

島根原子力発電所第2号機 審査資料	
資料番号	NS2-補-027-10-67 改 02
提出年月日	2022年9月29日

ガスタービン発電機の耐震性についての
計算書に関する補足説明資料

2022年9月

中国電力株式会社

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

目 次

1. 概要	1
2. ガスタービン発電機の固有値解析モデル	2
3. ガスタービン機関の機能維持評価モデル	9
4. 発電機制御盤の固有値解析モデル.....	13

1. 概要

本資料は、VI-2-10-1-2-3-1「ガスタービン発電機ガスタービン機関及び発電機の耐震性についての計算書」及びVI-2-10-1-2-3-2「ガスタービン発電機励磁装置及び保護継電装置の耐震性についての計算書」のうち解析コードを使用して評価を実施する、ガスタービン発電機の固有値解析モデル及びガスタービン機関の機能維持評価モデルの詳細な考え方を説明するものである。

2. ガスタービン発電機の固有値解析モデル

ガスタービン機関を含むガスタービン発電機は、FEMモデルにて固有値解析を実施する。解析モデルを図2-1に、解析モデルの詳細説明を以下に示す。

- (1) フレーム及びパッケージサポートははり要素、台板はシェル要素でモデル化する。
- (2) ガスタービン発電機の主要機器及び主要補機の質量は、それぞれの重心に集中するものとする。エンクロージャの扉は、質量のみ考慮することとし、扉取付部周辺フレームに付加する。エンクロージャの外板も質量のみ考慮することとし、フレームに分散して付加する。配管、ケーブル類は、等分布荷重として、当該質量のみをモデル全体に付加する。

【モデル化方針の詳細】

- a. ガスタービン発電機の主要機器 : 図2-2参照
主要機器の例として、ガスタービン機関及び発電機について説明する。ガスタービン機関及び発電機は(3)項記載の通り、機器単体では剛構造として取り扱う。したがって、FEMモデルとしてはそれぞれの重心位置に質点でモデル化し、質点と台板の接続は剛なはり要素（剛体要素）でモデル化する。また、はり要素の台板への接続箇所は取付ボルト位置とし、6成分接続（接続位置において、はり要素と台板節点の回転3方向及び並進3方向の挙動が同じとなる）とする。
- b. ガスタービン発電機の主要補機 : 図2-3参照
主要補機の例として、潤滑油冷却器及び潤滑油冷却器ファンについて説明する。潤滑油冷却器及び潤滑油冷却器ファンは、支持構造物（強度部材）ではないため、重心位置に質点でモデル化する。また、内挿拘束要素*により質点とエンクロージャフレームを接続する。接続は取付ボルト位置とする。また、他の例として、吸気ダクトも同様に重心位置に質点でモデル化し、内挿拘束要素により質点と吸気消音器への取付ボルト位置で接続する。
- c. エンクロージャ扉 : 図2-4参照
上記の、主要補機のモデル化方針と同じである。
- d. エンクロージャフレーム及び台板等 : 図2-5～2-7参照
エンクロージャフレーム及び台板は、ガスタービン発電機の支持構造物であり、ガスタービン発電機の応答を精緻に算定するために、はり要素及びシェル要素でモデル化する。ここで、エンクロージャフレームは、角形鋼管、山形鋼及び溝形鋼を主な構成部材としているため、はり要素でモデル化する。また、台板は、H形鋼及びリブ形状の圧延鋼材を主な構成部材としているため、シェル要素でモデル化する。また、他の例として、吸気消音器も同様に角形鋼管及び山形鋼を主な構成部材としているため、はり要素でモデル化する。
- e. エンクロージャ外板、配管及びケーブル類
エンクロージャ外板、配管及びケーブル類は、支持構造物（強度部材）ではないこと、また、エンクロージャ外板はエンクロージャフレームに、配管及びケー

ブル類はエンクロージャ及び台板に対して取付されることから、それぞれの質量を取付位置となるエンクロージャフレーム及び台板に分散してモデル化する。

注記*：内挿拘束要素

「MSC NASTRAN」における「内挿拘束要素（RBE3）」と呼ばれる要素。

本FEMモデルでは、内挿拘束要素を使用することで、主に以下の解析条件を設定する。

- 機器重心位置節点の質量、荷重及びモーメントを、取付ボルト位置節点に分配する。
- 分配する質量、荷重及びモーメントは、機器重心位置節点と取付ボルト位置節点の位置関係をもとに計算する（取付ボルト位置節点での各荷重の合力とモーメントが、機器重心位置節点での荷重とモーメントに等しくなるように分配する）。
- 一般的なはり要素とは異なり、剛性を持たない要素である。したがって、機器取付位置の剛性を実機より柔側に設定することで応答解析上、保守的な評価となる（はり要素の適切な剛性設定が困難な場合にも、有効な要素である）。

参考として、「剛体要素（RBE2）」は、十分に大きな剛性を持つため変形しないはり要素である。ここで、機器重心位置節点に、ある加速度が付加された場合の変形図のイメージを図2-8及び図2-9に示す。

- (3) ガスタービン機関及び発電機は、1個の大きなブロック状をしており、重心の位置がブロック状のほぼ中心にあり、かつ、下面が取付ボルトにて固定されている。したがって、全体的に一つの剛体と見なせるため1質点でモデル化する。

【モデル化方針の詳細】

(2)項記載の通り、ガスタービン機関及び発電機は、それぞれの重心位置に質点でモデル化し、質点と台板の接続は剛体要素でモデル化する。また、はり要素の台板への接続箇所は取付ボルト位置とし、6成分接続とする。

- (4) ガスタービン発電機の主要機器及び主要補機の重心位置については、公称値による重心位置を設定するものとする。

【モデル化方針の詳細】

詳細設計図面記載の重心位置を、FEMモデルに反映する。

- (5) 拘束条件は、基礎ボルトにて完全拘束とする。なお、基礎ボルトは剛体として評価する。パッケージサポートと壁面の拘束条件についても同様に完全拘束とする。

【モデル化方針の詳細】

台板は十分な板厚（18mm）を有しており剛性が高いこと及び台板の外縁部を適切にトルク管理された基礎ボルト（40本）で締結していることから、ボルト中心位置に設定したモデル節点を完全拘束とする。

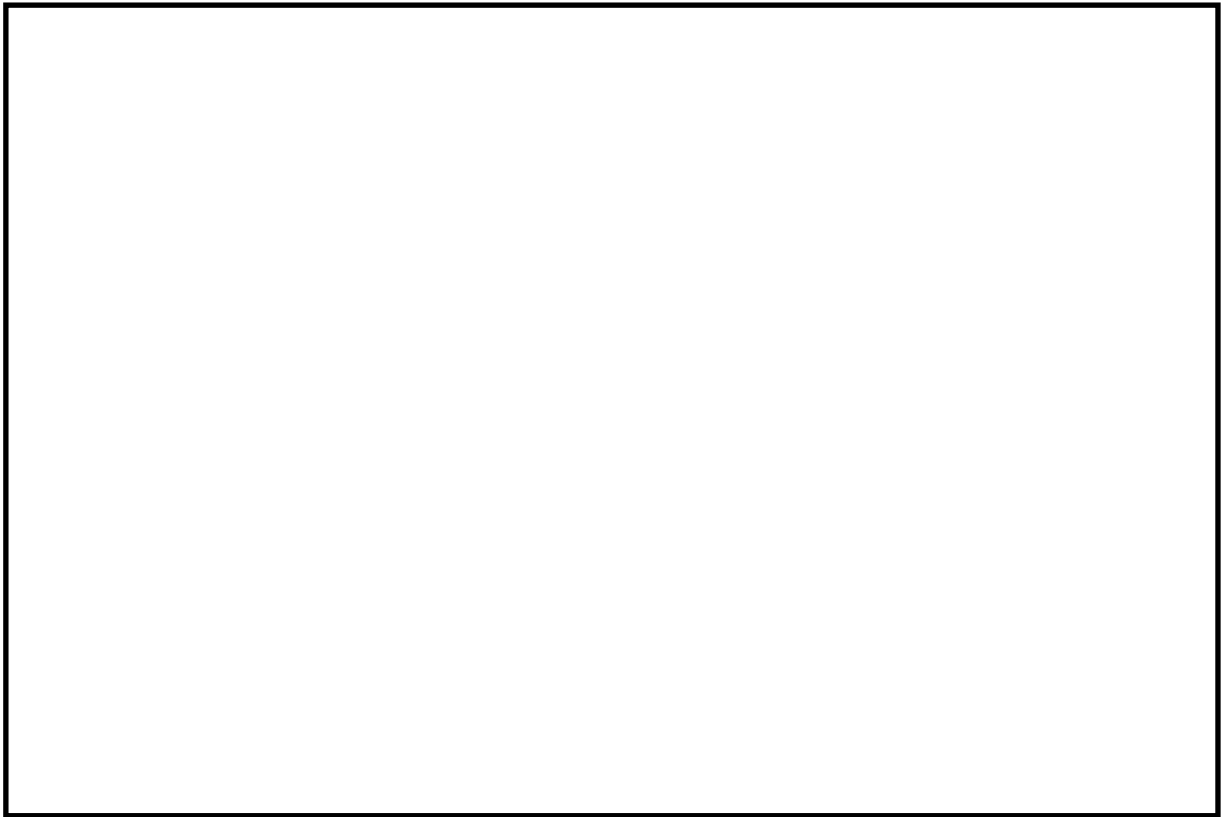
(6) 耐震計算に用いる寸法は，公称値を使用する。

【モデル化方針の詳細】

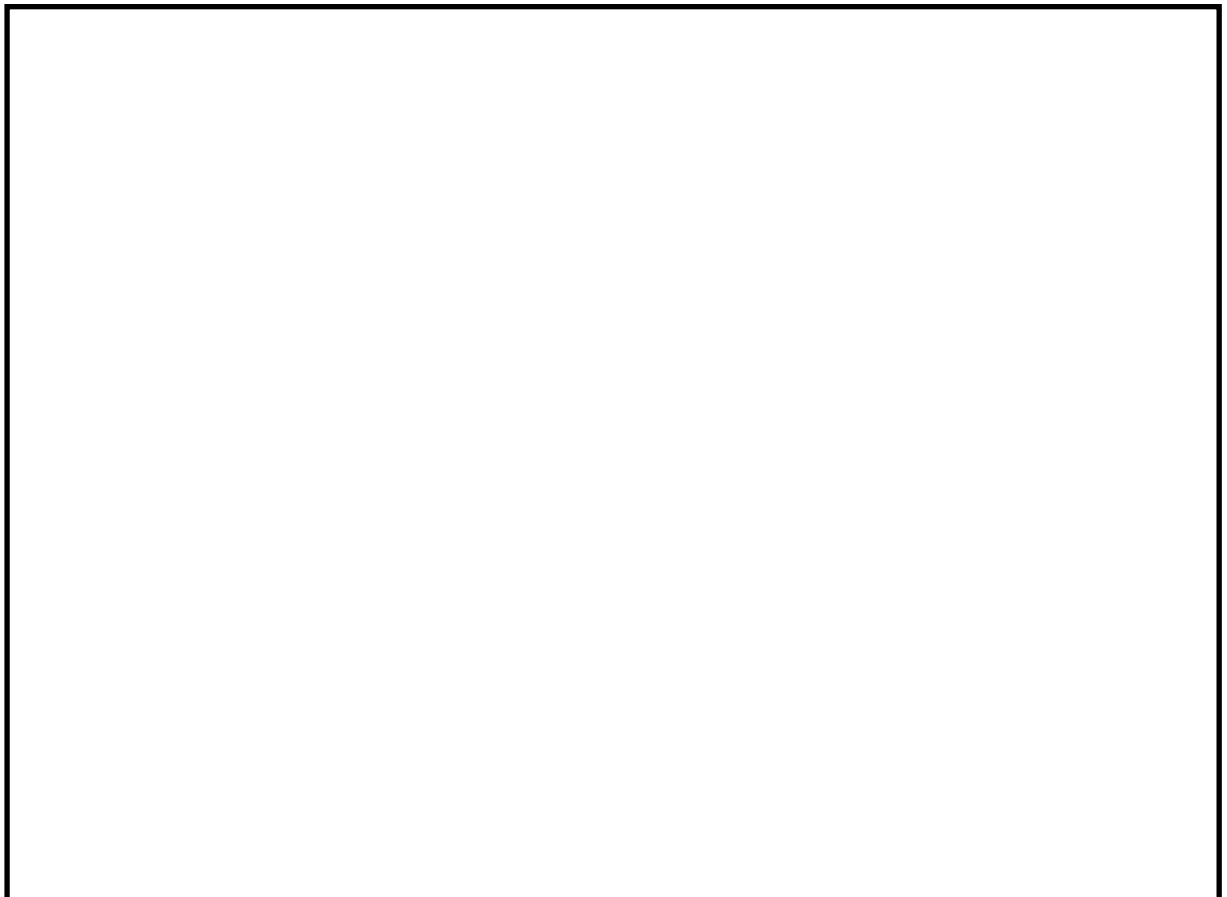
詳細設計図面記載の寸法を，FEMモデルに反映する。

(7) 解析コードは，「MSC NASTRAN」を使用し，固有値を求める。

なお，評価に用いる解析コードの検証及び妥当性確認等の概要については，VI-5「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。



(解析モデル)



(実機構造)

図 2-1 ガスタービン発電機の解析モデル (詳細)



図 2-2 ガスタービン発電機の主要機器の例（ガスタービン機関及び発電機）



図 2-3 ガスタービン発電機の主要補機の例（潤滑油冷却器及び潤滑油冷却器ファン）



図 2-4 エンクロージャ扉

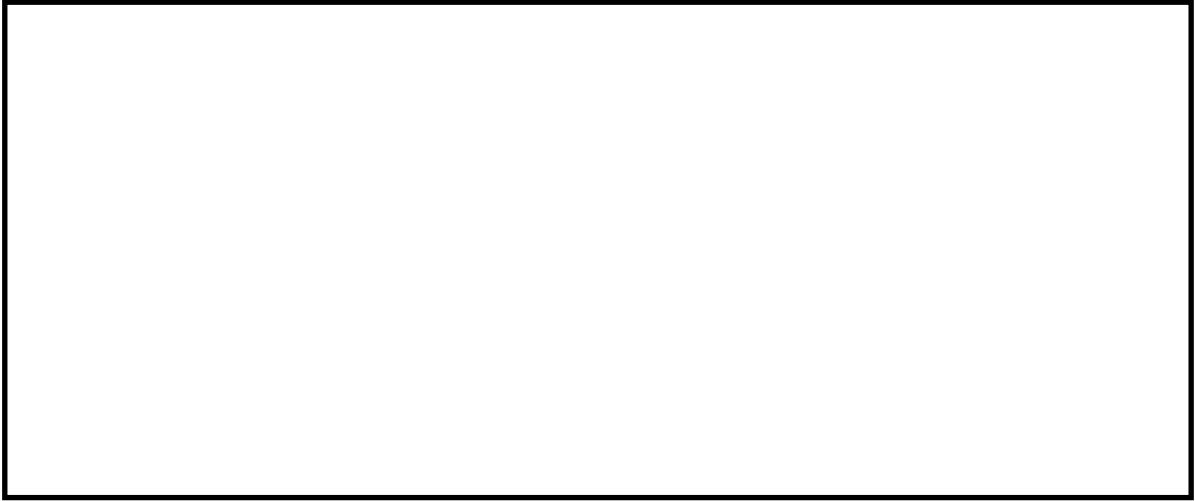


図 2-5 エンクロージャフレームの例（角形鋼管）

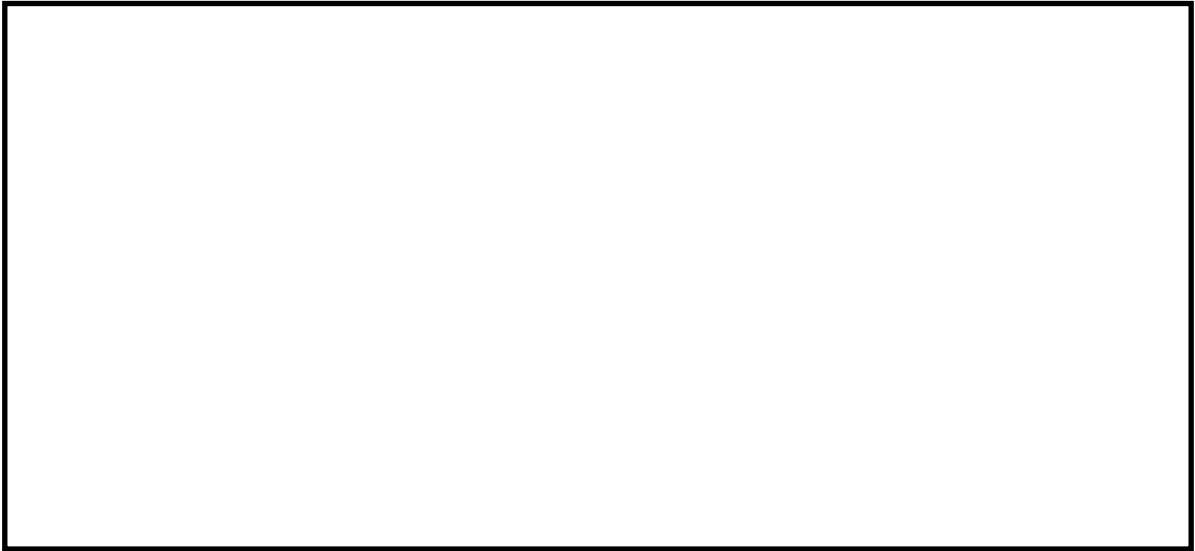


図 2-6 エンクロージャフレームの例（山形鋼，溝形鋼）

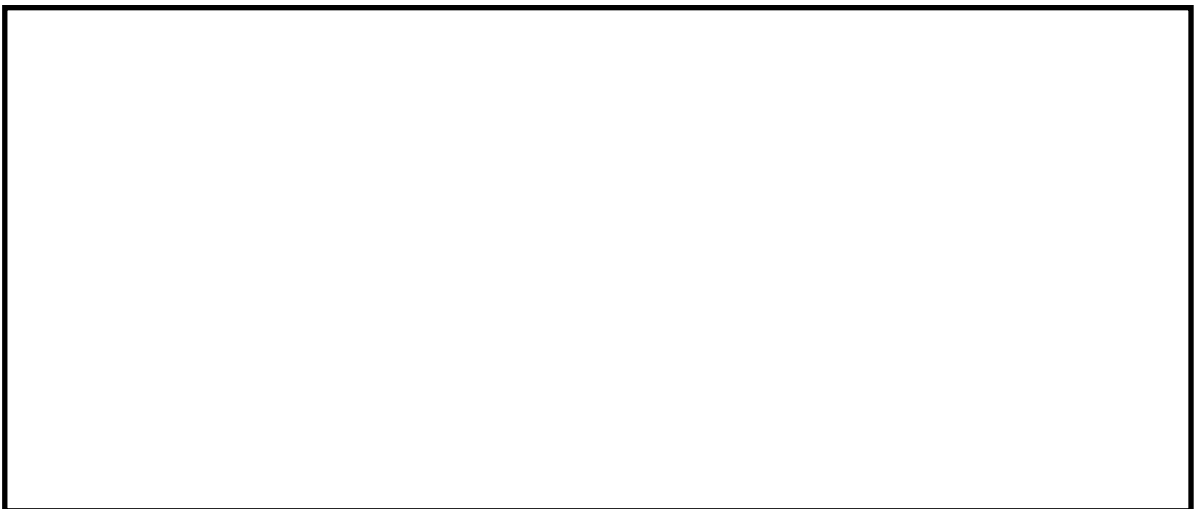


図 2-7 台板の例（H 形鋼，リブ形状の圧延鋼材）

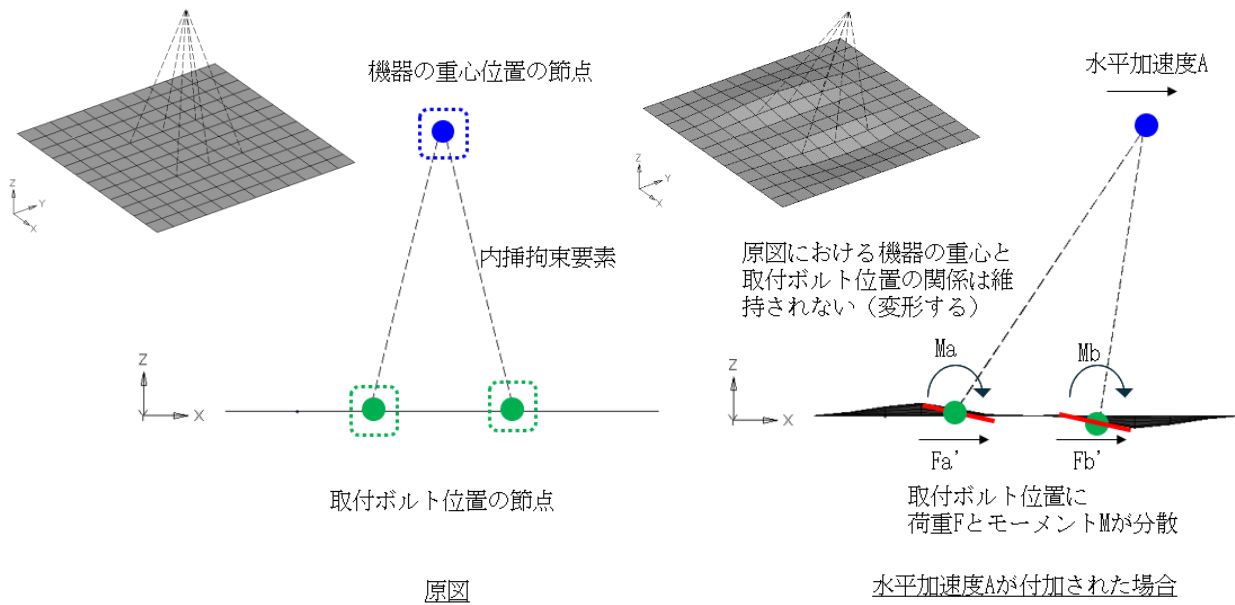


図 2-8 内挿拘束要素 (変形図のイメージ)

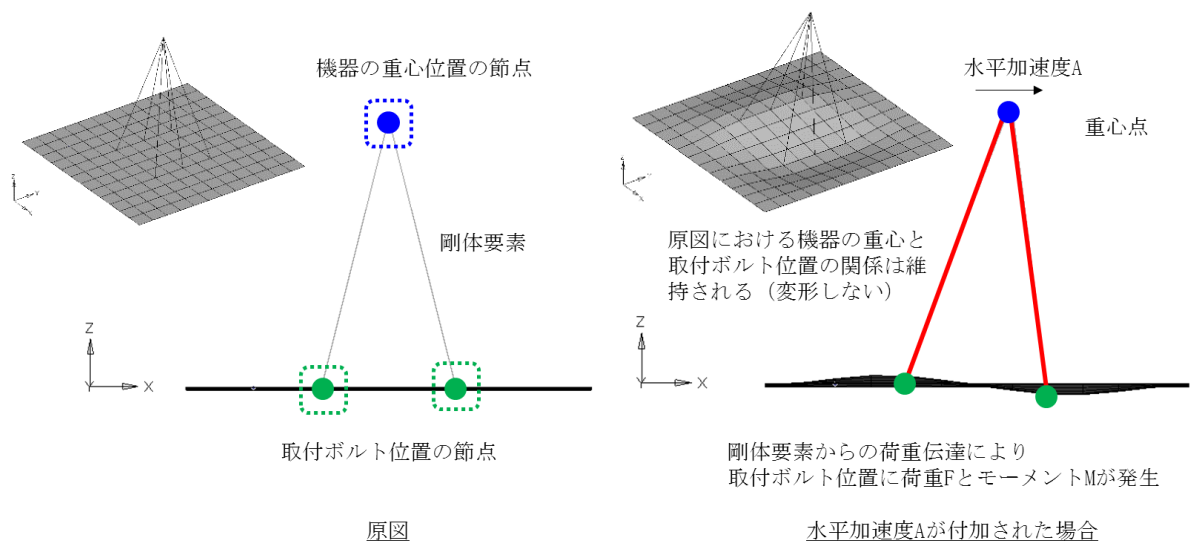


図 2-9 剛体要素 (変形図のイメージ)

3. ガスタービン機関の機能維持評価モデル

ガスタービン機関における動的機能維持評価として、はりモデルにて軸とケーシングのクリアランスを評価する。解析モデルを図3-1に、解析モデルの詳細説明を以下に示す。

- (1) クリアランスの評価にあたっては、ガスタービン機関回転軸とケーシングとの相対変位が評価対象となるが、ケーシングは運転時の高圧に耐えかつ高速回転する回転軸を支える厚肉構造であることから変形しない剛体として扱い、回転軸のみモデル化して地震時の応答加速度に対するたわみ量（変位量）を評価する。

【モデル化方針の詳細】

モデル化範囲は回転体である、メインシャフト及び外周部となるロータ部（第1段インペラ、第2段インペラ、カップリングロータ、第1段タービンディスク、第2段タービンディスク、第3段タービンディスク及びNO.2ベアリングシャフト）とする。回転体（ガスタービン機関回転軸）のたわみ量が、静止体（ケーシング）とのクリアランス以下であり、接触しないことを確認する。

- (2) ガスタービン機関回転軸は、メインシャフト及びロータ部からなる2重構造である。この内外2つの構造を各々はり要素でモデル化する。特に、インペラ、タービンディスク等の複雑な翼形状を持つロータ部品は、全体を一様なはり要素でモデル化できないため、実機構造と等価な剛性、質量を持つ円筒形状に諸元を置き換えてモデル化する。

【モデル化方針の詳細】 : 図3-2参照

メインシャフト及びロータ部をそれぞれ、はり要素でモデル化する。

- a. 中実なメインシャフトを模擬するはり要素、中空なロータ部を模擬するはり要素でモデル化する。
- b. メインシャフト及びロータ部の軸中心は、同じ位置である。
- c. はり要素の諸元設定にあたり、製作設計図面を基に等価な剛性となるように寸法を設定する。また、実機での打撃振動計測結果（固有振動数）とはりモデルの固有値解析結果を比較検証することで、諸元設定の妥当性を確認する。
- d. はり要素の諸元設定にあたり、製作設計図面を基に、はり要素の分割領域の長さに対応する質量を算出する。

- (3) 内側の中実形状のメインシャフトと外周の円筒形状に置き換えたロータを各々はり要素でモデル化し、2つのモデルを実機構造と同様に両端の第1段インペラ部及びNO.2ベアリングシャフト部と中央のカップリングロータ部の3箇所て結合する。

【モデル化方針の詳細】

実機構造における結合部は、はりモデルにおいても結合する。実機構造において、第1段インペラ、カップリングロータ及びNO.2ベアリングシャフトの3箇所は、メインシャフト及びロータ部が構造的に接触する結合部であるため、それぞれのはり要素の対応する分割領域も結合する。

- (4) 軸受は、軸受自体の変位は地震時に 程度と許容クリアランスに比べると十分小さいため剛体とし、拘束条件としては、軸受部A（玉軸受）を並進3方向固定、軸受部B（ころ軸受）を並進2方向（軸直方向）固定として設定する。

【モデル化方針の詳細】

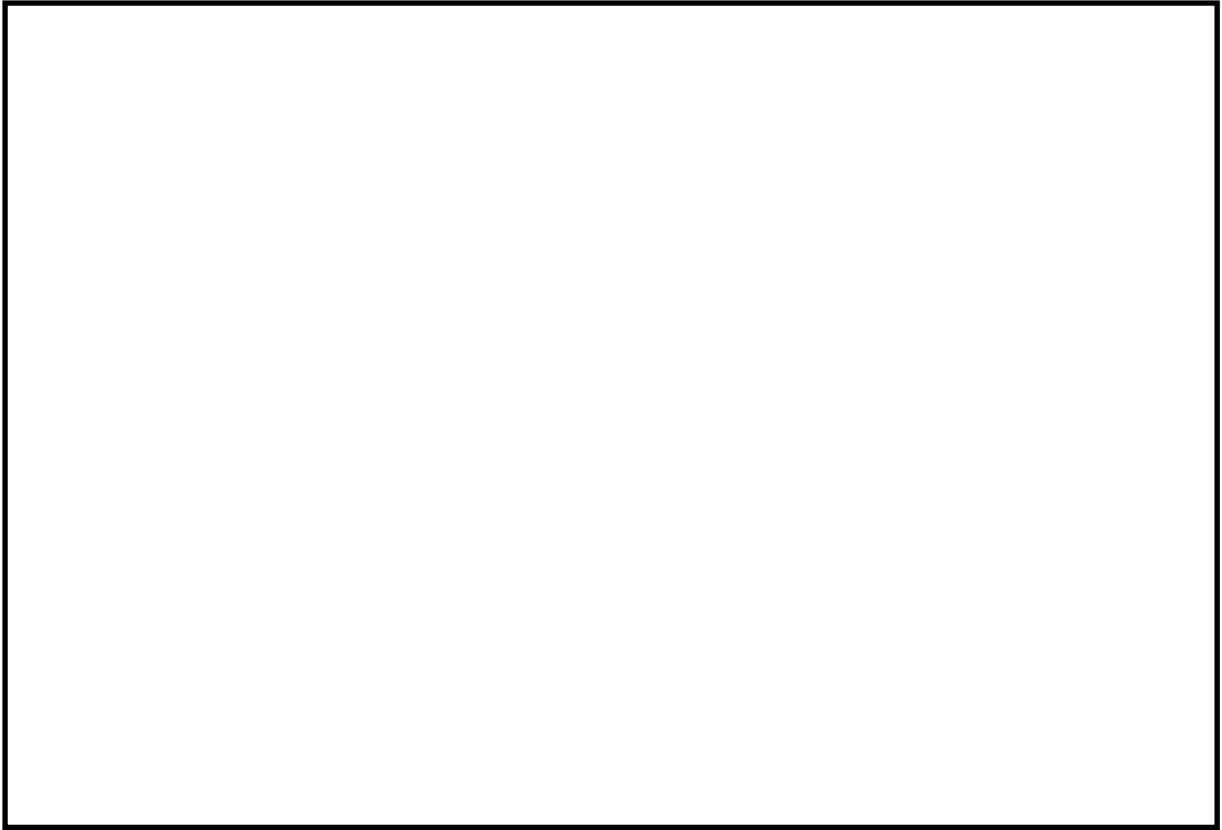
軸受部Aは、実機ではガスタービン機関運転時の軸方向への熱膨張の起点とするために固定されていることから、はり要素（回転体）は静止体に対して並進3方向固定とする。また、軸受部Bは、実機ではガスタービン機関運転時の軸方向への熱膨張を吸収するために固定されていないことから、はり要素は静止体に対して並進2方向（軸直方向）固定とする（並進軸方向は固定しない）。

- (5) アンバランス荷重による変位は、運転中に生じる主軸振動の管理値以下になるよう調整されているため、保守的に主軸振動に対するメーカ管理値をアンバランス荷重による変位として用いる。この変位を解析モデルから算出したたわみ量（変位量）に重畳（絶対和）する。

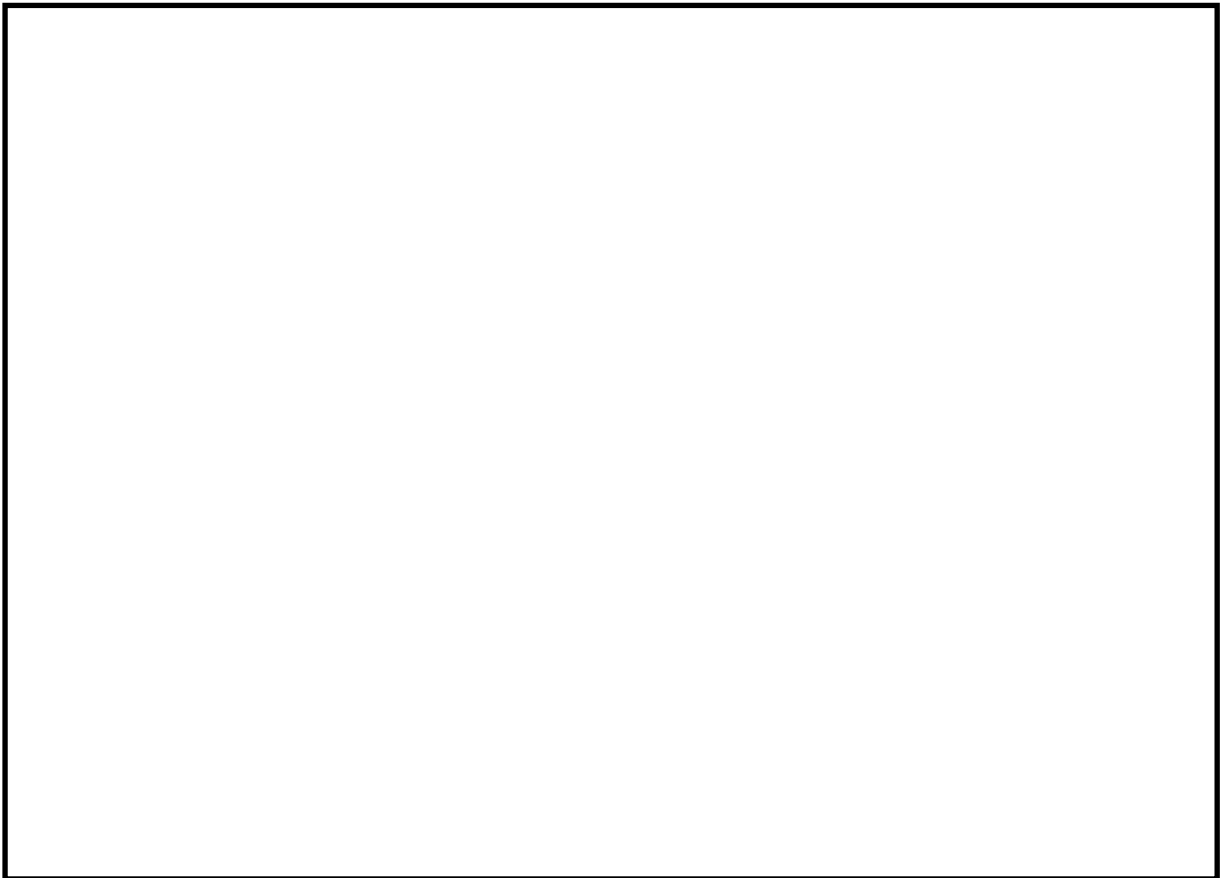
【モデル化方針の詳細】

アンバランス荷重による変位の最大値として、主軸振動に対するメーカ管理値の上限を設定する。

- (6) 解析コードは、「MSC NASTRAN」を使用する。なお、評価に用いる解析コード「MSC NASTRAN」の検証及び妥当性確認等の概要については、別紙「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。



(解析モデル)



(実機イメージ)

図 3-1 軸とケーシングのクリアランス評価の解析モデル

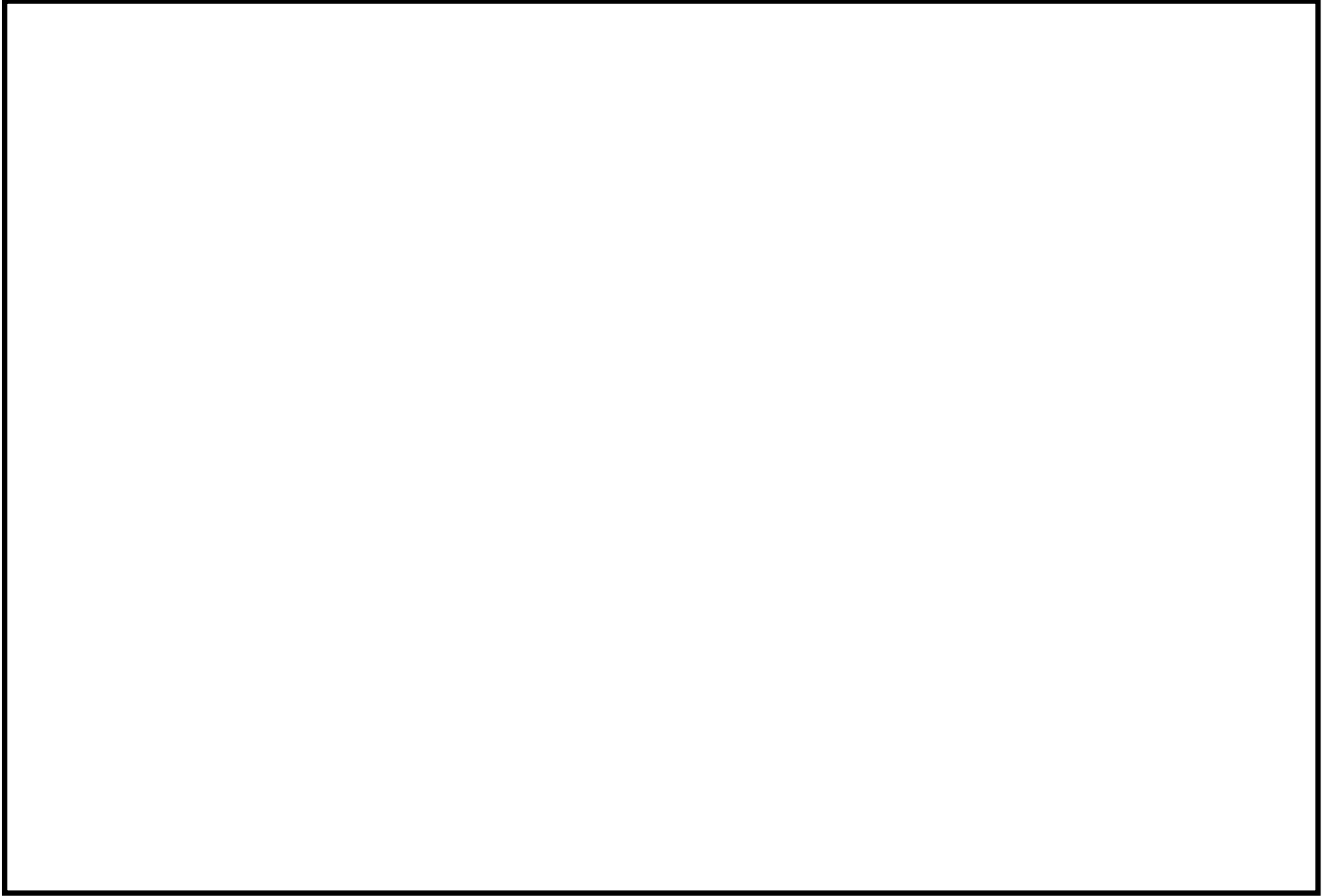


図 3-2 メインシャフト及びロータ部のはりモデル

4. 発電機制御盤の固有値解析モデル

発電機制御盤は、三次元 FEM モデルにて固有値解析を実施する。解析モデルを図 4-1 に、解析モデルの詳細説明を以下に示す。

- (1) 盤を構成する鋼材ははり要素、鋼板及びチャンネルベースはシェル要素でモデル化する。

【モデル化方針の詳細】

- a. 盤を構成する鋼材：図4-2～図4-3参照
b. チャンネルベース：図4-4参照

チャンネルベースは、C形鋼及び補強板を主な構成部材としている。発電機制御盤の支持構造物であり、発電機制御盤の応答を精緻に算定するために、シェル要素でモデル化する。

- (2) 発電機制御盤の取付器具の質量は、それぞれの取付位置に質量要素として均等に配分する。金具、ケーブル類は、等分布荷重として、当該質量のみをモデル全体に付加する。

【モデル化方針の詳細】

- a. 発電機制御盤の取付器具：図4-5参照

取付器具について、例として左側面盤のモデルを用いて説明する。取付器具は(2)項記載の通り、機器単体は剛性に寄与しないものとして取り扱う。したがって、FEMモデルとしてはそれぞれの取付位置に質点でモデル化する。

- b. 扉、カバー類：図4-5参照

上記の、取付器具のモデル化方針と同じである。

- c. 金具及びケーブル類

金具及びケーブル類は、支持構造物（強度部材）ではないこと、また、金具及びケーブル類は筐体に対して取付されることから、盤鋼材に分散してモデル化する。

- (3) 拘束条件は、基礎溶接部にて完全拘束とする。

【モデル化方針の詳細】

取付ボルトは、チャンネルベースと盤のボルト取付位置を結合（図4-6参照）する。

- (4) 列盤間の連結部は剛結合とする。

【モデル化方針の詳細】

列盤間の連結部（図4-7参照）を剛結合とする。

- (5) 耐震計算に用いる寸法は、公称値を使用する。

【モデル化方針の詳細】

詳細設計図面記載の寸法を、FEMモデルに反映する。

- (6) 解析コードは、「MSC NASTRAN」を使用し，固有値を求める。
なお，評価に用いる解析コードの検証及び妥当性確認等の概要については，VI-5「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

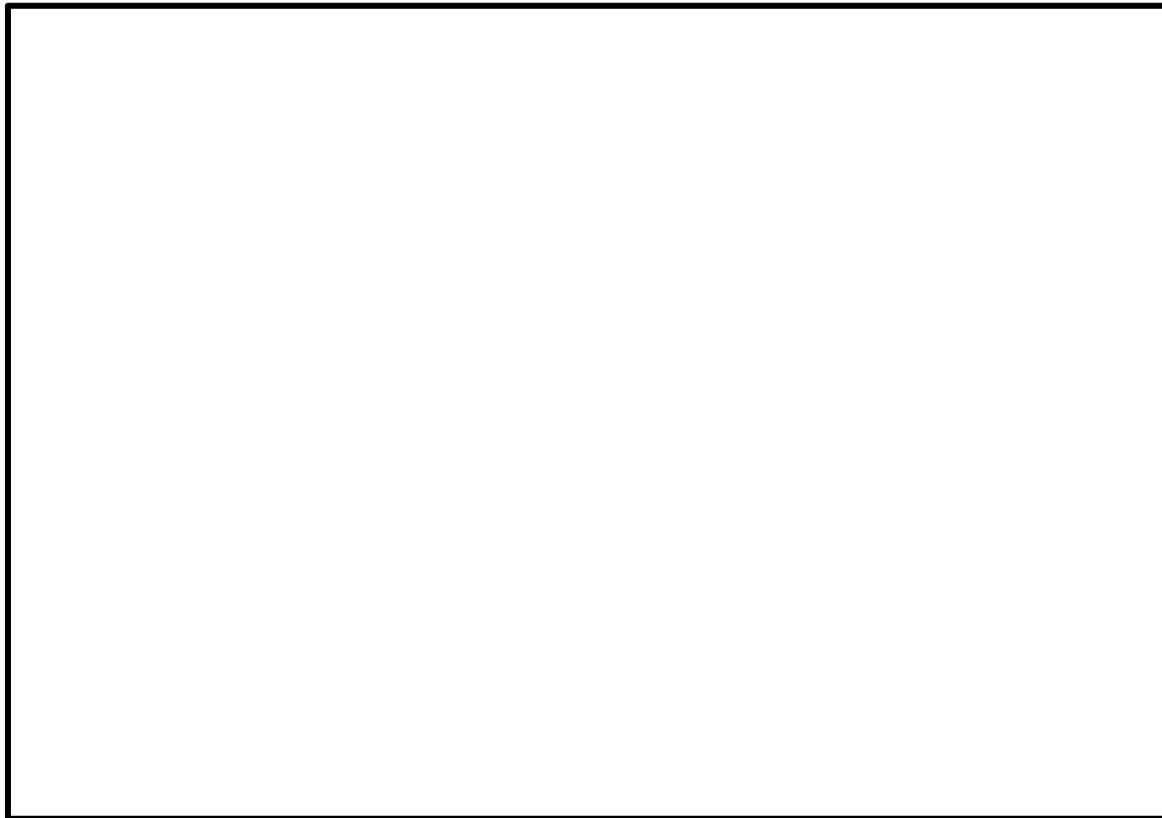


図 4-1 発電機制御盤の解析モデル

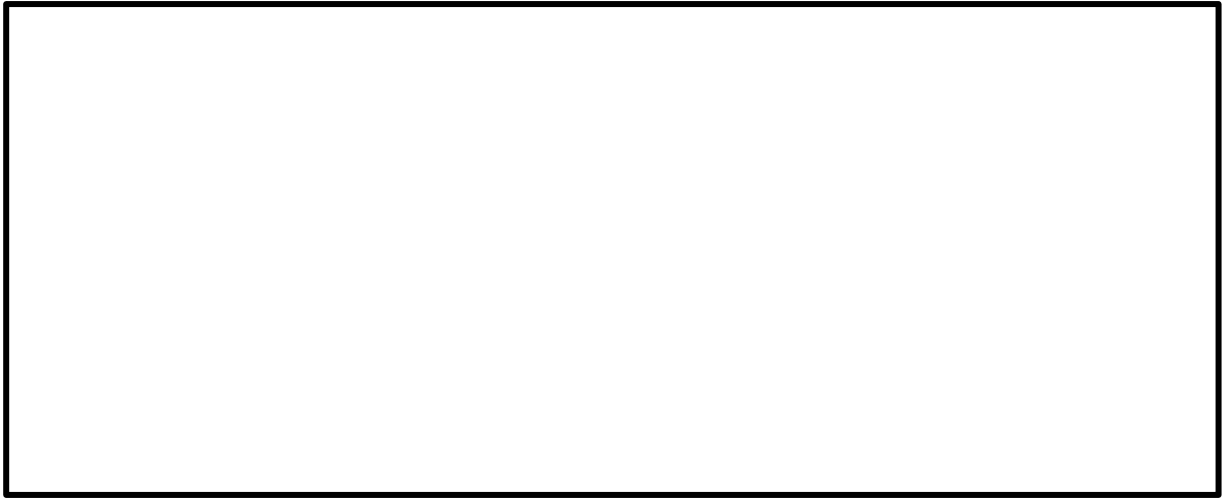


図 4-2 盤鋼材の例（角形鋼）

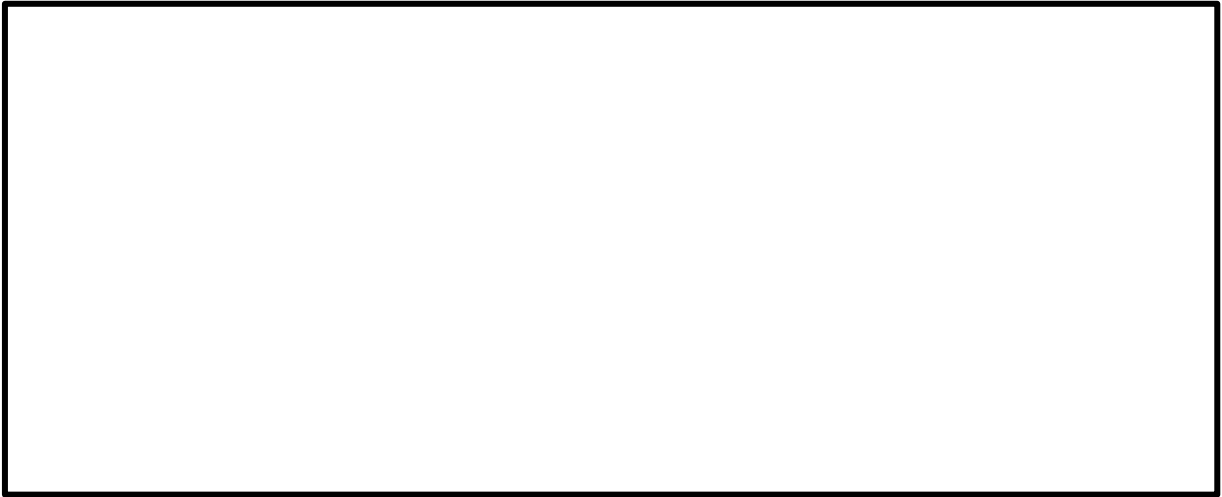


図 4-3 盤鋼材の例（山形鋼，溝形鋼）



図 4-4 チャンネルベースの例（C 形鋼及び補強板）

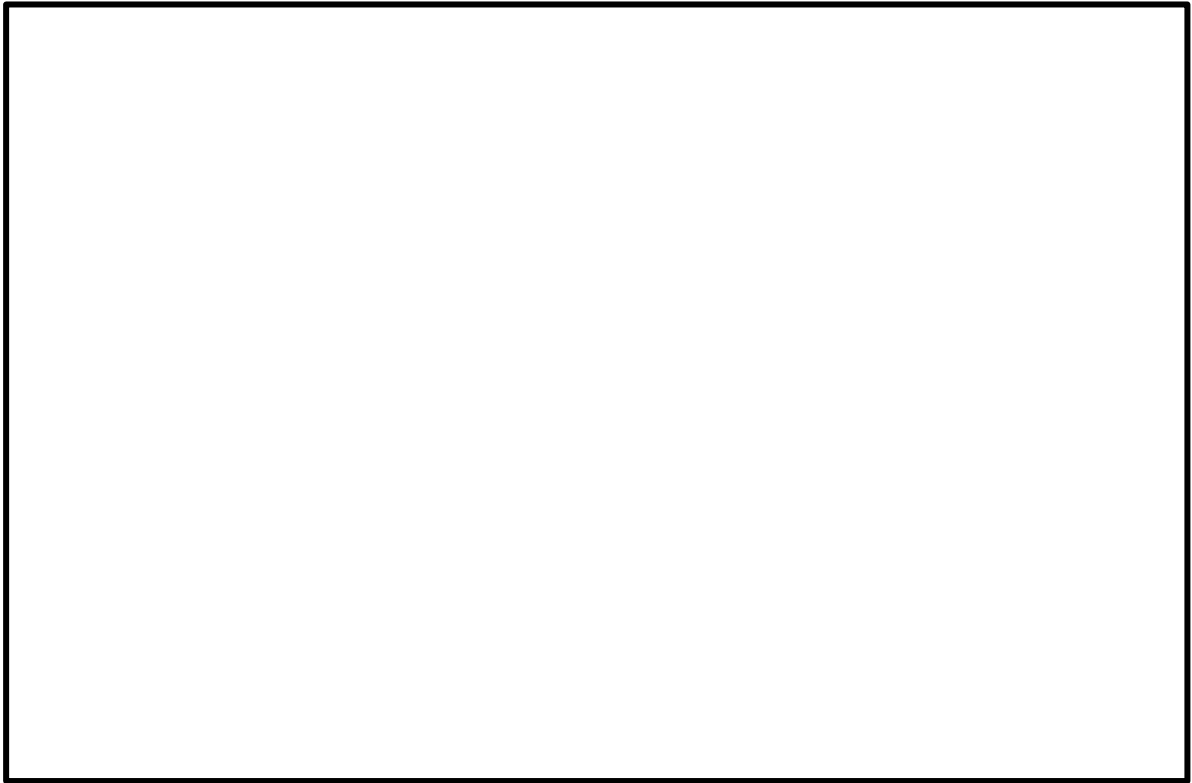


図 4-5 発電機制御盤（左側面盤）の取付器具

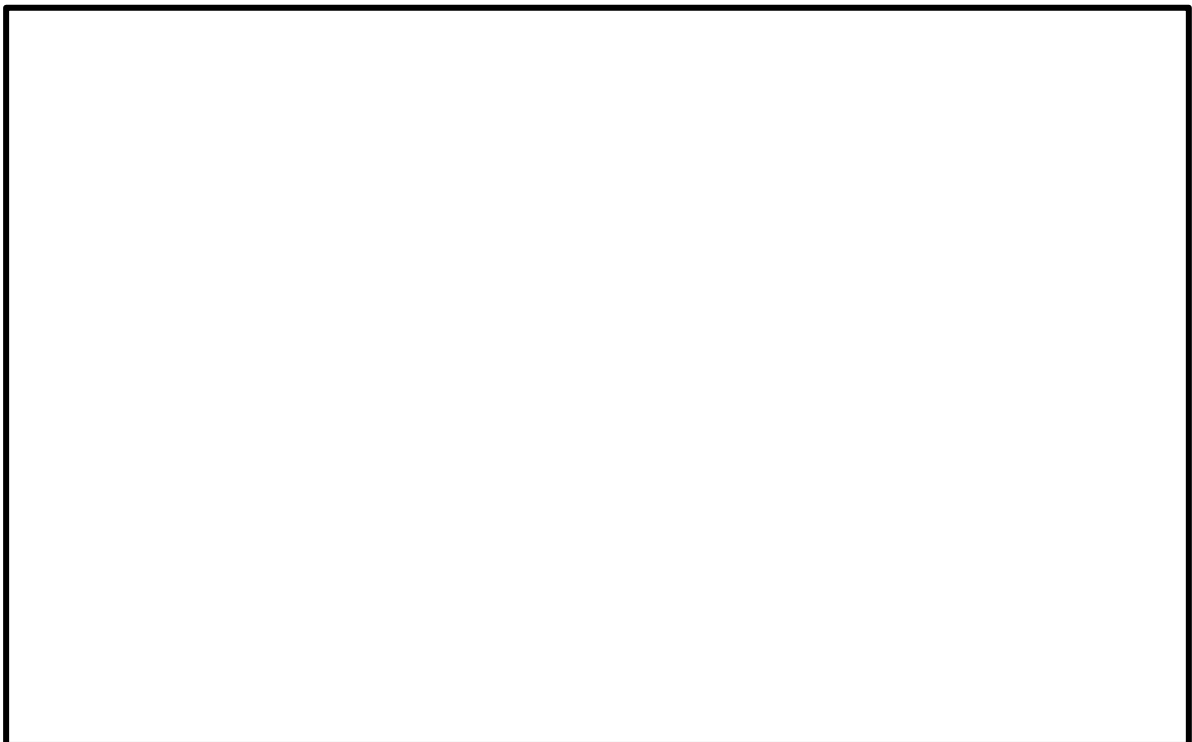


図 4-6 チャンネルベースと盤のボルト取付位置



図 4-7 列盤間の連結位置