

水素防護対策に関するBWR事業者への質問票

令和4年3月25日
原子力規制庁
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

回答事業者名：

日本原子力発電株式会社

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は、令和3年12月8日の原子力規制委員会において、水素防護対策を議論するための素材として、対策例を2例提示しました¹。これに関し、以下について回答ください。

1. 「対策例①：水素爆発の未然防止対策として格納容器フィルタベント機能を用いる」に関する質問

炉心損傷後～格納容器破損前の環境下で早期に格納容器フィルタベントを使用し、水素を放出する場合を想定し質問します。貴社の見解を教えてください。

Q①-1 ベントするタイミングを判断するためには、そのための情報が必要です。原子炉建屋のどこでどのようなパラメータが取得できればその判断が可能か、及びパラメータの検知の実現性について、説明してください。

注：回答内容は現時点での検討状況を踏まえたものであり、今後の検討進捗等により変更となる可能性があります。（以降、全ての回答について同様）

原子炉格納容器（以下、「PCV」という。）から原子炉建屋（以下、「R/B」という。）への水素や放射性物質の漏えいに対して、早期ベントの実施を判断するためのパラメータとして以下を想定している。

・R/Bの水素濃度，放射線量

加えて、PCVが破損する恐れが高まった場合においても早期ベントの実施が有効であることが考えられ、判断パラメータとして以下を想定している。

・PCVの温度，圧力，スプレイ流量，ポンプ等の運転状態

パラメータの検知については、電源機能の強化や可搬型計測器の配備等により十分な実現性があると考えている。

R/B内の水素濃度については、PCVの過圧・過温時に主に漏えいが生じると考えられ

¹ 別紙「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における検討状況」

るフランジ・ハッチ類（※）の周辺に検出器を設置することで、基本的に代表性は確保できると考えている。

※：トップヘッドフランジ，ドライウェル機器ハッチ及びCRD搬出ハッチ，所員用エアロック，サプレッション・チェンバアクセスハッチ

ただし，その他の部分（電気ペネトレーション等）からの漏えいや局所滞留の可能性も踏まえ，継続的に調査・検討を行っていく方針である。

Q①-2 ベントのタイミングをどのように設定するか、その際の放射性物質（希ガス等）の放出量の想定を、格納容器破損防止の有効性評価の評価ケースとの比較で説明してください。

早期ベントは、各種のSA対策が想定どおりに進捗・機能していない場合に実施を検討するものと考えており、電源機能や注水機能等の復旧対応状況に加え、Q①-1に示したようなパラメータを踏まえて総合的に判断する必要があると考える。

既存の対応手順として想定しているベント判断基準の例を以下に示す。

- ・ R/B内の放射線モニタ類の指示値の異常な上昇がある場合
- ・ R/B内水素濃度が2vol%に到達・上昇継続する場合
- ・ PCVスプレイが実施できない場合
- ・ PCV温度が200℃を超えて上昇する場合

仮に、事故後5時間程度でのベント実施を考えた場合、PCV破損防止の有効性評価の評価ケース（約19時間でベントを実施）に対して希ガスの放出量は2～3倍程度になると考えられる。（下図参照）

一方、エアロゾル等の放出量については、サプレッション・プールやフィルタ装置での除去効果を考慮すると、PCV破損防止の有効性評価ケースに対して大幅に増加する可能性は低い（※）と考えられる。

※：有効性評価ケース（サプレッション・チェンバ側からのベント時）におけるCs-137放出量は、ベント放出よりもR/Bへの漏えいが支配的

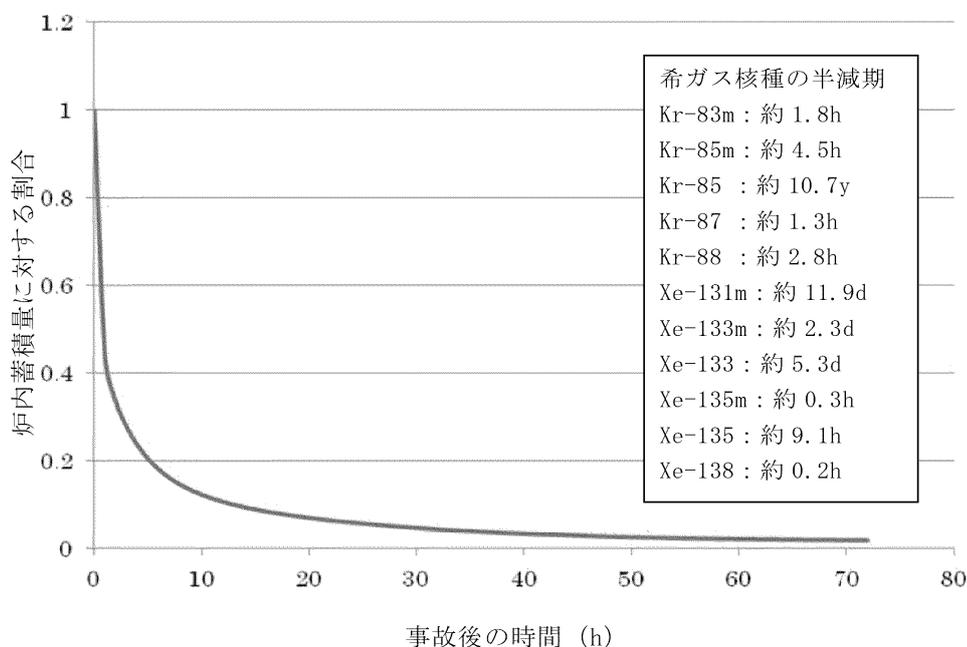


図 炉内蓄積量に対する割合の時間変化（希ガス核種合計）

Q①-3 ベントのタイミングを早めることによって、既存のSA対策設備、体制・手順等で成立しないものがありますか。ある場合、具体的な設備、体制・手順等と成立しない理由について説明してください。

炉心損傷後にベントを実施する場合、運転員及び重大事故等対応要員は中央制御室（以下、「MCR」という。）待避室や緊急時対策所等に待避する必要がある。

そのため、ベント判断時にMCRでの操作や可搬型設備の準備作業等のSA対策を実施していた場合には、当該作業は全て中断となり、プルーム通過等による線量低下を確認後、再開することとなる。

なお、ベント判断時点から要員退避やMCR待避室・緊急時対策所の加圧操作等を開始した場合、完了までに1時間程度を要すると想定される。

また、電源喪失等によりMCRからベント弁の遠隔操作ができない場合、現場でのベント実施には移動・操作を含めて3時間程度を要する。

※対策例①は、格納容器フィルタベントを原子炉建屋の損傷防止を目的とする設備としても用いることとなります。このため対策例①を採用した場合に、対策例①を採ることによって影響を受ける、あるいは対策例①を躊躇する要因がないか確認するものです。

Q①-4 Q①-3のうち、原子炉制御室の運転員が被ばくすることにより、体制・手順等で実施が困難となるものがありますか。ある場合、具体的な体制・手順等と成立しない理由について説明してください。

Q①-3のとおり、ベント実施時には運転員はMCR待避室に待避する必要があり、待避室内でのプラント運転操作は設計上想定していない。

PCV破損防止の有効性評価ケースにおけるMCR運転員の被ばく線量評価は、事故後初期とベント実施時で異なる運転班という前提となっている。また、事故後2時間から原子炉建屋ガス処理系（以下、「FRVS/SGTS」という。）及びMCR換気系を起動する想定としている。

早期ベントを実施する場合、事故後初期からベント実施までを同一運転員で対応する可能性や、希ガス等の放出量増加の影響等を考慮すると、運転員の被ばく線量の増加が考えられる。

また、ベントに伴う作業中断により上記のFRVS/SGTSやMCR換気系の起動操作ができない場合、被ばく線量はより大きくなると考えられる。

※設置許可基準規則第五十九条（運転員が制御室にとどまるための設備）について、同条解釈でいう事故シーケンスとは異なるケースを想定した場合の具体的な影響を確認するものです。被ばくそのものではなく、被ばく評価の方法（DFの設定など）によって評価上影響を受けるという場合には、その旨がわかるように説明してください。

Q①-5 格納容器から原子炉建屋への水素の漏えいと、格納容器フィルタベントによる外気への水素の放出を比較した場合、どちらが優位であると考えますか。その理由をできるだけ定量的に説明してください。

現時点で定量的な検討・回答は困難であるが、基本的な考えは以下のとおり。

【SA対策が想定どおり機能しており、PCVが健全である場合】

既存のR/B内の水素防護対策（FRVS/SGTSや静的触媒式水素再結合器（以下、「PAR」という。））により水素リスクは抑制可能と考えられることから、放射性物質の放出を伴うPCVベントよりも、R/Bへの漏えいを許容した対応が優先される。

【SA対策が想定どおり機能しておらず、PCV破損の可能性やR/B水素リスクが顕在化している場合】

水素爆発によるリスクは早期ベントによるリスクを上回ると考えられ、また放射性物質の除去効果の観点からも、ベントによる放出が優位。

ただし、Q①-3, 4に記載のように、事故対応状況によっては作業中断のデメリットが大きい場合も考えられる。

※格納容器フィルタベントの性能として、格納容器フィルタベントが原子炉建屋への水素漏えいを緩和する役割に期待できるかを確認するものです。場合分けが必要であれば、いくつかのケースを例示する形で説明してください。

原子炉建屋の水素爆発の未然防止の効果を期待することが難しい場合は、その理由を回答ください。

Q①-6 対策例①のような要求を規制基準とした場合、貴社の設置している発電用原子炉施設においてどのような設計変更、工事、体制・手順の整備その他の対応が必要になると考えられるか、その対応を行うためにどの程度の期間が必要と考えられるか、現時点で把握している範囲で回答ください。

ベント設備の設計や手順については、現状の方針から大幅な変更等は不要と考えている。

ただし、R/B内での局所滞留といった不確かさを踏まえた対応については、対応方針やそれに伴い必要となる対策について整理している段階であり、期間等について具体的に検討・回答できる段階にない。

※工事等の対応が必要となる場合には、それらを含めた全対応が完了する期間を回答ください。Q①-1により新たに検知設備が必要な場合は、その工事も含みます・また、フェーズ（設計変更、工事など）ごとにどの程度の期間を必要とするのかについても併せて回答ください。

2. 「対策例②（建屋放出）：水素爆発の未然防止対策として原子炉建屋内フィルタ付換気機能を用いる」に関する質問

炉心損傷後～格納容器破損前の環境下で早期に原子炉建屋内フィルタ付換気機能等を使用し、水素を放出する場合を想定し質問します。貴社の見解を教えてください。

Q②-1 SGT Sを作動する、又はトップベントやブローアウトパネルを開放するタイミングを判断するためには、そのための情報が必要です。原子炉建屋周辺のどこでどのようなパラメータが取得できればその判断が可能か、及びパラメータの検知の実現性について、説明してください。

FRVS/SGTSは、R/Bへの放射性物質や水素の流出可能性が生じた場合に速やかに起動すべきであり、R/B隔離信号（※1）が発信した場合に自動起動する設計となっている。

なお、PCV破損防止の有効性評価においては常用・非常用電源の喪失を仮定しているため、炉心損傷判断（※2）及び電源確保後に起動する手順としている。

※1：原子炉水位低L3，ドライウェル圧力高，R/B内モニタ放射能高

※2：PCV内放射線モニタ又は原子炉圧力容器温度にて判断

ブローアウトパネル（以下、「BOP」という。）は、R/Bの閉じ込め機能を解除するデメリットを踏まえ水素爆発のリスクが相応に高まった場合に開放すべきであり、判断パラメータとしてはR/B内水素濃度が考えられる。

パラメータ検知の実現性等については、Q①-1と同様である。

※Q①-1と同旨。

Q②-2 SGTSを作動する、又はトップベントやブローアウトパネルを開放するタイミングをどのように設定するかと、その際の放射性物質の放出量の想定を、格納容器破損防止の有効性評価の評価ケースとの比較で説明してください。

FRVS/SGTSは、R/Bへの放射性物質や水素の流出可能性が生じた場合に速やかに起動すべきであり、事故発生後早期に起動することが望ましい。

PCV破損防止の有効性評価ケースでは、FRVS/SGTS起動前のR/B換気率は無限大とし、起動後（事故後2時間～）もフィルタの除去効果には期待していない。早期のFRVS/SGTS起動やフィルタでの除去効果を仮定すると、放射性物質の放出量は低減すると考えられる。

BOPの開放については、水素爆発のリスクが相応に高まった場合に判断すべきであり、既存の対応手順としては、R/B内水素濃度が2vol%に到達し、PCVベントを実施しても上昇継続する場合に実施することとしている。

BOPの開放を行った場合、PCVから漏えいした放射性物質のR/Bからの放出速度が大きくなり、放出量は増加すると考えられる。

※Q①-2と同旨。

Q②-3 既存のSA対策設備、体制・手順等で成立しないものがありますか。ある場合、具体的な設備、対策、手順等と成立しない理由について説明してください。

FRVS/SGTSについては、事故発生後速やかに（有効性評価では電源復旧後に）起動することとしており、既存のSA対策の成立性に影響はないと考える。

BOPの開放が必要となる状況では、PCVの機能維持やR/Bでの水素抑制といったSA対策が成立していない可能性が高いと考えられるが、仮にSA対策の実施中にBOPの開放を想定した場合、運転員や重大事故等対応要員の被ばくの観点で対策への影響が考えられる。

※Q①-3と同旨。

Q②-4 次の方法により水素を放出する場合の放射性物質放出量を回答ください。

- a) 放射性物質除去（例：SGTSフィルタ）により放出する場合
- b) 放射性物質除去に期待せず（例：ブローアウトパネル）放出する場合

また、a)及びb)が以下の1)～3)の方法で排出できると仮定した場合、原子炉制御室の運転員が被ばくすることにより、体制・手順等で実施が困難となるものとその理由を挙げてください。

- 1) 排気筒から高所放出する場合
- 2) 原子炉建屋のオペレーションフロアの高さで放出する場合
- 3) 原子炉建屋の中下層階からの任意の高さで放出する場合

放射性物質の放出量やそれによる被ばく線量については、PCV内の状況や漏えいの状態、各種の除去効果やSGTS/BOPの放出タイミング等によって大きく左右されるため、現時点で具体的・現実的な評価を実施することは困難である。

なお、PCV破損防止対策の有効性評価ケースと比較した場合の影響についてはQ②-2のとおり。

有効性評価におけるMCRの運転員の被ばく評価についてはQ①-4のとおりであり、FRVS/SGTS起動後の排気筒からの高所放出がBOP等による放出となった場合、放出速度の増加や拡散効果の低減により、運転員の被ばく線量の増加が考えられる。

※制御室居住性への影響については、Q1-4と同旨。

Q②-5 原子炉建屋、SGTS及びブローアウトパネルは設計基準事故対処設備ですが、重大事故時の機能として設計上期待しているものがあるか、あればその機能を説明してください。また、トップベントに設計上期待している機能を説明してください。

重大事故等対処設備として期待している機能は以下のとおりである。

【FRVS/SGTS】

- ・水素排出によるR/B等の損傷防止
- ・MCRにおける被ばく線量の低減

【BOP】

- ・MCRにおける被ばく線量の低減（閉止機能）

【R/B】

- ・水素排出によるR/B等の損傷防止（PARへ水素を導く流路として）
- ・MCRにおける被ばく線量の低減

なお、BOPの開放機能については、水素排出によるR/B等の損傷防止における自主対策設備と位置付けている。

Q②-6 対策例②のような要求を規制基準とした場合、貴社の設置している発電用原子炉施設においてどのような設計変更、工事、体制・手順の整備その他の対応が必要になると考えられるか、その対応を行うためにどの程度の期間が必要と考えられるか、現時点で把握している範囲で回答ください。

現状では、対応方針やそれに伴い必要となる対策について整理している段階であり、期間等について具体的に検討・回答できる段階にない。

※Q①-6と同旨。

Q②—7 トップベントあるいはブローアウトパネルの開閉操作は、建屋に近接して手動操作する運用となっていますが、その作業要員の被ばくと水素爆発に対する安全確保方法について、回答ください。

BOPの開閉操作はMCRから遠隔で実施できる設計であり、操作時の被ばく及び水素爆発に対する安全確保に問題はない。

なお、電源喪失等により遠隔操作ができない場合には現場での開閉操作も可能であるが、その場合の被ばく及び水素爆発に対する安全確保方法については、今後の検討課題であると認識している。

Q②-8 下層階には、換気機能がなく、局所的に水素が滞留する可能性があります。下層階で水素滞留の可能性がある箇所（区画）と、当該箇所（区画）における換気設備の有無とその位置付け、吸気箇所、重大事故時における換気設備の動作状況、ダンパ等の閉止状況を回答ください。

東海第二発電所では、原子炉建屋ガス処理系としてSGTS（非常用ガス処理系）に加えてFRVS（非常用ガス再循環系）を有しており、FRVSの吸気及び排気場所は、R/B内の各階に多数存在（※）することから、FRVS起動時には下層階でも水素滞留が生じる可能性は低いと考えている。

※：吸気場所：地下1階，地上2階，3階，6階（オペフロ）に各1箇所

排気場所：地下2階に3箇所，地下1階～地上5階に各2箇所，
6階（オペフロ）に1箇所

容 量：17,000m³/h（R/B換気率4.8回/d相当）

ただし、局所的な水素滞留が生じ得る箇所（区画）の有無等については、当該区画の換気設備有無等も含めて、今後必要に応じプラントウォークダウン等により調査する方針である。

なお、R/Bの地下2階～地上1階についてはPCVのサプレッション・チェンバに相当する高さである。サプレッション・チェンバ内は極端な過熱状態にはなりにくくPCV貫通部も少ないことから、ドライウエル側と比較して有意な水素漏えい経路が生じる可能性は低いものと考えられる。

※一部の社では既に着手しているプラントウォークダウンによる下層階での水素滞留箇所の把握の状況（例えばペネトレーション室など、こういった区画で滞留する可能性があるか）、今後の予定（現在未実施の社含む）を含めて回答ください。

また、換気設備の位置付けについては、常用・非常用の別や設計基準事故時、重大事故時の使用の有無などについて回答ください。

Q②-9 下層階での水素滞留による水素爆発やその懸念により、重大事故対策の体制・手順等で実施が困難となるものを挙げてください。また、下層階に滞留する水素に対してどのように水素爆発を防止するか、考えうる方法を説明してください。

炉心損傷後においては、R/B原子炉棟内での事故対応操作は基本的に実施しない。

下層階での水素滞留による水素爆発リスクを前提とした場合、影響規模にもよるが、MCRを含めた対応要員の活動やSA設備の健全性といった、事故対策全般に影響が生じるおそれがある。

水素爆発を防止する対策としては、以下のような方法が考えられる。

- ・水素の局所滞留が生じる可能性がある箇所の調査・特定，通気性確保，水素濃度検出器の設置
- ・FRVS/SGTSのより確実・迅速な起動手手段の検討，手順・訓練整備
- ・水素滞留の徴候を確認した時点でのPCVベントの実施

※例えば、建屋内でオペレーションフロアに誘導するための流路を増やすことを考える場合には、それによって通常運転時から設計基準事故への対処に対する影響についても同時に考察ください。

Q②-10 格納容器から原子炉建屋への水素漏えい量の予測は、短期間（1～2年程度）で精度の向上が期待できると考えますか。また、水素の滞留場所を特定し、確実に検知し、除去する方法についても短期間で開発できると考えますか。可能と考える場合、その技術的根拠について説明してください。

PCVが健全であることを前提とした場合は、漏えい率をパラメータとして種々の評価・解析を行うことで、水素漏えい量やR/B内水素分布といった知見が得られる可能性がある。

一方、PCV破損を前提とした場合、漏えいの形態・速度は不確かさが大きく、短期間での予測の精度向上は困難であると考えます。

これらの点も踏まえ、今後のATENA WG等の場で水素の滞留検知・除去方法等を含めた検討を進めていく方針である。

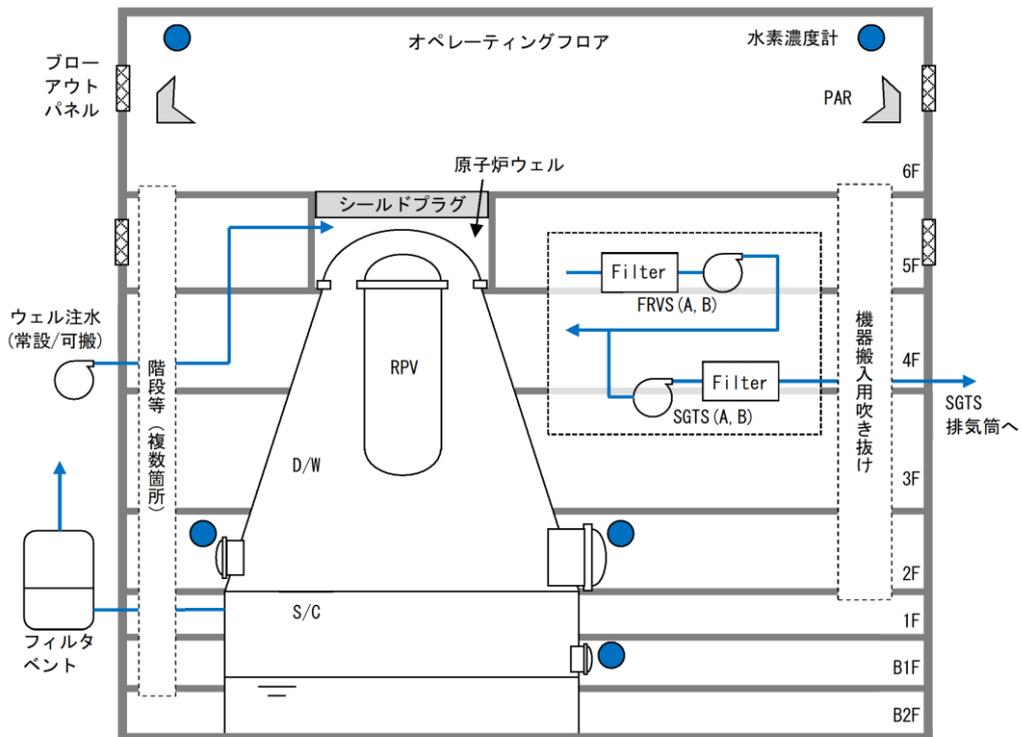
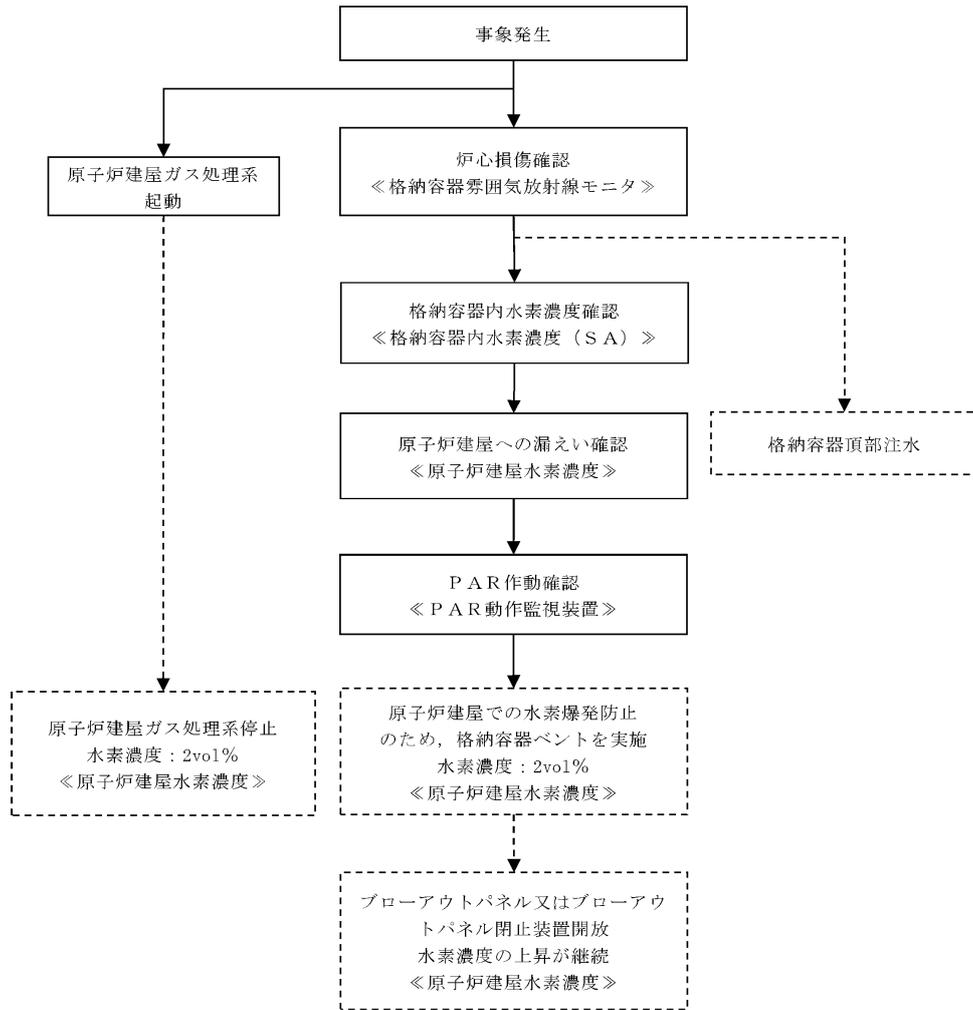
3. その他

上記1. 及び2. の質問に共通する、次の質問に回答ください。

- Q③-1 対策例①及び対策例②は水素防護対策を議論するための素材を例示したのですが、事業者として早期に実施可能な別の対策案があれば、対策例①及び対策例②よりも優位な点、実現可能時期等とともに説明してください。また、別の対策案がなく、仮に対策例①及び対策例②のいずれかを選択する場合、どちらを選択するか、その理由とともに回答ください。

対策例①及び②については、一方のみを選択するような対応ではなく、それぞれの対策の得失を踏まえて実施を検討すべきプラント状態や対応手順等を整理しておくことで、状況に応じた判断ができるよう備えておくことが望ましいと考える。

別の対策案として現時点で具体的に提案可能なものはなく、今後のATENA WG等の場で事業者としての検討を進めていく方針である。



(参考) 原子炉建屋水素対策の手順概要及び概念図