4条
地震による損傷の防止

＜目　次＞

1.　基本方針
1.1　要求事項に対する適合性
(1)　位置，構造及び設備
(2)　安全設計方針
(3)　適合性説明
1.2　気象等
1.3　設備等
1.4　手順等

2.　地震による損傷の防止
（別添１）使用済燃料乾式貯蔵施設の耐震設計方針
（別添２）使用済燃料乾式貯蔵容器及び貯蔵架台の耐震評価について
（別添３）使用済燃料乾式貯蔵施設に対する波及的影響の検討について
（別添４）貯蔵建屋の耐震重要度分類の整理について

1. 基本方針

1.1 要求事項に対する適合性

（1）位置，構造及び設備

(1) 耐震構造

本発電用原子炉施設は，次の方針に基づき耐震設計を行い，設置許可基準規則に適合するように設計する。

（ｉ）設計基準対象施設の耐震設計

設計基準対象施設については，耐震重要度分類に応じて，適用する地震力に対して，以下の項目に従って耐震設計を行う。

a. 耐震重要施設は，基準地震動による地震力に対して，安全機能が損なわれるおそれがないように設計する。

b. 設計基準対象施設は，地震により発生するおそれがある安全機能の喪失及びそれに続く放射線による公衆への影響を防止する観点から，各施設の安全機能が喪失した場合の影響の相対的な程度に応じて，耐震重要度分類を以下のとおり，Ｓクラス，Ｂクラス及びＣクラスに分類し，それぞれに応じた地震力に十分に耐えられるように設計する。

Ｓクラス　地震により発生するおそれがある事象に対して，原子炉を停止し，炉心を冷却するために必要な機能を持つ施設，自ら放射性物質を内蔵している施設，当該施設に直接関係しておりその機能喪失により放射性物質を外部に拡散する可能性のある施設，これらの施設の機能喪失により事故に至った場合の影響を緩和し，放射線による公衆への影響を軽減するために必要な機能を持つ施設及びこれらの重要な安全機能を支援するために必要となる施設，並びに地震に伴って発生するおそれがある津波による安全機能の喪失を防止するために必要となる施設であって，その影響が大きいもの

Ｂクラス　安全機能を有する施設のうち，機能喪失した場合の影響がＳクラスの施設と比べ小さい施設

Ｃクラス　Ｓクラスに属する施設及びＢクラスに属する施設以外の一般産業施設又は公共施設と同等の安全性が要求される施設

c. Ｓクラスの施設（e.に記載のものを除く。），Ｂクラス及びＣクラスの施設は，建物・構築物については，地震層せん断力係数C_iに，それぞれ3.0，1.5及び1.0を乗じて求められる水平地震力，機器・配管系については，それぞれ3.6，1.8及び1.2を乗じた水平震度から求められる水平地震力に十分に耐えられるように設計する。建物・構築物及び機器・配管系ともに，おおむね弾性状

態に留まる範囲で耐えられるように設計する。

ここで，地震層せん断力係数C_iは，標準せん断力係数C_0を0.2以上とし，建物・構築物の振動特性及び地盤の種類等を考慮して求められる値とする。

ただし，土木構造物の静的地震力は，Cクラスに適用される静的地震力を適用する。

Sクラスの施設（e.に記載のものを除く。）については，水平地震力と鉛直地震力が同時に不利な方向の組合せで作用するものとする。鉛直地震力は，建物・構築物については，震度0.3以上を基準とし，建物・構築物の振動特性及び地盤の種類等を考慮して求められる鉛直震度，機器・配管系については，これを1.2倍した鉛直震度より算定する。ただし，鉛直震度は高さ方向に一定とする。

d. Sクラスの施設（e.に記載のものを除く。）は，基準地震動による地震力に対して安全機能が保持できるように設計する。建物・構築物については，構造物全体としての変形能力（終局耐力時の変形）について十分な余裕を有し，建物・構築物の終局耐力に対し妥当な安全余裕を有するように設計する。機器・配管系については，その施設に要求される機能を保持するように設計し，塑性ひずみが生じる場合であっても，その量が小さなレベルに留まって破断延性限界に十分な余裕を有し，その施設に要求される機能に影響を及ぼさないように，また，動的機器等については，基準地震動による応答に対して，その設備に要求される機能を保持するように設計する。

また，弾性設計用地震動による地震力又は静的地震力のいずれか大きい方の地震力に対しておおむね弾性状態に留まる範囲で耐えられるように設計する。建物・構築物については，発生する応力に対して，建築基準法等の安全上適切と認められる規格及び基準による許容応力度を許容限界とする。機器・配管系については，応答が全体的におおむね弾性状態に留まるように設計する。

なお，基準地震動及び弾性設計用地震動による地震力は，水平２方向及び鉛直方向について適切に組み合わせて算定するものとする。

基準地震動は，敷地ごとに震源を特定して策定する地震動及び震源を特定せず策定する地震動について，敷地の解放基盤表面における水平方向及び鉛直方向の地震動としてそれぞれ策定する。策定した基準地震動の応答スペクトルを第１図及び第２図に，時刻歴波形を第３図～第13図に示す。解放基盤表面は，地盤調査の結果から，0.7km/s以上のＳ波速度（2.6km/s）を持つ堅固な岩盤が十分な拡がりと深さを持っていることが確認されているため，敷地標高を考慮してEL.+10mとする。

また，弾性設計用地震動は，基準地震動との応答スペクトルの比率が目安として0.5を下回らないような値に余裕を持たせ，「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針（昭和56年7月20日原子力安全委員会決定，平成13年3月29日一

部改訂）」における基準地震動S_1を踏まえ，工学的判断から基準地震動に係数0.53を乗じて設定する。

なお，Bクラスの施設のうち，共振のおそれのある施設については，弾性設計用地震動に２分の１を乗じた地震動によりその影響についての検討を行う。建物・構築物及び機器・配管系ともに，おおむね弾性状態に留まる範囲で耐えられるように設計する。

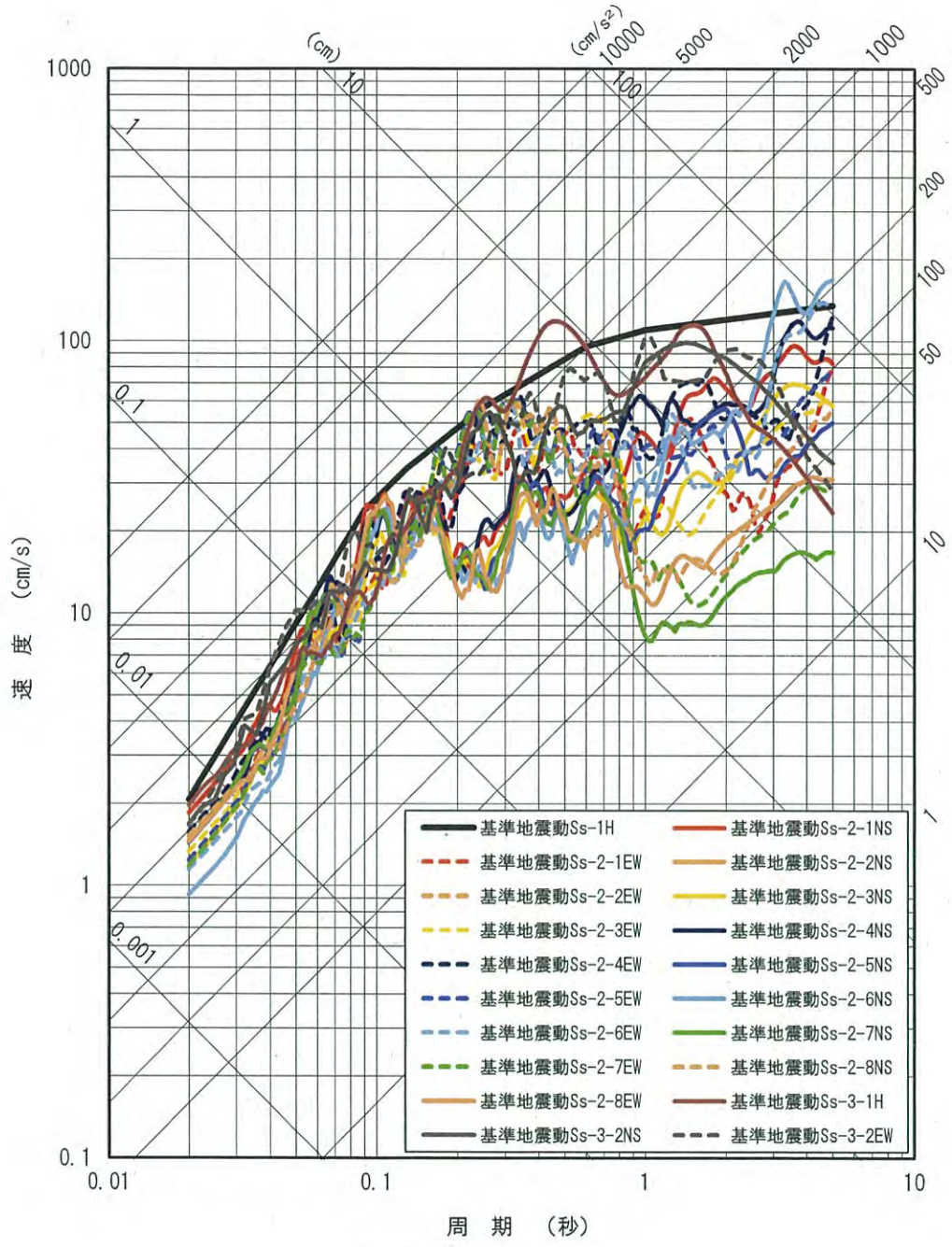
e. 津波防護施設，浸水防止設備，津波監視設備，浸水防止設備が設置された建物・構築物及び使用済燃料乾式貯蔵容器は，基準地震動による地震力に対して，それぞれの施設及び設備に要求される機能が保持できるように設計する。

f. 耐震重要施設は，耐震重要度分類の下位のクラスに属する施設の波及的影響によって，その安全機能を損なわないように設計する。また，使用済燃料乾式貯蔵容器は，周辺施設等の波及的影響によって，その安全機能を損なわないように設計する。波及的影響の評価に当たっては，敷地全体を俯瞰した調査・検討を行い，事象選定及び影響評価を行う。なお，影響評価においては，耐震重要施設又は使用済燃料乾式貯蔵容器の設計に用いる地震動又は地震力を適用する。

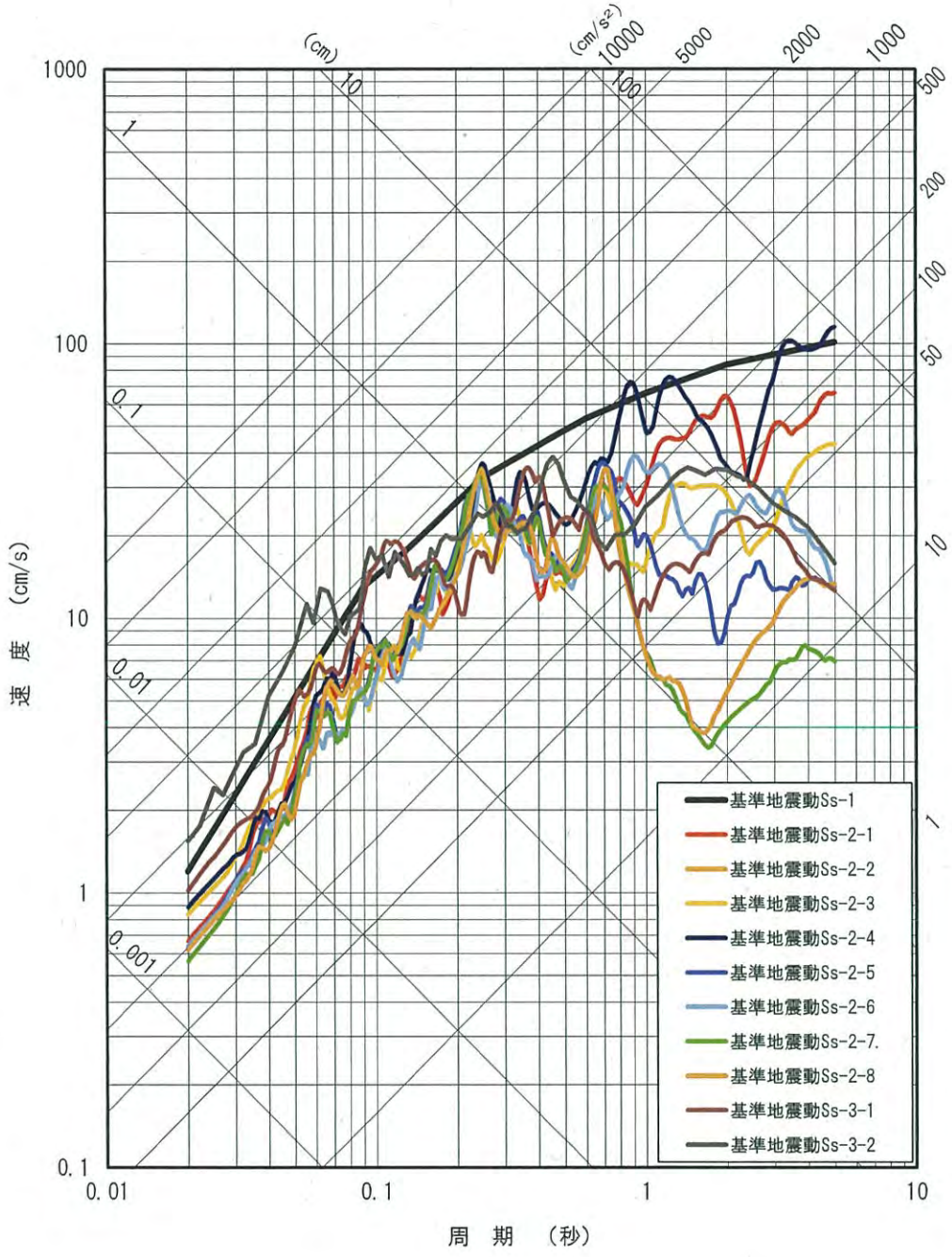
g. 炉心内の燃料被覆材の放射性物質の閉じ込めの機能については，以下のとおり設計する。

弾性設計用地震動による地震力又は静的地震力のいずれか大きい方の地震力に対して，炉心内の燃料被覆材の応答が全体的におおむね弾性状態に留まるように設計する。

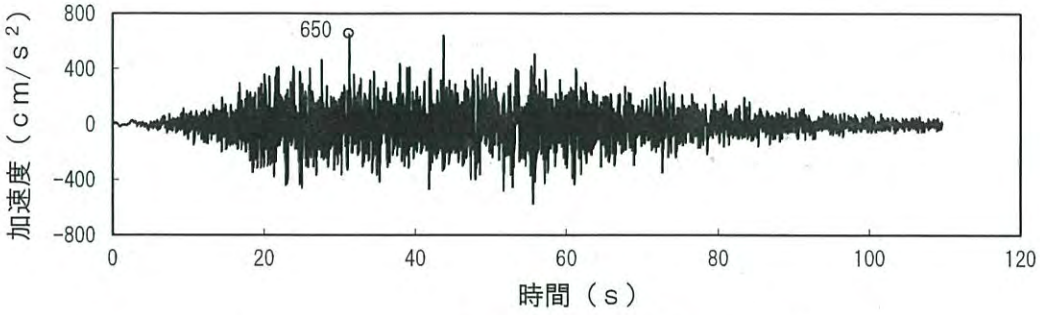
基準地震動による地震力に対して，放射性物質の閉じ込めの機能に影響を及ぼさないように設計する。



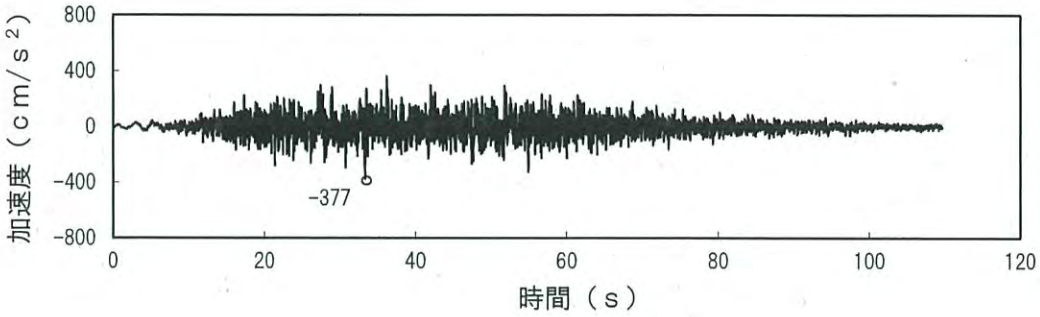
第１図　基準地震動Ssの応答スペクトル（水平方向）



第２図　基準地震動Ssの応答スペクトル（鉛直方向）

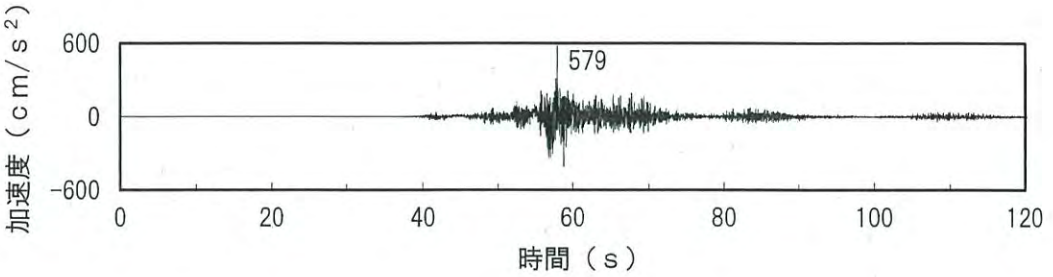


加速度（水平方向：Ss-1H）

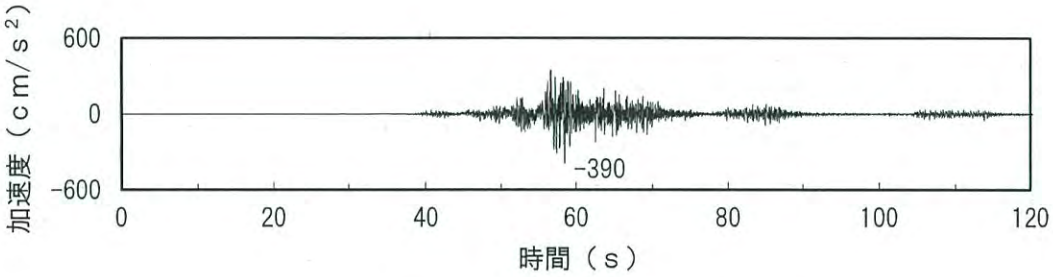


加速度（鉛直方向：Ss-1V）

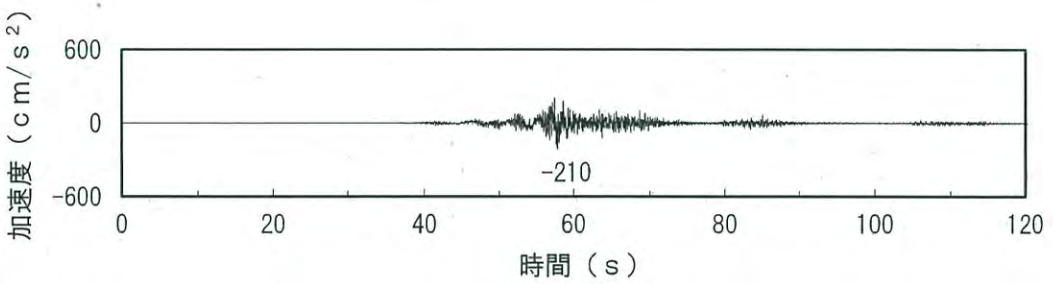
第３図　基準地震動Ss-1の設計用模擬地震波の時刻歴波形



加速度（水平方向：Ss-2-1(NS)）

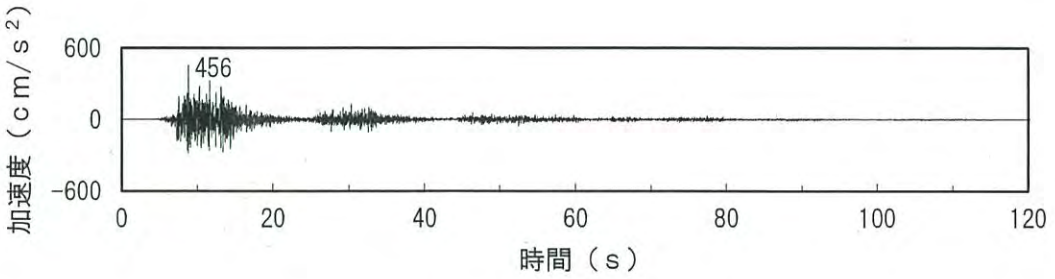


加速度（水平方向：Ss-2-1(EW)）

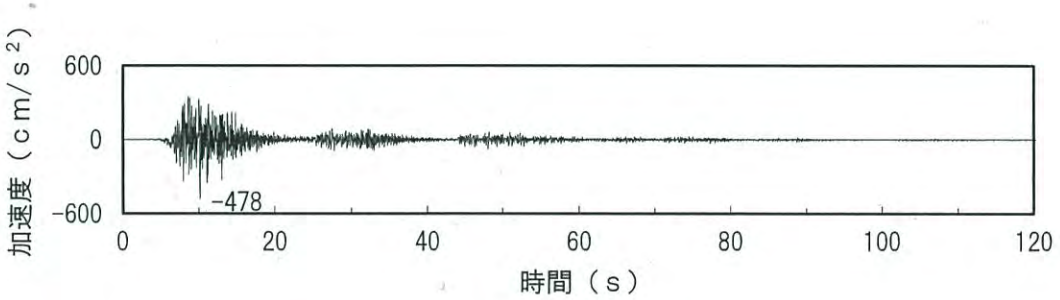


加速度（鉛直方向：Ss-2-1(UD)）

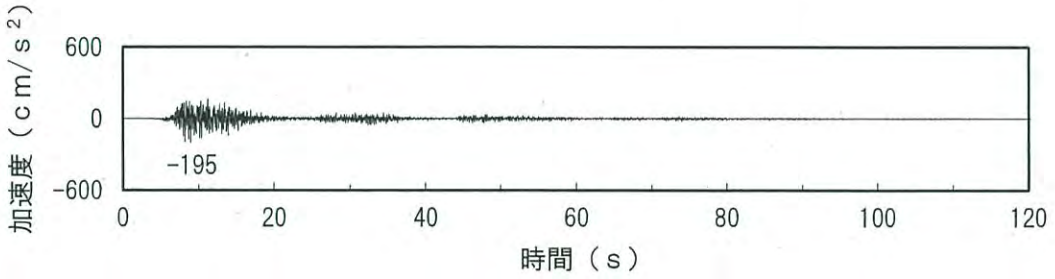
第４図　基準地震動Ss-2-1の時刻歴波形



加速度（水平方向：Ss-2-2(NS)）

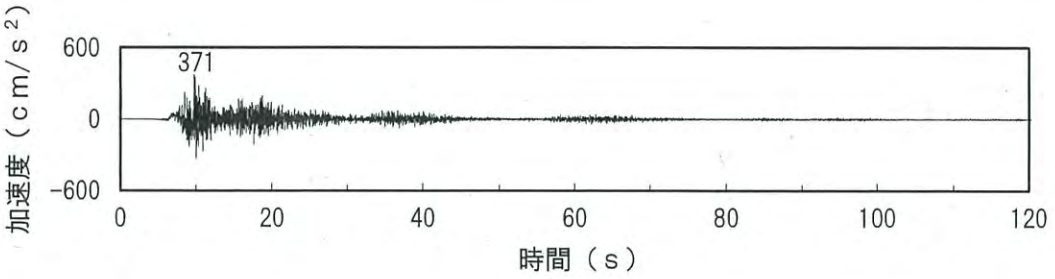


加速度（水平方向：Ss-2-2(EW)）

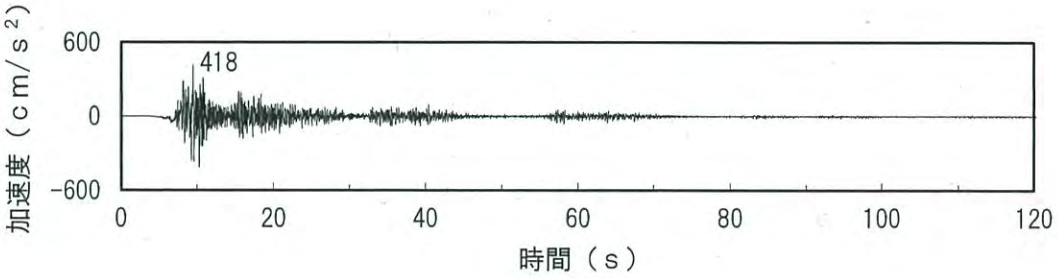


加速度（鉛直方向：Ss-2-2(UD)）

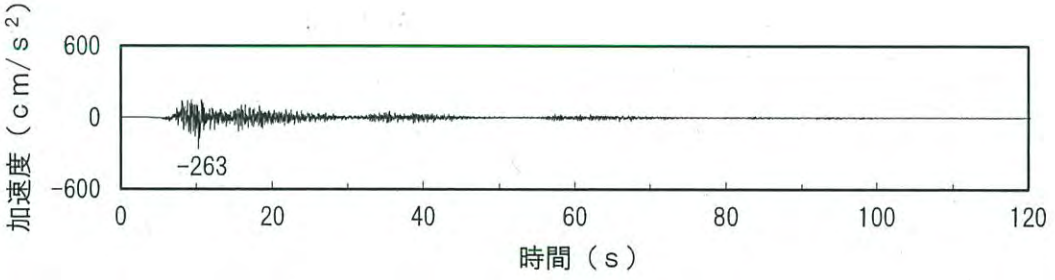
第５図　基準地震動Ss-2-2の時刻歴波形



加速度（水平方向：Ss-2-3(NS)）

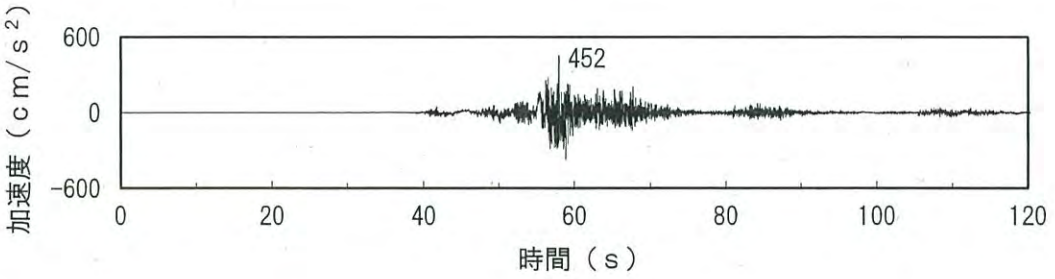


加速度（水平方向：Ss-2-3(EW)）

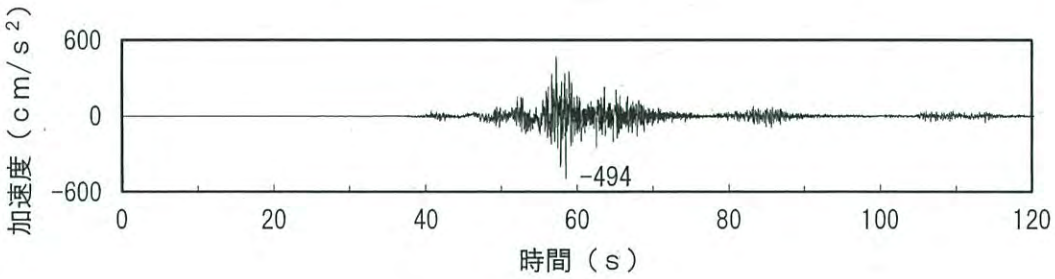


加速度（鉛直方向：Ss-2-3(UD)）

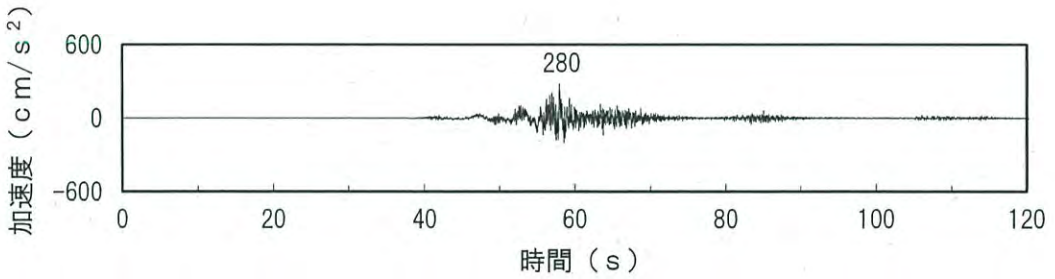
第６図　基準地震動Ss-2-3の時刻歴波形



加速度（水平方向：Ss-2-4(NS)）

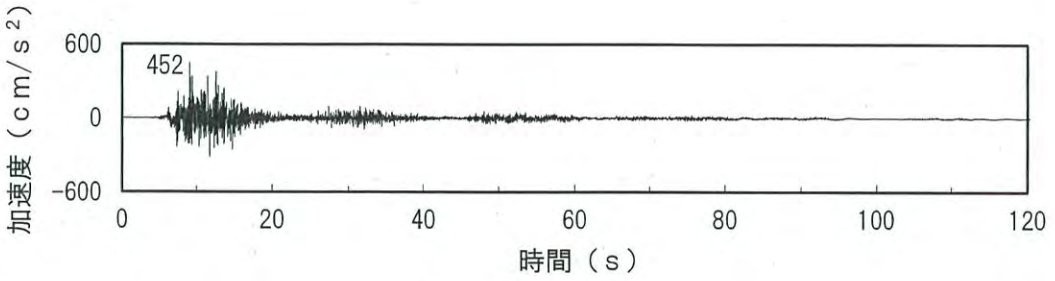


加速度（水平方向：Ss-2-4(EW)）

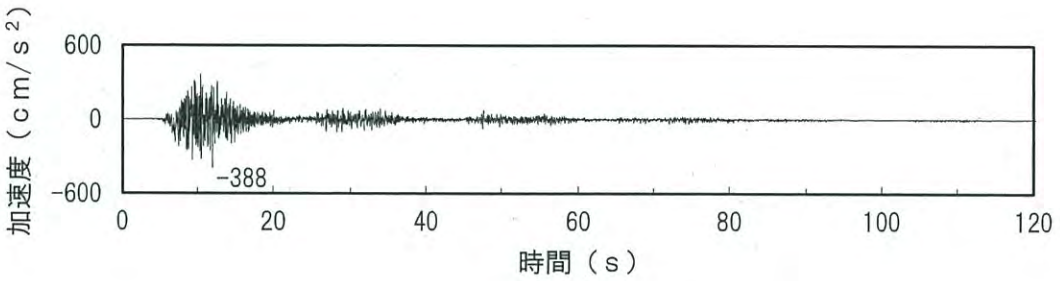


加速度（鉛直方向：Ss-2-4(UD)）

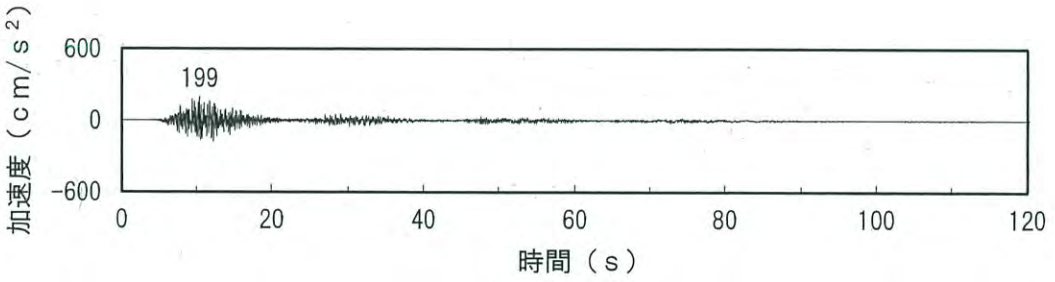
第７図　基準地震動Ss-2-4の時刻歴波形



加速度（水平方向：Ss-2-5(NS)）

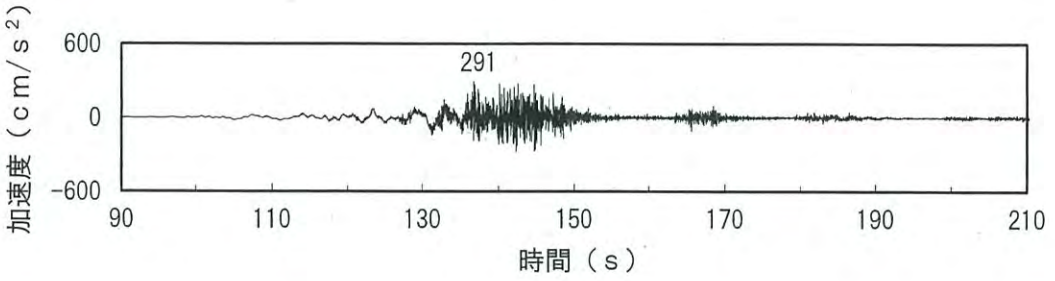


加速度（水平方向：Ss-2-5(EW)）

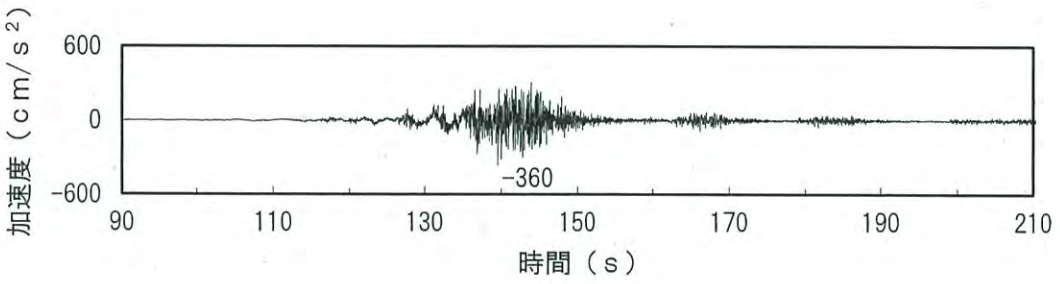


加速度（鉛直方向：Ss-2-5(UD)）

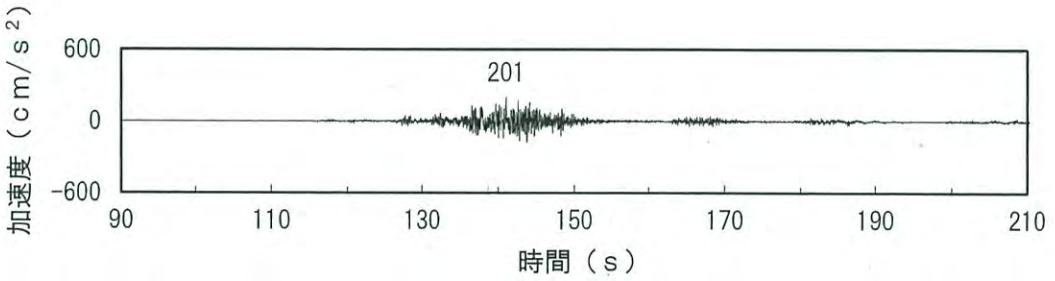
第８図　基準地震動Ss-2-5の時刻歴波形



加速度（水平方向：Ss-2-6(NS)）

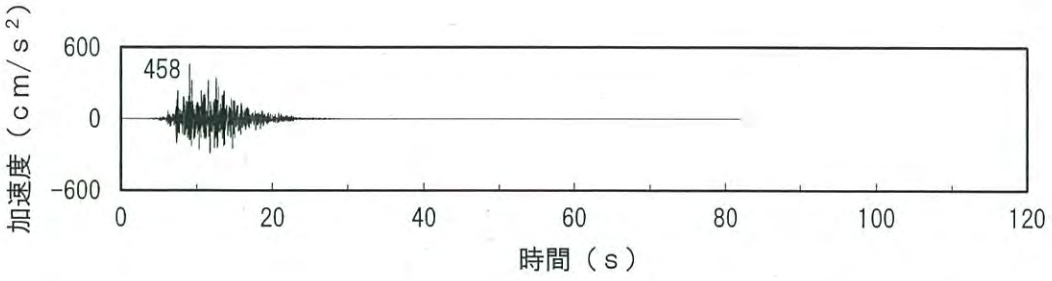


加速度（水平方向：Ss-2-6(EW)）

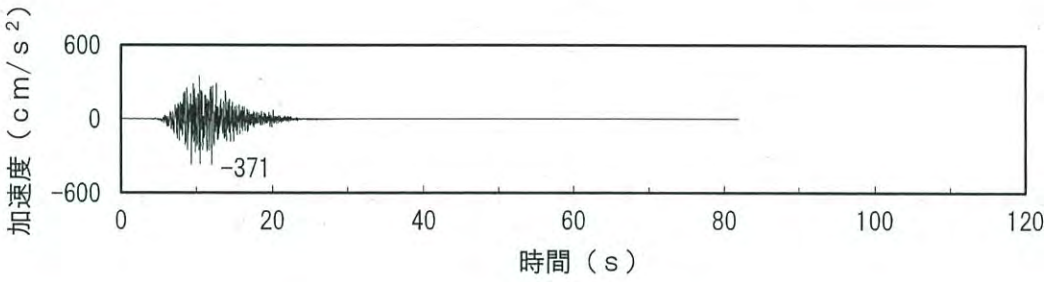


加速度（鉛直方向：Ss-2-6(UD)）

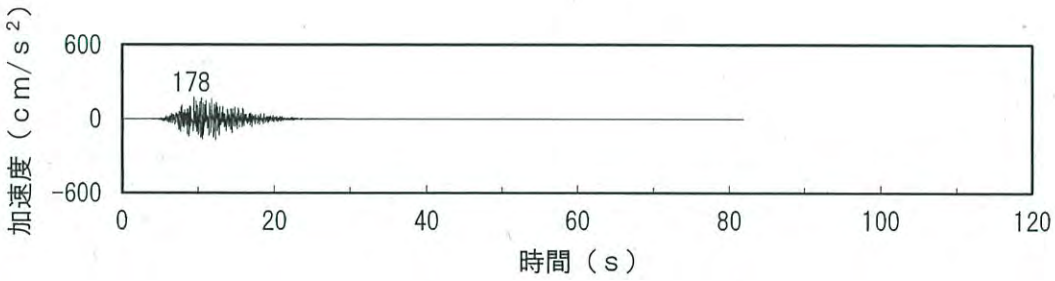
第９図　基準地震動Ss-2-6の時刻歴波形



加速度（水平方向：Ss-2-7(NS)）

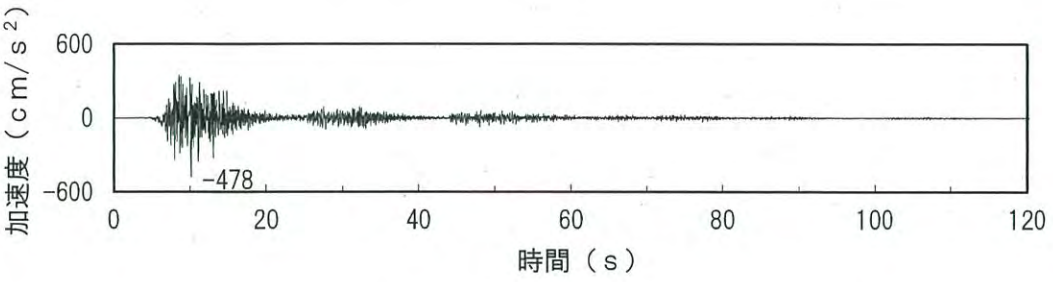


加速度（水平方向：Ss-2-7(EW)）

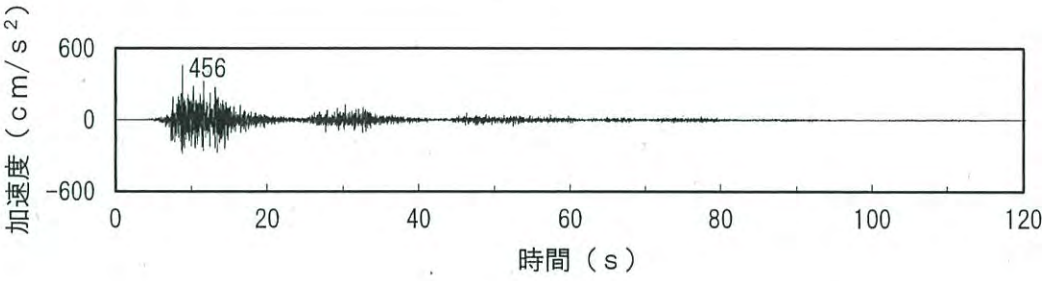


加速度（鉛直方向：Ss-2-7(UD)）

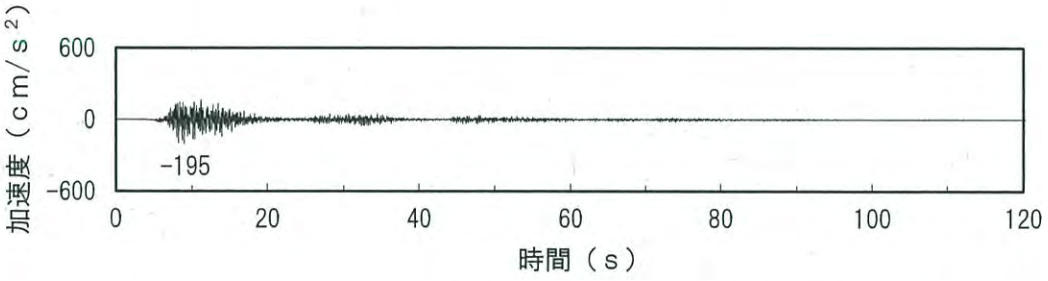
第１０図　基準地震動Ss-2-7の時刻歴波形



加速度（水平方向：Ss-2-8(NS)）

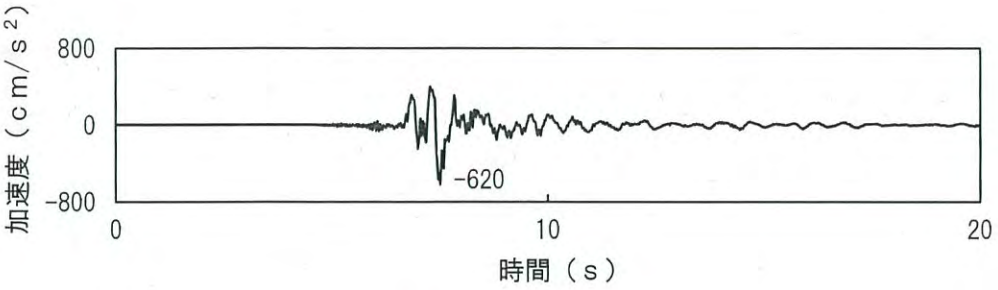


加速度（水平方向：Ss-2-8(EW)）

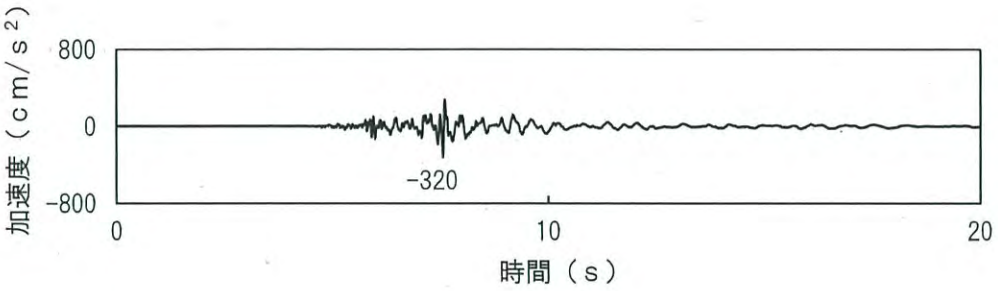


加速度（鉛直方向：Ss-2-8(UD)）

第１１図　基準地震動Ss-2-8の時刻歴波形

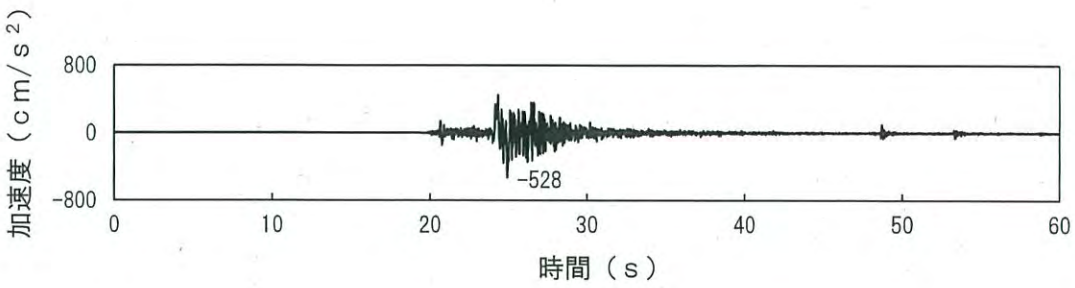


加速度（水平方向：Ss-3-1）

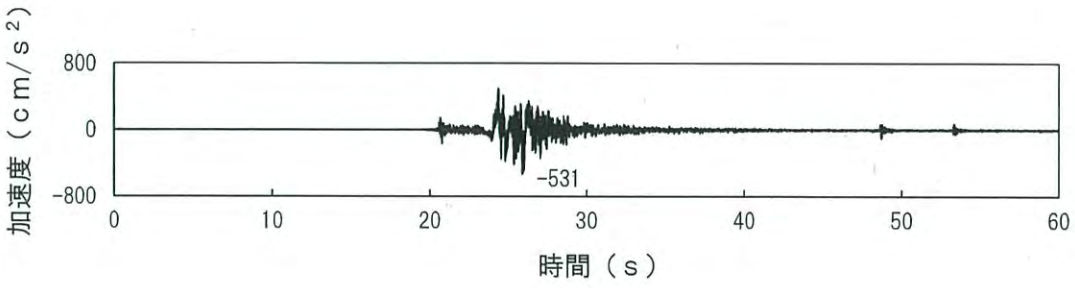


加速度（鉛直方向：Ss-3-1）

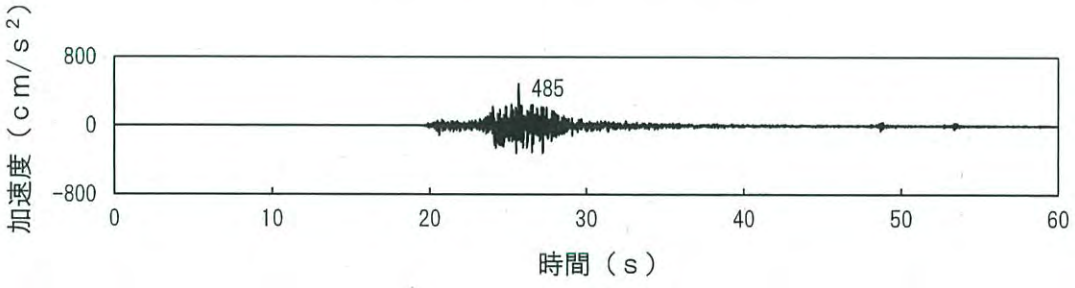
第１２図　基準地震動Ss-3-1の時刻歴波形



加速度（水平方向：Ss-3-2(NS)）



加速度（水平方向：Ss-3-2(EW)）



加速度（鉛直方向：Ss-3-2(UD)）

第１３図　基準地震動Ss-3-2の時刻歴波形

（2）安全設計方針

1.4 耐震設計

1.4.1 設計基準対象施設の耐震設計

1.4.1.1 設計基準対象施設の耐震設計の基本方針

設計基準対象施設の耐震設計は，以下の項目に従って行う。

(1) 地震により生じるおそれがあるその安全機能の喪失に起因する放射線による公衆への影響の程度が特に大きいもの(以下「耐震重要施設」という。)及び使用済燃料乾式貯蔵容器は，基準地震動による地震力に対して，その安全機能が損なわれるおそれがないように設計する。

(2) 設計基準対象施設は，地震により発生するおそれがある安全機能の喪失（地震に伴って発生するおそれがある津波及び周辺斜面の崩壊等による安全機能の喪失を含む。）及びそれに続く放射線による公衆への影響を防止する観点から，各施設の安全機能が喪失した場合の影響の相対的な程度（以下「耐震重要度」という。）に応じて，耐震重要度分類をＳクラス，Ｂクラス及びＣクラスに分類し，それぞれに応じた地震力に十分耐えられるように設計する。

(3) 建物・構築物については，耐震重要度分類の各クラスに応じて算定する地震力が作用した場合においても，接地圧に対する十分な支持力を有する地盤に設置する。

なお，建物・構築物とは，建物，構築物及び土木構造物（屋外重要土木構造物及びその他の土木構造物）の総称とする。

また，屋外重要土木構造物とは，耐震安全上重要な機器・配管系の間接支持機能，若しくは非常時における海水の通水機能を求められる土木構造物をいう。

(4) Ｓクラスの施設（(6)に記載のものを除く。）は，基準地震動による地震力に対してその安全機能が保持できる設計とする。

また，弾性設計用地震動による地震力又は静的地震力のいずれか大きい方の地震力に対しておおむね弾性状態に留まる範囲で耐えられる設計とする。

(5) Ｓクラスの施設（(6)に記載のものを除く。）について，静的地震力は，水平地震力と鉛直地震力が同時に不利な方向の組合せで作用するものとする。

また，基準地震動及び弾性設計用地震動による地震力は，水平２方向及び鉛直方向について適切に組み合わせて算定するものとする。なお，水平２方向及び鉛直方向の地震力が同時に作用し，影響が考えられる施設，設備については許容限界の範囲内に留まることを確認する。

(6) 屋外重要土木構造物，津波防護機能を有する設備(以下「津波防護施設」という。)，浸水防止機能を有する設備（以下「浸水防止設備」という。），敷地における津波監視機能を有する施設（以下「津波監視設備」という。），浸水防止設備が設置された建物・構築物及び使用済燃料乾式貯蔵容器は，基準地震動による地震力に対して，それぞれの施設及び設備に要求される機能が保持できるように設計する。なお，基準地震動の水平２方向及び鉛直方向の地震力の組合せについては，Ｓクラス施設

と同様とする。

また，重大事故等対処施設（特定重大事故等対処施設を含む。）を津波から防護するための津波防護施設，浸水防止設備及び津波監視設備並びに浸水防止設備が設置された建物・構築物についても同様の設計方針とする。

(7) Bクラスの施設は，静的地震力に対しておおむね弾性状態に留まる範囲で耐えられるように設計する。

また，共振のおそれのある施設については，その影響についての検討を行う。その場合，検討に用いる地震動は，弾性設計用地震動に２分の１を乗じたものとする。なお，当該地震動による地震力は，水平２方向及び鉛直方向について適切に組み合わせて算定するものとし，Sクラス施設と同様に許容限界の範囲内に留まることを確認する。

(8) Cクラスの施設は，静的地震力に対しておおむね弾性状態に留まる範囲で耐えられるように設計する。

(9) 耐震重要施設は，耐震重要度分類の下位のクラスに属するものの波及的影響によって，その安全機能を損なわないように設計する。また，使用済燃料乾式貯蔵容器は，周辺施設等の波及的影響によって，その安全機能を損なわないように設計する。

(10) 設計基準対象施設の構造計画及び配置計画に際しては，地震の影響が低減されるように考慮する。

(11) 炉心内の燃料被覆材の放射性物質の閉じ込めの機能については，以下のとおり設計する。

弾性設計用地震動による地震力又は静的地震力のいずれか大きい方の地震力に対して，炉心内の燃料被覆材の応答が全体的におおむね弾性状態に留まるように設計する。

基準地震動による地震力に対して，放射性物質の閉じ込めの機能に影響を及ぼさないように設計する。

1.4.1.2 耐震重要度分類

設計基準対象施設の耐震重要度を，次のように分類する。

(1) Sクラスの施設

地震により発生するおそれがある事象に対して，原子炉を停止し，炉心を冷却するために必要な機能を持つ施設，自ら放射性物質を内蔵している施設，当該施設に直接関係しておりその機能喪失により放射性物質を外部に拡散する可能性のある施設，これらの施設の機能喪失により事故に至った場合の影響を緩和し，放射線による公衆への影響を軽減するために必要な機能を持つ施設及びこれらの重要な安全機能を支援するために必要となる施設，並びに地震に伴って発生するおそれがある津波による安全機能の喪失を防止するために必要となる施設であって，その影響が大きいものであり，次の施設を含む。

・原子炉冷却材圧力バウンダリを構成する機器・配管系
・使用済燃料を貯蔵するための施設
・原子炉の緊急停止のために急激に負の反応度を付加するための施設及び原子炉の停止状態を維持するための施設
・原子炉停止後，炉心から崩壊熱を除去するための施設
・原子炉冷却材圧力バウンダリ破損事故後，炉心から崩壊熱を除去するための施設
・原子炉冷却材圧力バウンダリ破損事故の際に，圧力障壁となり放射性物質の放散を直接防ぐための施設
・放射性物質の放出を伴うような事故の際に，その外部放散を抑制するための施設であり，上記の「放射性物質の放散を直接防ぐための施設」以外の施設
・津波防護施設及び浸水防止設備
・津波監視設備

(2)　Bクラスの施設

安全機能を有する施設のうち，機能喪失した場合の影響がSクラスの施設と比べ小さい施設であり，次の施設を含む。

・原子炉冷却材圧力バウンダリに直接接続されていて，１次冷却材を内蔵しているか又は内蔵し得る施設
・放射性廃棄物を内蔵している施設（ただし，内蔵量が少ないか又は貯蔵方式により，その破損により公衆に与える放射線の影響が「実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則（昭和53年通商産業省令第77号）」第２条第２項第６号に規定する「周辺監視区域」外における年間の線量限度に比べ十分小さいものは除く。）
・放射性廃棄物以外の放射性物質に関連した施設で，その破損により，公衆及び従事者に過大な放射線被ばくを与える可能性のある施設
・使用済燃料を冷却するための施設
・放射性物質の放出を伴う場合に，その外部放散を抑制するための施設で，Sクラスに属さない施設

(3)　Cクラスの施設

Sクラスに属する施設及びBクラスに属する施設以外の一般産業施設又は公共施設と同等の安全性が要求される施設である。

上記に基づくクラス別施設を第1.4.1表に示す。

なお，同表には当該施設を支持する構造物の支持機能が維持されることを確認する地震動及び波及的影響を考慮すべき施設に適用する地震動についても併記する。

1.4.1.3 地震力の算定方法

設計基準対象施設の耐震設計に用いる地震力の算定は以下の方法による。

(1)　静的地震力

静的地震力は，Ｓクラスの施設（津波防護施設，浸水防止設備，津波監視設備，浸水防止設備が設置された建物・構築物及び使用済燃料乾式貯蔵容器を除く。），Ｂクラス及びＣクラスの施設に適用することとし，それぞれ耐震重要度分類に応じて次の地震層せん断力係数Ｃｉ及び震度に基づき算定する。

a.　建物・構築物

水平地震力は，地震層せん断力係数Ｃｉに，次に示す施設の耐震重要度分類に応じた係数を乗じ，さらに当該層以上の重量を乗じて算定するものとする。

Ｓクラス　3.0

Ｂクラス　1.5

Ｃクラス　1.0

ここで，地震層せん断力係数Ｃｉは，標準せん断力係数Ｃ０を0.2 以上とし，建物・構築物の振動特性及び地盤の種類等を考慮して求められる値とする。また，必要保有水平耐力の算定においては，地震層せん断力係数Ｃｉに乗じる施設の耐震重要度分類に応じた係数は，Ｓクラス，Ｂクラス及びＣクラスともに1.0 とし，その際に用いる標準せん断力係数Ｃ０は1.0 以上とする。Ｓクラスの施設については，水平地震力と鉛直地震力が同時に不利な方向の組合せで作用するものとする。鉛直地震力は，震度0.3 以上を基準とし，建物・構築物の振動特性及び地盤の種類等を考慮し，高さ方向に一定として求めた鉛直震度より算定するものとする。

ただし，土木構造物の静的地震力は，安全上適切と認められる規格及び基準を参考に，Ｃクラスに適用される静的地震力を適用する。

b.　機器・配管系

静的地震力は，上記a. に示す地震層せん断力係数Ｃｉに施設の耐震重要度分類に応じた係数を乗じたものを水平震度として，当該水平震度及び上記a. の鉛直震度をそれぞれ20%増しとした震度より求めるものとする。

なお，Ｓクラスの施設については，水平地震力と鉛直地震力は同時に不利な方向の組合せで作用するものとする。ただし，鉛直震度は高さ方向に一定とする。

上記a. 及びb. の標準せん断力係数Ｃ０等の割増し係数の適用については，耐震性向上の観点から，一般産業施設及び公共施設等の耐震基準との関係を考慮して設定する。

(2)　動的地震力

動的地震力は，Ｓクラスの施設，屋外重要土木構造物及びＢクラスの施設のうち共振のおそれのあるものに適用することとし，基準地震動及び弾性設計用地震動から定める入力地震動を入力として，動的解析により水平２方向及び鉛直方向について適切に組み合わせて算定する。なお，地震力の組合せについては水平２方向及び

鉛直方向の地震力が同時に作用するものとし，影響が考えられる施設，設備に対して許容限界の範囲内に留まることを確認する。

Ｂクラスの施設のうち共振のおそれのあるものについては，弾性設計用地震動から定める入力地震動の振幅を２分の１にしたものによる地震力を適用する。

屋外重要土木構造物，津波防護施設，浸水防止設備，津波監視設備，浸水防止設備が設置された建物・構築物及び使用済燃料乾式貯蔵容器については，基準地震動による地震力を適用する。

「添付書類六 5. 地震」に示す基準地震動は，「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」及び「震源を特定せず策定する地震動」について，解放基盤表面における水平方向及び鉛直方向の地震動としてそれぞれ策定し，年超過確率は，10^{-4}～10^{-6}程度である。

また，弾性設計用地震動は，基準地震動との応答スペクトルの比率が目安として0.5を下回らないよう基準地震動に係数0.53を乗じて設定する。ここで，係数0.53は工学的判断として，原子炉施設の安全機能限界と弾性限界に対する入力荷重の比率が0.5程度であるという知見(10)を踏まえ，さらに「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針（昭和56年7月20日原子力安全委員会決定，平成13年3月29日一部改訂）」における基準地震動S_1の応答スペクトルをおおむね下回らないよう配慮した値とする。また，建物・構築物及び機器・配管系ともに0.53を採用することで，弾性設計用地震動に対する設計に一貫性をとる。なお，弾性設計用地震動の年超過確率は，10^{-3}～10^{-5}程度である。弾性設計用地震動の応答スペクトルを第1.4.1図及び第1.4.2図に，弾性設計用地震動の時刻歴波形を第1.4.3図～第1.4.13図に，弾性設計用地震動と基準地震動S_1の応答スペクトルの比較を第1.4.14図に，弾性設計用地震動と解放基盤表面における地震動の一様ハザードスペクトルの比較を第1.4.15図及び第1.4.16図に示す。

a. 入力地震動

解放基盤表面は，地盤調査の結果から，0.7km/s以上のＳ波速度（2.6km/s）を持つ堅固な岩盤が十分な拡がりと深さを持っていることが確認されているため，敷地標高を考慮してEL.+10mとしている。

建物・構築物の地震応答解析における入力地震動は，解放基盤表面で定義される基準地震動及び弾性設計用地震動を基に，対象建物・構築物の地盤条件を適切に考慮したうえで，必要に応じ２次元ＦＥＭ解析又は１次元波動論により，地震応答解析モデルの入力位置で評価した入力地震動を設定する。地盤条件を考慮する場合には，地震動評価で考慮した敷地全体の地下構造との関係にも留意し，地盤の非線形応答に関する動的変形特性を考慮する。また，必要に応じ敷地における観測記録による検証や最新の科学的・技術的知見を踏まえ設定する。

b. 地震応答解析

(a)　動的解析法

i.　建物・構築物

動的解析による地震力の算定に当たっては，地震応答解析手法の適用性，適用限界等を考慮のうえ，適切な解析法を選定するとともに，建物・構築物に応じた適切な解析条件を設定する。建物・構築物の地震応答解析及び床応答曲線の策定に用いる動的解析は，原則として，線形解析及び非線形解析に適用可能な時刻歴応答解析法による。また，３次元応答性状等の評価は，線形解析に適用可能な周波数応答解析法による。

建物・構築物の動的解析に当たっては，建物・構築物の剛性はそれらの形状，構造特性等を十分考慮して評価し，集中質点系等に置換した解析モデルを設定する。

動的解析には，建物・構築物と地盤との相互作用を考慮するものとし，解析モデルの地盤のばね定数は，基礎版の平面形状，地盤の剛性等を考慮して定める。設計用地盤定数は，原則として，弾性波試験によるものを用いる。

地盤－建物・構築物連成系の減衰定数は，振動エネルギの地下逸散及び地震応答における各部の歪みレベルを考慮して定める。

基準地震動及び弾性設計用地震動に対する応答解析において，主要構造要素がある程度以上弾性範囲を超える場合には，実験等の結果に基づき，該当する建物部分の構造特性に応じて，その弾塑性挙動を適切に模擬した復元力特性を考慮した応答解析を行う。

また，Ｓクラスの施設を支持する建物・構築物の支持機能を検討するための動的解析において，施設を支持する建物・構築物の主要構造要素がある程度以上弾性範囲を超える場合には，その弾塑性挙動を適切に模擬した復元力特性を考慮した応答解析を行う。

応答解析に用いる材料定数については，地盤の諸定数も含めて不確かさによる変動幅を適切に考慮する。また，必要に応じて建物・構築物及び機器・配管系の設計用地震力に及ぼす影響を検討する。

原子炉建屋及び原子炉補助建屋については，３次元ＦＥＭ解析等から，建物・構築物の３次元応答性状及び機器・配管系への影響を評価する。

屋外重要土木構造物の動的解析は，構造物と地盤の相互作用を考慮できる連成系の地震応答解析手法とし，地盤及び構造物の地震時における非線形挙動の有無や程度に応じて，線形，等価線形，非線形解析のいずれかにて行う。

なお，地震力については，水平２方向及び鉛直方向について適切に組み合わせて算定する。

ii.　機器・配管系

動的解析による地震力の算定に当たっては，地震応答解析手法の適用性，適用

限界等を考慮のうえ，適切な解析法を選定するとともに，解析条件として考慮すべき減衰定数，剛性等の各種物性値は，適切な規格及び基準，あるいは実験等の結果に基づき設定する。

機器の解析に当たっては，形状，構造特性等を考慮して，代表的な振動モードを適切に表現できるよう１質点系，多質点系モデル等に置換し，設計用床応答曲線を用いたスペクトルモーダル解析法又は時刻歴応答解析法により応答を求める。配管系については，熱的条件及び口径から高温配管又は低温配管に分類し，その仕様に応じて適切なモデルに置換し，設計用床応答曲線を用いたスペクトルモーダル解析法又は時刻歴応答解析法により応答を求める。スペクトルモーダル解析法又は時刻歴応答解析法の選択に当たっては，衝突・すべり等の非線形現象を模擬する場合等には時刻歴応答解析法を用いる等，解析対象とする現象，対象設備の振動特性・構造特性等を考慮し適切に選定する。

また，設備の３次元的な広がりを踏まえ，適切に応答を評価できるモデルを用い，水平２方向及び鉛直方向の応答成分について適切に組み合わせるものとする。

なお，剛性の高い機器は，その機器の設置床面の最大応答加速度の 1.2 倍の加速度を震度として作用させて地震力を算定する。

(3)　設計用減衰定数

応答解析に用いる減衰定数は，安全上適切と認められる規格及び基準，既往の振動実験，地震観測の調査結果等を考慮して適切な値を定める。

なお，建物・構築物の応答解析に用いる鉄筋コンクリートの減衰定数の設定については，既往の知見に加え，既設施設の地震観測記録等により，その妥当性を検討する。

また，屋外重要土木構造物の地震応答解析に用いる鉄筋コンクリートの減衰定数については，地盤と構造物の連成系解析モデルにおける工学的な判断を踏まえて妥当性を検討する。

1.4.1.4 荷重の組合せと許容限界

設計基準対象施設の耐震設計における荷重の組合せと許容限界は以下による。

(1) 耐震設計上考慮する状態

地震以外に設計上考慮する状態を次に示す。

a. 建物・構築物

(a) 運転時の状態

発電用原子炉施設が運転状態にあり，通常の自然条件下におかれている状態

ただし，運転状態には通常運転時，運転時の異常な過渡変化時を含むものとする。

(b)　設計基準事故時の状態

発電用原子炉施設が設計基準事故時にある状態

(c) 設計用自然条件

設計上基本的に考慮しなければならない自然条件（積雪，風等）

b. 機器・配管系

(a) 通常運転時の状態

発電用原子炉の起動，停止，出力運転，高温待機及び燃料取替等が計画的又は頻繁に行われた場合であって運転条件が所定の制限値以内にある運転状態

(b) 運転時の異常な過渡変化時の状態

通常運転時に予想される機器の単一の故障若しくはその誤作動又は運転員の単一の誤操作及びこれらと類似の頻度で発生すると予想される外乱によって発生する異常な状態であって，当該状態が継続した場合には炉心又は原子炉冷却材圧力バウンダリの著しい損傷が生じるおそれがあるものとして安全設計上想定すべき事象が発生した状態

(c) 設計基準事故時の状態

発生頻度が運転時の異常な過渡変化より低い異常な状態であって，当該状態が発生した場合には発電用原子炉施設から多量の放射性物質が放出するおそれがあるものとして安全設計上想定すべき事象が発生した状態

(d) 設計用自然条件

設計上基本的に考慮しなければならない自然条件（積雪，風等）

(2) 荷重の種類

a. 建物・構築物

(a) 発電用原子炉のおかれている状態にかかわらず常時作用している荷重，すなわち固定荷重，積載荷重，土圧，水圧及び通常の気象条件による荷重

(b) 運転時の状態で施設に作用する荷重

(c) 設計基準事故時の状態で施設に作用する荷重

(d) 地震力，風荷重，積雪荷重等

ただし，運転時及び設計基準事故時の荷重には，機器・配管系から作用する荷重が含まれるものとし，地震力には，地震時土圧，機器・配管系からの反力，スロッシング等による荷重が含まれるものとする。

b. 機器・配管系

(a) 通常運転時の状態で作用する荷重

(b) 運転時の異常な過渡変化時の状態で作用する荷重

(c) 設計基準事故時の状態で作用する荷重

(d) 地震力，風荷重，積雪荷重等

(3) 荷重の組合せ

地震力と他の荷重との組合せは次による。

a. 建物・構築物（c. に記載のものを除く。）

(a) Sクラスの建物・構築物については，常時作用している荷重及び運転時の状態で施設に作用する荷重と地震力とを組み合わせる。

(b) Sクラスの建物・構築物については，常時作用している荷重及び設計基準事故時の状態で施設に作用する荷重のうち長時間その作用が続く荷重と弾性設計用地震動による地震力又は静的地震力とを組み合わせる。

(c) Bクラス及びCクラスの建物・構築物については，常時作用している荷重及び運転時の状態で施設に作用する荷重と，動的地震力又は静的地震力とを組み合わせる。

b. 機器・配管系（c. に記載のものを除く。）

(a) Sクラスの機器・配管系については，通常運転時の状態で作用する荷重と地震力とを組み合わせる。

(b) Sクラスの機器・配管系については，運転時の異常な過渡変化時の状態及び設計基準事故時の状態のうち地震によって引き起こされるおそれのある事象によって作用する荷重と地震力とを組み合わせる。

(c) Sクラスの機器・配管系については，運転時の異常な過渡変化時の状態及び設計基準事故時の状態で作用する荷重のうち地震によって引き起こされるおそれのない事象であっても，いったん事故が発生した場合，長時間継続する事象による荷重は，その事故事象の発生確率，継続時間及び地震動の超過確率の関係を踏まえ，適切な地震力と組み合わせる。

(d) Bクラス及びCクラスの機器・配管系については，通常運転時の状態で作用する荷重及び運転時の異常な過渡変化時の状態で作用する荷重と，動的地震力又は静的地震力とを組み合わせる。

c. 津波防護施設，浸水防止設備及び津波監視設備並びに浸水防止設備が設置された建物・構築物

(a) 津波防護施設及び浸水防止設備が設置された建物・構築物については，常時作用している荷重及び運転時の状態で作用する荷重と基準地震動による地震力とを組み合わせる。

(b) 浸水防止設備及び津波監視設備については，常時作用している荷重及び運転時の状態で作用する荷重等と基準地震動による地震力とを組み合わせる。

なお，上記（a），（b）については，地震と津波が同時に作用する可能性について検討し，必要に応じて基準地震動による地震力と津波による荷重の組合せを考慮する。また，津波以外による荷重については，「（2）荷重の種類」に準じるものとする。

d. 荷重の組合せ上の留意事項

(a) Sクラスの施設に作用する地震力のうち動的地震力については，水平２方向

と鉛直方向の地震力とを適切に組み合わせ算定するものとする。

(b) ある荷重の組合せ状態での評価が明らかに厳しいことが判明している場合には，その他の荷重の組合せ状態での評価は行わないことがある。

(c) 複数の荷重が同時に作用する場合，それらの荷重による応力の各ピークの生起時刻に明らかなずれがあることが判明しているならば，必ずしもそれぞれの応力のピーク値を重ねなくてもよいものとする。

(d) 上位の耐震クラスの施設を支持する建物・構築物の当該部分の支持機能を確認する場合においては，支持される施設の耐震クラスに応じた地震力と常時作用している荷重，運転時の状態で施設に作用する荷重及びその他必要な荷重とを組み合わせる。

なお，第1.4.1表に対象となる建物・構築物及びその支持機能が維持されていることを検討すべき地震動等について記載する。

(e) 地震と組み合わせる自然現象として，風及び積雪を考慮し，風荷重及び積雪荷重については，施設の設置場所，構造等を考慮して，地震荷重と組み合わせる。

(4) 許容限界

各施設の地震力と他の荷重とを組み合わせた状態に対する許容限界は次のとおりとし，安全上適切と認められる規格及び基準又は試験等で妥当性が確認されている許容応力等を用いる。

a. 建物・構築物（c. に記載のものを除く。）

(a) Sクラスの建物・構築物

i. 弾性設計用地震動による地震力又は静的地震力との組合せに対する許容限界

建築基準法などの安全上適切と認められる規格及び基準による許容応力度を許容限界とする。

ii. 基準地震動による地震力との組合せに対する許容限界

構造物全体としての変形能力（終局耐力時の変形）について十分な余裕を有し，建物・構築物の終局耐力に対して妥当な安全余裕を持たせることとする。

なお，終局耐力は，建物・構築物に対する荷重又は応力を漸次増大していくとき，その変形又は歪みが著しく増加するに至る限界の最大耐力とし，既往の実験式等に基づき適切に定めるものとする。

(b) Bクラス及びCクラスの建物・構築物（(e)，(f)に記載のものを除く。）

上記(a) i. による許容応力度を許容限界とする。

(c) 耐震クラスの異なる施設を支持する建物・構築物（(e)，(f)に記載のものを除く。）

上記（a）ⅱ．を適用するほか，耐震クラスの異なる施設がそれを支持する建物・構築物の変形等に対して，その支持機能を損なわないものとする。

なお，当該施設を支持する建物・構築物の支持機能が維持されることを確認する際の地震動は，支持される施設に適用される地震動とする。

（d） 建物・構築物の保有水平耐力（（e），（f）に記載のものを除く。）

建物・構築物については，当該建物・構築物の保有水平耐力が必要保有水平耐力に対して耐震重要度に応じた安全余裕を有していることを確認する。

（e） 屋外重要土木構造物

ⅰ． 静的地震力との組合せに対する許容限界

安全上適切と認められる規格及び基準による許容応力度を許容限界とする。

ⅱ． 基準地震動による地震力との組合せに対する許容限界

構造部材の曲げについては，曲げ耐力，限界層間変形角又は圧縮縁コンクリート限界ひずみに対して妥当な安全余裕を持たせることとし，構造部材のせん断については，せん断耐力に対して妥当な安全余裕を持たせることとする。ただし，構造部材の曲げ，せん断に対して，許容応力度を適用することで，安全余裕を持たせることもある。

なお，それぞれの安全余裕については，各施設の機能要求等を踏まえ設定する。

（f） その他の土木構造物

安全上適切と認められる規格及び基準による許容応力度を許容限界とする。

b．機器・配管系（c．に記載のものを除く。）

（a） Ｓクラスの機器・配管系（（c），（d），（e）に記載のものを除く。）

ⅰ．弾性設計用地震動による地震力又は静的地震力との組合せに対する許容限界

応答が全体的におおむね弾性状態に留まることとする。

ただし，１次冷却材喪失事故時に作用する荷重との組合せ（原子炉格納容器及び非常用炉心冷却設備等における長期的荷重との組合せを除く。）に対しては，下記ⅱ．に示す許容限界を適用する。

ⅱ．基準地震動による地震力との組合せに対する許容限界

塑性ひずみが生じる場合であっても，その量が小さなレベルに留まって破断延性限界に十分な余裕を有し，その施設に要求される機能に影響を及ぼすことがないように応力，荷重等を制限する。

また，地震時又は地震後に動的機能が要求される機器等については，基準地震動による応答に対して，実証試験等により確認されている機能確認済加速度等を許容限界とする。

（b） Ｂクラス及びＣクラスの機器・配管系

応答が全体的におおむね弾性状態に留まることとする。

(c) 燃料集合体

地震時に作用する荷重に対して，燃料集合体の１次冷却材流路を維持できること及び過大な変形や破損を生じることにより制御棒の挿入が阻害されることがないことを確認する。

(d) 燃料被覆材

炉心内の燃料被覆材の放射性物質の閉じ込めの機能については，以下のとおり確認する。

通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時に生じるそれぞれの荷重と，弾性設計用地震動による地震力又は静的地震力のいずれか大きい方の地震力を組み合わせた荷重条件に対して，炉心内の燃料被覆材の応答が全体的におおむね弾性状態に留まることを確認する。

通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時に生じるそれぞれの荷重と基準地震動による地震力を組み合わせた荷重条件により塑性ひずみが生じる場合であっても，その量が小さなレベルに留まって破断延性限界に十分な余裕を有し，放射性物質の閉じ込めの機能に影響を及ぼさないことを確認する。

(e) 使用済燃料乾式貯蔵容器

自重その他の貯蔵時に想定される荷重と，基準地震動による地震力を組み合わせた荷重条件に対して，当該使用済燃料乾式貯蔵容器に要求される機能を保持することを以下のとおり確認する。

密封境界部については，おおむね弾性状態に留まることを確認する。

使用済燃料乾式貯蔵容器の臨界防止機能を担保しているバスケットについては，臨界防止上有意な変形を起こさないことを確認する。

密封境界部以外の部位については，塑性ひずみが生じる場合であっても，その量が小さなレベルに留まって破断延性限界に十分な余裕を有することを確認する。

c. 津波防護施設，浸水防止設備及び津波監視設備並びに浸水防止設備が設置された建物・構築物

津波防護施設及び浸水防止設備が設置された建物・構築物については，当該施設及び建物・構築物が構造全体としての変形能力（終局耐力時の変形）について十分な余裕を有するとともに，その施設に要求される機能（津波防護機能及び浸水防止機能）が保持できることを確認する。

浸水防止設備及び津波監視設備については，その設備に要求される機能（浸水防止機能及び津波監視機能）が保持できることを確認する。

d. 基礎地盤の支持性能

(a) Ｓクラスの建物・構築物，Ｓクラスの機器・配管系，屋外重要土木構造物，

津波防護施設，浸水防止設備及び津波監視設備並びに浸水防止設備が設置された建物・構築物の基礎地盤

ⅰ．基準地震動による地震力との組合せに対する許容限界

接地圧が，安全上適切と認められる規格及び基準等による地盤の極限支持力度に対して妥当な余裕を有することを確認する。

ⅱ．弾性設計用地震動による地震力又は静的地震力との組合せに対する許容限界（屋外重要土木構造物，津波防護施設，浸水防止設備，津波監視設備，浸水防止設備が設置された建物・構築物及び使用済燃料乾式貯蔵容器の基礎地盤を除く。）

接地圧に対して，安全上適切と認められる規格及び基準等による地盤の短期許容支持力度を許容限界とする。

(b) B，Cクラスの建物・構築物，機器・配管系及びその他の土木構造物の基礎地盤

上記（a）ⅱ．による許容支持力度を許容限界とする。

1.4.1.5 設計における留意事項

(1) 耐震重要施設

耐震重要施設は，耐震重要度分類の下位のクラスに属する施設（以下「下位クラス施設」という。）の波及的影響によって，その安全機能を損なわないように設計する。

波及的影響の評価に当たっては，以下の４つの観点をもとに，敷地全体を俯瞰した調査・検討を行い，耐震重要施設の安全機能を損なわないことを確認する。なお，原子力発電所の地震被害情報をもとに，４つの観点以外に検討すべき事項がないか確認し，新たな検討事項が抽出された場合には，その観点を追加する。

影響評価には，耐震重要施設の設計に用いる地震動又は地震力を適用して評価を行うこととし，地震動又は地震力の選定に当たっては，施設の配置状況，使用時間等を踏まえて適切に設定する。また，水平２方向及び鉛直方向の地震力が同時に作用する場合の影響も考慮して評価する。

a. 設置地盤及び地震応答性状の相違等に起因する不等沈下又は相対変位による影響

(a) 不等沈下

耐震重要施設は，耐震重要施設の設計に用いる地震動又は地震力による下位クラス施設の設置地盤の不等沈下により，その安全機能を損なわないように設計する。

(b) 相対変位

耐震重要施設は，耐震重要施設の設計に用いる地震動又は地震力による下位クラス施設との相対変位により，その安全機能を損なわないように設計する。

b. 耐震重要施設と下位クラス施設との接続部における相互影響

耐震重要施設は，耐震重要施設の設計に用いる地震動又は地震力に対して，接続する下位クラス施設が損傷することにより，その安全機能を損なわないように設計する。

c. 建屋内における下位クラス施設の損傷，転倒及び落下等による耐震重要施設への影響

耐震重要施設は，耐震重要施設の設計に用いる地震動又は地震力による建屋内の下位クラス施設の損傷，転倒及び落下等により，その安全機能を損なわないように設計する。

d. 建屋外における下位クラス施設の損傷，転倒及び落下等による耐震重要施設への影響

(a) 施設の損傷，転倒及び落下等

耐震重要施設は，耐震重要施設の設計に用いる地震動又は地震力による建屋外の下位クラス施設の損傷，転倒及び落下等により，その安全機能を損なわないように設計する。

(b) 周辺斜面の崩壊

耐震重要施設は，耐震重要施設の設計に用いる地震動又は地震力によって生じるおそれがある周辺の斜面の崩壊に対して，その安全機能が損なわれるおそれがない場所に設置する。

(2) 使用済燃料乾式貯蔵容器

使用済燃料乾式貯蔵容器は，周辺施設等の波及的影響によって，その安全機能を損なわないように設計する。

波及的影響の評価に当たっては，以下の３つの観点をもとに，敷地全体を俯瞰した調査・検討を行い，使用済燃料乾式貯蔵容器の安全機能を損なわないことを確認する。なお，原子力発電所の地震被害情報をもとに，３つの観点以外に検討すべき事項がないか確認し，新たな検討事項が抽出された場合には，その観点を追加する。

影響評価には，使用済燃料乾式貯蔵容器の設計に用いる地震動又は地震力を適用して評価を行うこととし，地震動又は地震力の選定に当たっては，施設の配置状況，使用時間等を踏まえて適切に設定する。また，水平２方向及び鉛直方向の地震力が同時に作用する場合の影響も考慮して評価する。

a. 設置地盤及び地震応答性状の相違等に起因する不等沈下又は相対変位による影響

(a) 不等沈下

使用済燃料乾式貯蔵容器は，使用済燃料乾式貯蔵容器の設計に用いる地震動又は地震力による周辺施設等の設置地盤の不等沈下により，その安全機能を損なわないように設計する。

(b) 相対変位

使用済燃料乾式貯蔵容器は，使用済燃料乾式貯蔵容器の設計に用いる地震動又は地震力による周辺施設等との相対変位により，その安全機能を損なわないように設計する。

b. 使用済燃料乾式貯蔵容器間の相互影響

使用済燃料乾式貯蔵容器は，使用済燃料乾式貯蔵容器の設計に用いる地震動又は地震力による隣接する使用済燃料乾式貯蔵容器との相互影響により，その安全機能を損なわないように設計する。

c. 使用済燃料乾式貯蔵容器と周辺施設等との相互影響

(a) 周辺施設等の損傷，転倒及び落下等による使用済燃料乾式貯蔵容器への影響

使用済燃料乾式貯蔵容器は，使用済燃料乾式貯蔵容器の設計に用いる地震動又は地震力による周辺施設等の損傷，転倒及び落下等により，その安全機能を損なわないように設計する。

また，周辺施設等のうち，使用済燃料乾式貯蔵建屋は，使用済燃料乾式貯蔵容器の設計に用いる地震動又は地震力により，損壊しないように設計する。

(b) 周辺斜面の崩壊

使用済燃料乾式貯蔵容器は，使用済燃料乾式貯蔵容器の設計に用いる地震動又は地震力によって生じるおそれがある周辺の斜面の崩壊に対して，その安全機能が損なわれるおそれがない場所に設置する。

なお，上記(1)及び(2)の検討に当たっては，地震に起因する溢水及び火災の観点からも波及的影響がないことを確認する。

上記の観点で検討した波及的影響を考慮する施設を，第1.4.1表中に「波及的影響を考慮すべき施設」として記載する。

1.4.1.6 構造計画と配置計画

設計基準対象施設の構造計画及び配置計画に際しては，地震の影響が低減されるように考慮する。

建物・構築物は，原則として剛構造とし，重要な建物・構築物は，地震力に対し十分な支持性能を有する地盤に支持させる。

機器・配管系は，応答性状を適切に評価し，適用する地震力に対して構造強度を有する設計とする。配置に自由度のあるものは，耐震上の観点からできる限り重心位置を低くし，かつ，安定性のよい据付け状態になるよう配置する。

下位クラス施設は原則，耐震重要施設に対して離隔をとり配置するか，若しくは基準地震動に対し構造強度を保つようにし，耐震重要施設の安全機能を損なわない設計とする。

1.4.4 主要施設の耐震構造

1.4.4.1 原子炉建屋

原子炉建屋は，原子炉格納施設，原子炉周辺補機棟及び燃料取扱棟からなり，各棟は岩盤上に設置される鉄筋コンクリート造の基礎版（約62m×約80m）上に設けられる。原子炉建屋の主体構造は鉄筋コンクリート造（一部鉄骨鉄筋コンクリート造及び鉄骨造）である。

原子炉格納施設は原子炉格納容器，外周コンクリート壁，内部コンクリート等で構成される。

原子炉格納容器は内径約40m，全高約77mで，上部に半球ドーム，下部にさら形鏡を持つ円筒形の鋼板シェル構造である。

外周コンクリート壁は外径約47m，全高約83mで，上部に半球ドームを持つ円筒形の鉄筋コンクリート造シェル構造である。

また，内部コンクリートは原子炉格納容器内部に設け，その主要構造は剛な壁式鉄筋コンクリート造である。

1.4.4.2 原子炉補助建屋

原子炉補助建屋は，地上３階，地下２階であり，平面が約72m×約79mの鉄筋コンクリート造（一部鉄骨鉄筋コンクリート造）の建物で，基礎は岩盤上に設置される。

原子炉建屋と原子炉補助建屋との間は，適切な間げきを設け建物相互の干渉を防ぐようにする。

1.4.4.3 タービン建屋

タービン建屋は，地上２階，地下１階であり，平面が約95m×約46mの鉄骨造（一部鉄骨鉄筋コンクリート造）である。

1.4.4.4

1.4.4.5 使用済燃料乾式貯蔵建屋

使用済燃料乾式貯蔵建屋は，地上４階であり，平面が約59m×約42mの鉄筋コンクリート造（一部鉄骨鉄筋コンクリート造）の建物で，基礎は岩盤上に設置される。

1.4.4.6 原子炉容器

原子炉容器は，上部及び底部が半球状のたて置円筒形で，原子炉容器ふたはフランジで容器胴にボルト締めされており，それ自体肉厚の剛な構造である。

原子炉容器は，原子炉容器入口及び出口ノズルに溶接した鋼製のパッドを介して，内部コンクリートに固定する鋼製構造物に支持させる。なお，容器の熱膨張を拘束しないよう半径方向はフリーとし，下方及び周方向を拘束する構造にして地震力に対しても支持する。

1.4.4.7 制御棒クラスタ駆動装置

制御棒クラスタ駆動装置は，原子炉容器ふたに取付けられた磁気ジャック式駆動装置である。

制御棒クラスタ駆動装置は，上部端を耐震サポートにより内部コンクリートに支持し，下部を原子炉容器ふたに固定し，それ自体も剛性を持つので，地震力に対しても必要な強度を有する。

1.4.4.8 燃料集合体及び炉内構造物

燃料集合体は，燃料棒，制御棒案内シンブル，支持格子，上部ノズル，下部ノズル等により構成される。燃料集合体は制御棒案内シンブルとそれに接合した支持格子とによって骨格を形成し，燃料棒を正方格子状の配列で支持格子のばねに支持させるため燃料棒の熱膨脹を拘束しない構造となっている。また，燃料集合体に作用する地震力は，上部ノズル及び下部ノズルを介して炉内構造物の上部炉心板及び下部炉心板に伝達される。

炉内構造物は，上部炉心構造物及び下部炉心構造物から構成される。

上部炉心構造物は，上部炉心支持板，上部炉心支持柱，上部炉心板，制御棒クラスタ案内管等から構成され，下部炉心構造物は，炉心槽，下部炉心支持柱，下部炉心支持板，下部炉心板，炉心バッフル等から構成されている。燃料集合体及び炉内構造物に作用する水平地震力は，炉心槽上部フランジ部を介して原子炉容器フランジ部に，また炉心槽下端を介して原子炉容器胴内壁に取り付けた炉心支持金物にそれぞれ伝達される。さらに，炉内構造物に作用する鉛直地震力は，上部炉心支持板及び炉心槽上部フランジを介して原子炉容器フランジ部に伝達される。

1.4.4.9 １次冷却設備

１次冷却設備は，１次冷却材管，蒸気発生器，１次冷却材ポンプ，加圧器等で構成される。

１次冷却材管は，配管口径及び肉厚が大きく剛性が高いので熱膨張に対する考慮から配管の途中には支持構造物を設けない構造としている。

蒸気発生器は，水平方向を上部胴支持構造物，中間胴支持構造物及び下部支持構造物により，また，鉛直方向を支持脚により支持する。支持構造物は，１次冷却系の熱膨張を拘束しない構造となっており，水平地震力及び鉛直地震力は，各方向の支持構造物を介して内部コンクリートに伝達される。

１次冷却材ポンプは，水平方向を上部支持構造物及び下部支持構造物により，また，鉛直方向を支持脚により支持する。支持構造物は，１次冷却系の熱膨張を拘束しない構造となっており，水平地震力及び鉛直地震力は，各方向の支持構造物を介して内部コンクリートに伝達される。

加圧器は，支持スカート及び上部支持構造物により支持されており，地震力はこれらの支持構造物により内部コンクリートに伝達される。また，上部支持構造

物は，加圧器の熱膨張を拘束しない構造となっている。

1.4.4.10 その他

その他の機器・配管については，運転荷重，地震荷重，熱膨脹による荷重のもとで不都合な応力が生じないよう，必要に応じてスナバ，リジット・ハンガ，その他の支持装置を使用して耐震的にも熱的にも安全な設計とする。

第1.4.1表　クラス別施設（1／6）

耐震重要度分類	機能別分類	主要設備（注1）		補助設備（注2）		直接支持構造物（注3）		間接支持構造物（注4）		波及的影響を考慮すべき施設（注5）	
		適用範囲	耐震クラス	適用範囲	耐震クラス	適用範囲	耐震クラス	適用範囲	（注6）検討用地震動	適用範囲	（注6）検討用地震動
S	a. 原子炉冷却材圧力バウンダリを構成する機器・配管系	①原子炉容器 ②原子炉冷却材圧力バウンダリに属する容器・配管・ポンプ・弁	S S	①隔離弁を閉とするに必要な電気及び計装設備	S	①原子炉容器・蒸気発生器・1次冷却材ポンプ・加圧器の支持構造物 ②機器・配管，電気計装設備等の支持構造物	S S	①内部コンクリート ②原子炉建屋 ③原子炉補助建屋	Ss Ss Ss	①格納容器ポーラクレーン ②タービン建屋 ③その他	Ss Ss Ss
	b. 使用済燃料を貯蔵するための施設	①使用済燃料ピット ②使用済燃料ラック ③使用済燃料乾式貯蔵容器（注7）	S S S	—	—	①機器等の支持構造物 ②使用済燃料乾式貯蔵施設のうち貯蔵架台（注7）	S S	①原子炉建屋 ②使用済燃料乾式貯蔵建屋	Ss Ss	①使用済燃料ピットクレーン ②燃料取扱棟 ③使用済燃料乾式貯蔵建屋 ④その他	Ss Ss Ss Ss
	c. 原子炉の緊急停止のために急激に負の反応度を付加するための施設，及び原子炉の停止状態を維持するための施設	①制御棒クラスタ及び制御棒クラスタ駆動装置（原子炉トリップ機能に関する部分） ②化学体積制御設備のうちほう酸注入系	S S	①炉心支持構造物及び制御棒クラスタ案内管 ②非常用電源（燃料油系含む）及び計装設備	S S	①機器・配管，電気計装設備等の支持構造物	S	①内部コンクリート ②原子炉建屋 ③原子炉補助建屋 ④非常用電源の燃料油系を支持する構造物	Ss Ss Ss Ss	①格納容器ポーラクレーン ②タービン建屋 ③その他	Ss Ss Ss
	d. 原子炉停止後，炉心から崩壊熱を除去するための施設	①主蒸気・主給水系（主給水逆止弁より蒸気発生器2次側を経て，主蒸気隔離弁まで） ②補助給水系 ③補助給水タンク ④余熱除去設備	S S S S	①原子炉補機冷却水設備（当該主要設備に係るもの） ②原子炉補機冷却海水設備 ③燃料取替用水タンク ④炉心支持構造物（炉心冷却に直接影響するもの） ⑤非常用電源（燃料油系含む）及び計装設備	S S S S S	①機器・配管，電気計装設備等の支持構造物	S	①内部コンクリート ②原子炉建屋 ③原子炉補助建屋 ④海水ポンプ基礎等の海水系を支持する構造物 ⑤非常用電源の燃料油系を支持する構造物	Ss Ss Ss Ss Ss	①格納容器ポーラクレーン ②海水ピットクレーン ③タービン建屋 ④その他	Ss Ss Ss Ss

第1.4.1表　クラス別施設（2／6）

耐震重要度分類	機能別分類	主要設備 (注1)		補助設備 (注2)		直接支持構造物 (注3)		間接支持構造物 (注4)		波及的影響を考慮すべき施設 (注5)	
		適用範囲	耐震クラス	適用範囲	耐震クラス	適用範囲	耐震クラス	適用範囲	(注6) 検討用地震動	適用範囲	(注6) 検討用地震動
S	e. 原子炉冷却材圧力バウンダリ破損事故後，炉心から崩壊熱を除去するための施設	①安全注入設備 ②余熱除去設備（再循環用） ③燃料取替用水タンク	S S S	①原子炉補機冷却水設備（当該主要設備に係るもの） ②原子炉補機冷却海水設備 ③中央制御室の遮蔽と空調設備 ④非常用電源（燃料油系含む）及び計装設備	S S S S	①機器・配管，電気計装設備等の支持構造物	S	①内部コンクリート ②原子炉建屋 ③原子炉補助建屋 ④海水ポンプ基礎等の海水系を支持する構造物 ⑤非常用電源の燃料油系を支持する構造物	Ss Ss Ss Ss Ss	①格納容器ポーラクレーン ②海水ピットクレーン ③タービン建屋 ④その他	Ss Ss Ss Ss
	f. 原子炉冷却材圧力バウンダリ破損事故の際に，圧力障壁となり放射性物質の放散を直接防ぐための施設	①原子炉格納容器 ②原子炉格納容器バウンダリに属する配管・弁	S S	①隔離弁を閉とするに必要な電気及び計装設備	S	①機器・配管，電気計装設備等の支持構造物	S	①原子炉建屋 ②原子炉補助建屋	Ss Ss	①タービン建屋 ②その他	Ss Ss
	g. 放射性物質の放出を伴うような事故の際に，その外部放散を抑制するための施設であり，f. 以外の施設	①格納容器スプレイ設備 ②燃料取替用水タンク ③アニュラスシール ④アニュラス空気再循環設備 ⑤格納容器排気筒 ⑥安全補機室空気浄化設備	S S S S S S	①原子炉補機冷却水設備 ②原子炉補機冷却海水設備 ③非常用電源（燃料油系含む）及び計装設備	S S S	①機器・配管，電気計装設備等の支持構造物	S	①原子炉建屋 ②原子炉補助建屋 ③原子炉格納容器 ④外周コンクリート壁 ⑤海水ポンプ基礎等の海水系を支持する構造物 ⑥非常用電源の燃料油系を支持する構造物	Ss Ss Ss Ss Ss Ss	①海水ピットクレーン ②タービン建屋 ③その他	Ss Ss Ss
	h. 津波防護機能を有する施設及び浸水防止機能を有する施設 (注7)	①海水ピット堰 ②水密ハッチ ③水密扉 ④床ドレンライン逆止弁 ⑤貫通部止水処置	S S S S S	—	—	①機器等の支持構造物	S	①原子炉建屋 ②原子炉補助建屋 ③海水ポンプ基礎等の海水系を支持する構造物	Ss Ss Ss	①海水ピットクレーン ②タービン建屋 ③その他	Ss Ss Ss

第1.4.1表　クラス別施設（3／6）

耐震重要度分類	機能別分類	主要設備 (注1)		補助設備 (注2)		直接支持構造物 (注3)		間接支持構造物 (注4)		波及的影響を考慮すべき施設 (注5)	
		適用範囲	耐震クラス	適用範囲	耐震クラス	適用範囲	耐震クラス	適用範囲	(注6) 検討用地震動	適用範囲	(注6) 検討用地震動
S	i. 敷地における津波監視機能を有する施設 (注7)	①海面監視カメラ ②耐震型海水ピット水位計	S S	①非常用電源（燃料油系含む）及び計装設備	S	①電気計装設備等の支持構造物	S	①原子炉建屋 ②原子炉補助建屋 ③海水ポンプ基礎等の海水系を支持する構造物 ④非常用電源の燃料油系を支持する構造物	Ss Ss Ss Ss	①海水ピットクレーン ②タービン建屋 ③その他	Ss Ss Ss
	j. その他	①使用済燃料ピット水補給設備（非常用）	S	①非常用電源（燃料油系含む）及び計装設備	S	①機器・配管，電気計装設備等の支持構造物	S	①原子炉建屋 ②原子炉補助建屋 ③非常用電源の燃料油系を支持する構造物	Ss Ss Ss	①タービン建屋 ②その他	Ss Ss
		②炉内構造物	S	－	－	－	－	－	－	－	－

第1.4.1表　クラス別施設（4／6）

耐震重要度分類	機能別分類	主要設備 (注1)		補助設備 (注2)		直接支持構造物 (注3)		間接支持構造物 (注4)		波及的影響を考慮すべき施設 (注5)	
		適用範囲	耐震クラス	適用範囲	耐震クラス	適用範囲	耐震クラス	適用範囲	(注6) 検討用地震動	適用範囲	(注6) 検討用地震動
B	k. 原子炉冷却材圧力バウンダリに直接接続されていて，1次冷却材を内蔵しているか又は内蔵し得る施設	①化学体積制御系のうち抽出系と余剰抽出系	B	—	—	①機器・配管等の支持構造物	B	①内部コンクリート ②原子炉建屋 ③原子炉補助建屋	S_B S_B S_B	—	—
	l. 放射性廃棄物を内蔵している施設（ただし，内蔵量が少ない又は貯蔵方式により，その破損により公衆に与える放射線の影響が周辺監視区域外における年間の線量限度に比べ十分小さいものは除く）	①放射性廃棄物処理設備，ただし，Cクラスに属するものは除く	B	—	—	①機器・配管等の支持構造物	B	①原子炉建屋 ②原子炉補助建屋	S_B S_B	—	—
	m. 放射性廃棄物以外の放射性物質に関連した施設で，その破損により，公衆及び従事者に過大な放射線被ばくを与える可能性のある施設	①使用済燃料ピット水浄化系 ②化学体積制御設備のうちSクラス及びCクラスに属する以外のもの ③放射線低減効果の大きい遮蔽 ④燃料取扱棟クレーン ⑤使用済燃料ピットクレーン ⑥燃料取替クレーン ⑦燃料移送装置	B B B B B B B	—	—	①機器・配管等の支持構造物	B	①内部コンクリート ②原子炉建屋 ③原子炉補助建屋	S_B S_B S_B	—	—
	n. 使用済燃料を冷却するための施設	①使用済燃料ピット水冷却系	B	①原子炉補機冷却水設備（当該主要設備に係るもの） ②原子炉補機冷却海水設備 ③電気計装設備	B B B	①機器・配管，電気計装設備等の支持構造物	B	①原子炉建屋 ②原子炉補助建屋 ③海水ポンプ基礎等の海水系を支持する構造物	S_B S_B S_B	—	—

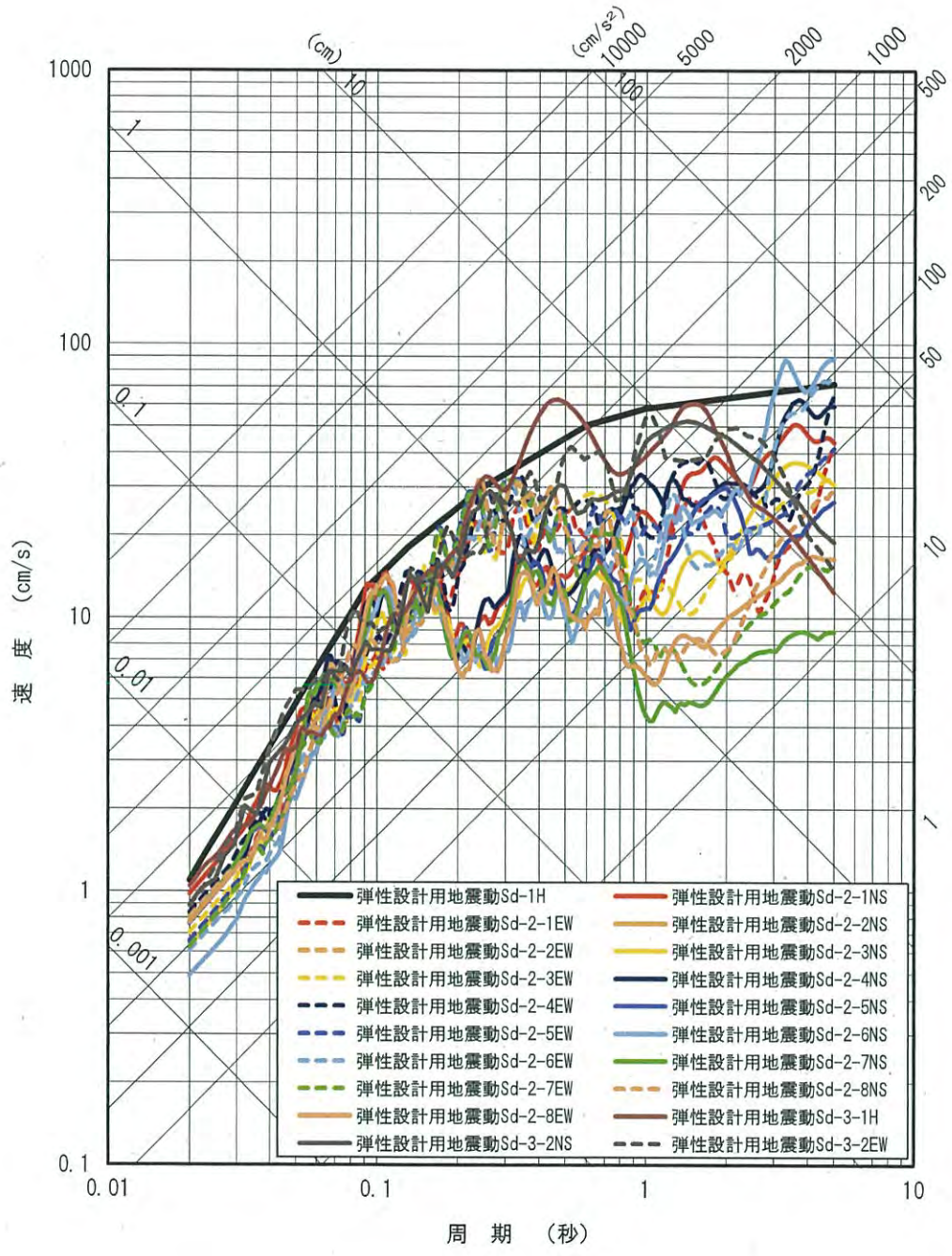
第1.4.1表　クラス別施設（5／6）

耐震重要度分類	機能別分類	主要設備 (注1)		補助設備 (注2)		直接支持構造物 (注3)		間接支持構造物 (注4)		波及的影響を考慮すべき施設 (注5)	
		適用範囲	耐震クラス	適用範囲	耐震クラス	適用範囲	耐震クラス	適用範囲	(注6) 検討用地震動	適用範囲	(注6) 検討用地震動
B	o. 放射性物質の放出を伴うような場合に，その外部放散を抑制するための施設で，Sクラスに属さない施設	－	－	－	－	－	－	－	－	－	－
C	p. 原子炉の反応度を制御するための施設でSクラス及びBクラスに属さない施設	①制御棒クラスタ駆動装置（原子炉トリップ機能に関する部分を除く）	C	－	－	①電気計装設備の支持構造物	C	①内部コンクリート ②原子炉建屋 ③原子炉補助建屋	S_c S_c S_c	－	－
	q. 放射性物質を内蔵しているか，又はこれに関連した施設でSクラス及びBクラスに属さない施設	①試料採取設備 ②床ドレン設備 ③洗浄排水処理設備 ④ドラム詰装置より下流の固体廃棄物処理設備（固体廃棄物貯蔵庫を含む） ⑤ベイラ ⑥化学体積制御系のうちほう酸回収装置蒸留水側及びほう酸補給タンク回り ⑦液体廃棄物処理設備のうち，廃液蒸発装置蒸留水側 ⑧原子炉補給水設備 ⑨新燃料貯蔵庫 ⑩使用済燃料乾式貯蔵建屋 (注8) ⑪その他	C C C C C C C C C C	－	－	①機器・配管，電気計装設備等の支持構造物	C	①内部コンクリート ②原子炉建屋 ③原子炉補助建屋 ④固体廃棄物貯蔵庫 ⑤使用済燃料乾式貯蔵建屋	S_c S_c S_c S_c S_c	－	－

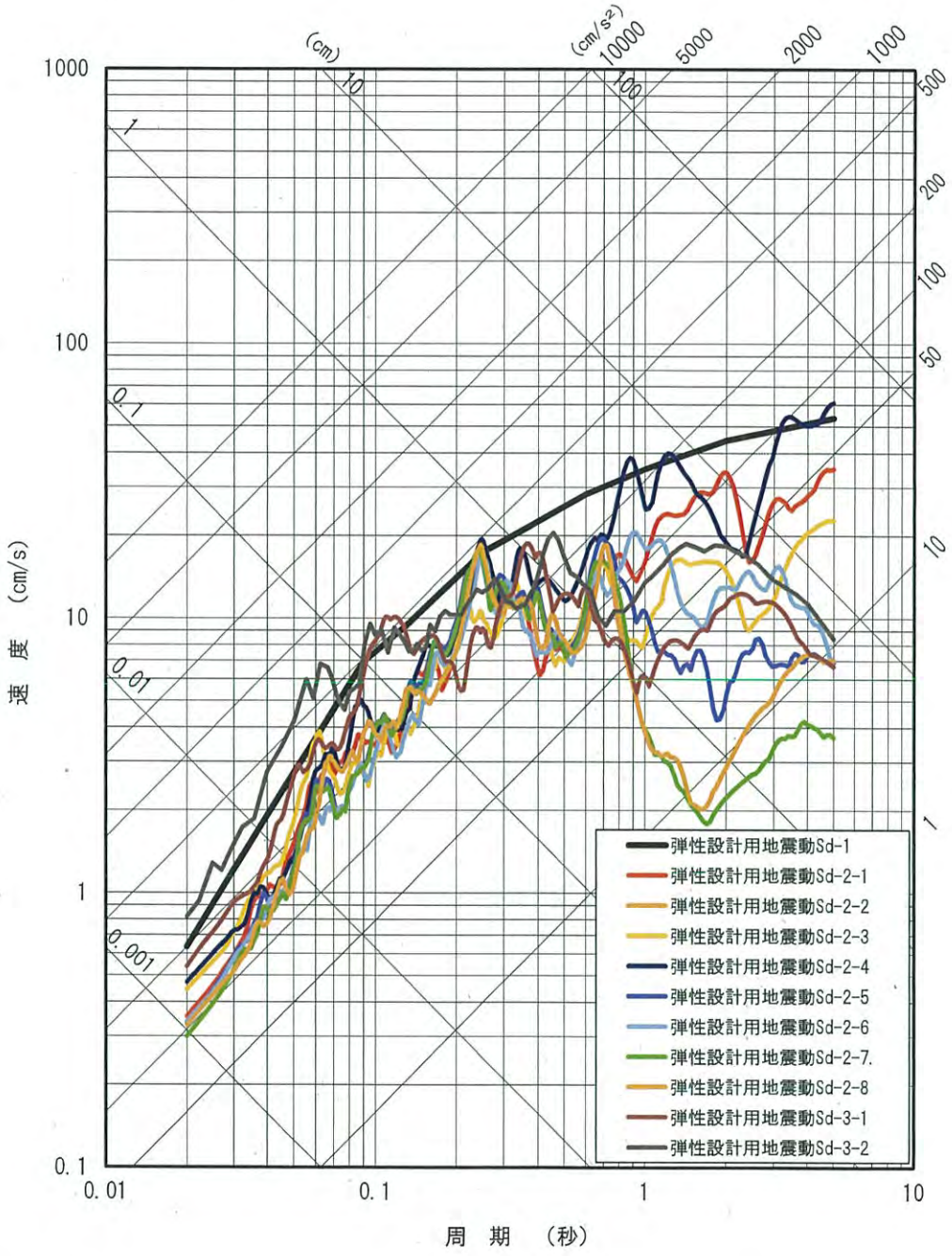
第1.4.1表　クラス別施設（6／6）

耐震重要度分類	機能別分類	主要設備 (注1)		補助設備 (注2)		直接支持構造物 (注3)		間接支持構造物 (注4)		波及的影響を考慮すべき施設 (注5)	
		適用範囲	耐震クラス	適用範囲	耐震クラス	適用範囲	耐震クラス	適用範囲	(注6) 検討用地震動	適用範囲	(注6) 検討用地震動
C	r. 原子炉施設ではあるが，放射線安全に関係しない施設	①タービン設備 ②原子炉補機冷却水設備 ③補助ボイラ及び補助蒸気設備 ④消火設備 (注9) ⑤主発電機・変圧器 ⑥換気空調設備 ⑦蒸気発生器ブローダウン設備 ⑧所内用空気圧縮設備 ⑨格納容器ポーラクレーン ⑩緊急時対策所 ⑪その他	C C C C C C C C C C C	①緊急時対策所計装設備・通信連絡設備	C	①機器・配管，電気計装設備等の支持構造物	C	①タービン建屋 ②内部コンクリート ③原子炉建屋 ④原子炉補助建屋 ⑤補助ボイラ建屋 ⑥緊急時対策所	S_C S_C S_C S_C S_C S_C	—	—

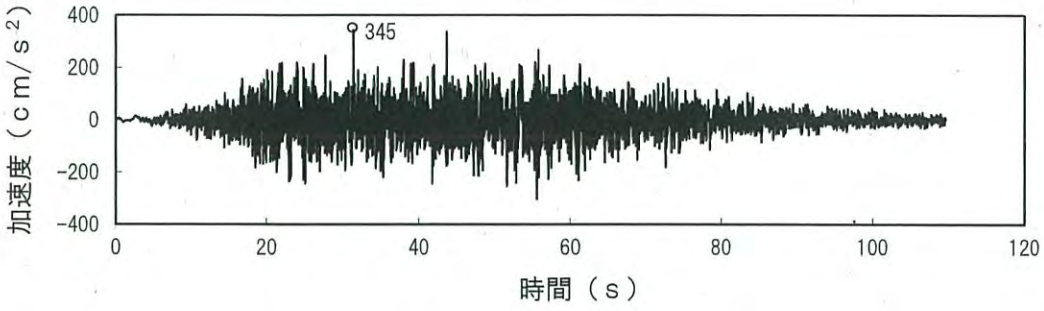
（注１）　主要設備とは，当該機能に直接的に関連する設備をいう。
（注２）　補助設備とは，当該機能に間接的に関連し，主要設備の補助的役割を持つ設備をいう。
（注３）　直接支持構造物とは，主要設備，補助設備に直接取り付けられる支持構造物，若しくはこれらの設備の荷重を直接的に受ける支持構造物をいう。
（注４）　間接支持構造物とは，直接支持構造物から伝達される荷重を受ける構造物（建物，構築物）をいう。
（注５）　波及的影響を考慮すべき施設とは，下位クラスに属する施設の破損等によって上位クラスに属する施設に波及的影響を及ぼすおそれのある施設をいう。
（注６）　S_s　：　基準地震動Ssにより定まる地震力
S_B　：　耐震Ｂクラス施設に適用される地震力
S_C　：　耐震Ｃクラス施設に適用される静的地震力
（注７）　基準地震動Ssによる地震力に対して，機能を保持できるものとする。
（注８）　使用済燃料乾式貯蔵施設の周辺施設（使用済燃料乾式貯蔵容器支持部，基礎を除く。）のうち使用済燃料乾式貯蔵建屋以外については，耐震重要度Ｃクラスに準じた設計とする。
（注９）　耐震Ｓクラス施設，Ｂクラス施設を防護対象とする消火設備（火災感知設備を含む。）については，それぞれS_s，S_Bに対して機能が維持されることを確認する。



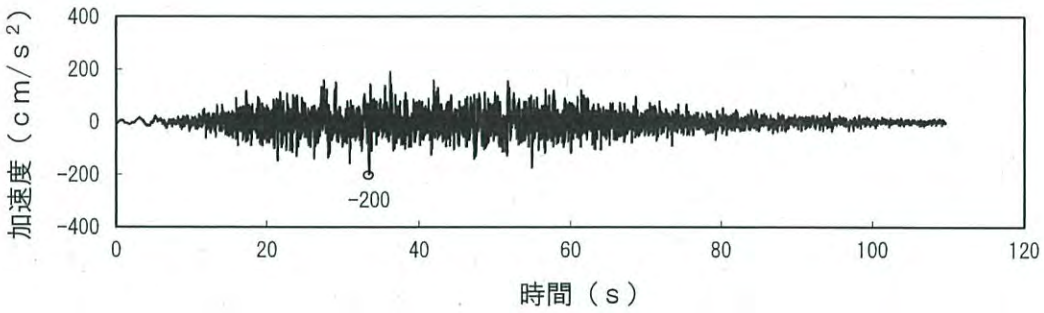
第1.4.1図　弾性設計用地震動の応答スペクトル（水平方向）



第1.4.2図　弾性設計用地震動の応答スペクトル（鉛直方向）

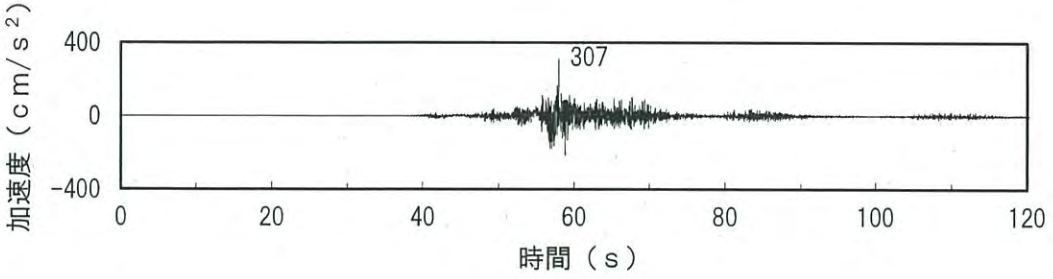


加速度（水平方向：Sd-1H）

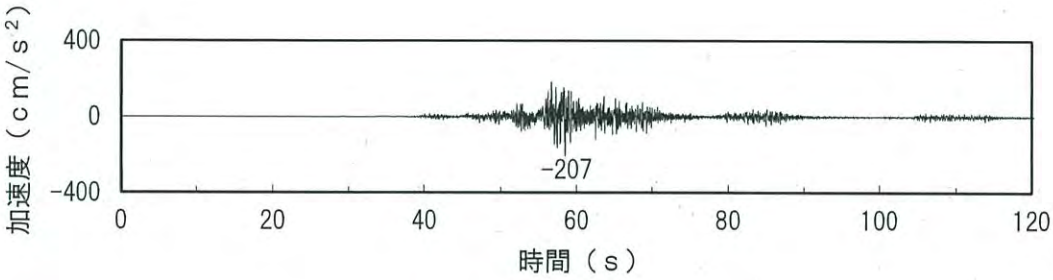


加速度（鉛直方向：Sd-1V）

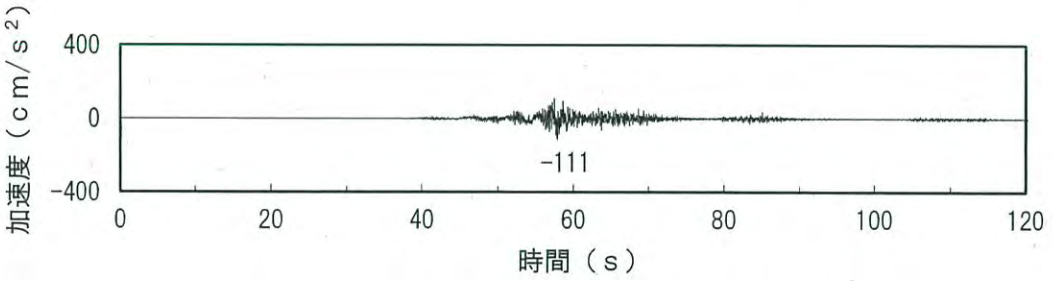
第1.4.3図　弾性設計用地震動Sd-1の設計用模擬地震波の時刻歴波形



加速度（水平方向：Sd-2-1(NS)）

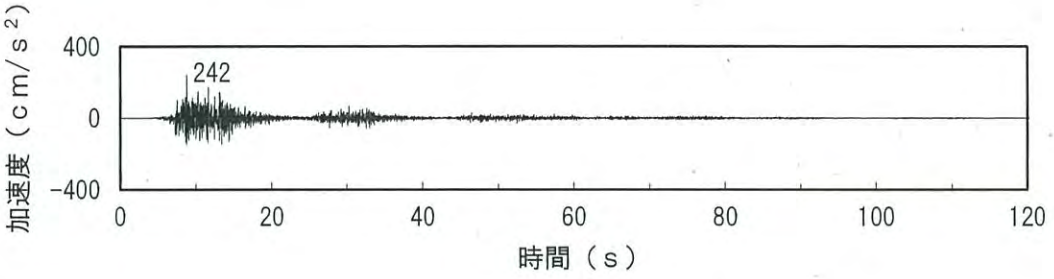


加速度（水平方向：Sd-2-1(EW)）

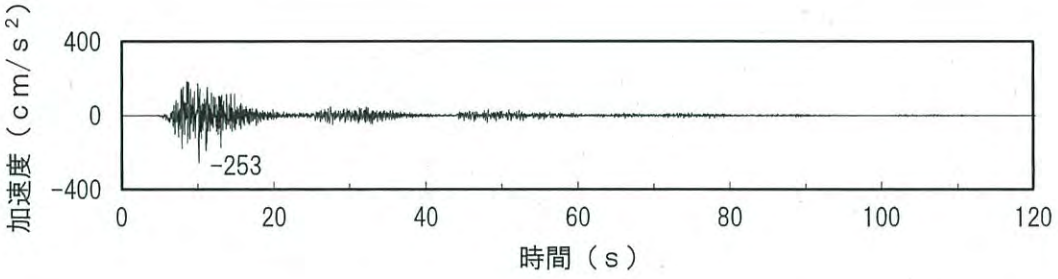


加速度（鉛直方向：Sd-2-1(UD)）

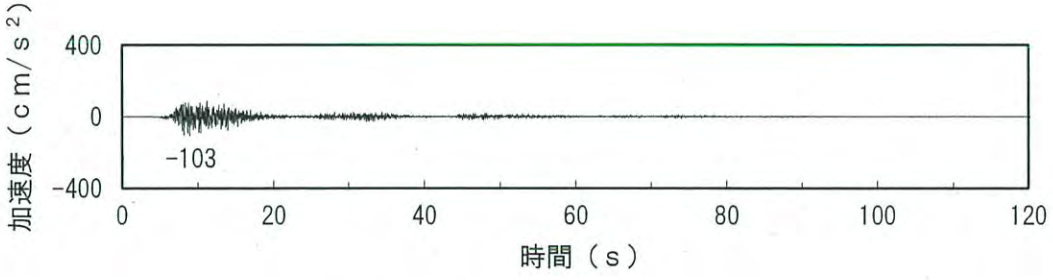
第1.4.4図　弾性設計用地震動Sd-2-1の時刻歴波形



加速度（水平方向：Sd-2-2(NS)）

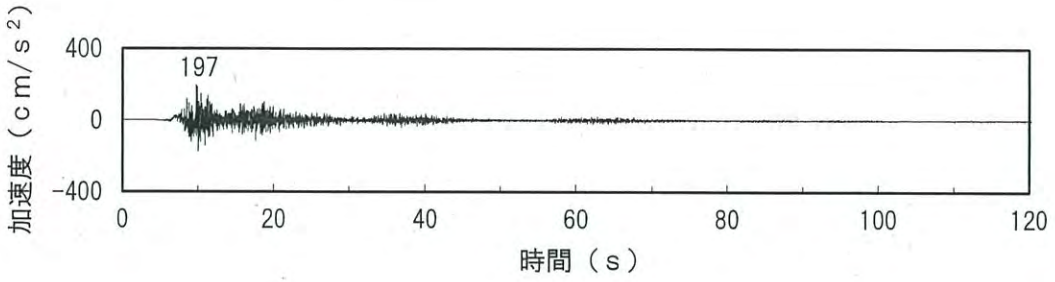


加速度（水平方向：Sd-2-2(EW)）

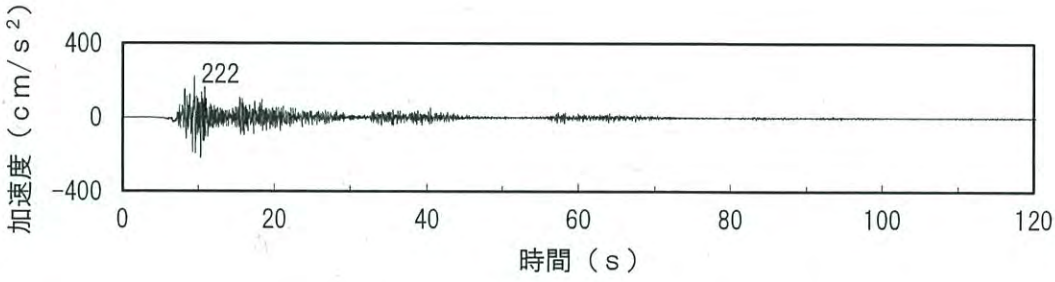


加速度（鉛直方向：Sd-2-2(UD)）

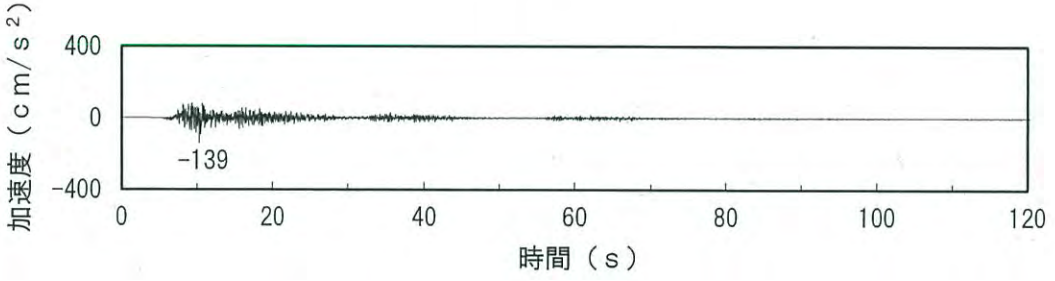
第1.4.5図　弾性設計用地震動Sd-2-2の時刻歴波形



加速度（水平方向：Sd-2-3(NS)）

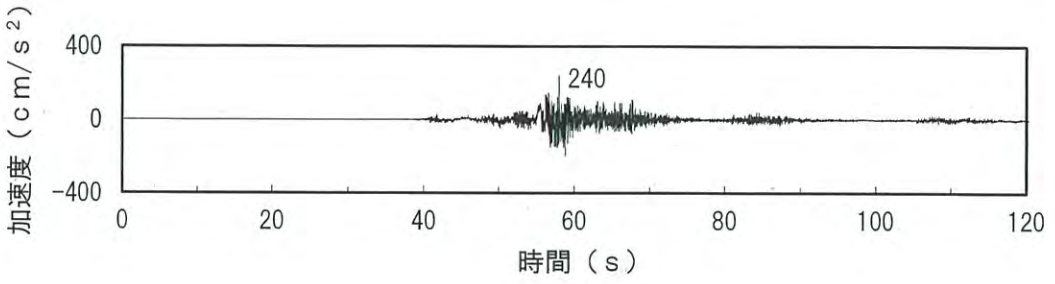


加速度（水平方向：Sd-2-3(EW)）

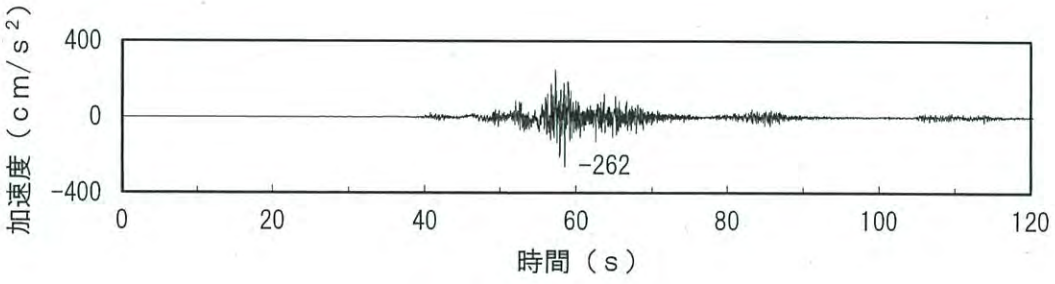


加速度（鉛直方向：Sd-2-3(UD)）

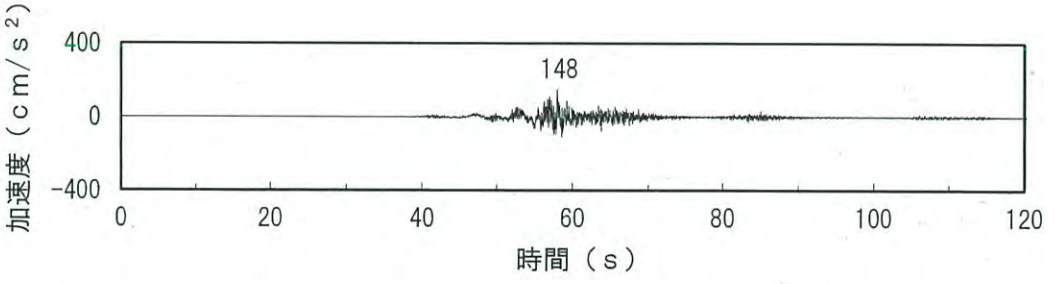
第1.4.6図　弾性設計用地震動Sd-2-3の時刻歴波形



加速度（水平方向：Sd-2-4(NS)）

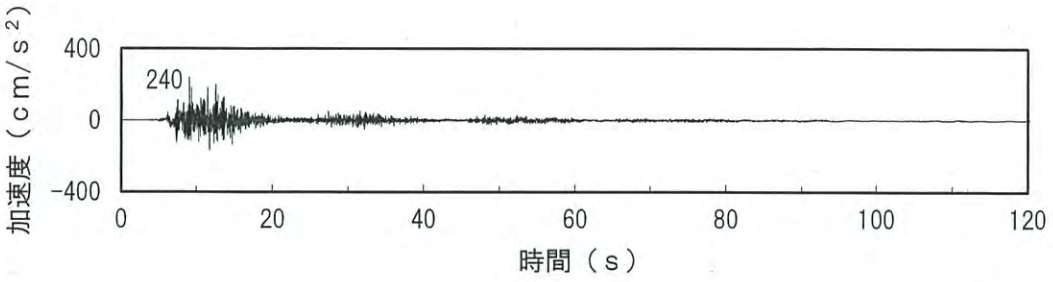


加速度（水平方向：Sd-2-4(EW)）

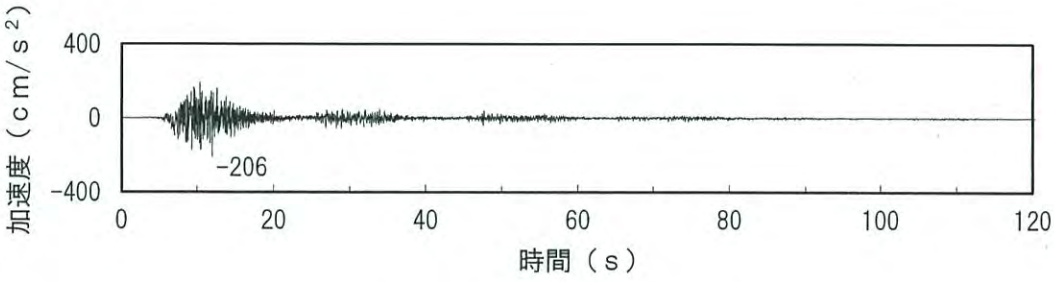


加速度（鉛直方向：Sd-2-4(UD)）

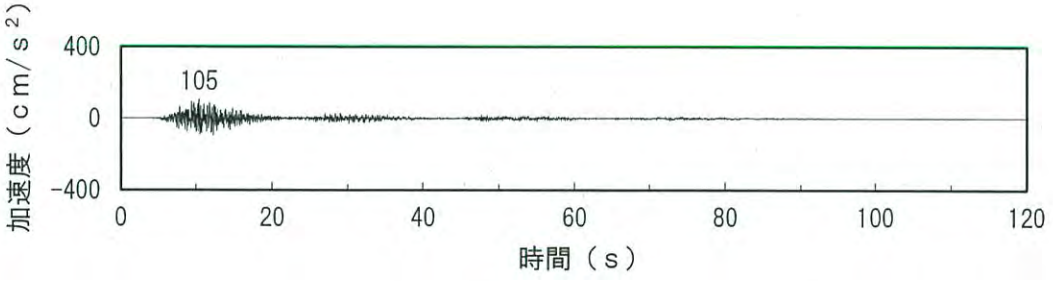
第1.4.7図　弾性設計用地震動Sd-2-4の時刻歴波形



加速度（水平方向：Sd-2-5(NS)）

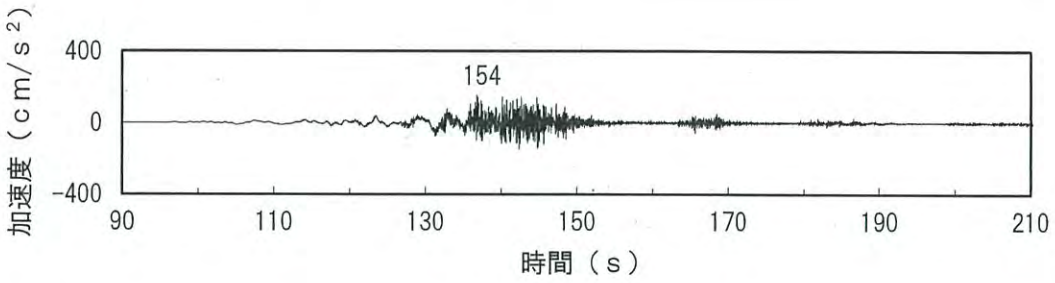


加速度（水平方向：Sd-2-5(EW)）

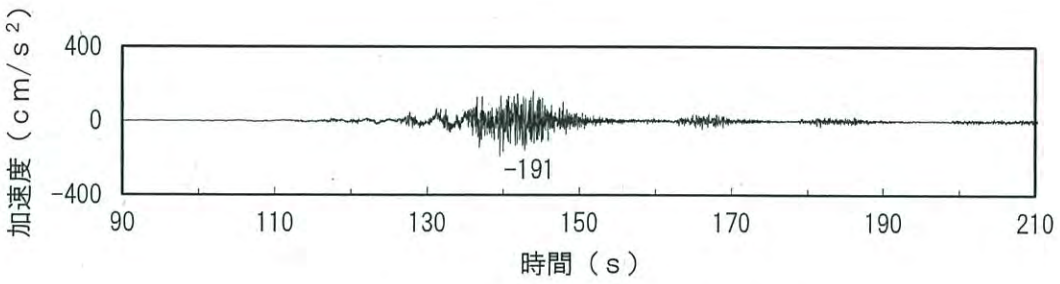


加速度（鉛直方向：Sd-2-5(UD)）

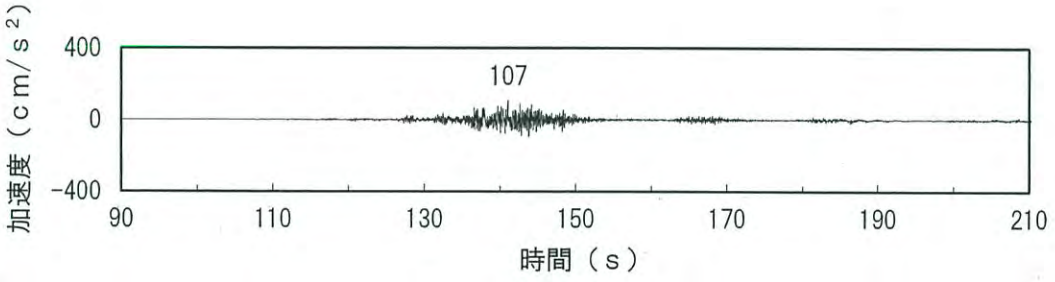
第1.4.8図　弾性設計用地震動Sd-2-5の時刻歴波形



加速度（水平方向：Sd-2-6(NS)）

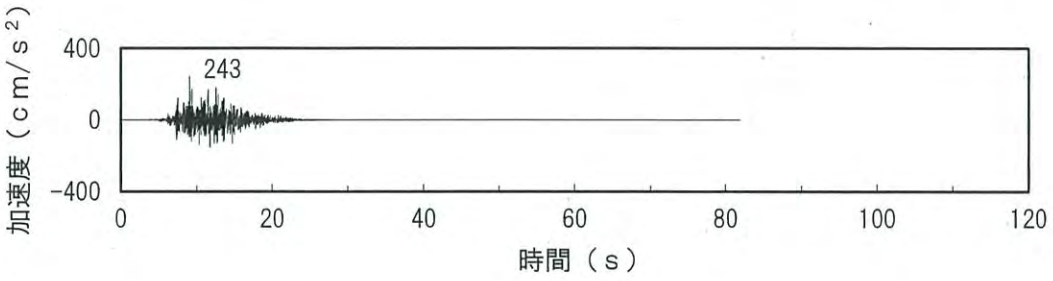


加速度（水平方向：Sd-2-6(EW)）

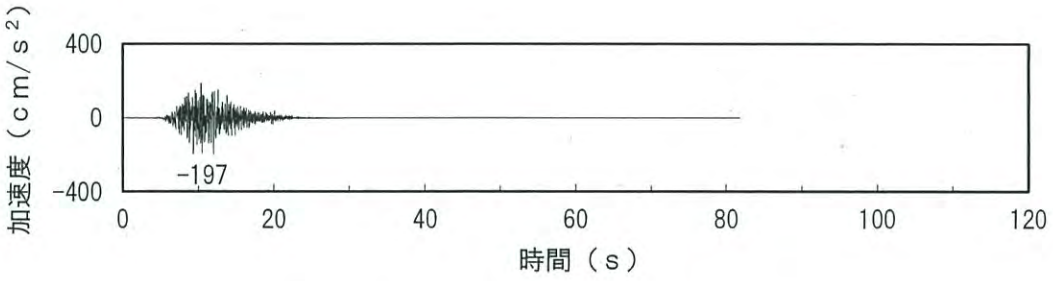


加速度（鉛直方向：Sd-2-6(UD)）

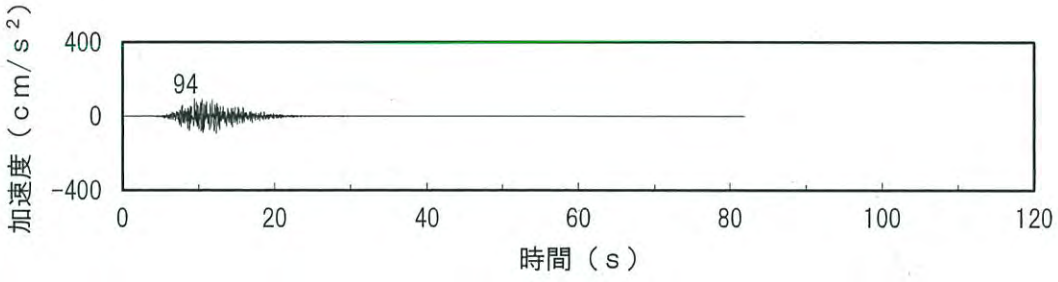
第1.4.9図　弾性設計用地震動Sd-2-6の時刻歴波形



加速度（水平方向：Sd-2-7(NS)）

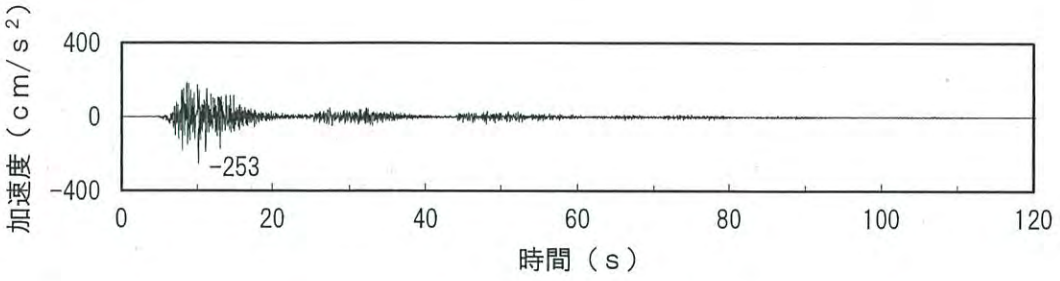


加速度（水平方向：Sd-2-7(EW)）

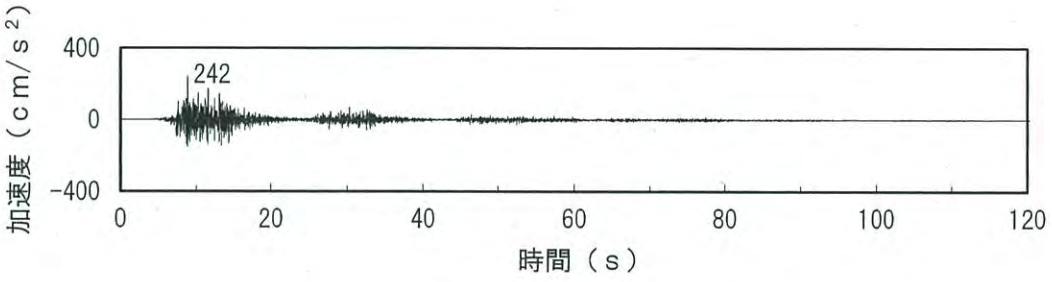


加速度（鉛直方向：Sd-2-7(UD)）

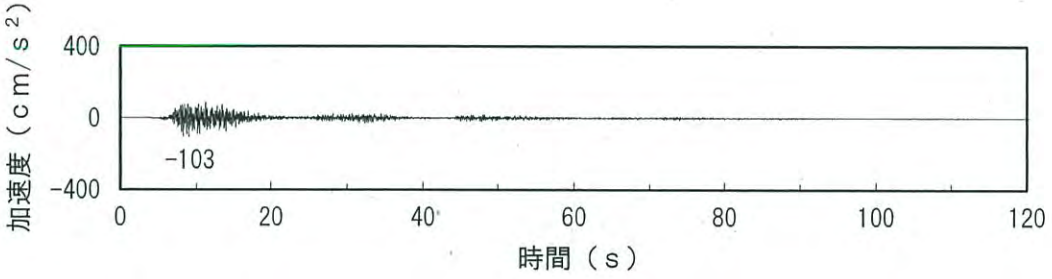
第1.4.10図　弾性設計用地震動Sd-2-7の時刻歴波形



加速度（水平方向：Sd-2-8(NS)）

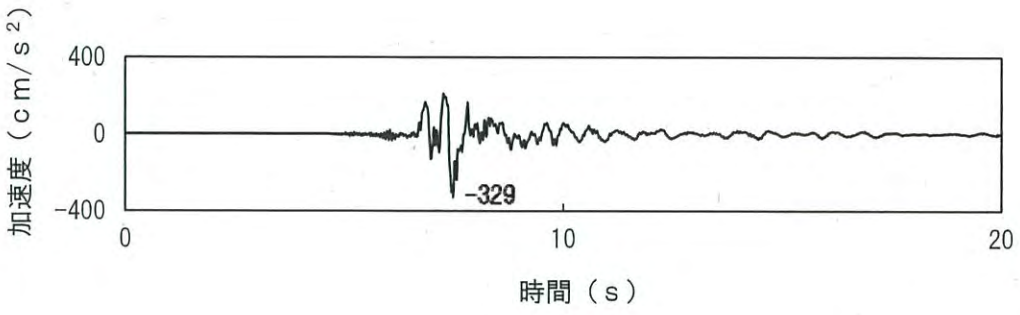


加速度（水平方向：Sd-2-8(EW)）

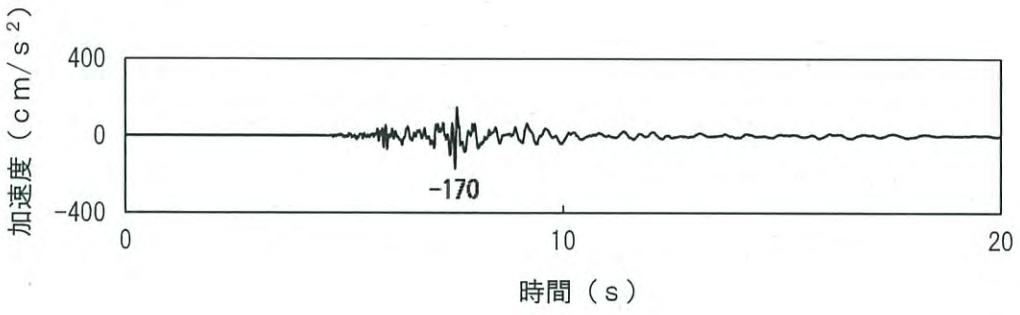


加速度（鉛直方向：Sd-2-8(UD)）

第1.4.11図　弾性設計用地震動Sd-2-8の時刻歴波形

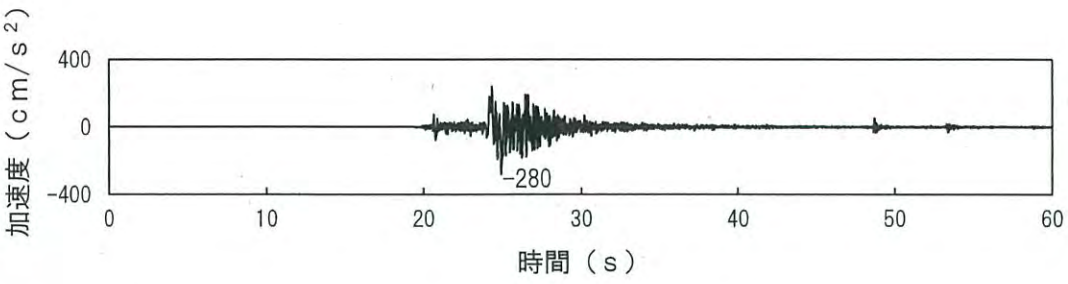


加速度（水平方向：Sd-3-1H）

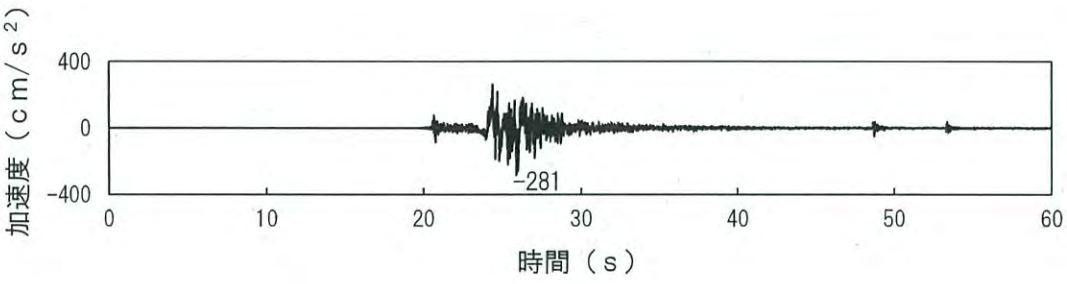


加速度（鉛直方向：Sd-3-1V）

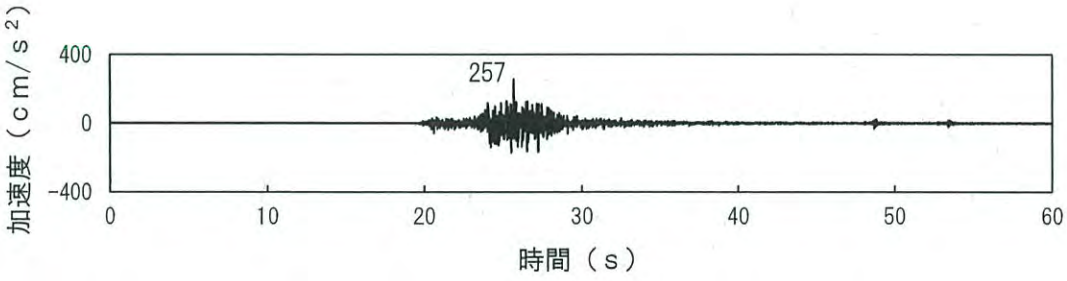
第1.4.12図　弾性設計用地震動Sd-3-1の時刻歴波形



加速度（水平方向：Sd-3-2(NS)）

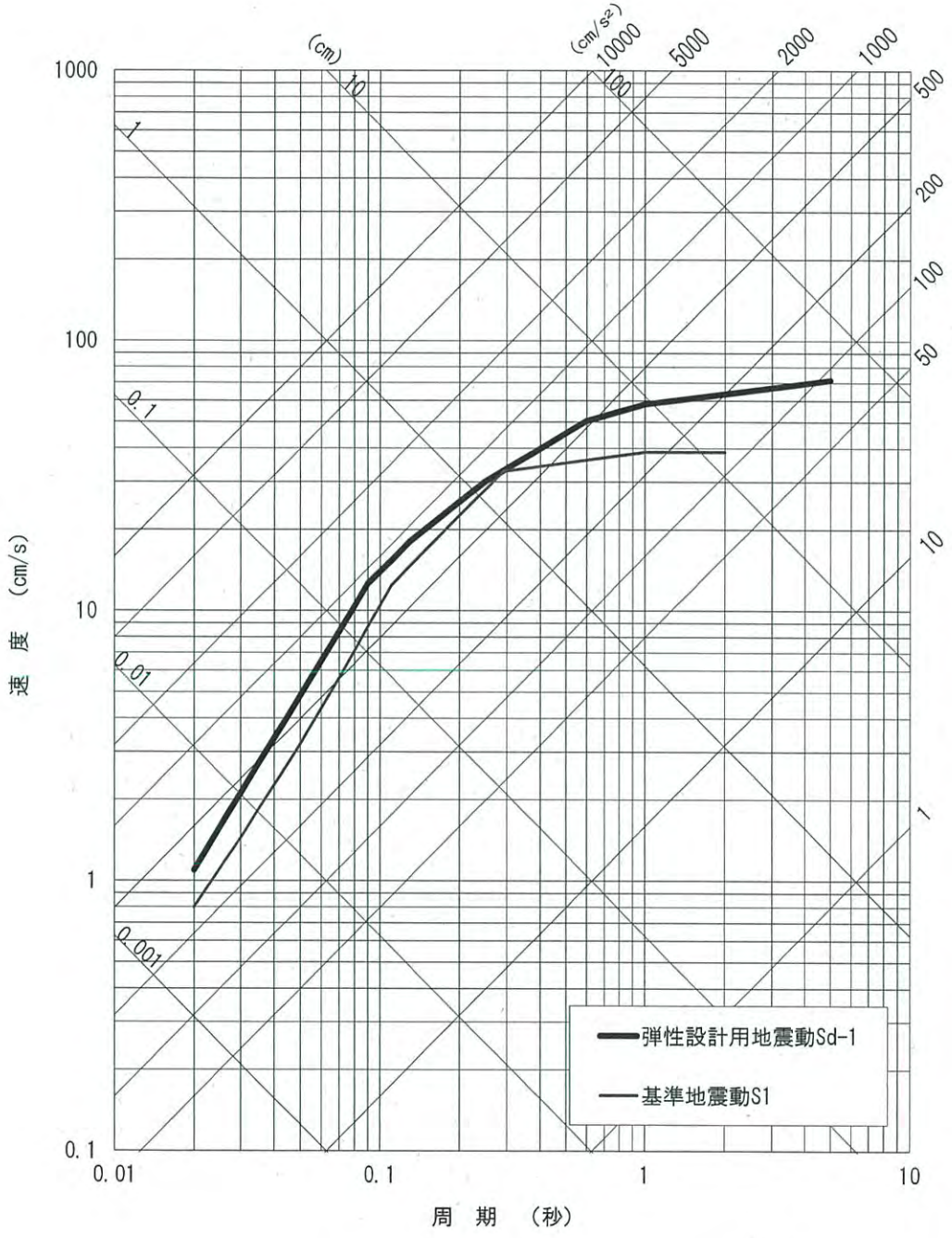


加速度（水平方向：Sd-3-2(EW)）

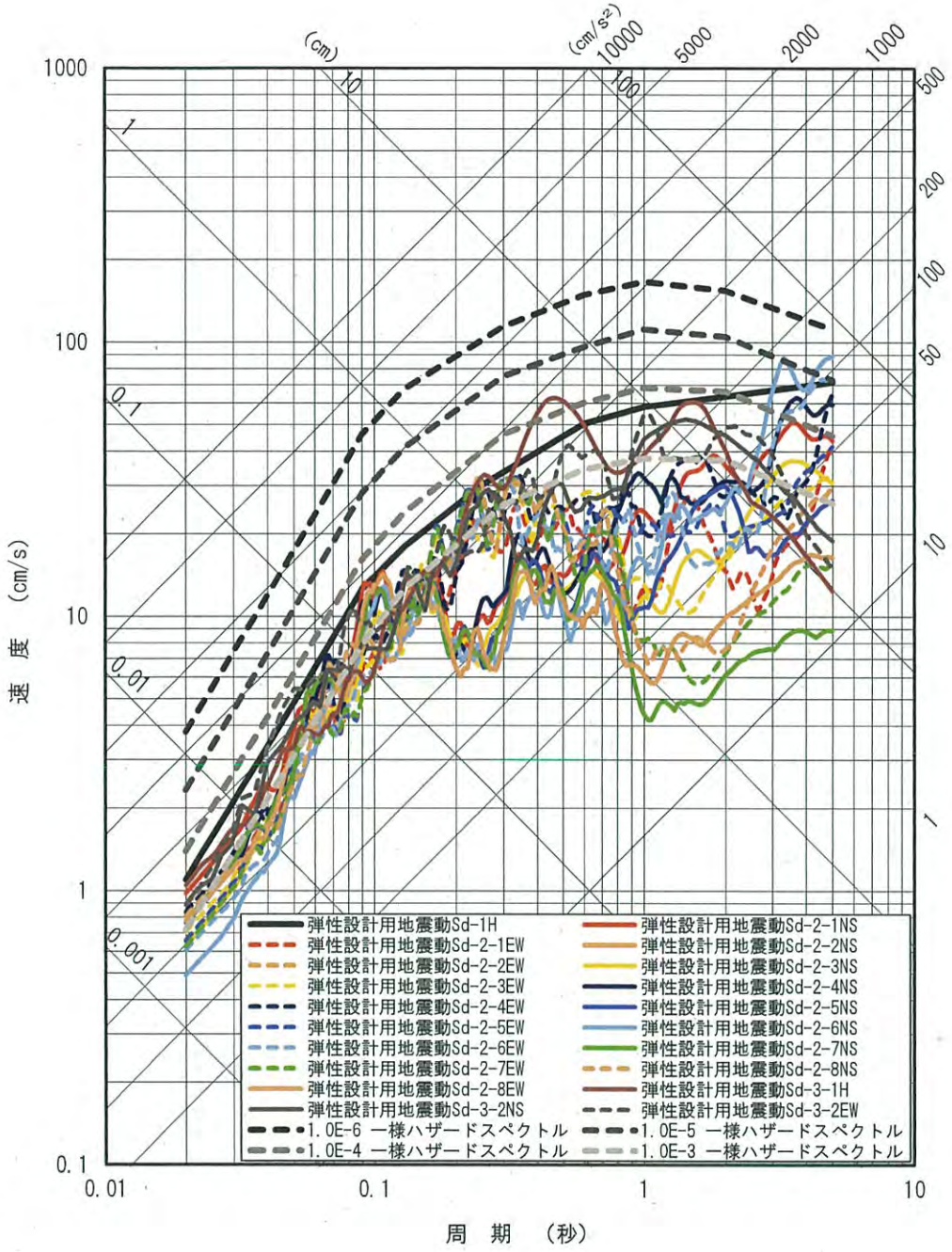


加速度（鉛直方向：Sd-3-2(UD)）

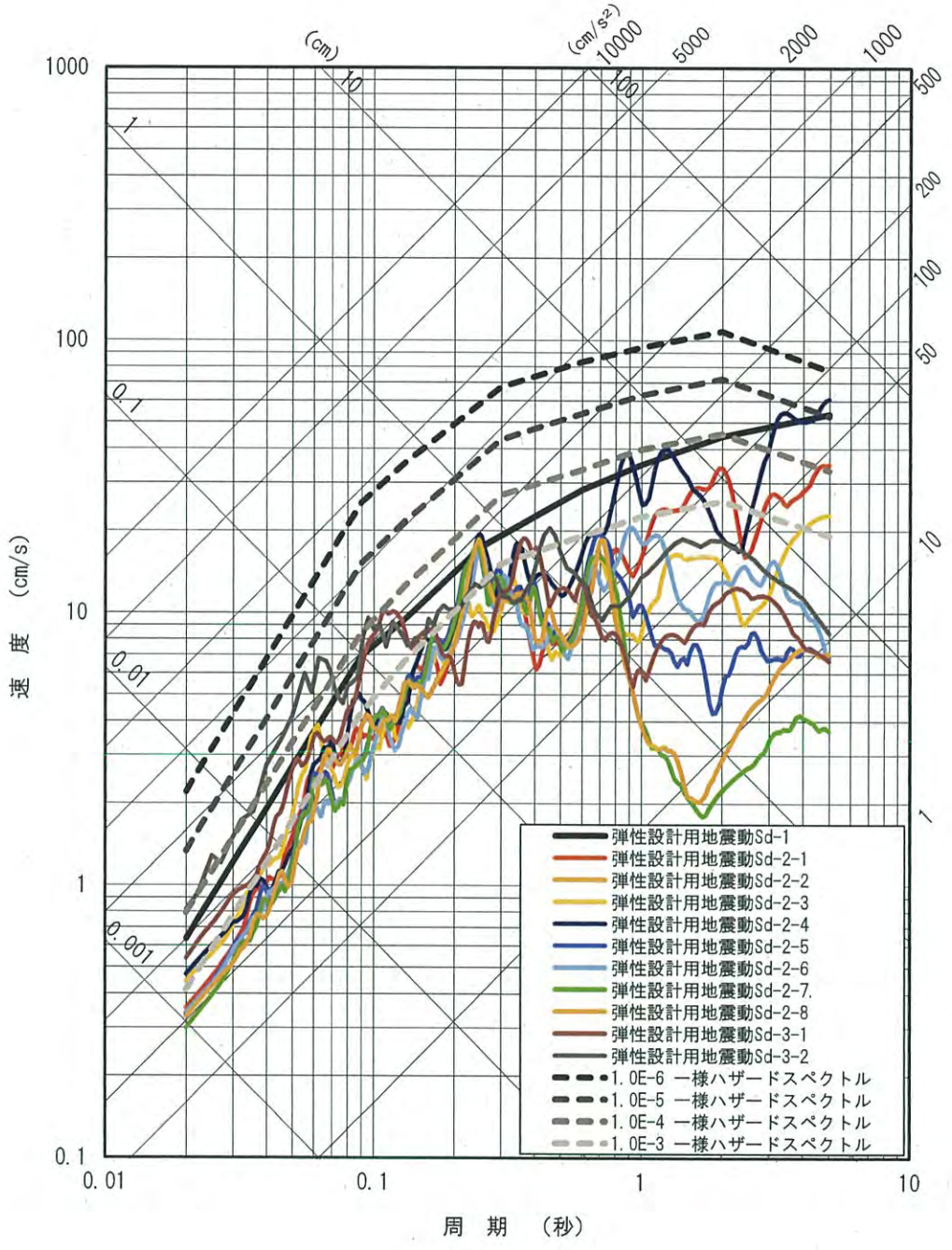
第1.4.13図　弾性設計用地震動Sd-3-2の時刻歴波形



第1.4.14図　弾性設計用地震動Sd-1と基準地震動S_1の応答スペクトルの比較
（水平方向）



第1.4.15図　弾性設計用地震動の応答スペクトル及び解放基盤表面における地震動の一様ハザードスペクトル（水平方向）



第1.4.16図　弾性設計用地震動の応答スペクトル及び解放基盤表面における地震動の一様ハザードスペクトル（鉛直方向）

1.13 参考文献

(10) 「静的地震力の見直し（建築編）に関する調査報告書（概要）」
(社)日本電気協会 電気技術調査委員会原子力発電耐震設計特別調査委員会建築部会 平成６年３月

（3）適合性説明

（地震による損傷の防止）

第四条　設計基準対象施設は、地震力に十分に耐えることができるものでなければならない。

2　前項の地震力は、地震の発生によって生ずるおそれがある設計基準対象施設の安全機能の喪失に起因する放射線による公衆への影響の程度に応じて算定しなければならない。

6　兼用キャスクは、次のいずれかの地震力に対して安全機能が損なわれるおそれがないものでなければならない。

一　兼用キャスクが地震力により安全機能を損なうかどうかをその設置される位置のいかんにかかわらず判断するために用いる合理的な地震力として原子力規制委員会が別に定めるもの

二　基準地震動による地震力

7　兼用キャスクは、地震の発生によって生ずるおそれがある斜面の崩壊に対して安全機能が損なわれるおそれがないものでなければならない。

適合のための設計方針

1　について

設計基準対象施設は，耐震重要度分類をＳクラス，Ｂクラス及びＣクラスに分類し，それぞれに応じた地震力に対しておおむね弾性範囲の設計を行う。

なお，耐震重要度分類及び地震力については，「2　について」に示すとおりである。

2　について

設計基準対象施設は，地震により発生するおそれがある安全機能の喪失（地震に伴って発生するおそれがある津波及び周辺斜面の崩壊等による安全機能の喪失を含む。）及びそれに続く放射線による公衆への影響を防止する観点から，各施設の安全機能が喪失した場合の影響の相対的な程度に応じて，以下のとおり，耐震重要度分類をＳクラス，Ｂクラス及びＣクラスに分類し，それぞれに応じた地震力を算定する。

(1)　耐震重要度分類

Ｓクラス：地震により発生するおそれがある事象に対して，原子炉を停止し，炉心を冷却するために必要な機能を持つ施設，自ら放射性物質を内蔵している施設，当該施設に直接関係しておりその機能喪失により放射性物質を外部に拡散する可能性のある施設，これらの施設の機能喪失により事故に至った場合の影響を緩和し，放射線による公衆への影響を

軽減するために必要な機能を持つ施設及びこれらの重要な安全機能を支援するために必要となる施設，並びに地震に伴って発生するおそれがある津波による安全機能の喪失を防止するために必要となる施設であって，その影響が大きいもの

Bクラス：安全機能を有する施設のうち，機能喪失した場合の影響がSクラスの施設と比べ小さい施設

Cクラス：Sクラスに属する施設及びBクラスに属する施設以外の一般産業施設又は公共施設と同等の安全性が要求される施設

(2) 地震力

上記（1）のSクラスの施設（屋外重要土木構造物，津波防護施設，浸水防止設備，津波監視設備，浸水防止設備が設置された建物・構築物及び使用済燃料乾式貯蔵容器を除く。），Bクラス及びCクラスの施設に適用する地震力は以下のとおり算定する。

なお，Sクラスの施設については，弾性設計用地震動による地震力又は静的地震力のいずれか大きい方の地震力を適用する。

a. 静的地震力

静的地震力は，Sクラス，Bクラス及びCクラスの施設に適用することとし，それぞれ耐震重要度分類に応じて次の地震層せん断力係数C_i及び震度に基づき算定する。

(a) 建物・構築物

水平地震力は，地震層せん断力係数C_iに，次に示す施設の耐震重要度分類に応じた係数を乗じ，さらに当該層以上の重量を乗じて算定するものとする。

Sクラス 3.0

Bクラス 1.5

Cクラス 1.0

ここで，地震層せん断力係数C_iは，標準せん断力係数C_0を0.2以上とし，建物・構築物の振動特性及び地盤の種類等を考慮して求められる値とする。Sクラスの施設については，水平地震力と鉛直地震力が同時に不利な方向の組合せで作用するものとする。鉛直地震力は，震度0.3以上を基準とし，建物・構築物の振動特性及び地盤の種類等を考慮して求めた鉛直震度より算定するものとする。ただし，鉛直震度は高さ方向に一定とする。

(b) 機器・配管系

耐震重要度分類の各クラスの地震力は，上記(a)に示す地震層せん断力係数C_iに施設の耐震重要度分類に応じた係数を乗じたものを水平震度とし，当該水平震度及び上記(a)の鉛直震度をそれぞれ20%増しとした震度より求めるものとする。

なお，Sクラスの施設については，水平地震力と鉛直地震力は同時に不利な方向の組合せで作用するものとする。ただし，鉛直震度は高さ方向に一定とする。

b.　弾性設計用地震動による地震力

弾性設計用地震動による地震力は，Ｓクラスの施設に適用する。

弾性設計用地震動は，「添付書類六 5. 地震」に示す基準地震動に工学的判断から求められる係数 0.53 を乗じて設定する。また，弾性設計用地震動による地震力は，水平２方向及び鉛直方向について適切に組み合わせたものとして算定する。

なお，Ｂクラスの施設のうち，共振のおそれのある施設については，弾性設計用地震動に２分の１を乗じた地震動によりその影響についての検討を行う。当該地震動による地震力は，水平２方向及び鉛直方向について適切に組み合わせて算定するものとする。

6　について

使用済燃料乾式貯蔵容器は，基準地震動による地震力に対して，安全機能が損なわれるおそれがないように設計する。

基準地震動による地震力は，基準地震動を用いて，水平２方向及び鉛直方向について適切に組み合わせたものとして算定する。

なお，使用済燃料乾式貯蔵容器については，周辺施設等の波及的影響によって，その安全機能を損なわないように設計する。

7　について

使用済燃料乾式貯蔵容器については，基準地震動による地震力によって生じるおそれがある周辺の斜面の崩壊に対して，その安全機能が損なわれるおそれがない場所に設置する。

1.2 気象等

該当なし

1.3 設備等

該当なし

1.4 手順等

該当なし

2.　地震による損傷の防止

（別添１）使用済燃料乾式貯蔵施設の耐震設計方針

（別添２）使用済燃料乾式貯蔵容器及び貯蔵架台の耐震評価について

（別添３）使用済燃料乾式貯蔵施設に対する波及的影響の検討について

（別添４）貯蔵建屋の耐震重要度分類の整理について

別添１

使用済燃料乾式貯蔵施設の
耐震設計方針

1. 耐震設計の基本方針

設計基準対象施設である使用済燃料乾式貯蔵施設の耐震設計は，以下の項目に従って行う。

(1) 使用済燃料乾式貯蔵施設の耐震設計

使用済燃料乾式貯蔵施設については，耐震重要度分類に応じて，適用する地震力に対して，以下の項目に従って耐震設計を行う。

a. 使用済燃料乾式貯蔵施設のうち，使用済燃料乾式貯蔵容器（支持部含む。）は，Sクラスの施設に分類し，基準地震震動による地震力に対して，設備に要求される機能が保持できるように設計する。

b. 使用済燃料乾式貯蔵施設のうち，特段の機能を要求する周辺施設は，設備に要求される機能が保持できるように設計する。

c. 使用済燃料乾式貯蔵施設のうち，特段の機能を要求しない周辺施設は，Cクラスの施設に準拠し，建物・構築物については，地震層せん断力係数C_iに，1.0を乗じて求められる水平地震力，機器・配管系については，1.2を乗じた水平震度から求められる水平地震力に十分に耐えられるように設計する。建物・構築物及び機器・配管系ともに，おおむね弾性状態に留まる範囲で耐えられるように設計する。

ここで，地震層せん断力係数C_iは，標準せん断力係数C_0を0.2以上とし，建物・構築物の振動特性及び地盤の種類等を考慮して求められる値とする。

d. 使用済燃料乾式貯蔵施設のうち 使用済燃料乾式貯蔵容器は，周辺施設等の波及的影響によって，その安全機能を損なわないように設計する。波及的影響の評価に当たっては，敷地全体を俯瞰した調査・検討を行い，事象選定及び影響評価を行う。なお，影響評価においては使用済燃料乾式貯蔵容器の設計に用いる地震動又は地震力を適用する。

(2) 適用規格

適用する規格としては，既往工認で適用実績がある規格のほか，最新の規格基準についても技術的妥当性及び適用性を示した上で適用可能とする。

既往工認で実績のある適用規格を以下に示す。

・「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1987」（社）日本電気協会

・「原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 JEAG4601・

補-1984」（社）日本電気協会
・「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-1991 追補版」（社）日本電気協会
・発電用原子力設備規格　設計・建設規格（（一社）日本機械学会，2012年版）
・発電用原子力設備規格　材料規格（（一社）日本機械学会，2012年版）
・建築基準法・同施行令
・鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説－許容応力度設計法－（（社）日本建築学会，1999改定）
・原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説（（社）日本建築学会，2005制定）
・鋼構造設計規準－許容応力度設計法－（（社）日本建築学会，2005改定）
・鉄骨鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説　－許容応力度設計と保有水平耐力－（（社）日本建築学会，2001改定）
・建築耐震設計における保有耐力と変形性能（（社）日本建築学会，1990改定）
・建築基礎構造設計指針（（社）日本建築学会，2001改定）
・発電用原子力設備規格 コンクリート製原子炉格納容器規格（社）日本機械学会，2003）

2. 耐震重要度分類

使用済燃料乾式貯蔵施設の耐震重要度分類について，第１表に示す。

3. 地震力の算定方法

使用済燃料乾式貯蔵施設の耐震設計に用いる地震力の算定方法は，以下のとおりとする。

(1) 静的地震力

静的地震力は，耐震重要度分類に応じて，施設に適用する静的地震力を適用する。なお，水平地震力と鉛直地震力は同時に不利な方向の組合せで作用するものとする。

(2) 動的地震力

動的地震力は，基準地震動から定める入力地震動を入力として，動的解析により水平２方向及び鉛直方向について適切に組み合わせて算定す

る。なお，地震力の組合せについては水平２方向及び鉛直方向の地震力が同時に作用するものとし，影響が考えられる場合には許容限界の範囲内に留まることを確認する。

また，使用済燃料乾式貯蔵施設について，適用する地震力に対して，要求される機能及び構造健全性が維持されることを確認するため，当該施設の構造を適切にモデル化した上での地震応答解析若しくは加振試験，又はその両方を実施する。

(3) 設計用減衰定数

使用済燃料乾式貯蔵施設の応答解析に用いる設計用減衰定数は，安全上適切と認められる規格及び基準，既往の振動実験，地震観測の調査結果等を考慮して適切な値を定める。

4. 荷重の組合せと許容限界

使用済燃料乾式貯蔵施設の耐震設計における荷重の組合せと許容限界は以下による。

(1) 耐震設計上考慮する状態

地震以外に設計上考慮する状態を次に示す。

a. 使用済燃料乾式貯蔵建屋

・使用済燃料乾式貯蔵容器が貯蔵されている状態

使用済燃料乾式貯蔵容器が貯蔵状態にあり，通常の自然条件下におかれている状態

ただし，使用済燃料乾式貯蔵容器貯蔵時には，通常運転時，運転時の異常な過渡変化時を含むものとする。

・設計基準事故時の状態

発電用原子炉施設が設計基準事故時にある状態

・設計用自然条件

設計上基本的に考慮しなければならない自然条件（積雪，風等）

b. 使用済燃料乾式貯蔵容器

・使用済燃料乾式貯蔵容器が貯蔵されている状態

・使用済燃料乾式貯蔵容器貯蔵時の異常な過渡変化時の状態

使用済燃料乾式貯蔵容器貯蔵時に予想される機器の単一の故障若しくはその誤作動又は運転員の単一の誤操作及びこれらと類似の頻度で発生すると予想される外乱によって発生する異常な状態であって，当該状態が継続した場合には炉心又は原子炉冷却材圧力バウン

ダリの著しい損傷が生じるおそれがあるものとして安全設計上想定すべき事象が発生した状態

・設計基準事故時の状態
発生頻度が運転時の異常な過渡変化より低い異常な状態であって，当該状態が発生した場合には発電用原子炉施設から多量の放射性物質が放出するおそれがあるものとして安全設計上想定すべき事象が発生した状態

・設計用自然条件
設計上基本的に考慮しなければならない自然条件（積雪，風等）

(2) 荷重の種類

a. 使用済燃料乾式貯蔵建屋

・使用済燃料乾式貯蔵容器が貯蔵されている状態で常時作用している荷重，すなわち固定荷重，積載荷重，土圧，水圧及び通常の気象条件による荷重

・設計基準事故時の状態で施設に作用する荷重

・地震力，風荷重，積雪荷重等
ただし，使用済燃料乾式貯蔵容器貯蔵時には，通常運転時，運転時の荷重には，機器・配管系から作用する荷重が含まれるものとし，地震力には，地震時土圧，機器・配管系からの反力，スロッシング等による荷重が含まれるものとする。

b. 使用済燃料乾式貯蔵容器

・使用済燃料乾式貯蔵容器が貯蔵されている状態で作用する荷重

・使用済燃料乾式貯蔵容器貯蔵時の異常な変化時の状態で作用する荷重

・設計基準事故時の状態で作用する荷重

・地震力，風荷重，積雪荷重等

(3) 荷重の組合せ

地震力と他の荷重との組合せは次による。

a. 使用済燃料乾式貯蔵建屋

使用済燃料乾式貯蔵容器の貯蔵時に常時作用している荷重及び，使用済燃料乾式貯蔵容器の貯蔵時の状態で作用する荷重と静的地震力とを組み合わせる。

b. 使用済燃料乾式貯蔵容器

使用済燃料乾式貯蔵容器の貯蔵時の状態で作用する荷重と地震力とを組み合わせる。

c. Cクラスの機器・配管系

使用済燃料乾式貯蔵容器の貯蔵時の状態で作用する荷重と，静的地震力とを組み合わせる。

d. 荷重の組合せ上の留意事項

(a) 使用済燃料乾式貯蔵容器に作用する地震力のうち動的地震力については，水平2方向と鉛直方向の地震力とを適切に組み合わせ算定するものとする。

(b) ある荷重の組合せ状態での評価が明らかに厳しいことが判明している場合には，その他の荷重の組合せ状態での評価は行わないことがある。

(c) 複数の荷重が同時に作用する場合，それらの荷重による応力の各ピークの生起時刻に明らかなずれがあることが判明しているならば，必ずしもそれぞれの応力のピーク値を重ねなくてもよいものとする。

(d) 使用済燃料乾式貯蔵容器を支持する使用済燃料乾式貯蔵建屋の当該部分の支持機能を確認する場合においては，基準地震動と常時作用している荷重及びその他必要な荷重とを組み合わせる。

(e) 地震と組み合わせる自然現象として，風及び積雪を考慮し，風荷重及び積雪荷重については，施設の設置場所，構造等を考慮して，地震荷重と組み合わせる。

(4) 許容限界

使用済燃料乾式貯蔵施設の地震力と他の荷重とを組み合わせた状態に対する許容限界は次のとおりとし，安全上適切と認められる規格及び基準又は試験等で妥当性が確認されている許容応力等を用いる。

a. 使用済燃料乾式貯蔵建屋

(a) Cクラス施設としての許容限界

建築基準法などの安全上適切と認められる規格及び基準による許容応力度を許容限界とする。

(b) 使用済燃料乾式貯蔵容器を支持する施設としての許容限界

構造物全体としての変形能力（終局耐力時の変形）について十分な余裕を有し，使用済燃料乾式貯蔵建屋の終局耐力に対して妥当な安全余裕を持たせることとする。なお，終局耐力は，使用済燃

料乾式貯蔵建屋に対する荷重又は応力を漸次増大していくとき，その変形又は歪みが著しく増加するに至る限界の最大耐力とし，既往の実験式等に基づき適切に定めるものとする。また，使用済燃料乾式貯蔵容器がそれを支持する使用済燃料乾式貯蔵建屋の変形等に対して，その支持機能を損なわないものとする。

(c) 使用済燃料乾式貯蔵建屋の保有水平耐力

必要保有水平耐力に対して耐震重要度に応じた安全余裕を有していることを確認する。

b. 使用済燃料乾式貯蔵容器

自重その他の貯蔵時に想定される荷重と，基準地震動による地震力を組み合わせた荷重条件に対して，当該使用済燃料乾式貯蔵容器に要求される機能を保持することを以下のとおり確認する。

密封境界部については，おおむね弾性状態に留まることを確認する。

使用済燃料乾式貯蔵容器の臨界防止機能を担保しているバスケットについては，臨界防止上有意な変形を起こさないことを確認する。

密封境界部以外の部位については，塑性ひずみが生じる場合であっても，その量が小さなレベルに留まって破断延性限界に十分な余裕を有することを確認する。

c. Cクラスの機器・配管系

応答が全体的におおむね弾性状態に留まることとする。

d. 基礎地盤の支持性能

基準地震動による地震力との組合せに対する許容限界は，接地圧が，安全上適切と認められる規格及び基準等による地盤の極限支持力度に対して妥当な余裕を有することを確認する。

静的地震力との組合せに対する許容限界は，接地圧に対して，安全上適切と認められる規格及び基準等による地盤の短期許容支持力度を許容限界とする。

5. 設計における留意事項

使用済燃料乾式貯蔵施設のうち，使用済燃料乾式貯蔵容器は周辺施設等の波及的影響によって，その安全機能を損なわないように設計する。

波及的影響の評価に当たっては，以下の３つの観点をもとに，敷地全体を俯瞰した調査・検討を行い，使用済燃料乾式貯蔵容器の安全機能を損なわないことを確認する。なお，原子力発電所の地震被害情報をもとに，３つの観

点以外に検討すべき事項がないか確認し，新たな検討事項が抽出された場合には，その観点を追加する。

影響評価には，使用済燃料乾式貯蔵容器の設計に用いる地震動又は地震力を適用して評価を行うこととし，地震動又は地震力の選定に当たっては，施設の配置状況，使用時間等を踏まえて適切に設定する。また，水平２方向及び鉛直方向の地震力が同時に作用する場合の影響も考慮して評価する。

(1) 設置地盤及び地震応答性状の相違等に起因する不等沈下又は相対変位による影響

a. 不等沈下

使用済燃料乾式貯蔵容器は，使用済燃料乾式貯蔵容器の設計に用いる地震動又は地震力による周辺施設等の設置地盤の不等沈下により，その安全機能を損なわないように設計する。

b. 相対変位

使用済燃料乾式貯蔵容器は，使用済燃料乾式貯蔵容器の設計に用いる地震動又は地震力による周辺施設等との相対変位により，その安全機能を損なわないように設計する。

(2) 使用済燃料乾式貯蔵容器間の相互影響

使用済燃料乾式貯蔵容器は，使用済燃料乾式貯蔵容器の設計に用いる地震動又は地震力による隣接する使用済燃料乾式貯蔵容器との相互影響により，その安全機能を損なわないように設計する。

(3) 使用済燃料乾式貯蔵容器と周辺施設等との相互影響

a. 周辺施設等の損傷，転倒及び落下等による衝突

影響使用済燃料乾式貯蔵容器は，使用済燃料乾式貯蔵容器の設計に用いる地震動又は地震力による周辺施設等の損傷，転倒及び落下等により，その安全機能を損なわないように設計する。

b. 周辺斜面の崩壊

使用済燃料乾式貯蔵容器は，使用済燃料乾式貯蔵容器の設計に用いる地震動又は地震力によって生じるおそれがある周辺の斜面の崩壊に対して，その安全機能が損なわれるおそれがない場所に設置する。

なお，上記検討に当たっては，地震に起因する溢水及び火災の観点からも波及的影響がないことを確認する。

6. 構造計画と配置計画

使用済燃料乾式貯蔵施設の構造計画に際しては，地震の影響が低減されるように考慮する。

使用済燃料乾式貯蔵建屋は，原則として剛構造とし，重要な建物・構築物は，地震力に対し十分な支持性能を有する地盤に支持させる。

使用済燃料乾式貯蔵容器は，貯蔵時の応答性状を適切に評価し，適用する地震力に対して転倒しない設計とする。

周辺施設等は，原則，使用済燃料乾式貯蔵容器に対して離隔をとり配置するか，若しくは基準地震動に対し構造強度を確保することにより，使用済燃料乾式貯蔵容器の安全機能を損なわない設計とする。

第１表　耐震重要度分類

【　】内は，検討用地震動を示す。

耐震クラス / 設備名称	S	C	間接支持構造物
核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設 3 使用済燃料貯蔵設備	使用済燃料乾式貯蔵容器（注１）		使用済燃料乾式貯蔵建屋【Ss】
放射線管理施設 3 生体遮蔽装置		補助遮へい（使用済燃料乾式貯蔵建屋）	使用済燃料乾式貯蔵建屋【Sc】
その他発電用原子炉の附属施設 4 火災防護設備 1 火災区域構造物及び火災区画構造物		使用済燃料乾式貯蔵建屋	使用済燃料乾式貯蔵建屋【Sc】
2 消火設備		消火設備配管	使用済燃料乾式貯蔵建屋【Sc】

（注１）基準地震動Ssによる地震力に対して，機能を保持できるものとする。

別添２

使用済燃料乾式貯蔵容器及び貯蔵架台の耐震評価について

目次

1. 概要 ····· 4条-別添2-1

2. 基本方針 ····· 4条-別添2-2
2.1 構造の説明 ····· 4条-別添2-2
2.2 評価方針 ····· 4条-別添2-4

3. 耐震評価箇所 ····· 4条-別添2-5
3.1 乾式キャスクの耐震評価箇所 ····· 4条-別添2-5
3.2 貯蔵架台の耐震評価箇所 ····· 4条-別添2-6

4. 地震応答解析 ····· 4条-別添2-7

5. 乾式キャスクの応力評価方法 ····· 4条-別添2-8
5.1 基本方針 ····· 4条-別添2-8
5.2 荷重の組合せ及び許容応力 ····· 4条-別添2-8
5.3 評価方法 ····· 4条-別添2-9

6. 貯蔵架台の応力評価方法 ····· 4条-別添2-13
6.1 基本方針 ····· 4条-別添2-13
6.2 荷重の組合せ及び許容応力 ····· 4条-別添2-13
6.3 評価方法 ····· 4条-別添2-14

1. 概要

使用済燃料乾式貯蔵容器（以下「乾式キャスク」という。）及び貯蔵架台の耐震評価は，以下に示す規格及びガイドに従い乾式キャスク及び貯蔵架台の地震応答解析及び応力評価を行い，乾式キャスク及び貯蔵架台に発生する応力が許容値以下となることを確認する。

本資料では乾式キャスクの耐震評価方針及び耐震評価方法を示し，耐震評価結果は工事計画にて示す。

- 原子力発電所耐震設計技術指針(JEAG 4601-1987)（日本電気協会 1987 年 8 月）
- 原子力発電所耐震設計技術指針(JEAG 4601-1991 追補版)（日本電気協会 1991 年 12 月）
- 原子力発電所耐震設計技術指針重要度分類・許容応力編(JEAG 4601・補-1984)（日本電気協会 1984 年 9 月）
- 発電用原子力設備規格 設計・建設規格(2012 年版)（JSME S NC1-2012）（日本機械学会 2012 年 12 月）
- 発電用原子力設備規格 材料規格(2012 年版)（JSME S NJ1-2012）（日本機械学会 2012 年 12 月）
- 原子力発電所敷地内での輸送・貯蔵兼用乾式キャスクによる使用済燃料の貯蔵に関する審査ガイド（原子力規制委員会 2019 年 3 月）

2. 基本方針

2.1 構造の説明

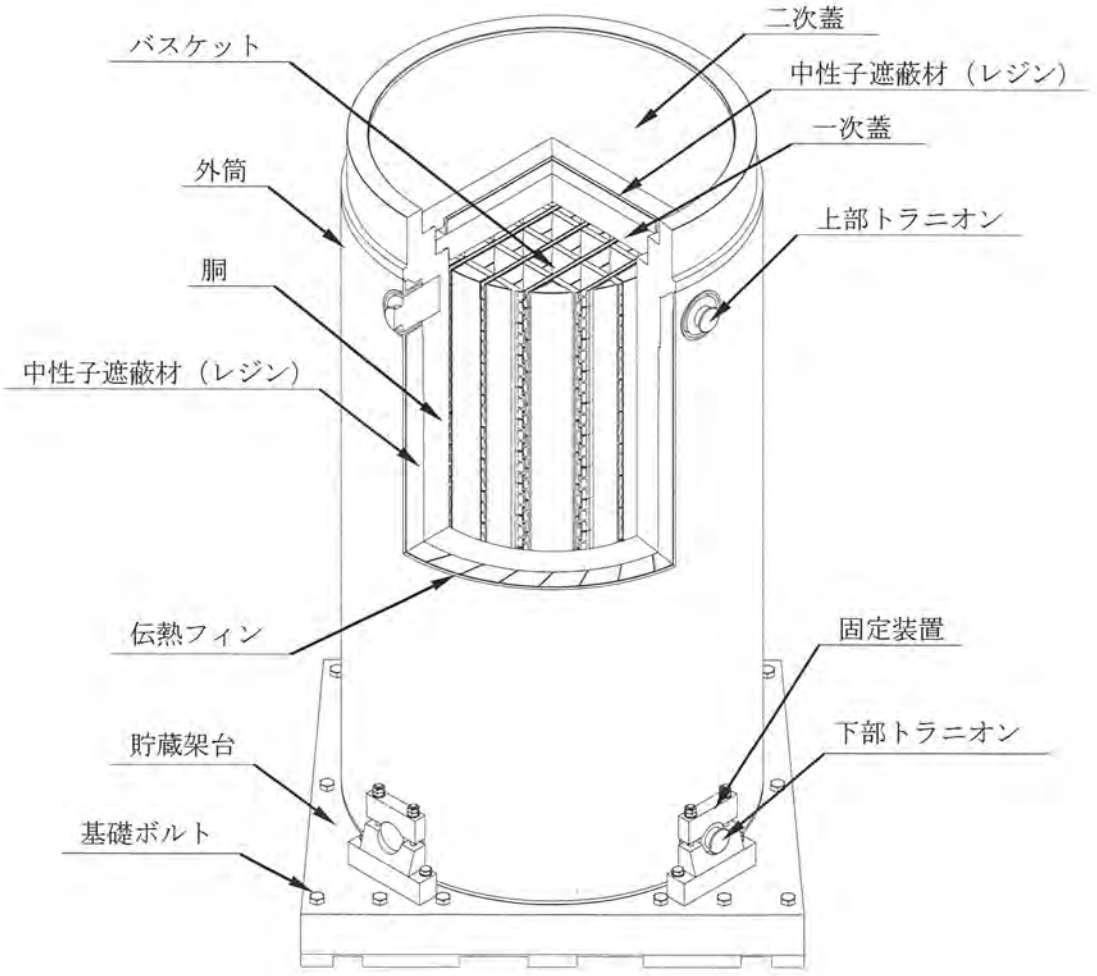
伊方発電所の乾式キャスクは，基礎に固定した貯蔵架台に設置し，４つの下部トラニオンを固定する方式としている。

伊方発電所に設置する乾式キャスクの構造を第 2-1 図に，今回の貯蔵方式における貯蔵架台の構造を第 2-2 図に示す。

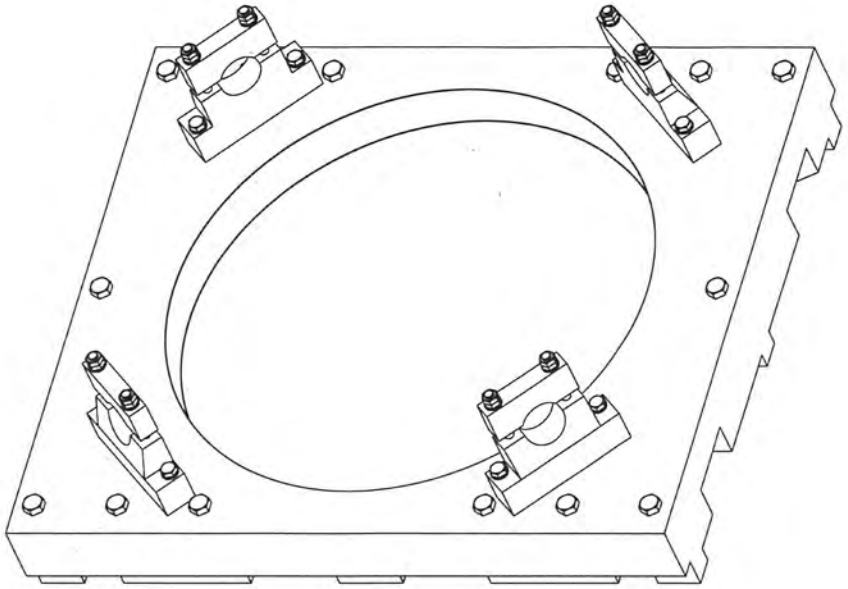
乾式キャスク及び貯蔵架台は，基準地震動 Ss による地震力に対してその安全機能が損なわれるおそれがないように，以下の構造としている。

・乾式キャスクは，４つの下部トラニオンを固定する構造とする。

・貯蔵架台は，使用済燃料乾式貯蔵建屋（以下「貯蔵建屋」という。）床面に埋め込まれた支持金物に対して，基礎ボルトで固定される構造とする。



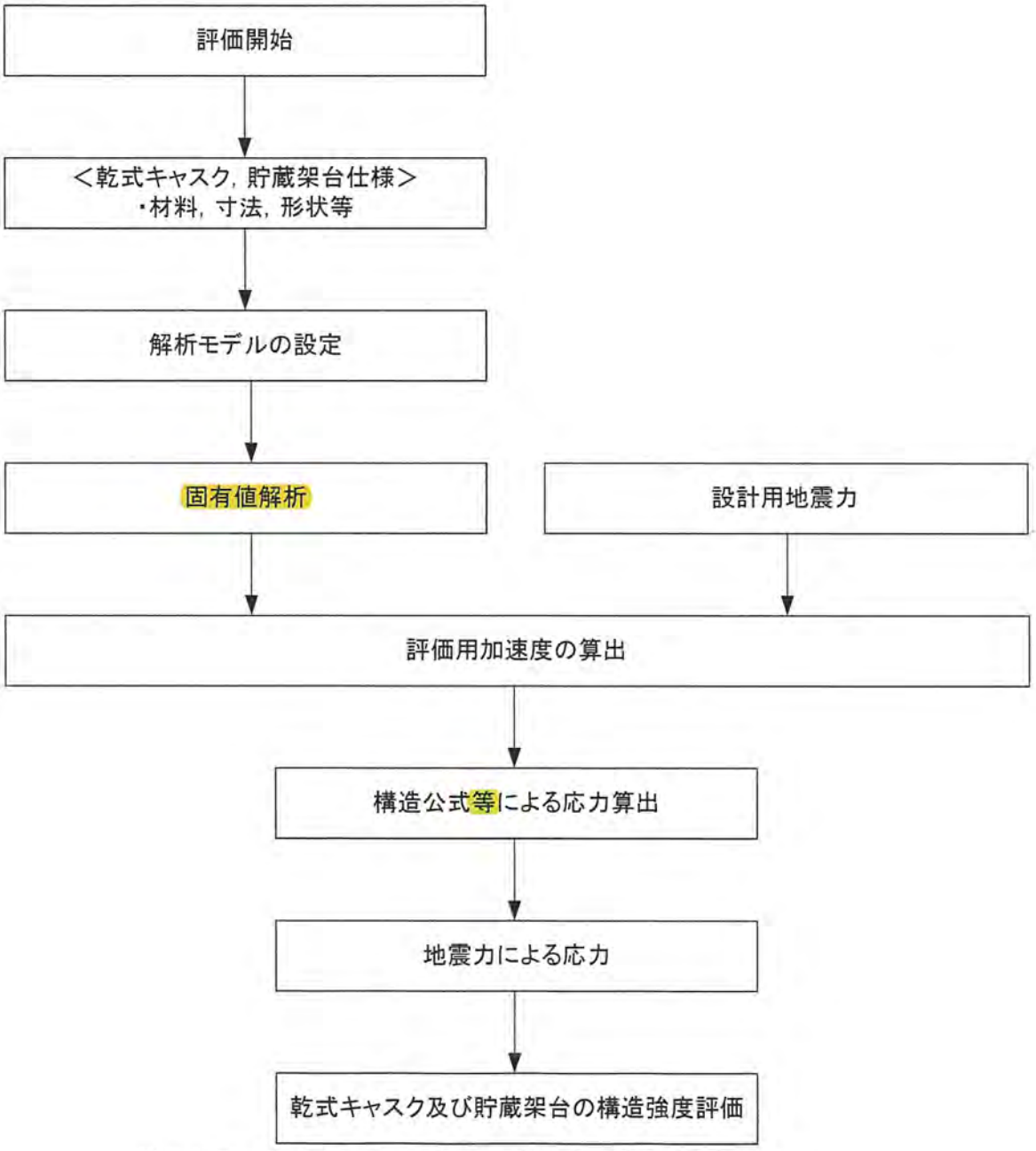
第2-1図　乾式キャスクの構造



第2-2図　貯蔵架台の構造

2.2　評価方針

乾式キャスク及び貯蔵架台の応力評価は，「2.1 構造の説明」にて示す乾式キャスク及び貯蔵架台の構造を踏まえ「3.　耐震評価箇所」にて設定する箇所において，「4. 地震応答解析」で算定した荷重による応力等が許容限界内に収まることを，「5.　乾式キャスクの応力評価方法」及び「6.　貯蔵架台の応力評価方法」にて示す方法にて確認することで実施する。乾式キャスク及び貯蔵架台の耐震評価フローを第2-3図に示す。



第2-3図　乾式キャスク及び貯蔵架台の耐震評価フロー

3. 耐震評価箇所

本資料で提示する耐震評価箇所については工事計画で評価する部位のうち，代表的な部位を示しており，工事計画の段階では，網羅的に耐震評価を実施する。

なお，その他の部位についても，許認可実績がある構造公式等を用いる方法で評価可能である。

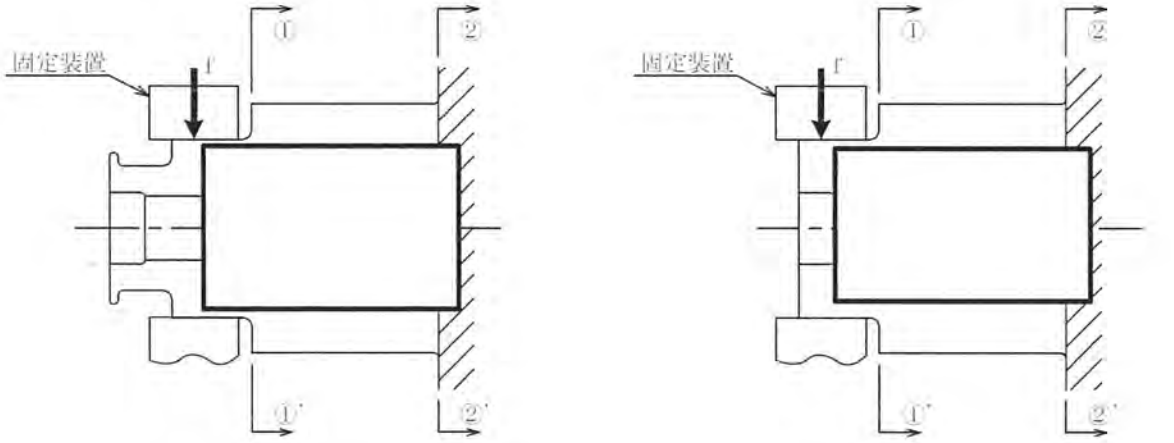
3.1 乾式キャスクの耐震評価箇所

乾式キャスクの耐震評価箇所を第3-1図に示す。

下部トラニオンには，２段トラニオンと，１段トラニオンがあるが，第3-1図に示すとおり，貯蔵架台の固定装置により固定される位置及び胴との接続部から固定位置までの形状は，２段トラニオンと１段トラニオンで同じであるため，解析モデルは共通である。

評価箇所については，貯蔵時の乾式キャスクの安全機能を維持する観点で，固定部であるトラニオンを対象として応力発生箇所を考慮して選定する。

（第3-1表参照）



(a) 下部２段トラニオン（90°，270°）　　(b) 下部１段トラニオン（0°，180°）

第 3-1 図　トラニオンの耐震評価箇所

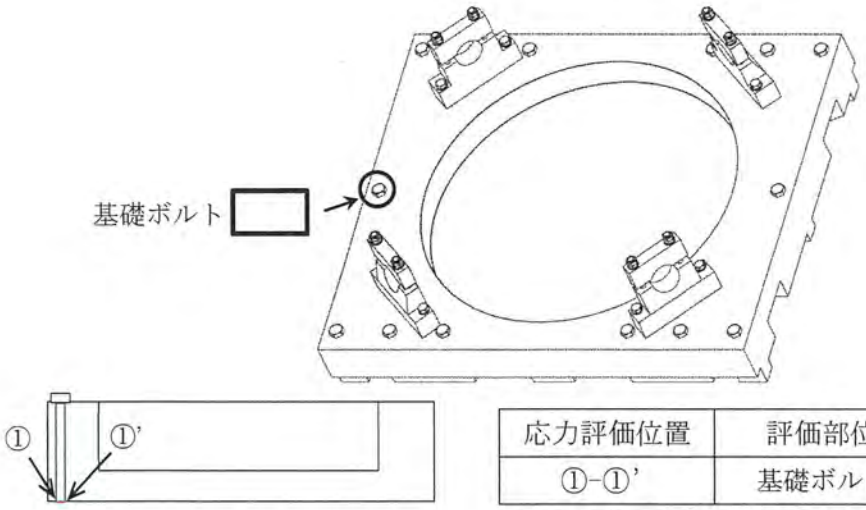
第 3-1 表　乾式キャスクの耐震評価箇所及び評価内容

耐震評価箇所		評価内容
①-①'	トラニオン	地震時に構造健全性を維持できることを評価
②-②'		

3.2　貯蔵架台の耐震評価箇所

貯蔵架台の耐震評価箇所を第3-2図に示す。

貯蔵架台は，地震時に貯蔵架台の固定が損なわれないように基礎ボルトを評価断面として選定する。



応力評価位置	評価部位	評価内容
①-①'	基礎ボルト	(1)

(1) 地震時に貯蔵架台の固定が損なわれないことを説明

第 3-2 図　貯蔵架台の耐震評価箇所

4. 地震応答解析

乾式キャスク及び貯蔵架台の応力解析に用いる評価用加速度を算定するため，固有値解析を実施する。乾式キャスクは，下部トラニオンを介して貯蔵架台に固定され，貯蔵架台は基礎ボルトを介して床面に固定される。固有振動数を計算するに当たり，乾式キャスクと貯蔵架台の固定方法を考慮した解析モデルを作成し、固有振動数を評価する。また，耐震計算に用いる寸法は，公称値を使用する。

ここで，固有振動数が 30Hz 以上である場合は最大床加速度の 1.2 倍を，30Hz 未満である場合は設計用床応答曲線からの読み値と最大床加速度の 1.2 倍を比較し，大きい方の値を用いて評価を行う。

5. 乾式キャスクの応力評価方法

5.1 基本方針

乾式キャスクは，「3. 耐震評価箇所」に示す安全機能を維持するための部位について，構造公式より応力評価を行う。

5.2 荷重の組合せ及び許容応力

乾式キャスクはトラニオンで固定されており，剛結合されているため，「4. 地震応答解析」で算出した荷重を与えて評価を行う。乾式キャスクのトラニオンの許容応力は，許容応力状態$\mathrm{IV_AS}$の許容限界（「原子力発電所耐震設計技術指針」，「発電用原子力設備規格設計・建設規格(2012 年版)」及び「発電用原子力設備規格材料規格(2012 年版)」を基に設定）を適用する。

乾式キャスクのトラニオンの荷重の組合せ及び許容応力状態を第 5-1 表に，許容応力を第 5-2 表に示す。

なお，乾式キャスクのトラニオン以外の部位の許容応力についても，「原子力発電所耐震設計技術指針」，「発電用原子力設備規格設計・建設規格(2012 年版)」及び「発電用原子力設備規格材料規格(2012 年版)」を基に設定する。

第 5-1 表　乾式キャスクの荷重の組合せ及び許容応力状態

施設区分		機器名称	耐震重要度分類	機器等の区分	荷重の組合せ	許容応力状態
核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設	使用済燃料貯蔵設備	乾式キャスク	S	クラス3容器 (注)	D＋P＋M＋Ss	$\mathrm{IV_AS}$

（注）耐震評価箇所であるトラニオンは，支持構造物であるため，その他の支持構造物の荷重の組合せ及び許容応力状態を適用する。

第5-2表　許容応力

許容応力状態	許容限界 (注)			
	一次応力		一次＋二次応力	
	せん断	曲げ	せん断	曲げ
$\mathrm{IV_AS}$	$1.5f_s^*$	$1.5f_b^*$	$3f_s$	$3f_b$
			Ss地震動のみによる応力振幅について評価する。	

(注)応力の組合せが考えられる場合には，組合せ応力に対しても評価を行う。

5.3 評価方法

(1) 一次応力

(a) せん断応力

最大応力が発生する箇所は第 3-1 図に示す下部トラニオンの評価位置①-①'又は②-②'である。水平方向加速度及び鉛直方向加速度により発生するせん断応力（$\tau_{①,②}$）は，次式で計算される。また，地震力により下部トラニオンに作用する荷重（F_m）は，地震時に乾式キャスクに作用する回転モーメントのつり合いより，次式のとおり計算される。（第 5-1 図参照）

$$\left.\begin{aligned}\tau_{①,②}&=\frac{F_m}{A_{①,②}}\\ F_m&=\frac{m\cdot(G_1\cdot h_{CG}-G_2\cdot a_2)}{\left(a_1+2\cdot\frac{a_2^2}{a_1}\right)}\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\quad(5.1)$$

ここで，計算式中の記号は以下のとおりである。

G_1 ：水平方向加速度（m/s^2）

$G_1=C_H\cdot g$

G_2 ：鉛直方向加速度（m/s^2）

$G_2=(1-C_V)\cdot g$

C_H ：水平震度

C_V ：鉛直震度

h_{CG} ：乾式キャスクの底面から重心までの高さ（mm）

a_1 ：回転支点O_Cから下部トラニオン固定装置の中心までの距離（mm）

a_2 ：回転支点O_Cから乾式キャスクの中心までの距離（mm）

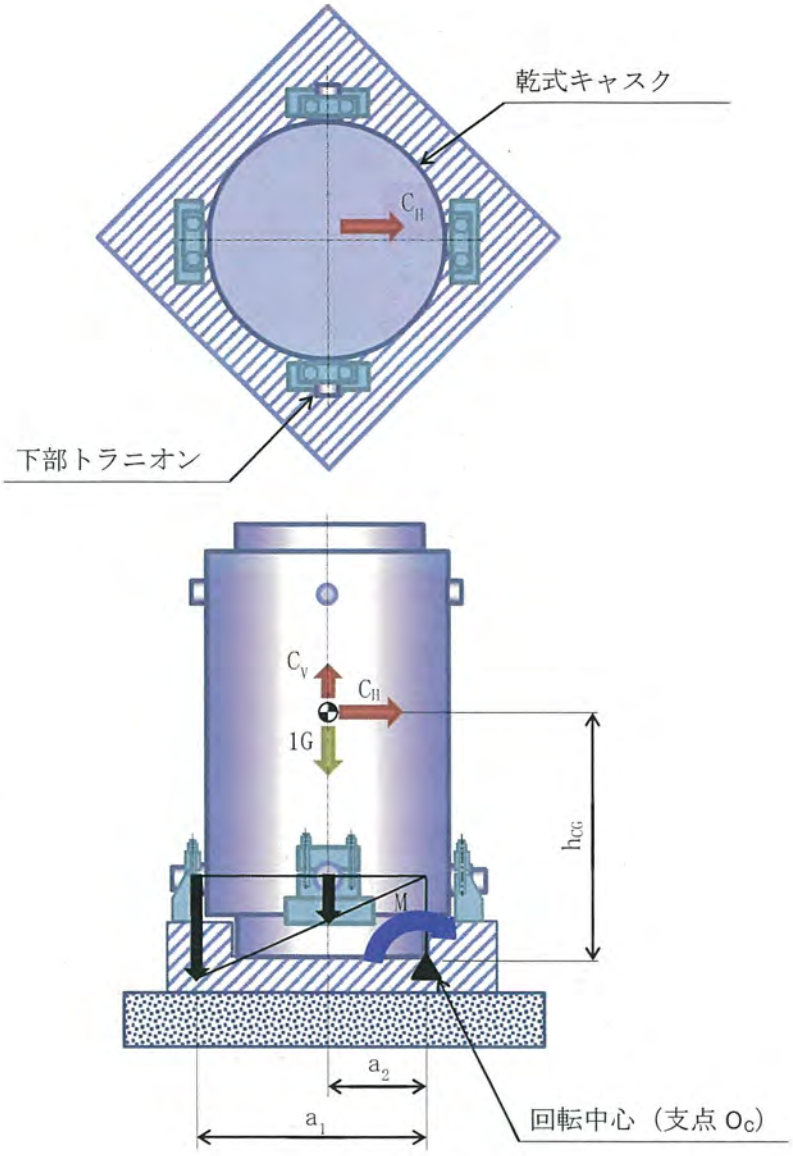
F_m ：地震力により下部トラニオンに作用する荷重（N）

m ：貯蔵時における乾式キャスクの質量（kg）

$A_{①}$ ：評価位置①-①'の断面積（mm^2）

$A_{②}$ ：評価位置②-②'の断面積（mm^2）

g ：重力加速度（9.80665 m/s^2）



第5-1図　地震時に作用する荷重の解析モデル (注)

（注）　貯蔵架台とトラニオンの方位は，地震力により下部トラニオンに作用する荷重F_mが最大となる関係としている。

(b) 曲げ応力

最大応力が発生する箇所は第 3-1 図に示す下部トラニオンの評価位置①-①'又は②-②'である。水平方向加速度及び鉛直方向加速度により発生する曲げ応力（$\sigma_{b①,\ b②}$）は，トラニオンを片持ち梁としてモデル化し，次式で計算される。また，地震力により下部トラニオンに作用する荷重（F_m）は，地震時に乾式キャスクに作用する回転モーメントのつり合いより，次式のとおり計算される（第 5-1 図参照）。

$$\left.\begin{aligned}\sigma_{b①,\ b②}&=\frac{M_{①,\ ②}}{Z_{①,\ ②}}\\ M_{①,\ ②}&=F_m\cdot L_{①,\ ②}\\ F_m&=\frac{m\cdot\left(G_1\cdot h_{CG}-G_2\cdot a_2\right)}{\left(a_1+2\cdot\frac{{a_2}^2}{a_1}\right)}\end{aligned}\right\}\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\ (5.2)$$

ここで，計算式中の記号は以下のとおりである。

$M_{①,②}$ ：曲げモーメント（N･mm）

F_m ：地震力により下部トラニオンに作用する荷重（N）

$Z_①$ ：評価位置①-①'の断面係数（mm^3）

$Z_②$ ：評価位置②-②'の断面係数（mm^3）

$L_①$ ：評価位置①-①'と荷重作用位置との距離（mm）

$L_②$ ：評価位置②-②'と荷重作用位置との距離（mm）

m ：貯蔵時における乾式キャスクの質量（kg）

G_1 ：水平方向加速度（m/s^2）

$G_1=C_H\cdot g$

G_2 ：鉛直方向加速度（m/s^2）

$G_2=(1-C_V)\cdot g$

C_H ：水平震度

C_V ：鉛直震度

h_{CG} ：乾式キャスクの底面から重心までの高さ（mm）

a_1 ：回転支点O_Cから下部トラニオン固定装置中心までの距離（mm）

a_2 ：回転支点O_Cから乾式キャスクの中心までの距離（mm）

g ：重力加速度（9.80665 m/s^2）

(c) 組合せ応力（曲げ応力とせん断応力）

最大応力が発生する箇所は第3-1図に示す下部トラニオンの評価位置 ①-①’又は②-②’である。曲げ応力（$\sigma_{b①,\ b②}$）とせん断応力（$\tau_{①,\ ②}$）との組合せ応力（$\sigma_{T①,\ T②}$）は，次式で計算される。

$$\sigma_{T①,\ T②}=\sqrt{\sigma_{b①,\ b②}{}^{2}+3\cdot\tau_{①,\ ②}{}^{2}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (5.3)$$

ここで，計算式中の記号は以下のとおりである。

$\sigma_{b①,\ b②}$　：(5.1) 式で計算される値

$\tau_{①,\ ②}$　：(5.2) 式で計算される値

(2) 一次＋二次応力

(a) せん断応力

地震力によるせん断応力（$\tau_{①,\ ②}$）の全振幅は，(5.1) 式で求めたせん断応力（$\tau_{①,\ ②}$）の２倍とする。

(b) 曲げ応力

地震力による曲げ応力（$\sigma_{b①,\ b②}$）の全振幅は，(5.2) 式で求めた曲げ応力（$\sigma_{b①,\ b②}$）の２倍とする。

6. 貯蔵架台の応力評価方法

6.1 基本方針

貯蔵架台は，「3. 耐震評価箇所」に示す安全機能を維持するための部位について，構造公式より応力評価を行う。

6.2 荷重の組合せ及び許容応力

貯蔵架台は基礎ボルトで固定されており，「4. 地震応答解析」で算出した荷重を与えて評価を行う。

貯蔵架台の評価部位の許容応力は，許容応力状態$\mathrm{IV_AS}$の許容限界（「原子力発電所耐震設計技術指針」，「発電用原子力設備規格設計・建設規格(2012年版)」及び「発電用原子力設備規格材料規格(2012年版)」を基に設定）を適用する。

貯蔵架台の荷重の組合せ及び許容応力状態を第6-1表に，許容応力を第6-2表に示す。

なお，基礎ボルト以外の部位の許容応力についても，「原子力発電所耐震設計技術指針」，「発電用原子力設備規格設計・建設規格(2012年版)」及び「発電用原子力設備規格材料規格(2012年版)」を基に設定する。

第6-1表　貯蔵架台の荷重の組合せ及び許容応力状態

施設区分		機器名称	耐震重要度分類	機器等の区分	荷重の組合せ	許容応力状態
核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設	使用済燃料貯蔵設備	貯蔵架台	S	—(注)	D＋P＋M＋Ss	$\mathrm{IV_AS}$

（注）その他の支持構造物の荷重の組合せ及び許容応力状態を適用する。

第6-2表　許容応力（その他の支持構造物）

許容応力状態	許容限界(注)（ボルト等）	
	一次応力	
	引張	せん断
$\mathrm{IV_AS}$	$1.5f_t^*$	$1.5f_s^*$

（注）　応力の組合せが考えられる場合には，組合せ応力に対しても評価を行う。

6.3 評価方法

貯蔵架台は，一体構造物であり，乾式キャスクのトラニオンを固定している。

また，基礎ボルトで貯蔵建屋床面と固定し，乾式キャスクを設置した貯蔵架台の横ずれを防止している。

以上のことから，「3. 耐震評価箇所」に示す基礎ボルトについて，応力評価を行う。

なお，架台の定着部は，原則としてボルトの限界引き抜き力に対して，コンクリート設計基準強度及びせん断力算定断面積による引き抜き耐力が上回るよう埋込深さを算定することで，基礎ボルトに対して十分な余裕を持つように設計する。

基礎ボルトの発生応力は，第 6-1 図に示すようにモーメントのつり合いより算出した荷重より，構造公式を用いて求める。応力算出式を以下に示す。

$$M = F_H \mathrm{h_{Vg}} + (F_V - \mathrm{mg})\mathrm{h_{Hg}} \tag{6.1}$$

$$F_T = M \div \left(\frac{{I_1}^2}{I_0} \times 2 + I_0 \times 6\right) \tag{6.2}$$

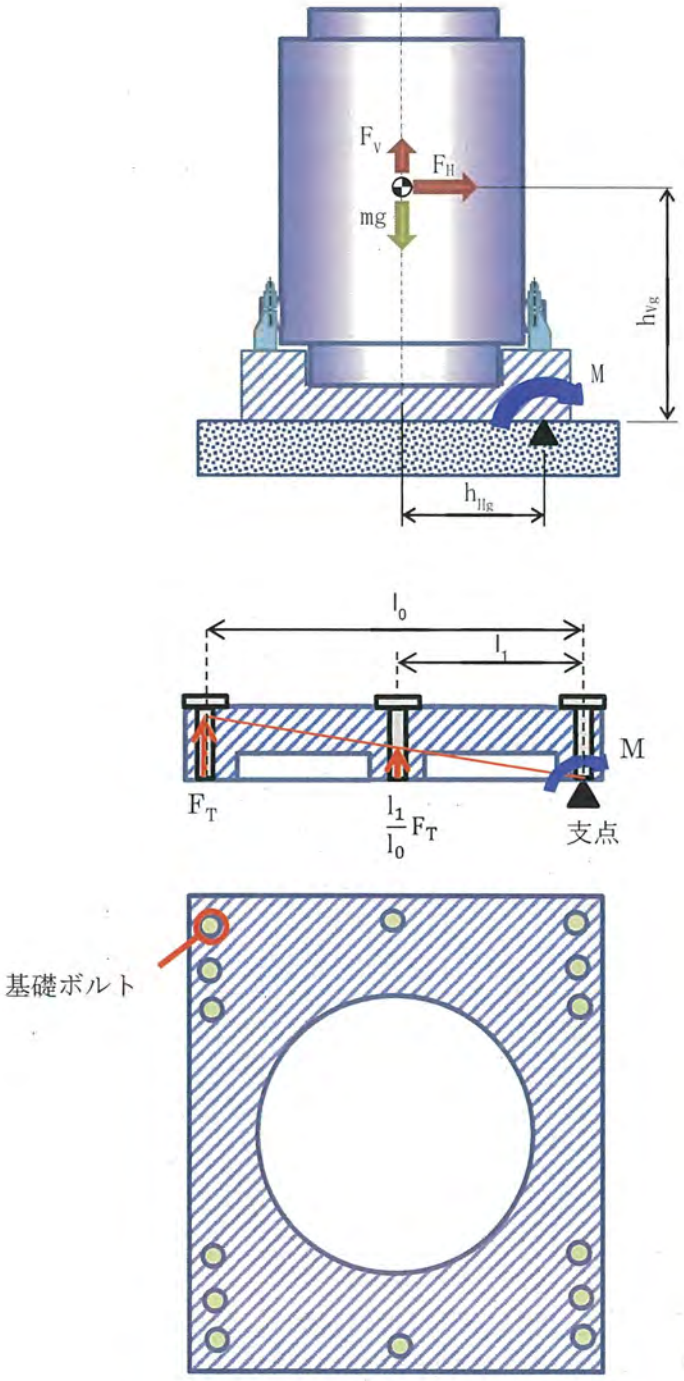
$$\sigma_t = \frac{F_T}{A_b \times 0.75} \tag{6.3}$$

$$F_\tau = \frac{F_H}{N} \tag{6.4}$$

$$\sigma_\tau = \frac{F_\tau}{A_b \times 0.75} \tag{6.5}$$

ここで，

M	：	貯蔵架台に生じる回転モーメント(N･m)
F_H	：	水平方向荷重（N）
F_V	：	鉛直方向荷重（N）
m	：	貯蔵時における乾式キャスクの質量（kg）
g	：	重力加速度（9.80665 m/s^2）
h_{Vg}，h_{Hg}	：	支点から重心までの水平及び鉛直方向距離（m）
F_T	：	基礎ボルト 1 本あたりの引張荷重（N）
σ_t	：	基礎ボルト 1 本あたりの引張応力（MPa）
l_0，l_1	：	支点から基礎ボルトまでの距離（m）
A_b	：	基礎ボルトの軸部断面積（mm^2）
F_τ	：	基礎ボルト 1 本あたりのせん断荷重（N）
N	：	基礎ボルトの本数（本）
σ_τ	：	基礎ボルト 1 本あたりのせん断応力（MPa）



第 6-1 図　基礎ボルトの応力算出に用いる諸元

別添３

使用済燃料乾式貯蔵施設に対する
波及的影響の検討について

1. 概要

「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置，構造及び設備の基準に関する規則」（以下「設置許可基準規則」という。）の解釈の別記４第４条において，兼用キャスクが，周辺施設からの波及的影響によって，その安全機能を損なわないように設計するよう要求されている。

伊方発電所の使用済燃料乾式貯蔵施設（以下「乾式貯蔵施設」という。）において，兼用キャスクである使用済燃料乾式貯蔵容器（以下「乾式キャスク」という。）が，周辺施設等からの波及的影響によって安全機能を損なわないように設計することとし，ここではその設計方針について示す。

2. 波及的影響の検討方針

波及的影響の検討は以下に示す方針に基づき実施する。

(1) 設置許可基準規則の解釈の別記４第４条に記載された３つの事項をもとに，検討すべき事象を整理する。

また，原子力発電所の地震被害情報をもとに，３つの事項以外に検討すべき事項がないか確認し，新たな検討事項が抽出された場合には，その事項を追加する。

(2) (1)で整理した検討事象をもとに，乾式キャスクに対して波及的影響を及ぼすおそれのある周辺施設等※を抽出する。

※ 使用済燃料乾式貯蔵建屋（以下「貯蔵建屋」という。）内に設置する周辺施設及び乾式キャスクの安全機能を維持するために必要な機能を有していない設備，並びに貯蔵建屋周辺に位置する施設を対象とする。また，乾式キャスク間の相互影響を考慮し，隣接する乾式キャスクも対象とする。

(3) (2)で抽出された周辺施設等について，配置，設計，運用上の観点から乾式キャスクの安全機能への影響評価を実施する。

3. 事象検討

3.1 設置許可基準規則の解釈の別記４に基づく事象の検討

設置許可基準規則の解釈の別記４第４条に記載された３つの事項をもとに，以下に具体的な検討事象を整理する。

① 設置地盤及び地震応答性状の相違等に起因する不等沈下又は相対変位による影響
- (1) 不等沈下に伴う周辺施設等の傾きや倒壊による貯蔵建屋との衝突
- (2) 地震時の建屋間相対変位による貯蔵建屋との衝突
- (3) 不等沈下や相対変位による建屋間渡り配管等の損傷

② 乾式キャスク間の相互影響
- (1) 隣接する乾式キャスク同士の衝突

③ 乾式キャスクと周辺施設等との相互影響（周辺施設の損傷，転倒，落下等による乾式キャスクへの影響を含む。）
- (1) 貯蔵建屋外の周辺施設等の損傷，転倒，落下等による貯蔵建屋との衝突
- (2) 貯蔵建屋内の周辺施設等の損傷，転倒，落下等による乾式キャスクとの衝突
- (3) 乾式キャスクに接続する周辺施設等の損傷による相互影響
- (4) 油又は水等を内包する周辺施設等の損傷による火災・溢水

3.2 地震被害事例に基づく事象の検討

また，上記の事項の他に考慮すべき事項がないかを確認するため，原子力施設情報公開ライブラリー（ＮＵＣＩＡ）に登録された以下の地震を対象に被害情報を確認する。

(対象とした情報)
- 宮城県沖地震（女川原子力発電所：平成 17 年 8 月）
- 能登半島地震（志賀原子力発電所：平成 19 年 3 月）
- 新潟県中越沖地震（柏崎刈羽原子力発電所：平成 19 年 7 月）
- 駿河湾地震（浜岡原子力発電所：平成 21 年 8 月）
- 東北地方太平洋沖地震（女川原子力発電所，東海第二発電所※：平成 23 年 3 月）

その結果，これらの地震の被害要因のうち，3.1 の検討事象に整理できないものとして，津波，溢水，火災及び警報発信等の設備損傷以外の要因が挙げられた。

津波，溢水及び火災については，別途「5 条　津波による損傷の防止」，「8 条　火災による損傷の防止」及び「9 条　溢水による損傷の防止」への適合性評価を実施するため，ここでは検討の対象外とする。

また，警報発信等については，設備損傷以外の要因による不適合事象であることから，波及的影響の観点で考慮すべき事象に当たらないと判断した。

4. 防護対象

貯蔵建屋内の輸送荷姿以外で静置している乾式キャスク（支持部及び基礎を含む。）に対して波及的影響を及ぼすおそれのある周辺施設等を抽出する。

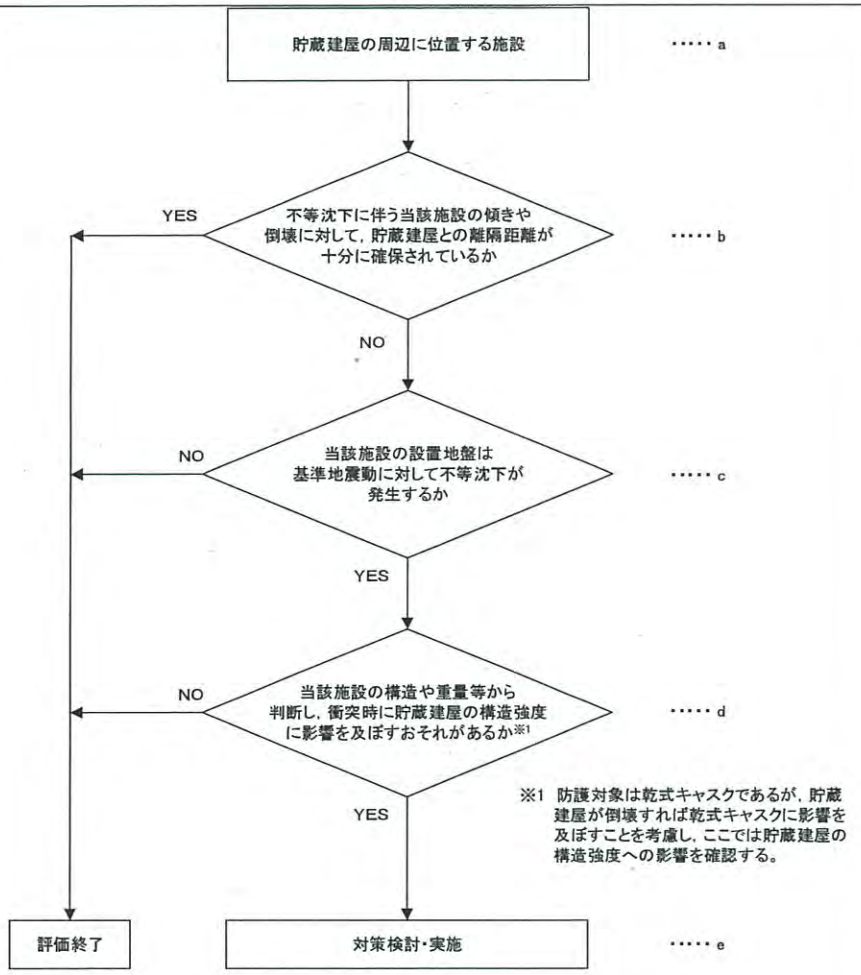
5. 波及的影響を及ぼすおそれのある周辺施設等の抽出方法及び影響評価方法

3項で整理した各検討事象に基づき，波及的影響を及ぼすおそれのある周辺施設等の抽出及び影響評価フローを作成し，当該フローに基づき検討を行う。検討事象とフローの整理を第5-1表に示す。

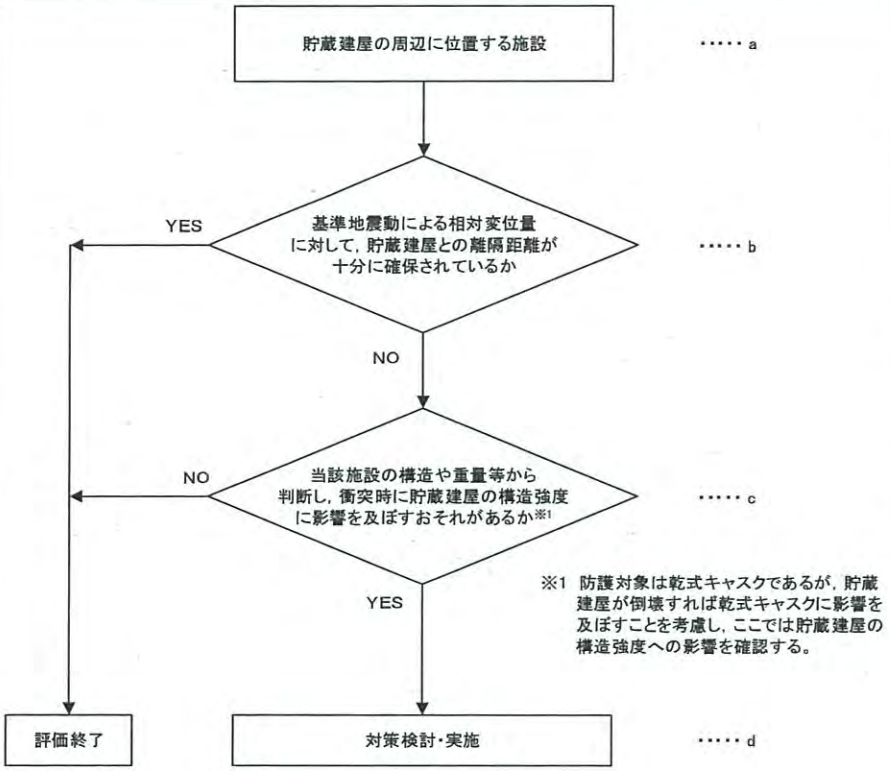
第5-1表　検討事象とフローの整理

検討事象		フロー
①不等沈下又は相対変位による影響	(1)不等沈下による衝突	第5-2表
	(2)相対変位による衝突	第5-3表
	(3)渡り配管等の損傷	第5-4表
②乾式キャスク間の相互影響	(1)乾式キャスク同士の衝突	第5-5表
③乾式キャスクと周辺施設等との相互影響	(1)損傷，転倒，落下等による衝突（建屋外）	第5-6表
	(2)損傷，転倒，落下等による衝突（建屋内）	第5-7表
	(3)接続部の影響	第5-8表

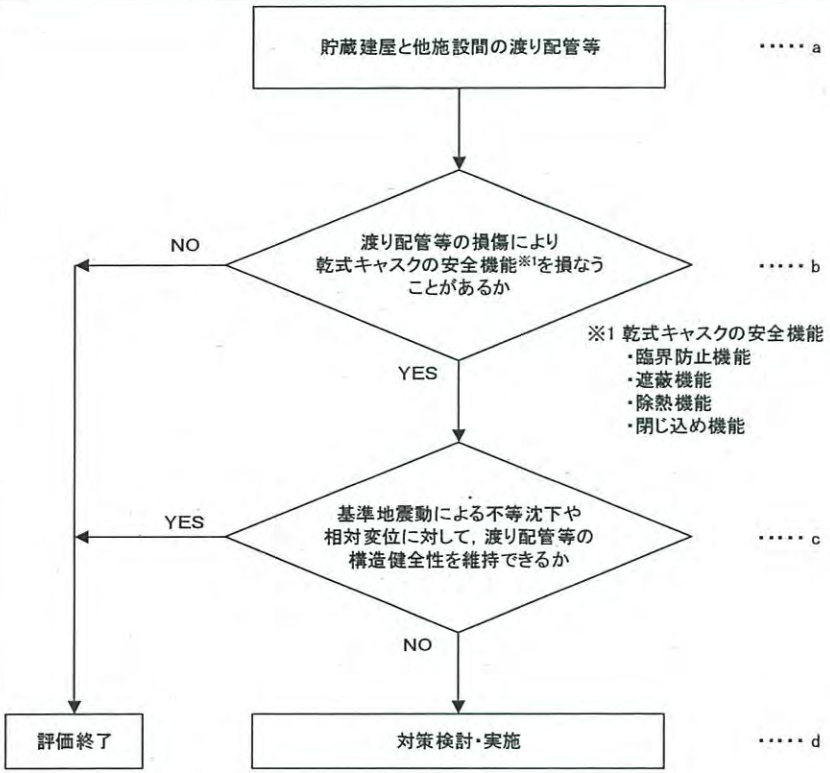
第 5-2 表　検討フロー（不等沈下による衝突）

フロー	説明
	a. 貯蔵建屋の周辺に位置する施設を検討対象とする。 b. 地盤の不等沈下に伴う当該施設の傾きや倒壊に対して，貯蔵建屋に衝突しない程度に十分な離隔距離をとって配置されているかを確認する。 c. 当該施設の設置地盤は，基準地震動に対して十分な支持性能を持つ岩盤であるかを確認する。 d. 当該施設の構造や重量等から判断し，傾きや倒壊により貯蔵建屋に衝突した場合に，貯蔵建屋の構造強度に影響を及ぼすおそれがあるかを確認する。 e. 貯蔵建屋の構造強度に影響を及ぼすおそれがある施設に対して，十分な離隔距離の確保や基礎地盤の改良工事等を行い，不等沈下による波及的影響を防止する。

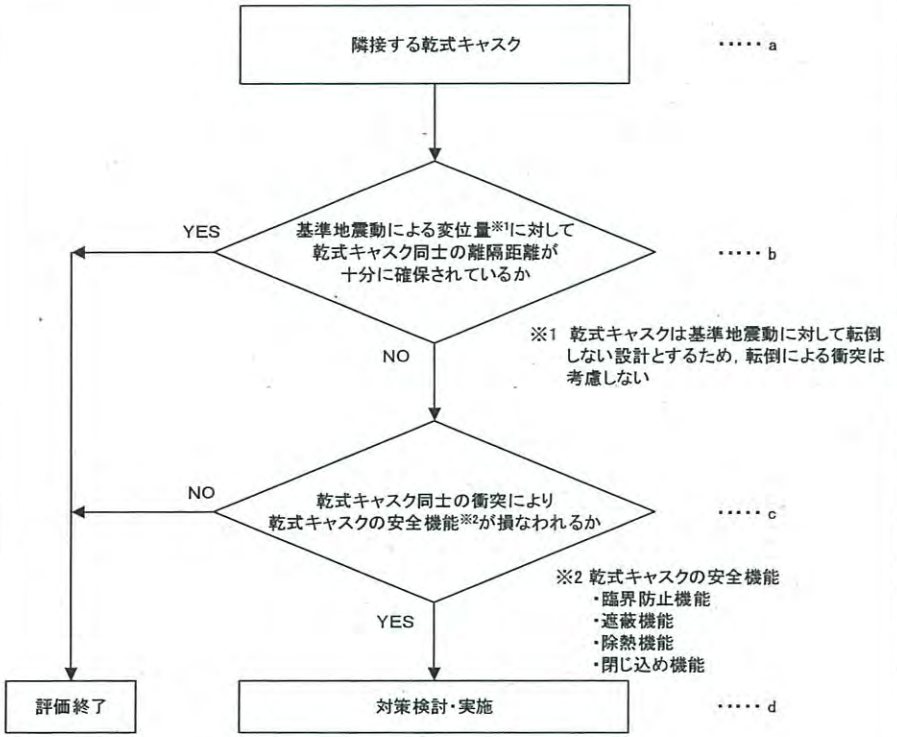
第 5-3 表　検討フロー（相対変位による衝突）

フロー	説明
	a. 貯蔵建屋の周辺に位置する施設を検討対象とする。 b. 基準地震動による相対変位量に対して，貯蔵建屋に衝突しない程度に十分な離隔距離をとって配置されているかを確認する。 c. 当該施設の構造や重量等から判断し，相対変位により貯蔵建屋に衝突した場合に，貯蔵建屋の構造強度に影響を及ぼすおそれがあるかを確認する。 d. 貯蔵建屋の構造強度に影響を及ぼすおそれがある施設に対して，十分な離隔距離の確保等を行い，相対変位による波及的影響を防止する。

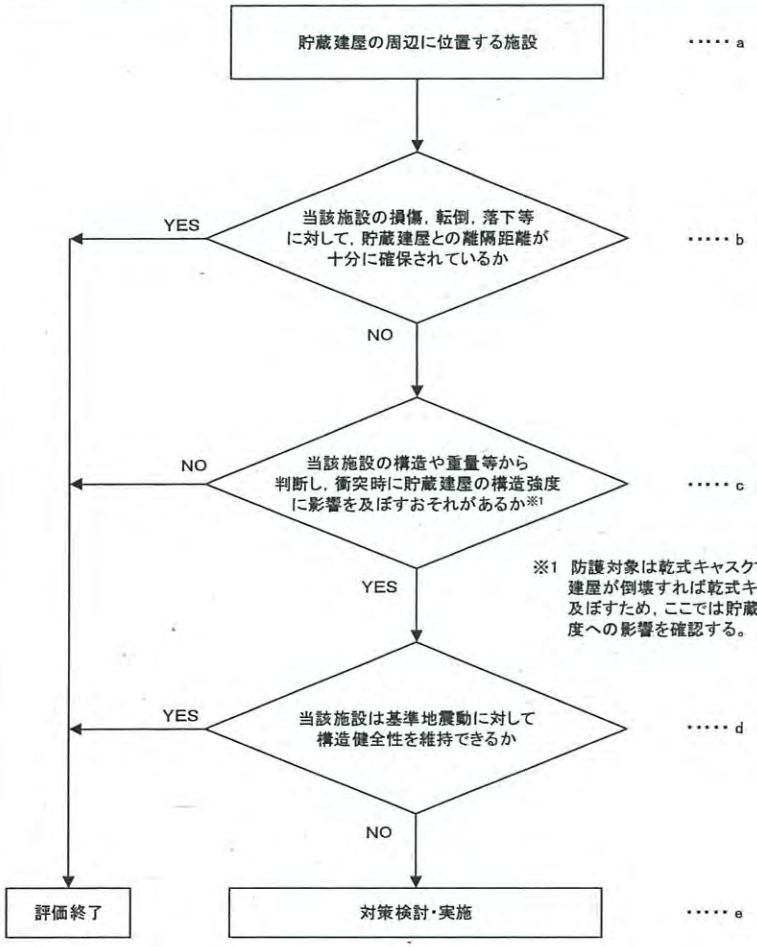
第 5-4 表　検討フロー（渡り配管等の損傷）

フロー	説明
	a. 貯蔵建屋と他施設間の渡り配管や電路を検討対象とする。 b. 不等沈下や相対変位が生じた場合には渡り配管や電路が損傷することが考えられるため，これらが損傷した場合に，乾式キャスクの安全機能を損なうことがあるかを確認する。 c. 基準地震動による不等沈下や相対変位に対して，渡り配管や電路の構造健全性を維持できるかを確認する。 d. 乾式キャスクの安全機能を担保するため必要な渡り配管や電路に対して，不等沈下や相対変位を考慮した設計を行い，波及的影響を防止する。

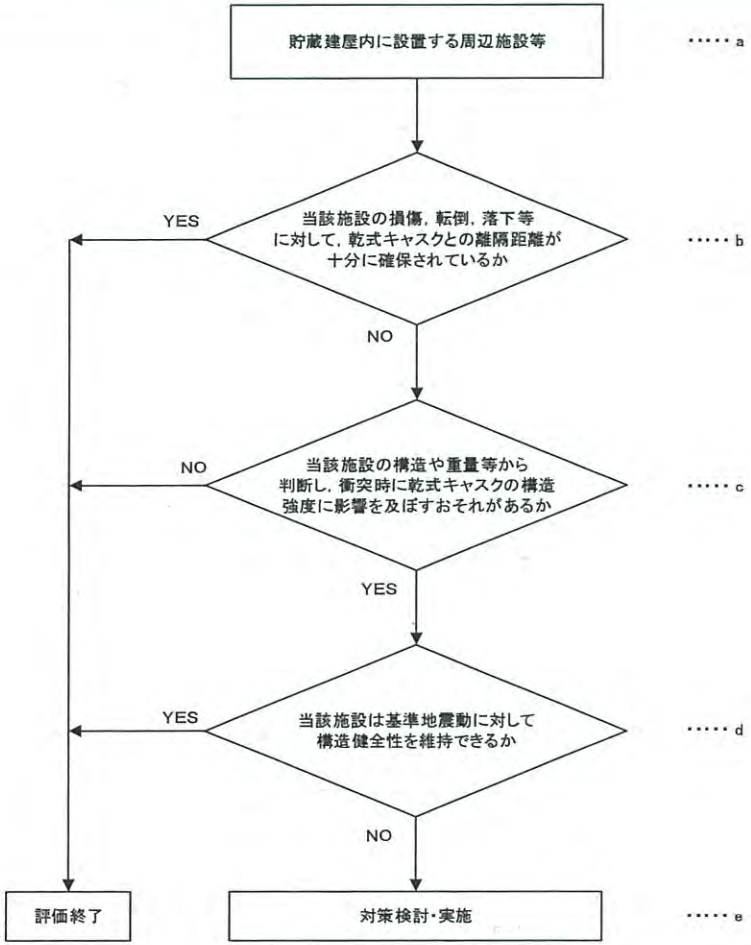
第 5-5 表　検討フロー（乾式キャスク同士の衝突）

フロー	説明
	a. 隣接する乾式キャスクを検討対象とする。 b. 基準地震動による乾式キャスクの変位量（振れ幅）に対して，乾式キャスク同士が衝突しない程度に十分な離隔距離をとって配置されているかを確認する。 c. 乾式キャスク同士の衝突により，安全機能を損なうことがあるかを確認する。 d. 乾式キャスク間の離隔距離を十分に確保する等の対策を行い，乾式キャスク間の相互影響による波及的影響を防止する。

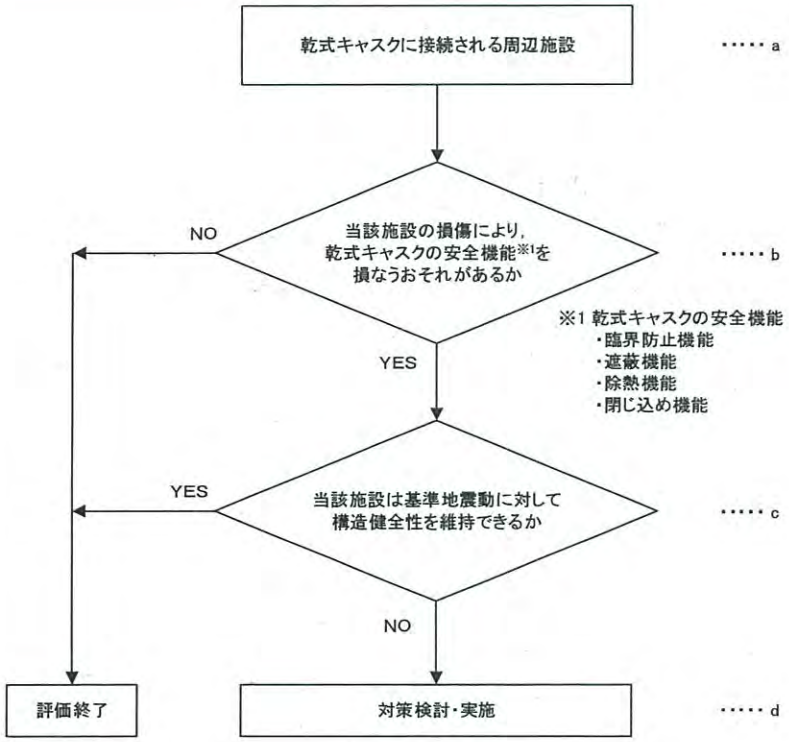
第 5-6 表　検討フロー（損傷，転倒，落下等による衝突（建屋外））

フロー	説明
	a. 貯蔵建屋の周辺に位置する施設を検討対象とする。 b. 当該施設の損傷，転倒，落下等に対して，貯蔵建屋に衝突しない程度に十分な離隔距離をとって配置されているかを確認する。 c. 当該施設の構造や重量等から判断し，損傷，転倒，落下等により貯蔵建屋に衝突した場合，貯蔵建屋の構造強度に影響を及ぼすおそれがあるかを確認する。 d. 当該施設が，地震時に損傷，転倒，落下等が生じないことを確認するため，基準地震動に対して構造健全性を維持できるかを確認する。 e. 基準地震動に対して構造健全性を維持できない施設に対して，十分な離隔距離の確保や耐震補強工事等を行い，損傷，転倒，落下等による波及的影響を防止する。

第 5-7 表　検討フロー（損傷，転倒，落下等による衝突（建屋内））

フロー	説明
	a.　貯蔵建屋内に設置する周辺施設及び乾式キャスクの安全機能を維持するために必要な機能を有していない設備を検討対象とする。 b.　当該施設の損傷，転倒，落下等に対して，乾式キャスクに衝突しない程度に十分な離隔距離をとって配置されているかを確認する。 c.　当該施設の構造や重量等から判断し，損傷，転倒，落下等により乾式キャスクに衝突した場合，乾式キャスクの構造強度に影響を及ぼすおそれがあるかを確認する。 d.　当該施設が，地震時に損傷，転倒，落下等が生じないことを確認するため，基準地震動に対して構造健全性を維持できるかを確認する。 e.　基準地震動に対して構造健全性を維持できない施設に対して，十分な離隔距離の確保や耐震補強工事等を行い，損傷，転倒，落下等による波及的影響を防止する。

第 5-8 表　検討フロー（接続部の影響）

フロー	説明
	a.　乾式キャスクに接続される周辺施設を検討対象とする。 b.　当該施設の損傷により，乾式キャスクの安全機能を損なうおそれがあるかを確認する。 c.　当該施設が，地震時に損傷しないことを確認するため，基準地震動に対して構造健全性を維持できるかを確認する。 d.　基準地震動に対して構造健全性を維持できない施設に対して，耐震補強工事等を行い，損傷による波及的影響を防止する。

6. 周辺施設等の抽出結果

波及的影響を及ぼすおそれのある周辺施設等の抽出は，屋外施設，屋内施設に分けて実施する。

6.1 屋外施設

第6-1図に示す構内配置図より，以下に示す貯蔵建屋の周辺に位置する既設施設を抽出し，5項に示す①及び③の観点の検討フローに基づき，貯蔵建屋及び乾式キャスクに対して波及的影響を及ぼすことがないことを確認する。

(1) ２－固体廃棄物貯蔵庫

２－固体廃棄物貯蔵庫は，貯蔵建屋東側EL.84m盤に設置された耐震Cクラスの建物であるが，貯蔵建屋に対して十分な離隔距離を有していることから，①及び③の観点で波及的影響を及ぼすおそれはない。

(2) 送電鉄塔

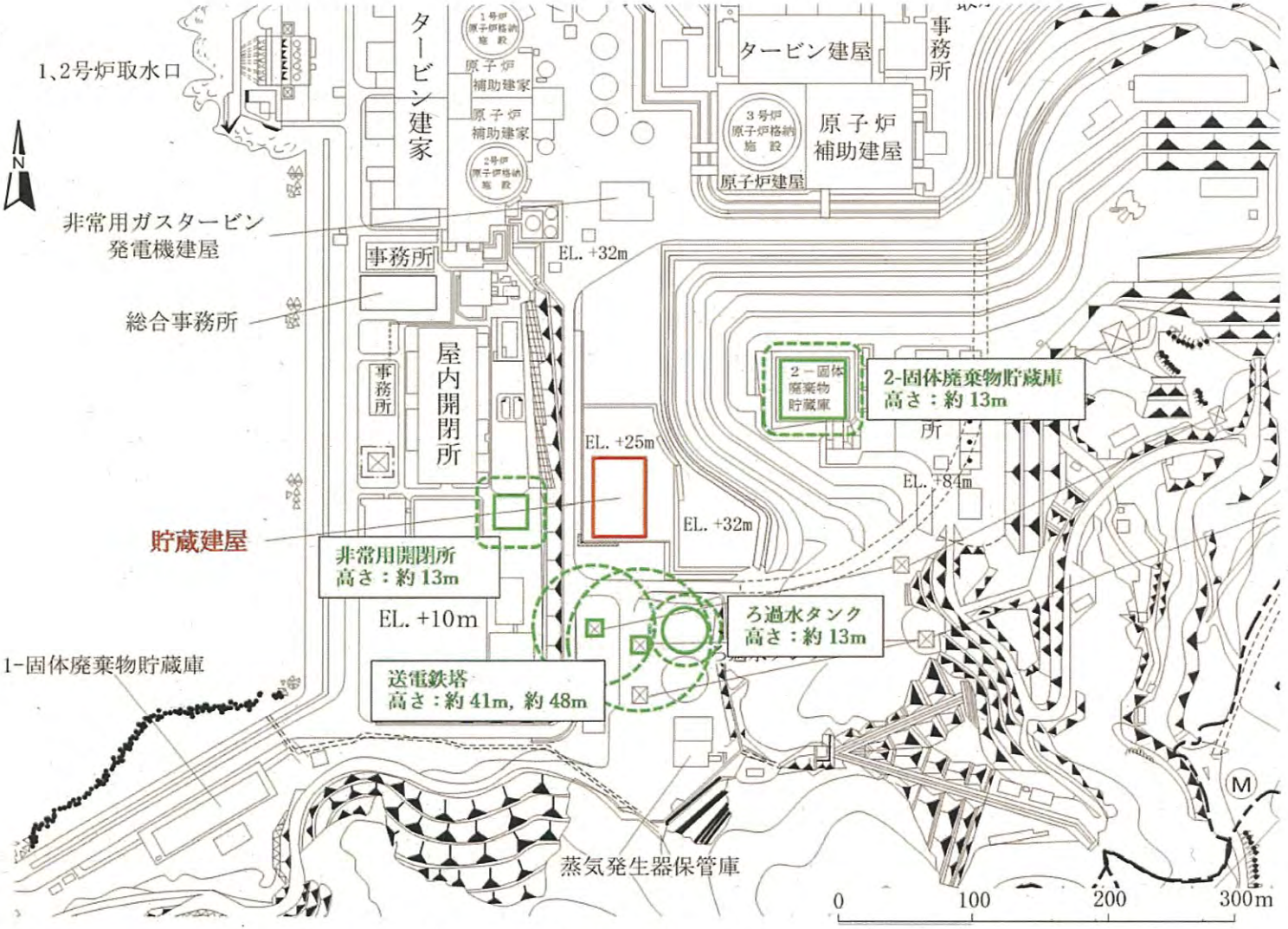
送電鉄塔（伊方北幹線No.1及び伊方南幹線No.1）は，貯蔵建屋南側EL.20m盤に設置された構造物であるが，貯蔵建屋に対して十分な離隔距離を有していることから，①及び③の観点で波及的影響を及ぼすおそれはない。

(3) ろ過水タンク

ろ過水タンクは，貯蔵建屋南側EL.20m盤に設置された耐震Cクラスの屋外タンクであるが，貯蔵建屋に対して十分な離隔距離を有していることから，①及び③の観点で波及的影響を及ぼすおそれはない。

(4) 非常用開閉所

非常用開閉所は，貯蔵建屋西側EL.10m盤に設置された建物であるが，貯蔵建屋に対して十分な離隔距離を有していることから，①及び③の観点で波及的影響を及ぼすおそれはない。


1、2号炉取水口
N
非常用ガスタービン
発電機建屋
総合事務所
貯蔵建屋
1-固体廃棄物貯蔵庫
タービン建家
1号炉
原子炉格納
施設
原子炉
補助建家
原子炉
補助建家
2号炉
原子炉格納
施設
事務所
EL. +32m
事務所
屋内開閉所
EL. +25m
EL. +32m
非常用開閉所
高さ：約 13m
EL. +10m
送電鉄塔
高さ：約 41m，約 48m
蒸気発生器保管庫
タービン建屋
事務所
3号炉
原子炉格納
施設
原子炉
補助建屋
原子炉建屋
2-固体
廃棄物
貯蔵庫
2-固体廃棄物貯蔵庫
高さ：約 13m
所
EL. +84m
ろ過水タンク
高さ：約 13m
M
0
100
200
300m

第 6-1 図　構内配置図

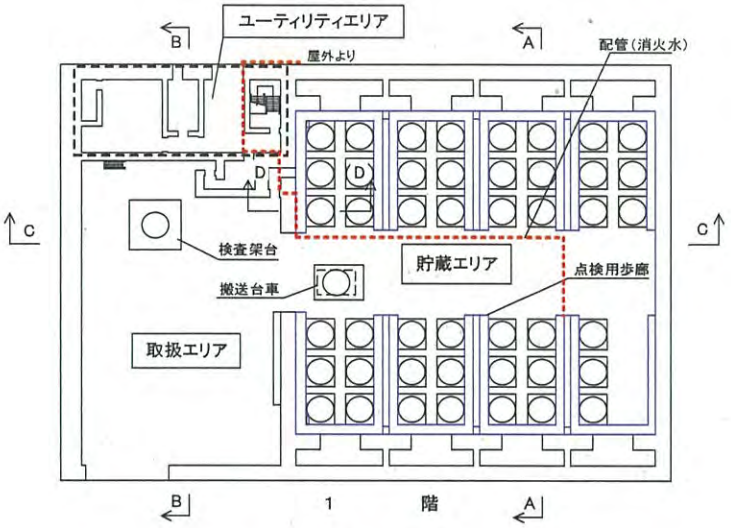
6.2　屋内施設

第 6-2 図及び第 6-3 図に示す貯蔵建屋内配置図より，第 6-1 表に示す貯蔵建屋内に設置する周辺施設等を抽出し，5 項に示す①及び③の観点の検討フローに基づき，乾式キャスクに対して波及的影響を及ぼさない設計とする。

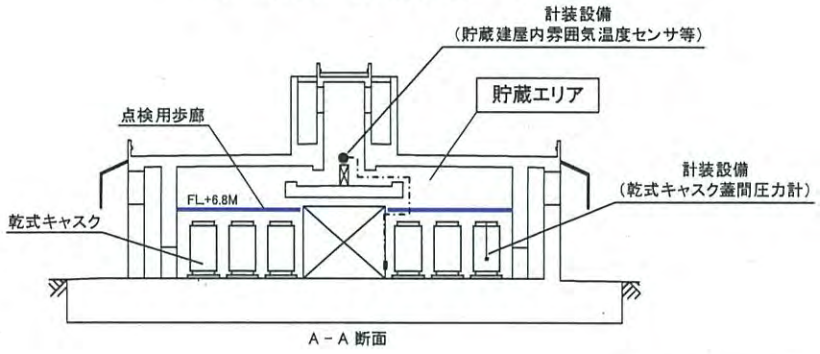
また，隣接する乾式キャスクを対象とし，5 項に示す②の観点の検討フローに基づき，乾式キャスクに対して波及的影響を及ぼさない設計とする。

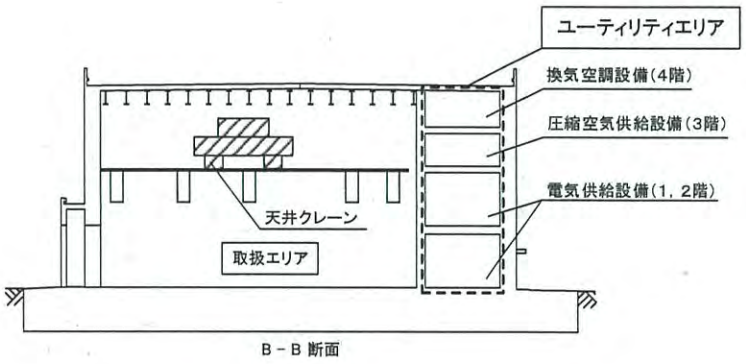
第 6-1 表　貯蔵建屋内に設置する周辺施設等

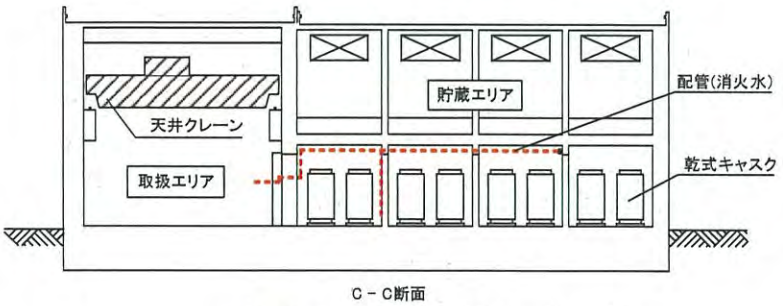
検討対象の設備	配置	対象とする検討事象
貯蔵建屋	－（全体）	③(2)
天井クレーン	取扱エリア	③(2)
搬送台車（エアパレット）	取扱エリア，貯蔵エリア	③(2)
検査架台	取扱エリア	③(2)
点検用歩廊	貯蔵エリア	③(2)
計装設備	貯蔵エリア	③(2)，③(3)
周辺施設へのユーティリティ設備（電気供給，圧縮空気供給，換気空調）	ユーティリティエリア	③(2)
渡り配管（消火水）及び渡り電路	屋外～取扱エリア	①（3)
配管（消火水）及び電路	取扱エリア，貯蔵エリア	③(2)
隣接する乾式キャスク	貯蔵エリア	②(1)



第 6-2 図　貯蔵建屋　平面図







第 6-3 図　貯蔵建屋　断面図

抽出した周辺施設等が乾式キャスクに対して波及的影響を及ぼさないように，以下のとおり設計する。

(1) 貯蔵建屋

貯蔵建屋は，離隔距離を確保するなどの配置上の対策は困難であり，地震により損壊した場合に，壁及び天井部が乾式キャスクに衝突することにより，乾式キャスクの安全機能に波及的影響を及ぼすおそれがある。このため，貯蔵建屋は基準地震動 Ss に対して損壊しない設計とする。(第 6-3 図)

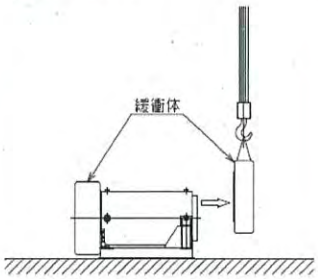
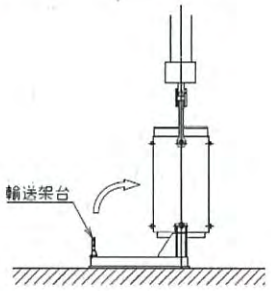
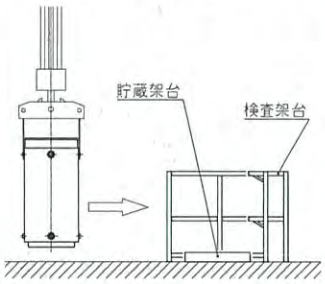
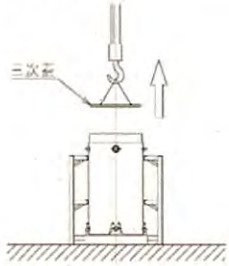
(2) 天井クレーン

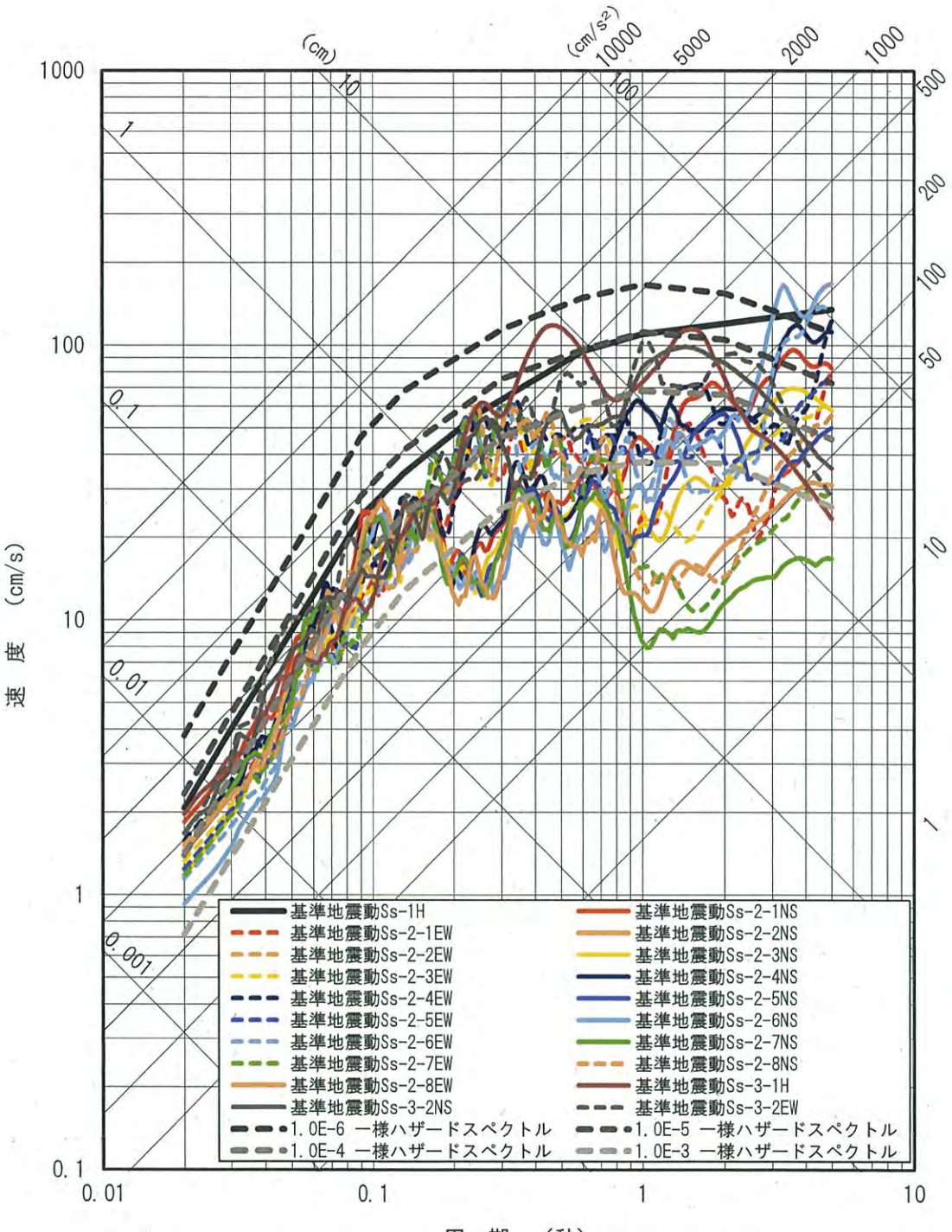
天井クレーンは，取扱エリアにおいて乾式キャスクを取り扱うものであり，乾式キャスクを取り扱うために乾式キャスクの上方に移動するが，天井クレーンが乾式キャスクの上方に位置するのは年間 1.5 時間程度（約 3 基程度）(第 6-2 表参照）と想定される。ここで，基準地震動 Ss の発生確率は，第 6-4 図及び第 6-5 図に示す伊方発電所の地震ハザード解析から得られる超過確率を参照し，JEAG4601・補-1984 で記載されている S2 の発生確率(5×10^{-4}～10^{-5}／サイト・年)を Ss の超過確率に読み替え，最大値である 5×10^{-4}／年を適用する。

以上より，JEAG4601 の地震と組み合わせるべき事象に対する発生頻度及びその状態の継続時間の考え方を準用し，天井クレーンが乾式キャスクの上方に位置する時間及び地震動の超過確率を考慮し，検討した結果，天井クレーンが乾式キャスク上方に位置する時に Ss が発生する確率は 5×10^{-4}/年×1.5 時間 ÷（365 日×24 時間）で算出され，10^{-7}／年を下回ることを確認した。そのため，天井クレーンが乾式キャスクの上方に位置する事象は，基準地震動 Ss と組み合わせるべき事象として選定されない。

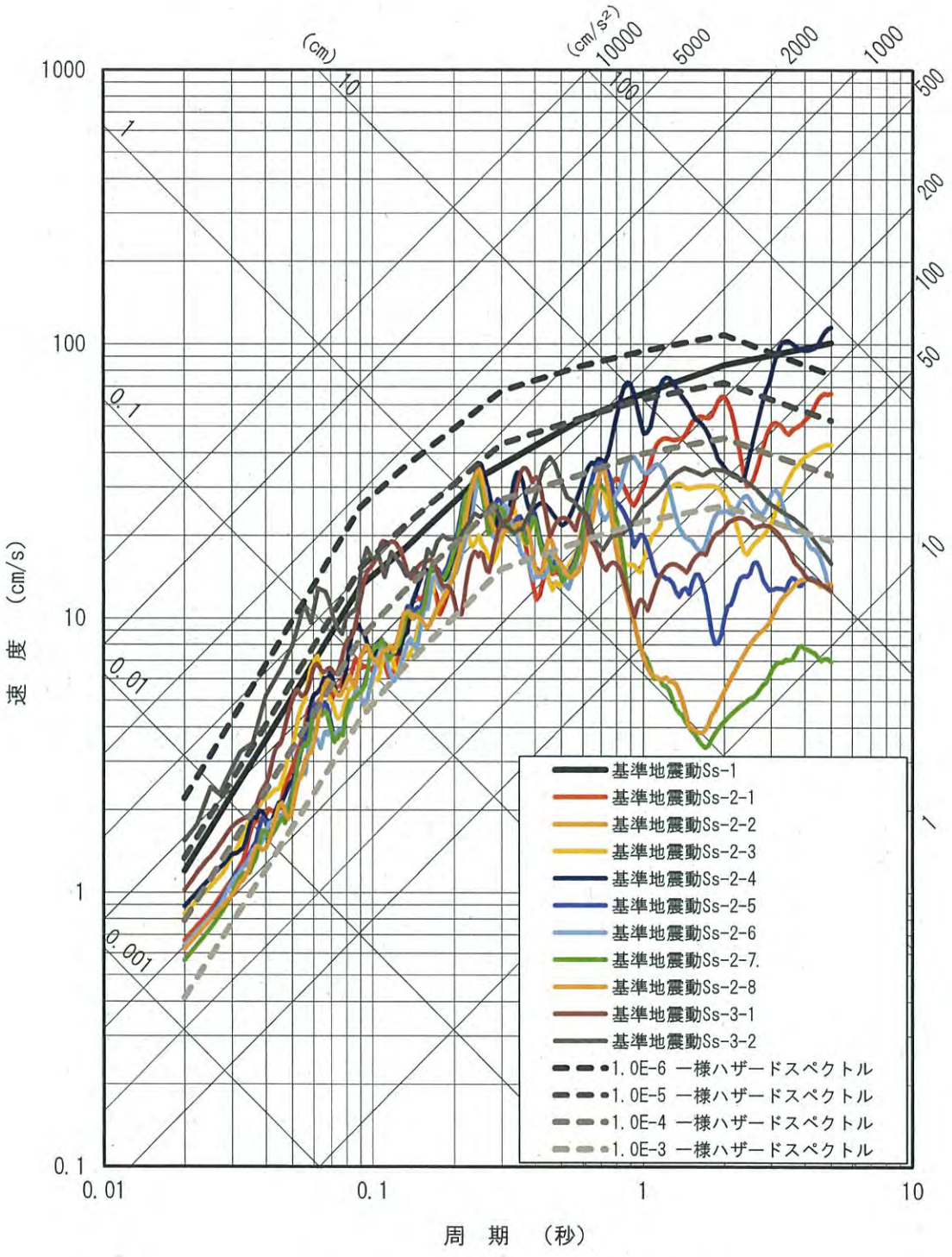
なお，貯蔵時の乾式キャスクに対しては波及的影響を及ぼさないように，貯蔵エリアには走行レールを敷設せず，貯蔵エリア上を走行することができない構造としている。(第 6-3 図 C－C 断面)

第 6-2 表　天井クレーンによる乾式キャスク１基あたりの取扱時間

取扱様態	クレーン操作	クレーン 移動速度	クレーン 移動距離	乾式キャスク 取扱時間
緩衝体取外し 	クレーン巻き上げ	約 1.8 m/分	約１m	約１分
	クレーン横行	約 6 m/分	約４m	約１分
			合計	約２分
乾式キャスク縦起こし 	クレーン巻き上げ	約 0.6 m/分	約４m	約７分
	クレーン走行	約 0.9 m/分	約４m	約７分
			合計	約１４分
吊り上げ，検査架台への移動 	クレーン巻き上げ 巻き下げ	約 0.6 m/分	約２m	約３分
	クレーン走行	約 6 m/分	約５m	約１分
			合計	約４分
３次蓋取り外し 	クレーン巻き上げ	約 4.5 m/分	約２m	約１分
	クレーン走行	約 18 m/分	約２m	約１分
			合計	約２分
			合計	約２２分



第6-4図　基準地震動の応答スペクトル及び解放基盤表面における
地震動の一様ハザードスペクトル（水平方向）



第6-5図　基準地震動の応答スペクトル及び解放基盤表面における
地震動の一様ハザードスペクトル（鉛直方向）

(3) 搬送台車（エアパレット）

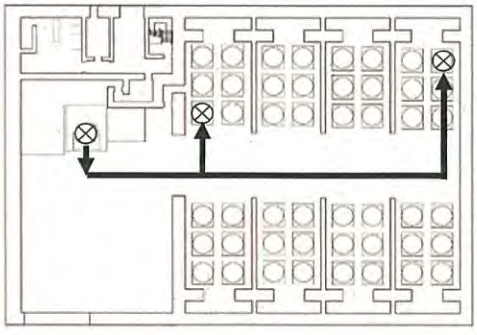
搬送台車は，乾式キャスクを取扱エリアから貯蔵エリアに搬送するものであり，乾式キャスクは貯蔵架台に載せた状態で搬送される。搬送に要する時間は年間1.5時間程度（約3基程度）（第6-3表参照）と想定される。ここで，基準地震動Ssの発生確率は，第6-4図及び第6-5図に示す伊方発電所の地震ハザード解析から得られる超過確率を参照し，JEAG4601・補-1984で記載されているS2の発生確率(5×10^{-4}～10^{-5}／サイト・年)をSsの超過確率に読み替え，最大値である5×10^{-4}／年を適用する。

以上より，JEAG4601の地震と組み合わせるべき事象に対する発生頻度及びその状態の継続時間の考え方を準用し，乾式キャスクの搬送に要する時間及び地震動の超過確率を考慮し，検討した結果，乾式キャスクを搬送台車に載せ，搬送している時にSsが発生する確率は5×10^{-4}/年×1.5時間　÷(365日×24時間)で算出され，10^{-7}／年を下回ることを確認した。そのため，搬送台車により乾式キャスクを搬送する事象は，基準地震動Ssと組み合わせるべき事象として選定されない。

また，仮に搬送台車が搬送中に逸走した場合には，貯蔵されている乾式キャスクの貯蔵架台と，搬送台車または搬送中の貯蔵架台が衝突するおそれがあるが，その際に乾式キャスク同士が衝突しないように，衝突時の乾式キャスクの接近量※に対して貯蔵架台端部と乾式キャスク間の水平距離を十分に確保する設計とする。(第6-2図)

※：乾式キャスクは貯蔵架台に固定されていることから，衝突時には搬送台車及び乾式キャスク（貯蔵架台含む）が一体で傾く。この場合の貯蔵中の乾式キャスクへの接近量は，直立状態の乾式キャスク端部から，傾いた後の乾式キャスク端部までの水平距離を指す。

第6-3表　搬送台車（エアパレット）による乾式キャスク1基あたりの取扱時間

取扱様態	搬送台車 移動速度	搬送台車 移動距離	乾式キャスク 取扱時間
乾式キャスク搬送 	2 m/分	平均約４５m (約２５m～約６５m)	約２２分

(4) 検査架台

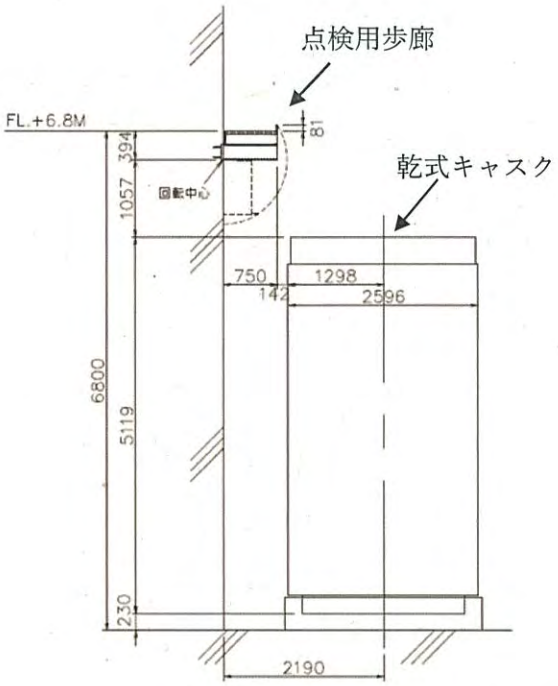
検査架台は，乾式キャスクの検査等のため，乾式キャスクの周囲に配置されるものである。

検査架台については「16 条　燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設」において，乾式キャスクと検査架台の衝突を想定しても，乾式キャスクの安全機能に影響がないことを確認しているため，損傷した場合にも乾式キャスクの安全機能に波及的影響を及ぼすおそれはない。（第 6-2 図）

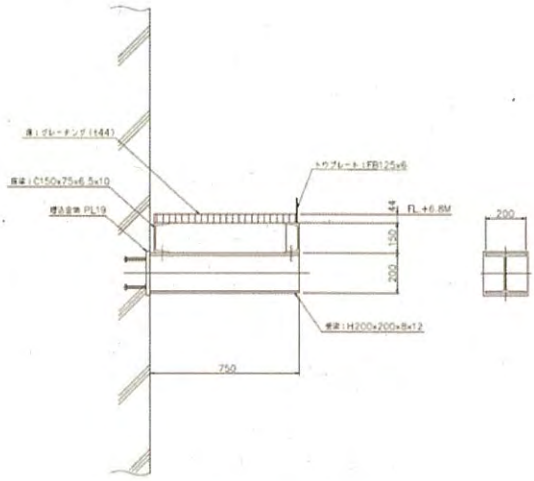
(5) 点検用歩廊

点検用歩廊は，貯蔵状態の乾式キャスクの点検等のため，貯蔵中の乾式キャスクの周囲に設置される。点検用歩廊は，貯蔵中の乾式キャスクへの波及的影響を及ぼさないように，乾式キャスクに衝突しない配置とする。

具体的には，点検用歩廊は，第 6-6 図に示すとおり設置することとしており，構造上最も弱い付け根部が損傷すると，乾式キャスクから遠ざかる方向に破壊が進むよう配置する。（第 6-2 図，第 6-3 図 A－A 断面，第 6-6 図）



キャスクと点検用歩廊の位置関係
（第 6-2 図 D－D 断面）



点検用歩廊拡大図

第 6-6 図　点検用歩廊詳細図

(6) 計装設備

a. 乾式キャスク蓋間圧力計

乾式キャスク蓋間圧力計は，貯蔵状態の乾式キャスクの一次蓋と二次蓋間の圧力を監視するため，乾式キャスク蓋部及び胴部に設置される。乾式キャスク蓋間圧力計又はその計装配管が損傷した場合においても，乾式キャスクのバウンダリは維持される設計とする。（第 6-3 図 A－A 断面）

b. 貯蔵建屋内雰囲気温度計

貯蔵建屋内雰囲気温度計を構成する設備は，建屋内の雰囲気温度を監視するため，建屋排気口付近に設置される。温度計を構成する設備は軽量であり，乾式キャスク内部との接続はないため，損傷した場合にも乾式キャスクの安全機能に波及的影響を及ぼすおそれはない。（第 6-3 図 A－A 断面）

(7) 周辺施設へのユーティリティ設備

周辺施設へのユーティリティ設備は，主に天井クレーン，エアパレット等への電気・圧縮空気供給設備，作業用の給排気ファンが該当し，主にユーティリティエリアに設置され，乾式キャスクに衝突しない配置としていることから，ユーティリティ設備の転倒及び落下等を想定しても，乾式キャスクの安全機能に波及的影響を及ぼすおそれはない。（第 6-2 図，第 6-3 図 B－B 断面）

(8) 渡り配管（消火水）及び渡り電路

乾式貯蔵施設への消火水の給水又は給電のため，貯蔵建屋外から貯蔵建屋内へ渡り配管（消火水）及び渡り電路を設置する。乾式キャスクは自然循環による空冷式であるため，渡り配管（消火水）及び渡り電路が損傷した場合にも乾式キャスクの安全機能に波及的影響を及ぼすおそれはない。

(9) 配管（消火水）及び電路

乾式貯蔵施設への消火水の給水又は給電のため，取扱エリア及び貯蔵エリア内に配管（消火水）及び電路を設置する。配管（消火水）及び電路は乾式キャスクに衝突しない程度に，十分離隔距離を確保する設計方針としていることから，配管，電路の転倒及び落下等を想定しても乾式キャスクの安全機能に波及的影響を及ぼすおそれはない。

配管（消火水）及び電路のうち，設計が確定している配管（消火水）の配置を第 6-2 図，第 6-3 図に示す。

（第 6-2 図，第 6-3 図 C－C 断面）

(10) 隣接する乾式キャスク

乾式キャスク貯蔵時に，地震が発生した場合に，隣接する乾式キャスク同士が衝突しないように，衝突時の乾式キャスクの揺れ幅に対して乾式キャスク間の水平距離を十分に確保する設計とする。

（第 6-2 図，第 6-3 図 A－A 断面，第 6-3 図 C－C 断面）

7. 検討結果

乾式貯蔵施設の設置にあたって，乾式キャスクが，周辺施設等からの波及的影響によって安全機能を損なわないように設計することとする。

波及的影響として検討すべき事象に基づき，波及的影響を及ぼすおそれのある周辺施設等の抽出した結果，6 項に示す施設又は設備が抽出されたため，当該施設又は設備の設計にあたっては必要な設計上の配慮を行うこととする。このうち，貯蔵建屋については，基準地震動 Ss に対して損壊しない設計とすることで，乾式キャスクへの波及的影響を及ぼさない設計とすることから，工事計画認可申請においてその耐震計算書を示す。

以　上

貯蔵建屋の耐震重要度分類の整理について

1．耐震重要度分類の整理

貯蔵建屋は設置許可基準規則の別記２を踏まえ，以下に示す理由により耐震重要度分類をＣクラスに分類しており，妥当である。

・設置許可基準規則の別記２において，Ｂクラスの項目には除外規定も含め「放射性廃棄物以外の放射性物質に関連した施設で，その破損により，公衆及び従事者に過大な放射線被ばくを与える可能性のある施設」，「放射性物質の放出を伴うような場合に，その外部放散を抑制するための施設で，Ｓクラスに属さない施設」と記載されている。また，Ｃクラスは「Ｓクラスに属する施設及びＢクラスに属する施設以外の一般産業施設又は公共施設と同等の安全性が要求される施設をいう。」とされている。

・貯蔵建屋は，設置許可基準規則の別記４に記載のとおり乾式キャスクは閉じ込め機能を担保する部位は外力に対しておおむね弾性状態に留まる範囲で耐えることとなっており，放射性物質の外部放散を抑制するための機能（閉じ込め機能）を貯蔵建屋に求めておらず，その機能を有しない。よって，「放射性物質の放出を伴うような場合に，その外部放散を抑制するための施設で，Ｓクラスに属さない施設」には該当しない。

・耐震重要度分類の設定においては，「耐震設計に係る工認審査ガイド」に「JEAG4601※の規定を参考に耐震設計上の重要度分類を適用していること」とされており，設置許可基準規則の別記２と JEAG4601 の耐震重要度分類は同等の内容が記載されているため，JEAG4601 が適用可能となっている。JEAG4601 にはＣクラスの対象設備として「放射性物質を内蔵しているか，又はこれに関連した施設でＳクラス，Ｂクラスに属さない施設」が示されている。

※ JEAG4601：「原子力発電所　耐震設計技術指針　重要度分類・許容応力編 JEAG4601・補－1984」

なお，破損による影響を定量的に示す観点から，参考として次項にその確認結果を示す。

2. 影響確認について

2.1 確認方法

貯蔵建屋の破損による公衆に与える放射線の影響確認のため，年間を通して貯蔵建屋がない状態を想定した場合であっても，敷地等境界評価点での線量が周辺監視区域外における線量限度である１mSv／y を下回ることを確認する。

確認方法としては，設置許可基準規則第 29 条で示す平常時における敷地等境界における線量評価結果より，貯蔵建屋がない場合の結果を算出する。

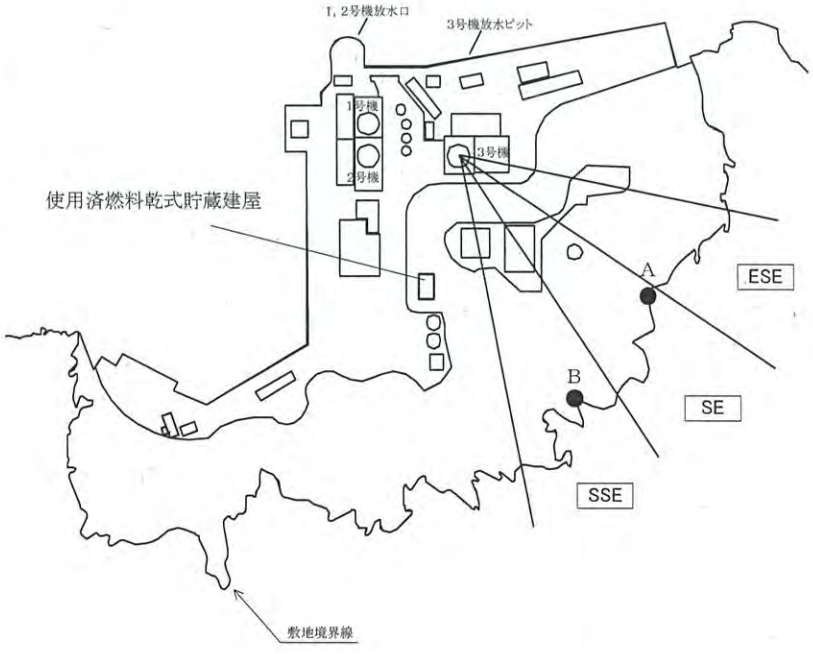
2.2 確認結果

表１に確認結果を示す。表１に示すとおり年間を通して貯蔵建屋がない状態を想定した場合であっても，線量限度である１mSv／y を下回っており，Ｃクラスに分類することは妥当である。

表１　貯蔵建屋がない場合の敷地等境界の線量まとめ

保管物名	貯蔵建屋がない場合の線量 （μSv／y）
乾式キャスク(45 基)	約 190※

※伊方発電所敷地境界での評価地点のうち，乾式貯蔵施設からの最短地点（下図 B 点）における既設建屋の線量（3.9μSv／y）との合算。



参考資料１

定置方法変更時点までにお示しした旧定置方法の使用済燃料乾式貯蔵容器及び貯蔵架台の耐震評価について（説明途上の内容を含む）

目次

1. 概要

2. 基本方針
 2.1 構造の説明
 2.2 評価方針

3. 耐震評価箇所
 3.1 乾式キャスクの耐震評価箇所
 3.2 貯蔵架台の耐震評価箇所

4. 乾式キャスク及び貯蔵架台の地震応答解析
 4.1 評価条件
 4.2 設計用地震力
 4.3 評価手法及び諸元
 4.4 地震応答解析結果

5. 乾式キャスクの応力評価
 5.1 評価方法
 5.2 荷重の組合せ及び許容応力
 5.3 使用材料の許容応力

6. 貯蔵架台の応力評価
 6.1 評価方法
 6.2 荷重の組合せ及び許容応力
 6.3 使用材料の許容応力

7. 乾式キャスクの転倒評価
 7.1 評価方法
 7.2 許容限界

8. 評価結果
 8.1 乾式キャスクの評価結果
 8.2 貯蔵架台の評価結果
 8.3 乾式キャスクの転倒評価結果

別紙1 乾式キャスク底部と貯蔵架台の嵌め合い部の隙間設定及び深さ設定の考え方について
別紙2 加振試験による耐震評価式の構築・検証について
別紙3 乾式キャスク及び貯蔵架台の耐震安全性評価に関する妥当性

1. 概要

使用済燃料乾式貯蔵容器（以下「乾式キャスク」という。）の定置方法として，乾式キャスクを基礎に固定する方法，基礎に固定しない方法及び非剛結方法がある。

本資料では，このうち非剛結方法で貯蔵する場合の耐震評価の考え方を説明する。

耐震評価は，以下に示す規格及びガイドに従い応力評価にて行い，乾式キャスク及び貯蔵架台に発生する応力が許容値以下となることを確認する。また，地震時に貯蔵架台の乾式キャスクに対する支持機能が失われることなく，乾式キャスクが傾く時の角度（以下「傾き角」という。）が転倒する角度（以下「転倒角」という。）に至らないことを確認する。

- 原子力発電所耐震設計技術指針(JEAG 4601-1987)（日本電気協会 1987 年 8 月）
- 原子力発電所耐震設計技術指針(JEAG 4601-1991 追補版)（日本電気協会 1991 年 12 月）
- 原子力発電所耐震設計技術指針重要度分類・許容応力編(JEAG 4601・補-1984)(日本電気協会 1984 年 9 月)
- 発電用原子力設備規格 設計・建設規格(2012 年版)（JSME S NC1-2012）(日本機械学会 2012 年 12 月)
- 発電用原子力設備規格 材料規格(2012 年版)（JSME S NJ1-2012）(日本機械学会 2012 年 12 月)
- 使用済燃料貯蔵施設規格・金属キャスク構造規格(2007 年版)(JSME S FA1-2007)（日本機械学会 2007 年 12 月）
- 原子力発電所敷地内での輸送・貯蔵兼用乾式キャスクによる使用済燃料の貯蔵に関する審査ガイド（原子力規制委員会 2019 年 3 月）

2. 基本方針

2.1 構造の説明

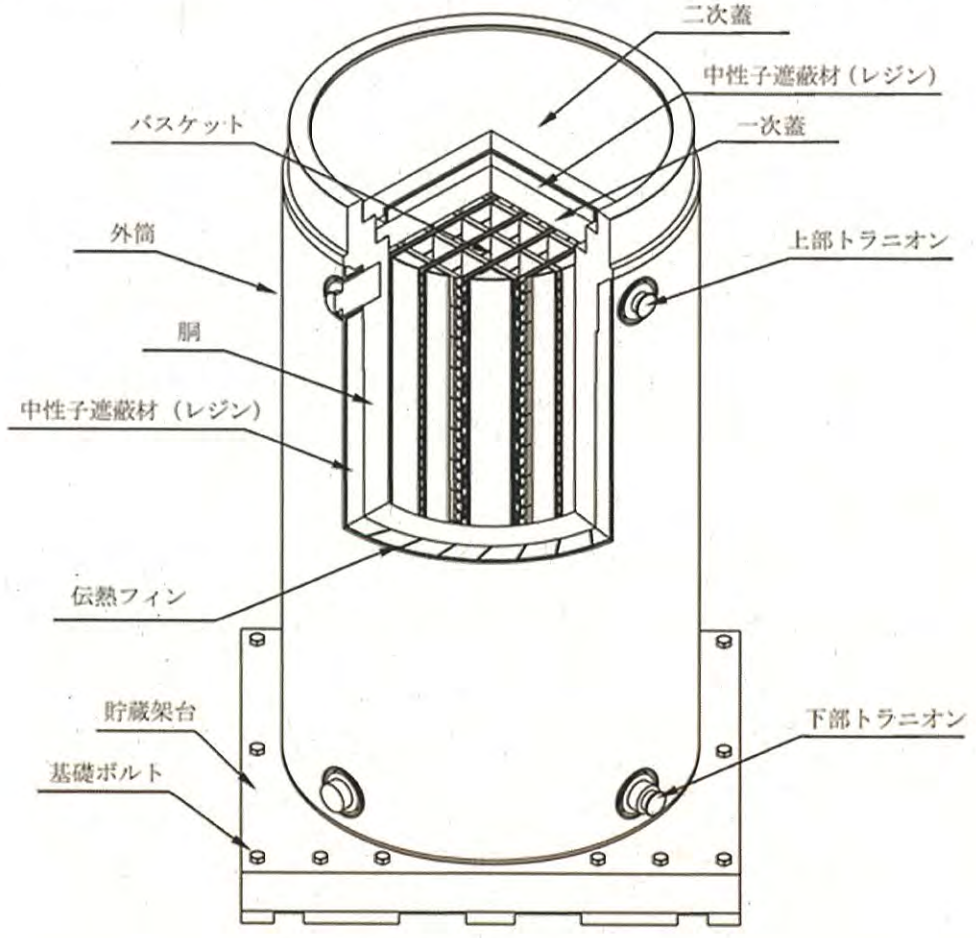
非剛結方法の乾式キャスクは，基礎に固定した貯蔵架台に設置することで，横滑りを制限する方法としている。これは第 2-1 表に示すとおり，乾式キャスクを基礎等に固定する場合としない場合の有利な点を兼ね備えた定置方法であるためである。

非剛結方法の乾式キャスクの構造を第2-1図に，貯蔵架台の構造を第2-2図に，貯蔵時の寸法を第 2-3 図に示す。また，乾式キャスクと貯蔵架台の隙間の寸法は製造公差等を考慮しても□（ノミナル値）以下となるよう設定している。隙間設定の考え方について「別紙 1 乾式キャスク底部と貯蔵架台の嵌め合い部の隙間設定及び深さ設定の考え方について」に示す。

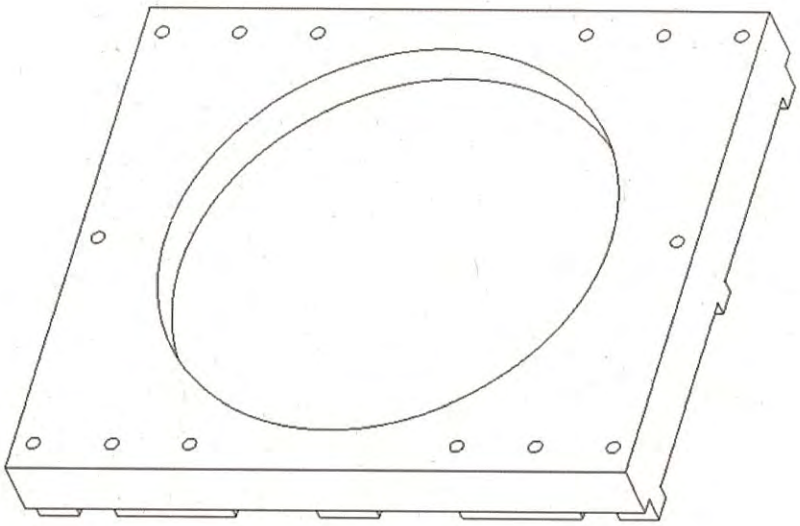
乾式キャスク及び貯蔵架台は，基準地震動 Ss による地震力に対してその安全機能が損なわれるおそれがないように，以下の構造としている。

・貯蔵架台に乾式キャスク底部と嵌め合う凹部を設けることで，固定せず乾式キャスクが転倒しない構造とする。

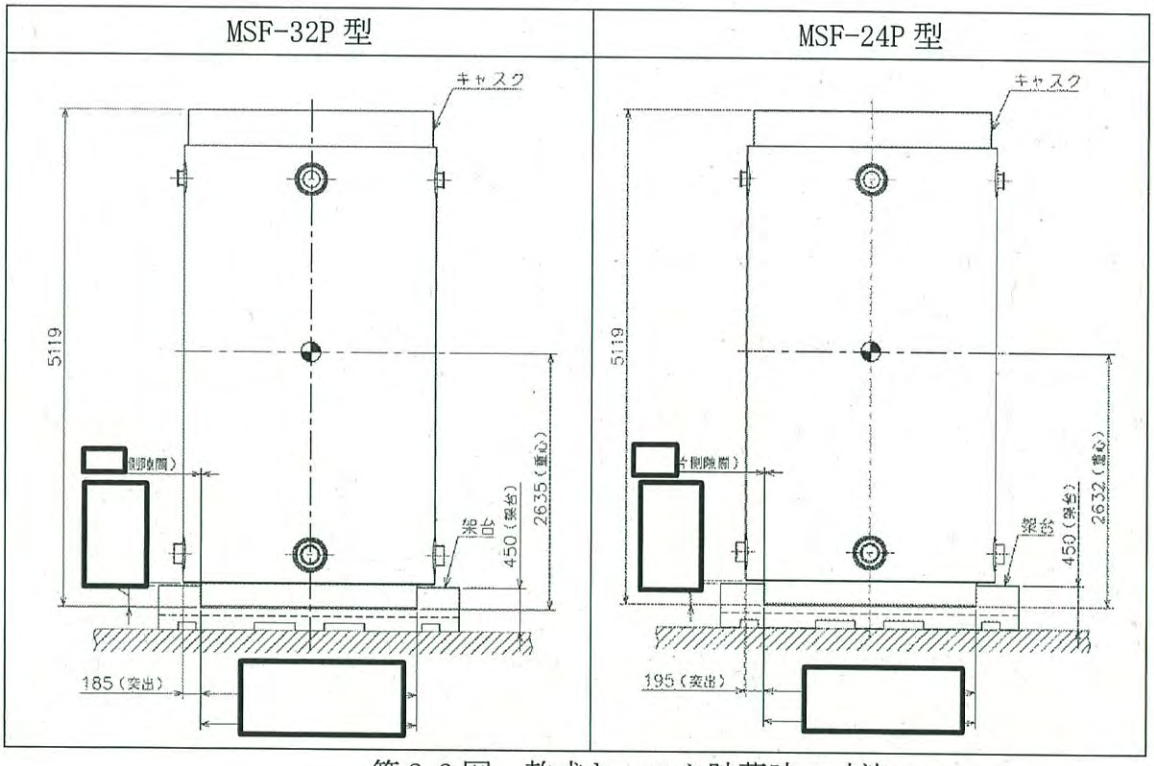
・貯蔵架台は，使用済燃料乾式貯蔵建屋（以下「貯蔵建屋」という。）床面に埋め込まれた支持金物に対して，基礎ボルトで固定される構造とする。



第2-1図　乾式キャスクの構造

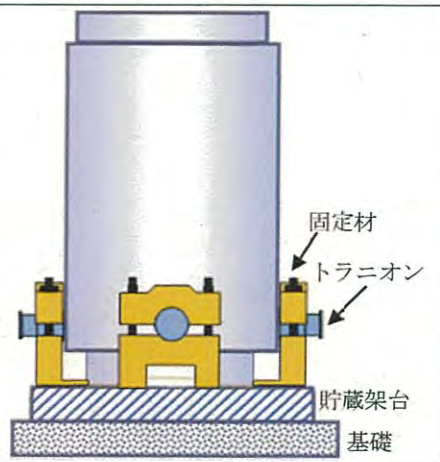
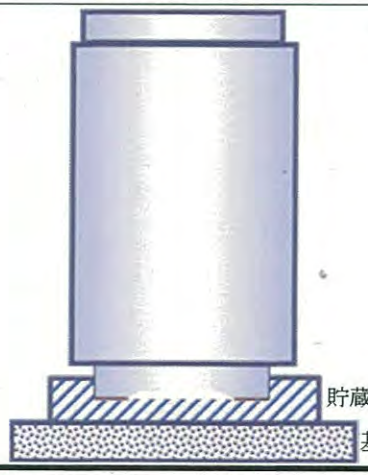
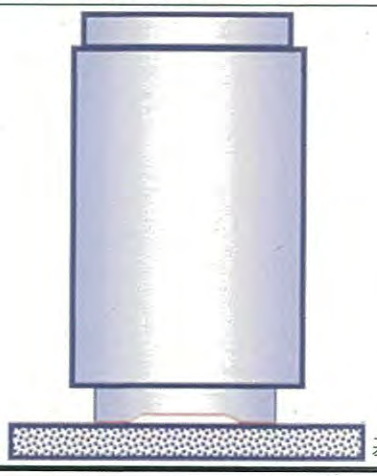


第2-2図　貯蔵架台の構造



第 2-3 図　乾式キャスク貯蔵時の寸法

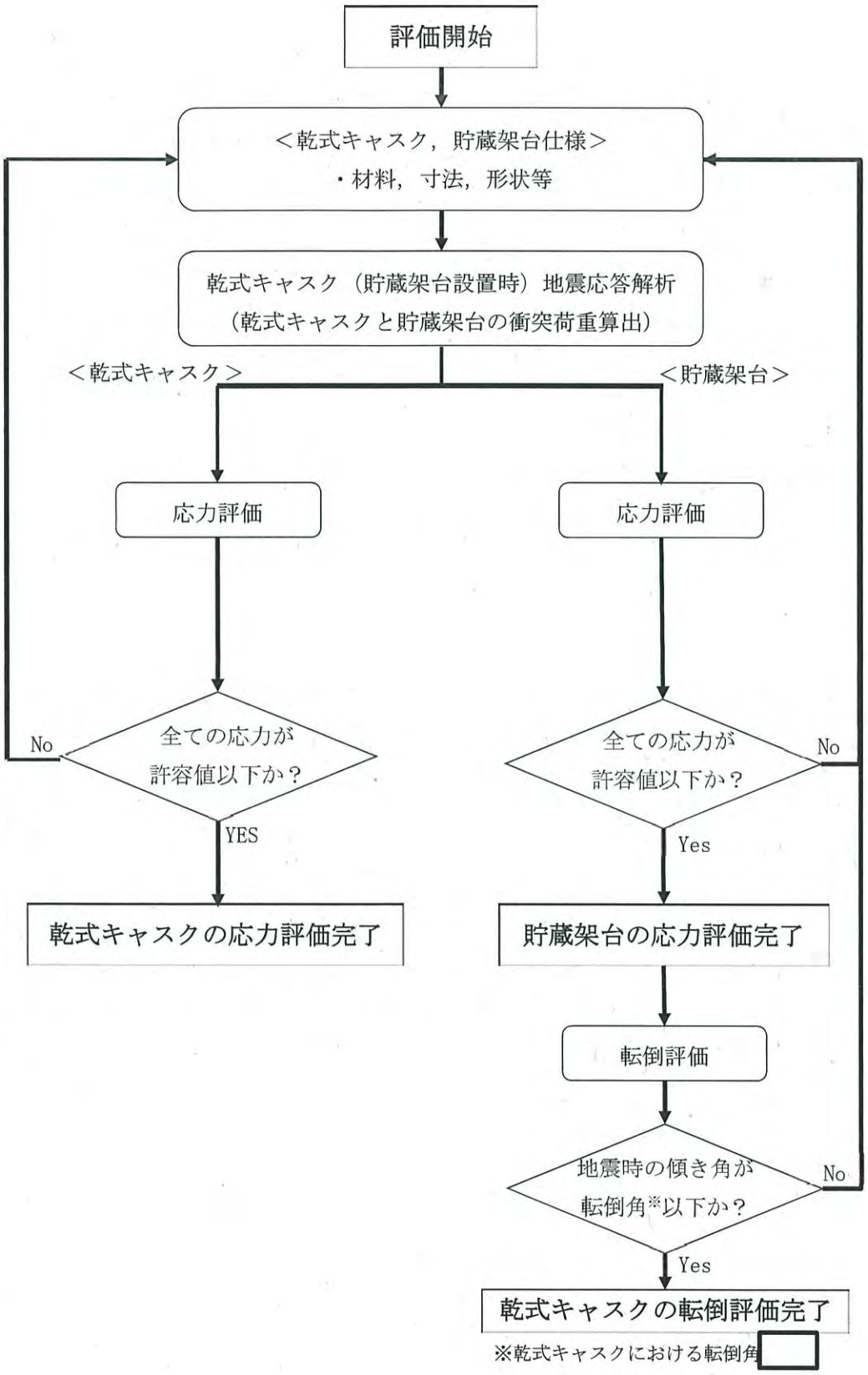
第 2-1 表　乾式キャスクの定置方法の比較

評価項目		固定する場合	非剛結方法	固定しない場合
				
管理		固定材の固縛力の管理を考慮する必要がある。	固定材がないため，固縛力の管理を必要としない。	
被ばく量		乾式キャスクと貯蔵架台との連結や解除作業時の固定材取付・取外及び基礎への固定を行うため，他の方法に比べ被ばくへの配慮が必要。	貯蔵架台と基礎の固定作業が必要だが，固定材の脱着が必要ないため，固定式に比べ被ばく量は少ない。	固定作業がないため，固定式に比べ被ばく量は少ない。
地震時の発生荷重	支持構造物	地震荷重が固定材に集中する。	乾式キャスクと貯蔵架台との摩擦等により，地震力が減衰し，貯蔵架台に大きな荷重は発生しない。	—
	乾式キャスク地震荷重作用部	乾式キャスクに作用する地震荷重がトラニオン等の作用部に集中する。	乾式キャスクに作用する地震荷重が貯蔵架台との摩擦等により減衰した上で，作用部に作用する。	乾式キャスクに作用する地震荷重が，摩擦等により減衰した上で，作用部に作用する
	乾式キャスク鉛直	浮き上がらないため荷重はほとんど発生しない。	貯蔵架台により浮き上がりが制限されており，大きな荷重は発生しない。	浮き上がりが制限されていないため，大きな荷重が発生するおそれがある。
	乾式キャスク水平	移動しないため荷重はほとんど発生しない。	貯蔵架台により移動量が制限されており，大きな荷重は発生しない。	移動量に制限がないため，隣接する乾式キャスクや周辺施設との相互影響により，大きな荷重が発生するおそれがある。
相互影響		貯蔵架台により位置固定されており，隣接する乾式キャスク周辺施設等との相互影響はない。	貯蔵架台により位置固定されており，隣接する乾式キャスクや周辺施設等との相互影響はない。	貯蔵架台による位置固定（移動制限）がないため，隣接する乾式キャスクや周辺施設等との相互影響が発生するおそれがある。

□：他の定置方法に比べ有利な項目

2.2 評価方針

乾式キャスク及び貯蔵架台の応力評価は,「2.1 構造の説明」にて示す乾式キャスク及び貯蔵架台の構造を踏まえ「3. 耐震評価箇所」にて設定する箇所において,「4. 乾式キャスク及び貯蔵架台の地震応答解析」で算定した荷重による応力等が許容限界内に収まることを,「5. 乾式キャスクの応力評価」,「6. 貯蔵架台の応力評価」及び「7. 乾式キャスクの転倒評価」にて示す方法にて確認することで実施する。確認結果を「8. 評価結果」に示す。乾式キャスク及び貯蔵架台の耐震評価フローを第2-4図に示す。



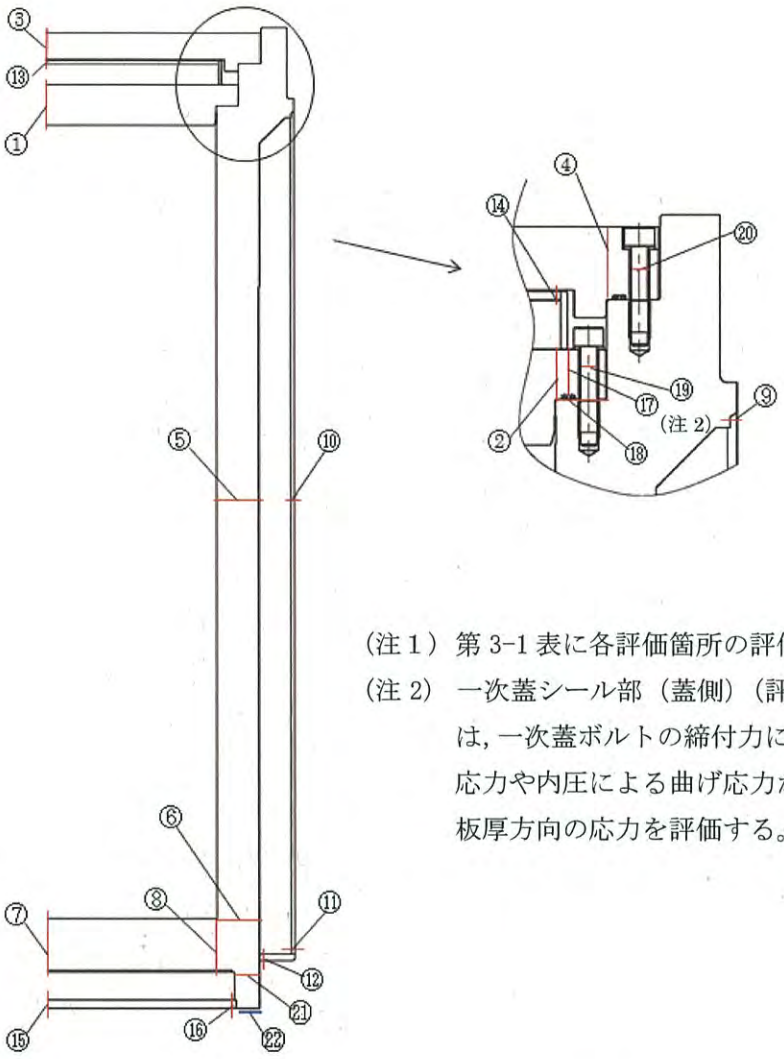
第2-4図　乾式キャスク及び貯蔵架台の耐震評価フロー

3. 耐震評価箇所

3.1 乾式キャスクの耐震評価箇所

乾式キャスクの耐震評価箇所を第3-1図に示す。

評価箇所については，貯蔵時の乾式キャスクの安全機能を維持する観点で，貯蔵時の応力発生箇所を考慮して，選定している。



（注１）第 3-1 表に各評価箇所の評価内容等を示す。

（注 2） 一次蓋シール部（蓋側）（評価位置⑰）⑰の評価は，一次蓋ボルトの締付力による板厚方向の圧縮応力や内圧による曲げ応力が支配的となるため，板厚方向の応力を評価する。

第 3-1 図　乾式キャスクの耐震評価箇所

第 3-1 表　乾式キャスクの耐震評価箇所及び評価内容（1/2）

耐震評価箇所		評価内容
①	一次蓋	地震時に構造健全性を維持し，除熱，遮蔽，閉じ込め機能を維持できることを評価
②		
③	二次蓋	地震時に構造健全性を維持し，除熱，遮蔽機能を維持できることを評価
④		
⑤	胴	地震時に構造健全性を維持し，除熱，遮蔽，閉じ込め機能を維持できることを評価
⑥		
⑦	胴（底板）	
⑧		
⑨	外筒	地震時に構造健全性を維持し，除熱，遮蔽機能を維持できることを評価
⑩		
⑪		
⑫	下部端板	地震時に構造健全性を維持し，遮蔽機能を維持できることを評価

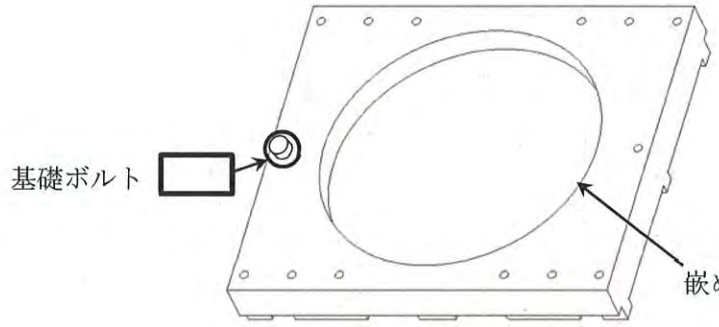
第 3-1 表　乾式キャスクの応力評価位置，評価部位及び評価内容（2/2）

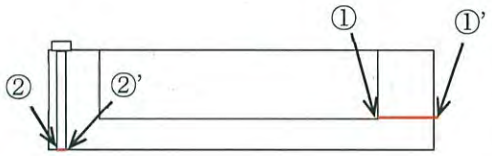
耐震評価箇所		評価内容
⑬	蓋部中性子遮蔽材カバー	地震時に構造健全性を維持し，遮蔽機能を維持できることを評価
⑭		
⑮	底部中性子遮蔽材カバー	地震時に構造健全性を維持し，遮蔽機能を維持できることを評価
⑯		
⑰	一次蓋シール部（蓋側）	地震時に構造健全性を維持し，閉じ込め機能を維持できることを評価
⑱	一次蓋シール部（胴側）	
⑲	一次蓋ボルト	地震時に構造健全性を維持し，閉じ込め機能を維持できることを評価
⑳	二次蓋ボルト	地震時に構造健全性を維持できることを評価
㉑	胴（脚部）	地震時に構造健全性を維持できることを評価
㉒		
－	バスケット	地震時に構造健全性を維持し，除熱，未臨界機能を維持できることを評価
－	伝熱フィン	地震時に構造健全性を維持し，除熱機能を維持できることを評価

3.2 貯蔵架台の耐震評価箇所

貯蔵架台の耐震評価箇所を第3-2図に示す。

貯蔵架台は，乾式キャスクが地震力に対して転倒するおそれがないように嵌め合い部の支持機能が維持される必要がある。そのため，貯蔵架台の嵌め合い部のうち，地震時に比較的大きな応力が発生すると想定される嵌め合い部根元部を評価断面として選定した。





応力評価位置	評価部位	評価内容
①-①'	嵌め合い部	(1)
②-②'	基礎ボルト	(2)

(1)地震時に貯蔵架台が乾式キャスクの支持機能を喪失しないことを説明

(2)地震時に貯蔵架台の固定が損なわれないことを説明

第 3-2 図　貯蔵架台の耐震評価箇所

4. 乾式キャスク及び貯蔵架台の地震応答解析

4.1 評価条件

(1) 地震時に貯蔵架台に設置した乾式キャスクに発生する挙動を第 4-1 図に示す。これらの挙動のうち，浮き上がり挙動は地震による鉛直方向の加速度が１Ｇを超える場合に発生するが，今回乾式キャスクを設置する地点の鉛直方向加速度は１Ｇを超えないため，滑り，回転，傾き、及びそれぞれの挙動を組合せた挙動が発生する。

これらの挙動のうち，傾き挙動は，ある一方向（径方向）へ乾式キャスクが傾く挙動であり，乾式キャスクの運動エネルギーが，ある一方向へ集中し貯蔵架台と衝突する。そのため，乾式キャスクの運動エネルギーの全てが荷重として，乾式キャスクおよび貯蔵架台に生じる。

滑り挙動は，貯蔵架台と乾式キャスク底面との摩擦力を介して地震力が乾式キャスクに伝播して発生するものであり，乾式キャスクの運動エネルギーは減衰するため，傾き挙動に比べて荷重は小さくなる。

回転挙動は，貯蔵架台に沿って乾式キャスクが回転する運動であり，乾式キャスクの運動エネルギーは回転エネルギーとして消散されるため，乾式キャスクおよび貯蔵架台に発生する荷重は傾き挙動に比べて小さくなる。

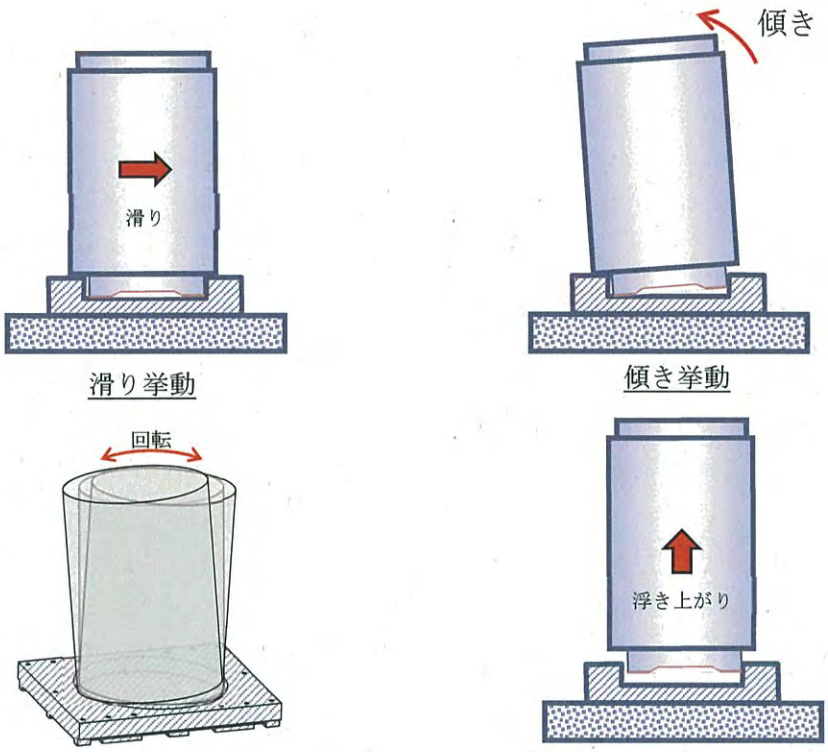
以上より，乾式キャスクの挙動のうち，乾式キャスクおよび貯蔵架台へ最も厳しい荷重が生じる傾き挙動時の応答を手計算及び 3 次元 FEM 解析を用いて解く。

なお，地震応答解析に用いる手計算の耐震評価式は，乾式キャスクの加振試験の結果を考慮し，実機に比べて保守的な荷重が算出されるよう構築している。「別紙 2　加振試験による耐震評価式の構築・検証について」に加振試験による検討内容を示す。

(2) 手計算では，傾き挙動におけるエネルギーのつり合い及びモーメントのつり合いから，乾式キャスクと貯蔵架台が衝突した時の荷重をエネルギー保存則により算出する。なお、評価に用いるエネルギー保存則は既往の工事計画にて，キャスク落下時の衝突荷重の算出に適用している実績のある手法である。

(3) 解析コードは ABAQUS（Ver. 6. 12-3）を使用する。なお，評価に用いる解析コード ABAQUS（Ver. 6. 12-3）は平成 28 年 3 月 23 日付け原規規発第 1603231 号にて認可された工事計画で実績のある解析コードである。

(4) 耐震計算に用いる寸法は，公称値を使用する。



第 4-1 図　地震時における乾式キャスクの挙動

4.2 設計用地震力

乾式キャスク及び貯蔵架台の耐震計算に用いる入力地震力は、乾式キャスクの設置場所における最大床応答加速度を2割増しした値(1.2ZPA)※を用いる。

本資料に示す耐震評価では，暫定的にEL.21mにおける地震波による床応答加速度を用いる。耐震評価に用いる設計用地震力を第4-1表に示す。

乾式キャスクは今回評価に用いている地盤上の基礎に設置されるものであり，建屋構造による増幅は小さい見込みである。

第4-1表　設計用地震力

地震動	設置場所（m）	備　考
基準地震動Ss-1	乾式貯蔵建屋設置地盤 EL.21.0	水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せを考慮した評価を行う。

※1.2ZPAの適用については，JEAG4601の考え方に準拠したものである。

具体的にはJEAG4601-1987「6.5.1 床応答スペクトル」において，運動方程式（(6.5.1-1) 式）により床応答スペクトルを算出すると記載されているが，この運動方程式には，床応答加速度の時刻歴を入力することとなっている。

エネルギー保存則を用いた今回の乾式キャスク及び貯蔵架台の評価では，床応答スペクトルの算出と同様に，運動方程式に床応答加速度の時刻歴波を入力すれば良いところ，その最大値であるZPAを，剛構造物の強度評価に対する考え方を踏まえ2割増しした1.2ZPAを入力し，評価に必要なエネルギー量を算出している。

4.3 評価手法及び諸元

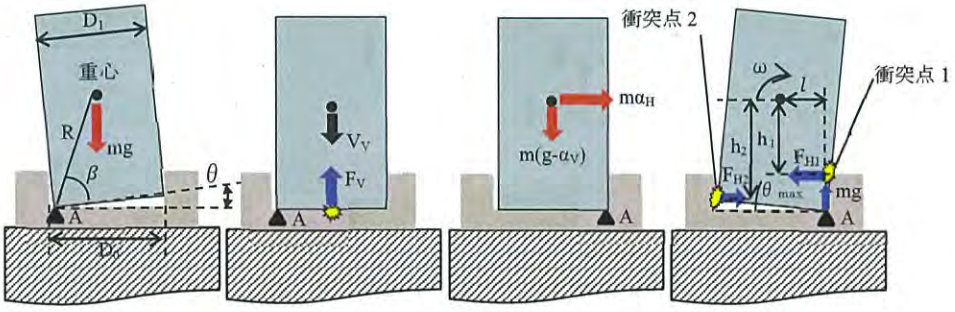
乾式キャスク及び貯蔵架台の地震応答解析では，第 4-2 図に示す傾き挙動における衝突荷重を算出する。傾き支点である A 点は，傾き挙動の進展により時々刻々移動する。この A 点及び乾式キャスクと貯蔵架台の接触箇所には，動摩擦力が発生し，運動エネルギーが消費されるが，本評価では，保守的にこの運動エネルギーの消費を無視する。

評価手法及び諸元を以下に示す。

(1) 鉛直方向の応答荷重は，乾式キャスクが貯蔵架台嵌め合い部底面に衝突した時の貯蔵架台の変位をエネルギーのつり合い ((1)式) から算出し，その変位を(2)式に代入することで算出される。なお，衝突後も傾き挙動が継続することから，運動エネルギーの鉛直成分が貯蔵架台との衝突で消費され，水平成分が傾き挙動の継続に使われると仮定する。

(2) 水平方向の応答荷重は，乾式キャスクが貯蔵架台嵌め合い部の二側面と接触した時の変位をエネルギーのつり合い ((3)式) 及びモーメントのつり合い ((4)式) の連立方程式から算出し，その変位を(5)式に代入することで算出される。

なお，衝突時の角速度 ω は地震による水平加速度 α_H 及び鉛直加速度 α_V，を考慮して設定する。



第4-2図　傾き挙動の1サイクル

$$\frac{1}{2}\mathrm{m}{V_V}^2 = \frac{1}{2}k_V{x_V}^2 \quad (1)$$

$$F_V = k_V x_V \quad (2)$$

$$\frac{1}{2}I_A\omega^2 = \frac{1}{2}k_1{x_1}^2 + \frac{1}{2}k_2{x_2}^2 + mgR(\sin(\theta_{max}+\beta) - \sin(\theta_0+\beta)) \quad (3)$$

$$h_1k_1x_1 = h_2k_2x_2 + mgl \quad (4)$$

$$F_{H1} = k_1x_1,\ F_{H2} = k_2x_2 \quad (5)$$

ここで,

m ： 乾式キャスク質量（kg）

V_V ： 貯蔵架台嵌め合い部底面との衝突直前の乾式キャスクの鉛直方向速度（m/s）

k_V ： 3 次元 FEM 解析モデルより求めた貯蔵架台の鉛直剛性（6.7×10^{10} N/m）

x_V ： 貯蔵架台の鉛直変位（m）

F_V ： 鉛直方向の応答荷重（N）

F_{H1}： 衝突点 1 の水平方向の応答荷重（N）

F_{H2}： 衝突点 2 の水平方向の応答荷重（N）

I_A ： A 点まわりの慣性モーメント（kg・m^2）

ω ： 貯蔵架台嵌め合い部二側面との衝突直前の乾式キャスクの角速度（rad/s）

k_1, k_2 ： 3 次元 FEM 解析モデルより求めた衝突点 1 及び 2 の水平剛性（k_1＝9.6×10^9 N/m, k_2＝1.7×10^{10}N/m）

x_1, x_2 ： 衝突点 1 及び 2 の水平変位（m）

h_1, h_2 ： 衝突点 1 及び 2 と重心との鉛直距離（m）

R ： A 点と重心位置との距離（m）

l ： A 点と重心位置との水平距離（m）

g ： 重力加速度（$9.80665\mathrm{m/s}^2$）

このうち，乾式貯蔵キャスクの貯蔵架台嵌め合い部底面との衝突直前の乾式キャスクの鉛直方向速度V_Vと貯蔵架台嵌め合い部二側面との衝突直前の乾式キャスクの角速度ωの算出過程を以下に示す。

a. 貯蔵架台嵌め合い部底面との衝突直前の乾式キャスクの鉛直方向速度V_V

乾式キャスク重心に重力が作用することで，乾式キャスク底面が貯蔵架台嵌め合い部底面に衝突する直前の乾式キャスクの鉛直方向速度V_Vを算出する。

（以下で，t，θ，$\dot{\theta}$，$\ddot{\theta}$の添え字 0 は初期状態である幾何学的な 3 点支持を，添え字 1 は底面衝突直前を意味する）

この時の A 点回りの回転の運動方程式は，以下の通りである。

$$I_A\cdot\ddot{\theta} = -mgR\cdot\cos(\beta+\theta) \quad (6)$$

I_Aは乾式キャスクの質量及び幾何形状から一義的に定まる。
これより，角加速度

$$\ddot{\theta}_0 = -\frac{m \cdot R}{I_A} g \cdot \cos(\beta + \theta_0) \tag{7}$$

を，角速度の初期値がゼロ，角度の初期値がθ_0であることを考慮し時間積分し，底面衝突時の関係

$$\frac{1}{2}\ddot{\theta}_0 {t_1}^2 + \theta_0 = 0 \tag{8}$$

から，底面衝突までの時間t_1が得られる。

$$t_1 = \sqrt{\frac{2\theta_0}{(-\ddot{\theta}_0)}} \tag{9}$$

したがって，底面衝突時の角速度$\dot{\theta}_1$は，

$$\dot{\theta}_1 = \ddot{\theta}_0 \cdot t_1 = -\sqrt{2(-\ddot{\theta}_0) \cdot \theta_0} \tag{10}$$

であり，以下の通り，乾式キャスクの鉛直方向速度を得る。

$$V_V = R \cdot \dot{\theta}_1 \cdot \cos\beta \tag{11}$$

なお，角度θ_0は傾き挙動による回転角であり，乾式キャスクと貯蔵架台嵌め合い部の幾何学的な関係を示す次式から定まる。

$$D_O = d \cdot \tan\theta_0 + D_1 \cdot \cos\theta_0 \tag{12}$$

ここで，

D_0 ： 貯蔵架台嵌め合い部の内径（m）
D_1 ： 乾式キャスク底部の外径（m）
d ： 貯蔵架台嵌め合い部の高さ（m）

b. 貯蔵架台嵌め合い部二側面との衝突直前の乾式キャスクの角速度ω

乾式キャスク底面が貯蔵架台嵌め合い部底面に衝突後，A 点を回転中心として重心が持ち上がる方向に回転する。この時，地震による水平方向加速度，鉛直方向加速度を回転が促進される方向に常に作用すると仮定し，貯蔵架台嵌め合い部二側面との衝突直前の乾式キャスクの角速度ωを算出する。（以下で，t，θ，$\dot{\theta}$，$\ddot{\theta}$の添え字 0 は初期状態である幾何学的な 3 点支持を，添え字 1 は底面衝突直前を，添え字 2 は底面衝突直後を，添え字 3 は二側面との衝突直前を意味する。）

この時の，A 点回りの回転の運動方程式は，以下の通りである。

$$I_A \cdot \ddot{\theta} = -m(g - \alpha_V)R \cdot cos(\beta + \theta) + m\alpha_H R\sin(\beta + \theta) \quad (13)$$

ここで，

α_H ： 地震の水平加速度（m/s^2）

α_V ： 地震の鉛直加速度（m/s^2）

これより，角加速度$\ddot{\theta}_3$は

$$\ddot{\theta}_3 = \frac{m \cdot R}{I_A}\left(-(g - \alpha_V) \cdot \cos(\beta + \theta_0) + \alpha_H \cdot \sin(\beta + \theta_0)\right) \quad (14)$$

となる。

角加速度$\ddot{\theta}_3$について，角速度の初期値が$\dot{\theta}_2$，角度の初期値がゼロであることを考慮し時間積分した以下の二側面との衝突直前の関係

$$\frac{1}{2}\ddot{\theta}_3 {t_3}^2 + \dot{\theta}_2 t_3 = \theta_0 \quad (15)$$

から，底面衝突から二側面との衝突までの時間t_3が得られる。二側面との衝突の角速度$\omega(= \dot{\theta}_3)$は，t_3を $\omega = \ddot{\theta}_3 t_3 + \dot{\theta}_2$ に代入することで，

$$\omega = \sqrt{\dot{\theta}_2^2 + 2\ddot{\theta}_3 \cdot \theta_0} \quad (16)$$

なお，底面衝突直後の角速度$\dot{\theta}_2$については，エネルギー保存則より，底面衝突前の乾式キャスク重心の水平方向速度

$$V_H = R \cdot \dot{\theta}_1 \cdot \sin\beta \quad (17)$$

による乾式キャスクの運動エネルギーが，底面衝突直後のA点回りの回転エネルギーに移行していると仮定し，以下の関係より得ることができる

$$\frac{1}{2} I_A \cdot \dot{\theta}_2^2 = \frac{1}{2} m \cdot V_H^2 \quad (18)$$

4.4 地震応答解析結果

「4.3 評価手法及び諸元」に基づき算出した乾式キャスク及び貯蔵架台に作用する地震応答荷重を第4-2表に示す。

第 4-2 表　乾式キャスク及び貯蔵架台に作用する荷重

荷重の種類		荷重 (N)
鉛直方向荷重(F_V)		2.0×10^7
水平方向荷重	乾式キャスクの傾き方向側(F_{H1})	2.6×10^7
	乾式キャスクの傾き方向と逆側(F_{H2})	2.4×10^7

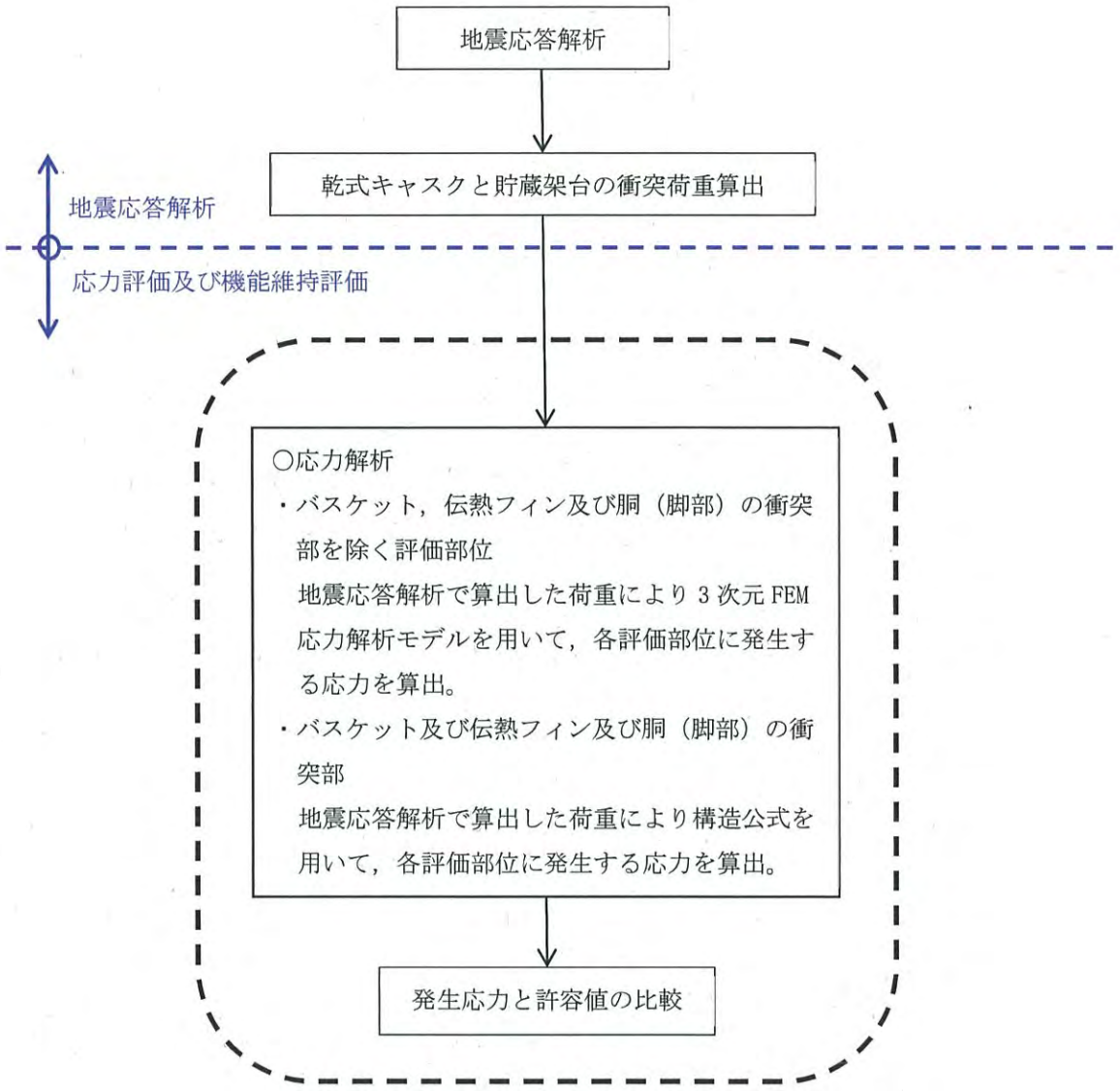
5. 乾式キャスクの応力評価

5.1 評価方法

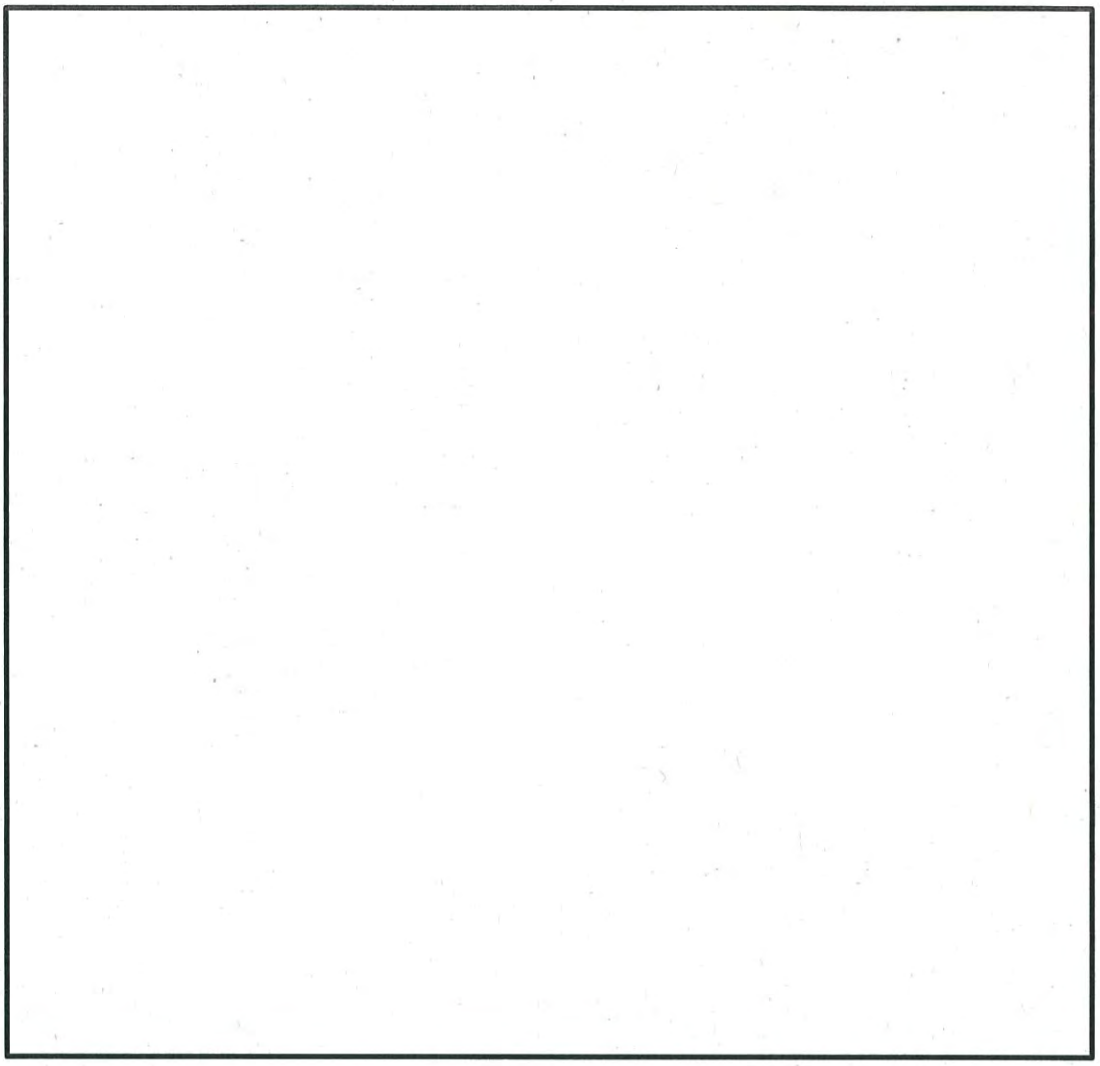
乾式キャスクは，「3.1 乾式キャスクの耐震評価箇所」に示す安全機能を維持するための部位について，第5-1図の乾式キャスクの応力評価フローに基づいて傾き衝突時及び底面衝突時の応力評価を行う。

バスケット，伝熱フィン及び胴（脚部）の衝突部を除く箇所に発生する応力は，第5-2図に示す3次元FEM応力解析モデルに「4. 乾式キャスク及び貯蔵架台の地震応答解析」で算出した荷重を入力し求める。また，乾式キャスクと貯蔵架台の嵌め合い部を境界条件として考慮する。また，胴，一次蓋，二次蓋，一次蓋ボルト及び二次蓋ボルトについては発生する応力を基に疲労評価を行う。

バスケット，伝熱フィン及び胴（脚部）の衝突部の発生応力は，「4. 乾式キャスク及び貯蔵架台の地震応答解析」で算出した荷重より，構造公式を用いて求める。応力算出式をa.～e.に示す。なお，評価にあたっては，嵌め合い部の発生応力が大きいMSF-32P型を代表として示す。



第 5-1 図　乾式キャスクの応力評価フロー



第 5-2 図　乾式キャスク応力評価用 3 次元 FEM モデル

a. バスケットプレートの圧縮応力の算出式

底面衝突時おいて，最下段のバスケットプレート（第 5-3 図参照）には，それより上部にあるバスケットプレート等の自重及び鉛直方向の慣性力が作用し，圧縮による膜応力

σ_c (MPa)が生じる。

$$\sigma_c = \frac{W_b \times G_v}{A_1} \quad (1)$$

ここで，

W_b ：バスケットプレート，バスケットサポート，中性子吸収材の合計質量(kg)

G_v ：自重及び鉛直方向の加速度（m/s^2）
（第 4-2 表に示す鉛直方向荷重(F_V)を乾式キャスク質量で除して算出）

A_1 ：バスケットプレートと胴の接触面積（mm^2）

バスケットプレートと胴の接触面積A_1は，以下の式で与えられる。計算に用いた寸法を第 5-3 図に示す。

$$A_1 = (b_1 - b_2) \times L_1 \times n \quad (2)$$

ここで，

b_1 ：バスケットプレート幅 1（mm）

b_2 ：バスケットプレート幅 2（mm）

L_1 ：バスケットプレート長さ（mm）

n ：胴に接触するバスケットプレート L_1 部の個数（-）

b. バスケットプレート縦板の圧縮応力の算出式

傾き衝突時において，バスケットプレート縦板切欠部には，第 5-4 図に示すように，領域Ⅰの範囲にあるバスケットプレート，バスケットサポート及び燃料集合体に生じる水平方向の慣性力並びに，領域Ⅱのバスケットプレートに生じる水平方向の慣性力により，圧縮による膜応力σ_c(MPa)が生じる。

$$\sigma_c = \frac{W_I + W_{II}}{A \times N} G_H \quad (3)$$

ここで，

W_I ：領域Ⅰのバスケットプレート，中性子吸収材，バスケットサポート及び燃料集合体の質量（kg）

W_{II} ：領域Ⅱのバスケットプレート及び中性子吸収材の質量（kg）

G_H ：水平方向の加速度（m/s^2）
（第 4-2 表に示す水平方向荷重(F_{H1} と F_{H2} の差分)を乾式キャスク質量で除して算出）

N ：バスケットプレート縦板の数（枚）

A ：バスケットプレート縦板の断面積（mm^2）

バスケットプレート縦板の断面積Aは，以下の式で与えられる。計算に用いた寸法を第 5-5 図に示す。

$$A = (b_1 + b_2 \times 2) \times h_1 - (b_3 + b_4 \times 2) \times h_2 \quad (4)$$

ここで，

b_1　：バスケットプレート縦板の幅 1（mm）
b_2　：バスケットプレート縦板の幅 2（mm）
h_1　：バスケットプレート縦板の高さ 1（mm）
b_3　：バスケットプレート縦板の幅 3（mm）
b_4　：バスケットプレート縦板の幅 4（mm）
h_2　：バスケットプレート縦板の高さ 2（mm）

c. バスケットプレート横板の曲げ応力及びせん断応力の算出式

傾き衝突時において，バスケットプレート横板切欠部には，第 5-6 図に示すようにバスケットプレート，中性子吸収材及び燃料集合体に生じる慣性力により曲げ応力σ_b及びせん断応力τが生じる。

$$\sigma_b = \frac{M}{Z} \quad (5)$$

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (6)$$

ここで，

M　：曲げモーメント（N･mm）
Z　：バスケットプレート横板の断面係数（mm^3）
F　：せん断荷重（N）
A　：バスケットプレート横板の断面積（mm^2）

曲げモーメントMは，以下の式で与えられる。

$$M = \frac{w \times \ell^2}{12} G_H \quad (7)$$

ここで，

w　：分布荷重（kg/mm）
ℓ　：バスケットセルの内幅（mm）
G_H　：水平方向の加速度（m/s^2）

分布荷重wは，以下の式で与えられる。

$$w = \frac{W_f + W_b \times N}{\ell \times N} \quad (8)$$

ここで，

W_f　：燃料集合体の質量（kg）
W_b　：バスケットプレート及び中性子吸収材の質量（kg）

N　　：バスケットプレート横板の数（段）

断面係数Zは，以下の式で与えられる。計算に用いた寸法を第 5-7 図に示す。

$$Z = \frac{h_1{}^3 \times b_1 - h_2{}^3 \times (b_2 + b_3 \times 2)}{6h_1} \quad (9)$$

ここで，

h_1　：バスケットプレート横板の高さ 1（mm）

b_1　：バスケットプレート横板の幅 1（mm）

b_2　：バスケットプレート横板の幅 2（mm）

h_2　：バスケットプレート横板の高さ 2（mm）

b_3　：バスケットプレート横板の幅 3（mm）

断面積Aは，以下の式で与えられる。計算に用いた寸法を 5-7 図に示す。

$$A = b_1 \times h_1 - h_2 \times (b_2 + b_3 \times 2) \quad (10)$$

せん断荷重Fは，以下の式で与えられる。

$$F = \frac{w \times \ell}{2} G_H \quad (11)$$

d. 伝熱フィンのせん断応力の算出式

底面衝突時において，伝熱フィン溶接部には，伝熱フィン及び中性子遮蔽材に生じる慣性力によりせん断応力τが生じる。なお，第 5-8 図に示すとおり，伝熱フィン溶接部は伝熱フィンに対して両側に隅肉溶接を施すが，保守側の評価として伝熱フィン溶接部のど部の面積は片側の隅肉のみを考慮して評価する。

$$\tau = \frac{(W_1 + W_2) G_v}{A} \quad (12)$$

ここで，

τ　：せん断応力（MPa）

W_1　：伝熱フィンの軸方向単位長さ当たり重量（kg/mm）

W_2　：中性子遮蔽材の軸方向単位長さ当たり重量（kg/mm）

G_v　：鉛直方向の加速度（m/s^2）

A　　：フィン溶接部のど部の軸方向単位長さ当たりの面積（mm^2/mm）

e. 胴（脚部）の圧縮応力の算出式

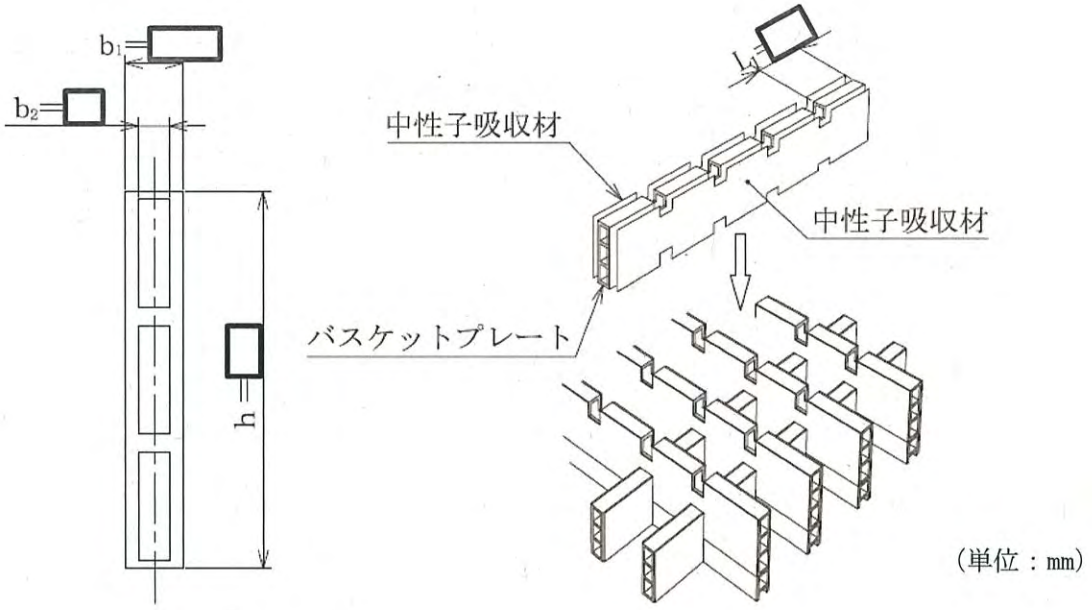
底面衝突時において，胴（脚部）には，乾式キャスクの慣性力が作用し，衝突部近傍に圧縮応力σ_c が生じる。

$$\sigma_c = \frac{F_V}{A_c} \quad (13)$$

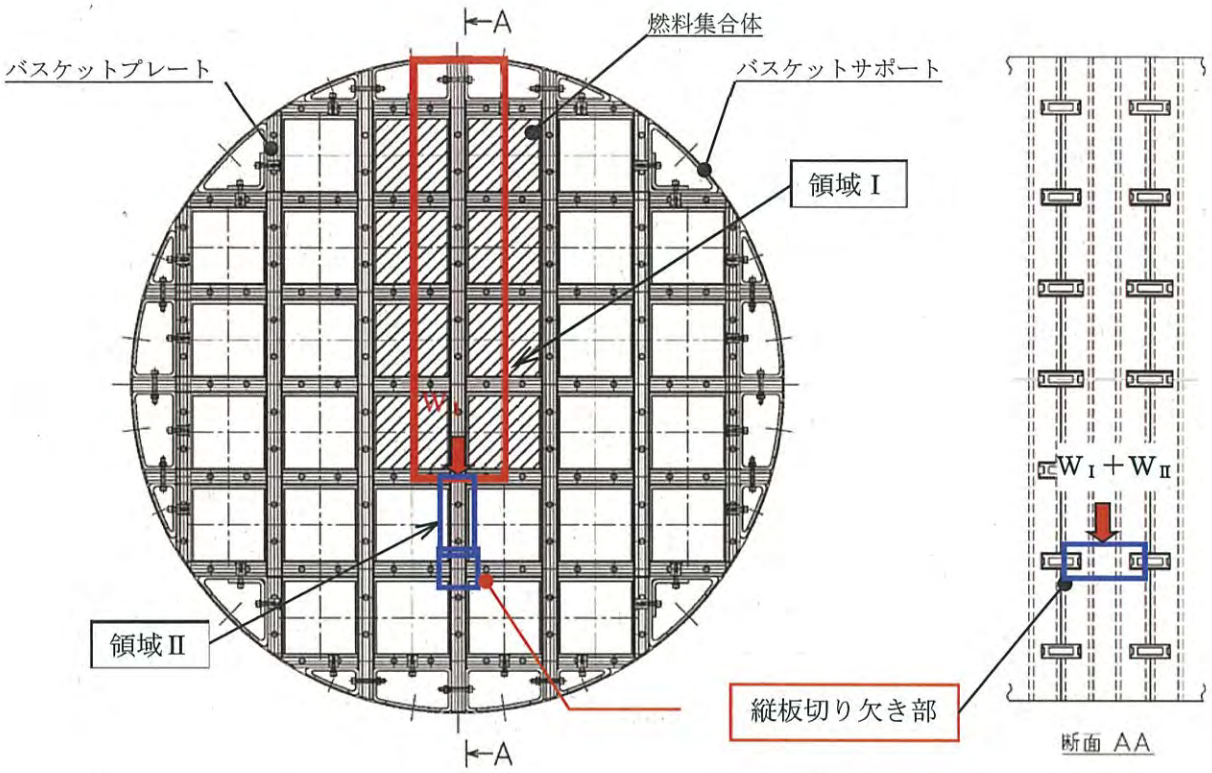
ここで，

F_v　：乾式キャスクに作用する鉛直方向荷重(N)

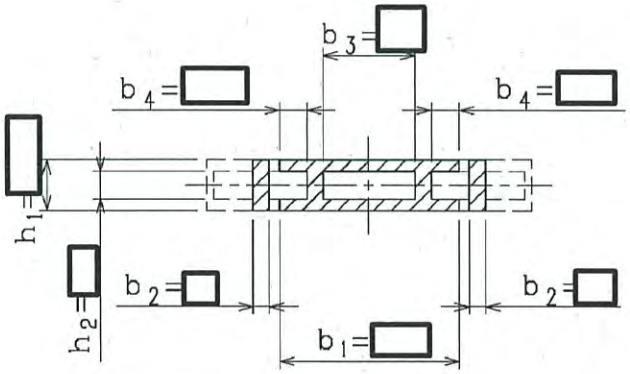
A_c　：胴（脚部）の断面積（mm^2）



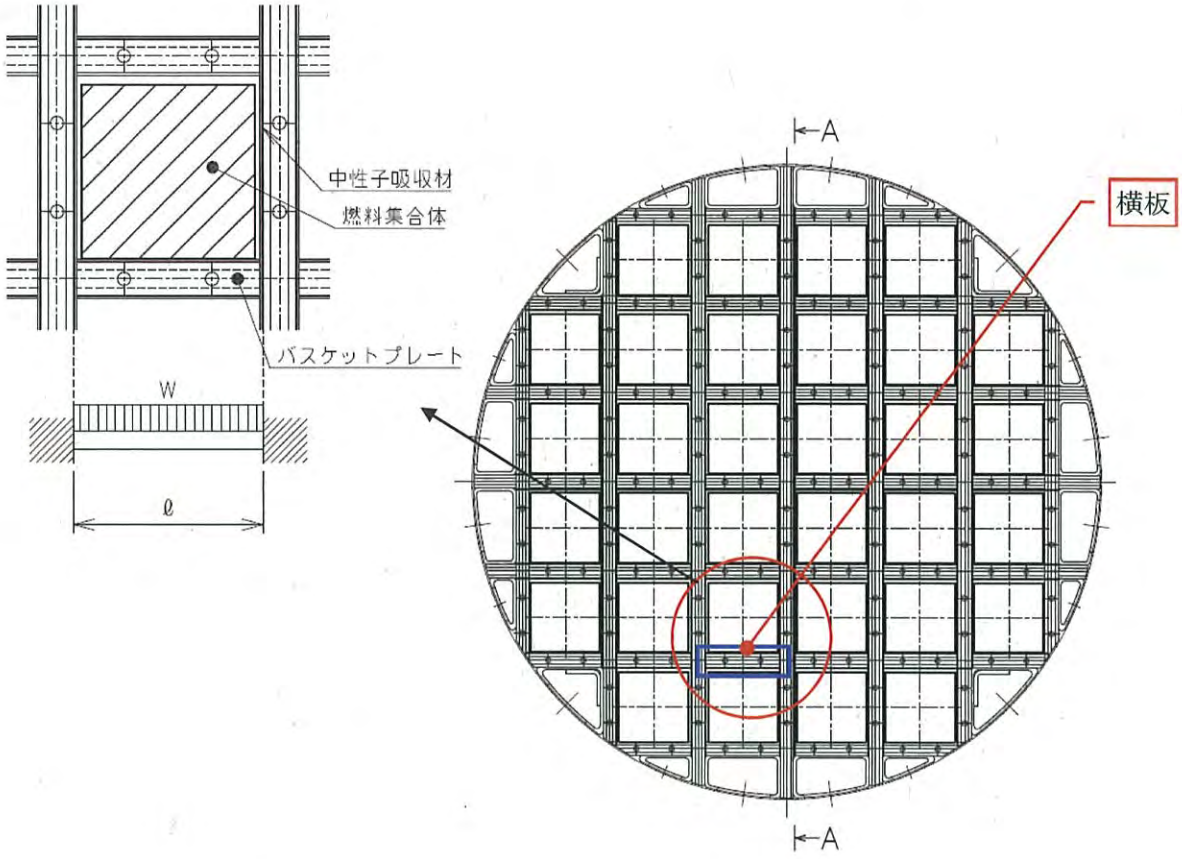
第 5-3 図　バスケットプレートのモデル図



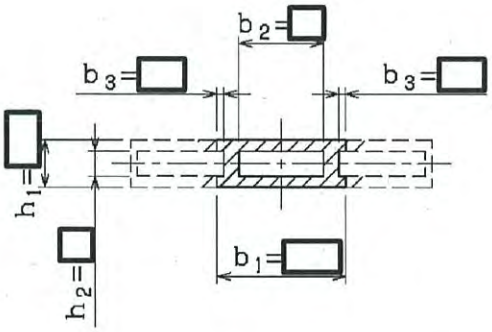
第 5-4 図　バスケットプレート縦板のモデル図



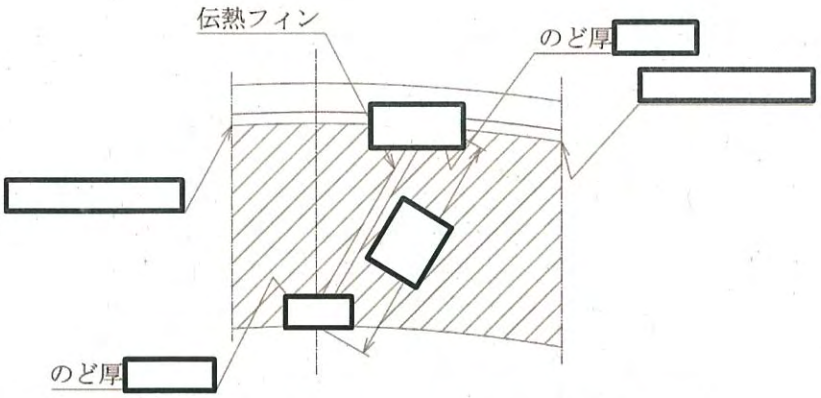
第 5-5 図　バスケットプレート縦板の断面



第 5-6 図　バスケットプレート横板のモデル図



第 5-7 図　バスケットプレート横板の断面



第5-8図　伝熱フィン溶接部のモデル図

5.2 荷重の組合せ及び許容応力

乾式キャスクにおいて，密封容器構成部材における評価部位の許容応力は，許容応力状態III_AS及びIV_ASの許容限界（「原子力発電所耐震設計技術指針」，「発電用原子力設備規格設計・建設規格(2012年版)」及び「発電用原子力設備規格材料規格(2012年版)」を基に設定）を適用する。

一方，密封容器を構成しない部材における評価部位の許容応力は，「原子力発電所耐震設計技術指針」，「発電用原子力設備規格設計・建設規格(2012年版)」，「発電用原子力設備規格・材料規格(2012年版)」及び「使用済燃料貯蔵施設規格・金属キャスク構造規格(2007年版)」等を基に設定した許容限界を適用する。

密封容器構成部材における荷重の組合せ及び許容応力状態を第5-1に示す。また，許容応力を第5-2表に示す。

第5-1表　乾式キャスクにおける荷重の組合せ及び許容応力状態

施設区分		機器名称	耐震重要度分類	機器等の区分	荷重の組合せ	許容応力状態
核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設	使用済燃料貯蔵設備	乾式キャスク	S	クラス3容器 (注1)	D＋P＋M＋Ss	IV_AS (注2)

(注1) 密封容器構成部材（胴，一次蓋，一次蓋ボルト，胴（脚部））が該当。

(注2) 密封境界部に係る評価部位の許容応力は，審査ガイドに従いおおむね弾性範囲内となる許容限界とする必要があることから，許容応力状態III_ASにおける一次一般膜応力の許容限界を適用する。

第5-2表　乾式キャスクの許容応力 (注1)

許容応力状態	許容限界 (注4)			
	一次一般膜応力	一次膜応力＋一次曲げ応力	一次＋二次応力	一次＋二次＋ピーク応力
III_AS	S_yと$2/3S_u$の小さい方。 ただし，オーステナイト系ステンレス鋼及び高ニッケル合金については1.2Smとする。	左欄の (注2) α倍の値	$3S_m$ (注3) Sd又はSs地震動のみによる応力振幅について評価する。	Sd又はSs地震動のみによる疲労解析を行い，運転状態Ⅰ，Ⅱにおける疲労累積係数との和を1.0以下とする。 (注4) (注5)
IV_AS	$2/3S_u$ ただし，オーステナイト系ステンレス鋼及び高ニッケル合金については2/3Suと2.4Smの小さい方。	左欄の (注2) α倍の値		

（注1）　地震時に乾式キャスクの安全機能が維持される見通しを確認するために、金属キャスク構造規格（JSME S FA1）に準じて設定する。また、一部の許容応力については、金属キャスク構造規格（JSME S FA1）に基づき設定する。

（注2）　αは純曲げによる全断面降伏荷重と初期降伏荷重の比又は1.5のいずれか小さい方の値とする。

（注3）　$3S_m$を超える場合は弾塑性解析を行う。この場合，JSME S NC1-2012 PVB-3300（同PVB-3313を除く）の簡易弾塑性解析を用いる。

（注4）　JSME S NC1-2012 PVB-3140(6)を満たすときは，疲労解析を行うことを要しない。ただし，「応力の全振幅」は「Sd又はSs地震動による応力の全振幅」と読み替える。

（注5）　運転状態Ⅰ，Ⅱにおいて疲労解析を要しない場合は，地震動のみによる疲労累積係数が1.0以下とする。

5.3 使用材料の許容応力

乾式キャスクの応力解析に用いる各部位の使用材料の許容応力を第5-3表に示す。

第5-3表　使用材料の許容応力

材　料	温度条件 (℃)		S_m (MPa)	S_y (MPa)	S_u (MPa)	評価部位
GLF1	設計(注1) 温度	115	124	185	377	一次蓋
						一次蓋シール部（蓋側）
GLF1		105	124	186	377	二次蓋
GLF1		140	122	183	377	胴
GLF1		150	122	183	377	胴（底板）
						胴（脚部）
GLF1		120	124	185	377	一次蓋シール部（胴側）
SGV480		135	155	233	426	外筒
SGV480		110	158	237	429	蓋部中性子遮蔽材カバー
SUS304		130	137	159	429	下部端板
						底部中性子遮蔽材カバー
SNB23-3		115	281	846	921	一次蓋ボルト
SNB23-3		105	283	850	927	二次蓋ボルト
MB-A3004-H112		190	36	56	116	バスケット
H3100 C1020P		135	—(注2)	54(注2)	176(注2)	伝熱フィン

(注1) 設計温度は，貯蔵時の乾式キャスクの熱解析結果から評価部位毎に設定した値である。

(注2) 「JSME材料規格2012年版」に値がないため，引用規格である「ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section II Part-D (Metric) (2007 Edition, 2008a Addenda, 2009b Addenda ASME) 」の記載値を適用した。ただし，Smの記載はないため「－」としている。

6. 貯蔵架台の応力評価

6.1 評価方法

貯蔵架台は，溶接部のない一体構造物であり，嵌め合い部で乾式キャスクを支持し，乾式キャスクの傾きを抑制している。また，基礎ボルトで貯蔵建屋床面と固定し，乾式キャスクを設置した貯蔵架台の横ずれを防止している。

以上のことから，「3.2 貯蔵架台の耐震評価箇所」に示す貯蔵架台の嵌め合い部及び基礎ボルトについて，第 6-1 図の貯蔵架台の応力評価フローに基づいて応力評価を行う。なお，本評価は，嵌め合い部の発生応力が大きい MSF-32P 用の貯蔵架台で代表する。

貯蔵架台本体の嵌め合い部の発生応力は，第 6-2 図に示す 3 次元 FEM 応力解析モデルに「4. 乾式キャスク及び貯蔵架台の地震応答解析」で算出した荷重を入力し求める。3 次元 FEM 応力解析モデルの拘束条件として，基礎ボルト点をピン結合とする。

基礎ボルトの発生応力は，第 6-3 図に示すように「4. 乾式キャスク及び貯蔵架台の地震応答解析」で算出した荷重より，構造公式を用いて求める。応力算出式を以下に示す。

$$M = F_{H1}h_{H1} - F_{H2}h_{H2} \tag{1}$$

$$F_V = M \div \left(\frac{{I_1}^2}{I_0} \times 2 + I_0 \times 6\right) \tag{2}$$

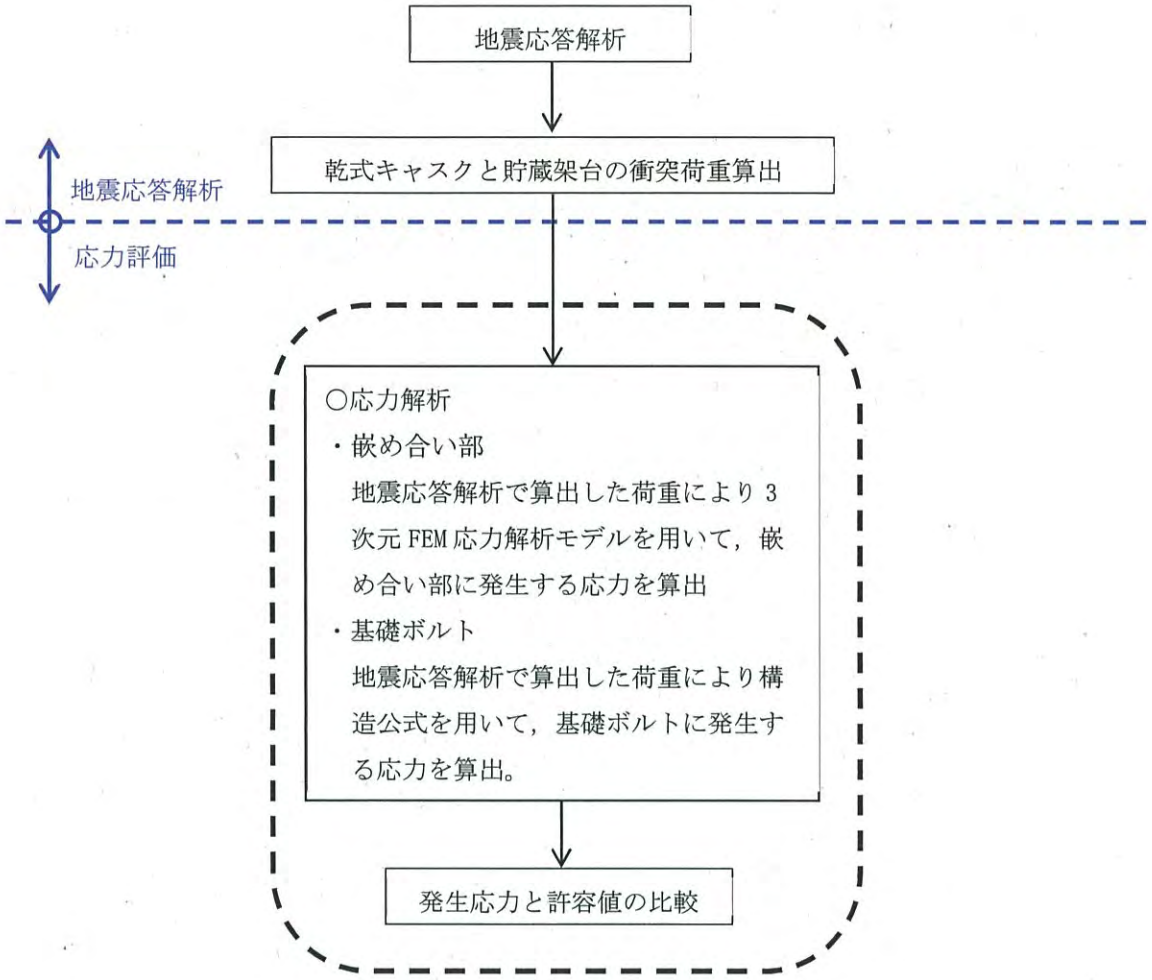
$$\sigma_t = \frac{F_V}{A_b \times 0.75} \tag{3}$$

$$F_\tau = \frac{(F_{H1} - F_{H2})}{N} \tag{4}$$

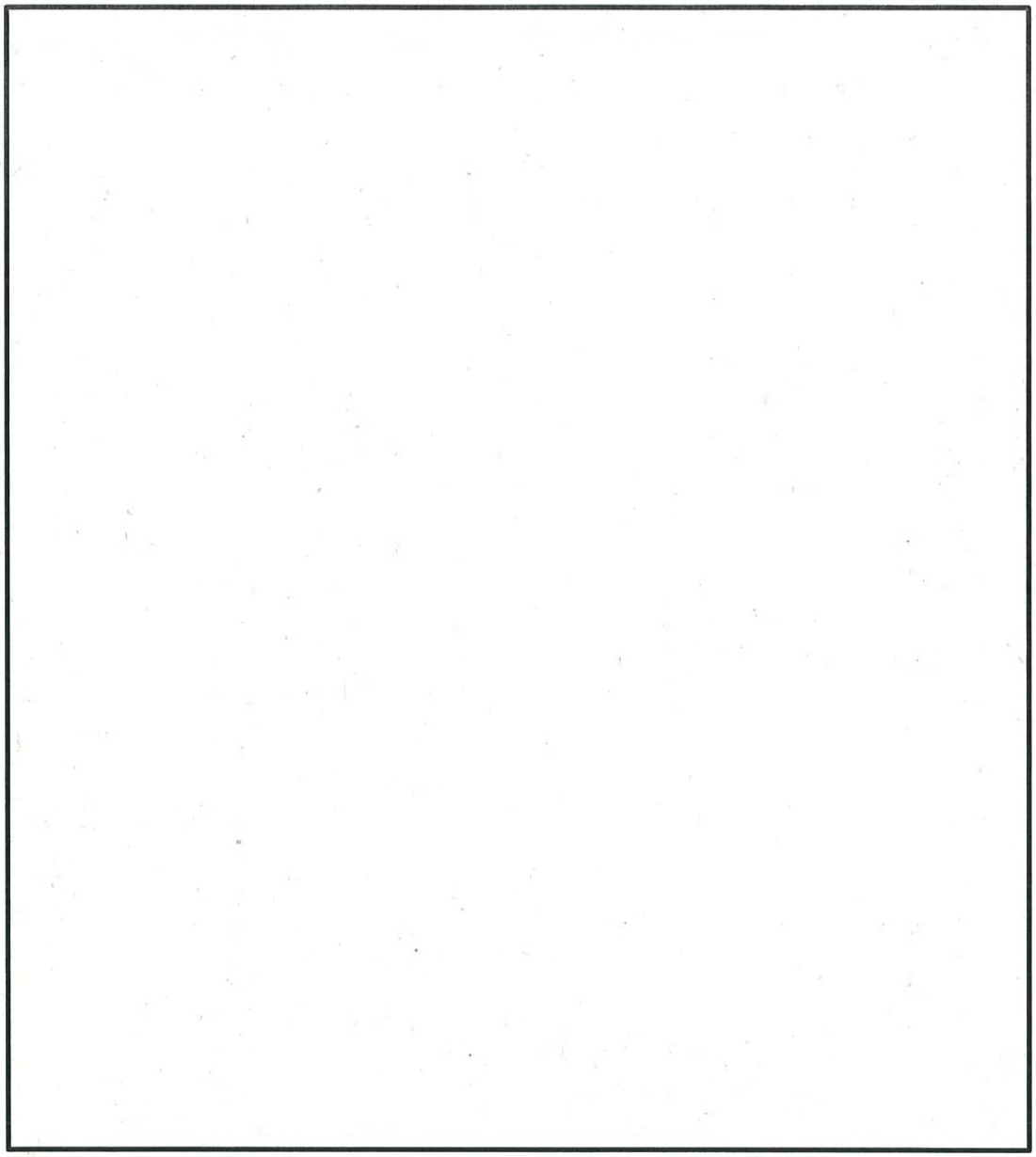
$$\sigma_\tau = \frac{F_\tau}{A_b \times 0.75} \tag{5}$$

ここで，

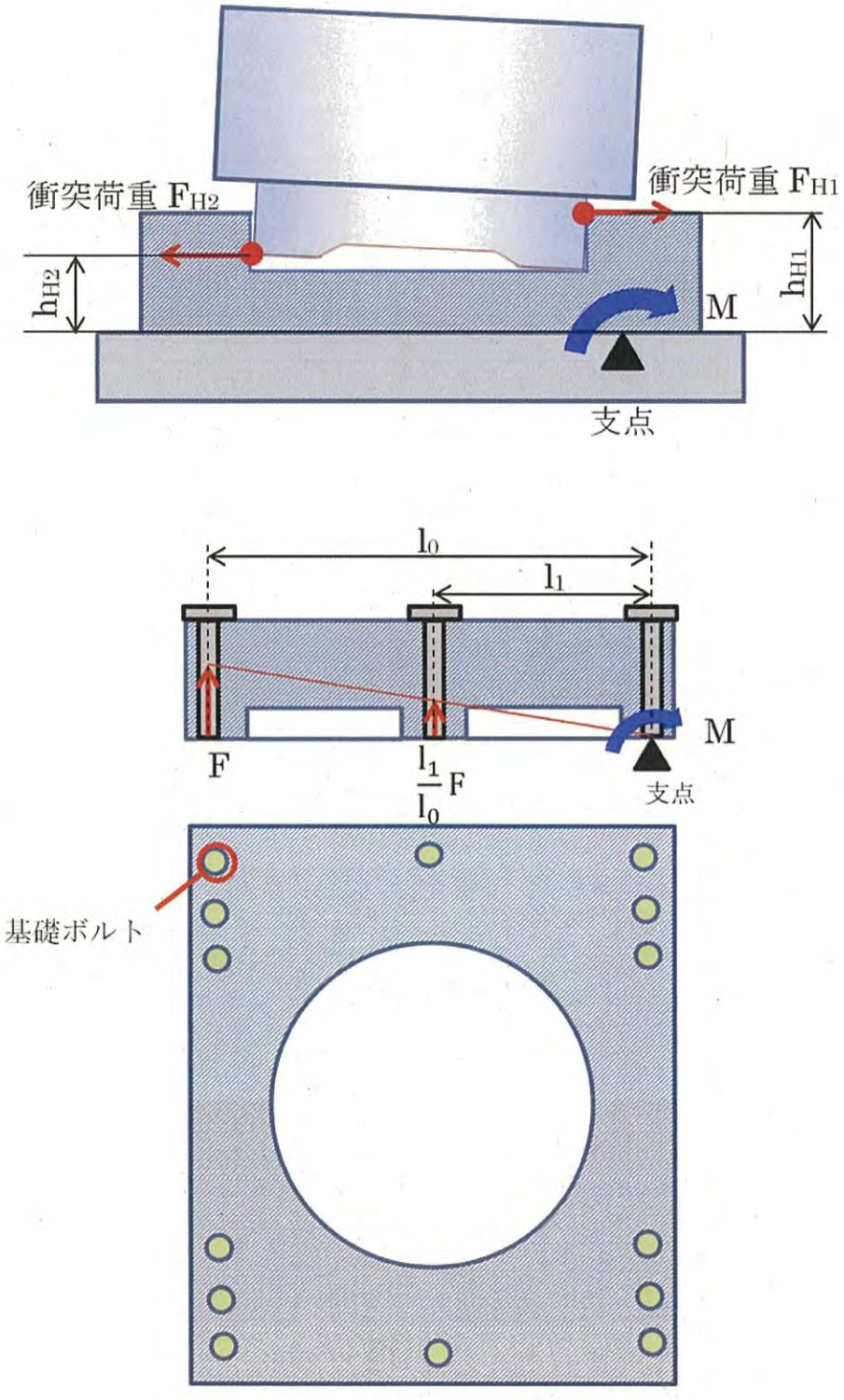
M ： 貯蔵架台に生じる回転モーメント(N・m)
F_{H1} ： 衝突点 1 の水平方向の応答荷重 (N)
F_{H2} ： 衝突点 2 の水平方向の応答荷重 (N)
h_{H1}, h_{H2} ： 支点から衝突点 1 及び 2 までの距離 (m)
F_V ： 基礎ボルト 1 本あたりの引張荷重 (N)
σ_t ： 基礎ボルト 1 本あたりの引張応力 (MPa)
I_0, I_1 ： 支点から基礎ボルトまでの距離 (m)
A_b ： 基礎ボルトの軸部断面積 (mm^2)
F_τ ： 基礎ボルト 1 本あたりのせん断荷重 (N)
N ： 基礎ボルトの本数 (本)
σ_τ ： 基礎ボルト 1 本あたりのせん断応力 (MPa)



第6-1図　貯蔵架台の応力評価フロー



第 6-2 図　貯蔵架台応力評価用 3 次元 FEM モデル



第 6-3 図　基礎ボルトの応力算出に用いる諸元

6.2 荷重の組合せ及び許容応力

貯蔵架台の評価部位の許容応力は，許容応力状態$\mathrm{IV_AS}$の許容限界（「原子力発電所耐震設計技術指針」，「発電用原子力設備規格設計・建設規格(2012年版)」及び「発電用原子力設備規格材料規格(2012年版)」を基に設定）を適用する。

貯蔵架台の荷重の組合せ及び許容応力状態は第6-1表に示す乾式キャスクの許容応力のうち，許容応力状態$\mathrm{IV_AS}$の許容限界を適用する，許容応力を第6-2表に示す。

第6-1表　貯蔵架台の荷重の組合せ及び許容応力状態

施設区分		機器名称	耐震重要度分類	機器等の区分	荷重の組合せ	許容応力状態
核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設	使用済燃料貯蔵設備	貯蔵架台	S	クラス3支持構造物	D＋P＋M＋Ss	$\mathrm{IV_AS}$

第6-2表　許容応力（クラス3支持構造物）

許容応力状態	許容限界 (注1) (注2) (注3)（ボルト以外）		許容限界 (注2)（ボルト等）	
	一次応力		一次応力	
	せん断	曲げ	引張	せん断
$\mathrm{IV_AS}$	$1.5f_s^*$	$1.5f_b^*$	$1.5f_t^*$	$1.5f_s^*$

(注1)「鋼構造設計規準　SI単位版」(2002年日本建築学会）等の幅厚比の制限を満足させる。

(注2)　応力の組合せが考えられる場合には，組合せ応力に対しても評価を行う。

(注3)　耐圧部に溶接等により直接取り付けられる支持構造物であって耐圧部と一体の応力解析を行うものについては，耐圧部と同じ許容応力とする。

6.3 使用材料の許容応力

貯蔵架台の応力解析に用いる各部位の使用材料の許容応力を第6-3表に示す。

第6-3表　使用材料の許容応力

評価部位	材料	温度条件 (℃)		S_y (MPa)	S_u (MPa)	F^* (MPa)
貯蔵架台 嵌め合い部	SF490A	最高使用 温度 (注1)	65	233	452	279
基礎ボルト	SNB23-3	雰囲気 温度 (注2)	50	884	982	687

(注1) 貯蔵架台と接する貯蔵建屋コンクリート床面の制限温度（65℃）における値である。

(注2) 乾式キャスクの除熱評価に設定している乾式キャスクの周囲温度（50℃）における値である。

7. 乾式キャスクの転倒評価

7.1 評価方法

乾式キャスク「4. 乾式キャスク及び貯蔵架台の地震応答解析」の評価条件における最大傾き角 θ_{MAX} と幾何学的に転倒する角度を比較することで乾式キャスクが地震時に転倒しないことを確認する。

地震時の最大傾き角 θ_{MAX} は，「4. 乾式キャスク及び貯蔵架台の地震応答解析」に示す乾式キャスクの水平方向衝突時の幾何学的な位置関係を解くことで算出される。算出式を以下に示す。なお，諸元については「4. 乾式キャスク及び貯蔵架台の地震応答解析」に示す。

$$l = R\cos(\theta_{max} + \beta) \tag{1}$$

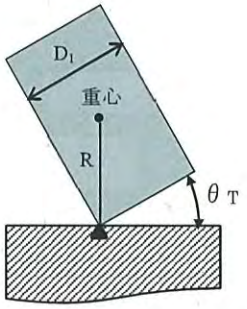
$$x_1 + x_2 = d \cdot \tan\theta_{max} + D_I \cdot \cos\theta_{max} - D_O \tag{2}$$

$$h_1 = R\sin(\theta_{max} + \beta) - d \tag{3}$$

$$h_2 = R\sin(\theta_{max} + \beta) - D_I \cdot \sin\theta_{max} \tag{4}$$

7.2 許容限界

転倒評価における許容限界は，乾式キャスク単体が縦置きされている状態で，幾何学的に転倒する状態である乾式キャスク重心が回転中心の直上に位置する時の角度を用いる（第 7-1 図参照）。転倒角の算出式を以下に示す。



第 7-1 図　乾式キャスク転倒時の位置関係

$$\theta_T = \sin^{-1}\left(\frac{D_1/2}{R}\right) \tag{5}$$

ここで，

θ_T　：乾式キャスクの転倒角（°）

D_1　：乾式キャスク底部の外径（m）

R　：回転中心と重心位置との距離（m）

8. 評価結果

8.1 乾式キャスクの評価結果

乾式キャスクの応力評価結果，疲労評価結果及び機能維持評価結果を第8-1表及び第8-2表に示す。乾式キャスクの各評価部位について，「5.1 評価方法」にて求めた発生応力は「5.2 荷重の組合せ及び許容応力」にて定めた許容限界を満足しており，設計用地震力に対して十分な構造強度を有しており，機能を維持することを確認した。

第8-1表　基準地震動S_sに対する応力評価及び疲労評価の結果（1/7）

評価対象設備			評価部位	応力評価				疲労評価		
				応力分類	発生値 (MPa)		許容限界 (MPa)	疲労累積係数		許容限界 (－)
					傾き 衝突時	底面 衝突時		傾き 衝突時	底面 衝突時	
核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設	使用済燃料貯蔵施設	乾式キャスク	一次蓋	一次一般膜応力	7	2	251	－	－	－
				一次局部膜+一次曲げ応力	12	15	377	－	－	－
				一次応力+二次応力	9	11	372	0.0004	0.0004	1
			二次蓋	一次一般膜応力	9	3	251	－	－	－
				一次局部膜+一次曲げ応力	32	17	377	－	－	－
				一次応力+二次応力	11	12	372	0.0004	0.0004	1

第8-1表　基準地震動S_sに対する応力評価及び疲労評価の結果（2/7）

評価対象設備			評価部位	応力評価				疲労評価		
				応力分類	発生値(MPa)		許容限界(MPa)	疲労累積係数		許容限界(−)
					傾き衝突時	底面衝突時		傾き衝突時	底面衝突時	
核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設	使用済燃料貯蔵施設	乾式キャスク	胴	一次一般膜応力	11	6	251	−	−	−
				一次局部膜+一次曲げ応力	12	7	377	−	−	−
				一次応力+二次応力	69	25	366	0.013	0.0004	1
			胴（底板）	一次一般膜応力	39	3	251	−	−	−
				一次局部膜+一次曲げ応力	45	21	377	−	−	−
				一次応力+二次応力	96	21	366	0.02	0.0002	1
			胴（脚部）	一次局部膜応力	104	22	377	−	−	−
				（衝突部）一次局部膜応力	−	24	377	−	−	−
				一次応力+二次応力	284	33	366	0.45	0.00025	1

第8-1表　基準地震動S_sに対する応力評価及び疲労評価の結果（3/7）

評価対象設備			評価部位	応力評価				疲労評価		
				応力分類	発生値(MPa)		許容限界(MPa)	疲労累積係数		許容限界(－)
					傾き衝突時	底面衝突時		傾き衝突時	底面衝突時	
核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設	使用済燃料貯蔵施設	乾式キャスク	外筒	引張応力	25	25	279			
				圧縮応力	42	2	279			
				せん断応力	19	9	161			
				曲げ応力	93	40	279			
				組合せ応力	105	42	279			
			下部端板	引張応力	11	4	214			
				圧縮応力	28	2	214			
				せん断応力	20	5	123			
				曲げ応力	129	31	214			
				組合せ応力	129	30	214			

第8-1表　基準地震動S_sに対する応力評価及び疲労評価の結果（4/7）

評価対象設備			評価部位	応力評価				疲労評価		
				応力分類	発生値(MPa)		許容限界(MPa)	疲労累積係数		許容限界(－)
					傾き衝突時	底面衝突時		傾き衝突時	底面衝突時	
核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設	使用済燃料貯蔵施設	乾式キャスク	蓋部中性子遮蔽材カバー	引張応力	－	－	284			
				圧縮応力	3	3	284			
				せん断応力	2	2	164			
				曲げ応力	6	9	284			
				組合せ応力	13	13	284			
			底部中性子遮蔽材カバー	引張応力	13	10	214			
				圧縮応力	101	1	214			
				せん断応力	53	11	123			
				曲げ応力	109	43	214			
				組合せ応力	195	55	214			

第8-1表　基準地震動S_sに対する応力評価及び疲労評価の結果（5/7）

評価対象設備			評価部位	応力評価				疲労評価		
				応力分類	発生値(MPa)		許容限界(MPa)	疲労累積係数		許容限界(—)
					傾き衝突時	底面衝突時		傾き衝突時	底面衝突時	
核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設	使用済燃料貯蔵施設	乾式キャスク	一次蓋シール部（蓋側）	一次応力+二次応力	66	63	185			
			一次蓋シール部（胴側）	一次応力+二次応力	17	19	185			
			一次蓋ボルト	平均引張応力	260	248	846	—	—	—
				平均引張応力+曲げ応力	281	250	846	0.0002	0.0002	1

第8-1表　基準地震動S_sに対する応力評価及び疲労評価の結果（6/7）

評価対象設備			評価部位	応力評価				疲労評価		
				応力分類	発生値(MPa)		許容限界(MPa)	疲労累積係数		許容限界(－)
					傾き衝突時	底面衝突時		傾き衝突時	底面衝突時	
核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設	使用済燃料貯蔵施設	乾式キャスク	二次蓋ボルト	平均引張応力	235	213	618	－	－	－
				平均引張応力+曲げ応力	296	246	927	0.0002	0.0002	1

第8-1表　基準地震動S_sに対する応力評価及び疲労評価の結果（7/7）

評価対象設備			評価部位		応力評価				疲労評価		
					応力分類	発生値(MPa)		許容限界(MPa)	疲労累積係数		許容限界(－)
						傾き衝突時	底面衝突時		傾き衝突時	底面衝突時	
核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設	使用済燃料貯蔵施設	乾式キャスク	バスケット	バスケットプレート（最下段）	圧縮応力	－	5	67			
				バスケットプレート（縦板）	圧縮応力	1	－	77			
				バスケットプレート（横板）	曲げ応力	1	－	100			
					せん断応力	1	－	43			

第8-2表　基準地震動S_sに対する機能維持評価結果

評価対象設備			評価部位	応力分類	発生値	許容限界	備考
					MPa	MPa	
核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設	使用済燃料貯蔵施設	乾式キャスク	伝熱フィン	せん断応力	2	101	—

8.2 貯蔵架台の評価結果

貯蔵架台の耐震評価結果を第8-3表に示す。「6.1 評価方法」にて求めた発生応力は「6.2 荷重の組合せ及び許容応力」にて定めた許容限界を満足しており，設計用地震力に対して十分な構造強度を有していることを確認した。

なお，架台の定着部は，原則としてボルトの限界引き抜き力に対して，コンクリート設計基準強度及びせん断力算定断面積による引き抜き耐力が上回るよう埋込深さを算定することで，基礎ボルトに対して十分な余裕を持つように設計する。

第8-3表　基準地震動S_sに対する応力評価結果

評価対象設備			評価部位	応力分類	発生値(注1)	許容限界	備考
					MPa	MPa	
核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設	使用済燃料貯蔵施設	貯蔵架台	貯蔵架台嵌め合い部	曲げ応力	98	322	—
				せん断応力	27	161	—
			基礎ボルト	引張応力	124	687	—
				せん断応力	78	396	—
				組み合わせ応力	124	687	—

8.3 乾式キャスクの転倒評価結果

乾式キャスクの転倒評価結果を第8-4表に示す。「7.1 評価方法」にて求めた傾き角は「7.2 許容限界」にて定めた幾何学的に転倒する角度を下回っており，設計用地震力に対して転倒しないことを確認した。

第8-4表　基準地震動Ssによる転倒評価結果

評価対象設備	傾き角	転倒角
乾式キャスク		

乾式キャスク底部と貯蔵架台の嵌め合い部の隙間設定及び深さ設定の考え方について

1. 概要

カップホルダ式貯蔵架台は，乾式キャスク底部を貯蔵架台に設けた凹部に嵌め合うことで地震力に対して乾式キャスクを保持する構造である。ここで，乾式キャスク底部と貯蔵架台の嵌め合い部の隙間が大きい場合は，幾何学的に乾式キャスクの傾き量が増加する。一方，隙間が小さい場合は，幾何学的に乾式キャスクの傾き量が減少するが，乾式キャスクを貯蔵架台へ設置する際の作業性が低下するため，ある程度の隙間量を確保する必要がある。これらの相反する事項を考慮し，乾式キャスクの設置作業に支障がなく，貯蔵時に地震が発生した場合の傾き量を最小に抑えるように乾式キャスク底部と貯蔵架台の隙間量を設定する必要がある。

伊方発電所で取り扱う乾式キャスク（MSF-24P 型及び MSF-32P 型）底部と貯蔵架台の隙間設定は，貯蔵時の乾式キャスクの傾き量を最小限とし，かつ，熱膨張等を考慮しても乾式キャスクの貯蔵架台への設置作業に支障がない隙間として，2 項に示す乾式キャスクの熱膨張等を考慮して，常温時の乾式キャスク底部と貯蔵架台の径方向隙間を□m と設定している。また，乾式キャスクが傾いた際に乾式キャスクの下部端板が貯蔵架台上面と接触しないように軸方向の嵌め合い深さを□mm とした。また、試験供試体の隙間は、実機の製造公差を考慮した最大径方向隙間量に対応する隙間□m）を設定した。

以下にその考え方をまとめる。

2. 径方向隙間設定の考え方

(1) 径方向の隙間量について

① 貯蔵架台への設置時の径方向隙間量

乾式キャスクは，使用済燃料からの崩壊熱により乾式キャスク各部の温度が上昇した状態で乾式貯蔵施設へ搬入されるため，乾式キャスクは若干の熱膨張をしている。一方，貯蔵架台は乾式貯蔵施設に保管されているため，基本的に室温になっている。このため，熱膨張した乾式キャスクを膨張していない貯蔵架台に嵌め込む際が最も隙間が小さい状態となり，この状態で設置作業に支障がない隙間量を設定する必要がある。乾式貯蔵施設搬入時は，乾式キャスク底部は熱膨張により直径が□大きくなるため，常温時の乾式キャスク底部と貯蔵架台の径方向隙間を□とすることで，熱膨張を考慮した乾式キャスクを室温状態の貯蔵架台に設置する際の隙間量は□となり，設置作業に支障がない隙間量となる。

② 貯蔵時の嵌め合い部の径方向隙間量

乾式キャスクを貯蔵架台へ設置し，貯蔵状態となれば，乾式キャスクから貯蔵架台へ熱が伝導し，貯蔵架台の温度が上昇して熱膨張する。このため，貯蔵

架台の嵌め合い部の直径が熱膨張により増加し，嵌め合い部の径方向隙間量は設置時に比べて大きくなる。ここで，乾式キャスク底部の温度は常に貯蔵架台の温度以上となり，乾式キャスク底部と貯蔵架台は同じ材料であるため，乾式キャスク底部と貯蔵架台に温度差がある時の隙間量は常に[redacted]となる。したがって，貯蔵時の嵌め合い部の径方向隙間量は①に示す設置時の値から大きくなるが，その最大値は乾式キャスク底部と貯蔵架台が同じ温度となる時の隙間量であり，常温時の設定値が最大の隙間量となる。

(2) 最大径方向隙間量について

乾式キャスク底部の直径は，[redacted]mm，貯蔵架台の直径は，[redacted]mm であり，隙間量は[redacted]mm（ノミナル値）となる。（図 1 参照）

ここで，乾式キャスク底部外径の製造公差は[redacted]，貯蔵架台の製造公差は[redacted]と定めていることから，隙間量が[redacted]mm を超えることはない。

なお，乾式キャスク底部外径の熱膨張量は貯蔵開始時が最も大きいため，乾式キャスクと貯蔵架台の隙間は，図 2 に示すとおり貯蔵開始時が最も小さく，時間経過とともに[redacted]m（ノミナル値）に近づく。

※1 ：MSF－32P 型，※2 ：MSF－24P 型

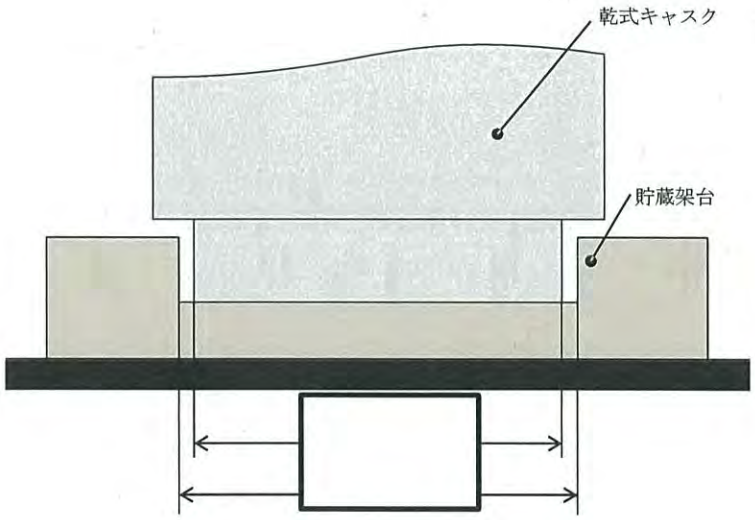


図 1. 乾式キャスク底部と貯蔵架台の隙間量

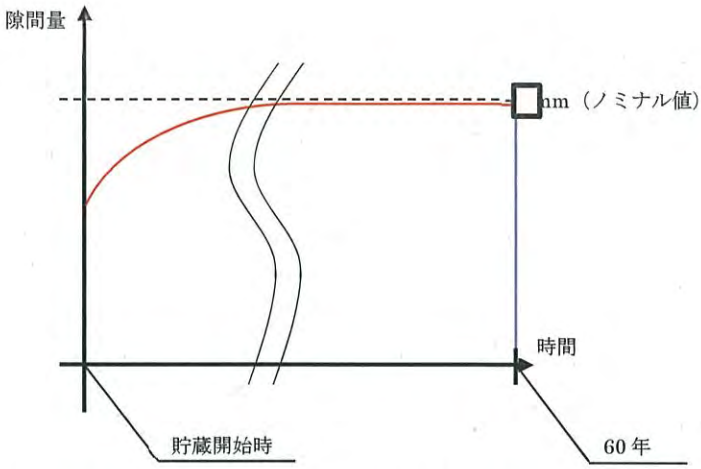


図 2. 時間経過による乾式キャスクと貯蔵架台の隙間量の変化

2. 軸方向の嵌め合い部深さの考え方

乾式キャスク底部と貯蔵架台の勘合部の深さが浅い場合は，傾いた際に乾式キャスクが架台から抜ける可能性がある。一方，深さが深い場合は，乾式キャスクが傾いた際に，乾式キャスクの下部端板が貯蔵架台上面に衝突する可能性がある（図 3)。これらを考慮し，乾式キャスクが傾いた際に乾式キャスクの下部端板と貯蔵架台上面の隙間に余裕があり，かつ，貯蔵時に地震が発生した場合の傾き量を最小に抑えるように，常温時の貯蔵架台勘合部のノミナル深さを□mm に設定した。

なお，熱膨張を考慮した場合，乾式キャスク及び貯蔵架台ともに膨張するため、ノミナル深さより隙間量が縮まることはない。

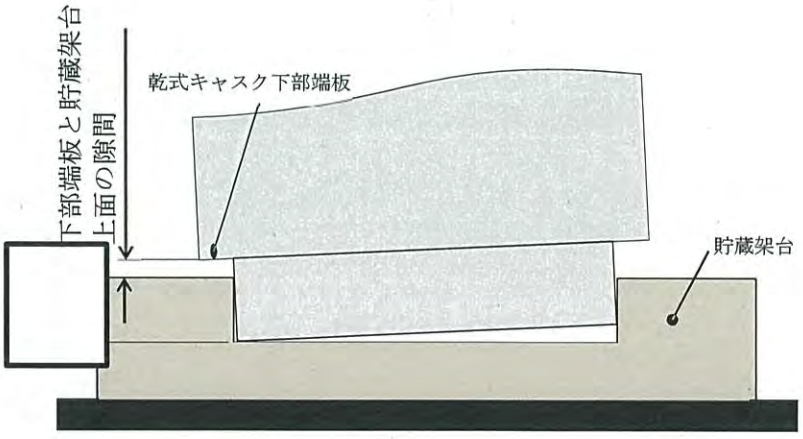


図 3. 乾式キャスク傾き時の下部端板との相関図

別紙2

加振試験による耐震評価式の構築・検証について

1. 概要

貯蔵架台に設置した乾式キャスクの地震時の挙動を把握し，地震時に乾式キャスクと貯蔵架台に発生する荷重の算出に用いる耐震評価式の構築・検証を行うために加振試験を実施した。

本資料では，その内容について説明する。

2. 地震時の乾式キャスクに想定される挙動

地震時に貯蔵架台に設置した乾式キャスクに発生すると考えられる挙動を第 2-1 図に示す。

これらの挙動のうち，滑り挙動は，貯蔵架台と乾式キャスク底面との摩擦力を介して地震力が乾式キャスクに伝播して発生するものであり，乾式キャスクが貯蔵架台の嵌め合い部で滑り，衝突することで荷重が発生するが，その荷重は摩擦等により小さくなると考えられる。

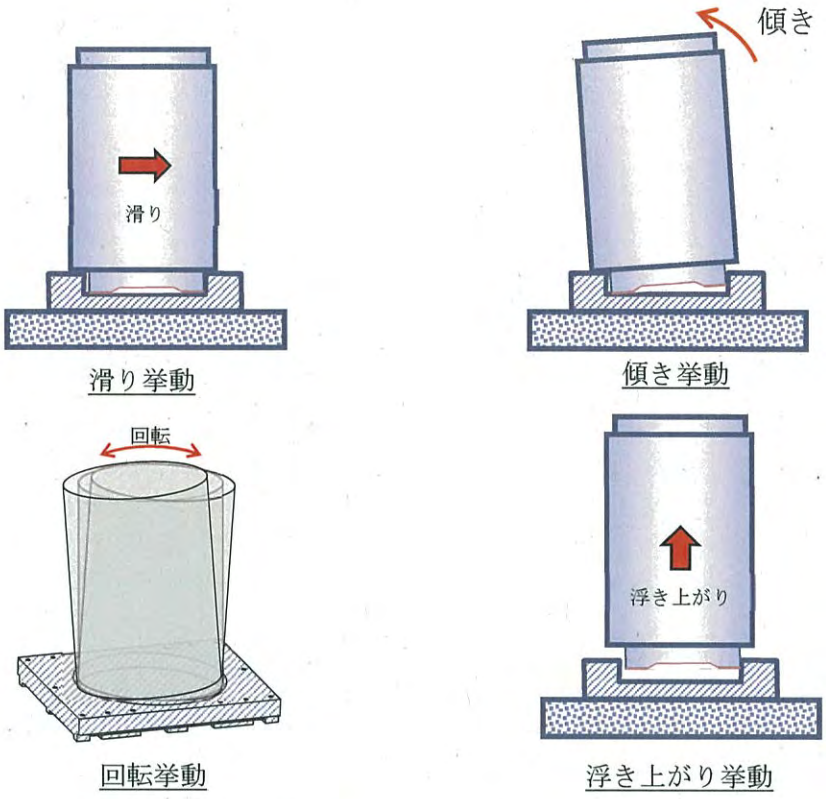
傾き挙動は，ある一方向（径方向）へ乾式キャスクが傾く挙動であり，乾式キャスクの運動エネルギーが，ある一方向へ集中し貯蔵架台と衝突する。そのため，乾式キャスクの運動エネルギーの全てが荷重として，乾式キャスクおよび貯蔵架台に作用すると考えられる。

回転挙動は，貯蔵架台の嵌め合い部内面に沿って乾式キャスクが回転する運動であり，乾式キャスクの運動エネルギーは回転エネルギーに変換されるため，乾式キャスクおよび貯蔵架台に発生する荷重は傾き挙動に比べて小さくなると考えられる。

浮き上がり挙動は，乾式キャスクが鉛直方向へ浮き上がる運動であり，設置場所における鉛直方向地震力が１Ｇを超えると発生すると考えられる。伊方発電所における乾式キャスクの設置位置では鉛直方向加速度は１Ｇを超えない見込みであるため，浮き上がり挙動は発生しないと考えられる。

そのため，乾式キャスクの耐震評価式の構築にあたっては，傾き挙動時に貯蔵架台と衝突する挙動を元に構築することで安全側に大きな荷重が算出される式になると考えられる。また，その時に発生する荷重は，乾式キャスクが地震力により加速することで蓄える運動エネルギー及び地震力によって傾くことで蓄える位置エネルギーを因子として決まると考えられる。

以上の考えが妥当であることを確認し，耐震評価式を構築するために試験計画を検討し，加振試験を実施した。



第 2-1 図　地震時における乾式キャスクの挙動

3. 試験計画

乾式キャスクの挙動の把握及び耐震評価式の構築・検証のために実施した加振試験の試験計画を説明する。具体的な加振試験の実施内容及びその試験結果を用いた検討内容を第 3-1 表に示す。

加振試験は，「3.1 試験供試体」にて示す試験供試体を用いて実施し，「3.2 試験の計測方法」にて得られた結果から，乾式キャスクの挙動の把握及び耐震評価式の構築・検証を行った。

第 3-1 表　加振試験による検討内容

試験波		検討内容	記載箇所
正弦波 （1 軸）		・乾式キャスクの地震時の挙動の把握及び耐震評価式の構築 地震時の乾式キャスクの挙動を把握し，耐震評価に用いる耐震評価式を構築する。	3. 正弦波試験
周波数分割波（1 軸）	短周期	・周波数特性による乾式キャスクの挙動への影響検討 正弦波試験で確認された乾式キャスクの挙動が地震波の周波数特性の影響を受けるか確認する。 ・周波数特性による耐震評価式への影響検討 正弦波試験で構築した乾式キャスクの耐震評価式が周波数特性の影響を受けるか確認する。	4. 周波数 分割波試験
	中周期		
	長周期		
仮想 Ss 波 （3 軸）		・3 方向地震時の耐震評価式の適用性の確認 1 軸方向の加振試験結果より構築・検証した耐震評価式が 3 方向地震時の乾式キャスクの耐震評価に適用可能か確認する。	5. 仮想 Ss 波 試験
伊方 Ss-1 波 （3 軸）		・実機への適用性の確認 上記の試験結果から妥当性が確認された耐震評価式が実機の評価に適用可能か確認する。	6. 伊方 Ss-1 波 試験

3.1 試験供試体

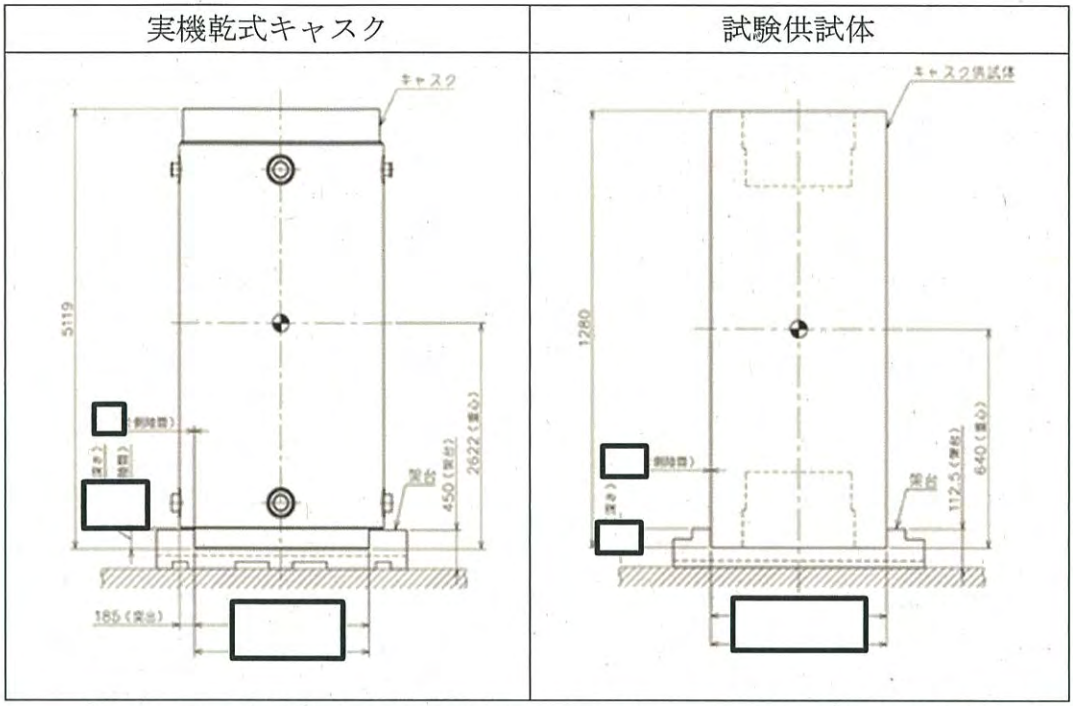
試験供試体の製作にあたって，実機乾式キャスクの MSF-21P 型，MSF-24P 型及び MSF-32P 型について，その寸法から適当である型式をモデルとして選定した。本試験では，地震時の乾式キャスクの挙動及び発生する荷重を把握することが目的であるため，重心周りの慣性モーメントが最も小さく，傾きやすいため，貯蔵架台に衝突した際のひずみ量を計測しやすいと考えられる MSF-21P 型を試験供試体のモデルとして用いることとし，加振試験に用いる試験供試体には実機乾式キャスクの 1/4 スケール模擬体を使用した。

第 3-1 図に実機乾式キャスク（MSF-21P 型）及び試験供試体の構造比較を，第 3-2 図に加振試験台上に設置された試験供試体を，第 3-2 表に試験のスケール設定方針を，第 3-3 表に試験供試体と伊方発電所で取り扱う実機乾式キャスクの寸法比較を示す。

第 3-2 表に示す通り，試験供試体の長さを 1/4 とし，それに伴い質量を 1/64（$=(1/4)^3$）とする一方，時間を 1/2 とすることで，実機乾式キャスクと発生する加速度を合わせている。回転モーメントに対して，慣性モーメントのスケールが小さく，実機に対して，より傾きやすい設定を用いた。また，試験供試体では，貯蔵架台嵌め合い部と乾式キャスク底部の直径のクリアランスもその他の寸法と同じく，実機クリアランスに対して 1/4 とした。この際，実機クリアランスには，製造公差や熱膨張で想定される最大値を想定しており，慣性モーメントの設定と合わせて，より乾式キャスクが傾きやすい条件での試験実施を意図した。

また，試験供試体は MSF-21P 型の乾式キャスクをモデルとしているため，伊方発電所で取り扱う MSF-24P 型及び MSF-32P 型とは型式が異なるが，第 3-3 表に示すとおり，乾式キャスクの寸法のうち，地震時の挙動において重要な因子と考えられる底部径及び底部径と貯蔵架台のクリアランスに加え，重心高さ，質量，重心まわりの慣性モーメント等の基本パラメータに差はなく，地震時の幾何学的な挙動は MSF-21P 型，MSF-24P 型及び MSF-32P 型いずれも同様である。また，滑り挙動については，形状に関係なく，摩擦係数と地震慣性力の関係より決まり，回転，傾き挙動の誘発は慣性モーメントにより決まる。ここで，MSF-21P 型は，伊方発電所で取り扱う MSF-24P 型及び MSF-32P 型より慣性モーメントが小さく，より傾きやすい型式であるため，ひずみ量を計測しやすい。そのため，試験結果で得られるひずみは伊方発電所で取り扱う MSF-24P 型及び MSF-32P 型でも適用可能である。

以上から，試験供試体を用いた加振試験の結果及び加振試験結果より構築する耐震評価式は，伊方発電所で取り扱う乾式キャスクにも適用できる結果であると考えられる。



第 3-1 図　実機乾式キャスク(MSF-21P 型)及び試験供試体の構造比較



第 3-2 図　加振試験台上に設置された試験供試体

第 3-2 表　試験のスケール設定方針

物理量	単位	次元	スケール
長さ	[m]	L	1/4
質量	[kg]	M	1/64
時間	[s]	T	1/2
加速度	[m/s^2]	LT^{-2}	1
慣性モーメント	[kg・m^2]	ML^2	1/1024 (*)
荷重	[N]	MLT^{-2}	1/64
回転モーメント	[N・m]	ML^2T^{-2}	1/256
角度	[rad]	―	1

(*) 試験供試体の実際の慣性モーメントはさらに小さく，実機に対して，より傾きやすい設定で試験を実施した。

第 3-3 表　試験供試体と実機乾式キャスクの寸法比較

乾式キャスク型式	加振モデル		実機	
	試験供試体	MSF-21P	MSF-24P	MSF-32P
傾き角 (注 1) (°)				
乾式キャスク底部の外径 (1) (mm)				
貯蔵架台嵌め合い部の内径(2) (mm)				
クリアランス (2)-(1) (mm)				
貯蔵架台嵌め合い部の深さ (mm)				
重心高さ (mm)	640 (注 2) 【2560】 (注 3)	2622	2632	2635
質量 (kg)	2000 (注 2) 【128000】 (注 4)	113100	116100	117000
重心まわりの慣性モーメント (kg・m^2)	2.67×10^2 (注 2) 【2.73×10^5】	3.11×10^5	3.21×10^5	3.25×10^5

(注 1) (　　) 内の数値は詳細傾き角を参考に記載。

(注 2) 【　　】内の数値は実機に換算した値を参考に記載。

(注 3) 実機の全長は 5119 (mm) であり，試験供試体と乾式キャスクにおける全長に対する重心高さの比は以下のとおりであり，有意な影響はない。

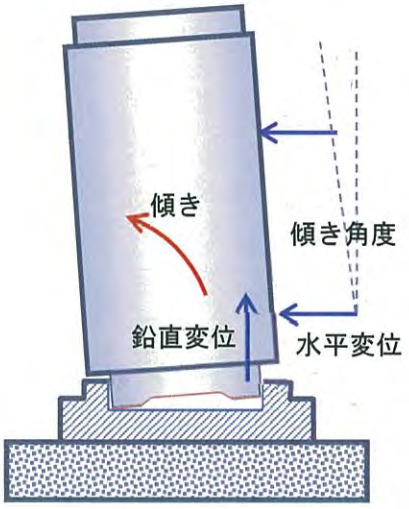
乾式キャスク型式	試験供試体	MSF-21P	MSF-24P	MSF-32P
全長に対する重心高さの比	0.50	0.51	0.51	0.51

(注 4) 以下のとおり，スケール比の誤差は軽微であり，有意な影響はない。

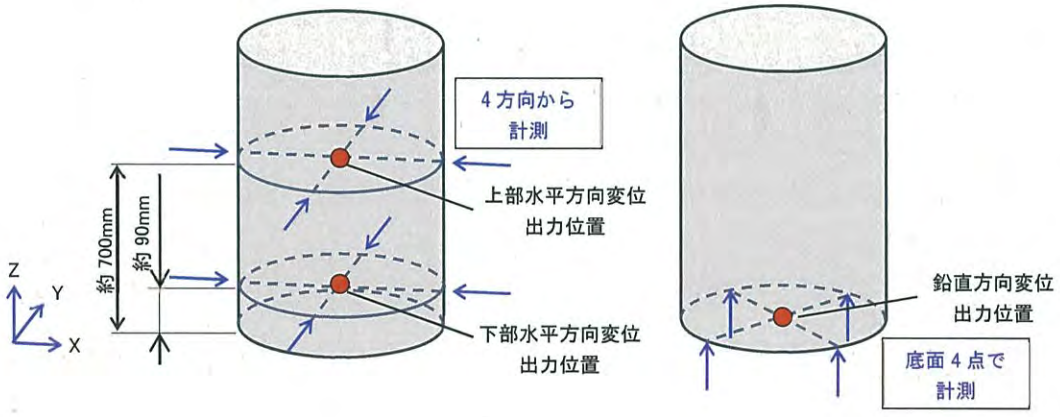
	スケール則	加振モデル
質量のスケール比	$\left(\frac{1}{4}\right)^3$	$\left(\frac{1}{3.84}\right)^3$

3.2 試験の計測方法

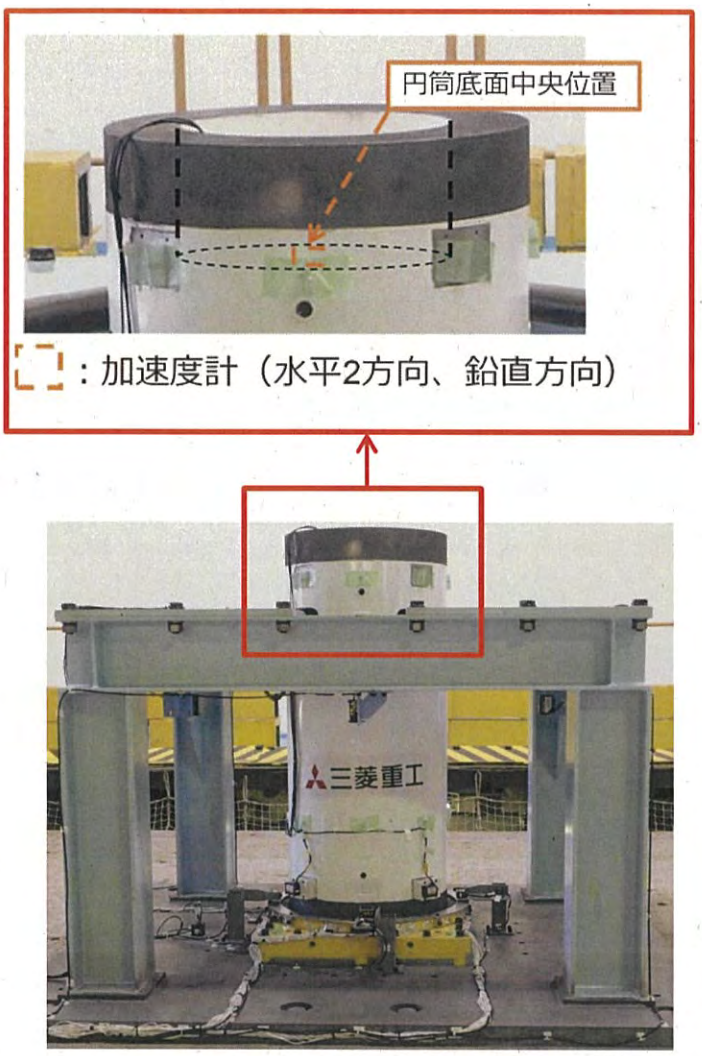
本試験では，乾式キャスクの挙動の把握，及び乾式キャスクと貯蔵架台の衝突時に径方向及び鉛直方向に発生する荷重を計測するために，試験供試体の水平／鉛直変位（第 3-3 図及び第 3-4 図），試験供試体の応答加速度（第 3-5 図）並びに貯蔵架台嵌め合い部上面及び脚部の側面にひずみゲージを設置（第 3-6 図）する。



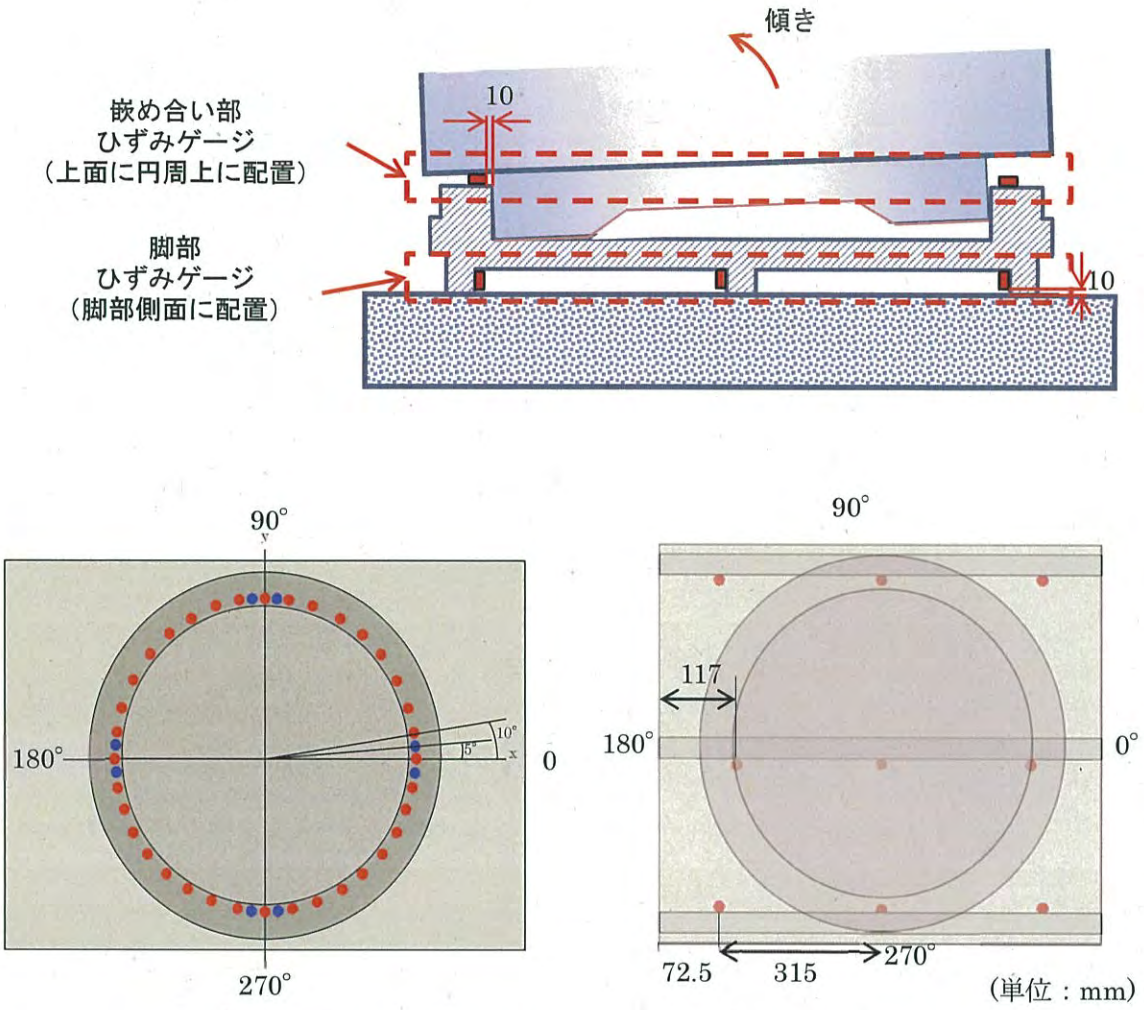
第 3-3 図　試験供試体水平／鉛直変位計測



第 3-4 図　変位の出力位置



第 3-5 図　試験供試体応答加速度の計測



第 3-6 図　貯蔵架台嵌め合い部のひずみ計測

4. 正弦波試験

地震時の乾式キャスクの挙動を把握し，耐震評価において，地震応答解析に用いる耐震評価式を構築するために「3. 試験計画」に示す試験装置を用いて，単純な1軸正弦波による加振試験を実施した。試験に用いた加振波を「4.1 加振波」に示す。

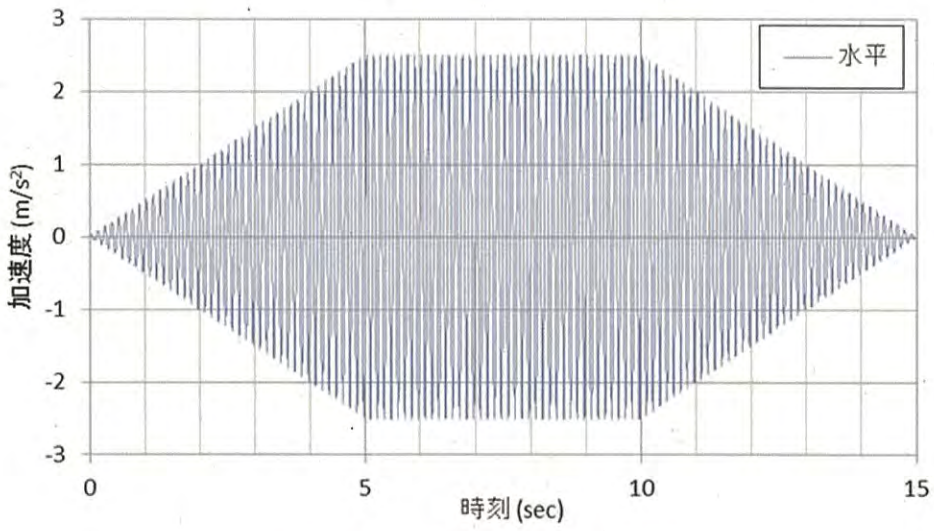
加振試験の結果を「4.2 試験結果」に，加振試験の結果より構築した，地震応答解析に用いる耐震評価式を「4.3 耐震評価式の構築」に，耐震評価式の検証の結果を「4.4 耐震評価式の検証」に示す。

4.1 加振波

第4-1表に，本試験に適用した加振波及び加振方向を示す。また，第4-1図に時刻歴波形を示す。

第4-1表　加振波及び加振方向

加振波	加振方向	備考
8Hz 正弦波	水平1方向	加振加速度：2.5m/s^2 加振振幅：1mm



第4-1図　正弦波　時刻歴波形

4.2 試験結果

第 4-2 図に，正弦波加振試験の計測結果として，試験供試体の水平方向変位及び鉛直方向変位（出力位置は第 3-4 図参照），貯蔵架台に生じた径方向圧縮ひずみ（嵌め合い部に複数設置したひずみゲージにより計測した値のうち最大値），鉛直方向圧縮ひずみ（脚部に複数設置したひずみゲージにより計測した値のうち最大値）を示す。

図中で分類した各挙動の特徴は以下の通りである。

- 滑り挙動　：水平方向のみ変動し，鉛直方向変位がほぼゼロを維持
- 傾き挙動　：水平方向変位が 1 方向に変動，または X 方向と Y 方向が同位相で変動し，鉛直方向変位がゼロ近くから変動
- 回転（楕円）挙動 ：鉛直方向変位が正の値を維持，かつ，水平方向変位と Y 方向変位の周期が 1/2π ずれる
  なお，正弦波加振試験では，加振方向が X 方向のみであることから，Y 方向の振幅が小さく，楕円軌道を描くが，これも回転挙動のひとつである
  さらに，X 方向と Y 方向の周期が異なる場合，楕円軌道を描きつつ，位相が一致するタイミングで傾き挙動に近い挙動が発生することもある

第 4-3 図に，正弦波試験の計測結果として，試験供試体の水平方向上部変位及び水平方向下部変位から得られた試験供試体の挙動を示す。地震時の試験供試体の挙動は以下のとおり整理される。

- 地震時の乾式キャスクには，滑り，回転，傾き挙動が発生する。
- 摩擦力を超える加速度が加わると滑りが発生する。
- 滑りが隙間量よりも大きくなると嵌め合い部側面に試験供試体が接触し，試験供試体が傾く。傾いた試験供試体は入力波の振幅にあわせて傾き状態から正立状態に戻り，逆方向に滑る。この挙動を繰り返す。
- 1 方向加振に対して，初期段階では 1 方向に振動し，傾き挙動を示すが，試験供試体底部及び貯蔵架台嵌め合い部の異なる直径の円筒形であり，衝突時に周方向に荷重が分散されるため試験供試体が楕円軌道を描くようになる。この時の衝突荷重が大きければ周方向へ運動する量が大きくなり，より円軌道に近い挙動を示すと考えられる。
- 試験供試体は入力波と同じ周期で滑り/傾き挙動を繰り返し，長時間加振しても応答が増幅しない。
- 入力波の加速度が小さくなることに伴い挙動も小さくなり，最終的に停止する。

各挙動に対して，代表時刻における，水平面での試験供試体の変位を示すリサージュ図を第 4-4 図～第 4-6 図に示す。

ここで，試験供試体及び貯蔵架台に発生する荷重が最も厳しい挙動について，水平方向の衝突で発生する「貯蔵架台嵌め合い部径方向圧縮ひずみ」及び鉛直方向の衝突で発生する「貯蔵架台の鉛直方向圧縮ひずみ」を基に検証する。

(1) 貯蔵架台嵌め合い部径方向圧縮ひずみ

第 4-2 図 に示す通り，加振波の加速度が小さい間では試験供試体の滑り挙動が発生しているが，この時には大きな径方向圧縮ひずみは見られない。加振波のピークである 5～11 秒の間では回転挙動と傾き挙動が発生しており，傾き挙動時は径方向圧縮ひずみのピーク（116μ）が見られ，回転挙動に移行した時には径方向圧縮ひずみが減少することが確認された。

以上の結果から，傾き挙動の時に大きな径方向圧縮ひずみが発生することが確認された。これは，傾き挙動は試験供試体の運動方向と地震力の作用方向が一致しており，試験供試体の持つエネルギーの多くが径方向圧縮ひずみとして衝突部に発生するのに対し，回転挙動では試験供試体の持つエネルギーが径方向圧縮ひずみと円運動に分散されるためと考察される。また，径方向圧縮ひずみは，加振波の大きさ，すなわち地震力の大きさに応じ，傾き挙動時の径方向圧縮ひずみが大きくなっていることを確認した。

(2) 貯蔵架台の鉛直方向圧縮ひずみ

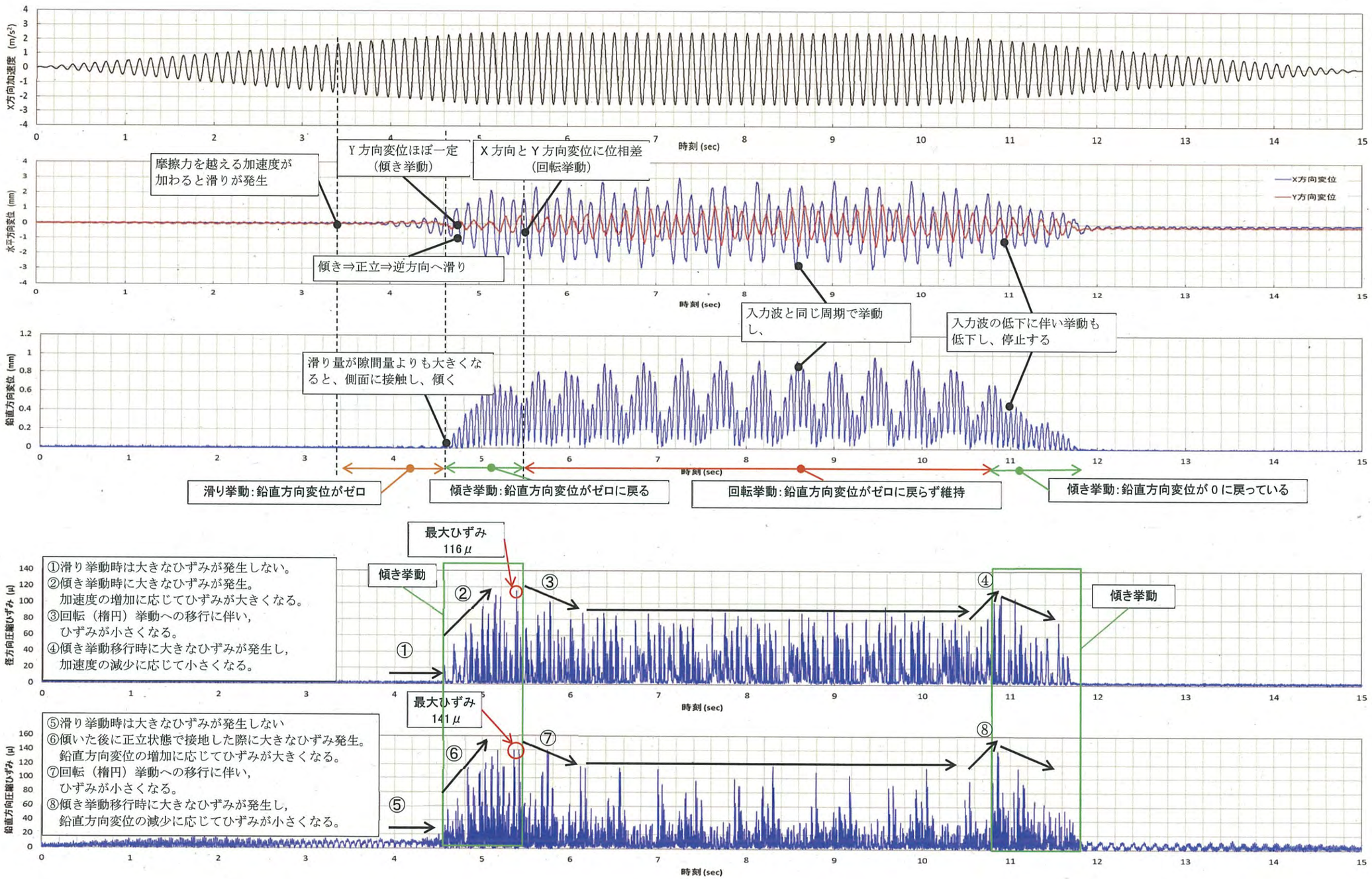
第 4-2 図に示す通り，滑り挙動では明瞭な鉛直方向圧縮ひずみは見られない。傾き挙動で鉛直変位が 0 に近い時間で大きな鉛直方向圧縮ひずみが発生しており，傾き挙動時に鉛直方向圧縮ひずみのピークが見られた。

以上の結果から，傾き挙動の時に大きな鉛直方向圧縮ひずみが発生することが確認された。これは，傾き挙動で試験供試体が倒れることで鉛直方向の変位が大きくなり，より大きな運動エネルギーが鉛直方向圧縮ひずみとして衝突時に発生するためと考察される。また，大きな鉛直方向圧縮ひずみは，鉛直方向変位が大きい時に発生しており，鉛直方向変位の大きさ，すなわち試験供試体が傾き時の重心高さに応じ，傾き挙動時の鉛直方向圧縮ひずみが大きくなっていることを確認した。

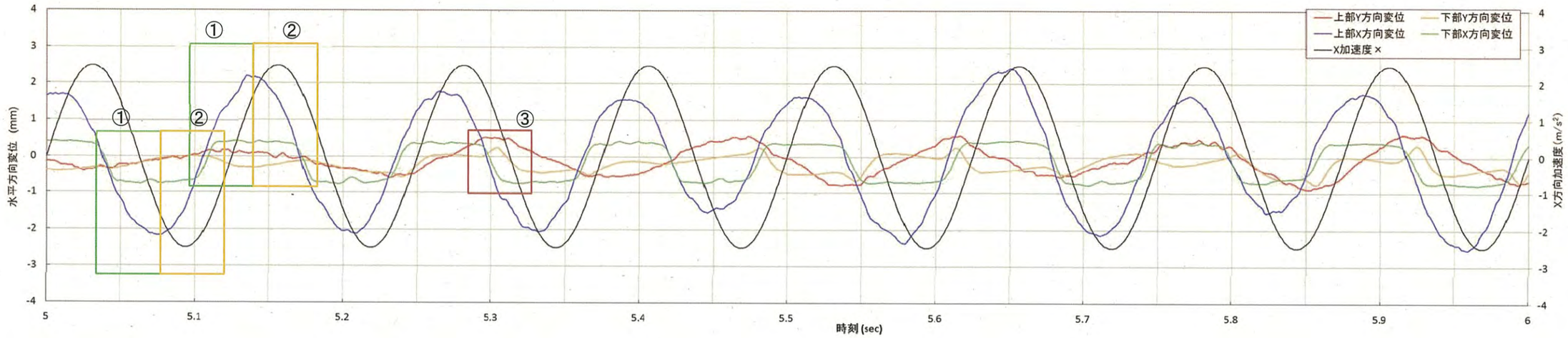
正弦波加振試験の結果より，貯蔵架台上に設置された試験供試体の地震時の挙動が，滑り挙動，回転（楕円）挙動，傾き挙動であることが確認された。合わせて，傾き挙動において，径方向，鉛直方向に大きなひずみが生じることを確認した。また，径方向のひずみは入力された地震力の大きさに応じて大きくなっているため，乾式キャスクに発生する径方向の荷重は，傾き挙動時に貯蔵架台と衝突した時に地震力に応じて，大きくなることを確認した。

一方，鉛直方向のひずみは試験供試体が傾いた時の鉛直方向変位（重心高さ）に応じて大きくなる傾向があるため，乾式キャスクに発生する鉛直方向の荷重は，地震力により乾式キャスクが傾いたときに蓄えられる位置エネルギーに応じて，大きくなることを確認した。

以上の結果から，乾式キャスクに大きな荷重が発生するのは傾き挙動時であり，その時に地震力により加速することで蓄えられる運動エネルギー及び地震力によって傾くことで蓄えられる位置エネルギーを因子として荷重が発生していることから，それらをパラメータとして，荷重が算出されるよう耐震評価式を構築することとした。耐震評価式の構築の考え方を「4.3 耐震評価式の構築」に示す。



第 4-2 図　正弦波試験の計測結果

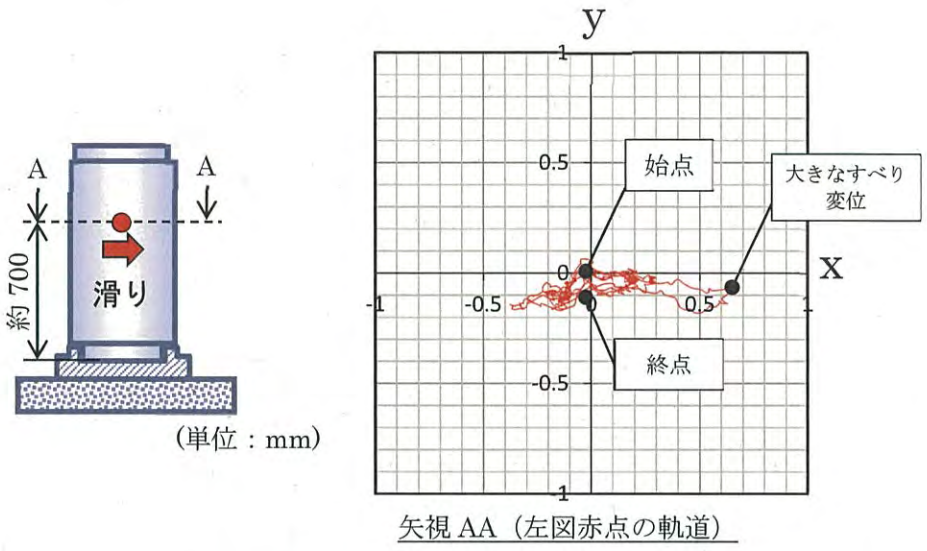


①X 方向加速度によって試験供試体に慣性力が働き，加速度と反対の方向に変位が生じている。この時，上部 X 方向変位と下部 X 方向変位が一致している時は X 方向に滑りが発生しており，貯蔵架台に衝突することで傾きが発生し，上部 X 方向変位が大きくなり，下部 X 方向変位は一定となっている。

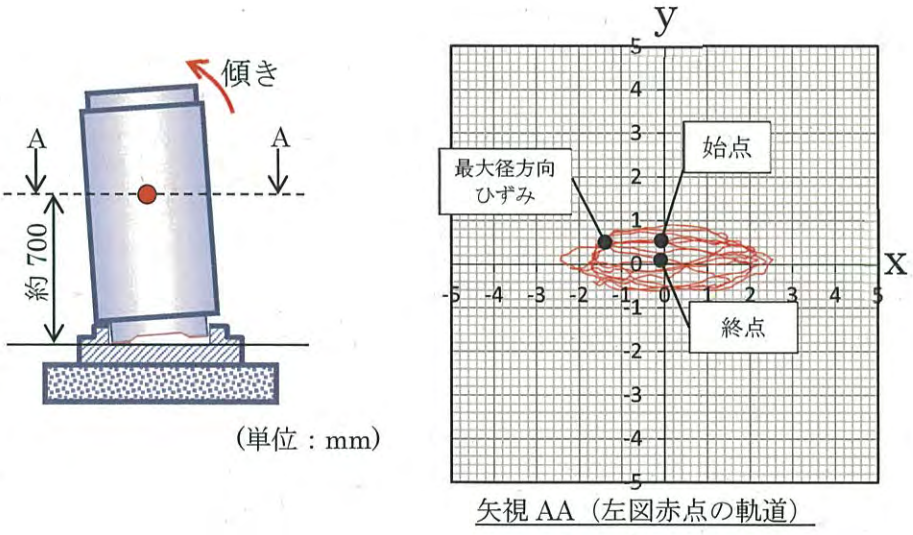
②傾きが収束すると反対方向に滑り，また貯蔵架台と衝突したところから傾いている。

③貯蔵架台との衝突時に，試験供試体と貯蔵架台で円筒同士の接触によって Y 方向の荷重が発生しており，Y 方向の傾き挙動が発生し，試験供試体の挙動が回転（楕円）挙動に近づく。

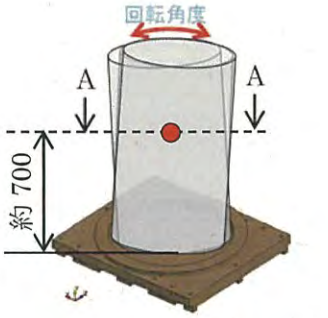
第 4-3 図　正弦波試験の試験供試体変位計測結果



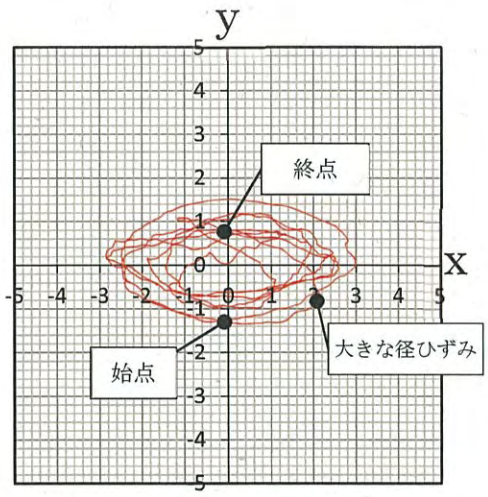
第 4-4 図　滑り挙動（時刻 4～4.5sec の例）



第 4-5 図　傾き挙動（時刻 5～6sec の例）



(単位：mm)



矢視 AA（左図赤点の軌道）

第 4-6 図　回転（楕円）挙動（時刻 9～10sec の例）

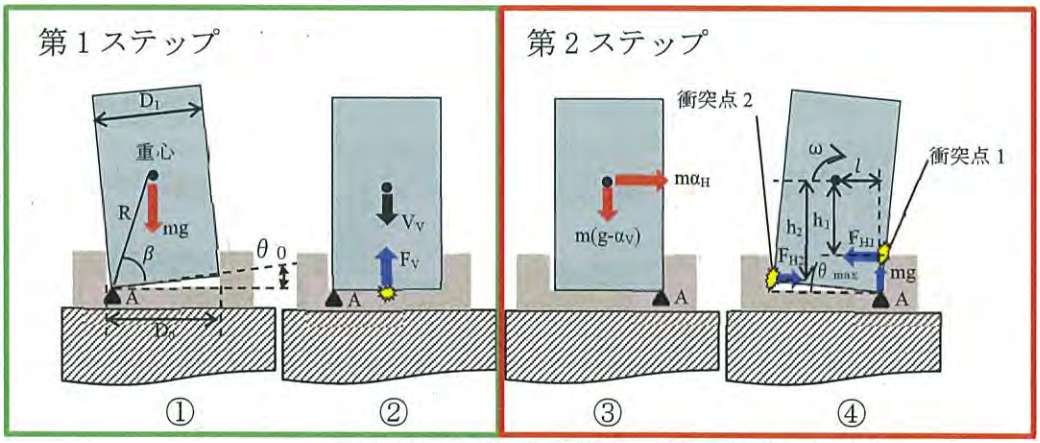
4.3 耐震評価式の構築

「4.2 試験結果」より，試験供試体の挙動として滑り挙動，回転挙動及び傾き挙動が確認され，そのうち傾き挙動において，試験供試体と貯蔵架台が衝突する時に地震力と重心高さに応じて荷重が発生することが確認できた。

この時の試験供試体の挙動を以下に示す内容で考察し，参考資料 1「4.3 評価手法及び諸元」に示す地震応答解析に用いる耐震評価式を構築した。

(1) 耐震評価式の構築にあたり，試験供試体が貯蔵架台に衝突する時の運動エネルギーを求め，エネルギー保存則を用いて衝突荷重を算出する。また，この時に径方向荷重算出には地震力を，鉛直方向荷重算出には試験供試体の重心高さを加味することで，正弦波試験で確認されたそれぞれの影響を考慮する。

試験供試体の運動エネルギーはその速度に比例するため，貯蔵架台衝突時の速度が最大になるよう，乾式キャスクと貯蔵架台のクリアランスは最大値とし，幾何学的な最大傾き角度から貯蔵架台中心部を摩擦等により減速せず通過し，貯蔵架台に衝突する挙動をモデルとして耐震評価式を構築した。モデルを第 4-7 図に示す。



第 4-7 図　試験供試体の傾き挙動のモデル

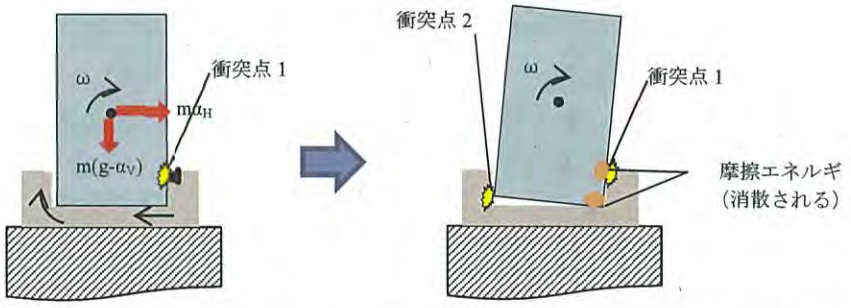
(2) 傾き状態から正立状態になる時の鉛直方向速度 Vv（第 1 ステップ）

正弦波試験の結果から，鉛直方向圧縮ひずみの因子が重心高さであることが確認されたため，試験供試体の重心位置が高くなるよう，傾いた状態①から自由落下で正立状態に至る②までの挙動より，試験供試体が貯蔵架台嵌め合い部底面に衝突する直前の試験供試体の鉛直方向速度 Vv の算出式を構築した。算出式の構築にあたっては，試験供試体が傾いた状態①の時の重心高さを考慮した。

(3) 貯蔵架台嵌め合い部衝突直前の試験供試体の角速度ω（第2ステップ）

正弦波試験の結果より，試験供試体は，正立状態で滑り，嵌め合い部側面に衝突した後，傾き挙動を生じる。この時，試験供試体が最も傾く挙動は，衝突点1を支点として，試験供試体が嵌め合い部の中を滑って傾き，第4-8図(b)のように嵌め合い部の反対側の側面に衝突するまで傾く場合であり，この挙動より，衝突直前の試験供試体回転速度ωを算出する耐震評価式を構築した。耐震評価式の構築にあたっては，地震力が径方向圧縮ひずみの因子であることが確認されたため，地震力を考慮した。

考慮する地震力は，JEAG4601のFRSの計算方法と同様に地震慣性力を重心位置にZPAを用いることとし，JEAG4601における剛構造物の強度評価に対する考え方を踏まえ，床応答のZPAに対する貯蔵架台の動的応答による増分を2割とした1.2ZPAを使用する。



(a) 試験供試体が側面に衝突　　(b) 試験供試体が傾き反対側面に衝突

第4-8図　試験供試体が傾き，嵌め合い部内で最大角度に到達するまでの挙動

なお，加振試験では挙動が移行する際に傾き支点の移動や側面の接触による摩擦によって，試験供試体がもつエネルギーが消散しているが，耐震評価式に保守性を考慮する観点から，摩擦等によるエネルギーの消散はないとし耐震評価式を構築した。

以上の考え方に基づき，構築した地震応答解析における耐震評価式を参考資料1「4.3 評価手法及び諸元」に示す。

4.4 耐震評価式の検証

「4.2 試験結果」より得られた荷重と，「4.3 耐震評価式の構築」により構築した耐震評価式より算出した荷重を比較し，耐震評価式の妥当性を確認する。

正弦波試験で観察された試験供試体の回転挙動と傾き挙動における径方向圧縮ひずみ及び鉛直方向荷重（加速度）と，試験供試体諸元及び幾何学的に決まる初期傾き角 θ_0 を用いて耐震評価式より算出した径方向圧縮ひずみ及び鉛直方向荷重（加速度）を比較した結果を第 4-2 表，第 4-9 図及び第 4-10 図に示す。

正弦波試験の結果と耐震評価式より算出した荷重の比較の結果，耐震評価式より求めた荷重は試験結果を上回っていることを確認した。

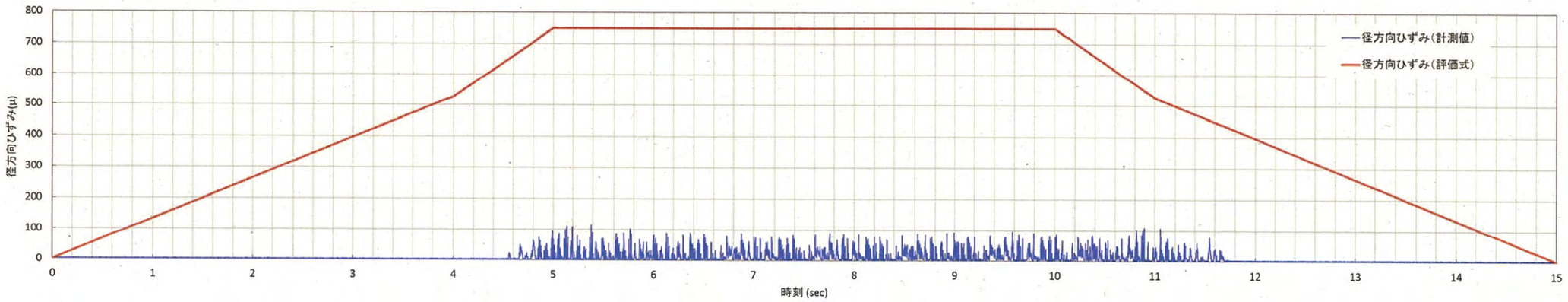
これは，耐震評価式では，荷重の算出にあたり，摩擦等によるエネルギーの消散を考慮せず，交番荷重である地震力を傾き方向に衝突時まで入力し続け，乾式キャスクがもつエネルギーを全て衝突荷重としたことによって，正弦波試験の結果から得られた荷重より保守的な結果になったと考えられる。

また，試験の結果から地震力が大きな領域でのひずみ量は回転挙動と傾き挙動それぞれでほぼ一定の大きさとなる。正弦波試験は同じ大きさ，特性の波を繰り返し入力する試験であり，繰り返し入力しても振動の増幅等は発生していないことから，試験は 1 回であるが，正弦波を繰り返し入力していることで，ばらつきの影響は考慮されている。

第 4-2 表　比較結果

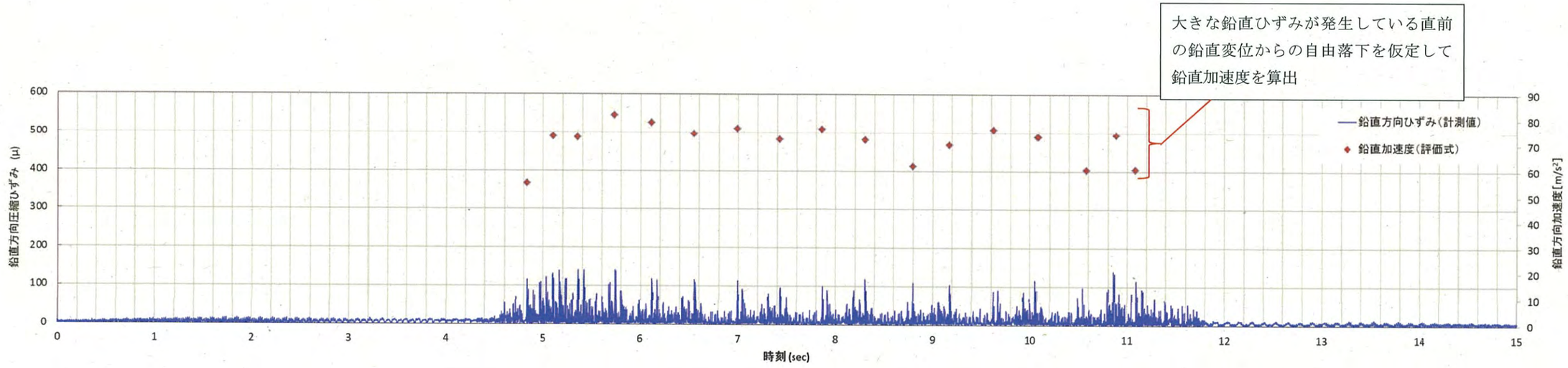
	半径方向		鉛直方向		
	圧縮ひずみ（μ）		衝突加速度（G）		鉛直ひずみ（μ）
	計測値	評価式	計測値	評価式	計測値
回転挙動 (注 1)	102	749	2.5	22	118
傾き挙動	116		2.1		141

（注 1）：回転挙動中の傾き挙動時に発生。



（径方向ひずみの評価式の計算条件：θ_0＝1.2 度，α_H＝2.5m/s^2（5 秒~10 秒），α_V=0m/s^2）

第 4-9 図　正弦波加振試験の計測結果（径方向圧縮ひずみ）



第 4-10 図　正弦波加振試験の計測結果（鉛直方向圧縮ひずみ）

5. 周波数成分分割波試験

「4. 正弦波試験」で把握した試験供試体の挙動が，地震波の周波数特性の影響を受けるか確認するために，「3. 試験計画」に示す試験装置を用いて，短周期（10～45Hz 卓越），中周期（4～15Hz 卓越）及び長周期（1～6Hz 卓越）の加振波による1軸加振試験を実施した。試験に用いた加振波を「5.1 加振波」に示す。

加振試験の結果を「5.2 試験結果」に，耐震評価式の検証結果を「5.3 耐震評価式の検証」に示す。

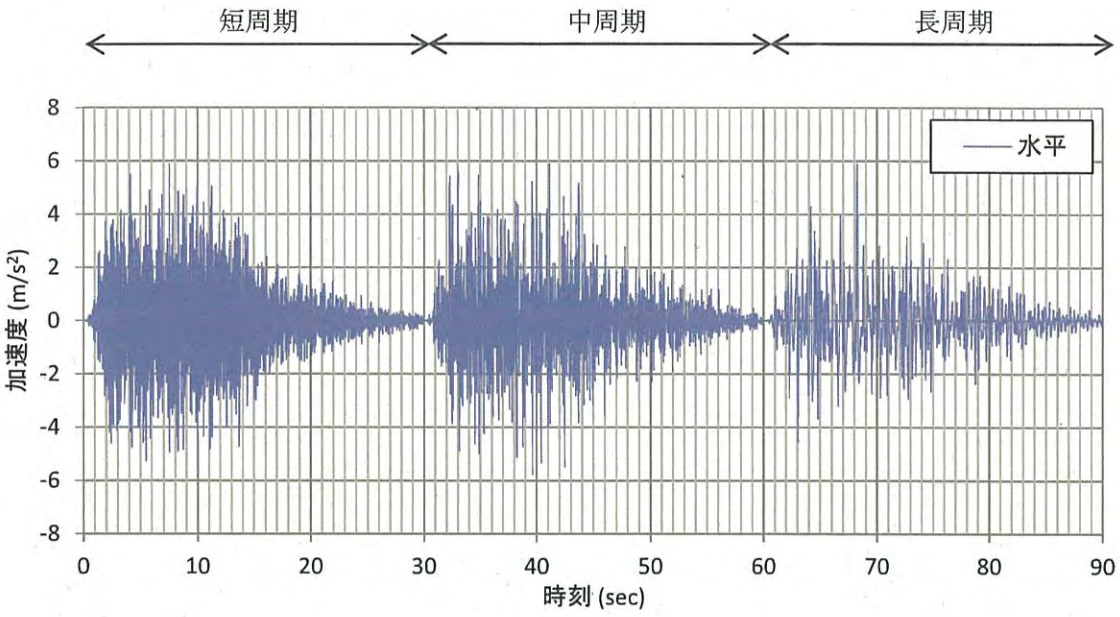
5.1 加振波

第 5-1 表に，本試験に適用した加振波及び加振方向を示す。また，第 5-1 図に時刻歴波形及び FRS を示す。

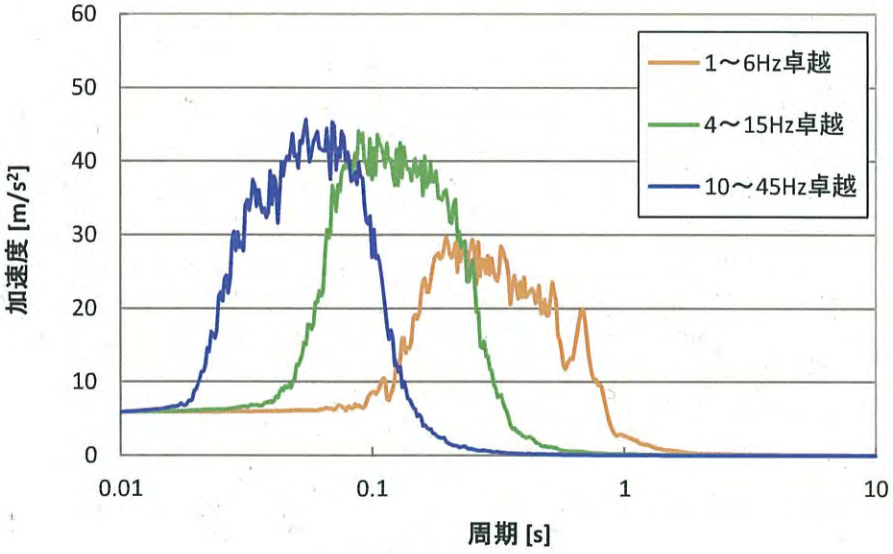
第 5-1 表　加振波及び加振方向

周波数成分分割波		備考	
短周期	水平 1 方向	水平方向の ZPA（m/s^2）	5.88
		周期成分	10～45Hz 卓越※1
中周期		水平方向の ZPA（m/s^2）	5.88
		周期成分	4～15Hz 卓越※1
長周期		水平方向の ZPA（m/s^2）	5.88
		周期成分	1～6Hz 卓越※1

※1　周波数成分は，加振波ベースのものを示す



時刻歴波



FRS（減衰定数 1%）

第 5-1 図　周波数成分分割波　時刻歴波形及び FRS

5.2 試験結果

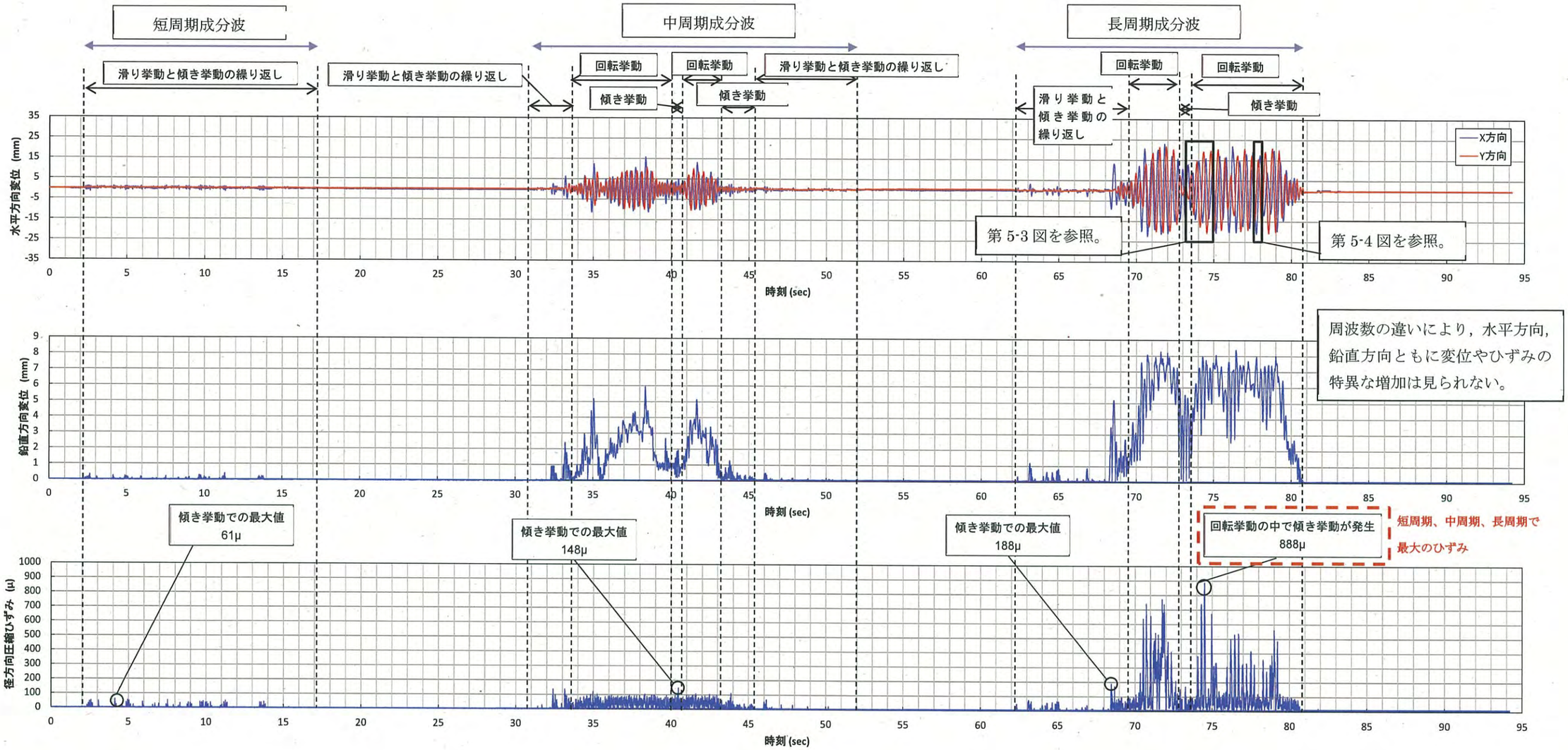
第 5-2 図に，周波数成分分割波試験の計測結果として，試験供試体の水平方向変位及び鉛直方向変位（出力位置は第 3-4 図参照），貯蔵架台に生じた径方向圧縮ひずみ（嵌め合い部に複数設置したひずみゲージにより計測した値のうち最大値）を示す。

周波数成分分割波試験の結果より，試験供試体の挙動は以下のとおり整理される。

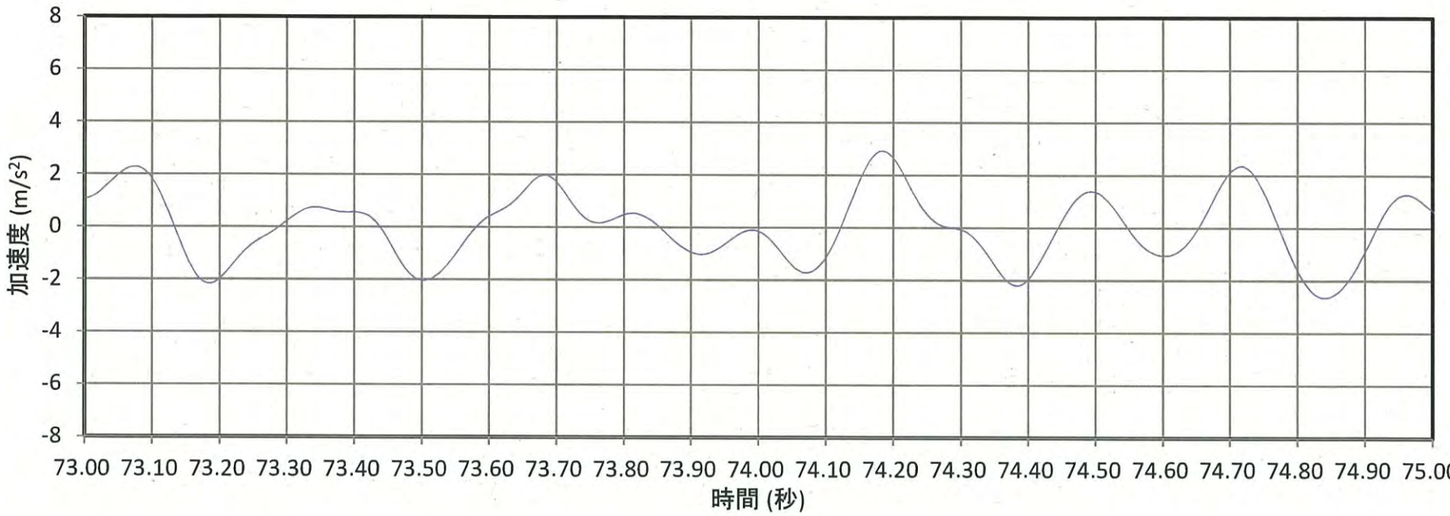
- 滑り，回転，傾き挙動は「4. 正弦波試験」で確認したとおり発生する。なお，「4. 正弦波試験」での試験供試体の回転挙動は楕円軌道であったが，周波数成分分割波試験においては，より円軌道に近い挙動となっている。これは，正弦波試験に比べて入力加速度が大きいため，貯蔵架台嵌め合い部との衝突荷重が大きくなり，周方向へ運動する量が大きくなり，より円軌道に近い挙動を示したものと考えられる。
- 短周期地震では，地震慣性力のベクトルが短期間に変わることで，滑り挙動の時に径方向に衝突せず，傾き挙動，回転挙動が発生しなかった。中／長周期地震では，「4. 正弦波試験」と同様の挙動が確認できた。
- 中周期地震において，回転挙動より傾き挙動時にて発生する荷重が厳しい結果となった。
- 長周期地震において，回転挙動の中で発生した傾き挙動での最大ひずみが 888 μ となり，短／中周期地震での結果に比べて大きな荷重が発生している。これは試験供試体に入力される慣性力のベクトルが同じ方向に比較的長く続くため，傾き挙動が長く続いた結果であると考察される。
- 周波数の違いにより，水平方向，鉛直方向ともに変位やひずみの特異な増加は見られなかったため，試験供試体に入力される加速度が特定の周期帯で拘束系に発生するような，共振は発生せず，加速度の増幅はないことを確認した。
- 軌道が円に近い回転挙動では，径方向ひずみが小さいことを確認した。

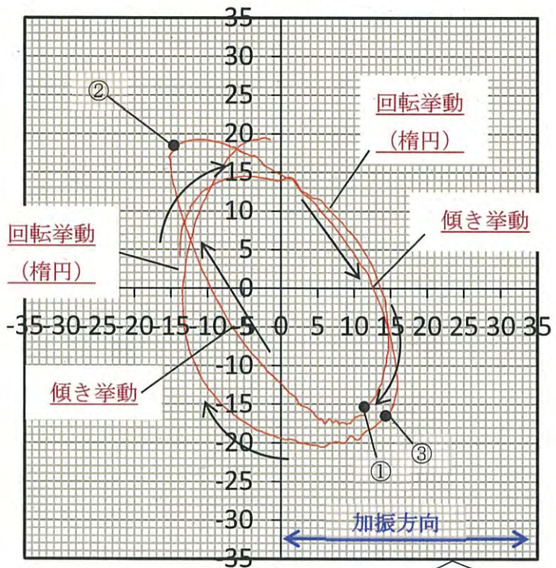
以上より，試験供試体の挙動は，地震波の特性によらず，「4. 正弦波試験」で確認したとおり，滑り挙動，回転挙動及び傾き挙動が発生し，このうち傾き挙動時に試験供試体と貯蔵架台に大きな径方向圧縮ひずみが発生することを確認した。

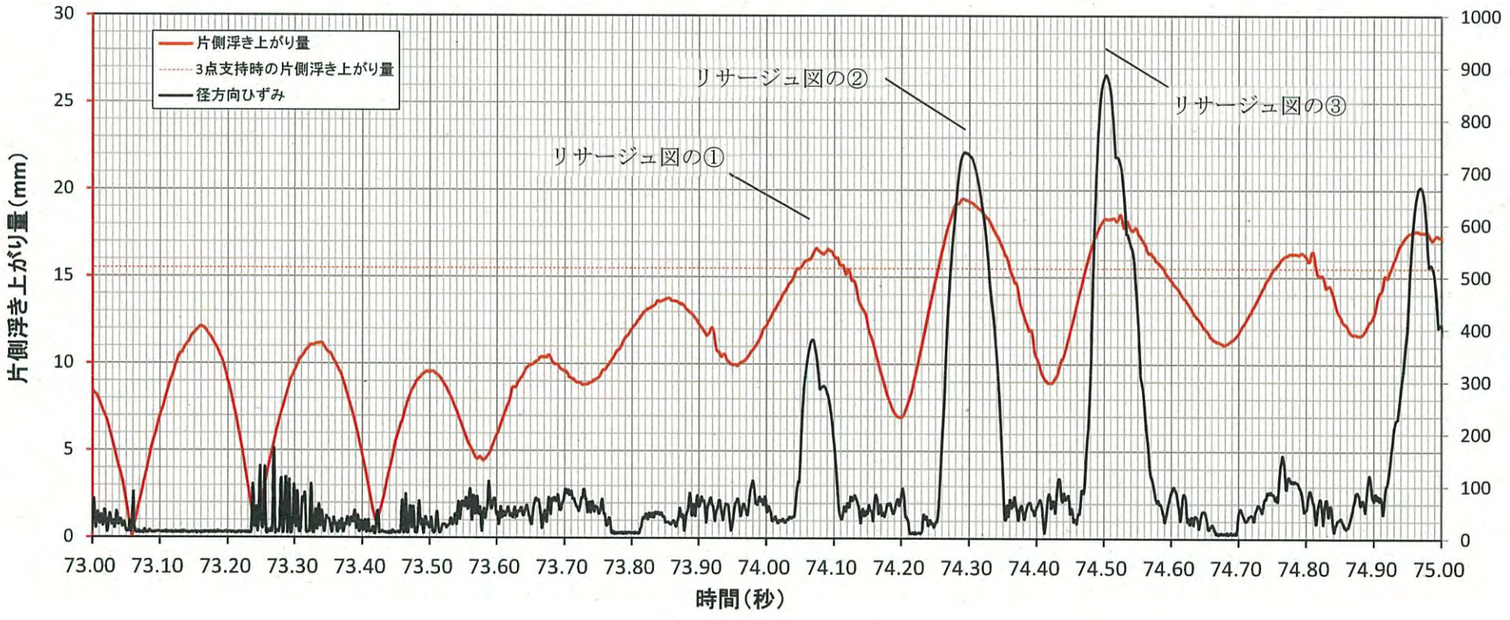
なお，長周期地震においては，大きな荷重が発生する傾向があり，「4. 正弦波試験」で考察したとおり，試験供試体の径方向の荷重は地震力に応じて大きくなることを確認した。



第 5-2 図　周波数成分分割波加振試験の計測結果

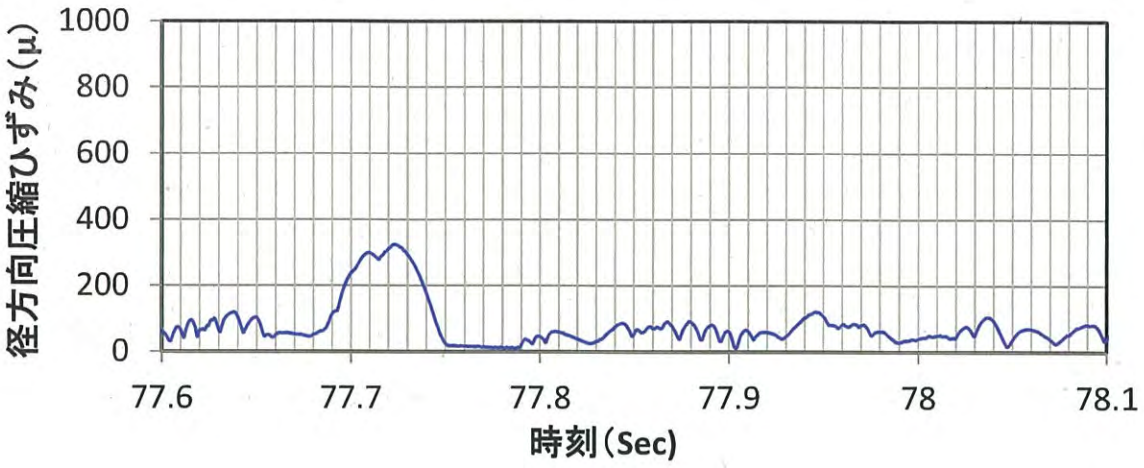


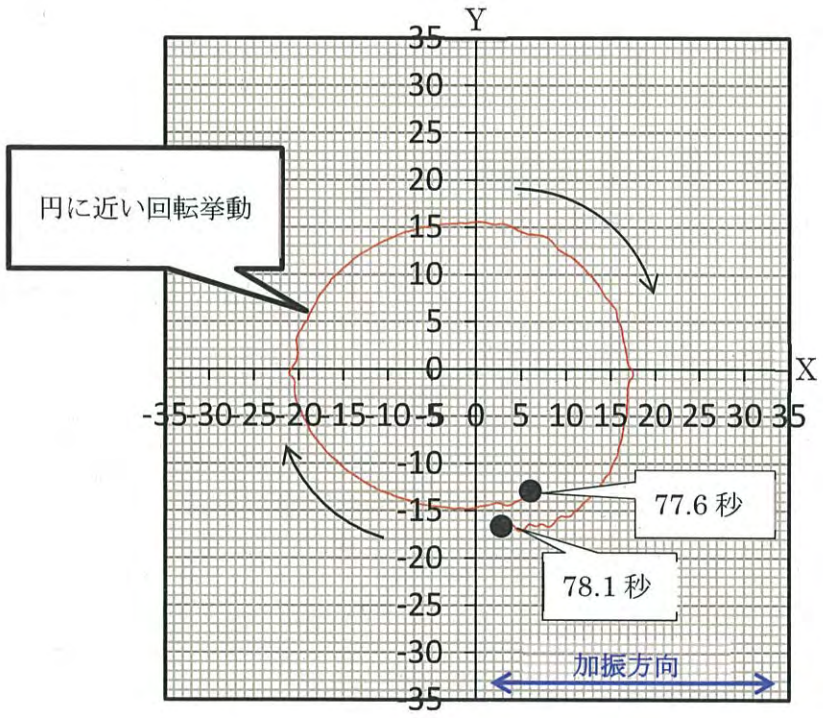




①（ひずみ約 380μ）
回転挙動から傾き挙動へ移行するタイミング
②（ひずみ約 740μ）
傾き挙動によりひずみが発生。
③（ひずみ 888μ）
傾き挙動により最大ひずみが発生。その後、回転挙動へ移行。

第 5-3 図　最大径方向ひずみ発生時刻近傍の挙動分析図





第 5-4 図　乾式キャスクの挙動分析（径方向ひずみが小さい時間帯）

5.3 耐震評価式の検証

「5.2 試験結果」より得られた荷重と，「4.3 耐震評価式の構築」により構築した耐震評価式より算出した荷重を比較し，耐震評価式の妥当性を確認する。

周波数成分分割波試験で観察された試験供試体の回転挙動と傾き挙動における径方向圧縮ひずみ及び鉛直方向荷重（加速度）を，試験供試体諸元及び幾何学的に決まる初期傾き角 θ_0 を用いて耐震評価式より算出した径方向圧縮ひずみ及び鉛直方向荷重（加速度）と比較した結果を第 5-4 表に示す。

周波数成分分割波試験は加振波の周波数特性で乾式キャスクが特異な挙動を示すか確認するために実施したため，試験回数は 1 回であるが，周波数成分分割波試験の結果と耐震評価式より算出した荷重の比較の結果，耐震評価式より求めた荷重は試験結果を上回っており，耐震評価式が十分な保守性を確保していることを確認した。

第 5-4 表　比較結果

	半径方向		鉛直方向		
	圧縮ひずみ（μ）		衝突加速度（G）		鉛直ひずみ（μ）
	計測値	評価式	計測値	評価式	計測値 (注3)
回転挙動	888 (注1)	1700	－ (注2)	22	－
傾き挙動	188		4.0		－

（注1）　回転挙動中の傾き挙動時に発生。

（注2）　回転挙動では試験供試体底面が貯蔵架台と衝突しないため，衝突加速度は発生しない。

（注3）　周波数成分分割波では鉛直ひずみを計測していない。

6. 仮想 Ss 波試験

1 軸方向の加振試験である「4. 正弦波試験」及び「5. 周波数成分分割波試験」より妥当性が確認された耐震評価式が，3 軸方向地震時の耐震評価に適用可能か確認するために，「3. 試験計画」に示す試験装置を用いて，仮想 Ss 波による 3 軸同時加振試験を実施した。試験に用いた加振波を「6.1 加振波」に示す。

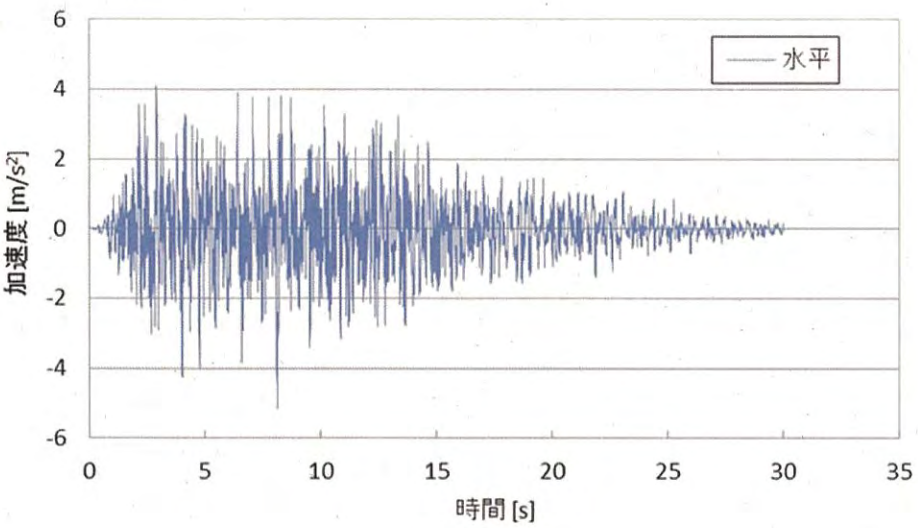
加振試験の結果を「6.2 試験結果」に，耐震評価式の検証の結果を「6.3 耐震評価式の検証」に示す。

6.1 加振波

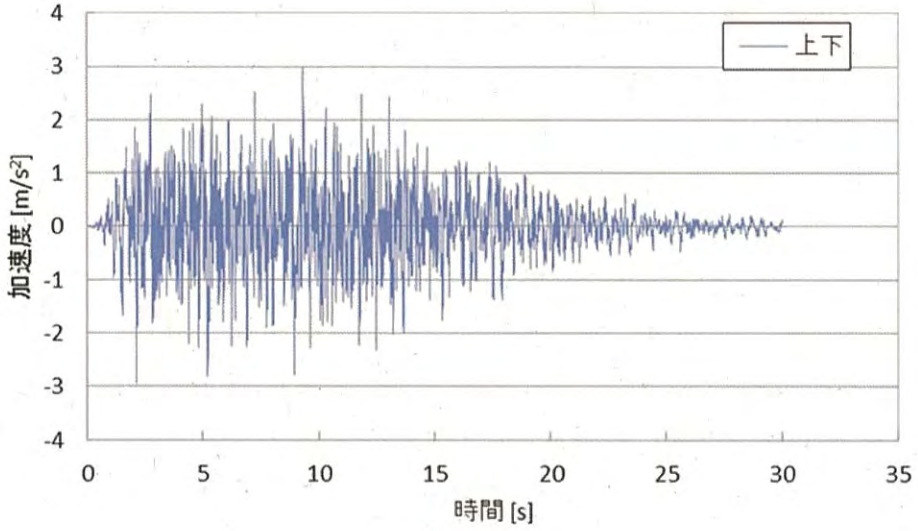
第 6-1 表に，本試験に適用した加振波及び加振方向を示す。また，第 6-1 図に時刻歴波形を示す。

第 6-1 表　加振波及び加振方向

加振波	加振方向	備考	
仮想波	水平 2 方向及び鉛直方向	水平方向の ZPA (m/s^2)	5.15
		鉛直方向の ZPA (m/s^2)	3.00



水平方向



鉛直方向

第 6-1 図　仮想 Ss 波　時刻歴波形

6.2 試験結果

第 6-2 図に，仮想 Ss 波の試験結果として，試験供試体の水平方向変位及び鉛直方向変位（出力位置は第 3-4 図参照），貯蔵架台に生じた径方向圧縮ひずみ（嵌め合い部に複数設置したひずみゲージにより計測した値のうち最大値），鉛直方向圧縮ひずみ（脚部に複数設置したひずみゲージにより計測した値のうち最大値）を示す。

計測データより，地震時の試験供試体の挙動は，「4. 正弦波試験」で確認したとおり，滑り挙動，回転挙動及び傾き挙動であり，このうち傾き挙動時に試験供試体と貯蔵架台に大きな荷重が発生することを確認した。なお，回転挙動においては，ほとんどが楕円軌道を描いており，また，X 方向と Y 方向の水平方向変位が同位相となり，傾き挙動に近い挙動（直線運動での貯蔵架台側面への衝突及び試験供試体が正立状態での接地）となって，大きな径方向圧縮ひずみ及び鉛直方向圧縮ひずみが発生することを確認した。

ここで，試験供試体及び貯蔵架台に発生する荷重が最も厳しい挙動について，水平方向の衝突で発生する「貯蔵架台嵌め合い部径方向ひずみ」及び鉛直方向の衝突で発生する「貯蔵架台の鉛直方向ひずみ」を基に検証する。

(1) 貯蔵架台嵌め合い部径方向ひずみ

径方向圧縮ひずみは，第 6-2 図(d) に示す通り，滑り挙動では大きなピークが見られず，回転挙動での最大値は 734μ（ただし，回転挙動中に傾き挙動に近い挙動が発生した際に計測），傾き挙動での最大値は 771μ であり，最大のひずみは傾き挙動で発生していることを確認した。

架台嵌め合い部径方向圧縮ひずみが最大となるタイミング(5.7sec 付近)の水平変位と径方向圧縮ひずみの関係及び水平面における試験供試体の挙動を示したリサージュ曲線を第 6-3 図に示す。第 6-3 図に示す通り，X 方向変位と Y 方向変位が同位相となり，試験供試体が直線的な運動で架台側面に衝突したことにより，貯蔵架台嵌め合い部に大きなひずみが発生したことがわかる。

回転挙動中で架台嵌め合い部径方向圧縮ひずみが最大となるタイミング（11.6sec 付近）の水平変位と径方向圧縮ひずみの関係及び水平面における試験供試体の挙動を示したリサージュ曲線を第 6-4 図に示す。第 6-4 図に示すとおり，回転挙動中に大きな径方向ひずみが発生したタイミングでは，回転挙動中に X 方向と Y 方向の変位が同位相に近づいており，傾き挙動に近い直線的な挙動で架台側面に衝突し，大きな径方向ひずみが発生していることを確認した。

(2) 貯蔵架台の鉛直方向ひずみ

鉛直方向圧縮ひずみは，第 6-2 図(e) に示す通り，滑り挙動では明瞭なピークが少なく，回転挙動での最大値は 218μ（ただし，回転挙動中に傾き挙

動に近い挙動が発生した際に計測),傾き挙動での最大値は231μであった。

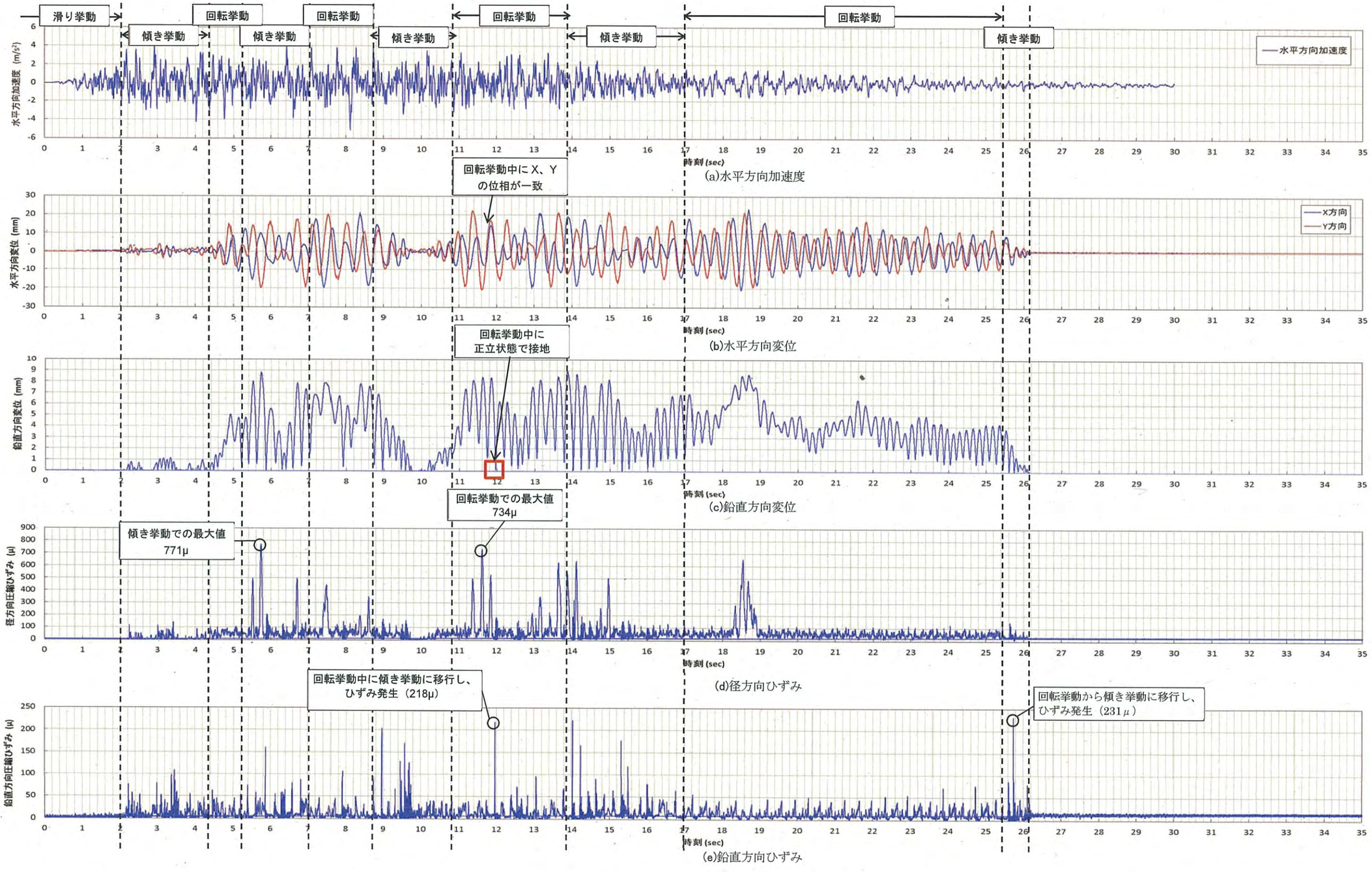
架台底面の鉛直方向ひずみが最大となるのは，応答終盤（約25.7秒）であり，これは地震力が小さくなるに従い回転挙動から傾き挙動へ移行する際に試験供試体が正立状態で貯蔵架台底面に接地し，ひずみ発生していると考えられる。

回転挙動中の最大鉛直ひずみが発生するタイミング（約12sec）では，第6-4図に示すとおり，回転運動中にX方向とY方向の変位が同位相に近づいており，X方向とY方向鉛直変位が同時に0となった際に，キャスクが正立状態で貯蔵架台に接地し，大きな鉛直方向ひずみが発生していることを確認した。

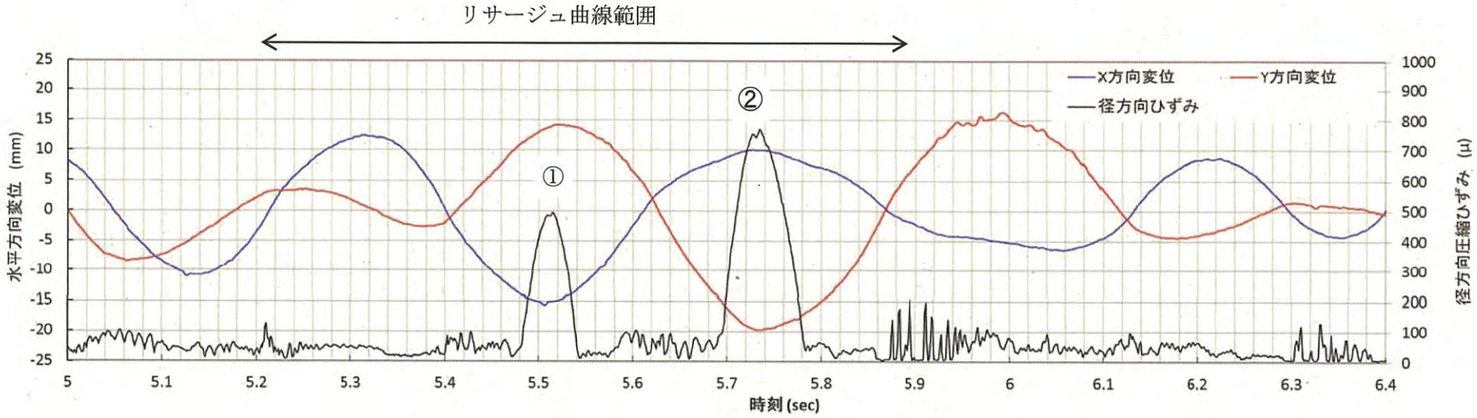
以上より，試験供試体の挙動は，実機相当の3軸方向の地震波に対しても「4. 正弦波試験」及び「5. 周波数成分分割波試験」にて確認された挙動と同様に滑り挙動，回転挙動及び傾き挙動が発生し，このうち傾き挙動時に試験供試体と貯蔵架台が衝突することで，径方向は地震力，鉛直方向は正立状態で接地する直前の鉛直方向変位（重心高さ）に応じた荷重が発生することが確認できた。

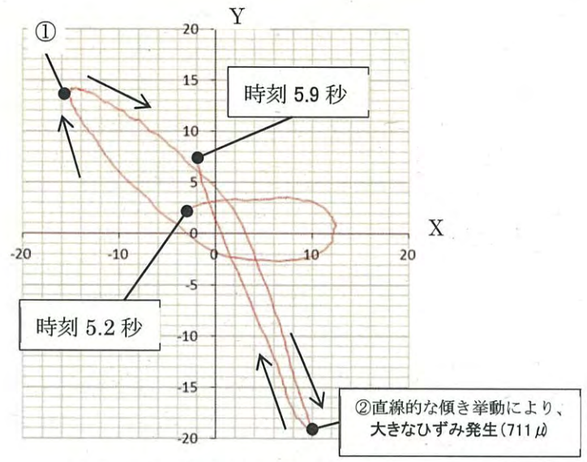
また，鉛直方向の地震力によって，試験供試体が浮き上がったり，鉛直方向の荷重が「4. 正弦波試験」及び「5. 周波数成分分割波試験」の結果に比べて増幅するような傾向はみられなかった。

なお，これらの挙動は4回の試験で同様の挙動を示すことが確認されている。



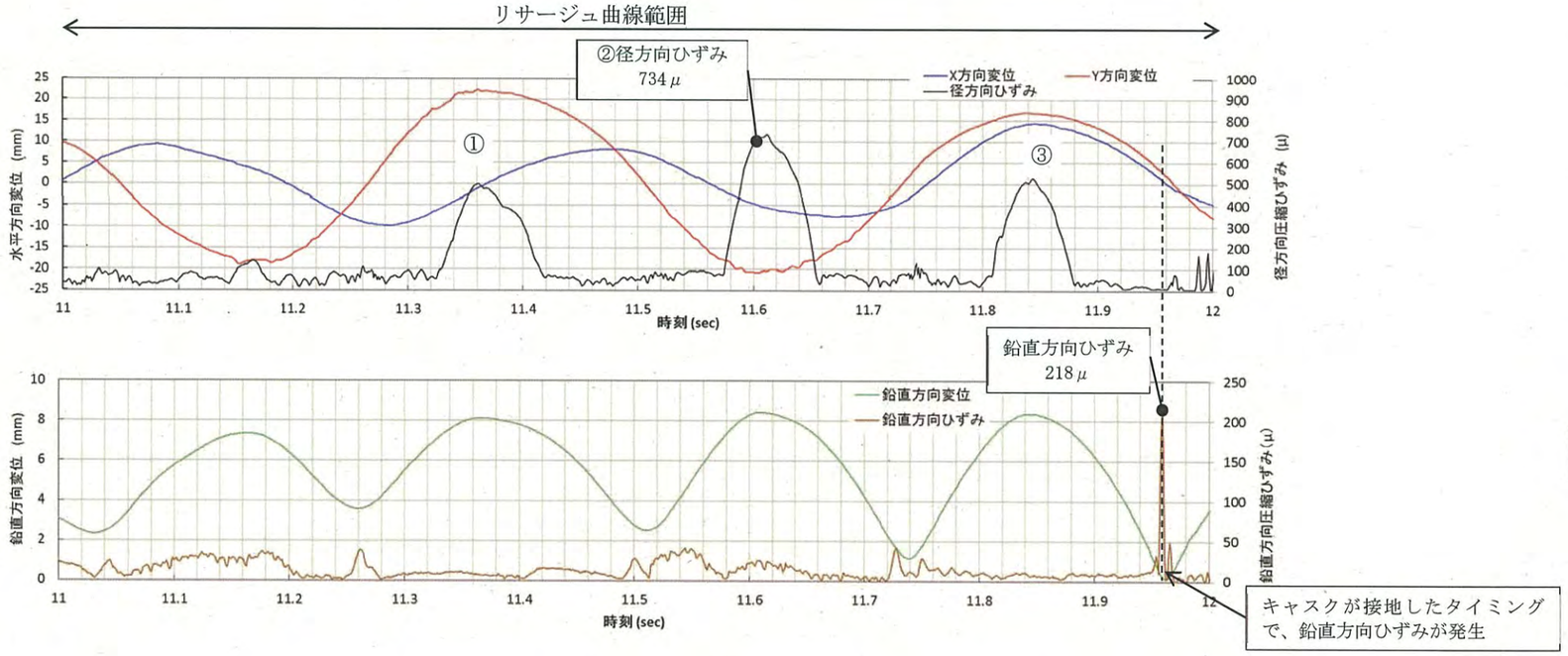
第 6-2 図　仮想 Ss 波加振試験の計測結果（1 回目）

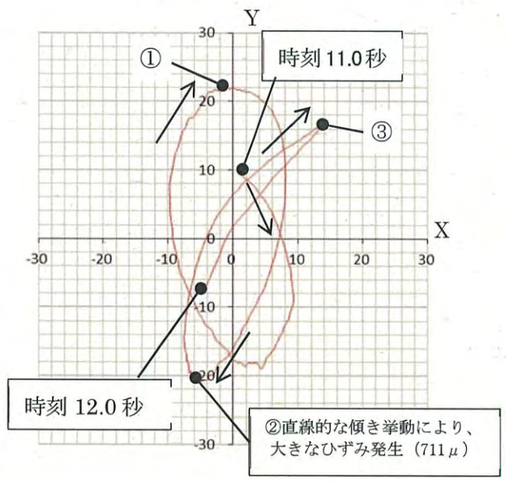




リサージュ曲線（5.2 秒～5.9 秒）

第 6-3 図　仮想 Ss 波　傾き挙動分析結果（1 回目）





リサージュ曲線（11 秒～12 秒）

第 6-4 図　仮想 Ss 波　回転挙動分析結果（1 回目）

6.3 耐震評価式の検証

「6.2 試験結果」より得られた荷重と，「4.3 耐震評価式の構築」により構築した耐震評価式より算出した荷重を比較し，耐震評価式の妥当性を確認する。

仮想 Ss 波試験で観察された試験供試体の回転挙動と傾き挙動における径方向圧縮ひずみ及び鉛直方向荷重（加速度）を，試験供試体諸元及び幾何学的に決まる初期傾き角 θ_0 を用いて耐震評価式より算出した径方向圧縮ひずみ及び鉛直方向荷重（加速度）と比較した結果を第 6-2 表に示す。

仮想 Ss 波試験の結果と耐震評価式より算出した荷重の比較の結果，耐震評価式より求めた荷重は試験結果を上回っており，耐震評価式が十分な保守性を確保していることを確認した。

また，第 6-2 図に示すとおり，仮想 Ss 波試験で確認されたひずみの大きさにはある程度のばらつきがあるが，いずれも，耐震評価式より算出したひずみ量を下回っており，耐震評価式がもつ保守性で地震時の乾式キャスクが示す荷重のばらつきは包絡されていると考えられる。

第 6-2 表　比較結果

<table>
<tr><th colspan="2" rowspan="3"></th><th colspan="3">半径方向</th><th colspan="4">鉛直方向</th></tr>
<tr><th colspan="2">圧縮ひずみ（μ）</th><th colspan="2">衝突加速度（G）</th><th colspan="2">鉛直ひずみ (注1)
（μ）</th></tr>
<tr><th>計算値 (注1)</th><th>評価値</th><th>計算値 (注1)</th><th>評価値</th><th colspan="2"></th></tr>
<tr><td rowspan="4">回転挙動</td><td>1回目</td><td>734 (注2)
(101%)</td><td rowspan="4">平均
728</td><td rowspan="8">2200</td><td rowspan="4">— (注3)</td><td rowspan="8">22</td><td>218
(198%)</td><td rowspan="4">平均
110</td></tr>
<tr><td>2回目</td><td>741 (注2)
(102%)</td><td>73
(66%)</td></tr>
<tr><td>3回目</td><td>653 (注2)
(90%)</td><td>83
(75%)</td></tr>
<tr><td>4回目</td><td>785 (注2)
(108%)</td><td>66
(60%)</td></tr>
<tr><td rowspan="4">傾き挙動</td><td>1回目</td><td>771
(84%)</td><td rowspan="4">平均
914</td><td>4.8
(107%)</td><td rowspan="4">平均
4.5</td><td>231
(86%)</td><td rowspan="4">平均
268</td></tr>
<tr><td>2回目</td><td>981
(107%)</td><td>5.1
(113%)</td><td>337
(126%)</td></tr>
<tr><td>3回目</td><td>999
(109)</td><td>3.8
(84%)</td><td>200
(75%)</td></tr>
<tr><td>4回目</td><td>906
(99%)</td><td>4.4
(98%)</td><td>303
(113%)</td></tr>
</table>

（注 1）　（　）内の数値は、各挙動で算出された計算値（4 回分）の平均値に対する相対比率である。

（注 2）　回転挙動中の傾き挙動時に発生。

（注 3）　回転挙動では試験供試体底面が貯蔵架台と衝突しないため，衝突加速度は発生しない。

7. 伊方 Ss-1 波試験

「4. 正弦波試験」,「5. 周波数成分分割波試験」及び「6. 仮想 Ss 波試験」にて確認した耐震評価手法が，実機に適用可能か確認するために，「3. 試験計画」に示す試験装置を用いて，伊方 Ss-1 波による 3 軸同時加振試験を実施した。試験に用いた加振波を「7.1 加振波」に示す。

加振試験の結果を「7.2 試験結果」に，耐震評価式の検証の結果を「7.3 耐震評価式の妥当性の検証」に示す。

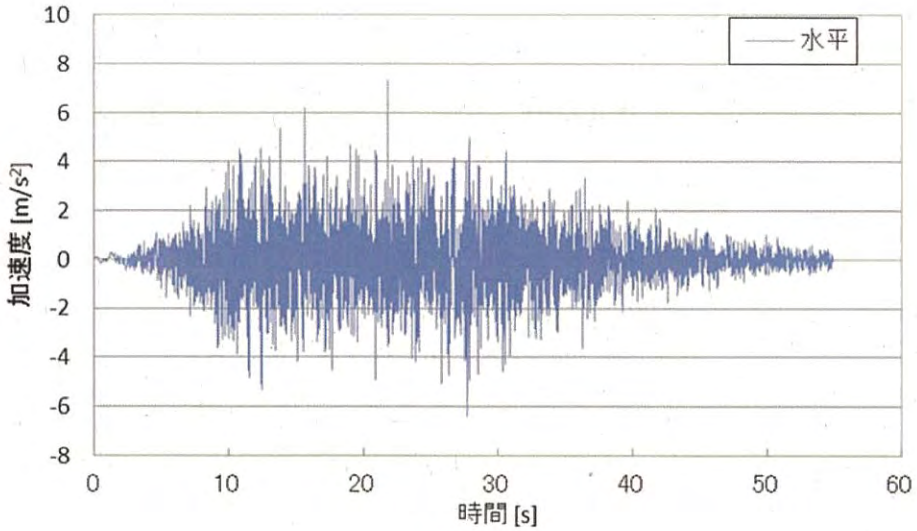
7.1 加振波

第 7-1 表に，本試験に適用した加振波及び加振方向を示す。また，第 7-1 図に時刻歴波形を示す。

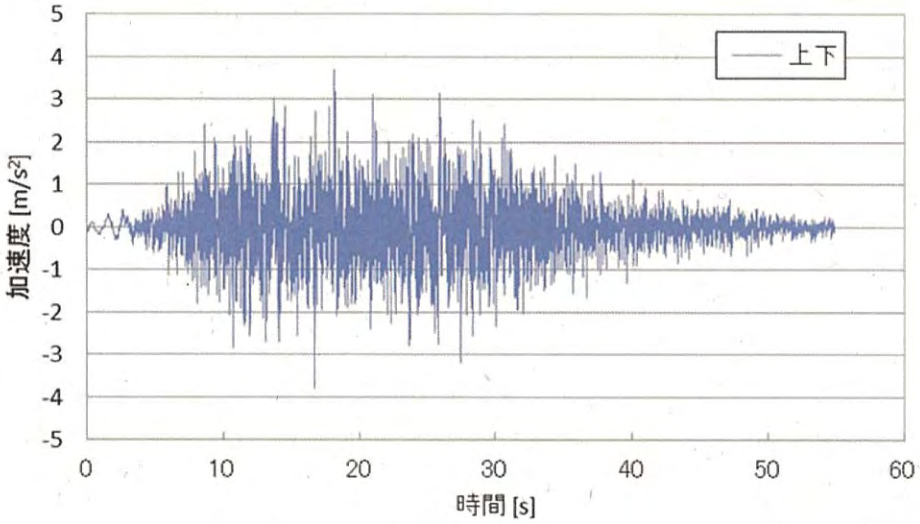
加振試験は，試験供試体を設置した加振試験台にて，同じ波で 4 回繰り返し実施した。

第 7-1 表　加振波及び加振方向

加振波	加振方向	備考
基準地震動 Ss-1	水平 2 方向及び鉛直方向	21m 盤の地震応答を用いる



水平方向



鉛直方向

第 7-1 図　伊方地震波　時刻歴波形

7.2 試験結果

第 7-2 図に，伊方 Ss-1 波加振試験の計測結果として，試験供試体の水平方向変位及び鉛直方向変位（出力位置は第 3-4 図参照），貯蔵架台に生じた径方向圧縮ひずみ（嵌め合い部に複数設置したひずみゲージにより計測した値のうち最大値），鉛直方向圧縮ひずみ（脚部に複数設置したひずみゲージにより計測した値のうち最大値）を示す。図中で分類したように，試験供試体の挙動は，滑り挙動，回転挙動，傾き挙動であることを確認した。また，傾き挙動，及び回転挙動で最大の径方向圧縮ひずみが発生している時刻付近の詳細な挙動分析結果をそれぞれ，第 7-3 図，第 7-4 図に示す。

各挙動に対して，代表時刻における，水平面での試験供試体の変位を示すリサージュ図を第 7-5 図～第 7-7 図に示す。

計測データより，地震時の試験供試体の挙動は，「4. 正弦波試験」で確認したとおり，滑り挙動，回転挙動及び傾き挙動であり，このうち傾き挙動時に試験供試体と貯蔵架台に大きな荷重が発生することを確認した。

ここで，試験供試体及び貯蔵架台に発生する荷重が最も厳しい挙動について，水平方向の衝突で発生する「貯蔵架台嵌め合い部径方向ひずみ」及び鉛直方向の衝突で発生する「貯蔵架台の鉛直方向ひずみ」を基に検証する。

(1) 貯蔵架台嵌め合い部径方向ひずみ

径方向圧縮ひずみは，第 7-2 図(c) に示す通り，滑り挙動では大きなピークが見られず，回転挙動での最大値は 579 μ，傾き挙動での最大値は 804 μ であり，傾き挙動の値が支配的であった。

第 7-2 図から，31sec 付近のデータを第 7-8 図，第 7-9 図に示す。貯蔵架台嵌め合い部径方向ひずみが最大となるタイミング（30.6sec 付近）では，試験供試体の片側浮き上がり量が大きく，試験供試体に大きな水平応答加速度が発生していることから，試験供試体が衝突したことにより貯蔵架台嵌め合い部に大きなひずみが発生したことがわかる。水平面における試験供試体の挙動を追ったリサージュ図も，このタイミングで試験供試体が傾き挙動にあったことを示しており，傾き挙動において，地震力の大きさに応じて，試験供試体と貯蔵架台に最大のひずみが生じたことを確認した。

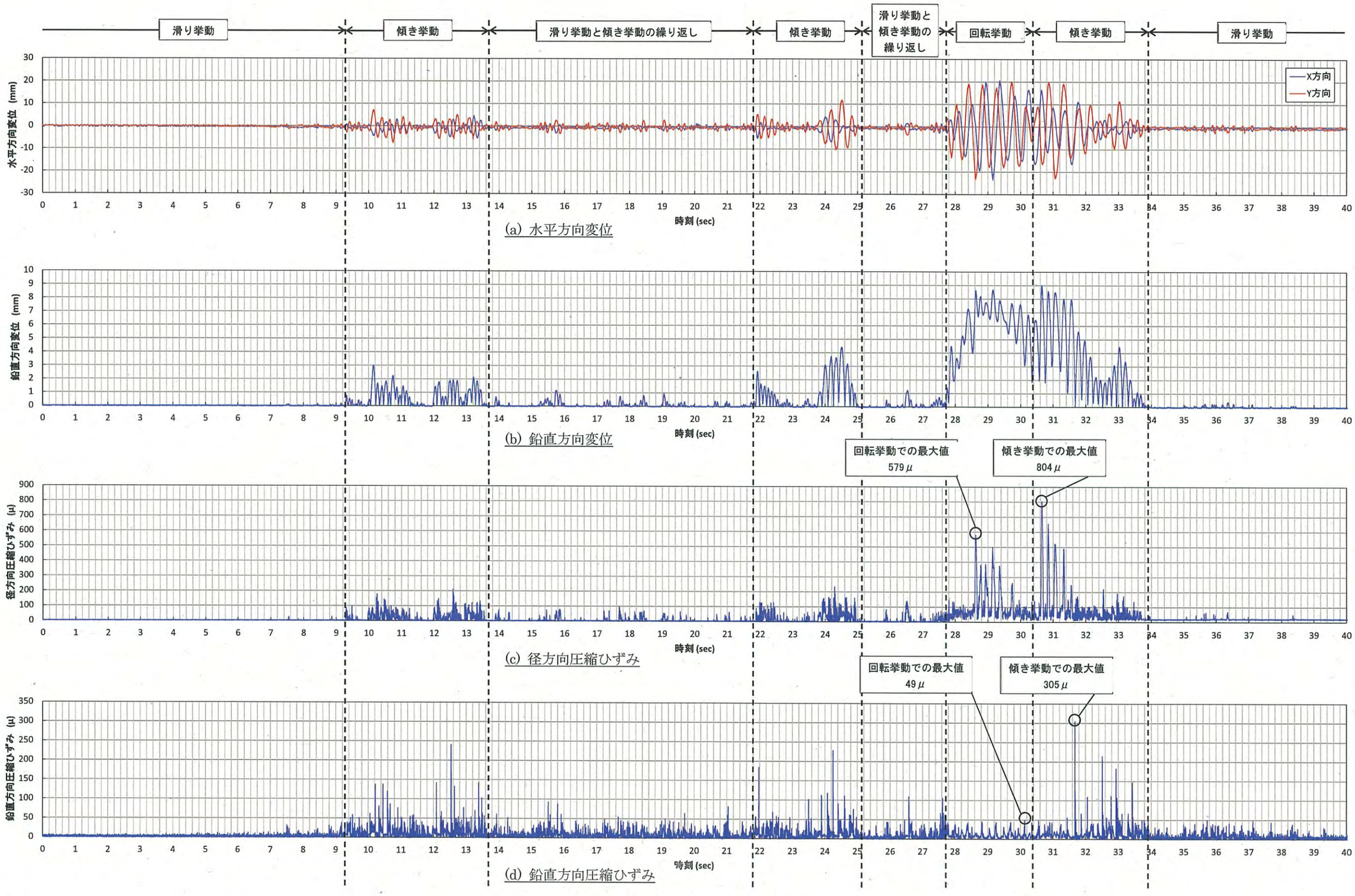
回転挙動において発生している最大値の 579 μ については，第 7-4 図から，回転挙動中に傾き挙動に近い直線的な挙動が発生し，これにより架台側面に衝突し，大きなひずみが発生していることがわかる。

(2) 貯蔵架台の鉛直方向ひずみ

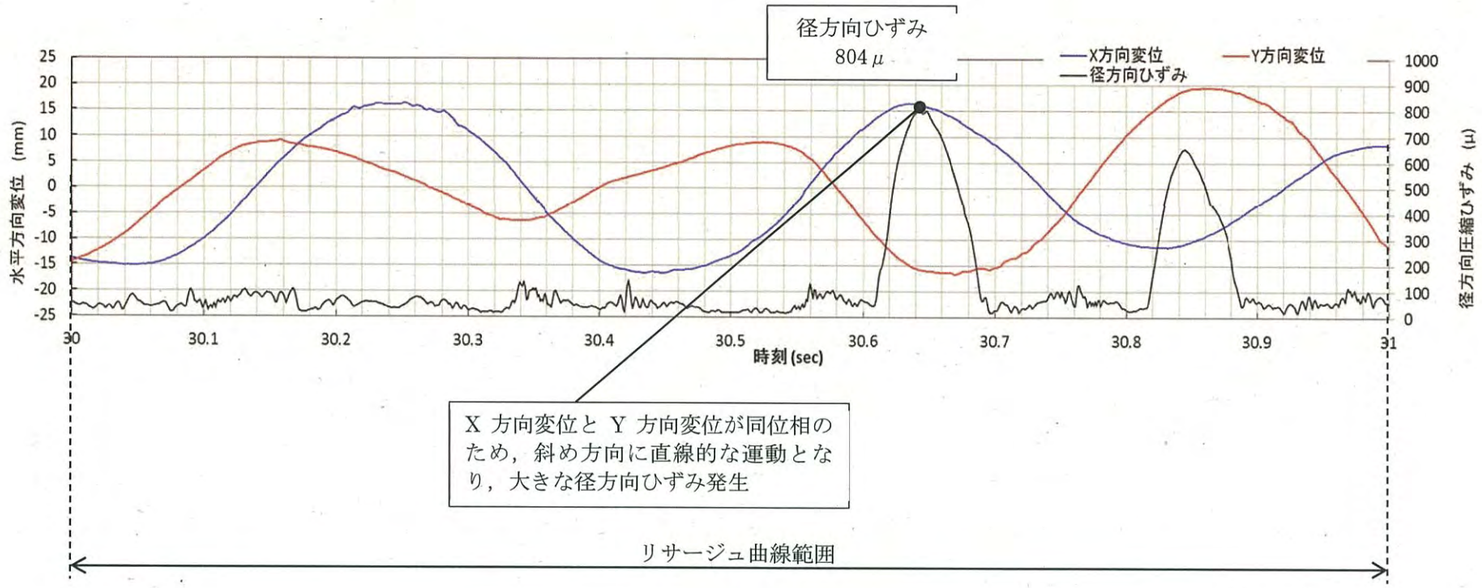
鉛直方向圧縮ひずみは，第 7-2 図(d) に示す通り，滑り挙動では明瞭なピークが少なく，回転挙動での最大値は 49 μ，傾き挙動での最大値は 305 μ であり，傾き挙動において貯蔵架台に対して最大の鉛直方向荷重が作用していることがわかる。

以上より，試験供試体の挙動は，実機の地震波に対しても「4. 正弦波試験」，「5. 周波数成分分割波試験」及び「6. 仮想Ｓｓ波試験」にて確認された挙動と同様に滑り挙動，回転挙動及び傾き挙動が発生し，このうち傾き挙動時に試験供試体と貯蔵架台が衝突することで，径方向は地震力，鉛直方向は重心高さに応じて大きな荷重が発生することが確認できた。なお，これらの挙動は４回の試験で同様の挙動を示すことが確認されている。

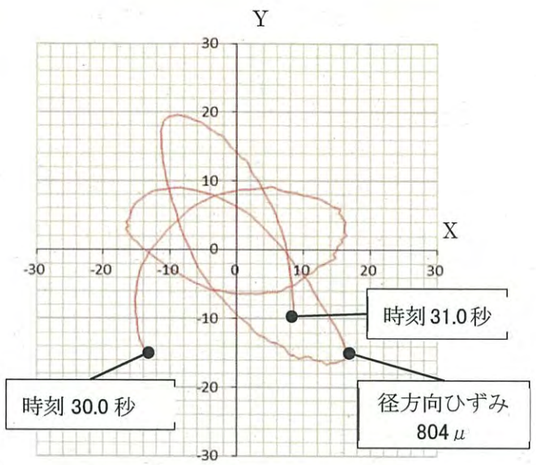
また，「3. 試験計画」にて確認したとおり，地震時の幾何学的な挙動はMSF-21P型，MSF-24P型及びMSF-32P型いずれも同様であり，試験供試体のモデルに用いた，MSF-21P型が伊方発電所で取り扱うMSF-24P型及びMSF-32P型より傾きやすくひずみ量を計測しやすく，伊方Ss-1波試験でも傾き挙動で最も大きなひずみを計測しているため，本試験の結果は伊方発電所で取り扱うMSF-24P型及びMSF-32P型でも適用可能である。



第 7-2 図　加振試験の計測結果（1 回目の例）

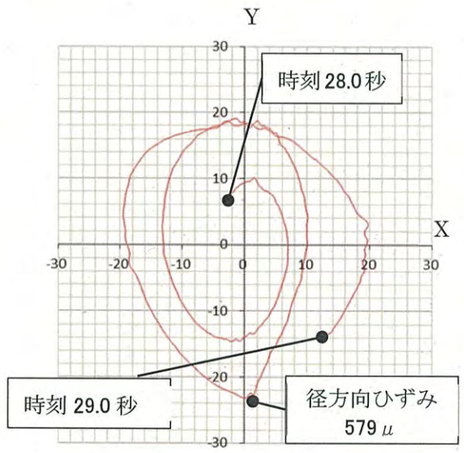


第 7-3 図　伊方 Ss-1 波　傾き挙動分析結果（1 回目）

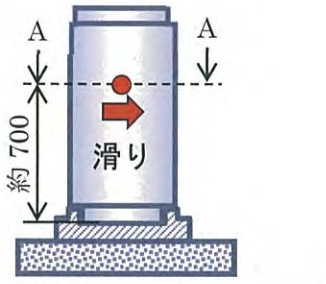


リサージュ曲線（30 秒～31 秒）

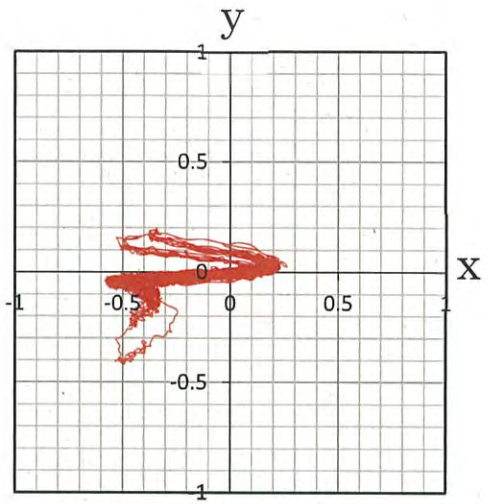
第 7-4 図　伊方 Ss-1 波　回転挙動分析結果（1 回目）



リサージュ曲線（28 秒～29 秒）

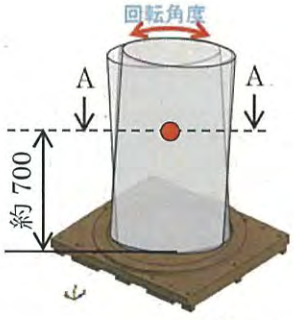


(単位：mm)

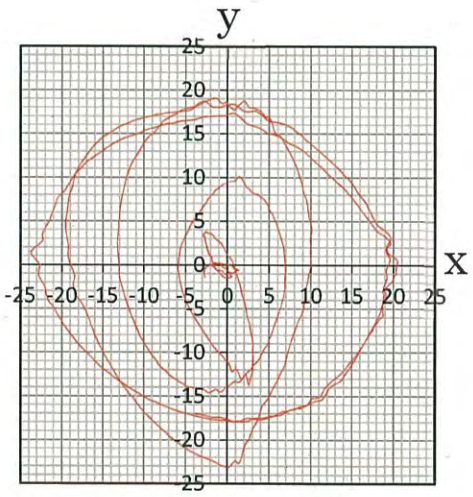


矢視 AA（左図赤点の軌道）

第 7-5 図　滑り挙動（時刻 0.5～5.5sec の例）

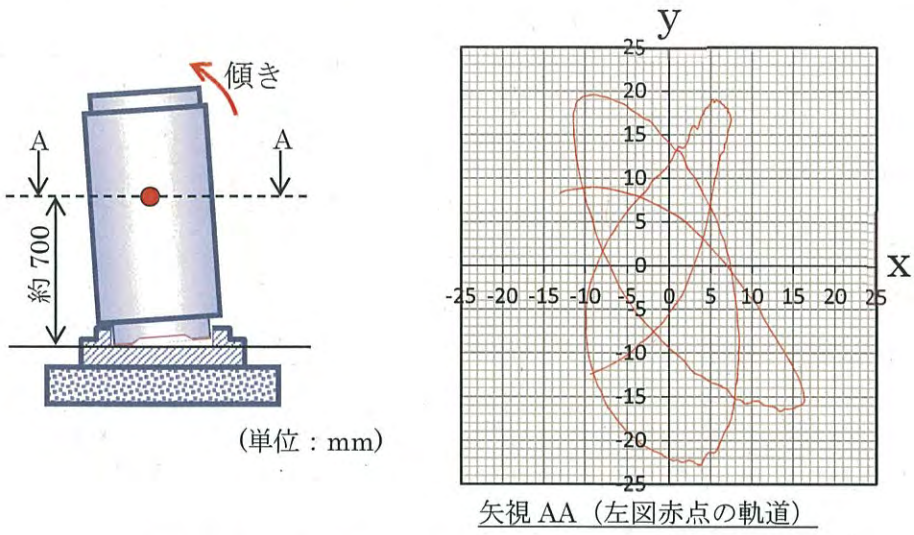


(単位：mm)

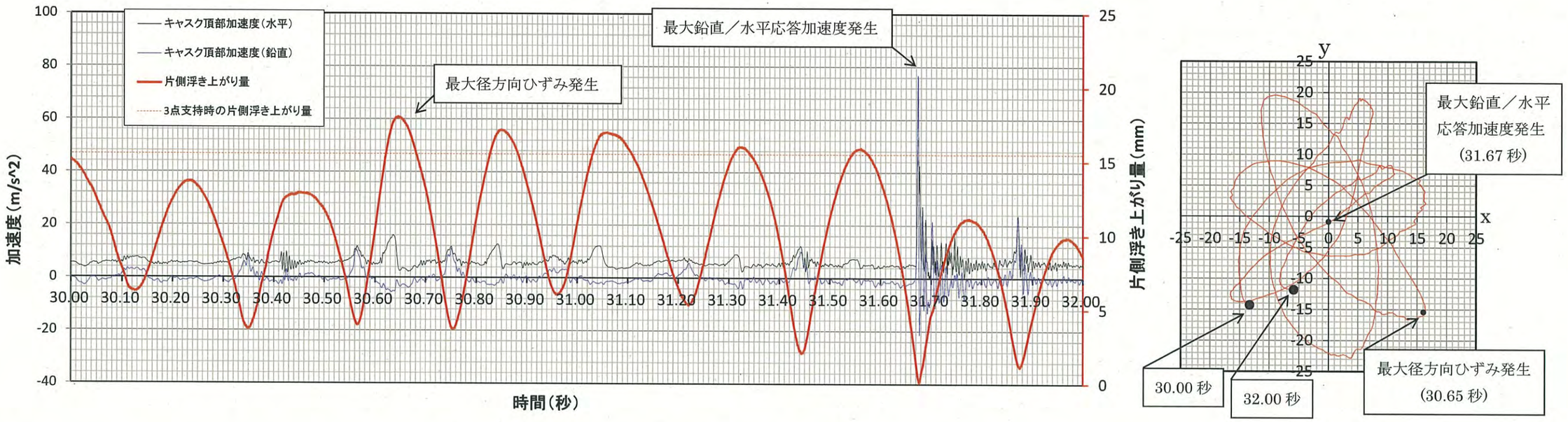


矢視 AA（左図赤点の軌道）

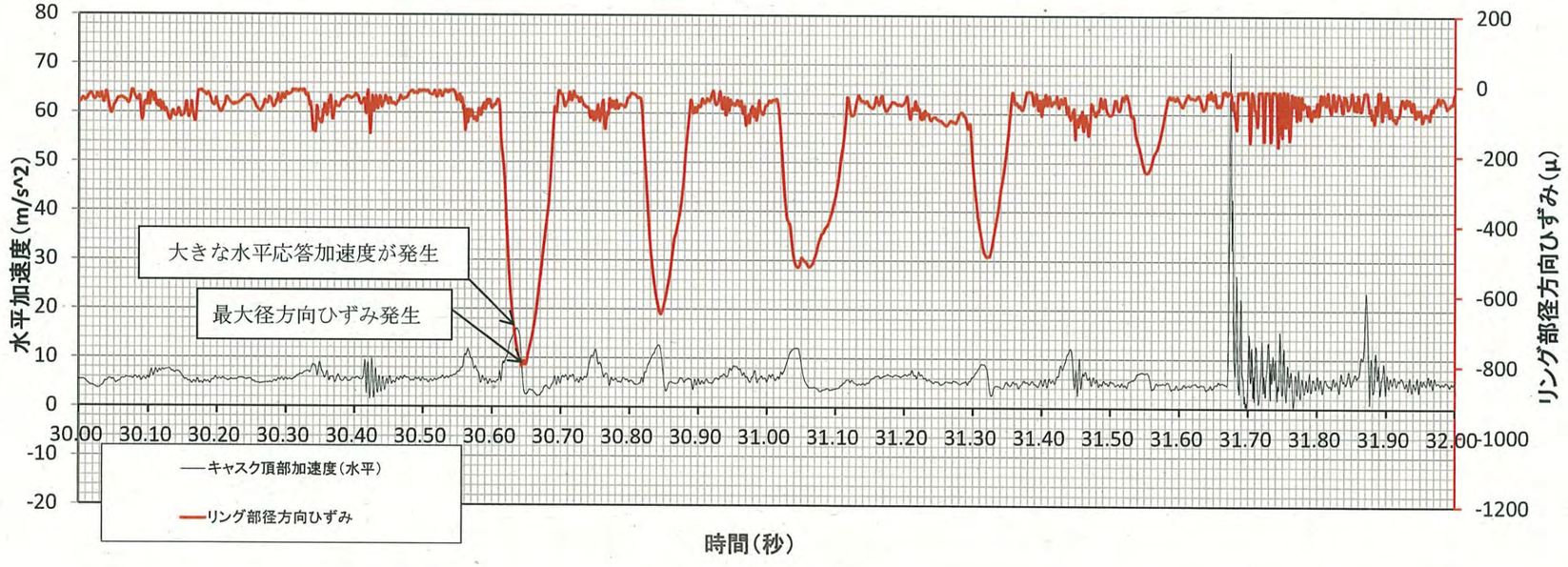
第 7-6 図　回転挙動（時刻 27.5～29.5sec の例）



第 7-7 図　傾き挙動（時刻 30.5～31.5sec の例）



第 7-8 図　試験供試体水平／鉛直応答加速度と片側浮き上がり量の関係（径方向最大ひずみ発生時間近傍）



第 7-9 図　試験供試体水平応答加速度とリング部径方向最大ひずみの関係

7.3 耐震評価式の妥当性の検証

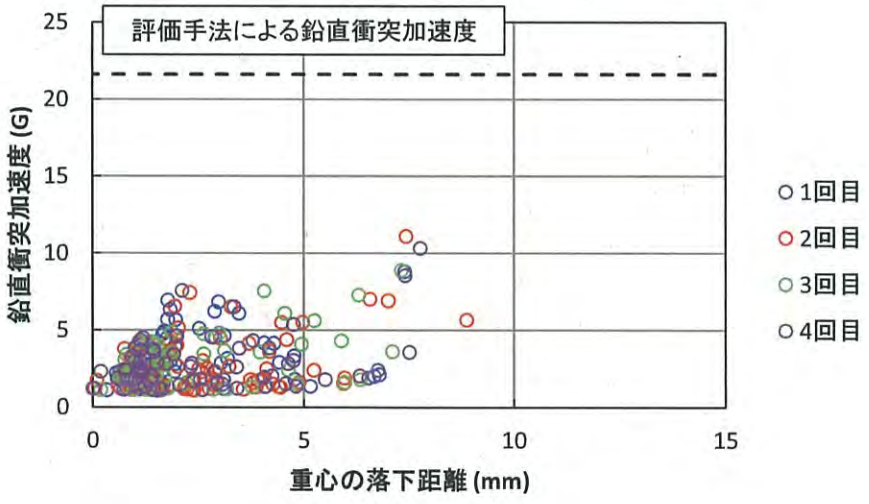
「7.2 試験結果」より得られた荷重と，「4.3 耐震評価式の構築」により構築した耐震評価式より算出した荷重を比較し，耐震評価式の妥当性を確認する。

7.3.1 試験供試体及び貯蔵架台に生じる鉛直方向荷重の算出方法の妥当性

地震応答解析のうち，試験供試体及び貯蔵架台に生じる鉛直方向荷重の算出にあたっては，「4.3 耐震評価式の構築」に示す幾何学的な 3 点接触の状態にある試験供試体が傾き，貯蔵架台底部に至る挙動を考慮し，エネルギーのつり合い式より試験供試体が貯蔵架台に衝突した時の荷重を算出している。

耐震評価式より算出される鉛直方向の荷重（衝突荷重）と，伊方 Ss-1 波試験にて，試験供試体頂部加速度計のデータから算出した鉛直方向荷重（衝突荷重）と，その荷重（加速度）が発生するまでの重心の落下距離を整理した結果を第 7-10 図に示す。なお，伊方 Ss-1 波試験は，4 回試験を実施しており，それぞれの試験結果を示す。

加振試験で生じた鉛直方向荷重（加速度）は，11G 程度であるのに対して，試験供試体諸元及び幾何学的に決まる初期傾き角 θ_0 を用いて，「4.3 耐震評価式の構築」にて構築した評価式により算出した鉛直方向荷重は，22G と大きな保守性を有している。



（※）落下開始～衝突荷重が最大となる地点までの落下距離をプロットしている。

4 回の試験結果の比較を第 7-2 表に示す。

第 7-10 図　加振試験で観察された鉛直衝突荷重とその重心の落下距離

第7-2表　貯蔵架台のひずみの比較結果

項目			伊方 Ss-1 波試験(注1)	
鉛直方向最大圧縮ひずみ（μ）	回転挙動(注2)	1回目	49（98%）	平均 49.75
		2回目	49（98%）	
		3回目	56（113%）	
		4回目	45(90%)	
	傾き挙動	1回目	305(83%)	平均 366
		2回目	430(118%)	
		3回目	262(注3)	
		4回目	363(99%)	

（注1）　（　）内の数値は、各挙動で算出された計算値（4回分）の平均値に対する相対比率である。

（注2）　回転挙動中の傾き挙動時に発生。

（注3）　3回目の伊方 Ss-1 波試験では，傾き挙動時に大きな加速度が発生せず，大きな荷重が発生しなかった。そのため，3回目の結果を除き，大きな荷重が計測された試験結果を比較する。

7.3.2 試験供試体及び貯蔵架台に生じる水平方向荷重の算出方法の妥当性

地震応答解析のうち，試験供試体及び貯蔵架台に生じる水平方向荷重の算出にあたっては，「4.3 耐震評価式の構築」に示すとおり，底面衝突前の試験供試体の運動エネルギーの水平成分に相当する角速度で底面衝突後に試験供試体が上昇をはじめ，地震力を定常的に負荷しながら，嵌め合い部の二側面への衝突に至る挙動を考慮し，エネルギーのつり合い式及びモーメントのつり合い式より試験供試体が貯蔵架台に衝突した時の荷重を算出している。

加振試験にて計測された貯蔵架台嵌め合い部のひずみに対して，試験供試体諸元を用いて，「4.3 耐震評価式の構築」により構築した評価式により算出したひずみを比較した結果を第 7-3 表に，加振試験にて最大のひずみを計測した 2 回目の結果の計測位置を第 7-11 図に，評価手法により最大ひずみを算出した位置を第 7-12 図に，評価手法により算出した径方向ひずみと試験で計測された径方向ひずみのグラフの比較を第 7-13 図に示す。

耐震評価手法により算出したひずみは，大きく加振試験の結果を上回っており，試験供試体及び貯蔵架台に生じる水平方向荷重は，十分な保守性が確保されていることを確認した。

第7-3表　貯蔵架台のひずみの比較結果

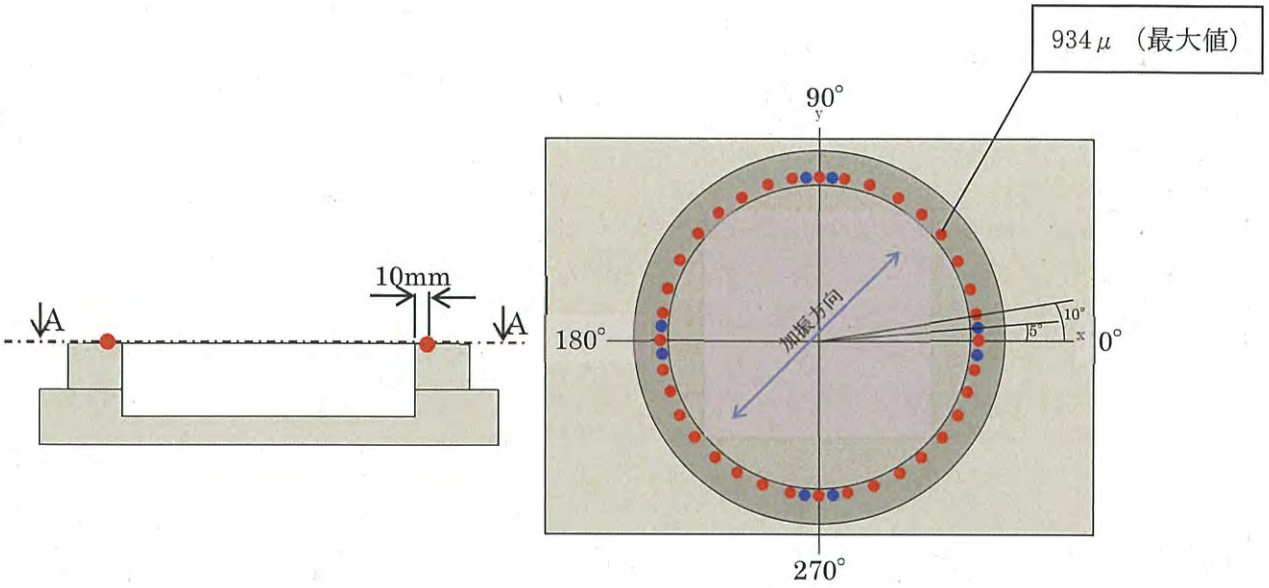
項目		伊方 Ss-1 波試験	本評価手法
径方向最大圧縮ひずみ（μ）	1 回目	804(注 1)	2700
	2 回目	934(注 1)	
	3 回目	646(注 2)	
	4 回目	762(注 1)	

(注 1) 最大ひずみが生じた傾き挙動時の値

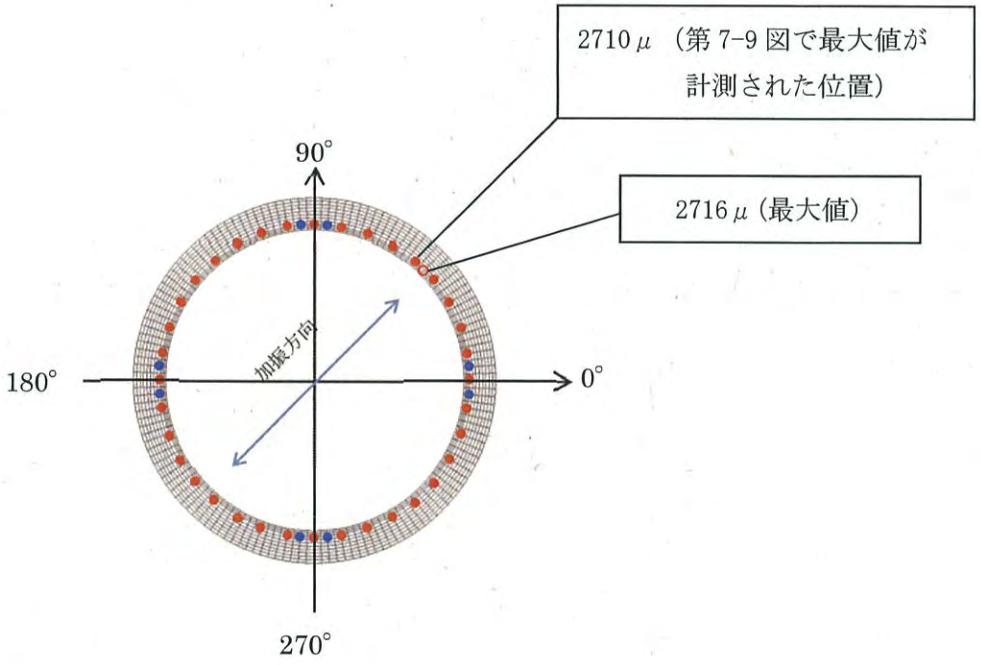
(注 2) 最大ひずみが生じた回転挙動中の傾き挙動時の値。なお，3 回目の加振試験の結果については，試験供試体が傾いたタイミングで大きな加速度が発生せず，傾き挙動において大きな荷重が発生する状況とならなかったものと考えられる。つまり，回転挙動時に傾き挙動時を上回るひずみが発生する可能性を示すものではない。

試験供試体から貯蔵架台に地震時に入力される水平方向荷重の立ち上り時間は，加振試験では 0.04sec 程度（径方向ひずみが 0.04sec 程度で 1000μ程度に上昇する過程を想定）であり，スケール則から，実機乾式キャスクでは更に長い値が想定される。一方，入力を受ける底面固定した実機の貯蔵架台は，1 次モードの固有周期が 0.005sec 程度であり，入力荷重の立ち上がり時間はこれに対して十分に長い。このことから，参考資料 1 に示す貯蔵架台の応力評価では，上記のとおり保守性が確保された水平方向荷重を 3 次元 FEM 応力解析モデルに静的に付与している。

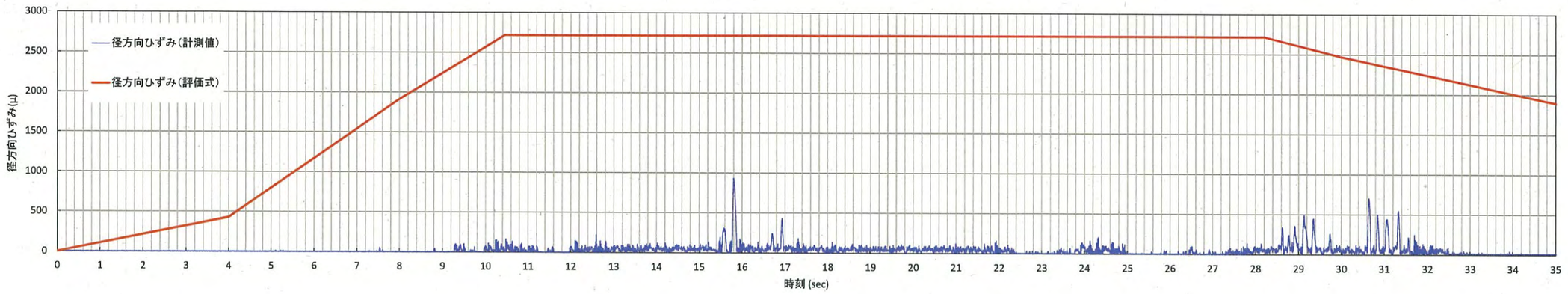
また，第 7-2 図等に示すとおり，伊方 Ss-1 波試験で確認されたひずみの大きさにはある程度のばらつきがあるが，いずれも，耐震評価式より算出したひずみ量を下回っており，耐震評価式がもつ保守性で地震時の乾式キャスクが示す荷重のばらつきは包絡されていると考えられる。



第 7-11 図 加振試験にて最大のひずみを計測した位置



第 7-12 図　評価手法により最大ひずみを算出した位置



(径方向ひずみ評価式の計算条件：θ =1.2 度，α_H=7.3m/s^2，α_V=3.65m/s^2)

第 7-13 図　　伊方 Ss-1 加振試験結果（径方向ひずみ）

8. まとめ

加振試験の結果から，「2. 地震時の乾式キャスクに想定される挙動」のとおり，貯蔵架台上に設置された試験供試体の地震時の挙動が，滑り挙動，回転挙動，傾き挙動であり，そのうち傾き挙動により試験供試体と貯蔵架台が衝突する時に大きな荷重が発生することを確認した。

また，乾式キャスクに大きな荷重が発生するのは傾き挙動時であり，その時に地震力により加速することで蓄える運動エネルギー及び地震力によって傾くことで蓄える位置エネルギーを因子として荷重が発生していることから，それらをパラメータとして，荷重が算出されるよう耐震評価式を構築し，正弦波試験，周波数分割波試験，仮想 Ss 波試験及び伊方 Ss-1 波試験の試験結果から得られる荷重と耐震評価式から得られる荷重を比較することで，耐震評価式では試験結果を上回る荷重が算出され，保守性を有しており，乾式キャスクの耐震評価に用いることが妥当であることを確認した。

これらの結果は試験供試体を用いた加振試験から得られたものであるが，「3.1 試験供試体」に示すように，試験供試体の幾何学的な挙動は伊方発電所に設置する乾式キャスクと同様であることに加え，大きな荷重が発生する傾き挙動に関して，慣性モーメントが伊方発電所に設置する乾式キャスクより小さく，より傾きやすい試験となっているため，試験供試体を用いた試験結果は伊方発電所に設置する乾式キャスクに適用可能である。

以上の結果から，参考資料１「4. 乾式キャスク及び貯蔵架台の地震応答解析」に示すように，この耐震評価式を用いて，伊方発電所に設置する乾式キャスクの耐震評価を行うことは妥当であることが検証できた。

乾式キャスク及び貯蔵架台の耐震安全性評価に関する妥当性

項目			乾式キャスクの耐震設計	許認可実績、準拠規格・基準	各項目に対する妥当性	各項目の保守性
設計条件			・乾式キャスクを基礎に固定した貯蔵架台に設置することにより、横滑りを制限する。 ・乾式キャスクは貯蔵架台に固定せず、地震による慣性力により貯蔵架台の嵌め合い部（凹部）内で挙動するが、転倒しない構造とする。			
耐震重要度分類		乾式キャスク	Sクラス （基準地震動Ssによる地震力に対して機能を維持する）			
		貯蔵架台	Sクラスの直接支持構造部 （基準地震動Ssによる地震力に対して機能を維持する）			
構造・配置、据付計画		乾式キャスク	貯蔵架台には固定せず、貯蔵架台に設けた凹部に縦置きで嵌め込み貯蔵する。			
		貯蔵架台	基礎ボルトにて建屋床面に固定する。			
主体構造		乾式キャスク	核燃料物質等の工場又は事業所の外における運搬に関する規則第6条又は第7条及び第11条に定める技術上の基準に適合する乾式キャスクであり、蓋部、胴部で構成する。内部に使用済燃料集合体を所定の幾何学的配置に維持するためのバスケットを有し、胴部には伝熱フィンが取り付く。			
		貯蔵架台	溶接部のない一体化構造物であり、表面に乾式キャスクを設置するための凹部を設ける。			
耐震評価の基本方針			乾式キャスク・貯蔵架台（基礎ボルト含む）が設計用地震力に対して十分な構造強度を有していること、および乾式キャスクが転倒しないことを確認する。解析による評価を実施することとし、解析の妥当性をモックアップ加振試験により確認する。			
①地震応答解析	地震時の応答（乾式キャスクの挙動）		乾式キャスクは、地震時に、貯蔵架台の凹部内で滑り・傾き・回転挙動が発生する。（鉛直方向地震力は重力加速度を超えないため、伊方では浮き上がりは発生しない）	－	乾式キャスクは凹部内で固定されていないため、地震の慣性力により滑りや傾き挙動が発生する。また、凹部側面が曲面であるため、乾式キャスクが凹部側面にそって回転挙動を発生する場合もある。ただし、凹部側面で挙動が制限されているため、貯蔵架台に対して大きくずれたり、転倒したりすることはない。また、鉛直地震動は重力加速度を超えないため、乾式キャスクが浮き上がりは生じない。	耐震評価上最も厳しい傾き挙動を選定しているが、挙動選定結果自体には、保守性を有していない。
	評価対象とする挙動		耐震評価上最も厳しい傾き挙動を選定	－	以下のSIN波加振試験結果より、傾き挙動が耐震評価上最も厳しいため、傾き挙動を評価対象としたことは妥当である。 ・滑り挙動では、貯蔵架台に大きなひずみが生じない。 ・加振台への入力が一定であっても、傾き挙動から回転挙動に移行すると、貯蔵架台のひずみが小さくなる。	
	設計用地震動		基準地震動Ssを用いる。なお，設置許可では乾式キャスクの安全機能が損なわれるおそれがない見通しを確認するため，暫定的に乾式貯蔵建屋設置地盤での地震応答（Ss-1）を用いて耐震評価を実施する。	既許可の基準地震動Ssを用いることは、従前から既工認で実施している。	左記のとおり、既許可の基準地震動Ssを用いており、妥当である。	基準地震動Ss策定時に考慮した保守性以上の保守性はない。
	設計用減衰定数		エネルギー保存則を解くための運動方程式には、設計用減衰定数の項は不要	認可実績があるエネルギー保存則を用いたキャスク落下時の衝突解析においても、運動方程式中に設計用減衰定数を考慮していない。	運動方程式を解く際に、機器減衰を考慮せず、入力された地震慣性力が全て運動エネルギーに変換されるとしており、妥当である。	実挙動において存在する減衰を評価上は考慮しておらず、保守性がある。
	固有周期		エネルギー保存則を解くための運動方程式には、固有周期の項は不要	認可実績があるエネルギー保存則を用いたキャスク落下時の衝突解析においても、運動方程式中に固有振動数を考慮していない。	ガタを有する非線形挙動において固有モード、振動数の概念はない。 実際に、短/中/長周期成分に分割した加振波で加振試験を実施した所、周期成分により、共振のような周波数特性を有する挙動は、観測されなかった。	エネルギー保存則の運動方程式を解く際に、物理的に固有周期が不要であるだけであり、保守性の考慮には関係ない。
	設計用地震力		キャスク重心に入力する慣性力として1.2ZPAで評価（水平2方向、鉛直方向）	運動方程式を解く際に、重心位置に地震慣性力（最大値はZPA）を入力する考え方については、JEAG4601のFRSの計算方法と同じである。なお、JEAG4601における剛構造物の強度評価に対する考え方を踏まえ、床応答のZPAに対する貯蔵架台の動的応答による増分を2割とした1.2ZPAを使用する。	左記に記載のとおり、物理的には、運動方程式を解く際は、地震慣性力（最大値はZPA）を重心位置に入力することは妥当である。 なお、加振試験時に共振のような周波数特性を有する挙動が観測されていないこと、また各加振試験より得られた荷重と、各加振試験の諸元を用いた耐震評価式から算出した荷重を比較し、耐震評価式の検証を行った結果、耐震評価式は、加振試験の結果に比べ、保守的に大きな荷重が算出されることが確認されたことからもキャスク重心位置に地震慣性力を入力することは妥当であると判断する。	運動方程式を解く際は、時々刻々の地震慣性力を入力すれば良いところ、保守的にその最大値であるZPAを、JAG4601における剛構造に対する応答増幅の考え方に従い２割増しして入力しており、保守性がある。
	２方向影響の考慮		２方向影響を考慮する	水平２方向の加速度をSRSS（この度の影響評価ではXY方向の最大加速度を$\sqrt{2}$倍している）して考慮することは、工認実績あり。	水平2方向で最大加速度を同時に常時作用させており、より厳しい評価となるため妥当である。	本評価手法では、水平2方向で最大加速度を同時に常時作用させており、保守的である。
	応答解析モデル		幾何学的な寸法からエネルギー保存則に基づく運動方程式を設定しており、応答解析モデルは作成していない。			
	地震力の入力位置		水平・鉛直地震力をキャスク重心位置へ入力する	設計用地震力の項を参照	同左	同左
	地震時荷重の算定箇所		地震により、乾式キャスクと貯蔵架台の衝突が発生する箇所の荷重を算定する。	大きな荷重が発生する衝突箇所に着目し、荷重の算定箇所を選定する手法は、燃料集合体の竜巻飛来物評価等で認可実績あり。	地震により、乾式キャスクと貯蔵架台の衝突が発生する箇所、つまり、大きな荷重が発生する箇所の荷重を算定していることから、妥当である。	地震荷重の算定箇所においては、保守性を有していない。
	荷重の算定手法		エネルギー保存則を用いた評価式を本評価のため新たに策定し、衝突荷重を算定	エネルギー保存則を用いた衝突評価としては、キャスク落下時の衝突荷重を算定する手法として許認可実績あり。 ただし、乾式キャスクの評価に適したエネルギー保存則を解くための運動方程式は、今回の申請にあたり、加振試験結果から新規に作成している。	キャスクが貯蔵架台凹部内で傾いた状態から傾き挙動を開始し、自由落下により貯蔵架台底部に衝突するときのエネルギーから鉛直方向の衝突荷重を算出している。貯蔵架台底部に衝突後、キャスクが貯蔵架台凹部側面に衝突するまで、水平／鉛直方向に入力加速度（1.2ZPA）がキャスクに作用するとしてエネルギーを算出し、そのエネルギーから貯蔵架台への衝突荷重を算出している。 本手法の妥当性については、別添2別紙2で確認した。	加振試験結果より、乾式キャスク及び貯蔵架台に作用する荷重は、以下の因子であることが判明した。 ・鉛直方向荷重は、地震力によって蓄えられた位置エネルギー量（重心高さ）に応じて発生する。 ・水平方向荷重は、地震力の大きさに応じて発生する。 荷重の評価手法において、以下の考慮をすることで、保守性を有している。 ・キャスクと貯蔵架台との隙間を想定される最大値に設定することで、キャスクの傾き角を最大に見積もることで、蓄えられるエネルギー量の最大値を算出し、実挙動に対して同等以上となるよう配慮している。 ・キャスクが有する運動エネルギーが全て貯蔵架台のひずみエネルギーに変換されるものとして荷重を算出しており、摩擦等によるエネルギー消費を無視している。 以上の評価手法が有する保守性を伊方Ss-1波等の加振試験結果と比較した所、２倍程度の保守性を有していることを確認した。
②応力評価	使用解析コード等		ABAQUS Ver.6.12-3：バスケット、伝熱フィン及び胴（脚部）の衝突部以外 構造公式：上記以外のキャスク及び貯蔵架台（基礎ボルト含む）	【解析コード】 ABAQUSによる3次元FEMモデルを用いた応力解析は炉内構造物の強度・耐震評価で工認実績あり。 【構造公式】 単純な構造の部位に対して、構造公式により手計算で耐震評価を実施することは、従前から既工認で実施している。	【解析コード】 ABAQUSコードは応力解析に適用できるコードとして検証されており、妥当である。 【構造公式】 左記のとおり、構造公式により耐震評価を実施することは、従前の工認で実施している内容であり、妥当である。	【解析コード】 解析コードの検証において、理論解と一致していることを確認しており、保守性を有していない。 【構造公式】 構造公式自体が、理論式であり、保守性を有していない。
	評価モデル		キャスクおよび貯蔵架台を実機寸法で3次元FEMモデル化	ABAQUSによる3次元FEMモデルを用いた応力解析は炉内構造物の強度・耐震評価で工認実績あり。	キャスク及び貯蔵架台の実形状を精緻にモデル化しており、妥当である。	実機寸法で評価しており、保守性は有していない。
	材質・温度		キャスク及び貯蔵架台の材質について、機器等の区分に従い、使用可能な材料を選定。また、適切な温度を設定。	【材料】 キャスク及び貯蔵架台の材料はJSME材料規格に規定された材料である。（準拠規格：JSME材料規格2012年版） 【温度】 最大崩壊熱量(32P：14.8kW)を超える設計崩壊熱量(32P：16.9kW)を入力してキャスクの温度を評価する手法については、設計承認にて認可実績あり。 また、許容限界設定にあたり熱解析結果を基に設定した設計温度を適用している。	【材料】 実機で使用している材料の物性値をJSME材料規格に基づき設定しており、妥当である。 【温度】 キャスクは貯蔵時の熱解析で算出された温度を元に設定した設計温度を適用しており、貯蔵架台はコンクリートの基準温度を採用しており、妥当である。	【材料】 材料については、規格値を適用しており、使用材料の最低強度を使用している。 【温度】 許容限界設計にあたり、熱解析結果を基に設定した設計温度を適用しており、保守的な発熱量を入力していることから実機より高めとなり、許容限界が小さめに設定される。
	評価部位		乾式キャスク、貯蔵架台（基礎ボルト含む）について安全機能維持の確認に必要な部位全て	安全機能維持に必要な部位を評価部位に設定する方針は既工認と同じ考え方である。	ガイドの審査方針に従い、キャスクの4つの安全機能維持の確認に必要な部位及び貯蔵架台の機能維持に必要な部位を評価部位に設定しており、妥当である。	評価部位の選定においては、保守性を有していない。
	設計用荷重		乾式キャスク及び貯蔵架台（嵌め合い部）：3次元FEMモデルに地震応答解析で求めた荷重を入力 基礎ボルト：構造公式に地震応答解析で求めた荷重を入力	【3次元FEM】 地震応答解析で算出した荷重を静的モデルに設計用荷重として入力する手法については炉内構造物や主機管台にて工認実績あり。 【基礎ボルト】 構造公式に地震応答解析で求めた荷重を入力する手法については、1次冷却材管にて工認実績あり。	【3次元FEM】 地震応答解析で算出した荷重を妥当性が確認された解析コードで構築した３次元FEMに入力しており、妥当である。 【基礎ボルト】 基礎ボルトの応力評価においては、地震応答解析で求めた荷重を構造公式に与えており、妥当である。	地震応答解析で求めた荷重をそのまま入力しており、地震応答解析時に考慮した保守性以上の保守性はない。
	荷重の入力方法		3次元FEMモデルに地震応答解析で求めた衝突荷重を静的に入力する	地震応答解析で算出した荷重を静的モデルに設計用荷重を入力とする手法については炉内構造物や主機管台にて工認実績あり。また、強制変位として入力する手法については一次系配管にて工認実績あり。	荷重作用時間が十分長いため、静的解析としてを扱うことは、妥当である。	地震応答解析で求めた荷重をそのまま入力しており、地震応答解析時に考慮した保守性以上の保守性はない。
	荷重の組合せ		地震時の荷重に加え、貯蔵時の自重、温度等を考慮する	既工認どおり、JEAG4601に基づき、地震荷重と他の荷重の組合せを考慮している。	左記のとおり、JEAG4601に基づき荷重の組合せを設定することは、従前の工認で実施している内容であり、妥当である。	荷重の組合せは、JEAG4601に従い地震と組み合わせるべき荷重を考慮しているもので保守性は有していない。
	応力分類		各部位の耐震クラス及び機器等の区分における評価項目に応じて設定	既工認どおり、JEAG4601に基づき、耐震クラス及び機器等の区分における評価項目に応じた応力分類を設定している。	左記のとおり、JEAG4601に基づき応力分類を設定することは、従前の工認で実施している内容であり、妥当である。	評価する応力分類を規定しているだけであり、保守性は有していない。
	許容限界		【強度評価】 キャスク及び貯蔵架台：許容応力状態Ⅳ$_A$Sの許容限界 （ただし、密封境界部については、おおむね弾性範囲となる許容限界として、許容応力状態をⅢ$_A$Sの許容限界を設定） 【転倒評価】 キャスクの転倒：重心位置が回転支点の水平方向位置を超えない傾き角度	【強度評価】 塑性ひずみが生じる場合であっても、その量が小さなレベルに留まって破断延性限界に十分な余裕を有する許容限界として、認可実績があるJEAG4601で設定している許容応力状態Ⅳ$_A$Sの許容限界を適用する。なお、密封境界部については、審査ガイドで、おおむね弾性範囲とすることが求められており、これを担保する許容限界として、認可実績があるJEAG4601で設定している許容応力状態Ⅲ$_A$Sの許容限界を適用する。 【転倒評価】 重心位置が回転支点の水平方向位置を超えない傾き角度を許容限界として設定している。 この方針は、使用済燃料ラックにおける転倒評価と同じ方針であり、工認実績あり。	左記のとおり、認可実績のある許容限界を設定しており、妥当である。	【強度評価】 許容応力状態Ⅳ$_A$S及びⅢ$_A$Sの許容限界については、JEAG4601・補-1984許容応力編参考資料Ⅰ「許容応力設定の背景」に記載されているように、保守性を考慮し設定されている。 【転倒評価】 許容限界には、保守性を有していないが、貯蔵架台に設置された乾式キャスクは、許容限界に対して十分余裕がある範囲に傾き量が制限される。

：許認可実績、準拠規格・基準において、妥当性に対する検討が特に必要な項目