

耐火木造を実現する新しい耐火工法の検討

Study on New Fireproof Construction Method to Realize Fireproof Wooden Construction

抱 憲 誓 久保田 淳

要 約

国内では、脱炭素社会に向けた環境建築の創出、森林資源の有効活用や炭素固定化による CO₂ 削減などを目的とし、木材利用が促進されている。このような状況下で、建物規模が大きくなると耐火構造が求められるため、可燃物である木材で耐火性能を実現する様々な研究が行われている。我々は、1 時間耐火構造を目指して国産スギ材およびカラマツ材を利用した純木質耐火集成材を開発した。純木質耐火集成材は、構造的に荷重を支持する荷重支持部、火災時の耐火被覆となる燃え止まり層、表面の化粧材で構成している。燃え止まり層には、インサイジング処理を行って難燃処理薬剤を注入しているが、インサイジング費用や薬剤の費用のため製造コストが高価となる。そこで本研究では、被覆材を含めて木材を利用し安価な耐火部材を実現するために、鉄骨部材で使用されている耐火塗料を利用して可能性を確認したので報告する。

目 次

- I. はじめに
- II. コーンカロリメータ試験
- III. 小型耐火炉を用いた加熱試験
- IV. おわりに

I. はじめに

国内では、脱炭素社会に向けた環境建築の創出、森林資源の有効活用や炭素固定化による CO₂ 削減などを目的とし、木材利用が促進されている。内装材や構造体への木材利用が進んでいるが、防火地域や準防火地域では、建物規模が大きくなると耐火構造が求められるため、可燃物である木材で耐火性能を実現する様々な研究が行われている。木部材の周囲を石膏ボードなどの不燃材で覆ったり、熱容量が高い材料を配したりして温度上昇を抑制する対策が採られている¹⁾。

我々は、1 時間耐火構造を目指して国産スギ材およびカラマツ材を利用した純木質耐火集成材を開発した²⁾。純木質耐火集成材は、Fig.1 に示すように、構造的に荷重を支持する荷重支持部、火災時の耐火被覆となる燃え止まり層、表面の化粧材で構成している。燃え止まり層は、インサイジング処理を行って難燃処理薬剤を注入しているが、インサイジング費用や薬剤の費用のため製造コストが高価となる。

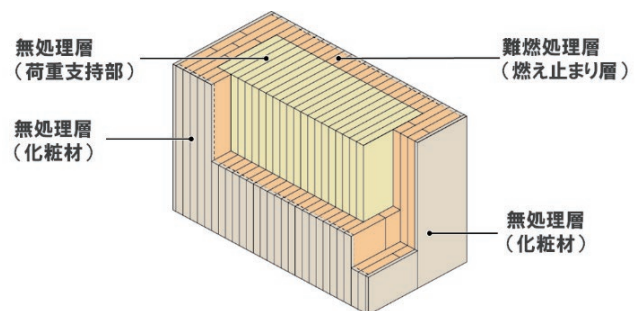


Fig.1 耐火集成材の断面構成

(Cross-sectional Structure of Fire-preventive Glued Laminated Timber)

そこで本研究では、木造の床部材を対象として、鉄骨部材に用いる耐火塗料を活用して、被覆材に木材を利用した薄い耐火被覆の実現性を確認したので報告する。

II. コーンカロリメータ試験

鉄骨部材用の耐火塗料は、高温に暴露されることで発泡した炭化層が断熱効果を発揮し、鉄骨部材の温度上昇を抑制する。木材についても同様の効果が発揮されるか確認するため、コーンカロリメータ試験装置を用いて一定の放射熱流束下で加熱試験を行い、発熱速度や木板の裏面温度を計測した。

キーワード：木造，耐火，耐火塗料，燃え止まり，カラマツ，コーンカロリメータ試験

Keywords：timber construction, fire proof, fire proof paint, non-spread of fire, larch, cone calorimeter test

1. 試験体

試験体は概ねの寸法が、厚さ 20mm, 100×100mm 角のカラマツ木板で、木板表面に塗布する耐火塗料の厚さを 0, 0.3, 0.6, 1mm とした。試験体の一覧を Table 1 に示す。塗料を含めた質量は約 110g～120g であり、密度は約 530kg/m³～630kg/m³ で、結果的に耐火塗料を塗装しない試験体の密度が大きくなった。木板は、室温 23℃, 湿度 50%の恒温槽で1カ月以上養生し、質量が安定した段階で試験を行った。木板の裏面には、温度計測用の K 型ディスク熱電対を設置した。熱電対の設置状況を Photo 1 に示す。試験体は、木板をアルミホイルで覆い試験体フォルダに格納した (Photo 2)。

2. 試験方法

東洋精機製作所製のコーンカロリメータ試験装置 (C4) を用い、放射熱流束 50kW/m² の加熱強度で 30 分間の試験を行った。発熱速度 (1 秒あたりに発生する発熱量) および木板の裏面温度を 1 秒間隔で計測した。試験後には木材の裏面の状態を目視で確認した。

3. 試験結果

(1) 発熱速度の経時変化

各試験体の発熱速度の経時変化を Fig.2 に示す。同一条件で 2 回試験を行ったため、実線と破線で計測値を示した。

試験体 No.1, No.2 の耐火塗料を塗布していないカラマツだけが燃焼すると、試験開始直後に発熱速度は 150～180kW/m² に達し (第一ピーク)、少し発熱速度が減少した状態で燃焼が続き、木板裏面まで炎が到達するタイミングで第二ピークを示して燃え尽きに向かう。一方、表面に耐火塗料を塗布した試験体 (No.3～No.8) では、試験開始直後に耐火塗料が無い試験体 (No.1, No.2) と同様に第一ピーク (100kW/m² 程度) を示すが、表面に発泡した断熱層が形成されると発熱速度が 0 付近まで低下する。その後、徐々に発熱速度が増加するが、これは耐火塗料の下の木板が緩やかに燃焼を始めるためと考えられる。

塗膜厚の影響に着目すると、おおむね厚さに応じて発熱速度は抑制されており、30 分間の測定では耐火塗料を 1mm 程度付加することで、燃焼抑制効果が確認できた。

(2) 裏面温度の経時変化

木板裏面の温度の経時変化を Fig.3 に示す。発熱速度の結果と同様に、試験結果を実線と破線で示した。

カラマツのみの試験体 (No.1, No.2) と耐火塗料を塗布した試験体 (No.3～No.8) で差異がみられた。Fig.3 中に木材の火災危険温度 260℃を示したが、カラマツのみの試験体 (No.1, No.2) は約 1080 秒で 260℃に達している。一方、耐火塗料を塗布した試験体 (No.3～No.8) では温度上昇が抑制されており、耐火塗料を 1mm 塗布した試験体 (No.7, No.8) では、30 分間の計測中には 260℃に達することはなかった。Photo 3 は試験終了後の試験体 No.7 の裏面の状態で、裏面は炭化せず

Table 1 試験体一覧
(List of Specimen for Cone Calorimeter Test)

No.	塗膜厚 [mm]	質量 [g]	密度 [kg/m ³]
1	—	123.88	624
2	—	122.73	618
3	0.3	111.81	559
4	0.3	109.21	546
5	0.6	120.57	603
6	0.6	120.11	601
7	1	120.02	600
8	1	107.10	536

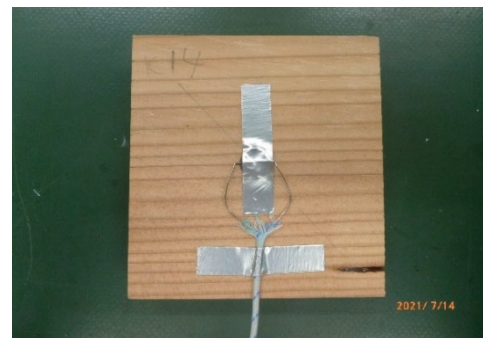


Photo 1 試験体の裏面温度測定
(Temperature Measurement on the Board Back)

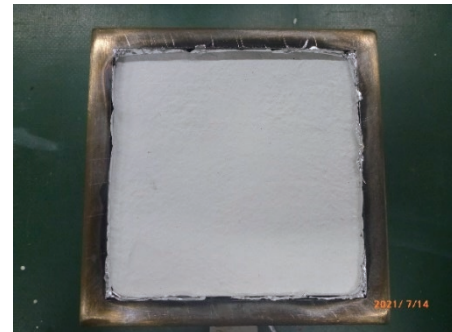


Photo 2 試験前の試験体
(Specimen Before Cone Calorimeter Test)

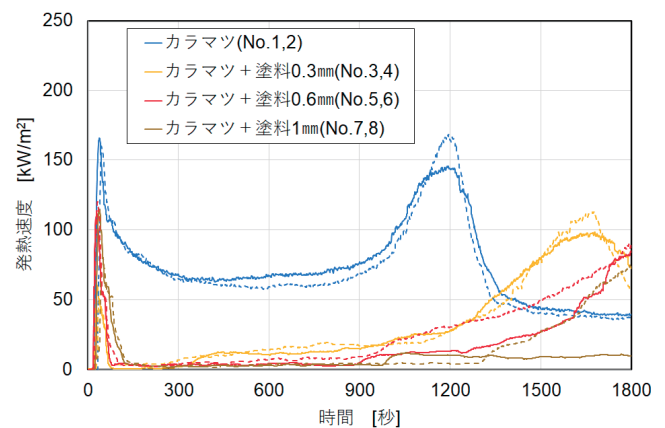


Fig.2 発熱速度の経時変化
(Time History of Heat Release Rate)

にカラマツが残存している。このことから、コーンカロリメータ試験の30分間の加熱では、耐火塗料1mmを塗布することで耐火性能を確保できる可能性が確認された。

Ⅲ. 小型耐火炉を用いた加熱試験

前節に記述したように、カラマツの木板20mmに耐火塗料1mmを塗布することで、コーンカロリメータ試験の30分間加熱に対して木板が残存することが確認できた。そこで、木造の床部材(直行集成板、以下CLTと示す)に耐火被覆として用いる木板の性能を確認するために、小型の耐火炉を用いて耐火試験を実施した。床部材に求められる耐火性能は、建物上部から4層が1時間耐火、5層以上は2時間耐火となる。

1. 試験体

コーンカロリメータ試験の結果より、1時間耐火の性能を発揮するために必要な木板厚さは40mm以上必要と考え、用意した試験体の板厚は50mm(640×640mm角)とした。試験体の一覧をTable 2に示す。木板表面に塗布する耐火塗料の厚さは、1時間耐火の試験体で0.5mm(No.2)、1.0mm(No.3)、1.5mm(No.4)、2時間耐火の試験体で1.5mm(No.5)と2mm(No.6)とした。木板の非加熱面側には、コーンカロリメータ試験と同様に、K型ディスク熱電対を5点設置した。また、耐火塗料を塗装しない試験体(No.1)も用意した。

Table 2 試験体一覧
(List of Specimen for Heating Test)

No.	加熱時間 [時間]	塗膜厚 [mm]	木板密度 [kg/m ³]	含水率 [%]
1	1	—	477	9.7
2	1	0.5	492	14.5
3	1	1.0	488	12.1
4	1	1.5	479	11.0
5	2	1.5	504	11.6
6	2	2	512	12.1

2. 試験方法

有効加熱範囲 H: 1000mm×W: 2000mm の小型耐火炉にケイ酸カルシウム板で構築した断熱箱を取り付け、板材を下側から加熱できる装置を使用した。各試験体の有効加熱範囲は520mm×600mmとなる。試験体を加熱装置に平置きして設置した状況をPhoto 4に示す。

試験は、ISO 834 曲線に従って加熱を行い、全ての裏面温度が下降、および炉内に残火がないことを確認して計測を終了した。試験後には、脱炉して加熱面の観察を行うとともに、木板を切断して残存断面の状態を確認した。

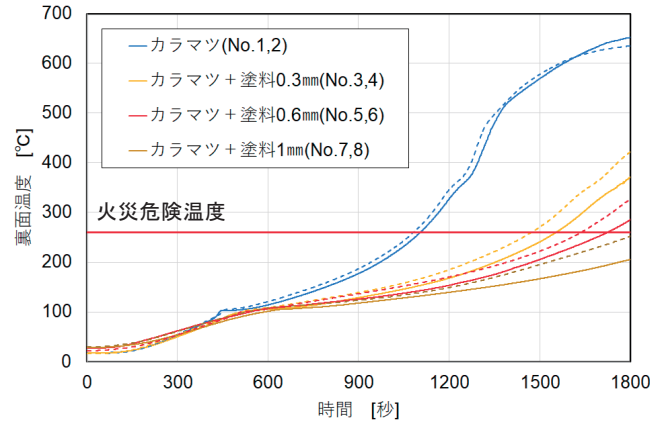


Fig.3 裏面温度の経時変化
(Time History of Temperature of Board Back)



Photo 3 試験後の裏面状況, No.7
(Back Side Condition after Cone Calorimeter Test, No.7)



Photo 4 加熱試験の裏面状況
(Test Situation of Heating Test)

3. 試験結果

(1) 加熱曲線

炉内温度の経時変化の一例をFig.4に示す。使用した小型耐火炉は、4基のバーナーを手動で制御する装置であるが、加熱がISO 834 曲線に従って行えたことがわかる。

(2) 無耐火被覆のカラマツの燃焼

耐火被覆を行わずに1時間の加熱を行い脱炉した試験体No.1の状況をPhoto 5に示す。裏面まで炭化が進み燃え止まらず、表面に耐火被覆を施さない木材は、厚さを確保しても耐火構造として採用できないことを再確認した。

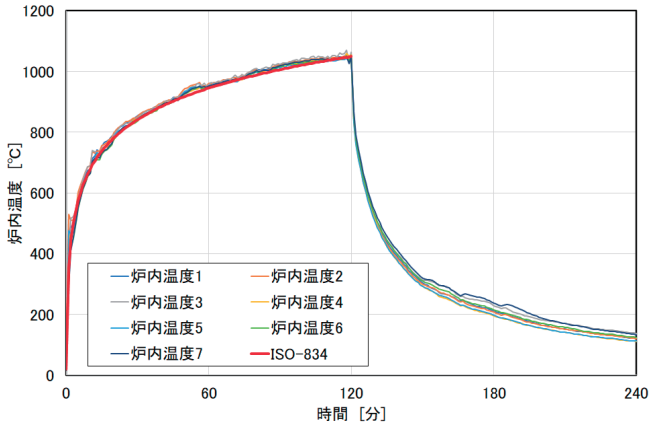


Fig.4 炉内温度の経時変化
(Time History of Heating Temperature)

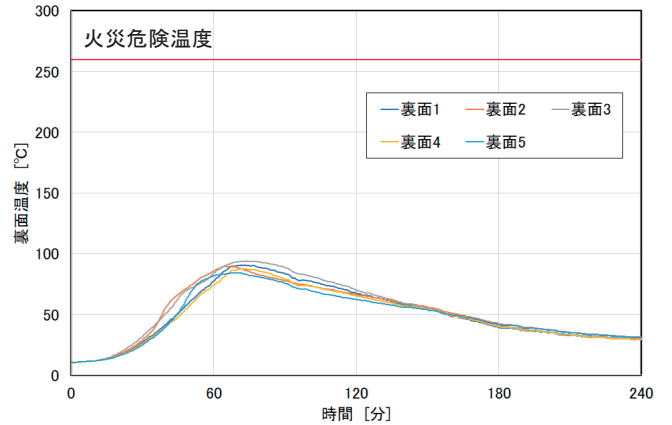


Fig.5 裏面温度の経時変化, No.2
(Time History of Temperature of Board Back, No.2)



Photo 5 加熱試験後のカラマツ板, No.1
(Larch Board after Heating Test, No.1)



Photo 6 加熱試験後の残存厚さ, No.2
(Residual Thickness After Heating Test, No.2)

(3) 1時間耐火仕様の耐火試験

試験体 No.2 の裏面温度の経時変化を一例として Fig.5 に示す。耐火塗料厚 0.5mm の試験体 No.2 は、加熱終了後の 80 分に最高温度 100°C に達し、その後裏面温度は下降して再度上昇することはなかった。また、5 点の計測点で裏面温度の差は小さく、火災危険温度の 260°C を十分下回る結果となった。試験後に切断して断面を確認したが、健全なカラマツが残存したことが確認できた。試験後の切断断面を Photo 6 に示すが、健全な部位が 15mm 残存した。計測点の間で裏面温度に差がなかったため、試験体 No.2~No.4 の各試験体で平均温度を算出し Fig.6 に示す。Fig.6 からわかるように、耐火塗料の厚さに応じて裏面の温度上昇が抑制され、塗膜厚 0.5mm (No.2) と 1mm (No.3) に比べて 1.5mm (No.4) は最高温度が約 20°C 低くなった。一方で、塗膜厚 0.5mm でも火災危険温度より十分低温となった。1 時間加熱の塗膜厚と残存厚の関係を Table 3 に示す。以上より必要な仕様は、塗膜厚 0.5mm とすると、木板 50mm のうち 15mm 残存したため、木板厚 35mm とした。

(4) 2時間耐火仕様の耐火試験

2 時間の加熱を実施した No.5 (塗膜厚 1.5mm) では、加熱停止後の放冷中に裏面まで炭化が進み、燃え止まりを実現できなかった。これは、加熱終了直前に全体的に温度上昇し、

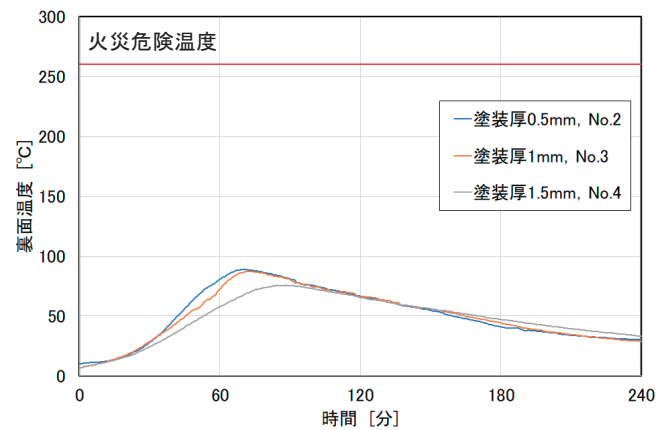


Fig.6 裏面温度の比較, No.2~No.4
(Comparison of Temperature of Board Back, No.2~No.4)

Table 3 塗膜厚と残存厚の関係
(Relationship between Coating Thickness and Residual Thickness)

No.	塗膜厚 [mm]	残存厚さ [mm]
2	0.5	15
3	1.0	20
4	1.5	30

その後温度計測点以外の場所で燃え抜けたため、一度降温した後再度温度上昇したことによると考えられる。試験後の試験体 No.5 の状態を Photo 7 に示す。部分的には木板が残存しているが、約半分が燃え抜けた。

塗膜厚 2mm の No.6 の裏面温度を Fig.7 に示す。最高温度が約 250℃まで昇温したものの、加熱停止後の放冷中を含めて燃え抜けはなく、燃え止まった。試験体 No.6 の脱炉後の加熱面を Photo 8 に、切断断面を Photo 9 に示す。木板表面は発泡した耐火塗料で覆われており、木板の燃焼が抑制されたと考えられる。また健全な木板は最も炭化した場所で 5mm 残った。以上より必要な仕様は、塗膜厚 2mm とすると、木板 50mm のうち 5mm が残存したため、木板厚 45mm とした。

(5) 既往の耐火仕様との比較

木造床を対象とした耐火被覆に着目すると、CLT の木板部材に不燃性の石膏ボードや難燃処理木材等で被覆することで耐火性能を付与している。

1 時間耐火仕様では強化石膏ボード 21mm+25mm で計 46mm の被覆が必要と報告されている^{3)・4)}。一方、2 時間耐火仕様では、強化石膏ボード 15mm×3 枚+けい酸カルシウム板 15mm (計 60mm) や難燃処理木材 90mm+化粧材 10mm (計 100mm) の被覆が必要と報告されている^{5)・6)}。

そこで、今回の試験結果と既往の知見の比較を Table 4 に示す。1 時間耐火および 2 時間耐火仕様とも、被覆厚は過去の被覆仕様よりも薄いことがわかる。また、質量比に関しても、既往の仕様に比べて半分程度となった。

被覆厚が薄くなることで階高のスペースを有効利用できること、また質量が小さいことから躯体全体を軽量化できる可能性が確認でき、有意な知見が得られた。

Table 4 試験結果と既往の知見の比較
(Relationship between Test Result and Reference Result)

耐火時間	被覆仕様	質量比
1 時間	強化石膏ボード 46mm	2.0
	木板+塗装 35.5mm	1
2 時間	強化石膏ボード等 60mm	1.6
	難燃処理木材 100mm	2.1
	木板+塗装 47mm	1



Photo 7 加熱試験後のカラマツ板, No.5
(Larch Board after Heating Test, No.5)

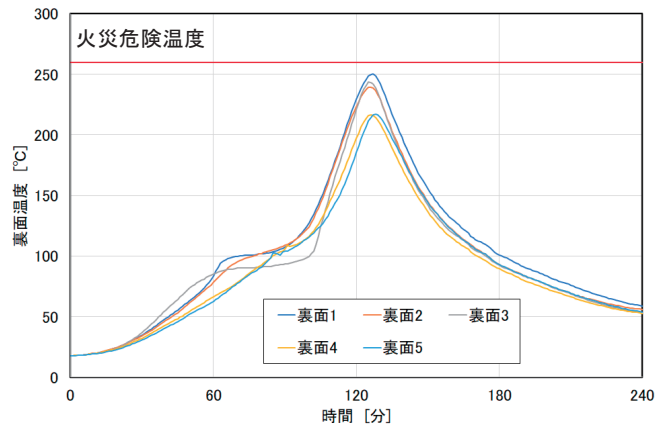


Fig.7 裏面温度の経時変化, No.6
(Time History of Temperature of Board Back, No.6)

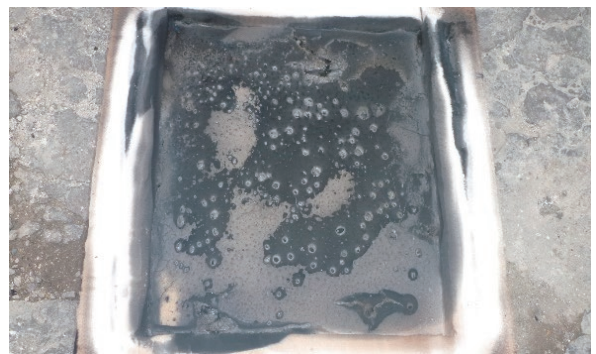


Photo 8 加熱試験後の加熱面, No.6
(Residual Thickness after Heating Test, No.6)



Photo 9 加熱試験後の残存厚さ, No.6
(Residual Thickness after Heating Test, No.6)

IV. おわりに

木造床を対象として、耐火被覆材に木材と耐火塗料を使用する仕様を検討し、コーンカロリメータ試験や小規模加熱試験を行い、以下の知見を得た。

- ①木板 20mm で 30 分間のコーンカロリメータ試験を行った結果、木板表面に耐火塗料を付加することで燃え抜けを実現できる可能性を確認した。裏面温度は耐火塗料 1mm の厚みで 260℃未満となった。

- ②小規模加熱試験では、ISO 834 の加熱曲線で加熱を行い放冷を含めて耐火性能を有するか確認した。1 時間耐火仕様では木板 35mm に耐火塗料を 0.5mm 塗る仕様で、2 時間耐火仕様では木板 45mm に耐火塗料を 2mm 塗る仕様で燃え止まりを確認した。
- ③過去に報告されている木造床の耐火被覆仕様と今回の知見を比較すると、1 時間耐火仕様で約 10mm、2 時間耐火仕様で約 13mm の被覆厚を薄くできる可能性が確認できた。また、被覆材には主に木材を使用しているため、木材使用量を多くすることができる。小規模加熱試験結果をもとに、今後はスケールアップした試験体で載荷加熱試験を実施し、耐火性能を確認する予定である。
- 参考文献**
- 1) 大橋宏和ほか；耐火木造部材の荷重支持部の木材密度が耐火性能に与える影響，日本建築学会技術報告集，第 21 巻，第 47 号，2015，pp.151-156.
 - 2) 抱 憲誓ほか；断面構成が異なる耐火集成材柱の燃焼特性，日本建築学会技術報告集，第 22 巻，第 52 号，2016，pp.997-1002.
 - 3) 大橋宏和ほか；耐火木造部材の耐火性能に関する研究 その 13 はり部材と CLT 床部材間の 1 時間耐火性能の検証，日本建築学会大会学術講演梗概集，2019.9，pp.219-220.
 - 4) 上川大輔ほか；耐火集成材（難燃処理木材被覆型）と無機被覆型 CLT 床との取り合い部の火災安全性の検証，日本建築学会大会学術講演梗概集，2019.9，pp.215-216.
 - 5) 中西隆ほか；CLT パネルを用いた 2 時間床耐火構造の開発 その 3 上面加熱試験，日本建築学会大会学術講演梗概集，2016.8，pp.177-178.
 - 6) 原田寿郎ほか；難燃処理木質パネルで被覆した CLT 床の 2 時間耐火加熱試験結果，日本建築学会大会学術講演梗概集，2018.9，pp.273-274.

Study on New Fireproof Construction Method to Realize Fireproof Wooden Construction

Norichika Kakae and Jun Kubota

In Japan, the use of wood is being promoted for the purpose of creating environmentally-friendly buildings for a carbon-free society, utilizing forest resources effectively, and reducing CO₂ by immobilizing carbon. Under such circumstances, as the scale of buildings increases, a fireproof structure is required, so various studies are being conducted to achieve satisfactory fireproof performance with combustible wood. We developed a pure-wood fireproof laminated material using cedar wood and pine wood for a one-hour fireproof structure. The material is composed of a load support part that structurally supports the load, a burnout layer that serves as a fireproof coating in the event of a fire, and a decorative material on the surface.

In this study, we confirmed the possibility of using fire-resistant paint used for steel frame members in order to create an inexpensive fire-resistant member by using wood including the covering material.