
アクションプラン（建屋開放実験等の検討・実施） の見直しについて

2024年6月7日

目次

1. 背景
2. 課題認識と当初計画
3. 建屋開放実験の実施検討
4. 別アプローチに係る検討
5. まとめ
6. スケジュール

1. 背景

- 原子炉建屋の水素爆発防護対策（以下、「水素防護対策」という。）については、新規制基準適合性審査対応等の中で数多くの対策を実施しているものの、福島第一原子力発電所事故から得られた新たな知見をもとに、さらなる自主的な安全性向上のため、ATENAでは、水素防護対策に係る短期的な取組みと中長期的な取組みを「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」として策定（2022年10月制定，2023年6月一部見直し）し、計画的に進めてきた。
- 上記アクションプランでは、「実機による風速等の検討」における中長期的な検討として、建屋開放実験（BOP）等の検討・実施を計画しており、利用価値のあるデータを取得するため、実機での現実的なSA環境模擬方法や測定方法等について検討を進めるとともに、より目的に適った方法が無いかを検討してきた。
- その結果、今後の計画の方向性がまとまったことから、報告する。

2. 課題認識と当初計画

(1) 課題認識

事業者は、水素防護対策の一環として、原子炉建屋内の水素を排出するためのブローアウトパネル（BOP）（又はトップベント）開放手段を、炉心損傷後の後段の自主対策として整備している。

そもそも、BOP開放を行う状況は、SA時※1を大幅に超える漏えい状態であると考えられ、原子炉建屋内が外部環境に対して高い圧力及び温度であることが想定される。よって、全体的な気体の流れは、漏えい箇所からBOP（外部環境）に向かって形成されると考えられるため、BOP開放による水素排出効果は期待できると考えている。

しかしながら、SA時を大幅に超える状況においてBOPを開放した場合、具体的にどの程度の気体の流れが生じ得るのか、局所に滞留するおそれのある水素の排出にどの程度の効果があるかといった確認までは実施していない状況である。

よって、SA時を大幅に超える状況下での後段の自主対策であるBOP開放による水素排出効果を具体的に把握することは、事故対応を行う上で有用と考える。

※1：SA有効性評価にて想定する範囲の事故時を言う。

2. 課題認識と当初計画

(2) BOP開放の効果確認に係る目的及び当初計画

(1)の課題認識を踏まえ、BOP開放時に原子炉建屋内(天井等の窪みを含む)にどの程度の気体の流れが形成されるのかを確認することを目的とし、目的を達成するための方法として、解析ではなく実機でのBOP開放状態での原子炉建屋内の気体の流れを測定する方法が適当であると考え、建屋開放実験(BOP)等の検討・実施を計画することとした。

ただし、建屋開放実験(BOP)では、利用価値のあるデータ測定ができない可能性があることから、まずは、建屋内で強制的な換気が行われ比較的測定が容易であると考えられる、HVAC運転時、SGTS運転時での建屋内風量測定を行った上で、BOP開放実験によるデータ測定の成立性を確認し、建屋開放実験(BOP)の実施可否判断を行うこととした。

3. 建屋開放実験の実施検討

建屋開放実験の実施にあたり、SA環境模擬、風速測定の方法等について検討した。

(1) SA環境模擬について

SA環境を模擬するパラメータとして、圧力、温度、ガス組成比（水蒸気を含む）及び放射線を挙げ、建屋開放実験における模擬の要否及び模擬方法について検討を行った。

模擬の要否に係る検討結果は下表のとおりである。

パラメータ	模擬の要否	理由
圧力	要	漏えい源と環境との間に圧力勾配が生じると考えられ、圧力勾配は気体移動の駆動力となるため、気体の流れに影響を与えると考えられる
温度	要	漏えい源と環境の間に温度勾配が生じると考えられ、温度勾配は気体移動の駆動力となり得るため、気体の流れに影響を与えると考えられる
ガス組成比 (水蒸気を含む)	要	排出経路上での蒸気の凝縮により、流路内の気体の組成・密度が変化し、気体の流れに影響を与えると考えられる
放射線	否	放射線量率の違いは、気体の流れに影響を及ぼさないと考えられる

3. 建屋開放実験の実施検討

SA環境の模擬については、圧力、温度、ガス組成比を模擬するため、格納容器からのリークポテンシャルが高い局所エリアにおいて、格納容器からの漏えい量に応じた蒸気及び水素（現実的には代替ガスとしてヘリウム）を継続的に発生させ、局所エリアのダクトから周回通路等への蒸気放出を模擬する方法が考えられる。

また、SA状態の不確かさ（格納容器漏えい量、漏えい箇所、漏えいガス組成等）の影響の確認ができるよう、蒸気発生量、水素発生量は変化可能とする必要がある。

以上より、SA環境の模擬のためには、リークポテンシャルの高い局所エリアそれぞれに、蒸気及び水素（現実的には代替ガスとしてヘリウム）の発生装置を設置することに加え、蒸気及び水素発生量の制御装置、蒸気及び水素の発生装置及び制御装置の電源、水及び水素の供給を行う装置が必要となり、非常に大規模な実験装置となる。このような実験装置システムを構築するためのシステム設計や配置設計が必要となることも想定され、実験装置システムを構築するための期間も必要になる。

さらに、BOP、トップベント開放を行うようなSA事象の不確かさを考慮すると、複数のSA環境を模擬することが必要となることから、実験の実施判断後、結果取得まで長期間を要することが想定される。

また、SA環境の模擬により原子炉建屋内に設置した機器等及び建屋そのものへの熱や水蒸気等による悪影響も懸念される。

3. 建屋開放実験の実施検討

(2) 風速等の測定方法について

SA環境を模擬しない場合の建屋開放実験では、更に微少な風速となる場合も想定され、外気の風速の影響もあり風速測定が著しく困難であると考えられる。

風速計の計測範囲（後述の北陸電力志賀2号機の建屋内風量測定の実績）は、 $0.01\text{m/s} \sim 30\text{m/s}$ であることから、SA環境を模擬しない場合では、風速測定自体が著しく困難であると考えられ、更に低レンジの風速測定が可能な風速計があった場合でも、微少風速を測定する際には、測定の不確かさ（風速計を持つ人の手の震えなど）を除くため、風速計を機械的に固定して計測を行う必要があると考えられる。また、建屋内の気体の流れの詳細を把握する必要があることから、水素の漏えい個所からBOP、トップベントまでの経路上に複数の測定点を設置する必要があり、風速計を支持する足場の設置など、大掛りな作業の発生が見込まれる。また、風速のみならず、圧力や温度等関連パラメータの計測も必要となる。

一方、SA環境を模擬した場合では、模擬しない場合に比べ測定可能性は高くなると考えるが、模擬しない場合と同様に経路上に複数の測定点の設置と、風速に加えて圧力や温度等関連パラメータの計測は必要となる。

3. 建屋開放実験の実施検討

(3) 建屋開放について

実機のBOP開放を行うと、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）が懸念される。

また、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規制上の課題がある。

(4) HVAC運転時建屋風量測定結果について

建屋開放実験の実施に先立って、本実験での測定方法の参考にすべく、2022年度に北陸電力志賀2号機において、HVAC単独運転時及びHVAC+SGTS運転時の建屋内風量測定を行った。HVAC運転時の風量測定結果から、測定対象とした部屋の天井付近では0.06m/s～0.08m/sの風速となることや測定結果と計算により求めた風速とに大きな差異がないことを確認している。

3. 建屋開放実験の実施検討

(5) 検討結果

- ✓ SA環境を模擬せず建屋開放した場合，建屋内と屋外の圧力差がない状態で建屋開放することとなるため，建屋開放による自然対流の風速は微少であることから，風速測定が著しく困難となることが考えられる。仮に，風速を測定できたとしても，SA時とは大きく異なる環境下でのデータ取得となり，目的に適った利用価値のあるデータとはならない。
- ✓ 建屋内でSA環境を模擬して建屋開放した場合，大規模な装置を手配する必要があることに加えて，SA環境を模擬することによる建屋内機器への悪影響の懸念がある。また，風量測定を行うため，建屋内の気体の流れを詳細に把握する目的で経路上に多数の測定環境を構築する必要がある。
- ✓ 建屋開放実験は，機動的にパラメータを振ってSA事象の不確かさの影響を把握するには不向きである。また，建屋開放することで建屋内機器への異物混入等の悪影響が懸念される。
- ✓ HVAC運転時建屋風量測定結果と計算により求めた風速とに大きな差異がないことを確認している。

以上より，建屋開放実験では，目的に適った利用価値のあるデータの取得は非常に困難と判断し，解析などの別のアプローチによる目的達成の可能性についても検討を行った。

4. 別アプローチに係る検討

現在のアクションプランのうち、2023年度より実施している「水素滞留・拡散挙動の評価手法構築・評価」では、下層階フロアを対象に天井等の窪みの水素挙動を評価可能なGOTHIC評価モデルの構築に取り組んでいる。本モデルは、原子炉建屋下層階に水素が漏えいした場合の、原子炉建屋下層階の天井等の窪みを含めた水素濃度の推移や風況を評価することに使用するものであり、今後はオペレーティングフロア（オペフロ）を加えた「下層階フロア（天井等の窪み含む）－吹抜空間－オペフロ」にモデル拡張することを計画している。

そのため、BOP及びトップベント開放時の評価が可能となるように、本モデルにBOPやトップベントを加えること等（適切な初期条件設定含む）により、建屋開放実験の実施目的を達成できると考える。

また、コードを使った評価であるため、建屋開放実験では難しいような、SA状態の不確かさ（漏えい率、漏えいガス組成、漏えい箇所等）の影響を感度解析により把握することも可能である。なお、上記解析に際して、BOP、トップベント開放を行うような状況は、SAの後段のため事象の不確かさが非常に大きく、格納容器からの水素の漏えい状況等を具体的な解析条件として設定することが困難であることから、SA時を大幅に超える状態を前提として解析条件を設定する必要がある。

加えて、現状認識と異なる場合等※²については、必要に応じて追加検討（解析の再検証や要素試験等）を行うことも考えられる。

※2（例）BOP、トップベント開放条件としているにも係らず、水素排出の効果が見られない場合

5. まとめ

当初目的の達成可否，より多くの利用価値のあるデータの取得の観点から，3. にて建屋開放実験の検討を行った結果，実施が非常に困難との判断に至った。しかしながら，4. の通り，現在解析実施中のモデルを，BOP開放時及びトップベント開放時の評価に適用できるように，改良や拡張，初期条件の検討を行うことにより，原子炉建屋内（天井等の窪みを含む）の風の流れや水素濃度等の把握が見込めると考える。

よって，BOP，トップベントの効果を確認する別アプローチとして解析評価（必要に応じて追加検討の実施（解析の再検証や要素試験等））を採用し，計画変更することとした。

なお，BOP，トップベント開放を行うような状況は，SAの後段のため事象の不確かさが非常に大きく，格納容器からの水素の漏えい状況等を具体的な解析条件として設定することが困難であることから，SA時を大幅に超える状態を前提として解析条件を設定する。

6. スケジュール

BOP, トップベント開放による原子炉建屋下層階を含めた水素挙動の確認については、「水素滞留・拡散挙動の評価手法構築・評価」の実施計画も踏まえて、以下の計画に変更し進めていく。

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
実機による風速等の測定	ATENA-WG		試験の評価方法の立案検討	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 (必要に応じて追加検討)	
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)		

今回の変更箇所