

# 新耐震指針に適合した原子力発電所向け 鉛蓄電池設備の開発

## Development of Lead-acid Battery-steel Rack Power System for Nuclear Power Plants Adapted to the New Seismic Guidelines

有田 秀樹\* 赤松 和也\* 長安 龍夫\*

Hideki Arita Kazuya Akamatsu Tatsuo Nagayasu

### Abstract

New earthquake-proof design guideline of the nuclear power plant was enacted in 2006. We used CAE (Computer Aided Engineering) analysis, and developed the lead-acid battery-steel rack power system for the nuclear power plant that suited new earthquake-proof guideline. Consequently, we have carried out earthquake-proof design of the system and its evaluation tests including a hammering test, a vibration sweep test and a vibration test using seismic wave.

*Key words*: CAE; New earthquake-proof design guideline

### 1 まえがき

近年、コンピュータや通信などIT革新による高度情報化社会の進展はめまぐるしいものがある。また、快適な生活へのニーズが高まり、産業、生活のあらゆる側面において電力の安定供給は必要不可欠である。このように、今後も電力需要の増加が見込まれるなか、原子力発電による電力供給量はすでに国内電力の約30%を占めており、いまやわが国の基幹電源として欠かせない存在となっている。また、環境破壊が深刻な社会問題となっている今日において、地球温暖化防止の観点からも、発電時にCO<sub>2</sub>を排出しない原子力発

電は、従来の火力発電に代わるクリーンエネルギーとして注目されている。

原子力発電所には、いかなる地震に対しても原子炉を「止める」、「冷やす」、放射性物質を「閉じ込める」という安全に関する基本原則があり、関連する諸施設は設計、建設、運転の各段階において地震への対策をおこなってきた。なかでも蓄電池設備は、地震などの非常時にも発電所の安全機能を正常に動作させるための直流電源として、従来から、耐震性の面でも高い信頼性を要求されてきた。また兵庫県南部地震をはじめとする近年の大地震で得られた知見ならびに耐震設計技術の進歩を反映し、2006年に「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」（以下、指針）が改訂されたことにより、さらに耐震性を向上させる必要性がでてきた。

\* 産業電池電源事業部 産業電池生産本部  
産業電池技術部

そこで、当社では今日までに蓄積した原子力設計ノウハウとCAE (Computer Aided Engineering) 解析<sup>1)</sup>を活用して、新指針に対応する新しい蓄電池設備を開発し、妥当性検証のための耐震評価試験を実施したので報告する。

## 2 原子力発電所設備に対する耐震性要求の概要

原子力発電所の諸施設は、その重要度に応じてS、B、およびCの3つの耐震クラスに分類されており、クラスごとに規定された設計用地震力にしたがい耐震設計をおこなう必要がある<sup>2)</sup>。なかでも蓄電池設備は、極めて重要な施設にも設置されるため、最も重要度の高い耐震Sクラスを満足する必要がある<sup>3)</sup>、その策定された基準地震動に耐える厳しい耐震性を保証しなければならない。

ここで、新指針に対応した床応答スペクトルを図1に示す。従来、蓄電池設備の耐震設計では、少なくとも20 Hzの固有振動数があれば設計用床応答スペクトルの卓越領域よりも高いため、地震力に対して共振することがない剛構造<sup>3)</sup>と判断していた。しかしながら、新指針では、この設計用床応答スペクトルがより

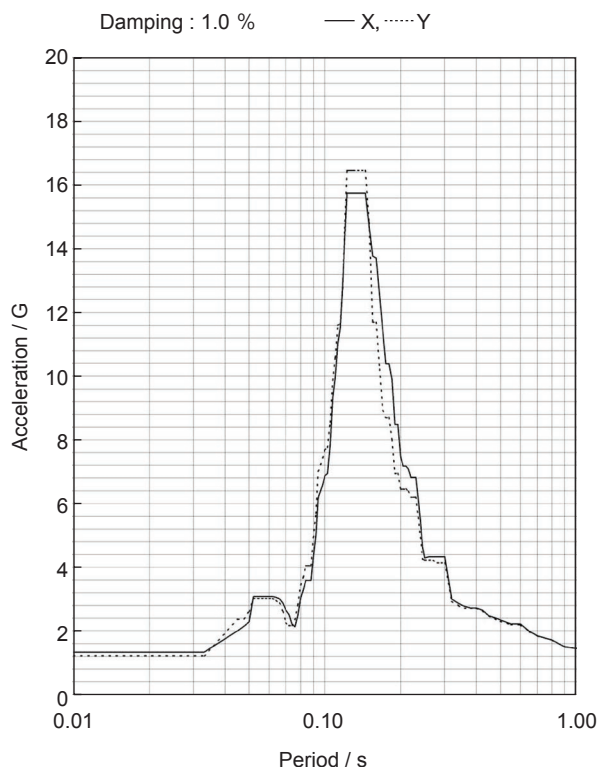


図1 新指針対応の床応答スペクトル

高い振動数領域でも卓越すると同時に、設計用地震力の値がさらに高められたことから、これらの条件においても剛構造を維持するためには、蓄電池設備の固有振動数を最低でも25 Hz以上とする必要がある。

## 3 耐震設計の概要と評価法

耐震設計において重要なことは、機器の固有振動数を地震の卓越振動数領域からできるだけ剛領域側に外し共振を防ぐとともに、減衰定数を大きくすることで機器の応答倍率をできるかぎり小さくすることである。

設計した機器の耐震性を評価する方法としては、机上解析と振動試験があり、当社では、机上解析による評価として、CAE解析により機器の固有振動モード解析をおこない、固有振動数を求める方法を採用している。この解析結果をもとに、設計用床応答スペクトルより求まる設計用地震力を静荷重として扱い、材料力学的手法による応力計算をおこなう。この計算は主として基礎部分に対しておこない、発生応力が許容限界内にあることを確認する。他方、振動試験による方法は、理論的解析上、不確定要素がある場合や、解析の妥当性を検証するために実施されるものであり、さらに、機器がその所定の機能を維持するかどうかの確認もできるという利点がある。今回の蓄電池設備は、指針改訂にともなう新設計であるため、振動試験をおこない、電気的機能維持も確認した。

## 4 蓄電池設備の耐震設計

蓄電池設備の主要諸元を表1、蓄電池の形状寸法を図2、蓄電池を架台に搭載した蓄電池設備全体系の形状寸法を図3に示す。以下、架台の長辺方向をX、短辺方向をY、上下方向をZとする。

蓄電池には、1SF-2500H形鉛蓄電池を採用した。1SF形は原子力発電所用直流電源設備として多く使用されているクラッド式据置鉛蓄電池のCS形と同じ性能を維持しながら蓄電池高さを低くおさえた設計であるため、2段形架台に搭載することで設置面積を削減できるメリットがある。これは今後、蓄電池容量増加の要求に対しても、既存の蓄電池室内への設置の面で有利となる。

架台の主要部材には、従来比で1ランク上の強度をもつ形鋼を使用した。さらに、可動式横枠を用いて架台と蓄電池の隙間をなくす密接構造を採用し、なおか

表1 蓄電池設備の主要諸元

単電池	蓄電池形式	1SF-2500H形
	外形寸法 / mm	L280 × W653 × H420
	定格容量 / Ah	2500
	液入質量 / kg	約 155
架台	外形寸法 / mm	約 L1550 × W1050 × H1500
	構成	4個並び2段1列
	質量 / kg	約 720
設備全体	構成単電池数 / 個	8
	総質量 / kg	約 2000

1SF-2500H モデル固有値解析 結果

Mode	Frequency	Effective masses		
	Hz	X	Y	Z
1	26.12	0.66	0.00	0.00
2	28.32	0.00	0.68	0.00
3	32.67	0.16	0.00	0.00
4	42.38	0.00	0.00	0.00
5	43.98	0.00	0.00	0.03
6	44.24	0.00	0.00	0.00
7	46.66	0.00	0.00	0.00
8	47.00	0.00	0.00	0.00

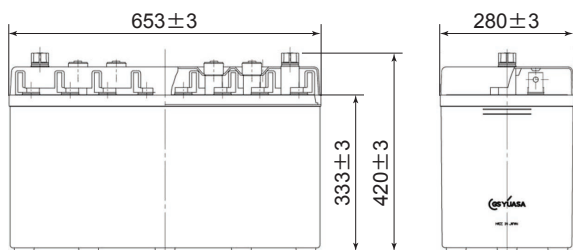


図2 1SF-2500H 形蓄電池の形状と寸法

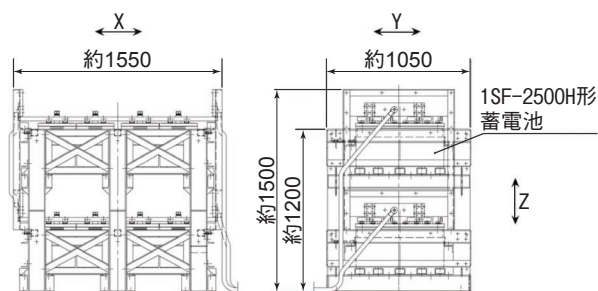
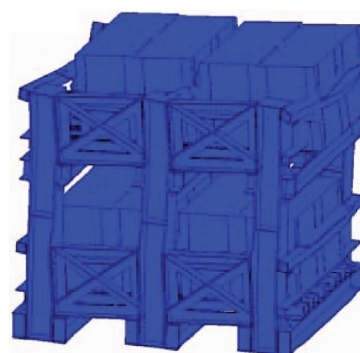


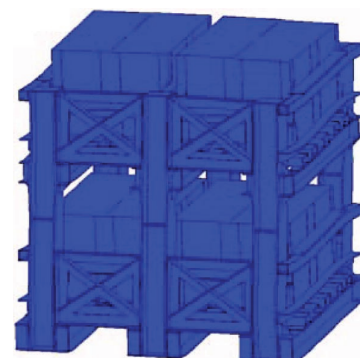
図3 蓄電池—架台全体系

つ、架台の支柱間にX形の補強棧を設けることにより支柱の剛性低下を補った。これらによって、蓄電池設備全体系としての固有振動数を机上計算上、従来よりも約5 Hz 高め、25 Hz 以上とすることを目標に設計をおこなった。

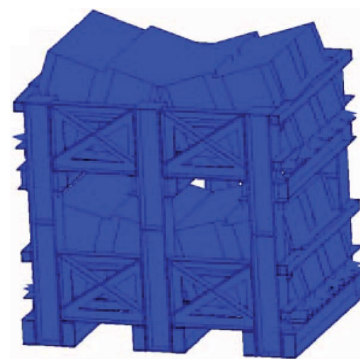
今回は、CAE 解析を用いて設計を進めた。3次元CAD および解析ソフトを使用し、設計進捗に応じて固有振動モード解析をおこなった。その結果を図4に示す。最終的に水平方向の固有振動数はX、Y方向ともに目標値である25 Hz を上回った。さらに、架台の強度確認をおこなうため、応力解析を実施した。その結果を図5に示す。蓄電池設備の確認済み加速度である水平3G、鉛直1Gの印加条件にて静解析をおこなった結果、構造上いちばん応力が発生すると思われる端支柱下部で19.2 N/mm<sup>2</sup> (Y方向)、同じく端支



左右(X)方向結果  
26.12 Hz



前後(Y)方向結果  
28.32 Hz



上下(Z)方向結果  
43.98 Hz

図4 CAE 解析による蓄電池設備の固有振動数確認結果

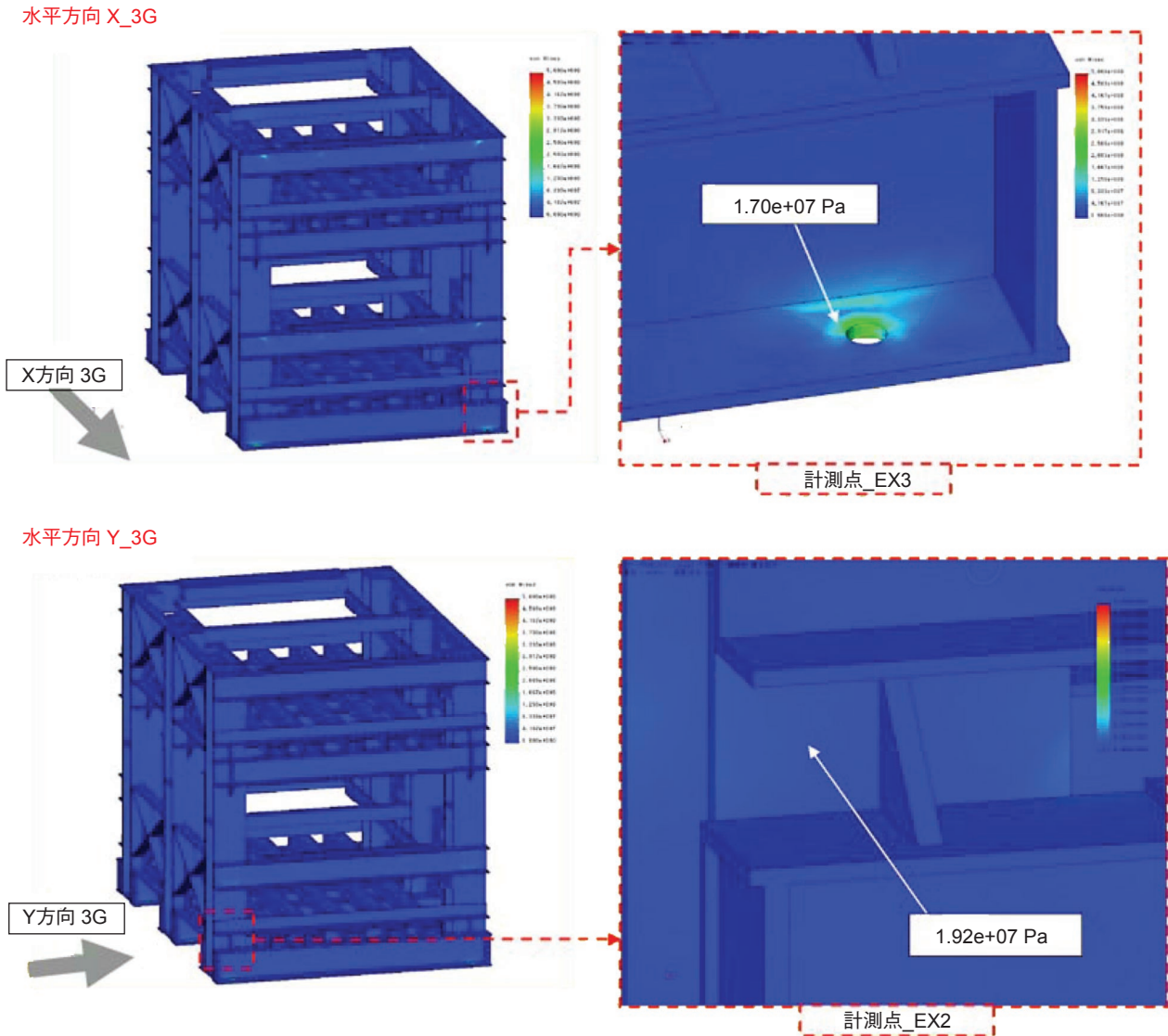


図5 CAE解析による蓄電池設備の応力解析結果

柱下部の取付ボルト近傍では  $17.0 \text{ N/mm}^2$  (X方向) と、許容値の  $280 \text{ N/mm}^2$  に対して非常に小さい値であることを確認した。

## 5 耐震評価試験の概要と結果

蓄電池設備の耐震性を評価するため、打振試験および加振機による振動試験をおこなった。

打振試験風景を図6に示す。打振試験では、基礎台上に蓄電池設備を据え付け、ハンマーで架台に機械的打撃を与えることにより、設備に生じる自由振動の波形から、固有振動数および減衰定数を求めた。

振動試験風景を図7に示す。振動試験では、まず掃引試験により蓄電池設備の振動特性を確認し、続いて



図6 蓄電池設備の打振試験風景

模擬地震波試験により強度および電氣的機能が維持されるかどうかを確認した。なお、模擬地震波試験に使用した試験波は、新指針の基準地震動に基づき蓄電池設備の設置階の床応答を包絡するように考慮したものである。

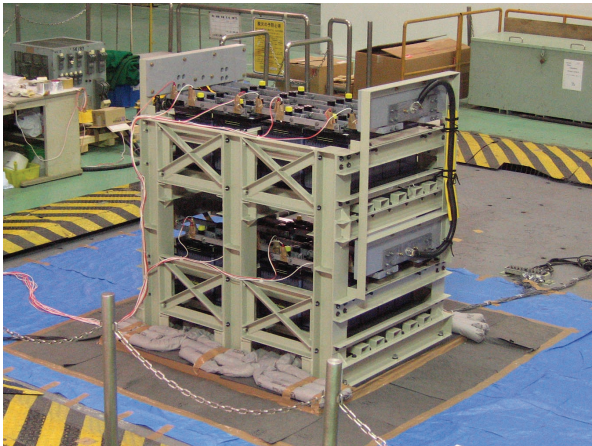


図7 蓄電池設備の振動試験風景

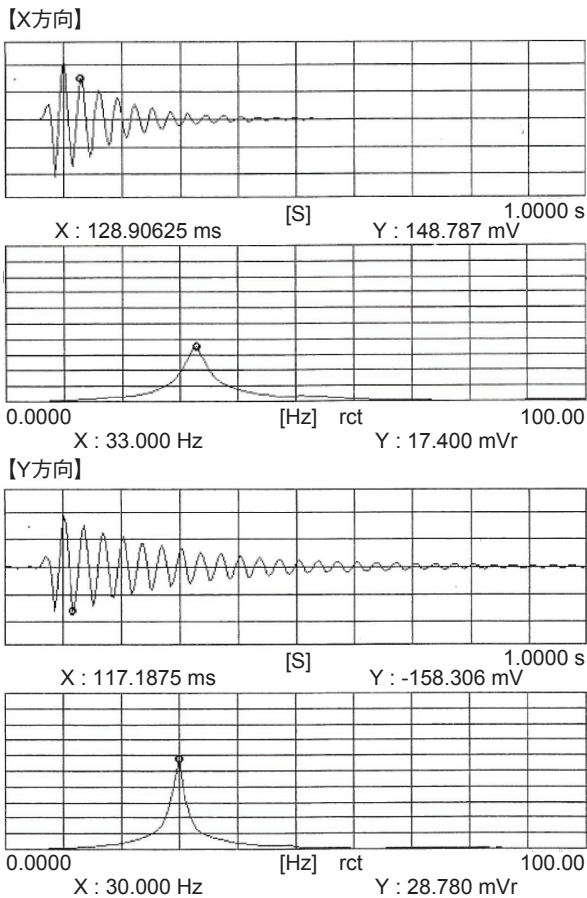


図8 蓄電池設備の打振試験による自由振動波形と周波数スペクトル

### 5.1 打振試験結果

X, Yの2方向について打振試験をおこなった。X, Y方向の周波数スペクトルおよび自由振動波形を図8に、試験結果を表2に示す。

固有振動数はX, Y方向ともに設計目標値である25 Hzを上回り, 30 Hzを確保することができた。また、減衰定数についても、「原子力発電所耐震設計技術指針」(以下, JEAG)に定める溶接構造物の規定値1%<sup>3)</sup>および設計目標値の2%を上回る結果が得られた。

### 5.2 加振機による振動試験

#### 5.2.1 試験設備

振動試験に使用した加振機の主要諸元を図9に、計測装置を図10に、加速度計および歪ゲージの取り付

表2 打振試験による蓄電池設備の固有振動数と減衰定数

方向	固有振動数 / Hz		減衰定数 / %		判定
	CAE 解析(参考)	目標値	目標値	目標値	
左右 (X)	33.0	26.1	25 以上	4.8	2 以上 ○
前後 (Y)	30.0	28.3	25 以上	2.7	2 以上 ○

項目	水平 X 方向	水平 Y 方向	鉛直 Z 方向
加振力 / ton·g	120	60	200
最大振幅 / mm	± 50	± 300	± 110
積荷台の大きさ / m	6 × 6 × 1		
搭載重量 / ton	100 max		
周波数範囲 / Hz	0 ~ 50		

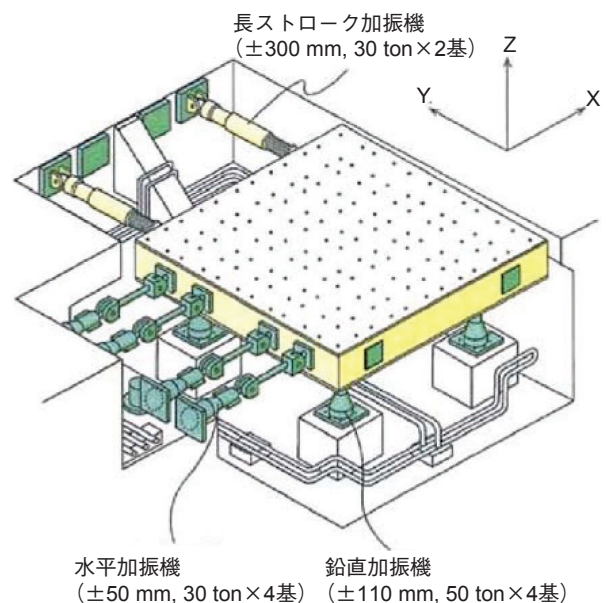


図9 加振機の主要諸元

け位置を図11に示す。

加速度計は、入力値測定用として鋼材ベース上に1個、応答値測定用として架台各部と電池各部に計10個、また歪ゲージは架台に計7個配置した。

5.2.2 試験方法

掃引試験により蓄電池設備の固有振動数および減衰定数を求めた。つぎに模擬地震波試験により蓄電池の電氣的機能が維持されているか、また架台の発生応力が

が許容限界内にあるか、さらに応答加速度の測定と蓄電池および架台の異常の有無を調査した。

5.2.3 掃引試験結果

掃引試験で得られた蓄電池設備の固有振動数と減衰定数を表3に示す。0.05 G 入力加速度の正弦波を4～50 Hz まで0.1 Hz ごとに掃引し、求めた蓄電池設備の共振曲線を図12に示す。XおよびY方向の曲線は、計測点のうち最大の応答を示した蓄電池上部のものであり、X方向は33.8 Hz, Y方向では32.0 Hz でそれぞれ共振点が得られた。Z方向では、本試験における周波数領域に共振点は認められなかった。

減衰定数は、規定値1%<sup>3)</sup>および設計目標値の2%に対し、X方向が8.99%、Y方向が9.64%であり、設計目標値を十分満足した。

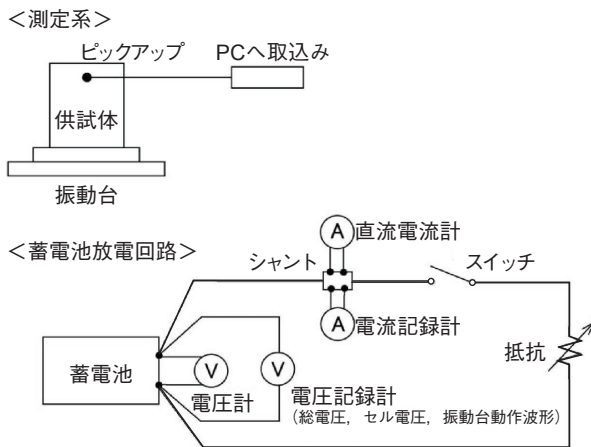
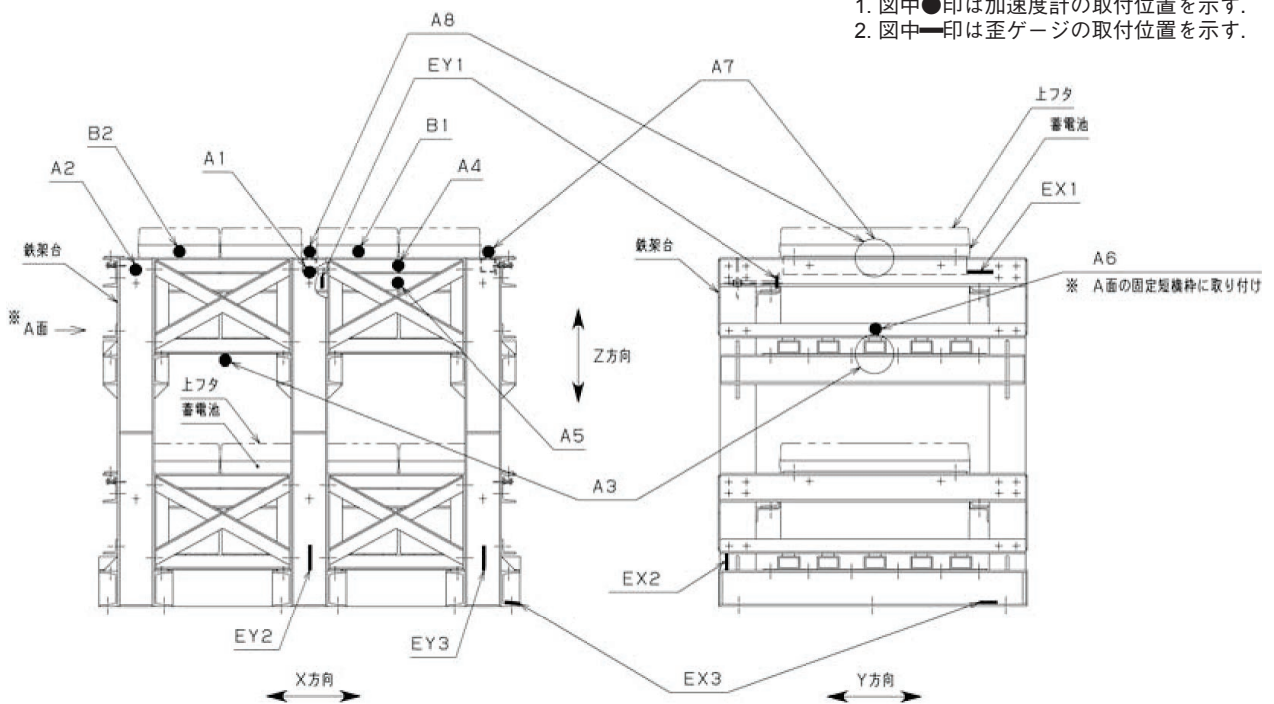


図10 加振機による振動試験計測装置

表3 蓄電池設備の掃引試験結果

方向	固有振動数 / Hz			減衰定数 / %		判定
	鉄架台	蓄電池	目標値	目標値	目標値	
左右 (X)	33.8	33.8	25 以上	8.99	2 以上	○
前後 (Y)	32.0	32.0	25 以上	9.64	2 以上	○
上下 (Z)	50 以上	50 以上	50 以上	-	-	○



- 1. 図中●印は加速度計の取付位置を示す。
- 2. 図中—印は歪ゲージの取付位置を示す。

図11 加速度計および歪ゲージ取付位置

5.2.4 模擬地震波試験結果

模擬地震波試験では、加振中に蓄電池を10時間率放電電流210 Aで放電させ、電氣的機能維持についても検証した。模擬地震波の最大加速度振幅設定値を表4に、加速度時刻歴波形を図13に、加速度床応答スペクトルを図14に示す。なお、本試験での加振方向はX-Z同時、Y-Z同時の2パターンとした。

模擬地震波試験における最大応答加速度および応答倍率を表5に、架台に生じた最大応力を表6に示す。また、加振中の電池電圧・放電電流の記録の一例を図15に示す。

加振時の最大応答加速度は、電池部についてはY-Z方向加振時の上段中央電池の上部における2.02

G（応答倍率 約1.26倍）、架台部については同じくY-Z方向加振時の上段可動長横枠部における1.99 G（応答倍率 約1.24倍）であった。最大の応答を示した電池部、架台部の応答加速度時刻歴波形を図16に示す。架台部に発生した最大応力は、端支柱下部の23.86 N/mm<sup>2</sup>であり、許容値（280 N/mm<sup>2</sup>）を十分満足した。

表4 模擬地震波の最大加速度振幅設定値

	新指針による某発電所の蓄電池設備設置階の床応答スペクトル ZPA / G		試験波 / G
	EW	NS	
水平方向	1.33	1.22	1.33
鉛直方向	0.65		0.65

表5 模擬地震波試験時の応答加速度および応答倍率

計測点	方向	入力加速度 / G	最大応答加速度 / G	応答倍率
架台 A5 架台上段可動長横枠	Y-Z	1.60	1.99	約1.24
蓄電池 B1 中央電池の上部	Y-Z	1.60	2.02	約1.26

表6 模擬地震波試験時の架台に生じた最大応力値

計測点	方向	発生応力 / N/mm <sup>2</sup>	許容応力 / N/mm <sup>2</sup>
EX3 架台支柱下部の取付ボルト近傍	X	18.80	280
EX2 架台端部支柱の下部	Y	23.86	280

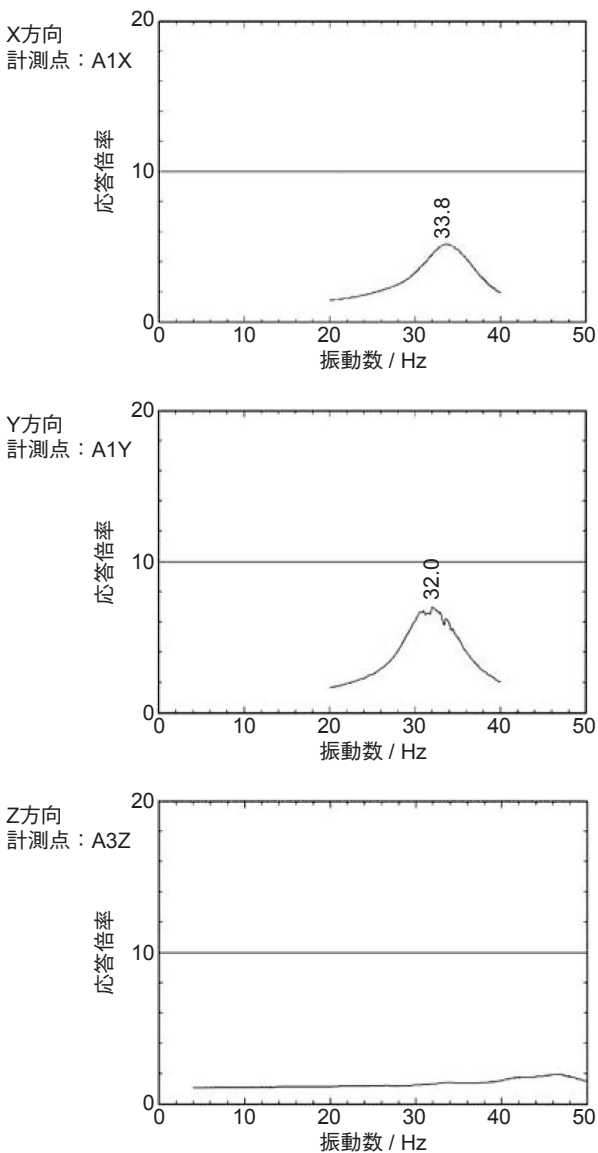


図12 蓄電池設備の掃引試験における共振曲線

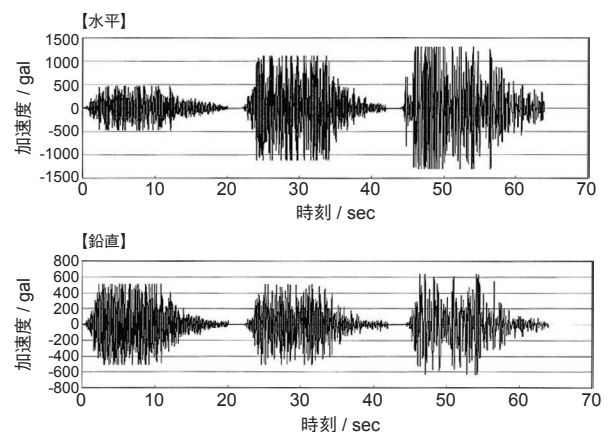


図13 模擬地震波の加速度時刻歴波形

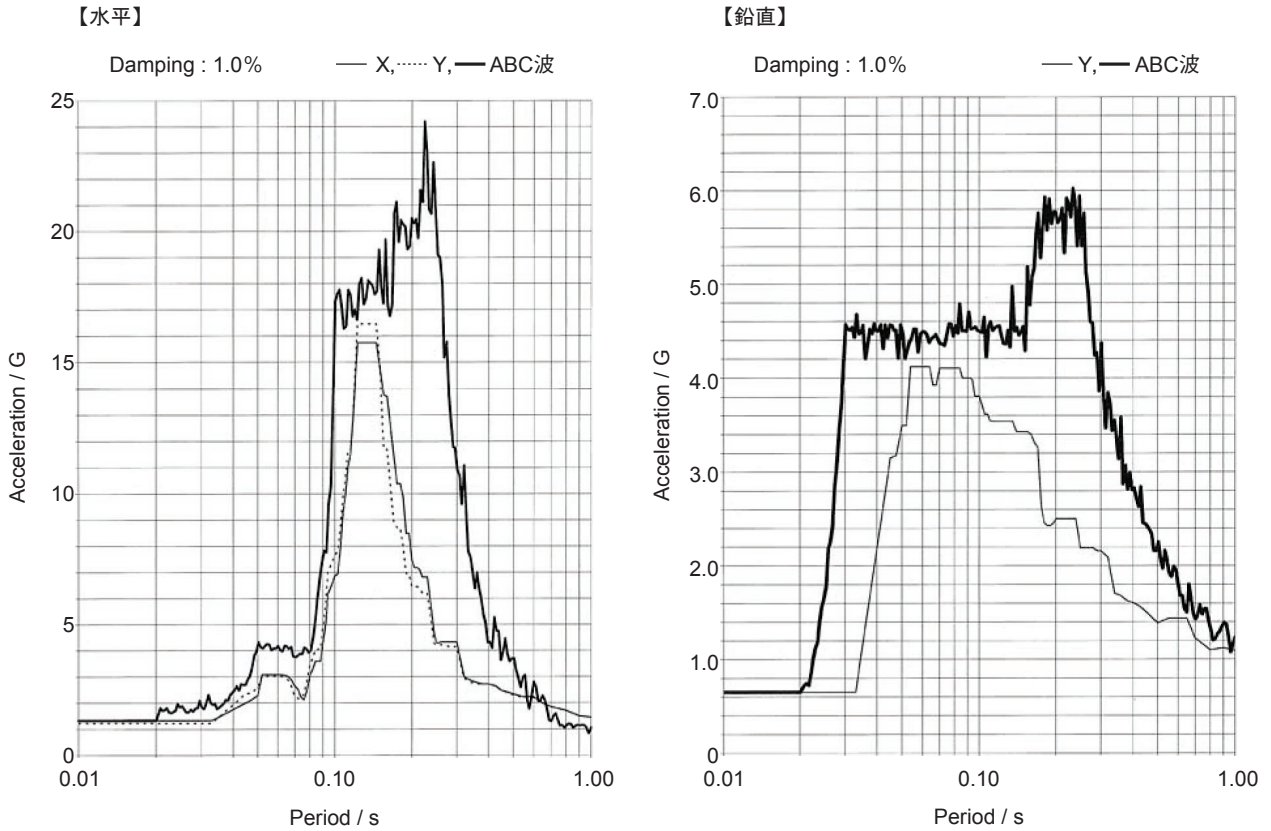


図 14 模擬地震波の床応答スペクトル

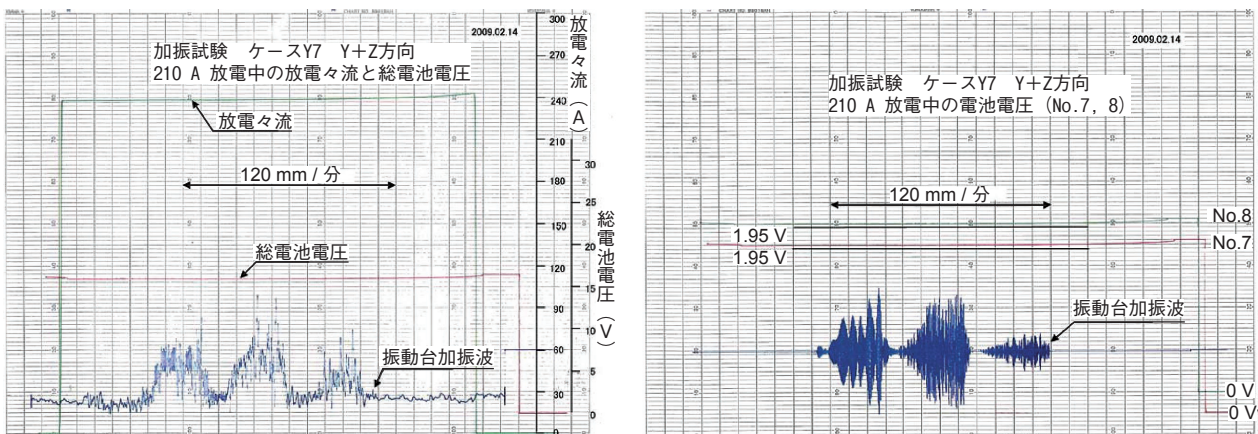


図 15 加振中の電池電圧・放電電流の推移

また、加振終了直後に、蓄電池の外観および内部の目視確認、端子部接続ボルトの緩みの確認をおこない、架台については組立ボルトおよび取付ボルトの緩みの確認をおこなったが、いずれにおいても損傷や緩み等の異常はなかった。

さらに、架台を解体後、蓄電池全数について、外観および気密検査を実施した結果、異常は認められず、

容量も JIS に定める規定値を充分保持していた。

架台の各部材について、変形の有無を確認した結果、異常は認められなかった。さらに、組立ボルトおよび取付ボルトの全数について、浸透液による探傷検査を実施した。ボルト探傷検査写真の一部を図 17 に示す。検査の結果、すべてにおいてひびなどの損傷は認められなかった。



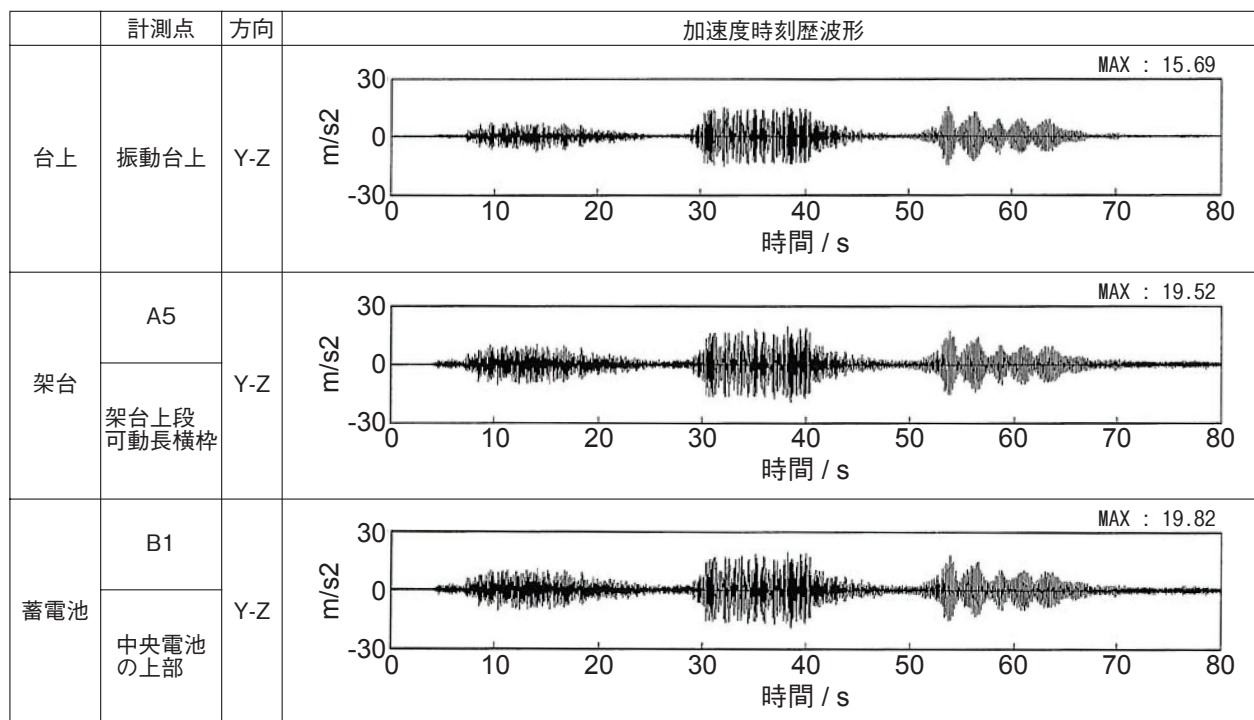


図 16 加振中の計測系における加速度時刻歴波形



検査前

検査後

図 17 浸透液による取付ボルト探傷検査

## 6 考察

新指針に対応すべく、今回、蓄電池設備の固有振動数を 25 Hz まで高める設計をおこなった。その結果、蓄電池設備の固有振動数は、打振試験では X、Y 方向とも 30 Hz 以上、加振機による掃引試験においても 30 Hz 以上であることが確認された。また、試験結果は CAE 固有振動モード解析の結果を若干上回るものであったが、これについては、過去に経験した振動試

験と解析の結果比較においても同様の傾向が確認されている。つまり、当社の解析モデルは安全側の条件で構築されていると考えることができる。

以上より、いずれの試験においても目標値を上回る結果を得られたことで、蓄電池設備の設計の妥当性が実証できた。また、目標値に対してさらに約 5 Hz の裕度があり、今後予想されるさらなる耐震レベルの見直しに備え、余裕をもった設計ができたと考える。

Z 方向については、掃引試験の結果、共振点は認められなかったが、共振曲線からみて固有振動数は 50 Hz 以上であると考えられる。

つぎに、減衰定数は、打振試験における架台部と蓄電池部の比較で低い方の値をとれば X 方向が蓄電池部で 4.8%、Y 方向も同じく蓄電池部で 2.7% であるのに対し、掃引試験では X 方向が 8.99%、Y 方向が 9.64% であり、目標値の 2% を大きく上回った。蓄電池設備の減衰定数は、架台が溶接構造物であることから JEAG に規定される溶接構造物の減衰定数である 1%<sup>3)</sup> が判定値となるが、架台は一部ボルト固定構造でもあり、当社では JEAG に規定されるボルトおよびリベット構造物の減衰定数である 2%<sup>3)</sup> を設計目標値として定め、より安全側の設計をおこなっている。

模擬地震波試験については、蓄電池の電氣的機能が維持されていることが確認・実証できた。また、加振

時における応答倍率は、最大箇所にして約1.26倍と非常に小さい値であった。これは、今回の指針改訂にともなう厳しい地震動に対しても、ほとんど応答しない範囲まで架台の剛性を高めることができたこと、さらに減衰定数が非常に大きい結果が得られたためと考える。

## 7 まとめ

今回、原子力発電所の指針改訂に対応すべく、新しい蓄電池設備の開発をおこない、その耐震評価試験結果から、以下のことが確認できた。

- (1) 開発した蓄電池設備が、新しい指針に対しても十分な耐震性を有しており、今後予想されるさらなる耐震レベルの見直しにも対応できるものであること。
- (2) 設計にCAE解析を用いることで、試験のやり直しなどのリスクを低減することができ、今後の開発業務においても非常に有効な手段となることが確認できた。

## 8 あとがき

原子力発電は発電時にCO<sub>2</sub>を排出しない環境負荷の小さいエネルギーとしてその重要性は高く、今後もわが国における地球温暖化対策の中心的な役割を果たすものと考えられる。また一方で、地震国であるわが国において、原子力発電所に求められる耐震性はたいへん厳しいものがある。

当社は、今後も製品の耐震安全性および信頼性の一層の向上に取り組み、原子力安全に貢献していく所存である。

## 謝 辞

本レポートの作成にあたり、ご協力いただいた方々に深く御礼申し上げます。

## 文 献

- 1) 平城元, 吉田豊, 福庭清秀, 田川弥八郎, 青戸武志, *GS News Technical Report*, **49** (1), 17 (1990).
- 2) 発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針, 平成18年9月19日, 原子力安全委員会.
- 3) JEAG4601: 1987, 原子力発電所耐震設計技術指針, 日本電気協会.