

リスク基盤の耐火性能検証 リスク基盤の避難安全検証

オンライン研修会資料

リスク基盤の火災安全性能検証 防火研修会プログラム

講師 京都大学名誉教授 田中哮義

リスク基盤の耐火性能検証・・・・・・・・・・・・・・ 1

耐火設計の源流
各国の耐火試験標準火災温度・時間曲線
耐火規定・耐火試験方法の導入
耐火性能検証法の導入
耐火試験と同じ温度を生ずる区画は存在するか？
MQH 温度の限界-開口輻射失熱
構造部材の崩壊確率、区画部材の延焼確率
建築基準法の耐火規定における許容崩壊確率
耐火基準と崩壊確率の算定値についての考察
建物の崩壊リスク→構造部材の許容崩壊確率
基準建物
許容崩壊確率のパラメタ値
耐火設計の設計火災荷重密度の計算手順
CASE STUDY

リスク基盤の避難安全検証・・・・・・・・・・・・・・ 2 2

背景と目的
性能的避難安全設計法の基本構成
リスク基盤の避難安全検証
 リスク基盤の避難安全検証における設計火源
許容避難リスクと設計火源
許容避難リスクと設計火源の決定
防火設備の作動・不作動に基づくシナリオ
許容避難リスクの各シナリオへの分配
許容死傷確率
設計火源 α の選択手順
リスクベース避難安全検証の特徴
居室避難の許容死傷確率と設計火源の例
居室避難：安全検証の免除条件
ケーススタディ

リスク基盤の耐火性能検証

田中 哮義

建築基準法2000年の改正において耐火性能検証法が導入され、工学的耐火設計への道が開かれた。しかし、建物規模に依らず設計火災荷重密度が同じとされているのは、建物の重要度に関わらず火災による崩壊確率は同じで良いと言っていることに他ならず、これは火災のみならずリスク管理一般の常識に外れている。

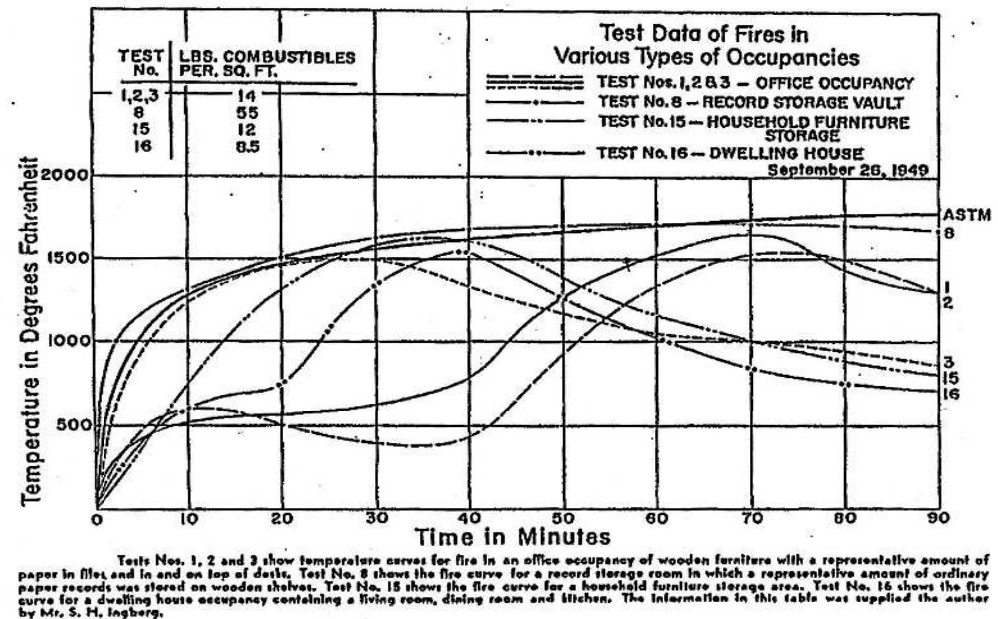
一方、建基法令107条では高さにより1～3時間の耐火基準が規定されているが、途中で階が1つだけ違うことで突然要求耐火時間が1時間跳ね上がる矛盾も兼ねてから疑問視されていた。

多くの人々が関わる社会的問題についての解は、このような両極端の方法のいずれかでなく、中庸に見出されるのだと思う。

耐火設計の源流: INGBERG (SIMMONS H.), NBS

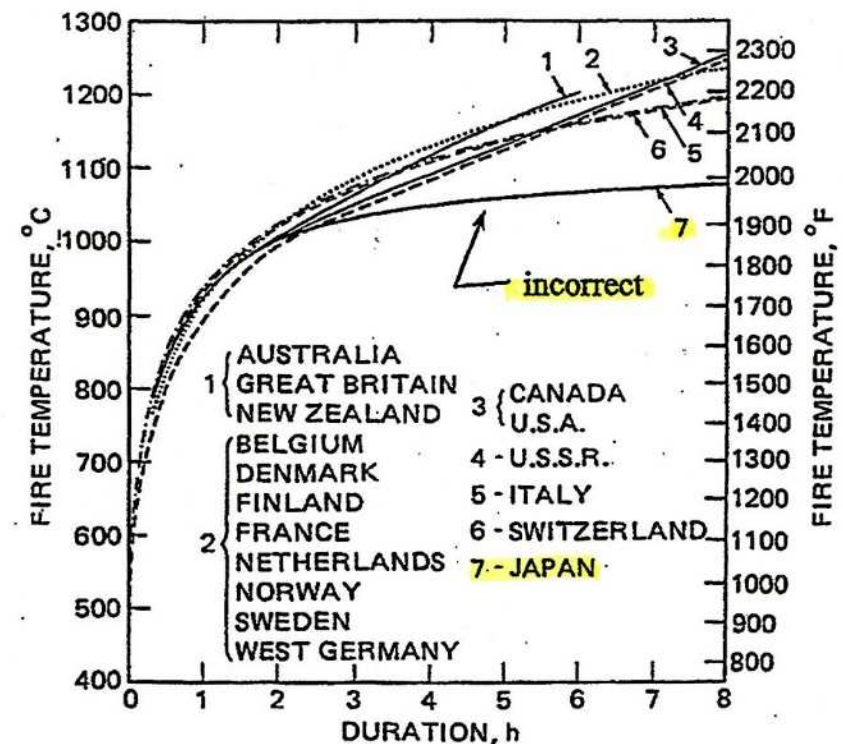
- Ingberg は事務室等の収納可燃物配置を模した一連の実大火災実験を実施し温度測定を行った。(1920年代)
- この結果はASTM、E118 耐火試験温度-時間曲線の基になった。しかし、測定温度とE118の曲線とは大幅に異なる
- 初期の温度は可燃物や着火源次第と思われるが、ピークに達した後の経過も異なる。唯一資料室の温度はE118に近いが、着火後の立ち上りは実火災では異常
- 当時からあった議論
 - 実火災温度は条件によりE118より高くも、低くもなる。
 - 1つの加熱温度で火災時の耐火性能の評価が可能か？

E118の基になった実大実験データ→



各国の耐火試験標準火災温度・時間曲線 (COOPER ET.AL NISTIR 5842,1995)

- 現在、世界の耐火試験の標準の温度曲線は、8時間まで規定されている。北米、EU、英国とオセアニア、その他で微妙に差はあるが、E118と大差は無い
- 唯一他と大きく違うのは日本の曲線(JIS)で、3時間以後の温度上昇が小さい。
- 但し、建築火災を対象とすれば時間(4時間)、温度性状ともJISの規定の方が適切と思われる。
- Ingbergは火災継続時間は火災荷重で決まると考えていた。川越・関根の研究(1960年代)までは、恐らく盛期火災の継続時間が開口因子に影響されることは分っていなかった。



²² Curve 7 is incorrect. The Japanese curve, which is defined in JIS A 1304 [2-2], has always been within a few degrees of the E 119 curve and is not defined beyond 4 hours. The erroneous curve 7 may be a result of an improper evaluation/extension of the following equation which was developed at the Japanese Building Research Institute to approximate the JIS temperature-time curve (up to 4 hours) [T. Tanaka, Building Research Institute, Japan, Personal Communication, 1995]:

$$T(t) = 1080 - 340 \exp(-0.8t) - 130 \exp(-5.0t) - 610 \exp(-19t), \text{ where } T [^{\circ}\text{C}] \text{ and } t [\text{hours}].$$

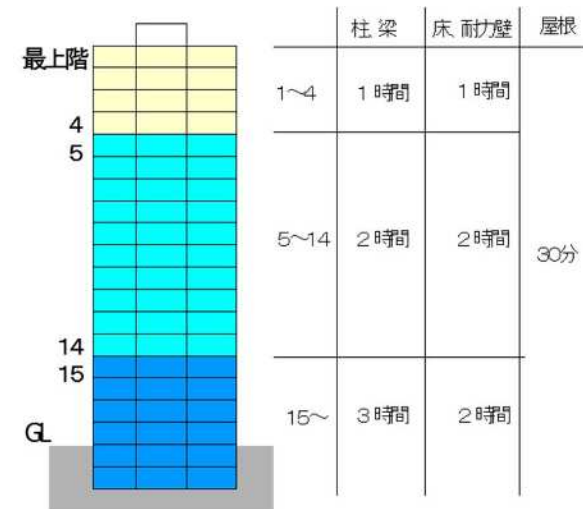
The JIS curve is used for testing all constructions except 3-story wood-house constructions. The latter are tested using the ISO 834 curve [2-4].

耐火規定・耐火試験法の導入(1964)

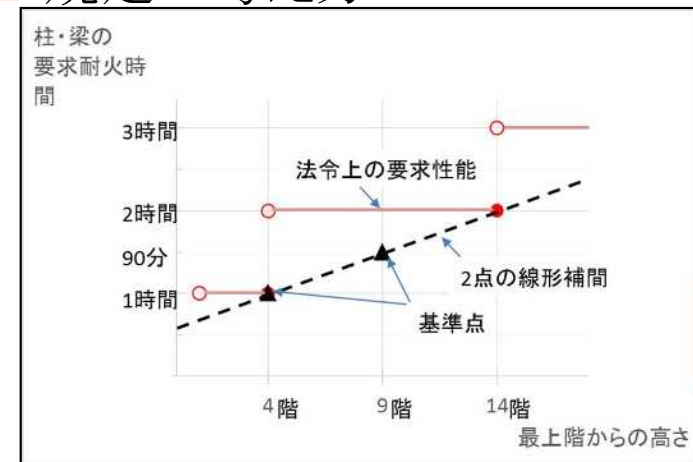
□ 耐火規定導入の背景

- ✓ 従来建築物の高さは31m(100尺)に制限されていたものが撤廃された(1961)
 - ✓ 因みに、31mの高さ制限は西洋諸国の高さ制限に倣ったものである(火災安全上)
- ## □ 令107条の耐火規定の考え方・背景
- ✓ 建築基準法成立(1950)時、RCの鉄筋のかぶり厚が規定されており、これが耐火1.5時間の性能を持つと評価された。
 - ✓ 高さ制限撤廃以前のRC造は9階建てが限度であった。
 - ✓ また戦後のRC公営住宅は4階建てであり、この耐火性能が1時間とされた。
 - ✓ これを外挿することで、14階までが耐火2時間、それ以上の階数で3時間と決められた。(水上、建築技術、2015)

□ 耐火規定(建基法・令107)



□ 規定の考え方



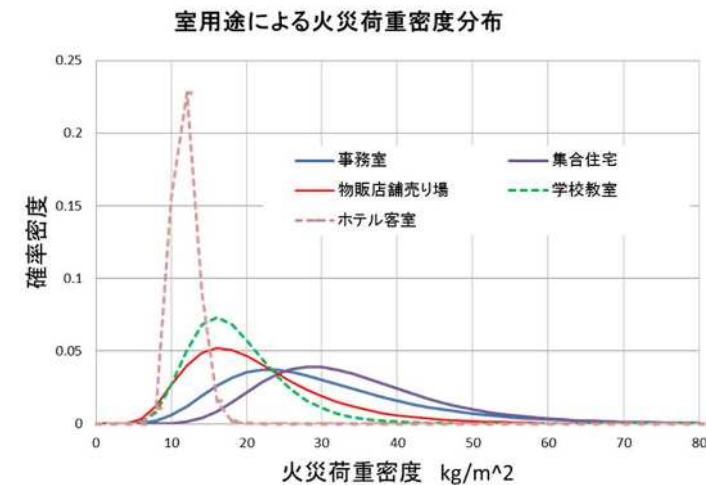
耐火性能検証法の導入 (2000)

□ 建築基準法の2000年改正を期に導入された。

- ✓ 性能的耐火設計を可能とするための、耐火性能の工学的検証法
- ✓ 耐火試験による評価の場合の認定耐火時間に替えて、建物空間用途ごとの設計火災荷重密度が規定される。しかし、建物階数・規模は無視。
- ✓ 設計火災荷重密度は可燃物調査データの概ね‘平均値＋標準偏差’だが

事務所は例外

□ 用途による積載火災荷重密度分布



建物 用途 室 用途	事務所 事務室	集合住宅 居室	物販店舗 売り場	学校 教室	ホテル 客室
火災荷重密度 平均 μ_w	30.1	34.0	21.5	18.6	11.8
標準偏差 σ_w	13.5	11.7	9.6	6.2	1.7
対数正規分布 平均 $\mu_{\ln,w}$	3.3129	3.4704	2.9772	2.8705	2.4578
標準偏差 $\sigma_{\ln,w}$	0.4281	0.3345	0.4264	0.3246	0.1433
設計火災荷重密度($w_D = \mu_w + \sigma_w$)	43.6	45.7	31.1	24.8	13.5
許容崩壊確率	0.140	0.147	0.140	0.147	0.156
検証法 設計火災荷重密度 w_D	35	45	30	25	15
許容崩壊確率	0.286	0.157	0.160	0.142	0.140

耐火試験と同じ温度を生ずる区画は存在するか？

- もし、耐火試験温度と同じ温度となる火災区画の条件が分れば、任意の区画の火災性状は、その条件の違いによって読み替えられる。

- ✓ ISO834標準火災 (温度・時間曲線)

$$\Delta T = 345 \log(8t + 1)$$

- ✓ MQH区画火災温度式

$$\frac{\Delta T}{T_{\infty}} = 0.023 \left(\frac{Q}{A_w \sqrt{H_w}} \right)^{2/3} \left(\frac{A_w \sqrt{H_w}}{A_T} \right)^{1/3} \left(\frac{t}{k\rho c} \right)^{1/6}$$

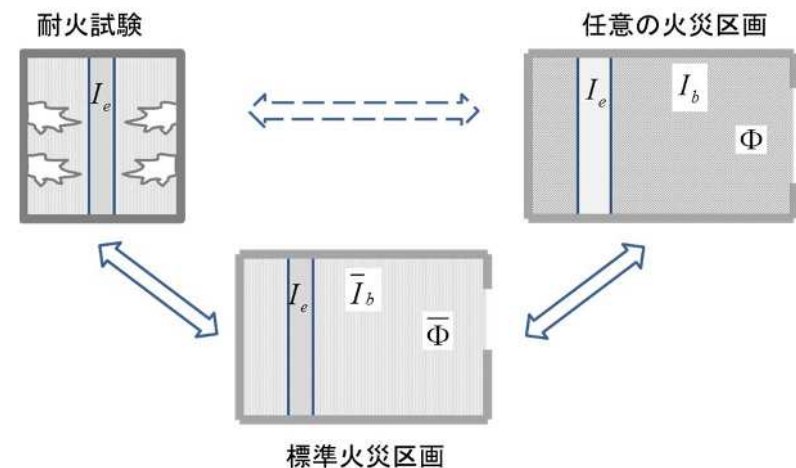
- ✓ MQH式を換気支配火災へ使えば

$$\frac{\Delta T}{T_{\infty}} = 6.0 \left(\frac{A_w \sqrt{H_w}}{A_T} \right)^{1/3} \left(\frac{t}{k\rho c} \right)^{1/6} \equiv 6.0 \left(\frac{\Phi}{I_B} \right)^{1/3} t^{1/6}$$

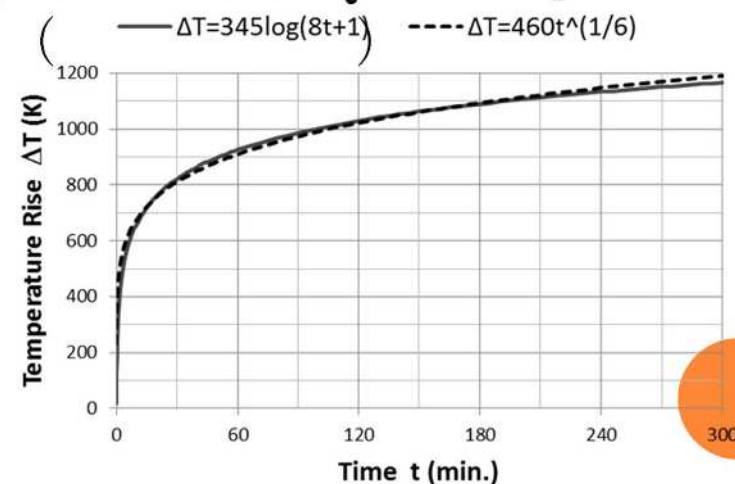
ただし、 $\Phi = A_w \sqrt{H_w} / A_T$, $I_B = \sqrt{k\rho c}$

- ISO834 (通常の火災) は区画条件が: $\Phi / I_B \approx 0.0175$ となる特殊な場合

- 標準 (耐火試験同等) 火災区画



- ISO834とMQH式 $\Phi / I_B \approx 0.0175$



MQH温度の限界—開口輻射失熱

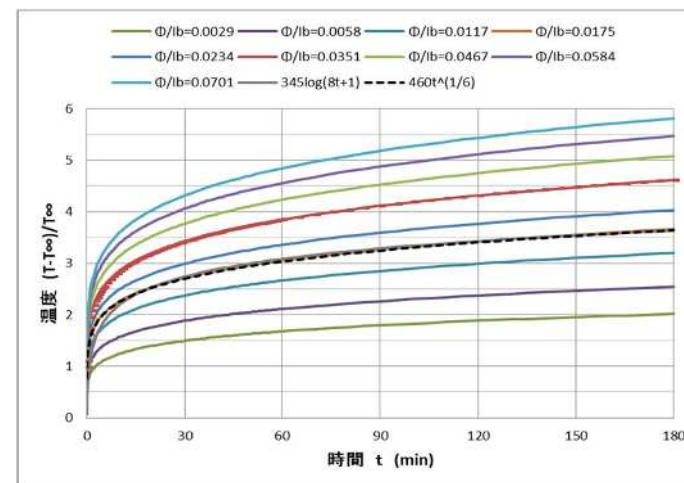
□ MQH区画火災温度式

- $\Phi/IB=0.0175$ ではISO834との一致が良い
- Φ/IB が大だと温度上昇が課題となる
- 窓開口からの輻射失熱が無視されているのが原因と考えられる

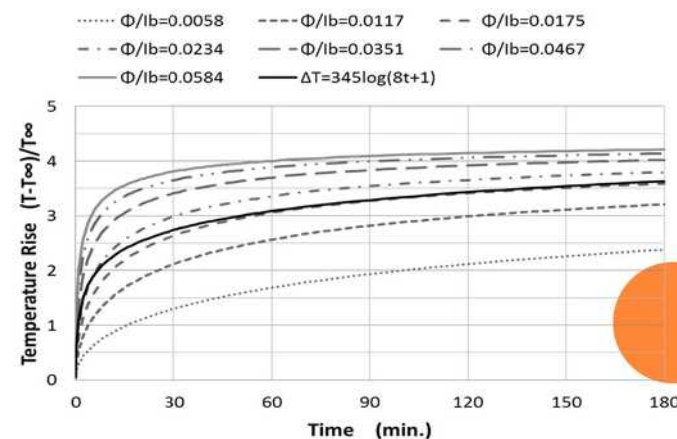
□ 窓輻射失熱を考慮した火災温度

- 過大な温度上昇が抑えられている
- $\Phi/IB=0.0175$ でのISO834との一致が少し悪くなるが、概ね近似した値となっている。

□ Φ/IB の値とMQH火災温度



□ Φ/IB と窓輻射を考慮した温度



構造部材の崩壊確率、区画部材の延焼確率

□ 崩壊確率、延焼確率

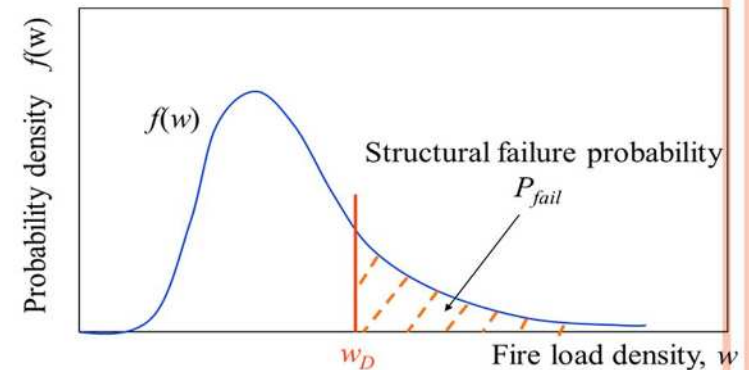
- ✓ 積載荷重はバラツキがあり、時間的変化もある。設計段階で精確には把握できないので、可燃物調査データなどを基に一定の値を設計火災荷重密度 (w_D) として定める。
- ✓ 実際の建物空間における火災荷重密度 (w) の値は広くバラツクので、 w_D を超す可能性もある。
- ✓ 構造部材の崩壊確率、区画部材の延焼確率など (P_{fail}) は、実際の火災荷重密度が設計火災荷重密度を超える確率と見做す。

□ 許容崩壊確率、許容延焼確率

- 社会的に認められた (w_D) の基で適切に設計された構造部材が崩壊する確率、区画部材が延焼防止に失敗する確率 ($P_{a, fail}$)

- 許容崩壊確率、許容延焼確率

$$\int_{w_D}^{\infty} f(w) dw = P_{a, fail}$$



- 積載火災荷重密度の確率分布

- ✓ 内装材などの固定火災荷重密度は、設計段階で確定値として把握できるものとする

建築基準法の耐火規定における許容崩壊確率

建基法耐火規定への適合は耐火加熱試験によって確認されるが、その条件は $\Phi/I_B = 0.0175$ の区画火災と同等であることを考慮すると

□ 火災継続時間

$$\tau_D = \frac{w A_{FLR}}{m_b} = \frac{w A_{FLR}}{6 A_w \sqrt{H_w}}$$

□ 火災荷重密度

$$w = 6 \frac{A_w \sqrt{H_w}}{A_{FLR}} \tau_D = 6 \frac{A_w \sqrt{H_w}}{A_T} \frac{A_T}{A_{FLR}} \tau_D = 6 \frac{\Phi}{I_B} \frac{A_T}{A_{FLR}} I_B \tau_D$$

□ 許容崩壊確率

(耐火時間における火災荷重密度の超過確率を計算)

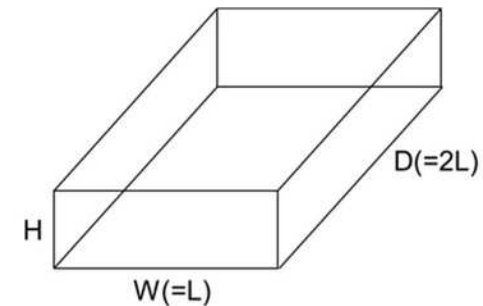
○ 右表の読み方の例

耐火試験で1hの加熱は $\Phi/I_b = 0.0175$ の区画で火災荷重密度 = 26.2 kg/m^2 の消費に相当する。実際の火災荷重密度がこれを超過する確率は54.4%ある。

■ 標準的事務所と共同住宅

$$\frac{A_T}{A_{FLR}} = \begin{cases} 2.43 & (H = 4: \text{事務所}) \\ 3.5 & (H = 3: \text{住宅}) \end{cases}$$

$$I_B = \begin{cases} 1.71 & (\text{普通コンクリート}) \\ 1.07 & (\text{軽量コンクリート}) \end{cases}$$



耐火時間 h	普通コンクリート			
	事務所		共同住宅	
	火災荷重密度	崩壊確率(%)	火災荷重密度	崩壊確率(%)
0	0	100	0	100
1	26.2	54.4	37.7	31.7
1.5	39.3	20.1	56.6	4.5
2	52.4	6.6	75.4	1.7
3	78.6	0.7	113.1	0

耐火基準と崩壊確率の算定値についての考察

- 標準耐火試験と同等の火災区画 ($\Phi/I_B = 0.0175$) では、1hあるいは1.5h消費される火災荷重密度は積載荷重密度のデータ分布の中で非常に大きい値ではないので、かなり大きな崩壊確率が算出される。
- しかし、1時間耐火の公営住宅も、1.5時間の事務所ビルも火災による構造部材の崩壊、防火区画壁の延焼(シャッター以外)が問題となった話は殆ど聞かない(戦災火災は例外かも知れない)。これには次のような原因も考えられる
 - ✓ 耐火建築での出火件数が少ない
 - ✓ 出火しても盛期火災にまで至る火災は更に少なくなる。
 - ✓ 盛期火災になっても消防活動によって火勢が抑制される
 - ✓ 耐火上余裕を持った設計がなされる。
 - ✓ 実際の火災荷重が多くない。
 - ✓ $\Phi/I_B < 0.0175$ 条件のため温度が耐火試験温度より低い。あるいは $\Phi/I_B > 0.0175$ の条件のため温度は高くなるが火災継続時間が短くなる。
- 建築部材の崩壊リスクは、これらのような多くの条件に関係しているので、盛期火災に曝されたときの崩壊確率が幾分高くても、そのような事象がおきる確率が小さければ許容される。

建物の崩壊リスク→構造部材の許容崩壊確率

○ 崩壊リスクの定義

$$R = PC$$

P : 構造部材の降伏が発生する確率

C : 構造部材の崩壊が発生した時の損害規模

○ 任意建物の崩壊リスク (P : 確率、 C : 損失)

$$R = \overbrace{(p_f A_f^{1/2}) Y_L P_{FO} P_{n-sup} P_{fail}}^P \overbrace{(NA_{FLR})}^C$$

○ 許容崩壊リスク

= 標準建物 (ベンチマーク) の崩壊リスク

$$R_a = (\bar{p}_f \bar{A}_f^{1/2}) \bar{Y}_L \bar{P}_{FO} \bar{P}_{n-sup} \bar{P}_{fail} (\bar{N} \bar{A}_{FLR})$$

○ 構造部材の許容降伏確率 $R \leq R_a$ より

$$P_{a,fail} \leq \bar{P}_{fail} \left(\frac{\bar{p}_f}{p_f} \right) \left(\frac{\bar{A}_f}{A_f} \right)^{1/2} \left(\frac{\bar{Y}_L}{Y_L} \right) \left(\frac{\bar{P}_{FO}}{P_{FO}} \right) \left(\frac{\bar{P}_{n-sup}}{P_{n-sup}} \right) \left(\frac{\bar{N} \times \bar{A}_{FLR}}{N \times A_{FLR}} \right)$$

$(p_f A_f^{1/2})$: 火災区画での出火確率 (年間)

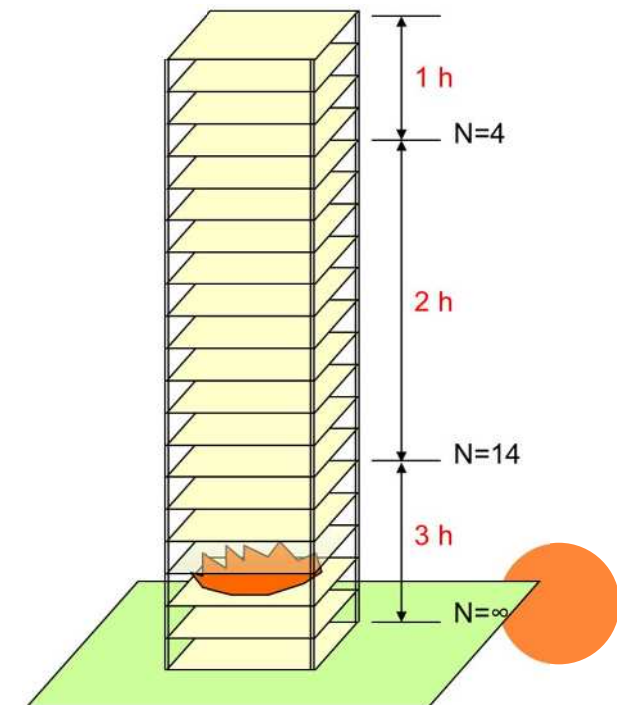
Y_L : 建築物の耐用年数

P_{FO} : 盛期区画火災に拡大する確率

P_{n-sup} : 消火活動による盛期火災失敗確率

P_{fail} : 構造部材が崩壊する確率

(NA_{FLR}) : 構造部材の崩壊によるダメージの規模



基準建物 (BENCH MARK BUILDING)

許容火災リスクを数値のみで示すと具体的なイメージがつかみ難い。火災リスクを基準建物として可視化すれば、リスクレベルを具体的にイメージすることが出来る。

ここでは高さ制限撤廃前の9階の建築を基準建物として選ぶ。

□ 建築基準法の耐火規定による基準建物

建基法の耐火規定は、建物階数のみによって定められているので、

$$P_{a,fail} N = \bar{P}_{fail} \bar{N}$$

これに階数9と崩壊確率をいれて

$$P_{a,fail} = 0.2 \left(\frac{9}{N} \right)$$

□ 崩壊リスクの定義式による基準建物

崩壊リスクは崩壊が生じる確率や、損害規模は床面積にもよるので、これを加味する。9階の建物では防火区画の最大値1,500m²を考慮し

$$P_{a,fail} = 0.2 \left(\frac{\bar{p}_f}{p_f} \right) \left(\frac{1500}{A_f} \right)^{1/2} \left(\frac{\bar{P}_{FO}}{P_{FO}} \right) \left(\frac{9 \times 2000}{N \times A_{FLR}} \right)$$

なお

$$A_{FLR} = 1500 \text{ (防火区画面積)}$$

耐火時間 h	+ 500 (コア普通通路など)			
	事務所		共同住宅	
	火災荷重密度	崩壊確率 (%)	火災荷重密度	崩壊確率 (%)
0	0	100	0	100
1	26.2	54.4	37.7	31.7
1.5	39.3	20.1	56.6	4.5
2	52.4	6.6	75.4	1.7
3	78.6	0.7	113.1	0

許容崩壊確率のパラメタ値

○ 許容崩壊確率の計算式

建物耐用年限、消防隊による火災抑制は省略

$$P_{a,fail} = 0.2 \left(\frac{\bar{p}_f}{p_f} \right) \left(\frac{1500}{A_f} \right)^{1/2} \left(\frac{\bar{P}_{FO}}{P_{FO}} \right) \left(\frac{9 \times 2000}{N \times A_{FLR}} \right)$$

○ 出火確率（小火を除いた成長火災）

表 事務室を基準とした代表的空間用途での面積当たり出火率比

	集合住宅	飲食店	物販店舗	事務所	ホテル	病院	学校	劇場
$\left\{ \frac{\bar{p}_f}{p_f} \right\}$	0.37	0.12	1.75	1	0.75	2.2	2.4	0.3

○ 区画火災への拡大確率比

$$\left(\frac{\bar{P}_{FO}}{P_{FO}} \right) = \begin{cases} 1 & (\text{no Sprinkler}) \\ 4 & (\text{with Sprinkler}) \end{cases}$$



耐火設計の設計火災荷重密度の計算手順

- 建築物の崩壊リスクを許容レベルに保つために、耐火設計において必要とされる設計火災荷重密度を求めること。

□ 計算手順

- ① 許容崩壊確率を求める

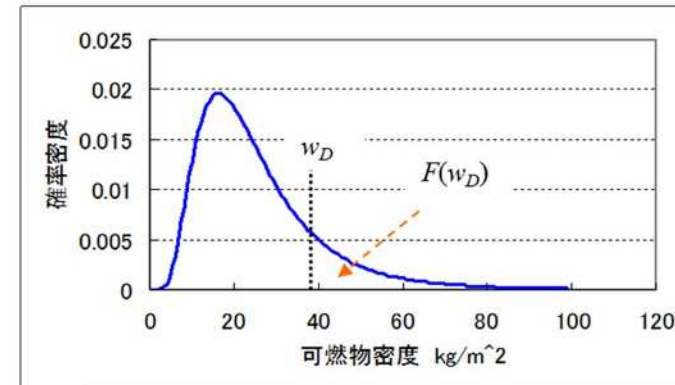
$$P_{a,fail} = 0.2 \left(\frac{\bar{P}_f}{P_f} \right) \left(\frac{1500}{A_f} \right)^{1/2} \left(\frac{\bar{P}_{FO}}{P_{FO}} \right) \left(\frac{9 \times 2000}{N \times A_{FLR}} \right)$$

- ② 設計火災荷重密度を求める

$$w_D = \text{LOGNORMINV}(1 - P_{a,fail}, \mu_{\ln w}, \sigma_{\ln w})$$

- その後は、通常の工学的手法を用いて耐火性能検証を行う

■ 火災荷重密度の確率分布



■ 対数正規分布

$$f(w) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\ln w} w} e^{-\frac{(\ln w - \mu_{\ln w})^2}{2\sigma_{\ln w}^2}}$$

$$F(w_D) = \int_{w_D}^{\infty} f(w) dw = 1 - \int_0^{w_D} f(w) dw$$

$$\mu_{\ln w} = \ln \left\{ \mu_w / \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma_w}{\mu_w} \right)^2} \right\}, \quad \sigma_{\ln w} = \sqrt{\ln \left\{ 1 + \left(\frac{\sigma_w}{\mu_w} \right)^2 \right\}}$$

建物用途	事務所	集合住宅	物販店舗	学校	ホテル
室用途	事務室	居室	売り場	教室	客室
平均 μ_w	30.1	34.0	21.5	18.6	11.8
標準偏差 σ_w	13.5	11.7	9.6	6.2	1.7
$\mu_{\ln w}$	3.3129	3.4704	2.9772	2.8705	2.4578
$\sigma_{\ln w}$	0.4281	0.3345	0.4264	0.3246	0.1433

CASE STUDY

(事務所, 火災区画=1500M²)

○ 許容崩壊確率

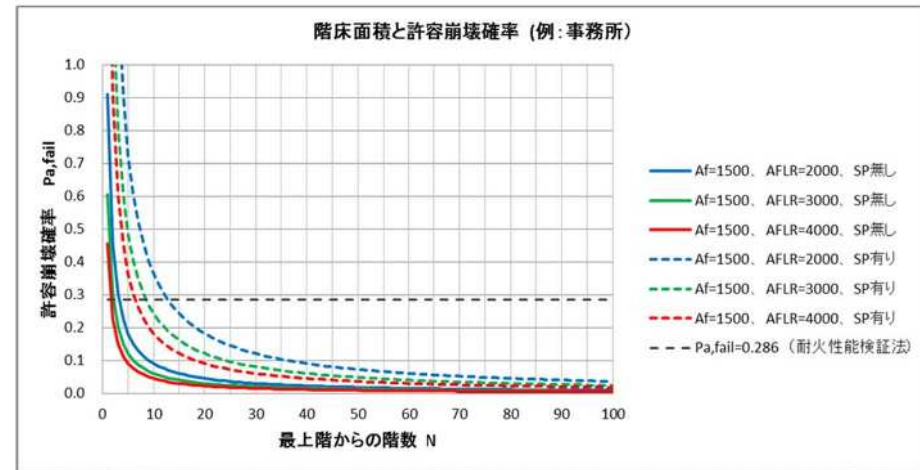
- SP無し:1, 2階程度なら耐火性不要(防火区画1500m²は必要)
- SP有りなら3, 4階程度なら耐火性不要

○ 設計火災荷重密度

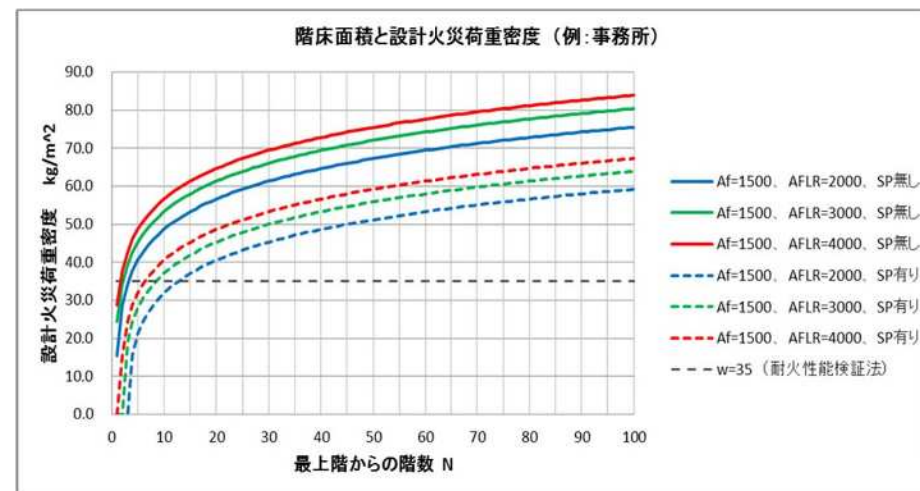
- 耐火性能検証法の設計火災荷重密度よりかなり大きい

(注):高層になるとSPは要求されているので破線の方の値が現実的

○ 階数、床面積と許容崩壊率



○ 階数、床面積と設計火災荷重密度



Case Study (事務所)

‘通常の火災’ ($\Phi/IB=0.0175$) における火災継続時間

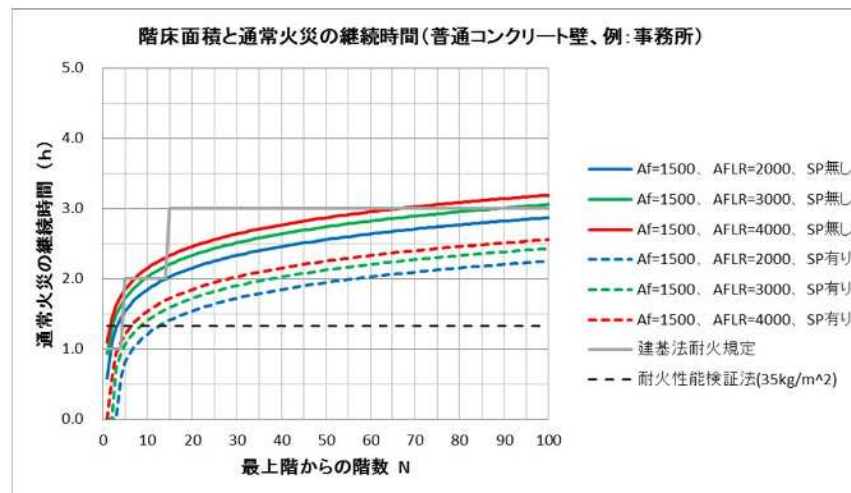
○ 普通コンクリート区画

- SP無し; 例107条の耐火時間と同程度
- SP有り: 例107条の耐火時間より短い

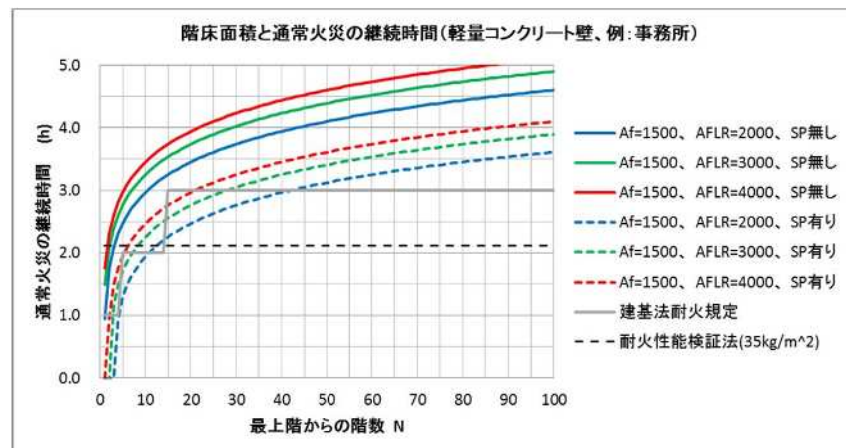
○ 軽量コンクリート区画

- 周壁の熱吸収が少ない、すなわち、同じ区画温度上昇を生じるための燃料消費量が少ないので、普通コンクリートより火災継続時間が長くなる
- 高層建築では普通コンクリート(破線)の方が近い

○ 普通C区画の火災継続時間



○ 軽量C区画の火災継続時間



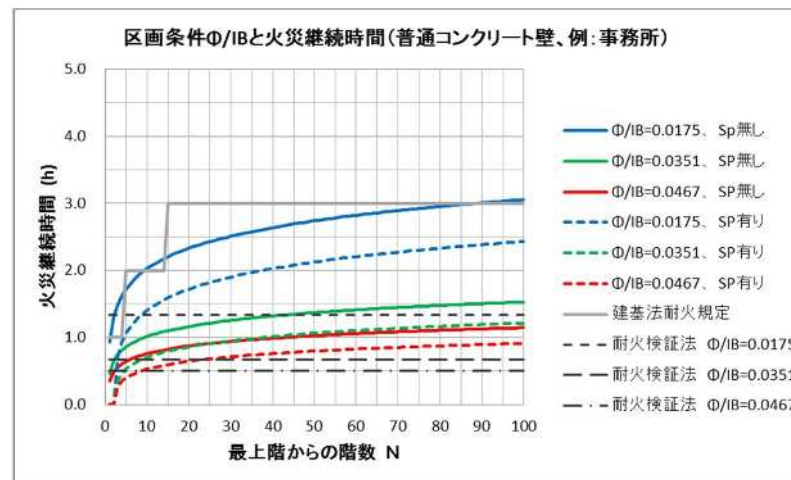
Case Study (事務所、 $A_{FLR}=3000m^2$)

区画条件 (Φ/I_B) が異なる時の火災継続時間

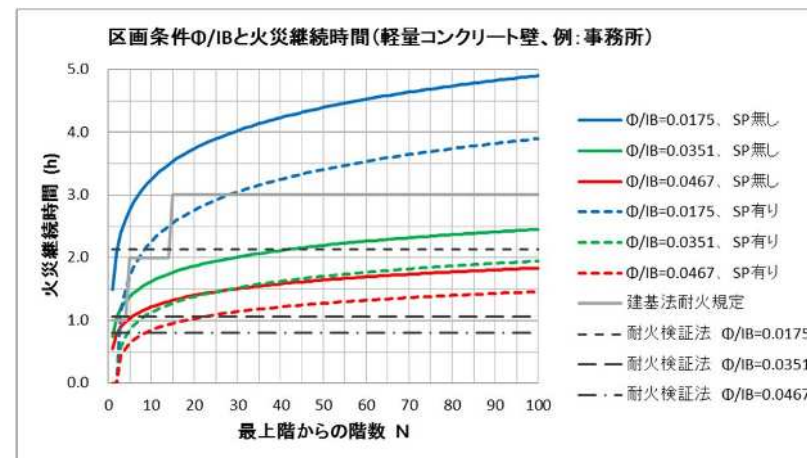
- Φ/I_B の値が大きいほど火災継続時間は短くなる

- 高層では区画の熱特性は軽量コンクリート程度となるが、消防法でSPは要求されるので、SP有りの場合の値を見れば良い。
- 多くの事務所の場合開口は大きいので、 $\Phi/I_B > 0.0175$ となる。このため火災継続時間はさほど長くない。
- 軽量コンクリート壁の場合でも、建基法、令107の耐火時間より遥かに緩い

- 普通C壁の火災区画



- 軽量C壁の火災区画



CASE STUDY (共同住宅, 火災区画=72M²)

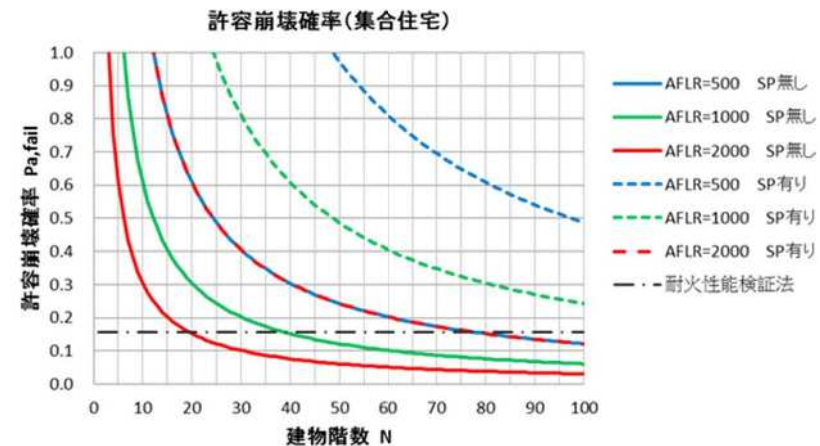
○ 許容崩壊確率:

- 面積の小さい共住区画面積が火災区画面積となること,および事務所建築に比較して一般に階床面積が小さいことにより、事務所ビルに比較して格段に大きくなる(緩くなる)

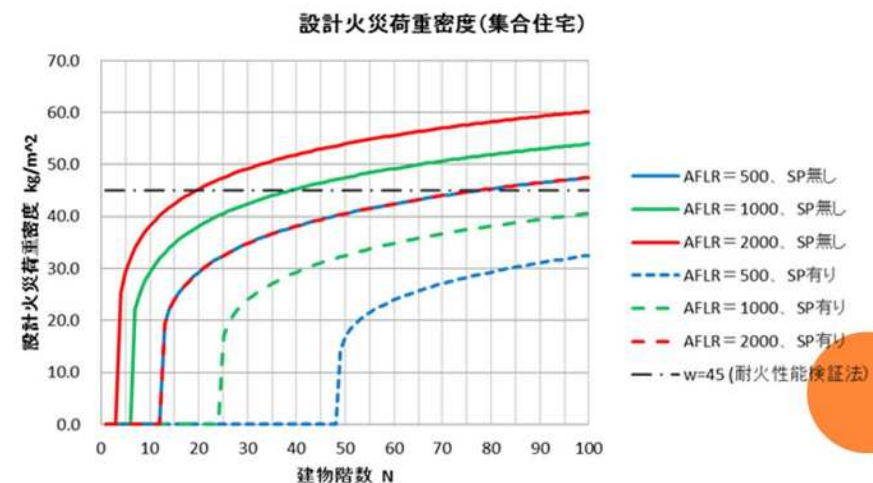
○ 設計火災荷重密度

- 事務所に比較して火災荷重密度自体は大きい、許容崩壊確率が大きいので設計火災荷重密度としては小さくなる。

○ 許容崩壊確率



○ 設計火災荷重密度



CASE STUDY (共同住宅)

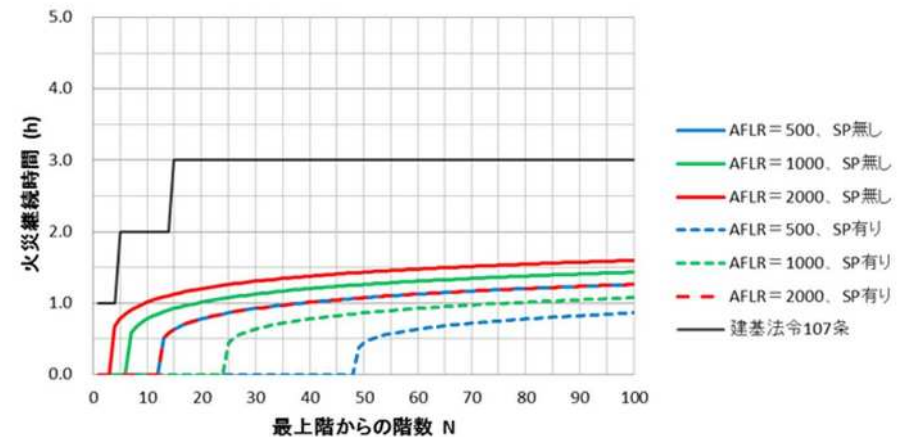
‘通常の火災’ ($\Phi/IB=0.0175$) における火災継続時間

○ Φ/IB の値と火災継続時間

- 一般に区画壁の Φ/IB の値が大きくなるほど火災継続時間が短くなるが、SPの設置があればさらに短くなる。
- 区画壁が軽量コンクリートだと普通コンクリートの場合に比較してかなり長いが、高層の場合は軽量コンクリートの場合が殆どであろう。
- 共同住宅では窓開口の制限があるため Φ/IB の値は0.0175よりかなり大きくなると考えられる。

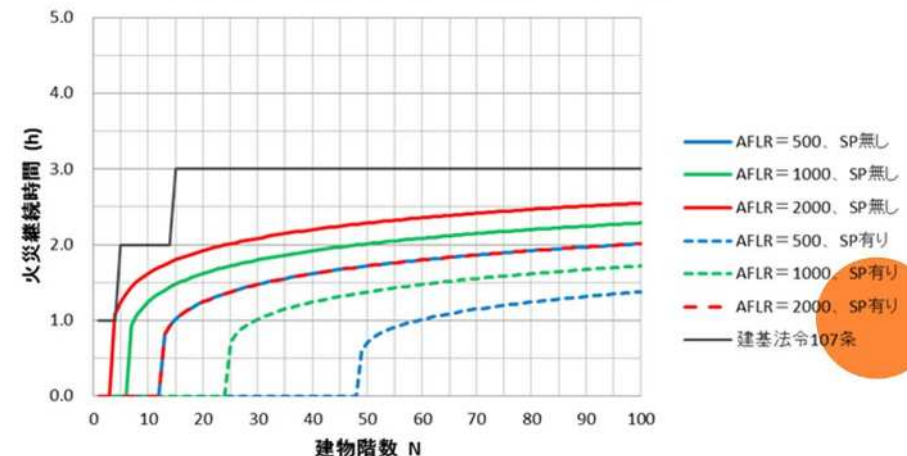
○ Φ/IB の値と火災継続時間(普通C)

通常火災の継続時間(集合住宅、普通コンクリート壁)



○ Φ/IB の値と火災継続時間(軽量C)

通常火災の継続時間(集合住宅、軽量コンクリート壁)



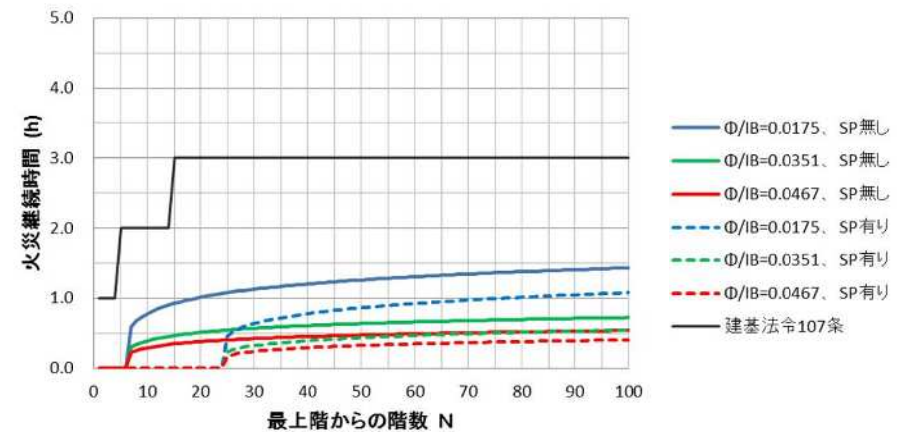
CASE STUDY(共同住宅)

区画条件(Φ/IB)が異なる場合の火災継続時間

- 共同住宅の場合には採光上の開口面積基準により Φ/IB の値が大きくなるので、殆どの場合 $\Phi/IB > 0.0175$ 、となると思われる。
- 従って、任意の場合の火災継続時間は‘通常の火災’（標準耐火試験温度）の場合の火災継続時間よりかなり短くなる。
- 区画壁が軽量コンクリートの場合は普通コンクリートの場合に比較して火災継続時間は長くなるが、殆どのタワーマンションではSP無しでも1.5時間を超さない程度と思われる。

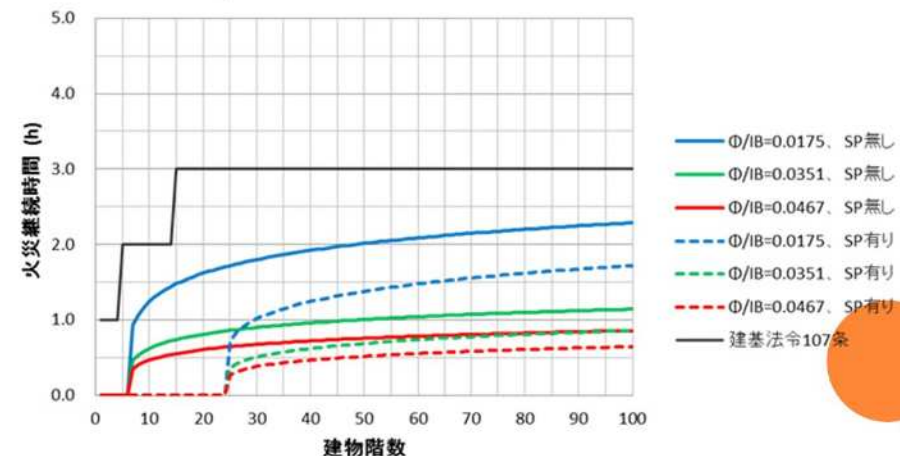
区画壁が普通Cの場合

Φ/IB と火災継続時間(集合住宅、普通コンクリート壁)



区画壁が軽量Cの場合

Φ/IB と火災継続時間(集合住宅、軽量コンクリート壁)

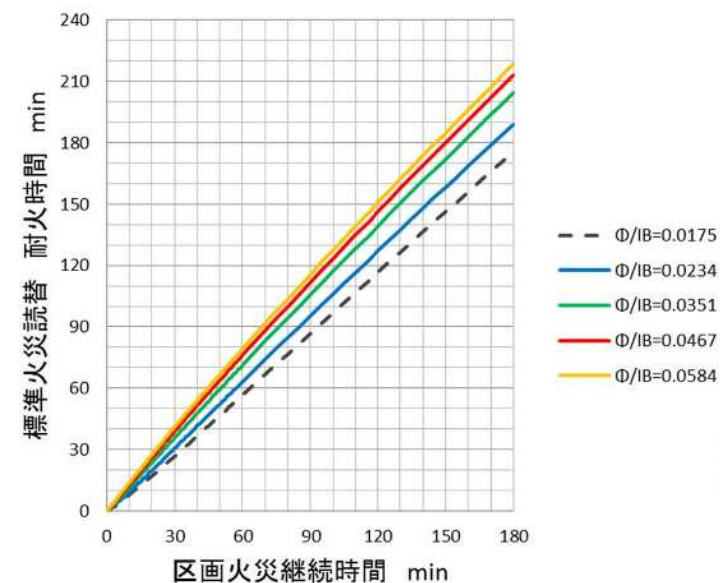


まとめと補足

- 本研究は建物の火災による建物崩壊リスクを許容レベルに抑制するために耐火設計で設定すべき設計火災荷重を定めることだけが目的である
- ケーススタディーはその手法の妥当性を確認するために行ったものである。
- その結果、高層・大規模な建物では設計火災荷重が耐火性能検証法のものより大きくなるが、現状の建物の条件(SP、開口、区画壁)を考えれば、火災継続時間が施行令107条の要求耐火時間を超すことは無い。
- むしろ共同住宅では、要求耐火性能を大幅に緩和して良いことになるケースも出てくる。

- 但し、今回の方法では防火区画が保たれていることが前提となっていることには注意が必要である。
- 火災区画の開口が大きくなるほど、火災継続時間は短くなる一方で温度が高くなるので、部材の耐火試験のためには、等価火災継続時間に読み替える必要が有る。その割り増し時間は精々2～3割程度と考えられる

等価標準火災継続時間への読み替え





リスク基盤の避難安全検証

JAFPE 防火研修会
2021年8月31日

田中 哮義

1. 背景と目的

■ 建築物の避難安全設計の重点

- 建物火災時の避難リスクは、居室避難に関しては多くの場合低い。一方、階避難、全館避難での避難リスクは居室避難に比較して潜在的に非常に高い。
- しかし、現在の避難安全検証では重点が完全に逆転しており、居室避難の検証に多大の労力と時間が費やされる一方で、階避難や全館避難は非常に軽く扱われている。

■ 建築物の安全性のレベル

- 建物の火災安全性についての認識が関係者によって大きく異なる。性能的火災安全設計の発展のためには火災リスクについて何等か定量的な共通指標が必要がある。

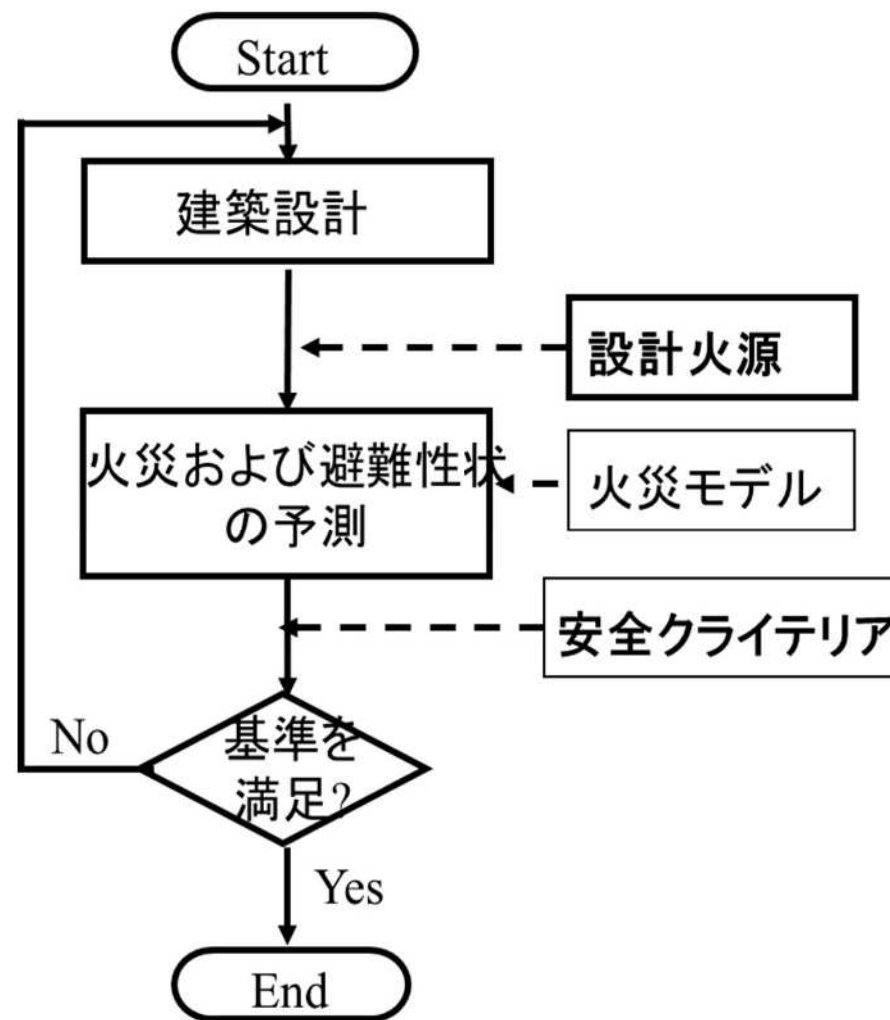
■ 防火設備システムの効果的設計

- 避難経路を保護するために非常に重要だが、効果的なシステム設計について真剣な取り組みが掛けている。
- 信頼性に難があることは確かだが、有効に生かさないのは大きな浪費

2. 性能的避難安全設計法の基本構成

2.1 手順、適合判定の特徴

- リスク基盤の避難安全検証法は避難安全設計法の基本的枠組みを変更しない
- ✓ 安全検証の‘決定論的’手順（決定論的性格は火災安全設計の効率上非常に重要）
- ✓ 適合判定のための性能的安全基準は設計火源および安全判定クライテリアの組み合わせで規定される。（これが安全レベルを決定する）
- ✓ 適合検証の方法は安全側であれば足りる。（いかなる工学的設計においても同様）





2. 性能的避難安全設計法の基本構成

2.2 設計火災条件、判定基準の特徴

■ 居室の在館者数

- 火災は居室が満室のときに発生する

■ 安全判定基準

- 煙に全く、あるいは些少にしか、曝されないなど、厳格な安全判定基準

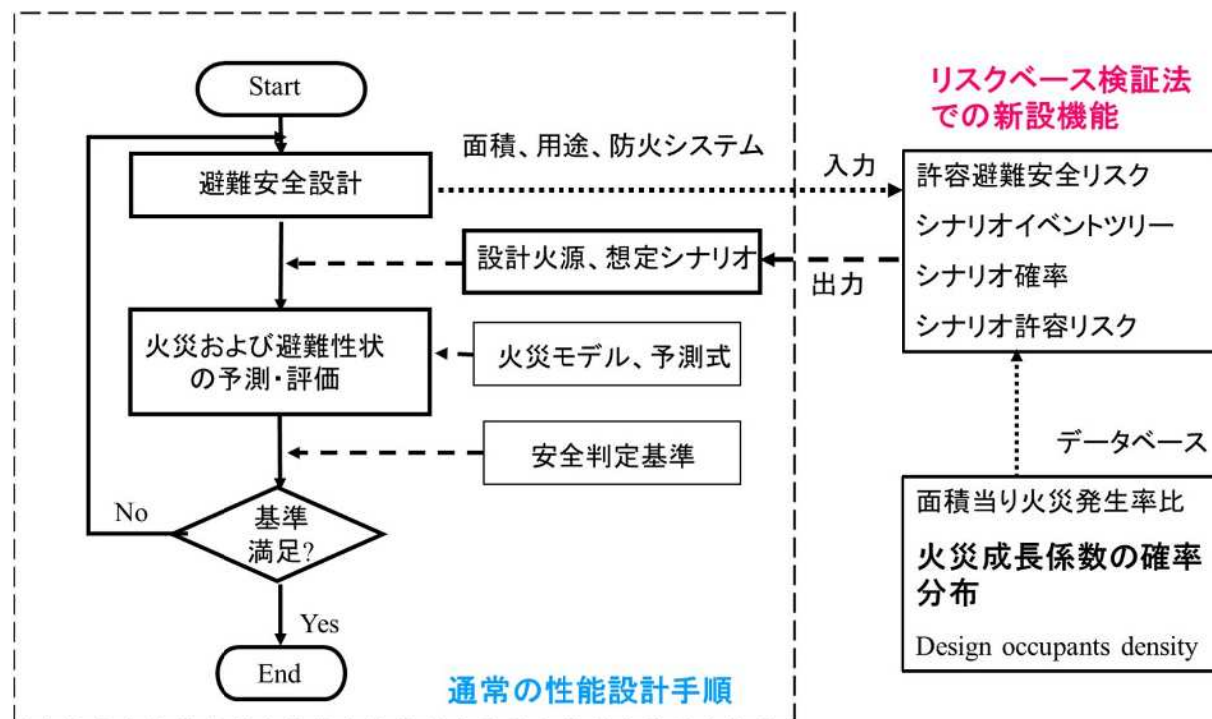
■ 設計火源

- 出火したした後、必ず‘危険な火災’となって継続的に拡大する

（これらが過度に厳しいということではない。設計実務上、単純化は必要である。しかし、現実にはそうでないことが多いことにも認識して極端に走らない配慮が必要）

リスク基盤の避難安全検証(構成)

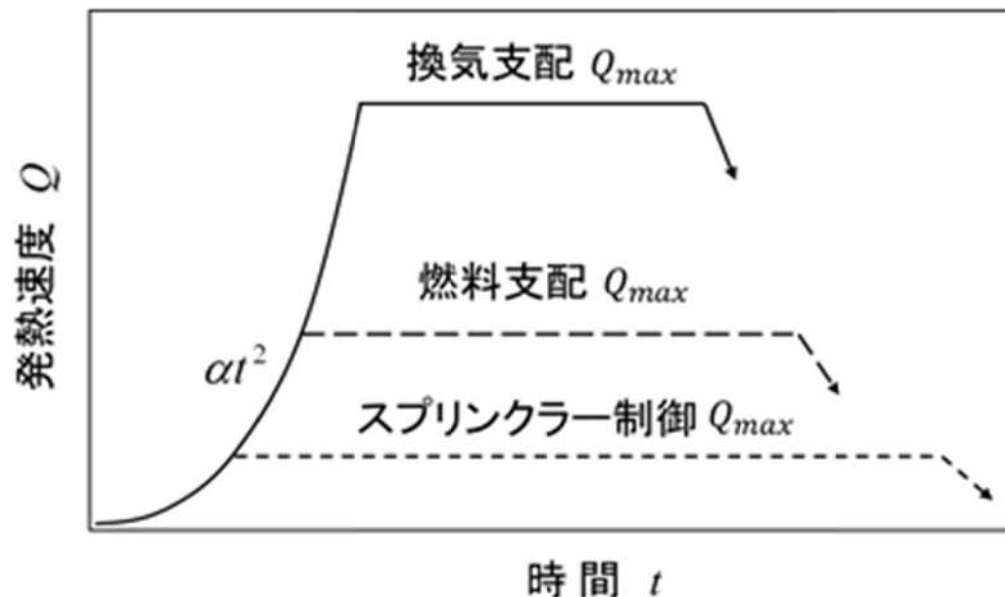
- リスク基盤の避難安全検証法と従来の性能的避難安全設計法との違い
- ✓ 設計火源を出火空間の出火率、避難人数を考慮した許容避難リスクに基づいて決定
- ✓ 防火設備の作動/不作動に因るイベント分類から検証すべき避難シナリオを抽出



4. リスク基盤の避難安全設計における設計火源

4.1 性能的避難安全設計における設計火源

- 設計火源は、常に‘危険な火災’として成長する火災が設定される。(小火などは無視される)
- 初期には出火直後から t^2 火災として拡大し、発熱速度が時間の2乗で増加する。
- 火災成長は、換気支配、SP制御などの条件に達すると、発熱速度はそれぞれの場合の最大値 Q_{max} で一定となる
(注:今回は燃料支配火災は扱わない)



設計火源の発熱速度

- 初期段階

$$Q = \alpha t^2$$

- 後期段階:

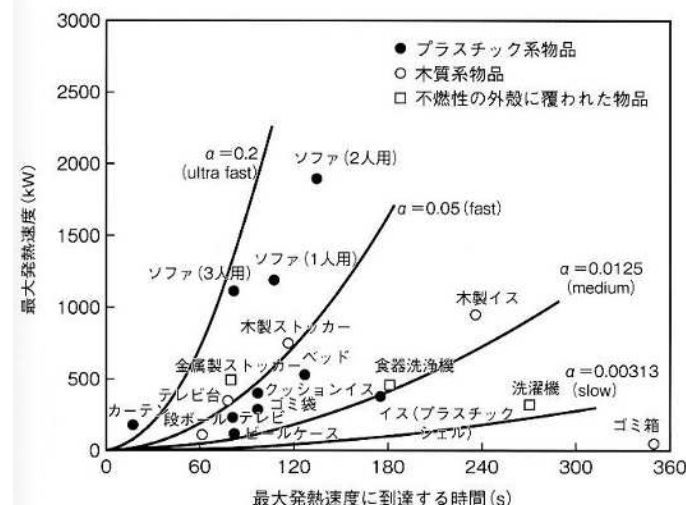
$$Q = Q_{max}$$

4. リスク基盤の避難安全設計における設計火源

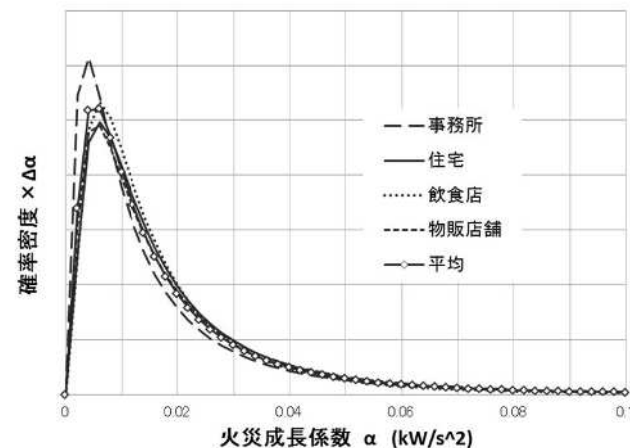
4.2 火災成長係数 α の確率密度分布

- 火源成長係数 α の大きさは避難への影響が大きい
- 酸素消費法の出現により α を燃焼実験で測定可能となった
- 総務省の火災報告データの分析によれば大きい α の確率密度は実験による α に比較してかなり小さい
- 実験と実際の火災では着火源の大きさが異なっているものと考えられる
- 用途による α の確率密度分布の差は小さい

■ NFPAのモデル火災の α

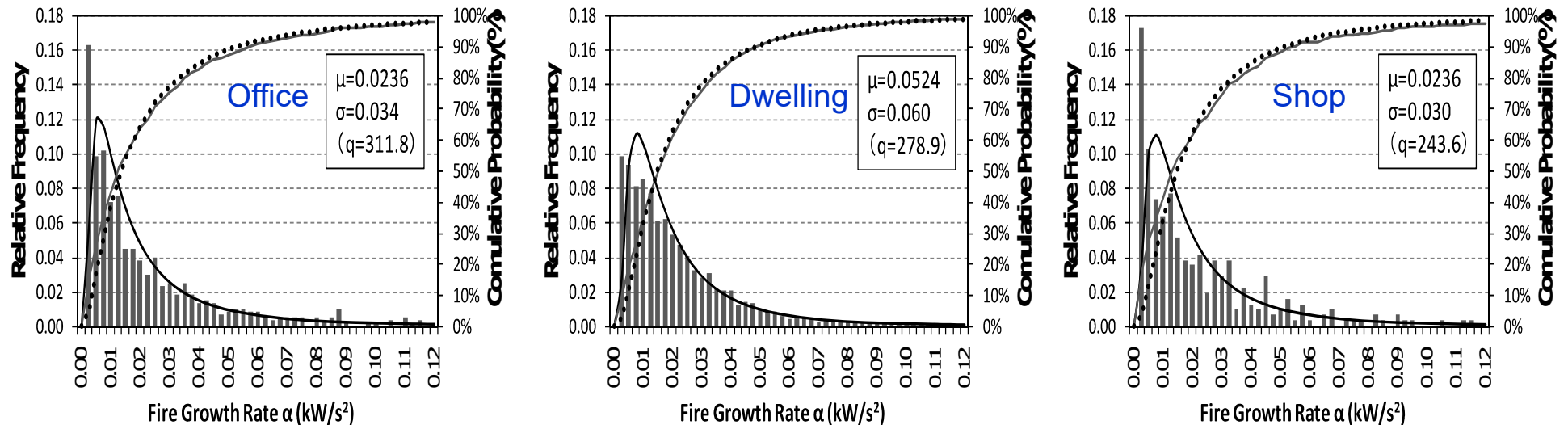


■ 火災報告データによる α



(参考) 火災成長係数 α の確率密度関数 (出口、池畠、野竹など)

- 火災成長係数 α の頻度分布は火災統計の燃焼面積に発熱速度を加味して得られる。



- 頻度分布から得られる確率密度分布は下式のような対数正規分布としてモデル化できる。

$$f(\alpha) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta\alpha} \exp\left\{-\frac{(\ln \alpha - \lambda)^2}{2\zeta^2}\right\}$$

5. 許容避難リスクと設計火源

5.1 設計火源の意味とは？

- ある居室の避難出口の幅が適切か否かを評価するためには、どんな設計火源を設定すべきなのか？
 - 設計火源の拡大が非常に緩慢なら→どんな幅でもOK
 - 非常に急減なら→どんな幅でもNG
- 避難出口幅をどう決めるのが適切かは分っていない
- 誰もが納得する決め方の原則が必要



5. 許容避難リスクと設計火源

5.2 避難リスク

■ 避難リスク R : 火災による死傷者の期待値

$$R = PC$$

- P : ‘危険な火災’ の出火率
- C : ‘危険な火災’ が発生した場合の死傷者数の期待値

■ 任意の空間(K)で出火した場合の避難リスク

$$R(K) = P(K)C(K) = p_{hf}(K)A_F(K)^{1/2} \times p_{cas}(K)C_0(K)$$

ここに

- $p_{hf}(K)A_F^{1/2}(K)$: 出火率(単位面積出火率 × 出火室面積^{1/2})
- $p_{cas}(K)$: 火災による死傷者発生確率
- $C_0(K)$: 空間 K の出火による避難対象者

5. 許容避難リスクと設計火源 標準空間(=ベンチマーク空間)

■ 標準空間(=ベンチマーク空間)の選択

避難リスクが許容できる標準空間として、戸建住宅(1つの空間と見做す)を選ぶ。(∵火災統計の存在、避難基準が無い)

$$R_a = p_{hf}(H) A_F(H)^{1/2} \times p_{cas}(H) C_0(H)$$

■ 設計ベースの避難リスク

任意の建物が許容避難リスクを満たすには $R(K) \leq R_a$ 、従って

$$p_{hf}(K) A_F(K)^{1/2} \times p_{cas}(K) C_0(K) = p_{hf}(H) A_F(H)^{1/2} \times p_{cas}(H) C_0(H)$$

避難安全設計は火災の発生を前提とするので、設計ベースの

$$R^D(K) = p_{cas}(K) C_0(K) \leq \left\{ \frac{p_{hf}(H)}{p_{hf}(K)} \right\} \left\{ \frac{A_F(H)}{A_F(K)} \right\}^{1/2} p_{cas}(H) C_0(H)$$

5. 許容避難リスクと設計火源 設計ベースの許容避難リスク

■ 設計ベースの許容避難リスク

前ページから設計ベースの許容避難リスクを $R_a^D(K)$ とすると

$$R_a^D(K) \equiv \left\{ \frac{p_{hf}(H)}{p_{hf}(K)} \right\} \left\{ \frac{A_F(H)}{A_F(K)} \right\}^{1/2} p_{cas}(H) C_0(H)$$

ここで 統計値から $A_F(H) = 175 \text{ m}^2$ 、 $p_{cas}(H) = 0.14$ また 避難安全検証法のから $\rho_0(H) = 0.06$ を使うと

$$p_{cas}(H) C_0(H) = 0.14 \times (0.06 \times 175) \approx 1.5$$

■ 設計ベースの許容避難リスク

$$R_a^D(K) = 1.5 \left\{ \frac{p_{hf}(H)}{p_{hf}(K)} \right\} \left\{ \frac{175}{A_F(K)} \right\}^{1/2}$$

なお、設計ベースの許容避難リスクには対象空間の出火率も関係することに注意。

6. 許容避難リスクと設計火源の決定

■ 許容避難リスク

火源の成長係数 α の中で α_D を採って設計火源としたとき、実際の火災の α が $\alpha_D < \alpha$ となる場合の死傷者数の期待値を避難リスク $R_a^D(K)$ とする。

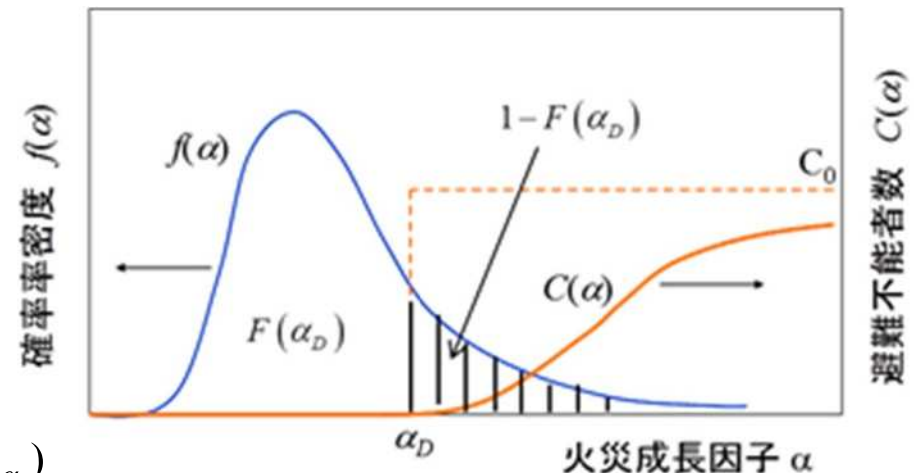
■ 設計火源(の成長係数 α_D)

1. 逆に避難リスクの許容値 $R_a^D(K)$ が決まれば、その許容値を超さないような α_D の設計火源を決めて避難安全検証を行う。
2. 許容避難リスク $R_a^D(K)$ から許容死傷確率(許容避難失敗確率)が次式で計算出来る

$$p_{cas}(K) \leq \frac{R_a^D(K)}{C_0(K)}$$

3. 右図で $p_{cas}(K) = 1 - F(\alpha_D)$ として

$$\alpha_D = \text{LOGNORM.INV} \left(1 - p_{cas}(K), \mu_{\ln \alpha}, \sigma_{\ln \alpha} \right)$$



許容避難リスクと設計火源（ここまでの整理）

(1) 設計ベースの許容避難リスク

$$R_a^D(K) = 1.5 \left\{ \frac{p_{hf}(H)}{p_{hf}(K)} \right\} \left\{ \frac{175}{A_F(K)} \right\}^{1/2}$$

表 空間用途に依る $\{p_{hf}(H)/p_{hf}(K)\}$

劇場	飲食	物販	ホテル	共同住宅	病院	学校	事務所	一般住宅
1.2	0.5	7.2	3.1	1.5	9.0	9.7	4.1	1.0

(2) 許容避難失敗確率(死傷確率)

$$p_{cas}(K) \leq \frac{R_a^D(K)}{C_0(K)}$$

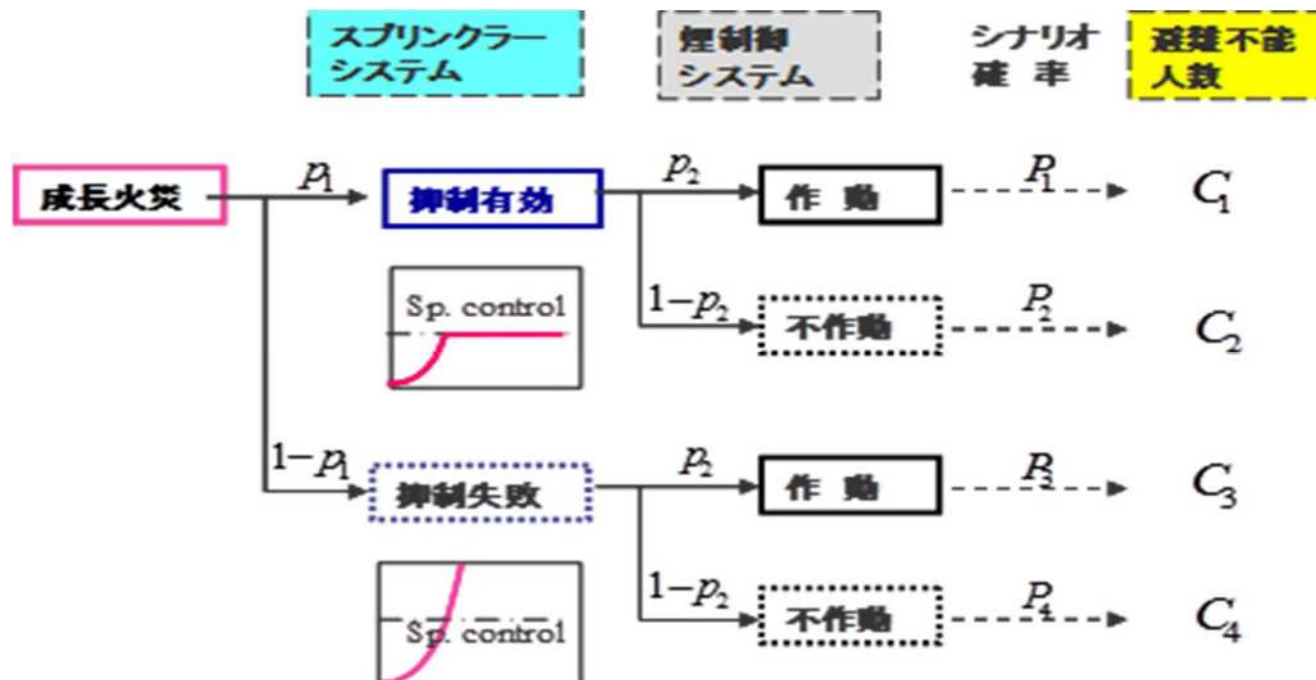
(3) 設計火源(の成長係数 α_D)

$$\alpha_D = \text{LOGNORM.INV} \left(1 - p_{cas}(K), \mu_{\ln \alpha}, \sigma_{\ln \alpha} \right)$$

7. 防火設備の作動/不作動に基づく火災シナリオ

■ 火災避難における防火設備設計の重要性と信頼性

- 避難経路の安全確保にとって防火設備は重要
- 防火設備の作動信頼性は100%ではないので作動/不作動によるシナリオを考慮することが必要
- このシナリオを考慮することは避難リスクを許容値以下に抑制するための有効な防火設備設計の助けになる。



$$\begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_1 p_2 \\ p_1 (1-p_2) \\ (1-p_1) p_2 \\ (1-p_1) (1-p_2) \end{pmatrix}$$

許容避難リスクの各シナリオへの分配

- 防火設備の作動/不作動により生じる複数のシナリオにおける避難リスクが満足すべき要件

$$\sum_{i=1}^N R^D(i) \leq R_a^D(K)$$

- 各シナリオの避難リスクと死傷確率

- 避難リスク $R^D(i) = P_i \times \bar{p}_{cas}(i) C_0$

- 死傷確率 $\bar{p}_{cas}(i) = \frac{R^D(i)}{P_i C_0}$

- 各シナリオの許容避難リスク配分したとき

- 許容避難リスク $R_a^D(K, i) = P_i \times \bar{p}_{cas}(i) C_0$

- 許容死傷確率 $\bar{p}_{cas}(i) = \frac{R_a^D(K, i)}{P_i C_0}$

許容死傷確率（許容避難失敗確率）

■ 設計ベースの許容避難リスクは

$$R_a^D(K) = p_{cas}(K) C_0(K)$$

であるが、対象となる空間が決まれば $C_0(K)$ は一定なので、許容避難リスク $R_a^D(K)$ を決めるのは $p_{cas}(K)$ を決めるのと同じ

■ そこで、改めて対象空間の許容死傷確率を

$$p_{cas}^a(K) = \frac{R_a^D(K)}{C_0} \quad \text{および} \quad p_{cas}^a(K, i) = \frac{R_a^D(K, i)}{C_0} \quad \text{とすれば}$$

■ シナリオの死傷確率は

$$\bar{p}_{cas}(i) = \frac{p_{cas}^a(K, i)}{P_i}$$

■ 許容死傷確率に掛かる制約は

$$\sum_{i=1}^N p_{cas}^a(K, i) \leq p_{cas}^a(K)$$

設計火源の α の選択手順 (まとめ)

1. 避難安全に関する防火設備の作動/不作動に基づいてシナリオイベントツリーを構築する。
2. 各防火設備の作動確率(P_i)を用いて各シナリオの生起確率を計算する。
3. 対象空間の許容避難リスクを次式によって計算する。

$$R_a^D(K) = 1.5 \left\{ \frac{p_{hf}(H)}{p_{hf}(K)} \right\} \left\{ \frac{175}{A(K)} \right\}^{1/2}$$

4. 下式の制約の下で、各シナリオに部分許容確率 $p_{cas}^a(K, i)$ を分配する。(上手い分配の仕方は防火技術者の能力次第)

$$\sum_{i=1}^N p_{cas}^a(K, i) \leq p_{cas}^a(K)$$

5. 各シナリオに対する設計火源を、下記の $\bar{p}_{cas}(i)$ に対する α_D を求め、決定する。

$$\bar{p}_{cas}(i) \left\{ = \frac{p_{cas}^a(K, i)}{P_i} \right\}$$

リスクベース避難安全検証の特徴

- 防火設備の作動/不作動の条件に基づくシナリオに対して、設計火源が決められる。従って、火災シナリオと設計火源が同時に同定される。
- 排煙設備などの防火設備は上記の与条件の下で死傷者が0になるように設計する。
- 各シナリオへの許容死傷確率($p_{cas}^a(K,i)$)配分では下記に留意。
 - $\bar{p}_{cas}(i) \geq 1$ ($p_{cas}^a(K,i) \geq P_i$) の場合 : 検証計算は不要(許容避難リスクは自動的に満足)
 - $1 \geq \bar{p}_{cas}(i) \geq 0$ ($P_i > p_{cas}^a(K,i) > 0$) の場合: $\dot{Q} = \min(\alpha_D t^2, \dot{Q}_{\max})$ を決定し、その下で安全検証を行う。
 - $\bar{p}_{cas}(i) = 0$ ($p_{cas}^a(K,i) = 0$) の場合: $\dot{Q} = \min(0.2t^2, \dot{Q}_{\max})$ の下で安全検証を行う。

居室避難の許容死傷確率と設計火源の例

- 防火設備が関係しない場合、居室避難の許容死傷確率は、室用途の特性で決まり、下式で計算出来る。

□ 許容死傷確率 $p_{cas}^a(K) = \frac{R_a^D(K)}{C_0}$ 及び $R_a^D(K) = 1.5 \left\{ \frac{p_{hf}(H)}{p_{hf}(K)} \right\} \left\{ \frac{175}{A_F(K)} \right\}^{1/2}$

- 下表は $p_{cas}^a(K)$ と設計火源の α_D の計算例を示す。用途による α_D の値の差は、出火率と在館者密度の違いを反映している。

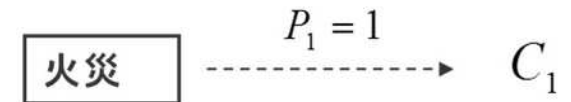
表 8.1 出火室の用途に依る面積と許容死傷確率 ($p_{cas}^a(K)$) および設計火源の成長係数 (α_D)

面 積	事 務 所		物 販		飲 食	
$A_F(K)$	$p_{cas}^a(K)$	α_D	$p_{cas}^a(K)$	α_D	$p_{cas}^a(K)$	α_D
50	4.4900	—	1.1226	—	0.0802	0.0429
100	1.5875	—	0.3969	0.0164	0.0283	0.0683
200	0.5612	0.0081	0.1403	0.0413	0.0100	0.1008
400	0.1984	0.0266	0.0496	0.0726	0.0035	0.1416
800	0.0702	0.0562	0.0176	0.1142		
1600	0.0248	0.1007	0.0062	0.1664		

居室避難：安全検証の免除条件

■ 防火設備が有効でない場合

発生した火源が成長するシナリオ1つのみ



■ 許容リスクの条件から

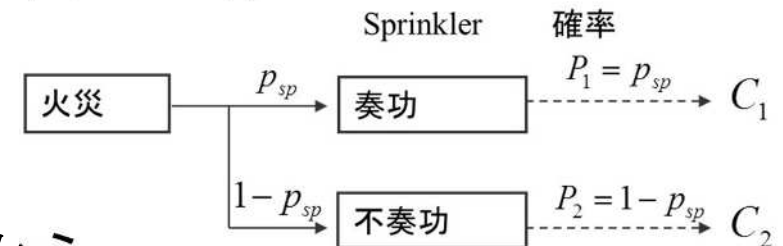
$$p_{hf}(K)A(K)^{1/2} \times p_{cas}(K)C_0(K) \leq p_{hf}(H)A(H)^{1/2} \times p_{cas}(H)C_0(H)$$

これに $C_0 = \rho_0 A$ を使うと、許容避難リスクを満たす面積は

$$A(K) \leq \left\{ \frac{p_{hf}(H)\rho_0(H)}{p_{hf}(K)\rho_0(K)} \right\}^{2/3} A(H) = 175 \left\{ \left(\frac{p_{hf}(H)}{p_{hf}(K)} \right) \left(\frac{\rho_0(H)}{\rho_0(K)} \right) \left(\frac{p_{cas}(H)}{p_{cas}(K)} \right) \right\}^{2/3}$$

■ スプリンクラーが有効な場合

SPが有効だとすればシナリオは2つ



■ SP不奏功の場合の許容リスク条件から

$$p_{hf}(K)A(K)^{1/2} \times (1 - p_{sp})p_{cas}(K)C_0(K) \leq p_{hf}(H)A(H)^{1/2} \times p_{cas}(H)C_0(H)$$

■ 許容リスクを満たす面積

$$A(K) \leq 175 \left\{ \frac{1}{1 - p_{sp}} \left(\frac{p_{hf}(H)}{p_{hf}(K)} \right) \left(\frac{\rho_0(H)}{\rho_0(K)} \right) \left(\frac{p_{cas}(H)}{p_{cas}(K)} \right) \right\}^{2/3}$$

居室避難：安全検証の免除条件(2)

- 戸建住宅の死傷確率： $p_{cas}(H) = 0.14$ としている。空間の使用形態を考慮すれば、殆どの用途で $p_{cas}(K) \leq p_{cas}(H)$ であろうと思われる。しかし、念のため $p_{cas}(K) = 0.14, 1.0$ の2ケースについて計算
- SPが奏功の場合も計算したが、実際には居室避難中に作動することは期待できないように思う。
- 計算結果は参考的なものとしても、多くの用途で安全検証を免除しても良い規模の室はかなりあると思われる。

空間用途	出火率比 $phf(H)/phf(K)$	在館者密度比 $\rho_0(H)/\rho_0(K)$	在館者密度 $[\rho_0(K)]$	空間面積(m ²)			
				$P_{cas}(K)=0.14$		$P_{cas}(K)=1$	
				Sp無し	Sp有り $psp=0.8$	Sp無し	Sp有り $psp=0.8$
戸建住宅	1	1	0.06	175	512	47	138
共同住宅	2	1	0.06	278	812	75	219
事務所	10	0.48	0.125	498	1456	134	393
物販店舗	11	0.12	0.5	211	616	57	166
飲食店舗	1	0.086	0.7	34	100	9	27
ホテル	4	0.375	0.16	229	671	62	181
劇場	7	0.04	1.5	75	219	20	59
病院	20	0.46	0.13	768	2247	207	606
学校	12	0.086	0.7	179	523	48	141

火災階避難(ケーススタディー)

■ 避難リスクの式

$$R(K) = P(K)C(K) = p_{hf}(K)A_F(K)^{1/2} \times p_{cas}(K)C_0(K)$$

□ $p_{hf}(K)A_F^{1/2}(K)$: 出火室に関わる

□ $p_{cas}(K)C_0(K)$: 避難対象者に関わる(居室、火災階、全館)

■ 階避難での許容死傷確率

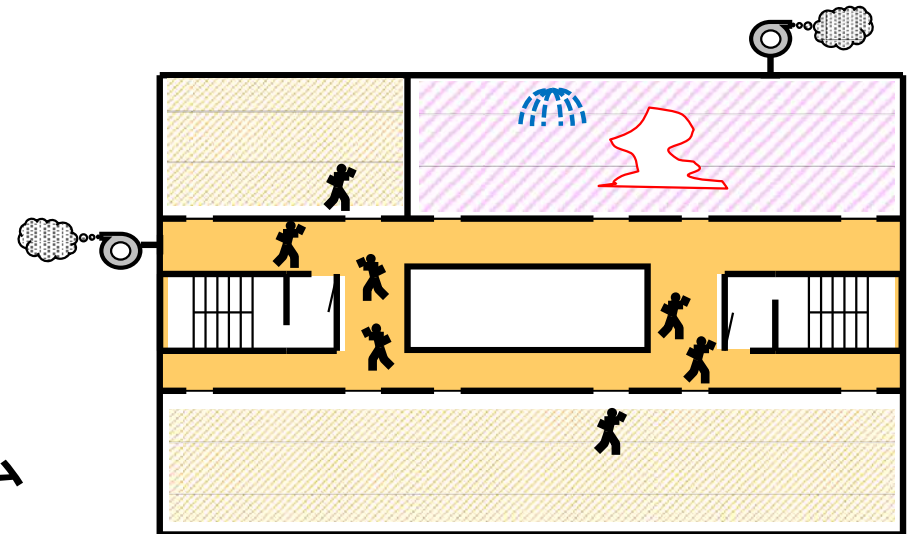
□ $p_{cas}^a(K) = \frac{R_a^D(K)}{C_0}$ が小さくなる

□

■ 階避難に関わる防火設備

□ 火災室SP, 扉、排煙システム

□ 廊下排煙etc



火災階避難(ケーススタディー例)(2)

■ 許容死傷確率の配分

- 不利な条件には多く配分する(シナリオ確率を分配分すれば検証不要)
- 有利な条件には少なく配分(0を配分すれば最も厳しい火源)

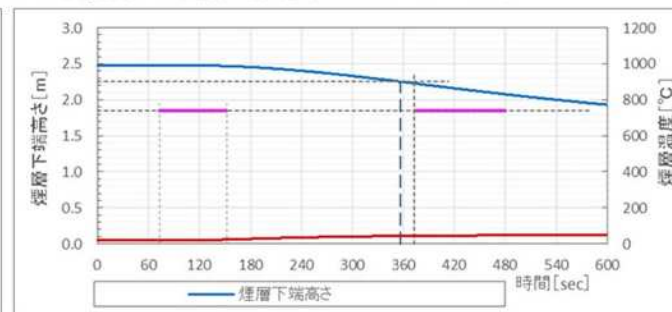
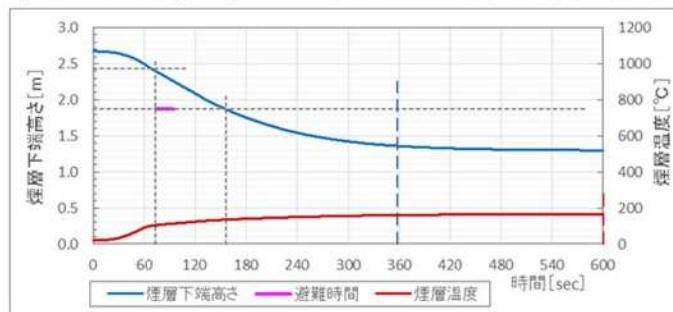
火災安全システムと確率					A= 200		A= 300		A= 400		
シナリオ NO	SP	SM 廊下	層(居室一廊下)		シナリオ 確率	確率配分	設計火源	確率配分	設計火源	確率配分	設計火源
			開放数	確率		0.04577		0.03819		0.03307	
1-1-(1)	有効 0.8	作動	0	0.640	0.4096	0	2-2-(1)	0	2-2-(1)	0	2-2-(1)
1-1-(2)		0.8	1	0.320	0.2048	0	1-1-(3)	0	1-1-(3)	0	1-1-(3)
1-1-(3)			2	0.040	0.0256	0	0.2t ² +Qsp	0	0.2t ² +Qsp	0	0.2t ² +Qsp
1-2-(1)		不作動	0	0.640	0.1024	0	2-2-(1)	0	2-2-(1)	0	2-2-(1)
1-2-(2)		0.2	1	0.320	0.0512	0	0.2t ² +Qsp	0	0.2t ² +Qsp	0	0.2t ² +Qsp
1-2-(3)			2	0.040	0.0064	0.0064	—	0.0064	—	0.0064	—
2-1-(1)	失敗 0.2	作動	0	0.640	0.1024	0	2-2-(1)	0	2-2-(1)	0	2-2-(1)
2-1-(2)		0.8	1	0.320	0.0512	0.0196	0.1134t ² +Qve	0.0110	0.1488t ² +Qve	0.00587	0.1956t ² +Qve
2-1-(3)			2	0.040	0.0064	0.0064	—	0.0064	—	0.0064	—
2-2-(1)		不作動	0	0.640	0.0256	0	(0.2t ² +Qve)	0	(0.2t ² +Qve)	0	(0.2t ² +Qve)
2-2-(2)		0.2	1	0.320	0.0128	0.0128	—	0.0128	—	0.0128	—
2-2-(3)			2	0.040	0.0016	0.0016	—	0.0016	—	0.0016	—
				計=	1.0	0.04577		0.03819		0.03307	

許容死傷確率

火災階避難(ケーススタディー例)(3)

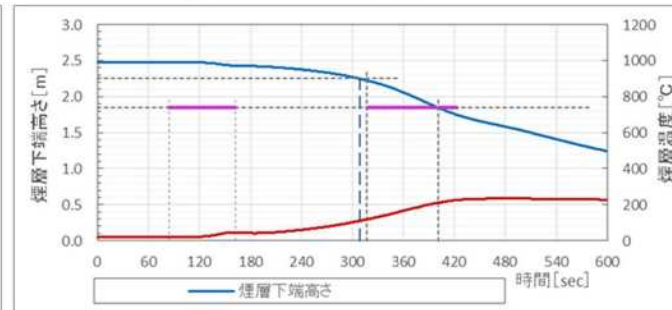
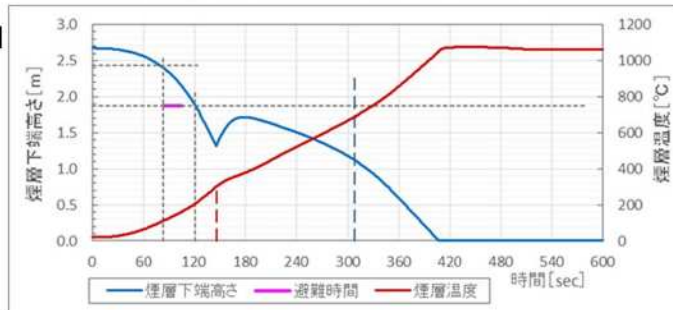
- 火源を設定したシナリオについて検証計算を行う

[A=200 m²、扉=2] シナリオ 1-1-(3): Sp支配火源 $\alpha=0.2$ 、扉開=2、排煙作動(ただし $mv=0$)



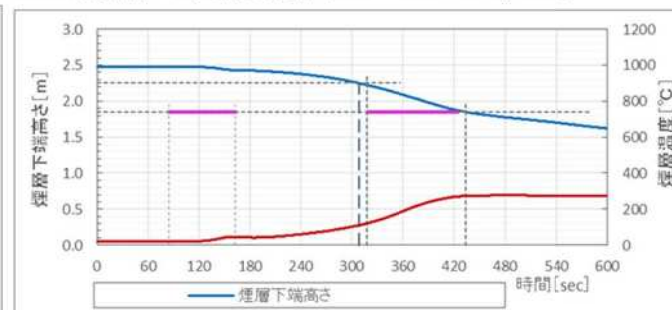
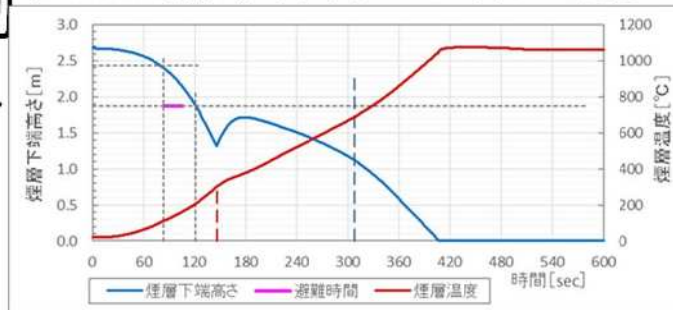
- 例えば、排煙量が少なければ増やす。(十分過ぎれば減らすことも可)

[A=200 m²、扉=2] シナリオ 2-1-(2): AVH支配 $\alpha=0.1134$ 、扉開=1、排煙作動 ($mv=0$)



- 防火設備の作動確率を改善すれば有利になる

[A=200 m²、扉=2] シナリオ 2-1-(2): AVH支配 $\alpha=0.1134$ 、扉開=1、排煙作動 ($mv=120$ m³/min)





火災安全システムと避難										A ₀		A ₀₀		1000	
シナリオ	SP	SMの低下	原の 低下-付生	SMの付生	原の 付生-階段	防火設備 健全 計	原(居住-低下) 開放数 健全		シナリオ 健全	許容電圧-配分 0.0228873	施設条件				
11(11)-0	有効	0.8	0.9	0.9	0.95		0	0.410	0.2017198	0	11(10)-4				
11(11)-1	0.8	0.8	0.9	0.9	0.95		1	0.410	0.2017198	0	11(10)-4				
11(11)-2		0.84	0.578	0.5184	0.49248	0.49248	2	0.154	0.0738449	0	11(10)-4				
11(11)-3							3	0.028	0.0128075	0	11(10)-4				
11(11)-4							4	0.002	0.0007880	0	11(10)-4				
11(10)-0					不作用(開)		0	0.410	0.0108188	0	11(10)-4				
11(10)-1					0.05		1	0.410	0.0108188	0	11(10)-4				
11(10)-2					0.02592	0.02592	2	0.154	0.0039813	0	11(10)-4				
11(10)-3							3	0.028	0.0008838	0	11(10)-4				
11(10)-4							4	0.002	0.0000415	0	11(10)-4				
11(10)-0					不作用		0	0.410	0.0224133	0	11(10)-4				
11(10)-1					0.1		1	0.410	0.0224133	0	11(10)-4				
11(10)-2					0.0578	0.05472	2	0.154	0.0084050	0	11(10)-4				
11(10)-3							3	0.028	0.0014008	0	11(10)-4				
11(10)-4							4	0.002	0.0000378	0	11(10)-4				
11(10)-0					不作用(開)		0	0.410	0.0011798	0	11(10)-4				
11(10)-1					0.05		1	0.410	0.0011798	0	11(10)-4				
11(10)-2					0.00288	0.00288	2	0.154	0.0004424	0	11(10)-4				
11(10)-3							3	0.028	0.0000757	0	11(10)-4				
11(10)-4							4	0.002	0.0000048	0	0.25*2+Gap				
11(10)-0					不作用		0	0.410	0.0224133	0	11(10)-4				
11(10)-1					0.9		1	0.410	0.0224133	0	11(10)-4				
11(10)-2					0.084	0.0578	2	0.154	0.0084050	0	11(10)-4				
11(10)-3							3	0.028	0.0014008	0	11(10)-4				
11(10)-4							4	0.002	0.0000378	0	11(10)-4				
11(10)-0					不作用(開)		0	0.410	0.0011798	0	11(10)-4				
11(10)-1					0.05		1	0.410	0.0011798	0	11(10)-4				
11(10)-2					0.00288	0.00288	2	0.154	0.0004424	0	11(10)-4				
11(10)-3							3	0.028	0.0000757	0	11(10)-4				
11(10)-4							4	0.002	0.0000048	0	11(10)-4				
11(10)-0					不作用		0	0.410	0.0024904	0	11(10)-4				
11(10)-1					0.1		1	0.410	0.0024904	0	11(10)-4				
11(10)-2					0.0084	0.00808	2	0.154	0.0009339	0	11(10)-4				
11(10)-3							3	0.028	0.0001558	0	11(10)-4				
11(10)-4							4	0.002	0.0000097	0	0.25*2+Gap				
11(10)-0					不作用(開)		0	0.410	0.0001311	0	0.25*2+Gap				
11(10)-1					0.05		1	0.410	0.0001311	0.0001311	—				
11(10)-2					0.00032	0.00032	2	0.154	0.0000492	0.0000492	—				
11(10)-3							3	0.028	0.0000082	0.0000082	—				
11(10)-4							4	0.002	0.0000005	0.0000005	—				
10(11)-0	有効				不作用		0	0.410	0.0504300	0	10(10)-4				
10(11)-1					0.9		1	0.410	0.0504300	0	10(10)-4				
10(11)-2					0.2	0.1298	2	0.154	0.0189112	0	10(10)-4				
10(11)-3					0.18	0.144	3	0.028	0.0031519	0	10(10)-4				
10(11)-4							4	0.002	0.0001970	0	10(10)-4				
10(10)-0					不作用(開)		0	0.410	0.0028542	0	10(10)-4				
10(10)-1					0.05		1	0.410	0.0028542	0	10(10)-4				
10(10)-2					0.00848	0.00848	2	0.154	0.0009953	0	10(10)-4				
10(10)-3							3	0.028	0.0001859	0	10(10)-4				
10(10)-4							4	0.002	0.0000104	0	0.25*2+Gap				
10(10)-0					不作用		0	0.410	0.0038033	0	10(10)-4				
10(10)-1					0.1		1	0.410	0.0038033	0	10(10)-4				
10(10)-2					0.0144	0.01388	2	0.154	0.0021012	0	10(10)-4				
10(10)-3							3	0.028	0.0003502	0	10(10)-4				
10(10)-4							4	0.002	0.0000219	0	0.25*2+Gap				
10(10)-0					不作用(開)		0	0.410	0.0002949	0	0.25*2+Gap				
10(10)-1					0.05		1	0.410	0.0002949	0.0002949	—				
10(10)-2					0.00072	0.00072	2	0.154	0.0001108	0.0001108	—				
10(10)-3							3	0.028	0.0000184	0.0000184	—				
10(10)-4							4	0.002	0.0000012	0.0000012	—				
10(10)-0					不作用		0	0.410	0.0038033	0	10(10)-4				
10(10)-1					0.1		1	0.410	0.0038033	0	10(10)-4				
10(10)-2					0.018	0.0144	2	0.154	0.0021012	0	10(10)-4				
10(10)-3							3	0.028	0.0003502	0	10(10)-4				
10(10)-4							4	0.002	0.0000219	0	10(10)-4				
10(10)-0					不作用(開)		0	0.410	0.0002949	0	10(10)-4				
10(10)-1					0.05		1	0.410	0.0002949	0	10(10)-4				
10(10)-2					0.00072	0.00072	2	0.154	0.0001108	0	10(10)-4				
10(10)-3							3	0.028	0.0000184	0	10(10)-4				
10(10)-4							4	0.002	0.0000012	0	0.25*2+Gap				
10(10)-0					不作用		0	0.410	0.0038033	0	10(10)-4				
10(10)-1					0.1		1	0.410	0.0038033	0	10(10)-4				
10(10)-2					0.0018	0.00152	2	0.154	0.0002335	0	10(10)-4				
10(10)-3							3	0.028	0.0000389	0	10(10)-4				
10(10)-4							4	0.002	0.0000024	0	0.25*2+Gap				
10(10)-0					不作用(開)		0	0.410	0.0000328	0	0.25*2+Gap				
10(10)-1					0.05		1	0.410	0.0000328	0.0000328	—				
10(10)-2					0.00008	0.00008	2	0.154	0.0000123	0.0000123	—				
10(10)-3							3	0.028	0.0000020	0.0000020	—				
10(10)-4							4	0.002	0.0000001	0.0000001	—				

まとめ

- リスク基盤の避難安全設計法は火災時の避難リスクを許容レベル如何に抑制する方法である。
- 避難安全検証のための設計火源と想定シナリオを組織的な方法で決定する。
- 基本的要素は:
 - 設計ベースの許容避難リスク
 - 防災設備の作動/不作動に基づくシナリオイベントツリー
 - 火災成長係数の確率密度分布
- 関連する防災設備の数が増えるに従い避難シナリオの数は増加するが、防火技術者の専門知識・技術を働かすことにより、実際にチェックが必要なシナリオの数は大幅に減らすことが出来る。
- リスク基盤の避難安全検証を実行することにより、防火システムへの冗長性の付与および個々の防火設備の信頼性向上も避難安全設計の重要な部分であることが理解される。

(参考1): 火災経験からみる火災安全設計の重点

■ 避難計画上の課題

大規模なビルの建設に先んじた米国は、多くの火災事故の経験を踏まえ、防火法規を作成して行った。遅れてビル建設を始めた日本は既に防火対策が組み込まれた米国法規に倣って防火基準を制定したので、それに対する理解が必ずしも十分ではない

■ 避難経路の不備と火災による犠牲者

劇場火災における死者の死亡原因 (NFPA, 1935)

• 避難出口の不足およびパニック	1,127
• 火災拡大による避難出口遮断	79
• 窓からの飛び降り	1
• 可燃性フィルムによる焼死	10
• 火災による焼死	1
• 消火中	11
• 原因不明	1,197
合 計	2,426

学校火災における死者の死亡原因 (NFPA, 1935)

• 避難出口の不足およびパニック	252
• 階段扉の開き勝ってが逆、格子窓	36
• 火災拡大による避難出口遮	37
• 就寝中窒息死	10
• 着衣着火	3
• 消火、救助中	21
• その他、原因不明	45
合 計	423

(参考2):世界の重大火災事例

西 暦	火 災 建 物	所在地	死者/傷者数
■ 1876	ブルックリン劇場	ブルックリン、米国	296
■ 1881	リング劇場	ウィーン、オーストリア	640
■ 1887	オラペ劇場	パリ、フランス	124
■ 1903	イロコア劇場	シカゴ、米国	602/250
■ 1911	トライアングル社	ニューヨーク、米国	145
■ 1937	安東劇場	安東、中国	650
■ 1942	ココナッツグローブ	ボストン、米国	492
■ 1967	リノバシオンデパート	ブリュッセル、ベルギー	322
■ 1971	大然閣ホテル	ソウル、韓国	163
■ 1974	ジョエルマビル	サンパウロ、ブラジル	189/345
■ 1977	ビバリーヒルズサパークラブ	ケンタッキー、米国	164
■ 1980	MGMグランドホテル	ラスベガス、米国	84/679

(参考3):日本の重大火災事例

- 日本の重大火災事例で、防火区画や竖穴区画の不備が関係しなかったものは殆ど無い。

西 暦	火 災 建 物	所在地	死者/傷者数	出火原因
◆ 1932	白木屋デパート	東京日本橋	14/91	電球スパーク
◆ 1943	布袋座(映画館)	北海道倶知安	208	映写室
◆ 1966	菊富士ホテル	群馬水上温泉	30/29	石油ストーブ
◆ 1968	池坊満月城ホテル	神戸市有馬温泉	30/44	?
◆ 1969	磐光ホテル	福島県郡山	30/35	たいまつ
◆ 1972	千日前デパート	大阪市	118/81	たばこ?
◆ 1973	大洋デパート	熊本市	103/121	?
◆ 1980	川治プリンスホテル	栃木県川治温泉	45/22	
◆ 1982	ホテルニュージャパン	東京千代田区	32/34	たばこ
◆ 2001	歌舞伎町雑居ビル	東京新宿区	44/3	?

(参考4): 群集パニックによる事故

- 劇場など大人数が集まる施設では群集パニックの発生による危険が火災自体の危険より大きかった例が多くある。下記の事例はその一部である。

- パニックが犠牲者を拡大した火災(例)

- 1876 ブルックリン劇場火災(297人)
- 1903 イロコワ劇場火災(602人)
- 1943 ココナッツグローブナイトクラブ火災(198人)
- 1977 ビバリーヒルズサパークラブ火災(164人)

- パニックのみで犠牲者が出た火災(例)

- 1929 ペスリー映画館(70人)

- パニックで犠牲者が出た非火災事故(例)

- 1849 グラスゴーの劇場(65人)
- 1878 リバプールの劇場(30人)

(参考5):過密群衆の行動に伴う危険

- 日本ではパニックにより多くの犠牲者が出た建物火災事例は知られていない。しかし、火災時に限らず、過密な大群衆の行動は、常に危険を孕んでいることに注意が必要である。群集行動の一部で何等かの問題が生じても他の大多数は把握できないし、出来たとしても大群衆の動きから逃れることは不可能なことが多いからである

■ 1904	提灯行列の混乱	死19、傷25
■ 1934	京都駅構内将棋倒し	死77、傷66
■ 1937	戦勝行列が線路に押し出される	死25、傷34
■ 1948	万代橋の欄干崩壊事故	死22、傷30
■ 1951	近江絹糸彦根工場の将棋倒し	死23、傷22
■ 1954	二重橋事件(正月一般参賀)	死17、傷64
■ 1956	弥彦神社初詣の将棋倒し	死124、傷94
■ 1960	横浜歌謡ショーの群衆転倒	死12、傷14
■ 1961	松尾鉾山小学校の将棋倒し	死10、傷13
■ 2001	JR朝霞駅歩道橋の将棋倒し	死10、傷123