

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、中長期的な取り組みである「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り組みとして「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、短期的な取り組みである「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、短期的な取り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れ出す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	・下層階に吸込口あり （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。	
	トップイベント		
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した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れ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れいが生じる。

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れい率に依存する。また、格納容器圧力が高い場合には、原子炉建屋への漏れい量が多くなる。

原子炉建屋へ漏れ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れいを検知することができる。

局所エリアを含め、下層階で水素が漏れいした場合、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