

燃え止まり型木質耐火構造部材の
自消性能設計に関する研究

Control of the Self-extinguishability of
Wood-based Protection Layers for
Wooden Fireproof-Structural Elements

2020 年 2 月

伯耆原 智世

Tomoyo HOKIBARA

燃え止まり型木質耐火構造部材の
自消性能設計に関する研究

Control of the Self-extinguishability of
Wood-based Protection Layers for
Wooden Fireproof-Structural Elements

2020 年 2 月

早稲田大学大学院 創造理工学研究科

建築学専攻 建築防災研究

伯耆原 智世

Tomoyo HOKIBARA

目次

第1章

序論	1
1.1 研究背景	1
1.1.1 耐火木造が満足すべき技術的基準と課題	1
1.1.2 木造建築の機運を高めた法整備と部材開発の状況	2
1.2 研究目的	2
1.3 研究対象とその位置づけ	5
1.4 既往研究	8
1.4.1 木材の燃焼に関する既往研究の整理	8
1.4.2 木材の燃焼過程	8
1.4.3 木材の難燃化	10
1.4.4 加熱終了後の赤熱燃焼性状	11
1.5 研究手順	12
参考文献	14

第2章

木材平板の自消性状と難燃処理木材の難燃性能	17
2.1 木材の燃焼過程の一般的な傾向と、難燃処理木材の難燃性能	18
2.1.1 実験目的	18
2.1.2 実験概要	18
2.1.3 実験結果	24
2.1.4 考察	32
2.2 木材の加熱後の赤熱燃焼と自消性状	34
2.2.1 実験目的	34
2.2.2 実験概要	34
2.2.3 実験結果	38
2.2.4 考察	46
2.2.5 燃え止まり型木質耐火構造部材設計への示唆	47
2.3 まとめ	48
参考文献	50

第3章

燃え止まり型木質耐火構造部材における被覆層と自消の関係	51
3.1 火災加熱される燃え止まり型小試験体を用いた自消性能の把握	51
3.1.1 実験目的	51
3.1.2 実験概要	52
3.1.3 実験結果	63
3.1.4 考察	80
3.2 燃え止まり型耐火構造梁の設計と自消性能の検証	85
3.2.1 目的及び試験体設計内容	85
3.2.2 実験概要	87
3.2.3 実験結果	98
3.2.4 考察	116
3.2.5 燃え止まり型木質耐火構造部材設計における適正寸法と難燃性能	118
3.3 まとめ	119
参考文献	121

第4章

要求耐火時間に依らない適正な燃えしろ層厚さ	122
4.1 目標とする耐火時間より短い火災加熱を受けた場合の自消性能	123
4.1.1 実験目的	123
4.1.2 実験概要	124
4.1.3 実験結果	127
4.1.4 考察	132
4.1.5 加熱時間に依らず自消する燃えしろ層厚さの推定	134
4.2 要求耐火時間に依らない適正な燃えしろ層厚さの把握	135
4.2.1 目的及び試験体設計内容	135
4.2.2 実験概要	135
4.2.3 実験結果	137
4.2.4 考察	144
4.3 まとめ	145
参考文献	146

第 5 章

総括	147
5.1 本論文の総括	147
5.2 結論	150
5.3 研究成果と今後の展望	151
参考文献	153
謝辞	154
研究業績書	156

第 1 章

序論

第1章 序論

1.1 研究背景

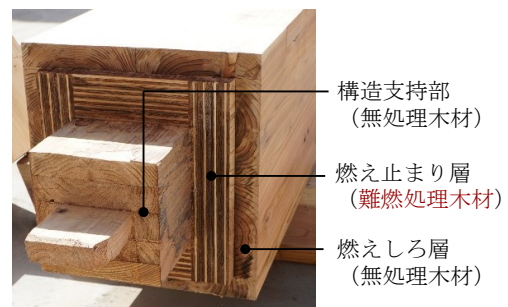
1.1.1 耐火木造が満足すべき技術的基準と課題

中高層木造を実現するには、木造による耐火構造が必要である。耐火性能とは、「通常の火災が終了するまでの間、当該火災による建築物の倒壊及び延焼を防止するために当該建築物の部分に必要とされる性能」(建築基準法第2条第七号)であり、建物の内部、外部で発生した火災に対して、火災終了後自然鎮火した後も自立していることが必要である。特に、木質部材で耐火構造の認定を取得する場合、構造部材自体が可燃物であるため、一度着火した場合でも、構造支持部に引火せずに、かつ、加熱終了後には自己消火（以下、自消）することが求められる。しかし、木材の燃焼性状については、過去長い間、化学分野や林業分野で研究が進められてきた一方で、木質材料で耐火建築物を実現しようとする場合に検証が必要な自消性状に関しては未だ不明瞭な点が多く、系統的な知見の整備が待たれている状況である。

木質耐火構造を実現する手法の中で、木を現しで利用できる方法は「燃え止まり型」と呼ばれ、構造支持部（無処理木材）の外側に燃え止まり層、さらに外側に燃えしろ層（無処理木材）を設ける。一般に、燃え止まり層には耐火性能を予測しやすいモルタルや石こう等の無機材料を用いて耐火性能を確保するが、本研究では、難燃薬剤を注入した難燃処理木材を用いる。このような「燃え止まり型」を「燃え止まり型木質耐火構造部材」と呼び、本研究対象とする。一般的な燃え止まり型とは異なり、部材断面全体が木質材料のため、加熱終了後の燃焼継続の有無が耐火性能に大きく影響する。被覆層となる燃えしろ層が厚ければ加熱時に構造支持部への入熱を抑制する点で有利だが、一方で厚すぎると、加熱終了後に可燃物となって、却って赤熱燃焼の継続を助長させる点で自消には不利に働くことが知られているが、これら被覆層の自消性状への影響は定量的に把握されていない。



(1) 道の駅ふたつ（2018年3月竣工 秋田県能代市）
※手前に写る2本の柱が耐火構造部材である



(2) 左記事例で用いた
「燃え止まり型木質耐火構造部材」

写真 1.1.1 部材断面全体を木質材料とした「燃え止まり型木質耐火構造部材」の例

1.1.2 木造建築の気運を高めた法整備と部材開発の状況

1998 年の性能規定化を目指す建築基準法の改正により、木質系材料についても、要求性能や検証方法が明確化され、性能基準を満たせば木質系材料が不燃材料や耐火構造にも使用できるようになった。2010 年 5 月には「公共建築物等における木材の利用の促進に関する法律」が制定されるなど、木材利用の促進における林業の再生や地球温暖化の防止などの観点から、木造の中・大規模建築の法整備や技術開発が進められてきた。

木造で耐火建構造を実現するにはいくつか方法があるが、表面に木を現しにできる燃え止まり型仕様では、2013 年に初めて「大阪木材仲買会館（大阪市西区）」や「野菜倶楽部 oto no ha Café（東京都文京区）」で実用化されている。今後、部材設計やスパンの自由度を高めるには、実験検証によって個々に国土交通大臣認定を取得する必要がある。表 1.1.1 及び表 1.1.2 にこれまでに耐火構造に認定された木製柱・はりについて、2019 年 4 月 30 日現在の一覧を示す。1 時間耐火構造では、最上階から数えて 5 階まで、2 時間耐火構造では 14 階までの耐火木造建築が実現可能となるが、近年では中高層木造実現に対する機運も高まって 2 時間以上の長時間の耐火構造の認定も増えつつあり、2017 年には初の 3 時間耐火構造の木製柱・はりの認定取得も実現されている。これらより、今後は長時間耐火性能を持つ、表面に木材を現しで利用可能な燃え止まり型木質耐火構造部材の開発への関心が高まっていくと想定される。

1.2 研究目的

1.1 研究背景で示した通り、耐火木造では、構造部材自体が可燃物であるため一度着火した場合、構造支持部材まで引火せずに「自消する」ことが必要であり、自消の可否に赤熱燃焼の継続が大きく影響することが知られているが、被覆層の設計内容と自消性状の関係は定量的に把握されていない。従って、現状では多くの実験を繰り返すことによって、試行錯誤して部材開発が行われており、耐火構造はごく限られた仕様が認定されているに過ぎず、木造の活用拡大の障害となっている。また近年、中高層木造への関心が高まっている中で、無機材料を燃え止まり層に用いた仕様を皮切りに 2 時間以上の長時間の耐火性能を有する木質耐火構造部材が研究・開発されており、社会的な要請が高まっている。

そこで本論文では、部材断面全体を木質化した燃え止まり型木質耐火構造部材を模した試験体を用いた加熱実験を行い、加熱終了後の赤熱燃焼及び自消性状と被覆層の関係を明らかにした上で、燃え止まり型木質耐火構造部材を想定した 1 時間、2 時間耐火性能を有する仕様を明らかにし、自消を確実に達成する被覆層の厚さや性能を示すことを目的とする。

表 1.1.1 これまでに耐火構造に認定された木製柱（2019年4月30日現在）

認定を受けた構造方法等の名称	耐火時間	申請者の氏名又は名称	認定番号	認定年月日
単板積層材張・せっこう被覆／木製柱	2時間	株式会社竹中工務店	FP120CN-0804	2019年4月22日
単板積層材張・せっこう被覆／木製柱	1時間	株式会社竹中工務店	FP060CN-0802	2019年4月8日
木製化粧材／ポリリン酸アンモニウム混入合成樹脂・強化せっこうボード重張被覆／木製柱	1時間	清水建設株式会社 技術研究所	FP060CN-0800	2019年3月25日
化粧材・普通硬質せっこうボード張・火山性ガラス質複層板・普通硬質せっこうボード重張／木製柱	1時間	株式会社熊谷組	FP060CN-0793	2018年12月26日
木製化粧材／発泡系耐火材・強化せっこうボード重張被覆／木製柱	1時間	清水建設株式会社	FP060CN-0783	2018年7月23日
木材・強化せっこうボード4枚重張／木製柱	3時間	株式会社シェルター	FP180CN-0702	2017年12月22日
木製表面材・ポリリン酸アンモニウム混入発泡性エチレン酢酸ビニル系樹脂シート・強化せっこうボード重張被覆／木製柱	2時間	清水建設株式会社	FP120CN-0703	2017年10月13日
木質系化粧材張／せっこう・カラマツ集成材被覆／木製柱	2時間	株式会社竹中工務店	FP120CN-0699	2017年7月19日
木製化粧材／薬剤処理木材被覆／木製柱	1時間	一般社団法人全国LVL協会株式会社 バイオマス科学研究所／丸菱油 化工業株式会社／アイカ工業株式 会社／SMB建材株式会社／山佐木 材株式会社／株式会社中島工務店 ／藤寿産業株式会社／秋田グルー ラム株式会社／相澤銘木株式会社 ／学校法人早稲田大学理工学術院 総合研究所／公立大学法人秋田県 立大学	FP060CN-0683	2017年5月22日
木材・強化せっこうボード2枚重張／木製柱	1時間	株式会社シェルター	FP060CN-0677	2017年3月10日
木材・強化せっこうボード2枚重張／木製柱	1時間	株式会社シェルター	FP060CN-0676	2017年3月10日
木材・強化せっこうボード3枚重張／木製柱	2時間	株式会社シェルター	FP120CN-0599-1	2017年2月8日
木材・強化せっこうボード重張被覆／木製柱	1時間	株式会社シェルター	FP060CN-0562-1	2017年2月8日
木質系化粧材張／せっこう・カラマツ集成材被覆／木製柱	1時間	齋藤木材工業株式会社	FP060CN-0657	2016年11月22日
木質系化粧材張／せっこう・カラマツ集成材被覆／木製柱	1時間	株式会社竹中工務店	FP060CN-0656	2016年11月22日
高密度すぎ板張／薬剤処理すぎ単板積層材被覆／木製柱	1時間	大成建設株式会社	FP060CN-0616	2016年11月22日
強化せっこうボード3枚重張被覆／木製柱	2時間	一般社団法人日本木造住宅産業協会 ／吉野石膏株式会社	FP120CN-0600	2016年5月27日
木材・強化せっこうボード3枚張／カラマツ被覆／木製柱	1時間	住友林業株式会社	FP060CN-0609	2016年5月12日
木・強化せっこうボード3枚重張／木製柱	2時間	株式会社シェルター	FP120CN-0599	2015年12月25日
強化せっこうボード重張／木質接着複合パネル・木製柱	1時間	ミサワホーム株式会社	FP060CN-0589	2015年8月19日
木製化粧材／発泡系耐火材・強化せっこうボード重張被覆／木製柱	1時間	清水建設株式会社	FP060CN-0583	2015年3月30日
すぎ集成材／強化せっこうボード5枚重張被覆／木製柱	2時間	株式会社シェルター	FP120CN-0560	2014年11月13日
すぎ集成材／強化せっこうボード3枚重張被覆／木製柱	1時間	株式会社シェルター	FP060CN-0551	2013年12月20日
強化せっこうボード重張被覆／木製柱	1時間	一般社団法人日本木造住宅産業協会	FP060CN-0542	2013年7月22日
スギ集成材・強化せっこうボード4枚重張被覆／木製柱	1時間	株式会社シェルター	FP060CN-0536	2013年6月6日
強化せっこうボード重張被覆／木製柱	1時間	社団法人日本木造住宅産業協会	FP060CN-0336	2008年5月26日
両面ポリエチレンテレフタレート不織布張ガラスクロス・黒鉛含有エポキシ樹脂シート／両面アルミニウムはく張ガラスクロス・黒鉛含有ブチルゴムシート・せっこうボード重張被覆／木製柱	1時間	積水化学工業株式会社／学校法人 早稲田大学理工学総合研究セン ター／大橋好光	FP060CN-0201	2005年9月27日

※国土交通省 「構造方法等の認定に係る帳簿」¹⁾をもとに筆者が作成

表 1.1.2 これまでに耐火構造に認定された木製はり（2019 年 4 月 30 日現在）

認定を受けた構造方法等の名称	耐火時間	申請者の氏名又は名称	認定番号	認定年月日
木質系化粧材張／せっこう・カラマツ集成材被覆／構造用集成材はり	1時間	株式会社竹中工務店	FP060BM-0532	2019年1月25日
木製化粧材／発泡系耐火材・強化せっこうボード重張被覆／木製はり	1時間	清水建設株式会社	FP060BM-0398-1	2018年7月23日
木材・強化せっこうボード4枚重張／木製はり	3時間	株式会社シェルター	FP180BM-0477	2017年12月22日
木質系化粧材張／せっこう・カラマツ集成材被覆／構造用集成材はり	2時間	株式会社竹中工務店	FP120BM-0487	2017年11月16日
木製化粧材／薬剤処理木材被覆／木製はり	1時間	一般社団法人全国LVL協会株式会社 バイオマス科学研究所／丸菱油 化工業株式会社／アイカ工業株式 会社／SMB建材株式会社／山佐木 材株式会社／株式会社中島工務店 ／藤寿産業株式会社／秋田グルー ラム株式会社／相澤銘木株式会社 ／学校法人早稲田大学理工学術院 総合研究所／公立大学法人秋田県 立大学	FP060BM-0421	2017年5月22日
強化せっこうボード3枚重張／強化せっこうボード4枚重張／木製はり	2時間	吉野石膏株式会社／一般社団法人 日本木造住宅産業協会	FP120BM-0469	2017年5月17日
木材・強化せっこうボード2枚重張／木製はり	1時間	株式会社シェルター	FP060BM-0420	2017年3月10日
木材・強化せっこうボード3枚重張／木製はり	2時間	株式会社シェルター	FP120BM-0392-1	2017年2月8日
木材化粧／強化せっこうボード3枚重張被覆／木製はり	2時間	株式会社シェルター	FP120BM-0385-1	2017年1月26日
木材化粧／強化せっこうボード重張被覆／木製はり	1時間	株式会社シェルター	FP060BM-0384-1	2017年1月26日
木材化粧／強化せっこうボード重張被覆／木製はり	1時間	株式会社シェルター	FP060BM-0359-1	2017年1月26日
スギ集成材・強化せっこうボード・難燃処理合板被覆／スギ構造用集成材はり	1時間	株式会社バイオマス科学研究所／ 丸菱油化工業株式会社／アイカ工 業株式会社／三井住商建材株式会 社	FP060BM-0393	2016年12月13日
木材・りん・窒素化合物系薬剤処理スギ集成材被覆／カラマツ材はり	1時間	有限会社ティー・イー・コンサル ティング	FP060BM-0389	2016年8月15日
木材・りん・窒素化合物系薬剤処理スギ集成材被覆／カラマツ材はり	1時間	三井住商建材株式会社	FP060BM-0388	2016年8月15日
木材・りん・窒素化合物系薬剤処理スギ集成材被覆／カラマツ材はり	1時間	鹿島建設株式会社	FP060BM-0387	2016年8月15日
木材・りん・窒素化合物系薬剤処理スギ集成材被覆／カラマツ材はり	1時間	住友林業株式会社	FP060BM-0386	2016年8月15日
木製化粧材／発泡系耐火材・強化せっこうボード重張被覆／木製はり	1時間	清水建設株式会社	FP060BM-0398	2016年8月1日
木材・強化せっこうボード3枚重張／木製はり	2時間	株式会社シェルター	FP120BM-0392	2016年5月27日
木材化粧／強化せっこうボード3枚重張被覆／木製はり	2時間	株式会社シェルター	FP120BM-0385	2015年12月25日
木材化粧／強化せっこうボード重張被覆／木製はり	1時間	株式会社シェルター	FP060BM-0384	2015年12月25日
側面カラマツ集成材・下面木材化粧／強化せっこうボード3枚重張被覆／木製はり	1時間	住友林業株式会社	FP060BM-0382	2015年12月10日
カラマツ材／強化せっこうボード重張被覆／木製はり	1時間	株式会社シェルター	FP060BM-0379	2015年10月19日
集成材・カラマツ集成材・モルタル被覆／集成材はり	1時間	齋藤木材工業株式会社	FP060BM-0353-1	2015年8月20日
集成材・カラマツ集成材・モルタル被覆／集成材はり	1時間	株式会社竹中工務店	FP060BM-0352-1	2015年8月20日
スギ集成材／強化せっこうボード4枚重張／強化せっこうボード被覆／木製はり	2時間	株式会社シェルター	FP120BM-0360	2014年10月10日
スギ集成材／強化せっこうボード重張被覆／木製はり	1時間	株式会社シェルター	FP060BM-0359	2014年10月10日
強化せっこうボード重張／木質接着複合パネル組立はり	1時間	ミサワホーム株式会社	FP060BM-0357	2014年9月19日
スギ集成材／強化せっこうボード3枚重張被覆／木製はり	1時間	株式会社シェルター	FP060BM-0349	2014年1月15日
強化せっこうボード重張被覆／木製はり一般社団法人	1時間	日本木造住宅産業協会	FP060BM-0344	2013年8月22日
カラマツ集成材・モルタル被覆／カラマツ集成材はり	1時間	齋藤木材工業株式会社	FP060BM-0326	2012年12月21日
カラマツ集成材・モルタル被覆／カラマツ集成材はり	1時間	株式会社竹中工務店	FP060BM-0325	2012年12月21日
難燃薬剤処理スギ集成材被覆／スギ構造用集成材はり	1時間	鹿島建設株式会社	FP060BM-0314	2012年3月5日
カラマツ集成材・モルタル被覆／カラマツ集成材はり	1時間	齋藤木材工業株式会社	FP060BM-0312	2011年12月9日
カラマツ集成材・モルタル被覆／カラマツ集成材はり	1時間	株式会社竹中工務店	FP060BM-0311	2011年12月9日
難燃処理スギ集成材被覆／スギ構造用集成材はり	1時間	鹿島建設株式会社	FP060BM-0239	2009年8月27日
スギ集成材・モルタル被覆／スギ集成材はり	1時間	株式会社大林組	FP060BM-0204	2008年2月1日
スギ集成材・モルタル被覆／スギ集成材はり	1時間	株式会社竹中工務店	FP060BM-0203	2008年2月1日

※国土交通省 「構造方法等の認定に係る帳簿」¹⁾をもとに筆者が作成

1.3 研究対象とその位置づけ

木造で耐火建築物を実現するには、図 1.3.2 に示すように適合ルート A～C の 3 通りがある。ルート A は、主要構造部に耐火構造とするための法適合確認を行い、耐火構造と認められた部材を用いて設計を行う手法であり、ルート B、C は、設計によって耐火建築物としての要求性能を満足させるが、高度な知識や経験、設計が必要である。

そこで、本研究では、汎用性が高いと考えられるルート A の仕様規定による木質耐火構造の開発をターゲットとして、研究を進める。木質耐火構造の耐火性能実現の原理は燃え止まり型、メンブレン（被覆）型、鉄骨内蔵型の 3 種類に主に分類されるが、本研究ではその中でも、部材断面全体の木質化が可能な燃え止まり型（図 1.3.1）と呼ばれる木質耐火構造部材を想定とする。

「燃え止まり型木質耐火構造部材」の燃え止まり層には種々の材料が使われるが、本論文で直接の対象とするのは、無処理の木材を構造部材として、その外側四面に難燃薬剤処理された木材を用いた燃え止まり層を接着し、さらにその外側四面に無処理の木材を燃えしろ層として接着した仕様である。

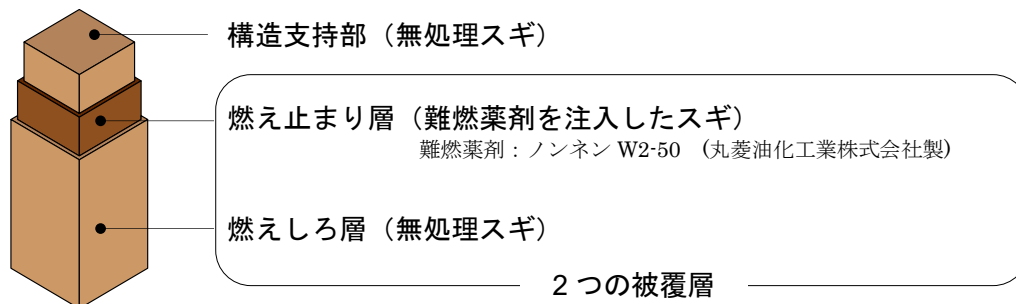


図 1.3.1 研究対象の燃え止まり型木質耐火構造部材

燃え止まり型では、表 1.1.1、表 1.1.2 にも示すように、これまで耐火性能を予測しやすいモルタルやせっこう系材料²⁾³⁾⁴⁾等（図 1.3.2 の燃え止まり型①-2）を燃え止まり層とした仕様が多くの開発されてきたが、部材断面をすべて木質部材で構成することができれば、設計・製造上や施工上において、下記のような利点が考えられる。

- ・ 1 つの製材工場で組み立てることが可能で従来の集成材製造ラインで製造できる⁵⁾。
- ・ 仕上げ材まで含めた部材を現場で組み立てることが可能であり、長大スパンに対応できる可能性が高い。
- ・ 自重が鉄骨造や鉄筋コンクリート造と比較して軽量で、基礎や杭工事の負荷が軽減でき、軟弱地盤にも比較的容易に建設することが可能である。

燃え止まり層にも木材を使用する仕様として、密度の大きい樹種⁶⁾⁷⁾等や難燃処理木材⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾等（図 1.3.2 の燃え止まり型①-1）が考えられるが、密度の大きい樹種は外国産であるため日本の森林資源の利用率が低くなり、品質・性能や生産効率を維持することが難しい。

そこで、本論文で扱う対象樹種はすべて、国内での最も需要が高く、ともに耐火構造部材に用いるカラマツ等よりも低密度で赤熱燃焼を継続しやすいと考えられるスギとし、燃え止まり層は、難燃薬剤処理されたスギとする。難燃薬剤はすべて、最も汎用性の高い窒素リン酸系とし、難燃薬剤ノンネン W2-50（丸菱油化工業株式会社製）を用いる。

主要構造部（法2条5号）

耐火構造（法第2条9号の2イ(1)） 適合ルートA

耐火構造：通常の火災が終了するまでの間、当該火災による建築物の倒壊及び延焼を防止するために当該建築物の部分に必要とされる性能を有する建築物の構造（法第2条7号）

政令で定める技術的基準に適合（令第107条）

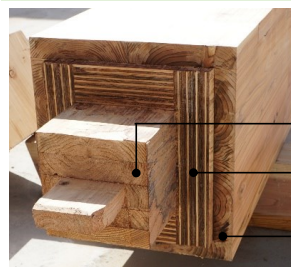
告示仕様※（平成12年建告第1399号 耐火構造の構造方法を定める件）

※木造では該当なし

大臣認定仕様（① 燃え止まり型 ② メンブレン(被覆)型 ③ 鉄骨内蔵型）

① 燃え止まり型

①-1 燃え止まり型木質耐火構造部材（本研究対象）



燃え止まり層に難燃処理木材を用いることで、すべての部材断面を木質化

構造支持部（木材）

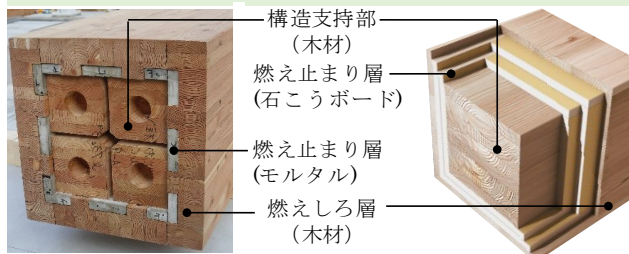
燃え止まり層（難燃処理木材）

燃えしろ層（木材）

写真例は「道の駅ふたつ（秋田県能代市二ツ井町）」で使用了木質耐火柱

認定取得は、秋田県立大学を中心とする耐火木質ラーメン構造研究会

①-2 燃え止まり層に無機材料を用いた燃え止まり型



構造支持部（木材）

燃え止まり層（石こうボード）

燃え止まり層（モルタル）

燃えしろ層（木材）

写真例は「大阪木材仲買会館(大阪市)」

で使用了木質耐火柱 燃え止まり®

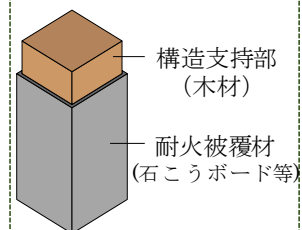
認定取得は、株式会社竹中工務店

木質耐火柱 COOL WOOD¹²⁾

認定取得は、株式会社ジェルク

実例：京都木材会館 等

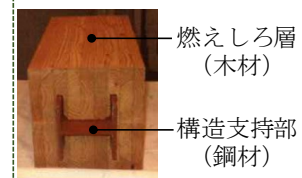
② メンブレン(被覆)型



認定取得は、日本木造住宅産業協会、日本ツーバイフォー建築協会

③ 鉄骨内蔵型

荷重は鉄骨部が負担するため、鉄骨造である



燃えしろ層（木材）

構造支持部（鋼材）

上の写真例は、日本集成材工業協同組合「木質ハイブリット集成材パンフレット」¹³⁾より

政令で定める技術的基準に適合（法第2条9号のニイ(2)）

耐火建築物の主要構造部に関わる技術的基準（令第108条の3）

耐火性能検証法（令第108条の3 第1項1号） 適合ルートB

平成12年建告第1433号（耐火性能検証法に関する算出方法を定める件）

実例：あけのペドーム、綾てるはドーム 等

大臣認定を受けた高度な検証法（令第108条の3 第1項2号） 適合ルートC

局所火源を想定した性能設計等の高度な設計により個々の事例について大臣認定を取得する。

実例：所沢市民体育館、JR高知駅プラットフォーム上屋、樹海体育館 等



あけのペドーム¹⁴⁾



JR高知駅プラットフォーム¹⁵⁾

図 1.3.2 耐火建築物が満足すべき技術的基準と研究対象（文献¹¹⁾をもとに筆者が作成）

1.4 既往研究

1.4.1 木材の燃焼に関する既往研究の整理

耐火性能では、「火災後も自立する」ことが要求されることから、木質材料で耐火性能を確保する場合、木材が加熱を受けた場合の燃焼性状に加えて、加熱終了後の自消性状についても把握する必要がある。自消の可否は、加熱終了後の赤熱燃焼に大きく影響を受けることから、木材が加熱を受けたときの燃焼性状及び加熱終了後の自消性状について、既往文献に基づいて整理する。

1.4.2 木材の燃焼過程

表 1.4.1 に大気中における昇温加熱下における木材の変化を示す。燃焼は、熱と光の発生を伴う酸化という化学反応と熱の流れが複合した複雑な現象であるが、表 1.4.1 より、木材の燃焼は、260～270℃前後で始まる有炎燃焼と、400～450℃前後で始まる赤熱燃焼の大きく 2 つの過程に分かれる。以下に、これら 2 つの燃焼過程について整理する。

表 1.4.1 昇温加熱下における木材の変化

燃焼段階	木材温度(℃)	状態
初期加熱 加熱	100	<ul style="list-style-type: none"> ・乾燥による自由水の放出、結合水の放出 ・主に吸熱反応であり、反応は極めて緩慢 ・リグニン、ヘミセルロースのガラス転移点(130~190℃) ・木材表面で炭化開始
(未着火)	150	<ul style="list-style-type: none"> ・長期加熱による自己発熱反応の臨界温度(150℃)低温着火 ・化学反応は緩慢だが、吸熱・発熱の両反応となる ・ヘミセルロースの分解開始 ・炭化緩慢に進行、少量の気体放出
引火前段階	225	<ul style="list-style-type: none"> ・長期加熱により組成条件が満たされた場合に引火するが、一般的には引火なし ・セルロース軟化
熱分解反応	250	<ul style="list-style-type: none"> ・引火は一般的には起こらず ・熱分解生成物生成、混合気体の組成条件が臨界に接近 ・260℃以上でガス放出増大
引火	270	<ul style="list-style-type: none"> ・急激な発熱反応開始、木材温度急激に上昇、ガス放出増大 ・煙の発生開始、表面着火
発炎燃焼 (くん焼及び赤熱燃焼を伴う)	290	<ul style="list-style-type: none"> ・タール分生成、ガス放出増大 ・木材表面に炎形成、炭化進行急 ・容易に引火 ・一次熱分解生成物の二次分解
	350	<ul style="list-style-type: none"> ・発熱反応急激 ・ガス放出最大に達する(350~400℃程度) ・熱分解ガス生成終了、タール分生成 ・煙発生終了(400℃程度) ・二次熱分解反応(発熱から吸熱反応へ) ・木材の重量減少急激
	400	<ul style="list-style-type: none"> ・二次熱分解反応(吸熱反応)、炭の形成急
発火	450	<ul style="list-style-type: none"> ・発火臨界点に達す
赤熱燃焼	500	<ul style="list-style-type: none"> ・ガスの放出及びタールの生成終了 ・発火容易 ・赤熱燃焼による炭の燃焼消失 ・木炭の炭化は、1500℃まで完結せず

※文献¹⁶⁾をもとに筆者が作成

(1) 木材の有炎燃焼

木材は加熱されると熱分解してタール・ガス・炭を生じ、①生成する可燃性気体と空気の混合気体が可燃領域の温度に達し、かつ②口火または温度上昇により着火に必要なエネルギーが供給されると着火し、有炎燃焼が起こる¹⁷⁾。着火した材料は、燃焼により発生する熱エネルギーを用いて上記の基本的な過程を繰り返すことで有炎燃焼を継続する¹⁷⁾。写真 1.4.1 は、木造建築物において、木材表面が炎に覆われ、可燃性ガスを生じている有炎燃焼の様子を表している。

木材は、多種の成分が組織をもって構成する複合的な物質であり、木材の防耐火性能を支配する熱分解性状、燃焼性状などは成分によって異なる。木材の主な化学成分であるセルロース、リグニン、ヘミセルロースのうち、ヘミセルロースが最初に分解され、180℃前後で熱分解を始め、ついでリグニンが 240℃前後で、セルロースが 280℃前後で熱分解を始める¹⁸⁾¹⁹⁾ことが知られている。セルロースの分解速度は最も大きく、木材重量の約半分を占め、可燃性ガスの形成の主役であると推定される¹⁹⁾。

なお、木材は、熱分解しつつ表面に炭化層を形成しながら燃焼する。この炭化層は熱分解速度が極めて小さく、熱伝導率が木材の 1/3～1/2 程度であるため、断熱効果を有することが知られている¹⁹⁾。

(2) 木材炭化後の赤熱燃焼

赤熱燃焼では、木材が加熱されて熱分解した炭化後の残渣（炭）が、火災盛期・減衰期において、可燃性ガスの発生が減少して周辺の酸素濃度が回復し、表面で空気に触れながら炭が焼失する現象である。比較的ゆっくり燃焼（おき燃焼）し、炎が失われた後も継続する。写真 1.4.2 に炭化物した木材が火炎を出さずに表面燃焼する様子を示す。この二次熱分解反応は、400～450℃前後²⁰⁾²¹⁾で始まる。

木材を炭化させた木炭は、単位発熱量が木材の 2 倍前後で、燃料として木材より効率が良いこと²²⁾、燃焼時に黒煙をほとんど発生しないことなどから、古来より燃料として利用されてきた。一方で、木質耐火構造に必要な加熱終了後の自消条件に関する定量的な研究はほとんど行われていない。



写真 1.4.1 熱分解を伴う有炎燃焼²¹⁾



写真 1.4.2 赤熱燃焼²¹⁾

これらより、燃え止まり型木質耐火構造部材において、木材が加熱された場合、加熱終了後の自消の可否を予測するためには、熱分解を伴う有炎燃焼と赤熱燃焼の2つの過程と自消条件の関係を把握する必要がある。

1.4.3 木材の難燃化

すべての部材を木質部材で構成する燃え止まり型木質耐火構造部材では、燃え止まり層に、薬剤処理して難燃化した難燃処理木材を使用する。難燃処理木材は、難燃処理薬剤を木材に注入して難燃化するもので、木材の約半分を占めるセルロースを対象とするものであるが多い。

木材の難燃化に対しては、これまで下記のような方法が提案されている¹⁹⁾。

- (1) 熱分解速度の低下: 熱分解の開始温度を低下させ、熱分解の速度を減少させて炭化残渣を多くして可燃性ガスの発生を抑える¹⁹⁾。セルロースを酸で加熱し分解すると、結晶領域の重合度が低下し、熱分解の開始温度が無処理材より低くなることが知られている²³⁾。(例: リン酸一水素アンモニウム、リン酸二水素アンモニウム)
- (2) 希釈作用: 熱分解反応の副反応生成物として、水や CO_2 の不燃性ガスの生成を促進させ、可燃性ガス濃度を希釈する。(例: リン酸アンモニウム、ホウ酸、塩化アンモニウムなど)¹⁹⁾
- (3) 構造の安定化: 架橋を促進し、生成される炭化層を安定化して難燃性を増加させる。(例: ホウ酸、ホウ酸ナトリウム)¹⁹⁾
- (4) 吸熱作用: 比重や密度を高めることや、結晶水を有する塩(例: ホウ酸ナトリウム、塩化アルミニウム)で処理し、水の潜熱を利用することで化学的に吸熱して温度上昇を抑える¹⁹⁾。
- (5) 断熱作用: 木材の表面に断熱層を形成させて内部に熱を伝わりにくくする。発砲性塗料がよく用いられるが、木材の炭化層も木材より熱伝導率が低く、断熱層になり得る¹⁹⁾。

木材や繊維に使用されている難燃剤には、ホウ素系、リン系、リン窒素系、含ハロゲンリン酸エステル系、無機系(水酸化マグネシウム、水酸化アルミニウム、アンチモン系、亜鉛系、グアニジン塩、シリコーン系)塩素系、臭素系があるが、本論文で使用する薬剤は、最も汎用性の高い窒素リン酸系とした。

また筆者らは、難燃薬剤ノンネン W2-50(丸菱油化工業株式会社製)²⁴⁾を注入した木粉

を試料とした加熱実験²¹⁾を実施し、難燃性は木材の熱分解開始温度よりも低い約 195℃で発現し始めること、難燃薬剤により、可燃ガスの発生を減少させ、高比重の炭化物が残存することで、難燃性を発現すると考えられることを明らかにした。これら加熱実験²¹⁾は木粉を試料とした材料実験であるため、建築部材としての難燃性の発現について、定量的に把握する必要がある。

1.4.4 加熱終了後の赤熱燃焼性状

1.4.2 節で示した木材の燃焼では、木材が加熱されている場合の高温時の木材の分解・燃焼についての既往研究について述べた。これらに加えて、木質耐火構造に要求される加熱終了後の自消性状について、既往研究で得られた知見を整理する。

堀らによるスギ平板を用いた一次元加熱実験²⁵⁾により、火災終了後の自己燃焼に関して深さ方向の温度推移や炭化深さを把握している。加熱面から 20～60mm では加熱終了後も 300～500℃を維持しており、炭化速度は加熱中で約 0.75mm/分、加熱後では約 0.10 mm/分を示して、加熱終了後の炭化速度は加熱中に比べて遅くなるが、燃焼し続けることが確認されている。

難燃処理ラミナを燃え止まり層に用いた燃え止まり型木質耐火構造部材を 1 時間耐火加熱した上川らの実験⁹⁾では、加熱終了後も試験体の一部では 500℃以上の高い温度を示しており、燃焼が継続した。燃焼継続した部分は脱落せずに残存した表層の無処理層の炭化物が赤熱燃焼しており、これが原因となりコア部の炭化・燃焼に至った。以上より、無処理木材の燃えしろ層が一定の厚さ以上ある場合、自消に支障をきたす場合があると考えられるが、その自消条件の定量的な把握はなされていない。

また、赤熱燃焼速度の測定を目的としカラマツを試験体としたコーンカロリメータによる茶谷らの加熱実験²⁶⁾では、自消の境界となる熱収支は 0～8.7kW/m² かつ試験体表面温度が 166℃～360℃を下回った場合であることが示唆されている。再現しやすい定常加熱条件を用いた小型実験で赤熱燃焼の定量的把握が試みられているが、燃え止まり型木質耐火構造部材の自消性状の把握には、火災加熱された場合の燃焼性状や難燃処理木材の吸熱効果も合わせた木質耐火部材の設計を対象とした自消条件の把握が必要である。

1.5 研究手順

本論文の検討を、次の3段階に分けて行った。

① 木材平板の自消性状と難燃処理木材の難燃性能（第2章）

これまで定量的な検討がほとんど行われていなかった木材の赤熱燃焼と自消の関係に見通しをつけるために、スギ平板を対象として、コーンカロリメータ試験装置を熱源とする定常加熱実験を行った。火災加熱時・加熱終了後の自消・赤熱燃焼についてスギ材の一般的な性状と、のちの第3章、第4章で燃え止まり層に用いる難燃処理木材の難燃性能を明らかにした。木材平板を加熱した場合の自消は、表面からの熱損失に起因し、その自消の境界条件を定量的に明らかにした。

さらに、燃え止まり型木質耐火構造部材を想定した場合、自消に至る適正な燃えしろ層厚さを推測した。

② 燃え止まり型木質耐火構造部材における被覆層と自消の関係（第3章）

燃えしろ層は無処理木材で構成されており、その厚さが厚いほど燃え止まり層の温度上昇が小さくなるため、これまで厚く設計されることが多かった²⁷⁾。しかし、既往研究⁹⁾から、燃えしろ層が一定以上の厚さがある場合、その内部で赤熱燃焼を続けるため自消に支障をきたす可能性があることが知られている。

そこで、①の結果から推測した燃えしろ層厚さに基づいて、1時間耐火性能を目標とした燃え止まり型木質耐火構造部材の断面を模した試験体を設計し、小型耐火加熱実験と実大梁耐火加熱実験を行った。燃えしろ層の赤熱燃焼を制御し、木材の分解を燃え止まり層内で停止させるのに必要な燃え止まり層の難燃性能及び適切な燃えしろ層厚さを把握することで、2つの被覆層と自消の関係を明らかにした。ここでは、火災加熱時間によって適切な燃えしろ層厚さが存在することを明らかにした。

③ 要求耐火時間に依らない適正な燃えしろ層厚さ（第4章）

②で無処理のスギ集成材を用いた燃えしろ層の厚さを、加熱中に燃え止まり層の難燃薬剤の分解温度に達するように設計すれば、自消が確保されることを把握した。これより、燃え止まり層の難燃薬剤の分解温度がわかれば、要求耐火時間に比例して、燃えしろ層の厚さを厚くすればよいことになる。例えば、1時間耐火性能なら25mm程度、2時間耐火性能ならば50mm程度が適切であるというように、長時間になるに従い厚くなる。実際の火災加熱は、要求されている耐火時間よりも短い加熱時間である可能性があ

る。本来耐火性能は、目標とする耐火時間より短い火災加熱を受けた場合でもその性能を発揮すべきである。しかし、火災加熱が要求耐火時間より短い場合、火災後に却って燃えしろ層内での赤熱燃焼を誘発する可能性があることを明らかにした。このことは、要求耐火時間に依らない適正な燃えしろ層厚さが存在することを示唆しており、要求耐火時間よりも短いあらゆる時間で加熱を受けた場合でも自消する被覆層の厚さや性能を提示した。特に、燃えしろ層厚さは、目標耐火性能に関わらず一定の適正範囲があり、それを超えると、火災加熱が要求時間に達しない場合には却って必要な耐火性能を維持できなくなるという他の原理による耐火構造に見られない特質があることを明らかにした。

研究フローと本論文の各章の関係を図 1.5.1 に示す。

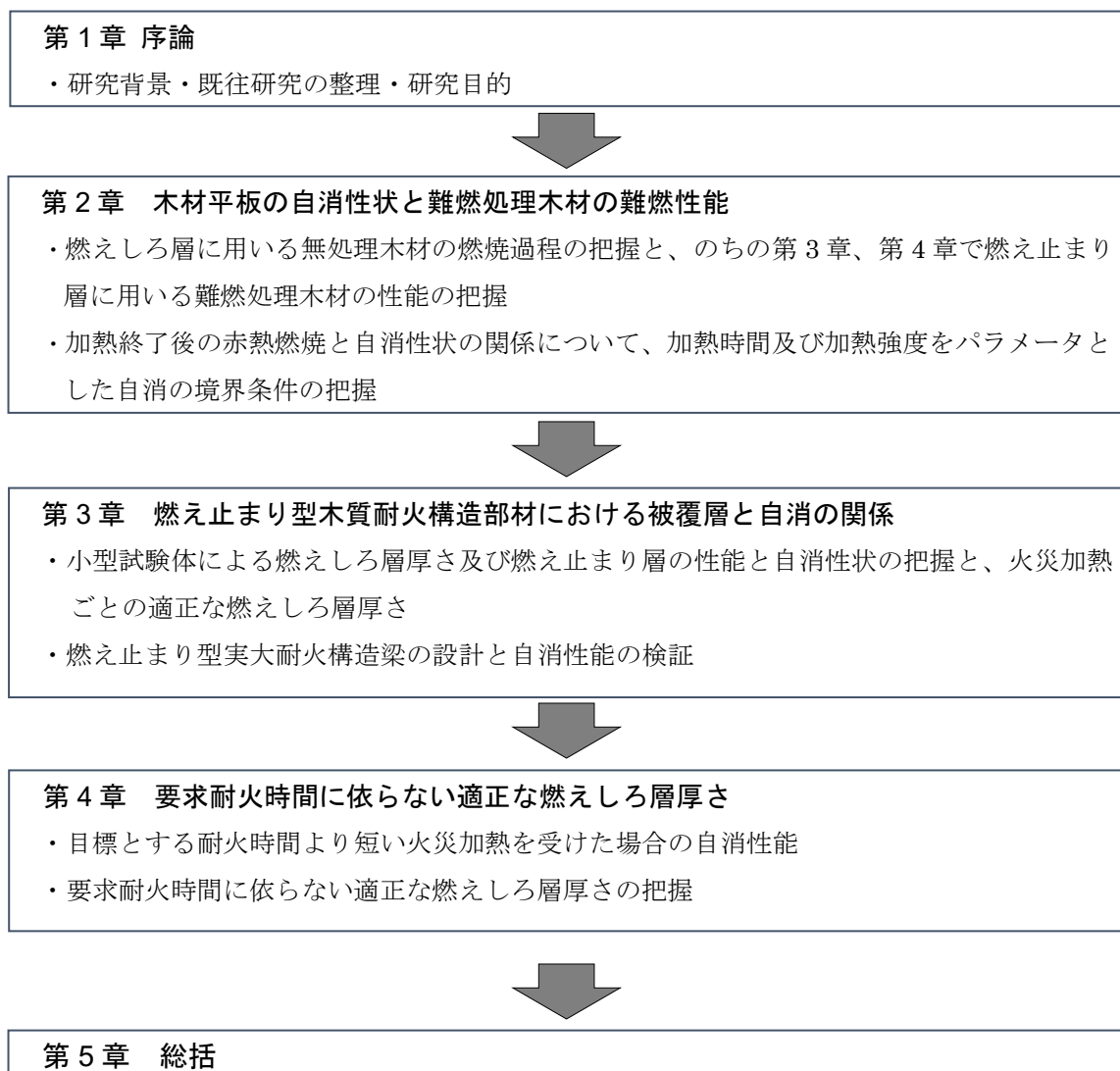


図 1.5.1 研究フロー

第1章の参考文献

- 1) 国土交通省 構造方法等の認定に係る帳簿 (2019年9月1日閲覧)
http://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/build/jutakukentiku_house_tk_000042.html
- 2) 大橋宏和・永盛洋樹・長岡勉・大野正人・五十嵐信也・遊佐秀逸・吉川利文・金城仁：耐火木造部材の耐火性能に関する研究 その3 柱梁接合部の載荷加熱実験，日本建築学会大会学術梗概集，防火，pp.141-142, 2013.8
- 3) 広田 正之・井戸 和彦・森田 武・水落 秀木・黒瀬 行信・貞広 修：木質ハイブリッド架構の開発 その2 耐火木質梁の耐火試験，日本建築学会大会学術講演梗概集，防火，pp.313-314, 2017. 7
- 4) 広田 正之・井戸 和彦・森田 武・水落 秀木・貞広 修：木質ハイブリッド架構の開発 その3 2時間耐火木質柱の耐火試験，日本建築学会大会学術講演梗概集，防火，pp.261-262, 2018. 9
- 5) 原田寿郎：日本における木質耐火構造開発のあゆみ，木材学会誌，Vol.55, No.1, pp. 1-9, 2009
- 6) 大橋 宏和・堀 長生・安部 裕・山口 純一・岡 日出夫・高橋 晃一郎：燃え止まり性能を有する木質構造部材に関する研究：その3 木製柱の載荷加熱実験，日本建築学会大会学術講演梗概集，防火，pp.89-90, 2006.7
- 7) 蛇石貴宏・関 真理子・黒田 瑛一・茶谷 友希子：木材の耐火性に関する研究（その2）梁の実大試験，pp.245-246, 2018.9
- 8) 原田寿郎・服部順昭・安藤恵介・西岡悠樹・宮林正幸・塩崎征男：耐火集成材の開発（その1）シェル型難燃層による集成材の燃え止まり，日本建築学会大会学術講演梗概集，防火，pp.85-86, 2006
- 9) 上川大輔・原田寿郎・宮林正幸・抱憲誓・西村 光太・宮本 圭一・大内 富夫・安藤 恵介・服部 順昭：難燃処理ラミナを用いた耐火集成材の開発 スギ集成材柱の1時間及び2時間耐火性能，日本建築学会環境系論文集，第75巻，第657号，pp. 929-935, 2010. 11
- 10) 成田敏基・安井 昇・藤田 和彦・亀岡 祐史・小宮 祐人・李 元羽・朴 智秀：難燃薬剤処理 LVL を被覆材とした耐火構造柱の検討（その3）木造の耐火構造柱，日本建築学会大会学術講演梗概集，防火，pp.281-282, 2017. 7

- 11) 一般社団法人 木を活かす建築推進協議会：木造建築のすすめ，2009.11
- 12) 株式会社シェルター HP 木質耐火部材 COOL WOOD (2019 年 12 月 30 日閲覧)
<http://www.shelter.jp/technical/coolwood>
- 13) 日本集成材工業協同組合：木質ハイブリット集成材パンフレット (2019 年 12 月 30 日
閲覧) <https://www.syuseizai.com/material02>
- 14) 養父市立あけのべ自然学校 HP (2019 年 12 月 30 日閲覧) <http://akenobe-nature.com/>
- 15) 一般社団法人 日本木造住宅産業協会：木造軸組工法による耐火建築物～木住協の 1 時
間・2 時間耐火構造 (2019 年 12 月 30 日閲覧) <https://www.mokujukyo.or.jp/kensetsu/>
- 16) 日本木材学会編：木材の科学と利用技術 2.防・耐火性能，150，1989
- 17) 丸善株式会社，森林総合研究所監修：木材工業ハンドブック改訂 4 版，2004.3
- 18) Ramiah,V. : J.Appl. Polymer Sci., 14, 1323, 1970
- 19) 平田利美：木材難燃化のメカニズム，木材工業 44(5)，pp 202-207，1989
- 20) 原田和典・梶山 幸祐・遊佐 秀逸・上杉 三郎・並木 勝義：木質構造部材の炭化性状に
関する数値解析，日本建築学会近畿支部研究報告集，pp209-212，2004.5
- 21) 山口智世・長谷見雄二・安井昇・小宮祐人・上川大輔・宮林正幸：火災加熱される木質
部材の熱分解・燃焼性状のモデル化に向けた基礎研究，日本建築学会大会学術講演梗概
集，防火，pp469-472，2013.8
- 22) 環境省 地球環境「事業者からの温室効果ガス排出量算定方法ガイドライン」，2003.7
- 23) J.W.lyions : The Chemistry and Uses of Fire Retardants, Wiley-Interscience, pp29-
66, 1970
- 24) 丸菱油化工業株式会社 HP http://marubishi.jp/?page_id=10 (2019 年 9 月 1 日閲覧)
- 25) 堀長生・西村俊彦・丹羽博則・安部裕・山口純一・上原茂男：燃え止まり性能を有する
木質構造部材に関する研究 (その 1 火災終了後の自己燃焼に関する実験的検討)，日
本建築学会学術講演梗概集 (防火)，pp149-150，2004.8
- 26) 茶谷 友希子・原田和典・土橋常登：カラマツ集成材の火災加熱後における炭化層の
赤熱反応速度の測定，日本建築学会環境系論文集 第 82 巻 第 736 号，pp.491-499，
2017.6
- 27) 石川 敬・板垣直行・原田浩司・長谷見雄二・中村 昇・岡崎泰男・林 知行・飯島泰男：

燃え止まり型木質耐火構造梁における燃えしろ層の適正寸法の検討 その 2 せいの高い梁の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 防火, pp277-278, 2014.9

第 2 章

木材平板の自消性状と難燃処理木材の難燃性能

第2章 木材平板の自消性状と難燃処理木材の難燃性能

第1章の既往研究から、木材が加熱されると、熱分解を伴う有炎燃焼と炭が固体燃焼する赤熱燃焼の主な2つの燃焼過程に分かれることが知られている。耐火構造で必要な性能は、火災加熱後にも自立していることであり、特に木質耐火構造では、部材自体が可燃物であるため、着火した場合でも、火災加熱を受けた後、構造支持部の木材が炭化せず、自消することが求められる。この自消性状は、加熱後の赤熱燃焼に影響を受け、特に燃えしろ層が厚い場合、燃えしろ層内部で赤熱燃焼が継続するため、自消に支障をきたす可能性があることが知られている¹⁾²⁾が、定量的な自消条件は明らかにされていない。燃え止まり型木質耐火構造部材が確実に自消する設計法を検討するには、燃えしろ層及び燃え止まり層と、加熱終了後における赤熱燃焼の継続条件について、定量的な関係の把握が不可欠である。

そこで本章では、まず、これまで定量的な検討がほとんど行われていなかった木材の赤熱燃焼と自消の関係に見通しをつけるために、スギ平板を対象として、コーンカロリメータ試験を用いた下記の2つの実験を考えた。

2.1 木材の燃焼過程の一般的な傾向と、難燃処理木材の難燃性能

スギ平板を試験体として燃えしろ層に用いる無処理木材の燃焼過程の把握と、のちの第3章、第4章で燃え止まり層に用いる難燃処理木材の難燃性能の把握を行う。

2.2 木材の加熱後の赤熱燃焼と自消性状

加熱終了後の赤熱燃焼と自消性状の関係について、加熱時間及び加熱強度をパラメータとして、木材の自消の境界条件の把握を行う。

以上の結果から、燃え止まり型木質耐火構造部材を想定した場合、自消に至る適正な燃えしろ層厚さを推測する。

木質部材の加熱実験として、コーンカロリメータでは、平板型の試験体の表面を定常状態で一様に放射加熱し、発熱速度と重量変化を測定することができる。そのため、試験体の燃焼過程を、一次元で単純な境界条件のもとで分析できること、耐火炉を使用する加熱実験に比べて加熱条件の制御と把握が容易で明快であることなどの点で、現在、一般的に利用可能な各種の加熱試験装置の中では、木質部材の燃焼性状の把握に特に適していると考えられる。更に試験装置・試験体とも小型であり、操作方法も標準化されているため、大型炉を使用する試験に比べて実験の実施が遙かに容易で、第三者による追試も行い易い。

2.1 木材の燃焼過程の一般的な傾向と、難燃処理木材の難燃性能

2.1.1 実験目的

本節では、無処理のスギ平板と、難燃処理したスギ平板を一方向から加熱し、燃焼発熱速度を測定して、一般的な木材の燃焼過程における燃焼速度の推移と温度依存性について把握することを目的とする。また、難燃処理木材については、ここで用いた試験体と同一材を第3章、第4章の耐火炉試験でも用いることから、防火材料の性能評価の試験法としても用いられているコーンカロリメータ試験にて、防火材料としての性能を評価する。

木材の炭化層形成後における赤熱燃焼の発熱は、火災盛期や加熱終了後の放置時の木質部材の発熱性状に影響を与えと考えられる。さらに、既往研究³⁾等より、木材の分解・発熱性状は温度によって変化すること、特に、着火して比較的早い段階を代表する熱分解反応と、その後の赤熱燃焼ではその変化が著しいことを考慮し、コーンカロリメータのデータ分析において熱分解反応と赤熱燃焼の各々が活発な温度帯との関係を検討するために試験体の裏面及び内部の温度測定を行う。

コーンカロリメータは、日本では、前述の通り防火材料の性能評価の試験法として最も一般的に用いられており、簡易な発熱性試験として多く用いられている⁴⁾⁵⁾等。その標準的な試験法では、加熱強度を 50kW/m^2 とし、加熱・発熱速度の測定時間は最長 20 分間となっているが、本実験では、加熱強度については、装置の許容する範囲で火災盛期や減衰期に近い加熱条件を再現するために、加熱強度は 25kW/m^2 、 35kW/m^2 、 50kW/m^2 の3段階とし、加熱時間についても、火災盛期や減衰期の赤熱燃焼までを視野に入れて、最長 120 分を含む、長時間とする。

2.1.2 実験概要

(1) 試験体

表 2.1.1 に試験体仕様一覧を、写真 2.1.1 に加熱前の各試験体を示す。樹種はすべてスギとし、加熱面は 100mm 角で、試験体厚さは、長時間加熱した際の側面から燃焼や裏面からの熱反射の影響を減らすため、また木材が構造部材として使われる場合を想定するため厚い方がよい。一方で、試験体を収納するホルダーに入る最大厚さで、試験体裏面に裏面温度測定用のディスク熱電対と内部温度測定用の熱電対を装着できる条件として最大厚さ 40mm を基本とした。本研究で使用する難燃薬剤は全て、普及性の高い窒素リン酸系とし、難燃薬剤ノンネン W2-50（丸菱油化工業株式会社製）を注入した。1)～3) に各仕様の詳細を示す。各試験体の寸法、密度、含水率等を表 2.1.2 に示す。含水率は、絶乾炉

(105℃)に入れて乾燥させ、重量減少から試験体の含水率を測定した。木材の含水率の計算式を以下に示す。

$$\text{含水率(\%)} = \{ (\text{絶乾前の重量} - \text{絶乾後の重量}) / \text{絶乾後の重量} \} \times 100$$

スギ難燃処理木材の難燃薬剤注入量を表 2.1.3 に示す。以降、本論文中に示す注入量は、目標注入量を示す。表 2.1.3 より、本研究で用いる難燃処理木材の注入量の平均値は、すべて目標注入量を超えていることがわかる。

1) 試験体 T

試験体 T は厚さ 40mm のスギ無処理材である。厚さ 20mm のスギラミナ 2 枚をレゾルシノール樹脂系接着剤で接着させた。

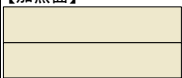
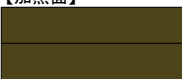


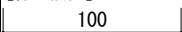

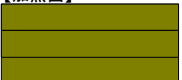
2) 試験体 E(E1、E2)

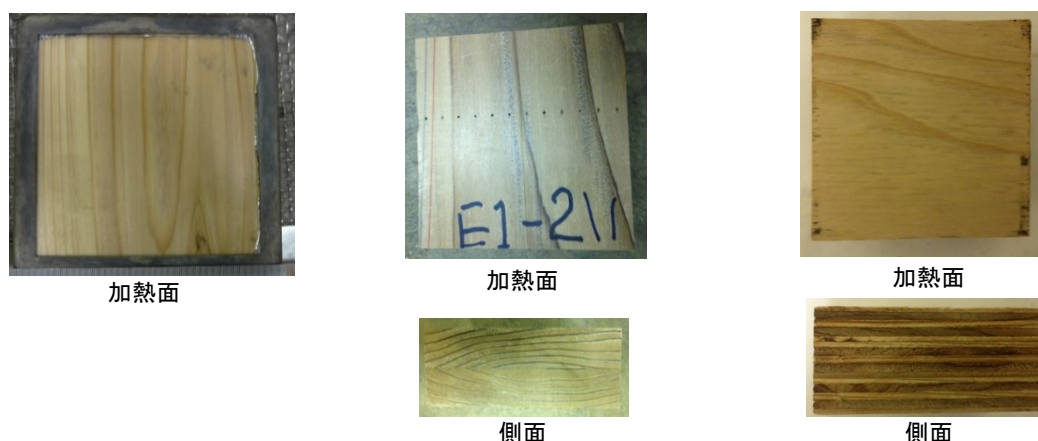
試験体 E は、第 3 章及び第 4 章の小型炉実験の燃え止まり層に使用する難燃処理木材と同一材である。厚さ 20mm のスギラミナ 2 枚をレゾルシノール樹脂系接着剤で接着させた厚さ 40mm のスギ難燃処理材である。E1、E2 は、それぞれ難燃薬剤の注入量を 180、110kg/m³ とした。

3) 試験体 P

試験体 P は、第 3 章の実大梁実験の燃え止まり層に使用する難燃処理木材と同一材である。難燃処理した厚さ 15mm のスギ合板 3 枚をレゾルシノール樹脂系接着剤で接着した厚さ 45mm のスギ難燃処理合板である。難燃薬剤の注入量は 140kg/m³ とした。

表 2.1.1 試験体仕様一覧

スギ無処理材				スギ難燃処理材				
試験体		加熱強度 [kW/m ²]	仕様（断面）	試験体		難燃薬剤 注入量	加熱強度 [kW/m ²]	仕様（断面）
T	T-25	25	<div>【加熱面】  20 20 40 100</div>	E	E1	180 kg/m ³	50	<div>【加熱面】  20 20 40 100</div>
	T-35	35	<div>【非加熱面】  100</div>					<div>【加熱面】  20 20 40 100</div>
	T-50	50	<div>【非加熱面】  100</div>		E2	110 kg/m ³	50	<div>【加熱面】  20 20 40 100</div>
凡例								
<div><div></div>：無処理木材</div>								
<div><div></div>：難燃処理木材（注入量 180 kg/m³）</div>								
<div><div></div>：難燃処理木材（注入量 110 kg/m³）</div>								
<div><div></div>：難燃処理合板（注入量 140 kg/m³）</div>								
P		140 kg/m ³	50	<div>【加熱面】  45 【非加熱面】 100</div>				



(1) 無処理木材 (試験体 T) (2) 難燃処理木材(試験体 E) (3) 難燃処理合板(試験体 P)

写真 2.1.1 加熱前の各試験体

表 2.1.2 各試験体の寸法・重量・含水率

試験体		加熱強度 [kW/m ²]	寸法[mm]			重量[g]	比重 [g/cm ³]	含水率 [%]	全乾比重* [g/cm ³]
			縦	横	厚さ				
T	T-25	25	100.39	99.22	39.95	155.44	0.390	13.0	0.339
					39.95				
			100.90	99.08	39.98				
					40.00				
	T-35	35	101.10	99.26	39.96	161.77	0.404	13.0	0.352
					39.94				
			100.78	99.29	39.86				
					39.95				
	T-50	50	101.33	99.82	40.17	150.39	0.372	13.0	0.324
					40.01				
			100.14	100.08	40.18				
					40.17				
E	E1	50	99.82	98.96	39.80	223.30	0.564	9.7	0.509
					39.91				
			100.14	100.08	39.85				
					39.73				
	E2		101.33	99.82	39.99	199.20	0.495	10.5	0.443
					39.93				
			100.14	99.53	40.08				
					40.17				
P			100.30	99.82	44.69	231.63	0.525	10.2	0.471
					45.01				
			99.04	98.03	44.70				
					44.72				

*全乾比重は比重及び含水率の測定結果より算出した。

表 2.1.3 スギ難燃処理材 試験体の難燃注入量

試験体		目標注入量 [kg/m ³]	加熱強度 [kW/m ²]	難燃薬剤注入量			
				平均値[kg/m ³]	最大値[kg/m ³]	最小値[kg/m ³]	標準偏差
E	E1	180	50	182.0	204.2	161.2	16.4
	E2	110	50	116.8	131.4	96.5	11.4
P		140	50	144.1	152.7	140.2	3.3

(2) 実験方法

本実験は森林総合研究所内の Cone Calorie MeterⅢ（東洋精機製）を用い、加熱強度及び加熱時間の条件以外、ISO5660 に準拠して行った。コーンカロリメータ試験装置の測定原理、試験体設置方法及び実験条件を 1)～3)に示す。

1) コーンカロリメータ試験装置の測定原理

コーンカロリメータ試験装置の概略図を図 2.1.1 に、コーンカロリメータ試験装置を写真 2.1.2 に示す。2.1、2.2 節の両実験ともに Cone Calorie MeterⅢ（東洋精機製）を用い、発熱速度及び重量を測定する。コーンカロリメータは、空気雰囲気下で円錐型のコーンヒーター（放射熱）によって試験体を加熱し、スパークにより着火、燃焼させ、燃焼排気ガス中の酸素濃度と排気ガス流量を測定し、質量、酸素消費法※によって試料の発熱量を測定する試験装置である。1982 年に米国で開発された比較新しい試験だが、ISO 5660・Fire test・Reaction to fire/Part1: Heat release（コーンカロリメータ）に採用され、材料の燃焼を扱う試験法として国際的に広く認知されている。前述のとおり日本でも、防火材料の性能評価に標準的に使われている。

※ 酸素消費法：燃焼によって生じる発熱量は、燃焼する物質の質量あたりで考えると物質毎に大きく異なるが、消費される酸素の質量で考えると物質の種類によらず、ほぼ一定の数値（酸素 1kg 当たり 13.1MJ の熱が発生）を示すことを利用した燃焼発熱量の測定法である。酸素消費法で燃焼発熱量を測定することによって熱損失等を排除した部材の純粋な燃焼発熱量を求めることができる。

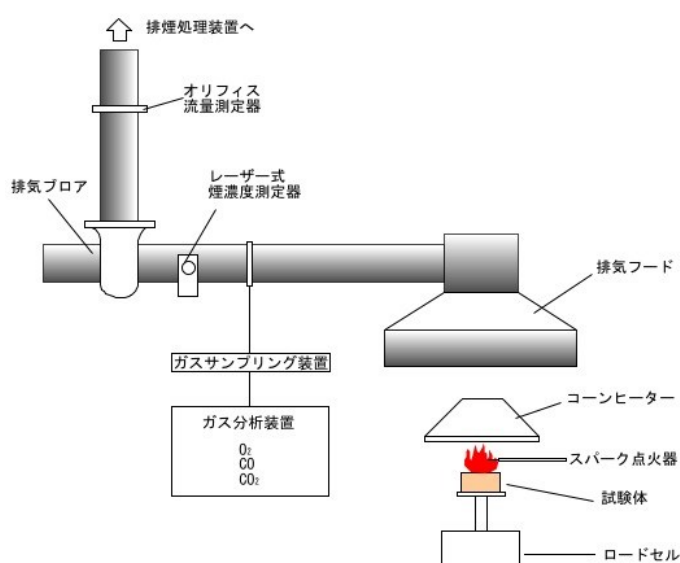


図 2.1.1 コーンカロリメータ試験装置 概略図



(1) 3分割された右端にコーンヒーター



(2) 実験中の試験体の様子

写真 2.1.2 コーンカロリメータ試験装置

2) 試験体設置方法

試験体は装置に水平に設置し、側面からの燃焼を防ぐためにアルミホイルを試験体側面に巻いた状態で試験体ホルダーに試験体を設置した。試験体の非加熱面と試験体ホルダーの間には、断熱材としてセラミックファイバースランケット（密度：約 110kg/m^3 、厚さ：約 30mm ）を詰めた。

3) 実験条件

本実験におけるパラメータは、加熱条件である加熱強度及び加熱時間である。

① 加熱強度

加熱強度は、防火材料試験に規定されている 50kW/m^2 を基準に、加熱強度 25、35、 50kW/m^2 とした。既往研究のスギを試験体としたコーンカロリメータ試験結果⁶⁾より、加熱強度 30kW/m^2 では加熱中の消炎が確認され、 40kW/m^2 では燃焼の継続が確認されている。従って、スギ材では加熱強度 $30\sim 40\text{kW/m}^2$ で自消するといえることから、加熱強度 35kW/m^2 においても実験を行った。なお、耐火構造の性能が検討される火災盛期の部材の加熱条件は一般に 50kW/m^2 を超えるが、本装置では 50kW/m^2 が長時間、安定的に加熱できる限界である。

② 加熱時間

従来、建築部材における木材の燃焼性状を把握しようとする試みは、内装材としての防火性能の検証に関心の重点があったため、木材が加熱された場合の着火時間や火災室からの避難時間程度の間の燃焼発熱性状等、性能が問題にされる時間が比較的短い。しかし耐火木造を視野に入れた本研究では、木材が加熱されて着火した後から炭化層形成後の赤熱燃焼過程まで把握する必要がある。そこで本実験では、無処理試験

体については最低でも加熱時間 1 時間を確保（60～80 分間）し、厚さ 40mm の試験体の裏面まで炭化が到達し、試験体全体が赤熱燃焼に至るように設定した。

(3) 測定項目

以下の各項目について、測定を行った。

1) 試験体内部温度及び裏面温度

内部温度は、直径 1mm の K 型シース熱電対を試験体裏面からドリルであけた穴に挿入し、2 秒間隔で測定した。試験体 T 及び E は、加熱表面から 10mm 間隔で、試験体 P は、加熱表面から 15mm 間隔で測定した。裏面温度は試験体非加熱面にディスク付き K(CA)熱電対を設置し 2 秒間隔で測定した。図 2.1.2 及び図 2.1.3 に試験体ごとの熱電対設置位置を示した。

2) 発熱速度及び総発熱量

酸素消費法より算定する。

3) 重量変化

加熱中の試験体の重量変化をコーンカロリーメータ試験装置に設置されているロードセルで測定する。

4) その他

試験体加熱面の目視観察、写真撮影を行った。

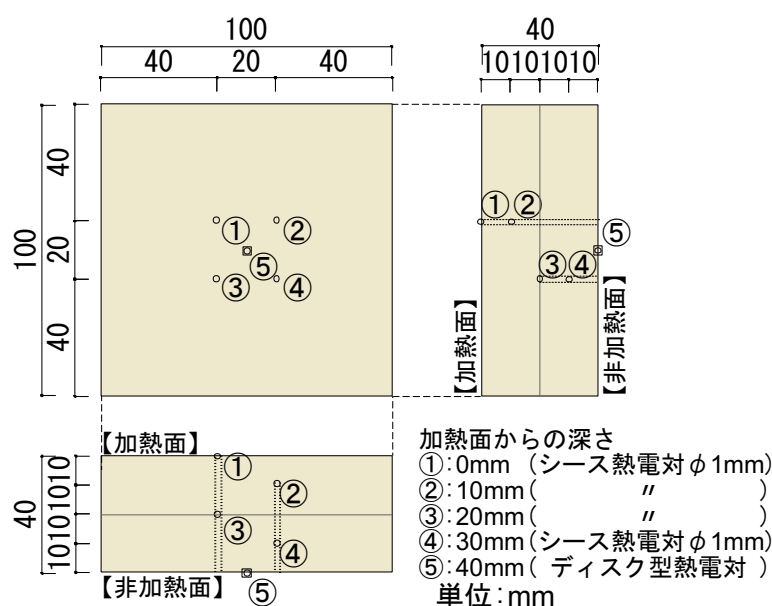


図 2.1.2 試験体 T,E 熱電対配置図

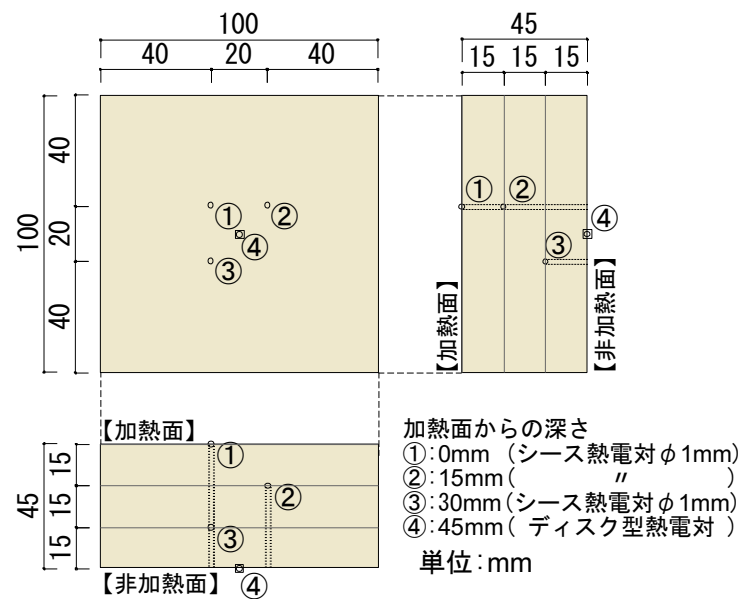


図 2.1.3 試験体 P 熱電対配置図

2.1.3 実験結果

次ページより、無処理木材及び難燃処理木材それぞれについて、実験結果を示す。

(1) 無処理木材 (試験体 T)

- 1) 試験体内部温度及び裏面温度
- 2) 発熱速度、総発熱量及び重量変化

(2) 難燃処理木材 (試験体 E1、E2、P)

- 1) 試験体内部温度及び裏面温度
- 2) 発熱速度、総発熱量及び重量変化

(1) 無処理木材（試験体 T）

1) 試験体内部温度及び裏面温度

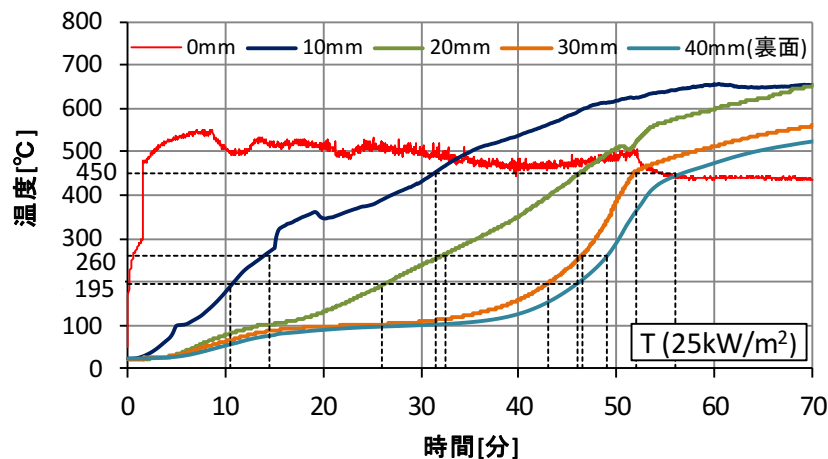


図 2.1.4 無処理木材 試験体 T-25 温度推移 (25kW/m²)

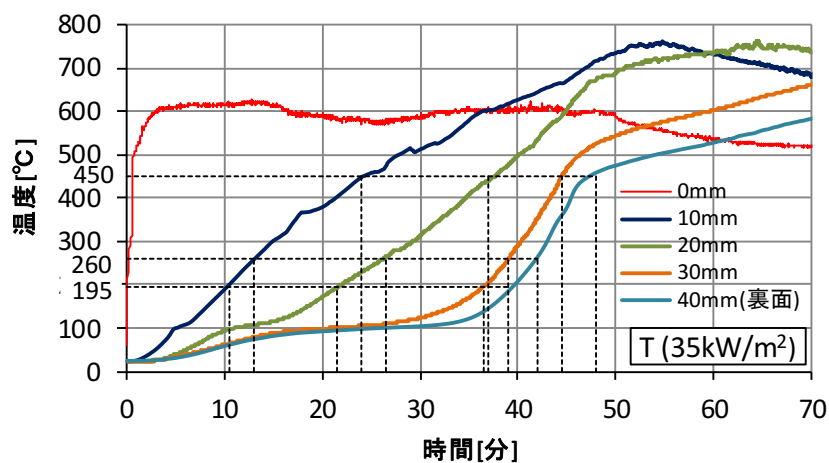


図 2.1.5 無処理木材 試験体 T-35 温度推移 (35kW/m²)

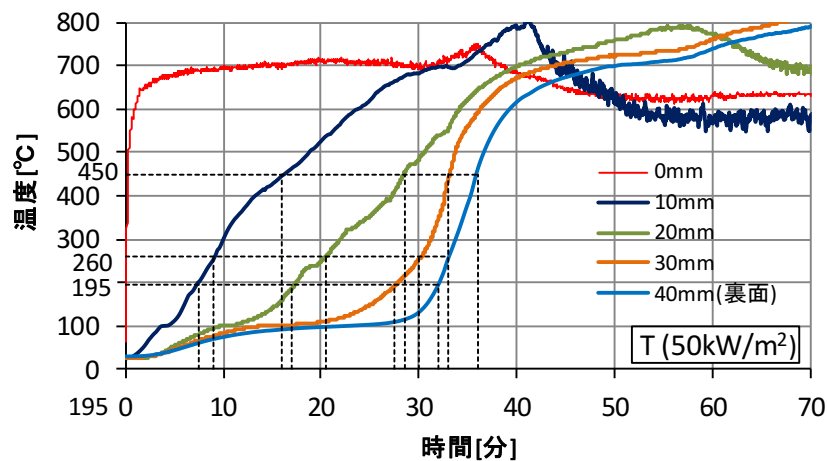


図 2.1.6 無処理木材 試験体 T-50 温度推移 (50kW/m²)

2) 発熱速度、総発熱量及び重量変化

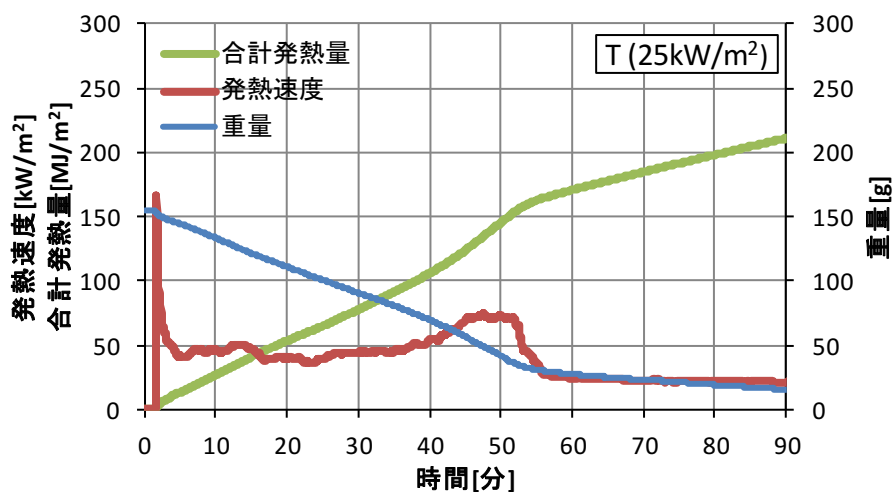


図 2.1.7 無処理木材 試験体 T-25 発熱速度・総発熱量・重量変化 (25kW/m²)

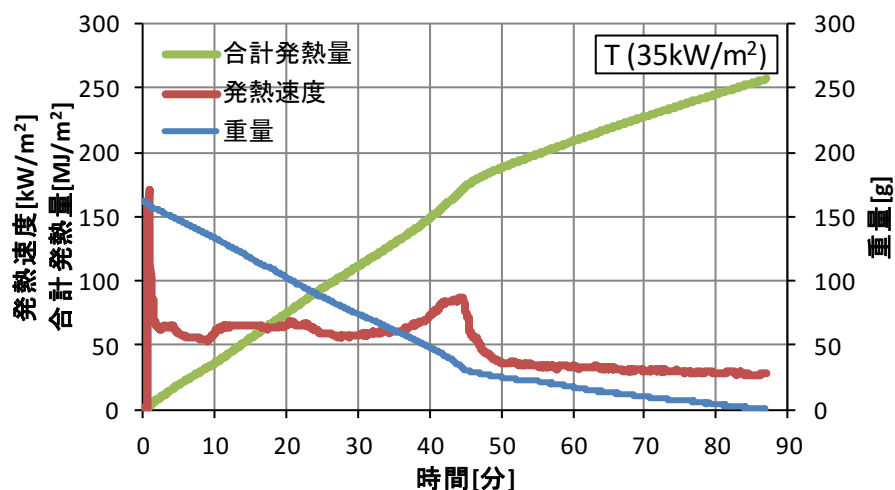


図 2.1.8 無処理木材 試験体 T-35 発熱速度・総発熱量・重量変化 (35kW/m²)

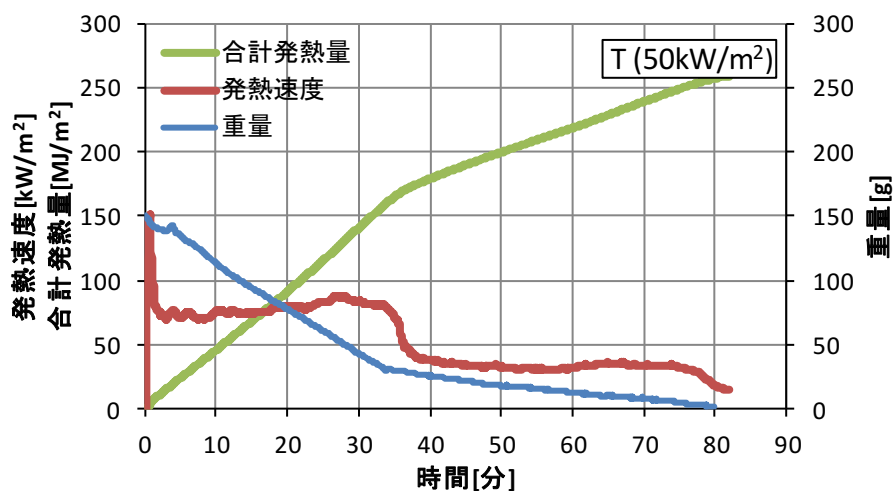


図 2.1.9 無処理木材 試験体 T-50 発熱速度・総発熱量・重量変化 (50kW/m²)

無処理木材では、図 2.1.7～図 2.1.9 より、発熱速度は、いずれの加熱条件においても表面に着火直後に急激に上昇したあと、減衰するという過去に多数行われた木材の燃焼発熱試験と同様の傾向を示した。この減衰の後、発熱速度はほぼ一定のまま推移するが、加熱開始から 35～50 分程度で、加熱条件によっては、一旦、緩やかに上昇した後、更に段差状に急激に低下し、それ以後、再びほぼ一定の発熱速度が続いている。従来、コーンカロリーメータによる建築材料の燃焼発熱測定時間は、最長で 20 分程度としているため、この二度目の発熱速度の段差状の低下後の発熱速度は測定された例は、短時間に燃え尽きるような薄い試験体を除いて少ない。ピークから減衰後に発熱速度がほぼ一定となっている区間は、加熱強度が大きいほど短く、発熱速度自体は、加熱強度が大きいほど大きくなった。

ここで、試験体表面の熱収支を考えるために、表面炭化後は表面の放射率が $\varepsilon=1.0$ となり、表面に入射する放射熱 q_{out}'' [kW/m²] が再放射されると仮定して得られる放射平衡表面温度 T [K] を求めると、 $q_{out}'' = \varepsilon \times \sigma \times T^4$ から、

$$T = (q_{out}'' / \sigma)^{1/4}$$

となる。ここで、 σ は Stefan-Boltzman 定数 ($=5.667 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$) である。各加熱強度に対する放射平衡表面温度は、摂氏換算で

$$25\text{kW/m}^2: 542^\circ\text{C} \quad 35\text{kW/m}^2: 613^\circ\text{C} \quad 50\text{kW/m}^2: 696^\circ\text{C}$$

となる。これを本実験における表面温度（図 2.1.4～図 2.1.6）と比較すると、どの加熱条件でも、着火直後のピークの後、35～50 分で発熱速度が段差状に低下するまでは、ほぼ終始、試験体の表面温度は、この放射平衡表面温度の前後で推移したことがわかる。

図 2.1.4～図 2.1.6 から、内部温度は表面付近では加熱初期から一様に上昇したが、加熱面から離れた位置では、裏面を含めて、100℃付近でいったん上昇が停滞した後、再び上昇するというパターンとなった。このため、100℃を超えるまでの時間は加熱面から離れるほど遅れが目立つが、その後の温度上昇は、加熱面付近よりも急激で、100℃を超えてから、木材の炭化温度の 260℃に達するまでの時間は、加熱面から遠いほど短くなっている。この間の表面温度は加熱強度が最小の 25kW/m² の場合でも 450℃に達しているから、試験体内部で起こっている反応は、表面付近では赤熱燃焼、遠方では熱分解反応で、熱分解反応が起こっている範囲が徐々に裏面側に進んでいると考えられる。また、この段階から更に発熱速度が段差状に低下した後の内部温度は表面温度よりむしろ高くなっており、内部で発熱して表面から外部に放熱が起こっていることを窺わせる。加えて、この段階で

裏面が 450℃を超えていることから、試験体内部で赤熱燃焼が起こっていると考えられる。

試験体裏面温度が木材の炭化温度 260℃に達する時間と試験体厚さ(40mm)から、各加熱強度の炭化速度の平均値を算出した。算出結果は表 2.1.4 に示す。既往研究⁷⁾⁸⁾⁹⁾等では示されているスギ、カラマツ等の木材の炭化速度 0.6~0.8mm/分と概ね一致し、コーンカロリメータ試験では、加熱強度 25 kW/m² が最もその値に近いことがわかる。一般に、耐火炉内で標準加熱される試験体よりも、大気中に試験体が設置され定常加熱されるコーンカロリメータの方が、酸素濃度が高く炭化速度は大きくなると考えられるが、炭化速度が大きくは変わらないため、本実験の結果から、燃え止まり型木質耐火構造部材仕様の設計に向けた考察を行う妥当性が示されたと言える。

表 2.1.4 各加熱強度における炭化速度の平均値

試験体		加熱強度[kW/m ²]	炭化温度に達する時間[分]	炭化速度[mm/分]
無処理	T-25	25	49.1	0.81
	T-35	35	41.9	0.95
	T-50	50	33.1	1.20

さて、内部温度の経過にみられる特徴のうち、100℃付近での温度上昇の停滞は水分の蒸発に起因し、加熱面から遠いほどこの停滞が顕著になるのは、加熱による水分蒸発で加熱面側の内部圧が上昇して、木材中の水分が非加熱側に移動するため非加熱側の含水率が上昇し、加熱されても熱が水分蒸発に使われるからだと考えられる。このことから、裏面側で 100℃を超えてからの温度上昇が急激になる理由の一つは、試験体裏面側が断熱材のブランケットに接している影響だと考えられる。

以上から、今回のコーンカロリメータ試験では、熱分解が活発な温度範囲が裏面近くに達した段階では、同時に熱分解が起こった幅がより初期の段階よりも大きくなったと推定される。発熱速度の2回目のピークは、裏面側が断熱されていることによる影響であり、木材が更に厚くなれば、その出現は遅れるか生じなくなるかのいずれかであろう。本実験で観測された炭化速度が大断面木材の経験値よりも大きめになっているのも、裏面の断熱の影響によるところが大きいと思われる。

(2) 難燃処理木材（試験体 E1、E2、P）

1) 試験体内部温度及び裏面温度

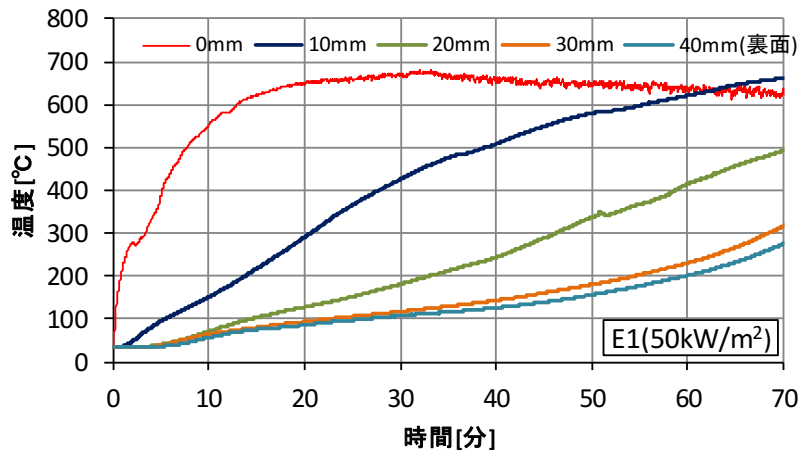


図 2.1.10 難燃処理木材 試験体 E1（注入量 180kg/m³） 温度推移

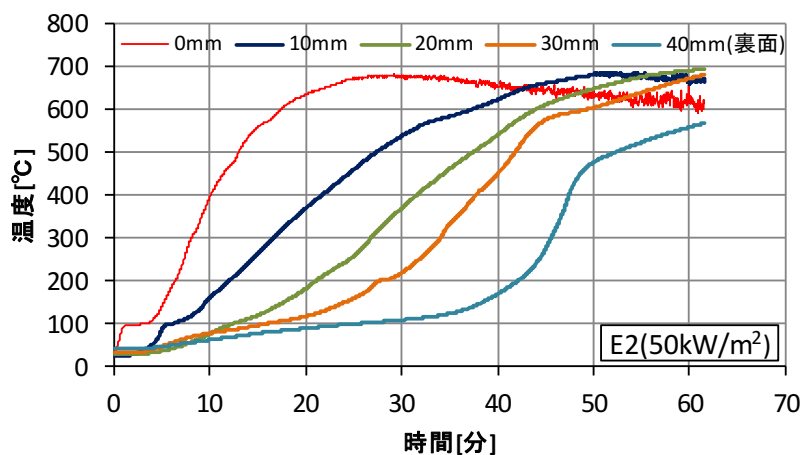


図 2.1.11 難燃処理木材 試験体 E2（注入量 110kg/m³） 温度推移

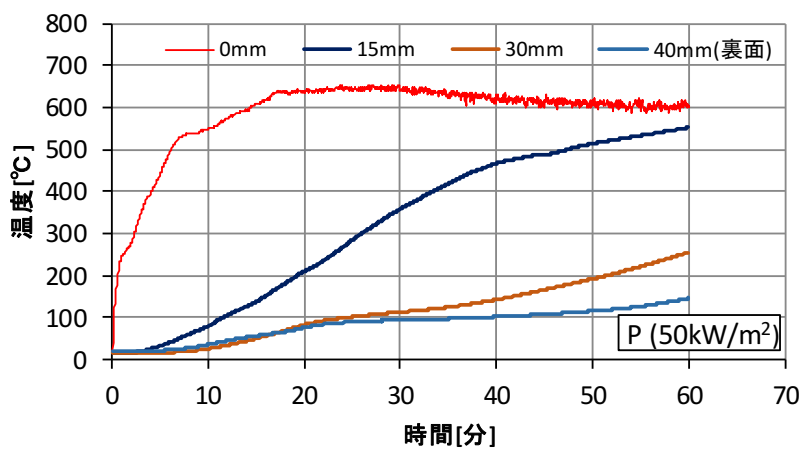


図 2.1.12 難燃処理合板 試験体 P（注入量 140kg/m³） 温度推移

2) 発熱速度、総発熱量及び重量変化

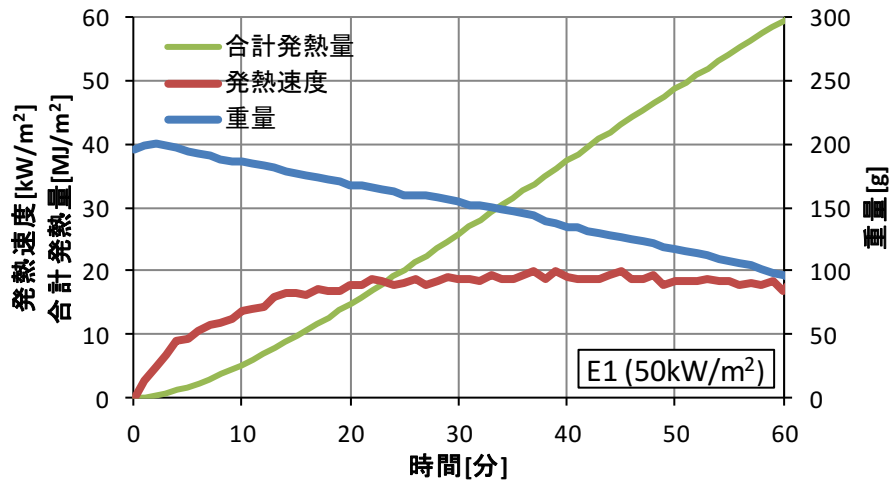


図 2.1.13 難燃処理木材 試験体 E1 (注入量 180kg/m³) 発熱速度・総発熱量・重量変化

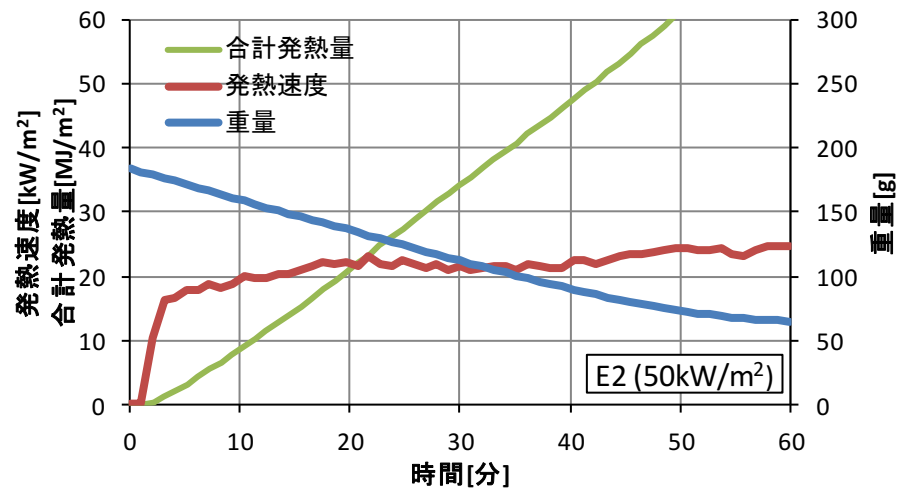


図 2.1.14 難燃処理木材 試験体 E2 (注入量 110kg/m³) 発熱速度・総発熱量・重量変化

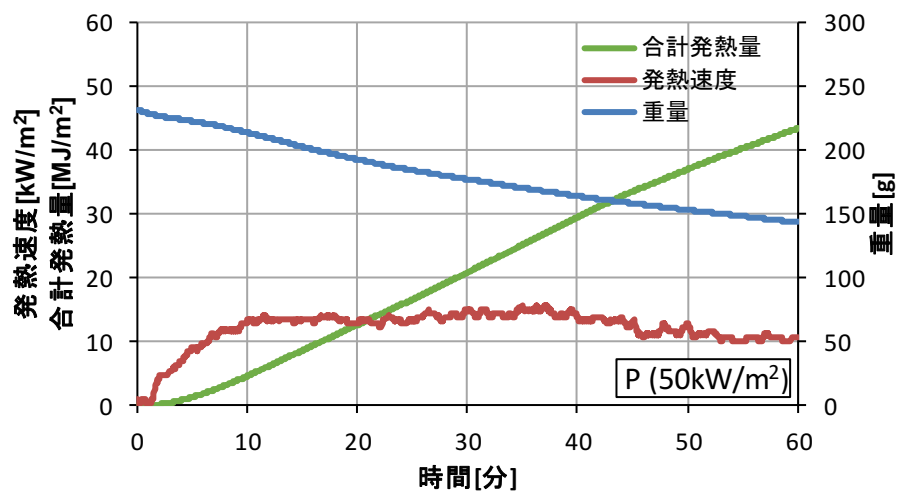


図 2.1.15 難燃処理合板 試験体 P (注入量 140kg/m³) 発熱速度・総発熱量・重量変化

図 2.1.13～図 2.1.15 より、難燃処理木材では、加熱開始直後から一定の発熱速度をとった。これは、難燃薬剤を注入することで熱分解による可燃性ガスの有炎燃焼過程を有さないためだと考えられる。従って、一定の発熱速度は、炭の固相燃焼である赤熱燃焼のみによる発熱速度を示していると考えられる。

・難燃処理材の防火材料性能について

燃え止まり層に使用する難燃処理木材は、建築基準法上の防火材料に位置付けられているものであれば、市場に流通する製品を利用できる可能性もあり、木質耐火構造部材の生産の安定化・低価格化に資すると考えられる。そこで、本実験で使用した難燃処理木材の防火材料としての性能を検討する。防火材料の判断基準はコーンカロリメータで加熱強度 50kW/m^2 とし、所定時間内（不燃材料 20 分、準不燃材料 10 分、難燃材料 5 分）において、下記を満たすことと定められている¹⁰⁾。

- ① 合計発熱量 8MJ/m^2 以下であること
- ② 裏面まで亀裂や穴が貫通しないこと
- ③ 最高発熱速度が 10 秒以上継続して 200kW/m^2 を超えないこと

本実験で使用した難燃処理木材では、加熱強度 50kW/m^2 のとき、合計発熱量 8MJ/m^2 かつ発熱速度 200kW/m^2 を加熱開始 10 分まで超えなかった E1、P は準不燃材料相当、5 分まで超えなかった E2 は難燃材料相当の性能を満たす。薬剤注入量が多いほど合計発熱量及び発熱速度は小さくなり、本実験で使用した難燃薬剤（丸菱油化工業株式会社製ノンネン W2-50）では、注入量が 140kg/m^3 以上では準不燃材料相当を満たし、注入量 110kg/m^3 以上では、難燃材料相当を満たすといえる。

表 2.1.5 難燃処理木材の防火材料の判定

試験体		加熱 強度 [kW/m ²]	①合計発熱量が 8 MJ/m ² を超える時間	②発熱速度が 200kW/m ² を超える時間	③亀裂や穴の 貫通	防火材料 の判定
E	E1(180kg/m ³)	50	13.2 分 (> 10 分)	60 分以上	なし	準不燃材料
	E2(110kg/m ³)		9.4 分 (> 5 分)	60 分以上	なし	難燃材料
	P(140kg/m ³)		12.7 分 (> 10 分)	60 分以上	なし	準不燃材料

2.1.4 考察

(1) コーンカロリメータ試験における発熱速度の温度依存性

木材を加熱した時の燃焼発熱速度が以下の3段階に分かれることは以前から知られている。そこで本コーンカロリメータ実験結果と、既往研究¹¹⁾¹²⁾から得られた木材の各温度帯の熱分解・燃焼性状を対応させることにより、以下のように建築部材としての木材の熱分解・燃焼性状における発熱速度の変化過程の温度依存性を考察する。

- ① 木材表面に着火直後の発熱速度の急上昇
- ② その後減衰し、ほぼ一定の発熱速度のまま推移
- ③ その後の段差状の急激な低下から、燃え尽きるまで再びほぼ一定の発熱速度で推移

既往研究¹¹⁾¹²⁾から木材の熱分解反応及び炭化は260℃、赤熱燃焼は450℃付近で活発化すると考えられる。コーンカロリメータ試験では、スギ集成材の裏面温度が450℃を超えると、燃え尽きるまで発熱速度はほぼ一定になっている。これは、試験体全体にわたって赤熱燃焼のみが生じているからと解釈できる。実験結果で示した通り、木材内部の温度は、裏面温度が450℃を超えた段階では、どの加熱条件でも表面温度より高くなっているが、これは、木材内部では赤熱燃焼により発熱し、表面では熱損失が生じていることを示している。

以上から、木材平板は、加熱面で引火して発炎してから裏面温度が赤熱燃焼帯に達するまでは、熱分解反応と赤熱燃焼が加熱面に近い部分と加熱面から遠い部分に分けて同時に起こっており、発熱速度は両反応の和となっていること、次に裏面温度が赤熱燃焼帯に達した後は、赤熱燃焼のみとなることが推測される。燃焼発熱速度の時間的变化を図式的に見ると、各時期の発熱速度はほぼ一定となるが、熱分解反応による発熱が赤熱燃焼による発熱に卓越し、熱分解反応の有無に応じて、両時期の間で段差状の急激な変化を生ずると解釈できる。

(2) 燃え止まり型木質耐火構造部材の自消性状に向けた一考

前述までの考察により、赤熱燃焼のみ起こっている段階では、木材内部温度が、加熱表面の温度よりも高くなっていることから、木材内部で燃焼発熱が生じて、表面から外部に放熱されていると考えられる。その段階での発熱速度は、コーンヒーターによる外部加熱よりも小さいため、外部加熱が停止されれば、赤熱燃焼は衰退し、自消に向かうと考えら

れる。また、熱分解と赤熱燃焼が共存している段階での試験体表面温度はコーンヒーターによる放射加熱とほぼ平衡していることから、試験体表面付近では温度勾配が小さく断熱状態に近い状態が生まれていると推測できる。

すなわち、大断面木材の表面からやや離れた部分で赤熱燃焼に至った場合、その表面側の炭化層の断熱効果により、同様の断熱状態が出現し得ると考えると、その場合は、木材全体が外部から加熱を受けなくても、本実験のように赤熱燃焼が持続すると考えられる。その内部では局所的にせよ、断熱に近い状態が維持されるため、雰囲気温度が低下しても、赤熱燃焼が続く可能性は大きいことが理解できる。木質耐火構造の耐火加熱試験において、加熱終了後も、中心部の構造支持部分を被覆する燃えしろ層・燃え止まり層の木材の燃焼がなかなか終わらないのは、この現象に起因するものと考えられる。よって、木質耐火構造部材で、最終的に構造支持部を炭化させることなく自然に自消させるためには、燃えしろ層などで、このような断熱状態が続かないようにする工夫を講じる必要があると考えられる。

(3) 難燃処理木材の防火材料性能について

本実験で使用した窒素リン酸系難燃薬剤ノンネン W2-50 を注入した難燃処理木材では、加熱強度 50kW/m^2 のとき、合計発熱量 8MJ/m^2 かつ発熱速度 200kW/m^2 を加熱開始 10 分まで超えなかった E1、P（難燃薬剤注入量 $140\sim 180\text{kg/m}^3$ ）は準不燃材料相当、5 分まで超えなかった E2（難燃薬剤注入量 110kg/m^3 ）は難燃材料相当の性能を満たした。

2.2 木材の加熱後の赤熱燃焼と自消性状

2.2.1 実験目的

第1章で示した通り、木質耐火構造では、火災加熱を受けた後でも、自消することが求められる。自消性状は、加熱後の赤熱燃焼に影響を受け、既往研究¹⁾²⁾より、特に燃えしろ層が厚い場合、燃えしろ層内部で赤熱燃焼が継続するため、自消に支障をきたす可能性があることが知られている。前節では、木材が赤熱燃焼に至った場合、外部加熱を受けなくても木材内部が断熱に近い状態で維持されると、赤熱燃焼が継続する可能性が示唆されているが、木質耐火部材を対象とした、加熱終了後の赤熱燃焼の継続について定量的な検討はなされていない。これらより本節では、無処理スギを試験体として、一定の入射熱流束条件下での加熱実験を行い、赤熱燃焼が継続する境界条件を把握することを目的とする。

加熱方法は、前節と同様にコントロールしやすく再現性の高いコーンカロリメータ試験装置に付属するコーンヒーターを用いる。加熱強度と加熱時間の加熱条件をパラメータとして、コーンヒーターで試験体を加熱後、試験体をコーンカロリメータ試験装置から取り出し常温無風下で自然放冷して、自然放冷中の内部温度や重量変化から加熱条件と自消性状の関係を把握する。

以上の無処理のスギ材を用いた実験結果から、燃え止まり型木質耐火構造部材を想定し、燃えしろ層の内部に燃え止まり層を設けた場合の自消条件を考察し、自消を確保する燃えしろ層厚さを推察する。

2.2.2 実験概要

(1) 実験方法

本実験は、2.1節と同様に森林総合研究所内のCone Calorie MeterⅢ（東洋精機製）を用い、加熱強度及び加熱時間の条件以外、ISO5660に準拠して加熱を行った。コーンカロリメータ試験装置の概略図は図2.1.1に示す。測定原理及び試験体設置方法は2.1節と同様である。

本実験では、図2.2.1に示すように、コーンヒーターによる試験体の加熱後、試験体を試験装置から取り出して試験体をホルダーから外し、非加熱面を断熱材（セラミックファイバーブランケット厚さ：約30mm、密度：約110kg/m³）で断熱した上で、室温28℃無風下にて自然放冷し、自消の有無を判断した。放置中の様子を写真2.2.1に示す。

自消の判断は、表面温度が赤熱燃焼の限界温度である 450°C ¹¹⁾¹²⁾ に比べ十分低下し、かつ重量減少が停止した時点と定めた。

加熱時間は、厚さ 40mm のスギ試験体が炭化完了するであろう 60 分を基準として、10、30、60 分、加熱強度は前節と同様に 25、35、50kW/m² を基本としたが、ある加熱条件に境に自消の有無が変化した場合、両条件の中間の条件で実験し、自消条件のより詳細な把握を試みた。

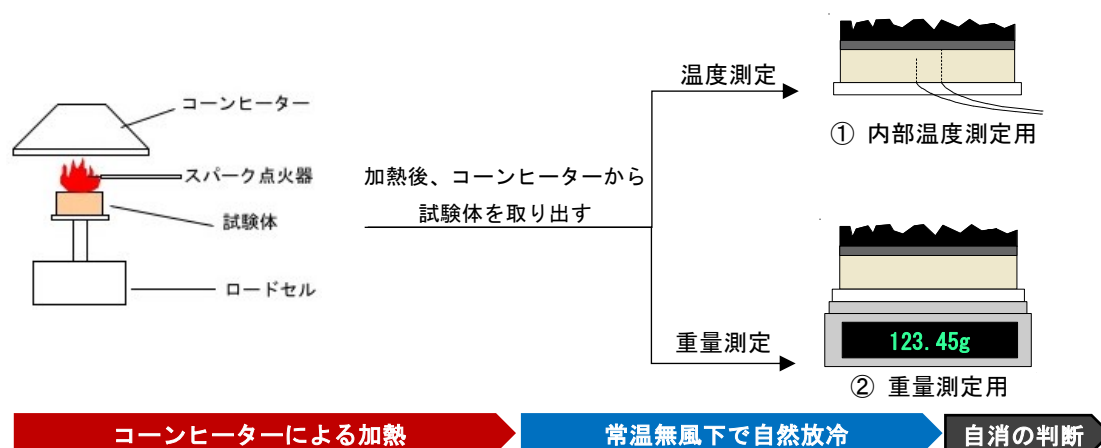


図 2.2.1 実験方法



① 内部温度測定用



② 重量測定用

写真 2.2.1 放置中の様子

(2) 試験体

第1章の研究対象で述べた通り、試験体は国内で最も耐火構造部材として需要が高いスギの無処理材を用いる。コーンカロリメータ試験装置では、定常加熱時に重量減少を測定できる試験体厚さの限界が 40mm である。したがって試験体は、無処理スギラミナ 20mm 厚さ 2 枚をレゾルシノール樹脂系接着剤で接着した加熱面 100mm×100mm×厚さ 40mm のスギ集成材とした。

各試験体の含水率は、絶乾炉（105℃）に入れて乾燥させ、重量減少から試験体の含水率を測定した。各算出結果は表 2.2.1 に示す。木材の含水率の計算式を以下に示す。

$$\text{含水率(\%)} = \{ (\text{絶乾前の重量} - \text{絶乾後の重量}) / \text{絶乾後の重量} \} \times 100$$

表 2.2.1 試験体含水率

試験体	含水率測定用 サンプル名	気乾重量[g]	絶乾重量[g]	含水率[%]
① 内部温度測定用	D-1a	7.35	6.618	11.061
	D-1b	7.55	6.781	11.341
	D-1c	7.53	6.778	11.095
② 重量測定用	D-2a	7.14	6.446	10.766
	D-2b	7.19	6.489	10.803
	D-2c	7.10	6.441	10.231

(3) 測定項目

試験体の内部温度分布及び重量を主に測定するが、内部温度測定には熱電対を用い配線が必要であるため、ロードセルを用いる重量測定とは同時に測定できない。このため、同一条件で実施する試験体を内部温度測定用試験体と重量測定用試験体の 2 種類を用意した。各試験体で、以下の項目について、測定を行った。

① 内部温度測定用試験体

1) 試験体内部温度及び裏面温度（加熱中及び自然放冷中）

内部温度測定点は、加熱表面から 10mm 間隔に配置し、15 秒間隔で測定した。直径 1mm の K 型シース熱電対を試験体裏面から加熱面方向に垂直にあけたドリル穴に挿入し測定した。裏面温度は、試験体非加熱面にディスク付き K(CA)熱電対を設置し 2 秒間隔で測定した。図 2.2.2 に試験体の熱電対設置位置を示す。

2) 試験体表面温度（自然放冷中）

表面温度は、熱映像（FLIR 社製、測定範囲～670℃）にて試験体表面の最高温度及び平均温度を 1 分または 5 分間隔で測定した。

3) 総発熱量（加熱中）

酸素消費法にて算出した。

4) その他（加熱中及び自然放冷中）

試験体加熱面の目視観察、ビデオ撮影、写真撮影を行った。

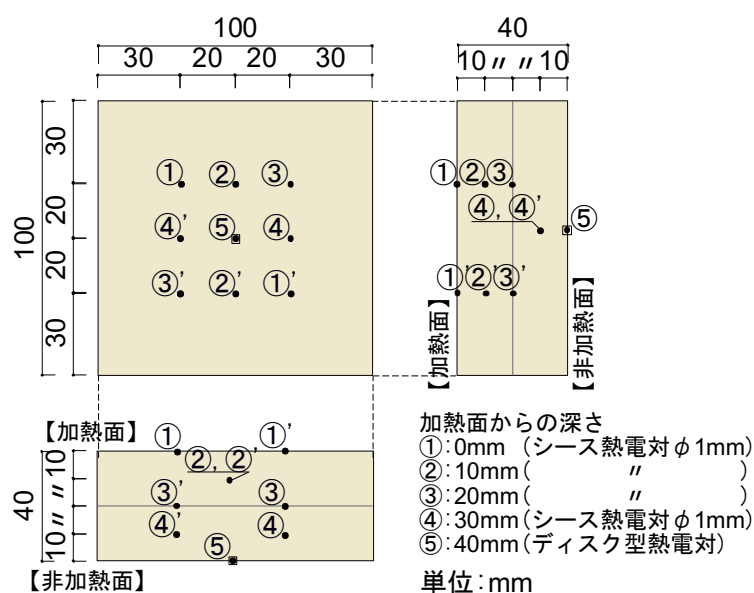


図 2.2.2 熱電対配置図

② 重量測定用試験体

1) 重量変化（加熱中及び自然放冷中）

加熱中の試験体の重量変化はコーンカロリメータ試験装置に設置されているロードセルで測定した。自然放冷中の重量変化は、電子天秤（メトラートレド社製）で測定した。

2) 試験体表面温度（自然放冷中）

表面温度は、熱映像（FLIR 社製、測定範囲～670℃）にて試験体表面の最高温度及び平均温度を 1 分または 5 分間隔で測定した。

3) 総発熱量（加熱中）

酸素消費法にて算出した。

4) その他（加熱中及び自然放冷中）

試験体加熱面の目視観察、ビデオ撮影、写真撮影を行った。

内部温度測定用及び重量測定用試験体について、実験を実施した加熱時間及び加熱強度の各加熱条件を表 2.2.2 に示す。

表 2.2.2 各測定用試験体で実施した加熱条件

加熱時間	10 分		20 分				25 分	30 分				45 分	60 分	
加熱強度 [kW/m ²]	30	50	30	35	50	50	50	25	30	35	50	25	25	30
① 内部温度 測定用	-	-	-	○	-	○	-	○	○	○	-	○	-	-
② 重量測定用	○	○	○	○	○	-	○	○	○	○	○	○	○	○

2.2.3 実験結果

各加熱条件における実験結果一覧を表 2.2.3 に示す。自消判定は、自消した場合は“○”、燃焼が継続した場合は“×”と記載した。加熱終了後の自消の判断は、表面温度が赤熱燃焼の限界温度である 450℃に比べ十分低下し、重量比減少速度が 0 になった時点とした。重量比は、実験中の試験体の重量を加熱前の重量で除した値とし、重量比減少速度は重量比を時間[s]で除した値とした。加熱終了時の炭化深さは、加熱終了時に 260℃を超えた深さを炭化深さとした。次ページより、以下の(1)～(3)について実験結果を示す。

- (1) 試験体表面及び内部・裏面温度と重量変化
- (2) 脱炉直後及び終局時の試験体の様子
- (3) 重量比減少速度の時間推移

表 2.2.3 各加熱条件における実験結果一覧

加熱 条件 実験 結果	加熱時間	10分		20分				25分	30分				45分	60分	
	加熱強度 [kW/m ²]	30	50	30	35	50		50	25	30	35	50	25	25	30
脱炉までの 総発熱量[MJ/m ²]		23.91	49.02	39.94	83.72	117.7	125.0	139.4	120.8	119.7	143.8	153.5	161.1	193.5	195.5
重量比	脱炉時	0.83	0.71	0.65	0.52	0.39	-	0.30	0.32	0.33	0.26	0.19	0.15	0.10	0.09
	終局	0.80	0.68	0.61	0.46	0.32	-	0.18	0.23	0.19	0.12	0.036	0.088	0.065	0.042
加熱終了時の 炭化深さ※1[mm]		-	10	10	20	-	20	20	30	30	40	40	40	40	40
自消するまでの 時間※2[分]		27	20	20	21	20	90	110	85	95	118	180	64	82	95
自消判定		○ (脱炉後早期に自消した)						× (燃え続けた)							×※3

※1:加熱終了時に 260℃を超えた深さを炭化深さとする。

※2:自然放冷開始を時刻 0 とする

※3:脱炉時に燃え尽きていた。

(1) 試験体表面及び内部・裏面温度と重量変化

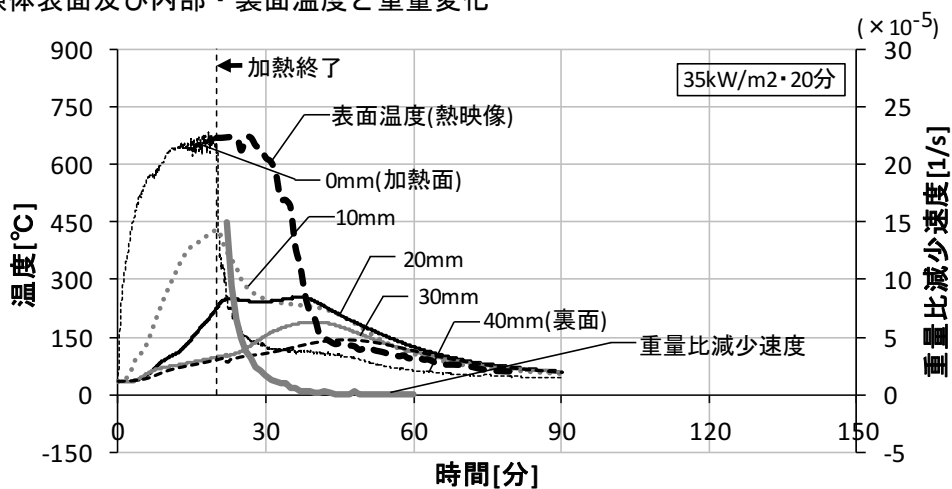


図 2.2.3 表面・内部温度と重量比減少速度（自消した場合）
（加熱強度 35kW/m^2 ・加熱時間 20 分）

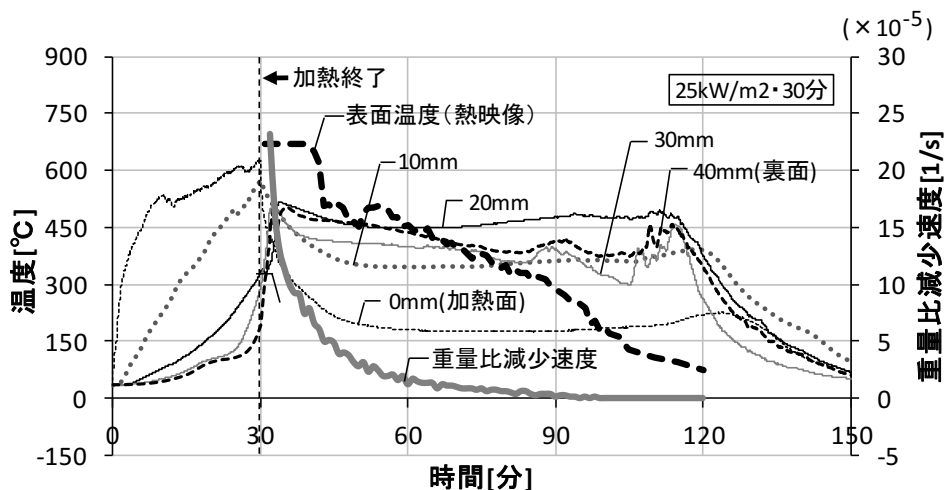


図 2.2.4 表面・内部温度と重量比減少速度（燃焼継続した場合）
（加熱強度 25kW/m^2 ・加熱時間 30 分）

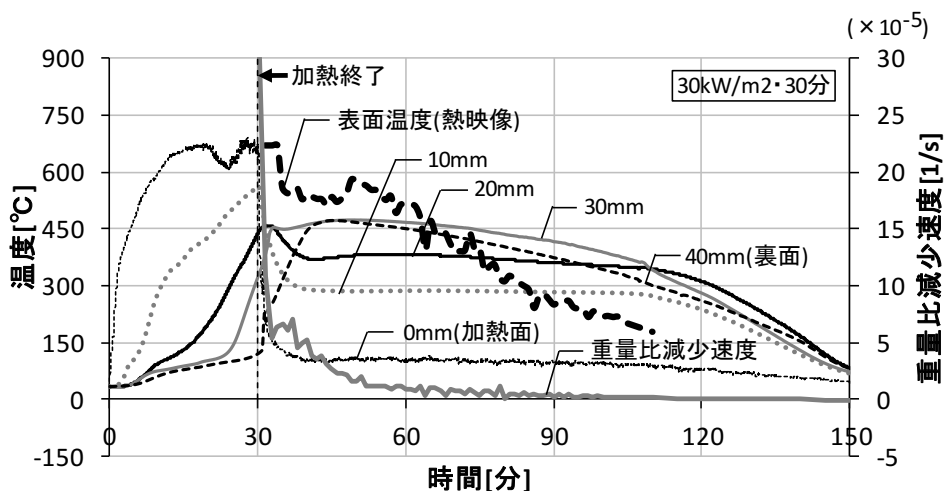


図 2.2.5 表面・内部温度と重量比減少速度（燃焼継続した場合）
（加熱強度 30kW/m^2 ・加熱時間 30 分）

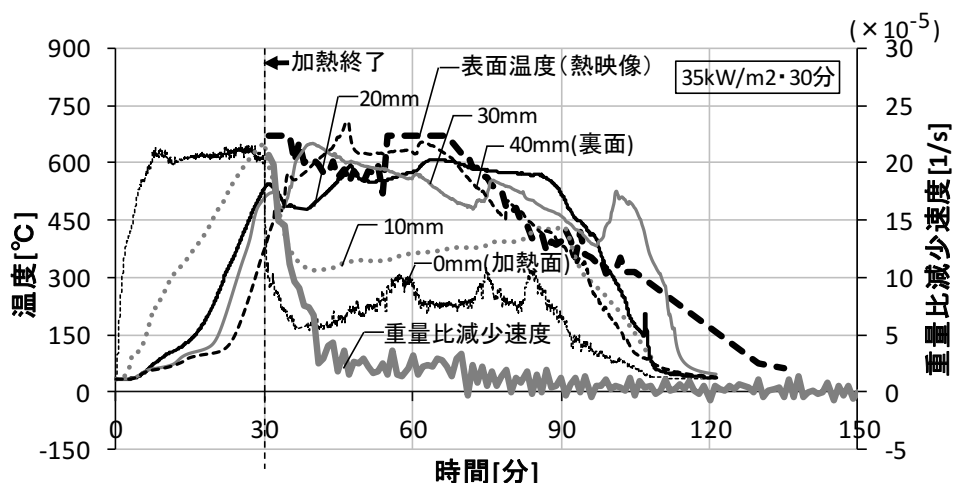


図 2.2.6 表面・内部温度と重量比減少速度（燃焼継続した場合）
（加熱強度 35kW/m^2 ・加熱時間 30 分）

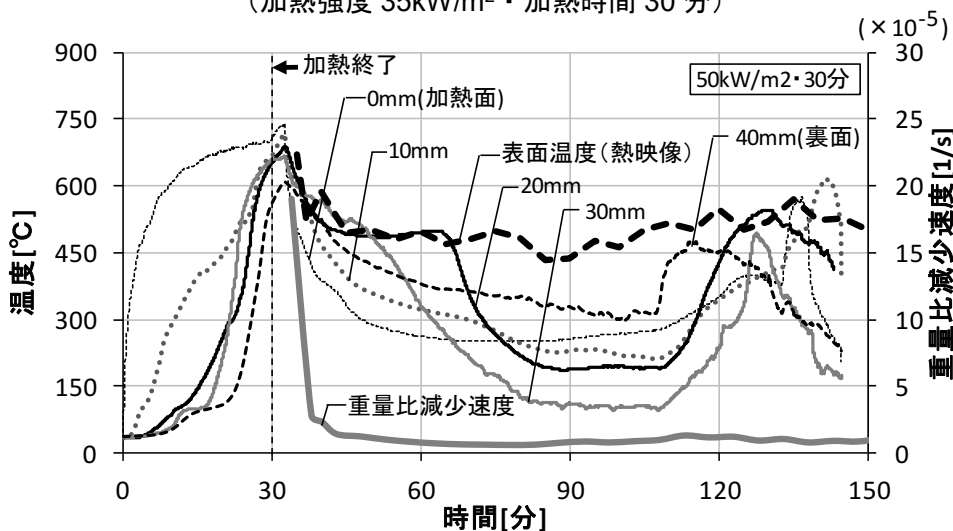


図 2.2.7 表面・内部温度と重量比減少速度（燃焼継続した場合）
（加熱強度 50kW/m^2 ・加熱時間 30 分）

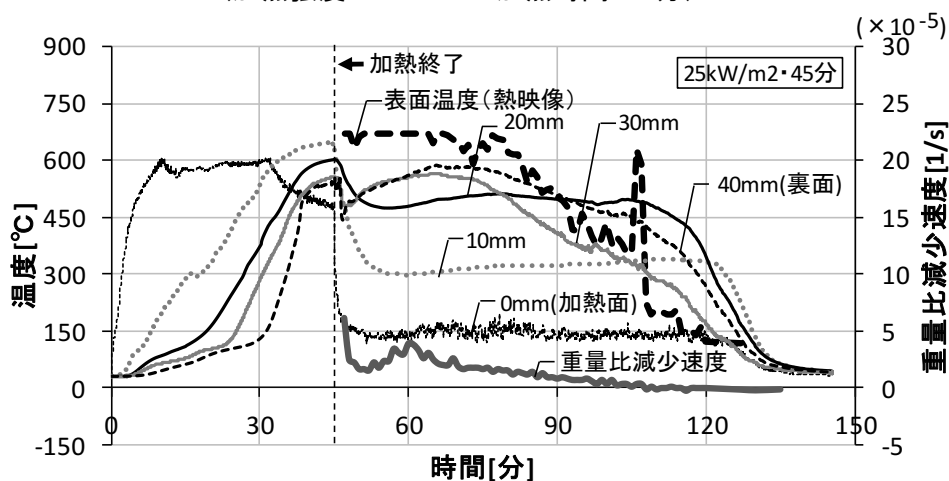


図 2.2.8 表面・内部温度と重量比減少速度（燃焼継続した場合）
（加熱強度 25kW/m^2 ・加熱時間 45 分）

図 2.2.3～図 2.2.8 は、表 2.2.2 に示す全 14 の加熱条件のうち、内部温度測定用として実験を行った 6 つの各加熱条件についての表面・内部温度の時間推移を示したものである。また、温度推移と重量変化の推移を比較して検討しやすいように、温度測定した 6 加熱条件について重量測定用試験体の測定結果から算出した重量比減少速度を併記した。

自消した加熱条件の測定結果を図 2.2.3 に、燃焼継続した加熱条件の測定結果を図 2.2.4～図 2.2.8 に示す。以下に、表面温度・内部温度及び重量比減少速度について、各実験結果を概観する。

・自消した場合（図 2.2.3）



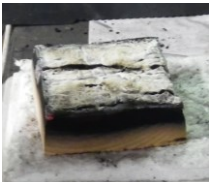


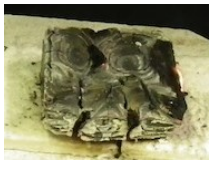
表面温度は、加熱終了後急激に減衰し、20 分以内に 150℃以下まで低下した。重量比減少速度についても表面温度と同様の推移を示し、加熱終了後 21 分で重量比減少速度は“0”となり、自消した。試験体内部温度についても加熱終了後に大きな温度上昇はなく、加熱時間の 3 倍程度経過した時点で常温に収束した。

・燃焼が継続した場合（図 2.2.4～図 2.2.8）

表面温度は、加熱終了後、時間に比例するように緩やかに低下した。加熱終了後の重量比減少速度は概ね時間に依らず一定値を保ちながら徐々に減少し、“0”になるまで自然放冷開始から早くとも 1 時間以上かかった。試験体内部温度の推移は、重量比減少速度が“0”になるまで概ね一定値を取り、その値は 300～600℃程度を維持していた。加熱中は表面から近いほど高温となったが、加熱終了後は深さ 10mm と、深さ 20～40mm の間で温度高低に逆転が起き、10mm のみ 300℃程度を推移、20mm 以深の温度は概ね 450℃以上を保っていた。これより、20mm 以深の試験体内部では、赤熱燃焼が継続していたと推定される。

(2) 脱炉直後及び終局時の試験体の様子

表 2.2.4 各加熱条件における実験結果と試験体の様子一覧


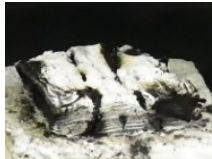



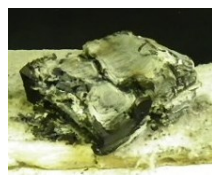








加熱時間[分]	加熱強度[kW/m ²]	脱炉までの総発熱量[MJ/m ²]	脱炉時／終局重量比	脱炉時炭化深さ[mm] ※1	自消するまでの時間[分] ※2	自消判定 ※4	脱炉直後の試験体の様子	終局時の試験体の様子
10	30	23.91	0.83 / 0.80	-	27	○		
	50	49.02	0.71 / 0.68	10	20	○		
20	30	39.94	0.65 / 0.61	10	20	○		
	35	83.72	0.52 / 0.46	20	21	○		
	50	117.7	0.39 / 0.32	-	20	○		
25	50	139.4	0.3 / 0.18	20	90	×		

※1:加熱終了時に 260℃を超えた深さを炭化深さとする。

※2:自然放冷開始を時刻 0 とする

※3:脱炉時に燃え尽きていた。

※4:“○”:脱炉後早期に自消,“×”:燃焼が継続した

加熱時間[分]	加熱強度[kW/m ²]	脱炉までの総発熱量[MJ/m ²]	脱炉時／終局重量比	脱炉時炭化深さ[mm] ※1	自消するまでの時間[分] ※2	自消判定 ※4	脱炉直後の試験体の様子	終局時の試験体の様子
30	25	120.8	0.32 / 0.23	30	85	×		
	30	119.7	0.33 / 0.19	30	95	×		
	35	143.8	0.26 / 0.12	40	118	×		
	50	153.5	0.19 / 0.036	40	180	×		
45	25	161.1	0.15 / 0.088	40	64	×		
60	25	193.5	0.1 / 0.065	40	82	×		
	30	195.5	0.09 / 0.042	40	95	× ※3		

※1:加熱終了時に260℃を超えた深さを炭化深さとする。

※2:自然放冷開始を時刻0とする

※3:脱炉時に燃え尽きていた。

※4: “○”: 脱炉後早期に自消, “×”: 燃焼が継続した

表 2.2.4 に実験結果の一覧として、脱炉直後及び終局時の試験体の様子、脱炉までの総発熱量、脱炉時及び終局時の重量比、加熱終了時の炭化深さ、自消するまでの時間をまとめた。重量比は、実験中の試験体の重量を加熱前の重量で除した値とし、加熱終了時の炭化深さは、加熱終了時に 260℃を超えた深さを炭化深さとした。

・脱炉時及び終局時の重量比

表 2.2.4 に示すように、加熱終了後 20 分程度で自消した場合と、燃焼継続した場合の 2 グループに分けることができた。自消の境界は、脱炉時重量比が 0.3～0.39 であり、既往研究¹³⁾において求めたスギの分解完了時重量比 0.28～0.31 程度と比較すると、概ね熱分解完了に近い値だといえる。

・脱炉までの総発熱量

表 2.2.4 より、脱炉までの総発熱量は、試験体に与える加熱条件（加熱強度と加熱時間の積）が大きいほど大きくなる傾向があり、脱炉までの総発熱量が約 120MJ/m² 以上であれば、燃焼継続すると言える。

・加熱終了時の炭化深さ

自消した条件では、加熱終了時の炭化深さは 10～20mm であり、燃焼継続した場合の加熱終了時の炭化深さは 20～40mm であった。

(3) 重量比減少速度の時間推移

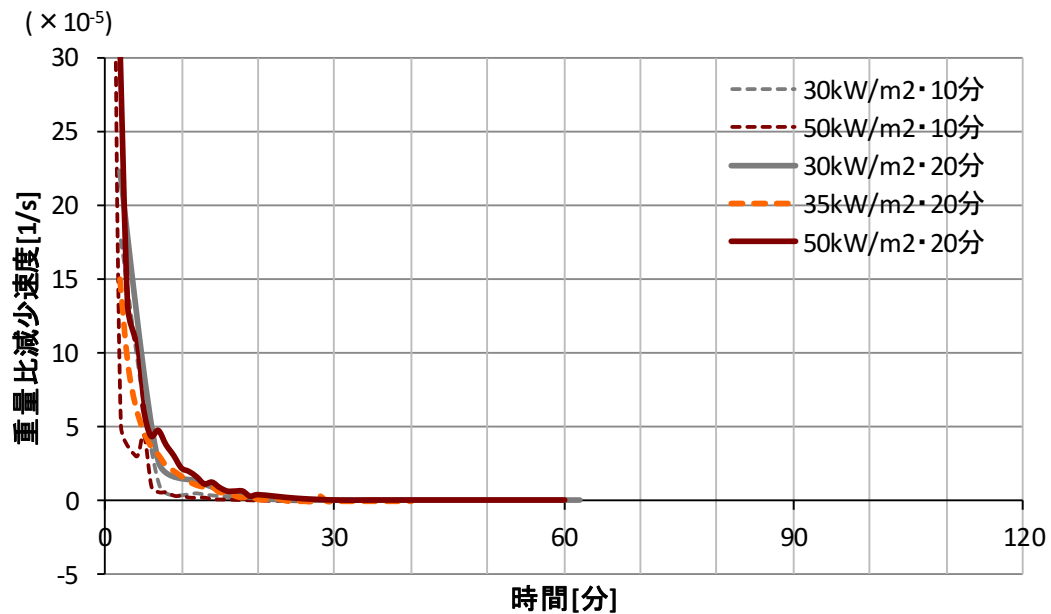


図 2.2.9 重量比減少速度の時間推移（自消した条件）

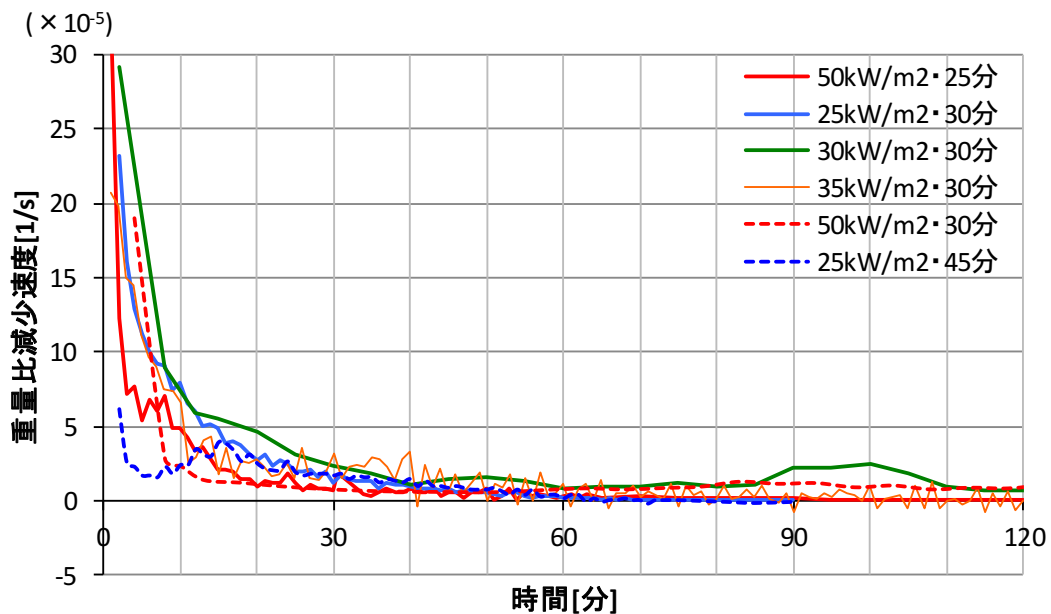


図 2.2.10 重量比減少速度の時間推移（燃焼継続した条件）

自消した条件及び燃焼継続した条件における重量比減少速度の時間推移を図 2.2.9、図 2.2.10 に示す。各試験体で比較検討しやすいよう、各試験での加熱終了時を時刻 0 に統一した。自消した条件では滑らかに速度が減少し、概ね 20 分程度で重量比減少速度が“0”になるが、燃焼継続した条件では、重量比減少速度の振れ幅が大きいことがわかる。

2.2.4 考察

(1) 表面からの熱損失による自消

図 2.2.3～図 2.2.8 より、表面から深さ 10mm と 20mm 以深で内部温度を比較すると、加熱中では加熱面に近い深さ 10mm の方が 20mm 以深より温度が高いが、加熱終了後は、自消の有無に関わらず、時間経過に伴い 20mm 以深の方が高温になる傾向がみられる。

また、図 2.2.3 に示すように自消した場合では、すべての内部温度は、加熱終了後の表面温度の降下に伴ってすぐに降下したが、燃焼継続した場合（図 2.2.4～図 2.2.8）では、試験体内部の深さ 20mm 以深で、赤熱燃焼温度帯である 380～480℃を保っていることから、少なくとも材深部で局部的に赤熱燃焼していると推測される。

これより、木材が赤熱燃焼を始めた場合、加熱終了後に雰囲気温度が低下すれば表面の熱収支の影響を強く受けて自消し易いのは深さ 10mm 程度の浅部であり、深さ 20mm 以遠の材深部では表面熱損失の影響が少なく、赤熱燃焼が継続しやすいことが窺える。

以上から、木材平板が加熱された場合、加熱終了後の自消は表面からの熱損失に起因し、自消の有無は、木材が燃焼発熱している深さが大きく影響するといえる。

(2) 加熱条件と自消限界

本実験のような定常加熱実験において、発熱速度の時間積分である脱炉までの総発熱量は、熱分解した深さを示す指標と考えられ、表 2.2.4 より、約 120MJ/m² 以下が自消限界であることが示された。また、本実験の加熱強度（25～50kW/m²）の範囲では、自消する加熱時間の条件が 20 分以内であり、炭化速度は耐火炉試験と概ね一致することから、木質耐火構造を想定した場合、無処理のスギ材だけでは耐火構造の実現は困難だと考えられる。そこで、木質材料のみで耐火構造の自消を達成するには、材深部で発生する赤熱燃焼を継続させない方法の検討が必要である。

2.2.5 燃え止まり型木質耐火構造部材設計への示唆

本節の実験結果から、無処理木材のみで耐火部材を構成するのは困難であり、材深部で赤熱燃焼を継続させない方法の検討が必要であることを明らかにした。そこで、無処理木材の燃えしろ層の内側に、加熱時に吸熱効果のある難燃処理木材を接着した燃え止まり型木質耐火構造部材を想定した場合について、自消可能な燃えしろ層厚さを検討する。

2.2.4 節の考察より、燃えしろ層厚さが 10mm より薄い場合、試験体表面からの熱損失の影響が大きく赤熱燃焼が停止し自消すると推測できるが、加熱時の燃え止まり層への入熱が大きくなる。一方で、燃えしろ層厚さをより厚くすると、加熱時の燃え止まり層への負荷は軽減されるが、加熱終了後の赤熱燃焼が継続し、加熱終了後も燃え止まり層への入熱が続き、自消しない可能性がある。筆者らが木粉を試料として行った熱分析結果¹⁴⁾より、難燃薬剤の分解温度は 195℃であることから、加熱時に燃え止まり層がこの分解温度に達していれば、燃え止まり層の吸熱効果を発揮すると推測される。

そこで、以下の 2 点を目標として、適正な燃えしろ層厚さを検討する。

- ① 燃え止まり層の吸熱効果を燃えしろ層の温度上昇抑制に利用できるように、加熱終了時まで燃えしろ層内部温度が赤熱燃焼の温度帯に達する深さに燃え止まり層を設ける。
- ② 表面からの熱損失だけで自消させるには、10mm 程度以下であることが必要であると考えられるが、10mm では加熱時間が長い場合、熱時の燃え止まり層への入熱が大きくなり、燃え止まり層への負担が大きくなる。燃えしろ層厚さを厚くすると赤熱燃焼する範囲が増大し、加熱終了後の温度も上昇すると考えられる。そこで、燃えしろ層において、赤熱燃焼が続く範囲をできるだけ抑制することを考えると、20mm 程度が適当と考えられる。

①の条件では、1 時間耐火性能を対象とした場合、燃えしろ層厚さは、図 2.1.6 の試験体内部温度推移から 30mm、②の条件では 20mm が最も適当と考えられる。ここで、燃え止まり層の難燃性能は、これらの条件で自消を達成できるように設計することが前提である。

但し、加熱中に燃え止まり層温度が薬剤分解温度に達し、分解が始まれば、その難燃効果により燃えしろ層深部の温度上昇が抑制されることが考えられることから、燃えしろ層厚さを 20～30mm に設計した時の内部温度は、本実験において同じ深さで測定した温度より低くなると推定される。

2.3 まとめ

- (1) コーンヒーターを用いた定常加熱を行った炭化速度は、既往研究⁷⁾⁸⁾⁹⁾等で示されている耐火加熱試験でのスギ、カラマツ等の木材の炭化速度 0.6~0.8mm/分と概ね一致した。一般に、耐火炉内で標準加熱される試験体よりも、大気中に試験体が設置され定常加熱されるコーンカロリメータの方が、酸素濃度が高く炭化速度は大きくなると考えられるが、炭化速度が大きくは変わらないため、本実験の結果から、燃え止まり型木質耐火構造部材仕様の設計に向けた考察を行うことの妥当性が示されたと言える。
- (2) 窒素リン酸系の難燃薬剤（ノンネン W2-50）を注入した難燃処理木材では、難燃薬剤注入量ごとに防火材料性能が異なり、薬剤注入量 140~180kg/m³（試験体 E1、P）では準不燃材料、薬剤注入量 110kg/m³（試験体 E2）では難燃材料の性能を満たすことを明らかにした。ただし、試験体 E1 は第3章及び第4章の小型炉試験に、試験体 E2 は第3章の小型炉試験に、試験体 P は第3章の実大梁試験に用いる難燃処理木材と同一材である。
- (3) 加熱時間と加熱強度をパラメータとして、コーンヒーターによる定常加熱したスギ小試験体を加熱後、常温下で自然放冷した場合、自消した試験体と概ね燃え尽きるまで赤熱燃焼が継続した試験体の2種類に分類された。これら自消の有無は、自然放冷中の試験体表面からの熱損失に大きく影響されることを明らかにした。表面から 10mm 程度の浅部での赤熱燃焼は表面からの熱損失により温度低下するのに対し、表面から 20mm 以上の深部では、炭化層に囲まれ保温された試験体深部で赤熱燃焼が継続し、熱損失の影響は小さく温度低下も緩慢であることから、加熱終了後の自消性状は赤熱燃焼の起こる深さに大きく影響されることを示した。
- (4) 上記結果を踏まえ、燃えしろ層に無処理木材を、燃え止まり層に難燃処理木材を用いた燃え止まり型木質耐火構造部材を想定して、自消する燃えしろ層厚さを推測した。燃えしろ層は、本章の検討より、厚ければ燃えしろ層の加熱終了後の赤熱燃焼を持続させる場合があることを明らかにした。一方で、薄ければ被覆効果が小さくなり、燃え止まり層が加熱中に高温に曝露されることから、自消の有無は、燃え止まり層の難

燃処理木材の性能に大きな影響を受けると考えられる。これらより、1 時間耐火性能を対象とした場合の自消可能な燃えしろ層厚さは、表面からの熱損失及び燃え止まり層の温度上昇抑制効果が発揮され则认为られる、20～30mm であると推測された。

第2章の参考文献

- 1) 上川大輔・原田寿郎・服部順昭・安藤恵介・嶋根純一・宮林正幸：耐火集成材の開発 その2 表層とコアを無処理ラミナとした集成材柱の燃え止まり，日本建築学会大会学術講演梗概集，防火，pp85-86，2007.7
- 2) 石川 敬・板垣直行・原田浩司・長谷見雄二・中村 昇・岡崎泰男・林 知行・飯島泰男：燃え止まり型木質耐火構造梁における燃えしろ層の適正寸法の検討 その2 せいの高い梁の検討，日本建築学会大会学術講演梗概集，防火，pp277-278，2014.9
- 3) 森林総合研究所監修：木材工業ハンドブック改訂4版，丸善株式会社，2004.3.
- 4) 中村昇・谷川信江：単板への難燃薬剤注入方法及び注入量の推定方法の検討，日本建築学会大会学術講演梗概集，防火，pp131-132，2011.7
- 5) 五頭辰紀・吉田正志：発熱性試験の評価基準に関する考察，日本建築学会大会学術講演梗概集，防火，pp155-156，2008.7
- 6) 景山悠太郎・長谷見 雄二・永盛 洋樹・中田 達也・原田 浩司・飯島 泰男・板垣 直行・関 真理子：スギ難燃処理合板を利用した木質耐火構造部材の開発その4 小型加熱実験，日本建築学会大会学術講演梗概集，防火，pp317-318，2009.7
- 7) 浜田稔：木材の燃焼速度，火災 vol.2，No.3，pp106-107，1953.3
- 8) 菅原進一：木材の炭化速度に関する考察検討，日本建築学会大会学術講演梗概集，防火，pp2109-2110，1978.9
- 9) 成瀬友宏・中村 賢一・遊佐 秀逸・増田 秀昭・原田 寿郎・山田 誠・佐藤 章：構造用製材の耐火性能 その1：スギとカラマツの炭化速度，日本建築学会大会学術講演梗概集，防火，pp.11-12，2004.7
- 10) (公財) 日本住宅・木材技術センター：防耐火性能試験・評価業務方法書，2013.4
- 11) 原田和典・梶山 幸祐・遊佐 秀逸・上杉 三郎・並木 勝義：木質構造部材の炭化性状に関する数値解析，日本建築学会近畿支部研究報告集，pp209-212，2004.5
- 12) 日本木材学会編：木材の科学と利用技術 2.防・耐火性能，150，1989
- 13) 平田利美：木材学会誌，41 (10)，pp879-886，1995
- 14) 山口智世・長谷見雄二・安井昇・小宮祐人・上川大輔・宮林正幸：火災加熱される木質部材の熱分解・燃焼性状のモデル化に向けた基礎研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，防火，pp. 469-472，2013.8

第 3 章

燃え止まり型木質耐火構造部材における被覆層と自消の関係

第3章 燃え止まり型木質耐火構造部材における被覆層と自消の関係

第2章から、加熱終了後の木材の燃焼継続は赤熱燃焼に由来¹⁾²⁾し、無処理の木材のみで自消を達成するには表面からの熱損失が支配的であり、自消の有無は赤熱燃焼の起こる深さが大きく影響することを明らかにした。ここから、本論文の研究対象である燃え止まり型木質耐火構造部材を想定すると、赤熱燃焼は燃えしろ表面に留まれば表面からの熱損失により自消するが、加熱終了時までには内部で赤熱燃焼が起これば、表面に形成された炭化層によって熱損失が少なくなり、自消しなくなる可能性がある。以上から、燃えしろ層は火災加熱終了後に内部で赤熱燃焼が続かないような厚さとして、燃え止まり層の温度抑制効果が発揮されるように加熱終了時までには燃え止まり層の内部温度が薬剤分解温度に達する深さに燃え止まり層厚さを設計することの2点が重要であると推定した。

そこで本章では、第2章の結果をもとに1時間耐火性能を目標として燃え止まり型木質耐火構造部材の一部を再現する試験体を製作し、ISO標準加熱曲線に準拠した加熱により、自消を達成できる仕様を明らかにする。まずは小試験体を用いて被覆層である燃えしろ層厚さ及び燃え止まり層の性能と自消性状の関係を把握(3.1節)し、その結果をもとに実大梁耐火加熱実験(3.2節)を行い、自消を確実に達成する仕様を検討する。

3.1 火災加熱される燃え止まり型小試験体を用いた自消性能の把握

3.1.1 実験目的

本節では、第2章の結果をもとに1時間耐火性能を目標とする燃え止まり型木質耐火構造部材の断面の一部を再現する小試験体を製作し、小型耐火炉(以下、小型炉)を用いた標準加熱曲線下における小型加熱実験により、自消を達成できる仕様を把握する。本実験では、実際の部材厚さを想定し、断面設計した試験体を用い、火災加熱を想定した場合の燃えしろ層厚さと燃え止まり層の性能が自消性能に与える影響を明らかにする。燃えしろ層の厚さは、第2章で自消に適正な厚さと推測した20~30mmの範囲内であり、1時間加熱時点で燃え尽きる程度の厚さと考えられる25mmを基準とし、その前後で10mm、50mmの3種類を設定した。

また第2章のコーンカロリメータ試験の結果から、難燃薬剤を注入した木材は、その薬剤注入量によって難燃性能が異なることがわかっている。そこで、第2章で用いた窒素リン酸系の難燃薬剤を使用し、防火材料として一般に流通する難燃処理木材の活用を視野にいれ、難燃化の程度を準不燃材料相当と難燃材料相当の2仕様を用いて、注入量における耐火性能への影響を把握する。

第2章のコーンカロリーメータ試験では、一定の加熱強度で木材平板を定常加熱した場合の燃焼特性把握を目的に実験を行った。加熱強度等の境界条件を容易に制御、変更しながら実験を行うことで燃焼熱について定量的な把握を行える点でコーンカロリーメータ試験は優れるが、燃焼が進むにつれ試験体の側面や裏面からも熱がまわり、本来想定される1面加熱と異なる伝熱現象が起こることが第2章の結果より推測される。実際の火災時の加熱性状は例えばISO834に記述されるような非定常加熱であり、時々刻々と温度が変化する状況下における木材の燃焼現象に関してすべからず把握できているとは限らない。

以上から、本実験では、燃えしろ層の厚さを変えた3パターン、注入量の異なる難燃処理木材2パターンの計6種、及び燃え止まり層の効果を把握するために、すべて無処理スギ材で構成したスギ集成材の計7種の試験体を設計し、小型炉内にて1時間加熱後、4時間自然放冷することで、火災加熱を想定した場合の燃えしろ層厚さと薬剤注入量における難燃性能の違いが自消性能に与える影響を把握する。

3.1.2 実験概要

(1) 実験方法

本実験は、森林総合研究所の小型炉を用い、側面加熱にてISO834標準加熱曲線に沿って1時間加熱後、炉内で4時間自然放冷した。炉の概略図を図3.1.1に、小型炉の内部、試験体設置時の様子を写真3.1.1に示す。小型炉の内寸は、825×420×465mm（縦×横×奥行）である。バーナーからの炎を調整するため、耐火煉瓦の衝立をバーナー前に設置した。

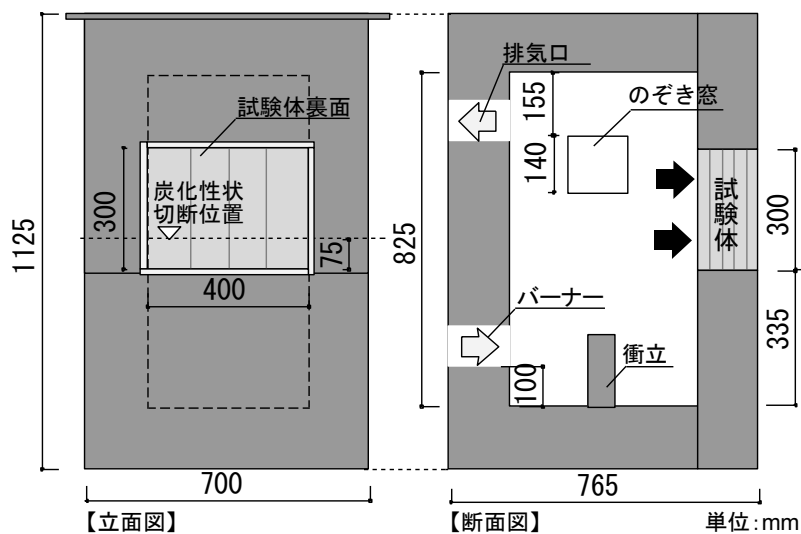
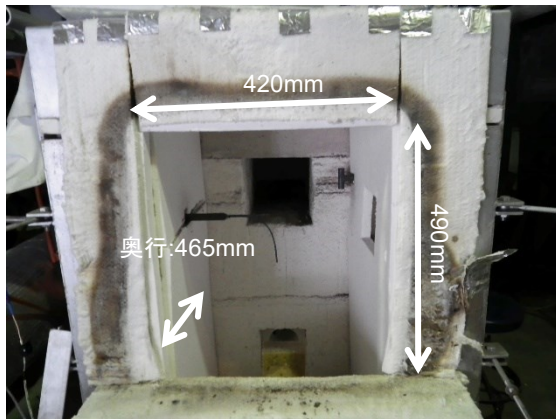


図 3.1.1 小型炉の概略図



(1) 小型炉内の様子



(2) 小型炉試験炉蓋及び試験体設置

写真 3.1.1 小型炉の様子

試験体を小型炉に納められるよう、図 3.1.2 に示すような門型の炉蓋を作製し、試験体を被覆した。1) 炉蓋の作製方法と、2) 試験体被覆方法を以下に示す。

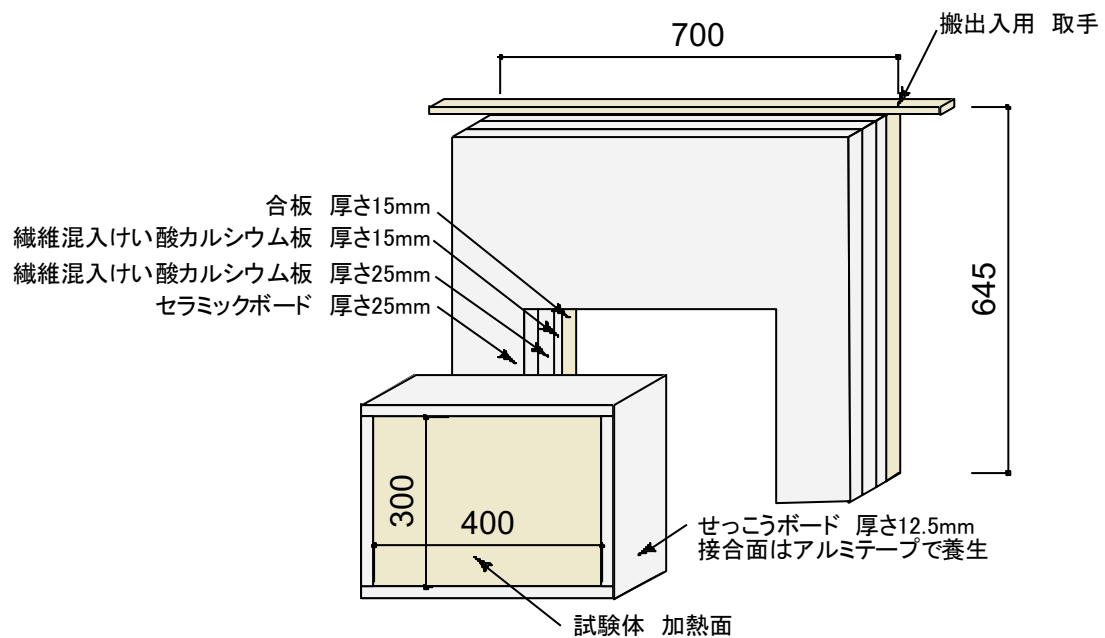


図 3.1.2 小型炉試験炉蓋及び試験体設置 概略図

1) 炉蓋作製方法

- ① 写真 3.1.2 のように、645×700mm の合板（厚さ 15mm）、繊維混入けい酸カルシウム板（厚さ 15mm、25mm を 2 枚張り）、セラミックボード（厚さ 25mm）を 300×400mm の試験体が納まるように切り欠く。繊維混入けい酸カルシウム板、セラミックボードは継ぎ目が重ならないように注意し、切り出す。
- ② ①で切り出した材をそれぞれせっこうボード用接着剤（吉野石膏製トラボンド）で接着する。
- ③ 各部材をビス止めし、固定する。



(1) 炉蓋 合板



(2) 炉蓋 繊維混入けい酸カルシウム板接着



(3) 炉蓋 繊維混入けい酸カルシウム板ビス止め



(4) 炉蓋 セラミックボード接着・ビス止め

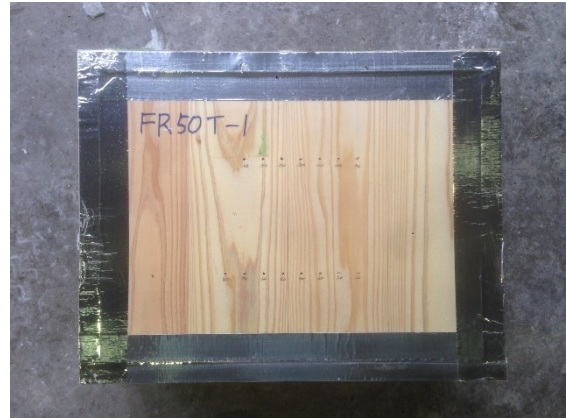
写真 3.1.2 小型炉 炉蓋の作製方法

2) 試験体被覆方法

- ① 写真 3.1.3 のように、加熱面 300×400mm の試験体の側面四周を厚さ 12.5mm のせっこうボードで被覆する。せっこうボード用接着剤（吉野石膏製トラボンド）で接着する。
- ② 接着したせっこうボードをビス止めする。
- ③ 試験体と被覆材の隙間が酸素供給口となり燃焼が促進されないよう、接着面をアルミテープで養生して隙間をふさぐ。



(1) 小型炉試験体 石こうボードの接着



(2) 小型炉試験体 アルミテープ目張（非加熱面から）

写真 3.1.3 小型炉 試験体被覆方法

(2) 試験体

表 3.1.1 に試験体仕様一覧を示す。試験体の加熱面の大きさは、縦 300mm×横 400mm とした。無処理スギ材のみで構成される S 仕様及び、燃え止まり型木質耐火構造部材の断面を模して、加熱面から燃えしろ層、燃え止まり層、荷重支持部を設けた、燃え止まり型試験体（以下 FR 仕様）を設計した。各ラミナの接着には、レゾルシノール樹脂系接着剤を用いた。但し、第 1 章で述べた通り、本節で使用する樹種はすべてスギ、難燃薬剤はすべて、窒素リン酸系薬剤ノンネン W 2-50（丸菱油化工業株式会社製）とする。前章までと同様に、以降、難燃薬剤の注入量は目標注入量を示す。以下に各仕様の詳細を示す。

1) FR 仕様

FR 仕様は、厚さ 50mm のスギ集成材（厚さ 25mm のラミナ 2 層）の上に、燃え止まり層としてスギ集成材に難燃処理薬剤を注入した厚さ 25mm のラミナ 2 層（総厚 50mm）を接着し、更に燃えしろ層として無処理のスギラミナを接着した。燃えしろ層厚さは、1 時間加熱時点で燃え尽きる程度の厚さであり、第 2 章で自消すると推定した 25mm を基準とし、10mm、25mm、50mm の 3 種類とした。25mm は、一般的なラミナ 1 枚分の厚さ、50mm はラミナ 2 枚分の厚さに相当する。3 仕様を設計することによって、加熱時の木材内部における熱伝導、熱分解、炭化、及び放置時における赤熱燃焼に対する、燃えしろ層厚さの影響を把握する。燃え止まり層に、第 2 章で準不燃材料相当と確認した難燃処理木材を用いた仕様を FR1、難燃材料相当と確認した難燃処理木材を用いた仕様を FR2 とし、FR は全 6 仕様とした。

2) S 仕様

更に、FR 仕様の燃え止まり層の効果を比較するために、厚さ 25mm の無処理スギラミナ 5 層を張り合わせた総厚 125mm のスギ集成材を S 仕様とした。

各燃え止まり型試験体 FR の試験体名は、Sa-FRb と表記し、a は無処理木材の燃えしろ層厚さ[mm]、b は燃え止まり層の難燃薬剤の目標注入量が 180kg/m³（準不燃材料相当）の時、b=1、110 kg/m³（難燃材料相当）の時、b=2 とする。以下、b=1（難燃薬剤注入量 180kg/m³）のグループを FR1、b=2（同 110kg/m³）のグループを FR2 という。本実験の試験体は、S10-FR1、S10-FR2、S25-FR1、S25-FR2、S50-FR1、S50-FR2、S の 7 仕様となる。試験体の含水率は、測定用サンプルを絶乾炉（105℃）に入れて乾燥させ、重量減少から測定した。各仕様の算出結果は表 3.1.2 に示す。含水率の計算式を以下に示す。

含水率(%)={ (絶乾前の重量－絶乾後の重量) / 絶乾後の重量 }×100

表 3.1.1 小型炉 試験体仕様一覧

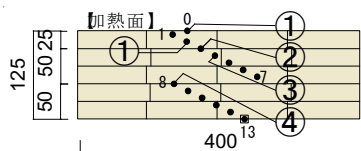
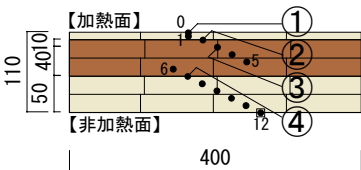
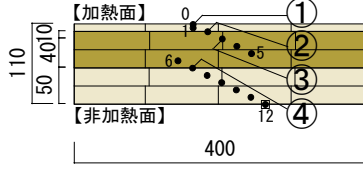
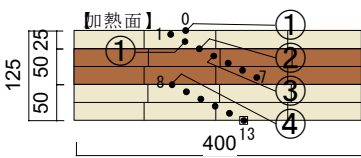
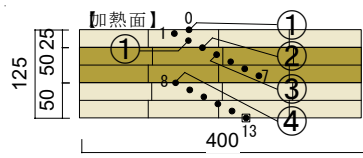
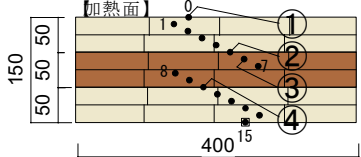
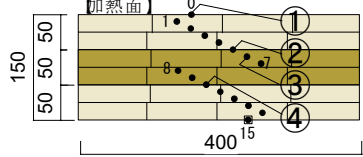
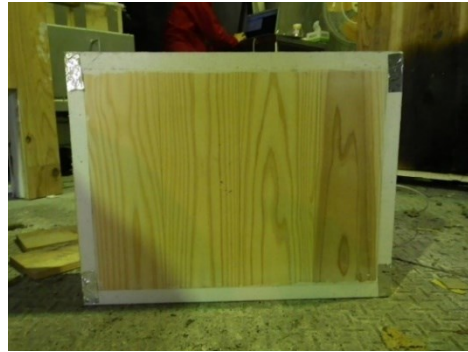
燃えしろ層厚さ	燃え止まり層	試験体	断面図	燃え止まり層	試験体	断面図
—	—	S		—	—	—
10mm	FR1 (注入量 180kg/m ³) 準不燃材料相当	S10-FR1		FR2 (注入量 110kg/m ³) 難燃材料相当	S10-FR2	
25mm		S25-FR1		S25-FR2		
50mm		S50-FR1		S50-FR2		

表 3.1.2 小型炉試験体 含水率

仕様	含水率測定用 サンプル名	気乾重量[g]	絶乾重量[g]	含水率[%]
S	—	94.74	86.57	8.62
FR1	1-1	34.27	31.37	8.83
	1-2	38.36	34.95	8.89
	1-3	39.87	36.41	8.68
FR2	2-1	70.71	64.69	8.51
	2-2	64.84	59.13	8.81
	2-3	80.53	73.4	8.85

写真 3.1.4～写真 3.1.5 に加熱前の試験体写真を掲載する。



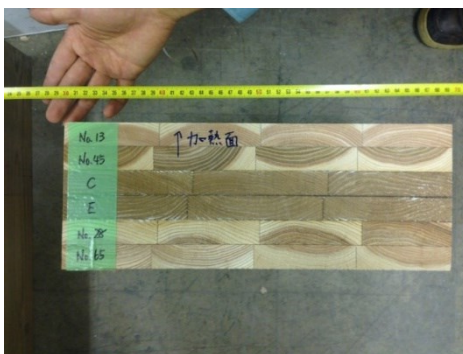
(1) 試験体 S



(2) 試験体 S10-FR1

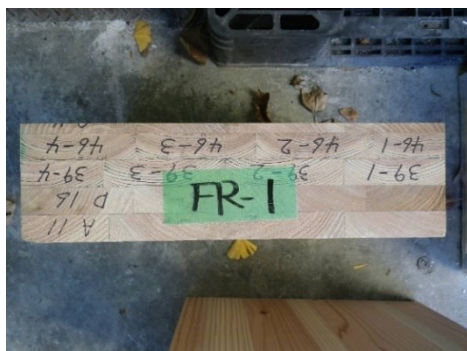


(3) 試験体 S25-FR1



(4) 試験体 S50-FR1

写真 3.1.4 実験前試験体の様子（S 仕様及び FR1 仕様）。



(1) 試験体 S10-FR2



(2) 試験体 S25-FR2



(3) 試験体 S50-FR2

写真 3.1.5 実験前試験体の様子 (FR2 仕様)

(3) 測定項目

以下の各項目について、測定を行った。

1) 試験体表面・内部温度及び裏面温度

表面温度及び内部温度は、K型シース熱電対（φ1.0mm）を用い、裏面から垂直に挿入し裏面に固定した。試験体表面付近は5mm間隔、その他は各部材の境界面を測定するよう10mm間隔に設置し、2秒間隔で測定した。裏面温度は、試験体非加熱面にディスク型熱電対を設置し2秒間隔で測定した。各試験体の測定点は図3.1.3～図3.1.6に示す。

2) 炉内温度

炉内温度は、K型シース熱電対（φ2.5mm）を用い、測定した。

3) 熱流束

試験体への流入熱を把握するため、試験体表面の中央部にφ26mmの穴をドリルで開け、直径1インチの熱流束計を裏面から通し、試験体表面から入射する熱流束を測定した。

4) その他

試験中の加熱面の様子については、試験体に向かって右側に設置されたのぞき窓から可能な限り試験体加熱面の目視観察、写真撮影等を行った（図3.1.1）。加熱中の有炎燃焼中は、炉内が明るく観察可能だが、自然放冷中に赤熱燃焼が終了すると、炉内が暗くなるため、目視観察は困難である。脱炉後は、目視にて赤熱燃焼の有無を観察することにより、自消の判断を行う。脱炉時に赤熱燃焼が確認されず、かつ、試験体内部温度も炉内温度に伴い、低下していれば自消に至ったと判断する。

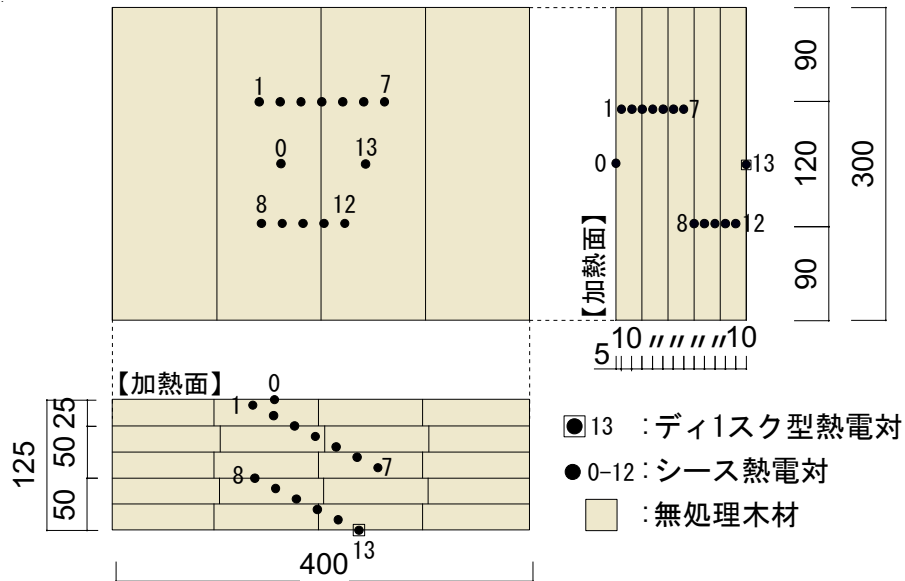
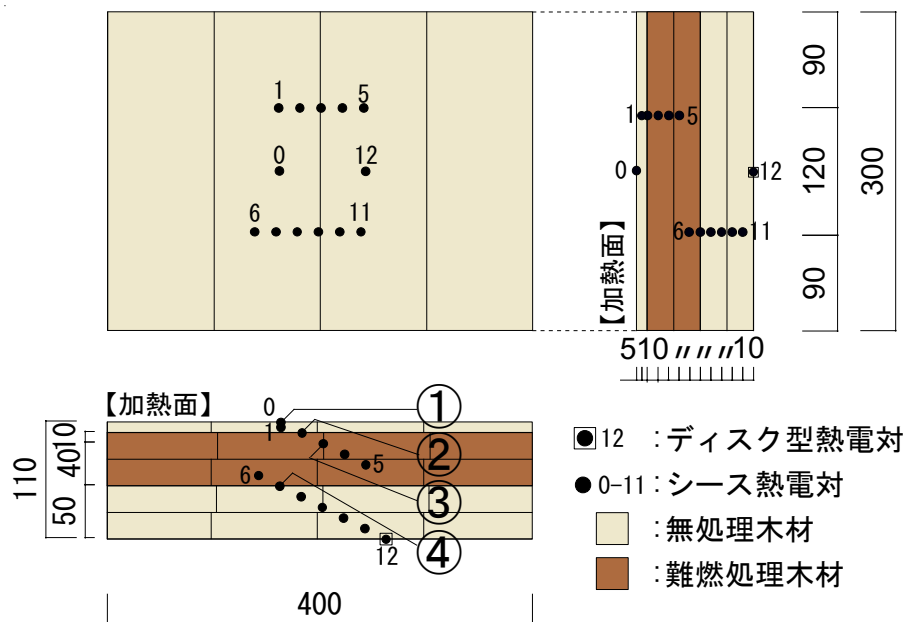


図 3.1.3 試験体 S 熱電対図



①表面 ②燃え止まり層表面 ③燃え止まり層内部 ④構造支持部材表面

図 3.1.4 試験体 S10-FR1、S10-FR2 熱電対図

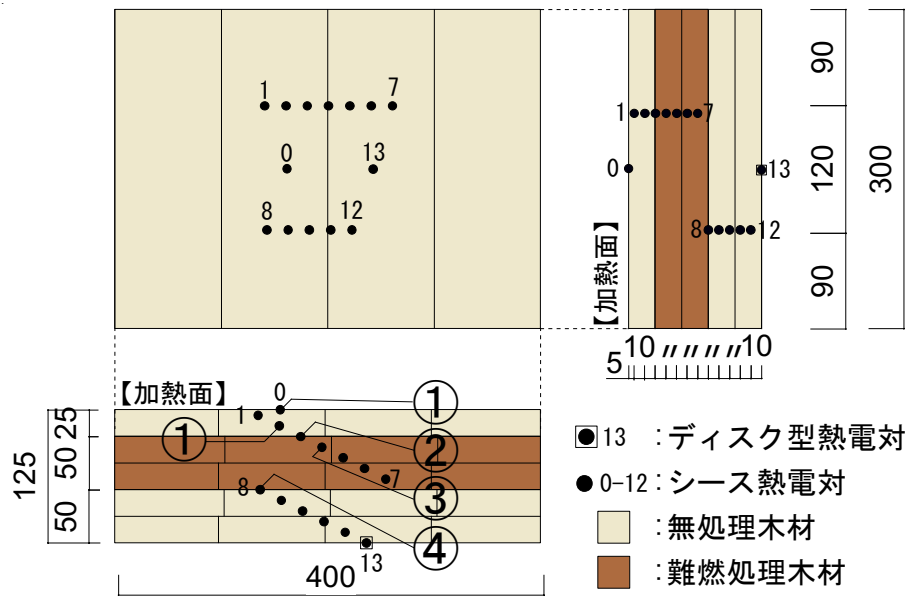


図 3.1.5 試験体 S25-FR1、S25-FR2 熱電対図

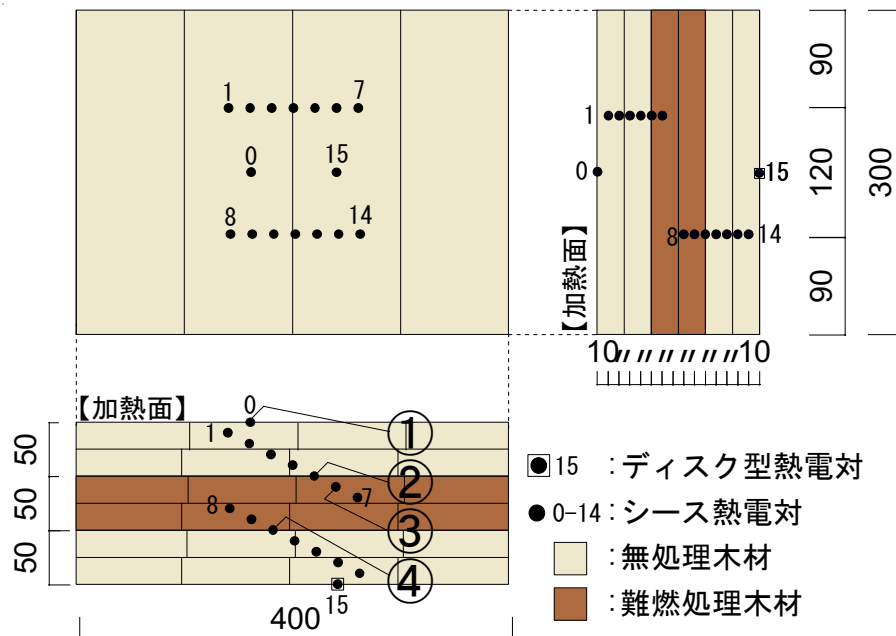


図 3.1.6 試験体 S50-FR1、S50-FR2 熱電対図

3.1.3 実験結果

I. 放置時炉内性状把握予備実験（試験体表面熱流束及び内部温度測定試験）とその結果

【実験目的】

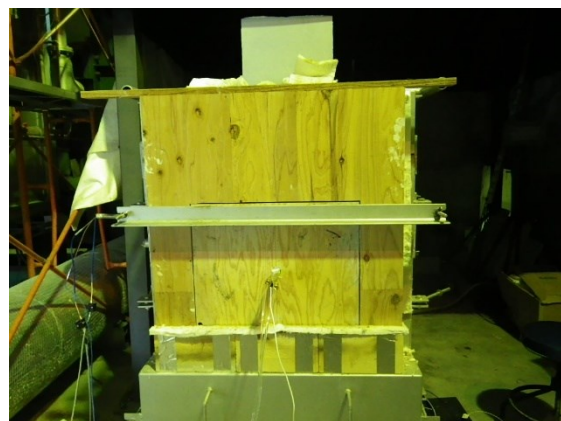
既往研究⁶⁾から、自然放冷中における炉内性状は、使用する耐火炉によって、顕著な差があることが分かっている。そこで、実験を開始する前に、繊維混入けい酸カルシウム板を用いた無機材料試験体を使用し、本実験で用いる森林総合研究所の小型炉の炉内性状を把握する予備実験を行った。

【実験概要】

本予備実験は、ISO834 標準加熱曲線に準拠し 60 分加熱した後炉内放置した。写真 3.1.6 のような繊維混入けい酸カルシウム板を試験体表面に設置し、試験体表面中心部に $\phi 26\text{mm}$ の穴を開け、熱流束計を設置した。また、炉内の試験体表面から 10cm の距離にシース熱電対を設置し、炉内温度を測定した。



(1) 試験前裏面の様子



(2) 試験体設置の様子



(3) 試験前加熱面の様子



(4) 試験後加熱面の様子

写真 3.1.6 予備試験の様子

【実験結果】

炉内温度及び試験体表面の熱流束について、実験結果をそれぞれ図 3.1.7 及び図 3.1.9 に示す。また（一財）ベターリビング筑波建築試験センター防耐火試験施設（以下、BL と略記）実大壁炉※¹ 及び京都大学小型炉※² で同加熱条件下において試験を行っている既往研究⁶⁾ の結果を炉内温度及び試験体表面の熱流束について、それぞれ図 3.1.8 及び図 3.1.10 に示し、比較を行う。

※1: BL 壁炉: 試験体寸法: 3000×3000mm、耐火炉寸法: 3200×3200mm 奥行 1000mm、炉壁材料: 200mm セラミックブロック

※2: 京都大学生存圏研究所内小型炉実験体寸法: 900×915mm、耐火炉寸法: 1960×1370mm 奥行 200mm、炉壁材料: 20mm セラミックブランケット+105mm 耐火レンガ

炉内温度及び試験体表面の熱流束について、それぞれ森林総研小型炉と、BL 壁炉、京大小型炉について比較すると、自然放冷中についても、森林総研小型炉と BL 壁炉の推移は概ね一致することがわかった。このことから、木質部材のような火炎を発生する試験体においても、その試験体燃焼性状は、実大壁炉の自然放冷中の性状について、概ね同条件下で比較が可能であると考えられる。

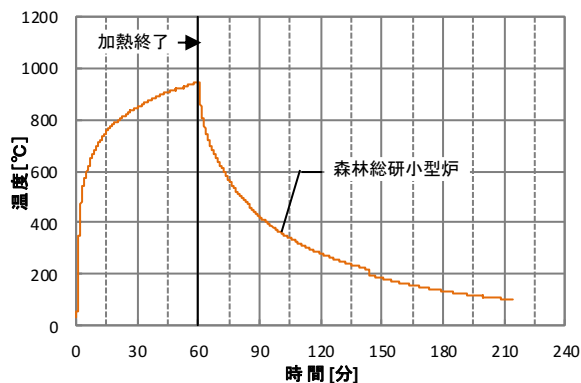


図 3.1.7 森林総研小型炉の炉内温度(予備実験)

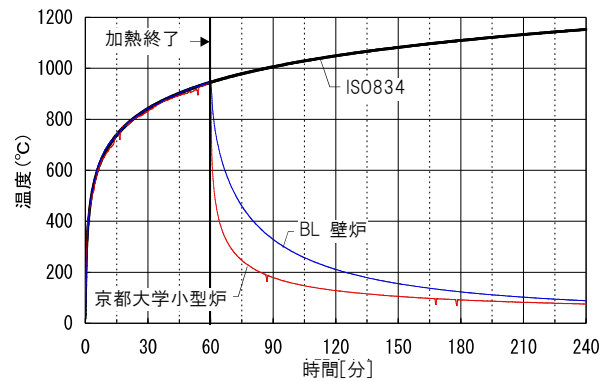


図 3.1.8 BL 壁炉及び京大小型炉の炉内平均温度 (参考文献⁶⁾をもとに作成)

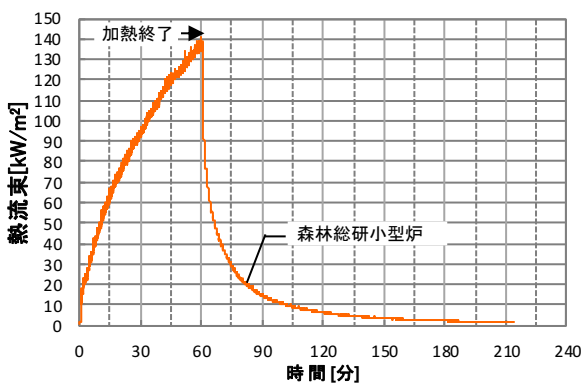


図 3.1.9 森林総研小型炉の熱流束(予備実験)

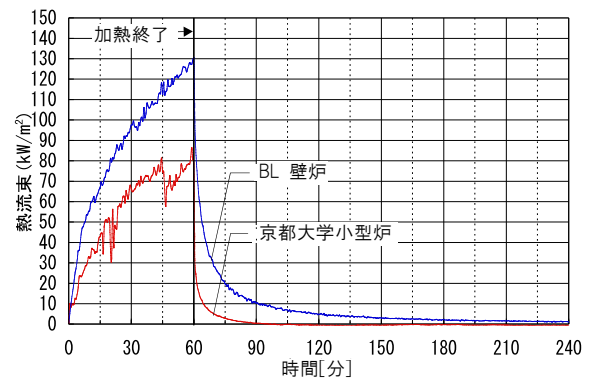


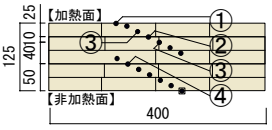
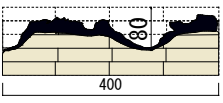
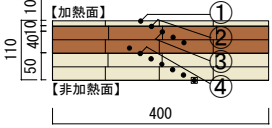
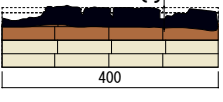
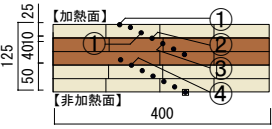
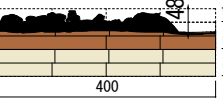
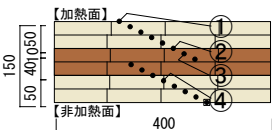
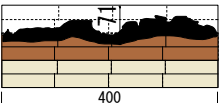
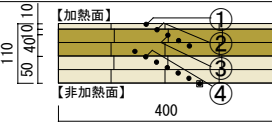
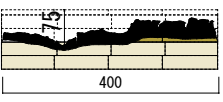
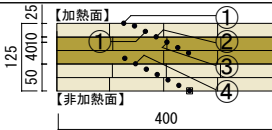
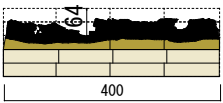
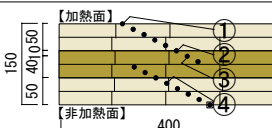
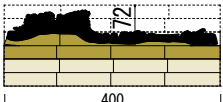
図 3.1.10 BL 壁炉及び京大小型炉の熱流束 (参考文献⁶⁾をもとに作成)

II. 実験結果

表 3.1.3 に各試験における、脱炉時の炭化性状と加熱終了時及び脱炉時の炭化深さ、及び脱炉時の赤熱燃焼の有無を示す。炭化深さは、脱炉後に図 3.1.1 に示す位置で試験体を断面方向に切断し、最も深い位置を最大炭化深さとした。脱炉時の赤熱燃焼については、脱炉時に赤熱燃焼が継続していた場合“有”、自消した場合“無”と示す。次ページより、以下の(1)～(4)について、試験体ごとの実験結果を示す。

- (1) 目視による脱炉時の燃焼継続の有無の確認
- (2) 試験体内部温度及び炉内温度推移
- (3) 脱炉時の炭化性状
- (4) 熱流束及び炉内温度推移

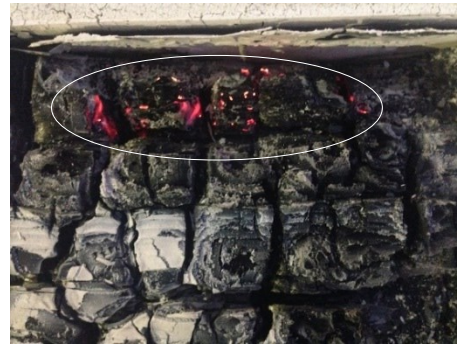
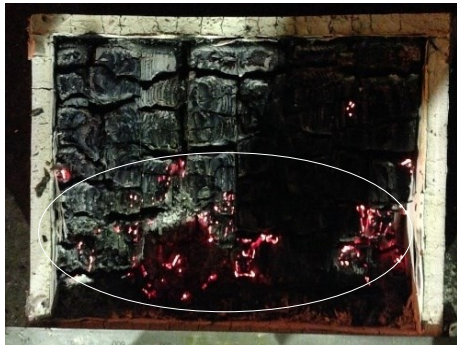
表 3.1.3 実験結果一覧

	燃え止まり層	燃えしろ層厚さ	試験体	断面仕様及び温度測定点	脱炉時の炭化性状	脱炉時 赤熱燃焼の有無	最大 炭化深さ
FR1	薬剤注入量[180kg/m ³](準不燃材料相当)		S			有	80mm
		10mm	S10-FR1			無	37mm
		25mm	S25-FR1			無	48mm
		50mm	S50-FR1			有	71mm
FR2	薬剤注入量[110kg/m ³](難燃材料相当)	10mm	S10-FR2			有	75mm
		25mm	S25-FR2			無	64mm
		50mm	S50-FR2			有	72mm

【凡例】□：無処理木材，■：難燃処理木材（注入量180kg/m³），■：難燃処理木材（注入量110kg/m³）

- ：温度測定点（①試験体表面，②燃えしろ層内部，③燃え止まり層表面，④燃え止まり層内部
④構造支持部表面）

(1) 目視による脱炉時の燃焼継続の有無の確認



(1) 試験体 S



(2) 試験体 S10-FR1



(3) 試験体 S25-FR1



(4) 試験体 50-FR1

写真 3.1.7 脱炉直後試験体の様子（S 仕様及び FR1 仕様）



(1) 試験体 S10-FR2



(2) 試験体 S25-FR2



(3) 試験体 50-FR2

写真 3.1.8 脱炉直後試験体の様子（FR2 仕様）

脱炉直後の各試験体の様子を写真 3.1.7、写真 3.1.8 に示す。赤熱燃焼が見受けられた部分を○で囲んで示した。表 3.1.4 に脱炉時の赤熱燃焼の有無をまとめる。

表 3.1.4 脱炉時における各試験体加熱表面の観察結果一覧

試験体	S	S10-FR1	S25-FR1	S50-FR1	S10-FR2	S25-FR2	S50-FR2
燃えしろ層厚さ	-	10mm	25mm	50mm	10mm	25mm	50mm
燃え止まり層の性能	-	準不燃材料相当 (薬剤注入量 180kg/m ³)			難燃材料相当 (薬剤注入量 110kg/m ³)		
脱炉時の赤熱燃焼の有無	有	無	無	有	有	無	有

(2) 試験体内部温度及び炉内温度推移

無処理木材（試験体 S）と、燃えしろ層厚さを各々10、25、50mm とした FR1、FR2 仕様（難燃薬剤の注入量 180kg/m^3 、 110kg/m^3 ）の計 7 試験体における内部温度の時間推移を図 3.1.11～図 3.1.17 に示す。図 3.1.18 には、仕様 S と S25-FR1 の温度推移の比較を示す。但し S25-FR2 では、断線のため 3.3～4.4 時間までのデータが欠落している。

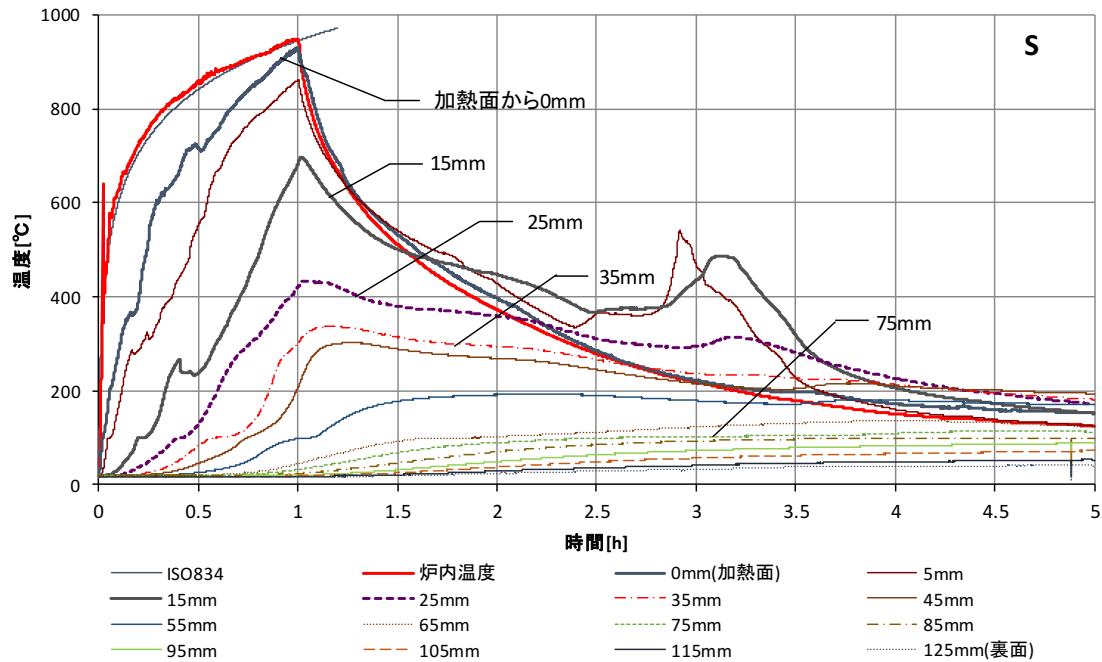


図 3.1.11 試験体内部温度及び炉内温度推移（試験体 S）

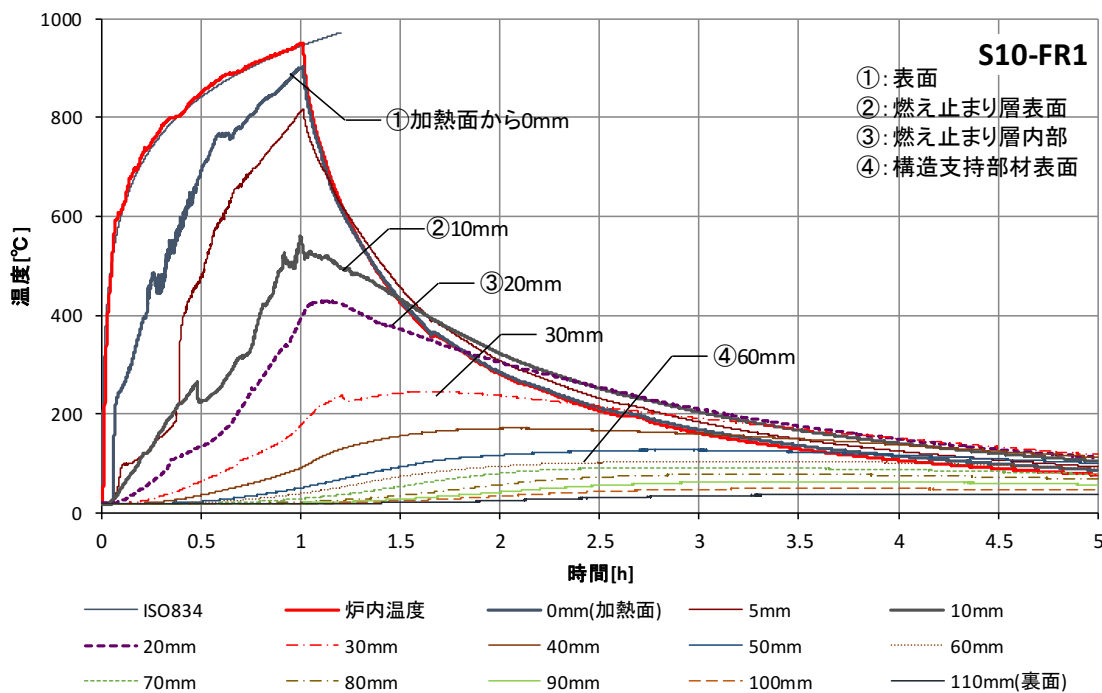


図 3.1.12 試験体内部温度及び炉内温度推移（試験体 S10-FR1）

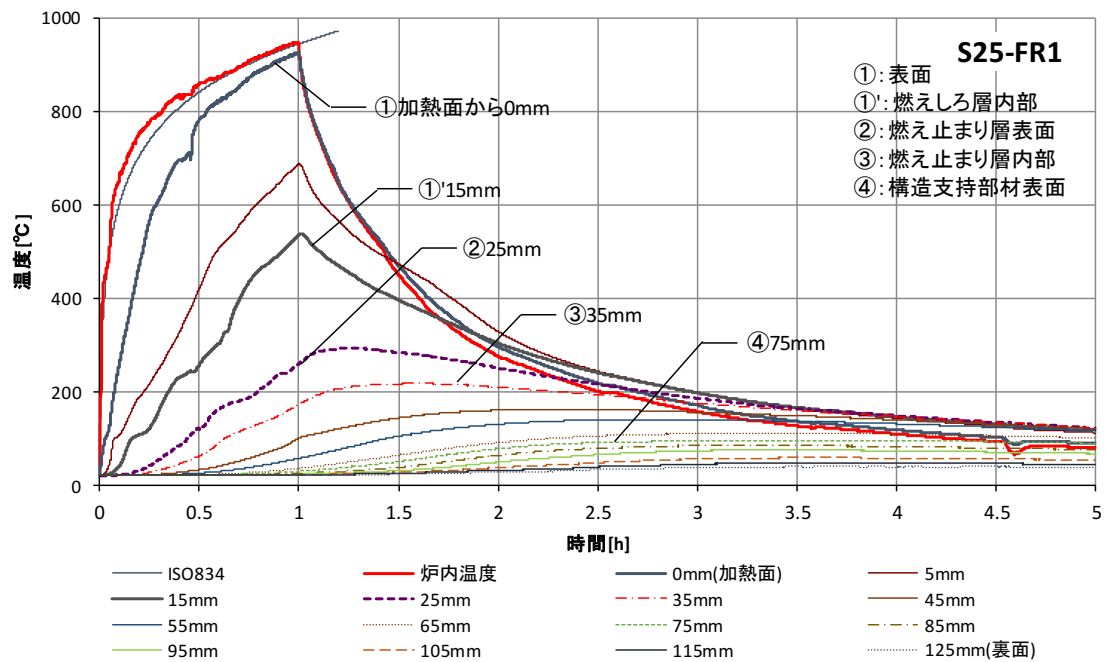


図 3.1.13 試験体内部温度及び炉内温度推移（試験体 S25-FR1）

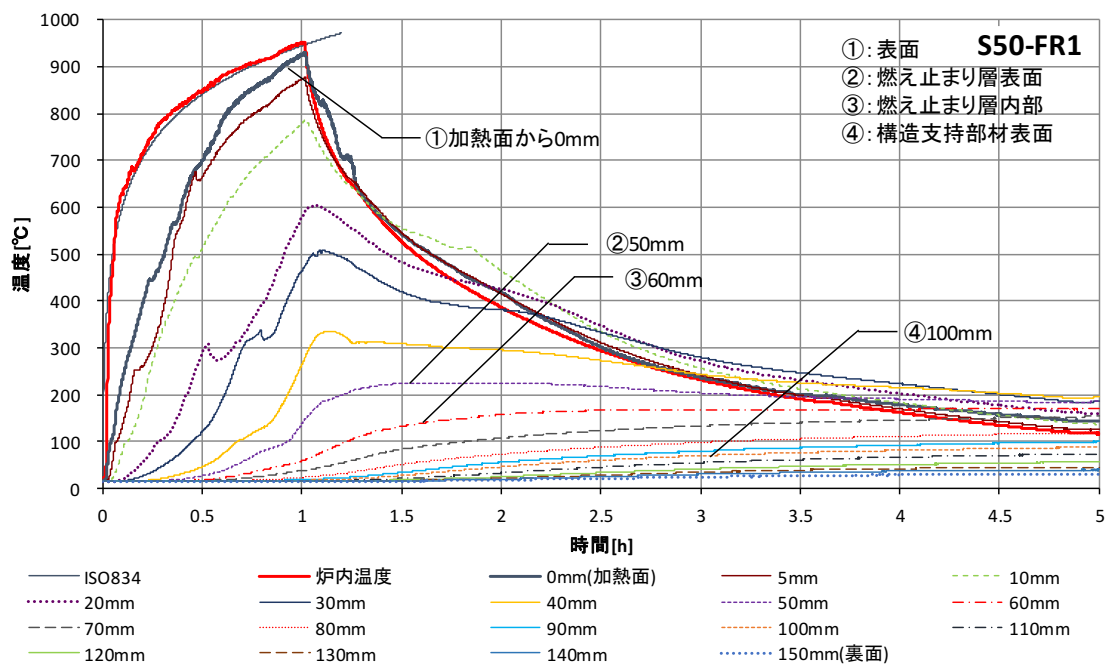


図 3.1.14 試験体内部温度及び炉内温度推移（試験体 S50-FR1）

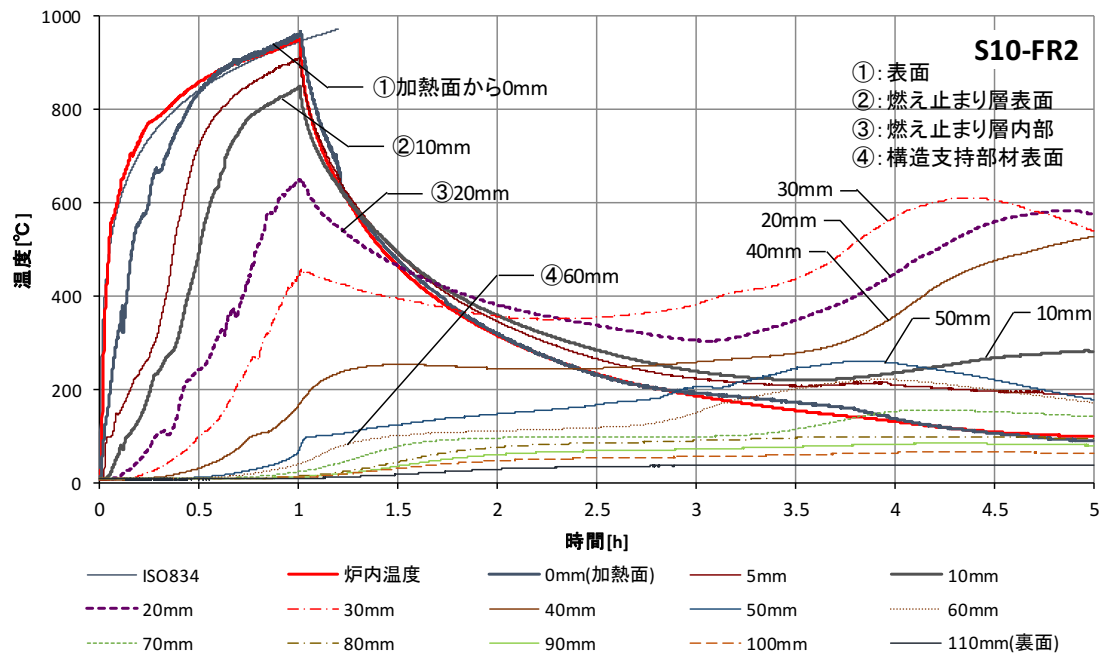


図 3.1.15 試験体内部温度及び炉内温度推移（試験体 S10-FR2）

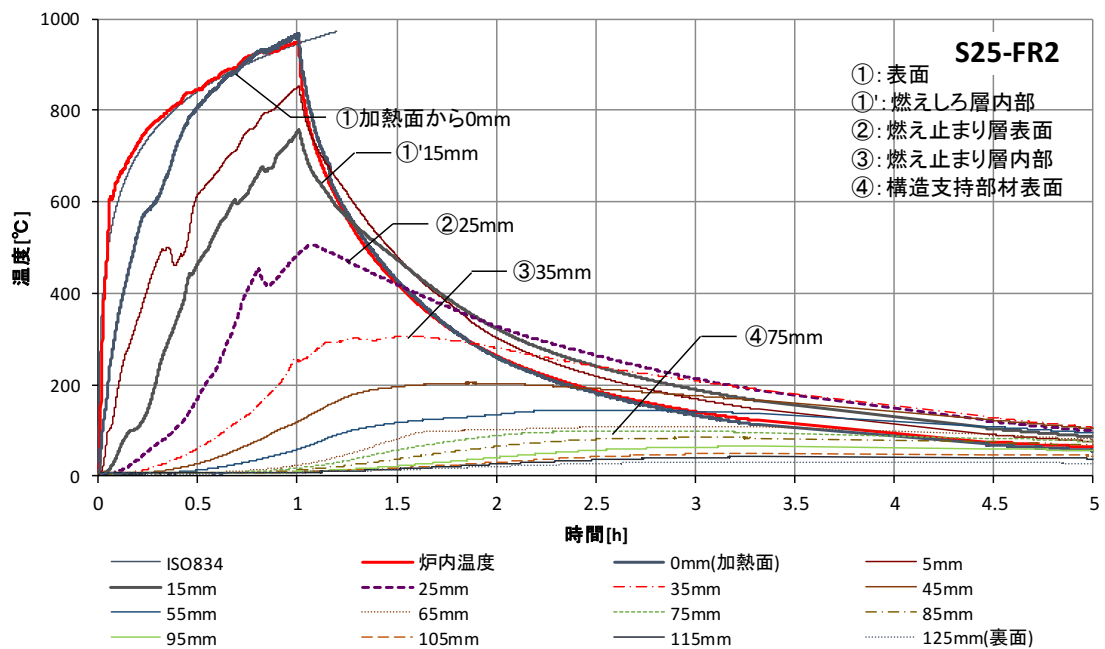


図 3.1.16 試験体内部温度及び炉内温度推移（試験体 S25-FR2）

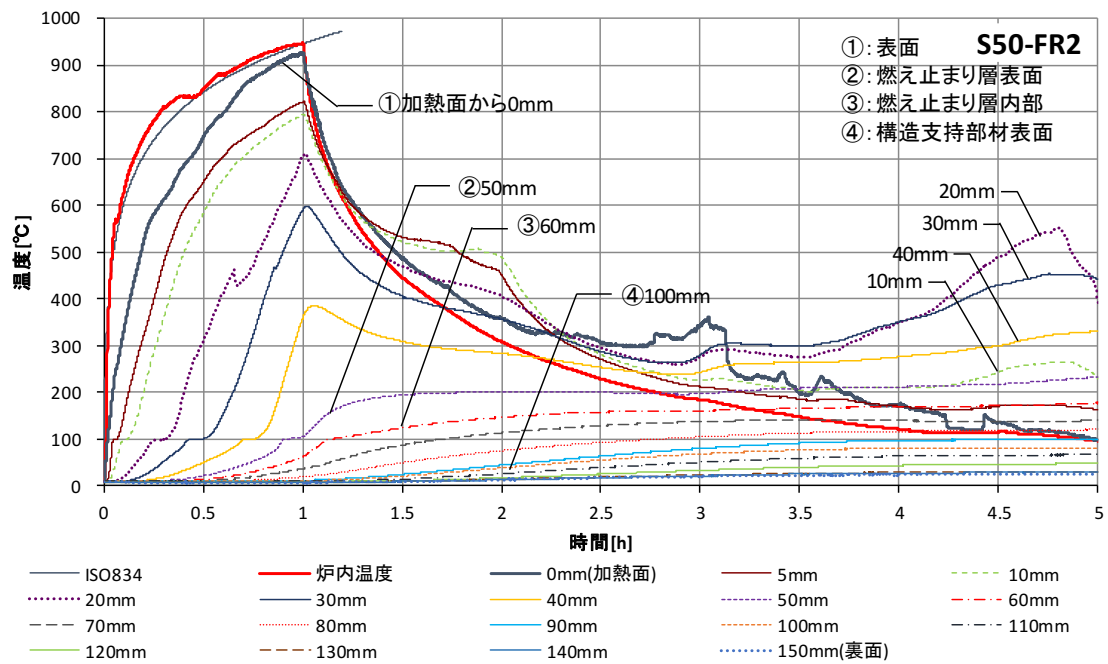


図 3.1.17 試験体内部温度及び炉内温度推移（試験体 S50-FR2）

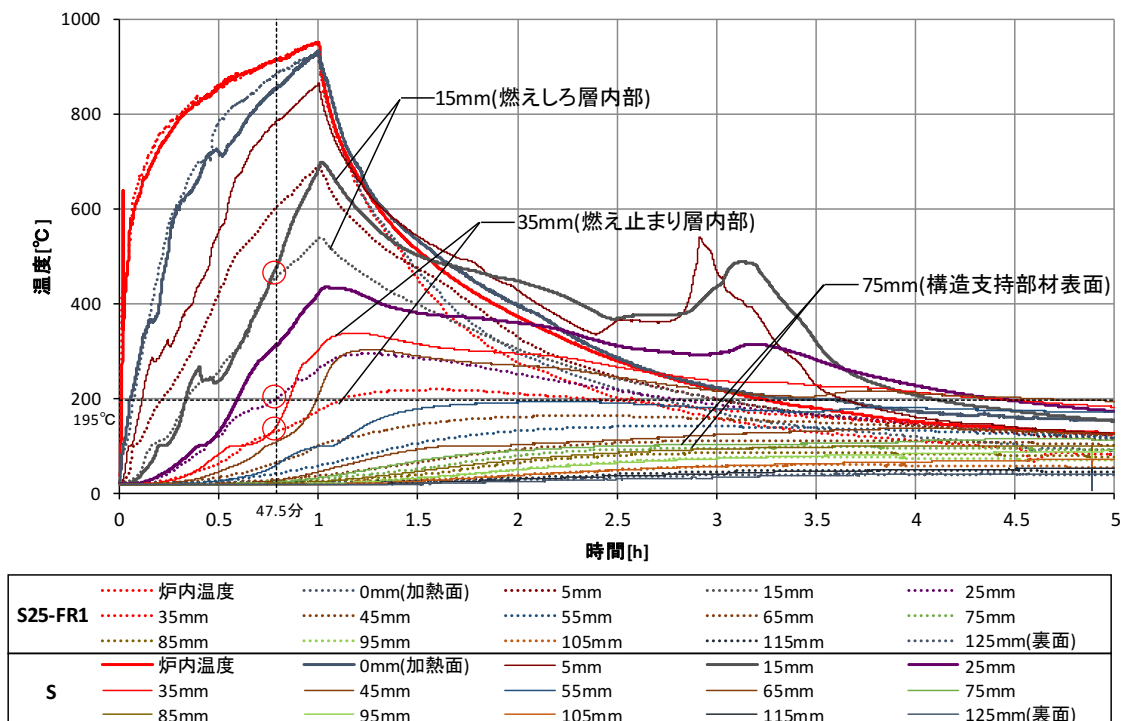


図 3.1.18 試験体内部温度及び炉内温度推移（試験体 S と S25-FR1 の比較）

表 3.1.5 に、各試験体の温度推移の様子をまとめる。

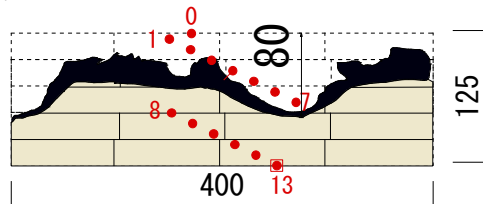
表 3.1.5 各試験体の温度推移の様子一覧

試験体	燃えしろ層 厚み[mm]	燃え止まり層の 性能	各試験体の温度推移の様子
S	—	—	<ul style="list-style-type: none"> 加熱終了時までに加熱面から 45mm までの深さが 260℃程度まで温度が上昇しており、炭化していることがわかる。 加熱終了時に 700℃以上をとっていた深さ 15mm までは、加熱が終わると、炉内温度に伴って、急激に温度は低下した。400℃以上となり、赤熱燃焼が始まっているとみられるのは、25mm の位置であった。25mm では加熱を終了しても、温度が急激に低下することなく、試験開始から 140 分程度まで 350℃程度を保っていた。 試験開始約 2.3 時間後から、温度 5,10,15mm の位置で温度が上昇した。これは赤熱燃焼に由来する燃焼だと考えられる。この赤熱燃焼の熱伝導により、25mm の位置でも遅れて温度上昇が確認された。
S10-FR1	10	準不燃材料相当 (薬剤注入量 180kg/m ³)	<ul style="list-style-type: none"> 加熱終了時まで、燃え止まり層表面(深さ 10mm)では約 500℃、燃え止まり層内部 (20mm) で約 400℃、30mm で約 200℃に達していることから、加熱終了時には燃え止まり層内部は難燃薬剤の分解温度に達している。 加熱終了後深さ 0~20mm の温度は、炉内温度にしたがって、降下した。 最高 200℃まで温度上昇していた 30mm では、炉内温度が 200℃に降下する試験開始約 2.6 時間まで温度を約 200℃に保っており、その後炉内温度にしたがって降下した。
S25-FR1	25		<ul style="list-style-type: none"> 加熱終了直後の各測定深さの最高内部温度は、0~15mm では 500℃以上、燃え止まり層表面(25mm)では約 300℃、燃え止まり層内部 (35mm) で約 200℃であり、加熱終了時には燃え止まり層内部は難燃薬剤の分解温度に達している。 加熱終了後 0~15mm の温度は、炉内温度にしたがって、降下した。 最高 300℃まで温度上昇していた 25,35mm では、炉内温度が 200℃に降下する約 2.5 時間まで温度を約 200℃に保っており、その後炉内温度にしたがって降下した。
S50-FR1	50		<ul style="list-style-type: none"> 加熱終了時の各測定位置の内部温度は、0~30mm では 500℃以上、40mm では 300℃、燃え止まり層表面(50mm)では約 200℃であったが、燃え止まり層内部 (60mm) では 100℃にも達せず、加熱終了時には燃え止まり層内部は難燃薬剤の分解温度に達していなかった。 その後 0~30mm は、炉内温度にしたがって、温度は降下した。 300℃まで温度上昇していた 40mm では、炉内温度が約 300℃に降下する 2.7 時間頃まで温度を約 260~300℃に保っており、その後炉内温度にしたがって降下した。同様に 200℃まで温度上昇していた 50mm では、炉内温度が 200℃に降下する 3.5 時間頃まで温度を約 200℃に保っており、その後炉内温度にしたがって降下した。

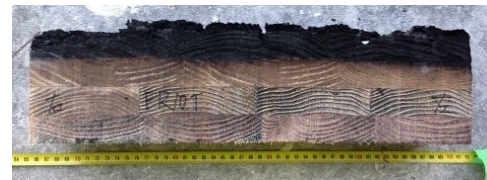
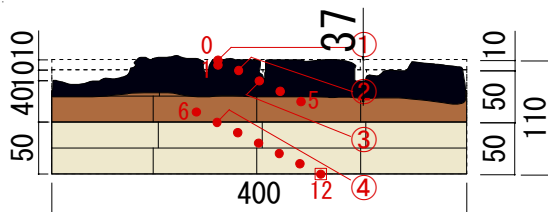
S10-FR2	10	難燃材料相当 (薬剤注入量 110kg/m ³)	<ul style="list-style-type: none"> ・加熱終了時までに加熱面から深さ 30mm までの深さが 460℃程度まで温度が上昇しており、炭化・赤熱燃焼していることがわかる。 ・加熱終了時に最高 800℃以上に達した 10mm までは、加熱が終わると、炉内温度に伴って、急激に温度は低下する。 ・深さ 20mm～40mm では、加熱終了後も温度が急激に低下することではなく、試験開始から約 2.5～3.1 時間ほどで再び温度上昇を開始し最高約 500～600℃に達したことから、脱炉まで赤熱燃焼が継続したことが示された。
S25-FR2	25		<ul style="list-style-type: none"> ・加熱終了直後の各測定深さの最高内部温度は、深さ 0～25mm(燃え止まり層表面)では 500℃を超え、35mm で約 300℃に、45mm で約 200℃に達した。 ・その後深さ 0～25mm では、炉内温度にしたがって、温度は降下した。 ・最高温度がそれぞれ 300℃、200℃まで達していた深さ 35,45mm では、炉内温度が 200℃に降下する試験開始から 2.4 まで約 200℃に保っており、その後炉内温度に従って降下した。
S50-FR2	50		<ul style="list-style-type: none"> ・加熱終了直後の各測定深さの最高内部温度は、深さ 0～30mm では 600℃以上、40mm では約 390℃、燃え止まり層表面(50mm)では約 200℃であったが、燃え止まり層内部 (60mm) では 100℃にも達せず、加熱終了時には燃え止まり層内部は難燃薬剤の分解温度に達していなかったことがわかる。 ・その後、加熱面から 0mm、5mm では炉内温度の低下に伴って、温度低下した。 ・一方で、深さ 20mm 以遠では、加熱終了後も温度が急激に低下することではなく、特に 20mm～30mm では、試験開始から 3 時間経過したあたりから再び温度上昇し最高 450℃に達し、赤熱燃焼が継続していることがわかる。 ・30mm 以遠についても、炉内温度以上の温度を保っており、赤熱燃焼により温度が上昇していると考えられる。 ・また、最高 200℃に達している深さ 50mm (燃え止まり層表面) では、加熱終了直後から、試験終了まで 200℃程度を維持し続けている。

(3) 脱炉時の炭化性状

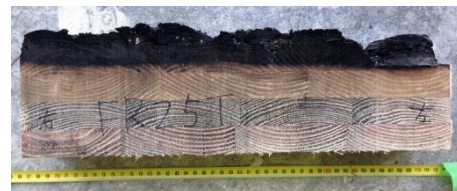
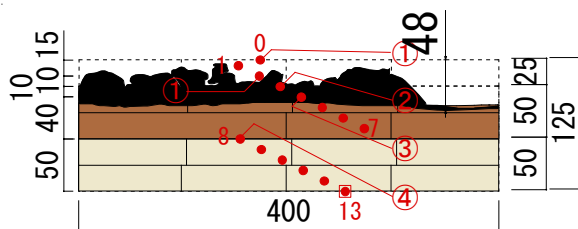
各試験体の脱炉時の断面写真及び炭化図を図 3.1.19、図 3.1.20 に、最大炭化深さ及び観察結果を表 3.1.6 に示す。



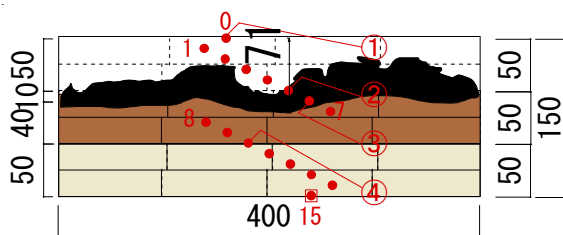
(1) 試験体 S



(2) 試験体 S10-FR1



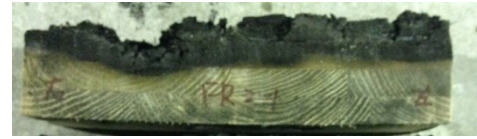
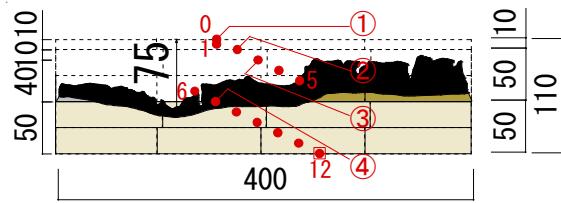
(3) 試験体 S25-FR1



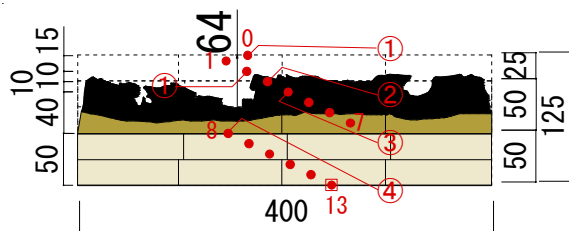
(4) 試験体 S50-FR1

凡例	
■ : 未炭化部 (無処理木材)	● : 温度測定点
■ : 未炭化部 (難燃処理木材 注入量180kg/m ³)	① : 表面
■ : 炭化層	② : 燃え止まり層表面
	③ : 燃え止まり層内部
	④ : 構造支持部材表面

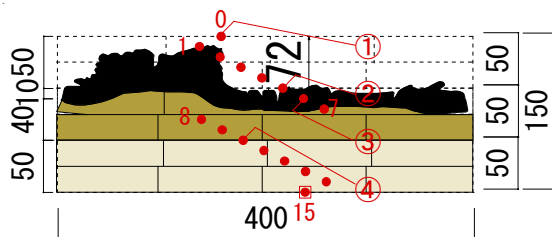
図 3.1.19 脱炉時の試験体断面写真及び炭化図 (S 仕様及び FR1 仕様)



(1) 試験体 S10-FR2



(2) 試験体 S25-FR2



(3) 試験体 S50-FR2

凡例			
□	: 未炭化部（無処理木材）	●	: 温度測定点
■	: 未炭化部（難燃処理木材 注入量110kg/m ³ ）	①	: 表面
■	: 炭化層	②	: 燃え止まり層表面
		③	: 燃え止まり層内部
		④	: 構造支持部材表面

図 3.1.20 脱炉時の試験体断面写真及び炭化図（FR2 仕様）

表 3.1.6 脱炉時の炭化性状一覧

試験体	燃えしろ層厚さ[mm]	燃え止まり層の性能	最大炭化深さ[mm]	実験結果
S	—	—	80	<ul style="list-style-type: none"> 断面全体で炭化深さが不均一で、その差は最大で 27mm 程度であった。 炭化深さが深いところでは残存炭化層が薄い傾向にあった。
S10-FR1	10	準不燃材料相当(注入量 180kg/m ³)	37	<ul style="list-style-type: none"> 最大炭化深さは、37mm (=燃えしろ層厚さ 10mm+27mm) であり、燃え止まり層内部(難燃処理ラミナ約 1 層分)まで達した。 断面全体で炭化深さ及び残存炭化層の厚さは概ね均一であった。
S25-FR1	25		48	<ul style="list-style-type: none"> 最大炭化深さは、48mm (=燃えしろ層厚さ 25mm+23mm) であり、燃え止まり層内部(難燃処理ラミナ約 1 層分)まで達した。 断面全体で炭化深さ及び残存炭化層の厚さは概ね均一であった。
S50-FR1	50		71	<ul style="list-style-type: none"> 最大炭化深さは、71mm (=燃えしろ層厚さ 50mm+21mm) であり、燃え止まり層内部(難燃処理ラミナ約 1 層分)まで達した。 残存する炭化層は最大で 30mm 程度、最小で 10mm 程度であり、その差は最大で 20mm 程度であった。
S10-FR2	10	難燃材料相当(注入量 110kg/m ³)	75	<ul style="list-style-type: none"> 最大炭化深さは、75mm (=10+65mm) であり、炭化は燃え止まり層の難燃処理ラミナでは留まらず中心の構造支持部材まで進行した。 炭化深さは断面全体をみるとやや不均一で、その差は最大で 25mm 程度であった。
S25-FR2	25		64	<ul style="list-style-type: none"> 最大炭化深さは、64mm (=25+39mm) であり、燃え止まり層内部(難燃処理ラミナ約 1.5 層分)まで達した。 断面全体で炭化深さ及び残存炭化層の厚さは概ね均一であった。
S50-FR2	50		72	<ul style="list-style-type: none"> 最大炭化深さは、72mm (=50+22mm) であり、燃え止まり層内部(難燃処理ラミナ約 1 層分)まで達した。 断面全体をみると炭化深さはやや不均一であり、その差は最大約 22mm 程度であった。

表 3.1.6 に、燃えしろ層厚さ及び燃え止まり層の難燃薬剤注入量の違いと最大炭化深さの関係を示す。燃焼継続した試験体 S50-FR1、S10-FR2、S50-FR2 の最大炭化深さは、難燃注入量に関わらず、概ね 70～75mm 前後であった。一方で、S25-FR1 及び S25-FR2 のように自消した場合の最大炭化深さは、難燃注入量が少ない方が大きい傾向にあった。燃え止まり層の難燃注入量が 180kg/m³ の場合、燃えしろ層が厚いほど最大深さが大きくなった。一方で、難燃注入量が 110kg/m³ の場合、構造支持部まで炭化した S10-FR2 の炭化深さが最大値であることから、難燃薬剤の注入量がある基準以下であると、火災加熱に耐えられず燃え止まり層内で燃焼が継続すると推定される。

(3) 熱流束及び炉内温度推移

燃えしろ層厚さの違いが流入熱に与える影響を把握するために、図 3.1.21～図 3.1.24 に難燃薬剤注入量ごとの試験体表面における熱流束及び炉内温度を示す。

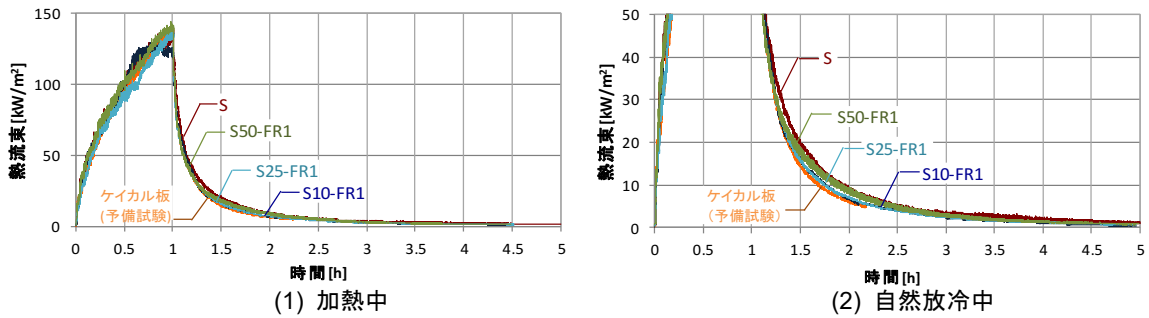


図 3.1.21 試験体表面における熱流束の時間推移（難燃薬剤注入量 180kg/m³における比較）

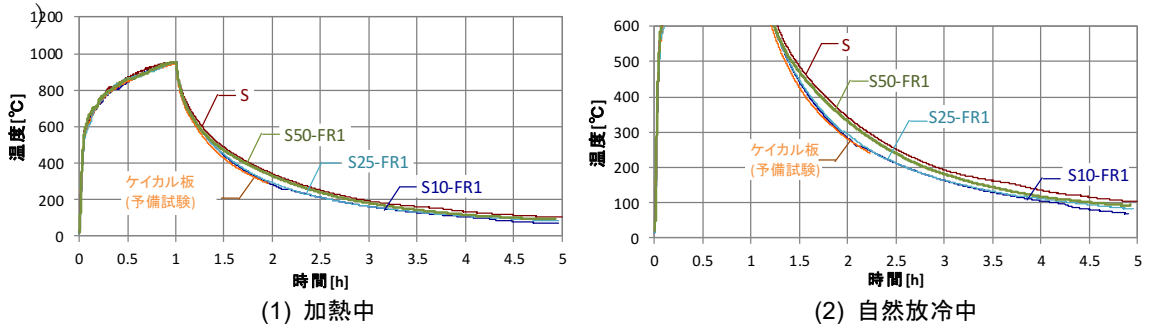


図 3.1.22 炉内温度の時間推移（難燃薬剤注入量 180kg/m³における比較）

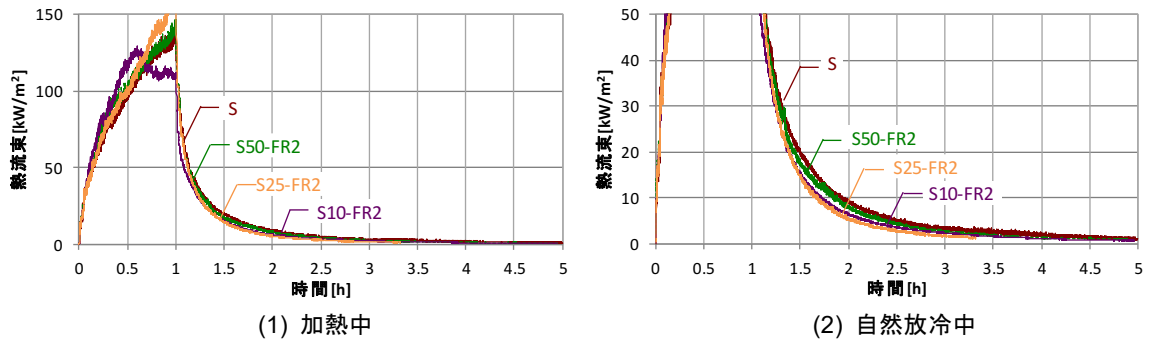


図 3.1.23 試験体表面における熱流束の時間推移（難燃薬剤注入量 110kg/m³における比較）

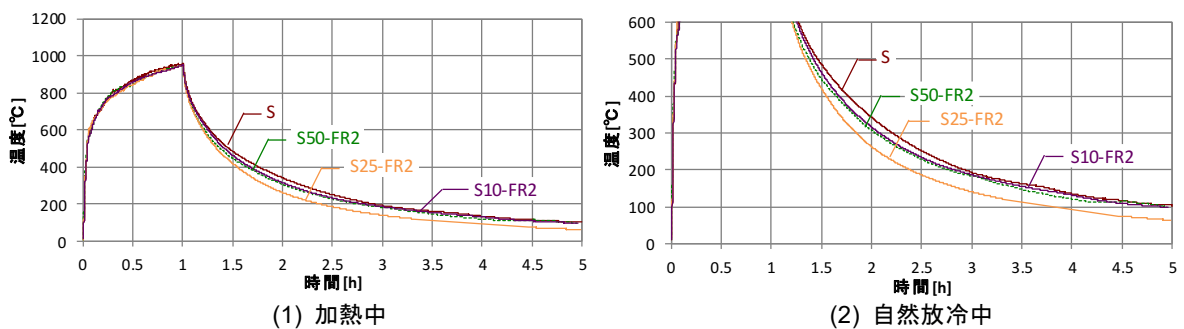


図 3.1.24 炉内温度の時間推移（難燃薬剤注入量 110kg/m³における比較）

難燃薬剤の目標注入量 180kg/m^3 における、熱流束（図 3.1.21）及び炉内温度（図 3.1.22）は、自然放冷中では試験体 S が最も値が大きく、試験体 S50-FR1、S25-FR1、S10-FR1、けい酸カルシウム板（予備試験）の順に大きい値をとったことから、燃えしる層が厚ければ厚いほど、自然放冷中の熱流束及び炉内温度は大きくなったと言える。

脱炉時に自消が確認された S25-FR1 と S10-FR1 は、熱流束及び炉内温度共に、けい酸カルシウム板（予備試験）と概ね同様の推移をみせたことで、加熱終了後 1 時間程度の時点では既に赤熱燃焼による燃焼継続はなく、自消していると判断できる。

また、燃焼継続した S と S50-FR1 では、熱流束及び炉内温度共に、炭化深さが大きい S の方がより大きな値をとっている。

難燃薬剤の目標注入量 110kg/m^3 における熱流束（図 3.1.23）及び炉内温度（図 3.1.24）は、自然放冷中では共に、S が最も値が大きく、S50-FR2、S10-FR2、S25-FR2、けい酸カルシウム板（予備試験）の順に大きい値をとった。脱炉時に自消が確認された S25-FR2 はけい酸カルシウム板（予備試験）と概ね同様の推移をみせたことで、加熱終了後 1 時間程度の時点では既に赤熱燃焼による燃焼継続はなく、自消していると判断できる。

図 3.1.25～図 3.1.27 に、難燃薬剤注入量の違いによる流入熱の変化を把握するため
に、燃えしろ層厚さごとの試験体表面における熱流束及び炉内温度を示す。

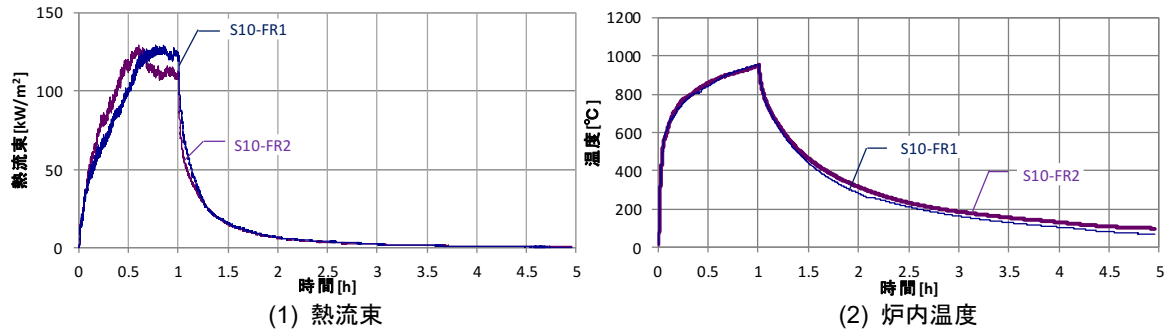


図 3.1.25 試験体表面における熱流束及び炉内温度の時間推移（難燃薬剤注入量の比較）－S10

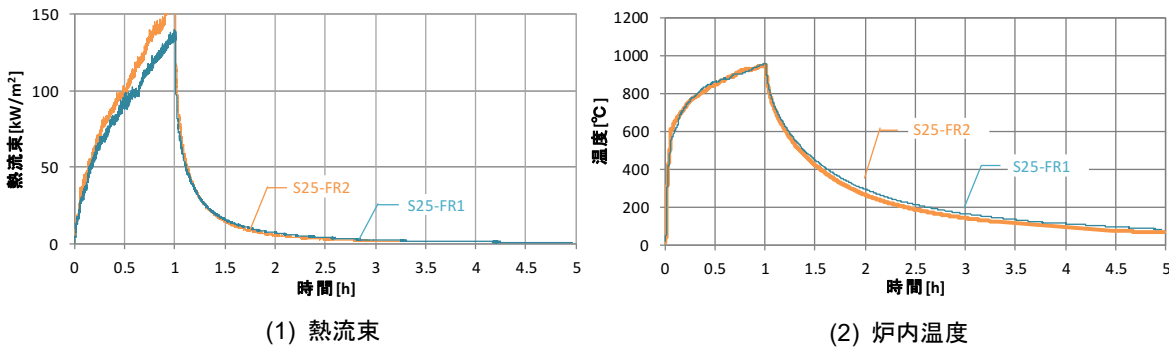


図 3.1.26 試験体表面における熱流束及び炉内温度の時間推移（難燃薬剤注入量の比較）－S25

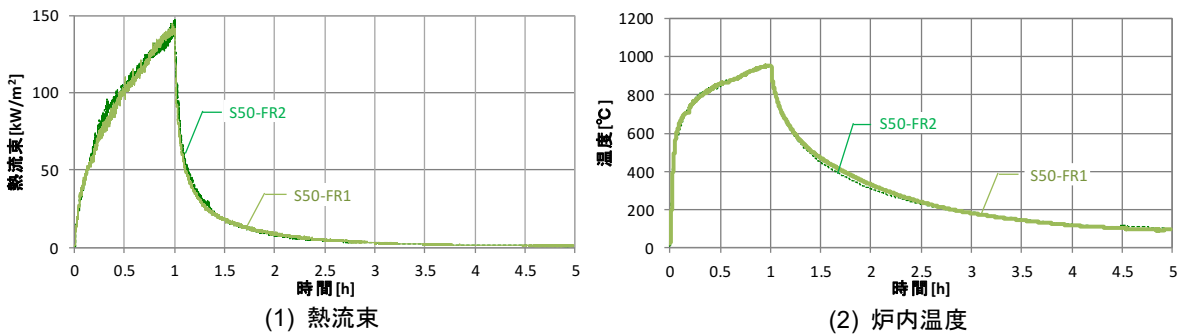


図 3.1.27 試験体表面における熱流束及び炉内温度の時間推移（難燃薬剤注入量の比較）－S50

図 3.1.25～図 3.1.27 より、燃えしろ層厚さが 25mm、50mm の試験体では、熱流束及び炉内温度ともに、自然放冷中においては難燃薬剤の注入量が少ないほど高い値をとった。燃えしろ層厚さ 10mm の試験体では、注入量が少なく燃焼継続した S10-FR2 の方が、注入量が多く自消した S10-FR1 より高い値をとる結果となった。

3.1.4 考察

(1) 1時間耐火性能を持つ燃え止まり型木質耐火構造部材の開発可能性の見通し

表 3.1.3 に脱炉後の試験体断面（炭化性状）と脱炉時の赤熱燃焼の有無の目視による観察結果を示した。燃え止まり層が準不燃材料相当の場合（FR1 仕様）、燃えしろ層厚さ 10mm（S10-FR1）及び 25mm（S25-FR1）で脱炉時に赤熱燃焼が継続しておらず、炭化深さが 37mm、48mm であったことから、燃え止まり層内で自消したといえる。また、燃え止まり層が難燃材料相当の場合（FR2 仕様）では、燃えしろ層厚さ 25mm の試験体（S25-FR2）のみ自消し、炭化深さは 64mm であったため、燃え止まり層内で自消した。これらより、本実験で燃え止まり層内で自消した仕様が 3 仕様あったことから、燃え止まり層に一般的な難燃処理木材（窒素リン酸系薬剤）を用いた燃え止まり型木質耐火構造部材は開発可能であると見通しが得られた。

(2) 各仕様の炭化性状と自消への影響

第2章では、燃えしろ層が薄ければ、燃え止まり層が火災加熱に曝露されること、厚ければ加熱終了後に燃えしろ層の赤熱燃焼を持続させる可能性があることが示されている。これら2点を踏まえて、本節では、自消する適切な燃えしろ層厚さと燃え止まり層の性能の検討を行った。

加熱終了後に燃えしろ層で赤熱燃焼が続いた S50-FR1、S50-FR2 では、いずれも自消に至らなかったことから、加熱終了後に燃えしろ層内で赤熱燃焼が起こらないように燃えしろ層を設計することが重要であると考えられる。

本実験結果から、燃えしろ層厚さ 50mm では、表 3.1.6 より脱炉時の炭化深さが FR1、FR2 で各々 71mm、72mm と概ね等しい。一方で、燃えしろ層厚さ 10mm の燃え止まり層の難燃レベルが難燃材料相当、準不燃材料相当のとき、炭化深さを比較すると、75mm、37mm であるため、その差は 48mm であった。同様に、燃えしろ層厚さ 25mm のとき炭化深さを比較すると、差は 16mm であった。これらより、難燃性能が低いほど炭化深さは深くなり、燃えしろ層厚さが薄いほど、難燃レベルによる炭化深さの差が大きくなった。

これらの傾向は、燃えしろ層が薄く被覆効果が小さい場合、燃え止まり層の温度上昇はその難燃性能に強く影響されるのに対し、加熱終了後の燃えしろ層深部での赤熱燃焼に対する燃え止まり層の温度上昇抑制効果には、燃え止まり層の難燃性能には大きな影響を受けないことを示している。

(3) 燃え止まり層による燃えしろ層の温度上昇抑制効果

図 3.1.18 で、試験体 S と S25-FR1 の温度推移を比較することで、燃え止まり層が燃えしろ層の温度上昇抑制に及ぼす効果を確認する。表面から 15mm 以内の無処理木材部分の温度推移は、両仕様で概ね一致した。

一方で、燃え止まり層のある S25-FR1 で燃え止まり層表面が難燃薬剤分解温度の約 195℃³⁾⁴⁾に達する時点を見ると、温度推移の勾配が、試験体 S と S25-FR1 の燃えしろ層内部及び燃え止まり層内部の両測定点で大きく異なり始め S25-FR1 の方が緩やかになった。この温度勾配の差は、S25-FR1 の燃え止まり層表面が難燃薬剤の分解温度の約 195℃³⁾⁴⁾になる 47.5 分ごろに現れ始めることから、難燃薬剤の分解による温度上昇抑制効果に起因すると考えられる。その後、この温度差の拡大に伴い、無処理木材である表面付近でも、試験体 S の方が高温になる。

これより、燃え止まり型木質耐火構造部材では、加熱終了時に燃えしろ裏面で予想される温度の範囲に難燃薬剤が主な吸熱反応帯を持つように、燃えしろ層厚さと燃え止まり層の性能を決める必要があると考えられる。

(4) 難燃薬剤注入量が自消性状に及ぼす影響

表 3.1.3、図 3.1.12 及び図 3.1.15 より、試験体 S10-FR1 は自消したが、S10-FR2 は燃焼継続した。燃え止まり層の性能が準不燃材料相当である S10-FR1 では、燃えしろ層厚さ 10mm と燃えしろ層が薄いため、加熱による入熱の影響により、S25-FR1 と比較して加熱中の燃え止まり層の表面温度（図 3.1.12 の②）は高いが、自消した。自消した要因は、燃え止まり層の難燃性能が高いために、炭化が進みながらも薬剤の分解を維持でき、温度上昇抑制効果を発揮し続けられたと考えられる。

一方、S10-FR2 は脱炉時に赤熱燃焼が目視で観察され（写真 3.1.8）、図 3.1.20 の炭化図を見ると、構造支持部材まで燃焼が進んでいる。加熱終了時に燃え止まり層内部（図 3.1.15 の③深さ 20mm）で 450℃以上であること、その後 20mm 以深の燃え止まり層内部が 200～350℃前後を維持していることから、加熱終了時に燃え止まり層が赤熱燃焼し、試験体内部で続く赤熱燃焼による加熱に対して薬剤の分解が持続し、消費し続けていると、自消せず燃焼継続する場合があると考えられる。したがって、難燃薬剤注入量 110kg/m³（試験体 S10-FR2）では、火災加熱に対する温度上昇を抑制するには薬剤注入量が不足したと解釈できる。

以上から、燃え止まり層への薬剤注入量が少ないと、燃え止まり層の温度上昇抑制効果

が不十分となり、赤熱燃焼を誘発し得ることが示された。

(5) 燃えしろ層厚さが自消性状に及ぼす影響

図 3.1.13、図 3.1.14 より、試験体 S25-FR1、S50-FR1 の自然放冷中の温度低下に着目すると、加熱面近傍では、加熱終了後の自然放冷 1～2 時間の間に温度低下の停滞が見られる。何れも炉内温度が 450℃以下に降下する前であるから、加熱面近傍での赤熱燃焼により温度低下が妨げられたと考えられる。炉内温度が 450℃より低くなった時点では、当該部分の温度は再び低下していることから、この時点で加熱面表面近くの赤熱燃焼は不活性化したと考えられる。これらは、第 2 章において、加熱面近傍の熱損失により加熱表面付近の赤熱燃焼が不活性化した結果と相違ない。

脱炉時には、試験体 S50-FR1 で赤熱燃焼が確認されたのに対し、試験体 S10-FR1 及び S25-FR1 では赤熱燃焼が見られなかった。試験体 S10-FR1 及び S25-FR1 では、炭化した燃えしろ層が焼失せずに試験体表面に残存していたことと、加熱終了時の燃え止まり層の内部温度（図 3.1.12 及び図 3.1.13 の③）が難燃薬剤分解温度（195℃³⁾⁴⁾）以上であり、温度上昇抑制効果を発揮したと考えられることから、可燃物が燃え尽きて燃焼が停止したのではなく、自消したと考えられる。

S50-FR1、S50-FR2 で加熱終了後、脱炉時まで赤熱燃焼が継続した要因は、燃えしろ層が厚いために、燃えしろ層深部で赤熱燃焼が発生し、表面の炭化層に保温されて熱損失の影響を受け難く、赤熱燃焼による発熱速度が大きいこと、燃えしろ層が厚いために加熱終了までに、燃え止まり層温度が薬剤の分解温度に達せず、難燃薬剤の温度上昇抑制効果が発揮できていないことの 2 点が挙げられる。

以上から、燃えしろ層が厚い場合、燃えしろ層深部では表面からの熱損失による温度低下の効果が低いこと、燃え止まり層の難燃薬剤分解温度に達せず、赤熱燃焼の持続が抑止されにくいことの両面で不利になる場合があることが示された。

図 3.1.14、図 3.1.17 より、試験体 S50-FR1、S50-FR2 とともに、加熱終了時に深さ 30mm で赤熱燃焼温度帯の 450℃を超えているが、これは第 2 章の実験で加熱終了時に深さ 20～40mm で 450℃以上となり、赤熱燃焼が進むと自消しなかった結果と一致する。

(6) 燃え止まり層温度の比較と赤熱燃焼継続の要因

自消した試験体 S10-FR1、S25-FR1、S25-FR2 の燃え止まり層内部の最高温度（温度推移の図中の③で示す温度）は、220～430℃を示しており、難燃薬剤の分解温度 195℃³⁾⁴⁾を

超え、かつ、赤熱燃焼温度帯である 450℃を超えない範囲となった。

自消せず赤熱燃焼が継続した試験体 S50-FR1、S50-FR2 の燃え止まり層最高温度は、加熱中に 100℃にも及ばなかった一方で、S10-FR2 では加熱中に赤熱燃焼温度帯である約 600℃に達した。これらと(4)、(5)の考察から、自消せず燃焼継続した要因として以下の 3 点が考えられる。

- ① 燃えしろ層が薄い S10-FR2 では、耐火加熱による入熱に対して薬剤注入量が少ないと、燃え止まり層自体で赤熱燃焼を生じる場合がある。
- ② 燃えしろ層が厚い S50-FR1、S50-FR2 では加熱中に燃え止まり層が難燃薬剤の分解温度(195℃³⁾⁴⁾に達することができずに、燃え止まり層による燃えしろ層深部の温度上昇抑制効果が発揮できない。
- ③ 燃えしろ層が厚い場合、加熱終了後、実験終了まで燃え止まり層の温度は 200℃前後で長時間に渡り続いており、試験体内部で続く赤熱燃焼による加熱に対して薬剤の分解が持続して難燃効果が低下し、燃え止まり層として機能しなくなる場合がある。

(7) 自消に必要な燃えしろ層厚さと燃え止まり層の難燃性能

(1)～(6)より、燃え止まり型木質耐火構造部材で加熱終了後の赤熱燃焼の持続を抑制するには、加熱中に燃え止まり層表面温度が、難燃薬剤の分解温度帯に達するように燃えしろ層厚さを設計し、それに合わせた燃え止まり層の難燃性能を選定する必要があると考えられる。すなわち、燃え止まり層の設計は、燃えしろ層厚さによって単純に最適化できるわけではなく、燃えしろ層が薄い場合は、燃え止まり層への入熱と加熱による難燃薬剤の分解による吸熱の平衡を維持できるように燃え止まり層に難燃性能を与えなければならず、燃えしろ層が厚く、加熱終了後に燃えしろ層内で赤熱燃焼が継続する場合は、長時間の赤熱燃焼による加熱に耐える難燃性能を燃え止まり層に与える必要がある。

また、本実験で見られた自消の有無と燃えしろ層厚さ・燃え止まり層の難燃性能の関係は、第 2 章の実験で観察された赤熱燃焼の持続の有無と共通し、本実験で燃えしろ層厚 25mm の時に難燃性能の低い燃え止まり層でも自消を達成できたことは、第 2 章の実験から予想可能な範囲にある。

(8) 燃え止まり層の難燃性能を最小化する燃えしろ層厚さ

これまでの検討により、燃えしろ層が厚い場合は加熱終了後に燃えしろ層深部で赤熱燃焼が継続し自消に至らない可能性があり、燃えしろ層が薄い場合は火災加熱により燃

え止まり層に対する被覆層の役割を果たせずに、燃え止まり層の難燃性能によっては燃え止まり層内で赤熱燃焼を誘発し自消を確保できなくなる可能性がある。

従って、燃えしろ層には、要求耐火性能ごとに燃え止まり層に必要な難燃性能が最小となる最適厚さが存在するといえる。燃え止まり層の難燃性能を最小化するには、加熱中に燃え止まり層温度が難燃薬剤の分解温度に達するように燃えしろ層厚さを設計し、燃え止まり層の温度上昇抑制効果により燃えしろ層深部の温度を加熱終了時に赤熱燃焼に至らない限界とするよう、燃え止まり層の性能を設計すればよい。

これより、難燃処理木材を燃え止まり層とする燃え止まり型木質耐火構造部材の適切な燃えしろ層厚さは、赤熱燃焼温度と難燃薬剤分解温度に基づいて、燃えしろ層に用いる木材の火災加熱時の内部温度推移、つまり炭化速度により予測できると考えられる。

3.2. 燃え止まり型耐火構造梁の設計と自消性能の検証

3.2.1 目的及び試験体設計内容

本節では、前節までの小試験体を用いた検討により把握した燃え止まり型耐火構造部材における最適な燃えしろ層厚さ及び燃え止まり層の性能について、妥当性を検討するために、別途、燃え止まり型木質耐火構造の梁として検討されている仕様⁷⁾を利用して、燃えしろ層及び燃え止まり層を設計し、実大断面の試験体を用いた1時間耐火構造の加熱実験を非載荷で行った。本実験では、前節の3.1節同様、炉内温度をISO834標準加熱曲線に従って制御する。耐火加熱実験では、炉内温度が同一となるように制御しても炉の構造・規模、試験体と温度測定位置の違いにより試験体への入熱に差が生じ得るが、ここでは、前節の小型炉実験における炭化速度が、実大規模の耐火加熱試験時と大きくは変わらないことから、小型炉実験の結果を参照して部材を設計した。

本実験で用いた仕様⁷⁾の燃え止まり層は荷重支持部側面が難燃処理合板、下面がせっこうボード(21mm3枚張)となっている。側面の燃えしろ層は、厚さ30mmの集成材単板を積層する設計のため、その厚さは、前節より燃え止まり層を準不燃材料相当とした時に自消の可能性を期待できる30mmと赤熱燃焼の継続が予測される60mmの2種類とした。試験体は全長1000mm、構造支持部断面を200×300mm、200×900mmの2通りとした。

このように断面設計した経緯を以下に示す。

前節の小型炉実験では、燃えしろ層厚さ(10、25、50mm)と燃え止まり層の薬剤注入量をパラメータとしてISO834の標準加熱曲線に沿って1時間加熱後、炉内で4時間放置し、赤熱燃焼の有無や内部温度を測定し、最適な燃えしろ層厚さと燃え止まり層の性能について把握する目的で実験を行った。薬剤注入量を大きくしても燃えしろ層厚さが50mmとすると、燃えしろ層が加熱終了時に燃え残り、また表面の炭化層による保温によって、内部の赤熱燃焼を促すことから、自消しなかった。このことから、燃え止まり型木質耐火構造部材において自消するには、燃えしろ層が厚ければ厚いほどよいというわけではなく、加熱終了時に燃え尽きる程度であれば、その後の燃焼継続は燃え止まり層の難燃処理木材によって抑制されることを明らかになった。また、本実験用試験体の製作にあたって利用可能な難燃処理合板の薬剤注入量は最大で140~150kg/m³であった。前節の実験では、燃え止まり層25mmで、薬剤注入量110kg/m³及び180kg/m³のどちらでも、自消した。但し、薬剤注入量が少ない試験体では、炭化深さが大きい傾向があり、注入量の変動係数も低注入量ほど大きい傾向が認められた。本節の実大実験で

は、それらを考慮して、概ね中間値である薬剤注入量 $140\sim 150\text{kg/m}^3$ の難燃合板を燃え止まり層とし、燃えしろ層の厚さを適切に設定することを考えた。

これらは小型試験体による実験のため、実際の部材の大きさになったときの熱容量及び可燃物量の多寡の影響は把握できない。また多くの仕様・実験数を積み重ね、燃焼継続または自消条件を把握することを目的としていたため、耐火性能試験で一般的な3時間+1時間の4時間放置としていた。しかし、4時間以上放置後に温度上昇が見られる報告もされていることから、小型炉実験で把握した知見を踏まえて、試験体仕様を設計し、より長い放置時間で試験体内部温度や自消の有無を観測することが必要である。

そこで本実験では、実大耐火梁を ISO834 の標準加熱曲線に沿って1時間加熱後、炉内で23時間放置することによって、燃えしろ層厚さが加熱終了後の赤熱燃焼及び梁せいの影響を把握し、最適な燃えしろ層厚さと燃え止まり層の性能について明らかにする。耐火炉内での放置中の試験体の温度経過には炉壁からの輻射熱等、入熱の影響が大きいと予測されるため、熱流束計で炉壁からの入熱を把握する。また、断面が大きいほど、燃え止まり層温度が上昇し難く、難燃薬剤注入量が少なくても自消を達成できる可能性がある。また、断面が大きいほど、燃え止まり層温度が上昇し難く、難燃薬剤固定量が少なくても燃え止まりを達成できる可能性がある。そこで本実験では、燃えしろ層厚さ及び梁せい（断面積）をパラメータとし、耐火部材設計における最適条件の指針を明らかにする。

3.2.2 実験概要

(1) 試験体

表 3.2.1 に試験体仕様一覧を示す。前節までと同様、使用する樹種はすべてスギとした。試験体は、燃えしろ層の厚さ 30mm、60mm の 2 種類に対して、梁せいの 300mm、900mm の 2 種類で、計 4 体を設計した。

燃えしろ層は前節から、厚ければよいというわけではなく、厚すぎると保温された炭化層内部で赤熱燃焼が活発になること、燃え止まり層の難燃薬剤の吸熱効果が発揮されない可能性があることが示された。前節より、加熱終了時に燃えしろ層裏面が炭化する程度で、燃え止まり層の難燃薬剤の分解温度 195°C ³⁾⁴⁾程度まで上昇するような厚さが適当であり、10、25、50mm のうち条件を満たすのは、25mm であった。そこで本節では、燃えしろ層厚さを最適と予想できる 30mm、赤熱燃焼を継続させると予想される 60mm の 2 種類を設定した。

燃え止まり層は、別途検討されている仕様⁷⁾を利用していることから、側面は難燃処理木材、下面はせっこうボードとした。側面の燃え止まり層は、燃えしろ層厚さが 25mm 程度とすると、 110kg/m^3 でも自消したが、3.2.1 で前述のとおり安全をみて 140kg/m^3 程度注入した材を用いた。このスギ難燃処理合板は第 2 章で準不燃材料相当の性能があると確認されている試験体 P と同一材である。本節で使用する難燃薬剤は、前節までと同様に全て窒素リン酸系薬剤ノンネン W2-50（丸菱油化工業株式会社製）とする。難燃処理材の注入量について、表 3.2.2 に測定結果を記す。前節までと同様、注入量は目標注入量を示す。また、各部材を接着する接着剤は、前節までと同様にレゾルシノール樹脂接着剤とした。燃え止まり層下面はせっこうボード（厚さ 21mm の 3 枚張）をせっこうボード用接着剤で接着、ビス止めして固定した。

また、材積によって熱容量や可燃物量が変化するため、自消に影響を与えられられるが、既往研究²⁾で、燃えしろ層の厚さをパラメータに実験を行っているが、実大梁の半分の試験体で実験を行っているに留まっているため、実大梁で実験を行う。

表 3.2.1 実大梁加熱実験試験体仕様

試験体	E	F	G	H
燃えしろ層厚さ	30mm	60mm	30mm	60mm
含水率 (スギ集成材)	11.5%	10.6%	11.2%	9.6%
燃え止まり層	(側面) スギ難燃処理合板 厚さ 45mm (15mm×3 枚) 薬剤注入量 140[kg/m ³] (準不燃材料相当) (下面) せっこうボード 63mm (21mm×3 枚)			
構造支持部材 断面	200×300mm		200×900mm	
断面図				

- : 無処理木材 (燃えしろ層・構造支持部)
 : 難燃処理木材 (燃え止まり層)
 : 温度測定点

表 3.2.2 燃え止まり層の難燃薬剤注入量

難燃薬剤注入量平均値 [kg/m ³]	最大値 [kg/m ³]	最小値 [kg/m ³]	標準偏差
144.22	152.71	140.2	3.4

中心部材の接着断面及び試験体製作（秋田県(株)相澤銘木にて）の様子を写真 3.2.1 に示す。



(1) 試験体中心部材断面（試験体 E）



(2) 試験体中心部材断面（試験体 F）



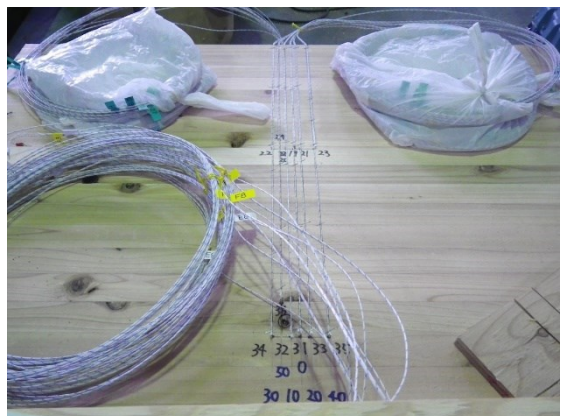
(4) 試験体中心部材断面（試験体 G）



(5) 試験体中心部材断面（試験体 H）



(5) 試験体製作の様子



(6) 試験体熱電対設置の様子

写真 3.2.1 試験体製作の様子

試験体の端部被覆及び炉内設置の様子を写真 3.2.2 に示す。



(1) 試験体加熱面側面右側 (試験体 E)



(2) 試験体加熱面側面右側 (試験体 F)



(3) 試験体加熱面下面 (試験体 E)



(4) 試験体加熱面下面 (試験体 F)



(5) 試験体加熱面側面右側 (試験体 G)



(6) 試験体加熱面側面右側 (試験体 H)



(7) 試験体加熱面下面 (試験体 G)



(8) 試験体加熱面下面 (試験体 H)

写真 3.2.2 試験体被覆と炉内設置の様子

(2) 測定項目

本実験では、以下の測定項目について、設定した。

1) 試験体内部温度

内部温度測定には K 型熱電対 (φ0.65mm) を使用し、加熱面から 10mm 間隔を基準に設置した。炉内の試験体の配置及び温度測定点を、それぞれ図 3.2.1、図 3.2.2 に示す。

2) 炉内温度

炉内温度は、K 型シーース熱電対 (φ3.2mm) を用い、計 8 点で計測した。

3) 炭化性状

脱炉後に、熱電対位置を避けて、中心を切断し、断面における炭化層や残存断面を計測、最大炭化深さ等を把握する。

4) 熱流束

第 2 章から、表面からの熱損失は自消性状に影響を与えることがわかっている。しかし燃焼し刻々と断面が変化する木材の正確な表面温度の測定は、耐火炉内では熱映像の撮影が難しいことから困難である。そこで、熱流計を用いて試験体からの放射熱を測定した。熱流束測定には水冷式熱流束計(φ25.4mm、Hukseflux 製、測定範囲 200kW/m² 以下)を用いた。図 3.2.3 に熱流束計の測定点 4 点の位置を示す。それぞれの試験体梁せいの中間高さに、試験体表面から約 700mm 離れた位置に設置した。

5) その他

観察窓から、試験体加熱面の目視観察、写真撮影等を行った。脱炉後目視にて赤熱燃焼の有無を観察することにより、自消の判断を行う。脱炉時に赤熱燃焼が確認されずに、かつ、試験体内部温度も炉内温度に伴い降下していれば自消と判断する。

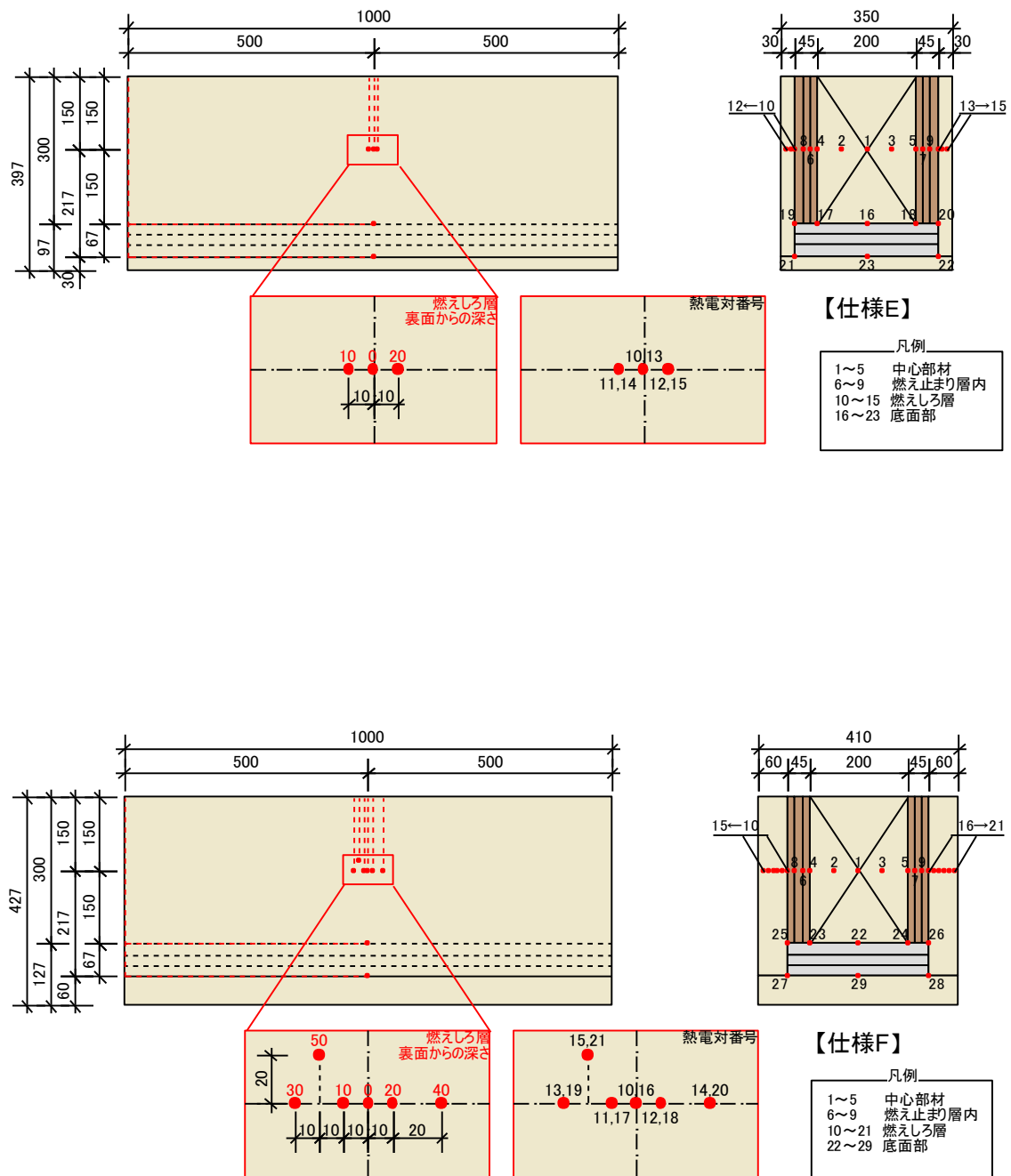


図 3.2.1 仕様 E 及び F 熱電対配置図

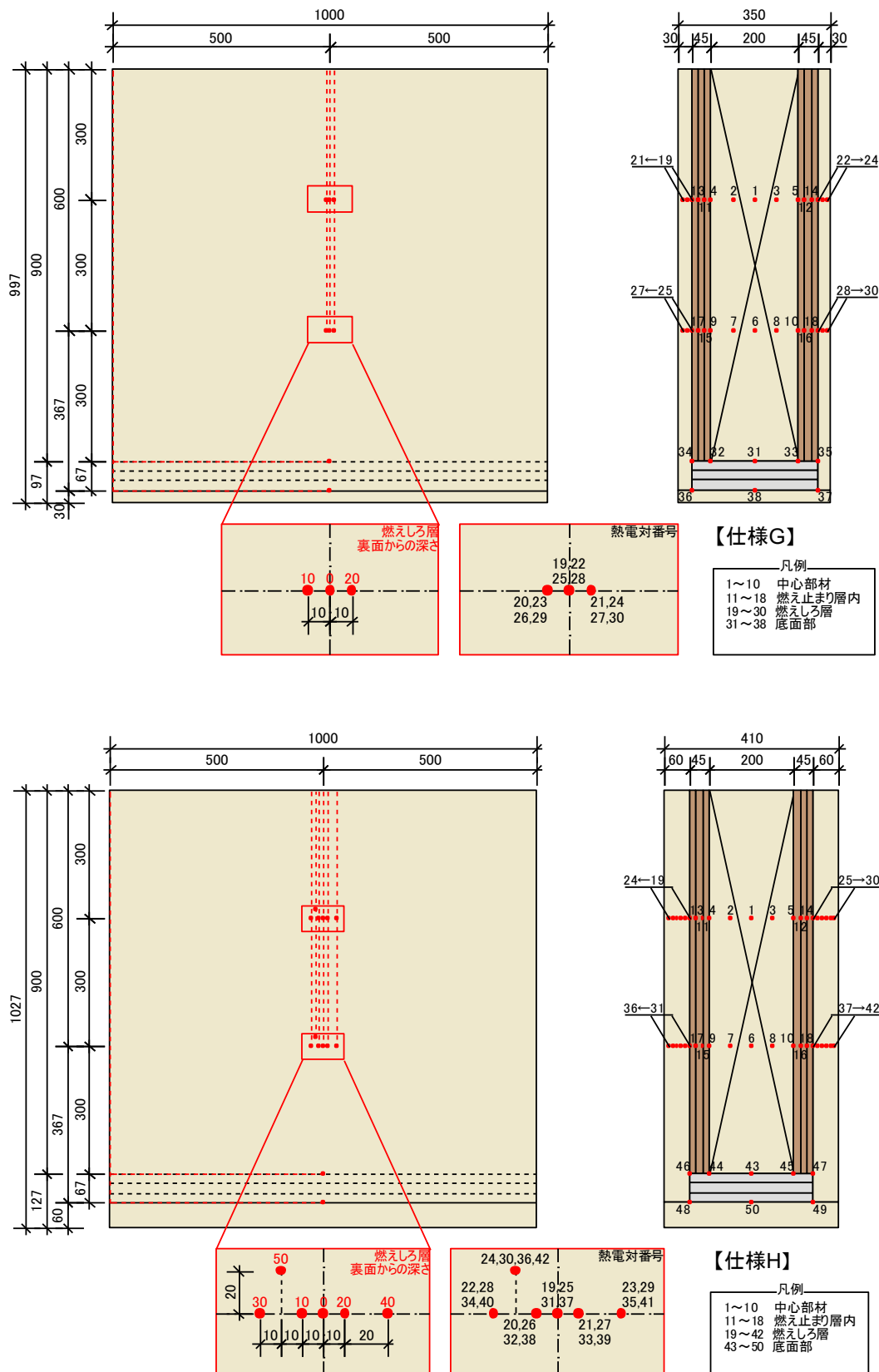


図 3.2.2 仕様 G 及び H 熱電対配置図

(3) 実験方法

(国研) 建築研究所の水平炉 (4300×4000mm) を用い、試験体 4 体を同時に ISO834 標準加熱曲線に沿って 1 時間加熱後、炉内にて 23 時間自然放冷した後、脱炉した。図 3.2.3 に水平炉の概略図を示す。熱流束計箱設置方法及び試験体被覆・設置方法については、次ページ以降に示す。

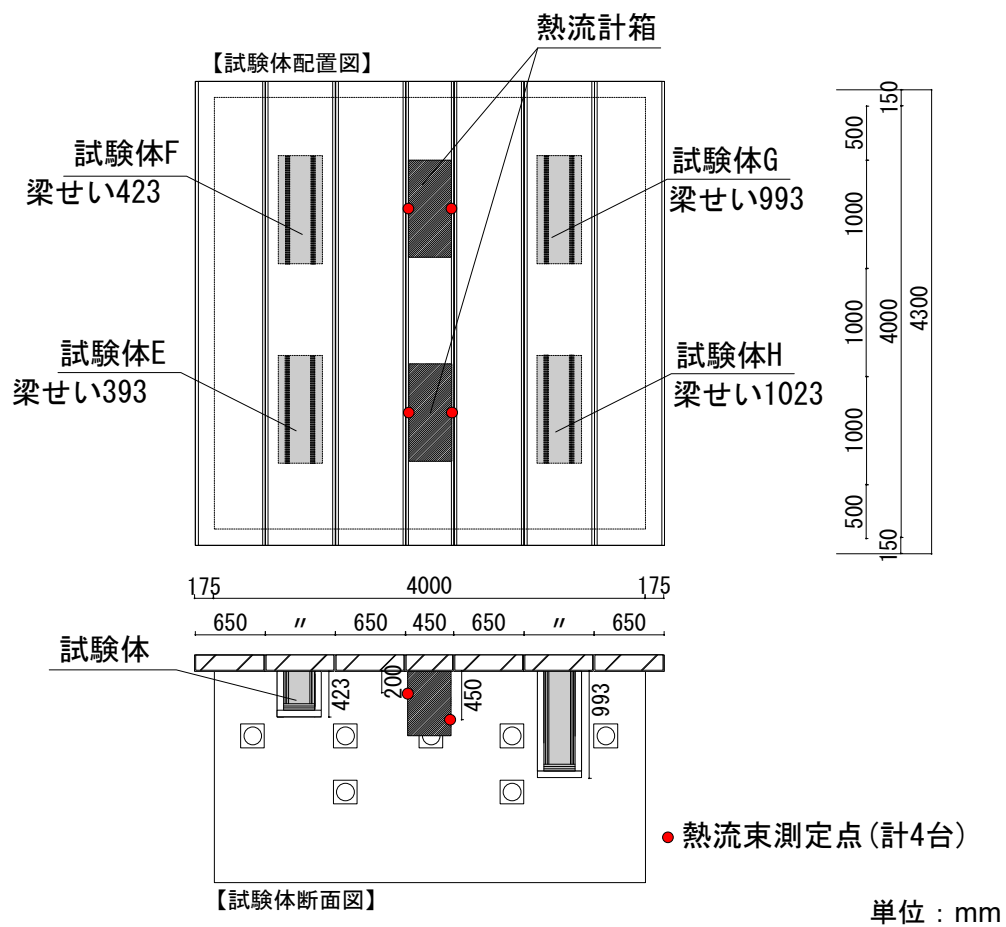


図 3.2.3 水平炉試験装置 概略図

1) 熱流束計箱設置方法

熱流束計は、水冷管による水流により測定部を冷やしながら測定を行う必要があるため、水冷管や配線を保護するために図 3.2.4 に示すような熱流束計箱を製作した。各試験体用の熱流束計箱を写真 3.2.3 に示す。

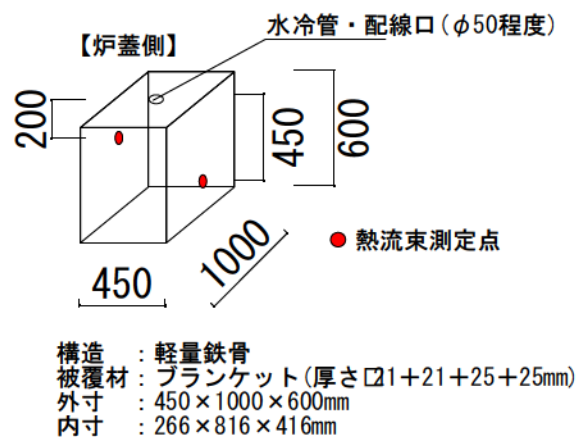


図 3.2.4 熱流束計箱 概略図



写真 3.2.3 熱流束計箱 (E~H の 4 体)

2) 試験体被覆方法

加熱時に試験体端部からの燃えこみを防ぐため、図 3.2.5 のように、試験体端部を被覆した。

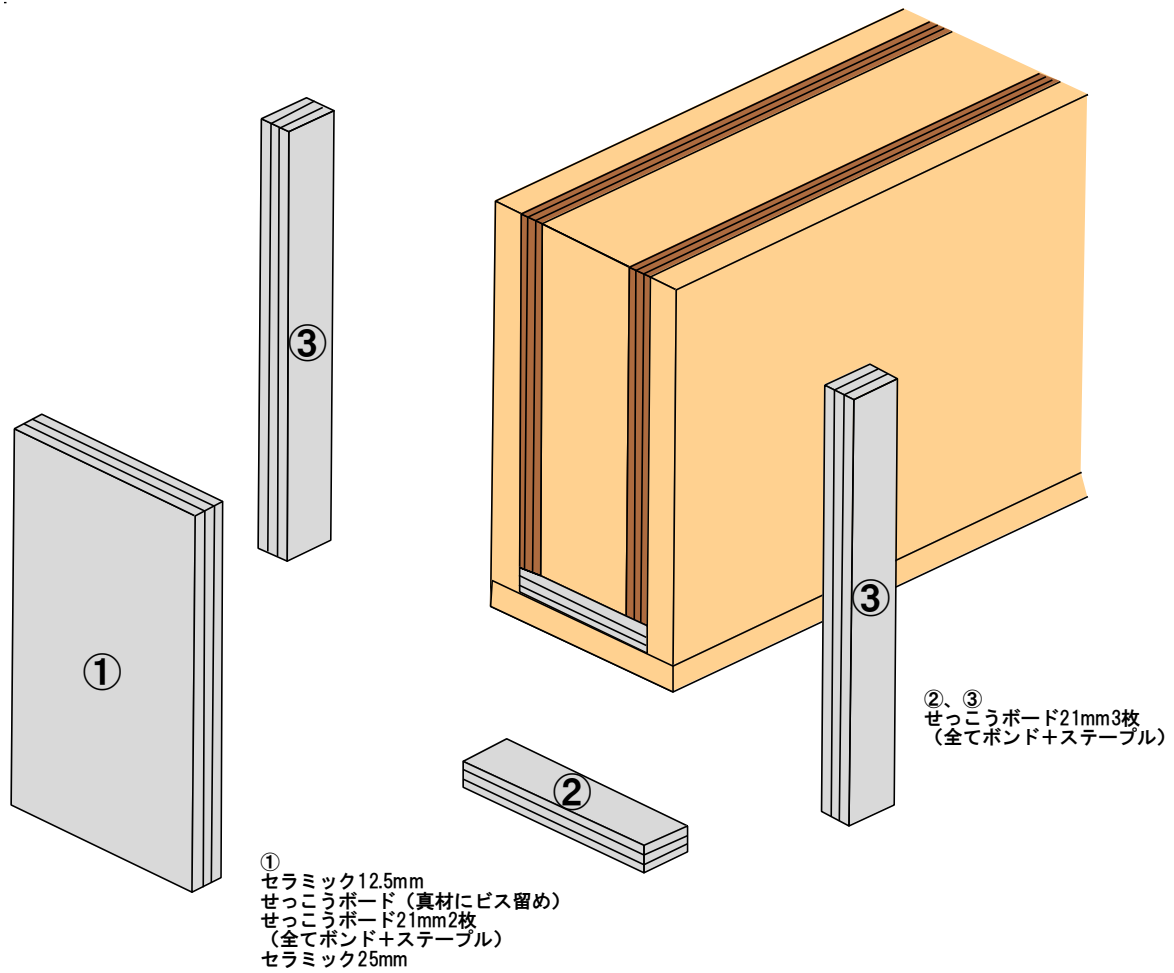


図 3.2.5 試験体端部の被覆方法

3) 試験体設置及び脱炉時の様子

各試験体設置及び脱炉時の様子について、写真 3.2.4 及び写真 3.2.5 に示す。



(1) 試験体 E、F



(2) 試験体 G、H

写真 3.2.4 試験体設置の様子



(1) 試験体 E、F



(2) 試験体 G、H

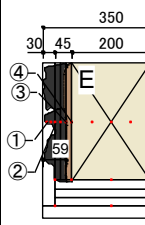
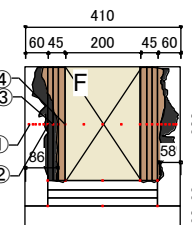
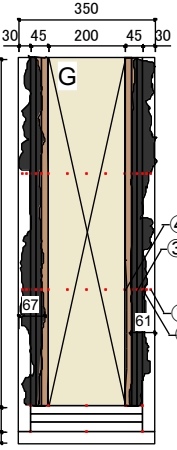
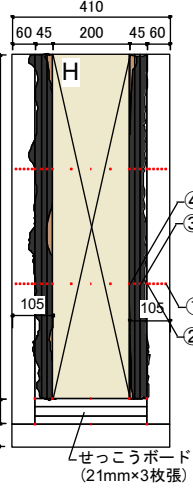
写真 3.2.5 試験体脱炉時の様子

3.2.3 実験結果

表 3.2.3 に各試験における、脱炉時の炭化性状と加熱終了時及び脱炉時の炭化深さ、及び脱炉時の赤熱燃焼の有無を示す。脱炉時の炭化深さは、最大炭化深さとした。脱炉時の赤熱燃焼については、脱炉時に赤熱燃焼が継続していた場合“有”、自消した場合“無”と示す。次ページより、以下の(1)～(4)について、実験結果を示す。

- (1) 目視による脱炉時の燃焼継続の有無の確認
- (2) 試験体内部温度及び炉内温度推移
- (3) 脱炉時の炭化性状
- (4) 熱流束及び炉内温度推移

表 3.2.3 実験結果一覧

試験体	E	F	G	H
燃えしろ層厚さ	30mm	60mm	30mm	60mm
燃え止まり層 (側面)	薬剤注入量 140[kg/m ³] (準不燃材料相当)			
構造支持部材 断面	200×300mm		200×900mm	
脱炉時の 炭化性状				
赤熱燃焼の有無 (最大炭化深さ [mm])	無(60)	有(86)	無(67)	有(105)

- : 温度測定点 (①燃えしろ層10mm, ②燃え止まり層表面, ③燃え止まり層一層目裏面, ④構造支持部材表面)
- : 残存断面(構造支持部) ■ : 炭化層
- : 残存断面(燃え止まり層) □内の数値は炭化深さ(mm)

(1) 目視による脱炉時の燃焼継続の有無の確認

脱炉時の試験体加熱表面の様子を写真 3.2.6 に、観察結果一覧を表 3.2.4 に示す。予想通り、燃えしろ層厚さ 30mm の試験体 E、G では赤熱燃焼は観察されず、燃えしろ層厚さ 60mm の試験体 F、H では赤熱燃焼が観察された。



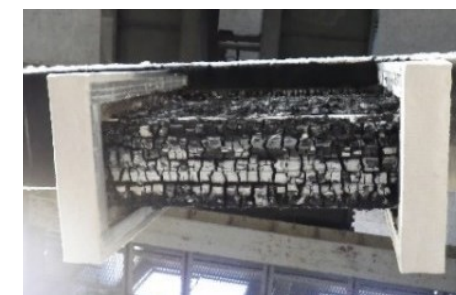
(1) 試験体 E (左：加熱面側面、右：加熱面下側)



(2) 試験体 F (左：加熱面側面、右：加熱面下側)



(3) 試験体 G (左：加熱面側面、右：加熱面下側)



(4) 試験体 H (左：加熱面側面、右：加熱面下側)

写真 3.2.6 脱炉時の試験体加熱表面の様子

表 3.2.4 脱炉時における試験体加熱表面の観察結果一覧

試験体	燃えしろ層厚さ	構造支持部材断面	脱炉時の赤熱燃焼	脱炉時における試験体加熱表面の観察結果
E	30mm	200×300mm	無	<ul style="list-style-type: none"> ・脱炉時に、試験体表面に赤熱燃焼は確認できなかったことから、自消したと判断した。 ・試験体側面は一樣に燃えしろ層が炭化した炭化層に覆われており、部分的な燃えぬけ等は確認されなかった。 ・試験体下面は大部分が、燃えしろ層のスギ集成材は燃え落ちていて、燃え止まり層であるせっこうボードがむき出しになっていた。下面の燃えしろ層が燃え落ちていたことで、試験体側面の下部分の燃焼の加速が抑制されたのではないかと考えられる。
F	60mm	200×300mm	有	<ul style="list-style-type: none"> ・脱炉時に、試験体表面に数箇所赤熱燃焼している部分を確認したことから、自消なかったと判断した。 ・試験体側面では炭化層の有無はまばらであり、所々燃え止まり層がむき出しになっていた。特に側面下側は概ね、炭化層が剥離し、燃え止まり層がむき出しになっていた。一方で、試験体下面はほとんど一樣に燃えしろ層が炭化した炭化層に覆われていた。 ・下面の燃えしろ層が燃え落ちずに脱炉時まで残存していたことで、試験体側面の下部分の燃焼の加速されたのではないかと考えられる。
G	30mm	200×900mm	無	<ul style="list-style-type: none"> ・脱炉時に、試験体表面に赤熱燃焼は確認できなかったことから、自消したと判断した。 ・試験体側面は一樣に燃えしろ層が炭化した炭化層に覆われており、部分的な燃えぬけ等は確認されなかった。 ・試験体下面は大部分が、燃えしろ層のスギ集成材は燃え落ちていて、燃え止まり層であるせっこうボードがむき出しになっていた。 ・下面の燃えしろ層が燃え落ちていたことで、試験体側面の下部分の燃焼の加速が抑制されたのではないかと考えられる。
H	60mm	200×900mm	有	<ul style="list-style-type: none"> ・脱炉時に、試験体表面に数箇所赤熱燃焼している部分を確認したことから、自消しなかったと判断した。試験体側面では炭化層の有無はまばらであり、所々燃え止まり層がむき出しになっていた。 ・特に側面下側は概ね、炭化層が剥離し、燃え止まり層がむき出しになっていた。一方で、試験体下面はほとんど一樣に燃えしろ層が炭化した炭化層に覆われていた。 ・下面の燃えしろ層が燃え落ちずに脱炉時まで残存していたことで、試験体側面の下部分の燃焼の加速されたのではないかと考えられる。

燃えしろ層厚さ 60mm の試験体 F、H の両試験体で脱炉時に赤熱燃焼が継続し、赤熱燃焼による燃え込みがまばらに起こった。一方で、燃えしろ層厚さ 30mm の仕様 E、G の両試験体で燃えしろ層の炭化層が殆ど落ちずに残存したまま鎮火した。

以上から、今後同仕様（難燃薬剤種類や燃え止まり層厚さ）で燃えしろ層厚さ 60mm では、自消はほぼ期待できないことが示された。

(2) 試験体内部温度及び炉内温度推移

各試験体の内部温度及び炉内温度の時間推移を図 3.2.6～図 3.2.21 に、温度推移の結果一覧を表 3.2.5 に示す。

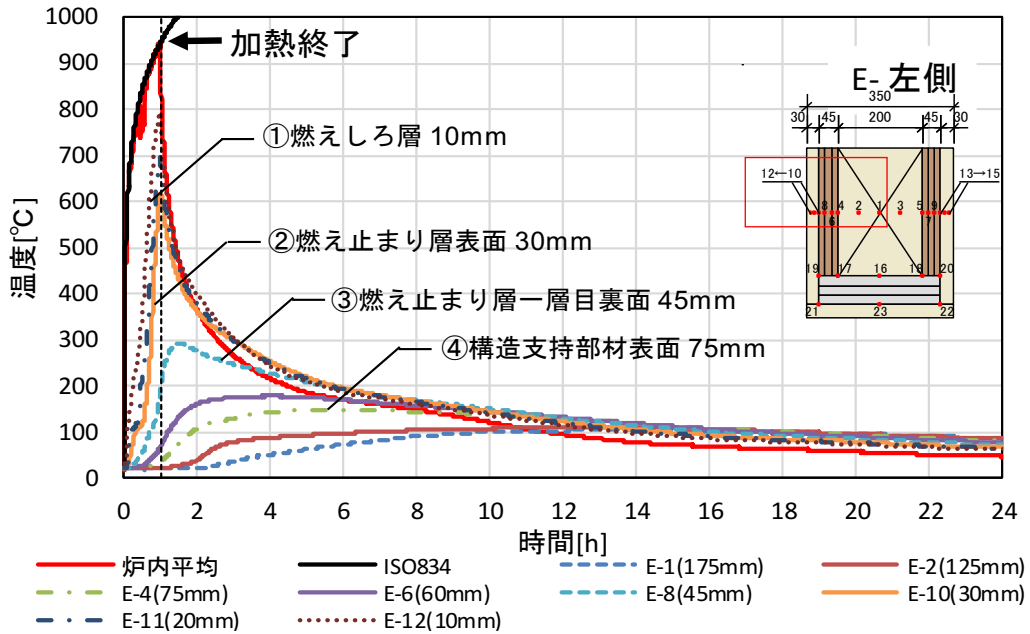


図 3.2.6 試験体内部温度及び炉内温度推移 (E-左側)

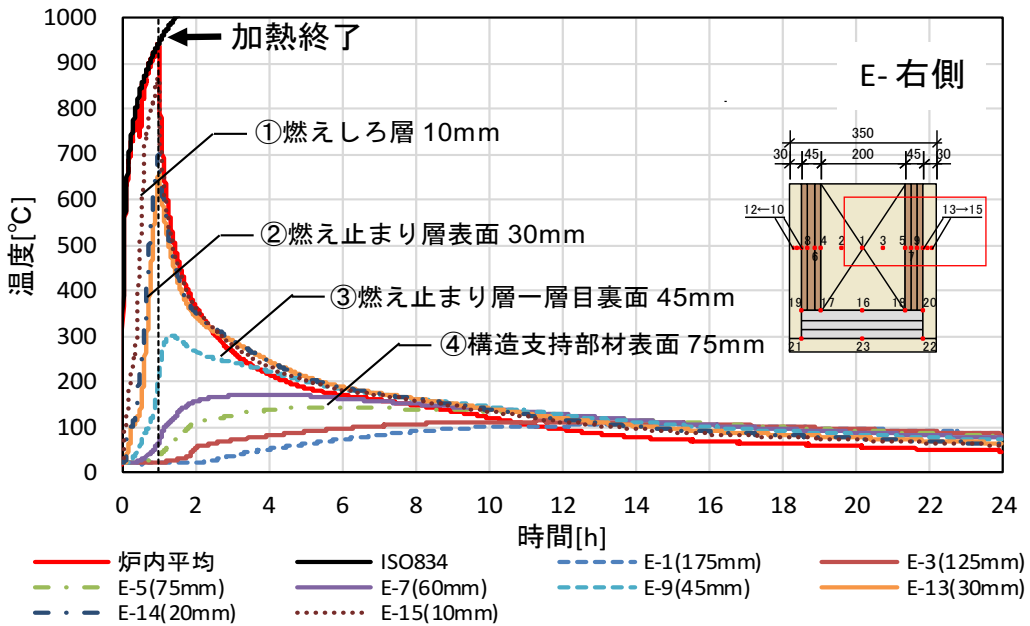


図 3.2.7 試験体内部温度及び炉内温度推移 (E-右側)

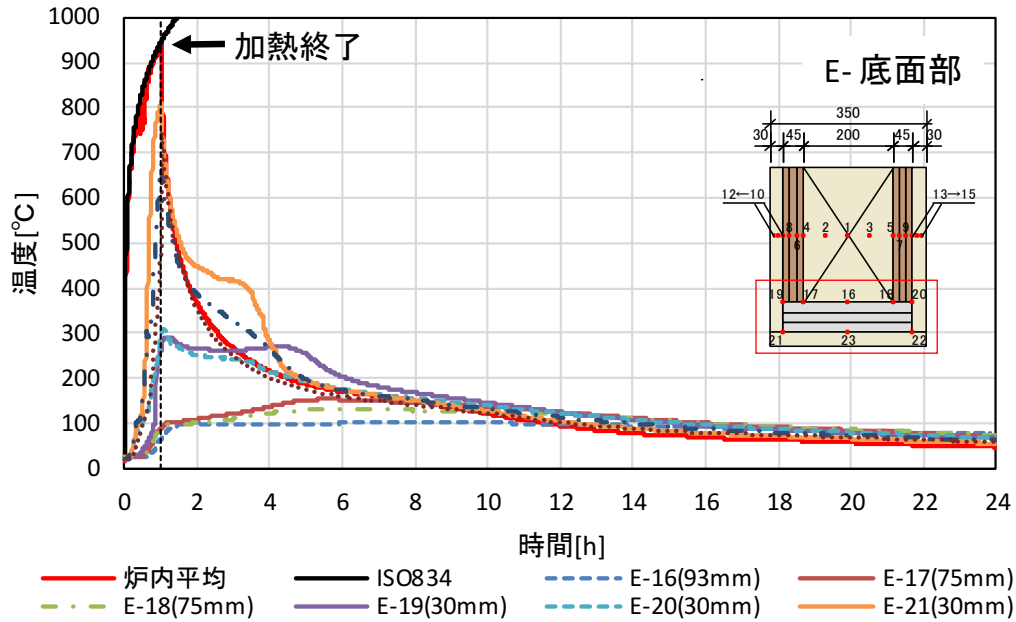


図 3.2.8 試験体内部温度及び炉内温度推移 (E-底面)

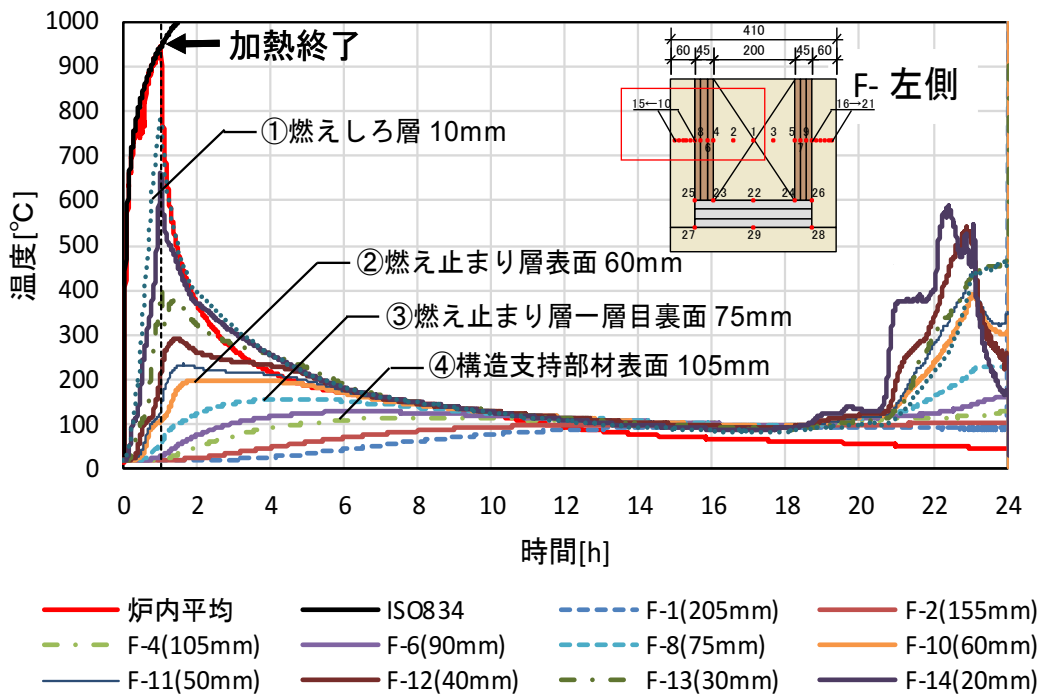
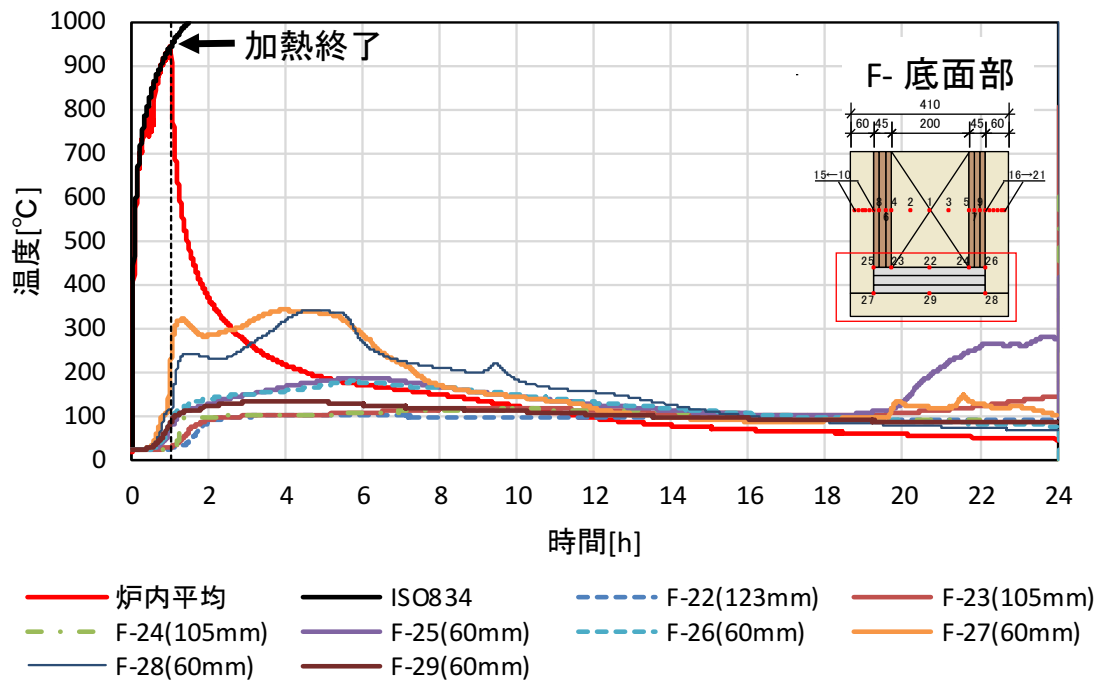
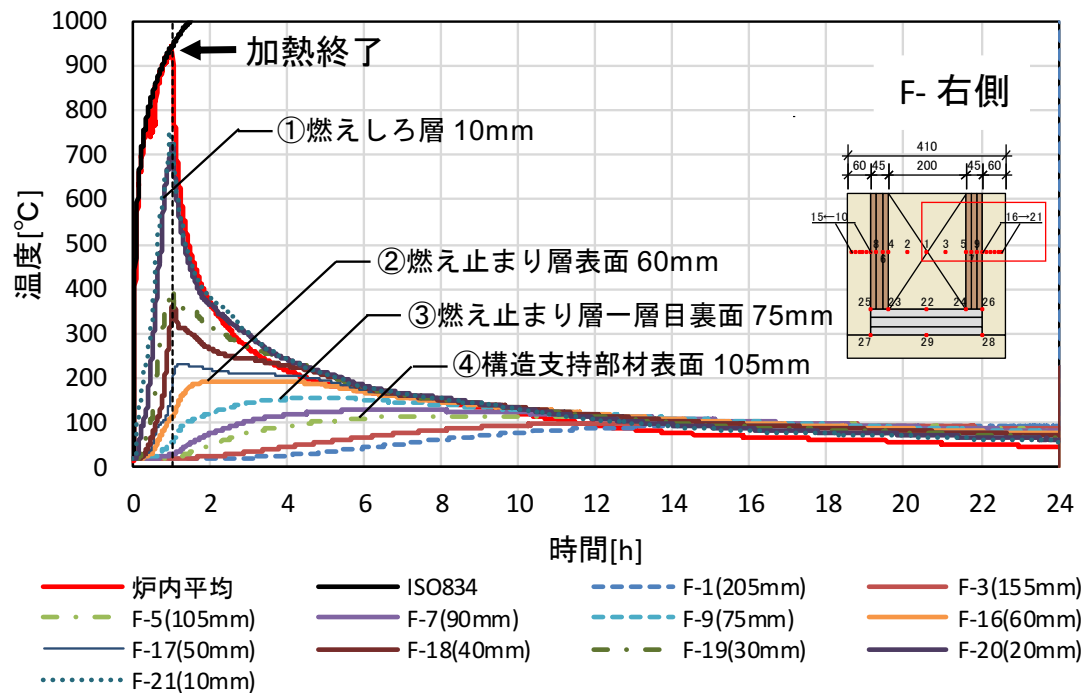


図 3.2.9 試験体内部温度及び炉内温度推移 (F-左側)



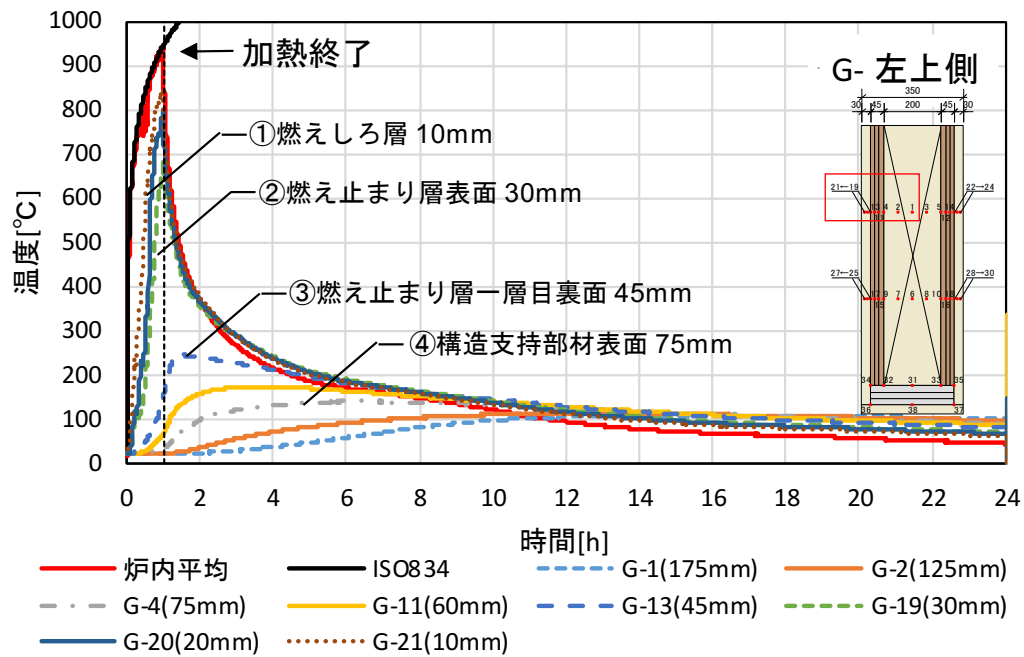


図 3.2.12 試験体内部温度及び炉内温度推移 (G-左上側)

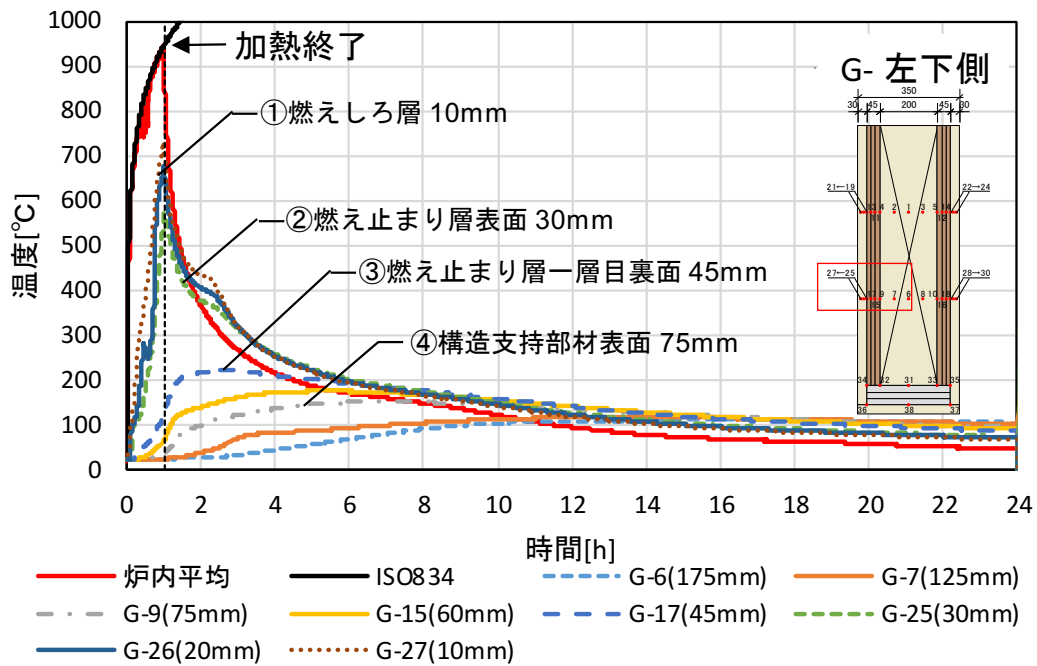


図 3.2.13 試験体内部温度及び炉内温度推移 (G-左上側)

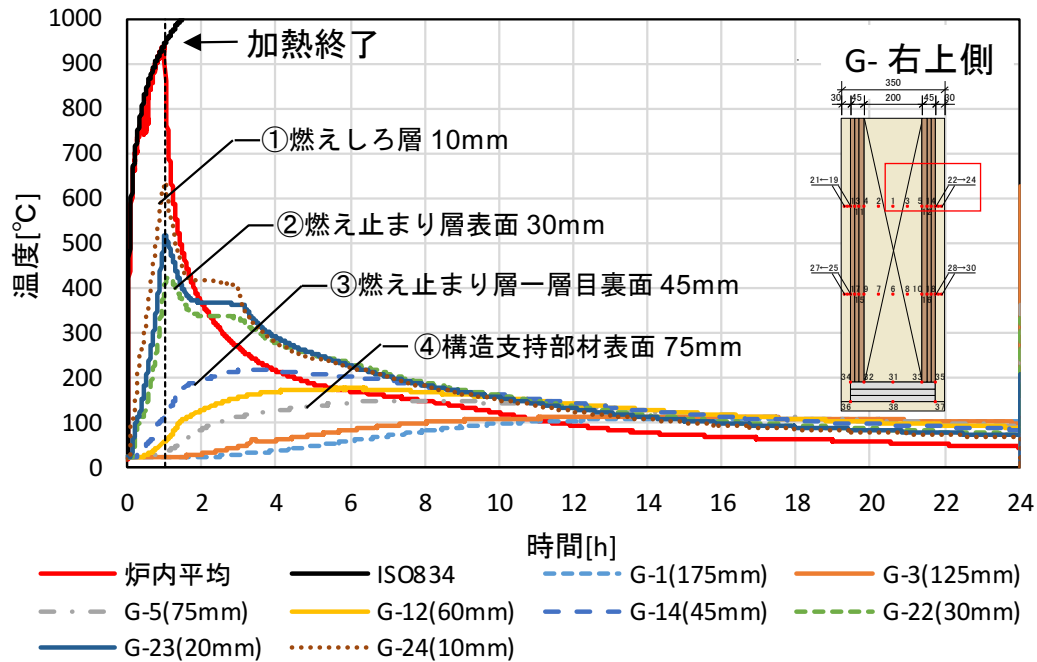


図 3.2.14 試験体内部温度及び炉内温度推移 (G-右上側)

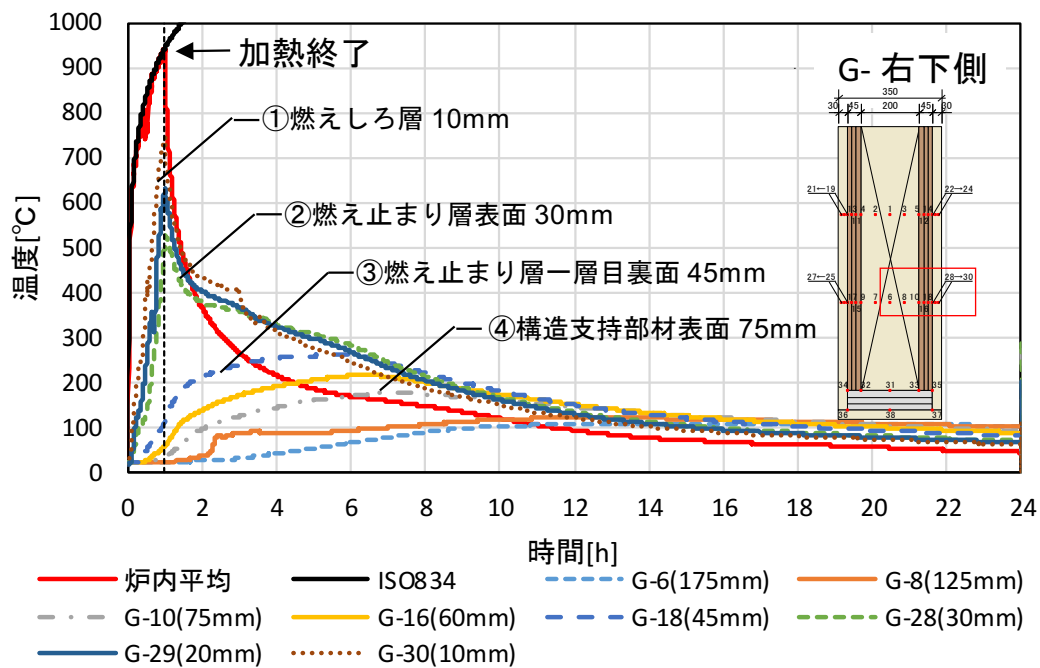


図 3.2.15 試験体内部温度及び炉内温度推移 (G-右下側)

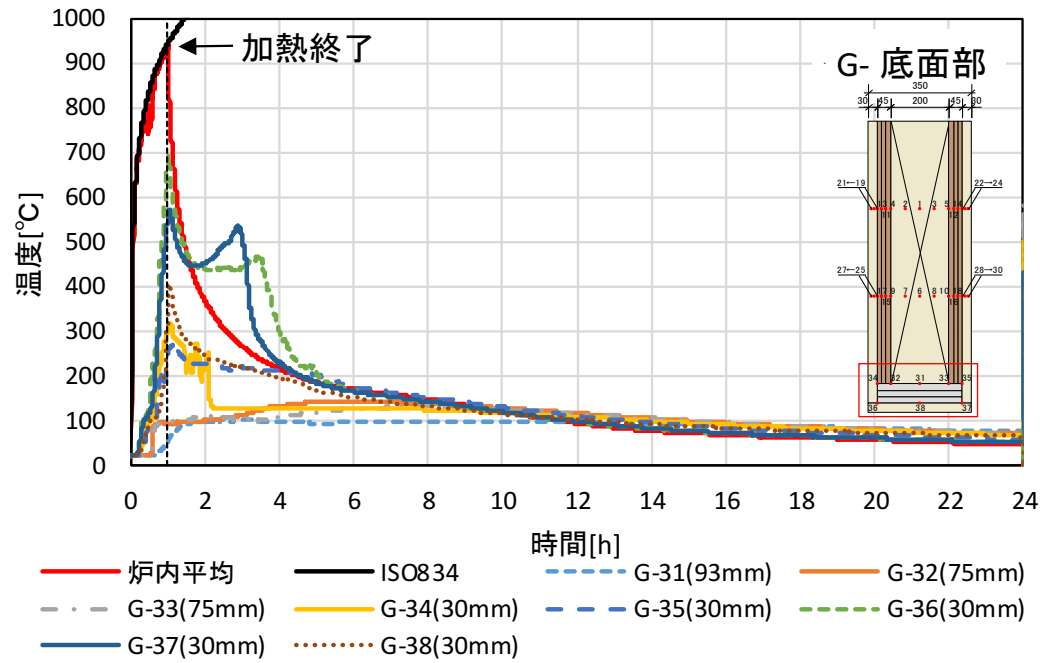


図 3.2.16 試験体内部温度及び炉内温度推移（G-底面部）

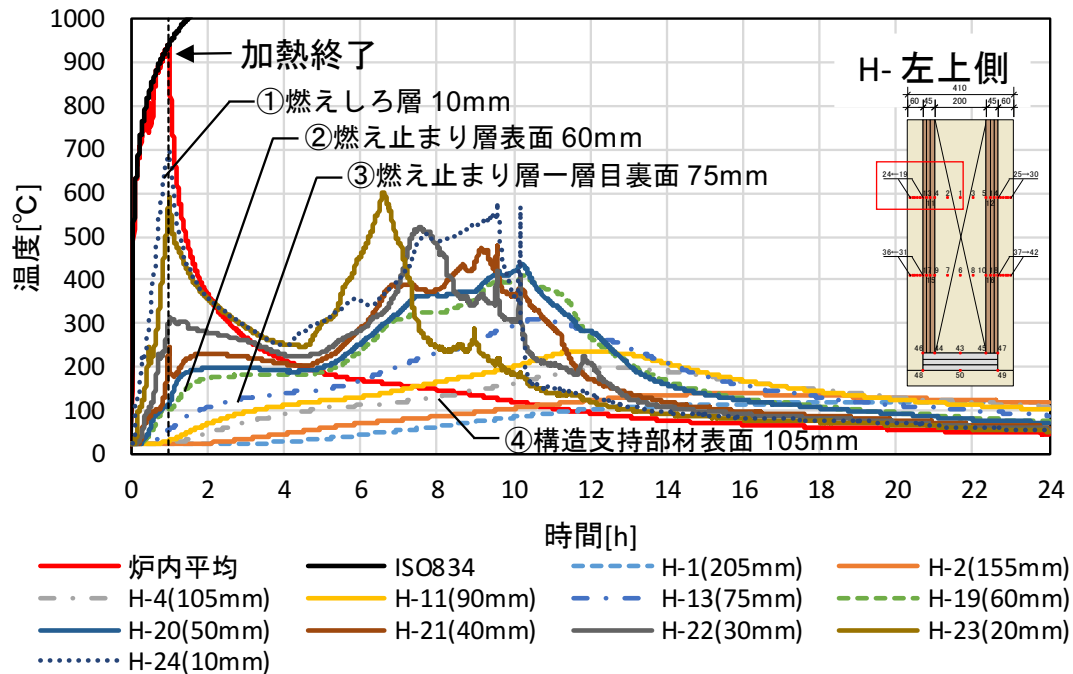


図 3.2.17 試験体内部温度及び炉内温度推移 (H-左上側)

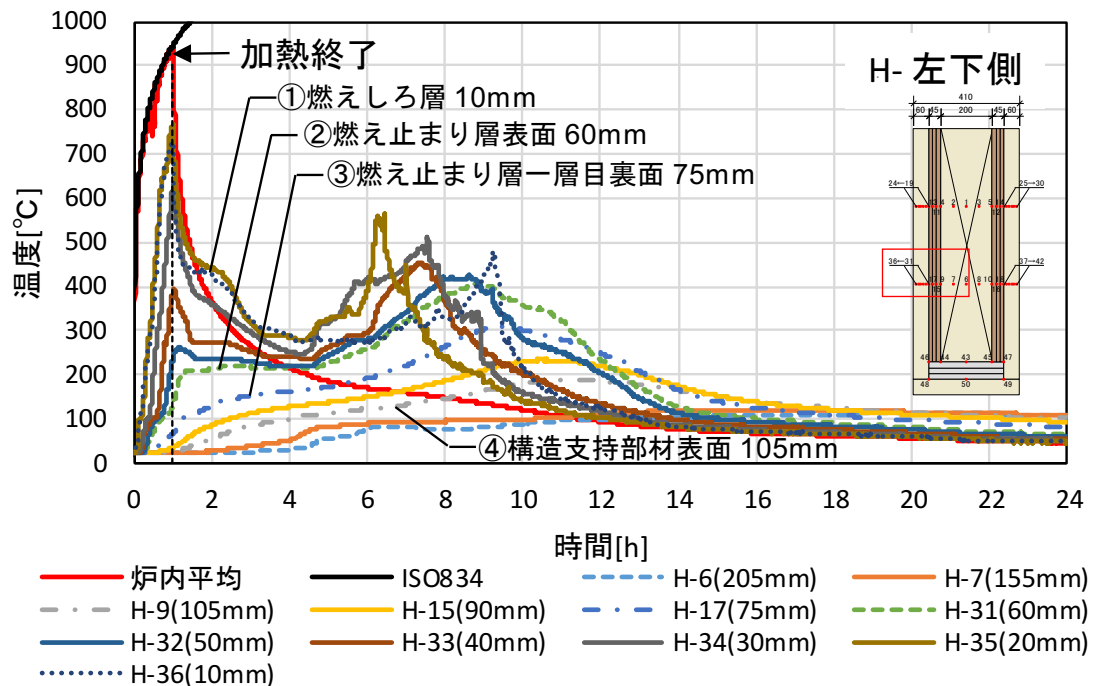


図 3.2.18 試験体内部温度及び炉内温度推移 (H-左下側)

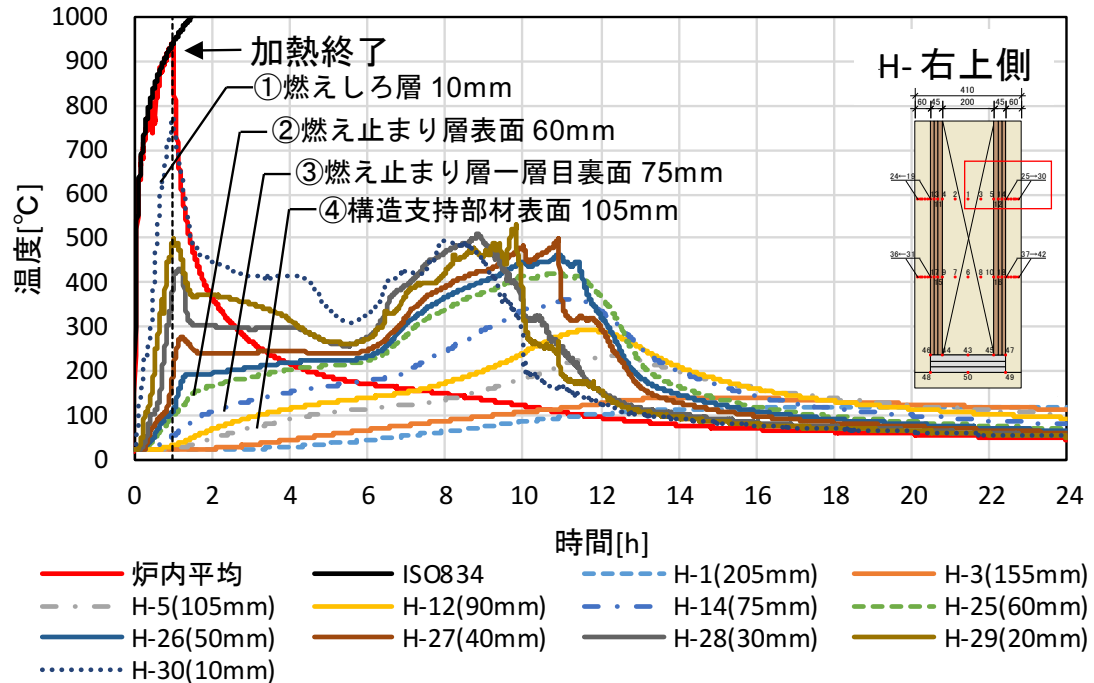


図 3.2.19 試験体内部温度及び炉内温度推移 (H-右上側)

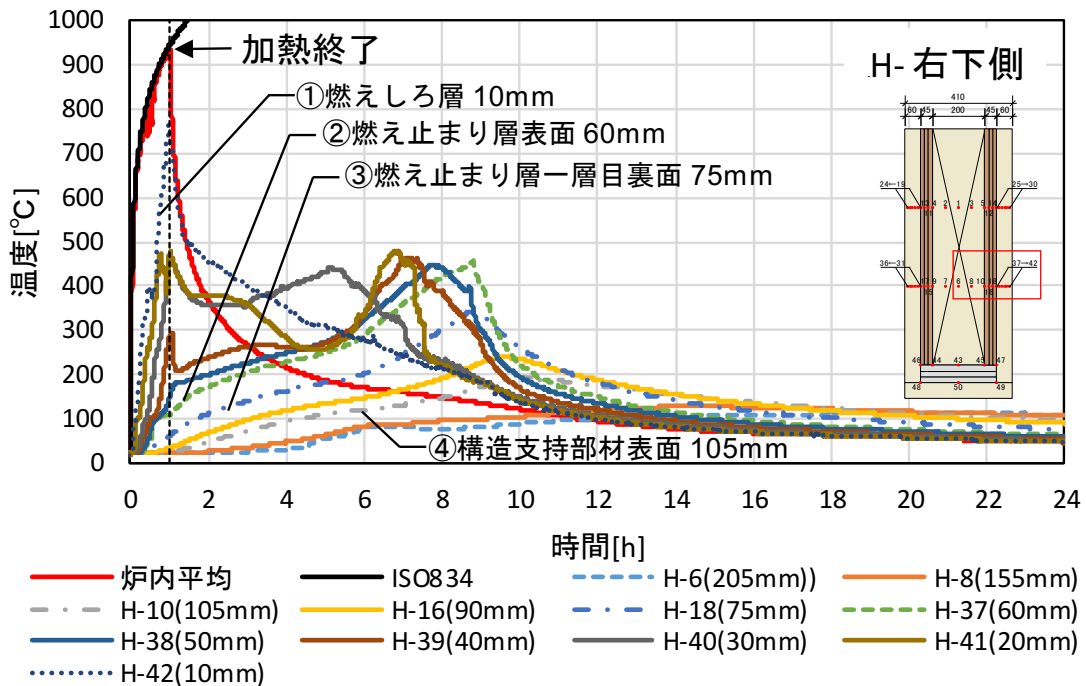


図 3.2.20 試験体内部温度及び炉内温度推移 (H-右下側)

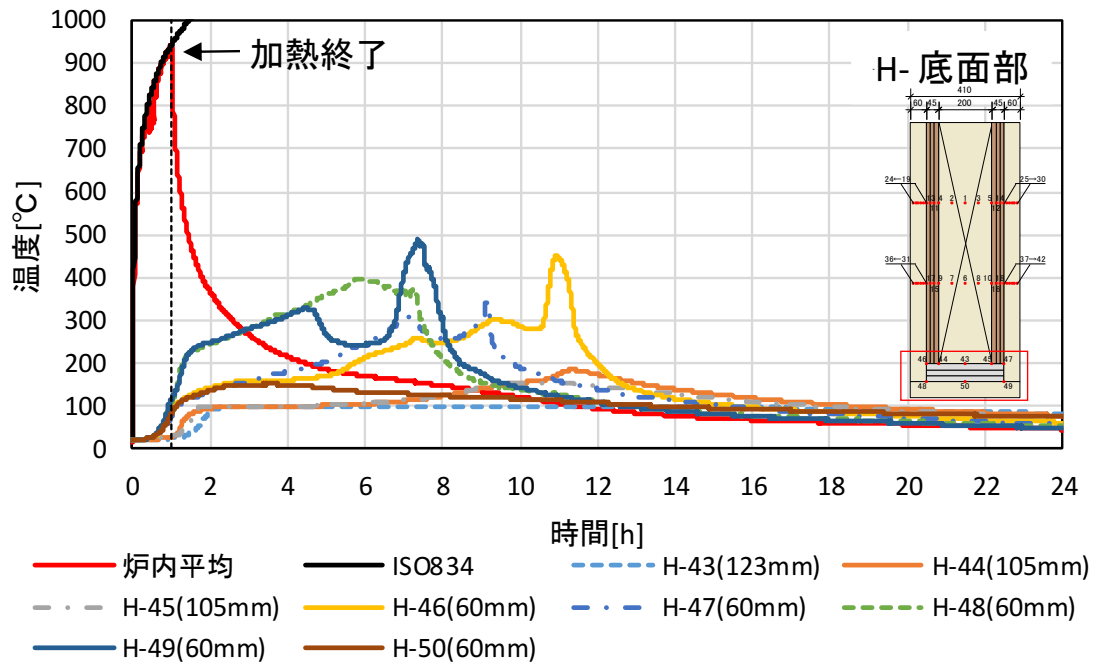


図 3.2.21 試験体内部温度及び炉内温度推移 (H-底面部)

表 3.2.5 各試験体の温度推移の様子一覧

試験体	燃えしろ層厚さ	構造支持部材断面	試験体の温度推移の様子	
E	30mm	200×300mm	燃えしろ層	<ul style="list-style-type: none"> すべての計測点で加熱終了の時点で 700℃を超えており、完全に炭化した。
			燃え止まり層一層目裏面	<ul style="list-style-type: none"> 燃え止まり層 1 層目裏面(E-8,9)は、加熱終了直後(加熱開始から 1.5 時間程度)にともに最高温度約 300℃に達し、炭化したとみられる。 その後下降し、4 時間ほどで炉内温度(約 180℃)と同程度になり、炉内温度と同様の下降を示した。
			底面	<ul style="list-style-type: none"> 燃えしろ層裏面のすべての計測点で加熱終了の時点で 300～700℃に達し、完全に炭化した。 その後下降し、4 時間ほどで炉内温度(約 180℃)と同程度になり、炉内温度と同様の下降を示した。
			脱炉時	<ul style="list-style-type: none"> 約 12 時間からすべての計測点の内部温度が、炉内温度とほぼ一致する推移をみせること、また脱炉時に赤熱燃焼が見られなかったことから、鎮火したと判断できる。
F	60mm	200×300mm	燃えしろ層	<ul style="list-style-type: none"> 加熱面から 40mm のすべての計測点で加熱終了の時点で 260℃を超えたが、50mm では、加熱終了直後においても 260℃に達しなかった。 その後試験体左側は、加熱開始後 19 時間ごろから温度上昇を示し、最高温度約 600℃に達したまま脱炉した。
			燃え止まり層一層目裏面	<ul style="list-style-type: none"> 加熱開始から 4 時間程度でともに最高温度約 150℃に達した。 その後試験体右側は炉内温度と同様の下降を示したが、左側は 19 時間ごろから温度上昇を示し、約 230℃で脱炉した。
			底面	<ul style="list-style-type: none"> 燃えしろ層裏面は、加熱終了の時点で 190～310℃であり、完全には炭化していないことがわかる。 その後加熱開始から 5 時間程度で再度温度上昇し、最高温度 330℃程度に達しその後は試験終了まで炉内温度と同様の下降を示した。
			脱炉時	<ul style="list-style-type: none"> 約 19.5 時間から、試験体左側(F-25,F-27)で、温度上昇を観測し、脱炉時に赤熱燃焼が見られたことから、自消しなかったと判断できる。
G	30mm	200×900mm	燃えしろ層	<ul style="list-style-type: none"> すべての計測点で加熱終了の時点で 700℃を超えており、完全に炭化した。
			燃え止まり層一層目裏面	<ul style="list-style-type: none"> 加熱終了直後(加熱開始から 2～6 時間程度)にともに最高温度約 220～250℃（難燃薬剤の分解温度以上）に達した。 その後下降し、7 時間ほどで炉内温度(約 180℃)と同程度になり、炉内温度と同様の下降を示した。

			底面	<ul style="list-style-type: none"> ・底面部では、燃えしろ層裏面は、すべての計測点で加熱終了の時点で 300～400℃に達し、完全に炭化した。 ・その後下降し、4 時間ほどで炉内温度(約 180℃)と同程度になり、炉内温度と同様の下降を示した。
			脱炉時	<ul style="list-style-type: none"> ・約 12 時間からすべての計測点の内部温度が、炉内温度とほぼ一致する推移をみせること、脱炉時に赤熱燃焼が見られなかったことから、自消したと判断できる。
H	60mm	200×900mm	燃えしろ層	<ul style="list-style-type: none"> ・加熱面から 50mm(H-32,38)では、加熱終了直後においても 260℃に達していなかった。 ・その後 3 時間程度までは下降を示したが、加熱開始後 5～6 時間ごろから、赤熱燃焼による温度上昇を示し、最高温度約 500～600℃に達した。10～12 時間後には温度が降下し、その後は炉内温度と比べて 100℃前後大きい値を推移した。
			燃え止まり層 一層目裏面	<ul style="list-style-type: none"> ・燃え止まり層 2 層目裏面は、加熱開始から 4 時間程度まで緩やかに温度上昇し、約 150℃に達したが、その後の赤熱燃焼による試験体表面の温度上昇により、10～12 時間で最高温度約 220～350℃に達した。その後温度は緩やかに降下し、炉内温度と比べて 100℃前後大きい値を推移した。
			底面	<ul style="list-style-type: none"> ・燃えしろ層裏面(H46,47)は加熱終了直後に最高温度約 150～250℃であり、完全には炭化していないことがわかる。 ・その後、加熱開始から 5～11 時間程度で再度温度上昇し、最高温度 330～500℃程度に達しその後は試験終了まで炉内温度と同様の下降を示した。
			脱炉時	<ul style="list-style-type: none"> ・脱炉時に赤熱燃焼が見られたことから、自消しなかったと判断できる。

(3) 脱炉時の炭化性状

各試験体の脱炉時の試験体断面写真及び炭化図を図 3.2.21 に、最大炭化深さ及び観察結果を表 3.2.6 にまとめる。

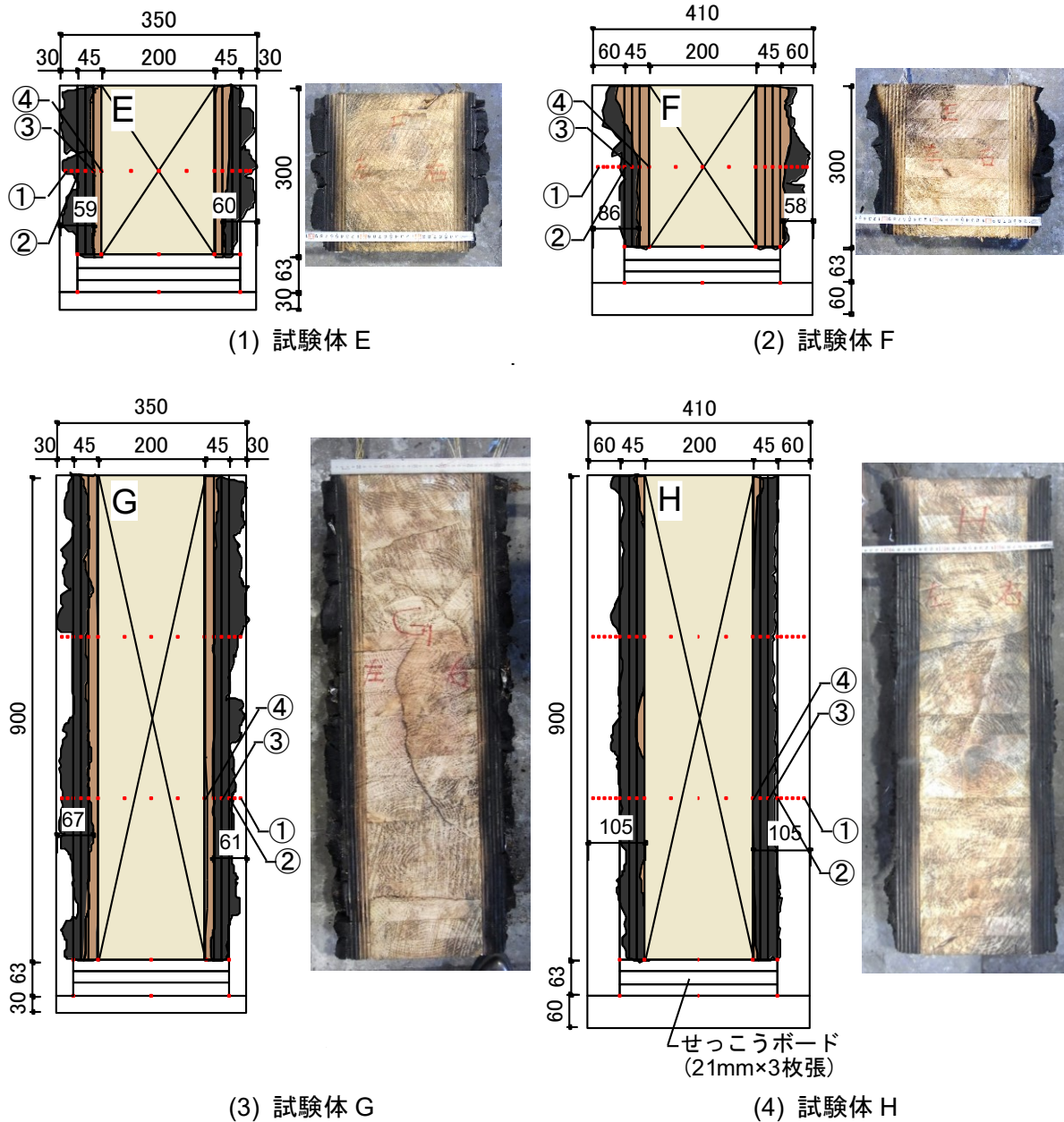


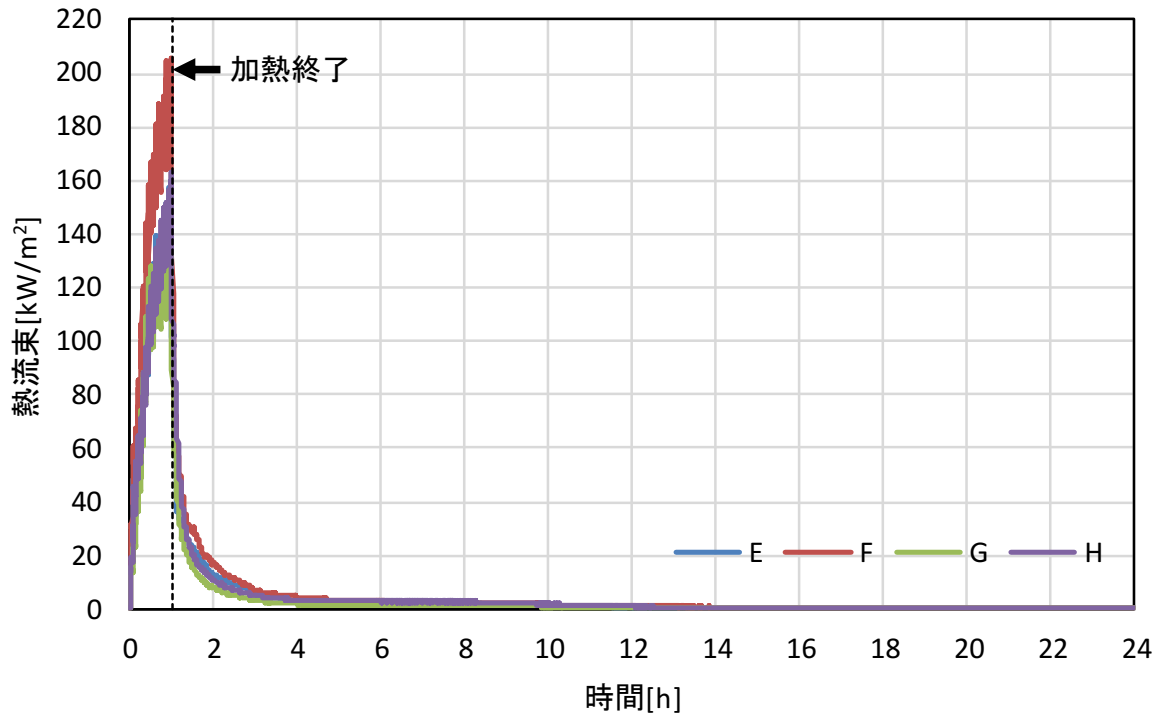
図 3.2.21 脱炉時の試験体断面写真及び炭化図

表 3.2.6 脱炉時の炭化性状一覧

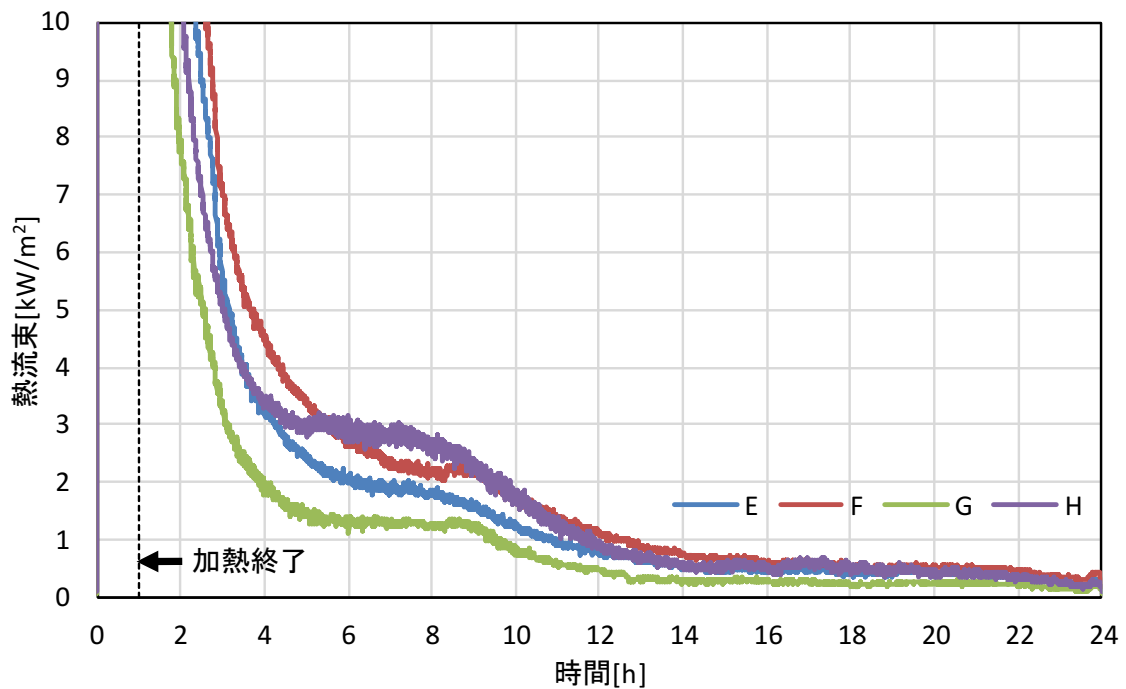
試験体仕様			実験結果	
試験体	燃えしる層厚さ[mm]	構造支持部材断面	最大炭化深さ[mm]	炭化性状の観察結果
E	30	200×300mm	60	<ul style="list-style-type: none"> 加熱面から燃え止まり層の 1～1.5 層目は一様に炭化し、燃え止まり層加熱面から 1.5～3 層目は未炭化のままであった。 試験体側面一様に最小厚さ 20mm 程度の炭化層が剥離せず、試験体に表面に生成されている。
F	60	200×300mm	86	<ul style="list-style-type: none"> 加熱面から燃え止まり層の 1～1.5 層目はまばらに炭化し、燃え止まり層加熱面から 1.5～3 層目は未炭化のままであった。 試験体側面に残存している炭化層厚さも、5～50mm と幅がありまばらであった。
G	30	200×900mm	67	<ul style="list-style-type: none"> 加熱面から燃え止まり層の 1～1.5 層目は一様に炭化し、燃え止まり層加熱面から 1.5～3 層目は未炭化のままであった。 試験体側面一様最小厚さ 20mm 程度の炭化層が剥離せず、試験体に表面に生成されている。
H	60	200×900mm	105	<ul style="list-style-type: none"> 燃え止まり層がほとんど炭化したが、目視では中心部材は未炭化のままであった。 燃え止まり層全層が炭化層となり、剥離せずに残存している炭化層の厚さは 45mm 程度であった。

(4) 熱流束及び炉内温度

熱流束及び炉内温度の推移傾向を、それぞれ図 3.2.22、図 3.2.23 に示す。

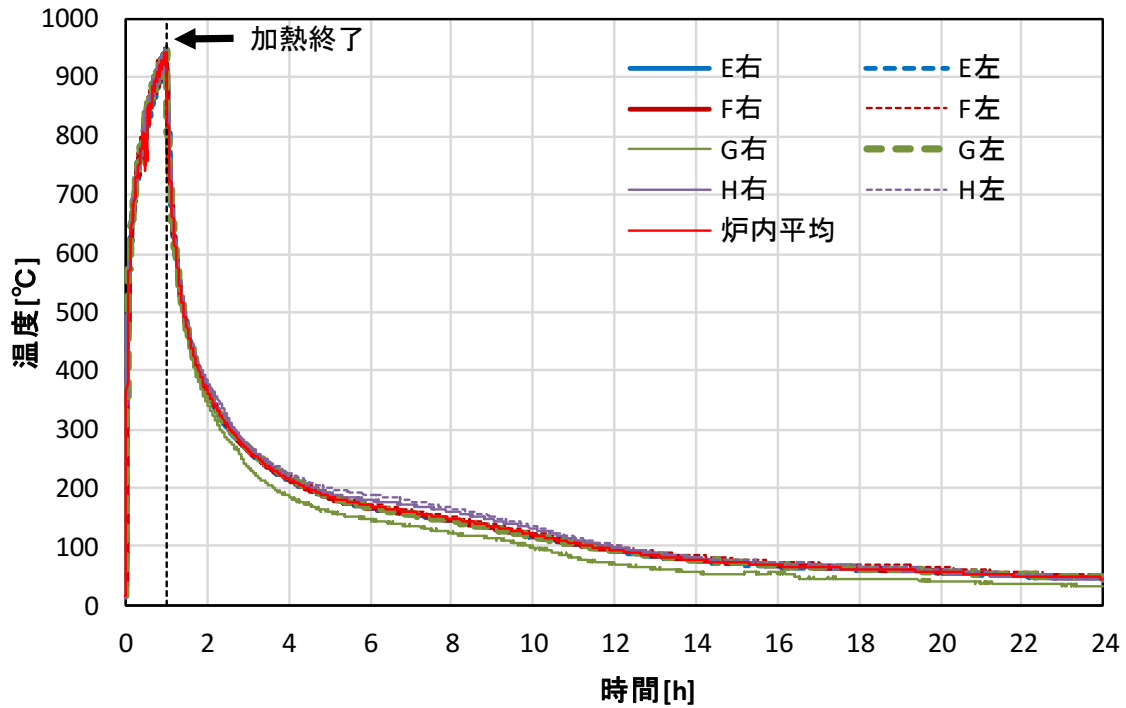


(1) 加熱中及び自然放冷中

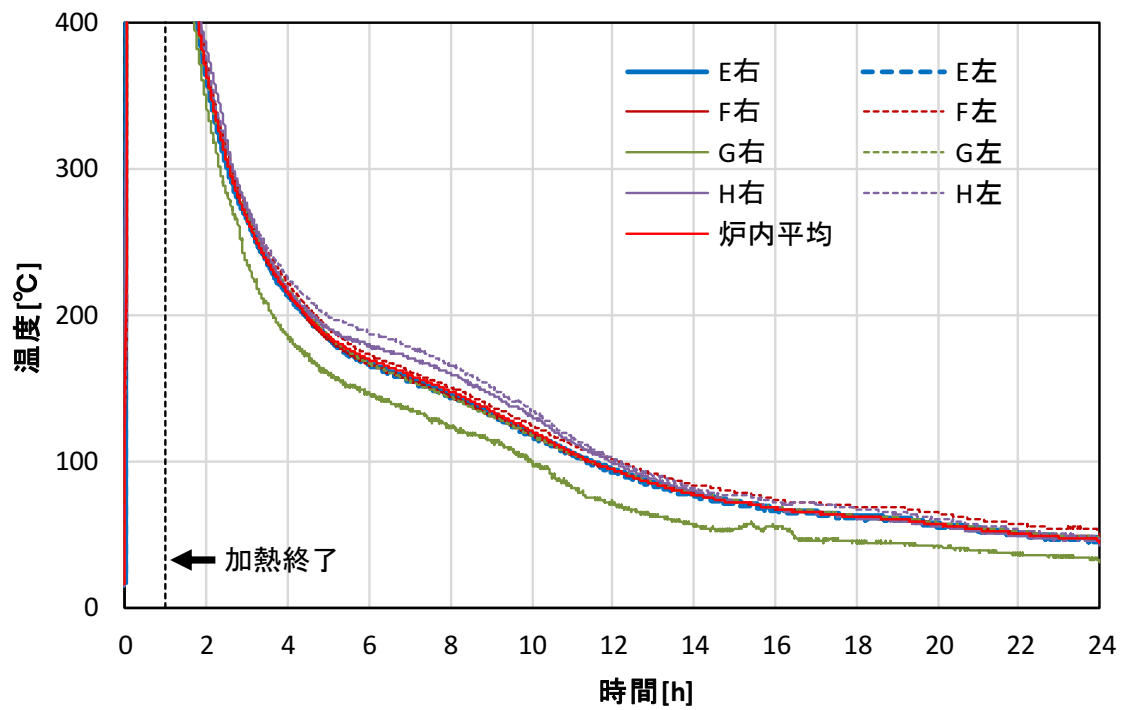


(2) 自然放冷中

図 3.2.22 熱流束の時間推移



(1) 加熱中及び自然放冷中



(2) 自然放冷中

図 3.2.23 炉内温度の時間推移

3.2.4 考察

本実験では、燃えしろ層厚さと梁せいをパラメータとして 1 時間加熱後、炉内にて 23 時間放冷し、脱炉時の赤熱燃焼の有無や、試験中の温度変化、脱炉時の炭化性状を把握した。予測通り、燃えしろ層厚さが 30mm の試験体 E、G は、脱炉時に赤熱燃焼はみられず、中心部材も炭化していなかったことから、燃えしろ層厚さ 30mm では自消し、燃えしろ層厚さが 60mm の試験体 F、H は、脱炉時に赤熱燃焼が確認されたことから、燃えしろ層厚さ 60mm では自消しない結果となった。これらより、試験体 E、G の仕様は、1 時間耐火性能を有する仕様であると見通しが得られた。

(1) 自消性状の把握

試験体 E、G（燃えしろ層厚さ 30mm）では、燃えしろ層の炭化層がほとんど落ちずに残存したまま鎮火していたことから、自然放冷中に炭化層の赤熱燃焼は起こらずに自消したと考えられる。また内部温度の推移から、加熱終了時までに燃え止まり層一層目裏面が難燃薬剤の分解温度の 195℃³⁾⁴⁾に達していることから、難燃剤の吸熱効果が断面一様に発現でき、自消したと考えられる。

試験体 F、H（燃えしろ層厚さ 60mm）では、脱炉時に炭化層亀裂部分に赤熱燃焼が見受けられた。燃えしろ層は概ね赤熱燃焼により燃え尽きたと考えられ、部分的に中心部材表面まで炭化していることから、赤熱燃焼がまばらに起こっていたことがわかる。加熱終了時までに燃えしろ層の深さ 40mm 程度までの炭化で留まっており、燃え止まり層が吸熱効果を発現する温度域に達せず一様に分解・吸熱出来ないこと、また表面に形成された炭化層によって保温され進行する炭化や、まばらに起こる赤熱燃焼によって自消しなかったと考えられる。また加熱終了後に燃え止まり層表面温度が高温で長時間停滞しているが、これは赤熱燃焼する燃えしろ層から燃え止まり層への入熱が薬剤の分解に消費されたためと考えられ、薬剤の分解が長時間続けば、難燃効果が低下し、燃え止まり層として機能しなくなる場合があることを明らかにした前節との結果と相違ない。

(2) 梁せいによる影響

最大炭化深さは試験体 E～H でそれぞれ 60、86、67、105mm であり、燃えしろ層が厚いほど、また梁せいが大きいほど大きくなる傾向にあった。特に側面下部の炭化深さが大きいのは、底面部の燃えしろ層が加熱終了後も赤熱燃焼することによって加熱され続けたためだと考えられる。特に試験体 F、H では、脱炉時までに底面部の燃えしろ層が脱落せ

ずに残存していたことから可燃物がより多く残存し、より炭化深さが大きくなったと考えられる。

自然放冷中について、同じ梁せいでは、自消した試験体（E、G）よりも燃焼継続していた試験体（F、H）の方が熱流束は大きい値を示した。また自消した試験体では、熱流束はEよりも梁せいの大きいGの値の方が小さい。これらは、炉壁からの放射の差異によるのではなく、熱流束計に近い梁試験体表面からの放射の違いを示すと考えられる。熱流束にこのような差が生じたのは、自然放冷中では、梁せいが大きい分の可燃物量の多さよりも、燃え止まり層の難燃性能の方が勝っていたためだと考えられる。

(3) 小型炉実験との関連性

本実験の試験体は、3.1 節から、適正な燃えしろ層厚さは、加熱終了時に燃えしろ層裏面が炭化する程度で、燃え止まり層の難燃成分が分解する 195°C ³⁾⁴⁾程度まで上昇するような厚さが適当であることから、燃えしろ層厚さを自消すると予想できる 30mm、赤熱燃焼を継続させると予想される 60mm の 2 タイプを設定した。また、燃え止まり層（難燃処理木材）は燃えしろ層厚さが 30mm 程度とすると、注入量 110kg/m^3 でも自消したが、安全をみて 140kg/m^3 程度注入した材を用いた。

このように小型炉実験から想定した実大の試験体を用いた耐火加熱試験を行うことで、小型炉実験で、実大試験結果をどの程度把握できるのか、その再現性を検討するために、自消した試験体 E、G と 3.1 節の試験体 S25-FR2（3.1 節 小型炉実験）の結果を比較する。

燃え止まり層に難燃薬剤を 140kg/m^3 注入した試験体 E、G では、 110kg/m^3 注入した S25-FR2（3.1 節 小型炉実験）の温度推移よりも約 100°C 燃えしろ層裏面の温度が高く推移したが、燃え止まり層内部（燃え止まり層表面から 10～15mm）では、概ね挙動は一致した。最大炭化深さを比較しても、試験体 E、G、S25-FR2（3.1 節 小型炉実験）の順に 60、67、64mm となっており、概ね一致した。

以上から、3.1 節の小型炉実験で、自消した試験体を本節の実大実験に用いても概ね再現されることが示された。

3.2.5 燃え止まり型木質耐火部材設計における適正寸法と難燃性能

本実験では、前節で示した小型炉実験の結果に基づいて部材断面を設計した燃え止まり型木質耐火構造部材の自消性を実大規模で検証した。これにより、2つの被覆層である燃えしろ層・燃え止まり層を再現した小試験体による加熱実験に基づいて、燃え止まり型木質耐火構造部材の設計を行える見通しが得られたといえる。

更に、部材設計の指針として、燃え止まり層温度が加熱中に難燃薬剤の分解温度に達するように燃えしろ層厚さを設計すること、加熱終了後は燃えしろ層温度が赤熱燃焼温度帯未満に留めるよう、燃え止まり層への入熱と難燃薬剤の分解による吸熱の平衡を維持できるような燃え止まり層の難燃性能とすることが重要であることを明らかにした。

3.3 まとめ

- (1) 前章のコーンカロリーメータ試験結果より1時間火災加熱に対する燃え止まり型木質耐火構造部材の適正な燃えしろ層厚さは、スギでは20～30mmであろうとの推定に基づき、燃え止まり型木質耐火構造部材を再現する試験体を製作し、耐火加熱実験を行った。小型炉実験における適正な燃えしろ層厚さと燃え止まり層の性能に基づき、実大規模の耐火加熱実験で検証し概ね再現されることを明らかにした。これにより、燃え止まり層に一般的な難燃処理材（窒素リン酸系薬剤）を用いた燃え止まり型木質耐火構造部材が開発可能であるとの見通しが得られた。本章により、1時間耐火性能を目標とすれば、燃え止まり層の難燃性能を最小限とする燃えしろ層厚さは25～30mmであることを明らかにした。
- (2) 燃え止まり型木質耐火構造部材において、加熱終了後も燃焼継続し自消が確保できない要因は、以下の3点が考えられることを明らかにした。
 - ① 燃えしろ層が薄い場合、耐火加熱による入熱に対して薬剤注入量が少ないと、燃え止まり層内で赤熱燃焼が継続する可能性がある。自消を確保するには、加熱中の入熱による薬剤の分解に耐えうる難燃性能を与える必要がある。
 - ② 燃えしろ層が厚い場合、加熱中に燃え止まり層が難燃薬剤の分解温度に達せず、燃え止まり層による吸熱効果によって燃えしろ層深部が温度上昇を抑制できない場合がある。
 - ③ 加熱終了後においても、難燃薬剤の分解が長時間に渡り継続すると、難燃効果が低下し、燃え止まり層として機能しなくなる場合がある。赤熱燃焼が燃えしろ層表面に留まれば加熱面表面からの熱損失により自消するが、内部で赤熱燃焼が起きると自消しなくなる可能性がある。
- (3) 実大梁耐火加熱実験より、燃えしろ層が厚いほど、梁せいが大きいほど、最大炭化深さは大きくなった。また、自消した仕様は、自然放冷中の熱流束が梁せいが大きいほど小さくなったことから、梁せいによる可燃物量の多さよりも燃え止まり層の分解吸熱の方が影響が大きいことを明らかにした。
- (4) 燃えしろ層が薄く被覆効果が小さい場合、燃え止まり層での赤熱燃焼を誘発するのに対し、厚いと加熱終了後も燃えしろ層深部で赤熱燃焼が継続し自消に至らない可

性能があることから、燃えしろ層には、燃え止まり層に必要な難燃性能が最小となる最適厚さが存在することを明らかにした。燃え止まり層の難燃性能を最小化するには、加熱中に燃え止まり層温度が難燃薬剤の分解温度に達するように燃えしろ層厚さを設計し、燃え止まり層の吸熱効果により燃えしろ層深部の温度上昇を抑制し、加熱終了時に赤熱燃焼に至らない限界とするよう、燃え止まり層の性能を設計すればよいことを示した。これらより、火災加熱時間によって適切な燃えしろ層厚さが存在することを明らかにした。

- (5) 難燃処理木材を燃え止まり層とする燃え止まり型木質耐火構造部材の適切な燃えしろ層厚さは、赤熱燃焼温度と難燃薬剤分解温度に基づいて、燃えしろ層に用いる木材の炭化速度により予測可能であることを明らかにした。

第3章の参考文献

- 1) 上川大輔・原田寿郎・宮林正幸・抱憲誓・西村 光太・宮本 圭一・大内 富夫・安藤 恵介・服部 順昭：難燃処理ラミナを用いた耐火集成材の開発 スギ集成材柱の1時間及び2時間耐火性能，日本建築学会環境系論文集，第75巻，第657号，pp. 929-935，2010.11
- 2) 石川 敬・板垣 直行・原田 浩司・長谷見 雄二・飯島 泰男・中村 昇・岡崎 泰男：燃え止まり型木質耐火構造梁における燃えしろ層の適正寸法の検討，日本建築学会東北支部研究報告集，材料施工Ⅱ，第77巻，pp.165-166，2014.6
- 3) 山口智世・長谷見雄二・安井昇・小宮祐人・上川大輔・宮林正幸：火災加熱される木質部材の熱分解・燃焼性状のモデル化に向けた基礎研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，防火，pp. 469-472，2013.8
- 4) 山口智世・小宮祐人・上川大輔・長谷見雄二・安井昇・宮林正幸：木材の燃焼過程のモデル化に向けた熱物性値の把握，日本建築学会大会学術講演梗概集，防火，pp. 245-246，2014.9
- 5) 原田和典・梶山 幸祐・遊佐 秀逸・上杉 三郎・並木 勝義：木質構造部材の炭化性状に関する数値解析，日本建築学会近畿支部研究報告集，pp.209-212，2004.5
- 6) 上川大輔：第二回（2005年）坪井記念研究助成 耐火加熱炉の熱収支特性の解明と木質系耐火構造試験における火災減衰期の再現法の提案 報告書，2007.3
- 7) 景山悠太郎・長谷見 雄二・永盛 洋樹・中田 達也・原田 浩司・飯島 泰男・板垣 直行・関 真理子：スギ難燃処理合板を利用した木質耐火構造部材の開発 その4 小型加熱実験，日本建築学会大会学術講演梗概集，防火，pp.317-318，2009.7

第 4 章

要求耐火時間に依らない適正な燃えしろ層厚さ

第4章 要求耐火時間に依らない適正な燃えしろ層厚さ

第3章では、難燃処理したスギ集成材を燃え止まり層、無処理のスギ集成材を燃えしろ層とした燃え止まり型木質耐火構造部材において、加熱中に燃え止まり層内部の温度を難燃薬剤の分解温度に達するように燃えしろ層の厚さを調整すれば、最小限の燃え止まり層の難燃性能で、加熱終了後には炉内温度の低下とともに部材の温度は低下し、自消に至ることを明らかにした。また、1時間耐火性能を有する燃え止まり型木質耐火構造では、最小限の燃え止まり層の難燃性能とするには、燃えしろ層厚さを25～30mm程度とすればよいと見通しを得た。

これら第3章までの検討により、木材の炭化速度と燃え止まり層に使用する難燃薬剤の分解温度から、1時間耐火性能のみならず、目標耐火時間に合わせて自消を達成する燃えしろ層の厚さを予測することが可能となった。既往研究¹⁾²⁾³⁾等から、建築物の構造部材に使用されるスギやカラマツ・ヒバ等の木材の炭化速度は0.6～0.8mm/分と知られている。スギを用い、難燃薬剤を窒素リン酸系として分解温度を195℃⁸⁾⁹⁾とした場合、燃え止まり層に必要な性能が最小化する燃えしろ層厚さは、要求される耐火時間が1時間なら約25mm、また2時間なら約50mmと、要求耐火時間に比例して厚くなると推測できる。

一方で、燃えしろ層が厚い場合、具体的には第3章の3.1節の燃えしろ層厚さ50mmの仕様S50や3.2節の燃えしろ層厚さが60mmの仕様F、Hが脱炉時に赤熱燃焼が継続し自消に至らなかったことや、既往研究⁴⁾⁵⁾より燃えしろ層が一定の厚さ以上ある場合、その内部で赤熱燃焼を続けるため自消しない可能性があると考えられている。これらより、第3章の検討のとおり、燃えしろ層厚さを要求耐火時間に比例して厚くするように設計した耐火構造部材は、目標とする要求耐火時間より短い時間火災加熱に曝された場合、加熱中に燃え止まり層が難燃薬剤の分解温度に到達せず、火災後に却って燃えしろ層内で赤熱燃焼が継続し、自消しない可能性があると考えられる。

近年では、5階以上の中高層木造建築の実現に向けて、2時間以上の長時間耐火時間を有する燃え止まり型木質耐火構造部材の開発に関心が高まっている。耐火性能は、目標とする耐火時間より短い火災加熱を受けた場合でもその性能を発揮すべきであり、ある目標耐火時間で設計された燃え止まり型木質耐火構造部材は、その目標耐火時間より短い火災加熱を受けた場合でも燃え止まり層で自消する必要がある。

そこで本章では、要求耐火時間に依らない適正な燃えしろ層厚さを以下の2段階に分けて把握して、要求耐火時間よりも短い時間で加熱を受けた場合でも自消する耐火構造部材の設計法を検討した。

4.1 目標とする設計耐火時間より短い火災加熱を受けた場合の自消性能

まず、要求耐火時間に比例して燃えしろ層の厚さを設計した場合、その要求耐火時間より短い火災加熱に曝した場合の自消の有無を確認するために、燃え止まり型木質耐火構造部材の断面を模した小試験体を用いて小型加熱実験を行った。

第3章の結果から、目標耐火時間を2時間とした場合、燃え止まり層に必要な性能を最小化するように燃えしろ層厚さを50mmと設計した試験体を用いて、加熱時間を、目標通りの2時間と目標時間の半分である1時間の2通りとして、ISO834標準加熱のもとで小型耐火加熱実験を行った。

また、無処理木材で構成している燃えしろ層は、加熱時には燃え止まり層への被覆効果があるが、一方で加熱終了後に残存していると可燃物となり赤熱燃焼が継続する可能性がある。燃えしろ層内で赤熱燃焼を継続させないためには燃えしろ層も難燃処理木材とする方法もあるが、コストや竣工後の管理の容易性、意匠上の要請からみて、表層の燃えしろ層には無処理木材を用いる必要が大きい。そこで、無処理木材の燃えしろ層を難燃処理木材に置き換えた仕様についても加熱実験を行い、燃えしろ層を無処理木材とした場合と、難燃処理木材とした場合を比較して、耐火性能への影響を確認した。

4.2 要求時間に依らない適正な燃えしろ層厚さの把握

4.1節の結果より、目標とする要求耐火時間よりも短い加熱時間で耐火加熱に曝された場合、自消しない場合があることが示された。また、第2章で把握した試験体表面からの熱損失のみで自消すると推測される炭化深さの条件と、第3章で把握した燃え止まり層の吸熱効果を発揮する燃えしろ層厚さの条件から、耐火加熱時間に依らない燃えしろ層厚さを25mmと予測した。これより、燃えしろ層厚さを25mmとした小試験体を製作し、要求時間に依らず、あらゆる加熱時間で自消を確保できるか確認した。

4.1 目標とする耐火時間より短い火災加熱を受けた場合の自消性能

4.1.1 実験目的

要求耐火時間を目標に設計した燃えしろ層厚さを用いた燃え止まり型木質耐火構造部材が要求耐火時間よりも短い時間加熱に曝された場合、自消するか把握するために、小型加熱実験を行った。第3章の結果をもとに2時間耐火性能を目標として燃えしろ層厚さ及び燃え止まり層の性能を設計した燃え止まり型木質耐火構造の断面を再現した小試験体を1時

間、2時間の2通りの加熱時間で火災加熱し、脱炉時の赤熱燃焼の継続有無から自消の有無を確認した。

また、燃えしろ層は無処理木材で可燃物のため、薄いほうが自消性には有利だが、加熱中に燃え止まり層への入熱から保護する役割を考えると厚いほうが有利と考えられる。そこで、燃えしろ層の有無による耐火性能への影響を把握するために、前述の2時間耐火性能を目標とした仕様の燃えしろ層の無処理木材を難燃処理木材に置き換えた仕様を用意し、2時間標準耐火加熱実験を実施した。特に加熱終了時と脱炉時の炭化深さから、燃えしろ層による燃え止まり層の被覆効果を定量的に把握した。

4.1.2 実験概要

(1) 実験概要

本実験は、森林総合研究所内の小型炉を用い、試験体を側面から加熱した。炉の概略図を図4.1.1に示す。ISO834標準加熱曲線に沿って1時間または2時間加熱後、炉内で6時間自然放冷した。小型炉の炉蓋及び試験体の設置・被覆方法は、第3章の3.1.2実験概要に示すものと同様である。

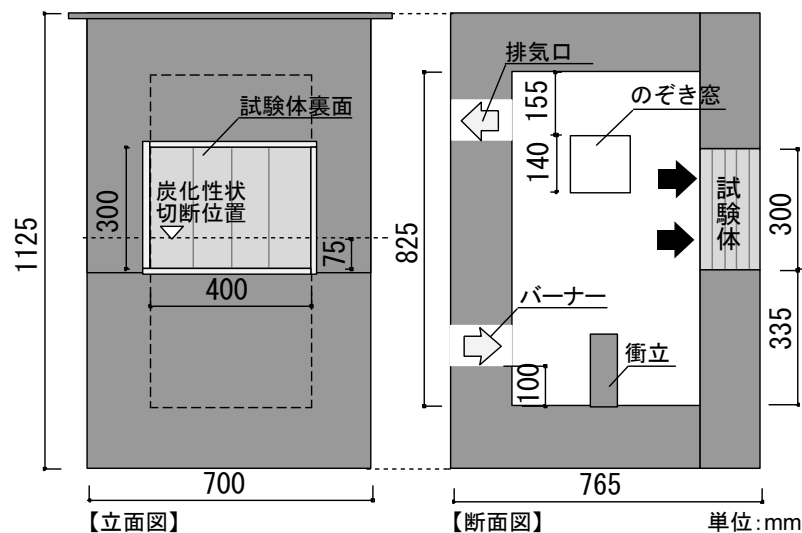


図 4.1.1 小型炉の概略図

(2) 試験体

試験体の加熱面の大きさは、縦 300mm×横 400mm とした。試験体名は Sa-b と表記し、a は無処理木材の燃えしろ層の厚さ[mm]、b は加熱時間[分]とする。本節の試験体は、S50-60、S50-120、S0-120 の3試験体とする。樹種は、前章までの実験と同様全てスギである。

試験体 S50-60、S50-120 の試験体仕様は共通であり、構造支持部を模した厚さ 50mm の

集成材（厚さ 25mm のラミナ 2 層）の上に、燃え止まり層として厚さ 50mm の難燃処理木材（厚さ 25mm のラミナ 2 層）を接着し、さらにその上に燃えしろ層として厚さ 50mm のスギ集成材を接着した仕様である。試験体 S0-120 は、燃えしろ層を無処理木材とした場合と、難燃処理木材とした場合で耐火性能にどのような違いがあるか把握するために、試験体 S50-60、S50-120 で無処理の集成材とした燃えしろ層部分を、50mm の難燃処理木材に替えた試験体である。試験体の断面構成を表 4.1.1 に示す。

燃え止まり層の難燃性能は、第 3 章の実験結果より、準不燃材料相当以上であれば加熱中に火災加熱に曝されても自消すると確認されていることから、燃えしろ層厚さが自消有無に与える影響を判別できるよう、第 2 章で準不燃材料相当と確認した、窒素リン酸系難燃薬剤（丸菱油化工業株式会社製ノンネン W2-50）を目標注入量 180kg/m³ とした難燃処理木材を用いる。各ラミナの接着はレゾルシノール樹脂系接着剤を用いた。

表 4.1.1 試験体仕様及び実験条件一覧

試験体	燃えしろ層 厚さ[mm]	加熱時間[分]	断面図
S50-60	50	60	
S50-120		120	
S0-120	0	120	

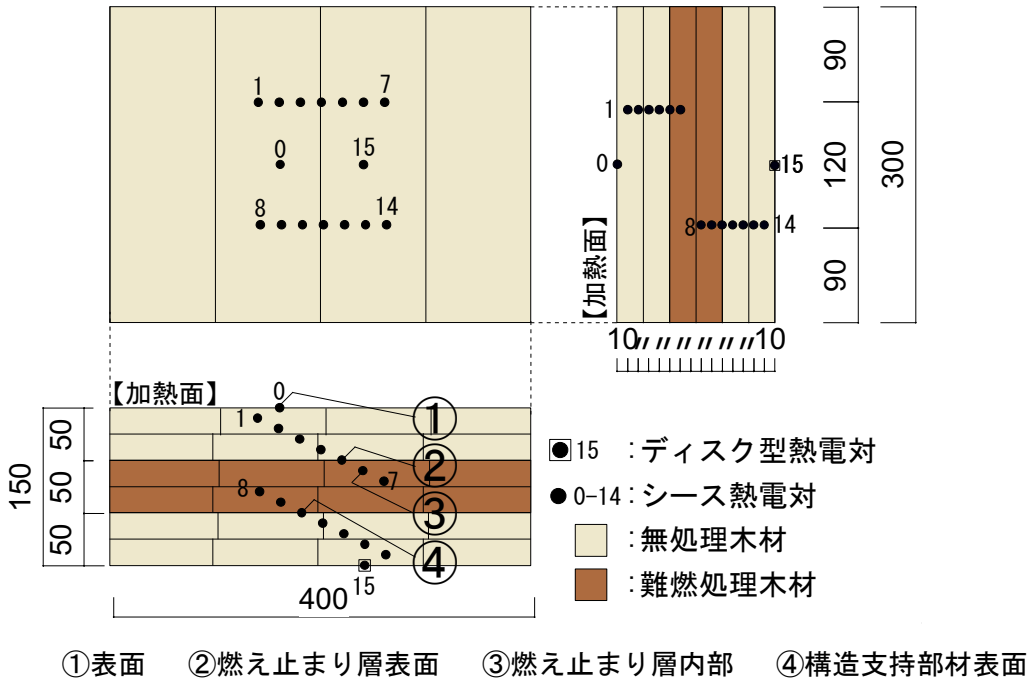
■：無処理木材 ■：難燃処理木材（薬剤注入量 180kg/m³）

・：温度測定点（①表面 ②燃え止まり層表面 ③燃え止まり層内部 ④構造支持部材表面）

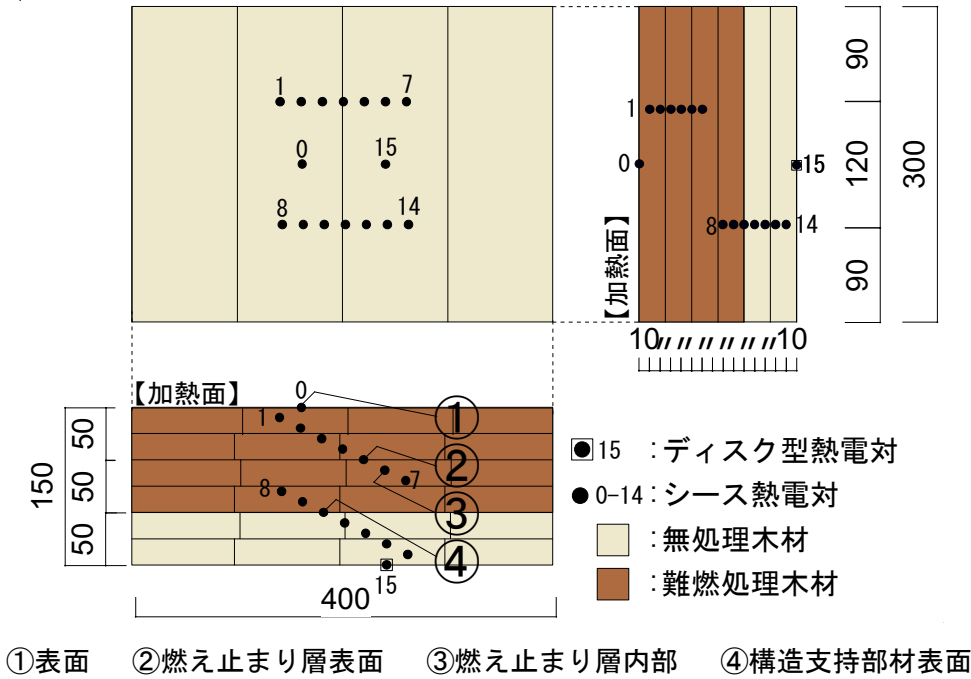
(3) 測定項目

測定項目は、試験体内部温度、裏面温度、炉内温度とした。内部温度の測定間隔は深さ方向に 10mm 間隔とし、測定には K 型シース熱電対（φ1.0mm）を用い、裏面から垂直に挿入し、裏面で固定した。裏面温度の測定にはディスク型熱電対を用いた。試験体の温度測定点は図 4.1.2 に示す。炉内温度はインコネル熱電対（φ2.5mm）により計測した。

また、脱炉時に目視にて赤熱燃焼の継続の有無を確認し、前章と同様に脱炉時に赤熱燃焼が確認されずに、かつ、試験体内部温度も炉内温度に伴い、降下していれば自消と判断する。



(1) 試験体 S50-60 及び S50-120



(2) 試験体 S0-120

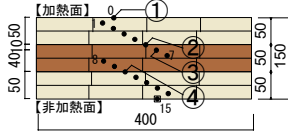
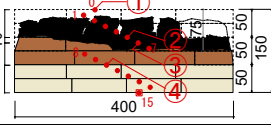
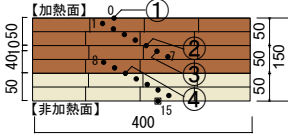
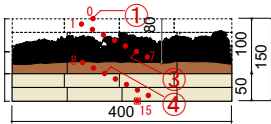
図 4.1.2 試験体仕様及び温度測定点

4.1.3 実験結果

表 4.1.2 に各実験における、脱炉時の炭化性状と加熱終了時及び脱炉時の炭化深さ、及び脱炉時の赤熱燃焼の有無を示す。加熱終了時の炭化深さは、無処理木材の炭化温度を 260℃、難燃処理木材の炭化温度を 195℃⁸⁾⁹⁾として、内部温度の測定深さを線形補完して算出した。脱炉時の炭化深さは、脱炉後に図 4.1.1 に示す位置で試験体を切断し、最も深い位置を炭化深さとした。脱炉時の赤熱燃焼については、脱炉時に赤熱燃焼が継続していた場合“有”、自消した場合“無”と示す。次ページより、以下の(1)～(3)について、実験結果を示す。

- (1) 目視による脱炉時の赤熱燃焼の有無の確認
- (2) 試験体内部温度及び炉内温度推移
- (3) 脱炉時の炭化性状

表 4.1.2 実験結果一覧

試験体	燃えしろ層厚さ [mm]	加熱時間 [分]	断面仕様及び温度測定点	脱炉時の炭化性状	炭化深さ [mm]	赤熱燃焼の有無
					加熱終了時※ 脱炉時	
S50-60	50	60			41 75 ← +34mm	有
S50-120		120			72 89 ← +17mm	
S0-120	0	120			60 80 ← +20mm	無

凡例	
□ : 未炭化部 (無処理木材)	● : 温度測定点
■ : 未炭化部 (難燃処理木材 注入量180kg/m ³)	① : 表面 ② : 燃え止まり層表面
■ : 炭化層	③ : 燃え止まり層内部 ④ : 構造支持部材表面

※ : 加熱終了時の炭化深さは、無処理木材の炭化温度の 260℃、難燃処理木材の炭化温度を 195℃として、内部温度の測定深さを線形補完して算出した。

(1) 目視による脱炉時の赤熱燃焼の有無の確認

写真 4.1.3 に各試験体の脱炉時の試験体表面の様子を示す。試験体 S50-60 は脱炉時に赤熱燃焼が観察されたが、試験体 S50-120 及び S0-120 では赤熱燃焼は確認されなかった。

目視による赤熱燃焼の有無や観察結果を表 4.1.3 にまとめる。



(1) 試験体 S50-60



(2) 試験体 S50-120



(3) 試験体 S0-120

写真 4.1.3 脱炉時の試験体加熱表面の様子

表 4.1.3 脱炉時における各試験体加熱表面の観察結果一覧

試験体	燃えしろ 層厚さ [mm]	加熱 時間 [分]	脱炉時の 赤熱燃焼 の有無	脱炉時における試験体加熱表面の観察結果
S50-60	50	60	有	<ul style="list-style-type: none"> 加熱面の一部に赤熱燃焼が確認された。 燃え込みが激しい部分とそうでない部分があり、不均一に燃焼が進んでいたことが観察される。
S50-120	50	120	無	<ul style="list-style-type: none"> 脱炉時に赤熱燃焼は確認されず、自消したと判断した。 加熱面一様に炭化していた。
S0-120	0	120	無	<ul style="list-style-type: none"> 脱炉時に赤熱燃焼は確認されず、自消したと判断した。 加熱面一様に炭化していたが、S50-120 よりも表面の炭化層の亀裂が浅い。

(2) 試験体内部温度及び炉内温度推移

図 4.1.3～図 4.1.5 に各試験体の加熱開始から自然放冷までの試験体内部温度及び炉内温度の時間推移を示す。

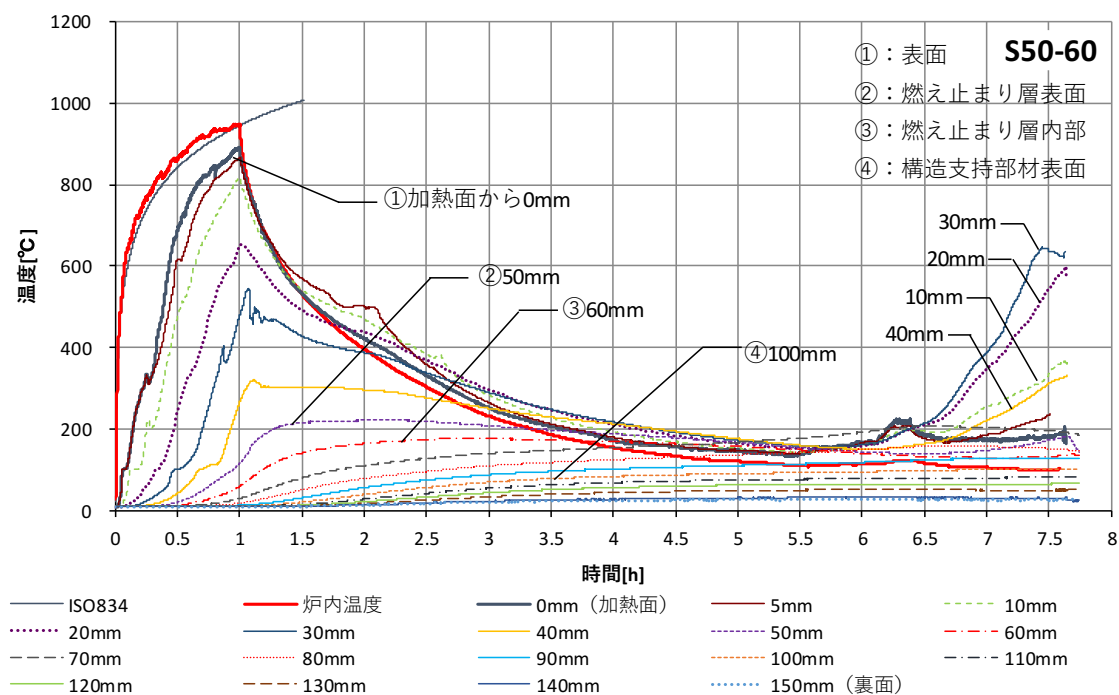


図 4.1.3 試験体の内部温度及び炉内温度推移（試験体 S50-60）

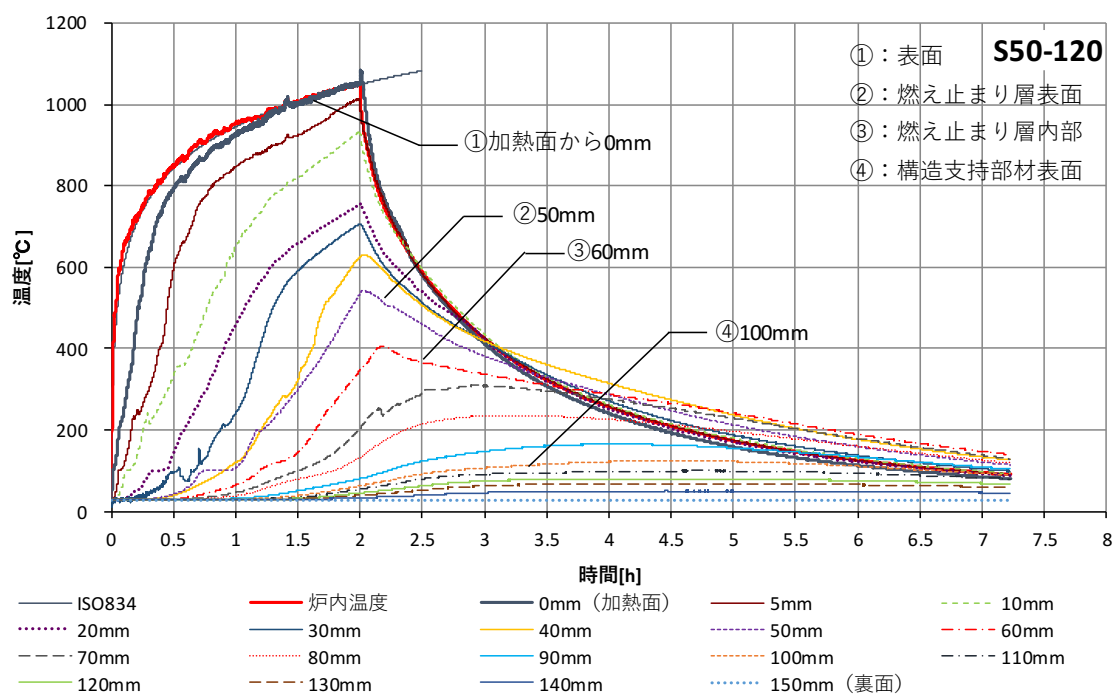


図 4.1.4 試験体の内部温度及び炉内温度推移（試験体 S50-120）

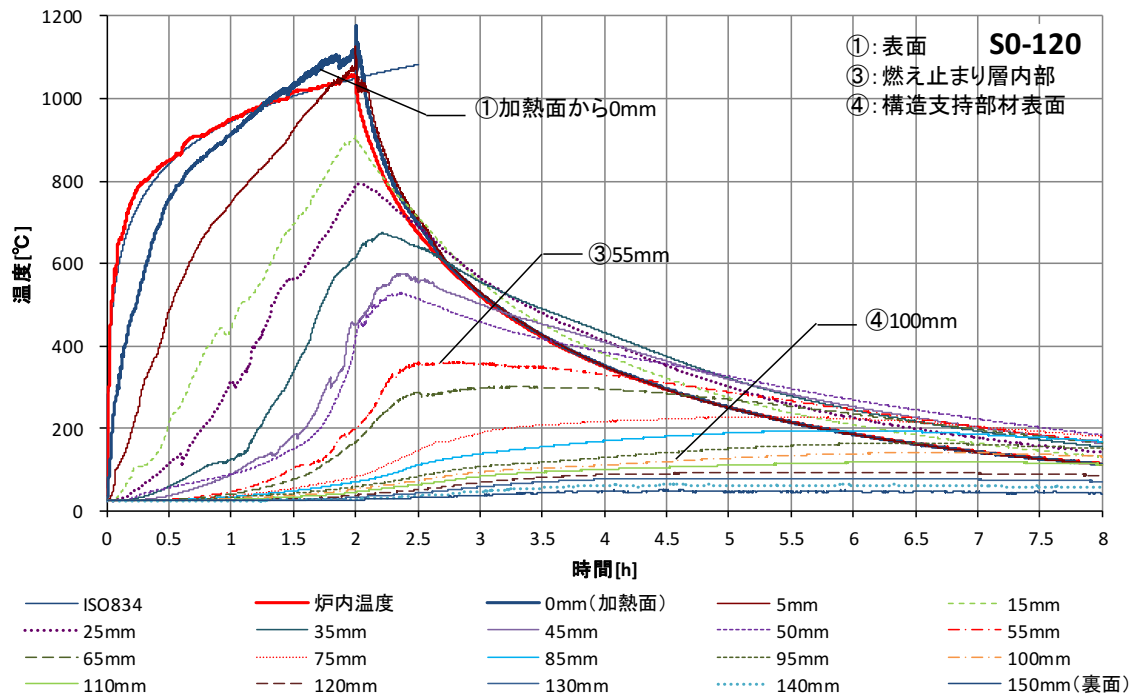


図 4.1.5 試験体の内部温度及び炉内温度推移（試験体 S0-120）

図 4.1.3～図 4.1.5 に示した各試験体の温度推移の様子を表 4.1.4 にまとめる。

表 4.1.4 各試験体の温度推移の様子一覧

試験体	燃えしろ層厚さ [mm]	加熱時間 [分]	試験体の温度推移の様子
S50-60	50	60	<ul style="list-style-type: none">加熱終了直後に燃え止まり層表面は最高約 220℃に達したが、燃え止まり層内部（③）温度は最高約 180℃に留まり、難燃薬剤分解温度の 195℃に達しなかった。加熱終了後から、炉内温度の降下に伴い内部温度も降下したが、試験開始後、約 6.5 時間後から脱炉まで、燃えしろ層内部（10～40mm）の温度が 350～600℃に再び上昇した。
S50-120	50	120	<ul style="list-style-type: none">加熱終了までに燃え止まり層内部温度は最高約 400℃に達し、難燃薬剤分解温度（195℃）を超えた。加熱終了後、炉内温度の降下とともに試験体内部温度も降下した。
S0-120	0	120	<ul style="list-style-type: none">加熱終了までに燃え止まり層内部温度は最高約 350℃に達し、難燃薬剤の分解温度（195℃）を超えた。加熱終了後、炉内温度の降下とともに試験体内部温度も降下した。

(3) 脱炉時の炭化性状

図 4.1.6 に各試験体の脱炉時の炭化図を、表 4.1.5 に最大炭化深さ及び炭化性状の観察結果をまとめる。

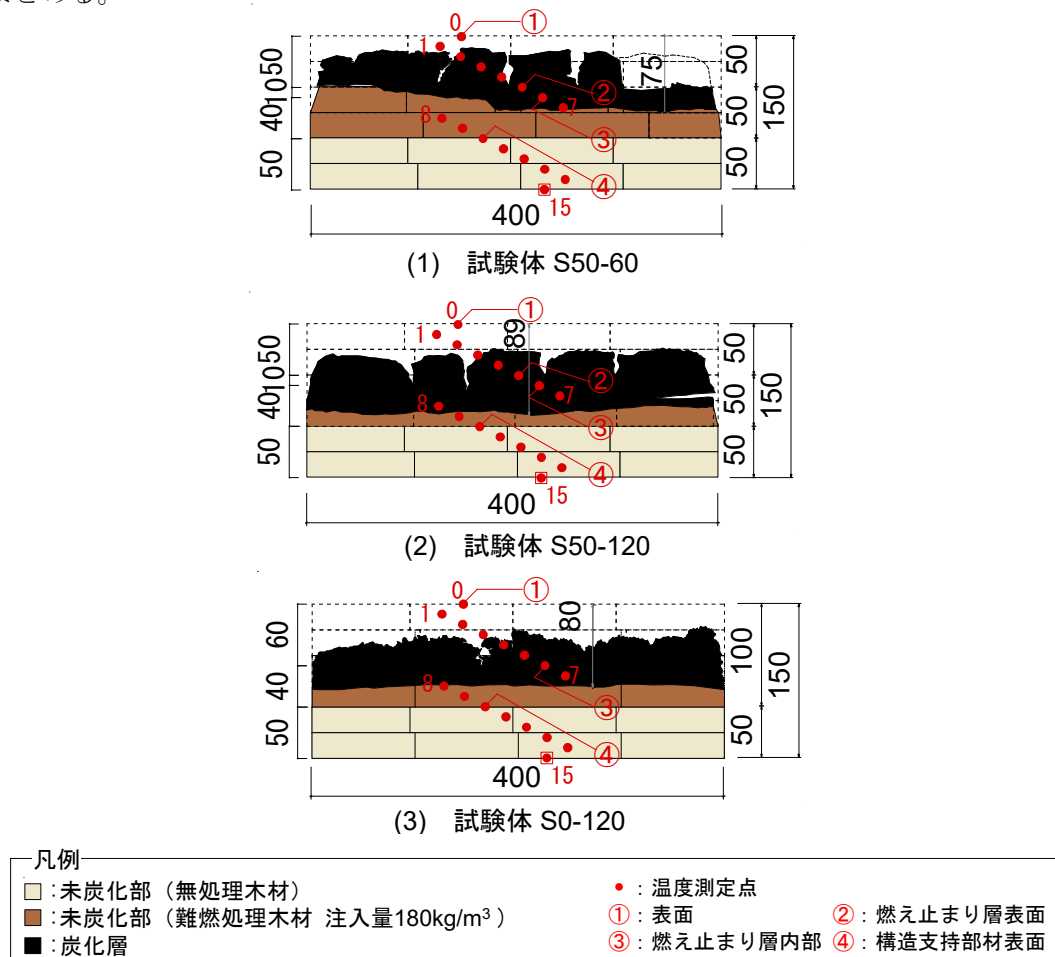


図 4.1.6 脱炉時の試験体の炭化図

表 4.1.5 脱炉時の炭化性状一覧

試験体	燃えしろ層厚さ[mm]	加熱時間[分]	炭化深さ[mm]		炭化性状の観察結果
			加熱終了時※	脱炉時	
S50-60	50	60	41	34mm → 75	<ul style="list-style-type: none"> 断面全体で炭化深さが不均一で、その差は最大で 25mm 程度であった。 炭化深さが深いところでは残存炭化層が薄い傾向にあった。
S50-120	50	120	72	17mm → 89	<ul style="list-style-type: none"> 断面全体で炭化深さ及び残存炭化層の厚さは概ね均一であった。
S0-60	0	120	60	20mm → 80	<ul style="list-style-type: none"> 断面全体で炭化深さ及び残存炭化層の厚さは概ね均一であった。

※：加熱終了時の炭化深さは、無処理木材の炭化温度を 260℃、難燃処理木材の炭化温度を 195℃として、内部温度の測定深さを線形補完して算出した。

4.1.4 考察

(1) 加熱時間と自消の関係

2 時間加熱された試験体 S50-120 は、写真 4.1.3 からわかるように脱炉時に赤熱燃焼は観察されず、図 4.1.4 の試験体内部温度からも加熱終了からの炉内温度の低下に伴って内部温度も低下していることから、自消したといえる。このことから、第 3 章の実験結果から 2 時間耐火性能を想定して燃えしろ層厚さを設計した試験体は、想定通りの 2 時間の火災加熱に曝された場合、自消した。

一方で、同仕様を目標耐火時間より短い加熱時間（1 時間）加熱した試験体 S50-60 は、写真 4.1.3 のように脱炉時に赤熱燃焼を確認したことから、自消に至らなかった。また図 4.1.3 の温度推移を見ると、加熱終了後、すべての温度計測点で緩慢に温度低下し、200℃以下まで低下したが、6.5 時間以降に燃えしろ層内部（加熱面から深さ 10～40mm）が 350～650℃程度まで温度上昇していることから、燃えしろ層内で赤熱燃焼が継続したと推測される。これより、想定した耐火時間よりも短い加熱に曝された燃え止まり型木質耐火構造部材は、自消しない場合があることが実証された。

表 4.1.5 の炭化深さより、試験体 S50-120 と S50-60 の加熱終了から脱炉時までの炭化の進行（〈脱炉時炭化深さ〉－〈加熱終了時炭化深さ〉、以降、燃え進みという）を比較すると、自消した試験体 S50-120 では 17mm であるのに対し、自消しなかった試験体 S50-60 では、加熱時間は S50-120 の半分にも関わらず、34mm と 2 倍燃え進んでいる。加えて、図 4.1.6 の炭化図より、試験体 S50-120 は炭化層が加熱表面から深さ方向に概ね均一に炭化層が形成されているのに対して、試験体 S50-60 ではばらつきがあることから、加熱終了後に赤熱燃焼が局部的に起こることによって激しく燃え進んだため、炭化層の厚さにばらつきが生じると推測される。

(2) 燃え止まり層内部の温度推移と自消

自消した試験体 S50-120 の燃え止まり層内部の温度（図 4.1.4 の③）は、加熱中である加熱開始後約 1.7 時間で難燃薬剤の分解温度（195℃⁸⁾⁹⁾を超えたが、自消しなかった試験体 S50-60 の燃え止まり層内部の温度（図 4.1.3 の③）は、加熱中に 100℃にも達しなかった。一方で、加熱終了から脱炉までを見ると、S50-60 の燃え止まり層内部温度（図 4.1.3 の加熱表面から 50～70mm）は薬剤分解温度の 195℃⁸⁾⁹⁾前後を維持している。これら燃え止まり層温度の推移から、試験体 S50-60 が自消せず、脱炉時まで赤熱燃焼が継続した要因として以下の 3 点考えられる。

- ① 目標とする要求耐火時間よりも短い加熱に曝されたため、加熱中に燃え止まり層の薬剤分解温度に達せず、燃え止まり層の吸熱効果が燃えしろ層内部の温度上昇の抑制に寄与できなかった。
- ② 要求耐火時間より短い加熱時間であるために、試験体内部の燃えしろ層の未炭化部分が加熱終了後も残存したこと、試験体表面に形成された炭化層が燃えしろ深部から外部への熱損失を抑制したこと、残存した燃えしろ層未炭化部分の燃焼が持続した。
- ③ 燃え止まり層内の温度が、加熱終了から脱炉まで薬剤分解温度の 195℃⁸⁾⁹⁾前後を維持していることから、試験体内部で持続する赤熱燃焼による加熱によって、薬剤が分解・消費し続け、赤熱燃焼が継続したと推察される。

(3) 燃えしろ層の難燃薬剤処理の有無と耐火性能

燃えしろ層は無処理木材で構成された可燃物であり、(2)で示したように、加熱後の燃えしろ層の未炭化部分の残存や加熱中の燃え止まり層の薬剤分解温度への到達時間などを勘案すると、燃えしろ層は薄い方が、燃え止まり層の自消効果を早期に発揮することができる点で、自消を達成する上で有利だと考えられる。一方で、加熱中には、燃えしろ層が存在することで燃え止まり層への入熱を抑制すると考えれば、燃えしろ層が厚い方が有利であると考えられる。

そこで、表 4.1.2 または表 4.1.5 から、試験体 S50-120 と燃えしろ層部分を難燃処理木材とした試験体 S0-120 の炭化深さを比較すると、加熱終了時まではそれぞれ 72mm、60mm であり、燃えしろ層を難燃処理した方が 10mm 以上炭化深さが浅くなったが、加熱終了時から脱炉時までの燃え進みはそれぞれ 17mm、20mm で概ね一致した。但し、この燃え進みは、脱炉時炭化深さから加熱終了時の炭化深さを引いた値である。これより、燃えしろ層部分に難燃処理木材を用いれば、加熱中の炭化の進行は緩慢になるが、加熱中に燃え止まり層温度が薬剤分解温度に達するように燃えしろ層の厚さを設計すれば、加熱終了後の燃え進みは、燃えしろ層が薬剤処理されているか否かに依らないと考えられる。従って、加熱中に燃え止まり層表面が難燃薬剤の分解温度に達するように設計されていれば、燃えしろ層を難燃薬剤処理せずとも、耐火構造部材としての自消性状に大きな影響はなく、耐火性能は担保されることが示された。

以上より、燃え止まり型木質耐火構造部材において、構造支持部材以外の、耐火性能に関わる燃えしろ層と燃え止まり層の合計厚さは、要求耐火時間により設計し、その範囲の中で、燃えしろ層を自消が保証される厚さに調整すればよいことが明らかとなった。ここで、部材

のコストや性能に影響の大きいと考えられる燃え止まり層の性能及び厚さを最低限にして、燃え止まり型木質耐火構造部材の目標耐火性能を達成するには、燃えしろ層厚さを自消が担保される最大厚さとする必要があると言える。

4.1.5 火災加熱時間に依らず自消する燃えしろ層厚さの推定

4.1.4 節までの検討から、要求耐火時間内に燃えしろ層が完全に炭化するように燃えしろ層の厚さを設計した燃え止まり型木質耐火構造部材は、その要求耐火時間よりも、実際に曝される火災加熱時間が短い場合、燃え止まり層内部の温度が加熱終了時まで薬剤分解温度に達しないこと、表面の炭化層に保温され、材深部に残存した未炭化の燃えしろ層が燃焼継続して難燃薬剤を消費することにより、自消しない場合があることが明らかになった。

そこで、火災加熱時間に依らず自消させるために、燃えしろ層を薄くすれば、加熱終了後の赤熱燃焼の可能性は小さくなる。一方で、燃えしろ層が薄いほど加熱時の燃え止まり層への入熱は大きくなり、結果的に燃え止まり層の性能及び厚さの増強が必要となる。燃えしろ層を難燃処理木材とした試験体 S0-120 に関する実験から、加熱中に炭化が完了する範囲内においては、燃えしろ層を無処理木材または難燃処理木材のどちらとしても、耐火性能に大きな影響がないことが示されている。これらのことから、前述のとおり、燃え止まり層の性能及び厚さを最小限とし、かつ目標耐火性能を発揮させる燃えしろ層厚さは、加熱終了後にその内部で赤熱燃焼しない上限厚さとする必要がある。

加えて、スギを対象とした第2章の実験結果では、燃えしろ層は厚すぎると赤熱燃焼を誘発するが、加熱面から炭化深さ 10～20mm 程度では表面からの熱損失で自消した。また、スギやカラマツ等の木材の炭化速度は 0.6～0.8mm/分¹⁾²⁾³⁾等と知られていることから、炭化深と炭化速度から算出して、火災加熱に曝される時間が 12.5～33 分程度の範囲であれば、表面からの熱損失で自消すると推定できる。以上より、表面からの熱損失で自消可能な火災加熱時間を超える、30 分以上加熱を受けた場合においても自消するには、表面からの熱損失に加えて、燃え止まり層による温度上昇抑制効果を発揮させる必要がある。つまり、30 分以上加熱を受けた時点で燃え止まり層の温度が薬剤分解温度に達していることが必要である。図 4.1.4 の内部温度推移から、加熱開始 27 分後に深さ 20mm、41 分後に深さ 30mm が薬剤分解温度(195℃⁸⁾⁹⁾)に達することが読み取れる。

以上より、燃えしろ層厚さを 20～30mm で設計すれば、短時間の加熱であれば表面からの熱損失で自消し、それ以上の火災加熱に対しては燃え止まり層の吸熱効果によって自消すると推測される。この燃えしろ層厚さでどの程度の加熱時間まで自消を確保できるかを明らかにすることが次の課題となる。

4.2. 要求耐火時間に依らない適正な燃えしろ層厚さの把握

4.2.1 目的及び試験体設計内容

本節では、要求耐火時間より加熱時間が短くても確実に自消に至る、火災加熱時間に依らず、適正な燃えしろ層厚さを検討するために、小型加熱試験を行った。前節の検討から、表面からの熱損失または燃え止まり層の温度上昇抑制効果により、加熱時間によらず自消可能な燃えしろ層の厚さは20～30mmと推測されること、第3章で燃えしろ層厚さ25mmの仕様が1時間耐火性能を有することを確認していることから、この仕様の試験体を目標耐火時間の1時間よりも短いあらゆる加熱時間加熱された場合でも、自消することを確認する。具体的には、加熱終了時に炭化が燃えしろ層のみに留まると考えられる30分、燃え止まり層の表面が薬剤分解温度に達すると考えられる45分の火災加熱に曝した場合の自消の有無を確認した。また目標耐火時間である1時間のほか、5階以上の中高層木造の実現に向けて、2時間耐火性能を有する仕様の把握を行うため、2時間加熱を行い、自消の有無を確認した。但し、60分加熱の試験体及び実験結果は、第3章3.1節の試験体S25-FR1の結果を準用する。

4.2.2 実験概要

(1) 試験体

表4.2.1に本節で用いる試験体仕様を示す。試験体は、第3章の3.1節で1時間耐火性能を確保した試験体S25-FR1と同仕様とした。樹種は、これまでの実験と同様全てスギである。厚さ50mmの集成材（厚さ25mmのラミナ2層）の上に、燃え止まり層として厚さ50mmの難燃処理木材（厚さ25mmのラミナ2層）を接着し、さらにその上に燃えしろ層として厚さ25mmのラミナを接着した。

表 4.2.1 試験体概要と実験条件一覧

試験体	燃えしろ層 厚さ[mm]	加熱時間 [分]	断面図
S25-30	25	30	
S25-45		45	
S25-60 (S25-FR1)*		60	
S25-120		120	

■：無処理木材 ■：難燃処理木材（薬剤注入量 180kg/m³）

・：温度測定点（①表面 ②燃え止まり層表面 ③燃え止まり層内部 ④構造支持部材表面）

※：第3章3.1節の試験体S25-FR1を準用する。

難燃処理木材は前節までと同様、窒素リン酸系難燃薬剤（丸菱油化工業株式会社製ノンネン W2-50）を目標注入量 180kg/m^3 とした。加熱面の大きさは縦 $300\times$ 横 400mm とし、各ラミナの接着はレゾルシノール樹脂系接着剤を用いた。試験体名は前節と同様に Sa-b と記し、a は燃えしろ層厚さ[mm]、b は加熱時間[分]とする。

(2) 実験方法

ISO834 標準加熱曲線に準拠して 30 分、45 分、1 時間、2 時間加熱後、各々加熱時間の 3 倍以上（2 時間加熱の場合 6 時間、その他 3～4 時間）炉内で自然放冷した。炉は前節と同様、森林総合研究所の小型炉を用いた。概略図を図 4.1.1 に示す。

(3) 測定項目

測定項目は前節と同様、試験体内部温度、裏面温度及び炉内温度とした。内部温度は、裏面から垂直に挿入した K 型シーす熱電対（ $\phi 1\text{mm}$ ）を用い、深さ方向に 10mm 間隔で測定した。裏面温度はディスク型熱電対により測定した。測定点を図 4.2.1 に示す。炉内温度はインコネル熱電対（ $\phi 2.5\text{mm}$ ）により計測した。また、脱炉時に目視にて赤熱燃焼の継続の有無を確認し、前節までと同様に脱炉に赤熱燃焼が確認されず、かつ、試験体内部温度も炉内温度に伴い、降下していれば自消と判断する。

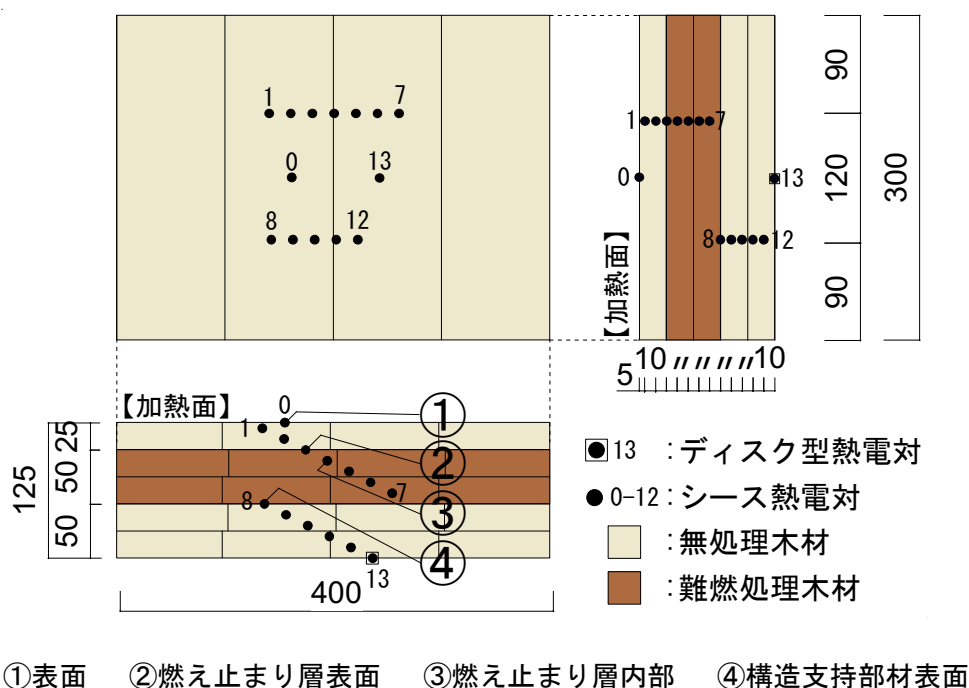


図 4.2.1 試験体仕様及び温度測定点

4.2.3 実験結果

表 4.2.2 に各試験における、脱炉時の炭化性状と加熱終了時及び脱炉時の炭化深さ、及び脱炉時の赤熱燃焼の有無を示す。加熱終了時の炭化深さは、無処理木材の炭化温度を 260℃、難燃処理木材の炭化温度を 195℃⁸⁾⁹⁾として、内部温度の測定深さを線形補完して算出した。脱炉時の炭化深さは、脱炉後に図 4.1.1 に示す位置で試験体を切断し、最も深い位置を炭化深さとした。脱炉時の赤熱燃焼については、脱炉時に赤熱燃焼が継続していた場合“有”、自消した場合“無”と示す。次ページより、以下の(1)～(3)について、実験結果を示す。

- (1) 目視による脱炉時の赤熱燃焼の有無の確認
- (2) 試験体内部温度及び炉内温度推移
- (3) 脱炉時の炭化性状

表 4.2.2 実験結果一覧

試験体	燃えしろ層厚さ [mm]	加熱時間 [分]	脱炉時の炭化性状	炭化深さ [mm]	赤熱燃焼の有無
				加熱終了時 ^{※1} 脱炉時	
S25-30	25	30		22 27	無
S25-45		45		31 35	
S25-60		60		33 48	
S25-120		120		58 78	

凡例

- | | |
|--|--|
| □ : 未炭化部 (無処理木材) | ● : 温度測定点 |
| ■ : 未炭化部 (難燃処理木材 注入量180kg/m ³) | ① : 表面 ② : 燃え止まり層表面 |
| ■ : 炭化層 | ③ : 燃え止まり層内部 ④ : 構造支持部材表面 |

※1 : 加熱終了時の炭化深さは、無処理木材の炭化温度の 260℃、難燃処理木材の炭化温度を 195℃として、内部温度の測定深さを線形補完して算出した。

※2 : 端部の燃え込みは被覆不良によるものである。

(1) 目視による脱炉時の赤熱燃焼の有無の確認

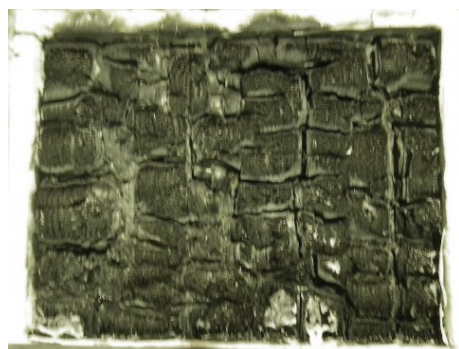
脱炉時の試験体加熱表面の様子を写真 4.2.1 に、観察結果一覧を表 4.2.3 に示す。すべての試験体で、脱炉時に赤熱燃焼は確認されなかった。



(1) 試験体 S25-30



(2) 試験体 S25-45



(3) 試験体 S25-60



(4) 試験体 S25-120

写真 4.2.1 脱炉時の試験体加熱表面の様子

表 4.2.3 脱炉時における試験体加熱表面の観察結果一覧

試験体	燃えしろ 層厚さ [mm]	加熱 時間 [分]	脱炉時の 赤熱燃焼 の有無	脱炉時における試験体加熱表面の観察結果
S25-30	25	30	無	・脱炉時に赤熱燃焼は確認されず、自消したと判断した。 ・加熱面一様に炭化していた。
S25-45		45	無	・脱炉時に赤熱燃焼は確認されず、自消したと判断した。 ・加熱面一様に炭化していた。
S2560		60	無	・脱炉時に赤熱燃焼は確認されず、自消したと判断した。 ・加熱面一様に炭化していた。
S25-120		120	無	・試験体の端部が燃え込んでいたが、これは端部の被覆不良によるものである。 ・試験体中心部については赤熱燃焼が確認されず、自消したと推定される。

(2) 試験体内部温度及び炉内温度推移

各試験体の内部温度及び炉内温度の時間推移を図 4.2.2～図 4.2.5 に、温度推移の結果一覧を表 4.2.4 に示す。すべての試験体で加熱終了後、炉内温度の低下に伴い試験体内部温度は低下し、自消したことを示している。

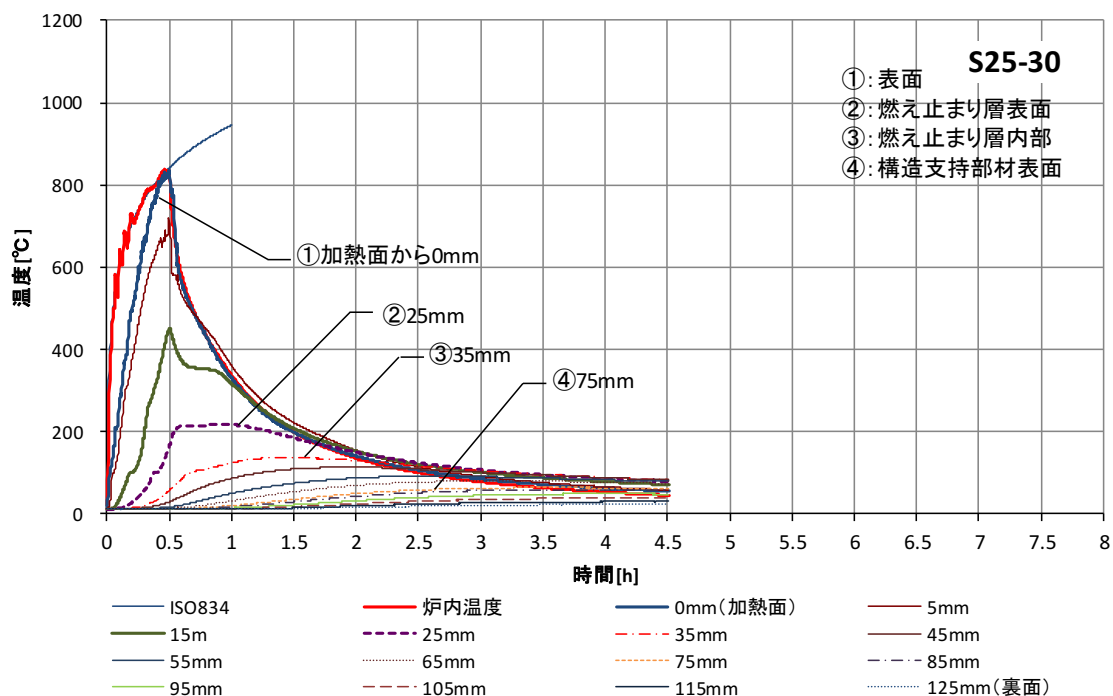


図 4.2.2 試験体内部温度及び炉内温度推移（試験体 S25-30）

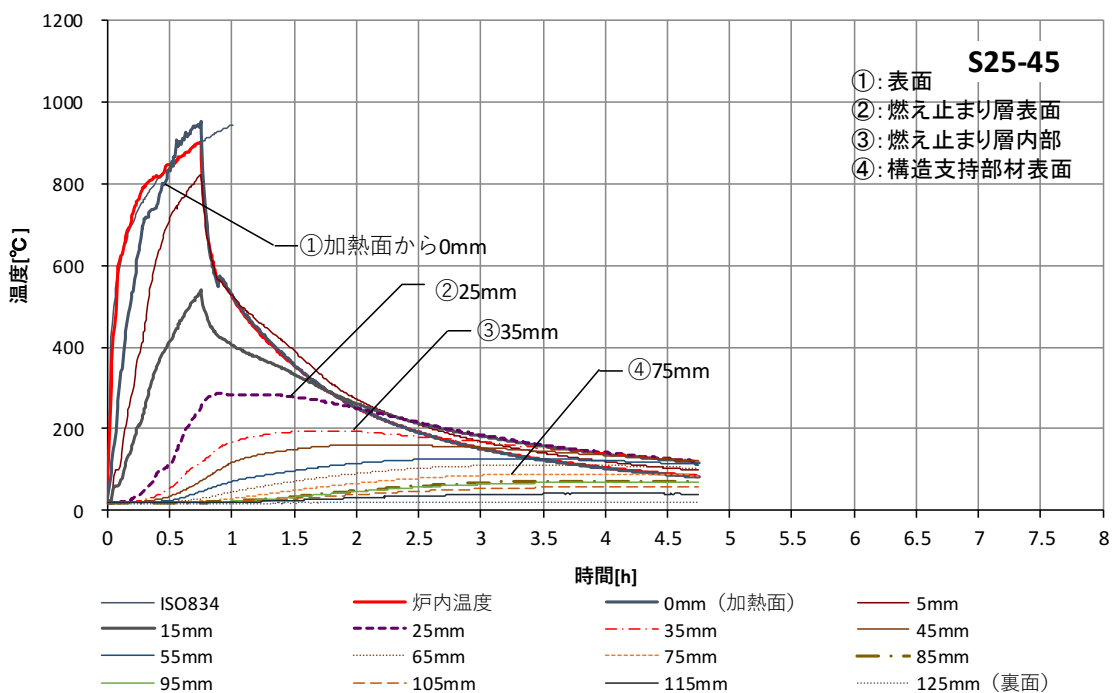


図 4.2.3 試験体内部温度及び炉内温度推移（試験体 S25-45）

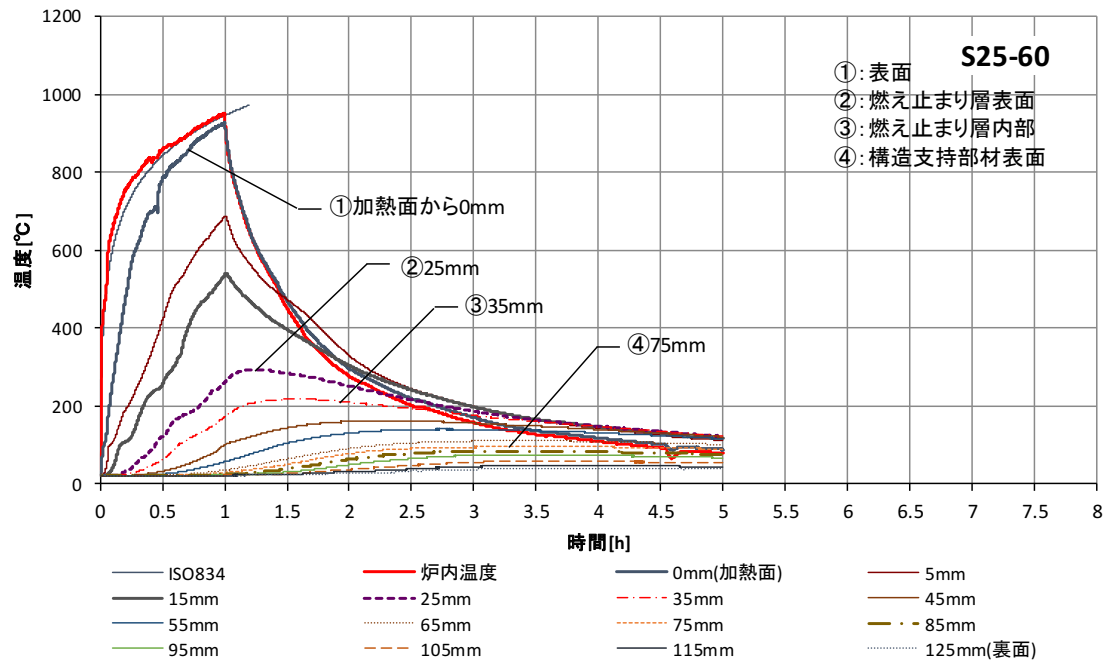


図 4.2.4 試験体内部温度及び炉内温度推移 (試験体 S25-60)

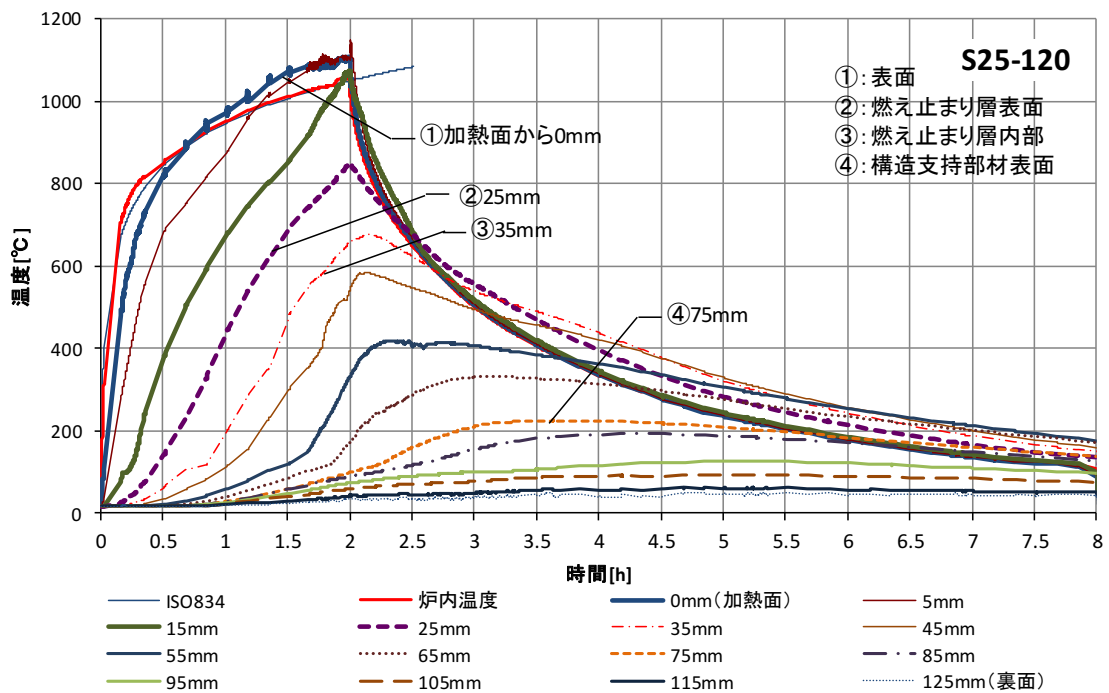


図 4.2.5 試験体内部温度及び炉内温度推移 (試験体 S25-120)

表 4.2.4 各試験体の温度推移の様子一覧

試験体	燃えしろ 層厚さ [mm]	加熱 時間 [分]	試験体の温度推移の様子
S25-30	25	30	<ul style="list-style-type: none"> 燃え止まり層表面は最高 200℃を上回ったが、燃え止まり層内部（③の加熱面から 35mm）は最高 120℃程度に留まった。 加熱終了後、約 1.5 時間後には炉内温度の降下とともに内部温度も降下した。
S25-45		45	<ul style="list-style-type: none"> 加熱終了直後に燃え止まり層表面が 300℃に達しており、燃え止まり層内部（③の加熱面から 35mm）温度も難燃薬剤分解温度の 195℃まで達した。 加熱終了後、約 1.5 時間後には炉内温度の降下とともに内部温度も降下した。
S25-60		60	<ul style="list-style-type: none"> 加熱終了直後に燃え止まり層表面が 300℃に達しており、燃え止まり層内部（③の加熱面から 35mm）温度も難燃薬剤分解温度の 195℃まで達した。 加熱終了後、約 1.5 時間後には炉内温度の降下とともに内部温度も降下した。
S25-120		120	<ul style="list-style-type: none"> 加熱終了までに燃え止まり層内部（③の加熱面から 35mm）温度は 700℃に達し、加熱終了後速やかに、炉内温度の降下とともに内部温度も降下した。 構造支持部表面の温度（④の加熱面から 75mm）は最高 220℃程度であった。

(3) 脱炉時の炭化性状

各試験体の脱炉時の断面写真及び炭化図を図 4.2.6 に、最大炭化深さ及び観察結果を表 4.2.5 にまとめる。

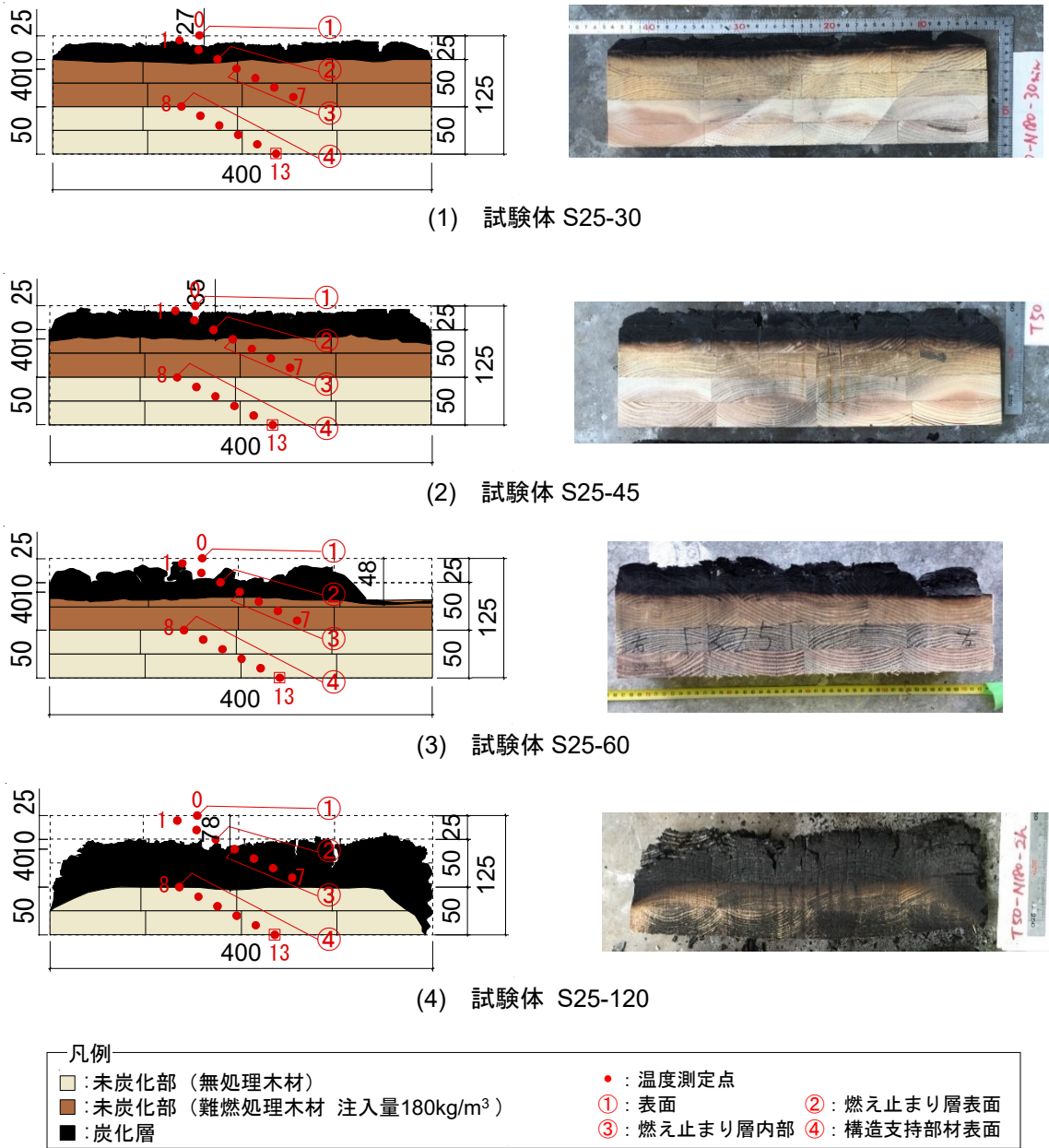


図 4.2.6 脱炉時の試験体断面写真及び炭化図

表 4.2.5 脱炉時の炭化性状一覧

試験体	燃えしろ 層厚さ [mm]	加熱 時間 [分]	炭化深さ[mm]		炭化性状の観察結果
			加熱終 了時※	脱炉時	
S25-30	25	30	22	27	・ 断面全体で炭化深さ及び残存炭化層の厚さは概ね均一であった。
S25-45		45	31	35	・ 断面全体で炭化深さ及び残存炭化層の厚さは概ね均一であった。
S2560		60	33	48	・ 断面全体で炭化深さ及び残存炭化層の厚さは概ね均一であった。
S25-120		120	58	78	・ 試験体の端部が燃え込んでいたが、これは端部の被覆不良によるものである。 ・ 中心部は一部構造支持部まで炭化が進んでいたが、炭化深さが断面内で概ね均一であった。

※：加熱終了時の炭化深さは、無書類木材の炭化温度を 260℃、難燃処理木材の炭化温度を 195℃として、内部温度の測定深さを線形補完して算出した。

表 4.2.2 より 4 つのすべての試験体は脱炉時に赤熱燃焼は確認されず自消した。木質耐火構造の性能評価¹⁰⁾では、脱炉時に赤熱燃焼が継続しておらず自消し、かつ構造支持部まで炭化していない場合を「燃え止まった」と判断するが、試験体 S25-30、S25-45、S25-60 については、最大炭化深さが構造支持部表面深さの 75mm を超えていないため、燃え止まったといえる。一方で、S25-120 については、最大炭化深さが 78mm であり、構造支持部まで炭化していることから、自消したものの、燃え止まりは達成できず、この仕様は 2 時間耐火性能を満たさないことが示された。脱炉時に自消していたこと、構造支持部の温度（図 4.2.5 の④）が加熱開始から 210 分後に最高 225℃に達した後、炉内温度の低下に伴い、構造支持部の内部温度も低下したことから、2 時間耐火性能を担保できなかったのは、燃えしろ層の赤熱燃焼によるものではなく、燃え止まり層の厚さや性能が不足したため構造支持部まで炭化したと考えられる。本実験と同様の準不燃材料相当の燃え止まり層を用いて 2 時間耐火性能を確保する場合には、燃え止まり層厚さを厚くすることが必要である。また、端部が燃え込んでいるのは、端部の被覆不良によるものである。

4.2.4 考察

(1) 加熱時間の違いと自消効果

30分火災加熱に曝された試験体 S25-30 では、表 4.2.5 より加熱終了時及び脱炉時の炭化深さがそれぞれ 22mm、27mm であることから、加熱中に燃えしろ層全体がおおむね炭化し、加熱終了後の炉内での自然放冷中には、ほぼ燃え止まり層は炭化せずに燃え止まり層の吸熱効果を発揮せずとも自消したと言える。また、燃え止まり層の内部温度（図 4.2.2 の③）は、加熱中に 100℃にも達していないことから、燃えしろ層厚さが 25mm の場合、加熱中に全て炭化しても、炭化層は十分薄く、燃え止まり層の自消効果に関わらず、表面からの熱損失で自消する見通しを得た。以上から、加熱時間が 30 分より短い場合でも、炭化層はさらに薄くなり、表面からの熱損失により自消しやすくなる。よって、加熱時間が 30 分以下では、表面からの熱損失で自消すると考えられる。

45分加熱の試験体 S25-45 の加熱終了時の炭化深さは、表 4.2.5 より 31mm であるから、加熱時間が45分を超えると加熱終了までに厚さ 25mm の燃えしろ層は完全に炭化が完了している。また加熱終了時に難燃薬剤の分解温度(195℃⁸⁾⁹⁾)に達する深さを燃え止まり層温度(図 4.2.3 の②、③)から線形補完して求めると、加熱表面から 29mm であることから、燃え止まり層の温度上昇抑制効果が加熱終了時に発揮されていると推定される。

これらより、45分以上の火災加熱に曝される場合、自消の有無は燃えしろ層以遠の、燃え止まり層の性能次第である。

(2) 燃え止まり型木質耐火構造部材における要求耐火時間に依らない適正な燃えしろ層厚さ

本実験の結果より、第2章及び第3章で検討した燃えしろ層と自消性能の関係を基に断面を設計した燃え止まり型木質耐火部材が、火災加熱時間に依らず自消性能を担保できることを示した。これにより、燃えしろ層をスギ、薬剤分解温度を 195℃⁶⁾⁷⁾とする難燃処理スギを燃え止まり層とする、燃え止まり型木質耐火構造部材の燃えしろ層厚さを 25mm 以下とすれば、火災加熱時間に関わらず自消する見通しが得られた。

4.3 まとめ

- (1) 目標とする要求耐火時間よりも短い時間で加熱された燃え止まり型木質耐火構造部材は、自消しない場合があることが示された。要因として考えられるのは、要求耐火時間よりも短い時間で加熱されたために、加熱中に燃え止まり層の薬剤分解温度に達せず、燃えしろ層の温度抑制に寄与できなかったこと、炭化層による熱損失の抑制と加熱終了後の未炭化の燃えしろ層の残存により試験体内部に高温の状態の可燃物が残存したこと、試験体内部で継続する赤熱燃焼により燃え止まり層の難燃薬剤が分解・消費し続けたことの3点である。
- (2) 燃え止まり型木質耐火構造部材において、構造支持部以外の耐火性能に関わる燃えしろ層と燃え止まり層の合計厚さは、耐火要求耐火時間により設計し、その中で自消を達成できるよう燃えしろ層の厚さを調整すればよいことが示された。さらに、木質耐火構造部材のコストや性能への影響が大きい燃え止まり層の性能及び厚さを最低限にし、かつ燃え止まり型木質耐火構造部材の目標耐火性能を達成するには、燃えしろ層厚さを自消が担保される最大厚さとする必要がある。
- (3) 燃えしろ層を無処理スギ、燃え止まり層を難燃処理スギ（薬剤分解温度 195℃⁸⁾⁹⁾とした燃え止まり型木質耐火構造部材において、燃えしろ層厚さが 25mm とすると、ISO834 に準拠した加熱曲線による加熱に曝される場合、30 分程度以下の加熱では、加熱表面からの熱損失により自消し、45 分程度以上の加熱では、燃え止まり層の温度上昇抑制効果により自消すると推定されることが示された。
- (4) 燃えしろ層を無処理スギ、燃え止まり層を難燃処理スギ（薬剤分解温度 195℃⁸⁾⁹⁾とした燃え止まり型木質耐火構造部材において、加熱時間に依らず自消する燃えしろ層厚さは 25mm 以下であることを明らかにした。

第4章の参考文献

- 1) 浜田稔：木材の燃焼速度，火災 vol.2, No.3, pp106-107, 1953.3
- 2) 菅原進一：木材の炭化速度に関する考察検討，日本建築学会大会学術講演梗概集，防火，pp2109-2110, 1978.9
- 3) 成瀬友宏・中村 賢一・遊佐 秀逸・増田 秀昭・原田 寿郎・山田 誠・佐藤 章：構造用製材の耐火性能 その1：スギとカラマツの炭化速度，日本建築学会大会学術講演梗概集，防火，pp.11-12, 2004.7
- 4) 上川大輔・原田寿郎・宮林正幸・抱憲誓・西村 光太・宮本 圭一・大内 富夫・安藤 恵介・服部 順昭：難燃処理ラミナを用いた耐火集成材の開発：スギ集成材柱の1時間及び2時間耐火性能，日本建築学会環境系論文集，第75巻，第657号，pp.929-935, 2010.11
- 5) 石川 敬・板垣 直行・原田 浩司・長谷見 雄二・飯島 泰男・中村 昇・岡崎 泰男：燃え止まり型木質耐火構造梁における燃えしろ層の適正寸法の検討，日本建築学会東北支部研究報告集，材料施工Ⅱ，第77巻，pp.165-166, 2014.6
- 6) 齊吉大河・青山源・伯耆原智世・長谷見雄二・鈴木淳一：2時間耐火性能を有する燃え止まり型木質耐火構造部材に関する研究 その3 断面部位による加熱条件の不均一性を考慮した燃え止まり層の設計の検討，日本建築学会大会学術講演梗概集，防火，pp201-202, 2019.9
- 7) 青山源・齊吉大河・伯耆原智世・長谷見雄二・上川大輔・高瀬 暲：2時間耐火性能を有する燃え止まり型木質耐火構造部材に関する研究 その4 梁部材の隅角部を模した小型実験による全断面実験の再現，日本建築学会大会学術講演梗概集，防火，pp203-204, 2019.9
- 8) 山口智世・長谷見雄二・安井昇・小宮祐人・上川大輔・宮林正幸：火災加熱される木質部材の熱分解・燃焼性状のモデル化に向けた基礎研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，防火，pp.469-472, 2013.8
- 9) 山口智世・小宮祐人・上川大輔・長谷見雄二・安井昇・宮林正幸：木材の燃焼過程のモデル化に向けた熱物性値の把握，日本建築学会大会学術講演梗概集，防火，pp.245-246, 2014.9
- 10) (公財) 日本住宅・木材技術センター：防耐火性能試験・評価業務方法書，2013.4

第 5 章

総括

第5章 総括

5.1 本論文の総括

本論文は5章により構成されている。以下に各章の要旨をまとめる。

第1章「序論」では、日本における木造建築に関わる法整備やこれまでの木質耐火構造部材の開発・実現の状況を示し、本論文の目的と研究対象の位置づけを整理した上で、既往研究及び研究手順・構成を示した。本論文の研究対象である燃え止まり型木質耐火構造部材は、燃え止まり層に石こうやモルタル等の無機材料ではなく、難燃薬剤を注入した木材を用いることで、部材断面すべてを木質材料とすることが可能であるため、従来の集成材製造ラインで加工可能であり、他の構造部材より自重が軽く基礎や杭工事の負荷が軽減される等の施工上・設計上の利点を整理した。被覆層となる燃えしろ層が厚ければ加熱時に構造支持部への入熱を抑制する点で有利だが、一方で厚すぎると、加熱終了後に可燃物となって、却って赤熱燃焼の継続を助長させる点で自消には不利に働くことが知られているが、これら被覆層の自消性状への影響は定量的に把握されていないことを示し、本研究の課題を明らかにした。本研究では、木材の赤熱燃焼と自消性状の関係を定量的に明らかにしたうえで、自消を確実に達成する被覆層の厚さや性能を把握することを目的とした。

第2章「木材平板の自消性状と難燃処理木材の難燃性能」では、これまで定量的な検討がほとんど行われていなかった木材の赤熱燃焼と自消の関係に見通しをつけるために、スギ平板を試験体として、コーンカロリメータ試験装置に付属するコーンヒーターによる定常加熱実験を行った。

これらの検討により、木材が赤熱燃焼を始めた場合、表面から10mm程度までの炭化では、加熱終了後に雰囲気温度が低下すれば熱損失により温度降下し、赤熱燃焼が停止するのに対し、深さ20mm以上炭化すると、試験体表面からの熱損失の影響は小さく、赤熱燃焼が続き易いことを明らかにした。これより、木材が赤熱燃焼に達した後、無処理木材のみで自消する条件は、燃焼範囲が表面から10mm程度であり、この場合、表面からの熱損失により木材の燃焼は自消すると考えられることを示し、木材の赤熱燃焼と表面からの熱損失による自消の境界条件を明らかにした。

さらに、燃え止まり型木質耐火構造部材が1時間耐火加熱された場合、自消を確保するための適正な燃えしろ層厚さを、以下の2つの目標を考慮したうえで内部温度測定結果から20～30mmであると推測した。

- ① 燃え止まり層を燃えしろ層の温度上昇抑制に活用するためには、加熱終了時近くに無処理木材の内部温度が赤熱燃焼帯に達する深さに燃え止まり層を設ける必要があり、その場合の燃えしろ層厚さは 30mm が適当である。
- ② 表面からの熱損失により自消させるには、10mm が適当と考えられるが、10mm では加熱時の燃え止まり層への入熱が大きい。燃えしろ層厚さを厚くすると赤熱燃焼する範囲が増大し、加熱終了後の温度も上昇すると考えられる。そこで、燃えしろ層において、赤熱燃焼が続く範囲をできるだけ抑制することを考えると、20mm 程度が適当と考えられる。

また、難燃薬剤処理スギを用いて、難燃薬剤の注入量をパラメータとしたコーンカロリメータ試験装置による加熱実験を行った。本論文で使用した窒素リン酸系の薬剤注入量が 140kg/m^3 以上では準不燃材料相当を、 110kg/m^3 以上では難燃材料相当を示すことを明らかにした。これより、燃え止まり層に使用する難燃処理木材の難燃性能と、薬剤注入量との相関関係を明らかにした。

第3章「燃え止まり型木質耐火構造部材における被覆層と自消の関係」では、前章にスギ平板の加熱実験により、1時間火災加熱に対する燃え止まり型木質耐火構造部材の燃えしろ層厚さは 20～30mm が適当だと推定されたことに基づき、燃え止まり型木質耐火構造部材を再現する試験体を製作し、小型耐火加熱実験及び実大梁耐火加熱実験を行った。燃えしろ層の厚さと燃え止まり層の難燃性能をパラメータとして、自消性能を確認した。この結果、自消に至った仕様がかったことから、1時間耐火性能を持つ仕様に見通しを得たといえる。一方で、自消しなかった仕様から、加熱終了後も燃焼継続する要因は下記3点であることを明らかにした。

燃えしろ層が厚い場合

- ① 表面からの熱損失の影響を受け難い範囲が大きくなるため。
- ② 加熱中に燃え止まり層が難燃薬剤の分解温度に達しないと、難燃処理木材による燃えしろ層深部の温度上昇の抑制効果が発揮できないため。

燃えしろ層が薄い場合

- ③ 燃え止まり層の難燃性能が低いと、燃え止まり層内で赤熱燃焼を誘発する可能性があるため。

以上より、燃えしろ層にスギ、燃え止まり層に難燃処理スギを用いる燃え止まり型木質耐火構造部材を確実に自消させるためには、燃えしろ層厚さを、加熱中に燃え止まり層の温度

が薬剤分解温度に達するような厚さとすること、燃え止まり層の難燃性能は、燃え止まり層への入熱と薬剤の分解による吸熱の平衡を維持できるようにすることが重要であることを明らかにした。これにより、適正な燃えしろ層厚さは薬剤分解温度と木材の炭化速度により推測可能であること、具体的には、1時間耐火性能を目標とすれば、燃え止まり層の難燃性能を最小限とする燃えしろ層厚さは25mm程度であることを明らかにした。また、小型試験体の加熱実験から得られた結果に基づいて実大梁の断面設計を行い、再現性を確認した。以上より、火災加熱時間に依って適切な燃えしろ層厚さが存在することを明らかにした。

第4章「要求耐火時間に依らない適正な燃えしろ層厚さ」では、今後さらに関心が高まるであろう2時間以上の長時間の耐火性能をもつ木質耐火構造部材設計に対する課題及び解決方法を提示した。前章で得られた知見により、燃えしろ層厚さは、要求耐火時間ごとに適正值が存在すると考えられる。具体的には、耐火1時間なら燃えしろ層厚さ25mm程度、2時間なら50mm程度と、要求耐火時間に比例して厚くなる。ところで、実際の加熱火災は要求されている耐火時間より短い加熱時間である可能性もある。このように、要求耐火時間よりも短い火災加熱に曝された場合、却って燃えしろ層内での赤熱燃焼を誘発し、自消しない場合があることを明らかにした。これは、燃えしろ層が実際の加熱時間に対して厚いために、加熱中に薬剤分解温度に達せず、加熱終了後には燃えしろ層深部で赤熱燃焼が持続しながら、その表面側では厚い炭化層が残存して熱損失を抑制するため、燃え止まり層に対して、却って薬剤の分解温度を超える加熱が長時間にわたり続くことが原因であることを明らかにした。しかし、ある目標時間を有する耐火性能は、目標とする耐火時間よりも短い加熱に曝された場合でも、耐火性能を発揮する必要がある。そこで、スギ、薬剤処理スギで構成した燃え止まり型木質耐火構造部材において、一方向からの断面を模した小型加熱試験を行い、要求耐火時間に依らず自消する燃えしろ層厚さは、25mm以下であることを明らかにした。

ここで、さらに加熱終了後の赤熱燃焼の可能性を低減するために、燃えしろ層を難燃処理木材とする方法も考えられるが、コストや竣工後の管理の容易性、意匠上の要請からみて表層の燃えしろ層には無処理木材を用いる必要が大きい。そこで、加熱中に炭化が完了する範囲では難燃処理木材とせずとも耐火性能に大きな影響がないことを明らかにした。これより、難燃処理木材の使用を最小限に抑えるには、燃えしろ層の無処理木材の厚さを加熱終了後に赤熱燃焼しない上限値とすればよいことを明らかにした。これにより本論文で対象とした、スギ、難燃処理スギを用いた燃え止まり型木質耐火構造部材では、要求耐

火時間に依らず自消する燃えしろ層厚さは、25mm 程度とすることが適正であると結論付けた。

5.2 結論

木質構造部材が耐火性能を有するには、構造部材自体が可燃物であるため、一度着火した場合でも構造支持部に引火せずに自己消火（以下、自消）する必要がある、自消の有無には赤熱燃焼が大きく影響することが知られている。木材の燃焼性状は、これまで主に化学分野や林業分野で研究が進められてきたが、耐火木造を実現しようとする場合に把握が必要な火災加熱終了後の自消については、系統的な知見の整備がされていなかった。そこで、本論文では、スギを対象として定常加熱試験及び耐火加熱試験を行い、木材の赤熱燃焼と自消性状の関係を定量的に明らかにした上で、特に燃えしろ層厚さ及び燃え止まり層の性能が、加熱終了後の自消性状に与える影響について知見を得ることにより、自消を確実に達成する燃え止まり型木質耐火木造部材の設計法を明らかにすべく検討を行った。ここでいう燃え止まり型木質耐火構造部材とは、構造支持部の無処理木材の外周に燃え止まり層として難燃処理木材を、その外周に燃えしろ層として無処理木材を配した構造部材である。

構造支持部材を火災加熱から守る燃えしろ層は、燃えしろ設計による準耐火構造の考え方と同様に、目標耐火時間が長くなるに従い厚く設計されるのが一般的だが、本論文の検討により、燃え止まり型木質耐火構造部材では、目標耐火時間によらず適正な燃えしろ層厚さの範囲があり、その範囲を超えると火災加熱が目標耐火時間に達しない場合、却って必要な耐火性能を維持できなくなるという、他の原理による耐火構造に見られない特質があることを明らかにした。本論文で対象としたスギ、窒素リン酸系の難燃薬剤を注入した難燃薬剤処理スギを用いた場合、コストや性能への影響が大きい難燃処理木材の使用を最小限に抑え、かつ、要求耐火時間に関わらず自消する燃えしろ層厚さは、25mm 程度であることを明らかにした。

燃えしろ層厚さが加熱時間に対して厚すぎると自消しない要因は、加熱中に燃え止まり層が難燃薬剤分解温度に達しないことから、燃え止まり層の吸熱効果を発揮できずに加熱終了後に燃えしろ層深部で赤熱燃焼が継続しながら、表面側では厚い炭化層が熱損失を抑制するため、燃え止まり層に対して薬剤の分解温度を超える加熱が長時間にわたり継続し燃え止まり層の性能を維持できないことである。以上より、25mm 以下に燃えしろ層を設

計すれば、目標耐火時間より短い火災加熱に曝された場合においても、加熱時間が 30 分以下では、表面からの熱損失により自消し、45 分以上では、自消の有無は燃え止まり層の難燃性能によることを明らかにした。

本検討で把握された燃えしろ層厚さ及び燃え止まり層の性能の設計法に従い設計したスギ、難燃薬剤処理スギを用いた燃え止まり型木質耐火構造部材では、小型炉試験や無載荷の実大梁試験レベルでは 1 時間及び 2 時間耐火性能の性能を確認¹⁾²⁾していることから、本論文の研究成果により、最上階から数えて 14 階建までの耐火木造建築が実現可能であるといえる。

5.3 研究成果と今後の展望

本論文での検討により、燃え止まり型木質耐火構造部材を対象として、耐火性能に大きな影響を与える、加熱終了後の自消性状について、燃えしろ層及び燃え止まり層の厚さや性能に関する定量的な知見を示した。本研究に基づいて燃えしろ層厚さと燃え止まり層の設計を行った燃え止まり型木質耐火構造部材が国土交通大臣認定を受け、1 時間耐火構造梁・柱として認定されている（大臣認定番号：FP060BM-0421、FP060CN-0683）。これら大臣認定仕様の構造部材を用いて、写真 5.3.1 及び写真 5.3.2 に示す、「道の駅ふたつ（2018 年 3 月竣工）」や「指定障害福祉サービス事務所ねむの木苑（2019 年 2 月竣工）」が竣工している。道の駅ふたつについては、手前に写る 2 本の柱が、ねむの木苑では、屋根を支える放射状の梁とその梁を支える V 字の柱に認定部材を用いている。

以上のように、本論文では、木材加熱後の自消性状に焦点を当て、基礎的な知見の収集と、それら知見に基づき燃え止まり型木質耐火構造の設計法の誘導、1 時間耐火性能を持つ燃え止まり型木質耐火構造梁・柱の開発、実用化にも至ったが、序論で示した通り、高層木造への気運の高まりに伴い、長時間耐火性能への要請が高まると考えられる。高層木造の実用化に伴い、RC 造や鉄骨造など他構造との混構造・ハイブリット構造の検討や燃え止まり層の性能向上に向けて更なる検討が必要であると考えられる。



(1) 外観

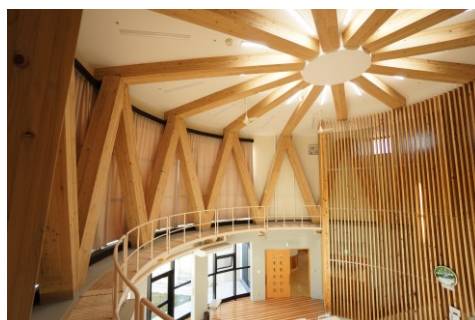


(2) 内観

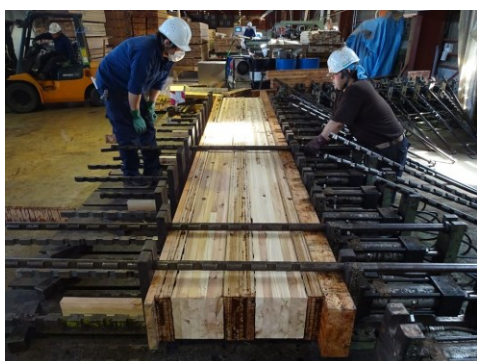
写真 5.3.1 燃え止まり型木質耐火構造部材を利用した設計事例 1
(道の駅ふたつい 2018 年 3 月竣工 秋田県能代市二ツ井町)



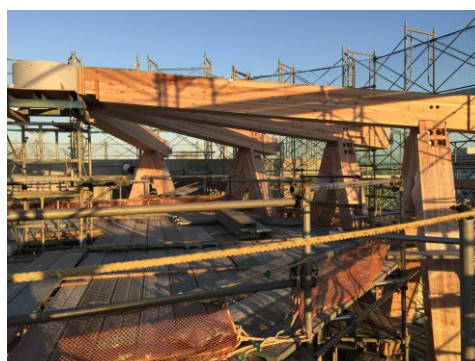
(1) 外観



(2) 内観



(3) 耐火部材製作の様子



(4) 耐火部材施工中の様子

写真 5.3.2 燃え止まり型木質耐火構造部材を利用した設計事例 2
(ねむの木苑 2019 年 2 月竣工 秋田県能代市)

第5章の参考文献

- 1) 齊吉大河・青山源・伯耆原智世・長谷見雄二・鈴木淳一：2 時間耐火性能を有する燃え止まり型木質耐火構造部材に関する研究 その3 断面部位による加熱条件の不均一性を考慮した燃え止まり層の設計の検討，日本建築学会大会学術講演梗概集，防火，pp201-202，2019.9
- 2) 青山源・齊吉大河・伯耆原智世・長谷見雄二・上川大輔・高瀬椋：2 時間耐火性能を有する燃え止まり型木質耐火構造部材に関する研究 その4 梁部材の隅角部を模した小型実験による全断面実験の再現，日本建築学会大会学術講演梗概集，防火，pp203-204，2019.9

謝辭

謝辞

本論文は、筆者が早稲田大学大学院 創造理工学部建築学専攻 後期博士課程において、同大学創造理工学部 長谷見雄二教授の指導のもとにまとめたものであり、大勢の方々から厚意あるご指導とご協力によって完成したものであります。ここに改めて記し、感謝の意を表します。

長谷見雄二博士には、本論文をはじめとする研究生活全般において、最良の環境を提供していただくとともに、温かい激励とご指導、ご鞭撻をいただきました。研究や実験に取り組む姿勢から、実験方法の細部に至るまで、ご指導いただきましたこと、心より感謝申し上げます。

学位論文審査にあたり、貴重なご指導とご助言をいただいた早稲田大学創造理工学部建築学科教授 田辺新一博士、同教授 高口洋人博士に心より感謝申し上げます。

大学生として研究を開始したときより、実験を実施するための環境を整備していただき、試験方法や装置の使用方法について、数多くのご助言・ご指導をいただいた森林総合試験所の上川大輔博士に心より感謝申し上げます。

長谷見雄二研究室入室時より、実験を進めるにあたり、多くのご助言・ご指導をいただいた早稲田大学 理工学研究所招聘研究員の安井昇博士と、国土交通省 国土技術政策総合研究所の鈴木淳一博士に心より感謝申し上げます。

試験体製作、実験の実施にあたり、早稲田大学 創造理工学部建築学科 長谷見雄二研究室卒業生の高瀬椋氏、早稲田大学 創造理工学部建築学科 長谷見雄二研究室の斉吉大河氏には、大変なご尽力をいただきました。心より感謝申し上げます。

試験体のご提供や実験計画をまとめるにあたり、多くのご助言・ご指導をいただいた(有)ティー・イー・コンサルティングの宮林正幸氏に心より感謝申し上げます。

秋田県立大学システム科学技術学部建築環境システム学科 教授 板垣直行博士をはじめ、秋田県立大学木材高度加工研究所の方々には、実大梁試験の実現および研究成果の大臣認定取得・実用化に向けて、多大なるご尽力をいただきました。板垣博士には論文執筆においても有用な資料の提供をいただきました。心より感謝申し上げます。

建設会社の設計部という、もとより多忙で、研究活動が主要な業務でない職場に籍を置きながら論文をまとめることができたことは、設計本部、設計部や技術研究所の方々のご配慮によるところが大であります。竹中工務店 竹市尚広博士、長岡勉博士、梅野圭介氏と所属グループの皆様には、日々の業務と研究活動の両立に多大なるご配慮をいただきました。とりわけ論文をまとめる最終年からは、耐火木造の設計業務に携わる機会を与えていただきました。心より感謝申し上げます。

また、研究を進めるにあたり、ご支援、ご協力をいただきながら、ここにお名前を記すことが出来なかった多くの方々に厚くお礼申し上げます。

最後になりますが、これまでの研究活動をはじめ日常生活を支えてくれた両親に心から感謝いたします。そして、どのような状況にあっても、仕事と研究生活の両立を応援してくれた夫に心から感謝いたします。

本研究は、科学研究費「大断面木質部材の防耐火性能設計の工学モデル」（研究代表者：長谷見雄二）及び「大規模居室における内装の燃焼拡大性状の予測と火災規模の局限化に関する研究」（研究代表者：長谷見雄二）により実施されたものです。ここに記して、深く感謝の意を表します。

2020 年 2 月
伯耆原 智世

研究業績

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 伯耆原 智世 印

(2019 年 12 月 現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
論文	<p>(○印は本論文を担う主要な業績を示す。)</p> <p>○ 燃え止まり型木質耐火構造部材における要求耐火時間に依らない適正な燃えしろ層厚さ, 日本建築学会環境系論文集 第 84 巻 第 761 号, pp.607-614, 2019 年 7 月, <u>伯耆原智世</u>・長谷見雄二・斉吉大河・高瀬棕・上川大輔・安井昇・宮林正幸</p> <p>○ 燃え止まり型木質耐火構造部材の工学的設計法に関する研究 小型試験に基づく燃えしろ・燃え止まり層の設計法の検討, 日本建築学会環境系論文集 第 81 巻 第 730 号, pp.1065-1074, 2016 年 12 月, <u>山口智世</u>・上川大輔・長谷見雄二・安井昇・高瀬棕・宮林正幸・鈴木淳一</p>
講演 (発表)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 石こう系材料を用いた燃え止まり型木質耐火構造に関する研究 1 時間標準耐火加熱試験による燃えしろ層厚さと自消性状の関係の把握, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (防火), pp181-182, 2019 年 9 月, <u>伯耆原智世</u>・長岡勉・長谷見雄二 ・ 2 時間耐火性能を有する燃え止まり型木質耐火構造に関する研究 (その 1) 適正な燃えしろ層厚さの把握, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (防火), pp269-270, 2018 年 9 月, <u>山口智世</u>・斉吉大河・長谷見雄二・上川大輔・高瀬棕・安井昇・遠藤智紀・渡辺秀太 ・ OPTIMIZATION OF THE WOOD-BASED FIRE PROTECTION LAYER—AN ENGINEERING APPROACH TO THE DESIGN OF FIRERESISTIVE BUILDING ELEMENTS BASED ON A SACRIFICE-LAYER CONCEPT, 15th World Conference on Timber Engineering (世界木質構造会議 2018), 2018 年 8 月, <u>Tomoyo YAMAGUCHI</u>・Yuji HASEMI・Daisuke KAMIKAWA・Jun-ichi SUZUKI ・ 燃え止まり型木質耐火構造部材の工学的設計法に関する研究: その 2 実大部材への適用及び数値的設計手法の開発可能性の検証, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (防火), pp.109-110, 2015 年 9 月, <u>山口智世</u>・長谷見雄二・安井昇・高瀬棕・板垣直行 ・ 木材の燃焼過程のモデル化に向けた熱物性値の把握, 日本建築学会大会学術講演梗概集(防火), pp.155-156, 2014 年 9 月, <u>山口智世</u>・小宮祐人・上川大輔・長谷見雄二・安井昇・宮林正幸 ・ 火災加熱される木質部材の熱分解・燃焼性状のモデル化に向けた基礎研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(防火), pp.469-472, 2013 年 8 月, <u>山口智世</u>・長谷見雄二・安井昇・小宮祐人・上川大輔・宮林正幸 ・ 木材の燃焼過程における吸発熱性状のモデル化に向けた基礎研究, 日本建築学会関東支部研究報告集, pp613-616, 2013 年 3 月, <u>山口智世</u>・長谷見雄二・小宮祐人・安井昇・上川大輔・宮林正幸

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演 (連名)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 2 時間耐火性能を有する燃え止まり型木質耐火構造部材に関する研究 その 3 断面部位による加熱条件の不均一性を考慮した燃え止まり層の設計の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集(防火), pp201-202, 2019 年 9 月, 齊吉大河・青山源・<u>伯耆原智世</u>・長谷見雄二・鈴木淳一 ・ 2 時間耐火性能を有する燃え止まり型木質耐火構造部材に関する研究 その 4 梁部材の隅角部を模した小型実験による全断面実験の再現, 日本建築学会大会学術講演梗概集(防火), pp203-204, 2019 年 9 月, 青山源・齊吉大河・<u>伯耆原智世</u>・長谷見雄二・上川大輔・高瀬棕 ・ 総木質燃え止まり型 2 時間耐火構造梁の開発研究-断面部位による加熱条件の不均一性を考慮した燃え止まり層の設計の検討-, 日本建築学会関東支部研究報告集, pp641-644, 2019 年 3 月, 青山源・齊吉大河・<u>伯耆原智世</u>・長谷見雄二・上川大輔・高瀬棕 ・ 2 時間耐火性能を有する燃え止まり型木質耐火構造部材に関する研究(その 2)適正な燃えしろ層厚さに対応した燃え止まり層の必要性能の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集(防火), pp271-272, 2018 年 9 月, 齊吉大河・<u>山口智世</u>・長谷見雄二・上川大輔・高瀬棕・安井昇・遠藤智紀・渡辺秀太 ・ 2 時間耐火性能を有する燃え止まり型木質構造部材に関する研究-設計耐火時間より短時間の火災加熱での赤熱燃焼を制御できる燃えしろ・燃え止まり層の検討-, 日本建築学会関東支部研究報告集, pp669-672, 2018 年 3 月, 齊吉大河・<u>山口智世</u>・長谷見雄二・上川大輔・高瀬棕・安井昇・遠藤智紀・渡辺秀太 ・ Development of Wood-based “Fireproof” Buildings in Japan, 14th World Conference on Timber Engineering (世界木質構造会議 2016), 2016 年 8 月, Yuji HASEMI・Naoyuki ITAGAKI・<u>Tomoyo YAMAGUCHI</u> ・ 燃え止まり型木質耐火構造部材の工学的設計法に関する研究: その 1 木材の自消条件から見た燃えしろ・燃え止まり層の最適設計, 日本建築学会大会学術講演梗概集(防火), pp139-142, 2015 年 9 月, 高瀬棕・<u>山口智世</u>・上川大輔・長谷見雄二・安井昇・宮林正幸 ・ 燃え止まり型スギ耐火部材の適正設計に関する基礎研究: 赤熱燃焼の定性的な予測とモデル化手法に関する検討, 日本建築学会関東支部研究報告集, pp673-676, 2015 年 3 月, 高瀬棕・<u>山口智世</u>・上川大輔・長谷見雄二・安井昇・宮林正幸