

平成28年度建築基準整備促進事業

F6. 防火被覆等の仕様にバリエーションを有する木・鉄骨系防耐火構造の壁および柱の合理的な性能評価に関する検討

事業主体：一般社団法人建築性能基準推進協会

共同研究：国立研究開発法人建築研究所

調査の目的・内容・実施体制

防耐火構造の認定において、多様なバリエーションを有する木造・鉄骨造の壁・柱の防火被覆等の仕様に関し、類型化や中小規模のモデル的試験の実施等により、複数のバリエーションを合理的に評価する方法を確立するための技術的知見を明確にする。

(イ) 複数のバリエーションを評価するための試験方法のあり方の検討

- (イー1) 柱(耐火構造に限る。)の性能評価に関するあり方に関する検討
- (イー2) 壁の性能評価に関するあり方に関する検討
- (イー3) 実大試験によらない性能評価のあり方に関する検討

(ロ) 試験方法の技術的検証を行うための耐火試験の実施

(ハ) バリエーションの合理的な性能評価方法の確認

- ・本調査は(一社)建築性能基準推進協会と(国研)建築研究所の共同研究として行った。
- ・実施にあたって、「**防耐火性能に関する評価試験の合理化検討委員会**」(委員長:河野守 東京理科大学教授)を設置し、調査全体をステアリングした。
- ・また、その下に**柱WG**(主査:成瀬友宏建築研究所上席研究員)及び**壁WG**(同左)を設置し、詳細な検討を行った。
- ・本調査は、平成27~28年度の2箇年調査である。

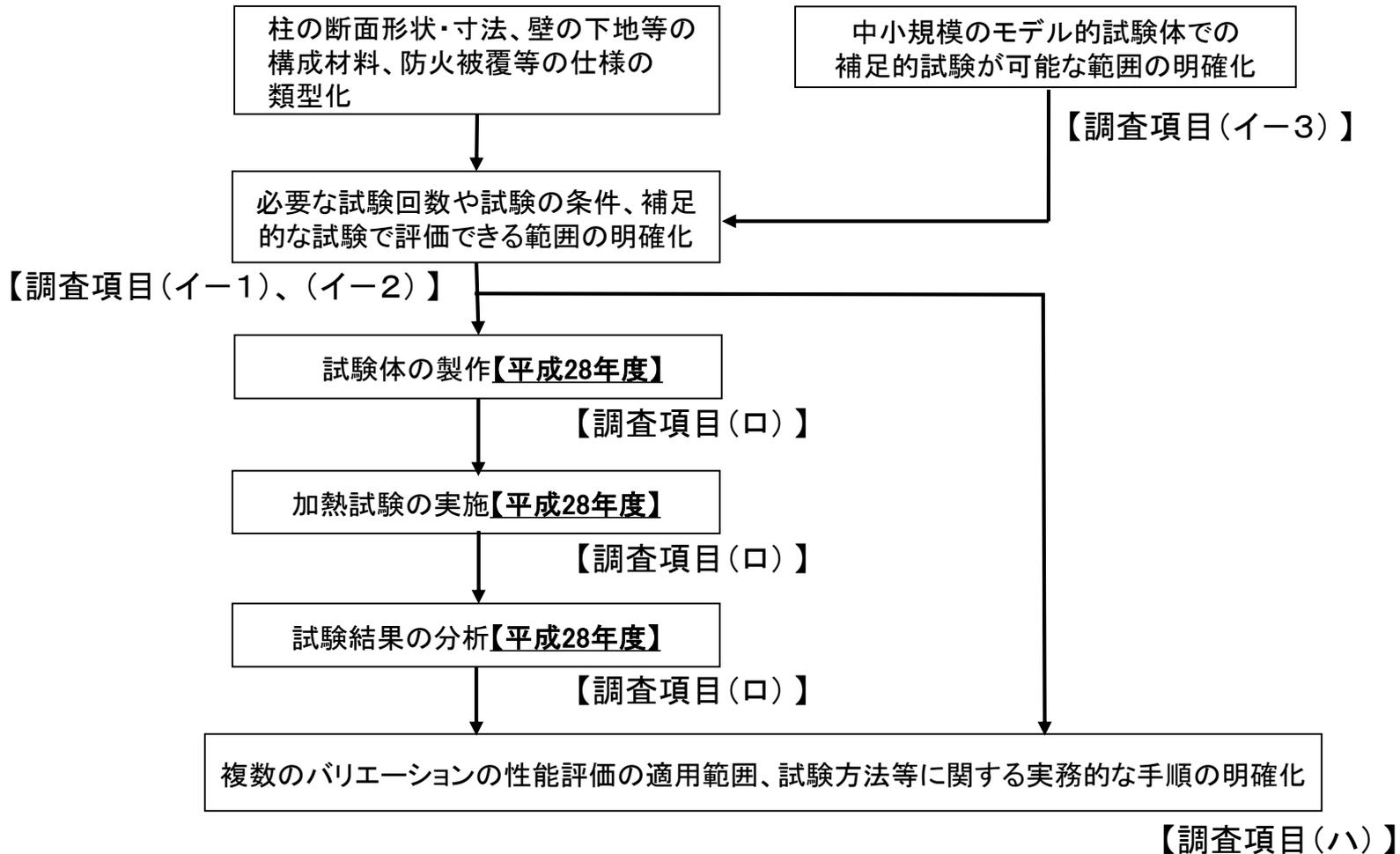
平成27・28年度 調査項目

- (イ) 複数のバリエーションを評価するための試験方法のあり方の検討
【平成27年度に実施済み】
 - (イ-1) 柱(耐火構造に限る。)の性能評価のあり方に関する検討
「柱の断面形状・寸法」、「防火被覆の種類・厚さとその組合せ」等の類型化
 - (イ-2) 壁の性能評価のあり方に関する検討
「下地等の構成材料の種類・厚さとその組合せ」、「防火被覆の種類・厚さとその組合せ」等の類型化
 - (イ-3) 実大実験によらない性能評価のあり方に関する検討
性能評価の合理化に資する補足的な試験として、中小規模のモデル的な試験方法を用いることのできる範囲の明確化

- (ロ) (イ)で提案された試験方法について、実際に加熱試験を行い、その妥当性を確認【平成28年度に実施】

- (ハ) 以上の調査成果に基づき、複数のバリエーションの性能評価の適用範囲、試験方法等に関する実務的な手順を明確化【平成27～28年度に実施】

調査のフロー



柱WGの検討内容(1)

- 木質柱耐火構造

〔現状とニーズ〕

- ・小断面、大断面の部材それぞれに長時間の載荷加熱試験が必要。
- ・試験法に関して、国内向けには、耐火試験時の冷却曲線等の試験条件が既定されていない等、再現性を十分に担保できていない。
- ・耐火試験の終了や合否の判断が、非損傷性(荷重支持能力)ではなく、便宜的に所定の時間における脱炉時の赤熱・炭化等となっており、要求性能との関係が明確ではない場合があり、技術開発を困難にしている。
- ・試験実施側においては、試験機関の周辺環境、労働条件等の制約から、長時間の試験の実施が困難となりつつある。

〔目的〕

- ・実大の載荷加熱試験と中小規模試験体の加熱試験を組み合わせた耐火試験により、試験回数や評価方法を合理化する。
- ・冷却条件、終了時間等を性能的に整理し、再現性の高い安定した試験法を立案する。

柱WGの検討内容(2)

- 鋼柱耐火構造

〔現状とニーズ〕

- ・柱の耐火時間(1、2、3時間)に応じた柱の被覆厚さや鋼材断面寸法、形状(H形、角形)ごとに個別の耐火試験と性能評価を実施している。
- ・外壁等との組み合わせにより、同一の被覆仕様であっても、外壁の種類ごとに耐火試験による性能評価が必要。
- ・断面形状と被覆厚さ等の工学量に基づく性能評価の合理化が求められている。大臣認定の適用範囲を拡張する方法として、実大載荷加熱試験によらない実験や解析等の活用が求められている。

〔目的〕

- ・試験・評価方法に、パッケージ型の評価(載荷試験と中小規模試験の組合せ、推定方法)を導入し、トータルの試験回数や試験体数を削減するとともに、工学的評価により性能評価を合理化する。

壁WGの検討内容(1)

- 壁の試験条件(防火構造・準防火構造、耐火構造)

〔現状とニーズ〕

- ・屋内側の防火被覆の構造が同一または類似の構造方法であっても、両面に対して試験を実施するケースがある。
- ・防火被覆として期待する下地面材を有する壁の仕様において、異なる下地面材を使用した場合の同等性が認められにくい。
- ・試験体仕様と実際に使用される仕様が乖離している。
- ・試験体の一部にバリエーションを有する場合、実大実験によって性能確認すべきかどうかの判断基準が明確でない。
- ・需要の高いバリエーション(規格化された標準的な下地材など)については、有利不利を明らかにして包含して評価することが求められる。

〔目的〕

- ・中小規模あるいは部分的に再現した試験体による評価、または試験なしでバリエーションを包含する方法の構築
- ・既存実験データの整理や比較試験の実施により、需要の高いバリエーションについて有利不利を例示。

壁WGの検討内容(2)

- 壁の仕上げ材

〔現状とニーズ〕

- ・各種構造の表面に、不燃性のタイル、石や木材等を仕上げ材として張る(貼る)場合には、別の構造方法として評価が必要。告示仕様に仕上げをする場合に緩和されていることとの整合性を欠く。
- ・表面塗装の塗料や防水シート、耐震シートなど、たとえ有機分の発熱が見られたとしても全体の耐火性への影響は少ないと思われる。
- ・表面材の貼り付けはむしろ遮熱性の向上に寄与しているとも考えられ、運用上の要求が高い。
- ・防水シートや耐震シートなどは防水性や耐震性の向上を目的に有機分が増加する傾向にあるが、部材全体で見れば微量であり、試験なし評価が望まれる。

〔目的〕

- ・耐火性能に悪影響を与えない仕上げ材の条件(材料、留め付け方法等)、有機量の微増が耐火性能に与える影響を明確にする。

柱の検討の方針

－ 木質系耐火構造

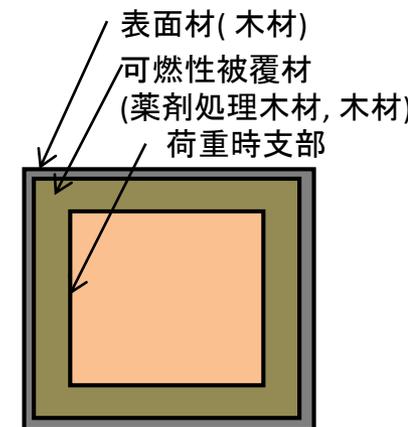
- 加熱冷却過程を含む、加熱条件に関して現存する試験装置の実態を把握するとともに、再現性の高い試験条件の構築方法を検討
- 実大試験と中規模試験の併用のための影響因子の分析、試験体選定方法や、試験条件等について検討

－ 鋼系耐火構造

- 耐火性能に影響を及ぼす工学量の特定と分析
- 最新のISO規格の試験法の導入に向けて、試験体の選定方法と実験による確認

木質系耐火部材の非損傷性に関する 影響因子の整理

柱の性能		熱的、機械的性質	変化要因等	小断面	大断面
非損傷性	座屈 耐力	断面性能I (断面二次モーメント)	部材寸法	劣	優
		弾性係数E (高温時を含む)	JAS規格 樹種:低密度材 低い 含水率:高含水 低い 温度(E≒0、スギ260℃)	劣 (温度)	優 (温度)
		接着材の剪断性能	接着材の種類: RRF > API、UP等 温度(100-150℃)	劣 (温度)	優 (温度)
	内部 温度	熱拡散率(kpc) 熱容量(比熱×比重)	温度 含水率	劣	優
被覆材の 遮熱性能	炭化	入熱条件: 平板部(1方向)	部材内部への失熱	劣	優
		入熱条件: 出隅部分(2方向)	隅角部の先端については、 吸熱効果の有効性は低い	差はほぼなし	
	炉内 温度	被覆材残渣(炭) の発熱量	被覆材の残存量 残渣などからの発熱量	優	劣
	亀裂 脱落性	被覆材の亀裂、 脱落の発生	被覆材の幅・長さ 収縮率 留め付けピッチ	優	劣

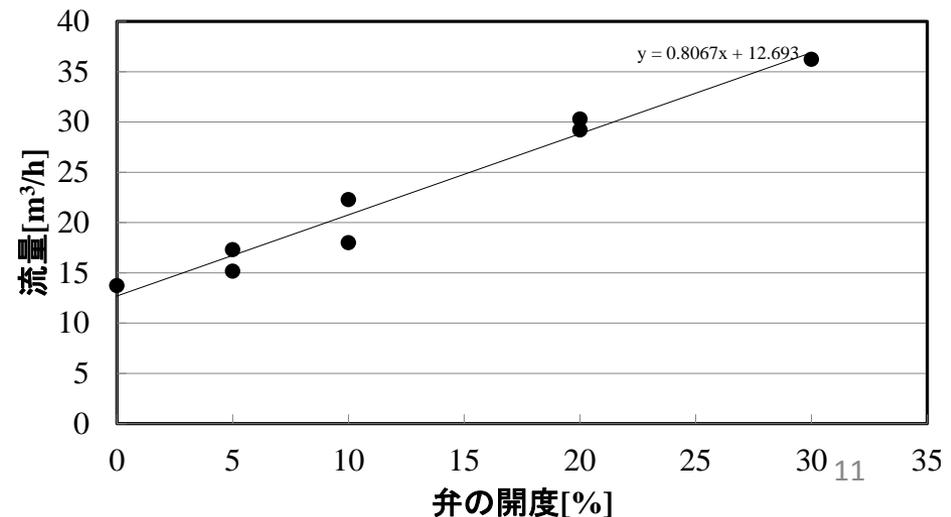
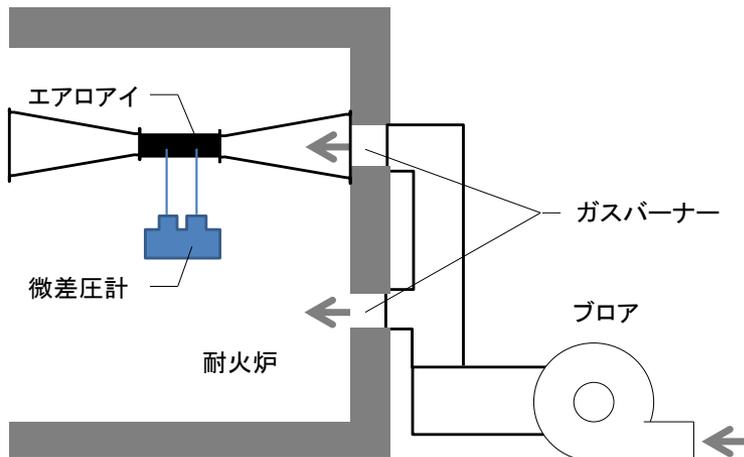


耐火炉の冷却特性の把握

- 供給空気量の実態把握
- 換気回数: 17~28回/h
- 換気回数が大きいほど冷却速度も速い傾向がある。
- 木造系の場合には、可燃物表面積が大なる場合には高温化する傾向がある。

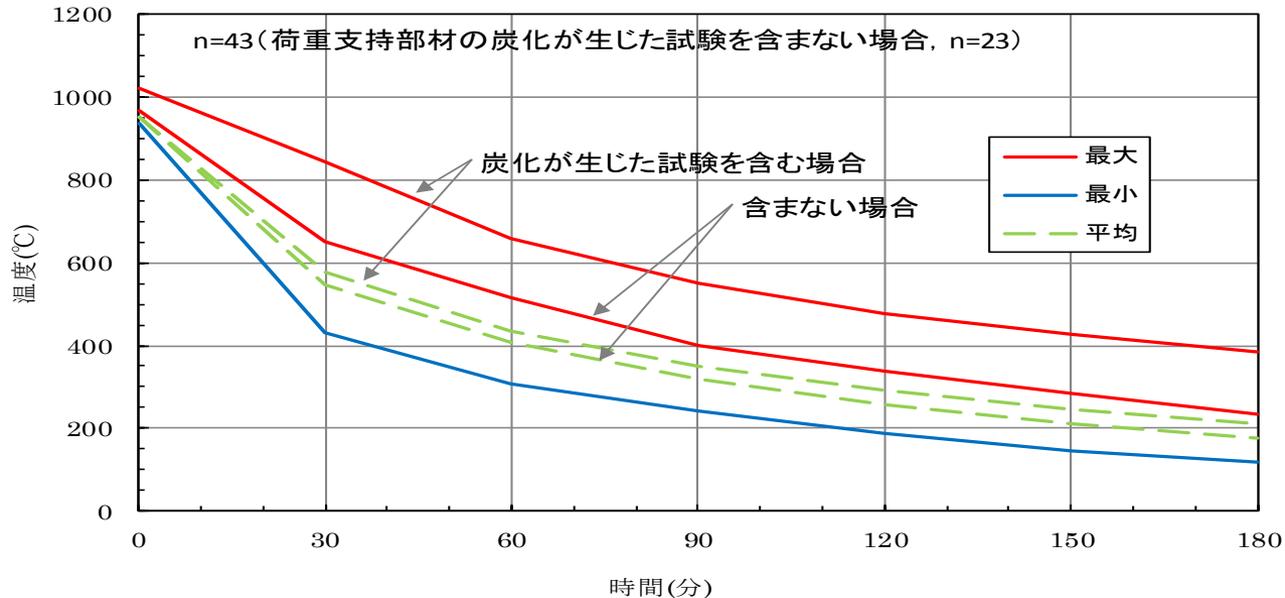


空気量測定状況



耐火炉の放冷後の温度履歴の一例

- 可燃性の試験体はその燃焼により、炉内環境が不燃系のものより高温化する傾向がある。
- 試験体の冷却環境の再現性の確保のため空気供給量等について実態調査を行った。
- 炉内環境の解析モデル等により、その原因を検討した。



木製柱・木被覆鋼製柱の平均炉内温度(A炉:1時間加熱)

木造耐火の耐火性能評価試験方法と試験体の選定方法(案)の提案

- 中小規模試験の導入
- 中規模試験による実大火災実験試験体の選定

断面サイズ		
最小	中 (幅≒700mm)	最大 (幅>700mm)
○	○	—
(2体を同時に加熱する)		

<中規模試験(比較試験)>

最小断面が不利な場合

中断面が不利な場合

断面サイズ		
最小	中 (幅≒700mm)	最大 (幅>700mm)
●●	—	—

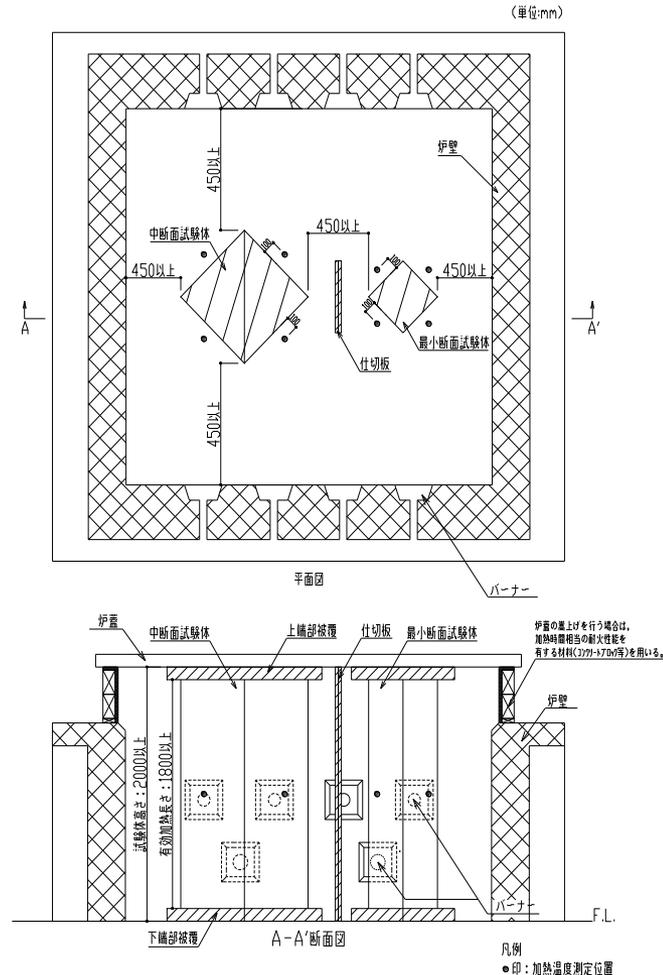
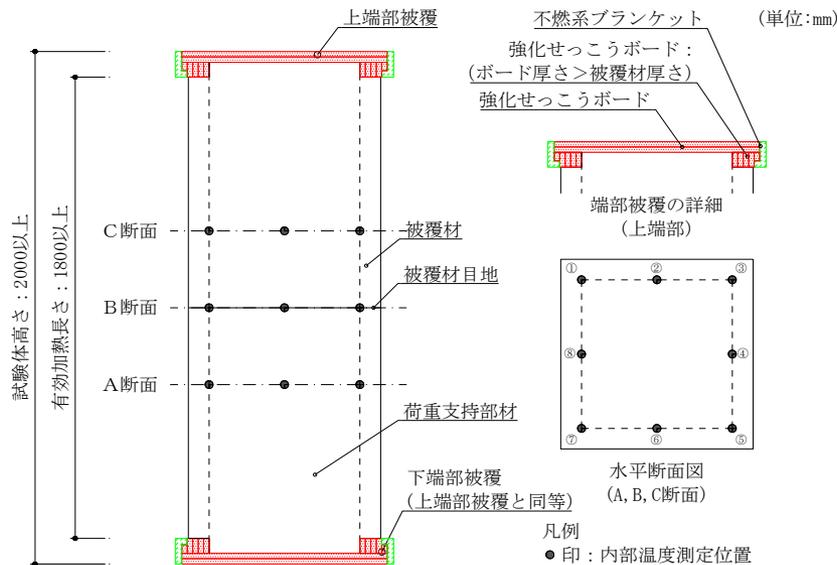
断面サイズ		
最小	中 (幅≒700mm)	最大 (幅>700mm)
—	●●	○

<実大規模試験>

- 1) ○は荷重なし、●は荷重加熱試験
- 2) 「幅700mm」は、性能評価機関で試験可能な最大断面

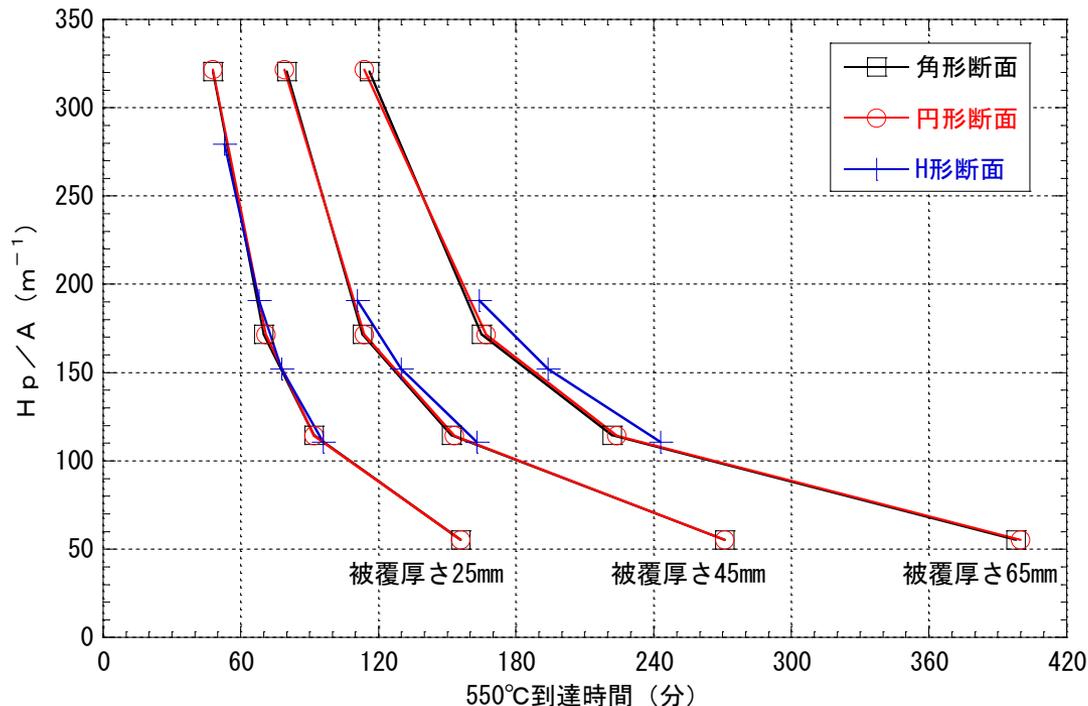
木造耐火の耐火性能評価試験方法と試験体の選定方法(案)の提案

－ 中規模試験体の条件



鋼柱の耐火構造の性能評価に関する影響因子

- 鋼材の形状と温度上昇特性(断面形状係数、温度分布)
 - 角形断面・円形断面・H形断面の違い: 断面形状係数 H_p/A と被覆厚さが同等であれば、 550°C に到達する時間は、断面形状によらず、概ね一致する。

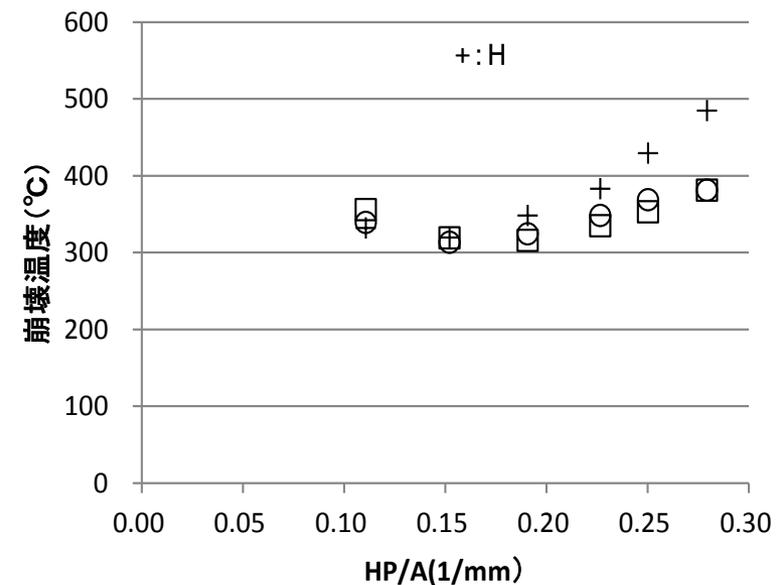
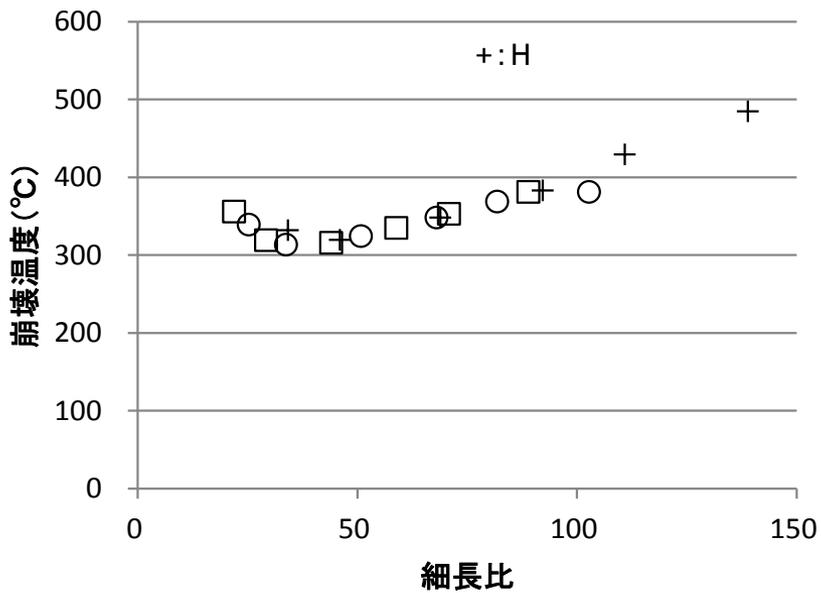


鋼材温度が 550°C に到達する時間と H_p/A の関係

鋼柱の耐火構造の性能評価に関する影響因子

－ 鋼材の形状と高温時耐力

- 高温時の鋼材の応力歪関係がラウンドハウスであれば、崩壊温度と細長比の関係は、最小極値を示す下に凸形状になる。
- 0.15以上 H_p/A では、同一の H_p/A の場合には、崩壊温度はH形>円形>角形となる。
- 極小値付近の角形鋼管の試験体を評価すれば、他の形状を包含可能



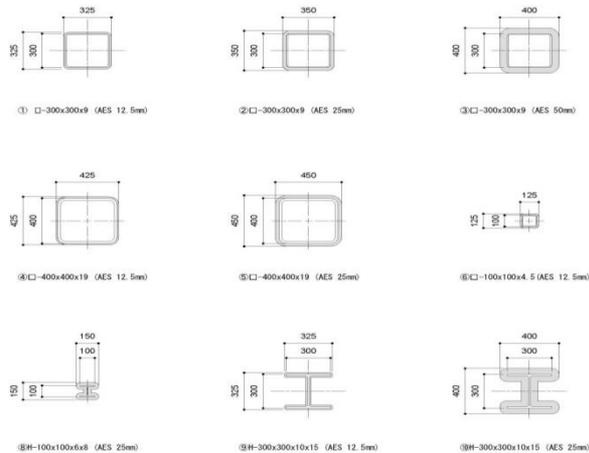
細長比と崩壊温度の関係(鋼構造耐火設計指針より)

中規模試験を併用した鋼柱の耐火性能評価試験方法

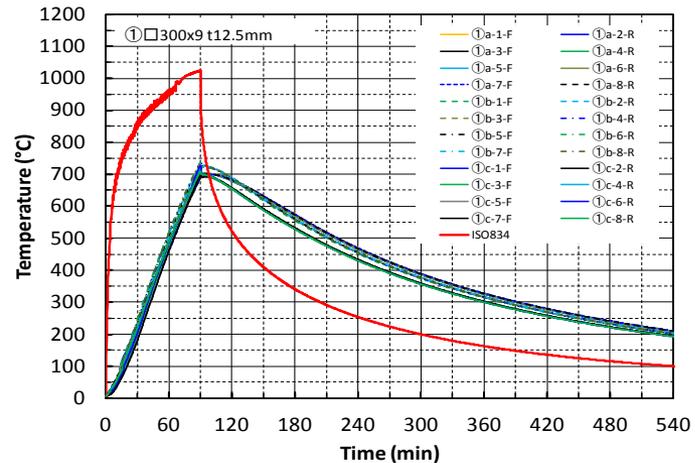
- 1時間、3時間の載荷加熱試験データに基づいて、小断面、被覆厚さを拡張するための試験計画の例

断面形状係数の比率 (As/Hs)	被覆厚さの比率		
	標準 1.0x	中 1.25~1.75x	大 2.0x~3.0x
	セラミック系 被覆AES		
	12.5mm	25mm	50mm
<u>0.44x~0.54x</u> □-100x4.5 (STKR400) H-100x100x6x8 (SN400)	○ (0.75時間耐火)	●○H (1.5時間耐火)	—
<u>1.0x</u> □-300x9 (STKR490) H-300x300x10x15(SS400)	●○H (1時間耐火)	○ (2時間耐火)	●○H (3時間耐火)
<u>2.0x</u> □-400x19(STKR400)	○ (2時間耐火)	○ (3時間耐火)	—
*括弧内の耐火時間は、鋼材強度が2/3になる温度(550℃)に達する時間の想定 ●: 載荷角柱 ○: 非載荷角柱 H: 非載荷H			

鋼柱の耐火性能試験の結果例



試験体 断面概要



試験結果の一例



中規模試験の状況

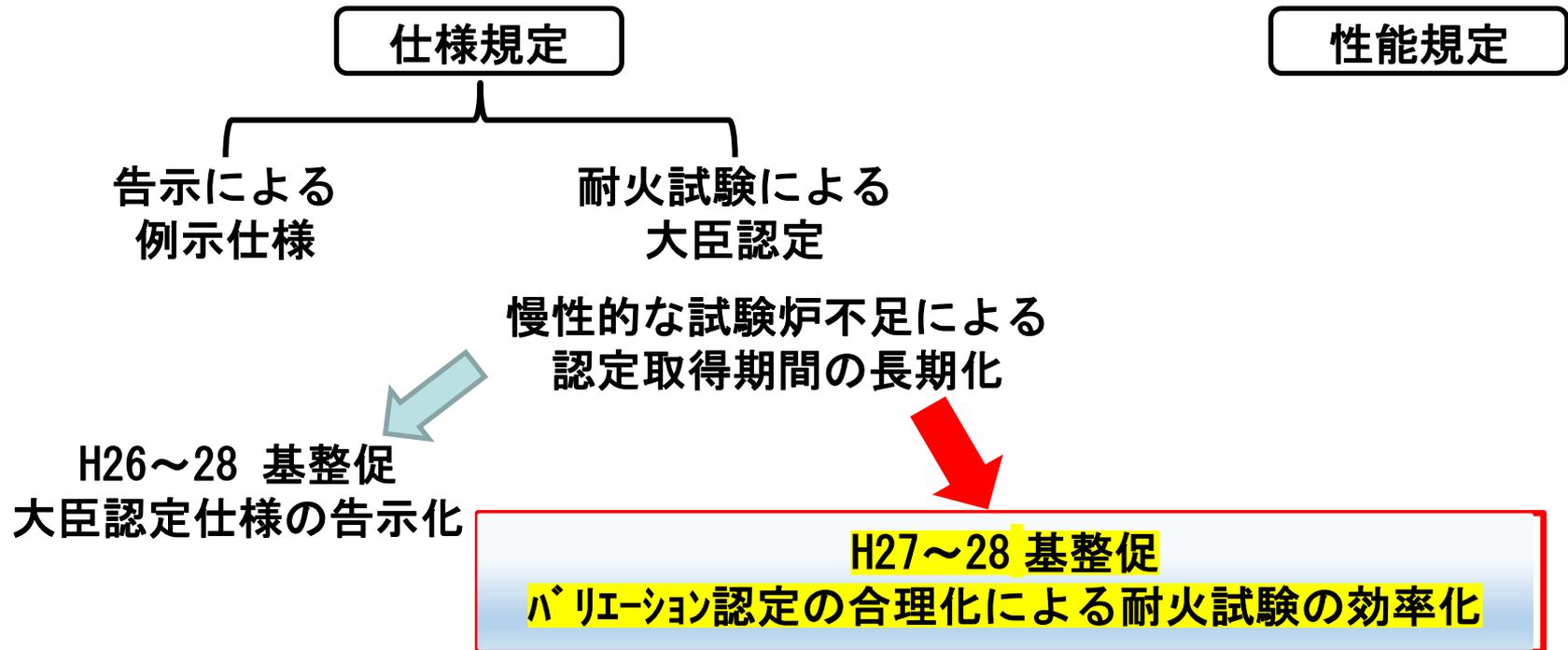


試験後の実大試験体

試験結果に基づく、柱の性能評価方法

- 所定温度に達する鋼材厚さと被覆厚さの関係は下記により評価できる。
 - Graphical Approach (図解法) : 温度到達時間と断面形状係数を耐火被覆厚さ毎にプロットし、線形補完する方法
 - パラメータ推定法 : 集中熱容量モデルを用いて、実験結果を再現する最適な熱コンダクタンスを推定し、数値計算により鋼材温度を推定する方法
- 鋼柱の耐火性能に寄与する工学量
 - 中規模試験等により鋼材形状(円形、角形、H型)と耐火被覆の効果が把握できれば、以下の工学量により評価が可能となる。
 - 鋼材の断面形状係数(平均厚さ)
 - 耐火被覆材の厚さ
 - 鋼材の幅厚比

壁の課題背景の概念図



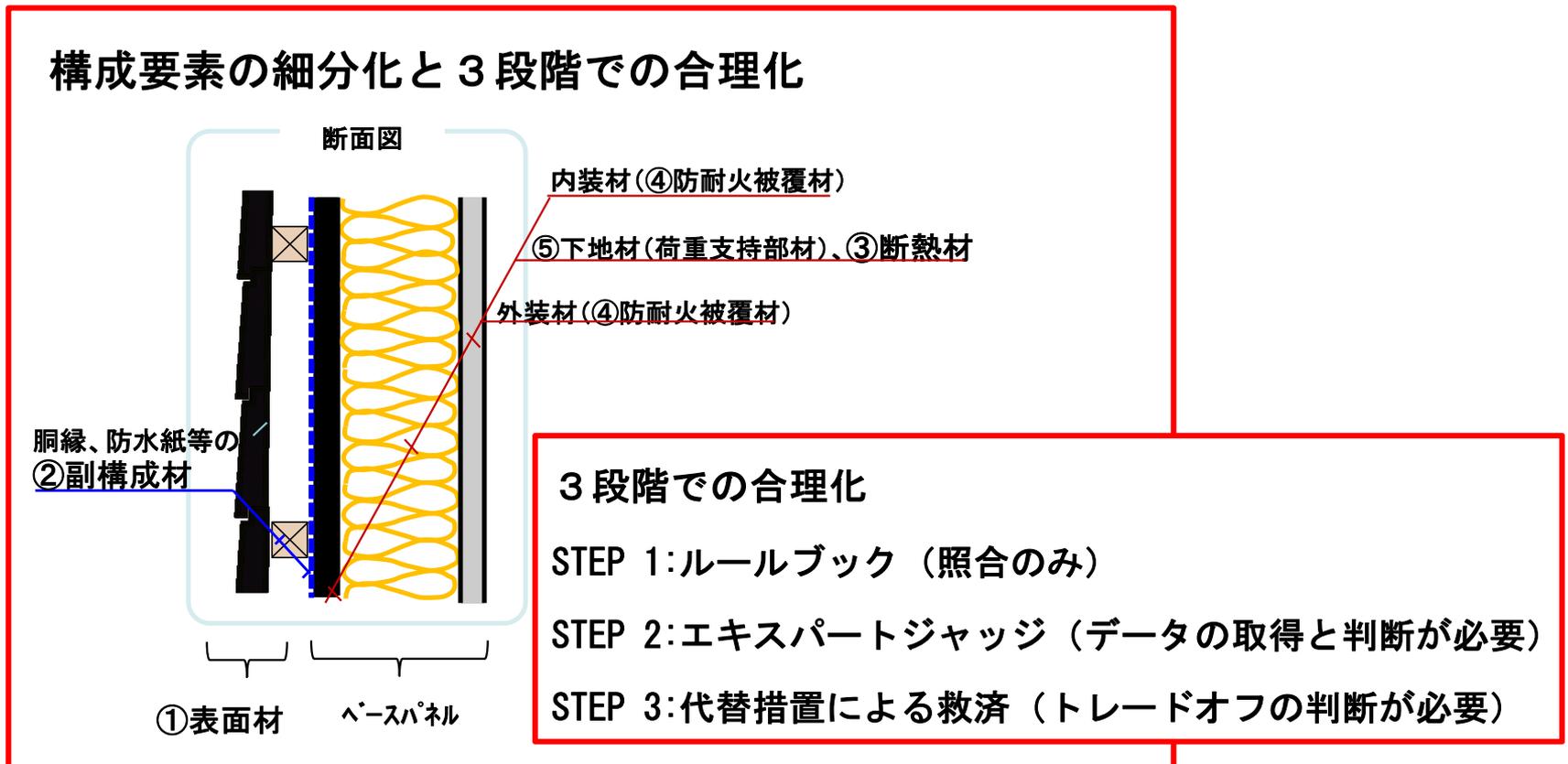
(イ) 柱(耐火構造に限る。)の性能評価に関するあり方検討

(ロ) 壁の性能評価に関するあり方検討

(ハ) 実大試験によらない性能評価のあり方検討

(ニ) バリエーションの合理的な性能評価方法の確認

構成要素の細分化と3段階での合理化



①表面材、②副構成材、③断熱材については、張り足すことの是非について検討。

④防耐火被覆材については、優劣あるいは同等性判定方法について検討。

表面材試験体一覧

(業界、関係団体のヒアリングより抽出)

試験体番号	材 料 名		厚み
1	セメント成形品A(最大)	市場品	35mm
2	セメント成形品A(最小)	市場品	10mm
3	窯業系サイディング(1次塗装品)	耐火試験における代表板(1次塗装品)	15mm(エンボス加工)
4	窯業系サイディング(塗装品)	耐火試験における代表板(塗装品)	15mm(エンボス加工)
5	塗材A(有機量1000g/m ²)(最大)	表材調仕上塗材	
6	塗材A(有機量1000g/m ²)(最小)	表材調仕上塗材	
7	塗材B(有機量1800g/m ² 最大)	アクリルシリコン系仕上げ塗料	
8	塗材B(有機量600g/m ² 最小)	アクリルシリコン系仕上げ塗料	
9	塗材C(最大)	防水型外層薄塗材E	
10	塗材C(最小)	防水型外層薄塗材E	
11	セメント成形品B(最大)	市場品	35mm
12	セメント成形品B(最小)	市場品	35mm
13	セメント成形品C(最大)	市場品	30mm
14	セメント成形品C(最小)	市場品	11mm
15	杉板	市場品	15mm
16	杉板	市場品	30mm

調査した表面材は、難燃材料相当の防火性能があった。

張り足しを許容する表面材の検討

表面材	概要	用途	防火グレード
繊維強化セメント板	<ul style="list-style-type: none"> ・JIS A 5430 繊維強化セメント板 <ol style="list-style-type: none"> 1)スレート板(波板、ボード) 2)けい酸カルシウム板(タイプ2、タイプ3) 3)スラグせっこう板(比重0.8、1.0、1.4) 	屋根、軒裏、外装 間仕切、内装、 耐火被覆	不燃材料
木質セメント板	<ul style="list-style-type: none"> ・JIS A 5404 木質セメント板 <ol style="list-style-type: none"> 1)木毛セメント板(硬質・中質・普通木毛) 2)木片セメント板(硬質・普通木片) 	屋根及び壁下地 外装下地	準不燃材料
セメント成形品 (擬石と呼ばれるもの)	<ul style="list-style-type: none"> ・JISなし 原材料:セメントと無機質骨材と無機繊維 	内外装仕上げ材	不燃材料 (有機質量5%以下) 準不燃材料(有機質量8%以下) 難燃材料 (有機質量10%以下)
陶磁器質タイル	<ul style="list-style-type: none"> ・JIS A 5209 陶磁器質タイル 粘土又はその他の無機質原料を成形し焼成 	内外装仕上げ 内外床仕上げ	不燃材料 (吸水率によりⅠ～Ⅲ類)
窯業系サイディング	<ul style="list-style-type: none"> ・JIS A 5422 窯業系サイディング セメント、けい酸質原料と繊維補強材を用いボードに成形(組成、配合の規定なし) 	外装仕上げ材 軒裏	不燃材料 (有機質量6%以下) 準不燃材料(有機質量8%以下)
塗材	<ul style="list-style-type: none"> ・JIS A 6909 建築用仕上塗材 セメント、合成樹脂などの結合材、顔料、骨材など主原料 <ol style="list-style-type: none"> 1)薄付け仕上塗材 2)厚付け仕上塗材 3)軽量骨材仕上塗材 4)複層仕上塗材 5)可とう形改修用仕上塗材 	内外装仕上げ	市場流通品の単位面積当たりの有機質量1000g/m ² のもの (発熱量35MJ/m ² であるが燃焼時間は5分以下で燃え尽きるため周囲への加害性は小さい)
木材(製材・集成材)	<ul style="list-style-type: none"> ・JAS 日本農林規格により規定 	内外装仕上げ	表面は燃えるがベースパネルへの影響は少ない

試験体図(2分割の例)

(窯業系サイディング塗装 有・無)



試験体W-1(加熱前)



試験体W-1(加熱後)

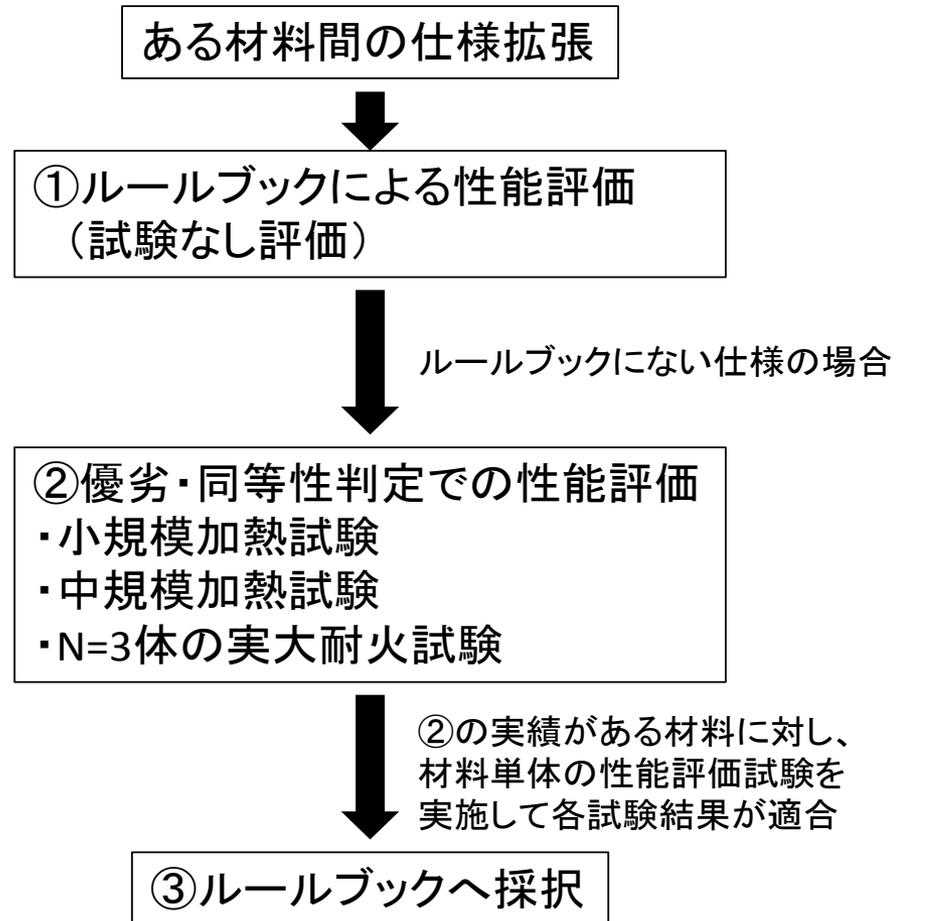


軸組表面



軸組断面(左:塗材なし 右:塗材あり) ²⁴

3段階での評価手法及び合理化フロー



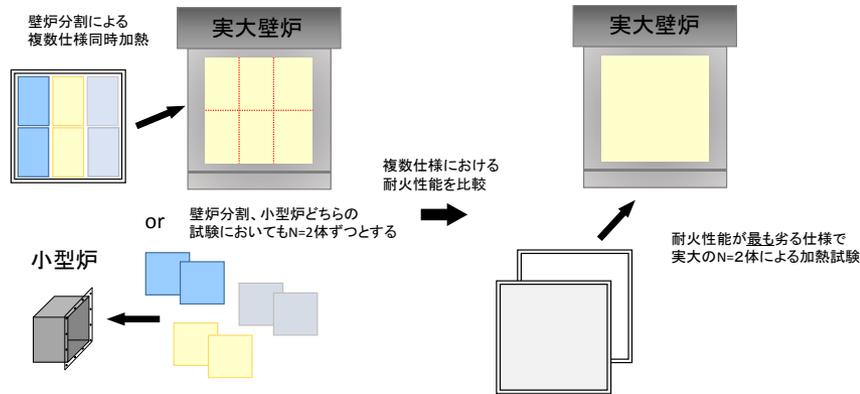
以後、同様の材料間の仕様拡張において
はルールブックでの性能評価が行われる

各試験種別における試験条件及び方法

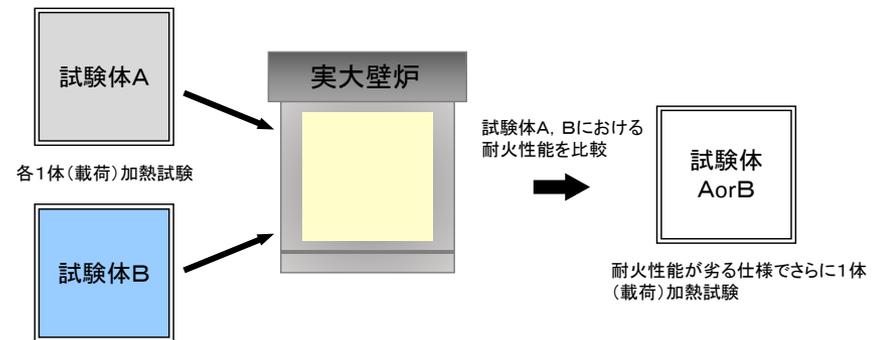
試験種別及び評価性能	試験条件	評価の手順
■ 小規模加熱試験 【評価性能】 設置位置に応じた各断面の遮熱性	<ul style="list-style-type: none"> ・同一工業等規格内の別材料かつ同一の留め付け方法 ・非耐力部材または木耐火部材 	実大炉における分割した試験体の加熱あるいは小型炉による加熱をN=2体実施する。性能の劣る仕様で実大耐火試験を2体（通常の耐火試験）を行う。
■ 中規模加熱試験 【評価性能】 設置位置に応じた各断面の遮熱性	<ul style="list-style-type: none"> ・同一工業等規格内の別材料あるいは別の留め付け方法 ・非耐力部材または木耐火部材 	各仕様の試験体寸法が製品規格以上となるように実大炉を分割し、同時加熱を実施する（N=1体ずつ）。性能の劣る仕様で実大耐火試験を2体（通常の耐火試験）行う。
■ N=3体の実大耐火試験 【評価性能】 設置位置に応じた各断面の遮熱性及び通常の耐火試験における要求性能	<ul style="list-style-type: none"> ・同一工業等規格内の別材料あるいは別の留め付け方法 ・耐力部材も可 	実大耐火試験（通常の耐火試験）を各仕様N=1体ずつ実施する。性能の劣る仕様でさらに1体試験を行う。（計3体）

各試験方法の概略

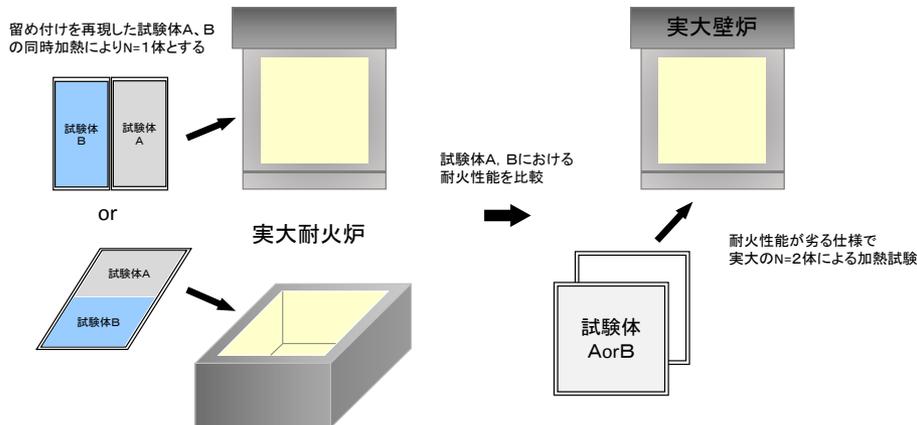
【小規模加熱試験】



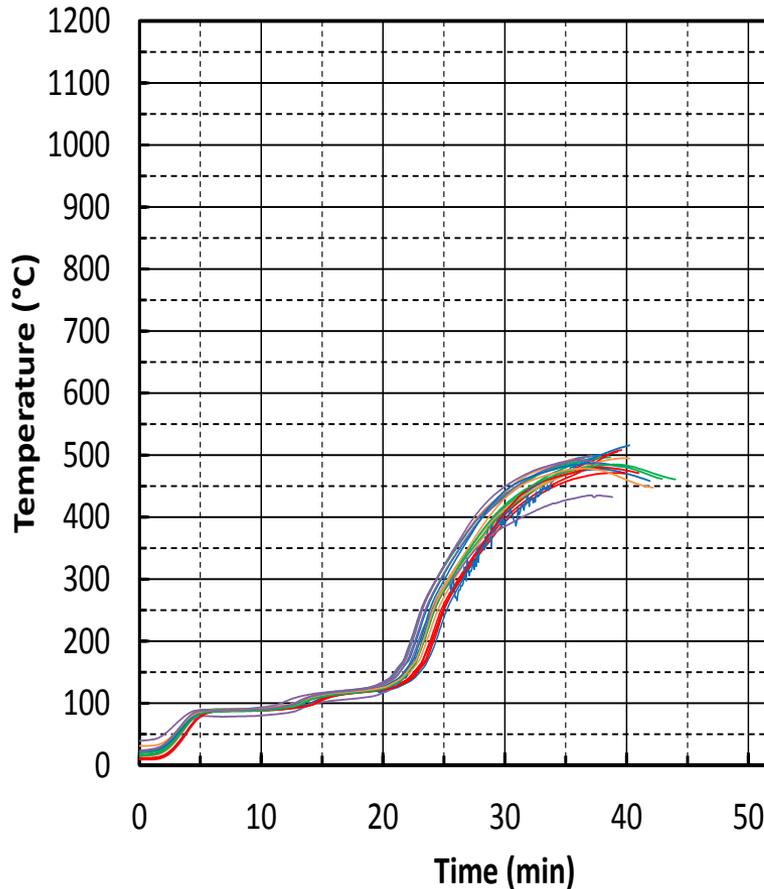
【N=3体の実大耐火試験】



【中規模加熱試験】



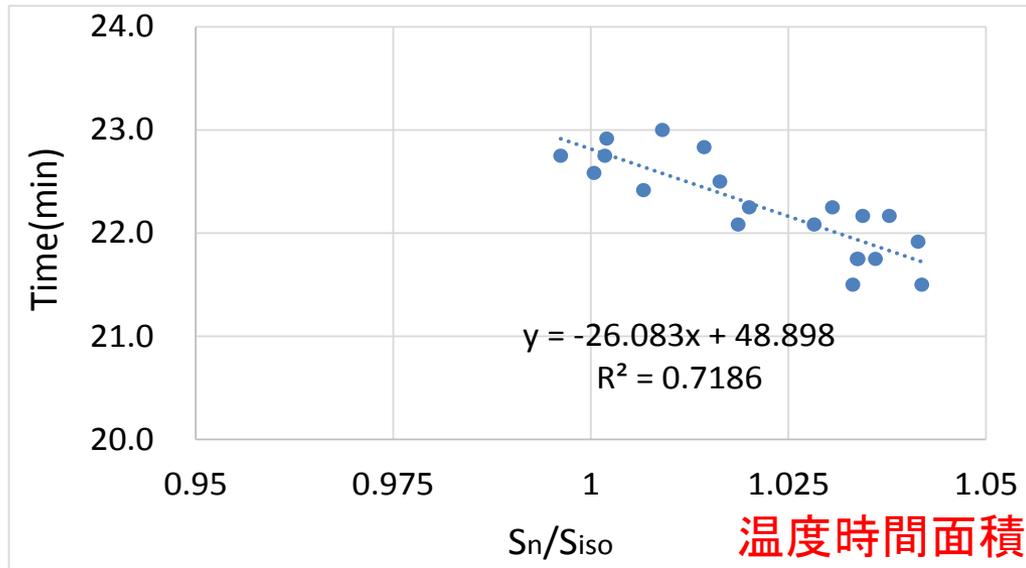
N数削減の必要条件：耐火性能のばらつきと余裕度のトレードオフ



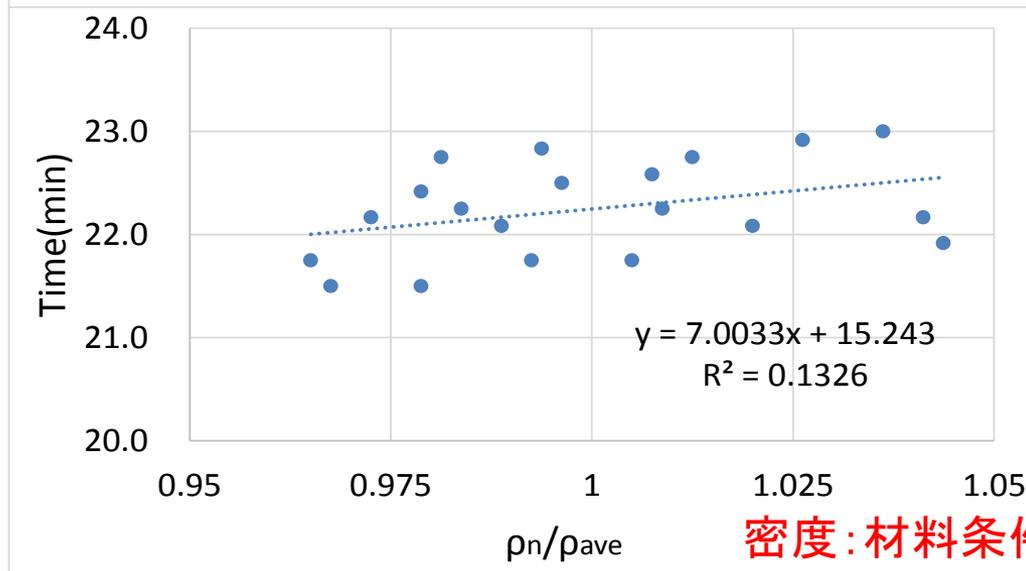
試験番号	試験体比重 (kg/m ³)	目地部遮熱制限 値到達時間(分)	一般部遮熱制限 値到達時間(分)	温度時間面積比
1	0.811	17.6	22.8	1.002
2	0.805	16.9	21.8	1.034
3	0.792	17.3	22.1	1.019
4	0.784	17.3	21.5	1.042
5	0.773	16.1	21.8	1.034
6	0.786	18.3	22.7	0.996
7	0.830	18.6	23.0	1.009
8	0.775	16.8	21.5	1.033
9	0.784	17.8	22.4	1.007
10	0.836	17.5	21.9	1.041
11	0.807	18.2	22.6	1.000
12	0.808	18.6	22.3	1.031
13	0.788	17.8	22.3	1.020
14	0.817	17.4	22.1	1.028
15	0.779	16.9	22.2	1.038
16	0.822	18.3	22.9	1.002
17	0.834	17.7	22.2	1.034
18	0.798	18.2	22.5	1.016
19	0.796	18.1	22.8	1.014
20	0.795	17.2	21.7	1.036
平均	0.801	16.8	21.2	1.022
標準偏差	0.019	1.1	1.1	0.015

N=20体での
遮熱性能のばらつき定量化

N数削減の必要条件：耐火性能のばらつきとの相関性

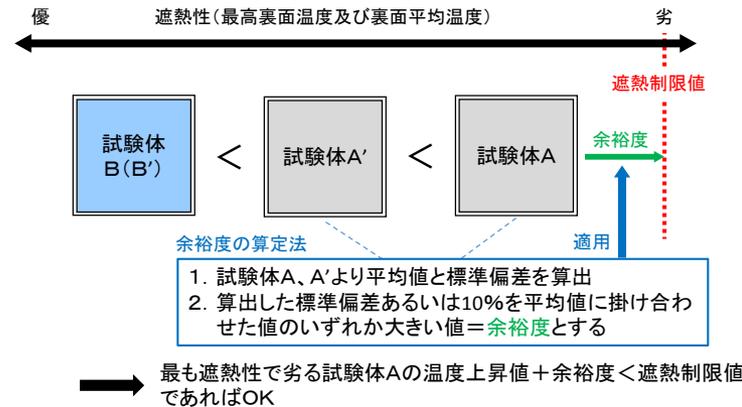


温度時間面積比：加熱条件のばらつき

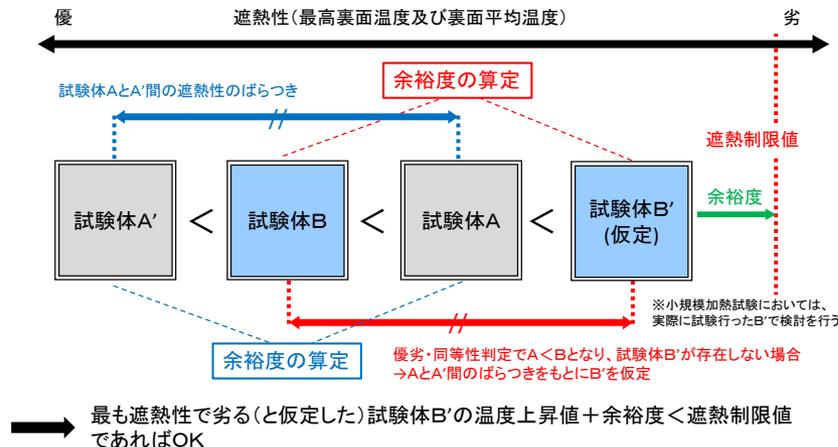


密度：材料条件のばらつき

N=3体での評価案：耐火性能のばらつきと余裕度のトレードオフ



Case1評価方法概略(耐火性能の優劣が明らかとなる場合)

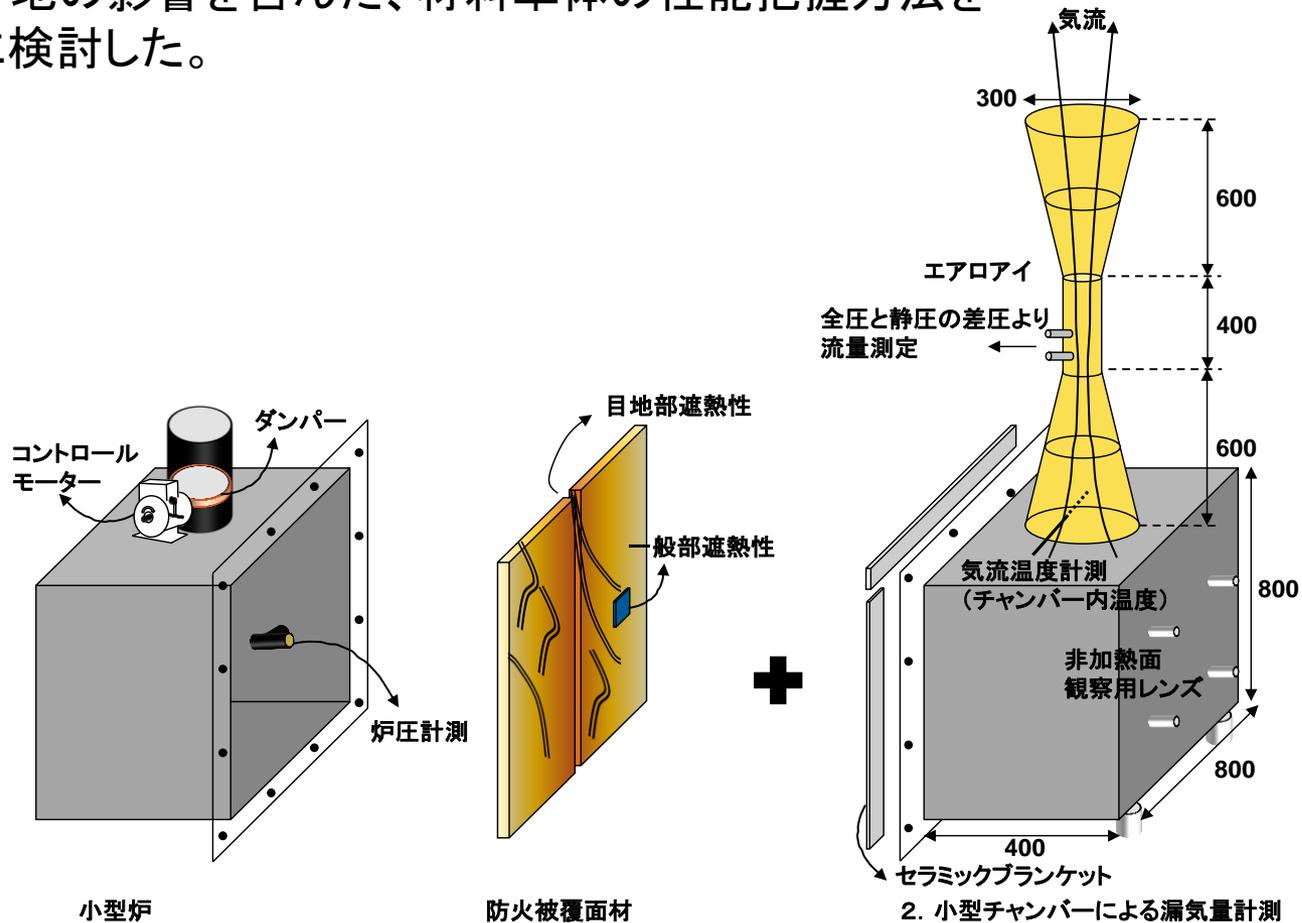


Case2評価方法概略 (耐火性能が明らかとならない(むしろ同等とみなせる)場合)

ルールブックへの採択基準: 材料単体試験の提案

(試験体の大きさ900×900mm)

亀裂や目地の影響を含んだ、材料単体の性能把握方法を実験的に検討した。



材料単体試験と耐火試験の比較

〔試験体の大きさ:実大の2分割および4分割〕
4種類のせっこうボード製品の比較例



加熱前の試験体



加熱後の試験体

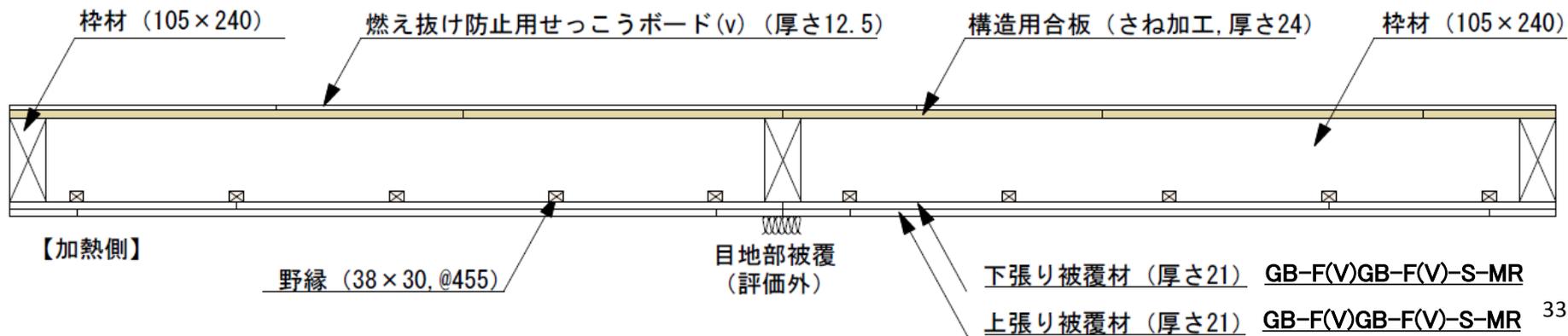
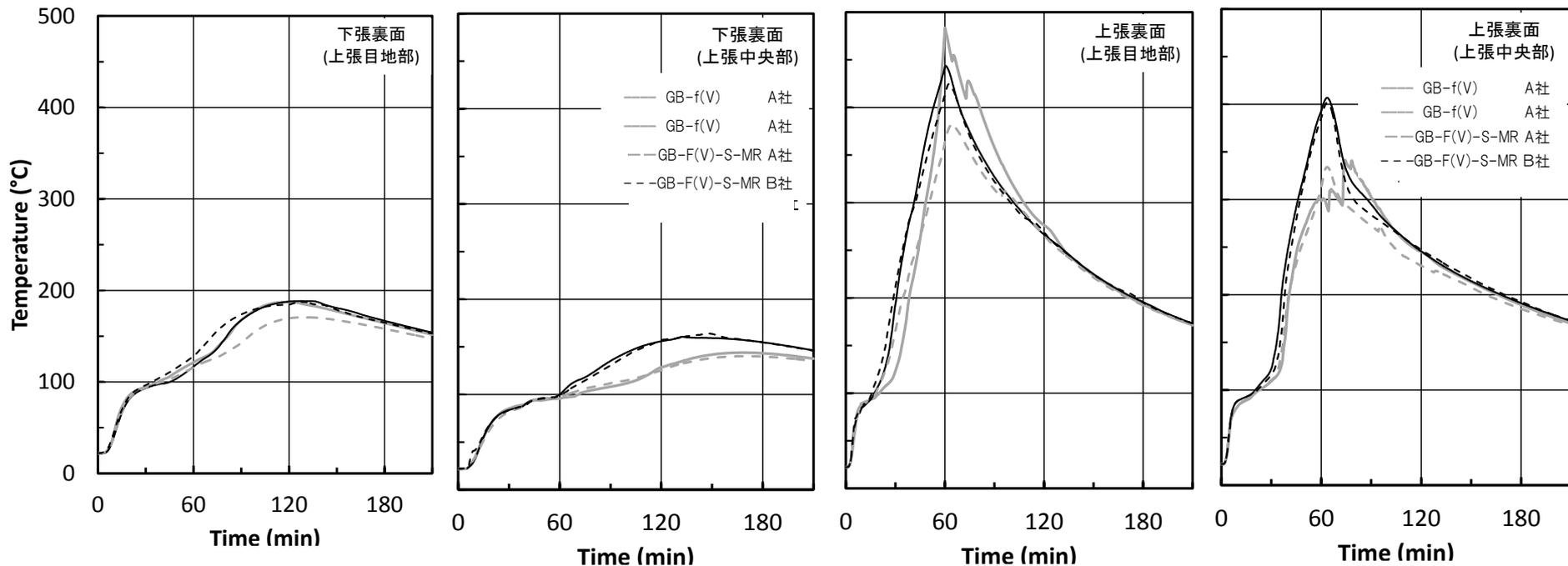


解体後の試験体
(下張りGB表面)

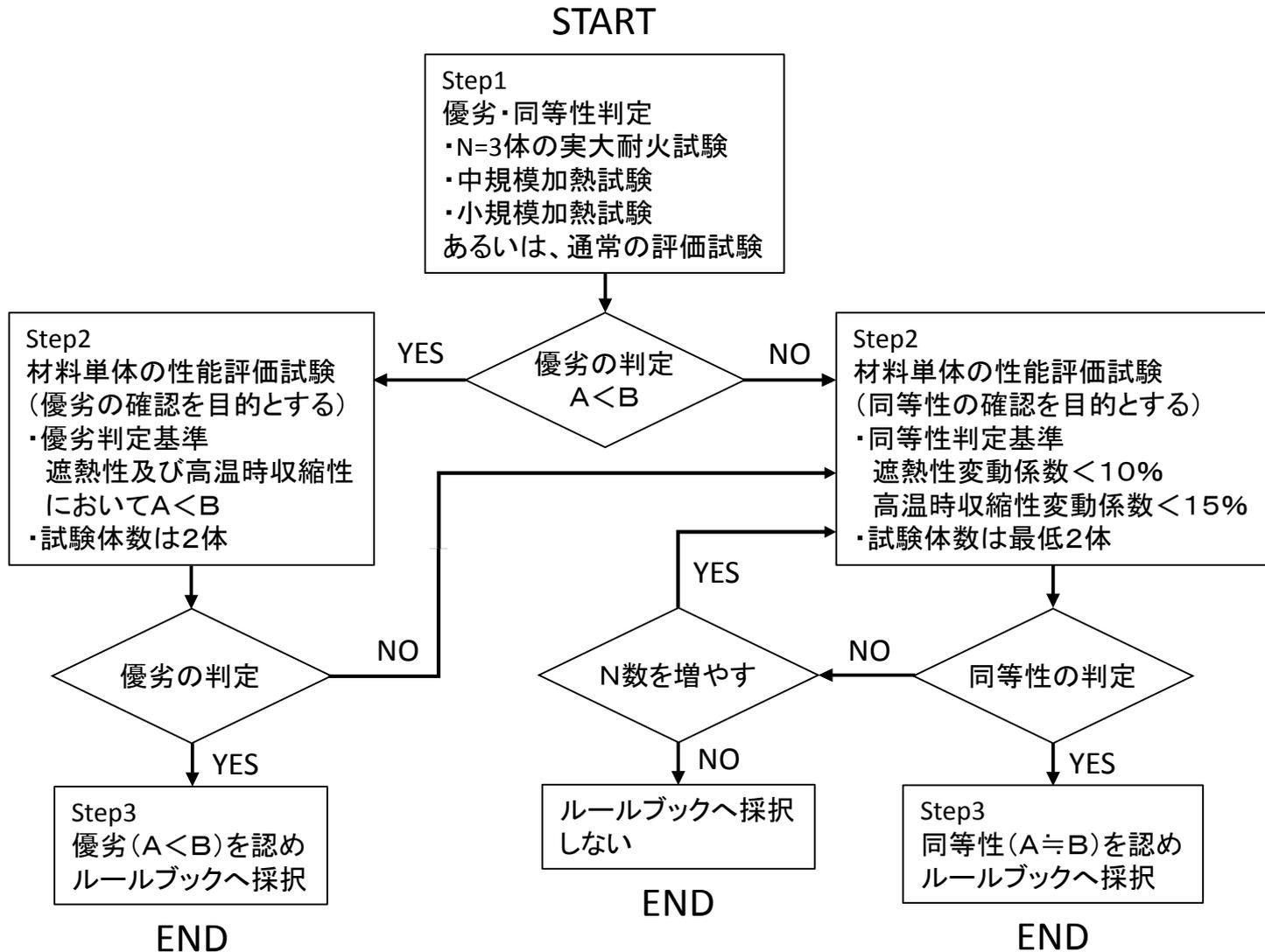


解体後の試験体
(野縁表面)

耐火試験の実験結果



ルールブックへの採択フロー



RCFおよびAESの同等性の確認

従来、耐火構造等の目地材等として一般的に利用されてきたリフラクトリーセラミック(RCF)が平成27年11月より労働安全衛生法の特定化学物質の規制対象となった。このためRCFの代替品としてアルカリアースシリケート(AES)利用の検討を昨年度に引き続き行った。

耐火時間	標準加熱温度	基準値+25%	1.2倍加熱	試験温度±誤差	試験結果(加熱線収縮率) 基準値3%以下
60分	945°C	969°C	973°C	1000°C±10	8品目とも 0.2~0.9%
120分	1049°C	1075°C	1076°C	1100°C±10	8品目とも 0.2~1.7%
180分	1110°C	1137°C	1150°C	1150°C±10	1品目のみ8.5~8.6%、他は0.3~2.6%

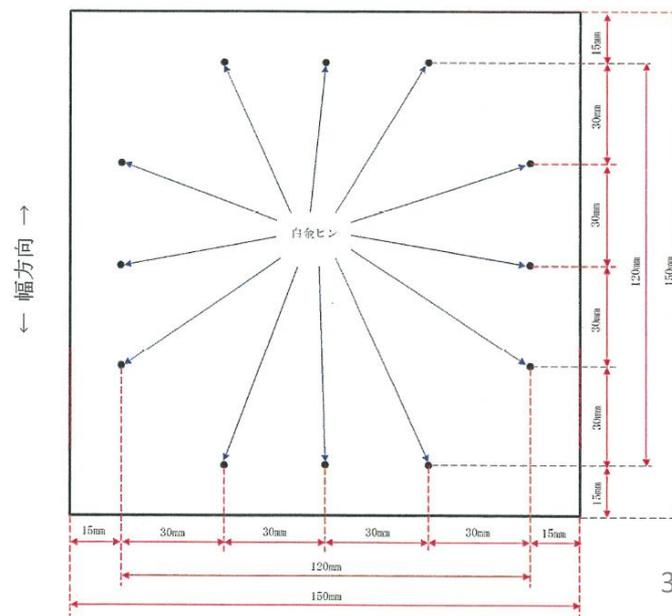
写真4

試料設置状況(電気炉内)



試料の寸法とピンの位置

← ロール方向 →



まとめ(1)

(1) 耐火構造柱(木材)の性能評価の合理化の検討

- 耐火試験の再現性を高め、評価の安定化を目的に、ISO834等の試験規格では十分に考慮されていない条件を整理し、統一方法について検討した。
- 試験時の放冷期間中の炉内環境：
 - 可燃材が燃え尽きる場合には、耐火炉の周壁等の材質、気積等を踏まえて、空気供給量を調整することにより、試験環境が安定する可能性がある。
 - 可燃材が放冷期間中も残存する場合には、可燃物表面積との関係を含めて、空気供給量を設定する必要がある。各試験炉の設定条件については追加的な検討が必要である。

(2) 耐火構造柱(鋼材)の性能評価の合理化の検討

- 複数の耐火試験結果やISO834-10,-11に規定される中規模の試験体を含んだパッケージ型の試験方法・評価方法の導入方法を検討した。
- 部材の幾何学的条件や熱特性を踏まえて、適切な試験体を複数選択することで、試験回数の削減と工学的合理性を有した適用範囲の拡張が可能となった。

まとめ(2)

(3) 壁の性能評価の合理化の検討

- 既存の告示仕様や大臣認定仕様に対して、防耐火上の支障無く表面材として張り足しが可能な材料種別や留め付け方法について整理した。
- 成果を活用して、既存の告示仕様や大臣認定仕様に対して張り足しを許容する材料一覧を提案する予定。

(4) 中小規模試験体の適用可能性の検討

- バリエーションの優劣・同等性判定方法として①実大炉を分割した比較試験方法、②小型炉を用いた比較試験方法について整理した。

(5) 材料単体の優劣・同等性判定手法の検討

- 高温時遮熱性・目地収縮性同時試験方法について提案し、実際の耐火試験との比較による妥当性の確認を行った。

(6) AESのRCFとの同等性評価方法の検討

- JIS R 3311:2008「セラミックファイバー」の熱収縮に関する試験方法、ISO834の標準加熱温度曲線による1, 2, 3時間加熱時の炉内温度等を踏まえて、評価方法を整理した。