調査研究報告　　No.448
RESEARCH REPORT 2024. 3

押出法ポリスチレンフォームの特性を活かした鉄骨造準耐火外壁の開発

Development of Semi-Fireproof Steel-Frame Exterior Walls Utilizing the Characteristics of Extruded Polystyrene Foam

糸毛　治[1)]、遠藤　卓[2)]、平塚 雄治[3)]、松本　崇[3)]、西本 大策[3)]、
山田 直明[3)]、桑嶋 勝己[3)]、花野 克哉[3)]、高橋 誠治[3)]、内村 光寿[3)]
Osamu Itoge[1)], Suguru Endo[2)], Yuji Hiratsuka[3)], Takashi Matsumoto[3)], Daisaku Nishimoto[3)],
Naoaki Yamada[3)], Katsumi Kuwajima[3)], Katsuya Hanano[3)], Seiji Takahashi[3)], Mitsutoshi Uchimura[3)]

地方独立行政法人北海道立総合研究機構
建築研究本部
北方建築総合研究所
Northern Building Research Institute
Building Research Department
Local Independent Administrative Agency Hokkaido Research Organization

[1)] 建築研究部　建築システムグループ　研究主幹・博士（工学）　[2)] 建築研究部　建築システムグループ　研究主任
[3)] 押出発泡ポリスチレン工業会
1) Senior Research Manager of Building System Group, Building Research Division, Dr. Eng., 2) Researcher of Building System Group, Building Research Division, 3) Extruded Polystyrene Foam Industry Association

本書の全部および一部の無断での転載はご遠慮ください。

No unauthorized reproduction

概　要
Abstract

押出法ポリスチレンフォームの特性を活かした鉄骨造準耐火外壁の開発
Development of Semi-Fireproof Steel-Frame Exterior Walls Utilizing the Characteristics of Extruded Polystyrene Foam

糸毛　治[1)]、遠藤　卓[2)]、平塚 雄治[3)]、松本　崇[3)]、西本 大策[3)]、
山田 直明[3)]、桑嶋 勝己[3)]、花野 克哉[3)]、高橋 誠治[3)]、内村 光寿[3)]
Osamu Itoge[1)], Suguru Endo[2)], Yuji Hiratsuka[3)], Takashi Matsumoto[3)], Daisaku Nishimoto[3)],
Naoaki Yamada[3)], Katsumi Kuwajima[3)], Katsuya Hanano[3)], Seiji Takahashi[3)], Mitsutoshi Uchimura[3)]

キーワード *：押出法ポリスチレンフォーム、鉄骨造外壁、準耐火構造、断熱外壁、熱可塑性樹脂*
Keywords : *Extruded polystyrene foam, Steel-frame exterior wall, Semi-fireproof structure, insulated exterior wall, Thermoplastic resin*

1．研究概要
1）研究の背景
・建築物着工統計によると、全国で令和３年度に着工した建築物のうち、鉄骨造建築物は棟数、床面積ともに約 17%を占める。
・カーボンニュートラルの実現に向け、建築物の一次エネルギー消費量を削減するためには、中小規模の鉄骨造建築物を対象に建築外皮の断熱性能を強化できる部材・工法を提案していく必要がある。
・鉄骨造の部材・工法は、木造とは異なり自由度が高く多様であるため、提案にあたっては、部材構成・施工法をできる限り単純化し、低コストで実現できることが求められる。
・断熱化された鉄骨造外壁の防火性能を考える場合、加熱方向に対する鉄骨部材と断熱材の位置関係によっては鉄骨部材の温度が上昇するため、それに伴う鉄骨部材の耐力低下、熱変形を考慮する必要がある。
・木造外壁に関する防火研究において、外壁内への火炎侵入を防止できれば、外壁内の押出法ポリスチレンフォーム断熱材は燃焼せずに約 100℃前後で溶融することがわかっている。この特性を生かせば、火災加熱時、断熱材の設置に伴って生じる鉄骨部材の温度上昇を抑制でき、防火性能と断熱性能を兼ね備えた新たな鉄骨造外壁が実現できる。
2）研究の目的
・外壁内に設置された押出法ポリスチレンフォーム断熱材は、火災加熱時、外壁内への火炎侵入がなければ、燃焼せずに溶融する特性に着目して、この特性が鉄骨造外壁の防耐火性能に与える影響を把握する。さらに、この特性を活かし、高い断熱性を持つ鉄骨造準耐火外壁を開発する。

2．研究内容
1）断熱材の溶融が鉄骨造外壁の防耐火性能に与える影響の把握（R４年度～R５年度）
・ねらい：押出法ポリスチレンフォーム断熱材を用いた鉄骨造外壁を対象に火災加熱を行い、外壁内への火炎侵入がない条件下で生じる押出法ポリスチレンフォーム断熱材の溶融が、鉄骨造外壁の防耐火性能に与える影響を把握し、防耐火性能の向上につながる条件とその手法を明らかにする。

[1)] 建築研究部建築システムグループ研究主幹・博士（工学）　[2)] 建築研究部建築システムグループ研究主任　[3)] 押出発泡ポリスチレン工業会
[1)] Senior Research Manager of Building System Group, Building Research Division, Dr. Eng., [2)] Researcher of Building System Group, Building Research Division, [3)] Extruded Polystyrene Foam Industry Association

・試験項目等：防耐火試験（実大試験体、またはモデル試験体を用いた火災加熱実験）

2）高断熱性と実用性を兼ね備えた鉄骨造外壁工法の検討（R４年度）

・ねらい：市場に受け入れられやすい鉄骨造外壁を提案するため、外壁の構成および施工法をできる限り単純化して、実用性を高めた外壁工法を検討し、加えて外壁内に気密層を確保して高い断熱性能を発現できる鉄骨造外壁工法を明らかにする。

・試験項目等：図面に基づく施工法、気密層、断熱性能の検討、コスト試算

3）準耐火性能を有する鉄骨造外壁の開発（R５年度）

・ねらい：２）を対象に１）で得られた知見を活かして、準耐火性能を有する鉄骨造外壁を開発する。断熱性能および防露性能を確認・検証して、鉄骨造外壁の構成・各部仕様を明らかにする。

・試験項目等：防耐火試験（実大試験体を用いた火災加熱実験）、断熱性能、防露性能の検討

３．研究成果

1）断熱材の溶融が鉄骨造外壁の防耐火性能に与える影響の把握（R４年度～R５年度）

・小型試験体を用いて火災加熱を行い、高い耐熱性を有するロックウール断熱材（以下、RW）との比較から、押出法ポリスチレンフォーム断熱材（以下、XPS）の溶融により、壁内の鉄骨柱の温度上昇を抑制する効果を確認した。

・この効果は、断熱材が柱の非加熱側に位置する場合、つまり内張断熱工法に対する屋外側加熱、外張断熱工法に対する屋内側加熱の場合に、防耐火性能（非損傷性）に対し有利側に作用する。

・実大試験体を用いた実験においても小型試験体と同じく XPS 溶融の効果を確認できたが、その効果は断熱材が接する鉄骨柱に限られることがわかった。

2）高断熱性と実用性を兼ね備えた鉄骨造外壁工法の検討（R４年度）

・次の点から、外壁はメンブレン型の構成とし、断熱工法は充填断熱＋内張断熱工法を採用した。

・XPS の溶融により、壁内の鉄骨柱の温度上昇を抑制する効果を最大限活かせる。

・内装材・内張断熱で断熱性・気密性が取りやすく、外装側の設計自由度が高く、実用性がある。

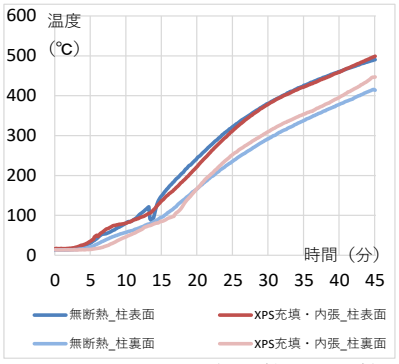
・押出発泡ポリスチレン工業会所属のメーカーで開発事例、実績があり、市場性がある。

3）準耐火性能を有する鉄骨造外壁の開発（R５年度）

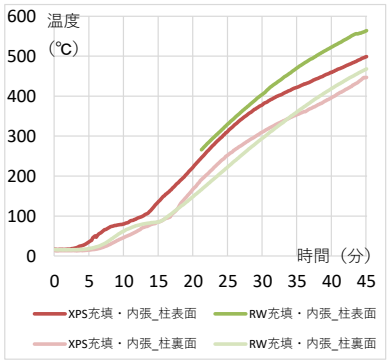
・実大試験体を用いた実験的検討より、準耐火性能を満足するための外壁構成を明らかにした。

・開発した外壁を対象に、断熱性能および防露性能を検証した。

＜具体的データ＞



XPS 充填・内張と無断熱との比較



XPS 充填・内張と RW 充填・内張

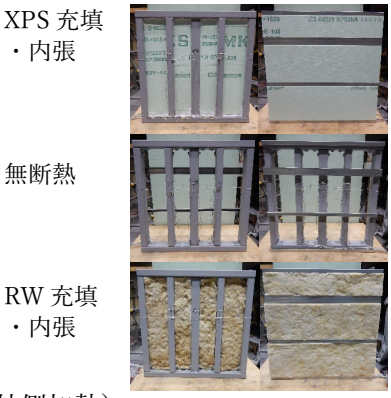


図１　小型試験体を用いた壁内の柱温度の把握（屋外側加熱）

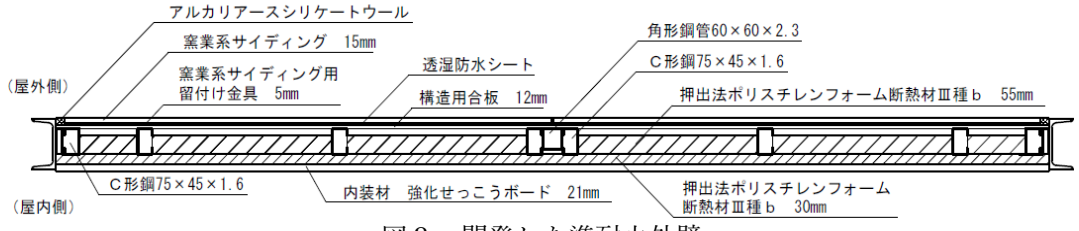


図２　開発した準耐火外壁

4．今後の見通し

・押出法ポリスチレンフォーム断熱材を用いた鉄骨造外壁が火災加熱を受けた際、外壁内で生じる断熱材の溶融が、鉄骨造外壁の防耐火性能に与える影響に関する知見は、査読論文として発表し周知するとともに、押出発泡ポリスチレン工業会において技術資料として取りまとめる。

・開発した押出法ポリスチレンフォーム断熱材を用いた鉄骨造準耐火外壁は、押出発泡ポリスチレン工業会が準耐火構造の大臣認定を取得して、実用化する。

目　次

１．研究の目的と概要 1
（１）研究の背景 1
（２）研究の目的 2
（３）研究の概要 2

２．高断熱性と実用性を兼ね備えた鉄骨造外壁工法の検討 4
（１）目的・検討方法 4
（２）断熱工法の選定 4
（３）鉄骨造外壁工法の選定 4
（４）鉄骨造外壁の基本構成・仕様 5

３．断熱材の溶融が鉄骨造外壁の防耐火性能に与える影響の把握 6
（１）目的・検討方法 6
（２）小型試験体 6
（３）試験方法 8
（４）試験結果・考察 8

４．準耐火性能を有する鉄骨造外壁の開発 11
（１）目的・検討方法 11
（２）試験方法 11
（３）予備試験による性能確認 12
（４）鉄骨造外壁の基本構成・仕様の見直し 15
（５）本試験による性能検証 16

５．断熱材の溶融が防耐火性能に与える影響の実大試験検証 19
（１）目的・検討方法 19
（２）試験方法 19
（３）実大試験体 19
（４）試験結果・考察 20

６．開発外壁の断熱性能の検討 22
（１）目的・検討方法 22
（２）計算モデル・計算方法 22
（３）熱貫流率の計算結果 23
（４）防露性能への考察 24

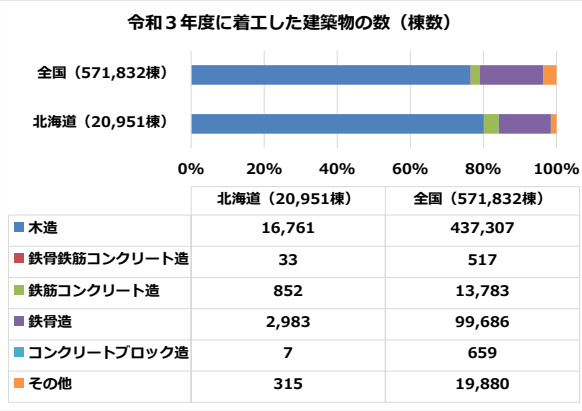
７．まとめ 25

1．研究の目的と概要

（1）研究の背景

建築物着工統計[1)]によると、全国で令和３年度に着工した建築物のうち、鉄骨造建築物は棟数、床面積ともに約 17%を占めている（図 1-1）。カーボンニュートラルの実現に向け、建築物の一次エネルギー消費量を削減するためには、これら鉄骨造建築物を対象に高断熱化を実現できる部材・工法が求められている。

鉄骨造外壁の断熱化には、ロックウール断熱材（以下、RW）やグラスウール断熱材（以下、GW）など、不燃性を有する人造鉱物繊維断熱材が用いられる場合が多い。この時、荷重を支える外壁（耐力壁）の防耐火性能を考えると、火災加熱の加熱方向に対し、外壁内の鉄骨柱と断熱材の位置関係によっては、断熱材（RW,GW）による熱ごもりが生じて、外壁内の鉄骨柱の温度が上昇する（図 1-2）。鉄骨部材は 400℃を超えると耐力が大きく低下すること[2)]が知られている。外壁内の鉄骨柱に耐力低下が生じると座屈を招きやすくなり、防耐火性能上、非損傷性の低下につながる。外壁内の鉄骨柱の耐力低下、熱変形を抑えるためには、断熱化にあたり鉄骨柱の温度が高くならないように配慮する必要がある。しかし充填断熱工法と外張・内張断熱工法を併用して高断熱化を図る場合、熱ごもりを解消して、防耐火性能と断熱性能を両立させることは難しくなる。



	北海道（20,951棟）	全国（571,832棟）
木造	16,761	437,307
鉄骨鉄筋コンクリート造	33	517
鉄筋コンクリート造	852	13,783
鉄骨造	2,983	99,686
コンクリートブロック造	7	659
その他	315	19,880

図 1-1　令和３年度に着工した建築物の数

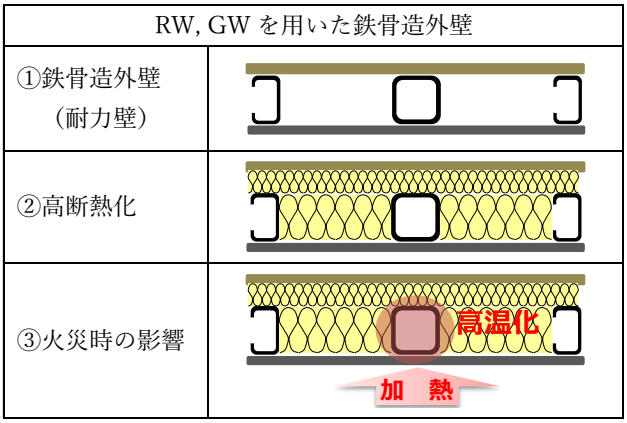


図 1-2　鉄骨造外壁の断熱化と火災加熱時の影響①

一方、押出法ポリスチレンフォーム（以下、XPS）は、日本産業規格 JIS A 9511「発泡プラスチック保温材」及び JIS　A　9521「建築用断熱材」に規定される発泡プラスチック断熱材の 1 つであり、断熱性と施工性の良さから広く普及している。しかし可燃性を有するため、XPS を用いた外壁では火災加熱を受けると XPS が燃焼する可能性があり、外壁内の可燃物量の増大が防火性能の低下につながる懸念がある。

これに対し、XPS を木造外壁に用いた既往の防火研究[3),4)]では、火災加熱に対し、内外装材等の被覆材が外壁内への火炎侵入を防ぐことができれば、その間、外壁内の XPS は燃焼しないこと、XPS は約 100℃前後で溶融することがわかっている。この時、溶融した XPS は外壁の下端部へ流れ落ちて、XPS を設置した所は空洞となるため、断熱材による熱ごもりは生じない（図 1-3）。

つまり XPS を用いた外壁では、防耐火性能の要求時間（例えば、防火構造であれば 30 分、準耐火構造であれば 45 分など）の間、火災加熱に対し、外壁の内外装材を脱落させずに保持し、火炎の侵入、XPS の燃焼を防止できれば、断熱材の設置に伴って生じる火災時の鉄骨部材の温度上昇を抑制できる

（図 1-4)。これにより、鉄骨柱の耐力低下・座屈を回避または遅延できるため、防耐火性能の向上につながると考えられる。

鉄骨造外壁の断熱化にあたり、この XPS の特性を生かすことができれば、高断熱化が容易となり、防火性能と断熱性能を兼ね備えた新たな鉄骨造外壁が実現できると考えられる。

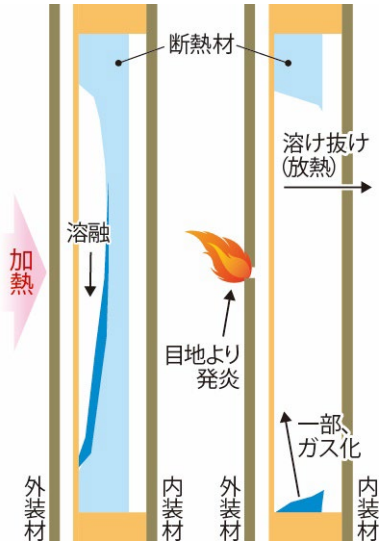


図 1-3　火災加熱時の外壁内の XPS の挙動

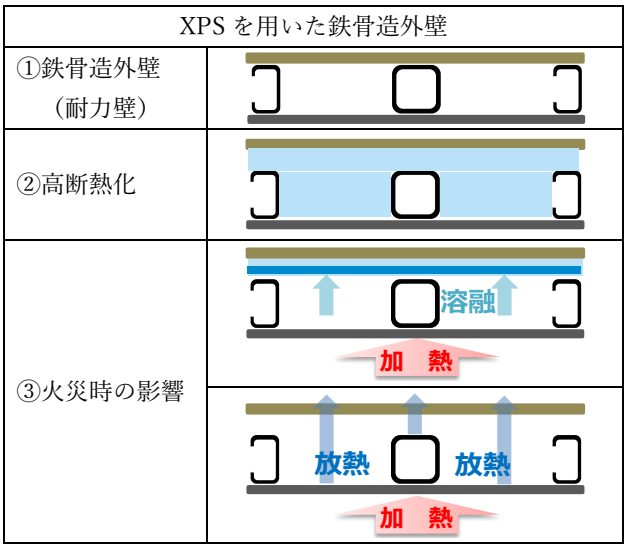


図 1-4　鉄骨造外壁の断熱化と火災加熱時の影響②

（2）研究の目的

本研究は、外壁内に設置された XPS は、火災加熱時、外壁内への火炎侵入がなければ、燃焼せずに溶融する特性（以下、XPS の溶融特性と称す。）に着目して、この特性が鉄骨造外壁の防耐火性能に与える影響を把握する。さらに、この特性を活かし、高い断熱性を持つ鉄骨造準耐火外壁を開発する。

（3）研究の概要

本研究では、前項の研究目的に対し、次の 3 つの研究項目に取り組む。

1）断熱材の溶融が鉄骨造外壁の防耐火性能に与える影響の把握

XPS を用いた鉄骨造外壁を対象に火災加熱を行い、外壁内への火炎侵入がない条件下で生じる XPS の溶融が、鉄骨造外壁の防耐火性能に与える影響を把握し、防耐火性能の向上につながる条件とその手法を明らかにする。

2）高断熱性と実用性を兼ね備えた鉄骨造外壁工法の検討

市場に受け入れられやすい鉄骨造外壁を提案するため、外壁の構成および施工法をできる限り単純化して、実用性を高めた外壁工法を検討し、加えて外壁内に気密層を確保して高い断熱性能を発現できる鉄骨造外壁工法を明らかにする。

3）準耐火性能を有する鉄骨造外壁の開発

2）を対象に 1）で得られた知見を活かして、準耐火性能を有する鉄骨造外壁を開発する。断熱性

能および防露性能を確認・検証して、鉄骨造外壁の構成・各部仕様を明らかにする。

なお当初、研究立案の段階では「１）防耐火性能に与える影響の把握」をした上で、その知見を「２）鉄骨造外壁工法の検討」を行う方針であった。研究実施の段階において、研究成果の実用性を重視し、先に「２）鉄骨造外壁工法の検討」を行い、対象とする外壁工法を定めた上で、「１）防耐火性能に与える影響の把握」を行う方針とした。この点を踏まえ、上記 3 つの研究項目と本報告書各章の対応は、次にとおりとなる（表 1-1）。

表 1-1　本研究の構成と本報告書の章立て

本研究の構成	本報告書の章立て
研究の背景・目的・概要	１．研究の目的と概要
研究項目２） 高断熱性と実用性を兼ね備えた鉄骨造外壁工法の検討	２．高断熱性と実用性を兼ね備えた鉄骨造外壁工法の検討
研究項目１） 断熱材の溶融が鉄骨造外壁の防耐火性能に与える影響の把握	３．断熱材の溶融が鉄骨造外壁の防耐火性能に与える影響の把握
研究項目３） 準耐火性能を有する鉄骨造外壁の開発	４．準耐火性能を有する鉄骨造外壁の開発 ５．断熱材の溶融が防耐火性能に与える影響の実大試験検証 ６．開発外壁の断熱性能の検討
研究のまとめ	７．研究のまとめ

2．高断熱性と実用性を兼ね備えた鉄骨造外壁工法の検討

（1）目的・検討方法

鉄骨造の部材・工法は、木造とは異なり自由度が高く多様である。本章では、本研究において準耐火構造外壁の開発対象とする鉄骨造外壁の基本構成を検討する。検討にあたり次の 3 点を重視した。

①部材構成・施工法をできる限り単純で実用性が高いこと

②断熱外壁として気密層を確保して高い断熱性能を発現できること

③低コストで実現でき、市場に受け入れられやすいこと

なお、③については直接コストを算出するのではなく、共同研究機関である押出発泡ポリスチレン工業会（以下、工業会）に所属する会員各社の営業担当者に、コスト面や現場での施工手間で問題が生じないか、その都度、ヒアリングによる確認を行いながら検討を進めた。

（2）断熱工法の選定

前章の図 1-2 および図 1-4 より、XPS の溶融特性による壁内の鉄骨柱の温度上昇抑制効果は、加熱面に対し断熱材が柱の背後に位置する場合に発揮されると想定すると、外張断熱工法または内張断熱工法を採用することが望ましい。

また鉄骨造外壁では、骨組みとなるリップ溝形鋼（以下、C 形鋼）や角形鋼管柱の施工精度があまり高くない場合を考慮すると、XPS を外張りとするよりも、内張りとする内張断熱工法の方が気密性を確保しやすい。そして屋内側の内張断熱材（XPS）、防湿層および内装材により、外壁の断熱性と気密性を確実に確保できるようになれば、外装材など屋外側の構成を自由度高く設定できる利点もある。

さらに工業会に所属する会員会社において、鉄骨造外壁の内張断熱工法（図 2-1）の販売実績があった点も踏まえ、本研究では内張断熱工法を採用し、内張断熱材だけでは断熱性能が不足する場合は、充填断熱材を併用して断熱性能を確保することとした。

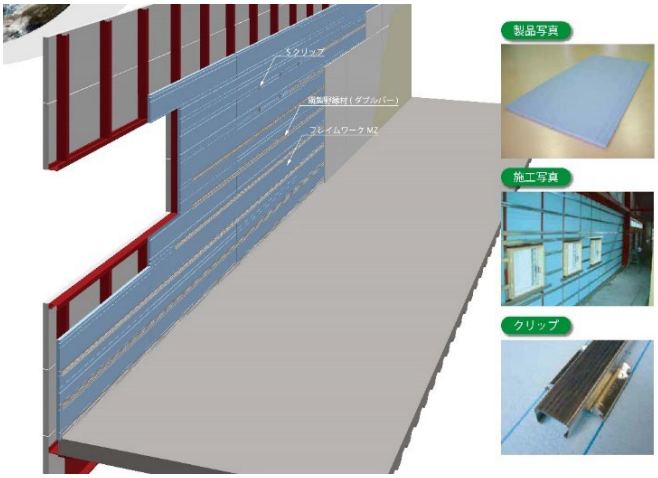


図 2-1　工業会に所属する企業が開発した鉄骨造外壁の内張断熱工法 [5)]

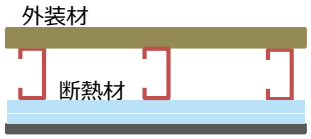
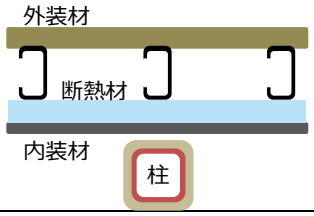
（3）鉄骨造外壁工法の選定

鉄骨造の外壁工法には、大きく分けて表 2-1 に示す 3 つの工法が挙げられる。本研究では荷重を支える外壁（耐力壁）の防耐火性能について検討を行うため、メンブレン工法を外壁工法に選定した。

なおメンブレン工法は、主に軽量鉄骨造で採用される外壁工法であり、中小規模の鉄骨造建築物に

多く採用されており、市場性も見込める点も選定の判断材料とした。

表 2-1　鉄骨造の外壁工法

鉄骨造の外壁工法	薄板軽量形鋼造	被覆柱+非耐力壁	メンブレン工法
			
採用される建築物	スチールハウス	重量鉄骨造，軽量鉄骨造	軽量鉄骨造
XPS の特性	活用できる	活用できない	活用できる
用途・規模	住宅に限定	中大規模の建築物が多い	中小規模の建築物が多い

（4）鉄骨造外壁の基本構成・仕様

本研究で開発対象とする鉄骨造外壁の基本構成を図 2-2 に示す。

外壁構成はメンブレン工法、内張断熱工法、できる限り単純な構成の 3 条件から、屋外側から外装材、鉄骨躯体（C 形鋼・鋼管柱）、内張断熱材、内装材の構成とした。屋外側は外装材を C 形鋼に留め付け、屋内側は C 形鋼に内張断熱層下地材を設置し、内装材はこの下地材に留め付けることとした。

1 章で述べた XPS の溶融特性を活かすためには、通常の火災による火熱に曝された場合に、内外装材は容易に着火や防火上有害な損傷が発生せず、防火被覆としての効果が期待できる材料であることが条件となる。この条件を満たし、市場品として流通し入手しやすく、かつ 45 分準耐火性能を実現しうる仕様として、外装材に窯業系サイディング（厚さ 15 ㎜）、内装材に強化せっこうボード（厚さ 15 ㎜）を選定した。内張断熱層の下地材は、既往の工法（図 2-1）を参考に、主に天井下地に使われる建築用鋼製下地材を用いて、外壁の下端から 303 ㎜間隔で配置し、その間に XPS を内張断熱材として設置する。XPS はあわせて鉄骨躯体部の中空層に充填断熱材として設置し、充填・内張の XPS の厚さは必要に応じて自由に設定するとした。

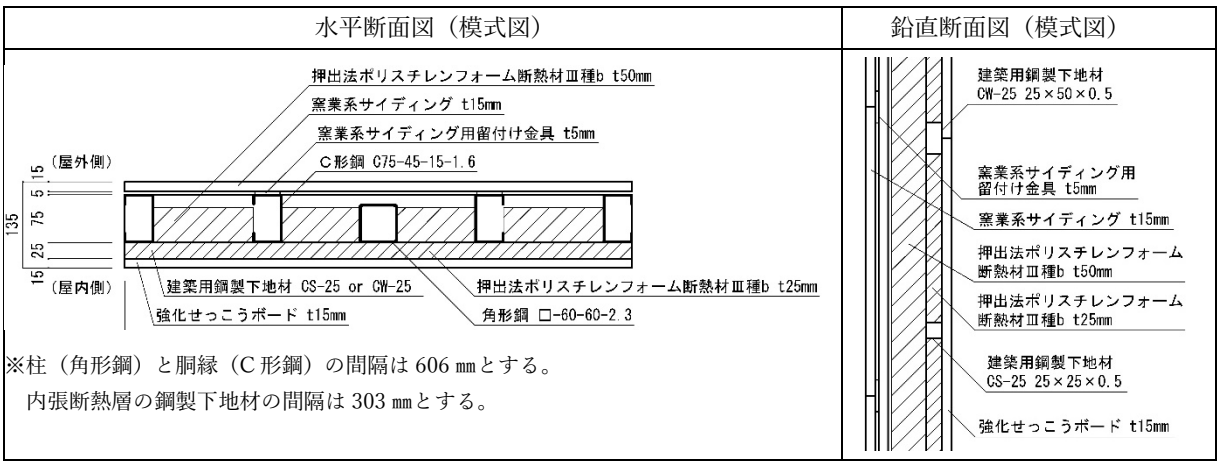


図 2-2　鉄骨造外壁の基本構成

3．断熱材の溶融が鉄骨造外壁の防耐火性能に与える影響の把握

（1）目的・検討方法

XPS を用いた外壁が内外装材を脱落させずに保持した状態で火災加熱を受ける際、外壁内の XPS が溶融することにより、外壁内の温度分布は変化する。この外壁内の温度分布の変化が、鉄骨柱の温度上昇、耐力低下に作用し、防耐火性能に影響を及ぼす。この XPS の溶融に伴う外壁内の温度分布の変化、防耐火性能への影響を見るためには、断熱材がない無断熱の場合、および火災加熱中に断熱材が溶融・燃焼しない RW を用いた場合と比較しながら検討を進める必要がある。

本章では、前章で定めた鉄骨造外壁の基本構成を対象に、小型試験体を用いた火災加熱試験を実施する。そして XPS を用いた場合と無断熱および RW を用いた場合との比較から、外壁内の XPS の溶融が鉄骨造外壁の防耐火性能に与える影響として、鉄骨柱の温度上昇抑制に寄与するのかを把握し、XPS の溶融特性が防耐火性能の向上につながる条件とその手法を明らかにする。

（2）小型試験体

小型試験体の大きさは外寸で幅 800 ㎜×高さ 800 ㎜とし、試験体数は外壁内に設置する断熱材を変えて 4 体とした。試験体仕様の一覧を表 3-1 に、試験体図を図 3-1 および図 3-2 に示す。

小型試験体の層構成は、前章で定めた鉄骨造外壁の基本構成に従った（図 3-1)。角形鋼管柱は□-60-60-2.3 を用いて試験体の中央に配置し、胴縁となる C 形鋼は C-75-45-15-1.6 を用いた。

表 3-1　小型試験体の仕様一覧

試験体仕様	充填断熱材	内張断熱材
1）無断熱	なし	なし
2）XPS 充填・内張	XPS Ⅲ種 bA 50 ㎜	XPS Ⅲ種 bA 25 ㎜
3）RW 充填	RW 30K 以上品 50 ㎜	なし
4）RW 充填・内張	RW 30K 以上品 50 ㎜	RW 40K 25 ㎜

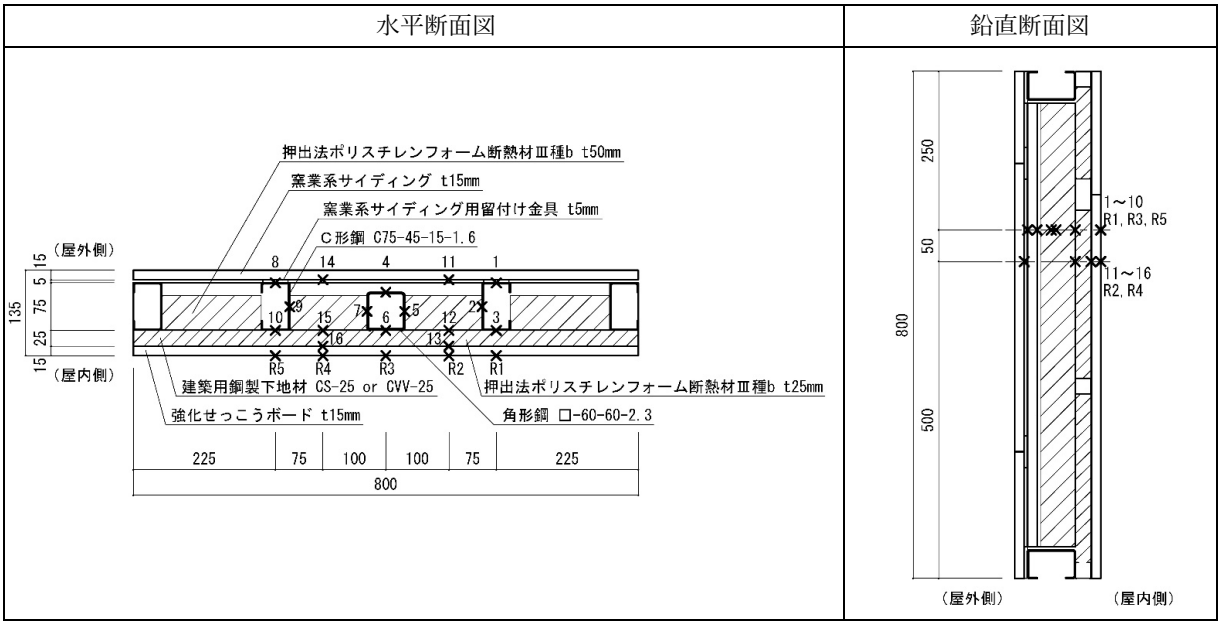


図 3-1　試験体図（例：２）XPS 充填・内張）

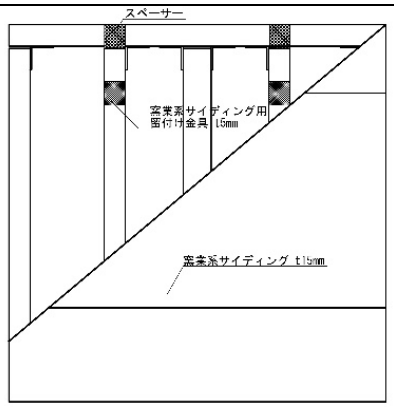
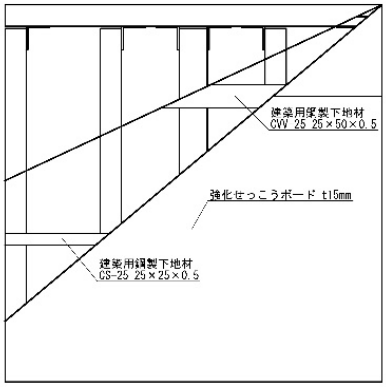
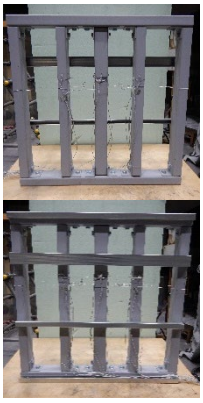
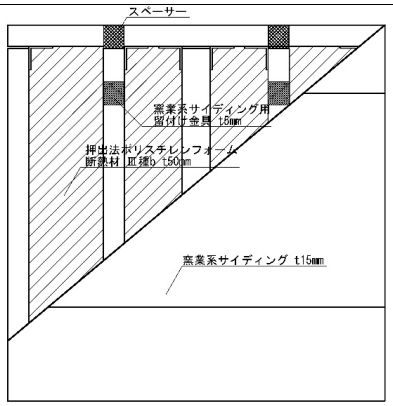
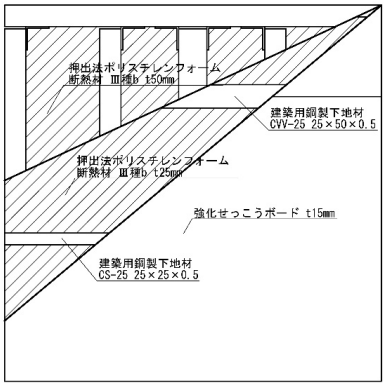
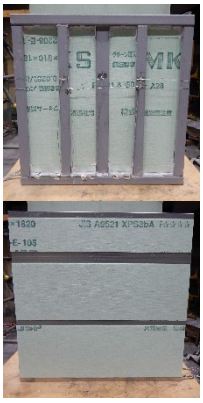
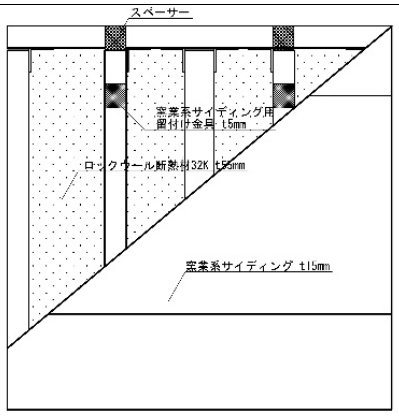
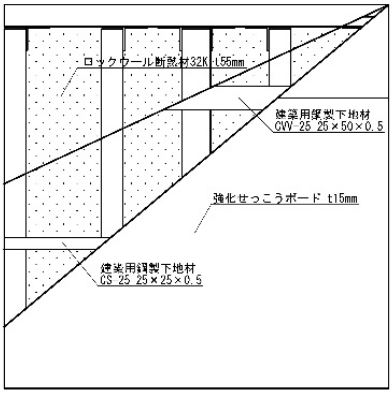
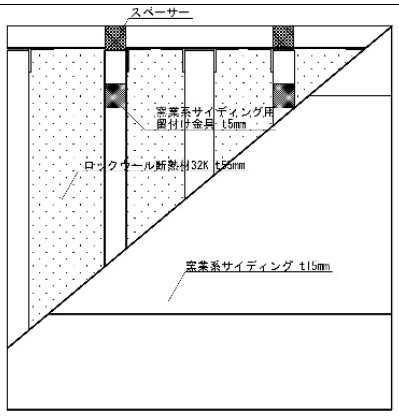
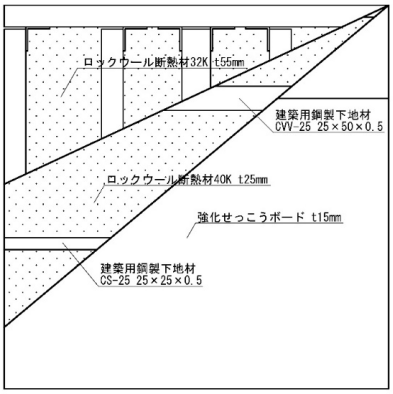
試験体	屋外側構成図	屋内側構成図	上：屋外側，下：屋内側
1） 無断熱			
2） XPS 充填 ・ 内張			
3） RW 充填			
4） RW 充填 ・ 内張			

図 3-2　試験体図（各試験体の構成図と写真）

（３）試験方法

試験は（地独）北海道立総合研究機構 建築研究本部の小型加熱炉（試験体の大きさ：幅 800 ㎜×高さ 800 ㎜、加熱面の大きさ幅 600 ㎜×高さ 600 ㎜）を用いて実施した。加熱条件は屋外側加熱で非載荷とし、ISO834-1 標準加熱曲線に従った加熱を 45 分間行った。炉内温度は K 型シーズ熱電対、試験体の各部温度は K 型熱電対を用いて、ともに 10 秒ごとに測定した。温度測定位置は、試験図（図 3-1）中に示す。



写真 3-1　小型加熱炉

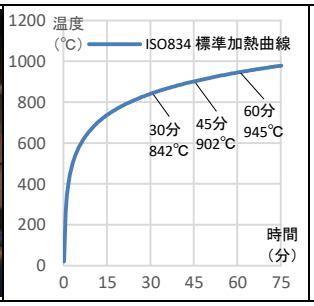


図 3-3　ISO834-1 標準加熱曲線

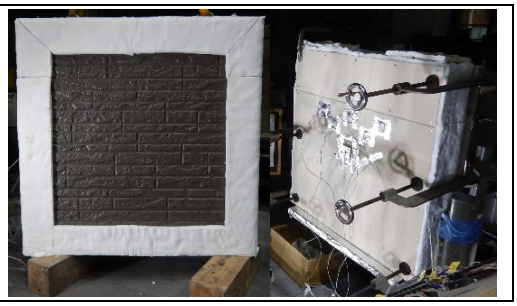


写真 3-2　小型試験体と試験の様子

（４）試験結果・考察

試験結果を図 3-4～図 3-6 に示す。２）XPS 充填・内張の各層温度推移（図 3-5、図 3-6）をみると、加熱開始 17 分頃に内装材表面の温度が急激に上昇しており、この時間帯に XPS が融け抜けて、XPS の断熱性能が喪失したとみられる。鉄骨柱の温度推移（図 3-4）に着目すると、１）無断熱と２）XPS 充填・内張では試験終了までほぼ同じ温度推移となった。内張断熱材を設置せずに XPS 充填のみとした場合も、柱温度推移は２）XPS 充填・内張とほぼ同じになると推定できる。

２）XPS 充填・内張と３）RW 充填では、XPS が融け抜けた以降、３）RW 充填の方が、柱の加熱側（柱表面）では温度が高く推移した。RW では熱ごもりが生じるところ、XPS では溶融して柱の温度上昇を抑制していることが確認できた。一方、柱の非加熱側（柱裏面）では温度が低く推移した。RW による柱側面の被覆効果と非加熱側への放熱の効果が柱裏面の温度上昇を抑制したとみられる。

２）XPS 充填・内張と４）RW 充填・内張では、XPS が融け抜けてから時間が経った 30 分以降に、４）RW 充填・内張の方が、柱の加熱側（柱表面）、柱の非加熱側（柱裏面）ともに温度が高く推移し

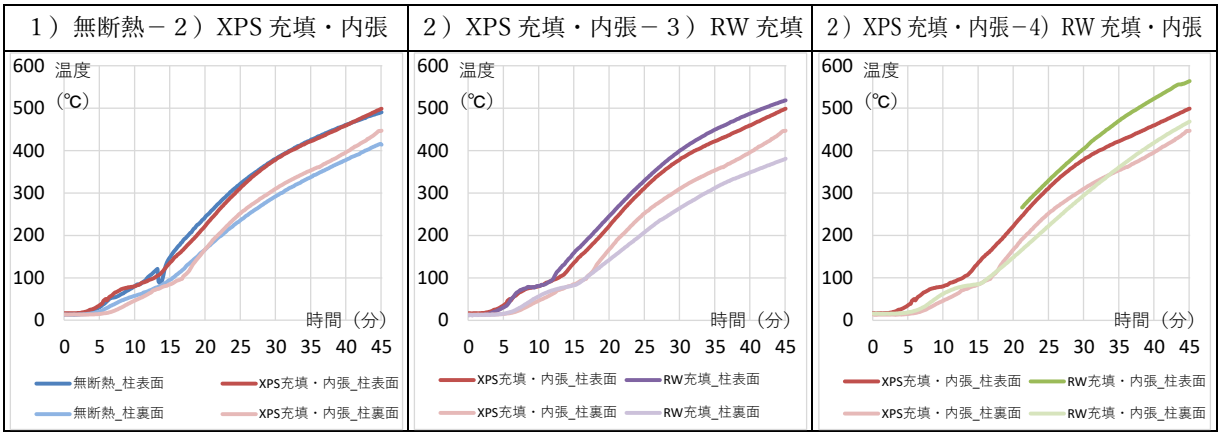


図 3-4　外壁内の鉄骨柱の温度推移の比較

た。４）RW 充填・内張では、屋外側加熱（加熱面）に対し RW が柱の非加熱側に位置する関係にあり、内張 RW が柱の非加熱側への放熱もさらに抑制したことが、３）RW 充填に比べて、さらに柱温度が高く推移した要因と考えられる。

以上の検討より、XPS の溶融による壁内の鉄骨柱の温度上昇抑制効果を確認できた。

この効果は、充填断熱工法の外壁においても確認できるが、加熱面に対し断熱材が柱の非加熱側に位置する場合、即ち、内張断熱工法外壁が屋外側加熱を受ける場合、または外張断熱工法外壁が屋内側加熱を受ける場合により強く発現し、防耐火性能（非損傷性）に対し有利に作用することがわかった。

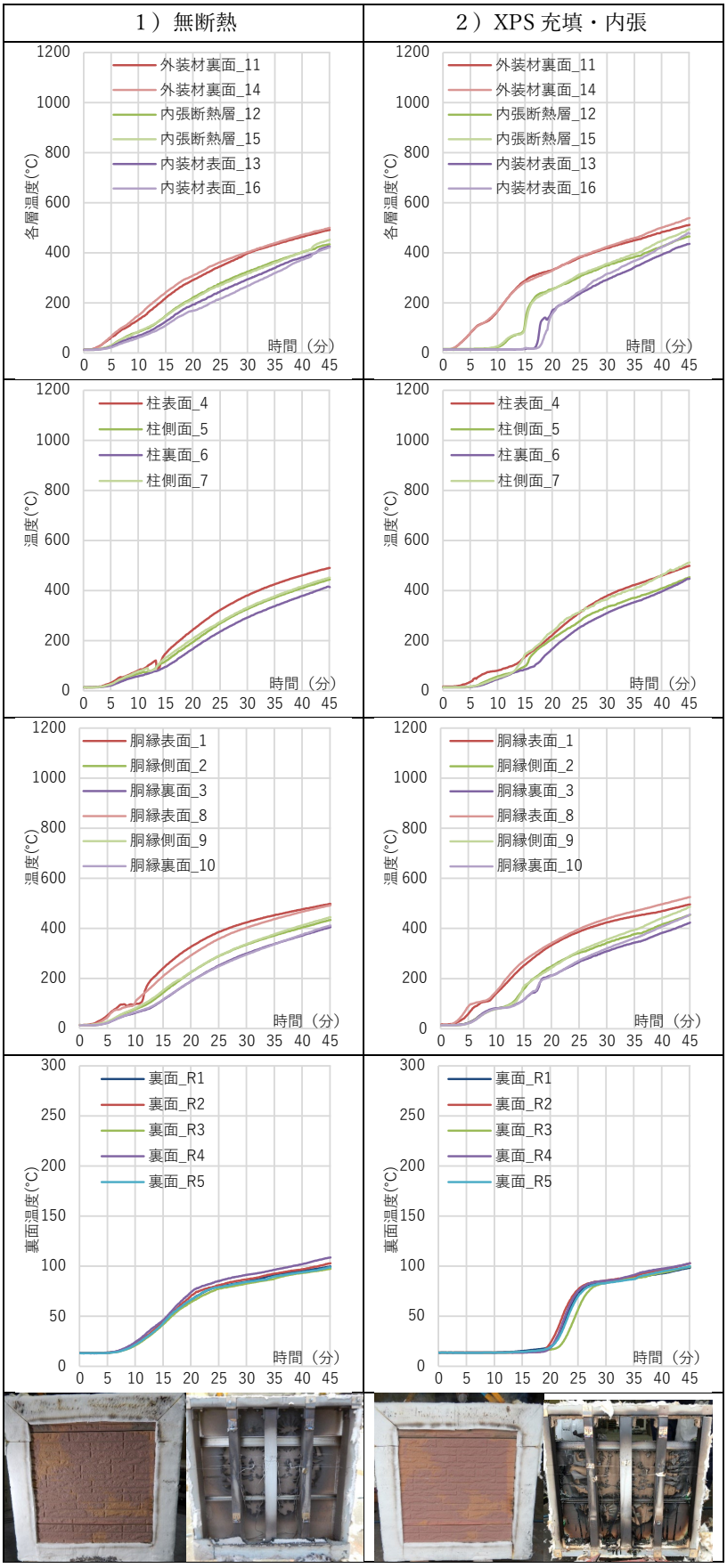


図 3-5　試験結果（無断熱、XPS 充填・内張）

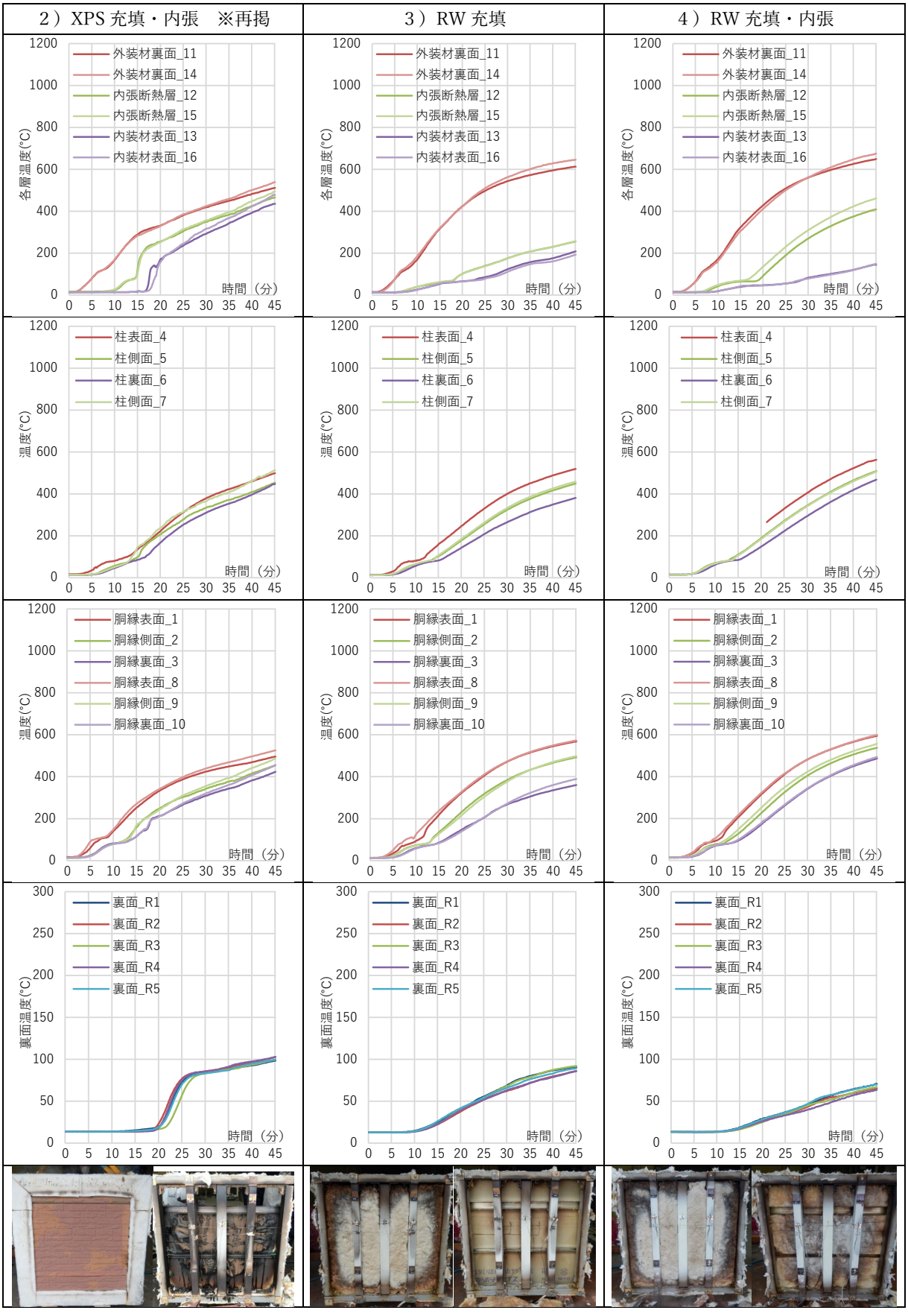


図 3-6　試験結果（XPS 充填・内張、RW 充填、RW 充填・内張）

４．準耐火性能を有する鉄骨造外壁の開発

（１）目的・検討方法

本章では 2 章で定めた鉄骨造外壁の基本構成を対象に、実大試験体を用いた防耐火試験を行って、準耐火性能を有する鉄骨造外壁の構成・各部仕様を明らかにすることを目的とする。

ここで開発目標とする準耐火性能は、建築基準法第 2 条 7 の 2 で定義される準耐火構造の外壁を想定し、建築基準法施行令第 107 条の 2「準耐火性能に関する技術的基準」で規定される性能を指す。

具体には、屋外側および屋内側からの 45 分間の火災加熱に対し、①非損傷性（通常の火災による火熱が加えられた場合に、加熱開始後、構造耐力上支障のある変形、溶融、破壊その他の損傷を生じないこと)、②遮熱性（通常の火災による火熱が加えられた場合に、当該加熱面以外の面（屋内に面するものに限る。）の温度が可燃物燃焼温度以上に上昇しないこと)、③遮炎性（通常の火災による火熱が加えられた場合に、火災を出す原因となるき裂その他の損傷を生じないこと）の３つの性能を満たすことである。なお、②遮熱性は、屋外側加熱のみに求められる性能であり、屋内側加熱では求められていない。従って、ここで目指す準耐火性能は、45 分間の火災加熱に対し、屋外側加熱では①～③の３つが、屋内側加熱では①，③の 2 つが防耐火性能の要求性能となる。

本章では、はじめに予備試験として、2 章で定めた鉄骨造外壁の基本構成・仕様で実大試験体を製作して防耐火試験（屋外側加熱、屋内側加熱）を行う。その結果から、準耐火性能を満たさない場合には、外壁の構成・各部仕様を見直し、あらためて本試験として防耐火試験による性能検証を行い、準耐火性能を有する鉄骨造外壁の構成・各部仕様を明らかにする。

（２）試験方法

実大試験体を用いた防耐火試験は、全国の防耐火構造の性能評価に用いられる「防耐火性能試験・評価業務方法書」[6)]に定めた「準耐火性能試験方法」に基づいて実施した。

（地独）北海道立総合研究機構 建築研究本部の壁炉（写真 4-1）を用い、試験体（幅 W3,240×高さ H3,230）に対し、荷重支持部材である壁内柱に長期許容応力度に相当する応力度が生じる荷重を載荷しながら、ISO834-1 標準加熱曲線に合うように加熱した。加熱時間は 45 分間とし、柱が荷重支持能力もしくは外壁が遮炎性を失い、試験続行が危険と判断された場合はその時点で加熱を止めて試験を終了した。炉内温度は K 型シーズ熱電対、試験体の各部温度は K 型熱電対を用いて、ともに 10 秒ごとに測定した。



写真 4-1　壁炉

温度測定位置は、各試験体の試験体図中に示す。あわせて水平変位を試験体中央で高さ 800 ㎜、1,600 ㎜、2,400 ㎜の位置で計 3 点、鉛直変位を試験体中央と試験体中央から左右に 600 ㎜の位置で計 3 点をそれぞれ測定した。

（3）予備試験による性能確認

2章で定めた鉄骨造外壁の基本構成・仕様がもつ防耐火性能を把握するため、予備試験として実大試験体を製作して、防耐火試験（屋外側加熱、屋内側加熱）を行う。

1）実大試験体

試験体（幅 W3,240×高さ H3,230）の詳細を図 4-1 に示す。試験体の構成は、屋外側から、外装材（窯業系サイディング厚さ 15 ㎜・金具留め）、充填断熱材（XPS 厚さ 55 ㎜、屋内側配置）[柱（角形鋼管柱□-60-60-2.3）、胴縁（C 形鋼 C-75-45-15-1.6）]、内張断熱材（XPS 厚さ 20 ㎜）[内張断熱層下地材（建築用鋼製下地材）]、内装材（強化せっこうボード厚さ 15 ㎜）とした。

【構造名】
押出法ポリスチレンフォーム断熱材充てん／窯業系サイディング表張／強化せっこうボード・押出法ポリスチレンフォーム断熱材裏張／軽量鉄骨造外壁

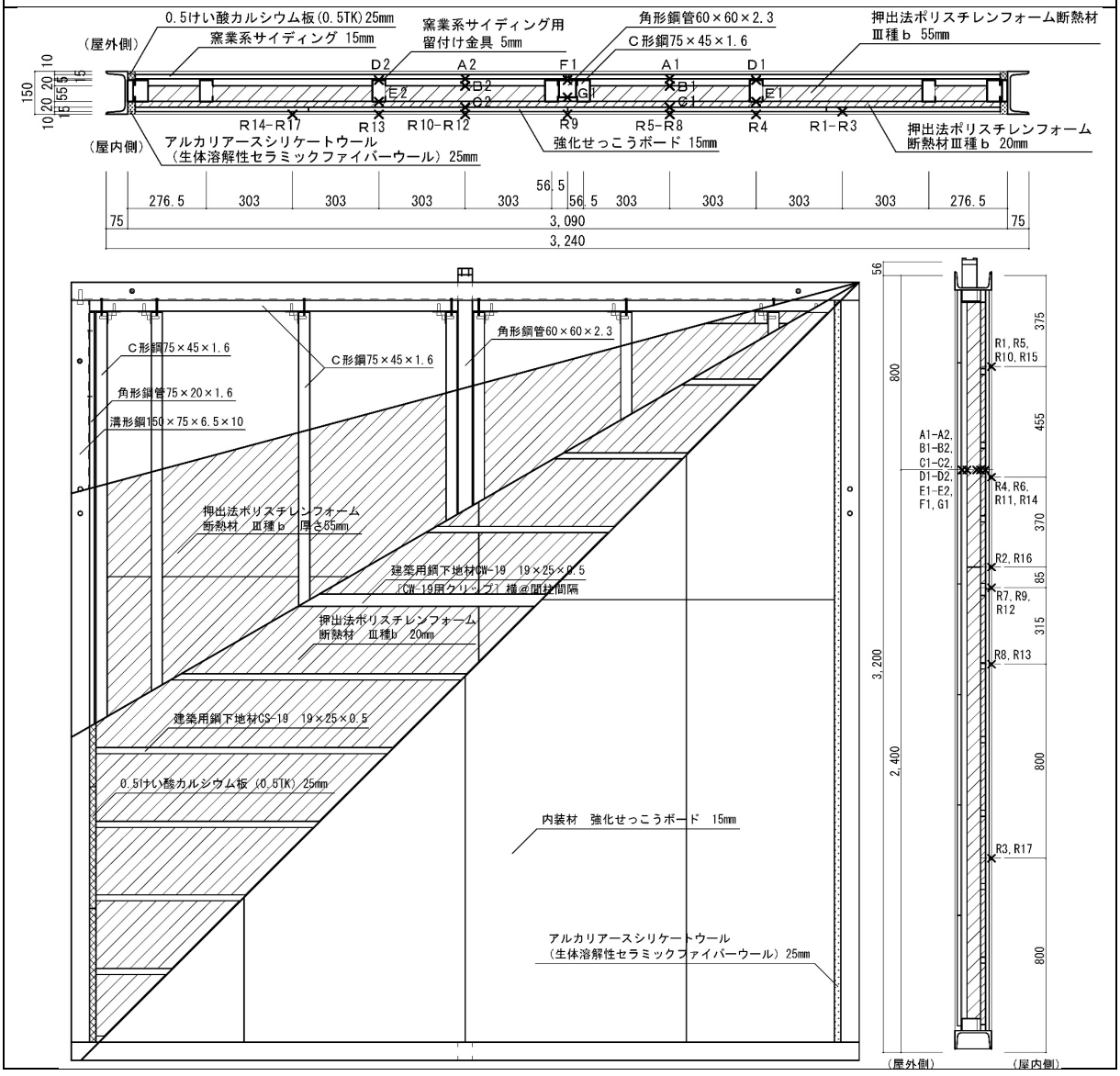


図 4-1　予備試験・試験体図

２）屋外側加熱の試験結果・考察

屋外側加熱の試験結果を図 4-2 に示す。加熱開始後 18 分 50 秒に内装材目地部において裏面温度上昇度が規定値を超えて遮熱性を喪失した。準耐火構造の要求性能である 45 分には及ばなかった。

試験終了後の試験体の観察より、鋼管柱が加熱側（炉内側）へ大きく変形していた。この鋼管柱の変形が加熱側の外装材を裏から押し上げたとみられる。外装材は加熱時間が短かったこともあり、脱落は生じなかったが、目地の開きが大きくなった。また内装材の目地部はパテ処理や裏当て材がないため、XPS が溶融した後、加熱に曝されて目地部が開いたとみられる。この内外装材の目地の開き、熱の貫通が、遮熱性の早期喪失につながったと考えられる。

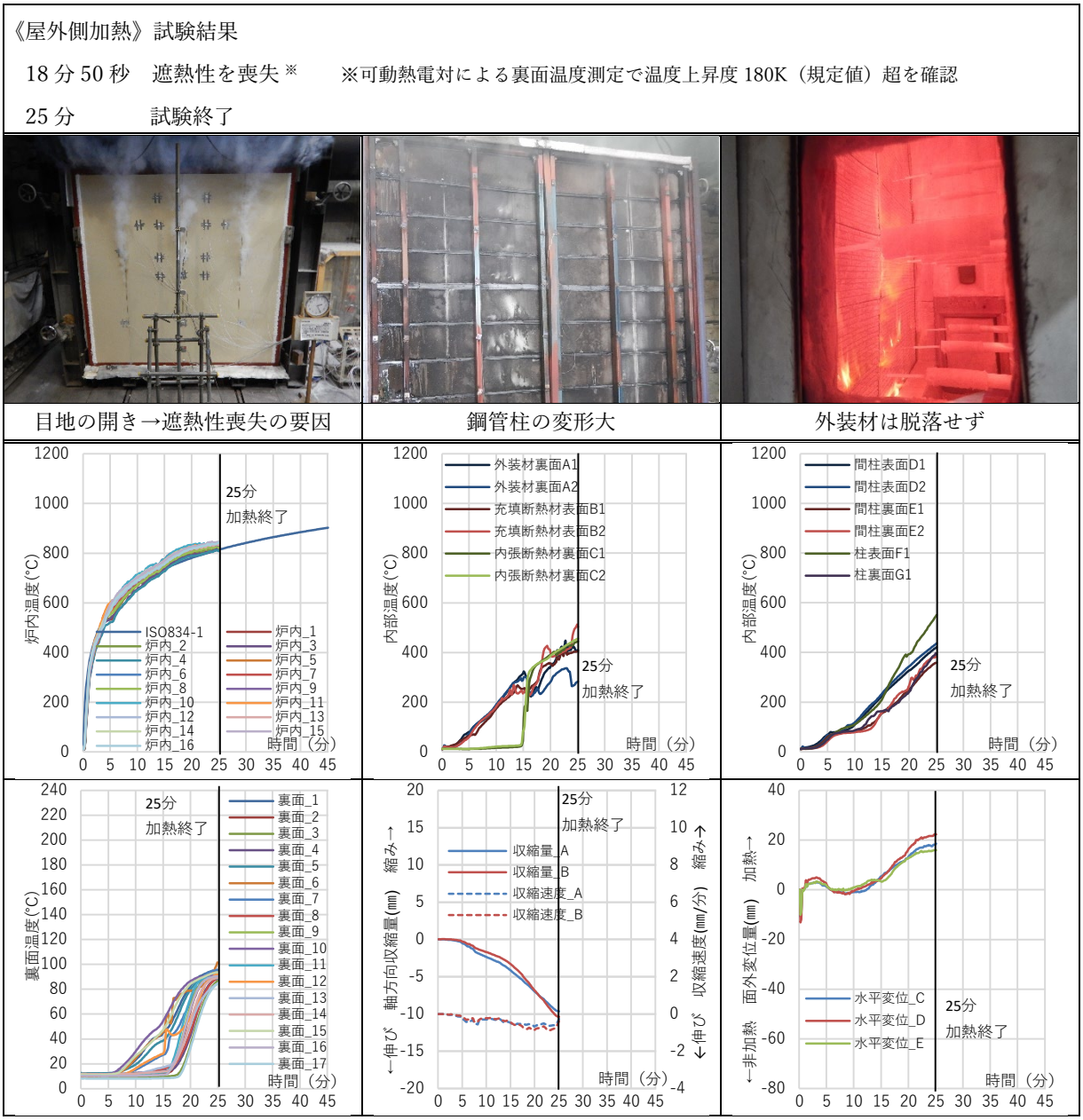


図 4-2　予備試験：屋外側加熱の結果

3）屋内側加熱の試験結果・考察

屋外側加熱の試験結果を図 4-3 に示す。加熱開始後 32 分に内装材目地部から炉内の炎が確認され、遮炎性を喪失し、続いて 36 分 40 秒に鋼管柱が座屈して非損傷性を喪失した。準耐火構造の要求性能である 45 分には及ばなかった。

試験終了後の試験体の観察より、屋外側加熱と同様、鋼管柱が加熱側（炉内側）へ大きく変形していた。この鋼管柱の変形が加熱側の内装材を裏から押し上げたとみられる。この押し上げに対し、内張断熱層の鋼製下地も変形しており、内装材を面的に保持しきれなかった。また 25 分 50 秒に鋼管柱の温度が 500℃超を超えており、鋼管柱の変形以前に、屋内側の被覆（内装材の性能）が圧倒的に不足していた。さらに非加熱側の屋外側の被覆が、窯業系サイディングだけであり目地部を通じた遮炎性の喪失につながりやすい。以上の点が要因として挙げられる。

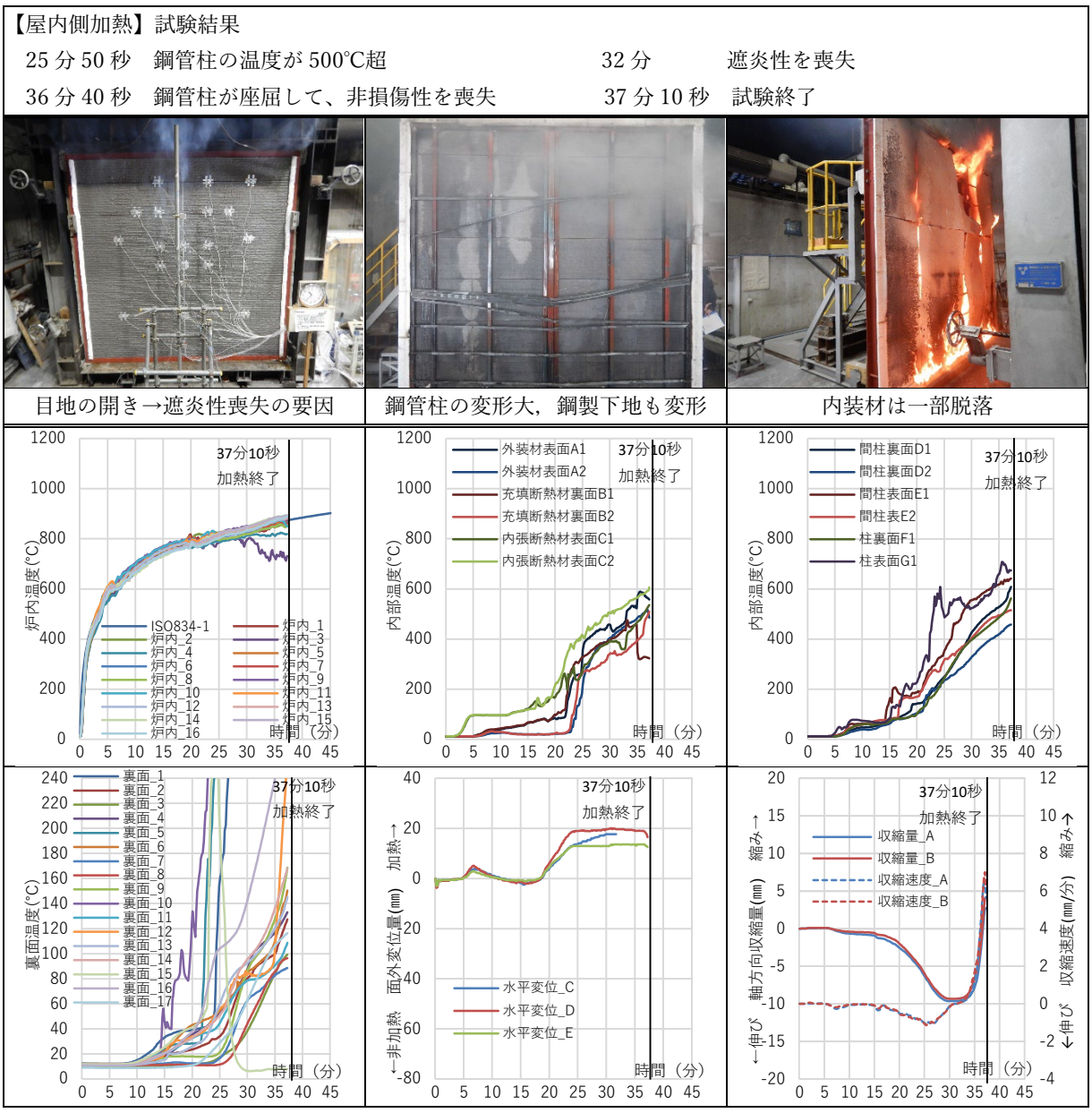


図 4-3　予備試験：屋内側加熱の結果

（4）鉄骨造外壁の基本構成・仕様の見直し

この予備試験の結果を受けて、2 章で定めた鉄骨造外壁の基本構成・仕様に対し、準耐火性能を付与するために構成・仕様の見直しを行った。見直しにより修正した点を表 4-1 に示す。

予備試験では、屋外側加熱、屋内側加熱ともに、加熱側となる屋外側・屋内側の被覆（外装材・内装材の性能）が圧倒的に不足していた。そのため XPS の溶融特性を見る以前に、鉄骨柱の温度が高くなり、大きく変形する要因となったと考えらえる。

そこで被覆材の補強策として、屋外側被覆では外装材と鉄骨躯体の間に新たな面材として厚さ 12 ㎜の構造用合板を追加した。屋内側被覆の補強策は、内張断熱層下地材を鋼製から木製にして下地材の変形を抑制するとともに、内装材である強化せっこうボードの厚さを 15 ㎜から 21 ㎜に厚くした。

また外装材（屋外側）および内装材（屋内側）の目地開きに対しても、被覆材の補強策である屋外側の構造用合板の追加、屋内側の内張断熱層下地材の木質化は効果があると考えられるが、さらなる目地開きへの対応策として、内装材の目地処理を追加した。

表 4-1　鉄骨造外壁の基本構成・仕様の見直し

	予備試験における構成・仕様	見直しにより修正した構成・仕様
屋外側被覆	外装材：窯業系サイディング（厚さ 15 ㎜） 構造用面材：なし	外装材：窯業系サイディング（厚さ 15 ㎜） 面材：構造用合板（厚さ 12 ㎜）
屋内側被覆	内装材：強化せっこうボード（厚さ 15 ㎜） 内装材目地処理：なし 内張断熱層下地材：鋼製下地材（厚さ 20 ㎜）	内装材：強化せっこうボード（厚さ 21 ㎜） 内装材目地処理：ガラスクロステープ+パテ 内張断熱層下地材：木製下地材（厚さ 30 ㎜）

（5）本試験による性能検証

4．（3）の予備試験の結果、4．（4）の鉄骨造外壁の基本構成・仕様の見直しを受けて、本試験として実大試験体を製作して、防耐火試験（屋外側加熱、屋内側加熱）を行う。

1）実大試験体

試験体（幅 W3,240×高さ H3,230）の詳細を図 4-4 に示す。試験体の構成は、屋外側から、外装材（窯業系サイディング厚さ 15 ㎜・金具留め)、防水シート（透湿防水シート)、面材（構造用合板 12 ㎜)、充填断熱材（XPS 厚さ 55 ㎜、屋内側配置）[柱（角形鋼管柱□-60-60-2.3)、胴縁（C 形鋼 C-75-45-15-1.6）]、内張断熱材（XPS 厚さ 30 ㎜）[内張断熱層下地材（木製下地材）]、内装材（強化せっこうボード厚さ 21 ㎜）とした。

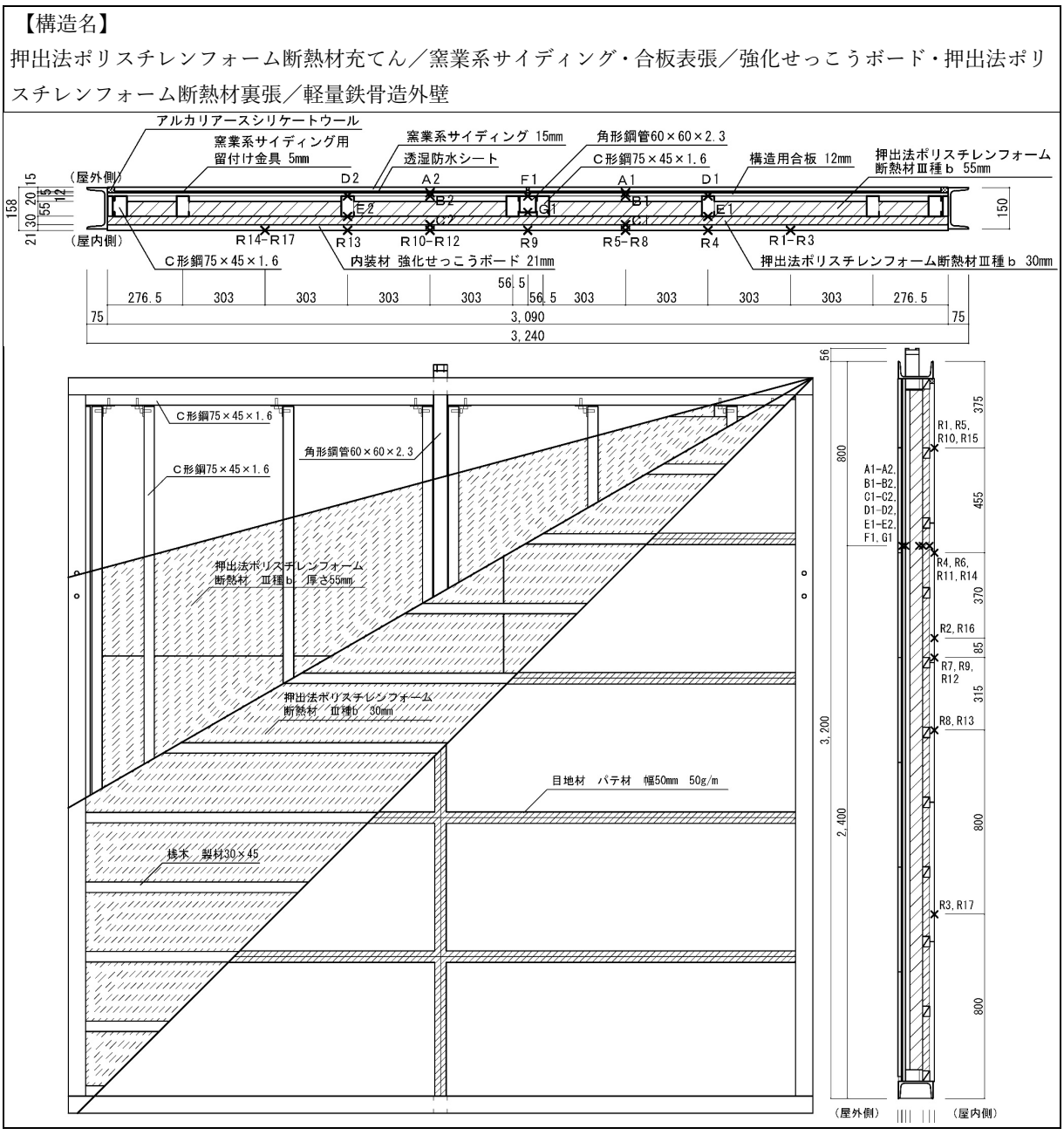


図 4-4　本試験・試験体図

２）屋外側加熱の試験結果・考察

屋外側加熱の試験結果を図 4-5 に示す。45 分間の火災加熱に対し、遮炎性、遮熱性、非損傷性いずれも喪失せず、準耐火構造の要求性能を満足した。

予備試験結果（図 4-2）に比べて、構造用合板により鋼管柱への熱流入を抑制し、軸方向収縮量および面外変位量を小さく抑えることができ、目地開きを防止した点が性能向上につながったと考えられる。但し、試験終了後の試験体の観察により確認された鋼管柱の加熱側（炉内側）の変形量から、準耐火構造の要求性能を満足したものの、性能的な余裕度はあまりなかったと推察される。

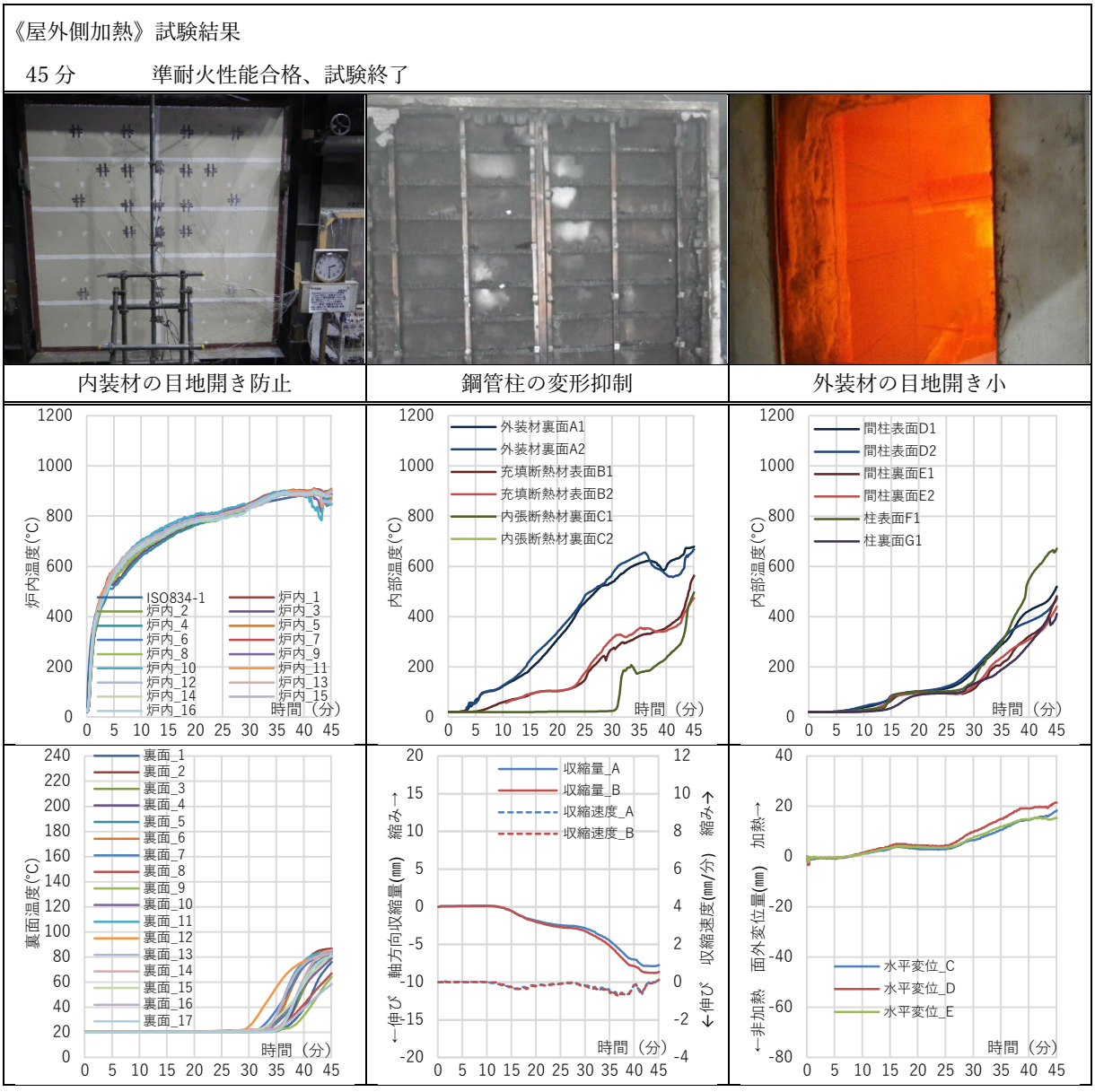


図 4-5　本試験：屋外側加熱の結果

３）屋内側加熱の試験結果・考察

屋内側加熱の試験結果を図 4-6 に示す。屋外側加熱と同じく 45 分間の火災加熱に対し、遮炎性、遮熱性、非損傷性いずれも喪失せず、準耐火構造の要求性能を満足した。

強化せっこうボードを 15 ㎜から 21 ㎜にすることで、屋内側被覆の性能は格段に向上した。予備試験結果（図 4-3）に比べて鋼管柱への熱流入を抑制し、軸方向収縮量および面外変位量を小さく抑えることができた。

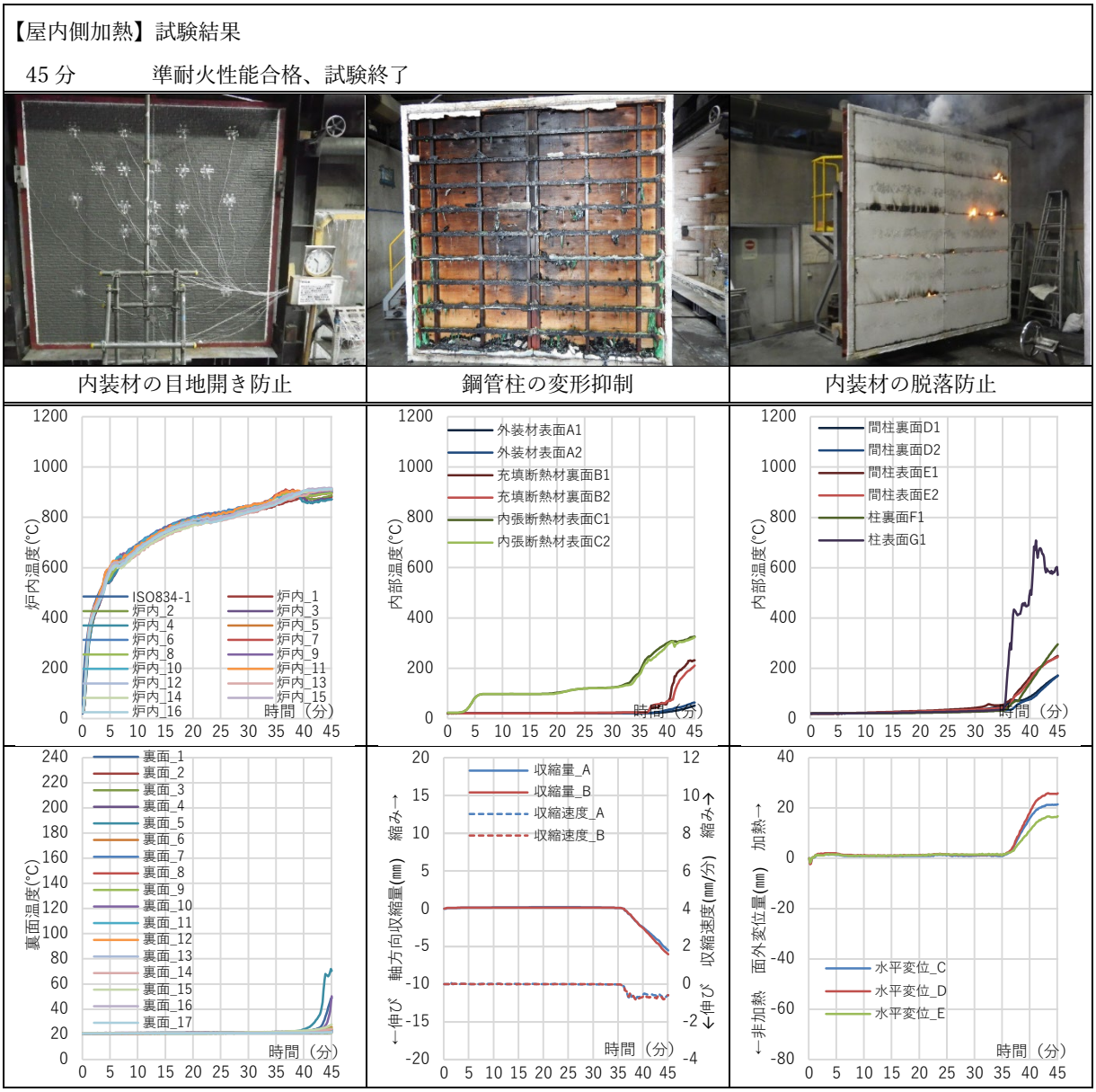


図 4-6　本試験：屋内側加熱の結果

以上より、見直しを行い修正した基本構成・仕様により、屋外側加熱および屋内側加熱ともに準耐火構造の要求性能を満足できることを確認した。

よって、準耐火性能を有する鉄骨造外壁の構成・各部仕様を明らかにできた。

5．断熱材の溶融が防耐火性能に与える影響の実大試験検証

（1）目的・検討方法

第 3 章において、小型試験体を用いた実験的検討により確認された XPS の溶融による壁内の鉄骨柱の温度上昇抑制効果が、実大試験でも同様に作用しているのか検証する。

具体には、第 4 章で準耐火性能を満足することが確認された開発外壁（以下、XPS 外壁とする）から、充填断熱材および内張断熱材の XPS をすべて RW に置き換えた外壁（以下、RW 外壁とする）の実大試験体を 1 体製作して、防耐火試験を実施する。加熱方向は加熱面に対し内張断熱材が柱の非加熱側に位置する屋外側加熱とする。その試験結果から、XPS 外壁と RW 外壁で比較し、外壁内の XPS の溶融が鉄骨造外壁の防耐火性能に与える影響として、鉄骨柱の温度上昇抑制に寄与しているのか検討する。

（2）試験方法

試験方法はすべて、4 章（2）に示す試験方法に揃えた。

（3）実大試験体

RW 外壁の試験体（幅 W3,240×高さ H3,230）の詳細を図 5-1 に示す。

試験体の構成は、屋外側から、外装材（窯業系サイディング厚さ 15 ㎜・金具留め）、充填断熱材（RW 密度 40kg/m^3、厚さ 50 ㎜、屋内側配置）[柱（角形鋼管柱□-60-60-2.3）、胴縁（C 形鋼 C-75-45-15-1.6）]、内張断熱材（RW 密度 40kg/m^3、厚さ 25 ㎜）[内張断熱層下地材（建築用鋼製下地材）]、内装材（強化せっこうボード厚さ 15 ㎜）とした。

なお開発外壁では充填断熱材 XPS 厚さ 55 ㎜としたが、本試験体では RW 密度 30kg/m^3、厚さ 55 ㎜は幅寸法が足らず施工できなかったため、RW 密度 40kg/m^3、厚さ 50 ㎜を用いた。

【構造名】
ロックウール断熱材充てん／窯業系サイディング表張／強化せっこうボード・ロックウール断熱材裏張／軽量鉄骨造外壁

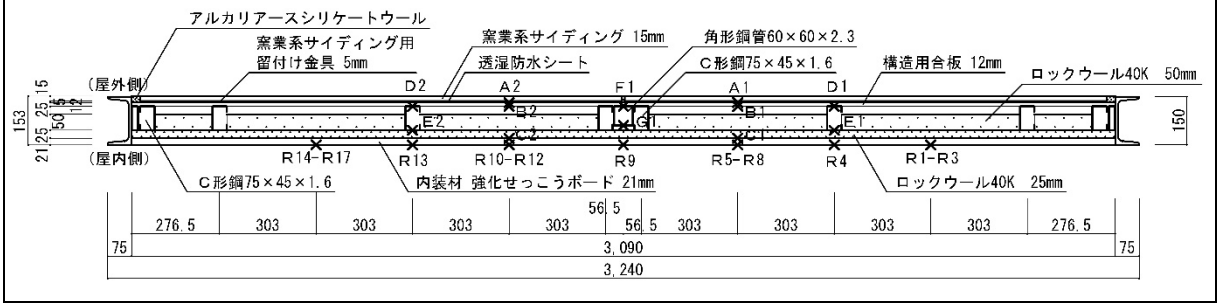


図 5-1　RW 外壁・試験体図

（４）試験結果・考察

RW 外壁の試験結果を図 5-2 に示す。45 分間の火災加熱に対し、遮炎性、遮熱性、非損傷性いずれも喪失せず、準耐火構造の要求性能を満足した。

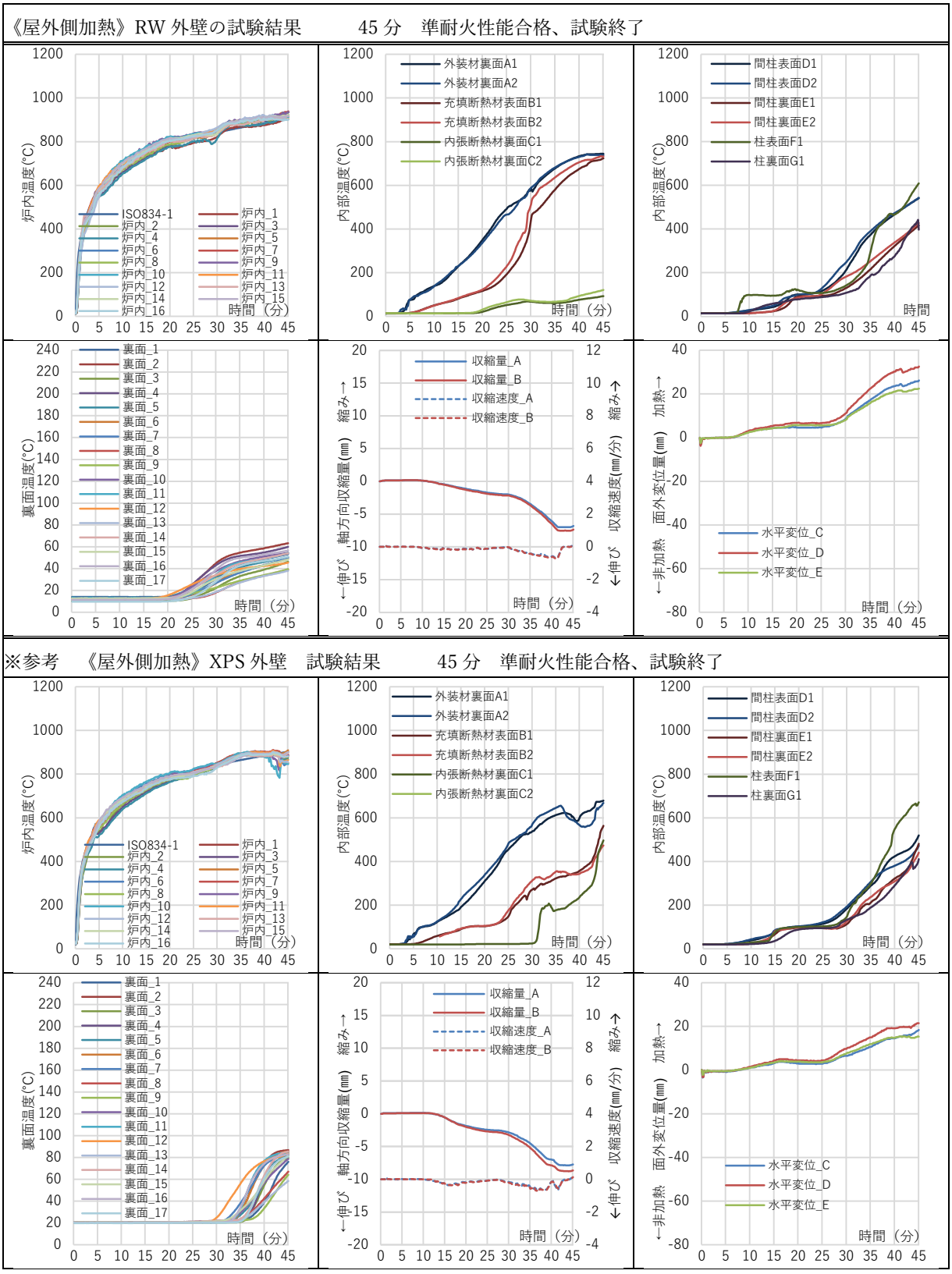


図 5-2　RW 外壁：屋外側加熱の結果

各層の温度推移を比べると、XPS 外壁では、加熱開始 30 分頃に内装材表面の温度が急激に上昇しており、この時間帯に XPS が融け抜けて、XPS の断熱性能が喪失したとみられる。それ以降、RW 外壁では各層の温度推移は高く上昇していくが、XPS 外壁の温度推移は上昇していない。

この点を胴縁の加熱側（胴縁表面）でみると胴縁表面では加熱開始 30 分以降、RW 外壁の方が XPS 外壁より温度が高く推移しており、同様の傾向が確認できる。しかし鋼管柱の加熱面側（柱表面)、非加熱面側（柱裏面）ともに、RW 外壁と XPS 外壁ではあまり温度推移に違いは見られなかった。

従って、3 章の小型試験体の検討で見られた RW の熱ごもりの影響は、胴縁には作用しているが鋼管柱には作用していないとみられる。この点は、鋼管柱の鉛直変位が反映される軸方向収縮量では、RW 外壁と XPS 外壁ではほとんど差がみられないのに対し、胴縁の面外変位が反映される面外方向変位量は RW 外壁の方が XPS 外壁よりも大きい点と合致する。この時、面外変位は直接、荷重とは関係しないが、RW 壁体は熱ごもりによる胴縁の加熱側（胴縁表面）の温度上昇により、胴縁の非加熱側（胴縁裏面）との温度差が XPS 外壁より大きくなったため、変位量も大きくなったと考えられる。

今回、実大試験体製作にあたり、準耐火構造の大臣認定取得のため、性能評価試験に使用される試験体の構成に従った。その際、鋼管柱は中央に配置し、胴縁が鋼管柱の両脇に並べる形で配置された。今回の試験体仕様では、鋼管柱と断熱材（XPS,RW）は接していないが、胴縁は断熱材と接している。

この位置関係も大きく影響を及ぼして、断熱材（RW）熱ごもりの影響、つまりは XPS の溶融特性が鉄骨柱の温度上昇抑制効果は、断熱材が接する鉄骨柱（胴縁）に限られたと考えられる。

また、今回、XPS が融け抜けて、XPS の断熱性能が喪失した時間は、加熱開始 30 分頃であり、小型試験体の加熱開始 17 分頃に比べて遅かった。これは準耐火性能を満たすために屋外側被覆を補強したためである。XPS の溶融特性が表れるようになるのは、XPS が融け抜けた以降であり、45 分の加熱時間に対して、XPS の溶融特性が発現する時間帯は極めて限られていたといえる。

そのため、XPS 外壁との温度差から見る RW 外壁の熱ごもりの影響は小さくなったと考えられる。裏返せば、XPS 外壁において、XPS の溶融特性が鉄骨柱の温度上昇抑制に寄与できる程度も小さくなったといえる。

以上より、実大試験体を用いた検証では、XPS の溶融特性が鉄骨柱の温度上昇抑制の効果は見られた。しかし、その効果は断熱材が接する鉄骨柱に限られることがわかった。

6．開発外壁の断熱性能の検討

（1）目的・検討方法

本章では、前章で開発した鉄骨造外壁（図 6-1）を対象に、充填断熱材および内張断熱材の厚さと外壁の熱貫流率との関係性を明らかにする。

検討方法は計算ソフト「INSYS 伝熱･結露計算シリーズ 2 次元伝熱･結露計算システム（Ver.3.1.0）」を用いて、二次元伝熱計算法により熱貫流率を算出する。

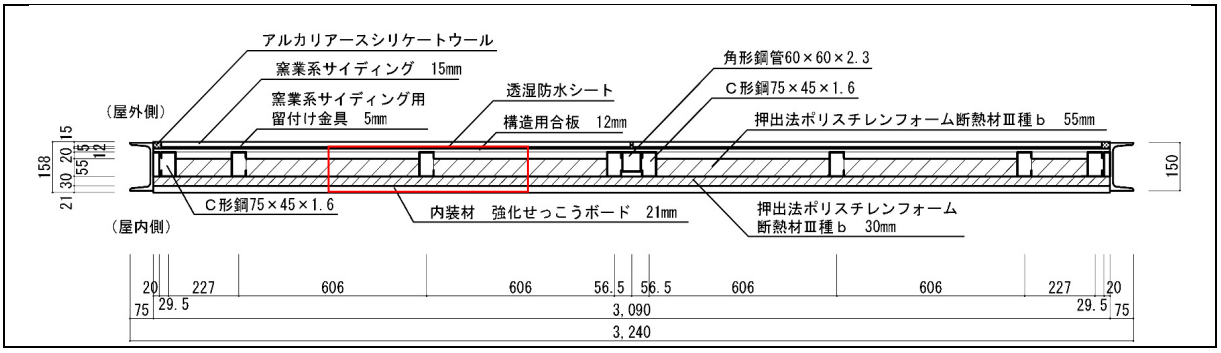


図 6-1　前章で開発した準耐火性能を持つ XPS を用いた鉄骨造外壁

（2）計算モデル・計算方法

1）二次元伝熱計算モデル

計算対象とする二次元伝熱計算モデル（図 6-2）は、図 6-1 に示す外壁の一般部位（柱及び梁の構造

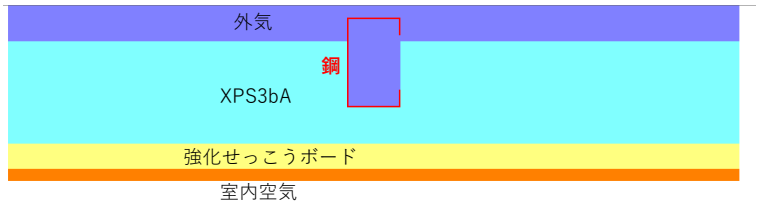


図 6-2　二次元伝熱計算モデル

表 6-1　各材料の熱伝導率

構成材料	熱伝導率(W/(m･K))	出典
構造用合板	0.16	文献 7)
天然木材	0.12	文献 7)
XPS3bA	0.028	JIS A 9521:2022
強化せっこうボード（GB-F）	0.241	文献 7)
鋼	55	文献 7)

表 6-2　表面熱伝達抵抗

層	熱抵抗(m^2･K/W)	出典
室内側総合熱伝達抵抗	0.11	文献 7)
室外側総合熱伝達抵抗（通気層等）	0.11	文献 7)

熱橋の影響を受けない部分、図 6-1 中の赤枠部）を対象とした（計算モデル A とする）。充填断熱層は水平方向 606 ㎜間隔で C 形鋼が設置され、内張断熱層は鉛直方向 303 ㎜間隔で幅 45 ㎜の木材が設置されるとした。各材料の熱伝導率は表 5-1、表面熱伝達抵抗を表 6-2 に示す。

また境界条件は外気温 0℃、室温 20℃と設定した。なお、物性値に温度依存性を与えないため、温度設定は熱貫流率に影響しない。空気層（厚さ 20 ㎜）は外気と連通するため熱抵抗値を 0 とし、空気層（外気）より室外側の建材の熱抵抗値を 0 とした[7)]。

さらに計算モデル A から内張断熱材を木材に置き換えたモデルを、別途、計算モデル B とした。

２）二次元伝熱計算の方法

計算は、計算ソフト「INSYS 伝熱・結露計算シリーズ 2 次元伝熱・結露計算システム（Ver.3.1.0)」を用いて、二次元伝熱計算法により、計算モデル A および計算モデル B の熱流量 (W/m) を算定した。なお計算ソフトは、事前に ISO 10211:2017 Annex C Case 2[8)]の例題で十分な精度が得られることを確認している。

内張断熱材および充填断熱材の厚さをそれぞれ計算パラメータとした。

内張断熱材は計算モデル A では XPS3bA、計算モデル B では木材とし、厚さを 30 ㎜, 45 ㎜, 75 ㎜, 100 ㎜の 4 段階とした。充填断熱材は計算モデル A, B 共通で XPS3bA とし、厚さを 55 ㎜, 75 ㎜の 2 段階とした。これらすべてのパラメータの組合せに対して、熱流量（W/m）を算定した。

そして、これら算定した熱流量 (W/m) を室内外温度差 (20 K)、計算モデルの水平長さ (0.606 m) で除した値を、計算モデル A または計算モデル B の熱貫流率（W/(m²･K)）とした。

次に、住宅省エネルギー基準における木造壁体の計算法[7)]を参考に、内張断熱部（計算モデル A）と内装下地木材（計算モデル B）の面積比率で重み付け平均して、求める開発外壁の熱貫流率とした。

（３）熱貫流率の計算結果

温度分布の算定結果の一例として、充填断熱材の厚さ 55 ㎜、内張断熱材の厚さ 30 ㎜の結果を図 6-3 に示す。

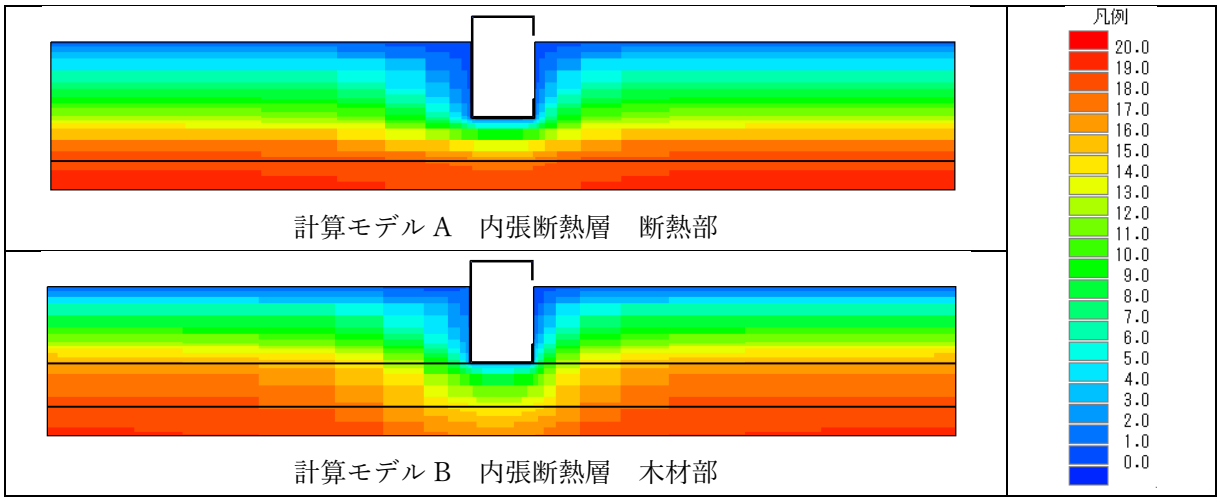


図 6-3　温度分布（充填断熱材の厚さ 55 ㎜，内張断熱材の厚さ 30 ㎜の例）

充填断熱材の厚さを 55 ㎜とした時の内張断熱材の厚さに応じた開発外壁の熱貫流率を表 6-3 に示す。内張断熱材の厚さを 30 ㎜とした時の充填断熱材の厚さに応じた開発外壁の熱貫流率を表 6-4 に示す。

熱貫流率には充填断熱材の厚さよりも内張断熱材の厚さの方が大きく寄与する。熱貫流率の値は、充填断熱材の厚さを 55 ㎜から 75 ㎜にすることで 0.04W/(m²･K)低減されるのに対し、内張断熱材の厚さを 30 ㎜から 45 ㎜にすることで 0.07W/(m²･K)低減された。

表 6-3　内張断熱材の厚さと 熱貫流率の関係（充填断熱材の厚さ 55 ㎜）

		A. 内張 断熱部	B. 内張下地 木材部	C. AとBの面積比率 から一般部全体の 熱貫流率を計算	D. 熱貫流 抵抗 (m²･K/W)
内張断熱 30mm	① 熱流量（計算結果）(W/m)	4.46	7.82	-	-
	② ①から換算した一般部位の熱貫流率 U (W/(m²･K))	0.37	0.65	**0.41**	2.44
内張断熱 45mm	① 熱流量（計算結果）(W/m)	3.68	7.08	-	-
	② ①から換算した一般部位の熱貫流率 U (W/(m²･K))	0.30	0.58	**0.34**	2.90
内張断熱 75mm	① 熱流量（計算結果）(W/m)	2.75	6.06	-	-
	② ①から換算した一般部位の熱貫流率 U (W/(m²･K))	0.23	0.50	**0.27**	3.74
内張断熱 100mm	① 熱流量（計算結果）(W/m)	2.28	5.45	-	-
	② ①から換算した一般部位の熱貫流率 U (W/(m²･K))	0.19	0.45	**0.23**	4.40

表 6-4　充填断熱材の厚さと熱貫流率の関係（内張断熱材の厚さ 30 ㎜）

		A. 内張 断熱部	B. 内張下地 木材部	C. AとBの面積比率 から一般部全体の 熱貫流率を計算	D. 熱貫流 抵抗 (m²･K/W)
充填断熱 55mm	① 熱流量（計算結果）(W/m)	4.46	7.82	-	-
	② ①から換算した一般部位の熱貫流率 U (W/(m²･K))	0.37	0.65	**0.41**	2.44
充填断熱 75mm	① 熱流量（計算結果）(W/m)	3.98	7.01	-	-
	② ①から換算した一般部位の熱貫流率 U (W/(m²･K))	0.33	0.58	**0.37**	2.73

（4）防露性能への考察

図 6-3 に示した算定結果の一例において、室内側表面温度が最も低くなる内張断熱層が木材部となる位置の中央で 16.7℃であった。室内の相対湿度を 60%と仮定した場合に表面結露が発生する露点温度（12.0 ℃）まで温度は低くなっていない。図 6-3 に示す算定結果は、充填断熱材の厚さが 55 ㎜、内張断熱材の厚さが 30 ㎜と最も断熱材が薄い場合の組合せである。よって、開発外壁において表面結露が発生しないと考えられる。

内部結露については、屋内側被覆は内装材に加えて内張断熱材が設置されており透湿抵抗は高い状態にある。この状態で透湿抵抗が足らない場合は、内張断熱材と内装材の間に防湿シートを必要に応じて設置することもできるため、十分な透湿抵抗を確保することは可能である。

7．まとめ

本研究では、外壁内に設置された押出法ポリスチレンフォーム断熱材は、火災加熱時、外壁内への火炎侵入がなければ、燃焼せずに溶融する特性に着目して、この特性を鉄骨造外壁に適用した際の防耐火性能に与える影響の把握および、この押出法ポリスチレンフォーム断熱材の溶融特性を活かした高い断熱性を持つ鉄骨造準耐火外壁の開発に取り組んだ。

以下、各章の検討で、次の結論を得た。

第 2 章では、準耐火構造外壁の開発対象とする鉄骨造外壁の基本構成を検討し、次の点から、外壁はメンブレン型の構成とし、断熱工法は充填断熱工法と内張断熱工法の併用工法を採用した。

・押出法ポリスチレンフォーム断熱材の溶融により、壁内の鉄骨柱の温度上昇を抑制する効果を最大限活かせる。
・内装材・内張断熱で断熱性・気密性が取りやすく、外装側の設計自由度が高く、実用性がある。
・押出発泡ポリスチレン工業会所属のメーカーで開発事例、実績があり、市場性がある。

第 3 章では、小型試験体を用いて火災加熱試験を行い、高い耐熱性を有するロックウール断熱材との比較から、押出法ポリスチレンフォーム断熱材の溶融により、壁内の鉄骨柱の温度上昇を抑制する効果を確認した。そして、この効果は、断熱材が柱の非加熱側に位置する場合、つまり内張断熱工法に対する屋外側加熱、外張断熱工法に対する屋内側加熱の場合に最も効果が大きくなり、防耐火性能（非損傷性）に対し有利側に作用することがわかった。

第 4 章では、実大試験体を用いた防耐火試験より、準耐火性能を満足するための外壁構成を次の通り、明らかにした。

・押出法ポリスチレンフォーム（55 ㎜）充てん／窯業系サイディング（15 ㎜）・合板（12 ㎜）表張／強化せっこうボード（21 ㎜）・押出法ポリスチレンフォーム（30 ㎜）裏張／軽量鉄骨造外壁

第 5 章では、第 4 章の開発外壁と、充填断熱材および内張断熱材をすべて RW に置き換えた外壁との比較から、第 3 章で確認された押出法ポリスチレンフォーム断熱材の溶融による壁内の鉄骨柱の温度上昇抑制効果が実大規模の防耐火試験でも効果があるのか検証した。その結果、実大試験体を用いた防耐火試験においても、小型試験体と同じく効果を確認できたが、その効果は断熱材が接する鉄骨柱に限られることがわかった。

第 6 章では開発外壁を対象に、断熱性能および防露性能を検証した。断熱性能については充填断熱材および内張断熱材の厚さと外壁の熱貫流率との関係性を明らかにした。

[参考文献]

1）国土交通省：建築着工統計調査（令和 3 年度分）, 2022.4

2）（一社）日本建築学会：構造材料の耐火性ガイドブック, 2017.2

3）糸毛治：小型試験体実験による木造外壁断熱工法の防火性能予測に関する研究，早稲田大学大学院創造理工学研究科 博士号学位論文, 2019.7

4）糸毛治，鈴木淳一，成瀬友宏，菅原進一：可燃性断熱材を充填した木造外壁の防火構造に関する性能評価方法，日本建築学会技術報告集, Vol.29, No.71, pp.221-226, 2023.2

5）ダウ化工株式会社（現：ジュポンスタイロ株式会社）：鉄骨造乾式断熱内装下地 フレイムワーク MZ クリッパー工法, 2018.6

6）（地独）北海道立総合研究機構：防耐火性能試験・評価業務方法書, 2023.3

7）国立研究開発法人建築研究所：平成 28 年省エネルギー基準に準拠したエネルギー消費性能の評価に関する技術情報（住宅）現行版 第三章 第三節 付録 A, pp.3-3-19, 2023.7

8) ISO 10211:2017 Thermal bridges in building construction -Heat flows and surface temperatures- Detailed calculations, 2017.6