

## 水素防護に関する知見について（（ 5 ）及び（ 9 ）関係）

令和 3 年 5 月 2 6 日

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

### 1 . 中間とりまとめから得られた知見等を踏まえた論点<sup>1</sup>

（ 5 ）水素爆発時の映像及び損傷状況から、原子炉建屋の破損の主要因は、原子炉建屋内に滞留した水素の爆燃（水素濃度 8 %程度）によって生じた圧力によることを示唆している。

#### 【知見等を踏まえた論点】

SA 時の原子炉建屋内の水素量、分布・拡散、滞留時間に着目した、水素爆発対策及び原子炉建屋の健全性への影響確認が必要か。

3号機の水素爆発時の火災や爆煙については、水素以外の可燃性ガスが寄与している可能性が高く、可燃性ガスの種類、量の把握と規制上の位置付けの整理が必要か。

（ 9 ）3号機のベント成功回数は2回。このベントによって4号機原子炉建屋内に水素が流入し、40時間にわたって水素が滞留した後、爆発に至った。

#### 【知見等を踏まえた論点】

水素の拡散や滞留等の挙動の検討が必要か。

水素が滞留した原子炉建屋等における SA 対策や復旧作業等の安全確保の検討が必要か。

原子炉建屋内の水素濃度の検知の必要性、水素が滞留した場合の水素濃度の低減対策、人の立ち入りを伴う SA 対策等との整理及び水素漏えいの回避対策の検討が必要か。

BWR トップヘッドフランジへの保護対策は PCV の他の箇所からの水素漏えいの誘因とならないか。

### 2 . 関連する現行の基準・ガイド等

重大事故等の拡大の防止等 [ 格納容器破損防止対策 ] ( 有効性評価 ) ( SA )

関係条文：設置許可基準規則・同解釈 37 条

SA 有効性評価ガイド（格納容器破損防止対策の有効性評価）

<sup>1</sup> 令和 3 年 4 月 7 日 第 1 回原子力規制委員会資料 2 別紙 1 から引用

関係施設・設備： 原子炉格納施設（原子炉格納容器、原子炉建屋、二次格納施設、放射性物質濃度制御設備、可燃性ガス濃度制御設備）

PWR，BWRの差異： 想定する格納容器破損モード

BWR（大LOCA+ECCS喪失+SBO）

PWR（大LOCA+注水機能喪失）

### 水素爆発による原子炉格納容器破損防止対策（SA）

関係条文：設置許可基準規則・同解釈 52 条

技術基準規則・同解釈 67 条

SA 技術的能力審査基準 1.9

関係施設・設備：原子炉格納施設（放射性物質濃度制御設備、可燃性ガス濃度制御設備）

PWR，BWRの差異：設備構成

BWR（可搬型窒素ガス供給装置、原子炉格納容器フィルタベント系）

PWR（静的触媒式水素再結合装置、原子炉格納容器水素燃焼装置）

### 水素爆発による原子炉建屋等損傷防止対策（SA）

関係条文：設置許可基準規則・同解釈 53 条

技術基準規則・同解釈 68 条

SA 技術的能力審査基準 1.10

関係施設・設備： 原子炉格納施設（放射性物質濃度制御設備、可燃性ガス濃度制御設備）

PWR，BWRの差異： 設備構成

BWR（静的触媒式水素再結合装置）

PWR（アニュラス空気浄化設備（水素排出）、格納容器排気筒）

### 火災による損傷の防止（SA）

関係条文：設置許可基準規則・同解釈 41 条

技術基準規則・同解釈 52 条

関係施設・設備： 火災防護設備

可燃性ガス発生を考慮（原子炉格納容器内の塗料、ケーブル等）する観点から関係条文としている。

## 3．現行の審査における申請内容及び確認事項

審査では、「格納容器内の水素燃焼への対策」として、設置許可基準規則第 37 条で定める有効性評価として格納容器内の水素燃焼に対して、水素の爆轟を防

止する（ドライ条件で、水素濃度 13vol%以下又は酸素濃度 5vol%以下）こと、設置許可基準規則第 52 条等に基づき格納容器内の水素爆発を防止できる設備・手順が整備されることを確認している。また、「格納容器からの漏えい防止対策」として、設置許可基準規則第 37 条の解釈に定める格納容器の限界温度・限界圧力（200 ・2Pd）での格納容器の健全性について確認している。さらに、「格納容器から水素が漏えいした場合の対策」として、設置許可基準規則第 53 条等に基づき二次格納施設で水素爆発を防止できる設備・手順が整備されることを確認している。以下、BWR、PWR それぞれについて具体的に記載する。

### （１）BWR

#### 格納容器内の水素燃焼への対策

- ✓ 有効性評価（水素燃焼）では、格納容器内が窒素置換されていることから、水素濃度ではなく酸素濃度で評価しており、水の放射線分解により発生する酸素の濃度が相対的に高くなるシーケンスである過圧過温シーケンス（大 LOCA + ECCS 喪失 + SBO）を選定している。酸素濃度を高く評価する観点から、発生する水素は解析によって得られた値を用いており、格納容器内の他の金属（アルミニウム及び亜鉛）による水素の発生については、酸素が発生する反応ではなく酸素濃度を相対的に低くすることになるため、考慮していない。
- ✓ 有効性評価（水素燃焼）では、格納容器内の酸素濃度が 5vol%（ドライ条件）を上回らない（一部期間で 5vol%（ドライ条件）を超えるが、この期間は LOCA による水蒸気で格納容器内が満たされておりウェット条件となる）ことを確認している。また、5vol%（ドライ条件）を超えるような場合は、格納容器フィルタベントによる水素・酸素の排出を行う手順であることを確認している。
- ✓ 有効性評価（水素燃焼）としては、MCCI が発生した場合には水素及び他の可燃性ガスの発生量が多くなることから酸素濃度が相対的に低くなるため選定していないが、他の有効性評価においても MCCI により発生する他の可燃性ガス（一酸化炭素）の発生量は、コリウムシールド等の対策を行うことで、水素発生量に対して小さくなるため、その影響を考慮していない。
- ✓ これらに関連した対策として、格納容器内の水素爆発防止のため、初期酸素濃度を 2.5%以下（柏崎刈羽は 3.5%以下）に管理するよう変更すること、格納容器フィルタベントの手動操作については、二次格納施設の外から遠隔操作が可能であることを確認している。

#### 格納容器からの漏えい防止対策

- ✓ トップヘッドフランジ、格納容器配管貫通部等のシール材を改良

EPDM 材等に変更しており、200 、2Pd 下における健全性を確認している。改良 EPDM 材は SA 環境を模擬したヘリウムでの漏えい試験を行い漏えいのないことを確認している。

#### 漏えいした水素への対策（二次格納施設（原子炉建屋）の水素対策）

- ✓ オペレーションフロア及び機器ハッチ等に水素濃度計を設置するとともに、オペレーションフロアに PAR（静的触媒式水素再結合装置）を設置し、原子炉建屋内の水素ガスの流路を確保するため、オペレーションフロア大物搬入口を開運用することを確認している。
- ✓ 原子炉建屋内の水素濃度計の値が一定値（2.0～2.5%）になった場合には、格納容器フィルタベントによる水素排出の手順を整備している。
- ✓ 東海第二は、水素濃度が低い場合における SGTS（非常用ガス処理系）による原子炉建屋からの排気にも期待している。なお、他の BWR プラント（柏崎刈羽、女川、島根）においても重大事故時において電源がある場合には SGTS を起動する手順としており、水素濃度が低い場合には、同様に水素排出に期待できる。
- ✓ PAR の設計に当たって、有効燃料部被覆管の 100%が反応した水素量が 10%/day（2Pd における設計漏えい率の約 10 倍）でトップヘッドフランジから漏えいしたと仮定した場合での GOTHIC による原子炉建屋内の水素濃度解析を実施し、可燃限界（4%）に至らないこと（可燃限界に至る場合は酸素濃度が低いこと）を確認している。
- ✓ また、感度解析として、有効性評価ケース（水素発生量約 200～600kg、格納容器漏えい率約 1.0～1.3%/day）で、トップヘッドフランジのほか機器ハッチ等からも漏えいした場合を仮定した解析を行い、可燃限界に至らないことを確認している（女川においてはウェル注水を実施した場合の評価としてトップヘッドフランジ以外の機器ハッチから漏えいしたとした水素濃度解析も行っており、可燃限界以下となることを確認している。）。

#### （2）PWR

##### 格納容器内の水素燃焼への対策

- ✓ 格納容器の自由体積の大きさにより、全炉心内ジルコニウム量の 75%が反応した場合でも、水素濃度制御設備（PAR やイグナイタ）に期待せず水素濃度は 13vol%（ドライ条件）を下回ることを確認している。
- ✓ 有効性評価（水素燃焼）では、事象進展が早く、水蒸気が凝縮され水素濃度が相対的に高くなるシーケンスである大 LOCA + 注水機能喪失を選定し、全炉心内ジルコニウム量の 75%が反応することによる水

素の発生と水の放射線分解、金属腐食（アルミニウム及び亜鉛）、ヒドラジンの放射線分解による水素の発生を考慮して評価を行っている。また、水素濃度監視装置（可搬型設備を用いたサンプリング形式）による監視もできることを確認している。

- ✓ 格納容器内の水素濃度低減対策として PAR 及びイグナイタを設置しており、有効性評価では、ベースケースとしてイグナイタの効果に期待しない条件で GOTHIC による水素濃度解析を行っており、この場合でも格納容器内の水素濃度が 13vol%（ドライ条件）を下回ることを確認している。
- ✓ 有効性評価（水素燃焼）では、MCCI によるコンクリート侵食量は有意ではないが、保守的に MCCI の不確かさを考慮した追加水素発生量を加算した場合でも、PAR 及びイグナイタにより、格納容器内の水素濃度が 13vol%（ドライ条件）を下回ることを確認している。なお、MCCI によるその他可燃物（一酸化炭素）については、コンクリート侵食量が有意ではないこと及びイグナイタで燃焼させることができることから、定量的な評価は行っていない。
- ✓ イグナイタについては、仮に格納容器ドーム頂部付近に水素が滞留若しくは成層化した場合も考慮し、当該箇所にも設置することを確認するとともに、着火源とならないよう炉心損傷判断（炉心出口温度 350 度到達）と同時に電源を投入する手順となっていることなどを確認している。

#### 格納容器からの漏えい防止対策

- ✓ 格納容器貫通部等のシール材の 200 、2Pd 下における健全性を確認している。シール材の健全性は、電共研における蒸気を用いた漏えい試験との比較・検討により確認している。

#### 漏えいした水素への対策（二次格納施設（アニュラス）の水素対策）

- ✓ アニュラス内に水素濃度計を設置するとともに、アニュラス空気再循環設備による水素排出を行うことを確認している。
- ✓ アニュラスへの水素の漏えい率について、分子流・金属透過の影響を検討した上で、空気の漏えい率 0.16%/day を適用できることを確認している。
- ✓ アニュラスへの漏えい率を 0.16%/day として、アニュラスの水素濃度を評価し、可燃限界（4%）以下であることを確認している（アニュラス排気に期待しない場合で 1.5vol%程度）。なお、評価方法は、GOTHIC による水素濃度解析ではなく、アニュラス部を 1 空間とし、格納容器から漏えいする水素量とアニュラス排気により放出される水素量のバ

ランスから算出している。

- ✓ アニュラスへの漏えい率を 10 倍 (1.6%/day) とした場合のアニュラスの水素濃度評価も行っており、約 1.4%となることを確認している (アニュラス排気に期待しない場合で 4%以下)。

#### 4. 検討

##### (1) 検討の前提となる安全上の機能の整理 (二次格納容器に期待する機能)

一次格納容器からの放射性物質の漏えいに対する障壁として機能すること、また、燃料取扱事故の場合などには主要な格納施設として機能することを期待している。このため、二次格納容器内部を負圧に保ち、フィルターを介して高所放出する設備を設けている。

また、国内 BWR では、財産保護を目的とした、主として原子炉建屋の内圧力上昇による天井・外壁等の破損防止のためブローアウトパネルを設けている。

なお、関連する要求は設置許可基準規則・同解釈 32 条及び技術基準規則・同解釈 44 条に記載がある。

##### (2) 基準・ガイド類との関係

- ✓ 現行の設置許可基準規則・同解釈 37 条においては、水素の爆轟を防止すること、可燃性ガスの燃焼が生じた場合においても格納容器圧力が最高使用圧力又は限界圧力を下回ることとしている。
- ✓ 現行の設置許可基準規則・同解釈 52 条においては、「水素爆発による原子炉格納容器の破損を防止するために必要な設備を設けなければならない」としており、BWR であれば原子炉格納容器内を不活性化すること、PWR であれば必要に応じ水素濃度制御設備を設置すること等を要求している。
- ✓ 現行の設置許可基準規則・同解釈 53 条においては、「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」としており、爆燃現象も対象とする規定と考えられる。
- ✓ 現行の設置許可基準規則・同解釈 53 条においては、SA 環境下の原子炉格納容器から原子炉建屋等への水素の漏えい量の想定に関して具体的な要求は置いていないが、「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」としている。
- ✓ 現行の SA 技術的能力審査基準 1.9 及び 1.10 においては、水素爆発による原子炉格納容器及び原子炉建屋等の損傷を防止するための手順等の整備を要求している。

### (3 - 1) 審査の前提となる技術的知見<sup>2</sup>

#### 水素の発生源

- ✓ 原子炉圧力容器内での、燃料被覆管のジルコニウム等金属の水蒸気による酸化が支配的な要因である。
- ✓ 原子炉圧力容器外では溶融デブリによる格納容器ベースマツト侵食が追加的な水素の発生源となり、石灰岩系コンクリートの場合には一酸化炭素の発生も重要となることが知られている。国内の原子力発電所で用いられている玄武岩系コンクリートは、一酸化炭素発生が少ないとされる。
- ✓ 長期的には、水の放射線分解により水素及び酸素がそれぞれ発生する。

#### SAにおける格納容器内の水素の分布

- ✓ 対象とする格納容器の構造、原子炉圧力バウンダリ系から格納容器へ水素が放出される経路や量、他の気体との混合の程度に大きく影響する。また、水素放出の特徴は想定する事故シーケンスに強く依存する。
- ✓ 水素とともに放出される水蒸気は、雰囲気の不活性化に寄与する等から、水素燃焼に対してリスク低減効果を与える。
- ✓ 高い位置で低密度の水素が放出されると成層化が生じる可能性が懸念される。
- ✓ 減圧のために通常使用される格納容器スプレイは、水素分布に対して混合プロセスの促進と水蒸気の凝縮による可燃性混合気の形成作用をもたらす。

#### 水素の燃焼限界

- ✓ 室温大気中でよく混合した水素の場合、火炎の上方向伝播の開始に必要な最低濃度が4.1vol%とされる。
- ✓ (水素-空気-水蒸気)の混合気に対する可燃性、可爆性は、Shapiro線図などの三元図により簡易判断が可能であることが知られている。(水素-酸素-窒素)の混合気については産業安全研究所<sup>3</sup>において三元図が整理されている。
- ✓ 水素の燃焼は大きく分けて爆轟と爆燃があることが知られている。これらの判断基準は、簡単には火炎の伝播速度が超音速か亜音速かの違いとされる。水素濃度が4 - 8vol%の範囲では、スパークにより着火さ

<sup>2</sup> 主に IAEA TECDOC-1661 Mitigation of Hydrogen Hazard in Severe Accidents in Nuclear Power Plants(2011)を参照したが、他に参考としたものは個別に脚注に記載した。

<sup>3</sup> 柳生ら、「水素の爆発危険性についての研究(第一報) 水素の爆発限界に及ぼす圧力の影響」, 産業安全研究所研究報告、RR-18-1、1969年9月

せた後に不完全燃焼が観測されている。燃焼の完全性は、8 - 10vol% の範囲でほぼ 100%となることが実験的に観測されている。

- ✓ 爆燃火炎が伝播する経路上に障害物などがある場合には急速に伝播速度が加速（火炎加速）することが知られている。
- ✓ 爆轟を直接的に発生させる場合には非常に大きなエネルギーが必要となり、安定な爆轟波の形成には 4.1kJ 程度は必要とされる。現在のところ、あり得る爆轟の開始条件は、爆轟の前の爆燃火炎の伝播速度が超音速となり衝撃波を形成して爆轟に遷移（DDT）することであることが知られている。

#### 格納容器からの水素漏えいの防止

- ✓ 高圧水素ステーションではシール材に EPDM 材が選択されるようである。また、二次格納容器での水素爆発を防止するために、格納容器の健全性を維持することが第一選択だと考えられている。このため、格納容器ベントによる排出、環境への放射性エアロゾル放出の低減のために格納容器スプレイを使うことも有効とされる。

#### ○原子炉建屋に漏えいした水素への対策

- ✓ SGTS で排出するなどが有効であるとされている<sup>4</sup>。

#### 水素の緩和対策

- ✓ これまでに実用化されているものは、PAR、電気式イグナイタ、窒素置換等による不活性化などが知られている。

### ( 3 - 2 ) 審査との関係

- ✓ 新規制基準下では、3 . に記載のとおり、格納容器内の水素燃焼対策、格納容器からの漏えい防止対策を行っており、さらに格納容器ベント等による格納容器の過圧対策を講じている。
- ✓ 二次格納施設の水素爆発防止対策として、水素濃度制御設備（PAR）又は水素排出設備（アニュラス再循環設備又は SGTS）を設置するとともに、二次格納施設内に水素濃度計を設置している。水素濃度制御設備（PAR）及び水素排出設備（アニュラス再循環設備）の設計に当たっては、保守的な条件で設計している。
- ✓ 二次格納施設の水素濃度について、水素の分布・拡散、滞留時間を詳細に確認したものではないが、BWR では GOTHIC による水素濃度評価、PWR では格納容器から漏えいする水素量とアニュラス排気によ

---

<sup>4</sup> S. R. Greene, "THE ROLE OF BWR SECONDARY CONTAINMENTS ON SEVERE ACCIDENT MITIGATION: ISSUES AND INSIGHTS FROM RECENT ANALYSES", Nuclear Engineering and Design, 120 (1990) 75-86, (1990)

り放出される水素量のバランスからの算出により二次格納施設内で水素濃度が可燃限界に至らないことを確認している。また、BWRにおいては、二次格納施設内の水素濃度が一定程度上昇した場合には、水素濃度が可燃限界に至る前に格納容器フィルタベントによる水素排出を実施する手順としており、原子炉建屋内への水素の漏えいを抑制する手順となっている。

- ✓ 以上のとおり、新規規制基準下においては二次格納施設内の水素漏えい対策や水素爆発対策がなされているが、これらの対策は、水素が他の気体（水蒸気等）と同様に設計漏えい率で漏えいすること（選択的な水素の漏えいがないこと）、有効性評価条件等を水素発生量としていることを前提とした対策である。こうした前提に立たずに対策を検討する場合、最も不確実性を排除できる方法として格納容器ベントを早期に行うことが有力な選択肢となるが、このあたりの兼ね合いをどう考えるかが議論のポイントと考えられる。

## 5. 現時点までの検討のまとめ

- ✓ 格納容器からの漏えいに関して、格納容器内で混合されている気体のうち水素ガスのみが他の気体（水蒸気等）と異なり早期に漏えいするのであれば、水素が早期に漏えいすることを前提にした対策の検討が必要と考えられる。（論点（5） 及び論点（9） ）
- ✓ 二次格納容器のオペレーションフロアより下の階での水素爆発又は水素以外の可燃性ガスによるものを含めた大きな燃焼の有無について、東京電力福島第一原子力発電所事故のさらなる調査・分析が必要と考えられる。（論点（5） ）
- ✓ SAにおける水素及び水素以外の可燃性ガスの発生の可能性、分布、拡散、滞留時間等について、東京電力福島第一原子力発電所事故のさらなる調査・分析及び国内外の知見の確認が必要と考えられる。（論点（5） 及び論点（9） ）
- ✓ 原子炉建屋に水素が滞留した場合の、その後の事故緩和策の実施のさらなる検討が必要と考えられる。（論点（9） ）