

【公開版】

日本原燃株式会社	
資料番号	耐震建物 15 <u>R3</u>
提出年月日	令和 3 年 <u>8 月 31 日</u>

## 設工認に係る補足説明資料

### 耐震計算書に関する

### 応力解析におけるモデル化，境界条件及び拘束条件の考え方

注記：文中の下線部は R2 から R3 への変更箇所を示す

## 目 次

1. 概要 .....	1
2. 応力解析におけるモデル化, 境界条件及び拘束条件 .....	2
別紙 1 安全冷却水 B 冷却塔基礎の応力解析におけるモデル化, 境界条件及び拘束条件の 考え方	
別紙 2 燃料加工建屋の応力解析におけるモデル化, 境界条件及び拘束条件の考え方	
別紙 3 前処理建屋の応力解析におけるモデル化, 境界条件及び拘束条件の考え方	
別紙 4 分離建屋の応力解析におけるモデル化, 境界条件及び拘束条件の考え方	
別紙 5 精製建屋の応力解析におけるモデル化, 境界条件及び拘束条件の考え方	
別紙 6 ハル・エンドピース貯蔵建屋の応力解析におけるモデル化, 境界条件及び拘束条 件の考え方	
別紙 7 制御建屋の応力解析におけるモデル化, 境界条件及び拘束条件の考え方	
別紙 8 緊急時対策建屋の応力解析におけるモデル化, 境界条件及び拘束条件の考え方	
別紙 9 主排気筒 (基礎) の応力解析におけるモデル化, 境界条件及び拘束条件の考え方	
別紙 10 ウラン・プルトニウム混合脱硝建屋の応力解析におけるモデル化, 境界条件及び 拘束条件の考え方	
別紙 11 ウラン・プルトニウム混合酸化物貯蔵建屋の応力解析におけるモデル化, 境界条 件及び拘束条件の考え方	
別紙 12 チャンネルボックス・バーナブルポイズン処理建屋の応力解析におけるモデル化, 境界条件及び拘束条件の考え方	
別紙 13 使用済燃料受入れ・貯蔵建屋の応力解析におけるモデル化, 境界条件及び拘束条 件の考え方	
別紙 14 安全冷却水系冷却塔 A (基礎) の応力解析におけるモデル化, 境界条件及び拘束 条件の考え方	
別紙 15 安全冷却水系冷却塔 B (基礎) の応力解析におけるモデル化, 境界条件及び拘束 条件の考え方	
別紙 16 第 1 非常用ディーゼル発電設備重油タンク室 (基礎) の応力解析におけるモデル 化, 境界条件及び拘束条件の考え方	
別紙 17 高レベル廃液ガラス固化建屋の応力解析におけるモデル化, 境界条件及び拘束条 件の考え方	
別紙 18 第 1 ガラス固化体貯蔵建屋東棟の応力解析におけるモデル化, 境界条件及び拘束 条件の考え方	
別紙 19 第 1 ガラス固化体貯蔵建屋西棟の応力解析におけるモデル化, 境界条件及び拘束 条件の考え方	
別紙 20 非常用電源建屋の応力解析におけるモデル化, 境界条件及び拘束条件の考え方	
別紙 21 燃料油貯蔵タンク基礎の応力解析におけるモデル化, 境界条件及び拘束条件の考 え方	

- 別紙 22 冷却塔 A、B（基礎）の応力解析におけるモデル化，境界条件及び拘束条件の考え方
- 別紙 23 第 1 保管庫・貯水所の応力解析におけるモデル化，境界条件及び拘束条件の考え方
- 別紙 24 第 2 保管庫・貯水所の応力解析におけるモデル化，境界条件及び拘束条件の考え方
- 別紙 25 第 1 軽油貯蔵所（基礎）の応力解析におけるモデル化，境界条件及び拘束条件の考え方
- 別紙 26 第 2 軽油貯蔵所（基礎）の応力解析におけるモデル化，境界条件及び拘束条件の考え方
- 別紙 27 重油貯蔵所（基礎）の応力解析におけるモデル化，境界条件及び拘束条件の考え方
- 別紙 28 ガラス固化体貯蔵建屋の応力解析におけるモデル化，境界条件及び拘束条件の考え方
- 別紙 29 ガラス固化体貯蔵建屋 B 棟の応力解析におけるモデル化，境界条件及び拘束条件の考え方

：後次回申請において提示

                    ：商業機密の観点から公開できない箇所

## 1. 概要

本資料は、再処理施設、廃棄物管理施設、MOX 燃料加工施設の設計基準対象施設及び再処理施設、MOX 燃料加工施設の重大事故等対処施設に対する、建物・構築物（本資料においては、建物及び屋外機械基礎とし、洞道、竜巻防護対策設備並びに排気筒及び換気筒は含まない。※）（以下、「建物・構築物」という。）の耐震計算書を補足説明するものである。

本資料では、応力解析に用いる FEM モデルを構築するにあたって各建物・構築物に共通するモデル化、境界条件及び拘束条件の考え方を示すとともに、各建物・構築物の FEM モデルの詳細な内容を別紙に示すことで、その解析のエビデンスを補強するものとする。

また、本資料は、今回設工認申請（令和 2 年 12 月 24 日申請）のうち、以下に示す添付書類の補足説明に該当するものである。

- ・再処理施設 添付書類「IV-2-1-1-1 安全冷却水 B 冷却塔の耐震性に関する計算書」のうち「b. 安全冷却水 B 冷却塔基礎の耐震計算書」
- ・MOX 燃料加工施設 添付書類「III-3-1-1-2 燃料加工建屋の耐震計算書」

※：本資料に示す内容において、適用範囲外とした施設についてはそれぞれの資料において説明を行う。また、本資料の引用で他の資料の説明に代える場合には、引用範囲を明らかに記すこととする。

## 2. 応力解析におけるモデル化，境界条件及び拘束条件

添付書類の耐震計算書において，応力解析時に FEM モデルを用いて断面を評価する部位としては，基礎スラブ，貯蔵区域壁，プール壁及びプール床がある。

建物・構築物の FEM モデルを構築するにあたって，各建物・構築物に共通するモデル化，境界条件及び拘束条件の考え方を以下に示す。

また，各建物・構築物の FEM モデルの詳細な内容については，別紙に示す。

各建物・構築物の FEM モデルは，シェル要素及び梁要素でモデル化している。各要素のモデル化における要素分割の考え方を以下に示す。

### ・シェル要素

要素分割は，基本的には発生する応力状態によって決まり，構造形状と荷重状態より要素分割数を考慮する。要素形状の縦横比（アスペクト比）は，重要部分で 1:2 以下，その他の領域や応力変化が少ない領域では，1:3 程度までで，分割に際しては 4 角形要素を利用して格子状とするのが一般的である。また，面内曲げ・軸力及び面外のせん断や曲げを受ける部材のシェル要素の辺の長さは，シェルの広がり方向の応力分布の状態から決まり，応力変化が大きい領域は要素を小さくする必要がある。

### ・梁要素

はり要素の場合は，曲げの変位関数が 3 次で精度が高いため，基本的に要素分割の細分化は不要であるが，部材の接合点間で変位情報出力や荷重入力がある場合には複数要素に細分することが一般的である。また，分布荷重がある場合や分布質量が関係する自重荷重などの計算では，要素分割することにより質量分布がより正確になり，解析結果の精度が向上する。更に，要素分割の細分化により，変形図やモード図で構造物の変形状態を容易に把握することが可能となる。

参考：構造解析のための有限要素法実践ハンドブック（非線形 CAE 協会）

当社の S クラス施設の間接支持構造物となる各建物・構築物には、直接基礎を採用している。基礎スラブの応力解析における地盤ばね及び上部構造の拘束の設定について、基本的な考え方を以下に示す。

#### (1) 底面地盤ばね

基礎スラブの節点には、基礎浮上りを考慮したばね要素を設ける。ばね要素は、原則として振動アドミタンス理論に基づき算出し、より精緻に求める場合は、薄層法または境界要素法に基づき算出する。ばね要素の算出方法は、以下のとおりとする。

- ・振動アドミタンス理論に基づく場合

水平ばねは、振動アドミタンス理論に基づく地震応答解析モデルの水平ばねを節点支配面積に応じて離散化する。鉛直ばねは、回転ばね反力として生じる転倒モーメントを適切に評価するため、振動アドミタンス理論に基づく地震応答解析モデルの回転ばねを節点支配面積に応じて離散化する。

- ・薄層法または境界要素法に基づく場合

薄層法または境界要素法に基づく場合は、加振点と任意点応答の関係から得られる剛性マトリクスを用いて、地盤の連続体としての連成効果を考慮した方向毎のばねとする。

#### (2) 側面地盤ばね

基礎スラブのモデル化には、側面地盤ばねは設定しない。なお、基礎スラブに入力する地震荷重は地震応答解析結果に基づいており、地震応答解析モデルで側面地盤ばねを設定している場合は、側面地盤ばねからの入力も考慮した地震荷重となっている。

#### (3) 上部構造の拘束

基礎スラブのモデル化にあたっては、上部構造を梁要素またはシェル要素にてモデル化することで、上部構造の拘束効果を考慮する。なお、基礎スラブの応力解析においては、上部構造の拘束効果がある部分（以下、「拘束部」という。）と比べて、壁開口等により上部構造の拘束効果がなく、比較的剛性が小さい部分（以下、「非拘束部」という。）に応力及び変形が集中すると考えられるため、非拘束部が検定上厳しくなると想定される。また、非拘束部における応力及び変形の集中は、拘束部と非拘束部の剛性差が大きいほど生じやすくなると考えられるため、上部構造の拘束効果を考慮するための梁要素またはシェル要素は、塑性化の影響を考慮せずに弾性要素としてモデル化する。

## 別紙 1

安全冷却水 B 冷却塔基礎の応力解析における  
モデル化, 境界条件及び拘束条件の考え方

目 次

1. 概要 ..... 別紙 1-1
2. 応力解析におけるモデル化, 境界条件及び拘束条件 ..... 別紙 1-1



1. 概要

本資料は,安全冷却水B冷却塔基礎の応力解析による評価のうち,基礎スラブについて,モデル化,境界条件及び拘束条件の詳細を示すものである。

2. 応力解析におけるモデル化,境界条件及び拘束条件

安全冷却水B冷却塔基礎の基礎スラブの応力解析におけるモデル化,境界条件及び拘束条件を第2.-1表に示す。

モデル概要

○モデル化範囲

- ・基礎スラブとして、図1の範囲をモデル化する。

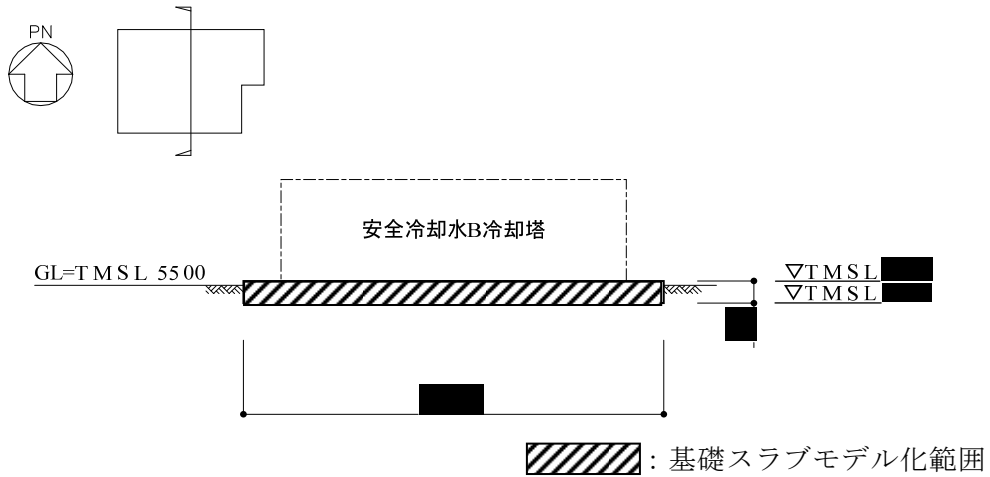


図1 モデル化範囲 (単位：m)

○使用要素

- ・基礎スラブ : シェル要素

○要素分割

- ・冷却塔の支持架構の柱位置に従い分割を行うものとし、基本的にEW方向は柱スパンに合わせ、NS方向は柱間を2分割とする。要素の一辺の長さは2.0~4.0m程度とする。

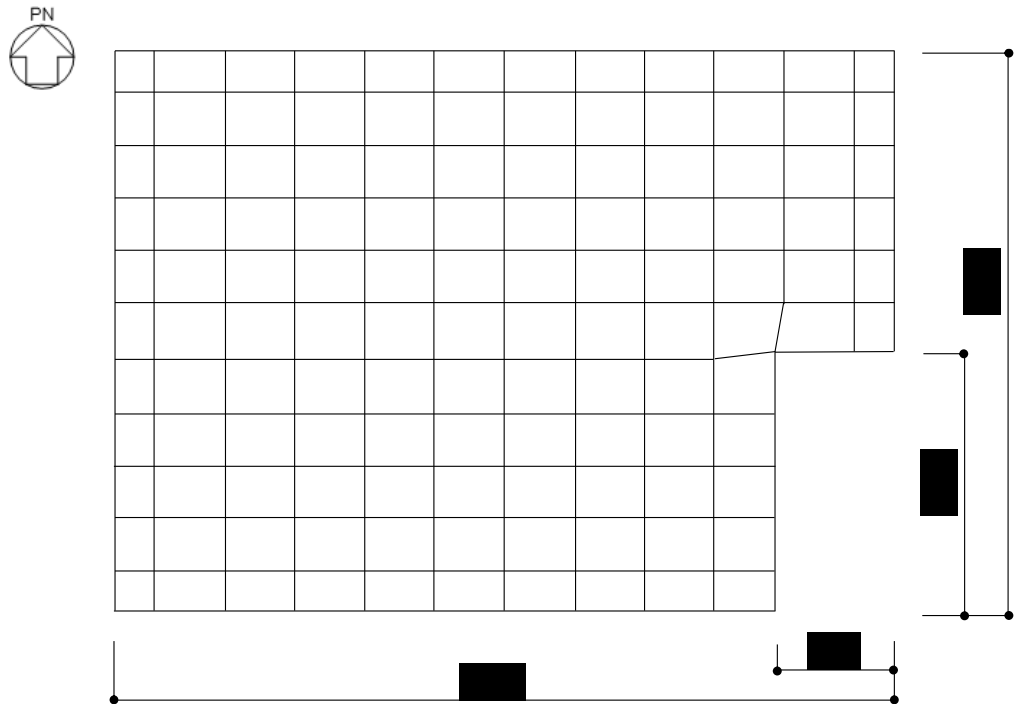


図2 FEMモデル (単位：mm)

第2.-1表 (2/2) 安全冷却水B冷却塔基礎の基礎スラブ

境界条件, 拘束条件	
上部構造物と基礎スラブの境界	
<ul style="list-style-type: none"> <li>基礎スラブの剛性に対して上部冷却塔の剛性が十分に小さいと考えられることから, 基礎スラブの応力評価において上部冷却塔による拘束効果は考慮しない。</li> </ul>	
基礎スラブと地盤の境界	
<ul style="list-style-type: none"> <li>基礎スラブの節点には, 底面地盤を表現するばね要素を設ける。解析では鉛直方向の底面地盤ばねに引張力が作用すると, 鉛直方向及び水平方向 (2方向) の合計3つのばね剛性をゼロとすることにより, 基礎の浮上りを表現する。</li> <li>水平剛性及び鉛直剛性は以下の通り設定する。</li> <li>水平剛性<math>K_{Hi}</math> 振動アドミッタンス理論による水平ばね<math>K_H</math>を節点支配面積<math>A_i</math>で離散化する。  <math display="block">K_{Hi\_NS(EW)} = (K_{H\_NS(EW)} / A) \times A_i</math> <math>A</math> : 基礎の底面積</li> <li>鉛直剛性<math>K_{Vi}</math> 地震時は, 転倒モーメントが支配的となるため, 振動アドミッタンス理論による回転ばね<math>K_R</math>を節点支配面積<math>A_i</math>で離散化する。  <math display="block">K_{Vi} = (K_{R\_NS} / I_{NS} + K_{R\_EW} / I_{EW}) / 2 \times A_i</math> <math>I</math> : 基礎の断面二次モーメント</li> </ul>	
<p>図3 ばね要素拡大図</p>	

## 別紙 2

燃料加工建屋の応力解析における  
モデル化，境界条件及び拘束条件の考え方

目 次

1. 概要…………… 別紙 2-1
2. 応力解析におけるモデル化, 境界条件及び拘束条件 …… 別紙 2-1

付録 1 燃料加工建屋基礎スラブの応力解析における壁開口の反映方法

## 1. 概要

本資料は燃料加工建屋の応力解析による評価のうち、FEM モデルを用いている基礎スラブについて、モデル化、境界条件及び拘束条件の詳細を示すものである。

なお、重要区域の壁については、せん断力分配解析によって各耐震壁に振り分けた応力に対して、重要区域の床については、床の支持条件に応じた理論解による応力に対して断面の評価を行っており、FEMモデルを用いていない。そのため、本資料での説明の対象外とする。

## 2. 応力解析におけるモデル化、境界条件及び拘束条件

燃料加工建屋の基礎スラブの応力解析におけるモデル化、境界条件及び拘束条件を第2.-1表に示す。

第2.-1表 (1/4) 燃料加工建屋の基礎スラブ

モデル概要

○モデル化範囲

- ・基礎スラブ及び基礎スラブより立ち上がる耐震壁（図1に示す範囲）をモデル化する。
- ・基礎スラブは，図2に示す基礎上端レベル以下を，段差がない平板としてモデル化する。
- ・上部構造については地震応答解析と同様に耐震壁のみ考慮し，梁要素としてモデル化を行う。なお，地下3階の同位置に壁が存在しない束壁は，壁高さ（内法で170mm）が基礎スラブ厚（2,700mm以上）に比べて十分小さく，基礎スラブへの拘束効果は小さいと考えられるためモデル化は行わない。また，独立柱は基礎スラブへの拘束効果は小さいと考えられるためモデル化は行わない。

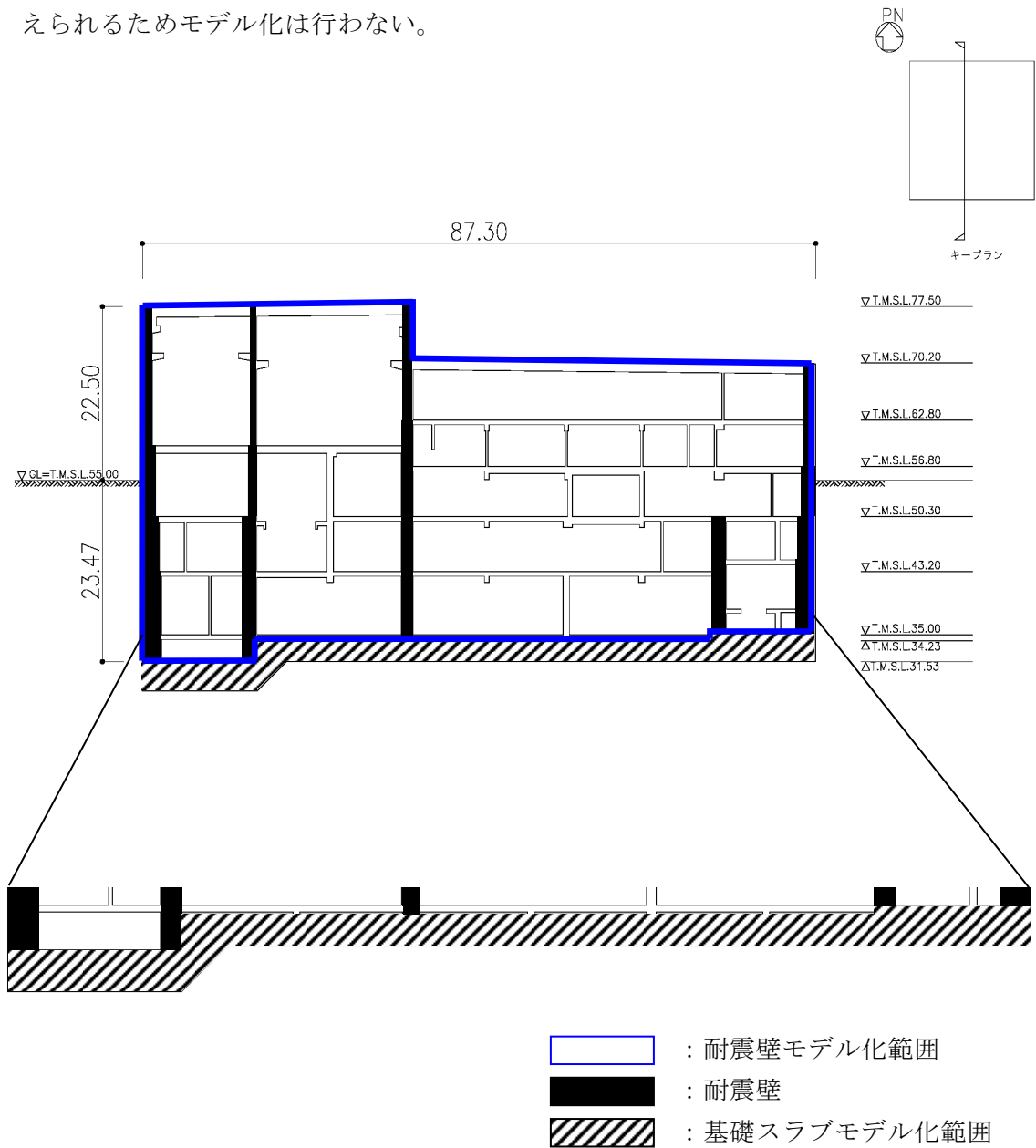


図1 モデル化範囲（NS方向断面図）（単位：m）

第2.-1表 (2/4) 燃料加工建屋の基礎スラブ

モデル概要

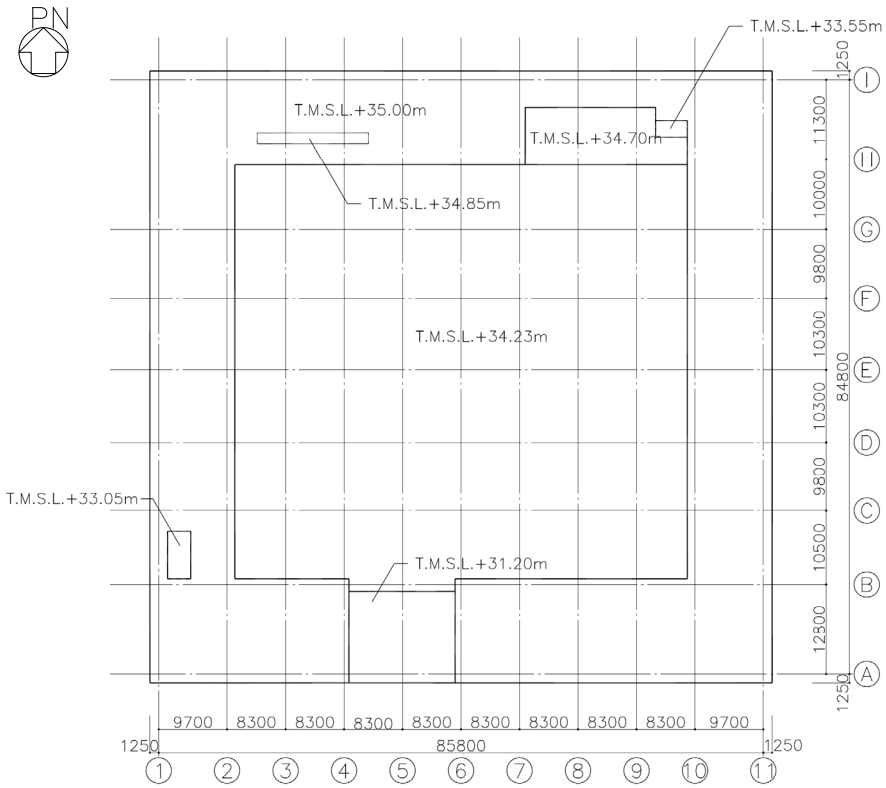


図2 基礎スラブ上端レベル (単位 : mm)

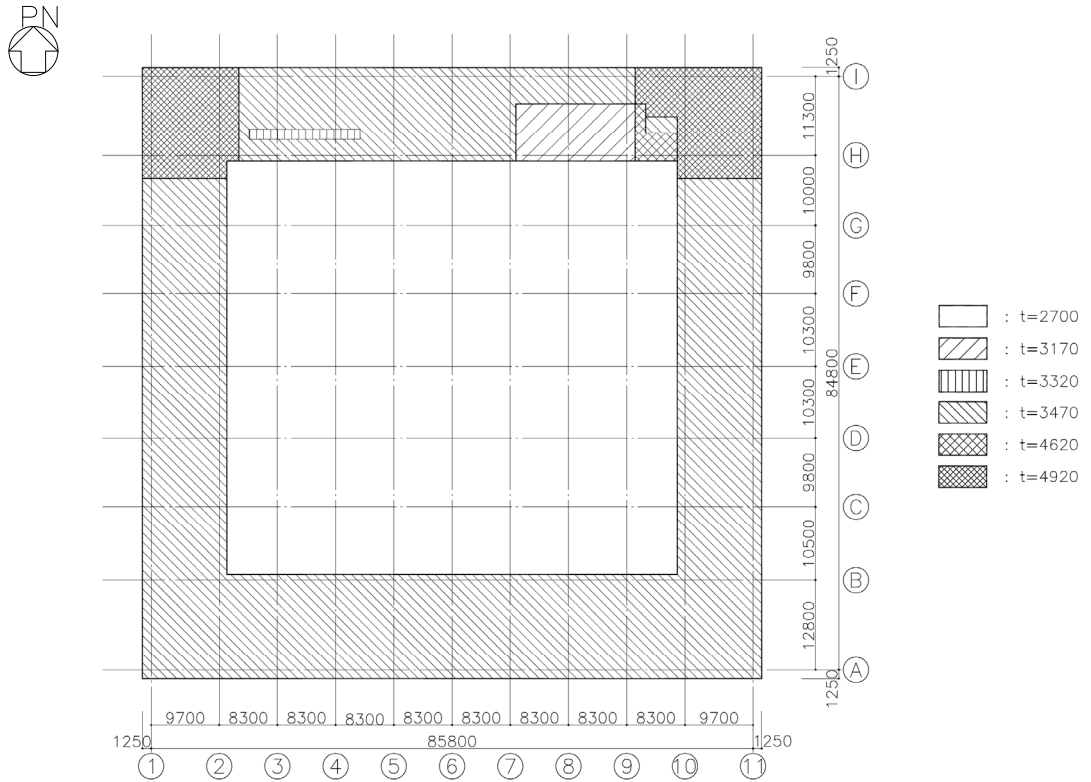


図3 基礎スラブ厚 (単位 : mm)

別紙 2-3



第2.-1表 (3/4) 燃料加工建屋の基礎スラブ

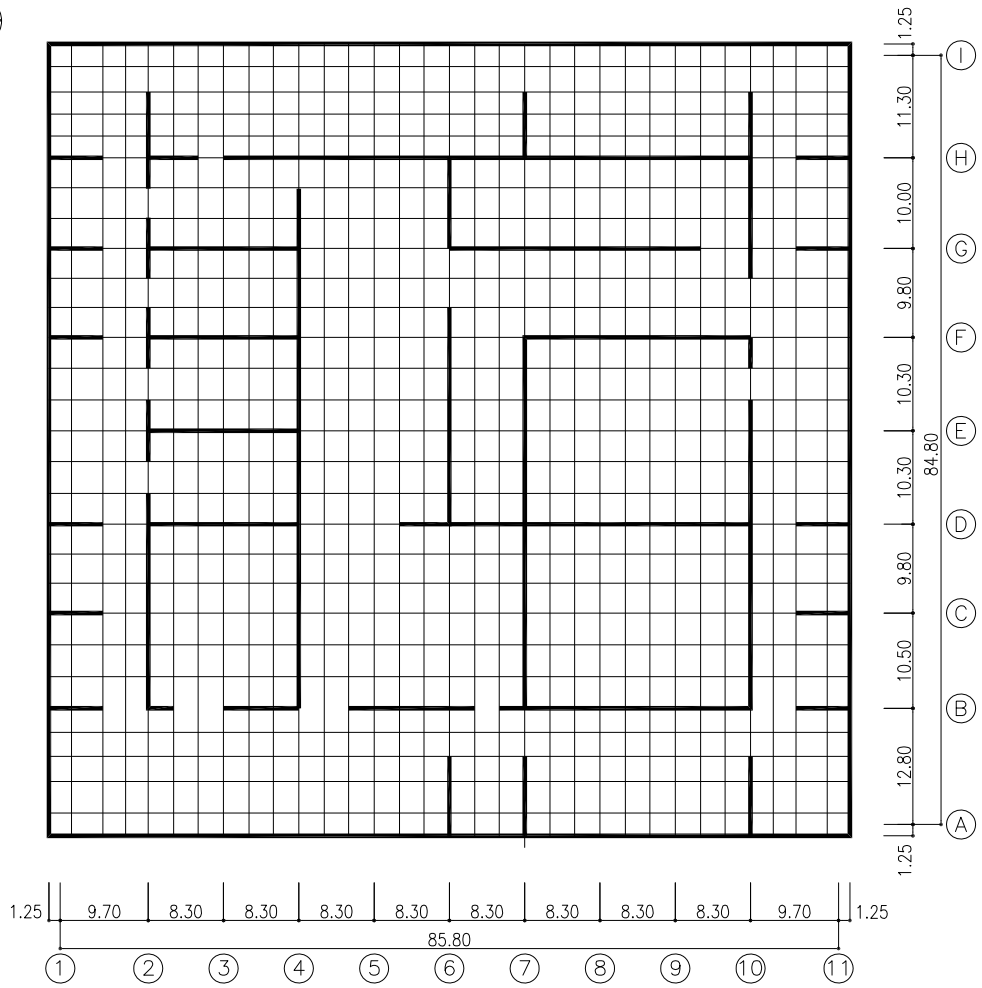
モデル概要

○使用要素

- ・基礎スラブ : シェル要素
- ・耐震壁 : 梁要素

○要素分割

- ・要素の一辺の長さを2.4~3.5m程度とし、上部構造物の配置を考慮して分割する。



— : 耐震壁 (梁要素)

図4 モデル概要 (単位 : m)

第2.-1表 (4/4) 燃料加工建屋の基礎スラブ

境界条件, 拘束条件	
上部構造物と基礎の境界	
<ul style="list-style-type: none"> <li>基礎スラブと上部構造物との境界部においては, 上部構造物の剛性による拘束を考慮するため各耐震壁の脚部に梁要素を設ける。</li> </ul>	
梁要素の剛性 (断面性能)	
<ul style="list-style-type: none"> <li>軸剛性 (軸断面積) <math>A = t \times h</math></li> <li>曲げ剛性 (断面二次モーメント) <math>I = t \times h^3 / 12 + A \times (h / 2 + D / 2)^2</math></li> <li>せん断剛性 (せん断断面積) <math>A_s = t \times h</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>t : 壁厚</li> <li>h : モデル化する壁の高さ</li> <li>D : 基礎スラブ厚</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>壁開口については, 梁要素を設定しない, あるいは梁要素の剛性を低減することで考慮する。具体的な反映方法は, 付録1「燃料加工建屋基礎スラブの応力解析における壁開口の反映方法」にて示す。</li> </ul>	
基礎スラブと地盤の境界	
<ul style="list-style-type: none"> <li>基礎スラブの節点には, 底面地盤を表現するばね要素を設ける。解析では鉛直方向の底面地盤ばねに引張力が作用すると, 鉛直方向及び水平方向 (2方向) の合計3つのばね剛性をゼロとすることにより, 基礎の浮上りを表現する。</li> <li>水平剛性及び鉛直剛性は以下の通り設定する。</li> <li>水平剛性<math>K_{Hi}</math> 振動アドミッタンス理論による水平ばね<math>K_H</math>を節点支配面積<math>A_i</math>で離散化する。 <math display="block">\underline{K_{Hi\_NS(EW)} = (K_{H\_NS(EW)} / A) \times A_i}</math> A : 基礎の底面積</li> <li>鉛直剛性<math>K_{Vi}</math> 地震時は, 転倒モーメントが支配的となるため, 振動アドミッタンス理論による回転ばね<math>K_R</math>を節点支配面積<math>A_i</math>で離散化する。 <math display="block">\underline{K_{Vi} = (K_{R\_NS} / I_{NS} + K_{R\_EW} / I_{EW}) / 2 \times A_i}</math> I : 基礎の断面二次モーメント</li> </ul>	
<p>図5 ばね要素拡大図</p>	

## 付録 1

# 燃料加工建屋基礎スラブの応力解析における 壁開口の反映方法

## 目 次

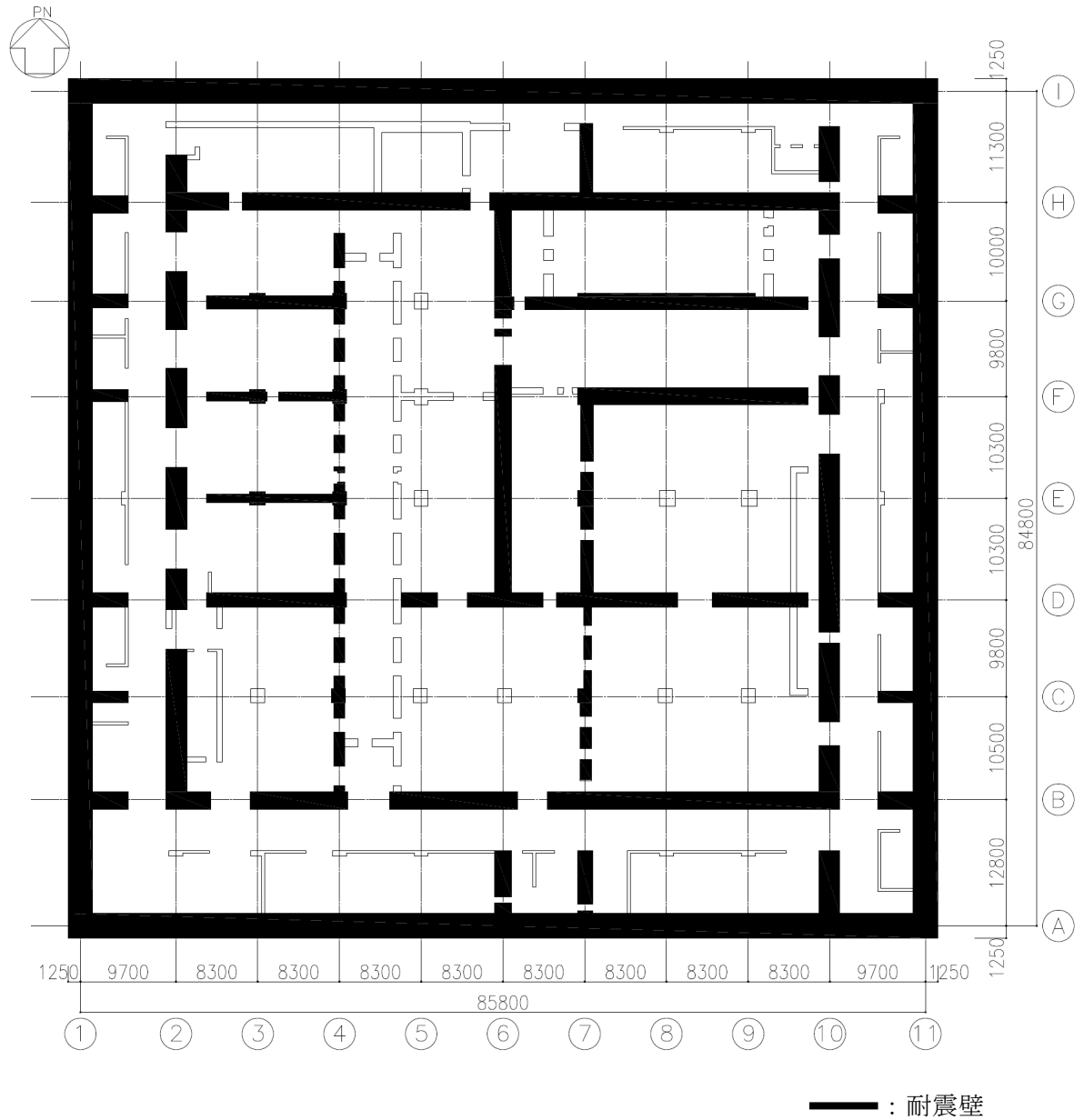
- 1. 概要..... 付録 1-1
- 2. 基礎スラブの上部構造による拘束の設定..... 付録 1-2
  - 2.1 拘束条件設定における壁開口の反映方法..... 付録 1-4

## 1. 概要

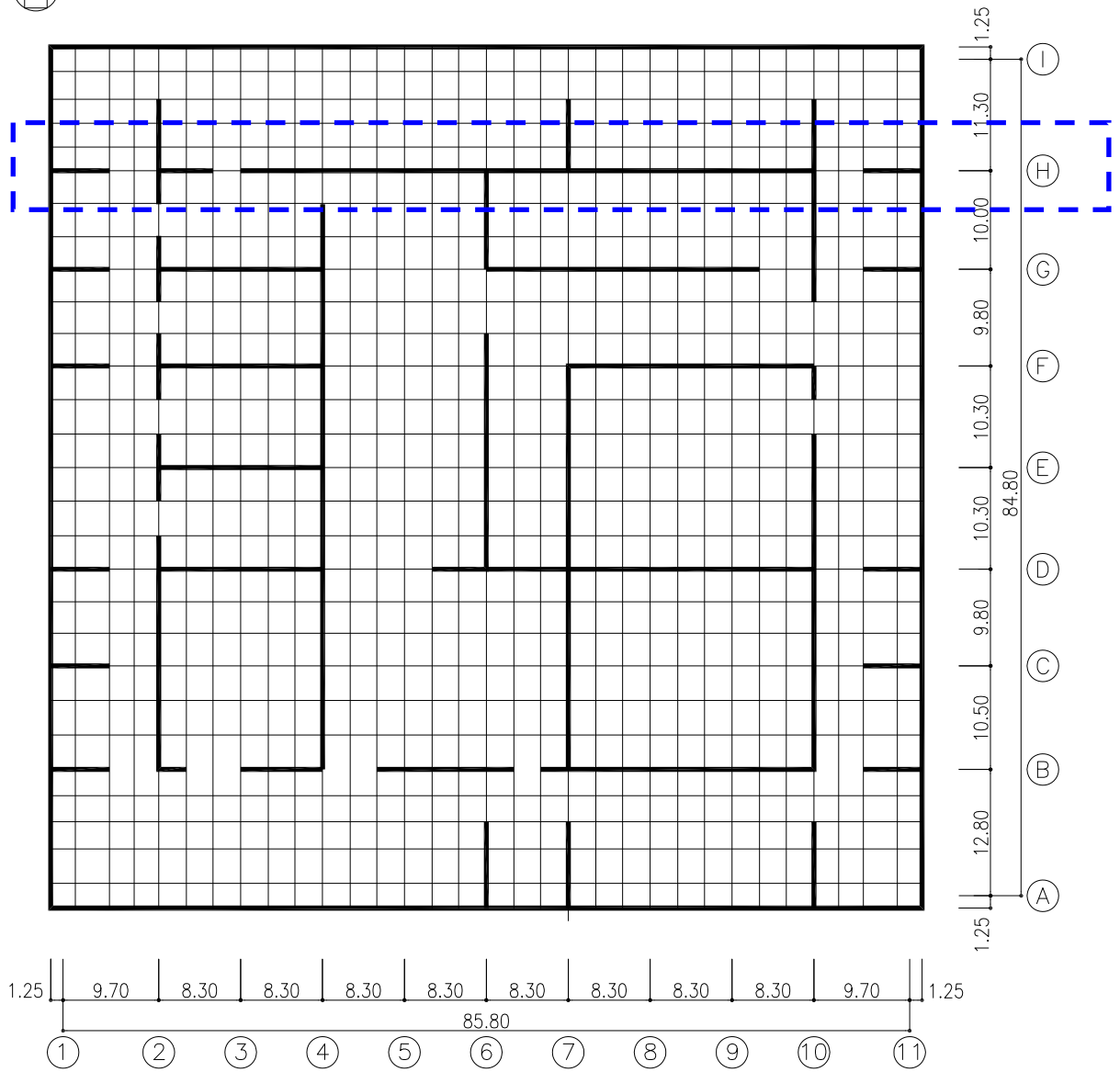
本資料は、燃料加工建屋の基礎スラブの FEM モデルについて、耐震壁のモデル化における壁開口の反映方法を示すものである。

## 2. 基礎スラブの上部構造による拘束の設定

燃料加工建屋の基礎スラブでは、応力解析におけるモデル化にあたって、上部構造の影響を考慮するため、地下3階の耐震壁位置（第2.-1図）に上部構造の剛性を考慮した梁要素を設けている。モデル概要と代表として示す部位を第2.-2図に示す。



第2.-1図 地下3階の耐震壁平面図



— : 耐震壁 (梁要素)  
- - - : 代表として示す部位

第 2.-2 図 モデル概要 (単位 : m)

## 2.1 拘束条件設定における壁開口の反映方法

梁要素(耐震壁)は、実状の耐震壁の配置通りにモデル化することを基本とし、基礎スラブのメッシュ分割に合わせて配置する。梁要素(耐震壁)の設定における壁開口の反映方法を下記に示す。

- ① 基礎スラブ直上の耐震壁に主要な壁開口が存在し、応力の伝達が十分に行われないと判断される部位については、基礎スラブに対する拘束効果が期待できないものとして、梁要素を設定しない。
- ② 設定する梁要素の剛性には、各階における壁開口の影響を考慮する。

例として、H通りにおける基礎スラブの梁要素の設定方法を第2.-3図に示す。

