

銀ゼオライトを用いた高除染性フィルターベントシステムの開発 Development of High Efficiency Filtered Containment Venting System by using AgX

北海道大学 奈良林 直 Tadashi NARABAYASHI Member
東京電力 川村 慎一 Shinichi KAWAMURA Member

Fukushima Daiichi NPP accident would be terminated, if sufficient accident countermeasures, such as water proof door, mobile power, etc. In case of Europe, it had already installed the heat removal system and filtered containment venting system (FCVS) from the lessons of TMI and Chernobyl Accidents. The new regulatory standard, the filtered vent system (FCVS) should be installed, and prevent the radioactive material in case of the severe accident and the overpressure breakage prevention of a primary containment vessel (PCV) and also the robustization of the FCVS. The authors examined the severe accident process in the 2nd unit of Fukushima Daiichi NPS, and found the vent by FCVS should be done before water injection into the core. The PCV spray and water injection into the pedestal basement should be also the countermeasures to the severe accident. Countermeasures for an intentional aircraft collision should be installed too.

Keywords: Fukushima Daiichi NPP Accident, Filtered Venting System, Severe Accidents, Silver Zeolite, Venturi Scrubber

1. 緒言

2011年(平成23年)3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震による津波により、福島第一原子力発電所が炉心溶融を伴う過酷事故を起こし、大量の放射性物質が飛散し周辺環境に甚大な影響を及ぼす事態となった。これを踏まえ、新規制基準では、国内全ての原子力発電所に格納容器フィルタードベントシステム(FCVS)を設置することになった。しかし、原子力安全・保安院や各種事故調の報告書に加え、規制委員会の福島第一原子力発電所の事故の分析や、東電の進捗報告書などの最近の知見によると、飯館村などの汚染したタイミングでは、福島第一原子力発電所2号機(以下1F-2)からの漏洩であった可能性が非常に高いことが分かる。2号機では隔離時注水系RCICの停止後、主蒸気逃がし安全弁(S/R弁)で原子炉を減圧したが、数時間ほど炉心注水が実施できず、炉心が空焚き状態が続き、格納容器内はRCIC蒸気タービンの排気蒸気などによって約0.4MPaまで加圧されており、その後の海水注入で、圧力が0.75MPaに上昇して、3月15日午前中に圧力が急減している。この時点で、原子炉建屋側面のブローアウトパネルから湯気が上がっているのが確認されており、格納容器が損傷したと考えられる⁽⁹⁾。2号機ではラプチャーディスクが割れておらず⁽⁵⁾、格納容器の損傷を招き、地元を放射性物質で汚染したことになる。これを防止するには、空焚き状態の炉心へ注水する前にフィルターベントを用いて速やかにベントできるようにしなければならない。つまり、FCVSの運用上からもPCVの過圧破損を防止する運用が求められる。本報では、フィルターベントの運用について述べる。

2. 福島第一原子力発電所2号機の事故分析

図1に示す通り、2号機では隔離時注水系RCICの停止後、主蒸気逃がし安全弁(S/R弁)で原子炉を減圧した。しかし、数時間ほど炉心注水が実施できず、炉心が空焚き状態が続いた。この段階で格納容器内はRCIC蒸気タービンの排気蒸気などによって約0.4MPaまで加圧されている。その後、海水注入が行われ、圧力抑制プール(S/P)の温度成層化に起因すると考えられる若干の圧力低下の後、格納容器内の圧力が0.75MPaまで上昇し、さらに、3月15日午前中に圧力が急減している。この時点で、原子炉建屋側面のブローアウトパネル開口部から、蒸気との放射性物質の飛散が始まった。これは、炉心が空焚きで温度が上がっていたところに注水が行われ、蒸気の多量発生に伴う格納容器の圧力上昇と、水・ジルコニウム反応による水素の発生などが生じて圧力が上昇して格納容器が損傷したと考えられる⁽¹⁰⁾。

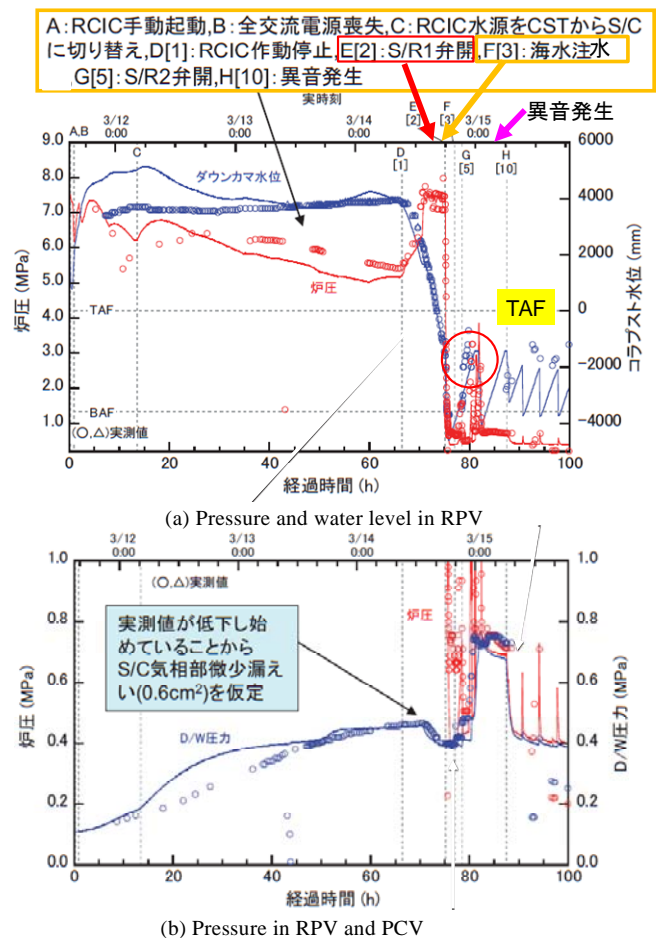


Fig.1 Comparison between Measured data and analysis results⁽⁵⁾

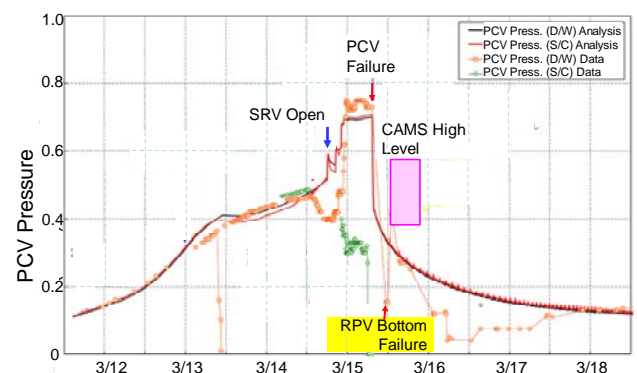


Fig.2 Comparison between measured data and analysis results⁽⁹⁾

表1は福島第1原子力発電所の1号機から4号機の事故の連鎖を時系列的に表したものである。炉心溶融事故は非常用復水器(IC)の作動が停止した1号機から始まり、水-ジルコニウム反応で発生した水素により原子炉建屋の最上階のコンクリート壁と屋上が吹っ飛ばす水素爆発が発生した。

次いで、3号機で、蒸気タービン駆動のRCICが停止し、原子炉水位低下に伴い蒸気タービン駆動のHPCIが作動したが、多量の蒸気が必要のため、原子炉の圧力が低下してHPCIの吐出流量もなくなり、作動停止した。これに伴い炉心溶融が発生してベント後、激しい水素爆発が発生し、原子炉建屋上部が大きく破損した。ただし、このような激しい水素爆発があっても格納容器の損傷は免れ、耐圧ベント系をもちいて圧力抑制プール(S/P)水をベント蒸気が通過する際のスクラビング効果(除染係数DFは約100)により、高い空間線量率にならずに済んでいる。

一方、2号機ではラブチャーディスクが割れずにベント弁を開けてもベントが出来なかったことが確認された⁽⁵⁾。ラブチャーディスクの設定圧が高過ぎることによって、格納容器の損傷を招き、図2に示すように、同日午後には圧力容器底部が損傷し、格納容器圧力の再上昇と格納容器内の放射線量(CAMSで実測)の急増が発生している。これにより地元を放射性物質で汚染したことになる(図3)。これを防止するには、空焚き状態であった炉心へ注水する前にフィルターベントを用いて速やかにベントできるようにしなければならない。つまり、FCVSの運用上からもPCVの過圧破損を防止する運用が求められる。

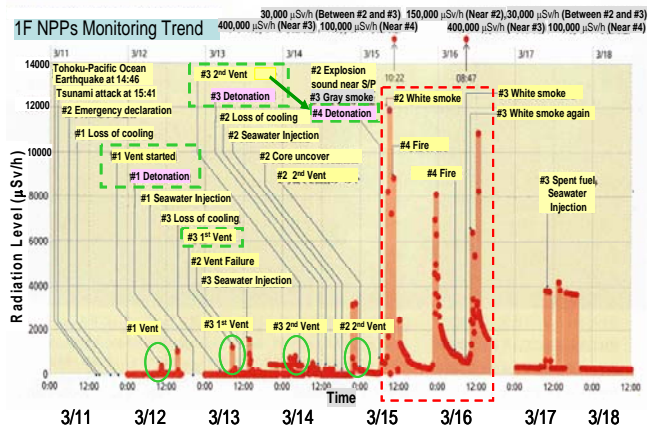


Fig.3 Monitored radiation levels for Fukushima Daiichi NPS (Nikkei Science, 2011).

Table 1 Chain of accidents at the Fukushima Daiichi NPS

機組	事故内容	発生時刻	影響
1号機	IC 炉心 Trip 溶解	3/11 14:46	3/19 受電
2号機	IC 炉心 Trip 溶解	3/12 15:41	3/18 受電
3号機	HPCI, RCIC (蒸気タービン駆動) 炉心 Trip 溶解	3/13 15:41	3/16 8:30~3/22 白煙・灰煙
4号機	定期検査中主シユブド交換 炉内に燃料なし	3/15	3/16 8:30~3/22 白煙・灰煙

3. フィルターベントシステムのロバスト化

図4のように、原子炉格納容器(PCV)には圧力抑制(S/P)プールがあり、このプール水に事故時に水酸化ナトリウムやチオ硫酸ナトリウムなどのアルカリ薬剤を注入すること

により、ヨウ素やセシウムの保持機能が数十倍に向上することが知られている⁽⁴⁾。これを「pH調整」と言い、我が国のBWRでもこのシステムを採用する発電所が出てきた。これにより、原子炉格納容器がフィルターベントとして機能するようになる。S/Pからのベント管の下流にFCVSが取り付けられるため、2つの異なるFCVSが直列に繋がることにより、最大でDF=100万程度の高除染性能が得られる。このためには、ヒートシンクの確保によるPCVの冷却が必要であり、PCVスプレーによるFPの除去機能強化に加え、格納容器スプレーのための多様な注水源と外部注水機材が準備されている。

また、深層防護の観点からS/Pの補助冷却機能の強化により、過酷事故時のS/Pの冷却とPCVの過圧防止を徹底することが重要であり、全国のBWRで順次対策中である。

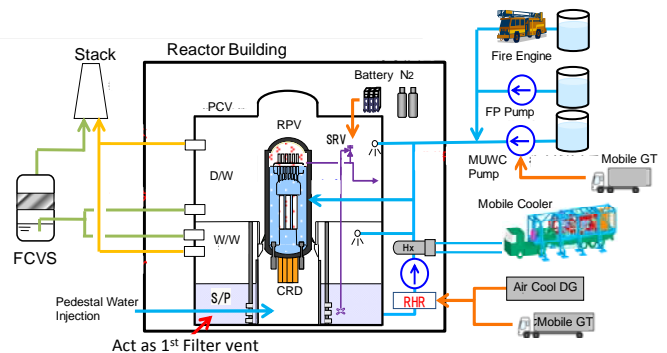


Fig.4 Robust type FCVS by using suppression pool.

4. 結論

1F-2号機の事故の分析の結果、炉心注水前にフィルターベントを用いた格納容器の減圧が必要であることが分かった。BWRでは格納容器のS/P水をアルカリ調整して、FPのスクラビングと保持特性を向上させ、併せて、最終ヒートシンク確保策を充実させる。格納容器本体のFCVSと外部設置のFCVSが直列に接続されることにより、除染性能の大幅向上と頑健化を同時に達成できる。本研究のフィルターベントの高性能化研究は科研費(基盤研究(B) 24360388)の一環として実施しており、日本保全学会規制関連検討会の審議を経ている。多くの方々のご支援とご助言に深謝する。

参考文献

- (1)奈良林直,杉山憲一郎,「東日本大震災に伴う原子力発電所の事故と災害 福島第一原子力発電所の事故の要因分析と教訓」原子力学会誌,vol.53, No.6, (2011), PP.387-400.
- (2)奈良林ら, 2011 秋の大会 L15, (3)同,2012 春の年会 G40,
- (4)奈良林ら, 2013 年秋の大会 H49,
- (5)原子力安全・保安院「東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故の技術的知見について」(別紙 2), (2012.3).
- (6)T. Narabayashi, "Lessons learned from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident", Turbulence, Heat and Mass Transfer 7, Begell House, Inc.pp.51-62,(2012).
- (7)奈良林ら, 第19回動力エネルギーシンポ, B231, (2014)
- (8)奈良林直, 佐藤修彰,「銀ゼオライトを用いた高除染性フィルターベントシステムの開発と可視化実験」, エネルギーレビュー(2014,11).
- (9)東京電力,「福島第一原子力発電所 1~3 号機の炉心・格納容器の状態の推定と未解明問題に関する検討」(第2回進捗報告)(2014.8.6).
- (10)石川迪夫,「考証・福島原子力事故」(2014.3).