

福島事故を踏まえたレジリエンスマネジメントの考察

A Study on Resilience Management of Nuclear Power Plants based on the Lessons Learned from Fukushima Accident

東京電力 HD
北海道大学

川村 慎一
奈良林 直

Shinichi KAWAMURA Member
Tadashi NARABAYASHI Member

Management for resilience of nuclear safety in severe accidents was studied based on the lessons learned from the emergency responses at Fukushima Daini NPP and Fukushima Dai-ichi NPP during the 2011 Great East Japan Earthquake. Firstly, it was found that continuous planning activities during the progress of an emergency, reflecting information from plant parameters and response action results, was critically important in the Fukushima Daini event. Reflecting this lesson, the concept of an Incident Command System was advocated and applied to nuclear emergency management, with specific improvement ideas such as a phased approach in response planning and common operation pictures. Then, from an analysis of the accident at Fukushima Dai-ichi Unit 2, the operation of Filtered Containment Venting System was advocated to be more flexible than conventional ideas based on the anticipations of plant behaviors. Finally, the above improvements were integrated in a model to improve resilience of nuclear safety in severe accidents.

Keywords: Resilience, Severe Accident, Fukushima Dai-ichi, Fukushima Daini, Common Operation Picture, Phased Approach, Emergency Management, Filtered Containment Venting System, Incident Command System

1. 緒言

2011年の東日本大震災で、福島第一原子力発電所（以下、福島第一）は安全機能を広範に喪失し、復旧が試みられたものの重大事故への進展を止められなかった。このことから、何らかの原因で喪失した安全機能を、必要な時間内に必要な性能レベルまで回復する能力、すなわちレジリエンス（回復力）の重要性が認識された。

一方、同じ震災で福島第二原子力発電所（以下、福島第二）では、福島第一とは被害の程度に差があったものの、原子炉を除熱するシステムが全て機能喪失しながら、事故進展の緩和措置を取りつつ、最終的に除熱システムを復旧して原子炉冷温停止に成功している。この対応では、安全機能の回復に至るまでのマネジメントが重要な役割を果たしたと考えられる。

本稿では、福島第二および第一の経験を分析し、レジリエンスによって重大事故への進展を防ぐマネジメントのあり方について考察する。

連絡先: 川村慎一、〒100-8571 東京都千代田区内幸町
1-1-3、東京電力ホールディングス（株）、
E-mail: shinichi.kawamura@tepcoco.jp

2. 福島第二におけるレジリエンス

2.1 緊急事態発生後の緩和措置

東日本大震災発生時、福島第二の4基（BWR、1100 MWe/基）は定格出力で運転中だった。これらは地震加速度の感知で安全システムが正常に機能して自動停止したが、その後の津波で海水を用いる冷却設備の大半が、電源盤やポンプの電動機の被水により機能喪失した。また、冷却系機能喪失の影響で他の多くの安全設備も動作不能になり、1、2、4号機では原子炉冷却用の全ての除熱設備と非常用炉心冷却系が機能喪失した。

この状況で原子炉への注水継続に用いた設備を Fig.1 に示す。高圧注水設備のうち冷却系を必要としないのは原子炉隔離時冷却系（RCIC）のみで、まずこのシステムが用いられた。その後、逃がし安全弁（SRV）で原子炉を減圧し、アクシデントマネジメントの手順で代替注水手段に位置付けていた復水補給水系（MUWC）が用いられた。このように高圧注水から低圧注水へ連続的に移行させ、炉心は常に冠水状態が維持された。

一方、崩壊熱で発生する蒸気はサプレッションチェンバに導かれたが、冷却できないので原子炉格納容器（以

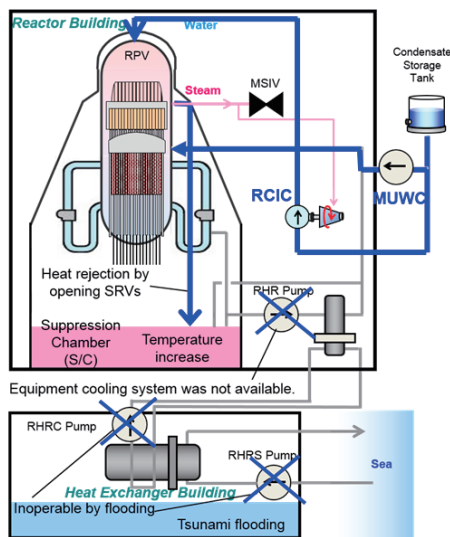


Fig.1 Emergency measures to inject water into the RPV.

下、格納容器)の圧力が上昇した。そこで、原子炉注水に用いていたMUWCを格納容器スプレイに間欠的に切り替えて、圧力上昇の抑制を図った。ただし、スプレイは原子炉注水の合間にしか実施できなかったため、最高使用圧力到達に備えて格納容器ベント準備を行ったが、結果的には残留熱除去系(RHR)が復旧し、ベントには至らなかった。

この対応では、プラントの設備と運転状態に関する情報収集と分析によって継続的に状況認識の精度を高めるとともに、不確かな要因に対して、常に対応手段の代替可能性を増加させるように戦略が組み立てられた。原子炉注水はRCICが当初の唯一の手段だったが、時間経過とともに故障などの不測の事態が発生することも考えられる。一方、減圧すればMUWCや消火系などが使用可能になり、多様な手段による代替可能性が増す。このことを念頭に、継続的な対応が行われた。格納容器圧力抑制についても、代替スプレイに加えてベントという次の手段を準備しつつRHRの復旧を急ぐなど、代替の選択肢を増す対応がとられた。

また、上述の活動を実行するうえでは、情報収集手段の確保と、緊急時対応要員間の認識共有には特に注意が払われていた。主要計測制御系の機能喪失に起因し、情報が錯綜した福島第一では、このような活動が著しく困難になっており、レジリエンスの成否に大きな影響を与えた要因のひとつと考えられる。

2.2 安全機能の回復

津波被害現場へのアクセスには安全上の様々な問題があり、当初は現場活動が制約を受けた。初動において、

安全を確保して要員を派遣するまでに約7時間、被害状況の確認作業にはさらに約7時間を要した。

被害状況の把握後には、復旧戦略の立案と必要資材の調達が行われた。損傷した電動機の代替品は、自衛隊による空輸や、トラック輸送によって発電所に届けられた。トラック輸送では、災害による国道の寸断、迂回ルート案内の混乱、輸送チームと発電所対策本部の通信手段の不通等により、予想以上の時間を要した。

復旧作業は、必要資材が到着した13日に本格的に行われた。被害を免れた電源盤および発電所外から緊急調達された電源車から、総延長約9kmの仮設ケーブルが敷設され、ポンプ用電動機が交換されてRHRが復旧した。この安全機能回復により、冷温停止が達成された。

これらの活動においても、情報収集と認識共有が重要な役割を果たしたと考えられる。特に重要なことは、設備の被害状況を把握し、必要な時間内における復旧可能性を分析したうえで、復旧の優先順位を定めるとともに、これらに関する認識を、緊急時対応要員間で共通のものにすることである。

課題としては、現場活動の安全確保や準備に時間を要するなどの制約条件から、事故発生からある程度の期間、現場活動が十分に展開できなかったことがあげられる。また、発電所外からの支援についても、自然災害との重畳による輸送の困難さ、輸送体制の準備不足などの要因から、時間を要したことが課題だった。

3. 緊急時対応の強化策

3.1 緊急時対応の課題

福島第二では、限られた情報と人的・物的資源で事態への対応を開始し、対応しながら状況認識を高め、対応戦略を順次改定して状況に対応すること、すなわち対応の戦略そのものだけでなく、戦略を立案・改定し続ける機能(戦略プランニング機能)が重要だった。しかし、従来の典型的な緊急時組織では、情報収集、事故進展予測、運転対応の検討、復旧対応の検討の機能が分散しており、戦略プランニングを統合的かつ継続的に行う機能が必ずしも明確ではない。

3.2 Incident Management System の応用

上述の課題解決のため、Incident Management System [1] (以下、ICS)の原子力への応用を検討した。ICSは米国で自然災害対応に実績のあるもので、状況変化への柔

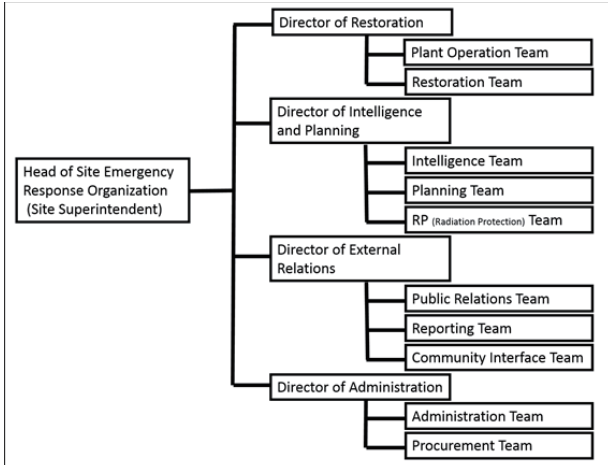


Fig.2 Site ERO structure with ICS concept applied.

軟な対応を考慮した設計であり、想定を超える事態に対処するマネジメントシステムとして検討価値がある。

ICS を応用した発電所緊急時組織の基本構成を、Fig.2 に示す。対策本部長のもとに戦略プランニング（情報分析と計画）機能の責任者、運転操作や復旧という実行機能の責任者、国・自治体への通報やマスコミ対応等の外部接点の責任者、総務機能の責任者を配している。

3.3 ICS における戦略プランニング機能強化

福島第二では、対策本部から中央制御室に派遣された連絡要員からの情報と、緊急時対応情報表示システム（SPDS）からのプラントパラメータの情報が纏められ、対策要員の認識共有のために掲示された。プラントパラメータそのものだけでなく、その分析結果や予測、設備の動作可否、復旧進捗が、重要な情報として共有されている。こうした情報の項目は発電所の設備構成から決まるので、あらかじめ標準形式化して備えるべきである。

これをコモン・オペレーション・ピクチャとして、紙と電子媒体で表示できるようにした。Fig.3 に一例を示す。

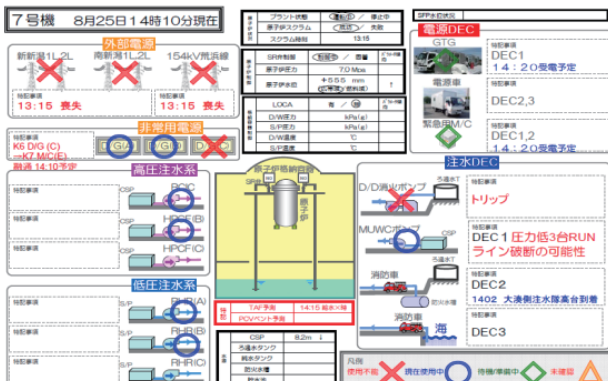


Fig.3 An example of a common operation picture.

画面の上側に原子炉とその制御の状況、格納容器温度・圧力の制御の状況、下側に原子炉水位の TAF 到達予測時刻、格納容器ベントが必要になる予測時刻が纏められている。また、左側には外部電源、非常用電源、非常用炉心冷却系の使用可否に関する情報が纏められている。一方、右側には重大事故等対処施設のうち、電源と注水に関する設備状況が記載されている。

また、福島第二の教訓から、初動の一定期間は現場活動が制約される可能性を考慮した戦略プランニングが重要である。初期は恒設設備を用いた対応で当座の安全確保を可能にし、時間経過とともに対応手段の代替可能性を高めるようなフェーズドアプローチを考慮して、対応に備えておくことが望ましい。

Fig.4 にフェーズドアプローチの概念を示す。フェーズドアプローチでは、緊急時対応を 3 つのフェーズに分類して戦略プランニングを行う。第 1 フェーズでは、現場活動の人的資源が限定されること、安全確保ができるまで現場活動が制約される可能性から、可搬の安全設備に必ずしも期待できない。したがって、恒設設備での対応を基本とする。福島第二では RCIC と MUWC を用いて原子炉注水を継続させ、当座の安全を確保したが、これが第 1 フェーズに相当する。第 2 フェーズでは所内配備の可搬設備や予備品等を活用して、安全確保手段を追加しつつ復旧を進める。さらに第 3 フェーズでは、所外からの人的・物的支援を導入して対応の厚みを増し、安全確保の継続性を確かなものにする。福島第二では所内に復旧機材がほとんど無かったことから、第 2 フェーズ相当の活動ができず、所外から資材が届くのを待つ第 3 フェーズに相当する復旧が行われた。

なお、各フェーズの継続時間は事故に応じて異なり、フェーズドアプローチの概念に沿って、必要な活動の優先順位を踏まえて戦略を構築することになる。ただし、事前に安全設備や要員構成を設計する際には、各フェーズの時間をある程度想定しておくことが、検討上必要になる。

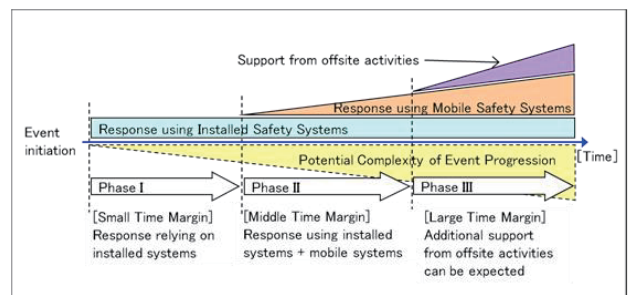


Fig.4 Concept of phased approach in emergency

発電所毎に、重要ハザードや、安全設備の構成、地理的条件等を考慮して想定すべきだが、福島第二の例では現場へのアクセスと状況確認に半日を要しており、フェーズ2に期待するのは事故発生から12時間後がひとつの目安になりえる。また、フェーズ3に期待するのは、所外が災害の影響を受けている可能性を考慮すると、一般的な災害経験から7日後がひとつの目安と考えられる。

4. 安全機能回復までの緩和措置と原子炉格納容器フィルタベント

4.1 機能回復過程における事象緩和措置

前章では安全機能を回復させるための緊急時対応について、主として組織活動の能力強化の観点から検討した。このような活動で、最終的には喪失した安全機能の回復を目指す。回復活動そのものと同様に重要なことは、回復までの期間に、回復不能な事態に陥ることを防止する緩和措置である。

福島第二では、除熱機能を回復するまでの緩和措置として、原子炉代替注水による炉心冷却が継続された。ここで、仮に炉心冷却に失敗する場合には、格納容器に核分裂生成物が放出されることから、そのバウンダリを維持するための措置をとり、環境への放出を抑制することが重要となる。

そうした措置のひとつとして、福島第一事故で課題となった格納容器ベントについて以下で考察する。この事故では、格納容器ベントに失敗した2号機から、最も多くの放射性物質が環境に放出されたと推定されている[2]。

4.2 格納容器ベントの役割

2号機格納容器の圧力変化の実測値とMAAPコードによる解析値は、東京電力[2]によってFig.5のとおり公表されている。ドライウェル圧力が3月15日7時から11時の間に著しく低下しており、この時間帯に格納容器が閉じ込め機能を喪失したと考えられる。

2号機では格納容器ベントが試みられていたが、ベント配管に設けたラプチャーディスクの作動設定圧力が、格納容器最高使用圧力にあわせて0.528 MPa[abs]だったため、Fig.5に示す圧力急上昇前にベントができなかった。なお、この圧力上昇は19時54分以降の原子炉注水再開で、水-ジルコニウム反応が進行したためと推定される。

このときまでに、格納容器上蓋フランジ等のシールに当時用いられていたシリコンゴムは、150°C以上の蒸気環境に長時間暴露されていたことから、基本構造となるシロキサンポリマーの加水分解により、性能劣化が進行していたと考えられる。ただし、圧力上昇後も暫くは圧力を保持していたことから、圧力上昇をもたらす原子炉注水再開前に仮に格納容器ベントが成功していれば、大量の

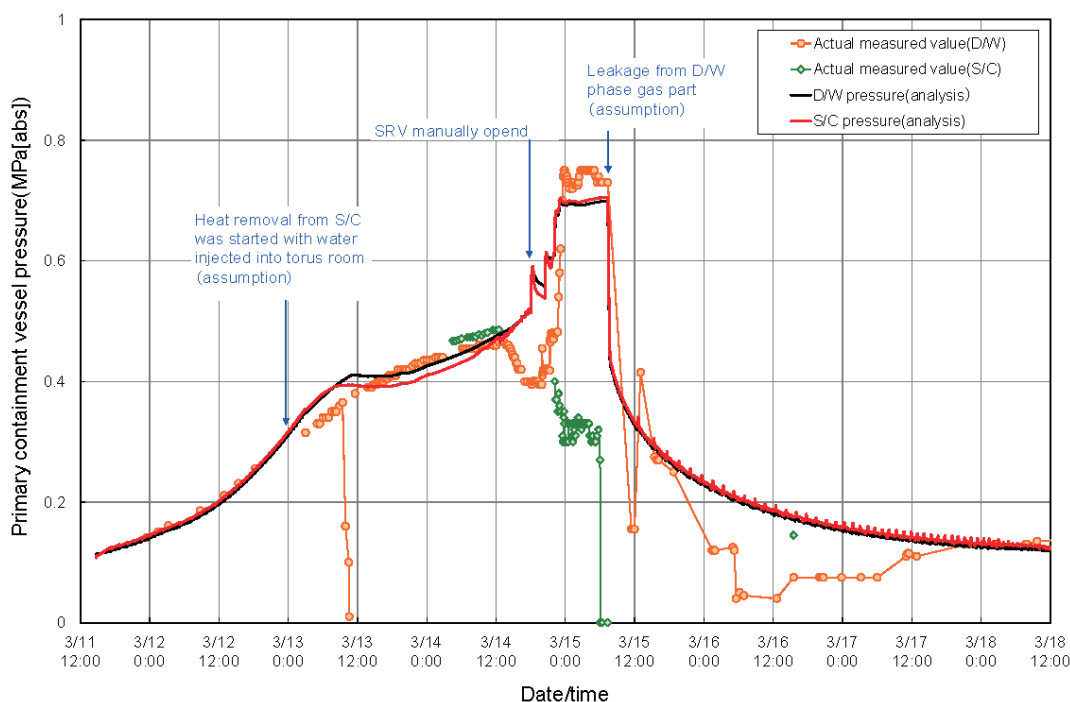


Fig.5 Pressure trend of the PCV at Fukushima Dai-ichi Unit 2.

放射性物質の漏えいを防止できていた可能性が高い。一方、格納容器ベントが実施できていれば、サプレッションプール水によるスクラビング効果によって、放射性物質の放出量を大幅に抑制することができたはずである。

また、格納容器ベントには、蒸気を放出することによって格納容器内の熱を大気に輸送する役割もある。原子炉および格納容器に外部から注水を行い、発生した蒸気を逃がすことで、機能喪失した除熱システムを復旧するまでの間、大気をヒートシンクとする除熱システムとして機能させることができる。

日本ではチェルノブイリ事故以降に、格納容器ベントがアクシデントマネジメント策の一つとして整備された。ただし、当時は格納容器が圧力もしくは温度の限界条件に達しないように、その手前に設定した圧力、温度条件で作動させる運用を想定し、上述のラプチャーディスクの設計などにもその考え方が反映されていた。

しかしながら、今後は格納容器ベントをレジリエンス戦略の一環として位置づけ、設定圧力に達したか否かだけでなく、例えば福島第一2号機のように格納容器圧力の急上昇が予測される場合に、予め格納容器ベントシステムを通気状態にしておくような予期型のベント運用も含め、状況に応じたフレキシブルなタイミングで、確実に使用する運用に考え方を要するべきである。

なお、上述した格納容器シール材のシリコンゴムは、既に耐熱・耐蒸気性能の高い改良型 EPDM への交換が進んでいるものの、より確実にレジリエンスを成功させる観点から、このような変更を提唱するものである。

4.3 格納容器フィルタベント

格納容器ベントにレジリエンスに向けた積極的な役割を期待する以上、その放射性物質除去性能を大幅に向上させるフィルタを追加するとともに、その性能を高いレベルで確保することが重要である。

水酸化セシウム等の粒子状の放射性物質や、無機ヨウ素を除去するフィルタについては、さまざまな研究開発が各国で行われている[3]。日本においても独自開発による実用化が行われており、重大事故時に想定される粒子状放射性物質に対する除染係数 (DF) が 1000 以上、無機ヨウ素に対する DF が 1000 以上確保されている[4]。

さらに、従来から開発が行われてきた上述のフィルタに加えて、これまでは除去が困難とされてきた有機ヨウ素に対しても、環境放出を抑制することが望ましい。この観点から銀ゼオライトを用いたフィルタが新たに開発さ

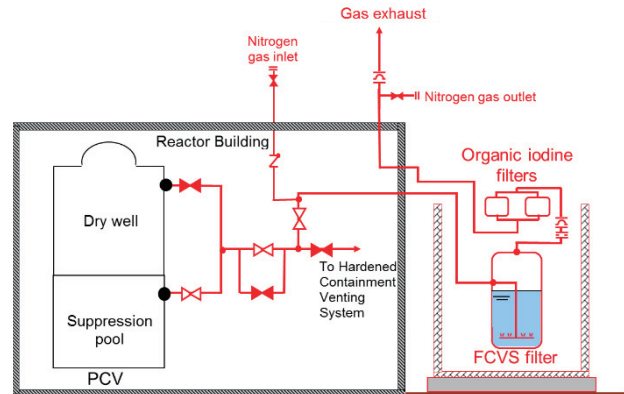


Fig.6 Basic configuration of the filtered containment venting system with organic iodine filters. response.

れており、実用化段階にある[5]。

これらを組合せた格納容器ベントシステムの系統概要を、Fig.6 に示す。

5. 緊急時対応の強化とフィルタベントによる総合的なレジリエンスマネジメントの改善

前章までに検討した緊急時対応の強化と、フィルタベントによる安全機能回復までの緩和措置、さらにその前提となるシール材の改良等による格納容器の耐性強化は、相互に関係してレジリエンスマネジメントを向上させるものとなる。Fig.7 にその概念図を示す。

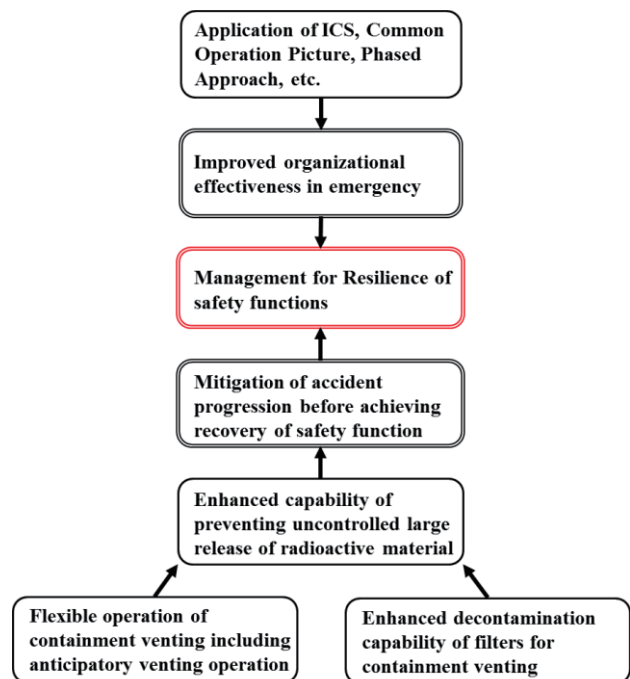


Fig.7 Proposed measures in this study to improve management for resilience and their relationship.

レジリエンスを成立させるためには、安全機能が回復するまでの緩和措置によって回復不能な状況に陥ることを避けるとともに、最終的には設備の復旧によって安全機能を回復させるマネジメントが重要である。

マネジメントに関して、本研究では ICS を原子力に応用したシステムを提案し、緊急時対応の組織能力を強化することを提言した。また、緩和措置に関して本研究では、格納容器に対する従来の考え方を变える提案をした。すなわち、想定を超過する事態では、ミニマムリリースを含む制御可能性を確実に維持することで、格納容器破損の防止を確かなものにするべきで、それによって回復不能な事態に陥ることを防ぎ、最終的なレジリエンスの成功につなぐということである。その観点から、予期型ベントを含むフィルタベントの柔軟な運用を提案した。なお、こうした柔軟な運用を確実に実施する観点でも、ICS を応用したマネジメントによって組織的能力を高めることが重要である。

6. 結 言

本研究では、レジリエンスを成功させるためのマネジメントを改善する目的で、緊急時の組織能力と、格納容器フィルタベントの運用に関して改善策を提言した。

参考文献

- [1] Federal Emergency Management Agency: “Introduction to the incident command system”, ICS 100, (2010)
- [2] 東京電力株式会社: “福島原子力事故調査報告書”, (2012)
- [3] OECD/NEA/CSNI: “Status report on filtered containment venting”, NEA/CSNI/R(2014)7, (2014)
- [4] 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, pp. 12-20 (2016)
- [5] 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, pp. 192-209 (2016)