

# 次世代型防耐火技術の開発と技術研究所新本館への適用

広田正之  
(技術研究所)

掛川秀史  
(技術研究所)

水落秀木  
(設計本部)

池田憲一  
(設計本部)

## Development of Fire Safety Systems for the New Offices of the Institute of Technology

by Masayuki Hirota , Shuji Kakegawa , Hideki Mizuochi and Kenichi Ikeda

### Abstract

The authors have developed new and flexible fire safety systems for the new offices of the Institute of Technology. This paper reports on three systems that correspond to stages of a fire's progress. The paper describes the construction and application a fire-phase information management system, and a fire protection system that incorporates a water curtain and a newly designed fire safety structure. The paper also outlines new methods for fire prediction and fire safety evaluation, and a new fire safety design. The performances of the systems were confirmed through fire experiments.

### 概 要

防火に関する建築基準法の性能規定化を最大限に活用し、火災安全性とフレキシビリティが両立したオフィスビルを実現するための次世代型防耐火技術を開発し、技術研究所新本館に導入し、実用化した。本報では、次世代型防耐火技術として、火災進展段階に対応した3つのシステムの概要を報告する。すなわち、火災フェイズ管理型防災システム、ドレンチャー水幕型防火区画システム、新耐火設計概念・設計システムについて、システムの構成や適用効果を示した。各システムを建物に導入するために具体化した予測手法や安全性評価の概念を提示した。また、これらのシステムの適用第一号として、技術研究所新本館を対象とした性能的火災設計の概要を示した。システムの性能は、実大火災実験を実施し、確認し、データ化した。

### § 1 . はじめに

建築基準法の防耐火に関して 2000 年に行われた性能規定化により新たな防火対策や火災安全設計技術の実用化が促進された。消防法の性能規定化の検討も進み、2004 年 6 月から一部が既に実施されている。性能的火災安全設計の社会的関心は、より高まっている。しかし、性能的火災安全設計と言われる最近の建物は標準的な避難安全検証法や耐火性能検証法を機械的に適用し、評価されたものが殆どである。性能規定化を最大限に活用し、明快な防災計画方針を通した設計を行うには、新たな防耐火技術や考え方と、それらを考慮できる予測手法を開発することが重要となる。

一方、オフィスビルの不動産価値の流動化が急速に進んでいる。これによって、IT 化等に対応しやすく、施設の更新が容易なフレキシビリティの高いオフィスビルのニーズが増加するものと考えられる。リニューアルやコンバージョンが盛んになる中、施設の使われ方の変化に対し、追加工事が発生しにくい防火対策、

あるいは対応が比較的容易な防火対策が望まれる。また、オフィス空間の開放性や建物のデザイン性を拡大させる様な設計自由度の向上も期待されている。さらに、火災安全設計に関わる総合的な建設コストを低減させ、コストパフォーマンスを高めることも重要となる。しかし、従来の防火対策は、これらの動きを円滑に行う上で制約となっていた。すなわち、避難安全対策である排煙設備は、小部屋空間の発生に伴い、ダクト工事等が生じた。延焼拡大防止対策の防火シャッターは、大きな設置スペースを要し、空調設備のダクト計画や建物の平面計画と衝突した。火災時の構造安定対策の耐火被覆は改修の度に補修作業等が発生した。

以上のことから、施設の火災安全性とフレキシビリティの両立を狙い、火災進展段階(火災フェイズ)に対応した3つのシステムからなる次世代型防耐火技術を開発し、当社技術研究所新本館(以下、新本館という)で実用化した。これらは、火災フェイズ管理型防災システム、ドレンチャー水幕型防火区画システム、新しい耐火設計概念・設計システムである。次世代型

防耐火技術を導入した新本館は防災性能評価・国土交通大臣認定を、火災フェイズ管理型防災システムは更に総合消防防災システム評価を、2003年に取得した。

本報は、次世代型防耐火技術について、各システムの開発の概要、システムを導入した建物の安全性評価方法の概要、新本館への具体的な適用<sup>1)</sup>を報告する。

## § 2 . 火災進展段階と次世代型防耐火技術

次世代型防耐火技術として、火災フェイズ管理型防災システム、ドレンチャー水幕型防火区画システム、新しい耐火設計概念・設計システムは、火災進展段階に対応し、図-1のように位置づけられる。火災フェイズ管理型防災システムは避難安全性を主に確保する対策である。また、水幕型防火区画、耐火設計システムは火災盛期を対象とした対策である。水幕型防火区画システムは延焼拡大防止性を、耐火設計システムは火災時の構造安定性を確保するものである。

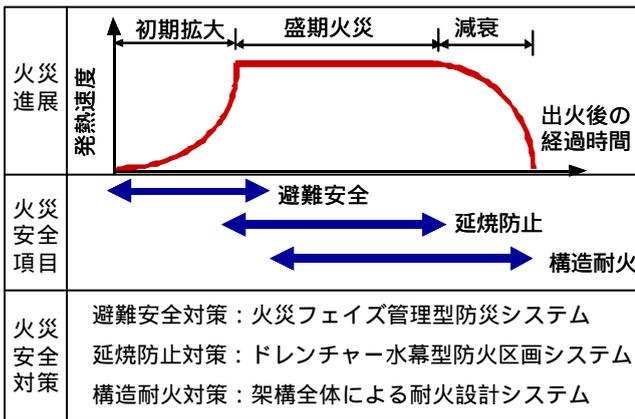


図-1 火災進展段階に対する各システムの位置づけ

これらのシステムは、建物の特徴や設計の方針にあわせて、単独にあるいは組み合わせで適用することができる。組み合わせることで、火災安全性と共にフレキシビリティも、より高いオフィスビルの実現が可能となる。付加価値の高い建物の具現化に結びつく。

## § 3 . 次世代型防耐火技術の機能と開発目的

開発する各システムは以下の機能を主に持たせる。

- ・火災フェイズ管理型防災システムは、火災感知だけでなく火災進展状況をモニタリングし、火災を自動確定し、防火対策の最適制御を可能とする。
- ・ドレンチャー水幕型防火区画システムは、水を利用する特定防火設備とし、従来の防火シャッター

と比較し、高い作動信頼性と延焼拡大防止性を有し、部材収納部分の省スペース化も可能とする。

- ・新しい耐火設計概念および設計システムは、従来の部材単位にかえて架構全体で火災時の構造安定性を得ることができ、余剰な耐火被覆対策を大幅に撤廃できる合理的な耐火設計を可能とする。こうした機能を持つシステムは具体化されていない。

ドレンチャーやウオーターミストについて、火災初期を対象に、室内が300程度程度の火災外力の小さな実験報告がある<sup>2)、3)、4)</sup>。しかし、これらは、火災初期と性状が全く異なる火災盛期を想定した高温時の火災外力に対する延焼防止性を明らかにしてはいない。

以上のことから、本開発は、次世代型防耐火技術の実用化を目的に、次に示す点の具体化を目標とした。

- ・各システムの構成および適用効果
- ・システムを考慮した建物の安全性評価方法
- ・実大火災実験にもとづくシステムの性能<sup>5)、6)、7)</sup>

## § 4 . 次世代型防耐火技術

### 4 . 1 火災フェイズ管理型防災システム

#### 4 . 1 . 1 構築方針

本システムは、初期段階の火災進展状況をリアルタイムで監視し、火災進展状況に応じて必要とされる防火設備を適切に連動制御する。これにより、避難誘導の早期化や被害拡大防止を図ることを目的とする。

従来の防火対策は、火災の進展に対して個々の防火対策を個別に制御することを原則としており、対策間の関連は一般的に考慮されていない。これに対し、今回開発したシステムは、火災の段階的な拡大状況をモニタリングする技術を核とし、防火対策を連動制御し防火対策を統合化することをめざしている。防火対策の統合化を図るにあたっては、図-2に示すように、初期火災フェイズから室内拡大フェイズに至る段階を重点的にモニタリングし、連動制御により、非火災階の避難誘導および縦穴区画の形成を行うこととした。

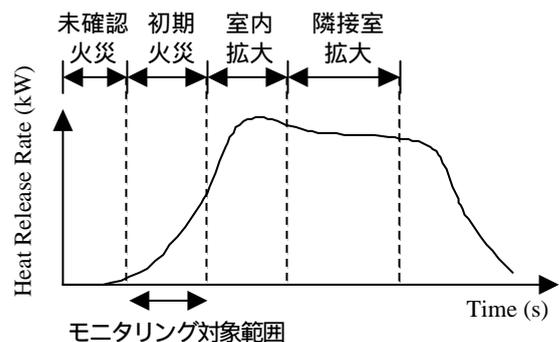


図-2 火災モニタリングの対象範囲

#### 4.1.2 システム構成<sup>8)</sup>

システムは、従来の自動火災報知設備に火災進展状況を予測する機能を付加したもので、熱検知機能を有する煙感知器と、R型受信機、および今回独自に開発した火災進展状況を判断する火災進展予測装置から構成される。全体構成を図-3に示す。

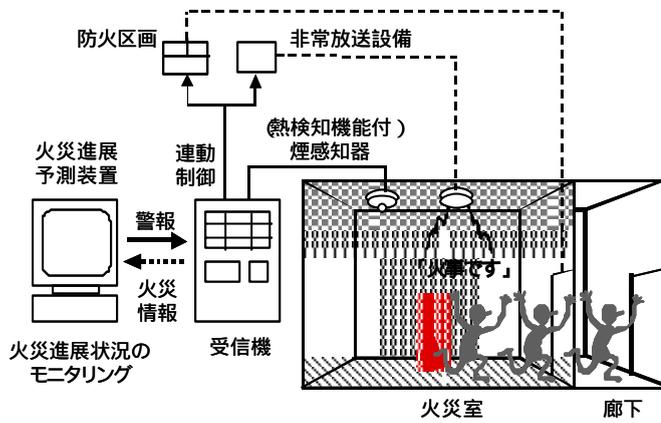


図-3 火災フェイズ管理型防災システムの構成

火災進展予測装置は、建築設備のビル管理システムを援用したもので、以下の機能を主に有している。

- ・自動火災報知設備の受信機から伝送される火災発報信号等の信号監視
- ・火災進展状況の予測結果に基づく警告信号(「火災フェイズ進展警告信号」と呼ぶ)の発信
- ・感知器ごとの設定パラメータの管理等

火災に伴う室内温度上昇を、感知器の温度情報に基づきリアルタイムで監視し、火災進展予測装置において火災の拡大状況を推定する。感知器の設置された室の条件に応じて設定した基準値よりも予測した火災の進展状況が早い場合は、警告を発報し、非常放送設備や防火戸等の防火設備を連動で制御することになる。

このような制御によって、出火室に駆け付けることなく火災進展状況を自動的に判断し、早期に避難誘導が行える。従来の自動火災報知設備と比較して在館者の避難安全性が向上する。火災進展状況に応じて防火区画を最適なタイミングで連動制御でき、火災による被害の拡大範囲を最小限に留めることも可能となる。

#### 4.1.3 火災進展状況のモニタリング方法<sup>8)</sup>

初期火災フェイズでは、天井近傍の煙層温度が急激に上昇する。一般的に、火災の進展が急速であれば、温度上昇に要する時間が短くなる。火災の進展が緩慢であれば、温度上昇に要する時間は長くなる。

本システムは、図-4に示すように、比較的簡易な方法により火災の進展状況をモニタリングできるようにするために、熱検知機能付煙感知器に対して、トリ

ガーとなる特定の基準温度(「温度基準値」)をあらかじめ数点設定しておき、温度基準値間の温度上昇所要時間をモニタリングすることによって、火災初期フェイズから室内拡大フェイズへの進展状況を予測する。モニタリングした温度上昇所要時間と、感知器の設置環境ごとに設定した温度上昇所要時間の基準値( $t_f$ :以下、「フェイズ進展基準時間」と呼ぶ)を比較することによって、火災の進展が設計段階での想定条件より早いかどうかを確認する。

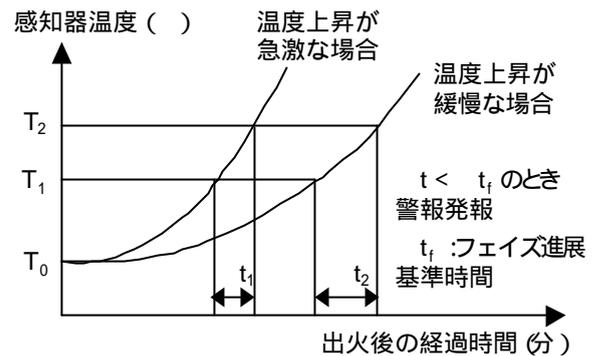


図-4 火災進展状況のモニタリング方法

モニタリングを行う温度区間は、火災発生の確度や熱検知機能の耐熱性能等を考慮し、火災初期の拡大の段階に当たる60~90の範囲内で異なる2区間を設定した。今回設定したモニタリングの対象とする温度区間は、火災フェイズとして、火災室で初期消火設備により対処可能な初期火災の段階から火災室内に拡大する段階の境界に当たる。このため、フェイズ進展警告が発報した時点で、早期の避難誘導や、吹き抜け等の竪穴区画を介した上層階への煙伝播防止対策を行うことが在館者の避難安全性を確保する上で有効となる。

温度の測定区間を温度範囲の異なる2区間とした理由は、初期火災フェイズでは、着火物の燃焼が不安定なため、可燃物の部位レベルでの燃え広がりによって天井面での温度上昇は、一様に変化せず、変動することが予想されるためである。モニタリングする温度区間が一組のみであると、温度区間の上限値を超えた後に急激に温度上昇した場合、室内火災フェイズへの進展段階を検知できなくなる可能性がある。

これに対し、温度区間のモニタリング範囲を異なる2区間とすることで、火災進展状況の判断を異なる温度範囲で合計2回行うことになり、モニタリングの信頼性が向上する。また、二組の温度測定区間でフェイズ進展基準時間がほぼ同じ値となるように温度基準値を設定することができると、一つのフェイズ進展基準時間を感知器ごとに参照すればよく、システム構築および条件設定を行う上で簡易化を図ることができる。

#### 4.1.4 火災フェイズ進展基準時間の設定

感知器が温度基準値に達する時間は、天井高さ、火源の発熱速度、感知器の設置間隔、感知器の応答時間指数等の条件をもとに次式によって算出できる<sup>9)</sup>。

$$\frac{dT_e}{dt} = \frac{u^{1/2}}{RTI} (T_g - T_e) \quad (1)$$

$$T_g = \begin{cases} 16.9Q^{2/3}/H^{5/3} & (r/H \leq 0.18) \\ 5.38(Q/r)^{2/3}/H & (r/H > 0.18) \end{cases} \quad (2)$$

$$u = \begin{cases} 0.95(Q/H)^{1/3} & (r/H \leq 0.15) \\ 0.2Q^{1/3} H^{1/2} / r^{5/6} & (r/H > 0.15) \end{cases} \quad (3)$$

ここに、 $T_e$ は感知器の感熱部温度(K)、 $T_g$ は感熱部付近の空気温度(K)、 $T_g$ は火源からの水平距離  $r$  (m) および天井高  $H$  (m) での上昇温度(K)、 $u$ は感知器の感熱部付近の流速(m/sec)、 $RTI$ は感知器の応答時間指数( $m^{1/2} sec^{1/2}$ )、 $Q$ は火源の発熱速度(kW)を示す。

火源から感知器までの水平距離は火源の位置によって変動する。これについて、システムの設計段階では感知器の設置間隔を考慮し、感知器から水平距離が最も遠い点で出火した場合を想定すればよい。式(1)において、感知器の感熱部温度  $T_e$ が温度基準値  $T_{S1}$ 、 $T_{S2}$ に達する時間をそれぞれ  $t_1$ 、 $t_2$ とすると、フェイズ進展基準時間  $t_f$ は、 $t_2 - t_1$ により算出することができる。

#### 4.1.5 制御アルゴリズム

システム制御フローを図-5に示す。フェイズ進展警報は以下の2つの条件を満足した段階で発報する。

- ・感知器が火災信号レベルに達し、自動火災報知設備が作動する。
- ・温度基準値間の温度上昇所要時間が、感知器ごとに設定したフェイズ進展基準時間よりも短い。

感知器ごとのフェイズ進展基準時間は、感知器が設置されている室の用途、天井高さ、感知器の設置間隔等をパラメータに設定し、データベース化しておく。火災発生時に受信機から送られてきた感知器の温度基準値間の温度上昇所要時間と、データベースとして保管している感知器ごとのフェイズ進展基準時間を比較し、フェイズ進展警報発報の有無を判断する。

個々の感知器にアドレス情報を組み込むことによって建物内のどの感知器で温度が上昇したかを判断することができる。フェイズ進展警報発報と判断された場合、消防法令上定められた連動制御と独立したかたちで設備の連動制御を行う。このため、通常の火災確定と、フェイズ進展警報のいずれか早い信号をもとに、放送設備による火災放送の鳴動および防火区画の防火戸や防火シャッターの連動制御を行うことになる。

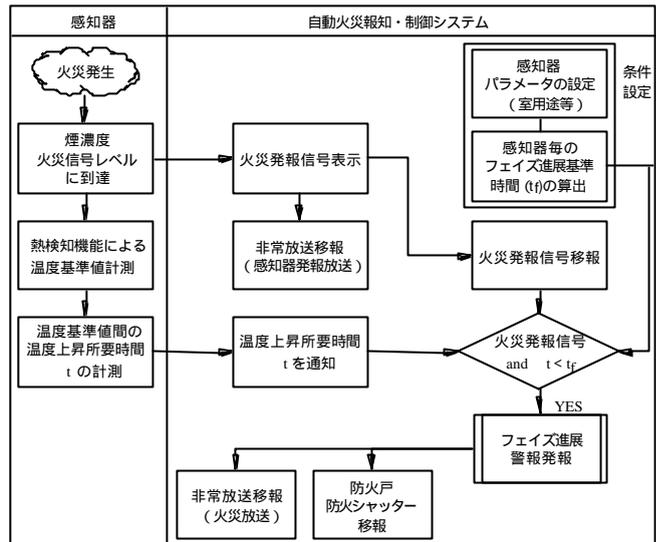


図-5 システムの制御フロー

#### 4.1.6 システムの性能確認

開発システムのプロトタイプモデルを対象とし、想定される種々の火源に対し、初期火災段階で、システムが正常に応答するかどうかを燃焼実験により確認した。W 10m×B 7m×H 4mの実験室内で、燃焼試験体に着火し、試験体の燃焼状況(写真-1)、実験室内の温度の時間変化およびシステムの応答状況を測定した。



(a) 燃焼前 (b) 警報発報時(4分後)

写真-1 事務用椅子の燃焼状況

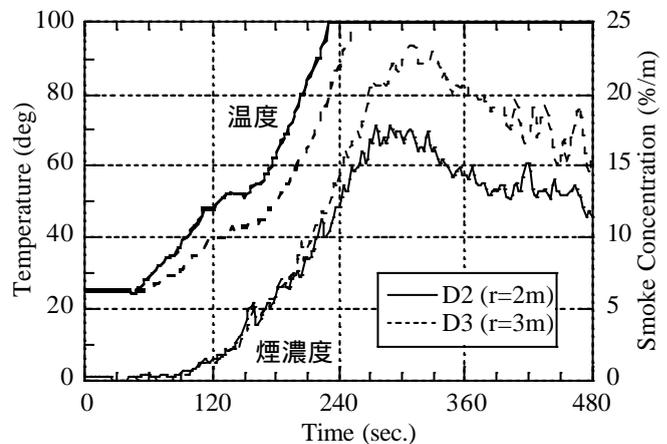


図-6 感知器の温度出力例(事務用椅子の場合)<sup>7)</sup>

表 - 1 火災進展予測装置の応答履歴

着火後の経過時間	感知器 D2 (火源からの距離 2m)	感知器 D3 (火源からの距離 3m)
2' 35"	煙感知器発報	-
2' 36"	-	煙感知器発報
3' 39"	温度上昇時間受信 ( t=22 秒 ) フェイズ進展警報発報	-
3' 54"	-	温度上昇時間受信 ( t=23 秒 ) フェイズ進展警報発報
4' 00"	温度上昇時間受信 ( t=20 秒 )	-
4' 15"	-	温度上昇時間受信 ( t=18 秒 )

事務用の椅子を燃焼させた場合の感知器の温度出力を図 - 6 に、火災進展予測装置の応答履歴を表 - 1 に示す。実験の結果、初期火災時の天井面での温度上昇に対して、システムは正常に起動し、設計時に想定した性能を確保できていることが確認された。

4.1.7 主な適用効果

従来の避難誘導では、火災感知後に、管理者による現場駆け付け、火災確認、非常放送といった一連のプロセスが必要であった。このため、避難開始迄に要する時間を補う意味からも排煙設備が欠かせなかった。しかし、本システムの採用で、従来の建築基準法による告示算定式と比較し、避難開始時間を短縮でき、排煙設備の設置を全館で不要とすることが可能となる。

結果的に、建物全体で排煙設備のダクトスペース分を有効建築面積にできる。また、天井内の横引きダクトが不要となり、設備ダクトや小部屋の計画が容易となる。間仕切設置変更に対して排煙設備は不要のまま済み、建物使用段階の自由度も増加する(図 - 7)。

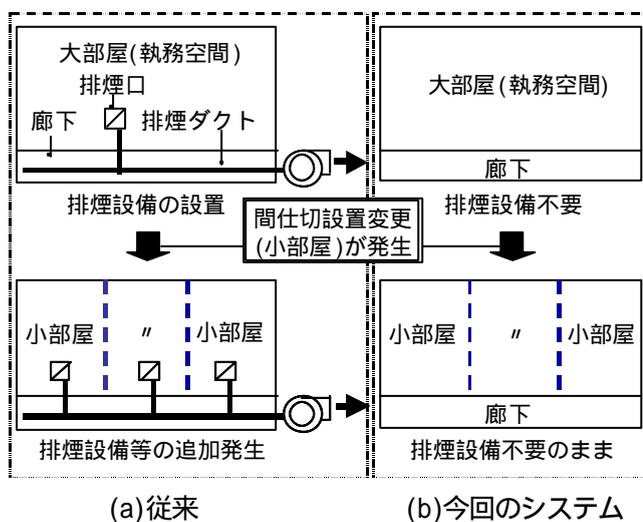


図 - 7 施設(小部屋の設計・変更)の自由度向上

4.2 ドレンチャー水幕型防火区画システム

4.2.1 構築方針

従来の鋼製の防火シャッターや防火戸は、物品が挟まることによる閉鎖障害の危険性、鋼材裏面からの放射による延焼拡大の恐れ等の課題があった。また、防火シャッターは、天井内の収納寸法が大きく新築や改築にあたり空調ダクトの計画等に多大な影響を及ぼした。さらに、防火シャッターや防火戸を連続して設置する場合に方立てが通行障害となることもあった。

このようなことから、水幕による防火区画システムは、区画形成の信頼性および延焼防止性の向上と共に納まりが容易であることが重要なファクターとなる。

4.2.2 システム構成<sup>1)、10)</sup>

ドレンチャー水幕型防火区画システムは、ドレンチャーヘッドから火災時に放水し、水幕を形成するものである。これにより、火災空間から非火災空間への放射熱や熱気流を遮蔽し、建物内の延焼拡大を防ぐ。

今回のシステムは、火災発生の危険性の少ないエレベーターホールや通路等の空間を挟んで、空間の両端の開口に1カ所ずつヘッドを設け、空間と一体化した特定防火設備である(図 - 8)。火災時には、2カ所で同時に水幕を形成する。システムは、水槽、ポンプ、ドレンチャーヘッド、配管、感熱開放継ぎ手、充水予作動式流水検知装置、制御盤から主に構成される。

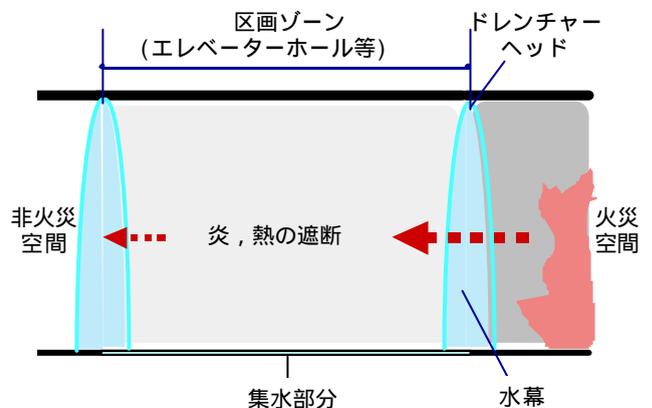
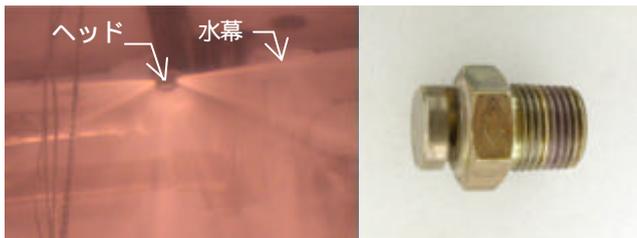


図 - 8 水幕型防火区画システムの概念

ドレンチャーヘッド1個でカバーする開口部の大きさは、幅員と高さが共に3mである。ヘッドは、180度の方向に放水できる広角型である(写真 - 2)。ドレンチャーヘッド1カ所当たりの必要放水量は、主に延焼防止性をもとに判断し、設定する。水槽の規模に関わる放水継続時間は、火災継続時間を上回り、かつ特定防火設備として要求される1時間をもとに設定する。

エレベーターホールの床は放水時の水が集められる構造である。水損防止を図ると共に、溜まる水の蒸発に伴う熱移動等を考慮し、延焼防止性も高めている。



(a)実験時の散水状況 (b)広角型

写真 - 2 ドレンチャーヘッド

#### 4.2.3 作動フロー

図-9に、ドレンチャー水幕型防火区画システムの作動フローを示す<sup>10)</sup>。自動火災報知設備が出火時の煙を感知すると、ドレンチャー制御盤に受信機から火災が移報され、火災階の充水予作動流水検知弁が起動する。さらに、ドレンチャーヘッドを設置した防火区画部分の温度が上昇し、感熱開放継ぎ手(標示温度66)が作動する。これによって、ヘッドから放水が行われ、配管内が減圧し、ポンプが自動起動する。ドレンチャー制御盤に放水表示がされ、放水が継続される。

煙感知を行う自動火災報知設備と、熱感知を行う感熱開放継ぎ手の双方の火災検知によって、日常時の誤作動および水損事故の防止も図られている。

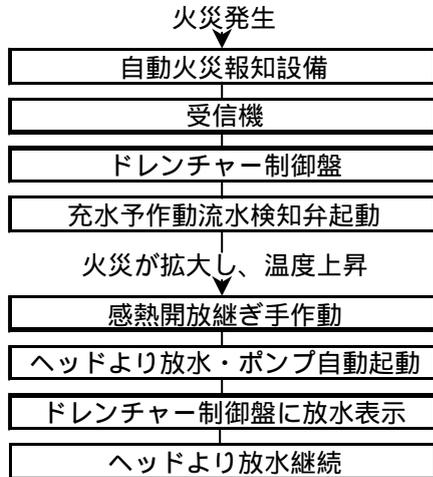


図 - 9 作動フロー

#### 4.2.4 空間温度予測の概要

ドレンチャーの水幕を介することによって火災空間からの放射や熱気流温度は低減される。低減率は水幕方式の放水量等によって異なる<sup>5)、6)</sup>。放水量を増すと低減率は高められる。実際には、建物の特性により、低放水量等の様々な方式が導入される可能性が高い。

そこで、今回のような水幕型防火区画システムの延焼防止性として、区画ゾーンをはじめとする空間の温度を予測し、安全側で評価することが重要となる。図

-10に、火災盛期を想定し、かつ水幕の影響も考慮した空間温度を予測するための概念図を示す。集水部分が床部分に有る場合である。図に示すように、火災盛期モデル<sup>11)</sup>をもとに火災時の空間温度を計算するようにした。物理化学的に空間内は一様と仮定した。水幕がある場合、開口部を通して放射と熱気流が持ち込む熱量は水幕が無い場合と比較し、低減されるものとした。水幕による放射熱等の低減効果は、ドレンチャーヘッドの種類、放水量、配置を変えた実大火災実験<sup>5)、6)</sup>を基に水幕方式ごとにデータとして与える。

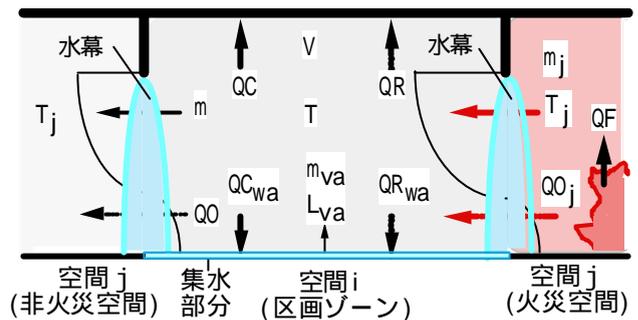


図 - 10 計算モデルの概念

ここに、 $T$ は空間  $i$  の温度 (K)、 $T_j$ は開口部を通して空間  $i$  と接続の空間  $j$  の温度 (K)、 $V$ は室容積 ( $m^3$ )、 $QF$ は発熱速度 (kW)、 $QR$ は輻射熱伝達による空間  $i$  の層の失熱速度 (kW)、 $QC$ は対流熱伝達による空間  $i$  の層の失熱速度 (kW)、 $QR_{wa}$ は輻射熱伝達による空間  $i$  の集水溝部分の受熱速度 (kW)、 $QC_{wa}$ は対流熱伝達による空間  $i$  の集水溝部分の受熱速度 (kW)、 $m_j$ は空間  $j$  から空間  $i$  への開口部流量 (kg/s)、 $m$ は空間  $i$  から空間  $j$  への開口部流量 (kg/s)、 $m_{va}$ は水蒸気の発生速度 (kg/s)、 $L_{va}$ は水の蒸発潜熱 (kJ/kg)、 $Q_{Fj}$ は開口部を通しての空間  $j$  から輻射熱伝達による空間  $i$  の層の受熱速度 (kW)、 $Q_0$ は開口部を通して空間  $i$  から輻射熱伝達による空間  $i$  の層の失熱速度 (kW)を示す。

#### 4.2.5 主な適用効果

本システムは、水幕の2列同時放水および集水スペースを併せた特定防火設備として遮熱性を高め、延焼防止性を向上させている。火災空間の状況確認を水幕を介して行うことが可能であり、消防活動上も有効である。さらに、以下のような適用効果があげられる。

従来の防火シャッターや防火戸と比較し、当システムは、物品が挟まらないため、閉鎖障害が生じない。万一、直下におかれた物品が出火あるいは着火しても放水によって消火が期待される。このように、閉鎖障害の問題は無く、区画形成の信頼性が高まる。

防火区画内はシステムのヘッドと配管だけとなる。防火シャッターや耐火スクリーンを納めるために必要

な天井裏スペース、方立てが不要となる。システムは必要な設置スペースを従来と比較して最小化できる。これによって、空調ダクト計画等が容易となり、建物設計や使用時の自由度向上が可能となる（図 - 11）。

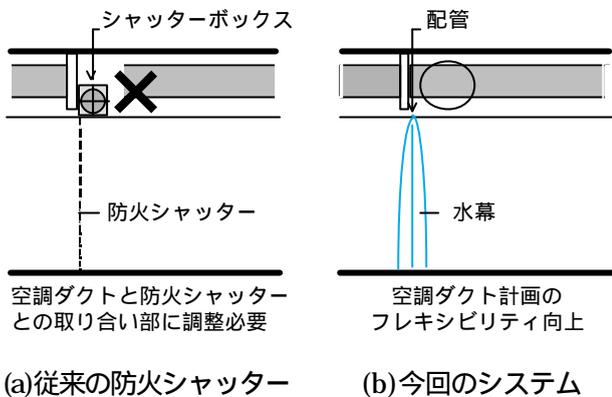


図 - 11 施設（空調の設計・更新）の自由度向上

#### 4.3 新しい耐火設計概念・耐火設計システム

##### 4.3.1 新しい耐火設計概念<sup>1), 12)</sup>

耐火設計は、オーナーや設計者が設定した目標性能を満足するように、火災時の構造安定性を建物に付与する設計であり、火災時の構造設計である。

現状の耐火設計は、従来の仕様規定によるルート A 耐火性能検証法によって簡易な性能設計を行うルート B、新たな性能評価方法を駆使して性能評価機関で建物ごとの評価を受け、大臣認定を申請する本格的な性能設計が可能なルート C がある（表 - 2）。

仕様規定や耐火性能検証法による方法は、建物の耐火性能を基本的に部材単位で検討する。火災時に定められた耐力を各部材が保持しなければならない。これに対して、大臣認定による方法で、耐火設計の上位概念と考えられる「火災によって建物を倒壊させないこと」を目標に設定し、検討することを可能とした。

「建物を崩壊させないこと」を目標に設定すると、部材の一部が火災時に耐力を失っても架構が崩壊しなければよい、というシナリオを組み立てられる。すなわち、ルート C の性能評価の方法は、仕様規定や耐火性能検証法の方法で定められている耐力を部材単位で下回っても、周辺架構への応力再配分を考慮して架構が崩壊しなければ、目標を満足できることになる。

##### 4.3.2 熱応力の予測評価の概要<sup>13)</sup>

構造耐火性の合理的な評価を行うために火災時の架構の応力・変形状を高精度に予測することは最も有効な手段の1つである。本システムは、直接火災加熱に暴露される構成部材に温度上昇に伴う熱膨張と材料特性の変化を取り込んで、架構全体の応答性状を予測するものである。以下の3ステップより構成される。

表 - 2 耐火設計の設計ルート

ルート	手続き	設計概念	設計火災	
			加熱条件	温度-時間関係
A	確認申請	耐火構造の集合体	標準加熱	温度-時間関係グラフ（標準加熱）
B			等価火災	温度-時間関係グラフ（等価火災、90分）
C	性能評価	予測される火災が終了するまで耐えること	実火災	温度-時間関係グラフ（実火災、等価）

- ・火災性状の予測
- ・鋼材断面の温度上昇の予測
- ・架構の応力と変形状の予測

火災性状の予測では、時間の経過に伴う火災区画の温度を主に算定する。すなわち、ISO834 に準拠した加熱曲線、任意の火災温度 - 時間関係の直接定義、あるいはゾーンモデル等による解析を行うことができる。

次に、火災加熱を受ける構造部材の断面温度を予測する。火災温度に対して、2次元差分法熱伝導解析により、鋼材温度の時間関係を求める。

最後に、3次元弾塑性熱応力変形解析により、全体骨組の応力・変形状を求める。この場合、時間STEP内の温度は一定と仮定する。鋼材断面の温度分布を切片モデルの最小単位要素にSTEP by STEP で与え、温度ひずみによる内力を収斂計算によって解除しながら、架構の弾塑性増分解析を行い、応力・変形を求める。

##### 4.3.3 主な適用効果

このような耐火設計によって、火災時における建物の構造安定性を失うことなく、次のような適用効果をもつ計画が具体化できる。すなわち、室内に露出する鉄骨部材の耐火被覆や耐火塗料、免震装置の耐火被覆の撤廃がこれまで以上に可能となる。これにより、工事費の低減が図れ、メンテナンスも容易となる。

#### § 5 . 新本館の防災計画

開発した次世代型防耐火技術を導入し、性能的火

災安全設計を実施した。その概要を以下に示す。

### 5.1 建物計画概要

新本館は、6層にわたる吹き抜けを有する開放的なオフィスビルである。吹き抜け部分の内観を写真-3および建物概要を表-3に示す。

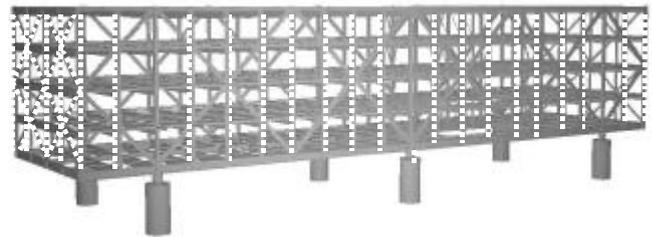
基準階平面プランを図-12に示す。吹き抜け、エレベーターホールを包含したコアにより2つの執務空間に分けられた構成である。多様な使い方に対応し、オープンスペースであり、基本的に天井も設けない。

図-13には、鉄骨架構を示す。4層を貫く斜材によって外力に耐えるメガトラス架構である。4層部分の外周梁、斜材、6本の主柱、主柱下の6台の免震装置が主構造材である。2階から5階を貫く斜材が各階の鉛直荷重を6つの免震装置に伝達する。各階外周部に曲げ柱を配し、床荷重を受ける外周梁からの鉛直荷重を一部負担し、外周梁のたわみも防止する。



写真-3 吹き抜け廻りの内観（見下げ）

建物名称	清水建設（株）技術研究所新本館
建設地	江東区越中島 3-4-17
用途	事務所
延べ床面積	約 9,461㎡
階数	地上 6階
高さ	最高 27.6m
構造	鉄骨造、一部鉄筋コンクリート造
工期	2002年9月～2003年10月
設計施工	清水建設（株）



点線部分：外周架構の無耐火被覆の鉄骨間柱（反対側も同様）

図-13 耐火被覆計画図

### 5.2 次世代型防耐火技術導入の防災計画概要

#### 5.2.1 基本的考え方<sup>1)</sup>

##### 1) 避難安全設計

執務空間に面して開放的な吹き抜けがあるため、建

物全館での煙伝播に対して以下の対策を特に行うこと  
によって避難安全性の確保を図るようにした。

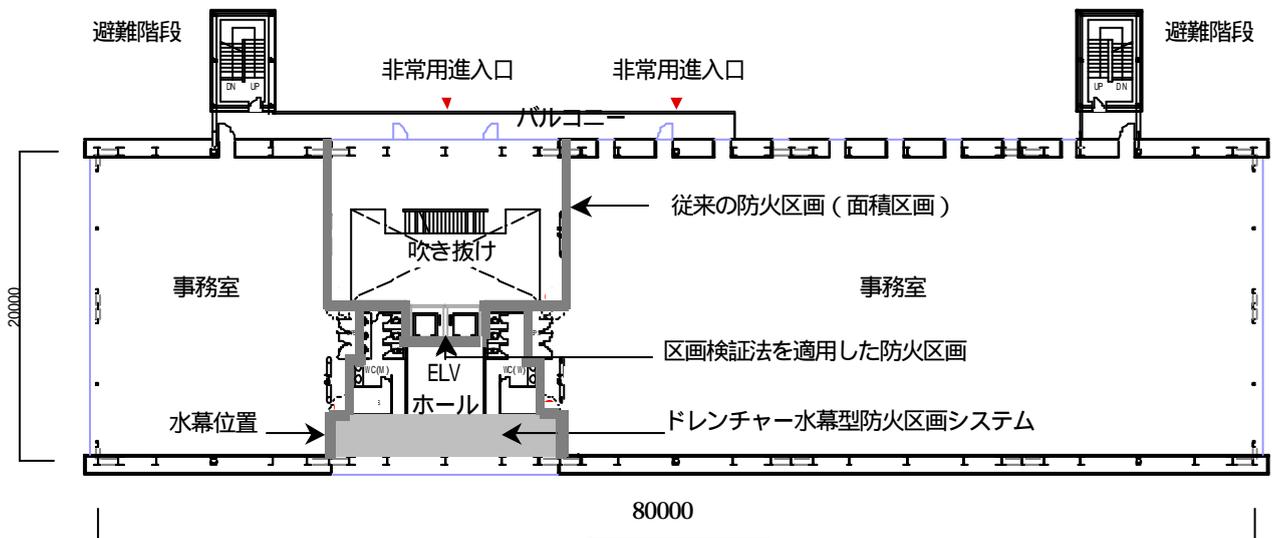


図-12 平面プラン（基準階）

第一に、吹き抜けを経由しなくても避難でき、しかも煙に汚染されにくい避難経路を設けた。すなわち、居室からの避難経路は、屋外バルコニー等の屋外空間を一旦介し、居室部分から独立した避難階段につながり、室内の火災の影響を受けにくい計画とした。バルコニーによって、消防隊による進入も容易となる。

第二に、早期の確実な避難誘導を可能とした。火災フェイズ管理型防災システム（写真 - 4）によって、管理者が出火点に駆け付け無くても火災を自動確定し避難誘導放送を自動で行う。避難開始を早めた。

第三に、上階への急激な煙拡散を抑えた。吹き抜け周辺の防火区画は、火災フェイズ管理型防災システムによって連動制御し、防火区画の形成を早期に行う。



写真 - 4 主な構成機器と熱検知機

## 2) 延焼拡大防止設計

火災拡大に対し、以下の対策を行うことによって延焼拡大防止性の確保を図るようにした。

第一に、吹き抜けを介しての延焼拡大の防止を図った。具体的に、可燃物が多く置かれる執務空間と吹き抜け部分との間は防火区画（面積区画）を施した。

第二として、面積区画成立の信頼性や区画の延焼拡大防止性を高めた。防火シャッターによる従来の区画にかえて作動信頼性の高い水幕を利用し、エレベーターホールと一体化した特定防火設備を設けた（写真 - 5）。これによって建物の延焼防止性を向上させた。

## 3) 耐火設計

耐火設計では、構造耐力上の主要な柱材の耐火性能を工学的な検討をもとに適正化した。外周部の曲げ柱といった鉄骨部材は耐火対策を合理化した。架構全体を対象とした減り張りの効いた耐火設計を実現した。

火災により建物を崩壊させないことを目標とした。

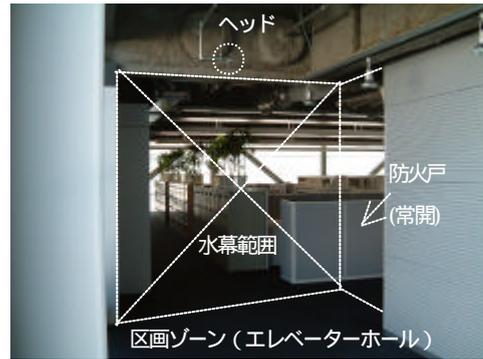


写真 - 5 設置部

メガ架構である構造形式を考慮し、架構全体で火災時の構造安定性を担保する考え方を採用した。

目標達成のシナリオのための原則を以下に示す。

- ・地震と火災は同時に発生しない。
- ・火災は、防火区画で終了する。防火区画を超えて隣接する区画へ延焼拡大しない。

具体的なシナリオについて次に示す。

- ・区画内で発生した火災によって区画内の鉛直荷重支持部材の一部が支持能力を喪失すると、メガ架構を含む他部材へ応力を配分し、崩壊させない。
- ・1階ピロティー部分の火災で、免震装置が鉛直荷重支持能力を失っても、上部架構が崩壊しない。

## 5.2.2 安全性評価

### 1) 避難安全性

建物の階避難および全館避難に対する安全性を検証した。これらの安全性は、避難者が避難場所まで逃げるのに要する時間（避難所要時間）と、避難者が火災時の煙に暴露されるまでの時間（避難限界時間）を比較し、評価する。避難所要時間は避難安全検証法を用い、避難限界時間は2層ゾーンモデルで算出した。

避難所要時間は、避難開始時間と避難行動時間からなる。避難開始時間は、避難行動時間以上に避難の所要時間を左右する。避難所要時間を求めるために、火災フェイズ管理型防災システムによって避難開始に至るシナリオを組み立て、避難開始時間を設定した。

図 - 14 は、避難開始時間について、告示算定式との比較を行った一例である。基準階で出火した場合の全館避難を想定したケースである。システムを採用し、その性能を取り込んだ避難シナリオによって避難開始時間を短縮できることがわかる。

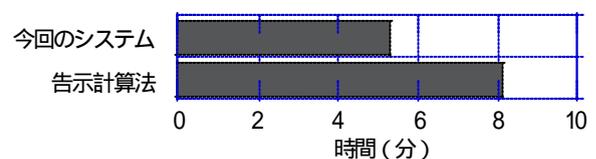


図 - 14 避難開始時間の比較例

## 2) 延焼拡大防止性

システムを導入した建物の同一階における延焼防止性は、区画ゾーンを介して火災空間から非火災空間に火災が拡大していないことを、空間温度についても火災盛期モデルをもとに予測し、検討した。執務空間をはじめ、万一、エレベーターホールで出火しても非火災空間には延焼拡大しないことを確認した。

図 - 15 に、大部屋タイプの執務空間（事務室大）が火災盛期である場合の各空間温度の算定例を示す。主な算定条件は以下である。エレベーター（ELV）ホールを挟んで水幕が形成されている。火災室の温度は耐火性能検証法で与える。窓ガラスが破損し、発生頻度の高い北北西の風が窓に向かって吹いている。なお、ELVホールは、集水部分の有無によって2分割した。

図から、火災空間と水幕を介したELVホールは、火災空間に比較して温度が大きく低下している。さらに区画ゾーンであるELVホールや二つ目の水幕を介することによって、小部屋タイプの非火災空間（事務室小）の温度は100程度に留まっていることがわかる。

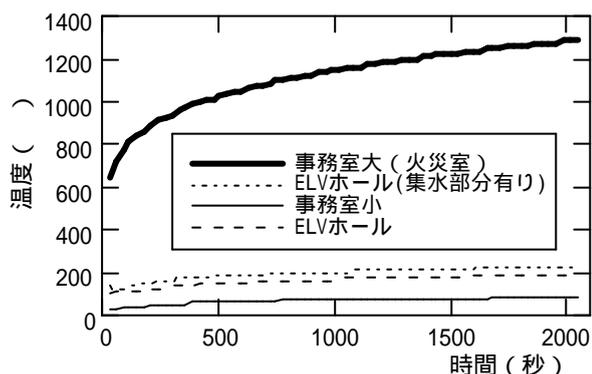


図 - 15 火災時の空間温度の算定例

また、上階への延焼防止性については、面積区画を行っていないエレベーター扉部分を介しての火災到達の有無を、防火区画検証法を適用し、検討した。

## 3) 火災時の構造安定性

構造安定性は、3次元の弾塑性熱応力解析手法<sup>13)</sup>によって、架構全体を対象に、変形量を求め、評価した。無耐火被覆化した柱材は、そのまま解析に取り込んでいる。これをもとに構造部材の断面を決定する。

### a) 外周曲げ柱の熱膨張と耐力低下を考慮した評価<sup>12)</sup>

火災発生区画の全ての曲げ柱が熱膨張し、引き続き耐力低下した時、架構が崩壊しないことを確認する。

火災が発生すると、耐火被覆の無い曲げ柱は急激に温度上昇し、上下の架構を押し広げる。その後、曲げ柱は温度上昇に伴って耐力が低下し、荷重支持能力を失う。曲げ柱に耐火被覆が無いため、火災発生から数分で生じると推定される。この時、耐火被覆を施した

鉄骨部材の温度上昇はまだ始まっていない。このような火災時の挙動を考慮し、以下のケースを評価した。

- ・曲げ柱の急激な熱膨張によって上下の梁が長期設計荷重に対して支持能力を失わない。
- ・その後の温度上昇によって曲げ柱の荷重支持能力が低下しても直結している梁等が崩壊しない。

構造安定性の判断は、柱部材角<sub>max</sub> =  $h/50$  以下、梁たわみ  $l^2/800d$  以下とする。ここに、Hは階高(m)、lはパン(m)、dは梁成(m)を示す。

架構変形の解析結果の一例を図 - 16 に示す。また、解析条件を以下に示す。

- ・柱や梁の耐火被覆は1時間耐火仕様の吹き付けロックウール等で必要に応じて増し吹きする。
- ・鉄骨部材の膨張率は  $1.22 \times 10^{-5}$  (1/ ) とする。
- ・梁と柱の部材温度は2次元差分法を用いた熱伝導解析により求める。火災温度は、耐火性能検証法における各室ごとの火災温度を用いる。温度は、各部材内部の温度が下降するまで算定する。

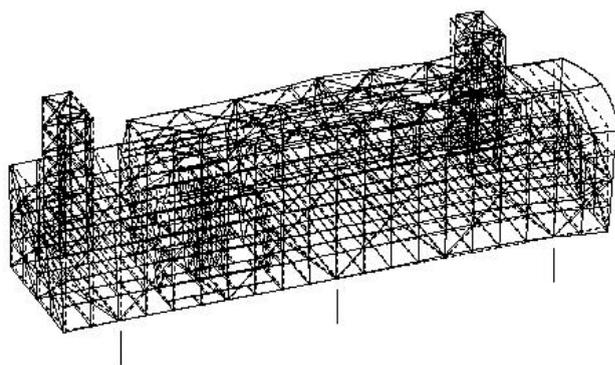


図 - 16 火災時の架構の変形図

### b) 中央部免震装置の耐力喪失を考慮した評価<sup>12)</sup>

図 - 17 には、一階ピロティー部分の局所火災によって1つの免震装置が荷重支持能力を失った時の架構変形図を示す。当該免震装置を取り去った状態を3次元解析して架構が崩壊しないことを確認した。

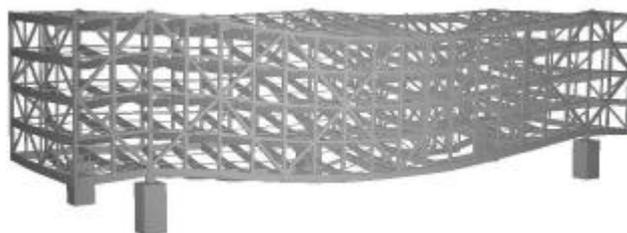


図 - 17 1階局所火災時の架構

## 5.2.3 適用効果の検証

火災フェイズ管理型防災システムの導入によって

従来のように排煙設備に依存しなくても、避難安全性を確保できた。オフィスビルで頻繁に行われる間仕切設置の変更に対して、これまで横引きダクトの引き回し等で防災面から影響を最も及ぼしていた排煙設備の設置が全館で不要となった。

従来の防火シャッターや耐火スクリーンに替わりに、水幕型防火区画システムによる延焼拡大防止性を新本館で確保できた。実際に、装置の設置スペースを従来よりもコンパクトにすることができた（写真 - 6）。従来のオフィスビルと比較して空調ダクトの計画や変更が容易となった。方立も不要となった。



写真 - 6 空調ダクト計画上の効果

新しい耐火設計の考え方とシステムによって、建物の構造安定性を失わず、合理的な計画を具現化し、過剰な耐火被覆を省略した。すなわち、6 台の免震装置のうち、中央 2 台の免震装置の耐火被覆を無くした。また、室内に露出する鉄骨曲げ柱の耐火被覆や耐火塗料を全て撤廃した（図 - 13 参照）。これにより、メンテナンスが容易となった。工事金額も抑制できた。

### 5.3 現行の仕様規定に対する緩和項目のまとめ

性能的な火災安全設計によって、現行の仕様規定に抵触し、緩和した項目を表 - 4 にまとめて示す。

表 - 4 現行の仕様規定に対する緩和（抵触）項目

火災安全対策	緩和（抵触）項目
避難安全対策	排煙設備全館未設置
	防煙区画500m <sup>2</sup> 超過 吹き抜け・エレベータ昇降路 における竪穴区画の未設置
延焼防止対策	水幕を利用した特定防火設備 エレベータ昇降路の面積区画
構造耐火対策	外周鉄骨間柱の無耐火被覆
	免震装置の無耐火被覆 主要構造部の耐火被覆合理化

## § 6 . 開発のまとめと今後の課題

本報は、次世代型防耐火技術として、オフィスビルの火災安全性とフレキシビリティの向上を狙い、実用化を目的に、3 つのシステムの機能、構成、適用効果および安全性評価方法を具体化し、適用例を示した。

火災フェイズ管理型防災システムは、中規模のオフィスビルへの適用を中心として、システム構成と共に制御アルゴリズムの考え方も明らかにした。今後は、用途や規模の異なる建物を対象に検討を行う。

水幕型防火区画システムは、空間と一体化したタイプを提案した。建物の用途や空間構成は様々であり、区画方法も多様化している。水幕は、ドレンチャーヘッドの種類、放水量、設置間隔、放水列数等によって性能を変えられる。様々な開口部の防火区画に展開できる可能性が高い。今後は、開口部が大きい場合の性能確認や評価方法の検討、防煙性能の検証があげられる。水量低減や水槽確保の設計上の課題もある。

新たな耐火設計として、従来の部材ベースの検討ではなく、防火区画を担保した上で建物の架構特性や部材特性を定量的に理解し、建物全体を捉えた耐火設計方法を提案した。特に、メガ架構やハットトラス構造<sup>14)</sup>は、架構特性が明解であり、火災の局所性および常温時と火災時の荷重支持の違いを利用した耐火設計が可能となる。今後は、火災荷重、局所火災等の条件の担保方法が課題である。

火災フェイズ管理型防災システムは松下電工株式会社と、水幕型防火区画システムは能美防災株式会社と共同開発した。ここに、関係者に深謝致します。

<参考文献>

- 1) 広田正之、掛川秀史、水落秀木、池田憲一：“清水建設技術研究所新本館の防耐火技術”、火災、Vol.53、No.6、pp.7~14、2003.12
- 2) 東京消防庁：“大規模建築物及び特異建築物等の消防対策に関する調査研究書（ドレンチャー及び高天井用消防設備のガイドライン）”、1992.3.
- 3) 吉川昭光、清水敦、佐藤博臣、栗岡均、森田昌宏：“ウオーターミストを利用した輻射熱遮断に関する研究”、日本建築学会大会学術講演梗概集”、2000.9.
- 4) 林龍也、辻利秀、栗岡均、佐藤博臣：“実大規模火災実験におけるウオータースクリーンの熱性状”、日本火災学会研究発表会概要集”、2001.5.
- 5) 広田正之、水落秀木、池田憲一、吉葉裕毅雄、山名俊男、大宮喜文、遊佐秀逸：“水幕を利用した防火設備の放射熱遮断特性に関する火災実験”、日本建築学会技術報告集第17号、pp.175~180、2003.6.
- 6) 水落秀木、池田憲一、広田正之、吉葉裕毅雄、山名俊男、大宮喜文、遊佐秀逸：“建物内におけるドレンチャー設備の温度低減効果に関する実験”、日本建築学会技術報告集第17号”、pp.181~184、2003.6.
- 7) 渡邊純一、下村茂樹、川野泰幸、和田剛嗣、矢代嘉郎、掛川秀史、大門豊、佐藤和浩：“火災フェイズ管理型防災システムの性能検証実験（火災フェイズに対応した防火管理システムに関する研究 - その3 - ）”、日本火災学会研究発表会概要集、2004.5.
- 8) 掛川秀史、矢代嘉郎、大門豊、佐藤和浩、河盛健行、川野泰幸、和田剛嗣：“火災フェイズ管理型防災システムの構成と制御アルゴリズム（火災フェイズに対応した防火管理システムに関する研究 - その2 - ）”、日本火災学会研究発表会概要集、2004.5.
- 9) Alpert、R.L.：“Calculation of Response Time of Ceiling-mounted Fire Detector”、Fire Technology、1972
- 10) 水落秀木、池田憲一、広田正之：“ドレンチャー設備の水幕を利用した防火区画システムの臨証事例”、日本建築学会大会学術講演梗概集、2004.8.
- 11) 田中孝義：“建築火災安全工学入門”、1993
- 12) 池田憲一、松井和幸、折原信吾、広田正之：“メガトラス鉄骨架構の耐火設計”、日本建築学会大会学術講演梗概集、2004.8.
- 13) 松井和幸、池田憲一、山根和宏：“耐火設計用3次元弾塑性構造解析システム「FIRE3D」の開発”、日本建築学会情報システム技術委員会第23回情報システム利用技術シンポジウム2000、2000.
- 14) 池田憲一、青木裕一、古株友徳、貞広修、松井和幸、中島英巳、佐藤文人、広田正之、斎藤秀人、“「ハットトラスとハイブリッドカラムを併用した木造架構システム」2003年度日本建築学会技術部門臨証競技”、建築雑誌、Vol.118、No.1511、2003.11.