

水素防護対策の検討状況について

2022年12月27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
 - (1) これまでの経緯
 - (2) 水素防護対策の検討アプローチ
2. 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
3. アクションプランの概要
 3. 1. 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
 - (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
 3. 2. 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
 - (2) 実機による風速等の測定
 - (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
4. まとめ

(1) これまでの経緯

- ✓ 「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」（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」（2022年7月28日開催）では、水素防護対策の検討について、BWR事業者で共通的なアプローチとなることから、ATENA及び個社で役割分担のうえ、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。

(2) 水素防護対策の検討アプローチ

- ✓ 新規制基準対応済みプラントは、多くの炉心損傷防止対策・格納容器破損防止対策が導入済みのため、原子炉建屋の水素爆発に至る可能性は極めて小さい。
- ✓ 従って、対処すべき事故の態様、水素漏えい箇所や規模等についての想定は困難であることから、ある事象の条件を設定し対策を検討する従来のアプローチよりも、プラントの置かれた状況に応じて柔軟な対応が取れるようなマネジメント策を幅広く検討しておく方がより効果的である。
- ✓ このため、各水素防護対策候補※に対して水素濃度、被ばくの観点からの簡易評価を実施して対策案の特徴と機能させるための条件、優先順位付け等を整理し、広範な水素漏えい事象に対応できるように検討を進めることとした。

※水素防護対策候補

格納容器から原子炉建屋への水素漏えい防止・抑制対策（格納容器ベント）

原子炉建屋に漏えいた水素の排出対策（自然排出、強制排出）

原子炉建屋内での処理（PAR）

(2) 水素防護対策の検討アプローチ（前ページの続き）

- ✓ まず、**短期的対応**としてSA時に**既存設備を原設計のまま活用した水素防護対策の検討**を行い、水素滞留を防止すべく**アクシデントマネジメントガイドライン（以下「AMG」という。）を改定**する。同時に、原子炉建屋下層階で水素が滞留する可能性の調査・評価を行うため、**プラントウォークダウンを実施し、下層階で水素が滞留する可能性がある箇所の選定**を進めるとともに、建屋内の水素拡散挙動を確認する目的で**常用換気空調系（以下「HVAC」という。）**、**非常用ガス処理系（以下「SGTS」という。）** 運転時の実機による**風速等の測定**を行う。
- ✓ **中長期的対応**としては、短期的対応で選定した水素滞留の可能性のある箇所に対して、その場所が本当に着火リスクとなる滞留が起きるか明らかにするため、**水素滞留・拡散挙動の評価手法構築・評価**を行う。また、実機による風速等の測定として**ブローアウトパネル（以下「BOP」という。）** 開放による**建屋開放実験の要否検討**を行う。これらにより選定された水素滞留の可能性のある箇所に対して、**追加的な対策として下層階の防護対策の検討**を行う。さらに、**建屋内水素濃度が上昇した場合等でも水素の排出機能が維持できるよう設備改造を含めた水素防護対策の検討**を行う。これらの**中長期的対応の検討結果をAMGへ反映**する。
- ✓ 以上をアクションプランとしてまとめてP 5 ~ 6 に示す。

2. 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（1/2）

実施項目	実施主体	2022年度 第1四半期	2022年度 第2四半期	2022年度 第3四半期	2022年度 第4四半期	2023年度	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	アクションプラン検討	▼アクションプラン作成（初版）		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 (P7参照)	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	▼AMG改定ガイドライン策定（初版）		
	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 (P11参照)	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		

2. 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（2/2）

実施項目	実施主体	2022年度 第1四半期	2022年度 第2四半期	2022年度 第3四半期	2022年度 第4四半期	2023年度	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 (P12参照)	ATENA-WG		プラントワークダウン手順書検討 ↑ 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)	手順書（初版）作成 (適宜、プラントワークダウン結果を踏まえ手順書を見直し)	適宜プラントワークダウン結果を反映			
(2) 実機による風速等の測定 (P15参照)	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 試験の成立性 要否判断	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 (P17参照)	ATENA-WG				建屋開放実験（BOP）の検討・実施	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 (P18参照)	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	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 (P18参照)	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を通しての運転継続可否検討		

3. 1. 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

○目的

- ✓ 水素防護対策の特徴や優先順位を整理し、各事業者のAMG改定のための基本的考え方等を取りまとめたAMG改定ガイドラインを作成する。
- ✓ 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する。
- ✓ また、AMG改定ガイドラインを考慮し、各プラントのAMGを改定する。

○これまでの検討状況

- ✓ 建屋漏えい時の簡易評価として、各水素防護対策の水素処理・排出能力、敷地境界での被ばく影響を簡易的に評価した。
- ✓ また、各水素防護対策に必要な電源、インターロックの影響等について整理した。
- ✓ 各水素防護対策の特徴等を踏まえ、各対策の導入条件や優先順位を検討中。

3. アクションプランの概要 (2 / 12)

各水素防護対策に係る簡易評価結果及び対策の特徴の整理結果

		水素処理・排出能力	被ばく影響 (敷地境界)	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た水素の処理・排出策							
強制排出	SGTS	中	影響 小 (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 ^{※2} 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	影響 小 (排気筒放出)	要 (常用母線)	事故発生時 ^{※2} に隔離	・下層階に吸込口あり	・着火リスクあり ・耐震Cクラス
自然排出	BOP	大	影響 中 (地上放出)	不要	—	—	—
	トップベント	小	影響 中 (地上放出)	不要	—	—	—
触媒式水素再結合器 (PAR)		中	—	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)	影響 大 ^{※1} (早期ベント実施時)	不要	—	—	—

※1：早期ベント（事象発生から十数時間以内を想定）をすると、被ばく影響の大きい短半減期核種の希ガス（格納容器ベントのフィルタで捕捉不可）が直接環境に大量に放出されるため。

※2：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。

3. アクションプランの概要 (3 / 12)

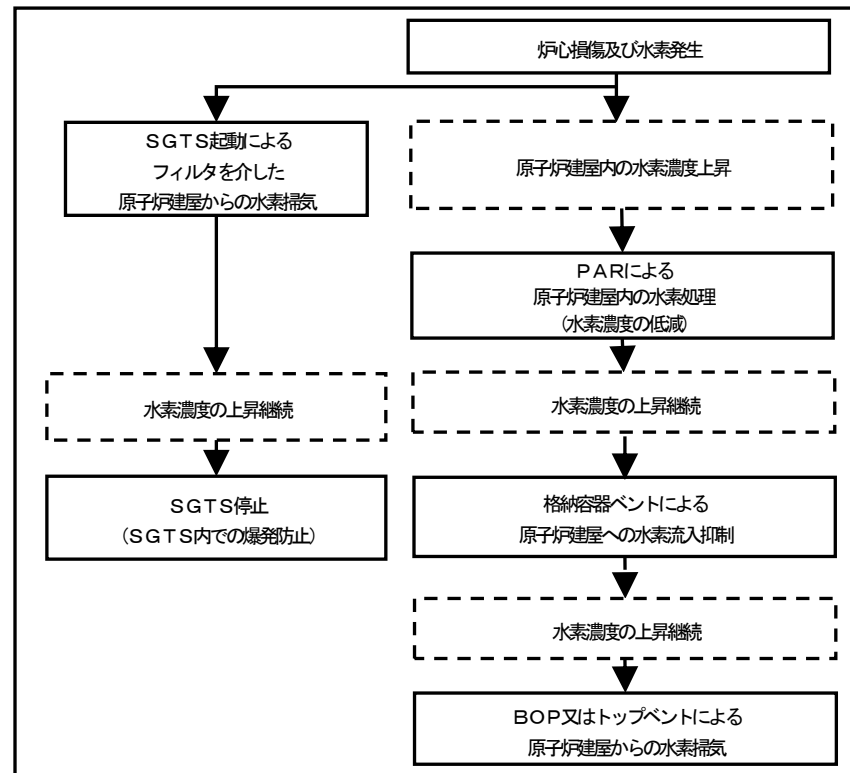
各水素防護対策の導入条件の整理結果

機能・設備		導入条件等	備考
原子炉建屋へ漏えいしてきた水素の処理・排出策			
強制排出	SGTS	炉心損傷を判断した場合。	<ul style="list-style-type: none"> 原子炉建屋水素濃度が2vol%程度となった場合は、水素爆発を誘引する可能性があるため、SGTSを停止する。
	HVAC	同上	<ul style="list-style-type: none"> HVACの電源は常用電源のため、外部電源健全時の場合のみ使用可能。 事故発生時に自動隔離されるため、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が必要。
自然排出	BOP	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に開放する。	<ul style="list-style-type: none"> 格納容器ベントを実施したにも関わらず原子炉建屋水素濃度の上昇傾向が継続する場合は、BOP又はトップベントを開放し、原子炉建屋に滞留した水素を排出する。
	トップベント		
建屋内水素処理	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、能動的に作動する。	<ul style="list-style-type: none"> 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			
PCVからの水素排出	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。	<ul style="list-style-type: none"> SGTSやPARが動作しているにも関わらず、原子炉建屋の水素濃度が上昇する場合、原子炉建屋への水素の漏えいを抑制するため、FCVSによる格納容器ベントを実施する。

3. アクションプランの概要 (4 / 12)

○今後の検討 (～今年度中)

- ✓ これまでの検討状況を踏まえ、**AMG改定ガイドラインを作成**する。
- ✓ また、**対応手順のひな型 (AMGの改定版の例) を作成**する。



【新規制基準対応を踏まえたAMGのフローの例】

（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

○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。

3. アクションプランの概要 (6 / 12)

3. 2. 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 (プラントウォークダウン)

○目的

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

○取組計画・現在の取組状況

➤ 標準手順書の作成

「水素が滞留するおそれがある箇所」を形状等から特定する標準手順書を作成済み。

➤ ウォークダウン実施

✓ 自プラントの状況確認のため、各社それぞれ実施済み。

- 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、滞留する可能性がある形状を「水素が滞留するおそれがある箇所」として確認。

✓ 各社確認結果を共有した。確認結果を踏まえ、自プラントの現場確認の追加要否を検討中。

➤ 解析モデル構築に向けた滞留するおそれがある箇所の特定と寸法の整理

「水素滞留・拡散挙動の評価手法構築・評価」のインプット情報とするために、滞留するおそれがある箇所の特定と寸法の整理を行う。

3. アクションプランの概要 (7 / 12)

(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)

○現場確認における作業例



現場確認の例①



現場確認の例②



CADを使用した例



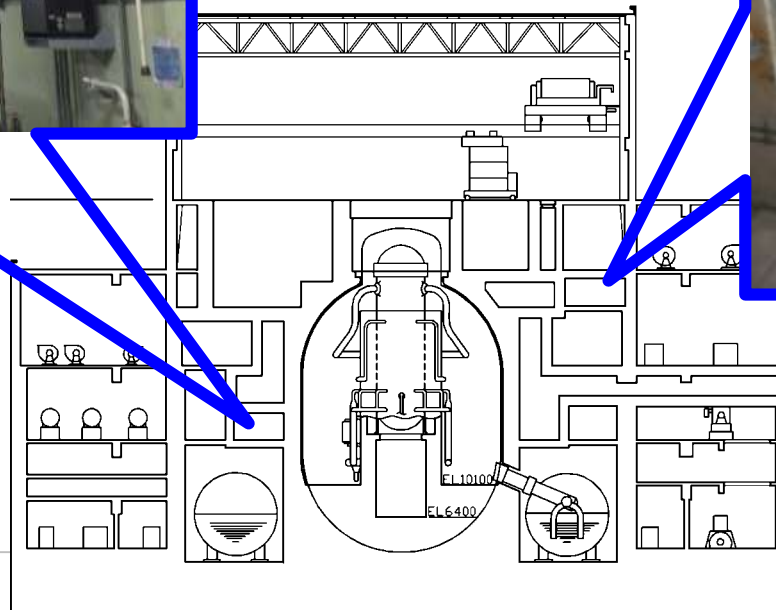
距離計/レーザーポインタ、
カメラ、図面等

現場確認に使用したツールの例

3. アクションプランの概要 (8 / 12)

(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)

○現場確認において調査した箇所为例



（2）実機による風速等の測定

○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の実施要否について検討を進める中で、**風速計の測定限界が小さく、建屋開放実験によって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、**建屋開放実験に先立って、HVAC、SGTS運転中の風速等を測定し、建屋開放実験の実施要否の判断材料の一つ**とするとともに、**測定結果を「水素滞留・拡散挙動の評価手法構築・評価」へ反映**することとした。
- ✓ 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、**規制庁と相談、調整させていただきたい。**

3. アクションプランの概要（10 / 12）

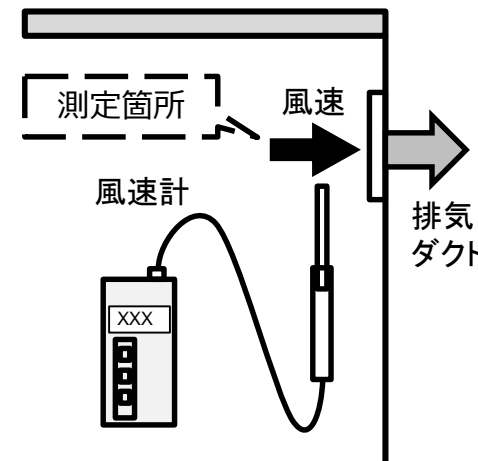
(2) 実機による風速等の測定

○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」の情報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

実機での測定に向け、代表箇所及び測定方法をBWR各社とメーカーにて協議中。

3. アクションプランの概要 (11 / 12)

(3) 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、水素滞留のおそれが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

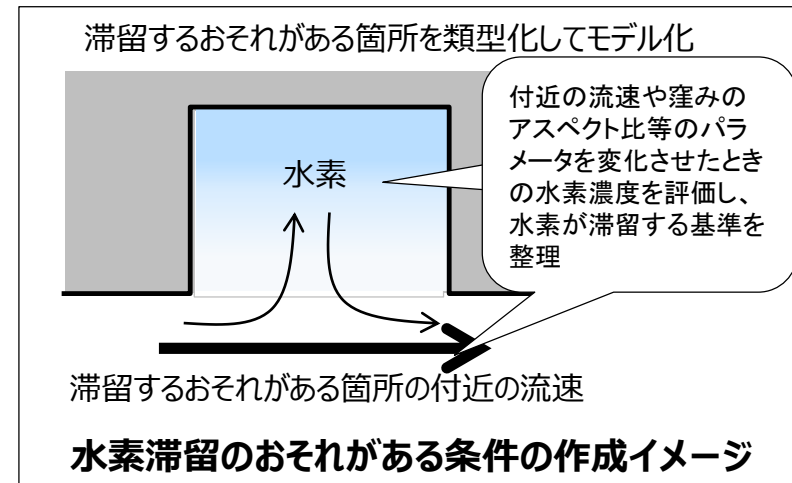
- ✓ プラントウォークダウン等から得られたデータを元に 水素が滞留するおそれがある箇所の類型化
- ✓ 類型化した箇所をモデル化し、解析コードにて滞留箇所付近流速、窪みのアスペクト比等のパラメータを変化させ、水素濃度を評価

➤ 水素滞留のおそれがある条件の策定

上記の評価結果、実機風速測定データ等から水素滞留のおそれがある条件を作成
(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おそれあり等)

➤ 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)



（4）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。

○今後の取組計画・現在の取組状況

現時点での対策例は以下の通り。

- （対策例）・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

○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

- ✓ 現状、アクションプランに基づき、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んでいる。
- ✓ 今後は、プラントウォークダウン結果を踏まえ、建屋内風速測定、水素滞留・拡散挙動の評価を実施して水素が滞留するおそれがある箇所を確認し、その結果を下層階の防護対策検討や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）の検討に反映していく。
- ✓ また、水素防護対策の検討結果は、AMG改定ガイドラインとしてまとめ、適宜、各事業者のAMG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。

保安規定に係る現状と改正案を踏まえた今後の対応方針

【保安規定の現状の整理】

- ✓ 実用炉規則第83条及び第92条に重大事故等対策の記載があり、これに基づき原子炉建屋の水素防護対策を含む発電用原子炉施設の保全に係る措置を保安規定に定めている。
- ✓ 設置許可には、技術的能力審査基準「1. 7 原子炉格納容器の過圧破損を防止するための手順等」の対応として、原子炉建屋水素濃度上昇時の格納容器ベント基準を定めている。
- ✓ 保安規定には、実用炉規則第92条、保安規定審査基準、技術的能力審査基準及び設置許可に基づき、「原子炉格納容器の過圧破損を防止するための手順等」として原子炉建屋水素濃度上昇時の格納容器ベント基準を定めている。

【今後の対応方針】

- ✓ 格納容器ベント手順の目的の1つとして「原子炉建屋の水素防護対策」を明確化するとともに、実施判断基準に達した場合にためらわず実施することについて、再稼働までに各事業者において計画的に保安規定変更認可申請を行う。