新規制基準と運転延長への対応 1

日本原子力学会の原子力発電部会は2017年秋の大会で「国内原子力発電所における新規制基準，運転期間延長等への対応」をテーマに企画セッションを開催した。本稿はその内容をもとに，登壇者に改めて執筆をお願いしたものである。

福島事故の教訓と新規制基準を踏まえた 柏崎刈羽原子力発電所の安全性向上について

東京電力ホールディングス 川村 慎一

福島事故の主要な教訓として，外的事象に対する防護，共通要因故障防止，設計を超える事態における事故進展防止，放射性物質放出による影響の緩和，設計を超える事態に対応できる緊急時能力の課題をとりあげ，柏崎刈羽原子力発電所を例として安全性向上の取り組みについて論じる。これを含む安全性向上策の柏崎刈羽原子力発電所6，7号機への適用については，新規制基準への適合性の観点から審査が進められている。

KEYWORDS: *Fukushima Accident, Resilience, Alternate Cooling, Filtered Containment Venting, Incident Command System*

I. 緒言

福島事故の教訓を踏まえ，東京電力ホールディングスでは原子力発電所の安全性向上の取り組みを進めている。本稿では事故の教訓のうち主要なものとして，①外的事象に対して，発電所の防護手段が不十分だったこと，②共通要因で安全機能が広範囲に喪失したこと，③設計を超える事態において，事故進展を防止する備えが不十分だったこと，④放射性物質の地表沈着により，長期の住民避難や経済活動の停止など，甚大な社会的影響をもたらしたこと，⑤設計の想定を超える事態に，緊急時組織が十分に対応できなかったことをとりあげ，これらを踏まえた柏崎刈羽原子力発電所(以下，柏崎刈羽)の改善状況を述べる。これらの教訓への対応を含む同発電所6，7号機の安全性向上策については，新規制基準への適合性審査が進められているところである。

II. 外的事象に対する発電所の防護

福島事故の直接的な原因は，地震による外部電源の喪失と，津波による重要な安全設備の機能喪失である。このことから，外的事象の影響を再評価して，発電所の防護を強化した。この検討にあたっては，外的事象を網羅的に評価する観点から，IAEA SSG-3¹⁾，

Safety Improvements at Kashiwazaki Kariwa Nuclear Power Station based on the Lessons learned from the Fukushima Accident and New Regulatory Requirements : Shinichi Kawamura.

(2017年10月17日 受理)

NUREG/CR-2300²⁾等から事象を収集し，自然現象として40事象，人為事象として20事象を取り上げて再評価した。

また，従来から考慮していた地震と津波に対しても，最新の知見を反映して再評価を行い，断層連動の可能性等をより保守的に考慮するなどして，設計基準とする条件を見直した。

III. 安全機能の共通要因故障防止

福島事故では，津波という共通要因で重要な安全機能が広範囲に失われた。津波対策では設計基準とする条件を見直し，浸水防止の再評価や引き波時に取水を確保する堰の設置を行ったが，津波以外にも火災や内部溢水のように，共通要因故障を引き起こす可能性のある事象が考えられる。

共通要因故障の可能性を低減するためには，多重化された設備間の物理的および電氣的な分離を徹底することや，対策を多様化することが有効である。図1に内部溢水への対策例を示す。安全上重要な設備が設置されている区画への浸水を防止するために，水密扉や浸水防止ダンパ等の設置や，壁貫通部の水密処理等が行われている。

火災についても，事故以前の防護策から対策を強化している。難燃ケーブルの使用等によって火災の発生を防止するとともに，複数の異なる原理の感知器を設けて速やかに火災を感知し，消火できるようにしている。また，異なる区分の安全設備の間には延焼を防止する壁等を設け，火災の影響を軽減している。柏崎刈羽では原則

図1 内部溢水対策の例

図2 事故シーケンスの検討概念

として、これに3時間の耐火性能を持たせることとした。さらに、壁を貫通する配管等を通じて熱が伝わることで悪影響が生じないように、必要な措置を講じている。

IV. 設計を超える事態における事故進展防止

決定論的アプローチで保守的に設定する設計基準事故時の条件を超える事態を検討するために、確率論的リスク評価の手法を用いて、様々な事故進展の可能性と、その安全上の重要度を検討し、代表的な事故シーケンスを選定した。その検討概念を図2に示す。

そのうえで、設計基準事故に対処する安全設備とは独立で、可能な限り多様な対策を検討し、事故収束における人的活動の成立性(人数、時間、環境条件等)を確認した。図3に重大事故における対応の検討例を示す。事故発生から、時間経過に沿ってどんな認知と判断が可能であるか考え、とるべき対応措置を順次検討する。このようにして、どのような対応が有効か評価される。

こうして検討された事故進展防止の設備の例を、図4に示す。この例では、原子炉が高圧の状態から安定冷却を継続できるまで、設計基準事故に対処する安全設備とは独立の多種、多様な手段を用いて連続的に注水と除熱ができるようになっている。

なお、消火系を用いた原子炉への代替注水は、平成6年3月に設置方針を決定して整備が進められ、新潟県中

図3 重大事故における対応の検討例

図4 重大事故時の多種、多様な注水、除熱手段例

越沖地震後には消防車を接続できる送水口も各発電所に設けられていた。しかしながら、福島事故ではこの代替注水系による注水の一部が、原子炉ではなくタービン設備側にバイパスしていたことが事故後に判り、中央制御室から容易にバイパスルートを隔離できるように改善を加えた。

V. 放射性物質放出による影響の緩和

上述の対策によっても炉心損傷が防げない場合には、原子炉格納容器(以下、格納容器)によって周辺環境への影響を緩和しつつ、復旧による安全機能の回復(レジリエンス)につなぐ。

福島事故では2号機から放出された放射性物質が、周辺環境へ最も大きな影響を与えたとされているが³⁾、その原因は格納容器ベントができず、高温蒸気環境下で格納容器上蓋フランジのシール材の復元力特性が劣化することで、格納容器内圧の上昇によるフランジ面の変形にシールが追従できなかったと推定されている⁴⁾。これを受けて格納容器に用いられているシール材の耐熱、耐蒸気、耐放射線性等を再評価し、改良型 EPDM (Ethylene Propylene Diene Monomer) 等の材料を従来のシリコン系材料に代わって導入した。

また、重大事故時に代替手段で格納容器を冷却できるようにする目的で、代替循環冷却系を開発して柏崎刈羽6、7号機に導入した。図5にその概要を示すが、海水と熱交換できるシステムを搭載したトレーラをプラントに接続することで、サプレッションプール水を冷却してか

図5 代替循環冷却系の系統構成

図6 フィルタベント設備の構成

ら、代替注水ポンプ(復水移送ポンプ)で格納容器内にスプレイすることができる。これによって、重大事故時に格納容器の温度、圧力の上昇を抑制することが可能である。

仮に代替循環冷却系が使えない場合には、格納容器のフィルタベントを行う。このシステムは川村ら^{5,6)}によって開発され、図6に示す設備構成で、柏崎刈羽6, 7号機に導入されている。

フィルタの除染係数の要求仕様は、粒子状物質と無機ヨウ素に対してそれぞれ1,000以上、有機ヨウ素に対して50以上であるが、性能試験結果から、実力として粒子状物質に対しては10,000以上、有機ヨウ素に対してはベント開始時の過渡的状況で50を下回ることなく、開始直後を除く定常的な流動条件では1,000以上であることが確認されている。

また、重大事故時にアルカリ薬液を格納容器に注入し、内部の水をアルカリ性に保つことで気体状ヨウ素の生成を抑制することができる^{7,8)}。そのための設備として格納容器pH制御システムを開発し、新規規制基準の要求以上の自主対策設備として柏崎刈羽6, 7号機に設置した。

VI. 設計を超える事態に対応できる緊急時能力

IAEAによる深層防護の第4層は、Design Basisを超える過酷なプラント状態をコントロールすることが目的

図7 ICSを応用した発電所緊急時組織の体制

とされている⁹⁾。この状態では、設計基準事故に対応する安全機能が喪失もしくは性能低下していることが想定され、安全機能を必要なレベルまで、必要なタイミングまでに回復すること、すなわちレジリエンスが重要な役割を果たすと考えられる。

この観点で福島事故を考えると、代替手段による安全機能の回復を図ったものの、炉心の溶融や格納容器バウンダリの機能喪失などの重大な不可逆の状態に至る前に、必要な回復ができなかったと捉えられる。

東京電力における事故当時の緊急時組織では、発電所本部長以下に、12の機能班がフラットに配置されていた。事故を想定して定めた手順に従って対応できる場合には、各班が同時進行で迅速に活動を展開することができた体制だが、想定を超える事態においては、本部長が有効に管理できるスパンを超えてしまい、各班の活動の統制が難しくなる弱点があった。そこで、Incident Command System(以下、ICS)¹⁰⁾を原子力に初めて応用し、緊急時の主要機能を集約して階層化するとともに、管理スパンの適正化と指揮命令系統の明確化を図る改善を行った。ICSは米国で自然災害対応の分野で発達してきた緊急時対応システムであり、想定を超えて事態の拡大が予測できない場合においても柔軟に対応する仕組みが備えられている。

ICSを応用した発電所の緊急時組織体制を図7に示す。この体制では、情報の収集・分析を行って、対応戦略を立案する機能が明確になっている。事前の想定を超える事態においては、限られた情報をもとに緊急時対応を開始し、対応を継続する中で得られた情報に基づいて随時戦略を改定し続けること、すなわち予め定めた対応戦略ではなく、戦略プランニングを継続する機能そのものが重要である。このことは、東日本大震災における福島第二原子力発電所(以下、福島第二)の緊急事態において、情報収集を継続して状況認知を高めつつ、対応の優先順位を明確にして事態を収拾した経験が示している¹¹⁾。

また、対応戦略の立案にあたっては、フェーズドアプ

図8 フェーズドアプローチによる事故対応

図9 従来の規制基準と新規規制基準との比較¹²⁾

ローチを取っている。これは、福島事故でも福島第二の緊急事態でも、発災直後には対応リソースに制約があったことや、安全確保の観点から現場活動に制約を生じたことを教訓とし、対応初期には恒設設備で対応しつつ、時間の経過とともに、可搬設備他の代替手段の導入や、発電所外からの支援を順次加えて対応の厚みを増す戦略である。図8にフェーズドアプローチの概念を示す。このように、現実的な制約条件を考慮して、事故対応が成立するように資材、要員、手順を時間とともに展開するのが、このアプローチの特徴である。

さらに、運転と復旧という従来は個別に分かれていた機能も、現場対応のオペレーション機能として統合された。これには、可搬設備の運用における運転と復旧の連携、レジリエンスに向けた復旧活動と当面の緩和オペレーションの連携などを改善する狙いがある。

VII. 新規規制基準への適合性審査

福島事故後に強化された規制要件は、図9のとおりである¹²⁾。上述の検討を踏まえた安全性向上策は、新規規制基準の主要事項に対応する。これ以外の要件に対する諸対策も含め、柏崎刈羽原子力発電所6、7号機の安全性向上策は設置変更許可申請書に反映され、新規規制基準への適合性が審査されている（著者注：2017年秋の大会以降の進捗として、新規規制基準への適合性が認められるとする審査書案が、平成29年10月4日に原子力規制委員会にて取りまとめられ、本原稿執筆時点でこれに対する意見募集が行われている）。

VIII. 結言

東京電力ホールディングスでは、福島事故の教訓を踏まえた対策を検討し、柏崎刈羽原子力発電所への適用を進めている。また、それを含む同発電所6、7号機の安全性向上策について、新規規制基準への適合性審査を受けているところである。引き続き、訓練および各種の評価を通じて安全性向上の有効性を高め、継続的な改善に取り組む方針である。

－ 参考文献 －

- 1) IAEA, “Development and application of level 1 probabilistic safety assessment for nuclear power plants”, Specific Safety Guide SSG-3, 2010.
- 2) Nuclear Regulatory Commission, “A guide to the performance of probabilistic risk assessments for nuclear power plants”, NUREG/CR-2300, 2016.
- 3) 東京電力株式会社, “福島原子力事故調査報告書”, 2012.
- 4) 川村慎一, 大木俊, 奈良林直, “福島第一原子力発電所2号機の原子炉格納容器漏えいを踏まえた格納容器の事故時耐性強化と格納容器ベントの運用について”, 日本原子力学会和文論文誌, Vol.15, No.2, 2016, pp.53-65.
- 5) 川村慎一, 木村剛生, 大森修一, 奈良林直, “原子炉格納容器フィルタベントシステムの開発”, 日本原子力学会和文論文誌, Vol.15, No.1, 2016, pp.12-20.
- 6) 川村慎一, 木村剛生, 渡邊史紀, 平尾和紀, 奈良林直, “原子炉格納容器フィルタベント用の有機ヨウ素フィルタの開発”, 日本原子力学会和文論文誌, Vol.15, No.4, 2016, pp.192-209.
- 7) L. Soffer, S. Burson, C. Ferrell, R. Lee, J. Ridgely, “Accident source terms for light-water nuclear power plants”, NUREG-1465, 1995.
- 8) E. Beahm, C. Weber, T. Kress, G. Parker, “Iodine chemical forms in LWR severe accidents”, NUREG/CR-5732, 1992.
- 9) IAEA, “Defence in depth in nuclear safety”, INSAG-10, 1996.
- 10) Federal Emergency Management Agency, “Introduction to the incident command system”, ICS 100, 2010.
- 11) 川村慎一, 奈良林直, “東日本大震災における福島第二原子力発電所の緊急時対応の教訓を反映した原子力緊急時マネジメントシステムの改善”, 日本原子力学会和文論文誌, Vol.15, No.2, 2016, pp.84-96.
- 12) 原子力規制委員会, “実用発電用原子炉に係る新規規制基準について－概要－”, 原子力規制委員会 Web Site, <https://www.nsr.go.jp/data/000070101.pdf>, 2013.

著者紹介

川村慎一（かわむら・しんいち）

東京電力ホールディングス

原子力技術統括

（専門分野/関心分野）

原子炉工学，安全システム工学，保全工学，エアロゾル工学