

浜岡原子力発電所3・4&5号機 排気筒耐震裕度向上のための設計と施工

Design and Construction for Seismic-upgrading of Existing Stacks of Unit 3, 4, and 5 at Hamaoka Nuclear Power Station

会沢 悟 AIZAWA Satoru JFE エンジニアリング 建築鉄構事業部 東部建築鉄構部開発室技術グループ・マネージャー
山形 頼義 YAMAGATA Yoriyoshi JFE エンジニアリング 建築鉄構事業部 清水製作所計画室
加藤 宣彦 KATOU Nobuhiko JFE エンジニアリング 建築鉄構事業部 管理部工事室

要旨

中部電力(株)では、浜岡原子力発電所が東海地震の想定されている地域に立地していることに鑑み、耐震安全性に関して、既往の耐震基準の範疇に安住せず、常に最新の知見を反映し、耐震裕度を向上させていくことを方針としている。本工事はその一環として、既設排気筒(自立型)の耐震性向上を目的として、周囲に新設した支持鉄塔と筒身をオイルダンパーにより接続し、 $V_s=700$ m/s 基盤表面での最大加速度 $1\,040$ cm/s^2 の目標地震動に対する耐震化を行い耐震裕度を高める、国内原子力発電所では初めての試みの工事であった。

Abstract:

Chubu Electric Power Co., Inc. provided a new target earthquake, and developed a seismic-upgrading for Hamaoka Nuclear Power Station. Upgrade of stacks of unit 3, 4, and 5 were also included in the plan. This paper described outline of the structural plan for the seismic-upgrading, fabrication works and construction for these stacks, with regard to the seismic-safety during the construction.

1. はじめに

浜岡原子力発電所の当該排気筒は高さ約 100 m の鋼製自立型排気筒である。今回の耐震裕度向上工事においては、筒身単独で耐震性を向上することが困難のため、外部に鋼製鉄塔を新設し、既設筒身と新設鉄塔をオイルダンパーで接続する構造が用いられ、JFE エンジニアリングでは、構造設計から本計画に参画し、工場製作および現場工事まで担当した。

なお、工事に際しては稼働中の原子力発電所への影響を排除するため、工場製品の品質向上や現地架設重機の免震化など工事期間中の安全性についても十分考慮した計画をたて推進した。

2. 排気筒耐震裕度向上の計画

2.1 目標地震動

図 1¹⁾ に設定された目標地震動 ($V_s=700$ m/s 相当の基盤表面 (FL-20 m) での最大加速度 $1\,040$ cm/s^2) の加速度時

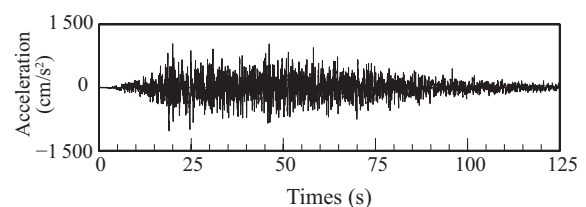


図 1 目標地震動の加速度時刻歴
Fig. 1 Time history of acceleration (Max.= $1\,040$ cm/s^2)¹⁾

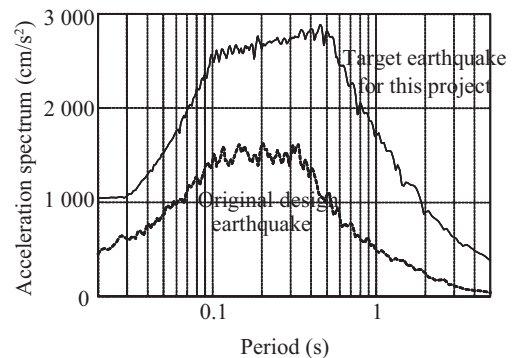


図 2 目標地震動の加速度応答スペクトル (減衰定数 $k=0.05$)¹⁾
Fig. 2 Acceleration spectrum (Damping ratio $k=0.05$)¹⁾

刻歴を、**図2²⁾**に加速度応答スペクトル(減衰比 $h=0.05$)を示す。なお、オリジナル設計における地震動のスペクトルも参考として示す。

2.2 計画概要

工事前の浜岡原子力発電所の排気筒は、高さ100.0m、内径8.8m(底部)、内径5.5m(頂部)の排気筒の全溶接鋼製自立型構造で、建築基準法などの基準を満足しており、耐震上も十分な耐震性を有した構造であるが、耐震裕度向上のため、排気筒の外周を鉄塔で囲んで支持する方法を採用した。

構造検討当初、目標地震動が自立型排気筒建設時の地震動に比べてかなり大きいため、通常の鉄塔による支持方法では、排気筒の応答低減が困難であったばかりか鉄塔においても製作施工を可能とする材質選定や断面の決定が困難であった。

そこで最近の知見に基づき、排気筒と鉄塔をオイルダンパーで連結することによる制震構造を採用した。検討は主にオイルダンパーの性能および設置レベル、鉄塔の高さおよび剛性をパラメーターに、排気筒筒身の曲げ耐力と鉄塔材質を考慮しながら行った。このとき、市販のオイルダンパーでは要求性能を満足できなかったため、新たに専用のオイルダンパーを開発した。

写真1¹⁾に工事前と工事後の排気筒の全景写真を、**図3¹⁾**に4号機の計画概要を示す。

排気筒(以下、筒身)周囲を、高さ90.5m、根開き38.0mの鋼管鉄塔で囲み、両者を高さ方向に3つのレベルでオイルダンパーにより連結する。**表1¹⁾**にオイルダンパーの仕様を、**表2¹⁾**にオイルダンパーの設置レベルと設置台数を示す。

オイルダンパーは筒身に新たに設置された支持点アームと鉄塔水平構面材からのブラケットの間に設置し、その両端は高力ボルトにより接合した。なお、筒身側では、支持点アームから伝達されるオイルダンパーの反力により発生す

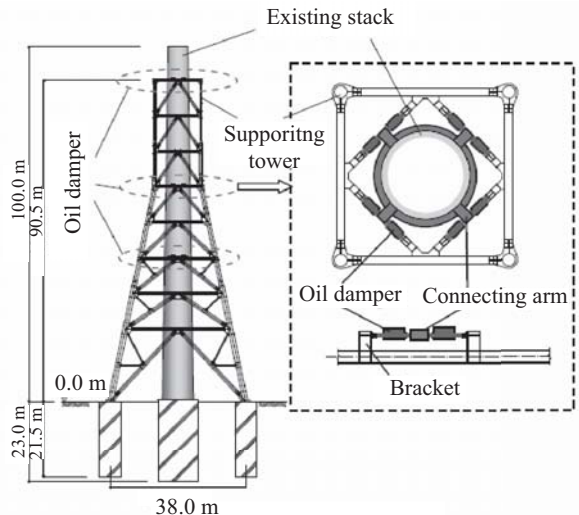


図3 4号機排気筒耐震裕度向上計画概要
Fig. 3 Outline of structural design¹⁾

表1 オイルダンパーの仕様

Table 1 Damper specification¹⁾

Type	Damping coefficient	Stiffness	Permissible velocity	Stroke
L型	5.0 kNsec/cm	80 kN/mm	180 cm/s	±300 mm
M型	7.5 kNsec/cm	110 kN/mm	120 cm/s	±200 mm

表2 オイルダンパーの設置レベルと設置台数

Table 2 Damper distribution¹⁾

Vertical level	Damper type	Number
90.5 m	L型	16
60.5 m	M型	8
40.5 m	M型	8

る応力に抵抗するため、補強リングを新たに設置した。鋼管鉄塔の主材に用いた材質は、支柱材にSM520B、斜材および水平材にはSM490Aである。現場接合部は、支柱材を完全溶け込み溶接、その他の部材は高力ボルトによる摩擦接合とした。

2.3 地震応答解析

地震応答解析¹⁾は、筒身と鉄塔をおのおの1軸とした質点系曲げせん断棒モデルに置換した2軸モデル(**図4¹⁾**)と鉄塔を立体モデル化した2つのモデルで実施した。ここでは、2軸モデルについて紹介する。オイルダンパーはダッシュポットとばねを直列にしたMaxwellモデルとし、地盤部分については地盤を多質点系並列地盤モデルで評価した排気筒-地盤練成系相互作用モデルとした。解析モデルへの入力 $V_s=700$ m/s相当の基盤表面(FL-20 m)で定めた目標地震動より次元波動論を用いて求めた応答波とした。



写真1 4号機排気筒の全景(工事前と工事終了後)

Photo 1 Photo of the stack unit 4 (Before upgrading and after upgrading)¹⁾

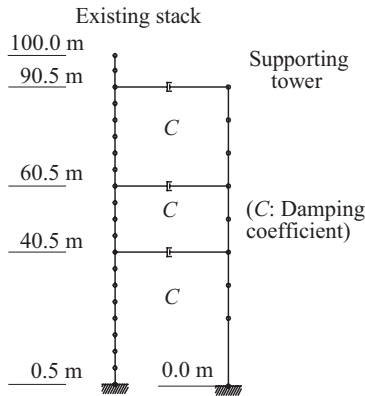


図4 振動解析モデル概要(地上部)

Fig. 4 Simplified vibration model (above GL)¹⁾

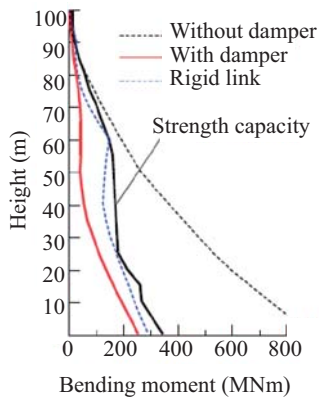


図5 筒身の最大応答曲げモーメント

Fig. 5 Bending moment of existing stack¹⁾

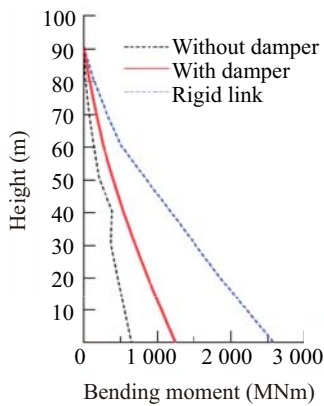


図6 鉄塔の最大応答曲げモーメント

Fig. 6 Bending moment of supporting tower¹⁾

2.4 解析結果

図5¹⁾および6¹⁾に筒身および鉄塔の最大応答曲げモーメントを示す。これらの図には比較のため筒身と鉄塔を通常の結合とした場合の応答値も示す。オイルダンパーの効果により筒身の応答は最小となり当初(自立型)の耐力内に

おさめることができた。鉄塔の応答も通常の剛結補強では実現できない応答の低減を可能とした。

3. 支持鉄塔工場製作

3.1 使用鋼材について

主要部材の大半は、鋼管で構成されており、最大径は1500φである。本工事の設計図は、鋼板としての材料規格が記載されており、造管後の規格が規定されていない。このため、造管した後の性能を同等強度の規格範囲内となるように、JFE スチールと協議を行い、材料発注時に必要な性能試験を付加した。

3.2 鋼管へのリング取り付け

鉄塔部材は、鋼管にリングスチフナが取り付け構造となっており、リングスチフナ取り付け後の鋼管精度が重要である。そこで超高層ビルでも実績があり、JFE スチール西日本製鉄所(福山地区)で製造されていた、外ダイヤフラム付き円形鋼管柱(1992年～2006年販売商品)の製造方法を採用した。この製造方法の利点は、造管精度を一般の鋼管より厳しく管理できることにより鋼管同士の接合精度が良いことである。鋼管の精度は、径に関わらず精度目標を±2mm以内とした。

3.3 工場での製造における現地再現性への配慮

各号機の鉄塔形状は、発電所内の敷地制約などで、スパン、傾斜がそれぞれ異なっている。また、格点部間で勾配が変化する部材もあり、さまざまな配慮が必要であった。稼働中の原子力発電所構内での工事であるため、現地トラブル「0」を目指し、下記施策を実施した。

3.3.1 工場内での柱材接合

主柱材については、現場継手部が溶接のため、工場内で下部になる柱材と上部になる柱を仮接合した。これを繰り返し実施し、全部材仮接合した。仮接合の際、造管精度などによる誤差で適正な接合ができない部材は、あらかじめ矯正を行い、適正なルート間隔が確保できることを確認し、その上で内部の接合用治具取り付けを行った(写真2, 3)。

3.3.2 三次元勾配への対応

格点部で勾配が変化する主柱材について、設計勾配に合わせた架台、治具を工場内で製作した。これにより、単一部材での製品精度の確保がしやすくなった上、寸法計測が確実に実施できた(写真4)。

3.3.3 筒身本体と接続する補強リング部材の製造

既設である筒身に補強リングを取り付け、鉄塔と繋ぐ構造となっているが、既設部材に取り付ける補強リングの精度確保が重要であった。このため、単体部材の精度を厳しく管理し製作した上、全体仮組を行い製作精度の確認を実施した(写真5)。

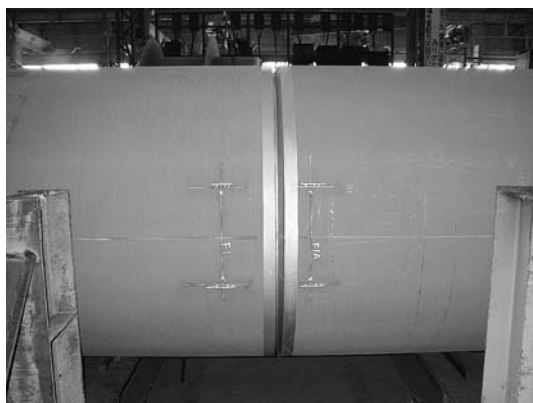


写真2 柱継手部(外面)

Photo 2 Column to column joint (Outside view)



写真5 仮組立状況

Photo 5 Pre-assembly situation



写真3 柱継手部(内面)

Photo 3 Column to column joint (Inside view)



写真6 らせん階段外観

Photo 6 Spiral staircase (Full view)



写真4 柱組立状況

Photo 4 Column assembling situation

3.3.4 らせん階段の運搬と塗装

らせん階段はステンレスが使用され、鉄塔本体と同様の重防食塗装であるため、各部材ごとに専用架台を製作し、ブラスト処理から塗装、そして現地の運搬を円滑に行った(写真6)。

4. 支持鉄塔工事概要

4.1 タワークレーン・構台架設

4.1.1 耐震性を考慮した工法検討

(免震タワークレーン(T/C)の検討)

支持鉄塔建て方用重機については、建設時に遭遇するかもしれないS1クラス地震(設計用最強地震による基準地震動)が発生し影響を受けても、倒壊で既設排気筒や稼働中の原子力安全施設に影響を及ぼさない工法が求められ、以下の工法を検討した。

- (1) 下部中型クローラークレーン(C/C) + 上部T/C (免震・自立式)
- (2) 下部中型C/C + 上部T/C (鉄塔支持式)
- (3) 大型C/C (免震架台設置)
- (4) 下部中型C/C + デリック
- (5) 下部中型C/C + 上部ワイヤージャッキ引き上げ
- (6) 下部中型C/C + 上部小型クライミングクレーン

検討の結果、下部建て方を中型C/C、上部建て方をT/C(免震・自立式)で行う工法(1)の総合評価が高かったが、免震・自立式T/Cの実績がないことと経済性の観点から、上部建て方を鉄塔支持式T/Cで行う工法(2)を5号機をモデルとして詳細検討を試みた。結果は、S1地震動において、



写真7 免震装置

Photo 7 Seismic isolation placement

T/C マスト頂部の応答加速度が規定値を大きく超えてしまい、T/C を鉄塔で支持する工法は構造的に成立しないことが分かった。そこで、鉄塔上部の建て方には、免震・自立式T/C工法を採用することとし、免震装置はS1地震動においてT/Cマスト頂部の応答加速度を、初期組立時、完成時ともに規定値以下に抑えた。

4.1.2 免震T/Cの仕様(写真7)

- ・ タワークレーン：JCC900HK（マスト6本）
- ・ 構台：8.7m × 8.7m × 61.25m 高さ（1スパン×7層構造）
W ≒ 450 t
- ・ 基礎：12m × 12m × 6.5m 高さ W ≒ 2 250 t
- ・ 免震装置、他
 - 積層ゴム 4台
 - 鉛ダンパー 2台
 - 鋼棒ダンパー 2台
 - 台風対策ストッパー 1台

4.1.3 免震・自立式T/C基礎検討

鉄塔上部建て方に使用する免震・自立式T/Cの基礎方式については、浜岡の地盤状況、工程への影響や経済性について検討を行い、T/C基礎は地上基礎とし、地上基礎下面から支持岩盤までの構造を3号および4号はマンメイドロック、5号は地盤改良とした。

4.1.4 鉄塔工事の検討

支持鉄塔架設用重機として、S1地震で転倒しない免震・自立式T/Cを採用した。配置については、T/C組立期間中に強風が発生しても、クレーンジブが跳ね起きない限界跳ね起き角度を算出し、できる限り支持鉄塔近傍に設置することとし、T/Cが持つ揚重能力と作業半径を最大限に活用した(写真8)。また、T/Cの作業半径内には、構内アクセス路との調整を行いながら、地組場エリアを設定、また近くに仮置場ヤードを準備して、タイムリーな製品の搬入とした。



写真8 3号機全景

Photo 8 Full view of No. 3 Unit

4.2 支持鉄塔工事

4.2.1 工事着工迄

この工事は設計委託業務の中で工事開始約1年前の2005年4月より施工検討会を開催し、支持鉄塔(構真柱・本体)・仮設タワークレーン(基礎・免震装置・クレーン構台・本体)の検討を行い当初は工事完成を5号機、3号機、4号機の順番で行い、2008年3月としていたが、2006年初めに姿完成(塗装完了まで)を2007年9月、工事完成を2007年末として発注された。鉄塔架設は2007年3月より工事開始予定だったが、2006年8月初に中部電力(株)より2007年5月25日に機能完成として(塗装は未完了でよい)できないかとの打診を受け、工場塗装を3節より下は1層目塗装までとしてこの工程を進めた。

4.2.2 支持鉄塔架設

2006年5月の工事着工に至り、タワークレーン構台基礎工事に着手し、並行して構真柱は7月末より据付に入った。位置出し、据付確認、溶接は鉄筋の中の狭いスペースでの作業であった。

9月よりタワークレーン組立て、構台架設、クライミングを繰返し行い、組立て据付完了後、鉄塔部材は当社清水製作所からまず4号機の工場製作部材を2006年12月末に搬入し、地組み溶接を行った。1節から3節までは水平材の繋ぎ組立て、1節は柱、斜材の繋ぎがあり斜材・水平材は地組後、溶接を行った。翌年正月明けから3号機の部材搬入地組に入り、5号機は2月より部材搬入となり支持鉄塔の架設を行った。3節以降は吊上げ重量能力以内の時は極力柱、水平材、斜材の地組みを2面行い架設した。

3号機に関しては既設筒身脚部の補強としてダブルリングプレート溶接により198ヶ所の取付けを行った。

4号機の架設状況を写真9に示す。



写真9 4号機全景

Photo 9 Full view of No. 4 unit



写真11 海より全景

Photo 11 Full view from Enshunada Coast



写真10 補強リング、オイルダンパー取付状況

Photo 10 Installation of reinforcement ring and damper

4.2.3 補強リング・オイルダンパー取付・機能完成

鉄塔と筒身を繋ぐ個所の筒身に取付ける補強リングは前もって試験体を製作し、施工性についての検討を実施した。現地取付け前には、模型により鉄工鍛冶、溶接工に作業順序・方法・注意点などを周知させ施工した。特に、補強リングおよびオイルダンパー取付精度の管理には工場仮組検査を含めて細心の注意を払った。

浜岡の冬場は特に風が強い所であるが、天候に恵まれ5月には予定どおりに機能完成した(写真10)。

4.2.4 その他工事

機能完成後は各ステージの最終納め、3節以下の塗装および3節以上の接合部の仕上げ塗装を行った。7月末からは内部点検のテレビカメラを入れて補強リング部の確認、起振機による振動試験を行い最後に公開試験を行った。支持鉄塔工事は9月初めに工事を完了した。

タワークレーン・構台解体は鉄塔工事完了後、クライミングダウン、構台解体を順次行った。タワークレーン本体解体後3号機の構台基礎の解体を行い、予定どおり契約工期の2007年12月25日に竣工を迎えることができた(写真11)。

5. おわりに

鋼製自立型煙突を、既設筒身と新設鉄塔とをオイルダンパーで接続することにより、目標地震動を目標とする耐震裕度の向上を達成することができた。また、稼働中の原子力発電所への影響を排除するため、工場製品の品質向上や現地架設重機の免震化など、製作工場と現場が協力して国内初となる工事を完成させることができた。

2009年8月11日、駿河湾を震源地とする地震が発生し、浜岡原子力発電所がある御前崎市は震度6弱に見舞われたが、耐震裕度向上工事を行った排気筒には特に問題はなかった。

本工事については、中部電力(株)本店土木建築部殿を初めとし、浜岡原子力発電所保修部建築課殿、鹿島建設(株)殿の各担当部署のご指導、ご協力をいただき、大幅な工期短縮を実現し、無事故無災害で完遂することができた。ここに関係者の方々には深く感謝申し上げる次第です。

参考文献

- 1) Shimamoto, R.; Mori, F.; Kitaori, T.; Aizawa, S.; Ohara, E.; Kurino, H. Seismic-upgrading of Existing Stacks of Nuclear Power Station Using Structural Control Oil Dampers. The 14th World Conference of Earthquake Engineering. Beijing, China



会沢 悟



山形 頼義



加藤 宣彦