより良いものとなるだろう．国際的に繰り広げられている論争を見れば，放射線の影響を受けた地域における避難民の帰還条件を低レベルの放射線効果に関する最新の科学的知見に基づいてより精緻に定義することの必要性が分かる．

9.6.6. コミュニケーションと公衆の信頼の問題

通常時及び危機的状況の両方において，様々な原子力関係者へのタイムリーな情報提供を含めたコミュニケーションの拡大が必要である．危機的状況が生じてしまった後から適切なコミュニケーションをどのように行うかを考えるのでは遅すぎる．従って，関係者が確固とした事実に基づく情報に信頼を寄せられるようにするためにはコミュニケーションの手続きを予め定め，維持しておく必要がある．産業界，政府，並びに関係する学協会には，再び原子力発電に対する公衆の信頼を得るための幅広い新たな取組みが求められる．その際，公衆と原子力発電所を設計，建設，運転，そして規制する人々の間の*個人的な信頼関係*と透明性といった要素を強く強調しておきたい．原子力発電の幅広い関係者への時宜を得た情報提供に関する考慮を含め，平常時においても緊急事態においても，コミュニケーションの強化が必要である．

9.7. 新たな原子力安全概念の構築に向けた次のステップに関する推奨

ASME は 140 ヶ国における 12 万 7 千人の会員を有する職業エンジニアの団体であり，原子力等多くの産業界で広く使われている約 500 の規格基準類と関連する適合性認証プログラムを策定している．ASME のこの能力と経験をもってすれば，かつて一世紀前に ASME が続発するボイラーの爆発事故の防止に取組んだのと同様に，過酷事故を防止し影響を緩和するためにとるべき行動を明らかにしてその実現を支援するために適切なアクションを起こし，世界中の関連学会，産業界組織，政府組織とのコミュニケーションを図っていくことは可能である．このようなアクションは3つの段階に別けて進めていくべきである；即ち，(1) 新たな原子力概念の構築に向けてどのような進め方が適当か，という点について合意形成を図るために世界の原子力関係者を招いたワークショップを主催する； (2) 規格基準開発； (3) この作業から得られる結論や推奨事項をあらゆる媒体によって広めていく．しかしながら，ASME に出来るのは議論を始め，合意形成の手伝いをすることまでであり，新たな原子力安全概念の実現は原子力産業界と規制当局の役割である．

9.7.1. 新しい原子力安全概念構築のためのワークショップ

ASME は世界の関係者に支持され得る推奨事項の合意形成に向けて，出来るだけ早期に一連のワークショップを開催すべきである．関係者の間には世界の原子力産業界が福島第一事故を受けてどのように進んで行かなければならないか，という点について（意見の相違はあるものの），共通の見方がある．ASME は中立組織であり，関係者が意見の集約を図れるようなワークショップや会議を主催する上で適切な立場にある．より詳細な推奨事項を纏めていくためにはフォローアップ（産業界又は政府の出資によるプロジェクトや単一テーマのワークショップなど）が必要になるだろう．しかしながら，取り組むべき重要課題が何か，について関係者の合意形成に加えて，本報告書で概要を示している基本的事項について意見交換を行うことにより新しい原子力安全概念の構築に踏出すことが必要である．取組むべき重要な疑問には以下のようなものがある：

- 設計基準事象はどこまで拡張すれば十分か，あるいは設計基準外をどこまで考えれば十分か？
- 設計基準の高度化に当って国際的な情報入手と協調はどのように実現されるべきか？
- 新型炉に関して進行中の MDEP や WNA CORDEL 等の活動を考えた上で，世界中の既存炉の設計基準をどのように標準化し，維持していくべきか．
- 新しい原子力安全概念の下で確率論的手法により原子炉を設計し運転する際に用いるべき適切なリスク指標は何か？
- プラントのオペレーターや原子炉メーカの技術スタッフの技能に差異が存在することを認めたうえで，プラント状態を維持するための手法としては何を用いるべきか？
- 原子力の安全性を世界的に向上するために，INPO モデルをどのように，またどの程度拡張（外挿）し，広めていくべきか？
- 規制当局は緊急避難地域の改定のための技術的根拠をどのように構築していくべきか？
- 世界の原子力業界は最新の科学的知見の活用によって閾値なしの線形モデルの使用の妥当性の検討も含め，低レベルの放射線効果の取扱に関するより合理的で理解の得られる手法の開発をどのように推奨していくべきか？
- 産業界は新しい原子力安全概念を運転プラント及び建設中のプラント，並びに今後の設計にどのように適用すべきか？

- 世界の原子力産業界は，規制，製造メーカ，運転者及び所有者，各国の産業界組織，NEA，WNA，IAEA などの国際機関などの様々な関係機関の役割をどのようにして規定すべきか．

9.7.2. 原子力規格基準の改訂と拡張

規格基準は工業システムを安全に設計，製造，運転するために必要な規則と知識を（産業界や規制から）独立に定められるものである．ASME は世界中の原子力産業界で用いられている規格基準を発行し維持している，広く認知された規格基準策定団体 (Standards Development Organization, SDO) である．ASME ボイラー圧力容器規格のセクション III（設計建設），セクション XI（供用期間中検査），O&M（運転と保全），ASME/ANS の確率論的リスク評価 (PRA) 標準等はその代表である．

新技術や産業界の知識を原子力規格基準に取り入れるための取組みに関して，ASME は福島第一から学んだ教訓を他の SDO と連携して文書化し，これらの教訓を規格基準の改訂に反映しようと努めてきた．新しい規格基準が必要となる可能性も他の SDO では認識している．例えば，ASME/ANS PRA 標準は ASME/ANS の原子力リスクマネジメント合同委員会が策定したものである．これは PRA 標準を所掌し，原子力産業界におけるリスク情報活用の各種活動に適用するリスクマネジメントに関する規格基準の開発の責任を有するコンセンサスベースの標準委員会である．この委員会では原子力発電所の全ての運転モードに渡るリスクマネジメントのための詳細な戦略的計画を立案している．この委員会は全リスク概念を実現する上で鍵となる役割を果たすことが期待されている．

ASME の原子力規格理事会 (The ASME Board on Nuclear Codes and Standards, BNCS) では設計基準と過酷事故対応に関するタスクグループが立上げられている．本タスクの目的は，東日本大震災と津波，並びにその後の福島第一原子炉事故に関連するデータの収集と評価を管理し，ASME の規格基準における取組みの可能性に関する推奨を行うことにある．タスクグループは ANS，ASTM International，IEEE や他の SDO と情報共有を図っていく．また，必要に応じて他国の SDO や IAEA などの国際機関とも協力していく．例えば，既にこのタスクグループでは日本機械学会によるシビアアクシデントマネジメントガイドラインのレビューを行なっている．

タスクグループはデータの技術的評価を行ういくつかのサブタスクの設置，形成に着手している．これらのサブタスクのスコープは外部事象設計基準，構造健全性，安全システム，並びに過酷事故対応・緩和，などである．タスクグループは，ASME の適切な標準委員会に対して規格基準開発の取組みに関する推奨を行うことになる．

タスクグループが検討している分野には以下がある；外部事象設計基準とそのコンセクエンスの取扱い，長期間の前電源喪失，水素の制御，圧力バウンダリの健全性，燃料プールの健全性，過酷事故時の対応と回復に関するガイダンス，などである．

タスクグループはこれらの取組みについて NRC，NEI，その他米国産業界の関係機関とのコミュニケーションと連携を図っていくこととしている．

本タスクフォースの作業の結果として得られる規格基準の取組みに関する推奨事項は，BNCS のタスクグループの仕事に統合されていくべきものである．

9.7.3. 結論と推奨事項の周知

ASME では，この報告書の結論と推奨事項，及びそれらのフォローアップについて，市民との対話，議会へのブリーフィング，映像と音のメディア，白書，技術記事，会議などあらゆる手段を通じて周知し，コミュニケーションを図る計画である．このようなコミュニケーションはそれぞれの国における異なるニーズと資源に基づいた技術的に健全なエネルギー戦略と整合する形で展開すべきものである．

9.8. まとめと結論

福島第一の事故によって，過酷な外部事象に対する原子力発電所の安全性に関する再評価が世界中で実施されることになった： 世界におけるその対応は既存発電所の運転と新規発電所の開発に影響することになる．本報告書では極めて稀ではあるが生じ得る事象による事故の社会的政治的及び経済的影響（帰結）に着目することの必要性と，必須の安全性を実現するための必要な要素を構築するアプローチに焦点を当てた．本報告書で提案したアプローチは公衆の健康と安全，並びに環境を守ることを更に改善するものである．

自然災害と産業事故への社会の反応は，その原因に係わらずどんなに強調しても強調し過ぎることはない．社会に甚大な影響を与える可能性の故に，産業安全の概念は防護活動と全体的な対応の枠組みに本来備わっているべきものであり，そこには公衆が（産業施設の）安全性や事故の社会的影響についてどのように受け止めるか，という点に関してコミュニケーションが果たす決定的に重要な役割の認識が含まれている．特に原子力の場合，事故の影響に取り組むことは最終目的ではない．新しい安全概念の効用には，世界の原子力発電を継続発展させるために重要な社会的政治的及び経済的な要因を含むという点がある．

REFERENCES

[1] 824 F. 2d 108, 262 U.S. App. D.C. 381, 56 USLW 2108, 17, Envtl. L. Rep. 21,233, UNION OF CONCERNED SCIENTISTS, et al., Petitioners v. U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION and the United States of America, Respondents Nuclear Utility Backfitting and Reform Group, Intervenor (Two Cases)., Nos. 85-1757, 86-1219., United States Court of Appeals, District of Columbia Circuit, Argued Feb. 6, 1987. Decided Aug. 4, 1987.

[2] "Special Report on the Nuclear Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station," Institute of Nuclear Power Operations, November 2011.

[3] John D. Boice, Jr., Sc.D., Professor of Radiation Epidemiology, Department of Medicine, Vanderbilt University, Testimony to the hearing on Nuclear Energy Risk Management after Fukushima, United State House of Representatives, Committee on Science, Space and Technology, Subcommittees on Energy & Environment and Investigations and Oversight, Washington, D.C., May 13, 2011.

[4] "Chernobyl's Legacy: Health, Environmental and Economic Impacts," The Chernobyl Forum, March 2006.

[5] "Recommendations for Enhancing Reactor Safety in the 21st Century: Near Term Task Force Review of Insights from the Fukushima Dai-ichi Accident," NRC Report, July 12, 2011.

[6] "Moving Forward for Safety," Prepared Remarks by NRC Chairman Gregory B. Jaczko, The Regulatory Information Conference, Washington, D.C., March 13, 2012.

[7] "The Dream that Failed," The Economist, Special Report – Nuclear Energy, March 10, 2012.

[8] "To Engineer is Human – The Role of Failure in Successful Design," Henry Petroski, 1985.

[9] "To Protect and Serve," Mechanical Engineering – ASME Codes and Standards Celebrating 125 Years, ASME Vol.131/No.6 pp. 28-33, June 2009.

[10] "History of the ASME Boiler Code," Arthur M. Greene, in *Mechanical Engineering*, p.9, ASME, 1955.

[11] "Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents," Seattle, WA: Boeing Aviation Safety, 2011.

[12] Significant Events per reactor year as identified by U.S. Nuclear Regulatory Commission Staff (NUREG-1350); Capacity Factor is the fraction of 100% of full operating capacity (data from the Annual Report of the U.S. Energy Information Administration), August 2010.

[13] "Events that Shaped the Industry," Institute of Nuclear Power Operations, January 2010.

[14] "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," A. Stohl et. al., Journal of Atmospheric Chemistry and Physics Discussions, Volume 11, pp. 28319-28394, 2011.

[15] "Interim Report of the Japanese Government Investigation Committee on the Accidents at Fukushima Nuclear Power Stations of Tokyo Electric Power Company," December 26, 2011.

[16] IAEA International Fact Finding Expert Mission of the Nuclear Accident following the Great East Japan Earthquake and Tsunami, May 24-June 11, 2011.

[17] "Important Report from TEPCO," Tokyo Electric Power Company, Incorporated, April 26, 2012, retrieved from http://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/info/index-e.html.

[18] "Fukushima Daiichi Accident –Technical Causal Factor Analysis," Electric Power Research

Institute, March 2012.

[19] NUREG 0980: Atomic Energy Act, Vol. 1, 42 USC 2013, Section 103, Purpose.

[20] NUREG 0980: Atomic Energy Act, Vol. 1, 42 USC 2013.

[21] Final Safety Evaluation Report Related to Certification of the **AP1000**® Standard Plant Design, Docket No. 52-006, U.S. NRC, August 2011.

[22] "Breaking the Vicious Circle: Towards Effective Risk Regulation," S. Breyer, Harvard University Press, Cambridge, 1993.

[23] "Safety Goals for the Operations of Nuclear Power Plants," Policy Statement, U.S. NRC, 51 Federal Register 30028, August 21, 1986.

[24] "Basic Safety Principles for Nuclear Power Plants," 75-INSAG-3 Rev. 1, INSAG-12, 1999.

[25] "EPRI Utility Requirements Document for Next Generation Nuclear Plants," Electric Power Research Institute, Revision 10, January 23, 2012, retrieved from http://urd.epri.com/.

[26] "NEVER AGAIN: Suggestions for Achieving the Essential Goal of Nuclear Safety," Jukka Laaksonen, et al., May 31, 2011.

[27] "Backfitting," 10 CFR 50.109.

[28] "Regulatory Analysis Guideline," NRC report NUREG BR-0058, which references ―Handbook for Value Impact Assessment," NRC report NUREG/CR-3568. "Severe Accident Mitigation Alternative (SAMA) Analysis," Nuclear Energy Institute Guidance Document, NEI 05-01 Rev A, November 2005.

[29] "On the Role of Defense in Depth in Risk-Informed Regulation," J. N. Sorensen, G. E. Apostolakis, T. S. Kress, and D. A. Powers, Probability and Safety Analysis Conference, Washington D.C., 1999, August 22-25, 1999.

[30] NRC News No. S-04-009; The 3rd Annual Homeland Security Summit Session on, The Best- Laid Plans: A Case Study in Preparedness Planning, ―The Very Best-Laid Plans (the NRC's Defense-in Depth Philosophy);" Remarks of Nils J. Diaz, June 3, 2004.

[31] "NRC action Plan Developed as a Result of the TMI-2 Accident," NUREG-0660, Rev. August 1980.

[32] "Reactor Safety Study: An Assessment of Accident Risks in U.S. Commercial Nuclear Power Plants," Norman C. Rasmussen, et al., NRC publication WASH-1400 (NUREG 75/01), 1975.

[33] "EPRI Probabilistic Risk Assessments (PRA) Computer Based Training (CBT)," v1.0, EPRI, 1019204, January 2010.

[34] "Individual Plant Examination for Severe Accident Vulnerabilities" NRC Generic Letter 88-20, November 23, 1988.

[35] "Use of Probabilistic Risk Assessment Methods in Nuclear Regulatory Activities," Final Policy Statement, Federal Register Volume 60, Number 158, 42622, August 16, 1995.

[36] "An Approach for Using Probabilistic Risk Assessment In Risk-Informed Decisions on Plant-Specific Changes to the Licensing Basis," Regulatory Guide 1.174, Revision 2, May 2011.

[37] "A Framework for Integrated Risk-Informed Decision Making Process," INSAG-25, A report by the International Nuclear Safety Group, Final Draft, March 2011.

[38] "A Proposed Risk Management Regulatory Framework," Apostolakis, G., et al., U.S. Nuclear Regulatory Commission, April 2012.

[39] "An Approach for Determining the Technical Adequacy of Probabilistic Risk Assessment Results for Risk-Informed Activities," ASME/ANS standards on PRA endorsed in NRC Regulatory Guide

1.200, Revision 1, January 2007.

[40] "A year after tsunami, Japanese prime minister notes failures in government response," Associated Press, Washington Post, March 3, 2012.

[41] "Prioritization Of Recommended Actions To Be Taken In Response To Fukushima Lessons Learned," NRC Staff Requirements Memorandum on SECY-11-0137, Annette L. Vietti-Cook, Secretary, December 15, 2011.

[42] "Staff Requirements – SECY-11-0137 – Prioritization Of Recommended Actions To Be Taken in Response to Fukushima Lessons Learned," Memorandum from Annette L. Vietti-Cook, Secretary, to R. W. Borchardt, Executive Director for Operations and J. E. Dyer, Chief Financial Officer.

[43] "Proposed Orders and Requests for Information in Response to Lessons Learned from Japan's March 11, 2011, Great Tohoku Earthquake and Tsunami," SECY-12-0025, February 17, 2012.

[44] "NRC Response to Fukushima Dai-ichi Accident," Bill Borchardt, NRC Executive Director for Operations, presentation to ASME Presidential Task Force on Response to Japan Nuclear Power Events, December 8, 2011.

[45] 10 CFR 52.47(b)(2).

[46] 10 CFR 51.55(a).

[47] "International Standardization of Nuclear Reactor Designs: A Proposal by the World Nuclear Association's Working Group on Cooperation in Reactor Design Evaluation and Licensing," WNA Report, 2010.

[48] "Nuclear Reactor Safety: On the History of the Regulatory Process," David Okrent, University of Wisconsin Press, 1981.

[49] "Safety Features of Operating Light Water Reactors of Western Design," M. Gavrilas, et al., CRC Press, 1995.

[50] "Nuclear Reactor Safety: On the History of the Regulatory Process," David Okrent, University of Wisconsin Press, p. 18-19, 1981.

[51] ibid., p. 23-24.

[52] ibid., p. 63-67.

[53] ibid., p. 69.

[54] ibid., p. 89.

[55] ibid., p. 96-114.

[56] ibid., p. 135.

[57] 10 CFR 50.46 and Appendix K.

[58] TMI-2 NRC Lessons Learned Task Force Report, NUREG-0578, 1979.

[59] "Managing Risk: the Human Element," J Wiley and Sons, R.B. Duffey and J.W. Saull, UK, 2008.

[60] "Understanding History to Interpret the Present," Bill Corcoran, Nuclear Plant Journal, pp.40-41, Sep/Oct, 2010.

[61] "U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board," Investigation Report NO. 2005-04-I-TX, Refinery Explosion and Fire (15 Killed, 180 Injured), 2007.

[62] "Where Japan Is and Where Japan Will Go: Update of the Fukushima Accident and Post-Fukushima Nuclear Energy Policy in Japan," S. Kondo, ICONE 19, JSME, 19th International Conference on Nuclear Engineering, Plenary Session presentation, Osaka 565-0871, Japan, October 24-25, 2011.

[63] "The Accident at the Fukushima Daiichi NPP and Severe Accident Management," K. Soda,

ICONE 19, JSME,19th International Conference on Nuclear Engineering", Plenary Session presentation, Osaka University, Osaka 565-0871, Japan, October 24-25, 2011.

[64] "Lessons Learned from the Fukushima NPS Accidents, ICONE 19, JSME, 19th International Conference on Nuclear Engineering," W. Mizumachi, Forum presentation, Osaka University, Osaka 565-0871, Japan, October 24-25, 2011.

[65] "Fukushima-Daiichi NPP Accident," K. Okamoto, ICONE 19, JSME, 19th Internationa Conference on Nuclear Engineering," Forum presentation, Osaka University, Osaka 565-0871, Japan, October 24-25, 2011.

[66] "The Way Forward, U.S. Industry Leadership in Response to Events at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant," Nuclear Energy Institute, February 23, 2012.

[67] "Needs and Capabilities for Severe Accident Management," B. De Boeck, M. Vidard, J. Royen.

[68] "Follow-up to the Fukushima Daiichi Nuclear Station Fuel Damage Event," NRC Inspection Manual, Temporary Instruction 2515/183, March 24, 2011.

[69] "Availability and Readiness Inspection of Severe Accident Management Guidelines (SAMGs)," NRC Inspection Manual, Temporary Instruction 2515/184, May 6, 2011.

[70] "Communication from the Commission to the Council and the European Parliament on the Interim Report on the Comprehensive Risk And safety assessments ("stress tests") of nuclear power plants in the European Union," COM/2011/0784, November 24, 2011.

[71] "Mitigation Strategies for Beyond Design Basis External Events," NEI Presentation at NRC Public Meeting, March 28, 2012.

[72] "An Integrated, Safety-Focused Approach to Expediting Implementation of Fukushima Daiichi Lessons Learned," Letter Adrian Heymer (NEI) to David Skeen (NRC), December 16, 2011.

[73] "Emergency Plans," U.S. Code of Federal Regulations, Title 10, Part 50.47.

[74] "Emergency Planning and Preparedness for Production and Utilization Facilities," U.S. Code of Federal Regulations, Appendix E to Part 50.

[75] "Near-Term Report and Recommendations for Agency Actions Following the Events in Japan," SECY-11-0093, July 12, 2011.

[76] "IAEA Mission to Review NISA's Approach to the Comprehensive Assessments for the Safety of Existing Power Reactor Facilities," Tokyo and Ohi, Japan, January 23"31, 2012.

[77] "State-of-the-Art Reactor Consequence Analyses (SOARCA) Project – Main Report (Rev3)." NRC Accession Number ML11168A034.

[78] "Planning Basis for the Development of State and Local Government Radiological Emergency Response Plans in Support of Light Water Nuclear Power Plants," U.S. NRC, NUREG-0396/EPA 520/1-78-016, December 1978.

[79] "Criteria for Preparation and Evaluation of Radiological Emergency Response Plans and Preparedness in Support of Nuclear Power Plants," U.S. NRC, NUREG 0654/FEMA-REP-1, Rev. 1, November 1980.

[80] "Evaluation of Margin in Plume Exposure Pathway Emergency Planning Zone for Surry and North Anna," D.E. Leaver et al, Prepared for Dominion by Polestar Applied Technology, Inc., December, 2003.

[81] "Development of an Emergency Planning and Preparedness Framework for Small Modular Reactors," SECY-11-0152, October 28, 2011.

[82] "Emergency Preparedness for SMRs," Nuclear Energy Institute, NRC SMR Licensing Public

Workshop, December 15, 2011.

[83] "Proposed Planning Basis for SMR EPZ Size," David Leaver and Edward Wallace, American Nuclear Society Meeting, Washington, D.C., November, 2011.

[84] NRC Accession Number ML093570581, DOE letter, Christopher Miller to Dolores Lineback, January 12, 2010.

[85] "Improving Regulation and Regulatory Review," Presidential Executive Order 13563, Federal Register, Vol. 76, No. 14, January 21, 2011.

[86] "Onsite Emergency Response Capabilities," Nuclear Regulatory Commission, 10 CFR Parts 50 and 52, Federal Register Vol. 77, No. 75, April 18, 2012.

[87] "Severe Accident Management Programmes for Nuclear Power Plants," IAEA, Safety Guide NS-G-2.15, 2009.

[88] "Global Snap Poll on Earthquake in Japan and its Impact on Views about Nuclear Energy" Winn-Gallup International, April 19, 2011.

[89] "The Dynamics of Public Trust in Business – Emerging Opportunities for Leaders," Business Roundtable Institute for Corporate Ethics, 2009.

[90] "On Social Acceptance of Nuclear Power," Michael W. Golay, presentation at The James A. Baker III Institute for Public Policy, Rice University, August 2001.

[91] "TMI-2 Lessons Learned Task Force Final Report," Office of Nuclear Reactor Regulation, U.S. NRC, NUREG-0585, p. 1-2, October 1979.

[92] "Effects of Ionizing Radiation," UNSCEAR 2008 Report, Vol. II., 2011.

[93] "The Need for Change: The Legacy of TMI," John G. Kemeny, Chairman, Report of the President's Commission on the Accident at Three Mile Island, Washington, D.C., October 30, 1979.

[94] "Annual Energy Outlook 2011 with Projections to 2035," U.S. Energy Information Administration, DOE/EIA – 0383 (2011), April 2011.

[95] "Long-Term Operations: The Feasibility of Extending the Life of U.S. Nuclear Facilities to 60 Years and Beyond," ASME, July 2010.

[96] "Life-cycle assessment – Vattenfall's Electricity in Sweden," Vattenfall AB, retrieved from http://www.vattenfall.com/en/file/2005-LifeCycleAssessment_8459810.pdf.

[97] "Japan's Energy Landscape a Year After the Tsunami," Mike Kapsch, Investment U Research, March 22, 2012, retrieved from http://www.investmentu.com/2012/March/japanenergy-landscape-after-the-tsunami.html.

[98] "Lowering Deaths per Terawatt Hour for Civilization," Next Big Future, March 16, 2011, retrieved from http://nextbigfuture.com/2011/03/lowering-deaths-per-terawatt-hour-for.html.

付録 A 社会に対する原子力発電の影響

A.1 はじめに

ASME タスクフォースは，今日及び予見可能な将来において原子力発電がエネルギー供給の重要な一部を占め，世界のエネルギーミックスの重要な選択肢であるべきと考える．タスクフォースは原子力発電が安全で温室効果ガスを排出しない電源として確実に利用可能であるために必要な社会基盤を強化すると信じて止まない．この報告書は原子力発電の種々の事故に対して当初から批判的な立場をとっている．そこでは，50 年を超える運転経験における事故やニアミスから得られた教訓や事故の原因となりその帰結に寄与した欠陥に焦点を当てている．原子力発電の安全性を向上し，次の世代がこの技術を利用可能であるようにするために，これらの勧告は意思決定する者に対して適切な枠組みを提供する物でなければならない．事故を扱う限り，このような文脈で適切なバランスを保つことは難しい．そこで，この付録 A は原子力発電についてよりバランスのとれた議論をするために書かれている．この技術には改善の余地はあるものの，多くの良い側面もある．この付録はいわばコインの裏表を議論するものである．

A.2 主な原子炉事故の経済的並びに社会的政治的影響

A.2.1 福島第一事故の影響

福島第一事故の経済的な影響全般に関する信頼出来る評価は難しい．オープンな民主国家においてこのような大規模の除染作業が行われるのはこれが初めてである．さらに，原子炉事故は東日本大震災と津波のさなかに生じたものであり，この地震と津波自体が日本の沿岸地域とその経済に壊滅的な被害－それは原子力発電所の影響を遥かに上回る－をもたらしたのである．このことが経済被害を原子炉事故によるものと地震・津波によるものとに区別することを難しくしている．タスクフォースは福島第一事故による経済損失を以下のカテゴリに分類して検討した：

- *福島第一事故後，安全評価（ストレステスト）の実施と運転再開が認められるまで日本の原子力発電所 54 基全てが運転停止している間の代替発電のコスト:*福島第一事故以前には原子力発電は日本の発電量の約 30% を供給していた．World Nuclear News (2012 年 1 月 25 日) によれば，失われた原子力発電容量を代替するための化石燃料（主として LNG）の輸入増による支払いは 2011 年の後半 9 ヶ月間で 550 億ドルに達しており，これが 2011 年の 320 億ドルに上る貿易赤字の主要因とされている．これは 1980 年代以来初めて日本が経験した貿易赤字である．
- *福島第一発電所 1－4 号機の除染と廃止措置に掛かる費用:*日本政府はその完了に 40 年かかると見積もっている．日本原子力産業会議 (JAIF) は 2011 年 6 月，除染費用は 2500 億ドルに上るとの推定を発表した．JAIF によれば（2012 年 1 月 30 日），そのために 650 億ドルに等しい最初の融資保証が日本の国家予算に計上された．
- *福島第一発電所外で放射能汚染された土地の除染:*日本の野田首相は汚染された地域を再び居住可能とするために必要な推定費用が 130 億ドルになると述べた（2011 年 10 月 02 日，ロイター報道）．JAIF によれば（2012 年 1 月 03 日），この目的のために 59 億ドルが国家予算に計上されている．放射能で汚染された地域の除染に要する実際の費用は，個別の目的に応じて受け入れ可能であるとして用いられ，今後も用いられることになる最終線量レベルに依存するが，これは地域に依存する難しい判断である．
- *事故中及び事故後に強制避難させられた市民への補償:* JP モルガンは当初この費用が約

230億ドルに上ると推定した(2011年4月11日のロイター報道). ただし, この額は人々が帰還を制限される期間や法的手続きの如何に大きく依存する. ブルームバーグはこの費用が580億ドルに登ると報じた(2012年1月12日). JAIFによれば(2012年1月30日)日本政府は保障の支払いを取扱うために原子力損害賠償支援機構を設立し, 初回の交付国債として650億ドルを用意した.

- *東京電力が失った資本:*ブルームバーグ, ロイター, 並びにその他の報道によれば東京電力の株価は福島第一事故以来 90%値下がりしており, これは主として東京電力の財政的な責任の範囲が不明確であることによっているという. これは東京電力株13億株に対して300億ドルの損失が生じたのに等しい. もちろん, このうちいくらかは時間とともに回復することも期待されるが.
- *東日本において福島第一事故と放射能汚染の結果生じた経済活動の低下:*日本のGDPに対するこの地域の寄与は高々2.5%であるからこの損失は小さく, この分析では無視することにする. しかしながら, 日本からの食料やその他の製品の潜在的な汚染の可能性に対する恐れの結果, 経済的影響は日本の GDP に対するこの地域の寄与から直接推定するものより大きいだろう.

このように見てくると, 福島第一事故のコストは現在全部で5000億ドルに近づいている. 停止している原子力発電所の代替電力用にLNGの輸入が増え続けるから, 将来このコストは増えていくだけである. 2012年5月5日の時点において日本の全ての原子力発電所は安全評価と安全性向上策が行われる間, 期間未定のまま停止している. 日本政府が運転再開を認めても地方自治体(県)が最終的な承認の権限を有している. それぞれの立地地域の自治体が運転再開を認めるのか, それは何時か, 日本政府が原子力撤退の決定を下すのか, 現時点では不明である. もし日本が原子力を放棄するとすれば, 多くの原子力インフラの閉鎖や原子力技術の輸出ビジネスを失うなど経済と環境に対する途方も無い影響が生じるだろう.

日本の東海岸では何万人もの人々が今も放射線防護のために故郷から強制避難させられている. この人々は強いストレスを感じながら事故の影響を受け続けることになる. この人々が何時, どのような条件の下で帰還を許されることになるかは不明である. これら避難民への補償とケアは除染作業が行われる間続く.

福島第一の出来事によって公衆に著しい放射能災害を引起した訳ではないから, この原子炉事故の帰結が社会的政治的, 財政的な惨事のみであったことは明確である. この惨事の大きさが新たな原子力安全概念構築の動機である.

A.2.2 チェルノブィル事故の影響

チェルノブィルの原子炉事故は原子力発電の歴史における最悪の事故である. 炉型により, また原子炉に格納容器がなかったことにより夥しい量の放射性物質が環境に放出された. さらに近隣住民への告知と避難が政府の政治構造の故に遅れた. 事故の影響は以下のようにまとめることが出来る[4]:

- 世界中, 特に欧州の原子力発電所の閉止と展開に対する影響は25年間に2500億ドルから5000億ドルに及ぶと推定されている.
- 30万を超える人々が移住させられるなどの心理的社会的な大きな影響があった.
- 土地, 居住地, 及び仕事場の著しい崩壊. IAEAはベラルーシ, ロシア, 及びウクライナのおよそ150,000平方キロが汚染されており, プラントから30キロの範囲が“立入り禁止区域”に指定されていることに言及している.

・ 現在，事故の影響を最も受けた地域の約7百万人が今でも事故による影響の度合いや回復における役割に応じた保障や手当を受け取っている.

国連の放射線効果に関する科学委員会によれば（United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR)），「チェルノブィル事故は影響を受けた人々の生活に深刻な社会的，心理的崩壊をもたらし，広い範囲で膨大な経済損失を与えた．3カ国の広大な領域が放射性物質で汚染され，チェルノブィルから放出された放射性核種は北半球の全ての国々で検出された．．．ベラルーシ，ロシア連邦，ウクライナの住民のうち，**2005 年の時点までで事故時に被ばくした幼児と青少年の甲状腺ガンが 6000 ケース報告されている.** この数は次の数十年で増え続けると予想される．．．**この増加は別にして，事故から 20 年が経過した現在，放射線被ばくによる公衆の健康影響の証左は見当たらない.** 放射線被ばくと関係付けられる全体的なガンの発生率増加，死亡率の増加，あるいは良性不調の発生率の増加が有るという科学的な証拠はない．白血病は固形ガンと比較して被ばくから発生までの期間が短いことから特に心配の対象となるが，人口当たりの発生率が増加しているようには見えない．最も被曝量の多かった人々は放射線影響のリスクに曝されたが，人口の大部分はチェルノブィル事故による放射線の影響で深刻な健康影響を被ったとは考えられない．放射線被ばくと関係しない健康問題も多い．」[92]

15 人の若者が甲状腺ガンによる合併症で亡くなったことは今では衆知の事実であり，それはチェルノブィル原子炉事故によるものと考えてよいであろう．原子炉の火災の消火を試みる間に激しく被ばくして急性の放射線障害を起こした48名の作業員と消防隊員が事故から10年以内に亡くなったことは確かな事実である.

A.2.3 スリーマイルアイランド 2 号機事故の影響

TMI-2 事故では公衆とプラント従業員への測定可能な健康リスクは無かった．NRC，EPA (Environmental Protection Agency)，健康教育福祉省 (Department of Health, Education and Welfare)，DOE,並びにペンシルベニア州が行った研究において事故による放射線の健康影響を追跡調査している．地域住民2百万人の平均的な被ばく量は1ミリレム（0.01ミリシーベルト）と推定されている．ちなみにこの人々がある1年間に自然界の放射線源から受ける被ばく量は100ミリレム（1ミリシーベルト）である．これらの研究並びに他の独立した研究から導かれた結論はNRCのウェブサイト”スリーマイルアイランド事故の背景 (Backgrounder on the Three Mile Island Accident) に掲載されている．それによると，「原子炉に深刻な損傷があったにも拘らず放射能のほとんどは閉じ込められ．．．実際の放出は人々の健康と環境に対して無視出来る程度の影響しかなかった．」 スリーマイルアイランドに関する大統領直轄の委員会は次のように報告した．「．．．ガンの発生は無いだろう．あるいはあったとしても検出不可能な位小さな値であろう．同様の結論が他の健康影響についても当てはまる．」[93]

TMI-2 発電所の数十億ドルに上る財産価値の損失に加え，TMI-2 事故による経済的，社会的政治的なインパクトには以下のようなものがある：

- 原子炉事故の後始末．1979 年 8 月に着手され 1993 年 12 月に完了したが，その費用におよそ 10 億ドルを要した
- ペンシルベニア州経済の毎年 9 億ドルの損失
- バックフィットを含む米国の原子力発電所での対応費用は 100 億～600 億ドルを要したと推定されている
- 14 万人の妊婦及び就学前児童の短期間の避難

- 非政府組織や一部の一般市民の間での反原発の立場からの安全問題への懸念の顕在化，それはここ数十年続いている．
- 既に建設が開始されていた多くの新規原子力発電所のキャンセルと原子力産業界の自信喪失，それらは実際の事故の影響とは関連しないリスクを恐れてのものだった

A.3 米国における現在及び将来の原子力発電の価値

米国では 104 基の原子炉が運転中であり発電総量の 20%を供給している．The Energy Information Administration Annual Energy Outlook 2011 [94]は 2035 年までに電力需要が 31% 増加すると予想している．

米国の全原子炉の資産価値は今日 1000 億から 2000 億ドルに達する．これらの原子炉はそれぞれのプラント年齢と寿命延長に応じて今後 20 年から 40 年の間信頼出来る電力供給を継続することが出来る．図 A-1 は認可寿命 40 年，運転認可期間を 40 年から 60 年に延長した場合，そして 60 年以上延長した場合の米国での原子力発電の推移を示している．米国の全ての既存商用炉は事実上 20 年の寿命延長を認められているか，これから認められることになる．60 年を超える寿命延長は ASME の長期間運転に関するワークショップ[95]でも議論されたように種々の課題がある．

図 A-1 中の赤線は米国の電力需要が増加していくなかで現在の原子力発電による供給割合の 20%を維持するために必要な発電容量である．この保守的な需要予測を満たすためでさえ 2050 年には現在運転している原子力発電所の 2 倍の原子炉が必要である．60 年を超える長期間運転が実現されない場合，米国は毎年 5 基の大型原子力発電所を建設していくことが必要になる．これを，僅か 5 基の建設しか進んでいない今日の状況（長く遅れているワッツバー2 号機，ジョージア州とサウスカロライナ州で最近認可された 4 基の建設運転許可 (Combined Construction and Operating Licenses, COL) と比べてみるとよい．現在米国において原子力発電が排出ガス効果のない全発電の大部分を占めているが，排出ガスのないベースロード電源の増加を他の電源によって達成することは不可能ではないにしても，大変困難である．世界における電力需要の増加予測を考えると多くの国，特にアジアにおいて状況は同じである．

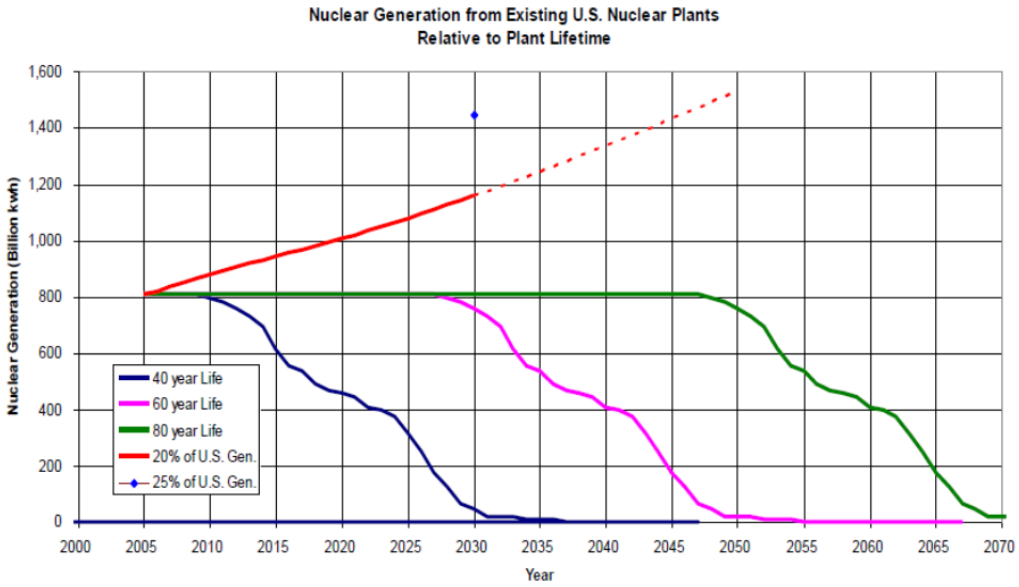

Figure A-1 – Nuclear Generation from Existing U.S. Nuclear Plants

鍵はあらゆる技術を投入し，これまでの事故の教訓を活かしつつ，原子力発電の安全性向上を続けていくことである．TMI-2 事故以降米国の原子力発電所に取入れられた設計，プラント運転の改良とヒューマンパフォーマンスの向上によって大規模な放射性物質の放出を伴う過酷事故に関するリスクは一桁以上低減されている．新たな原子力安全概念が示唆し，推奨している改善が同様のリスク低減につながることを期待している．

A.4 原子力発電の信頼性

原子力発電所の正常な運転から得られる便益はいくつもある．原子力発電は温暖化ガスを排出しない信頼性があり安全なベースロード電力の電源であり，化石燃料への依存を減じてくれる．第 2 章（図 4）で示したように，米国の全原子力発電所の運転実績は利用率と安全性の両方において 1980 年台から 1990 年台にかけて劇的に向上した．その結果原子力発電はここ 10 年にわたり米国において最も信頼性のある電源であった．利用率に関する米国の他電源との比較を表 A-1 に示す．どのプラントを送電網に投入するか，運転出力をどうするかに関する電力会社あるいは配電会社の判断により種々のプラントの利用率が変わることは知られている．原子力発電所は石炭火力と同様，伝統的にベースロード電源として運転されてきた．一方天然ガスのコンバインドサイクルプラントは負荷追従のために用いられてきた．この種の判断は燃料費，運転コスト，種々の再生可能エネルギー源の利用可能性，負荷追従への技術的対応性，排出ガス，その他の要因に基づいて行われる．米国でパイプライン天然ガスの価格が低い現在，コンバインドサイクルプラントの基幹電源としての役割が増していくだろうと考えられる．従って，天然ガスプラントの利用率は将来向上していき石炭プラントのそれは減じていくだろう．特に低効率で温室効果ガスを多く排出する旧式の小型プラントにその傾向が顕著であろう．

Table A-1 – Average Capacity Factor in the U.S. by Energy Source (1998 – 2009)

Year	Coal	Petroleum	Natural Gas CC[1]	Natural Gas Other	Nuclear	Hydroelectric Conventional	Other Renewables	All Energy Sources
1998	67.7	22.2	--	34.2	79.2	46.6	57.0	54.6
1999	68.1	22.4	--	33.2	85.3	45.9	56.9	54.9
2000	71.0	20.5	--	37.1	87.7	39.5	59.1	54.6
2001	69.2	21.5	--	35.7	89.4	31.4	50.2	51.4
2002	70.0	18.1	--	38.2	90.3	38.0	54.0	49.7
2003	72.0	22.4	33.5	12.1	87.9	40.0	50.0	47.7
2004	71.9	23.3	35.5	10.7	90.1	39.4	50.5	47.9
2005	73.3	23.8	36.8	10.6	89.3	39.8	47.0	48.3
2006	72.6	12.6	38.8	10.7	89.6	42.4	45.7	48.0
2007	73.6	13.4	42.0	11.4	91.8	36.3	40.0	48.7
2008	72.2	9.2	40.6	10.6	91.1	37.2	37.3	47.4
2009	63.8	7.8	42.2	10.1	90.3	39.8	33.9	44.9

[1] Prior to 2003, the generation collected on Form EIA-906 did not have a distinction for combined cycle (CC) prime movers. All natural gas-fired plants of all types are included in "Natural Gas Other" for 1998 to 2002.
Note: Technical Note: Average Capacity Factor is the ratio of actual generation to maximum potential output, expressed as a percent.
Average Capacity Factor = [(Net Generation)/(Net Summer Capacity* Number of Hours in the Year)] * 100
for the respective energy source and year.
Sources: U.S. Energy Information Administration, Form EIA-860, "Annual Electric Generator Report," Form EIA-923, Power Plant Operations Report," and predecessor forms.

これらの利用率を見ると，米国の電力の約 20%を供給している運転中の 104 基の原子力発電所が米国の貴重な財産であることは明らかである．

A.5 価格の安定性とエネルギーセキュリティ

核燃料が高いエネルギーを含有し全発電コストに占める燃料コストの割合が小さい (~15%) ことにより，原子力発電の使用によって電力コストの安定性と高い確実性がもたらされる．ウラン燃料は相対的に小さな容積で大きなエネルギーを含有するので貯蔵が容易である；従って原子力発電のコストはウラン資源の価格の揺らぎにほとんど左右されない．原子力発電が価格変動性の影響を受けないという

この特性によって，ベースロード市場におけるエネルギー保障と価格安定性がもたらされている．図 A-2 は主要な火力発電の発電コスト（燃料及び運転，メンテナンスコスト）の歴史的な傾向を示している;コストには原子力発電が最も高い初期資本コストは含んでいない．原子力発電のコストが最も低く，石炭火力はそれをやや上回り，天然ガス，石油と続く．ここで最も重要な要素は石炭と原子力のコストの安定性である．

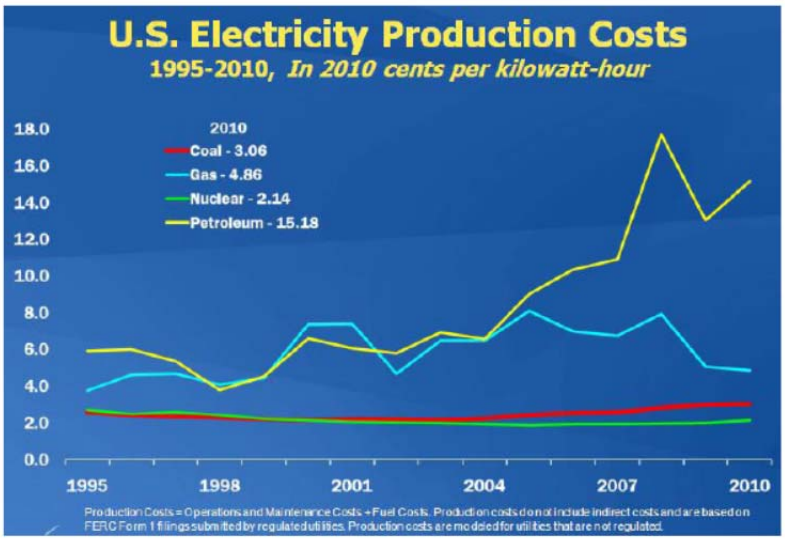

Figure A-2 – U.S. Electricity Production Costs by Fuel Type

A.6 温室効果ガスの排出

発電への低炭素排出技術の活用を進めて行くことは米国及び世界中で支持されている．米国では石炭火力による発電が 50%を上回っており大量の CO2 の排出に繋がっている．世界の傾向を見ると，石炭火力の利用はもっと多く，天然ガスと石油がそれに続いている（図 A-3 参照）．化石燃料が他のエネルギー源に比較して入手が容易で価格も手頃であるが故にこの傾向は続くと予想されている．しかしながら，温室効果ガスの排出による地球温暖化への懸念もあり，この傾向が変化して原子力発電が排出効果のないエネルギー源として主役になる可能性もある．

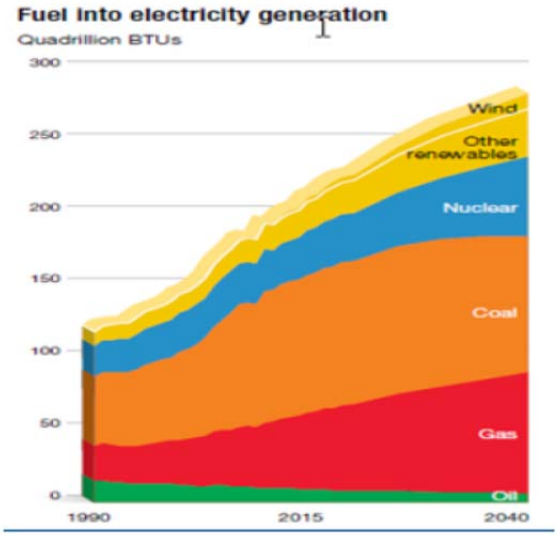

Figure A-3 – Power Generation by Fuel Type (1990 to 2040)

様々な発電用燃料の CO2 排出に対する寄与に関する最適な目安はライフサイクルに亘る排出の評価により得られる. これには発電所の建設, 燃料供給, プラントの運転, そして最終的にプラントの廃止によって生み出される CO2 が含まれる. 原子力発電は最も低排出の発電方式の一つである. [96]

過去 1 年間, 原子力発電所を全て停止した日本は化石燃料に大きく依存することを強いられてきた.

- LNG の輸入は 2012 年 1 月には記録的な量となり 2011 年 1 年間では 28%増加した.
- 発電用の石炭の輸入も 2012 年 1 月には前年の 26%増となり, 2011 年 1 年間では 8%増であった.
- 2012 年 3 月の原油の輸入量は前年 3 月の 350%増であった; 全体としての消費は前年の 9%増であった. [97]

化石燃料の使用を増やすのは温室効果ガスの排出によって環境に負の影響を及ぼす.

現時点において, 原子力発電所は米国における排出効果の無い電力のほぼ 69% を占めている. 水力発電 (~21%) がこれに続き, その次が再生可能エネルギー源 (~10%) である.

A.7 各種電源の相対的な健康リスク

全てのエネルギー技術には正常な運転時のみならずエネルギーの搬送チェーン (delivery chain) に伴う事故の結果として生じる公衆の健康と安全に対するリスクがある. エネルギー搬送チェーンには資源探査と生産, 運搬, 処理と貯蔵, 地域への分配, エネルギー生産, 並びに廃棄物の処理処分という段階がある. 死亡事故はこれらのどの段階でも起こり得る. テクノロジーの相違によって主に死亡事故が起こりやすい段階は異なっている. 例えば石炭の場合は炭鉱爆発, 火災, 落盤事故などが主なリスクである. 石油の場合は運搬と配送時の事故のリスクが大きい. 原子力発電による死亡事故は相対的に少ないが主として電力生産の段階で生じ, これは数少ない原子炉事故に起因している. この場合の死亡事故には高レベルの被ばくによる即発性の死亡と潜伏性あるいは長期的な健康被害(放射線性ガンによる死亡)がある.

後発性の死亡は, 他のエネルギー源の事故だけでなく原子力発電所の通常運転による健康への影響を適切に考える上で配慮すべき重要事項であることを認識しておくことは重要である. 実際, 事故による即時の死亡はこれまでの歴史において非常に少ないので, 後発性の影響が原子力発電のリスクプロファイルの大部分を占めると推定されている. UNSCEAR の最も科学的な予測によれば, 後発性

のガン死は以前の推定よりはるかに少なく，原子炉事故による死亡，例えばチェルノブイリに関連付けられるガンの症例は当該地域において通常発症するガンの症例と統計的に区別できないだろうとの主張がなされている．

これらのデータは，過酷事故の影響を考慮したとしても原子力発電による一般公衆に対するリスクが各種発電方式の中で最小であることを示している．現在公表されているデータによれば TWh 当たりの死亡率は原子力発電が最も小さい．現在のデータは福島第一以前のものであるが，この事故による死者はなかったし著しい潜伏性の健康影響もないと予想されている．従ってデータは依然として有効であり原子力発電技術を継続して利用し，拡大していくことを支持している．[98]

まとめると，原子力発電の便益を示す事は出来るのであって，それは原子力発電の継続利用と成長につながる意思決定において考慮されるべきものである．