

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。

津波に対する設計方針については、事業許可基準規則及び解釈を踏まえて「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」(H31.2.6, 原子力規制庁)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」(R1.8.21, 原子力規制庁)に具体的な審査方針が示されていることから、当該方針に基づき基本的安全機能が維持されることの確認を実施する。

### (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等に対して、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。

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。

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。

#### 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等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。

なお、遮蔽機能の復旧として、受入れ区域の遮蔽機能の復旧は考慮しないが、金属キャスク損傷部の遮蔽機能等の復旧を実施し、線量評価にて考慮する。

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もので、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) 金属キヤ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、建屋損傷に伴う落下物等に対して金属キヤ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、金属キヤスク損傷部の遮蔽性能復旧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。</p> <p>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。</p> <p>【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貯蔵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」(H31.2.6. 原子力規制庁)

\*2) 「リサイクル燃料貯蔵株式会社リサイクル燃料貯蔵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」(R1.8.21. 同上)

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な安全機能が維持されること（閉じ込め機能ではパウンダリの維持等）</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、金属キヤ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ヤ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等に対して、金属キヤ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ヤ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、金属キヤ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、金属キヤスクの密封境界部への衝撃荷重が大きい事象である①天井クレーンの水平姿勢キヤスクへの落下及び②天井スラブの縦姿勢キヤ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ヤスクへの衝撃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. 金属キヤスクの閉じ込め評価】</p> <p>金属キヤ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、工学的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、金属キヤ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ヤスクの拘束条件等を考慮する。</p> <p>【4. 金属キヤスクの閉じ込め評価】</p> <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ヤ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ヤスクの一次蓋からの漏洩率を保守的に設定して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> <p>落下物（クレーンガダ）が金属キヤ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、金属キヤ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>
<p>（緩衝材等の措置無しの場合に適用）</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>評価方法の妥当性</li> </ul>	<p>・横ずれ量の判定基準の妥当性</p>	<p>【4. (5)閉じ込め機能の低下による影響】</p> <p>落下物（クレーンガダ）が金属キヤ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、金属キヤ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)
<p>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>	<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50μSv/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ヤ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等の衝突に伴う金属キヤ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>なお、遮蔽機能の復旧として、受入れ区域の遮蔽機能の復旧は考慮しないが、金属キヤスク損傷部の遮蔽機能等の復旧を実施し、線量評価にて考慮する。</p> <p>【5. 使用済燃料貯蔵施設の遮蔽評価】</p> <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、手続を講じる。</p> <p>【6. 衝撃を受けた金属キヤスクの対策】</p>
<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ヤスクの基本的安全機能を確保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、金属キヤ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>	<p>—</p>	<p>【5. 使用済燃料貯蔵施設の遮蔽評価】</p> <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、手続を講じる。</p> <p>【6. 衝撃を受けた金属キヤスクの対策】</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」(H31.2.6 原子力規制庁) (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

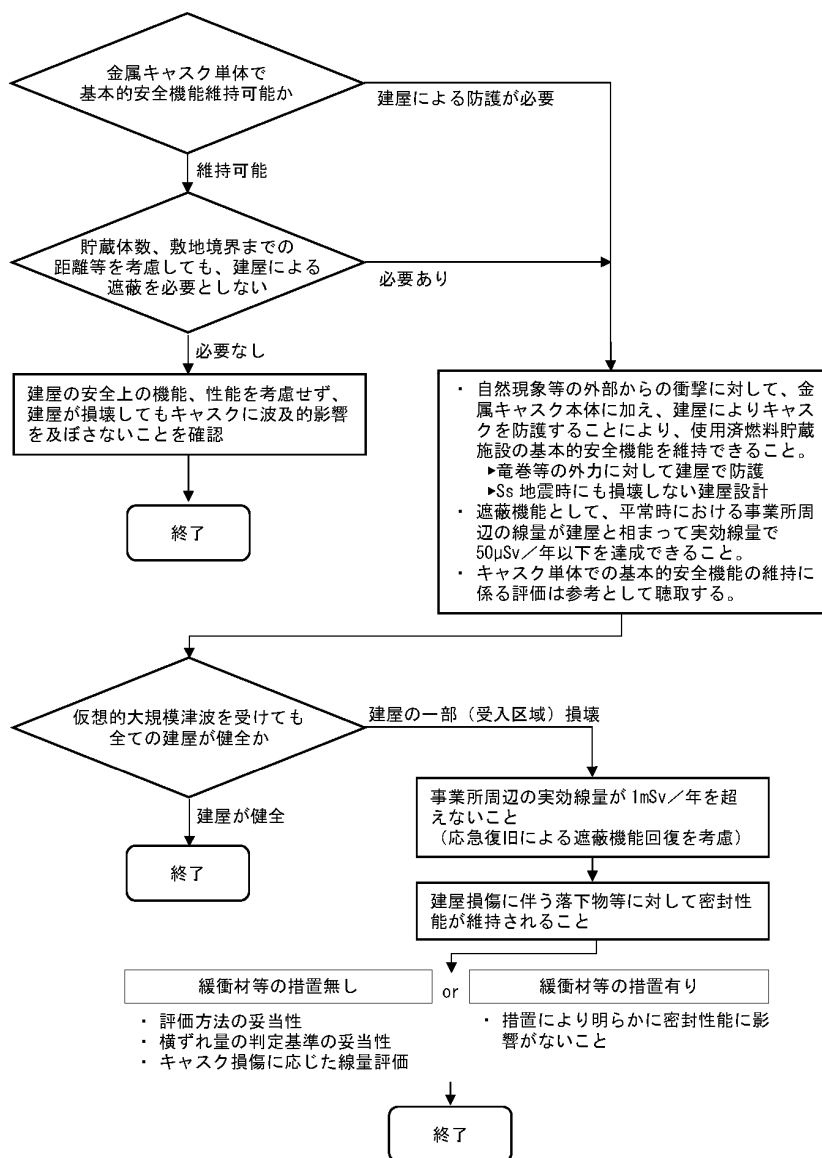
同解釈の適用に当たっては、貯蔵建屋の損傷の有無は、仮想的大規模津波に対して水深係数3を用いた波圧によって評価を求める。貯蔵建屋が損傷した場合の金属キャスクの基本的安全機能の評価については、貯蔵建屋の上部構造物の落下(受入れ区域では天井クレーンの落下等)による衝撃荷重に対して基本的安全機能が維持されること(閉じ込め機能ではバウンダリの維持等)を求め、また、復旧期間を含む1年間の公衆の実効線量が1mSvを超えないことを求める。

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」(R1. 8. 21 原子力規制庁)(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、仮想的な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성에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想定して金属キャスクの基本的安全機能の確認にて考慮する。

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、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等に対して閉じ込め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の衝突については、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、金属キャスクの密封境界部への衝突荷重が大きい事象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、金属キャスクへの落下物等の衝突により漏洩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洩率が増加する、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洩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、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、事業所周辺の公衆に放射線障害を及ぼさないことを確認する。

受入れ区域の損傷に伴い外壁及び天井が完全に喪失する状態を仮定し、受入れ区域の損傷による落下物等の衝突に伴う金属キャスクの遮蔽機能の低下を考慮して、金属キャスクからの直接線及びスカイシャイン線による線量を評価する。

線量評価では、敷地境界外における公衆の実効線量が遮蔽機能の復旧を考慮して年間 1mSv を超えないことを確認する。

#### 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じる。

#### 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

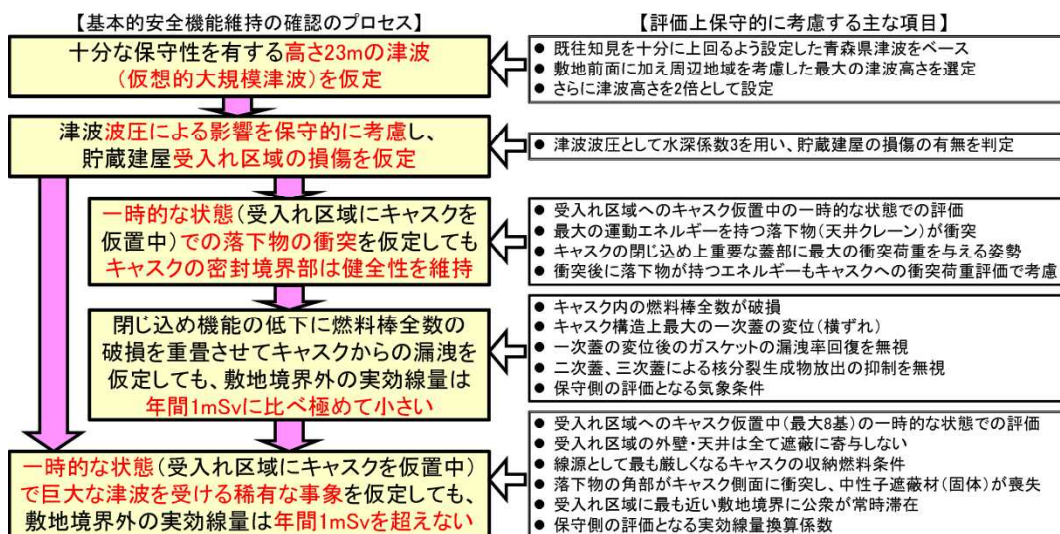
た金属キャスクに係る対応以外にも対策を講じる。

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じるとともに、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じる。

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等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じる。

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。

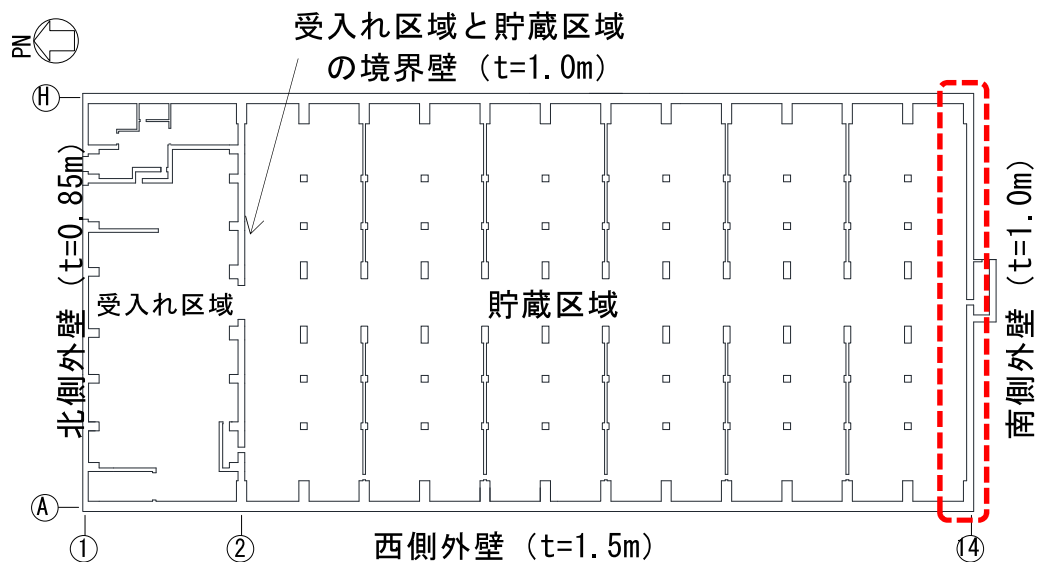
なお、受入れ区域については、波圧による外壁の応力が許容応力を超えることから、受入れ区域の損傷を想定して金属キャスクの基本的安全機能の確認を行う。

#### (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、南側外壁の壁厚(1.0m)が東側・西側外壁の壁厚(1.5m)に比べて薄いことから、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」(H23.12.2) 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. 貯蔵区域のうち、壁厚の薄い南側外壁の健全性の確認
- ii. 貯蔵区域の遮蔽扉（2ヶ所）の健全性の確認
- 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

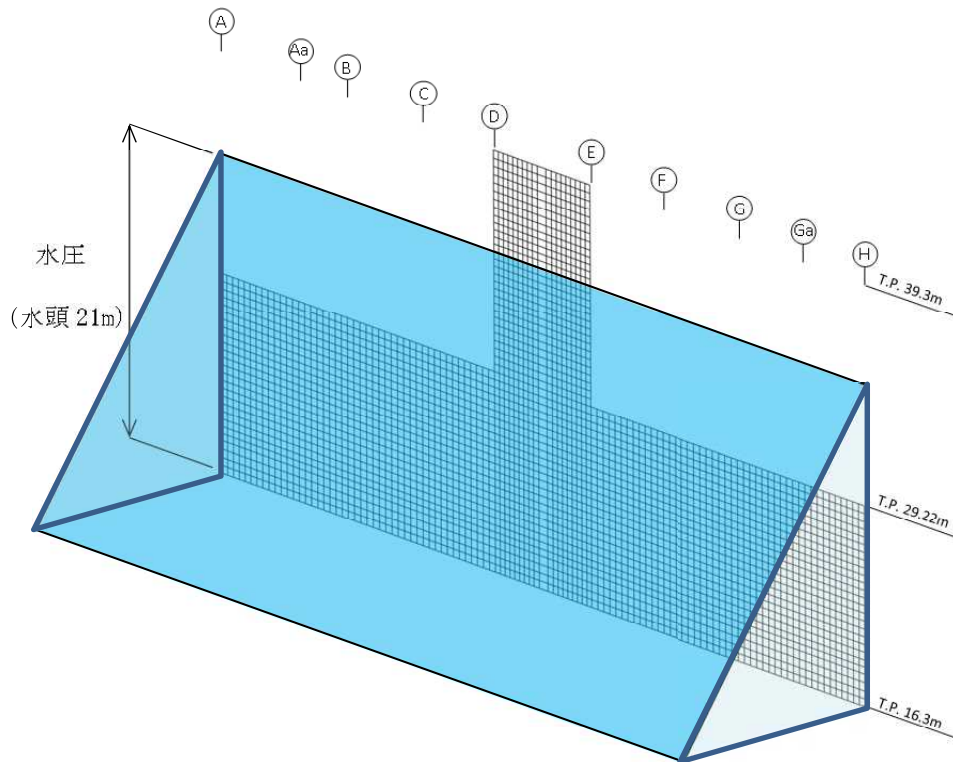
### (b) 検討方法及び判定基準

#### i. 南側外壁の健全性確認

津波により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. 4）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  $3000 \mu$  及び鉄筋の引張ひずみ  $5000 \mu$  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. 12）に示される許容値をそれぞれ用いる。

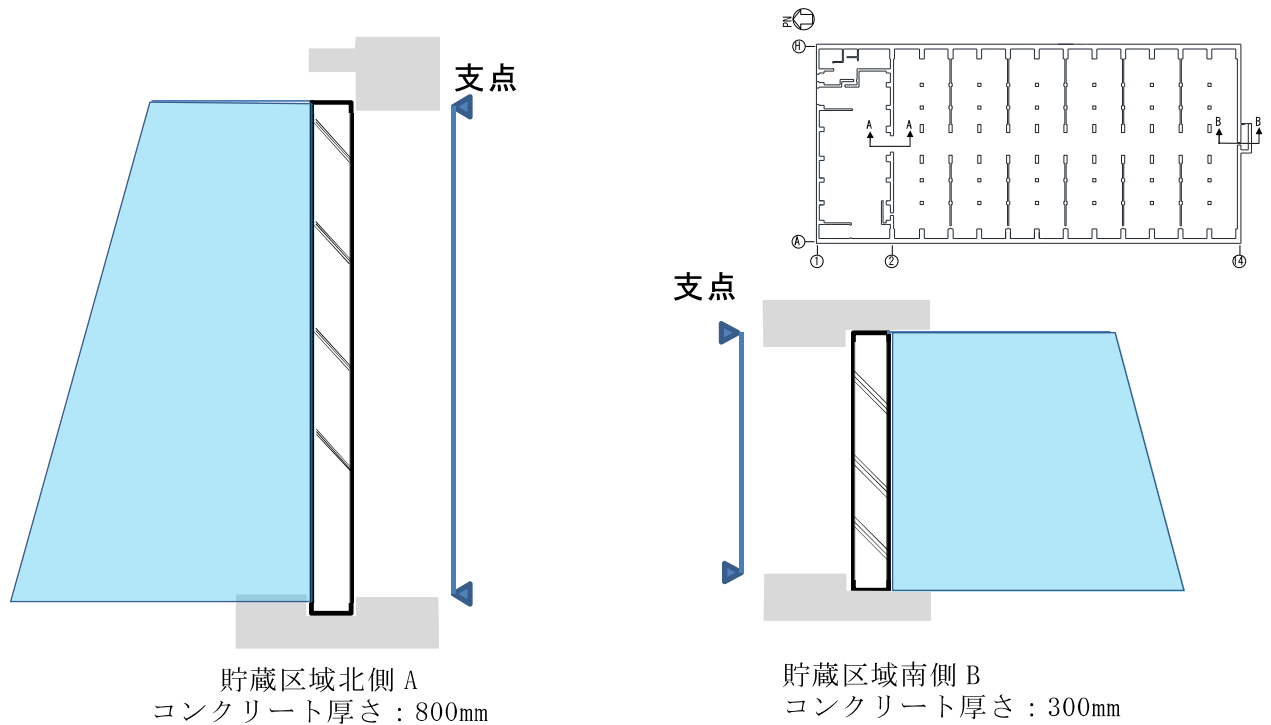
ii. 貯蔵区域の遮蔽扉の健全性確認

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，津波により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，建物裕度の確認を行う。

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（H22.8 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，積雪及び降下火砕物が考えられるが，以下の理由から，津波による波圧との荷重の組合せの必要性は小さいと考えられる。

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の必要性は小さいと考えられる。

ii. 竜巻及び風

竜巻及び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の必要性は小さいと考えられる。

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の必要性は小さいと考えられる。



(2) 津波による建屋耐性評価結果

a. 貯蔵区域南側外壁の健全性確認結果

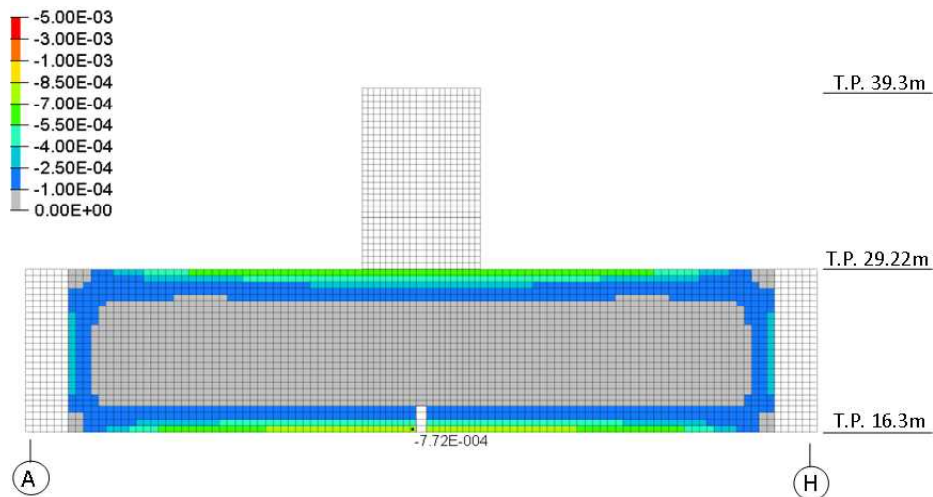
前述の弾塑性有限要素法解析により算定した、建屋外壁に発生するひずみの評価結果を第 3-1 表及び第 3-4 図(1)～(3)に示す。コンクリートの圧縮ひずみ、鉄筋の引張ひずみ及び面外せん断力はいずれも許容値以下であり、貯蔵区域南側外壁の健全性を確認した。

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。

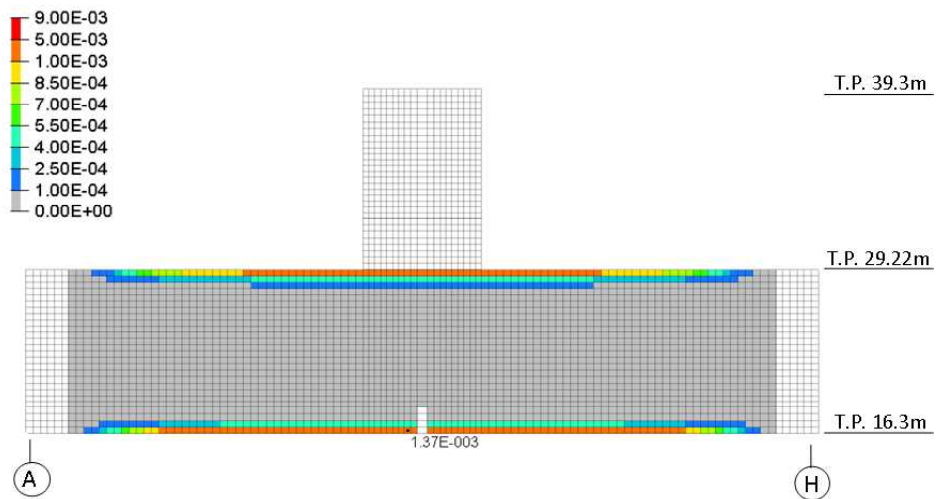
第 3-1 表 評価結果（貯蔵区域南側外壁）

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

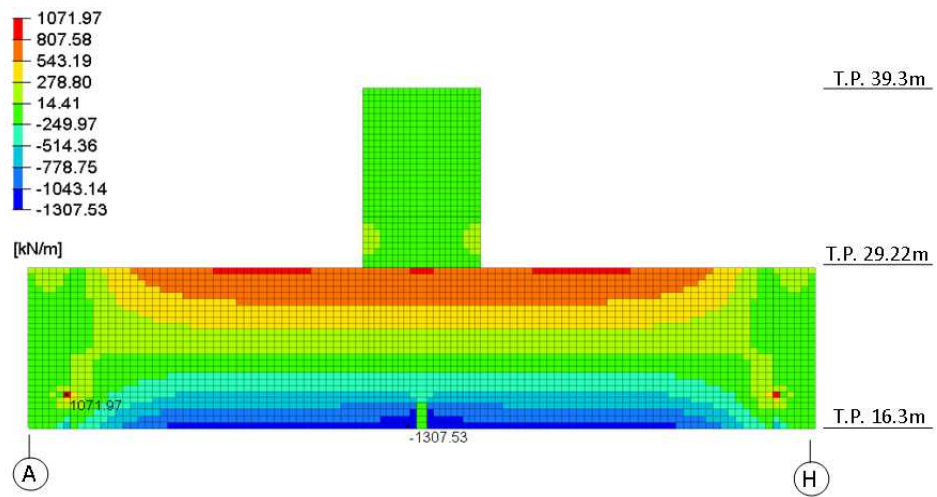
\*) 面外せん断力に対する許容値の算出方法は別添 4 参照



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 <sup>2</sup> )	鋼板の短期 許容応力度 <sup>*1</sup> (N/mm <sup>2</sup> )	検定比 <sup>*2</sup>
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。

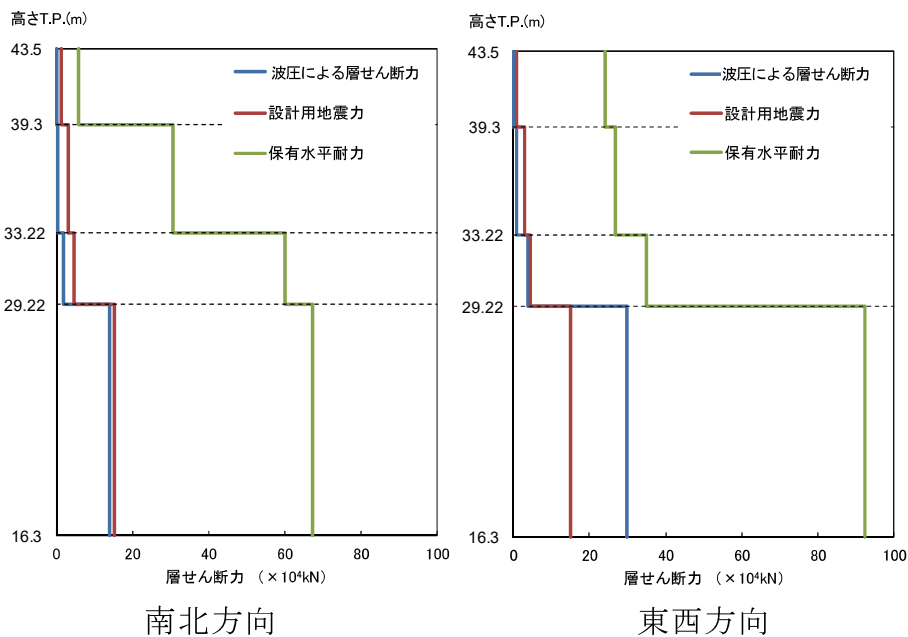
c. 津波による波圧（荷重）と設計用地震力及び保有水平耐力の比較結果

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、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建屋の荷重～変形関係における波圧による層せん断力で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

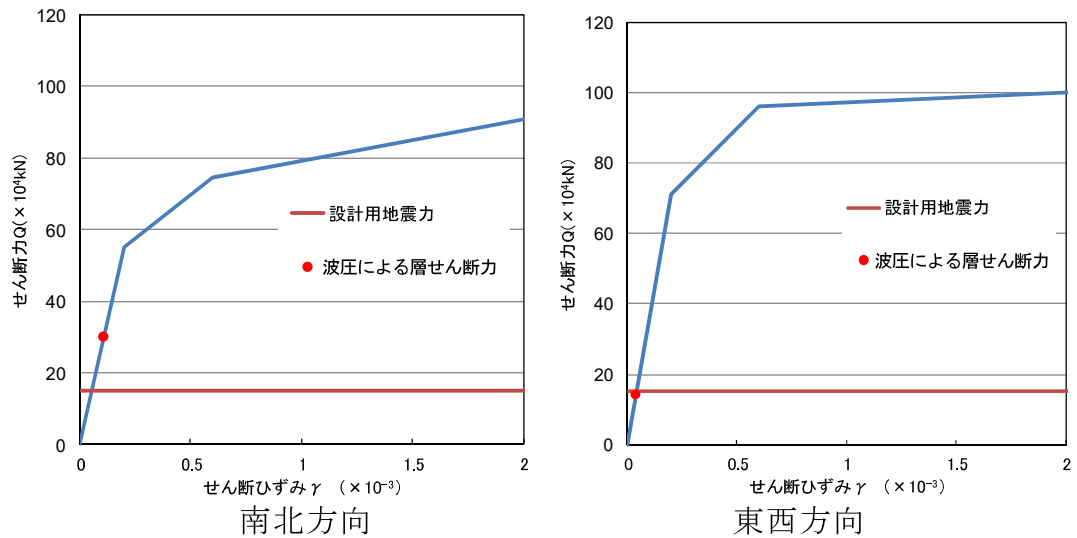
	波圧による層せん断力 ( $\times 10^4 \text{kN}$ )	設計用地震力* (1.5Ci) ( $\times 10^4 \text{kN}$ )	保有水平耐力* ( $\times 10^4 \text{kN}$ )
南北方向	14.0	15.09	67.25
東西方向	29.83	15.09	92.32

\*) 設工認申請書記載値 (H22.8 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、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等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洩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. 落下物等の設定について

(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（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①たて起こし架台上での緩衝体なしで水平姿勢の状態及び②移動中及び検査架台における緩衝体なしで縦姿勢の状態を考慮する。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に取り付けられており、落下物等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等の衝突部位は、閉じ込め機能への影響を評価する観点から蓋部を考慮する。なお、金属キャスクの胴部は、落下物等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. 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洩率を設定してプルームによる線量の評価に反映する。

なお、貯蔵区域に貯蔵されている金属キャスクへの浸水による影響については、仮に金属キャスクの蓋部が浸水した場合でも蓋間の正圧は維持され(蓋間圧力は0.27MPaabs以上であり高さ15m以上の静水圧に相当するが、浸水深は地上高さ7mである)、また津波襲来後にガスケット外周部の洗浄等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。



## (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ヤスクへの衝突状態の設定 (建屋構造材) (1/2)

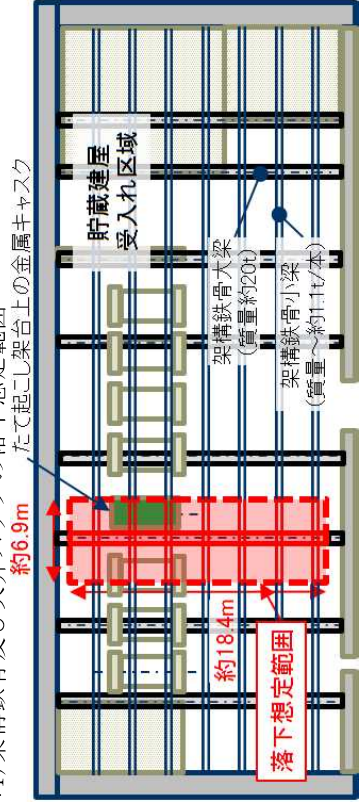
落下物	質量 (t)	落下高さ (m)	金属キヤスク姿勢	金属キヤスク上に落下するための条件	事象の起こりやすさ	落下エネルギー (N・m)	衝突想定条件 (代表事象) として設定
コンクリート側壁	約 73	約 7.2	水平	津波波力により受入れ区域が損傷し、たて起こし架台上的金属キヤスクの上部まで伸びた柱間の北側側壁が転倒し自由落下 (金属キヤスクが水平姿勢の場合の模式図を第4-2-2表①に示す)	北側側壁が損傷した場合、コンクリートが破損、変形して倒れ、金属キヤスクへの衝突が想定される	約 $5.2 \times 10^6$	落下エネルギーが天井クレーンの落下に比べ小さく、天井クレーンの落下で代表できると考えられるため除外
			縦		搬送中の金属キヤスクは北側側壁から離れており、衝突は考え難い	—	金属キヤ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、たて起こし架台上的金属キヤ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、金属キヤスクへの衝突が想定される	約 $4.3 \times 10^6$	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	津波波力により受入れ区域が損傷し、搬送中の縦姿勢の金属キヤスクの上部にある天井スラブが自由落下	同上	約 $4.9 \times 10^6$	落下エネルギーが縦姿勢の金属キヤスクの場合で最大であり、縦姿勢の金属キヤ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 <sup>*1</sup>	約 14	水平	津波波力により受入れ区域が損傷し、たて起こし架台上的金属キヤ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、金属キヤスクに衝突するには延性の高い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 <sup>*2</sup>	約 $3.8 \times 10^6$	—
			縦		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も接合 (母材強度よりも高い荷重でも接合部が保持) されており、両方の接合部が同時に破損する可能性は考え難く、仮に片方 (北側) の接合部が破損しても、落下エネルギーが自落下して金属キヤスクに衝突する可能性は考え難いため除外	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も接合 (母材強度よりも高い荷重でも接合部が保持) されており、両方の接合部が同時に破損する可能性は考え難く、仮に片方 (北側) の接合部が破損しても、落下エネルギーが自落下して金属キヤスクに衝突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、搬送中の縦姿勢の金属キヤスクの上部にある架構鉄骨が自由落下	搬送中の金属キヤスクは北側側壁から離れており、衝突は考え難い	—	金属キヤスクへの衝突は考え難いため除外

○：代表事象として設定

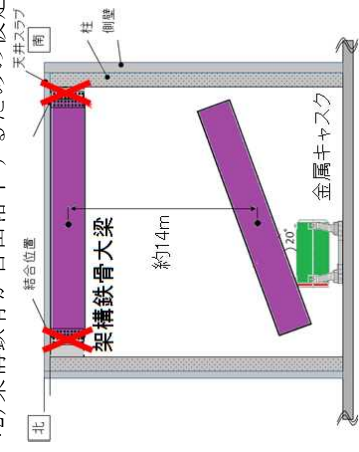
第 4-2-1 表 落下物の抽出及び金属キヤスクへの衝突状態の設定 (建屋構造材) (2/2)

落下物	質量 (t)	落下高さ (m)	金属キヤスク姿勢	金属キヤ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、たて起こし架台上的の金属キヤ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天井スラブも落下する可能性が考えられる	約 2.5 × 10 <sup>7</sup>	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ヤスクと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、搬送中の縦姿勢の金属キヤ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 <sup>7</sup>	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、たて起こし架台上的の金属キヤスクの上部にある北壁側のクレーンガーダが自由落下 (金属キヤ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が支えられなかったクレーンガーダが落下し、金属キヤ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ため、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 <sup>5</sup>	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		搬送中の金属キヤスクは北側側壁から離れており、衝突は考え難い	—	金属キヤスクへの衝突は考え難いため除外

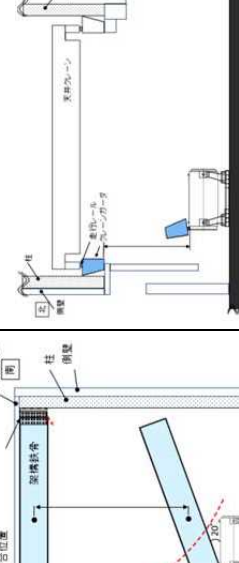
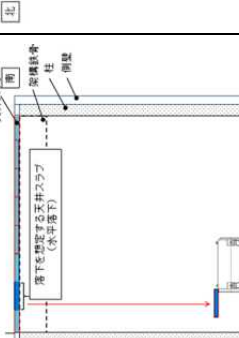
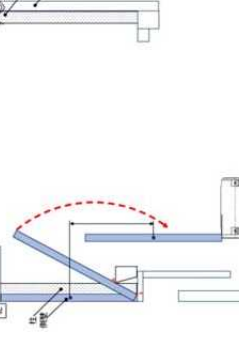
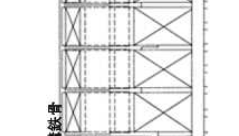

\*1) 架構鉄骨及び天井スラブの落下想定範囲



\*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)

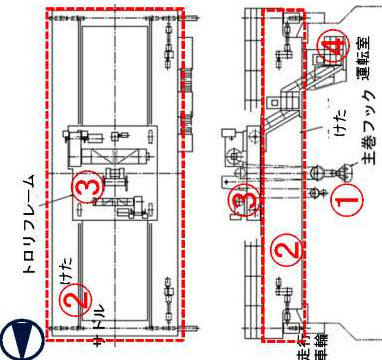
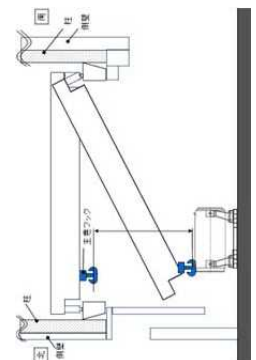
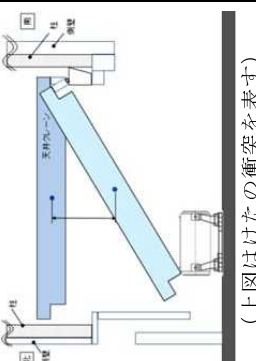
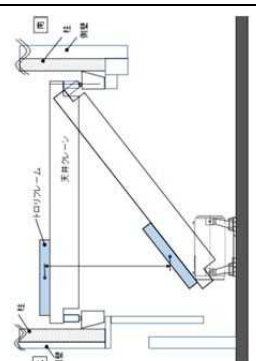
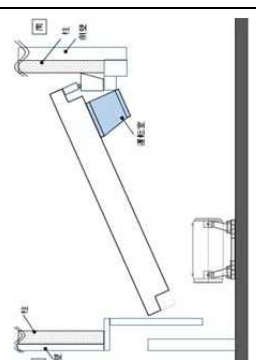
受入れ区域概略図	①コンクリート側壁	②天井スラブ (単独)	③架構鉄骨	④クレーンガーダ
 <p>天井スラブ 架構鉄骨 コンクリート側壁 ① 天井クレーンガーダ ④</p>	 <ul style="list-style-type: none"> <li>・北側側壁の衝突として、落下高さが大きく衝突エネルギーが大きく上部の側壁を仮定する (転倒) による衝突を仮定する。</li> <li>・側壁は柱で仕切られており側壁全体が一体となつて転倒する可能性は小さいと考えられることから、破損に伴う落下物のサイズとして、たて起こし架台付近の 1 区画 (幅 6.75m × 高さ 8.8m × 厚さ 0.5m) を考慮する。</li> <li>・水平姿勢の金属キヤ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ヤスク蓋部に衝突する状態を仮定する。</li> </ul>	 <ul style="list-style-type: none"> <li>・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。</li> <li>・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面の大きさは架構鉄骨の断面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。</li> <li>[金属キヤスクが水平姿勢の場合]</li> <li>・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)</li> <li>[金属キヤスクが縦姿勢の場合]</li> <li>・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)</li> </ul>	 <ul style="list-style-type: none"> <li>・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にくく、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ヤスクに衝突する可能性は考えにくい。</li> <li>・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にくい。</li> </ul>	 <ul style="list-style-type: none"> <li>・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蓋部が落下し金属キヤスク蓋部に衝突する状態を仮定する。</li> <li>・金属キヤ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、剛性の高い走りレールが金属キヤスク蓋部に衝突する状態を仮定する。</li> </ul>

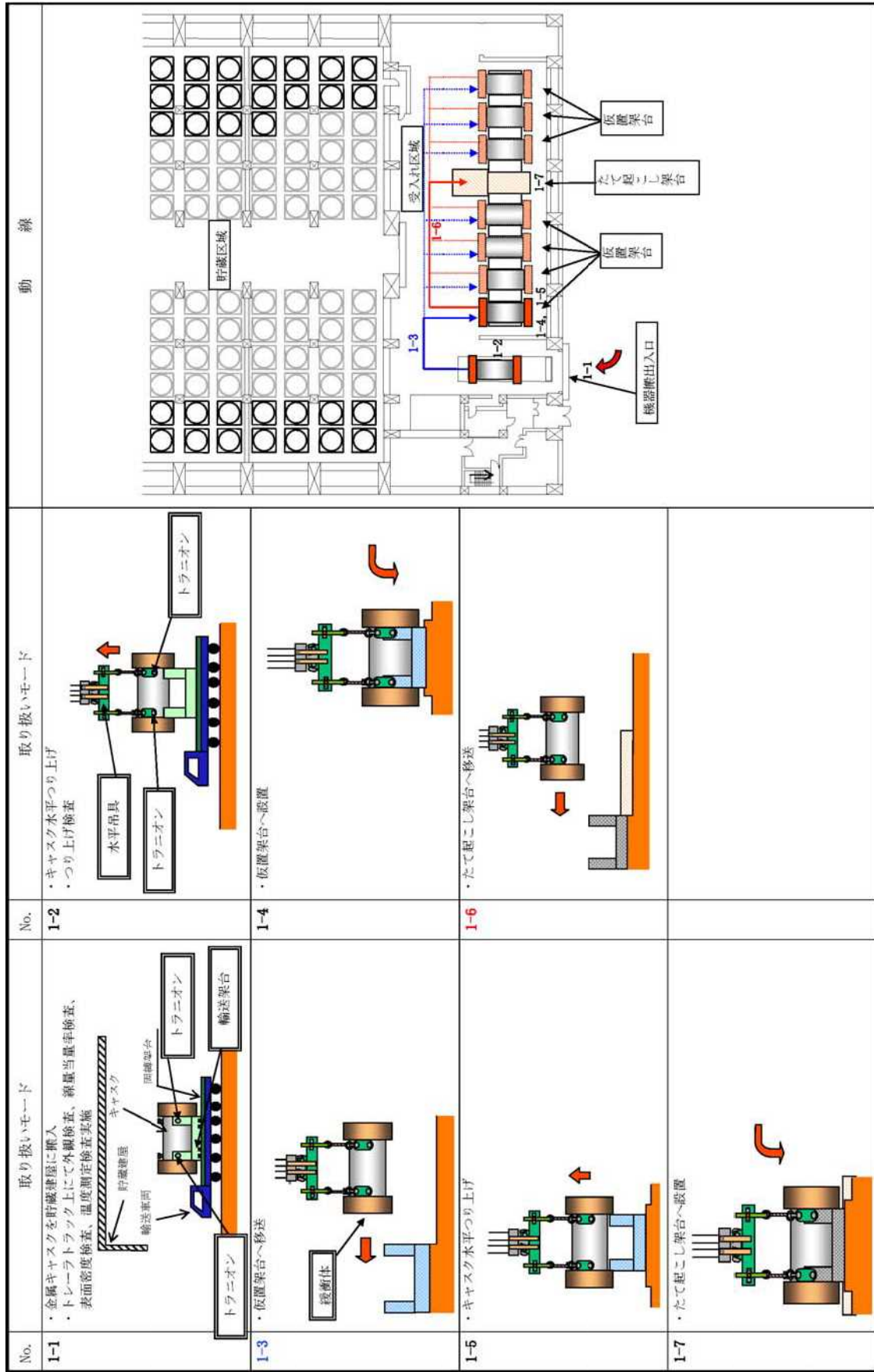
第 4-2-3 表 落下物の抽出及び金属キヤスクへの衝突状態の設定 (天井クレーン)

落下物	質量 (t)	落下高さ (m)	金属キヤスク姿勢	金属キヤ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、たて起こし架台上的金属キヤ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	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ヤスクへの衝突が想定される	約 $2.6 \times 10^5$	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
			水平				
トロリフック	約 43	約 10	水平	模式図を第 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	運転室は天井クレーンの南側にあり、受入れ区域の北側に仮置きされている金属キヤスクの上部にある可能性は小さく、衝突は考え難い	約 $4.2 \times 10^6$	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
運転室	約 128	—	水平	金属キヤスクへの衝突は考え難いため除外			
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、搬送中の縦姿勢の金属キヤ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	金属キヤスクが縦姿勢での搬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ヤスクの上部にある可能性は小さく、衝突は考え難い	約 $1.9 \times 10^5$	天井クレーンが縦姿勢の金属キヤ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ヤ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、金属キヤスクへの衝突は考え難いため除外
			縦				
トロリフック	約 43	—	縦			—	
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)

<p>天井クレーン概略図</p> 	<p>①主巻フック</p> 	<p>②けた, サドル, 走行車輪</p>  <p>(上図はけたの衝突を表す)</p>	<p>③トロリフレーム</p> 	<p>④運転室</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"> <li>金属キヤスク受入時の緩衝材取り外し等の作業が金属キヤ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。</li> <li>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、金属キヤスクへの衝突時には単独の衝突を考慮する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>金属キヤスク受入時に天井クレーンが仮置中の金属キヤ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。</li> <li>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、金属キヤ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。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>金属キヤ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ヤ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。</li> <li>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、金属キヤスクへの衝突時には単独の衝突を考慮する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>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ヤスク蓋部に衝突する可能性を考慮する。</li> </ul>



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)

No.	取り扱いモード	No.	取り扱いモード	No.	取り扱いモード	動
2-1	緩衝体の取り外し 	2-2	貯蔵架台をたて起こし架台付近に設置 	2-3	取り扱いモード ・吊具主アームを上部トラフラインに取り付け 	
2-4	主アームの外れ防止金具を取り付けた後、キヤスクをたて起こし 	2-5	・トラフライン押さえを取り外した後、キヤスクをつり上げ 	2-6	・つり上げ高さを目視にて確認し横行・下降操作を繰り返して、貯蔵架上まで移送 	
2-7	キヤスクを貯蔵架台に着床、固定 	2-8	・貯蔵架台下部に搬送台車を挿入 	2-9	・搬送台車浮上 	
2-10	・旋回動作、走行動作により検査架台へ移送 	2-11	・搬送台車着床、貯蔵架台固定ボルト取り付け 	2-12	・三次蓋 (輸送用) の取り外し 	

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



No.	取り扱いモード	No.	取り扱いモード	No.	取り扱いモード	動	緑
3-1	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 蓋間圧力検出器、キャスク表面温度検出器取り付け</li> <li>・ 気密漏えい検査</li> <li>・ 貯蔵架台に搬送台車挿入</li> <li>・ 貯蔵架台固定ボルト取り外し</li> </ul>	3-2	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 搬送台車浮上</li> </ul>	3-3	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 検査架台からキャスク抜出し</li> </ul>		
3-4	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 貯蔵場所まで移送</li> </ul>	3-5	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 搬送台車の着床、貯蔵架台の設置</li> </ul>	3-6	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 貯蔵架台の固定ボルト一部取り付け</li> </ul>		
3-7	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 搬送台車の抜取り</li> </ul>	3-8	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 貯蔵架台の固定ボルト取り付け・確認</li> </ul>	3-9	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 表面温度及び蓋間圧力端子箱へケーブル接続</li> <li>・ 二重蓋間圧力検査、表面温度検査、据付検査</li> </ul>		

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

落下物及び金属キャスクへの衝突状態を整理した結果から、事象の起こりやすさ、落下エネルギー、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。設定した衝突想定条件と津波漂流物のパラメータの比較を第 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(受入れ区域内の金属 キャスク，緩衝体なし)

### d. 津波漂流物の衝突条件との比較

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。

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、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)となるトレーラトラック(キャスク搬送用)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、仮想的な大規模津波による流速は、仮想的な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）の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。設定した落下物の衝突想定条件は津波漂流物の衝突に比べても十分厳しい条件であり、津波漂流物の衝突条件を包含すると考えられる。

第 4-2-6 表 津波漂流物の衝突条件と衝突想定条件の比較

	津波漂流物	衝突想定条件（落下物）	
品目	トレーラトラック （キャスク搬送用）	天井クレーン	天井スラブ
質量	約 36t	約 128t	約 30t
速度	～約 10m/s 仮想的な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。

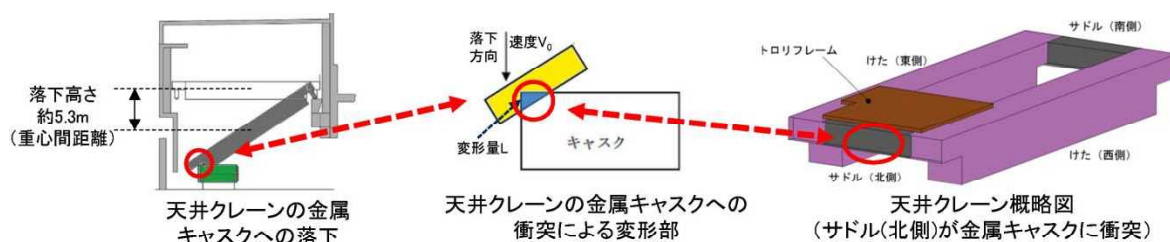
a. 衝突荷重の設定

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。

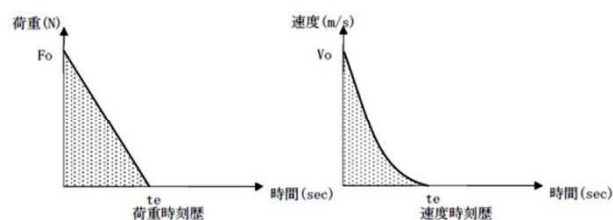


第 4-3-1 図 天井クレーンの金属キャスクへの衝突による変形 (模式図)

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"> <li>・ 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</li> <li>・ 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</li> <li>・ 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</li> </ul>
衝突荷重の与え方	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 荷重 48MN</li> <li>・ 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</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 荷重の値(48MN)は衝突荷重の設定結果に基づく</li> <li>・ 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）</li> </ul> <div data-bbox="885 891 1295 1034" 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"> <li>・ 金属キャスクは全体形状を模擬</li> <li>・ 金属キャスクはたて起こし架台上を想定した水平姿勢</li> <li>・ 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</li> <li>・ 三次蓋がない状態を仮定</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 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）</li> <li>・ 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</li> <li>・ 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逃す</li> </ul>



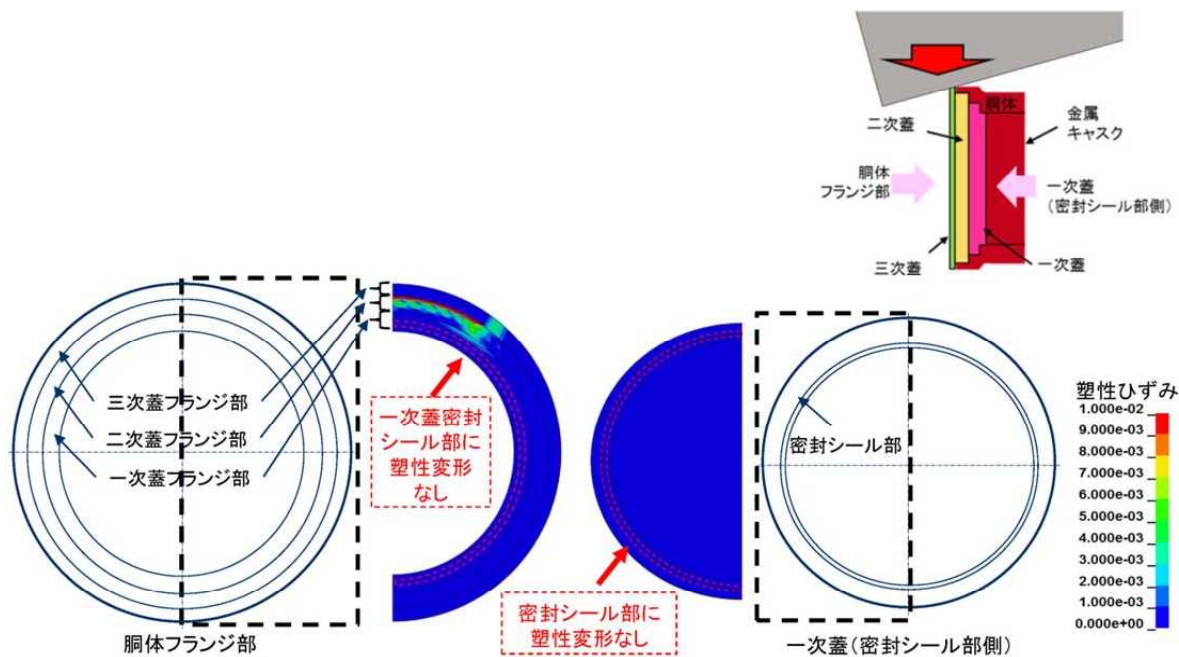
c. 評価結果

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

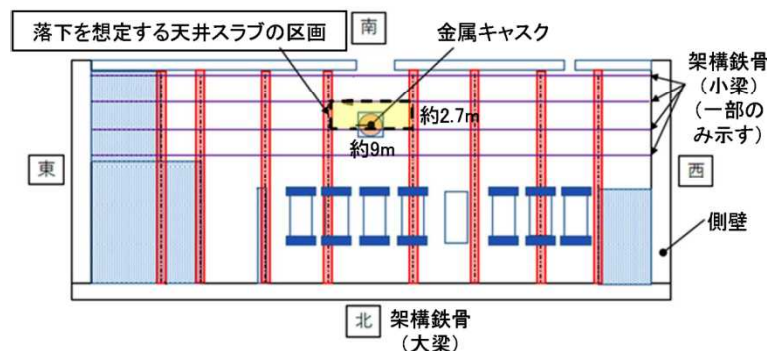
(4) 天井スラブの縦姿勢キャスクへの落下による影響の評価

(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。

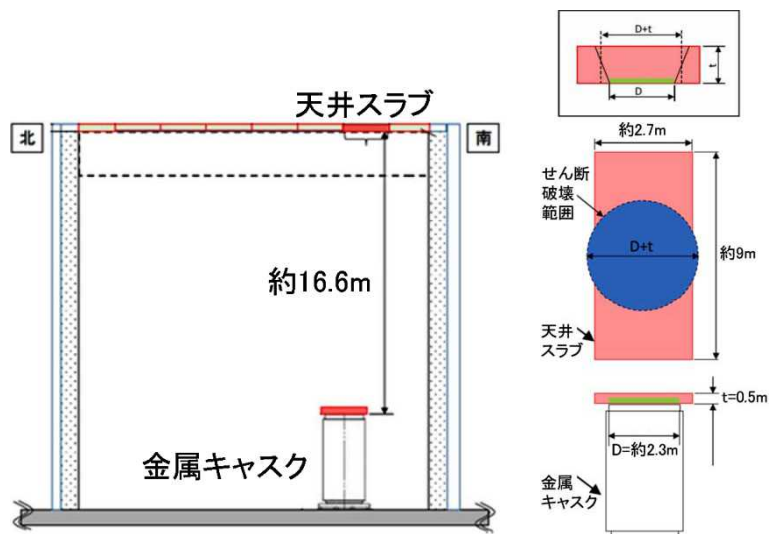


第4-4-1図 落下を想定する天井スラブ

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図に示す通り天井スラブが天井に平行に落下し、金属キャスク頂部フランジ部の外径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

さくになると考えられる。



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 <sup>3</sup> )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 <sub>τ</sub> )	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。

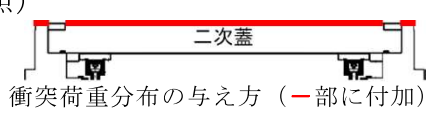
解析コードは(3)の天井クレーン落下時の構造評価と同様に、構造解析汎用コード ABAQUS を用いる。

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"> <li>・ 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</li> <li>・ 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</li> <li>・ 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</li> </ul>
衝突荷重の与え方	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 荷重 11MN</li> <li>・ 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</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 荷重の値(11MN)は衝突荷重の設定結果に基づく</li> <li>・ 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）</li> </ul> 
金属キャスクのモデル	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 金属キャスクは全体形状を模擬</li> <li>・ 金属キャスクは貯蔵架台上を想定した縦姿勢</li> <li>・ 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</li> <li>・ 三次蓋がない状態を考慮</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 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</li> <li>・ 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</li> </ul>

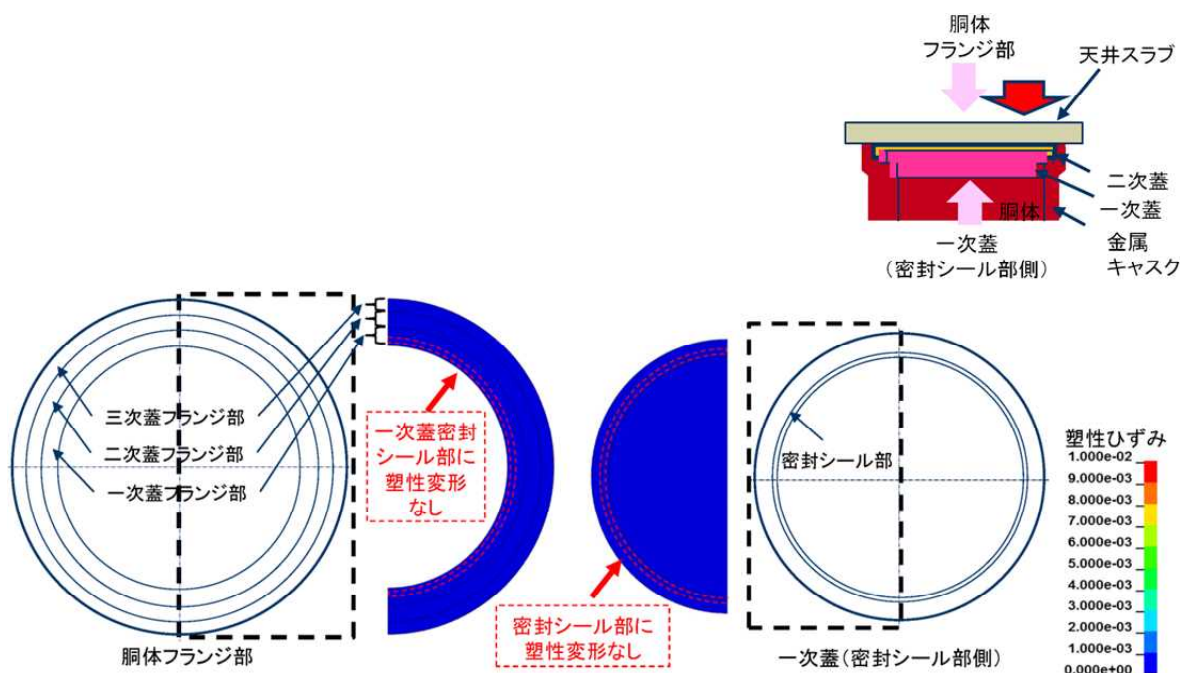
c. 評価結果

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等の衝突により漏洩に至るためには、①落下物等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洩率が増加する及び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洩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等が衝突し、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等の荷重が直接作用しないことから、落下物等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、落下物等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洩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洩率は、落下物等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洩率の回復は考慮しない。
  - iv. 金属キャスクの一次蓋から漏洩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等が衝突し、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、落下物等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洩した状態を仮定
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 $3.8 \times 10^{14}$ Bq よう素(I-129) : 約 $4.4 \times 10^9$ 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洩量	金属キャスクからの漏洩率 : $1 \times 10^{-4}$ Pa・m <sup>3</sup> /s ・ 落下物等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洩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 ・ 設定した漏洩率に相当する漏洩孔径 : 約 $1.3 \times 10^{-5}$ m <sup>*1</sup> ・ 漏洩孔長 : 約 $4.6 \times 10^{-3}$ m ・ 一次蓋からのガス漏洩率 <sup>*2</sup> (標準状態 : 25℃, 1 気圧) : 約 $8.0 \times 10^{-10}$ m <sup>3</sup> /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洩率の回復により、漏洩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洩率の変動は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 $3.3 \times 10^{11}$ Bq
I-129	約 $3.8 \times 10^6$ 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 ( $\chi/Q$ ) 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 ( $\chi/Q$ ) 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  $1\text{Bq}$  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  $1\text{mSv}$  と比べ極めて小さい。

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(<math>\chi/Q</math>)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洩であることを考慮）                  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)：<math>H_{ex}=K \times D/Q \times Q_{out}</math>                  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(<math>1.6 \times 10^{-17} Gy/Bq</math>)  <math>Q_{out}</math>：金属キャスクからの漏洩放射エネルギー(<math>\gamma</math>線実効エネルギー0.5MeV換算値。Kr-85の<math>\gamma</math>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)：<math>H_{in}=R \times H \times \chi/Q \times Q_{out}</math>                  R：呼吸率(<math>5.16 m^3/d</math>：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(<math>2.0 \times 10^{-7} Sv/Bq</math>：小児)  <math>\chi/Q</math>：相対濃度(<math>4.2 \times 10^{-3} s/m^3</math>)  <math>Q_{out}</math>：金属キャスクからの漏洩放射エネルギー(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 <math>2.4 \times 10^{-5} mSv</math></p>
<p>内部被ばく (I-129)による実効線量</p>	<p>約 <math>2.0 \times 10^{-4} mSv</math></p>
<p>実効線量合計</p>	<p>約 <math>2.2 \times 10^{-4} mSv</math></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等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、また落下物等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洩を仮定しても、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、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等の衝突により遮蔽機能が低下する場合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復旧を考慮して年間 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、金属キャスクの遮蔽評価結果に基づくより現実的な条件を使用する。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 $\mu$ Sv/h, $\gamma$ 線 51.7 $\mu$ 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 $\mu$ 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 $\gamma$ 線の線質を設定	中性子 100%とした場合、 $\gamma$ 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
中性子線及び $\gamma$ 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、金属キャスクの遮蔽評価結果に基づくより現実的な条件を使用する。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 $\gamma$ 線の線質を設定	中性子 100%とした場合、 $\gamma$ 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
中性子線及び $\gamma$ 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 $\gamma$ 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

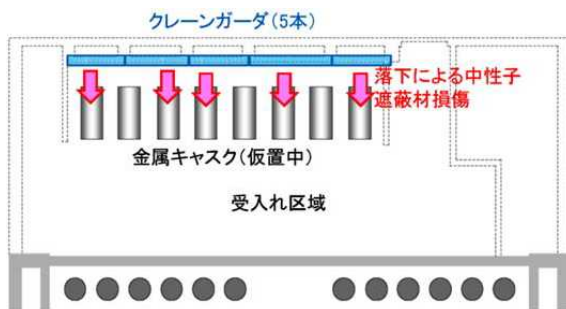
c. 金属キャスクの状態（受入れ区域の金属キャスクの中性子遮蔽材損傷部）については、受入れ区域の損傷に伴う落下物が金属キャスクに衝突して外筒を貫通し、中性子遮蔽材が損傷する場合を仮定する。

(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。

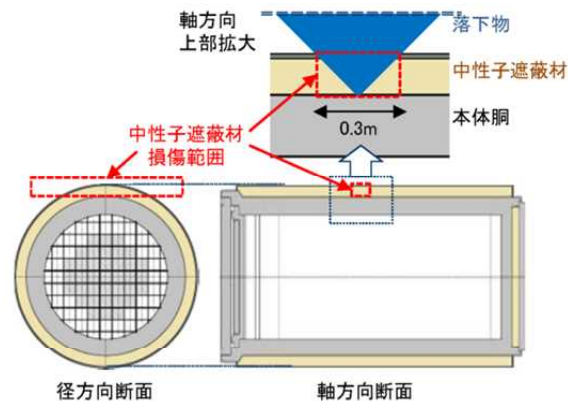
(b) クレーンガーダは金属キャスクの仮置エリア付近に 5 本あることから、第 5-1 図に示すように 1 本が 1 基の金属キャスクの中性子遮蔽材を損傷させるものとし、クレーンガーダの落下により 5 基の金属キャスクの中性子遮蔽材を損傷させるものとする。なお、1 本のクレー

ンガード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) クレーンガードの衝突により、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。



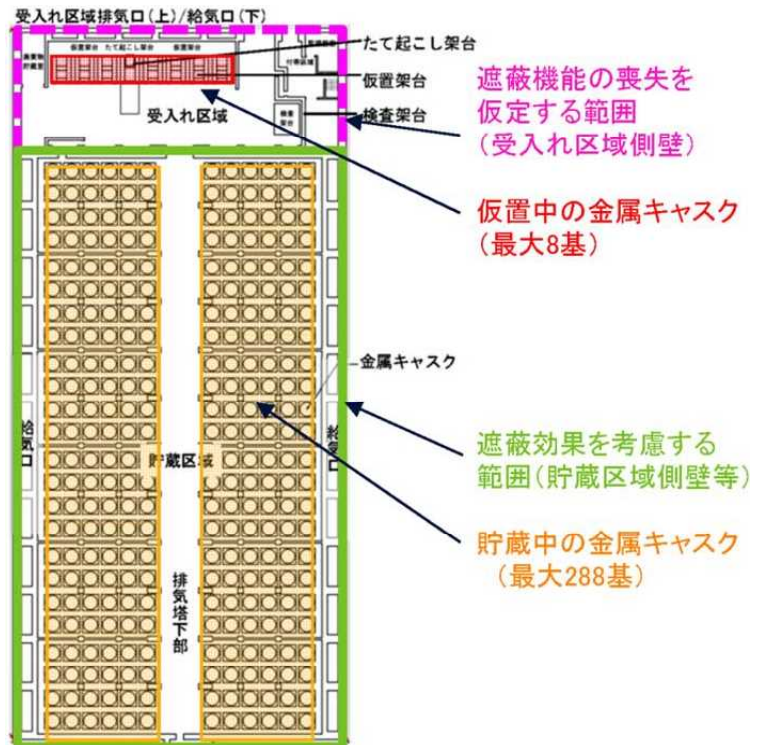
第 5-1 図 クレーンガードの金属キャスクへの落下



第 5-2 図 落下物による中性子遮蔽材の損傷の仮定

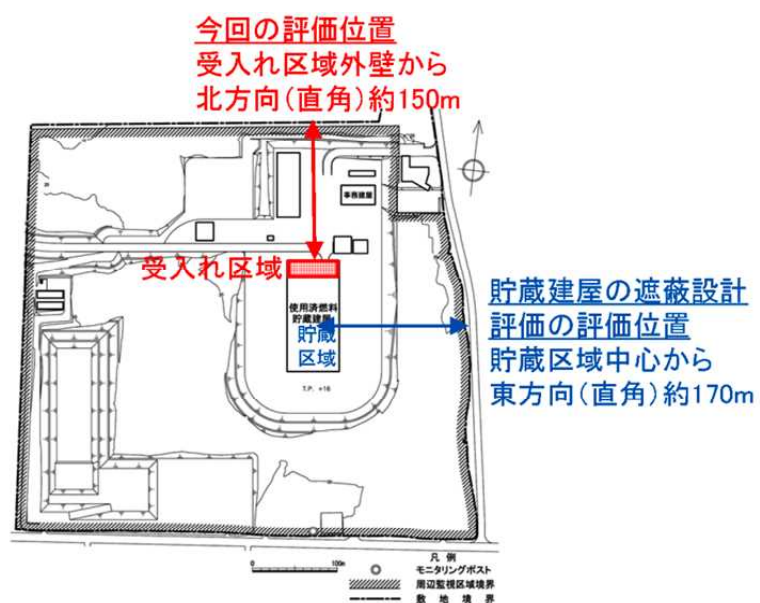
d. 貯蔵建屋の状態は、波圧に対し受入れ区域の北側外壁が許容応力を超えることから、受入れ区域の損傷を仮定し、第 5-3 図に示すように貯蔵建屋のうち、受入れ区域の外壁（北側、東側及び西側）及び天井の遮蔽機能の喪失を仮定する。なお、受入れ区域の損傷形態を定量的に評価する上での不確かさが大きいいため、相当に保守的と考えられるが、東側及び西側外壁や天井も含めて遮蔽機能の喪失を仮定する。なお、遮蔽機能の復旧として、受入れ区域の損傷部の遮蔽機能の復旧は考慮しないが、金属キャスク損傷部の遮蔽機能及び貯蔵区域遮蔽扉部の遮蔽機能の復旧を考慮し、復旧期間は前者を 3 ヶ月、後者を 1 ヶ月とする。





第 5-3 図 貯蔵建屋壁の遮蔽機能喪失の仮定

e. 線量評価位置は, 受入れ区域の金属キャスクからの寄与が大きいため, 第 5-4 図に示すように受入れ区域に近い北方向 (受入れ区域外壁から約 150m) とする。なお, 貯蔵建屋の遮蔽設計評価では貯蔵区域からの線量が最大となる東方向 (貯蔵区域中心から約 170m) で評価している。



第 5-4 図 線量評価位置

遮蔽評価条件を第 5-3 表に示す。

第 5-3 表 遮蔽評価条件

項目	条件	備考
解析コード	MCNP-4C (3次元連続エネルギーモンテカルロ法コード)	「使用済燃料貯蔵建屋の遮蔽設計」における評価に用いるコードと同様
断面積ライブラリ	MCNPDLC-200/MCNPDATA	ENDF/B-VIをベースとしてMCNP用に作成された内蔵ライブラリ
実効線量換算係数	ICRP Publication74の前方-後方照射条件(AP)	—
線源条件	金属キャスク基数は貯蔵区域288基, 受入れ区域8基(最大基数) 線源強度はBWR用大型キャスク(タイプ2)の遮蔽評価結果を基に設定	—
金属キャスクの状態	受入れ区域8基のうち5基については, 落下物の衝突による中性子遮蔽材の損傷を仮定	—
貯蔵建屋の状態	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喪失を仮定 貯蔵区域遮蔽扉は開放状態を仮定	遮蔽扉が津波襲来時に開放されている場合を考慮
遮蔽機能の復旧期間	受入れ区域の遮蔽機能の復旧は考慮しない 金属キャスク損傷部の遮蔽機能: 3ヶ月 貯蔵区域遮蔽扉部の遮蔽機能: 1ヶ月	金属キャスク損傷部については, 保守的に受入れ区域の瓦礫撤去(期間は受入れ区域の建屋物量に基づき解体手順を踏まえて~2ヶ月程度と想定)後に追加遮蔽体等を設置し, 併せて3ヶ月程度を要すると仮定
線量評価点	北方向の敷地境界(受入れ区域外壁から約150m)	線量の寄与が大きな受入れ区域の金属キャスクに近い, 北方向の敷地境界とする

(2) 遮蔽評価の結果

上記の評価方法に基づき敷地境界外における公衆の実効線量を評価した結果を第5-4表に示す。敷地境界外における公衆の実効線量は年間で約 $7.8 \times 10^{-1}$ mSvであり、年間1mSvを超えないことを確認した。

第5-4表 敷地境界外における公衆の実効線量の評価結果

受入れ区域に存在する 金属キャスクからの実効線量（年間）	約 $7.6 \times 10^{-1}$ mSv*
貯蔵区域に存在する 金属キャスクからの実効線量（年間）	約 $1.9 \times 10^{-2}$ mSv
実効線量合計（年間）	約 $7.8 \times 10^{-1}$ mSv

\*)このうち金属キャスクの中性子遮蔽材損傷部からの実効線量（年間）は約 $1.4 \times 10^{-1}$ mSv

(3) 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の衝突を考慮しても、敷地境界外における公衆の実効線量が遮蔽機能の復旧を考慮して年間1mSvを超えず、使用済燃料貯蔵施設の遮蔽機能が維持されることを確認した。

## 6. 衝撃を受けた金属キャスクの対策

衝撃を受けた金属キャスクの安全機能を確認するための検査又は試験及び当該安全機能を健全に維持するための保守又は修理，並びに施設外への搬出に必要な確認ができるよう，以下の手段を講じるものとする。

- ・ 設計貯蔵期間中において，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手段を講じる。
- ・ 衝撃を受けた金属キャスクを使用済燃料貯蔵施設外へ搬出するための必要な確認ができる手段を講じる。

### (1) 衝撃を受けた金属キャスクの使用済燃料貯蔵施設外搬出における要求事項

衝撃を受けた金属キャスクを，保守又は修理，並びに必要な確認をした上で，施設外への搬出する上で，「核燃料物質等の工場又は事業所外における運搬に関する規則」において，BM型輸送物に相当する要求事項を第6-1表に示す。

第6-1表 BM型輸送物の技術上の基準の概要

	通常の輸送要件	一般の試験条件	特別の試験条件
未臨界性	臨界しない	臨界しない	臨界しない*
遮蔽性	表面で2mSv/h以下 (表面から1mで 0.1mSv/h以下)	表面の最大線量当量 率が著しい増加せず	表面から1mで10mSv/h 以下
密封性	—	1時間あたり、A <sub>2</sub> 値の 10 <sup>-6</sup> を超えないこと	1週間あたり、A <sub>2</sub> 値を超 えないこと
除熱性	—	表面温度が85℃以下、 容器の健全性を維持す る温度以下	上記を満足する前提と して、必要な部位が機 能を維持する温度以下
その他	通常の温度変化や振 動等で、健全性を維持	上記を満足する前提と して、容器が概ね弾性 範囲であること	上記を満足する前提と して、必要な部位が破 断、損傷等しないこと

\*) 乾式容器では燃料破損時の未臨界性確保のため二重の水密境界を要求

使用済燃料貯蔵施設の位置，構造及び設備の基準 に関する規則の解釈（抜粋）

第13条（安全機能を有する施設）

- 1 第1項に規定する「安全性を損なわないもの」とは，当該使用済燃料貯蔵施設以外の原子力施設との間，又は当該使用済燃料貯蔵施設内で共用するものについて，その機能，構造等から判断して，共用によって当該使用済燃料貯蔵施設の安全性に支障を来さないものをいう。
- 2 第2項に規定する「当該施設の安全機能を確認するための検査又は試験及び当該安全機能を健全に維持するための保守又は修理ができるもの」とは，以下の設計をいう。
  - 一 設計貯蔵期間を通じて，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ようになっていること。また，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ようになっていること。
  - 二 金属キャスク取扱設備（使用済燃料貯蔵施設内において金属キャスクの移送等の取扱いに供される設備のことをいう。以下同じ。）は，動作中に金属キャスクの基本的安全機能を損なうことがないよう，必要な検査，修理等ができるようになっていること。

**第五条** A型輸送物に係る技術上の基準は、次の各号に掲げるものとする。

- 五 周囲の圧力を六十キロパスカルとした場合に、放射性物質の漏洩がないこと。
- 七 表面における最大線量当量率が二ミリシーベルト毎時を超えないこと。ただし、専用積載として運搬する核燃料輸送物であつて、核燃料物質等車両運搬規則（昭和五十三年運輸省令第七十二号）第四条第二項並びに第十九条第三項第一号及び第二号に規定する運搬の技術上の基準に従うもののうち、安全上支障がない旨の原子力規制委員会の承認を受けたものは、表面における最大線量当量率が十ミリシーベルト毎時を超えないこと。
- 八 表面から一メートル離れた位置における最大線量当量率（コンテナ又はタンクを容器として使用する核燃料輸送物であつて、専用積載としないで運搬するものについては、表面から一メートル離れた位置における最大線量当量率に原子力規制委員会の定める係数を乗じた線量当量率）が百マイクロシーベルト毎時を超えないこと。ただし、…承認を受けたときは、この限りでない。
- 九 原子力規制委員会の定めるA型輸送物に係る一般の試験条件の下に置くこととした場合に、次に掲げる要件に適合すること。
  - イ 放射性物質の漏洩がないこと。
  - ロ 表面における最大線量当量率が著しく増加せず、かつ、二ミリシーベルト毎時を超えないこと。

**第六条** BM型輸送物に係る技術上の基準は、次の各号に掲げるものとする。

- 一 前条第一号から第八号までに定める基準。ただし、同条第六号イに定める要件は、適用しない。
- 二 原子力規制委員会の定めるBM型輸送物に係る一般の試験条件の下に置くこととした場合に、次に掲げる要件に適合すること。
  - イ 前条第九号ロの要件
  - ロ 放射性物質の一時間当たりの漏洩量が原子力規制委員会の定める量を超えないこと。
  - ハ 表面の温度が日陰において摂氏五十度（専用積載として運搬する核燃料輸送物にあつては、輸送中人が容易に近づくことができる表面（その表面に近接防止枠を設ける核燃料輸送物にあつては、当該近接防止枠の表面）において摂氏八十五度）を超えないこと。
- 二 表面の放射性物質の密度が表面密度限度を超えないこと。
- 三 原子力規制委員会の定めるBM型輸送物に係る特別の試験条件の下に置くこととした場合に、次に掲げる要件に適合すること。
  - イ 表面から一メートル離れた位置における最大線量当量率が十ミリシーベルト毎時を超えないこと。
  - ロ 放射性物質の一週間当たりの漏洩量が原子力規制委員会の定める量を超えないこと。
- 四 運搬中に予想される最も低い温度から摂氏三十八度までの周囲の温度の範囲において、亀裂、破損等の生じるおそれがないこと。
- 五 原子力規制委員会の定める量を超える量の放射能を有する核燃料物質等が収納されている核燃料輸送物にあつては、原子力規制委員会の定める試験条件の下に置くこととした場合に、密封装置の破損のないこと。ただし、安全上支障がないと原子力規制委員会が認める場合は、この限りでない。

**第十四条** 第三条又は前条の規定に従つて運搬することが著しく困難な場合であつて、安全な運搬を確保するために必要な措置を採り、かつ、これらの規定によらないで運搬しても安全上支障がない旨の原子力規制委員会の承認を受けたときは、これらの規定によらないで運搬することができる。この場合において、当該運搬する物の最大線量当量率は、表面において十ミリシーベルト毎時を超えてはならない。

## (2) 衝撃を受けた金属キャスクの基本的な対応方針

前章までに述べたとおり，十分な保守性を有する仮想的な大規模津波を設定し，水深係数3を用いた波圧に基づいて受入れ区域の損傷を想定し，それに伴う落下物等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している。

衝撃を受けた金属キャスクについて，外観，線量当量率，表面温度確認により，「遮蔽」，「閉じ込め」，「除熱」，「臨界防止」に関する性能確認の初期確認を行い，落下物の状況等を確認して，衝撃を与えた事象が，既に閉じ込め機能が維持可能と評価している静的解析評価条件を網羅していることを確認する。このことにより，金属キャスク一次蓋の健全性を評価する。

衝撃を受けた金属キャスクについて，以下の対応を行う。

- ・漏洩箇所に実施可能な漏止め材の充填や漏止め溶接を実施
- ・遮蔽材の欠損を補修必要な追加補修

衝撃を受け，必要な追加補修ないし追加遮蔽を実施した金属キャスクについて，遮蔽性，密封性，除熱性，未臨界性，構造健全性等について，解析により確認を行う。

これにより，一般の試験条件，特別の試験条件を満足することを確認し，通常輸送により，使用済燃料貯蔵施設外へ搬出を行う。

一般の試験条件，特別の試験条件の満足を確認できない場合には，遮蔽性を確認するとともに，運搬に当たって講ずる障害防止のための措置を検討し，特別措置により，使用済燃料貯蔵施設外へ搬出を行う。

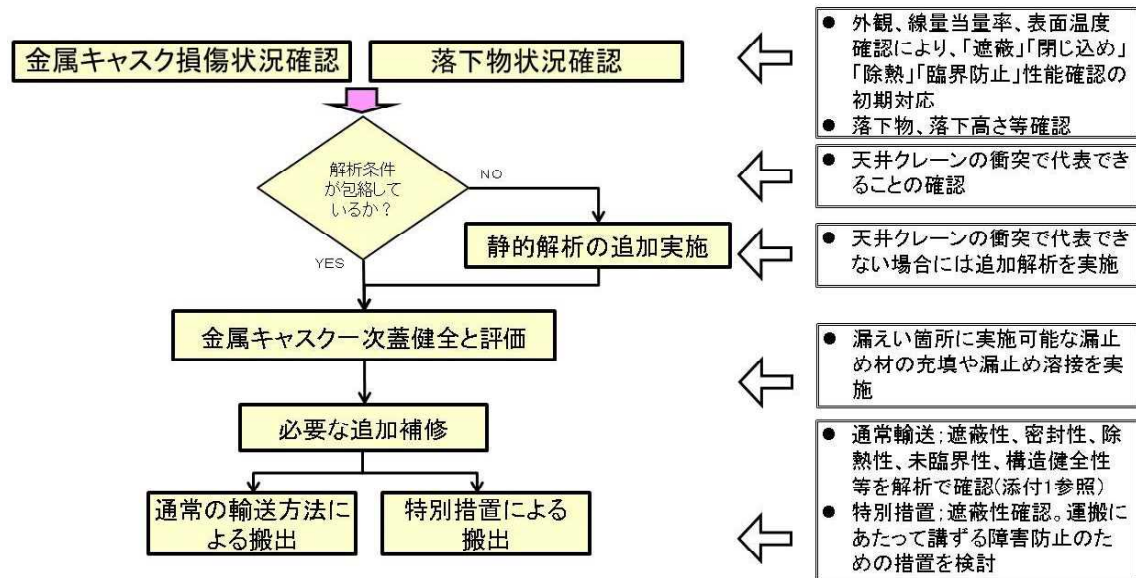
仮想的な大規模津波による受入れ区域損傷に伴う落下物等の想定条件を第6-2表に示す。また，衝撃を受けた金属キャスクの基本的な対応方針（天井クレーン，天井スラブ，クレーンガード）を第6-1図(1)～(3)に示す。

第 6-2 表 仮想的な大規模津波による受入れ区域損傷に伴う落下物等の想定条件

	落下物	金属キャスク姿勢	緩衝体の有無
①	天井クレーン	水平(たて起こし架台)	なし
②	天井スラブ	縦(移動中)	なし
③	クレーンガーダ	水平(仮置架台) 水平(たて起こし架台)	あり なし

ケース①の対応フロー

天井クレーンが、水平状態の金属キャスクに落下し、閉じ込め(密封)機能に影響のおそれ

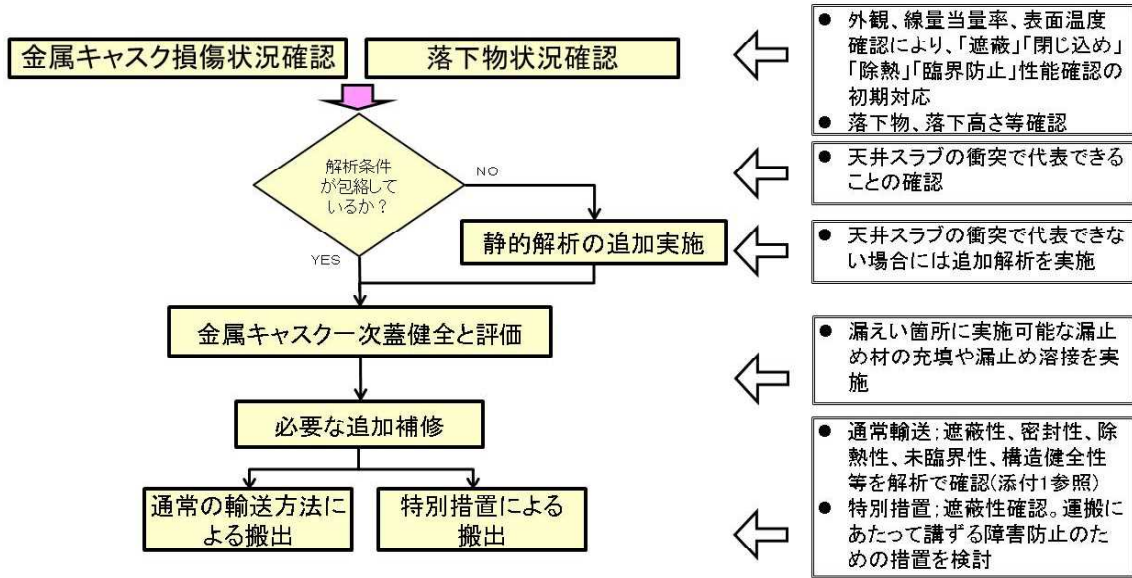


第 6-1 図(1) 衝撃を受けた金属キャスクの基本的な対応フロー(天井クレーン)



ケース②の対応フロー

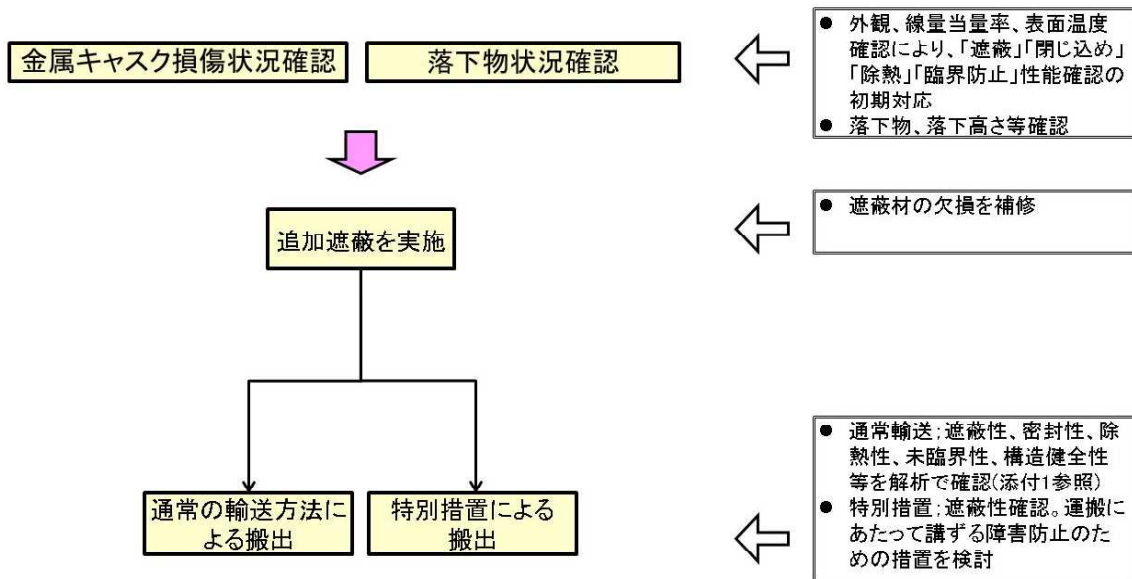
天井スラブが、縦状態の金属キャスクに落下し、密封機能に影響のおそれ



第 6-1 図(2) 衝撃を受けた金属キャスクの基本的な対応フロー（天井スラブ）

ケース③の対応フロー

クレーンガーダが、水平状態の金属キャスクに落下し、遮蔽機能に影響のおそれ



第 6-1 図(3) 衝撃を受けた金属キャスクの基本的な対応フロー（クレーンガーダ）

(3) 衝撃を受けた金属キャスクの基本的安全機能に係る初期確認、保守・修理、及び試験検査の対応について

a. 遮蔽に係る初期確認、保守・修理、及び試験検査の対応について

(a) 初期確認

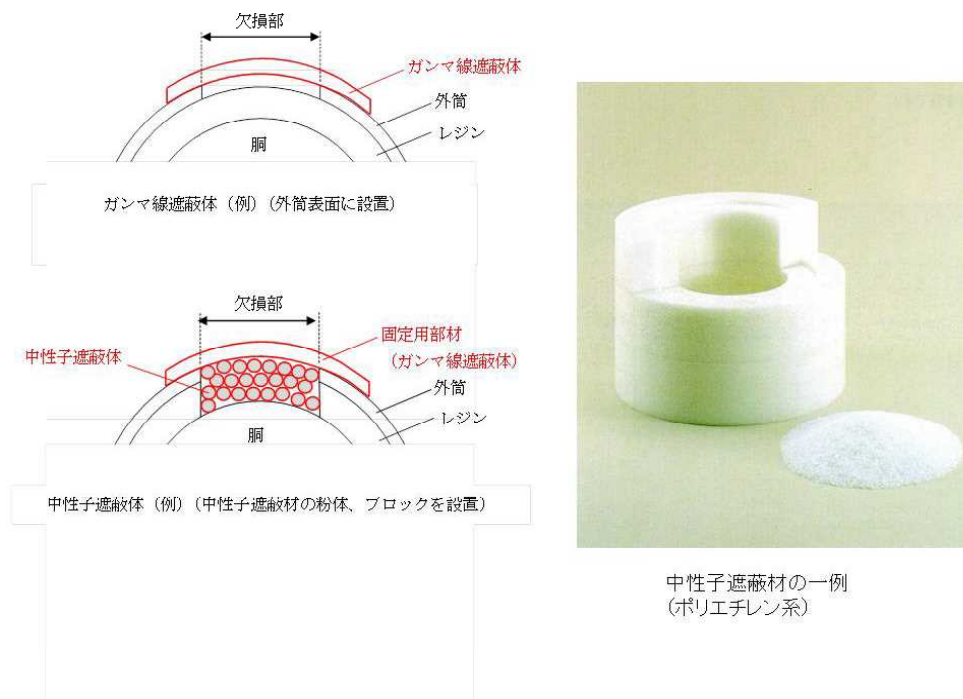
金属キャスクの損傷等により遮蔽機能が損なわれていないことの確認のため、雰囲気線量の測定として、該当する金属キャスクの周囲の線量上昇有無の確認を実施する。

具体的には、外観検査として外筒部の変形や損傷の有無確認を、キャスク線量当量率の測定として外観検査で異常がある箇所での線量当量率の測定をそれぞれ実施する。

(b) 保守・修理

外筒、中性子遮蔽材（レジン）の損傷の場合、敷地境界外における公衆の実効線量の評価条件を満足するよう追加遮蔽を行う。

第 6-2 図に、追加遮蔽の例を示す。



第 6-2 図 衝撃を受けた金属キャスクの追加遮蔽の例

(c) 搬出に必要な試験・検査

必要な追加遮蔽を行った上で、通常の輸送、一般の試験条件の線量当量率(金属キャスクの表面で 2mSv/h 以下、表面から 1m で 0.1mSv/h 以下)を満足することを線量当量率検査( $\gamma$ 線と中性子の合計)にて確認する。第 6-3 図に中性子サーベイメータの例を示す。

特別措置での輸送では、金属キャスクの表面で 10mSv/h 以下を満足するように、追加遮蔽や人が近づけないような手段を講ずる。



第 6-3 図 中性子サーベイメータの例

b. 閉じ込め(密封)に係る初期確認, 保守・修理, 及び試験検査の対応について

(a) 初期確認

金属キャスクの損傷等により閉じ込め(密封)機能が損なわれていないことの確認のため、以下の確認を実施する。

具体的には、雰囲気線量の測定として該当する金属キャスクの周囲の線量上昇がないことの確認を、外観検査として蓋部の変形や損傷、架台からの落下の有無の確認を、また最外層の蓋の気密漏洩検査を実施する。

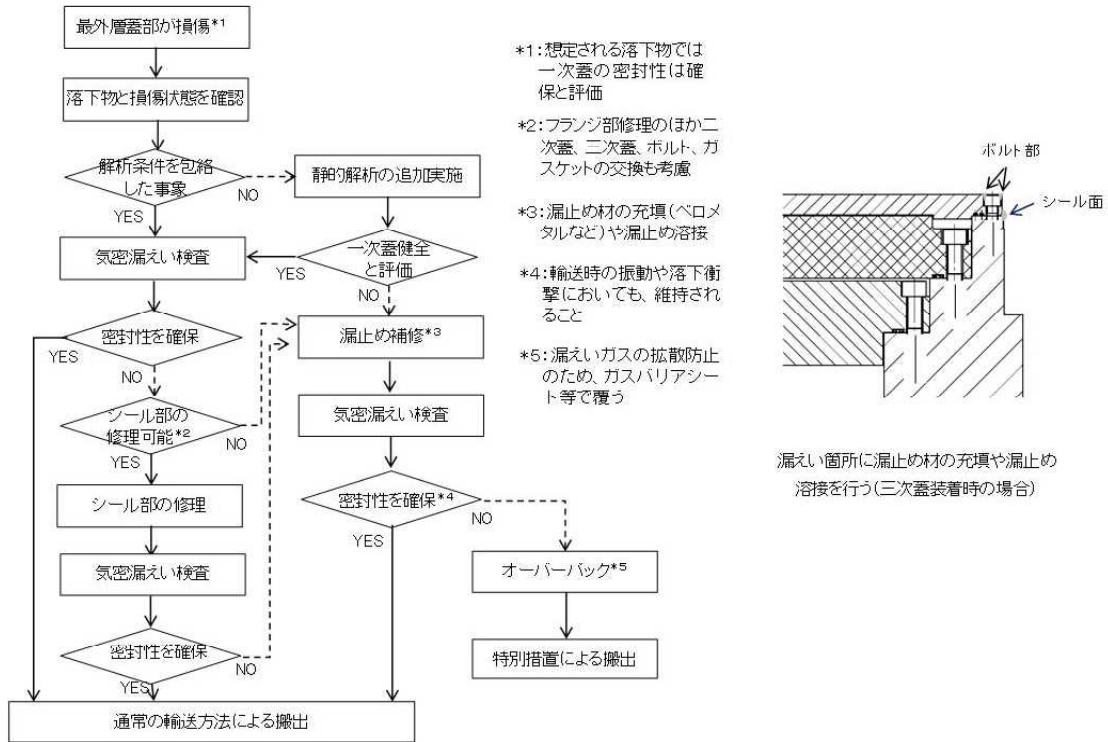
なお、最外層の蓋の気密漏洩検査については、損傷が軽微で通常の検査ができる場合は漏洩率を測定し、できない場合は「保守・修理」に移行する。

(b) 保守・修理

金属キャスクの一次蓋の密封性(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) は確保される。

最外層の蓋に異常がある場合は、漏洩箇所を漏止め材の充填や漏止め溶接等追加補修を行う。第 6-4 図に補修フローを示す。

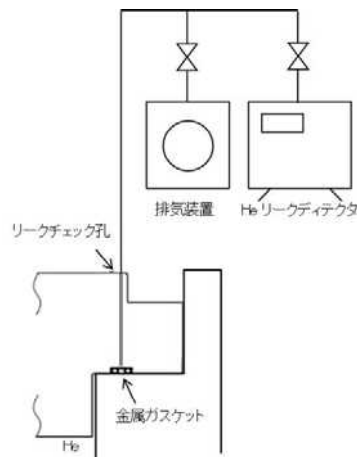


第 6-4 図 補修フロー

(c) 搬出に必要な試験・検査

必要な漏止めを行った上で、一般の試験条件の漏洩率を満足することを気密漏洩検査にて確認する。

特別措置での輸送では、安全な運搬を確保するため放射線障害防止の措置（オーバーパック等の拡散防止）を講ずる。第 6-5 図に、気密漏洩検査の例を示す。



第 6-5 図 気密漏洩検査(He リーク試験)の例

c. 除熱に係る初期確認，保守・修理，及び試験検査の対応について

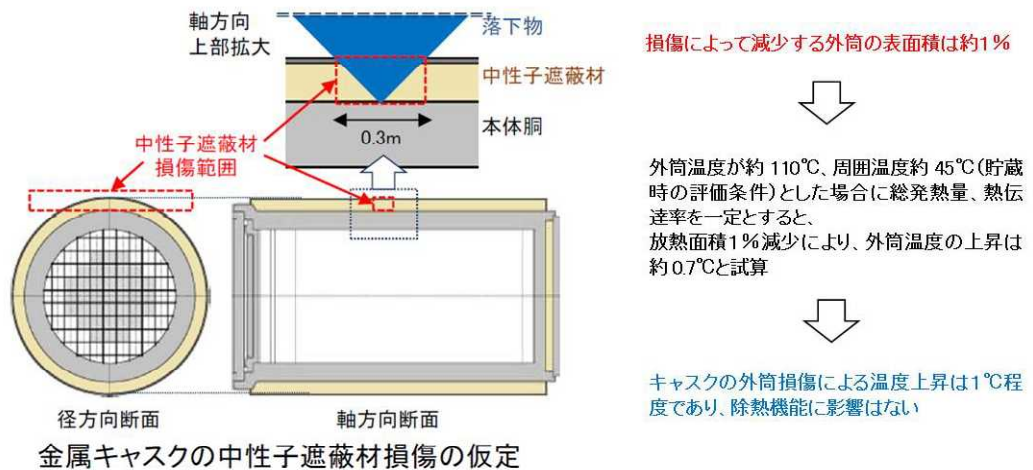
(a) 初期確認

金属キャスクの変形等により除熱機能が損なわれていないことの確認のため，外観検査として落下物や瓦礫を撤去した後外筒部の変形や損傷の有無を確認するとともに，金属キャスクの表面温度の測定として表面温度の温度計による測定を実施する。

(b) 保守・修理

仮にクレーンガーダが落下し金属キャスクの外筒が損傷することにより放熱面積が低下しても，温度上昇はわずかである。第 6-6 図に想定する損傷に伴う除熱への影響を示す。

状況に応じて，瓦礫撤去等により周囲に空間を設けて自然対流の促進を実施する。



第 6-6 図 想定する損傷に伴う除熱への影響

(c) 搬出に必要な試験・検査

使用済燃料貯蔵施設外へ搬出するために，輸送中に人が容易に近づくことができる表面（近接防止柵を設ける場合には，当該近接防止柵の表面）が法令基準を満足するか表面温度を測定する。

第 6-7 図に，可搬型温度計の例を示す。



第 6-7 図 可搬型温度計の例

d. 臨界防止に係る初期確認，保守・修理，及び試験検査の対応について

(a) 初期確認

金属キャスクの変形等により臨界機能が損なわれていないことの確認のため，雰囲気線量の測定として該当する金属キャスク周囲の線量上昇の有無を確認するとともに，外観検査として外筒部の変形や損傷，架台からの落下の有無を確認する。

なお，周囲の落下物や瓦礫は記録した上で，それらを撤去し，衝突しうる物が天井クレーンや天井スラブの衝突事象に包絡されることを確認する。

(b) 保守・修理

一次蓋の閉じ込め(密封)機能が維持されていれば水の浸入はないこと，除熱機能が維持されていれば，バスケットや燃料への影響はないこと及び落下物による衝撃力によるバスケットや燃料への影響はないことから，保守・修理は不要と考えられる。

(c) 搬出に必要な試験・検査

二重の水密性を試験で確認する。なお，冠水状態の未臨界を確保できる場合は，一重の密封性で輸送する場合もある。

## 7. 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、「6. 衝撃を受けた金属キャスクの対策」で実施する対策以外にも対策を講じる。

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じるとともに、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じる。

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等による衝撃を受けることはなく、基本的な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じる。

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。

### (1) 対策の全体方針

リサイクル燃料備蓄センターの主要既設設備の配置を第7-1図(1)に、主要既設設備に対する浸水の影響及び対応を第7-1表にそれぞれ示す。

主要な建物・構築物は T.P. +16m の貯蔵建屋設置盤に設置されており、仮想的な大規模津波（津波高さ T.P. +23m）による浸水が想定されるとともに、波圧による受入れ区域の損傷を仮定することから、このような状況を想定した対応を実施する。

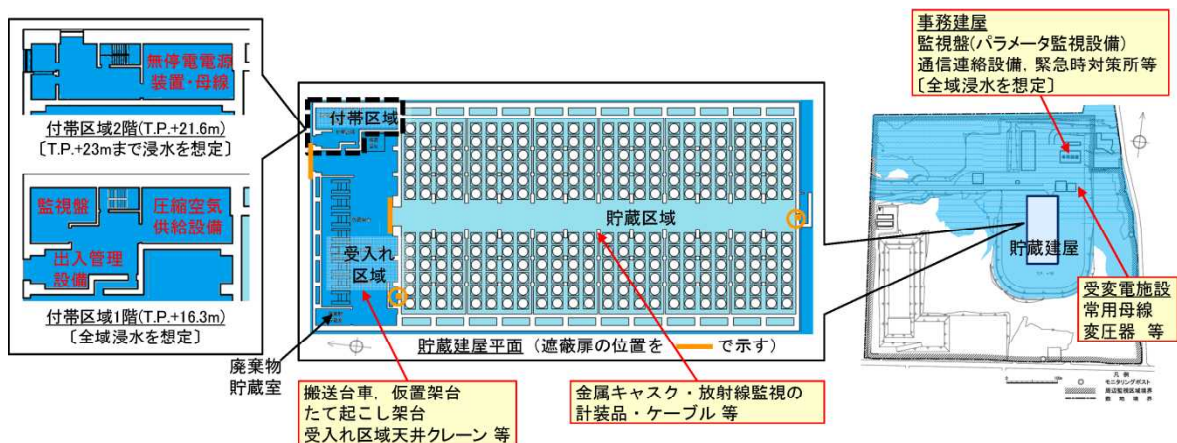
また、対応要員による基本的な安全機能維持の確認等は、津波の遡上波が到達しない標高（T.P. +30m）の敷地（以下「高台」という。）の予備緊急時対策所とする建物、可搬型計測機器、代替電源、燃料設備、資機材保管庫等を使用し対応する。予備緊急時対策所等の設置場所を第7-1図(2)に示す。

津波襲来後の対応のうち、金属キャスクの基本的な安全機能の維持を確認するための試験、検査及び当該確認結果のセンター外必要箇所への通信連絡については、速やかに対応し以後継続的に対応する。なお、基本的な安全機能のうち臨界防止機能維持については金属キャスクの設計で担保されることから、

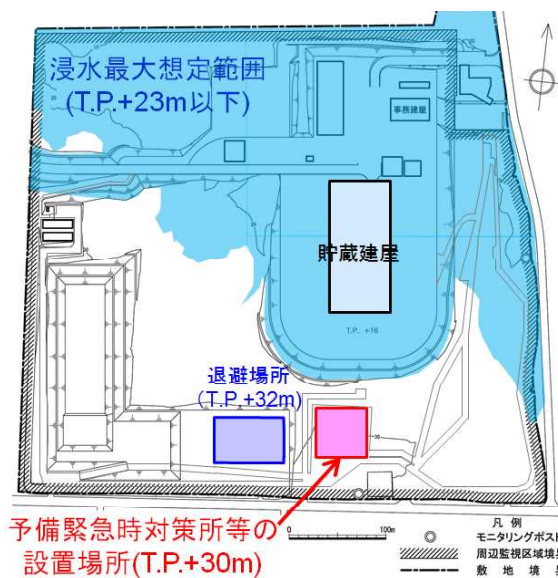
金属キャスクの基本的安全機能の維持を確認するための試験, 検査の対象とする基本的安全機能は, 遮蔽機能, 閉じ込め機能及び除熱機能とする。

また, 受入れ区域損傷に伴う重量物の落下・衝突の影響により万が一金属キャスクに損傷が認められた場合に, 金属キャスクの基本的安全機能を維持するために必要な補修及び金属キャスクを施設外へ搬出するために必要な確認については, 準備が整い次第順次実施する。

以上の措置に必要な設備及び資機材の仕様は, 一定期間外部支援に期待できないことを考慮するとともに調達の高難性も考慮したものとする。また, 高台の設備及び資機材の通常時における保管においては竜巻等の自然現象の影響を考慮する。



第 7-1 図(1) 主要既設設備の配置



第 7-1 図(2) 予備緊急時対策所等の設置場所



第 7-1 表 主要既設設備に対する浸水の影響及び対応

主要既設設備	主な影響	対応
<u>受入れ施設</u> ・天井クレーン ・搬送台車，圧縮空気供給設備 ・仮置架台，たて起こし架台，検査架台	・電源の喪失により天井クレーンによる移送が不能となる。 ・搬送台車及び圧縮空気供給設備の浸水により搬送が不能となる。	・金属キャスクの基本的安全機能は確保されることから，短期的な金属キャスクの搬送自体は必須とはならないため，中長期的に移送・搬送手段の復旧を図る。
<u>計測制御系統施設</u> ・金属キャスク蓋間圧力監視装置 ・金属キャスク表面温度監視装置 ・貯蔵建屋給排気温度監視装置	・監視盤室（貯蔵建屋）の浸水，計装品・ケーブル類の浸水，電源の喪失により機能を喪失する。	・基本的安全機能が確保されていることを継続的に確認するため，浸水及び機能喪失の程度に応じて，計装品やケーブル類の交換，代替計測等の手段により監視手段を確保する。 ・計装品・ケーブル類の予備品，代替計測機器，予備電源等を，津波が遡上しない場所に確保する。
<u>放射線管理施設</u> ・出入管理設備 ・個人管理用測定設備 ・エリアモニタリング設備 ・環境モニタリング設備	・付帯区域（貯蔵建屋）の浸水，電源の喪失等により，出入管理及び個人管理用測定の機能を喪失する。 ・監視盤室の浸水，ケーブル類の浸水，電源の喪失によりエリアモニタ，モニタリングポストの機能を喪失する。	・出入管理については，人による監視の強化で対応する。 ・代替計測に必要な機材（サーベイメータ）や予備の個人線量計等を，津波が遡上しない場所に確保する。
<u>電気設備</u> ・変圧器，遮断器，母線等 ・無停電電源装置	・受変電施設，電気品室（貯蔵建屋），ケーブル管路が浸水し，機能を喪失する。	・金属キャスク監視，放射線監視，通信連絡，設備復旧等の活動に要する予備の電源を，津波が遡上しない場所に確保する。
<u>通信連絡設備等</u>	・事務建屋内及び監視盤室（貯蔵建屋）内の設備が浸水し，機能を喪失する。	・予備の対応拠点及び機器（衛星携帯電話，無線連絡機器等）を，津波が遡上しない場所に確保する。
<u>廃棄施設</u>	・廃棄物貯蔵室が浸水し，ドラム缶の転倒，破損が発生する可能性がある。	・廃棄物の発生は通常想定されず，また発生しても極めて少量であり影響は小さいと考えられることから，中期的にドラム缶の整理を行う。
<u>消防用設備</u>	・監視盤室の浸水，ケーブル類の浸水，電源の喪失により火災感知設備の機能を喪失する。	・人による監視の強化で対応する。なお，既設電源が喪失している場合，貯蔵建屋内における電気火災発生の可能性は小さいと考えられる。なお，火災発生時には，津波が遡上しない場所に確保した消火器で消火する。

## (2) 個別の対策

### a. 金属キャスクの遮蔽機能の確認手段

通常時は、モニタリング設備により放射線量率を計測し、遮蔽機能が確保されていることを確認する。周辺監視区域境界付近のモニタリング設備として、周辺監視区域境界付近に固定モニタリング設備（モニタリングポスト2基及びモニタリングポイント12地点）を設置している。また、貯蔵建屋内のモニタリング設備として、エリアモニタリング設備（エリアモニタ）を設置している。

仮想的大規模津波襲来により、電源設備及びモニタリングポスト1基が水没した場合、高台を拠点とした遮蔽機能維持の確認として、金属キャスクの可視範囲及び周辺の状況について外観目視確認を行い、金属キャスク表面の損傷状況及び落下物の状況を確認する。

併せて高台に配備された可搬型計測機器を用い、通常時に測定している定点の周辺監視区域境界付近（モニタリングポスト所在地2点）及び貯蔵建屋内（7点）について代替計測を実施し有意な放射線の線量当量率上昇が認められないこと確認する。

有意な放射線の線量当量率上昇を検知した場合は、その原因と疑われる金属キャスク各々の線量率測定及び外観の目視確認により当該金属キャスクを特定し、仮設遮蔽の設置、柵等による区画等の必要な措置を講ずる。

遮蔽機能維持の確認のための金属キャスク等へのアクセスに当たっては、損傷した受入れ区域の建屋構造材の落下及び津波漂流物の漂着が想定されることから、状況に応じ重機を用いこれらを除去する。

### b. 金属キャスクの閉じ込め機能の確認手段

通常時は、蓋間圧力監視装置により蓋間圧力を計測し、閉じ込め機能が確保されていることを確認する。

仮想的大規模津波襲来により電源設備及び金属キャスクが水没した場合、高台を拠点とした閉じ込め機能維持の確認として、金属キャスクの可視範囲及び周辺の状況について外観目視確認を行う。

併せて周辺監視区域境界付近の線量当量率上昇がないことを可搬型計

測機器にて確認し、有意な変化が認められない場合は外観目視確認結果と合わせて閉じ込め機能が損なわれていないと判断し、その後準備が整い次第仮設計器による代替計測を実施する。

遮蔽機能維持の確認のための金属キャスク等へのアクセス確保については、「a. 金属キャスクの遮蔽機能の確認手段」と同様である。

#### c. 金属キャスクの除熱機能の確認手段

通常時は、表面温度監視装置及び給排気温度監視装置により、金属キャスク表面温度及び貯蔵建屋の給排気温度を計測し、監視盤室にて監視し、除熱機能が確保されていることを確認する。

仮想的な大規模津波襲来により電源設備及び金属キャスク周辺が浸水した場合の高台を拠点とした除熱機能維持の確認として、金属キャスクの可視範囲及び周辺の状況について外観目視確認を行い、金属キャスクの損傷等の状況を確認する。併せて高台の可搬型計測機器を用い、通常時に測定している金属キャスクの表面温度検出器の近傍と給排気温度検出器近傍の代替計測を実施し、有意な温度上昇が認められないこと確認する。

除熱機能維持の確認のための金属キャスク等へのアクセス確保については、「a. 金属キャスクの遮蔽機能の確認手段」と同様である。

### (3) 代替計測

#### a. 遮蔽機能の代替計測

通常時は、貯蔵建屋内のモニタリング設備であるエリアモニタリング設備（エリアモニタ）及び周辺監視区域境界付近固定モニタリング設備の内モニタリングポスト2基により放射線の線量当量率を計測し、遮蔽機能が確保されていることを確認する。

既設のモニタリング設備は、仮想的な大規模津波襲来による浸水の影響で電源設備及びモニタリングポスト1基が水没して機能喪失し、放射線の線量当量率の監視ができなくなることから、津波襲来後の確認は可搬型計測機器を用いた代替計測で対応する。

##### (a) エリアモニタリング設備

可搬式の放射線サーベイメータにより、ガンマ線と中性子を計測する。測定ポイントは通常時に測定している定点（貯蔵建屋内7点）と

し、通常時測定値との比較により遮蔽機能の異常の判断を行う。

(b) 周辺監視区域境界付近モニタリング設備

可搬式の放射線サーベイメータにより、ガンマ線と中性子を計測する。測定ポイントは通常時に測定している定点（既設モニタリングポスト所在地2点）とし、通常時測定値との比較により遮蔽機能の異常の判断を行う。

なお、通常時の測定値を大幅に超えるような測定値が得られた場合には、その原因と疑われる金属キャスク各々の線量率測定及び外観の目視確認を重点的に実施し、仮設の遮蔽の設置、柵等の物理的障壁設置による接近制限等必要な措置を講ずる。

使用機材は以下のとおりである。

- ・可搬型線量当量率測定用サーベイメータ

計測方式                      シンチレーション, 電離箱

数量                              各1台\*

- ・可搬型中性子サーベイメータ

計測方式                       $^3\text{He}$  比例計数管

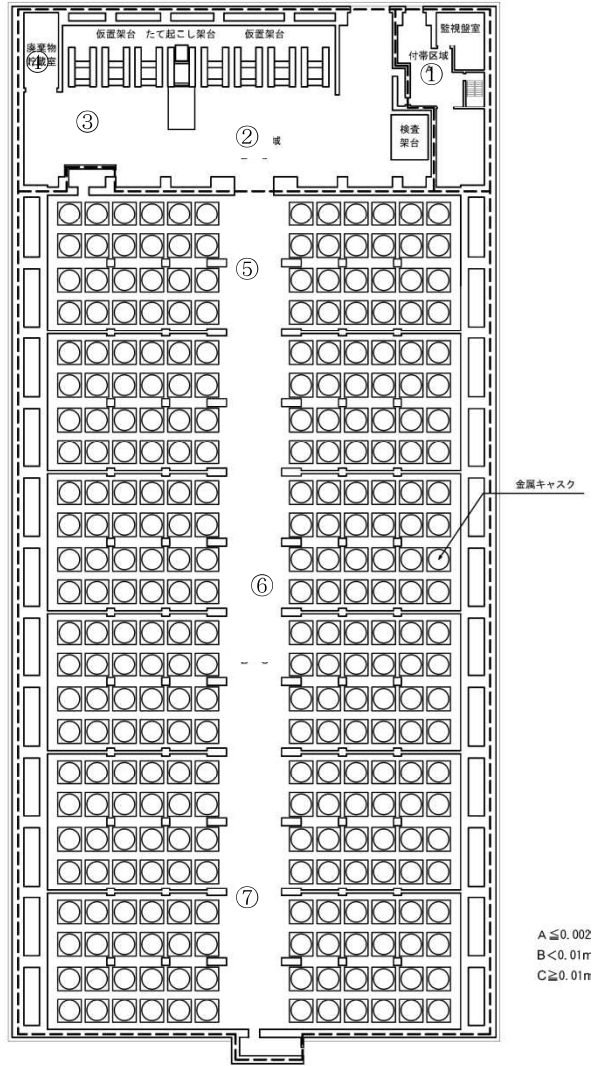
数量                              1台\*

\*) 点検校正のため高台資材保管庫から持ち出す場合は、通常使用しているサーベイメータの中から高台資材保管庫に補充する。

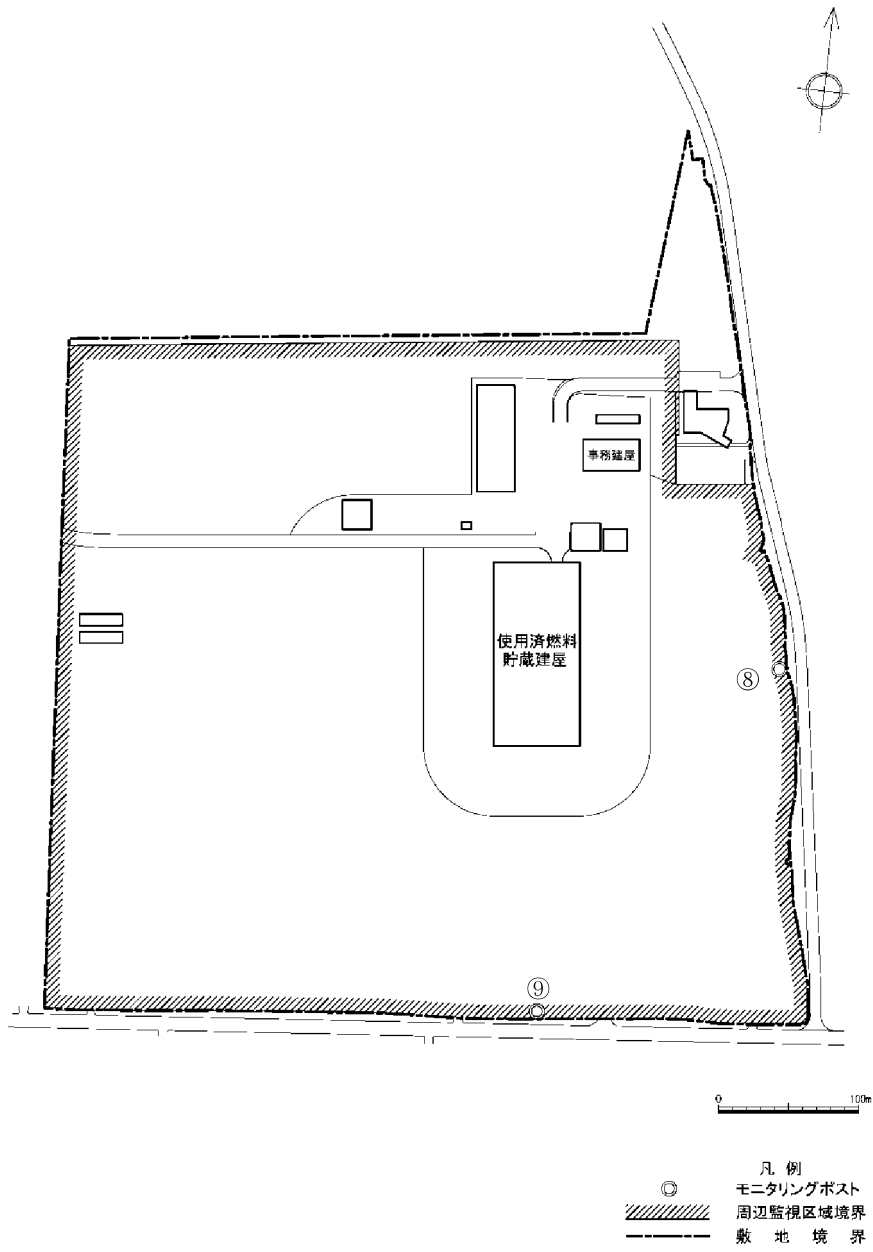
代替計測に用いる可搬型線量当量率測定用サーベイメータは、津波襲来時の浸水の影響を受けない高台の資材保管庫に保管し、速やかな確認ができるよう保管環境を維持するとともに適時充電しておく。

貯蔵建屋内の測定ポイントを第7-2図(1)に、周辺監視区域境界付近の測定ポイントを第7-2図(2)にそれぞれ示す。

貯蔵建屋 1 階



第 7-2 図 (1) 貯蔵建屋内の測定ポイント



第 7-2 図(2) 周辺監視区域境界付近の測定ポイント

## b. 閉じ込め機能の代替計測

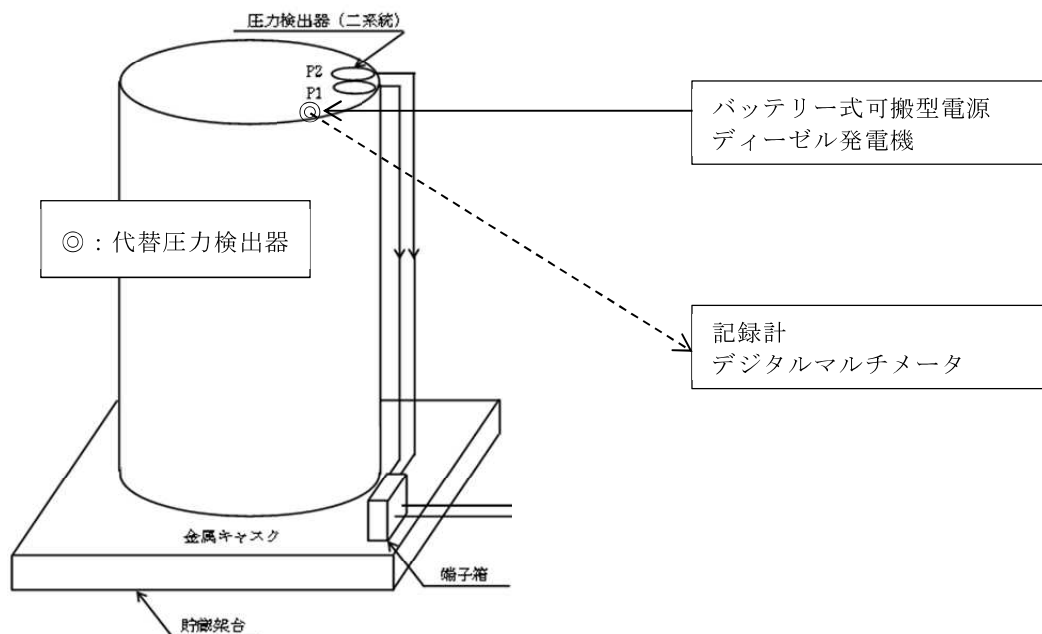
通常時は、蓋間圧力監視装置により金属キャスクの蓋間圧力を計測し、閉じ込め機能が確保されていることを確認する。

貯蔵区域に貯蔵中の金属キャスクについては、仮想的な大規模津波襲来時、貯蔵区域への津波の侵入に伴い金属キャスク上部まで水没し、既設の圧力検出器の機能喪失が想定される。蓋間圧力は可搬型計測機器による計測が困難であることから、津波の冠水状態が解消した後、清掃や仮設電源設備の設置等の準備作業を行い、代替の圧力検出器を取り付け、蓋間圧力を確認し有意な圧力低下が生じていないことを確認する。

### (a) 蓋間圧力の確認

金属キャスクの蓋部にて代替の圧力検出器の取付けと仮設電源の接続を行い、出力信号をデジタルマルチメータあるいは記録計を接続して測定値を読み取ることとし、バッテリー型可搬式電源、ディーゼル発電機等を電源として用いる。

金属キャスクの蓋間圧力の代替計測の概要を第7-3図に示す。



第7-3図 金属キャスクの蓋間圧力の代替計測の概要

(b) 使用機材

使用機材は以下のとおりである。

- ・代替圧力検出器 最大 300 台程度<sup>\*1</sup> (うち予備 12 台<sup>\*1</sup>)
- ・記録計又はデジタルマルチメータ 最大 10 台<sup>\*1</sup> (うち予備 2 台<sup>\*1</sup>)
- ・バッテリー式可搬型電源又は可搬型ディーゼル発電機  
2 台<sup>\*2</sup> (うち予備 1 台<sup>\*2</sup>)

\*1) いずれも金属キャスクの最大保管数量時

\*2) 金属キャスクの保管数量に応じ変動

(c) 準備作業と期間

仮想的な大規模津波により貯蔵建屋内は浸水し、電源設備も浸水することから貯蔵建屋内の照明器具類もすべて使用できなくなる。そのため、海水の排水後、仮設照明の設置と並行して清掃作業を進めることになる。また、金属キャスクの上部まで浸水することから圧力検出器は使用できなくなり代替の圧力検出器の取付けが必要となるため、金属キャスク上部へのアクセス用足場の設置や金属キャスク蓋部の洗浄も必要となる。

代替計測の準備が完了したものから計測は開始することになるが、全 288 基の金属キャスクの代替計測準備完了までには、仮設照明設置等の準備作業を含めて約 2 ヶ月程度を有する見込みである (受入れ区域の金属キャスクは含まない)。

なお、福島第一原子力発電所及び東海第二発電所でのキャスク保管実績では、蓋間圧力の異常を検知した例は無く、また仮に基準漏洩率の 100 倍で漏洩したとしても大気圧に達するまで約 3 ヶ月を要するとの評価<sup>\*3</sup> もあることから、最長で欠測期間が 2 ヶ月程度となるが、浸水による影響だけであり閉じ込め機能には問題はないと考えられる。

\*3) 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規制要求の考え方 (案) (原子力規制委員会使用済燃料輸送貯蔵兼用キャスク貯蔵に関する検討チーム, H29.6.26)



### c. 除熱機能の代替計測

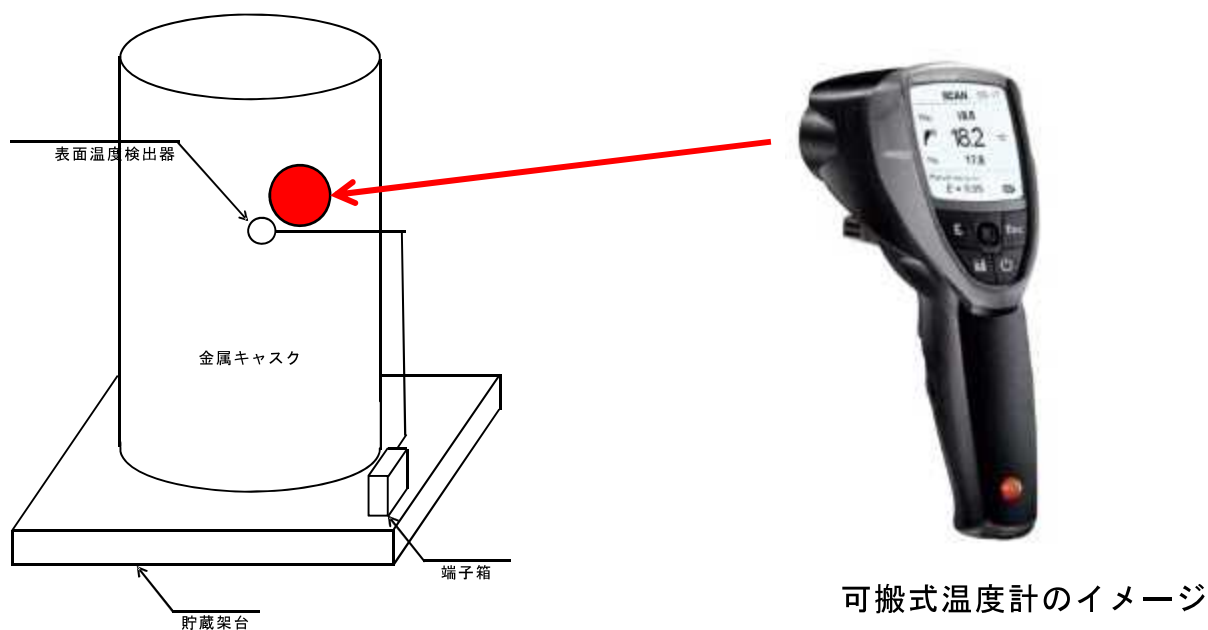
通常時は、表面温度監視装置及び給排気温度監視装置により、金属キャスク表面温度及び貯蔵建屋の給排気温度を計測し、監視盤室にて監視し、除熱機能が確保されていることを確認する。

仮想的な大規模津波襲来により電源設備及び金属キャスクが水没した場合、機能を喪失することから、高台に配備された可搬型計測機器を用い、通常時に測定している金属キャスクの表面温度検出器の近傍と給排気温度検出器近傍の代替計測を実施し、有意な温度上昇が認められないことを確認する。

#### (a) 金属キャスク表面温度

金属キャスク表面温度は、非接触型の可搬式温度計を用いて金属キャスクの表面温度検出器近傍の温度を計測する。

金属キャスク表面温度の代替計測の概要を第7-4図に示す。



第7-4図 金属キャスク表面温度の代替計測の概要

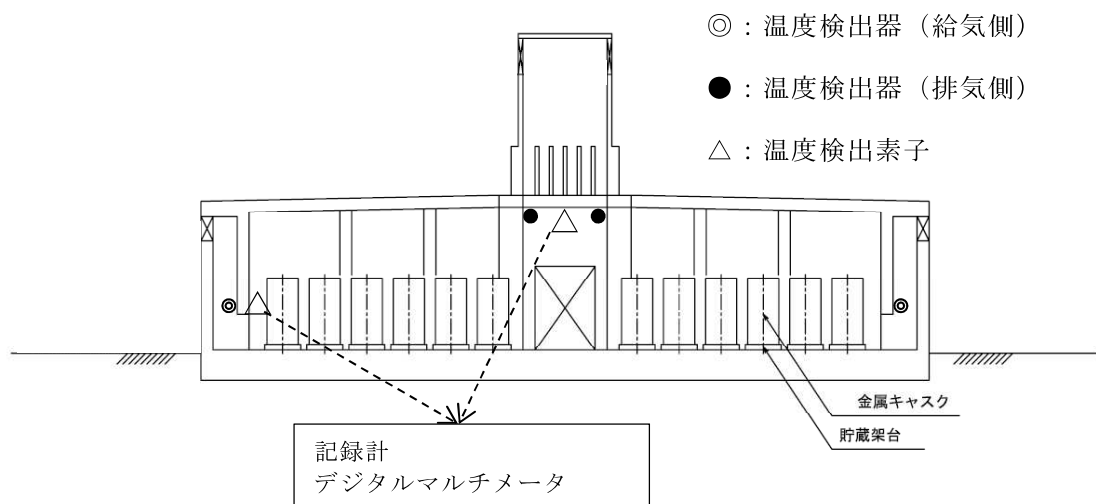
(b) 貯蔵建屋給排気温度

貯蔵建屋給排気温度は、測温抵抗体等の温度検出素子をポールに取り付けて既設給排気温度計近傍に近づけ、出力信号をデジタルマルチメータまたは記録計に接続して測定値を読み取る。

記録計、デジタルマルチメータの電源として、バッテリー式可搬型電源またはディーゼル発電機を用いる。

代替計測に用いる温度検出素子、可搬式温度計、電源等は高台の資機材保管庫に保管し、保管環境を維持するとともに適時充電が可能な設計とする。

貯蔵建屋給排気温度の代替計測の概要を第7-5図に示す。



第7-5図 貯蔵建屋給排気温度の代替計測の概要

d. 代替計測時の浸水想定及び漂流物の影響

代替計測時の貯蔵区域の浸水想定は、貯蔵区域－受入れ区域間の遮蔽扉が「開」のときに地震が発生し電源喪失することで速やかな「閉」操作が困難な状態での津波襲来を想定することから、受入れ区域の損傷と相まって、津波は貯蔵区域－受入れ区域間の遮蔽扉開口部から貯蔵区域内に流入する想定とし、同区域の浸水深は貯蔵建屋外と同じ7mとなり、一時的に高さ約5mの金属キャスク上部まで冠水状態となる。

このため、貯蔵区域の金属キャスクの外観目視確認及び代替計測については、同区域の冠水状態が解消（状況に応じ排水作業）した後、浸水とともに持ち込まれ貯蔵区域内に堆積した土砂、漂流物等を除去した上で実施する。

(4) 高台に設置する設備及び予め配備する資機材

a. 予備緊急時対策所

仮想的な大規模津波襲来時、事務建屋等の浸水により事務建屋内の緊急時対策本部が機能しないことから、高台にユニットハウス（軽量鉄骨プレハブ建築物）を設置し、仮想的な大規模津波襲来時の対応拠点とする。

予備緊急時対策所は、対応要員の居住環境を考慮し空調、照明等を設置し、外部電源が喪失した場合は電源車から給電する。



第 7-6 図 予備緊急時対策所  
（イメージ）

b. 災害対応用電源

地震による送電鉄塔の倒壊等に伴い外部電源喪失が発生した場合でも、無停電電源装置から必要な機器への電源供給は継続され、無停電電源装置の給電時間を超える停電が発生した場合には電源車から無停電電源装置に電気を供給する設計としているが、仮想的な大規模津波襲来時には、無停電電源装置を含む電源設備も浸水し機能喪失が想定される。

仮想的な大規模津波襲来時は、既設の基本的な安全機能の監視装置も浸水により機能喪失し早期の復旧が見込めないことから、既設設備への早期の電源供給は不要である。

一方で、基本的な安全機能維持を確認するための検査、試験ができること等を満足するため、必要な活動は高台の予備緊急時対策所を拠点として対応することから、仮想的な大規模津波襲来時は、電源車により電源供給する。

また、貯蔵建屋設置盤における対応（補修等復旧作業）に必要な電源は、可搬型ディーゼル発電機により供給する。

・ 電源車

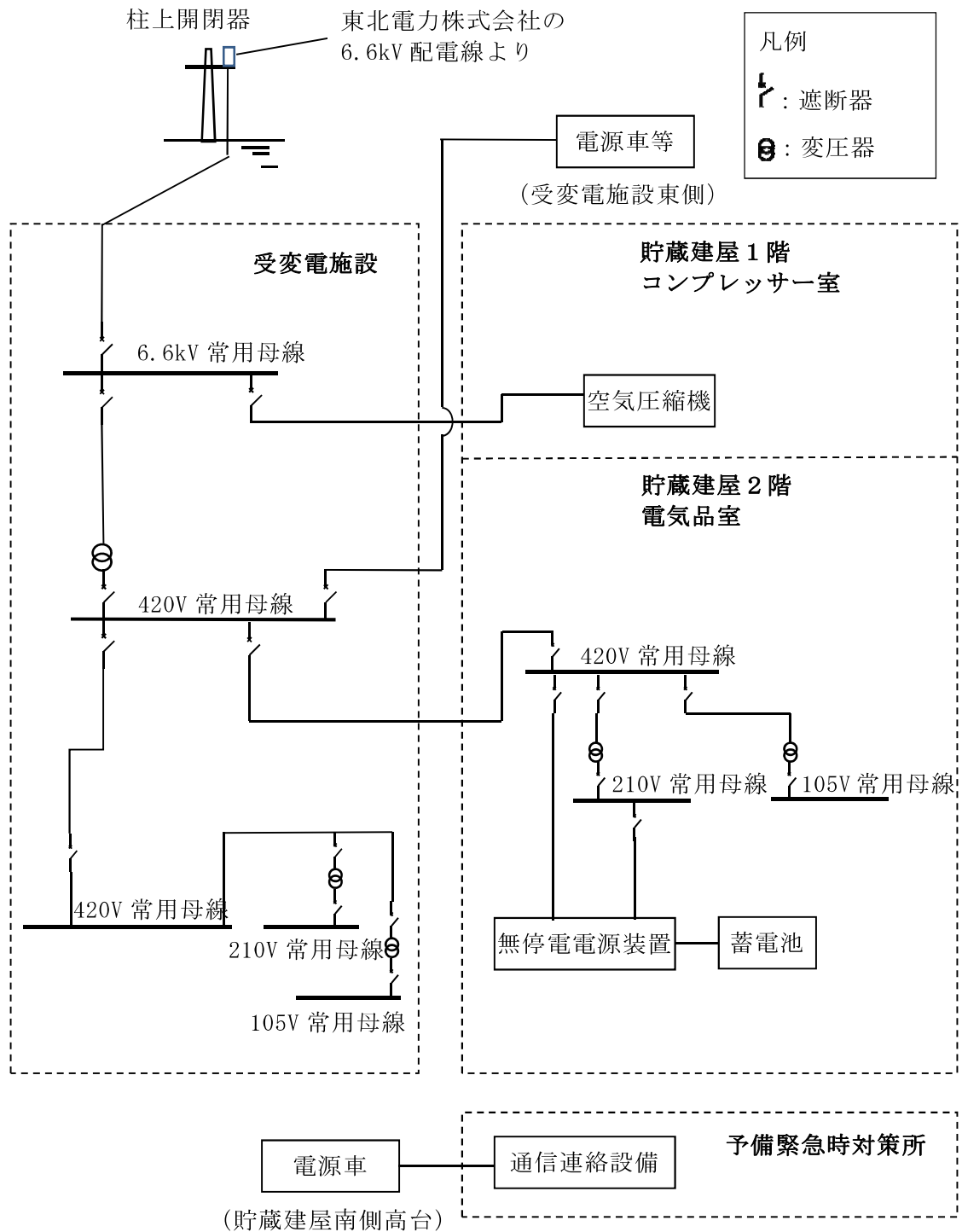
容量 250kVA

燃料 軽油

・ 可搬型ディーゼル発電機

燃料 軽油

リサイクル燃料備蓄センターの電気系統概略を第7-7図に示す。



通常時、電源車は貯蔵建屋南側高台に設置

外部電源喪失時には受変電施設東側に移動して給電

第7-7図 リサイクル燃料備蓄センター電気系統概略

c. 燃料設備

地下式の燃料貯蔵タンクを設置し、仮想的な大規模津波襲来時の対応に必要な電源車及び可搬型ディーゼル発電機の補給用軽油を貯蔵する。

電源を喪失した場合でも、電源車等への燃料の補給を行える手段を確保する。

・燃料貯蔵タンク（地下式）

容量(ℓ)            4000/個

個数                3（うち予備1）

d. 可搬型計測機器

「(3)代替計測」に記載のとおり。

e. 通信連絡設備

センター内外通信連絡設備の設計については「第21条 通信連絡設備等」に記載のとおりである。

仮想的な大規模津波襲来時は、事務建屋等が浸水し内包するセンター内外通信連絡設備が機能喪失することから、代替となるセンター内外通信連絡設備を使用する。

- ・衛星携帯電話, 衛星携帯電話接続の FAX
- ・携帯型無線連絡設備
- ・通信用バッテリー, 蓄電池

f. 放射線管理資機材

仮想的な大規模津波襲来時の対策要員による復旧作業等における放射線管理のため、放射線管理資機材を使用する。

- ・電子式線量計
- ・GM管式サーベイメータ
- ・装備（タイベック, 全面マスク等）

g. 資機材保管庫

資機材保管庫としてユニットハウスまたは防災備蓄倉庫を設置する。

資機材保管庫には、可搬型計測機器等に加え、対応要員用に食料, 水等を配備しておく。

## h. 重機等

仮想的な大規模津波による波圧により受入れ区域が損傷することから、落下・堆積した建屋構成材等について以下に例示する重機による撤去を想定する。また、津波漂流物の漂着が想定されることから、アクセス確保作業について重機による撤去を想定する。重機の燃料は軽油とし地下式の燃料貯蔵タンクを補給源とする。

また、復旧作業等に使用する軽油を燃料とする多目的車両を使用する。

- ・ホイールローダ
- ・バックホウ
- ・ユニック
- ・トラック
- ・多目的車両（普通車両）

## i. 大津波警報発生時の退避場所

大津波警報発生時には、津波の遡上波が到達しない退避場所に退避することとする。退避場所は予備緊急時対策所等の設置場所の西側（第7-1図(2)参照）であり、地震発生後の場合は退避場所の状況を確認の上、退避ルートを指示する。

退避人員として社員約65人、協力会社約70人を見込み、最大200人を想定し一次避難所として900m<sup>2</sup>（4.5m<sup>2</sup>/人）以上を確保する。

（参考）1都4県の避難所面積

- ・一次避難所における避難者1人当たりの収納面積：1.57～2.93m<sup>2</sup>/人
- ・二次避難所における避難者1人当たりの収納面積：2.15～3.98m<sup>2</sup>/人  
（中央防災会議「首都直下地震避難対策等専門調査会」による「首都直下地震避難対策等専門調査会報告」避難者に係る対策の参考資料(H20.10)より）

なお、津波状況の進展により、津波襲来後の活動（インフラの準備、敷地内状況の目視確認、外部への被災状況の通報連絡、金属キャスクの確認、放射線測定等）に要する要員のみを残す。

## 仮想的大規模津波による浸水状況の補足説明

## 1. 目的

青森県の想定津波の2倍（T.P.+23m）が十分に保守的であることを異なる視点から確認するため、申請時の波源モデルのすべり量をどの程度大きくするとT.P.+23m程度の津波となるかを算定し、このすべり量が既往の知見に比べ十分に保守的であることを確認した結果、申請時の波源モデルのすべり量を2.4倍～2.5倍（平均すべり量21.7m～22.6m, 超大すべり量86.9m～90.5m）とすることで、施設設置盤と建屋周りの水位がほぼT.P.+23mとなった。このすべり量は、既往の巨大地震及び将来予測のモデルのすべり量の2～3倍となっており（別添1-1図及び別添1-2図参照）、これからも仮想的大規模津波は十分に保守的であると言える。

ここでは、貯蔵建屋周りの浸水及び流れの状況として参考にする観点から、当該解析の結果に基づき貯蔵建屋周りの浸水及び流れの状況を考察する。

## 2. 考察

## (1) 等価なモデルによる浸水状況

仮想的な大規模津波と等価なモデルにおける敷地沿岸の水位及び流速の経時的な変化を別添1-3図、敷地の水位及び流速の経時的な変化を別添1-4図にそれぞれ示す。また貯蔵建屋周りの水位及び流速の分布の経時的な変化並びに状況の説明を別添1-5図に示す。

## (2) 等価なモデルによる浸水状況の考察

貯蔵建屋周りの浸水深、流速及び流向の推移から、貯蔵建屋周りの浸水状況について以下のとおりまとめられる。

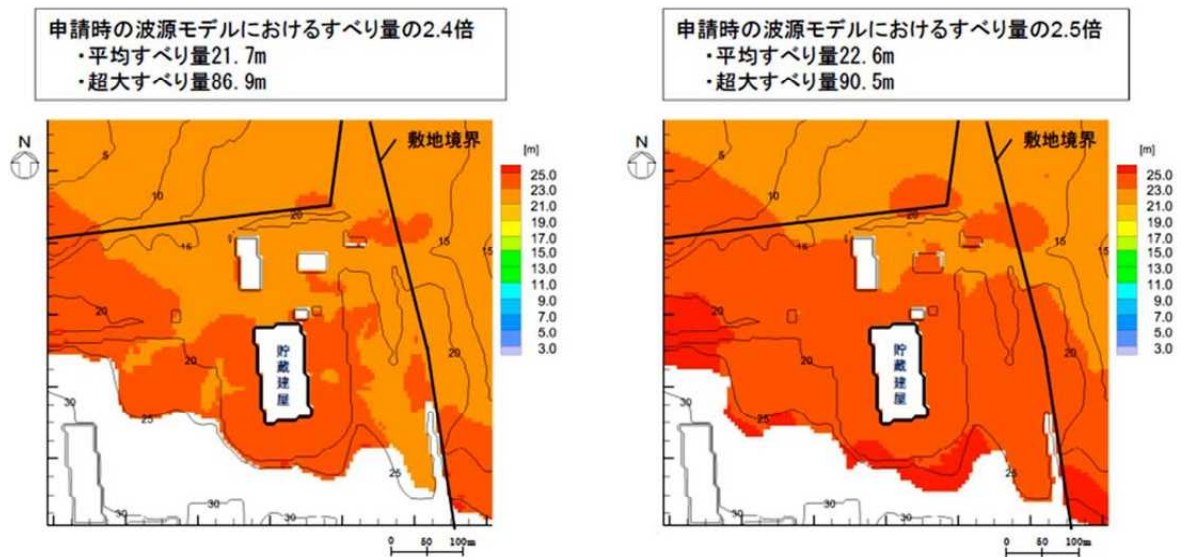
- a. 津波による遡上波は、貯蔵建屋設置盤の北側の丘陵等を迂回する形で敷地の北西側より貯蔵建屋設置盤に到達する。
- b. 貯蔵建屋設置盤に到達した遡上波は、貯蔵建屋の北西角で2つの流れに分かれる。貯蔵建屋北側から東側に回り込む流れと貯蔵建屋西側から南側に回り込む流れに分かれる。



- c. 貯蔵建屋近辺において遡上波による比較的高い流速が発生する主なケースは、主に以下の2つである。
- (a) 浸水の初期段階における貯蔵建屋北西側での北西→南東方向の流れ（流速～7m/s）であり、貯蔵建屋設置盤への遡上波の流入の主成分として発生する。（別添 1-5 図のスナップショット②～③参照）
  - (b) 浸水の中期段階における貯蔵建屋外壁沿いでの発生貯蔵建屋の外壁に沿って発生する流れ（貯蔵建屋西側及び東側で北→南方向、貯蔵建屋南側で西→東方向、流速～10m/s）であり、貯蔵建屋設置盤内の拡がりを持った領域を浸水させ、水位（浸水深）を均一化する方向に発生する。（別添 1-5 図のスナップショット③～④参照）
- d. 貯蔵建屋北西角付近にて流れが分かれる際には、貯蔵建屋設置盤の拡がりを持った領域を浸水させ水位を均一化するように流れの方向の変化が形成されており、貯蔵建屋前面における流れのせき上げは顕著なものではない。貯蔵建屋外壁に加わる力の様相は、防波堤や防潮堤のような、遡上波を正面から受けて流れをせき止める（あるいは流れの方向を変える）方向に加わる力とは異なっている。
- e. 貯蔵建屋設置盤における水位（浸水深）と流速の関係は、おおむね相反する（水位（浸水深）が増すに従い、流速は低下していく）傾向にある。流れを発生させるメカニズムとして、遡上波自体が持つ力ではなく、下流側で水位を均一化する力（重力）の寄与が大きいことが考えられる。

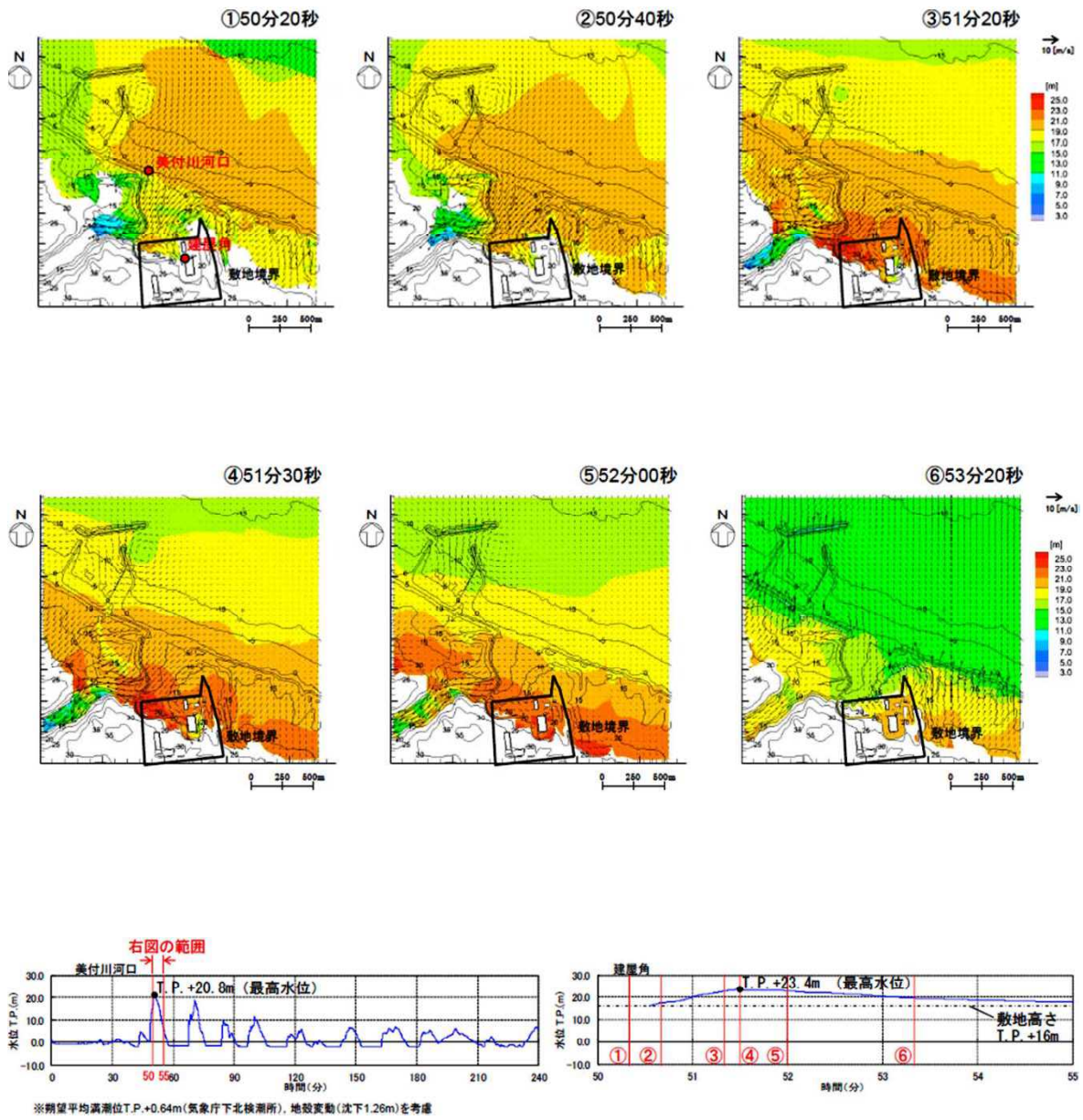
	検討モデル			巨大地震のすべり量に関する既往知見		
	青森県による津波想定	申請時の波源モデル	仮想的な大規模津波と等価なモデル 申請時の波源モデルの2.4~2.5倍	2011年東北地方太平洋沖型地震のモデル <杉野ほか(2014)>	南海トラフの巨大地震の津波断層モデル <内閣府(2012)>	世界のMw9.0クラスの巨大津波
モデル図						
Mw	9.0	9.07	9.32~9.34	9.1	9.1	9.5
断層面積	—	11.9万km <sup>2</sup>	11.9万km <sup>2</sup>	13.5万km <sup>2</sup>	14万km <sup>2</sup>	13.5万km <sup>2</sup>
平均すべり量	—	9.05m	21.7 ~ 22.6m	10.4m	約10m	約11m
超大すべり量	45~50m	36.20m	86.9 ~ 90.5m	31.2m	約40m	28~32m
平均応力降下量	—	3.0MPa	7.2~7.5MPa	3.1MPa	3.0MPa	—

別添 1-1 図 検討モデルと既往知見における諸元の比較

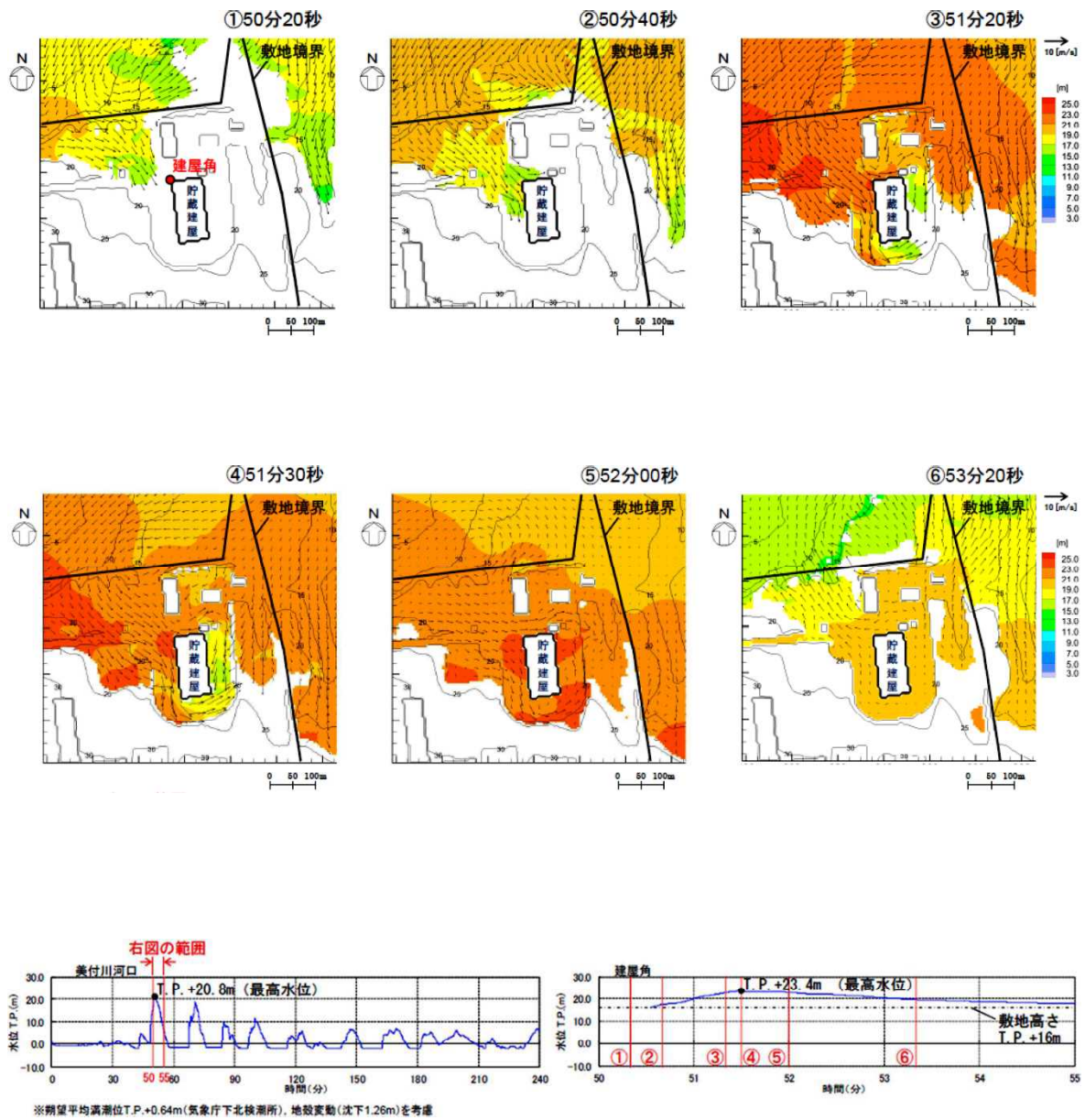


別添 1-2 図 仮想的な大規模津波と等価なモデルにおける最高水位分布\*1

\*1) 最高水位分布とは、各計算格子における全時刻歴の最高水位を図化したものである。  
 \*2) この解析結果は仮想的な大規模津波 23m の妥当性を検証するために実施したものである。



別添 1-3 図 仮想的な大規模津波と等価なモデルにおける  
 水位及び流速のスナップショット（敷地沿岸）  
 （申請時の波源モデルにおけるすべり量の 2.4 倍のケースを例示）



別添 1-4 図 仮想的な大規模津波と等価なモデルにおける  
 水位及び流速のスナップショット（敷地）  
 （申請時の波源モデルにおけるすべり量の 2.4 倍のケースを例示）

時刻	水位分布*	流速分布*	経時的な状況の説明
① 50分 20秒			<ul style="list-style-type: none"> <li>貯蔵建屋設置盤の北側（海岸方向）には丘陵及び築堤状の自然地形があり、津波による遡上波はこれらの自然地形を迂回する形で、敷地の北西側から貯蔵建屋設置盤に到達する。</li> </ul>
② 50分 40秒			<ul style="list-style-type: none"> <li>遡上波が貯蔵建屋の北西角に到達する。（貯蔵建屋外壁付近の浸水深は～3m程度）</li> <li>遡上波は貯蔵建屋北側外壁に沿って東向きに進む水流と、貯蔵建屋西側外壁に沿って南向きに進む水流とに分かれる。</li> <li>流速のピークは貯蔵建屋の北西側（図中○で示す領域）で生じている（流速～7m/s）が、貯蔵建屋設置盤の一部しか浸水していないことから、貯蔵建屋設置盤における流れは主に浸水域を拡げる方向に生じている。</li> <li>このため、貯蔵建屋付近では流速は低下し、また流速の主成分は貯蔵建屋外壁と平行な方向に生じている。</li> </ul>
③ 51分 20秒			<ul style="list-style-type: none"> <li>貯蔵建屋設置盤の浸水が進むに従い、貯蔵建屋北側外壁沿いの流れは東側に、西側外壁沿いの流れは南側にそれぞれ回り込み、浸水域が拡大している。</li> <li>海岸側の津波高さ上昇に伴い、貯蔵建屋北側の自然地形を乗り越える形で遡上波が到達するが、既に到達している北西側からの遡上波に遮られ、貯蔵建屋北側に流れが直接衝突する状況とはなっていない。</li> <li>貯蔵建屋設置盤への遡上波として、貯蔵建屋に向かう流れ（流速～7m/s）が北西側で生じている。（図中○で示す領域）</li> <li>貯蔵建屋の西側及び南側で速度の高い（～10m/s）流れが一部生じているが、貯蔵建屋設置盤を浸水させる方向の流れであり、貯蔵建屋外壁に沿う方向に流速の主成分が生じている。</li> </ul>

\*) 矢印は流向及び流速を示す

別添 1-5 図 仮想的な大規模津波と等価なモデルにおける水位及び流速のスナップショット（貯蔵建屋周り）（1/2）  
（申請時の波源モデルにおけるすべり量の 2.4 倍のケースを例示）

時刻	水位分布*	流速分布*	経時的な状況の説明
④ 51分 30秒			<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 貯蔵建屋北西角では水位がピークに達し、また貯蔵建屋設置盤のほぼ全域が浸水に至る。</li> <li>・ 貯蔵建屋の北西側と南東側に水位の差があるため、水位を均一化する方向に、貯蔵建屋の外壁に沿って速度の高い流れが継続している。</li> <li>・ 一方、敷地北西側の津波高さがピークを越えつつあることから、貯蔵建屋設置盤の北西側からの遡上波の流速は低下し始める。</li> <li>・ 流向が南向きから東向きに変化する貯蔵建屋設置盤南西側の法面でせき上がりが見られるが、貯蔵建屋外壁付近では顕著なせき上がりは見られない。</li> </ul>
⑤ 52分 00秒			<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 貯蔵建屋設置盤の浸水が進行することにより、水位が飽和状態に近づくとともに、貯蔵建屋設置盤の水位が均一に近い状態となる。</li> <li>・ このため、貯蔵建屋の外壁に沿った流れも含めて、貯蔵建屋の周囲における流速は大幅に低下する。</li> </ul>
⑥ 53分 20秒			<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 敷地北西側の津波高さが低下を始める。</li> <li>・ これに伴い、貯蔵建屋設置盤を浸水させていた海水が、標高の低い敷地の北西側から引き始めるため、浸水時とは逆向きの流れが生じる。</li> <li>・ 貯蔵建屋の周囲では、建屋東側→北側→北西側の流れ及び建屋南側→西側→北西側の流れが生じる。</li> <li>・ 海水が引き始めるとともに、貯蔵建屋設置盤の水位は低下を始める。</li> </ul>

\*) 矢印は流向及び流速を示す

別添 1-5 図 仮想的な大規模津波と等価なモデルにおける水位及び流速のスナップショット（貯蔵建屋周り）（2/2）  
（申請時の波源モデルにおけるすべり量の 2.4 倍のケースを例示）

(参考) 津波解析に関する補足説明

津波解析の基礎方程式には、非線形長波理論として後藤・小川 (1982) の方法を採用している。後藤・小川 (1982) の方法の基礎方程式は連続式と運動方程式からなり、運動方程式には移流、圧力勾配、渦動粘性、底面摩擦を含む。なお、運動の鉛直成分は圧力分布に影響を及ぼさず、圧力は静水圧分布と仮定することで、津波の運動は平面二次元の問題として扱われる。

この式を入力された境界条件 (地形条件) のもとで数値解析的に解くことで、未知数である  $\eta$  (水位),  $M$  ( $x$  方向の流量),  $N$  ( $y$  方向の流量) が算出される。

・連続の式

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0$$

・運動方程式

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - K_m \left( \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) + \gamma_{bi}^2 \left( \frac{M \sqrt{M^2 + N^2}}{D^2} \right) = 0$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - K_m \left( \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) + \gamma_{bi}^2 \left( \frac{N \sqrt{M^2 + N^2}}{D^2} \right) = 0$$

ただし、

$x, y$  : 水平方向座標,  $t$  : 時間,  $g$  : 重力加速度,

$M, N$  : それぞれ  $x, y$  方向の線流量,  $D$  : 水の厚さ ( $D = h + \eta$ ),

$h$  : もとの水深,  $\eta$  : 水位,  $K_m$  : 海水の水平渦動粘性係数,

$\gamma_{bi}^2$  : 摩擦係数 ( $= gn_1^2 / D^{1/3}$ ,  $n_1$  : 海底のマニングの粗度係数)

である。

(出典：原子力発電所の津波評価技術 2016, 平成 28 年 9 月)

津波解析の計算条件を別添 1-1 表に示す。

別添 1-1 表 津波解析の計算条件

項目	計算条件
計算時間間隔	0.1 秒
計算開始潮位	T. P. + 0.64m (朔望平均満潮位)
基礎方程式及び数値計算スキーム	非線形長波理論 (浅水理論) に基づく後藤・小川 (1982) の方法
沖側境界条件	後藤・小川 (1982) の自由透過の条件
陸側境界条件	敷地周辺 : (計算格子間隔 80m ~ 5m) の領域は陸上遡上境界条件 それ以外は完全反射条件
初期条件	Mansinha and Smylie (1971) の方法
海底摩擦係数	マニングの粗度係数 ( $n=0.03s/m^{1/3}$ )
水平渦動粘性係数	考慮していない

## 津波漂流物について

## 1. 目的

敷地内が津波により浸水した場合の津波漂流物による使用済燃料貯蔵施設の基本的安全機能への影響が考えられるため、調査により漂流物となる可能性のある物品を把握するとともに、調査結果に基づき物品の抽出を行い、大型の津波漂流物として参照する物品を設定する。

## 2. 津波漂流物調査

リサイクル燃料備蓄センターの敷地内及び敷地外で津波漂流物となる可能性のある物品を把握するため、津波漂流物調査を平成 28 年 11 月から 12 月にかけて実施した。

## (1) 調査方法

## a. 調査の範囲

津波漂流物の発生源として敷地内及び敷地外の両者が考えられることから、各々につき以下のように設定する。

## (a) 敷地内

津波漂流物の発生源となり得る T. P. +23m 以下の範囲(仮想的な大規模津波により浸水する範囲)を中心として調査する。

## (b) 敷地外

敷地周辺における主な施設の配置を別添 2-1 図に示す。

港湾施設としては、日本原子力研究開発機構(JAEA)所有の関根浜港(西側約 1km)、第 1 種漁港の関根漁港(西側約 2km)及び石持漁港(東側約 4km)が立地する。これらの港に寄港しない大型船舶は、別添 2-2 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。

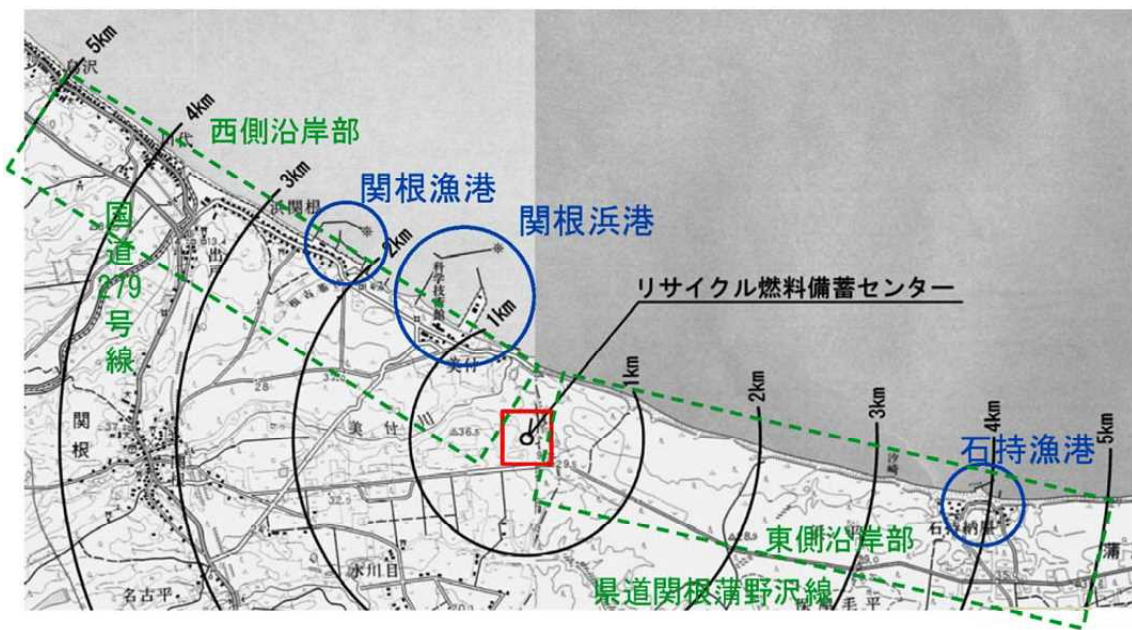
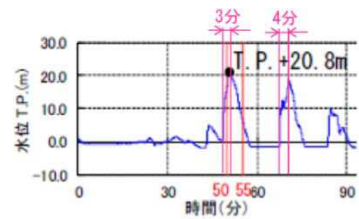
陸上(主要施設、集落等)では関根浜港付近に、日本原子力研究開発機構(JAEA)青森研究開発センター及び海洋研究開発機構(JAMSTEC)むつ研究所が立地する。敷地外の西側沿岸部には国道 279 号線や市道等の道路が走り、これらの道路沿いを中心に集落が存在する。敷地外



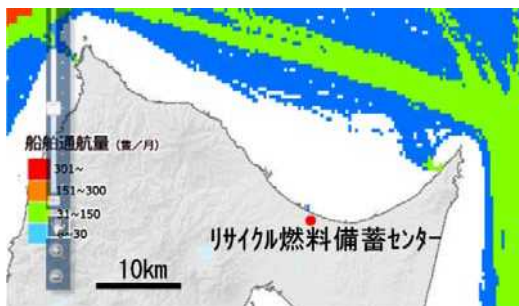
の東側沿岸部には、海岸から約 1km 離れた内陸側(標高 30m 程度)を走る県道(関根蒲野沢線)があり、石持漁港付近を除いて海岸付近に目立った人工物はみられない。

仮想的な大規模津波に伴う漂流物の発生源として、貯蔵建屋を中心とした 5km\* の範囲にある海岸沿いのおおむね標高 30m 以下の区域に対して調査範囲を設定することとし、前述の施設の配置状況を踏まえて西側沿岸部(関根浜港, JAEA, JAMSTEC, 関根漁港及び沿岸部の道路沿い)及び東側沿岸部(石持漁港及び沿岸部の道路沿い)に区別して調査を実施する。

\*) 仮想的な大規模津波と等価なモデルにおける津波評価(右図: 別添 1-3 図の抜粋に追記)で押し波継続時間(第 1 波+第 2 波)に津波流速を乗じた移動距離を参考にして保守的に設定する。  
 ((3分+4分)×60s×10m/s=4200m⇒5km)



別添 2-1 図 敷地周辺における主な施設の配置



別添 2-2 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)

b. 調査対象物

調査対象物（津波漂流物の発生源となり得る物品を網羅的に抽出する観点から、項目及び確認方法を設定）

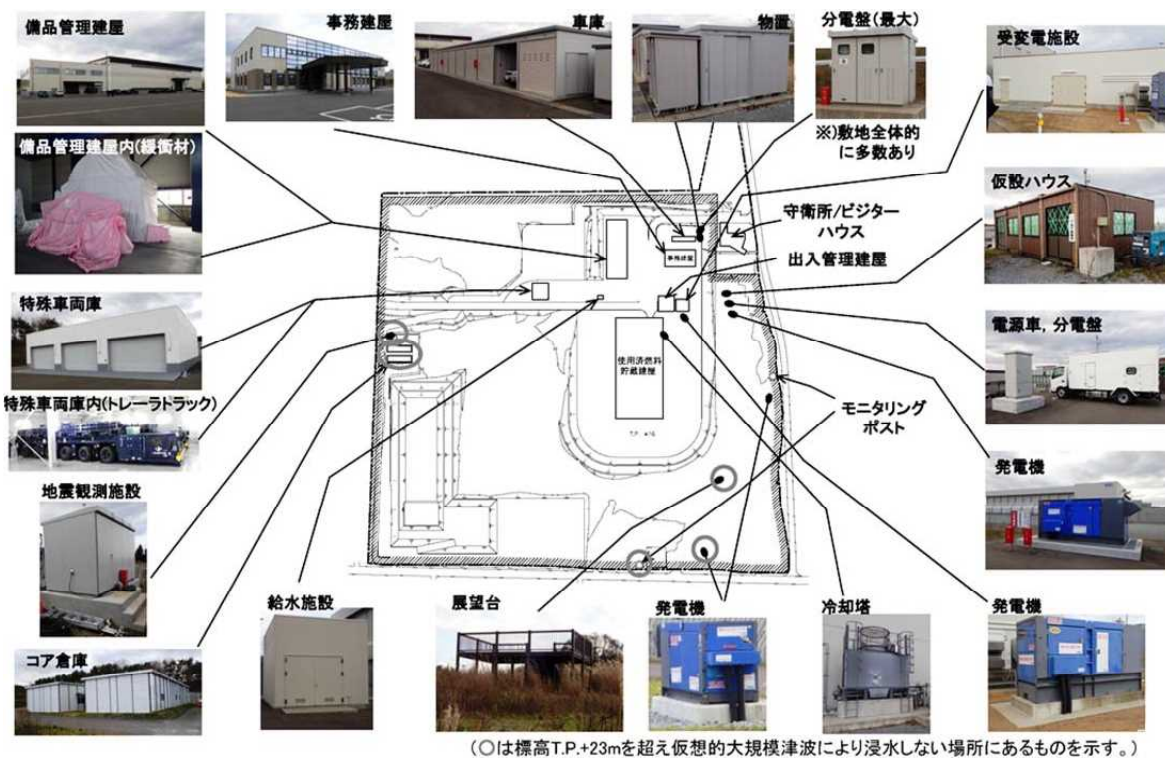
- ・船舶（海上及び陸上保管）、港湾施設（浮棧橋、浮標等）
- ・建築物、構築物（一般家屋、公共施設等（学校、郵便局、商店、集会所等）、産業施設等）
- ・タンク、コンテナ等
- ・車両（一般車両、大型車両等）

c. 調査方法

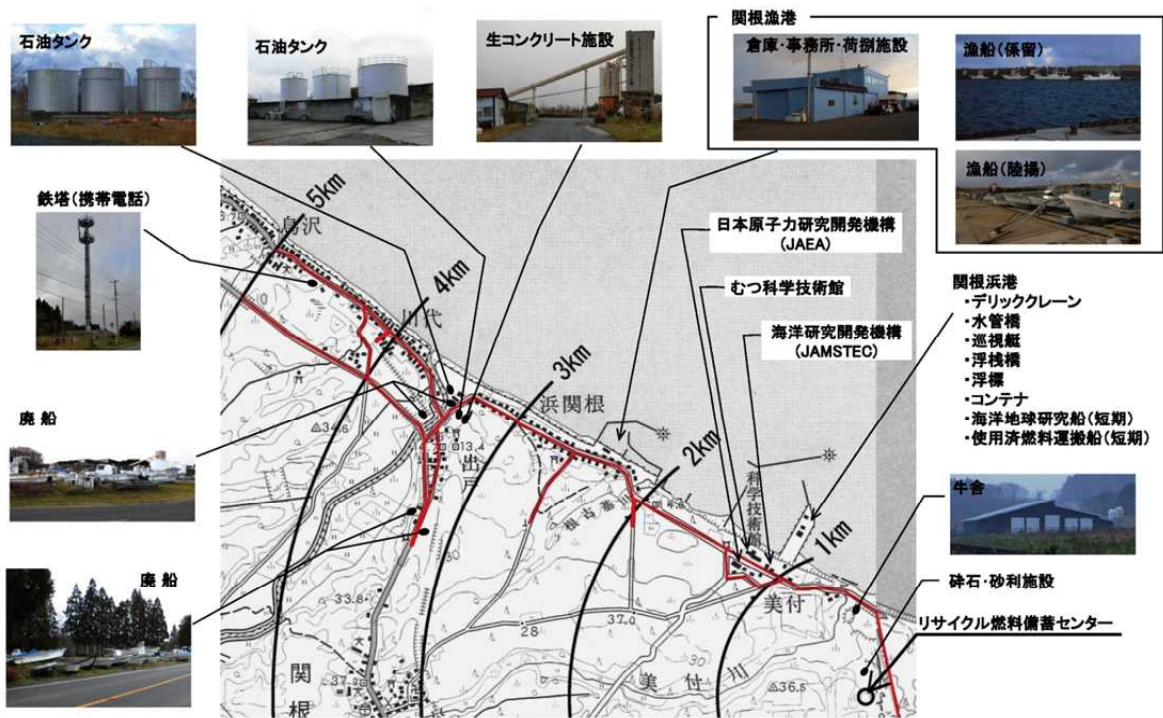
現地における目視確認を基本とし、運用状況等については関係者への聞き取りを実施する。

(2) 調査結果

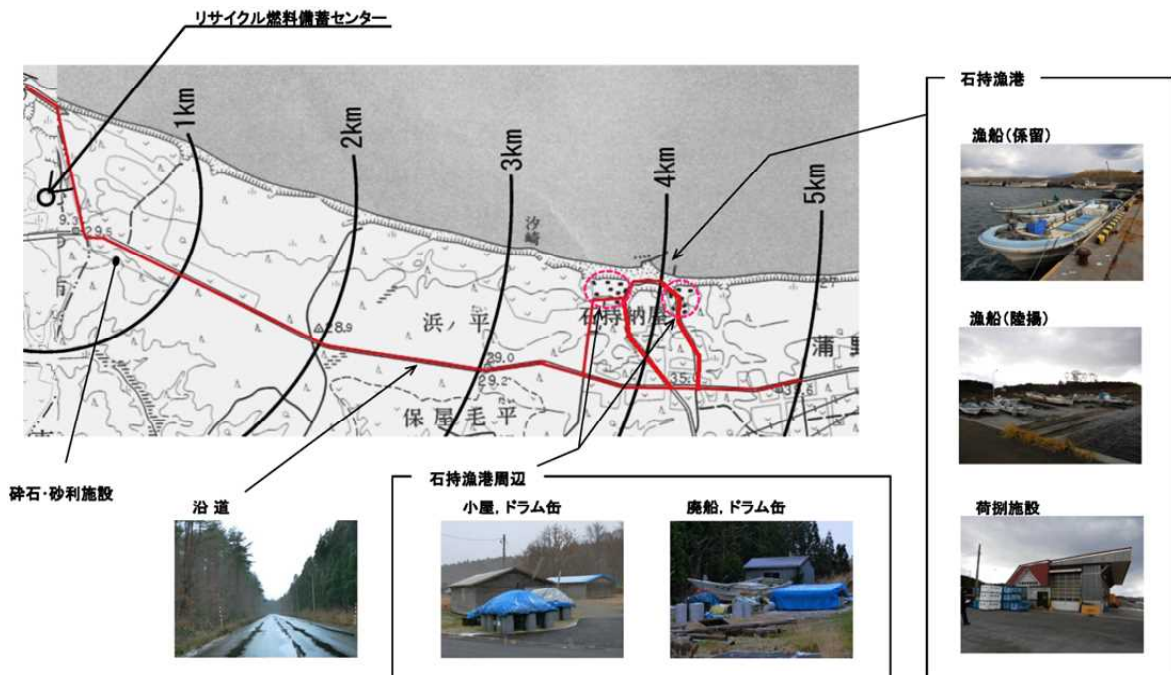
敷地内及び敷地外（西側沿岸部及び東側沿岸部）で確認された品目と確認箇所を別添 2-3 図(1)～(3)に示す。なお、各品目の詳細については 3. における抽出結果と併せて別添 2-2 表(1)及び(2)に示す。



別添 2-3 図(1) 確認された品目と確認箇所（敷地内）



別添 2-3 図(2) 確認された品目と確認箇所（敷地外：西側沿岸部）



別添 2-3 図(3) 確認された品目と確認箇所（敷地外：東側沿岸部）

### 3. 津波漂流物の抽出と設定

2.における津波漂流物調査結果に基づき、使用済燃料貯蔵施設の基本的安全機能への影響の観点から物品の抽出を行い、大型の津波漂流物として参照する物品を設定する。

#### (1) 津波漂流物の抽出の考え方

津波漂流物の影響を考察する上では、発電炉における観点をベースに使用済燃料貯蔵施設の特徴を踏まえてスクリーニングの観点を設定する。スクリーニングの観点を別添 2-1 表に示す。

基本的安全機能の観点からは、金属キャスク等への津波漂流物の衝突による強度への影響が重要であることから、衝突に伴う運動エネルギーの付与が大きくなる大型の物品を抽出の対象とする。

大型の物品の範囲としては、竜巻における設計飛来物（ワゴン車：質量1970kg）を参考に、おおむね乗用車レベル（1t 程度以上）とする。

また、漂流過程（漂流開始時、漂流中、衝突時）において変形、分解しやすい物品については衝突による影響が小さいと考えられることから、スクリーニングにおいて抽出の対象から除外する。

別添 2-1 表 津波漂流物のスクリーニングの観点

発電炉における観点	使用済燃料貯蔵施設における観点
<u>漂流物化するか</u> ・重量と浮力の相対関係により漂流物化しない ・設置状況より漂流物化しない ・退避可能であり漂流物化しない	・同左
<u>到達するか</u> ・距離、地形、流向より到達しない（発電所、取水口）	・個別状況を踏まえて評価する。
<u>閉塞させるか</u> ・取水口・取水路を閉塞させるか	・冷却に海水を使用しないこと、また貯蔵建屋給気口及び排気口（貯蔵区域及び受入れ区域）は津波浸水深より高い位置にあり津波漂流物が侵入する可能性は小さいことから、閉塞については考慮しない。 ・津波漂流物の衝突の影響が重要であることから、大型の物品を抽出する観点でスクリーニングを行う。

(2) 津波漂流物の抽出

2.における津波漂流物調査にて確認された物品を区分して整理し、漂流物として抽出すべき物品を抽出する。

抽出から除外する観点として、①漂流物化しない（水密性がなく大きな浮力が生じない、地面に固定されている、船舶等で退避可能）、②到達しない（距離、地形、流向から敷地に到達する可能性が小さい）及び③敷地に到達しても使用済燃料貯蔵施設への影響が小さい（大型の漂流物でない、漂流過程において変形・分解する）を踏まえる。

敷地内及び敷地外で確認された品目と抽出からの除外の有無を別添 2-2 表(1)及び(2)に示す。

(3) 大型の津波漂流物として参照する物品の設定

(2)にて津波漂流物として抽出した物品のうち、金属キャスク等への津波漂流物の衝突による強度への影響が大きくなる大型の津波漂流物として、質量が最大(約 36t)のトレーラトラック（キャスク搬送用）を設定した。

別添 2-2 表(1) 調査及び抽出の結果 (敷地内)

大区分	小区分	品目	漂流物として抽出*	備考	
建築物 構築物	鉄筋コンクリート造	守衛所/ビジターハウス, 出入管理建屋, モニタリングポスト	× (A1/A2)		
	鉄骨造	事務建屋, 車庫, 備品管理建屋, 特殊車両庫, 給水施設, 受変電施設	× (B2)		
	その他	発電機		○	質量: 約 5.2t (最大のもの)
		分電盤		○	質量: 約 3.9t (最大のもの)
		冷却塔		○	質量: 約 1.8 t
ゲート			× (A1)		
タンク コンテナ 等	物置, 仮設 ハウス等	倉庫, 詰所, 仮設トイレ	○	質量: 約 2 t (最大のもの, 推定値)	
	その他	キャスク緩衝体 (備品管理建屋)	○	質量: 約 6t	
		貯蔵架台, 輸送用機材 (備品管理建屋)	× (A1)		
車両	特殊車両	トレーラトラック (特殊車両庫)	○	質量: 約 36t	
		電源車	○	質量: 約 8t	
		動力消防ポンプ積載軽トラック (車庫)	○	質量: 約 1t	
	一般車両	乗用車, トラック, バス	○	質量: 約 13t (最大のもの: バス)	

\*) 漂流物として抽出しない事由の凡例

- (A1) 水密性がなく大きな浮力が生じないため漂流物化しない
- (A2) 設置状況より漂流物化しない
- (A3) 退避可能であり漂流物化しない
- (A4) 距離, 地形, 流向より到達しない
- (B1) 大型の漂流物でない
- (B2) 漂流過程において変形・分解し, 衝突による影響が小さいと考えられる

別添 2-2 表(2) 調査及び抽出の結果 (敷地外)

大区分	小区分	品目	漂流物として抽出*2	備考
船舶 港湾施設	大型船舶	使用済燃料運搬船 (関根浜港) 海洋地球研究船 (同上)	× (A3)	津波警報発生時は緊急離岸することとしており、離岸手順を整備
	小型船舶	巡視艇 (関根浜港) 漁船 (関根漁港, 石持漁港等) 廃漁船 (敷地外西側沿岸部等)	○	質量: 約 13t 質量: 約 8t (最大のもの) (漁船に含まれる)
	港湾施設	浮棧橋 (関根浜港) 浮標 (同上)	○	質量: 約 24t (目視寸法より推定) 質量: 約 2.5t (海洋観測用)
		デリッククレーン (関根浜港) 水管橋 (関根浜港) ケーソン (漁港)	× (A1)	
建築物 構築物*1	鉄筋コンクリート造	事務所, 宿泊施設, 荷捌施設 (漁港), 水道施設, モニタリングポスト等	× (A1/A2)	
	鉄骨造	事務所, 集会所, 保育園, コンビニエンスストア, 自動車工場, 鉄工所, 水産加工場, 牛舎, 倉庫等	× (B2)	
	プレハブ	倉庫, 小屋, 詰所等 (関根浜港周辺等に多数分布)	× (B2)	
	木造	一般家屋, 神社, 小学校, 荷捌施設 (漁港), 倉庫, 小屋等	× (B2)	
建築物 構築物 (続き)	その他	セメントミキサ (生コン製造施設) ベルトコンベア (砕石・砂利施設, 生コン製造施設) 鉄塔 (携帯基地局, 気象観測塔等) 監視塔 (漁港)	× (A1)	
		沈泥槽 (砕石・砂利施設)	× (A1/A2)	
タンク コンテナ 等	タンク	石油タンク (敷地外西側沿岸部)	× (A4)	直線距離が約 3.5km で 途中に起伏あり
	コンテナ 物置 仮設ハウス	倉庫, 小屋, 詰所等 (関根浜港周辺等に多数分布)	○	質量: 約 30.5t (20ft コンテナ最大総重量)
	ドラム缶	(漁港等に多数分布)	× (B1)	質量: 約 20kg
車両	特殊車両	重機類 (ショベルカー, フォーク リフト等)	× (A1)	
	一般車両	乗用車, トラック, バス	○	質量: 約 13t (最大のもの: バス)

\*1) 建築物・構築物の構造は推定を含む

\*2) 漂流物として抽出しない事由の凡例は別添第 2-2 表(1)に同じ

## 有限要素法解析における境界条件の検討

## 1. 目的

「3. 貯蔵建屋の耐性評価」における貯蔵区域の南側外壁の有限要素法を用いた応力解析では、モデル四周の境界条件を固定条件として解析を行っている。しかしながら、建屋南北方向には剛性の高い耐震壁及び屋上スラブがあるものの、モデル四周の節点には僅かながら変位が生じている可能性も否定できないことから、モデル四周の節点に生じる変位を考慮した場合の応力解析結果への影響を検討する。

## 2. 外壁モデルによる解析の考え方

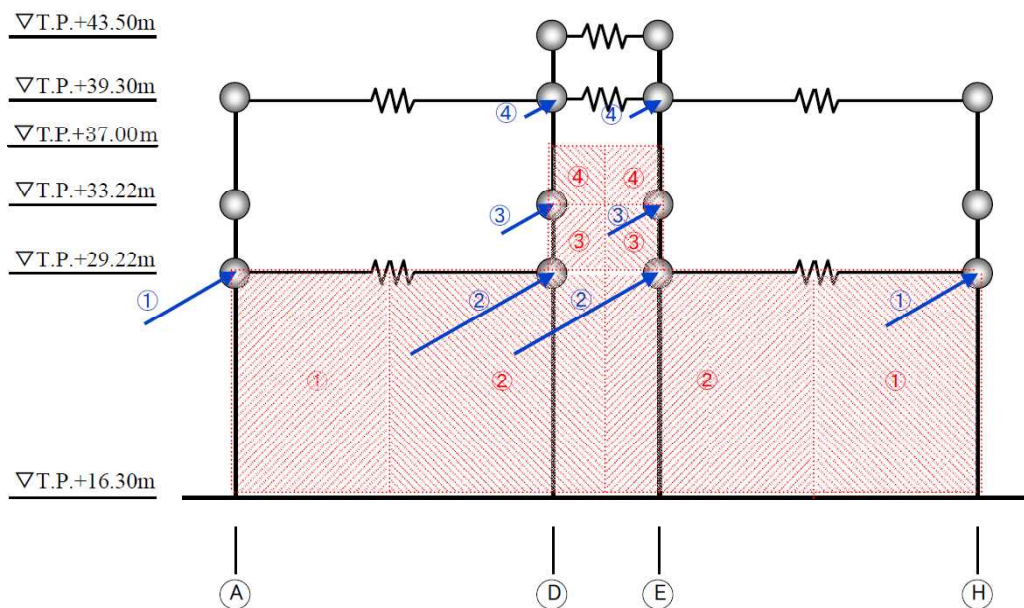
応力解析に用いるモデルは「3. 貯蔵建屋の耐性評価」で用いたモデルをそのまま用い、水圧により生じる建屋南北方向の変位を有限要素法モデルの当該節点に強制変形として考慮した上で波圧を考慮した解析を実施し、変位を考慮しない解析結果との比較を行う。

## 3. 波圧による貯蔵建屋南北方向の変位の算出

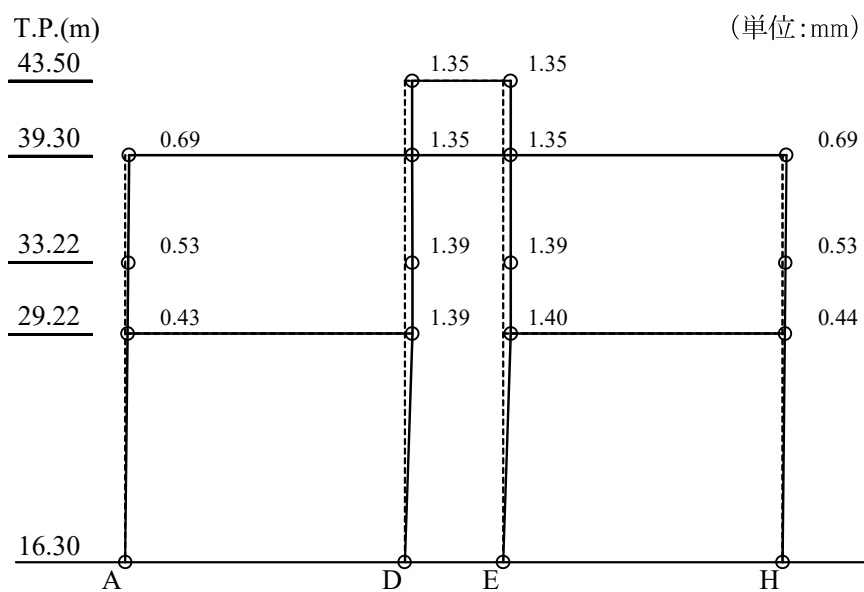
有限要素法モデルに考慮する変位量については、別添 3-1 図に示すように、貯蔵建屋多軸モデルに波圧を作用させ、波力による建屋南北方向の建屋各位置の変位量を算出する。

その結果、別添 3-2 図に示すような変位量が算出された。





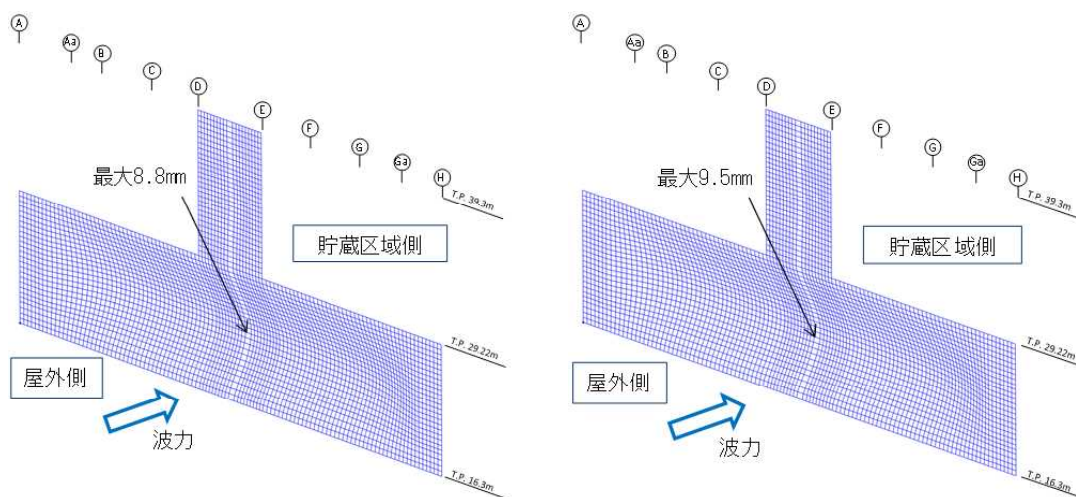
別添 3-1 図 貯蔵建屋多軸モデル及び質点に作用するする荷重



別添 3-2 図 波力による貯蔵建屋南北方向の変位

#### 4. 境界条件の差異による解析結果の比較

モデル四周を固定とした解析結果と，建屋南北方向の変位を考慮した解析との比較を別添 3-3 図及び別添 3-1 表に示す。



外壁の変形状態（周辺固定）

外壁の変形状態（変位考慮）

別添 3-3 図 外壁モデル外周の境界条件による変形状態の比較

別添 3-1 表 外壁モデル外周の境界条件によるひずみ及び応力の比較

評価項目	周辺固定	変位考慮	変位考慮 /周辺固定
コンクリート圧縮ひずみ $\epsilon_c$	$7.72 \times 10^{-4}$	$7.95 \times 10^{-4}$	1.03
鉄筋引張ひずみ $\epsilon_t$	$1.37 \times 10^{-3}$	$1.44 \times 10^{-3}$	1.05
面外せん断力 Q (kN/m)	1308	1319	1.01

両者の比較の結果，外壁モデル外周の境界条件による変形，ひずみ及び応力はいずれも両者でほぼ一致しており，外壁モデル外周の境界条件が計算結果に影響を与えないことを確認した。

## 面外せん断力に対する許容値の算出方法

## 1. 面外せん断力に対する許容値の考え方

建屋南側外壁の面外せん断力に対応する許容値の設定に当たっては、「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説（日本建築学会，1999.11）」の15条「梁・柱及び柱梁接合部のせん断に対する算定」に示される係数 $\alpha$ を用いている。

係数 $\alpha$ は次式により算定される。

$$\alpha = \frac{4}{\frac{M}{Qd} + 1}$$

ここで

$\alpha$ ：部材のせん断スパン比による割り増し係数

M：部材の曲げモーメント

Q：部材のせん断力

d：壁の有効せい（0.9m）

## 2. 算定に用いた応力

上記の係数 $\alpha$ の算出に用いた曲げモーメント及びせん断力には、有限要素法解析により求めた面外せん断力が最大となる要素の応力を用いている。

係数 $\alpha$ の算出に用いた曲げモーメント及びせん断力を別添 4-1 表に記す。

別添 4-1 表 係数 $\alpha$ の算出に用いた曲げモーメント及びせん断力

解析ケース	曲げモーメント (kN・m/m)	せん断力 (kN/m)	$\alpha$ の値
変位考慮せず	1939	1308	1.51
変位考慮	1986	1319	1.50

## 動的解析について

## 1. 目的

受入れ区域の損傷に伴う落下物の衝突に対する金属キャスクの構造解析として「4. 金属キャスクの閉じ込め評価」では衝突荷重を設定した上で静的解析を実施する手法を用いている。

一方、落下物の衝突挙動を動的解析により評価する手法もあり、許認可解析における使用実績や妥当性を確保するための前提条件、不確かさの扱い等の観点から課題はあるものの、落下物に対する金属キャスクの頑健性を示す上で一定の知見を得ることが可能と考えられる。

このため、静的解析の補足的な評価として動的解析を実施し、落下物の衝突に伴う全体的な挙動や静的解析で設定した荷重条件の妥当性の確認を行うとともに、参考評価として静的解析による評価が困難な項目（金属キャスク内に収納された燃料の健全性及び天井クレーン衝突時の金属キャスクの落下の可能性）について考察を行う。

## 2. 動的解析の実施

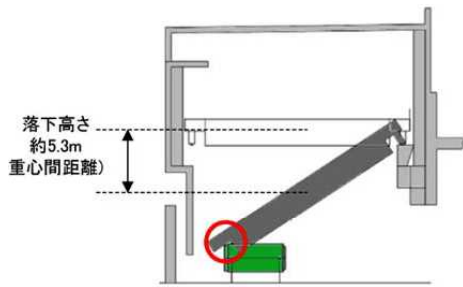
## (1) 動的解析の条件

「4. 金属キャスクの閉じ込め評価」で評価を行った衝突想定条件のうち金属キャスクへの衝撃荷重が大きな天井クレーンの水平姿勢キャスクへの落下について動的解析を実施する。

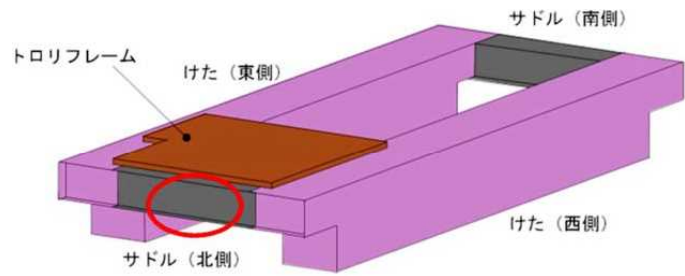
解析コードは衝撃・構造解析ソフトウェア LS-DYNA を用い、静的解析同様の天井クレーンの衝突状態（別添 5-1 図及び 5-2 図参照）の模擬や金属キャスクのモデル化を行う。

また天井クレーンはけたとサドルをシェル要素でモデル化し、トロリフレームはソリッド要素に一樣密度を与えて重量模擬する。

別添 5-1 表に動的解析の評価条件を示す。



別添 5-1 図 天井クレーンの  
金属キャスクへの落下状態



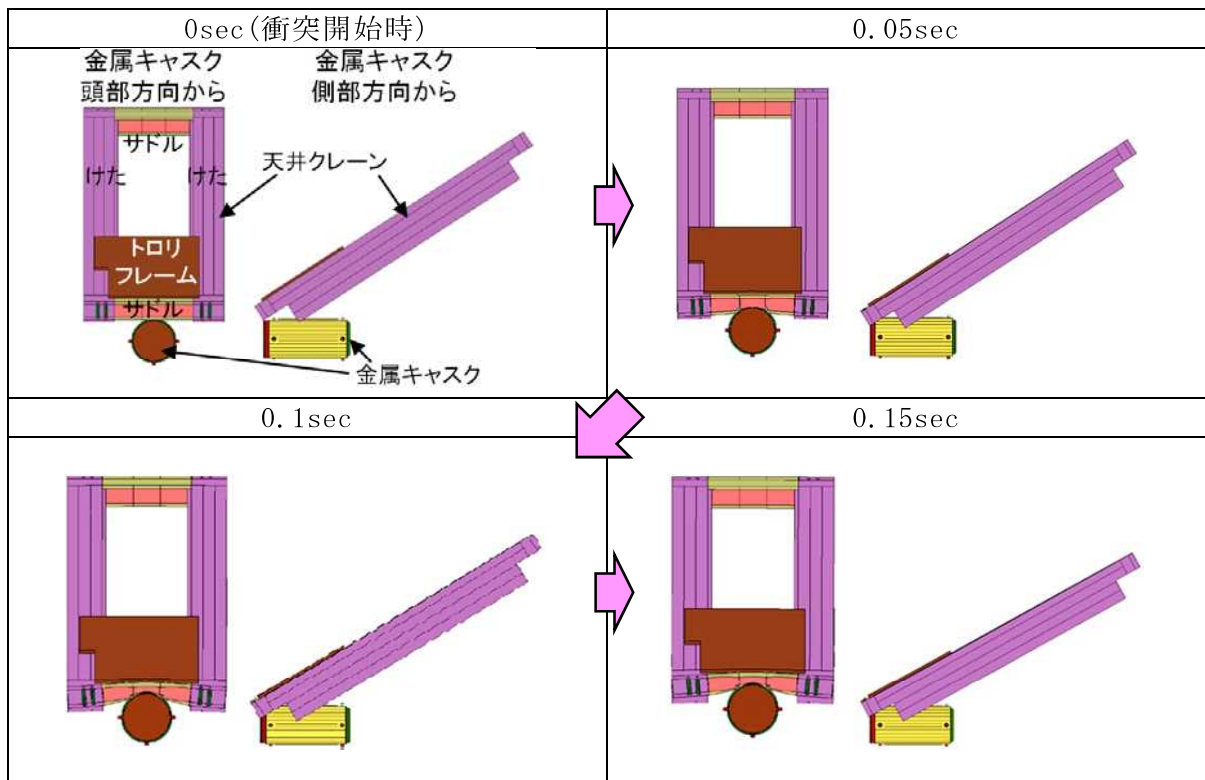
別添 5-2 図 天井クレーン概略図  
(サドル (北側) が金属キャスクに衝突)

(2) 動的解析の結果

a. 全体的な挙動の確認

落下物の衝突に伴う全体的な挙動の確認のため、天井クレーンの水平姿勢キャスクへの衝突状態の確認を行う。金属キャスクへの衝突に伴う天井クレーンの形状変化を別添 5-3 図に示す。

天井クレーンのサドル (北側) が金属キャスクへ衝突した後にサドルの変形が進展しており、サドルの変形挙動は静的評価における荷重の設定の前提条件と整合している。



別添 5-3 図 金属キャスクへの衝突に伴う天井クレーンの形状変化

b. 静的解析の前提とした条件との比較

動的解析結果に基づき天井クレーンの衝突により金属キャスクに与える荷重を求めた結果は最大 6MN であり、静的解析の入力条件とした荷重である 48MN（第 4-3-2 表参照）が大きな保守性を持っていることを確認した。

また天井クレーンのサドル(北側)の変形量は最大で約 0.42m であり、静的解析の荷重設定で用いた変形量である約 0.55m（第 4-3-2 表参照）が保守的であることを確認した。

以上より、静的解析の前提とした衝突時の挙動や荷重設定の妥当性を確認した。

別添 5-1 表 動的解析の評価条件 (1/2)

項目	解析条件	備考
解析コード	LS-DYNA (衝撃・構造解析ソフトウェア)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ ローレンス・リバモア国立研究所により開発された有限要素法 (DYNA3D) を基に開発された構造解析用の汎用コードであり, 衝突問題や動的荷重を受ける構造物の応力, ひずみや加速度応答等を算出</li> <li>・ 輸送物の設計承認, 発電用原子炉の設置許可*1 関連の解析で実績があり, また金属キャスク落下試験に基づく検証解析例*2</li> <li>*1) 重大事故等対策の有効性評価 (水蒸気爆発時のペDESTAL 構造評価)</li> <li>*2) 貯蔵建屋内金属キャスク落下衝撃解析手法の整備に関する報告書 (H18.6, (独)原子力安全基盤機構)</li> </ul>
天井クレーンの衝突姿勢	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 天井クレーンは南北方向を向いたまま, サドル部が金属キャスクの蓋部側面に衝突</li> <li>・ 天井クレーンは金属キャスクの直上より, 水平姿勢から 約 33° 傾斜させて衝突</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 受入れ区域の北側側壁で津波波力による応力が許容応力を超えることから, 天井クレーンが水平方向に回転することは考え難い</li> <li>・ 受入れ区域の北側側壁が破損し, 南側の支持部を支点に回転して金属キャスクの蓋部に当たる状況を仮定 (なお, 密封境界部に作用する荷重が大きくなるよう, 一次蓋側面にサドル立板を衝突させる)</li> </ul>
金属キャスクのモデル	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 金属キャスクは全体形状を模擬</li> <li>・ 金属キャスクはたて起こし架台上を想定し, 水平姿勢で三次蓋を取り付けた状態</li> <li>・ 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</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 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)</li> <li>・ 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</li> </ul>
落下物の衝突速度	約 10.2m/s	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 天井クレーンの落下高さ (約 5.3m) 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</li> </ul>

別添 5-1 表 動的解析の評価条件 (2/2)

項目	解析条件	備考
天井クレーンのモデル	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ けたとサドルをシェル要素でモデル化</li> <li>・ トロリフレームはソリッド要素に一樣密度を与えて重量模擬し、走行方向（南北方向）以外を拘束</li> </ul>	—
天井クレーンの質量	128t	—
天井クレーン部材の物性値	縦弾性係数：203000MPa ポアソン比：0.3 降伏応力：450MPa （サドルの場合） 引張強さ：555MPa（同上） 伸び：0.23（同上）	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 縦弾性係数は鉄骨材料に基づき炭素量0.3%以下の炭素鋼の値を使用</li> <li>・ 降伏応力，引張強さ及び伸びは材料の実測値を使用（材料強度が高い方が，衝突荷重が大きく評価上厳しくなるため，規格値ではなくミルシートの値を使用）</li> </ul>



### 3. 参考評価

静的解析による評価が困難な項目（金属キャスク内に収納された燃料の健全性及び天井クレーン衝突時の金属キャスクの落下の可能性）について、実施した動的解析の結果に基づき考察を行う。

#### (1) 金属キャスク内に収納された燃料の健全性

燃料は金属キャスクの内部にあるため落下物等の荷重が直接作用せず、衝撃荷重がバスケット等を伝搬することによって影響を受けるため、動的解析の結果を参照して考察を行う。

天井クレーンの衝突により金属キャスクに与える加速度を求めた結果、金属キャスク（胴体中央）の加速度は最大でも 5G 程度となる。

一方、照射済の燃料被覆管を用いた動的座屈試験（次頁参照）が行われており、当該試験で得られた結果に基づき燃料棒の破断に至る加速度を推定した結果、燃料棒軸方向で約 980G、燃料棒径方向で約 5800G の加速度が必要と考えられる（別添 5-2 表参照）。

動的解析で得られた加速度は燃料棒の破断に至る加速度に比べ非常に小さいことから、天井クレーンの金属キャスクへの衝突時の衝撃で燃料棒が破断し、ペレットが燃料棒から逸脱する可能性は考え難い。

別添 5-2 表 動的座屈試験結果に基づく燃料棒破断に至る加速度の推定

荷重作用方向	燃料棒の破断が確認されていない荷重	試験結果より算出した破断に至る加速度	備考
燃料棒軸方向	46kN	約 980G	燃料棒 1 本当たりの質量 約 4.8kg（高燃焼度 8 × 8 燃料）
燃料棒径方向	0.5kN/mm	約 5800G	燃料棒の単位長さ当たりの質量 約 $1.1 \times 10^{-3}$ kg/mm タイロッド本数：8 本/集合体

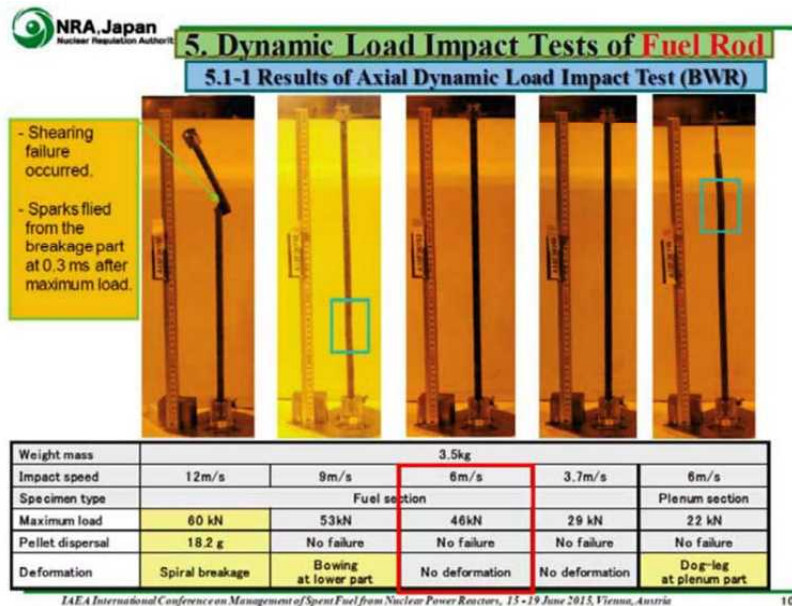
(参考) 燃料棒動的座屈試験\*の概要

照射済の燃料被覆管に荷重を与えて燃料棒の破断の有無を確認する試験が以下のように実施されている。

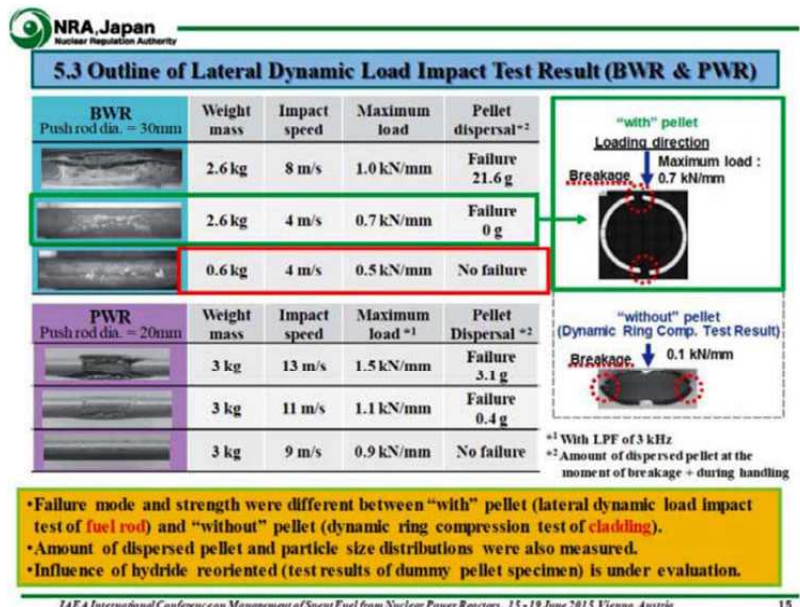
使用した被覆管は使用済燃料（9×9（A型）燃料，平均燃焼度 55.6GWd/t）から得たものであり，燃料棒平均高速中性子照射量(E>1MeV)は  $10.3 \times 10^{25}/m^2$  である。

試験は，軸方向動的座屈試験として燃料棒の1スパン分（約500mm）を模擬した試験片に軸方向に動的荷重を与える試験及び径方向動的圧縮試験として燃料棒の一部（約150mm）を模擬した試験片に径方向に動的荷重を与える試験の2種類を実施している。

軸方向荷重で～46kN，径方向荷重で～0.5kN/mmの範囲で，燃料被覆管の破断が生じない結果が得られている。



別添 5-4 図(1) 燃料棒軸方向試験結果



別添 5-4 図(2) 燃料棒径方向試験結果

\*T. Hirose, M. Ozawa, A. Yamauchi, “Fuel Rod Mechanical Behaviour Under Dynamic Load Condition on High Burnup Spent Fuel of BWR and PWR”, International Conference on Management of Spent Fuel from Nuclear Power Reactors: An Integrated Approach to the Back-End of the Fuel Cycle, 15-19 June 2015, Vienna, Austria

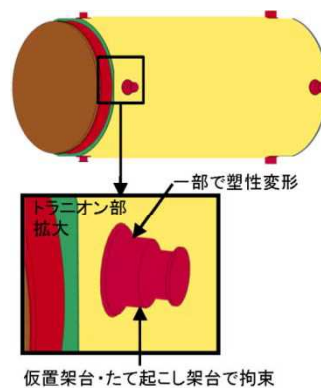
(2) 天井クレーン衝突時の金属キャスクの落下の可能性

受入れ区域で仮置中の金属キャスクは4箇所のトラニオンでたて起こし架台又は仮置架台に支持されており（別添 5-5 図参照），天井クレーンが落下して衝突した場合，衝突荷重によりトラニオンが破断し金属キャスクが落下する可能性が考えられる。

静的解析は保守的に設定した衝突荷重(48MN)を定常状態で与える状況を模擬しており，本来は瞬時的な荷重である衝突荷重を定常状態で与えていることから衝突時のトラニオンの健全性を確認する上では極めて保守的な前提となっているため，動的解析の結果に基づきトラニオン部の挙動を考察する。

動的解析の結果，トラニオンのひずみは最大でも 0.2%であり，天井クレーンの衝突荷重が加わっても，金属キャスクのトラニオンが破断してたて起こし架台及び仮置架台から落下する可能性は考え難い。

なお，たて起こし架台の下には衝撃吸収材を設置していること，また仮置架台上の金属キャスクには輸送用の緩衝体を取付けていることから，仮にトラニオンが破断して金属キャスクが落下しても，金属キャスクが受入れ区域の床面に直接衝突することはない。



別添 5-5 図 金属キャスクのトラニオン部

## 金属キャスクからの漏洩率について

## 1. 目的

受入れ区域の損傷により落下物等が金属キャスク蓋部に衝突した場合の金属キャスクからの漏洩量について「4. (5)閉じ込め機能の低下による影響」における評価では、落下物等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する観点から金属キャスクからの漏洩率を  $1 \times 10^{-4} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$  と設定している。

ここでは漏洩率の設定の考え方を整理するとともに、金属キャスクからの漏洩量に影響を与えるパラメータである漏洩率及び燃料破損割合について、変動による影響を考察する。

## 2. 金属キャスクからの漏洩率の設定

## (1) 漏洩率の設定の考え方

金属キャスクの蓋部で横ずれが発生した場合の漏洩率への影響については、金属ガスケットの横ずれ量と漏洩率の関係としてこれまで試験による実測データが蓄積されている。

落下物等の衝突により金属キャスクの蓋部で発生する横ずれ量については動的構造解析による評価が可能であるが、動的解析は許認可解析における使用実績や妥当性を確保するための前提条件、不確かさの扱い等の観点から課題があることから、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の横ずれ量を設定し、当該横ずれ量及び実験的知見に基づき金属キャスクからの漏洩率を保守的に設定することとする。

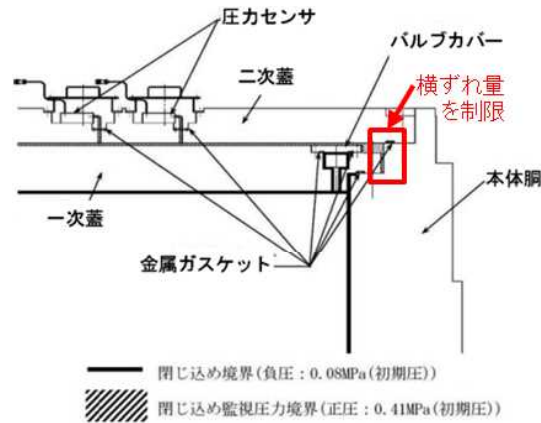
## (2) 金属キャスクの構造に基づく横ずれ量の設定

金属キャスクの一次蓋や二次蓋の蓋部は、別添 6-1 図で示すように蓋の横ずれが容器本体で制限されるいわゆるインロー構造となっており、蓋部に荷重を受けても蓋の横ずれ量は最大でも本体胴フランジとの間隙に限定される。

一次蓋と本体胴フランジの間隙は～2mm 程度であることから、ここでは

発生する横ずれ量を 2mm と仮定する。

なお、ボルトとボルト穴との間隙は一次蓋と本体胴フランジとの間隙よりも大きいので、一次蓋の横ずれがボルトに干渉することはない。



別添 6-1 図 金属キャスクのシール部詳細

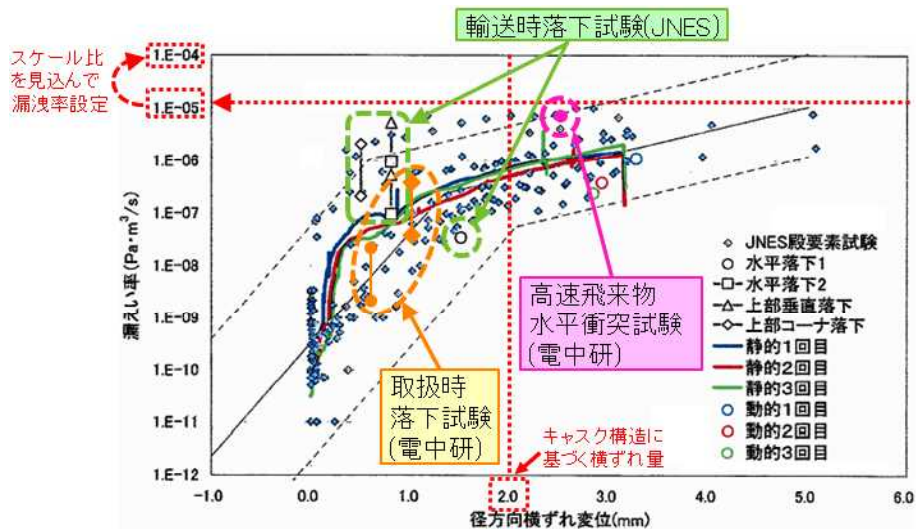
### (3) 横ずれ量に基づく金属キャスクからの漏洩率の設定

金属ガスケットの横ずれ量と漏洩率の関係はこれまで試験による実測データが蓄積されており、これらを踏まえて漏洩率を設定し、プルームによる線量の評価条件として反映する。

動的横ずれ試験の結果として、横ずれ量と漏洩率との関係を整理したグラフを別添 6-2 図に示す。横ずれ量 2mm 程度では試験から得られた漏洩率の上限は  $1 \times 10^{-5} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$  程度となっている。

動的横ずれ試験の試験体とした金属ガスケットは実キャスクの金属ガスケットの周径の約 1/10 であることから、上記の結果にスケール比を見込んで漏洩率を 10 倍とし、一次蓋の漏洩率を  $1 \times 10^{-4} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$  と設定する。

なお、一次蓋の口開きについては、「4. 金属キャスクの閉じ込め評価」で密封境界部がおおむね弾性範囲内と評価しており、また仮に口開きが発生しても瞬時であることから、漏洩評価上は問題とならないと考えられる。別添 5 で実施した動的解析の結果でも一次蓋と本体胴の相対変位は 0.01mm 未満であり、有意な結果とはなっていない。



別添 6-2 図 動的横ずれ試験の結果の比較  
 (\*1 に既往の衝突試験結果等を加筆)

(4) 金属キャスクの実衝撃試験との比較

漏洩率の設定で参照する動的横ずれ試験は、衝撃試験機で試験体に衝撃を与えて横ずれを発生させる試験であることから、金属キャスクに実際に衝撃を与えた試験の結果と比較を行う。

実際に衝撃を与えた試験として、実機大金属キャスクの落下試験（緩衝体有及び緩衝体無）及び縮小サイズのキャスクに航空機エンジン模擬の飛来物を高速で衝突させた試験の例がある。

金属キャスクの実衝撃試験における横ずれ量と漏洩率との関係を別添 6-2 図に加筆するとともに、今回評価の衝突想定条件との諸元の比較を別添 6-1 表に示す。

金属キャスクの実衝撃試験による漏洩率のデータは動的横ずれ試験のデータのばらつきの範囲に収まっており、実衝撃試験であることによる漏洩率の有意な変化はみられず、また今回評価の衝突想定条件は、金属キャスクの実衝撃試験における運動エネルギー及び衝突荷重の範囲にほぼ含まれている。

このため、今回評価の衝突想定条件が金属キャスクへの実衝撃現象であることを考慮しても、金属キャスクの漏洩率の設定は妥当と考えられる。

別添 6-1 表 金属キャスクの実衝撃試験との諸元比較

項目	事象	衝突エネルギー	衝突荷重	備考
●今回評価の衝突想定条件	金属キャスク(水平姿勢)蓋部への天井クレーン落下	$3.7 \times 10^6 \text{N} \cdot \text{m}$ (金属キャスク及び天井クレーンの吸収エネルギー)	6MN (別添5の動的解析結果に基づく)	—
●輸送時落下試験(JNES) <sup>*2</sup>	実機大キャスク(緩衝体有)の9m落下	$1.2 \times 10^7 \text{N} \cdot \text{m}$	35MN(水平落下) 81MN(垂直落下)	別添6-2図の出典(*1)ではスケール比や経年ファクタを考慮した漏洩率(二次蓋)をプロット
●取扱時落下試験(電中研) <sup>*3</sup>	実機大キャスク(緩衝体無)のコンクリート床板への水平落下(1m)等	$1.2 \times 10^6 \text{N} \cdot \text{m}$	58MN(水平落下)	漏洩率(一次蓋)を上記落下試験と同様の考え方で別添6-2図に加筆 スケール比: $\times 1/10$ 経年ファクタ: $\times 100$ 及び $\times 1000$
●高速飛来物水平衝突試験(電中研) <sup>*4</sup>	1/2.5スケールキャスク(縦置)の蓋部に航空機エンジン模擬の飛来物(質量316kg)を高速(57.3m/s)で衝突	$8.2 \times 10^6 \text{N} \cdot \text{m}$	30MN	衝突エネルギー及び衝突荷重は実スケール相当値を記載 衝突エネルギー: $\times 2.5^3$ 衝突荷重: $\times 2.5^2$ 漏洩率は実値を別添6-2図に加筆

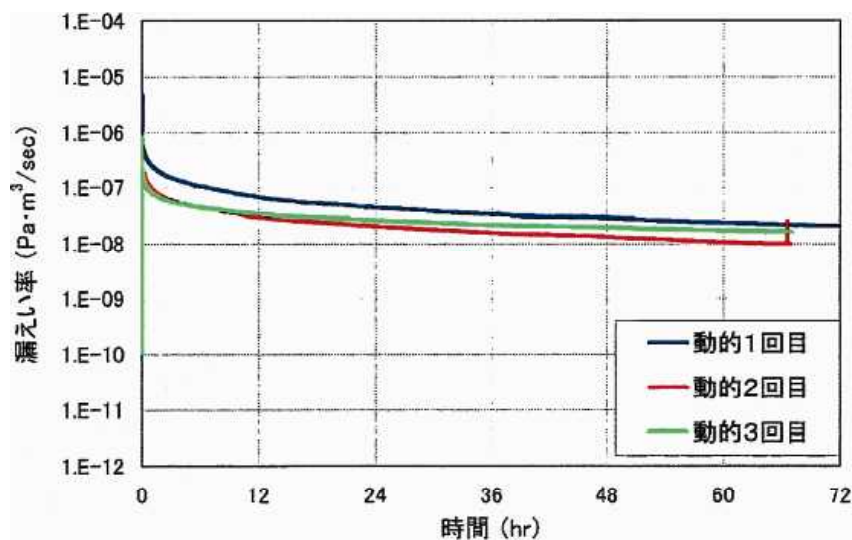
(項目欄の●の色は別添6-2図の加筆と合わせてある)

(5) 金属キャスクの漏洩率の保守性

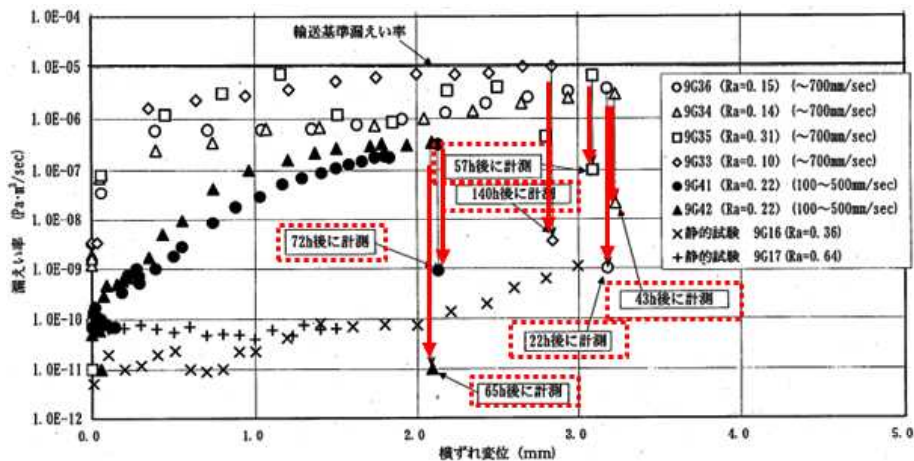
金属ガスケットの動的横ずれ試験では、別添 6-3 図(1)及び(2)に示すように、横ずれ発生後、時間の経過（数十時間程度）とともに一定程度の漏洩率の回復（おおむね 2 桁以上）がみられている。

漏洩率の回復がみられる機構としては、金属ガスケットに荷重が作用すると一時的に締付力が不足状態になり漏洩率は増加するが、ボルトに発生する応力が弾性範囲内であれば締付力は回復し、ガスケット接触面の隙間をアルミ材が徐々に埋めるためと考えられる。

このため、「4. (5) 閉じ込め機能の低下による影響」における評価条件（横ずれ発生直後の漏洩率を用い、その後の時間の経過による漏洩率の回復は考慮しない）は設定として保守的である。



別添 6-3 図(1) 時間の経過による漏洩率の経時変化\*1



別添 6-3 図(2) 時間の経過による漏洩率の回復(\*5 に加筆)

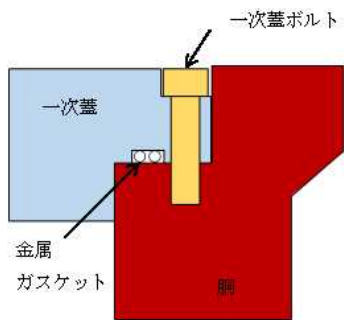


(参考) 金属ガスケットの漏洩率回復について

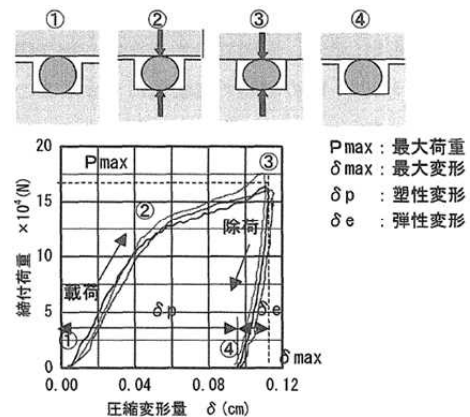
金属ガスケットは別添 6-4 図に示すように、一次蓋に設けられた溝部に取り付けられる締切型であり、金属ガスケットのつぶし代を考慮して深さを決定している。このため別添 6-5 図に示すように、一定量を超えたボルトの締付力は蓋と胴の接触部が受け持つことになるため、金属ガスケットが過度に圧縮変形することはない。

金属ガスケット部における漏洩は、別添 6-6 図に示すように金属ガスケット表面が蓋や胴のフランジ部に接触する面の微小な隙間に起因しており、金属ガスケットをボルト締付によって所定の締付力とすると、別添 6-7 図及び別添 6-8 図に示すように、ガスケット表面と対応面(蓋フランジの当たり面、あるいは、キャスク本体の当たり面)との隙間をガスケットに使用されているアルミ材が埋めることによって閉じ込める。

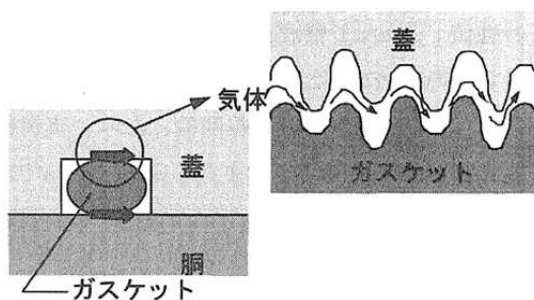
そこに荷重が作用すると、一時的に締付力が不足状態になり漏洩率は増加するが、ボルトに発生する応力が弾性範囲内であれば締付力は回復し、ガスケット接触面の状態が初期の状態と同様に隙間をアルミ材が徐々に埋めるため漏洩率は回復すると考えられている。



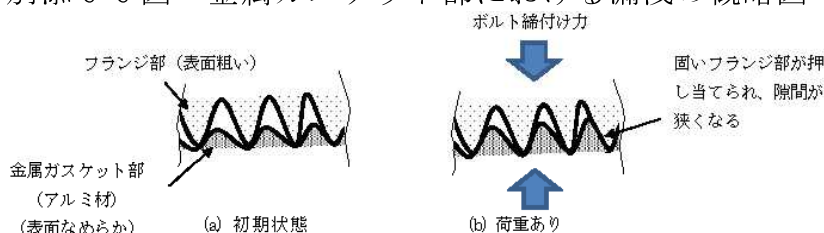
別添 6-4 図 一次蓋フランジ部 (模式図)



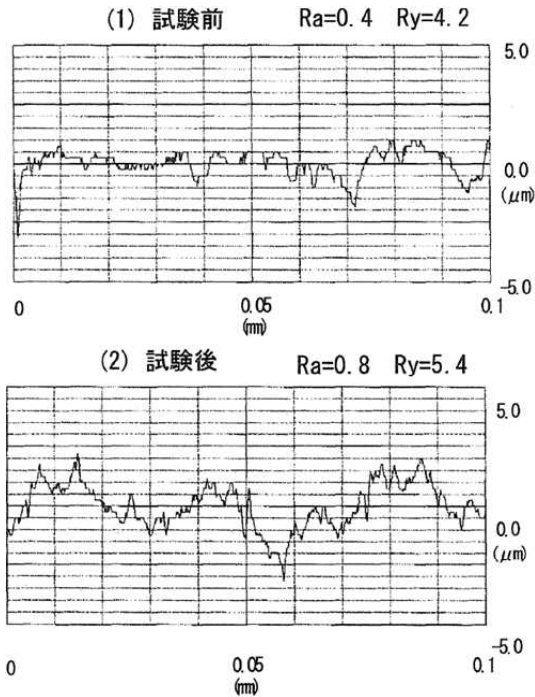
別添 6-5 図 金属ガスケットの圧縮復元特性\*6



別添 6-6 図 金属ガスケット部における漏洩の概略図\*6



別添 6-7 図 金属ガスケットの締付時の概念図



別添 6-8 図 漏洩率測定試験前後の金属ガスケットの表面粗さの比較\*6  
 (試験後 (締付終了後) の表面粗さ Ra がフランジの  
 表面粗さ Ra=1.0 μm にほぼ等しくなっている)

- \*1) 平成 19 年度リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等 (貯蔵設備長期健全性等確証試験) 報告書 ((財)電力中央研究所, H20.3)
- \*2) 平成 15 年度金属キャスク貯蔵技術確証試験報告書 1/3 最終報告(04 基シ報-0007) ((独)原子力安全基盤機構, H16.6)
- \*3) 金属キャスク落下時瞬時漏洩評価-実物大金属キャスク落下試験- ((財)電力中央研究所, H18.12)
- \*4) 航空機衝突時の使用済燃料貯蔵施設の耐衝撃性評価(その2)-縮尺金属キャスクを用いた高速飛来物水平衝突試験- ((財)電力中央研究所, H21.5)
- \*5) 平成 15 年度リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等 (金属キャスク貯蔵技術確証試験) 報告書 ((財)原子力発電技術機構, H15.9)
- \*6) キャスク密封部における接面漏洩評価法の提案 研究報告:U01006 ((財)電力中央研究所, H13.7)

### 3. パラメータによる影響

金属キャスクからの漏洩量に影響を与えるパラメータである漏洩率及び燃料破損割合について、パラメータを変化させた場合の「4. (5)閉じ込め機能の低下による影響」における評価への影響を考察する。

#### (1) 漏洩率による影響

評価で使用している金属キャスクからの漏洩率  $1 \times 10^{-4} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$  を増加させた場合の影響について考察する。

金属キャスクからの漏洩率 1桁増加させ  $1 \times 10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$  として第 4.5-1 表の評価条件と同様の手法により評価すると、一次蓋からのガス漏洩率は約  $8.2 \times 10^{-9} \text{m}^3/\text{s}$  となり、漏洩率  $1 \times 10^{-4} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$  の場合(約  $8.0 \times 10^{-10} \text{m}^3/\text{s}$ ) の約 10 倍に増加する。

核分裂生成物の放出量はガス漏洩率にほぼ比例することから、核分裂生成物放出量は漏洩率  $1 \times 10^{-4} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$  の場合の 10 倍程度と考えられ、敷地境界外における公衆の実効線量についても同様の変動があると考えられるが、実効線量は  $2 \sim 3 \times 10^{-3} \text{mSv}$  程度であり、 $1 \text{mSv}/\text{年}$  と比べ極めて小さいことは同様と考えられる。

#### (2) 燃料破損割合による影響

評価では金属キャスク 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する極めて保守的な条件を設定しているが、実際には金属キャスクの内部は負圧であり、ある程度の燃料棒の破損が発生しないと金属キャスク内部の負圧が維持され一次蓋からの漏洩が発生しない。

このため、金属キャスク内部が正圧となる燃料棒の破損割合を概算を行った結果、燃料集合体約 18~19 体相当となり、金属キャスク 1 基分の燃料集合体数(69 体)の 1/4 程度を超えなければ、金属キャスク内が正圧とならず、一次蓋からの漏洩が発生しないと考えられる。

## 第 11 条 外部からの衝撃による損傷の防止

### <目 次>

1. 設計方針
2. リサイクル燃料備蓄センターにおいて想定される自然現象及び安全性を損なわせる原因となるおそれがある事象であって人為によるもの（故意によるものを除く。）の選定について
3. 選定した事象等に関する考察
4. 自然現象の組合せについて

#### (参 考)

- 参考 1 使用済燃料貯蔵建屋なしの場合の外部事象による金属キャスクの基本的安全機能への影響

## 1. 設計方針

### (1) 自然現象（地震及び津波を除く。）

使用済燃料貯蔵施設は、想定される自然現象（地震及び津波を除く。）が発生した場合においても基本的安全機能を損なわない設計とする。

自然現象を網羅的に抽出するために、国内外の文献を参考に自然現象を抽出し、リサイクル燃料備蓄センターの立地及び周辺環境を踏まえ、使用済燃料貯蔵施設の安全性に影響を与える可能性がある自然現象を選定した上で、設計上の考慮の要否を検討する。使用済燃料貯蔵施設の安全性に影響を与える可能性がある自然現象には、「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の解釈」（第 11 条）に示される、洪水、風（台風）、竜巻、凍結、降水、積雪、落雷、地滑り、火山の影響、生物学的事象、森林火災等の自然現象を含める。

設計上の考慮の要否の検討に当たっては、国内外の文献から抽出された自然現象に対し、発生頻度が極めて低いと判断される事象、リサイクル燃料備蓄センター周辺では起こり得ない事象、事象の進展が緩慢で対策を講ずることができる事象、使用済燃料貯蔵施設の基本的安全機能に影響を及ぼさない事象及び他の事象に包含できる事象を選別し、これらに該当しない事象を使用済燃料貯蔵施設において設計上の考慮を必要とする事象として選定する。また、異種の自然現象の重畳も適切に考慮する。

### (2) 人為によるもの（故意によるものを除く。）

使用済燃料貯蔵施設は、事業所又はその周辺において想定される当該使用済燃料貯蔵施設の安全性を損なわせる原因となるおそれがある事象であって人為によるもの（故意によるものを除く。）（以下「人為事象」という。）に対して基本的安全機能を損なわない設計とする。

使用済燃料貯蔵施設の設計に当たっては、国内外の文献を参考に人為事象を抽出し、リサイクル燃料備蓄センターの立地及び周

辺環境を踏まえ、使用済燃料貯蔵施設の安全性に影響を与える可能性がある人為事象を選定した上で、設計上の考慮の要否を検討する。使用済燃料貯蔵施設の安全性に影響を与える可能性がある人為事象には、「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の解釈」（第 11 条）に示される、飛来物（航空機落下等）、ダムの崩壊、爆発、近隣工場等の火災、有毒ガス、船舶の衝突、電磁的障害等の人為事象を含める。

設計上の考慮の要否の検討に当たっては、国内外の文献から抽出された人為事象に対し、発生頻度が極めて低いと判断される事象、リサイクル燃料備蓄センター周辺では起こり得ない事象、事象の進展が緩慢で対策を講ずることができる事象、使用済燃料貯蔵施設の基本的安全機能に影響を及ぼさない事象及び他の事象に包含できる事象を選別し、これらに該当しない事象を使用済燃料貯蔵施設において設計上の考慮を必要とする事象として選定する。

2. リサイクル燃料備蓄センターにおいて想定される自然現象及び安全性を損なわせる原因となるおそれがある事象であって人為によるもの（故意によるものを除く。）の選定について

(1) 想定される自然現象及び使用済燃料貯蔵施設の安全性を損なわせる原因となるおそれがある事象であって人為によるもの（故意によるものを除く）の抽出

「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の解釈」（第11条）において「想定される自然現象（地震及び津波を除く。）」と「使用済燃料貯蔵施設の安全性を損なわせる原因となるおそれがある事象であって人為によるもの（故意によるものを除く。）」として以下のとおり例示されている。

第11条（外部からの衝撃による損傷の防止）

1 第1項に規定する「想定される自然現象（地震及び津波を除く。）」とは、使用済燃料貯蔵施設の敷地及びその周辺の自然環境を基に、最新の科学的知見に基づき、洪水、風（台風）、竜巻、凍結、降水、積雪、落雷、地滑り、火山の影響、生物学的事象、森林火災等から適用されるものをいう。

3 第2項に規定する「想定される当該使用済燃料貯蔵施設の安全性を損なわせる原因となるおそれがある事象であって人為によるもの（故意によるものを除く。）」とは、敷地及び敷地周辺の状況を基に選択されるものであり、飛来物（航空機落下等）、ダムの崩壊、爆発、近隣工場等の火災、有毒ガス、船舶の衝突、電磁的障害等をいう。

リサイクル燃料備蓄センターでの設計上考慮すべき事象の選定に当たっては、第1表に示す資料を参考に網羅的に事象を抽出した。結果を第2表及び第3表に示す。

第1表 事象の選定に当たって参考とした資料

資料番号	資料名称
資料1	Specific Safety Guide No. SSG-15, Storage of Spent Nuclear Fuel, IAEA, 2012
資料2	10CFR Part 72, Licensing Requirements for the Independent Storage of Spent Nuclear Fuel, High-Level Radioactive Waste, and Reactor-Related Greater than Class C Waste, April 24, 2014
資料3	NUREG-1536 Rev.1_, Standard Review Plan for Spent Fuel Dry Storage Systems at a General License Facility, NRC, July 2010
資料4	NUREG-1567, Standard Review Plan for Spent Fuel Dry Storage Facilities, NRC, March 2000
資料5	NUREG-1864, A Pilot Probabilistic Risk Assessment of a Dry Cask Storage System at a Nuclear Power Plant, NRC, March 2007
資料6	Probabilistic Risk Assessment (PRA) of Bolted Storage Casks, EPRI, December 2004
資料7	キャスクを用いる使用済燃料及び発熱性放射性廃棄物の乾式中間貯蔵に関する指針, 2012年11月改訂版, ESK (最終処分委員会: ドイツ)
資料8	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その解釈, 平成25年11月27日制定, 原子力規制委員会



第2表 事象の抽出結果（自然現象）

No.	事象	資料*							
		1	2	3	4	5	6	7	8
1	風（台風）	○	○	○	○	○	○	○	○
2	竜巻	○	○	○	○		○		○
3	降水	○			○	○	○	○	○
4	高気温	○			○		○		○
5	低気温・凍結	○						○	○
6	極限的な気圧	○							
7	積雪	○			○	○	○	○	○
8	着氷・着雪	○					○		
9	氷結	○			○	○			
10	ひょう	○			○	○	○		
11	干ばつ	○							
12	砂嵐	○					○		
13	日射影響	○							
14	霧	○							
15	霜	○							
16	落雷	○	○	○	○	○	○	○	○
17	隕石					○	○		
18	火山の影響	○				○	○		○
19	雪崩	○							
20	洪水	○	○	○	○	○	○	○	○
21	地表面の浸食	○				○	○		
22	地すべり	○	○	○	○		○	○	○
23	陥没	○							
24	地震	○	○	○	○	○	○	○	○
25	地盤の安定性	○	○		○				
26	地盤の液状化		○						
27	地下水による影響	○							

No.	事象	資料※							
		1	2	3	4	5	6	7	8
28	波浪	○			○				
29	高潮	○							
30	津波	○	○	○	○	○	○		○
31	海岸浸食	○							
32	生物学的事象	○				○	○		○
33	自然発生的な火災・爆発	○							
34	異常高温, 気圧による火災					○	○		
35	森林火災				○	○	○	○	○
36	有毒ガス	○			○				
37	静振		○	○	○				

※ 第1表参照