

危険物施設の放爆に関するシミュレーション（案）

1 放爆口の確保に関する既往のシミュレーション手法

危険物火災の際に爆発的な燃焼現象が発生し、製造所等の屋根を放爆構造にすることにより被害の軽減を図る必要がある場合としては、建物内に大量の可燃性蒸気が滞留している状況で何らかの火源により爆発的な燃焼が起こる場合や、建物内の酸素量では十分な完全燃焼が起こらない程度に大量の危険物が燃焼している状態で、何らかの要因により新たな酸素が供給されることにより爆発的な燃焼が生ずる場合、危険物設備や装置が爆発的な異常燃焼を起こすことにより建物全体に爆風の影響が及ぶ場合等が想定される。

これらの爆発的な燃焼現象をシミュレートする手法としては、平成 18 年に消防庁危険物保安室が行った「危険物保安に関する技術基準の性能規定導入・推進に係る調査検討報告書」（詳細は下記及び参考資料 2 - 1 参照。以下「シミュレーション手法 1」という。）や全米防火協会が作成した NFPA68（詳細は下記参照。以下「シミュレーション手法 2」という。）がある。

(1) シミュレーション手法 1

「危険物保安に関する技術基準の性能規定導入・推進に係る調査検討会」（平成 18 年度消防庁危険物保安室事務局）では、危険物施設内で爆発が生じた場合に、爆風圧を安全に放出することができる建物構造に必要とされる性能及び評価方法について検討されている。

ア シミュレーションの概要

爆発が発生する空間を単純な建物構造で開口部（窓）と屋根（スレート板）のみが脆弱な部分とし、ガソリン 1 リットル相当分のエネルギー 34.6MJ が瞬間的に放出される想定として 2 種類の検証を行っている。

① 基本ケース（開口部（窓）の開口率の影響の検証）

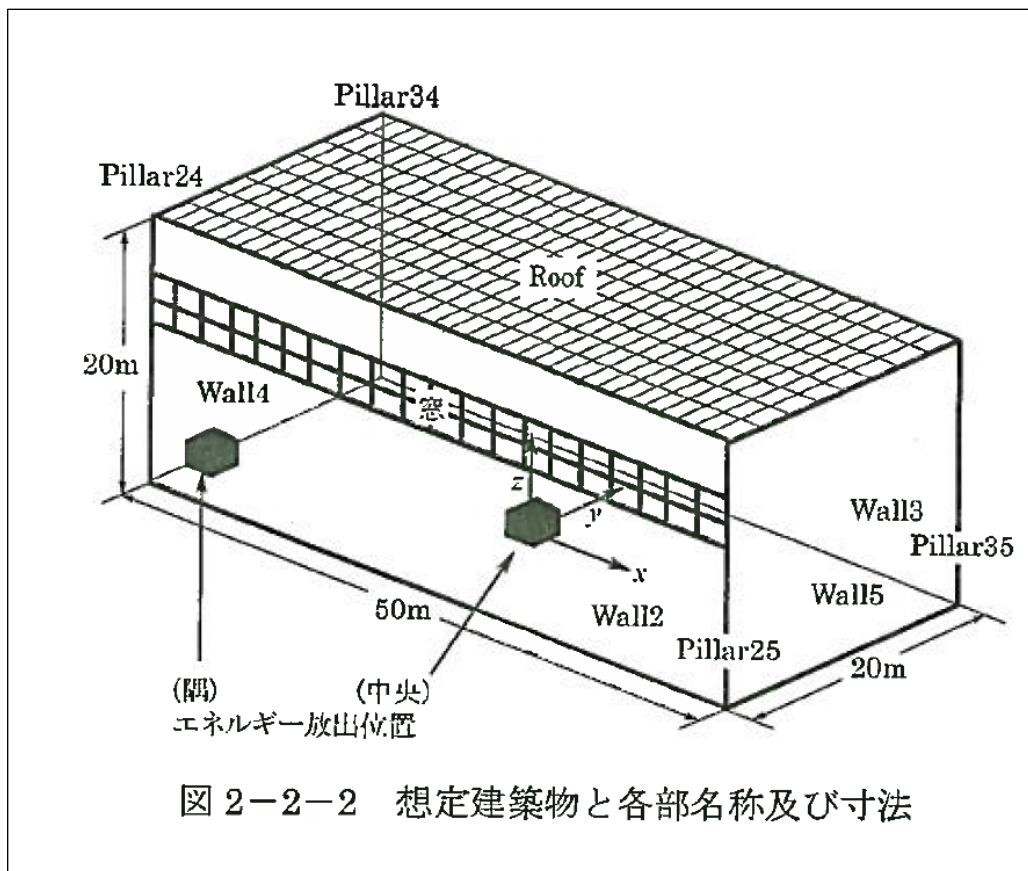
開口部（窓）の開口率を 3%～50%まで変化させ、各部分にかかる圧力、脆弱部分の破壊状況についてシミュレーションを実施している。

② 応用ケース（開口部（窓）の強度の影響の検証）

開口部（窓）の強度については著しく過小評価している可能性があるとして、強度を 5 倍及び 10 倍に変えたケースについてもシミュレーションしている。

詳細なシミュレーション条件については次のとおり。

(参考資料 2 - 1 抜粋)



本建築物において長方形屋根を Roof、手前側の長方形壁を Wall2、奥側長方形壁を Wall3、奥側正方形壁を Wall4、手前側正方形壁を Wall5 と呼称する。

また、各壁を連結する角柱にあたる 4 箇所の垂直線を図中に示されたようにそれぞれ Pillar24~Pillar35 と呼称する。以降の記述においては、これらの表記を用いる。

本シミュレーションでは、壁に窓が設置されている状況として、表 2-2-1 に示される 6 種類について実施した。また、各条件における開口部位置等を図 2-2-3 に示す。

なお、表 2-2-1 における開口率は、(開口部の全面積)/(壁面全面積=2800m²)として定義されたものである。

エネルギー放出位置については、図 2-2-2 に示されるように、(1) 床面中央位置 (エネルギー放出位置=中央と呼称) または (2) Pillar24 から短辺方向(y 方向)に 5m ずれた位置(エネルギー放出位置=隅と呼称)の 2 箇所を想定し、その体積は $V = 2m \times 2m \times 2m$ であるとした。

数値解析には 3 次元オイラー方程式が用いられている。理想気体を想定し、比熱比は一定値 1.4 とされている。数値解法には、空間的には結果的に TVD 法と同じ性質を持ち合わせたものが使用された。時間積分には、4 次のルンゲ・クッタ法が使用された。また、本計算の精度を確認するために、爆風理論との比較が行われ、数値シミュレーション結果の精度が、定量的議論に充分耐えると検証されている。

表 2-2-1 壁面の開口部条件 (6 種類)

開口部条件	Wall2 開口面積(m ²)	Wall3 開口面積(m ²)	Wall4 開口面積(m ²)	Wall5 開口面積(m ²)	開口率 (%)	備考
1	22×4	0	0	0	3.14	
2	50×4	0	0	0	7.14	(開口部下部)
3	50×4	0	0	0	7.14	(開口部上部)
4	50×6	50×6	0	0	21.43	
5	50×4	50×4	20×4	20×4	20.00	
6	50×10	50×10	20×10	20×10	50.00	

(イ) 実施ケース (全 14 ケース)

①基本ケース (12 ケース)

・エネルギー放出位置

中央または隅においたケース

・開口部

表 2-2-1 に示す 6 条件によるケース

以上、12 ケース (エネルギー放出位置 (2 条件) × 開口部 (6 条件))

についてシミュレーションを実施した。

②応用ケース (2 ケース)

窓ガラス強度の閾値を変えた 2 ケースについてシミュレーションを実施した。^{*1} (なお、開口部条件は 3 とした (開口率 7.14%、開口部上部、表 2-2-1 参照)。)

イ 実施結果概要

(ウ) 実施結果概要

- ① 用いられた網入りガラスとスレート屋根「破壊荷重模型」の範囲内では、計算された12ケースの全てにおいて、ガラス窓又はスレート屋根の放爆作用は十分と言えなかった。即ち、「窓の破壊がスレート屋根破壊を防ぐ」、或いは「スレート屋根破壊が窓破壊を防ぐ」というような結果は得られなかった。
- ② 基本的には、極めて爆心付近にガラス窓が存在する場合、即ち (a) 爆心が壁に近く、(b) ガラス窓が床爆心位置に近い低位置に設置されている場合には、窓ガラス破壊による放爆効果は一定の効果を発揮する。
- ③ スレート屋根破壊が放爆効果を発揮し、窓ガラス破壊を未然に防ぐには、(a) 窓ガラス強度を十分上げるか、若しくは(b) 爆心が屋根近傍である場合に限られる。
- ④ ガラス窓破壊強度閾値を5及び10倍した計算では、ガラス窓は殆ど破壊されず、屋根は完全に破壊し、その放爆によって建物内部の爆風は減衰した。しかしながらその減衰は余り速くはない。(Case13、Case14) (下図参照)

開口部（窓）の設定強度

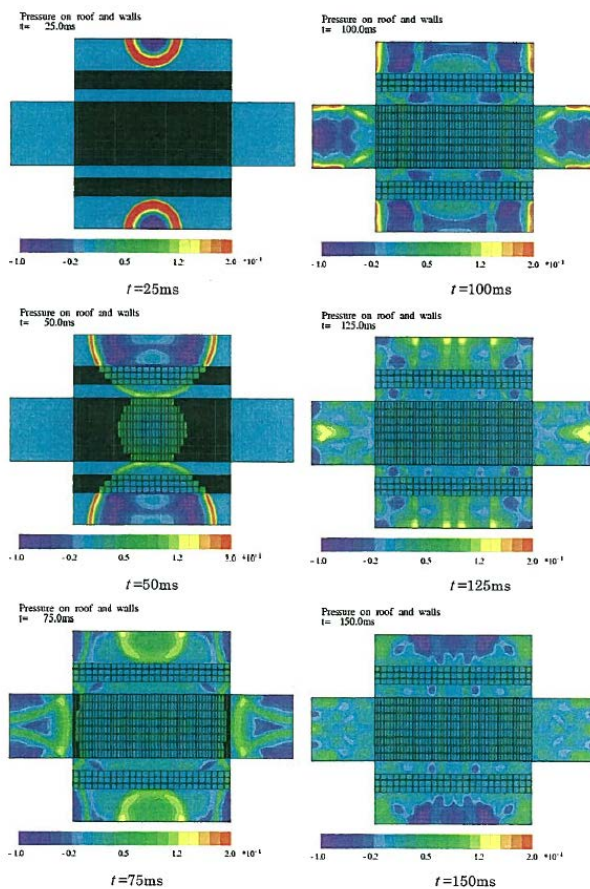


図 2-2-9 建物表面展開図：Roof および Wall2~5 上の圧力分布の履歴と破壊された窓ガラスまたはスレート板の位置(図中の■は壊れずに残った部分)

開口部（窓）の設定強度×10倍

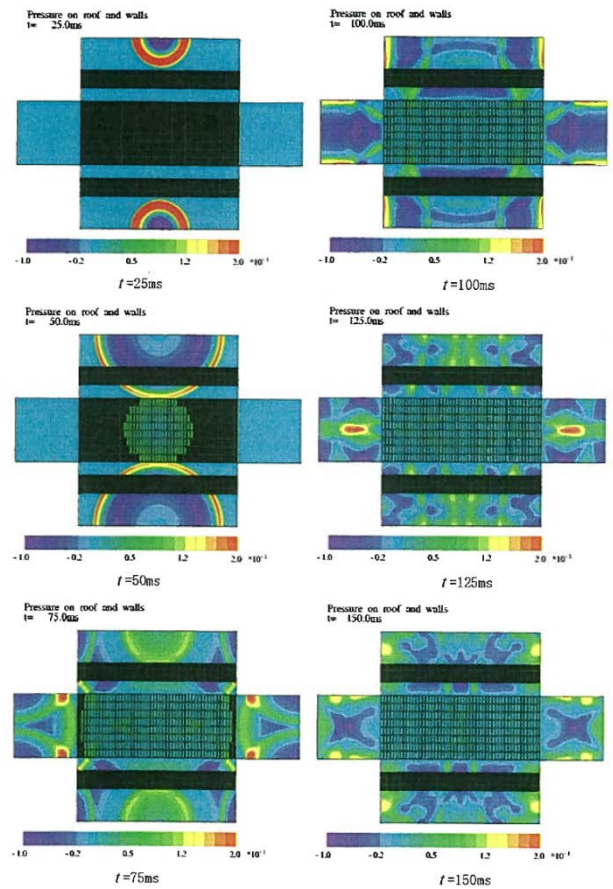


図 2-2-23 建物表面展開図：Roof および Wall2~5 上の圧力分布の履歴と破壊された窓ガラスまたはスレート板の位置(図中の■は壊れずに残った部分)

(2) シミュレーション手法2

全米防火協会が作成した NFPA68 では、放爆口の設計方法として、閉鎖空間の耐圧力の大きさを条件とし2種類の計算方法を提示している。いずれの方法も可燃性ガスの燃焼速度を考慮したものとなっている。

- ア 耐圧力が 0.1bar (0.1×10²kPa) 以下の閉鎖空間の場合
放爆口の面積の計算式として、次の式が提示されている。

$$A_v = \frac{C \times (A_s)}{P_{red}^{1/2}}$$

A_v : 放爆口の面積 [m²]

A_s : 閉鎖空間の内表面積 [m²]

C : 可燃性ガスの放散係数 (標準燃焼速度で定義される係数) [bar^{1/2}]

$$\left[\begin{array}{l} C \text{ は次の式で与えられる。} \\ C = 1.57 \times 10^{-5} \times (S_u)^2 + 1.57 \times 10^{-4} \times (S_u) + 0.0109 \\ S_u \text{ : 標準燃焼速度 [cm/s] ※ただし、60cm/s 以下に限られる。} \end{array} \right]$$

P_{red} : 放爆口作動後に閉鎖空間にかかる最大圧力 [bar]

- イ 耐圧力が 0.1bar (0.1×10²kPa) より高い閉鎖空間の場合
放爆口の面積の計算式として、次の式が提示されている。

$$A_v = \{(0.127 \log_{10} K_G - 0.0567) P_{red}^{-0.582} + 0.175 P_{red}^{-0.572} (P_{stat} - 1)\} V^{2/3}$$

ここで、 $K_G \leq 550 \text{ bar}\cdot\text{m/s}$

$0.05 \text{ bar} \leq P_{red} \leq 2 \text{ bar}$

$P_{stat} \leq 2 \text{ bar}$

$V \leq 1000 \text{ m}^3$

K_G : 可燃性ガスの爆発指数 (最大圧力上昇速度で定義される指数) [bar·m/s]

P_{stat} : 爆発放爆口が開放した際の圧力 [bar]

V : 閉鎖空間の体積 [m³]

- ウ 放爆口の質量の影響補正

ア、イいずれの場合も、放爆口が 40kg/m² 以下で爆発係数 K_G が 130 bar·m/s 以下の場合、次に示すとおり放爆口の質量を考慮することができる。

$$M_T = \left[6.67 \cdot (P_{red}^{0.2}) \cdot (n^{0.3}) \cdot \left(\frac{V}{K_G^{0.5}} \right) \right]^{1.67}$$

M_T : 荷重閾値 [kg/m²]

n : 放爆口の数

実際の放爆口の単位面積あたりの重量 M が M_T より大きい場合は、次の式で得られる ΔA_i を A_v に加えて補正する。

$$\Delta A_i = A_v \cdot (0.0075) \cdot M^{0.6} \cdot \frac{K_G^{0.5}}{n^{0.3}} \cdot V \cdot P_{red}^{0.2}$$

なお、 K_G が 75bar-m/sec よりも小さい場合は、 $K_G=75\text{bar-m/sec}$ とする。

※ また、放爆口の設置位置に関する考え方については、このシミュレーション手法2を採用している「爆発圧力放散設備技術指針」（独立行政法人産業安全研究所）で、次のとおり示されている。

- 爆発放爆口を1箇所に設ける場合
 - ・ 着火源となるおそれが最も高い箇所に近い位置に設ける。
 - ・ 着火源となるおそれが最も高い箇所が特定出来ない場合には、装置内で最も広い空間を有する箇所に面する壁の中央に設ける。
- 複数の爆発放爆口を設ける場合
 - ・ 着火源となるおそれが最も高い箇所の近くと、装置内で最も広い空間を有する箇所に面する壁の中央に設けることを原則とする。
 - ・ 可能な場合には、装置の相対する壁面のそれぞれ中央付近に設ける。
 - ・ 装置の1つの壁面に複数の爆発放爆口を設けざるを得ない場合には、壁面の中心に対して対称な分布となるように設ける。
 - ・ 大型の装置においては、最大限均等、かつ装置表面を網羅するように複数の放爆口を設置することが望ましい。

（3）放爆口の確保に関する既往のシミュレーション手法から得られた知見

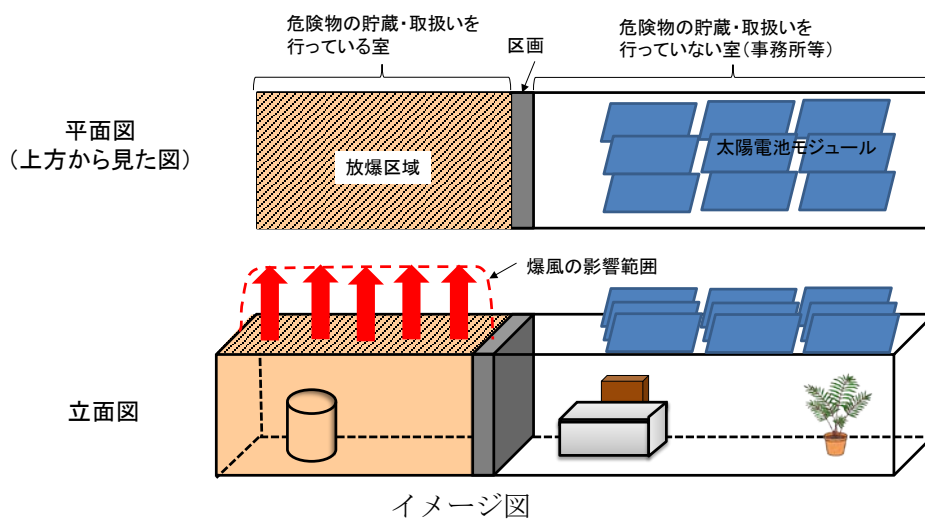
シミュレーション手法1は製造所等の中にある一部設備が爆発的燃焼を起こした場合に建物の壁体や屋根面に加わる爆風圧力をシミュレートしたものであり、シミュレーション手法2は閉鎖空間に充満した可燃性蒸気に何らかの火源から着火し、爆発的燃焼を起こした場合の閉鎖空間の壁や放爆口に加わる圧力をシミュレートしたものであり、それぞれが前述の放爆構造を必要とする危険物火災の一部を想定したシミュレーションと言える。

シミュレーション手法1では、放爆口以外の場所の破損を防ぐには、放爆口以外の場所と一定以上の強度差を確保しなければならないこと、爆心の位置を配慮した上で放爆口を設置しなければならないことが示されており、シミュレーション手法2では、必要な放爆口の面積には、可燃性ガスの爆発指数、壁強度、爆発放爆口強度、体積が大きく関係することが示されている。

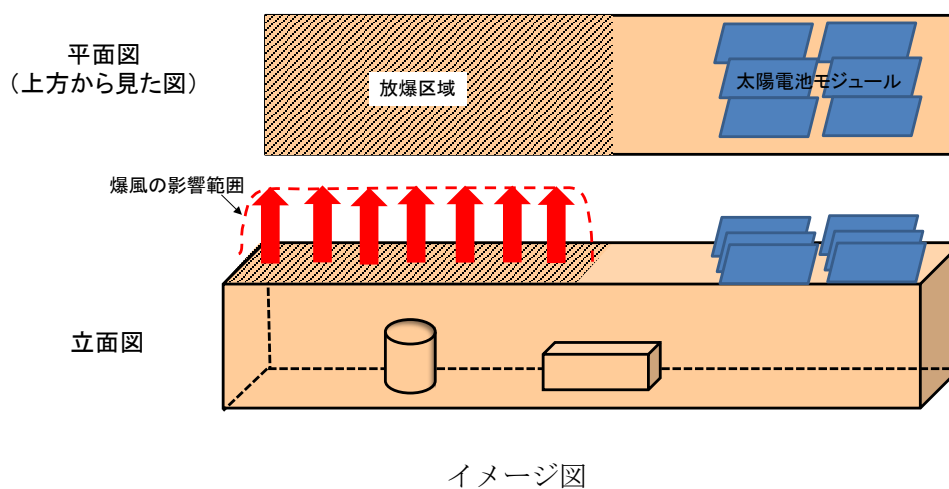
2 太陽光発電設備を既に設置した危険物施設の放爆口の確保と太陽電池モジュールの設置に関する考え方

参考資料2-2の「危険物施設における太陽光発電設備の設置状況に関する実態調査結果」（以下「アンケート調査結果」という。）P.11 で見られた太陽光発電設備を既に設置した危険物施設の放爆口の確保と太陽電池モジュールの設置に関する考え方は次のとおり。

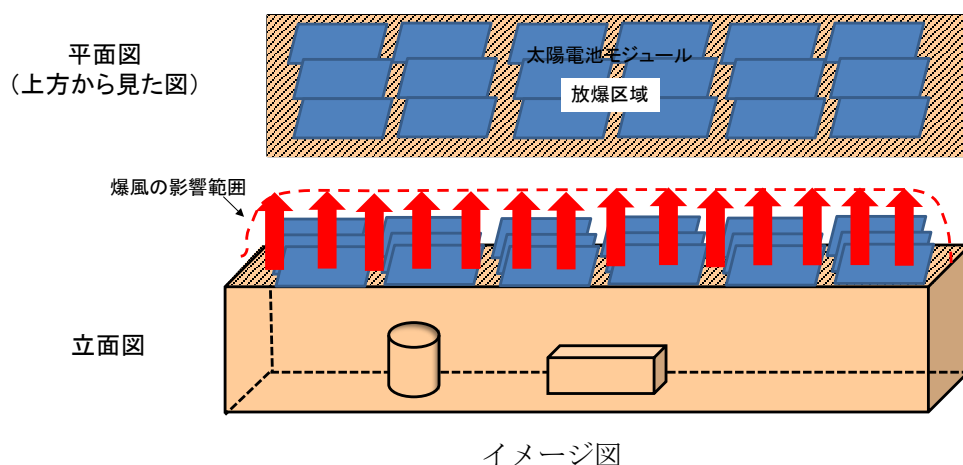
① 危険物を貯蔵又は取り扱う室以外の室の屋根に太陽電池モジュールを設置



② 危険物を貯蔵又は取り扱う室の屋根の一部に太陽電池モジュールを設置



③ 放爆口上に太陽電池モジュールを設置



④ その他

- ・ 4面壁なしのため放爆構造と同等とした
- ・ 用途が研究所であり、階層構造となっているため、放爆構造とすることが困難であり、各室ごと不燃区画された中で取り扱う危険物も少量(0.2倍)であり、万一の爆発にも内壁の強度が爆発による圧力上昇に勝るため室外への影響はないことから、特例適用とした。
- ・ 危険物取り扱いが耐火区画内のためN2消火設備及び排気ダクト等から爆風をぬく
- ・ 引火点が高い危険物のみを貯蔵し、又は取り扱うため、放爆口は不要とした。
- ・ PCB外部漏えい防止の為、開口部設けず
- ・ 太陽電池モジュールを屋根に直接設置せず、屋根との間に空間を設けることで屋根全体を放爆口として爆風を抜くこととした。
- ・ 特になし
- ・ 無許可で設置
- ・ 不明

危険物施設の放爆に関するシミュレーションでは、調査結果で見られた代表的な形態のうち、製造所等の屋根に太陽光パネルを載せた場合で放爆構造に大きな影響を及ぼす②、③の設置形態について検証することとしたい。

3 太陽光発電設備を既に設置した危険物施設の放爆口の確保のための検証事項（案）

アンケート調査結果で見られた2②及び③の放爆口を確保するための方策について、懸念される事項とそれに対する検証事項（案）は次のとおり。

懸念事項 1

放爆口の強度が高いことにより、壁又は間仕切り壁等の強度以上に室内圧が上昇し壁又は間仕切り壁が崩壊する



検証事項（案）

安全な放爆に必要な放爆口と壁及び間仕切り壁との強度差について検証してはどうか。

放爆口が完全に開放しない状況を想定すると、ある程度大きめに安全率を設定することも対応方針として視野に入れるべきではないか。

懸念事項 2

放爆口の面積や位置が不適切なため、室内の圧力上昇速度の差の影響で放爆口以外の場所が先に崩壊する。



検証事項（案）

安全な放爆に必要な放爆口の大きさ及び配置について検証してはどうか。

太陽電池モジュールを設置した屋根の近傍に放爆口を設けることにより、効果的に圧力を抜き太陽電池モジュールを設置した屋根の損傷を防止することも対応方針として検討するべきではないか。

3 シミュレーション案

製造所等の屋根に太陽光パネルを載せた場合で放爆構造に大きな影響を及ぼすのは、アンケート調査結果で見られた2②及び③の放爆口を確保するための方策だが、屋根の放爆構造が必要となる様々な火災が想定される一方で、既知のシミュレーション手法としては二つの手法が存在し、両手法とも放爆想定をシミュレートしたものとと言えるため、本検討会では両手法を検討することとする。

まず、1(2)のシミュレーション手法2により、建物内に可燃性蒸気が滞留した状態で爆発燃焼が起きた場合に放爆構造を確保するために必要な開口面積が算出できる。

ここで、製造所等で貯蔵し、又は取り扱われる危険物の種類はあらかじめ特定することが困難であることから、可燃性ガス固有のパラメータは最も危険性の高い物質を想定すべきである。

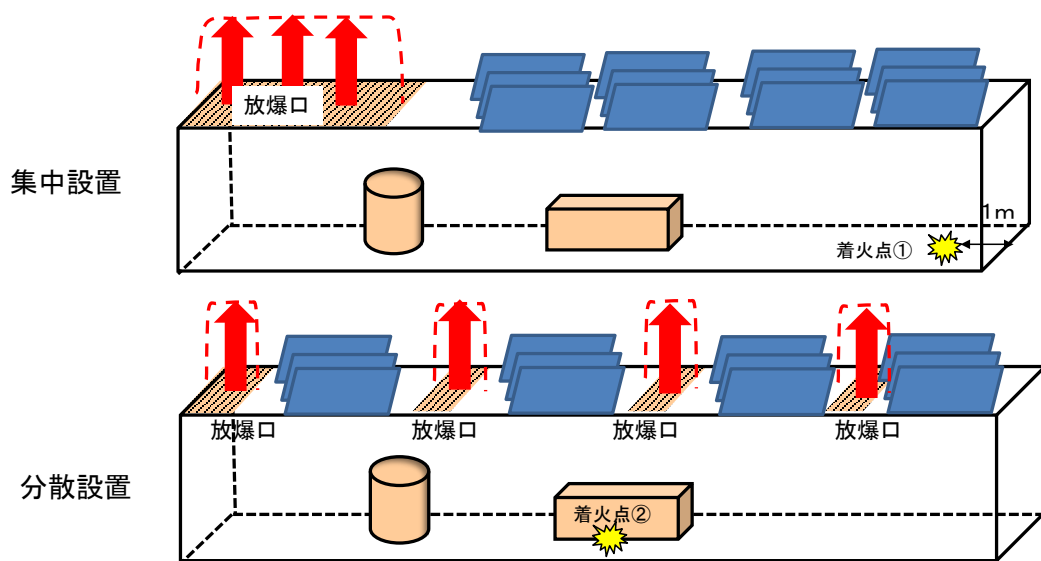
次に、計算式で求められる放爆口面積は、開口部の偏在等による爆発力の放出効果を確認する必要があることから、1(2)のシミュレーション手法1及び2を活用して、放爆口以外の部材が破損する前に放爆口が有効に圧力を逃がすことができることの検証を行うこととする。

具体的には、平成18年に行ったシミュレーション手法1では屋根材を大波スレートとし、壁及び床は剛体としたが、本検討ではアンケート調査結果を踏まえ、屋根の一部に太陽光パネルを載せた折板、他の屋根材は放爆構造を確保できる屋根材（詳細は事業者等に相談する予定）とし、その配置パターンは均等に放爆口を設ける場合と、偏在させて設ける場合を想定する。

なお、平成18年に行ったシミュレーション結果として、網入りガラスを用いた開口部の取扱いについては、開口部の強度が小さい場合は放爆口が働くことに加えて当該開口部も破損するとされ、開口部の強度が大きい場合は当該開口部が破損することなく放爆口が働く可能性が高いとされている。ただし、いずれの場合も放爆口が働くことに変わりがなかったことから、今回行うシミュレーションでは開口部がない条件でシミュレーションを行うこととする。

同様にシミュレーション手法2でも、原則として放爆口の配置パターンは均等に設ける場合と偏在させて設ける場合を想定することとするが、時間と経費の状況によっては均等に設ける場合のみシミュレーションを行うこととする。

また、シミュレーションを行う建物の大きさは、比較的小さな作業場、中規模程度の倉庫、大規模な製造所をイメージし、3パターンを想定することとするが、時間と経費の状況によっては検証パターン数が増加することもある。



シミュレーションイメージ