

免震構造の耐火性に関する研究

— 免震装置用ゴムの燃焼特性と火災性状解析 —

堀 長 生 高 橋 晃一郎
村 岡 宏

Study on Fire Resistance in Base Isolated Structure

— Combustion Behavior and Fire Analysis of Rubber for Base Isolation Devices —

Nagao Hori Koichiro Takahashi
Ko Muraoka

Abstract

Base isolation devices are used without fire protection on the assumption that the risk is minimal. In this study, we carried out a fire analysis for a reactor building and investigated the possibility of a fire spreading to an adjacent base isolation device. We tested several types of rubber in the base isolation devices using a cone-calorimeter conforming to ISO. The results showed that if the heat flux against the base isolation device is under 25 kW/m^2 , the covering rubber layer can prevent fire from spreading, and fire is stopped. The fire analysis investigated the effects of atmospheric temperature on the floor where the base isolation devices are installed, the fire plume, and the heat flux from the fire. This investigation verified that fire does not spread to an adjacent base isolation device if the distance between them using high damping rubber and natural rubber are more than 88cm and 70cm, respectively. This analysis method is useful in estimating fire safety of base isolation systems for intermediate floors.

概 要

一般的な免震構造における免震装置は、外部からの延焼と火災発生の危険性を極めて小さくできる場合に限って、特別な火災防護対策を講じる必要がないとされている。今般、免震原子炉建屋において、万一免震装置が火災を起こしたという想定で火災解析を実施し、隣接する免震装置への延焼の可能性について検討した。

標準的な材料燃焼試験法として国際的に導入されつつあるコーンカロリメータにより、免震装置用ゴムの試験を行い、天然ゴム、高減衰ゴム、被覆ゴムの着火時間や発熱速度など燃焼性に関する基本物性を把握するとともに、天然ゴムによる免震装置は 25 kW/m^2 以下の輻射熱で加熱されたとき、表面の被覆ゴムで燃え止まり、連鎖的な火災拡大がないことを確認した。

火災解析は、免震層の雰囲気温度、火炎による影響、火災プルームによる影響、火炎からの輻射による影響について行った。その結果、高減衰ゴムの免震装置では88cm、天然ゴムでは70cm以上の離間距離があれば、隣接免震装置への延焼危険がないことが判明した。ここで用いた解析手法は、今後の中間階免震などに適用される免震装置の火災安全性評価手法として有効であると考えられる。

1. はじめに

免震装置は、鋼板とゴム材料を積層して構成されている可燃物であるため、免震建物に適用する際には、火災時の安全性を十分に配慮することが求められている。一般的な免震建物では、外部からの延焼危険性が極めて小さい閉鎖された空間における基礎部分に限るか、免震階に人の出入りをできないようにするなどの対策と、火災の火種と想定される電気ケーブルなどの適切な仕様および管理により火災発生の可能性を十分に小さくする対策を講じた場合に限って、特別な火災防護対策なしでの運用が認められているのが現状である。

原子カプラントの免震原子炉建屋においても免震装置の設置は基礎部分に限られており、火災防護の考え方は一般的な建築物と同様で大きな支障はないと考えられるが、建物の特殊性と重要性を考慮した場合、万一、免震装置が火災を起こしたという想定で、隣接する免震装置への延焼の可能性について火災解析を実施して他の免震装置への影響評価を行うことは重要である。

免震装置用ゴムの燃焼特性のデータは極めて少なく、また免震装置の燃焼に関するデータも全くないため、工学的な火災解析ができないのが現状であった。

本報は、コーンカロリメータによって免震装置用ゴムの燃焼試験を行い、火災解析の前提となる各種ゴム材

料の燃焼性に関する基本物性を把握し、この試験で得られた発熱速度データを基に火災解析を行い、免震装置火災時の隣接免震装置への影響を評価したものである。

2. 免震装置用ゴムの燃焼試験¹⁾

2.1 試験方法

コーンカロリメータによる燃焼試験を行い、免震装置用ゴムの発熱速度(HRR:Heat Release Rate), 着火時間, 発煙量, CO, CO₂発生量などの測定を行う。

2.1.1 コーンカロリメータ法 コーンカロリメータは, ISO5660-1{Fire tests-Reaction to fire-part 1:Rate of heat release from building products(Cone calorimeter method)}で標準化された試験方法である。

この装置は, 1980年代初頭に米国のDr. HuggettとDr. Parkerらの研究により酸素消費理論が確立され, これを機に米国のNBS(現在のNIST:National Institute of Standards and Technology)で開発された。

Fig. 1にコーンカロリメータの概要を示す。

試験体をロードセル上に水平に設置し, その上方25mmに位置するコーンヒーターにより100kW/m²までの任意の外部加熱強度を与えることができ, 実際の火災を想定した材料の燃焼が再現できるようになっている。

試験体は試験開始と同時にコーンヒーターにより加熱され, 試験体が着火するまで着火装置によるスパークが連続的に行われる。試験体への着火後は, 燃焼ガスは排気フードによりすべて捕集され各分析装置によって分析測定される。

測定できる燃焼特性は, ①平均・最高発熱速度(kW/m²) ②総発熱量(MJ/m²) ③燃焼熱(MJ/kg) ④着火時間(sec) ⑤質量減少速度(g/s・m²) ⑥煙による減光係数(1/m) ⑦燃焼ガス(CO₂, CO)濃度(%)である。

これらのデータの内, 平均・最高発熱速度, 総発熱量, 燃焼熱は酸素消費理論に基づき燃焼ガス中の酸素濃度を測定して求める。酸素消費理論の優れた点は, 物質が燃える際にその化学組成や状態(ガス, 液体, 固体)に係わらず, 酸素消費量1kg当たり13.1MJの熱が発生することを利用している点であり, 得られるデータは材料固有の工学データであるため, その利用価値も高く, 様々な方面に応用することが可能である。

2.1.2 試験条件 試験条件を以下に示す。

試験装置: コーンカロリメータ(アトラス社製 CONE2)

試験体設置方向: 水平方向

試験体形状: 10cm×10cm×厚さ(8mm/9mm, 50mm)

試験体数: 各条件3体

外部加熱強度: 25, 50kW/m²(ISO5660の規定による)

試験体の固定: 試験体を, Fig. 2に示すように, φ0.28mmの鋼線により4カ所井桁状にトレイに固定した。当初, 試験体をトレイに置くだけで実施したが, 燃焼時に試験体に変形し, 裏側にも火が入り見掛けの燃焼面積が大きくなるため固定して試験を行うこととした。

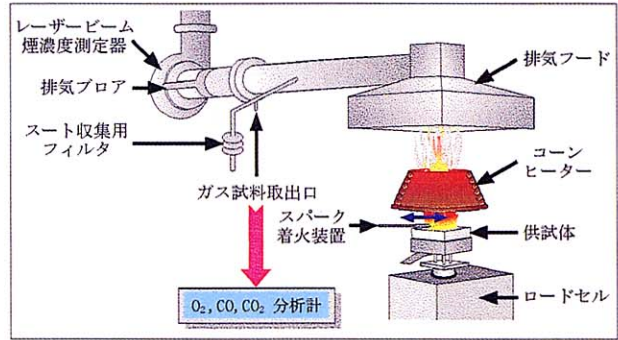


Fig. 1 コーンカロリメータの概要
General View of the Cone Calorimeter

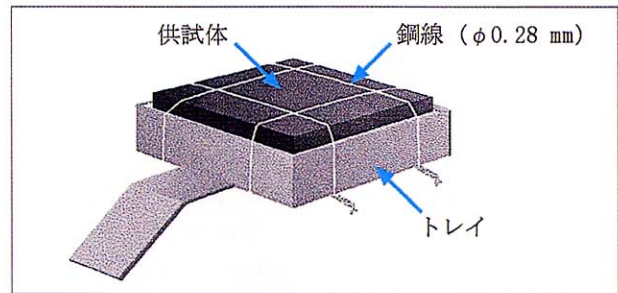


Fig. 2 鋼線による試験体の固定方法
Fastening Method for Specimen by Steel Wire

Table 1 試験体一覧
Materials Used

ゴムの種類	外部加熱強度 (kW/m ²)	厚さ (mm)
高減衰ゴム	25	8
	50	8
	25	50
	50	50
被覆ゴム	25	8
	50	8
	25	50
	50	50
天然ゴム	25	9
	50	9
	25	50
	50	50
積層ゴム	25	50
	50	50

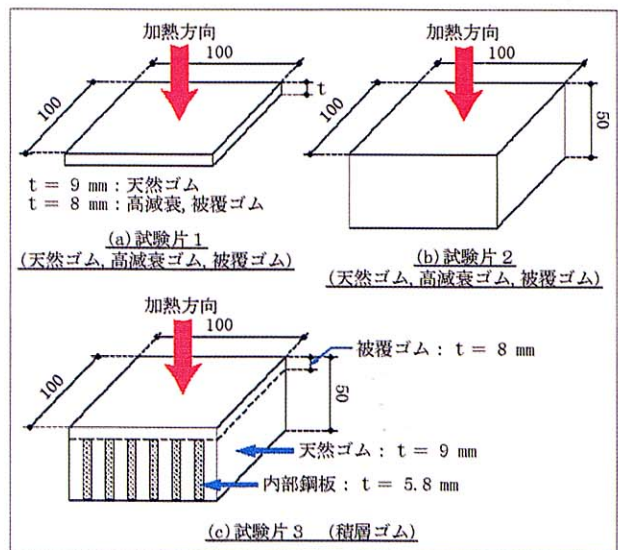


Fig. 3 試験体の形状
Shape of Samples

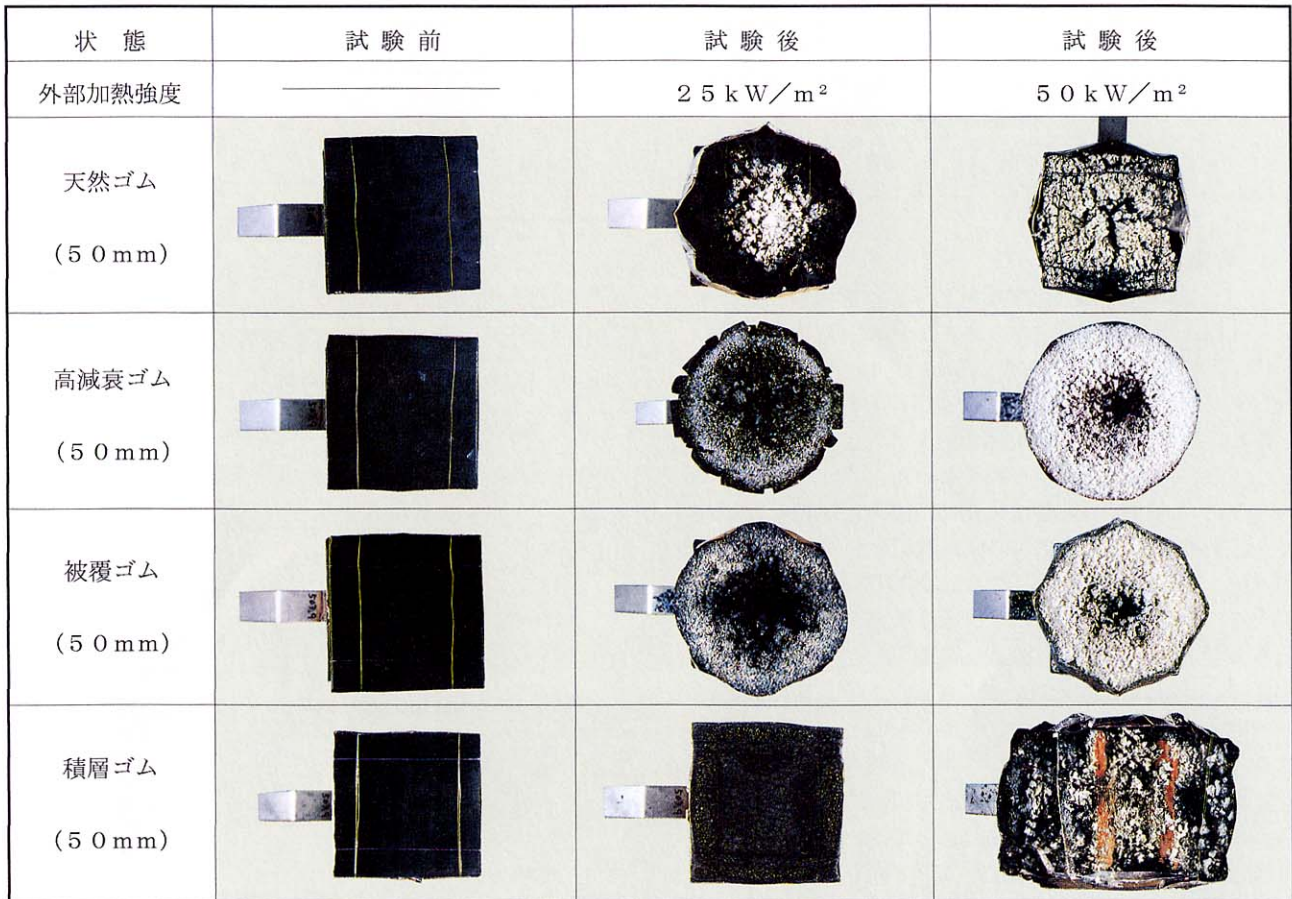


Photo 1 各種ゴム材料の試験前後の様子
Photograph of before and after Test of Rubbers and Laminated Rubbers

Table 2 免震装置用ゴムの燃焼試験結果
Fire Performance of Rubbers for Base Isolation Devices

	外部加熱強度 (kW/m ²)	着火時間 (sec.)	最大発熱速度 (kW/m ²)	総発熱量 (MJ/m ²)	燃焼熱 (MJ/kg)	最大煙濃度 (1/m)	平均CO ₂ 生成量 (kg/kg)	最大CO ₂ 濃度 (%)	平均CO生成量 (kg/kg)	最大CO濃度 (%)
天然ゴム (9mm厚)	25	77.08	673.72	275.54	35.11	7.028	2.485	1.443	0.059	0.061
	50	17.54	749.95	268.54	33.66	8.962	2.382	1.615	0.065	0.079
高減衰ゴム (8mm厚)	25	120.61	444.06	209.61	32.51	4.538	2.603	0.940	0.123	0.036
	50	27.06	674.32	226.45	30.94	8.173	2.566	1.469	0.177	0.068
被覆ゴム (8mm厚)	25	95.66	373.70	235.48	36.31	2.692	2.961	0.793	0.069	0.031
	50	20.00	443.57	247.32	35.24	4.505	2.798	0.916	0.116	0.038
天然ゴム (50mm厚)	25	109.50	475.33	1429.87	35.48	5.552	2.656	0.962	0.056	0.038
	50	18.36	629.56	1387.17	35.31	7.835	2.560	1.304	0.062	0.061
高減衰ゴム (50mm厚)	25	169.44	430.88	623.89	34.38	5.122	3.110	0.857	0.184	0.035
	50	33.02	475.50	967.19	32.46	6.463	3.110	0.918	0.226	0.041
被覆ゴム (50mm厚)	25	118.26	270.71	802.09	36.44	2.342	3.295	0.552	0.163	0.025
	50	25.00	406.22	1424.96	35.53	4.244	3.051	0.854	0.106	0.027
積層ゴム (50mm厚)	25	127.17	236.53	81.49	36.49	2.175	3.240	0.528	0.063	0.017
	50	23.65	841.85	796.56	21.50	9.255	2.174	2.121	0.050	0.103

2.1.3 試験体の種類 試験体の種類をTable 1に、試験体の形状はFig. 3に示す。積層ゴム試験体は実際の免震装置を模擬したカットモデルであり、鋼板と天然ゴムを交互に積層し、加熱側表面を被覆ゴムにより保護しており、免震装置が燃焼した際の内部鋼板の影響に着目したものである。

2.2 試験結果

Photo 1は50mm厚の各種ゴム材料の試験前後の様子を示したものである。ゴム単体(天然, 高減衰, 被覆)の試験

体は、燃焼性状に相違があるもののゴムの厚さや外部加熱強度の大きさに係わらず燃え止まりは見られず、最後まで燃焼した。積層ゴム試験体では、外部加熱強度50kW/m²では最後まで燃焼したが、25kW/m²では表面の被覆ゴムで燃え止まりが見られた。

Table 2に各種ゴム材料の燃焼試験結果(着火時間, 最大発熱速度, 総発熱量など)を示す。最大発熱速度は、厚さが薄いほど、また、外部加熱強度が高くなるほど大きくなる。燃焼熱は、材料固有の値であるので厚さおよび外部加熱強度の違いによる差は小さい。

Fig. 4 に各試験体の着火時間を示す。外部加熱強度 25kW/m²の場合は80~160秒で、50kW/m²の場合は20~40秒で着火する。着火から試験終了までの時間は、薄い試験体で20~30分、厚い試験体で1.5~5時間であった。

Fig. 5~Fig. 8に発熱速度の経時変化を示す。

2.3 考察

2.3.1 ゴムの種類（化学組成）による燃焼特性 着火時間は、試験体の厚さや、外部加熱強度の大小に係わらず、天然、被覆、高減衰の順に着火した。これは、Table 3に示すゴム材料の引火点温度と整合していることがわかった。また、最大発熱速度は大きいものから順に、天然、高減衰、被覆の順となった。

一般にゴム材料の燃焼は最初に可塑剤が燃焼し、続いて主成分の樹脂の燃焼に移り、最後にカーボンの燃焼が起きる。Fig. 5, Fig. 6の天然ゴムと被覆ゴムに見られるような二つの発熱ピークはこのような燃焼過程を反映したものである。一方、高減衰ゴムに見られるような三つの発熱ピークは免震機能を発現させるため、他の樹脂成分が混合されたことに起因しているものと考えられる。

2.3.2 ゴムの厚さの影響 同じ種類のゴムを同じ外部加熱強度で加熱した場合、その着火は、薄いもの(8,9mm)の方が厚いもの(50mm)より早い。これは、薄い試験体では、厚い試験体に比べて熱容量が小さいために温度上昇が早く、表面での可燃性ガスの放出が激しいためと推測される。また、最大発熱速度は、薄い試験体の方が大きい。

2.3.3 外部加熱強度の影響 外部加熱強度が大きくなると、すべての材料で着火時間は早くなる。Photo 1から外部加熱強度が25kW/m²では、黒い部分が見られカーボンの残存が認められるが、50kW/m²では、試験体全体が白くなり完全燃焼していることがわかる。

2.3.4 積層ゴムの燃焼特性 積層ゴムは、鋼板とゴムを交互に積層し周囲を被覆ゴムで保護したものである。本試験では鋼板と天然ゴムの積層ゴムについて試験を行った。

Photo 2の上段は、外部加熱強度が25kW/m²の時の燃焼過程の様子である。着火後 5分で一度燃焼のピークが見られ後約20分で鎮火し表面の被覆ゴムで燃え止まりが見られた。これは、積層ゴム中の鋼板の熱伝導率が大きく、裏面側への放熱があるため燃焼温度が下がり燃え止まったものと推測される。一方、Photo 2の下段は外部加熱強度が50kW/m²の時の燃焼過程の様子を示したものである。着火後約2分で燃焼のピークが見られ、約30分で燃え止まるかに見られたが、約50分を経過した時点で二度目の燃焼ピークが見られ、その際の最大発熱速度はFig. 8から約800kW/m²であることがわかった。この最大発熱速度は、天然ゴムを単体で燃焼させた場合より大きいものであった。この理由は、燃焼の過程で、ゴムと鋼板の間に隙間ができ、空気の流入によって燃焼が起きたため見かけの燃焼面積の増大によるためと推測される。

Table 3 ゴム材料の引火点温度及び発火点温度
Flash Points and Ignition Temperature of Rubbers

ゴム材料	引火点温度(℃)*1	発火点温度(℃)
天然ゴム	396	439
高減衰ゴム	456	494
被覆ゴム	420	472

*1: JIS K2265 クリーブランド開放式引火点試験方法による値

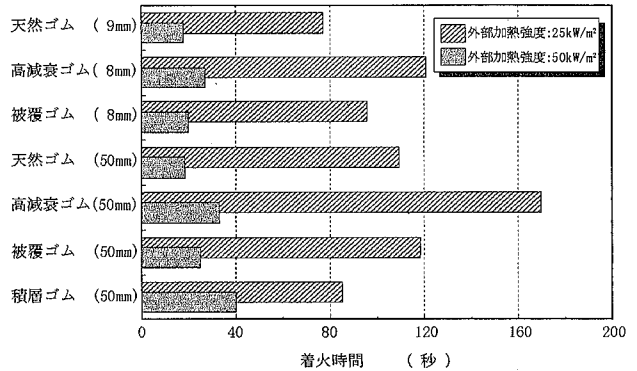


Fig. 4 免震装置用ゴムの着火時間
Time of Ignition of Rubbers for Base Isolation Devices

3. 火災解析による免震装置の延焼評価²⁾

3.1 解析方針

前章で報告されたコーンカロリメーターによる各種免震装置用ゴムの燃焼特性試験データ(以下、コーン試験と呼ぶ)をもとに、免震原子炉建屋に用いられる免震装置の火災解析を行い、隣接する免震装置への延焼の有無を評価する。

まず、免震層内の任意の免震装置が1基燃焼するものと仮定する。この場合に炎上する免震装置に隣接する免震装置への火炎、ブルーム、輻射等による影響を検討し、隣接する免震装置が燃焼に到るかどうかを評価する。解析手法には火災工学の分野で一般的に用いられている手法を用いる。³⁾ Fig. 9に火炎とブルームの概念を示す。

3.2 解析条件

3.2.1 免震層及び免震装置の寸法 燃焼を検討する免震層の寸法は天井高さ2m、床面積5356m²(92.5m×57.9m)であり、免震層と外部との間に10mm~30mmの隙間が存在すると仮定する。免震装置の配置(離間距離)と寸法はTable 4に示す様に4種類に分けられる。ここでいう離間距離とは、積層ゴム表面から隣接積層ゴム表面までの距離である。

3.2.2 解析ケース 解析ケースは上述した免震装置の配置・寸法による4種類について行うが、火炎、火災ブルーム、輻射による表面温度の算定にはコーン試験による4種類の発熱速度データ(天然ゴム、高減衰ゴム、被覆ゴム、積層ゴム)を用いるため、解析ケースは全体で10ケースとした。

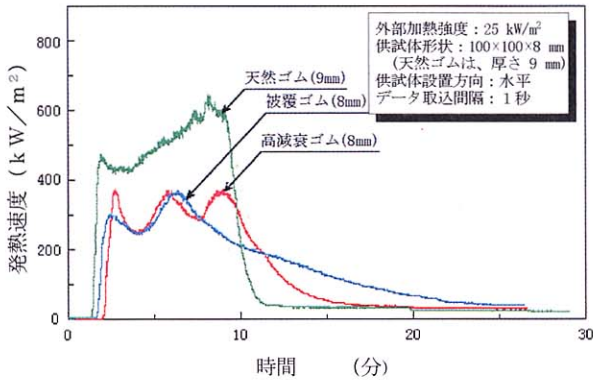


Fig. 5 免震装置用ゴムの発熱速度 (1)
HRR Curves for Rubbers(1)

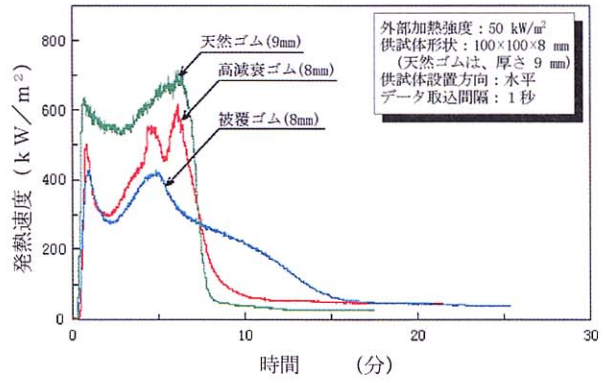


Fig. 6 免震装置用ゴムの発熱速度 (2)
HRR Curves for Rubbers(2)

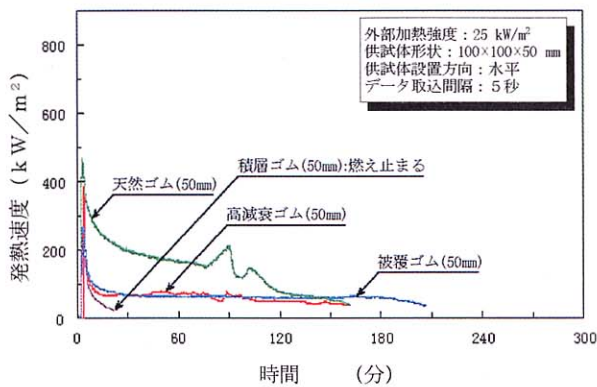


Fig. 7 免震装置用ゴムと積層ゴムの発熱速度 (1)
HRR Curves for Rubbers and Laminated Rubber(1)

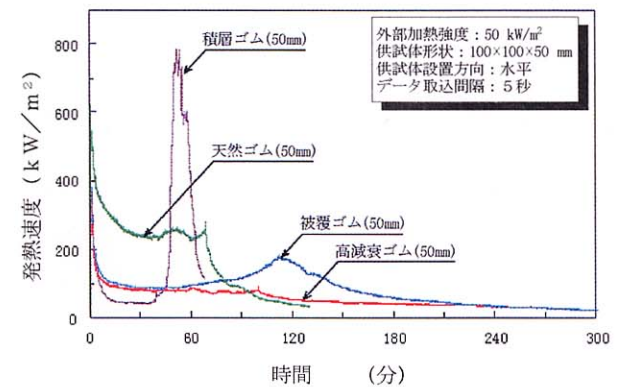


Fig. 8 免震装置用ゴムと積層ゴムの発熱速度 (2)
HRR Curves for Rubbers and Laminated Rubber(2)

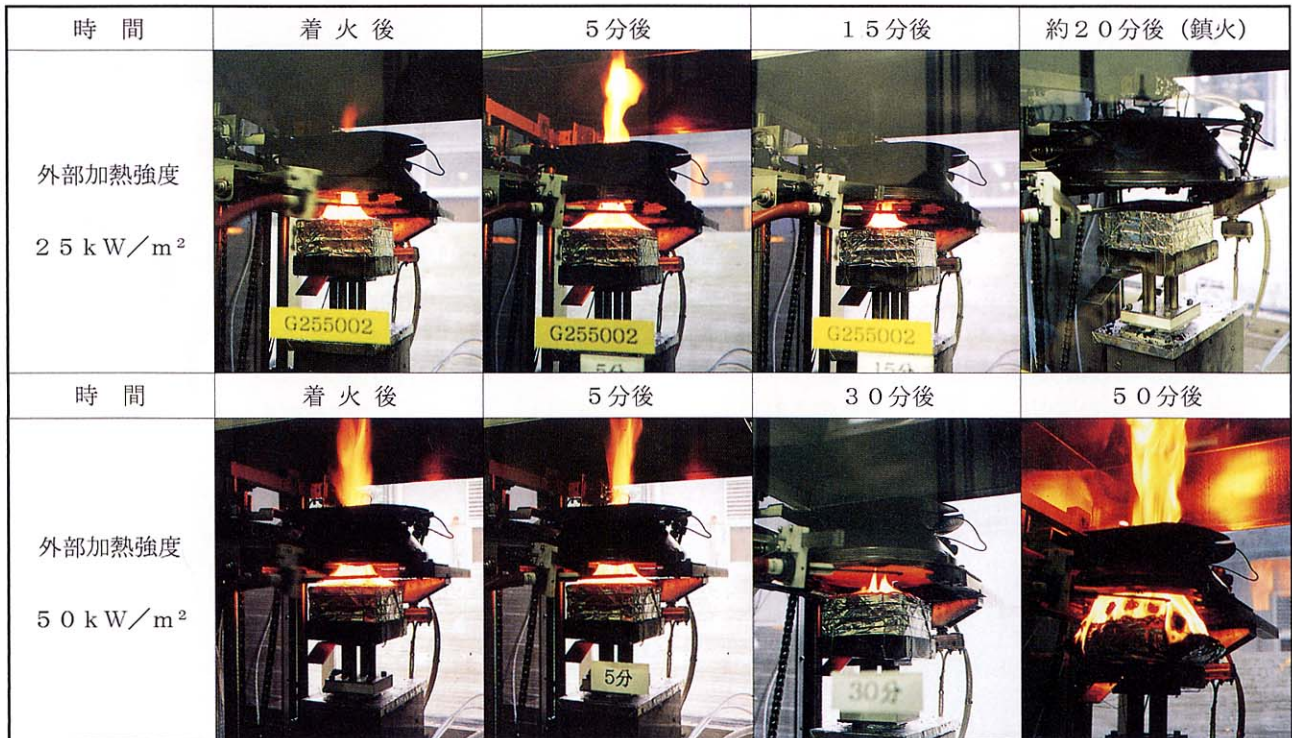


Photo 2 積層ゴムの燃焼
Photograph of the Flame Behavior for Laminated Rubbers

3.2.3 解析に用いる発熱速度データ 火炎到達長、プルーム温度の検討にはコーン試験により得られた免震装置用ゴムの発熱速度のうち、試験体厚さ50mm、外部加熱強度25kW/m²の着火後180秒までの平均発熱速度を用いる。

3.3 解析方法

3.3.1 免震層の雰囲気温度の検討 免震層内で免震装置（密配置の積層ゴム：天然ゴム）が1基燃焼した場合の免震層内の雰囲気温度（煙層温度）を2層ゾーン煙流動予測計算⁴⁾により求める。この場合の積層ゴムの発熱速度は換気支配型燃焼による火盛り期の燃焼速度より求める。燃焼速度は関根-Thomasの関係式に従う。

$$\dot{m} = (5.5 \sim 6.0) A_p \sqrt{H} \quad \dots\dots (1)$$

除間幅30mmとして(1)式より求めると発熱速度は2813kWとなる。

燃焼継続時間は積層ゴム1個の重量が507kgであり、燃焼熱がコーン試験より35.5MJ/kgであることより換算すると1.78時間となるため、計算時間は2時間とした。

3.3.2 火炎による影響検討 隣接免震装置への火炎の到達の有無を検討する。火炎長は自由空間における火炎高さL_fの算出式に従う。

$$L_f / D = \gamma Q^* \quad \dots\dots (2)$$

無次元発熱量Q*は次式で定義する。

$$Q^* = Q_{max} / (\rho_o C_p T_o g^{1/2} D^n) \quad \dots\dots (3)$$

ただし、D=√Sとする。

天井面を水平に這う火炎の到達長L_cは次式による。

$$L_c = 2 \times (L_f - H_c) \quad \dots\dots (4)$$

3.3.3 火炎プルームによる影響検討 隣接免震装置表面位置での火炎プルームの温度、天井面からの厚さを検討する。検討にはAlpertの式を用いる。⁹⁾ 火源からの距離Rの位置でのプルーム温度T_pは次式より求める。

$$T_p - T_o = (5.38 (Q_{max} / R)^{2/3}) / H_c \quad \dots\dots (5)$$

プルーム流速Uは次式による。

$$U = 0.195 Q_{max}^{1/3} H_c^{1/2} / R^{5/6} \quad \dots\dots (6)$$

プルーム質量流量mは次式による。

$$m = 0.327 (\rho_o^2 Q_{max}^{1/3} / C_p T_o) H_c^{5/3} \quad \dots\dots (7)$$

火源からの距離Rでのプルーム厚さdは次式による。

$$d = m / 2 \pi R \rho_o U \quad \dots\dots (8)$$

3.3.4 火炎からの輻射による影響検討 Fig. 10に示すように火炎からの輻射による材料表面への入射熱量が一定であり、同時に表面温度の上昇により周囲の流体中に対流熱伝達で熱を失うとすれば、隣接免震装置の表面温度は安全側で考えて(9)、(10)式で表される。

$$T_s(t) = T_o + \frac{\epsilon \dot{q}_e''}{h} \left[1 - \exp\left(\frac{h^2 t}{k \rho c}\right) \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{h^2 t}{k \rho c}} \right] \quad \dots\dots (9)$$

T_s(∞)の場合は

$$T_s(\infty) = T_o + \frac{\epsilon \dot{q}_e''}{h} \quad \dots\dots (10)$$

(9)式によるh、h²/kρcの値は各種材料のコーン試験の結果より推定する。

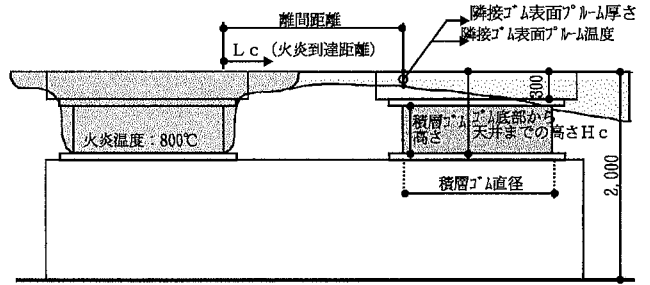


Fig. 9 火炎及びプルームの概念図
Concept of Flame and Plume

Table 4 免震装置の寸法及び離間距離
Size and Interval of Base Isolation Devices

項目	標準配置		密配置	
	高減衰ゴム	天然ゴム	高減衰ゴム	天然ゴム
積層ゴム高さ (m)	0.215	0.187	0.422	0.364
積層ゴム直径 (m)	1.42	1.6	1.42	1.6
離間距離 (m)	0.88	0.7	0.82	0.64

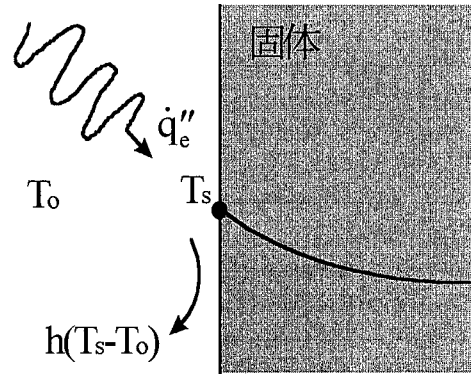


Fig. 10 熱流束を受ける固体表面の熱収支
Thermal Balance on the Solid Surface

材料表面入射熱流束と着火時刻との関係を横軸に \dot{q}_e'' 、縦軸に $1 / \sqrt{t_{ig}}$ を配して整理すると、横軸、縦軸の切片、直線の勾配がそれぞれFig. 11に示すような量を与えるので、これから材料の着火に関する特性値が求められる。⁶⁾ ちなみに横軸の切片は $t \rightarrow \infty$ において着火が生ずる限界入射熱を与える。今回行った試験では2種類の外部加熱強度において試験を行っているので、それぞれの外部加熱強度における着火時間より直線の勾配、横軸、縦軸の切片が求められる。したがって、 $h^2 / k \rho c$ の値も求められる。また、 h の値も限界入射熱 $\dot{q}_{e,ig}''$ で加熱された場合を仮定すると材料表面における熱収支は(11)式のように表される(但し、 $\epsilon = 1$ と置く)ため、これよ

り求められる。

$$\dot{q}_{0,ig}'' = hc(T_{ig} - T_0) + \sigma(T_{ig}^4 - T_0^4) \equiv h(T_{ig} - T_0) \quad \dots (11)$$

3.4 解析結果及び影響評価

3.4.1 雰囲気温度 Table 5に各種ゴム材料の燃焼特性を、Table 6に前述した解析手法による各種計算結果を示す。Fig. 12は2層ゾーン煙流動予測計算による天然ゴム仕様の免震装置（密配置）が1基燃焼した場合の免震層内の煙層温度及び煙層高さの推移である。出火から2時間後の煙層温度は63℃となり、煙層高さは天井から1m程度降下する。安全側に考え、雰囲気温度は煙層温度に等しいと仮定し、プルーム温度、輻射による表面温度の算定には初期温度を63℃とする。

3.4.2 プルーム温度 算出されたプルーム温度の中にはTable 3に示すゴム材料の引火点温度を超えているものがある。しかし、すべてのプルーム厚さは、天井とゴムの最高高さ間の距離：0.3m以内であるため、火災プルームが直接ゴム部分に接触する可能性は少ない。

3.4.3 輻射による表面温度の上昇 $t=7, 200\text{sec}$, $t=\infty$ のいずれの温度もゴム材料の引火点温度を下まわった。しかし、コーン試験により推定された着火温度 T_{ig} と比較すると、密配置の被覆ゴムデータにおいて表面温度は T_{ig} を上まわった。ただし、このケースにおいては、解析により求めた免震装置表面における放射受熱強度が 5kW/m^2 であること、及びコーン試験の結果から外部加熱強度 25kW/m^2 では被覆ゴムで燃え止まりが見られることの両方から、積層ゴム全体の燃焼に至る可能性は少ないと考えられる。

JIS K2265による引火点温度とコーン試験より推定した着火温度が異なる理由としては、2種類のための加熱強度条件から着火温度を推定したためと考えられる。したがって、正確な着火温度推定にはより多くの条件から着火温度を推定することが望まれる。

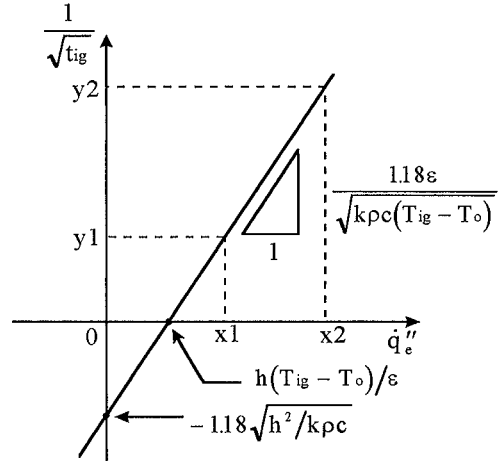


Fig. 11 材料表面入射熱流束と着火時間の関係
Relation between External Heat Flux and Time to Ignition

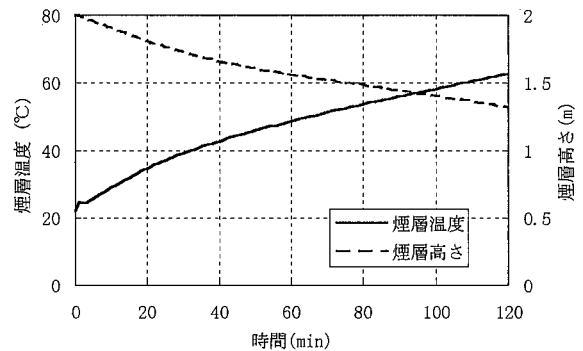


Fig. 12 免震層内の煙層温度及び煙層高さ
Smoke Layer Temperature and Height in the Basement Floor

Table 5 各種ゴム材料の燃焼特性
Combustive Property of Rubbers

項目	天然ゴム	高減衰ゴム	被覆ゴム	積層ゴム
引火点温度*1 (°C)	396	456	420	-
解析に用いる発熱速度 (kW/m ²)	369	193	202	177
着火限界放射強度 $\dot{q}_{0,ig}''$	7.7	5.2	3.7	6.0
解析による着火温度 T_{ig} (°C)	312	257	213	277
表面熱損失率 h (kW/m ² K)	0.026	0.022	0.019	0.024
$h^2/k\rho c$	0.00128	0.000299	0.000186	0.000574

*1 : JIS K2265 クリーブランド開放式引火点試験方法による値

Table 6 解析結果
Results of Analysis

免震装置の配置 免震装置の形状	標準配置					密配置				
	高減衰ゴム仕様		天然ゴム仕様			高減衰ゴム仕様		天然ゴム仕様		
使用材料データ	高減衰 ゴム	被覆 ゴム	天然 ゴム	被覆 ゴム	積層 ゴム	高減衰 ゴム	被覆 ゴム	天然 ゴム	被覆 ゴム	積層 ゴム
火災の到達長 (m)	0	0.160	0.210	0.195	0.080	0	0.794	0.854	0.853	0.652
離間距離 (m)	0.88	0.88	0.70	0.70	0.70	0.82	0.82	0.64	0.64	0.64
火災到達の有無	無	無	無	無	無	無	無	有*2	有*2	有*2
隣接ゴム表面プルーム温度 (°C)	269	369	470	435	402	317	442	579	538	497
プルーム流速 (m/s)	0.816	0.984	1.207	1.155	1.105	1.247	1.511	1.847	1.774	1.697
プルーム質量流速 (kg/s)	0.157	0.189	0.168	0.160	0.153	0.309	0.375	0.315	0.302	0.289
プルーム体積流速 (m ³)	0.400	0.483	0.429	0.410	0.392	0.791	0.958	0.805	0.773	0.740
隣接ゴム表面プルーム厚さ (m)	0.09	0.09	0.08	0.08	0.08	0.12	0.12	0.11	0.11	0.11
雰囲気温度 (°C)	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63
放射受熱強度 (kW/m ²)	2.3	2.3	2.4	2.4	2.4	4.8	4.8	5.0	5.0	5.0
表面温度 T_s ($t=7, 200\text{sec}$) (°C)	133	136	138	139	139	209	215	170	222	222
表面温度 T_s ($t=\infty$)	167	182	155	187	165	280	312	254	322	276

*2 : 評価結果は安全側の仮定を用いた火災到達式による。

3.4.4 火炎の到達 密配置の天然ゴム仕様の免震装置では火炎が到達する結果となった。積層ゴムが火炎に暴露された場合は火炎の温度800℃と考えると入射熱量は68kW/m²となり、コーン試験では50kW/m²の加熱強度で積層体の試験体が40秒程度で着火し、燃焼継続が1時間以上あることを考慮すると延焼の可能性は大きいと考えられる。

4. まとめ

本報では、免震装置用ゴムの燃焼実験を行い、各種ゴム材料の燃焼性に関する基本物性を把握するとともに、このデータを基に火災性状解析を行い、隣接する免震装置への延焼評価を行った。これらの燃焼実験および火災解析の結果より以下の知見が得られた。

1) コーンカロリメータによる燃焼試験を実施した結果、火災解析の前提となる発熱速度や着火時間など材料固有の工学的データを得ることができた。

2) 天然ゴムによる積層ゴムは25kW/m²で加熱された時、表面の被覆ゴムで燃え止まり、50kW/m²では燃焼した。これより、火災時に積層ゴムが受ける外部加熱強度が25kW/m²以下であれば、積層ゴムの連鎖的な火災拡大の可能性は極めて少ないことが判明した。

3) 積層ゴムの保護に使われる被覆ゴムは、より難燃効果の高い材料を用いることによって積層ゴムの耐火性を高めることが期待できる。

4) 解析の結果、標準配置では、すべてのケースにおいて隣接免震装置に延焼しないことが判明した。一方、密配置では延焼する可能性が認められた。高減衰ゴム仕様では輻射熱により、天然ゴム仕様では火炎到達による。ただし、コーン試験では外部加熱強度25kW/m²以下で燃え止まっているため、高減衰ゴム仕様では着火しても燃え止まると考えられる。

5) 解析結果からは延焼の可能性が示唆されたが、解析手法としては安全側の仮定を用いているため、実際には連鎖的な延焼拡大に至る可能性は少ないと考えられる。しかしながら、閉鎖空間における火災性状については未だ不明の部分が多く、今回の解析結果からは予想できない現象が起こる可能性もあるといえる。

コーンカロリメータは建築材料の燃焼特性データ（着火時間、発熱速度等）を正確に測定できるため、標準的な材料燃焼試験装置として国際的に導入されつつあるが、この試験装置により得られたデータを用いて、免震階に配置された免震装置の火災性状が安全側で予測できることが判明した。現在、一般建築における免震装置では、基礎部分に使われる場合に限って、特別の火災防護対策無しでの運用が認められているが、中間階や基礎以外に使われる免震階で免震装置を適用する際には、この手法が免震装置の火災安全性評価に有用であると考えられる。

記号

\dot{m}	: 質量燃焼速度 (kg/min)
Q_{\max}	: 火源の発熱速度 (kW/m ²)
A_B	: 開口面積 (m ²)
H	: 開口高さ (m)
L_f	: 火炎高さ (m)
D	: 火炎の代表長さ (m)
γ, n	: 定数
ρ_o	: 周囲の空気密度 (kg/m ³)
C_p	: 周囲の比熱 (kJ/kg·K)
T_o	: 周囲空気温度 (K)
g	: 重力加速度 (m/s ²)
S	: 積層ゴム表面積 (m ²)
L_c	: 火炎の到達長 (m)
H_c	: 積層ゴム底部から天井までの高さ (m)
R	: 火源からの距離 (m)
T_p	: プルーム温度 (K)
U	: プルーム流速 (m/s)
m	: プルーム質量流速 (kg/s)
d	: プルーム厚さ (m)
k	: 材料の熱伝導率 (kW/m·K)
ρ	: 材料の密度 (kg/m ³)
c	: 材料の比熱 (kJ/kg·K)
h	: 材料の表面熱伝達率 (kW/m ² ·K)
h_c	: 対流熱伝達率 (kW/m ² ·K)
ϵ	: 材料表面放射率 (-)
t_{ig}	: 着火時間 (s)
T_{ig}	: 着火温度 (K)
$T_s(t)$: 時刻 t における積層ゴム表面温度 (K)
q''_o	: 材料表面入射熱流束 (kW/m ²)
$q''_{o,ig}$: 着火限界放射強度 (kW/m ²)
σ	: Stefan-Boltzmann定数 (5.667×10^{-11} kW/m ² K ⁴)

謝 辞

この研究は日本原子力発電株式会社により委託されたFBR電力共通研究「実証炉プラント最適化研究（その2）水平免震建屋設計に関する研究」の成果の一部である。また、研究の実施にあたり日本大学教授齋藤光先生にご指導頂きました。関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 堀他：FBR免震設計に関する研究（コーンカロリメータによる免震ゴム材料の燃焼性評価），日本建築学会大会学術講演梗概集，P1047～1048，(1997)
- 2) 村岡他：FBR免震設計に関する研究（火災解析による免震装置の延焼評価），日本建築学会大会学術講演梗概集，P1049～1050，(1997)
- 3) 日本建築センター：建築物の総合防火設計法 第2巻 出火拡大防止設計法
- 4) 日本建築センター：煙流動及び避難性状予測のための実用計算プログラム解説書（第2版）平成4年
- 5) Alpert, R. L.: Calculation of Responce Time of Ceiling-Mounted Detector, Fire Technology, Vol. 8, 181-195, 1972
- 6) 長谷見雄二：放射熱を基準とする建築間火災拡大予測法，災害の研究，第18巻，1987