

コンクリートキャスクの耐震試験

白井孝治, 亘 真澄

(財) 電力中央研究所 地球工学研究所 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646)

連絡先 E-mail: shirai@criepi.denken.or.jp

1. 背景・目的

日本においては、原子力発電所から出る使用済燃料は再処理するまでの間、中間貯蔵される。貯蔵方式の一つとして、コンクリート製貯蔵容器を使った方式(コンクリートキャスク貯蔵方式)があり、海外では多数の実績があるが、日本では、まだ実用化されていない。

長期の貯蔵期間中に地震を経験することが予想される貯蔵容器は、バスケット、燃料等の間に複数のガタを有する系であり、また貯蔵エリアの床面に固縛しない自立設計の貯蔵容器も想定されている(図1参照)。

一方、これまでの強震時における貯蔵容器の応答に関する評価事例については、相似則を適用したスケールモデルによる振動試験や、燃料・バスケットのガタを考慮しない貯蔵容器単体モデルによる解析が実施されており、燃料の挙動まで評価した事例は少ない。

本試験では、実規模大の使用済燃料貯蔵容器を用いて、大型三軸振動台によるバスケットや燃料のガタ系における相互作用を考慮した振動試験を実施し、燃料集合体のガタ振動時の特性や複数の燃料集合体の応答位相差による群効果を明らかにすることを目的とした。

① 耐震用試験体の製作

耐震試験で使用する実規模大貯蔵容器(コンクリートキャスク)、振動試験用模擬燃料集合体(PWR, BWR)、貯蔵施設床モデル等の設計・製作を実施した。

② 三軸大型振動台による振動試験

振動試験は、文部科学省管轄の防災科学技術研究所の大型三軸振動台(実大三次元振動破壊実験施設「通称:E-ディフェンス」:図2参照)を用いて実施した。

③ 実規模大貯蔵容器地震時応答評価

振動試験結果に基づき、地震時における貯蔵容器や内部収納物(燃料集合体やバスケット等)の挙動を把握し、複数の燃料集合体の応答位相差による群振動の影響や燃料集合体のガタ振動時の特性を明らかにした。

なお、本研究は、経済産業省 原子力安全・保安院からの受託研究として実施したものである¹⁾。

2. 試験工程

図3に、耐震試験の実施フロー(平成16年度~平成

18年度までの3カ年)を示す。E-ディフェンスを使用した振動試験は、平成17年度に実施した。

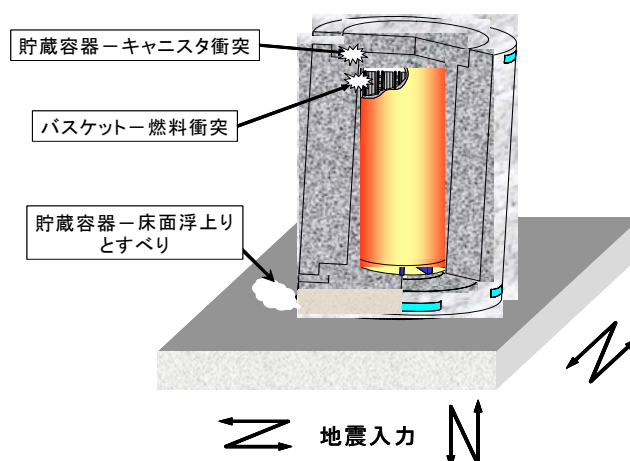
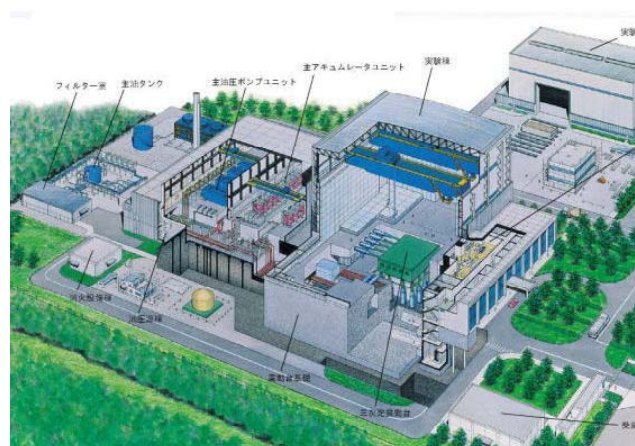


図1 地震時における貯蔵容器のガタ系の挙動



[施設鳥瞰図]

| | |
|--------|---------------------------------------------------|
| 所在地 | 兵庫県三木市 |
| 最大搭載質量 | 1,200 t |
| 搭載面積 | 20m × 15m |
| 駆動方式 | アキュムレータ蓄圧/電気油圧制御 |
| 加振方向 | 水平垂直同時3軸 |
| 最大速度 | 水平200cm/s 垂直70cm/s |
| 最大加速度 | 水平900cm/s ² 垂直1500cm/s ² |
| 最大変位 | 水平±100cm 垂直±50cm |

図2 E-ディフェンスの主な仕様

3. 耐震用試験体

本試験では、平成11～15年度に、実証試験を行ったコンクリートキャスクの仕様を参考にして、実規模大の使用済燃料貯蔵容器や模擬燃料集合体を製作した。

(1) 耐震試験用PWR 模擬燃料集合体

ペレット以外は実機相当の構成品を用いた17×17型実尺模擬燃料集合体モデル1体(図4参照)と等価模擬燃料体20体(図5参照)を製作した。

実尺模擬燃料集合体モデルのペレットは、二酸化ウランの代わりに重量と形状を模擬した鉛-アンチモン

ペレットを使用した。さらに、グリッドセルのリサイズを行い、グリッドバネ力を使用済燃料相当(目標緩和率15～20%)に低減した²⁾。

等価模擬燃料体については、上下部ノズルを固定条件とした際の一次固有振動数と等価とするように剛性や質量分布を決定した。すなわち、グリッドスパン毎の重量をグリッド位置に集中質量として燃料中心軸に配置し、全体の曲げ剛性は、外周部コーナーに配置した中空鋼管のタイロッドで保持し、直径や肉厚で固有振動数を調整した。なお、横方向の剛性は無視した。

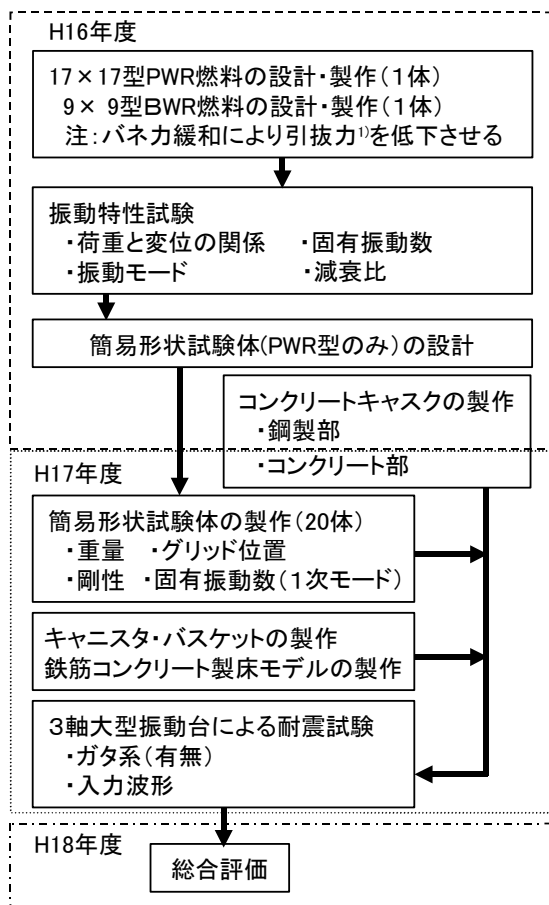


図3 耐震試験の実施フロー

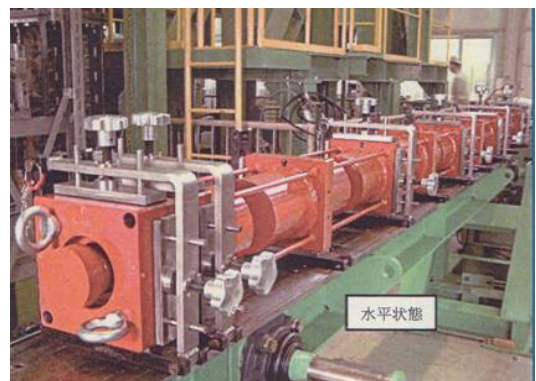
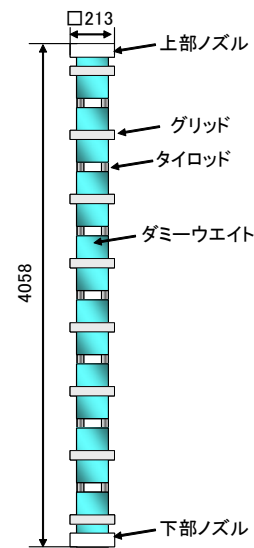


図5 等価模擬燃料体の基本構造

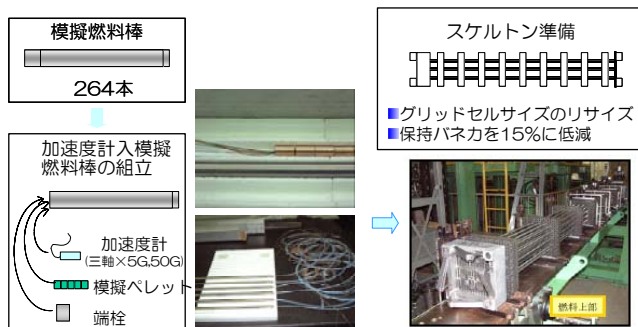


図4 PWR 実尺モデルの製作

(2) コンクリート製貯蔵容器

貯蔵容器の主な仕様は、下記のとおりである。

- ① 寸法：貯蔵容器部：外径 3.9/内径 1.8×高さ 5.3m
底部：外径 3.9×高さ 0.5m
- ② 鉄筋種類/サイズ：SD345/D25
- ③ 鉄筋位置：内外周筋、内外縦筋
- ④ コンクリートかぶり：60mm
- ⑤ コンクリート種類：低熱セメント
- ⑥ コンクリート設計基準強度：24MPa

底面の摩擦係数の影響を評価するため、底部の円板スラブは着脱式とし、接触面は2材料（鋼材とコンクリート）とした。また、給排気口等の詳細は省略した。キャニスタ衝突時の衝撃力や滑り量を測定するため、貯蔵容器内面の鋼製ライナー部の側板や底板間に渦電流変位計やロードセルを設置した。

(3) キャニスタ

キャニスタの寸法は、外径 1638mm、高さ 4453mm（キャニスタ吊具を除く）であり、重量は単体重量約 13 トン、（PWR 燃料集合体 21 体装荷時 約 27 トン）である。主要部品の材質は、本体はステンレス鋼、バスケットはアルミ、蓋は炭素鋼であり、蓋部構造は簡略化し、ボルト止め構造とした。

バスケットは、押出成形で製作した中空状のアルミ板を格子状に組み上げた構造とし、バスケット格子内に渦電流変位計・ひずみゲージを埋め込み、燃料集合体の挙動を計測した。

図 6 に、キャニスタの仕上がり状況を示す。



図 6 キャニスタの仕上がり状況

(4) 貯蔵施設床モデル

耐震試験に使用する貯蔵施設の床を模擬した鉄筋コンクリート床版の主な仕様は、下記のとおりである。

- ① 寸法：8×8×0.8m
- ② 鉄筋種類/サイズ：SD345/D22
- ③ 鉄筋位置：上・下面
- ④ 長辺・短辺方向：ピッチ 200mm
- ⑤ コンクリートかぶり：100mm
- ⑥ セメント種類：低熱セメント
- ⑦ 設計基準強度：24MPa

4. 試験計画

(1) 試験項目

表 1 に、耐震試験の実施項目を示す。

主な試験の実施項目は、下記のとおりである。

- I 燃料集合体振動特性試験
- II 摩擦特性試験
- III キャニスタ耐震試験
- III 転倒試験
- IV コンクリート充填鋼板製キャスク耐震試験
- V 鉄筋コンクリート製キャスク耐震試験

(2) 測定項目

ガタ衝突時にキャスク各部に生じる加速度や、加震時における貯蔵容器やキャニスタのロッキング角速度や角度をジャイロセンサにより計測した。また、貯蔵容器内でのキャニスタのガタ衝突による衝撃力やすべり変位を測定するため、支持レールと支持板に、ロードセルや軸力ボルト、ならびに渦電流変位計を設置した。バスケットセル内にも渦電流変位計を設置し、バスケットセルと燃料集合体との相対距離を測定した。試験データの収録サンプリング周波数は 2kHz である。

(3) 試験条件

表 2 に、試験条件を示す。加振波については、ランダム波（0.2～30Hz, 40 秒）、正弦波掃引（(3.2Hz/min で 10Hz から 0.4Hz までのスイープダウン）、観測地震波（El Centro, JMA 神戸）、人工地震波とした。人工地震波は、「震源を事前に特定できない地震の考え方と地震動の策定について」（原安委：原子力発電耐震設計専門部会 地震・地震動 WG）に基づき作成した。

5. 試験結果

図7に、鉄筋コンクリート製キャスク耐震試験の実施状況を示す。また、その収録データの時刻歴として、JMA 神戸波による耐震試験（試験略称：S6-P-11C）の結果を図8～19に示す。

本試験の結果から、以下の知見を得た。

- ・ロッキングや滑り、回転を伴うコンクリートキャスクの三次元的な地震時応答を明らかにし、剛体の転倒限界評価式より得られる限界加速度を超えるレベルに増幅した波形を入力しても、コンクリートキャスクは転倒に至らないことを明らかにした。
- ・キャスクとキャニスタ間、キャニスタと燃料間のギャップにより、入力加速度が増加しても、燃料に発生するひずみは比例的には増加しておらず、対象とした地震入力の範囲では、燃料の応答は弾性範囲内に抑えられることが明らかとなった。



図7 試験の実施状況

参考文献

- 1) (財) 電力中央研究所:「リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等(貯蔵設備長期健全性等確認試験) 報告書」平成17年度,平成18年3月
- 2) (財) 原子力発電技術機構:「平成8年度軽水炉改良技術確認試験(高燃焼度等燃料に関するもの)に関する報告書」,平成9年3月

表1 耐震試験の実施項目

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| I 燃料集合体振動特性試験 ・ 無負荷状態の振動台の特性把握 ・ 燃料集合体単体の振動特性の把握 | 安全評価で使用する解析ツールへの入力データの根拠 |
| II 摩擦特性試験 ・ 容器底部の摩擦特性評価 | |
| III キャニスタ耐震試験 ・ キャニスタの転倒挙動評価 ・ 燃料とバスケットのガタ衝突による相互作用に係わる応答特性評価 | 金属キャスクに動的地震力が作用した場合の収納物の健全性評価 ・ 固縛要否の判定基準の設定 ・ 燃料健全性の評価基準 |
| IV CFS 製キャスク耐震試験 V RC 製キャスク耐震試験 ・ 350ton 載荷状態の振動台の特性評価 ・ 底面の摩擦特性の影響評価 ・ 固縛/非固縛状態のキャスクの応答評価 複層のガタ系の影響が貯蔵容器全体の浮上り挙動や燃料健全性に及ぼす影響評価 | コンクリートキャスクに動的地震力が作用した場合の収納物の健全性評価 ・ 固縛状態の貯蔵容器の挙動評価 ・ 複数のガタ系の影響が燃料健全性に及ぼす影響 ・ 底板の材質（摩擦係数）が転倒挙動に及ぼす影響 |

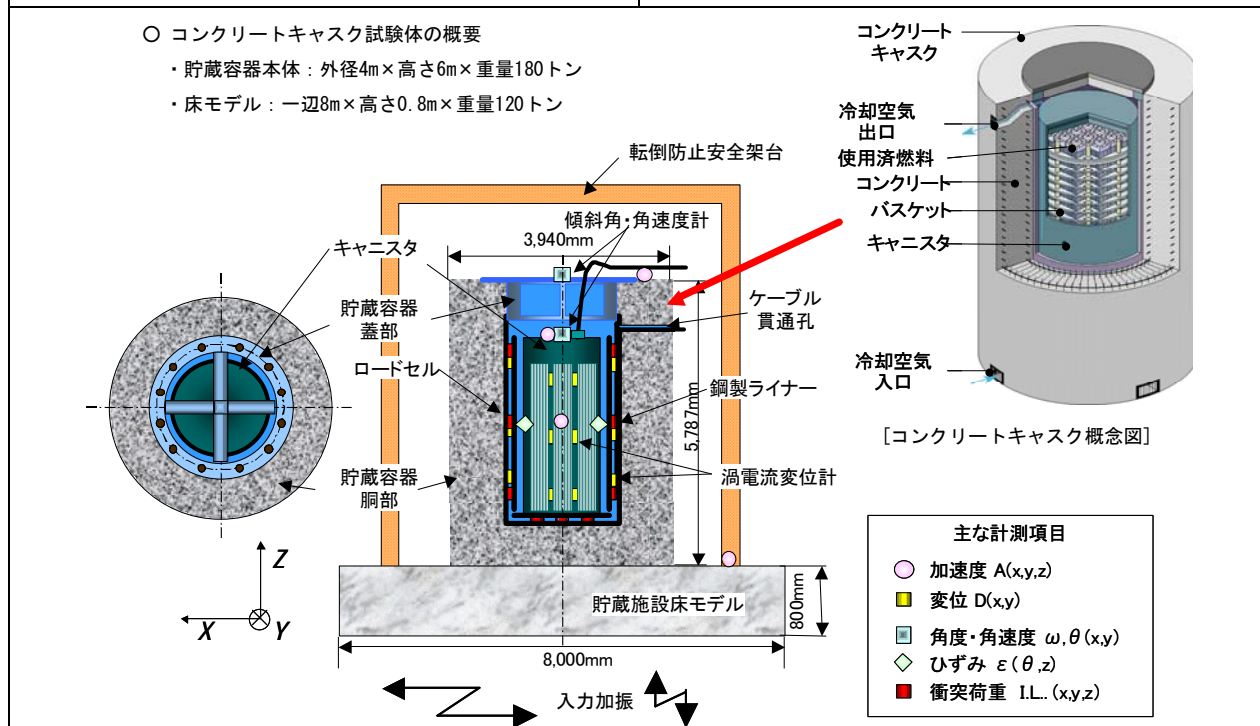
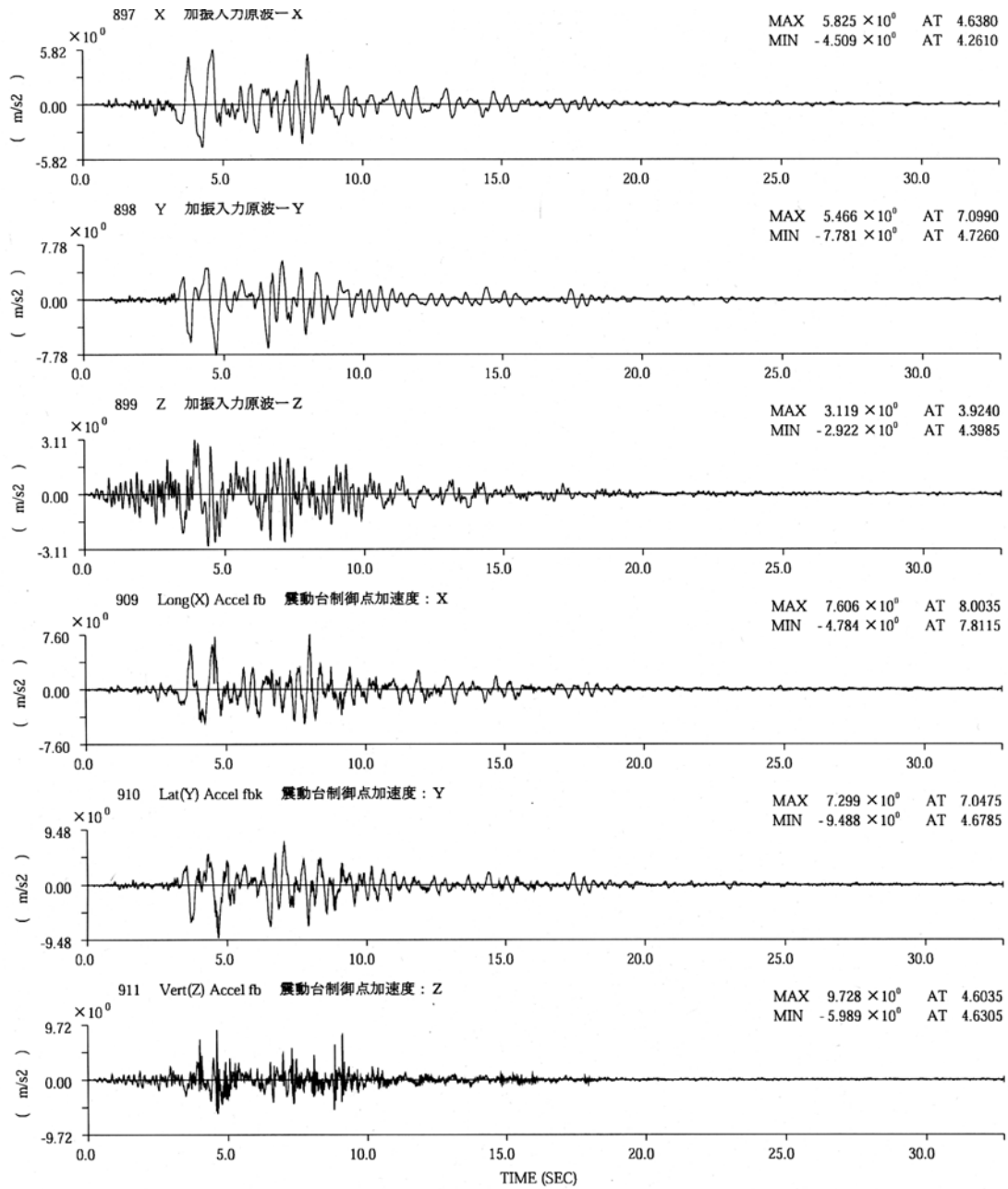


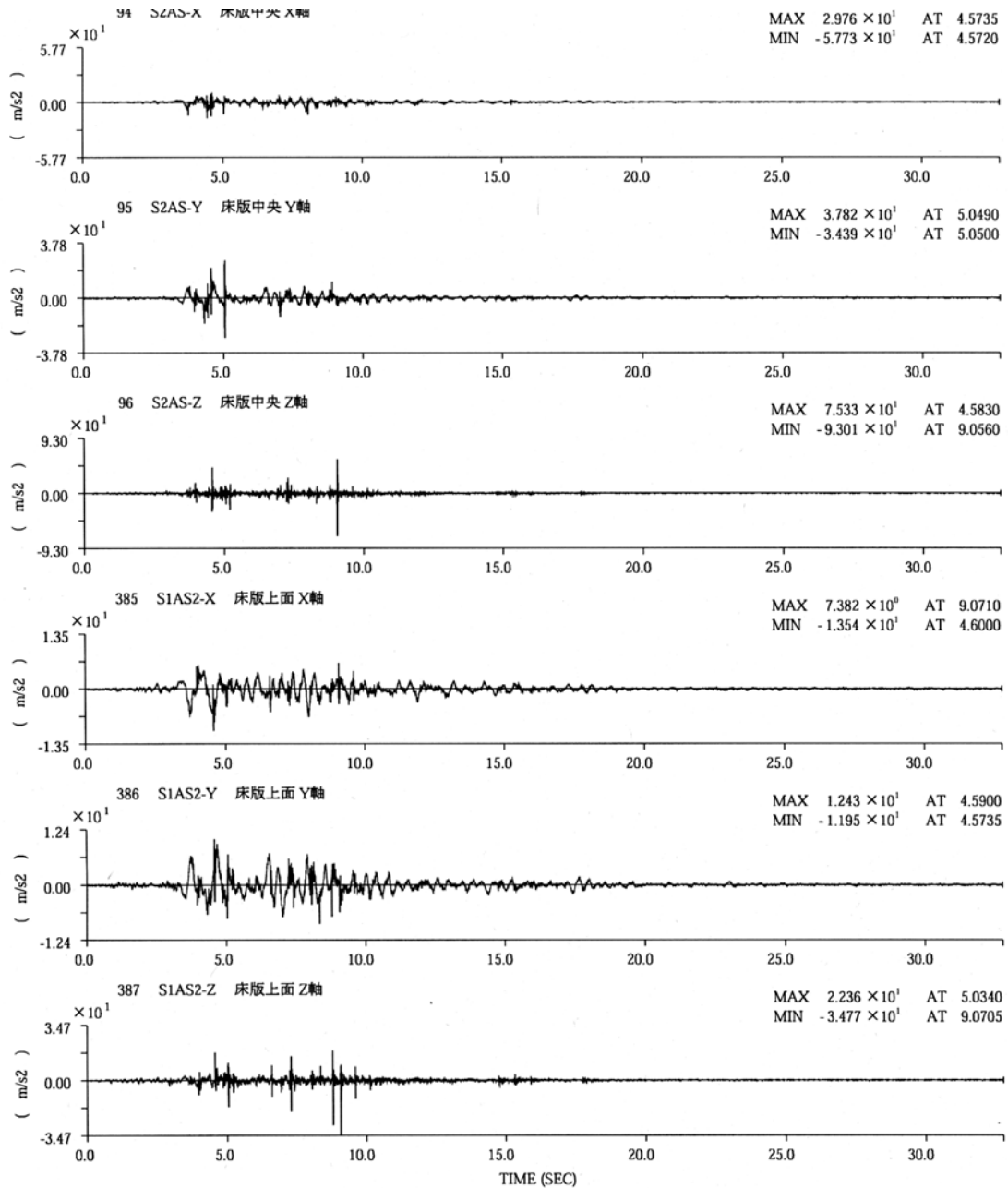
表2 試験条件

| ケース | 確認事項 | ガタ (×:無、○:有) | | | 燃料体数 | 入力 | | |
|---------|----------------------------|--------------|------------------|--------|------|----------------------------|-----------------------|---------------------------|
| | | 燃料ーバスケット | キャニスター貯蔵容器 (又は床) | 貯蔵容器ー床 | | 波 | 方向 | レベル (倍) |
| I | 燃料集合体振動特性試験 | ○ | --- | --- | 1* | ランダム波 正弦波 人工波 観測波 | Y Y,Z X,Y,Z | 1/2, 2/3, 1 1.4 (裕度確認) |
| II | 摩擦特性試験 | --- | --- | ○ | --- | 正弦波 | Y | 加速度一定 |
| III | キャニスタ耐震試験 (浮上限界・転倒限界) | ○ | ○ | --- | 21 | ランダム波 正弦波 人工波 観測波 | Y Y,Z X,Y, Z | 1/2, 2/3, 1 |
| IV V | コンクリートキャスク耐震性評価 (浮上限界・固縛力) | ○ | ○ | ○ | | | | 1/2, 2/3, 1 1.2 (裕度確認) |



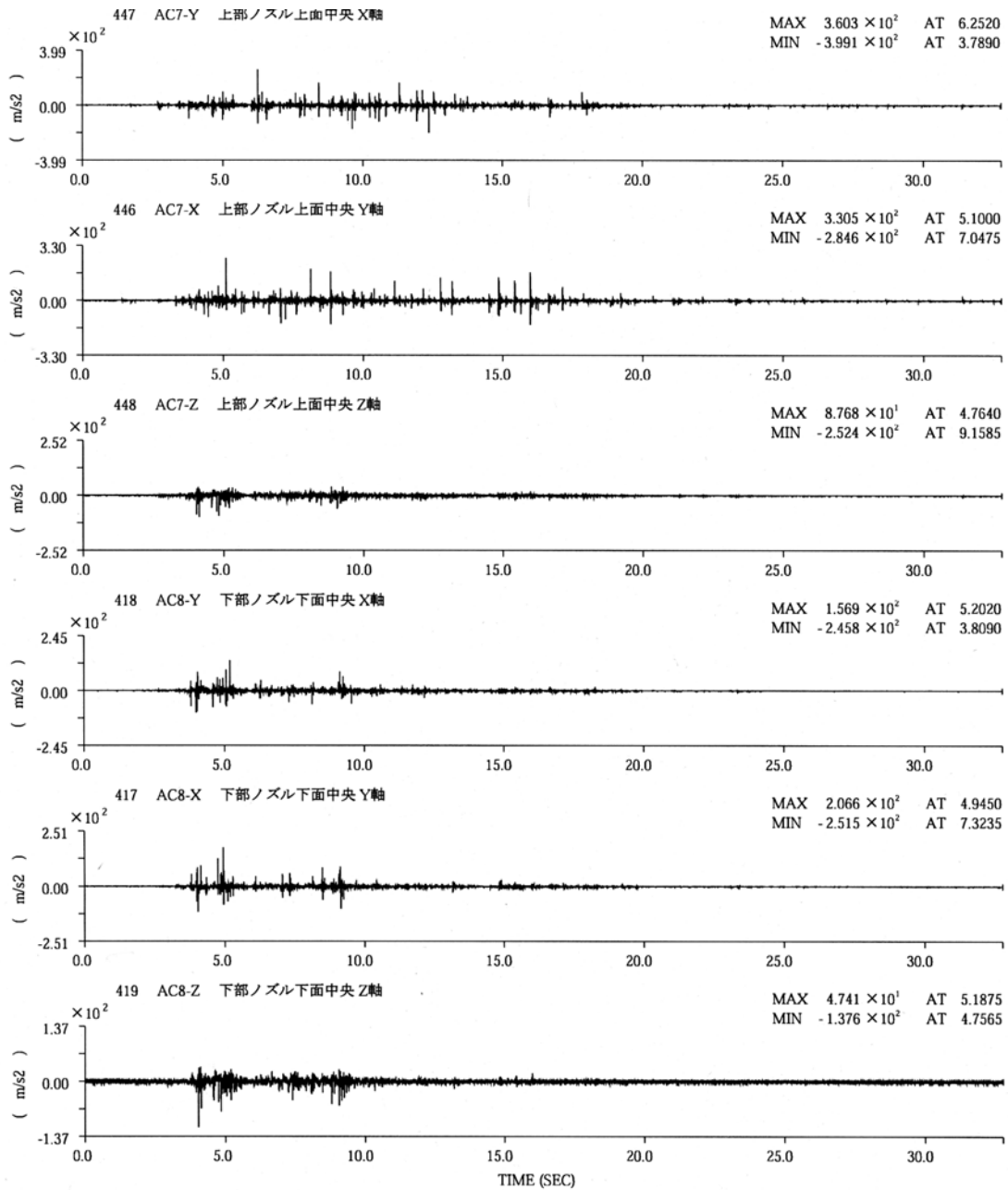
S6-P-11C 00 入力加速度
 コンクリートキャスク耐震試験フェーズⅢ(コンクリート製底板・非固縛条件)

図8 入力加速度時刻歴



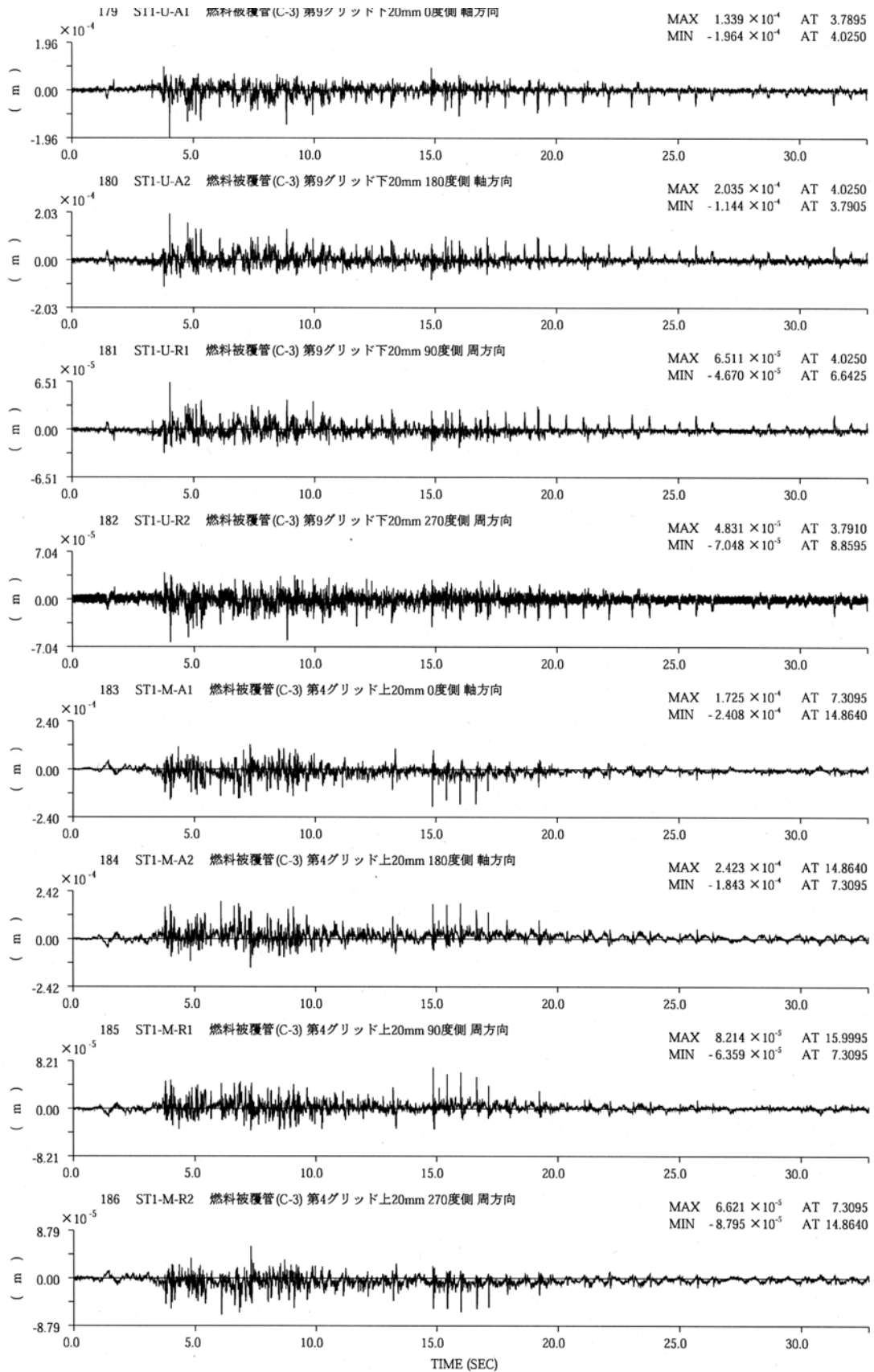
S6-P-11C 20 コンクリート床版 加速度(1)
 コンクリートキャスク耐震試験フェーズⅢ(コンクリート製底板・非固縛条件)

図9 コンクリート床版の加速度時刻歴



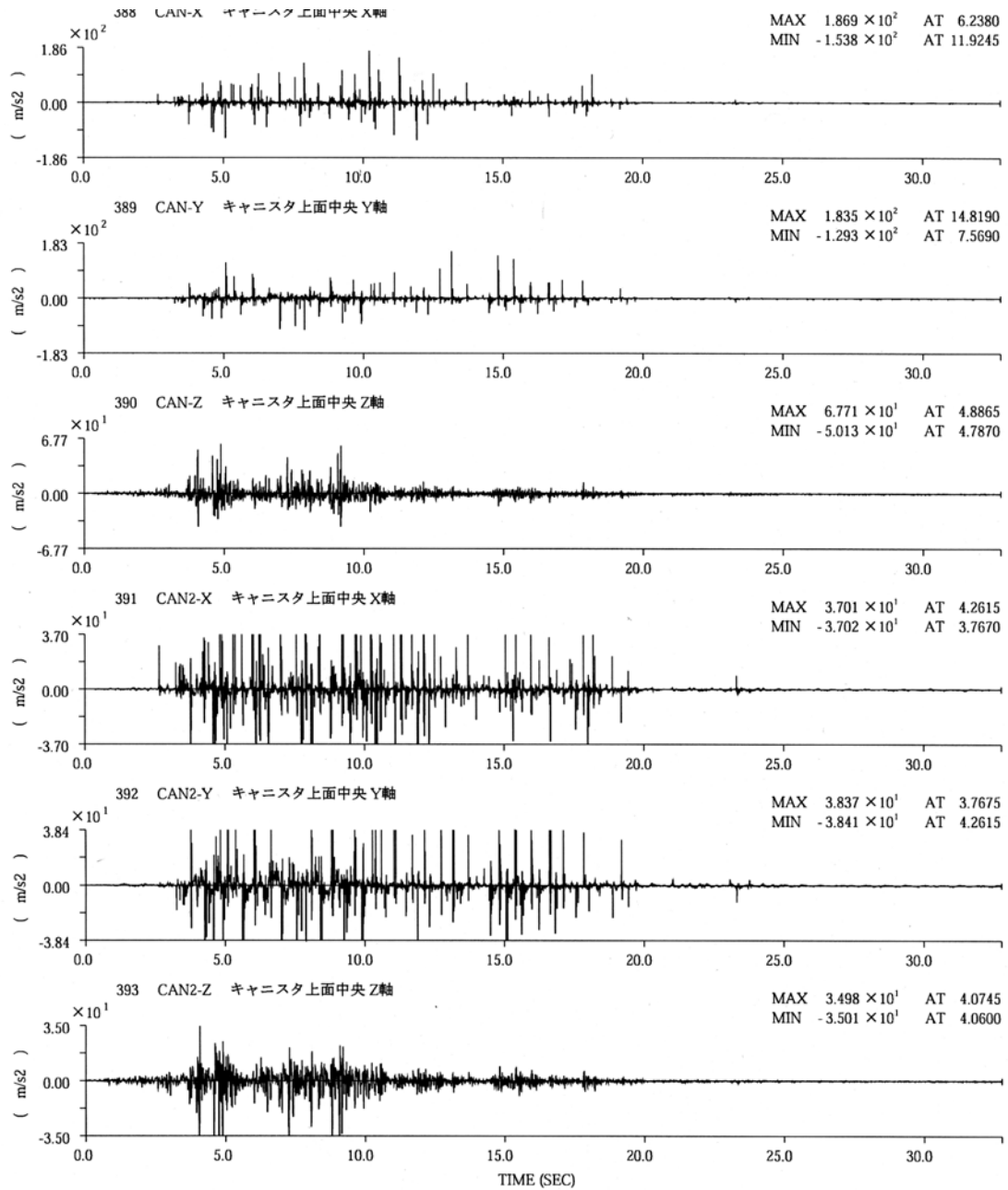
S6-P-11C 30 PWR模擬燃料集合体 加速度(1)
 コンクリートキャスク耐震試験フェーズⅢ(コンクリート製底板・非固縛条件)

図 10 PWR 模擬燃料集合体の加速度時刻歴



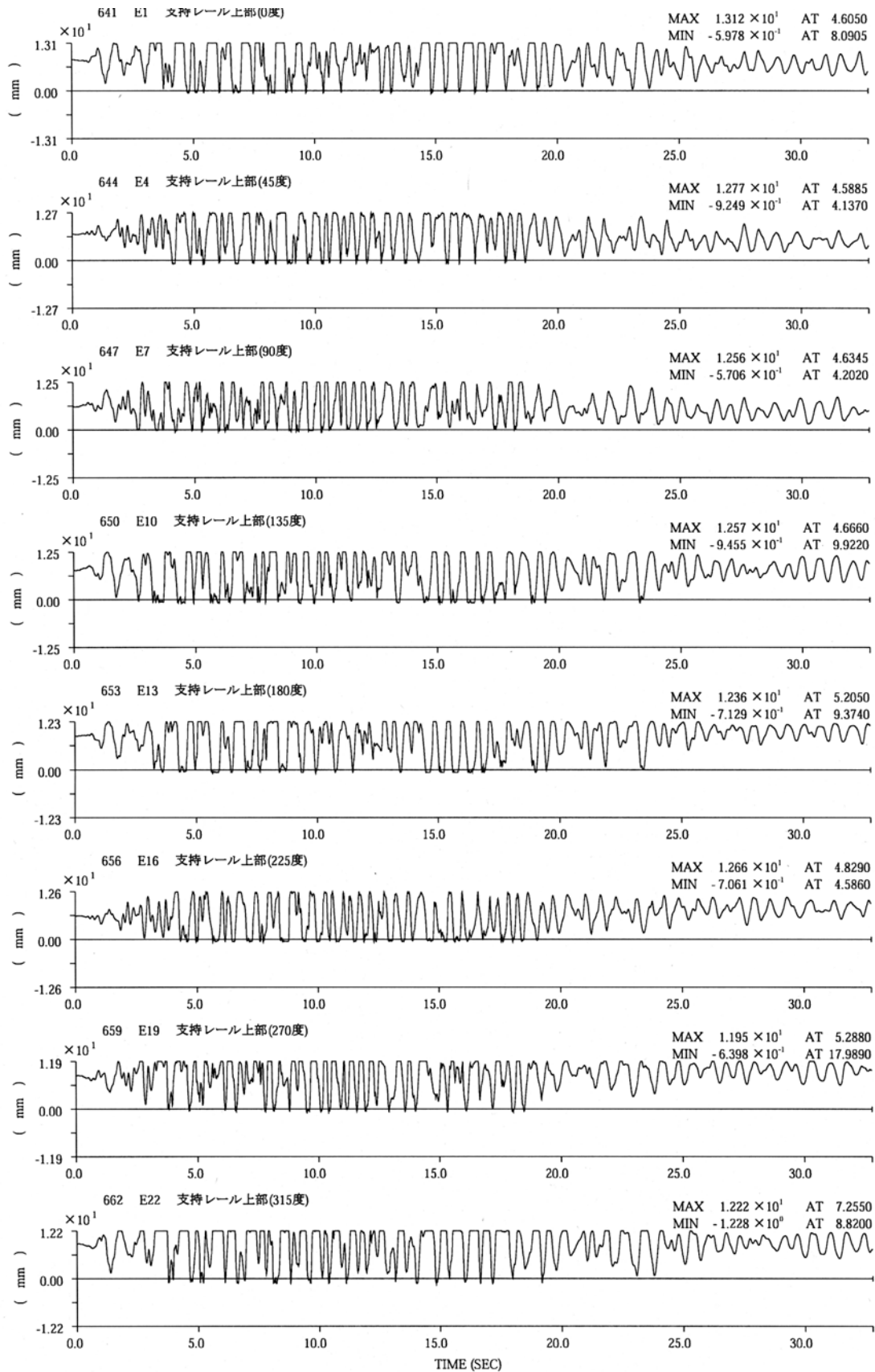
S6-P-11C 33 PWR模擬燃料集合体 燃料棒ひずみ(1)
 コンクリートキャスク耐震試験フェーズⅢ(コンクリート製底板・非固縛条件)

図 11 PWR 模擬燃料集合体被覆管のひずみ時刻歴



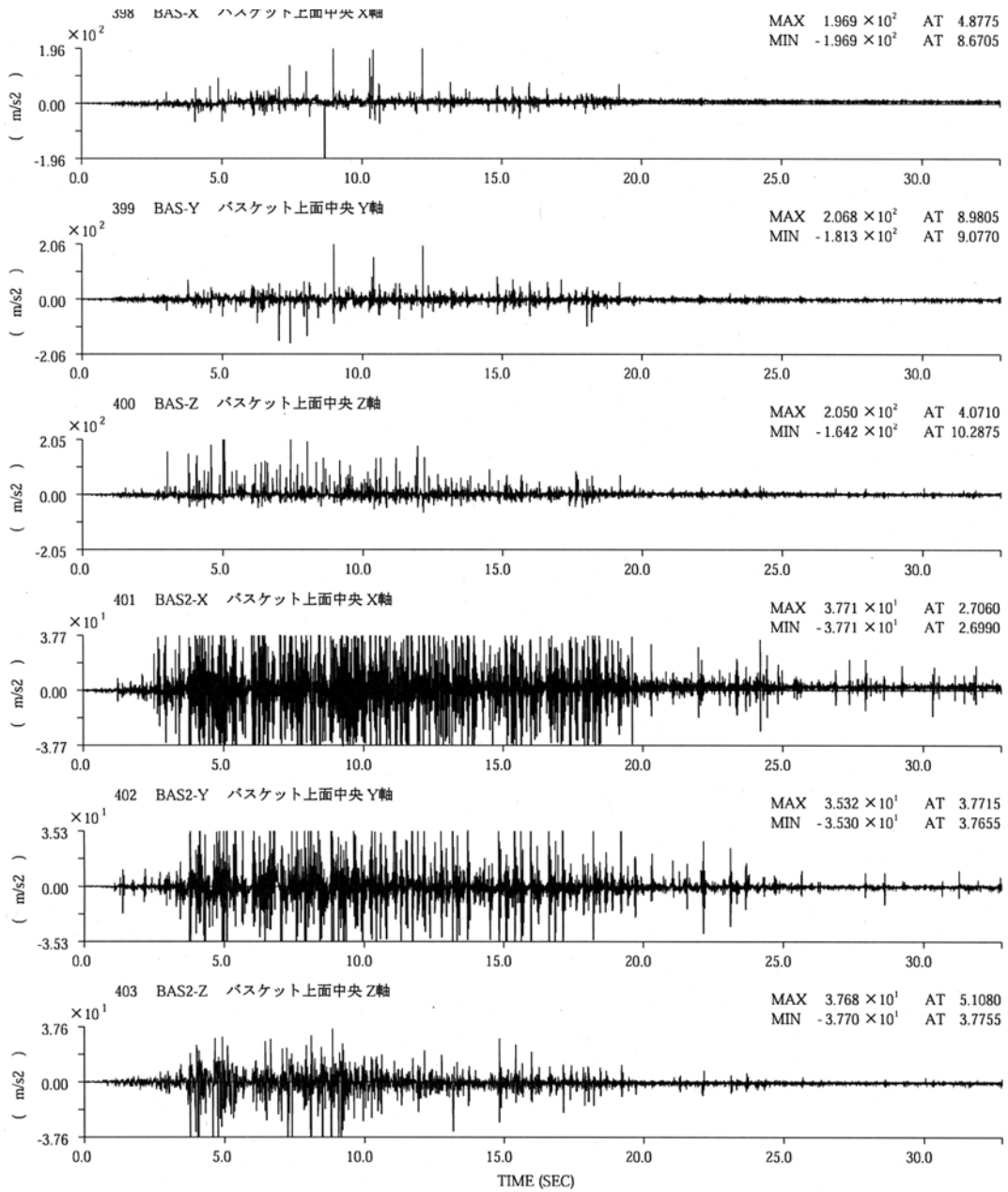
S6-P-11C 60 キャニスタ 加速度
 コンクリートキャスク耐震試験フェーズⅢ(コンクリート製底板・非固縛条件)

図 12 キャニスタ上部の加速度時刻歴



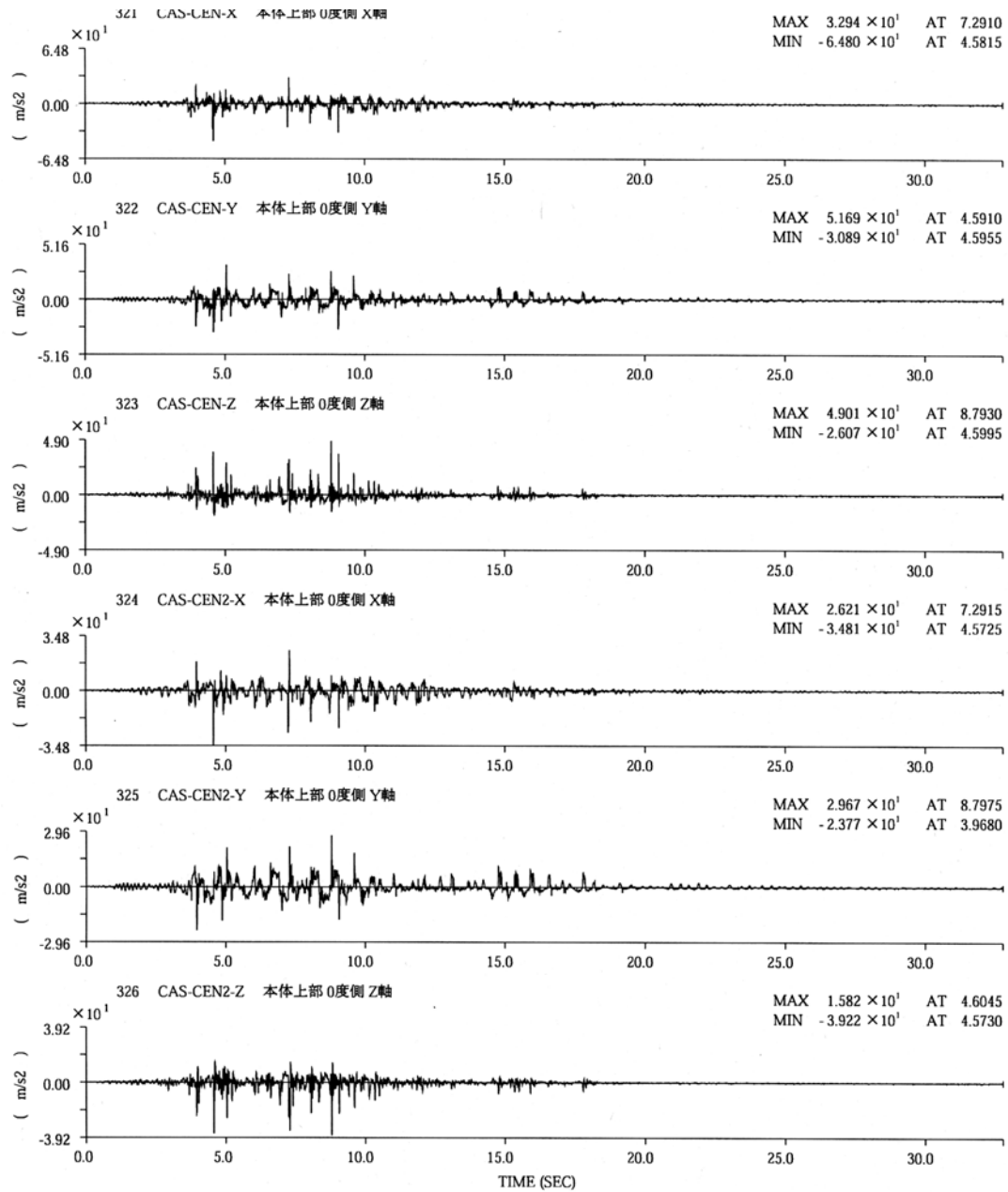
S6-P-11C 61 キャニスタ 変位(1)
 コンクリートキャスク耐震試験フェーズⅢ(コンクリート製底板・非固縛条件)

図 13 キャニスタ上部変位の時刻歴



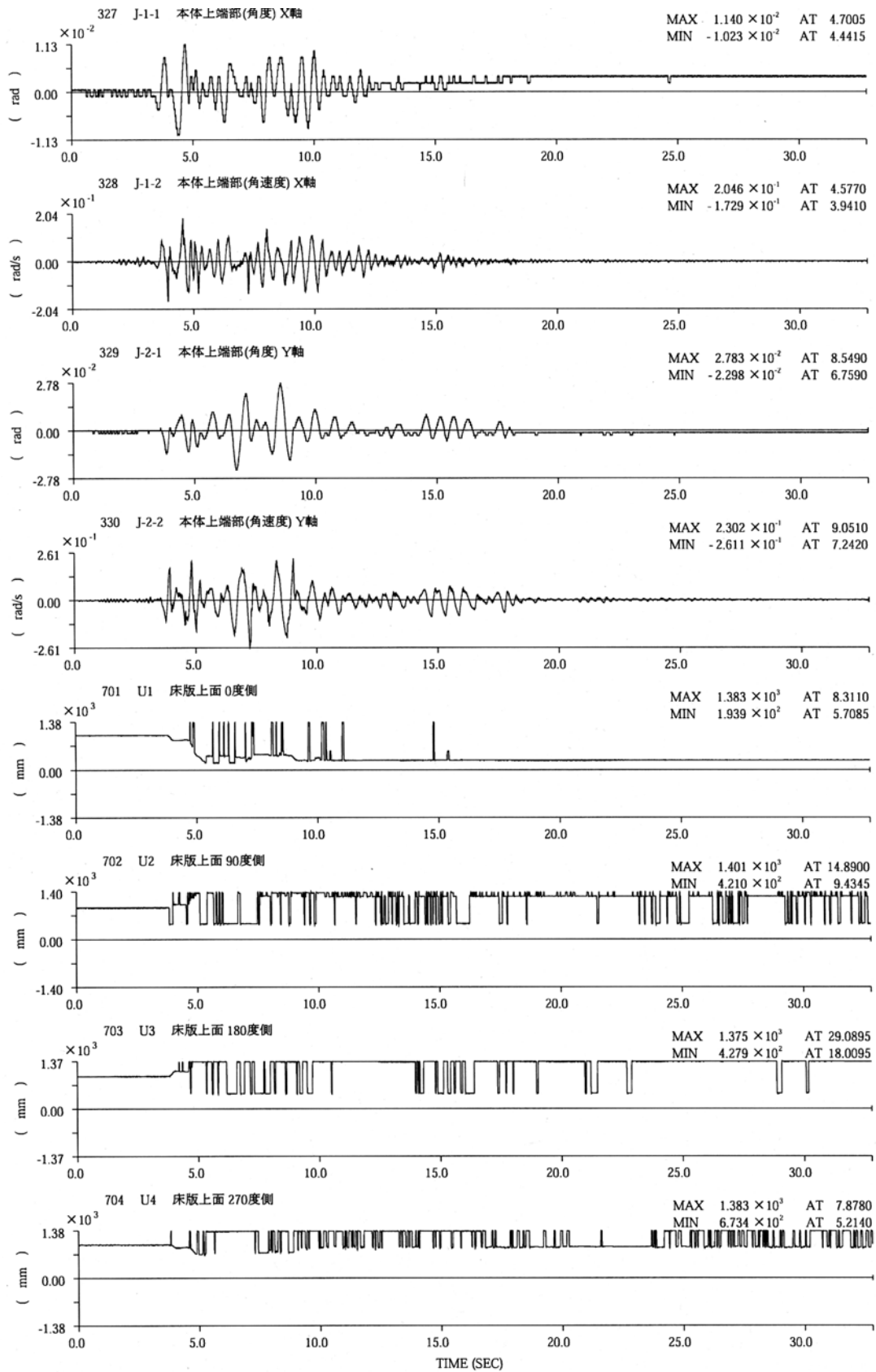
S6-P-11C 71 バケット 加速度
 コンクリートキャスク耐震試験フェーズⅢ(コンクリート製底板・非固縛条件)

図 14 バケット上部の加速度時刻歴



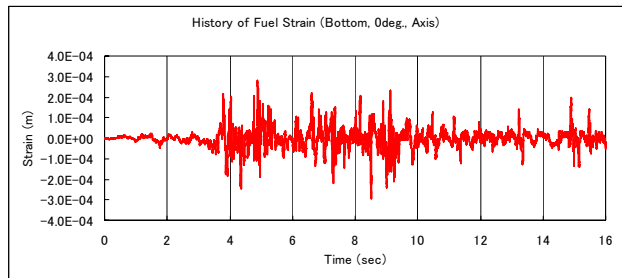
S6-P-11C 82 キャスク 加速度(3)
 コンクリートキャスク耐震試験フェーズⅢ(コンクリート製底板・非固縛条件)

図 15 コンクリートキャスク上部の加速度時刻歴

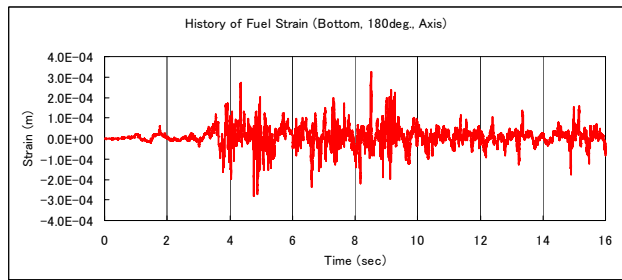


S6-P-11C 83 キャスク 変位
 コンクリートキャスク耐震試験フェーズⅢ(コンクリート製底板・非固縛条件)

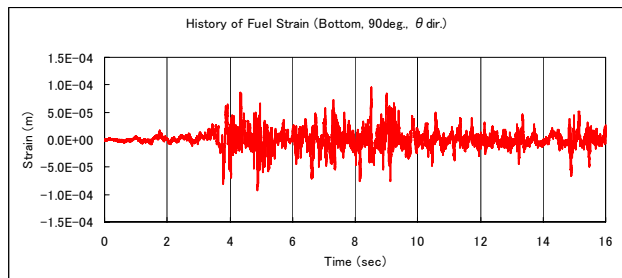
図 16 コンクリートキャスクの応答角度と変位の時刻歴



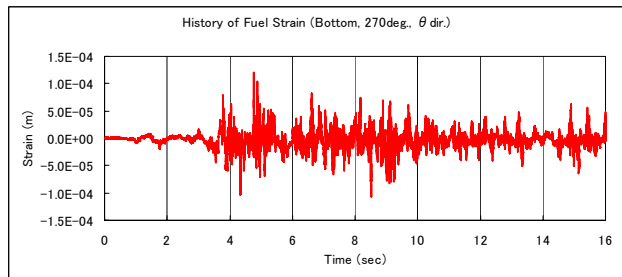
(燃料被覆管 0° 側軸方向)



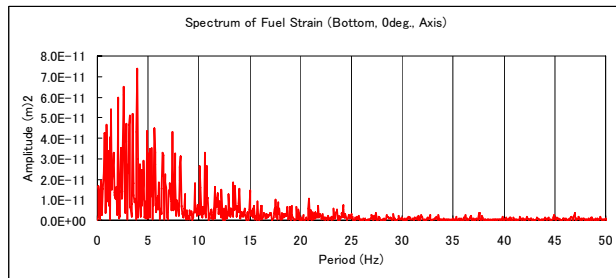
(燃料被覆管 180° 側軸方向)



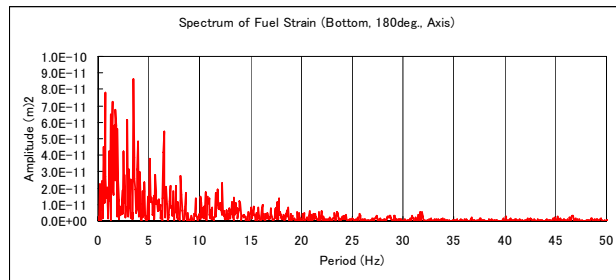
(燃料被覆管 90° 側径方向)



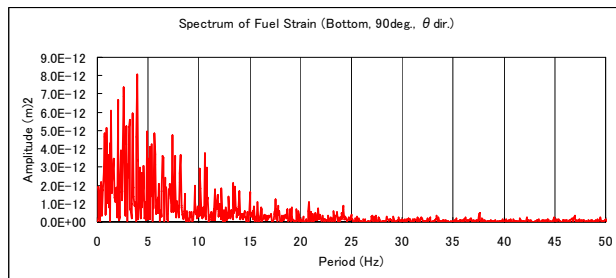
(燃料被覆管 270° 側径方向)



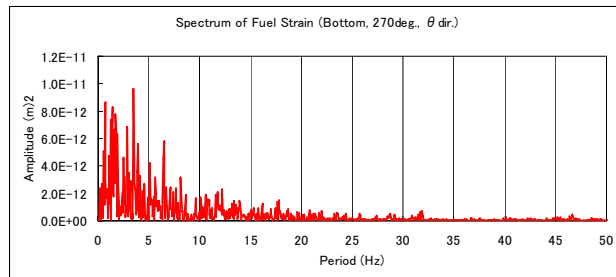
(燃料被覆管 0° 側軸方向)



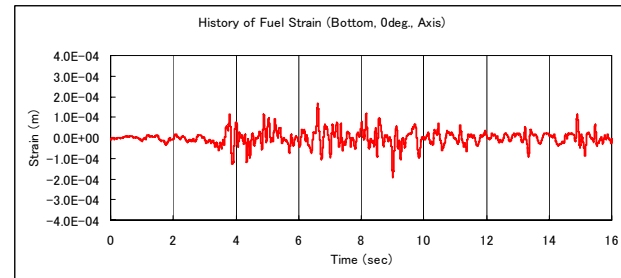
(燃料被覆管 180° 側軸方向)



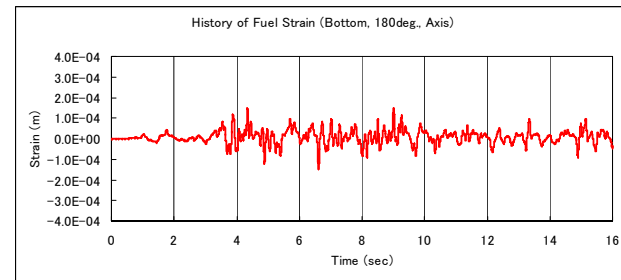
(燃料被覆管 90° 側径方向)



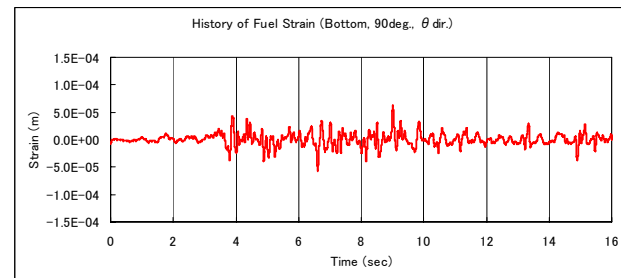
(燃料被覆管 270° 側径方向)



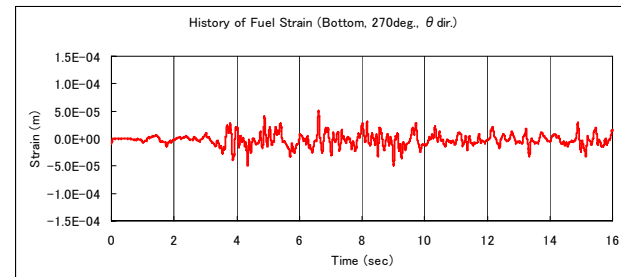
(燃料被覆管 0° 側軸方向)



(燃料被覆管 180° 側軸方向)



(燃料被覆管 90° 側径方向)



(燃料被覆管 270° 側径方向)

図 17 PWR 燃料集合体被覆管下部のひずみ時刻歴 (フィルタ処理前)

図 18 ひずみ時刻歴のパワースペクトル

図 19 PWR 燃料集合体被覆管下部のひずみ時刻歴 (フィルタ処理後)