

東京電力福島第一原子力発電所事故に関する知見の 規制への取り入れに係る今後の対応方針

令和5年8月30日
原子力規制庁

1. 趣旨

本議題は、第4回東京電力福島第一原子力発電所事故に関する知見の規制への取り入れに関する作業チーム事業者意見聴取会合（令和5年6月21日。以下「第4回意見聴取会」という。）¹において聴取したBWR事業者²及び原子力エネルギー協議会（ATENA）（以下「事業者等」という。）の水素防護対策に関する取組状況について報告するとともに、水素防護対策以外の論点の検討も含めた東京電力福島第一原子力発電所事故（1F事故）に関する知見の規制への取り入れに係る今後の対応方針の了承について諮るものである。

2. 経緯

令和3年度第17回原子力規制委員会（令和3年6月30日）において、原子力規制委員会（以下「委員会」という。）から、東京電力福島第一原子力発電所事故の調査・分析に係る中間取りまとめ（令和3年3月版。以下「21年版中間取りまとめ」という。）から得られた知見（水素防護対策・ベント機能・減圧機能）のうち、水素防護対策を優先して検討するよう指示がなされたことを受け、東京電力福島第一原子力発電所事故に関する知見の規制への取り入れに関する作業チーム（以下「作業チーム」という。）は、水素防護対策に係る検討を優先的に進めてきた。

その後、令和4年度第38回原子力規制委員会（令和4年9月14日）において「沸騰水型原子炉における原子炉建屋の水素防護対策に関する知見の規制上の取扱いの考え方」が了承された。当該考え方に基づき、令和4年度第75回原子力規制委員会（令和5年2月22日）において規制基準³の改正が決定され、

¹ 第1回意見聴取会は令和4年4月22日に開催、当該意見聴取結果の報告は令和4年度第12回原子力規制委員会（令和4年5月25日）において実施。第2回意見聴取会は令和4年7月28日に開催、当該意見聴取結果の報告は令和4年度第31回原子力規制委員会（令和4年8月24日）において実施。第3回意見聴取会は令和4年12月27日に開催、当該意見聴取結果の報告は令和4年度第71回原子力規制委員会（令和5年2月8日）において実施。

² 東北電力株式会社、東京電力ホールディングス株式会社、中部電力株式会社、北陸電力株式会社、中国電力株式会社、日本原子力発電株式会社及び電源開発株式会社

³ 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（原規技発第1306193号）、実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則の解釈（原規技発第1306194号）、実用発電用原子炉に係る発電用原子炉設置者の重大事故の発生及び拡大の防止に必要な措置を実施するために必要な技術的能力に係る審査基準

現在、新規制基準適合性審査チームにおいて、事業者から提出された当該改正に対応するための保安規定変更認可申請の審査を進めている⁴。

また、作業チームにおいては、上記考え方にに基づき、事業者等の自律的・計画的取組をフォローアップしている。今般、作業チームにおいて、第4回意見聴取会を開催し、水素防護対策に関する事業者等の取組状況等について聴取した。なお、第4回意見聴取会には、作業チームに加え、杉山原子力規制委員会委員にも参加いただいた。

3. 事業者等からの意見聴取結果

作業チームは、事業者等が策定し令和4年11月7日に公表した「水素防護対策に係るアクションプラン」（以下「アクションプラン」という。）に基づき、自律的かつ計画的に水素防護対策に取り組んでいるか、特に、第3回意見聴取会において令和4年度内に完了するとしていた短期的対応を中心に、その状況を聴取した。

意見聴取結果の主なポイントは以下のとおり。なお、詳細については別紙にまとめている。

（1）短期的対応の取組状況について

事業者等が令和4年度内に完了するとしていた短期的対応への取組状況に関して意見聴取を行った。

意見聴取の結果、短期的対応のうち、プラントウォークダウンによる原子炉建屋下層階における水素が滞留する可能性がある箇所の調査及び常用換気空調系（以下「HVAC」という。）及び非常用ガス処理系（以下「SGTS」という。）運転時の原子炉建屋内の風速等の測定については、当初の計画どおり令和4年度内に取組を実施したことを確認した。一方で、重大事故（以下「SA」という。）時にHVACを現設計のまま活用するためのアクシデントマネジメントガイドライン（以下「AMG」という。）の改定に係る基本的考え方を取りまとめたガイドライン（以下「AMG改定ガイドライン」という。）の策定については、追加で検討すべき事項が生じたこと等により、策定期間が令和5年3月末から令和5年6月に遅れたものの、策定が完了したことを確認した。このことから、事業者等による短期的対応については、一部計画の遅れはありつつも、取組が概ね完了したことを確認した。

（原規技発第1306197号）

⁴ 令和5年3月8日に、東北電力株式会社から当該改正に対応するための女川原子力発電所の保安規定変更認可申請を、東京電力ホールディングス株式会社から同趣旨の柏崎刈羽原子力発電所の保安規定変更認可申請をそれぞれ受理しており、審査を進めている。その他のBWRについては、新規制基準への適合に係る審査の中で、当該改正への対応を確認していくことになる。

(2) 取組の遅れ及びそれに対するマネジメントについて

AMG改定ガイドライン策定の遅れについて、その理由や対応、アクションプラン見直しのプロセス及び情報公開の方法などに関して意見聴取を行った。

意見聴取の結果、遅れが生じたのは、CNO（原子力部門の責任者）が出席する会議において指摘された、電源の確保等のSA時にHVACを活用するに当たって留意すべき事項についてより詳細な検討を行うこと及び海外における同様の取組に関する状況を調査することといった追加検討事項等への対応のためであり、策定するAMG改定ガイドラインをより良いものにしようとした結果であること、追加検討事項等への対応に当たっては、集中的な検討を実施し、かつ、後段の取組を並行的に進めることによって、アクションプラン全体への影響を最小限に抑えるための対応をとったこと、その結果、各BWRプラントにおけるAMG改定ガイドラインのAMGへの反映及び手順書の整備等の対応を再稼働前までに実施するとの当初の計画には変更が生じないことを確認した。また、これらの情報について、ATENAのホームページに新たに開設した特設ページにて公表していることを確認した。

一方で、アクションプランの見直しのプロセスについて、遅れが生じることが判明してからアクションプランの見直しを実施・公表するまでに時間を要したこと、特設ページについても、開設したことにまずは意義があるものの、取組の結果だけではなくプロセスも含めた丁寧な情報公開という点でまだ不足している部分があると思われることから、事業者等に対して、自律的な取組の観点から、適時適切かつ丁寧な情報公開に向けて、今後も継続的な改善に取り組むよう指摘した。

(3) 今後の取組について

各BWRプラントにおけるAMG改定ガイドラインのAMGへの反映等の対応及び中長期的対応に係る今後の取組に関して意見聴取を行った。

意見聴取の結果、各BWRプラントにおけるAMG改定ガイドラインのAMGへの反映等の対応については、再稼働前までに完了するよう、各BWR事業者からATENAに対して実施計画を提出することとしていること、各BWR事業者における実施計画に基づく実行段階では、ATENA-WG⁵において、進捗状況を共有するとともに、実行段階で得られた良好事

⁵ ATENAの中に、BWR事業者のみならずPWR事業者の原子力安全を専門にするメンバーも参画する形で設置された会議体。週に1回程度の頻度で開催されている。

例や課題等についても共有し、必要に応じてAMG改定ガイドラインへのフィードバックを行うとしていること、対応完了時も各BWR事業者からATENAに対して報告を行うこととしていることなどを確認した。また、取組の状況については、適宜規制当局にも報告・説明するとしていることを確認した。

中長期的対応については、第3回意見聴取会での説明から大きな変更はなく、短期的対応で得られた結果を踏まえ、ブローアウトパネルの開放試験等並びに水素挙動の評価手法構築及び評価について検討・実施し、当該評価結果等を踏まえ、原子炉建屋下層階への水素濃度計や静的触媒式水素再結合装置の追設、HVACやSGTSの防爆化などの設備改造等の追加的な対策を検討・実施するとしていることを確認した。また、これら中長期的対応における検討の結果についてもAMG改定ガイドラインや各BWRプラントのAMGに反映するとしていること、反映の実行段階においては、上記同様、ATENA-WGにおいて適切に連携して取り組んでいくとしていることを確認した。

4. 今後の対応方針（委員会了承事項）（案）

水素防護対策については、引き続き事業者等の取組状況をフォローアップしていく必要はあるものの、2.に記載のとおり委員会としての考え方の了承やそれに基づく規制基準の改正を行っており、また、3.に記載のとおり短期的対応が概ね完了するなど、事業者等による取組も進んでいる。これを踏まえ、水素防護対策以外の論点の検討も含めた1F事故に関する知見の規制への取り入れに係る今後の対応方針については、以下のとおりとする。

- 水素防護対策に関する事業者等の取組状況については、意見聴取の結果、事業者等においてアクションプランに基づき自律的・計画的に取組を進めようとする方針、姿勢及び実態が確認できたことから、引き続き、作業チームにおいて意見聴取会等の場でフォローアップし、必要に応じて委員会に報告することとする。
- 水素防護対策以外の論点は次表のとおり。これらのうち、令和5年度第15回原子力規制委員会（令和5年6月14日）において規制上の取扱いについて検討を開始することが了承された、東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所1号炉の原子炉補機冷却システムの汚染に関する調査・分析から得られた知見（以下「RCW汚染に関する論点」という。）については、ベント機能・減圧機能に係る論点（水素防護対策以外の21年版中間とりまとめから得られた知見）に比べ、検討の方向性がより明確であることから、当面は、RCW汚染に関する論点の検討を優先的に進めることとする。

表：水素防護対策以外の論点

※ベント機能・減圧機能に係る論点については令和3年度第25回原子力規制委員会資料7-1から抜粋。

	得られた知見等	対応
ベント機能	<p>耐圧強化ベントラインの非常用ガス処理系配管への接続により、自号機非常用ガス処理系及び原子炉建屋内へのベントガスの逆流、汚染及び水素流入による原子炉建屋の破損リスクの拡大が生じた。</p>	<p>○耐圧強化ベント配管内のガスの滞留の可能性が排除できるか、耐圧強化ベント系の存続の是非について検討する。</p> <p>○設計基準対象施設と重大事故等対応施設の接続、兼用については、規定上明確にする必要があるかについて今後の検討課題とする。</p>
	<p>1/2号機共用排気筒の内部に排気筒頂部までの排気配管がなく、排気筒内にベントガスが滞留、排気筒下部の高い汚染の原因となった。</p>	<p>○配管については、最高使用圧力・最高使用温度・内部流体の平均流速等をもとにした配管設計・強度設計が行われているが、流路構造による影響を検討する。</p> <p>○1/2号排気筒下部で高線量部分が観測されたのは、フィルタのない耐圧強化ベント系から排出された放射性エアロゾルが滞留した可能性があるため、耐圧強化ベント実施のタイミングを含めた耐圧強化ベントの使用の是非について検討する。</p>
	<p>サプレッションチェンバ・スクラビングにおいて、炉心溶融後のベント時には真空破壊弁の故障によりドライウェル中の気体がスクラビングを經由せずに原子炉格納容器外に放出される可能性がある。</p>	<p>○真空破壊弁が複数回の作動により故障する可能性に関する設計の考え方等について、ATENA・事業者・バルブメーカーから知見を収集する。</p> <p>○SA時の環境下で真空破壊弁が閉止できなくなる（故障する）可能性に関する設計の考え方等について、ATENA・事業者・バルブメーカーから知見を収集する。</p> <p>○SA時の環境（温度・圧力・水蒸気・放射線等）を加味した原子炉格納容器の漏えい率について、ATENA・事業者から知見を収集する。</p>

減 圧 機 能	主蒸気逃がし安全弁の逃がし弁機能の不安定動作（中途開閉状態の継続と開信号解除の不成立）が確認された。	○主蒸気逃がし安全弁について、故障原因の究明及び重大事故等状況下での能力について、ATENA・事業者・バルブメーカーから知見を収集する。
	主蒸気逃がし安全弁の安全弁機能の作動開始圧力の低下が確認された。	○SA時の環境下での機器（例えば、主蒸気逃がし安全弁）の動作に関する設計の考え方等について、ATENA・事業者・バルブメーカーから知見を収集する。 ○重大事故等状況下での計測機器の能力について、ATENA・事業者・計測機器メーカーから知見を収集する。
	自動減圧系が設計意図と異なる条件の成立（サプレッションチェンバ圧力の上昇による低圧注水系ポンプの背圧上昇を誤検知すること）で作動したことにより原子炉格納容器圧力がラプチャーディスクの破壊圧力に達し、ベントが成立した。	○ADSの作動信号としている検出器の設置位置や設定値等によっては、意図せず動作条件が成立することが有り得ることから、ADSの作動信号に関する設計の考え方（機器の破損防止のためのインターロックがSA時の操作に与える悪影響の回避）について、ATENA・事業者・計測機器メーカーから知見を収集する。 ○PCV圧力の上昇に水素等が有意に寄与するシナリオが事故シーケンスグループの選定に影響するか、PCV圧力の上昇の要因として水素等を明にする必要があるか、今後の検討課題とする。
R C W 汚 染	1号機において、RCW系統の高線量汚染が確認されており、その推定原因として、熔融燃料が圧力容器から格納容器に落下し、格納容器ペDESTAL内にある機器ドレンサンプを冷却するRCW配管を損傷し、放射性物質等のリークパスを形成した可能性がある。	○1号機以外のプラント（1F2～6号機及び廃止措置計画が認可されたプラントを除く。）における配管等の設計等を確認するとともに、当該事象へのとり得る対策を議論し、本件知見の規制上の取扱いについて検討する。 ○格納容器下部の配管の配置や隔離弁の詳細な設計等の検討を進めるに当たって必要な情報については、事業者に提供を求め、聴取する。

5. 参考

別紙

第4回東京電力福島第一原子力発電所事故に関する知見の規制への取り入れに関する作業チーム事業者意見聴取会合における意見聴取結果の詳細（P. 8～16）

参考 1

水素防護対策の検討状況について（第4回東京電力福島第一原子力発電所事故に関する知見の規制への取り入れに関する作業チーム事業者意見聴取会合資料4-1）（P. 17～49）

参考 2

BWRの原子炉建屋の水素防護対策に係るAMG改定等ガイドライン（ATENA 23-S01 Rev. 0）（第4回東京電力福島第一原子力発電所事故に関する知見の規制への取り入れに関する作業チーム事業者意見聴取会合資料4-2）（P. 50～76）

第4回東京電力福島第一原子力発電所事故に関する知見の規制への取り入れに関する作業チーム事業者意見聴取会合における意見聴取結果の詳細

令和5年8月30日

東京電力福島第一原子力発電所事故に関する知見の規制への取り入れに関する作業チーム

第4回東京電力福島第一原子力発電所事故に関する知見の規制への取り入れに関する作業チーム事業者意見聴取会合（令和5年6月21日。以下「第4回意見聴取会」という。）におけるBWR事業者^{*1}及び原子力エネルギー協議会（ATENA）（以下「事業者等」という。）からの意見聴取結果の詳細は以下のとおり。

（1）短期的対応の取組状況について

【事業者等の説明】

- 「水素防護対策に係るアクションプラン」（以下「アクションプラン」という。）において令和4年度内に実施するとしていた短期的対応、すなわち、
 - 重大事故等（以下「SA」という。）時に既存設備を現設計のまま活用する水素防護対策をアクシデントマネジメントガイドライン（以下「AMG」という。）に反映するための基本的考え方等を取りまとめたAMG改定ガイドラインの策定
 - 原子炉建屋下層階で水素が滞留する可能性のある箇所の調査・評価を行うためのプラントウォークダウンの実施
 - 原子炉建屋内の水素拡散挙動を確認するための常用換気空調系（以下「HVAC」という。）及び非常用ガス処理系（以下「SGTS」という。）運転時の原子炉建屋内における風速等の測定について、結果をとりまとめた（参考1の4ページを参照。）。
- AMG改定ガイドラインの策定については以下のとおり（参考1の8～14ページを参照。）。
 - SA時に既存設備を現設計のまま活用する水素防護対策として、各BWR事業者が、必要に応じてHVACを活用できるようAMG等を改定するためのAMG改定ガイドラインを策定した。
 - HVACとその他の水素防護対策の特徴を整理した結果、HVACは、水素を原子炉建屋から強制的に排出する手段として効果的であると思われるものの、常用系の設備であり、耐震クラスも低いことから、SA時の健全性が必ずしも担保されないこと、電源の確保、インターロックの解除等が必要であ

^{*1} 東北電力株式会社、東京電力ホールディングス株式会社、中部電力株式会社、北陸電力株式会社、中国電力株式会社、日本原子力発電株式会社及び電源開発株式会社

ること等を踏まえ、使用に当たっての明確な優先順位を定めることはせず、「発電所対策本部の本部長が、必要に応じて、その使用を総合的（臨機応変）に判断する」こととした。また、電源、作業リソース、作業環境、外部への放射性物質の放出、水素爆発の着火源といった、SA時にHVAC使用を判断する際の留意事項を示した。

- BWRプラントを対象に、下層階の水素滞留が懸念される場合に備えた対応として、必要な時にHVACを活用できるようにするため、策定したガイドラインに基づき、AMGの改定、電源確保及びインターロック解除のための手順の整備及び手順書等への上記留意事項の反映を行うこととした。
- ATENAは、令和5年6月8日にAMG改定ガイドラインの策定を決定、同月13日に初版を公表し、BWR事業者に対して上記の取組を再稼働前までに実施するよう求めるとともに、令和5年8月下旬を目途に実施計画の提出を求めた。
- プラントウォークダウンについては以下のとおり（参考1の15～20ページを参照。）。
 - 中長期的対応として予定している水素挙動の評価手法構築及び評価のインプットデータを得るため、各BWR事業者の代表プラントにおいて、原子炉建屋下層階における水素が滞留する可能性のある箇所^{*2}を、特に当該箇所の類型化の観点から、プラントウォークダウンによって調査した。
 - 調査は、標準手順書を定めた上で、図面やCADによる確認、現場におけるカメラ・ビデオによる撮影や測定等により行った。
 - 調査の結果、調査を実施したいずれのプラントにおいても水素が滞留する可能性のある箇所が6つの類型（天井の躯体の窪み、壁等により区切られた区画等）に分類されることが分かった。
 - なお、代表プラント以外については、中長期的対応である水素挙動の評価手法構築及び評価等に係る検討の中で、必要に応じて現場確認を実施する。
- 風速等の測定については以下のとおり（参考1の21～27ページを参照。）。
 - 中長期的対応として予定している水素挙動の評価手法構築及び評価の検討材料とするため、代表プラント（北陸電力株式会社志賀原子力発電所2号炉）において、HVAC単独運転時と（SGTSの効果を確認するため）HVAC及びSGTS同時運転時における原子炉建屋内の風速等を測定した。
 - 測定は、SA時に格納容器から水素が漏えいする可能性が高い小部屋を中心に、プラントウォークダウンで調査した水素が滞留する可能性のある箇所6類型全てを包絡できるよう選定した13の部屋を対象に、風速計と（風速が弱い箇所においては）ミスト発生器を用いて行った。
 - 測定の結果、比較的断面積の小さな箇所においては風速計による測定が実施

^{*2} 事業者等の説明によれば、今回の調査においては、SA時に水素が実際に流入する可能性がある箇所に限らず、水素のような空気よりも比重の軽い気体が仮に存在した場合に滞留する可能性がある箇所を幅広く抽出したとしている。

でき、かつ、ダクトの給排気量等を踏まえた簡易評価と比較することで、当該測定結果の有効性を確認することができた。また、風速が弱い箇所や、プラントウォークダウンで調査した水素が滞留する可能性のある天井の躯体の窪みなどにおいても、ミスト発生器による気流確認によって、ミストが滞留することなく動きがあることが確認できた。なお、HVAC単独運転時とHVAC及びSGTS運転時における測定結果を比較したところ、風速に若干の差は見られたものの、その程度は通常時の風速の脈動の範囲であった。

【作業チーム^{*3}の意見】

- SA時のHVACの活用に当たっての留意事項について、電源以外にどのような事項を抽出し検討したのか。
- プラントウォークダウンについて、調査対象とした代表プラントの選定の考え方はどのようなものか。また、代表プラント間で水素が滞留する可能性のある箇所の数の差や、6類型に当てはまらない箇所の有無については確認しているのか。
- 代表プラント以外のプラントに対する現場確認は必要に応じて実施するとのことだが、その考え方は。プラント毎に原子炉建屋の設計にある程度違うところもあることを踏まえれば、水素が滞留する可能性のある箇所を可能な限り見落とさないとの観点からは、代表プラント以外でも現場確認を実施する方がよいのではないか。
- 風速等の測定について、代表プラントとして志賀原子力発電所2号炉を選定した理由、13箇所の風速等の測定箇所の選定の考え方、SGTS単独運転時の風速等測定を行わなかった理由、HVAC及びSGTS同時運転時の風速等測定を行った目的及び確認できた事項を、それぞれ詳細に説明してほしい。
- SA時を考えれば、SGTS単独運転という状況の方がより想定されるシチュエーションと考えられる。SGTS単独運転時の風速等の測定の実施についても検討すべきではないか。

【事業者等の意見】

- HVACの活用に当たっての留意事項としては、電源に関するもの以外に、事故時のHVAC自体の健全性、他のSA対策のための作業もある中でHVAC活用のための作業員を賄いきれるか、また、作業員が受ける線量などの作業環境はどうか、HVACの吸い込み口近傍での水素爆発の可能性、（空調設備としてHEPAフィルタは備えているものの）HVACが基本的には放射性物質を除去するためのフィルタを備えていないこと、事故時におけるダクトの破損等による閉塞や風量の不均一化などといった点について検討を行った。
- プラントウォークダウンの対象とした代表プラントは、各BWR事業者1プラントかつ新規規制基準適合に係る設置変更許可を申請したプラントを選定している。

^{*3} 東京電力福島第一原子力発電所事故に関する知見の規制への取り入れに関する作業チーム

水素が滞留する可能性のある箇所の数については、各プラント間で大きな差はなく、当該箇所の形状についても、6類型で包絡されていることを確認した。

- 代表プラント以外の現場確認については、水素挙動の評価手法構築及び評価等の中長期的対応の中で検討することになるため、現時点で何かを決定しているものではないが、事業者等としては、まずは代表プラントの調査結果等を踏まえたモデルプラントにおける水素挙動の評価を実施し、その際、感度解析的に滞留箇所の形状等を変えたときに当該変更が評価結果に大きく影響するようであれば、個別のプラントにおいて必要なデータ収集を行う方向で考えている。一方で、最終的に個別のプラントで水素防護対策の検討を実施する際には、プラント毎の現場の情報を把握する必要があると考えている。
- 風速等の測定の代表プラントとして志賀原子力発電所2号炉を選定したのは、プラントウォークダウンを行ったプラントの中で比較的工事が少なく、足場の設置等の風速等測定に影響を生じるような現場環境への変更が少なかったため。風速等の測定箇所の考え方については、格納容器ハッチがある部屋など水素の漏えいポテンシャルが比較的高いと思われる部屋を5部屋、当該部屋とグレーチング等を経て接続する1部屋、プラントウォークダウンで調査した水素が滞留する可能性のある箇所6類型を包絡するよう選定した3部屋、その他測定が実施しやすい部屋として4部屋で計13部屋を選定した。
- SGT S単独運転時の風速等測定を行わなかったのは、測定を実施した時期が2月末～3月上旬と比較的結露が発生しやすい時期であったことから、設備管理の観点を考慮し、結露防止のためHVACの運転を停止することが難しかったことによる。
- HVAC及びSGT S同時運転時の風速等測定は、当該測定結果からSGT Sによる効果を推測することを目的に行ったもの。SGT Sに比べてHVACの給排気容量が非常に大きいことから、SGT Sの運転の有無で若干の風速の変動は観測できたものの、その効果について確定的な確認はできなかった。今後、中長期的対応におけるブローアウトパネル（以下「BOP」という。）開放試験等の検討の中で、SGT S単独運転時の風速等の測定についても、その可否を含めて検討していきたい。

【杉山原子力規制委員会委員の意見】

- HVACを活用したとしても、トップヘッドフランジから原子炉ウェルに漏えいした水素を排出することは難しいと考える。トップヘッドフランジからの水素等の漏えいについては、（新規規制基準への適合のための対応の中で自主対策として実施するとしている）ウェル注水によって防げると事業者として考えているのか。
- トップヘッドフランジから原子炉ウェルへの水素等の漏えいについては、そもそも懸念すべきポイントなのかも明確ではないと考えている。水素、核分裂生成物、水蒸気、窒素等を含む漏えい気体と、原子炉ウェルに元々存在する気体の挙動によって、そもそも可燃限界に達することはないのか、あるいは、水蒸気凝縮等に

よって短期間であっても可燃領域に達するのか、そういった点についても、今後検討を行ってほしい。

- 風速等の測定時には、原子炉建屋内の機器等搬入用のハッチは開放していたのか。また、オペレーティングフロアにおける空気の流れは観測できたのか。

【事業者等の意見】

- トップヘッドフランジからの漏えいについて、ウェル注水は実施する方向で検討している。漏えいした気体による原子炉ウェルにおける水素燃焼の可能性については、御指摘を踏まえ、検討していきたい。
- 風速等の測定時には機器等搬入用のハッチは開放していた。今回は作業員の手が届く範囲の測定しかできていないが、その範囲においては、オペレーティングフロアにおいても風速等は測定できた。ただし、オペレーティングフロアの天井付近など高い位置は測定できていない。

(2) 取組の遅れ及びそれに対するマネジメントについて

【事業者等の説明】

- AMG改定ガイドラインの策定については、当初、令和5年3月末を予定していたところ、CNO（原子力部門の責任者）出席の会議における議論の結果、SA時にHVACを使用する場合の電源確保に関する留意事項や当該設備を使用することによる悪影響に係る追加検討及び海外における同様の取組の実施状況の確認が必要となったことから、令和5年6月中旬策定にアクションプランを見直した。
- 追加検討による遅れを最短にすべく、定例で実施しているATENA-WGに加え追加的な検討の場を設けるなど集中的な検討を行うとともに、各BWR事業者におけるAMG改定の検討を並行して進めた。その結果、AMG改定ガイドライン策定の遅れによる後工程への影響はない見込みである（参考1の5～7ページを参照。）。

【作業チームの意見】

- AMG改定ガイドラインについて、追加検討及び海外における同様の取組の実施状況の確認によって、どのような成果が得られたのか、また、それらがどのように当該ガイドラインの策定に反映されたのか。また、追加検討等に係る具体的な流れはどのようなものだったのか。
- AMG改定ガイドライン策定の遅れについて、基本的には、CNO出席の会議における議論を踏まえ、より良いガイドライン策定のための追加検討等を行ったためであること、また、遅れを最小限にして工程全体への影響が生じないよう、集中的な検討を行うなどの対応をとったことは理解。一方で、追加検討等のプロセスを聞く限り、追加検討等によって取組に遅れが生じ、アクションプランの見直しが必要であることが判明した後も、それが実際にホームページ上で公表される

時点までに時間を要した（ホームページ上でアクションプランの見直し含め関連の情報を掲載した特設ページが公表されたのは令和5年6月20日。）ことは、改善すべき点。事業者等による自律的な取組の観点からは、最終的な結果だけではなく、アクションプランの見直しなどの情報についても、ホームページ等において、丁寧な公表・説明を行うべき。

- 特設ページについては、まず公表したことに意義はあると思われるものの、自律的な取組の観点から、適時適切な情報公開が行えるよう、引き続き取り組んでほしい。

【事業者等の意見】

- 追加検討については、例えば、事故時にHVACを非常用電源につなぎ込む際、短絡・地絡、電源の容量、突入電流といった事項に注意する必要があることから、電源の容量の予めの確認や、突入電流の想定、負荷のカットといったことについて準備をしておくといったことについて、BWR事業者及びメーカーを中心に検討を行った。検討結果については、留意事項としてまとめており、今後AMG改定ガイドラインを踏まえて整備される手順書等に反映される。
- 海外における同様の取組の実施状況については、BWR事業者から、BWRオーナーズグループを經由して米国のプラントにおける対応を確認したところ、米国においても、水素防護対策として使用可能な場合にはHVACを活用するといったことが行われていることを確認した。
- AMG改定ガイドラインについては、令和5年4月上旬のCNO出席の会議において、追加検討等に関するコメントがあったことから、2ヶ月ほどかけて対応を行った。その後、ATENA-WG内での再レビューを経て、同年6月8日のCNO出席の会議において、当該ガイドラインの策定を決定した。
- 水素防護対策等に関するホームページの充実について、前回の第3回意見聴取会でも実施すると言いながら中々準備が整わなかったのは反省。まだこれからブラッシュアップを検討していく必要はあるものの、まずはなるべく早く公開できるように作業を進めたところ。今後は、ATENAとしての透明性の観点も踏まえ、アクションプランの変更等、プロセスも含めてホームページ等で適時適切に公表・説明するよう改善していく。

（3）今後の取組について

【事業者等の意見】

- AMG改定ガイドラインについては、今後、各BWR事業者から提出される実施計画をとりまとめ公表し、規制当局にも報告する（参考1の14ページを参照。）。
- また、各BWR事業者における実施計画に基づく実行段階においては、ATENA-WGの枠組みを活用し、事業者等の間で進捗状況を共有するとともに、実行段階における良好事例や課題などの共有も行うことで、AMG改定ガイドラインの改定も含め、取組の改善につなげていく。それらの状況について、ATENA

は、当面の間、半期に最低限1回程度の頻度で規制当局に報告する。

- 各BWR事業者は、A T E N Aに実施計画に示す時期までに対応完了の報告を行う。対応が完了できない場合には、その旨をA T E N Aに報告する。A T E N Aは、当該情報について規制当局に報告する。
- 中長期的対応としているB O P開放試験等については、短期的対応における風速等の測定結果も踏まえつつ、平常時とS A時の環境の違いの取扱いや具体的な試験方法について検討を行っており、令和5年度下期に要否判断等を行う予定（参考1の28ページを参照。）。
- 中長期的対応として予定している水素挙動の評価手法構築及び評価については、短期的対応におけるプラントウォークダウンによる調査結果やB O P開放試験等の結果を用いて、原子炉建屋内の水素挙動の詳細評価手法を構築するとともに、水素が滞留する可能性のある条件を策定する予定。それらを用いて、原子炉建屋内の全体解析を実施し、水素挙動の評価を行う（参考1の29ページを参照。）。
- 上記評価の結果等を踏まえ、水素が滞留する可能性のある箇所に対して、追加的な対策（静的触媒式水素再結合装置や水素濃度計の追設、扉の改造）を検討する。また、令和6年度までに、H V A C・S G T Sの着火リスク低減や、H V A Cの電源等の強化等、設備改造を視野に入れた水素防護対策の検討を行う（参考1の30ページを参照。）。
- 中長期的対応の検討結果は、A M G改定ガイドラインとしてまとめるとともに、各BWRプラントのA M Gに反映する（参考1の31、32ページを参照。）。

【作業チームの意見】

- 策定したA M G改定ガイドラインを踏まえた各BWR事業者における対応について、A T E N A-WGの枠組みを活用した実行段階における良好事例や課題などの共有は、事業者等における自律的な取組として有効なものと認識しているが、ここで得られた良好事例や課題等についても、A M G改定ガイドライン等に反映していくのか。また、A T E N A-WGの枠組みを活用した取組は、中長期的対応の実行段階においても有効だと考えるが、同様に取り組んでいくのか。
- 策定したA M G改定ガイドラインに基づく各BWR事業者におけるS A時のH V A Cの活用に係る取組について、再稼働前までに実施するとのことだが、具体的にどこまで実施するのか。実効性の観点からは、手順書等の整備だけでなく、訓練なども実施するべきではないか。また、訓練の中で得られた知見についてはA T E N A-WGの枠組みを活用して共有するなど、適切に連携して取り組んでほしい。
- 今後の取組においては、現場からのフィードバックに加えて、海外の情報や、原子力規制委員会における東京電力福島第一原子力発電所事故の調査・分析（以下「1 F事故分析」という。）など規制当局での関連する検討から得られる情報なども、A T E N A-WGにおいて適切にインプットし、継続的な改善につなげてほしい。

【事業者等の意見】

- 実行段階において得られたフィードバックすべき事項についても、AMG改定ガイドライン等に反映していく。また、ATENA-WGは事業者に加えてメーカーも参画しており、様々な知見を持ち寄ることが可能なので、中長期的対応の実行段階等においても、当該WGの枠組みを活用し、知見を出し合って取組を行っていく。
- SA時のHVACの活用に関する各BWR事業者等の取組の中で、事故時の電源の確保のための操作やインターロックの解除操作など、特殊な操作について特に重点的に教育・訓練を実施していきたいと考えている。また、その中で得られた知見については、事業者等の間で共有し、取組の改善につなげていきたい。
- 指摘のあった1F事故分析における検討状況については、ATENA-WGとしても継続的に注視している。引き続き様々な情報を取り入れ、取組の継続的な改善につなげていく。

(4) その他

【作業チームの意見】

- 既に面談^{*4}でも伝達済だが、令和5年度第15回原子力規制委員会（令和5年6月14日）で規制上の取扱いの検討を開始することが了承された、1F事故分析における1号炉の原子炉補機冷却系（以下「RCW」という。）の汚染に関する調査・分析から得られた知見（以下「本件知見」という。）に関して、当該規制委員会においても示したとおり、プラント毎の格納容器下部の配管の配置や隔離弁の詳細な設計等、検討を進める当たり必要な情報について、整理し提供すること。なお、対象のプラントは、1F及び廃止措置計画が認可されたプラント以外の全てのBWR及びPWRとする。

【事業者等の意見】

- 情報の整理及び提供について承知した。本件知見に係る原子力規制委員会におけるこれまでの議論については注視しており、当該議論を踏まえ、ATENA-WGにおいても令和5年5月頃から調査・検討を行っていたところ。これまでの調査状況の概要を説明すると、PWRに関しては、本件知見による影響が懸念される原子炉キャビティに配置されている配管には、格納容器外に貫通するものは確認されておらず、大きな問題はないと考えている。
- 一方で、BWRについては、これまでのところ新規規制基準適合に係る設置変更許可を申請したプラントを対象に調査をしている。例えば、RCWについては、格納容器型毎に設計が若干異なっており、Mark-I改であれば機器ドレンサン

^{*4} 令和5年6月14日に実施した以下の面談。
<https://www2.nra.go.jp/data/000436273.pdf>

プ等がペDESTALの外に設置されており、1号炉で起こったと考えられるものと同じ事象が起きることは考えがたい。Mark-II及びABWRでは、機器ドレンサンプ等がペDESTAL内に設置されているものの、それぞれ遮断弁が設置されている又は隔離信号により動作する隔離弁が設置されていることを確認している。また、RCW以外の配管についても、調査を進めている。

- いずれにせよ、必要な情報について改めて調査・整理し、3ヶ月後程度を目途に報告できるよう、対応を進める。

以 上

水素防護対策の取組状況について

2023年6月21日

東北電力株式会社	東京電力ホールディングス株式会社
中部電力株式会社	北陸電力株式会社
中国電力株式会社	日本原子力発電株式会社
電源開発株式会社	原子力エネルギー協議会

余白

1. はじめに
2. アクションプランによる実績と今後の対応（概要）
3. AMG改定ガイドラインの策定
4. 対策の具体化に向けた検討結果
5. 今後の対応（中長期的対応）について
6. まとめ

(1) これまでの経緯

原子力規制委員会は、東京電力福島第一原子力発電所の調査・分析に係る中間とりまとめ（以下、「1F事故調査分析中間とりまとめ」という。）を公表しており、これを受け産業界としても得られた知見から技術的課題とその分析・評価を行い、水素滞留、可燃性ガスの影響、逃し弁機能の不安定動作、予期せぬインターロックの動作の4つの技術的課題を抽出している。特に、水素滞留については、BWR事業者で共通的なアプローチとなることから、ATENAおよび各事業者で役割分担を行い優先して取り組むこととしていた。ここでは水素の拡散挙動に関して解析を実施することに加え、知見拡充を待たずとも検討を進める対策について検討を進めることとした。

ATENAは、2022年11月に東京電力福島第一原子力発電所事故の調査・分析から得られた知見への対応に関する、水素防護対策に係るアクションプランを公表した。このアクションプランでは短期的対応と中長期的対応に分けて検討を進めることとしており（詳細はP4~5、アクションプランを参照）、今回、短期的対応として進めてきた課題の検討結果について取り纏めてご報告する。これまでの経緯を以下に示す。

- ✓ 「第1回東京電力福島第一原子力発電所事故に関する知見の規制への取り入れに関する作業チーム事業者意見聴取会合（以下、「意見聴取会合」）」（2022年4月22日開催）において、事業者から、原子炉建屋における水素爆発の更なるリスク低減を図るために、各プラントの特徴等を踏まえ、様々な水素防護対策を検討していくことを説明。
- ✓ 「第2回意見聴取会合」（2022年7月28日開催）では、水素防護対策の検討について、短期的対応、中長期的対応に分けて取り組むことを説明。また、原子炉建屋の水素防護対策に係るアクションプランを策定した時点で提示することとしていた。
- ✓ 「第3回意見聴取会合」（2022年12月27日開催）では、作成・公表したアクションプランに基づき、短期的対応としてAMG改定ガイドラインの作成、プラントウォークダウン、建屋内風量測定の検討に取り組むことを説明。

（1）短期的対応について

- ✓ これまでの東京電力福島第一原子力発電所事故の調査・分析から得られた知見から、下層階に水素が滞留する可能性が明らかになった。これまでの新規制基準対応の中で水素防護対策も含めた数多くの安全対策を実施しており、水素爆発に至る可能性は極めて低いと考えられるが、更なるリスク低減を図るため、下層階の水素滞留への対策を検討することとし、アクションプランとして短期的対応と中長期対応に分けて検討を進めることとした。
- ✓ 短期的対応では、「水素滞留の可能性」を考慮した場合の水素防護対策について比較検討を行い、以下の改善策を実施した。
 - ①水素滞留防止対策の比較検討を行い、優先順位・導入条件・懸念事項を付けて、事業者のAMG等改定に資する「AMG改定ガイドライン（初版）」を作成した。このガイドラインの前提として、短期間で対策実施が可能とするため、既存設備を現設計のまま活用することとした。
 - ②また、対策の具体化に向けた検討として、中長期的対応として予定している「下層階の水素滞留の可能性」がある箇所に対して対策要否を判断するため、水素滞留・拡散挙動の評価手法構築・評価等を行う際に、インプットデータを与える観点から以下を実施した。
 - a) 実プラントのプラントワークダウンを行い、水素滞留の可能性のある箇所を選定
 - b) 下層階の水素滞留防止に寄与する機器による実プラントでの風量測定等
- ✓ そこで今回は、上記の短期的対応について結果を取りまとめたので、ご報告する

（2）中長期的対応について

- ✓ 短期的対応で実施したプラントウォークダウンや実機による風速等の測定の結果を踏まえ、中長期的対応としている建屋内風速測定の要否検討、水素滞留・拡散挙動の評価、設備改造を含めた水素防護対策（着火リスクの低減、HVACの電源強化等）の検討を実施する。その結果を下層階の防護対策検討に反映していく。
- ✓ 中長期的対応としている水素防護対策の各検討結果は、AMG改定ガイドライン（改訂版）としてまとめ、適宜、各事業者のAMGへ反映する。

（3）アクションプランの見直しについて

アクションプランについては、3月末の実施状況を踏まえ、以下の通りアクションプランの見直しを行った。

- ✓ AMG改定ガイドラインの発行
 - ・AMG改定ガイドラインを策定する中で、HVACを必要に応じて活用するにあたり、各事業者のCNOが出席するステアリング会議において、HVACの電源確保（常用電源喪失時、非常用電源から常用電源への融通確保）を実施すべきではない状況やHVAC使用による悪影響を確認することとなり、影響・リスクや留意事項・対処策等についての更なる追加検討が必要になったこと、加えて、海外での実施状況確認が必要になったことから、当初予定していた3月末から6月中旬に見直しを行った。
 - ・なお、この見直しにあたり、検討を十分行うとともに最短期間とすべく、ATENA-WGでの通常の会議のみならず、追加的に別打合せを持ち、集中的に討議を行った。これによる後工程への影響は、各事業者によるAMG改定等の検討を並行して行うことにより、特段無く、これまでの予定通り、再稼働前に反映可能な予定である。

アクションプラン（改訂版）（1/2）

実施項目	実施主体	2022年度 上期	2022年度 下期	2023年度 上期	2023年度 下期	2024年度	2025年度 以降
1. アクションプランの作成	ATENA-WG	概要検討 ↓ アクションプラン作成（初版） ↓ アクションプラン検討	アクションプラン作成（初版）	▼アクションプラン変更	適宜、得られた知見等を反映し アクションプランを見直し		
2. AMGの改定 (1) 既存設備を原設計のまま活用した水素防護対策の検討 (P8~参照)	ATENA-WG	建屋漏えい時の簡易評価 (FCVS/HVAC/SGTS/BOP/トップベント) ↓ 対策の比較検討 (各対策の対応する事故条件、機器の特性の整理) ↓ 水素防護対策 (FCVS/HVAC/SGTS/BOP/トップベント) の優先順位・導入条件・懸念事項の整理 ↓ 手順のひな型の作成	水素防護対策 (FCVS/HVAC/SGTS/BOP/トップベント) の優先順位・導入条件・懸念事項の整理 ↓ 手順のひな型の作成	▼AMG改定ガイドライン策定（初版）	AMG改定ガイドラインの検討		
	各事業者				AMG改定ガイドラインの検討	AMG改定検討・改定 (プラントによる)	
(2) 中長期的な水素防護対策の検討結果を踏まえたAMG改定ガイドの改定/AMG再改定の検討・AMGへ反映 (P31参照)	ATENA-WG / 各事業者					AMG改定ガイドラインの改定 / AMG再改定の検討・AMGへ反映 (中長期的検討結果の反映)	次頁「3. 対策の具体化に向けた検討」の以下の項目の検討結果をAMGへ反映 (3) 水素滞留・拡散挙動の評価手法構築・評価 (4) 下層階の防護対策検討 (5) 設備改造を含めた水素防護対策検討

短期的な検討
 中長期的な検討
 今回の変更箇所

アクションプラン（改訂版）（2/2）

実施項目	実施主体	2022年度 上期	2022年度 下期	2023年度 上期	2023年度 下期	2024年度	2025年度 以降
3. 対策の具体化に向けた検討 (1) 原子炉建屋下層階で水素が滞留する可能性の調査・評価 (P15~参照)	ATENA-WG	プラントワークダウン手順書検討	▼手順書（初版）作成	プラントワークダウン実施 (下層階で水素の滞留が予想される箇所の特定)			
(2) 実機による風速等の測定 (P21~参照)	ATENA-WG		HVAC、SGTS運転時の建屋内風速測定	▼風量測定結果		建屋内風速測定試験の実施	▼試験結果
(3) 水素滞留・拡散挙動の評価手法構築・評価 (P29参照)	ATENA-WG		試験の評価方法の立案検討	試験の成立性・要否判断	評価手法構築 (電中研研究と連携)		構築した評価手法による評価 (各電力)
(4) 下層階の防護対策検討 (P30参照)	各事業者			(必要に応じて先行的な対策検討)			適宜評価結果を反映 例) 水素濃度計の追設検討 PARの追設検討 扉改造の検討
(5) 設備改造を含めた水素防護対策検討 (P30参照)	ATENA-WG				例) 着火リスクの低減検討 (HVAC、SGTS) HVACの電源等の強化検討 HVACのDBA/SAを通じた運転継続可否検討		

○目的

- ✓ 水素防護対策の特徴を整理し、各BWR事業者のAMG等を改定するための基本的考え方等を取りまとめた「BWRの原子炉建屋の水素防護対策に係るAMG改定等ガイドライン」（以下、「**AMG改定ガイドライン**」という。）を作成する。
- ✓ AMG改定ガイドライン（初版）を考慮し、各BWR事業者は**各プラントのAMGを改定**※する。 ※再稼働前までに実施

本ガイドラインの前提として、短期間で実施可能な対策とするため、**既存設備を原設計のまま活用することとした。**

○成果

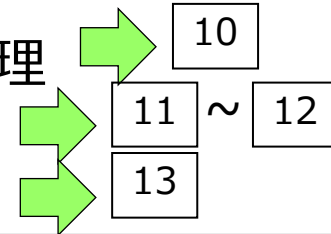
- ✓ 各BWR事業者が、必要に応じHVACを活用できるようAMG等を改定するための**AMG改定ガイドライン（初版）を作成した。**
- ✓ また、**AMG改定のひな形を作成した。**

AMG改定ガイドラインの構成を以下に示す。

ここではAMG改定ガイドラインの「2. 下層階の滞留に対するHVACの評価」、「3. 水素防護対策のAMG等への反映事項について」の概要について説明する。

<AMG改定ガイドラインの構成>

1. 序文
2. 下層階の水素滞留対策としてのHVACの評価
 2. 1 HVACを含めた水素防護対策の特徴の整理
 2. 2 優先順位の考え方と各対策の導入条件
3. 水素防護対策のAMG等への反映事項について



【水素防護対策の例】

- 原子炉建屋に漏えいした水素を排出する対策
 - 強制排出：非常用ガス処理系（SGTS）、常用換気空調系（HVAC）
 - 自然排出：ブローアウトパネル（BOP）、トップベント
- 原子炉建屋に漏えいした水素を処理する対策：触媒式水素再結合装置（PAR）
- 格納容器から原子炉建屋への水素の漏えいを抑制する対策
 - ：格納容器圧力逃がし装置（FCVS）

※全ての対策が、全BWRプラントにて採用されているものではなく、プラント設計や設備の相違により採用されている対策が異なる場合がある。

3. AMG改定ガイドラインの策定

(1) HVACを含めた水素防護対策の特徴の整理

		水素排出, 処理能力	放射性物質の 放出低減	電源の要否	インターロック の影響	下層階での水素滞 留への影響	その他の留意点
原子炉建屋へ漏えいした水素の排出・処理策							
強制 排出	SGTS	中	・排気筒放出 ・フィルタ有	要 (非常用母線/ SA電源で動作可)	事故発生時※に 自動起動	・下層階に吸入口あり (プラント依存)	・着火リスクあり
	HVAC	大	・排気筒放出 ・フィルタ無	要 (常用母線)	事故発生時※に 隔離	・下層階に給排気口あり	・着火リスクあり ・耐震Cクラス
自然 排出	BOP	大	・建屋高所部 ・フィルタ無	要 (遠隔操作の場合) 不要 (現場操作の場合)	—	—	—
	トップバント	小	・建屋高所部 ・フィルタ無	要 (遠隔操作の場合) 不要 (現場操作の場合)	—	—	—
触媒式水素 再結合器 (PAR)		中	(放出せず)	不要	—	—	—
格納容器から原子炉建屋への水素漏えい防止・抑制策							
格納容器圧力 逃がし装置 (FCVS)		— (格納容器から環境へ 直接水素を排出)	・建屋高所部 ・フィルタ有	要 (遠隔操作の場合) 不要 (現場操作の場合)	—	—	—

※ : LOCA等の事故発生時に、原子炉水位低 (L-3) , ドライウェル圧力高, オペフロ放射能高等の信号で原子炉建屋の換気系がHVACからSGTSへ自動的に切り替わる。

(2) 優先順位の考え方と各対策の導入条件

【優先順位および各対策の導入条件】

HVACは原子炉建屋に漏えいした水素の強制排出対策であるが、電源確保、隔離インターロックの解除等が必要であり、また、使用するためにはHVACは常用系であり耐震クラスが低くSA設備に比ベシビアアクシデント時の健全性が必ずしも担保されないこと等を踏まえると、事故シーケンスが特定できずその使用時期は明確には定められないことから、HVACは明示的には優先順位を定めないこととする。

HVACの使用に当たっては下記の様々な使用上の留意事項があるものの、例えばSGTS運転中に原子炉建屋下層階の建屋水素濃度が上昇している場合はHVACを活用することが効果的である可能性があること等から、「発電所対策本部の本部長が、必要に応じて、その使用を総合的（臨機応変）に判断する」こととする。

【事故時におけるHVAC使用上の留意事項】

- HVACの電源は常用電源のため、外部電源が利用可能か又は非常用電源から常用母線へ給電する必要がある。このため、外部電源喪失時には電源確保（現場操作）が必要である。また、非常用電源から常用母線へ給電を行った際に、給電する常用母線側（特に大規模地震後の場合、必ずしも健全性が担保されない）に短絡、地絡が生じると常用母線側だけではなく非常用母線側の電源が喪失するおそれがあることを考慮すること。
- HVACの電源確保の際は、突入電流も考慮してHVAC運転に必要な電源容量も含めた電源が確保されていること。
- 炉心損傷防止、格納容器破損防止に係るそれぞれの対応操作と作業リソースが競合する可能性があることを考慮すること。
- 上記の電源確保、隔離解除作業にあたっては、それぞれの作業環境（線量、水素濃度等）を考慮すること。また、原子炉建屋から外部への放射性物質の放出の影響について考慮すること。
- HVACの水素排出能力はSGTSよりも高いが、HVAC系統内の水素濃度が可燃限界の4vol%以上となるおそれがある場合は、SGTSと同様、着火源となるリスクがあることから、HVACを使用しない又は停止することを考慮すること。

(2) 優先順位の考え方と各対策の導入条件 (続き)

表2 各水素防護対策の導入条件

機能, 設備		導入条件等	備考
原子炉建屋へ漏えいした水素を排出する対策			
強制排出	SGTS	炉心損傷を判断した場合※	原子炉建屋水素濃度が2vol%程度となった場合は, 着火源となるリスクがあるため, SGTSを停止する。
	HVAC	-	原子炉建屋からの水素排出対策として期待する場合は, 次の事項を考慮する必要がある。 <ul style="list-style-type: none"> • HVACの電源は常用電源のため, 外部電源が利用可能か, 又は非常用等電源を常用母線へ給電するための手順 (遮断器のインターロック解除手順, HVACへの給電経路上に故障がないことを確認する手順を含む) を予め整備しておく必要がある。 • 事故発生時に自動隔離されるため, 原子炉建屋からの水素排出にHVACを使用する場合は隔離インターロックの解除の手順を予め整備しておく必要がある。
自然排出	BOP	FCVSによる格納容器ベント実施後も原子炉建屋の水素濃度が上昇継続した場合, 又は原子炉建屋内に滞留した水素を排出する必要がある場合。	
	トップベント		
原子炉建屋内に漏えいした水素を処理する対策			
触媒式水素再結合器 (PAR)		原子炉建屋の水素濃度が1.5vol%程度となれば, 自発的に作動する。	PARの作動状況は, PAR出入口温度を監視することで確認する。
格納容器から原子炉建屋への水素漏えい防止・抑制策			
格納容器圧力逃がし装置 (FCVS)		原子炉建屋水素濃度が2vol%程度となった場合。	

※ : LOCA等の事故発生時に, 原子炉水位低 (L-3), ドライウェル圧力高, オペロ放射能高等の信号でSGTSは自動起動し, 原子炉建屋の換気系がHVACからSGTSに切り替わる。交流電源の喪失等によりSGTSが起動していない場合は, 電源復旧後速やかにSGTSを起動する。

(3) 原子炉建屋の水素防護対策のAMGへの反映について

本ガイドラインに基づき、BWRプラントを対象に、**下層階の水素滞留が懸念される場合に備えた対応として、必要な時にHVACを活用できるようにするため、AMGの改定、手順の整備等を実施**する。
「AMGの改定、手順の整備等」の具体的な内容は以下の通り。

a. AMGの改定

HVACを現設計のまま活用するためには様々な使用上の留意事項があることから、AMGの対応フロー内には明示的に優先順位を記載せず、必要に応じてHVACが活用できるようにするため、「HVAC活用にあたっては、発電所対策本部の本部長※が、例えばSGTS運転中にもかかわらず原子炉建屋下層階の水素濃度が上昇している時等に、下記c.の留意事項を勘案の上、必要に応じて、HVACを使用するか否かを総合的（臨機応変）に判断する」旨をAMGのフローの欄外等に記載する。

※原子力防災管理者のこと。事業者毎に名称は異なる場合がある。

b. 整備すべき手順書

HVACを現設計のまま必要に応じて活用するにあたって、以下の2つの手順書を作成すること。

- ✓ HVACの電源を確保するため、外部電源が利用できない場合の非常用等電源を常用母線へ給電するための手順（遮断器のインターロック解除手順を含む）
- ✓ 事故発生時に自動隔離されるHVACについて原子炉建屋から水素排出をするためにHVACを使用する場合の隔離インターロックの解除の手順

c. HVAC活用にあたって注意すべき事項の記載（手順書等への記載）

下記の5項目について、注意すべき項目として記載する。

- 必要な機器、電源等の健全性
- 必要な電源容量
- 作業に係るリソース
- 現場の作業環境、外部環境への影響
- 着火リスク

なお、【AMGの改定】、【整備すべき手順書】、【HVAC活用にあたって注意すべき事項の記載（手順書等への記載）】全てを反映するに当たり、AMG、手順書等への具体的な記載内容は各事業者の判断に委ねるものとする。

○実績及び今後の対応

- ATENAは、6/13にAMG改定ガイドライン（初版）を 発刊し、ATENAホームページに公開した。
- ATENAは、BWR事業者に対して、AMG改定ガイドラインに基づき、以下の安全対策を再稼働前までに実施することを求めるとともに、安全対策の実施計画の提出を求めた。
 - ✓ 下層階の水素滞留が懸念される場合に備えた短期的対応として、必要な時にHVACを活用できるようにするため、AMGの改定、手順の整備等を実施すること。
- 今後、ATENAは、BWR事業者の安全対策の実施計画取りまとめ後、ATENAホームページに公開するとともに、NRAに連絡する。
- また、安全対策の実行段階においては、ATENA-WGの枠組みを活用し、BWR事業者等間で適宜、進捗状況の共有、実行時における良好事例・失敗事例、懸念事項等の共有を行い、各社の改善等につなげていく。ATENAは、その状況について、当面、最低限半期に1回、NRAに連絡する。
- 各BWR事業者は、ATENAに、各社の実施計画時期までに、完了報告を行う。また、完了できない場合は、その理由を付して報告する。ATENAは、その結果をNRAに連絡する。

(1) 原子炉建屋下層階で水素が滞留する可能性の調査・評価 (プラントウォークダウン)

○目的

各プラントに存在する「水素が滞留する可能性がある箇所」を形状等から特定し、水素防護対策検討の材料とする。

○背景

- ・中長期的対応として予定している「下層階の水素滞留の可能性」がある箇所に対して対策要否を判断するため、水素滞留・拡散挙動の評価手法構築・評価を行う際に、インプットデータを与える観点からプラントウォークダウンを実施する。

(1) 原子炉建屋下層階で水素が滞留する可能性の調査・評価（プラントウォークダウン）（続き）

○取組計画・取組結果

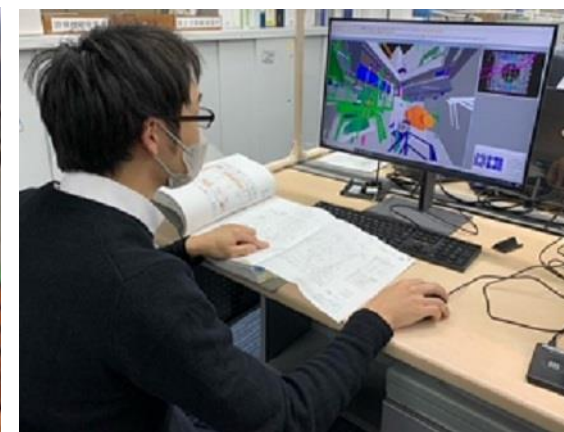
➤ 標準手順書の作成【既報】

「水素が滞留する**可能性**がある箇所」を形状等から特定する**標準手順書**を作成した。

➤ ウォークダウン実施【既報】

✓ 自プラントの状況確認のため、標準手順書に則り**各社それぞれ代表 1 プラント**で実施した。

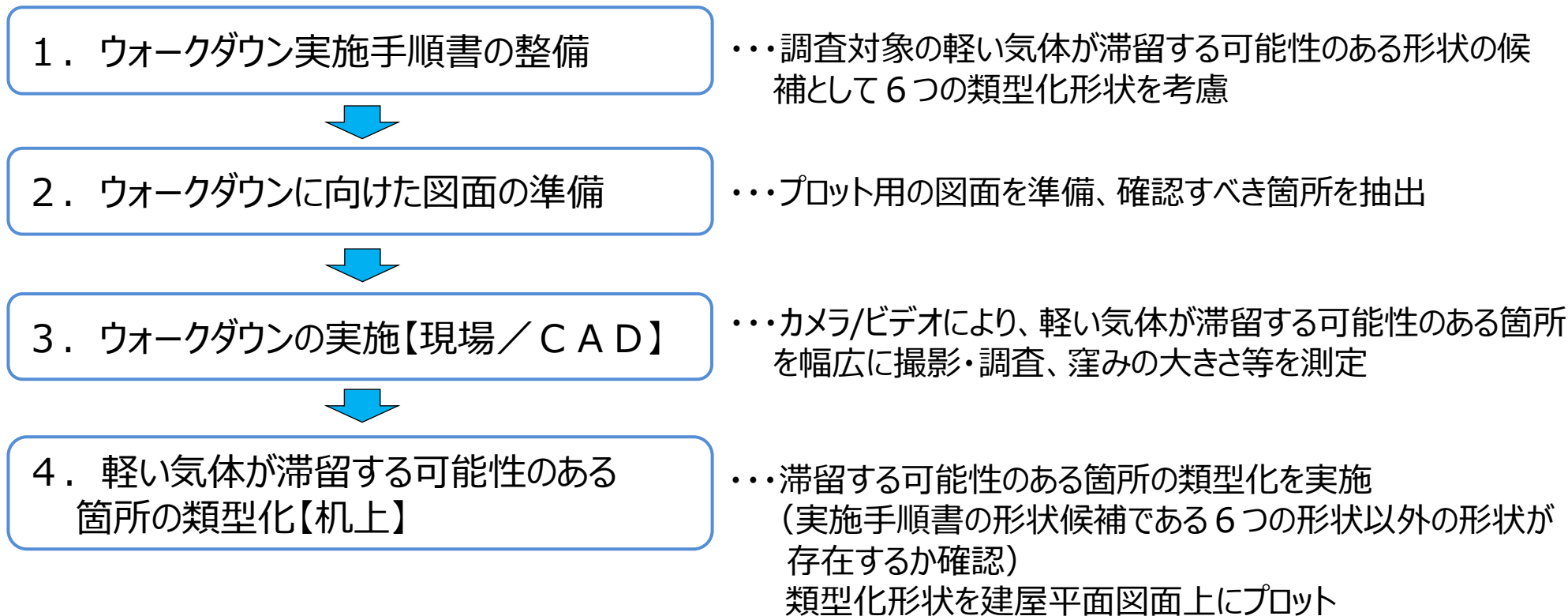
- 対象は、原子炉建屋最上階のオペレーションフロアを除く原子炉建屋全域とした。
- 現場確認に先立ち、図面等から確認すべき箇所を抽出。
- 現場確認においては、事故時における実際の水素流入経路等は考慮せず、**仮に水素が流入したと仮定した場合に滞留する可能性がある形状（軽い気体が存在すれば滞留すると思われる形状）**があるかを調査した。



現場確認等における作業風景

(1) 原子炉建屋下層階で水素が滞留する可能性の調査・評価（プラントウォークダウン）（続き）

プラントウォークダウン実施フロー



なお、上記とは別に、建屋流動解析への入力データに活用するため、水素漏えい箇所から近傍にある滞留する可能性のある箇所までの距離測定を実施した。

4. 対策の具体化に向けた検討結果

(1) 原子炉建屋下層階で水素が滞留する可能性の調査・評価（プラントウォークダウン）（続き）

- ✓ 調査した結果、滞留する可能性がある形状が**各プラント（表1）に存在する**ことが確認できた。またその形状は6つの類型化形状（表2）に分類される結果となった。

表1 プラントウォークダウンを実施したプラント

事業者	プラント
東北電力	女川2号炉
東京電力HD	柏崎刈羽7号炉
中部電力	浜岡4号炉
北陸電力	志賀2号炉
中国電力	島根2号炉
日本原子力発電	東海第二
電源開発	大間

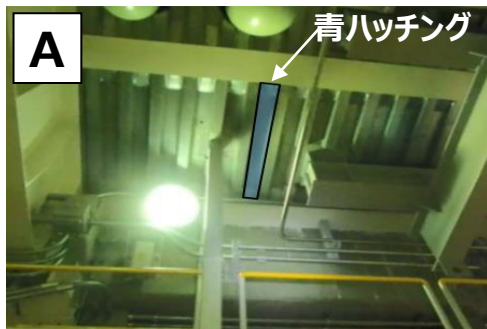
表2 滞留する可能性のある形状の類型化

類型化	種類・形状	類型化	種類・形状
A	デッキプレート	B	気体の移行を妨害する天井の出張り
C	天井の躯体の窪み	D	空調ダクトの貫通孔が天井付近に設置されていない小部屋
E	壁・天井等で区切られて生じた横穴	F	壁・天井により区切られた区画

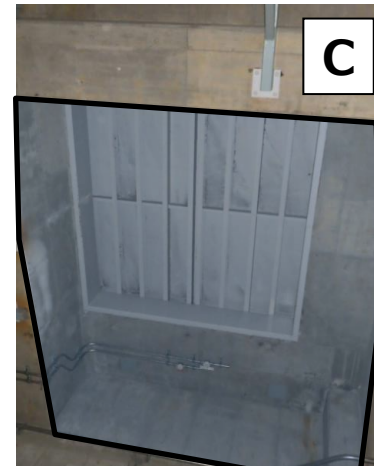
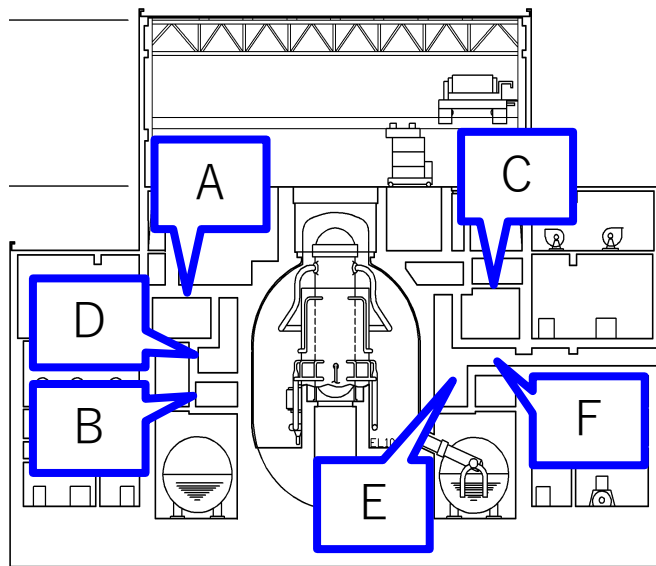
4. 対策の具体化に向けた検討結果

(1) 原子炉建屋下層階で水素が滞留する可能性の調査・評価（プラントウォークダウン）（続き）

類型化した形状のイメージは以下のとおり。なお、原子炉建屋の全域天井部に存在するデッキプレートは、その形状（窪みの深さが浅い：青ハッチング部）を考慮し、滞留箇所となることは考えにくいいため、形状寸法調査や建屋平面図面へのプロット対象から除外した。



デッキプレート（天井を見上げた図）



天井部の躯体の窪み（周回通路から見上げた図）



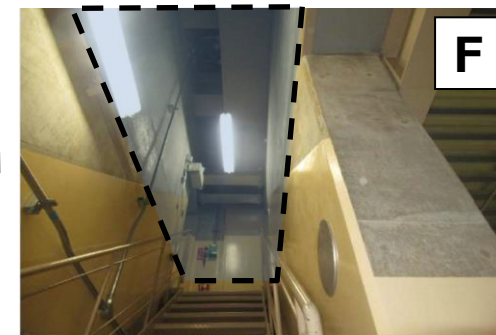
空調ダクトの貫通孔が天井付近に設置されていない小部屋（エアロック室）



気体の移行を妨害する天井の出張り（小部屋（CRD補修室））



壁・天井等で区切られて生じた横穴（横穴部）



壁・天井により区切られた区画（階段室）

青ハッチング：仮に水素が流入した場合に滞留の可能性がある領域

(1) 原子炉建屋下層階で水素が滞留する可能性の調査・評価（プラントウォークダウン）（続き）

○考察

周回通路や小部屋、階段室など原子炉建屋の全てのエリアを対象として天井付近の窪みを調査したものであるが、どのプラントの現場においても軽い気体が滞留する可能性があるような形状は一定程度存在する。また、今回のプラントウォークダウンでは6分類に類型化できることが分かった。

○成果の活用と今後の現場確認について

分類できた形状については、実機での風量測定作業における測定点の選定に利用するとともに、窪みの大きさや水素漏えい箇所からの距離を建屋流動解析へのインプットデータなどに活用していく。

なお、代表プラント以外のプラントについては、建屋流動解析評価をはじめとする建屋水素防護対策検討といった後段検討の中で、必要に応じ現場確認を実施する。

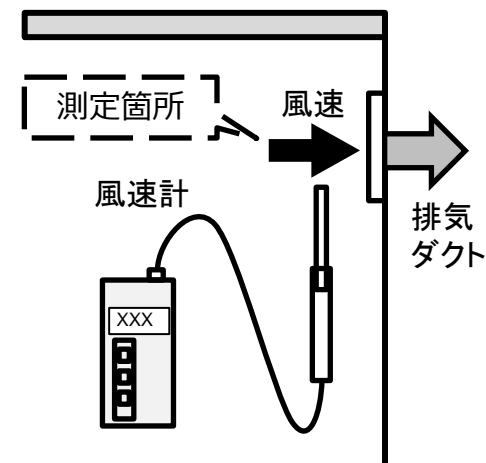
(2) 実機による風速等の測定

○目的

- ✓ 原子炉建屋内における水素挙動の評価の検討材料とするため、実機において、格納容器からの水素漏えいポテンシャルの高い部屋（機器ハッチ等がある部屋）及び周辺の小部屋等の中から、プラントウォークダウンにて確認した知見を踏まえて、測定代表箇所を選定し、HVAC、SGTS 運転中の実風速測定を実施する。
- ✓ また、風速等の測定結果を次行程の「水素滞留・拡散挙動の評価手法構築・評価」のインプットデータとするために必要な評価を実施する。

○実施計画

- **測定代表箇所の検討**
プラントウォークダウンを踏まえて適切な測定場所を検討
- **測定方法の検討（右図参照）**
風速計による測定をメインとするが実際の風速が小さく測定できなかった場合の実効性のある測定方法を検討
- **代表プラントによる実風速測定**
- **測定結果の集約及び評価**



風量測定イメージ

4. 対策の具体化に向けた検討結果

(2) 実機による風速等の測定 (続き)

a. 測定状況の概要

実機による風速等測定について以下の通りに実施した。

- 測定場所：北陸電力 志賀原子力発電所 2号機
- 測定箇所：原子炉建屋内 13部屋
(水素漏えいポテンシャルの高い部屋5部屋を含む)
- 測定条件：①HVAC運転時、②HVAC及びSGTS運転時
- 測定方法：風速計による「風速(風量)測定」
ミスト発生装置による「気流確認」
- 実施時期：2023年 2月末～3月上旬 (実施期間5日間)



風量測定実施状況



気流確認実施状況

(2) 実機による風速等の測定 (続き)

b. 測定方法の概要

(a) 風速 (風量) 測定

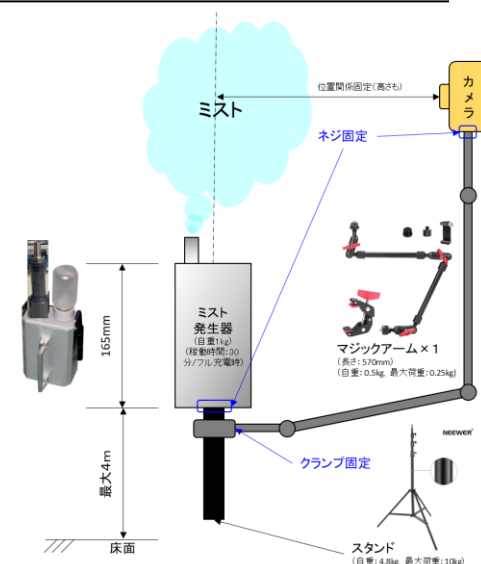
- 一般的な風速計を用いて、ダクト及び小部屋天井付近等の測定を実施。
- 風速測定の結果とダクト開口部の面積によって、各ダクトの風量が算出が可能。



<風速計仕様>
・計測範囲
0.01m/s~
30.0m/s

(b) 気流確認

- 気流確認のため右記のような専用のミスト発生装置を作成。
- 純水をミスト化し気中に放出するミスト発生器のほか、記録用のカメラや採寸用の角尺を固定。
- 装置を三脚スタンドに固定することで測定時の振動による誤差を抑制するとともに、地上から最大4m程度の高さでも気流確認が可能。



4. 対策の具体化に向けた検討結果

(2) 実機による風速等の測定 (続き)

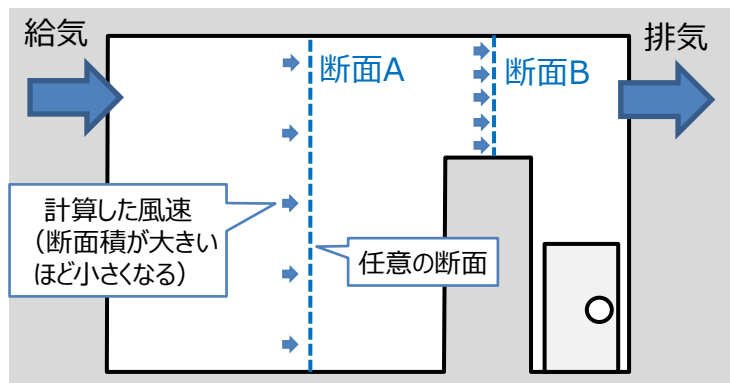
c. 測定目的及び結果

(a) 風速測定の有効性確認

部屋の風量を測定点の断面積で除することで簡易的に測定点の風速を計算し、測定値と比較することで、測定値のおおよその妥当性を確認する。

<確認結果>

- 比較的断面積の狭い箇所では風速計による風速の測定が可能であった。
- これらの測定点においては、計算により求めた風速と測定値の間に大きな差異はなく、風速計による測定の有効性を確認できた。



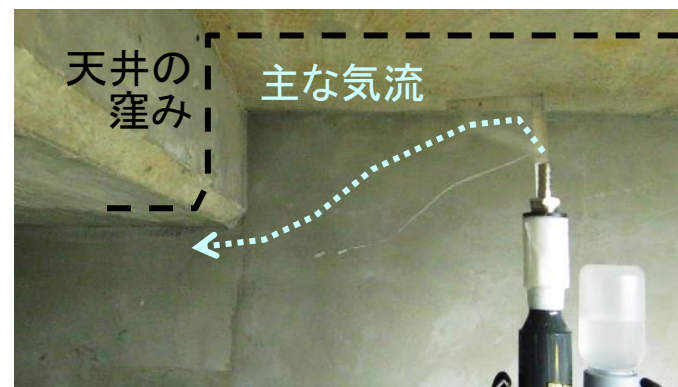
風速の計算(イメージ)

(b) 天井付近の気流確認

滞留の恐れがある天井の窪みや躯体の出っ張り等において、実機において気体の滞留が発生していないか確認する。

<確認結果>

- 浅い窪み (20cm程度) においては、窪み内に滞留せずに流出する様子が確認できた。
- 深い窪み (100cm程度) においては、窪みから流出する様子を明確には確認できなかったものの、ゆっくりとした気流が存在することを確認できた。



気流確認結果(例)

(2) 実機による風速等の測定 (続き)

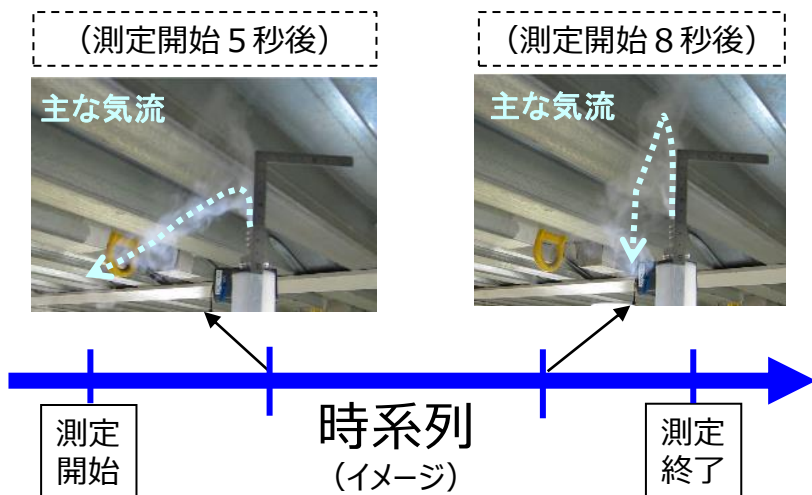
c. 測定目的及び結果

(c) 風速の弱い測定点での気流確認

風が弱い測定点では、風速計の性能により明確な測定値が得られない場合がある。そのような測定点において、ミストにより気流が存在するか確認する。

<確認結果>

- 風速計による測定結果が0.1m/s未満の風の弱い測定点においてミストによる気流確認を実施したところ、風速や風の方向が時間により不規則に変化する気流の存在を確認できた。

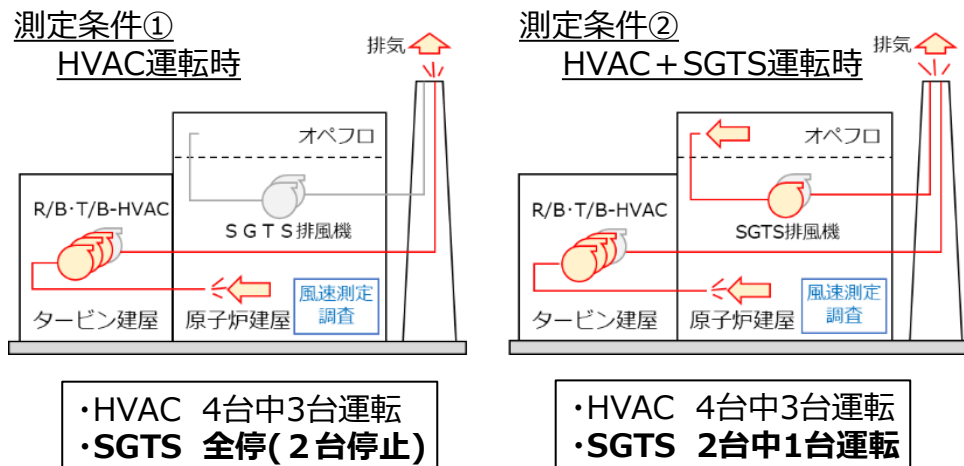


(d) SGTS運転による影響確認 (風速測定及び気流確認)

SGTS運転時における、オペフロ階層以外からの排気状況への影響を確認するため、SGTS運転前後で同じ測定点の風速等の測定結果を比較する。

<確認結果>

- HVAC運転時と比較して、風速等の測定結果に若干の変化が確認されたが、その変化量については、通常、風速が脈動する範囲程度であった。



(2) 実機による風速等の測定（続き）

d. 考察

- ダクトの給排気風量から測定点のおよその風速を簡易的に算出した結果と測定値を比較したところ、大きな差異はなく、風速計による測定の有効性を確認できた。
- 風の弱い（風速計による測定結果が0.1m/s未満の場所）測定点でも、ミストによる気流確認によって、発生したミストは滞留し続けることはなく、不規則に動いていることが確認できた。
- 浅い窪み（20cm程度）では、ミストは滞留せずに流出する様子が確認できた。深い窪み（100cm程度）の最上部においても、ミストの可視範囲においては、ゆっくりとした気流が存在することを確認できた。

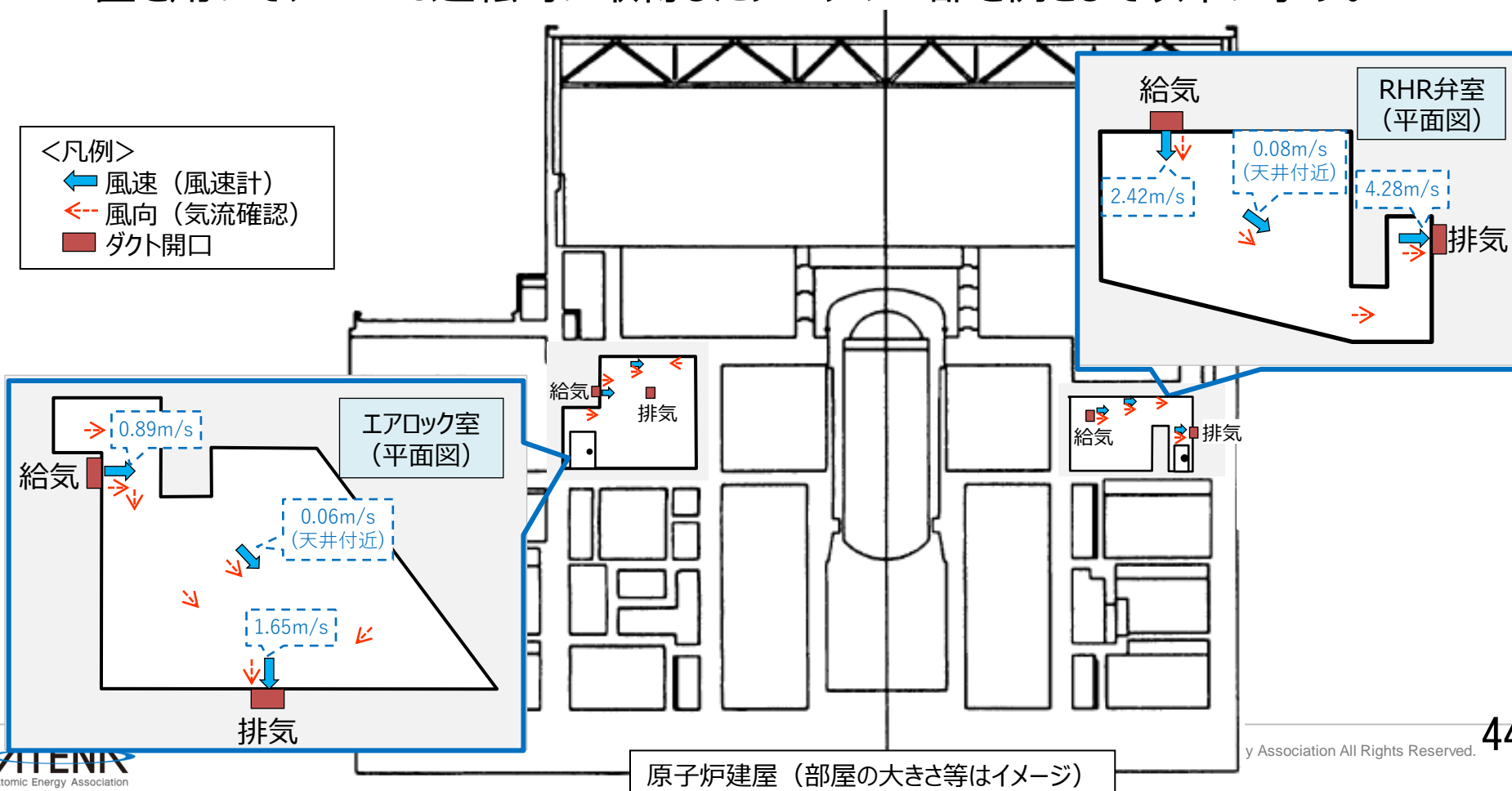
e. 成果の活用について

- 今回、平常時（HVAC運転時）の実機による風速測定を行ったが、シビアアクシデント発生時とは環境が異なることから、今回の測定結果をもとにシビアアクシデント条件下の水素の流れをどのように推定していくのか引き続き検討を行い、最終的な水素防護対策の検討に活用していく。

(2) 実機による風速等の測定 (続き)

f. 測定データ (例)

- ・建屋内の測定点において、風の流れを把握するために、風速計及びミスト発生装置を用いて、HVAC運転時に取得したデータの一部を例として以下に示す。



(1) 実機による風速等の測定（建屋開放実験（BOP）等の検討・実施）

○原子炉建屋開放実験の実施要否判断の検討状況について

- ✓ BOP開放による原子炉建屋開放実験は、有意なデータを得られる見通しが不透明であることから、HVAC、SGTS運転中の風速の結果を本実施の要否の判断材料の一つとすることとしていた。
- ✓ また、有意義なデータ採取を行うべく、SA事故時の建屋環境の再現要否や、実験と解析の組み合わせによる検証、縮尺模型を用いた実験など、試験方法やSA環境との違いをどのように取扱うのかについて検討している所。
- ✓ 今回得られた実機による風速等の結果も踏まえ、試験の評価法案を検討し2023年度下期に試験成立性確認と要否判断を行う。
- ✓ なお、建屋開放実験には、以下の懸念があることから、今後更に検討を進めていく。
 - ・外気の直接取入れによる建屋内機器への影響（粉塵、塩分、雨水の混入、鳥類・昆虫の侵入等）が懸念され、建設段階及び運転段階のプラントでの実施は難しいことから、今後、廃止措置段階のプラントを主な候補として、必要な調整を行った上で、実施プラントを選定する。
 - ・原子炉建屋が管理区域・非管理区域の境界であるため、BOP開放によって管理区域が非管理区域に開放されることについて法令上の整理が必要である。今後、試験方法を決めた上で、必要に応じてNRAと相談、調整していく。

(2) 水素滞留・拡散挙動の評価手法構築・評価

○目的

原子炉建屋内の水素拡散の詳細評価手法を構築し、水素滞留の可能性のある条件を策定する。

○今後の取組計画・現在の取組状況

➤ 原子炉建屋内の水素拡散の詳細評価手法構築

- ✓ プラントウォークダウン等から得られたデータを元に 水素が滞留する可能性のある箇所の類型化
- ✓ 類型化した箇所をモデル化し、解析コードにて滞留箇所付近流速、窪みのアスペクト比等のパラメータを変化させ、水素濃度を評価

➤ 水素滞留の可能性がある条件の策定

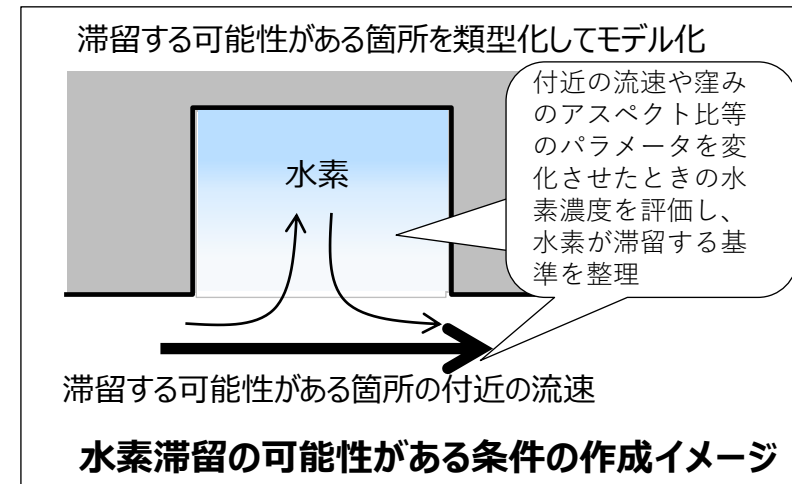
上記の評価結果、実機風速測定データ等から水素滞留の可能性のある条件を作成

(例:滞留箇所付近の流速、窪みのアスペクト比、一定条件を満たす場合には水素滞留の可能性あり等)

➤ 各プラントの評価

原子炉建屋内の全体解析を実施し、原子炉建屋各部の流速や水素濃度等を評価。

(各社プラントの対策（PAR、BOP、トップベント、SGTS等）を考慮）



（3）下層階の防護対策検討

○目的

下層階の水素滞留の可能性のある箇所に対する追加的な対策を検討する。
（必要に応じて先行的な対策も検討）

○今後の取組計画・現在の取組状況

現時点では「水素濃度計の追設」、「PARの追設」、「扉改造」を検討中

（4）設備改造を含めた水素防護対策検討

○目的

設備改造を視野に入れた水素防護対策を検討する。

○今後の取組計画・現在の取組状況

現時点での検討案は以下の通り。

- （検討案）・着火リスクの低減検討（HVAC、SGTS）
- ・HVACの電源等の強化検討
- ・HVACのDBA/SAを通しての運転継続可否検討

（5）中長期的な水素防護対策の検討結果を踏まえたAMG改定ガイドの改定／AMG再改定の検討・AMGへ反映

○目的

「3. 2. 対策の具体化に向けた検討」（（3）水素滞留・拡散挙動の評価手法構築・評価、（4）下層階の防護対策検討、（5）設備改造を含めた水素防護対策検討）にて実施する中長期的な課題の検討結果をAMGへ反映する。

○今後の取組計画・現在の取組状況

中長期的課題の検討結果を踏まえ実施。

- ✓ アクションプランに基づき、短期的対応であるAMG改定ガイドライン（初版）の作成、プラントウォークダウン、建屋内風量測定の検討結果をとりまとめた。
- ✓ 今後は、AMG改定ガイドライン（初版）に基づき、各事業者にて、再稼働前までに、AMGの改定等を順次進める予定である。
- ✓ また、今回、短期的対応で実施したプラントウォークダウンや建屋内風量測定の結果を踏まえ、中長期的対応としている建屋内風速測定の要否検討、水素滞留・拡散挙動の評価、設備改造を含めた水素防護対策（着火リスクの低減、HVACの電源強化等）の検討を実施する。その結果を、下層階の防護対策検討に反映していく。
- ✓ 上記の中長期的対応としている水素防護対策の各検討結果は、AMG改定ガイドライン（改訂版）としてまとめ、適宜、各事業者のAMG等へ反映する。
- ✓ ATENAは、今後も新たな知見等を反映してアクションプランを適宜見直していく。また、アクションプランに示した各項目の実施状況について確認し、適宜ATENAホームページにて公表するとともにNRAに説明していく。

BWR の原子炉建屋の水素防護対策に係る AMG 改定等ガイドライン

2023 年 6 月

原子力エネルギー協議会

【はじめに】

原子力規制委員会は2021年3月に「東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会」（以下、「1F事故検討会」という。）の調査結果を「東京電力福島第一原子力発電所事故の調査・分析に係る中間とりまとめ」（以下、「中間とりまとめ」という。）として公表しており、これを受け、ATENAは「東京電力福島第一原子力発電所事故の調査・分析から得られた知見への対応」をテーマとして選定（2021年12月）し、検討を開始した。ATENAでは中間とりまとめから得られた技術的課題とその分析、評価を実施し、水素滞留、予期せぬインターロックの動作、逃がし弁機能の不安定動作、可燃性ガスの影響の4つの技術的課題を抽出している。

特に、水素滞留については、1F事故検討会において「下層階での水素滞留の可能性」が知見として得られたことから、新規制基準適合性審査対応等の中でこれまで数多くの原子炉建屋の水素爆発防護対策（以下、「水素防護対策」という。）を実施しているものの、更に下層階からの水素排出手段の検討を進めることとし、水素の拡散挙動に関して解析を実施することに加え、知見拡充を待たずとも検討を進める対策として建屋排気（常用換気空調系）の導入（建屋からの水素排気）等を検討した（2022年2月）。

水素滞留に関する検討にあたっては、BWR事業者共通課題としてATENAにて取り組み、その検討結果については各事業者で反映する形を基本とし、「沸騰水型原子炉における原子炉建屋の水素防護対策に係るアクションプラン」を策定した（2022年11月）。アクションプランでは、中長期的な取組みである「水素滞留・拡散挙動の評価手法構築・評価」、「下層階の防護対策検討」、「設備改造を含めた水素防護対策検討」に加え、速やかに実施できる短期的な取組みとして「既存設備を原設計のまま活用した水素防護対策の検討」、「原子炉建屋下層階で水素が滞留する可能性の調査・評価」、「実機による風速等の測定」を進めることとした。

今回、短期的な取組みである「既存設備を原設計のまま活用した水素防護対策の検討」においては、既存の対策では下層階の水素滞留が懸念される場合に備えて必要に応じて常用換気空調系（以下、「HVAC」という。）を活用できる手順を準備することとし、各事業者のアクシデントマネジメントガイド（以下、「AMG」という。）改定に資する「BWRの原子炉建屋の水素防護対策に係るAMG改定等ガイドライン」を作成した。

本ガイドラインの情報等の取扱いについては、以下のとおりとする。

（免責）

ATENA、ATENA従業員、会員、支援組織等本ガイドラインの作成に関わる関係者（以下、「ATENA関係者」という。）は、本ガイドラインの内容について、明示黙示を問わず、情報の完全性及び第三者の知的財産権の非侵害を含め、一切保証しない。ATENA関係者は、本ガイドラインの使用により本技術要件書使用者その他の第三者に生じた一切の損失、損害及び費用についてその責任を負わない。本ガイドラインの使用は、自己の責任において本ガイ

ドラインを使用するものとする。

(権利帰属)

本ガイドラインの著作権その他の知的財産権(以下、「本件知的財産権」という。)は、ATENAに帰属する。本件知的財産権は、本ガイドラインの使用者に移転せず、また、ATENAの承諾がない限り、本ガイドラインの使用者には本件知的財産権に関する何らの権利も付与されない。

(本頁以下余白)

改定履歴

改定年月	版	改定内容	備考
2023年6月13日	Rev.0	新規制定	

目次

1. 序文	1
1.1 目的	1
1.2 概要	1
1.3 適用範囲	1
1.4 用語の定義	1
2. 下層階の水素滞留対策としての HVAC の評価	3
2.1 HVAC を含めた水素防護対策の特徴の整理	3
2.1.1 HVAC の特徴	3
2.1.2 HVAC を含めた各水素防護対策の特徴の整理（表 1 参照）	3
2.2 優先順位の考え方と各水素防護対策の導入条件	7
2.2.1 優先順位の考え方	7
2.2.2 各水素防護対策の導入条件（表 2 参照）	7
3. 水素防護対策の AMG 等への反映事項について	10
参考資料 1 BWR プラントにおける水素防護対策の整理	12

1. 序文

1.1 目的

本ガイドラインの目的は、下層階の水素滞留が懸念される場合に備えて、短期的な取組みとして実施する対策として AMG を改定して必要に応じて HVAC を活用する手順を準備することを支援するため、AMG 改定の考え方を示すことである。

1.2 概要

1F 事故検討会において「下層階での水素滞留の可能性」が知見として得られたことから、その対策について議論すべく検討を開始している。特に HVAC は排気能力が高く、下層階の滞留対策としては他の手段より効果が高い可能性があることから、HVAC の活用可否を評価するために、各種水素対策の特徴を整理した上で比較評価を実施し、下層階の水素滞留が懸念される場合に備えて必要に応じて HVAC を活用できるよう既存の AMG に反映させることとした。

本ガイドラインでは、まず 2 章「下層階の水素滞留対策としての HVAC の評価」において、BWR プラントを対象とした水素防護対策に範囲を絞り、HVAC を評価するため、HVAC を含めた水素防護対策毎の効果の簡易評価により水素排出能力や放射性物質の放出量低減、機能させるための条件等、特徴を整理し、優先順位付け等を行っている。また、HVAC の使用に当たっての条件、注意事項等を纏めている。3 章「水素防護対策の AMG 等への反映について」では、AMG 改定の考え方や注意事項等を纏めている。

1.3 適用範囲

BWR プラントの水素防護対策の反映に適用する。

1.4 用語の定義

本ガイドラインにおける用語は次の定義による。

アクシデントマネジメントガイド (AMG)	: 発電所対策本部 ^{※1} が使用する、シビアアクシデント事象に拡大した場合にも影響を緩和するためのガイドのこと。
オペレーティングフロア	: 原子炉建屋の最上階で、燃料の交換作業等が行われる場所。
下層階	: オペレーティングフロア(以下、「オペフロ」という。)より下の階のこと。
ブローアウトパネル (BOP ; blow-out panel)	: 原子炉建屋やタービン建屋の壁に設置された圧力開放機構であり、事故時に圧力が上昇した際に開放設

※1 事業者毎に名称は異なる場合がある。

- 定圧力でパネルが開放し圧力上昇を抑制する機能を有する設備をいう。
- トップベント : 原子炉建屋内の水素爆発防止対策として、オペフロ上部に滞留した水素を放出するために原子炉建屋天井部等に設置されたベント装置をいう。
- 常用換気空調系 (HVAC ; Heating, Ventilation, and Air Conditioning) : 通常時の原子炉建屋の換気を行うための設備をいう。
- 非常用ガス処理系 (SGTS ; Stand-by Gas Treatment System) : 原子炉冷却材喪失事故 (以下、「LOCA」という。) 等の事故発生時において、原子炉建屋内を負圧に保ち、フィルタを通して放射性物質を低減して高所放出することにより、原子炉建屋から直接外部へ放射性物質が放出されることを防止する設計基準事故対処設備をいう。
また、重大事故時等では、原子炉格納容器 (以下、「格納容器」という。) から原子炉建屋内に漏えいする水素等を含む気体を吸引し、フィルタを通して放射性物質を低減して高所放出することにより、原子炉建屋から直接外部へ放射性物質が放出されることの防止と水素爆発による原子炉建屋の損傷の防止を目的とした重大事故等対処設備である。
- 触媒式水素再結合装置 (PAR ; Passive Autocatalytic Recombiner) : 触媒反応を用いて水素と酸素を再結合させ、原子炉建屋の水素濃度を低減する設備をいう。
- 格納容器圧力逃がし装置 (FCVS; Filtered Containment Venting System) : 格納容器内雰囲気ガスをフィルタ装置に導き、放射性物質を低減させた後に放出口から排出することで、排気中に含まれる放射性物質の環境への放出量を低減しつつ、格納容器内の圧力を低下させる設備をいう。

(本頁以下余白)

2. 下層階の水素滞留対策としての HVAC の評価

1F 事故検討会において「下層階での水素滞留の可能性」が知見として得られたことから、その対策について議論を行った。特に HVAC は排気能力が高く、下層階の滞留対策としては他の手段より効果が高い可能性があることから、HVAC の活用について検討を行った。ここでは HVAC 活用可否を評価するため、HVAC を含めた各水素防護対策の特徴、HVAC の優先順位、導入条件を整理した。

2.1 節に HVAC の特徴や HVAC を含めた各対策例の特徴の整理、2.2 節に水素防護対策の優先順位の考え方と各対策の導入条件を示す。表 1 に対策例の特徴の整理結果、表 2 に対策例の導入条件の整理結果を示す。

但し、水素防護対策として抽出した全ての対策が、全 BWR プラントにて採用されているものではなく、プラント設計や設備の相違により採用されている対策が異なることに注意が必要である。

2.1 HVAC を含めた水素防護対策の特徴の整理

2.1.1 HVAC の特徴

HVAC は、通常時の原子炉建屋の換気を行うための設備である。HVAC の容量は、プラントにより異なるが、100%容量で 200,000m³/h 程度であり、1 系統運転であったとしても、SGTS に比べて非常に大きな容量である。また、HVAC の給排気口は原子炉建屋の各フロアに複数あるため、下層階を含む原子炉建屋に漏えいした水素の排出能力は高い。

ただし、HVAC の電源容量は大きく、また、常用母線に接続されていること及び事故時は原子炉水位低信号や原子炉建屋内放射能高信号等により隔離され原子炉建屋内の換気系が SGTS に切り替わるインターロックを有していることに留意する必要がある。HVAC を原子炉建屋に漏えいした水素を排出する対策として使用する場合は、常用母線が使用可能（外部電源が利用可能又は非常用電源から常用母線へ給電するための手順（遮断器のインターロック解除手順を含む）が整備されている）で、かつ、HVAC の隔離信号を解除する手順が整備されていることが必要である。

また、HVAC の排気ファンのみを起動すると原子炉建屋内が過負圧となるおそれがあるため、排気ファンだけではなく給気ファンも起動する必要がある。さらに、SGTS と同様、HVAC は防爆仕様ではないため、HVAC 系統内の水素濃度が可燃限界となる 4vol% 以上で使用する場合は着火源となるリスクがある。

2.1.2 HVAC を含めた各水素防護対策の特徴の整理（表 1 参照）

(1) 作動原理

HVAC を含めた各水素防護対策の作動原理を以下に示す。

- ・ HVAC 及び SGTS は給排気ファン等の動的機器による強制排出である。
- ・ FCVS は格納容器の内圧と大気圧の圧力差を用いた格納容器内からの排出である。

- ・ BOP 及びトップベントは原子炉建屋の開口部からの自然排出である。
- ・ PAR は、触媒反応による水素と酸素の自発的な再結合処理である。

(2) 水素排出, 処理能力

HVAC を含めた各水素防護対策の水素排出, 処理能力に関する簡易評価から得られた特徴は以下のとおりである。

【水素排出, 処理能力】

排気量が多い HVAC や開口部面積が大きい BOP が最も水素濃度低減効果が高く, 次いで PAR と SGTS, トップベントの順である。

【下層階での水素滞留への影響】

HVAC は原子炉建屋各階に給排気口を有しており, 原子炉建屋下層階の水素を直接的に排出する能力を有している。一方で PAR, SGTS, BOP 及びトップベントは, 下層階からオペフロに導かれた水素を処理する (PAR は水素の再結合処理, SGTS は強制排出, BOP 及びトップベントは自然排出) 対策である。

【その他】

- ・ FCVS は、水素の原子炉建屋への漏えい抑制策として有効である。
- ・ 天井部に設置されているトップベントは、比重の小さな水素がオペレーティングフロア上部に蓄積し、成層化することを防止する効果を発揮する場合がある。

(3) 放射性物質の放出低減

HVAC を含めた各水素防護対策の簡易評価から得られた放射性物質の放出低減に関する特徴は以下のとおりである。

【放出元】

FCVS は格納容器からフィルタを介した直接放出であり, SGTS, HVAC, BOP 及びトップベントは, 格納容器から漏洩した放射性物質の原子炉建屋からの放出である。PAR は建屋内で水素を再結合処理するため外部への放出を伴わない。

【フィルタ機能の有無】

環境への放射性物質の放出量は, 放出元の放射性物質の量が同じであれば, よう素等の放射性物質を除去する機能 (フィルタ等) の有無により放出量が変わる。当該フィルタ等を有するのは SGTS 及び FCVS であり, フィルタ等を有しないのは HVAC^{※2}, BOP 及びトップベントである。

【放出箇所】

放射性物質の放出量が同じでも, 高所 (排気筒) 放出の場合, 放射性物質の拡散効果に期待できる。高所 (排気筒) 放出の対策は SGTS 及び HVAC である。一方で排気筒に比べると低所放出になるのは FCVS, BOP 及びトップベントである。

※2 HVAC の高性能粒子フィルタ (HEPA フィルタ) は放射性物質を除去する機能を有したものであるものの, 実力としては粒子状放射性物質を除去する能力がある。しかしながら, この能力は実証されていないことから, ここでは同機能がないと整理した。

【減衰時間】

FCVS は、格納容器ベントの実施タイミングが重要となる。格納容器ベントの実施タイミングが早い場合、希ガスが直接環境に大量に放出されるが、希ガスの多くは短半減期核種であるため、格納容器ベントの実施タイミングを遅らせることで、短半減期核種が格納容器内で減衰し、放射性物質の環境への放出量が低減される。

【被ばく影響】

一般的に被ばく影響は放射性物質の放出量と放出箇所の放出高さによる拡散の影響等を受ける。前述のとおり、放出量は放出元の放射性物質の量、フィルタ機能によるそれぞれの除去効果が影響する。また、被ばく量は放出箇所の高さによる拡散効果と、放出タイミングによる短半減期各種の減衰効果のそれぞれの影響を受ける。被ばく影響の評価では、これらの要素を考慮する必要がある。

(4) 電源の要否

HVAC を含めた各水素防護対策の電源の要否に関する特徴は次のとおりである。

- ・ 電源については、HVAC の電源は常用電源のため、外部電源が利用可能か又は非常用電源から常用母線へ給電する必要がある。
- ・ SGTS は非常用電源が必要。
- ・ FCVS, BOP 及びトップベントは電源がない場合でも手動による現場操作で使用可能である。
- ・ PAR は自発的な触媒反応を利用しているため、電源は不要である。

(5) インターロックの影響

SGTS, HVAC は、それぞれ LOCA 等の事故発生時に原子炉水位低 (L-3), ドライウェル圧力高, オペフロ放射能高等の信号で HVAC が停止して隔離され、SGTS が自動起動することで、原子炉建屋の換気が HVAC から SGTS へ自動的に切り替わる。

(6) 着火リスク

動作に動的機器を用いる HVAC 及び SGTS の使用は、建屋水素濃度が可燃限界を超えた場合、着火リスクがある。

表1 HVACを含めた各水素防護対策の特徴の整理

	水素排出, 処理能力	放射性物質の放出低減	電源の要否	インターロックの影響	下層階での水素滞留への影響	その他の留意点
原子炉建屋へ漏えいしてき水素の処理・排出策						
強制排出	SGTS	中	要 （非常用母線/ SA電源で動作可）	事故発生時※に 自動起動	・下層階に吸入口あり （プラント依存）	・着火リスクあり
	HVAC	大	要 （常用母線）	事故発生時※に 隔離	・下層階に給排気口あり	・着火リスクあり ・耐震クラス
自然排出	BOP	大	要（遠隔操作の場合） 不要（現場操作の場合）	—	—	—
	トップハント	小	要（遠隔操作の場合） 不要（現場操作の場合）	—	—	—
触媒式水素再結合器（PAR）	中	（放出せず）	不要	—	—	—
格納容器から原子炉建屋への水素漏えい防止・抑制策						
格納容器圧力逃がし装置（FCVS）	— （格納容器から環境へ 直接水素を排出）	・建屋高所部 ・フィルタ有	要（遠隔操作の場合） 不要（現場操作の場合）	—	—	—

※：LOCA等の事故発生時に、原子炉水位低（L-3）、ドライウェル圧力高、オペロ放射能高等の信号で原子炉建屋の換気系がHVACからSGTSへ自動的に切り替わる。

2.2 優先順位の考え方と各水素防護対策の導入条件

2.2.1 優先順位の考え方

HVAC は、SGTS と同様、原子炉建屋に漏えいした水素の強制排出対策であるが、次の事項を考慮すると、事故シーケンスが特定できずその使用時期は明確には定められないことから、HVAC は明示的には優先順位を定めないこととする。

- ・HVAC の電源は常用電源のため、外部電源が利用可能か又は非常用電源から常用母線へ給電する必要があること。
- ・HVAC は事故発生時に自動隔離されるため、HVAC を起動するためには隔離インターロックの解除操作（現場操作）が必要であること。
- ・放射性物質の放出量を抑制する観点から、チャコールフィルタを有する SGTS による水素排出が優先されること。
- ・HVAC は常用系であり耐震クラスが低いため、地震時には SA 設備に比べ、シビアアクシデント時の健全性が必ずしも担保されないこと。
- ・HVAC の水素排出能力は SGTS よりも高いが、HVAC 系統内の水素濃度が可燃限界となる 4vol% 以上の場合は、SGTS と同様、着火源となるリスクがあること。

2.2.2 各水素防護対策の導入条件（表 2 参照）

HVAC の使用に当たっては電源確保、隔離インターロックの解除が必要であり、また、使用するためには HVAC は常用系であり耐震クラスが低く SA 設備に比べシビアアクシデント時の健全性が必ずしも担保されないこと等様々な使用上の留意事項があるものの、例えば SGTS 運転中に原子炉建屋下層階の建屋水素濃度が上昇している場合は HVAC を活用することが効果的である可能性があること等から、「発電所対策本部の本部長^{※3}が、必要に応じて、その使用を総合的（臨機応変）に判断する」こととする。

【事故時における HVAC 使用上の留意事項】

- ・HVAC の電源は常用電源のため、外部電源が利用可能か又は非常用電源から常用母線へ給電する必要がある。このため、外部電源喪失時には電源確保（現場操作）が必要である。また、非常用電源から常用母線へ給電を行った際に、給電する常用母線側（特に大規模地震後の場合、必ずしも健全性が担保されない）に短絡、地絡が生じると常用母線側だけではなく非常用母線側の電源が喪失するおそれがあることを考慮すること。
- ・HVAC の電源確保の際は、突入電流も考慮して HVAC 運転に必要な電源容量も含めた電源が確保されていること。
- ・炉心損傷防止、格納容器破損防止に係るそれぞれの対応操作と作業リソースが競合する可能性があることを考慮すること。

※3 原子力防災管理者のこと。事業者毎に名称は異なる場合がある。

- ・上記の電源確保、隔離解除作業にあたっては、それぞれの作業環境（線量、水素濃度等）を考慮すること。また、原子炉建屋から外部への放射性物質の放出の影響について考慮すること。
- ・HVAC の水素排出能力は SGTS よりも高いが、HVAC 系統内の水素濃度が可燃限界の4vol%以上となるおそれがある場合は、SGTS と同様、着火源となるリスクがあることから、HVAC を使用しない又は停止することを考慮すること。

（本頁以下余白）

表2 各水素防護対策の導入条件

機能, 設備		導入条件等	備考
原子炉建屋へ漏えいした水素を排出する対策			
強制排出	SGTS	炉心損傷を判断した場合※	原子炉建屋水素濃度が2vol%程度となった場合は、着火源となるリスクがあるため、SGTSを停止する。
	HVAC	-	原子炉建屋からの水素排出対策として期待する場合は、次の事項を考慮する必要がある。 <ul style="list-style-type: none"> • HVACの電源は常用電源のため、外部電源が利用可能か、又は非常用等電源を常用母線へ給電するための手順（遮断器のインターロック解除手順、HVACへの給電経路上に故障がないことを確認する手順を含む）を予め整備しておく必要がある。 • 事故発生時に自動隔離されるため、原子炉建屋からの水素排出にHVACを使用する場合は隔離インターロックの解除の手順を予め整備しておく必要がある。
自然排出	BOP	FCVSによる格納容器イベント実施後も原子炉建屋の水素濃度が上昇継続した場合、又は原子炉建屋内に滞留した水素を排出する必要がある場合。	
	トップバント		
原子炉建屋内に漏えいした水素を処理する対策			
触媒式水素再結合器 (PAR)		原子炉建屋の水素濃度が1.5vol%程度となれば、自動的に作動する。	PARの作動状況は、PAR出入口温度を監視することで確認する。
格納容器から原子炉建屋への水素漏えい防止・抑制策		格納容器圧力逃がし装置 (FCVS)	原子炉建屋水素濃度が2vol%程度となった場合。

※：LOCA等の事故発生時に、原子炉水位低（L-3）、ドライウェル圧力高、オペロ放射能高等の信号でSGTSは自動起動し、原子炉建屋の換気系がHVACからSGTSに切り替わる。交流電源の喪失等によりSGTSが起動していない場合は、電源復旧後速やかにSGTSを起動する。

3. 水素防護対策の AMG 等への反映事項について

下層階の水素滞留が懸念される場合に備えて、本ガイドラインに基づき、BWR プラントを対象に、以下の実施事項を反映すること。

【実施事項】

下層階の水素滞留が懸念される場合に備えた対応として、必要な時に HVAC を活用できるようにするため、AMG の改定、手順書の整備等を実施する。

上記「AMG の改定、手順書の整備等」の具体的な内容は以下の通り。

① AMG の改定

HVAC を現設計のまま活用するためには様々な使用上の留意事項があることから、AMG の対応フロー内には明示的に優先順位を記載せず、必要に応じて HVAC が活用できるようにするため、「HVAC 活用にあたっては、発電所対策本部の本部長^{※4}が、例えば SGTS 運転中にもかかわらず原子炉建屋下層階の水素濃度が上昇している時等に、下記の留意事項を勘案の上、必要に応じて、HVAC を使用するか否かを総合的（臨機応変）に判断する」旨を AMG のフローの欄外等に記載する。

【留意事項】

- ・ 必要な機器、電源等の健全性
- ・ 必要な電源容量
- ・ 作業に係るリソース
- ・ 現場の作業環境、外部環境への影響
- ・ 着火リスク

② 整備すべき手順書

HVAC を現設計のまま必要に応じて活用するにあたって、以下の2つの手順書を作成すること。

- ・ HVAC の電源を確保するため、外部電源が利用できない場合の非常用等電源を常
用母線へ給電するための手順（遮断器のインターロック解除手順を含む）
- ・ 事故発生時に自動隔離される HVAC について原子炉建屋から水素排出をするため
に HVAC を使用する場合の隔離インターロックの解除の手順

③ HVAC 活用にあたって注意すべき事項の記載（手順書等への記載）

下記の5項目について、注意すべき事項として記載する。

- ・ 必要な機器、電源等の健全性
- ・ 必要な電源容量
- ・ 作業に係るリソース
- ・ 現場の作業環境、外部環境への影響
- ・ 着火リスク

^{※4}原子力防災管理者のこと。事業者毎に名称は異なる場合がある。

なお、上記①～③の主旨を反映するに当たり、AMG, 手順書等への具体的な記載内容は各事業者の判断に委ねるものとする。

(本頁以下余白)

BWR プラントにおける水素防護対策の整理

1. はじめに

国内の BWR プラントでは、2011 年 3 月 11 日に発生した東京電力福島第一原子力発電所事故以前より、設計基準事故への対応の一環として、ジルコニウム-水反応や水の放射線分解によって生じる水素や酸素を考慮しても格納容器内での水素燃焼を防止するため、通常運転時において格納容器内を窒素で置換するとともに、水の放射線分解により継続的に発生する水素及び酸素の処理のために可燃性ガス濃度制御系を設置している。安全評価では、これらの対策の妥当性を確認するために、原子炉冷却材喪失事故時における水素、酸素の発生量を保守的に設定した解析を行い、事故発生後少なくとも 30 日間は格納容器内雰囲気中の酸素又は水素の濃度のいずれかが、それぞれ可燃限界となる 5vol%又は 4vol%以下に抑制され、格納容器内の雰囲気は可燃限界未満に制御されることを確認している。

一方、東京電力福島第一原子力発電所事故は上記の設計基準事故を大幅に上回るシビアアクシデントであり、1 号機、3 号機及び 4 号機の原子炉建屋で水素爆発が発生し、原子炉建屋内外における対応作業の継続性に大きな影響を与えた。なお、2 号機においては、1 号機における原子炉建屋の水素爆発時の影響によってオペフロのブローアウトパネルが開放されたことから、水素が外部に排出され、原子炉建屋の水素爆発が回避されたと推定されている。

事故の直前まで運転をしていた 1 号機、3 号機については、原子炉への注水が停止した後に炉心溶融が生じており、その過程でジルコニウム-水反応によって設計基準事故における想定量を超えた水素が発生したと推定される。格納容器雰囲気中の水素濃度は上昇していたと考えられるが、窒素置換により酸素量が少ない状態が維持されていたことから、格納容器内で水素爆発には至っていない。ただし、格納容器の除熱ができていなかったことから格納容器内の温度、圧力が上昇し、水素が原子炉建屋内に漏えい、蓄積することで水素爆発に至っている。格納容器から原子炉建屋内への水素流出経路は不明であるものの、格納容器上蓋の結合部分や機器ハッチの結合部分等における漏れ止めのためのシール部分が高温に晒され、機能低下した可能性が高いと考えられる。また、格納容器のベントラインから非常用ガス処理系のラインを経由して原子炉建屋に流入する経路も考えられる。なお、4 号機の原子炉建屋で発生した水素爆発については、3 号機からの格納容器のベントガスが非常用ガス処理系配管を通じて 4 号機に流入し、水素爆発に至ったと推定されている。

規制（2 章にて後述）において、東京電力福島第一原子力発電所事故の教訓を踏まえ、新たに「水素爆発による原子炉建屋等の損傷を防止するための設備」の設置が求められており、事業者は原子炉建屋内に触媒式水素再結合装置（PAR）を新たに設置する等の対策を講じるとともに、格納容器からの水素漏えいの不確かさも考慮した上で原子炉建屋内の水素濃度に応じて自主的に段階的な防護対策を講じることとしている。

本資料では、規制要求を含めた水素防護対策を整理した。2章では規制要求、3章では各水素防護対策の基本的な考え方、4章では水素防護対策の例を示し、各水素防護対策の導入条件、優先順位を整理した。

2. 規制要求

2.1 設置許可基準規則及び技術基準規則

「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」（設置許可基準規則）第五十三条に、水素爆発による原子炉建屋の損傷を防止するための設備に係る規制要求として、次のように記載されている。

（水素爆発による原子炉建屋等の損傷を防止するための設備）

第五十三条

発電用原子炉施設には、炉心の著しい損傷が発生した場合において原子炉建屋その他の原子炉格納容器から漏えいする気体状の放射性物質を格納するための施設（以下「原子炉建屋等」という。）の水素爆発による損傷を防止する必要がある場合には、水素爆発による当該原子炉建屋等の損傷を防止するために必要な設備を設けなければならない。

また、「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則」（技術基準規則）第六十八条にも上記と同様の規制要求が記載されている。

2.2 設置許可基準規則解釈及び技術基準規則解釈

「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」（設置許可基準規則解釈）第53条の「水素爆発による当該原子炉建屋等の損傷を防止するために必要な設備」には次のように記載されている。なお、設置許可基準規則解釈第53条は、BWRプラントにおける格納容器ベントを水素防護対策として明確に位置付けることを目的として、令和5年2月22日に改正された。改正箇所は下線の箇所のとおりである。

第53条（水素爆発による原子炉建屋等の損傷を防止するための設備）

1 第53条に規定する「水素爆発による当該原子炉建屋等の損傷を防止するために必要な設備」とは、以下に掲げる措置又はこれらと同等以上の効果を有する措置を行うための設備をいう。

a) 原子炉格納容器の構造上、炉心の著しい損傷が発生した場合において原子炉格納容器内の水素濃度が高くなり、高濃度の水素ガスが原子炉格納容器から漏えいするおそれのある発電用原子炉施設には、原子炉格納容器から原子炉建屋等への水素ガスの漏えいを抑制し、原子炉建屋等内の水素濃度の上昇を緩和するための設備として、次に掲げるところにより、原子炉格納容器から水素ガスを排出することができる設備を設置すること。この場合において、当該設備は、本規程第50条の規定により設置する原子炉格納容器圧力逃がし装置と同一設備であってもよい。

i) その排出経路での水素爆発を防止すること。

- ii) 排気中の水素濃度を測定することができる設備を設けること。
- iii) 前各号に掲げるもののほか、本規程第50条第3項b)各号の規定に準ずること。
- b) 水素濃度制御設備（制御により原子炉建屋等で水素爆発のおそれがないことを示すこと。）又は原子炉建屋等から水素ガスを排出することができる設備（動的機器等に水素爆発を防止する機能を付けること。放射性物質低減機能を付けること。）を設置すること。
- c) 想定される事故時に水素濃度が変動する可能性のある範囲で推定できる監視設備を設置すること。
- d) これらの設備は、交流又は直流電源が必要な場合は代替電源設備からの給電を可能とすること。

また、「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則の解釈」（技術基準規則解釈）第68条にも上記と同様に記載されている。

2.3 技術的能力に係る審査基準

「実用発電用原子炉に係る発電用原子炉設置者の重大事故の発生及び拡大に防止に必要な措置を実施するために必要な技術的能力に係る審査基準」（技術的能力審査基準）の1.10の「水素爆発による原子炉建屋等の損傷を防止するための手順等」には次のように記載されている。なお、技術的能力審査基準の1.10は、BWRプラントにおける格納容器ベントを水素防護対策として明確に位置付けることを目的として、令和5年2月22日に改正された。改正箇所は下線の箇所のとおりである。

- 1.10 水素爆発による原子炉建屋等の損傷を防止するための手順等
- 【要求事項】**
- 発電用原子炉設置者において、炉心の著しい損傷が発生した場合において原子炉建屋その他の原子炉格納容器から漏えいする気体状の放射性物質を格納するための施設（以下「原子炉建屋等」という。）の水素爆発による損傷を防止する必要がある場合には、水素爆発による当該原子炉建屋等の損傷を防止するために必要な手順等が適切に整備されているか、又は整備される方針が適切に示されていること。
- 【解釈】**
- 1 「水素爆発による当該原子炉建屋等の損傷を防止するために必要な手順等」とは、以下に掲げる措置又はこれらと同等以上の効果を有する措置を行うための手順等をいう。
- a) 炉心の著しい損傷が発生した場合において原子炉格納容器から原子炉建屋等への水素ガスの漏えいを抑制し、原子炉建屋等の水素濃度の上昇を緩和するため、原子炉格納容器から水素ガスを排出することができる設備による原子炉格納容器から水素ガスを排出する手順等を整備すること。

b) 炉心の著しい損傷が発生した場合において原子炉建屋等の水素爆発による損傷を防止するため、水素濃度制御設備又は原子炉建屋等から水素ガスを排出することができる設備により、水素爆発による当該原子炉建屋等の損傷を防止するために必要な手順等を整備すること。

c) 水素爆発による損傷を防止するために必要な設備が、交流又は直流電源が必要な場合は代替電源からの給電を可能とする手順等を整備すること。

また、技術的能力審査基準 1. 0 の「共通事項」の「(4) 手順書の整備、訓練の実施及び体制の整備」についても、格納容器ベント実施に関する要求を明確化する観点から、令和 5 年 2 月 22 日に改正された。改正箇所は下線の箇所のとおりである。

1. 0 共通事項

(4) 手順書の整備、訓練の実施及び体制の整備

【要求事項】

発電用原子炉設置者において、重大事故等に的確かつ柔軟に対処できるよう、あらかじめ手順書を整備し、訓練を行うとともに人員を確保する等の必要な体制の適切な整備が行われているか、又は整備される方針が適切に示されていること。

【解釈】

1 手順書の整備は、以下によること。

a) (略)

b) 発電用原子炉設置者において、炉心の著しい損傷及び原子炉格納容器の破損を防ぐために最優先すべき操作等の判断基準を予め明確化する方針であること。

(ホウ酸水注入系 (SLCS)、海水及び格納容器圧力逃がし装置の使用を含む。)

また、当該判断基準に達した場合に当該操作等をためらわず実施する手順とする方針であること。

c) ~ g) (略)

2・3 (略)

3. 水素防護対策の基本的な考え方

重大事故時の格納容器内には炉心損傷によって生じた放射性物質や水素が存在しており、格納容器内雰囲気の違いによって、原子炉建屋内の放射能濃度や水素濃度が上昇する。原子炉建屋内の水素濃度の上昇が継続した場合には、可燃限界に到達し、空気中の酸素との反応によって水素爆発に至る可能性があることから、「原子炉建屋に漏えいした水素を排出する対策」、「原子炉建屋に漏えいした水素を処理する対策」及び「格納容器から原子炉建屋への水素の漏えいを抑制する対策」の各対策の特徴を踏まえ、実効性のある対策を講じ、原子炉建屋における水素爆発を防止する。

3.1 重大事故時の格納容器内における水素発生について

重大事故時は、ジルコニウム-水反応や水の放射線分解等により水素が発生する。ジルコニウム-水反応は、燃料被覆管に含まれる金属ジルコニウムが高温となり水と反応する現象であり、水素が急激に発生する。また、水の放射線分解は、水に放射線が照射されることにより水素と酸素に分解する現象であり、水と高い放射線場が共存する炉心部及び格納容器サプレッションプールにおいて継続的に水素及び酸素が発生する。その他、格納容器スプレイ時のスプレイ水による金属材料（亜鉛、アルミ等）の腐食や、熔融炉心-コンクリート反応（MCCI）によっても水素が発生する。

BWRにおいて重大事故が発生した場合、ジルコニウム-水反応によって格納容器内の水素濃度は13vol%を大きく上回るが、窒素置換により格納容器内の酸素濃度は5vol%より低く管理されているため、格納容器内雰囲気の不活性化状態に維持することで、格納容器内の気体の組成が可燃限界に至ることはない。しかしながら、水の放射線分解により水素及び酸素が発生するため、緩和措置が取られない場合には、格納容器内の水素、酸素が可燃限界に到達する。

なお、BWRでは格納容器内の水素、酸素濃度の上昇を抑えるための設計基準事故対処設備として可燃性ガス濃度制御系（以下、「FCS」という。）が設置されているが、重大事故時はFCSの水素処理能力に対して格納容器内の水素発生量が非常に大きく、FCSによる水素、酸素の処理には期待できない。

3.2 原子炉建屋における水素濃度の上昇について

規制要求では、炉心損傷が発生した場合において、格納容器の破損を防止するための対策が求められており、これらの対策が有効に機能した場合は格納容器の健全性が維持されるため、格納容器内の雰囲気が大量に原子炉建屋に漏えいすることは考えにくい。格納容器の健全性が維持されている状態であっても、原子炉建屋への一定程度の漏えいが生じる。

原子炉建屋における水素濃度の上昇率は、格納容器内の水素濃度や原子炉建屋への漏えい率に依存する。また、格納容器圧力が高い場合には、原子炉建屋への漏えい量が多くなる。

原子炉建屋へ漏えいするポテンシャルの高い箇所としては、トップヘッドフランジや、所員用エアロック室、機器ハッチ等が挙げられる。トップヘッドフランジが通じるオペフロや、局所エリア（所員用エアロック室、機器ハッチ等のある部屋）に水素濃度計を設置することにより、当該エリアへの水素漏えいを検知することができる。

局所エリアを含め、下層階で水素が漏えいした場合、大物搬入口上部の開口部や階段を通じてオペフロに移行すると考えられる。

3.3 水素防護対策の検討に当たり考慮すべき事項

水素防護対策を検討するに当たっては、以下を考慮する必要がある。

- ・原子炉建屋内の水素濃度が上昇している状況においては、水素とともに放射性物質や水蒸気が格納容器から漏えいしていると考えられ、原子炉建屋内の環境（温度、湿度、放射線量等）が悪化していること
- ・原子炉建屋内の水素濃度が可燃限界となる 4vol%以上で換気系のファン等の動的機器を用いて原子炉建屋内の水素を強制的に排出する場合、当該機器が着火源となるリスクがあること
- ・原子炉建屋内の水素を排出するには放射性物質の放出を伴うため、放射性物質の放出低減の観点から、フィルタ付き設備による水素排出が優先されるべきであること

4. 水素防護対策の例と導入条件、優先順位の整理

4.1 節に水素防護対策の例、4.2 節に水素防護対策の優先順位の考え方と各対策の導入条件を示す。

4.1 水素防護対策の例

(1) 原子炉建屋水素濃度監視設備

格納容器から原子炉建屋に漏えいした水素濃度を監視する。

<対策例>

水素濃度を検出するための検出器の種類としては触媒式と熱伝導式があり、計測可能な範囲が異なる（触媒式：0～10vol%，熱伝導式：0～20vol%）。また、水素濃度を検出するための検出器は、原子炉建屋内に漏えいした水素を早期検知する観点から、格納容器からの漏洩ポテンシャルの高い箇所に連なるオペフロヤ、所員用エアロック室等の局所エリアに設置している。

原子炉建屋内の水素濃度を監視するための設備は、重大事故等対処設備に位置付けられ、代替電源設備（交流電源又は直流電源）から給電可能な設計となっている。

(2) 原子炉建屋に漏えいした水素を排出する対策

原子炉建屋に漏えいした水素を外部に排出することにより、原子炉建屋内の水素濃度を低減する。水素の排出方式としては、動的な機器を用いた強制排出と、原子炉建屋開口部分からの自然排出がある。

<対策例>

a. 強制排出

(a) 非常用ガス処理系（SGTS）

SGTS は、設計基準事故対処設備としては、LOCA 等の事故発生時において、原子炉建屋内を負圧に保ち、原子炉建屋から直接外部へ放射性物質が放出されることを防止するとともに、フィルタを通して高所放出することにより放射性物質を低減している。

また、SGTS は重大事故等対処設備としても活用できるものであり、設計基準事故対処設備と同様の経路で水素等を含む気体を排出することで、放射性物質の放出を低減しつつ水素爆発による原子炉建屋の損傷を防止する。

SGTS の 1 系列当たりの容量は、プラントにより異なるが、概ね 2,000~3,000m³/h 程度であり、原子炉建屋内の空気を 1 系列当たり 0.5~1 回/日で換気することができる設計となっている。

ただし、SGTS は防爆仕様ではないため、SGTS 系統内の水素濃度が可燃限界となる 4vol% 以上で使用する場合は着火源となるリスクがある。

SGTS は非常用母線に接続しており、非常用電源設備や代替電源設備から給電可能である。

b. 自然排出

(a) ブローアウトパネル (BOP)、トップベント

オペフロの一部 (外壁や天井) を開放することにより、オペフロに滞留した水素を含む原子炉建屋内雰囲気は大気へ直接放出し、原子炉建屋内の水素爆発を防止する。開放箇所としては、オペフロに設置された BOP、トップベントがある。これらの開放操作は、中央制御室からの遠隔操作又は現場操作により実施する。

また、BOP 開放後の原子炉建屋の気密性を確保するための対策として、BOP 閉止装置を設置するプラントもある。

なお、BOP、トップベントを現場操作により開放するような状況では、すでに炉心損傷が進んでおり、原子炉建屋内や屋外の環境 (温度、湿度、放射線量等) が悪化している状況であることに留意する必要がある。

(3) 原子炉建屋に漏えいした水素を処理する対策

原子炉建屋内の水素濃度が上昇してきた状況において、空気中の酸素と水素を再結合させることで原子炉建屋内の水素濃度を低減する。

<対策例>

a. 触媒式水素再結合装置 (PAR)

PAR は、触媒反応を用いて水素と酸素を再結合させ、原子炉建屋の水素濃度を低減する設備である。PAR は触媒カートリッジ及びハウジングで構成されており、周辺の水素濃度が 1.5vol% 程度まで上昇すると自動的に作動するため、電源や運転員による起動操作は不要である。

オペフロに設置された PAR は、炉心の著しい損傷が発生し、格納容器から大量の水素が原子炉建屋に漏えいする過酷な状態を想定した場合においても、原子炉建屋内の水素濃度が可燃限界未満となるよう設計している。具体的には、燃料有効部被覆管の 100% に相当するジルコニウムが水と反応した場合の水素発生量を想定

し、格納容器設計漏えい率を大幅に上回る 10%/日で原子炉建屋に漏えいした場合でも水素濃度が可燃限界を超えないよう、PAR の設置基数を決定している。これは、有効性評価結果（雰囲気圧力、温度による静的負荷（格納容器過圧・過温破損）の水素発生量（ジルコニウム-水反応、金属腐食及び水の放射線分解を考慮）、評価上想定する格納容器漏えい率（最大約 1.3%/日：東海第二発電所の例）を包含した条件である。また、PAR の設置基数の算出に当たっては、周辺雰囲気に含まれるガス状のよう素による PAR の性能低下を考慮している。

PAR の作動状況は、PAR の入口側及び出口側の温度を中央制御室から監視することにより確認することができる。

(4) 格納容器から原子炉建屋への水素の漏えいを抑制する対策

格納容器内の水素を含むガスを大気へ放出し、格納容器圧力を低減させること等によって、原子炉建屋への水素漏えい量を抑制する。なお、新規制基準適合性審査適合プラントでは、格納容器が過圧・過温された場合の閉じ込め機能を高める対策として、原子炉ウェル部への注水手段の整備やフランジ等のシール部に耐性の高い材質（改良 EPDM）を採用することとしている。

<対策例>

a. 格納容器圧力逃がし装置 (FCVS)

FCVS は、格納容器内雰囲気ガスをフィルタ装置に導き、放射性物質を低減させた後に放出口から排出することで、排気中に含まれる放射性物質の環境への放出量を低減しつつ、格納容器内の圧力を低下させる設備である。

FCVS は、系統内を窒素置換により不活性化することで、系統内における水素爆発を防止する設計としている。また、排気配管には系統内の窒素置換に必要な大気との障壁として、排気の妨げにならない微差圧で動作するラプチャーディスク（圧力開放板）を設けている。

FCVS により格納容器内の水素を含むガスを外部へ排出すること及び格納容器内の圧力を低下させることで、原子炉建屋への水素漏えいを抑制する。FCVS は、中央制御室からの遠隔操作又は現場操作によって起動が可能である。

4.2 水素防護対策の優先順位の考え方と各対策の導入条件

水素防護対策の優先順位の考え方を述べる。なお、各対策の導入状況や水素処理、排出能力はプラント毎に異なるため、対策の優先順位はプラント毎に異なる場合があることに注意する。

炉心損傷が発生し、格納容器内の水素濃度が上昇した場合でも、格納容器の健全性が維持されている（格納容器破損防止対策が有効に機能している）状態であれば、格納容器から原子炉建屋への水素の漏えい量は限定的である（格納容器圧力が設計圧力の 2 倍

(2Pd)における格納容器漏えい率は、約 1.3%/日と評価される。(東海第二発電所の例)。
 この場合、原子炉建屋内の水素濃度は緩やかに上昇すると考えられるが、フィルタがある SGTS により原子炉建屋内の水素を強制排出することで、原子炉建屋の水素濃度の上昇を抑制、低減する。

SGTS の起動の有無にかかわらず、格納容器からの水素漏えい量が増加した場合は、原子炉建屋内の水素濃度が 1.5vol%程度になれば、PAR が自発的に作動し、原子炉建屋内の水素濃度は可燃限界の 4vol%未満に抑制される。なお、格納容器漏えい率を保守的に 10%/日と設定しており、SGTS による水素排出に期待しない場合でも、原子炉建屋内の水素、酸素濃度は可燃限界未満に維持されるよう PAR の基数は設定されている(原子炉建屋内の酸素が欠乏状態となれば、PAR による水素の処理が停止し原子炉建屋内の水素濃度が上昇するが、酸素濃度が低いため、可燃限界には至らない)。

また、SGTS 運転中であるにもかかわらず、原子炉建屋内の水素濃度が水素濃度計の計器誤差等の余裕を見込んだ 2vol%程度を超える状況となった場合は、SGTS による水素排出量よりも格納容器からの水素漏えい量の方が多量にあることから、格納容器から原子炉建屋への水素漏えいを抑制することを目的として、フィルタを有する FCVS により格納容器ベントを実施する。この際、SGTS の動的機器が着火源となり水素爆発が発生するリスクがあることから、原子炉建屋内の水素濃度が水素濃度計の計器誤差等の余裕を見込んだ 2vol%程度を超える状況となった場合は SGTS を停止する。

FCVS により原子炉建屋への水素漏えいを抑制したにもかかわらず原子炉建屋内の水素濃度が上昇する場合や、原子炉建屋内に滞留した水素を排出する必要がある場合には、BOP 又はトップベント等を開放するが、これらの設備にはフィルタがないため、BOP 又はトップベント等の開放は、FCVS による格納容器から原子炉建屋への水素漏えいを抑制する対策の後備手段と位置付けるのが適切であると考えられる。

以上を踏まえると、水素防護対策の優先順位は次のとおりとなる。

- ①SGTS による原子炉建屋に漏えいした水素の排出
- ②PAR による原子炉建屋に漏えいした水素の処理(自発的に作動)
- ③FCVS による格納容器から原子炉建屋への水素漏えいの抑制
- ④BOP 又はトップベントによる原子炉建屋に漏えいした水素の排出

上記の水素防護対策の優先順位を踏まえ、水素防護に係る各対策の導入条件は次のとおりとなる。

- ・SGTS による原子炉建屋に漏えいした水素の排出の導入条件は、格納容器の健全性が維持されている状況においても格納容器からの一定の漏えいがあることを考慮し、格納容器内の水素濃度が上昇する「炉心損傷を判断した場合」となる。なお、SGTS は LOCA 等の事故発生時に事故信号で自動起動するが、交流電源の喪失等により SGTS が起動していない場合は、電源復旧後速やかに SGTS を起動する。ただし、原子炉建

屋内の水素濃度が水素濃度計の計器誤差等の余裕を見込んだ 2vol%程度まで上昇した場合は、SGTS の動的機器が着火源となり水素爆発が発生する可能性があることを考慮し、SGTS を停止する。

- ・ FCVS による格納容器から原子炉建屋への水素漏えいの抑制の導入条件は、「原子炉建屋内の水素濃度が水素濃度計の計器誤差等の余裕を見込んだ 2vol%程度となった場合」となる。
- ・ BOP 又はトップベントによる原子炉建屋に漏えいした水素の排出の導入条件は、「FCVS による格納容器ベントを実施したにもかかわらず原子炉建屋内の水素濃度が上昇する場合等、原子炉建屋内に滞留した水素を排出する必要がある場合」となる。

(本頁以下余白)

発行者 : 原子力エネルギー協議会

問合せ先 : contact@atena-j.jp