報　告

地震時のプラント運転員の対応性に関する研究

松永征雄・鈴木哲也

中部電力株式会社研究資料 1995.11

〈概　要〉　地震時のプラント運転員の対応性を検討するため、加振台上に模擬制御室を設置し、運転員による制御盤のスイッチ操作及びパソコンによるキーボード操作の試験を行なった。試験結果によれば、地震動が大きくなるのに伴い、警報の確認、計器指示値の読取り及びスイッチの操作が徐々に困難となる傾向があるが、地震による自動停止程度のレベルの加速度までは、顕著な影響は見られず、運転員の対応能力に十分期待できることが解った。また震度Ⅶ以上に相当する設計用限界地震に対しては、キーボードへのミスタッチがやや増加し、歩行も容易でなくなる。

また中央制御室で使用している椅子の加振試験の結果、設計用限界地震時においても移動距離は最大で50cmを越えず、転倒現象も無かったため、制御盤等への接触は考えられず、地震時の移動に対する拘束は不要と判断した。

本研究は㈱東芝と共同で実施した。

〈キーワード〉　ジシン、ヒューマンファクタ、ヒューマンパフォーマンス、カシンダイ、セイギョバン

1　まえがき

原子力発電所は想定される地震動に対して耐震性が確保されており、地震時の運転操作も不要とはいえ、地震時にはプラントの状態変化を示す警報、計器指示値の変動が認められ、運転員は中央制御室において、通常時と同様にプラント運転状態を監視することが求められている。またプラントに何らかの異常が認められた場合には、適切な対応操作が要求される場合も考えられる。

しかしプラントの安全性に影響を及ぼすような地震は、その発生が極めてまれで、ほとんどの人が未体験であるため、大地震が運転員のプラント運転操作性に及ぼす影響の評価は難しいのが現状である。

本研究では、このような背景のもとに、加振台に運転員を搭乗させ、模擬地震体験を通して制御盤の警報・計器指示値の確認及びスイッチの操作について試験し、地震時の対応性について検討した。

また中央制御室で使われている椅子は地震に備えて、念のためにロープで拘束しているが、試験に基づいて拘束の要否を判断するため、地震時の挙動を解明した。

2　研究成果

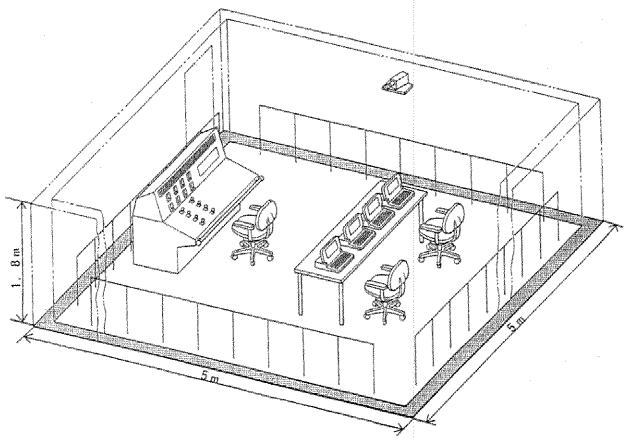
2-1 地震時のプラント運転員の対応性

(1)　試験方法

ア　試験装置

試験装置は中央制御室を模擬可能な面積（長さ５ｍ×幅５ｍ）で、水平／上下２軸の同時加振が可能な加振台を用い、加振台上を高さ1.8ｍの壁で覆い、床面をＰタイル仕上げの板貼りとした模擬制御室を設けた。加振台の主な仕様を第１表に示す。

この模擬制御室には模擬制御盤と作業机を各一体設置した。模擬制御盤等の試験装置を第１図に示す。



第１図　試験装置全体図

第１表　加振台仕様

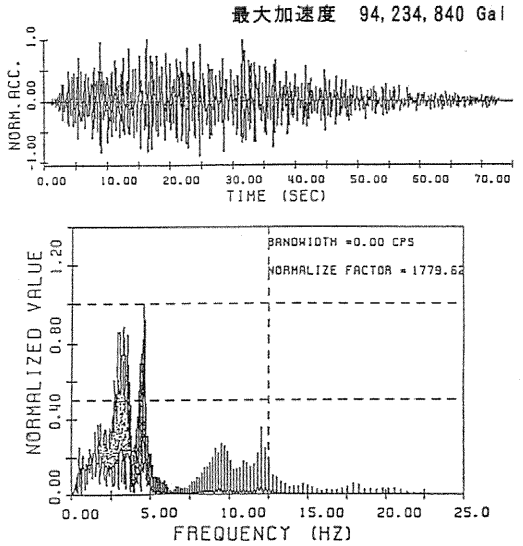
1	名称	多軸大形加振台試験設備
2	加振台寸法	５ｍ×５ｍ
3	最大積載荷重	20 ton
4	最大加振力	40ton・g（水平）
		27ton・g（垂直）
5	最大振幅	±75mm（水平）
		±37.5mm（垂直）
6	最大加速度	１ g（水平）
		0.67 g（垂直）
7	加振方向	水平・垂直同時
8	周波数	～30Hz
9	加振波形	正弦波・地震波

模擬制御盤には48の警報窓と、８個の指示計と操作スイッチ、警報用スピーカー、並びにプラントの運転状態を表示するCRTが設けられている。この他、地震時の

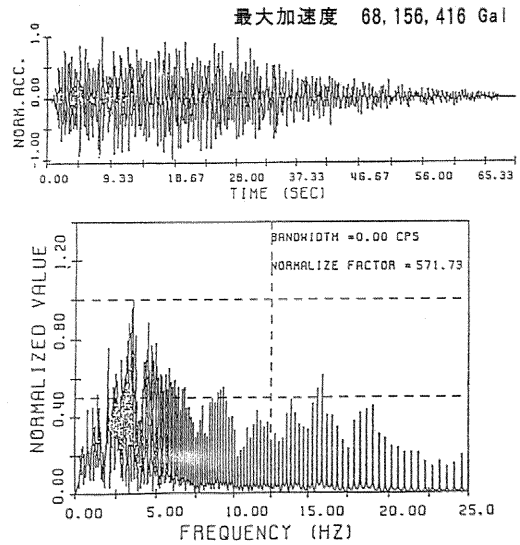
第２表　加振台への入力地震波

ケース（名称）	入　力　波	加振方向	最大加速度（gal）
Case 1（スクラム）	地震による自動停止レベルの地震が発生した場合の中央制御室での応答波	水平	234
		上下	156
Case 2（震度4）	地表面上で震度４(80 gal)相当の地震が発生した場合の中央制御室での応答波	水平	94
		上下	68
Case 3（S2）	中央制御室で想定される最大の応答波	水平	840
		上下	416
Case 4（タフト）	観測地震動 タフト波の記録を水平、上下共に２倍にして用いる。	水平	346
		上下	202

水平方向



上下方向



第２図　入力加速度時刻歴とスペクトル(模擬地震動)

作業を容易にするための手摺も設けられている。

指示値及び警報は盤の内部に設けられたパソコンにより制御され、また運転員のスイッチ操作の早さや適確さを記録する。

作業机の上には４台のパソコンを設置し、運転員にキーボードからの入力作業の課題を与えるようにした。

イ　加振台への入力地震波

試験では４種類の地震動を入力波とし、水平一方向と上下方向に同時に加振を行った。尚水平方向は制御盤に対し直角方向から加振した。

加振に用いた地震動は、しばしば強震地震として報道されている気象庁震度階Ⅳの地震、プラントが自動停止する大きさの地震、並びにプラントの設計用地震動の中で最も大きな地震を想定し、それぞれ模擬地震動を用いてその時の制御室での予想地震動を地震応答解析により求めて用いた。また波形は、実際の観測地震として、著名な強震記録である通称タフト波を用いた。最大加速度は設計用限界地震（S２）時の水平方向840Gal上下方向416Galである。４種類の地震動の概要を第２表に、入力地震動の加速度時刻歴とフーリエスペトルを模擬地震動について第２図に示す。模擬地震動は代表的原子力プラントの設計検討用地震動を用いた。

ウ　試験手順

運転員による計器類確認の可否及び操作性を調査するため、模擬地震発生中に下記の基本的な操作を行ってもらい、データを採取した。

試験参加者は実際にプラントの運転を担当する運転員であり、当直長以下30名を３名ずつの10班に分けて加振台に搭乗させた。

各班では３名のうち１名が模擬制御盤を、２名がパソコンを担当することとし、１班あたり約３時間かけて試験を行った。約３時間の加振台搭乗時に第２表の地震動で４回の加振を行い、模擬制御盤操作とパソコン操作の各作業において、運転員の警報内容・計器指示値読取りと対応操作に要する時間と正確さを測定した。

(ア)　模擬制御盤による試験

①　試験方法

模擬地震発生中、制御盤に異常警報を発生させると同時に、計器に異常値を指示させる。

運転員は最初作業机の脇で記録整理等の作業をしているが、警報発生に伴い制御盤の前に移動し、発生した警報名称、警報発生原因に関係する計器の指示値を読んだ後、発生した異常状態に対応した操作を行う。

簡単な警報シナリオを４ケース用意し、１回の地震に１ケースを対応させる。用意した警報シナリオは、原子炉水位低、CRD 冷却水差圧高、MG セット油温度低、CUW ポンプパージ水流量高の４種類である。

各警報シナリオは実プラントの事象進展とは異なり簡略化されている。地震と警報シナリオとの対応を第３表に示す。

第3表　試験ケース一覧表

ケース(名称) (加振の順)	加振回数	パソコンによる試験		模擬制御盤による試験	
		事　象	参加者 (2名/ 1加振)	事　　象	参加者 (1名/ 1加振)
Case 1 (スクラム)	計10回	警報・ 指示計	20名	原子炉水位 低	10名
Case 2 (震度4)	〃	〃	〃	CRD冷却水差圧 高	〃
Case 3 (S2)	〃	〃	〃	MGセット油温度 低	〃
Case 4 (タフト)	〃	〃	〃	CUWポンプ パージ水流量 高	〃

② 収集データ

- 加振開始から異常警報発生および対応操作実施までの時間を測定する。
- 操作の正否を記録に残す。

(イ) パソコンによる試験

① 試験手順

加振台上の机の上に置いたパソコン画面に給水ポンプに関する計12の警報を表示し、このうちの1つを一定の時間間隔で無作為に点灯させる。運転員は警報窓のどれかが点灯するのを確認して、警報窓と1：1に対応するキーを押してリセットする。

並行してパソコン画面に表示した4つの指示計のうち一つの制限値をオーバーさせる。運転員は指示計のオーバーを確認して、指示計と1：1に対応するキーを押しリセットする。

警報の表示、指示計のオーバーは3秒の時間間隔で繰り返し、運転員の対応性を検討する。

パソコン画面と操作キーボードを第3図に示す。

② 収集データ

警報点灯回数、反応時間、正解率等を測定する。

(2) 試験結果

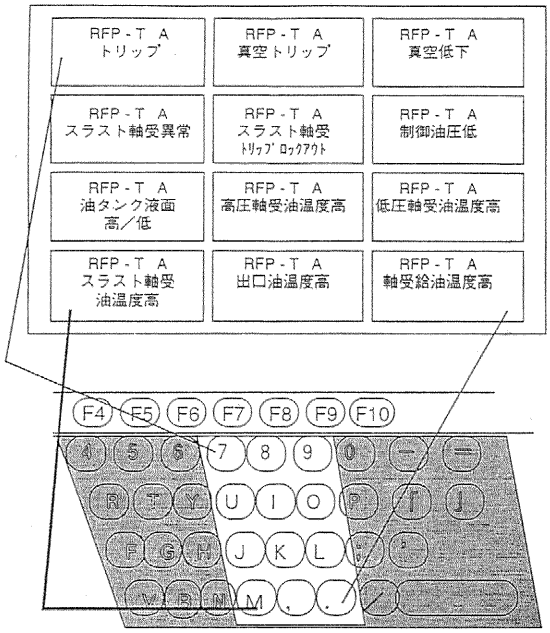
ア　模擬制御盤による試験

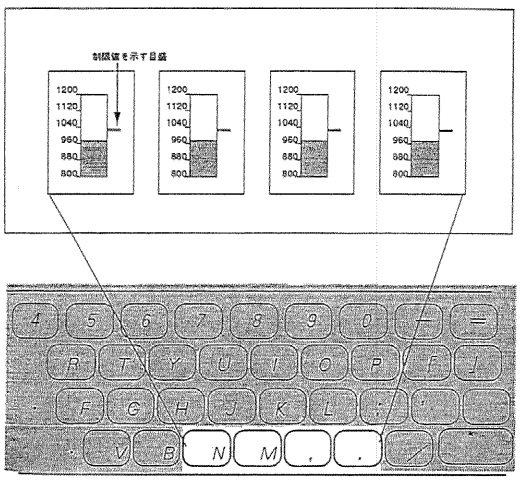
模擬制御盤による試験では全体で6件の誤操作が観測された。この誤操作は運転員が試験に用いた制御盤の操作に不慣れなことが主要因であり、シナリオ2（CRD冷却水差圧高）とシナリオ3（MGセット油温度低）に各3件ずつ発生しており、いづれも要求操作とは逆の操作を行った結果であった。これらは警報に対し操作内容が直接に指示されていないため状況判断を行う必要があった事が主要因であり、運転員が試験に用いた制御盤の操作に不慣れなことに起因している。しかし、このように警報に対する操作内容が直感的にわかり難い場合は、大地震時のように精神的な負担が生じる場合には誤判断を誘発する可能性があることを示唆している。

警報発生から正しい対応操作の実施までの時間（応答時間）を定量データとしてまとめた。なお実験に用いた模擬制御盤では正しい操作をしない限り警報がクリアできないように設計されている。第4表に盤操作応答時間の平均値と標準偏差を、第4図に各ケースに対する盤操作平均応答時間を棒グラフで示す。

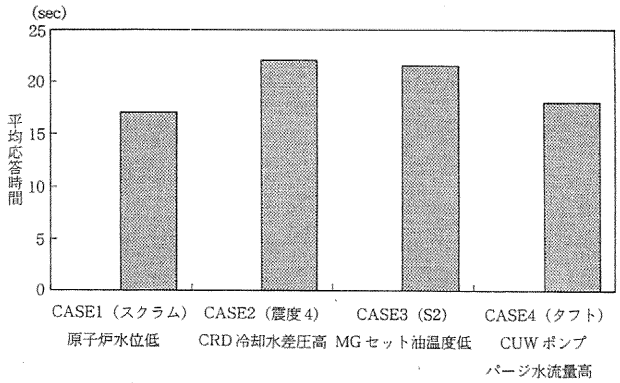
第4表　盤操作応答時間

ケース	事　　象	平均応答 時間(Sec)	標準偏差
CASE1 (スクラム)	原子炉水位 低	17.08	4.67
CASE2 (震度4)	CRD 冷却水差圧 高	22.08	11.49
CASE3 (S2)	MG セット油温度 低	21.52	10.00
CASE4 (タフト)	CUW ポンプパージ 水流量 高	17.94	4.30





第3図　試験用パソコン画面と操作キーボード



第4図　盤操作平均応答時間

地震加速度の大小関係と応答時間の大小関係をまとめると次のようになる。

- 地震加速度

　CASE 3 ＞ CASE 4 ＞ CASE 1 ＞ CASE 2

- 盤操作応答時間

　CASE 2 ＞ CASE 3 ＞ CASE 4 ＞ CASE 1

この結果からは、地震の加速度と盤操作応答時間との相関は特に見られないといえる。

CASE 2 と CASE 3 は他の 2 ケースと比べて応答時間が長くなっている。これは、CASE 1 では、

　原子炉水位低　⇨　給水流量調整弁開

CASE 4 では、

　CUW ポンプパージ水流量高　⇨　流量調整弁閉

のように直感的に分かりやすい内容の操作であるのに対して、CASE 2 と CASE 3 は、

　CASE 2 ：CRD 冷却水差圧大　⇨（流量過大）

　　⇨　冷却水流量調整弁閉

　CASE 3 ：MG セット油温度低　⇨（冷却水過大）

　　⇨　冷却水流量調整弁閉

のように、警報内容のプロセス量と操作対象であるプロセス量との間の関係が、一回解釈を挿入して初めて明確になるという操作内容であるためと思われる。

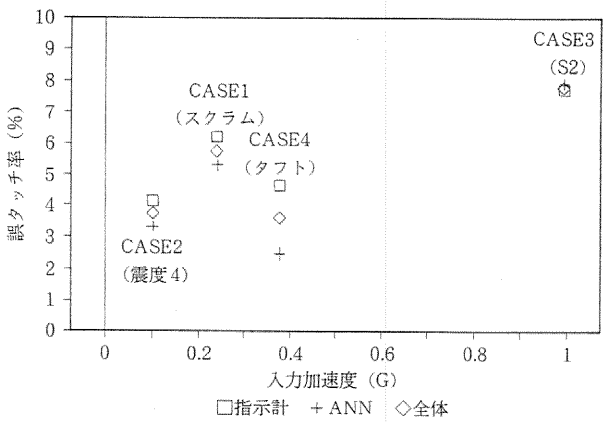
以上より、今回実施した地震波および操作のケースに対しては、盤操作応答時間から見ると、地震の加速度との相関は見られず、地震により監視・操作が困難になることを示す有意な結果は得られなかった。また、今回の試験範囲では、盤操作応答時間は地震の加速度に依存せず、むしろ操作内容の性格に依存する傾向が見られた。

試験後に実施したアンケート結果によれば、スクラムレベルまでは操作が困難とする者は少なく、地震加速度による監視・操作の阻害は顕著ではないと考えられる。しかし設計用限界地震では操作は困難とする者がやや困難とする者も含めて90％に達している。

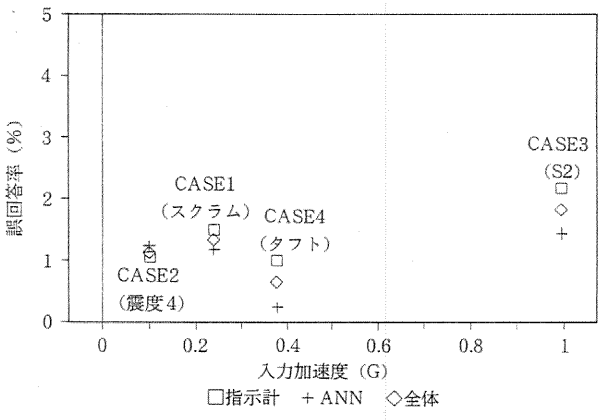
イ　パソコンによる試験

パソコンによる試験では指示値の読取りという知覚に関する警報確認課題とキーボード操作の即答性という運動機能に関する課題の 2 点から構成されている。試験結果は誤タッチ率、誤回答率、応答時間の形でまとめた。

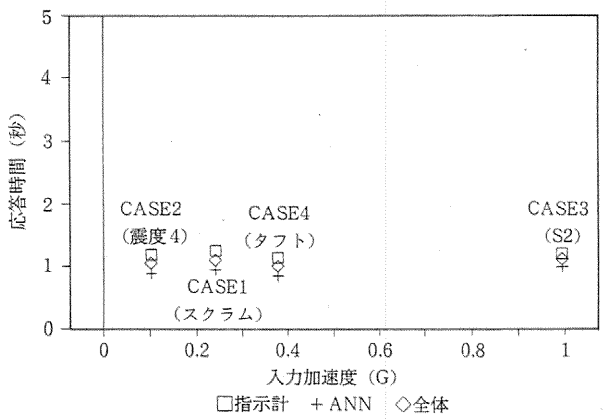
誤タッチ率、誤回答率、応答時間と地震最大加速度との関係を第 5 図～第 7 図に示す。これらの数値は、警報画面・指示計画面の確認及びキーの操作に及ぼす地震加速度の影響を示していると考えられる。



第5図　誤タッチ率と振動台加速度の関係



第6図　誤回答率と振動台加速度の関係



第7図　応答時間と振動台加速度の関係

誤タッチ率は第 5 図に示すとおり、タフト波を除き、入力加速度の大きいほど誤タッチ率も高くなっており、地震加速度との相関があることを示している。自然観測波であるタフト波は、人工地震波である S 1 、S 2 波に比べ入力加速度の大きさに対して誤タッチ率が低くなっている。これは自然観測波の主要動の継続時間が人工地

震波に比べて短いことが影響していると思われる。

CASE 1（スクラム）の誤タッチ率が全体の傾向に比べ多少高めとなっている。これはスクラムレベルの試験は4回の加振の第一回目であり、操作の習熟度が低かったためと考えられる。（スクラム：自動停止）

第6図の誤回答率も誤タッチ率と同様の傾向を示している。

第7図に示した応答時間は入力加速度の大きさに対してほとんど有意な差を示していない。

試験後に実施したアンケートの結果によれば、スクラムレベルまでは通常時と比較して警報の確認・指示計値の読取りが困難とする者は少なく、地震加速度による監視・操作の阻害は顕著ではないと考えられる。

以上の結果から判断すると、地震加速度が大きくなるに伴い、警報画面・指示計画面の確認及びキーの操作が徐々に困難となる傾向があるが、スクラムレベル程度までは地震加速度による影響は顕著ではない。

しかしS2地震動に対しては、机上のパソコン作業において、キーボードへのミス・タッチ率が大きくなり、また容易に歩行できなくなる現象が認められた。

(3) 結　論

加振台に人を搭乗させ、模擬制御盤とパソコンによる確認及び操作性の試験を行なった結果、以下の知見が得られた。

① 地震動が大きくなるに伴い、警報の確認、計器指示値の読取り及びスイッチの操作が徐々に困難となるが、地震による自動停止程度の加速度レベルまでは、顕著な影響は見られず、運転員の対応能力に期待できることがわかった。

② 設計用限界地震に対しては、運転員のアンケートでも操作は困難としており、歩行も容易でないため、運転員の対応能力に期待することは適当でなく、地震により自動停止することは妥当である。

2-2 地震時の椅子の挙動試験

(1) 目　的

中央制御室の椅子の地震時の挙動を調べ、地震時の移動に対する拘束の必要性について判断する。

(2) 試験方法

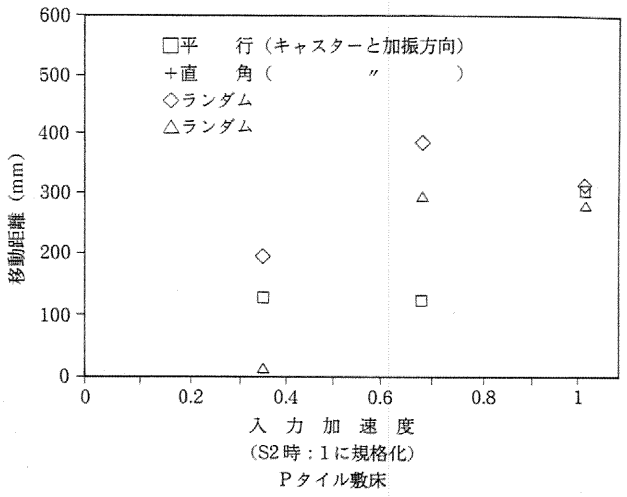
2-1項で述べた加振台の上に、キャスター付の椅子を同時に3脚固定せずに置いた。入力地震動は第1表に示すS2地震動とし水平上下同時加振とした、入力レベルは1/3、2/3、1/1の3レベルとした。加振試験を実施し、椅子の加振前の位置から加振終了後にどの程度移動したか測定する。地震時の椅子の挙動は床面の状態に左右される。このため床面の状態を実プラントに近付けるために、Pタイルとカーペットの2種類について実施した。計測項目としては加振台加速度と、椅子に取り付けたペンにより椅子の移動軌跡を記録した。

(3) 試験結果

第8図はPタイル床における地震による初期位置からの移動距離と入力加速度レベルの関係を示している。椅子と床の間の摩擦係数は、Pタイル床のほうがカーペット床のそれよりも小さい。そのためPタイル床の移動距離はカーペット床のそれよりも大きい。

これらの図から椅子の移動距離と入力加速度との間にははっきりした比例関係がある。しかしながらS2地震時に、摩擦係数の小さいPタイル床においても、移動距離は最大でも50cmを超えない。

また試験において転倒現象は観測されなかった。



第8図　椅子の最大移動距離と入力加速度レベル

3　まとめ

3-1 地震時のプラント運転員の対応性

加振台に運転員を搭乗させ、パソコンによる試験、模擬制御盤による試験を行なった結果、地震動が大きくなるに伴い、警報の確認、計器指示値の読取り及びスイッチの操作が徐々に困難となるが、地震による自動停止程度の加速度レベルまでは、顕著な影響は見られず、運転員の対応操作に期待できることがわかった。

設計用限界地震に対しては、操作は困難であり、運転員の対応能力に期待することは適当でなく、地震により自動停止することは妥当である。

3-2 地震時の椅子の挙動試験

S2地震時に、摩擦係数の小さいPタイル床においても、移動距離は最大でも50cmを超えない。また試験において転倒現象も観測されなかった。このため地震時の人・物への悪影響は無く、ロープによる拘束は不要と判断した。

［執筆者紹介］

松永征雄　Yukuo　MATSUNAGA

①電力技術研究所　原子力グループ
②原子力プラントに係る研究を担当
③なし

鈴木哲也　Tetsuya　SUZUKI

①電力技術研究所　原子力グループ
②原子力プラントに係る研究を担当
③●ASME-PVP 会議
平成6年6月
●日本地震工学シンポジウム
平成6年12月
④原子力学会、機械学会

〔査読者意見〕

原子力発電所のフルスケールシミュレータ訓練では、地震発生時の対応訓練も当然実施されているが、地震による揺れの操作性への影響については想像の域であった。

本研究では、加振台上に模擬制御室を置き、実際に運転員の対応性を確認しており、成果は解析等の他の手法では得がたく研究の意義は大きいと考える。

又、制御室の椅子の拘束については、従来より賛否二つの見方があったものの結論が得られなかった。実証による合理的根拠が得られたことは、現場のニーズに適合する大きな成果と言える。

（原子力管理部　原子力運営課　大橋　仁）