

リサイクル燃料備蓄センター設工認
設 2-補-014 改 1
2021 年 12 月 20 日

リサイクル燃料備蓄センター
設計及び工事の計画の変更認可申請書
(補足説明資料)

津波による損傷の防止について

令和 3 年 1 2 月

リサイクル燃料貯蔵株式会社

目次

1. 津波による損傷の防止についての補足説明	1
1. 1 金属キャスクの閉じ込め機能評価の設計条件及び計算条件 に関する補足説明（設2-補-014-01）	1
1. 2 津波漂流物評価対象の選定 に関する補足説明（設2-補-014-02）	1
1. 3 仮想的大規模津波に対する使用済燃料貯蔵建屋の影響評価 に関する補足説明（設2-補-014-03）	2
1. 4 仮想的大規模津波に対する受入設備の影響評価 に関する補足説明（設2-補-014-04）	2

参考資料

参考 第10条 津波による損傷の防止

※変更箇所を赤字で示す。

1. 津波による損傷の防止についての補足説明

本資料は、設工認申請書添付 6-1「津波への配慮に関する説明書」のうち設工認申請書添付 6-1-4「仮想的大規模津波の影響を考慮する施設の評価方針」、設工認申請書添付 6-1-5-2「仮想的大規模津波に対する使用済燃料貯蔵建屋の影響評価」及び設工認申請書添付 6-1-7「仮想的大規模津波に対する受入設備の影響評価」について補足説明するものである。

なお、金属キャスクの閉じ込め評価や貯蔵建屋の耐性評価で考慮すべき落下物や津波漂流物の設定、衝突想定条件の設定等の検討プロセスは参考資料に示すとおりであり、これまでの審査における説明から変更はない。

落下物の設定については、建屋構造材と重量物の質量・剛性等の属性を考慮し、閉じ込め機能への影響の厳しさの観点から代表性のある衝突想定条件を設定している。またこの設定では、一定の保守性を考慮しつつ、過度に保守的なものとならないよう受入れ区域の損傷形態や落下物の落下形態に基づいて予想される挙動も考慮した設定となっている。

なお、許容応力を超えた領域での貯蔵建屋の挙動は定量的に評価する上での不確かさが大きく、不確かさを踏まえた上限をとると相当に極端な仮定（複数の落下物が金属キャスクに同時に衝突する等）となることが考えられるため、工学的判断を踏まえた設定とした。

(参考「第 10 条 津波による損傷の防止」/10 条-37~44 参照)

1. 1 金属キャスクの閉じ込め機能評価の設計条件及び計算条件に関する補足説明（設 2-補-014-01）

本資料は、設工認申請書添付 6-1-4「仮想的大規模津波の影響を考慮する施設の評価方針」における金属キャスクの閉じ込め機能評価の設計条件及び計算条件について説明するものである。

主に、金属キャスクの強度解析に用いる解析温度と衝突荷重について説明する。

1. 2 津波漂流物評価対象の選定に関する補足説明（設 2-補-014-02）

本資料は、設工認申請書添付 6-1-4「仮想的大規模津波の影響を考慮する施設の評価方針」における津波漂流物評価対象の選定について説明するものである。

主に、津波漂流物評価対象の選定における浮力評価について説明する。

1. 3 仮想的大規模津波に対する使用済燃料貯蔵建屋の影響評価に関する
補足説明（設2-補-014-03）

本資料は、設工認申請書添付 6-1-5-2「仮想的大規模津波に対する使用済燃料貯蔵建屋の影響評価」における評価の考え方について説明するものである。

主に、評価方法と許容限界の考え方について説明する。

1. 4 仮想的大規模津波に対する受入設備の影響評価に関する補足説明
（設2-補-014-04）

本資料は、設工認申請書添付 6-1-6「仮想的大規模津波に対する受入設備の影響評価」における計算方法について説明するものである。

主に、計算条件及び波力の算出について説明する。

以 上

第 10 条 津波による損傷の防止

<目 次>

1. 設計方針
2. 施設の特性に応じた津波防護の基本方針
3. 貯蔵建屋の耐性評価
4. 金属キャスクの閉じ込め評価
5. 使用済燃料貯蔵施設の遮蔽評価
6. 衝撃を受けた金属キャスクの対策
7. 敷地内の浸水を想定した対策

(別 添)

- 別添 1 仮想的大規模津波による浸水状況の補足説明
- 別添 2 津波漂流物について
- 別添 3 有限要素法解析における境界条件の検討
- 別添 4 面外せん断力に対する許容値の算出方法
- 別添 5 動的解析について
- 別添 6 金属キャスクからの漏えい率について
- 別添 7 遮蔽機能復旧期間の想定について
- 別添 8 津波による波圧と地震荷重の組合せについて

1. 設計方針

使用済燃料貯蔵施設は、その供用中に当該使用済燃料貯蔵施設に大きな影響を及ぼすおそれがある津波として、基準津波に相当する仮想的な大規模津波を想定し、これに対して、使用済燃料貯蔵建屋（以下「貯蔵建屋」という。）の受入れ区域の損傷を仮定しても、基本的な安全機能が損なわれるおそれがない設計とする。

既往の知見を大きく上回る仮想的な大規模津波を想定し、これを基準津波に相当する津波として、津波防護施設及び浸水防止設備の設置による遡上波の到達や流入の防止は行わず遡上波が使用済燃料貯蔵施設に到達する前提とする。

貯蔵建屋の貯蔵区域（以下「貯蔵区域」という。）は波力に耐えるよう設計するとともに、貯蔵されている金属キャスク及び貯蔵架台（金属キャスクの支持構造物）の基本的な安全機能が貯蔵区域の浸水により損なわれないよう設計する。

貯蔵建屋の受入れ区域（以下「受入れ区域」という。）については、損傷を仮定しても、落下物や津波漂流物の衝突により仮置きされている金属キャスクの閉じ込め機能が損なわれず、また適切な復旧手段及び復旧期間において金属キャスク損傷部及び貯蔵区域に通じる遮蔽扉部分の遮蔽機能を回復することにより、事業所周辺の公衆に放射線障害を及ぼさないよう設計する。

受入れ区域の損傷により衝撃を受けた金属キャスクの基本的な安全機能を確認するための検査及び試験並びに同機能を維持するために必要な保守及び修理を行い、金属キャスクを使用済燃料貯蔵施設外へ搬出するために必要な確認を行う手段を講ずる。なお、搬出までの間は金属キャスクを適切に保管する。また、津波襲来後の敷地内の浸水により通常の監視機能が喪失するため、必要な体制を整備するとともに、貯蔵区域に貯蔵している金属キャスクの遮蔽機能、閉じ込め機能及び除熱機能の確認を行う代替計測や放射線管理、津波襲来後の活動等に必要な手段を講ずる。

(1) 「使用済燃料貯蔵施設の位置，構造及び設備の基準に関する規則」及び同解釈の適用方針

「使用済燃料貯蔵施設の位置，構造及び設備の基準に関する規則」（以下「事業許可基準規則」という。）第 10 条（津波による損傷の防止）では「使用済燃料貯蔵施設は，その供用中に当該使用済燃料貯蔵施設に大きな影響を及ぼすおそれがある津波に対して基本的安全機能が損なわれるおそれがないものでなければならない。」としている。

以下に，設計方針を踏まえた事業許可基準規則解釈の適用方針を示す。

a. 事業許可基準規則解釈第 10 条 1 について

事業許可基準規則解釈第 10 条 1 は基準津波の策定における要求を規定している。

リサイクル燃料備蓄センターでは既往の知見を大きく上回る仮想的大規模津波を想定し，これを基準津波に相当する津波として使用済燃料貯蔵施設の基本的安全機能が損なわれないよう設計する方針としており，耐津波設計としての津波防護施設，浸水防止設備等を設置せず，これらの設計の入力とする基準津波を策定しないことから適用しない。

b. 事業許可基準規則解釈第 10 条 2 及び 3 について

事業許可基準規則解釈第 10 条 2 は，基本的安全機能を確保する上で必要な施設は，基準津波による遡上波が到達しない十分高い場所に設置する（第一項）か，津波防護施設等の設置による遡上波の到達防止を含めて遡上波による基本的安全機能を損なうおそれがないこと（第二項）を要求しており，遡上波の到達防止を行う場合の検討につき事業許可基準規則解釈第 10 条 3 にて要求している。

リサイクル燃料備蓄センターでは仮想的大規模津波による遡上波の使用済燃料貯蔵施設への到達を前提とすることから，事業許可基準規則解釈第 10 条 2 の第二項に基づき，遡上波によって基本的安全機能が損なわれないよう設計する方針とする。

なお，遡上波によって基本的安全機能が損なわれないことを確認するための具体的な方針については「2. 施設の特성에応じた津波防護の基本方針」にて述べる。

また、津波防護施設等の設置による遡上波の到達防止を行わないことから、事業許可基準規則解釈第10条3は適用しない。

c. 事業許可基準規則解釈第10条4について

事業許可基準規則解釈第10条4は、津波防護施設、浸水防止設備及び津波監視設備を設置する場合の要求を規定している。

リサイクル燃料備蓄センターでは仮想的な大規模津波による遡上波の使用済燃料貯蔵施設への到達を前提としており、津波防護施設、浸水防止設備及び津波監視設備を設置しないことから適用しない。

第1-1表に、事業許可基準規則及び同解釈の適用方針を示す。

第 1-1 表 事業許可基準規則及び同解釈の適用方針

事業許可基準規則及び同解釈	適用方針
<p>(津波による損傷の防止)</p> <p>第十条 使用済燃料貯蔵施設は、その供用中に当該使用済燃料貯蔵施設に大きな影響を及ぼすおそれがある津波に対して基本的安全機能が損なわれるおそれがないものでなければならない。</p>	<p>・使用済燃料貯蔵施設は、その供用中に当該使用済燃料貯蔵施設に大きな影響を及ぼすおそれがある津波として、基準津波に相当する仮想的な大規模津波を想定し、これに対して、使用済燃料貯蔵建屋の受入れ区域の損傷を仮定しても、基本的安全機能が損なわれるおそれがない設計とし、以下の適用方針（第 2-1 表含む）に基づき適用する。</p>
<p>事業許可基準規則解釈第 10 条（津波による損傷の防止）</p> <p>1 第 10 条に規定する「大きな影響を及ぼすおそれがある津波」（以下「基準津波」という。）は、実用炉設置許可基準解釈第 5 条 1 及び 2 を準用して策定すること。</p>	<p>・既往の知見を大きく上回る仮想的な大規模津波を想定し、これを基準津波に相当する津波として使用済燃料貯蔵施設の基本的安全機能が損なわれないよう設計する方針としており、耐津波設計としての津波防護施設、浸水防止設備及び津波監視設備を設置せず、これらの設計の入力とする基準津波を策定しないことから適用しない。</p>
<p>2 第 10 条の「基本的安全機能が損なわれるおそれがないものでなければならない」を満たすために、基準津波に対する使用済燃料貯蔵施設の設計に当たっては、以下の方針によること。</p> <p>一 基本的安全機能を確保する上で必要な施設（津波防護施設、浸水防止設備及び津波監視設備を除く。）は、基準津波による遡上波が到達しない十分高い場所に設置すること。</p> <p>二 基準津波による遡上波が到達する高さにある場合には、遡上波によって基本的安全機能を損なうおそれがないこと。なお、「基本的安全機能を損なうおそれがないこと」には、防潮堤等の津波防護施設及び浸水防止設備を設置して、遡上波の到達又は流入を防止することを含む。</p>	<p>・仮想的な大規模津波による遡上波の使用済燃料貯蔵施設への到達を前提とすることから、第二項に基づき、遡上波によって基本的安全機能が損なわれないよう設計する方針とする。</p>
<p>3 上記 2 の遡上波の到達防止に当たっては、実用炉設置許可基準解釈第 5 条 3 の一の②を準用すること。</p>	<p>・遡上波の到達防止を前提としないことから、適用しない。</p>
<p>4 上記 2 の二の津波防護施設、浸水防止設備及び津波監視設備を設置する場合には、実用炉設置許可基準解釈第 5 条 3 の二及び五から七までの方針を準用すること。</p> <p>【実用炉設置許可基準規則解釈第 5 条 3】</p> <p>二 取水・放水施設及び地下部等において、漏水する可能性を考慮の上、漏水による浸水範囲を限定して、重要な安全機能への影響を防止すること。そのため、以下の方針によること。（以下略）</p> <p>五 津波防護施設及び浸水防止設備については、入力津波（中略）に対して津波防護機能及び浸水防止機能が保持できること。また、津波監視設備については、入力津波に対して津波監視機能が保持できること。（以下略）</p> <p>六 地震による敷地の隆起・沈降、地震（本震及び余震）による影響、津波の繰り返しの襲来による影響及び津波による二次的な影響（洗掘、砂移動及び漂流物等）を考慮すること。</p> <p>七 津波防護施設及び浸水防止設備の設計並びに非常用海水冷却系の評価に当たっては、入力津波による水位変動に対して朔望平均潮位を考慮して安全側の評価を実施すること。なお、その他の要因による潮位変動についても適切に評価し考慮すること。また、地震により陸域の隆起又は沈降が想定される場合、想定される地震の震源モデルから算定される、敷地の地殻変動量を考慮して安全側の評価を実施すること。</p>	<p>・仮想的な大規模津波による遡上波の使用済燃料貯蔵施設への到達を前提としており、津波防護施設、浸水防止設備及び津波監視設備を設置しないことから適用しない。</p>

(2) 津波防護基本方針の対象とする施設

事業許可基準規則及び同解釈は、津波防護基本方針の対象施設を同解釈第10条2に示す基本的安全機能を確保する上で必要な施設(津波防護施設、浸水防止設備及び津波監視設備を除く)及び同解釈第10条4に示す耐津波設計である津波防護施設、浸水防止設備及び津波監視設備としている。

ここでは仮想的大規模津波に対して、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施設を網羅的に抽出した結果、使用済燃料貯蔵設備本体(金属キャスク及び貯蔵架台)、並びに貯蔵区域(貯蔵区域の遮蔽扉を除く。)を津波防護基本方針の対象とする。

a. 使用済燃料貯蔵設備本体(金属キャスク及び貯蔵架台)

基本的安全機能を有する施設であり、耐震設計にてSクラスが要求される施設であることから、津波防護基本方針の対象とする。

b. 貯蔵建屋

遮蔽機能及び除熱機能の一部を担う施設であり、耐震設計上は基準地震動による地震力に対して基本的安全機能が損なわれるおそれがないことを要求している。

事業許可基準規則解釈(第9条に係る別記2)では、基準地震動による貯蔵建屋の損傷を一定の条件*で許容しており、貯蔵建屋の受入れ区域は仮想的大規模津波による損傷を仮定することから、津波防護基本方針の対象としないが、貯蔵区域は遮蔽機能及び除熱機能の一部を担う施設であるため、津波防護基本方針の対象(貯蔵区域の遮蔽扉を除く。)とする。

また、当該条件の考え方を準用し、金属キャスクの基本的安全機能等に関する必要な確認を行うとともに、貯蔵区域の外壁、遮蔽扉の健全性に関し必要な確認を行うこと、受入れ区域の損傷に伴う落下物や津波漂流物に対して金属キャスクの閉じ込め機能が維持されること及び受入れ区域の損傷を仮定しても敷地境界外における公衆の実効線量が遮蔽機能の回復を考慮して年間1mSvを超えないことを確認する。なお、貯蔵区域の遮蔽扉は、原則として、金属キャスクを受入れ区域から貯蔵区域に移送する一連の作業をしている間のみ開放状態(1基当たり1日程度)で

あるが、それ以外の期間は閉鎖状態となる。

*)貯蔵建屋損傷時における確認事項

- a) 金属キャスクが有する基本的安全機能が損なわれるおそれがないこと
- b) 適切な復旧手段及び復旧期間において、損傷を受けた貯蔵建屋の遮蔽機能及び除熱機能が回復可能であること
- c) 上記の復旧期間において、事業所周辺の公衆に放射線障害を及ぼさないこと

c. 受入施設

使用済燃料の受入施設（機能喪失により金属キャスクが有する基本的安全機能を損なうおそれがないことが明らかであるものを除く）として、金属キャスクの落下を防止する受入れ区域天井クレーン（以下「天井クレーン」という。）及び転倒を防止する搬送台車に対し基準地震動による地震力に対して基本的安全機能が損なわれるおそれがないことを要求している。

天井クレーンについては、受入れ区域の損傷に伴う落下を想定して金属キャスクの閉じ込め機能が維持されることを確認するため、津波防護基本方針の対象としない。

また、搬送台車についても、津波により転倒防止に係る機能が喪失しないことから、津波防護基本方針の対象としない。

d. 津波防護施設、浸水防止設備及び津波監視設備

耐津波設計としてこれらの施設、設備を設置せず、津波防護基本方針の対象としない。

第1-2表に、津波防護基本方針の対象施設に関する適用方針を示す。

第 1-2 表 津波防護基本方針の対象施設に関する適用方針

基本的安全機能を確保する上で必要な施設 (事業許可基準規則解釈第 9 条 2)		基本的安全機能との関連	耐震クラス (事業許可基準規則解釈第 9 条 2)	適用項目 (事業許可基準規則解釈)
分類	リサイクル燃料備蓄センターの該当設備			
① 使用済燃料貯蔵設備本体 (金属キャスク等)	金属キャスク	基本的安全機能を担う施設	Sクラス	第 10 条 2
	貯蔵架台	貯蔵時等の金属キャスクの転倒防止		
—	貯蔵建屋	遮蔽機能及び除熱機能の一部を担う施設	Bクラス (Ss 機能維持)	第 10 条 2 ^{*1}
② 使用済燃料の受入施設 (その機能喪失により、金属キャスクが有する基本的安全機能を損なうおそれが明らかであるものを除く。)	天井クレーン	金属キャスクの落下等を防止	Bクラス (Ss 機能維持)	第 10 条 2 ^{*2}
	搬送台車	金属キャスクの転倒等を防止	Bクラス (Ss 機能維持)	第 10 条 2 ^{*3}
③ 津波防護施設及び浸水防止設備	(該当なし)	津波による影響の発生防止	Sクラス	第 10 条 4 ^{*4}
④ 津波監視設備	(該当なし)	津波の監視		

*1) 受入れ区域については、仮想的な大規模津波による貯蔵建屋の損傷を仮定し、金属キャスクの基本的安全機能が損なわれないこと等を確認する

また、貯蔵区域については、外壁及び遮蔽壁の健全性を確認する

*2) 受入れ区域の損傷に伴う落下を仮定するため対象外

*3) 津波により転倒防止に係る機能が喪失しないことから対象外

*4) 施設、設備を設置しないため対象外

(3) 敷地及び敷地周辺における地形，施設の配置等

a. 敷地及び敷地周辺の地形，標高，河川の存在

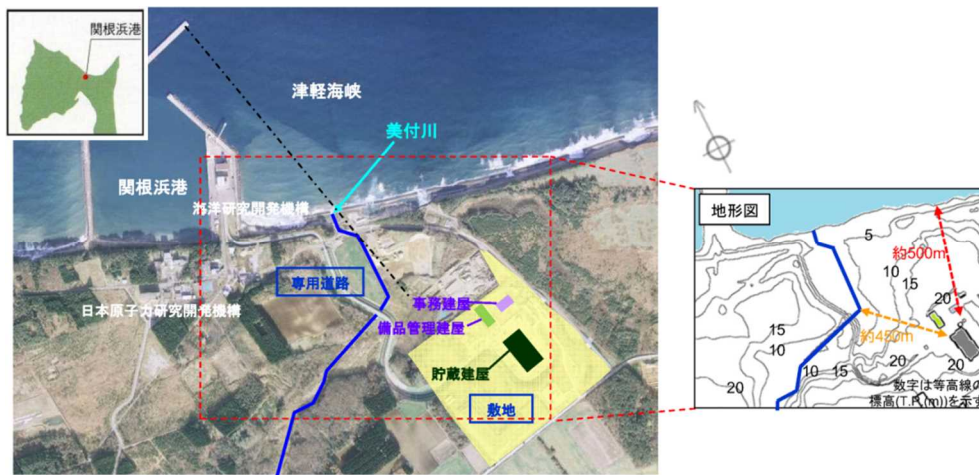
敷地及び敷地周辺の地形を第 1-3-1 図に示す。

使用済燃料貯蔵施設を設置する敷地は，下北半島の津軽海峡側のほぼ中央部に位置し，なだらかな台地からなっている。

敷地の形状はほぼ正方形であり，敷地全体の広さは約 26 万 m² である。貯蔵建屋，事務建屋等は，敷地内に造成した T. P. +16m の地盤面（貯蔵建屋設置盤）に設置されており，貯蔵建屋設置盤の東側，南側及び西側は T. P. +20m～+30m の台地に囲まれている。

施設は，海岸線から約 500m の離隔がある。

河川としては敷地西側に美付川があり，敷地北西側の低地(T. P. +4m 程度)を流れているが，流れる場所は貯蔵建屋に最も近い所で約 450m の距離がある。



第 1-3-1 図 敷地及び敷地周辺における地形，施設の配置等

b. 敷地における施設の位置，形状等

リサイクル燃料備蓄センターの全体配置は，第 1-3-2 図に示すとおりである。主要な施設として貯蔵建屋，事務建屋等があり，これらの施設は，敷地内に造成した T. P. +16m の地盤面（貯蔵建屋設置盤）に設置されている。

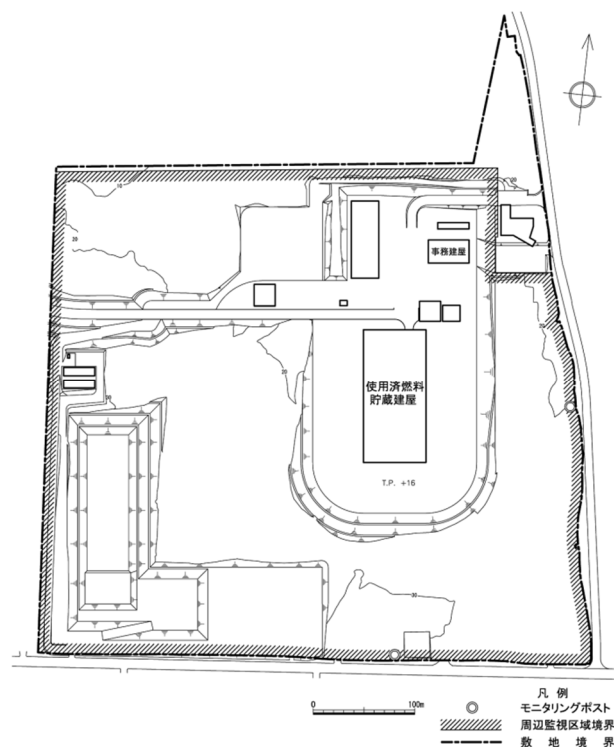
貯蔵建屋は敷地の中央から東寄りに位置する。地上 1 階で，平面が約

131m（南北方向）×約 62m（東西方向）、整地地盤からの高さが約 28m の鉄筋コンクリート造（一部鉄骨鉄筋コンクリート造及び鉄骨造）の建物である。貯蔵建屋は、貯蔵区域、受入れ区域及び付帯区域で構成し、貯蔵区域で金属キャスクを貯蔵し、受入れ区域で金属キャスクの搬出入、検査等を行う。

貯蔵区域及び受入れ区域は、金属キャスク表面に伝えられた使用済燃料集合体の崩壊熱を自然換気方式により適切に除去する設計とし、換気のための給気口及び排気口を設ける。

受入れ区域は、金属キャスクの搬出入作業のため、最大 8 基の金属キャスクを仮置きすることとし、仮置架台、たて起こし架台等を装備するとともに、上部には金属キャスクを取扱うための天井クレーンを装備する。

事務建屋は、貯蔵建屋の北側に位置する。



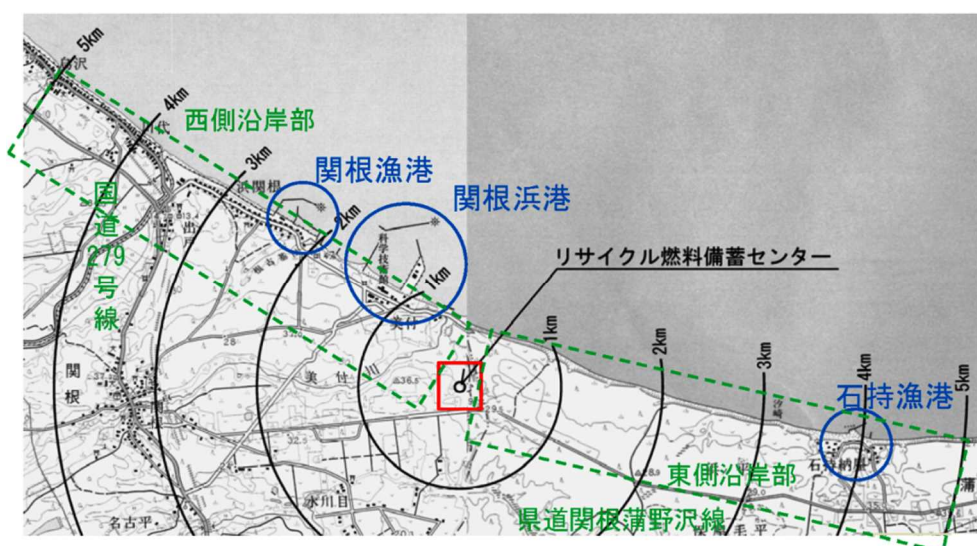
第 1-3-2 図 リサイクル燃料備蓄センター全体配置図

c. 敷地周辺の人工構造物の位置，形状等

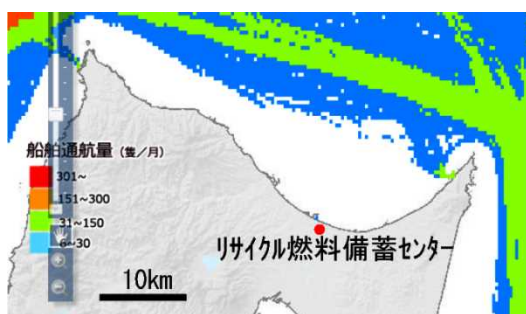
敷地周辺における主な施設の配置を第 1-3-3 図に示す。

港湾施設は，日本原子力研究開発機構所有の関根浜港が西側約 1km に，第 1 種漁港の関根漁港が西側約 2km に，同じく石持漁港が東側約 4km にそれぞれ立地する。これらの港に寄港しない大型船舶は，第 1-3-4 図に示すとおり敷地前面海域では沖合 10km 以遠を航行している。

陸上では関根浜港付近に，日本原子力研究開発機構青森研究開発センター及び海洋研究開発機構むつ研究所が立地する。敷地外の西側沿岸部には国道 279 号線や市道等の道路が走り，これらの道路沿いを中心に集落が存在する。敷地外の東側沿岸部には，海岸から約 1km 離れた内陸側の標高 30m 程度の場所を走る県道関根蒲野沢線があり，石持漁港付近を除いて海岸付近に目立った人工物はみられない。



第 1-3-3 図 敷地周辺における主な施設の配置



第 1-3-4 図 船舶自動識別装置搭載船の通行量実績（2014 年 11 月）
（海上保安庁「海洋台帳」に追記）

(4) 仮想的大規模津波による浸水想定等

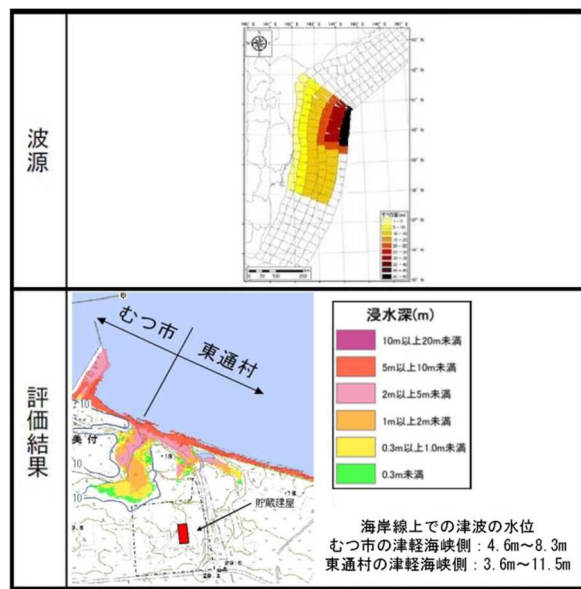
a. 仮想的大規模津波の概要

津波防護基本方針の策定に当たっては、既往の知見を大きく上回る仮想的な大規模津波を想定し、使用済燃料貯蔵施設の基本的安全機能が損なわれないよう設計する方針とする。

敷地周辺の津波に関する客観的な既往の知見としては、青森県による津波想定、文献調査、津波堆積物調査結果が挙げられ、青森県による津波想定は、文献調査結果及び津波堆積物調査結果から十分な保守性を有することが確認されている。

これにさらなる保守性を持たせた仮想的な大規模津波として、第 1-4-1 図に示す青森県による津波想定における敷地前面及び敷地周辺の最大津波高さである T.P.+11.5m の 2 倍とし、T.P.+23m とした。

なお、このときの浸水深は、貯蔵建屋の設置地盤高が T.P.+16m であることから、一様に 7m となる。



第 1-4-1 図 青森県による津波想定

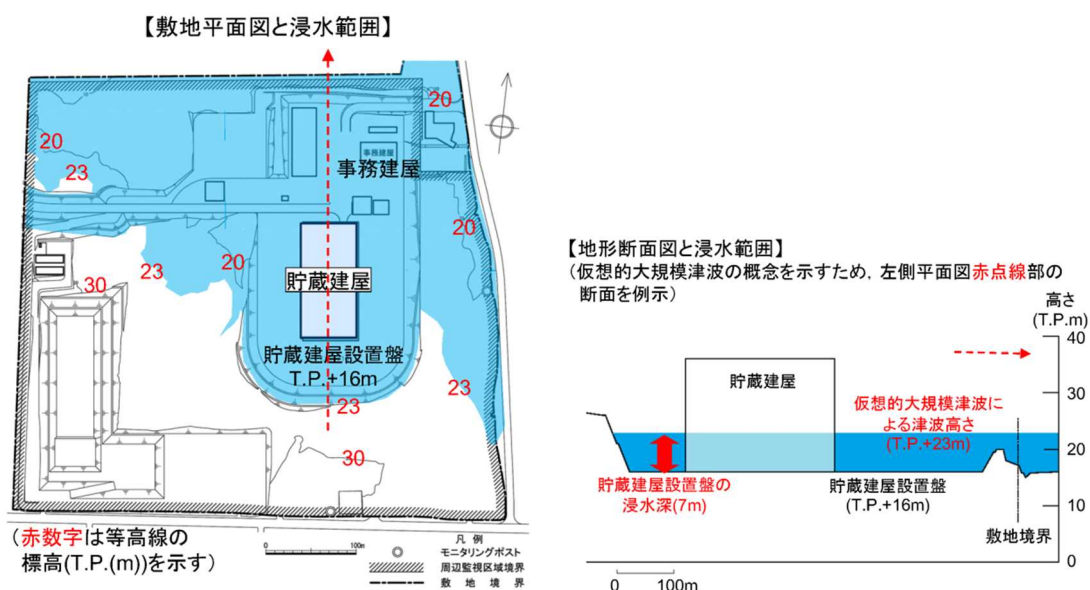
(<http://www.pref.aomori.lg.jp/kotsu/build/tunami-yosoku.html> に一部加筆)

b. 浸水範囲の考え方

仮想的な大規模津波の設定の考え方に基づき、以下のように具体的な浸水範囲を設定する。

第1-4-2図に仮想的な大規模津波による浸水範囲の概念を示す。

敷地内の浸水範囲は、T.P.+23mの等高線を境界としてT.P.+23m以下の区域が一律に浸水し、貯蔵建屋のT.P.+23m以下に位置する開口部及び遮蔽扉の隙間部から貯蔵建屋内への流入が発生するものとする。



第1-4-2図 仮想的な大規模津波による浸水範囲の概念図

仮想的な大規模津波は一定の津波高さの形で仮想的に設定した津波であり、通常の津波評価が地形、構築物や潮位の条件を反映したモデルに基づき遡上・浸水域の定量的な評価を実施して局所的・経時的な遡上の有無、浸水深、流速等のパラメータを算出するのと異なり、局所的・経時的なパラメータが直接的に導出されない。

c. 入力津波について

実際の津波は動的な現象であり、局所的な浸水深及び浸水の有無については、地形や構築物等の影響による遡上及び駆け上がりの挙動による影響並びに地震による敷地の隆起・沈降等による影響に伴う変動が生じうるが、仮想的な大規模津波が遡上波の到達を前提とするため津波高さ自

体に大きな保守性を持たせ仮想的に設定した津波であることを踏まえると、局所的な浸水深の差異については、設定における保守性に包含されることが考えられる。

したがって、更なる安全性向上の観点から、基準津波に相当する津波として、既往知見を大きく上回る仮想的な大規模津波（津波高さ T.P. +23 m、貯蔵建屋の設置位置で一様に 7 m の浸水深）を想定するが、津波防護施設、浸水防止設備及び津波監視設備を設置しないことから、個別の入力津波は設定しない。

なお、波源域を三陸沖北部～根室沖とした波源モデルを設定し、仮想的な大規模津波と同等の浸水深となるすべり量について検証したところ、すべり量は 2.4 倍程度であり、既往の知見に比べ十分に保守的な値となる。

上記の仮想的な大規模津波と等価なモデルにおける貯蔵建屋周りの水位及び流速の分布を別添 1 に示す。

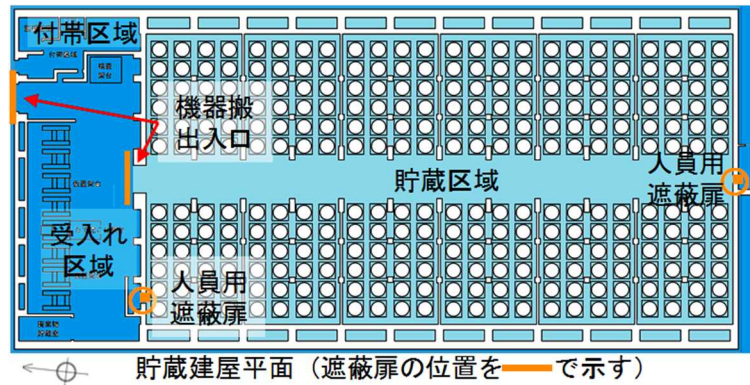
d. 貯蔵建屋内の浸水状態について

一方、貯蔵建屋内についても、金属キャスクの基本的な安全機能への影響を考察するため、貯蔵建屋の構造を踏まえて浸水状態を設定する。

受入れ区域については、津波波力による受入れ区域の損傷を仮定するため、貯蔵建屋外と同様に、津波高さ T.P. +23m（地上高さ 7m）までの範囲の浸水を考慮する。

貯蔵建屋の機器搬出入口及び人員用遮蔽扉の位置を第 1-4-3 図に示す。貯蔵区域の主な開口部として、受入れ区域との間に機器搬出入口及び人員用遮蔽扉が、貯蔵建屋外との間に給気口、排気口及び人員用遮蔽扉が存在する。人員用遮蔽扉は通常閉であり、また 2 箇所（貯蔵区域と受入れ区域の間及び受入れ区域と貯蔵建屋外の間）は同時に開放しないため、貯蔵建屋が健全であれば機器搬出入口から貯蔵区域への大規模な浸水は考えられないが、津波波力による受入れ区域の損傷を仮定することから、期間は限定されるが機器搬出入口（貯蔵区域と受入れ区域の間）が開放されている場合を考慮し、貯蔵区域内の浸水を考慮する。

なお、貯蔵区域の給気口は開口部下端の地上高さが約 7.7m であり津波による浸水深(7m)を上回るため給気口からの大規模な浸水は考え難く、さらに貯蔵区域の排気口の位置は地上高さが約 23m であるため、排気口からの浸水が発生することは考えられない。また、これらの高さ関係から津波により給排気口が閉塞することはない。



第 1-4-3 図 貯蔵建屋の機器搬出入口及び人員用遮蔽扉の位置

2. 施設の特性に応じた津波防護の基本方針

使用済燃料貯蔵施設の安全確保の仕組みは発電炉と比較して、基本的安全機能がほぼ金属キャスクに集約された極めてシンプルな構成であること、基本的安全機能は動力源や電気信号を要しない静的なメカニズムにより確保可能であること、基本的安全機能を確保する上で人による判断や操作をほとんど必要としないこと、使用済燃料の崩壊熱が発電炉と比べ格段に小さく、大気を最終的な逃がし場とすること等の特徴を有している。

金属キャスクは輸送容器として想定される事故条件に対しても密封性能や遮蔽性能を失わないよう設計されており、貯蔵時の津波による外力に対しても相当の裕度を期待でき、かつ浸水の影響も極めて限定的と考えられることを踏まえて津波防護の基本方針を設定する。

津波防護の基本方針については、事業許可基準規則及び同解釈に加え「リサイクル燃料貯蔵株式会社リサイクル燃料備蓄センターの使用済燃料貯蔵事業変更許可申請に係る審査の状況について」（原子力規制庁、平成31年2月6日）及び「リサイクル燃料貯蔵株式会社リサイクル燃料備蓄センターの使用済燃料貯蔵事業変更許可申請に係る新規制基準適合性審査について」（原子力規制庁、令和元年8月21日）に具体的な審査方針が示されていることから、当該方針に示される審査方針を踏まえたものとする。

(1) 原子力規制庁による審査方針の反映

上記文書で示されている審査方針にて、津波により貯蔵建屋が損傷した場合に満たすべき事項として①金属キャスクが有する基本的安全機能が損なわれるおそれがないこと、②適切な復旧手段及び復旧期間において損傷を受けた貯蔵建屋の遮蔽機能及び除熱機能が回復可能であること及び③上記の復旧期間において事業所周辺の公衆に放射線障害を及ぼさないことが示されていることを踏まえ、具体的な適用項目に対して以下のように反映する。

a. 金属キャスクの基本的安全機能について

上記①については、貯蔵建屋の上部構造物の落下による衝撃荷重に対して基本的安全機能が維持されることの確認を行う。

受入れ区域の損傷に伴う落下物や津波漂流物に対して、金属キャスク

への衝撃の緩和・回避措置を設計としては実施しないことから、衝突を想定して金属キャスクの閉じ込め機能が維持されることを確認する。なお、自主的な取組みとして、より一層の安全性向上に向け受入れ区域屋根の架構鉄骨に対し影響緩和措置を実施する。

受入れ区域の損傷に伴う落下物として、金属キャスクの運用状態と考えられる落下物（建屋構造材及び天井クレーン）の組合せから、金属キャスクの密封境界部への衝突荷重が大きい事象である天井クレーンの水平姿勢キャスクへの落下及び天井スラブの縦姿勢キャスクへの落下の2つを衝突想定条件として設定する。

設定した衝突想定条件における衝突時の挙動に基づき、保守的に設定した衝突荷重に対する金属キャスクの構造評価を実施し、密封境界部がおおむね弾性範囲内にとどまることを確認する。

b. 使用済燃料貯蔵施設の遮蔽について

上記②及び③については、受入れ区域には金属キャスクを貯蔵しないが、搬入・搬出時に津波の襲来を受けた場合を仮定し、受入れ区域の外壁及び天井の喪失並びに落下物や津波漂流物の衝突に伴う金属キャスクの中性子遮蔽材の一部損傷とともに、貯蔵区域の遮蔽扉が閉鎖できない状態を仮定して敷地境界外における直接線及びスカイシャイン線による線量を評価し、実効線量が年間 1mSv を超えないことを確認する。

受入れ区域の遮蔽機能を回復するため、受入れ区域及び仮置中の金属キャスクの損傷状況に応じて、受入れ区域の周囲や金属キャスクの損傷部への仮設遮蔽の設置等の応急復旧を実施する。

なお、受入れ区域の除熱機能については、金属キャスクが落下物や津波漂流物に埋没して自然対流が阻害される可能性は小さいが、金属キャスクの除熱を回復するため落下物の撤去等を行う。

上記審査方針における適用項目の反映状況を第 2-1 表に示す。

第 2-1 表 原子力規制庁による審査方針における適用項目の反映状況 (1/3)

「審査の状況について」*1に おける適用項目	「新規制基準適合性審査について」*2に おける適用項目	適用項目の反映状況 (【】は説明箇所を示す)
<p>事業許可基準規則の解釈(第9条に係る別記2)において、基準地震動によって貯蔵建屋が損傷した場合に基本的安全機能が損なわれるおそれがないこととして、次の事項を満たすことを示しているので、津波によって貯蔵建屋が損傷した場合も同事項を満たすことを確認する。</p> <p>a) 金属キャスクが有する基本的安全機能が損なわれるおそれがないこと</p> <p>b) 適切な復旧手段及び復旧期間において、損傷を受けた貯蔵建屋の遮蔽機能及び除熱機能が回復可能であること</p> <p>c) 上記の復旧期間において、事業所周辺の公衆に放射線障害を及ぼさないこと</p>	<p>—</p>	<p>a) について「新規制基準適合性審査について」*2に基づき、貯蔵建屋損傷に伴う落下物や津波漂流物に対して金属キャスクの閉じ込め機能が維持されることを確認する。</p> <p>b) 及び c) について「新規制基準適合性審査について」*2に基づき受入れ区域の外壁及び天井の遮蔽機能の喪失を仮定し、金属キャスク損傷部の遮蔽性能回復等を考慮して線量を評価し、敷地境界外における公衆の実効線量が年間 1mSv を超えないことを確認する。 (次項以降で具体的内容を記載)</p>
<p>貯蔵建屋の損傷の有無は、仮想的大規模津波に対して水深係数 3 を用いた波圧によって評価する</p>	<p>—</p>	<p>貯蔵区域については水深係数 3 を用いて外壁及び遮蔽扉の評価を実施し健全性を確認するとともに、津波による波圧(荷重)が保有水平耐力を下回ることを確認する。 また、受入れ区域については水深係数 3 を用いた波圧による外壁の応力が許容応力を超えることから損傷を想定する。 【3. 貯蔵建屋の耐性評価】</p>

*1) 「リサイクル燃料貯蔵株式会社リサイクル燃料備蓄センターの使用済燃料貯蔵事業変更許可申請に係る審査の状況について」(原子力規制庁, 平成 31 年 2 月 6 日)

*2) 「リサイクル燃料貯蔵株式会社リサイクル燃料備蓄センターの使用済燃料貯蔵事業変更許可申請に係る新規制基準適合性審査について」(原子力規制庁, 令和元年 8 月 21 日)

第 2-1 表 原子力規制庁による審査方針における適用項目の反映状況 (2/3)

「審査の状況について」*1に おける適用項目	「新規制基準適合性審査について」*2に おける適用項目	適用項目の反映状況 (【】は説明箇所を示す)
<p>貯蔵建屋の上部構造物の落下（受入れ区域では天井クレーンの落下等）による衝撃荷重に対して基本的安全機能が維持されること（閉じ込め機能ではバウンダリの維持等）</p>	<p>建屋受入れ区域の損傷に伴い生じうる架構鉄骨の落下において、金属キャスクへの衝撃を緩和する又は回避する措置を検討し、多重の閉じ込め構造を有する金属キャスクの密封性能が確実に維持できること</p>	<p>受入れ区域の損傷に伴う落下物や津波漂流物に対して、金属キャスクへの衝撃の緩和・回避措置を設計としては実施しないことから、衝突を想定して金属キャスクの閉じ込め機能が維持されることを確認する（なお、自主的な取組みとして、より一層の安全性向上に向け架構鉄骨への影響緩和措置を実施する）。</p> <p>受入れ区域の損傷に伴う落下物として、金属キャスクの運用状態と考えられる落下物（建屋構造材及び天井クレーン）の組合せから、金属キャスクの密封境界部への衝突荷重が大きい事象である①天井クレーンの水平姿勢キャスクへの落下及び②天井スラブの縦姿勢キャスクへの落下を衝突想定条件として設定する。</p> <p>設定した衝突想定条件における衝突時の挙動に基づき、保守的に考慮した金属キャスクへの衝突荷重を入力として構造評価を実施し、衝突荷重に対し密封境界部がおおむね弾性範囲内にとどまることを確認する。</p> <p>【4. 金属キャスクの閉じ込め評価】</p>
	<p>（緩衝材等の措置無しの場合に適用）</p> <ul style="list-style-type: none"> ・評価方法の妥当性 	<p>金属キャスクの構造評価方法として、当初は動的解析を用いることとしていたが、工学式により設定した衝突荷重に基づき許認可実績のある解析コードを用いた静的解析を実施することとした。</p> <p>評価に当たり、金属キャスクへの衝突荷重は落下物（天井クレーン及び天井スラブ）の衝突挙動を踏まえて保守的に設定し、密封境界部に作用する荷重が大きくなるよう分布させるとともに、保守的な結果となるよう金属キャスクの拘束条件等を考慮する。</p> <p>【4. 金属キャスクの閉じ込め評価】</p>
	<ul style="list-style-type: none"> ・横ずれ量の判定基準の妥当性 	<p>落下物の蓋部への衝突による横ずれ量を、当初は動的解析結果に基づき設定していたが、解析に依存しない方法として金属キャスクの構造に基づく最大値を考慮し、実験的知見に基づき金属キャスクの一次蓋からの漏えい率を保守的に設定しブルームによる影響を評価することとした。</p> <p>【4. (5) 閉じ込め機能の低下による影響】</p>
	<ul style="list-style-type: none"> ・キャスク損傷に応じた線量評価 	<p>落下物（クレーンガード）が金属キャスクへの衝突により外筒を貫通して上部の中性子遮蔽材の一部を損傷させ、金属キャスクからの線量が増加する状況を仮定して使用済燃料貯蔵施設の遮蔽評価を実施する。</p> <p>【5. 使用済燃料貯蔵施設の遮蔽評価】</p>

*1)*2)の注釈は第 2-1 表 (1/3) 参照

第 2-1 表 原子力規制庁による審査方針における適用項目の反映状況 (3/3)

「審査の状況について」*1に おける適用項目	「新規制基準適合性審査について」*2に おける適用項目	適用項目の反映状況 (【】は説明箇所を示す)
復旧期間を含む 1 年間の公衆の実効線量が 1mSv を超えないこと	<p>基本的安全機能のうち遮蔽機能については、平常時における事業所周辺の線量が建屋と相まって実効線量で 50 μ Sv/年以下を達成できること</p> <p>ただし、仮想的大規模津波により建屋受入れ区域が損傷する場合は、応急復旧による遮蔽機能の回復を考慮して公衆の受ける実効線量が 1mSv/年を超えないこと</p>	<p>平常時における事業所周辺の線量については、「事業許可基準規則への適合性について (第四条 遮蔽等)」の「使用済燃料貯蔵建屋の遮蔽設計」を参照</p> <p>受入れ区域には金属キャスクを貯蔵しないが、搬入・搬出時に津波の襲来を受けた場合を仮定し、受入れ区域の外壁及び天井の喪失並びに落下物や津波漂流物の衝突に伴う金属キャスクの中性子遮蔽材の一部損傷を仮定して敷地境界外における直接線及びスカイシャイン線による線量を評価し、実効線量が年間 1mSv を超えないことを確認する。</p> <p>受入れ区域の遮蔽機能を回復するため、受入れ区域及び仮置中の金属キャスクの損傷状況に応じて、受入れ区域の周囲や金属キャスクの損傷部への仮設遮蔽の設置等の応急復旧を実施する。</p> <p>【 5. 使用済燃料貯蔵施設の遮蔽評価】</p>
事業許可基準規則第 13 条 (安全機能を有する施設) の解釈に基づき、衝撃を受けた金属キャスクの基本的安全機能を確認するための検査及び試験並びに同機能を維持するために必要な保守及び修理ができることとともに、金属キャスクを当該使用済燃料貯蔵施設外へ搬出するために必要な確認ができること	—	<p>遮蔽、閉じ込め (密封)、除熱及び臨界防止の各機能について初期確認、保守・修理及び搬出に必要な試験・検査の各項目につき必要な実施事項を定め、手段を講ずる。</p> <p>【 6. 衝撃を受けた金属キャスクの対策】</p>

*1)*2)の注釈は第 2-1 表 (1/3) 参照

「リサイクル燃料貯蔵株式会社リサイクル燃料備蓄センターの使用済燃料貯蔵事業変更許可申請に係る審査の状況について」(原子力規制庁,平成31年2月6日)(抜粋)

4. 今後の審査方針

(略) 金属キャスクが設置されている貯蔵建屋が仮想的大規模津波に対して損傷しないことではなく、使用済燃料貯蔵施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則(以下、「事業許可基準規則」という。)10条(津波による損傷の防止)の要求事項に立ち戻って、貯蔵建屋が損傷した場合においても基本的安全機能が損なわれるおそれがないことの説明を求めることとしたい。

具体的には、事業許可基準規則の解釈(第9条に係る別記2)において、基準地震動によって貯蔵建屋が損傷した場合に基本的安全機能が損なわれるおそれがないこととして、次の事項を満たすことを示しているので、津波によって貯蔵建屋が損傷した場合も同事項を満たすことを確認する。

- a) 金属キャスクが有する基本的安全機能が損なわれるおそれがないこと
- b) 適切な復旧手段及び復旧期間において、損傷を受けた貯蔵建屋の遮蔽機能及び除熱機能が回復可能であること
- c) 上記の復旧期間において、事業所周辺の公衆に放射線障害を及ぼさないこと

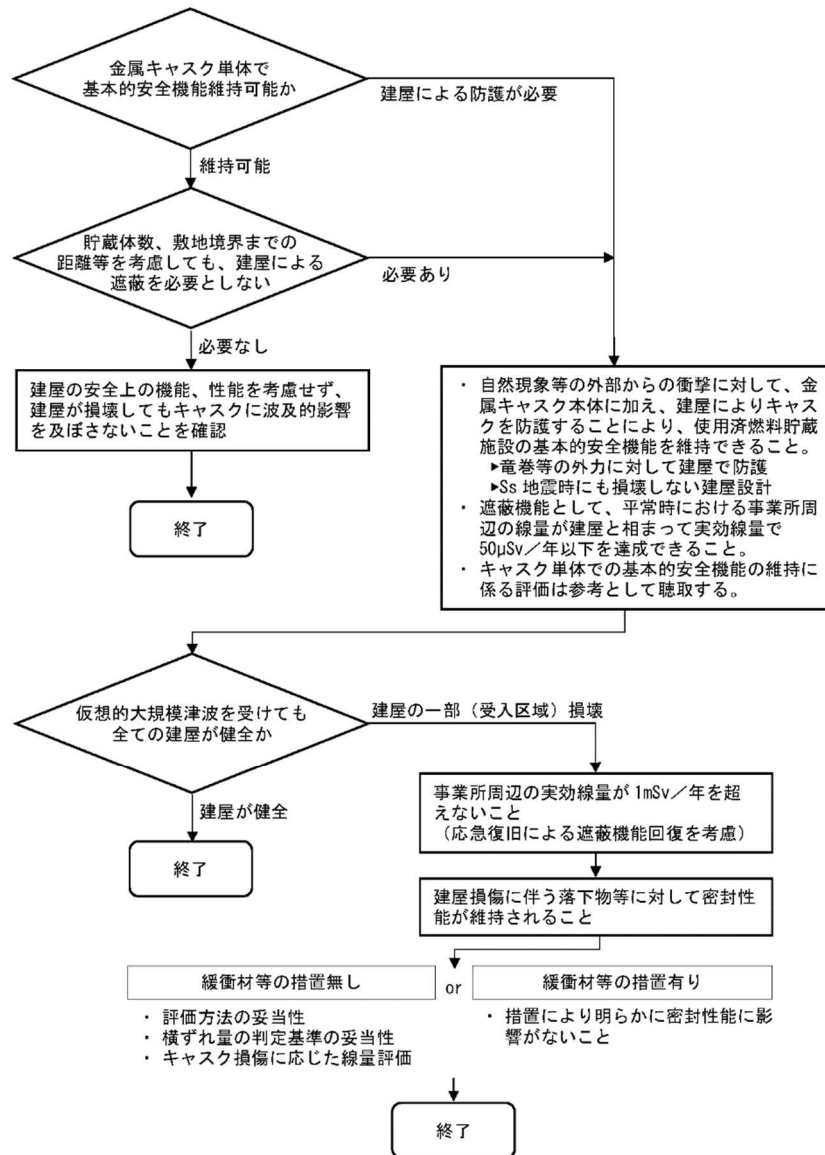
同解釈の適用に当たっては、貯蔵建屋の損傷の有無は、仮想的大規模津波に対して水深係数3を用いた波圧によって評価を求める。貯蔵建屋が損傷した場合の金属キャスクの基本的安全機能の評価については、貯蔵建屋の上部構造物の落下(受入れ区域では天井クレーンの落下等)による衝撃荷重に対して基本的安全機能が維持されること(閉じ込め機能ではバウンダリの維持等)を求め、また、復旧期間を含む1年間の公衆の実効線量が1mSvを超えないことを求める。

また、事業許可基準規則第13条(安全機能を有する施設)の解釈に基づき、衝撃を受けた金属キャスクの基本的安全機能を確認するための検査及び試験並びに同機能を維持するために必要な保守及び修理ができることとともに、金属キャスクを当該使用済燃料貯蔵施設外へ搬出するために必要な確認ができることを求める。

「リサイクル燃料貯蔵株式会社リサイクル燃料備蓄センターの使用済燃料貯蔵事業変更許可申請に係る新規制基準適合性審査について」（原子力規制庁，令和元年8月21日）（抜粋）

- 使用済燃料貯蔵施設は，自然現象等の外部からの衝撃に対して，金属キャスク本体に加え，建屋によりキャスクを防護することにより，使用済燃料貯蔵施設の基本的安全機能を維持できること。
- 基本的安全機能のうち遮蔽機能については，平常時における事業所周辺の線量が建屋と相まって実効線量で $50 \mu\text{Sv}/\text{年}$ 以下を達成できること。ただし，仮的大規模津波により建屋受入れ区域が損傷する場合は，応急復旧による遮蔽機能の回復を考慮して公衆の受ける実効線量が $1\text{mSv}/\text{年}$ を超えないこと。
- また，上記の建屋受入れ区域の損傷に伴い生じうる架構鉄骨の落下において，金属キャスクへの衝撃を緩和する又は回避する措置を検討し，多重の閉じ込め構造を有する金属キャスクの密封性能が確実に維持できること。

使用済燃料貯蔵施設の建屋の取扱いに関する審査フロー



(2) 施設の特性に応じた津波防護の基本方針に基づく実施項目

原子力規制庁による審査方針を踏まえ、施設の特性に応じた津波防護の基本方針に基づき実施する項目を以下に示す。

a. 貯蔵建屋の津波波圧に対する耐性の確認

貯蔵建屋については、仮想的な大規模津波に対して水深係数3を用いた波圧による評価に基づき損傷の有無を判定することが求められている。

このため、貯蔵建屋のうち貯蔵区域については、仮想的な大規模津波に伴う波圧に対し耐性を有することを確認する。

また、貯蔵建屋のうち受入れ区域については、波圧による外壁の応力が許容応力を超えることから、受入れ区域の損傷を仮定し、津波により貯蔵建屋が損傷した場合に満たすべき事項として上記審査方針に示される①金属キャスクが有する基本的安全機能が損なわれるおそれがないこと、②適切な復旧手段及び復旧期間において損傷を受けた貯蔵建屋の遮蔽機能及び除熱機能が回復可能であること及び③上記の復旧期間において事業所周辺の公衆に放射線障害を及ぼさないことを踏まえてb.以降の確認を行う。

b. 金属キャスクの基本的安全機能の確認

貯蔵建屋が損傷した場合の金属キャスクの基本的安全機能の確認については、貯蔵建屋の上部構造物の落下による衝撃荷重に対して基本的安全機能が維持されること（閉じ込め機能ではバウンダリの維持等）及び復旧期間を含む敷地境界外における公衆の実効線量が年間1mSvを超えないことが求められている。

このため、仮想的な大規模津波が十分な保守性を有するよう設定した極めて確率の低い事象であることとあいまって可能性の低い状況を含め各段階で数々の保守的な仮定をおいた評価を実施し、金属キャスクの基本的安全機能が維持されることを確認する。

(a) 閉じ込め機能の維持の確認

損傷を仮定する受入れ区域には金属キャスクを貯蔵しないが、搬入・搬出時に津波の襲来を受けた場合を仮定して、上記①に関し、落下物や津波漂流物による衝撃荷重に対して基本的安全機能が維持され

ることを確認する。

受入れ区域の損傷に伴う落下物や津波漂流物に対して、金属キャスクへの衝撃の緩和・回避措置を設計としては実施しないことから、衝突を想定して金属キャスクの閉じ込め機能が維持されることを確認する。なお、自主的な取組みとして、より一層の安全性向上に向け受入れ区域屋根の架構鉄骨に対し影響緩和措置を実施する。

落下物や津波漂流物の衝突想定条件を、金属キャスクの運用状態と考えられる落下物の組合せから設定し、衝突時の挙動に基づき保守的に設定した衝突荷重に対する金属キャスクの構造評価を実施し、密封境界部がおおむね弾性範囲内にとどまることを確認する。

また、金属キャスクへの落下物や津波漂流物の衝突により漏えい発生に至るためには、金属キャスク内の多数の燃料棒が破損し金属キャスク内が正圧となる、衝突荷重により一次蓋に大きな変位が発生し蓋部の漏えい率が増加する、二次蓋及び三次蓋の閉じ込め機能が喪失するといった複数の条件の重畳が必要であるが、ここでは金属キャスクからの漏えいの発生を仮定するため保守的な条件を重畳させてプルームによる線量の評価を実施し、敷地境界外における公衆の実効線量が年間 1mSv に比べ極めて小さいことを確認する。

(b) 遮蔽機能の維持の確認

損傷を仮定する受入れ区域には金属キャスクを貯蔵しないが、搬入・搬出時に津波の襲来を受けた場合を仮定して、上記②及び③に関し、受入れ区域の外壁及び遮蔽扉の喪失及び落下物や津波漂流物の衝突に伴う金属キャスクの中性子遮蔽材の一部損傷を仮定して敷地境界外における直接線及びスカイシャイン線による線量を評価し、実効線量が年間 1 mSv を超えないことを確認する。

受入れ区域の遮蔽機能を回復するため、受入れ区域及び仮置中の金属キャスクの損傷状況に応じて、受入れ区域の周囲や金属キャスクの損傷部への仮設遮蔽の設置等の応急復旧を実施する。

なお、受入れ区域の除熱機能については、金属キャスクが落下物や津波漂流物に埋没して自然対流が阻害される可能性は小さいが、金属

キャスクの除熱を回復するため落下物、土砂及び津波漂流物の撤去を行う。

c. 衝撃を受けた金属キャスクの検査、試験等

事業許可基準規則解釈第13条に基づき、衝撃を受けた金属キャスクの基本的安全機能を確認するための検査及び試験並びに同機能を維持するために必要な保守及び修理を行い、金属キャスクを当該使用済燃料貯蔵施設外へ搬出するために必要な確認を行う手段を講ずる。なお、搬出までの間は金属キャスクを適切に保管する。

d. 敷地内の浸水を想定した対策

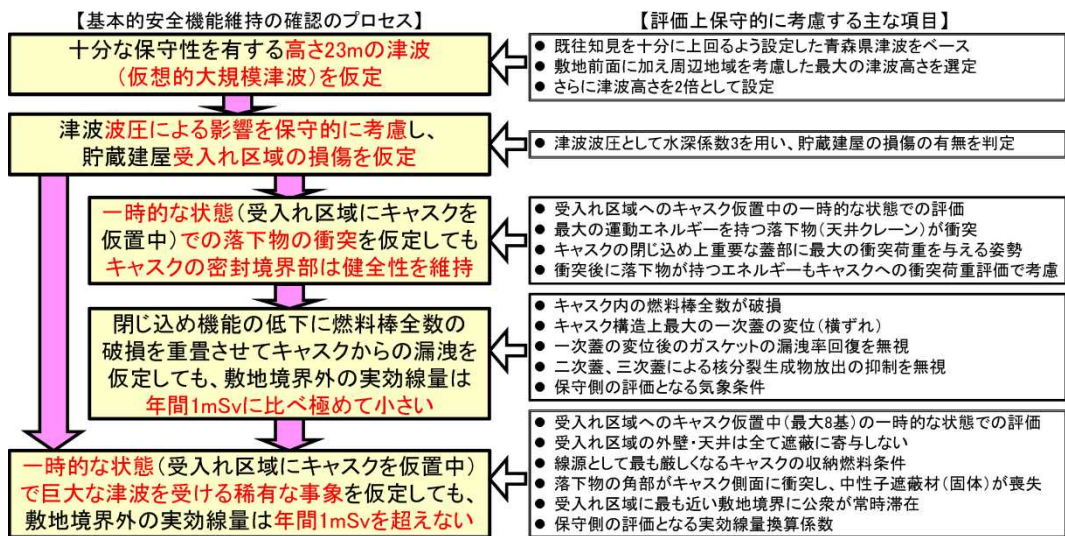
貯蔵建屋や事務建屋等主要な建屋は貯蔵建屋設置盤に設置されており、仮想的な大規模津波による敷地内の浸水を仮定することから、衝撃を受けた金属キャスクに係る対応以外にも対策を講ずる。

遮蔽機能に関する対策として、受入れ区域が損傷した場合の遮蔽機能回復の応急復旧手段を講ずるとともに、津波襲来後に環境放射線管理、貯蔵建屋周辺の線量管理及び個人の被ばく管理を行えるよう手段を講ずる。

貯蔵区域で貯蔵中の金属キャスクは受入れ区域の損傷による落下物や津波漂流物による衝撃を受けることはなく、基本的安全機能が損なわれるおそれはないが、津波襲来後に通常の監視機能が喪失することから、除熱機能や閉じ込め機能に係る代替計測を実施する手段を講ずる。

また、津波襲来後の活動インフラとして、事務建屋浸水後の活動の拠点としての予備緊急時対策所、津波襲来後の短期的な活動に必要な資材の保管場所としての高台資材保管庫及び活動に必要な電力を供給するための災害対応用電源を準備する。

ここで実施する評価は、十分な保守性を有するよう設定した極めて確率の低い仮想的な大規模津波に対し、可能性の低い状況を含めて各段階で数々の保守的な仮定をおいても、金属キャスクの基本的安全機能が維持されることを確認するためのものである。基本的安全機能の維持に係る確認のプロセスと評価上保守的に考慮する主な項目を第2-1図に示す。



第 2-1 図 基本的な安全機能の維持に係る確認のプロセスと保守性

3. 貯蔵建屋の耐性評価

貯蔵建屋については、仮想的な大規模津波に対して水深係数3を用いた波圧による評価に基づき損傷の有無を判定することが要求されており、貯蔵区域が仮想的な大規模津波に伴う波圧に対し耐性を有することを確認する。

同様に、貯蔵区域の遮蔽扉（3箇所）についても、閉鎖されている状態で仮想的な大規模津波に伴う波圧に対し耐性を有することを確認する。

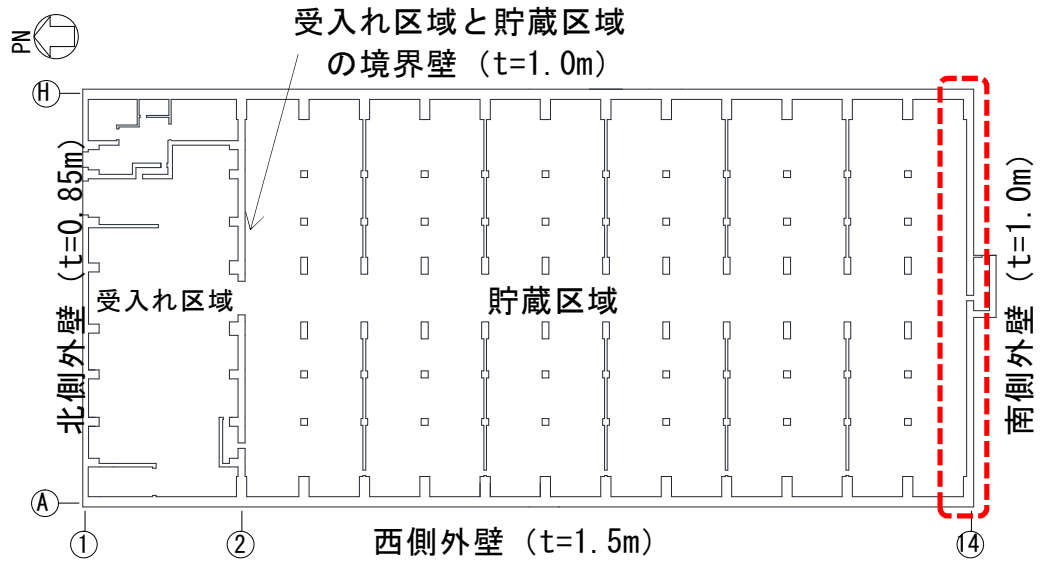
なお、受入れ区域については、波圧による外壁の応力が許容応力を超えることから損傷を想定する。

(1) 貯蔵建屋の耐性評価の考え方

a. 評価部位の考え方

貯蔵建屋の平面図を第3-1図に示す。貯蔵建屋のうち評価対象として貯蔵区域を選定し、受入れ区域については津波により損傷するものとする。

貯蔵区域の津波波圧を受ける外壁のうち、東側及び西側の外壁（壁厚1.5m）は南側の外壁及び受入れ区域との境界壁（壁厚1.0m）よりも厚いこと、受入れ区域との境界壁は南側外壁に比べて取り付く柱により相対的に剛性が高いことから、津波に対する評価部位として南側外壁を選定する。



- 受入れ区域との境界壁 2 通り
 壁厚：1.0m, 1.3×2m の柱が約 4~9m スパンで配置
 東西側 A, H 通り
 壁厚：1.5m, 1.5×1.4m の柱が約 9m スパンで配置
 南側 14 通り
 壁厚：1.0m, 壁柱で柱型はなし

第 3-1 図 貯蔵建屋平面図

b. 水深係数の設定

敷地の浸水深 7m による津波荷重の算定に用いる水深係数は、国土交通省告示 1318 号「津波浸水想定を設定する際に想定した津波に対し安全な構造方法等を定める件」（平成 23 年 12 月 2 日）に示される水深係数のうち最大である 3 とする。

c. 貯蔵建屋の耐性評価

(a) 検討内容

貯蔵建屋の耐性評価として、以下の項目につき確認を行う。

- i. 貯蔵区域の外壁の健全性確認
- ii. 貯蔵区域の遮蔽扉の健全性確認
- iii. 津波による波圧（荷重）と設計用地震力及び保有水平耐力の比較

(b) 検討方法及び判定基準

- i. 貯蔵区域の外壁の健全性確認

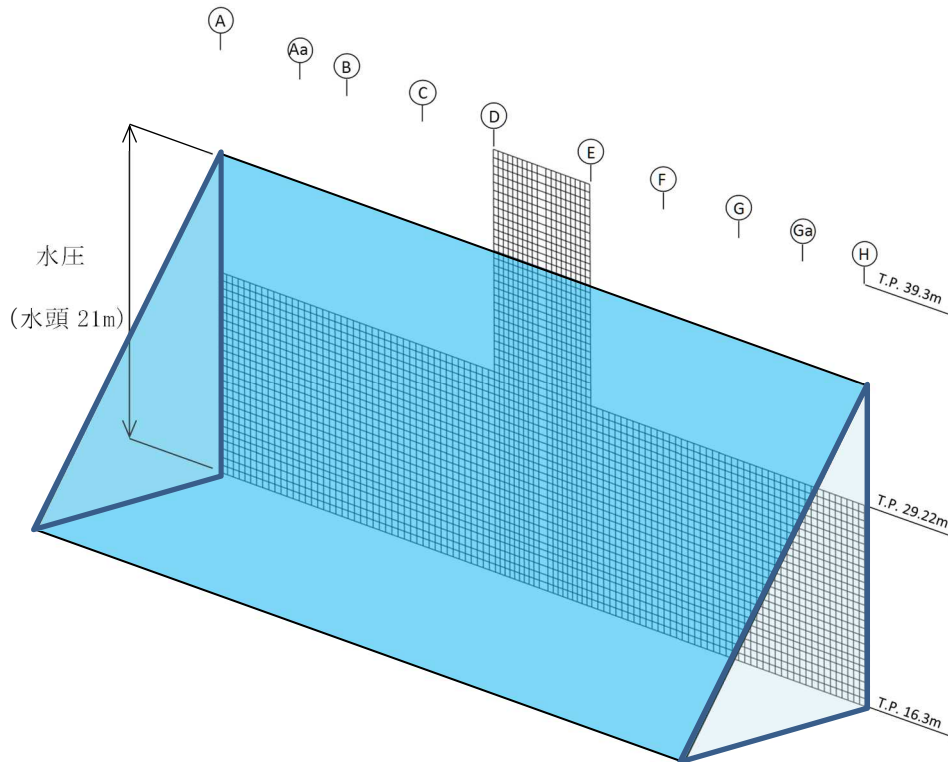
貯蔵区域の四周の外壁に採用する荷重が等しいことから、相対的に最も応力の高くなる部位を代表部位として確認を行う。

東側及び西側の外壁は南側の外壁及び受入れ区域との境界壁よりも厚いこと、受入れ区域との境界壁は南側外壁に比べて取り付く柱により相対的に剛性が高いことから、貯蔵区域の南側外壁を対象として健全性の確認を行う。

津波により貯蔵建屋外壁に作用する荷重の算定に当たっては、これを第 3-2 図に示す静的荷重として評価し、後述する有限要素法解析モデルに入力し、外壁に生じる応力を算出する。

モデル化の考え方は以下のとおりである。

- ・貯蔵区域の南側外壁をモデル化し、有限要素法を用いた静的弾塑性解析を用いる。
- ・解析は構造解析用汎用コード ABAQUS を用い、対象となる外壁を、断面内のコンクリート及び鉄筋を複数層に分割した積層シェルモデルによりモデル化する。



第 3-2 図 外壁に作用する荷重（貯蔵区域南側外壁）

判定基準として「発電用原子力設備規格 コンクリート製原子炉格納容器規格 JSME S NE1-2011」（日本機械学会, 2011 年 4 月）の荷重状態Ⅳの許容値として定めるコンクリートの圧縮ひずみ 3000μ 及び鉄筋の引張ひずみ 5000μ を、面外せん断応力度については「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」（日本建築学会, 2018 年 12 月）に示される許容値をそれぞれ用いる。

ii. 貯蔵区域の遮蔽扉の健全性確認

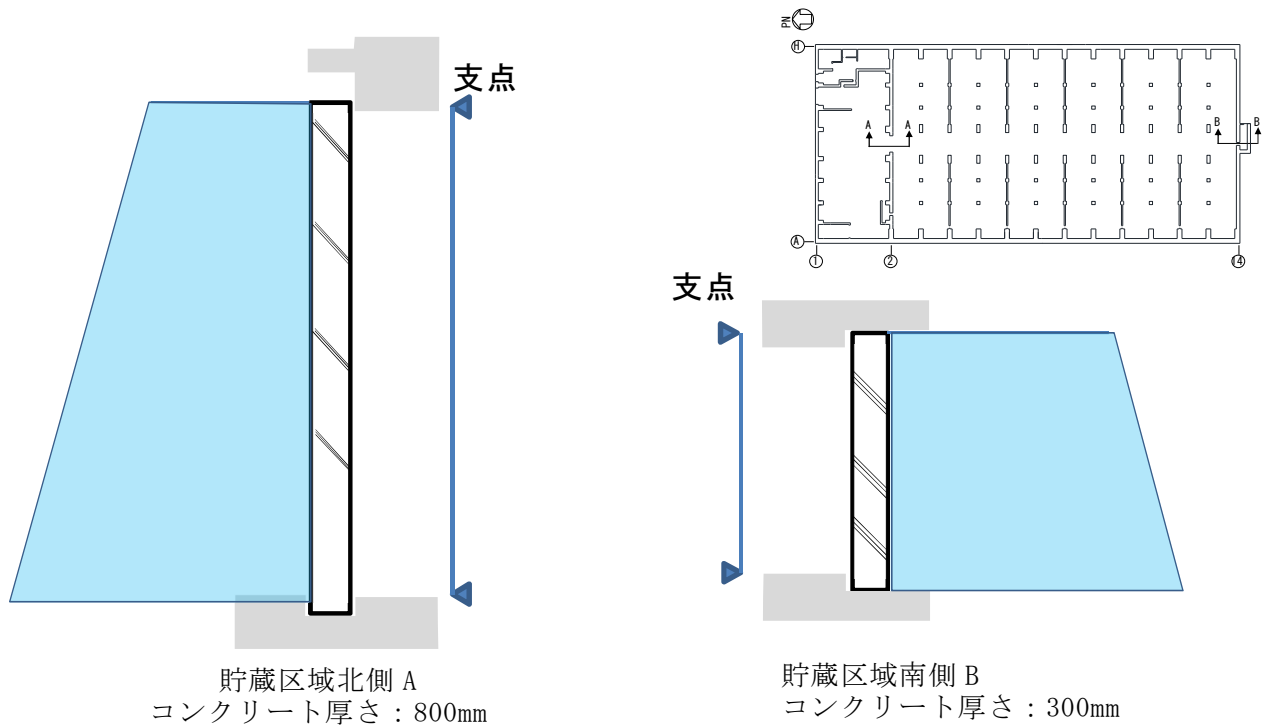
遮蔽扉（2箇所）に対して、津波による浸水深 7m に対し水深係数 3 を考慮した水圧による荷重を第 3-3 図に示すように考慮する。

評価に当たり、遮蔽扉に発生する曲げモーメントの評価として、遮蔽扉を両端ピン支持とした梁とみなし水圧を考慮して算定する。

強度評価では、充填されているコンクリートの耐力の寄与分は保守的に考慮せず、遮蔽扉に発生する曲げモーメントにより表面の鋼板の応力度を評価する。

判定基準に用いる許容値として、曲げモーメントにより鋼板に生

じる引張応力度として鋼板の短期許容応力度を用いる。



第 3-3 図 遮蔽扉の応力算定の考え方

- iii. 津波による波圧（荷重）と設計用地震力及び保有水平耐力の比較
上記の確認に加え、津波による荷重と建物の設計用地震力及び地震時の耐力である保有水平耐力との比較を行い、設計裕度の確認を行う。

津波荷重との比較を行う設計用地震力及び保有水平耐力は、設工認申請書記載値（平成 22 年 8 月 27 日認可済）を用いる。

- (c) 設計上考慮すべき自然現象との荷重の組合せについて

貯蔵建屋への荷重の観点から設計上考慮すべき自然現象として地震、竜巻、風（台風）、積雪及び降下火砕物が考えられるが、以下の理由から、津波による波圧とこれらの荷重の組合せは考慮しない。

- i. 地震

地震については、発生可能性が小さく継続時間も短いことから津波による波圧と同時に作用する可能性が考え難いこと、仮に同時に発生しても荷重の作用方向が異なる（地震力は作用方向の耐震壁の

面内せん断力で負担する設計であるが、津波波力は貯蔵建屋外壁に直交する方向の面外方向に作用する荷重である）ことから、津波による波圧との荷重の組合せは考慮しない。

ii. 竜巻及び風（台風）

竜巻及び風（台風）による荷重は津波による波圧と比べて非常に小さく、津波による波圧に包絡されると考えられること、また竜巻は発生可能性が小さく継続時間が短いことから、津波による波圧との荷重の組合せは考慮しない。

iii. 積雪及び降下火砕物

積雪及び降下火砕物は荷重の作用方向が異なる（積雪及び降下火砕物は鉛直方向の柱の軸力で負担する設計であるが、津波波力は貯蔵建屋外壁に直交する方向の面外方向に作用する荷重である）ことから、津波による波圧との荷重の組合せは考慮しない。

(2) 津波による貯蔵建屋耐性評価結果

a. 貯蔵区域南側外壁の健全性確認結果

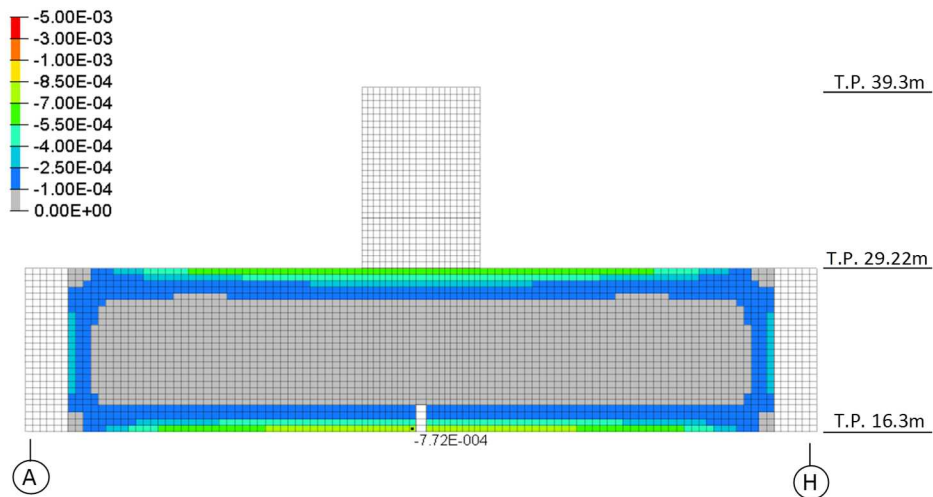
前述の弾塑性有限要素法解析により算定した、貯蔵建屋外壁に発生するひずみの評価結果を第3-1表及び第3-4図(1)～(3)に示す。コンクリートの圧縮ひずみ、鉄筋の引張ひずみ及び面外せん断力はいずれも許容値以下であり、貯蔵区域南側外壁の健全性を確認した。

なお、別添3に示すとおり、有限要素法解析における境界条件として外壁頂部が面外方向に変形した場合の影響は軽微である。

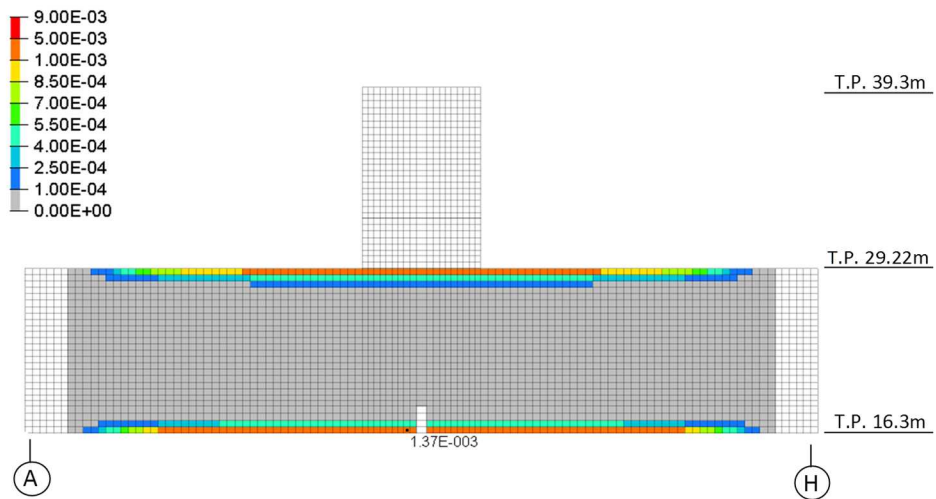
第3-1表 評価結果（貯蔵区域南側外壁）

評価項目	評価結果	許容値	判定
コンクリート圧縮ひずみ (ϵ_c)	7.72×10^{-4}	3.0×10^{-3}	可
鉄筋引張ひずみ (ϵ_t)	1.37×10^{-3}	5.0×10^{-3}	可
面外せん断力 Q (kN/m) *	1308	1463	可

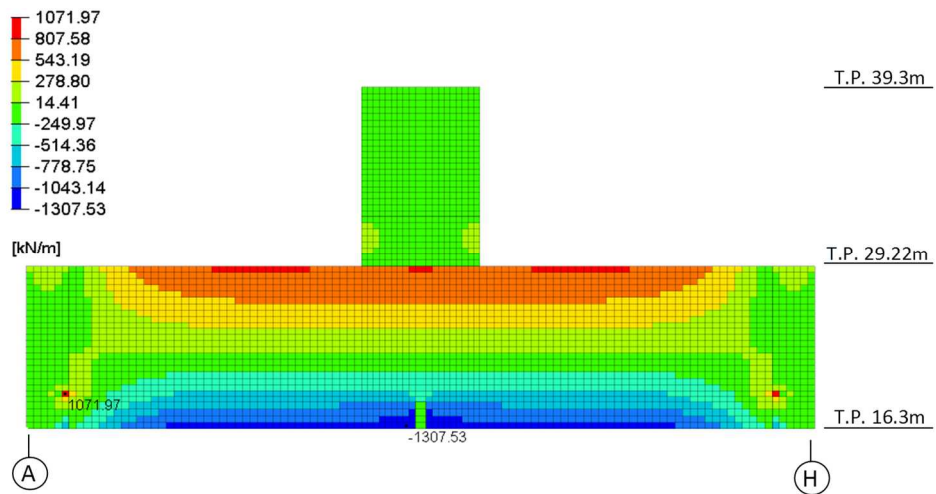
*) 面外せん断力に対する許容値の算出方法は別添4参照



第3-4図(1) コンクリート最小ひずみ分布（圧縮ひずみ）



第 3-4 図 (2) 鉄筋最大ひずみ分布 (引張ひずみ)



第 3-4 図 (3) 面外せん断力分布

b. 貯蔵区域の遮蔽扉の健全性確認結果

水深係数3を考慮した波圧に対し、貯蔵区域外壁北側及び南側の遮蔽扉に発生する応力を第3-2表に示す。鋼板に生じる応力は許容値以下であり、貯蔵区域の遮蔽扉の健全性を確認した。

第3-2表 評価結果（貯蔵区域の遮蔽扉）

	曲げモーメントにより 鋼板に生じる応力度 (N/mm ²)	鋼板の短期 許容応力度 ^{*1} (N/mm ²)	検定比 ^{*2}
貯蔵区域北側	115.6	235	0.50
貯蔵区域南側	42.0	235	0.18

*1) 鋼板の短期許容応力度は「鋼構造設計規準－許容応力度設計法－」（日本建築学会, 2005）に示される鋼材の短期許容応力度とする。

*2) 検定比は、曲げモーメントにより鋼板に生じる応力度と鋼板の短期許容応力度の比として求めた。

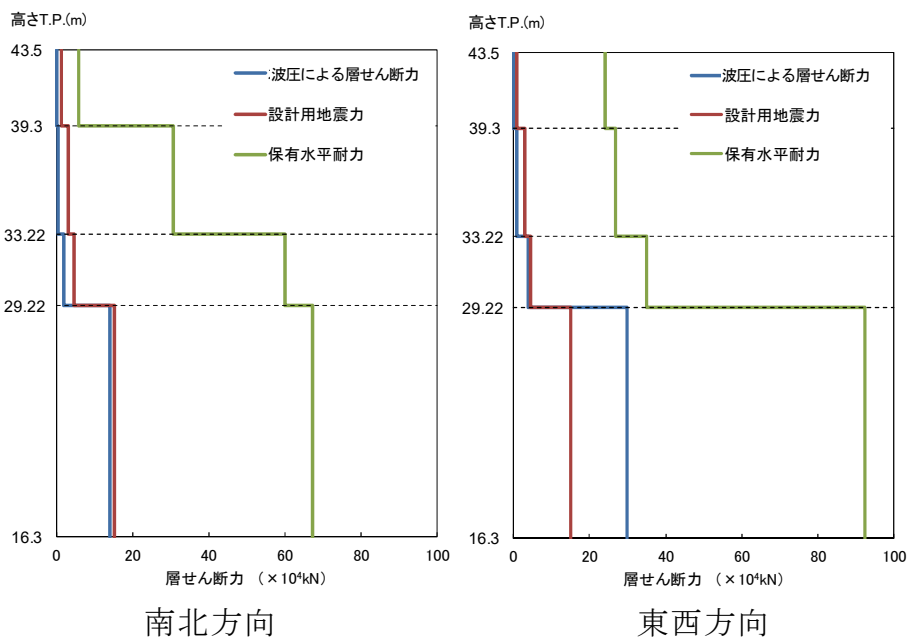
c. 津波による波圧（荷重）と設計用地震力及び保有水平耐力の比較結果

波圧による層せん断力と設計用地震力及び保有水平耐力の比較結果を第3-3表及び第3-5図に示す。水深係数3による波圧による層せん断力は、東西方向では貯蔵建屋設計時に考慮した設計用地震力を上回るものの、保有水平耐力を下回っており、貯蔵建屋は波圧に対して十分な裕度を有している。また、地震応答解析モデルによる貯蔵建屋の荷重～変形関係における波圧による層せん断力で貯蔵建屋の浮き上がりや転倒・滑動が起こらないことについては保有水平耐力に基づく確認を行っており、津波の波圧による層せん断力が保有水平耐力を下回ることから、津波の波圧による貯蔵建屋の浮き上がりや転倒・滑動は起こらないことを確認した。

第3-3表 津波の波圧（水深係数3）による層せん断力と設計用地震力及び保有水平耐力との比較

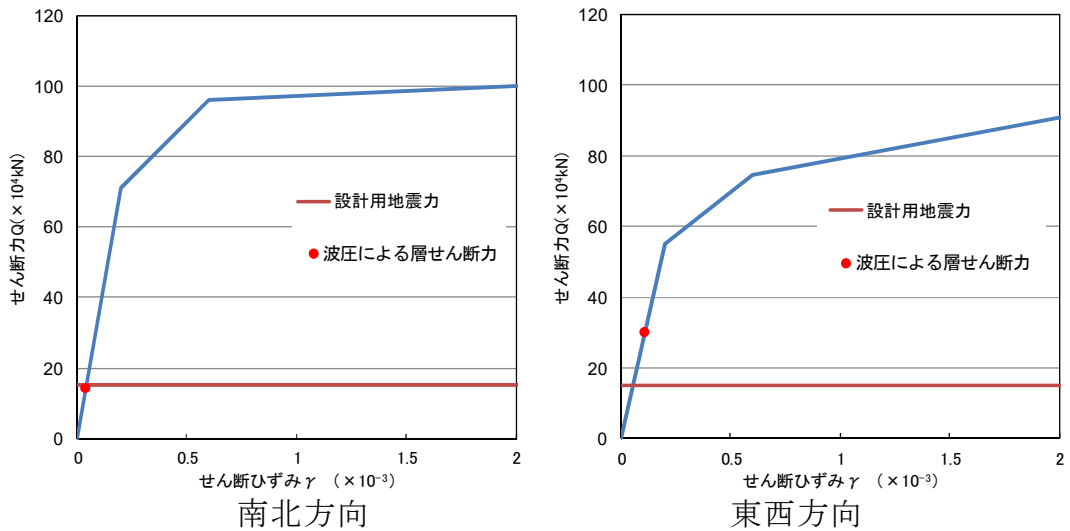
	波圧による層せん断力 ($\times 10^4 \text{kN}$)	設計用地震力* (1.5Ci) ($\times 10^4 \text{kN}$)	保有水平耐力* ($\times 10^4 \text{kN}$)
南北方向	14.0	15.09	67.25
東西方向	29.83	15.09	92.32

*) 設工認申請書記載値（平成22年8月27日認可済）に基づく



第3-5図 波圧による層せん断力，設計用地震力及び保有水平耐力の比較

さらに、波圧による層せん断力と地震応答解析モデルに基づき算定される貯蔵建屋の荷重～変形関係との比較を第 3-6 図に示す。比較の結果、波圧による層せん断力は、貯蔵建屋の荷重～変形関係において弾性範囲であり、十分な裕度を持つ値である。



*)せん断耐力は貯蔵建屋のうち、貯蔵区域の耐力である。

第 3-6 図 荷重～変形関係との比較 (1層 T.P. +16.3m～+29.22m)

4. 金属キャスクの閉じ込め評価

損傷を仮定する受入れ区域には金属キャスクを貯蔵しないが、金属キャスクの搬入・搬出時に津波の襲来を受けた場合を仮定して、受入れ区域の損傷に伴う落下物や津波漂流物に対して密封性能が維持されることを確認する。

受入れ区域の損傷に伴う落下物の衝突については、金属キャスクの密封境界部への衝突荷重が大きい事象として①天井クレーンの水平姿勢キャスクへの落下及び②天井スラブの縦姿勢キャスクへの落下を衝突想定条件として設定する。

設定した衝突想定条件における衝突時の挙動に基づき、保守的に考慮した金属キャスクへの衝突荷重を入力として構造評価を実施し、衝突荷重に対し密封境界部がおおむね弾性範囲内にとどまることを確認する。

また、金属キャスクからの漏えいの発生を仮定するため保守的な条件を重畳させてプルームによる線量の評価を実施し、敷地境界外における公衆の実効線量が年間 1mSv に比べ極めて小さいことを確認する。

(1) 閉じ込め評価の考え方

金属キャスクの閉じ込め評価については、以下の考え方に基づき実施する。

a. 落下物や津波漂流物の設定について

金属キャスクへの衝突により大きな衝撃力を与える可能性のある落下物として、質量、剛性及び落下速度の観点から建屋構成材及び天井クレーンを考慮して落下物を抽出する。

(a) 貯蔵建屋の津波波力評価において水深係数3に基づく波圧を仮定した場合、貯蔵区域の側壁については許容応力の範囲内であるが、受入れ区域の側壁については許容応力を超えることから、受入れ区域の損傷を仮定して落下物を設定する。

(b) 落下物として、受入れ区域の損傷により発生する建屋構造材や重量物を考慮する。落下物の衝突による金属キャスクの閉じ込め機能への影響を評価することから、仮置中の金属キャスクに大きな衝撃力を与える可能性のある落下物の属性として、①質量が大きい、②剛性の高い材質（鉄，コンクリート）及び③高速で衝突する（落下

距離が大きい) が考えられるため、建屋構成材及び天井クレーンを考慮して落下物を抽出し、金属キャスクの状態を踏まえて閉じ込め機能への影響の厳しさの観点から代表性のある衝突想定条件を設定する。

(c) 衝突想定条件を設定する上では、一定の保守性を考慮しつつ、過度に保守的なものとならないよう、金属キャスクに与える衝撃の観点から受入れ区域の損傷形態及び落下物の落下形態に基づき予想される挙動を考慮して設定する。許容応力を超えた領域での貯蔵建屋の挙動は定量的に評価する上での不確かさが大きく、不確かさを踏まえた上限をとると相当に極端な仮定(貯蔵建屋の屋根全体が一体となって落下し金属キャスクに衝突する等)となることが考えられるため、工学的判断を踏まえて設定する。

(d) 受入れ区域の損傷を仮定することから、津波の水流により貯蔵建屋外から侵入する津波漂流物の金属キャスクへの衝突についても考慮する。受入れ区域の側壁が仮に損傷しても、貯蔵建屋外からの大型の津波漂流物が支障なく貯蔵建屋内に流入し高速で金属キャスクに衝突する可能性は小さいと考えられるが、津波漂流物の衝突を考慮した条件を落下物による衝突想定条件と比較し、落下物による衝突想定条件に包含されない場合は津波漂流物による衝突想定条件を設定する。

b. 金属キャスクの状態について

(a) 受入れ区域における金属キャスクの状態は、受入れ工程を踏まえて水平姿勢・緩衝体なし(たて起こし架台上)の状態及び縦姿勢・緩衝体なし(移送中及び検査架台上)の状態を考慮する。なお、仮置架台(最大7基)及びたて起こし架台(1基)にて仮置き中の状態の金属キャスクは、輸送中の落下時の衝撃緩和を目的とした緩衝体を取り付けられており、落下物や津波漂流物の衝突に対しても金属キャスクの蓋部を保護する上で相当の耐性を有すると考えられる。

(b) 金属キャスクへの落下物や津波漂流物の衝突部位は、閉じ込め機能への影響の観点から蓋部を考慮する。なお、金属キャスクの胴部

は、落下物や津波漂流物の衝突により貫通し閉じ込め機能が失われる可能性は極めて小さいと考えられる。

c. 構造評価について

金属キャスクの閉じ込め機能評価を、金属キャスクの蓋部に衝突荷重を与えた状態を模擬して構造評価により行う。

構造評価の入力条件となる落下物の衝突荷重は、a. で設定した衝突想定条件に基づき工学式により設定することとし、保守的な衝突荷重となるよう前提条件を与える。

d. 判定基準について

(a) 金属キャスクの密封境界部の範囲は、「原子力発電所敷地内での輸送・貯蔵兼用乾式キャスクによる使用済燃料の貯蔵に関する審査ガイド」の定義を準用し、閉じ込め機能を担保する一次蓋締付ボルト及び密封シール部とする。

(b) 金属キャスクを模擬した構造評価により、密封境界部がおおむね弾性範囲内にとどまることを確認する。密封境界部がおおむね弾性範囲内にとどまることとして、胴体の一次蓋密封シール部及び一次蓋の密封シール部に塑性変形がみられないこと並びに一次蓋用締付ボルトのボルト応力が降伏応力を超えないこととする。なお、一次蓋の横ずれ量については金属キャスクの構造に基づく最大値を設定し、実験的知見に基づき漏えい率を設定してプルームによる線量の評価に反映する。

e. 金属キャスクの浸水による影響について

津波により金属キャスクの蓋部が浸水しても蓋間圧力(0.27MPaabs以上であり、水深15m以上の浸水による水圧に相当)は水深7mの浸水による水圧を上回るため圧力障壁は維持される。なお、金属キャスクシール部は最大でも水深2m程度の浸水であり、金属キャスクの設置階は貯蔵建屋周囲の地盤面より高いため、標高の低い敷地の北西側から津波が引くと同時に機器搬出入口から排水されることから、長時間に亘り金属キャスク(シール部)が浸水している状態は考え難い。また津波襲来後に金属ガスケット外周部の洗浄やエアブローの対応を取ることが可能で

あることから、閉じ込め機能が損なわれることはないと考えられる。

さらに津波により貯蔵建屋内へ土砂が流入したとしても、水分を含んだ土砂が金属キャスクの熱を奪うため、短期的に除熱不良になることはなく、土砂、落下物及び津波漂流物の撤去を行うため、基本的安全機能が損なわれるおそれはない。

また、仮想的大規模津波の遡上波の大部分は、貯蔵建屋の北西角に到達した後、貯蔵建屋を取り囲むように進み、その他の遡上波である貯蔵区域の機器搬出入口から流入する津波は、損傷した受入れ区域が障壁となることから、その流速は貯蔵建屋周囲で最も大きい流速（水流）である10m/sを下回ると考えられる。したがって、貯蔵建屋周囲で最も大きい水流により生じる波力（約780kN）は、基準地震動による水平方向地震力（約2,200kN）に包含されることから、貯蔵区域の機器搬出入口から流入する津波が貯蔵架台に固定している金属キャスクに作用したとしても、貯蔵架台と床との固定状態は維持される。

(2) 衝突想定条件の設定

(1)で示した考え方に基づき、受入れ区域損傷時の金属キャスクの閉じ込め機能評価の入力条件となる衝突想定条件を設定する。

衝突想定条件の設定に当たっては、受入れ区域の損傷に伴う落下物による衝突想定条件を設定した上で、津波漂流物の衝突を考慮した条件が落下物による衝突想定条件に包含されるか否かを確認する。

a. 落下物の抽出

落下物の衝突による金属キャスクの閉じ込め機能への影響を評価することから、仮置中の金属キャスクに大きな衝撃力を与える可能性のある落下物の属性として、①質量が大きい、②剛性の高い材質（鉄、コンクリート）及び③高速で衝突する（落下距離が大きい）が考えられるため、建屋構成材及び天井クレーンを考慮して落下物を抽出する。

建屋構成材のうち大きな衝撃力を与える可能性のある落下物として、コンクリート側壁、天井スラブ、架構鉄骨及びクレーンガーダを抽出する。

また天井クレーンのうち大きな衝撃力を与える可能性のある落下物として、主巻フック、けた、サドル、走行車輪、トロリフレーム及び運転室を抽出する。

b. 落下条件の整理

a. で抽出した落下物に対し、金属キャスクの姿勢（水平状態及び縦状態）、受入れ区域内の機器配置及び金属キャスクとの位置関係を踏まえて、金属キャスク上に落下するための条件、事象の起こりやすさ、落下エネルギー（落下物の位置、質量より設定）の観点から整理を行う。

整理の結果を第 4-2-1 表～第 4-2-4 表に、また受入れ区域における金属キャスク取扱工程を第 4-2-1 図(1)～(3)にそれぞれ示す。

第4-2-1表 落下物の抽出及び金属キャスクへの衝突状態の設定（建屋構造材）（1/2）

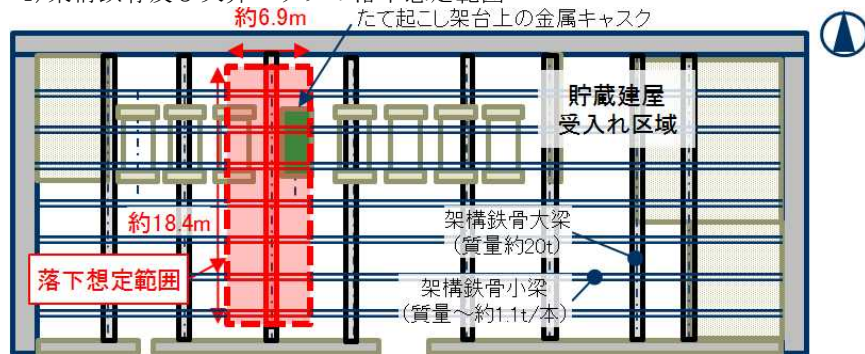
落下物	質量 (t)	落下高さ (m)	金属キャスク姿勢	金属キャスク上に落下するための条件	事象の起こりやすさ	落下エネルギー (N・m)	衝突想定条件（代表事象）として設定	
コンクリート側壁	約 73	約 7.2	水平	津波波力により受入れ区域が損傷し、たて起こし架台上の金属キャスクの上部まで伸びた柱間の北側側壁が転倒し自由落下（金属キャスクが水平姿勢の場合の模式図を第4-2-2表①に示す）	北側側壁が損傷した場合、コンクリートが破損、変形して倒れ、金属キャスクへの衝突が想定される	約 5.2×10^6	—	落下エネルギーが天井クレーンの落下に比べ小さく、天井クレーンの落下で代表できると考えられるため除外
		—	縦		移送中の金属キャスクは北側側壁から離れており、衝突は考え難い	—	—	金属キャスクへの衝突は考え難いため除外
天井スラブ（単独）	約 23	約 19	水平	津波波力により受入れ区域が損傷し、たて起こし架台上の金属キャスクの上部にある天井スラブが自由落下（模式図を第4-2-2表②に示す）	受入れ区域の損傷が大きい場合、天井のコンクリートスラブが破損、変形して落下し、金属キャスクへの衝突が想定される	約 4.3×10^6	—	落下エネルギーが天井クレーンの落下に比べ小さく、天井クレーンの落下で代表できると考えられるため除外
	約 30	約 16.6	縦	津波波力により受入れ区域が損傷し、移送中の縦姿勢の金属キャスクの上部にある天井スラブが自由落下	同上	約 4.9×10^6	○	落下エネルギーが縦姿勢の金属キャスクの場合で最大であり、縦姿勢の金属キャスクに係る衝突想定条件（代表事象）として設定
架構鉄骨（単独）	約 28*1	約 14	水平	津波波力により受入れ区域が損傷し、たて起こし架台上の金属キャスクの上部にある架構鉄骨が自由落下（模式図を第4-2-2表③に示す）	受入れ区域の損傷が大きい場合、架構鉄骨の落下は否定できないが、金属キャスクに衝突するには延性のある鋼材である架構鉄骨の両端が破断して落下する必要がある*2	約 3.8×10^6	—	架構鉄骨の大梁は受入れ区域北側及び南側の柱にボルトで保有耐力接合（母材強度よりも高い荷重でも接合部が保持）されており、両方の結合部が同時に破損する可能性は考え難く、仮に片方（北側）の結合部が破損しても、落下エネルギーが部材の変形に使われ、架構鉄骨が自由落下して金属キャスクに衝突する可能性は考え難いため除外 小梁単独についても、大梁と格子状に連結されており両端が同時に破損して自由落下する可能性は考え難いため除外
	同上	約 7.7	縦	津波波力により受入れ区域が損傷し、移送中の縦姿勢の金属キャスクの上部にある架構鉄骨が自由落下	移送中の金属キャスクは北側側壁から離れており、衝突は考え難い	—	—	金属キャスクへの衝突は考え難いため除外

○：代表事象として設定

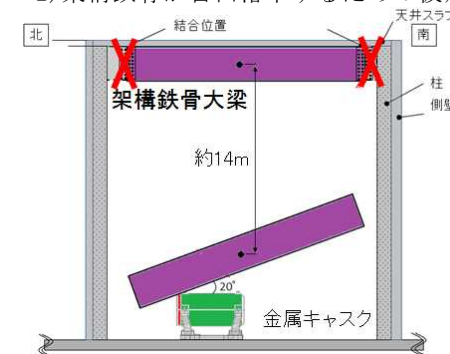
第 4-2-1 表 落下物の抽出及び金属キャスクへの衝突状態の設定（建屋構造材）（2/2）

落下物	質量 (t)	落下高さ (m)	金属キャスク姿勢	金属キャスク上に落下するための条件	事象の起こりやすさ	落下エネルギー (N・m)	衝突想定条件（代表事象）として設定
架構鉄骨 + 天井スラブ	約 183*1 (約 28 (鉄骨) + 約 155 (スラブ))	約 14	水平	津波波力により受入れ区域が損傷し、たて起こし架台上の金属キャスクの上部にある架構鉄骨が天井スラブを伴い自由落下（模式図を第 4-2-2 表③に示す）	天井スラブは架構鉄骨に載った状態で支持される構造であり、架構鉄骨が落下した場合は天井スラブも落下する可能性が考えられる	約 2.5×10^7	天井スラブは架構鉄骨に載った状態で支持され架構鉄骨に直接固定されていないことから、架構鉄骨と天井スラブと一緒に落ちて同時に金属キャスクに同時に衝撃を与える可能性は考え難いため除外
	同上	約 7.7	縦	津波波力により受入れ区域が損傷し、移送中の縦姿勢の金属キャスクの上部にある架構鉄骨が天井スラブを伴い自由落下	同上	約 1.4×10^7	同上
クレーンガーダ	約 11	約 7.1	水平	津波波力により受入れ区域が損傷し、たて起こし架台上の金属キャスクの上部にある北壁側のクレーンガーダが自由落下（金属キャスクが水平姿勢の場合の模式図を第 4-2-2 表④に示す）	北側側壁が損傷した場合、側壁の柱が損傷するのに伴い柱で支えられたクレーンガーダが落下し、金属キャスクへの衝突が想定されるが、クレーンガーダと北壁の柱を結合する金具が破断して落下する必要があるが、天井スラブのみの落下に比べれば可能性は小さい	約 7.7×10^5	落下エネルギーが天井クレーンの落下に比べ小さく、天井クレーンの落下で代表できると考えられるため除外
		—	縦		移送中の金属キャスクは北側側壁から離れており、衝突は考え難いため除外	—	—

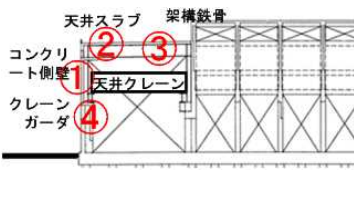
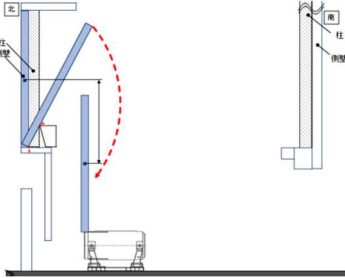
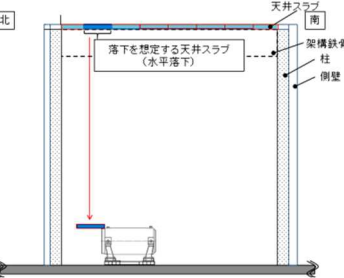
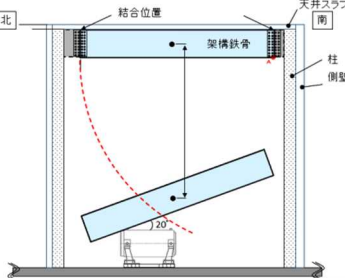
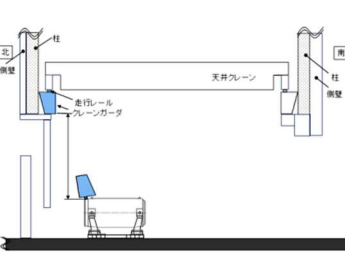
*1) 架構鉄骨及び天井スラブの落下想定範囲



*2) 架構鉄骨が自由落下するための仮定



第 4-2-2 表 落下物及び落下形態の想定 (建屋構造材)

受入れ区域概略図	①コンクリート側壁	②天井スラブ (単独)	③架構鉄骨	④クレーンガーダ
				
<p>受入れ区域の構造を踏まえ、北側側壁の破損に伴う建屋構造材の落下物として以下を考慮する。</p> <p>①コンクリート側壁</p> <p>②天井スラブ (単独)</p> <p>③架構鉄骨 (受入れ区域の天井スラブを支持する梁であり、南北方向の大梁と、大梁の間に東西方向に掛けられた小梁で構成される)</p> <p>④クレーンガーダ (受入れ区域の北側及び南側に、天井クレーンの走行レールを支持するためのクレーンガーダが設置されている)</p>	<ul style="list-style-type: none"> 北側側壁の衝突として、落下高さが大きく衝突エネルギーが大きい上部の側壁の落下 (転倒) による衝突を仮定する。 側壁は柱で仕切られており側壁全体が一体となって転倒する可能性は小さいと考えられることから、破損に伴う落下物のサイズとして、たて起こし架台付近の 1 区画 (幅 6.75m × 高さ 8.8m × 厚さ 0.5m) を考慮する。 水平姿勢の金属キャスク蓋部への衝突荷重が大きくなるよう、側壁の転倒状況を保守的に見込み、側壁が鉛直な状態で金属キャスク蓋部に衝突する状態を仮定する。 	<ul style="list-style-type: none"> 天井スラブは、架構鉄骨 (南北方向の大梁及び東西方向の小梁) で支持されている。 延性のある鋼材である架構鉄骨が破断しない場合、落下する天井スラブの断片の大きさは架構鉄骨の区画内に制限されることから、破損に伴う落下物のサイズとして、架構鉄骨の大梁と小梁で仕切られた 1 区画を考慮する。 [金属キャスクが水平姿勢の場合] 東西 6.75m × 南北約 2.7m × 厚さ 0.5m (たて起こし架台付近で最大の 1 区画) [金属キャスクが縦姿勢の場合] 東西 9m × 南北約 2.7m × 厚さ 0.5m (受入れ区域全体で最大の 1 区画) 	<ul style="list-style-type: none"> 架構鉄骨の大梁は受入れ区域北側及び南側の柱にボルトで保有耐力接合 (母材強度よりも高い荷重でも接合部が保持) されており、両方の結合部が同時に破損する可能性は考え難く、仮に片方 (北側) の結合部が破損しても、落下エネルギーが部材の変形に使われ、架構鉄骨が自由落下して金属キャスクに衝突する可能性は考え難い。 小梁単独についても、大梁と格子状に連結されており両端が同時に破損して自由落下する可能性は考え難い。 	<ul style="list-style-type: none"> 北側側壁の破損に伴い、柱で支持されている北側のクレーンガーダが落下し金属キャスク蓋部に衝突する状態を仮定する。 金属キャスク蓋部への衝撃の観点から、取付け位置はクレーンガーダの上部であるが、剛性の高い走行レールが金属キャスク蓋部に衝突する状態を仮定する。

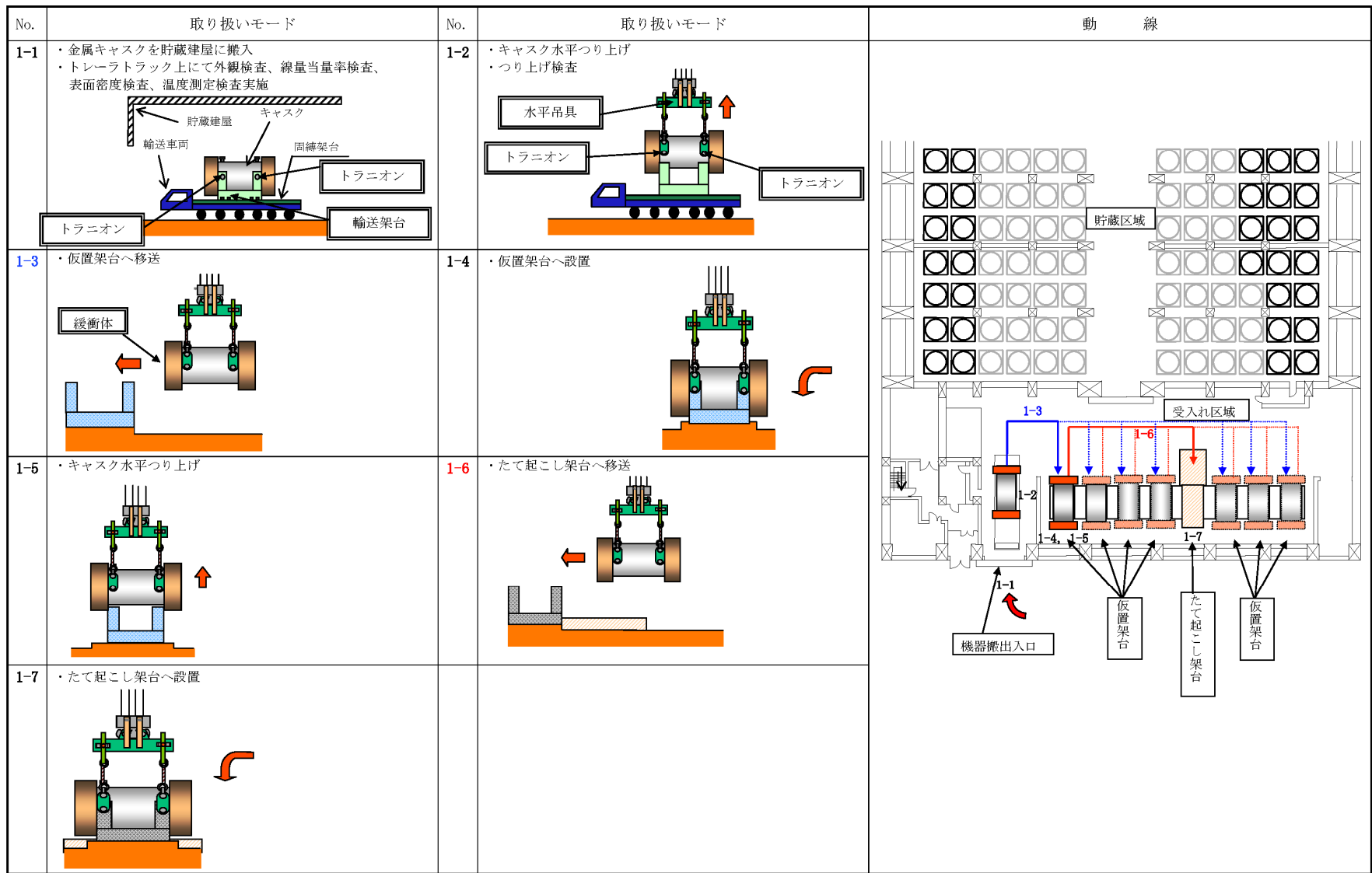
第 4-2-3 表 落下物の抽出及び金属キャスクへの衝突状態の設定（天井クレーン）

落下物	質量 (t)	落下高さ (m)	金属キャスク姿勢	金属キャスク上に落下するための条件	事象の起こりやすさ	落下エネルギー (N・m)	衝突想定条件（代表事象）として設定	
主巻フック	約 3.45	約 7.8	水平	津波波力により受入れ区域が損傷し、たて起こし架台上の金属キャスクの上部にある天井クレーンが北側クレーンガードから外れて自由落下 モード図を第 4-2-4 表の①～④に示す ①：主巻フック ②：けた、サドル、走行車輪 ③：トロリフレーム ④：運転室	受入れ区域の損傷により、クレーンが走行レールから脱輪し金属キャスクへの衝突が想定される	約 2.6×10^5	—	落下エネルギーがクレーン本体（けた＋サドル＋走行車輪）の落下に比べ小さく、クレーン本体で代表できると考えられるため除外
けた	約 128	約 5.3	水平			約 6.7×10^6	○	落下エネルギーが水平姿勢の金属キャスクの場合で最大であり、水平姿勢の金属キャスクに係る衝突想定条件（代表事象）として設定
サドル						約 4.2 × 10 ⁶	—	落下エネルギーがクレーン本体（けた＋サドル＋走行車輪）の落下に比べ小さく、クレーン本体で代表できると考えられるため除外
走行車輪	—	—	金属キャスクへの衝突は考え難いため除外					
トロリフレーム						約 43	約 10	水平
運転室	約 128	—	水平	—	—	—	—	—
主巻フック	約 3.45	約 5.5	縦	津波波力により受入れ区域が損傷し、移送中の縦姿勢の金属キャスクの上部にある天井クレーンが北側クレーンガードから外れて自由落下	金属キャスクが縦姿勢での移送は搬送台車で行うことから、天井クレーンが縦姿勢の金属キャスクの上部にある可能性は小さく、衝突は考え難い	約 1.9×10^5	—	天井クレーンが縦姿勢の金属キャスクの上部にある可能性は小さいこと、また受入れ区域北側外壁の破損により天井クレーンは北側から落下すると考えられるが金属キャスクが縦状態となるのは受入れ区域の南側であることから、金属キャスクへの衝突は考え難いため除外
けた	約 128	約 5.9	縦			約 7.4×10^6	—	
サドル						約 43	—	
走行車輪	約 128	—	縦					
トロリフレーム						約 43	—	
運転室	約 128	—	縦	—	—	—	—	—

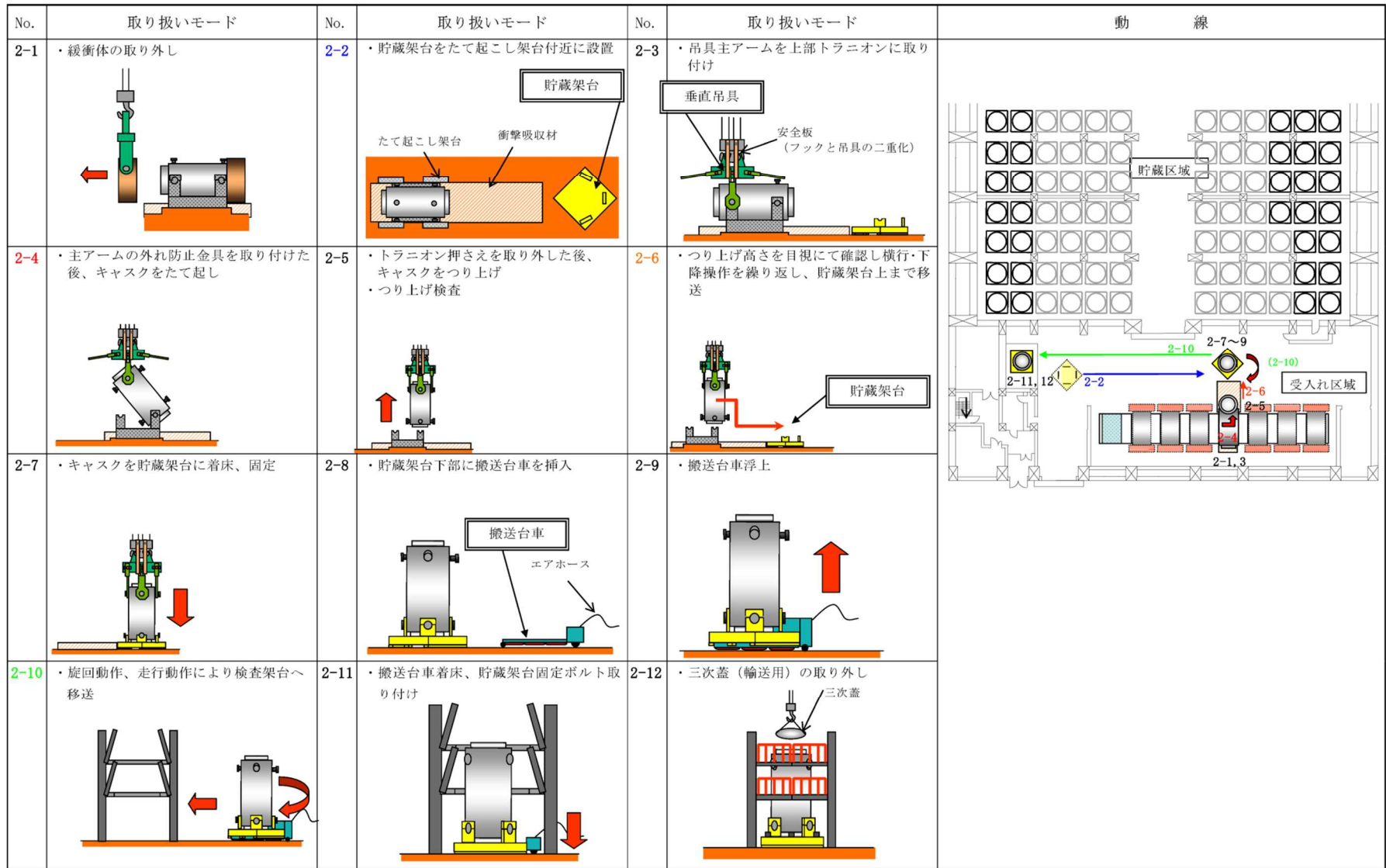
○：代表事象として設定

第 4-2-4 表 落下物及び落下形態の想定（天井クレーン）

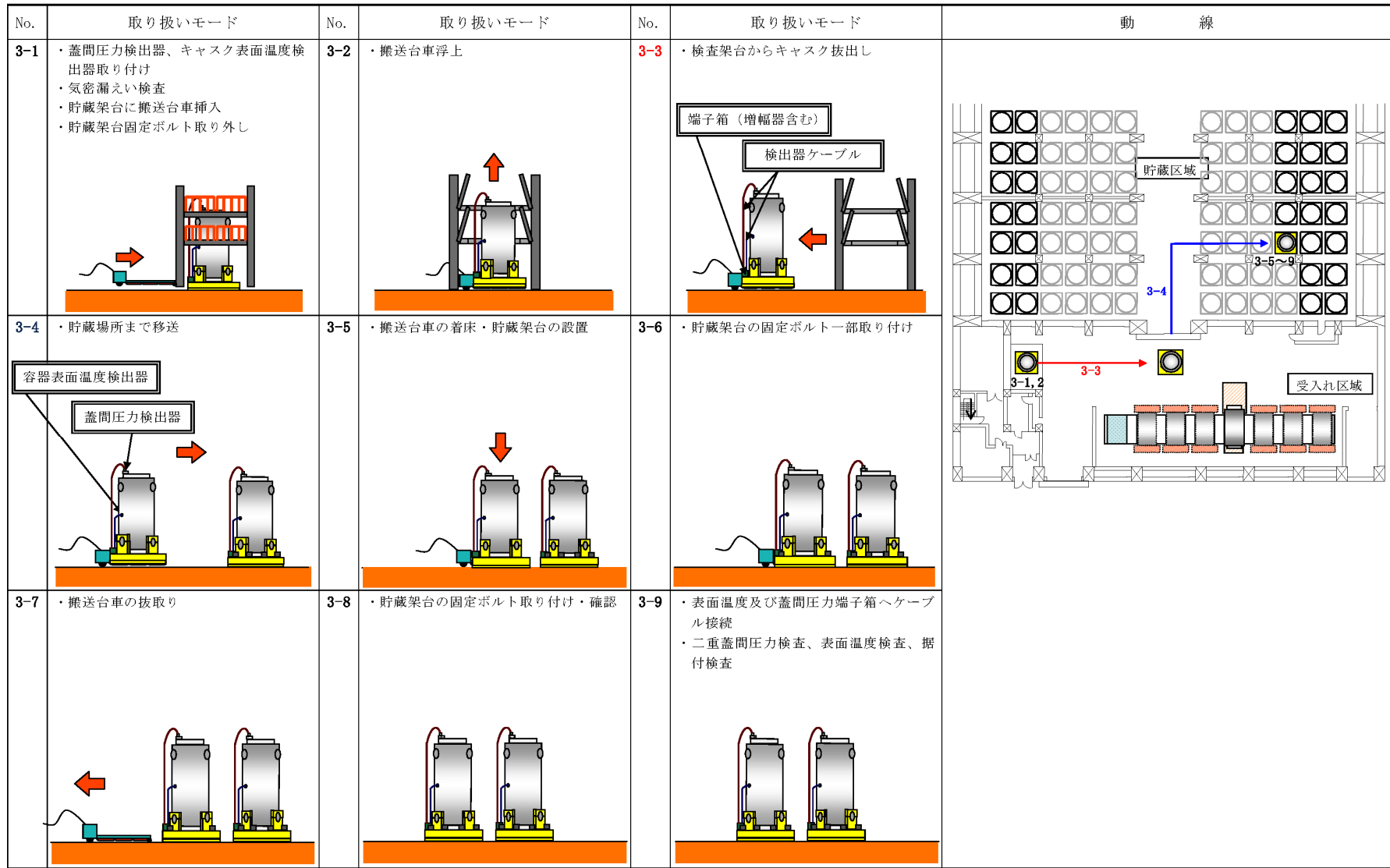
天井クレーン概略図	①主巻フック	②けた, サドル, 走行車輪	③トロリフレーム	④運転室
		<p>(上図はけたの衝突を表す)</p>		
<p>天井クレーン構造及び落下に伴う衝突荷重の掛かり方を踏まえ、北側側壁の破損に伴う落下による衝突箇所として以下を考慮する。</p> <p>①主巻フック ②けた, サドル, 走行車輪 ③トロリフレーム ④運転室</p>	<ul style="list-style-type: none"> 金属キャスク受入時の緩衝材取り外し等の作業を行う際に、主巻フックが金属キャスク蓋部の上部に接近することから、主巻フックの落下を仮定する。 主巻フックはワイヤで天井クレーン本体に接続されており、クレーン本体とは固定されていないことから、金属キャスクへの衝突時には単独の衝突を考慮する。 	<ul style="list-style-type: none"> 金属キャスク受入時に天井クレーンが仮置中の金属キャスクの上部を横断することから、天井クレーンの落下を仮定する。 天井クレーンの部品のうちけた, サドル, 走行車輪は互いに固定されており、金属キャスクへの衝突時にはこれらの荷重が同時に加わると考えられることから、けた, サドル, 走行車輪を一体として考慮する。 	<ul style="list-style-type: none"> 金属キャスク受入時の緩衝材取り外し等の作業を行う際に、トロリフレームが金属キャスク蓋部の上部に接近することから、トロリフレームの落下を仮定する。 トロリフレームは、けた上の横行レール上に載っており、クレーン本体とは固定されていないことから、金属キャスクへの衝突時には単独の衝突を考慮する。 	<ul style="list-style-type: none"> けた（西側）の南側下部に運転室が付いており、天井クレーン落下時には突起部として先に衝突する可能性が考えられることから、運転室が天井クレーン本体（けた, サドル, 走行車輪）の荷重を受けて金属キャスク蓋部に衝突する可能性を考慮する。



第4-2-1 図(1) 金属キャスク取扱工程 (金属キャスクの受入れ～金属キャスクの仮置き)



第 4-2-1 図(2) 金属キャスク取扱工程 (緩衝体取り外し～金属キャスクたて起こし～検査架台への移送)



第 4-2-1 図(3) 金属キャスク取扱工程 (検査架台～貯蔵場所への設置)

c. 衝突想定条件の設定

抽出した落下物に対し，金属キャスクの姿勢，受入れ区域内の機器配置及び金属キャスクとの位置関係に基づき，事象の起こりやすさ，落下エネルギー及び他の事象による代表性を踏まえ，①天井クレーンの水平姿勢キャスクへの落下及び②天井スラブの縦姿勢キャスクへの落下を衝突想定条件として設定する。

設定する衝突想定条件を第 4-2-5 表に示す

第 4-2-5 表 設定する衝突想定条件

落下物	落下物概要	金属キャスク姿勢
①天井クレーン (けた+サドル+ 走行車輪)	質量 : 約 128t 落下高さ : 約 5.3m 落下速度 : 約 10.2m/s 落下エネルギー : 約 $6.7 \times 10^6 \text{N}\cdot\text{m}$	水平姿勢 (たて起こし 架台上に仮置きされた金属 キャスク) 緩衝体なし
②天井スラブ (単独)	質量 : 約 30t 落下高さ : 約 16.6m 落下速度 : 約 18.1m/s 落下エネルギー : 約 $4.9 \times 10^6 \text{N}\cdot\text{m}$	縦姿勢 (受入れ区域内の 移送中及び検査架台上の金 属キャスク) 緩衝体なし

d. 津波漂流物による衝突条件との比較

受入れ区域の損傷を仮定することから，津波の水流により貯蔵建屋外から侵入する津波漂流物の金属キャスクへの衝突の可能性についても考慮する。

仮に，貯蔵区域の遮蔽扉が開放された状態で受入れ区域が損傷しても，①損傷した受入れ区域が障壁となること，②貯蔵区域と受入れ区域との境界壁及び貯蔵区域の機器搬出入口は損傷しないこと，③受入れ区域内で比較的大きな機器である仮置架台，たて起こし架台，検査架台は固定されていること，④機器搬出入口の正面に金属キャスクを貯蔵していないことから，衝撃力のある大型の漂流物が貯蔵区域の機器搬出入口から支障なく流入し金属キャスクに衝突する可能性は極めて小さいと考えられるが，ここでは極めて保守的な仮定として大型の津波漂流物が仮想的な大規模津波による水流と同じ速度で移動する場合につき落下物による衝突想定条件と比較する。

大型の津波漂流物として，敷地内及び敷地外における津波漂流物調査

の結果に基づき、質量が最大(約 36t)となるキャスク搬送車両を設定する(別添2参照)。なお、大型の船舶については敷地前面海域では十分に離れた沖合を航行していること等から、考慮すべき漂流物とはならない。

また、仮想的大規模津波による流速は、仮想的大規模津波と等価なモデルによる津波解析の結果、貯蔵建屋周りの流速として最大でも約 10m/s の結果が得られている(別添1参照)ことから 10m/s とする。

これらの仮定に基づき津波漂流物と設定した落下物(天井クレーン及び天井スラブ)による衝突想定条件について質量、速度及び運動エネルギーを比較した結果を第 4-2-6 表に示す。設定した落下物による衝突想定条件は津波漂流物による衝突条件に比べても十分厳しく、津波漂流物による衝突条件は落下物による衝突想定条件に包含される。

同様に、貯蔵区域に設置している貯蔵架台への津波漂流物の影響についても、大型の津波漂流物による衝突を想定する必要はなく有意な荷重は発生しないと考えられ、前述の「4. 金属キャスクの閉じ込め評価 (1) 閉じ込め評価の考え方 e. 金属キャスクの浸水による影響について」に示すとおり、仮想的大規模津波の水流による直接的な荷重は基準地震動による水平方向地震力に包含されるため、貯蔵架台と床の固定状態は維持される。

第 4-2-6 表 津波漂流物による衝突条件と衝突想定条件の比較

品目	津波漂流物	衝突想定条件(落下物)	
	キャスク搬送車両	天井クレーン	天井スラブ
質量	約 36t	約 128t	約 30t
速度	～約 10m/s 仮想的大規模津波と等価なモデルによる津波解析から得られた貯蔵建屋周りの流速	約 10.2m/s 落下高さ約 5.3m の自由落下に基づく速度	約 18.1m/s 落下高さ約 16.6m の自由落下に基づく速度
運動エネルギー	約 $1.8 \times 10^6 \text{N} \cdot \text{m}$	約 $6.7 \times 10^6 \text{N} \cdot \text{m}$	約 $4.9 \times 10^6 \text{N} \cdot \text{m}$

(3) 天井クレーンの水平姿勢キャスクへの落下による影響の評価

(2)にて設定した想定衝突条件のうち、天井クレーンの水平姿勢キャスクへの落下について、金属キャスクの閉じ込め機能への影響を確認するため、衝突時の挙動に基づき保守的に考慮した金属キャスクへの衝突荷重を入力として構造評価を実施し、衝突荷重に対し密封境界部がおおむね弾性範囲内にとどまることを確認する。

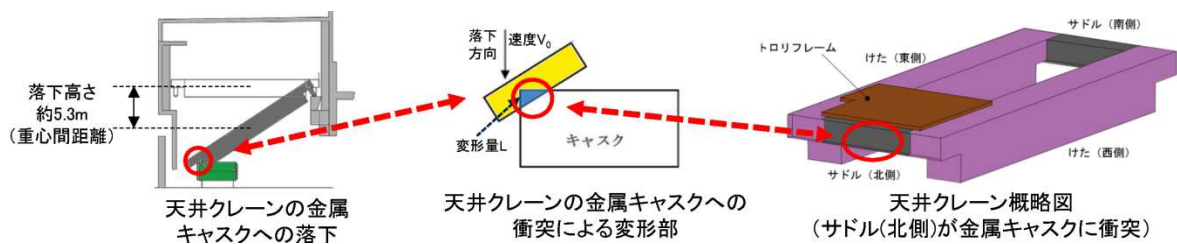
a. 衝突荷重の設定

構造評価の入力条件となる衝突荷重を、工学式に基づき設定する。

天井クレーンの主要部分（けた及びサドル）は鋼板を組み合わせた構造であり、落下して金属キャスクに衝突し衝突荷重を与える際の反作用力により天井クレーンの衝突部位が塑性変形すると考えられることから、天井クレーンの塑性変形に要するエネルギーに基づき衝突荷重を設定する。当該手法は、衝突現象の許認可解析として、衝突評価で用いられている Riera の考え方を取り入れた竜巻飛来物の衝突評価で実績のある手法である。

天井クレーンの金属キャスクへの衝突による変形を第 4-3-1 図に示す。天井クレーンは北側と南側のクレーンガーダで支持されているが、受入れ区域外壁の損傷に伴い北側の支持を失って落下し、直下の金属キャスクの蓋部に衝突する。最も衝突荷重の観点から厳しくなるよう、天井クレーンは金属キャスクの直上に位置し、北側のサドルが金属キャスクの蓋部に衝突して塑性変形するものとする。

天井クレーンの落下エネルギーと塑性変形に要するエネルギーが等しくなるよう変形量(L)を算出する。変形量を算出する上では、衝突荷重を保守的に設定するため、天井クレーンの落下エネルギーは実際には金属キャスクの塑性変形や落下物の衝突後の運動エネルギーにも変換されるが、すべて天井クレーンの塑性変形で吸収されるものとする。

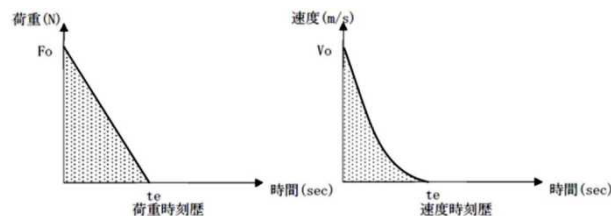


第 4-3-1 図 天井クレーンの金属キャスクへの衝突による変形 (模式図)

衝突時の荷重及び速度の模式図を第 4-3-2 図に示す。荷重作用時間を短めに設定する方が衝突荷重を厳しく見積もるため、衝突時の減速を考慮せず、荷重作用時間(t_e)を変形量/初期速度(L/V_0)で算出する。

落下物の荷重時刻歴を第 4-3-2 図の左側に示す三角形状とし、時刻 t_e (荷重作用時間) で 0 になると仮定すると下式が成り立つため、最大荷重(F_0)を m, V_0, t_e から算出する。

$$m \cdot V_0 = \int_0^{t_e} F(t) dt = \int_0^{t_e} F_0 \{1 - (t/t_e)\} dt = F_0 \cdot t_e / 2$$



第 4-3-2 図 衝突時の荷重及び速度 (模式図)

天井クレーン落下時の荷重設定の前提条件を第 4-3-1 表に、荷重設定の結果を第 4-3-2 表にそれぞれ示す。構造評価の入力条件に使用する最大荷重(F_0)は約 48MN となる。

第 4-3-1 表 天井クレーン落下時の荷重設定の前提条件

項目	数値	備考
落下高さ	5.3m	天井クレーンの通常時及び金属キャスクへの衝突時の重心高さの差
落下物の衝突速度 (V_0)	10.2m/s	天井クレーンの落下高さ (上記) に基づく位置エネルギーを運動エネルギーと等価として算出した速度
落下物の質量 (m)	128t	天井クレーンの質量
衝突部の形状	サドル部の形状を考慮	鋼板を組み合わせ (断面幅約 1.2m×高さ約 1.0m) 補強用のリブを入れた構造
単位体積当たりの塑性エネルギー	$5.03 \times 10^8 \text{ J/m}^3$	サドル部材の流動応力 (503MPa : 降伏応力と引張強さの平均) に基づく サドル部材の降伏応力 (450MPa) と引張強さ (555MPa) は実測値を使用 (材料強度が高い方が衝突荷重が大きくなるため, 規格値ではなくミルシートの値を使用)

第 4-3-2 表 天井クレーン落下時の荷重設定の結果

項目	数値	備考
落下エネルギー	約 $7.3 \times 10^6 \text{ J}$	天井クレーンの落下高さ (5.3m) + 変形量 (下記) に相当
変形量 (L)	約 0.55m	単位体積当たりの塑性エネルギー×変形部の体積 (変形量に基づく) が落下エネルギー (上記) と等しくなるような変形量 (高さ)
荷重作用時間 (t_e)	約 0.054s	変形量 (L) / 衝突速度 (V_0)
落下時の運動量	約 $1.3 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{s}$	落下物の質量 (m) × 衝突速度 (V_0)
最大荷重 (F_0)	約 48MN	前頁末の算出式に基づき, 落下物の質量 (m), 衝突速度 (V_0), 荷重作用時間 (t_e) を用いて $F_0 = 2mV_0/t_e$ として算出

b. 構造評価条件

天井クレーン落下時の衝突荷重を金属キャスクの蓋部に与えた状態を模擬して金属キャスクの構造評価を行う。

解析コードは構造解析用汎用コード ABAQUS を用いる。

a. で設定した衝突荷重を，密封境界部に作用する荷重が大きくなるよう金属キャスクの一次蓋側面に相当する範囲に与える。

金属キャスクはたて起こし架台上の水平姿勢の全体形状を模擬し，評価結果を厳しくするよう，支持部（たて起こし架台）の変形及び三次蓋による荷重の抑制を無視する。

構造評価の条件を第 4-3-3 表に示す。

第 4-3-3 表 天井クレーン落下時の水平姿勢キャスク構造評価の条件

項目	解析条件	備考
解析コード	ABAQUS (構造解析用汎用コード)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 米国 HKS 社 (現ダッソーシステムズ社) で開発された有限要素法に基づく構造解析用汎用コード ・ 応力解析, 熱応力解析及び伝播解析などを行うことができ, 特に非線形解析が容易に行えることが特徴 ・ 金属キャスクの応力解析, 発電用原子炉の応力解析 (原子炉容器, 炉心支持構造物, 蒸気発生器等) で多くの実績
衝突荷重の与え方	<ul style="list-style-type: none"> ・ 荷重 48MN ・ 荷重範囲は, 軸方向は一次蓋側面に相当する範囲, 周方向は金属キャスク直径の約 1/2 の範囲として一様分布を与える 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 荷重の値 (48MN) は衝突荷重の設定結果に基づく ・ 密封境界部 (一次蓋, 一次蓋フランジ及び一次蓋締付ボルト) に作用する荷重が大きくなるよう, 荷重範囲及び荷重分布を設定 (下図参照) <div data-bbox="906 891 1294 1032" style="text-align: center;"> </div> <p style="text-align: center;">衝突荷重分布の与え方 (模式図)</p>
金属キャスクのモデル	<ul style="list-style-type: none"> ・ 金属キャスクは全体形状を模擬 ・ 金属キャスクはたて起こし架台上を想定した水平姿勢 ・ 金属キャスクの支持部 (たて起こし架台) はモデル化せず, トラニオンを固定 ・ 三次蓋がない状態を仮定 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 金属キャスクに緩衝体に取り付けられていない, たて起こし架台上を想定 (仮置架台上の金属キャスクには緩衝体に取り付けられており, 落下物の衝突に対しても蓋部を保護する上で相当の耐性を有すると考えられる) ・ 天井クレーンの衝突時の金属キャスクへの衝突荷重を大きくする観点から, 支持部 (たて起こし架台) の変形は考慮しない ・ たて起こし架台上では三次蓋が取り付けられているが, 三次蓋及び三次蓋締付ボルトにより密封境界部 (一次蓋) に作用する荷重が抑制されるため, 保守的に抑制効果を見捨てる

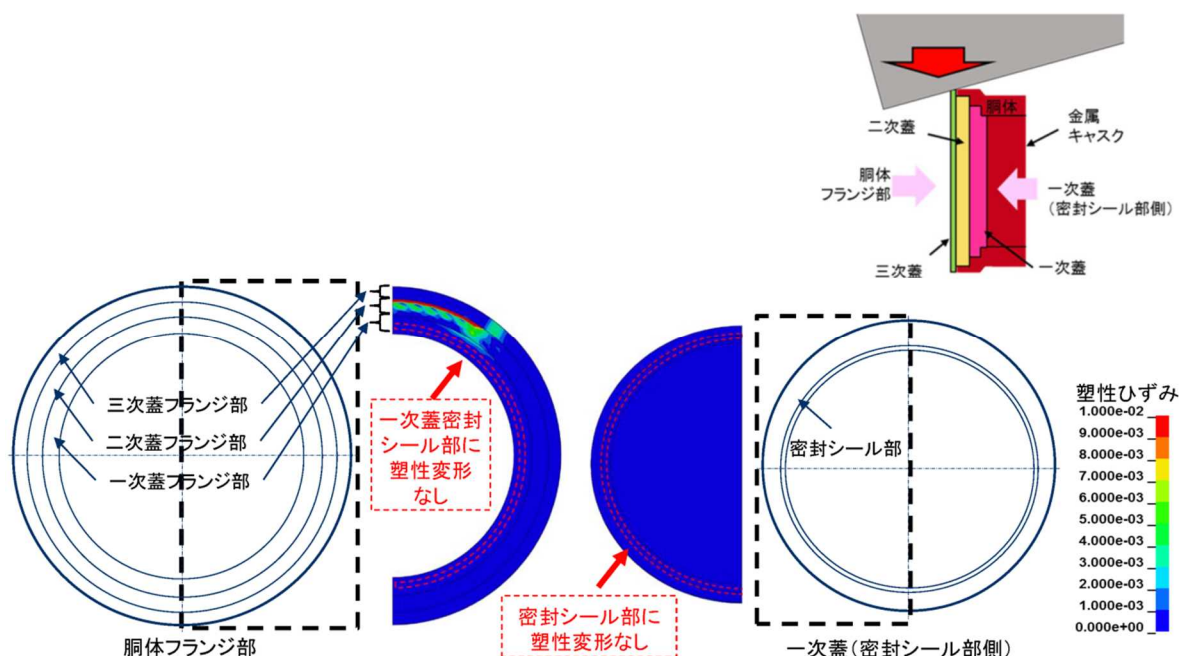
c. 評価結果

評価結果を第 4-3-3 図及び第 4-3-4 表に示す。

ひずみに関しては、第 4-3-3 図に示すとおり、胴体の二次蓋フランジ部、一次蓋フランジ部の外縁等の一部塑性変形が見られるが、一次蓋密封シール部に塑性変形は見られず、また一次蓋の密封シール部にも塑性変形は見られない。

また、応力に関しては、第 4-3-4 表に示すとおり、一次蓋用締付ボルトのボルト応力は降伏応力を超えず弾性範囲に収まっている。

以上のことから、天井クレーン落下時の水平姿勢キャスクの密封境界部はおおむね弾性範囲にとどまることを確認した。



第 4-3-3 図 天井クレーン落下時の水平姿勢キャスクのひずみ評価結果

第 4-3-4 表 天井クレーン落下時の水平姿勢キャスクの応力評価結果

判定項目		評価結果	判定基準
ボルト応力	一次蓋締付ボルト	○ (約 735MPa)	設計降伏点 (Sy 値) 一次蓋締付ボルト 831MPa

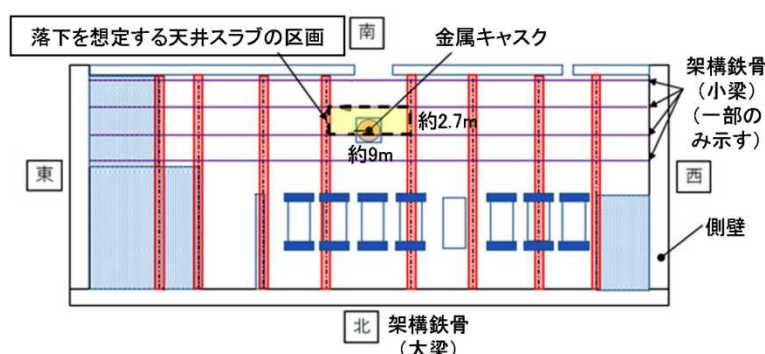
(4) 天井スラブの縦姿勢キャスクへの落下による影響の評価

(2)にて設定した想定衝突条件のうち、天井スラブの縦姿勢キャスクへの落下について、金属キャスクの閉じ込め機能への影響を確認するため、衝突時の挙動に基づき保守的に考慮した金属キャスクへの衝突荷重を入力として構造評価を実施し、衝突荷重に対し密封境界部がおおむね弾性範囲内にとどまることを確認する。

a. 衝突荷重の設定

構造評価の入力条件となる衝突荷重を、工学式に基づき設定する。

落下を想定する天井スラブを第4-4-1図に示す。架構鉄骨の大梁と小梁で仕切られた1区画の落下を想定することとし、受入れ区域全体で最大となる区画の天井スラブを想定する。

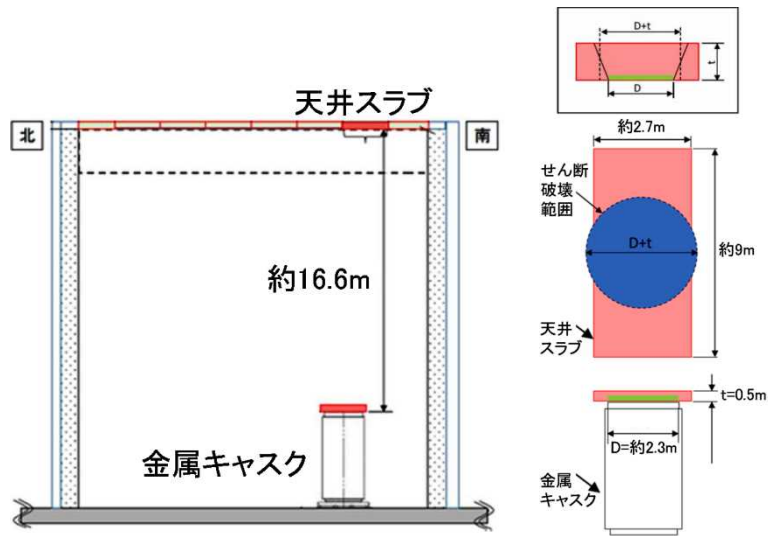


第4-4-1図 落下を想定する天井スラブ

天井スラブが落下して金属キャスクに衝突した場合、天井スラブに対し金属キャスクは剛であり、落下して金属キャスクに衝突し衝突荷重を与える際の反作用力により天井スラブが破壊すると考えられることから、天井スラブが金属キャスク頂部に衝突してせん断破壊する際の応力に基づき衝突荷重を設定する。

天井スラブの金属キャスクへの当たり方としては、衝突荷重が厳しくなるよう、第4-4-2図に示す天井スラブが受入れ区域の天井と平行に落下して金属キャスク頂部に衝突し、フランジ部の外周でせん断破壊して打ち抜かれる場合を想定する。なお、天井スラブが二次蓋中央部に衝突する場合、二次蓋は一次蓋に接触しないため密封境界部への影響は小さくなり、また天井スラブが天井に鉛直に落下する場合は平行に落下する

場合に比べ荷重は小さくなると考えられる。



第 4-4-2 図 天井スラブの金属キャスクへの衝突（模式図）

天井スラブ落下時の荷重設定の前提条件を第 4-4-1 表に、荷重設定の結果を第 4-4-2 表にそれぞれ示す。構造評価の入力条件に使用する最大荷重(F_0)は約 11MN となる。

第 4-4-1 表 天井スラブ落下時の荷重設定の前提条件

項目	数値	備考
落下高さ	16.6m	天井スラブの通常時及び金属キャスクへの衝突時の重心高さの差
落下物の衝突速度	18.1m/s	天井スラブの落下高さ（上記）に基づく位置エネルギーを運動エネルギーと等価として算出した速度
落下物の質量	30t	受入れ区域全体で最大の区画となる天井スラブの寸法（東西約 9m×南北約 2.7m×厚さ 0.5m）及びコンクリート密度(2.45t/m ³)に基づき設定
金属キャスクフランジ部上面の直径 (D)	2.3m	—
天井スラブ厚さ(t)	0.5m	—
天井スラブ強度 (σ)	2.4MPa	金属キャスクに与える荷重が大きくなるよう、原子力発電所耐震設計技術規程 (JEAC4601-2008)の許容せん断応力度（供用状態 D）(=1.5Fc/30)に従って設定 (Fc は実強度 (=1.4×33MPa))

第 4-4-2 表 天井スラブ落下時の荷重設定の結果

項目	数値	備考
せん断荷重 (F _τ)	約 11MN	$F_{\tau} = \pi \times (D+t) \times t \times \sigma$ により算出 D：金属キャスクフランジ部上面の直径， t：天井スラブ厚さ，σ：天井スラブ強度

b. 構造評価条件

天井スラブ落下時の衝突荷重を金属キャスクの蓋部に与えた状態を模擬して金属キャスクの構造評価を行う。

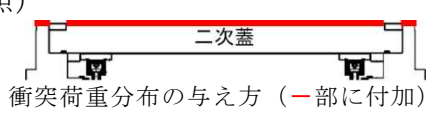
解析コードは(3)の天井クレーン落下時の構造評価と同様に、構造解析用汎用コード ABAQUS を用いる。

a. で設定した衝突荷重を、金属キャスクの上面に相当する二次蓋及び二次蓋フランジ部に与える。

金属キャスクは貯蔵架台上の縦姿勢の全体形状を模擬し、評価結果を厳しくするよう、支持部（貯蔵架台）の変形を無視し、貯蔵区域への移送時に当たる三次蓋がない状態で評価する。

構造評価の条件を第 4-3-3 表に示す。

第 4-4-3 表 天井スラブ落下時の縦姿勢キャスク構造評価の条件

項目	解析条件	備考
解析コード	ABAQUS（構造解析用汎用コード）	<ul style="list-style-type: none"> ・ 米国 HKS 社（現ダッソーシステムズ社）で開発された有限要素法に基づく構造解析用汎用コード ・ 応力解析，熱応力解析及び伝播解析などを行うことができ，特に非線形解析が容易に行えることが特徴 ・ 金属キャスクの応力解析，発電用原子炉の応力解析（原子炉容器，炉心支持構造物，蒸気発生器等）で多くの実績
衝突荷重の与え方	<ul style="list-style-type: none"> ・ 荷重 11MN ・ 荷重範囲は二次蓋及び二次蓋フランジ部として一様分布を与える 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 荷重の値(11MN)は衝突荷重の設定結果に基づく ・ 縦姿勢の金属キャスクへの衝突を考慮し，荷重範囲を金属キャスク頂部とする（下図参照） 
金属キャスクのモデル	<ul style="list-style-type: none"> ・ 金属キャスクは全体形状を模擬 ・ 金属キャスクは貯蔵架台上を想定した縦姿勢 ・ 金属キャスクの支持部（貯蔵架台）はモデル化せず底部を固定 ・ 三次蓋がない状態を考慮 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 縦姿勢の金属キャスクは貯蔵架台上にあるが，衝突時の金属キャスクへの衝突荷重を大きくする観点から，支持部（貯蔵架台）の変形は考慮しない ・ 取扱工程上三次蓋がある状態（検査架台まで）とない状態（貯蔵区域への移送時）があるが，密封境界部（一次蓋）への荷重が厳しくなる後者の場合で評価

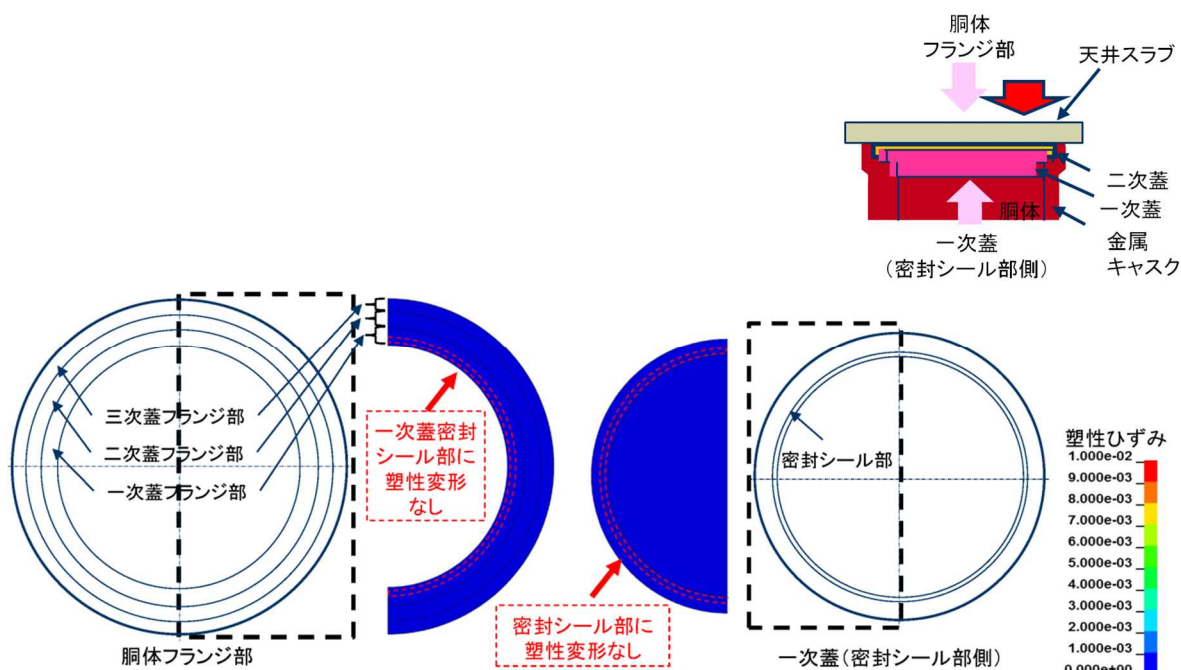
c. 評価結果

評価結果を表及び第 4-4-3 図及び第 4-4-4 表に示す。

ひずみに関しては、第 4-4-3 図に示すとおり、胴体の一次蓋密封シール部及び一次蓋の密封シール部に塑性変形は見られない。

また、応力に関しては、第 4-4-4 表に示すとおり、一次蓋用締付ボルトのボルト応力は降伏応力を超えず弾性範囲に収まっている。

以上のことから、天井スラブ落下時の水平姿勢キャスクの密封境界部はおおむね弾性範囲にとどまることを確認した。



第 4-4-3 図 天井スラブ落下時の縦姿勢キャスクのひずみ評価結果

第 4-4-4 表 天井スラブ落下時の縦姿勢キャスクの応力評価結果

判定項目		評価結果	判定基準
ボルト応力	一次蓋締付ボルト	○ (約 263MPa)	設計降伏点 (Sy 値) 一次蓋締付ボルト 831MPa

(5) 閉じ込め機能の低下による影響

金属キャスクへの落下物や津波漂流物の衝突により漏えいに至るためには、①落下物や津波漂流物の衝突により金属キャスク内の多数の燃料棒が破損し金属キャスク内が正圧となる、②衝突荷重により一次蓋に大きな変位が発生し蓋部の漏えい率が増加する及び③二次蓋及び三次蓋の閉じ込め機能が喪失する、の複数の条件が重畳するの必要があり、発生の可能性は極めて小さいと考えられる。

ここでは金属キャスクの閉じ込め機能の低下による漏えいの発生を仮定するため保守的な条件を重畳させてブルームによる線量を評価し、敷地境界外における公衆の実効線量が年間 1mSv に比べ極めて小さいことを確認する。

a. 核分裂生成物の大気中への放出量

(a) 破損燃料棒の評価

金属キャスクへ落下物や津波漂流物が衝突し、収納された燃料集合体の燃料棒から気体状の核分裂生成物が金属キャスク内に放出されるものとする。

使用済燃料は金属キャスクの内部にあるため落下物や津波漂流物の荷重が直接作用しないことから、落下物や津波漂流物の衝突により多数の燃料棒が破損することは考え難いが、保守的に金属キャスク 1 基分の燃料集合体全数(69 体)の燃料棒全数が破損すると仮定する。

(b) 核分裂生成物の移行と放出量の評価

金属キャスク内が正圧となり、落下物や津波漂流物の衝突により一次蓋のシール部から気体状の核分裂生成物が漏えいした状態を仮定する。

核分裂生成物の移行と放出量の評価は、発電炉の原子炉設置許可申請書添付書類十における「燃料集合体の落下」等の評価と同様に、燃料棒ギャップ内の希ガス及びよう素を対象として評価を行うが、金属キャスクに収納される燃料が長期の冷却期間を経過していることを踏まえ、長半減期核種として希ガスについては Kr-85 を、よう素については I-129 をそれぞれ考慮することとし、次の仮定に基づいて行う。

- i. 金属キャスクに収納される燃料の核分裂生成物量は、収納燃料条件に基づき最も厳しい条件である平均燃焼度 34GWd/t、冷却期間 18 年とする。
- ii. 燃料棒ギャップ内の核分裂生成物の量は、発電炉の原子炉停止後の時間が経過した燃料が破損した場合の評価と同様に、燃料棒内の全蓄積量に対して 30%とする。
- iii. 金属キャスクの一次蓋からの漏えい率は、落下物や津波漂流物の蓋部への衝突による横ずれ量として金属キャスクの構造に基づく最大値を考慮し、実験的知見に基づき保守的に $1 \times 10^{-4} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ とし、金属キャスクの内圧及び温度については初期状態に対し燃料棒からの核分裂生成物ガスの放出による熱伝導低下と圧力上昇を考慮する。なお、時間の経過による漏えい率の回復は考慮しない。
- iv. 金属キャスクの一次蓋から漏えいした核分裂生成物は大気中へ放出されるものとし、三次蓋及び二次蓋による放出の抑制効果は保守的に考慮せず、貯蔵建屋内の減衰効果についても考慮しない。
核分裂生成物放出量の評価条件を第 4-5-1 表に示す。

(c) 評価結果

上記の解析条件に基づいて計算した核分裂生成物の大気中への放出量は第 4-5-2 表のとおりである。

第 4-5-1 表 核分裂生成物放出量の評価条件

事象	金属キャスクへ落下物や津波漂流物が衝突し, 収納された燃料集合体の燃料棒から気体状の核分裂生成物が金属キャスク内に放出 金属キャスク内が正圧となり, 落下物や津波漂流物の衝突により一次蓋のシール部から気体状の核分裂生成物が漏えいした状態を仮定
評価対象核種	希ガス (Kr-85) 及びよう素 (I-129) (長期冷却後の燃料であることを考慮し, 長半減期の気体状核種を選定)
核分裂生成物の生成量	新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料 燃焼度 34GWd/t (収納燃料条件 (平均燃焼度)) 冷却期間 18 年 (収納燃料条件)
破損燃料体数	金属キャスク 1 基分の燃料集合体全数 (69 体) の燃料棒全数の破損を仮定
燃料棒ギャップへの核分裂生成物移行割合	30% (同種の評価で長半減期の気体状核種に適用されている値)
金属キャスク内に放出される核分裂生成物量	希ガス (Kr-85) : 約 3.8×10^{14} Bq よう素 (I-129) : 約 4.4×10^9 Bq (核分裂生成物の生成量×破損燃料体数×燃料棒ギャップへの核分裂生成物移行割合)
金属キャスクからの漏えい量	金属キャスクからの漏えい率 : 1×10^{-4} Pa・m ³ /s ・ 落下物や津波漂流物の蓋部への衝突による横ずれ量として金属キャスクの構造に基づく最大値を考慮し, 実験的知見に基づき保守的に設定 (別添 6 参照) ・ 横ずれ発生後, 時間の経過による漏えい率の回復は考慮しない 金属キャスクの内圧及び温度: 初期状態に対し燃料棒からの核分裂生成物ガスの放出による熱伝導低下と圧力上昇を考慮 ・ 設定した漏えい率に相当する漏えい孔径 : 約 1.3×10^{-5} m ^{*1} ・ 漏えい孔長 : 約 4.6×10^{-3} m ・ 一次蓋からのガス漏えい率 ^{*2} (標準状態 : 25℃, 1 気圧) : 約 8.0×10^{-10} m ³ /s 三次蓋及び二次蓋による放出の抑制効果は保守的に考慮しない 貯蔵建屋内の減衰効果は考慮しない
放出期間	3 ヶ月 (対応措置ないし時間の経過による漏えい率の回復により, 漏えいは抑制されるものとする)

*1) 使用済燃料貯蔵施設 (中間貯蔵施設) に係る技術検討報告書 (資源エネルギー庁, H12.12) に基づき算出

*2) 放出期間 (3 ヶ月) の平均。なおこの期間内のガス漏えい率の変動は 1%未満

第 4-5-2 表 核分裂生成物放出量の評価結果

Kr-85	約 3.3×10^{11} Bq
I-129	約 3.8×10^6 Bq

b. 線量評価

(a) 評価前提

実効線量の計算は、発電炉の原子炉設置許可申請書添付書類十における評価と同様に行う。線量の評価に用いる相対濃度 (χ/Q) 及び相対線量 (D/Q) は、気象条件については保守的な評価結果となるような条件を設定して、気象指針に示された方法に従って求めたものを用いる。評価に使用する相対濃度 (χ/Q) 及び相対線量 (D/Q) を第 4-5-3 表に示す。

(b) 評価方法

敷地境界外における実効線量は、発電炉の原子炉設置許可申請書添付書類十における評価と同様に計算する。ただし、よう素の内部被ばくによる実効線量は、呼吸率について放出期間が長いことを考慮して 1 日平均の値である $5.16\text{m}^3/\text{d}$ を用い、I-129 を 1Bq 吸入した場合の小児の実効線量を $2.0 \times 10^{-7}\text{Sv/Bq}$ として求める。

線量の評価条件を第 4-5-3 表に示す。

(c) 評価結果

上記の評価方法に基づき敷地境界外の実効線量を評価した結果を第 4-5-4 表に示す。敷地境界外における公衆の実効線量は約 $2.2 \times 10^{-4}\text{mSv}$ であり、遮蔽機能の維持の確認に係る実効線量である年間 1mSv と比べ極めて小さく無視し得る程度である。

第 4-5-3 表 線量評価条件

<p>拡散条件</p>	<p>相対線量(D/Q)及び相対濃度(χ/Q)を、以下の条件に基づき設定 放出箇所：地上放出 気象条件：風向固定，風速 1m/s，大気安定度 F（評価結果が保守的となる条件） 放出時間：長時間放出（一次蓋部からの緩慢な漏えいであることを考慮） 建屋影響：非考慮 敷地境界までの距離：150m（受入れ区域北側～北側敷地境界）</p>
<p>線量評価式</p>	<p>外部被ばく(Kr-85)による実効線量(Sv)：$Hex=K \times D/Q \times Qout$ K：空気カーマから実効線量への換算係数(1Sv/Gy) D/Q：相対線量($1.6 \times 10^{-17} Gy/Bq$) Qout：金属キャスクからの漏えい放射エネルギー(γ線実効エネルギー 0.5MeV 換算値。Kr-85 の γ線実効エネルギーは 0.0022MeV) 内部被ばく(I-129)による実効線量(Sv)：$Hin=R \times H \times \chi/Q \times Qout$ R：呼吸率($5.16m^3/d$：放出期間が長いことを考慮し，小児 1日平均) H：実効線量への換算係数($2.0 \times 10^{-7} Sv/Bq$：小児) χ/Q：相対濃度($4.2 \times 10^{-3} s/m^3$) Qout：金属キャスクからの漏えい放射エネルギー(Bq)</p>

第 4-5-4 表 線量評価結果

<p>外部被ばく(Kr-85)による実効線量</p>	<p>約 $2.4 \times 10^{-5} mSv$</p>
<p>内部被ばく(I-129)による実効線量</p>	<p>約 $2.0 \times 10^{-4} mSv$</p>
<p>実効線量合計</p>	<p>約 $2.2 \times 10^{-4} mSv$</p>

(6) 結論

仮想的な大規模津波に伴う波力による受入れ区域の損傷を仮定し，かつ受入れ区域に金属キャスクが仮置きされている一時的な状態にて落下物や津波漂流物の衝突を考慮しても，金属キャスクの密封境界部がおおむね弾性範囲内にとどまり，また落下物や津波漂流物の衝突に伴う閉じ込め機能の低下に燃料棒全数の破損を重畳させて金属キャスクからの漏えいを仮定しても，敷地境界外における公衆の実効線量が年間 1mSv に比べ極めて小さく無視できる程度であり，使用済燃料貯蔵施設の閉じ込め機能が維持されることを確認した。

5. 使用済燃料貯蔵施設の遮蔽評価

受入れ区域の損傷及び金属キャスクへの落下物や津波漂流物の衝突により遮蔽機能が喪失するとともに、貯蔵区域の遮蔽扉が閉鎖できない状態を仮定して線量を評価し、敷地境界外における公衆の実効線量が遮蔽機能の回復を考慮して年間 1mSv を超えないことを確認する。

(1) 遮蔽評価の条件

線量の評価は、「事業許可基準規則への適合性について(第四条 遮蔽等)」の「使用済燃料貯蔵建屋の遮蔽設計」における評価と同様の手法に基づきつつ、本評価の目的及び条件を踏まえた適切な条件を反映して行う。

a. 貯蔵区域の金属キャスクの線源条件については、異常事象時の評価であることから、貯蔵建屋の遮蔽設計評価上の保守的な条件とは異なり、より現実的な条件として金属キャスクの遮蔽評価結果と同等になるよう設定する。貯蔵建屋の遮蔽設計評価との比較を第 5-1 表に示す。

第 5-1 表 貯蔵区域の金属キャスクの線源条件の比較

	今回の評価	(参考) 貯蔵建屋の遮蔽設計評価
線源	金属キャスク遮蔽評価結果 (表面から 1m 離れた位置における線量当量率が中性子 26.2 μ Sv/h, γ 線 51.7 μ Sv/h) と同等になるように設定	金属キャスク表面から 1m 離れた位置における線量当量率が 100 μ Sv/h となるように規格化
評価線質	金属キャスク遮蔽評価結果に基づく中性子及び γ 線の線質を設定	中性子 100%とした場合、 γ 線 100%とした場合のそれぞれを評価し、保守的な評価結果を使用
中性子及び γ 線の表面エネルギースペクトル	同右	コンクリートの透過率が高い包絡スペクトルを設定

b. 受入れ区域の金属キャスクの基数は最大となる 8 基とし、線源条件については、金属キャスクの中性子遮蔽材の一部が損傷するため、金属キャスクが健全な場合の線量と中性子遮蔽材損傷部からの線量のそれぞれを算出し合算することとし、貯蔵区域の金属キャスクの線源条件と同様に、

より現実的な条件として金属キャスクの遮蔽評価結果と同等になるよう設定する。貯蔵建屋の遮蔽設計評価との比較を第5-2表に示す。

第5-2表 受入れ区域の金属キャスクの線源条件の比較

	今回の評価	(参考) 貯蔵建屋の遮蔽設計評価
線源	金属キャスク遮蔽評価結果における金属キャスク表面線束の積算値を設定 (金属キャスクの中性子遮蔽材損傷部については、本体胴表面の線束が損傷部から生じているものとして設定)	金属キャスク表面から1m離れた位置における線量当量率が $100\mu\text{Sv/h}$ となるように規格化
評価線質	金属キャスク遮蔽評価結果に基づく中性子及び γ 線の線質を設定	中性子100%とした場合、 γ 線100%とした場合のそれぞれを評価し、保守的な評価結果を使用
中性子及び γ 線の表面エネルギースペクトル	金属キャスク遮蔽評価結果に基づく中性子及び γ 線のスペクトルを設定	コンクリートの透過率が高い包絡スペクトルを設定

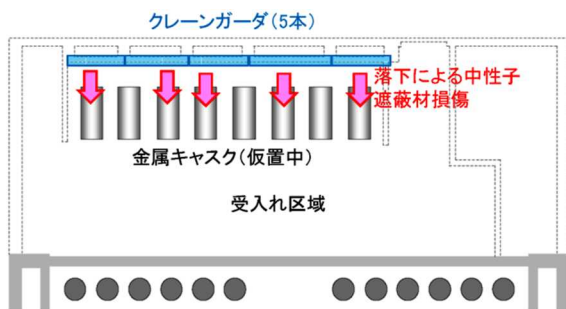
c. 金属キャスクの状態（受入れ区域の金属キャスクの中性子遮蔽材損傷部）については、受入れ区域の損傷に伴う落下物が金属キャスクに衝突して外筒を貫通し、中性子遮蔽材が損傷する場合を仮定する。

(a) 外筒を貫通する可能性のある落下物として「4.(2)衝突想定条件の設定」にて抽出した落下物のうち、上面の走行レールの剛性が高く、落下時に反転して水平状態の金属キャスクの側面へ衝突する状況を仮定すると外筒を貫通する可能性が考えられるクレーンガーダを選定する。なお、閉じ込め評価で想定した落下物である天井クレーンについては外筒への衝突で塑性変形し、また天井スラブは外筒への衝突で破壊すると考えられることから、金属キャスクの外筒を貫通する可能性は小さい。

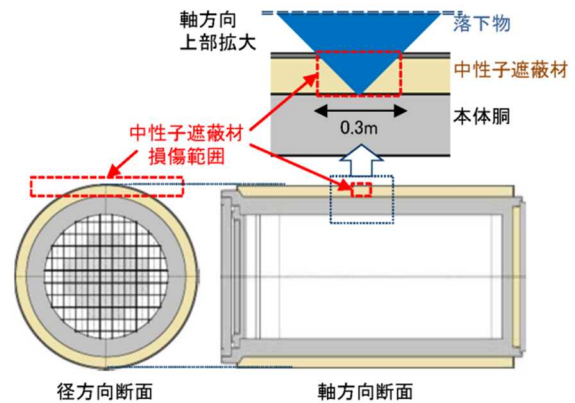
(b) クレーンガーダは金属キャスクの仮置エリア付近に5本あることから、第5-1図に示すように1本が1基の金属キャスクの中性子遮蔽材を損傷させるものとし、クレーンガーダの落下により5基の金属

キャスクの中性子遮蔽材を損傷するものとする。なお、1本のクレーンガーダが同時に複数の金属キャスクに衝突して両者の金属キャスクの中性子遮蔽材が損傷する可能性は小さいと考えられる。

(c) クレーンガーダの衝突により、水平状態の金属キャスクの上部の中性子遮蔽材が、第5-2図に示すように径方向に平行に幅0.3mで損傷するものとする。中性子遮蔽材の損傷状態の前提は、外筒の貫通が起こりうる状況として落下物の角部の衝突を仮定した場合、外筒を貫通した落下物が本体胴で止まるまでに中性子遮蔽材に幅約0.3mの楔形の損傷を発生させると考えられるとする仮定に基づく。開口部の幅は約0.3mであり、遮蔽評価上は保守的に方形の損傷を仮定する。



第5-1図 クレーンガーダの金属キャスクへの落下



第5-2図 落下物による中性子遮蔽材の損傷の仮定

d. 貯蔵建屋の状態は、波圧に対し受入れ区域の北側外壁が許容応力を超えることから、受入れ区域の損傷を仮定し、第5-3図に示すように貯蔵建屋のうち、受入れ区域の外壁（北側、東側及び西側）及び天井の遮蔽機能の喪失を仮定する。なお、受入れ区域の損傷形態を定量的に評価する上での不確かさが大きいいため、相当に保守的と考えられるが、東側及び西側外壁や天井も含めて遮蔽機能が喪失するとともに、貯蔵区域の遮蔽扉が開放された状態で浸水し、津波が引くと同時に機器搬出入口から排水された後も遮蔽扉が閉鎖できない状態を仮定する。なお、遮蔽機能の回復として、受入れ区域の復旧は考慮しないが、金属キャスク損傷部の遮蔽機能の回復（追加遮蔽体の設置とともに、その前段で受入れ区域