

原子力発電所の地震時の安全確保について



震災特集

中 村 隆 夫*

Seismic safety and countermeasures in Nuclear power plant

Key Words : Nuclear power plant, Seismic safety, Tsunami, Defentth in depth,
Risk analysis

はじめに

3月11日、太平洋三陸沖を震源に我が国観測史上最大とされる M9.0 の大地震「東日本大震災」が発生しました。この地震により東日本の太平洋岸に巨大な津波が押し寄せ、2万人を超す死者・行方不明者が生じる未曾有の大災害となりました。本稿を始めるに当たり、この地震の犠牲者に深く哀悼の意を表するとともに、被災された方々に心よりお見舞いを申し上げます。

一方で、この地震により、太平洋岸に立地する女川、福島第一、第二、東海原子力発電所及び多くの火力発電所では、地震や津波による発電停止及び設備の損傷を被り、女川、福島第二及び東海の各原子力発電所では懸命の対応により原子炉の安全性は確保されましたが、福島第一原子力発電所においては1号機から4号機までの原子炉において停止機能¹⁾は確保されたものの、冷却機能に重大な損傷が生じ、閉じ込め機能も喪失の恐れが生じるという深刻な事態に陥りました。このため、原子力発電所周辺の住民に避難や屋内退避の指示が出され、かつて我が国が経験したことのない原子力発電所の放射能放出事故による影響が周辺住民の市民生活に及ぶこととな

りました。

原子力発電所の安全確保の基本的考え方

最初に、原子力発電所の安全確保の基本的考え方について振り返ってみたいと思います。

原子力発電所の安全確保の目的は、原子炉の持つ潜在的な危険から一般公衆を防護することですが、一般産業施設と大きく異なる点は、その危険の大きさではなく、放射線あるいは放射能に係る特殊性にあります。

それでは、どのように放射線の危険から防護すれば良いかですが、国際放射線防護委員会 (ICRP) は、放射線利用の基本原則として、「放射線による被ばくはそれがもたらす利益がある時以外は正当化されない」、「合理的に達成しえる限り低く抑え」、「個人の被ばく量にはある限度を設ける」ことを求めています。

この原則を原子力発電所の設計の考え方に適用したらどうなるのでしょうか。一般公衆が放射線により被ばくする事故は原子炉に内蔵している核分裂で生じた放射性物質が大量に放出されるケースですから、それを防止するために堅固な壁をいくつも作ってその中に閉じ込めるという対応をとることになります。これを多重の「物理障壁」と呼んでいます。

しかし、どれほど頑丈な物理障壁を作っても、内蔵している放射性物質が環境中に出ていく可能性をゼロにすることは理論的にはできません、すなわち放射能の放リスクは必ず存在することから、あらかじめこれに備えておく必要があります。原子力発電所ではこのために何段もの安全対策がとられます。この考え方を「多重防護」あるいは「深層防護」と呼んでいます。国際原子力機関 (IAEA) の基本安全原則では、物理障壁と防護レベルの関係を図-1に示したように定義しています。

¹⁾ 原子力発電所の安全確保において、原子炉を停止する、冷却する、そして放射能を閉じ込めるという三つの機能が事故防止の上で最も重要とされている。



*Takao NAKAMURA

1949年8月生
東京大学工学部原子力工学科卒業
(1972年)
現在、大阪大学 大学院工学研究科 環境・エネルギー工学専攻 原子力社会工学領域 教授 工学博士 原子力システム安全・経年劣化管理
TEL : 06-6879-7900
FAX : 06-6879-7903
E-mail : nakamura@see.eng.osaka-u.ac.jp



図-1 IAEAにおける物理障壁と防護レベルの関係

防護レベルの1から3は、我が国でも多重防護と呼ばれているところの「異常の発生防止」（立地点の選定、設備信頼性の確保）「異常の拡大防止」（異常を早期検知し原子炉を停止する）「異常の影響緩和」（原子炉を冷やし、放射能を閉じ込める）が対応しており、更に、IAEAでは、レベル4をアクシデントマネジメント²⁾、レベル5を防災対策³⁾の整備とし、これらにより原子力発電所の安全を確保することとしています。

原子力発電所の地震時の安全確保

それでは、原子力発電所の地震時の安全確保はどうなっているのでしょうか。

まず立地点の選定においては、第一に原子炉の異常や事故を誘発するようないわゆる「外的事象」（地震や津波等）ができるだけ少ない地点を選ぶこと、第二に、原子炉の事故によって社会が被る損害が少なくなる様に周辺社会から適切な「離隔距離」を確保することを基本的考え方としています。

我が国では、以上の二点を念頭において立地点の適否を判断するため、原子力安全委員会（以下、原安委と言う）が「原子炉立地審査指針」を定め、外的事象については「大きな事故の誘因となる様な事象が過去において無かったことは勿論であるが、将来においてもあるとは考えられないこと。また、災害を拡大するような事象も少ないこと。」という、

²⁾ 設計で想定している範囲を超えてしまった時の臨機応変な対応

³⁾ 周辺社会においてあらかじめ災害への備えを準備

立地選定に関する原則を定めています。

外的事象に対する具体的な設計要求については、原安委の定める「設計審査指針」の指針2、「自然現象に対する設計上の考慮」において、「1. . . . 機能喪失を起こした場合の安全上の影響を考慮して、耐震設計の区分がなされるとともに、適切と考えられる設計用地震力に十分耐えられる設計であること。」及び「2. . . 地震以外の想定される自然現象によって原子炉施設の安全性が損なわれない設計であること。」が定められ、津波はこの自然現象の一つに当たります。

更に、「耐震設計審査指針」では、次のように耐震設計の基本方針が定められています。

1. 耐震設計上重要な施設は、. . . 施設の供用期間中に極めてまれではあるが発生する可能性があり、施設に大きな影響を与えると想定することが適切な地震動に対する地震力によって、その安全機能が喪失することの無いように設計しなければならない。
2. 地震学的見地からは、1で策定した地震動を上回る地震動が生起する可能性は否定できず、これを「残余のリスク」という。施設の設計にあたっては、この残余のリスクを実行可能な限り小さくする努力が払われるべきである。

また、耐震設計審査指針を受けて日本電気協会から、JEAC4601「原子力発電所耐震設計技術規程」及びJEAG-4601「原子力発電所耐震設計技術指針」が2008年に発行されています。

この民間規格では、耐震設計審査指針に適合するものとして最新の知見を踏まえた具体的な耐震設計手法が規定され、基礎地盤や周辺斜面の安定性評価、津波水位評価など、地震に随伴する事象の評価方法についても規定されました。ただし2007年に発生した新潟県中越沖地震において得られた新しい知見（後述）については、今後の改訂において反映される予定です。

原子力発電所の耐震安全性確認と残余のリスク

現在の耐震設計審査指針は、阪神淡路大震災以降の多くの知見を取り入れて2006年に改訂されました。その特徴は、

1. 耐震設計において用いる基準地震動の策定方法を高度化し、耐震設計上考慮する活断層の評価年代を後期更新世以降の活動が否定できないもの（約13万年前）まで拡張すると共に、新しい活断層評価手法の導入が図られました。また、敷地ごとに震源を特定して策定する地震動や震源を特定せず策定する地震動の評価の高度化が図られました。
2. 耐震安全に係る重要度分類を見直し、特に重要な施設の範囲が非常用炉心冷却系（ECCS）などにまで拡張されました。
3. 「残余のリスク」を合理的に実行可能な限り小さくするための努力を払うべきとして、確率論的安全評価手法（PSA）の導入が進められました。

1, 2 を受けて、運転中あるいは建設中の原子力発電所において基準地震動が見直され、より大きな基準地震動に対して安全上重要な施設の安全機能が確保されることを確認する「耐震安全性確認」が電力会社によって進められました。また、この確認作業と合わせて、耐震裕度を更に向上させるための工事が行われ、災害に強い発電所に向けた活動が行われています。

一方、日本原子力学会では3.の残余のリスクの評価において用いられる AESJ-SC-P006-2007「地震 PSA 実施基準」を発行しています。

地震 PSA については、国、電力・メーカー及び大学・研究所などにおいて検討が進められ、地震による事故シーケンス⁴⁾とその発生確率を計算することによりリスク⁵⁾を評価し、「残余のリスク」の大きさや地震によって大事故に至る重要な事故シーケンスなどを明らかにすることにより、アクシデントマネジメントの検討に役立てることができます。過去に公表されている研究成果によれば、地震により大事故に至る事故シーケンスとして、今回の福島事故の原因と類似した「電源喪失」の寄与の重要性が指摘されています。

今後は地震 PSA 手法を用いて残余のリスク評価



図-2 地震 PSA 評価の流れ

が進められる予定ですが、アクシデントマネジメントの整備にこれらの成果の活用が期待されます。

新潟県中越沖地震における知見の反映

2007年7月に M6.8 の新潟県中越沖地震が柏崎刈羽原子力発電所近傍で発生し、原子炉建屋の基礎部において設計の約2倍の加速度応答が観測されました。しかし、安全上重要な「止める」「冷やす」「閉じ込める」機能は確実に作動し、原子炉の安全は確保されました。

その後の調査により、設計用の地震動を上回った原因は、発電所地下の地盤の3次元構造によるものであることが明らかとされました。また、設計を超える加速度に対して設備の健全性が確保されたのは、設計における耐震性確保に加えて、高品質材料の使用、内圧や遮へいなど耐震性確保以外の目的を達成するために講じられる構造設計上の裕度により十分な安全余裕が盛り込まれたためであることが明らかとされています。

これら新しい知見を元に、今後、深部の地盤データの採取や設備の設計応答の保守性の定量化などに向けた検討が開始されています。

福島第一発電所の被災状況と事故のシナリオ

福島第一原子力発電所の被災状況の詳細は、原子力安全・保安院あるいは東京電力の発表、及び新聞などの報道を見て頂くとし、ここでは、これまでに公表されている情報をもとに事故のシナリオについてまとめて見ました。これらの事故シナリオは現時点での推定であることに留意ください。

観測データから見て地震による最大加速度はほぼ設計値と同じレベルにあり、冷却機能が回復した

⁴⁾ 原子力発電所の安全機能の喪失が引き起こす事象の組み合わせ

⁵⁾ 事故の大きさとその発生確率の関係

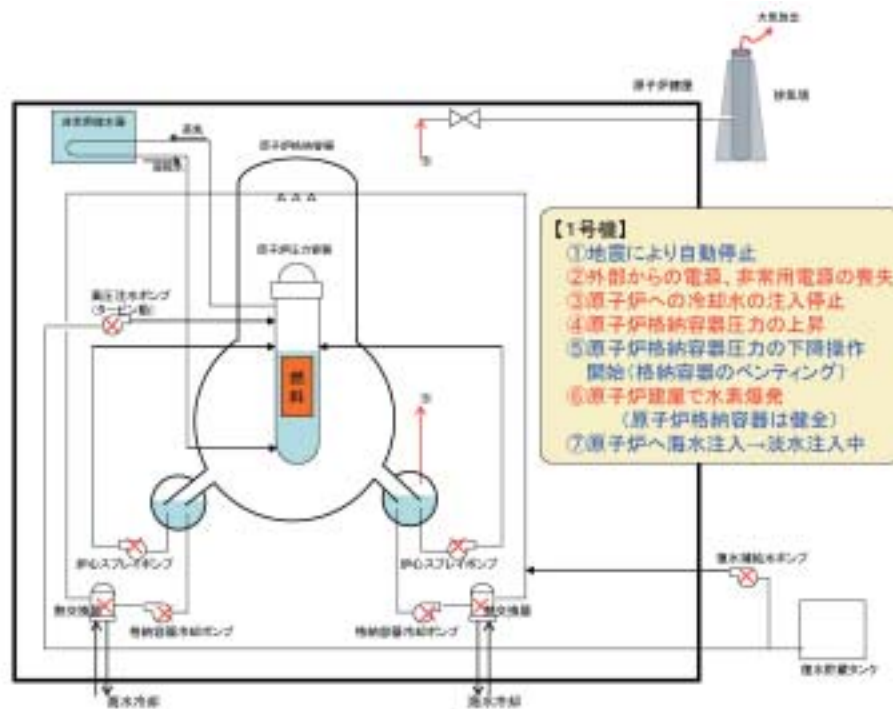


図-3 福島第一原子力発電所1号機の事故状況

5,6号機や東北電力の女川原子力発電所の被災状況からも、地震動によって冷却機能が喪失した可能性は低く、地震後に発電所を襲った津波により非常用海水ポンプ及び非常用ディーゼル発電機が機能喪失して全交流電源喪失事故になりました。1号機では非常用復水器により、2-5号機では原子炉隔離時冷却系という蒸気タービン駆動のポンプを蓄電池によって制御するシステムにより炉心注水が行われましたが、蓄電池の寿命が尽きたため冷却機能が喪失し、原子炉水位が下がって炉心が露出したものと推定します。

注水による冷却がなくなると、核分裂生成物の崩壊熱(停止直後で定格出力の約7%、1日後で約0.7%)により燃料が過熱損傷し被覆管のジルカロイが酸化して水素が発生し、それが格納容器から漏れて原子炉建屋に溜まり引火爆発しました。

長時間に亘る全交流電源喪失事故については、「設計審査指針」の指針27では電源復旧が期待できるので考慮不要とされていましたが、地震PSAの検討では地震を起因とする場合には重要な事故シーケ

ンスの一つであり、今回の事故では、津波により電源の復旧ができなくなったことが、その後の事故の収束を不可能にしてしまいました。

シビアアクシデントの発生とその対策

過去に発生したシビアアクシデント⁶⁾事例としては、米国スリーマイルアイランド事故と旧ソ連のチェルノブイル事故が挙げられます。これらの事故と今回の福島事故を比較し、主な違いを表-1にまとめてみました。チェルノブイル事故との重要な違いは、原子炉が停止したことと、事故直後は閉じ込め機能が確保されたことです。また、スリーマイルアイランド事故との違いは、格納容器の閉じ込め機能が事故後に一部損傷したことです。また、過去の二つの事故は、重要な規則違反や誤操作が引き金となっていますが、今回の福島事故は津波という自然災害が原因となり発生しました。

このようなシビアアクシデントに対応するため、我が国では過去の大事故の経験とPSA研究の成果を元にアクシデントマネジメントが検討され、整備が進められてきました。ただし、地震や津波に対するアクシデントマネジメントが実際に行われたのは今回が初めてであり、今後更なる検討と整備が必要

⁶⁾ 炉心が大きく損傷し、放射性物質の放出により周辺住民の避難が必要とされるような大事故。苛酷事故とも言う。

表-1 これまでに発生したシビアアクシデントとの比較

	福島第一原子力発電所事故	スリーマイルアイランド事故	チェルノブイル事故
発生年	2011年3月	1979年3月	1986年4月
国際原子力事象評価尺度 (INES)	レベル7	レベル5	レベル7
原子炉の型式(炉型)	沸騰水型軽水炉(BWR)	加圧水型軽水炉(PWR)	黒鉛減速軽水沸騰圧力管型炉
事故原因	地震に伴う津波により全交流電源が喪失し、原子炉が冷却不能	給水ポンプや過給機の故障と、運転員が非常用炉心冷却系(ECCS)を止める操作ミスが重なって原子炉が冷却不能	禁止されていた長時間の低出力運転で試験を強行したため、原子炉が不安定となり出力が急上昇して原子炉を破壊
事故の経過と対応	原子炉水位が下がり、燃料が露出して一部溶融するとともに、発生した水素が建屋に漏えいして爆発し、建屋を破壊した。原子炉と格納容器に海水(淡水)を注入すると共に、格納容器から排気して圧力を下げた	非常用炉心冷却系を再起動して原子炉を冷却することにより事故は終息したが、炉心は溶融し、原子炉容器の下部に溶け落ちたが格納容器の機能は維持された	原子炉が核暴走(反応度事故)し、減速材の黒鉛の火災により大量の放射性物質を大気中に放出。ほう素材の大量投下と消火作業により事故は終息
安全機能の破壊 (停止・冷却・閉じ込め)	停止:○ 冷却:× 閉じ込め△	停止:○ 冷却:× 閉じ込め○	停止:× 冷却:× 閉じ込め×
周辺への影響(避難)	原子炉から20km:避難 原子炉から30km:屋内避難	事故後一時的に約10万人の周辺住民が避難したとされている	事故後1週間以内に原子炉から30km以内の人は強制移転(約11万人)、現在、立ち入り禁止

と考えられます。

今後検討すべき課題

今回、このような大事故に至った直接的な原因は、地震に伴って発生した津波に対する想定及び対策が不十分であったことですが、もっと俯瞰的に見れば、東日本大震災に対する社会全体の事前の備えが不十分であった様に、原子力災害に対し、そのリスクを予測して災害を未然に防ぐシステム作りに取り組む真剣さに欠けていたのではないのでしょうか。

今後具体的に取り組むべき課題については限られた紙面では言い尽くせませんが、例えば今回の事故の対応で思い出したことに、我が国で最初に導入されたPWRである美浜1号機には格納容器の頂部へ外部から消火水を注いで冷やす外部スプレイ設備が設置されていたことです。この設計はウエスチングハウス社が新しく開発した軽水炉AP-1000の設計にも引き継がれ、今回のような全交流電源喪失が起きた場合にも、3日間以上運転員の手を借りずに原子炉と格納容器の冷却を可能にする考え方が取り入れられており、シビアアクシデントのリスクを低減しています。

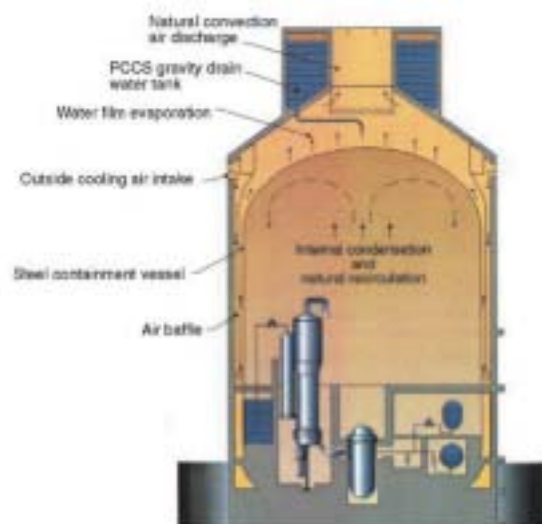


図-4 AP-1000の静的格納容器冷却システム

最後になりましたが、事故の安定化と早期の避難解除が切に待たれるところです。

今回の事故を踏まえて、原子力における信頼回復と安全性の確保に向け、原子力安全の考え方を原点に返って見直す活動が求められているのではないかと思います。