

1号機原子炉建屋で発生した水素爆発の解析

1. はじめに

2011年3月12日に、1号機の原子炉建屋（以下、本添付資料では「建屋」と記載する）で水素爆発が発生した。建屋への水素の漏えい経路としては様々な可能性が考えられるが、建屋5階部分の線量率が比較的高いことなどから、格納容器トップヘッドフランジ部からシールドプラグを通じて5階に水素が漏えいし、爆発に至った可能性が高いと考えている。この推定をより確からしいものとするため、水素爆発にかかる追加検討を実施した。

検討のアプローチとしては、建屋への水素漏えい位置、着火位置などをパラメータとした水素爆発の解析を実施し、解析ケース毎に解析結果の特徴を整理し、建屋の損傷状況と比較することで、1号機がどのように水素爆発に至ったのかを推定した。なお、新潟県技術委員会福島事故検証課題別ディスカッション【地震動による重要機器の影響】¹にて、非常用復水器（IC）配管が損傷した可能性について指摘があったため、当該箇所から建屋4階への水素漏えいを仮定したケースも合わせて解析した²。本検討で仮定する建屋への水素漏えい経路のイメージを図1に示す。

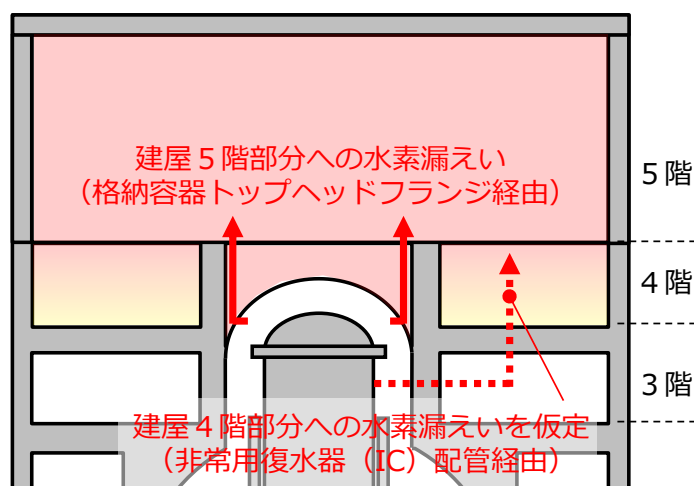


図1 建屋への水素漏えい経路のイメージ

¹ 本検討の内容は、同ディスカッション（第9回～第11回）においても公表している。

² IC配管の損傷箇所を仮定する場合、ICタンク内伝熱配管（地震動による損傷等）、あるいは格納容器内の原子炉圧力容器付近の配管（高温化による損傷等）を対象とすることが考えられるが、そのような損傷の場合には、各々建屋外、格納容器内への放出となるため、IC配管からの漏えいが水素爆発に影響する事はない。本検討では、具体的な損傷モードは想定できないものの、格納容器外のIC配管から建屋内への直接漏えいを仮定した。

2. 水素爆発解析

福島第一原子力発電所1号機、3号機、4号機の建屋で水素爆発が発生したが、いずれの号機においても水素の漏えい位置や漏えい量、着火位置などは分かっていない。このため、解析によって当時の爆発の様子を細部にわたって正確に再現することは極めて困難である。ただし、水素漏えいの位置や着火位置をパラメータとした複数の解析を行い、それぞれの解析のおおよその特徴を整理した上で、建屋の損傷状況と比較することで、より確からしい水素爆発シナリオを推定することは可能と考えられるため、今回1号機の水素爆発を評価するにあたり、そのような目的のもと解析を実施した。

爆発に至るシナリオとして、建屋5階シールドプラグを通じてのみ水素が漏えいした場合と、5階に加え、指摘のあった4階 IC 配管を通じた水素漏えいを仮定した場合を想定した。そして、それぞれの場合において、漏えいした水素が建屋内に広がっていき、最終的に爆発する様子を解析した。その際、着火位置の影響を確認するため、5階で着火した場合と、4階で着火した場合を想定した（詳細は2.2 解析条件 表1参照）。解析には、水素拡散・燃焼解析コード FLACS [1]を用いた。解析では、水素漏えい位置を設定し、水素分布の解析を行った上で、着火位置を設定し、水素爆発の解析を行い、得られた爆発の特徴を整理した。

なお、本解析では、水蒸気など、水素以外の漏えいガスについては考慮していない。水蒸気の割合が大きくなると一般的に爆発の規模は小さくなるが、実際には水蒸気も建屋に漏えいしていたものと考えられるため、1号機の爆発の規模が本解析の結果と同程度であった場合には、水素量は解析で設定した値より多かったものと考えられる。また、構造物の損傷による流路の変化については、爆発の進展に大きく影響すると考えられる一部の構造物を除いては、考慮していない。これらを考慮しないことにより爆発の様子に多少の影響はあると考えられるものの、本解析は爆発のおおよその特徴を捉えることを目的としているため、検討の結論に影響するものではないと考えている。

2.1 解析体系

建屋全体における爆発の影響を評価するため、解析対象範囲は建屋全体（地下階～5階）とした。なお、建屋外へ流れ出た爆風の影響を考慮するため、建屋の外側もある程度の範囲を解析領域に含めた。

図2、図3に、建屋5階と4階の平面図を示す。爆発による損傷の大きい建屋5階と4階については、構造物があることによる爆発の進展への影響を考慮するため、主要な構造物（機器ハッチ蓋、5階南側通路の壁、4階 IC タンク、換気ダクト等）を配置した。なお、機器ハッチとは、機器の運搬に使

用される建屋 1 階から 5 階まで貫通する穴であり、事故時、5 階部分には蓋をされていた。水素の移行や燃焼伝播を考慮する流路については、主要な流路として、階段開口部、換気ダクト、燃料プールのダクト、機器ハッチの隙間をモデル化した。解析のメッシュ幅は、水素濃度分布と水素爆発の影響を適切に評価できるよう、50cm とした。

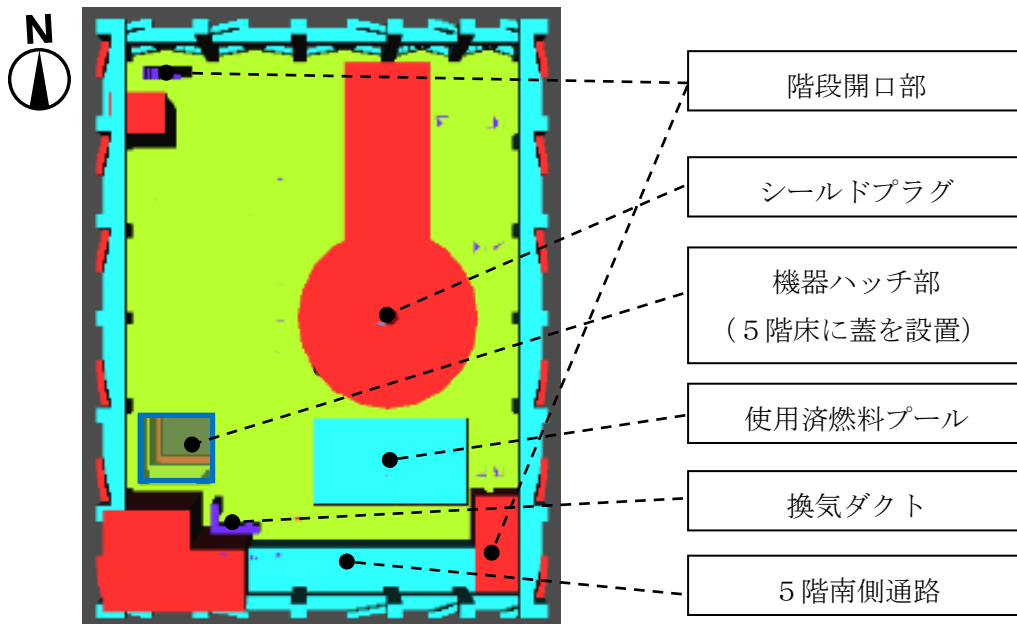


図2 建屋5階平面図

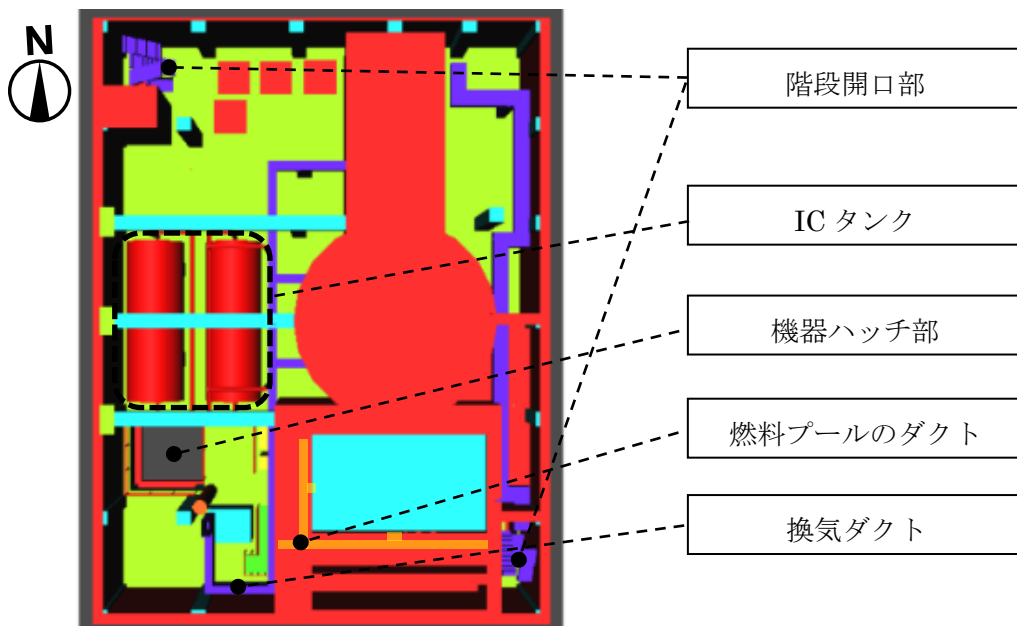


図3 建屋4階平面図

2.2 解析条件

(1) 解析ケース

前述のように複数の漏えい位置と着火位置を想定した。解析ケースを表1に示す。また、漏えい位置・着火位置を図4に示す。

表1 解析ケース

	ケース① 5階漏えい・ 5階着火	ケース② 5階+4階漏えい・ 4階着火	ケース③ 5階+4階漏えい・ 5階着火	ケース④ 5階漏えい・ 4階着火
漏えい位置	5階シールドプラグ	5階シールドプラグ+4階IC配管	5階シールドプラグ+4階IC配管	5階シールドプラグ
水素漏えい量	約 134kg	約 154kg (ケース①+ 4階IC配管 から 20kg)	約 154kg (ケース①+ 4階IC配管 から 20kg)	約 210kg
着火位置	5階シールドプラグ直上	4階天井付近 (機器ハッチ 蓋直下)	5階シールドプラグ直上	4階天井付近 (機器ハッチ 蓋直下)

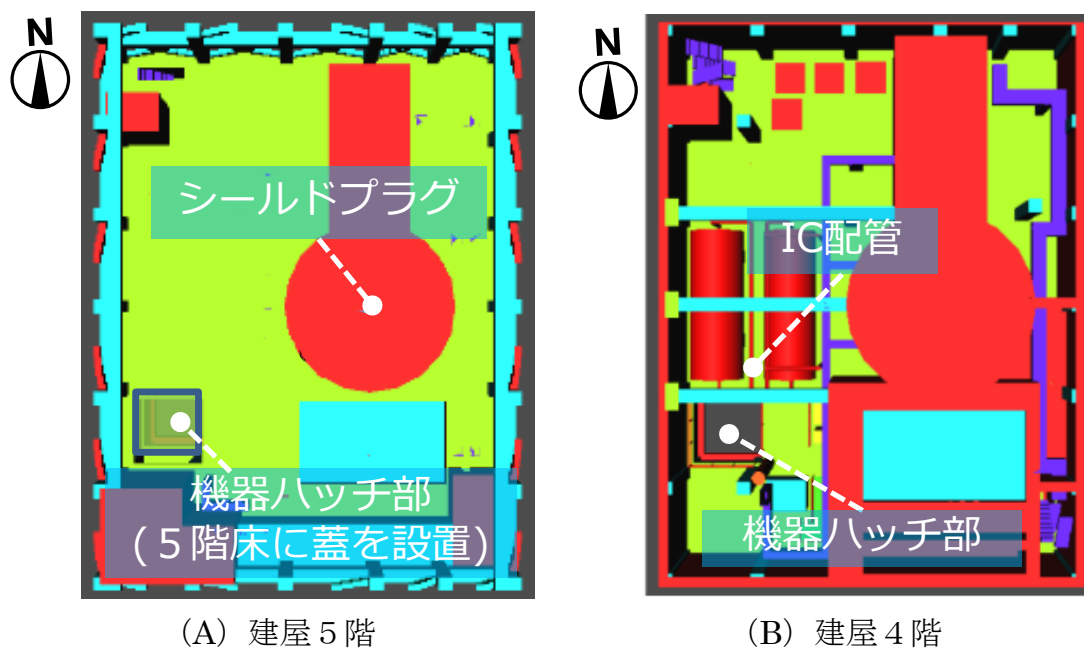


図4 漏えい位置および着火位置

表 1 に示す各ケースの水素漏えい量は、水素分布解析の結果に基づいて設定した。設定の考え方について以下に示す。

5階シールドプラグからの水素漏えい量は、ケース①～③の約 134kg とケース④の約 210kg の 2 パターンを設定した。前者は、水素分布解析を行った結果を見て、主に 5階部分のみに水素が分布するような水素漏えい量として設定した。後者は、水素分布解析の結果を見て、4階にも着火する程度には水素が移行するが、3階までは水素がほとんど移行しないような水素漏えい量として設定した。これは、建屋 3階以下には水素爆発による構造物の顕著な損傷が見られないためである。

ケース②、③における 4階 IC 配管からの水素漏えい量は 20kg を設定した。仮に 4階 IC 配管からの漏えいがあったとすると、圧力容器から建屋への漏えいとなるが、添付資料 1-3 でも述べたように、事故初期のプラントパラメータの挙動からは、漏えいの兆候は見られない。このため、プラントパラメータに影響しない程度の漏えい面積として 0.3cm^2 を、炉内の水素発生量として事故解析コードの結果を参考に 800kg を仮定した上で、添付資料 3 に示す MAAP 解析結果における原子炉圧力と漏えい面積との関係も考慮して、IC 配管からの水素漏えい量を約 40～200kg と見積もった。ただし、その水素量を 4階 IC 配管から漏えいさせた場合、4階の水素濃度が非常に高くなり、その条件で解析した場合には建屋の損傷状況と整合しないことが明らかであったため、それよりも少ない水素漏えい量として 20kg を設定した。

(2) 構造物の損傷条件

1号機の建屋で水素爆発が生じた結果、5階の側壁は吹き飛び、天井が落下した。また、事故時には機器ハッチは5階部分に蓋をされていたが、現在、機器ハッチの蓋は見つかっていない。このうち、5階の側壁と機器ハッチの蓋の損傷の有無は、爆発の進展に影響が大きいと考えられるため、爆発の過程における損傷を考慮した。以下に、これらの構造物が損傷する条件の設定について示す。

なお、5階の天井については、現場の損傷状況として、天井スラブは一体となって落下しており、内圧で吹き飛んだようには見られないこと、5階の天井は側壁よりも耐力が高く、側壁よりも後に損傷すると考えられること、側壁が吹き飛んだ時点で建屋の内圧は下がり、爆発が収束に向かうと考えられることから、爆発の進展への影響は小さいと考えられる。

a. 5階側壁について

図 5 (A) ～ (C) に 5階側壁の建屋構造物との接続部について示す。5階

側壁は鉄製のパネルであり、専用のクリップ型鋼材により胴縁と固定されていた (A)。胴縁端部はブラケット部材に M-16 のボルト 2 本で固定されていた (B) (C)。水素爆発後、胴縁はほぼ全て飛散していることから、胴縁とブラケット部材を固定するボルトが、水素爆発に伴う内圧 (5 階部分の圧力) の上昇によって損傷したと考えられる。

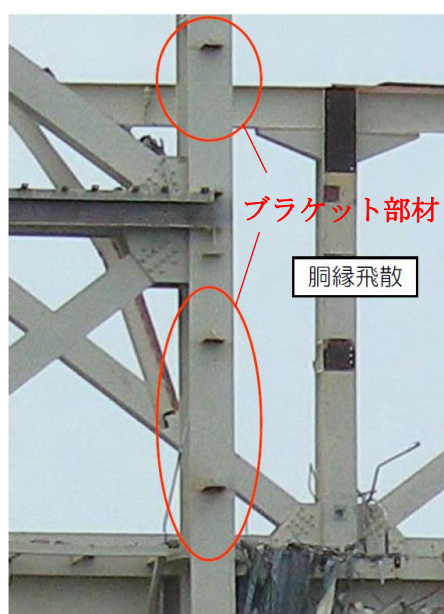
ボルトの破壊判定条件として、当該ボルトの使用材料の引張強さからせん断耐力を求め、これを内圧に換算した値として 16kPa を設定した。計算上は 5 階の圧力がこの値を超えた時点で 5 階側壁が破損し、消失する設定とした。



(A) 鉄製パネルと胴縁の接続



(B) 胴縁端部のボルト穴



(C) ブラケット部材

図5 5階側壁の建屋構造物との接続部

b. 機器ハッチの蓋について

機器ハッチの蓋は図6に示すような折り畳み式の蓋になっており、重量は 1.5 トン、許容積載値は 200kg (機器ハッチ蓋の下面中央にある蝶番部 (最弱部) に対する許容値。実際には、この値の 1.5 倍～数倍程度の荷重が蓋全体にかかった場合に、蝶番部が損傷する可能性がある) である。蓋の開閉は接続されているワイヤとウィンチによって行う。蓋のふちの部分は 5 階床と重なっており、その部分を車輪が転がることによってスムーズに開閉できるようになっている。現在、図7に示すように、機器ハッチ蓋は 5 階床部分から消失している。

解析においては、機器ハッチの蓋は 5 階と 4 階の圧力差によって開口し、消失する設定とした。4 階の圧力が高い状態で開口する場合は、機器ハッチ

重量を持ち上げるのに必要な圧力差で開口する設定とした。5階の圧力が高い状態で開口する場合は、蓋が5階側から圧力を受けて変形して開口することが考えられる³が、そのような状況に至る圧力は不明である。そこで、機器ハッチが開口する圧力を5階側壁が破損する圧力の10%、30%、50%、80%にそれぞれ設定した感度解析を実施した。このうち80%に設定したケースでは、5階側壁が損傷するまでに機器ハッチの蓋が開口せず、4階以下に爆風がほとんど発生しない結果となったが、これは後述する建屋の損傷状況とは整合しない。その他のケースでは、爆発の様相はほぼ同等となったことから、本検討では、機器ハッチが開口する圧力を5階側壁が破損する圧力の30%、約5kPaに設定した。なお、この圧力は上述の許容積載値200kgに対して70倍程度の荷重となるため、蓋の変形は相応に大きくなったものと考えられる。

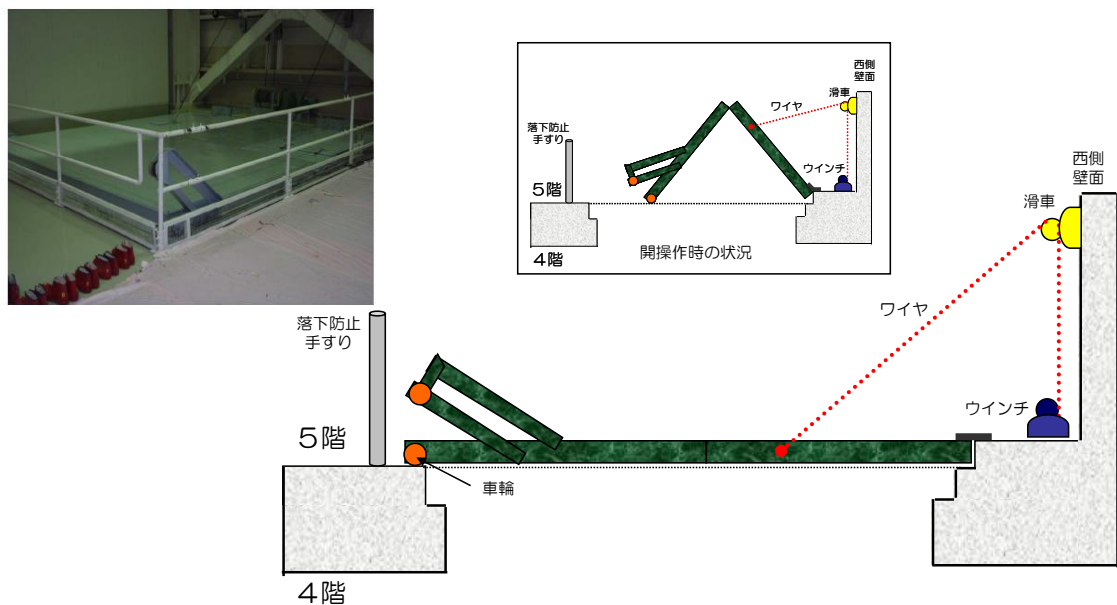


図6 機器ハッチ蓋の構造 (イメージ)

³ 蝶番部が損傷しても、蓋自体が大きく変形するわけではなく、直ちに大きな開口に至るものではないと考えられるが、さらに高い荷重がかかった場合には、蓋の変形も大きくなると考えられる。



図7 水素爆発後の機器ハッチ部（4階から5階を見上げて）

2.3 解析結果

表1に示したケース①～ケース④の解析結果における爆発の特徴を表2にまとめる。

表2 解析ケースごとの爆発の特徴

水素漏えい位置	5階着火	4階着火
5階シールドプラグ	<p>ケース①</p> <p>機器ハッチ蓋破損後、5階側壁が破損。主に4階以上に爆風が発生</p>	<p>ケース④</p> <p>ケース①と同等、ただし、爆発の規模はやや大きい</p>
5階シールドプラグ + 4階 IC 配管	<p>ケース③</p> <p>ケース①と同様の爆発の進展をたどった後、ケース②に類似の爆風が付加される</p>	<p>ケース②</p> <p>4階で圧力が急激に上昇。5階、4階だけでなく、3階、2階にも非常に強い爆風が発生</p>

以降、各ケースの解析結果の詳細について示す。なお、解析結果については各ケースの特徴を表すシーンを切り出して記載しているが、解析における爆発の進展に伴う圧力、水素濃度、温度、流速の変化については当社ホームページに動画を掲載している⁴。

⁴ 動画 URL: <http://photo.tepco.co.jp/date/2017/201702-j/170217-01j.html>（日本語のみ）

(1) ケース①：5階漏えい・5階着火

着火時の水素分布を図8に示す。水素は主に5階部分に分布しており、一部は階段開口部や機器ハッチ蓋の隙間を通じて4階部分にも回り込んでいる状況となっている。

解析結果を図9(A)～(E)に示す。5階で燃焼が進展し(A)、5階の圧力が上昇する(B)。これにより機器ハッチの蓋が開口し、開口した機器ハッチ部を通じて、圧力差に応じて4階以下に下向きの爆風が発生する。この際、3階以下では機器ハッチ部から水平方向に向かう爆風の流れ込みは小さい(C)。その後、さらに5階の圧力が上昇することで、耐力の低い5階側壁が破損し、横向きの爆風が発生する(D)。側壁破損後、5階の圧力が低下することで、相対的に4階以下の圧力が高くなり、機器ハッチを通じた上向きの流れが遅れて発生する(E)。

なお、本ケースでは着火位置を5階シールドプラグとしているが、着火位置を5階の他の位置に変更したケースも別途実施し、爆発の特徴は類似の結果が得られることを確認している。

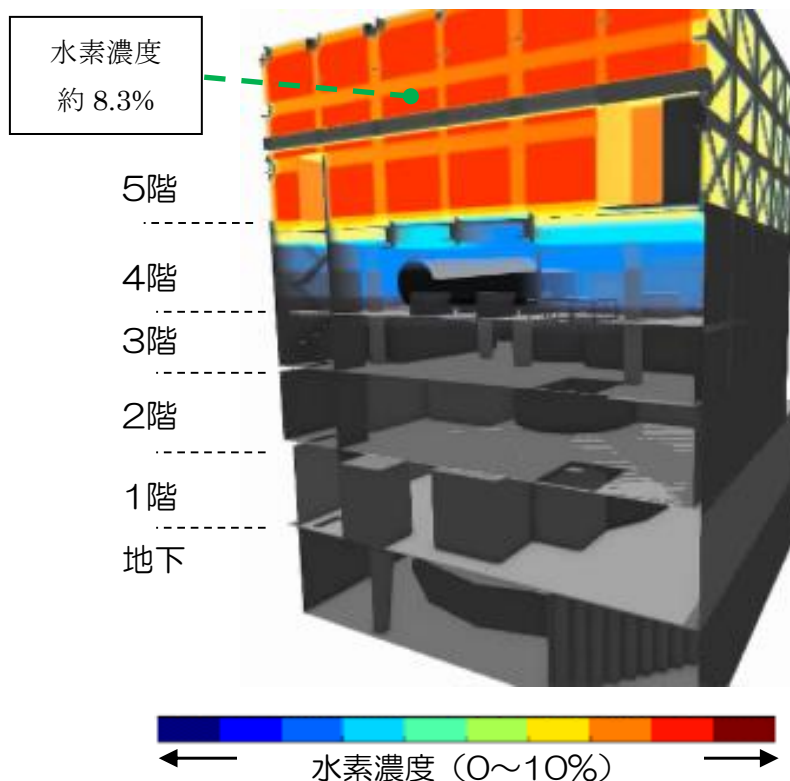
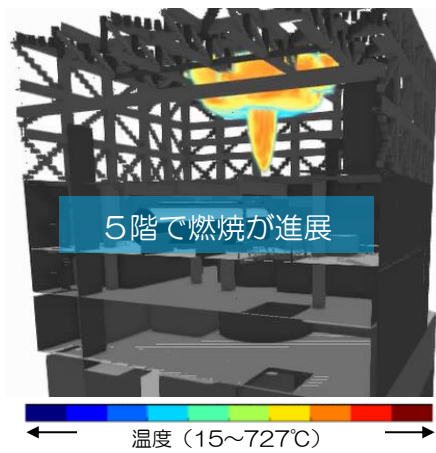
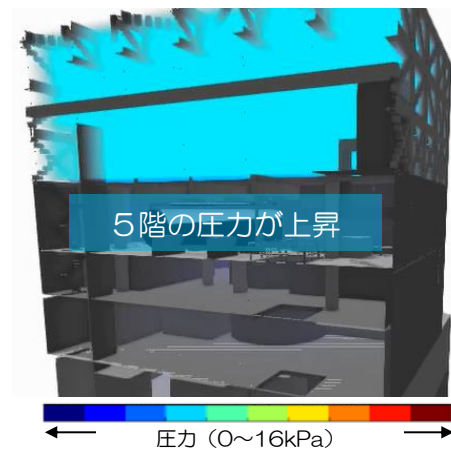


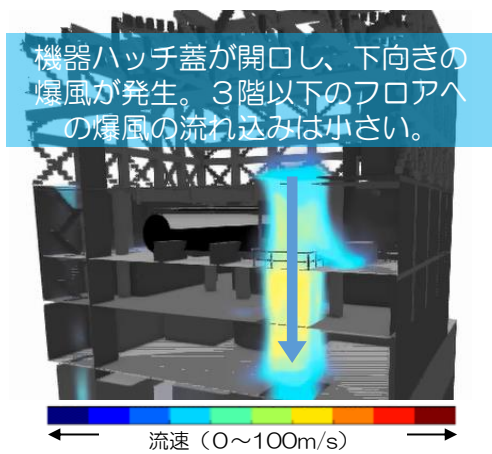
図8 着火時の水素濃度分布 (ケース①：5階漏えい・5階着火)



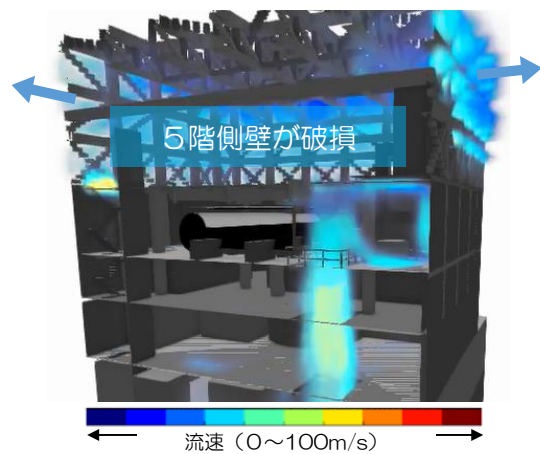
(A)



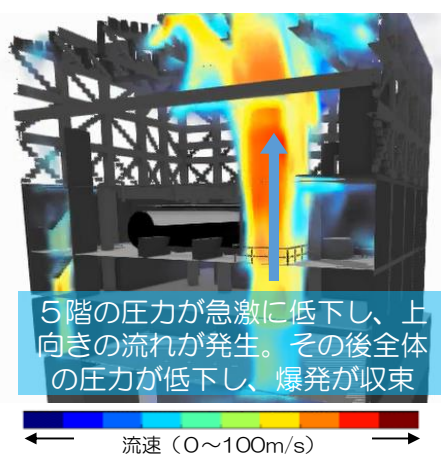
(B)



(C)



(D)



(E)

図9 水素爆発解析結果 (ケース①: 5階漏えい・5階着火)

(2) ケース②：5階＋4階漏えい・4階着火

着火時の水素分布を図 10 に示す。水素濃度のカラーバーの範囲がケース①と異なるため、5階部分の水素濃度が青く表示されているが、5階の水素濃度はケース①と同等である。4階IC配管からの漏えい箇所近傍において、天井付近の水素濃度が高くなる傾向が見られる。

解析結果を図 11 (A) ～ (E) に示す。着火後、水素濃度の高い4階西側で急激に燃焼が進展し (A)、圧力が急激に上昇する (B)。4階と5階の圧力差により、機器ハッチ蓋が開くとともに、着火点のある4階では、気体の逃げ道になる機器ハッチの方向に向かう強い爆風が発生する (C)。これに伴い、3階以下にも機器ハッチ部から水平方向に強い爆風の流れ込みが発生する (D)。また、5階では強い爆風の影響により、天井と側壁がほぼ同時に損傷しており、横向きの流れと上向きの流れがほぼ同時に発生している (E)。

本ケースでは、圧力の上昇速度がケース①と比較して急峻であり、ケース①よりも爆風の速度が大きくなっている (流速のカラーバーの範囲は、図 9 に示すケース①では 0～100m/s であるのに対し、図 11 に示すケース②では 0～200m/s である)。

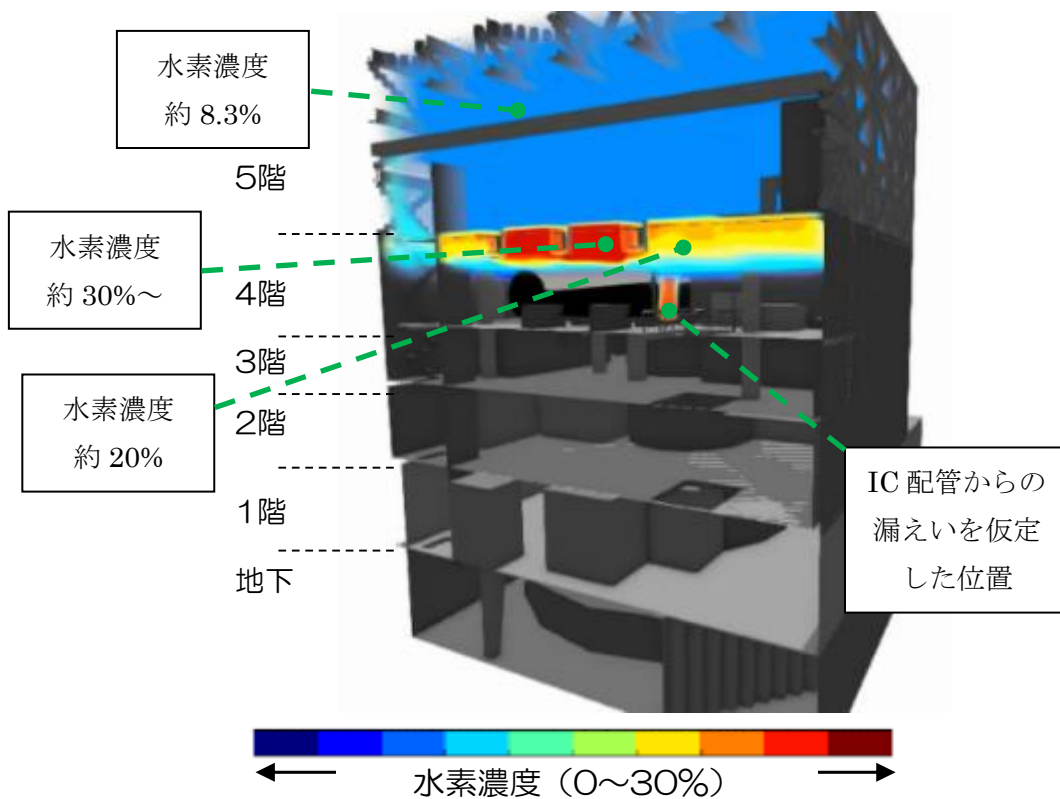
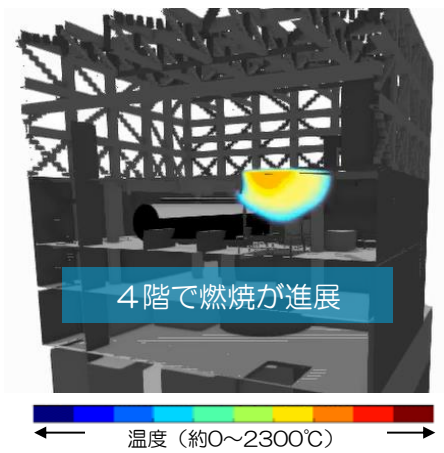
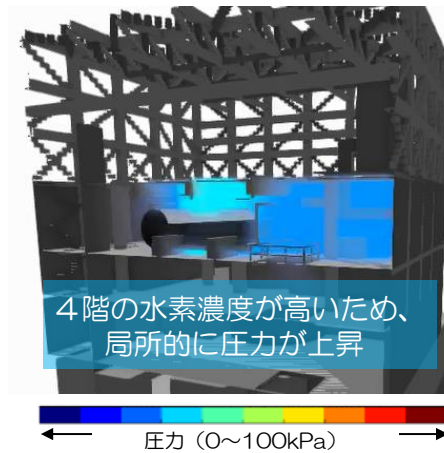


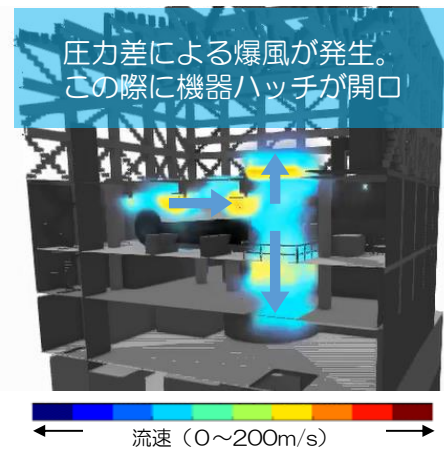
図 10 着火時の水素濃度分布 (ケース②：5階＋4階漏えい・4階着火)



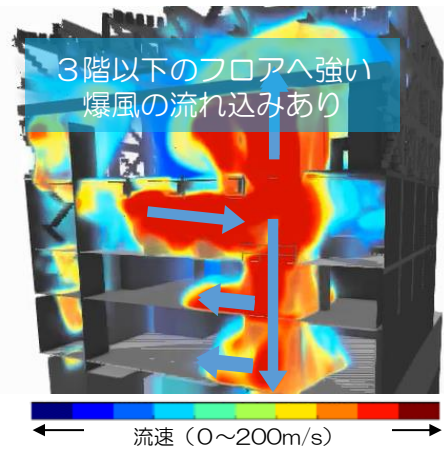
(A)



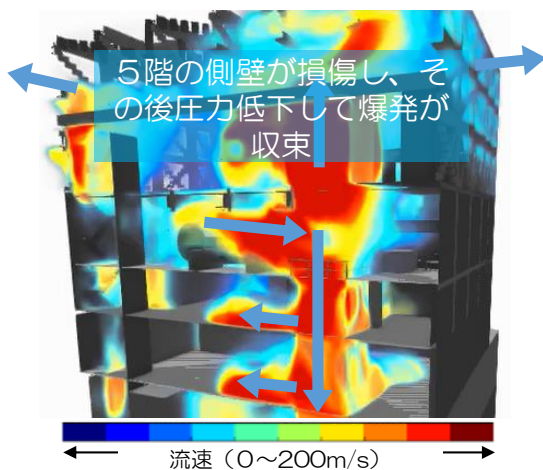
(B)



(C)



(D)



(E)

図 11 水素爆発解析結果 (ケース②) : 5階+4階漏えい・4階着火)

(3) ケース③：5階+4階漏えい・5階着火

着火時の水素濃度分布はケース②と同様（図10）であるが、ケース③では着火位置を5階シールドプラグに変更している。

着火位置である5階の水素濃度分布はケース①と同様であるため、着火後はケース①と同様の爆発の進展（図9（A）～（E））をたどる。その後の解析結果を図12（A）～（D）に示す。図9に示した爆発の進展の後も4階天井部分に高濃度の水素が残存しており（A）、そこに5階の火炎が着火する（B）ことによって4階で局所的に圧力が上昇し（C）、ケース②と類似の強い爆風が付加される形となった（D）。このため、機器ハッチを通じた上向きの流れが2回見られる形となった。

なお、本ケースでは着火位置を5階シールドプラグとしているが、着火位置を5階の他の位置に変更したケースも別途実施し、爆発の特徴としては類似の結果が得られることを確認している。

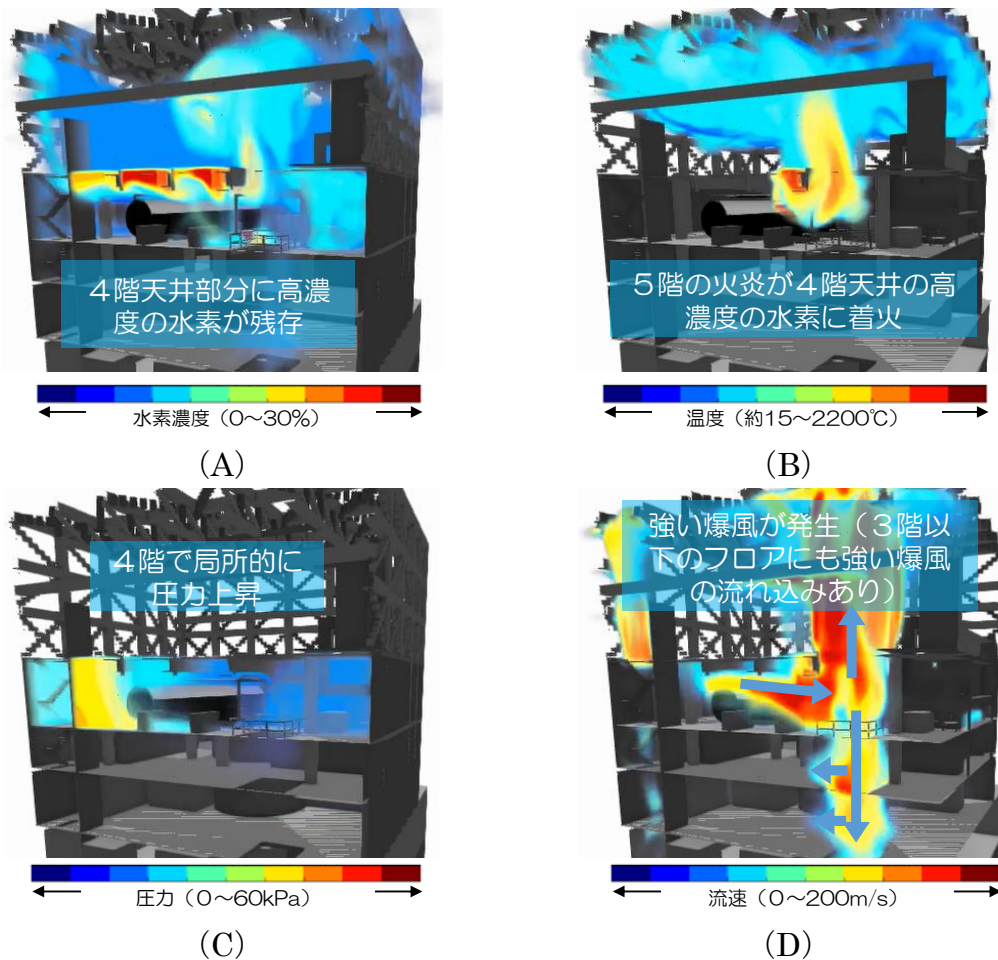


図12 水素爆発解析結果（ケース③：5階+4階漏えい・5階着火）

(4) ケース④：5階漏えい・4階着火

着火時の水素分布を図13に示す。水素漏えい量をケース①の約134kgから約210kgに増やした結果、5階だけでなく、4階にも燃焼が進展する程度に水素が移行しているが、3階までは水素がほとんど移行していないような結果となっている。

解析結果を図14(A)～(D)に示す。4階で着火した結果、4階で燃焼が進展するが、機器ハッチ蓋の隙間を通じて5階に燃焼が伝播している(A)。5階と比較して4階の水素濃度が低いため、4階の燃焼の進展は緩慢であり、主に5階で燃焼が進展する(B)。その結果、5階の圧力が4階よりも先に上昇し(C)、その結果、機器ハッチ蓋は5階からの圧力によって開口し、下向きの爆風が発生する(D)。その後の挙動は、図9(D)(E)に示したケース①の爆発の進展と類似の結果となる。

ケース①よりも水素漏えい量が大きく、水素濃度が高いため、爆発の規模(爆風の速度)はやや大きいものの、爆発の特徴はケース①と同等となっている。

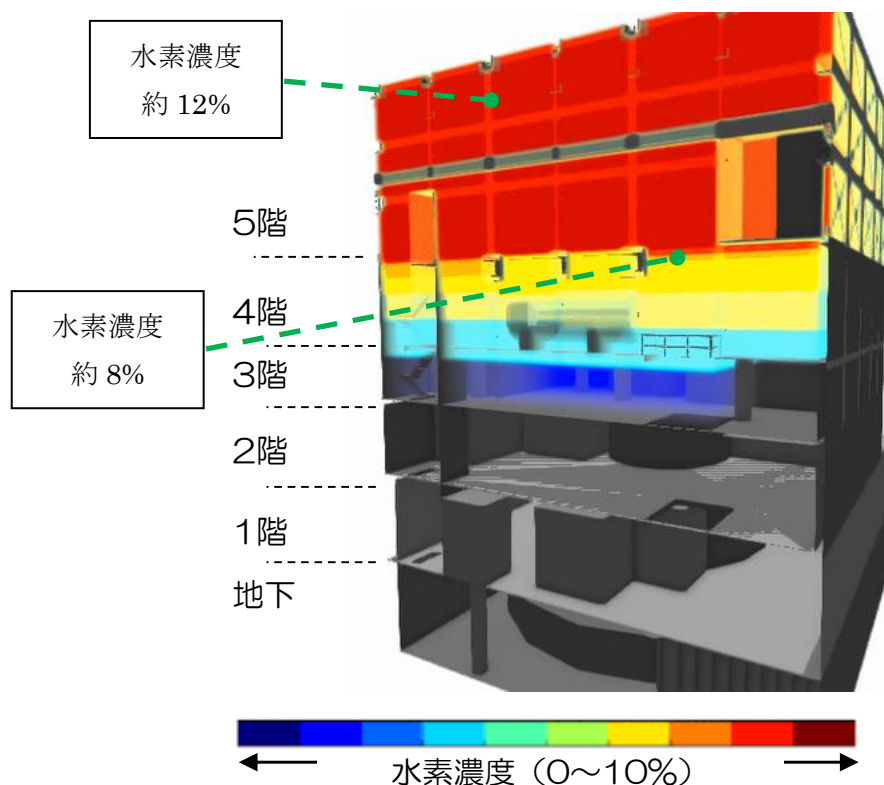
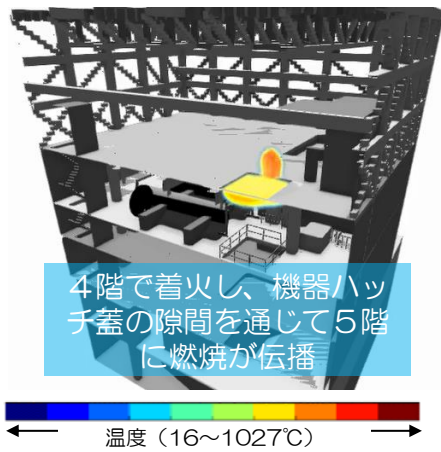
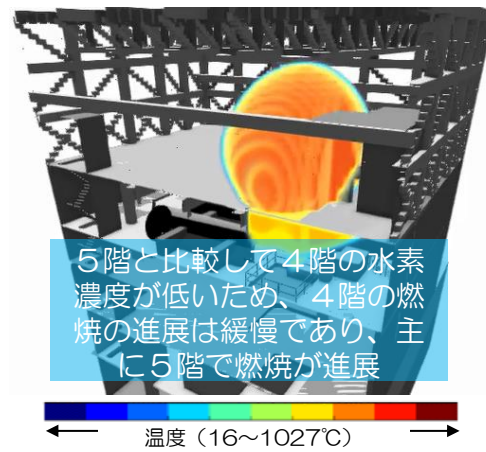


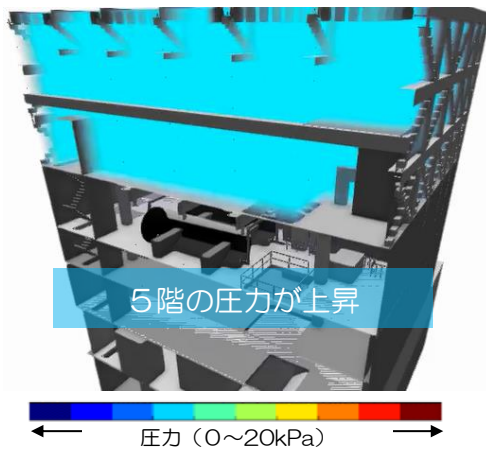
図13 着火時の水素濃度分布 (ケース④：5階漏えい・4階着火)



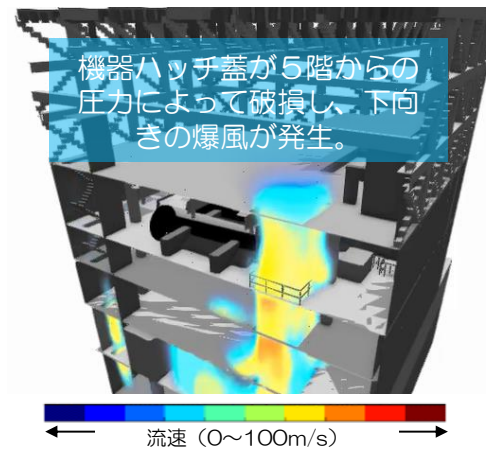
(A)



(B)



(C)



(D)

図 14 水素爆発解析結果 (ケース④) : 5階漏えい・4階着火)

3. 解析結果と損傷状況の比較

より確からしい水素爆発シナリオを推定するため、2.に示した水素爆発解析の結果の特徴と、建屋の損傷状況を部位ごとに比較した。

3.1 建屋5階部分

水素爆発後の建屋5階部分は側壁が吹き飛んでおり、また、天井スラブが床に落下している。5階床面は大部分が天井スラブに覆われており、5階床面の損傷状況は明らかになっていない。それ以外の部分の損傷についても、爆発そのものによる損傷か、天井の落下による損傷かの判別は困難である。

一方、無人カメラによる水素爆発時の映像が得られている。図15に、爆発時の映像における煙の様子(A)と、解析結果における爆風の様子(B)を並べて示す。(A)に示す映像からは、5階側壁損傷時は横向き、遅れて高速の上向きの爆風が流れる様子が見られた。(B)に示す解析結果では、5階側壁損傷後、ケース①では横向きの流れに遅れて高速の上向きの流れが発生しており、映像と同じ傾向である。これに対し、ケース②では横向きの流れと同時に上向きの流れが発生している。なお2.3(3)で前述したように、ケース③では、ケース①の後に新たに上向きの爆風が付加され、上向きの流れが2回見られる。また、ケース④はケース①と類似の傾向となる。

これらより、5階漏えいを仮定したケース①、④で見られた側壁損傷後の上向きの流れを、映像が捉えた可能性がある。一方、5階+4階漏えいを仮定したケース②、③では、ケース②では横向きの流れと上向きの流れの生じるタイミングが、ケース③では回数が、それぞれ映像と異なる。

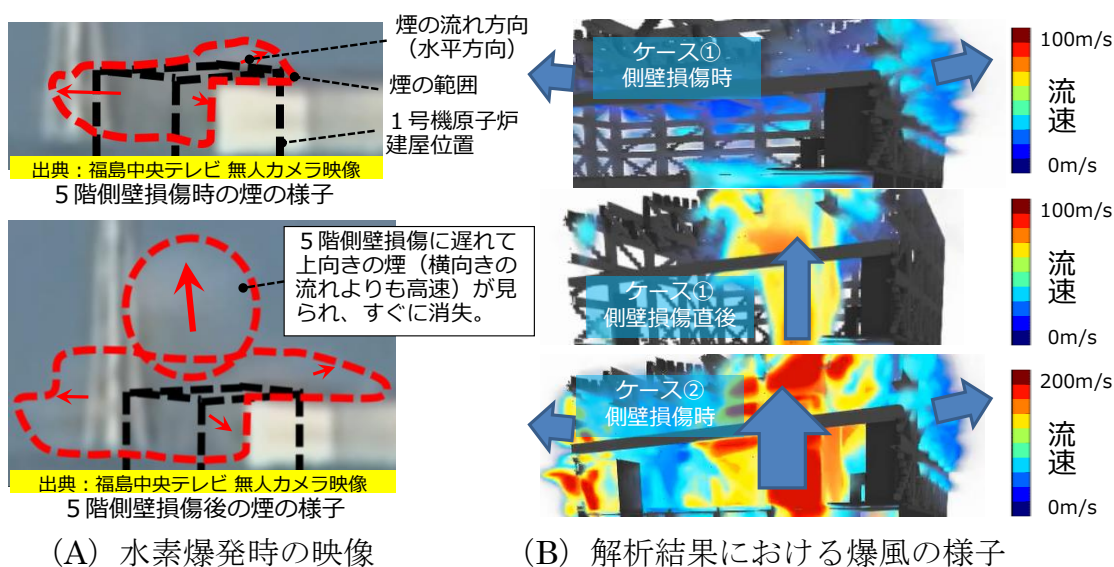


図15 爆発時の映像と解析結果の比較

3.2 建屋4階部分

建屋4階部分の損傷のうち、水素爆発に起因すると考えられる主要な損傷として、(1) 機器ハッチ周辺のプルボックスの変形・ハンドレールの損傷、(2) ICタンク南側の保温材・保温材カバーの剥がれ、(3) MCC、仮設トイレ、換気ダクト等の変形、が挙げられる。また、同じ4階でも、(4) 4階東側の損傷は軽微である。それぞれについて、水素爆発解析の結果の特徴と建屋の損傷状況を比較した⁵。

- (1) 機器ハッチ周辺のプルボックスの変形・ハンドレールの損傷について
当該部分の損傷状況を図16に示す。(B)に示したプルボックスは、上から押しつぶされたような変形をしている。

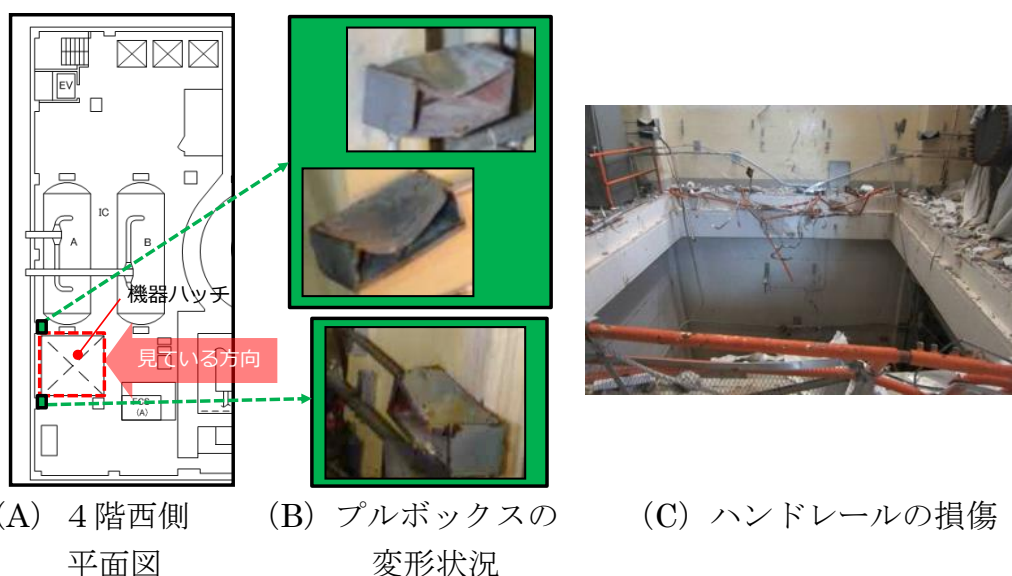


図16 機器ハッチ周辺のプルボックスの変形・ハンドレールの損傷

これに対し、ケース①における爆風の解析結果を図17に示す。図は、機器ハッチ付近の垂直断面の流速ベクトルを示している。解析結果の見ている方向は図16(A)と同様である。図17(A)より、機器ハッチ蓋損傷直後の下向きの爆風はハッチの外側にも流れ込んでおり、壁付近のプルボックス位置に爆風が及んでいる。これにより、図16(B)で見られたように、プルボックスは下向きに変形した可能性がある。一方、図17(B)に示す5階壁破損後の上向きの流れは、主にハッチの内側部分を通過しているため、ハッチ

⁵ 4階北西部では天井が損傷しているが、損傷が局所的であることなどから、これは水素爆発に伴う圧力上昇による損傷ではなく、天井スラブ等の落下衝撃による損傷と考えている。

の外側のプルボックスは流れの影響を受けにくく、上向きには変形しなかった可能性がある。また、図 16 (C) に示したハンドレールは機器ハッチ蓋損傷後、あるいは5階側壁損傷後のいずれかの爆風によって損傷した可能性がある。なお、ケース④はケース①よりもやや爆風の速度が大きいものの、ケース①と爆発の進展は類似している。

次に、ケース②、③における爆風の解析結果を図 18 に示す。ケース②、③では、4階の高濃度の水素に着火した後、プルボックス位置に横向きの強い爆風が衝突している。一方、図 16 (B) に示したプルボックスの損傷状況を見ると、横向きに強い爆風を受けた形跡は見られない。

これらより、4階機器ハッチ周辺のプルボックスの変形の方法は、5階漏えいを仮定したケース①、④の爆風の向きと整合しており、5階+4階漏えいを仮定したケース②、③では爆風の向きが異なる。

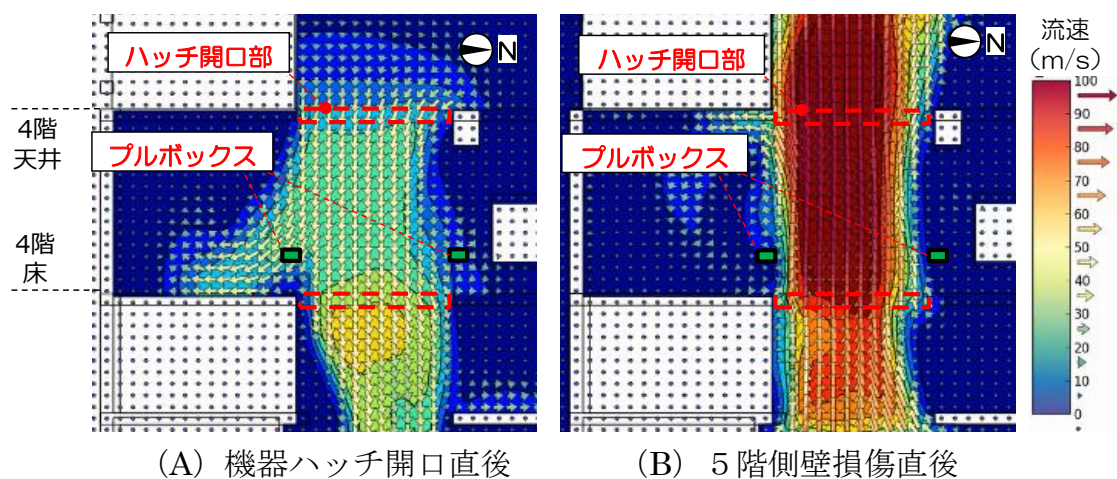


図 17 プルボックス位置における爆風の速度分布 (ケース①)

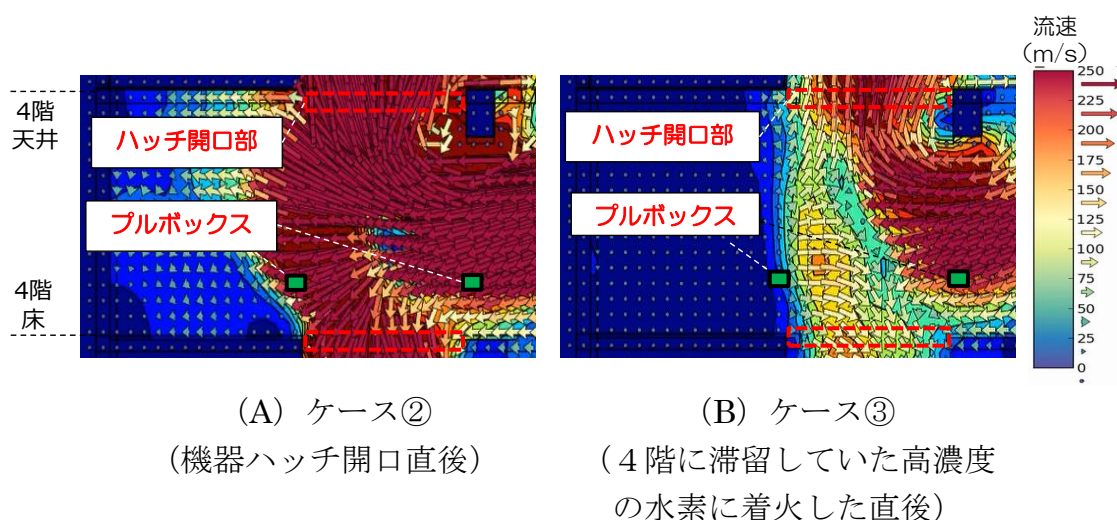


図 18 プルボックス位置における爆風の最大速度

(2) IC タンク南側の保温材・保温材カバーの剥がれについて

IC タンクの保温材・保温材カバーの損傷状況を図 19 (A) ~ (C) に示す。

(D) は写真のしている方向を示している。オレンジ色に見える箇所が IC タンクの本体である。IC タンク表面は本来、写真に白く写っている保温材 ((C) 参照) が、銀色の保温材カバー ((B) 参照) で覆われている。これに対し、IC タンク南側の保温材カバーは剥がれ、保温材が露出している (A)。一方、IC タンク北側の保温材カバーは健全である (B)。なお、IC タンク南側には、保温材カバーや保温材が IC タンク近くに存在しているものがある (C)。



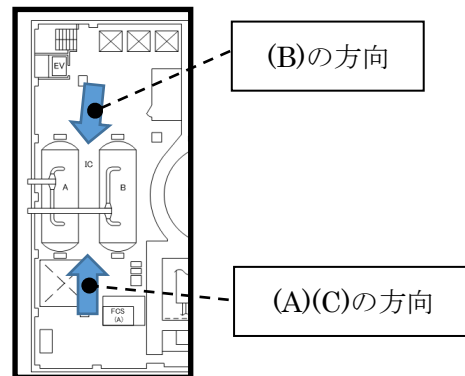
(A) IC タンク南側 (その 1)



(B) IC タンク北側



(C) IC タンク南側 (その 2)



(D) 4 階西側平面図

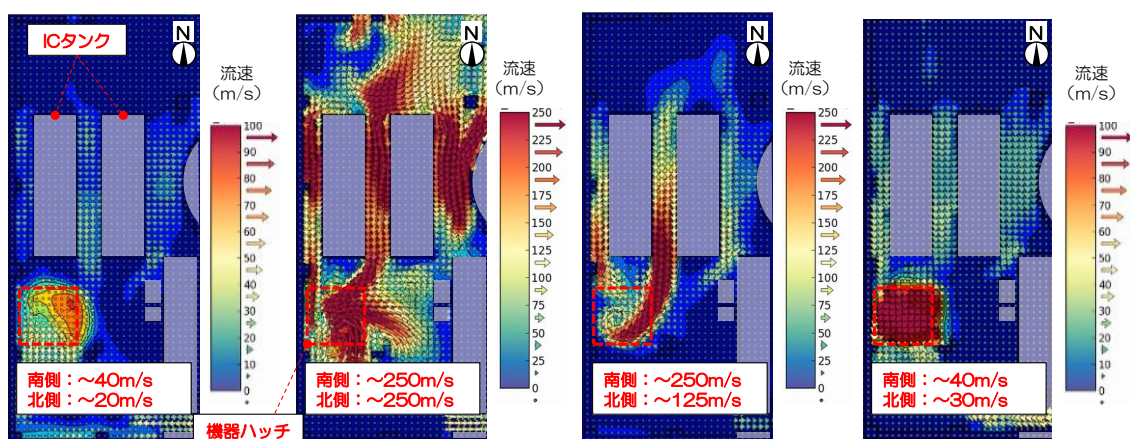
図 19 IC タンクの保温材・保温材カバーの損傷状況

これに対し、IC タンク付近の爆風の最大速度の解析結果を図 20 に示す。図は、IC タンク高さ中央位置における水平断面の流速ベクトルを示している。ケース②、③については、IC タンク南側、北側ともに、爆風の最大速度が 125m/s~250m/s 程度と非常に大きくなっている。ケース①、④については、IC タンク南側で~40m/s 程度、北側で~30m/s 程度であり、IC タンク南側で見られる程度の爆風の速度によって保温材カバーが剥離するかは断定できないものの、IC タンク北側の爆風の速度は南側と比較して小さい。こ

これは南側と北側の保温材カバーの損傷状況が異なっている状況と一致する。

また、仮に、ケース②やケース③で見られるような非常に強い爆風が生じた場合には、剥がれた保温材や保温材カバーは風圧によって相応の距離を移動すると考えられるが、図 19 の (C) に示したように、現状は IC タンク付近に落下している保温材や保温材カバーも見られることから、爆風の速度は比較的小さかった可能性がある。

これらより、IC タンク南側および北側の保温材・保温材カバーの状況は、5階漏えいを仮定したケース①、④と整合する傾向であり、5階+4階漏えいを仮定したケース②、③では爆風の速度が大きすぎる可能性がある。



(A) ケース① (B) ケース② (C) ケース③ (D) ケース④

図 20 IC タンク中央位置 (水平断面) における爆風の最大速度

(3) 換気ダクト、MCC、仮設トイレの変形について

換気ダクト、MCC、仮設トイレの損傷状況を図 21 (A) (B) に示す。(C) は写真の見ている方向を示している。図中で赤い点線で囲った部分は外側に変形している部分、青い点線で囲った部分は内側に変形している部分を示しており、両者が混在している。

これに対し、換気ダクト高さにおける圧力分布の解析結果を図 22 に示す。水素の燃焼によって、建屋内の空間の圧力が急速に上昇するタイミング (A) では、ダクト内の圧力変化が建屋空間の圧力変化に追いつかず、建屋空間よりも低くなっている。また、5階側壁が損傷し、建屋内の空間の圧力が急減するタイミング (B) では、逆にダクト内の圧力が建屋の空間よりも高くなっている。このように、爆発の進展の各時点において、換気ダクト内外で圧力差が発生している。

換気ダクト、MCC、仮設トイレ等の中空の構造物においては、このような

構造物内外の圧力差が生じると考えられ、建屋内圧力の上昇時と低下時の影響が混在し、図 21 で見られるように内側に向かう変形と外側に向かう変形が混在する要因となった可能性がある。なお、図 22 にはケース①の結果を示しているが、上記の傾向は解析ケースによらず共通であり、いずれの解析ケースも損傷状況とは矛盾しないと考えられる。

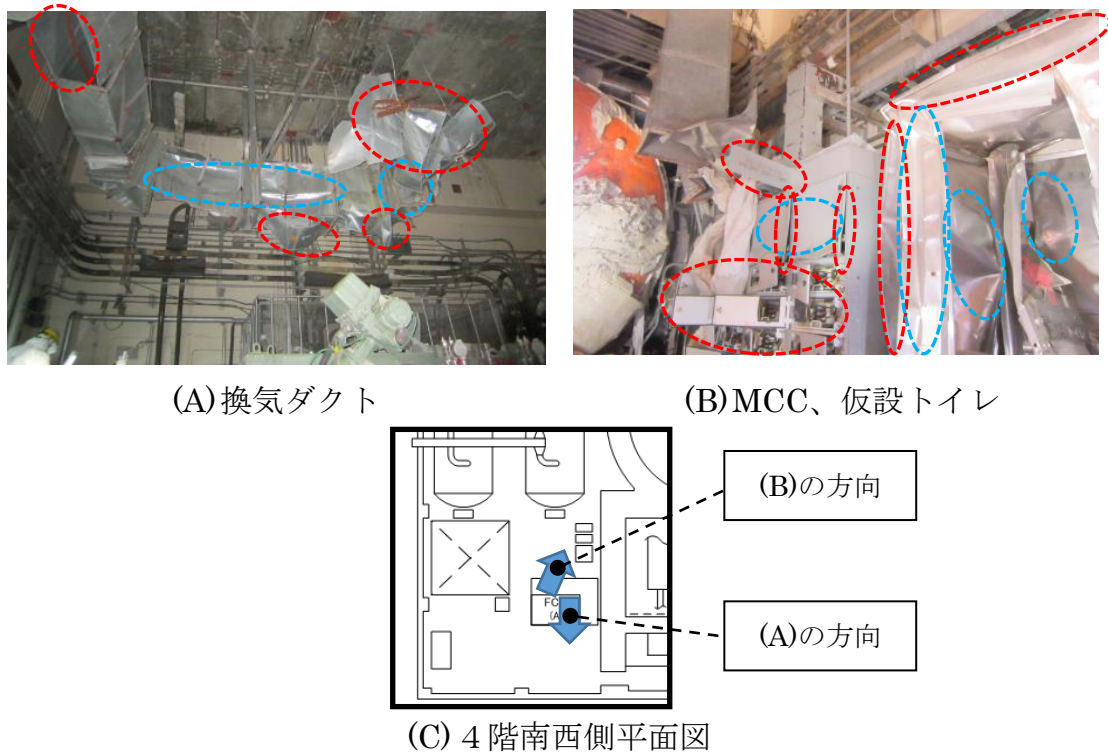


図 21 換気ダクト、MCC、仮設トイレの変形

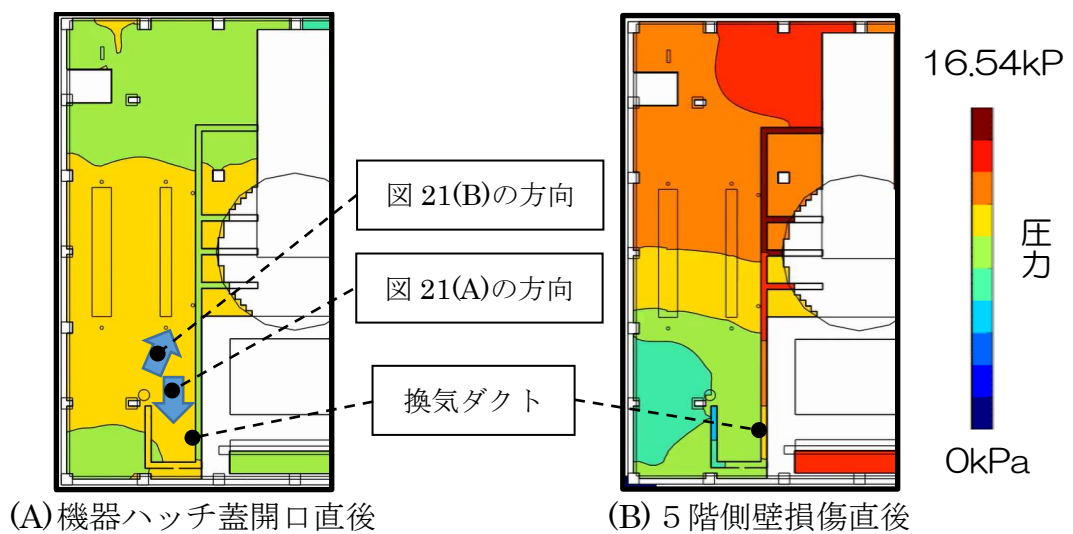


図 22 4階換気ダクト高さの圧力分布（ケース①）

(4) 4階東側の損傷について

前述のように、4階東側の損傷は4階西側と比較して軽微である。4階東側では、天井の高さが低く、5階や4階西側から水素が回り込みにくいいため、水素濃度は低く、全解析ケースにおいて水素燃焼には至っていない。

図 23 に、4階東側における爆風の最大速度の解析結果を示す。4階東側では、流路となるアクセス口が比較的狭いため、いずれの解析ケースにおいても西側と比較して発生する爆風の最大速度は小さくなっており、損傷が軽微である状況とは矛盾しないと考えられる。

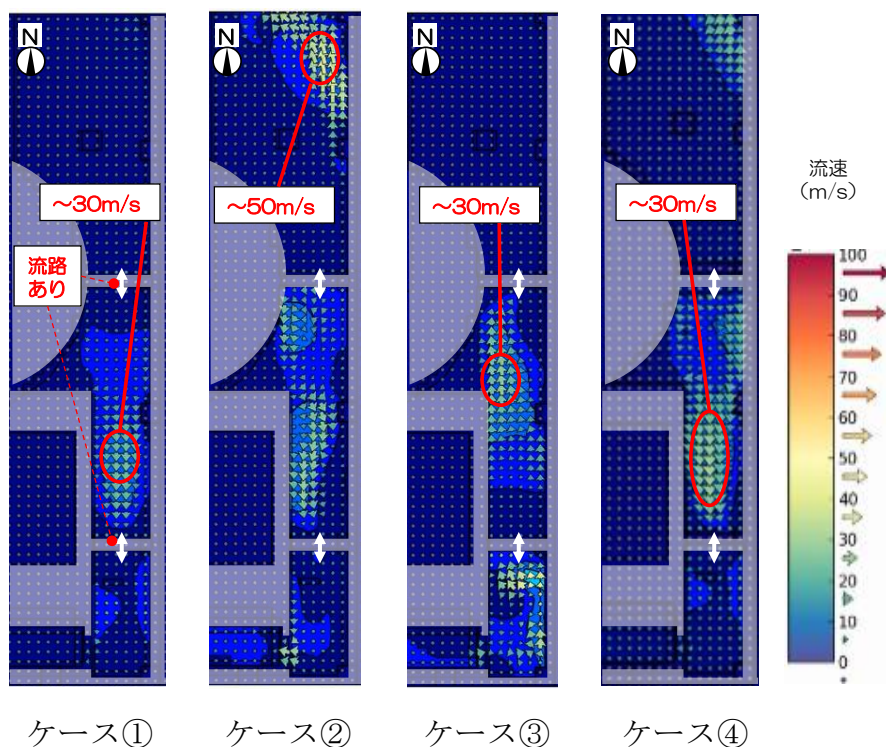


図 23 4階東側における爆風の最大速度

3.3 建屋3階以下

3階以下の機器ハッチ周辺の状況を図 24 に示す。比較的薄い構造物の変形（赤丸で囲んだ部分）は見られるものの、その他の構造物の損傷はほとんど見られない。3.2 に示した4階西側の損傷状況と比べても軽微であり、強い爆風を受けた形跡は見られない。

これに対し、3階以下に流れ込む爆風の最大速度の解析結果を図 25 に示す。図は、機器ハッチ付近の垂直断面の流速ベクトルを示している。解析結果の見ている方向は図 16 (A) と同様である。解析における3階以下のフロアに流れ込む爆風の最大速度は、ケース②、③ではケース①、④と比較して

非常に大きくなっている。このため、流れ込む爆風の速度の観点では、5階+4階漏えいを仮定したケース②、③では爆風が強すぎる傾向が見られる。

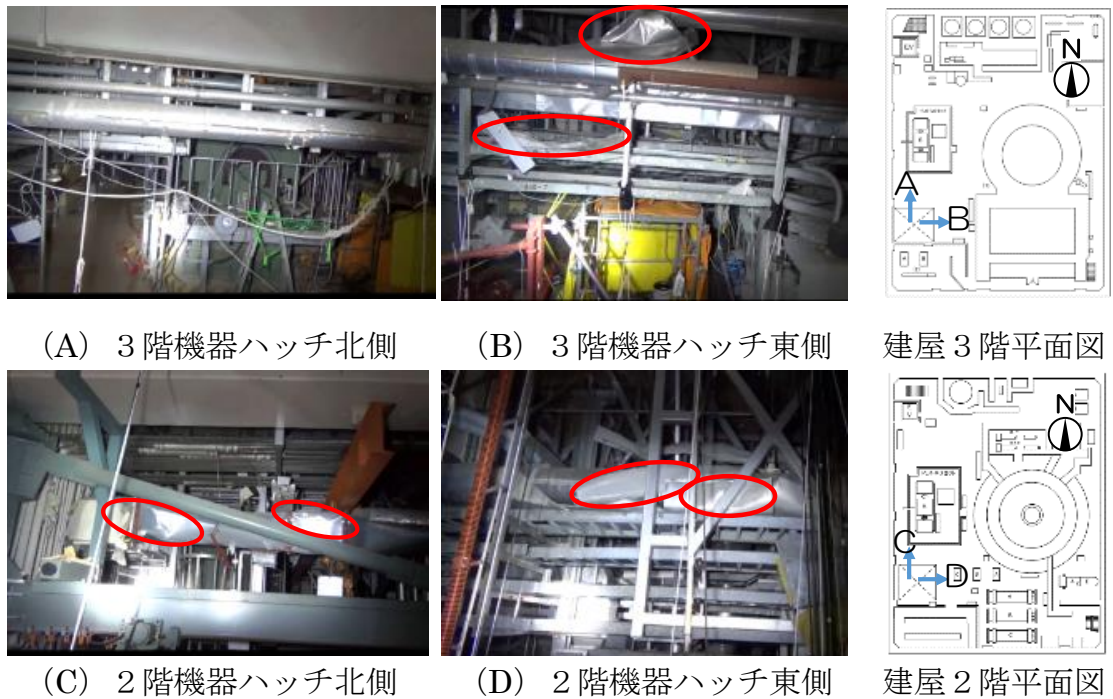


図 24 3階以下の機器ハッチ周辺の状況

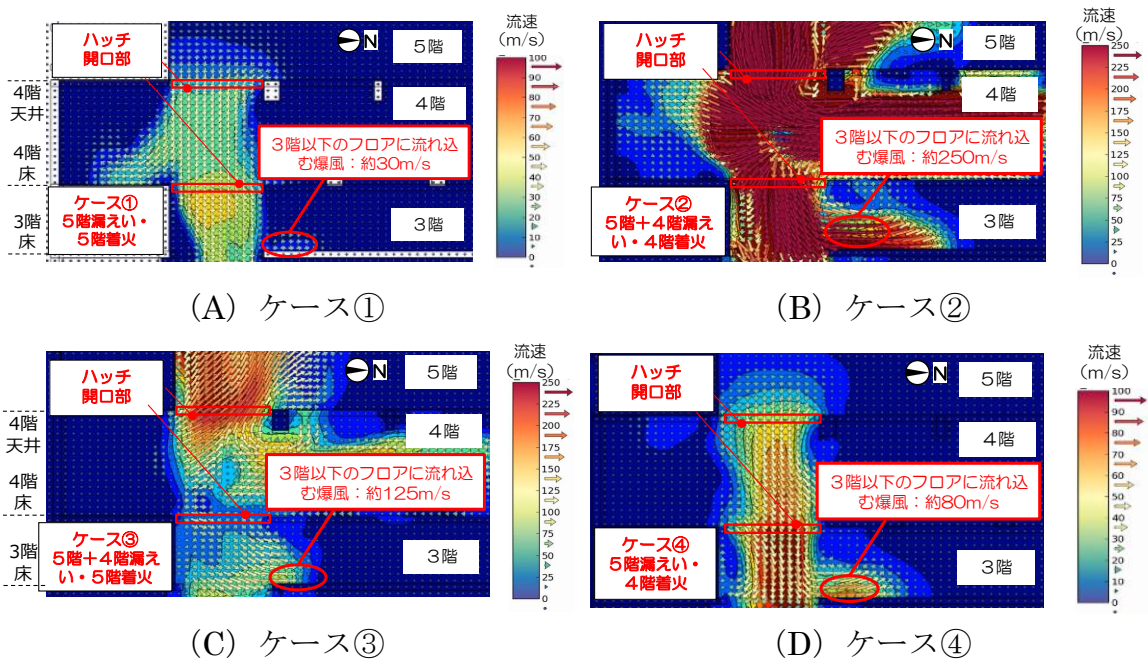


図 25 3階以下に流れ込む爆風の最大速度

3.4 解析結果と建屋の損傷状況の比較のまとめ

これまでに示した、解析結果と建屋の損傷状況の比較を表3にまとめる。なお、図中の○は解析結果が損傷状況と矛盾しないことを、▲は解析結果と損傷状況との相違の説明が困難であることを示す。表3より、従来想定していた、建屋5階に水素が漏えいしたシナリオがより確からしいと推定した。

表3 解析結果と建屋の損傷状況の比較

階層	損傷状況	解析結果との比較	
		ケース①、④ 5階漏えい	ケース②、③ 5階+4階漏えい
5階	側壁が吹き飛んでいる	○ (2.3 参照)	○ (2.3 参照)
	機器ハッチの蓋が開口している	○ (2.3 参照)	○ (2.3 参照)
	側壁損傷後の煙の流れ	○ (3.1 参照)	▲ (3.1 参照)
4階	機器ハッチ周辺の損傷 (ハンドレールの損傷・プルボックスの変形、ICタンク南側の保温材の剥がれ)	○ (3.2 参照)	▲ (3.2 参照)
	換気ダクト/MCC/仮設トイレの変形	○ (3.2 参照)	○ (3.2 参照)
	ICタンク北側の保温材カバーは健全	○ (3.2 参照)	▲ (3.2 参照)
	東側の損傷は軽微	○ (3.2 参照)	○ (3.2 参照)
3階以下	機器ハッチ周辺以外の損傷は軽微	○ (3.3 参照)	▲ (3.3 参照)

4. まとめ

解析結果と建屋の損傷状況との比較より、福島第一原子力発電所1号機で発生した水素爆発に対して、4階 IC 配管など、4階部分で水素が漏えいしていた可能性は低く、従来想定していた、建屋5階に水素が漏えいしたシナリオがより確からしいと推定した。これは、現場調査結果[2] (IC 周辺の機器、配管に損傷が確認されなかったこと等) とも整合する結果である。

5. 柏崎刈羽原子力発電所の安全対策との関係

本検討より、格納容器トップヘッドフランジ部から水素の漏えいがあった可能性が改めて示唆された。このため、格納容器からの水素の漏えいを防止する対策が必要である。また、万一漏えいがあった場合にも、局所的な水素の滞留も含め、建屋内の水素濃度を十分に低く保ち、水素爆発を防止する対策が必要である。

格納容器漏えい防止対策としては、格納容器自体の過温・過圧破損を防止するため、格納容器シール材の強化、トップヘッドフランジ冷却、格納容器への代替スプレー手段の強化、代替循環冷却、フィルタベント等の対策を講じる。なお、格納容器を貫通する配管は、事故時に生じるような異常を検知した場合には、隔離弁により自動的に隔離される設計となっている。

また、水素爆発防止対策としては、万一水素が建屋に漏えいした場合にも速やかに検知できるよう、漏えいを想定しうる箇所（格納容器トップヘッドの先の建屋最上階、機器ハッチ・エアロックのある小部屋）に水素濃度計を設置している。建屋最上階で水素濃度が制限値を超えた場合はフィルタベントによって格納容器を減圧し、建屋への更なる水素漏えいを抑制する対策を講じる。さらに、水素濃度を十分に低く保つため、建屋最上階への静的触媒式水素再結合装置（PAR）の設置、トップベントによる建屋からの水素の排出等の対策を講じている。以上の対策の概要を図 26 に示す。なお、機器ハッチ・エアロックから水素が漏えいした場合も、水素は換気ダクト等を通じて建屋最上階へ導かれるため、建屋内において水素濃度が可燃限界に至ることはないと評価している。

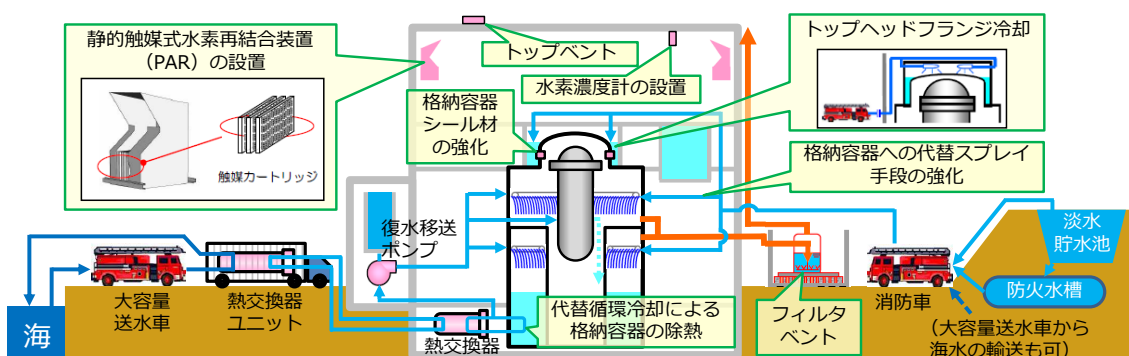


図 26 柏崎刈羽原子力発電所における格納容器漏えい・水素爆発防止対策

参照文書

- [1] Hansen, O.R. et al., "Validation of FLACS-hydrogen CFD consequence prediction model against large scale H2 explosion experiments in the FLAME facility," 1st International Conference on Hydrogen Safety, Pisa, Italy (2005)
- [2] 東京電力「福島第一原子力発電所 1 号機非常用復水器の動作状況の評価について」(2011/11/22)