

耐火性能を有する木質材料の開発 ～小型耐火試験機による耐火性能の評価～

染川さおり・増田勝則・柳川靖夫・田中陽子*¹・伊藤貴文・春日二郎*²

電気炭化炉を改造した小型耐火試験機を用いて、不燃薬剤を加圧注入法で含浸した木質材料の耐火試験を行った。この試験機において、炉内温度の調整を手動で行うことにより、1時間耐火試験で求められる標準加熱曲線（ISO834）の再現が可能であった。

耐火試験に供する材料を次のとおり作製した。厚さ15mmのスギ辺材板目板にホウ酸系2種類およびグアニジンリン酸塩系1種類の不燃薬剤をそれぞれ含浸させ、幅はぎして接着した後に、繊維方向を直交させて3層および4層積層接着し、それぞれ厚さ45mmおよび60mmの試験体を作製した。同様にして、厚さ15mmおよび18mmのヒノキ材板目板を3層積層し、それぞれ厚さ45mmおよび54mmの試験体を作製した。また、厚さ3mmのスギ辺材単板にグアニジンリン酸塩系の薬剤を含浸させ、17層および19層積層し接着して、それぞれ厚さ51mmおよび57mmの合板を作製した。これらを用いて電気炭化炉を改造した小型耐火試験機で耐火試験を行った結果、スギの厚さ60mmの試験体、ヒノキの厚さ54mmの試験体および57mmのスギ合板が1時間耐火構造の基準を満たした。3種類の薬剤間で耐火性能の差はなかった。これらの不燃薬剤の性能を確認するために、厚さ18mmのスギ辺材板目板およびヒノキ材板目板を用いて、コーンカロリメータ法による発熱性試験を行った結果、3薬剤とも建築基準法に規定される不燃材料の基準を満たした。

1. はじめに

我が国では、木造建築物は古くから人々に親しまれてきた。しかし、木材は火災に弱いことから、戦後の建築行政により、市街地の建築物や大規模な建築物といった耐火性能が求められる建築物には、木材の使用が制限されてきた。その後、2000年に建築基準法に性能規定が導入され、耐火性能が証明できれば、木造で耐火建築物を建築することが可能になった。一方、木材の炭素固定能力に着目した環境政策といった観点から、国では木材の利用促進に関する政策が進められている。その一つとして、「公共建築物等における木材の利用の促進に関する法律」が2010年に施行された。この法令に基づく基本方針によると、耐火建築物とする必要のない低層の公共建築物について、木造化を積極的に促進し、耐火構造が必要な公共建築物についても、技術開発の推進や様々な課題の解決状況等を踏まえ、木造化が可能と判断されるものは木造化を図る、とされている。これらの動向をふまえて本県でも、「公共建築物における“奈良の木”利用推進方針」を策定し、県産材の利用促進を図っているところである。こうした中で、多くのメーカーや研究機関では、耐火性能を持つ部材等の研究や開発が進められて

おり、様々な部材において建築基準法に基づく耐火構造の認定を受けている¹⁾。この耐火構造の認定基準となる耐火性能は、建築基準法によって技術的基準が定められているが、具体的な試験方法や評価方法については、同法で定める指定性能評価機関がISO834に準じて規定している。実大の耐火壁を対象とした実大試験もこれに含まれるが、その作製および試験には時間、労力、費用ともに大きな負担がかかる。より性能の良い材料を見つけるためには数多くの材料が必要であり、小さい試験片での予備試験による耐火性能の確認が有効である。

ところで、現時点で認定を受けた部材や工法の中には、木材を石膏ボードなどの不燃材料で被覆し、木材が現しに使われない場合が多い。木材の利用について一般的な理解を得るためには、視覚的にもその良さが訴えられるように木材を現しに使い、多くの人に親しみをもちってもらうことが重要である。ところが、現しで無処理の木材を用いると、実際に火災が起きた場合、着火しやすく、火災初期に激しく燃えることが予想される。

本研究では、200mm×200mmの小試験体で耐火試験を行うことのできる小型耐火試験機の作製と、当センターの不燃木材に関する既往の研究成果^{2) 3)}を応用し、木材のみで構成された木質材料によって、1時間耐火構

* 1 現奈良県南部農林振興事務所

* 2 株式会社ヨコタニ

造を有する木質耐火壁の材料の開発を目指した。また、不燃薬剤の違いが耐火性能に影響するかどうか確認した。

2. 材料および方法

2.1 材料

2.1.1 耐火試験

(1) 幅はぎ積層材

130mm (幅) × 17mm (厚さ) × 500mm (長さ) のスギ辺材板目板 (以下、スギ板材と略す。) に、3種類の薬剤 (表1) の水溶液を以下に示す方法でそれぞれ含浸させた。すなわち、薬液中にスギ板材を浸せきし70hPaで1時間減圧した後、1.2MPaで2時間加圧した。その後スギ板材を薬液から取り出し、約2日間温度なりゆきで室内に放置したのち、送風乾燥器内で、50℃で1日、80℃で14日間乾燥させ、含水率を15%以下にした。次に、レゾルシノール・フェノール樹脂接着剤 ((株) アイカ工業製 PR-10) を使用してこのスギ板材を2枚ずつ幅はぎして接着した後、厚さを15mmに整え、長さ方向に2分割した。これらを3枚用いて互いに繊維方向が直交するように積層して接着した材料 (以下、幅はぎ積層材と略す。) を、周囲を切り落として200mm × 200mm × 45mmに仕上げた。同様にして4層積層した厚さ60mmの試験体を作製した。またヒノキ材板目板 (以下、ヒノキ板材と略す。) を用いて、ヒノキの幅はぎ積層材と同様の手順で作製した。薬剤3を用いてヒノキ板材を3層積層し、200mm × 200mm × 45mmの試験体を作製した。また、3種類の薬剤を用いて、厚さを変えたヒノキ板材を3層積層し、200mm × 200mm × 54mmの試験体を作製した。これらを各薬剤毎に2体ずつ作製し、23℃50%RH下で恒量になるまで養生した。

(2) 合板

ロータリーレースを用いて厚さ3mmに製造したスギ単板に、1.5倍に希釈した薬剤3を70hPaで1時間減圧、1.2MPaで1.5時間加圧して含浸した後、送風乾燥器内に入れ50℃で5日間乾燥させた。これらを17枚用いて前出のレゾルシノール・フェノール樹脂接着剤により単板を繊維方向に互いに直交させて積層した合板 (以下、スギ

合板と略す。) を、周囲を切り落として200mm × 200mm × 51mmに仕上げた。同様にして19層積層した厚さ57mmの試験体を作製した。スギ合板は厚さ毎に2体ずつ作製し、幅はぎ積層材と同様に23℃50%RH下で恒量になるまで養生した。

2.1.2 小型耐火試験機

(1) 作製

小型耐火試験機は、電気炭化炉 (外形寸法550 × 730 × 755 松内製作所 (株) 製M-45) の扉に約210mm × 210mmの開口部を設け、この開口部に図1に示すような金属製の外枠を取り付けた試験体をはめ込む構造とした。炉内の温度調整は、熱電対を炉内中央に1カ所、開口部中央に1カ所取り付け、データロガー (OMRONポータブルマルチロガー 形ZR-RX20) につないで10秒毎に炉内温度を観測し、標準加熱曲線と比較しながら加熱温度の設定を手動で行った。図2に試験体をセットした小型耐火試験機の全景を示す。

(2) 性能確認試験

建築基準法に基づく指定性能評価機関である一般財団法人日本建築総合試験所 (以下、日総試と略す。) で株式会社ヨコタニが実施した開発用簡易加熱試験と同一の材料の一部を小型耐火試験機の性能確認用の試験体に加工した。開発用簡易加熱試験は950mm × 950mmで行われ、今回の材料は、厚さ42mmおよび58mmのスギ材ならびにヒノキ材に、1.5倍に希釈した薬剤3を幅はぎ積層材と同様に加圧注入法で含浸し乾燥させた後、接着は行わず本ざね加工したものである。そこで、小型耐火試験機用の200mm × 200mmの試験体についても、このさねの部分が中央に存在するように加工し、厚さ42mmおよび58mmの試験体を得た。それぞれの樹種で厚さ毎に1体ずつ作製した。

2.1.3 発熱性試験

幅はぎ積層材と同様に1~3の薬剤を加圧注入し乾燥させたスギ板材を100mm (幅) × 100mm (長さ) × 18mm (厚さ) に加工したものを使用した。ヒノキの試験体も同様に作製し、100mm (幅) × 100mm (長さ) × 18mm (厚さ) に加工した。各薬剤毎にそれぞれ2体ずつ作製した。

2.2 方法

表1 試験に供した薬剤

薬剤1	水：リン酸二水素アンモニウム：ホウ酸：ホウ砂=100:40:24:6
薬剤2	水：リン酸二水素アンモニウム：ホウ酸：ホウ砂=100:40:20:10
薬剤3	グアニジンリン酸塩系不燃薬剤 (製品名: (株) ヨコタニ エフネン65S)

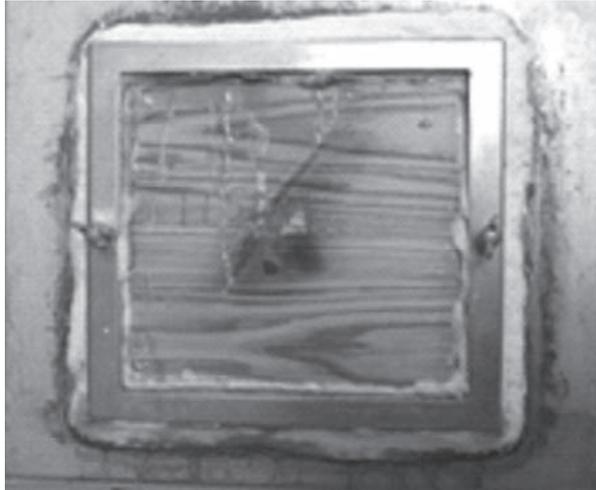


図1 試験体の設置状況



図2 小型耐火試験機

2.2.1 小型耐火試験機の性能確認試験

指定性能評価機関における耐火試験では、耐火炉に試験体を設置し、標準加熱曲線に従って要求耐火時間の加熱を行い、その後、要求耐火時間の3倍時間耐火炉に設置したまま放置し、試験体の変形や変形速度が合格基準に達するかどうかを評価する。木材ではさらに、燃えどまることが要求される。準耐火試験では、要求耐火時間の加熱のみで評価する。株式会社ヨコタニが日総試で実施した試験は壁の1時間準耐火試験であったため、この試験における試験体の温度変化と、小型耐火試験機での1時間加熱試験における試験体の温度変化を比較して、小型耐火試験機の性能を確認した。また、加熱後の炉内

温度については、上川らの小型耐火炉試験⁴⁾における実大炉内温度の温度変化と比較して、性能を確認した。

2.2.2 耐火試験

小型耐火試験機に試験体を設置して(図2)、熱電対を試験体の裏面中央と左下の2カ所に設置し、標準加熱曲線に沿って1時間加熱した後、電源を切った。その後試験体を扉に装着した状態で3時間放置した後、枠から試験体を外し、そのまま実験室内に放置した。試験開始から試験体を外すまでの間、試験体の裏面2カ所の温度をデータロガーで10秒毎に記録し、遮熱性を評価した。試験体を外した時点で試験体に残り火、発煙等が見られず、裏面温度が100℃前後まで下がっていれば、燃え止まりを確認したとみなした。実験終了後、目視により試験体を観察し、火炎が通る亀裂(燃え抜け)の有無を確認して遮熱性を評価した。

2.2.3 発熱性試験

発熱性試験は、独立行政法人産業技術総合研究所中部センター所有のコーンカロリメータ装置((株)東洋精機製作所製 コーンカロリメータⅢ)を使用して行った。作製したスギ板材およびヒノキ板材をコーンカロリメータ装置で20分間加熱し、その間の総発熱量と瞬間発熱速度を測定した。加熱終了後、試験体の収縮や亀裂の有無について目視で確認した。

3 結果と考察

3.1 小型耐火試験機の性能確認

小型耐火試験機の加熱時における炉内の温度変化を、図3に示す。500℃までの加熱では、炉内温度の上昇が標準加熱曲線と比較して少し遅れたが、500℃以降については、標準加熱曲線に沿って炉内温度を上昇させることができた。標準加熱曲線では500℃に達する時間が約3分であることから、小型耐火試験機では、500℃に達

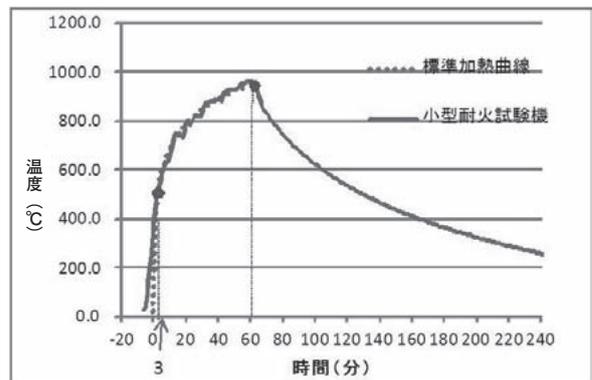


図3 小型耐火試験機の加熱時における炉内の温度変化

した時間から3分前を加熱開始時間として、そこから60分間手で標準加熱曲線に沿って炉内温度を上昇させることにより、ほぼ標準加熱曲線に沿った加熱が可能であることが確認された。

次に、日総試で実施した試験体と同一の試験体による耐火試験の結果を表2に示す。燃えぬけや裏面温度の変化は、両試験でほぼ同じ経過であった。また、放置時間の炉内温度については、上川ら⁴⁾の報告によると、加熱終了から180分が経過した時点で実大試験では約100℃まで下がるのに対し、小型耐火試験機では200~240℃であった。したがって、放置時間においては、実大試験よりも小型耐火試験機の方が炉内温度が高いため、燃えどまりにくい環境にあると考えられた。

3.2 耐火試験

3.2.1 幅はぎ積層材

指定性能評価機関が規定した1時間耐火壁(非耐力壁)

の耐火構造の認定基準(以下、耐火の基準と略す)では、試験体を1時間加熱した後3時間放置する間に、加熱裏面の最高温度が初期温度+180℃以下、平均温度が初期温度+140℃以下となること、かつ燃え抜けがないことが求められる。表3にスギ板材3層の幅はぎ積層材の結果を示す。また、図4にその裏面温度の経過を、図5に試験後の試験体の様子を示す。図4に示すように薬剤3で処理した幅はぎ積層材のみが裏面温度の基準を満たしたが、2体のうち1体で裏面に黒い変色部分が発生し「不合格」と判定した。したがって、厚さ15mmのスギ板材3層の幅はぎ積層材は、すべての薬剤において耐火の基準を満たさなかった。次に、表4にスギ板材4層の幅はぎ積層材の結果を示す。また、図6にその裏面温度の経過を示す。4層の幅はぎ積層材は、すべての薬剤において耐火の基準を満たした。表5にヒノキの幅はぎ積層材の結果を示す。また、図7にその裏面温度の経過を示す。

表2 性能確認試験

【日総試】								
樹種	厚さ (mm)	初期温度 (℃)	最高裏面温度 (℃)	認定基準との比較 (℃)	平均裏面温度 (℃)	認定基準との比較 (℃)	遮炎性	合否
スギ	42	16.0	218.0	-	×	-	×	×
スギ	58	15.0	53.0	-142.0	51.2	-103.8	○	○
ヒノキ	42	14.0	112.0	-82.0	92.4	-61.6	○	○
ヒノキ	58	15.0	50.0	-145.0	44.2	-110.8	○	○
【小型耐火試験機】								
樹種	厚さ (mm)	初期温度 (℃)	最高裏面温度 (℃)	認定基準との比較 (℃)	平均裏面温度 (℃)	認定基準との比較 (℃)	遮炎性	合否
スギ	42	23.8	205.7	-	×	-	×	×
スギ	58	22.8	51.7	-151.1	52.9	-109.9	○	○
ヒノキ	42	24.4	104.1	-100.3	97.7	-66.7	○	○
ヒノキ	58	30.8	65.2	-145.6	65.2	-105.6	○	○

※スギ42：60分以内に裏面中央から燃え抜け

※日総試のデータについては(株)ヨコタニ提供

※遮炎性 ○：変化なし △：黒い変色部分あり、亀裂 ×：燃え抜け

表3 幅はぎ積層材：スギ(15mm厚×積層数3, 厚さ45mm)の結果

試験体 No.	薬剤	初期温度 (℃)	最高裏面温度 (℃)	認定基準との比較 (℃)	平均裏面温度 (℃)	認定基準との比較 (℃)	遮炎性	合否
1	1	9.0	213.6	24.6	174.3	25.3	×	×
2	1	12.3	209.4	17.7	182.6	30.3	△	×
3	2	11.0	188.0	-3.0	170.2	19.2	△	×
4	2	15.1	184.4	-10.7	166.8	11.7	△	×
5	3	12.4	158.3	-34.1	144.5	-7.9	△	△
6	3	7.6	134.6	-53.0	135.6	-12.2	○	○

※遮炎性 ○：変化なし △：黒い変色部分あり、亀裂 ×：燃え抜け

表4 幅はぎ積層材：スギ (15mm厚×積層数4, 厚さ60mm) の結果

試験体 No.	薬剤	初期温度 (°C)	最高裏面温度 (°C)	認定基準との比較 (°C)	平均裏面温度 (°C)	認定基準との比較 (°C)	遮炎性	合否
1	1	11.9	91.9	-100.0	88.3	-63.6	○	○
2	1	15.4	99.6	-95.8	97.0	-58.4	○	○
3	2	16.4	107.8	-88.6	97.2	-59.2	○	○
4	2	18.0	119.0	-79.0	105.0	-53.0	○	○
5	3	21.6	95.6	-106.0	89.8	-71.8	○	○
6	3	21.0	95.9	-105.1	94.4	-66.6	○	○

※遮炎性 ○：変化なし △：黒い変色部分あり、亀裂 ×：燃え抜け

表5 幅はぎ積層材：ヒノキ (18もしくは15mm厚×積層数3,厚さ54mmもしくは45mm) の結果

試験体 No.	薬剤	厚さ (mm)	初期温度 (°C)	最高裏面温度 (°C)	認定基準との比較 (°C)	平均裏面温度 (°C)	認定基準との比較 (°C)	遮炎性	合否
1	1	54	22.0	127.3	-74.7	121.8	-40.2	○	○
2	1	54	23.1	135.7	-67.4	116.7	-46.4	○	○
3	2	54	23.2	149.5	-53.7	133.1	-30.1	○	○
4	2	54	21.5	141.8	-59.7	130.2	-31.3	○	○
5	3	54	4.3	89.0	-95.3	88.1	-56.0	○	○
6	3	54	9.7	92.7	-97.0	88.0	-61.7	○	○
7	3	45	6.9	132.5	-54.4	124.7	-22.2	△	△
8	3	45	9.1	133.2	-55.9	125.3	-23.8	○	○

※遮炎性 ○：変化なし △：黒い変色部分あり、亀裂 ×：燃え抜け

薬剤3で処理した厚さ15mmのヒノキ板材3層の幅はぎ積層材は、裏面温度の基準を満たしたが、2体のうち1体で裏面に黒く変色した部分が発生したため、「不合格」と判定した。厚さ18mmのヒノキ板材3層の幅はぎ積層材は、すべての薬剤の試験体において耐火の基準を満たした。

3.2.2 合板

表6にスギ合板の結果を、図8に裏面温度の経過を示す。19層積層した合板が耐火の基準を満たした。17層積層した合板は、裏面温度の基準は満たしたが、2体のう

ち1体の試験体の裏面に小さな亀裂が多数入って薬剤が噴き出したため、「不合格」と判定した。図9に19層の合板を、試験終了後、中央部で切断した断面を示す。炭化は16層目まで進行しており、17層の結果とあわせると、合板では炭化のラインがこの2層の間にあるため、17層では十分な耐火性能を得ることができないと考えられる。

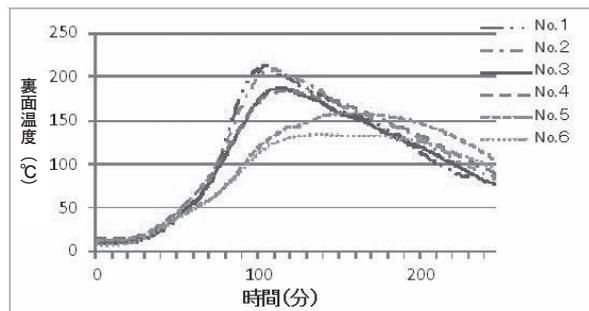


図4 幅はぎ積層材：スギ(積層数3) の裏面温度の変化



図5 耐火試験後の試験体(表3 No1)

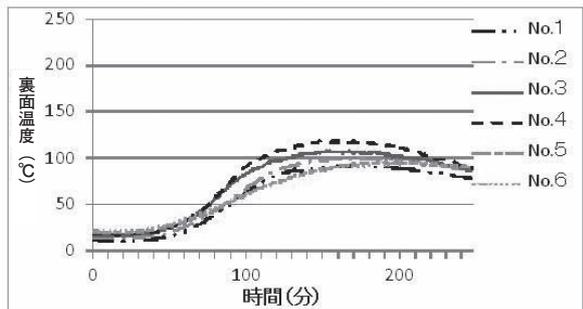


図6 幅はぎ積層材：スギ(積層数4)の裏面温度の変化

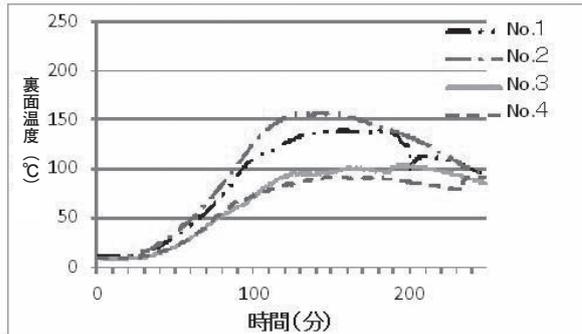


図8 スギ合板の裏面温度の変化

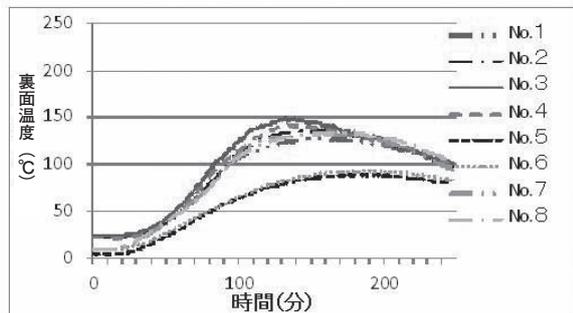


図7 幅はぎ積層材：ヒノキ(積層数3)の裏面温度の変化

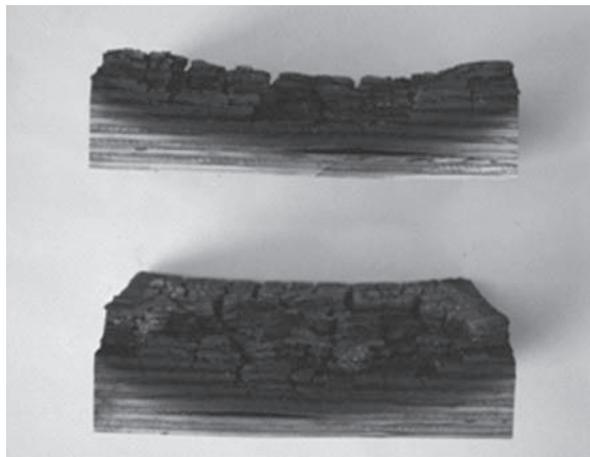


図9 19層接着した合板の試験後の断面(表5 No3)

表6 スギ合板の結果(単板厚さ3mm)

試験体 No.	薬剤	厚さ (mm)	初期温度 (°C)	最高裏面温度 (°C)	認定基準との比較 (°C)	平均裏面温度 (°C)	認定基準との比較 (°C)	遮炎性	合否
1	17	51	10.2	139.3	-50.9	127.7	-22.5	○	○
2	17	51	9.4	157.1	-32.3	138.5	-10.9	△	△
3	19	57	7.6	103.5	-84.1	104.0	-43.6	○	○
4	19	57	9.2	92.6	-96.6	106.6	-42.6	○	○

※遮炎性 ○：変化なし △：黒い変色部分あり、亀裂 ×：燃え抜け

表7 発熱性試験の結果

樹種	試験体 No.	薬剤	総発熱量 (MJ/m ²)	最大発熱速度 (kw/m ²)	収縮率 (%)	樹種	試験体 No.	薬剤	総発熱量 (MJ/m ²)	最大発熱速度 (kw/m ²)	収縮率 (%)
スギ	1	1	3.65	4.78	3.4	ヒノキ	1	1	0.87	2.98	3.2
	2	1	2.98	4.67	3.6		2	1	4.05	4.75	2.9
	3	2	2.13	3.65	2.9		3	2	2.70	4.34	3.6
	4	2	2.37	3.89	3.2		4	2	2.68	3.65	2.1
	5	3	3.34	4.72	0.4		5	3	1.90	2.97	0.3
	6	3	5.04	8.16	0.3		6	3	5.64	7.09	0.1

※遮炎性 ○：変化なし △：黒い変色部分あり、亀裂 ×：燃え抜け

3.3 発熱性試験

発熱性試験の結果を表7に示す。不燃材料の認定基準は、20分間加熱中に瞬間発熱速度は $200\text{kW}/\text{m}^2$ 以下、総発熱量が $8\text{MJ}/\text{m}^2$ 以下であるが、全ての試験体においてこの基準を下回った。試験体に亀裂は見られず、収縮も基準である5%を下回った。

4. まとめ

数多くの材料からより性能の良い材料を見つけるために、電気炭化炉を改造した小型耐火試験機で、標準加熱曲線を再現することにより、小さな試験体での耐火試験が可能であることがわかった。この小型耐火試験機を使用して行った耐火試験の結果、3種類の不燃薬剤を加圧注入した厚さ15mmのスギ板材を4層積層した厚さ60mm厚の試験体と、厚さ18mmのヒノキ板材を3層積層した厚さ54mmの試験体が耐火の基準を満たした。スギ合板については、希釈した薬剤3を加圧注入した単板を19層積層した厚さ57mmの試験体が耐火の基準を満たした。薬剤間の違いはなかった。また、幅はぎ積層材に用いたスギ板材およびヒノキ板材を用いてコーンカロリメータ法による発熱性試験を行った結果、3種類の薬剤とも不燃材料の発熱性試験における認定基準を満たした。

謝 辞

コーンカロリメータ装置による発熱性試験を実施するにあたりご指導賜りました、独立行政法人産業技術総合研究所中部センター 金山公三氏、三木恒久氏に対し、感謝いたします。

引用文献

- 1) 平野陽子：木造の耐火・準耐火建築物の現状. 住宅と木材 35 (6), P18-P31, (2011)
- 2) 伊藤貴文：木質材料用不燃化薬剤およびその製造方法. 特許第4445991号 (2007.11.5出願 2010.1.22登録)
- 3) 伊藤貴文, (独) 産業技術総合研究所, (株) ヨコタニ：木質材料用不燃化薬剤、この木質材料用不燃化薬剤の製造方法、この木質材料用不燃化薬剤を用いた木質材料の不燃化方法および不燃化木質材料. 特願2009-005578特開2010-162727.
- 4) 上川大輔, 原田寿郎, 服部順昭, 安藤恵介, 宮本圭一, 抱 憲誓, 西村光太, 宮林正幸：荷重支持部の周囲に難燃薬剤処理木材を配置した耐火集成材の開発－燃え止まり性能に対する部材内部のネジ・木栓および目地の影響－. 木材工業67 (7), 296-301 (2012)
(2013年4月19日受理)