

燃え止まり型耐火集成材「燃エンウッド」

中高層木造建物の実現に向けた技術開発とその適用

花井厚周

気候変動対策, 脱炭素社会の実現のため, 循環型資源である木材を用いた中高層木造建物が, いま世界の潮流である。第二次世界大戦後, 日本では, 過去の大規模な火災の教訓から燃えないまちづくりが進められ, 住宅以外の木造建物が建てられない時期が続いた。しかし, 2000年の建築基準法の改正により, 耐火木造建築が建設可能となり, 今後, 日本においても, 中高層木造建築の増加が見込まれる。本稿では中高層木造建物の実現のために必要となる耐火集成材の開発の経緯と最新の耐火集成材技術および技術を適用した事例を紹介する。

キーワード: カーボンニュートラル, 気候変動対策, 脱炭素社会, SDGs, 耐火建築物, 耐火集成材, 3時間耐火, 木現し

1. はじめに

(1) 木造建築が世界の潮流

世界各地で中高層木造建築が建設され, 大きな潮流を生みだしている。循環型資源である木材はCO₂固定能力を有し, 気候変動対策・脱炭素社会・SDGs達成には欠かせない資源・材料である。この流れを受け, 日本でも中高層木造建築が注目を集めている。それは2050年カーボンニュートラルの実現へ向けた取組みのひとつであり, 日本の社会課題である森林荒廃・林業衰退に対するソリューションにもなる。日本の国土の2/3が森林であり, 戦後の拡大造林政策による植林が伐期を迎え, 国産木材需要の拡大が国の重要施策でもある。

(2) 日本の木造建築の変遷

かつて日本の建築物はほとんどが木造建物だった。

日本は数多くの大きな地震の発生する地域であり, また, 台風が多く発生する位置にあることから, 日本の都市部の木造建物は台風や, 関東大震災のような大地震, そして大地震後の大規模な火災などの天災により大きな被害を受けてきた(写真—1)。さらに, 第二次世界大戦の戦火により日本の都市部の木造建物の多くが消失した。

このような背景から, 火事にならないまちづくりを目指した建築基準法が1950年に作られた。これにより日本の都市部の多くは防火地域に指定され, 小規模

な建物以外は, 世界で他に類を見ない日本特有な耐火建築物が求められることとなった。その結果, 後述するが, 2000年に建築基準法が改正され, 木造でも耐火建築物として認められるようになるまでの50年間, 日本では小規模な住宅以外の木造建築を作ることができなくなった。

建築基準法の改正により, 柱・梁・壁・床・屋根・階段といった主要構造部は建物の最上階から数えた階数により表—1に示す耐火性能が必要となった。耐火性能の具体的な検証方法は, これらの主要構造部が要求される火災終了時間以降も部分的な焼失を生じず, 建物を支え続けられることを確認する手法となる。

すなわち, 日本の耐火建築物は通常の火災が終了するまでの間, 建物の倒壊や崩壊を許容しないことを求められる。



写真—1 関東大震災後の火災被害 (上野山から見た浅草方面)

表一 主要構造部の耐火要求性能

主要構造部	最上階から数えた階				
	~4階以内	5~9階	10~14階	15~19階以上	20階以上
耐力壁	120分				
柱	60分	90分	120分	150分	180分
梁				120分	
床				120分	
屋根	30分				
階段	30分				



写真一 日本最古の木造建築 法隆寺

2. 耐火集成材の開発

(1) 既往の耐火集成材の技術

写真一は日本最古の木造建築物である法隆寺を示す。

日本では古くから木造建物の構造部材を仕上材で覆うことなく、露出して使うことが多いため、私たち日本人は木質材料の本来持っている香り、温もりを感じられる空間を求めることが多い。このことから、日本では木質部材を使う場合は、できる限り、木を現して使うニーズが根強くある。

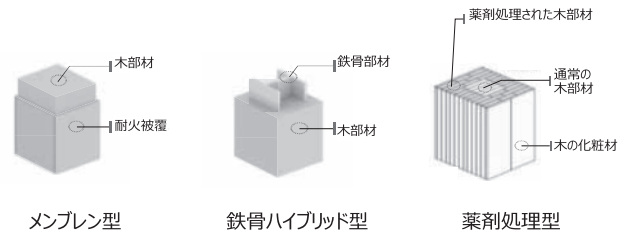
前述したが、日本では建物規模、用途により耐火建築物であることが建築基準法で求められるため、中高層木造建物の実現には耐火集成材の採用が必須となる。

耐火集成材の開発は2000年の建築基準法の改正を機に始まり、現在では多くの団体および企業が耐火集成材の技術を保有している¹⁾。それらの耐火集成材の技術を分類すると図一に示すように大きく3種類に分けられる。

一つはメンブレン型と呼ばれ、建物の重量を支える荷重支持部をせっこうなどの耐火被覆で覆う形式である。しかしこの技術では、木造部分が耐火被覆で見えなくなるので、木材を現すためには耐火被覆の外に木質の仕上材を取り付けなければならない。

その他の耐火技術としては鉄骨ハイブリッド型がある。この技術は建物を支える鉄骨部材の外側に鉄骨部材の耐火被覆の代わりに木材を配置するものである。建物の重量を支える部材が鉄骨部材となるため、木造ではなく通常の鉄骨造として設計することとなる。

最後は薬剤処理型である。この技術は荷重支持部の外側に薬剤処理した集成材やLVL (Lamited Veneer Lumberの略 単板集成材を指す) 等の木質材料を取り付け、耐火層とするものである。



図一 耐火集成材の技術

(2) 耐火性能検証について

前述の2000年の建築基準法の改正では、木造建物を耐火建築物とするための要求性能が明文化され、その要求性能に適合するか否かの確認方法が規定された。この要求性能は、以下の3つの項目となる。

- ①非損傷性 (火災終了後においても、建築物が倒壊してはならない)
- ②遮熱性 (非加熱面において可燃物が燃焼してはならない)
- ③遮炎性 (非加熱面へ亀裂等により火炎が生じてはならない)

これらの要求性能への適合を確認するにはルートA、ルートBおよびルートCと呼ばれる3つの方法がある。

ルートAは主要構造部に求められる要求性能を定められた試験方法で公的な試験場において耐火試験にて確認する方法である。

ルートBは建築基準法施行令108条の3および建設省告示第1433号に規定されている方法にて耐火性能を検証する方法である。

さらにルートCは前述の告示に示される方法以外の高度な専門知識により検証を行う方法である。

ここでは、ルートAにより耐火性能を確認する方法を説明する。耐火試験は図二に示すISO-834標準加熱温度曲線に従い、所定の载荷加熱を行う。加熱終了後、非加熱側温度が下降するまで炉内放置し、最

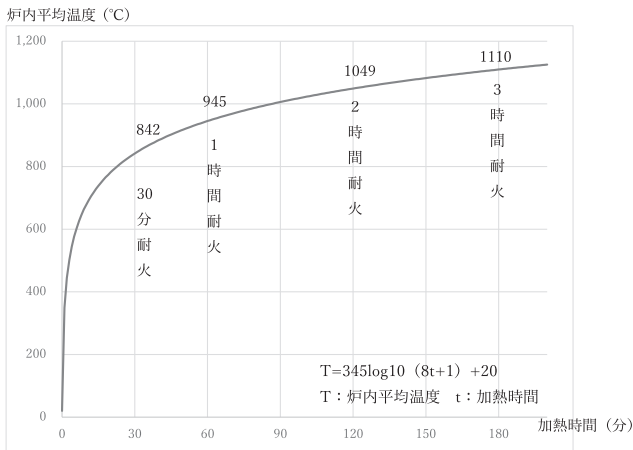


図-2 ISO-834 加熱温度曲線

最終的に要求性能を満足したかの判定を行う。

(3) 燃え止まり型耐火集成材の開発

弊社では、木造部材であることに拘り、かつ、木を現しで使える耐火集成材を目指し、2003年から前述の耐火集成材技術とは異なる「燃え止まり型」の耐火集成材の開発を始めた。

開発する「燃え止まり型」耐火集成材は、木を現しで使いながら、火災を燃え止まらせ、荷重支持部を健全に保つために3つの層の断面構成とした(図-3)。

最外層の「燃え代層」は、火災中に炭化することで、部材内部への入熱を抑制する。「燃え止まり層」は高い熱容量を持つ材料などで、燃え代層の熱を吸収し消火する。「荷重支持部」は火災中、及び火災終了後も木材の着火温度である260°C以下を保ち、建物荷重を安全に支持する。

図-4に耐火集成材「燃エンウッド」の断面構成を示す。

なお、「燃エンウッド」の命名は日本語の「燃えない」という言葉と、英語の「エンジニアリングウッド」を合わせた造語である。

「燃え代層」は現しの木材の適用範囲に幅を持たせるため、木材の樹種は問わず、製材、集成材、LVL、CLT (Closs Laminated Timber の略 直交集成材)を採用できるようにした。

「燃え止まり層」にはモルタルまたはせっこう系セルフレベリング材 (以下SL材と呼ぶ)とし、燃え代層と荷重支持部を結ぶ木材には比重の大きい木材であるカラマツに限定した。

「荷重支持部」には国産材に限定せず、外国の木材も採用できるように幅を持たせた仕様とした。

図-5に耐火集成材「燃エンウッド柱」の耐火試験の状況を示す。黒く燃え残っているのは燃え代層で

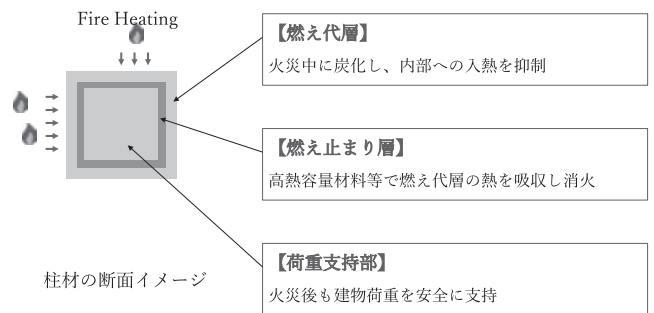


図-3 燃え止まり型耐火集成材の概念図

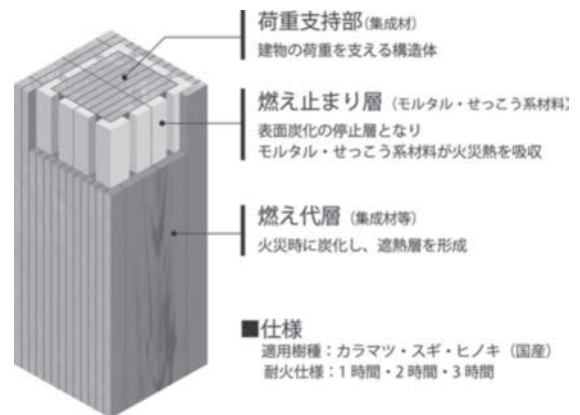


図-4 耐火集成材「燃エンウッド」の断面構成図

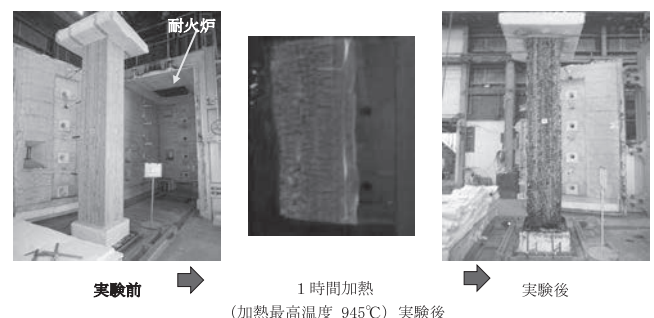


図-5 耐火集成材「燃エンウッド柱」耐火試験状況

あり、荷重支持部の温度は木材の燃焼・炭化温度260°Cに達していない。また、過度な変形も生じずに長期許容荷重を支持できたことから、耐火部材としての要求性能を満足したことが確認できた。

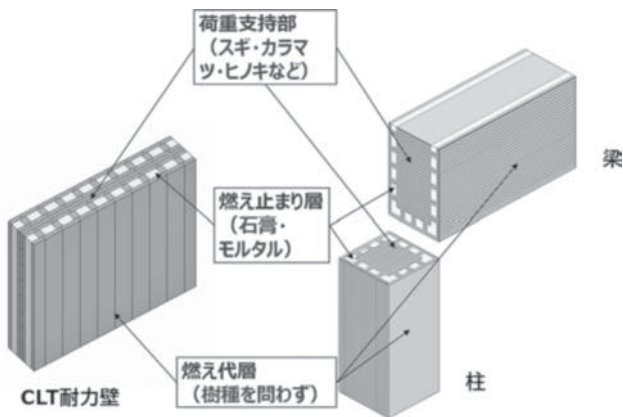
(4) 燃え止まり型耐火集成材「燃エンウッド」シリーズ

前述の開発により、燃え止まり型耐火集成材「燃エンウッド」は2013年の竣工プロジェクトからこれまでに21件の建物に適用してきた。(そのうち1件は施工中 2023年12月末時点)。2時間耐火の「燃エンウッド」では、建物の最上階から14層までを木造とする建物の建設に限られてきたが、さらに開発を進めることにより、図-6に示す主要構造部である柱、梁及び建物自重を支える耐力壁のラインナップを揃えるこ

とができた。表—2にこれらのラインナップの国土交通大臣の認定を取得している耐火時間と建築基準法に定める建物の最上階から数えた階数により求められる耐火性能の関係を示す。

燃エンウッドの柱と梁の3時間耐火認定の取得および燃エンウッド CLT 耐力壁の2時間耐火認定を取得したことで、建物の階数に制約なく木造建物を建設することが可能となった。

次章以降にて3時間耐火集成材「燃エンウッド」および「燃エンウッド CLT 耐力壁」の技術の概要とその適用事例を紹介する。



図—6 耐火集成材「燃エンウッド」ラインナップ

表—2 耐火集成材「燃エンウッド」と建築基準法の対応表

主要構造部	最上階から数えた階				
	～4階以内	5～9階	10～14階	15～19階以上	20階以上
耐力壁	耐火時間(上段:必要耐火時間 下段:耐火認定取得時間)				
	60分	90分	120分		
	120分				
柱・梁	60分	90分	120分	150分	180分
	60分	120分		180分	

3. 3時間耐火集成材の開発

(1) 技術概要

これまでの1時間および2時間耐火の「燃エンウッド」と同様、集成材による「荷重支持部」、せっこう系SL材とカラマツ集成材で構成された「燃え止まり層」、木材の「燃え代層」の3層で構成される耐火構造の木造部材(集成材)は変わらず、「燃え止まり層」と「燃え代層」の厚さを変えることで、3時間の耐火性能を保有させることとした。

さらに、近年、耐火集成材を建物外部に露出して配置したいというニーズがあるため、「燃え代層」の外側に下地を含めて取り外し可能な「外装材」を装着可能な仕様とした。

「荷重支持部」の集成材は国産の代表的な樹種だけでなく、海外の代表的な樹種も適用可能とした。

「燃え代層」は木材の樹種は問わず、製材、集成材、LVL、CLTのいずれも適用できる仕様とした。

「外装材」は建物外部に露出させることを想定し、耐候処理した木材でも適用可能とし、かつ、将来的、既存の「外装材」を取り外し、新規の「外装材」を取り付けられる仕様とした。図—7に3時間耐火集成材「燃エンウッド」の柱断面の構成を示す。

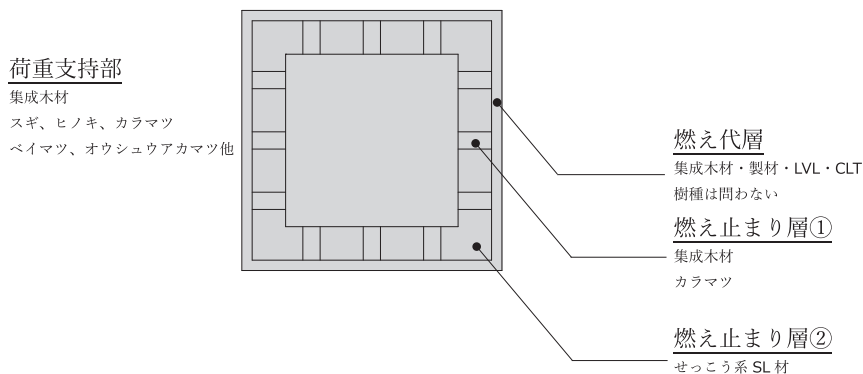
上記の仕様による耐火試験体を製作し、3時間耐火認定試験を受験することとした。

(2) 耐火試験結果

耐火認定試験は前述の耐火性能検証で述べた試験方法に従って行った。図—2に示すISO-834加熱温度曲線に従った3時間の荷重加熱試験の炉内最高温度は1,110℃に達し、これまでにない過酷な温度条件の試験となった。

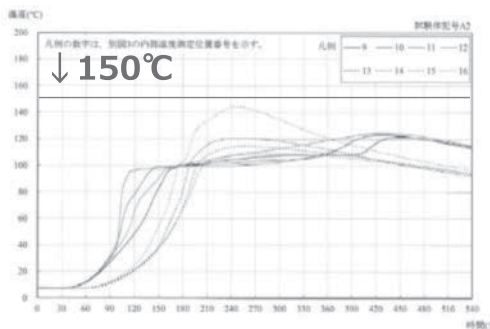
図—8に柱の3時間耐火認定試験における荷重支持部の温度-時間関係を示す。

加熱開始から40分程度は「燃え代層」の燃焼によ



図—7 3時間耐火集成材「燃エンウッド」の柱断面構成図

り荷重支持部の温度上昇は生じず、その後、「燃え代層」の消失により、「燃え止まり層」が直接、火に焙られることとなり、せっこう系SL材からの結晶水の脱水が始まる。荷重支持部の温度は加熱開始から100分程度で100℃に達し、その後、100分程度の100℃停滞期間を経て、荷重支持部の温度上昇が再開する。最高温度は加熱開始から約4時間後に150℃程度となり、荷重支持部の温度測定箇所すべての温度低下を確認し、試験を終了した。荷重支持部が燃焼・炭化温度の260℃を超えず、非損傷性が確認できたので、3時間



図一八 柱の3時間耐火認定試験における荷重支持部の温度-時間関係



写真一三 3時間耐火認定試験終了後の柱試験体

の耐火性能を有していると判断できた。写真一三に3時間耐火認定試験終了後の柱試験体を示す。

4. 耐火集成材「燃エンウッド CLT 耐力壁」の開発

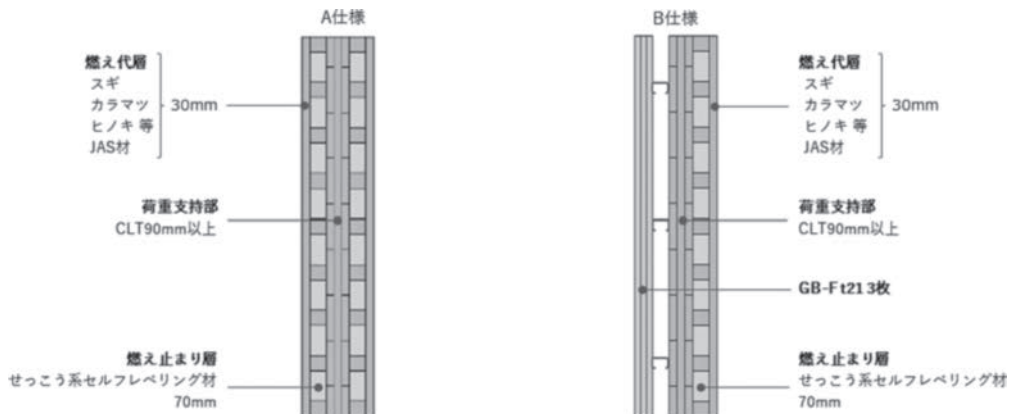
(1) 技術概要

柱、梁がなくCLTの壁と床で建物を構成するCLTパネル工法は2016年に建築基準法において告示化され、耐火建築物とならない低層建物を中心に普及が進んできた。しかし、近年の中高層木造市場の拡大に伴い、耐火建築物となる規模の建物においても、CLTパネル工法適用のニーズが生じてきた。このニーズに応えるため、建物の自重を支える耐力壁にも耐火性能を有した技術の確立が必要となった。なお、必要とする耐火性能は前述の表一に示す階数の制限のない2時間耐火性能に絞ることとした。

耐火集成材柱「燃エンウッド CLT 耐力壁」の「荷重支持部」はCLT壁とし、柱・梁の「燃エンウッド」と同様、「燃え止まり層」はせっこう系SL材とカラマツ集成材で構成し、「燃え代層」は木材とした3層の構成とした。

荷重支持部のCLTは厚さ90mm以上とし、「燃え代層」はスギ、ヒノキ、カラマツから樹種を選べるようにした。なお、柱と梁の耐火性能は2面加熱される荷重支持部の隅角部の温度で決定するが、壁の加熱面は1面となることから、「燃え止まり層」と「燃え代層」の厚さは柱及び梁の厚さよりも薄くすることとした。

CLTパネル工法を採用する建物の用途は、住宅、ホテル、寄宿舎などが多いため、耐火性能だけでなく住戸境壁として必要な遮音性能を有する必要がある。また、外壁としての止水性能と断熱性能も必要である。このため、2時間の耐火認定取得のほかに、遮音性能に関する大臣認定の取得も行うこととした。



図一九 「燃エンウッド CLT 耐力壁」遮音間仕切壁仕様

耐火認定試験は、遮音性能を確保できる間仕切壁の仕様および下地ごと取り換え可能な外壁仕様の2種類について実施し、それぞれ個別の耐火認定を取得することとした。図-9に燃エンウッドCLT耐力壁の遮音間仕切壁仕様を示す。

(2) 耐火試験結果^{2), 3)}

外壁仕様の「燃エンウッドCLT耐力壁」の2時間耐火試験結果を紹介する。

図-10に外壁仕様の2時間耐火試験体図を示す。試験体は2枚のCLT壁の接合部を有したものとし、耐火性能上、不利な状況を再現した。「荷重支持部」は厚さ90mmのCLT壁とし、その外側にカラマツ集成材およびせっこう系SL材を千鳥に配した厚さ70mmの「燃え止まり層」そして厚さ30mmのスギの「燃え代層」を設けた。さらにその外側に透湿防水シートを貼り、縦横の胴縁に木製外装材を取り付けた。なお、木製外装材は密度の小さな熱処理木材とした。CLT壁の接合部の耐火層は強化せっこうボードを4枚重ね張りとし、また、非加熱側(裏面)は揚重時の重量軽減、不利側の境界条件とするためAESウールで覆った。

加熱初期の20分から75分頃までは外装材のスギ熱処理木材や「燃え代層」のスギ集成材の燃焼の影響で、炉内温度が急激に上昇したが、それ以降は、図-2に示したISO-834加熱温度曲線にほぼ合致した。図-11に「荷重支持部」CLT壁の加熱側表面の温度を示す。CLT壁の表面温度は加熱開始から100分程度で100℃に達した。その後、60分程度の100℃停滞期間を経て、荷重支持部の温度上昇が再開する。最高温度

が130℃程度まで上昇したものの、木材の燃焼・炭化温度の260℃に比べ、十分低く推移しており、CLT壁の非損傷性を確認できた。試験終了後の試験体の状況を写真-4に示す。

(3) 適用事例

建築地の福岡は豊かな自然と穏やかな風土に恵まれ、魅力ある景観と快適な生活基盤、充実した都市機能がコンパクトに整った街であり、比較的密度な計画地は細かな路地や隙間をもったヒューマンスケールの街区である。将来にわたって福岡の都市環境を持続していくために、温暖化していく地球環境に向き合った環境負荷の小さい低炭素・循環型まちづくりの新たなモデルケースとして多世代が暮らす20室の社員寮を計画した。

1階は、サテライトオフィス・ギャラリー・寮生ラウンジを半屋外の土間を介して配置し、地域に接地する新たなワークスペースとギャラリーを計画した。

インテリアは燃エンウッドCLT耐力壁を仕上げとして見せる意匠とし、力強い木質空間を提供した。

表-3に建築概要、写真-5に建物外観、写真-6に居室内観を示す。

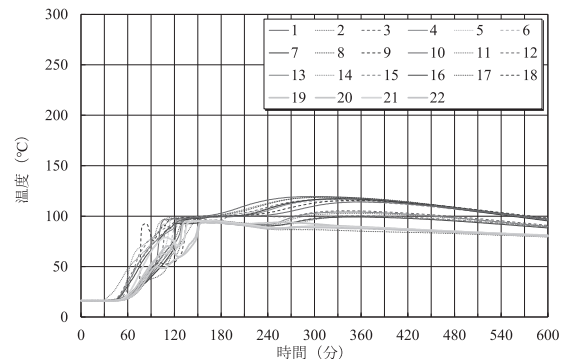


図-11 「荷重支持部」CLT壁の加熱側表面の温度

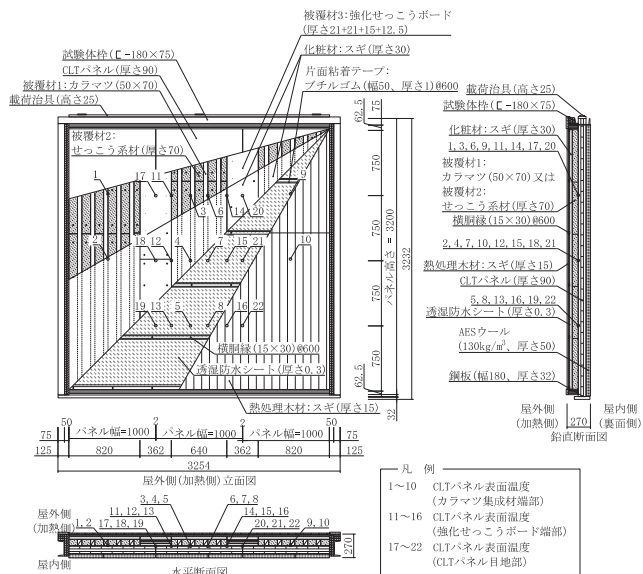


図-10 外壁仕様の2時間耐火試験体図

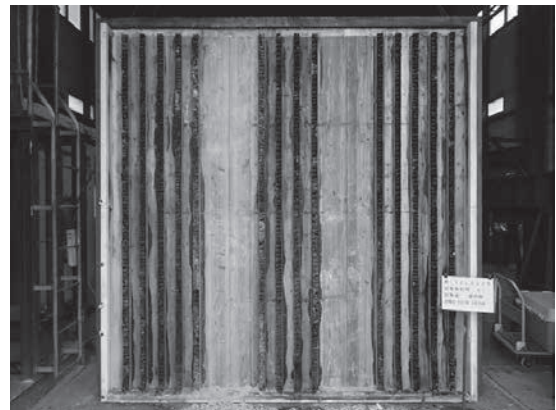


写真-4 耐火試験終了後の試験体状況

表-3 建築概要

建設地	福岡県中央区警固
設計・施工	(株)竹中工務店
用途	単身者用社宅 (20室)
階数	地上5階
	建築面積 186.1 m ²
	延床面積 919.7 m ²
	建物高さ 18.2 m
構造種別	CLT パネル工法 RC 造



写真-5 建物外観



写真-6 居室内観

5. おわりに

気候変動対策, サステナブル社会の実現そして2050年のカーボンニュートラルの実現に向け, また, 日本の社会課題である森林荒廃・林業衰退に対する解決策として木材需要の拡大を背景に, 今後, 日本でも中高層木造市場の拡大が予想される。中高層木造建築の実現には耐火集成材技術は必要不可欠であり, 今後の市場拡大に向け, 供給体制の充実を図るとともに原価低減活動が非常に重要となると考えている。

JICMA

《参考文献》

- 1) 住友林業(株): 建材マンスリー 2020年7月号, No657, https://sfc.jp/treecycle/mokuzai_distro/pdf/202007.pdf (参照日 2023年12月21日)
- 2) 大橋宏和, 他3名: 「耐火木造部材の耐火性能に関する研究 その18 CLT 間仕切壁(耐力壁)の2時間耐火性能」日本建築学会大会学術講演梗概集 日本建築学会 2022年9月
- 3) 花井厚周, 他3名: 「耐火木造部材の耐火性能に関する研究 その19 CLT 外壁(耐力壁)の2時間耐火性能」日本建築学会大会学術講演梗概集 日本建築学会 2022年9月

【筆者紹介】

花井 厚周 (はない あつなり)
 (株)竹中工務店
 木造・木質建築推進本部
 副本部長

