

# 解説 記事

## フィルタベントシステムの概要と 必要性および有効性について

日立 GE ニュークリア・エナジー株式会社  
伊藤 秀一 Shuichi ITO

### 1. はじめに

福島第一原子力発電所の事故を踏まえて、国内の沸騰水型原子力発電所（BWR）では重大事故時における対処施設の一つとして、フィルタベントシステムの導入が進められている。

フィルタベントシステムは、フィルタベントが設置されている格納容器ベントシステムであり、重大事故時において、格納容器内で一時的に閉じ込めた放射性物質および崩壊熱を格納容器破損前に排出し、最終的な熱の逃がし場（大気）への熱輸送を確保すると同時に、格納容器内の雰囲気環境放出する際に放射性物質を除去し環境影響低減を図る重要な役割を担っている。これらの機能は、フィルタベントのみで達成しているのではなく、その他の対策を含めた格納容器ベントシステム全体で信頼性を確保しているものである。

本解説記事では、フィルタベントシステムの概要と必要性及び有効性について解説する。

また、現在進められている重大事故対策とは別に原子力発電所の更なる安全向上として、特定重大事故等対処施設（以下、「特重施設」と称する。）としてもフィルタベントの導入が計画されている。特重施設におけるフィルタベントについて、その要求事項とその対応案についても紹介する。

### 2. フィルタベントシステムの概要

現在、重大事故対策として考えられているフィルタベントシステムの概要を図1に示す。

フィルタベントシステムは、福島第一原子力発電所の事故において速やかな隔離弁の開操作ができなかった状況を踏まえて、確実にベントを行うための対策と、更なる安全向上として環境影響低減策等のその他の対策が考えられている。

確実にベントを行うための対策としては、格納容器ベントを行う上で必要となる電動式隔離弁の作動、空気作動式隔離弁の作動、圧力開放板の作動を確実に行うための対策として下記が考えられている。

- ① 弁作動用電源の強化
- ② 空気作動弁（AO弁）のボンベによる操作が可能な設計
- ③ 人力による弁開操作
- ④ 空気作動弁（AO弁）供給空気の強化
- ⑤ 圧力開放板作動圧力の低圧化

また、その他の対策としては、水素爆発防止、放出された放射性物質の監視、放出される放射性物質の環境影響低減策として下記が考えられている。

- ⑥ 水素爆発防止対策
- ⑦ 放射性物質濃度の監視
- ⑧ サプレッション・プール水の pH 管理
- ⑨ 放射性物質除去（フィルタベント）

フィルタベントシステムで重要となるベント時に放出される放射性物質の環境影響低減策としては、炉心損傷時に放出されるヨウ化セシウム（エアロゾル）の低減として、サプレッション・プールでのスクラビング効果による除去に加えてサプレッション・プール水に捕獲されたエアロゾルが無機ヨウ素として再揮発することを抑制するためにサプレッション・プール水の pH をアルカリ性に維持する pH 管理が考えられている。更に、ドライウェルに移行したエアロゾル及び有機ヨウ素に対しては、フィルタベント（有機ヨウ素除去フィルタ付）による除去が対応策として考えられており、放射性物質の更なる環境影響低減が図られている。

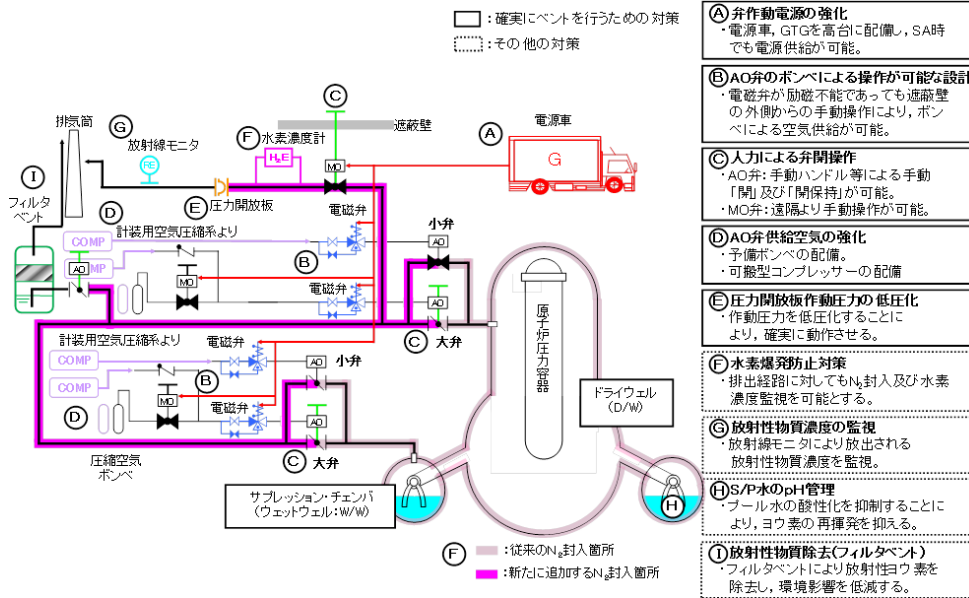


図1 フィルタベントシステムの概要

### 3. フィルタベントシステムの必要性及び有効性について

重大事故時におけるフィルタベントシステムに要求される重要項目としては、ベント時に放出される放射性物質の環境影響低減である。

前述のフィルタベントシステムの対策を含めた放射性物質の環境影響低減策を表1に示す。格納容器ベント時に環境影響を与える放射性物質としては、炉心損傷時に放出されるヨウ化セシウム（エアロゾル）が主要因であり、その対応としては、サプレッション・プールでのスクラビング効果による除去とサプレッション・プールのpH管理に加え、ドライウェルに移行したエアロゾルに対してはドライウェルスプレイによる除去が低減策として考えられている。また、再揮発した無機ヨウ素とサプレッション・プールの塗装材等の有機物

との反応により生成される有機ヨウ素に対しては、除去フィルタ（銀ゼオライトフィルタ）による除去が対処方法として考えられている。

具体的な対策内容としては、サプレッション・プールでのスクラビング効果については、サプレッション・プールの水位が低下し水深を確保できない場合にはその効果が十分得られないことから、その有効性の確保策としてサプレッション・プール冷却機能の早期復旧により水位維持が可能のようにRHR系のサポート系を強化することが考えられている。

また、サプレッション・プール水のpH管理については、プール水のpHをアルカリ性に維持するための薬液注入系統の設置、ドライウェルスプレイ確保策としては代替PCVスプレイ系統の設置、有機ヨウ素除去については銀ゼオライトフィルタ（有機ヨウ素除去フィルタ）付フィルタベントの設置が挙げられる。

表1 放射性物質の環境影響低減策

環境影響低減策	対処方法	対策内容
格納容器ベント（ウェットウェル） ヨウ化セシウム（CsI）の放出量低減	<ul style="list-style-type: none"> <li>サプレッション・プールのスクラビング効果により、ヨウ化セシウムを除去</li> <li>除去性能を確保するために、サプレッション・プールの水位維持が必要となるため、サプレッション・プール冷却の早期復旧のためにRHRサポート系の強化</li> </ul>	スクラビング効果確保のためにRHR系サポート強化 <ul style="list-style-type: none"> <li>代替RCW（熱交換器車または冷却水供給用ポンプ車）</li> <li>空冷式発電設備および大容量電源車</li> </ul>
格納容器ベント（ウェットウェル） 無機ヨウ素（I <sub>2</sub> ）の放出量低減	<ul style="list-style-type: none"> <li>サプレッション・プール水のpHをアルカリ性に管理することにより、無機ヨウ素の生成による再揮発を抑制</li> </ul>	サプレッション・プール水のpH管理
格納容器ベント（ドライウェル） ヨウ化セシウム（CsI）の放出量低減	<ul style="list-style-type: none"> <li>ドライウェルスプレイによるヨウ化セシウム除去効果を確保</li> </ul>	代替PCVスプレイ
格納容器ベント（共通） 有機ヨウ素の放出量低減	<ul style="list-style-type: none"> <li>有機ヨウ素除去フィルタによる除去</li> </ul>	銀ゼオライトフィルタ付フィルタベントの設置

これらの放射性物質の環境影響低減策は、共同研究等における試験等でその効果が確認されている。その概要を以下に示す。

(1) スクラビング効果

炉心損傷時において、原子炉圧力容器から主蒸気逃がし安全弁を介してサプレッション・プールに流入するヨウ化セシウムに対して、スクラビング効果による除去性能に対する影響因子を把握するため、影響因子として考えられる試験パラメータを変えた試験を実施している。除去性能に対する影響因子としては、スクラビング水深、エアロゾル粒径、気体のガス/水蒸気割合の影響が大きい因子であることが確認されている。

なお、実機を模擬したエアロゾル（多分散粒子径）を用いてプール水深パラメータとしてプール水の沸騰状態を模擬した条件で除去性能（DF）測定を実施し、約3m程度の比較的浅い水深においても100以上のDFが得られている。

(2) ドライウェルスプレーによるエアロゾル除去 [1]

ドライウェルスプレーによるエアロゾルの除去効果を検証するため、原子力発電技術機構において模擬の格納容器、サプレッション・プール、圧力容器等からなる試験装置を用いて、スプレーによる除去効果に関する実験を実施している。

試験容器の頂部からスプレーに対して高さを変えた3点の計測点（頂部、中間部、下部）で直後からのエアロゾル濃度の時間変化を測定し、頂部ではスプレー散水直後からエアロゾル濃度が30分以内に初期濃度の約1/5に急速に減少する結果が得られている。

(3) pH管理による無機ヨウ素の生成抑制

サプレッション・プール水のpH管理による効果については、米国規制ガイド（NUREG-1465）において、pH管理しない場合には全放出ヨウ素の91%が無機ヨウ素となり、pH7以上にpH管理をした場合では無機ヨウ素が全放出ヨウ素の4.85%となると評価されており、その効果が定量的に示されている。

また、日本原子力研究開発機構により開発された化学反応及び物質移動速度論に基づくヨウ素化学計算コード（THALES2/Kiche）において、BWR4 / Mark Iプラント（米国 Browns Ferry）を対象としてサプレッション・プール水のpH低下に対するヨウ素の挙動の解析を実施し、pH管理により無機ヨウ素（I<sub>2</sub>）の

格納容器内への浮遊（再揮発）割合の低減される結果が報告されている [2]。

以上より、サプレッション・プールにおけるスクラビング効果、ドライウェルスプレーによる除去、pH管理による無機ヨウ素の生成抑制による放射性物質の環境影響低減策の有効性が確認されている。

フィルタベントシステムは、前述の放射性物質の環境影響低減策に加えて、フィルタベントを設置することで放射性物質の環境影響を最小化することが可能であり、更なる安全向上としては必要なシステムであると考えられる。

4. 特重施設のフィルタベントについて

原子力発電所の更なる安全向上として、特重施設としてもフィルタベントの導入が計画されている。特重施設は、「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」の施行から5年以内に設置を求められている施設であり、航空機の意図的な衝突およびその他テロリズムにより、常設されている設計基準事故対処施設および重大事故等対処施設の安全機能が喪失し、重大事故が発生した場合に対処する施設である。このため、特重施設は大型航空機の衝突により原子炉建屋と同時損傷を防止するため必要な離隔距離（例えば100m以上）を確保すること、または頑健な建屋に収納することが要求されている。

【実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則】

第四十二条

工場等には、次に掲げるところにより、特定重大事故等対処施設を設けなければならない。

- 一 原子炉建屋への故意による大型航空機の衝突その他のテロリズムに対してその重大事故等に対処するために必要な機能が損なわれるおそれがないこと。
- 二 原子炉格納容器の破損を防止するために必要な設備を有するものであること。
- 三 原子炉建屋への故意による大型航空機の衝突その他のテロリズムの発生後、発電用原子炉施設の外からの支援が受けられるまでの間、使用できるものであること。

【実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈】

第 42 条

1. 第 1 号に規定する「原子炉建屋への故意による大型航空機の衝突その他のテロリズムに対してその重大事故等に対処するために必要な機能が損なわれるおそれがないこと」とは、以下に掲げる設備又はこれらと同等以上の効果を有する設備とする。

(a) 原子炉建屋及び特定重大事故等対処施設が同時に破損することを防ぐために必要な離隔距離（たとえば 100m 以上）を確保すること、又は故意による大型航空機の衝突に対して頑健な建屋に収納すること。

...

現状の各 BWR プラントにおける対応としては、重大事故等対処施設の設置計画が先行していることから、重大事故等対処施設のフィルタベントを設置した後に、特重施設のフィルタベントを追設するフィルタベント 2 基構成の対応と

なっている。しかし、特重施設としてのフィルタベントの設置をあらかじめ考慮し、頑健性を確保したフィルタベント 1 基構成とする対応も考えられる。

本項では、今後設置される特重施設を考慮した場合のフィルタベントの構成として、頑健型フィルタベントの設置について紹介する。

特重施設のフィルタベントにおいて必要となる考慮事項としては、航空機の衝突事象等に起因した事象により、設計基準事故対処施設および重大事故等対処施設が機能喪失した状態において、格納容器の破損防止対策を講じた上で、格納容器ベント時に放出される放射性物質を除去し、環境影響を低減することである。

航空機の衝突事象においてこれらの機能を維持するためには、設備の機能喪失防止に加え、電源の確保、操作場所の確保が必要となる。その対応策としては、頑健性確保または多重化と位置的分散による機能維持が考えられる。

現状計画されているフィルタベントを 2 基設置する場合（多重化型）と頑健性を確保したフィルタベントを 1 基設置する場合（頑健型）において、設備構成と要求される項目を表 2 に示す。

表 2 特重施設を含めたフィルタベント設備構成と要求項目

項目	多重化型	頑健型
構成	格納容器ベント（ウェットウェルベント） フィルタベント（重大事故等対処施設） フィルタベント（特重施設）	格納容器ベント（ウェットウェルベント） フィルタベント（特重施設）
電源	電源 重大事故等対処施設用：重大事故対策用電源 特重施設用：特重施設用電源	電源 特重施設用：特重施設用電源 重大事故対策用電源の融通を考慮
操作場所	フィルタベント隔離弁操作場所 重大事故等対処施設用：中央制御室 特重施設用：特重施設用制御室 （現場での人力操作を考慮）	フィルタベント隔離弁操作場所 特重施設用：特重施設用制御室 中央制御室での操作も可能とする。 （現場での人力操作を考慮）
排気管	フィルタベント排気ラインは航空機衝突時に全て同時に機能喪失しないように位置的分散を図る。	フィルタベント排気管の防護（排気管の 2 系列化と位置的分散、燃料流入防止対策）により、閉塞または航空機燃料流入を防止する。

多重化型は、格納容器雰囲気サブプレッション・プールを經由して系外に放出するウェットウェルベントに加えて、重大事故等対処施設のフィルタベントと特重施設のフィルタベントの構成であり、電源、操作場所、排気管は各設備に独立して設置される。この場合においても、特重施設のフィルタベントには原則として頑健性が要求されるが、重大事故等

対処施設のフィルタベントと同時に機能喪失しないように位置的分散を考慮することによる機能維持が可能となる。

頑健型は、ウェットウェルベントに加えて、特重施設のフィルタベントの構成であり、電源と操作場所は、航空機衝突時およびテロ時に特重施設用電源からの給電により特重施設用制御室において操作することを原則とするが、重大事



故時にも対応が可能なように重大事故等対処施設用電源からの給電による中央制御室での操作についても可能とする対応となる。

また、航空機衝突時の頑健性を確保の観点から、フィルタベントは地下設置として格納槽の天井部は防護可能な壁厚を確保することが対応策として考えられる。地上への排出が必要となる排気管は、航空機衝突により排気管が閉塞した場合においても機能維持可能なように、2系列化と位置的分散を考慮し、さらに排気管近傍で航空機衝突した場合において、排気管の開口部から航空機燃料の流入に伴う火

災損傷を防ぐため堰等の対策することが考えられる。

以上の対応策を考慮した場合の頑健型フィルタベントの構成例を図2に示す。

現状の特重施設を含めたフィルタベントの構成としては、重大事故等対処施設として設置されているフィルタベントに特重施設用フィルタベントを追加する多重化型の構成が計画されているが、航空機衝突における防護を図り信頼性を確保した上で頑健型フィルタベントを導入する対応も考えられる。

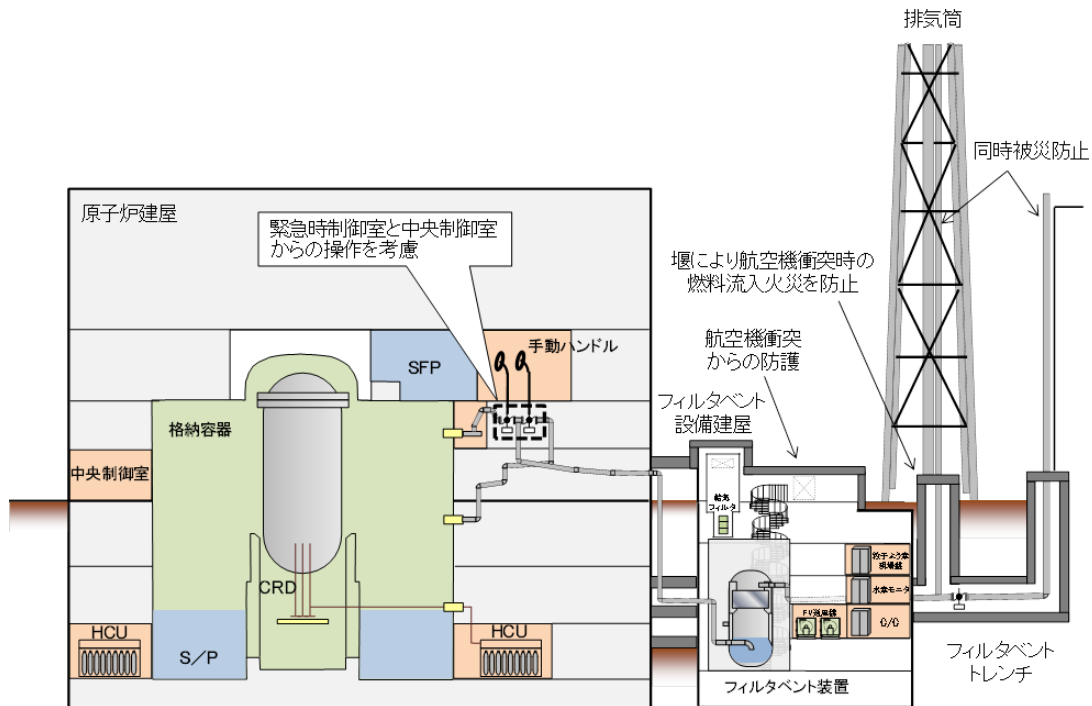


図2 頑健型フィルタベントの構成例

## 5. 米国のフィルタベント対応状況

BWRプラントが多く建設されている米国では、福島第一原子力発電所の事故を踏まえ、規制側と産業界の間でMark I / II BWRのベント戦略に関して議論を実施し、規制側より下記のベント戦略命令が示されている。

ベント戦略としては、原子炉注水や格納容器スプレいを強化し、格納容器ベント（ウェットウェルベント）と組み合わせて使用することを優先的に検討していく方針となっている。

米国ではフィルタベントの設置よりも原子炉注水、格納容器スプレィ、および格納容器ベントの強化が優先されている。

### NRCによるベント戦略命令（EA-13-109）

#### フェイズ1：ウェットウェルベント要件

（最長で2018年6月30日まで）

→重大事故環境下でも機能できる信頼性の高いウェットウェルベント系の設置。

#### フェイズ2：ドライウェルベント要件

（最長で2019年6月30日まで）

→下記①②のいずれかを選択。

①ウェットウェルベントと同様の性能を持つドライウェルベント系を設置。

②ドライウェルからのベントが必要ないことを保障する戦略の策定。

## 6. まとめ

現在検討されているフィルタベントシステムは、炉心損傷時に放出されるヨウ化セシウム（エアロゾル）の低減として、サプレッション・プールでのスクラビング効果による除去、サプレッション・プールで除去されたエアロゾルが無機ヨウ素として再揮発することを抑制するためにサプレッション・プール水の pH 管理、また、ドライウェルに移行したエアロゾルのドライウェルスプレイによる低減が考慮された上で、さらにフィルタベントによる除去が可能なシステムとなっている。このシステムより、必要な除去性能を十分満足でき、環境影響低減策としての有効性が十分確保されている。

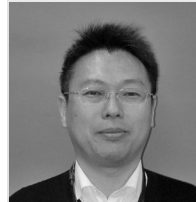
また、原子力発電所の更なる安全向上として計画されている特重施設におけるフィルタベントシステム構成としては、重大事故等対処施設として設置されているフィルタベントに特重施設用のフィルタベントを追加する多重化型の構成が計画されているが、排気管の 2 系列化等の信頼性を確保した上で頑健型フィルタベントを導入することも考えられる。

## 参考文献

- [1] 原子力発電技術機構「重要構造物安全評価（原子炉格納容器信頼性実証試験事業）に関する総括報告書、平成 15 年 3 月
- [2] 日本原子力研究開発機構、「BWR4/Mark-I プラントのヨウ素化学挙動を考慮した格納容器内ソースターム評価に係る検討」JAEA-Research 2010-051, 2011 年 2 月

(平成 27 年 9 月 1 日)

## 著者紹介



著者：伊藤 秀一  
 所属：日立 GE ニュークリア・エナジー株式会社 原子力計画部 主任技師  
 専門分野：安全計画、システム設計

## リスクベース設備管理の科学技術と普及戦略に関する 国際シンポジウム（RBM2015）（日本保全学会協賛）

会議名	リスクベース設備管理の科学技術と普及戦略に関する国際シンポジウム（RBM2015）
会期	2015 年 11 月 30 日（月）～ 12 月 1 日（火）
会場	早稲田大学小野記念講堂（東京都新宿区）
主催	リスクベース設備管理第 180 委員会、日本学術振興会
共催	早稲田大学
参加登録費	50,000 円 20,000 円（180 委員会産業界委員、協賛学協会員） 10,000 円（180 委員会学界委員、学生） ※すべてバンケット費込
申込等	ウェブサイト <a href="http://riskbase180.org/rbm2015/">http://riskbase180.org/rbm2015/</a> をご覧ください