設備改造を含めた水素防護対策検討

2025年6月

原子力エネルギー協議会

（ATENA）

Copyright © Atomic Energy Association All Rights Reserved.

目次

1. 経緯・目的
2. シビアアクシデント時を前提とした空調設備使用に関する懸念整理
3. 高水素濃度下における防爆化の知見整理
4. 空調設備運転に伴う着火リスクの低減検討
5. まとめ
6. 今後の進め方

ATENA Atomic Energy Association
Copyright © Atomic Energy Association All Rights Reserved.

1．経緯・目的

- 1F事故の調査・分析から得られた知見のうち水素防護対策については、アクションプランを制定し実施項目ごとに計画的に検討を進めており、HVACは使用できる状況にあると判断すれば水素排出手段として使用するものとしてAMG改定ガイドを発行し、適宜、改訂してきたところである。
- AMG改定ガイドには、事故時におけるHVAC使用上の留意事項等や、非常用電源を常用母線へ給電する手順や隔離インターロックの解除手順を記載しているため、高水素濃度下における防爆化に係る知見整理を踏まえて追記すべき事項の検討を行った。
- また、空調設備（HVAC/SGTS）を、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として使用することについての実現性を確認することを目的に、設備改造を含めた水素防護対策の検討を行った。具体的には、シビアアクシデント時の環境下等における空調設備の機能維持や、高水素濃度下における防爆化に係る知見整理、空調設備運転に伴う系統機器の着火リスクの低減対策について検討を実施した。
- さらに、AMG改定ガイドにてHVACに非常用電源から給電する手順を定めている状況を踏まえ、HVACの電源強化要否の検討に資するため、空調設備を含む電気設備への着火リスク低減対策についても検討を行った。

Copyright © Atomic Energy Association All Rights Reserved.

２．シビアアクシデント時を前提とした空調設備使用に関する懸念整理(1/3)

空調設備の強化に係る検討として、動作要求機器に対し、シビアアクシデント（SA状態/設計上想定しているSA環境を超える条件（以下、「SAを超える状態」という。））時の耐性を確認

- シビアアクシデント時の機能維持に関する設備耐性について、現設計に基づき課題の整理・対応の検討を実施
- 環境条件については、格納容器の健全性（漏えい率）が維持されている場合には水素濃度が可燃限界に到達しないことを確認済のため、漏えい率が一定程度想定を超えた状態も想定
- 耐震性については、常用系であるHVACを対象に、重大事故等対処設備に対する要求への適合を想定して、課題の整理・対応の検討を実施（重大事故等対処設備であるSGTSは、耐震性がある）
- 現状、BWRプラントでは空調設備は可燃限界到達前に停止する対応をとる為、水素以外の環境条件に対する耐性について整理（水素についてはスライド6～9にて整理）

課題	HVAC	SGTS
温度・湿度耐性	常用系のDB設計の為、耐性無し。	SAで用いる為、基本的には耐性有り。 ただし、SAを超える状態の場合は一部機器に課題有り。 （SGTSファン電動機等）
耐震性	常用系（耐震Cクラス）の為、耐性無し。 耐震性向上のためには大規模な工事が必要。	SAで用いる為、耐性有り。

Copyright © Atomic Energy Association All Rights Reserved.

２．シビアアクシデント時を前提とした空調設備使用に関する懸念整理(2/3)

HVACの運転開始・運転継続時の課題整理

運転開始・運転継続を行う場合の課題について、設備設計、放射性物質の放出低減及び規制対応の観点で課題の整理及び対応方策の検討を実施した。ここで、SGTSについては、重大事故等対処設備として位置付けており、運転開始・運転継続について特段の課題はないため、HVACを対象に検討を実施した結果を示す。

【設備設計】

- HVACは常用電源から給電の為、非常用電源又はSA電源から給電が必要。この場合、送風機・排風機の電源容量分の確保が必要。
- HVACは事故時に自動隔離されるインターロックを有するため、運転継続するためには、インターロックの解除が必要となる。サポート系が健全な状態であればインターロックを改造することにより対応が可能（隔離弁の駆動源である圧縮空気系喪失時には現場操作が必要）

※：代表プラントにおける検討では、HVACの送・排風機起動のため、隔離信号の解除、隔離弁全閉信号の解除が必要

【放射性物質の放出低減】

- HVACには、高性能粒子フィルタ及びチャコールフィルタが設置されていないため、SGTSに対して放射性物質（よう素）の放出量は大きくなるため、被ばく線量はSGTSに比べて増加するため、放射性物質の濃度を低減する為の対応が必要となる可能性がある。
- SGTSと同等の低減機能を持たせるには、代表プラントにおける検討では、高性能粒子フィルタで約50倍、チャコールフィルタで約75倍のフィルタ枚数が必要との結果となっている。

Copyright © Atomic Energy Association All Rights Reserved.

２．シビアアクシデント時を前提とした空調設備使用に関する懸念整理(3/3)

【規制対応】

- HVACの運転開始・運転継続を行う場合、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　第四十四条（放射性物質の濃度低減設備）の、放射性物質の濃度低減設備に対する要求事項を満足する必要がある。
- シビアアクシデント時において、R/B内の空気は高線量となることが想定されるため、 SGTS配管と同様に「JSMEクラス2管」での管理が必要となる。この場合、HVACのダクトは「溶検対象」の設備となり、溶検の検査項目に対応させるためダクトの改造が必要となる。

以上から、空調設備をシビアアクシデント（SA状態/SAを超える状態）時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として使用する場合、特に常用系であるHVACについては、大規模かつ広範囲な改造（耐環境性の確保、耐震性の強化、ダクトの改造等）が必要となることを確認した。

また、現状で想定する事故状況に応じて使用可能であれば使用する場合でも、中央制御室運転員や緊急時対策所要員への被ばく影響が大きくなることから、HVAC使用時は中央制御室や緊急時対策所での被ばく低減措置を講じることが望ましいことを確認した。【必要であればAMG改定ガイドに反映】

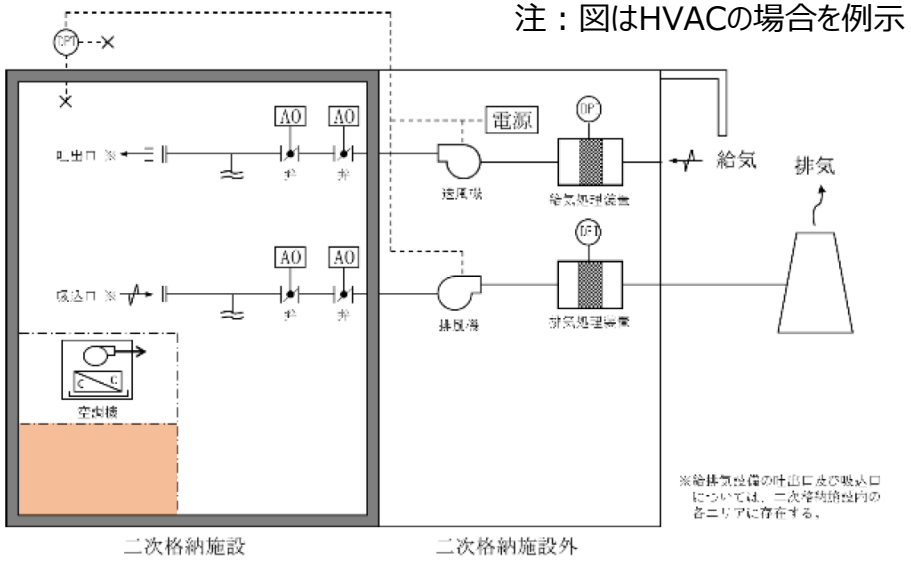
Copyright © Atomic Energy Association All Rights Reserved.

3．高水素濃度下における防爆化の知見整理(1/2)

空調設備を使用する水素環境の整理

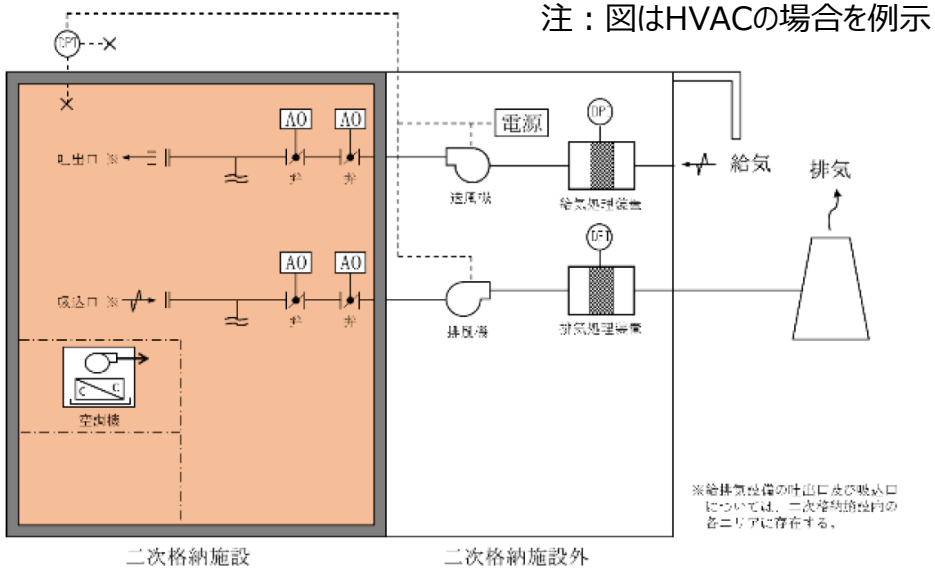
【空調設備のない特定のエリアが可燃濃度を超過】

注：図はHVACの場合を例示



【二次格納施設全体が可燃濃度を超過】

注：図はHVACの場合を例示



- 流路内における着火防止と、 空調設備を含む電気設備の防爆化の両者の観点が必要
- 空調設備のない特定のエリアが可燃濃度を超過する環境、二次格納施設全体が可燃濃度を超過する環境で使用を想定する場合の両方において、流路内における着火防止を考慮する必要がある（詳細はスライド8）。
- 二次格納施設全体が可燃濃度を超過する環境で使用を想定する場合、 空調設備を含む電気設備の防爆化が必要となる（詳細はスライド9）。さらに、水素爆発を防止するためには、二次格納施設に設置されるその他設備（着火源となりうる設備）全ての防爆化が必要となる（既設炉でHVACのみ改造したとしても水素対策としての効果は限定的）。

Copyright © Atomic Energy Association All Rights Reserved.

3．高水素濃度下における防爆化の知見整理(2/2)

原子力分野以外の知見も踏まえて着火源に関する知見を整理

- 過去の原子力分野の水素爆発事象、その他の危険物施設における火災事故等の調査を行うとともに、着火源について確認を実施した。
- 上記の確認結果を基に、シビアアクシデント時に原子炉建屋内で着火源となる可能性のあるものを抽出し，着火源の種類ごとに特徴を整理した。
- 水素の着火エネルギーは非常に小さいため、特に発生箇所が特定できない静電気火花の着火源に対して、水素の着火可能性を排除することはできない。

着火源の種類	着火源の特徴
静電気火花	人体の帯電電位レベル2kV(=0.2mJ相当)でも最小着火エネルギー0.02mJを上回り、着火する可能性
自己着火、 高温物との接触	空気中、大気圧条件での自己着火温度520～570℃高温物と接触した場合に着火する可能性
電気火花	商用電源の負荷回路で発生する電気火花が最小着火エネルギー以上の場合に着火する可能性
機械的衝撃、 摩擦火花	鋼材や合金の衝突・落下により、2000℃程度の高温微粒子が発生して着火する可能性
触媒等	PARで高濃度水素を処理する際に、触媒部温度が1000Ｋを超えた場合に着火する可能性
容器（配管） 壁面との接触	錆等が配管内壁面に衝突し、最小着火エネルギー以上となった場合に着火する可能性

Copyright © Atomic Energy Association All Rights Reserved.

4．空調設備運転に伴う着火リスクの低減検討(1/2)

空調設備の流路内における着火防止対策の整理

- 前スライドで示した着火源の種類及び特徴を踏まえ、代表プラントを対象に、空調設備の流路内において発火可能性のある箇所を抽出し、着火リスク低減のための対策について検討を実施した。
- 流路内の着火源として、発生箇所が特定できない静電気火花があることや特定の着火源に対する着火リスク低減対策が、その他の着火源の着火リスクを増加させる場合もあることから、流路内における水素の着火可能性を排除することはできない。

着火源の種類	流路内で発火可能性のある箇所	着火リスク低減対策例
静電気火花	ダクト流路全般	・アースの設置 ・静電気の起きにくい材料の採用
自己着火、 高温物との接触	ー （ダクト流路内には高温物なし）	ー
電気火花	電気ヒータ（SGTSの場合）	・給電せず使用しない（フィルタ性能が低下する可能性あり）
機械的衝撃、 摩擦火花	ダンパ摺動部、可動部接触面	・接触部へのゴム設置（静電気のリスクは増加）
触媒等	ー （ダクト流路内には対象物なし）	ー
容器（配管） 壁面との接触	ダクト流路全般	・ダクト内面ライニング又は塗装

Copyright © Atomic Energy Association All Rights Reserved.

４．空調設備運転に伴う着火リスクの低減検討(2/2)

空調設備の系統構成機器や電気設備における防爆対策について整理

代表プラントを対象に、二次格納施設全体が可燃濃度を超過する環境で使用することを想定して着火源となりうる空調設備の系統構成機器や電気設備の防爆化検討を実施した結果は以下のとおり。

- HVAC、SGTS共通

  電磁弁、リミットスイッチ、電動機等：防爆型への変更が必要（合わせて耐震対応も必要）

- HVAC

  計器類：防爆型の伝送器やスイッチが一般産業向けのみであり、現状は適用不可

- SGTS

  計器類：防爆型の伝送器やスイッチが一般産業向けのみであり、現状は適用不可

  これらはデジタル品のため、耐環境性（放射線環境）の合格見通しが低い

上記の空調設備の系統構成機器や電気設備を対象とした防爆対応に加えて、完全な着火防止のためには、二次格納施設内の着火源となりうる全ての機器に対しても防爆対応が必要となる。

また、これまでの水素燃焼事例でも、明確な着火箇所の特定に至っていない場合もあることも踏まえると、二次格納施設全体が可燃濃度を超過する環境で、水素燃焼を防止することは現実的ではない。

以上から 着火源となりうる機器の網羅的な防爆化は困難なため、濃度管理によるリスク低減対策が有効であると考えられる。

Copyright © Atomic Energy Association All Rights Reserved.

５．まとめ

アクションプランに示した設備改造を含めた水素防護対策検討として、「HVACの強化に係る検討」、「HVACの運転開始・運転継続に係る検討」及び「着火リスクの低減に係る検討」を行い、以下の結論を得た。

- 空調設備のない特定のエリアが可燃濃度を超過する環境または二次格納施設全体が可燃濃度を超過する環境のいずれにおいても、水素の着火エネルギーが極めて小さく着火可能性を排除できないことから、空調設備使用は現実的ではないため、設備改造ではなく濃度管理によるリスク低減対策が有効であることが分かった。
- ただし、この検討結果からAMG改定ガイドへの影響を確認すべき事項（以下①～②）が抽出されたため、 今後影響を確認し、必要に応じてAMGへの反映等を実施していく。なお、米国の手順も確認しており、その知見からAMG改定ガイドに反映すべき事項が無いことを確認している。
  - ① HVACは事故時に自動隔離されるインターロックを有するため、運転継続するためには、インターロックの解除が必要（AMG改定ガイドに反映済）
  - ② MCRや緊対所の被ばく影響が大きくなることから、HVAC使用時やBOP/トップベント使用時はMCRや緊対所での被ばく低減措置を講じることが望ましい

Copyright © Atomic Energy Association All Rights Reserved.

6．今後の進め方

- 今回の検討結果における空調設備使用は現実的ではなく、可燃限界未満での濃度管理によるリスク低減対策が有効との結果を踏まえ、AMG改定ガイドに記載の空調設備使用の考え方は踏襲しつつ、検討から得られた知見としてMCRや緊対所の被ばく影響及び高水素濃度下における防爆化の知見について、下記２．（２）へのインプットとし、AMG改定ガイドの改訂等の検討を進める。
- また、今回の検討結果（下記３．（５））は、下層階の防護対策検討（下記３．（４））における各社の意思決定のインプットとして活用していく。

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（改訂２版）（抜粋）

実施項目	実施主体	2024年度上期	2024年度下期	2025年度	2026年度	2027年度以降
2.AMGの改訂 (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	ATENA-WG ／各事業者			「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へ必要に応じて反映 （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		
3.対策の具体化に向けた検討 (2)実機による風速等の測定	ATENA-WG	試験成立性・要否判断		解析条件検討・解析評価（電中研研究と連携）	▼解析結果	
(3)水素滞留・拡散挙動の評価手法構築・評価	ATENA-WG		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）	（必要に応じ追加検討）
(4)下層階の防護対策検討	各事業者		（必要に応じて先行的な対策検討）			例）水素濃度計の追設検討、PARの追設検討、扉改造の検討等
(5)設備改造を含めた水素防護対策検討	ATENA-WG					

Copyright © Atomic Energy Association All Rights Reserved.

【参考１】

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（改訂２版）（１/２）

2024.6.7

実施項目	実施主体	2022年度	2023年度	2024年度上期	2024年度下期	2025年度	2026年度	2027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	▼アクションプラン変更（改訂１）	▼アクションプラン変更（改訂２版）		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	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 ▼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	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へ必要に応じて反映 （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

Copyright © Atomic Energy Association All Rights Reserved.

【参考１】

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（改訂２版）（２/２）

実施項目	実施主体	2022年度	2023年度	2024年度上期	2024年度下期	2025年度	2026年度	2027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	ATENA-WG	プラントウォークダウン手順書検討 ▼手順書（初版）作成 プラントウォークダウン実施（下層階で水素の滞留が予想される箇所の特定） 適宜プラントウォークダウン結果を反映						
（２）実機による風速等の測定	ATENA-WG	風量測定結果 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	建屋開放実験（BOP）等の検討・実施		解析条件検討・解析評価（電中研研究と連携） ▼解析結果	（必要に応じ追加検討）	
（３）水素滞留・拡散挙動の評価手法構築・評価	ATENA-WG		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（各事業者） 適宜評価結果を反映		
（４）下層階の防護対策検討	各事業者		（必要に応じて先行的な対策検討）				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	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を通しての運転継続可否検討					

短期的な検討　中長期的な検討

Copyright © Atomic Energy Association All Rights Reserved.