

使用済燃料乾式貯蔵容器の貯蔵架台のクラス分類について

1. はじめに

使用済燃料乾式貯蔵容器（以下、「乾式キャスク」という）の貯蔵架台については、乾式キャスクの支持構造物として設計するため、乾式キャスクの機器クラス分類に整合したクラス分類としている。

ここで、乾式キャスクの機器クラスについては、実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則第二条の定義よりクラス1機器、クラス2機器及び原子炉格納容器等以外の設計基準対象施設に属する容器であるため、クラス3機器（クラス3容器）と分類している。なお、具体的系統及び機器は「設計・建設規格」の解説による。（別紙1参照）

このため、貯蔵架台についても、クラス3支持構造物として分類し設計している。

今回、貯蔵架台をクラス3支持構造物として設計することの妥当性について、強度設計の観点及び「使用済燃料貯蔵施設の技術基準に関する規則」との整合の観点で説明する。

2. 貯蔵架台の強度設計

(1) クラス3支持構造物に対する強度評価について

設計・建設規格において、クラス3支持構造物に対する強度評価として、一次応力に対する評価が要求されており、クラス1支持構造物と比較すると、表1のとおり差異がある。

表1 クラス3支持構造物とクラス1支持構造物の各応力に対する許容応力の比較

			クラス3支持構造物	クラス1支持構造物
供用状態 A及び B	一次 応力	引張応力	引張応力 $\leq f_t$	引張応力 $\leq f_t$
		せん断応力	せん断応力 $\leq f_s$	せん断応力 $\leq f_s$
		圧縮応力	圧縮応力 $\leq f_c$	圧縮応力 $\leq f_c$
		曲げ応力	曲げ応力 $\leq f_b$	曲げ応力 $\leq f_b$
		支圧応力	支圧応力 $\leq f_p$	支圧応力 $\leq f_p$
		組合せ応力	組合せ応力 $\leq f_t$	組合せ応力 $\leq f_t$
	一次 応力 + 二次 応力	引張応力	—	引張応力 $\leq 3f_t$
		圧縮応力		圧縮応力 $\leq 3f_c$
		せん断応力		せん断応力 $\leq 3f_s$
		曲げ応力		曲げ応力 $\leq 3f_b$
		支圧応力		支圧応力 $\leq 1.5f_p$
座屈応力	座屈応力 $\leq 1.5f_s$ or $1.5f_c$			

(2) 貯蔵架台における応力評価について

貯蔵架台の設置状況を別紙2の図1に示す。貯蔵架台には各部の自重、ボルトの初期締め付け力等による一次応力（せん断応力、支圧応力、圧縮応力）が作用するため、各応力に対して応力評価を実施する必要がある。一方、二次応力については、次の理由から先行と同様に乾式キャスクの温度変化による応力は無視できる。

<乾式キャスクによる熱応力>

- ・乾式キャスク底部と貯蔵架台の嵌合部は隙間があり熱応力は発生しない
- ・トラニオンと固定装置との拘束については、トラニオンの線膨張係数が大きく、トラニオンと固定装置との熱収縮差により拘束力は緩和される

<貯蔵架台と床との拘束による熱応力>

- ・貯蔵架台と床（コンクリート）との拘束については、貯蔵架台（炭素鋼）と床（コンクリート）との線膨張係数に差がなく、貯蔵架台の熱収縮によって床との拘束力は生じないことから熱応力は無視できる

よって、貯蔵架台における応力評価結果は表2のとおりとなり、一次応力と一次応力+二次応力の計算値は同じとなる。また、一次応力+二次応力の評価では、一次応力の評価に比べて許容値が大きくなることから、裕度は大きくなる。

表2 貯蔵架台の応力評価結果（貯蔵時）（タイプ1の例）（単位：MPa）

部位	応力分類	評価位置*	クラス3支持構造物			(参考)クラス1支持構造物					
			一次応力			一次応力			一次応力+二次応力		
			計算値	許容値	計算値/許容値	計算値	許容値	計算値/許容値	計算値	許容値	計算値/許容値
貯蔵架台	せん断応力	図1 ①	3	89	0.04	3	89	0.04	3	269	0.02
	支圧応力	図2 ②	4	291	0.02	4	291	0.02	4	436	0.01
		図2 ③	12	291	0.05	12	291	0.05	12	436	0.03
	圧縮応力	図2 ④	12	155	0.08	12	155	0.08	12	466	0.03
トラニオン押さえ	支圧応力	図3 ⑤	10	316	0.04	10	316	0.04	10	474	0.03

※：評価位置については、別紙2に示す。

(3) まとめ

以上から、貯蔵架台の強度設計については、クラス3容器を支持するクラス3支持構造物として設計することで、問題なく構造健全性が評価できるため妥当と考える。

3. 使用済燃料貯蔵施設の技術基準に関する規則との整合

(1) 使用済燃料貯蔵施設の技術基準に関する規則に対する貯蔵架台の設計

使用済燃料貯蔵施設の技術基準に関する規則の要求事項のうち、貯蔵架台に係る材料及び構造に対して、弊社の貯蔵架台の設計が要求事項を満たしていることを示す。

ここで、同規則での材料及び構造に係る要求は、第十四条が該当するため、当該規則及び解釈に対しての弊社貯蔵架台の設計を別紙3に示す。

別紙3から、弊社の貯蔵架台の設計が、使用済燃料貯蔵施設の技術基準に関する規則第十四条に対しても要求事項を満たしていることが分かる。

(2) 使用済燃料貯蔵施設の技術基準に関する規則におけるクラス分類

使用済燃料貯蔵施設の技術基準に関する規則において、クラス分類の要求自体はないが、乾式キャスクの同規則第十四条（材料及び構造）への適合を示す方法として、同解釈の別記の（1）を適用する場合には、設計・建設規格等のクラス1容器の規定によることが求められている。一方、同解釈の別記の（2）を適用する場合には、金属キャスク構造規格の密封容器等によることが求められている。

また、貯蔵架台のクラス分類については、規則及び解釈において言及はない。

ここで、別記の（1）を採用する場合においては、容器のクラス分類に応じて貯蔵架台をクラス1支持構造物として分類することは、整合の取れた考え方と考えられる。一方、別記の（2）を採用する場合においては、乾式キャスクのクラス分類がないため、貯蔵架台においても、クラス分類によらず（クラス1支持構造物と分類する必要が無く）、適切な方法で同規則の十四条への適合を示すことが妥当と考える。

弊社の設計においては、乾式キャスクの設計は、金属キャスク構造規格に則って設計するとともに、1のとおり設計・建設規格のクラス3容器としても設計しているため、貯蔵架台においては、クラス3支持構造物として分類し、その構造健全性を評価している。

表3 クラス分類整理

		クラス分類等	
		乾式キャスク	貯蔵架台
使用済燃料貯蔵施設の 技術基準に関する規則	別記の（1）	クラス1容器	クラス1支持構造物
	別記の（2）	密封容器等	クラス指定なし
実用発電用原子炉及びその附属施設の 技術基準に関する規則（弊社設計）		クラス3容器 密封容器等	クラス3支持構造物

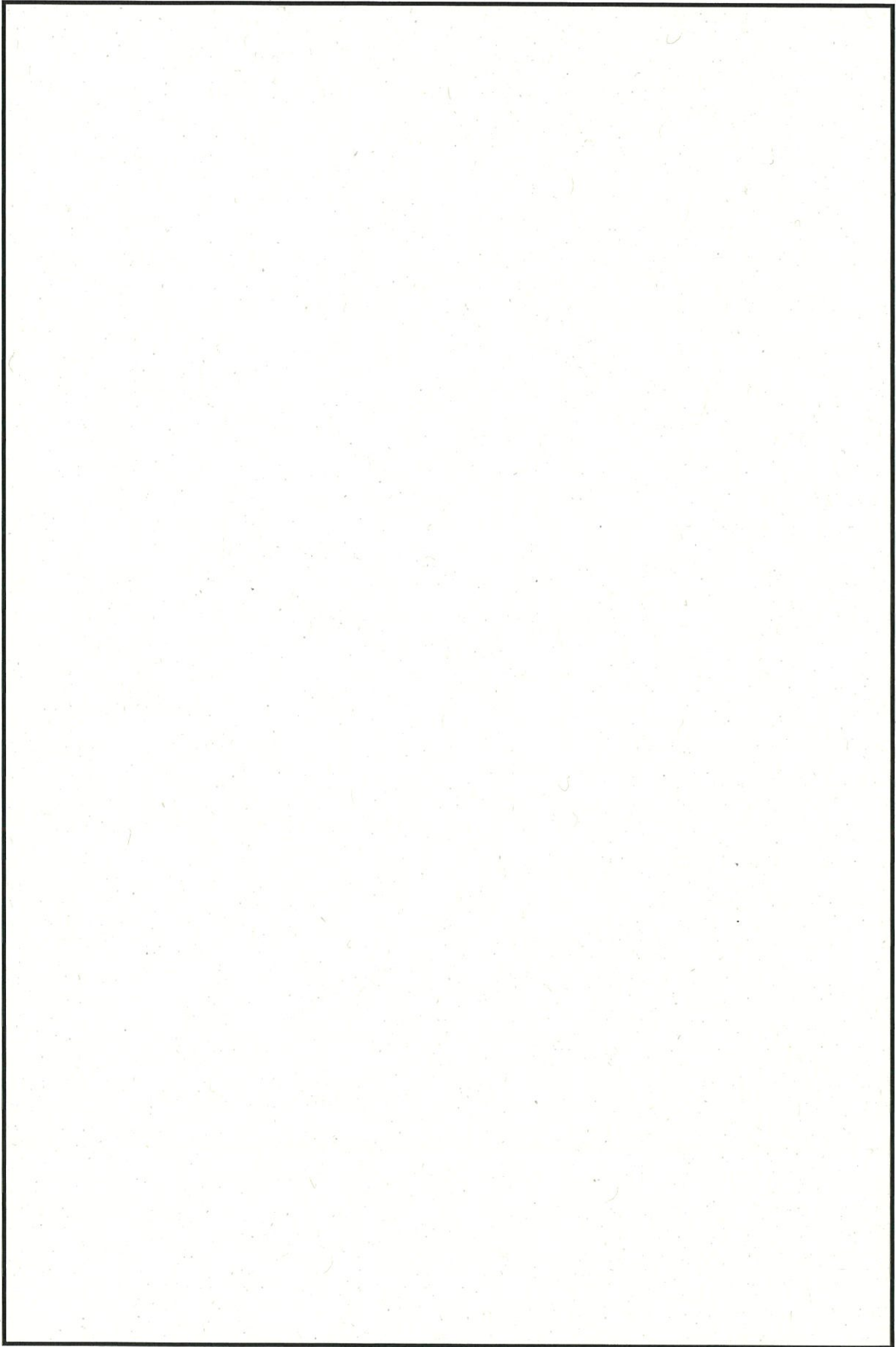
(3) まとめ

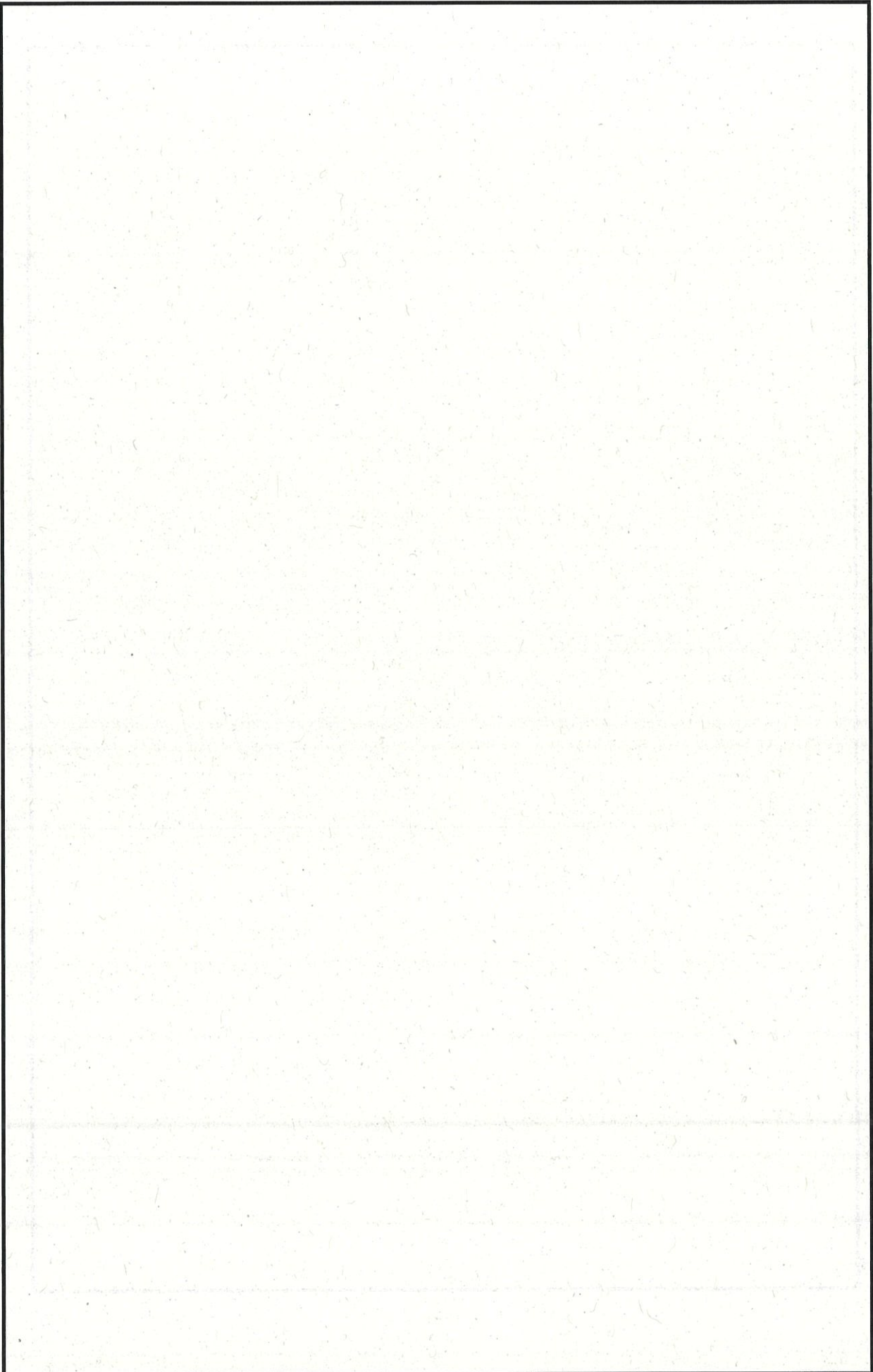
以上から、弊社の貯蔵架台においては、使用済燃料貯蔵施設の技術基準に関する規則の要求事項を満足しているとともに、そのクラス分類についても、特段のクラス指定がないため、クラス3支持構造物に分類し、評価・設計することは、使用済燃料貯蔵施設の技術基準に関する規則に整合していると考えます。

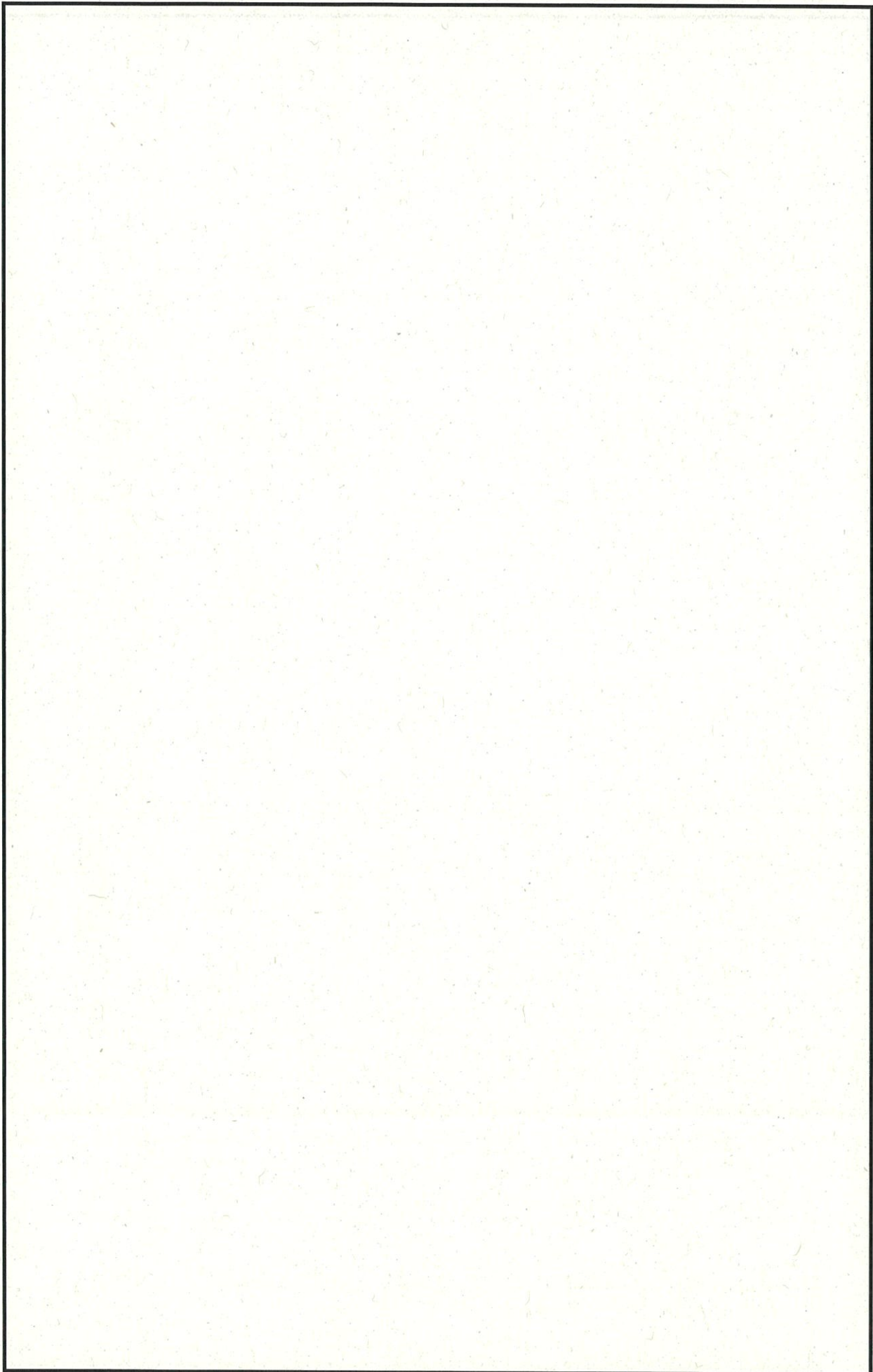
4. 結論

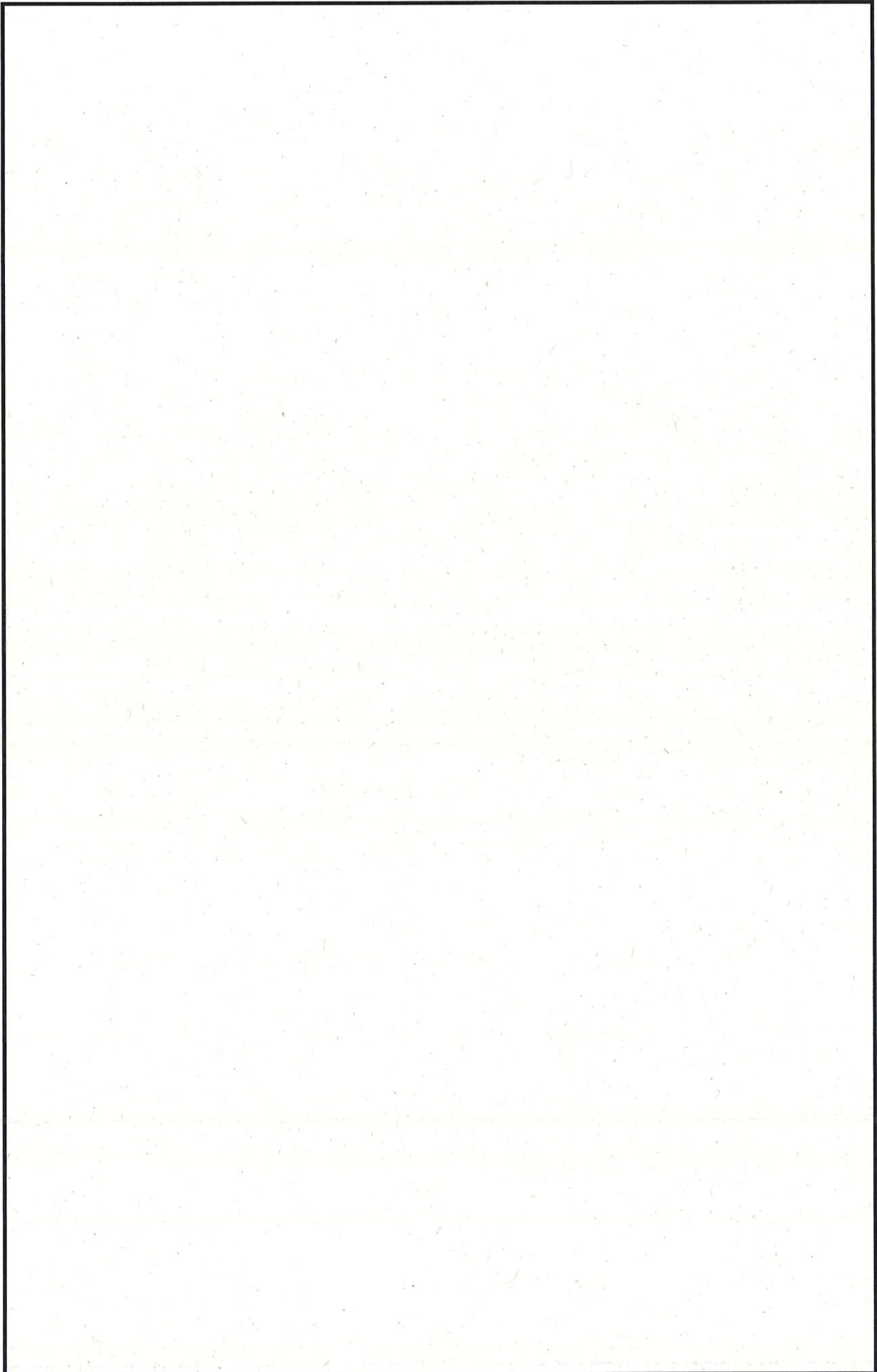
2、3から、発電用原子炉施設として、実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則に従い、貯蔵架台をクラス3支持構造物として設計することは、強度設計の観点から妥当であり、使用済燃料貯蔵施設ではないが、使用済燃料貯蔵施設の技術基準に関する規則への整合の観点からも妥当であると考えます。

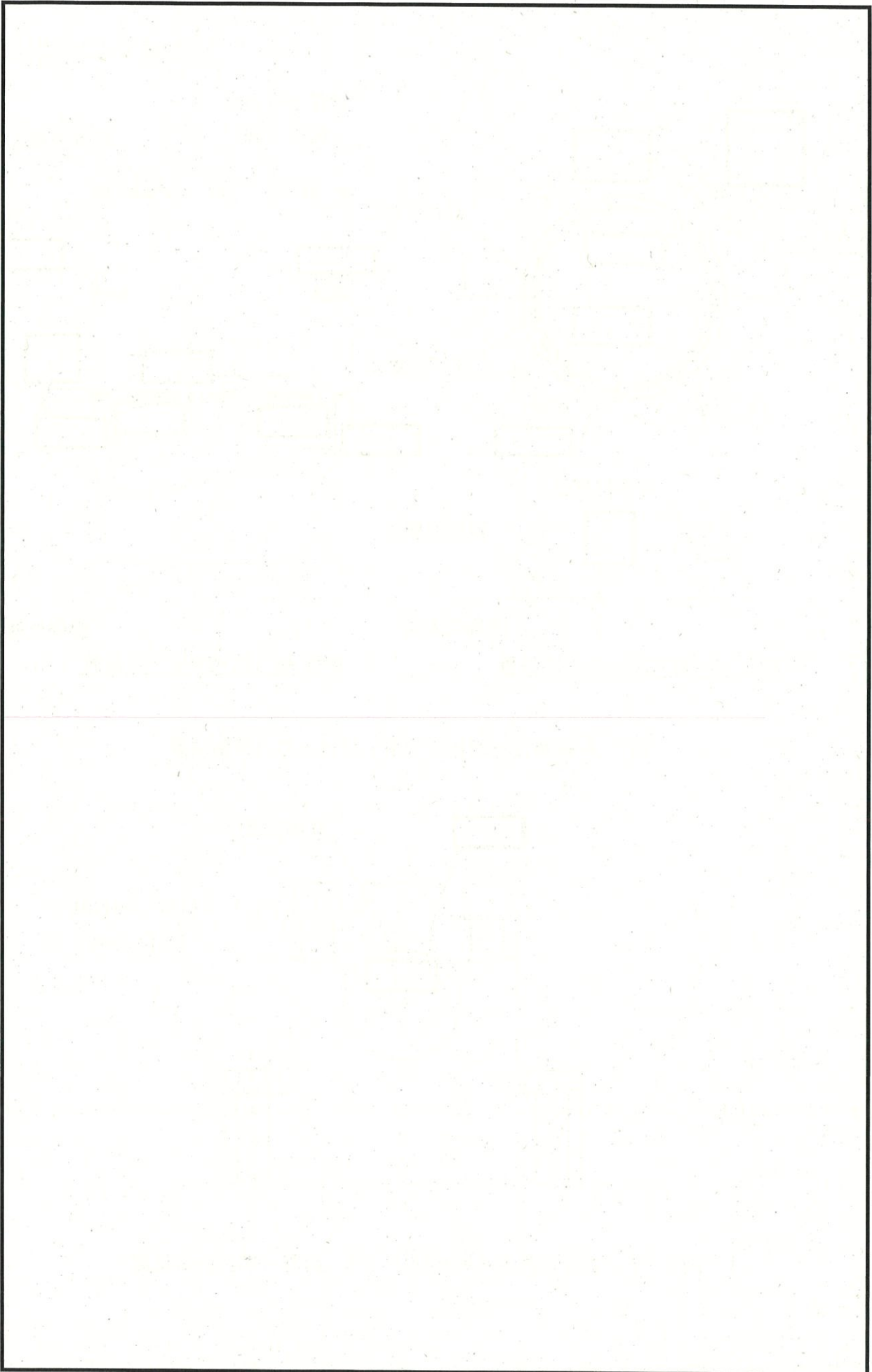
以上

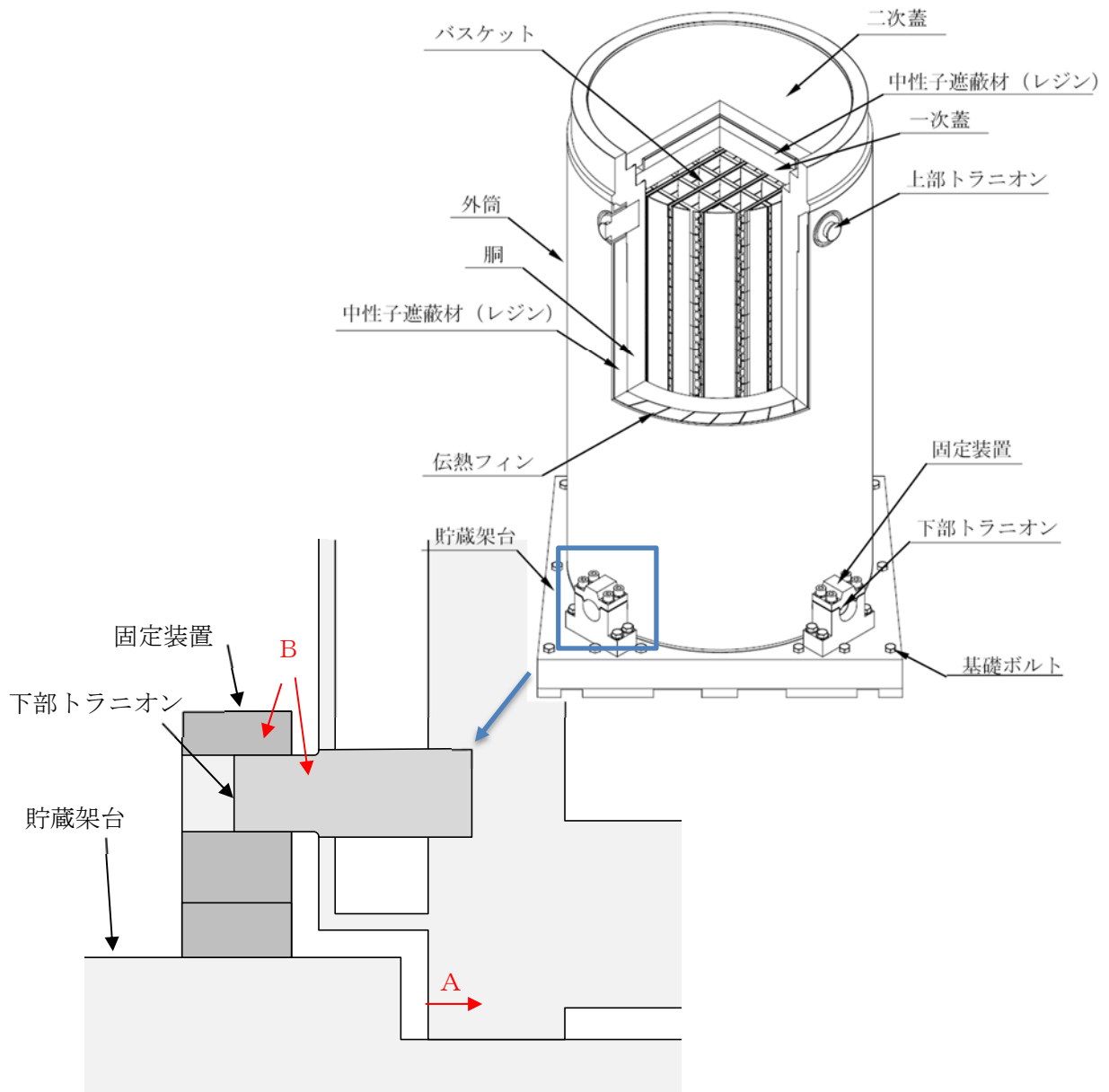












- A : 乾式キャスク底部が熱膨張している状態で設置するため、その後の使用済燃料の発熱量低下に伴う乾式キャスクの熱収縮においてキャスクは貯蔵架台へ応力を与えない
- B : 乾式キャスク底部が熱膨張している状態で設置するため、その後の使用済燃料の発熱量低下に伴う乾式キャスクの熱収縮において、キャスクは固定装置へ応力を与えない

図1 貯蔵架台の設置状況

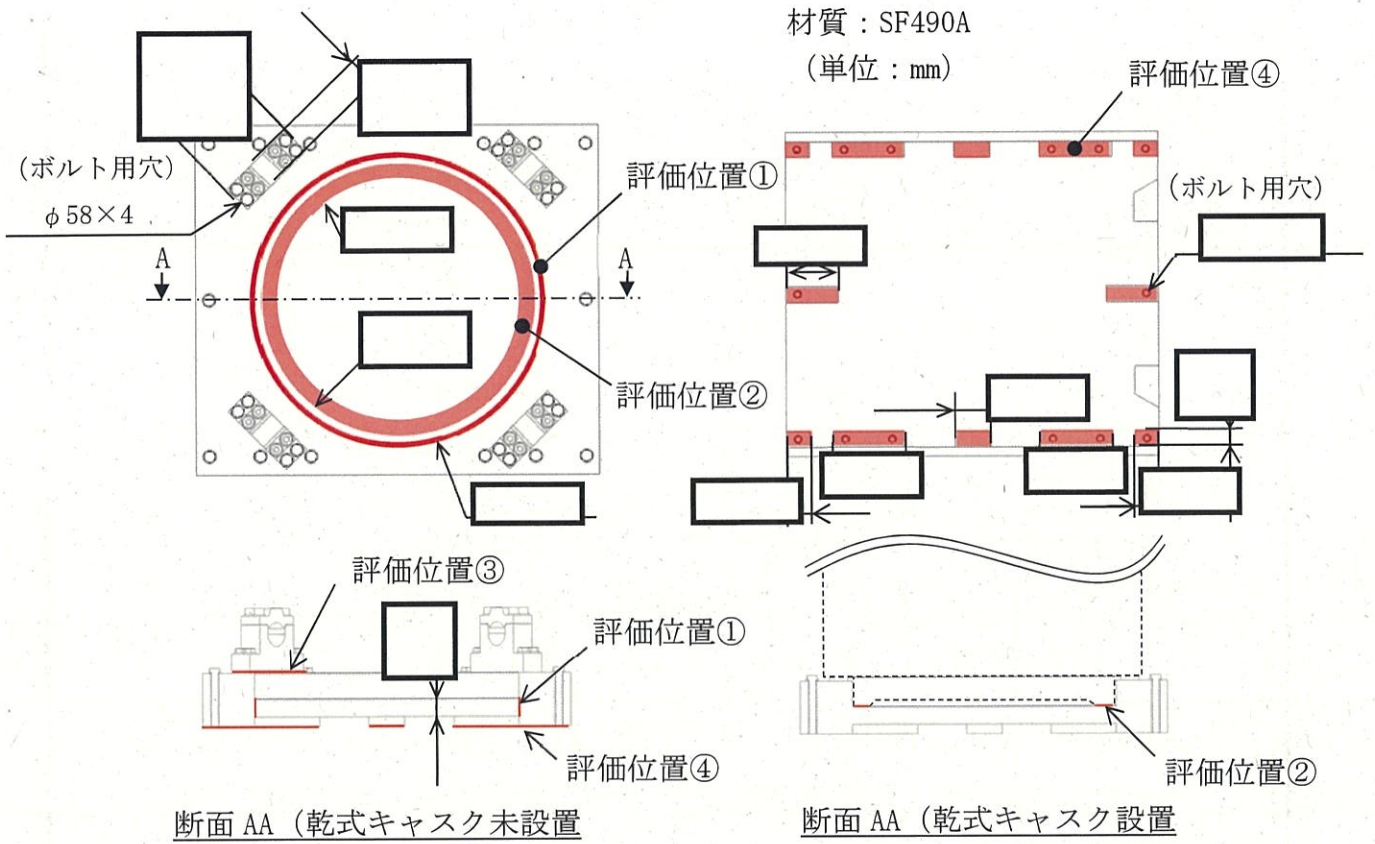


図2 貯蔵架台の形状・寸法・材料・応力評価位置

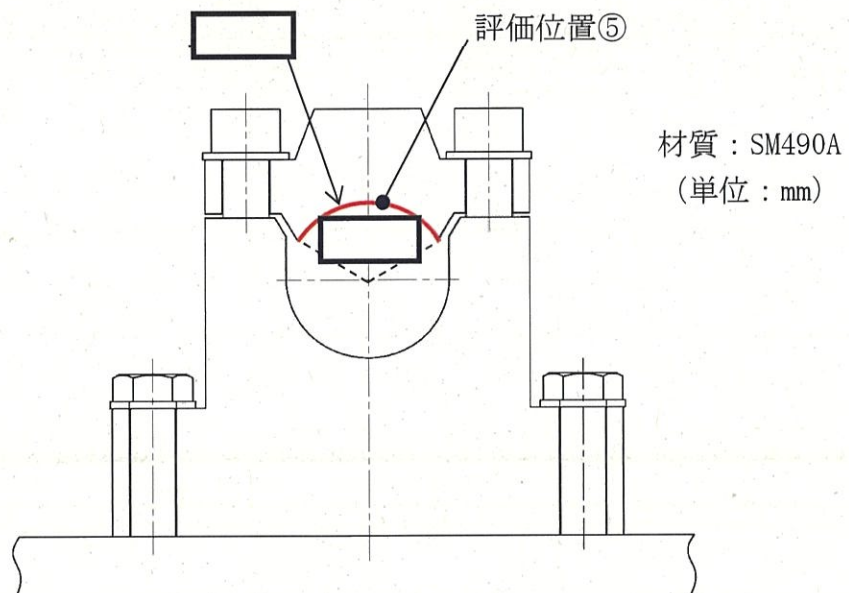


図3 トラニオン押さえの形状・寸法・材料・応力評価位置

使用済燃料貯蔵施設に関する規則	使用済燃料貯蔵施設に関する規則の解釈	要求事項を満足しているか否か	理由
<p>(材料及び構造) 第十四条 使用済燃料貯蔵施設に属する容器、管及びこれらの支持構造物のうち、使用済燃料貯蔵施設の基本的安全機能を確保する上で必要なもの（以下この項において「容器等」という。）の材料及び構造は、次に掲げるところによらなければならない。この場合において、第一号及び第三号の規定については、法第四十三条の九第二項に規定する使用前事業者検査の確認を行うまでの間適用する。 一 容器等に使用する材料は、次に掲げるところによるものであること。</p>	<p>第14条 (材料及び構造) 1 第1項第1号ロ及びハの適切な破壊じん性を有することの確認において、板厚の薄い材料や脆性破壊が問題とならないことが明白な材料については機械試験による確認に代えて寸法や材質により確認することができる。</p>	-	冒頭宣言
<p>イ 容器等が、その使用される圧力、温度、水質、放射線、荷重その他の使用条件に対して適切な機械的強度及び化学的組成（使用中の応力その他の使用条件に対する適切な耐食性を含む。）を有すること。</p>		○	資料10-3にて評価を実施
<p>ロ 使用済燃料等を閉じ込めるための容器（以下この項において「密封容器」という。）に使用する材料にあっては、当該密封容器が使用される圧力、温度、放射線、荷重その他の使用条件に対して適切な破壊じん性を有することを機械試験その他の評価方法により確認したものであること。</p>		-	密封容器に対する要求
<p>ハ 管及び支持構造物に使用する材料にあっては、当該管及び支持構造物の最低使用温度に対して適切な破壊じん性を有することを機械試験その他の評価方法により確認したものであること。</p>		○	貯蔵架台には以下の理由から破壊じん性に係る試験は不要である。 ○発熱量を有する乾式キャスクを支持することから、破壊じん性が問題となるような低温とはならない。 ○貯蔵中は静置されており、熱応力等による二次応力等や衝撃荷重が発生しない。
<p>ニ 有害な欠陥がないことを非破壊試験により確認したものであること。</p>		○	弊社の支持構造物は板材、鍛造品及びボルトで構成されるが、設計建設規格のクラス1支持構造物においても、板材や鍛造品には、非破壊試験要求は無く、非破壊試験要求のあるボルトについては、弊社の調達において、非破壊試験を要求する。
<p>二 容器等の構造及び強度は、次に掲げるところによるものであること。</p>		-	冒頭宣言
<p>イ 取扱い時及び貯蔵時において、全体的な変形を弾性域に抑えること。</p>	<p>2 第1項第2号イに規定する「全体的な変形を弾性域に抑えること」とは、構造上の全体的な変形を弾性域に抑えることに加え、材料の引張り強さに対しても十分な構造強度を有することをいう。 3 第1項第2号イ及びロの適用に当たっては、解析により以下を確認すること。 (1) イの「全体的な変形を弾性域に抑えること」とは、一般部に加え、構造不連続部にあっても塑性変形を許容しないこと。</p>	○	資料10-3にて評価を実施
<p>ロ 密封容器にあっては、破断延性限界に十分な余裕を有し、金属キャスクに要求される機能に影響を及ぼさないこと。また、閉じ込め機能（事業許可基準規則第2条第2項第3号ハに規定する閉じ込め機能をいう。）を担保する部位（ハにおいて「密封シール部」という。）については、変形を弾性域に抑えること。</p>	<p>(2) ロの「破断延性限界に十分な余裕を有し」とは、箇所限定なしに塑性変形が生ずることを許容するが、構造体の著しい機能喪失に至るような塑性変形は許容しないこと。</p>	-	密封容器に対する要求
<p>ハ 密封容器にあっては、試験状態において、全体的な塑性変形が生じないこと。また、密封シール部については、変形を弾性域に抑えること。</p>		-	密封容器に対する要求
<p>ニ 密封容器及び支持構造物にあっては、取扱い時及び貯蔵時において、疲労破壊が生じないこと。</p>		○	貯蔵中は静置され、取扱は保守的に想定しても10回であり、かついずれの状態でも小さな負荷荷重（12MP程度（貯蔵架台脚部））であることから、疲労破壊は生じない。 なお、設計建設規格のクラス1支持構造物において、疲労評価要求はない。
<p>ホ 取扱い時及び貯蔵時において、座屈が生じないこと。</p>		○	資料10-3の評価結果から座屈が生じないことを確認 (資料10-3-3-9：貯蔵架台脚部の圧縮応力12MPa<許容圧縮応力(座屈しない応力)134MPa)
<p>三 密封容器の主要な耐圧部の溶接部（溶接金属部及び熱影響部をいう。以下この号において同じ。）は、次に掲げるところによるものであること。</p>	<p>4 第1項第3号に規定する「主要な耐圧部の溶接部」とは、次の各号に掲げる容器又は管の溶接部をいう。 (1) 使用済燃料貯蔵設備本体、廃棄施設、放射線管理施設若しくは使用済燃料貯蔵設備の附属施設に属する容器又はこれらの施設に属する外径61mm（最高使用圧力が98kPa未満の管にあっては、100mm）を超える管であって、その内包する放射性物質の濃度が37mBq/cm³（その内包する放射性物質が液体中にある場合は、37kBq/cm³）以上のもの (2) 使用済燃料貯蔵設備本体、廃棄施設、放射線管理施設若しくは使用済燃料貯蔵設備の附属施設に属する容器又はこれらの施設に属する外径150mm以上の管であって、その内包する放射性物質の濃度が37mBq/cm³（その内包する放射性物質が液体中にある場合は、37kBq/cm³）未満のものうち、次に定める圧力以上の圧力を加えられる部分（以下「耐圧部分」という。）について溶接をするもの イ 水用の容器又は管であって、最高使用温度が100℃未満のものについては、最高使用圧力1,960kPa ロ イに掲げる容器以外の容器については、最高使用圧力98kPa以上ハ イに掲げる管以外の管については、最高使用圧力980kPa（長手継手の部分にあっては、490kPa）</p>	-	密封容器に対する要求
<p>イ 不連続で特異な形状でないものであること。</p>	<p>5 第1項第3号イに規定する「不連続で特異な形状でないもの」とは、溶接部の設計において、溶接部の開先等の形状に配慮し、鋭い切欠き等の不連続で特異な形状でないものをいう。</p>	-	密封容器に対する要求
<p>ロ 溶接による割れが生ずるおそれなく、かつ、健全な溶接部の確保に有害な溶込み不良その他の欠陥がないことを、非破壊試験により確認したものであること。</p>	<p>6 第1項第3号ロに規定する「溶接による割れが生ずるおそれなく」とは、溶接後の非破壊試験において割れがないことに加え、溶接時の有害な欠陥により割れが生ずるおそれがないことをいう。 7 第1項第3号ロに規定する「非破壊試験」とは、放射線透過試験、超音波探傷試験、磁粉探傷試験、浸透探傷試験、目視試験等をいう。</p>	-	密封容器に対する要求
<p>ハ 適切な強度を有するものであること。</p>	<p>8 第1項第3号ハに規定する「適切な強度を有する」とは、母材と同等以上の機械的強度を有するものであることをいう。</p>	-	密封容器に対する要求
<p>ニ 機械試験その他の評価方法により適切な溶接施工法及び溶接設備並びに適切な技能を有する溶接士であることをあらかじめ確認したもにより溶接したものであること。</p>		-	密封容器に対する要求
<p>2 使用済燃料貯蔵施設に属する容器及び管のうち、使用済燃料貯蔵施設の基本的安全機能を確保する上で重要なものは、適切な耐圧試験又は漏えい試験を行ったとき、これに耐え、かつ、著しい漏えいがないように設置されたものでなければならない。</p>	<p>9 第1項第1号から第3号までの規定に適合する材料及び構造並びに第2項の規定に適合する耐圧試験及び漏えい試験は、次に掲げる規定のいずれかに適合したものをいう。 (1) 日本機械学会「発電用原子力設備規格 設計・建設規格（2012年版）（JSME S NC1-2012）（以下「設計・建設規格」という。）」、日本機械学会「発電用原子力設備規格 材料規格（2012年版）（JSME S NJ1-2012）」（以下「材料規格」という。）」、日本機械学会「発電用原子力設備規格溶接規格（2012年版（2013年版を含む。））（JSME S NB1-2012/2013）（以下「溶接規格」という。）」及び日本機械学会「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）」（以下「金属キャスク構造規格」という。）の規定に、「金属キャスクの材料及び構造について（別記）」の要件を付したものの (2) 金属キャスク構造規格の規定に、「金属キャスクの材料及び構造について（別記）」の要件を付したものの</p>	-	密封容器及び管に対する要求