

# 各種プラント施設の耐震診断と耐震補強

## Examples of Evaluation and Improvement in Seismic Capacity for Existing Plant Facilities

吉田 勝利 YOSHIDA Katsutoshi JFE エンジニアリング シビルエンジニアリングセンター 設計部 統括スタッフ(副部長)  
増田 博 MASUDA Hiroshi JFE エンジニアリング シビルエンジニアリングセンター 設計部 統括スタッフ(課長)  
岡本 紀明 OKAMOTO Noriaki JFE エンジニアリング シビルエンジニアリングセンター 設計部 統括スタッフ(課長)

### 要旨

プラント施設の耐震補強の主目的は、大地震時における人命確保はもとより、被災後の迅速な操業再開を可能にするプラント設備の機能維持であり、補強工事の実施に際しては操業を妨げない工法が求められる。本稿の液化天然ガスの受入基地の事例では、荷役設備の機能維持の課題を支持架構の耐力を向上させることによって解決した。最終需要先へ都市ガスを供給する整圧所の事例では、既設建屋の外側に新設の補強架構を設けることにより、操業を継続しながらの補強工事を容易にした。また、ごみ焼却施設の事例では、耐震診断基準の異なる鉄骨造と鉄筋コンクリート造の併用構造について、一体構造としての評価を行ない、補強箇所にアプローチしやすい施工性に配慮した補強工事を実現した。

### Abstract:

Main purpose of improvement in seismic capacity for existing plant facilities is not only ensuring the safety of person working there at the time of the severe earthquake but also maintaining the function of plant facilities enabling the quick restart of operation after the incident. Also it is required not to disturb the plant operation during the reinforcement works. In this paper, the following examples are shown. (1) Liquefied natural gas (LNG) unloading facility (supporting structure by steel framing): Structural steel framing reinforced by additional steel section against seismic response based on Level 2 seismic motion. (2) City gas governor station (RC building): RC Framing reinforced by additional outer structural steel framing to reduce the seismic load of RC framing. (3) Waste incineration plant facility (RC building with structural steel framing for roofing and siding): Combined framing reinforced by additional bearing wall and steel bracing to satisfy specified criteria for existing building.

## 1. はじめに

プラント施設の耐震基準は地震被災のたびに強化され、1981 年には建築基準法における新耐震設計法の導入、高圧ガス保安法における耐震告示の制定によって、関東大震災級の大地震を想定した現在の耐震基準の骨格が整備されてきた(表 1)。また、1995 年の阪神大震災を受け、耐震改修促進法が制定されたのを契機に、旧耐震設計で建設された既存施設の耐震補強が全国的に実施されるようになった。

プラント施設の耐震補強は、一般建築物のような人命確保を大前提とした構造躯体の損傷防止だけでなく、機器や配管および電気計装を含めたプラント設備全体の機能維持の視点が不可欠である。また、工事に際してはプラント操業を妨げない配慮が必要になる。近年、当社が実施した耐震補強プロジェクトの例を表 2 に示す。本稿では、この中か

ら液化天然ガス(以後、LNG)の受入基地、都市ガス整圧所およびごみ焼却施設の事例について報告する。

## 2. LNG 受入基地 (LNG 受入アンローディングアーム設備)

### 2.1 施設概要

本施設は LNG タンカーから LNG を受け入れるためのアンローディングアームおよびその支持架構で、新潟東港北端に位置する日本海エル・エヌ・ジー株式会社殿新潟基地海上バース上に設置されているものである(図 1)。本施設で受け入れられた LNG は、陸上貯蔵設備(LNG タンク)に貯蔵され、供給先の需要に応じて出荷される。

### 2.2 耐震診断

日本海エル・エヌ・ジー株式会社殿より業務委託を受け、海上受入設備から陸上受入設備の配管およびその支持架構

表1 関係法令の耐震設計基準の変遷  
Table 1 Transition of the seismic design standards

地震 (マグニチュード)	建築関連法令	高圧ガス関連法令
1923年 大正関東地震 (M7.9) (関東大震災)	1924年 市街建築物法改正: 耐震計算の義務化 (水平震度 0.1)	
1948年 福井地震 (M7.1)	1950年 建築基準法 (制定): 水平震度 0.2	1951年 高圧ガス取締法制定
1964年 新潟地震 (M7.5)	1971年 建築基準法改正施行: RC柱のせん断補強強化など	
1968年 十勝沖地震 (M7.9)		
1978年 宮城県沖地震 (M7.4)	1981年 建築基準法改正 (施行): 新耐震設計法導入による構造設計基準全面改正	1981年 高圧ガス耐震告示制定: 塔槽類, 支持構造および基礎の耐震基準の明確化
1993年 釧路沖地震 (M7.5)		
1994年 三陸はるか沖地震 (M7.6)		
1995年 兵庫県南部地震 (M7.3) (阪神大震災)	1995年 耐震改修促進法制定 2000年 建築基準法改正 (施行): 建築基準の性能規定化	1997年 高圧ガス耐震告示改正: 巨大地震動の考慮 液状化地盤変状考慮
2003年 十勝沖地震 (M8.0)		
2004年 新潟県中越地震 (M6.8)		
2005年 福岡県西方沖地震 (M7.0)		
2007年 新潟県中越沖地震 (M6.8)		
2011年 東北地方太平洋沖地震 (M9.0) (東日本大震災)	2007年 建築基準法改正 (施行): 建築確認審査厳格化 構造技術規定の明確化	

表2 JFEエンジニアリングの近年の耐震診断・耐震補強の事例  
Table 2 Examples of seismic evaluation and seismic reinforcement project

対象分野	対象施設	対象構造物	関係法令		建設年度		構造種別			耐震補強の方法
			建築基準法	高圧ガス保安法	～1980	1981～	S	RC	CB	
エネルギー	LNG受入基地	管理棟	準拠			新耐震設計		採用		・耐力壁の増厚, 耐力壁の窓閉塞 ・耐震スリットの追加
		LNG受入アンローディングアーム設備		準拠	旧耐震設計		採用			・柱の補強, 梁の補強, 耐震プレースの補強
	都市ガス整圧所	ガバナーステーション	準拠		旧耐震設計		採用	採用	採用	・耐震壁の増厚, 耐震壁の窓閉塞 ・耐震スリットの追加, 鉄骨梁の補強
		ガバナーステーション	準拠		旧耐震設計			採用		・外付け鉄骨フレームによる補強
	ガス配管橋	橋脚		準拠		新耐震設計	採用	採用		・耐震プレースの補強
	原子力発電所	排気筒	準拠		旧耐震設計		採用		・支持鉄塔の新設 ・オイルダンパーによる制振構造化 <sup>1)</sup>	
都市環境	ごみ処理施設	リサイクル棟	準拠		旧耐震設計		採用			・柱の補強, 耐震プレースの追加 ・屋根トラスの補強
		ごみ焼却棟	準拠		旧耐震設計		採用	採用		・耐震壁の増設, 耐震プレースの追加 ・屋根プレースの補強
産業機械	飼料基地	飼料配合工場	準拠			新耐震設計	採用			・柱の補強, 梁の補強 ・耐震プレースの追加, 耐震プレースの補強
		飼料サイロ	準拠		旧耐震設計		採用			・サイロ容器の補強

■ 本稿で紹介 LNG: 液化天然ガス  
S: 鉄骨造 RC: 鉄筋コンクリート造 CB: コンクリートブロック造

について、現行の「高圧ガス設備等耐震設計指針」<sup>2,3)</sup>に基づく耐震性の評価を実施している。その中で陸上架構の支持地盤(護岸部分)の側方流動解析なども実施しており、配管機器+架構+基礎の一括評価を行なうことで、総合的

な耐震性評価と合理的な補強工事の実現を目標としている。その中で、前項に示したアンローディングアーム(ニイガタ・ローディング・システムズ株式会社製 16B×60DCMA-FP型, 1984年より営業運転開始)について、同上指針に基

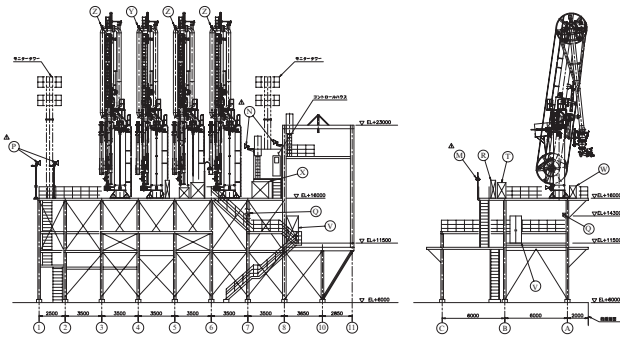


図1 既設の液化天然ガス (LNG) アンローディングアーム設備  
Fig. 1 Existing unloading arms for liquefied natural gas (LNG)

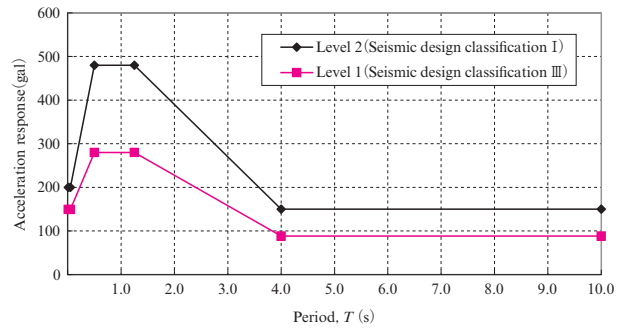


図2 地震動の加速度応答スペクトル  
Fig. 2 Acceleration response spectra based on guideline

づくレベル1相当の耐震性評価を実施した結果、構成部材の断面力が許容強度を超過する部分があることが確認された。この許容強度超過がそのまま倒壊など、構造物としての重大な損傷に繋がるものではないものの、アンローディングアームとしての機能が維持されないものとなることが想定された。

よって、設備全体の耐震性の向上などを目的として、耐震性に優れた新型のアンローディングアームに更新するものとし、支持架構と合わせ評価地震動をレベル2相当に引き上げて検討することとなった。

### 2.3 採用地震動，構造モデル

地震動の加速度応答スペクトルは、「高圧ガス設備等耐震設計指針」<sup>3)</sup>に基づくレベル2地震動（重要度分類I）に相当する地表面加速度を、同指針の代替評価法用に補正した基準地表面加速度（200 gal）としたもので、図2に示すものとした。構造モデルとしては、新型のアンローディングアーム（ニイガタ・ローディング・システムズ株式会社製16B×60'RCMAS型，水平応答2.0G（2000 gal）対応）を支持架構に搭載した状態で全体をビーム要素として構築し、支持架構脚部は基礎杭の重量・剛性を考慮したバネ・マスモデルとした。構造モデルを図3に示す。また、地震応答解析は弾性応答を基本とすることから、モード合成法によるものとした。

### 2.4 アンローディングアームの応答

新型アンローディングアームとその支持架構の各部の最大水平応答加速度について、Y方向（接岸線垂直方向）を代表として図4に示す。地震動のレベルを上げたことにより全体として応答加速度が増加したが、アンローディングアームの強度評価上の応答加速度としては2.0G（2000 gal）以内に納まっており、アンローディングアームそのものはレベル2地震動に対して、強度上、問題ないことが確認された。

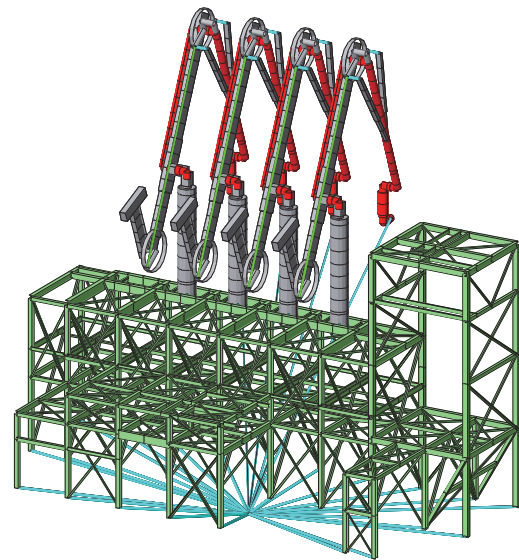


図3 アンローディングアームを含む全体構造モデル  
Fig. 3 Overall view of structural model including unloading arm

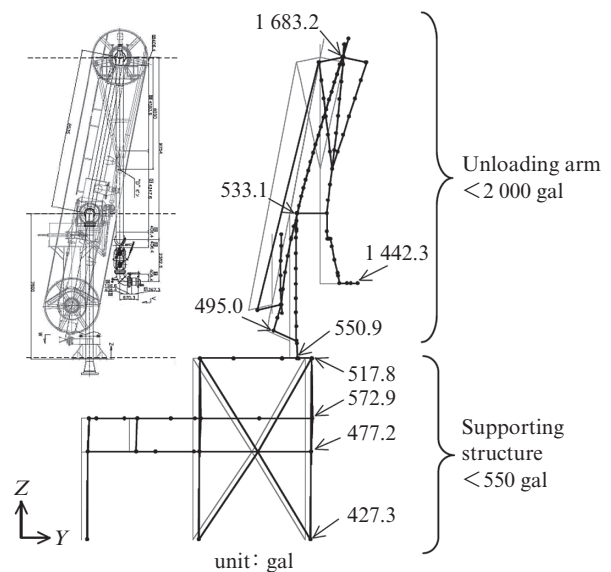


図4 最大水平応答加速度  
Fig. 4 Maximum acceleration response of structural model

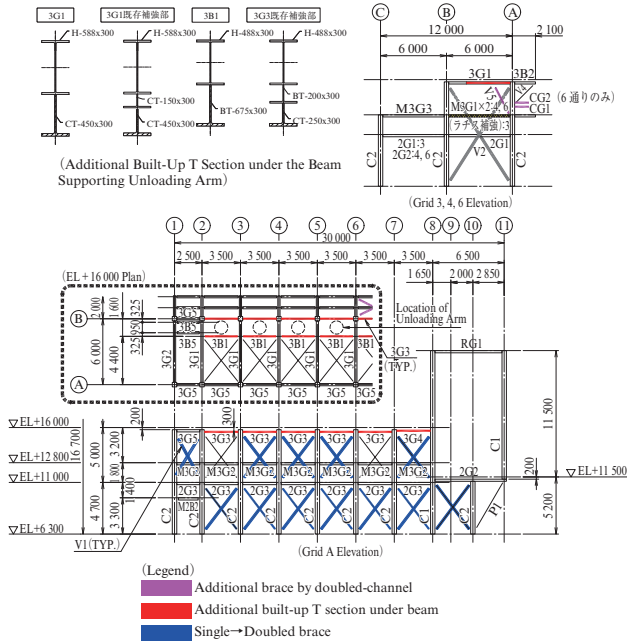


図5 アンローディングアーム支持架構の耐震補強

Fig. 5 Reinforce work of supporting structure for  $K_{MH}=0.55$

## 2.5 支持架構の応答および補強概要

アンローディングアーム支持架構は構造が複雑であるため、2.4節の地震応答解析結果から方向・層別の最大水平応答をおおむね絡するレベルとなる550 galを設定し、支持架構部分の設計用の静的震度 $K_{MH}$ を両方向共0.55とした。なお、現設計の静的震度は0.3である。

上記地震力による応力解析結果に基づいた補強概要を図5に示す。設備を稼動しながらの補強となるため、常時荷重に対する安定性を考慮し、強度不足となった部材を取り替えるのではなく、必要断面を付加する形で補強設計を実施した。特に、アンローディングアームの転倒モーメント増大によりこれを直接支持する梁に比較的大きな断面による補強(H型断面梁下へのBuilt-up T断面の追加)が必要となった。また、架構全体としての設計震度が増大しているため、鉛直ブレースについてはほぼ全数補強(既設山形鋼シングルをダブル化など)が必要となった。最終的な補強鋼材重量は約20トンとなり、その他、ベースプレートの拡幅など、柱脚の補強を実施した。なお、断面性能評価時の許容応力度比は1.0以下とした。

## 3. 都市ガス整圧所(ガバナーステーション)

### 3.1 施設概要

本施設は、周囲を住宅地に囲まれた東京ガス株式会社殿の都市ガス整圧所の中にあり、1950年代に建設された鉄筋コンクリート造平屋建ての建築物である(写真1)。都市ガス整圧所は、高圧および中圧ガス導管網を通じてLNG受入



写真1 ガバナーステーション外観(補強工事前)

Photo 1 Governor station before reinforce work

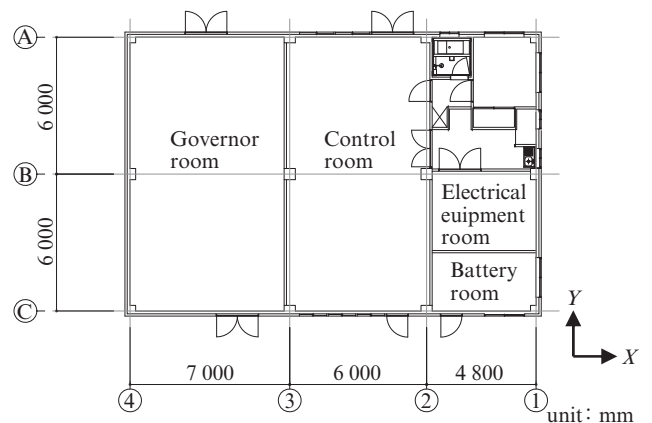


図6 平面プラン

Fig.6 Building plan (Before reinforcement work)

れ基地から送られてきたガスを減圧し、最終需要先へ送り出すための施設である。ガバナーステーションの平面プランは、図6に示すように、減圧のための機器・配管類があるガバナ室と整圧所全体の管理を行なう制御室などで構成されている。

### 3.2 耐震診断結果

東京ガス株式会社殿より業務委託を受けて、「既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準」<sup>4)</sup>に基づく耐震性評価を実施した。診断の結果、耐力壁がバランスよく配置されたY方向については問題なかったが、開口部が多いX方向については一部の柱に脆性的な損傷が予想されるなど耐震性能の不足が認められた。

### 3.3 耐震補強

耐震補強工法は、建替えなどの抜本的な対策も含めて検討されたが、施設の連続操業に大きな影響を及ぼさないこと、住宅地への防音上の配慮から外壁の撤去が難しいことなどから、最終的には既設建屋の外側に新設の補強架構を設ける外付け鉄骨フレーム工法を採用した。

外付け鉄骨フレーム工法は、既設建屋に手を加えることなく、機器や配管および電気計装ケーブル類の移動、盛

替えが基本的に必要ないため、施設を一時的にでも休止させる必要がないという利点がある。

鉄骨フレームの設計においては、既設建屋のコンクリートが将来劣化する可能性に配慮し、十分な強度と剛性を確保することによって、地震時に既設建屋に生じる水平力のすべてを安全に支持できる構造としている。耐震補強方針を以下に示す。

- ・鉄骨フレームは、既設鉄筋コンクリートの建屋の水平変形を抑えられるよう剛性を確保するものとし、許容層間変形角を1/1 000以下とする。
- ・鉛直方向の地震動にも耐えられるように、既設鉄筋コンクリートの建屋と鉄骨フレームを接続する。
- ・鉄骨フレームの基礎は、杭基礎として最小限の基礎面



写真2 ガバナーステーション外観（補強工事後外壁面）  
Photo 2 Governor station after reinforce work (Outer wall)



写真3 ガバナーステーション外観（補強工事後屋根面）  
Photo 3 Governor station after reinforce work (Roof)

積とし、既設埋設物との干渉を避ける。

- ・大地震時に脆性破壊のおそれがある開口部に接する既設柱には、耐震スリットを設置する。

写真2, 3に補強完了後の状況を示す。鉄骨フレームに壁を取り付けて新設同等の外観としながら、屋根を設けないことで建築確認申請を不要として、早期着工と全体工期の短縮化を実現した。

## 4. ごみ処理施設（ごみ焼却棟）

### 4.1 施設概要と現地調査結果

既存のごみ処理施設では、高い燃焼効率と発電効率、クリーンな排ガス処理のために最新のプラント設備への更新を図るとともに、施設全体の耐震性能を向上させるために耐震補強を実施する例が多い。この事例の一つとして、東村山市の既存施設の断面図を図7に示す。本施設は、短辺方向20.0m×長辺方向55.6mの平面形状を有し、高さ24.0mの鉄骨造（以後、S造）+鉄筋コンクリート造（以後、RC造）建築物である。プラットホーム、ごみピット、炉・排ガス処理室といった大きく3つの空間で構成されている。

現地調査結果を表3に示す。部材寸法計測・コンクリート物性試験・鉄骨突合せ溶接部の非破壊試験を実施し、設計図書との整合性とコンクリートと鉄骨について材料の健全性を確認した。

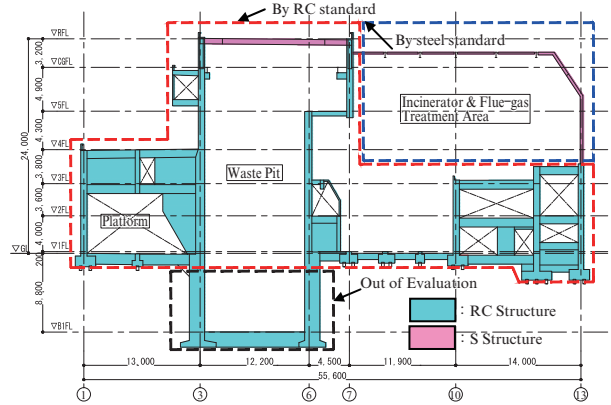


図7 施設断面（構造区分および診断範囲）

Fig. 7 Building section (Structural division and evaluation scope)

表3 現地調査結果

Table 3 Results of site investigation and material test

現地調査項目	調査目的	判定基準	調査結果	判定
部材寸法	既設図面と現状の照合	図面と整合していること	不整合なし	良好
ひび割れ	ひび割れ発生状況の把握	ひび割れ幅0.3 mm以下	ひび割れ幅0.3 mm以下	良好
コンクリート圧縮強度	現状のコンクリート強度把握	設計強度以上( $F_c=21 \text{ N/mm}^2$ 以上)	平均 $F_c=30.6 \text{ N/mm}^2$	良好
コンクリート中性化	鉄筋の腐食有無確認	鉄筋かぶり厚さ以下(30 mm以下)	平均中性化深さ10 mm	良好
溶接部非破壊検査	溶け込み溶接部の内部欠陥有無確認	検査基準に適合していること	検査基準に適合	良好
不同沈下	建物不同沈下有無確認	沈下ひび割れがないこと	沈下ひび割れなし	良好

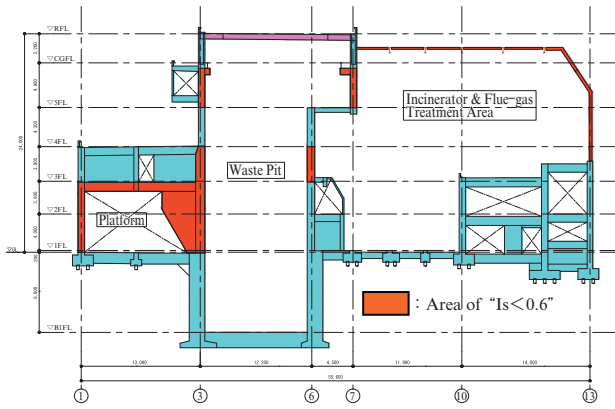


図8 耐震診断結果

Fig. 8 Results of seismic evaluation based index, Is

### 4.2 耐震診断

耐震診断は、「既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準」<sup>4)</sup>と「既存鉄骨造建築物の耐震診断基準」<sup>5)</sup>に準拠した。目標とする耐震性能指標 Is 値は、0.6 以上とした。

RC 造と S 造で診断方法が異なるため、構造種別ごとに分離した解析モデルを使用し、耐震壁や耐震ブレースといった耐震要素や荷重の偏在を考慮できるように実際の架構形状を忠実に再現した立体解析を行なった。

耐震診断の結果として、図8に耐力不足の部材を示す。RC 造部分、S 造部分ともに耐震補強が必要であることを確認した。

### 4.3 耐震補強

図9, 10にRC造・S造部分の耐震補強実施例を示す。RC造部分は、耐震壁の増設と増打ちなどにより耐力増加を図り、S造部分は、耐震ブレースの追加等によって Is 値の改善を図った。また、耐力不足が確認されたごみピット壁(RC造部分)の補強工事は、施設の連続操業に大きな影響を及

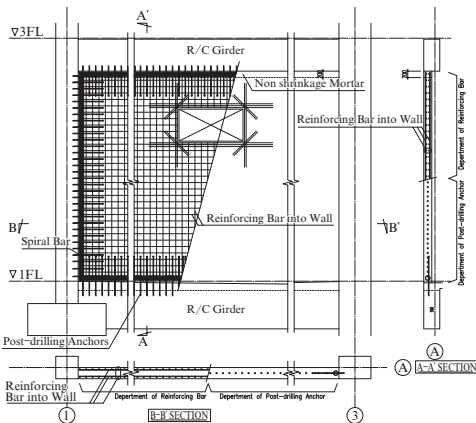


図9 鉄筋コンクリート造(RC造)部分の補強事例(耐震壁の増設)

Fig. 9 Example of seismic retrofit in reinforced concrete (RC) structure (Additional bearing wall)

ぼすため、このエリアに作用する地震水平力を軽減する必要がある。そのため、屋根面の水平ブレース (S造部分)を補強することによって、隣接する炉・排ガス処理室に水平力を移行できることを確認し、操業への影響を最小限に抑えることができた。この評価には、S造部分とRC造部分を一体とした全体モデルでの保有水平耐力計算を採用した。

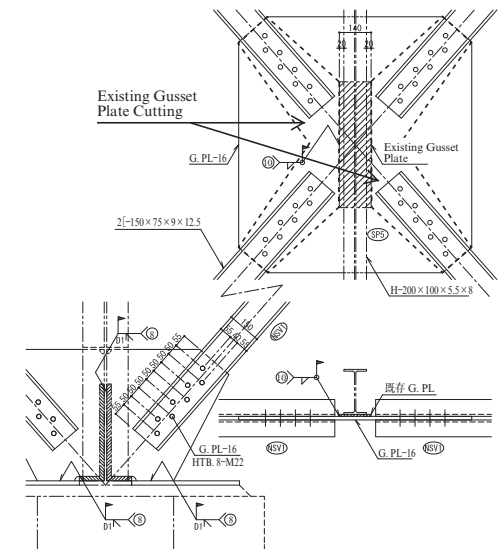


図10 鉄骨造 (S造) 部分の補強事例 (耐震ブレースの追加)

Fig. 10 Example of seismic retrofit in steel structure (Additional bracing)

表4 耐震補強前後の耐震性能指標値, Is (目標: Is>0.6)

Table 4 Seismic capacity-proof index, Is

Structural type	Floor	X Direction		Y Direction	
		Before seismic reinforcement	After seismic reinforcement	Before seismic reinforcement	After seismic reinforcement
RC	CGFL	1.82	1.80	2.01	1.99
	5FL	0.57	0.60	1.03	1.02
	4FL	0.69	0.71	0.64	0.63
	3FL	1.03	0.93	0.87	0.60
	2FL	0.54	1.24	0.46	0.77
	1FL	0.39	0.84	0.37	0.76
S	CGFL	0.26	0.67	0.35	0.82
	5FL	0.22	0.68	0.35	0.72

表5 耐震補強後の保有水平耐力比, Qu/Qu\_n (目標: Qu/Qu\_n>1.0)

Table 5 Horizontal load-carrying capacity ratio

Floor	X Direction	Y Direction
	After seismic reinforcement	After seismic reinforcement
CGFL	1.34	1.14
5FL	1.15	1.21
4FL	1.07	1.06
3FL	1.97	1.08
2FL	1.25	1.60
1FL	1.84	1.60

耐震補強前後の耐震性能指標値を表4、耐震補強後の保有水平耐力を表5に示す。補強後においては、各階とも耐震性能指標値と保有水平耐力のいずれも目標値をクリアし、所定の耐震性能を確保した。

## 5. おわりに

本稿では、耐震補強の主体となる構造部分の検討内容を中心に紹介したが、これらの作業を合理的かつ円滑に遂行するためには、機器や配管および電気計装の技術担当や補強工事計画担当など関連技術者との緊密な連携が不可欠であったことは言うまでもない。

プラント施設は社会生活や産業の基盤であり、東日本大震災以後、事業継続計画の位置づけの中で耐震補強の必要性が高まっている。今後も、単なる構造躯体の損傷防止にとどまらずに、被災後の安定操業といった長期的な視野に立って、耐震補強を提案していく所存である。

最後に、本稿で紹介した耐震補強プロジェクトの実施にあたっては、日本海エル・エヌ・ジー株式会社殿、東京ガス株式会社殿、東村山市殿にご指導・ご協力を賜りました。ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 会沢悟, 山形頼義, 加藤宣彦. 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. JFE 技報. 2010, no. 25, p. 60-65.
- 2) 高圧ガス保安協会. 高圧ガス設備等耐震設計指針レベル1耐震性能評価. 1997.
- 3) 高圧ガス保安協会. 高圧ガス設備等耐震設計指針レベル2耐震性能評価. 2000.
- 4) 日本建築防災協会. 既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準, 既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震改修設計指針・同解説. 2001.
- 5) 日本建築防災協会. 耐震改修促進法のための既存鉄骨造建築物の耐震診断および耐震改修指針・同解説. 1996.



吉田 勝利



増田 博



岡本 紀明