
水素防護対策の検討結果について

2023年6月14日

東北電力株式会社
中部電力株式会社
中国電力株式会社
電源開発株式会社

東京電力ホールディングス株式会社
北陸電力株式会社
日本原子力発電株式会社
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

原子力規制庁は、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する
 - 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を実施する
- ✓ 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。
- ✓ 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、影響・リスクや留意事項・対処策等についての更なる深掘り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。

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 (P35参照)	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 (P19~参照)	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 (P25~参照)	ATENA-WG		適宜プラントワークダウン結果を反映	▼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 (P33参照)	ATENA-WG		HVAC、SGTS運転時の建屋内風速測定	試験の評価方法の立案検討	試験成立性・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 (P34参照)	各事業者			建屋開放実験（BOP）の検討・実施	(必要に応じて先行的な対策検討)		適宜評価結果を反映
(5) 設備改造を含めた水素防護対策検討 (P34参照)	ATENA-WG				例) 水素濃度計の追設検討 PARの追設検討 扉改造の検討		
					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/\$Aを通したの運転継続可否検討		

○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

本ガイドライン作成にあたっては、原子炉建屋下層階での水素滞留の可能性に対する対策も含め、建屋水素防護対策全般を対象とした。なお、短期的な対応では、**既存設備を原設計のまま活用することを前提**として対策を検討することとした。

○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>

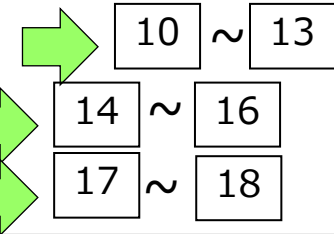
1. 序文

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。

(1) HVACを含めた水素防護対策の特徴の整理

原子炉建屋の水素防護対策について簡易評価等を実施し、その特徴（水素処理・排出能力、放射性物質の放出量低減、電源の要否、インターロックの影響）を整理した。

【HVACを含めた各水素防護対策の水素処理・排出能力に関する特徴の整理】

【水素処理、排出能力】

- 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。

(1) HVACを含めた水素防護対策の特徴の整理 (続き)

【 HVACを含めた各水素防護対策の放射性物質の放出低減に関する特徴の整理】

【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※、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。

【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。

※： 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はないものの、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。

(1) HVACを含めた水素防護対策の特徴の整理 (続き)

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	・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	・下層階に吸込口あり (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)	—	—	—
	トップベント	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) 優先順位の考え方と各対策の導入条件（続き）

【各対策の導入条件】

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。

【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

※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。

(3) 原子炉建屋の水素防護対策のAMGへの反映について（続き）

【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

【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、上記の【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、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。

(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を対象。
- 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

1. ウォークダウン実施手順書の整備

・・・調査対象の軽い気体が滞留する可能性のある形状の候補として6つの類型化形状を考慮

2. ウォークダウンに向けた図面の準備

・・・プロット用の図面を準備、確認すべき箇所を抽出

3. ウォークダウンの実施【現場／CAD】

・・・カメラ/ビデオにより、軽い気体が滞留する可能性のある箇所を幅広く撮影・調査、窪みの大きさ等を測定

4. 軽い気体が滞留する可能性のある箇所の類型化【机上】

・・・滞留する可能性のある箇所の類型化を実施（実施手順書の形状候補である6つの形状以外の形状が存在するか確認）
類型化形状を建屋平面図面上にプロット

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

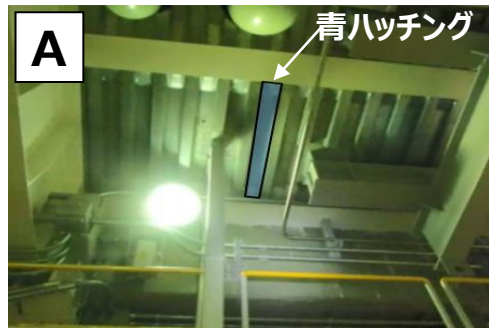
表2 滞留する可能性のある形状の類型化

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引っ張り
C	天井の躯体の窪み	D	建物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

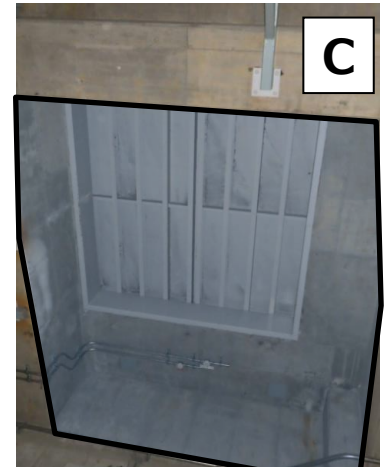
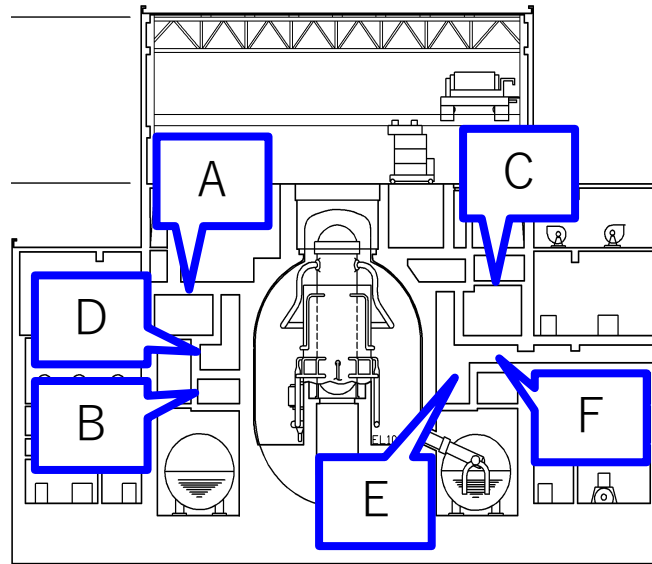
4. 対策の具体化に向けた検討結果

(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）



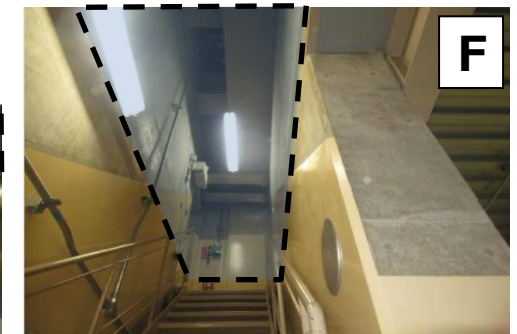
空調ダクトの貫通孔が天井付近に設置されていない小部屋（エアロック室）



気体の移行を妨害する天井の出張り（小部屋（CRD補修室））



壁等で区切られた横穴（横穴部）



壁等で区切られた区画（階段室）

(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。

4. 対策の具体化に向けた検討結果

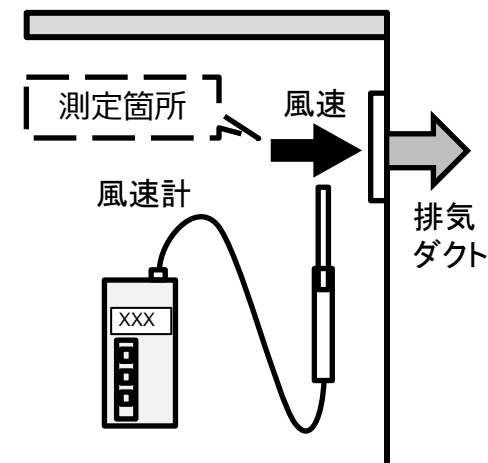
(2) 実機による風速等の測定

○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

○現在の状況

2月末～3月上旬に実機による風速等の測定を実施完了。

(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

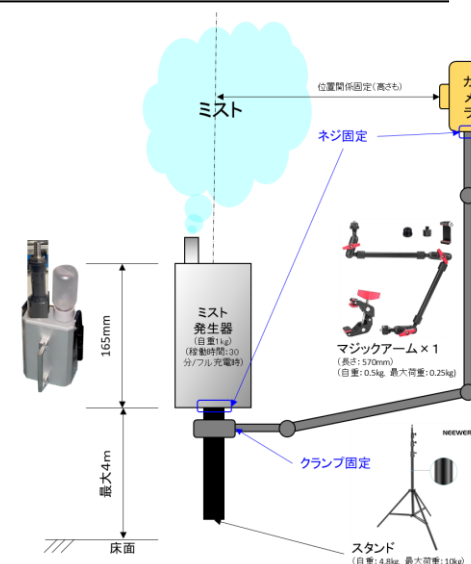
- 一般的な風速計を用いて、ダクト及び小部屋天井付近等の測定を実施。
- 風速測定の結果とダクト開口部の面積によって、各ダクトの風量が算出が可能。



<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)

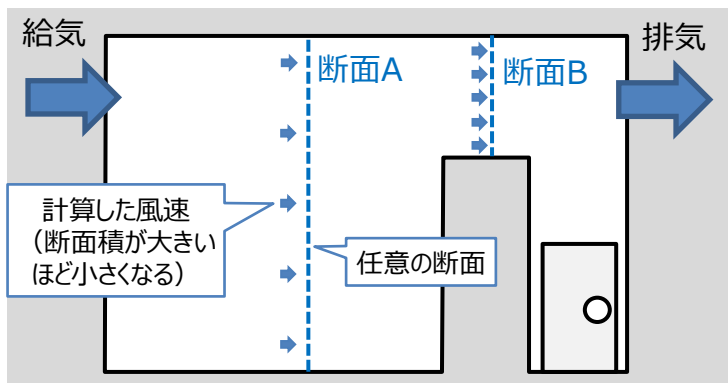
c. 測定目的及び結果

(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>

- 浅いくぼみ (20cm程度) においては、くぼみ内に滞留せず流出する様子が確認できた。
- 深いくぼみ (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)

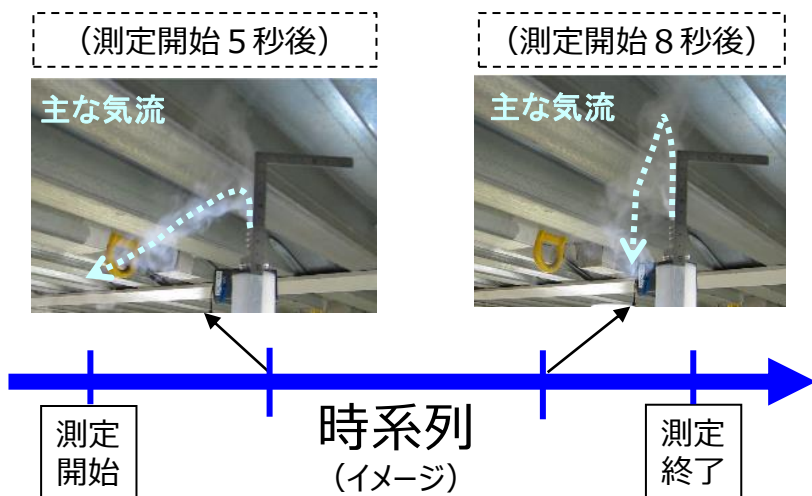
c. 測定目的及び結果

(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。

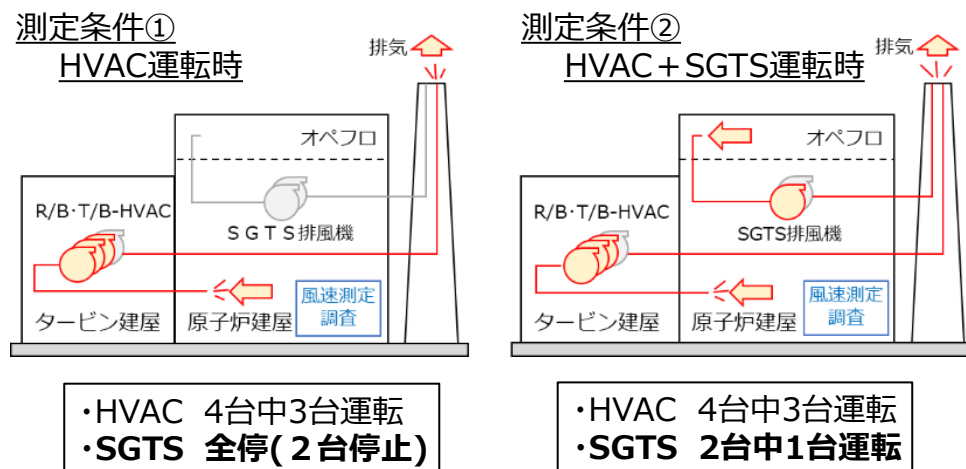


(d) SGTS運転による影響確認 (風速測定及び気流確認)

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。
- 浅いくぼみ（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。深いくぼみ（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

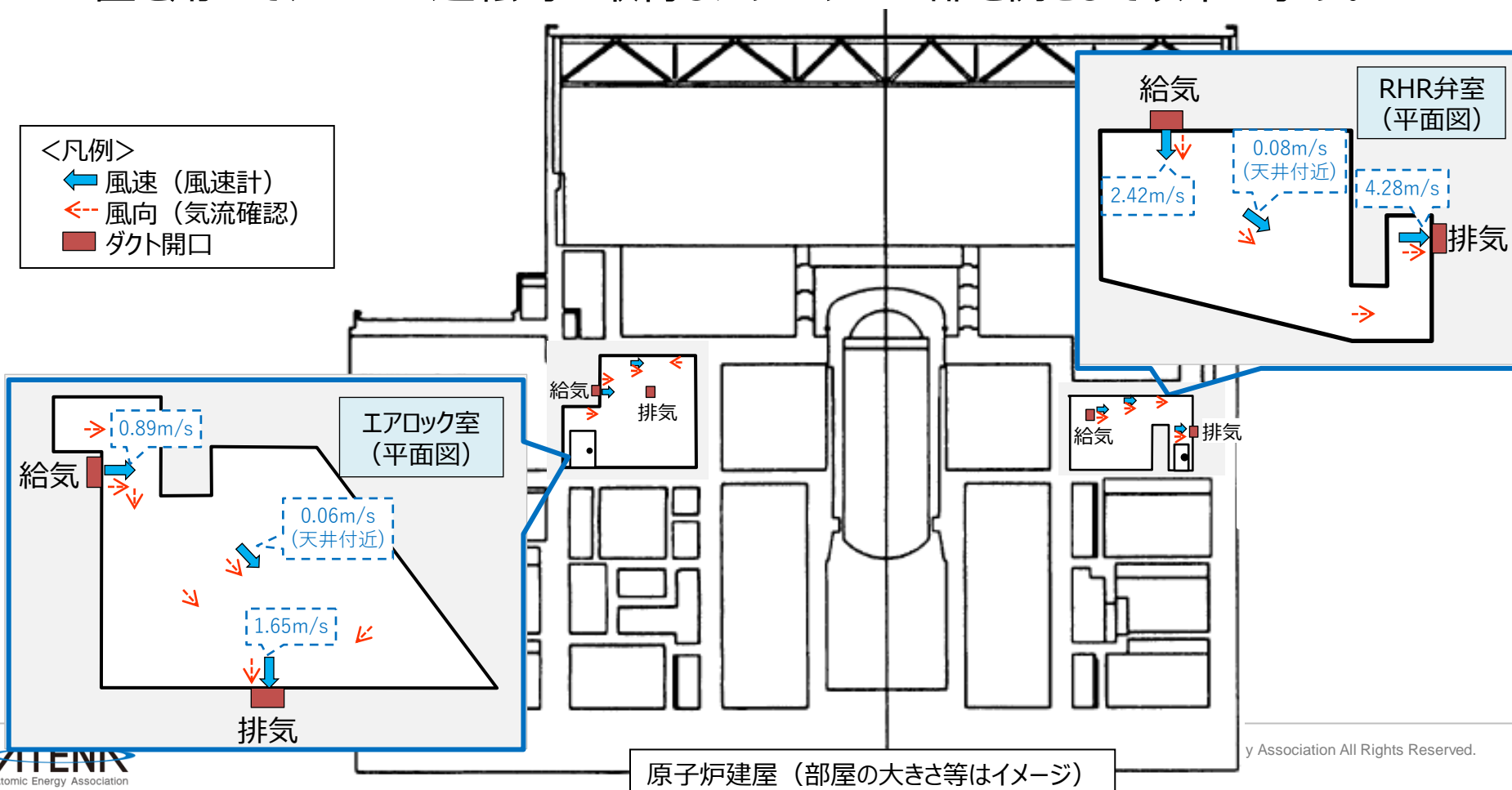
- 今回、平常時（HVAC運転時）の実機による風速測定を行ったが、シビアアクシデント発生時とは環境が異なることから、今回の測定結果をもとにシビアアクシデント条件下の水素の流れをどのように推定していくのか引き続き検討を行い、最終的な水素防護対策の検討に活用していく。

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)

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））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、試験方法が決めた上で、必要に応じて規制庁と相談、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

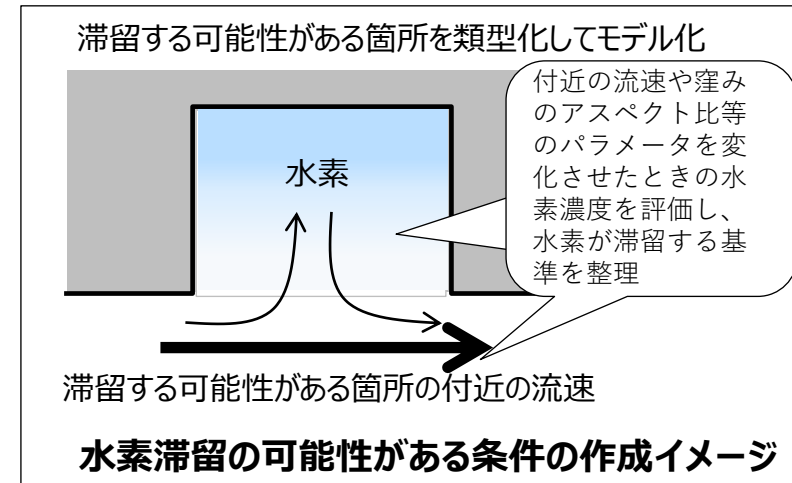
上記の評価結果、実機風速測定データ等から水素滞留の可能性のある条件を作成

(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の評価。

(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規制庁に説明していく。