

解説 記事

欧州原子力発電所のストレステストの結果

日本エヌ・ユー・エス株式会社
伊藤 邦雄 Kunio ITO

1. 欧州ストレステストの実施

欧州理事会（年4回開催されるEU（欧州連合）の首脳会議）は2011年3月の福島事故後、以下の決定を行った。

- ・ EUにおける全原子力発電所の安全性を、包括的で透明性のあるリスク及び安全評価（ストレステスト）としてレビューすること。
- ・ 欧州原子力安全規制者グループ（ENSREG）及び欧州委員会（EC）は、ストレステストの範囲や様式を作成すること。
- ・ 独立した国別の規制機関及びピアレビューにより評価を行うこと。
- ・ 結果や講じるべき対策について EC 及び ENSREG 内で共有し公開すること。
- ・ EC は原子力施設の安全性に関わる既存の法的、規制上の枠組みをレビューし、2011年末までに必要な改善策を提示すること。

1.1 技術仕様

技術仕様は、西欧原子力規制者会議（WENRA）が2011年4月に作成した案をもとにして、ENSREG から2011年5月に公表された。

地震、洪水その他の過酷な自然現象に対する発電所の安全裕度について評価を行うもので、これらの事象に伴う安全機能の喪失の影響（全交流電源喪失を含む）と、シビアアクシデント・マネージメント（設計基準を超える過酷な事故の影響をどのように防止あるいは緩和できるか）の有効性を評価する。

- a) 起因事象
 - ・ 地震
 - ・ 洪水
- b) サイトで考えられる起因事象による安全機能喪失の影響
 - ・ 全交流電源喪失（SBO）を含む電源の喪失

- ・ 最終ヒートシンク（UHS）の喪失
- ・ 両者の組み合わせ
- c) シビアアクシデント・マネージメントの問題
 - ・ 炉心冷却機能喪失の防護及び管理の手段
 - ・ 燃料貯蔵プールの冷却機能喪失の防護及び管理の手段
 - ・ 格納容器健全性喪失の防護及び管理の手段

b) 項と c) 項の評価では、福島で経験したような地震と津波に限定せず、洪水や悪天候も考慮に含める。評価アプローチは決定論的であり、極端なシナリオの解析の際には、その喪失確率とは関係なく、防護措置が連続して効かなくなる状況を想定する。

主要な次の3つの側面について報告する必要がある。

- ・ プラントの設計基準で講じられた対策及び設計要件へのプラント適合性
- ・ 設計基準を超える領域でのプラントの頑強性。この目的で、安全関連の構築物、系統及び機器（SSC）の頑強性（設計裕度、多様性、多重性、構造的防護、物理的分離など）及び深層防護概念の有効性。施設及び対策の頑強性に関して、審査の一つの焦点は、事象シーケンスにおけるステップ状の変化（クリフエッジ効果：例えば全交流電源喪失事象の際の蓄電池の消耗）を抽出することと、必要ならばこれを回避する措置の考慮である。
- ・ 深層防護レベルを高める変更措置の可能性（機器の耐性の改善；他の防護レベルからの独立性の強化）

確認事項は以下の通りである。

- ・ 起因事象により受ける可能性がある損傷と、プラント許認可時の安全性立証に際してクレジットを取っていない手段を考慮して、3つの基本安全機能（反応度制御、燃料冷却、放射能閉じ込め）及び支援機能（電源供給、最終ヒートシンクによ

る冷却)を維持する手段

- ・ 可搬式の外部手段の使用可能性と使用条件
- ・ 別の原子炉の設備を利用する既存の手順
- ・ 同一サイトの他の原子炉の機能への依存性
- ・ 燃料損傷が回避不能になるまでの時間：PWR と BWR について、燃料が原子炉容器内に存在する場合は、炉水位が炉心上端に低下するまでの時間、並びに燃料損傷(急速な燃料被覆管の酸化と水素発生)に至るまでの時間
- ・ 燃料が使用済燃料プールに存在する場合は、プールの沸騰までの時間、適切な放射線遮蔽が維持される時間、水位が燃料要素頂部まで低下するまでの時間、燃料酸化が生じるまでの時間

1.2 ストレステストの実施とピアレビュー

このストレステストには、17 カ国 (EU 加盟国のうち運転中プラントを有する 14 カ国及び廃止措置中プラントを有するリトアニア、並びにウクライナ及びスイス) が参加した。

2011 年 6～10 月にかけて各国事業者が ENSREG の仕様に沿ったストレステストを実施し、12 月末には各国の規制機関がそれに対する評価を行い、必要に応じて要求事項を発行し、国別報告書を提出した。この国別報告書に対して、欧州規模のピアレビューが 2 段階で実施された。ピアレビューの目的は、ストレステストが ENSREG の仕様に従って実施されたかを評価するとともに、重要な問題が見落とされていないかを確認し、そして各国の規制機関に対して良好事例や更なる改善のための情報を提供することにある。

第一段階は 2012 年 1 月～3 月に実施されたトピカルレビューであり、外部ハザード、安全機能の喪失、シビアアクシデント・マネージメントという 3 分野の専門家チーム (各 20 数名) が各国の評価アプローチの差や主要な知見について比較評価を行った。2012 年 2 月の会合で各国チームはレビューチームから出された質問に回答し、残りの質問は第二段階にまわされた。

第二段階は、2012 年 3～4 月に実施された国別レビューで、6 つの専門家チーム (各 8 名) がそれぞれ 3 ヶ国ずつレビューを行った。これには、各国少なくとも 1 サイトへの訪問も含まれており、合計 54 基、結果的に欧州内にある全ての原子炉タイプへの訪問が実施された。なおピアレビューチームは、EU メンバー国にスイス、ウクライナと EC 委員会を加えた原子力安全分野の専門家から構成され、クロアチア、米国、日本、IAEA からのオブザーバも参加した。ピアレビューの結

果は 2012 年 4 月 26 日付の ENSREG 資料として公表された。

EC は、ストレステスト及び関連活動に基づく結論や勧告事項を特定し、下記の報告書を 2012 年 10 月 4 日付で欧州理事会及び欧州議会へ提出した (EC の web サイトで公開)。

- ・ 「EU における原子力発電所の包括的なリスク及び安全評価 (ストレステスト) 及び関連活動に関する EC から欧州理事会及び欧州議会への報告」 (COM(2012)571)
- ・ 「EU における原子力発電所の包括的なリスク及び安全評価の実施に関する技術的要約」 (SWD(2012) 287)

2. 欧州ストレステストの結果

ENSREG のピアレビュー委員会の報告書では、国別報告書に対する評価を通して判明した各国の発電所の強固な点、弱点そして更なる安全性向上のための勧告事項が示されている。

ピアレビュー報告書によれば、ストレステストの結果、欧州における原子力発電所の安全性は一般に高いことが確認できたが、ほとんど全ての原子力発電所でさらなる安全性の改善が勧告されている。それは、以下の 4 つの主要領域に及ぶものである。

- ・ 加盟国間の整合性を高めるために、地震、洪水、異常気象などの自然災害に関する評価及び安全裕度に関する欧州の指針を作成すべきである。欧州で得られる最善の専門知識を有する西欧原子力規制者会議 (WENRA) は、この任務を遂行する上で望ましい立場にある。
- ・ 各原子力発電所の定期安全審査 (PSR) を少なくとも 10 年ごとに実施すべきである。これは、原子力発電所の安全と頑健性を維持し、改善するとともに、原子力発電所が遭遇する可能性のある自然災害について再評価するためである。
- ・ 放射能漏えいに対して人間と環境を保護するための最後の防壁として、格納容器の健全性を確保するための公認された対策を実施しなければならない。
- ・ 自然災害による事故は、これを防止し、その影響を限定するために緩和すべきである。検討すべき対策には、シビアアクシデントを防止し、管理するためのバンカー設備、極端な自然災害に対して保護された可搬式設備、極端な自然災害と汚染に

対して保護される緊急時対応センター、長期の事象において現地の原子力発電所運転者を支援するために迅速に対応できる救助隊及び救助設備などがある。

上記の結論が出された背景には、ピアレビューによって以下の点が見出されたことがある。

- ・ 地震や洪水の設計基準に対する評価アプローチは国による差異があったものの適切であった。設計基準を超える事象に対するマージンの評価に対しては差異が大きく、クリフエッジを評価した国は少なかった。これは時間的な誓約や、統一的に認められた評価手法がないためである。
- ・ 定期安全審査 (PSR) は発電所の安全性を再評価するうえで強力な重要なツールであることが分かった。
- ・ 各発電所のシビアアクシデントに対する防止方策は緩和方策に比べると進んでいる。緩和方策の実施状況は国によって差が大きい。特に、格納容器の健全性の確保は重要である。取るべき方策としては、高圧での炉心溶融防止のための1次系の減圧、水素爆発の防止、格納容器過圧の防止である。過圧防止策の例としてフィルターベントがある。
- ・ バンカー設備は、厳しい外部事象に耐久可能なもので、通常的安全系とは独立した電源と燃料供給、水源付きの専用ポンプ、独自の計装制御系を持つ設備として、ドイツとオランダやスペインの一部 (KWU 社設計炉) などで主に航空機落下対策として設置済みである (独立非常用系と呼ばれている)。更にフランスでは今後、ハードコア (hardened core) の設置を進めるとしているが、これは上記の目的を満たすハード設備に加えて、職員の訓練と手順書の整備を含めたものを指す。

さらに、欧州委員会は、各国の規制機関が複数の原子炉の同時事故の影響に関して更に詳細な解析を将来の安全審査に含めることを勧告している。また、冷却喪失によるリスクを減らすために、設備と資材の経年劣化、使用済み燃料貯蔵プールの保護、ならびにプールに貯蔵される使用済み燃料の量を減らす可能性なども考慮に含めることとしている。

欧州委員会は、安全性の評価を今回の評価スコープ外とされたオフサイト緊急時対策及び対応の準備にまで広げることが、公衆の安全を向上させる上で重要な

追加的活動であると考えている。従って、欧州委員会は第一ステップとして、「EU 加盟国及び近隣諸国における所外の原子力緊急時対策と対応の準備のレビュー」に関する調査に着手している。この目的は、EU 加盟国及び近隣諸国における所外での原子力緊急時対策と対応の能力を評価し、不整合性と欠陥を確認し、可能性のある改善に向けた提案 (法案または法案以外の提案) を作成することにある。

また原子力発電所に航空機が衝突した場合の安全上の影響について、欧州委員会は ENSREG に対して、一貫性のある方法論を作成し、欧州連合全体で同等の高水準の基準に到達するために、安全面の施策に速やかに着手することを勧告している。

ストレステストのピアレビューの結果、各発電所に対する安全性改善のための勧告事項 (recommendation) と、レビューの課程で見出された各発電所の良好事例 (good practice) がまとめられている。

勧告事項は、2012 年 10 月に提出された文書 (COM(2012) 571) の付属資料「EU 加盟国の原子力発電所でのストレステスト時の改善に向けた主な勧告のまとめ」にリストアップされている。なお、以下の文章では、原文の should という表現を「すべきである」と訳した (一般には「することが推奨される」の意味で使用される)。なお、勧告事項の背景情報を「補足」として《》内に記載した。

1. a). 地震に関しては、1 万年に 1 回未満という超過確率に対応する外部ハザード安全ケースを使用すべきである。(原子力発電所建設サイトの適切性は、過去 1 万年の間に生じた最も過酷な地震を考慮に入れた解析をベースに評価すべきである。)
- b). 洪水に関しては、1 万年に 1 回未満という超過確率に対応する外部ハザード安全ケースを使用すべきである。(上記の地震と同様、過去 1 万年の間に生じた最も過酷な洪水を考慮に入れるべきである。)
2. 少なくとも 0.1g の最大地盤加速度 (PGA) に対応した設計基準地震 (DBE) を使用すべきである。
3. 事故対応に必要な手段は、外部事象から適切に防護された場所に保管すべきである。
4. 所内地震計装を設置または改善すべきである。
5. 全電源喪失及び/または最終ヒートシンク喪失時に安全機能を回復させるために運転員が利用できる時間として、(人間の介在なしに) 1 時間以上を確保すべきである。《補足：多くの場合、SBO の後に対策が取られないと、1~10 時間で炉心の加熱に

至る。4基の原子炉（2カ国）では安全機能の復旧に利用可能な時間が1時間以内しかなかった。」

6. 緊急時操作手順（EOP）はあらゆるプラント状態（全出力運転状態から停止状態）を網羅するべきである。
7. シビアアクシデント・マネージメント・ガイドライン（SAMG）は原子力発電所のあらゆる状態（すなわち、全出力運転状態から停止状態）を網羅するべきである。
8. シビアアクシデントの際に水素（または他の可燃性ガス）爆発を防止するための受動的措置（静的触媒型再結合器（PAR）または他の代替物）を設置すべきである。《補足：国によってはDBA用にPARを設置しており、シビアアクシデント時のリスク低減に有効かどうか、追加の台数が必要かどうか未確認または現在検討中の国がある。》
9. 事故の際に原子炉格納容器外に放出される放射性物質の量を制限するために格納容器フィルターベントを設置するべきである。《補足：ENSREGのピアレビュー報告書での記載は、「原子炉や格納容器タイプによってその必要性は異なる。炉容器外部でのシビアアクシデント現象が防止できればその有効性は減る。その他の場合には格納容器健全性を防護し、放射能放出を低減するための最終手段として認識されている。」としていたが、本書（COM(2012) 571）ではやや踏み込んだ表現になっている。》
10. シビアアクシデントによる放射能放出、中央制御室での火災または極端な外部事象による損傷によって中央制御室に留まることができない場合には、バックアップの非常用制御室を利用できるようにすべきである。

また、良好事例は下記のものである。

- GP1：完全に独立した代替の最終ヒートシンクがある。
- GP2：通常的安全系から完全に独立し、外部事象に対して十分防護された区域に追加的安全系階層がある（例：バンカー配置、安全系のハードコア）。
- GP3：通常のディーゼル発電機から物理的に分離され、全交流電源喪失、外部事象またはシビアアクシデント状態への対策専用の追加ディーゼル発電機（または燃焼タービン）が設けられている。
- GP4：全交流電源喪失、外部事象またはシビアアクシデント状態への対策専用の可搬設備、特にディーゼル発電機が設けられている。
- GP5：緊急時対応活動の調整が行える、追加の所内

緊急時管理センターが利用可能であり、放射線ハザード及び外部自然ハザードに対して適切に防護されている。

2012年10月4日付ECのプレスリリースでは、「ピアレビューの結果、いくつかの原子炉では、上記の勧告事項に照らして必ずしもそれらが適用されていない分野がいくつか指摘された。それらは以下のとおりである。」と報告された。（なお、カッコ内には該当する発電所の国名を示した。ただし必ずしも国内の全機で守られていないわけではないし、改善を計画、実施中の国もある。）

- ・ 地震リスク（10,000年）：145基のうち54基（37%）で考慮されていない。《仏、ルーマニア》
- ・ 洪水リスク（10,000年）：62基（43%）で考慮されていない。《仏、ベルギーなど》
- ・ 最低地震ハザードレベル（0.1g）：65基（45%）で利用されていない。《フィンランド、独など》
- ・ シビアアクシデント対応設備保管：81基（56%）で守られていない。《仏、スウェーデンなど》
- ・ 所内地震計：121基（83%）で設置または改善しなければならない。《独、スウェーデン、オランダ、チェコ》
- ・ 電源喪失後の対応（1時間以上介入なし）：5基（3%）で守られていない。《フィンランド、スウェーデン》
- ・ 緊急時操作手順（EOP）（あらゆる状態）：57基（39%）で守られていない。《フィンランド、英など》
- ・ シビアアクシデント・マネージメント・ガイドライン（SAMG）：79基（54%）で守られていない。《フィンランド、仏、独、スペイン、英など》
- ・ 水素爆発防止受動的措置：40基（28%）で守られていない。《フィンランド／独／フィンランドのBWR、チェコなど》
- ・ 格納容器フィルターベント：32基（22%）で設置していない。《ハンガリー、スロバキア、ウクライナは未設置、チェコ、スペイン、英、ベルギーは検討中》
- ・ バックアップの非常用制御室：24基（17%）で利用できない。《英のガス炉など》

3. 今後の予定

欧州委員会は、すべての参加国に対して、ストレステストの勧告を速やかに実施するよう促している（つまり勧告事項の実施が事実上要請されている）。追加の安全性改善策で「1基当たり3,000万～2億ユーロが必要」としており、132基の総コストは100億～250億ユーロ

一口にのぼるとの試算結果も示している。

2012年7月25日にENSREGからアクションプランが出され、各国の規制機関は2012年末までに実施スケジュールを盛り込んだ国家行動計画を作成することが定められた。これを受けて、2012年末から2013年1月にかけて各国の国家行動計画が提出されている。

2013年4月には、各国行動計画の内容や実施状況を協議するワークショップが予定されている。欧州委員会は、2014年6月にストレステストの勧告の実施について報告する意向である。

それと並行して、欧州委員会は、原子力安全に関する欧州の既存の法的枠組みを見直し、2013年初頭には今回のストレステストと福島事故で学んだ教訓を反映させるための修正事項を提案する。また、食品と飼料の放射能汚染に関する最大許容水準に関する提案とともに、原子力保険と損害賠償に関するさらなる提案が検討されており、2013年中に行われることになる。また、とくに国際原子力機関（IAEA）との協力など国際レベルでの強固な協力も不可欠とされている。

なお、今回の評価ではテロ攻撃への対応は含まれていない。この問題は、欧州理事会の核セキュリティに関するアドホックグループ（AHGNS）が検討している。

3. まとめ

ENSREGはWENRAと共同でストレステストの仕様を作成し、各発電所はそれに沿った評価を実施した。評価においては、各発電所が有するべきマージンはどれだけ必要なのかについて、特定の許容基準は示されていない。各発電所の運転が許容できるかどうかは、各国の規制機関の責任で判断されるものである、とされ、各国の規制機関はストレステストの結果に基づき、停止を必要とする技術的な理由はないと結論するとともに、一連の良好事例を確認した。

EUの報告書では、推奨事項（10項目）と最適事例（5項目）に対する各発電所別の星取表が付録に添付されているが、この最終報告書はENSREGの関与なしに、独自に作成された模様である。これらの推奨事項と良好事例は、各国の規制環境や各発電所のサイトと設計の特徴を考慮していない（欧州にはGEやWH社設計だけではなく、KWU、ABB、AREVA、VVERなどの設計があり、それぞれ安全設計上の特徴がある）。星取表のチェックマークは、原子炉に欠陥があるようなイメージを与え、公衆に対して誤解を招くもの、との批判も産業界の一部から出されている。

いずれにしても、EUのストレステストは、共通の仕

様に基づいて欧州規模で実施された総合的な安全評価であり、初の試みである。事業者、規制当局、国際的な専門家の共同作業によって、外部事象によってもたらされる過酷な状態についての洞察をプラント個別に把握することができた。またオープンで透明性のあるピアレビューが行われ、外部事象に対する頑強性を増すための改善策が確認された。

世界最高水準の安全性を追求するわが国においても、今後これらの実施状況を注意深くモニターすることは重要であろう。

参考文献

- [1] European Commission, "Communication from the Commission to the Council and the European Parliament on the comprehensive risk and safety assessments ("stress tests") of nuclear power plants in the European Union and related activities," COM(2012) 571, October 4, 2012.
- [2] European Commission, "Commission Staff Working Document - Technical summary on the implementation of comprehensive risk and safety assessments of nuclear power plants in the European Union," SWD(2012) 287, October 4, 2012.
- [3] ENSREG, Stress tests and Peer Review Process Joint statement of ENSREG and the European Commission, April 26, 2012
- [4] ENSREG, Peer review report, Stress Test Peer Review Board Stress tests performed on European nuclear power plants, v12i – 2012 04 25
- [5] EUROPA Press Release, Communication on nuclear stress test, October 4, 2012
- [6] Implementation of the EU stress test in European nuclear power plants, Dr. Cord-Henrich Lefhalm, RWE Power, October 2012
- [7] ENSREG, Action plan, Follow-up of the peer review of the stress tests performed on European nuclear power plants, July 25, 2012

(平成25年2月27日)

著者紹介



著者：伊藤 邦雄
 所属・役職：日本エヌ・ユー・エス株式会社 部門長
 専門分野：海外安全規制