

構造強度及び耐震性について

1 構造強度

1.1 乾式キャスクの構造強度

(1) 乾式貯蔵キャスク

1) 評価方針

本設備で保管する乾式貯蔵キャスク及び支持架台は、既存設計のものを使用し、乾式貯蔵キャスクの安全機能に関しては、添付資料－2「評価の基本方針」で記載している既存評価書にて評価されている。

乾式貯蔵キャスク及び支持架台の構造強度については、既存評価の結果を基に、乾式貯蔵キャスクの構造強度が本設置場所での保管に適合していることを確認する。

2) 主な構成部材と適用基準

① 主な構成部材

乾式貯蔵キャスク及び支持架台の構造強度設計は、要求される安全機能を維持するため、次の構造部材について評価する。

A. キャスク容器

乾式貯蔵キャスクのうち、放射性物質を閉じ込めるための圧力バウンダリを構成するものであって、胴板、底板、一次蓋、一次蓋締付けボルト、貫通孔蓋板及び貫通孔蓋板締付けボルトをいう。

B. バスケット

乾式貯蔵キャスクの容器内に配置され、使用済燃料を収納し、かつ燃料間距離を保つことにより、燃料の支持機能及び臨界防止機能を併せ持つものであって、バスケットプレート、バスケットサポート及びバスケットサポート取付けボルトをいう。

C. トラニオン

乾式貯蔵キャスクの取扱い時及び仮保管時の支持のため、吊上げ及び固定に使用されるものであって、トラニオン及びトラニオン締付けボルトをいう。

D. 二次蓋

乾式貯蔵キャスクの密封監視のために圧力空間を保持するための部材である。

E. 支持架台

乾式貯蔵キャスクの仮保管時にトラニオンを支持する構造であり、乾式貯蔵キャスク全体を支持するものであって、支持架台、固定ボルト及び基礎ボルトをいう。なお、基礎ボルトについては、本設備において新たに設置するため、本評価から除き、耐震性についての説明書に記載する。

② 適用基準と規格

乾式貯蔵キャスクの構造強度設計における適用基準と規格を構造部材ごとに表 1.1-1

に示す。

表 1.1-1 乾式貯蔵キャスクの構造強度に係る適用基準・規格

機器	設計・建設規格 機器区分	構造強度 評価方法	考え方
キャスク容器	クラス3 容器	クラス1 容器の 規定を準用	放射性物質を貯蔵する観点から、使用済燃料プールや使用済樹脂貯蔵タンク等と同様に JSME 設計・建設規格の区分の定義からクラス3 容器に区分されるものと考ええる。しかしながら、構造強度評価方法については、熱荷重や取扱い時の衝撃荷重等の各種の荷重の作用が想定されることから応力解析により発生応力を求めて評価することが必要であり、構造強度評価手法は「解析による設計」の考え方が採用されている JSME 設計・建設規格のクラス1 容器に準拠することとする。
バスケット	ノンクラス	炉心支持構造物の規 定を準用	バスケットは、使用済燃料ラックと同様に JSME 設計・建設規格の区分の定義に当てはまらないと考ええる。しかしながら、使用済燃料を直接支持する部材であるため、構造強度評価手法は JSME 設計・建設規格の炉心支持構造物に準拠することとする。なお、バスケット材料として使用するアルミニウム合金 (A6061P) 及びボロン添加アルミニウム合金 (B-A0) は、「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」の規定に準じてバスケット材料として A6061P 及び B-A0 を使用すると共に、材料と強度評価手法の整合の観点から、バスケットは構造規格に準じた評価手法による強度評価も行う。
トラニオン	クラス3 支持構造物	クラス1 支持構造物 の規定を準用	トラニオンはキャスク容器を支持することから、JSME 設計・建設規格の区分の定義からクラス3 支持構造物に区分されるものと考ええる。しかしながら、乾式貯蔵キャスク全体を支持するため、キャスク容器との整合をとり、構造強度評価手法は JSME 設計・建設規格のクラス1 支持構造物に準拠することとする。
二次蓋	ノンクラス	クラス3 容器の 規定を準用	JSME 設計・建設規格に該当する機器区分はないものと考ええる。しかしながら、乾式貯蔵キャスクの貯蔵時の密封監視のために圧力空間を保持するための部材であり、二次蓋及び一次蓋の蓋間内が正圧となる。したがって、構造強度評価手法はクラス3 容器の規定に準拠することとする。
支持架台	クラス3 支持構造物	クラス1 支持構造物 の規定を準用	支持架台は、トラニオンと同様にキャスク容器を支持することから、JSME 設計・建設規格の区分の定義からクラス3 支持構造物に区分されるものと考えられる。しかしながら、保管時にトラニオンを支持するため、トラニオンとの整合をとり、構造強度評価手法は JSME 設計・建設規格のクラス1 支持構造物に準拠することとする。

3) 既存評価書における構造強度評価方法

① 設計条件

乾式貯蔵キャスク及び支持架台の構造評価に当たっての荷重を以下に示す。

A. 圧力による荷重

乾式貯蔵キャスク各部の内面及び外面が受ける最高使用圧力、取り扱い時及び貯蔵時に受ける圧力並びに試験圧力による荷重をいう。

既存評価における乾式貯蔵キャスクの最高使用圧力を以下に示す。

キャスク容器：1.6 MPa

二次蓋：0.4 MPa

B. 機械的荷重

自重、衝撃荷重及びその他の付加荷重をいう。機械的荷重の主なものは以下の通りである。

- a. 自重による荷重
- b. ボルト締付け力
- c. 運搬時荷重
- d. 吊上げ荷重
- e. 衝撃荷重

C. 熱荷重

乾式貯蔵キャスクに生じる温度変化、温度こう配による荷重であって、熱解析の結果から得られるものをいう。

既存評価において用いる各構造部材の最高使用温度を以下に示す。

キャスク容器：170℃

バスケット：225℃

トラニオン：170℃

支持架台：50℃

② 評価方法

乾式貯蔵キャスク及び支持架台の構造解析フローを図 1.1-1 に、主な構造部材の応力評価箇所を図 1.1-2(1)～(4)に示す。

A. キャスク容器

キャスク容器の胴、底板及び蓋部等の構造強度は、想定される圧力荷重、機械的荷重、熱荷重をもとに、キャスク容器の実形状をモデル化し、構造解析コード ABAQUS を用いて胴、底板、一次蓋、一次蓋締付けボルト等の応力評価を行う。

ABAQUS による解析は、圧力荷重、機械的荷重及び熱荷重によって生じる形状の不連続の効果を含む応力の解析及び温度分布計算に使用する。

B. バスケット

バスケットの構造強度評価は、想定される機械的荷重、熱荷重をもとにバスケットの

実形状をモデル化し、構造解析コード ABAQUS 及び応力評価式を用いて応力評価を行う。

ABAQUS による解析は、荷重によって生じる形状の不連続の効果を含む応力の解析及び温度分布計算に使用する。

C. トラニオン

トラニオンの構造強度評価は想定される機械的荷重及び熱荷重を基に、応力評価式を用いて行う。

D. 二次蓋

二次蓋の構造強度評価は想定される機械的荷重及び熱荷重を基に、応力評価式を用いて行う。

E. 支持架台

支持架台の構造強度評価は想定される機械的荷重及び熱荷重を基に、応力評価式を用いて行う。

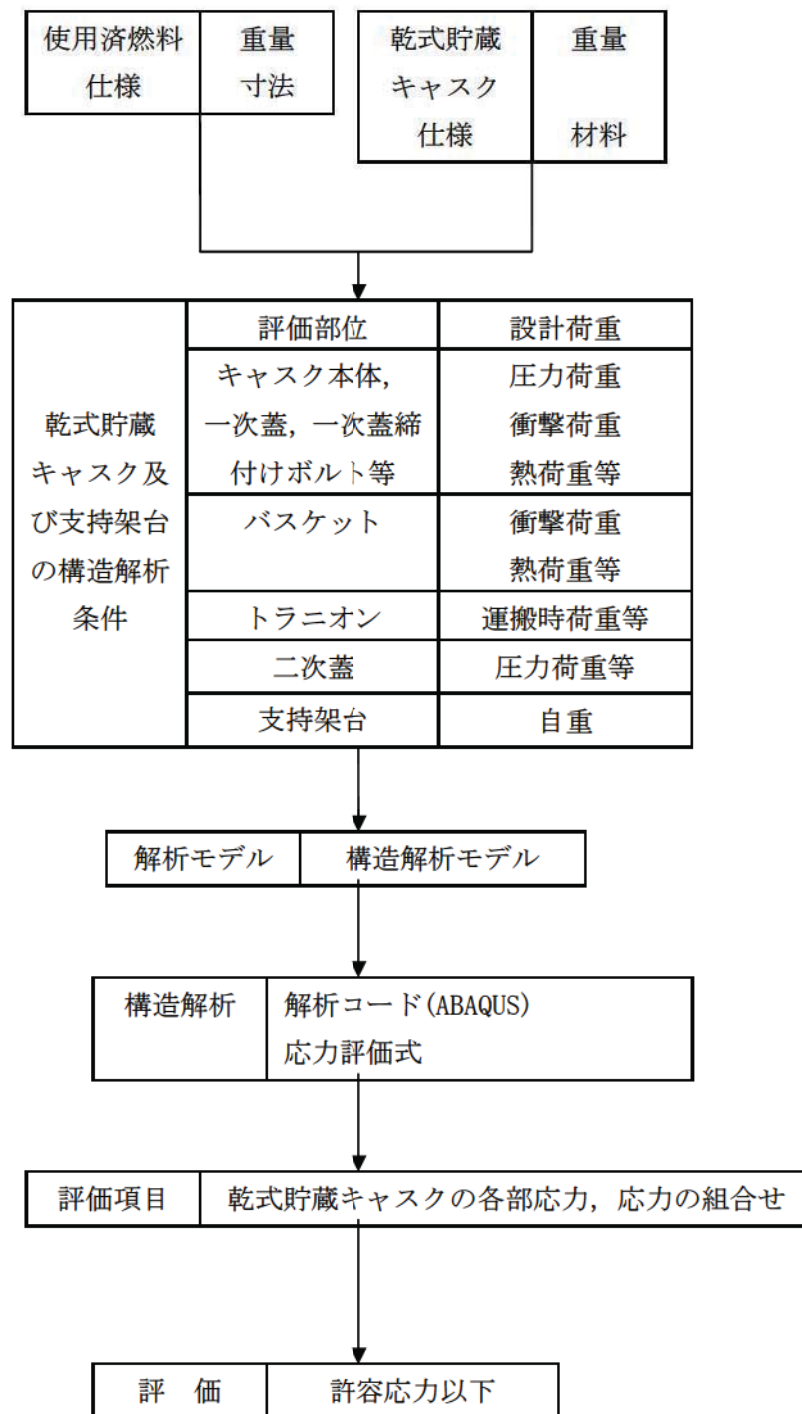


図 1.1-1 乾式貯蔵キャスク及び支持架台の構造強度評価フロー

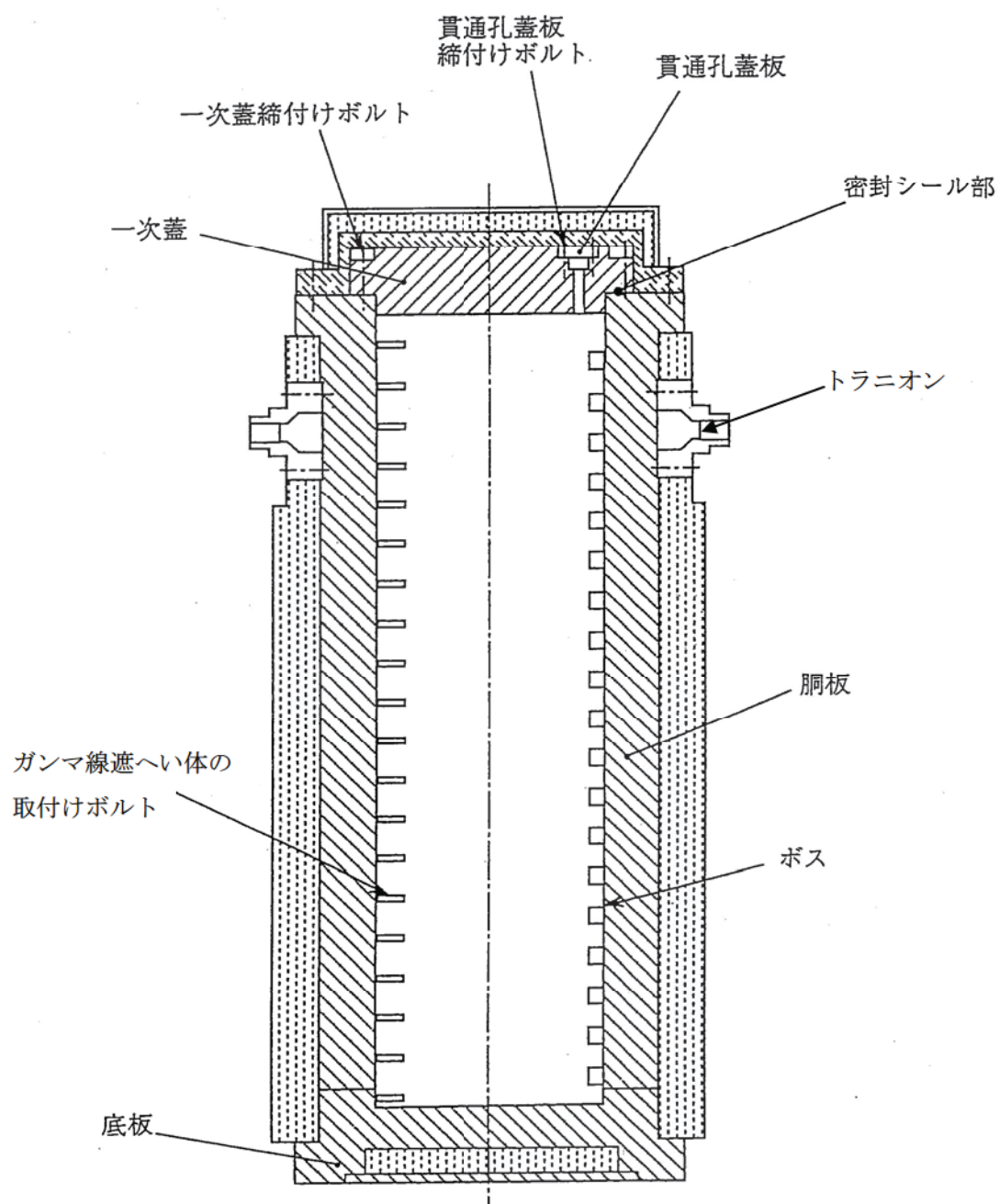


図 1.1-2 (1) キャスク容器の応力評価箇所 (全体断面図)

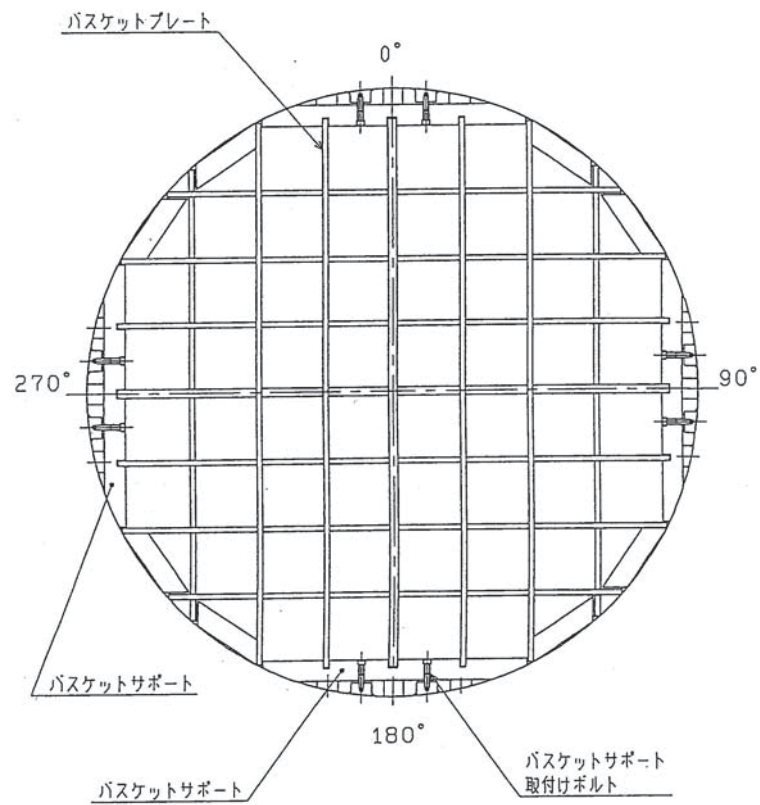


図 1.1-2 (2) バスケットの応力評価箇所

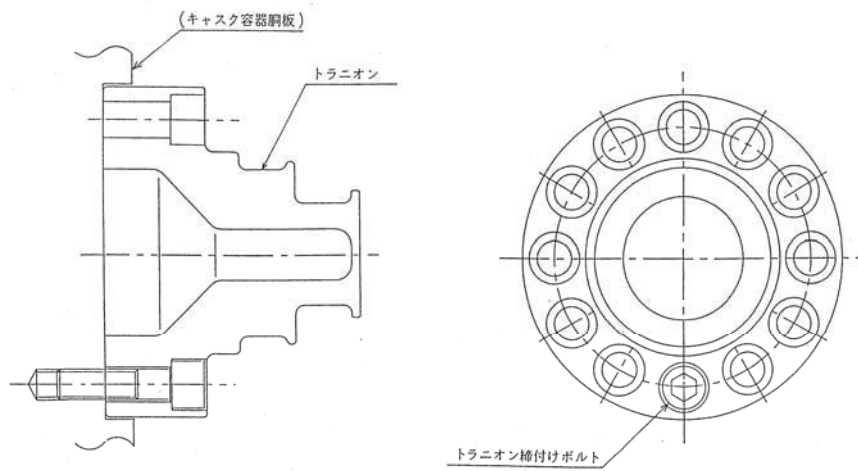
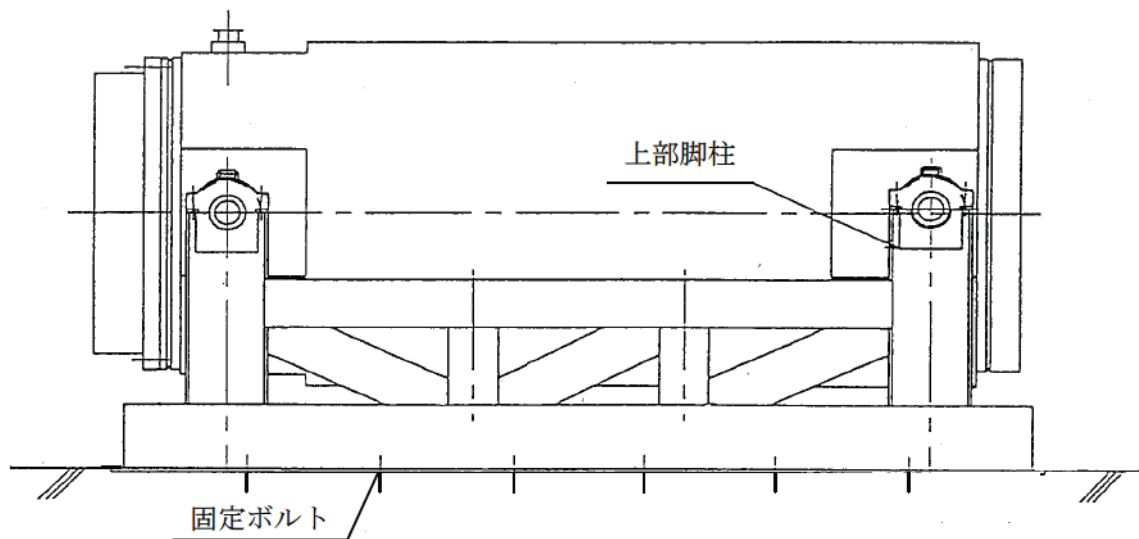
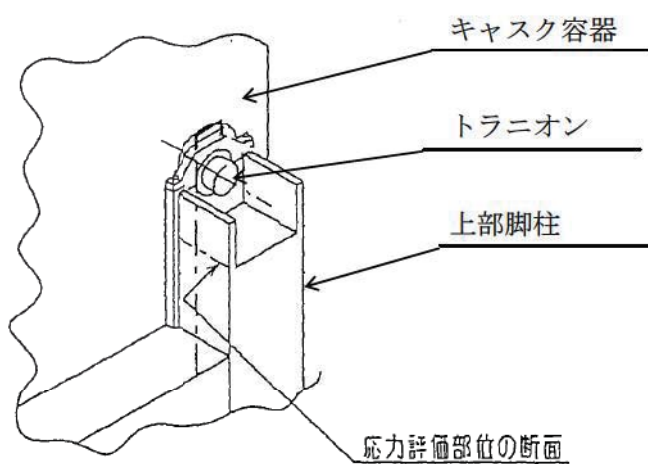


図 1.1-2 (3) トラニオンの応力評価箇所



a) 支持架台の応力評価箇所



b) 上部脚柱詳細

図 1.1-2 (4) 支持架台の応力評価箇所

③ 設計事象と荷重の組み合わせ

乾式貯蔵キャスクの構造強度評価において考慮する設計事象を表 1.1-2 に示す。

既存評価における選定事象は以下の通りである。

〔設計事象Ⅰ〕

- ・貯蔵
- ・乾式貯蔵キャスクの吊上げ，吊下げ，移動
- ・事業所内運搬

〔設計事象Ⅱ〕

- ・コンクリート基礎への支持架台付きでの衝突

また，各設計事象においてキャスク容器，バスケット，トラニオン，二次蓋及び支持架台の設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せを表 1.1-3(1)～(5)に示す。（地震時を除く）

表 1.1-2 乾式貯蔵キャスクの設計事象

設計事象	定 義	解 説	既存評価における選定事象
I	乾式貯蔵キャスクの通常取扱い時及び貯蔵時の状態をいう。	貯蔵状態及び計画的な取扱い状態。	・貯蔵 ・乾式貯蔵キャスクの吊上げ，吊下げ，移動 ・事業所内運搬
II	設計事象 I，設計事象 III，設計事象 IV 及び試験状態以外の状態をいう。	乾式貯蔵キャスクの寿命程度の期間中に予想される取扱い機器の単一故障，単一誤動作等の事象によって，乾式貯蔵キャスクが通常貯蔵状態あるいは通常取扱い状態から外れるような状態をいう。	・乾式貯蔵キャスクの異常着床 ・乾式貯蔵キャスクのキャスク支持架台への衝突
III	乾式貯蔵キャスク又はその取扱い機器等の故障，異常な作動等により，貯蔵又は計画された取扱いの停止が緊急に必要とされる状態をいう。	発生頻度が十分低い事象によって引き起こされる状態をいう。すなわち，設計事象 II でいう機器の単一故障，運転員の単一誤操作等によって引き起こされるもののうち，その発生頻度が十分に低いと考えられるものを分類する。	
IV	乾式貯蔵キャスクの安全設計上想定される異常な事態が生じている状態をいう。	発生頻度が極めて低く，乾式貯蔵キャスクの寿命中に起こるとは考えられない事象によって引き起こされる状態をいうが，万一発生した場合の設計の妥当性を確保するために特に設けたものをいう。	
試験状態	耐圧試験によりキャスク容器に最高使用圧力を超える圧力が加えられている状態をいう。		・耐圧試験（製造時）

(JSME S FA1-2007 使用済燃料貯蔵施設規格 金属キャスク構造規格による)

表 1.1-3 (1) キャスク容器の設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せ

設計事象 \ 荷重時		圧力による荷重	自重による荷重	ボルト初期締付け力	運搬時荷重	吊上げ荷重	衝撃荷重 (基礎コンクリートへの衝突)	熱荷重	備考
設計条件	設計時	○ ¹⁾	○	○	○ ²⁾	○ ²⁾	○ ²⁾		
I	貯蔵時	○	○	○				○	
	運搬時	○	○ ³⁾	○	○			○	
	吊上げ時	○	○ ³⁾	○		○		○	
	搬出前作業及び燃料取出し作業時	○	○	○				○	
II	衝撃荷重作用時	○	○ ³⁾	○			○	○	
試験状態	試験時	○ ⁴⁾	○	○					

注 1) 最高使用圧力

注 2) 運搬時荷重、吊上げ荷重及び衝撃荷重は同時に作用しないので、最大荷重を用いて評価する。

注 3) 本状態での自重による荷重は、運搬時荷重、吊上げ荷重及び衝撃荷重に含まれる。

注 4) 最高使用圧力の 1.5 倍の圧力

表 1.1-3 (2) バスケットの設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せ

設計事象 \ 荷重時		自重による荷重	運搬時荷重	吊上げ荷重	衝撃荷重 (基礎コンクリートへの衝突)	熱荷重	備考
設計条件	設計時	○	○ ¹⁾	○ ¹⁾	○ ¹⁾		
I	貯蔵時	○				○	
	運搬時	○ ²⁾	○			○	
	吊上げ時	○ ²⁾		○		○	
II	衝撃荷重作用時	○ ²⁾			○	○	

注 1) 運搬時荷重、吊上げ荷重及び衝撃荷重は同時に作用しないので、最大荷重を用いて評価する。

注 2) 本状態での自重による荷重は、運搬時荷重、吊上げ荷重及び衝撃荷重に含まれる。

表 1.1-3 (3) トラニオンの設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せ

設計事象 \ 荷 重 荷重時		自重による荷重	運搬時荷重	吊上げ荷重	衝撃荷重 (基礎コンクリートへの衝突)	¹⁾ 熱荷重	備考
I	貯 蔵 時	○				○	
	運 搬 時	²⁾	○			○	
	吊 上 げ 時	²⁾		○		○	
II	衝撃荷重作用時	²⁾			○	○	

注 1) 乾式貯蔵キャスクにおける温度変化により生じる荷重をいう。ただし、キャスク容器の熱膨張により生じる荷重に限る。

注 2) 本状態での自重による荷重は、運搬時荷重、吊上げ荷重及び衝撃荷重に含まれる。

表 1.1-3 (4) 二次蓋の設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せ

設計事象 \ 荷 重 荷重時		圧力による荷重	ガスケットからの荷重	自重による荷重	運搬時荷重	吊上げ荷重	衝撃荷重 (基礎コンクリートへの衝突)	熱荷重	備考
I	貯蔵時	○	○	○					

表 1.1-3 (5) 支持架台の設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せ

設計事象 荷重時 荷 重		自重による荷重	運搬時荷重	吊上げ荷重	衝撃荷重 (基礎コンクリートへの衝突)	¹⁾ 熱荷重	備考
I	貯蔵時	○				○	

注 1) 乾式貯蔵キャスクにおける温度変化により生じる荷重をいう。ただし、キャスク容器の熱膨張により生じる荷重に限る。

④ 評価結果

既存評価の評価結果から規定を満足していることが確認されている。評価結果については参考資料に示す。

4) 本設備での評価

表 1.1-4(1)～(4)に本仮保管設備での荷重条件と既存評価との比較を示す。

なお、二次蓋については圧力による荷重等により評価されるが、既存評価と本仮置設備での評価でこれらの荷重条件に変更がないため、既存評価と差異はない。

以上から、本仮保管設備での荷重条件は既存評価における荷重条件に包絡されることから、本仮保管設備の乾式貯蔵キャスクの構造強度は規定を満たす。

表 1.1-4(1) 既存評価との荷重条件の比較 (キャスク容器)

キャスク仮保管設備									既存評価（1 F キャスク工認）		
設計 事象	代表 事象 ^{注1)}	包絡され る事象	荷重条件	評価結果	代表 事象	包絡される 事象	荷重条件	備考			
設計 条件	設計時	—	運搬時と 同じ	既存評価と同じ荷重 条件	設計時	—	運搬時と 同じ	設計時のうち、運搬時荷 重、吊上げ荷重及び衝撃荷 重の中で荷重条件が最も 厳しいのは運搬時荷重			
Ⅰ	貯蔵時	—	圧力、自重、 ボルト、熱	既存評価と同じ荷重 条件	貯蔵時	—	圧力、自重、 ボルト、熱	設計事象Ⅰのうち大半の 期間を占める代表的な事象			
	運搬時	・仮保管設 備内での吊 上げ	圧力、ボルト、 運搬 ^{注2)} 、熱	既存評価と同じ荷重 条件	運搬時	・取扱い時（原子 炉建屋内での吊 上げ） ・真空乾燥時 ・取扱い時（保管 建屋内での吊上 げ）	圧力、ボルト、 運搬 ^{注2)} 、熱	荷重条件が最も厳しいた め、代表事象は運搬時			
Ⅱ	基礎コン クリート への架台 付き衝突	—	圧力、ボルト、 衝撃、熱	「3.2 異常事象の評価」 の結果から、運搬時の 荷重条件に包絡 ^{注3)}	異常着床	—	圧力、ボルト、 熱、衝撃 ^{注4)}	—			
					キャスク支 持架台への 衝突 （保管建屋 内）	キャスク支持架台 への衝突（原子炉 建屋内）	圧力、ボルト、 熱、衝撃 ^{注4)}	板厚の薄い胴板が衝突す る保管建屋内での事象が 代表事象			
試験 状態	試験時	—	圧力 ^{注5)} 、 自重、ボルト	既存評価と同じ荷重 条件	試験時	—	圧力 ^{注5)} 、自 重、ボルト	—			

注1) 本事象について応力解析を行う。

注2) 運搬時の荷重は上方向 2G, 下方向 3G(自重を考慮), 前後方向 2G, 左右方向 1G

注3) 「3.2 異常事象の評価」の結果より衝撃荷重は中型乾式貯蔵キャスクで 2.75G, 大型乾式貯蔵キャスクで 2.63G となり, 運搬時の下方向

荷重 3G に包絡される。

注4) 衝撃荷重は 2G であり, 自重を含む。

注5) クラス 3 容器の試験圧力である最高使用圧力の 1.5 倍の圧力

表 1.1-4 (2) 既存評価との荷重条件の比較 (バスケット)

キャスク仮保管設備				既存評価（1Fキャスク工認）				
設計 事象	代表 事象 ^{注1)}	包絡され る事象	荷重条件	評価結果	代表 事象	包絡される 事象	荷重条件	備考
設計 条件	設計時	—	運搬時と 同じ	既存評価と同じ荷重 条件	設計時	—	運搬時と 同じ	設計時のうち、運搬時荷 重、吊上げ荷重及び衝撃荷 重の中で荷重条件が最も 厳しいのは運搬時荷重
	貯蔵時	—	自重，熱	既存評価と同じ荷重 条件	貯蔵時	—	自重，熱	設計事象Ⅰのうち大半の 期間を占める代表的な事象
Ⅰ	運搬時	・仮保管設 備内での吊 上げ	運搬 ^{注2)} ，熱	既存評価と同じ荷重 条件	運搬時	・取扱い時（原子 炉建屋内での吊 上げ） ・真空乾燥時 ・取扱い時（保管 建屋内での吊上 げ）	運搬 ^{注2)} ，熱	荷重条件が最も厳しいた め、代表事象は運搬時
	基礎コン クリート への架台 付き衝突	—	熱，衝撃	「3.2 異常事象の評価」 の結果から、運搬時の 荷重条件に包絡 ^{注3)}	異常着床 キャスク支 持架台への 衝突 （保管建屋 内）	— キャスク支持架台 への衝突（原子炉 建屋内）	熱，衝撃 ^{注4)}	板厚の薄い胴板が衝突す る保管建屋内での事象が 代表事象
Ⅱ								

注1) 本事象について応力解析を行う。

注2) 運搬時の荷重は上方向 2G, 下方向 3G (自重を考慮), 前後方向 2G, 左右方向 1G

注3) 「3.2 異常事象の評価」の結果より衝撃荷重は大型乾式貯蔵キャスクで 2.63G, 中型乾式貯蔵キャスクで 2.75G となり、運搬時の下方向
荷重 3G に包絡される。

注4) 衝撃荷重は 2G であり、自重を含む。

表 1.1-4(3) 既存評価との荷重条件の比較（トラニオン）

設計 事象	キャスク仮保管設備				既存評価（1Fキャスク工認）			備考
	代表 事象 ^{注1)}	包絡され る事象	荷重条件	評価結果	代表 事象	包絡される 事象	荷重条件	
I	貯蔵時	—	自重，熱	既存評価と同じ荷重 条件	貯蔵時	—	自重，熱	設計事象 I のうち大半の 期間を占める代表的事象
	運搬時	—	運搬 ^{注2)} ，熱	既存評価と同じ荷重 条件	運搬時	・取扱い時（原子 炉建屋内での吊 上げ） ・真空乾燥時 ・取扱い時（保管 建屋内での吊上 げ）	運搬 ^{注2)} ，熱	荷重条件が最も厳しい事 象
	吊上げ時	—	熱，吊上げ ^{注3)}	既存評価と同じ荷重 条件	吊上げ時	—	熱，吊上げ ^{注3)}	—
II	基礎コン クリート への架台 付き衝突	—	熱，衝撃	「3.2 異常事象の評価」 の結果から，運搬時の 荷重条件に包絡 ^{注4)}	異常着床	—	—	トラニオンに支持機能が 働かない状態
					キャスク支 持架台への 衝突 （保管建屋 内）	—	—	この荷重条件は運搬時に 包絡

注1) 本事象について応力解析を行う。

注2) 運搬時の荷重は上方向 2G，下方向 3G(自重を考慮)，前後方向 2G，左右方向 1G

注3) 吊上げ荷重は 1.32G であり，自重を含む。

注4) 「3.2 異常事象の評価」の結果より衝撃荷重は中型乾式貯蔵キャスクで 2.75G，大型乾式貯蔵キャスクで 2.63G となり，運搬時の下
方向荷重 3G に包絡される。

表 1.1-4(4) 既存評価との荷重条件の比較 (支持架台)

設計 事象	キャスク仮保管設備				既存評価（1 F キャスク工認）			
	代表 事象 ^{注1)}	包絡され る事象	荷重条件	評価結果	代表 事象	包絡される 事象	荷重条件	備考
I	貯蔵時	—	自重，熱	既存評価と同じ荷重 条件	貯蔵時	—	自重，熱	設計事象 I のうち大半の 期間を占める代表的事象

注1) 本事象について応力解析を行う。

参考資料

福島第一原子力発電所第 6 号機 工事計画認可申請書本文及び添付資料
福島第一原子力発電所第 4 号機 工事計画認可申請書本文及び添付資料
における応力計算結果の抜粋（地震時を除く）

1.1 キャスク容器(1/2)

部 位	材 料	設 計 事 象	一次一般膜応力強さ		一次局部膜応力強さ		一次膜＋ 一次曲げ応力強さ		(応力値の単位: N/mm ²) 一次＋二次応力強さ	
			計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力
胴 板	GLF1相当	設計時	7	120	17	181	19	181	—	—
		I, II	—	—	—	—	—	—	42	362
		試験時	8	162	5	244	11	244	—	—
一次蓋	GLF1相当	設計時	1	120	15	181	29	181	—	—
		I, II	—	—	—	—	—	—	29	362
		試験時	1	162	20	244	37	244	—	—
底 板	GLF1相当	設計時	3	120	8	181	9	181	—	—
		I, II	—	—	—	—	—	—	17	362
		試験時	3	162	6	244	12	244	—	—
貫通孔蓋板	SUS304	設計時	7	133	33	200	49	200	—	—
		I, II	—	—	—	—	—	—	58	401
		試験時	8	135	33	203	49	203	—	—
密封シール部	GLF1相当	設計時	16	120	—	—	17	181	—	—
		I, II	—	—	—	—	—	—	15	181
		試験時	10	162	—	—	10	181	10	181
ボス溶接部	SUS304L	設計時	19	56	—	—	19	84	—	—
		I, II	—	—	—	—	—	—	54	168
		試験時	1	57	—	—	1	85	—	—
ガンマ線遮へ い体取付けボ ルト溶接部	SUS304	設計時	9	60	—	—	9	90	—	—
		I, II	—	—	—	—	—	—	99	181
		試験時	3	67	—	—	3	101	—	—

キャスク容器 (2/2)			(応力値の単位: N/mm ²)			
部 位	材 料	設計事象	平均引張応力		平均引張応力 + 曲げ応力	
			計算値	許容応力	計算値	許容応力
一次蓋縮付けボルト	GBL1	設計時	89	216	—	—
		I, II	93	433	123	650
貫通孔蓋板縮付けボルト	GBL1	設計時	199	216	—	—
		I, II	234	433	306	650

許容応力は設計・建設規格による。

1.2 バスケット(1/2)

部 位	材 料	設 計 事 象	一次一般膜応力強さ		一次膜＋一次曲げ応力強さ		一次＋二次応力強さ	
			計算値	許容応力 ¹⁾	計算値	許容応力 ¹⁾	計算値	許容応力 ¹⁾
バスケット プレート	A6061P及 びB-A0	設計時	5	33	8	49	—	—
		I, II	—	—	—	—	11 9 ²⁾	99 — 49 ²⁾
バスケット サポート	SUS304	設計時	6	126	6	189	—	—
		I, II	—	—	—	—	6	378

バスケット(2/2)

部 位	材 料	設 計 事 象	一次一般膜応力強さ		一次膜＋一次曲げ応力強さ		一次膜＋二次膜応力強さ		(一次＋二次) 膜応力＋ 曲げ応力強さ	
			計算値	許容応力 ¹⁾	計算値	許容応力 ¹⁾	計算値	許容応力 ¹⁾	計算値	許容応力 ¹⁾
バスケットサ ポート取付け ボルト	SUS304	設計時	72	126	—	—	—	—	—	—
		I, II	—	—	—	—	77	125	77	166

注1) 設計・建設規格に基づく許容応力値を左側に、構造規格に基づく許容応力値を右側に示す。
注2) 応力強さのサイクルにおける応力の最大値を評価。

1.3 トラニオン(1/3)

トラニオン(1/3)															(応力値の単位: N/mm ²)			
部 位	材 料	設 計 事 象	一 次 応 力															
			引張応力		圧縮応力		せん断応力		曲げ応力		支圧応力		組合せ応力					
			計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力				
トラニオン	SUS630	I	10	390	10	389	88	225	188	390	37	732	242	390				

トラニオン(2/3)

トラニオン(2/3)											(応力値の単位: N/mm ²)			
部 位	材 料	設 計 事 象	一 次 + 二 次 応 力											
			引 張 ・ 圧 縮 応 力		せん断応力		曲 げ 応 力		支 圧 応 力					
			計 算 値	許 容 応 力	計 算 値	許 容 応 力	計 算 値	許 容 応 力	計 算 値	許 容 応 力				
トラニオン	SUS630	I	20	1172	99	676	188	1172	37	1098				

トラニオン(3/3)

トラニオン(3/3)								
部 位	材 料	設計事象	一次応力					
			引張応力		せん断応力		組合せ応力	
			計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力
トラニオン 締付けボルト	GBL1	I	233	324	85	249	275	324

許容応力は設計・建設規格による。

1.4 二次蓋

(厚さの単位:mm)

部位	材料	設計事象	設計厚さ	必要厚さ
平板	SUSF304	I	90.00	71.81
胴	SUSF304	I	57.00	3.05

許容応力は設計・建設規格による。

1.5 支持架台

(応力値の単位:N/mm²)

部位	材料	設計事象	一次応力 ¹⁾	
			計算値	許容応力
支持架台	炭素鋼 (SS400)	I	11	141

許容応力は設計・建設規格による。

注 1) 圧縮, 曲げ, せん断による組合せ応力

2.1 キャスク容器(1/2)

部 位	材 料	設 計 事 象	一次一般膜応力強さ		一次局部膜応力強さ		一次膜＋一次曲げ応力強さ		一次＋二次応力強さ	
			計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力
胴 板	GLF1相当	設計時	6	120	10	181	13	181	—	—
		I, II	—	—	—	—	—	—	36	362
一次 蓋	GLF1相当	試験時	7	162	4	244	10	244	—	—
		設計時	1	120	13	181	24	181	—	—
		I, II	—	—	—	—	—	—	24	362
		試験時	1	162	17	244	28	244	—	—
底 板	GLF1相当	設計時	2	120	12	181	14	181	—	—
		I, II	—	—	—	—	—	—	16	362
		試験時	3	162	5	244	9	244	—	—
		設計時	9	133	33	200	50	200	—	—
貫通孔蓋板	SUS304	I, II	—	—	—	—	—	—	58	401
		試験時	10	135	33	203	50	203	—	—
密封シール部	GLF1相当	設計時	16	120	—	—	17	181	—	—
		I, II	—	—	—	—	—	—	15	181
		試験時	9	162	—	—	9	181	9	181
		設計時	60	60	—	—	30	90	—	—
バスケットサポーター取付けボルト溶接部	SUS304	I, II	—	—	—	—	—	—	142	181
		試験時	4	67	—	—	4	101	—	—
ガンマ線遮蔽体取付けボルト溶接部	SUS304	設計時	9	60	—	—	9	90	—	—
		I, II	—	—	—	—	—	—	97	181
		試験時	3	67	—	—	3	101	—	—

キャスク容器(2/2)

部 位	材 料	設 計 事 象	平均引張応力		平均引張応力＋曲げ応力	
			計算値	許容応力	計算値	許容応力
一次蓋縮付けボルト	GBL1	設計時	84	216	—	—
		I, II	88	433	113	650
貫通孔蓋板縮付けボルト	GBL1	設計時	198	216	—	—
		I, II	230	433	299	650

許容応力は設計・建設規格による。

2.2 バスケット(1/2)

部 位	材 料	設計事象	一次一般膜応力強さ		一次膜＋一次曲げ応力強さ		一次＋二次応力強さ	
			計算値	許容応力 ¹⁾	計算値	許容応力 ¹⁾	計算値	許容応力 ¹⁾
バスケットプレート	A6061P及びB-A0	設計時	5	33	9	49	—	—
		I, II	—	—	—	—	9	99
バスケットサポート	SUS304	設計時	6	126	6	189	—	—
		I, II	—	—	—	—	6	378

バスケット(2/2)

部 位	材 料	設計事象	一次一般膜応力強さ		一次膜＋一次曲げ応力強さ		一次膜＋二次膜応力強さ		(一次＋二次) 膜応力＋曲げ応力強さ	
			計算値	許容応力 ¹⁾	計算値	許容応力 ¹⁾	計算値	許容応力 ¹⁾	計算値	許容応力 ¹⁾
バスケットサポート取付けボルト	SUS304	設計時	85	126	—	—	—	—	—	—
		I, II	—	—	—	—	89	125	89	166

注1) 設計・建設規格に基づく許容応力値を左側に、構造規格に基づく許容応力値を右側に示す。

注2) 応力強さのサイクルにおける応力の最大値を評価。

2.3 トラニオン(1/3)

トラニオン(1/3)													(応力値の単位: N/mm ²)			
部位	材料	設計事象	一次応力													
			引張応力		圧縮応力		せん断応力		曲げ応力		支圧応力		組合せ応力			
			計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力		
トラニオン	SUS630	I	9	390	9	389	74	225	157	390	37	732	202	390		

トラニオン(2/3)

トラニオン(2/3)											(応力値の単位: N/mm ²)	
部 位	材 料	設計事象	一 次 + 二 次 応 力									
			引張・圧縮応力		せん断応力		曲げ応力		支圧応力			
			計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力		
トラニオン	SUS630	I	17	1172	83	676	157	1172	37	1098		

トラニオン(3/3)

トラニオン(3/3)										
部 位	材 料	設計事象	一次応力							
			引張応力		せん断応力		組合せ応力			
			計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力
トラニオン 縮付けボルト	GBL1	I	194	324	71	249		230	324	

許容応力は設計・建設規格による。

2.4 二次蓋

(厚さの単位:mm)				
部位	材料	設計事象	設計厚さ	必要厚さ
平板	SUSF304	I	90.00	64.18
胴	SUSF304	I	57.00	3.00

許容応力は設計・建設規格による。

2.5 支持架台

(応力値の単位:N/mm ²)				
部位	材料	設計事象	一次応力 ¹⁾	
			計算値	許容応力
支持架台	炭素鋼 (SS400)	I	9	141

許容応力は設計・建設規格による。

注 1) 圧縮、曲げ、せん断による組合せ応力

構造強度計算に用いるコード (ABAQUS) について

(1) 概要

ABAQUS コードは米国 Hibbitt, Karlsson&Sorensen, Ins. (HKS 社)で開発された有限要素法に基づく応力・座屈解析等の汎用解析コードであり、輸送キャスクの応力解析等に広く利用されている。

(2) 機能

ABAQUS コードは、応力解析に際して以下の機能を有している。

- ① 定常、非定常の弾性、非弾性のいずれの解も得ることができる。
- ② 材料特性として時間依存、歪の履歴依存及びに等方性・異方性等を考慮することができる。
- ③ モデルの形状は一次元～三次元、又は連続体についても取り扱うことができる。
- ④ 伝熱解析結果をそのまま境界条件として熱応力解析に用いることが可能である。
- ⑤ 荷重条件として集中荷重、分布荷重、モーメント、加速度力（慣性力）、圧力、遠心力及びコリオリ力等が取り扱える。また、これらの条件の時間依存、線形変化に対しても対応可能である。

(3) 解析フロー

ABAQUS コードの解析フローを図 1.1-3 に示す。

(4) 使用実績

ABAQUS コードは、これまで多くの応力解析に対し使用実績がある。

(5) 検証方法

理論値との比較による検証が実施されていることを確認している。

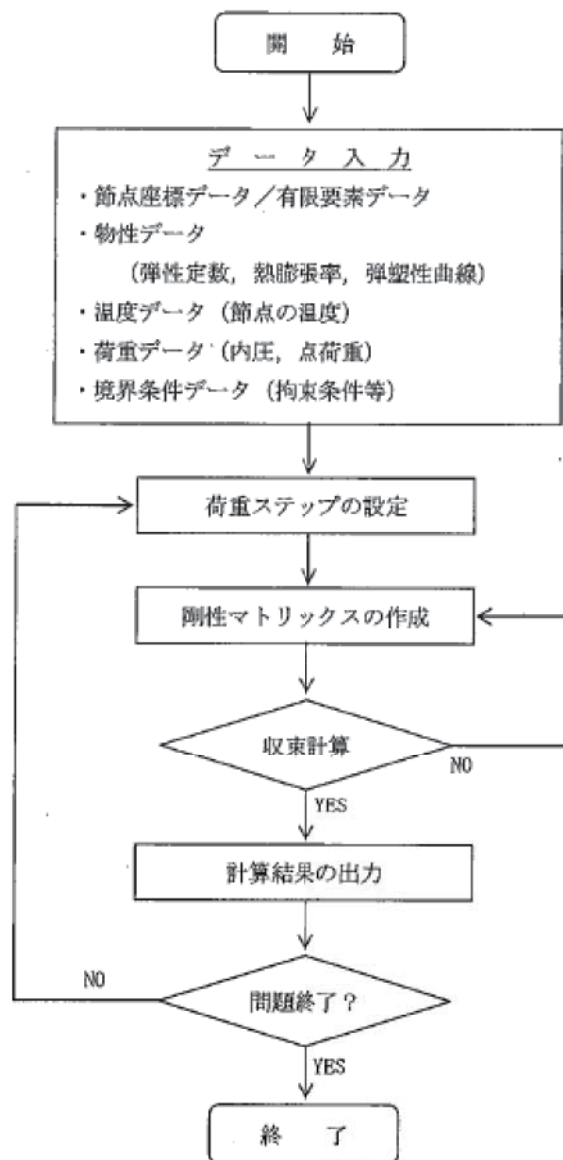


図 1.1-3 ABAQUS コードの応力解析フロー図

(2) 輸送貯蔵兼用キャスク A

輸送貯蔵兼用キャスク A については今後評価結果を記載する。

(3) 輸送貯蔵兼用キャスク B

1) 評価方針

本設備で保管する輸送貯蔵兼用キャスク B は、既存設計のものを使用する。従って、輸送貯蔵兼用キャスク B の構造評価は、基本的に既存評価の結果を基に評価し、既存評価の結果を参考とできない内容については新たに評価を実施し、本設置場所での保管に適合していることを確認する。

2) 主な構成部材と適用基準

① 主な構成部材

輸送貯蔵兼用キャスクの構造強度設計は、要求される安全機能を維持するため、次の構成部材について評価する。

A. キャスク容器

輸送貯蔵兼用キャスク B のうち、放射性物質を閉じ込めるための圧力バウンダリを構成するものであって、胴、底板、一次蓋、一次蓋締付けボルト、カバープレート及びカバープレート締付けボルトをいう。

B. バスケット

輸送貯蔵兼用キャスク B の容器内に配置され、使用済燃料を収納し、かつ燃料間距離を保つことにより、燃料の支持機能及び臨界防止機能を併せ持つものであって、バスケットプレートをいう。

バスケットの応力解析は、バスケットプレートについて行っている。

C. トラニオン

輸送貯蔵兼用キャスク B の取扱い及び仮保管時の支持のため、吊上げ及び固定に使用されるものであって、トラニオンをいう。

トラニオンについて応力解析を行っている。

D. 二次蓋

輸送貯蔵兼用キャスク B の密封監視のための圧力空間を保持するための部材であると同時に、一次蓋と二次蓋で多重の閉じ込め構造を形成し、一次蓋と同等の閉じ込め性能を要求される部材である。

② 適用基準と規格

輸送貯蔵兼用キャスク B の構造強度設計には「使用済燃料貯蔵施設規格金属キャスク構造規格 (JSME S FA1-2007)」を適用する。

3) 既存設計における構造強度評価方法

輸送貯蔵兼用キャスク B の強度評価にあたり、既存設計における評価方法を示す。

① 設計条件

輸送貯蔵兼用キャスクBの構造評価にあたっての荷重を以下に示す。

A. 圧力による荷重

輸送貯蔵兼用キャスクB各部の内面及び外面が受ける最高使用圧力、取扱い時及び貯蔵時に受ける圧力並びに試験圧力による荷重をいう。

既存評価における輸送貯蔵兼用キャスクBの最高使用圧力を以下に示す。

キャスク容器：1.0 MPa

二次蓋：0.4 MPa

B. 機械的荷重

自重、衝撃荷重及びその他の付加荷重をいう。機械的荷重の主なものは以下の通りである。

a. 自重による荷重

b. ボルト締付け力

c. 吊上げ荷重

d. 衝撃荷重

C. 熱荷重

輸送貯蔵兼用キャスクBに生じる温度変化、温度こう配による荷重であって、熱解析の結果から得られるものをいう。

既存評価書における各構造部材の最高使用温度を以下に示す。

キャスク容器：150℃

バスケット：260℃

トラニオン：130℃

二次蓋：110℃

② 評価方法

輸送貯蔵兼用キャスクBの構造解析フローを図1.1-4に、主な構造部材の応力評価箇所を図1.1-5(1)、(2)に示す。

A. キャスク容器

キャスク容器の胴、底板及び蓋部等の構造強度は、想定される圧力荷重、機械的荷重、熱荷重をもとに、キャスク容器及び二次蓋の実形状をモデル化し、構造解析コードABAQUSを用いて、胴、底板、一次蓋及び一次蓋締付けボルト等の応力評価を行う。

ABAQUSによる解析は、圧力荷重、機械的荷重及び熱荷重によって生じる形状の不連続の効果を含み応力の解析及び温度分布計算に使用する。

B. バスケット

バスケットの構造強度評価は、想定される機械的荷重、熱荷重をもとに応力評価式を用いて応力評価を行う。

C. トラニオン

トラニオンの構造強度評価は想定される機械的荷重及び熱荷重を基に，応力評価式を用いて評価を行う。

D. 二次蓋

二次蓋の構造強度評価は，キャスク容器の構造強度評価と同時に構造解析コードABAQUSにより計算し，二次蓋及び二次蓋締付けボルトの応力評価を行う。

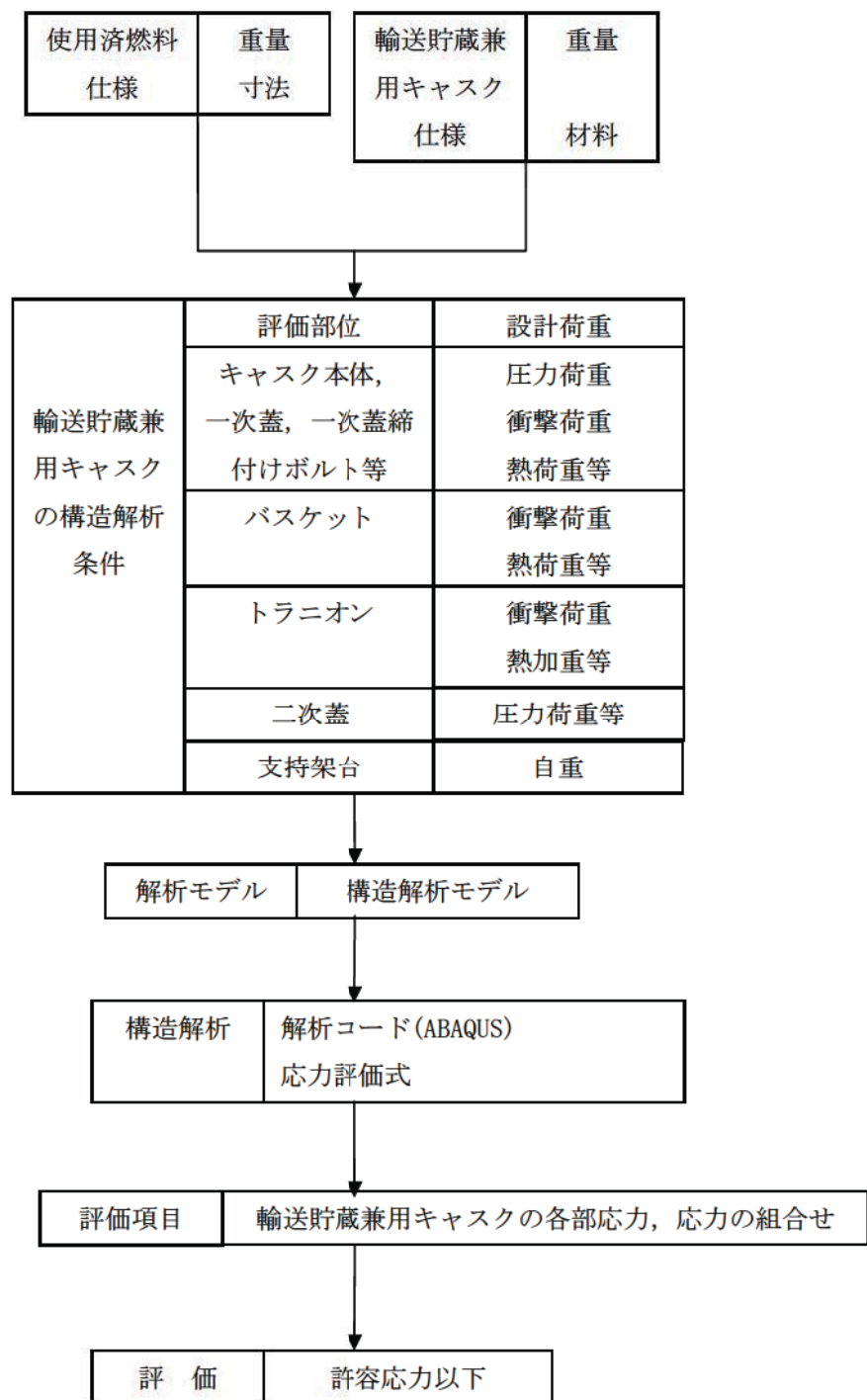


図 1. 1-4 輸送貯蔵兼用キャスク B の構造強度評価フロー

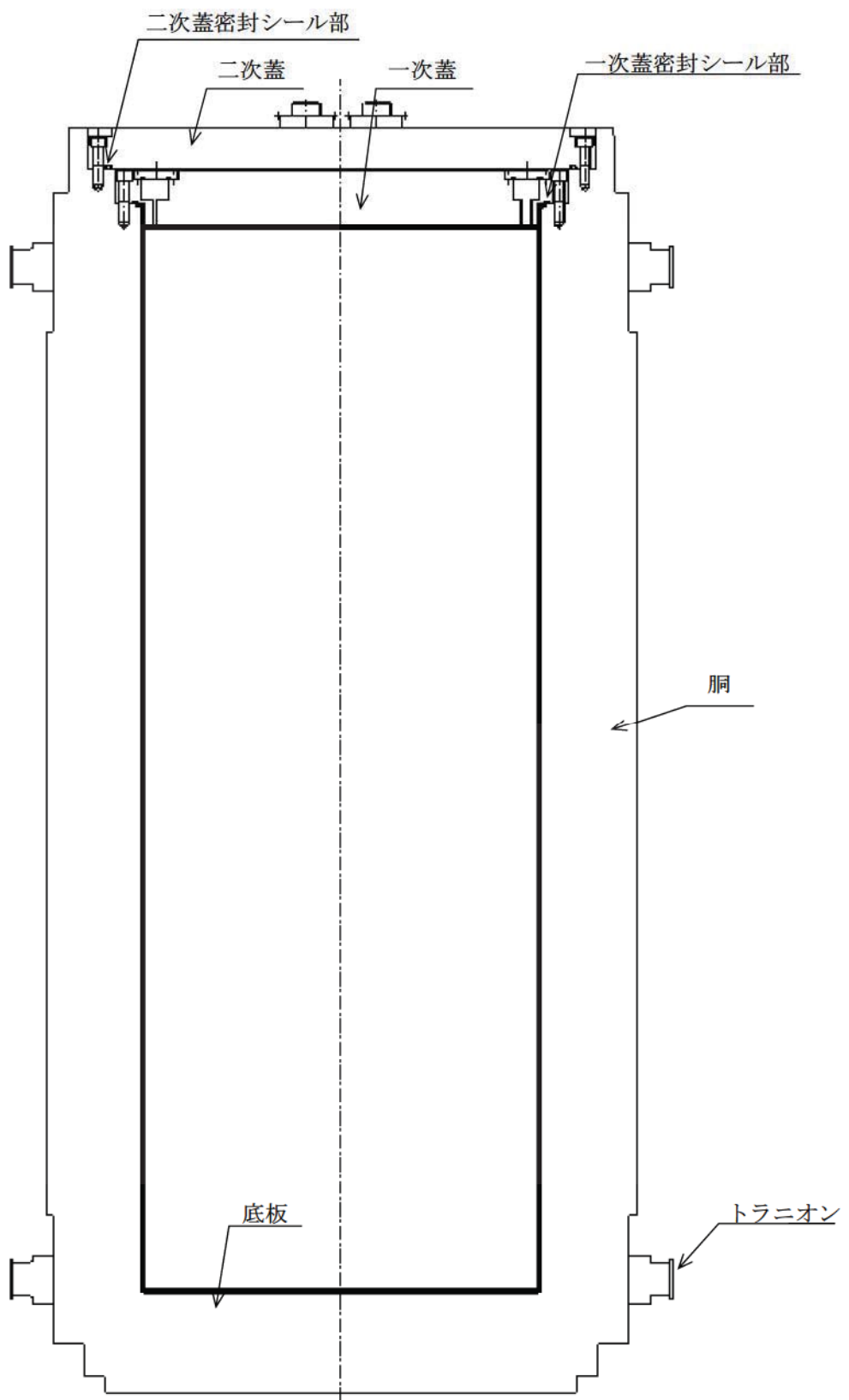


図 1.1-5(1) キャスク容器の応力評価箇所（全体断面図）

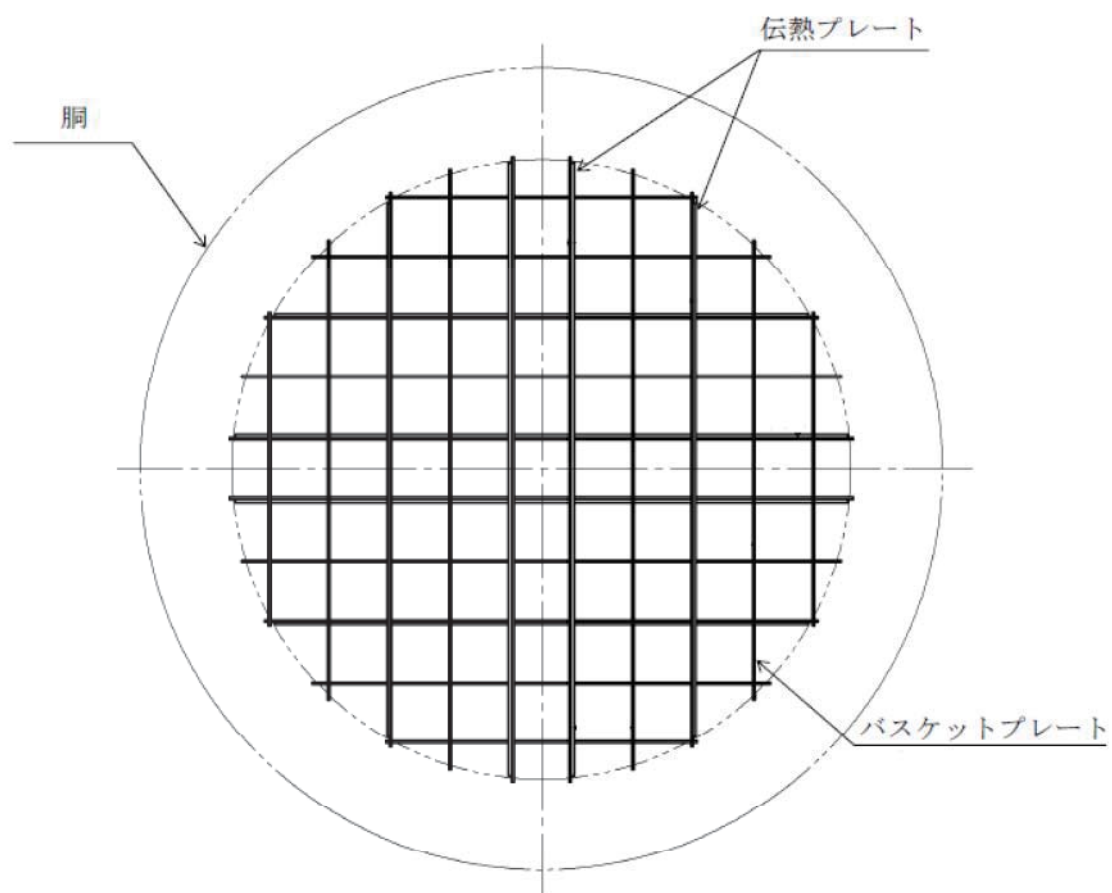


図 1.1-5(2) バスケットの応力評価箇所

③ 設計事象と荷重の組合せ

既存評価書における輸送貯蔵兼用キャスクBの設計事象と選定事象を表 1.1-5 に示す。

設計事象Ⅰ及びⅡにおける選定事象は以下のとおりである。

[設計事象Ⅰ]

- ・ 貯蔵時
- ・ 吊上げ，吊下げ，移動

[設計事象Ⅱ]

- ・ 支持脚への衝突
- ・ 貯蔵架台への衝突

また，各設計事象においてキャスク容器及び二次蓋，バスケット，トラニオンの設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せを表 1.1-6(1)～(3)に示す。（地震時を除く）

表 1.1-5 既存評価書における輸送貯蔵兼用キャスク B の設計事象

設計 事象	定義	解説	選定事象
I	輸送貯蔵兼用キャスクの通常の取扱い時及び運搬時の状態をいう。	輸送貯蔵兼用キャスクの計画的な取扱い状態。	・貯蔵 ・吊上げ，吊下げ，移動
II	設計事象 I，設計事象 III，設計事象 IV 及び試験状態以外の状態をいう。	輸送貯蔵兼用キャスクの寿命程度の期間中に予想される取扱い機器の単一故障，単一誤動作等の事象によって，輸送貯蔵兼用キャスクが通常取扱い状態から外れるような状態をいう。	・支持脚への衝突 ・貯蔵架台への衝突
III	輸送貯蔵兼用キャスク又はその取扱い機器等の故障，異常な作動等により，計画された取扱いの停止が緊急に必要とされる状態をいう。	発生頻度が十分低い事象によって引き起こされる状態をいう。すなわち，設計事象 II でいう機器の単一故障，運転員の単一誤操作等によって引き起こされるもののうち，その発生頻度が十分に低いと考えられるものを分類する。	
IV	輸送貯蔵兼用キャスクの安全設計上想定される異常な事態が生じている状態をいう。	発生頻度が極めて低く，輸送貯蔵兼用キャスクの寿命中に起こるとは考えられない事象によって引き起こされる状態をいうが，万一発生した場合の設計の妥当性を確保するために特に設けたものをいう。	
試験 状態	耐圧試験により，キャスク容器に最高使用圧力を超える圧力が加えられている状態をいう。		・耐圧試験 (製造時)

表 1.1-6(1) キャスク容器及び二次蓋の設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せ

設計事象 供用状態 評価事象 荷 重			圧力による荷重	自重による荷重	ボルト初期締付け力	吊上げ荷重	衝撃荷重	熱荷重
設計条件	設計条件	設計時 ^{注1)}	○	— ^{注4)}	○	○	○	—
I	A ^{注2)}	通常貯蔵時	○	○	○	—	—	○
		吊上げ時	○	— ^{注4)}	○	○	—	○
II	B ^{注2)}	衝撃荷重作用時	○	— ^{注4)}	○	—	○	○
試験状態	試験状態	試験時	○ ^{注3)}	○	○	—	—	—

注1) 最高使用圧力に対する評価条件で，供用状態A及びBの一次応力評価を代表する事象

注2) 評価事象の中で，他の評価事象に包絡される事象や荷重条件については評価を省略する。

注3) 耐圧試験圧力（最高使用圧力により定められる圧力）とする。

注4) 本状態での自重による荷重は，衝撃荷重又は吊上げ荷重の慣性力による荷重に含まれる。

表 1.1-6(2) バスケットの設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せ

設計事象 供用状態 荷重 評価事象			自重による荷重	吊上げ荷重	衝撃荷重	熱荷重
設計条件	設計条件	設計時 ^{注1)}	— 注2)	○	○	—
I	A	貯蔵時	○	—	—	○
		吊上げ時	— 注2)	○	—	○
II	B	衝撃荷重作用時	— 注2)	—	○	○

注 1) 供用状態 A 及び B の一次応力評価を代表する事象

注 2) 本状態での自重による荷重は、衝撃荷重又は吊上げ荷重の慣性力による荷重に含まれる。

表 1.1-6(3) トラニオンの設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せ

設計事象 供用状態 荷重 評価事象			自重による荷重	固縛荷重	吊上げ荷重	衝撃荷重	熱荷重 ^{注1)}
I	A	貯蔵時	○	○	—	—	○
		吊上げ時	— 注2)	—	○	—	○
II	B	衝撃荷重作用時	— 注2)	—	—	○	○

注 1) キャスク容器の熱膨張により生じる応力に限る。

注 2) 本状態での自重による荷重は、衝撃荷重又は吊上げ荷重の慣性力による荷重に含まれる。

④ 評価結果

既存評価の評価結果から規定を満足していることが確認されている。

4) 本設備での構造評価

表 1.1-7(1)～(3)に本仮保管設備での荷重条件と既存評価との比較を示す。このことから以下のことが言える。

- ①キャスク容器（二次蓋含む）の設計条件，運搬時（設計事象Ⅰ），搬送台車架台への衝突時（設計事象Ⅱ）の評価加速度は既存評価書で包絡される。吊上げ時（設計事象Ⅰ）の評価加速度は後述の 5)で行う「支持架台への衝突時（設計事象Ⅱ）」の解析で用いる加速度に包絡される。
- ②バスケットの設計条件，運搬時（設計事象Ⅰ），搬送台車架台への衝突時（設計事象Ⅱ）の評価加速度は既存評価書で包絡される。吊上げ時（設計事象Ⅰ）の評価加速度は後述の 5)で行う「支持架台への衝突時（設計事象Ⅱ）」の解析で用いる加速度に包絡される。
- ③トラニオンの運搬時（設計事象Ⅰ），搬送台車架台への衝突時（設計事象Ⅱ）の評価加速度は既存評価書で包絡される。吊上げ時（設計事象Ⅰ）の評価加速度は後述の 5)で行う「支持架台への衝突時（設計事象Ⅱ）」の解析で用いる加速度に包絡される。

以上の包絡性の説明及び本設備において最も厳しい荷重条件として，「支持架台への衝突（設計事象Ⅱ）」について応力解析を実施する。評価対象は，キャスク容器，二次蓋，バスケット及びトラニオンの各部とする。

なお，キャスク容器（二次蓋含む）の設計条件（最高使用圧力），試験状態及びトラニオンの吊り上げ時の荷重条件は既存評価書により包絡する。

表 1.1-7(1) 既存評価との比較と評価方法（キャスク容器及び二次蓋）

設計 事象	キャスク仮保管設備				参考（既存評価書）			
	代表事象	包絡される 事象	荷重条件	本設備での評価方法（包絡性含む）	代表 事象	包絡され る事象	荷重条件	備考
設計 条件	設計条件	—	圧力 ^{注1)} ， ボルト， 衝撃 ^{注2)}	・最高使用圧力における縦姿勢における 衝撃荷重負荷時の評価は既存評価書で 包絡する。 ○（既存評価書で包絡）	設計時	—	圧力 ^{注1)} ， ボルト， 衝撃 ^{注3)}	設計事象Ⅰ及びⅡの 中で荷重条件が最も 厳しいのは貯蔵架台 への衝突時
	吊上げ時	貯蔵時	圧力，ボルト， 吊上げ ^{注4)} ，熱	荷重条件、支持条件が同じ「キャスク支 持架台への衝突（設計事象Ⅱ）」の評価 で包絡する。 ○（設計事象Ⅱで包絡）	貯蔵時	—	圧力，ボルト，自重， 熱	設計事象Ⅰのうち大 半の期間を占める代 表的な事象
Ⅰ					吊上げ時	—	圧力，ボルト，吊上げ ^{注5)} ，熱	荷重条件が最も厳し いのは吊上げ時
	運搬時	—	圧力，ボルト， 熱，運搬 ^{注6)}	核燃料輸送物設計承認申請書のうち、一 般の試験条件 0.3m 落下に包絡する。 ○（既存評価書で包絡）	一般の試験 条件 0.3m 頭 部垂直落下	—	圧力，ボルト，熱，落 下時荷重 ^{注7)}	—
					一般の試験 条件 0.3m 底 部垂直落下	—	圧力，ボルト，熱，落 下時荷重 ^{注7)}	—
					一般の試験 条件 0.3m 水平落下	—	圧力，ボルト，熱，落 下時荷重 ^{注7)}	—

表 1.1-7(1) 既存評価との比較と評価方法（キャスク容器及び二次蓋）

設計 事象	キャスク仮保管設備				参考（既存評価書）			
	代表事象	包絡される 事象	荷重条件	本設備での評価方法（包絡性含む）	代表 事象	包絡され る事象	荷重条件	備考
Ⅱ	支持架台への衝突時	輸送架台への衝突時	圧力，ボルト， 衝撃 ^{注8)} ，熱	他事象の包絡及び本設備の設計事象Ⅰ及びⅡにおける最も厳しい荷重条件として解析評価する。 ◎（応力解析を実施）	—	—	—	—
	搬送台車架台への衝突時	—	圧力，ボルト， 衝撃 ^{注2)} ，熱	既存評価における「支持脚への衝突時」と同じ荷重条件 ○（既存評価書で包絡）	支持脚への衝突時	—	圧力，ボルト， 衝撃 ^{注9)} ，熱	—
	試験時	—	圧力 ^{注9)} ， 自重，ボルト	既存評価と同じ荷重条件 ○（既存評価書で包絡）	貯蔵架台への衝突時	—	圧力，ボルト， 衝撃 ^{注3)} ，熱	荷重条件が最も厳しいのは、貯蔵架台への衝突時
試験 状態					試験時	—	圧力 ^{注10)} ， 自重，ボルト	—

◎：解析を実施。○：既存評価又は他の評価事象で包絡

注 1) キャスク容器内圧は最高使用圧力。

注 2) 衝撃荷重は縦姿勢下方向 2.33G であり，自重を含む。

注 3) 衝撃荷重は縦姿勢下方向 5G であり，自重を含む。

注 4) 吊上げ荷重は横姿勢下方向 1.32G であり，自重を含む。

注 5) 吊上げ荷重は縦姿勢下方向 1.3G であり，自重を含む。

注 6) 運搬時荷重は上方向 2G，下方向 3G（自重を含む），前後方向 2G，左右方向 1G である。

注 7) 頭部垂直落下荷重は 30.0G，底部垂直落下荷重は 30.0G，水平落下荷重は 20.0G である。

注 8) 衝撃荷重は横姿勢下方向 3G であり，自重を含む。

注 9) 衝撃荷重は縦姿勢下方向 2.5G であり，自重を含む。

注 10) 最高使用圧力の 1.25 倍の圧力。

表 1.1-7(2) 既存評価の比較と評価方法 (バスケット)

設計 事象	キャスク仮保管設備				参考（既存評価書）			
	代表事象	包絡される 事象	荷重条件	本設備での評価方法（包絡性含む）	代表 事象	包絡される 事象	荷重条件	備考
設計 条件	設計条件	—	衝撃 ^{注1)}	・縦姿勢における衝撃荷重負荷時の一次応力に対する評価は既存評価書の「貯蔵架台への衝突時（設計事象Ⅱ）」で包絡する。 ○（既存評価書で包絡）	設計時	—	衝撃 ^{注2)}	—
	吊上げ時	貯蔵時	吊上げ ^{注3)} ， 熱	荷重条件，支持条件が同じ「キャスク支持架台への衝突（設計事象Ⅱ）」の評価で包絡する。 ○（設計事象Ⅱで包絡）	貯蔵架台への衝突時の衝突時	・貯蔵時 ・吊上げ時	衝撃 ^{注2)} ，熱	設計事象Ⅱの条件に包絡される
Ⅰ	運搬時	—	圧力，ボルト， 熱，運搬 ^{注4)}	核燃料輸送物設計承認申請書のうち，一般の試験条件 0.3m 落下に包絡する。 ○（既存評価書で包絡）	一般の試験条件 0.3m 頭部垂直落下	—	圧力，ボルト，熱，落下時荷重 ^{注5)}	—
					一般の試験条件 0.3m 底部垂直落下	—	圧力，ボルト，熱，落下時荷重 ^{注5)}	—
					一般の試験条件 0.3m 水平落下	—	圧力，ボルト，熱，落下時荷重 ^{注5)}	—

表 1.1-7(2) 既存評価の比較と評価方法 (バスケット)

設計 事象	キャスク仮保管設備				参考 (既存評価書)			
	代表事象	包絡される 事象	荷重条件	本設備での評価方法 (包絡性含む)	代表 事象	包絡される 事象	荷重条件	備考
II	支持架台への 衝突時 ^{注6)}	輸送架台への 衝突時	衝撃 ^{注7)} , 熱	他事象の包絡及び本設備の設計事 象 I 及び II における最も厳しい荷 重条件として評価する。 ◎ (応力解析を実施)	—	—	—	—
	搬送台車架台 への衝突時	—	衝撃 ^{注1)} , 熱	既存評価と同じ荷重条件 ○ (既存評価書で包絡)	貯蔵架台への 衝突時	・支持脚への 衝突時	衝撃 ^{注2)} , 熱	—

◎：解析を実施。 ○：既存評価又は他の評価事象で包絡

注 1) 衝撃荷重は縦姿勢下方向 2.33G であり、自重を含む。

注 2) 衝撃荷重は縦姿勢下方向 5G であり、自重を含む。

注 3) 吊上げ荷重は横姿勢下方向 1.32G であり、自重を含む。

注 4) 運搬時荷重は上方向 2G, 下方向 3G(自重を含む), 前後方向 2G, 左右方向 1G である。

注 5) 頭部垂直落下荷重は 30.0G, 底部垂直落下荷重は 30.0G, 水平落下荷重は 20.0G である。

注 6) 長期荷重(自重)に対する評価を含む。

注 7) 衝撃荷重は横姿勢下方向 3G であり、自重を含む。

表 1.1-7(3) 既存評価の比較と評価方法（トラニオン）

設計 事象	キャスク仮保管設備				参考（既存評価書）			
	代表事象	包絡される 事象	荷重条件	本設備での評価方法（包絡性含む）	代表 事象	包絡される 事象	荷重条件	備考
I	吊上げ時	貯蔵時	吊上げ ^{注1)} ，熱	荷重条件、支持条件が同じ「キャスク支持架台への衝突（設計事象Ⅱ）」の評価で包絡する。 ○（設計事象Ⅱで包絡）	貯蔵時	—	自重，ボルト，熱	—
	運搬時	—	運搬 ^{注3)} ，熱	核燃料輸送物設計承認申請書のうち、通常の輸送条件に包絡される。 ○（既存評価書で包絡）	吊上げ時	—	吊上げ ^{注2)} ，熱	荷重条件が最も厳しいため、代表事象を吊上げ時とする。
	支持架台への衝突時	輸送架台への衝突時	衝撃 ^{注4)} ，熱	本設備の設計事象Ⅱにおける最も厳しい荷重条件として評価する。 ◎（応力解析を実施）	運搬時	—	運搬 ^{注3)} ，熱	—
II	搬送台車架台への衝突時	—	衝撃 ^{注5)} ，熱	既存評価と同じ荷重条件 ○（既存評価書で包絡）	支持脚への衝突時	・貯蔵架台への衝突	衝撃 ^{注6)} ，熱	荷重条件が最も厳しいため、代表事象を支持脚への衝突時とする。

◎：解析を実施。○：既存評価又は他の評価事象で包絡

注 1) 吊上げ荷重は横姿勢下方向 1.32G であり，自重を含む

注 2) 縦姿勢下方向 1.3G であり，自重を含む。

注 3) 運搬時荷重は上方向 2G，下方向 3G(自重を含む)，前後方向 2G，左右方向 1G である。

注 4) 横姿勢下方向 3G であり，自重を含む。

注 5) 衝撃荷重は縦姿勢下方向 2.33G であり，自重を含む。

注 6) 衝撃荷重は縦姿勢下方向 2.5G であり，自重を含む。

5) 支持架台への衝突時の評価（設計事象Ⅱ）

以下に支持架台への衝突時の応力解析結果を示す。

① 計算条件

A. 解析事象

「支持架台の衝突時」

キャスクの支持架台への設置に作業員の誤操作によりクレーンの下降速度でトラニオンがトラニオン受台に着床する事象をいう。着床時の衝突荷重（加速度：自重を含む）は、「3.2 異常事象の評価」での評価に余裕をみて 3G とする。

B. 最高使用温度

各機器の最高使用圧力及び最高使用温度は添付資料－4「1.1. 乾式キャスクの除熱機能（3）輸送貯蔵兼用キャスク B の除熱機能」の解析結果に基づき、以下とする。

表 1.1-8 最高使用圧力及び最高使用温度

キャスク容器	最高使用圧力	1.0 MPa
	最高使用温度	150 ℃
二次蓋	最高使用圧力	0.4 MPa
	最高使用温度	110 ℃
バスケット	最高使用温度	260 ℃
トラニオン	最高使用温度	130 ℃

② 解析方法

A. 解析手順概要

a. キャスク容器及び二次蓋

キャスク容器の応力解析は、想定される圧力荷重、機械的荷重及び熱荷重を基に、キャスク容器の実形状をモデル化し、解析コードである ABAQUS を用いて行う。

なお、二次蓋についてもキャスク容器と同様に評価を行う。

b. バスケット

バスケットの応力解析は、想定される機械的荷重及び熱荷重を基に、応力評価式を用いて行う。

c. トラニオン

トラニオンの応力解析は、想定される機械的荷重及び熱荷重を基に応力評価式を用いて行う。

B. 応力評価式による応力評価

a. バスケット

(イ) 一次一般膜応力

最大応力が発生するのはバスケットプレート端部である。鉛直方向加速度により発生する一次一般膜応力(σ_x)は、次式で計算する。

$$\sigma_x = \frac{m_A \cdot G_1}{A_1} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 m_A : 評価対象バスケットプレートとこれに接する使用済燃料等の合計質量(kg)

G_1 : 鉛直方向加速度(G)

A_1 : バスケットプレートの断面積(mm²)

(ロ) 一次一般膜＋一次曲げ応力

最大応力が発生するのはバスケットプレート格子端部である。鉛直方向加速度により発生する一次曲げ応力(σ_y)は、次式で計算する。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_y &= \frac{M}{Z} \\ M &= \frac{m_B \cdot G_1 \cdot l_p}{12 \cdot \frac{l_w}{2}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 M : バスケットプレート格子端部の単位幅当たりの曲げモーメント(N・mm/mm)

Z : バスケットプレートの単位幅当たりの断面係数(mm³/mm)

m_B : 評価対象バスケットプレートとこれに接する伝熱プレート、使用済燃料等の合計質量(kg)

l_p : バスケットプレート内のり(mm)

l_w : バスケットプレートのキャスク容器軸方向長さ(mm)

G_1 : 鉛直方向加速度(G)

鉛直方向加速度により発生するバスケットプレートの格子端部に発生する平均せん断応力(τ_{xy})は次式で計算する。

$$\tau_{xy} = \frac{m_B \cdot G_1}{2 \cdot \frac{A_1}{2}} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 G_1 : 鉛直方向加速度(G)

A_1 : バスケットプレートの断面積(mm²)

(ハ)一次+二次応力

最大応力が発生するのはバスケットプレート格子端部である。支持架台への衝突により発生する一次+二次応力は(1)～(3)式で計算する。

(ニ)平均せん断応力

バスケットプレート格子端部に発生する平均せん断応力(σ_s)は(3)式で計算する。

(ホ)平均支圧応力

バスケットプレート端部に発生する平均支圧応力(σ_p)は(1)式で計算する。

(ヘ)圧縮応力

バスケットプレート端部に発生する圧縮応力(σ_c)は(1)式で計算する。

b. トラニオン

イ. 一次応力

(イ) せん断応力

最大応力が発生する箇所は図 1. 1-5(1)に示す下部トラニオンである。衝撃荷重により発生するせん断応力 (τ) は、次式で計算する。

$$\left. \begin{aligned} \tau &= \frac{F_m}{A} \\ F_m &= \frac{m}{4} \cdot G_2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 F_m : 支持架台への衝突時においてトラニオンに作用する荷重 (N)

m : 金属キャスクの質量 (kg)

A : 評価点の断面積 (mm^2)

G_2 : 鉛直方向加速度 (G)

(ロ) 曲げ応力

最大応力が発生する箇所は図 1. 1-5(1)に示す下部トラニオンである。衝撃荷重により発生する曲げ応力 (σ_b) は、次式で計算する。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_b &= \frac{M}{Z} \\ M &= F_m \cdot L \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 M : 曲げモーメント (N・mm)

Z : 評価点の断面係数 (mm^3)

L : 評価点と荷重作用位置との距離 (mm)

F_m : (1) 式と同じ

(ハ) 組合せ応力

最大応力が発生する箇所は図 1.1-5(1)に示す下部トラニオンである。

せん断応力 (τ) と曲げ応力 (σ_b) との組合せ応力 (σ_T) は、次式で計算する。

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma_b^2 + 3 \cdot \tau^2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、τ : (1) 式と同じ

σ_b : (2) 式と同じ

ただし、Z : 評価点の断面係数 (mm³)

L : 評価点と荷重作用位置との距離 (mm)

ロ. 一次＋二次応力

キャスク容器の熱膨張による応力は無視できるので、トラニオンに発生する一次＋二次応力は、イ.と同様である。

C. 解析結果

表 1.1-9 に支持架台への衝突時の主な応力評価結果を示す。

支持架台への衝突時において輸送貯蔵兼用キャスク B は金属キャスク構造規格に定められた許容応力を満足している。

表 1.1-9 支持架台の衝突時の応力評価結果

(単位 : MPa)

評価部位	部位	計算値	許容応力
キャスク容器	胴	34	366
	底板	38	366
	一次蓋	56	366
	一次蓋密封シール部	58	183
	一次蓋締付けボルト	336	831
二次蓋	二次蓋	34	474
	二次蓋密封シール部	37	183
	二次蓋締付けボルト	279	847
バスケット	バスケットプレート	12	219
トラニオン	トラニオン	133	394

6) 評価結果

5)に示したとおり、「支持架台への衝突時」（設計事象Ⅱ）において輸送貯蔵兼用キャスク B の各評価部位（キャスク容器、二次蓋、バスケット、トラニオン）は金属キャスク構造規格に定められた許容応力を満足する。

従って、表 1.1-7 に示す「支持架台の衝突時」で包絡する各設計事象は、いずれも輸送貯蔵兼用キャスクの構造強度の規定を満足し、輸送貯蔵兼用キャスク B は、本設備で要求される構造強度を有している。

(4) 輸送貯蔵兼用キャスク用支持架台

1) 評価方針

本設備で使用する輸送貯蔵兼用キャスク用支持架台の構造評価について記載する。

輸送貯蔵兼用キャスク用支持架台は新設計であるため、新たに評価を実施し、本設置場所での保管に適合していることを確認する。なお、輸送貯蔵兼用キャスク A については今後評価結果を記載する。

2) 主な構成部材と適用基準

① 主な構成部材

輸送貯蔵兼用キャスク用支持架台は鋼製支持架台、埋め込み金物、基礎ボルト、コンクリート支持架台により構成される。

② 適用基準

輸送貯蔵兼用キャスク用支持架台は原子力発電所耐震設計技術規程[JEAC4601-2008]及び、発電用原子力設備規格 設計・建設規格 2005 年版 (2007 年追補版含む)[JSME S NC1-2005/2007]を適用する。

3) 構造強度の評価方法

輸送貯蔵兼用キャスク用支持架台の強度評価における評価方法を示す。

① 設計条件

輸送貯蔵兼用キャスク用支持架台の構造評価に当たっての機械荷重を以下に示す。

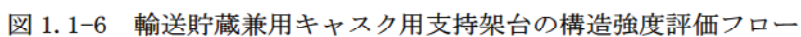
A. 自重による荷重

B. キャスクによる荷重

② 評価方法

輸送貯蔵兼用キャスク用支持架台の構造解析フローを図1.1-6に、主な構造部材の応力評価箇所を図1.1-7に示す。

鋼製支持架台、基礎ボルト、コンクリート支持架台について想定される機械荷重を基に、応力評価式を用いて応力評価を行う。



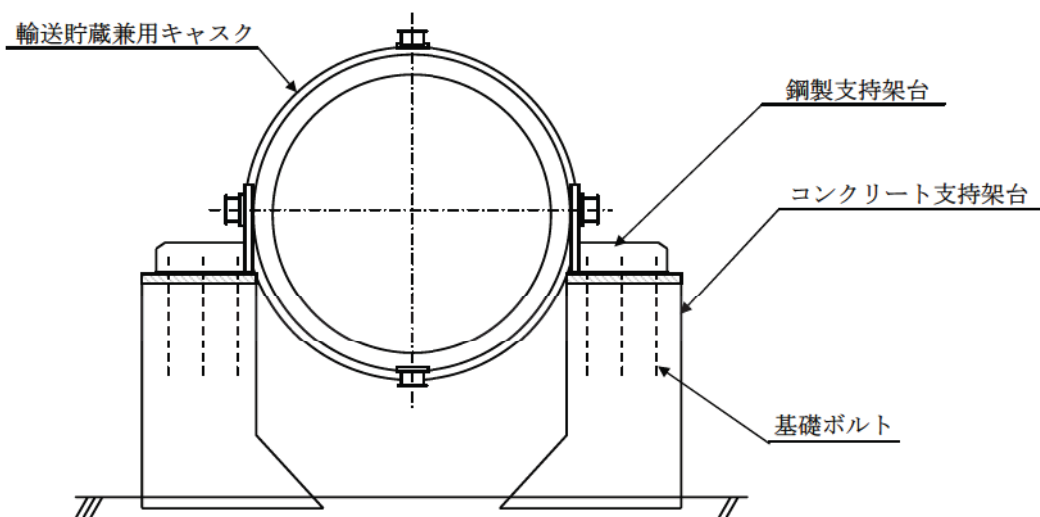
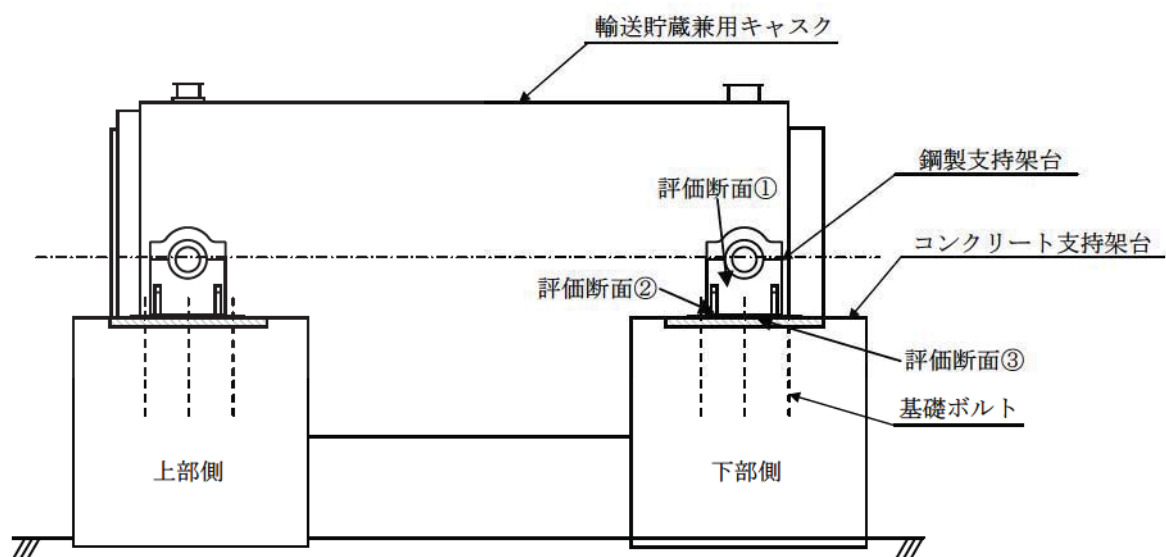


図 1.1-7 輸送貯蔵兼用キャスク用支持架台の応力評価箇所

③ 設計事象と荷重の組合せ

輸送貯蔵兼用キャスク用支持架台の設計事象と選定事象は以下の通りである。

[設計事象Ⅰ]

・貯蔵時

4) 輸送貯蔵兼用キャスク用支持架台の貯蔵時の評価（設計事象Ⅰ）

以下に貯蔵時の輸送貯蔵兼用キャスク用支持架台の応力評価結果を示す。

① 計算条件

A. 解析事象

「貯蔵時」

キャスクが支持架台に設置されている計画的な取り扱い状態をいう。

② 解析方法

A. 解析手順概要

輸送貯蔵兼用キャスク用支持架台の応力解析は、想定される機械荷重を基に、応力評価式を用いて行う。

B. 荷重計算

図 1.1-8 に示す鋼製支持架台 1 脚に作用するキャスク自重 (F_{WU} , F_{WL}) は次式で表される。

$$F_{WU} = \frac{P_W}{2} \cdot \frac{b}{(a+b)}$$

$$F_{WL} = \frac{P_W}{2} \cdot \frac{a}{(a+b)}$$

$$P_W = W \cdot g$$

ここで、

F_{WU} : 鋼製支持架台 1 脚（上部側）に作用するキャスク自重 (N)

F_{WL} : 鋼製支持架台 1 脚（下部側）に作用するキャスク自重 (N)

P_W : キャスク自重 (N)

a : キャスク重心から上部トラニオン軸心までの距離 (mm)

b : キャスク重心から下部トラニオン軸心までの距離 (mm)

W : キャスク設計質量 (kg)

g : 重力加速度 (m/s^2)

C. 応力評価

a. 鋼製支持架台（評価断面①）

図 1.1-9 において自重により鋼製支持架台（評価断面①）に発生する圧縮応力 (σ_c) は次

式で表される。

$$\sigma_c = \frac{F_W}{B \cdot t}$$

ここで、

F_W : 図 1.1-8 に示す自重の設計用値 (N)

B : 図 1.1-9 に示す評価断面の幅 (mm)

t : 図 1.1-9 に示すトラニオン受部の板厚 (mm)

b. 鋼製支持架台 (評価断面②)

図 1.1-10 において自重により鋼製支持架台 (評価断面②) に発生する圧縮応力 (σ_c) は次式で表される。

$$\sigma_c = \frac{F_W}{B_1 \cdot t_1 + 2 \cdot B_2 \cdot t_2}$$

図 1.1-10 において自重により鋼製支持架台 (評価断面②) に発生する最大曲げ応力 (σ_{b1} , σ_{b2}) は次式で表される。

$$\sigma_{b1} = \frac{F_W \cdot (L_1 - t_1 / 2)}{I} \cdot L_1 \quad (\text{トラニオン受側})$$

$$\sigma_{b2} = \frac{F_W \cdot (L_1 - t_1 / 2)}{I} \cdot L_2 \quad (\text{リブ側})$$

図 1.1-10 において自重により鋼製支持架台 (評価断面②) に発生する組合せ応力 (σ_{T1} , σ_{T2}) は次式で表される。

$$\sigma_{T1} = \sigma_c + \sigma_{b1} \quad (\text{トラニオン受側})$$

$$\sigma_{T2} = \sigma_c - \sigma_{b2} \quad (\text{リブ側})$$

ここで、

F_W : 図 1.1-8 に示す自重 (F_{WU} , F_{WL}) の設計用値 (N)

B_1 : 図 1.1-10 に示すトラニオン受部の幅 (mm)

B_2 : 図 1.1-10 に示すリブの幅 (mm)

t_1 : 図 1.1-10 に示すトラニオン受部の板厚 (mm)

t_2 : 図 1.1-10 に示すリブの板厚 (mm)

L_1 : 図 1.1-10 に示す中立軸からトラニオン受け端部までの距離 (mm)

L_2 : 図 1.1-10 に示す中立軸からリブ端部までの距離 (mm)

I : 図 1.1-10 に示す断面の中立軸に関する断面二次モーメント (mm^4)

c. 鋼製支持架台 (評価断面③)

図 1.1-11 において自重により基礎ボルトから引張力を受けて発生する曲げ応力

(σ_{bb}) , コンクリート支持架台から圧縮力を受けて発生する曲げ応力 (σ_{bc}) は次式で表される。

$$\sigma_{bb} = \frac{T \cdot L_1}{B \cdot t^2 / 6}$$

$$\sigma_{bc} = \frac{\sigma_{cc} \cdot L_2^2 / 2}{t^2 / 6}$$

$$T = \sigma_{tb} \cdot A_m$$

ここで,

σ_{tb} : 図 1.1-11 に示す基礎ボルトに発生する本荷重条件下における引張応力 (N/mm²)

σ_{cc} : 図 1.1-11 に示すコンクリートに発生する本荷重条件下における圧縮応力 (N/mm²)

T : 図 1.1-11 に示す基礎ボルトに発生する本荷重条件下における引張力 (N)

t : 図 1.1-11 に示す鋼製支持架台底板の板厚 (mm)

B : 図 1.1-11 に示す基礎ボルトから引張力を受けて発生する曲げ応力の評価断面幅 (mm)

L₁ : 図 1.1-11 に示す基礎ボルトから引張力を受けて発生する曲げモーメントのモーメントアーム長さ (mm)

L₂ : 図 1.1-11 に示すコンクリートから圧縮力を受ける長さ (mm)

A_m : 基礎ボルト呼び径断面積 (mm²)

図 1.1-11 において自重により, 基礎ボルトから引張力を受けて発生するせん断応力 (τ_b), コンクリート支持架台から圧縮力を受けて発生するせん断応力 (τ_c) は次式で表される。

$$\tau_b = \frac{T}{B \cdot t}$$

$$\tau_c = \frac{\sigma_{cc} \cdot L_2}{t}$$

ここで, 各記号は上記と同様である。

図 1.1-11 において自重により, 基礎ボルトから引張力を受けて発生する組合せ応力 (σ_{Tb}), コンクリート支持架台から圧縮力を受けて発生する曲げ応力 (σ_{Tc}) は次式で表される。

$$\sigma_{Tb} = \sqrt{\sigma_{bb}^2 + 3 \cdot \tau_b^2}$$

$$\sigma_{Tc} = \sqrt{\sigma_{bc}^2 + 3 \cdot \tau_c^2}$$

d. 基礎ボルト

図 1.1-12 において自重により基礎ボルトに発生する引張応力 (σ_t) は, 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説(2010 年版)より次式で表される。

$$\sigma_t = \sigma_{cc} \cdot n \cdot \frac{(D - d_t - X_n)}{X_n} \cdot \frac{A_b}{A_m}$$

$$\sigma_{cc} = N \cdot X_n / S_n$$

$$S_n = [X_{n1}^2 / 2 - n \cdot P_t \cdot (1 - d_{t1} - X_{n1})] \cdot b \cdot D^2$$

$$I_n = [X_{n1}^3 / 3 + n \cdot P_t \cdot (1 - d_{t1} - X_{n1})^2] \cdot b \cdot D^3$$

$$X_{n1} = X_n / D$$

$$d_{t1} = d_t / D$$

$$P_t = a_t / (b \cdot D)$$

$$a_t = A_b \cdot N_b$$

ここで、

σ_{cc} : 図 1.1-12 に示すコンクリートの最大圧縮応力 (N/mm²)

n : ヤング係数比 (=15)

D : 図 1.1-12 に示す断面高さ (mm)

b : 図 1.1-12 に示す断面幅 (mm)

d_t : 図 1.1-12 に示す引張側ボルトに関する距離 (mm)

d_{t1} : 引張側ボルトに関する係数 (-)

X_n : 図 1.1-12 に示す中立軸距離を表し、次式を満足する値 (mm)

$$X_n - D / 2 + e = I_n / S_n$$

ただし、 e : 図 1.1-12 に示す鉛直力偏心距離 (mm)

X_{n1} : 中立軸比 (-)

N : 図 1.1-12 に示す鉛直力であり、自重の設計用値 (N)

a_t : 有効ボルト総断面積 (mm²)

P_t : 引張鉄筋比 (-)

A_b : 基礎ボルト有効断面積 (mm²)

A_m : 基礎ボルト呼び径断面積 (mm²)

N_b : 有効引張側ボルト本数 (本)

S_n : 有効等価断面一次モーメント (mm³)

I_n : 有効等価断面二次モーメント (mm⁴)

e. コンクリート支持架台

コンクリート支持架台の下端に発生する荷重は表 1.1-10 の通りである。これらの荷重を用いて後述する 1.4 コンクリート基礎の構造強度と同様に評価を行う。

表 1.1-10 コンクリート支持架台下端における荷重

		NS方向			EW方向		
		鉛直力	水平力	モーメント	鉛直力	水平力	モーメント
		(kN)	(kN)	(kN・m)	(kN)	(kN)	(kN・m)
長期	キャスク	320.00	0.00	105.00	320.00	0.00	0.00
		—	—	—	—	—	—
	ペDESTAL	35.22	0.00	0.00	35.22	0.00	0.00
	合計	355.22	0.00	105.00	355.22	0.00	0.00
短期	キャスク	320.00	154.00	105.00	320.00	148.00	68.90
		—	—	182.49	—	—	175.38
	ペDESTAL	35.22	10.56	5.68	35.22	10.56	5.68
	合計	355.22	164.56	293.17	355.22	158.56	249.96

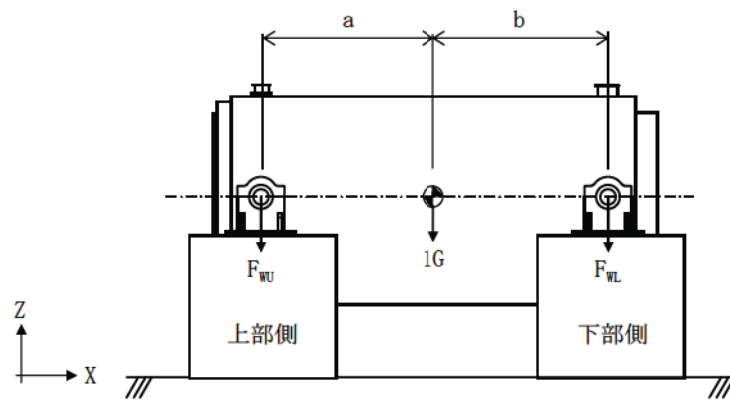


図 1.1-8 鋼製支持架台に作用する荷重

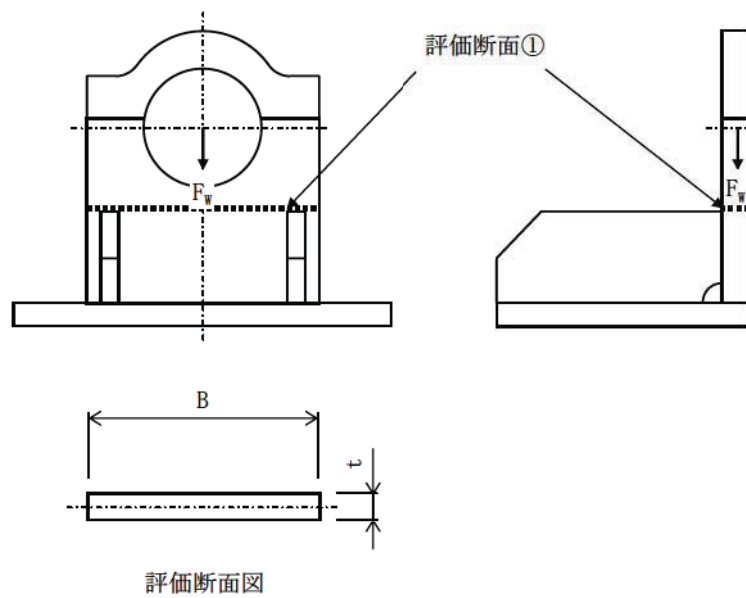


図 1.1-9 計算モデル図（設計事象 I，評価断面①）

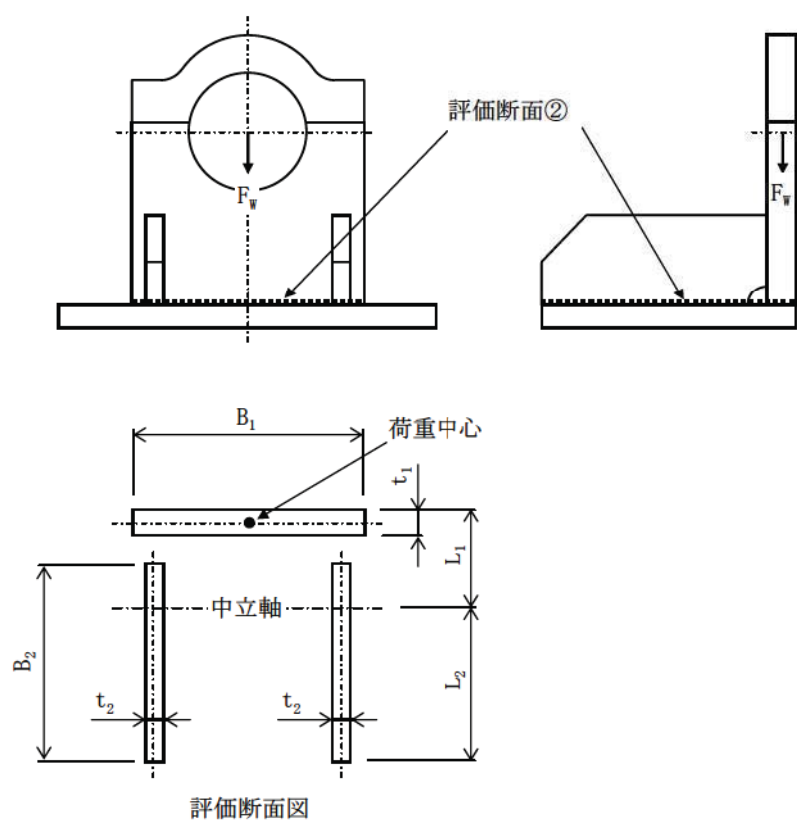


図 1.1-10 計算モデル図（設計事象 I，評価断面②）

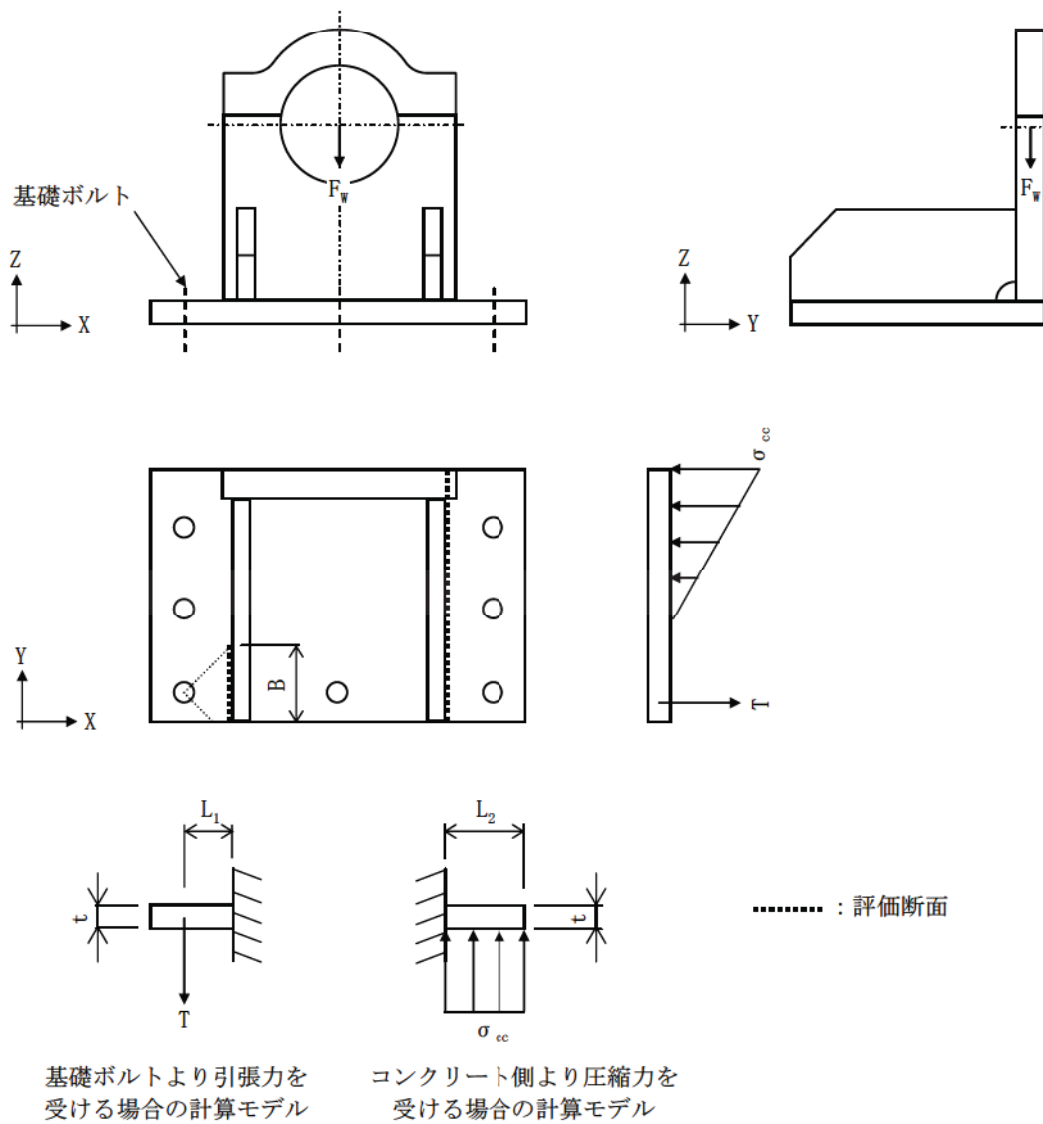


図 1.1-11 計算モデル図（設計事象 I，評価断面③）

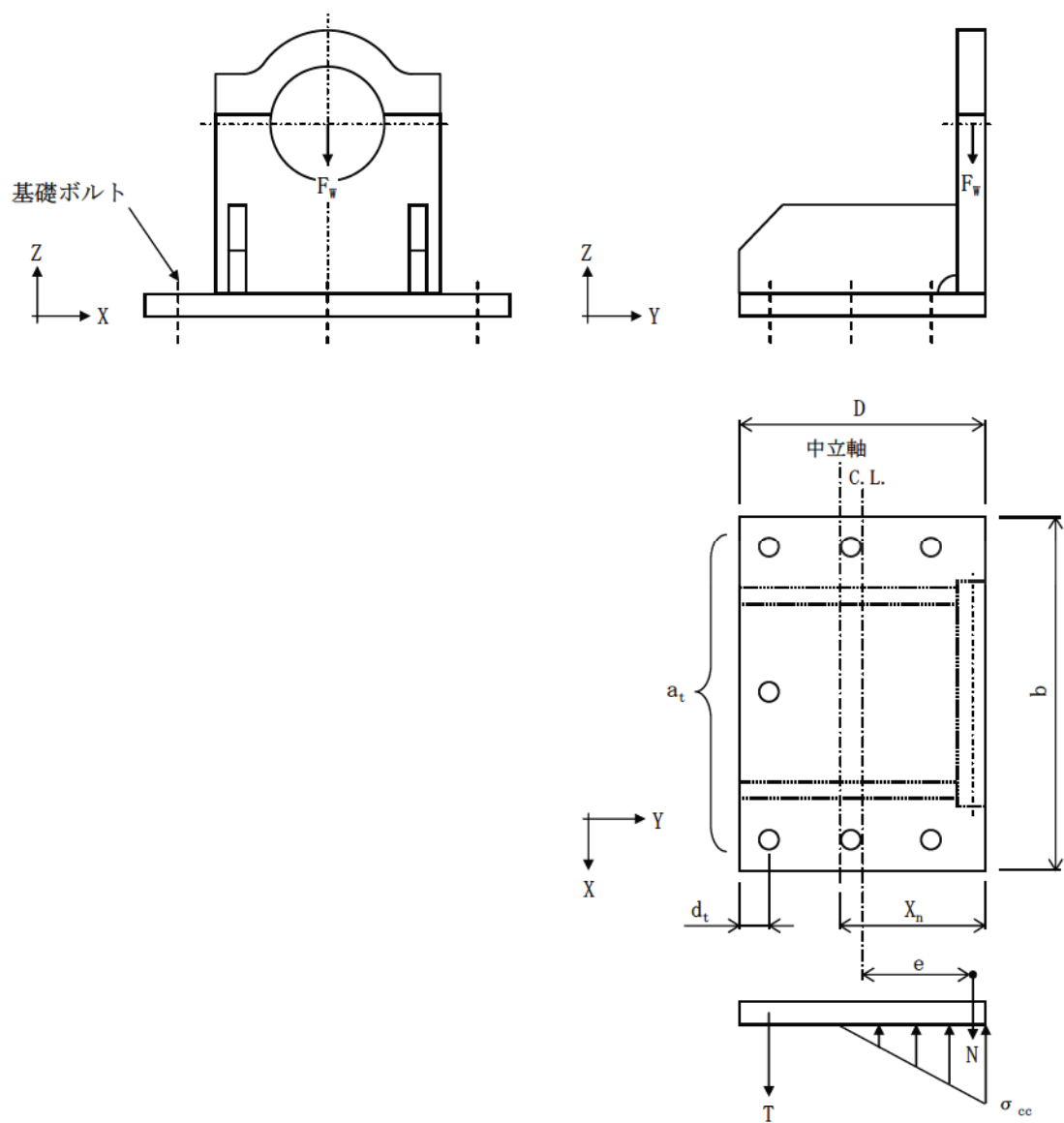


図 1.1-12 計算モデル図（設計事象 I，基礎ボルト）

③ 解析結果

表 1.1-11 に貯蔵時の評価結果を示す。

貯蔵時の輸送貯蔵兼用キャスク用支持架台は許容応力を満足している。

表 1.1-11(1) 鋼製支持架台の評価 (タイプB)

部 位		応力の種類	計算値	許容応力
鋼製支持 架台	評価断面①	圧縮	10 N/mm ²	186 N/mm ²
	評価断面②	圧縮	5 N/mm ²	187 N/mm ²
		曲げ	8 N/mm ²	188 N/mm ²
		組合せ	9 N/mm ²	188 N/mm ²
	評価断面③	曲げ	68 N/mm ²	188 N/mm ²
		せん断	8 N/mm ²	108 N/mm ²
		組合せ	69 N/mm ²	188 N/mm ²
基礎ボルト		引張	20 N/mm ²	226 N/mm ²

表 1.1-11(2) コンクリート支持架台の評価

項 目		記号	単位	ペデスタル			
				長期		短期	
				NS方向	EW方向	NS方向	EW方向
断面力	曲げモーメント	Md	(kN・m)	105	0	293	250
	軸力	Nd	(kN)	355	355	355	355
	せん断力	Vd	(kN)	0	0	165	159
応力度	コンクリート	圧縮応力度 σ_c	(N/mm ²)	1.24	0.29	3.68	1.52
		許容圧縮応力度 σ_{ca}	(N/mm ²)	9.00	9.00	13.50	13.50
		$\sigma_c / \sigma_{ca} \leq 1.0$		0.14	0.03	0.27	0.11
		判定		OK	OK	OK	OK
	鉄筋	引張応力度 σ_s	(N/mm ²)	14	4	93	24
		許容引張応力度 σ_{sa}	(N/mm ²)	196	196	294	294
		$\sigma_s / \sigma_{sa} \leq 1.0$		0.07	0.02	0.32	0.08
		判定		OK	OK	OK	OK
	せん断	せん断応力度 τ	(N/mm ²)	0.000	0.000	0.202	0.180
		許容せん断応力度 τ_a	(N/mm ²)	0.450	0.450	0.675	0.675
		$\tau / \tau_a \leq 1.0$		0.00	0.00	0.30	0.27
		判定		OK	OK	OK	OK

1.2 コンクリートモジュールの構造強度

(1) 乾式貯蔵キャスク用コンクリートモジュール

1) 評価方針

本設備で使用する乾式貯蔵キャスク用コンクリートモジュールが、建築基準法に基づく規定を満たしていることを確認する。

2) 乾式貯蔵キャスク用コンクリートモジュールの構成

コンクリートモジュールの概略図を図 1.2-1 に示す。

コンクリートモジュールは長辺側板 3 枚、短辺側板 2 枚、天板 3 枚のコンクリート製パネルで構成されている。それぞれのパネルは金物とボルトにより連結されている。

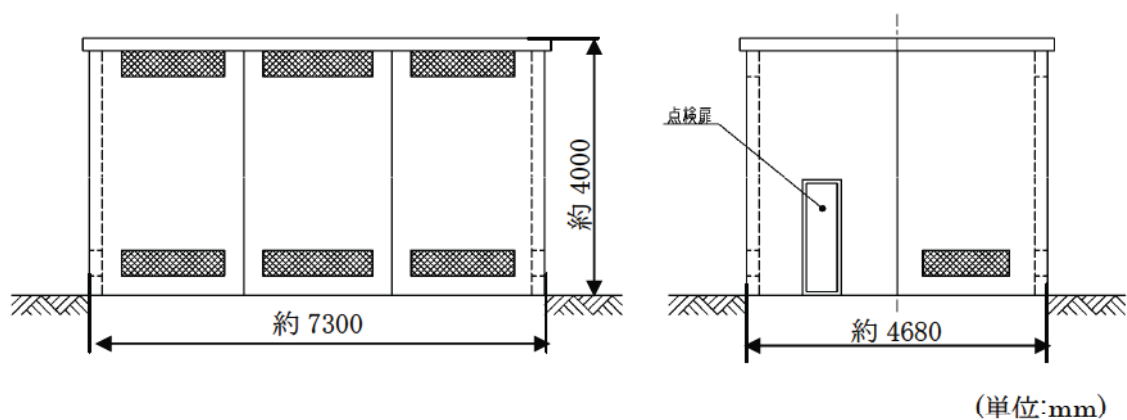


図 1.2-1 コンクリートモジュール概略図

3) 解析モデル

許容応力度設計及び各荷重に対する検討には 3 次元 FEM モデルを採用し、解析コードとして NASTRAN を用いる。

FEM モデルとして、コンクリートモジュールの PC 板（側板及び天板）及び接合部の金物は板厚一様な平板要素でモデル化する。PC 板と金物の接合部はボルト位置で同一変位とし、基礎とベースプレートの接合部はアンカーボルト位置で拘束する。解析モデルを図 1.2-2 に示す。

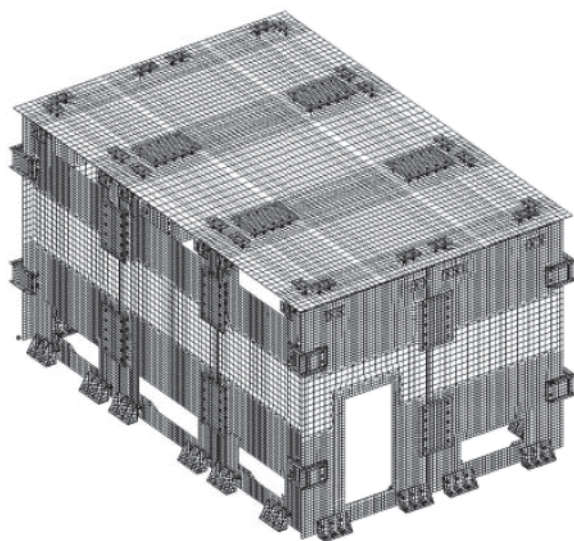


図 1.2-2 コンクリートモジュールの解析モデル

4) 許容応力度

許容応力度を以下のように定める。材料の許容応力度は建築基準法・同施行令に定める値とし、表 1.2-1 に示す。

表 1.2-1 鉄筋の許容応力度 (N/mm²)

種類	長期		短期	
	引張及び圧縮	せん断補強	引張及び圧縮	せん断補強
SD295A 及び B	195	195	295	295

5) 応力計算

① 応力評価点

応力評価点は SRSS 法により求められる各部材応力の中から最大応力となる部材を抽出して評価を行う。評価箇所は図 1.2-3 に示す箇所とする。

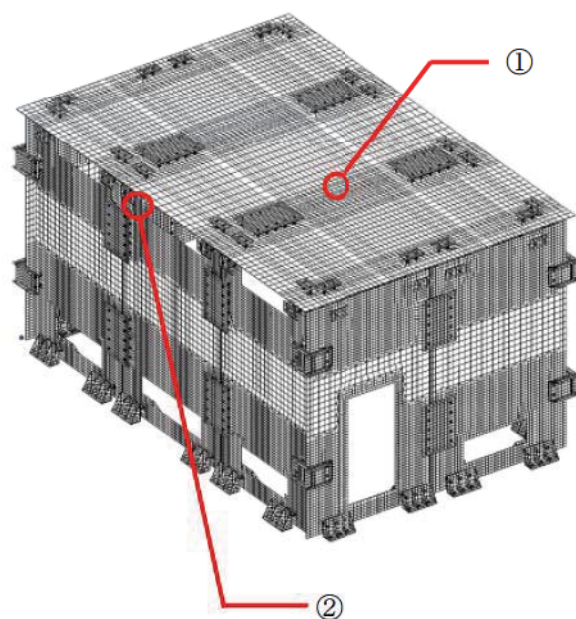


図 1.2-3 応力評価箇所

応力評価箇所名称

- ① 天板パネル
- ② 側板パネル

② 荷重条件

コンクリートモジュールの強度評価においては建築基準法施行令第 82 条より表 1. 2-2 の荷重組合せに基づき評価を行う。なお、地震時の荷重に関しては 2. 3 (1) にて別途評価を行っており、基準地震動 S_s において倒壊しないことを確認している。また、積雪時、暴風時の荷重は地震時の荷重に包絡されることから、ここでは常時の荷重のみ評価する。

A. 固定荷重

固定荷重は、鉄筋コンクリートで 24kN/m^3 、鋼材で 77kN/m^3 とし算定する。また、コンクリートの厚さは 200mm とする。仕上げは 0N/m^2 とする。

B. 積載荷重

積載荷重は 0 N/m^2 とする。

C. 積雪荷重

建築基準法施行令第 86 条、平成 12 年建設省告示第 1455 号、福島県建築基準法施行細則より設定する。

D. 風圧力

コンクリートモジュールに作用する風圧力は、建築基準法施行令第 87 条及び平成 12 年建設省告示第 1454 号により算定する。

表 1. 2-2 荷重組合せ

力の種類	荷重及び外力について想定する状態	本設計
長期に生ずる力	常時	$G + P$
短期に生ずる力	積雪時 ^{※1}	$G + P + S$
	暴風時 ^{※1}	$G + P + W$
	地震時 ^{※2}	$G + P + K$

ただし、 G ：固定荷重、 P ：積載荷重、 S ：積雪荷重、 W ：風圧力によって生ずる力、 K ：地震力

※1 積雪荷重と風圧力の荷重の組合せに関する構造強度の評価は、2. 3 (1) の耐震性の評価に包絡される。

※2 地震時の荷重の組合せに関する評価は、2. 3 (1) の耐震性の評価にて行う。

③ 応力評価

A. 天板パネル(①) (図 1.2-4 参照)

天板 PC 板 $t = 200$, 鉄筋 : SD295A ($L\sigma t = 195 \text{ N/mm}^2$)

D10@200 (長辺方向 上筋, 短辺方向 上下筋) D10 : 断面積 $A = 71 \text{ mm}^2$

D13@200 (長辺方向 下筋) D13 : 断面積 $A = 127 \text{ mm}^2$

$d = 150\text{mm}$, $j = 131\text{mm}$

長期許容曲げモーメント (鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説より)

$$M_a = a_t \cdot f_t \cdot j$$

$$\Rightarrow f_t = \frac{M_a}{a_t \cdot j} \quad f_t \text{ を } \sigma_t, M_a \text{ を } M_d \text{ に置き換え, 鉄筋の引張応力度を算定する。}$$

設計曲げモーメント

最大曲げモーメント $8270 \text{ Nmm/mm} \rightarrow 1\text{m}$ 辺りに換算すると $M_d = 8.27\text{kNm}$

$$\sigma_t = \frac{M_d}{a_t \cdot j} = \frac{8.27 \times 10^6}{127 \times 5 \times 131} = 99.5 \text{ N/mm}^2$$

検定値

$$f_t / \sigma_t = 195 / 99.5 = 1.96 > 1.0 \dots \text{OK}$$

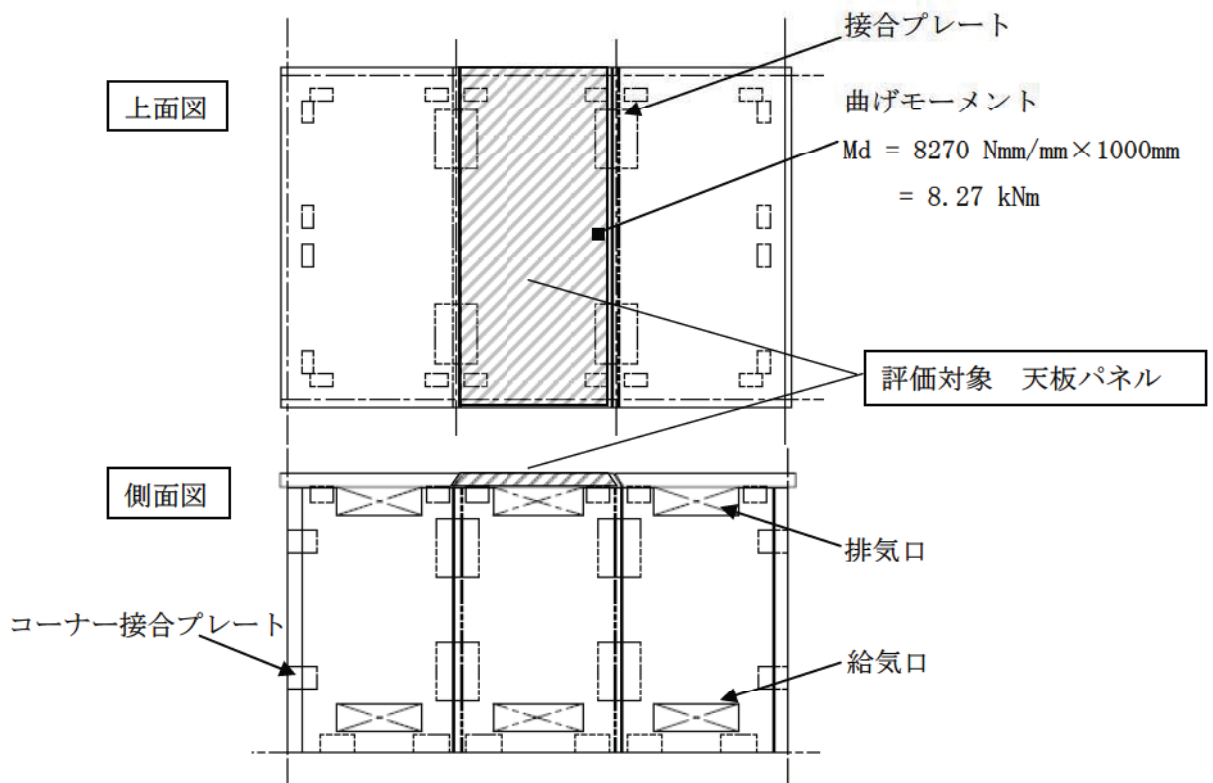


図 1.2-4 天板パネル

B. 側板パネル(②) (図 1.2-5 参照)

側板 PC 版 $t = 200$, 鉄筋 : SD295A ($L\sigma t = 195 \text{ N/mm}^2$)

D10@200 (縦筋・横筋, 内外共) D10 : 断面積 $A = 71 \text{ mm}^2$

D13 (開口部及び外周部の補強筋) D13 : 断面積 $A = 127 \text{ mm}^2$

$d = 150\text{mm}$, $j = 131\text{mm}$

長期許容曲げモーメント (鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説より)

$$M_a = a_t \cdot f_t \cdot j$$

$$\Rightarrow f_t = \frac{M_a}{a_t \cdot j} \quad f_t \text{ を } \sigma_t, M_a \text{ を } M_d \text{ に置き換え, 鉄筋の引張応力度を算定する。}$$

設計曲げモーメント

最大曲げモーメント $7374 \text{ Nmm/mm} \rightarrow 500\text{mm}$ 辺りに換算すると $M_d = 3.69 \text{ kNm}$

$$\sigma_t = \frac{M_d}{a_t \cdot j} = \frac{3.69 \times 10^6}{(127 + 71 + 127) \times 131} = 86.7 \text{ N/mm}^2$$

検定値

$$f_t / \sigma_t = 195 / 86.7 = 2.25 > 1.0 \dots \text{OK}$$

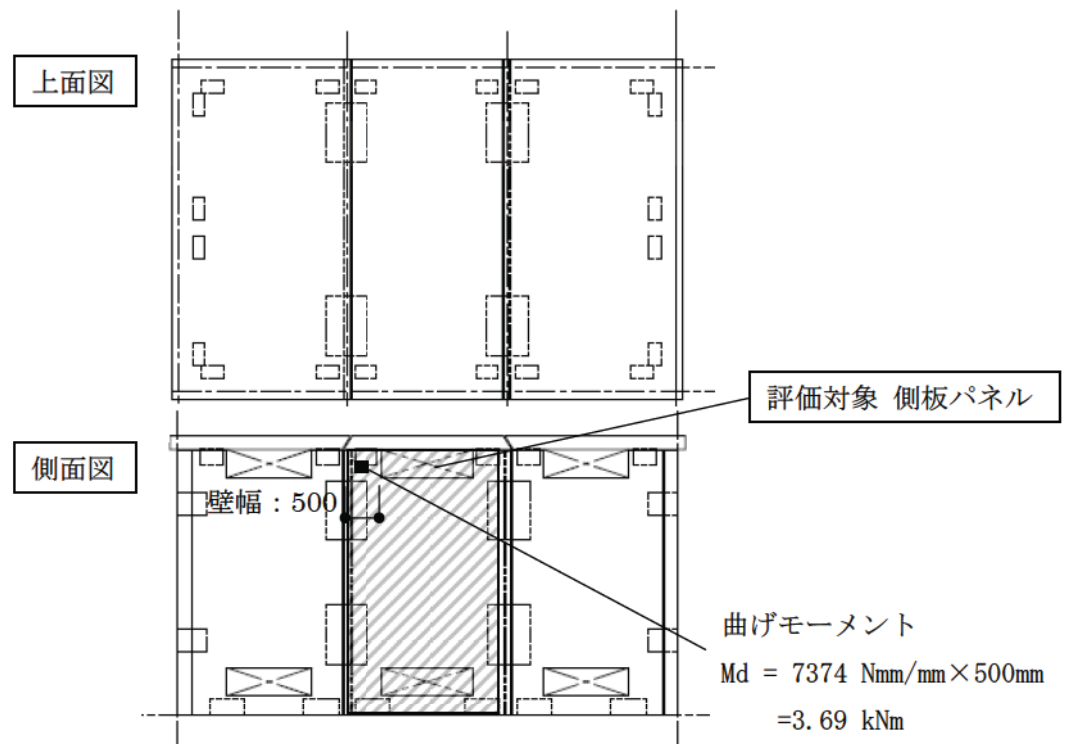


図 1.2-5 側板パネル

④ 評価結果

評価結果を表 1.2-3 に示す。

表 1.2-3 評価結果 (N/mm²)

	項目	計算値	許容値	評価結果
①	天板パネル	99.5	195	OK
②	側板パネル	86.7	195	OK

以上よりコンクリートモジュールは建築基準法に基づく規定を満たしている。

(2) 輸送貯蔵兼用キャスク用コンクリートモジュール

1) 評価方針

本設備で使用する輸送貯蔵兼用キャスク用コンクリートモジュールが、建築基準法に基づく規定を満たしていることを確認する。

2) 輸送貯蔵兼用キャスク用コンクリートモジュールの構成

コンクリートモジュールの概略図を図 1.2-6 に示す。

コンクリートモジュールは長辺側板 3 枚、短辺側板 2 枚、天板 3 枚のコンクリート製パネルで構成されている。それぞれのパネルは金物とボルトにより連結されている。

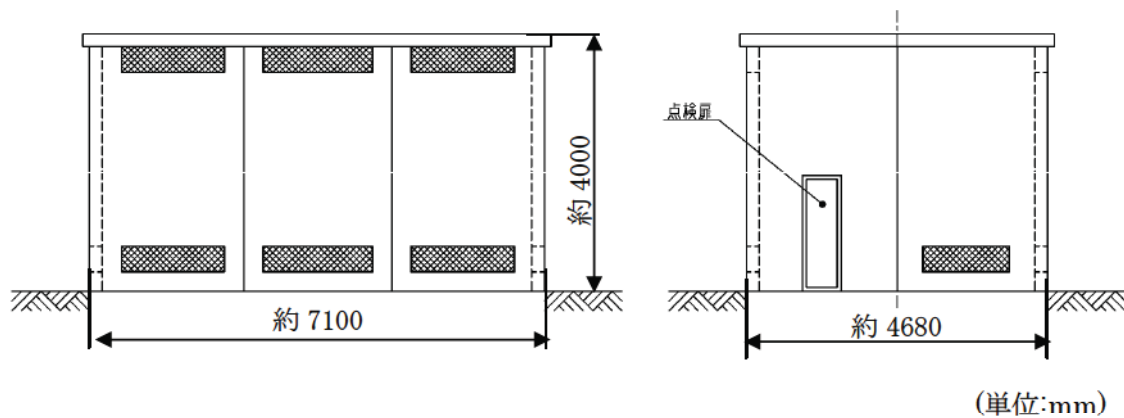


図 1.2-6 コンクリートモジュール概略図

3) 解析モデル

許容応力度設計及び各荷重に対する検討には 3 次元 FEM モデルを採用し、解析コードとして NASTRAN を用いる。

FEM モデルとして、コンクリートモジュールの PC 板（側板及び天板）及び接合部の金物は板厚一様な平板要素でモデル化する。PC 板と金物の接合部はボルト位置で同一変位とし、基礎とベースプレートの接合部はアンカーボルト位置で拘束する。解析モデルを図 1.2-7 に示す。

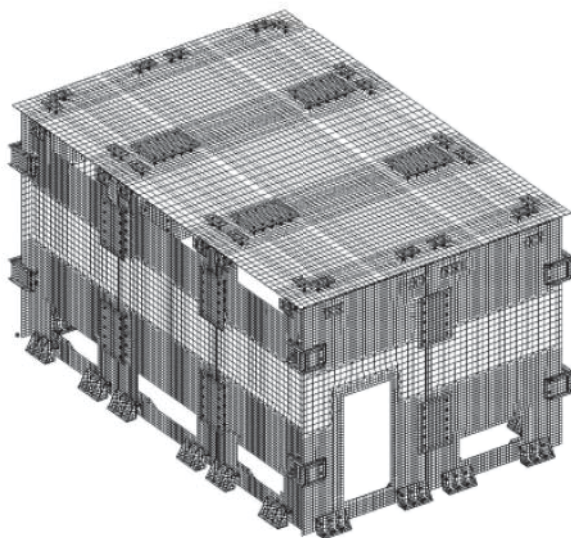


図 1.2-7 コンクリートモジュールの解析モデル

4) 許容応力度

許容応力度を以下のように定める。材料の許容応力度は建築基準法・同施行令に定める値とし、表 1.2-4 に示す。

表 1.2-4 鉄筋の許容応力度 (N/mm²)

種類	長期		短期	
	引張及び圧縮	せん断補強	引張及び圧縮	せん断補強
SD295A 及び B	195	195	295	295

5) 応力計算

① 応力評価点

応力評価点はSRSS 法により求められる各部材応力の中から最大応力となる部材を抽出して評価を行う。評価箇所は図 1.2-8 に示す箇所とする。

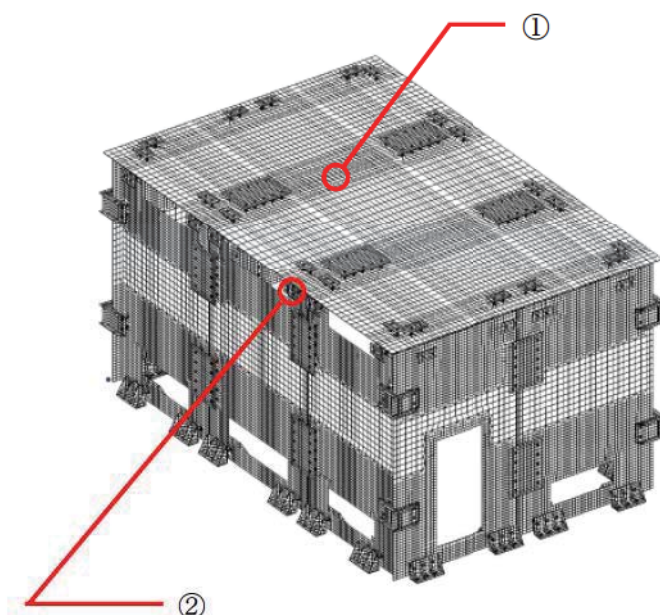


図 1.2-8 応力評価箇所

応力評価箇所名称

- ① 天板パネル
- ② 側板パネル

② 荷重条件

コンクリートモジュールの強度評価においては建築基準法施行令第 82 条より表 1.2-5 の荷重組合せに基づき評価を行う。なお、地震時の荷重に関しては 2.3 (2) にて別途評価を行っており、基準地震動 S_s において倒壊しないことを確認している。また、積雪時、暴風時の荷重は地震時の荷重に包絡されることから、ここでは常時の荷重のみ評価する。

A. 固定荷重

固定荷重は、鉄筋コンクリートで 24kN/m^3 、鋼材で 77kN/m^3 とし算定する。また、コンクリートの厚さは 200mm とする。仕上げは 0N/m^2 とする。

B. 積載荷重

積載荷重は 0 N/m^2 とする。

C. 積雪荷重

建築基準法施行令第 86 条、平成 12 年建設省告示第 1455 号、福島県建築基準法施行細則より設定する。

D. 風圧力

コンクリートモジュールに作用する風圧力は、建築基準法施行令第 87 条及び平成 12 年建設省告示第 1454 号により算定する。

表 1.2-5 荷重組合せ

力の種類	荷重及び外力について想定する状態	本設計
長期に生ずる力	常時	$G + P$
短期に生ずる力	積雪時 ^{※1}	$G + P + S$
	暴風時 ^{※1}	$G + P + W$
	地震時 ^{※2}	$G + P + K$

ただし、G：固定荷重、P：積載荷重、S：積雪荷重、W：風圧力によって生ずる力、K：地震力

※1 積雪荷重と風圧力の荷重の組合せに関する構造強度の評価は、2.3(2)の耐震性の評価に包絡される。

※2 地震時の荷重の組合せに関する評価は、2.3(2)の耐震性の評価にて行う。

③ 応力評価

A. 天板パネル(①) (図 1.2-9 参照)

天板 PC 板 $t = 200$, 鉄筋 : SD295A ($L\sigma t = 195 \text{ N/mm}^2$)

D10@200 (長辺方向 上筋, 短辺方向 上下筋) D10 : 断面積 $A = 71 \text{ mm}^2$

D13@200 (長辺方向 下筋) D13 : 断面積 $A = 127 \text{ mm}^2$

$d = 150\text{mm}$, $j = 131\text{mm}$

長期許容曲げモーメント (鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説より)

$$M_a = a_t \cdot f_t \cdot j$$

$$\Rightarrow f_t = \frac{M_a}{a_t \cdot j} \quad f_t \text{ を } \sigma_t, M_a \text{ を } M_d \text{ に置き換え, 鉄筋の引張応力度を算定する。}$$

設計曲げモーメント

最大曲げモーメント 8118 Nmm/mm $\rightarrow$ 1m 辺りに換算すると $M_d = 8.12 \text{ kNm}$

$$\sigma_t = \frac{M_d}{a_t \cdot j} = \frac{8.12 \times 10^6}{127 \times 5 \times 131} = 97.7 \text{ N/mm}^2$$

検定値

$$f_t / \sigma_t = 195 / 97.7 = 2.00 > 1.0 \dots \text{OK}$$

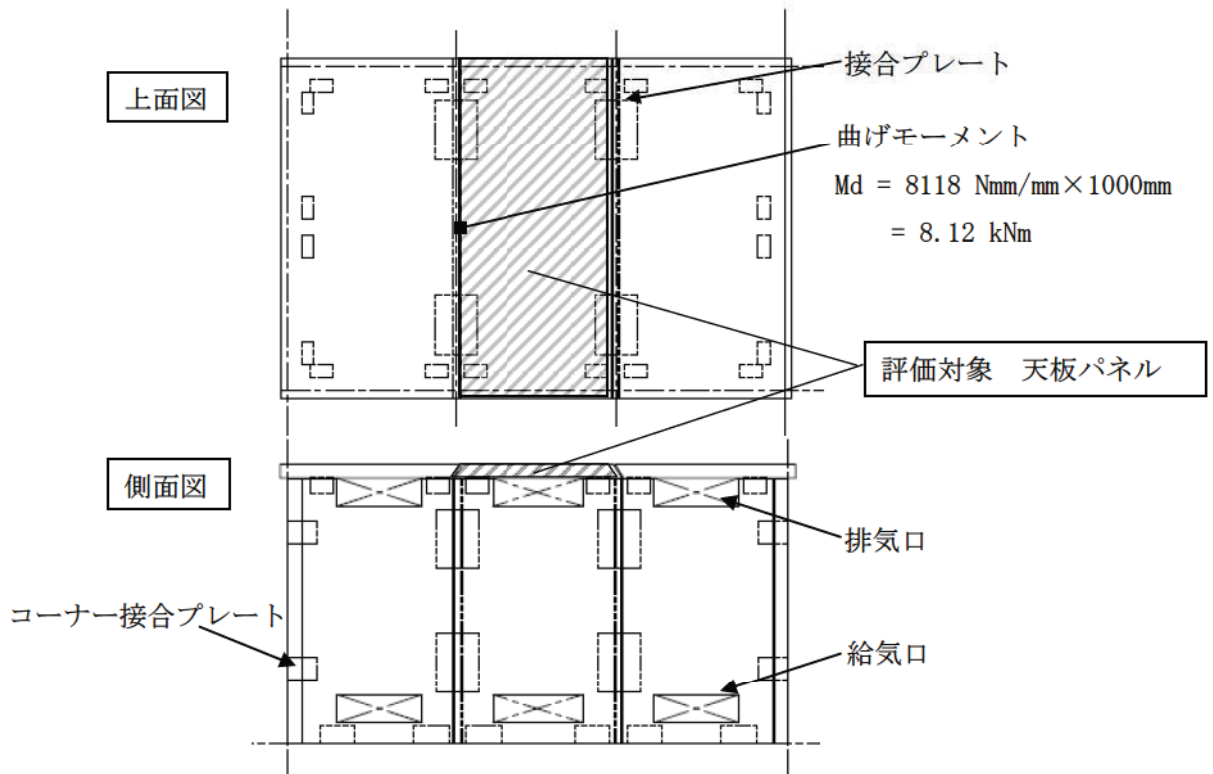


図 1.2-9 天板パネル

B. 側板パネル(②) (図 1.2-10 参照)

側板 PC 版 $t = 200$, 鉄筋 : SD295A ($L\sigma t = 195 \text{ N/mm}^2$)

D10@200 (縦筋・横筋, 内外共) D10 : 断面積 $A = 71 \text{ mm}^2$

D13 (開口部及び外周部の補強筋) D13 : 断面積 $A = 127 \text{ mm}^2$

$d = 150\text{mm}$, $j = 131\text{mm}$

長期許容曲げモーメント (鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説より)

$$M_a = a_t \cdot f_t \cdot j$$

$$\Rightarrow f_t = \frac{M_a}{a_t \cdot j} \quad f_t \text{ を } \sigma_t, M_a \text{ を } M_d \text{ に置き換え, 鉄筋の引張応力度を算定する。}$$

設計曲げモーメント

最大曲げモーメント $7151 \text{ Nmm/mm} \rightarrow 500\text{mm}$ 辺りに換算すると $M_d = 3.58 \text{ kNm}$

$$\sigma_t = \frac{M_d}{a_t \cdot j} = \frac{3.58 \times 10^6}{(127 + 71 + 127) \times 131} = 84.1 \text{ N/mm}^2$$

検定値

$$f_t / \sigma_t = 195 / 84.1 = 2.32 > 1.0 \dots \text{OK}$$

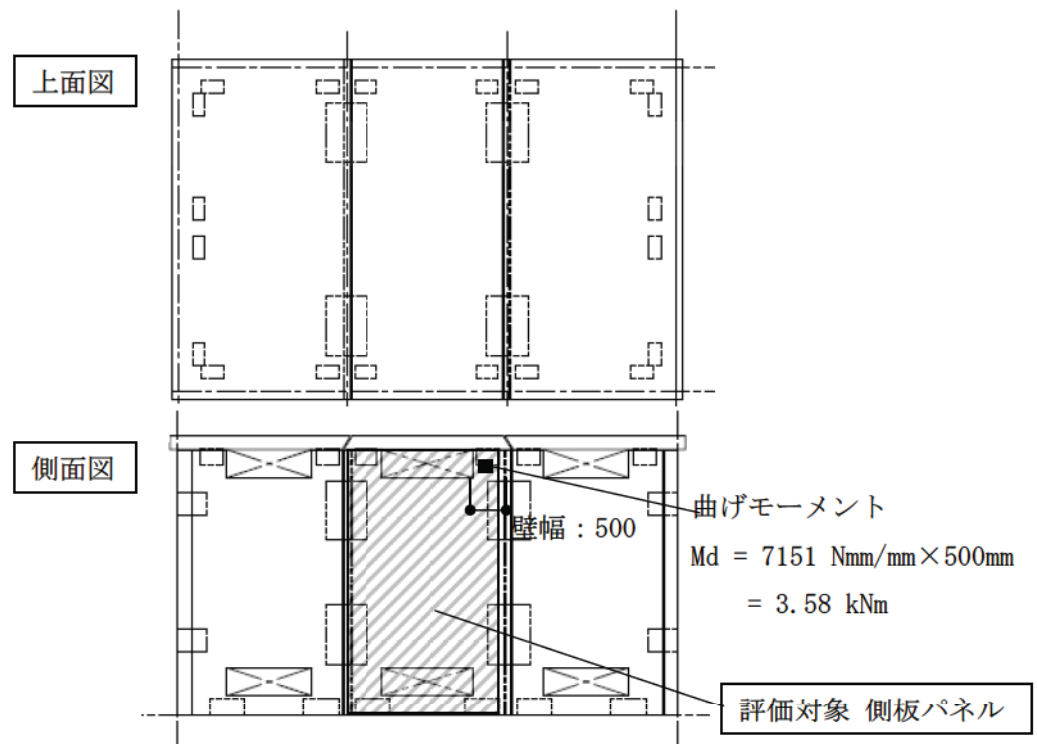


図 1.2-10 側板パネル

④ 評価結果

評価結果を表 1.2-6 に示す。

表 1.2-6 評価結果 (N/mm²)

	項目	計算値	許容値	評価結果
①	天板パネル	97.7	195	OK
②	側板パネル	84.1	195	OK

以上よりコンクリートモジュールは建築基準法に基づく規定を満たしている。

1.3 クレーンの構造強度

(1) 評価方針

本設備で使用するクレーンの構造強度がクレーン構造規格(平成7年12月26日 労働省告示第134号)に基づく規定を満たしていることを確認する。

(2) 構造強度評価の概要

評価対象とするクレーンの主要仕様を表 1.3-1 に、概要図を図 1.3-1 に示す。

表 1.3-1 クレーンの仕様

項 目	仕様
型 式	門形クレーン
主巻定格	150ton
補巻定格	20ton
スパン	19m

構造強度評価においては以下の荷重に関して考慮する。

垂直動荷重: 定格荷重に吊具の質量を加えた荷重がクレーンに作用することによって生じる力。

垂直静荷重: クレーンを構成する部分のうち、垂直動荷重に含まれない部分の質量によって生じる力。

水平動荷重: クレーンの走行、横行、若しくは旋回に伴う慣性力、又は遠心力によって生じる力。

熱荷重: 温度変化により部材の伸縮が妨げられることによって生ずる力。当該クレーンは熱伸縮を拘束する構造でないため、熱荷重は生じない。

風荷重: クレーンが風を受けることにより生ずる力。

地震荷重: 垂直静荷重の二十パーセントに相当する水平荷重。

衝突荷重: クレーンが緩衝装置に衝突したときに生ずる力。

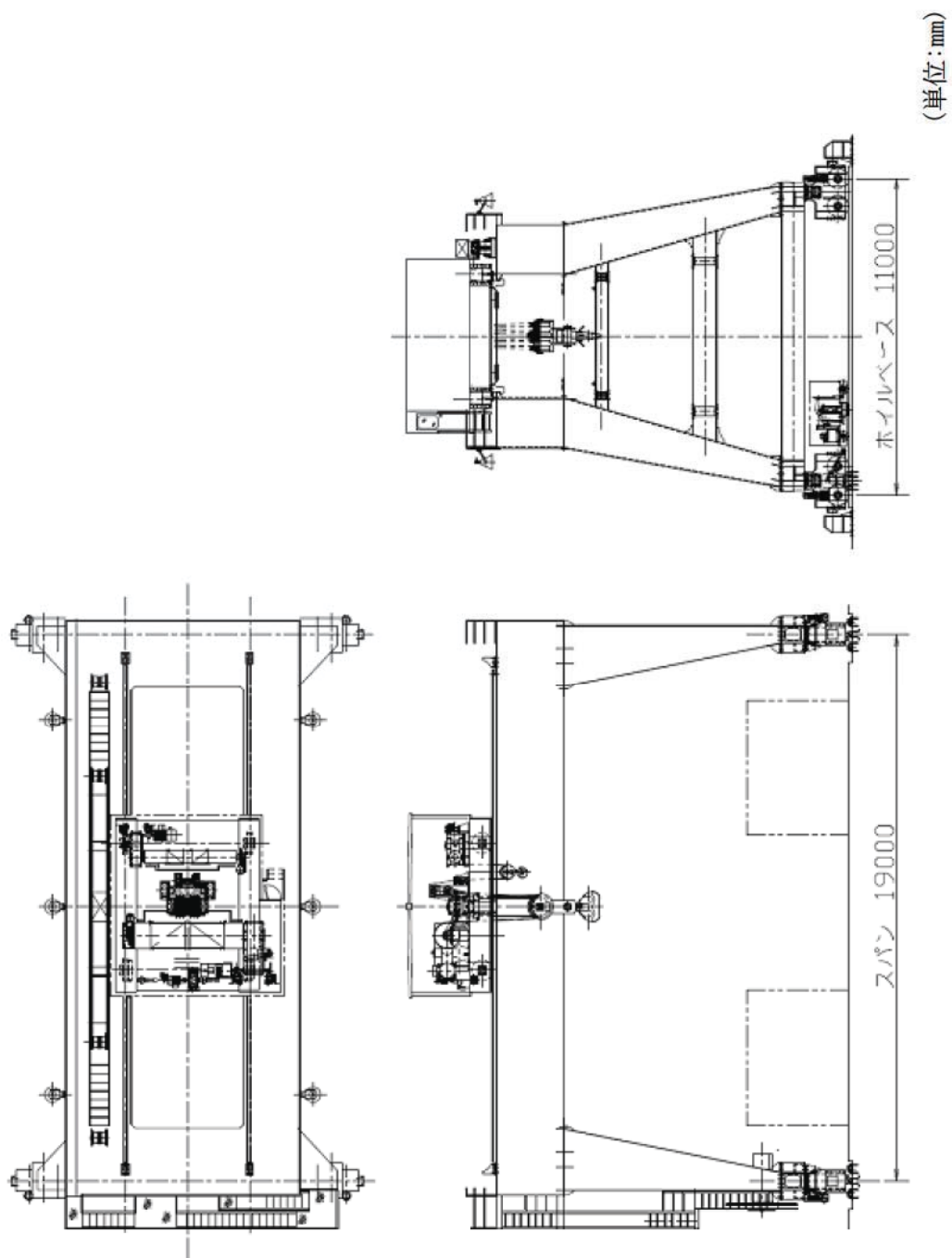


図 1.3-1 クレーン全体図

(3) クレーン各部の応力評価

1) 評価対象部位の形状

評価対象箇所を図 1.3-2 に示す。また評価対象部位の形状を図 1.3-3, 4 に示す。

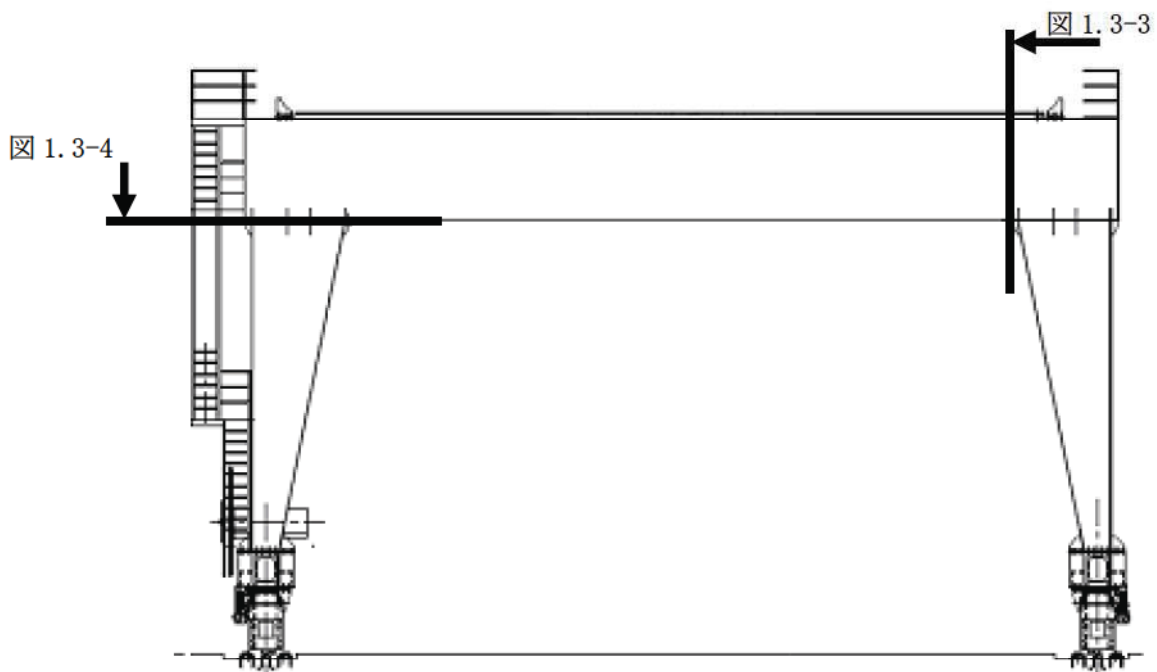


図 1.3-2 応力評価対象箇所

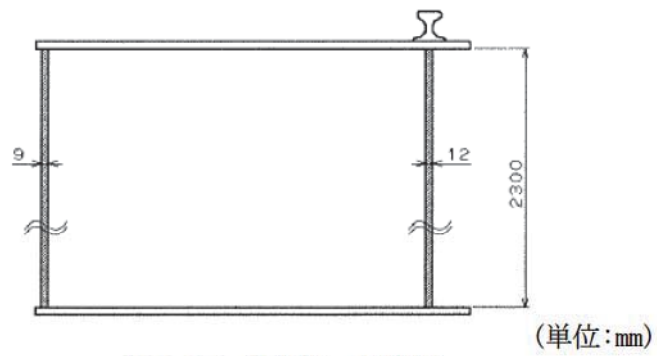


図 1.3-3 本体ガーダ端部

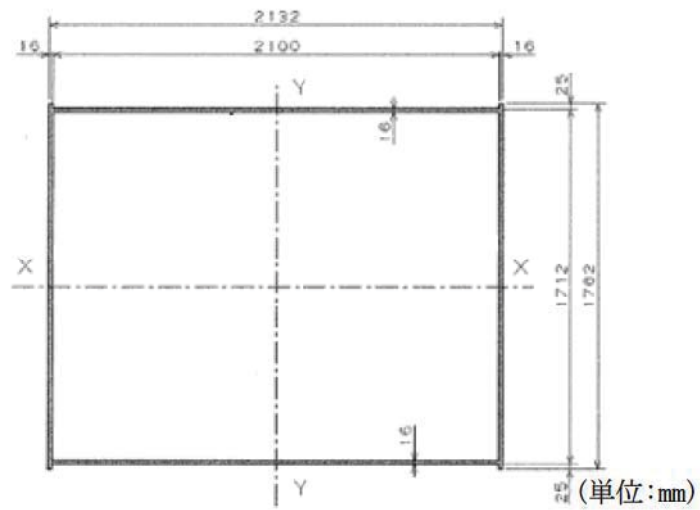


図 1.3-4 剛脚上部

2) 発生応力と許容応力

クレーン構造規格に基づき算出したクレーン各部に発生する応力と許容応力の比較を表 1.3-2 に示す。

表 1.3-2 クレーン各部応力の評価結果

	材料	応力の組合せ ^(注1)	算出応力 (N/mm ²)	許容応力 (N/mm ²)	評価結果
本体ガード 下部	SM490A	構造規格第 11 条 1 項第 1 号	69	182	O. K.
		構造規格第 11 条 1 項第 2 号	70	209	O. K.
		構造規格第 11 条 1 項第 3 号	62	236	O. K.
		構造規格第 11 条 1 項第 4 号	58	236	O. K.
		構造規格第 11 条 1 項第 5 号	28	236	O. K.
本体ガード 上部	SM490A	構造規格第 11 条 1 項第 1 号	66	158	O. K.
		構造規格第 11 条 1 項第 2 号	67	181	O. K.
		構造規格第 11 条 1 項第 3 号	59	205	O. K.
		構造規格第 11 条 1 項第 4 号	55	205	O. K.
		構造規格第 11 条 1 項第 5 号	27	205	O. K.
剛脚	SS400	構造規格第 11 条 1 項第 1 号	15	127	O. K.
		構造規格第 11 条 1 項第 2 号	16	146	O. K.
		構造規格第 11 条 1 項第 3 号	14	165	O. K.
		構造規格第 11 条 1 項第 4 号	11	165	O. K.
		構造規格第 11 条 1 項第 5 号	12	165	O. K.

注 1：構造規格における応力の組合せは以下の通り。

第 1 号：衝撃係数及び作業係数を乗じた垂直動荷重，作業係数を乗じた垂直静荷重，作業係数を乗じた水平動荷重並びに熱荷重の組合せ

第 2 号：衝撃係数及び作業係数を乗じた垂直動荷重，作業係数を乗じた垂直静荷重，作業係数を乗じた水平動荷重，熱荷重並びにクレーンの作動時における風荷重の組合せ

第 3 号：垂直動荷重，垂直静荷重，熱荷重及び地震荷重の組合せ

第 4 号：垂直動荷重，垂直静荷重，熱荷重及び衝突荷重の組合せ

第 5 号：垂直静荷重，熱荷重及びクレーンの停止時における風荷重の組合せ

(4) 評価結果

以上から当該クレーンの構造強度はクレーン構造規格に基づく規定を満たしている。

1.4 コンクリート基礎の構造強度

(1) 評価方針

長期及び短期荷重時のコンクリート基礎に対する要求性能は、キャスク支持架台に作用する力を支持するとともに、これを固定する固定ボルトの引抜き力が許容引抜き力を下回ること、及び、基礎の傾斜が許容傾斜量を下回ることである。ここでは、コンクリート基礎の構造強度評価を行い、基礎が要求性能を有していることを確認する。

評価の方法は、長期及び短期荷重時に対する梁モデルによる構造計算を行い、コンクリート基礎の応力度の照査、地盤改良体強度の照査、地盤の支持力度の照査を行うこととする。

(2) 評価方法の概要

1) 構造図面

図 1.4-1～図 1.4-4 にキャスク配置図，基礎構造図及び地盤改良断面図を示す。

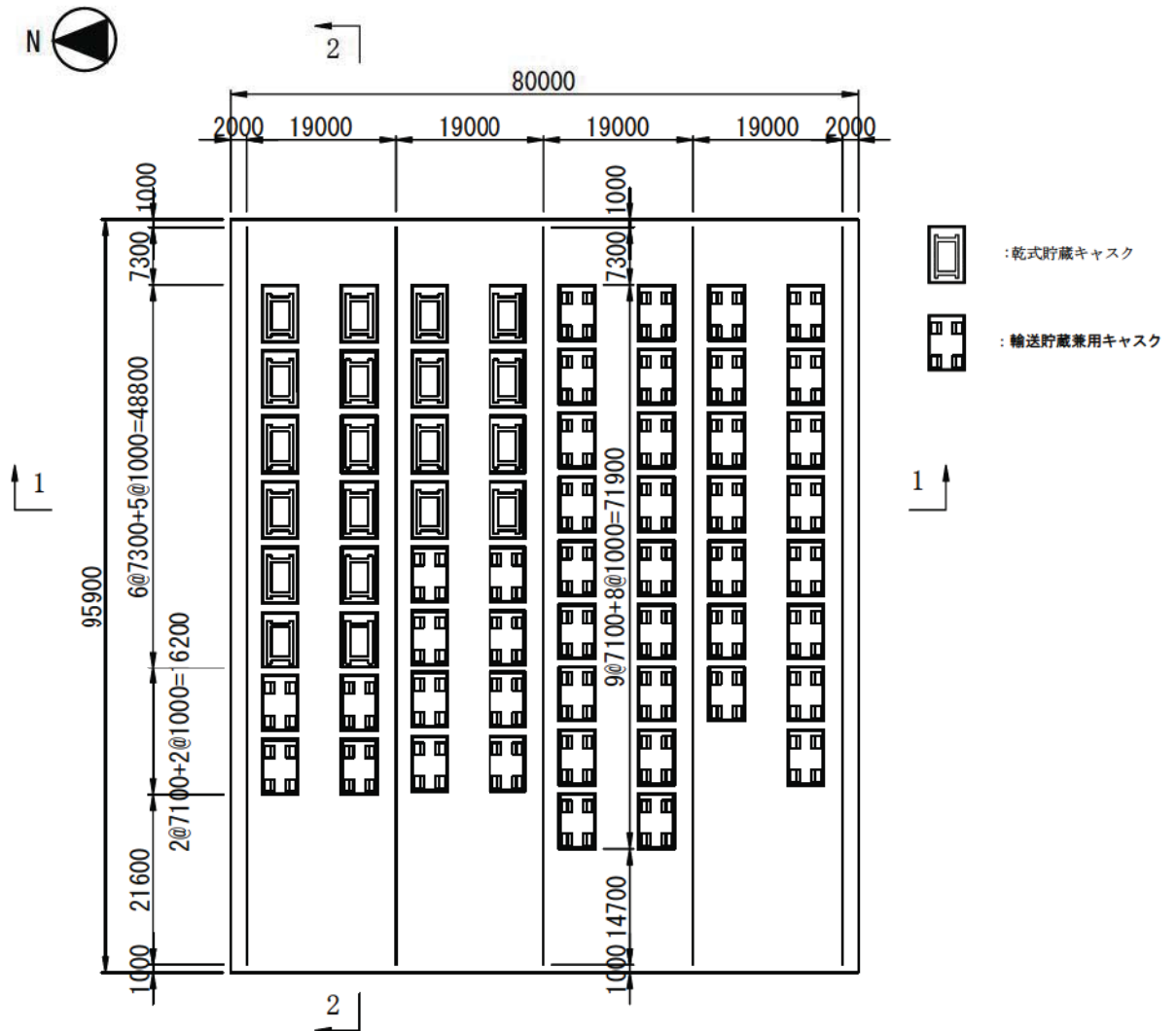


図 1.4-1 キャスク配置図 (単位 : mm)

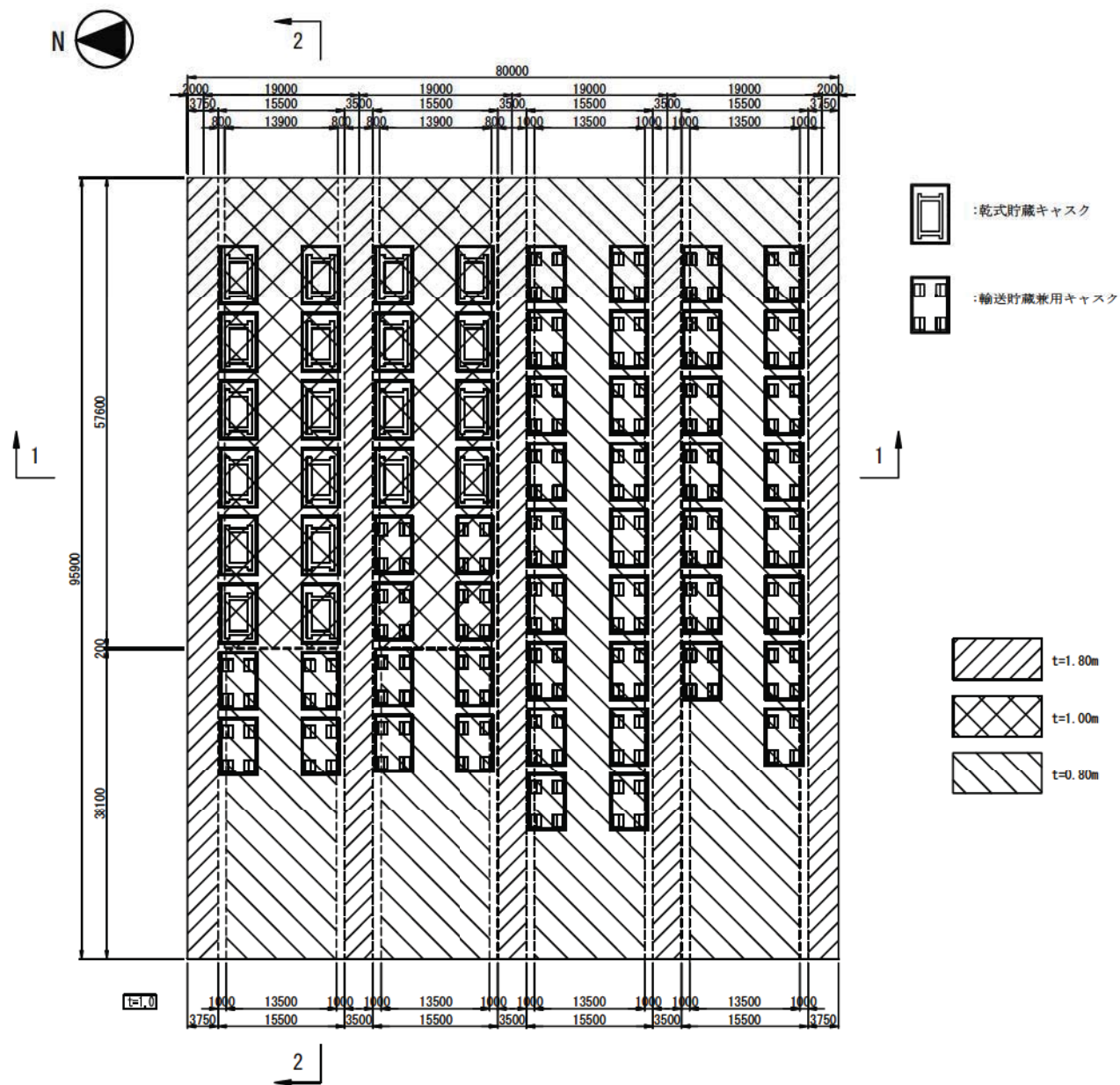


図 1.4-2 基礎平面図 (単位 : mm)

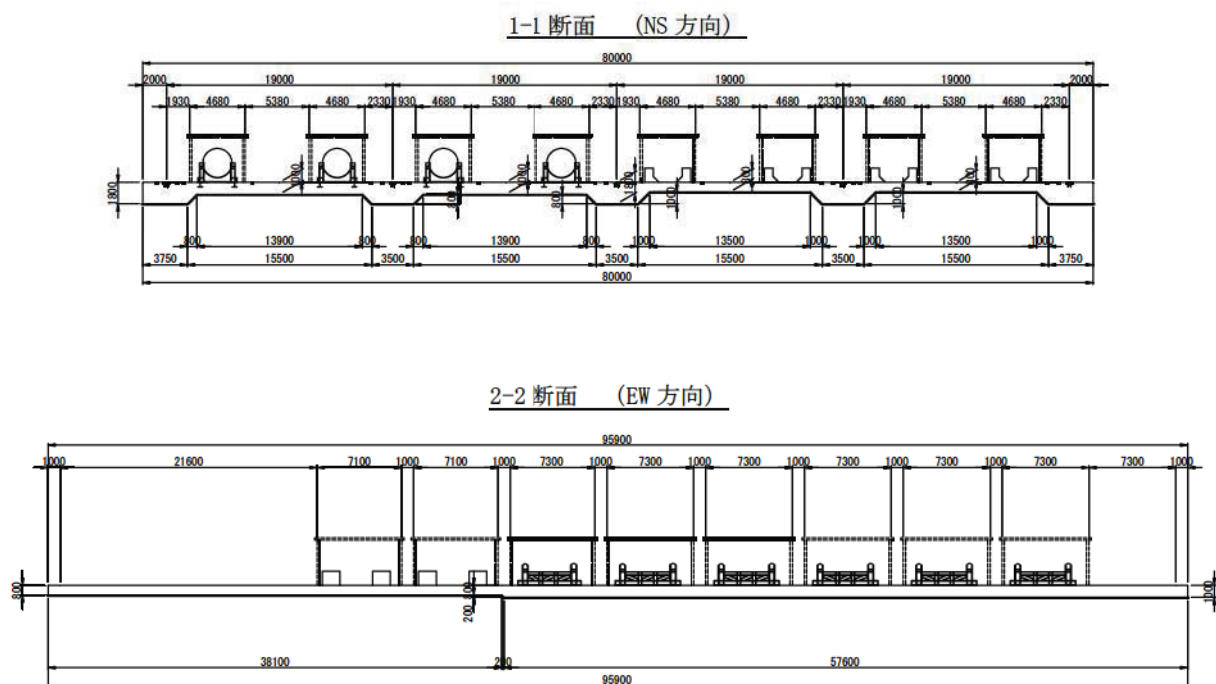


图 1.4-3 基础断面图 (单位: mm)

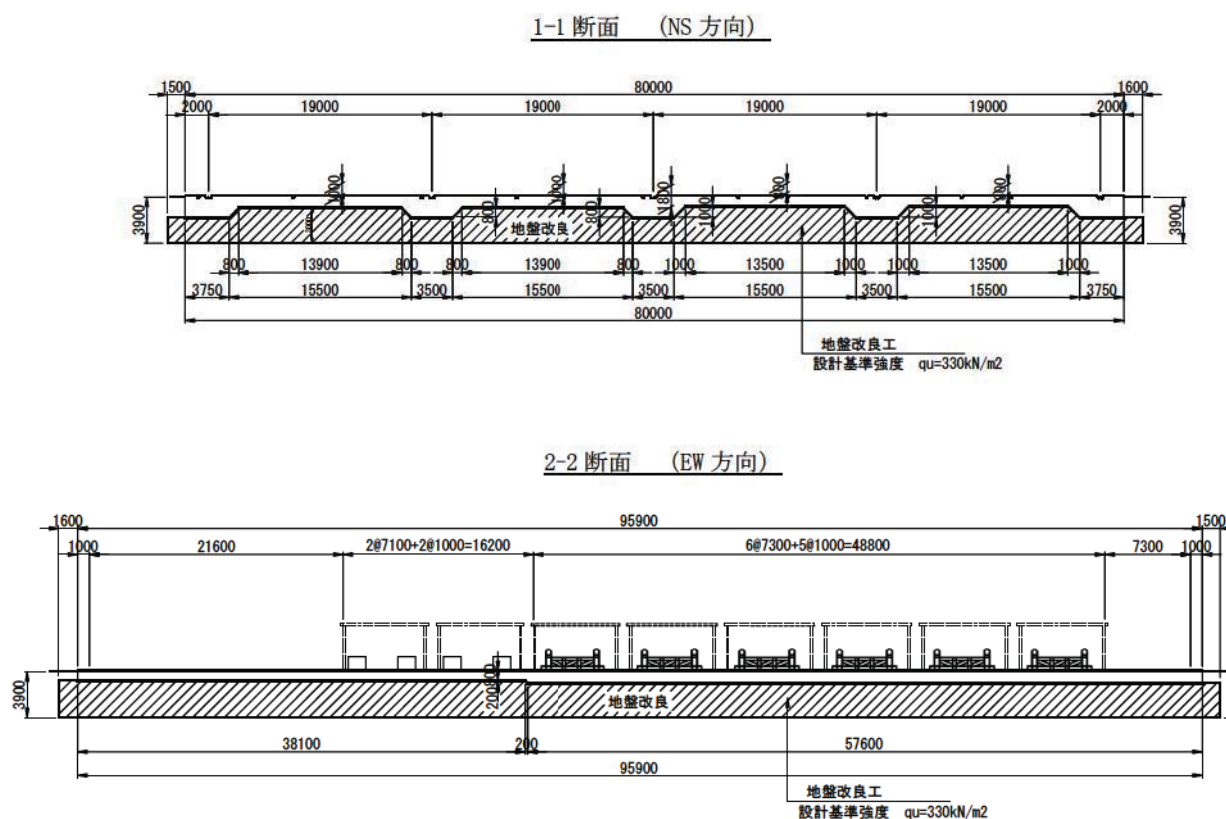


图 1.4-4 地盤改良断面图 (单位: mm)

2) 検討フロー

コンクリート基礎の構造強度の検討フローを図 1.4-5 に示す。

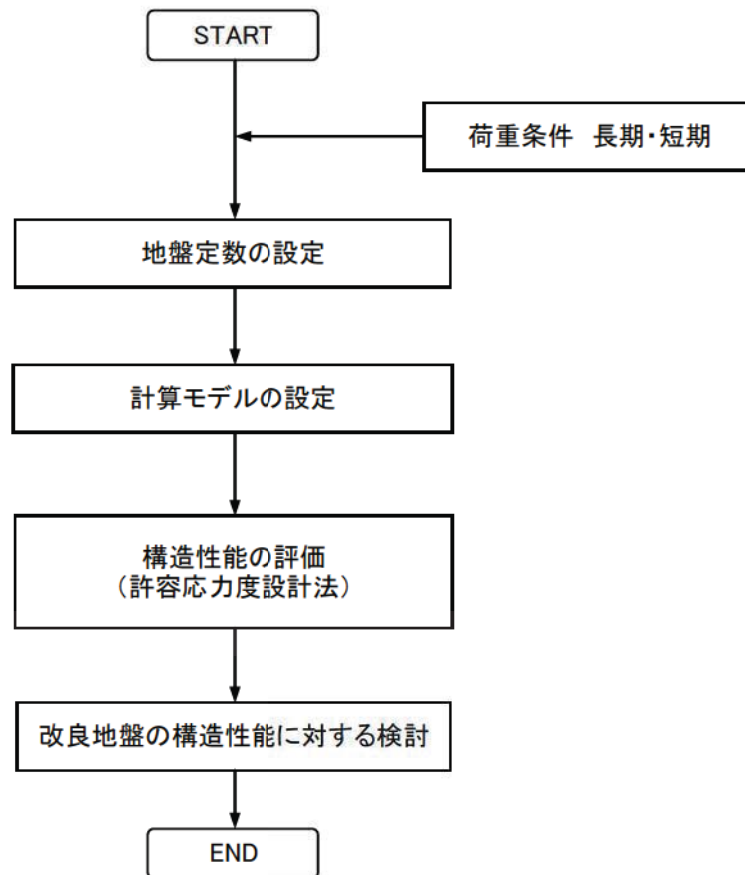


図 1.4-5 キャスク仮保管設備コンクリート基礎の構造強度の検討フロー

3) 準拠規準

コンクリート基礎の検討は、以下の法規及び規準類に準拠して行う。

- ① 原子力発電所耐震設計技術規程 JEAC4601-2008 (社) 日本電気協会
- ② 乾式キャスクを用いる使用済み燃料中間貯蔵建屋の基礎構造の設計に関する技術規程 JEAC4616-2009 (社) 日本電気協会
- ③ コンクリート標準示方書 設計編 (2007) (社) 土木学会
- ④ コンクリート標準示方書 構造性能照査編 (2002) (社) 土木学会
- ⑤ 原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震設計に関する安全性照査マニュアル (1992) (社) 土木学会
- ⑥ 原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル (2005) (社) 土木学会
- ⑦ 道路橋示方書・同解説 I 共通編 IV下部構造編 (社) 日本道路協会 (平成 14 年)
- ⑧ 道路橋示方書・同解説 I 共通編 V耐震設計編 (社) 日本道路協会 (平成 14 年)

4) 評価方法

構造強度の評価方法を表 1.4-1 に示す。

表 1.4 -1 構造強度の評価方法

評価対象	評価方法	準拠規準
鉄筋コンクリート	コンクリート及び鉄筋の発生応力度が許容応力度を下回ることを確認する。	④
改良地盤	改良地盤に作用する地盤反力度，せん断応力度が，改良地盤の許容圧縮応力度，許容せん断応力度を下回ることを確認する。	②
支持地盤	改良体下面に作用する地盤反力度が，許容地盤反力度を下回ることを確認する。	②及び⑦
基礎の沈下	クレーンレール部基礎の沈下に伴うレールの傾斜が許容値を下回ることを確認する。	—

5) 使用材料及び許容応力度

使用材料の物性値及び設計強度を表 1.4-2 及び表 1.4-3 に示す。

表 1.4-2 コンクリートの材料定数，許容応力度及び鉄筋の許容応力度

コンクリートの材料定数

	記号	単位	
ヤング係数	E	(N/mm ²)	2.50 × 10 ⁴
単位体積重量	γ	(kN/m ³)	24.0

コンクリートの許容応力度

	記号	単位	長期	短期
設計基準強度	σ _{ck}	(N/mm ²)	24.00	
許容圧縮応力度	σ _{ca}	(N/mm ²)	9.00	13.50
許容せん断応力度	τ _{al}	(N/mm ²)	0.450	0.675

鉄筋の許容応力度

	記号	単位	長期	短期
鋼材の種類			SD345	
許容引張応力度	σ _{sa}	(N/mm ²)	196	294
鉄筋径			D13～D32	

表 1.4-3 改良地盤，支持地盤の物性値，許容応力度並びにクレーンレールの許容傾斜量

改良地盤の物性値、許容応力度

	記号	単位	長期	短期
変形係数	E	(kN/m ²)	32900	
許容圧縮応力度	f _{sc}	(kN/m ²)	110	220
許容せん断応力度	f _{ss}	(kN/m ²)	22	44

支持地盤の許容支持力度

	記号	単位	長期	短期
許容支持力度	q _a	(kN/m ²)	666	531

クレーンの許容傾斜量

	記号	単位	長期	短期
許容傾斜量	i	—	1/800	—

※「鋼構造設計規準—許容応力度設計法—，2005 改定，（社）日本建築学会」より

(3) 本設備の設計荷重とコンクリート基礎のモデル化

1) 設計荷重

設計で考慮する荷重を以下に示す。

・鉛直荷重 (VL)

コンクリート基礎自重による鉛直方向の荷重で、基礎及びペデスタルの鉛直荷重を対象とする。表 1.4-4 に鉛直荷重を示す。

表 1.4-4 鉛直荷重

		奥行き方向幅	部材高	鉛直荷重
		(m)	(m)	(kN/m)
レール支持梁(EW方向)	レール部スラブ	3.50	1.80	151
NS方向スラブ	レール部スラブ	8.30	1.80	359
	キャスク部スラブ	8.30	1.00	199
	キャスク部スラブ	8.30	0.80	159
	ペデスタル	1.50 × 0.72 × 1.185		70
EW方向スラブ	キャスク部スラブ	5.17	1.00	132
	キャスク部スラブ	5.17	0.80	111
	ペデスタル	1.50 × 0.72 × 1.185		70

注) ペデスタルの鉛直荷重は2脚当りを示す。

・クレーン荷重 (CL)

クレーンによる荷重を表 1.4-5 に示す。

表 1.4-5 クレーン荷重

			(1輪当り)					
			走行車輪荷重					
	状態	フック寄り	走行給電側			反走行給電側		
			鉛直方向	横行方向	走行方向	鉛直方向	横行方向	走行方向
			(UD方向)	(NS方向)	(EW方向)	(UD方向)	(NS方向)	(EW方向)
			(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)
長期	定格荷重(150t)	走行給電側	622	62	93	262	26	39
短期	定格荷重(150t)	走行給電側	743	86	86	142	17	17

注) 基礎天端の荷重を示す。

・キャスク荷重(CAL)

キャスクによる荷重を表 1.4-6 に示す。

表 1.4-6 キャスク荷重

貯蔵キャスク			1基当たり	
	項目	単位	長期	短期
NS方向	鉛直力	(kN)	1280	1280
	水平力	(kN)	0	307
	モーメント	(kN・m)	0	453
EW方向	鉛直力	(kN)	1280	1280
	水平力	(kN)	0	307
	モーメント	(kN・m)	88	540

輸送貯蔵兼用キャスク			1脚当たり	
			長期	短期
NS方向	鉛直力	(kN)	320	320
	水平力	(kN)	0	154
	モーメント	(kN・m)	105	105
EW方向	鉛直力	(kN)	320	320
	水平力	(kN)	0	148
	モーメント	(kN・m)	0	69

・モジュール荷重(MJL)

モジュールによる荷重を表 1.4-7 に示す。

表 1.4-7 モジュール荷重

貯蔵キャスク			1基当たり	
	記号	単位	NS方向	EW方向
長期	V	(kN)	576	576
	H	(kN)	0	0
短期	V	(kN)	576	576
	H	(kN)	-138	138

輸送貯蔵兼用キャスク			1基当たり	
	記号	単位	NS方向	EW方向
長期	V	(kN)	565	566
	H	(kN)	0	0
短期	V	(kN)	565	565
	H	(kN)	-136	136

・地震荷重(K)

コンクリート基礎の短期荷重における設計震度は、一般産業施設（原子力施設の耐震設計上の重要度分類におけるCクラス相当）として、準拠規準①より以下の値とする。

$$K_H=0.3$$

なお、鉛直震度は考慮しない。

〔参考〕 準拠規準①より抜粋

5.3.1 設計用地震力

屋外重要土木構造物に用いる設計用地震力は、以下に示す2つの地震力とする。

① 構造物の基本設計に用いる静的地震力

屋外重要土木構造物の基本設計に用いる静的水平地震力は、以下に示す設計水平震度（ K_H ）によることを原則とする。

表 5.3.1-1 設計震度

地 盤 の 種 類	K_H
原子炉建屋基礎地盤とほぼ同等の地盤	0.2
原子炉建屋基礎地盤より軟質で震度の増幅が予想される地盤	0.3

② 構造物の詳細設計に用いる地震動

屋外重要土木構造物の詳細設計に用いる地震動は、基準地震動 S_s （水平方向地震動及び鉛直方向地震動）に基づくものとする。

・風荷重(WL)

コンクリート基礎に対しては、風荷重は考慮しない（コンクリート基礎が扁平な形状であり大部分が地中構造物のため）。

・積雪荷重 (SL)

短期事象では地震時が支配的であることから、積雪時の検討は省略する。

2) コンクリート基礎のモデル化

コンクリート基礎は梁バネモデルにより解析する。検討モデルは荷重と基礎形状の特性により、表 1.4-8 に示す 3 タイプについてモデル化する。

表 1.4-8 検討タイプ

検討タイプ	考慮する設備荷重	形状特性
レール支持梁(EW方向)	クレーン	幅3.5m、厚1.8mの一定形状
NS方向基礎	キャスク、クレーン、モジュール	厚1.8m、1.0m、0.8m
EW方向基礎	キャスク、モジュール	厚1.0m、0.8m

3 タイプの検討位置を図 1.4-6 に、解析モデルを表 1.4-9 に示す。

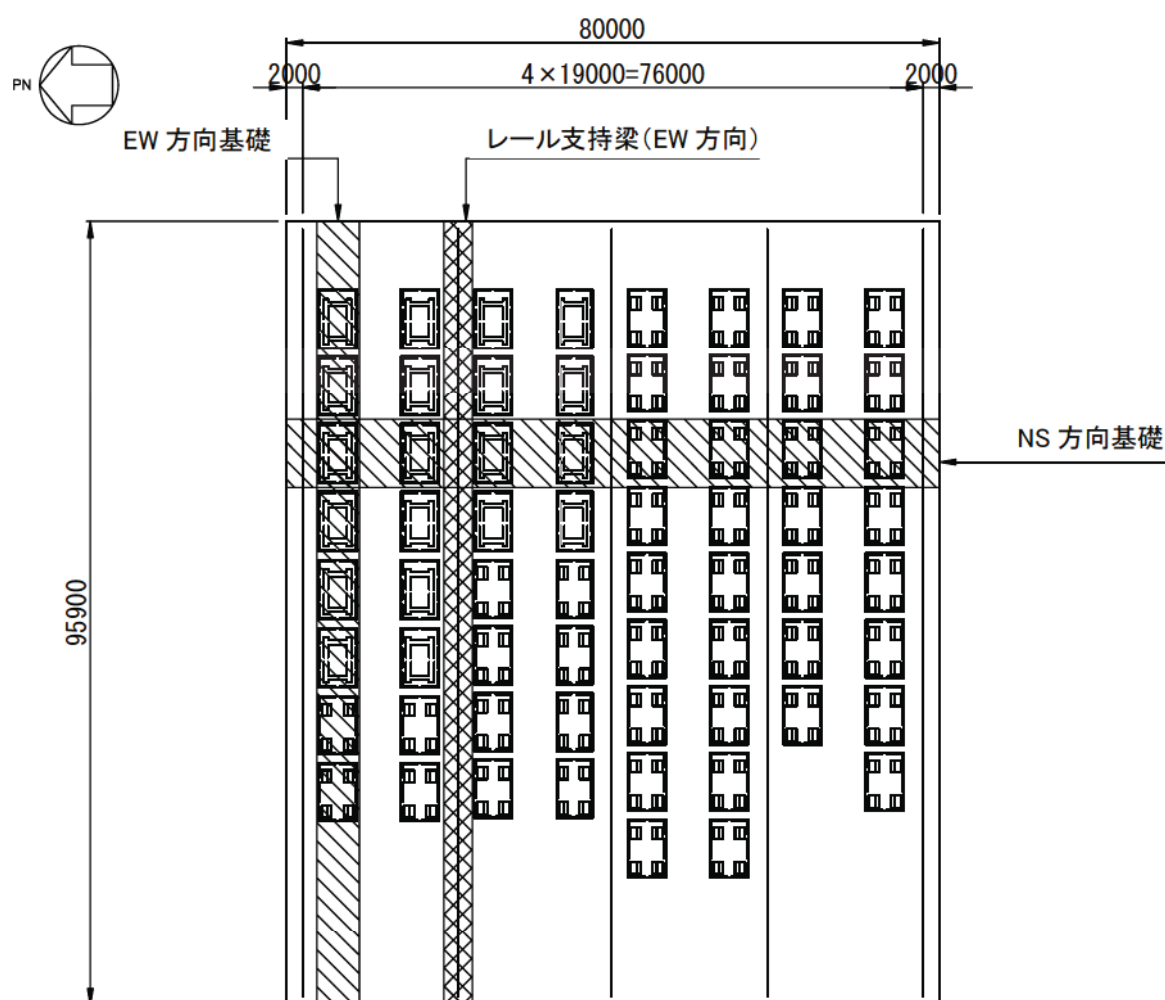
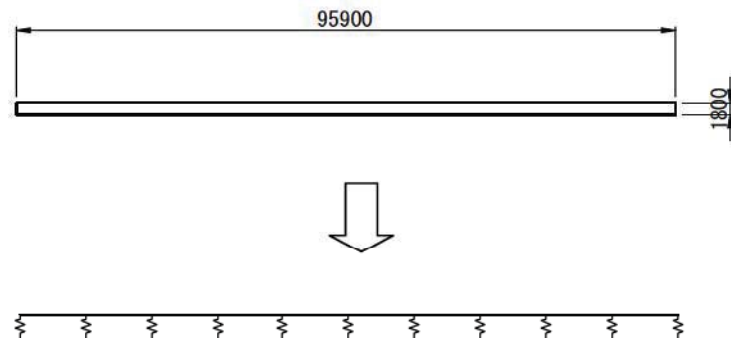
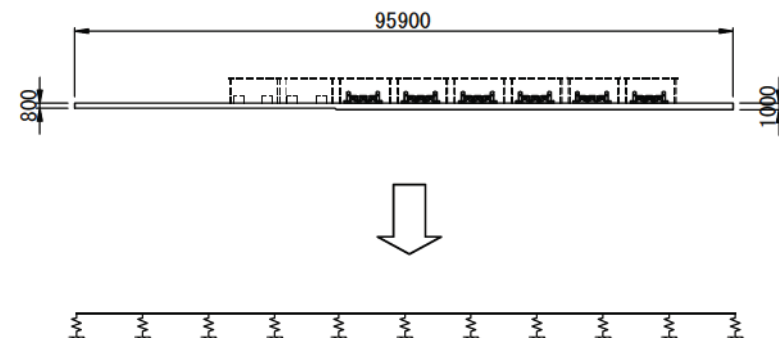


図 1.4-6 検討モデル (単位: mm)

表 1. 4-9 検討タイプの形状とモデル図

レール 支持梁	
N S 方向基礎	
E W 方向基礎	

(単位:mm)

3) 荷重の組合せ

荷重組合せを表 1.4-10 に示す。

表 1.4-10 コンクリート基礎の荷重組合せ

レール支持梁(EW方向)

想定する状態	許容応力度	荷重組合せ内容
常時	長期	VL+CL
地震時	短期	VL+CL+K(EW)

NS方向基礎

想定する状態	許容応力度	荷重組合せ内容
常時	長期	VL+CL+CAL+MJL
地震時	短期	VL+CL+CAL+MJL+K(NS)

EW方向基礎

想定する状態	許容応力度	荷重組合せ内容
常時	長期	VL+CAL+MJL
地震時	短期	VL+CAL+MJL+K(EW)

4) クレーン及びキャスク・モジュールの載荷ケース

載荷ケース別のクレーン及びキャスク・モジュールの載荷位置を表 1.4-11～1.4-14 に示す。

表 1.4-11 クレーンの載荷位置 (レール支持梁 (EW 方向))

クレーン 1	
クレーン 2	
クレーン 3	
クレーン 4	
クレーン 5	

表 1.4-12 クレーンの載荷位置 (NS 方向基礎)

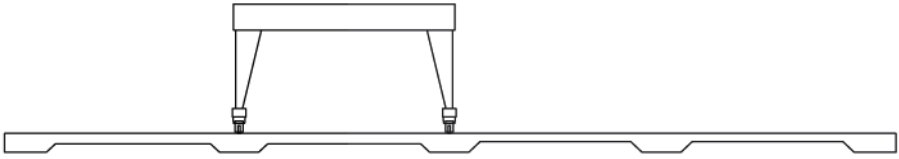
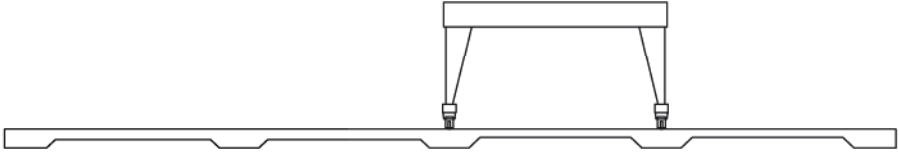
クレーン 1	
クレーン 2	
クレーン 3	
クレーン 4	

表 1.4-13 キャスク及びモジュールの載荷位置 (NS 方向基礎)

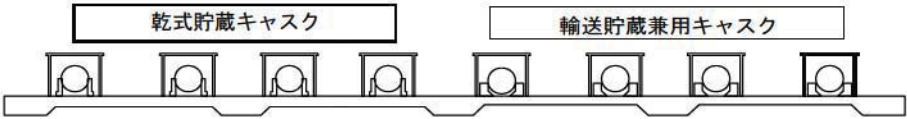
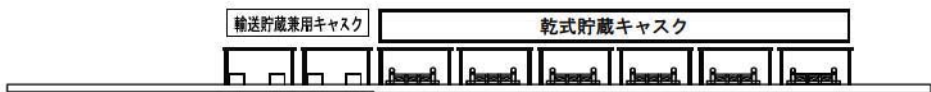
キャスク・モジュール 1	
キャスク・モジュール 2	
キャスク・モジュール 3	
キャスク・モジュール 4	
キャスク・モジュール 5	

表 1.4-14 キャスク及びモジュールの载荷位置 (EW 方向基礎)

モジュール 1 モジュール 1	
モジュール 2 モジュール 2	
モジュール 3 モジュール 3	
モジュール 4 モジュール 4	
モジュール 5 モジュール 5	
モジュール 6 モジュール 6	
モジュール 7 モジュール 7	

5) 載荷ケースの組合せ

クレーン及びキャスク・モジュールの載荷ケースの組合せを表 1.4-15～表 1.4-17 に示す。

表 1.4-15 載荷ケースの組合せ（レール支持梁（EW 方向））

	組合せケース	クレーン	キャスク・モジュール
長期	ケース 1	クレーン 1	-
	ケース 2	クレーン 2	-
	ケース 3	クレーン 3	-
	ケース 4	クレーン 4	-
	ケース 5	クレーン 5	-
短期	ケース 6	クレーン 1	-
	ケース 7	クレーン 2	-
	ケース 8	クレーン 3	-
	ケース 9	クレーン 4	-
	ケース 10	クレーン 5	-

表 1.4-16 載荷ケースの組合せ（NS 方向基礎）

	組合せケース	クレーン	キャスク・モジュール	
長期	ケース 1	クレーン 1	キャスク・モジュール 1	乾式貯蔵キャスク 4 基+輸送貯蔵兼用キャスク 4 基
	ケース 2		キャスク・モジュール 2	乾式貯蔵キャスク 4 基+輸送貯蔵兼用キャスク 2 基
	ケース 3		キャスク・モジュール 3	乾式貯蔵キャスク 4 基
	ケース 4		キャスク・モジュール 4	乾式貯蔵キャスク 2 基
	ケース 5		キャスク・モジュール 5	乾式貯蔵キャスクなし
	ケース 6	クレーン 2	キャスク・モジュール 1	乾式貯蔵キャスク 4 基+輸送貯蔵兼用キャスク 4 基
	ケース 7		キャスク・モジュール 2	乾式貯蔵キャスク 4 基+輸送貯蔵兼用キャスク 2 基
	ケース 8		キャスク・モジュール 3	乾式貯蔵キャスク 4 基
	ケース 9		キャスク・モジュール 4	乾式貯蔵キャスク 2 基
	ケース 10		キャスク・モジュール 5	乾式貯蔵キャスクなし
	ケース 11	クレーン 3	キャスク・モジュール 1	乾式貯蔵キャスク 4 基+輸送貯蔵兼用キャスク 4 基
	ケース 12		キャスク・モジュール 2	乾式貯蔵キャスク 4 基+輸送貯蔵兼用キャスク 2 基
	ケース 13		キャスク・モジュール 3	乾式貯蔵キャスク 4 基
	ケース 14		キャスク・モジュール 4	乾式貯蔵キャスク 2 基
	ケース 15		キャスク・モジュール 5	乾式貯蔵キャスクなし
	ケース 16	クレーン 4	キャスク・モジュール 1	乾式貯蔵キャスク 4 基+輸送貯蔵兼用キャスク 4 基
	ケース 17		キャスク・モジュール 2	乾式貯蔵キャスク 4 基+輸送貯蔵兼用キャスク 2 基
	ケース 18		キャスク・モジュール 3	乾式貯蔵キャスク 4 基
	ケース 19		キャスク・モジュール 4	乾式貯蔵キャスク 2 基
	ケース 20		キャスク・モジュール 5	乾式貯蔵キャスクなし
短期	ケース 21	クレーン 1	キャスク・モジュール 1	乾式貯蔵キャスク 4 基+輸送貯蔵兼用キャスク 4 基
	ケース 22		キャスク・モジュール 2	乾式貯蔵キャスク 4 基+輸送貯蔵兼用キャスク 2 基
	ケース 23		キャスク・モジュール 3	乾式貯蔵キャスク 4 基
	ケース 24		キャスク・モジュール 4	乾式貯蔵キャスク 2 基
	ケース 25		キャスク・モジュール 5	乾式貯蔵キャスクなし
	ケース 26	クレーン 2	キャスク・モジュール 1	乾式貯蔵キャスク 4 基+輸送貯蔵兼用キャスク 4 基
	ケース 27		キャスク・モジュール 2	乾式貯蔵キャスク 4 基+輸送貯蔵兼用キャスク 2 基
	ケース 28		キャスク・モジュール 3	乾式貯蔵キャスク 4 基
	ケース 29		キャスク・モジュール 4	乾式貯蔵キャスク 2 基
	ケース 30		キャスク・モジュール 5	乾式貯蔵キャスクなし
	ケース 31	クレーン 3	キャスク・モジュール 1	乾式貯蔵キャスク 4 基+輸送貯蔵兼用キャスク 4 基
	ケース 32		キャスク・モジュール 2	乾式貯蔵キャスク 4 基+輸送貯蔵兼用キャスク 2 基
	ケース 33		キャスク・モジュール 3	乾式貯蔵キャスク 4 基
	ケース 34		キャスク・モジュール 4	乾式貯蔵キャスク 2 基
	ケース 35		キャスク・モジュール 5	乾式貯蔵キャスクなし
	ケース 36	クレーン 4	キャスク・モジュール 1	乾式貯蔵キャスク 4 基+輸送貯蔵兼用キャスク 4 基
	ケース 37		キャスク・モジュール 2	乾式貯蔵キャスク 4 基+輸送貯蔵兼用キャスク 2 基
	ケース 38		キャスク・モジュール 3	乾式貯蔵キャスク 4 基
	ケース 39		キャスク・モジュール 4	乾式貯蔵キャスク 2 基
	ケース 40		キャスク・モジュール 5	乾式貯蔵キャスクなし

表 1.4-17 載荷ケースの組合せ（EW 方向基礎）

	組合せケース	クレーン	キャスク・モジュール	
長期	ケース 1	-	キャスク・モジュール 1	乾式貯蔵キャスク 6 基+輸送貯蔵兼用キャスク 2 基
	ケース 2	-	キャスク・モジュール 2	乾式貯蔵キャスク 6 基
	ケース 3	-	キャスク・モジュール 3	乾式貯蔵キャスク 5 基
	ケース 4	-	キャスク・モジュール 4	乾式貯蔵キャスク 4 基
	ケース 5	-	キャスク・モジュール 5	乾式貯蔵キャスク 3 基
	ケース 6	-	キャスク・モジュール 6	乾式貯蔵キャスク 2 基
	ケース 7	-	キャスク・モジュール 7	乾式貯蔵キャスク 1 基
短期	ケース 8	-	キャスク・モジュール 1	乾式貯蔵キャスク 6 基+輸送貯蔵兼用キャスク 2 基
	ケース 9	-	キャスク・モジュール 2	乾式貯蔵キャスク 6 基
	ケース 10	-	キャスク・モジュール 3	乾式貯蔵キャスク 5 基
	ケース 11	-	キャスク・モジュール 4	乾式貯蔵キャスク 4 基
	ケース 12	-	キャスク・モジュール 5	乾式貯蔵キャスク 3 基
	ケース 13	-	キャスク・モジュール 6	乾式貯蔵キャスク 2 基
	ケース 14	-	キャスク・モジュール 7	乾式貯蔵キャスク 1 基

6) 設計断面力

検討タイプ別に、全ての組合せケースの最大値（負の値は最小値）を抽出し、設計断面力とする。

7) 荷重図

代表例として、検討タイプ別に下側鉄筋の決定ケースとなった組合せケースの荷重図を図 1.4-7～図 1.4-9 に示す。

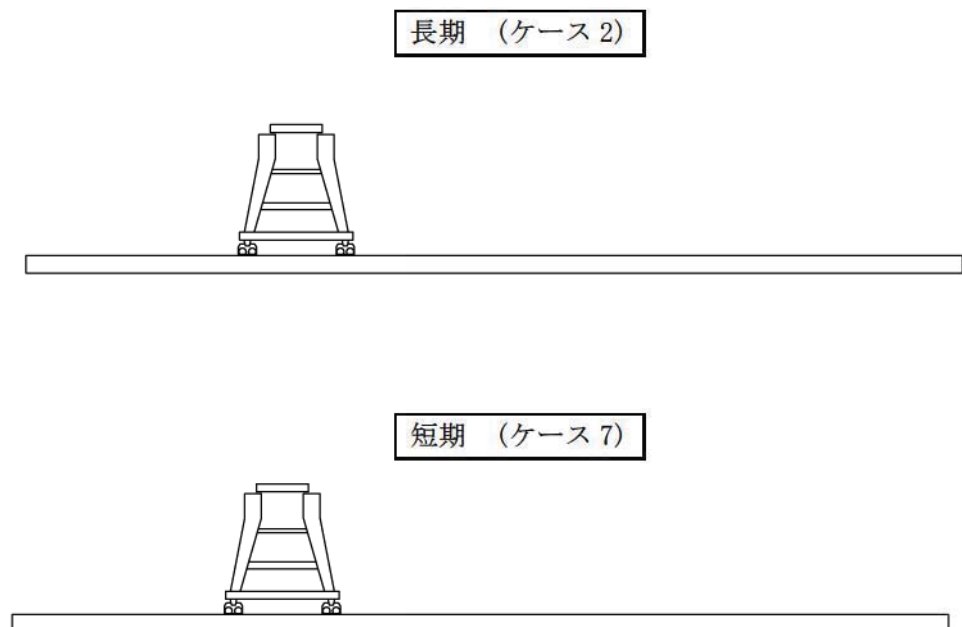
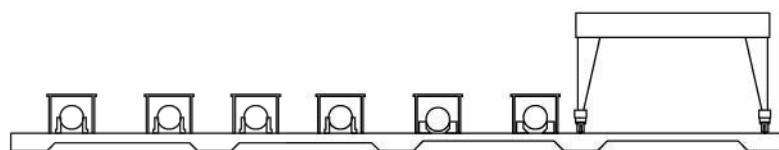


図 1.4-7 荷重図（レール支持梁（EW 方向））

長期 (ケース 17)



短期 (ケース 37)

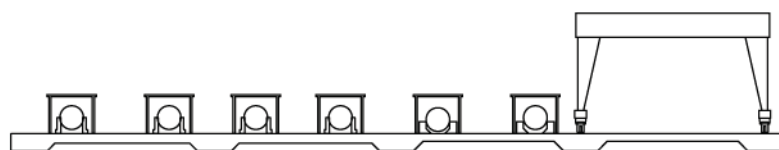


図 1.4-8 荷重図 (NS 方向基礎)

長期 (ケース 7)



短期 (ケース 8)



図 1.4-9 荷重図 (EW 方向基礎)

(4) 構造強度の評価

構造強度の評価は次式に示すように応力度が許容応力度を下回ることを確認する。

曲げ応力度の照査

$$\sigma_c \leq \sigma_{ca}$$

$$\sigma_s \leq \sigma_{sa}$$

ここに,

σ_c : コンクリートの曲げ圧縮応力度 (N/mm²)

σ_{ca} : コンクリートの許容曲げ圧縮応力度 (N/mm²)

σ_s : 鉄筋の引張応力度 (N/mm²)

σ_{sa} : 鉄筋の許容引張応力度 (N/mm²)

せん断応力度の照査

$$\tau \leq \tau_a$$

ここに,

τ : コンクリートのせん断応力度 (N/mm²)

τ_a : コンクリートの許容せん断応力度 (N/mm²)

断面検討結果を表 1.4-18～表 1.4-20 に示す。

断面検討の結果、応力度が許容応力度以下であることを確認した。

表 1.4-18 断面検討結果（レール支持梁（EW 方向））

項目			記号	単位	レール支持梁
部材	部材幅		b	(mm)	3500
	部材高		h	(mm)	1800
鉄筋	1段目	位置	d	(mm)	525
		鉄筋			D25
		本数		(本)	24.00
		鉄筋量	As	(cm^2)	121.61
	2段目	位置	d	(mm)	866
		鉄筋			D25
		本数		(本)	6.00
		鉄筋量	As	(cm^2)	30.40
	3段目	位置	d	(mm)	1658
		鉄筋			D32
		本数		(本)	24.00
		鉄筋量	As	(cm^2)	190.61
	せん断	鉄筋			D22
		ピッチ		(mm)	—
		鉄筋本数		(本)	4.000
		配置間隔	S _s	(mm)	450

	引張鉄筋	項目	記号	単位	長期	短期
設計断面力	上側	決定ケース			ケース5	ケース10
		曲げモーメント	Md	(kN・m)	-1838	-1409
		軸力	Nd	(kN)	-142	-131
		せん断力	Vd	(kN)	7	9
	下側	決定ケース			ケース2	ケース7
		曲げモーメント	Md	(kN・m)	3175	2777
		軸力	Nd	(kN)	47	43
		せん断力	Vd	(kN)	169	162
	せん断力最大	決定ケース			ケース2	ケース8
		せん断力	Vd	(kN)	748	814

引張鉄筋	項目		記号	単位	長期	短期
上側	コンクリート	圧縮応力度	σc	(N/mm^2)	2.43	1.87
		許容曲げ圧縮応力度	σca	(N/mm^2)	9.00	13.50
		$\sigma c / \sigma ca \leq 1.0$			0.27	0.14
		判定			OK	OK
	鉄筋	引張応力度	σs	(N/mm^2)	123	95
		許容引張応力度	σsa	(N/mm^2)	196	294
		$\sigma s / \sigma sa \leq 1.0$			0.63	0.32
		判定			OK	OK
下側	コンクリート	圧縮応力度	σc	(N/mm^2)	3.10	2.71
		許容曲げ圧縮応力度	σca	(N/mm^2)	9.00	13.50
		$\sigma c / \sigma ca \leq 1.0$			0.34	0.20
		判定			OK	OK
	鉄筋	引張応力度	σs	(N/mm^2)	109	95
		許容引張応力度	σsa	(N/mm^2)	196	294
		$\sigma s / \sigma sa \leq 1.0$			0.56	0.32
		判定			OK	OK
せん断		引張応力度	τ	(N/mm^2)	0.147	0.160
		許容引張応力度	τa	(N/mm^2)	0.450	0.675
		$\tau / \tau a \leq 1.0$			0.33	0.24
		判定			OK	OK

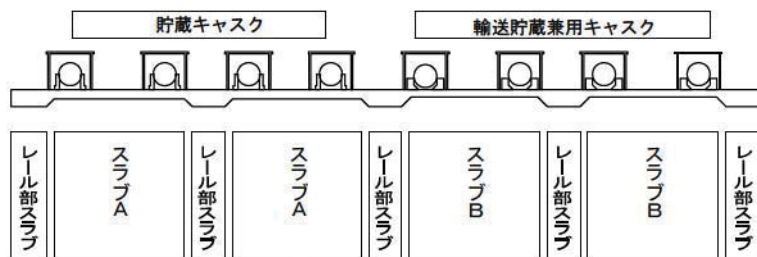


図 1.4-10 NS 方向基礎検討位置図

表 1.4-19 断面検討結果 (NS 方向基礎)

項目		記号	単位	レール部スラブ	スラブA	スラブB
部材	部材幅	b	(mm)	4380	7280	5760
	部材高	h	(mm)	1650	850	650
鉄筋	1段目※	位置	d	(mm)	350	100
		鉄筋		D25	D25	D25
		本数	(本)	58.000	48.000	38.000
		鉄筋量	As	(cm ²)	293.89	192.55
	2段目	位置	d	(mm)	1540	540
		鉄筋		D32	D25	D32
		本数	(本)	29.000	48.000	38.000
		鉄筋量	As	(cm ²)	230.32	301.80
	せん断	鉄筋		D16	D16	D16
		ピッチ	(mm)	600	600	600
		鉄筋本数	(本)	13.833	13.833	13.833
		配置間隔	S _s	(mm)	900	600

	引張鉄筋	項目	記号	単位	長期			短期		
					レール部スラブ	スラブA	スラブB	レール部スラブ	スラブA	スラブB
設計断面力	上側	決定ケース			ケース 5	ケース 7	ケース11	ケース34	ケース27	ケース31
		曲げモーメント	Md	(kN・m)	-934	-1501	-1338	-187	-1388	-1070
		軸力	Nd	(kN)	-116	-56	-16	-695	-466	-117
		せん断力	Vd	(kN)	643	45	28	268	74	78
	下側	決定ケース			ケース18	ケース13	ケース17	ケース34	ケース33	ケース37
		曲げモーメント	Md	(kN・m)	3570	2622	2471	3573	2216	1931
		軸力	Nd	(kN)	128	80	119	-391	-516	-486
		せん断力	Vd	(kN)	633	406	988	752	1151	1016
	せん断力最大	決定ケース			ケース 9	ケース 7	ケース16	ケース31	ケース33	ケース36
		せん断力	Vd	(kN)	913	1167	1047	926	1151	1053

引張鉄筋位置	項目	記号	単位	長期			短期		
				レール部スラブ	スラブA	スラブB	レール部スラブ	スラブA	スラブB
上側	コンクリート	圧縮応力度 σ_c	(N/mm ²)	0.73	4.74	4.30	0.00	4.50	3.43
		許容曲げ圧縮応力度 σ_{ca}	(N/mm ²)	9.00	9.00	9.00	13.50	13.50	13.50
		$\sigma_c / \sigma_{ca} \leq 1.0$		0.08	0.53	0.48	0.00	0.33	0.25
		判定		OK	OK	OK	OK	OK	OK
	鉄筋	引張応力度 σ_s	(N/mm ²)	29	144	145	39	146	119
		許容引張応力度 σ_{sa}	(N/mm ²)	196	196	196	294	294	294
		$\sigma_s / \sigma_{sa} \leq 1.0$		0.15	0.73	0.74	0.13	0.50	0.40
		判定		OK	OK	OK	OK	OK	OK
下側	コンクリート	圧縮応力度 σ_c	(N/mm ²)	2.86	4.98	7.21	2.68	4.17	5.53
		許容曲げ圧縮応力度 σ_{ca}	(N/mm ²)	9.00	9.00	9.00	13.50	13.50	13.50
		$\sigma_c / \sigma_{ca} \leq 1.0$		0.32	0.55	0.80	0.20	0.31	0.41
		判定		OK	OK	OK	OK	OK	OK
	鉄筋	引張応力度 σ_s	(N/mm ²)	106	149	174	119	136	146
		許容引張応力度 σ_{sa}	(N/mm ²)	196	196	196	294	294	294
		$\sigma_s / \sigma_{sa} \leq 1.0$		0.54	0.76	0.89	0.40	0.46	0.50
		判定		OK	OK	OK	OK	OK	OK
せん断	せん断応力度 τ	(N/mm ²)		0.082	0.217	0.267	0.083	0.214	0.268
		許容せん断応力度 τ_a	(N/mm ²)	0.450	0.450	0.450	0.675	0.675	0.675
	$\tau / \tau_a \leq 1.0$			0.18	0.48	0.59	0.12	0.32	0.40
		判定		OK	OK	OK	OK	OK	OK

※ 1 段目の鉄筋量は長期上引張が最も厳しくなる部材における値を示す。

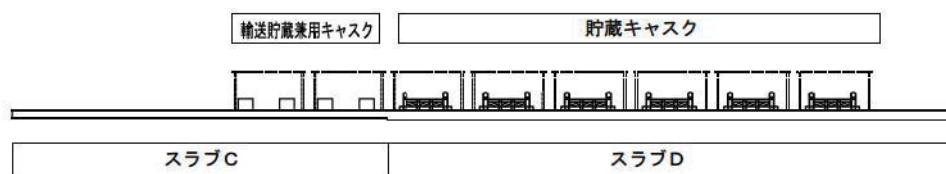


図 1.4-11 EW 方向基礎検討位置図

表 1.4-20 断面検討結果 (EW 方向基礎)

項目		記号	単位	スラブC	スラブD
部材	部材幅	b	(mm)	4,003	4,504
	部材高	h	(mm)	800	1,000
鉄筋	1段目	位置	d	275	525
		鉄筋		D25	D25
		本数	(本)	24,000	30,000
		鉄筋量	As	121.61	152.01
	2段目	位置	d	661	866
		鉄筋		D25	D22
		本数	(本)	26,000	30,000
		鉄筋量	As	131.74	116.13
	せん断	鉄筋		D16	D16
		ピッチ	(mm)	600	600
		鉄筋本数	(本)	8,617	8,617
		配置間隔	Ss	600	600

	引張鉄筋	項目	記号	単位	長期		短期	
					スラブC	スラブD	スラブC	スラブD
設計断面力	上側	決定ケース			ケース 1	ケース 5	ケース 9	ケース 11
		曲げモーメント	Md	(kN・m)	-730	-1000	-453	-674
		軸力	Nd	(kN)	0	0	-979	-947
		せん断力	Vd	(kN)	5	2	13	4
	下側	決定ケース			ケース 1	ケース 7	ケース 8	ケース 14
		曲げモーメント	Md	(kN・m)	907	1930	927	1524
		軸力	Nd	(kN)	3	2	-562	-100
		せん断力	Vd	(kN)	468	39	450	5
	せん断力最大	決定ケース			ケース 1	ケース 7	ケース 8	ケース 14
		せん断力	Vd	(kN)	619	564	685	474

引張鉄筋位置	項目	記号	単位	長期		短期		
				スラブC	スラブD	スラブC	スラブD	
上側	コンクリート	圧縮応力度	σ_c	(N/mm ²)	4.19	5.85	2.88	4.92
		許容曲げ圧縮応力度	σ_{ca}	(N/mm ²)	9.00	9.00	13.50	13.50
		$\sigma_c / \sigma_{ca} \leq 1.0$			0.47	0.65	0.21	0.36
		判定			OK	OK	OK	OK
	鉄筋	引張応力度	σ_s	(N/mm ²)	130	160	136	171
		許容引張応力度	σ_{sa}	(N/mm ²)	196	196	294	294
		$\sigma_s / \sigma_{sa} \leq 1.0$			0.66	0.82	0.46	0.58
		判定			OK	OK	OK	OK
下側	コンクリート	圧縮応力度	σ_c	(N/mm ²)	3.75	4.88	3.79	3.85
		許容曲げ圧縮応力度	σ_{ca}	(N/mm ²)	9.00	9.00	13.50	13.50
		$\sigma_c / \sigma_{ca} \leq 1.0$			0.42	0.54	0.28	0.29
		判定			OK	OK	OK	OK
	鉄筋	引張応力度	σ_s	(N/mm ²)	113	163	135	131
		許容引張応力度	σ_{sa}	(N/mm ²)	196	196	294	294
		$\sigma_s / \sigma_{sa} \leq 1.0$			0.58	0.83	0.46	0.45
		判定			OK	OK	OK	OK
せん断	せん断応力度	τ	(N/mm ²)	0.207	0.144	0.229	0.121	
	許容せん断応力度	τ_a	(N/mm ²)	0.450	0.450	0.675	0.675	
	$\tau / \tau_a \leq 1.0$			0.46	0.32	0.34	0.18	
	判定			OK	OK	OK	OK	

(5) 改良地盤の構造強度に対する検討

1) 検討方針

検討は「JEAC 4616-2009」に準拠し、長期及び短期荷重により発生する荷重に対して許容応力度を満足することを確認する。

改良地盤の許容応力度は、改良地盤の設計圧縮強度、圧縮応力度及びせん断応力度に対する安全率に基づき設定する。

支持地盤の許容支持力度は、支持地盤の極限支持力度に対する安全率に基づき設定する。

2) 検討モデル

改良地盤の範囲は、コンクリート基礎下面から O.P. +35.80m までである。図 1.4-12 に地盤改良平面図、図 1.4-13 に 1-1 断面を示す。

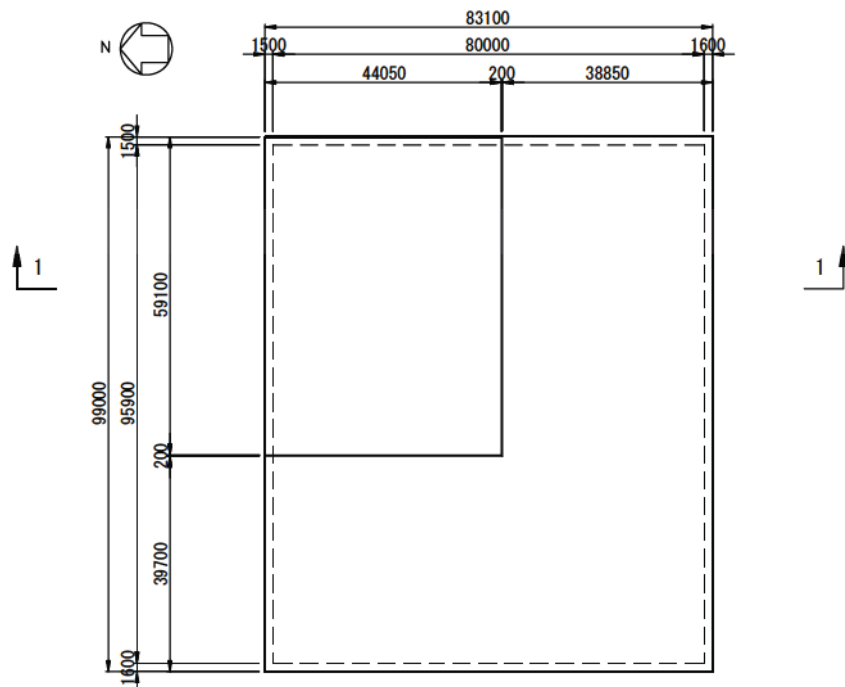


図 1.4-12 地盤改良平面図 (単位: mm)

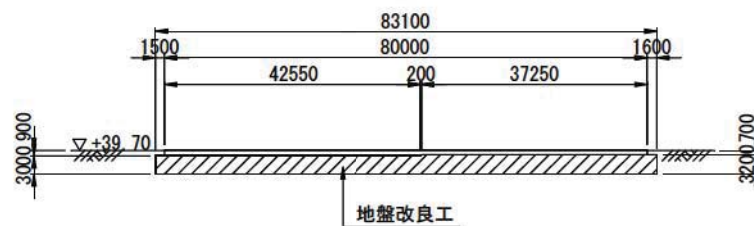


図 1.4-13 1-1 断面 (単位: mm)

3) 改良地盤に生じる地盤反力度に対する検討

改良地盤に生じる地盤反力度に対する検討は、改良地盤に発生する最大地盤反力度（梁バネモデルにより算出するバネ反力度）が改良地盤の許容圧縮応力度を下回ることを確認する。

$$q_{\max} \leq f_{sc}$$

ここに、

$q_{\max}$: 最大地盤反力度 (kN/m²)

f_{sc} : 改良地盤の許容圧縮応力度 (kN/m²)

長期 ${}_L f_{sc} = 110$ (kN/m²)

短期 ${}_S f_{sc} = 220$ (kN/m²)

安全率の検討結果を表 1.4-21 に示す。検討結果より改良地盤に発生する最大地盤反力度が改良地盤の許容圧縮応力度を下回ることを確認した。

表 1.4-21 改良地盤の地盤反力度に対する検討結果
(基礎下面)

		最大地盤反力度	改良地盤の 許容圧縮応力度	検定値	判定
		$q_{\max}$	${}_L f_{sc}, {}_S f_{sc}$	$q_{\max} / f_{sc} \leq 1.0$	
		(kN/m ²)	(kN/m ²)		
レール支持梁	長期	104	110	0.95 < 1.0	OK
	短期	119	220	0.54 < 1.0	OK
NS方向スラブ	長期	84	110	0.76 < 1.0	OK
	短期	97	220	0.44 < 1.0	OK
EW方向スラブ	長期	72	110	0.65 < 1.0	OK
	短期	72	220	0.33 < 1.0	OK

4) 改良地盤に生じるせん断応力に対する検討

改良地盤に生じるせん断応力に対する検討は、改良地盤に発生する最大せん断応力度が許容せん断応力度を下回ることを確認する。

$$\tau_{\max} \leq f_{ss}$$

$$\tau_{\max} = \kappa \cdot \tau$$

$$f_{ss} = 1/5 \cdot f_{sc}$$

ここに、

$\tau_{\max}$: 最大せん断応力度 (kN/m²)

f_{ss} : 改良地盤の許容せん断応力度 (kN/m²)

κ : 形状係数 ($\kappa = 1.2$)

τ : 平均せん断応力度 (kN/m²)

f_{sc} : 改良地盤の許容圧縮応力度 (kN/m²)

長期 $_L f_{sc} = 110$ (kN/m²)

短期 $_S f_{sc} = 220$ (kN/m²)

$_L f_{ss} = 1/5 \cdot 110 = 22$ (kN/m²)

$_S f_{ss} = 1/5 \cdot 220 = 44$ (kN/m²)

長期 $\tau = 0.046$ (kN/m²) $\tau_{\max} = 0.046 \times 1.2 = 0.055$ (kN/m²)

短期 $\tau = 12.1$ (kN/m²) $\tau_{\max} = 12.1 \times 1.2 = 14.5$ (kN/m²)

せん断応力度の検討結果を表 1.4-22 に示す。検討結果より改良地盤に発生する最大せん断応力度が許容せん断応力度を下回ることを確認した。

表 1.4-22 改良地盤のせん断応力度に対する検討結果

	最大せん断応力度 $\tau_{\max}$	許容せん断応力度 $_L f_{ss}, _S f_{ss}$	検定値	判定
	(kN/m ²)	(kN/m ²)	$\tau_{\max} / f_{ss} \leq 1.0$	
長期	0.055	22	0.003 < 1.0	OK
短期	14.5	44	0.33 < 1.0	OK

5) 支持力の検討

改良地盤直下の支持地盤については、改良体下面に作用する設計地盤反力度が許容支持力度を下回ることを確認する。

$$q_{\max} \leq q_a$$

ここに、

$$\begin{array}{ll} q_{\max} : & \text{最大地盤反力度 (kN/m}^2\text{)} \\ & \begin{array}{ll} \text{長期} & q_{\max} = 96.7 \text{ (kN/m}^2\text{)} \\ \text{短期} & q_{\max} = 102.1 \text{ (kN/m}^2\text{)} \end{array} \\ \\ q_a : & \text{支持地盤の許容支持力度 (kN/m}^2\text{)} \\ & \begin{array}{ll} \text{長期} & q_a = 666 \text{ (kN/m}^2\text{)} \\ \text{短期} & q_a = 531 \text{ (kN/m}^2\text{)} \end{array} \end{array}$$

支持力の検討結果を表 1.4-23 に示す。検討結果より改良体下面に作用する設計地盤反力度が許容支持力度を下回ることを確認した。

表 1.4-23 支持力に対する検討結果

	設計地盤反力度 $q_{\max}$	支持地盤の 許容支持力度 q_a	検定値	判定
	(kN)	(kN)	$q_{\max}/q_a \leq 1.0$	
長期	96.7	666	0.15 < 1.0	OK
短期	102.1	531	0.19 < 1.0	OK

6) 基礎の沈下に対する検討

レール支持梁において、梁の傾斜量が許容値を下回ることを確認する。傾斜量は梁モデルの隣接格点の沈下差を要素長で除して求める。基礎の沈下の検討結果を表 1.4-24 に示す。検討結果より梁の傾斜量が許容値を下回ることを確認した。

表 1.4-24 基礎の沈下に対する検討結果

	傾斜量	許容傾斜量	判定
長期	1/1031	1/800	OK

2 耐震性

2.1 乾式キャスクの耐震性

(1) 乾式貯蔵キャスク

1) 評価方針

本設備で使用する乾式貯蔵キャスクは、添付資料-2「評価の基本方針」で記載している既存評価書で確認した設計で製作するもので、既存評価書にてキャスク保管建屋における基準地震動 S_2 に対する耐震性が確認されている。

本設備での保管にあたっては設置場所が異なることから、本設置場所における基準地震動 S_s による地震動に対し、既存評価の結果を用いて余裕率の範囲にあることを確認する。

2) 評価方法

既存評価に基づく乾式貯蔵キャスクの耐震性の評価手順を図 2.1-1 に示す。

評価は既存設計からの耐震安全性評価で用いている応答倍率法を参考に、既存評価書の設計震度と本設置場所での設計震度の応答比を求め、余裕率と比較することで耐震安全性評価を行う。

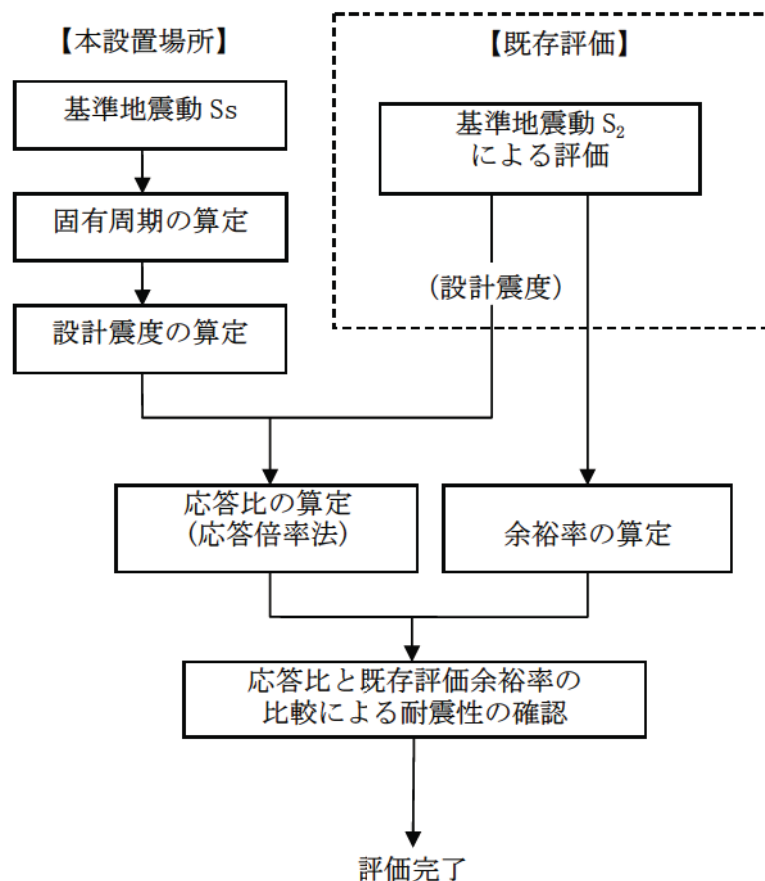


図 2.1-1 乾式貯蔵キャスクの耐震性評価フロー

3) 固有周期の算定

支持架台に設置された乾式貯蔵キャスクの固有周期の算定モデルは、既存評価と同様である。以下に乾式貯蔵キャスクの固有周期についての計算方法及び計算結果を示す。

① 固有周期の計算条件

- A. 乾式貯蔵キャスクは、横置きで支持される。
- B. 乾式貯蔵キャスクの自重（内部を含む）は、4 個のトラニオンを介してキャスク支持架台に固定される。
- C. 二次蓋は二次蓋締付けボルトでキャスク容器に固定される。
- D. キャスク支持架台は固定ボルトで固定具に固定される。固定具は基礎ボルトで基礎に固定される。

概略構造図を図 2.1-2 に示す。なおキャスク容器とは、胴板、底板、一次蓋、一次蓋締付けボルト、貫通孔蓋板及び貫通孔蓋板締付けボルトで構成される。

② 固有周期の計算方法

A. 設定条件

- a. 自重及び鉛直方向地震力に対しては、キャスク支持架台の 4 本の脚柱で支える。
- b. キャスク容器軸方向水平地震力に対しては、キャスク支持架台の 2 本の脚柱で支える。
- c. キャスク容器軸直角方向水平地震力に対しては、キャスク支持架台の 4 本の脚柱で支える。

B. 計算モデル及び計算方法

- a. キャスク容器及びキャスク支持架台をはりでモデル化する。
- b. キャスク容器のはりは、その質量（内部のバスケット、使用済燃料等を含む）と等価質量となるはり要素を用いる。
- c. キャスク支持架台の脚柱下部を固定端とする。
- d. 計算コードとして NASTRAN を用いる。
- e. 計算モデルは図 2.1-3 とする。なお、計算モデルは既存評価と同様である。

③ 固有周期

固有周期の算定結果を表 2.1-1 に示す。

表 2.1-1 保管時の乾式貯蔵キャスクの固有周期
大型キャスク（単位：s）

方 向	固有周期
キャスク容器軸方向	0.048
キャスク容器軸直角方向	0.045
キャスク容器鉛直方向	0.013

中型キャスク（単位：s）

方 向	固有周期
キャスク容器軸方向	0.043
キャスク容器軸直角方向	0.035
キャスク容器鉛直方向	0.012

計算モデル及び乾式貯蔵キャスク，支持架台の仕様が既存評価書と同じことから，固有周期は，既存評価と同様である。

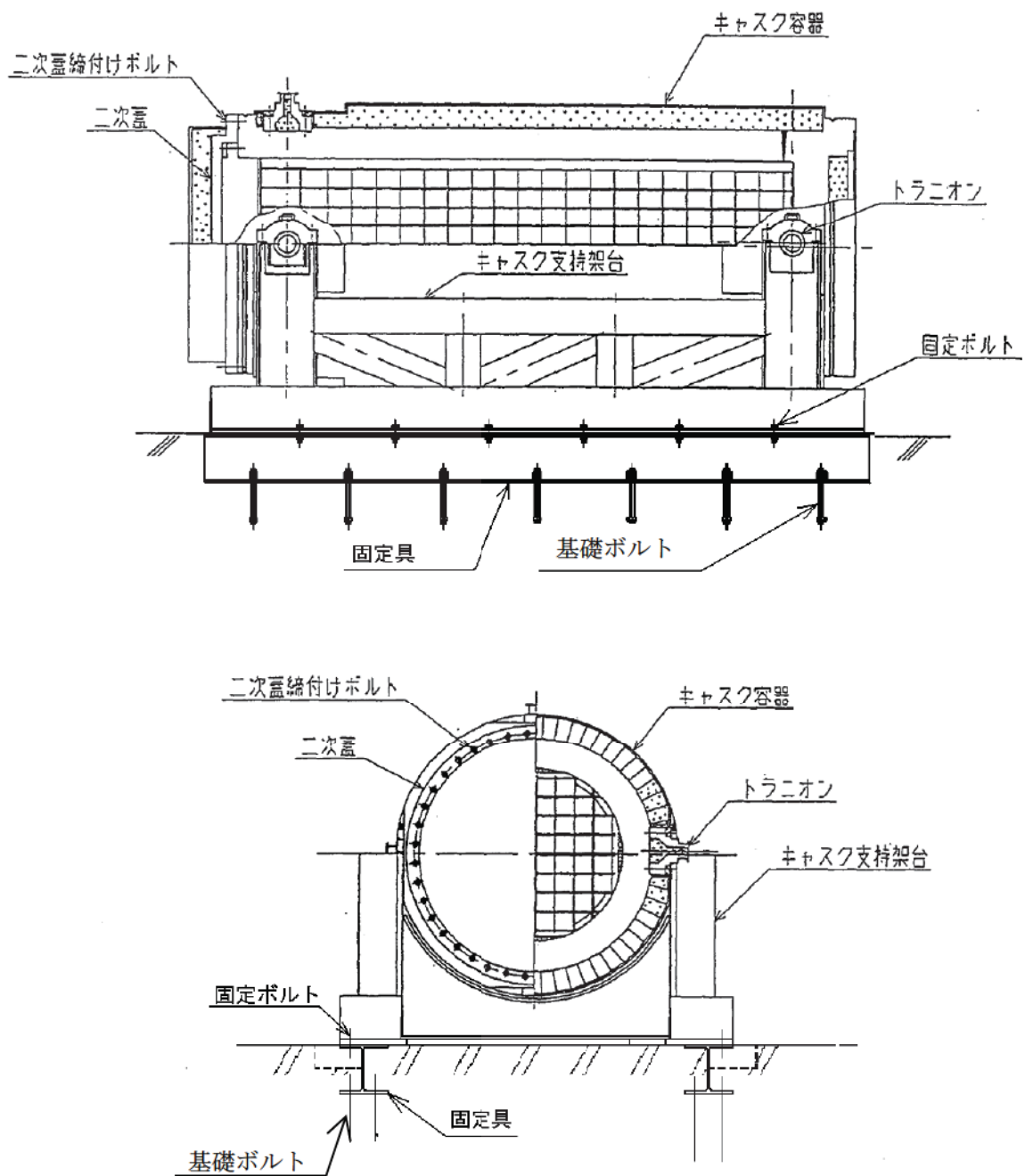
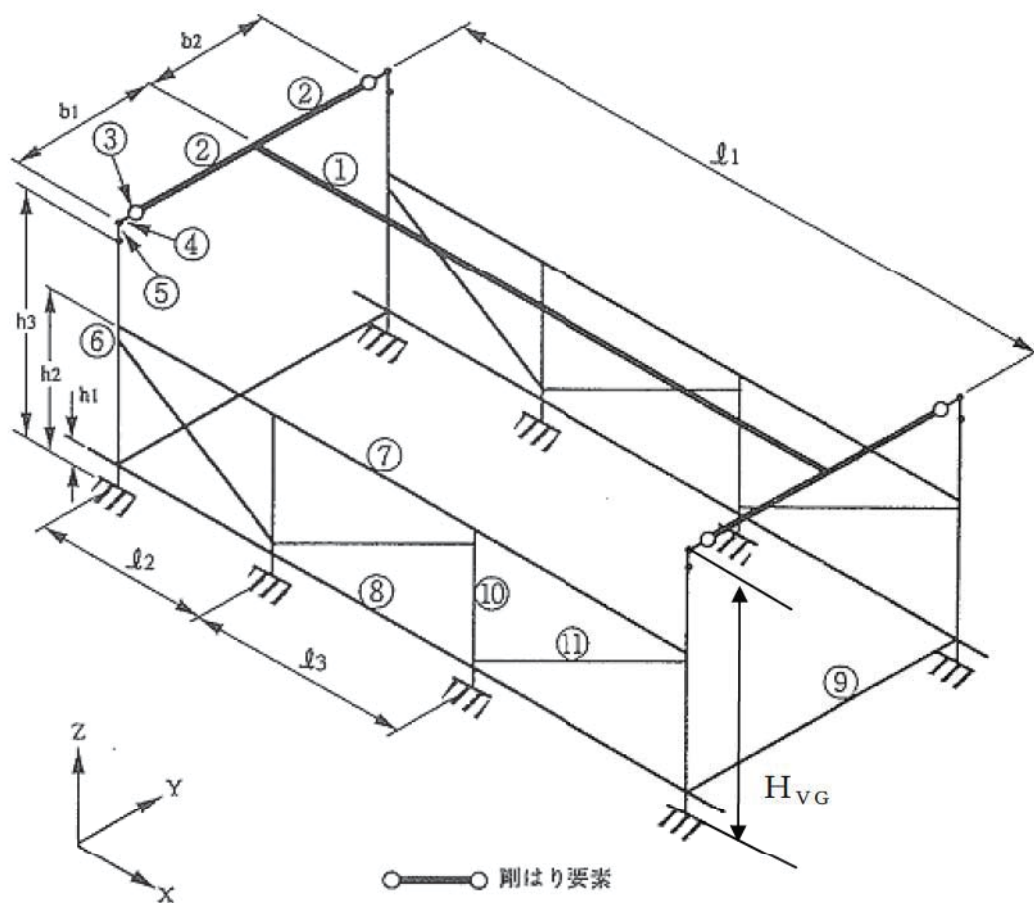


図 2.1-2 乾式貯蔵キャスクの概略構造図



	部 材 名 称		部 材 名 称
①	キャスク容器本体 (等価質量の剛はり要素)	⑥	下 部 脚 柱
②	キャスク容器本体 (剛はり要素, 質量なし)	⑦	上部軸方向水平はり
③	トラニオン取付部	⑧	下部軸方向水平はり
④	ト ラ ニ オ ン	⑨	軸直角方向水平はり
⑤	上 部 脚 柱	⑩	脚 柱 補 強 垂 直 材
		⑪	脚 柱 補 強 斜 材

(単位:mm)

	h_1	h_2	h_3	b_1	b_2	l_1	l_2	l_3	H_{VG}
大型	200	1000	1380	1301	1007	4250	1480	1290	1600
中型	200	1030	1380	1218	902	4250	1480	1290	1600

図 2.1-3 固有周期解析モデル

4) 本設備での設計震度

「3) 固有周期の算定」で求めた固有周期から、乾式貯蔵キャスクの耐震性の評価に用いる設計用地震力を定める。

乾式貯蔵キャスクの固有周期は全て 0.05sec 以下であることから、乾式貯蔵キャスクは剛体と見なすことができる。従って設計用地震力は 1.2ZPA とする。表 2.1-2 に Ss の 1.2ZPA を示す。

表 2.1-2 Ss の 1.2ZPA

	1.2ZPA(水平)	1.2ZPA(鉛直)
Ss	0.79G	0.49G

5) 耐震性評価

① 設計震度の比較

「4) 本設備での設計震度」で算出した本設置場所の設計水平及び鉛直震度と既存評価における設計水平及び鉛直震度を表 2.1-3 に示す。

表 2.1-3 既存評価との設計震度の比較

項目	既存評価	本設置場所
基準地震動	S ₂	Ss
水平震度 Ch	0.55G	0.79G
鉛直震度 Cv	0.23G	0.49G

② 耐震性の評価

前項で示した設計震度の比較から、応答倍率法により本設置場所における乾式貯蔵キャスクの耐震性を評価する。

また応答比の算出方法は種々あるが、ここではより安全側の評価となるように応答比 β を以下のように定める。

$$\beta = \max\left(\frac{C_{H1}}{C_{H0}}, \frac{C_{V1}}{C_{V0}}\right)$$

C_{H0} : 既存の評価で用いた水平震度

C_{H1} : 新たな評価で用いる水平震度

C_{V0} : 既存の評価で用いた鉛直震度

C_{V1} : 新たな評価で用いる鉛直震度

既存評価書で用いている設計震度と本評価で用いる設計震度の値から上式で算定した応答比は 2.130 である。

参考資料より既設評価における余裕率は全ての部位で 2.130 を上回っており、本設置場所においても耐震安全性を確保できる。

1 基準地震動 S_2
I-1 乾式貯蔵キャスク 大型 (6 号機)

基準地震動 S_2	
水平方向 設計加速度	鉛直方向 設計加速度
$C_H=0.55G$	$C_V=0.23G$

福島第一原子力発電所 第 6 号機工事計画認可申請書及び添付資料
(平成 22 年 10 月 22 申請, 東京電力株式会社)
IV-3-2 使用済燃料乾式貯蔵容器の応力計算

出典

(1) キャスク容器

部位	材料	設計事象	一次一般膜応力強さ		余裕率	一次膜＋ 一次曲げ応力強さ		余裕率	一次＋二次応力		余裕率
			計算値	許容応力		計算値	許容応力		計算値	許容応力	
胴板	GLF1 ¹⁾	I +S ₂	6	251	41.8	8	377	47.1	12	362	30.2
一次蓋	GLF1 ¹⁾	I +S ₂	1	251	251.0	27	377	14.0	2	362	181.0
底板	GLF1 ¹⁾	I +S ₂	2	251	125.5	7	377	53.9	4	362	90.5
貫通孔蓋板	SUS304	I +S ₂	7	276	39.4	49	414	8.4	2	401	200.5
密封シール部	GLF1 ¹⁾	I +S ₂	11	181	16.5	11	181	16.5	5	181	36.2
ボス溶接部	SUS304L	I +S ₂	5	125	25.0	5	188	37.6	9	168	18.7
ガンマ線遮へい体 取付ボルト 溶接部	SUS304	I +S ₂	3	125	41.7	3	188	62.7	7	181	25.9

注 1) GLF1 相当材は GLF1 として表記する。

(キャスク容器)

部位	材料	設計事象	平均引張応力		余裕率	平均引張応力 + 曲げ応力		余裕率
			計算値	許容応力		計算値	許容応力	
一次蓋 締付けボルト	GBL1	I +S ₂	81	649	8.0	106	649	6.1
貫通孔蓋板 締付ボルト	GBL1	I +S ₂	199	649	3.3	265	649	2.4

(単位: N/mm²)

(2) バスケット

部位	材料	設計事象	一次一般膜応力強さ		余裕率	一次膜+一次曲げ応力強さ		余裕率
			計算値	許容応力 ¹⁾		計算値	許容応力 ¹⁾	
バスケット プレート	A6061P 及び B-Al	I +S ₂	2	65	32.5	3	98	32.7
バスケット サポート	SUS304	I +S ₂	2	266	133.0	2	400	200.0
バスケット サポート 取付ボルト	SUS304	I +S ₂	18	266	14.8	18	400	22.2

(単位: N/mm²)

注 1) 設計・建設規格に基づく許容応力値を左側に、構造規格に基づく許容応力値を右側に示す。

(3) トラニオン

(単位:N/mm²)

部位	材料	設計事象	一次応力					
			引張応力		圧縮応力		せん断応力	
			計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力
トラニオン	SUS630	I +S ₂	6	586	6	583	17	338
				97.7		97.2		19.9

部位	材料	設計事象	一次応力					
			曲げ応力		支圧応力		組合せ応力	
			計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力
トラニオン	SUS630	I +S ₂	21	586	37	1098	35	586
				27.9		29.7		16.7

部位	材料	設計事象	一次+二次応力					
			引張・圧縮応力		せん断応力		曲げ応力	
			計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力
トラニオン	SUS630	I +S ₂	22	1172	23	676	29	1172
				53.3		29.4		40.4

部位	材料	設計事象	一次+二次応力					
			引張応力		せん断応力		組合せ応力	
			計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力
トラニオン 締付ボルト	GBL1	I +S ₂	71	584	28	449	86	584
				8.2		16.0		6.8

(4) 二次蓋

(単位:N/mm²)

部位	材料	設計事象	一次膜+ 一次曲げ応力強さ		余裕率	一次+二次応力		余裕率
			計算値	許容応力		計算値	許容応力	
二次蓋	SUSF304	I +S ₂	25	372	14.9	8	301	37.6

部位	材料	設計事象	平均引張応力		余裕率
			計算値 ¹⁾	許容応力	
二次蓋 締付ボルト	GBL1	I +S ₂	157	346	2.2

注 1) 曲げ応力を含んだ計算値

1-2 乾式貯蔵キャスク 中型 (4, 5 号機)

基準地震動 S_2	
水平方向 設計加速度	鉛直方向 設計加速度
$C_H=0.55G$	$C_V=0.23G$

福島第一原子力発電所 第4号機工事計画認可申請書及び添付資料
(平成22年10月22申請, 東京電力株式会社)
IV-3-2 使用済燃料乾式貯蔵容器の応力計算

出典

(1) キャスク容器

(単位: N/mm^2)

部位	材料	設計事 象	一次一般膜応力強さ		余裕率	一次膜＋ 一次曲げ応力強さ		余裕率	一次＋二次応力		余裕率
			計算値	許容応力		計算値	許容応力		計算値	許容応力	
胴板	GLF1 ¹⁾	I + S ₂	5	251	50.2	7	377	53.9	10	362	36.2
一次蓋	GLF1 ¹⁾	I + S ₂	1	251	251.0	22	377	17.1	2	362	181.0
底板	GLF1 ¹⁾	I + S ₂	2	251	125.5	6	377	62.8	4	362	90.5
貫通孔蓋板	SUS304	I + S ₂	9	276	30.7	50	414	8.3	2	401	200.5
密封シール部	GLF1 ¹⁾	I + S ₂	12	181	15.1	14	181	12.9	5	181	36.2
バスケットサポー ト取付ボルト 溶接部	SUS304L	I + S ₂	15	125	8.3	15	188	12.5	30	181	6.0
ガンマ線遮へい体 取付ボルト 溶接部	SUS304	I + S ₂	3	125	41.7	3	188	62.7	6	181	30.2

注1) GLF1 相当材は GLF1 として表記する。

(キャスク容器)

部位	材料	設計事象	平均引張応力		余裕率	平均引張応力 + 曲げ応力		余裕率
			計算値	許容応力		計算値	許容応力	
一次蓋 締付けボルト	GBL1	I +S ₂	78	649	8.3	99	649	6.6
貫通孔蓋板 締付ボルト	GBL1	I +S ₂	198	649	3.3	263	649	2.5

(単位: N/mm²)

(2) バスケット

部位	材料	設計事象	一次一般膜応力強さ		余裕率	一次膜+一次曲げ応力強さ		余裕率
			計算値	許容応力 ¹⁾		計算値	許容応力 ¹⁾	
バスケット プレート	A6061P 及び B-Al	I +S ₂	2	65	32.5	3	98	32.7
バスケット サポート	SUS304	I +S ₂	2	266	133.0	2	400	200
バスケット サポート 取付ボルト	SUS304	I +S ₂	21	266	12.7	21	400	19.0

(単位: N/mm²)

注 1) 設計・建設規格に基づく許容応力値を左側に、構造規格に基づく許容応力値を右側に示す。

(3) トラニオン

(単位:N/mm²)

部位	材料	設計事象	一次応力					
			引張応力		圧縮応力		せん断応力	
			計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力
トラニオン	SUS630	I +S ₂	5	586	117.2	583	14	338
					116.6			24.1

部位	材料	設計事象	一次応力					
			曲げ応力		支圧応力		組合せ応力	
			計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力
トラニオン	SUS630	I +S ₂	18	586	32.6	1098	30	586
					29.7			19.5

部位	材料	設計事象	一次+二次応力					
			引張・圧縮応力		せん断応力		曲げ応力	
			計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力
トラニオン	SUS630	I +S ₂	19	1172	61.7	676	24	1172
					35.6			48.8

部位	材料	設計事象	一次+二次応力					
			引張応力		せん断応力		組合せ応力	
			計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力
トラニオン 締付ボルト	GBL1	I +S ₂	60	584	9.7	449	72	584
					18.7			8.1

(4) 二次蓋

(単位: N/mm²)

部位	材料	設計事象	一次膜+ 一次曲げ応力強さ		余裕率	一次+二次応力		余裕率
			計算値	許容応力		計算値	許容応力	
二次蓋	SUSF304	I +S ₂	19	372	19.6	7	301	43.0

部位	材料	設計事象	平均引張応力		余裕率
			計算値 ¹⁾	許容応力	
二次蓋 縮付ボルト	GBL1	I +S ₂	151	346	2.3

注 1) 曲げ応力を含んだ計算値

- (2) 輸送貯蔵兼用キャスク A
輸送貯蔵兼用キャスク A については今後評価結果を記載する。

(3) 輸送貯蔵兼用キャスク B

1) 評価方針

キャスク仮保管設備における輸送貯蔵兼用キャスク B の基準地震動 S_s に対する耐震強度を確認する。

2) 固有周期の算定

以下に輸送貯蔵兼用キャスク B の固有周期について計算方法及び計算結果を示す。

① 固有周期の計算条件

- A. 輸送貯蔵兼用キャスク B は、横置きで支持される。
- B. 輸送貯蔵兼用キャスク B の自重（内部を含む）は、4 個のトラニオンを介してキャスク支持架台に固定される。
- C. 二次蓋は二次蓋締付けボルトでキャスク容器に固定される。
- D. 鋼製支持架台は基礎ボルトでコンクリート支持架台に固定され、コンクリート支持架台は基礎と一体の構造となっている。概略構造図を図 2.1-4 に示す。

② 固有周期の計算方法

A. 設定条件

- a. 自重及び鉛直方向地震力に対して、キャスク支持架台の 4 本の脚柱で支える。
- b. キャスク容器軸方向水平地震力に対して、キャスク支持架台の 2 本の脚柱で支える。
- c. キャスク容器軸直角方向水平地震力に対して、キャスク支持架台の 4 本の脚柱で支える。

B. 計算モデル及び計算方法

- a. キャスク容器及びキャスク支持架台をはりでモデル化する。
- b. キャスク容器のはりは、その質量（内部のバスケット、使用済燃料等を含む）と等価質量となるはり要素を用いる。
- c. コンクリート支持架台の下部を固定端とする。
- d. 計算コードとして NASTRAN を用いる。
- e. 計算モデルは図 2.1-5 とする。

③ 固有周期

固有周期の算定結果を表 2.1-4 に示す。

表 2.1-4 保管時の輸送貯蔵兼用キャスク B の固有周期

(単位:s)

方 向	固有周期
キャスク容器軸方向	0.047
キャスク容器軸直角方向	0.041
キャスク容器鉛直方向	0.020

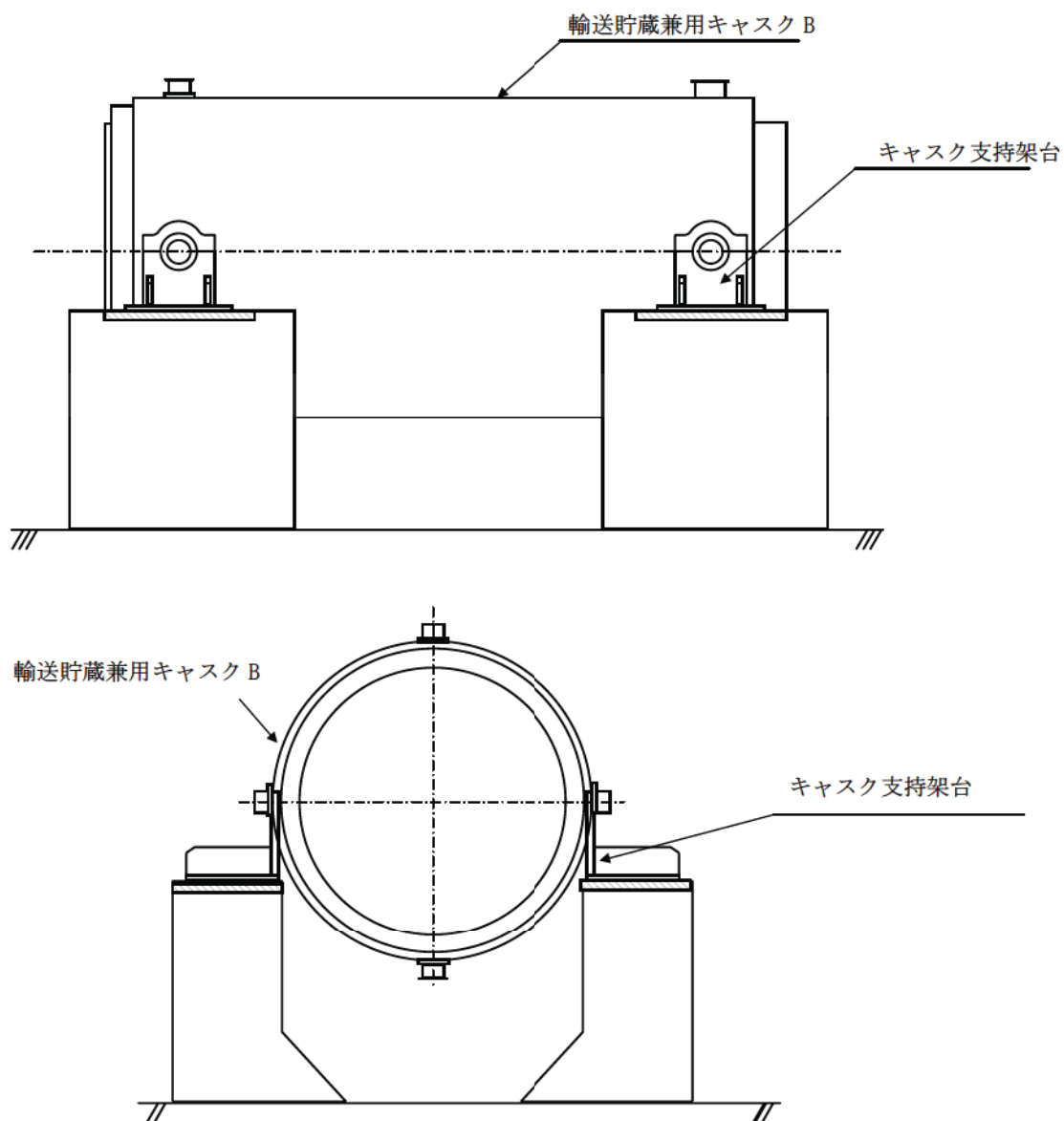


図 2.1-4 輸送貯蔵兼用キャスク B の概略構造図

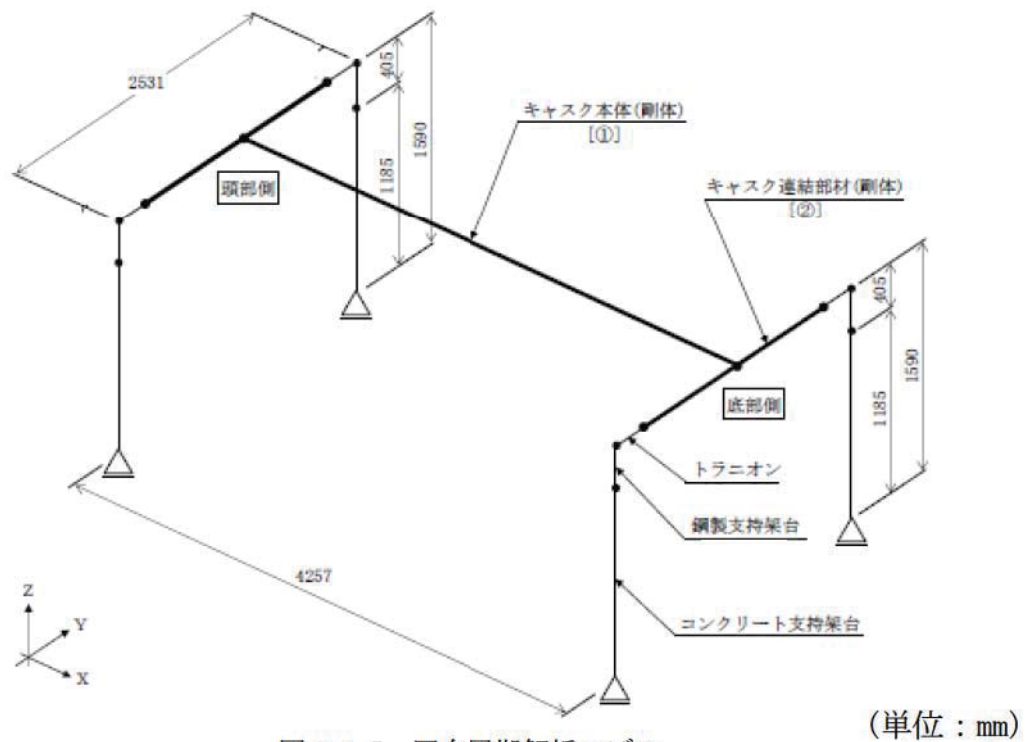


図 2.1-5 固有周期解析モデル

3) 設計震度

「2) 固有周期の算定」で求めた固有周期から、添付資料-2「3 耐震設計方針」に基づき、輸送貯蔵兼用キャスク B の耐震性の評価に用いる設計用地震力を定める。

輸送貯蔵兼用キャスク B の固有周期は全て 0.05sec 以下であることから、輸送貯蔵兼用キャスク B は剛体とみなすことができる。従って設計用地震力は 1.2ZPA とする。表 2.1-5 に S_s の 1.2ZPA を示す。

表 2.1-5 S_s の 1.2ZPA

	1.2ZPA(水平)	1.2ZPA(鉛直)
S_s	0.79G	0.49G

4) 解析条件

① 荷重の組合せ

S_s 地震時の評価において、キャスク容器及び二次蓋、バスケット、トラニオンの設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せを表 2.1-6(1)～(3)に示す。

表 2.1-6(1) キャスク容器及び二次蓋の設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せ

設計事象 評価事象 荷 重		圧力による荷重	自重による荷重	ボルト初期締付け力	熱荷重	地震荷重
I + S s	S s 地震力が作用する場合	○	○	○	— 注)	○

注) 密封シール部及び密封蓋締付けボルトの応力評価に当たっては、熱荷重を考慮する。

表 2.1-6(2) バスケットの設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せ

設計事象 評価事象 荷 重		自重による荷重	熱荷重	地震荷重
I + S s	S s 地震力が作用する場合	○	—	○

表 2.1-6(3) トラニオンの設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せ

設計事象 評価事象 荷 重		自重による荷重	熱荷重 注)	地震荷重
I + S s	S s 地震力が作用する場合	○	○	○

注) キャスク容器の熱膨張により生じる応力に限る。

② 最高使用圧力と温度

各機器の最高使用圧力及び最高使用温度を表 2.1-7 に示す。

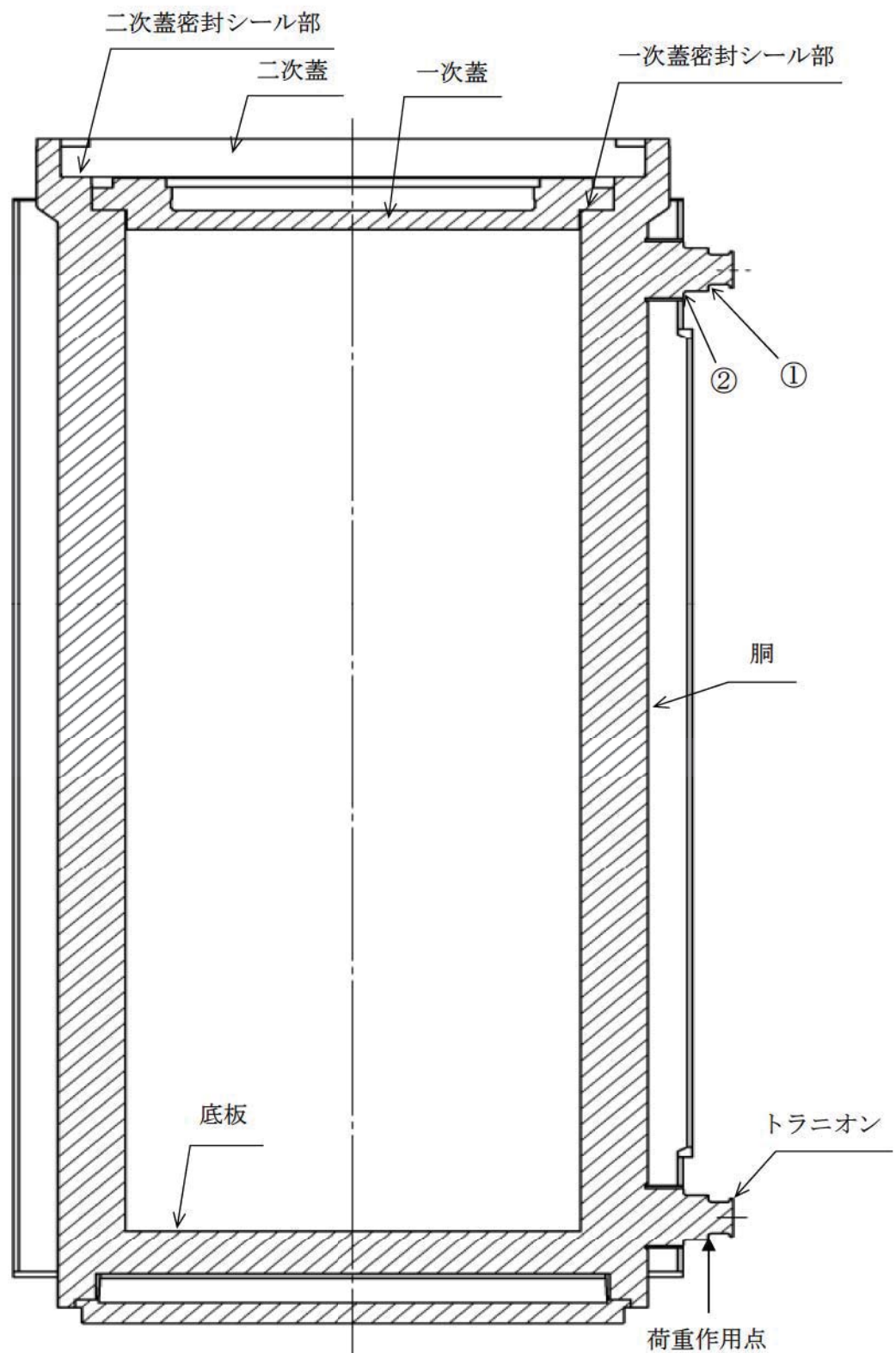
なお、各部最高使用温度は、添付資料-4「1.1 乾式キャスクの除熱機能 (3) 輸送貯蔵兼用キャスク B の除熱機能」の算定結果に基づく。

表 2.1-7 最高使用圧力及び最高使用温度

キャスク容器	最高使用圧力	1.0 MPa
	最高使用温度	150 °C
二次蓋	最高使用圧力	0.4 MPa
	最高使用温度	110 °C
バスケット	最高使用温度	260 °C
トラニオン	最高使用温度	130 °C

③ 解析箇所

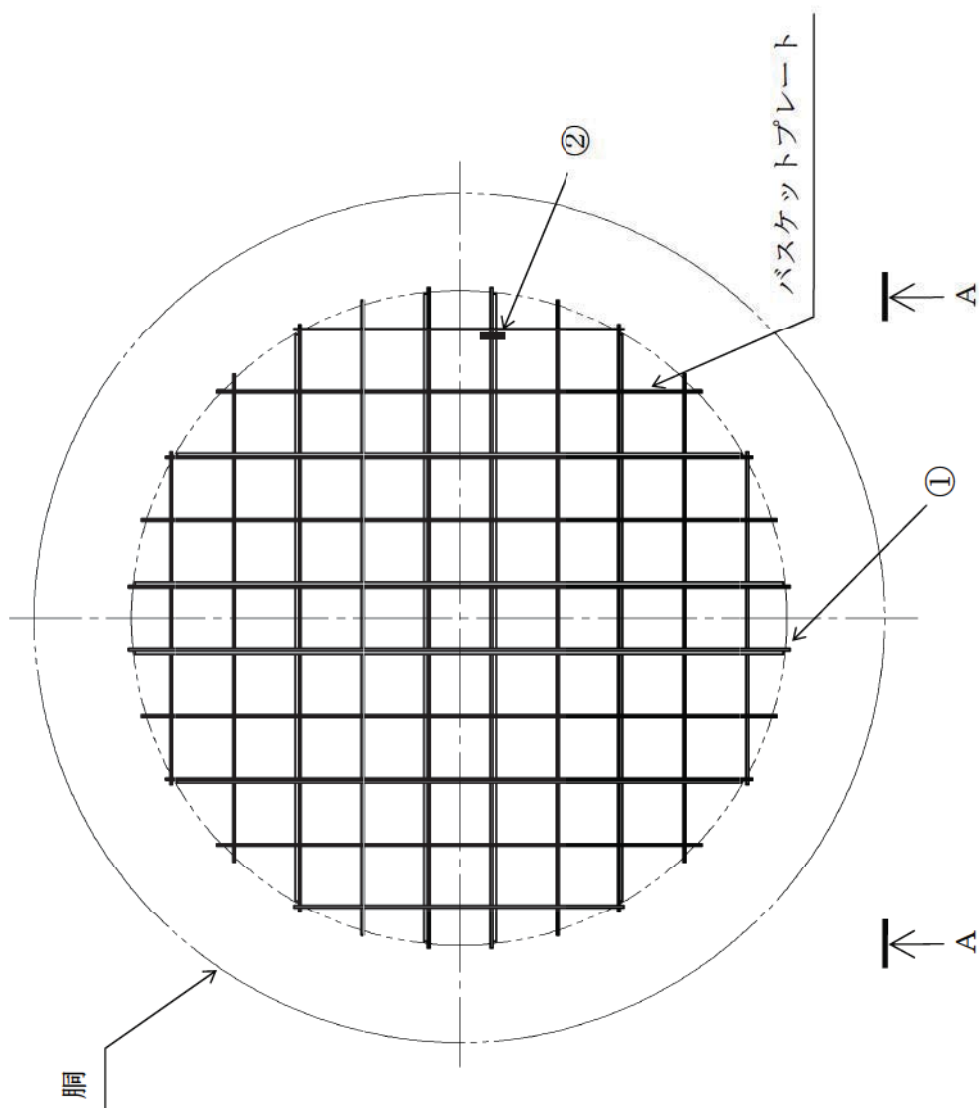
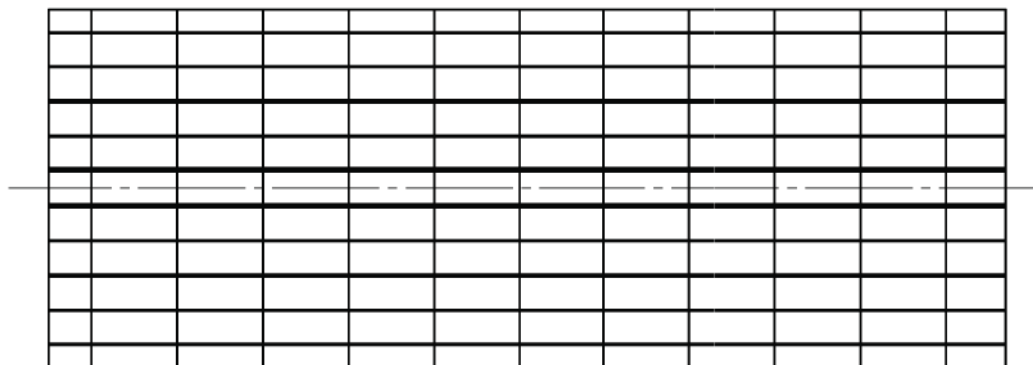
応力解析箇所を図 2.1-6, 7 に示す。



①、②はトランシオンの評価点を示す

図 2.1-6 キャスク容器等の応力解析箇所

A～A矢視図



①, ② : 応力評価点 (面)

図 2.1-7 バスケットの応力解析箇所

④ 物性値

A. キャスク容器及び二次蓋

熱応力計算に使用する材料の物性値を表 2.1-8 に示す。なお、熱応力計算に使用する物性値はその温度依存性を考慮する。

内圧及び機械的荷重による応力計算に使用する物性値は、温度分布計算で得られた温度を各部ごとに設定し、これに対応した値を用いる。なお、常温は 20℃とする。

B. バスケット

熱応力計算に使用する材料の物性値を表 2.1-9 に示す。なお、熱応力計算に使用する物性値はその温度依存性を考慮する。

機械的荷重による応力計算に使用する物性値は、最高使用温度に対する値を用いる。なお、常温は 20℃とする。

C. トラニオン

熱応力計算に使用する材料の物性値を表 2.1-10 に示す。

機械的荷重による応力計算に使用する物性値は、最高使用温度に対する値を用いる。なお、常温は 20℃とする。

表 2.1-8 熱応力計算に使用する材料の物性値 (キャスク容器及び二次蓋)

構成部材	材料	温度 (°C)	縦弾性係数 (MPa)	平均熱膨張係数 ($\times 10^{-6}$ mm/(mm $\cdot$ °C))	ポアソン比 (-)
胴 底板 一次蓋	炭素鋼 (GLF1)	20	203000	9.73	0.3
		50	201000	10.10	
		75	200000	10.39	
		100	198000	10.69	
		125	196000	11.00	
		150	195000	11.28	
		175	193000	11.56	
		200	191000	11.85	
二次蓋 底部中性子 遮へい材カバー	炭素鋼 (SGV480)	20	202000	9.73	0.3
		50	200000	10.10	
		75	198000	10.39	
		100	197000	10.69	
		125	195000	11.00	
		150	193000	11.28	
		175	192000	11.56	
		200	190000	11.85	
一次蓋締付けボルト 二次蓋締付けボルト	低合金鋼 (SNB23-3)	20	192000	11.14	0.3
		50	189000	11.40	
		75	188000	11.62	
		100	186000	11.82	
		125	185000	12.00	
		150	184000	12.21	
		175	182000	12.37	
		200	180000	12.54	

表 2.1-9 熱応力計算に使用する材料の物性値（バスケット）

構成部材	材料	温度 (℃)	縦弾性係数* ¹ (MPa)	平均熱膨張係数* ¹ ($\times 10^{-6}$ mm/(mm・℃))	ポアソン比 (-)
バスケット プレート	ボロン添加 ステンレス鋼板 (B-SUS304P-1)	20	216000	15.22	0.3
		50	216000	15.52	
		75	214000	15.88	
		100	212000	16.24	
		125	210000	16.24	
		150	208000	16.24	
		175	206000	16.43	
		200	204000	16.63	
		225	202000	16.83	
		250	200000	17.02	
		275	199000	17.12	
		300	197000	17.22	

* 1 事例規格参照

表 2.1-10 熱応力計算に使用する材料の物性値（トラニオン）

構成部材	材 料	温度 (℃)	縦弾性係数 (MPa)	平均熱膨張係数 ($\times 10^{-6}$ mm/(mm・℃))
トラニオン	ステンレス鋼 (SUS630 H1150)	130	188000	11.25

5) 解析

① 解析手順

(1) キャスク容器及び二次蓋

キャスク容器の応力解析フローを図 2.1-8 に示す。

キャスク容器の応力解析は、想定される圧力荷重、機械的荷重及び熱荷重を基に、キャスク容器の実形状をモデル化し、解析コードである ABAQUS 及び応力評価式を用いて行う。

なお、二次蓋についてもキャスク容器と同様に評価を行う。

(2) バスケット

バスケットの応力解析フローを図 2.1-9 に示す。

バスケットの応力解析は、想定される機械的荷重及び熱荷重を基に、応力評価式を用いて行う。

(3) トラニオン

トラニオンの応力解析フローを図 2.1-10 に示す。

トラニオンの応力解析は、想定される機械的荷重及び熱荷重を基に、応力評価式を用いて行う。

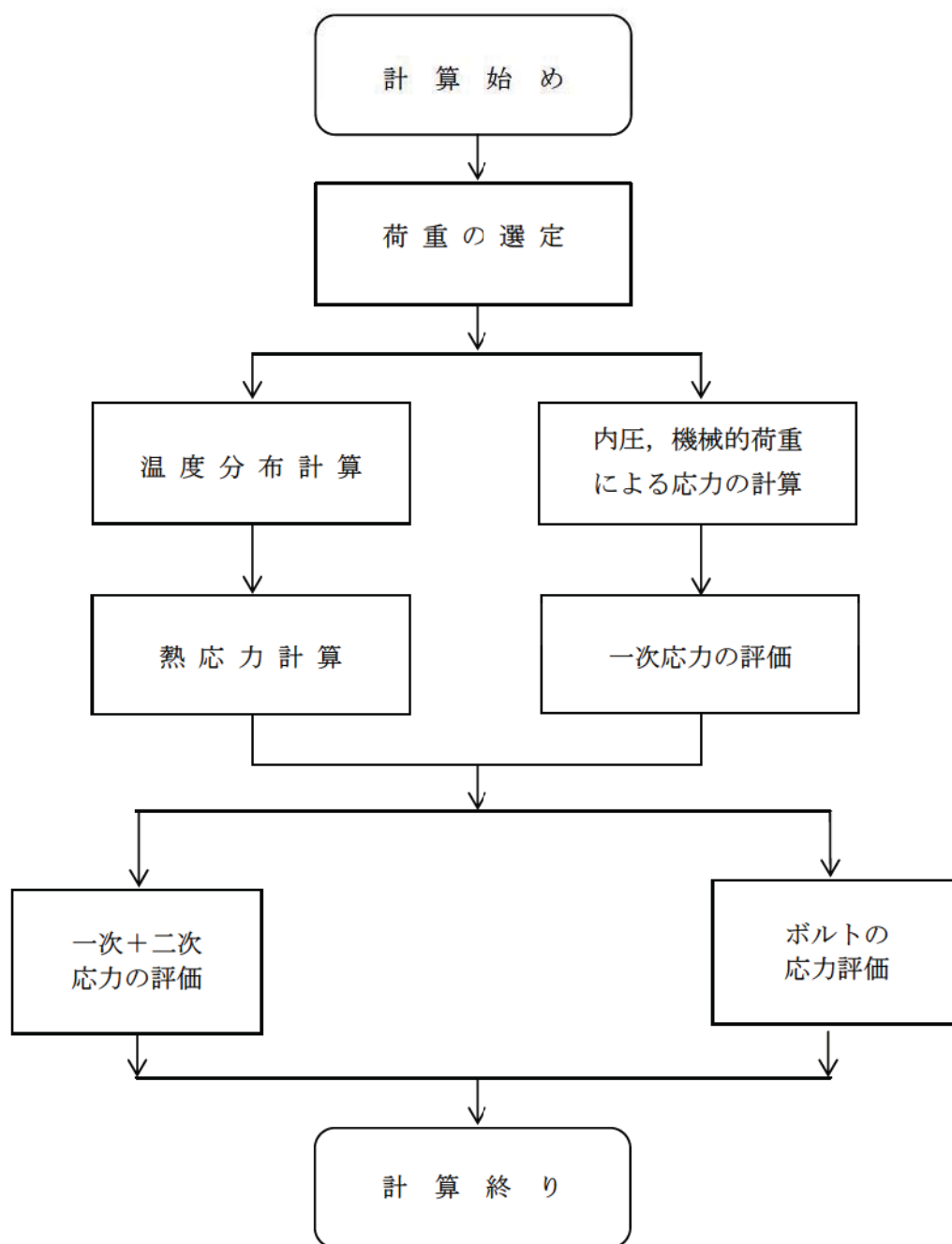


図 2.1-8 キャスク容器及び二次蓋の応力解析フロー図

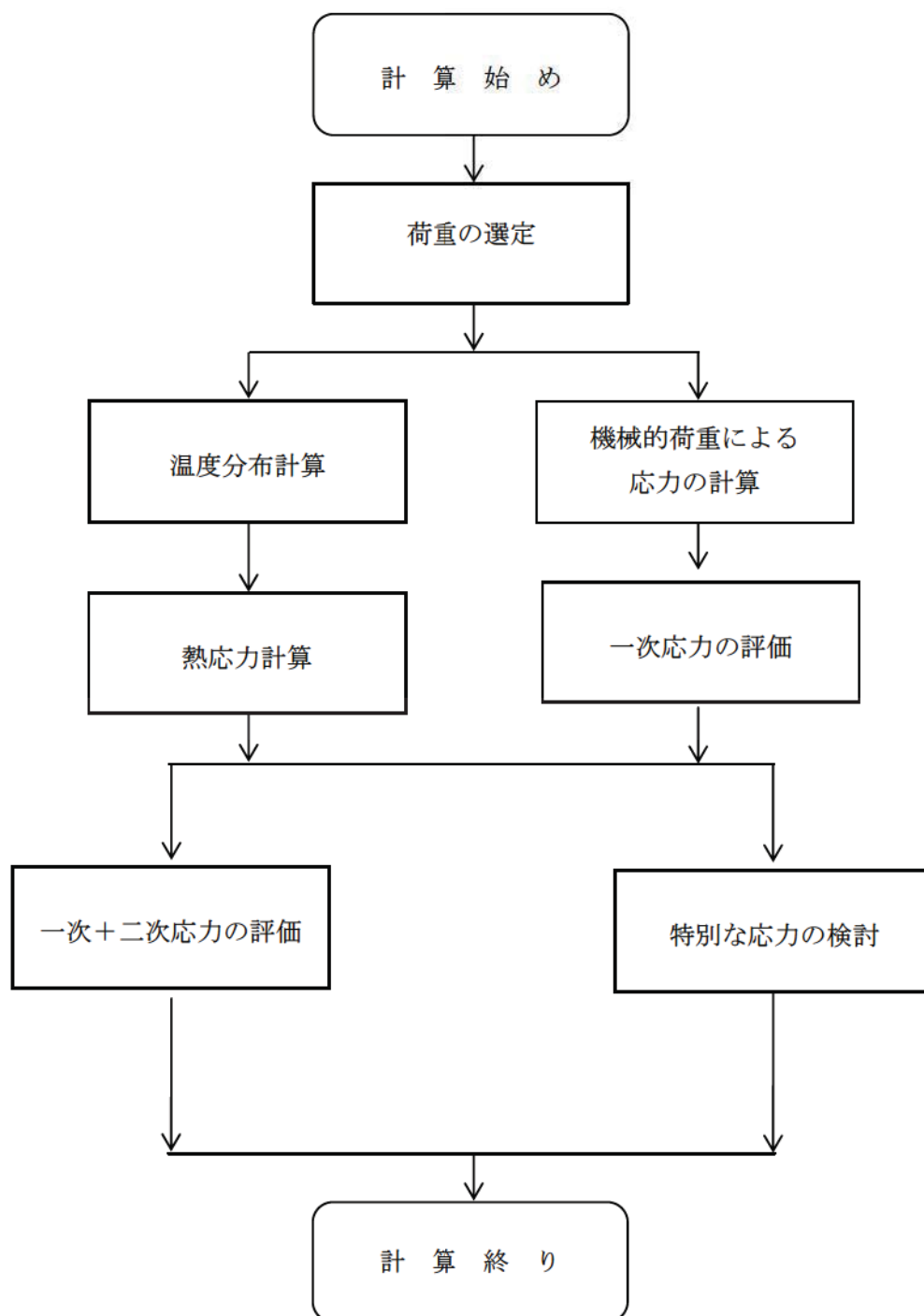


図 2.1-9 バスケットの応力解析フロー図

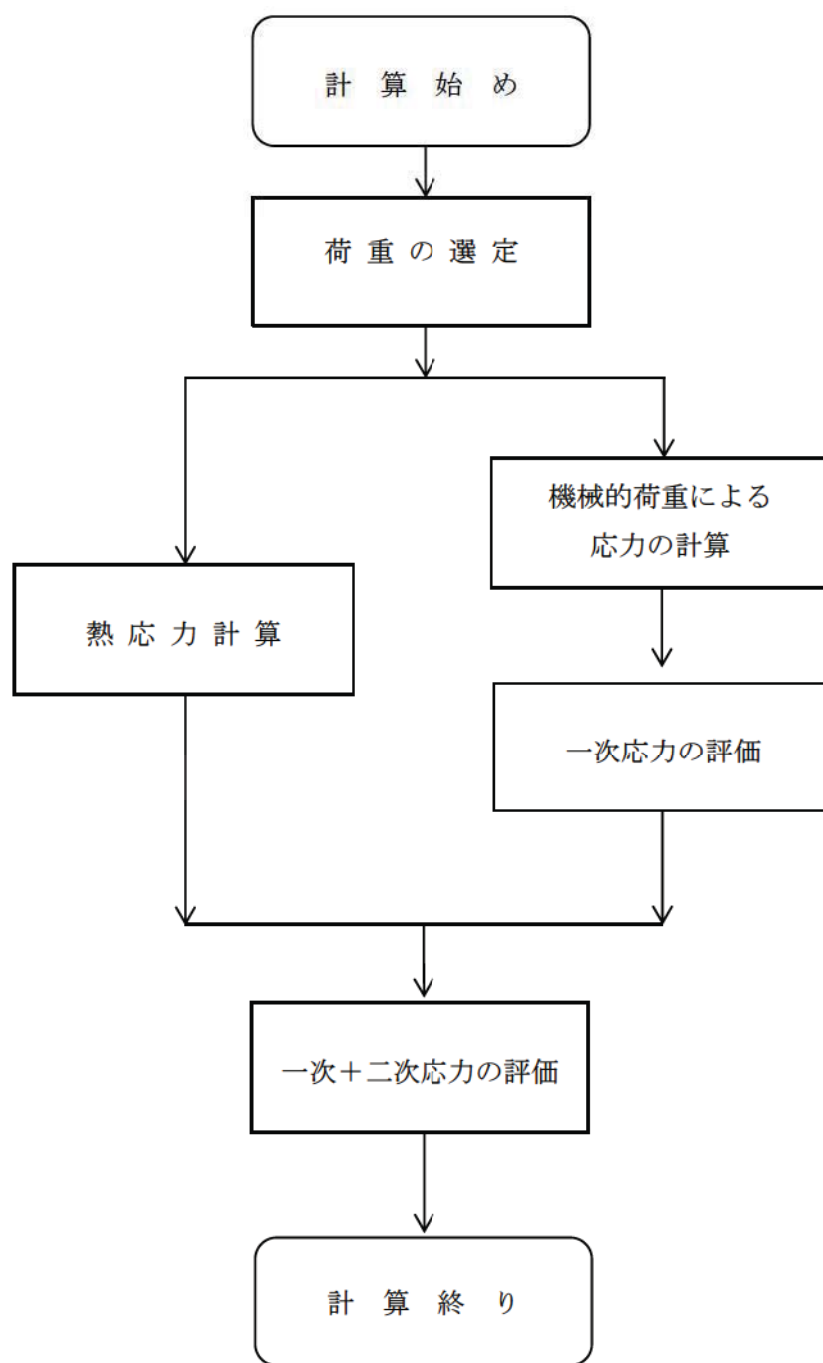


図 2.1-10 トラニオンの応力解析フロー図

② 応力の評価

A. キャスク容器及び二次蓋

a. 一次応力

一次蓋，一次蓋締付けボルト，胴，底板，底部中性子遮へい材カバー，二次蓋及び二次蓋締付けボルトの応力計算は，解析コード ABAQUS により行う。

水平方向加速度及び鉛直方向加速度として次の値を用いる。鉛直方向加速度については，プラスの方向と自重の加速度と組み合わせて考慮する。

$$\left. \begin{array}{l} G_1 = C_H \cdot G \\ G_2 = (1 + C_V) \cdot G \end{array} \right\} \text{(軸方向水平地震力+鉛直方向地震力+自重の場合)}$$

ここで， C_H ：水平方向設計震度（＝0.79）

C_V ：鉛直方向設計震度（＝0.49）

$$\left. \begin{array}{l} G_3 = C_H \cdot G \\ G_2 = (1 + C_V) \cdot G \end{array} \right\} \text{(軸直角方向水平地震力+鉛直方向地震力+自重の場合)}$$

ここで， C_H ：水平方向設計震度（＝0.79）

C_V ：鉛直方向設計震度（＝0.49）

b. 一次＋二次応力

- (a) 密封シール部を除く、一次蓋、胴、底板、底部中性子遮へい材カバー及び二次蓋
応力計算の方法は、a. と同様である。ただし、荷重条件は地震力のみとして計算を行い、振幅を考慮して最大値を2倍して求める。

- (b) 密封シール部、一次蓋締付けボルト及び二次蓋締付けボルト

応力計算の方法は、a. と同様である。ただし、荷重条件として熱荷重を含める。

c. 平均支圧応力

胴とバスケット側面との接触部に発生する平均支圧応力 (σ_p) は次式で計算する。

$$\sigma_p = \frac{m_G \cdot G_2}{A}$$

ここで、 G_2 : a. と同じ

m_G : バスケットプレート及び燃料の質量(kg)

A : 胴の接触面積(mm²)

B. バスケット

- a. 地震力が鉛直方向と軸直角方向に作用する場合

- (a) 一次一般膜応力

最大応力が発生するのはバスケットプレート端部 (図 2.1-7 ①部) である。

鉛直方向加速度により発生する一次一般膜応力 (σ_x) は次式で計算する。

$$\sigma_x = \frac{m_A \cdot G_2}{A_1}$$

ここで G_2 : A. a. と同じ

m_A : 使用済燃料とバスケットプレート等の合計質量(kg)

A_1 : バスケットプレートの断面積(mm²)

- (b) 一次一般膜＋一次曲げ応力

最大応力が発生するのはバスケットプレート格子端部 (図 2.1-7 ②部) である。

水平方向加速度により発生する一次一般膜応力 (σ_y) は次式で計算する。

$$\sigma_y = \frac{m_A \cdot G_3}{A_1}$$

ここで G_3 : A. a. と同じ

m_A : 使用済燃料とバスケットプレート等の合計質量(kg)

A_1 : バスケットプレートの断面積(mm²)

鉛直方向加速度により発生する一次曲げ応力 (σ_y) は次式で計算する。

$$\sigma_y = \frac{M}{Z}$$

$$M = \frac{m_B \cdot G_2 \cdot l_p}{12 \cdot \frac{l_w}{2}}$$

ここで G_2 : A. a. と同じ

M : バスケットプレート格子端部の単位幅当たりの曲げモーメント (N・mm/mm)

Z : バスケットプレートの単位幅当たりの断面係数 (mm³/mm)

m_B : 使用済燃料, 伝熱プレート及びバスケットプレートの合計質量 (kg)

l_p : バスケットプレートの内り (mm)

l_w : バスケットプレートのキャスク容器軸方向長さ (mm)

ただし, バスケットプレート同士の嵌合のため切欠きがあり, 実際の荷重負荷面の長さを $l_w/2$ とする。

鉛直方向加速度によりバスケットプレート格子端部 (図 2.1-7 ②部) に発生する平均せん断応力 (τ_{xy}) は, 次式で計算する。

$$\tau_{xy} = \frac{m_B \cdot G_2}{2 \cdot \frac{A_1}{2}}$$

ここで G_2 : A. a. と同じ

m_B : 使用済燃料, 伝熱プレート及びバスケットプレートの合計質量 (kg)

A_1 : バスケットプレートの断面積 (mm²)

(c) 平均せん断応力

バスケットプレート格子端部 (図 2.1-7 ②部) に発生する特別な応力の検討の対象である平均せん断応力 (σ_s) は次式で計算する。

$$\sigma_s = \frac{m_B \cdot G_2}{2 \cdot \frac{A_1}{2}}$$

ここで G_2 : A. a. と同じ

m_B : 使用済燃料, 伝熱プレート及びバスケットプレートの合計質量 (kg)

A_1 : バスケットプレートの断面積 (mm²)

(d) 平均支圧応力

バスケットプレート端部 (図 2.1-7 ①部) に発生する特別な応力の検討の対象である平均支圧応力 (σ_p) は次式で計算する。

$$\sigma_p = \frac{m_A \cdot G_2}{A_1}$$

ここで G_2 : A. a. と同じ

m_A : 使用済燃料とバスケットプレート等の合計質量 (kg)

A_1 : バスケットプレートの断面積 (mm²)

(e) 圧縮応力

バスケットプレート端部 (図 2.1-7 ①部) に発生する特別な応力の検討の対象である圧縮応力 (σ_c) は次式で計算する。

$$\sigma_c = \frac{m_A \cdot G_2}{A_1}$$

ここで G_2 : A. a. と同じ

m_A : 使用済燃料とバスケットプレート等の合計質量 (kg)

A_1 : バスケットプレートの断面積 (mm²)

b. 地震力が鉛直方向と軸水平方向に作用する場合

(a) 一次一般膜応力

最大応力が発生するのはバスケットプレート端部 (図 2.1-7 ①部) である。

鉛直方向加速度により発生する一次一般膜応力 (σ_x) は次式で計算する。

$$\sigma_x = \frac{m_A \cdot G_2}{A_1}$$

ここで, G_2 : A. a. と同じ

m_A : 使用済燃料とバスケットプレート等の合計質量 (kg)

A_1 : バスケットプレートの断面積 (mm²)

水平方向加速度により発生する一次一般膜応力 (σ_z) は次式で計算する。

$$\sigma_z = \rho \cdot l_w \cdot G_1$$

ここで, G_1 : A. a. と同じ

ρ : バスケットプレートの密度 (kg/mm³)

l_w : バスケットプレートの全長 (mm)

(b) 一次一般膜+一次曲げ応力

最大応力が発生するのはバスケットプレート格子端部 (図 2.1-7 ②部) である。

鉛直方向加速度により発生する一次曲げ応力 (σ_y) は次式で計算する。

$$\sigma_y = \frac{M}{Z}$$

$$M = \frac{m_B \cdot G_2 \cdot l_p}{12 \cdot \frac{l_w}{2}}$$

ここで G_2 : A. a. と同じ

M : バスケットプレート格子端部の単位幅当たりの曲げモーメント (N・mm/mm)

Z : バスケットプレートの単位幅当たりの断面係数 (mm³/mm)

m_B : 使用済燃料, 伝熱プレート及びバスケットプレートの合計質量 (kg)

l_p : バスケットプレートの内り (mm)

l_w : バスケットプレートのキャスク容器軸方向長さ (mm)

ただし, バスケットプレート同士の嵌合のため切欠きがあり, 実際の荷重負荷面の長さを $l_w/2$ とする。

水平方向加速度により発生する一次一般膜応力 (σ_z) は次式で計算する。

$$\sigma_z = \rho \cdot l_w \cdot G_1$$

ここで, G_1 : A. a. と同じ

ρ : バスケットプレートの密度 (kg/mm³)

l_w : バスケットプレートの全長 (mm)

鉛直方向加速度により発生するバスケットプレート格子端部 (図 2.1-7 ②部)

に発生する平均せん断応力 (τ_{xy}) は次式で計算する。

$$\tau_{xy} = \frac{m_B \cdot G_2}{2 \cdot \frac{A_1}{2}}$$

ここで G_2 : A. a. と同じ

m_B : 使用済燃料, 伝熱プレート及びバスケットプレートの合計質量 (kg)

A_1 : バスケットプレートの断面積 (mm^2)

(c) 平均せん断応力

バスケットプレート格子端部 (図 2.1-7 ②部) に発生する特別な応力の検討の対象である平均せん断応力 (σ_s) は次式で計算する。

$$\sigma_s = \frac{m_B \cdot G_2}{2 \cdot \frac{A_1}{2}}$$

ここで G_2 : A. a. と同じ

m_B : 使用済燃料, 伝熱プレート及びバスケットプレートの合計質量 (kg)

A_1 : バスケットプレートの断面積 (mm^2)

(d) 平均支圧応力

バスケットプレート端部 (図 2.1-7 ①部) に発生する特別な応力の検討の対象である平均支圧応力 (σ_p) は次式で計算する。

$$\sigma_p = \frac{m_A \cdot G_2}{A_1}$$

ここで G_2 : A. a. と同じ

m_A : 使用済燃料とバスケットプレート等の合計質量 (kg)

A_1 : バスケットプレートの断面積 (mm^2)

(e) 圧縮応力

バスケットプレート端部 (図 2.1-7 ①部) に発生する特別な応力の検討の対象である圧縮応力 (σ_c) は次式で計算する。

$$\sigma_c = \frac{m_A \cdot G_2}{A_1}$$

ここで G_2 : A. a. と同じ

m_A : 使用済燃料とバスケットプレート等の合計質量 (kg)

A_1 : バスケットプレートの断面積 (mm^2)

C. トラニオン

a. 地震力が鉛直方向と軸直角方向に作用する場合

(a) 一次応力

イ. せん断応力

最大応力が発生する箇所は図 2.1-6 に示す下部トラニオンの評価点①である。

鉛直方向加速度により発生するせん断応力 (τ) は, 次式で計算する

$$\tau = \frac{F_m}{A}$$

$$F_m = \frac{m_2 \cdot G_2}{4}$$

ここで、 G_2 : A. a. と同じ

F_m : 地震力によりトラニオンに作用する荷重 (N)

m_2 : 保管時における金属キャスクの質量 (kg)

A : 評価点①の断面積 (mm^2)

ロ. 曲げ応力

最大応力が発生する箇所は図 2.1-6 に示す下部トラニオンの評価点②である。

鉛直方向加速度により発生する曲げ応力 (σ_b) は次式で計算する。

$$\sigma_b = \frac{M}{Z}$$

$$M = F_m \cdot L$$

ここで、 F_m : イ. と同じ

Z : 評価点②の断面係数 (mm^3)

L : 評価点②と荷重作用位置との距離 (mm)

ハ. 圧縮応力

最大応力が発生する箇所は図 2.1-6 に示す下部トラニオンの評価点②である。

水平方向加速度により発生する圧縮応力 (σ_c) は、次式で計算する。

$$\sigma_c = \frac{F_m}{A}$$

$$F_m = \frac{m_2 \cdot G_3}{2}$$

ここで、 G_3 : A. a. と同じ

F_m : 地震力によりトラニオンに作用する荷重 (N)

m_2 : 保管時における金属キャスクの質量 (kg)

A : 評価点②の断面積 (mm^2)

ニ. 組合せ応力

イ. せん断応力と曲げ応力

最大応力が発生する箇所は図 2.1-6 に示す下部トラニオンの評価点①である。

せん断応力 (τ) と曲げ応力 (σ_b) との組合せ応力 (σ_T) は、次式で計算する。

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma_b^2 + 3 \cdot \tau^2}$$

ここで、 τ : イ. と同じ

σ_b : ロ. と同じ

ただし, Z : 評価点①の断面係数(mm³)

L : 評価点①と荷重作用位置との距離(mm)

(b) 一次+二次応力

イ. セン断応力

地震力によるせん断応力(τ)の全振幅は, (a) イ. で求めたせん断応力(τ)の2倍とする。

ロ. 曲げ応力

地震力による曲げ応力(σ_b)の全振幅は, (a) ロ. で求めた曲げ応力(σ_b)の2倍とする。

ハ. 圧縮応力

地震力による圧縮応力(σ_c)は左右方向荷重により作用し, 左右方向が反転した場合, 対向する別のトラニオンで荷重を受ける。地震力による圧縮応力(σ_c)の最大値は, (a) ハ. で求めた圧縮応力(σ_c)と同様である。

b. 地震力が鉛直方向と軸水平方向に作用する場合

(a) 一次応力

イ. セン断応力

最大応力が発生する箇所は図 2.1-6 に示す下部トラニオンの評価点①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(τ)は, 次式で計算する

$$\tau = \frac{F_m}{A}$$
$$F_m = \frac{m_2 \sqrt{4G_1^2 + G_2^2}}{4}$$

ここで, F_m : 地震力によりトラニオンに作用する荷重(N)

m_2 : 保管時における金属キャスクの質量(kg)

A : 評価点①の断面積(mm²)

ロ. 曲げ応力

最大応力が発生する箇所は図 2.1-6 に示す下部トラニオンの評価点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(σ_b)は次式で計算する。

$$\sigma_b = \frac{M}{Z}$$

$$M = F_m \cdot L$$

ここで、 F_m :イ. と同じ

Z : 評価点②の断面係数(mm³)

L : 評価点②と荷重作用位置との距離(mm)

ハ. 組合せ応力

Ⅰ. せん断応力と曲げ応力

最大応力が発生する箇所は図 2. 1-6 に示す下部トラニオンの評価点①である。

せん断応力(τ)と曲げ応力(σ_b)との組合せ応力(σ_T)は次式で計算する。

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma_b^2 + 3 \cdot \tau^2}$$

ここで、 τ :イ. と同じ

σ_b :ロ. と同じ

ただし、 Z : 評価点①の断面係数(mm³)

L : 評価点①と荷重作用位置との距離(mm)

(b) 一次+二次応力

イ. せん断応力

地震力によるせん断応力(τ)の全振幅は、(a) イ. で求めたせん断力(τ)の 2 倍とする。

ロ. 曲げ応力

地震力による曲げ応力(σ_b)の全振幅は、(a) ロ. で求めた曲げ応力(σ_b)の 2 倍とする。

6) 解析結果

応力計算結果を表 2. 1-11～表 2. 1-14 に示す。いずれの機器も許容応力を満足している。

表 2.1-11(1) 計算結果 (キャスク容器)

(単位：MPa)

部 位	材 料	許容応力 区分	一次一般膜応力強さ		一次膜＋一次曲げ応力強さ		一次＋二次応力強さ	
			計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力
一次 蓋	炭素鋼	供用状態 D (IVAS)	4	251	18	377	49	366
胴	炭素鋼	供用状態 D (IVAS)	2	251	11	377	19	366
底板	炭素鋼	供用状態 D (IVAS)	3	251	10	377	11	366
底部中性子 遮へい材 カバ－	炭素鋼	供用状態 D (IVAS)	5	282	45	424	15	465
一次 蓋密封 シ－ル 部	炭素鋼	供用状態 D (IVAS)	－	－	13	183	59	183

表 2.1-11(2) 計算結果 (キャスク容器)

(単位：MPa)

部 位	材 料	許容応力 区分	平均支圧応力	
			計算値	許容応力
胴	炭素鋼	供用状態 D (IVAS)	2	377

表 2.1-11(3) 計算結果 (キャスク容器)

部 位	材 料	許容応力 区分	平 均 引 張 応 力		平 均 引 張 応 力 + 曲 げ 応 力	
			計算値	許容応力	計算値	許容応力
一次蓋締付けボルト	低合金鋼	供用状態 D (IVAS)	243	831	345	831

(単位 : MPa)

表 2.1-12(1) 計算結果 (二次蓋)

部 位	材 料	許容応力 区分	一次一般膜応力強さ		一次膜+一次曲げ応力強さ		一次+二次応力強さ	
			計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力
二次蓋	炭素鋼	供用状態 D (IVAS)	1	286	30	429	63	474
二次蓋密封 シール部	炭素鋼	供用状態 D (IVAS)	—	—	17	183	37	183

(単位 : MPa)

表 2.1-12(2) 計算結果 (二次蓋)

部 位	材 料	許容応力 区分	平 均 引 張 応 力		平 均 引 張 応 力 + 曲 げ 応 力	
			計算値	許容応力	計算値	許容応力
二次蓋締付けボルト	低合金鋼	供用状態 D (IVAS)	245	848	273	848

(単位 : MPa)

表 2.1-13(1) 計算結果 (バスケット)

(単位 : MPa)

部 位	材 料	許容応力 区分	一次一般膜応力強さ		一次一般膜＋一次曲げ応力強さ	
			計算値	許容応力	計算値	許容応力
バスケット プレート	ボロン添加 ステンレス鋼板	供用状態 D (IVAS)	2	291	7	437

表 2.1-13(2) 計算結果 (バスケット)

(単位 : MPa)

部 位	材 料	許容応力 区分	平均せん断応力		平均支圧応力		圧縮応力	
			計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力
バスケット プレート	ボロン添加 ステンレス鋼板	供用状態 D (IVAS)	1	175	2	404	2	176

表 2.1-14(1) 計算結果 (トラニオン)

(単位：MPa)

部 位	材 料	許容応力 区分	一次応力							
			圧縮応力		せん断応力		曲げ応力		垂直応力とせん断 応力の組合せ	
			計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力
トラニオン	ステンレス鋼	供用状態 D (IVAS)	13	590	42	341	81	591	96	591

表 2.1-14(2) 計算結果 (トラニオン)

(単位：MPa)

部 位	材 料	許容応力 区分	一次＋二次応力					
			圧縮応力		せん断応力		曲げ応力	
			計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力
トラニオン	ステンレス鋼	供用状態 D (IVAS)	13	590	84	682	163	1182

2.2 キャスク支持架台の耐震性

(1) 乾式貯蔵キャスク

1) 評価方針

本設備で使用する乾式貯蔵キャスク支持架台, 固定ボルト及び基礎ボルトの耐震性について示す。

支持架台については, 添付資料-2「評価の基本方針」で記載している既存評価書で基準地震動 S_2 に対する耐震性が確認されているが, 新たに設置する固定ボルト及び基礎ボルトと同様に, 本書にて基準地震動 S_s に対する耐震強度を確認する。

2) 支持架台及び固定具の構成

乾式貯蔵キャスク支持架台，固定ボルト及び基礎ボルトを図 2.2-1 に示す。

乾式貯蔵キャスクは横置きでトラニオンを介し，4つの支持脚柱を持つ支持架台で支持される。支持架台は固定ボルトと基礎ボルトで基礎に固定される。

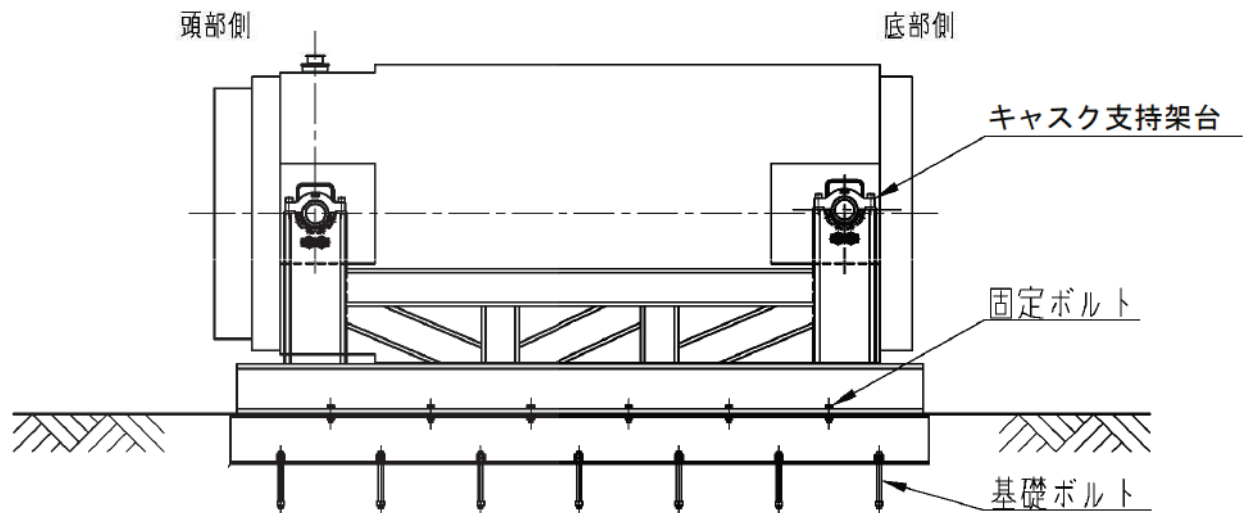


図 2.2-1 乾式貯蔵キャスク支持架台概略構造図

3) 支持架台

① 概要

本項では、大型及び中型の乾式貯蔵キャスクの支持架台の応力計算について示す。

なお、本項で示す「応力評価箇所」「計算条件」「応力計算」は、既存評価書に基づくものである。

A. 記号の説明

応力評価に関する記号の説明を以下に示す。

記号	記 号 の 説 明	単 位
A_s	支持架台の上部脚柱の断面積	mm^2
f_t	許容引張応力	N/mm^2
f_s	許容せん断応力	N/mm^2
f_c	許容圧縮応力	N/mm^2
f_b	許容曲げ応力	N/mm^2
f_p	許容支圧応力	N/mm^2
$f_t^{*1)}$	許容引張応力	N/mm^2
$f_s^{*1)}$	許容せん断応力	N/mm^2
$f_c^{*1)}$	許容圧縮応力	N/mm^2
$f_b^{*1)}$	許容曲げ応力	N/mm^2
$f_p^{*1)}$	許容支圧応力	N/mm^2
G	重力加速度 (=9.80665)	m/s^2
J_s	支持架台の上部脚柱のねじり剛性係数	mm^4
ℓ_{SY}	図 2.2-3 に示す支持架台の上部脚柱における荷重点からせん断中心までの距離	mm
ℓ_{TY}	図 2.2-3 に示す支持架台の上部脚柱における荷重点から断面中立軸までの距離	mm
ℓ_{TZ}	図 2.2-3 に示すトラニオン部（荷重作用点）から支持架台の脚柱の応力評価部位までの距離	mm
S_s	基準地震動 S_s による地震力	—
t_{SC}	トラニオン受部の上部脚柱の板厚	mm
W_{S1}	支持架台の上部脚柱の総質量	kg
W_V	キャスク容器（内部を含む）の総質量	kg
Z_{SCX}	図 2.2-3 に示す支持架台の上部脚柱の X 軸に関する断面係数	mm^3
Z_{SCY}	図 2.2-3 に示す支持架台の上部脚柱の Y 軸に関する断面係数	mm^3

記号	記 号 の 説 明	単 位
σ_{bHX}	キャスク容器軸方向水平地震力により支持架台の上部脚柱に発生する曲げ応力	N/mm ²
σ_{bHY}	キャスク容器軸直角方向水平地震力により支持架台の上部脚柱に発生する曲げ応力	N/mm ²
σ_{co}	自重により支持架台の上部脚柱に発生する圧縮応力	N/mm ²
σ_{bo}	自重により支持架台の上部脚柱に発生する曲げ応力	N/mm ²
σ_{To}	自重により支持架台の上部脚柱に発生する組合せ応力	N/mm ²
σ_c	座屈応力	N/mm ²
σ_{cV}	自重と鉛直方向地震力により支持架台の上部脚柱に発生する圧縮応力	N/mm ²
σ_{bV}	自重と鉛直方向地震力により支持架台の上部脚柱に発生する曲げ応力	N/mm ²
σ_{Tc}	自重のみによる圧縮応力と鉛直方向地震力による圧縮応力の合成圧縮応力	N/mm ²
σ_{Tb}	自重のみによる曲げ応力と鉛直方向地震力による曲げ応力、水平地震力による曲げ応力の合成曲げ応力	N/mm ²
σ_{THX}	自重、鉛直方向地震力、キャスク容器軸方向水平地震力により支持架台の上部脚柱に発生する圧縮応力、曲げ応力及びせん断応力の組合せ応力	N/mm ²
σ_{THY}	自重、鉛直方向地震力、キャスク容器軸直角方向水平地震力により支持架台の上部脚柱に発生する圧縮応力、曲げ応力及びせん断応力の組合せ応力	N/mm ²
τ_{SHX}	キャスク容器軸方向水平地震力により支持架台の上部脚柱に発生する平均せん断応力	N/mm ²
τ_{SHY}	キャスク容器軸直角方向水平地震力によりキャスク支持架台の上部脚柱に発生する平均せん断応力	N/mm ²
τ_{THX}	キャスク容器軸方向水平地震力により支持架台の上部脚柱に加わるねじりによるせん断応力	N/mm ²
τ_{HX}	水平地震力による平均せん断応力とねじりせん断応力の合成せん断応力	N/mm ²
$\Delta \sigma_c$	地震力のみによる引張・圧縮応力の応力範囲	N/mm ²
$\Delta \sigma_b$	地震力のみによる曲げ応力の応力範囲	N/mm ²
$\Delta \tau$	地震力のみによるせん断応力の応力範囲	N/mm ²
$I + S_s$	設計事象 I の仮保管時の状態において、 S_s 地震力が作用した場合の許容応力状態	—

注 1) f_t^* , f_s^* , f_c^* , f_b^* , f_p^* : f_t , f_s , f_c , f_b , f_p の値を算出する際に設計・建設規格 SSB-3121.1(1)における「付録材料図表 Part5 表 8 に規定する材料の設計降伏点」とあるのを「付録材料図表 Part5 表 8 に規定する材料の設計降伏点の 1.2 倍の値」と読み替えて算出した値。

B. 計算条件

計算条件を表 2.2-1 に示す。

2.1 (1) 3) ③より支持架台の固有周期が 0.05[s]以下であることから、支持架台は剛であると考えられる。よって支持架台の機械的荷重である設計用地震力は乾式貯蔵キャスクと同様に 1.2ZPA とする。

C. 許容応力

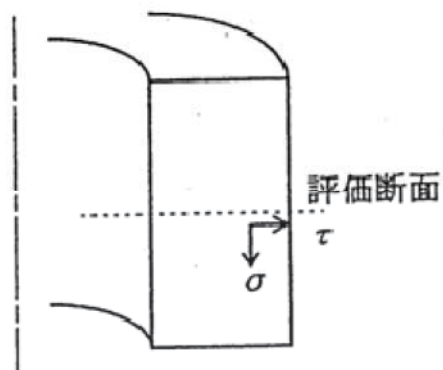
支持架台材料の許容応力値を表 2.2-2 に示す。

D. 応力の記号と方向

応力の記号とその方向は下記のとおりである。

σ : 評価断面に垂直な方向の応力

τ : せん断応力



② 応力計算

A. 応力評価点

支持架台の応力評価点を図 2.2-2 及び図 2.2-3 に示す。

B. 仮保管時（ S_s 地震力が作用する場合）

a. 荷重条件

仮保管時において S_s 地震力が作用する場合の荷重は、次に示す組合せとする。

荷重の組合せ：自重＋地震力

b. 計算方法

支持架台の応力計算は、以下に示す方法で計算する。

(a) 支持架台の応力

支持架台の上部脚柱（図 2.2-3 参照）に発生する圧縮応力、曲げ応力、せん断応力及びこれらの組合せ応力を計算する。

自重のみによる支持架台の上部脚柱（図 2.2-3 参照）の一次応力の圧縮応力（ σ_{co} ）、曲げ応力（ σ_{bo} ）、組合せ応力（ σ_{To} ）は次式で表される。

$$\sigma_{co} = \frac{(W_V + W_{S1}) \cdot G}{4 \cdot A_5} \quad (1)$$

$$\sigma_{bo} = \frac{(W_V + W_{S1}) \cdot G \cdot l_{TY}}{4 \cdot Z_{SCX}} \quad (2)$$

$$\sigma_{To} = \sigma_{co} + \sigma_{bo} \quad (3)$$

ここで、

W_V : キャスク容器（内部を含む）の総質量

・大型 115000 kg

・中型 96000 kg

W_{S1} : 支持架台の上部脚柱の総質量

・大型 600 kg

・中型 600 kg

A_5 : 支持架台の上部脚柱の断面積

・大型 50600 mm²

・中型 53080 mm²

l_{TY} : 図 2.2-3 に示す支持架台の上部脚柱における荷重点から断面中立軸までの距離

・大型 93.6 mm

・中型 116.4 mm

Z_{SCX} : 図 2.2-3 に示す支持架台の上部脚柱の X 軸に関する断面係数

・大型 キャスク容器側 : 5.535×10^6 mm³

キャスク容器と反対側 : 2.611×10^6 mm³

・中型 キャスク容器側 : 7.081×10^6 mm³

キャスク容器と反対側 : 3.352×10^6 mm³

なお、応力計算では下記の荷重を組合せる。

- ①自重＋鉛直方向地震力＋軸方向水平地震力
 ②自重＋鉛直方向地震力＋軸直角方向水平地震力

イ．自重＋鉛直方向地震力＋軸方向水平地震力の場合

(イ)一次応力

自重のみによる圧縮応力 (σ_{co}) と鉛直方向地震力による圧縮応力 (σ_{cv}) の合成圧縮応力 (σ_{Tc})

$$\sigma_{cv} = \frac{C_v \cdot (W_v + W_{s1})}{4 \cdot A_5} \quad (4)$$

$$\sigma_{Tc} = \sigma_{co} + \sigma_{cv} \quad (5)$$

自重のみによる曲げ応力 (σ_{bo}) と鉛直方向地震力による曲げ応力

(σ_{bv})、水平地震力による曲げ応力 (σ_{bHX}) の合成曲げ応力 (σ_{Tb})

$$\sigma_{bv} = \frac{C_v \cdot (W_v + W_{s1}) \cdot \ell_{TY}}{4 \cdot Z_{SCX}} \quad (6)$$

$$\sigma_{bHX} = \frac{C_H \cdot (W_v + W_{s1}) \cdot \ell_{TZ}}{2 \cdot Z_{SCY}} \quad (7)$$

$$\sigma_{Tb} = \sigma_{bo} + \sigma_{bv} + \sigma_{bHX} \quad (8)$$

水平地震力による平均せん断応力 (τ_{SHX}) とねじりせん断応力 (τ_{THX}) の合成せん断応力 (τ_{HX})

$$\tau_{SHX} = \frac{C_H \cdot (W_v + W_{s1})}{2 \cdot A_5} \quad (9)$$

$$\tau_{THX} = \frac{C_H \cdot (W_v + W_{s1}) \cdot \ell_{SY} \cdot t_{SC}}{2 \cdot J_5} \quad (10)$$

$$\tau_{HX} = \tau_{SHX} + \tau_{THX} \quad (11)$$

以上の圧縮応力 (σ_{Tc})、曲げ応力 (σ_{Tb})、せん断応力 (τ_{HX}) による組合せ応力 (σ_{THX}) は次式で表される。

$$\sigma_{THX} = \sqrt{(\sigma_{Tc} + \sigma_{Tb})^2 + 3 \cdot \tau_{HX}^2} \quad (12)$$

ここで、

l_{TZ} : 図 2.2-3 に示すトラニオン部 (荷重作用点) から支持架台の脚柱の応力評価部位までの距離

・大型 250 mm

・中型 250 mm

Z_{SCY} : 図 2.2-3 に示す支持架台の上部脚柱の Y 軸に関する断面係数

・大型 $6.400 \times 10^6 \text{ mm}^3$

・中型 $6.815 \times 10^6 \text{ mm}^3$

J_5 : 図 2.2-3 に示す支持架台の上部脚柱のねじり剛性係数

・大型 $3.448 \times 10^7 \text{ mm}^4$

・中型 $3.296 \times 10^7 \text{ mm}^4$

- l_{SY} : 図 2.2-3 に示す支持架台の上部脚柱における荷重点からせん断中心までの距離
- ・大型 124.7 mm
 - ・中型 152.7 mm
- t_{SC} : トラニオン受部の上部支柱の板厚
- ・大型 50 mm
 - ・中型 50 mm
- C_V : 鉛直方向加速度
- ・大型 0.49 G
 - ・中型 0.49 G
- C_H : 水平方向加速度
- ・大型 0.79 G
 - ・中型 0.79 G

(ロ)一次＋二次応力

地震力のみによる引張・圧縮の応力範囲 ($\Delta \sigma_c$), 曲げの応力範囲

($\Delta \sigma_b$), せん断の応力範囲 ($\Delta \tau$), 及び座屈応力 (σ_c) は次式により表される。なお, この部位では支圧応力, せん断座屈, 曲げ座屈は生じないので圧縮応力に対する座屈を評価する。

$$\Delta \sigma_c = 2 \cdot \sigma_{cV} \quad (13)$$

$$\Delta \sigma_b = 2 \cdot (\sigma_{bV} + \sigma_{bHX}) \quad (14)$$

$$\Delta \tau = 2 \cdot \tau_{HX} \quad (15)$$

$$\sigma_c = \sigma_{Tc} \quad (16)$$

ロ. 自重＋鉛直方向地震力＋軸直角方向水平地震力の場合

(イ)一次応力

自重のみによる応力と鉛直方向地震力による応力, 軸直角方向水平地震力による曲げ応力 (σ_{bHY}) を組合せた曲げ応力 (σ_{Tb}) 及び平均せん断応力 (τ_{SHY}) との組合せ応力 (σ_{THY}) は次式で表される。

$$\sigma_{bHY} = \frac{C_H \cdot (W_V + W_{S1}) \cdot \ell_{TZ}}{4 \cdot Z_{SCX}} \quad (17)$$

$$\tau_{SHY} = \frac{C_H \cdot (W_V + W_{S1})}{4 \cdot A_5} \quad (18)$$

$$\sigma_{Tb} = \sigma_{bo} + \sigma_{bV} + \sigma_{bHY} \quad (19)$$

$$\sigma_{THY} = \sqrt{(\sigma_{Tc} + \sigma_{Tb})^2 + 3 \cdot \tau_{SHY}^2} \quad (20)$$

(ロ)一次＋二次応力

地震力のみによる曲げの応力範囲 ($\Delta \sigma_b$), せん断の応力範囲 ($\Delta \tau$) は次式により表される。引張・圧縮の応力範囲 ($\Delta \sigma_c$) は (13) 式による。なお, この部位では支圧応力は生じない。座屈評価は (16) 式による。

$$\Delta \sigma_b = 2 \cdot (\sigma_{bV} + \sigma_{bHY}) \quad (21)$$

$$\Delta \tau = 2 \cdot \tau_{SHY} \quad (22)$$

c. 計算結果

応力計算結果を表 2.2-3 に示す。

③ 応力の評価

A. 一次応力の評価

設計事象における評価を表 2.2-3 に示す。

表 2.2-3 より、支持架台の一次応力は、許容応力以下となる。

B. 一次＋二次応力の評価

設計事象における評価を表 2.2-3 に示す。

表 2.2-3 より、支持架台の一次＋二次応力は、許容応力以下となる。

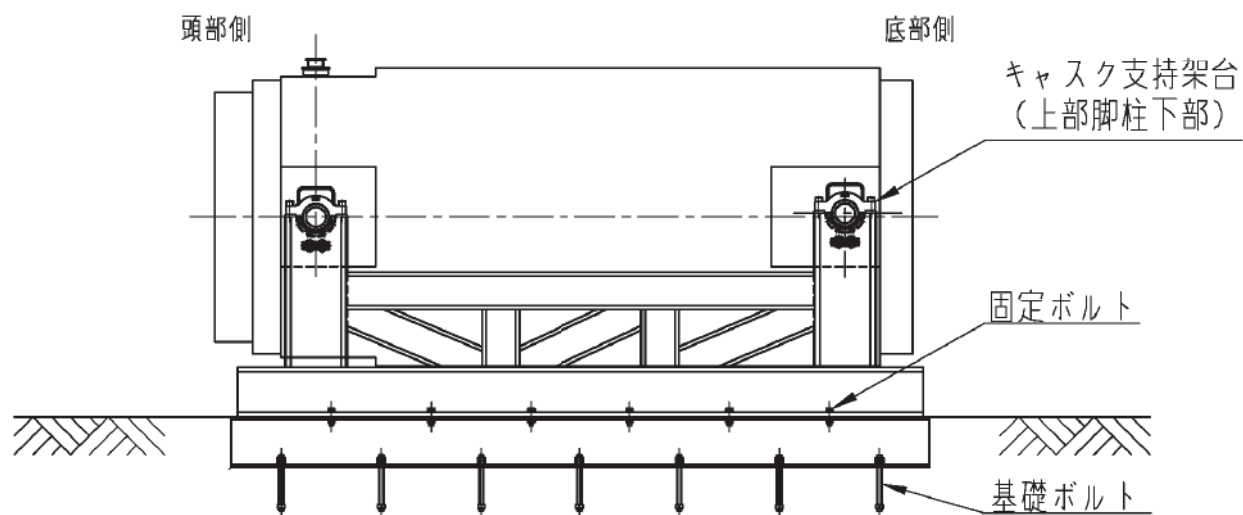


図 2.2-2 応力評価部位

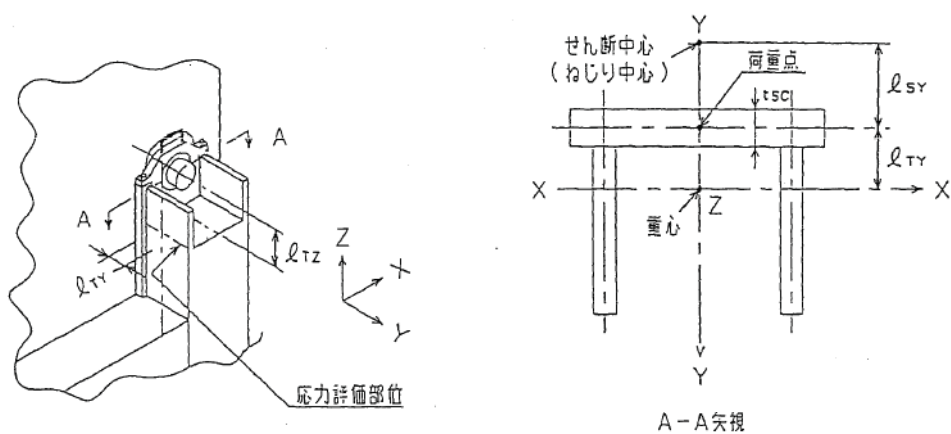


図 2.2-3 応力評価部位 (キャスク支持架台の上部脚柱)

表 2.2-1 計算条件

項 目		計算条件
機械的荷重	地 震 力	S _s 地震力 水平方向 : 0.79 G 鉛直方向 : 0.49 G
熱 荷 重	最高使用温度	50℃
材料		SS400

表 2.2-2 支持構造物用材料の許容応力値

許容 応力 区分	応力の種類		許容応力値 (N/mm ²)		
			炭素鋼 ¹⁾ (支持架台)		
			大型	中型	許容値基準
			SS400	SS400	
I + S _s	一次 応力	引張応力	253	253	1.5 f _t [*]
		圧縮応力	210	211	1.5 f _c [*]
		せん断応力	146	146	1.5 f _s [*]
		曲げ応力	253	253	1.5 f _b [*]
		支圧応力	346	346	1.5 f _p [*]
	一次 + 二次 応力	引張・圧縮応力	423	423	3 f _t ²⁾
		せん断応力	244	244	3 f _s ²⁾
		曲げ応力	423	423	3 f _b ²⁾
		支圧応力	346	346	1.5 f _p [*]
		座屈応力	210	211	1.5 f _b , 1.5 f _s 又は 1.5 f _c

注 1) 一次応力における組合せ応力評価は以下による。

- ① 評価断面に垂直な方向の応力 (σ) とせん断応力 (τ) を組合せた応力 (σ_T) は、引張応力に対する許容応力値以下であること。

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma^2 + 3 \cdot \tau^2}$$

- ② 組合せ応力評価として、評価断面に垂直な方向の応力同士での組合せ (軸応力+曲げ応力、せん断応力を考慮しない) として下記の評価がある。

○圧縮応力と曲げ応力との組合せが生じる場合は、次式を満足すること。

$$\frac{|\sigma_c|}{1.5 \cdot f_c^*} + \frac{|{}_c\sigma_b|}{1.5 \cdot f_b^*} \leq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{|{}_t\sigma_b| - |\sigma_c|}{1.5 \cdot f_t^*} \leq 1$$

○引張応力と曲げ応力との組合せが生じる場合は、次式を満足すること。

$$\frac{|\sigma_t| + |{}_t\sigma_b|}{1.5 \cdot f_t^*} \leq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{|{}_c\sigma_b| - |\sigma_t|}{1.5 \cdot f_b^*} \leq 1$$

ここで、σ_c : 平均圧縮応力 (N/mm²)

σ_t : 平均引張応力 (N/mm²)

_cσ_b : 圧縮側曲げ応力 (N/mm²)

_tσ_b : 引張側曲げ応力 (N/mm²)

注 2) S_s地震力のみによる応力範囲について評価。

表 2.2-3 支持架台の応力評価（仮保管時：S_s地震力が作用する場合）

（単位：N/mm²）

部位	応力の種類	大型			中型		
		計算値		許容応力	計算値		許容応力
		ケース 1 ¹⁾	ケース 2 ¹⁾		ケース 1 ¹⁾	ケース 2 ¹⁾	
支持架台	引張応力	—	—	253	—	—	253
	圧縮応力	9	9	210	7	7	211
	せん断応力	90	5	146	94	4	146
	曲げ応力	33	37	253	26	27	253
	組合せ応力	159	30	253	165	21	253
	支圧応力	—	—	346	—	—	346
	引張・圧縮応力	6	6	423	5	5	423
	せん断応力	180	9	244	188	7	244
	曲げ応力	45	53	423	36	36	423
	支圧応力	—	—	346	—	—	346
	座屈応力 ³⁾	9	9	210	7	7	211

注 1) ケース 1 は自重＋鉛直方向地震力＋軸方向水平地震力の場合

ケース 2 は自重＋鉛直方向地震力＋軸直角方向水平地震力の場合

注 2) S_s地震力のみによる応力範囲について評価

注 3) 自重＋地震力の最大応力で評価

4) 固定ボルト，基礎ボルト

① 概要

本項では，大型及び中型の乾式貯蔵キャスクの支持構造物のうち固定ボルト，基礎ボルトに関する応力計算について示す。

なお，地震時における支持架台の設計震度は大型と中型で同じであり，乾式貯蔵キャスクの質量は大型の方が大きく（大型：115000kg，中型：96000kg），また当該評価部位の形状，材料等は共通であるため大型のみを検討対象とする。

A. 形状・寸法・材料

本計算書で解析する箇所の形状・寸法・材料を図 2.2-4 に示す。

B. 計算条件

計算条件を表 2.2-4 に示す。

C. 許容応力

解析箇所の許容応力を表 2.2-5 に示す。

D. 応力の記号と方向

応力の記号とその方向は，3) ① D 項と同じである。

② 応力計算

A. 荷重条件

仮保管時において S_s 地震力が作用する場合の荷重は、次に示す組合せとする。

荷重の組合せ：自重＋地震力

B. 計算方法

固定ボルト、基礎ボルトの応力計算は、以下に示す方法で計算する。

なお、鉛直地震力と水平地震力を同時に考慮した荷重により、発生する応力を計算する。

a. 固定ボルトの応力

(a) 固定ボルトの引張応力

イ. 自重＋鉛直方向地震力＋軸方向水平地震力の場合

図 2.2-6 において、最大引張応力が発生するのは支点から最も遠い固定ボルトである。支点回りのモーメントの釣合による最大引張応力 (σ_{tFHx}) は次式で表される。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{tFHx} &= \frac{F_{fX1}}{A_{fb}} \\ F_{fX1} &= \frac{L_{fX1} \cdot M_{fTHx}}{\sum_{i=1}^6 N_{fXi} \cdot L_{fXi}^2} \\ M_{fTHx} &= \{C_H \cdot H_{fVG} - (1G - C_V) \cdot L_{fVGX}\} \cdot W_V + \{C_H \cdot H_{fSG} - (1G - C_V) \cdot L_{fSGX}\} \cdot W_S \end{aligned} \right\} (1)$$

ここで、

- W_V : キヤスク質量 (=115000 kg)
- W_S : キヤスク支持架台質量 (=15000 kg)
- C_V : 鉛直方向震度 (=0.49 G)
- C_H : 水平方向震度 (=0.79 G)
- G : 重力加速度 (=9.80665 m/s²)
- $F_{fX1} \sim F_{fX6}$: 図 2.2-6 に示す固定ボルトに発生する引張力 (N)
- A_{fb} : 固定ボルト 1 本の呼び径断面積 (=855.3 mm²)
- $L_{fX1} \sim L_{fX6}$: 図 2.2-6 に示す固定ボルトの各位置 (mm)
- ΔL_{fX} : 図 2.2-6 に示す固定ボルトの間隔
 $L_{fXi+1} = L_{fXi} - \Delta L_{fX}$
 ΔL_{fX} (=800 mm), L_{fX1} (=4750 mm)
- $N_{fX1} \sim N_{fX6}$: 図 2.2-6 に示す固定ボルトの各位置での本数 (=各 2 本)
- M_{fTHx} : 軸方向水平地震力に関する転倒モーメント (N・mm)
- H_{fVG} : 図 2.2-6 に示すキヤスク容器の重心高さ (=1600 mm)
- H_{fSG} : 図 2.2-6 に示すキヤスク支持架台の重心高さ (=522 mm)
- L_{fVGX} : 図 2.2-6 に示すキヤスク容器の軸方向の重心位置 (=2672 mm)
- L_{fSGX} : 図 2.2-6 に示すキヤスク支持架台の軸方向の重心位置 (=2754.9 mm)

(1) 式の転倒モーメント (M_{fTH}) が負であれば、引張力 (F_{fx1}) は作用しないので、この場合は引張応力の計算は省略する。

ロ. 自重+鉛直方向地震力+軸直角方向地震力の場合

図 2.2-7 において、最大引張応力が発生するのは支点から最も遠い固定ボルトである。支点回りのモーメントを片側の固定ボルトで受ける場合の最大引張応力 (σ_{tfHY}) は次式で表される。

$$\begin{aligned}\sigma_{tfHY} &= \frac{F_{fY}}{A_{fb}} \\ F_{fY} &= \frac{M_{fTHY}}{N_{fY} \cdot L_{fY}} \\ M_{fTHY} &= \{C_H \cdot H_{fVG} - (1G - C_V) \cdot L_{fVGY}\} \cdot W_V + \{C_H \cdot H_{fSG} - (1G - C_V) \cdot L_{fSGY}\} \cdot W_S\end{aligned} \quad \left. \vphantom{\begin{aligned}\sigma_{tfHY} &= \frac{F_{fY}}{A_{fb}} \\ F_{fY} &= \frac{M_{fTHY}}{N_{fY} \cdot L_{fY}} \\ M_{fTHY} &= \{C_H \cdot H_{fVG} - (1G - C_V) \cdot L_{fVGY}\} \cdot W_V + \{C_H \cdot H_{fSG} - (1G - C_V) \cdot L_{fSGY}\} \cdot W_S\right\} (2)$$

ここで、

- W_V : キヤスク質量 (=115000 kg)
- W_S : キヤスク支持架台質量 (=15000 kg)
- C_V : 鉛直方向震度 (=0.49 G)
- C_H : 水平方向震度 (=0.79 G)
- G : 重力加速度 (=9.80665 m/s²)
- F_{fY} : 図 2.2-7 に示す固定ボルトに発生する引張力 (N)
- A_{fb} : 固定ボルト 1 本の呼び径断面積 (=855.3 mm²)
- L_{fY} : 図 2.2-7 に示す支点から固定ボルトまでの距離 (=3200 mm)
- N_{fY} : 図 2.2-7 に示す固定ボルト位置 (L_{fY}) での本数 (=6 本)
- M_{fTHY} : 軸直角方向水平地震力に関する転倒モーメント (N・mm)
- H_{fVG} : 図 2.2-7 に示すキヤスク容器の重心高さ (=1600 mm)
- H_{fSG} : 図 2.2-7 に示すキヤスク支持架台の重心高さ (=522 mm)
- L_{fVGY} : 図 2.2-7 に示すキヤスク容器の軸直角方向の重心位置 (=1650 mm)
- L_{fSGY} : 図 2.2-7 に示すキヤスク支持架台の軸直角方向の重心位置 (=1650 mm)

(2) 式の転倒モーメント (M_{fTHY}) が負であれば、引張力 (F_{fY}) は作用しないので、この場合は引張応力の計算は省略する。

(b) 固定ボルトのせん断応力

固定ボルトのせん断応力 (τ_f) は次式で表される。

$$\tau_f = \frac{C_H \cdot (W_V + W_S)}{N_f \cdot A_{fm}} \quad (3)$$

ここで,

C_H : 水平方向震度 (=0.79 G)

N_f : 固定ボルトの本数 (=12 本)

A_{fm} : 固定ボルトの有効断面積 (=693.6 mm²)

W_V : キャスク質量 (=115000 kg)

W_S : キャスク支持架台質量 (=15000 kg)

G : 重力加速度 (=9.80665 m/s²)

b. 基礎ボルトの応力

(a) 基礎ボルトの引張応力

イ. 自重+鉛直方向地震力+軸方向水平地震力の場合

図 2.2-8 において，最大引張応力が発生するのは支点から最も遠い基礎ボルトである。支点回りのモーメントの釣合による最大引張応力（ σ_{taHX} ）は次式で表される。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\text{taHX}} &= \frac{F_{\text{aX}i}}{A_{\text{ab}}} \\ F_{\text{aX}1} &= \frac{L_{\text{aX}1} \cdot M_{\text{aTHX}}}{\sum_7 N_{\text{aXi}} \cdot L_{\text{aXi}}^2} \\ M_{\text{aTHX}} &= \{C_H^1 \cdot H_{\text{aVG}} - (1G - C_V) \cdot L_{\text{aVGX}}\} \cdot W_V + \{C_H \cdot H_{\text{aSG}} - (1G - C_V) \cdot L_{\text{aSGX}}\} \cdot W_S \\ &\quad + \{C_H \cdot H_{\text{aPG}} - (1G - C_V) \cdot L_{\text{aPGX}}\} \cdot W_P \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ここで，

W_V : キャスク質量（=115000 kg）

W_S : キャスク支持架台質量（=15000 kg）

W_P : 固定具質量（=3000 kg）

C_V : 鉛直方向震度（=0.49 G）

C_H : 水平方向震度（=0.79 G）

G : 重力加速度（=9.80665 m/s²）

$F_{\text{aX}1} \sim F_{\text{aX}7}$: 図 2.2-8 に示す基礎ボルトに発生する引張力（N）

A_{ab} : 基礎ボルト 1 本の呼び径断面積（=1017.9 mm²）

$L_{\text{aX}1} \sim L_{\text{aX}7}$: 図 2.2-8 に示す基礎ボルトの各位置（mm）

ΔL_{aX} : 図 2.2-8 に示す基礎ボルトの間隔

$$L_{\text{aX}i+1} = L_{\text{aX}i} - \Delta L_{\text{aX}}$$

$$\Delta L_{\text{aX}} \text{（=800 mm）, } \Delta L_{\text{aX}1} \text{（=5200 mm）}$$

$N_{\text{aX}1} \sim N_{\text{aX}7}$: 図 2.2-8 に示す基礎ボルトの各位置での本数（本）

M_{aTHX} : 軸方向水平地震力に関する転倒モーメント（N・mm）

H_{aVG} : 図 2.2-8 に示すキャスク容器の重心高さ（=2000 mm）

H_{aSG} : 図 2.2-8 に示すキャスク支持架台の重心高さ（=922 mm）

H_{aPG} : 図 2.2-8 に示す固定具の重心高さ（=200 mm）

L_{aVGX} : 図 2.2-8 に示すキャスク容器の軸方向の重心位置
（=2722 mm）

L_{aSGX} : 図 2.2-8 に示すキャスク支持架台の軸方向の重心位置
（=2804.9 mm）

L_{aPGX} : 図 2.2-8 に示す固定具の軸方向の重心位置（=2800 mm）

(4) 式の転倒モーメント（ M_{aTHX} ）が負であれば，引張力（ $F_{\text{aX}1}$ ）は作用しないので，この場合は引張応力の計算は省略する。

ロ. 自重+鉛直方向地震力+軸直角方向地震力の場合

図 2. 2-9 において、最大引張応力が発生するのは支点から最も遠い基礎ボルトである。支点回りのモーメントを片側の基礎ボルトで受ける場合の最大引張応力 (σ_{taHY}) は次式で表される。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\text{taHY}} &= \frac{F_{\text{aY1}}}{A_{\text{ab}}} \\ F_{\text{aY1}} &= \frac{M_{\text{aTHY}} \cdot L_{\text{aY1}}}{N_{\text{aY1}} \cdot L_{\text{aY1}}^2 + N_{\text{aY2}} \cdot L_{\text{aY2}}^2} \\ M_{\text{aTHY}} &= \{C_{\text{H}} \cdot H_{\text{aVG}} - (1G - C_{\text{V}}) \cdot L_{\text{aVGY}}\} \cdot W_{\text{V}} + \{C_{\text{H}} \cdot H_{\text{aSG}} - (1G - C_{\text{V}}) \cdot L_{\text{aSGY}}\} \cdot W_{\text{S}} \\ &\quad + \{C_{\text{H}} \cdot H_{\text{aPG}} - (1G - C_{\text{V}}) \cdot L_{\text{aPGY}}\} \cdot W_{\text{P}} \end{aligned} \right\} (5)$$

ここで、

- W_{V} : キャスク質量 (=115000 kg)
- W_{S} : キャスク支持架台質量 (=15000 kg)
- W_{P} : 固定具質量 (=3000 kg)
- C_{V} : 鉛直方向震度 (=0.49 G)
- C_{H} : 水平方向震度 (=0.79 G)
- G : 重力加速度 (=9.80665 m/s²)
- $F_{\text{aY1}} \sim F_{\text{aY2}}$: 図 2. 2-9 に示す基礎ボルトに発生する引張力 (N)
- A_{ab} : 固定ボルト 1 本の呼び径断面積 (=1017.9 mm²)
- $L_{\text{aY1}} \sim L_{\text{aY2}}$: 図 2. 2-9 に示す支点から基礎ボルトまでの距離
($L_{\text{aY1}}=3200$ mm, $L_{\text{aY2}}=3000$ mm)
- N_{aYi} : 図 2. 2-9 に示す基礎ボルト位置 (L_{aYi}) での本数 (=各 7 本)
- M_{aTHY} : 軸直角方向水平地震力に関する転倒モーメント (N・mm)
- H_{aVG} : 図 2. 2-9 に示すキャスク容器の重心高さ (=2000 mm)
- H_{aSG} : 図 2. 2-9 に示すキャスク支持架台の重心高さ (=922 mm)
- H_{aPG} : 図 2. 2-9 に示す固定具の重心高さ (=200 mm)
- L_{aVGY} : 図 2. 2-9 に示すキャスク容器の軸直角方向の重心位置 (=1650 mm)
- L_{aSGY} : 図 2. 2-9 に示すキャスク支持架台の軸直角方向の重心位置 (=1650 mm)
- L_{aPGY} : 図 2. 2-9 に示すキャスク支持架台の軸直角方向の重心位置 (=1650mm)

(5) 式の転倒モーメント (M_{aTHY}) が負であれば、引張力 (F_{aY1}) は作用しないので、この場合は引張応力の計算は省略する。

(b) 基礎ボルトのせん断応力

基礎ボルトのせん断応力 (τ_f) は次式で表される。

$$\tau_f = \frac{C_H \cdot (W_V + W_S + W_P)}{N_a \cdot A_{am}} \quad (6)$$

ここで、

C_H : 水平方向震度 (=0.79 G)

N_a : 基礎ボルトの本数 (=28 本)

A_{am} : 基礎ボルトの有効断面積 (=816.7 mm²)

W_V : キャスク質量 (=115000 kg)

W_S : キャスク支持架台質量 (=15000 kg)

W_P : 固定具質量 (=3000 kg)

G : 重力加速度 (=9.80665 m/s²)

④応力の評価

設計事象 I + S_sにおける固定ボルト及び基礎ボルトの評価を表 2.2-6 に示す。

表 2.2-6 より、各部の一次応力は許容応力以下となっている。

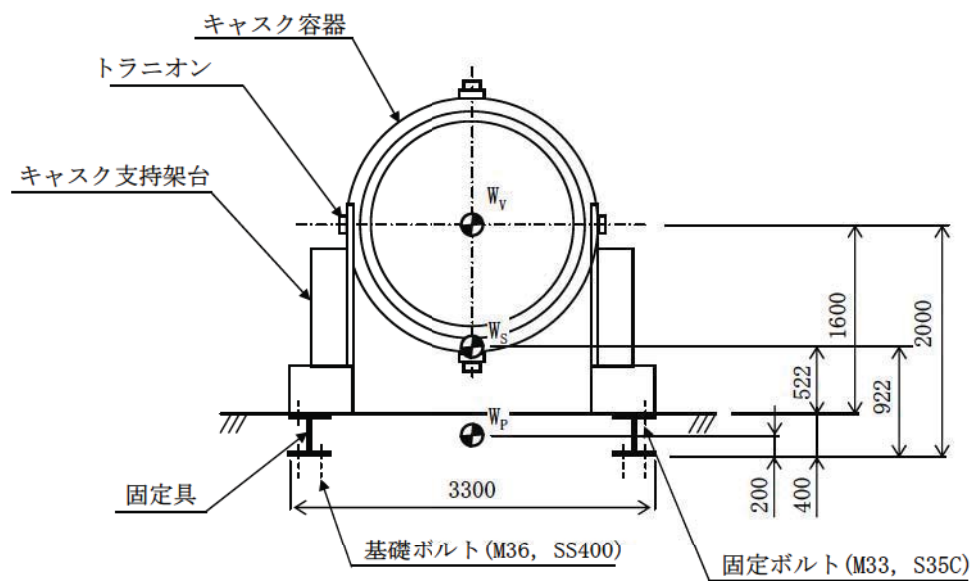
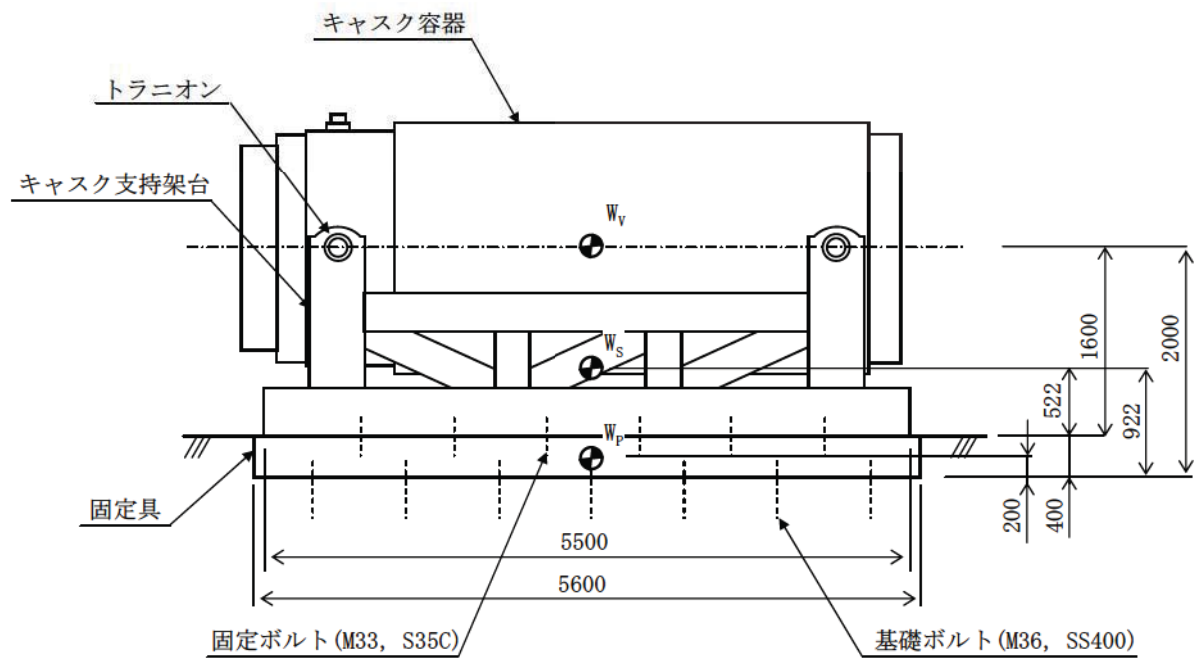


図 2. 2-4 形状・寸法・材料

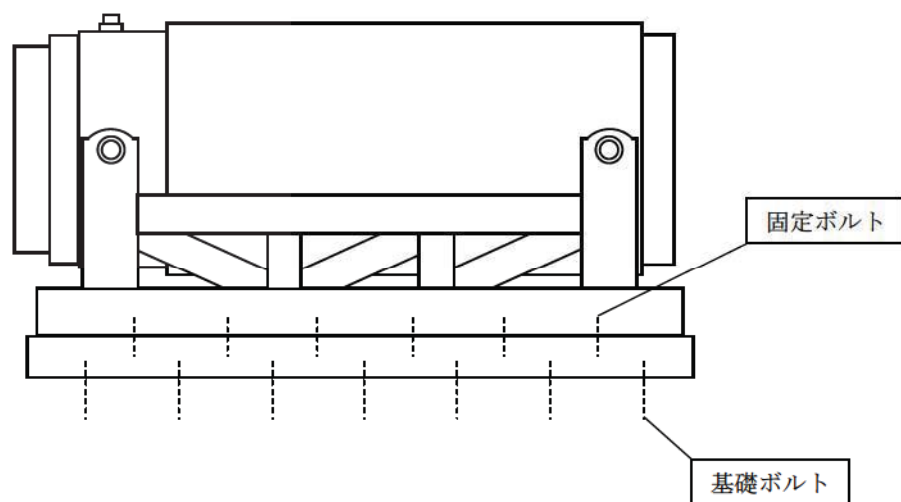


図 2.2-5 応力評価部位

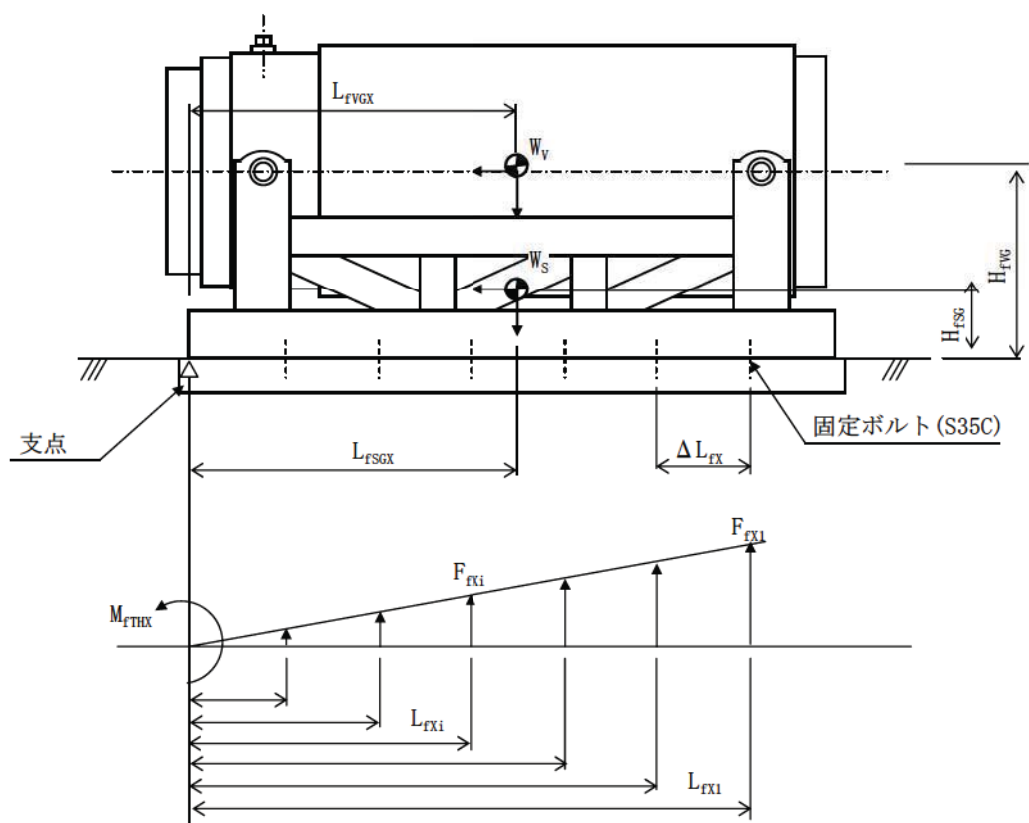


図 2.2-6 自重+鉛直方向地震力+軸方向水平地震力が作用した場合の
固定ボルトの引張応力計算モデル

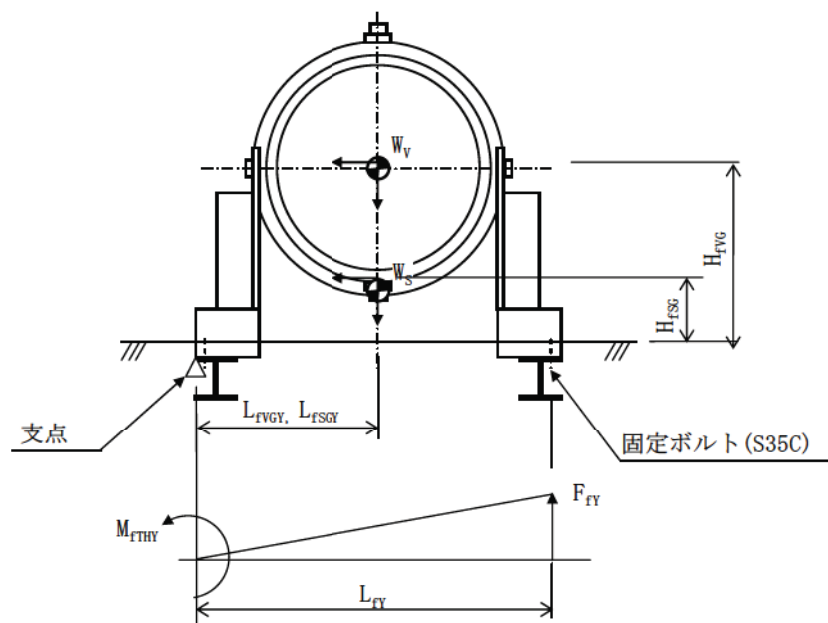


図 2.2-7 自重+鉛直方向地震力+軸直角方向水平地震力が作用した場合の
固定ボルトの引張応力計算モデル

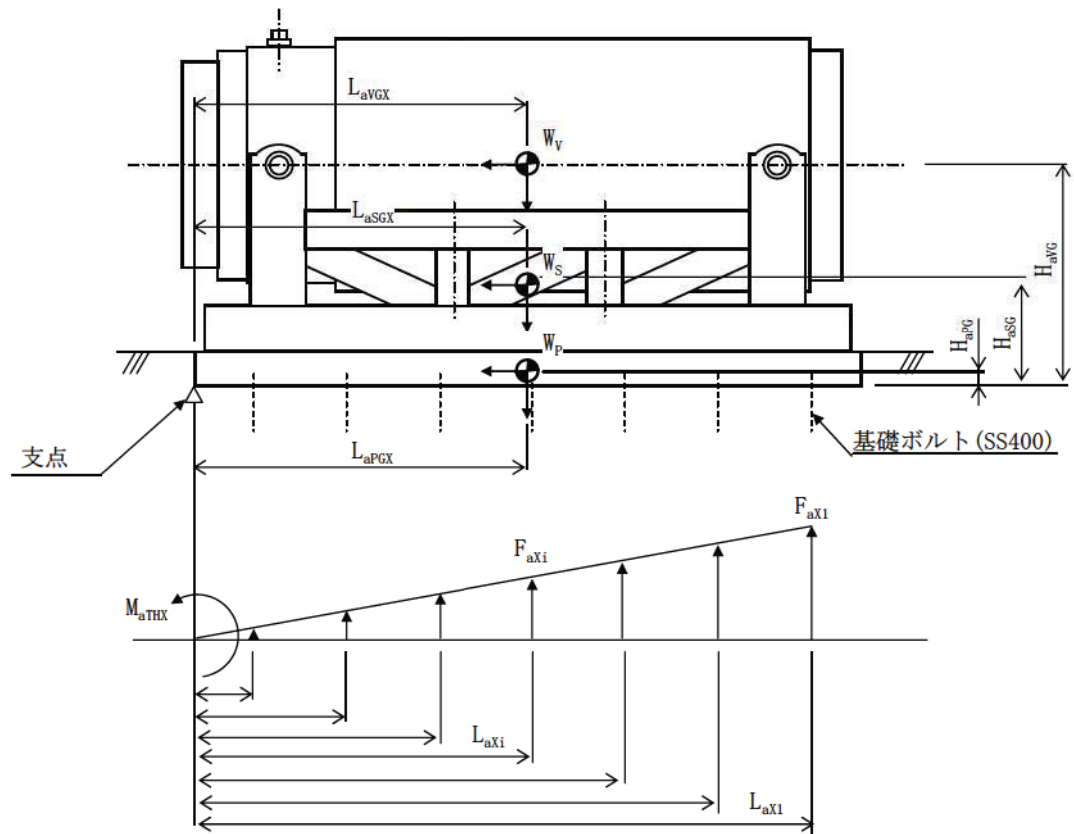


図 2.2-8 自重+鉛直方向地震力+軸方向水平地震力が作用した場合の
基礎ボルトの引張応力計算モデル

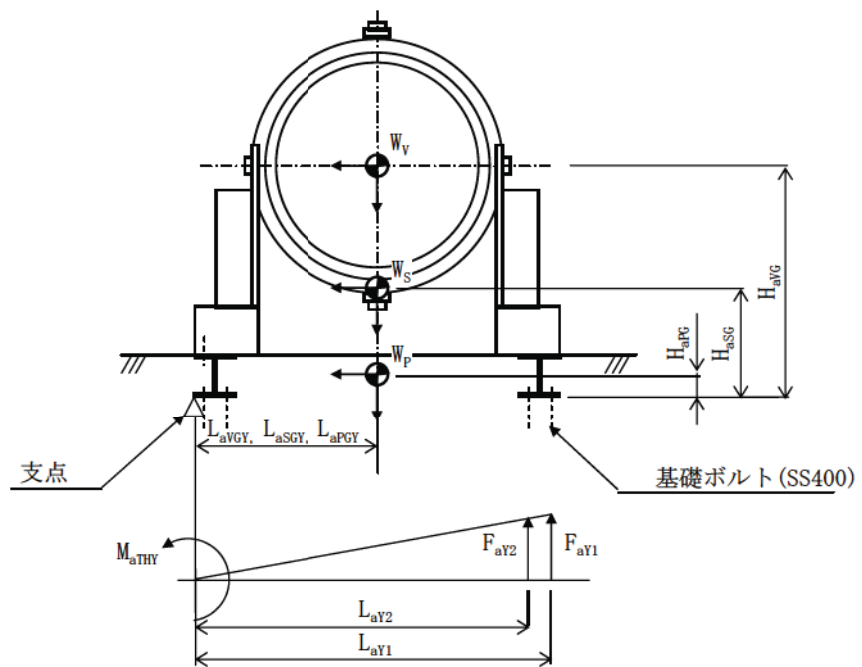


図 2.2-9 自重+鉛直方向地震力+軸直角方向水平地震力が作用した場合の
基礎ボルトの引張応力計算モデル

表 2.2-4 計算条件

項 目		計算条件
機械的荷重	地震力	S _s 地震力 水平方向 : 0.79 G 鉛直方向 : 0.49 G
熱 荷 重	最高使用温度	50℃
材料	固定ボルト	炭素鋼 (S35C)
	基礎ボルト	炭素鋼 (SS400)

表 2.2-5 許容応力

(単位 : N/mm²)

部位	材料	設計事象	許容応力 ^(注1)	
			引張	せん断
固定ボルト	炭素鋼 (S35C)	I + S _s	(注 2)	224
基礎ボルト	炭素鋼 (SS400)		(注 2)	158

(注 1) 許容応力は、次式で算出

<固定ボルト及び基礎ボルト>

$$\text{許容引張応力 } f_t = \frac{F}{2} \times 1.5$$

$$\text{許容せん断応力 } f_s = \frac{F}{1.5\sqrt{3}} \times 1.5$$

ただし、

$$F : \text{設計基準強度 (N/mm}^2\text{)} \quad F = \text{Min}[1.2S_y, 0.7S_u]$$

(注 2) 固定ボルト及び基礎ボルトの許容引張応力はせん断応力との組合せを考慮し、次式で低減させる

$$\text{Min}[f_{t0}, 1.4f_{t0} - 1.6\tau]$$

ここで、

 f_{t0} : ボルトの許容引張応力 (N/mm²) τ : ボルトに発生するせん断応力 (N/mm²)

表 2.2-6 固定ボルト及び基礎ボルトの応力評価（設計事象 I + S_s）

（単位：N/mm²）

部位	応力の種類	計算値		許容応力 ^(注2)
		ケース 1 ^(注1)	ケース 2 ^(注1)	
固定ボルト	引張	— ^(注3)	26	213
	せん断	121	121	224
基礎ボルト	引張	2	19	206
	せん断	45	45	158

（注 1） ケース 1：自重＋鉛直方向地震力＋軸方向水平地震力

 ケース 2：自重＋鉛直方向地震力＋軸直角方向水平地震力

（注 2） 固定ボルト及び基礎ボルトの許容引張応力は，発生せん断応力を考慮し低減させた値

（注 3） (1)式に示す転倒モーメント（M_{FTHX}）が負となり，固定ボルトに引張応力が発生しない。

(2) 輸送貯蔵兼用キャスク

1) 評価方針

キャスク仮保管設備における輸送貯蔵兼用キャスク用支持架台の基準地震動 S_s に対する耐震性について示すものである。なお、輸送貯蔵兼用キャスク A については今後評価結果を記載する。

2) 主な構成部材と適用基準

① 主な構成部材

輸送貯蔵兼用キャスク用支持架台の耐震強度は、地震時に要求される安全機能を維持するため、鋼製支持架台、埋め込み金物、基礎ボルト、コンクリート支持架台により構成される。

② 適用基準と規格

輸送貯蔵兼用キャスク用支持架台は原子力発電所耐震設計技術規程 [JEAC4601-2008] 及び、発電用原子力設備規格 設計・建設規格 2005 年版 (2007 年追補版含む) [JSME S NC1-2005/2007] を適用する。

3) 固有周期の算定

輸送貯蔵兼用キャスク用支持架台の固有周期は 2.1 乾式キャスクの耐震性 (3) 輸送貯蔵兼用キャスク B の内 2) 固有周期の算定と同一である。

4) 設計震度

輸送貯蔵兼用キャスク用支持架台の設計震度は 2.1 (3) 輸送貯蔵兼用キャスク B の内 3) 設計震度と同一である。

5) 解析条件

① 荷重の組合せ

S_s 地震時の評価において、輸送貯蔵兼用キャスクの設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せを表 2.2-7 に示す。

表 2.2-7 輸送貯蔵兼用キャスク用支持架台の設計上考慮すべき荷重の種類とその組合せ

設計事象		自重による荷重	地震荷重
評価事象			
I + S s	S s 地震力が作用する場合	○	○

② 解析箇所

輸送貯蔵兼用キャスク用支持架台の応力解析を行う箇所を図 2.2-10 に示す。

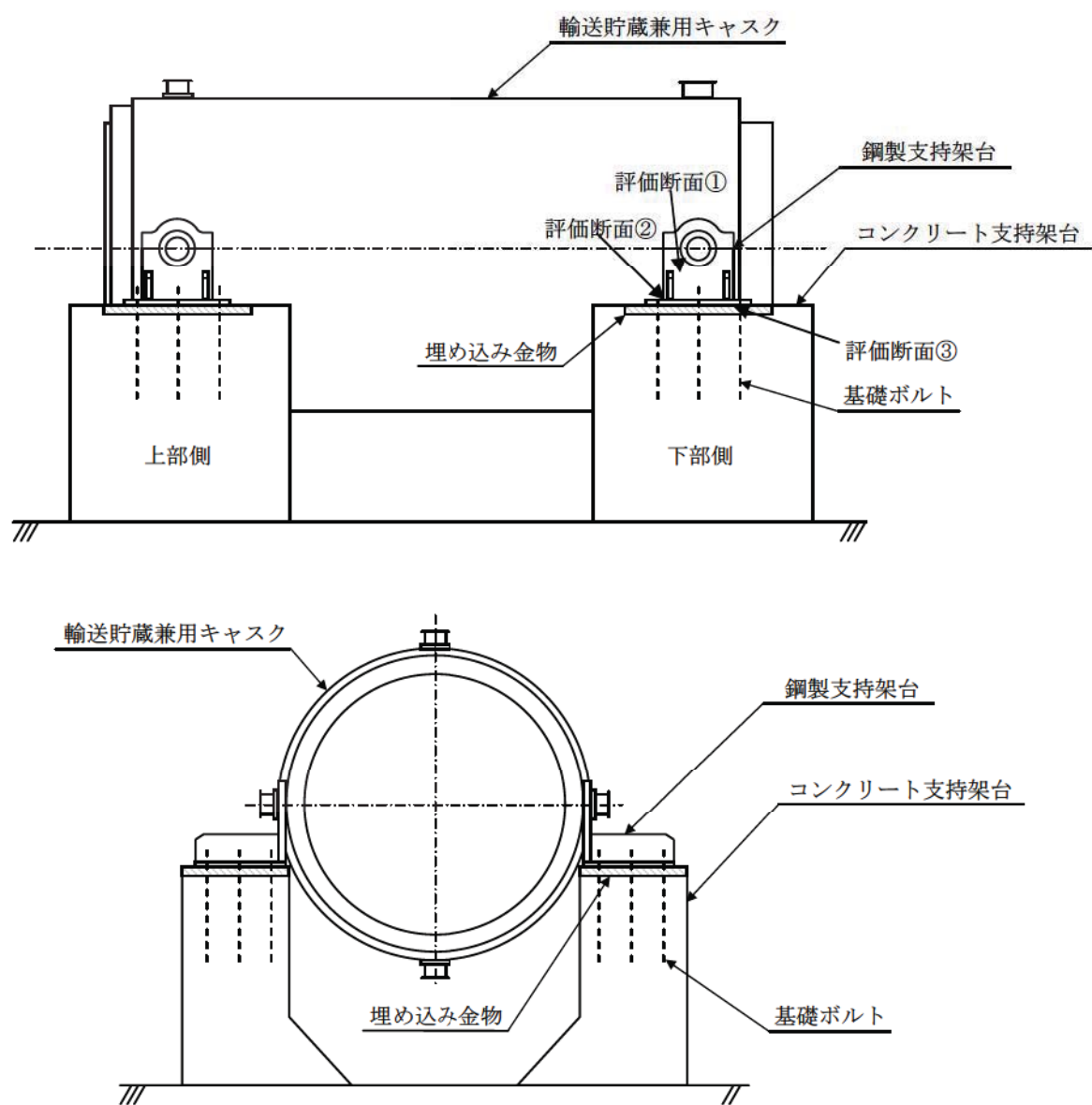


図 2.2-10 輸送貯蔵兼用キャスク用支持架台