

～パッケージ型評価試験の補足資料～

目次

1. パッケージ型評価試験とは
2. 従来の耐火性能評価との違い
3. 試験・評価方法の詳細
4. さいごに

1. パッケージ型評価試験とは

ISO834 Part10, 11 (2014年刊行)

耐火被覆された鋼部材を対象に、
被覆厚さと鋼材厚さ(断面形状係数)を変数とした
載荷加熱試験(実大)と加熱試験(中規模)を組み合わせ
耐火被覆システムの性能を合理的に評価する方法



鋼材厚さ(熱容量) 増加による温度上昇抑制効果を考慮できる



パッケージ型評価試験

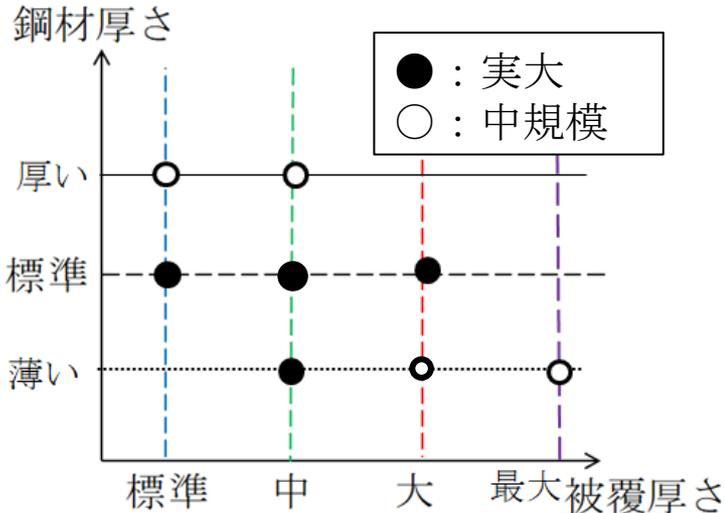
下記の委員会等で、日本における耐火設計・耐火性能評価の
現状に則して調整、検討された評価試験方法

- ◆平成27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壁の合理的な性能評価に関する検討
- ◆平成29年度 一般社団法人 建築性能基準推進協会 防耐火構造・材料部会 鋼部材評価法WG

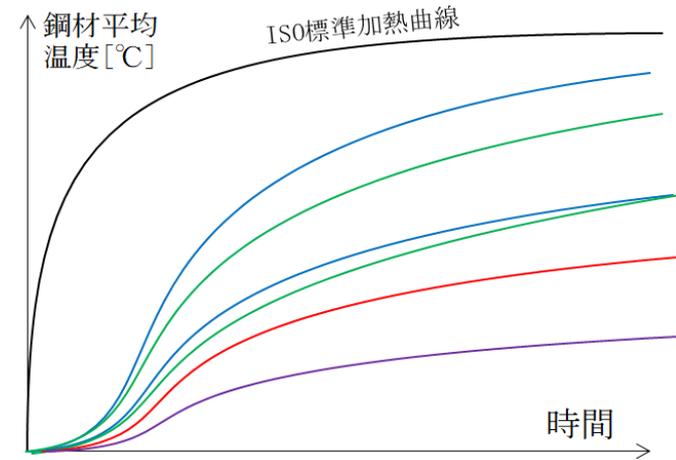
1. パッケージ型評価試験とは

イメージの

試験体



鋼材温度データ



過去の認定試験
データも活用可能

評価

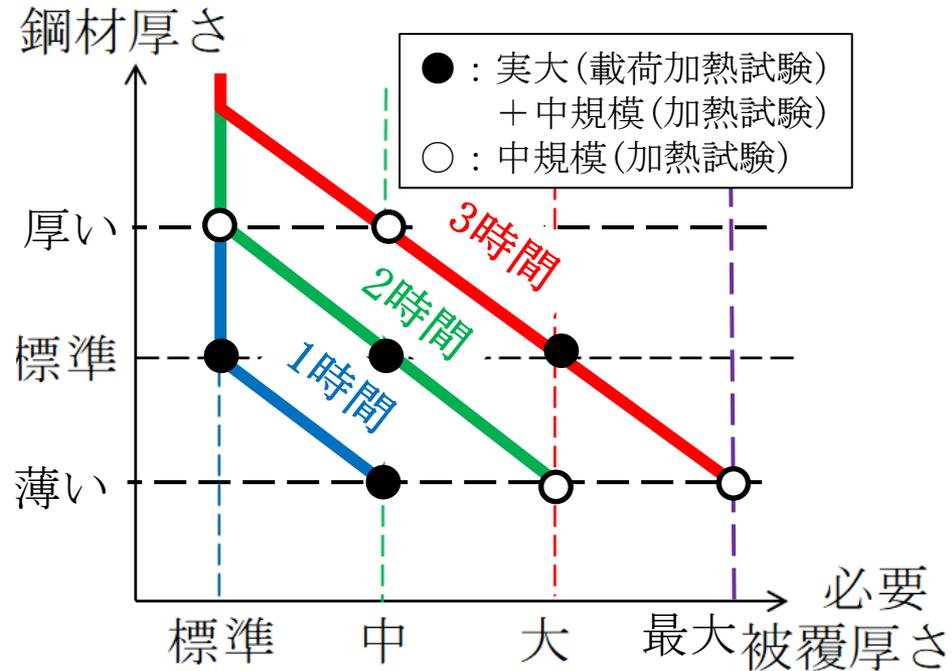
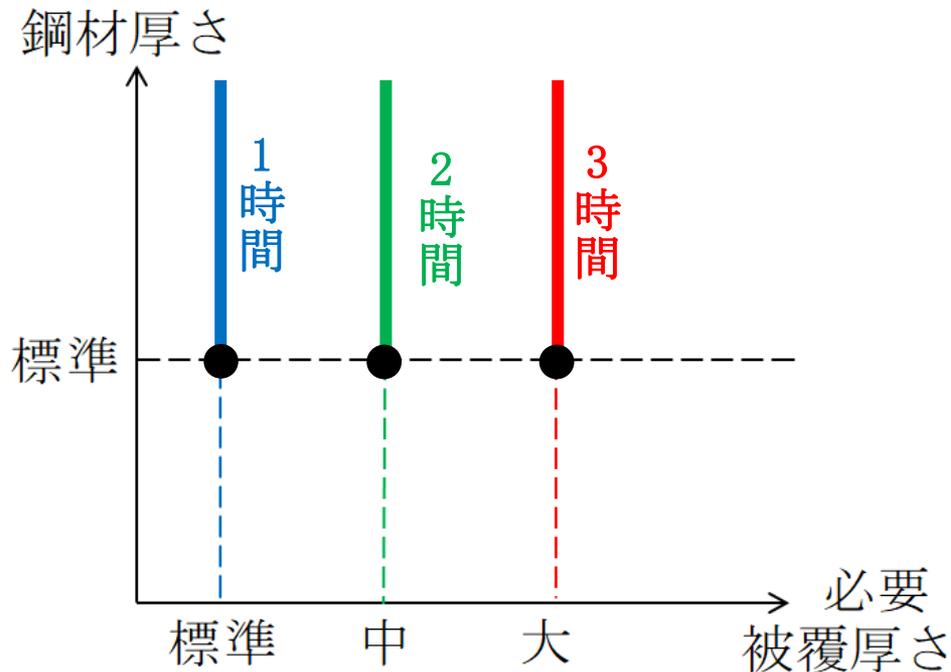
所定の耐火時間を満足する
鋼材厚さと被覆厚さの関係を
求める

熱物性値同定・温度計算

- 試験で得られた鋼材温度データを用いて被覆材の熱物性値を求める
- 熱物性値を用いてあらゆる鋼材厚さ、被覆厚さの条件で温度を計算

2. 従来の耐火性能評価との違い

	従来	パッケージ試験
試験	原則 1 仕様につき 実大載荷加熱2体	被覆厚さ・鋼材厚さを変数とする 実大載荷加熱＋中規模加熱 複数の組み合わせ
評価範囲	試験した断面 以上 〃 被覆厚さ 以上	熱容量増加を考慮した 必要被覆厚さvs鋼材厚さの関係



2. 従来の耐火性能評価との違い

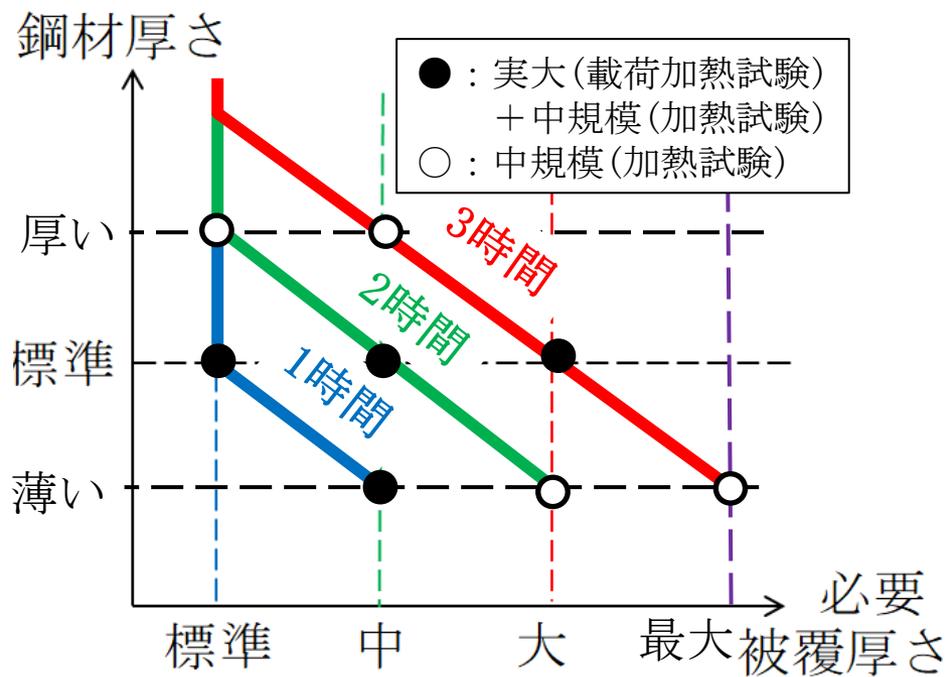
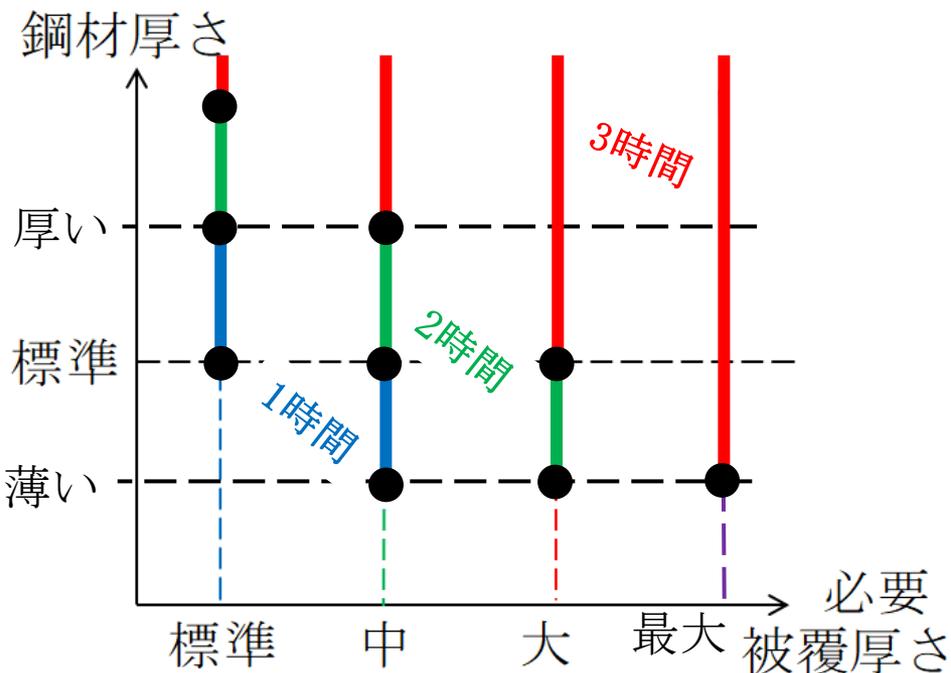
従来の性能評価で同様の認定を取得しようとする

- ◆試験体数が莫大となる
(下の例だと、18体の実大載荷加熱)
- ◆試験～認定に要する期間も長くなる
- ◆鋼材厚さ－被覆厚さ関係が不連続な階段状の評価となる



パッケージ試験だと

- ◆試験体数が大幅に減る
(下の例だと、6体の実大載荷加熱
+5体の中規模加熱)
- ◆中規模加熱試験は1回で可能なので、
期間短縮となる
- ◆鋼材厚さ－被覆厚さの連続的な
関係で評価できる



3. 試験・評価方法の詳細

適用範囲

IS0834 Part10, 11

- ◆部材 鋼柱、鋼梁
- ◆被覆材 Passive(非反応系)材料 e. g. 吹付RW、PB、けいカル板
Reactive(反応系)材料 e. g. 発泡塗料



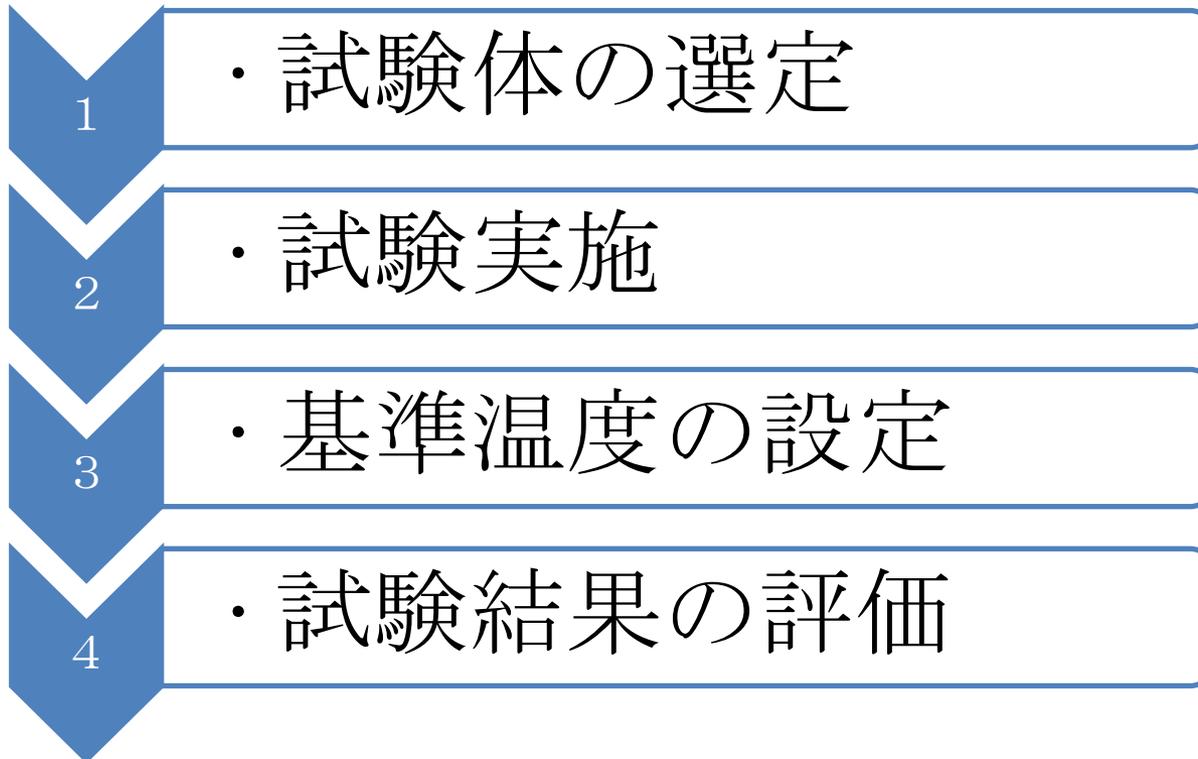
パッケージ試験

- ◆部材 鋼柱
- ◆被覆材 非反応系材料
- ◆被覆形式 単体被覆(≠壁との合成被覆)

※鋼梁や発泡塗料、壁との合成被覆については、適用範囲拡大に向け、今後の検討が必要

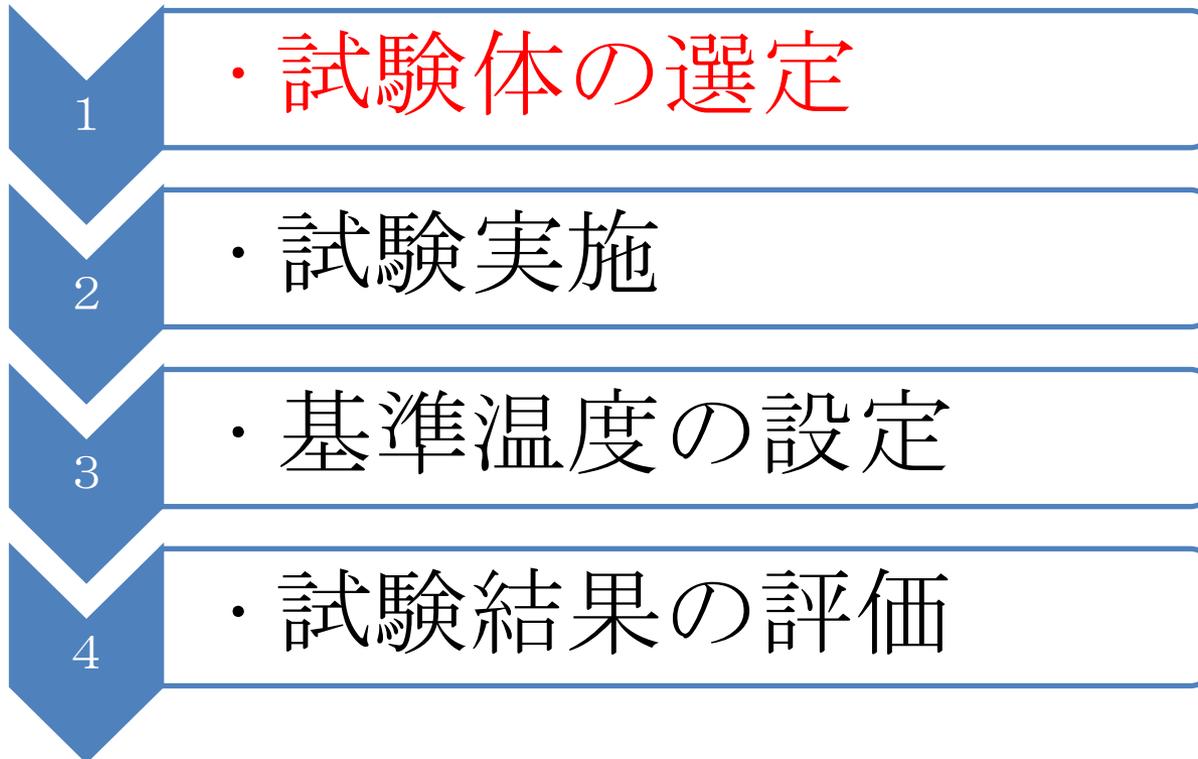
3. 試験・評価方法の詳細

パッケージ型評価試験の流れ



3. 試験・評価方法の詳細

パッケージ型評価試験の流れ



3. 試験・評価方法の詳細

試験体選定

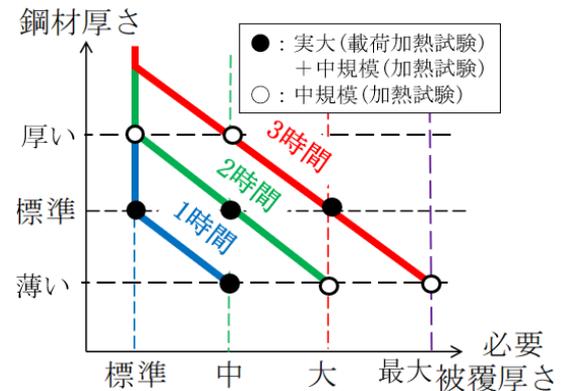
必要な被覆厚さの範囲で、平均鋼材厚さ $(H_s/A_s)^{-1}$ と基準温度到達時間の関係が適切に得られるよう試験体を選定する。

鋼材平均厚さ $(H_s/A_s)^{-1}$ (断面形状係数の逆数)	耐火被覆厚さ			
	A1 標準 1x	A2 中 2x	A3 大 3~4x	A4 最大
①厚い(2.0x) 例) □400×19	○	○	—	—
②標準(1.0x) □300×9, □400×9 H300×300×10×15	●○H	●○	●○H	—
③薄い(0.5x) 例) □100×4.5 H100×100×6×8	—	●○H	○	○H

- : 鋼管柱 载荷加熱試験(2体)
- : 鋼管柱 加熱試験(熱容量試験)
- H : H形柱 加熱試験(熱容量試験)

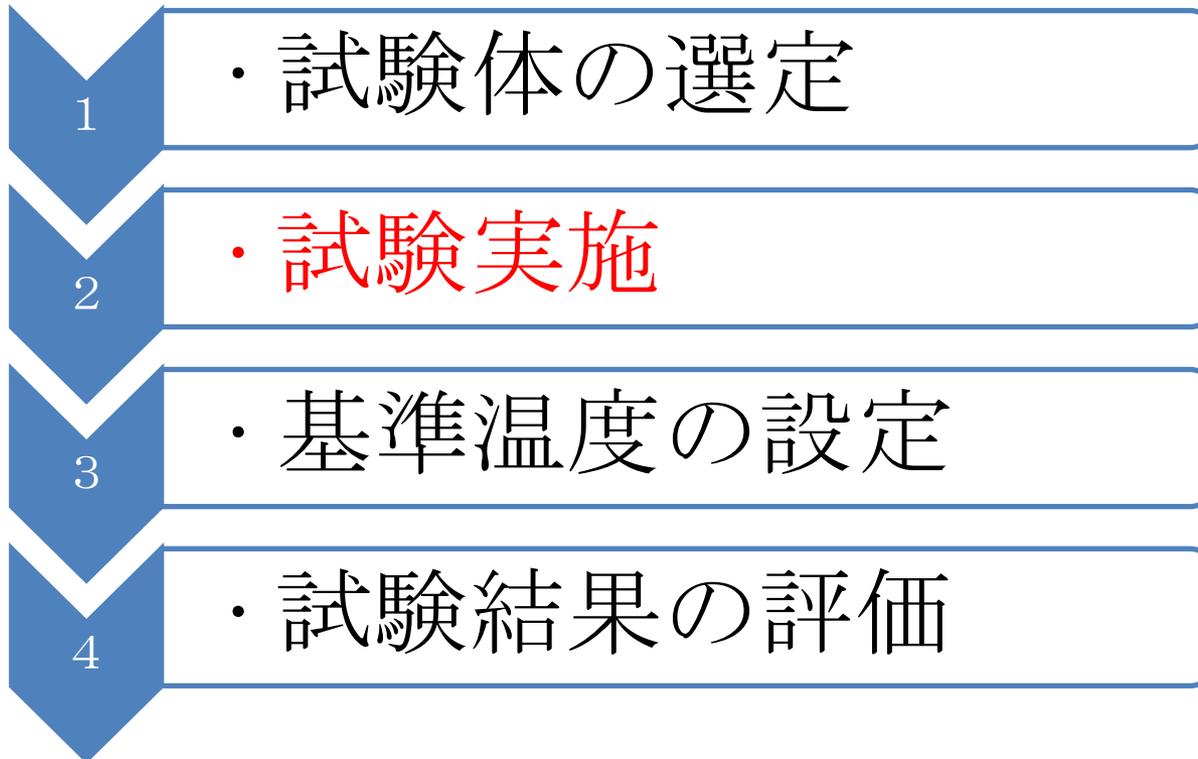
目標耐火時間

- 1時間耐火
- 2時間耐火
- 3時間耐火



3. 試験・評価方法の詳細

パッケージ型評価試験の流れ



3. 試験・評価方法の詳細

試験実施

◆ 実大規模試験体の**載荷加熱試験**
＝性能評価試験として実施

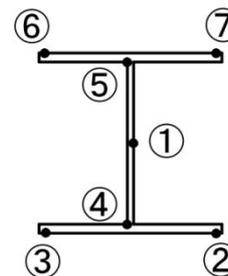
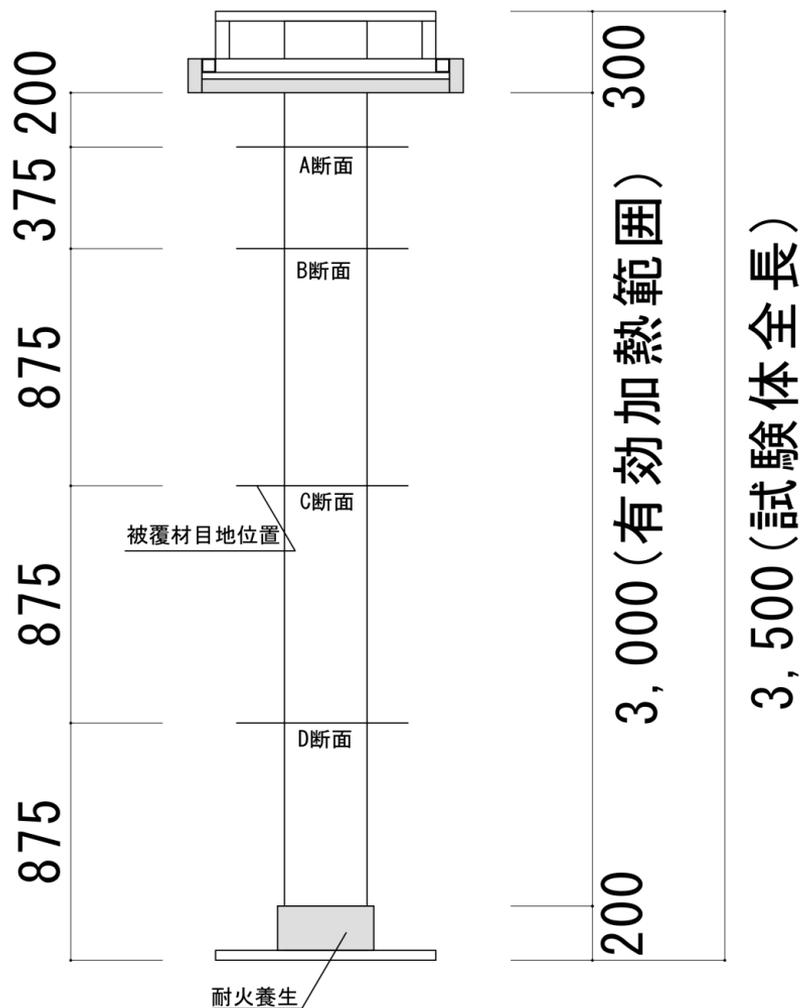
◆ 中規模試験体の**非載荷加熱試験**
＝性能確認試験として実施

➤ 全試験体の鋼材平均温度が550°Cに達するまで加熱を継続。
(後追いはなし)

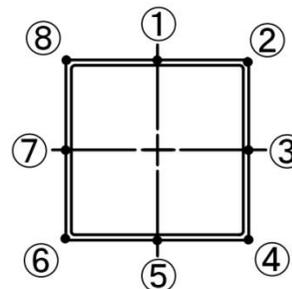
3. 試験・評価方法の詳細

試験実施

実大規模試験体の温度測定位置



H形鋼柱 (A断面～D断面)

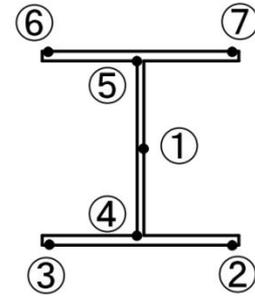
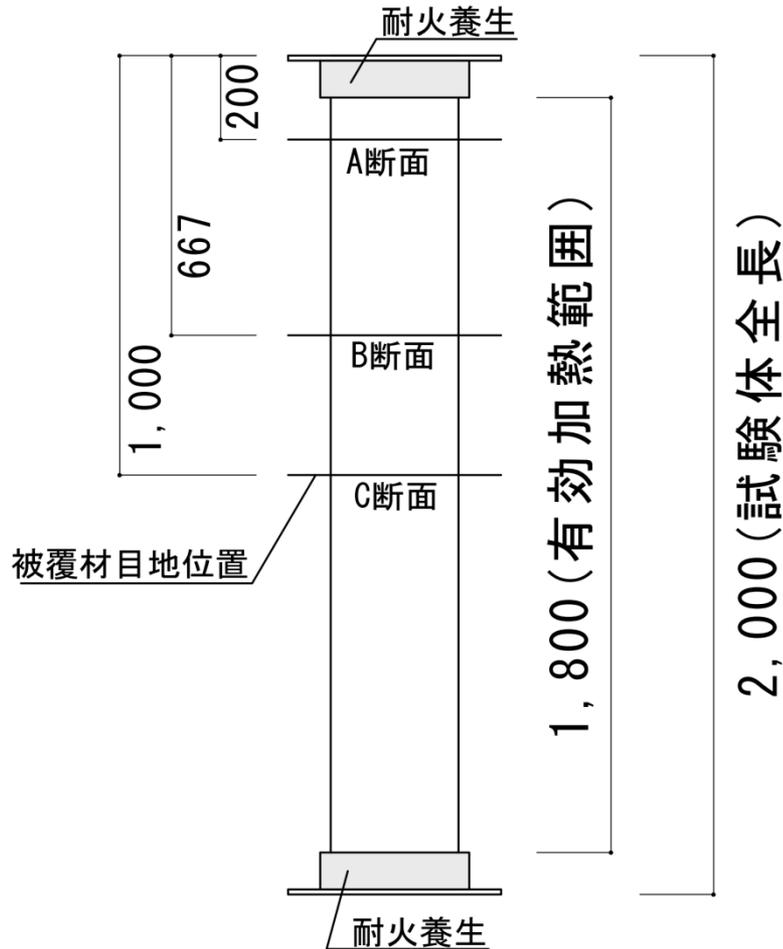


鋼管柱 (A断面～D断面)

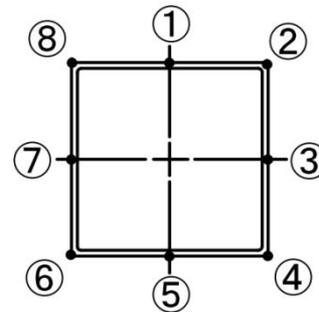
3. 試験・評価方法の詳細

試験実施

中規模試験体の温度測定位置



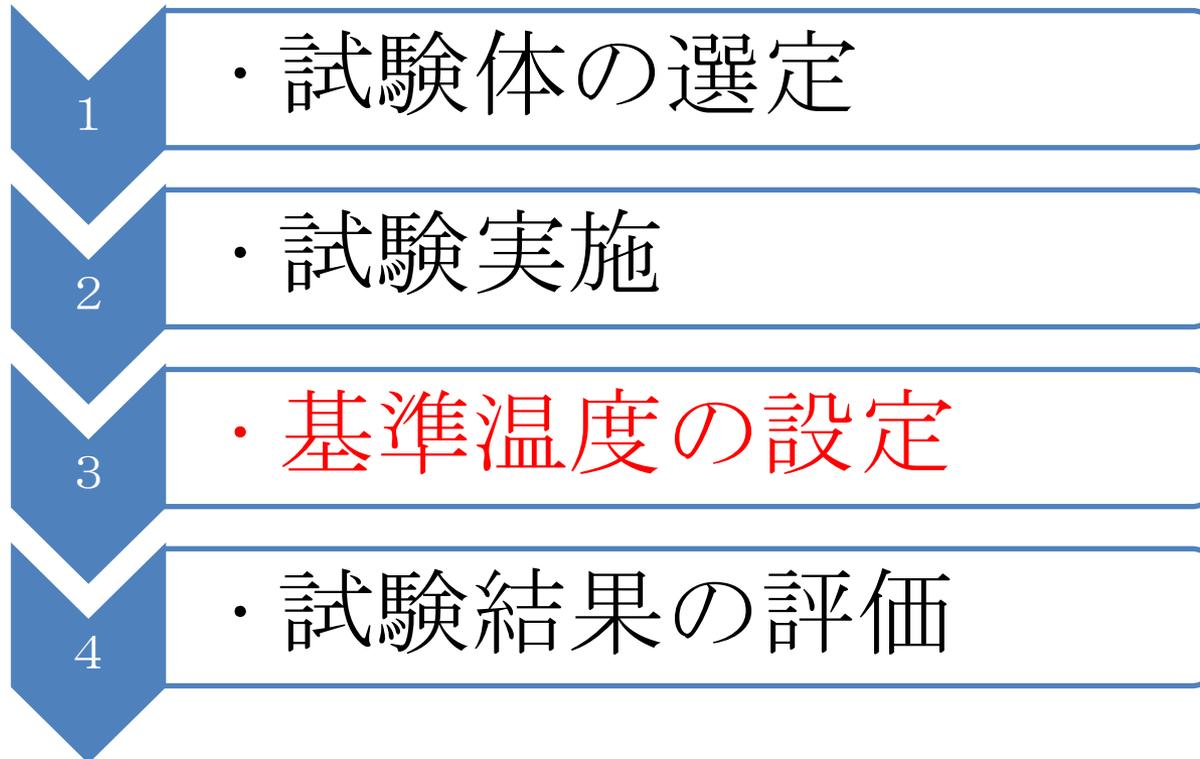
H形鋼柱 (A断面～C断面)



鋼管柱 (A断面～C断面)

3. 試験・評価方法の詳細

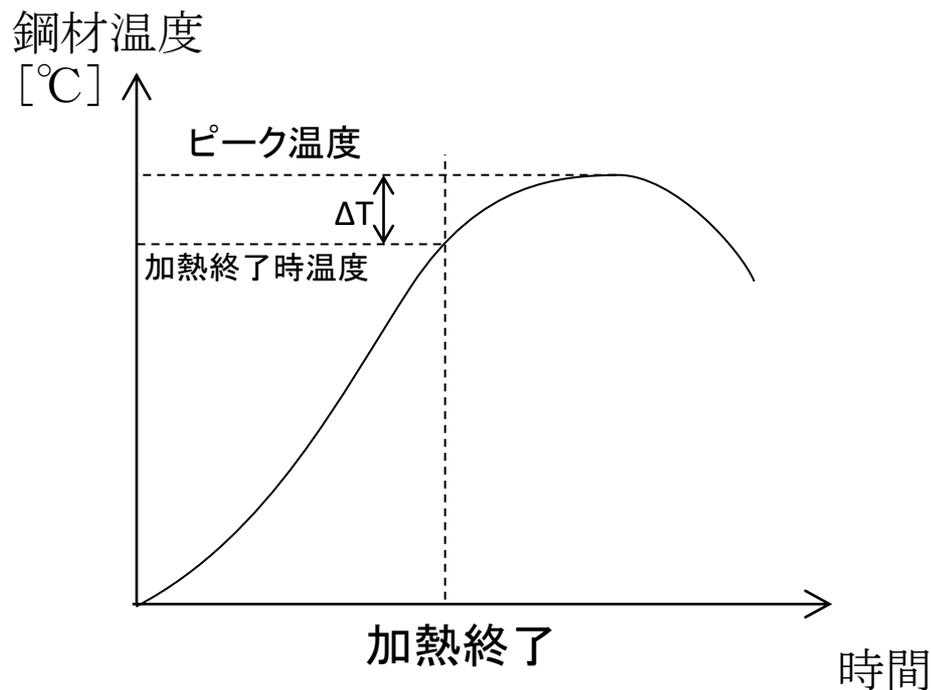
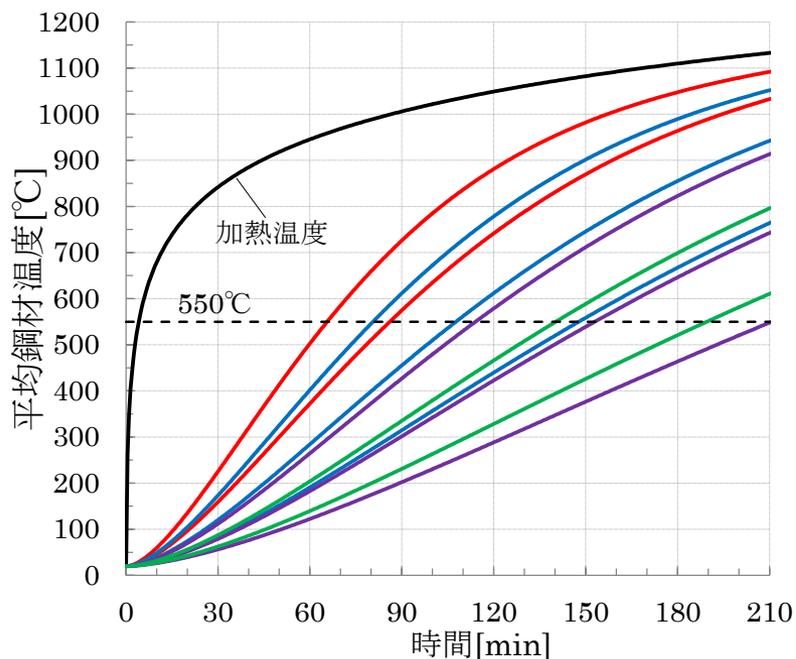
パッケージ型評価試験の流れ



3. 試験・評価方法の詳細

基準温度の設定

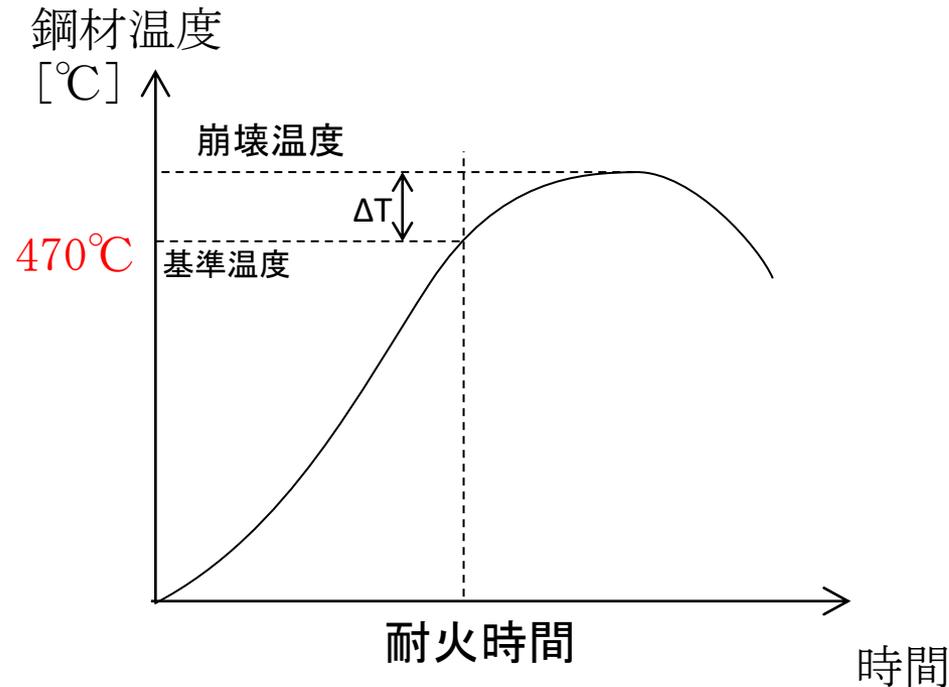
中規模加熱試験では、全試験体の平均鋼材温度550°Cまで同時加熱
⇒所定の耐火時間で加熱終了した後の温度上昇を確認できない



加熱終了後の温度上昇分を考慮しても、荷重支持部材が崩壊しない温度
＝パッケージ試験において耐火時間を決定するための基準温度を
決める必要がある

3. 試験・評価方法の詳細

基準温度の設定



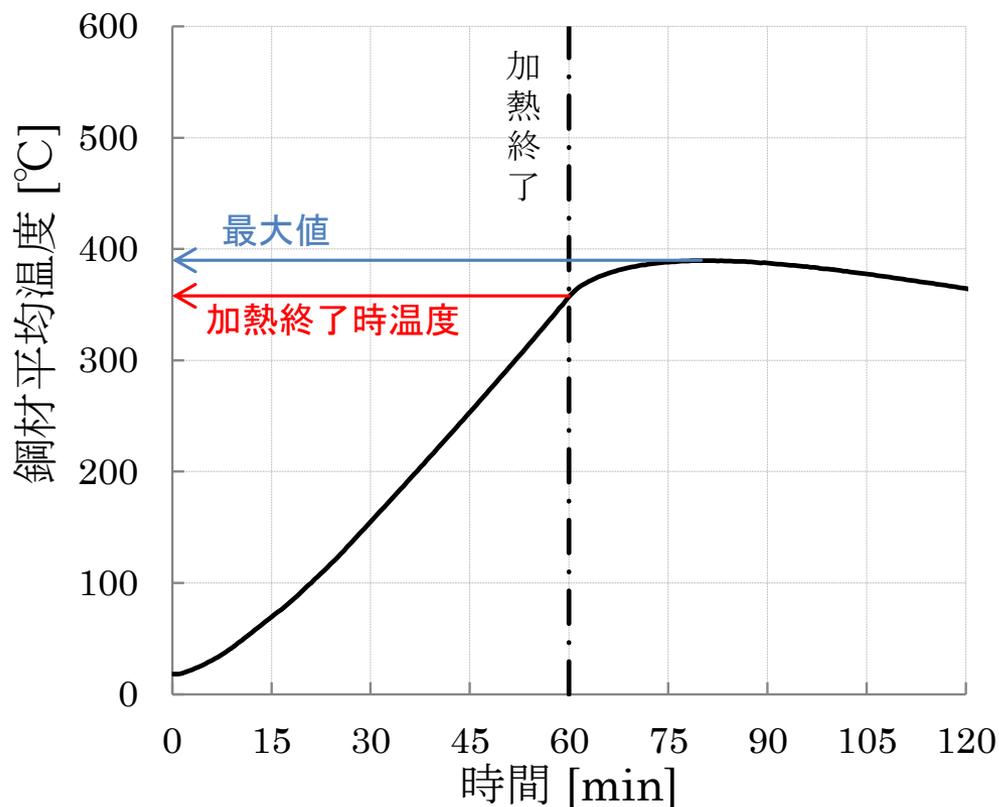
過去の評価試験における崩壊温度データ、および加熱終了後の温度上昇データから、単体被覆鋼柱の基準温度は原則、**470°C**とする

ただし、加熱終了後の温度上昇性状を考慮して、放冷過程でも500°Cに達さないことが明らかなる場合には、500°Cを上限に増加させることができる

3. 試験・評価方法の詳細

基準温度の設定

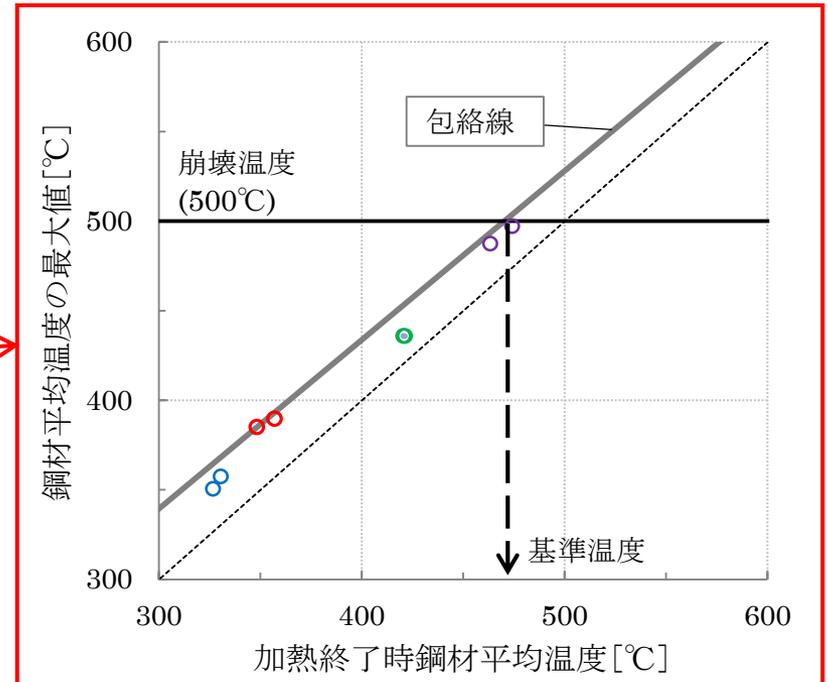
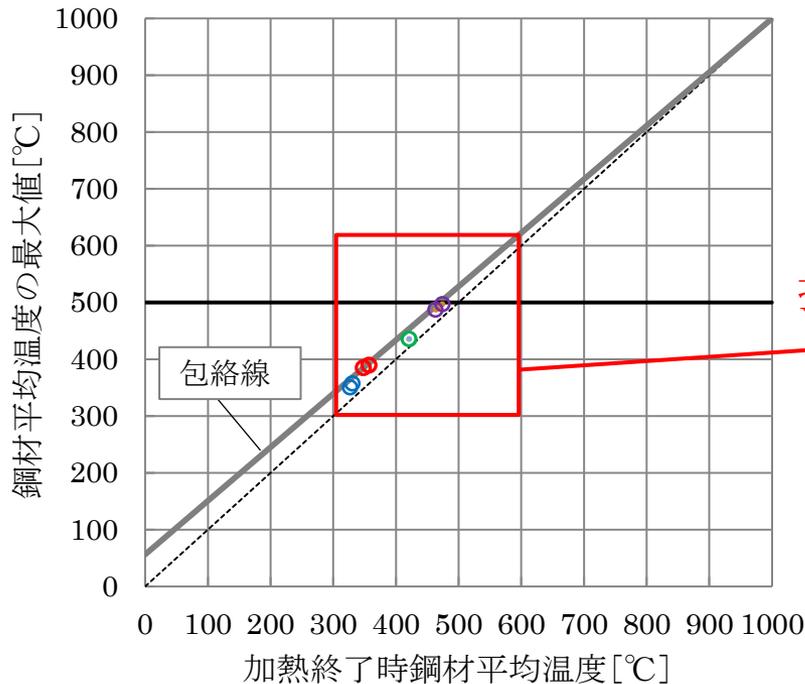
後追いありの载荷加熱試験などの鋼材温度データから
【加熱終了時温度】と【最大値】を読み取る



上記の加熱終了時温度と最大値の関係をプロットする
(次ページにつづく)

3. 試験・評価方法の詳細

基準温度の設定

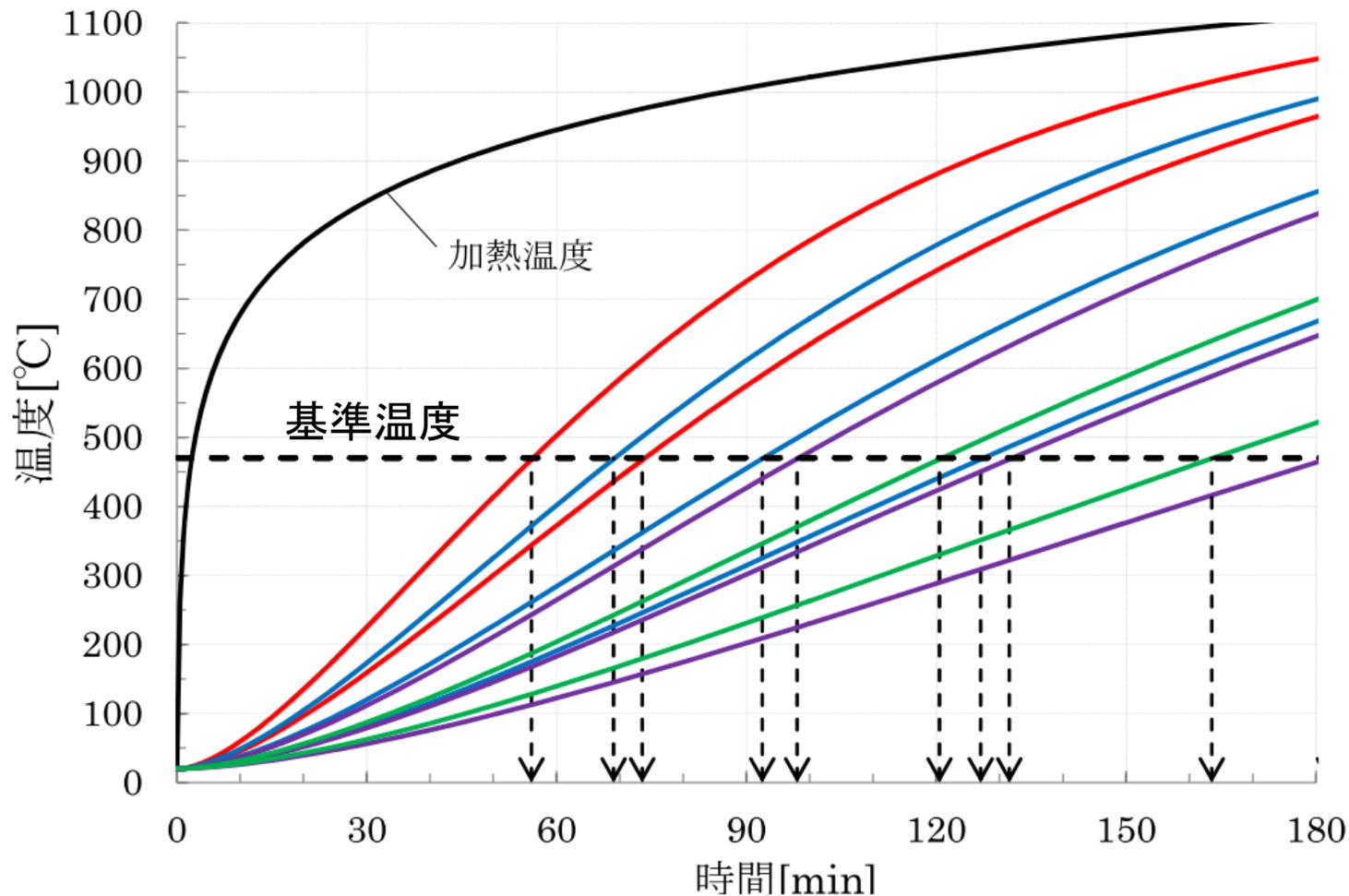


試験で得たプロットを包絡する直線を求め、
崩壊温度500°Cとの交点から基準温度を定める。

⇒後追い時の温度上昇が小さい被覆材の場合には、
基準温度を増加させることが可能

3. 試験・評価方法の詳細

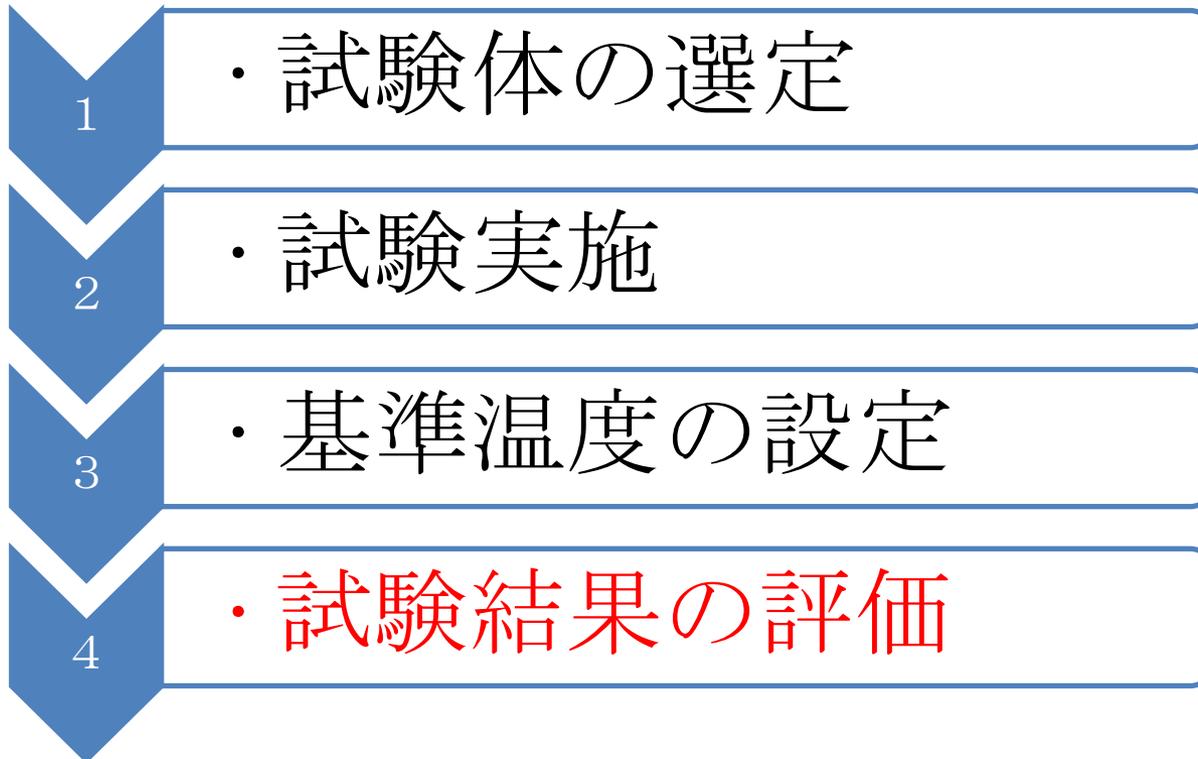
基準温度の設定



基準温度に達する時間が耐火時間となる

3. 試験・評価方法の詳細

パッケージ型評価試験の流れ



3. 試験・評価方法の詳細

試験結果の評価

ISO834 Part10, 11

- ◆ 図解法
- ◆ 差分法による熱伝導解析(λ : 被覆材温度の関数)
- ◆ 差分法による熱伝導解析(λ : 一定)
- ◆ 回帰分析
- ◆ 3D法(H_p/A ・被覆厚・耐火時間の3次元平面による図解法、反応性材料の評価に用いる)



パッケージ試験

- ◆ **耐火性能検証法**に基づき評価
⇒ 試験データから熱物性値を求め、熱伝導方程式を解析的に解くことで鋼材温度を計算する手法

3. 試験・評価方法の詳細

試験結果の評価

耐火性能検証法による鋼材温度計算の概要

熱収支モデル

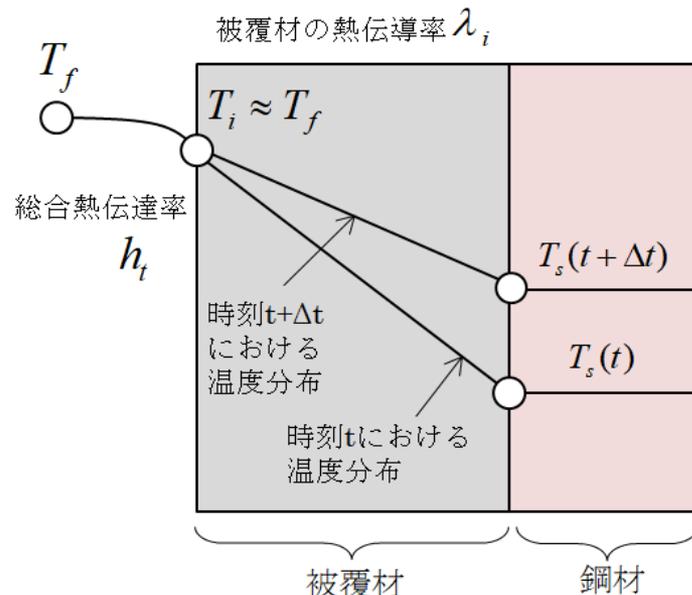
$$\left(\frac{\rho_i c_i A_i}{2} + \rho_s c_s A_s \right) \frac{dT_s}{dt} = \frac{1}{\frac{1}{h_t H_i} + \frac{1}{\lambda_i (H_i / A_i) H_s}} \{T_f(t) - T_s(t)\}$$

$$\Leftrightarrow \frac{dT_s}{dt} = h \{T_f(t) - T_s(t)\}$$

ここで

$$h = \frac{\phi K_0 (H_s / A_s)}{\left(1 + \frac{\phi R}{H_i / A_i} \right) \left(1 + \frac{\phi H_s / A_s}{2 H_i / A_i} C \right)}$$

- K_0 : 基本温度上昇速度 (鋼材形状で決まる)
- $\phi = H_i / H_s$: 周長比 (被覆材・鋼材寸法で決まる)
- $C = \rho_i c_i / \rho_s c_s$: 熱容量比 (被覆材種類で決まる)
- $R = h_t / \lambda_i$: 熱抵抗係数



: 部材温度上昇係数

3. 試験・評価方法の詳細

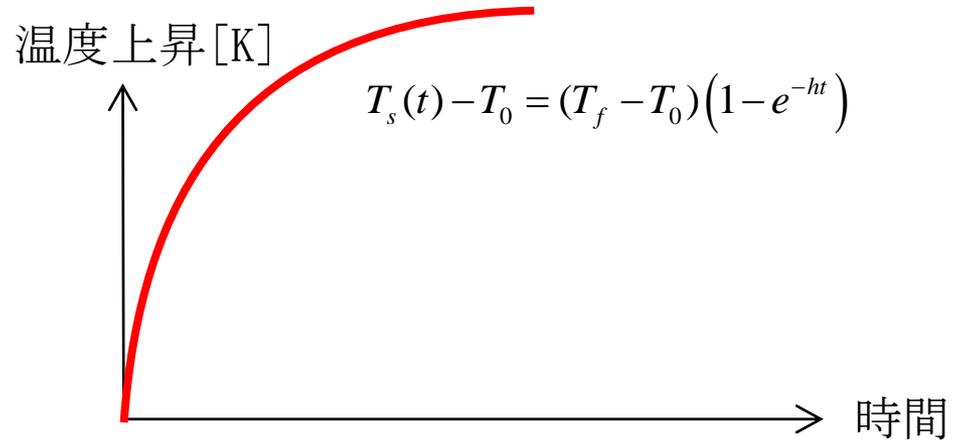
試験結果の評価

耐火性能検証法による鋼材温度計算の概要

$$\frac{dT_s}{dt} = h \{ T_f(t) - T_s(t) \}$$

加熱温度が時間的に一定の仮定により
鋼材温度上昇は以下となる。

$$T_s(t) - T_0 = (T_f - T_0) (1 - e^{-ht})$$

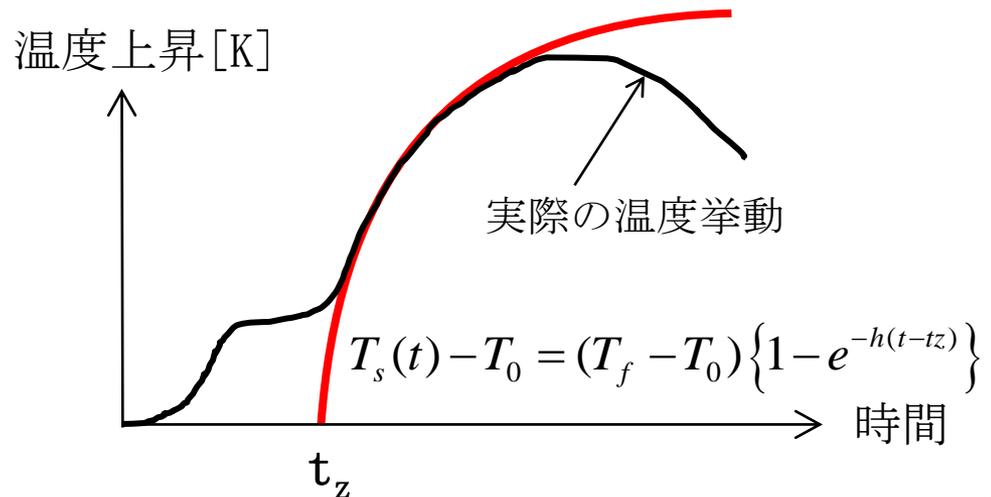


実際には…

被覆材裏面への熱浸透や
水分蒸発による潜熱の影響

$$T_s(t) - T_0 = (T_f - T_0) \{ 1 - e^{-h(t-t_z)} \}$$

⇒温度上昇遅延時間 t_z だけ温度上昇の
開始を遅らせることで実際の挙動を再現

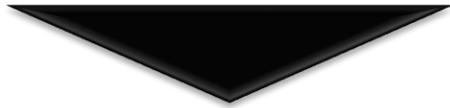


3. 試験・評価方法の詳細

試験結果の評価

耐火性能検証法による鋼材温度計算の概要

$$T_s(t) - T_0 = (T_f - T_0) \left\{ 1 - e^{-h(t-t_z)} \right\}$$



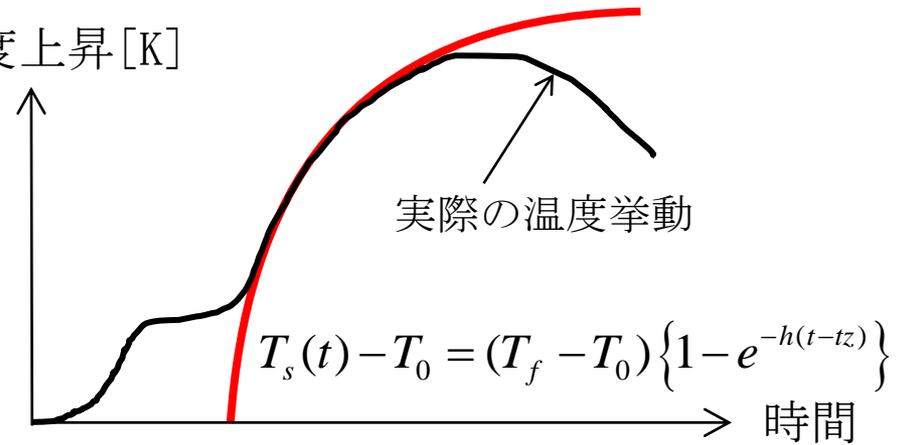
温度上昇遅延時間 t_z と

部材温度上昇係数 h が求めれば、温度計算できる。

$$h = \frac{\phi K_0 (H_s / A_s)}{\left(1 + \frac{\phi R}{H_i / A_i} \right) \left(1 + \frac{\phi H_s / A_s}{2 H_i / A_i} C \right)}$$

- K_0 : 基本温度上昇速度
- $\phi = H_i / H_s$: 周長比
- $C = \rho_i c_i / \rho_s c_s$: 熱容量比
- $R = h_i / \lambda_i$: 熱抵抗係数

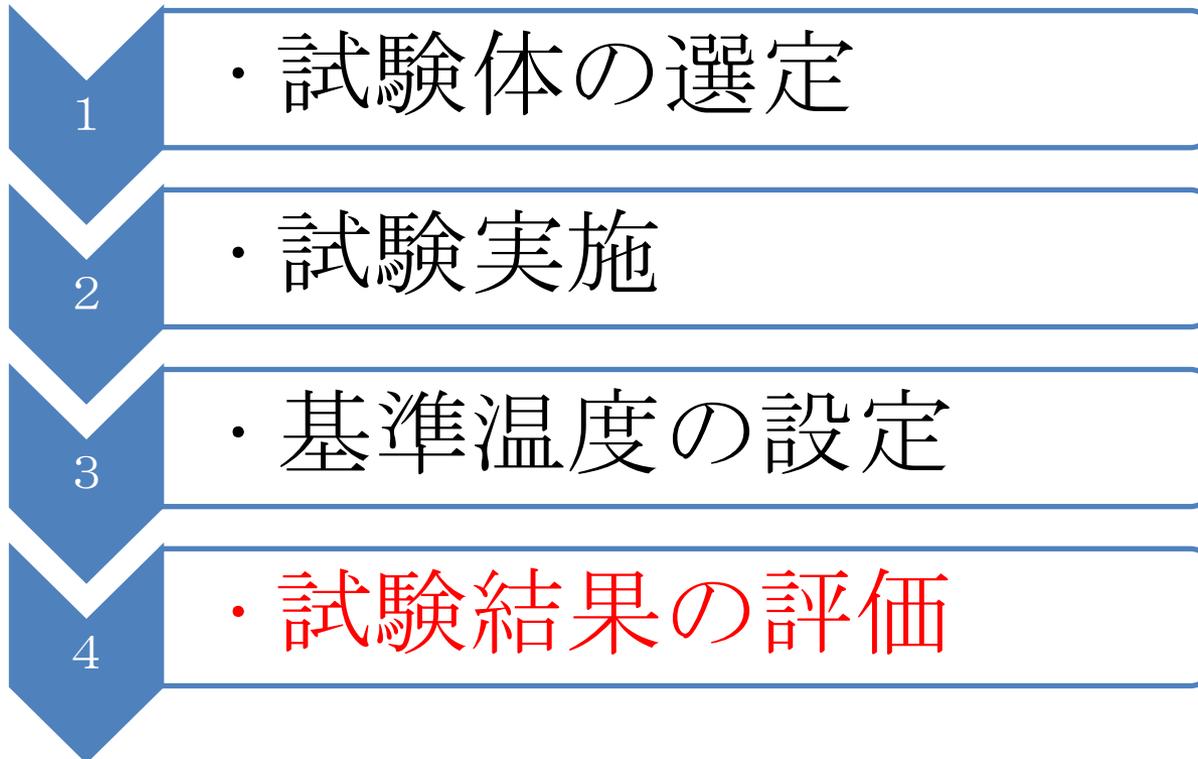
温度上昇 [K]



熱抵抗係数 R が求めれば、さらに自由な条件で温度計算できる

3. 試験・評価方法の詳細

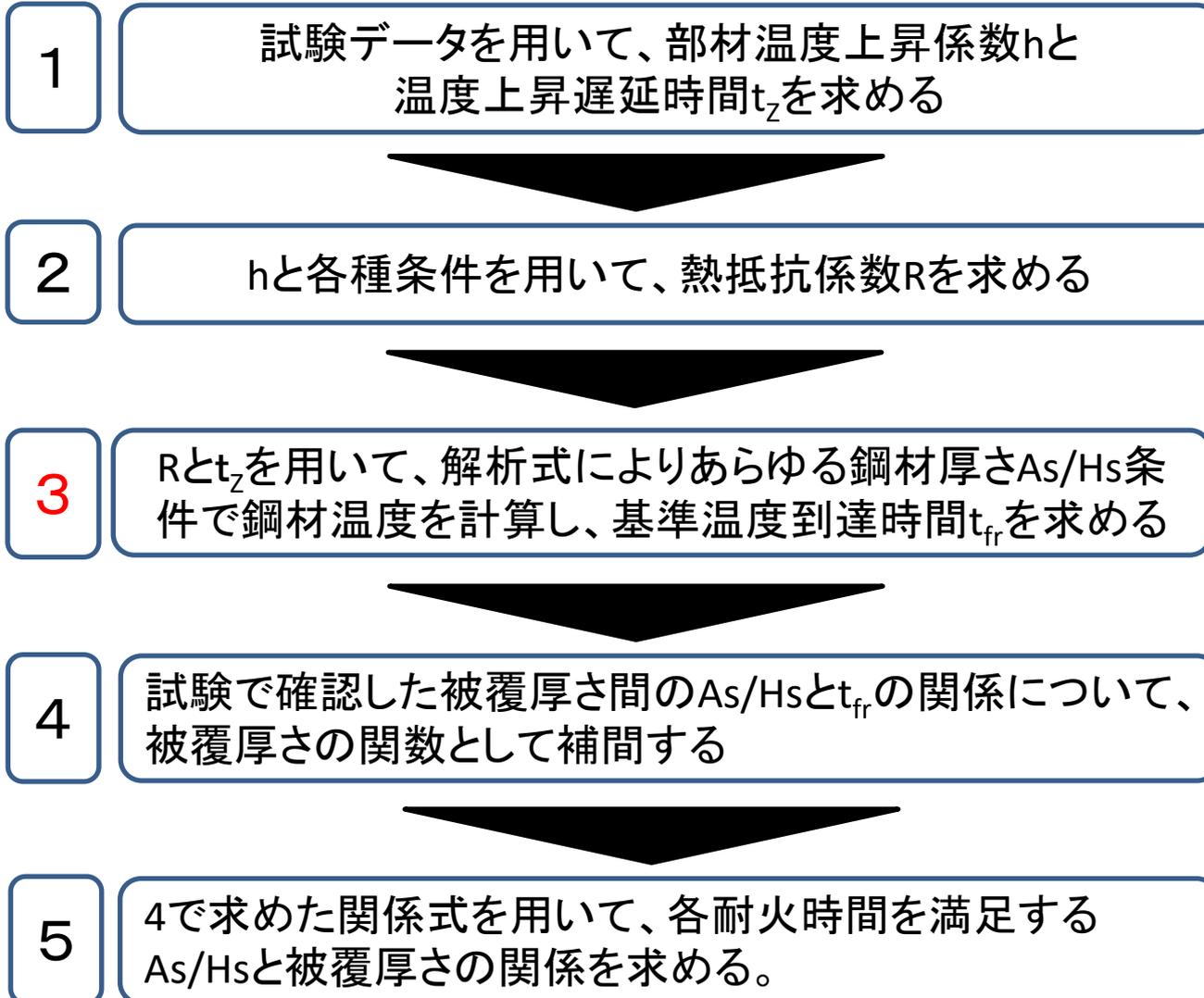
パッケージ型評価試験の流れ



3. 試験・評価方法の詳細

試験結果の評価

試験結果評価のフロー



3. 試験・評価方法の詳細

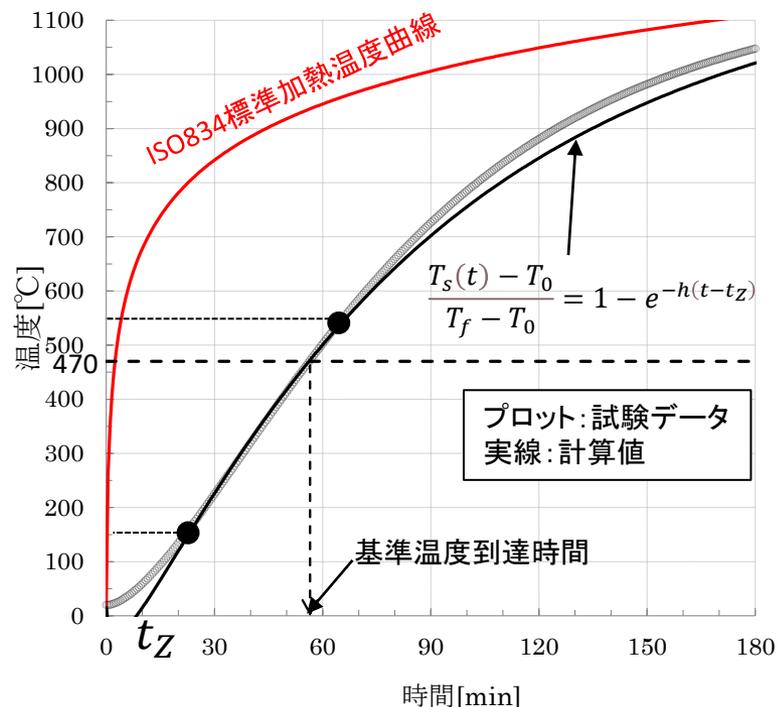
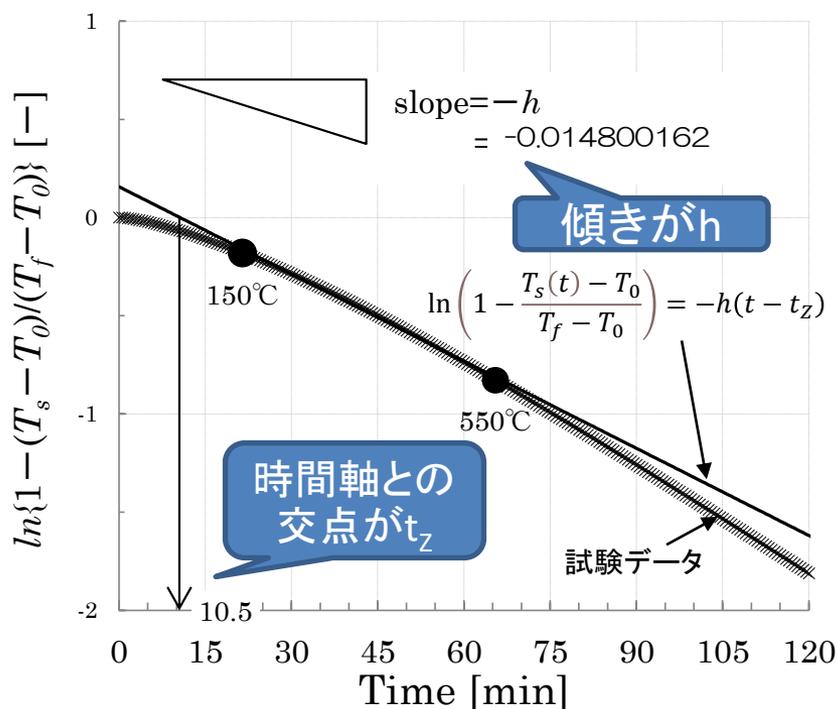
試験結果の評価

1

試験データを用いて、部材温度上昇係数 h と温度上昇遅延時間 t_z を求める

$$T_s(t) - T_0 = (T_f - T_0) \{1 - e^{-h(t-t_z)}\} \Leftrightarrow \ln \left(1 - \frac{T_s(t) - T_0}{T_f - T_0} \right) = -h(t - t_z)$$

算出の一例を示す。データには試験体鋼材温度の平均値を用いる。



フィッティングする下限温度および上限温度が低いと、小さい h が算出される(性能が高く評価される)

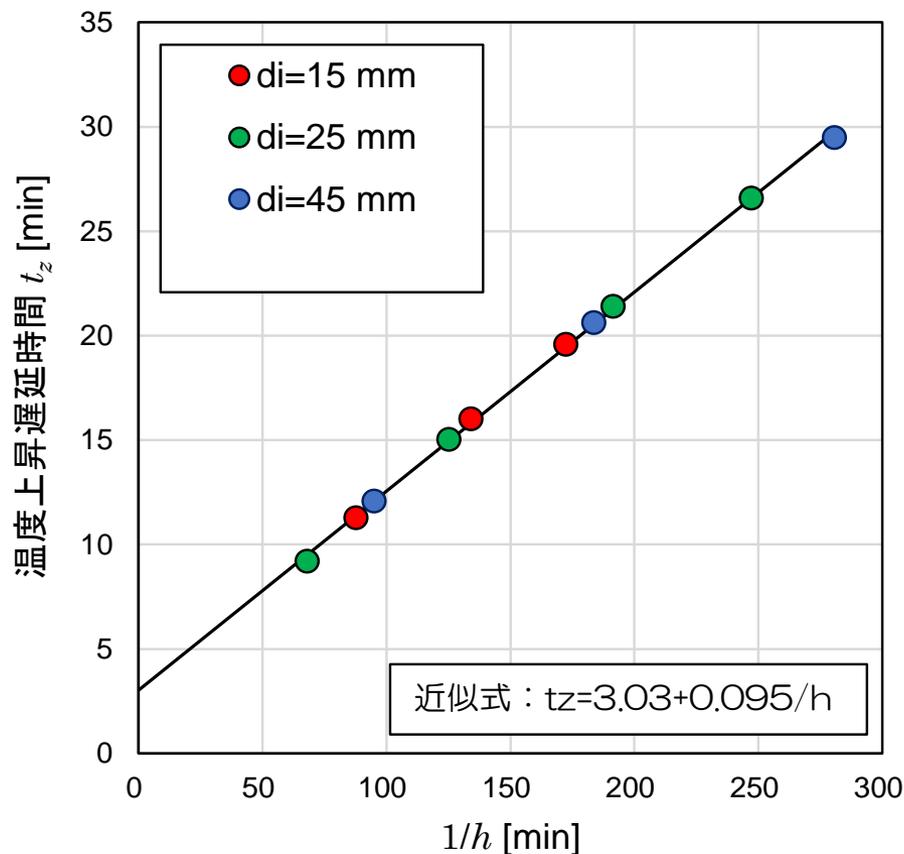
プロットが試験データ
実線が計算結果

3. 試験・評価方法の詳細

試験結果の評価

1

試験データを用いて、部材温度上昇係数 h と温度上昇遅延時間 t_z を求める



『耐火性能検証法』では平均被覆厚さ A_i/H_i の2乗に比例するとしているが、上図では、 $1/h$ との相関が最もよかったため、 t_z は h の関数としている。
(実務では相関の良い変数を用いれば良い)

3. 試験・評価方法の詳細

試験結果の評価

2

hと各種条件を用いて、熱抵抗係数Rを求める

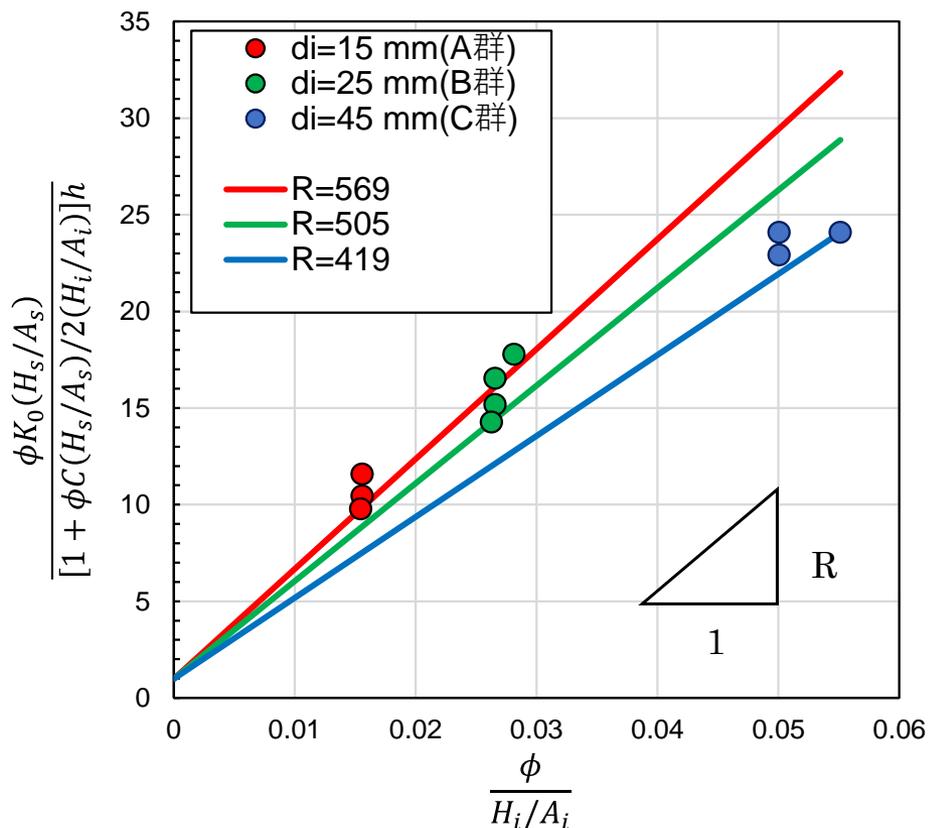
$$h = \frac{\phi K_0 (H_s / A_s)}{\left(1 + \frac{\phi R}{H_i / A_i}\right) \left(1 + \frac{\phi H_s / A_s}{2 H_i / A_i} C\right)}$$

$$\Leftrightarrow \frac{\phi K_0 (H_s / A_s)}{1 + \phi C (H_s / A_s) / 2 (H_i / A_i)} \frac{1}{h} = \frac{\phi}{(H_i / A_i)} R + 1$$

各試験データのhと
各種情報を右図にプロット
して傾きからRを求める



被覆厚さ毎に
最小のRを採用する



3. 試験・評価方法の詳細

試験結果の評価

3 Rとt_zを用いて、解析式によりあらゆる鋼材厚さAs/Hs条件下で鋼材温度を計算し、基準温度到達時間t_{fr}を求める

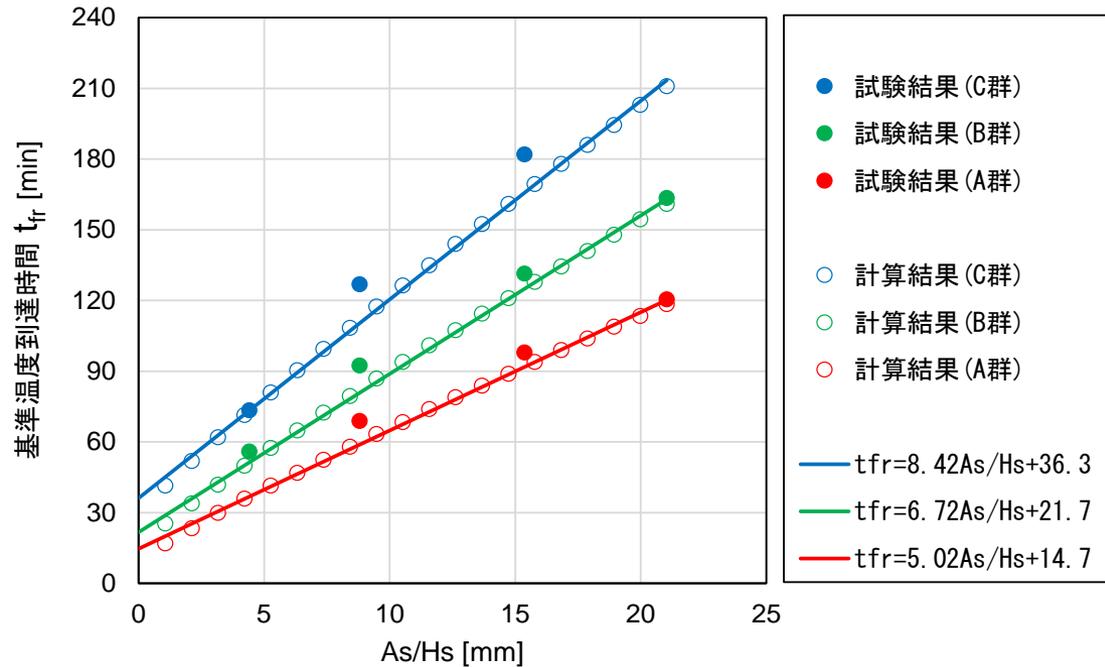
下式を用いてT_sが基準温度470℃となる時間t_{fr}を求める。

$$T_s = \{345 \log_{10}(8t + 1) - T_0\}(1 - e^{-h(t-t_z)}) + T_0$$

$$h = \frac{\phi K_o (H_s / A_s)}{\left\{1 + \frac{\phi R}{(H_i / A_i)}\right\} \left\{1 + \frac{\phi (H_s / A_s)}{2 (H_i / A_i)} C\right\}}$$

$$t = f(T_s)$$

解析解を導くのが困難
↓
数値計算等で解く必要がある

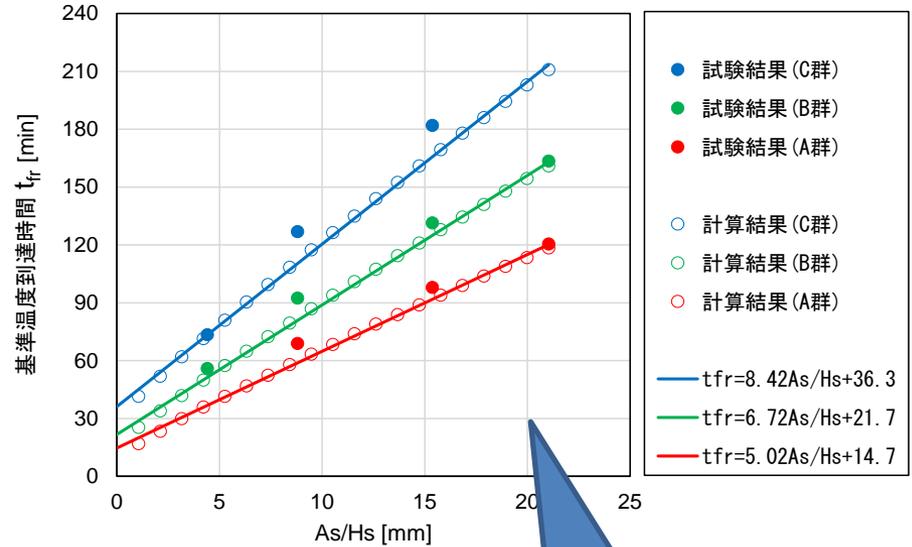
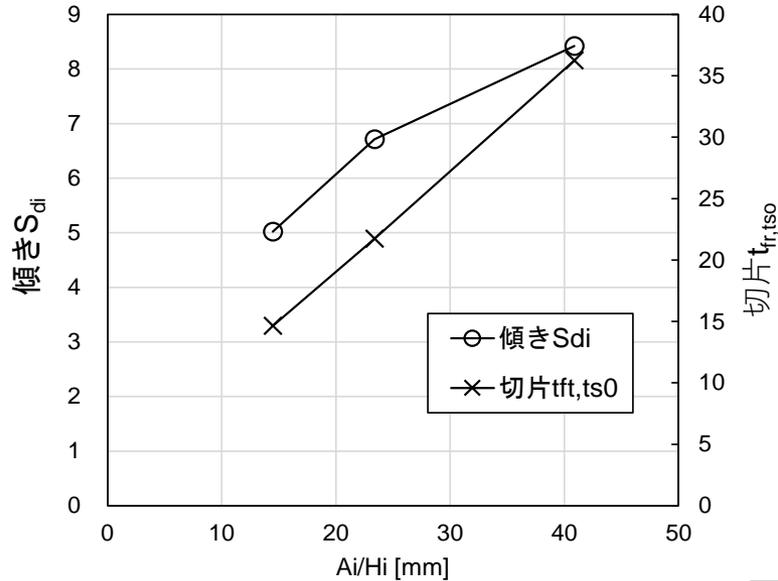


3. 試験・評価方法の詳細

試験結果の評価

4

試験で確認した被覆厚さ間のAs/Hsと t_{fr} の関係について、被覆厚さの関数として補間する



ここで、 $d_i = A_i/H_i$

$$t_{fr} = S_{di} \frac{1}{H_s / A_s} + t_{fr,ts0}$$

15 ≤ d_i < 25 のとき

$$\begin{cases} S_{di} = A_1 d_i + B_1 \\ t_{fr,ts0} = C_1 d_i + D_1 \end{cases}$$

25 ≤ d_i ≤ 45 のとき

$$\begin{cases} S_{di} = A_2 d_i + B_2 \\ t_{fr,ts0} = C_2 d_i + D_2 \end{cases}$$

計算結果が実験結果よりも安全側であることを確認

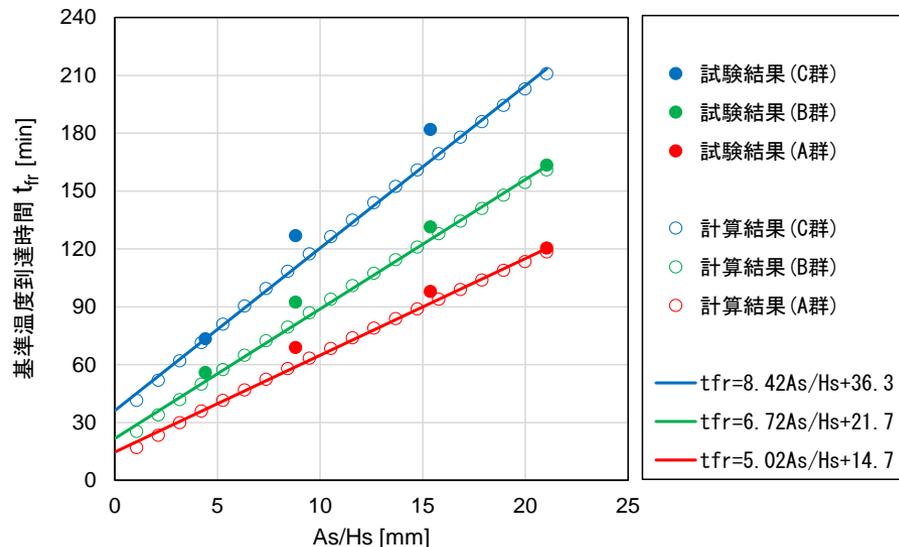
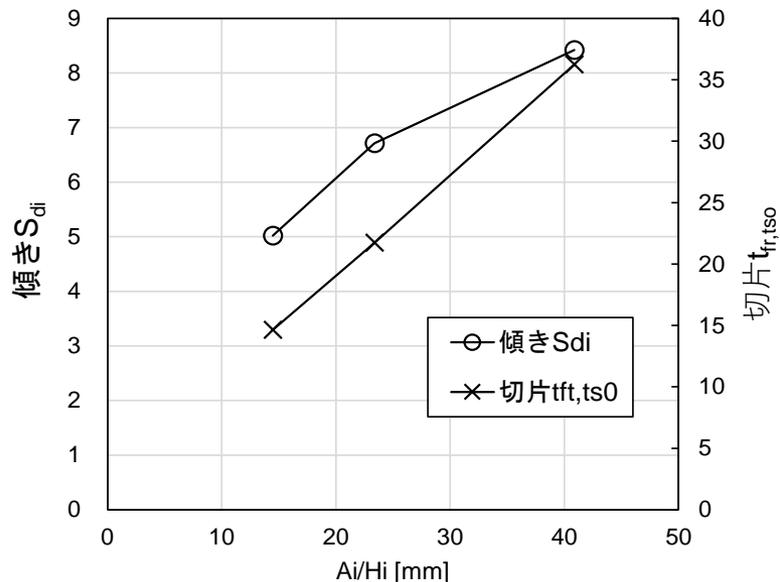
危険側の場合、Rを下げて安全側の計算となるよう調整する

3. 試験・評価方法の詳細

試験結果の評価

5

4で求めた関係式を用いて、各耐火時間を満足する A_s/H_s と必要被覆厚さの関係を求める。



ここで、 $d_i = A_i/H_i$

$$t_{fr} = S_{di} \frac{1}{H_s / A_s} + t_{fr,ts0}$$

$$15 \leq d_i < 25 \text{ のとき } \begin{cases} S_{di} = A_1 d_i + B_1 \\ t_{fr,ts0} = C_1 d_i + D_1 \end{cases}$$

$$25 \leq d_i \leq 45 \text{ のとき } \begin{cases} S_{di} = A_2 d_i + B_2 \\ t_{fr,ts0} = C_2 d_i + D_2 \end{cases}$$

$$A_s/H_s = \frac{t_{fr} - (C_1 d_i + D_1)}{(A_1 d_i + B_1)}$$

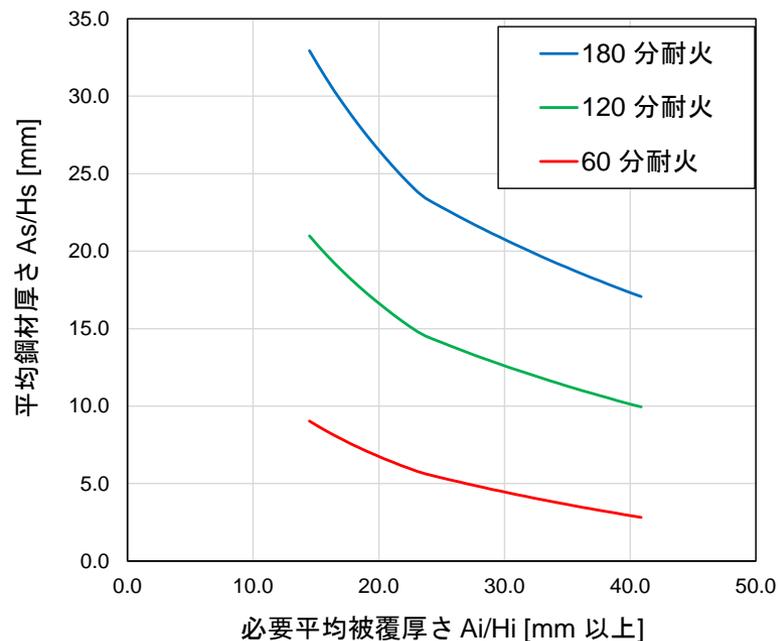
$$A_s/H_s = \frac{t_{fr} - (C_2 d_i + D_2)}{(A_2 d_i + B_2)}$$

3. 試験・評価方法の詳細

試験結果の評価

5

4で求めた関係式を用いて、各耐火時間を満足するAs/Hsと必要被覆厚さの関係を求める。



60分耐火		120分耐火		180分耐火	
平均鋼材厚さ As/Hs [mm]	必要平均被覆厚さ Ai/Hi [mm以上]	平均鋼材厚さ As/Hs [mm]	必要平均被覆厚さ Ai/Hi [mm以上]	平均鋼材厚さ As/Hs [mm]	必要平均被覆厚さ Ai/Hi [mm以上]
9.0	14.5	21.0	14.5	32.9	14.5
8.4	15.8	19.8	15.8	31.2	15.8
7.8	17.1	18.7	17.1	29.6	17.1
7.3	18.4	17.7	18.4	28.1	18.4
6.8	19.8	16.8	19.8	26.8	19.8
6.4	21.1	16.0	21.1	25.5	21.1
6.0	22.4	15.2	22.4	24.4	22.4
5.6	23.7	14.5	23.7	23.4	23.7
5.4	25.0	14.1	25.0	22.8	25.0
5.1	26.4	13.7	26.4	22.2	26.4
4.9	27.7	13.3	27.7	21.7	27.7
4.6	29.0	12.9	29.0	21.2	29.0
4.4	30.3	12.5	30.3	20.6	30.3
4.2	31.6	12.2	31.6	20.1	31.6
4.0	33.0	11.8	33.0	19.7	33.0
3.8	34.3	11.5	34.3	19.2	34.3
3.6	35.6	11.1	35.6	18.7	35.6
3.4	36.9	10.8	36.9	18.3	36.9
3.2	38.2	10.5	38.2	17.9	38.2
3.0	39.5	10.2	39.5	17.5	39.5
2.8	40.9	9.9	40.9	17.1	40.9

注) 平均鋼材厚さが表の中間の値の場合は、その間の平均被覆厚さは厚い方の数値以上とする。

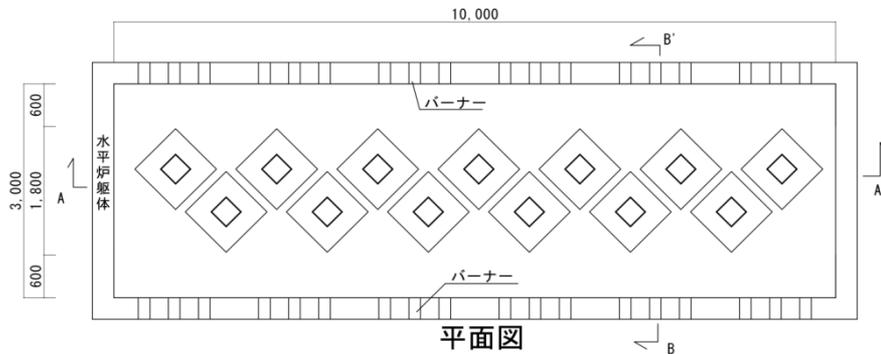
4. さいごに

パッケージ型評価試験のメリット

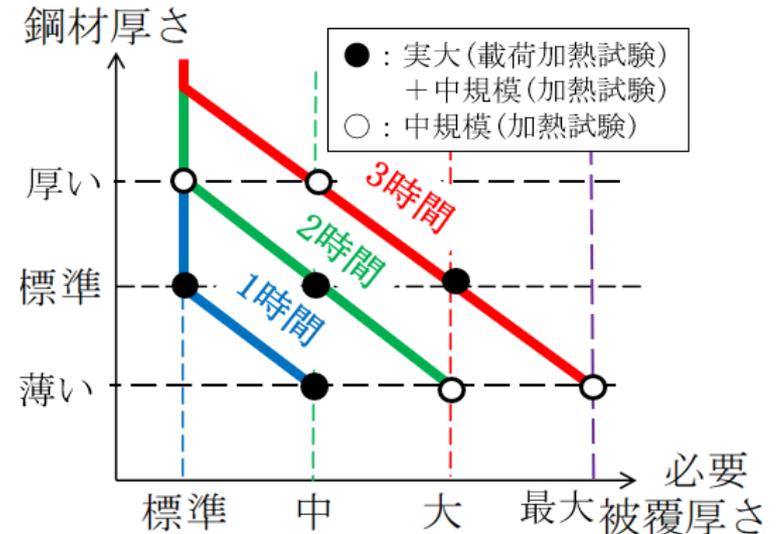
従来の評価試験に比べて、

- ①少ない試験体数
- ②短い期間(同時に複数体の試験が可能のため)
- ③より合理的な鋼材厚さと必要被覆厚さの関係での幅広い範囲の認定取得が可能

中規模試験体の配置イメージ



認定範囲のイメージ



4. さいごに

今後の課題

- ◆ **適用範囲拡大**に向けての追加検討
(鋼梁・発泡塗料・壁との合成耐火など)