

難燃処理木材の白華確認試験

米丸 啓介 原 和泉
(技術研究所) (生産技術本部)

Efflorescence Confirmation Test of Flame-Retardant Wood

Keisuke Yonemaru and Izumi Hara

内装制限を受ける用途や規模等の建築物でも木材需要が高まっており、難燃処理木材の採用が増加傾向にある。従来の難燃処理木材は含浸させた難燃薬剤が高湿度環境下で潮解・白華する現象が問題となっており、薬剤を改良した白華しにくい難燃処理木材が開発されている。本報ではこれらの耐白華性能について、建築物の施工中に想定される降雨や高湿度環境を想定した実験室環境への暴露試験を実施し検証した結果をまとめる。

The demand for wood is increasing even in buildings whose purpose and size are subject to interior finishing design restrictions, and the use of flame-retardant wood is on the rise. Conventional flame-retardant wood has problems in that the impregnated chemical leaching and efflorescence in high-humidity environments, so flame-retardant wood with efflorescence resistant chemical has been developed. This report summarizes the results of verifying these efflorescence resistance properties by conducting exposure tests in a laboratory environment that simulates the rainfall and high humidity environments expected during construction of buildings.

1. はじめに

木材は成長過程で吸収した CO₂ を貯蔵しており、建築物に木材の利用を進めることは地球温暖化防止への貢献が期待できる。カーボンニュートラルに向けた社会の動きの中、近年では中・大規模建築への木材の利用が進み、各所で木質耐火構造の開発が進められている。内装用途についても、室内空間における木質材料が人に与える効果が研究される²⁾など、需要が高まっている。中・大規模建築においても、内装制限をクリアするために難燃処理木材の採用が増加傾向にある。従来の難燃処理木材は含浸させた難燃薬剤が高湿度環境下で潮解・白華する現象が問題となっている。また、難燃処理木材の防火性能は難燃薬剤の含浸量に依存していることから、薬剤が潮解し表面化すると木材中の薬剤量が減少し所期の防火性能を満たせなくなる可能性もある。これらを解決するために、薬剤を改良した白華しにくい難燃処理木材が開発され白華の程度に改善がみられる。しかし、現状では改良版の難燃処理木材であっても、メーカーによる差はあるが、高湿の空気に触れない場所で使用するよう注意書きがみられる場合が少なくない。建築物内装への適用を考えた場合、建物が竣工して

運用が開始されてしまえば内装材はメーカーが想定するような環境に置かれることになるが、建物の施工中には天候に応じた外気に触れることもあれば、雨水に直接濡れる可能性も否定できない。そこで、本研究では建物施工中を想定した実験室環境へ市販の難燃処理木材を暴露し、それらの白華による外観の変化や難燃薬剤の溶出による質量の変化について検証した。

2. 試験概要

2.1 使用材料

市販されている難燃処理木材の中から、難燃薬剤、防火性能、樹種、基材形態が異なる 5 種類 (A~E) を選定した。C 以外は白華を抑制するタイプの難燃薬剤が用いられている。5 種類の難燃処理木材の表面の塗装や厚みを変動因子として合計 14 種類を高湿試験と散水試験に供した。試験体一覧を表-1 に示す。試験体は市販されているそれぞれの難燃処理木材から 100mm 角の正方形に切り出した。保護塗装仕様のもは、No.12 以外は試験体の 6 面を塗装した。各難燃処理木材が保護塗装との組合せで防火材料の認定を取得している。保護塗装は難燃処理木

表-1 試験体一覧

No.	難燃処理木材 記号：難燃処理薬剤 -防火性能・樹種・形態	白華 抑制	厚さ (mm)	表面 塗装
1	A：リン酸グアニジン -不燃-すぎ・無垢材	○	15	無し
2			30	無し
3			15	造膜1
4			15	造膜2
5	B：リン酸グアニジン -不燃-ひのき・無垢材	○	15	無し
6			15	造膜1
7			15	造膜2
8	C：リン酸ホウ酸系 -不燃-すぎ・無垢材	×	15	無し
9			15	造膜1
10			15	造膜2
11	D：リン酸グアニジン -準不燃-すぎ・無垢材	○	15	無し
12			15	造膜3
13	E：ホウ酸系 -不燃-すぎ・集成材	○	15	無し
14			15	浸透

材に取り込まれる水分の抑制を期待した造膜系が中心で、ウレタン樹脂系（表-1 中の造膜 1、造膜 2）かアクリルウレタン樹脂系（造膜 3）の塗料である。このうち“造膜 2”は塗料自体が不燃材料の大臣認定を有している。浸透系塗料については米ぬか系油塗料（浸透）である。1仕様あたりの試験体数は高湿試験が3体、散水試験が2体である。

2.2 外気を想定した暴露試験（高湿試験）

外気を想定した暴露試験は、防火木材の耐久性を評価する北欧適合性評価機構の規格（NT FIRE054）³⁾の実験室環境を参考に実施した。まず、試験体を恒温恒湿槽（PR-4J；エスペック社製）内で 23℃・50%RH の環境に水平に暴露し状態調整（すべての試験片の 24 時間の質量変化率が 0.1%以下になるまで継続）を行い、初期質量を記録した。次に、槽内を高湿度環境にし、すべての試験片の 24 時間の質量変化率が 0.2%以下になるまで暴露を継続した。その後、試験体を 60℃に設定した乾燥炉（GPH-201；エスペック社製）に移し、72 時間乾燥させ、試験後の試験体の外観観察を行った。このうち、表面の変状（表面化した白華や変色）が見られた試験体については固く絞った布で拭き取り性の確認を行った。試験後の試験体の質量については、常時 20℃で空調されている試験室内で試験体を約 1 週間養生した後に測定した。恒温恒湿槽内の試験体の状況を写真-1 に示す。試験体から溶出し滴下する液体を受けるためのアルミニウム製バットを下に敷いた。



写真-1 恒温恒湿槽内の状況（高湿試験）

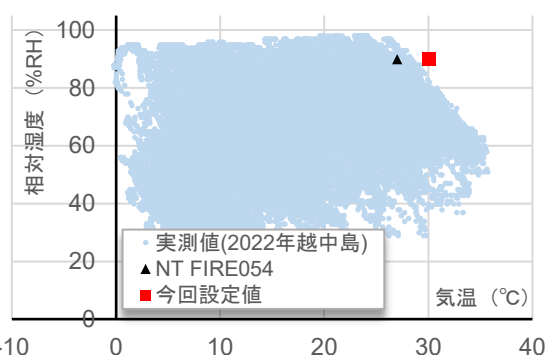


図-1 温湿度データ

高湿度環境については、NT FIRE054 では温湿度が 27℃・90%RH と設定されていたが、実測データをもとに独自の環境（30℃・90%RH）を設定した。図-1 に温湿度の実測データを示す。清水建設技術研究所の越中島暴露試験場で観測された屋外の気象データから抽出したものであり、横軸に気温、縦軸に相対湿度をとり 2022 年 1 年間の 10 分毎の値が●でプロットされている。図中に NT FIRE054 の高湿度環境である 27℃・90%RH を▲で示すが、これは実測データの点群の中にある。今回設定した 30℃・90%RH（■で示す）は点群の外にあり、観測地では経験できないやや厳しい高湿度環境である。

2.3 降雨を想定した暴露試験（散水試験）

難燃処理木材が輸送中や建物施工中での仮置きや外装ができるまでの間に受ける降雨の影響を想定した試験を行った。試験の条件は北欧適合性評価機構の規格（NT FIRE053 Method B）⁴⁾の試験サイクルを参考に設定した。まず、高湿試験と同様の状態調整後に試験体の初期質量の測定を行った。次に、恒温恒湿槽内で降雨と乾燥を模した環境を繰り返した後に試験体の外観観察を行った。このうち、表面の変状が見られた試験体については固

く絞った布で拭き取り性の確認を行った。試験後の試験体の質量は23°C・50%RHの環境で約1週間養生した後に測定した。

降雨と乾燥を模した実験室環境については、参考にしたNT FIRE053 Method Bでは、32°C未満の気温で4時間散水した後にUVを当てながら63°C前後の送風で4時間乾燥させる工程を2回繰り返した後、8時間休止状態にしておく24時間を1サイクルとし、これを42サイクル(1000時間)繰り返す。調査した範囲では、この試験方法や設定値の根拠に関する情報が得られなかったが、この規格は難燃処理された木質材料の防火性能の耐候性を評価するためのものである。建設現場に搬入される難燃処理木材が降雨による影響を受ける可能性がある期間を3つの現場で調査したところ、最長で1か月と想定された。今回は比較的短期間の降雨の影響評価であることや使用する試験装置の都合等から、サイクル数を10に減らしUVの影響は考慮しないなど、各工程の条件を変更して実施した。今回の試験条件とNT

表-2 試験条件の比較(散水試験)

	今回の設定	NT FIRE053 Method B
1サイクルの構成	降雨4時間→乾燥4時間→ 降雨4時間→乾燥4時間→休止8時間	
降雨の条件	気温30°C、 降水量約34mm	気温32°C未満、 降水量約720mm
乾燥の条件	63°C-23%RH UV無し	63±3°Cで送風 UV有り
休止の条件	23°C-50%RH	制御無し
試験体の角度	水平	18°
サイクル数	10(240時間)	42(1000時間)
備考	難燃処理された木質内装材が建物施工中に受ける降雨の影響評価	難燃処理された木質材料の屋外環境を想定した耐久性試験方法

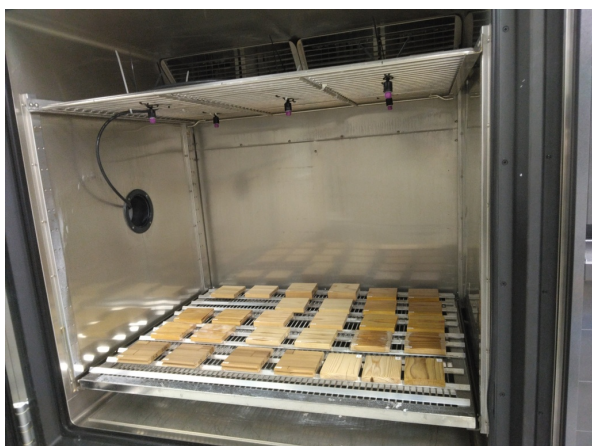


写真-2 恒温恒湿槽内の状況(散水試験)

FIRE053 Method Bの条件を比較して表-2に示す。散水は、恒温恒湿槽内の上部に市販の散水装置を組み込み、タイマーを恒温恒湿槽のサイクルと同期させて行った。散水装置の水量を調節して装置が安定して散水できる最小量で行ったところ、時間当たりの降水量は約34mm(気象庁では“激しい雨”に分類⁵⁾)であった。恒温恒湿槽内の状況を写真-2に示す。

3. 試験結果

3.1 高湿試験

高湿試験の観察結果を表-3にまとめる。写真は各仕様3体の試験体のうち代表的な1体のものである。状態調整後の外観、試験後の外観とその時の白華の状況、試験後に表面を拭き取った後の外観とその状況を示した。図-2に試験体の質量減少率をまとめる。試験前後の試験体の質量の減少分を試験前(状態調整後)の質量で除して求めた。図中には仕様毎に各試験体の値を○で、それらの平均値を棒と数値で示した。

無塗装の試験体(No.1, No.2, No.5, No.8, No.11, No.13)では、高湿試験後にすべてが白華した。このうち、No.8は従来の難燃薬剤(難燃処理木材C)の仕様であり、下部のアルミバットに試験体から溶出した液体が溜まっていた。これ以外は白華抑制タイプであるが、試験体表面の全面に(No.1, No.5)、あるいは冬目付近に部分的に(No.11, No.13)うっすらと白い粉がついている状況であり、唯一試験体の厚さが30mmであるNo.2にあっては表面全体がやや濃色化していた。これらはNo.8に比べて外観上の潮解・白華の程度が軽微であり、白華抑制タイプの薬剤の効果が確認できた。質量減少率については、No.8が平均値で22.79%、それ以外が2.45%~4.58%であった。質量減少の少なからず白華抑制タイプの効果が確認できた。白華した表面の拭き取りでは、No.8は拭きムラが残り、No.2の濃色化は拭き取れなかった。これら以外の試験体の白華はきれいに拭き取ることができた。

表面を塗装した試験体について、浸透系のもの(No.14)は、無塗装の試験体でみられた白華がみられなかった。質量減少率も無塗装の試験体に比べて小さな値となっており、浸透系塗装により潮解・白華がさらに抑制された状態が見て取れる。No.9を除く造膜系のもの(No.3, No.4, No.6, No.7, No.10, No.12)は、いずれも質量減少率がNo.14よりさらに小さな値となった。このうち不燃のウレ

タン樹脂系の“造膜 2”を用いた試験体 (No.4, No.7, No.10) では、木材と塗膜の間に白華が生じ、その部分の塗膜に膨れや剥がれがみられた。木材と塗膜の間の白華は試験後の拭き取りでは取り除くことができなかつた。それ以外では、ウレタン樹脂系

の“造膜 1”と従来タイプの難燃処理木材との組合せ (No.9) では無塗装のもの (No.8) よりは軽微であるが全面で白華が表面化し、白華抑制タイプとの組合せ (No.3, No.6) では白華が生じなかつた。アクリルウレタン樹脂系の“造膜 3”と白華抑制タ

表-3 高湿試験の観察結果

No.	1	2	3	4	5	6	7
難燃処理木材	A (白華抑制タイプ)				B (白華抑制タイプ)		
厚さ(mm)・塗装	15・無し	30・無し	15・造膜 1	15・造膜 2	15・無し	15・造膜 1	15・造膜 2
状態調整後							
高湿試験後							
外観観察	全面白華	濃色化	白華無し	塗膜内白華	全面白華	白華無し	塗膜内白華
拭き取り後							
拭き取り性	良好	拭き取れず	—	拭き取れず	良好	—	拭き取れず
No.	8	9	10	11	12	13	14
難燃処理木材	C (白華対策なし)			D (白華抑制タイプ)		E (白華抑制タイプ)	
厚さ(mm)・塗装	15・無し	15・造膜 1	15・造膜 2	15・無し	15・造膜 3	15・無し	15・浸透
状態調整後							
高湿試験後							
外観観察	全面白華	全面白華	塗膜内白華	部分白華	部分白華	部分白華	白華無し
拭き取り後							
拭き取り性	拭きムラ	拭きムラ	拭き取れず	良好	良好	良好	—

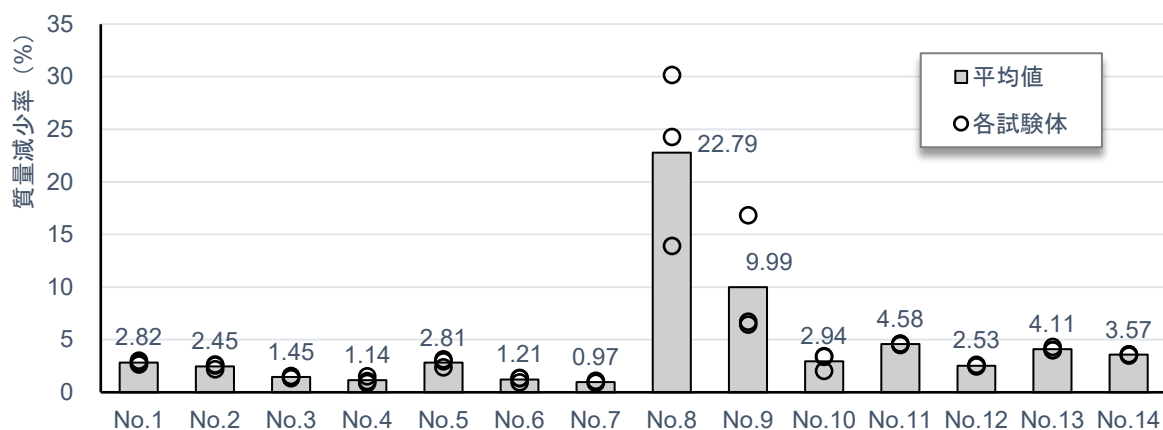


図-2 高湿試験における試験体の質量減少率

イプの難燃処理木材との組合せ (No.12) では無塗装のもの (No.11) より軽微な白華が部分的に表面化したしたが、こちらは試験後の拭き取りで取り除くことが出来た。

3.2 散水試験

散水試験の結果を表-4にまとめる。写真は各仕様2体の試験体のうち代表的な1体である。高温試験と同様に状態調整後の外観、試験後の外観とその時の白華の状況、試験後に表面を拭き取った

表-4 散水試験の観察結果

No.	1	2	3	4	5	6	7
難燃処理木材	A (白華抑制タイプ)				B (白華抑制タイプ)		
厚さ(mm)・塗装	15・無し	30・無し	15・造膜1	15・造膜2	15・無し	15・造膜1	15・造膜2
状態調整後							
散水試験後							
外観観察	白華無し	白華無し	濃色化	塗膜内白華	白華無し	部分脱色	部分脱色
拭き取り後							
拭き取り性	—	—	拭き取れず	拭き取れず	—	拭き取れず	拭き取れず
No.	8	9	10	11	12	13	14
難燃処理木材	C (白華対策なし)			D (白華抑制タイプ)		E (白華抑制タイプ)	
厚さ(mm)・塗装	15・無し	15・造膜1	15・造膜2	15・無し	15・造膜3	15・無し	15・浸透
状態調整後							
散水試験後							
外観観察	白華無し	全面白華	部分脱色	部分白華	部分脱色	白華無し	濃色化
拭き取り後							
拭き取り性	—	拭きムラ	拭き取れず	良好	拭き取れず	—	拭き取れず

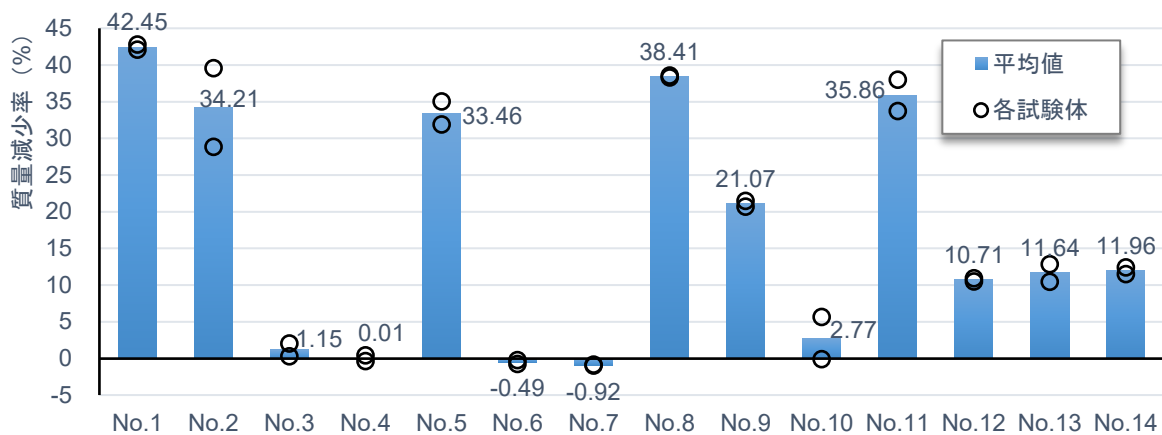


図-3 散水試験における試験体の質量減少率

後の外観とその状況を示した。図-3に試験体の質量減少率をまとめる。試験前後の試験体の質量の減少分を試験前(状態調整後)の質量で除して求めた。図中には仕様毎に各試験体の値を○で、それらの平均値を棒と数値で示した。

無塗装の試験体(No.1, No.2, No.5, No.8, No.11, No.13)では、試験後の外観観察では白華が見られない(No.1, No.2, No.5, No.8, No.13)か、高湿試験よりも軽微(No.11)であった。しかし、質量減少率が11.64%~42.45%と大幅に大きな値であり、潮解した難燃薬剤の多くが散水により洗い流されたと考えられる。No.11に生じた軽微な白華は試験後の拭き取りで取り除くことが出来た。

表面に保護塗装を施した試験体では、浸透系保護塗装(No.14)以外で、無塗装で同じ難燃処理木材の試験体に比べて質量減少率が大幅に小さな値となった(No.3, No.4, No.6, No.7, No.9, No.10, No.12)。これらについては液水に対する塗装の保護効果が高いためと考えられる。しかしながら、これらのすべてにおいて、濃色化(No.3, No.14)や塗膜内での白華(No.4)、部分脱色(No.6, No.7, No.10, No.12)、全面白華(No.9)が生じており、試験後の拭き取りでは取り除くことが出来なかった。また、加工後に切断面の木口のみ塗装を行わなかったNo.12では木口から一定の距離の範囲が白華しており、他造膜系塗装の試験体に比べて質量減少率が大きかった。

4. 考察

難燃処理木材の白華確認試験を総括する。

高湿試験では、白華抑制タイプの難燃処理木材(A, B, D, E)は従来タイプ(C)に比べて白華が抑制できることを確認した。それでも最大で5%弱程度の質量減少がみられたことから、この状態でも所定の防火性能が確保される必要がある。保護塗装の効果について、質量減少は同じ難燃処理木材の無塗装に比べてさらに抑えられており有効である。外観の変状は、造膜系の塗料のうち不燃のウレタン樹脂系の保護塗装(造膜2)を用いた試験体のすべてで塗膜と木材の間で白華し拭き取れなかった。それ以外の造膜系保護塗装と白華抑制タイプの難燃処理木材の組合せでは良好な結果であった。

散水試験では、無塗装の試験体で潮解した難燃薬剤が液水に洗い流されていると思われ、白華が外観上観察されないか、高湿試験よりも軽微な状

況であった。しかし、質量減少が大きく、白華抑制タイプの難燃処理木材(A, B, D)は従来タイプ(C)と同等かそれ以上の値となっており、液水に対しては難燃薬剤を溶出させない効果が確認できなかった。他に比べて質量減少が唯一明らかに小さかった白華抑制タイプのEでも12%弱の質量減少率であり、高湿試験の3倍程度であった。保護塗装については、質量減少を抑える効果はみられたが、表面から拭き取れない変状が生じ、簡単には修復できないことから外観上の問題が生じると考えられる。造膜系保護塗装で部分脱色がみられた試験体について、塗膜に基材に達する切れ目を入れ付着力を確認したところ、脱色がみられた部分は剥離しているか、脱色していない部分に比べて剥がれ易かった。試験体サイズであっても塗膜の防水が十分ではなく水分が少量浸入し、“塗膜内白華”と判定した試験体とはやや異なる様相であるが、難燃処理木材が部分的に潮解・白華した範囲の塗膜の付着力が低下したものと考えられる。

難燃処理木材の防火性能は難燃薬剤の含浸量に依存しており、難燃薬剤量は木材1m³あたりの固形量で管理されている。今回の試験体はいずれも市販品からの切り出しであるため難燃薬剤量の詳細は不明である。厚さ15mmの板材に準不燃材料の性能を付与するリン酸グアニジン系薬剤の固形分量は150kg/m³が目安であるとする研究⁶⁾があり、今回の同じ条件(難燃処理木材D)の無塗装の試験体(No.11)の試験後の質量減少量とこの値を比較した。図-4にNo.11の質量減少量を試験体の体積で除し1m³あたりの質量として示す。図中には試験毎に各試験体の値を○で、それらの平均値を棒と数値で示した。高湿試験後の質量減少量の平均値は目安とされる難燃薬剤量の約20%であった。高湿試験については試験体の難燃薬剤量を2割程度以上割り増しておくことで、試験後に準不燃材料の目安とされる薬剤量を残留させるこ

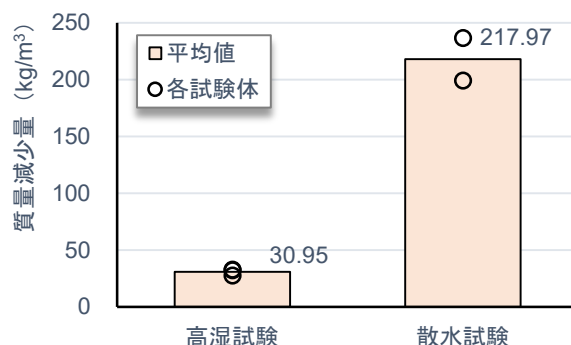


図-4 No.11の質量減少量

とが出来る。高湿試験の試験体は、高湿度環境下で質量が安定するまでに、白華抑制タイプで最大 2 週間、従来タイプで最大 3 週間で要しており、難燃処理木材に白華が生じるまでには比較的時間を要する。白華対策としての難燃薬剤量の割り増しは、本研究で想定している建物施工中のような限定的な期間に対しては有効であると考えられる。なお、この割り増し量を計算するためには、難燃処理木材がその防火性能を満たすために必要な難燃薬剤量の下限値と、難燃薬剤溶出量のばらつきの評価が必要である。散水試験後の質量減少量の平均値は目安とされる難燃薬剤量の約 145%であった。市販の難燃処理木材では、部位による難燃薬剤のばらつきを考慮して多めに含浸されているようであるが、散水試験ではその薬剤の多くが溶出しており、防火性能を損ねることが危惧される。木質材料の難燃薬剤の処理方法を鑑みると、溶出した難燃薬剤を再注入することは容易ではないことから、建物施工中において難燃処理木材の雨ざらしは厳禁であり、液水が表面に付着しないように十分な養生を行う必要がある。D 以外の白華抑制タイプの難燃処理木材 (A, B, E) についても、高湿試験と散水試験の質量減少率が同じような傾向にある。防火性能や薬剤の違いにより多少の差はあると思われるが、建物施工中の高湿環境や降雨環境に対しては同様に扱うのが良いと考えられる。

5. まとめ

難燃処理木材による内装材が建物施工中に経験する高湿環境と降雨環境での白華を確認するために、それぞれを想定した実験室環境に市販の 5 種類の難燃処理木材を暴露し、それらの白華の状況を検証した。得られた知見を以下にまとめる。

- 高湿環境に対しては、白華抑制タイプの難燃処理木材の有効性が確認できた。ただし、白華の抑制が完全ではないため薬剤を割増して防火性能を確保する必要がある。保護塗装の併用は組合せによってはさらなる白華の抑制が期待できる。
- 降雨環境では、難燃薬剤の多くが溶出し難燃処理木材の防火性能を損ねることが危惧される。雨ざらしは厳禁であり、液水が付着しないように十分な養生が必要である。保護塗装の併用は薬剤の溶出には効果があるが、拭き取れない外観の変状が生じる場合がある。

謝辞

本研究をまとめるにあたり、細田木材工業株式会社、越井木材工業株式会社、加賀木材株式会社にご助言をいただいた。末筆ながら謝意を表する。

<参考文献>

- 1) 例えば、遠藤 智紀ら：“1 時間の耐火性能を有する木鋼梁の開発 (その 1) ~ (その 4)”，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.293-300, 2021.9
- 2) 例えば、萬羽 郁子ら：“年代別にみた木質内装化が在室者に及ぼす心理・生理的効果の検証”，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.241-242, 2020.9
- 3) NORDTEST Method : NT FIRE 054 “DURABILITY OF REACTION TO FIRE – PERFORMANCE CLASSES OF FIRE-RETARDANT TREATED WOOD-BASED PRODUCTS IN INTERIOR AND XTERIOR END USE APPLICATIONS”，Nordic Innovation Centre, 2006.6
- 4) NORDTEST Method : NT FIRE 053 “ACCELERATED WEATHERING OF FIRE-RETARDANT TREATED WOOD FOR FIRE TESTING”，Nordtest, 2003.12
- 5) 気象庁 HP より：ホーム>知識・解説>天気用法で用いる用語 >雨の強さと降り方， <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/ know/yougo_hp/amehyo.html>
- 6) 河原崎 政行：“難燃処理された内装用及び外装用木材の燃焼性状と経年変化”，秋田県立大学 博士学位論文, 2021.3

