解説

米国科学アカデミーの福島原子力事故報告書
米国原子力プラントの安全性向上のための福島原子力事故からの教訓

筑波大学　成合 英樹

米国科学アカデミーは，東日本大震災に伴う福島第一原子力発電所事故につき2年間の調査研究を行い，7月24日に報告書のドラフトを公表した。この調査で分かったことを9つの新知見(Finding)にまとめ，10の提言(Recommendation)がなされた。提言は，過酷事故へのハード面での対応や訓練に加え，設計基準超過事象とリスク評価，安全規制への新しいリスクの考え方の活用，周辺地域の緊急時対応，原子力安全文化の改善等，広い視点でなされている。

Ⅰ．はじめに

2011年3月11日の東日本大震災と大津波により，福島第一原子力発電所で3基の原子炉の炉心溶融と原子炉建屋の水素爆発による大きな損壊，そして大量の放射性物質が施設外へ広範囲に放散する大事故が発生した。丁度米国では，原子力の将来に関するブルーリボン委員会(the Blue Ribbon Committee on American Nuclear Future)が，米国における使用済み燃料と高レベル放射性廃棄物の処理に関するエネルギー省の見解の評価を終えたところであったが，使用済み燃料プールからの放射性物質放出の可能性問題が持ち上がった。ブルーリボン委員会は，米国科学アカデミー(NAS：National Academy of Science)が福島原子力事故からの教訓の評価を行うよう意見を出したが，米国議会で取り上げられ，米国原子力規制委員会(NRC：Nuclear Regulatory Commission)とNASの契約として調査研究が行われた。

調査研究の課題は4点で，第一は事故の要因，第二が使用済み燃料と高レベル廃棄物の安全の再評価，第三が商用原子炉の安全・セキュリティーにおける原子炉システムと運転への教訓，第四が商用原子炉の安全・セキュリティーのための規制への教訓である。しかし事務的要因もあって今回の報告には第二の課題は含まれず，残りの3つの課題についての検討がまとめられた。第二の課題は引き続いて行われ，別の報告書としてまとめられる予定である。

Report of the Fukushima Nuclear Accident by the National Academy of Science; Lessons Learned from the Fukushima Nuclear Accident for Improving Safety of U.S. Nuclear Plants：Hideki NARIAI.

(2014年8月29日 受理)

NASは，米国原子力プラントの安全とセキュリティー向上のための福島原子力事故からの教訓委員会(以下，委員会)を設置した。委員会は委員長と副委員長を含め21名の委員よりなるが，原子力工学関連以外に広範な専門分野の専門家より構成された。総計39回の会合を行ったが，そのうちの1回を東京で行うと共に，福島第一，第二，女川の原子力発電所に行き調査を行った。

なお，既に多くの事故調査委員会がある中での本調査の目的は，「米国の原子力プラントの安全とセキュリティーを改善すべく，他の機関の評価結果も考慮しつつ福島原子力事故からの教訓に関し広いスコープで高いレベルのレビュー」を行うこととした。委員会としての任務には事故の責任の所在を明らかにすることはなく，また米国の原子力プラントへの教訓が任務で，日本を含む他の国への提言ではない，としている。しかし報告書には，「委員会としては本報告が他の国の原子力プラントの安全にも有用であると考える」として，広く活用されることを期待している。

Ⅱ．報告書の構成

報告書は約370頁で，7章の本文と15項目の付録，そして概要よりなる。第1章の序論は本調査研究の説明がなされている。第2章は，本調査研究の基礎資料として沸騰水型炉(BWR：Boiling Water Reactor)を中心に日米のプラント情報の概要が記されている。第3章と4章に，東日本大震災と津波による日本の原子力プラントへの影響，及び福島第一原子力発電所事故の概要が記されている。第5章はプラント運転と規制への教訓，第6章にサイト外における緊急時対応と教訓，第7章に原子力安全文化への教訓が記されている。巻末の付録は，委員会委員の紹介や用語表等のほかに，過酷事故と水素制

御，確率論的リスク評価等の説明がなされており，また報告書中には随所に「サイドバー」としてベントのような専門用語や福島事故の時系列等が分かりやすく説明されている。

Ⅲ．日本と米国の原子力プラント

報告書第2章では，専門外の人のためということで，日米の原子力プラントの現状及びBWRを中心に冷却系や格納容器等の機器についての説明がなされた。そして米国の35基のBWRのうちの21基が福島第一原子力発電所の1～4号機と同じ設計であることも説明された。次いで，長年にわたって幾つかの重要な改善がなされてきたことが記されている。

まず1975年のブラウンズフェリー1号機の電線ケーブル空気漏洩チェックに端を発する火災の教訓からの対策強化である。大変困難な課題で米国では長年かかったが，まだ全ての原子炉がこの対策をとったわけでないこと，日本ではこの対策は取り入れられなかったことが記されている。なお，日本もこの火災対策には長年かかっていたが，最近，原子力規制委員会で規制要件化がなされた。

1979年のTMI事故では多くの教訓が得られ，格納容器強化ベント，格納容器の不活性化等，そして制御系の改善がなされた。これらは日本でも行われたことが記されている。日本では原子力安全委員会ができたばかりで，これらも含む52項目の教訓を摘出して対策を実施すると共に，ABWR，APWRの開発にも含まれていった。

1988年にNRCはある一定期間の全電源喪失に備えるよう規則を定めた。1990年の原子力安全委員会の安全設計審査指針では，この期間を30分間とした。バックアップ用電池は日米共に4～8時間の耐久時間であった。NRCは最近，追加指令として無限時間の電源喪失を考えることを要求した。

2001年のテロリスト攻撃に対応するため，NRCは2002年に飛行機衝突を含む全ての原因による大火災や爆発に備えた緩和戦略を立てるよう指示した。（最終規則は2009年）日本の産業界はこのことを知らなかったので対策はとらなかった。規制当局の原子力安全・保安院（NISA）はこれを説明されて知っていたが院内に留め，事業者へ要求することはなかった。

2007年の新潟中越沖地震で変圧器の火災があり，追加水源・消防ポンプ車・免震重要棟等が日本で規制要求となった。これらは福島原子力事故対応にも有用であった。

Ⅳ．福島原子力事故の要因

東日本大震災と津波に関する概要，各原子力発電所による影響の違い，そして福島原子力事故の要因が，第3章と第4章に記されている。

福島第一原子力発電所を襲った想定以上の大きさの津波に関して委員会は詳細な調査を行った。そして2001年に東日本沿岸への大規模津波が800年から1100年の間隔で発生している可能性があるとする指摘があり，その後も大津波の警告があったとし，特に東電が2008年の試行計算の結果があったにも関わらず，更なる調査検討が必要として対策をとらなかったことを問題にしている。

特に，防波堤や新岸壁のような建設に時間がかかるものでなくとも，海水ポンプの浸水からの防護，非常用電源・スイッチ・バッテリーの高所化，入口浸水防護のようなものだけでもしてあれば，事故対応がもう少し楽であった，というものである。

委員会は新知見（3.1）として，「原子力プラントの事業者と規制者は原子力プラントのハザードに関する新しい知見を常に探求すること，リスク評価にこの情報と対応手段を含むこと，リスク評価で影響がある場合には対策をタイムリーに行うこと」とした。

さらに事故からの新知見（4.1）として以下のようにまとめている。「福島原子力事故は，外部電源喪失，浸水によるAC・DC電源喪失，原子炉のモニタ・制御系・冷却機能を喪失させて3基の炉心損傷となり，3基の原子炉建屋は水素爆発で損壊し，放射性物質の施設外への大量放出となって，広域住民と国民の苦痛・大きな経済的損失をもたらした。福島第一原子力発電所の職員は勇気をもって粘り強くこれに対応し，事故の拡大を防ぐことに貢献した。しかし，プラント安全機器類の浸水防護に失敗，電源喪失による対応手段の限定化と実時間情報の喪失，最終ヒートシンクの喪失に伴う全電源喪失耐久時間超過，多数基プラントの干渉による事故対応の複雑化，運転員・緊急時対応職員の電源喪失事故に対する訓練不足，時宜を得た指令伝達の失敗，サイト緊急時対応センター内，及び本部と現地の緊急時対応センター間の役割と責任の不明確さ，多数号機にまたがる事故の広がり等により，各プラントの職員レベルでは対応することができなかった。」

Ⅴ．プラントの運転と安全規制への教訓

福島原子力事故後，各国政府・国際機関等は原子力の安全に対するレビューを開始した。米国では産業界と規制機関が行っており，原子力のシステム・運転・規制に変更をもたらそうとしている。

委員会の新知見（5.1）は以下の通りである。「米国や各国の原子力プラントの運転者や規制者が，原子力プラントシステム・運転・運転員訓練を改善しようとしている。米国では原子力産業界によるFLEX（Diverse and flexible coping strategies）イニシアチブとNRCによるNTTF（Near-Term Task Force Review of Insights from the Fukushima Dai-ichi Accident）である。これらは実施中であり，その内容・有効性・規制体系での状況を評価するにはまだ早い。」

委員会は，原子力の産業界や規制者が上記の活動を実

施する際に，設計基準超過事象に対しても効果的に対応できるよう2件の提言を行った。提言(5.1A)は，「システム等の改良の必要性で，これには予測していなかった事態への緊急的な対応と共に，次に記すプラントシステムや機器類の有効性・利用性・信頼性・冗長性・多様性に特に注意すべきとしている。すなわち，計測・安全系制御のDC電源，電源喪失時の実時間プラント状況予測手段，崩壊熱除去・炉減圧・格納容器ベント系，炉・格納容器・使用済み燃料プールの主要な熱水力パラメータのモニタ，水素モニタと緩和策，放射線とセキュリティーモニタ，制御室と技術支援センター間・現地と外部支援施設間等の情報伝達と実時間情報システム」である。

また提言(5.1B)は，「リソースの利用と運転者の訓練に関するもので，予測しなかった事態への臨機応変の対応も含まれる。特に注意が必要なこととして，(1)多数基立地サイトで緊急時に長時間困難な状況が続く事態での職員の対応能力。(2)緊急時手段・広範な損傷緩和指針・過酷事故管理指針の強化・統合。これには以下の点への配慮が必要とした。AC・DC電源の長時間完全喪失，DC電源とプラント空気供給系が使用できない時の原子炉容器減圧と格納容器ベント，プラント電力が得られない時の低圧水注入，十分な水位を保ちつつ圧力容器減圧から低圧注水への遷移，冷却系と格納容器への大きな水素爆発の影響防止・緩和策，停止中の炉で主要安全系が使用できない時の原子炉冷温停止状態の維持。(3)運転員とプラント緊急時対応組織の訓練。これには，極端な設計超過事象で炉を安全に停止できるよう臨機応変の対応を用いた特別訓練，及び原子力プラントシステム設計と運転の理解を深め，緊急時対応能力の向上を図る一般的訓練」である。

Ⅵ. 設計基準超過事象リスクの評価能力向上

設計基準超過事象にいかに対応するかが問題である。これに対する委員会の新知見(5.2)は以下の通りである。

「設計基準超過事象，特に低頻度・大規模事象では，原子力プラントに過酷事故を発生させ，炉心と使用済み燃料に損傷を与える。過酷事故ではプラント内で水素の発生と燃焼を引き起こし，放射性物質を敷地外環境へ放散する。過酷事象で生ずる安全のリスクをより深く理解し，それを緩和する適切な方策をとる必要がある。」

委員会はこれに対して3つの提言を行った。第一の提言(5.2A)は，「米国の産業界とNRCは，設計基準超過事象によるリスクを同定・評価・対応する能力を向上すべきである。特に事象同定が重要で，それには，プラントシステムの干渉効果やその事象に対する運転員や主要メンバーの対応を考え，それによる広範囲の施設外での健康・環境・経済・社会的結果のより良い予測を行う。」

第二の提言(5.2B)は，「能力を高めようとする産業界の努力をNRCが支援すべきことで，手法に対するガイダンスを与え，技術的なピアレビューにより監督する」というものである。

第三の提言(5.2C)は，「米国の産業界とNRCが第一の提言を行う時には，広大な地域と多数基プラントへ影響を及ぼす可能性を持つ設計基準超過事象によるリスクに特に注意を払うべきで，これらには地震・津波・大洪水・磁気嵐等がある。」

Ⅶ. 原子力安全規制における新しいリスクの考え方の活用

これまで，冷却材喪失事故や過渡過出力事故のような設計基準事故が炉のシステム設計で要求されてきた。しかし，福島原子力事故は1979年のTMI事故や1986年のチェルノブイリ事故と同様の設計基準超過事故である。

委員会は新知見(5.3)を示した。すなわち，「原子力プラントの40年にわたる解析と運転経験から，原子力プラントの炉心損傷リスクが設計基準超過事故で支配されることが示された。このような事故は，多重の人的過失や機器故障，運転手順書違反，厳しい外部事象によって生ずる。原子力プラントの安全を規制する従来の方法は，設計基準事故のような決定論的考え方によっていたが，炉心損傷事故を防止し，またその結果を緩和するには適切でない。そこで新しいリスク評価の考え方が原子炉の許認可や規制に適用され始めている。これらの考え方を許認可や規制に完全に適用すれば，炉心損傷リスクとそれによる結果をもっと低減し，原子力プラント，特に現在稼動中のプラントの相対的な安全性を向上させることができる。」

これに対する提言(5.3)は，「NRCは新しいリスクの考え方を原子炉の安全規制でもっと活用すべきで，これは提言5.2Aで示したリスクを同定評価する能力の向上によって可能となる」とした。

委員会は，「新しいリスクの考え方が，3つの要素“何が起こり得るか？どの位生じ易いか？もし生じたら結果はどうなるか？”で定義されるリスクを意味するとした。これに答えるには定量的解析評価では限界がある。また，この提言を完全に実施すると，最近のNRCの規制手段，例えばバックフィット解析のようなものは変更する必要があるかもしれない」としている。

Ⅷ. 敷地外緊急時対応能力と必要な改善

福島原子力事故による広範な住民の退避等により，これまでの日本の防災対策における多くの課題が明らかになった。委員会では，日本の緊急時対応の脆弱性についての新知見，及び米国への教訓としての新知見と教訓を記している。

新知見(6.1)は，以下のように日本の緊急時対応につ

いて多くの点をあげている。「福島原子力事故は日本の施設外緊急時管理の弱点を明らかにした。さらに地震と津波という相反する要求が，事故に対する対応能力を限定化させた。準備された原子力緊急時対応計画の実施は広域にわたる大自然現象に圧倒され，情報伝達・電力・その他主要インフラは長時間にわたる停止状態となった。さらに，準備された緊急時計画が大事故時には不適切であった。政府・産業界の職員による意思決定プロセスは，プラント状態・事故進展・放射性物質の施設外放出・近隣住民への放射線量に関する信頼性のある実時間情報がなく大変であった。中央政府と地方自治体間の調整も情報伝達が悪く妨げられた。防護措置はその場対応で，特に老齢者・病人等の弱者やヨウ化カリウム配布で問題であった。放射線基準・除染基準等の政策変更が国民に混乱と日本政府への不信感をもたらした。汚染地区の除染と帰還努力がなされているが時間的計画と最終的な姿が明確でない。緊急時における有効な情報伝達方法の準備と実施ができず，日本政府・規制機関・産業界に対する国民の信頼を喪失することとなった。」

委員会は米国における状況への新知見と2件の提言を行っている。新知見（6.2）では「過酷事故に対する米国の準備状況を検討する時間・手段がなかったとしつつ，福島原子力事故のような過酷・長時間にわたる，地域スケールの自然災害である原子力の過酷事故に対して，米国の緊急時対応能力が十分であるかどうかの疑問が生じた」としている。

その上で，提言（6.2A）として，「米国の原子力産業界と緊急管理責任を有する組織は，敷地外の地域スケールの災害を伴う過酷な原子力事故に対する準備状況を評価すること。関係する住民との情報伝達計画を含めた緊急時対応計画は，長期間の事故災害シナリオに対応した有効な戦略，良く訓練された人員と適切な物質的資源を有するよう必要な部分の増補や改定がなされると共に，以下の事項対応を含めたものであること。すなわち，広域外部電源喪失や情報伝達系・交通手段・緊急時インフラの損壊。原子力プラントや使用済み燃料プールからの放射性物質放散等の実時間情報がない状況。原子力プラントから10マイル緊急時計画区域を越えた放射性物質の放散。」を記している。

提言（6.2B）は，「米国の原子力産業と緊急時管理責任を有する組織は，過酷原子力事故により影響を受ける周辺住民に対する防護手段（例えば屋内退避，避難，隔離，ヨウ化カリウム配布）のバランスを評価し，指針を改定すること。特に子供・病人・老人の防護活動，社会的・心理的・経済的影響を含めた長期間の屋内退避・避難・隔離の影響，放射性物質放散により汚染された地域の避難住民の帰還決定，に注意すること。」である。

Ⅸ．原子力の安全文化の改善

原子力の安全文化とは，安全を最も重視して継続的に行動することである。この点に関して委員会は，日本の現状に対する1件の新知見，米国に対する1件の新知見と2件の提言を行っている。

日本に対する新知見（7.1）では以下の点が指摘された。「日本政府は福島原子力事故の前に，原子力安全文化の必要性を強く認めていたが，東京電力と規制者はその文化を確立・実施・維持することに欠けていた。福島原子力事故後の日本の規制システムの調査では，規制機関が独立でなく規制の虜（regulatory capture）になっていると結論した。」

新知見（7.2）は米国における状況を述べたものである。「米国における原子力安全文化の確立・実施・維持・情報伝達は，原子力産業界とNRCの優先事項である。米国の産業界は実質上INPO（Institute of Nuclear Power Operations）を通して，原子力安全文化プログラムの設定と，それらの各プラントへの実施状況に対する評価メカニズムを自主的に確立してきた。NRCは原子力安全文化に関する政策声明を発表したが，声明には産業界に対する実施ステップや個別の要請は含まれていなかった。」

そして委員会は提言（7.2A）として以下を示した。「NRCと米国原子力産業界は，安全に関わる全ての活動において安全文化を強く維持し継続的にチェックしなければならない。加えて，NRCは規制者の独立性を維持する指導性を持たねばならない。NRCは，外部の影響により，原子力の安全文化が妥協させられることなく，議論が妨げられることなく，安全に関わることを公衆に公開することを確約しなければならない。」

さらに委員会は提言（7.2B）として，「米国産業界とNRCは，自分達の原子力安全文化を評価・改善する努力に関し，透明性を高め，情報伝達を増やす機会を探るべきである」とした。

Ⅹ．むすびに代えて

1．報告書全体について

報告書は極めて広い視点と深い考察に基づいて書かれている。これは21人の委員構成において，原子炉工学・伝熱流動・放射線影響・保健物理・地球物理・耐震構造工学・リスク・認識心理・法律と規制・テロ対応等の広い分野の優れた専門家がカバーしていることによる。さらに，当初から委員会のミッションを明確にして議論を進めたことが，多くの混乱した情報の中で，明確に将来の方向を出す提言にまとめることができたと考える。

このレビューでは，委員会の新知見や提言を中心に記したが，本文には多くの調査記録の記載がある。以下に印象に残った幾つかを記す。

2. ハザードに対する新情報と津波評価

新知見・教訓に，「ハザードに関する新情報の継続した探求」がある。委員会は事故を起こした津波ハザードに関して東電等の状況を調べ，貞観津波と同じような津波が来るという恐れが十分あったにもかかわらず，対応がなされなかった，という趣旨の報告になっている。しかし，事故前の十年間を考えても，明確な指摘が専門家の間でもなされず，従って約19,000人の津波による犠牲者を出すことになったと考える。東電は，2007年の柏崎刈羽原子力発電所の地震による停止から再稼動へ向けて順次立上げが行われており，これを早くという思いもあったと推測される。いずれにしても，ハザードに関する新情報を常に追求していくことが教訓で，また大変重要なことである。しかし，どのような状況下でも常に優先して対応するにはどうすればよいか，自然現象の厳しい日本の大きな課題である。

3. 新しいリスクの考え方

委員会は，原子力プラントの運転と規制への教訓に関連して「新しいリスクの考え方」をもっと規制に用いることを指摘している。リスク評価において，レベル1PRA（炉心損傷），レベル2PRA（格納容器破損），レベル3PRA（放射性物質の施設外への放散）が開発されて，主に内部事象に関する評価が行われてきた。委員会は，日本の産業界がこのようなPRAを積極的に取り入れていなかったことを指摘している。その上で，委員会で新しいリスクの考え方として設計基準超過事象を含む広範な事象シナリオに基づいた評価を行うこととしている。外的事象等を含め，広く新しいリスク評価の考え方を規制に活用することを喚起したものである。

またこれに関連して，米国におけるバックフィット解析についての言及がある。米国では原子力プラントの新しい改良を行った場合に，それを既存プラントにバックフィットするかどうかはコストベネフィットの観点で検討する。その改良を行うコストが，安全系の場合にはリスクの減少に伴う利益より小さければその改良を行う価値があるというもので，その際にリスク評価解析を用いる。例えば，NRCによるBWRのベント系の変更要求は，コストの割にメリットがないということで採用されなかった。

4. 避難時の問題

委員会は施設外の緊急時管理に関して，報告書の新知見6.1で，福島第一原子力発電所周辺住民の避難に伴う問題点を広く指摘しており，米国を対象とした提言に活用している。それと共に報告書には，事故発生6日目の3月16日に米国国務省が，「福島第一から80km（50mile）以内（米国での基準）の米国人への退避」助言を行い，日本政府はこの地域の住民の避難を指示していないので混乱したことを記している。原子力の緊急時に外国の機関が自国の滞在者・旅行者に助言を行おうとする時どうしたらよいか，という問題提起で，今後，検討解決すべき課題としてあげている。

5. 規制の虜

委員会は，日本の原子力の安全文化について，報告書の新知見7.1に記している。そこでは規制機関が独立でなく「規制の虜」となっていたと結論している。本文には規制の虜の説明があり，規制される者が規制者に対して公衆よりも自分達の関心事を植えつけようとするプロセスとしている。すなわち，公衆の安全より規制される者の都合を優先させるということである。当時の規制者である原子力安全・保安院（NISA）が原子力を推進する経産省の部局であったことも記して一層この説明をわかりやすくしている。本文にはさらに，日本の官庁と産業界との間の天下りと天上がりについても説明し，日本の企業と規制当局との関係を説明している。

6. 安全文化と規制者の専門性

安全文化とは，原子力の安全を最優先に考え，継続して努力することである。その意味では安全文化の重要な点は，原子力に対する高い専門性である。報告書では規制当局にフルタイムの専門技術者が少ないことが指摘されている。この点が大きな問題で，米国では10年以上前に調査を行い，日本の官庁のシステムと規制者の十分でない専門性を理解していた。高い専門性を持ち，技術の進歩にも対応でき，かつ待遇面でも優遇されて規制を行う規制機関のシステムを如何に作っていくか，日本の原子力の課題である。

10年前に米国の関係機関に新設の原子力安全基盤機構理事長として挨拶に伺った。エネルギー省の原子力局で後にNRC委員であったMagwoodさんにご挨拶したが，「あなたのような人でよかった」と言われ，どういう意味か分からなかった。「少しでも専門性が高く，規制の虜と関係ない人」と言いたかったのか，と最近になって改めて思う。

－ 参考資料 －

1) Lessons Learned from the Fukushima Nuclear Accident for Improving Safety of U.S. Nuclear Plants, National Academy of Science.

著者紹介

成合英樹（なりあい・ひでき）
筑波大学名誉教授
（専門分野/関心分野）原子力熱工学，伝熱流動，安全工学