

第 10 条 津波による損傷の防止

<目 次>

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

(別 添)

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

1. 設計方針

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

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

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

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

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

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

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

以下に，設計方針を踏まえた事業許可基準規則解釈の適用方針を示す。

a. 事業許可基準規則解釈第 10 条 1 について

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

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

b. 事業許可基準規則解釈第 10 条 2 及び 3 について

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

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

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

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

c. 事業許可基準規則解釈第10条4について

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

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

第1-1表に、事業許可基準規則及び同解釈の適用方針を示す。

第 1-1 表 事業許可基準規則及び同解釈の適用方針

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

(2) 津波防護基本方針の対象とする施設

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

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

a. 使用済燃料貯蔵設備本体(金属キャスク及び貯蔵架台)

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

b. 貯蔵建屋

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

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

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

あるが、それ以外の期間は閉鎖状態となる。

*)貯蔵建屋損傷時における確認事項

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

c. 受入施設

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

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

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

d. 津波防護施設、浸水防止設備及び津波監視設備

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

第1-2表に、津波防護基本方針の対象施設に関する適用方針を示す。

第 1-2 表 津波防護基本方針の対象施設に関する適用方針

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

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

また、貯蔵区域については、外壁及び遮蔽壁の健全性を確認する

*2) 受入れ区域の損傷に伴う落下を仮定するため対象外

*3) 津波により転倒防止に係る機能が喪失しないことから対象外

*4) 施設、設備を設置しないため対象外

(3) 敷地及び敷地周辺における地形，施設の配置等

a. 敷地及び敷地周辺の地形，標高，河川の存在

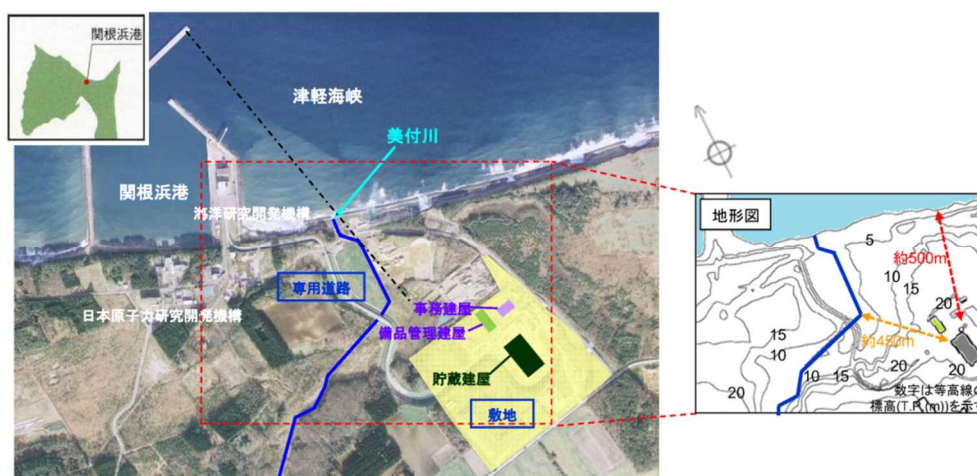
敷地及び敷地周辺の地形を第 1-3-1 図に示す。

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

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

施設は，海岸線から約 500m の離隔がある。

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



第 1-3-1 図 敷地及び敷地周辺における地形，施設の配置等

b. 敷地における施設の位置，形状等

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

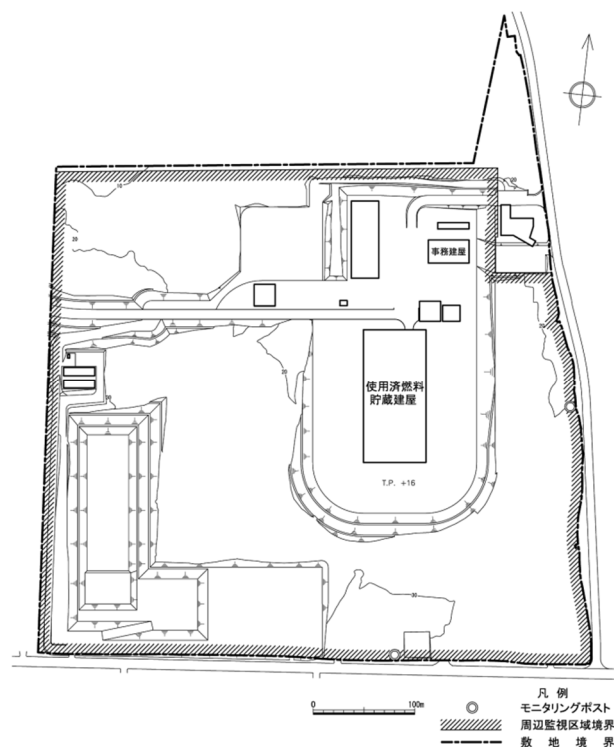
貯蔵建屋は敷地の中央から東寄りに位置する。地上 1 階で，平面が約

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

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

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

事務建屋は、貯蔵建屋の北側に位置する。



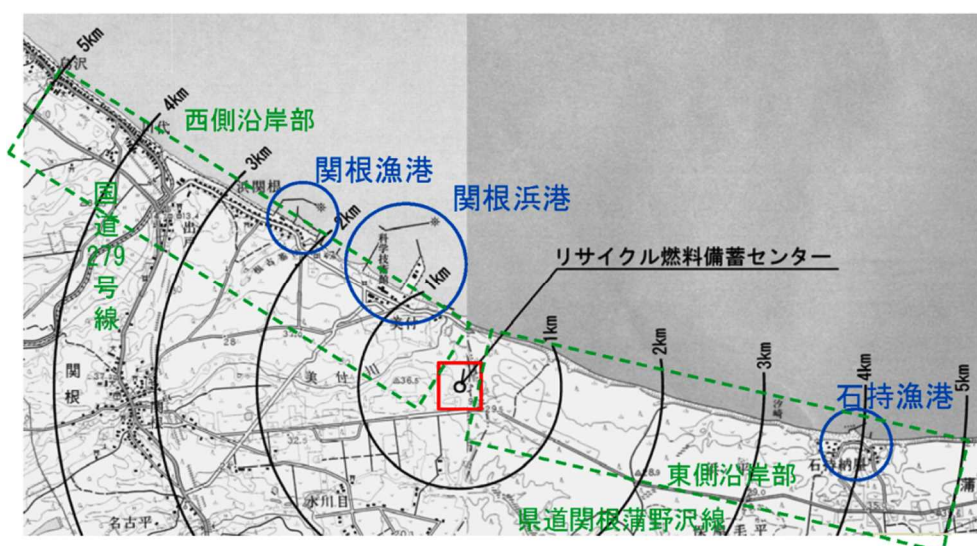
第 1-3-2 図 リサイクル燃料備蓄センター全体配置図

c. 敷地周辺の人工構造物の位置，形状等

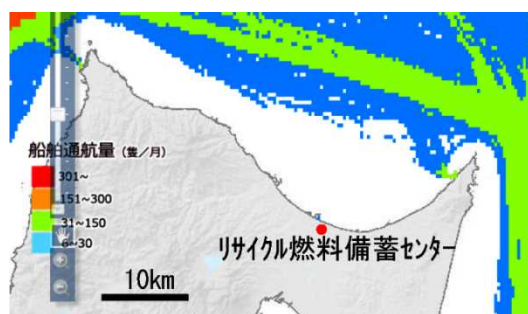
敷地周辺における主な施設の配置を第 1-3-3 図に示す。

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

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



第 1-3-3 図 敷地周辺における主な施設の配置



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

(4) 仮想的大規模津波による浸水想定等

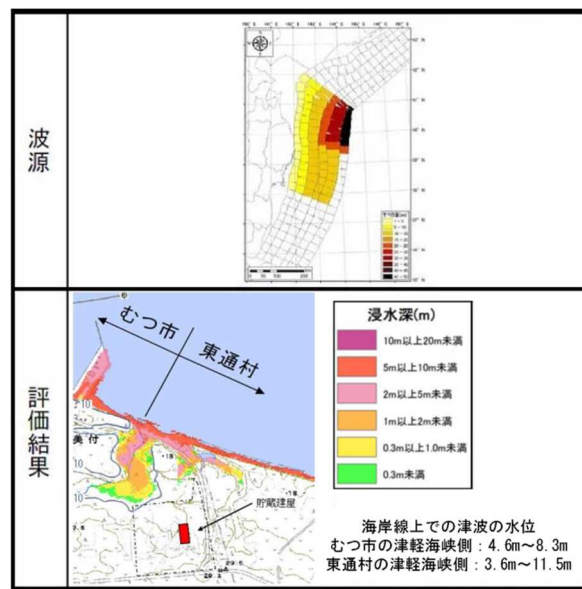
a. 仮想的大規模津波の概要

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

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

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

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



第 1-4-1 図 青森県による津波想定

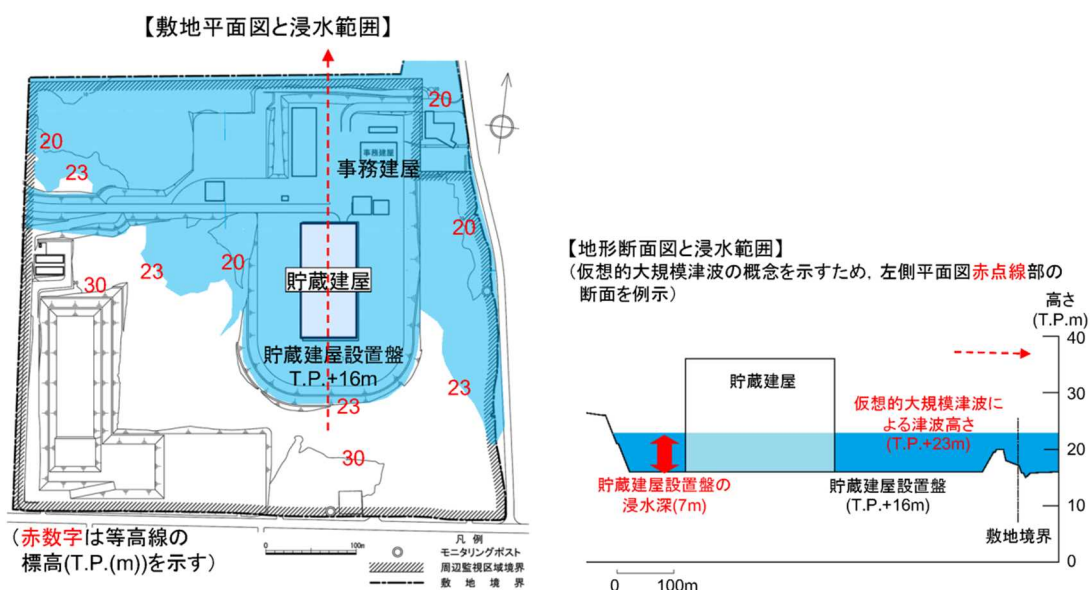
(<http://www.pref.aomori.lg.jp/kotsu/build/tunami-yosoku.html> に一部加筆)

b. 浸水範囲の考え方

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

第1-4-2図に仮想的な大規模津波による浸水範囲の概念を示す。

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



第1-4-2図 仮想的な大規模津波による浸水範囲の概念図

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

c. 入力津波について

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

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

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

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

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

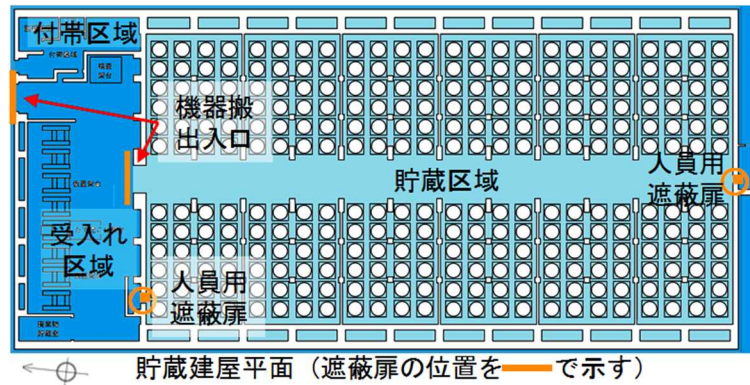
d. 貯蔵建屋内の浸水状態について

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

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

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

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



第 1-4-3 図 貯蔵建屋の機器搬出入口及び人員用遮蔽扉の位置

2. 施設の特性に応じた津波防護の基本方針

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

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

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

(1) 原子力規制庁による審査方針の反映

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

a. 金属キャスクの基本的安全機能について

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

受入れ区域の損傷に伴う落下物や津波漂流物に対して、金属キャスク

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

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

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

b. 使用済燃料貯蔵施設の遮蔽について

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

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

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

上記審査方針における適用項目の反映状況を第 2-1 表に示す。

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

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

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

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

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

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

*1)*2)の注釈は第 2-1 表 (1/3) 参照

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

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

*1)*2)の注釈は第 2-1 表 (1/3) 参照

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

4. 今後の審査方針

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

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

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

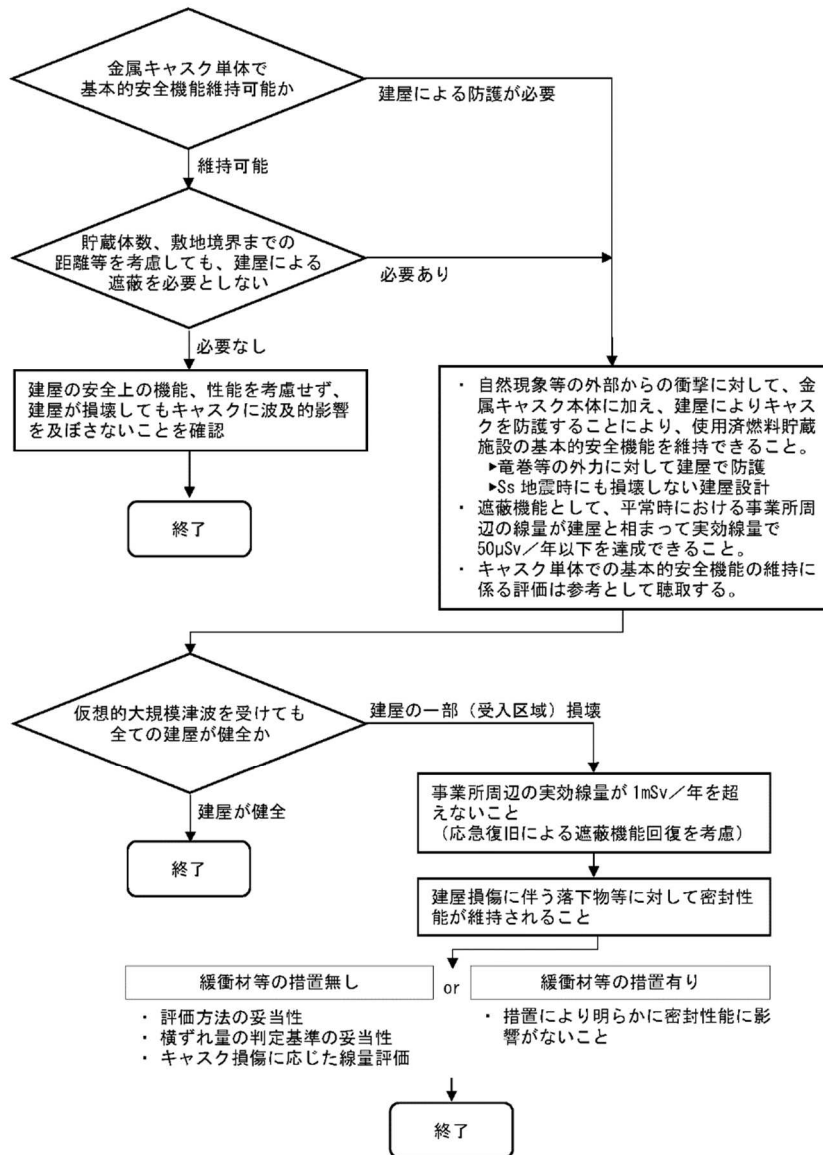
同解釈の適用に当たっては、貯蔵建屋の損傷の有無は、仮想的大規模津波に対して水深係数3を用いた波圧によって評価を求める。貯蔵建屋が損傷した場合の金属キャスクの基本的安全機能の評価については、貯蔵建屋の上部構造物の落下(受入れ区域では天井クレーンの落下等)による衝撃荷重に対して基本的安全機能が維持されること(閉じ込め機能ではバウンダリの維持等)を求め、また、復旧期間を含む1年間の公衆の実効線量が1mSvを超えないことを求める。

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

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

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

使用済燃料貯蔵施設の建屋の取扱いに関する審査フロー



(2) 施設の特性に応じた津波防護の基本方針に基づく実施項目

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

a. 貯蔵建屋の津波波圧に対する耐性の確認

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

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

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

b. 金属キャスクの基本的安全機能の確認

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

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

(a) 閉じ込め機能の維持の確認

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

ることを確認する。

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

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

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

(b) 遮蔽機能の維持の確認

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

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

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

キャスクの除熱を回復するため落下物、土砂及び津波漂流物の撤去を行う。

c. 衝撃を受けた金属キャスクの検査、試験等

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

d. 敷地内の浸水を想定した対策

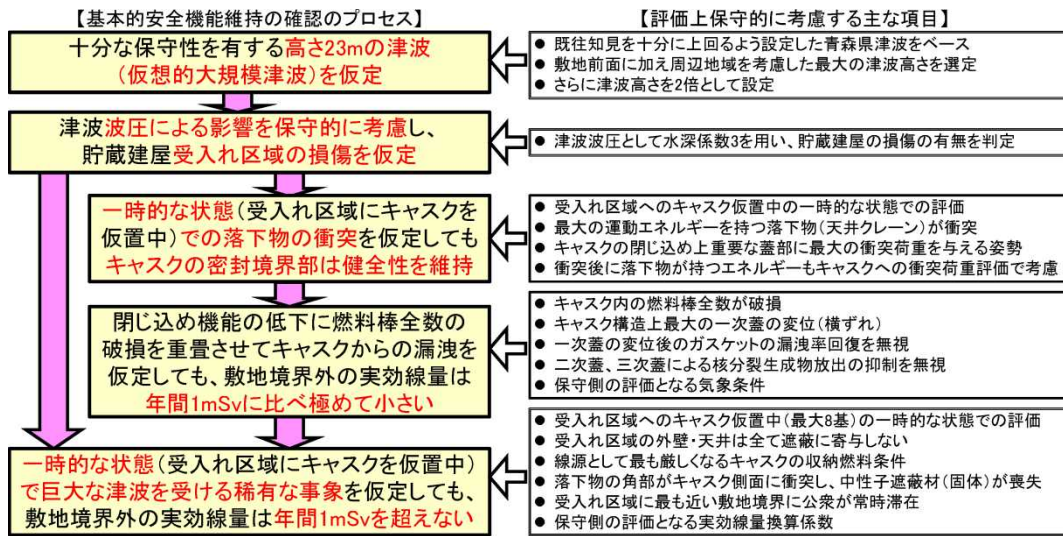
貯蔵建屋や事務建屋等主要な建屋は貯蔵建屋設置盤に設置されており、仮想的な大規模津波による敷地内の浸水を仮定することから、衝撃を受けた金属キャスクに係る対応以外にも対策を講ずる。

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

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

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

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



第 2-1 図 基本的な安全機能の維持に係る確認のプロセスと保守性

3. 貯蔵建屋の耐性評価

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

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

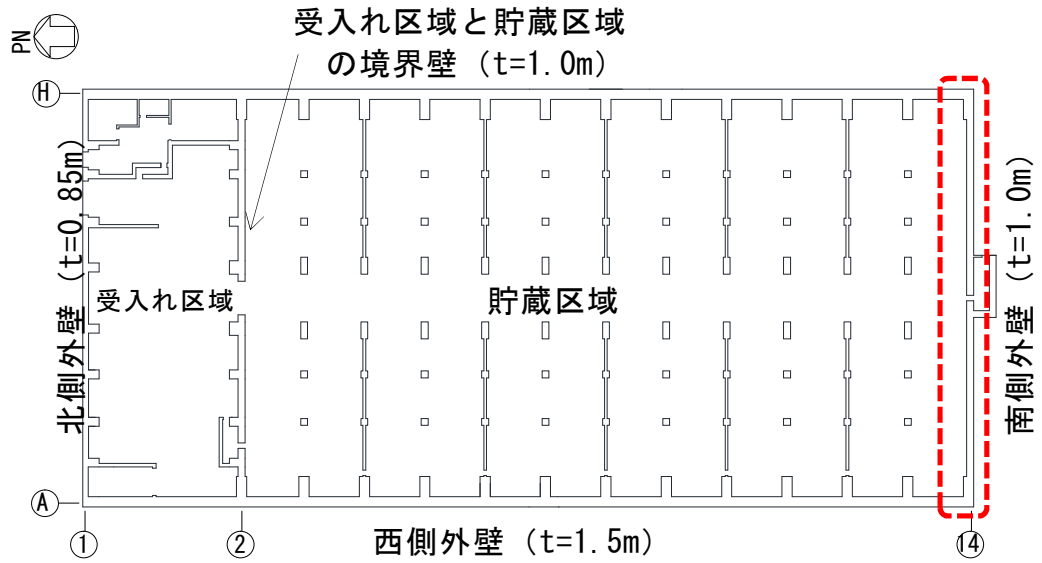
なお、受入れ区域については、波圧による外壁の応力が許容応力を超えることから損傷を想定する。

(1) 貯蔵建屋の耐性評価の考え方

a. 評価部位の考え方

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

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



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

第 3-1 図 貯蔵建屋平面図

b. 水深係数の設定

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

c. 貯蔵建屋の耐性評価

(a) 検討内容

貯蔵建屋の耐性評価として、以下の項目につき確認を行う。

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

(b) 検討方法及び判定基準

i. 貯蔵区域の外壁の健全性確認

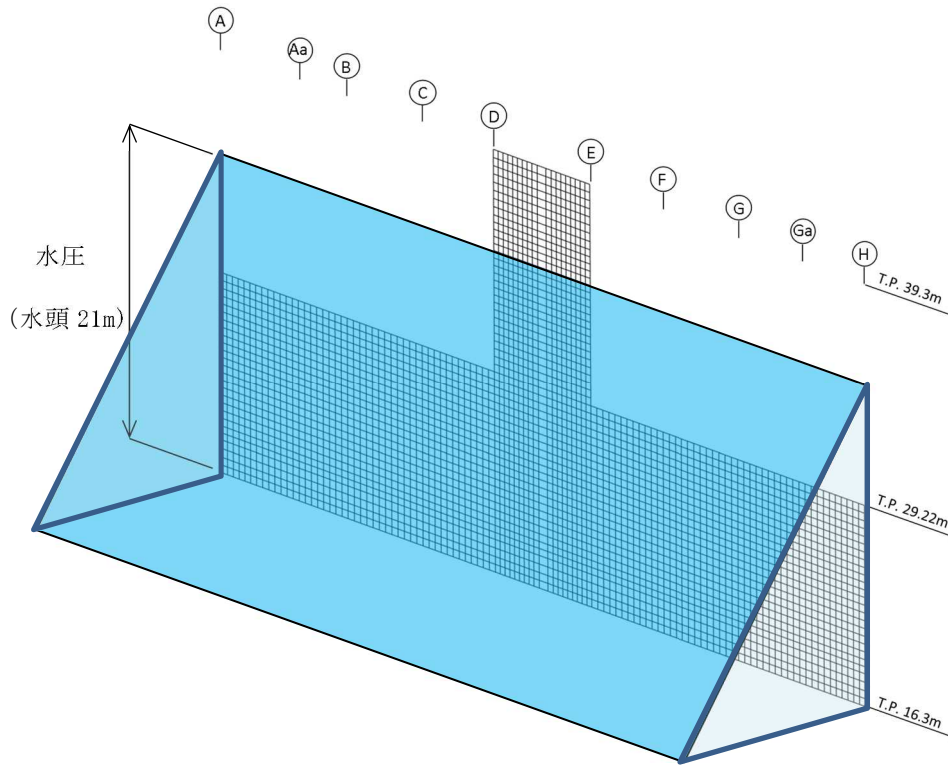
貯蔵区域の四周の外壁に採用する荷重が等しいことから、相対的に最も応力の高くなる部位を代表部位として確認を行う。

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

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

モデル化の考え方は以下のとおりである。

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



第 3-2 図 外壁に作用する荷重（貯蔵区域南側外壁）

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

ii. 貯蔵区域の遮蔽扉の健全性確認

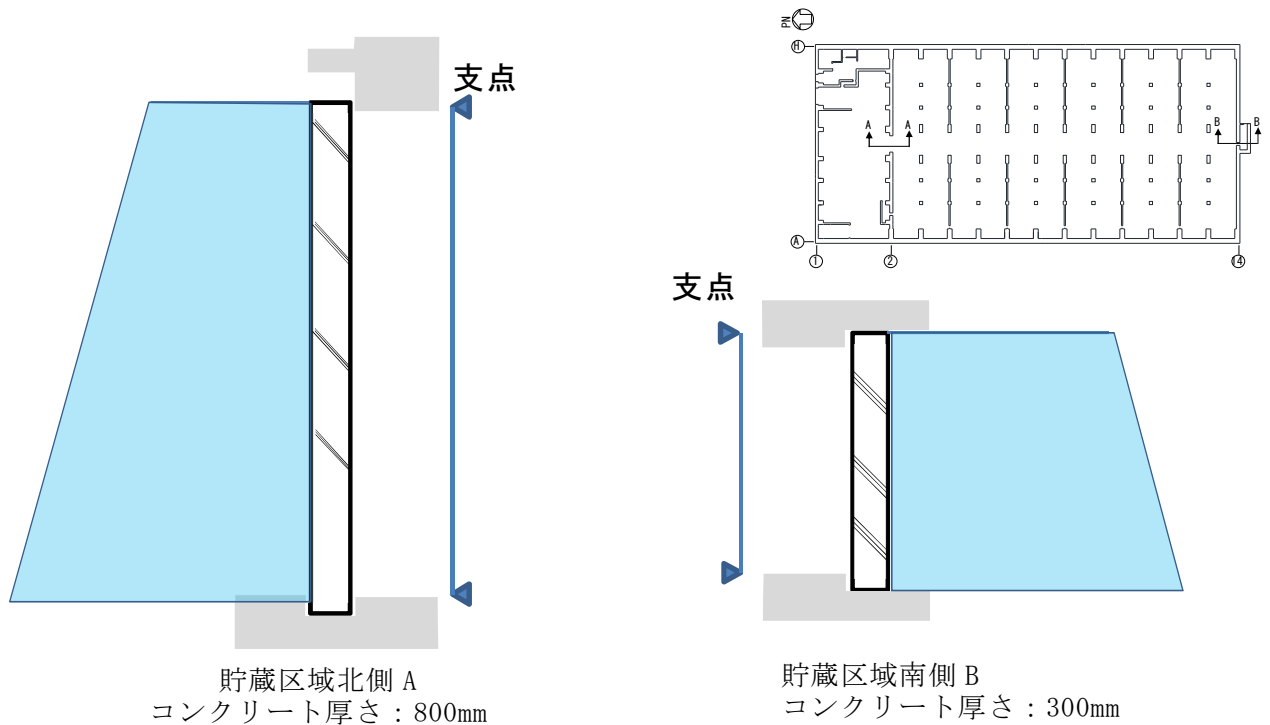
遮蔽扉（2箇所）に対して、津波による浸水深 7m に対し水深係数 3 を考慮した水圧による荷重を第 3-3 図に示すように考慮する。

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

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

判定基準に用いる許容値として、曲げモーメントにより鋼板に生

じる引張応力度として鋼板の短期許容応力度を用いる。



第 3-3 図 遮蔽扉の応力算定の考え方

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

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

- (c) 設計上考慮すべき自然現象との荷重の組合せについて

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

- i. 地震

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

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

ii. 竜巻及び風（台風）

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

iii. 積雪及び降下火砕物

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

(2) 津波による貯蔵建屋耐性評価結果

a. 貯蔵区域南側外壁の健全性確認結果

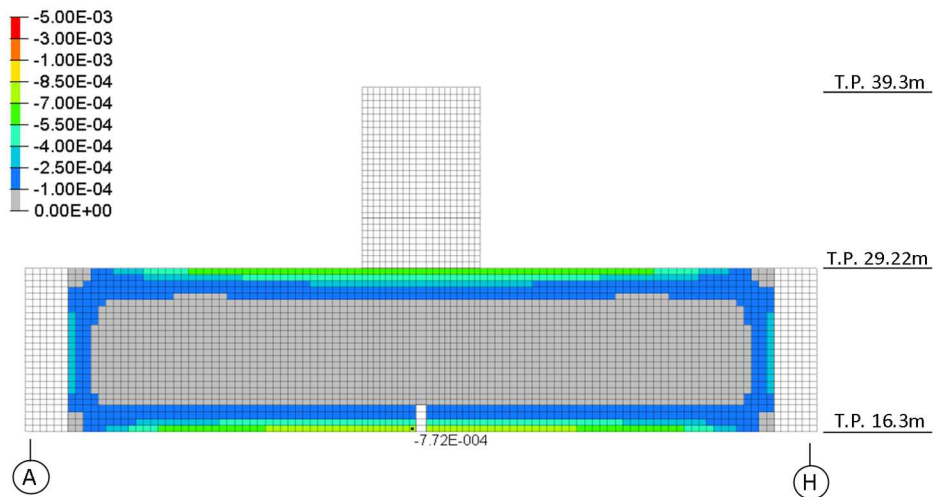
前述の弾塑性有限要素法解析により算定した、貯蔵建屋外壁に発生するひずみの評価結果を第3-1表及び第3-4図(1)～(3)に示す。コンクリートの圧縮ひずみ、鉄筋の引張ひずみ及び面外せん断力はいずれも許容値以下であり、貯蔵区域南側外壁の健全性を確認した。

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

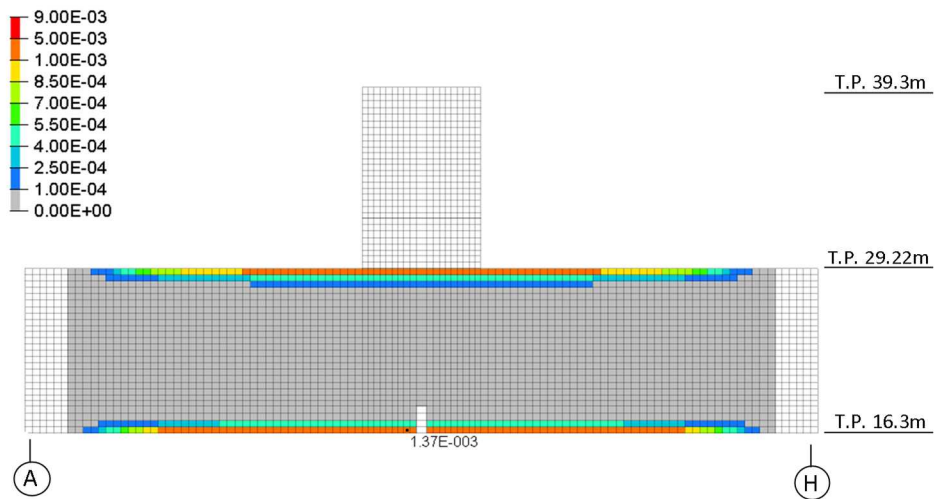
第3-1表 評価結果（貯蔵区域南側外壁）

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

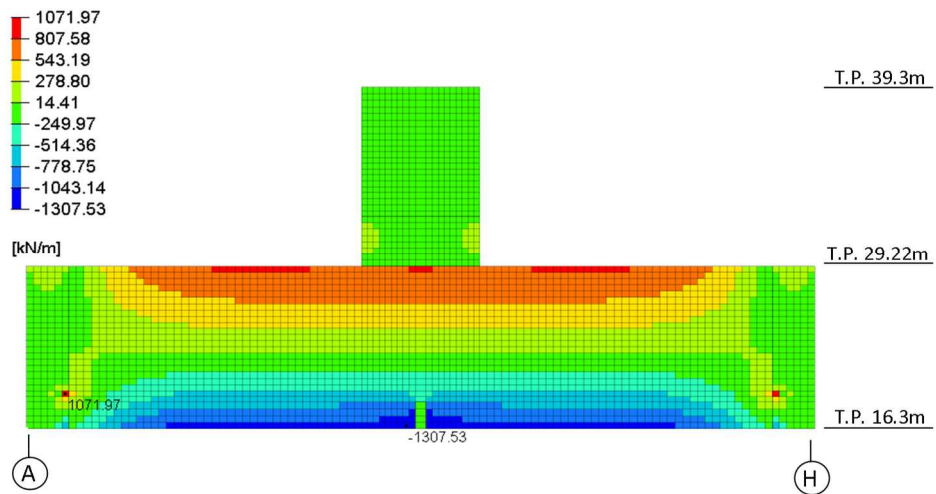
*) 面外せん断力に対する許容値の算出方法は別添4参照



第3-4図(1) コンクリート最小ひずみ分布（圧縮ひずみ）



第 3-4 図 (2) 鉄筋最大ひずみ分布 (引張ひずみ)



第 3-4 図 (3) 面外せん断力分布

b. 貯蔵区域の遮蔽扉の健全性確認結果

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

第 3-2 表 評価結果（貯蔵区域の遮蔽扉）

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

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

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

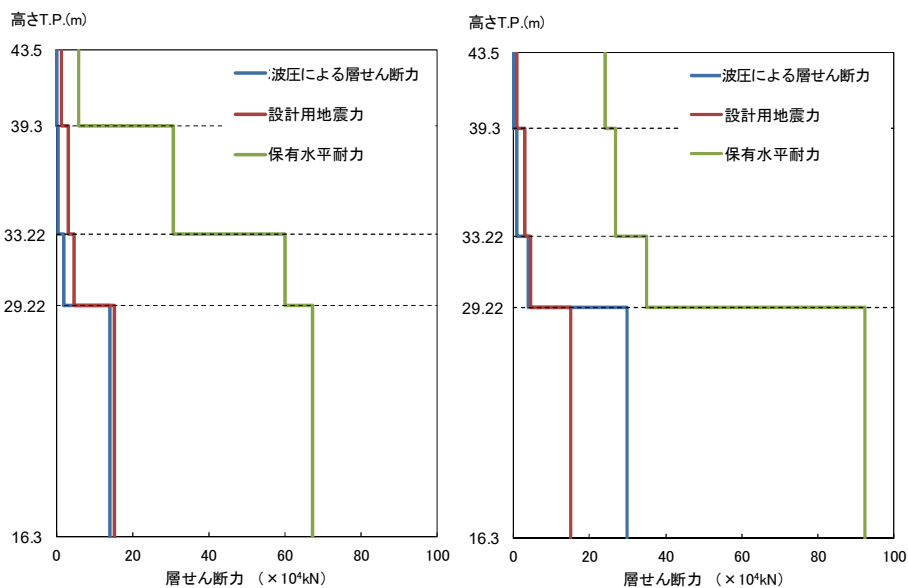
c. 津波による波圧（荷重）と設計用地震力及び保有水平耐力の比較結果

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

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

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

*) 設工認申請書記載値（平成22年8月27日認可済）に基づく

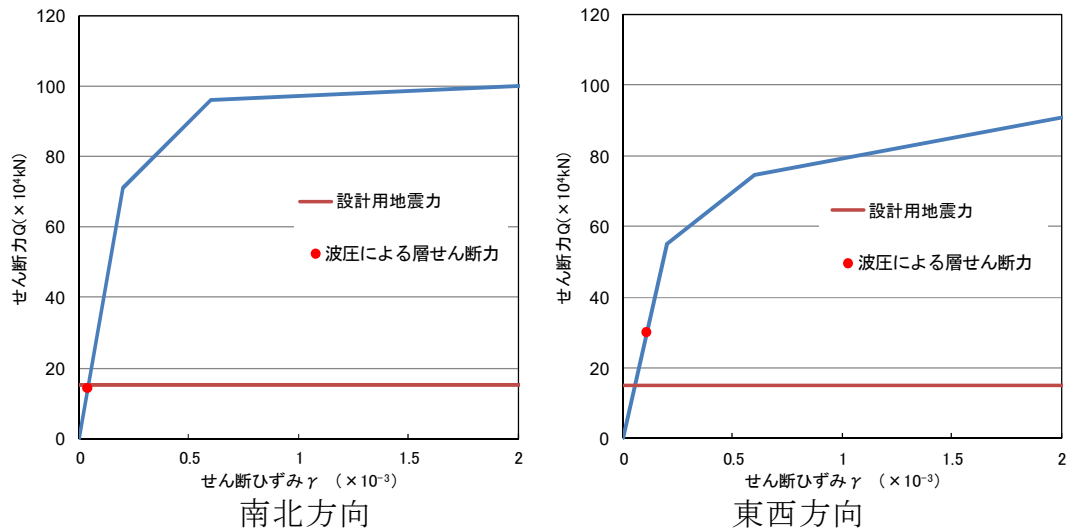


南北方向

東西方向

第3-5図 波圧による層せん断力，設計用地震力及び保有水平耐力の比較

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



*)せん断耐力は貯蔵建屋のうち、貯蔵区域の耐力である。

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

4. 金属キャスクの閉じ込め評価

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

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

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

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

(1) 閉じ込め評価の考え方

金属キャスクの閉じ込め評価については、以下の考え方に基づき実施する。

a. 落下物や津波漂流物の設定について

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

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

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

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

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

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

b. 金属キャスクの状態について

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

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

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

c. 構造評価について

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

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

d. 判定基準について

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

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

e. 金属キャスクの浸水による影響について

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

あることから、閉じ込め機能が損なわれることはないと考えられる。

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

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

(2) 衝突想定条件の設定

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

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

a. 落下物の抽出

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

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

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

b. 落下条件の整理

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

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

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

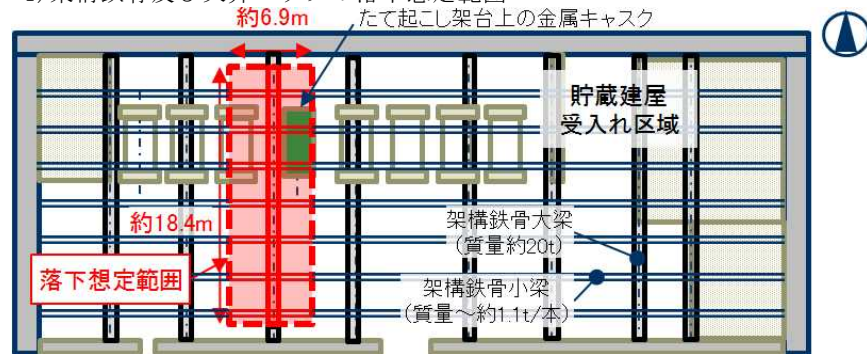
落下物	質量 (t)	落下高さ (m)	金属キャスク姿勢	金属キャスク上に落下するための条件	事象の起こりやすさ	落下エネルギー (N・m)	衝突想定条件（代表事象）として設定
コンクリート側壁	約 73	約 7.2	水平	津波波力により受入れ区域が損傷し、たて起こし架台上の金属キャスクの上部まで伸びた柱間の北側側壁が転倒し自由落下（金属キャスクが水平姿勢の場合の模式図を第4-2-2表①に示す）	北側側壁が損傷した場合、コンクリートが破損、変形して倒れ、金属キャスクへの衝突が想定される	約 5.2×10^6	— 落下エネルギーが天井クレーンの落下に比べ小さく、天井クレーンの落下で代表できると考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

○：代表事象として設定

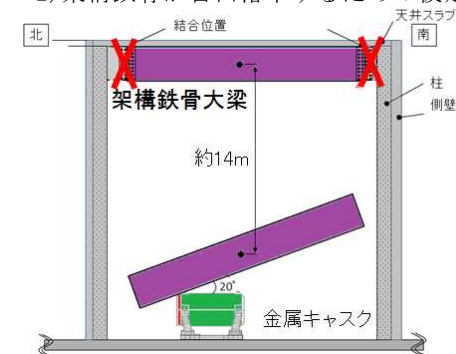
第 4-2-1 表 落下物の抽出及び金属キャスクへの衝突状態の設定（建屋構造材）（2/2）

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

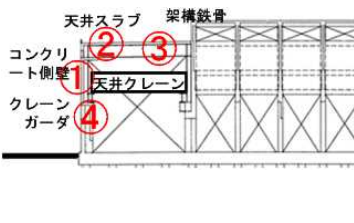
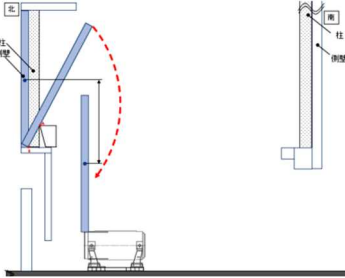
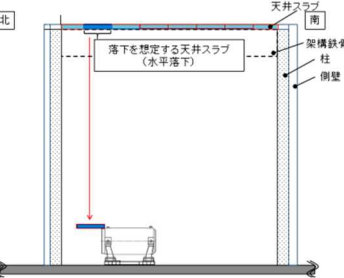
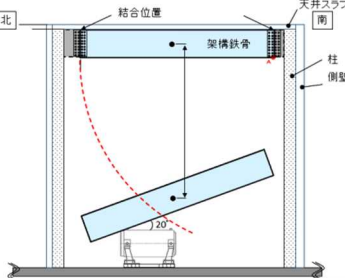
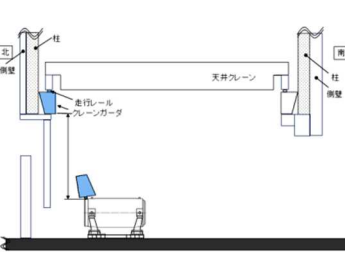
*1) 架構鉄骨及び天井スラブの落下想定範囲



*2) 架構鉄骨が自由落下するための仮定



第4-2-2表 落下物及び落下形態の想定 (建屋構造材)

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

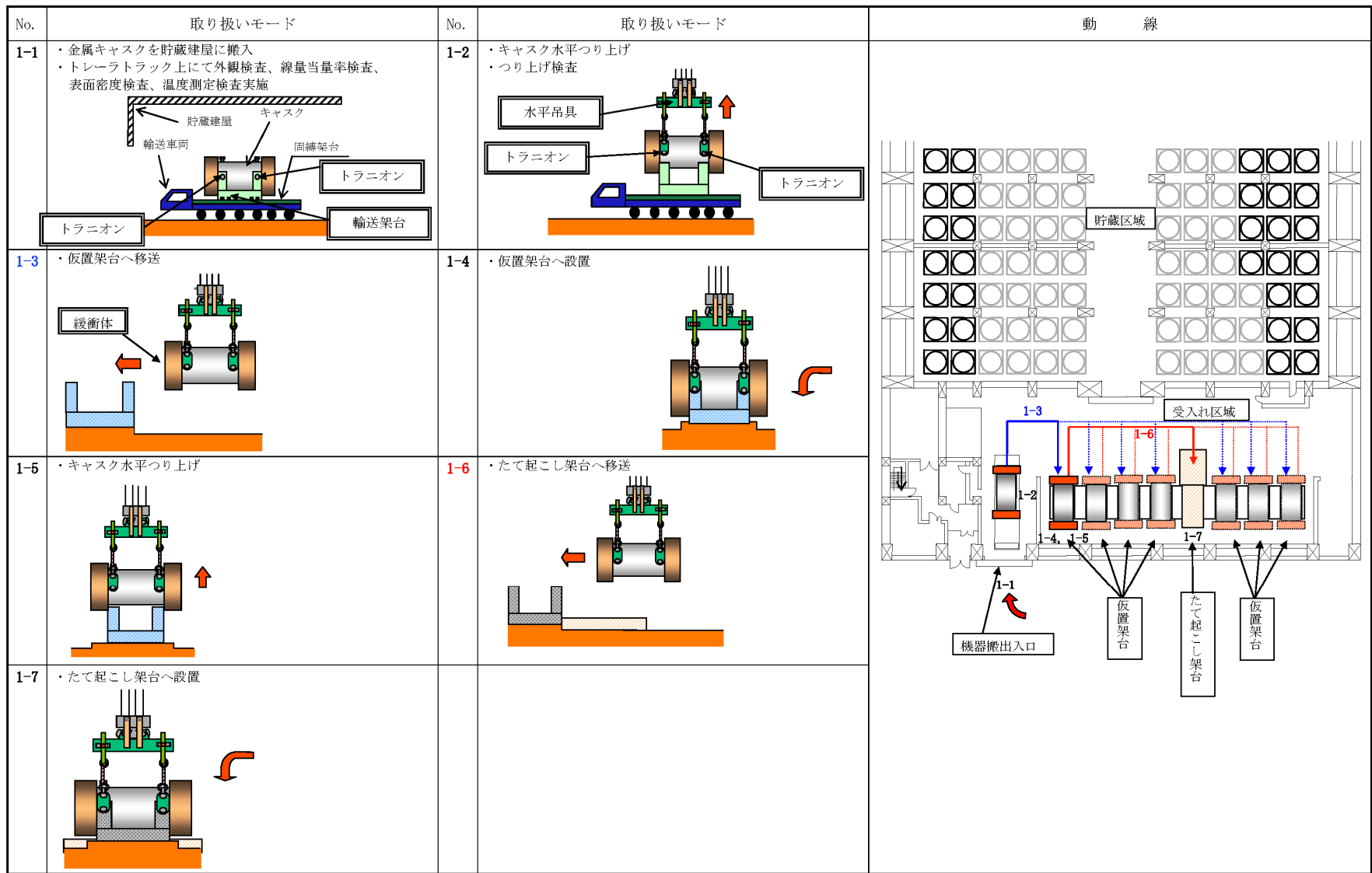
第 4-2-3 表 落下物の抽出及び金属キャスクへの衝突状態の設定（天井クレーン）

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

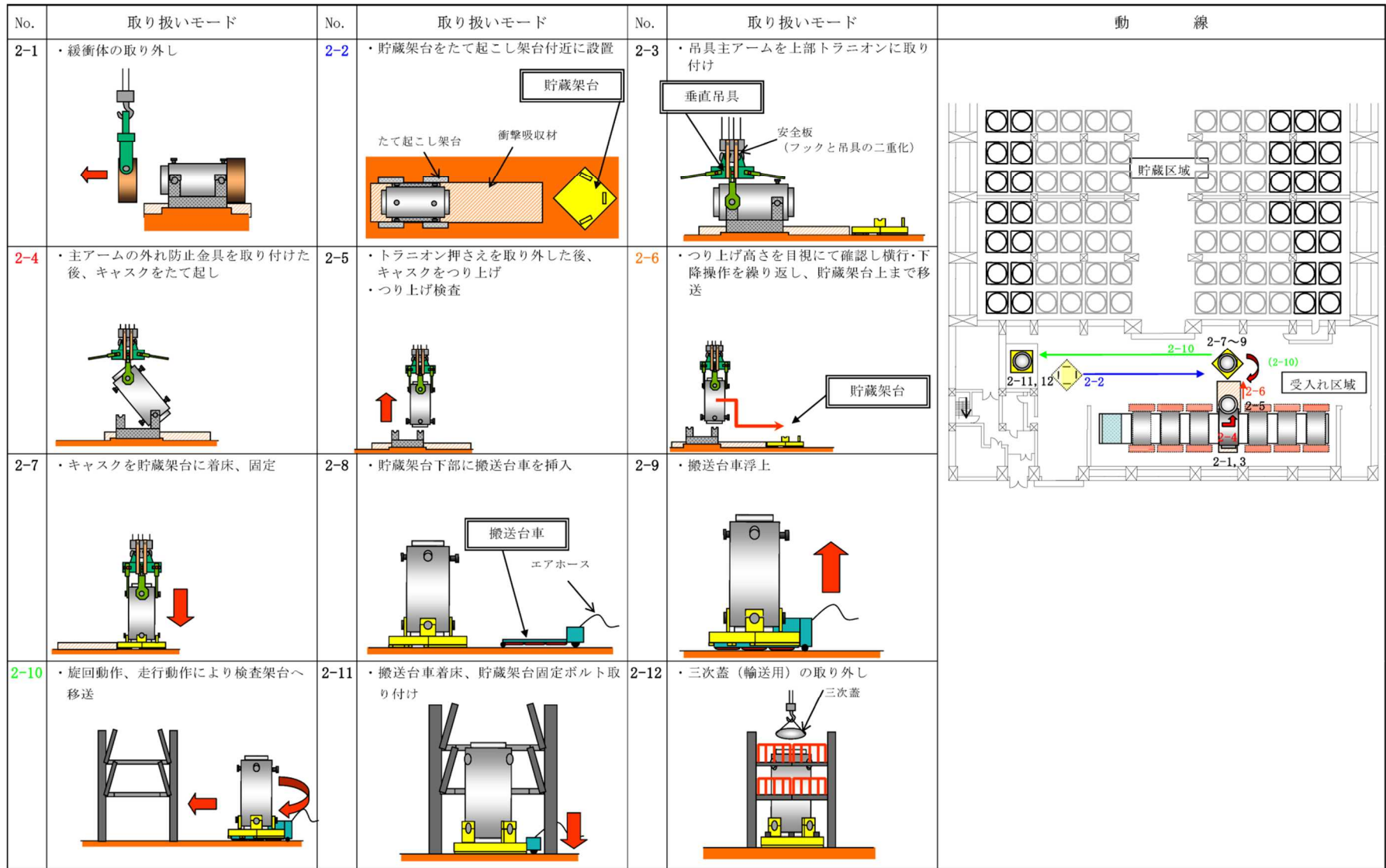
○：代表事象として設定

第 4-2-4 表 落下物及び落下形態の想定（天井クレーン）

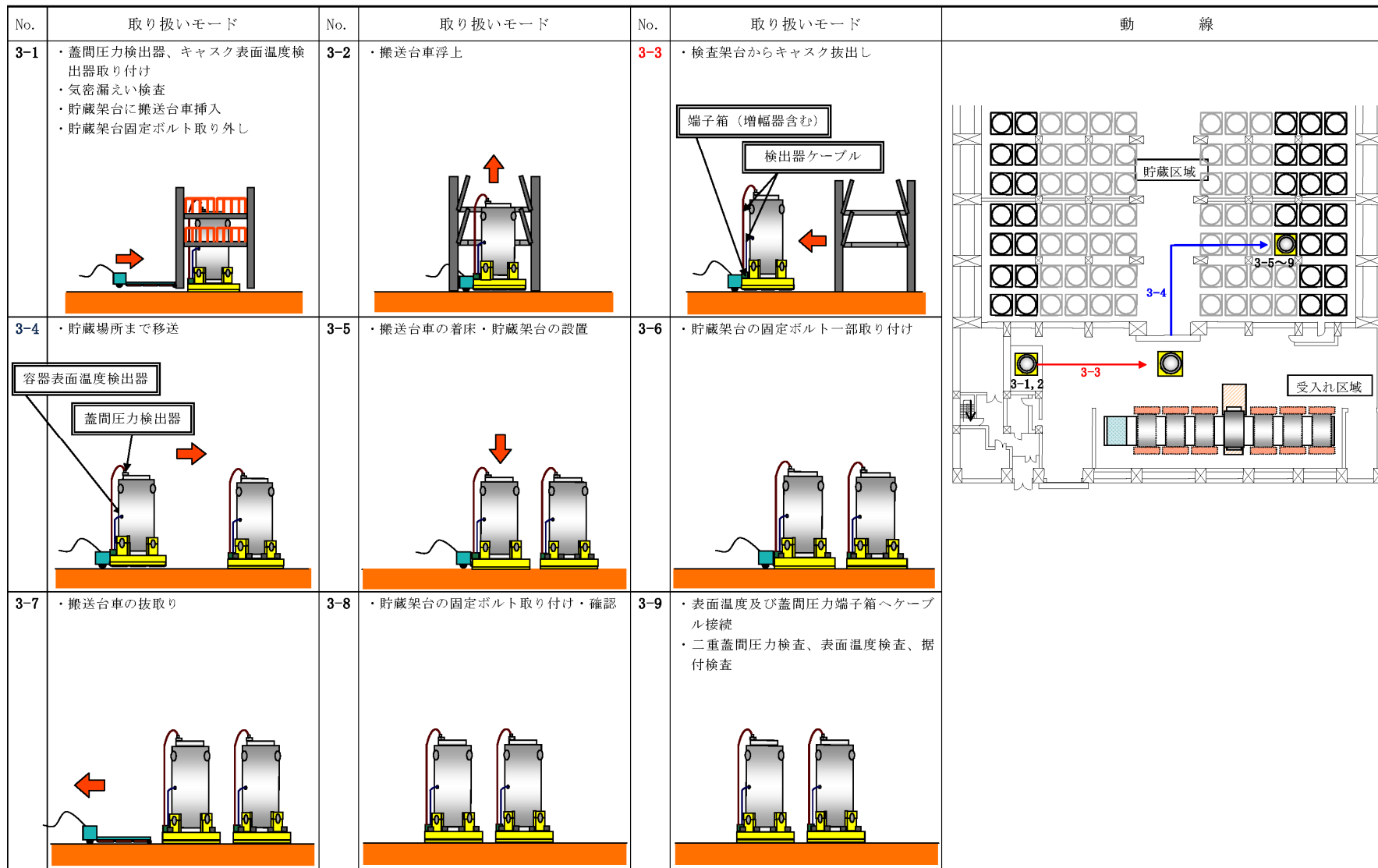
天井クレーン概略図	①主巻フック	②けた, サドル, 走行車輪	③トロリフレーム	④運転室
		<p>(上図はけたの衝突を表す)</p>		
<p>天井クレーン構造及び落下に伴う衝突荷重の掛かり方を踏まえ、北側側壁の破損に伴う落下による衝突箇所として以下を考慮する。</p> <p>①主巻フック ②けた, サドル, 走行車輪 ③トロリフレーム ④運転室</p>	<ul style="list-style-type: none"> 金属キャスク受入時の緩衝材取り外し等の作業を行う際に、主巻フックが金属キャスク蓋部の上部に接近することから、主巻フックの落下を仮定する。 主巻フックはワイヤで天井クレー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



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



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



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

c. 衝突想定条件の設定

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

設定する衝突想定条件を第 4-2-5 表に示す

第 4-2-5 表 設定する衝突想定条件

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

d. 津波漂流物による衝突条件との比較

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

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

大型の津波漂流物として，敷地内及び敷地外における津波漂流物調査

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

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

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

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

第 4-2-6 表 津波漂流物による衝突条件と衝突想定条件の比較

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

(3) 天井クレーンの水平姿勢キャスクへの落下による影響の評価

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

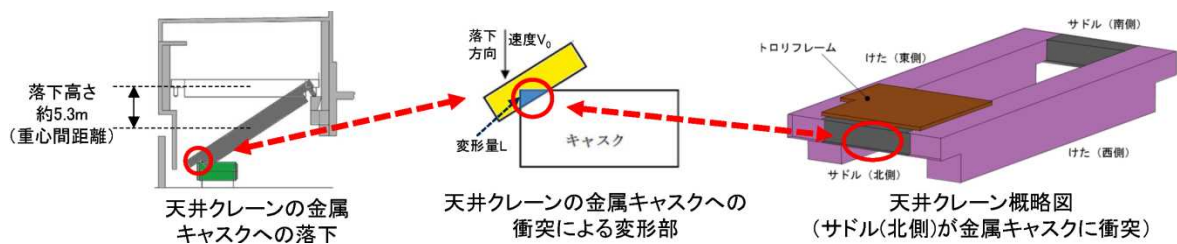
a. 衝突荷重の設定

構造評価の入力条件となる衝突荷重を、工学式に基づき設定する。

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

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

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

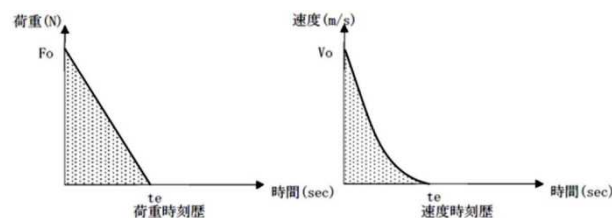


第 4-3-1 図 天井クレーンの金属キャスクへの衝突による変形（模式図）

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

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

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



第 4-3-2 図 衝突時の荷重及び速度（模式図）

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

第 4-3-1 表 天井クレーン落下時の荷重設定の前提条件

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

第 4-3-2 表 天井クレーン落下時の荷重設定の結果

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

b. 構造評価条件

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

解析コードは構造解析用汎用コード ABAQUS を用いる。

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

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

構造評価の条件を第 4-3-3 表に示す。

第 4-3-3 表 天井クレーン落下時の水平姿勢キャスク構造評価の条件

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

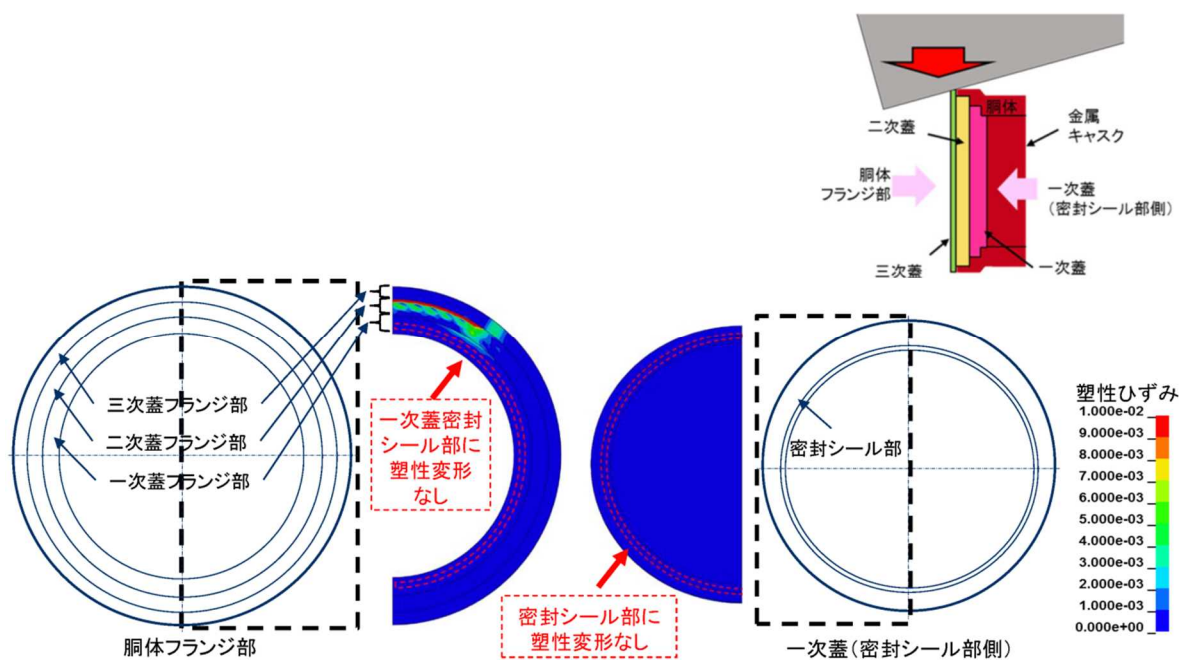
c. 評価結果

評価結果を第 4-3-3 図及び第 4-3-4 表に示す。

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

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

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



第 4-3-3 図 天井クレーン落下時の水平姿勢キャスクのひずみ評価結果

第 4-3-4 表 天井クレーン落下時の水平姿勢キャスクの応力評価結果

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

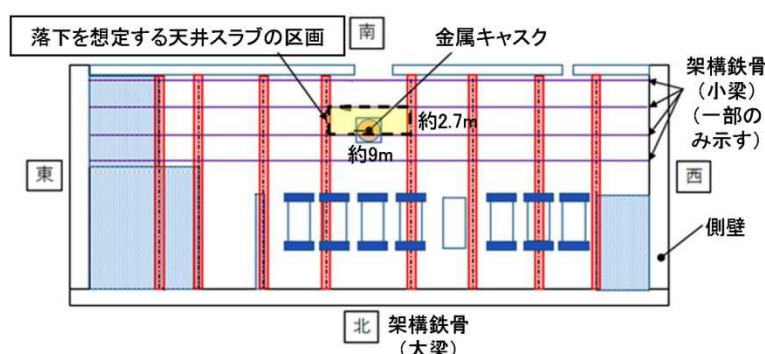
(4) 天井スラブの縦姿勢キャスクへの落下による影響の評価

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

a. 衝突荷重の設定

構造評価の入力条件となる衝突荷重を、工学式に基づき設定する。

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

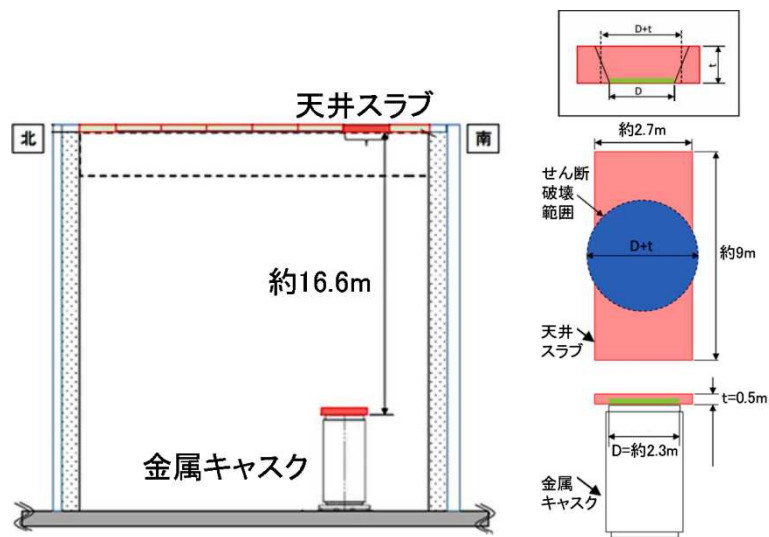


第4-4-1図 落下を想定する天井スラブ

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

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

場合に比べ荷重は小さくなると考えられる。



第 4-4-2 図 天井スラブの金属キャスクへの衝突（模式図）

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

第 4-4-1 表 天井スラブ落下時の荷重設定の前提条件

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

第 4-4-2 表 天井スラブ落下時の荷重設定の結果

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

b. 構造評価条件

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


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

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

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

構造評価の条件を第 4-3-3 表に示す。

第 4-4-3 表 天井スラブ落下時の縦姿勢キャスク構造評価の条件

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

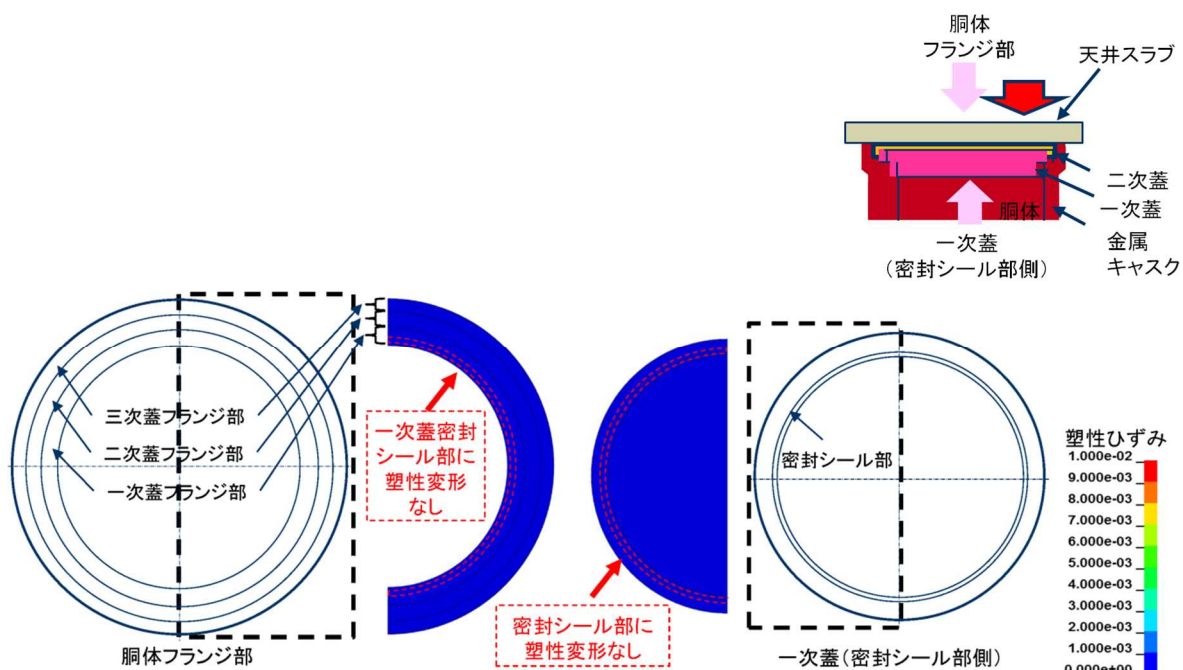
c. 評価結果

評価結果を表及び第 4-4-3 図及び第 4-4-4 表に示す。

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

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

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



第 4-4-3 図 天井スラブ落下時の縦姿勢キャスクのひずみ評価結果

第 4-4-4 表 天井スラブ落下時の縦姿勢キャスクの応力評価結果

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

(5) 閉じ込め機能の低下による影響

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

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

a. 核分裂生成物の大気中への放出量

(a) 破損燃料棒の評価

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

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

(b) 核分裂生成物の移行と放出量の評価

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

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

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

(c) 評価結果

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

第 4-5-1 表 核分裂生成物放出量の評価条件

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

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

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

第 4-5-2 表 核分裂生成物放出量の評価結果

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

b. 線量評価

(a) 評価前提

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

(b) 評価方法

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

線量の評価条件を第 4-5-3 表に示す。

(c) 評価結果

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

第 4-5-3 表 線量評価条件

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

第 4-5-4 表 線量評価結果

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

(6) 結論

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

5. 使用済燃料貯蔵施設の遮蔽評価

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

(1) 遮蔽評価の条件

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

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

第 5-1 表 貯蔵区域の金属キャスクの線源条件の比較

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

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

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

第5-2表 受入れ区域の金属キャスクの線源条件の比較

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

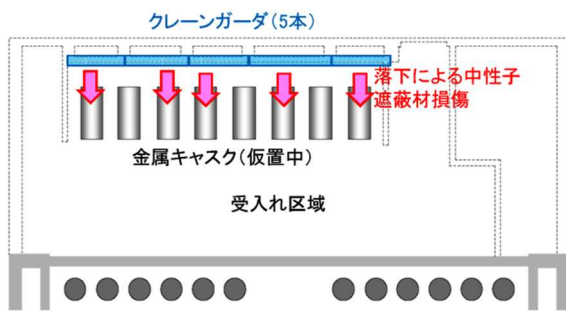
c. 金属キャスクの状態（受入れ区域の金属キャスクの中性子遮蔽材損傷部）については、受入れ区域の損傷に伴う落下物が金属キャスクに衝突して外筒を貫通し、中性子遮蔽材が損傷する場合は仮定する。

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

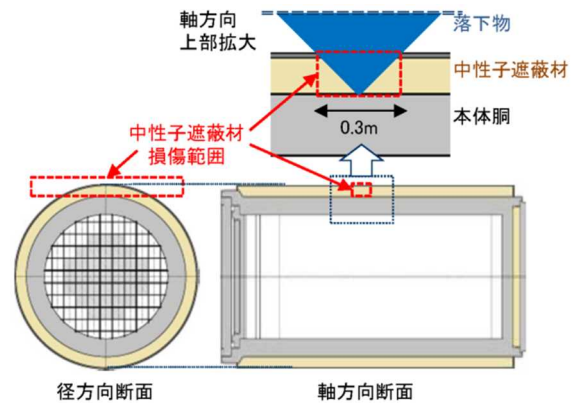
(b) クレーンガーダは金属キャスクの仮置エリア付近に5本あることから、第5-1図に示すように1本が1基の金属キャスクの中性子遮蔽材を損傷させるものとし、クレーンガーダの落下により5基の金属

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

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



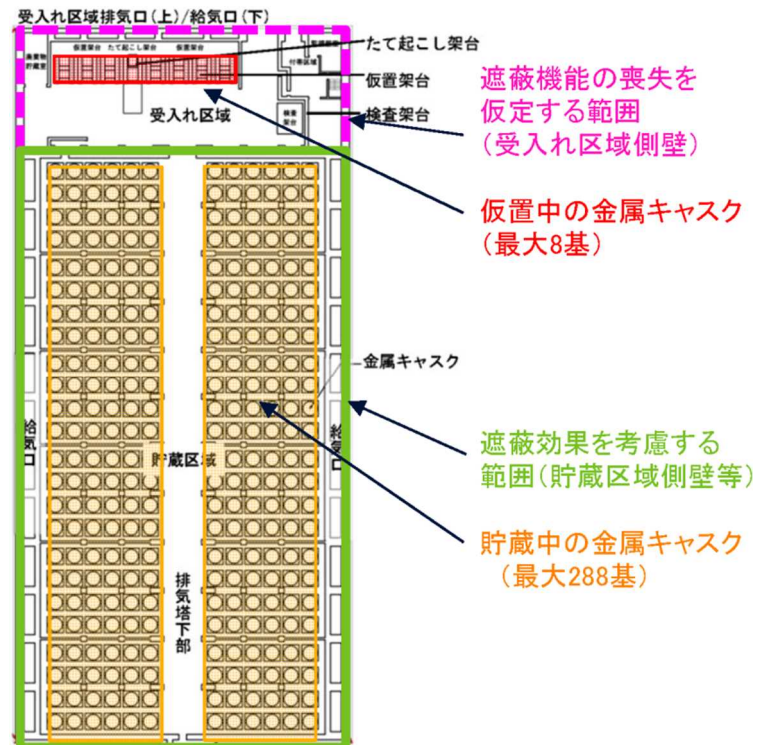
第5-1図 クレーンガーダの金属キャスクへの落下



第5-2図 落下物による中性子遮蔽材の損傷の仮定

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

の瓦礫撤去を想定) 及び貯蔵区域に通じる遮蔽扉部分の遮蔽機能の回復 (遮蔽体の設置) 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)の遮蔽評価結果と同等になるよう設定	—
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回復は考慮しない 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, 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)後に追加遮蔽体を設置し, 併せて3ヶ月程度を要すると想定
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 7.8×10^{-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 7.6×10^{-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 1.9×10^{-2} mSv
実効線量合計（年間）	約 7.8×10^{-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 1.4×10^{-1} mSvである。

(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回復を考慮して年間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，以下の手段を講ずるものとする。

- ・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ずる。

- ・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ずる。なお，搬出までの間は金属キャスクを適切に保管する。

(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」（以下，「事業所外運搬規則」という。）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_2 値の 10^{-6} を超えないこと	1週間あたり、 A_2 値を超 えないこと
除熱性	—	表面温度が 85°C 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，それに伴う落下物や津波漂流物に対して金属キャスクの閉じ込め機能が維持されることを確認している。

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。

- ・漏えい箇所に実施可能な漏れ止め材の充填や漏れ止め溶接を実施
- ・遮蔽材の欠損を補修

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，データ採取及び解析により確認を行う。

これにより，事業所外運搬規則第6条に基づく一般の試験条件，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，事業所外運搬規則第14条に定める特別措置により，使用済燃料貯蔵施設外へ搬出を行う。

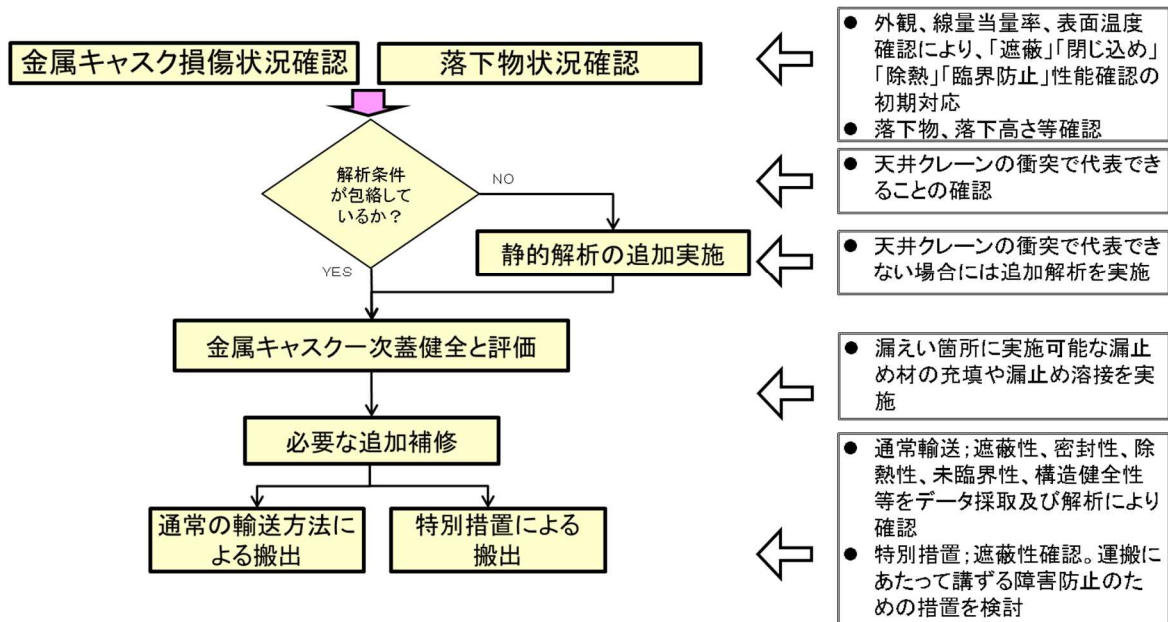
仮想的な大規模津波による受入れ区域損傷に伴う落下物の想定条件を第6-2表に示す。また，衝撃を受けた金属キャスクの基本的な対応方針（天井クレーン，天井スラブ，クレーンガード）を第6-1図(1)～(3)に示す。

第 6-2 表 仮想的大規模津波による受入れ区域損傷に伴う落下物の想定条件

	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

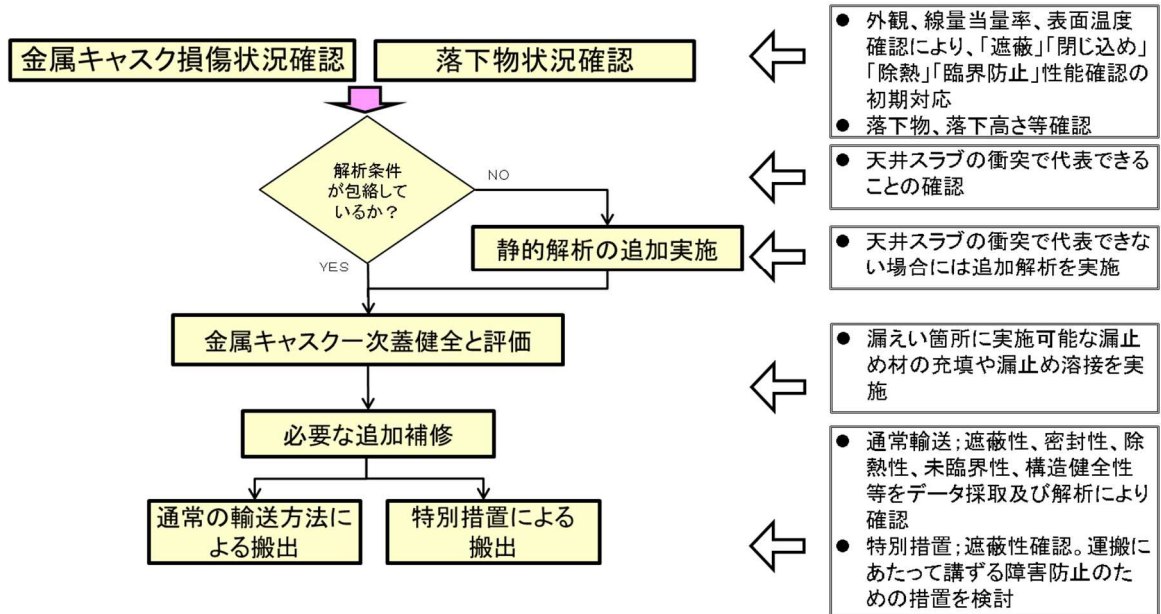
天井クレーンが、水平状態の金属キャスクに落下し、閉じ込め(密封)機能に影響のおそれ



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

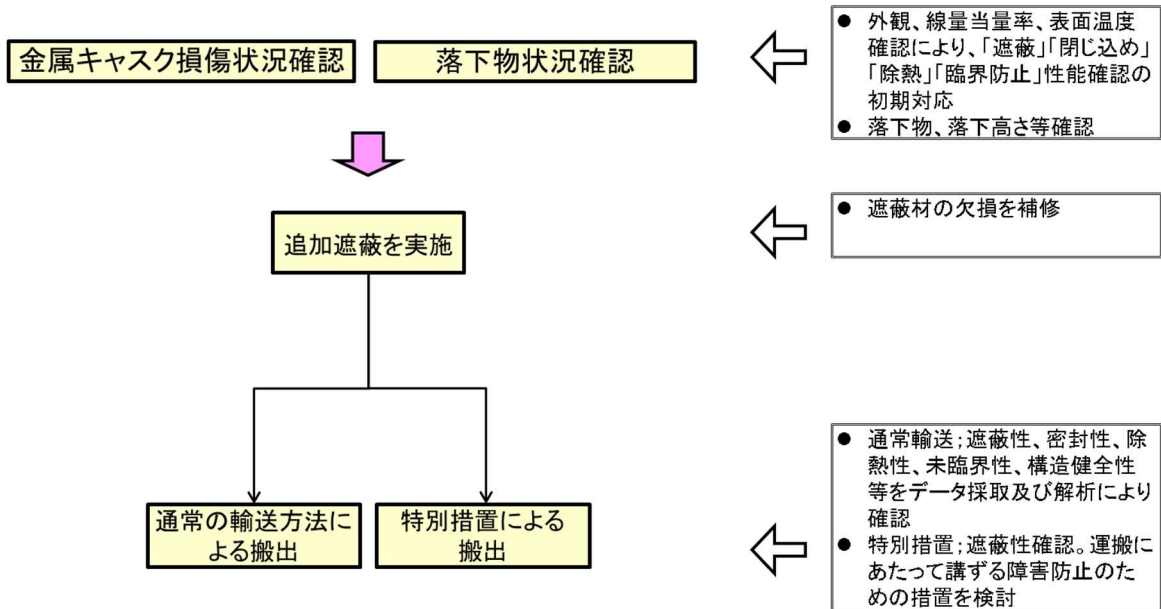
天井スラブが、縦状態の金属キャスクに落下し、密封機能に影響のおそれ



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

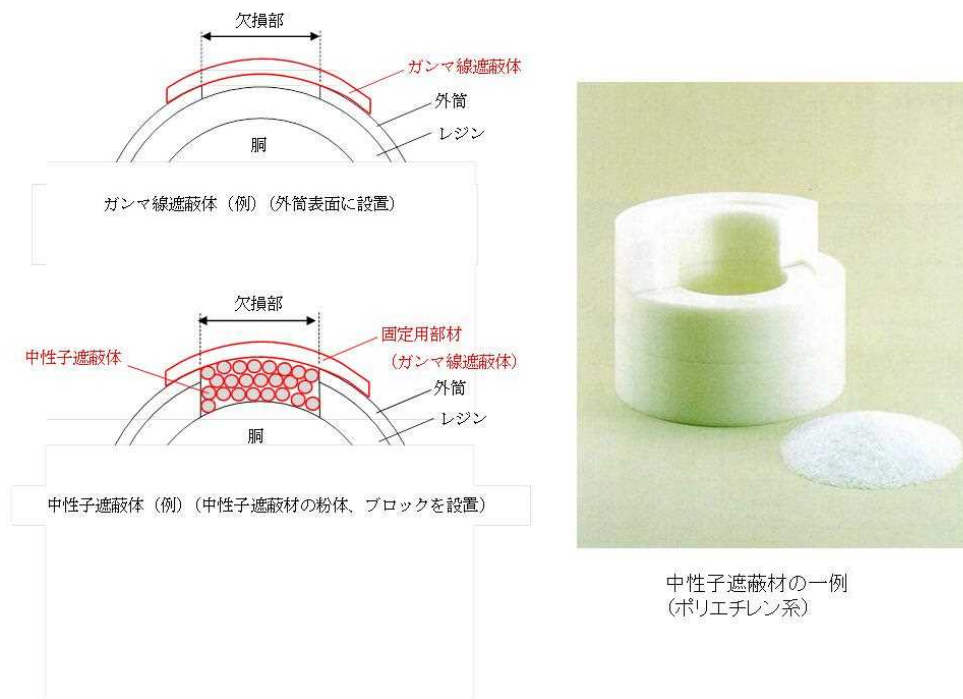
金属キャスクの損傷等により遮蔽機能が損なわれていないことの確認のため，雰囲気線量の測定として，該当する金属キャスクの周囲の線量上昇有無の確認を実施する。

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(γ 線と中性子の合計)にて確認する。第 6-3 図に中性子線用サーベイメータの例を示す。

事業所外運搬規則第 14 条に基づく輸送では、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 中性子線用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えい検査を実施する。

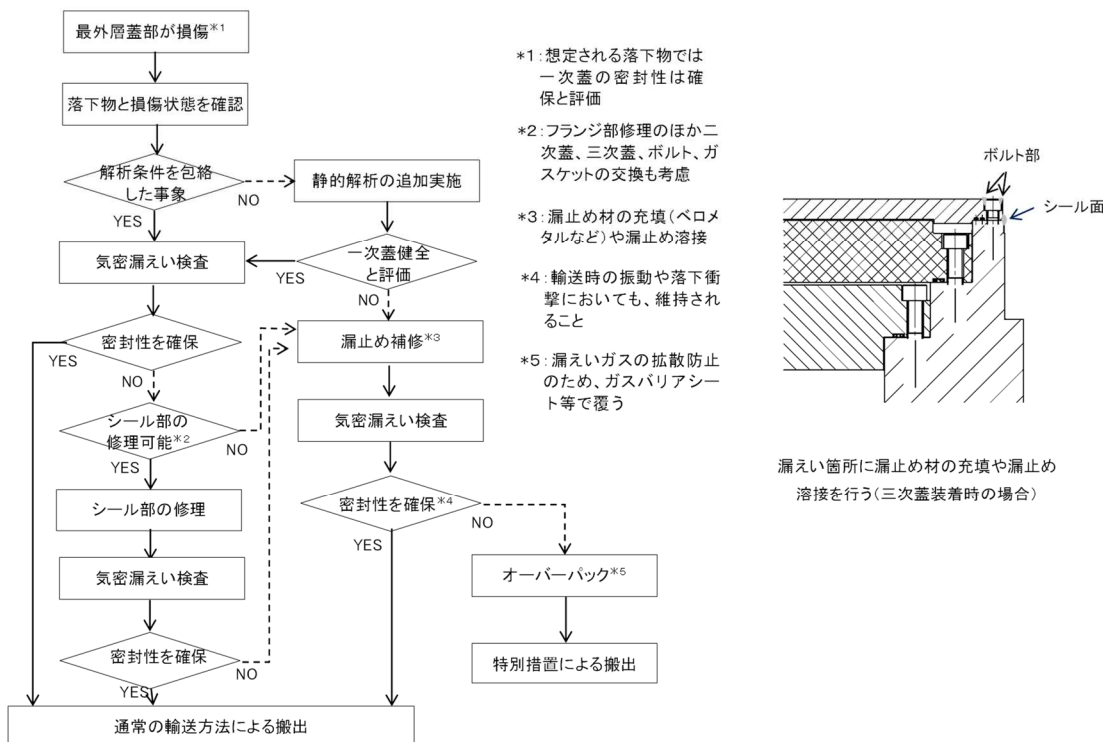
なお、最外層の蓋の気密漏えい検査については、損傷が軽微で通常の検査ができる場合は漏えい率を測定し、できない場合は「保守・修理」に移行する。

(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、漏えい箇所に漏れ止め材の充填や漏れ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。



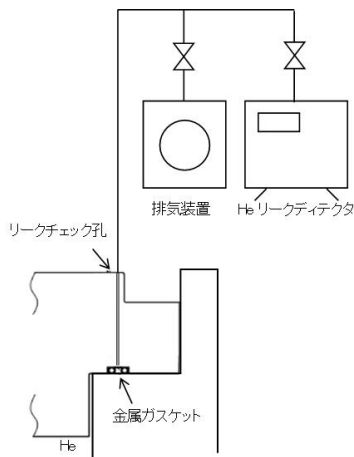
第 6-4 図 補修フロー

(c) 搬出に必要な試験・検査

必要な漏れ止めを行った上で、一般の試験条件の漏えい率を満足することを気密漏えい検査にて確認する。

事業所外運搬規則第 14 条に基づく輸送では、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、気密漏えい検査の例を示す。



第 6-5 図 気密漏えい検査(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

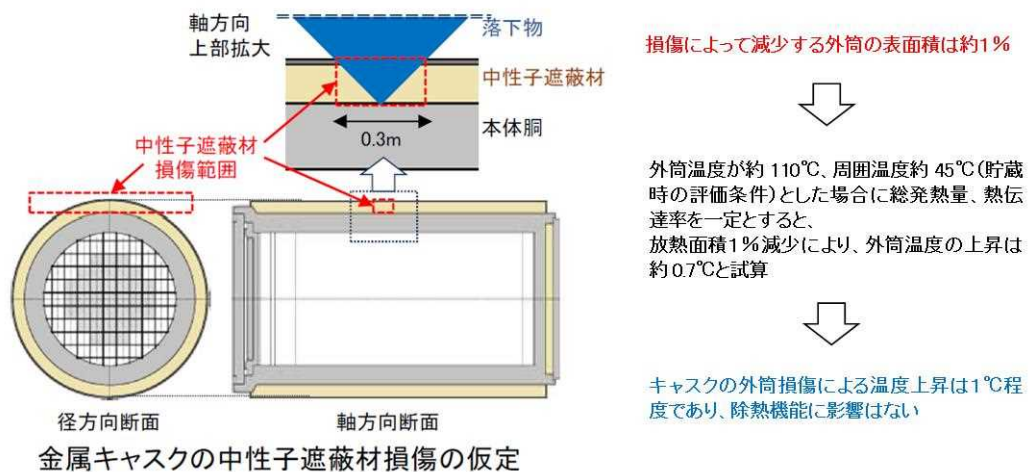
(a) 初期確認

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に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減少しても，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，落下物の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，衝突しうる物が既往の評価事象である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。

遮蔽，閉じ込め，除熱及び臨界防止の各基本的安全機能につき，初期確認，保守・修理及び搬出に必要な試験・検査として実施する項目を第 6-3 表に示す。

第 6-3 表 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・修理及び搬出に必要な試験・検査

	初期確認	保守・修理	搬出に必要な試験・検査
遮蔽	<ul style="list-style-type: none"> 外筒部の変形や損傷の有無を確認 金属キャスクの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実施 	<ul style="list-style-type: none"> 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実施 	<ul style="list-style-type: none"> 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を満足することを線量当量率検査で確認 事業所外運搬規則第 14 条に基づく輸送では, 金属キャスクの表面で線量当量率を満足するよう, 追加遮蔽や接近防止を実施
閉じ込め(密封)	<ul style="list-style-type: none"> 該当する金属キャスク周囲の線量上昇の有無を確認 蓋部の変形や損傷, 架台からの落下の有無を確認 最外層の蓋の気密漏えい検査を実施 (通常の検査が困難な場合は保守・修理に移行) 	<ul style="list-style-type: none"> 落下物が衝突しても金属キャスクの一次蓋の密封性は確保 最外層の蓋に異常がある場合は, 漏えい箇所に漏れ止め材の充填や漏れ止め溶接等追加補修を実施 	<ul style="list-style-type: none"> 必要な漏れ止めを行った上で, 一般の試験条件の漏えい率を満足することを気密漏えい検査で確認 事業所外運搬規則第 14 条に基づく輸送では, 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, 離隔距離の確保)を実施
除熱	<ul style="list-style-type: none"> 外筒部の変形や損傷の有無を確認 金属キャスクの表面温度の温度計による測定を実施 	<ul style="list-style-type: none"> 仮に金属キャスクの外筒が損傷し放熱面積が減少しても温度上昇はわずかと考えられるが, 状況に応じて落下物, 土砂及び津波漂流物の撤去により周囲に空間を設け自然対流を促進 	<ul style="list-style-type: none"> 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(近接防止枠を設ける場合には, 当該近接防止枠の表面)が法令基準を満足するよう温度を測定
臨界防止	<ul style="list-style-type: none"> 該当する金属キャスク周囲の線量上昇の有無を確認 外筒部の変形や損傷, 架台からの落下の有無を確認(落下物や瓦礫は記録した上で撤去し, 衝突事象が既往の評価事象に包絡されることを確認) 	<ul style="list-style-type: none"> 保守・修理は不要と考えられる (閉じ込め機能が維持され水が浸入しないこと, 落下物によるバスケットや燃料への影響はないことから, 臨界の可能性は考え難い) 	<ul style="list-style-type: none"> 二重の水密性を試験で確認(冠水状態の未臨界を確保できる場合は一重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ずる。

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

貯蔵区域で貯蔵中の金属キャスクは受入れ区域の損傷による落下物や津波漂流物による衝撃を受けることはなく、基本的な安全機能が損なわれるおそれはないが、津波襲来後の敷地内の浸水により通常の監視機能が喪失するため、外部支援等の準備が整い次第、金属キャスクの遮蔽機能、閉じ込め機能及び除熱機能の確認を行う代替計測に必要な手段を講ずる。

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

(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。

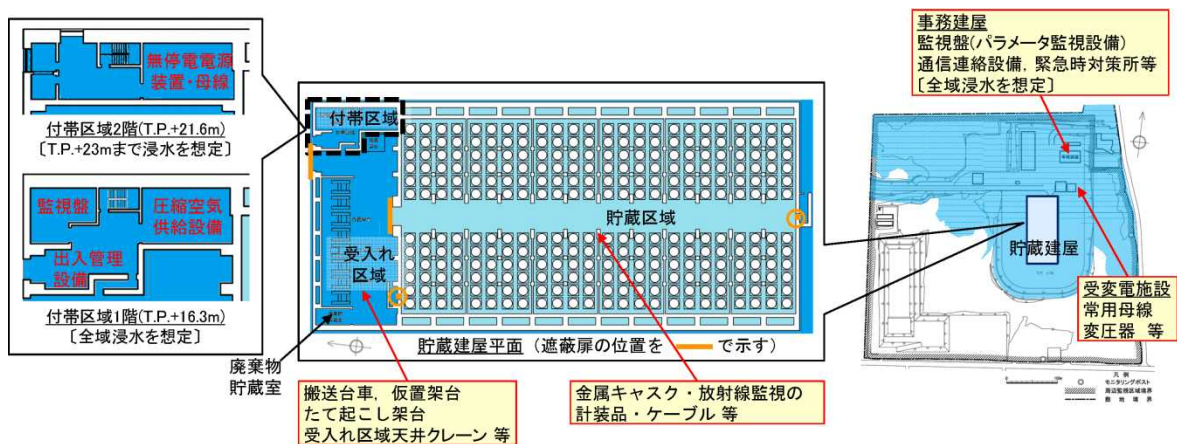
また、対応要員による基本的な安全機能維持の確認等は、津波の遡上波が到達しない標高（T.P. +30m）の敷地（以下「高台」という。）の予備緊急時対策所とする建物、可搬型計測機器、代替電源、燃料設備、資機材保管庫等を使用し対応する。予備緊急時対策所等の設置場所を第 7-1 図(2)に示す。

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

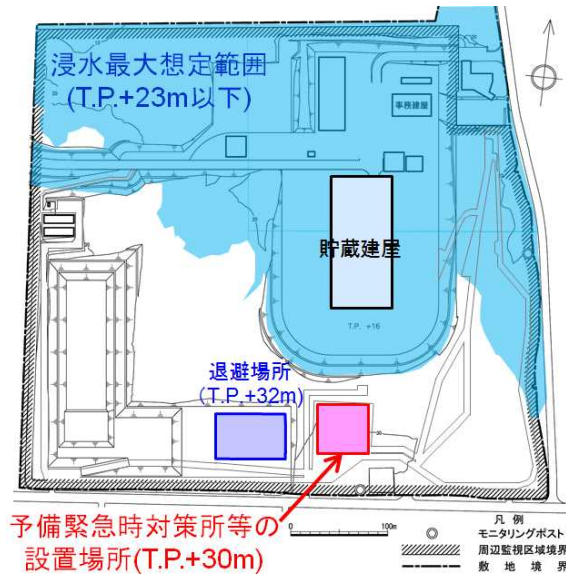
ち臨界防止機能維持については金属キャスクの設計で担保されることから、金属キャスクの基本的安全機能の維持を確認するための試験、検査の対象とする基本的安全機能は、遮蔽機能、閉じ込め機能及び除熱機能とする。

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可能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移送が不能となる。	・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移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，ドラム缶が廃棄物貯蔵室外，敷地内及び敷地外へ漂流する可能性がある。	・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が，漂流防止対策として，水面に浮上するドラム缶は水面に浮上できる大きさのネットで覆う。
<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) 金属キャスク（貯蔵区域）の基本的安全機能の確認

貯蔵区域で貯蔵中の金属キャスクは受入れ区域の損傷による落下物や津波漂流物による衝撃を受けることはなく、基本的安全機能が損なわれるおそれはないが、津波襲来後の敷地内の浸水により通常の監視機能が喪失することから、基本的安全機能の確認を実施する手段を講ずる。

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。

仮想的な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く。

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。

金属キャスク（貯蔵区域）の基本的安全機能の確認として実施する項目の概要を、(4)で述べる津波襲来後の活動に必要な対策として実施する項目の概要と併せて第7-2表に示す。

(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

可搬型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

可搬型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、可搬型の放射線サーベイメータは、参考に示すモニタリングポストの計測範囲のガンマ線及び中性子の線量当量率が測定可能である。

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。

・可搬型ガンマ線用サーベイメータ

計測方式 シンチレーション, 電離箱

数量 各1台*

・可搬型中性子線用サーベイメータ

計測方式 ^3He 比例計数管

数量 1台*

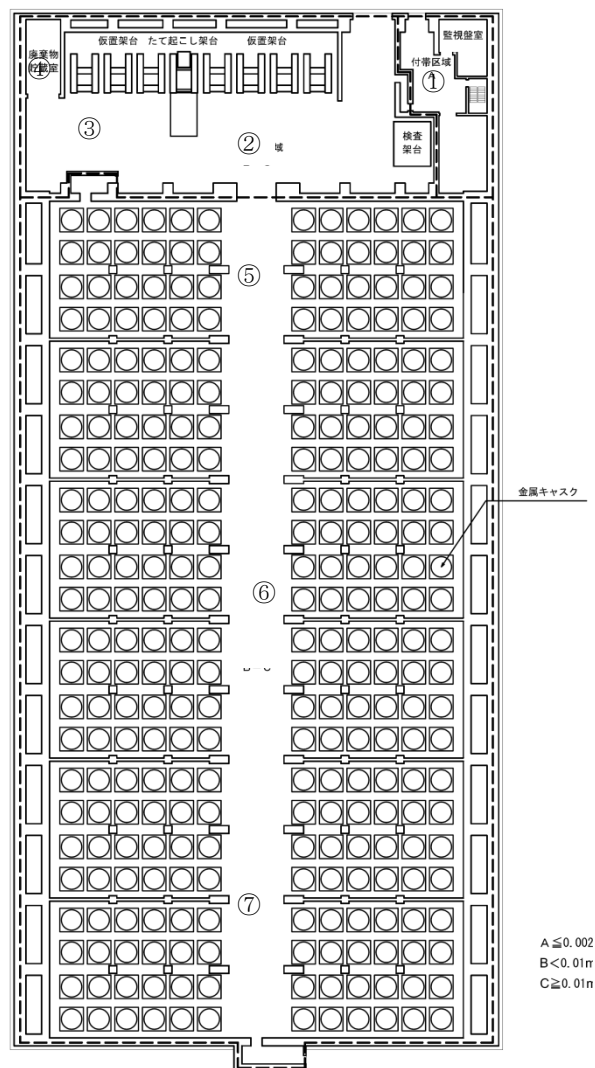
*) 点検校正のため高台資材保管庫から持ち出す場合は、通常使用してい

るサーベイメータの中から高台資材保管庫に補充する。

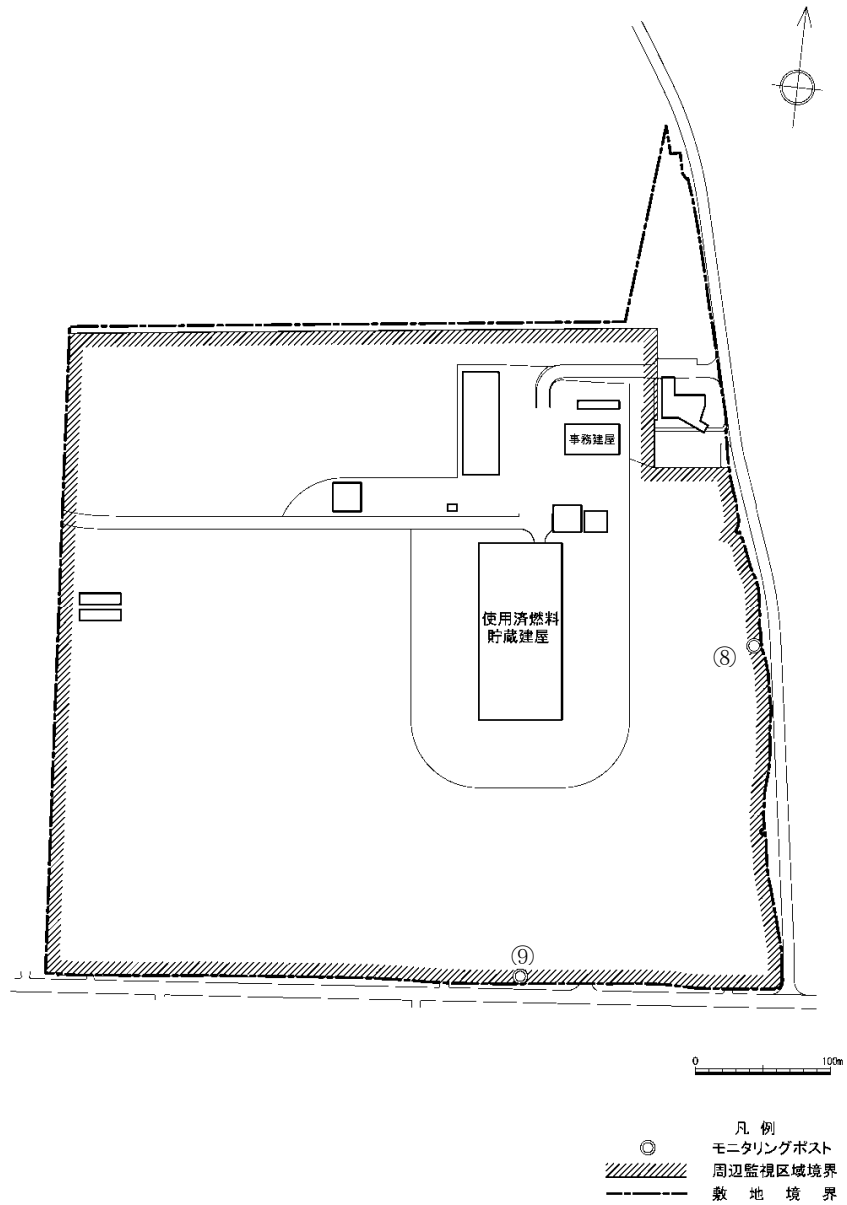
代替計測に用いる可搬型の放射線サーベイメータは、津波襲来時の浸水の影響を受けない高台の資材保管庫に保管し、速やかな確認ができるよう保管環境を維持する。

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

(参考) モニタリングポストの計測範囲

	計測範囲
ガンマ線 (シンチレーション) (電離箱)	10 ~ 10 ⁴ nGy/h
	10 ³ ~ 10 ⁸ nGy/h
中性子	10 ⁻² ~ 10 ⁴ μSv/h

b. 閉じ込め機能の代替計測

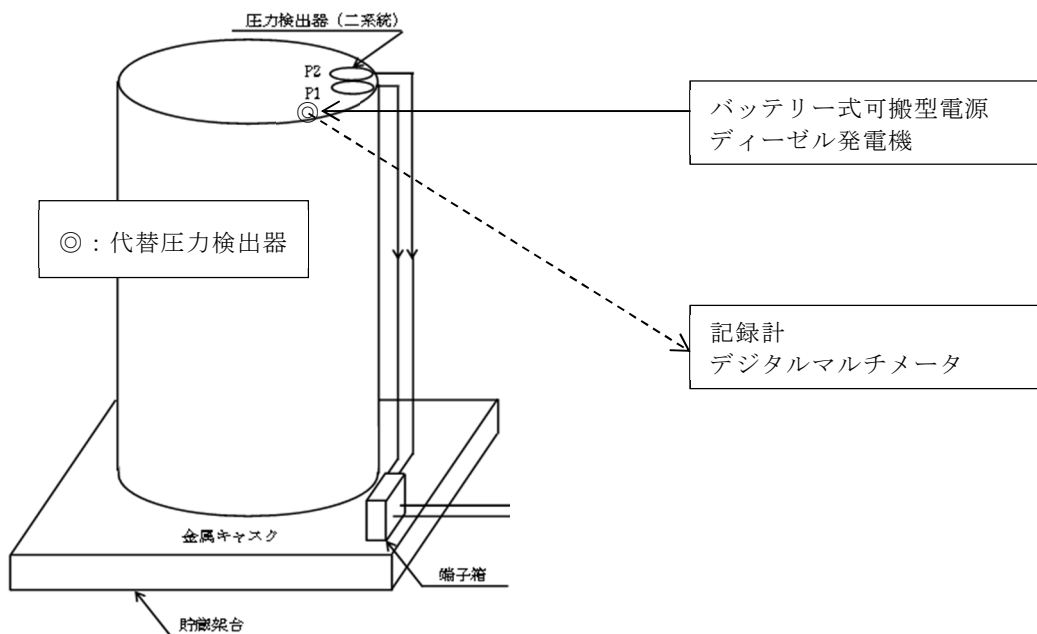
通常時は、蓋間圧力監視装置により金属キャスクの蓋間圧力を計測し、閉じ込め機能が確保されていることを確認する。

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、バッテリー式可搬型電源、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*1 (うち予備 12 台*1)
- ・記録計又はデジタルマルチメータ 最大 10 台*1 (うち予備 2 台*1)
- ・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*2 (うち予備 1 台*2)

*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、また仮に基準漏えい率の 100 倍で漏えい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*3 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

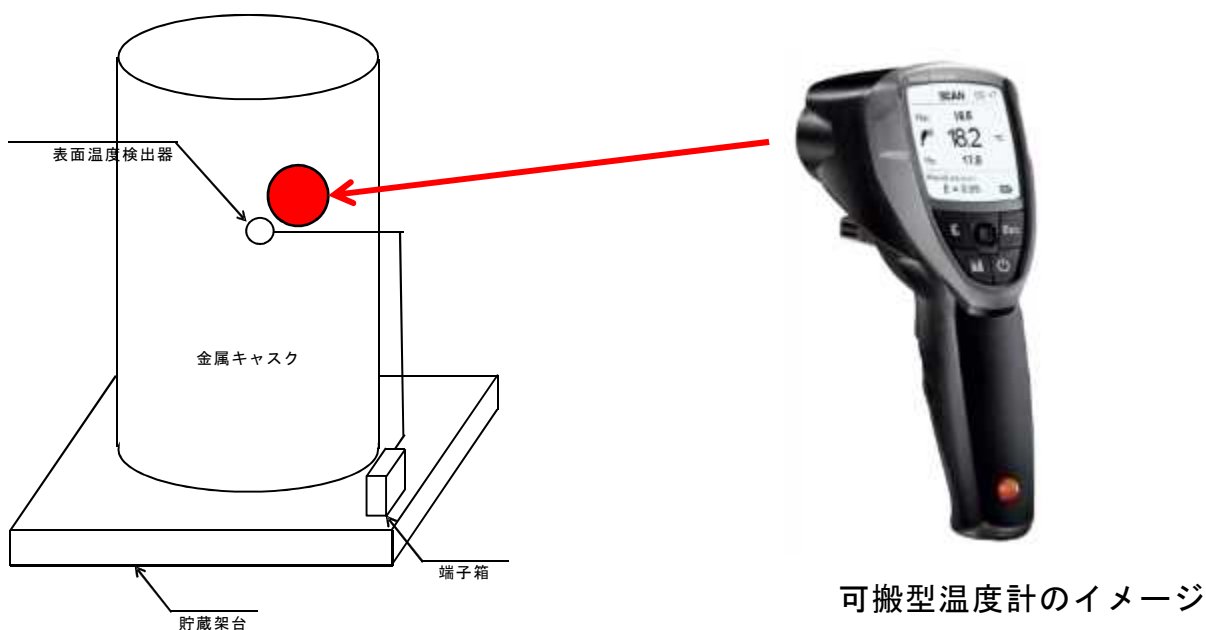
通常時は、表面温度監視装置及び給排気温度監視装置により、金属キャスク表面温度及び貯蔵建屋の給排気温度を計測し、監視盤室にて監視し、除熱機能が確保されていることを確認する。

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、非接触型の可搬型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

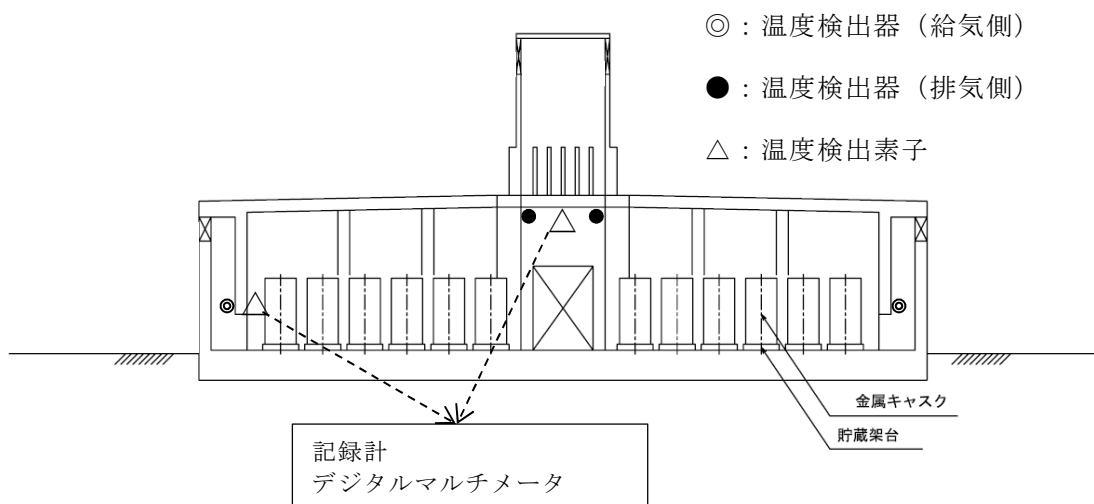
(b) 貯蔵建屋給排気温度

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、可搬型温度計、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、電源車により電気を供給する。

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

・電源車

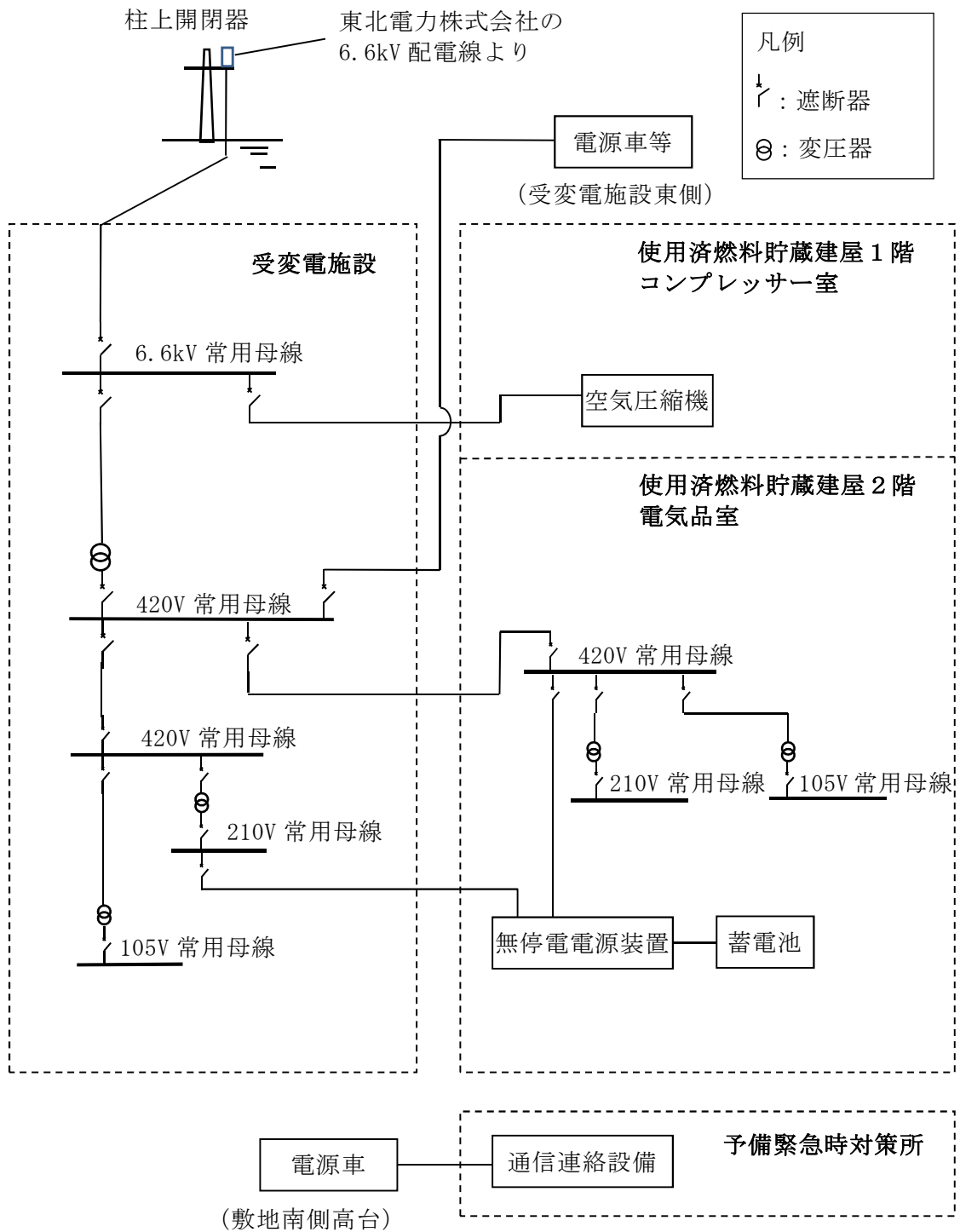
容量 250kVA

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単線結線図を第7-7図に示す。



通常時、電源車は敷地南側高台に設置

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の単線結線図

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. 警報時の退避場所

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、退避ルートを示す。

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900m²（4.5m²/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：1.57～2.93m²/人
- ・二次避難所における避難者1人当たりの収納面積：2.15～3.98m²/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。

津波襲来後の活動に必要な対策として実施する項目の概要を、(2)で述べた金属キャスク（貯蔵区域）の基本的安全機能の確認として実施する項目の概要と併せて第7-2表に示す。

第7-2表 敷地内の浸水を想定して実施する項目の概要

項 目		概 要
金属キャスク (貯蔵区域) の基本的安全 機能の確認	遮蔽機能	<ul style="list-style-type: none"> 金属キャスクの可視範囲及び周辺の状態を目視確認し, 金属キャスクの損傷等の状況を確認 可搬型計測機器により周辺監視区域境界付近及び貯蔵建屋内で代替計測を実施し, 線量当量率の有意な上昇がないことを確認 線量当量率の有意な上昇がある場合は, 測定及び目視確認により金属キャスクを特定し, 仮設遮蔽の設置, 柵, 縄張り, 区画及び掲示物による措置を実施
	閉じ込め 機能	<ul style="list-style-type: none"> 金属キャスクの可視範囲及び周辺の状態を目視確認 可搬型計測機器により線量当量率の有意な上昇がないことを確認し, 準備が整い次第蓋間圧力の仮設計器による代替計測を実施
	除熱機能	<ul style="list-style-type: none"> 金属キャスクの可視範囲及び周辺の状態を目視確認し, 金属キャスクの損傷等の状況を確認 可搬型計測機器による金属キャスク表面温度測定及び仮設計器による貯蔵建屋給排気口近傍の温度の代替計測を実施し, 温度の有意な上昇がないことを確認
津波襲来後の 活動に必要な 対策	予備緊急時 対策所	<ul style="list-style-type: none"> 津波襲来後の金属キャスク監視, 通信連絡及び緊急時対策本部の拠点を高台に設置
	災害対応用 電源	<ul style="list-style-type: none"> 予備緊急時対策所に必要な電気を電源車により供給 復旧作業, 貯蔵建屋内の仮設照明及び代替計測に用いる仮設計器に必要な電気を可搬型ディーゼル発電機により供給
	燃料設備	<ul style="list-style-type: none"> 軽油貯蔵タンクで電源車及び可搬型ディーゼル発電機の補給用燃料を貯蔵
	通信連絡 設備	<ul style="list-style-type: none"> 代替となるセンター内外の通信連絡設備を使用
	放射線管理 資機材	<ul style="list-style-type: none"> 復旧作業, 貯蔵建屋内のモニタリング及び周辺監視区域付近のモニタリングにおける放射線管理のための放射線管理資機材を使用
	資機材 保管庫	<ul style="list-style-type: none"> 可搬型計測機器や対応要員用の食料や水を配備する資機材保管庫を設置
	重機等	<ul style="list-style-type: none"> 受入れ区域の損傷により落下した建屋構成材や津波漂流物を重機により撤去
	警報時の 退避場所	<ul style="list-style-type: none"> 津波の遡上波が到達しない高台に退避場所を設置

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、施設設置盤と貯蔵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

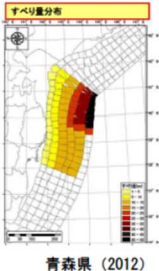
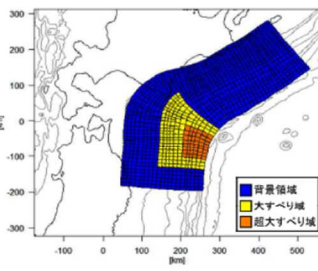
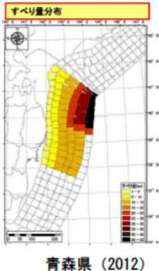
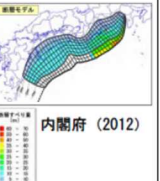
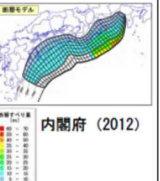
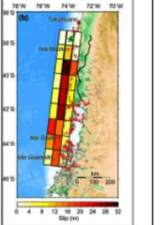
仮想的大規模津波と等価なモデルにおける敷地沿岸の水位及び流速の経時的な変化を別添1-3図、敷地の水位及び流速の経時的な変化を別添1-4図にそれぞれ示す。また貯蔵建屋周りの水位及び流速の分布の経時的な変化並びに状況の説明を別添1-5図に示す。

(2) 等価なモデルによる浸水状況の考察

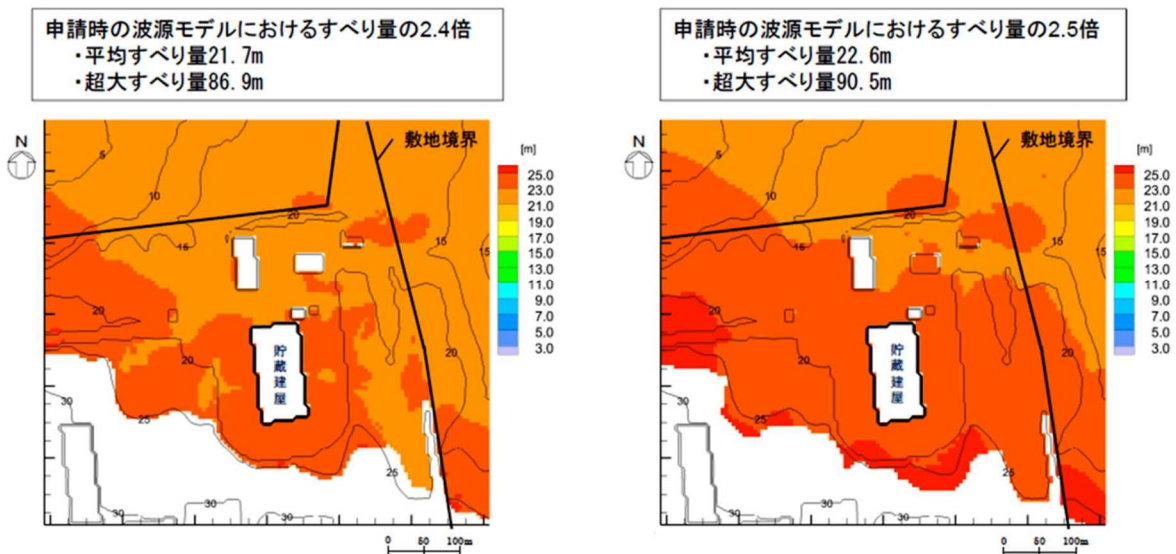
貯蔵建屋周りの浸水深、流速及び流向の推移から、貯蔵建屋周りの浸水状況について以下のとおりまとめられる。

- 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。

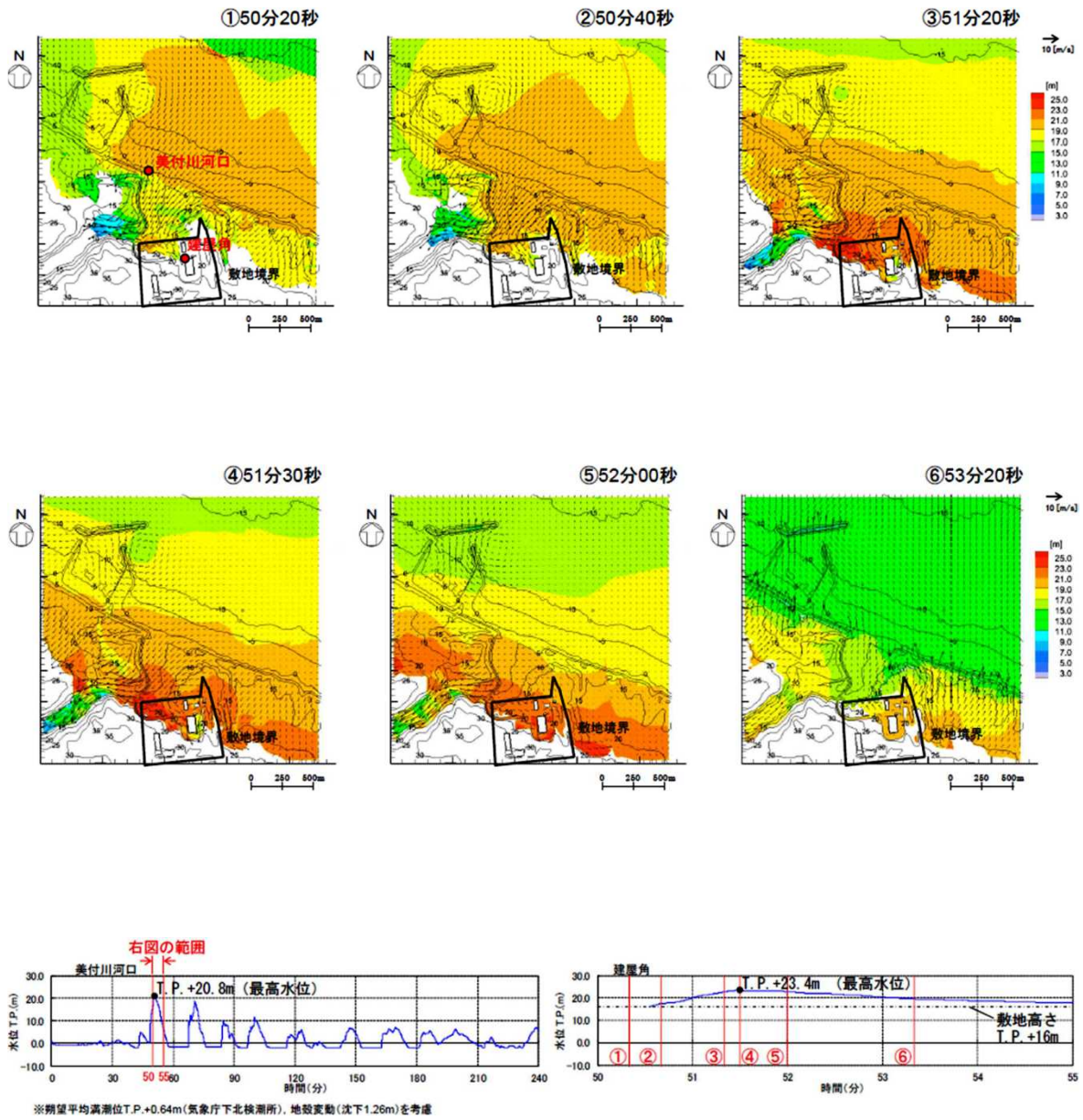
	検討モデル			巨大地震のすべり量に関する既往知見		
	青森県による津波想定	申請書時の波源モデル	仮想的な大規模津波と等価なモデル 申請時の波源モデルの2.4~2.5倍	2011年東北地方太平洋沖型地震のモデル <杉野ほか(2014)>	南海トラフの巨大地震の津波断層モデル <内閣府(2012)>	世界のMw9.0クラスの巨大津波
モデル図						
Mw	9.0	9.07	9.32~9.34	9.1	9.1	9.5
断層面積	—	11.9万km ²	11.9万km ²	13.5万km ²	14万km ²	13.5万km ²
平均すべり量	—	9.05m	21.7 ~ 22.6m	10.4m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

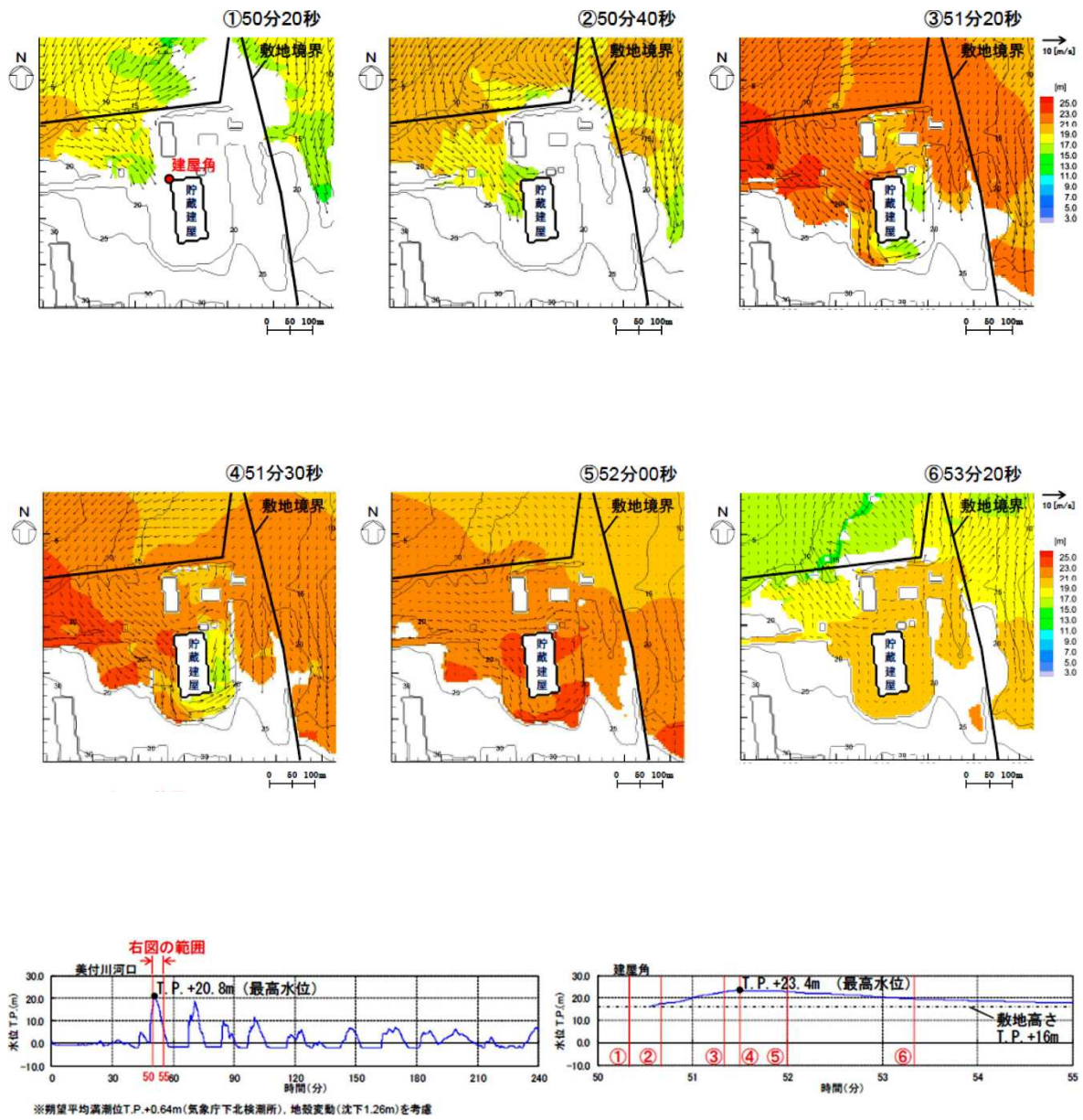


別添 1-2 図 仮想的な大規模津波と等価なモデルにおける最高水位分布*1

*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"> 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。
② 50分 40秒			<ul style="list-style-type: none"> 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） 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。 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。 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。
③ 51分 20秒			<ul style="list-style-type: none"> 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。 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。 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） 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。

*) 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"> ・ 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。 ・ 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。 ・ 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。 ・ 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。
⑤ 52分 00秒			<ul style="list-style-type: none"> ・ 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。 ・ 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。
⑥ 53分 20秒			<ul style="list-style-type: none"> ・ 敷地北西側の津波高さが低下を始める。 ・ 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。 ・ 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。 ・ 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。

*) 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 η (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

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

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

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, η : 水位, K_{nl} : 海水の水平渦動粘性係数,

γ_{bl}^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 ($n=0.03\text{s/m}^{1/3}$)
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。

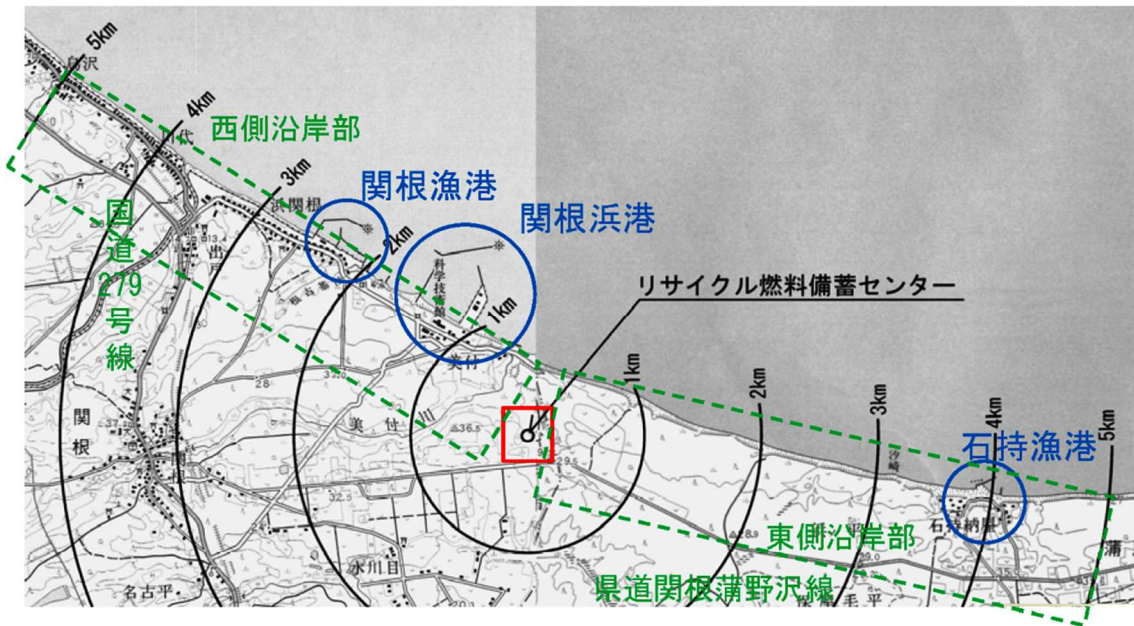
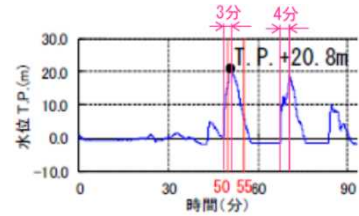
港湾施設は、日本原子力研究開発機構(JAEA)所有の関根浜港が西側約 1km に、第 1 種漁港の関根漁港が西側約 2km に、同じく石持漁港が東側約 4km にそれぞれ立地する。これらの港に寄港しない大型船舶は、別添 2-2 図に示すとおり敷地前面海域では沖合 10km 以遠を航行している。

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

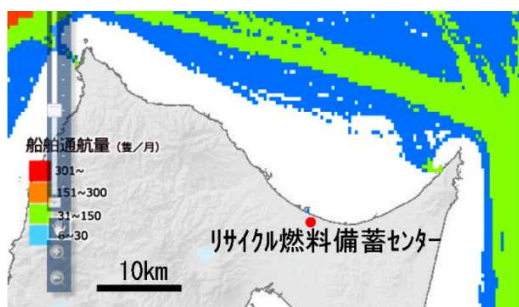
の道路沿いを中心に集落が存在する。敷地外の東側沿岸部には、海岸から約 1km 離れた内陸側の標高 30m 程度の場所を走る県道関根蒲野沢線があり、石持漁港付近を除いて海岸付近に目立った人工物はみられない。

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）に区分け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）

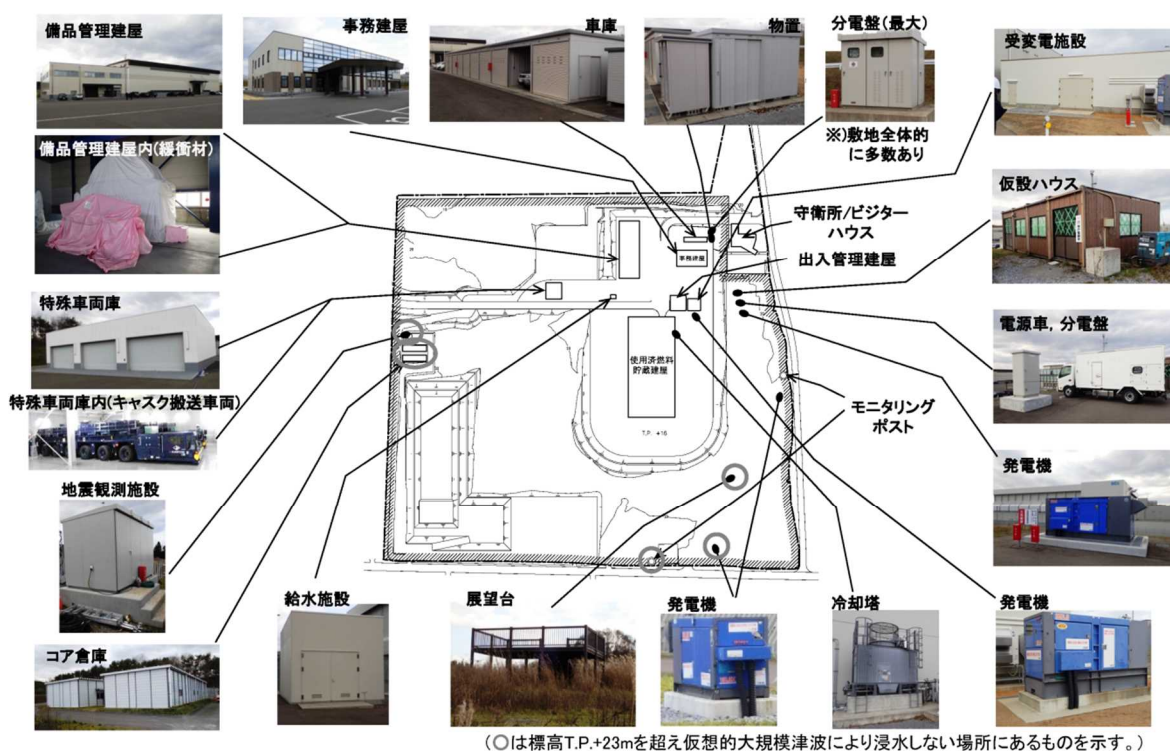
- ・船舶（海上及び陸上保管）、港湾施設（浮棧橋、浮標等）
- ・建築物、構築物（一般家屋、公共施設等（学校、郵便局、商店、集会所等）、産業施設等）
- ・タンク、コンテナ等
- ・車両（一般車両、大型車両等）

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）

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)のキャスク搬送車両を設定した。

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	キャスク搬送車両 (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、貯蔵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。

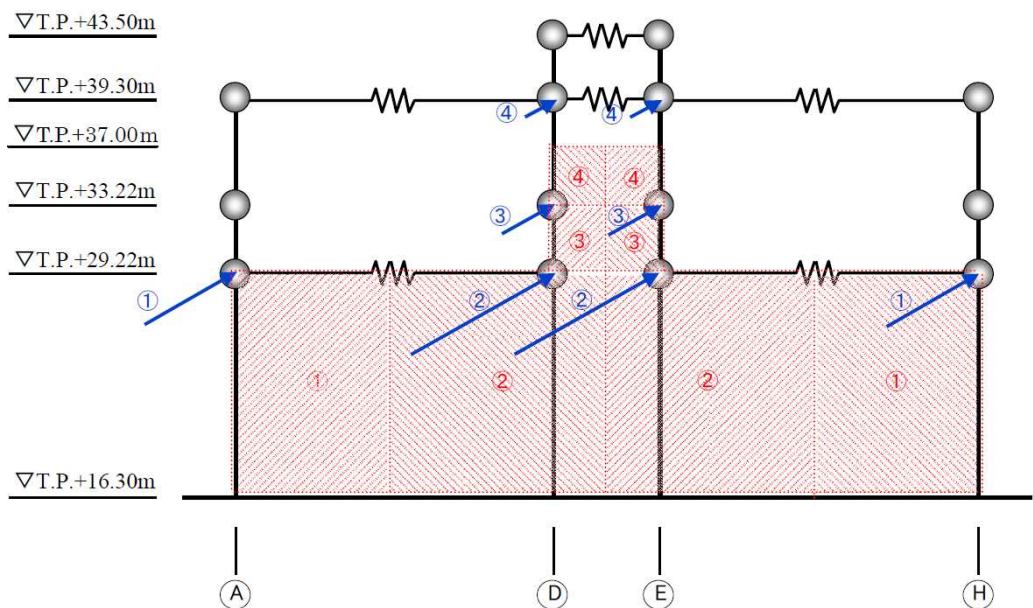
2. 外壁モデルによる解析の考え方

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、水圧により生じる貯蔵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。

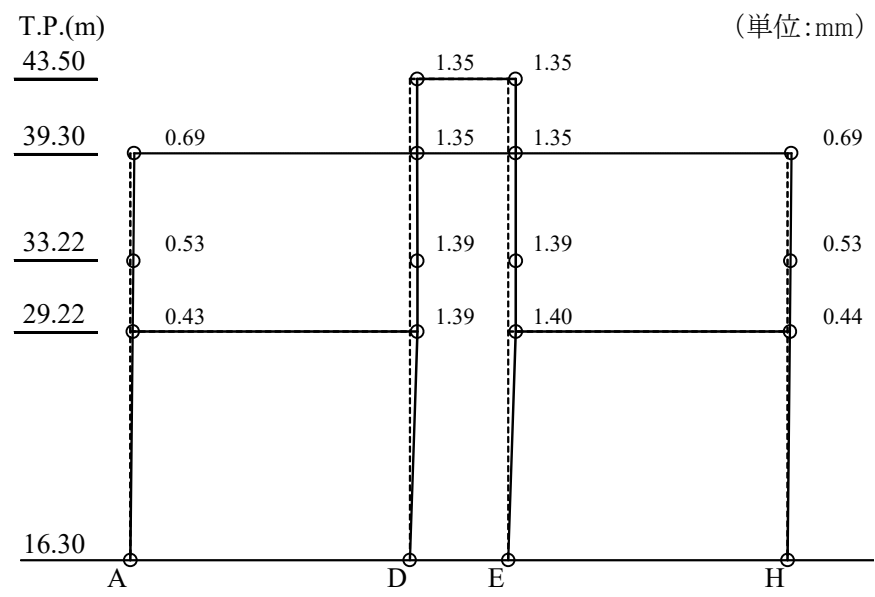
3. 波圧による貯蔵建屋南北方向の変位の算出

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、波力による貯蔵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。



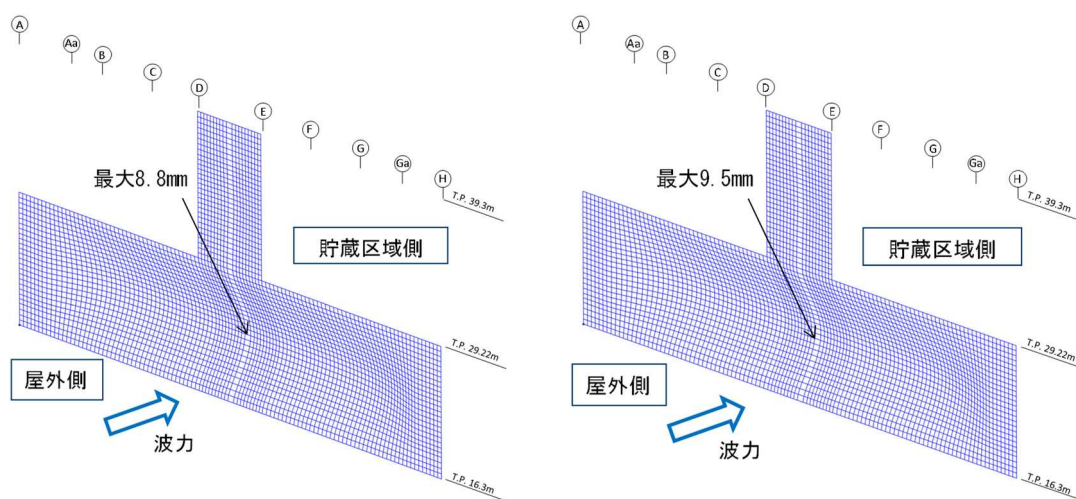
別添 3-1 図 貯蔵建屋多軸モデル及び質点に作用するする荷重



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，貯蔵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 ϵ_c	7.72×10^{-4}	7.95×10^{-4}	1.03
鉄筋引張ひずみ ϵ_t	1.37×10^{-3}	1.44×10^{-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

貯蔵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 α を用いている。

係数 α は次式により算定される。

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

ここで

α : 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 α 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 α 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 α 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)	α 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

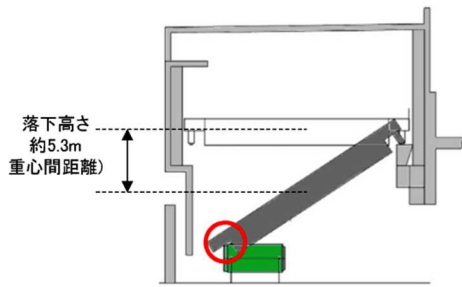
(1) 動的解析の条件

「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。

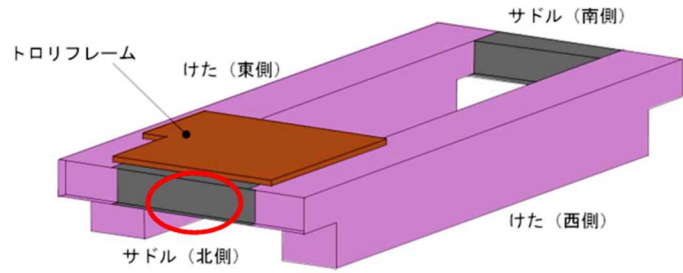
解析コードは衝撃・構造解析ソフトウェア LS-DYNA を用い、静的解析同様の天井クレーンの衝突状態（別添 5-1 図及び 5-2 図参照）の模擬や金属キャスクのモデル化を行う。

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



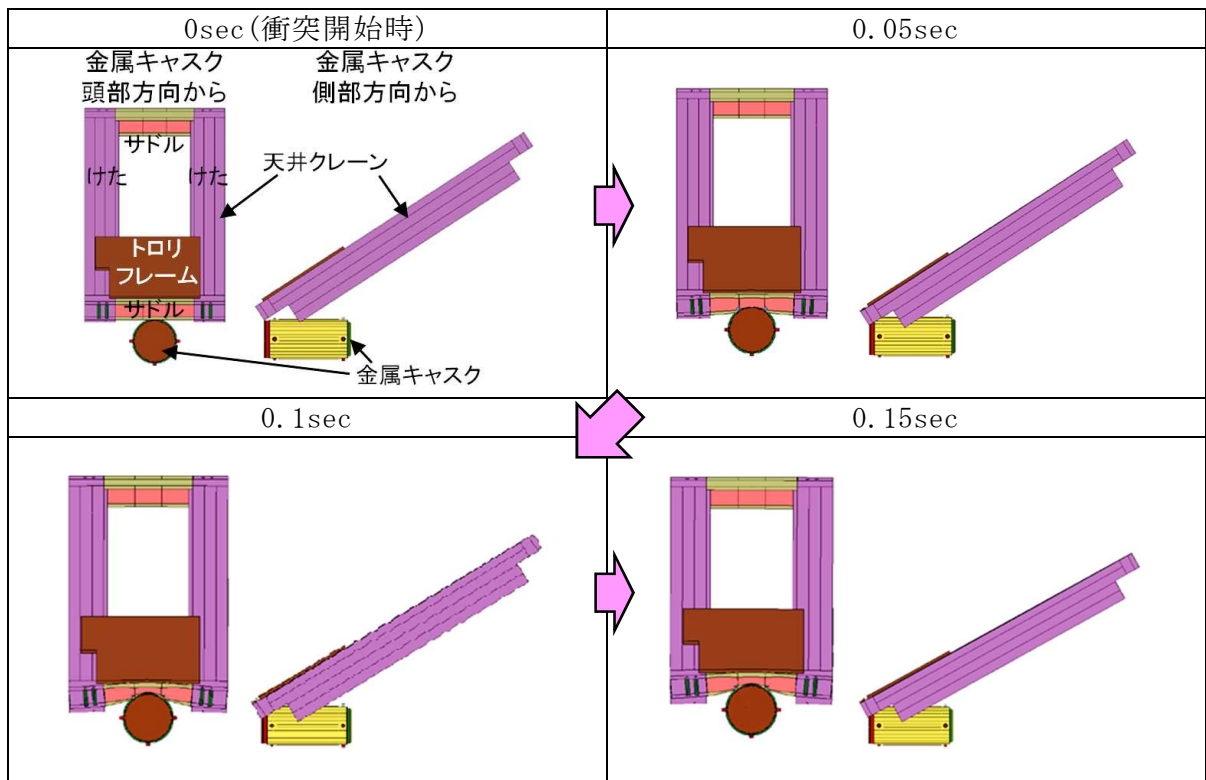
別添 5-2 図 天井クレーン概略図
(サドル (北側) が金属キャスクに衝突)

(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"> ・ 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 ・ 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 *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) *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)
天井クレーンの衝突姿勢	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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 ・ 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 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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 ・ 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)
金属キャスクのモデル	<ul style="list-style-type: none"> ・ 金属キャスクは全体形状を模擬 ・ 金属キャスクはたて起こし架台上を想定し, 水平姿勢で三次蓋を取り付けた状態 ・ 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 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 金属キャスクに緩衝体に取り付けられていない, たて起こし架台上を想定 (仮置架台上の金属キャスクには緩衝体に取り付けられており, 落下物の衝突に対しても蓋部を保護する上で相当の耐性を有すると考えられる) ・ 天井クレーンの衝突時の金属キャスクへの衝突荷重を大きくする観点から, 支持部 (たて起こし架台) の変形は考慮しない
落下物の衝突速度	約 10.2m/s	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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

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"> ・ けたとサドルをシェル要素でモデル化 ・ 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 	—
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"> ・ 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 ・ 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）

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 1.1×10^{-3} kg/mm タイロッド本数：8 本/集合体

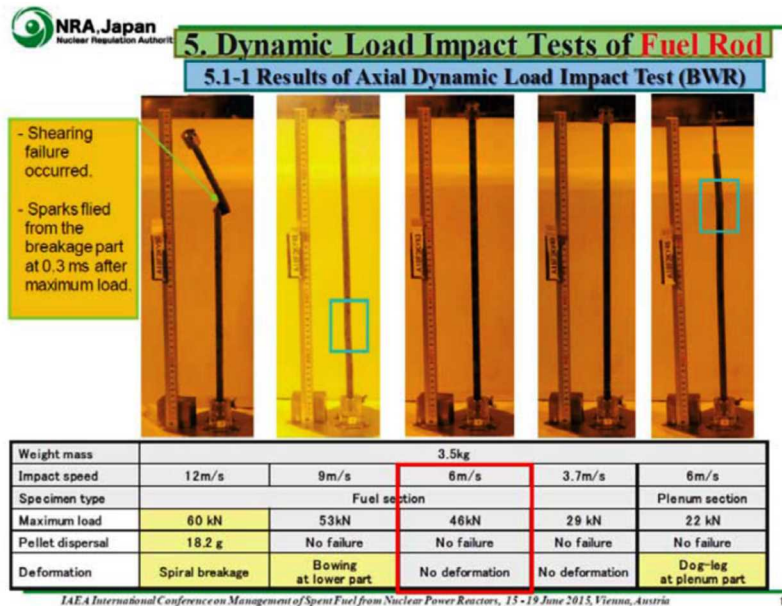
(参考) 燃料棒動的座屈試験*の概要

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。

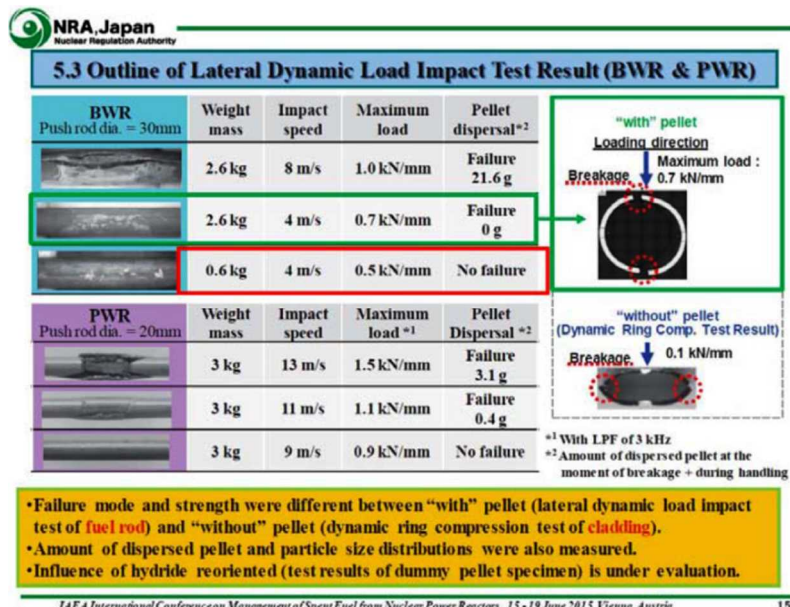
使用した被覆管は使用済燃料（9×9（A型）燃料，平均燃焼度 55.6GWd/t）から得たものであり，燃料棒平均高速中性子照射量(E>1MeV)は $10.3 \times 10^{25}/m^2$ である。

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

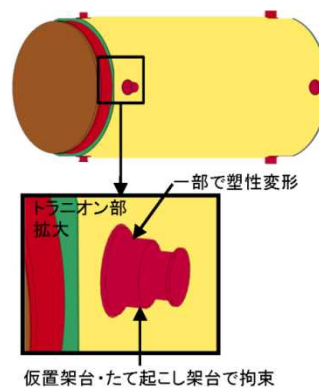
(2) 天井クレーン衝突時の金属キャスクの落下の可能性

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えい率について

1. 目的

受入れ区域の損傷により落下物や津波漂流物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えい量について「4. (5)閉じ込め機能の低下による影響」における評価では，落下物や津波漂流物の蓋部への衝突による横ずれ量として金属キャスクの構造に基づく最大値を考慮し，実験的知見に基づき保守的に設定する観点から金属キャスクからの漏えい率を $1 \times 10^{-4} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ と設定している。

ここでは漏えい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えい量に影響を与えるパラメータである漏えい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えい率の設定

(1) 漏えい率の設定の考え方

金属キャスクの蓋部で横ずれが発生した場合の漏えい率への影響については，金属ガスケットの横ずれ量と漏えい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。

落下物や津波漂流物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えい率を保守的に設定することとする。

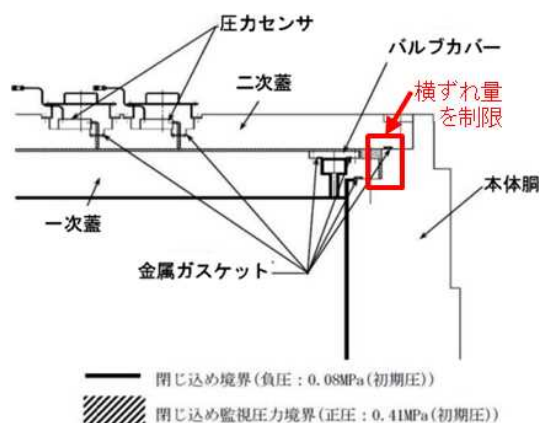
(2) 金属キャスクの構造に基づく横ずれ量の設定

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ため、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

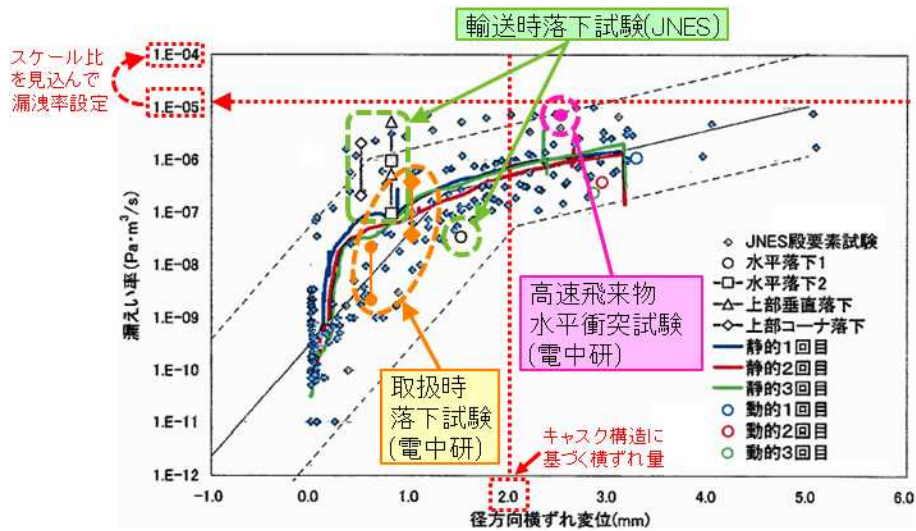
(3) 横ずれ量に基づく金属キャスクからの漏えい率の設定

金属ガスケットの横ずれ量と漏えい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えい率を設定し、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、横ずれ量と漏えい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えい率の上限は $1 \times 10^{-5} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 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えい率を 10 倍とし、一次蓋の漏えい率を $1 \times 10^{-4} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 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、漏えい評価上は問題とされないと考えられる。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

漏えい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えい率との関係を別添 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えい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えい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、金属キャスクの漏えい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)*2	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えい率(二次蓋)をプロット
●取扱時落下試験(電中研)*3	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)	漏えい率(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)*4	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: $\times 2.5^2$ 漏えい率は実値を別添6-2図に加筆

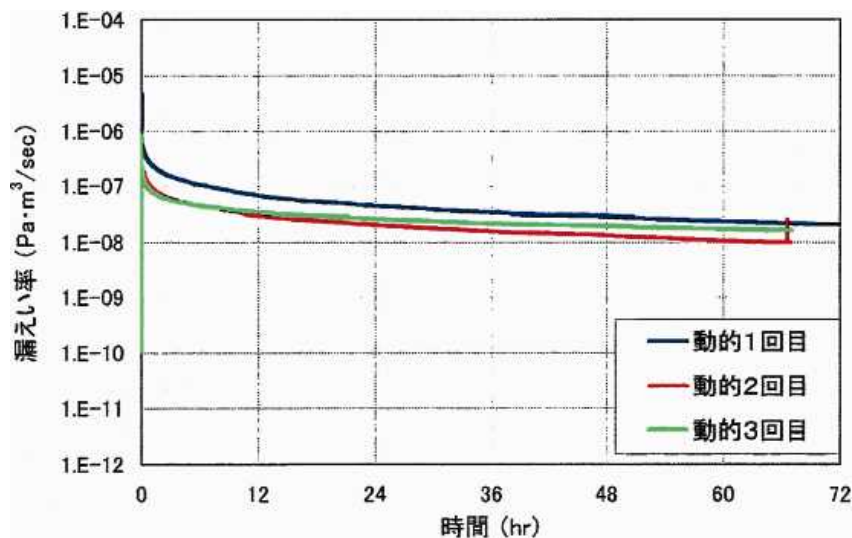
(項目欄の●の色は別添6-2図の加筆と合わせてある)

(5) 金属キャスクの漏えい率の保守性

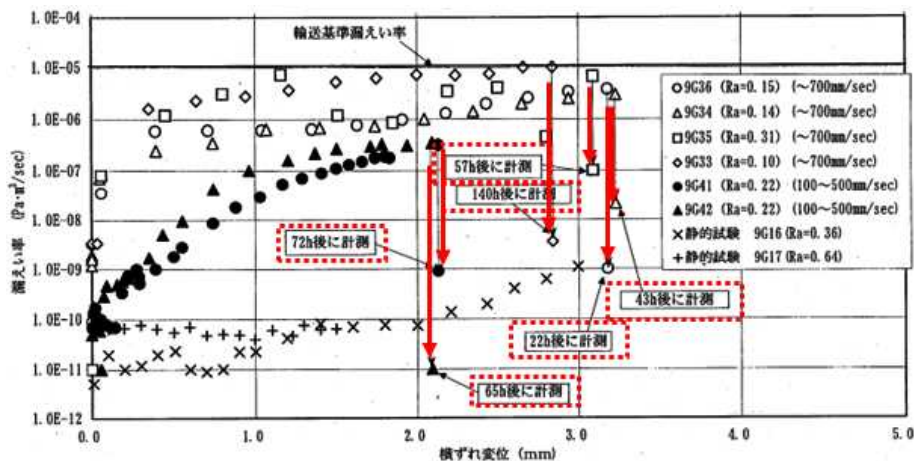
金属ガスケットの動的横ずれ試験では、別添 6-3 図(1)及び(2)に示すように、横ずれ発生後、時間の経過（数十時間程度）とともに一定程度の漏えい率の回復（おおむね 2 桁以上）がみられている。

漏えい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えい率は増加するが、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えい率を用い、その後の時間の経過による漏えい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えい率の経時変化^{*1}



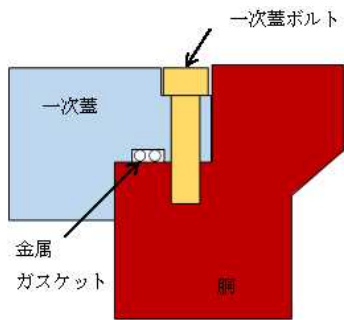
別添 6-3 図(2) 時間の経過による漏えい率の回復(*5 に加筆)

(参考) 金属ガスケットの漏えい率回復について

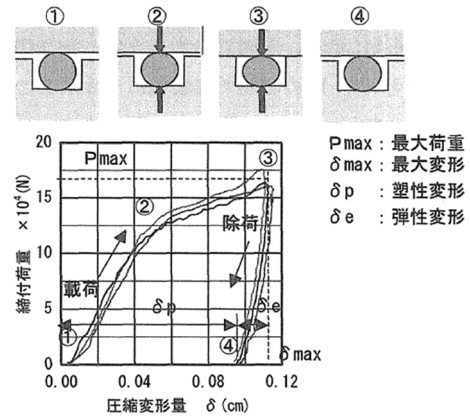
金属ガスケットは別添 6-4 図に示すように、一次蓋に設けられた溝部に取り付けられる締切型であり、金属ガスケットのつぶし代を考慮して深さを決定している。このため別添 6-5 図に示すように、一定量を超えたボルトの締付力は蓋と胴の接触部が受け持つことになるため、金属ガスケットが過度に圧縮変形することはない。

金属ガスケット部における漏えいは、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。

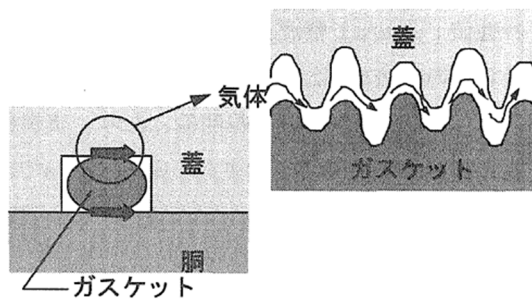
そこに荷重が作用すると、一時的に締付力が不足状態になり漏えい率は増加するが、ボルトに発生する応力が弾性範囲内であれば締付力は回復し、ガスケット接触面の状態が初期の状態と同様に隙間をアルミ材が徐々に埋めるため漏えい率は回復すると考えられている。



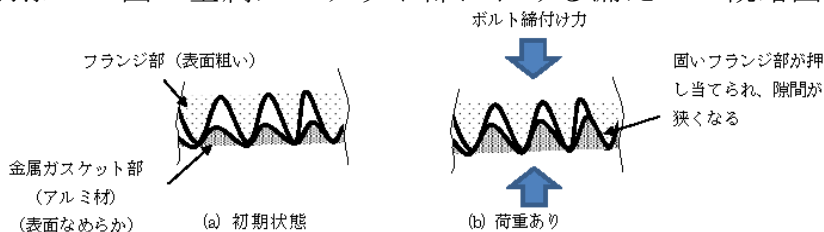
別添 6-4 図 一次蓋フランジ部 (模式図)



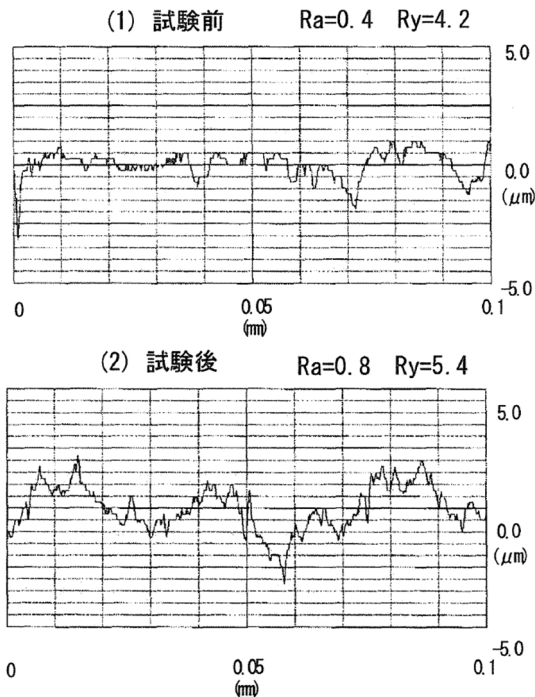
別添 6-5 図 金属ガスケットの圧縮復元特性*6



別添 6-6 図 金属ガスケット部における漏えいの概略図*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 漏えい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えい量に影響を与えるパラメータである漏えい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) 漏えい率による影響

評価で使用している金属キャスクからの漏えい率 $1 \times 10^{-4} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 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えい率を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えい率は約 $8.2 \times 10^{-9} \text{m}^3/\text{s}$ となり、漏えい率 $1 \times 10^{-4} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 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えい率にほぼ比例することから、核分裂生成物放出量は漏えい率 $1 \times 10^{-4} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 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えいが発生しない。

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、一次蓋からの漏えいが発生しないと考えられる。

遮蔽機能復旧期間の想定について

「5. 使用済燃料貯蔵施設の遮蔽評価」の評価条件である遮蔽機能の復旧期間として、金属キャスク損傷部の遮蔽機能に3ヶ月、貯蔵区域遮蔽扉部の遮蔽機能に1ヶ月を想定している。これらの期間は、その内訳工程毎に、以下のよう
に想定している。

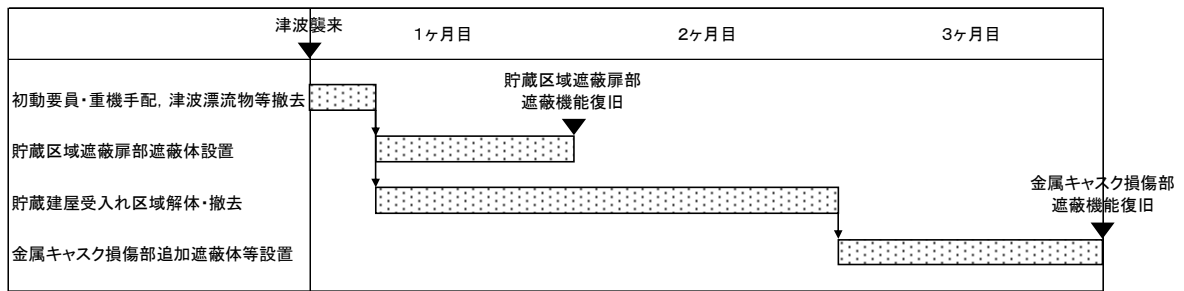
初動要員・重機の手配、及び貯蔵建屋へアクセスする道路上（津波浸水域）の津波漂流物等撤去の期間としては、1週間程度を想定している。この期間は、東北地方太平洋沖地震時の津波被災地での津波漂流物等撤去事例を建設会社より聞き取り、想定した期間である。

貯蔵区域遮蔽扉部への遮蔽体設置は、遮蔽扉が開放されている際に津波が襲来して閉止できなくなり、その部分の遮蔽が確保できなくなった際に実施するものである。遮蔽体設置は、土嚢袋にセメント等を満たして作成した土嚢を段積みして構築することを考え、期間としては、3週間程度を想定している。この期間は、貯蔵建屋の建設会社、及び遮蔽体の材料とするセメント等を扱う会社による見積工程を基に、想定した期間である。

損傷した貯蔵建屋受入れ区域の解体・撤去は、金属キャスク損傷部への追加遮蔽体設置の際、その設置場所や作業安全を確保するために実施するものである。保守的に、健全な状態の受入れ区域全域を解体・撤去するものとして考え、期間としては、7週間程度を想定している。この期間は、貯蔵建屋の建設会社、及び解体専門会社による見積工程を基に、想定した期間である。

金属キャスク損傷部への追加遮蔽体設置の期間としては、1ヶ月程度を想定している。この期間は、「6. 衝撃を受けた金属キャスクの対策」の「第6-2 図 衝撃を受けた金属キャスクの追加遮蔽の例」に示す遮蔽材の設置について、金属キャスクメーカーと共に検討し、想定した期間である。

これらの期間は、解体・撤去物量を多く見積もる等、保守的な想定に基づいており、冬期の積雪による影響等を考慮しても、津波襲来後に実現可能な期間となっている。



別添 7 図 遮蔽機能復旧工程（想定）

津波による波圧と地震荷重の組合せについて

「3. 貯蔵建屋の耐性評価」では津波による波圧と地震荷重の組合せは考慮しないとしているが、ここでは、仮想的な大規模津波による波圧と仮想的な大規模津波を発生させる本震に続いて発生する余震による荷重が同時に作用した場合を仮定し、貯蔵建屋の健全性について検討する。

1. 余震の規模

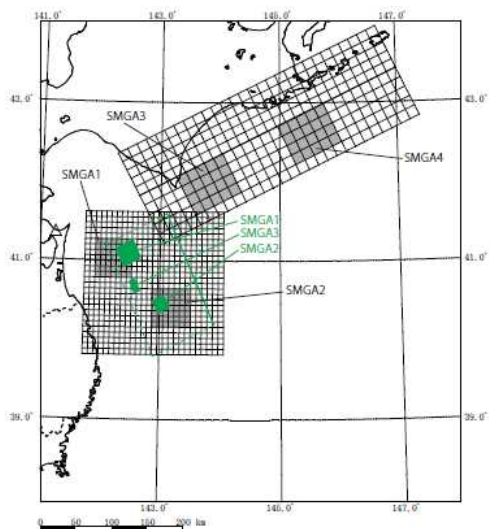
敷地の地震動を考慮する際に策定した、検討用地震の一つである「M9 プレート間地震（2011 年東北地方太平洋沖地震を踏まえた地震（Mw9.0）（三陸沖北部から根室沖の連動モデル）」を、津波評価に用いた「仮想的な大規模津波（等価な震源モデルの地震規模は Mw9.32～9.34）」と対応関係にある地震とし、余震を評価する際の本震と想定する（別添 8-1 図）。

余震は、本震の震源領域である三陸沖北部から根室沖を震源として発生するものと考えられる。この領域のうち、貯蔵建屋の健全性についての検討で考慮する余震は、敷地との距離を考慮し三陸沖北部を震源として想定する。三陸沖北部を震源とする、敷地に大きな影響のある地震として「想定三陸沖北部の地震（Mw8.3）（地震調査委員会策定）」があることから、この地震を余震として想定する（別添 8-2 図）。

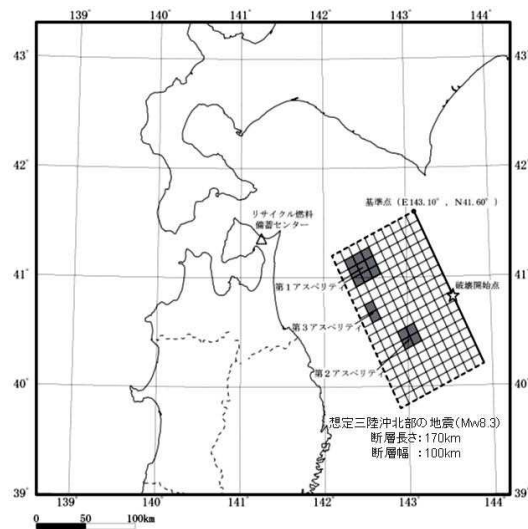
地震調査委員会の地震データを基に、過去の地震における本震の規模と最大余震の規模の関係を整理した（別添 8-1 表）。検討対象とした地震は、本震のマグニチュードが M7.0 以上で、かつ、本震と最大余震との時間間隔が 12 時間以内の地震とした。本震と余震のマグニチュードの差は 0.7～2.2 となる。これより、「想定三陸沖北部の地震（Mw8.3）」を、「M9 プレート間地震（2011 年東北地方太平洋沖地震を踏まえた地震（Mw9.0）（三陸沖北部から根室沖の連動モデル）」の余震として想定するのは妥当であると考えられる。

2. 貯蔵建屋の健全性

仮想的大規模津波による波圧と余震による荷重による層せん断力と，地震応答解析モデルに基づき算定される貯蔵建屋の荷重～変形関係との比較を別添 8-3 図に示す。比較の結果，仮想的大規模津波による波圧と余震による荷重による層せん断力は，貯蔵建屋の荷重～変形関係において弾性範囲であり，十分な裕度を持つ値である。



別添 8-1 図 「M9 プレート間地震
(2011 年東北地方太平洋沖地震を
踏まえた地震 (Mw9.0)) (三陸沖北
部から根室沖の連動モデル)」の断
層モデル図



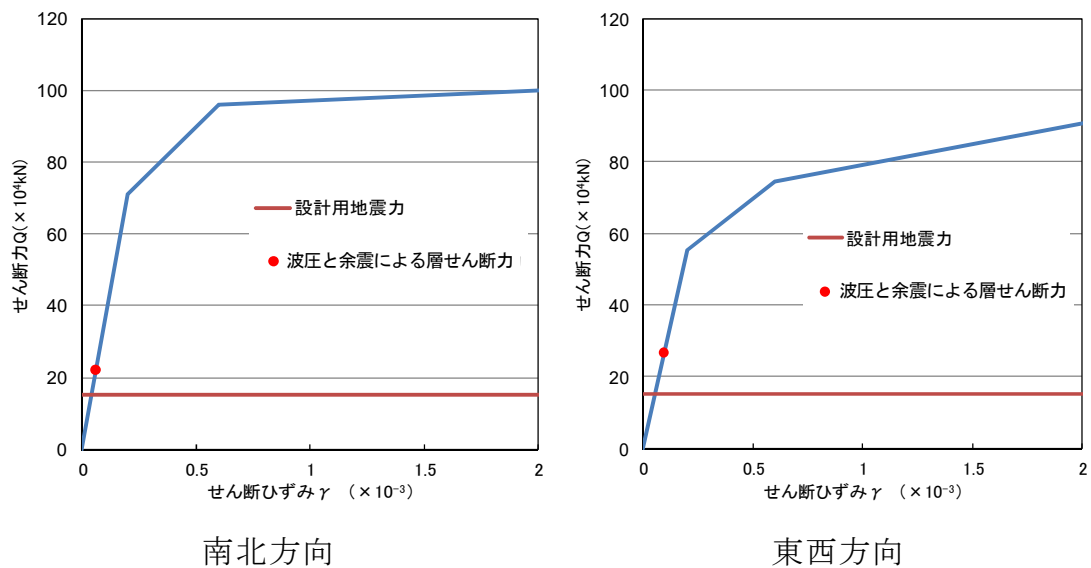
別添 8-2 図 「想定三陸沖北部の
地震 (Mw8.3)」の断層モデル図

別添 8-1 表 過去の地震における本震の規模と最大余震の規模の関係

No	発生年月日	震源	マグニチュード ^{※1}		時間差
			本震 M0	最大余震 M1	
1	1995. 1. 17	淡路島	7.3	5.4	1:52
2	2003. 5. 26	宮城県沖	7.1	4.9	6:20
3	2003. 9. 26	十勝沖	8.0	7.1	1:18
4	2004. 11. 29	釧路沖	7.1	6.0	0:04
5	2006. 11. 15	千島列島東方	7.9	6.7	1:12
6	2008. 6. 14	岩手宮城内陸	7.2	5.7	0:37
7	2008. 9. 11	十勝沖	7.1	5.7	0:12
8	2011. 3. 11	東北地方太平洋沖	9.0 ^{※2}	7.6	0:29
9	2012. 12. 7	三陸沖	7.3	6.6	0:13

※1) 気象庁マグニチュード

※2) モーメントマグニチュード Mw



別添 8-3 図 荷重～変形関係との比較 (1層 T.P. +16.3m～+29.22m)

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^{(1)～(8)}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。

検討の結果、設計上の考慮を必要とする事象は、風（台風）、竜巻、低温・凍結、降水、積雪、落雷、火山の影響（降下火砕物）及び森林火災とし、敷地及び周辺地域の過去の記録、現地調査を参考にして、予想される最も過酷と考えられる条件を適切に考慮する。

(2) 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。）

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⁽⁹⁾～⁽¹⁶⁾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人為事象の選定について

(1) 人為事象の抽出

「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

第3表 事象の抽出結果（人為事象）

No.	事象	資料※							
		1	2	3	4	5	6	7	8
1	外部火災	○	○						
2	近隣工場等の火災・爆発			○	○	○	○		○
3	工業施設事故	○			○		○		
4	有害物質の放出	○						○	
5	船舶の衝突					○	○		○
6	輸送機関の事故による火災・爆発					○	○		
7	輸送機関の事故	○			○				
8	爆発	○	○				○	○	○
9	パイプライン事故	○				○	○		
10	軍事施設からのミサイル					○	○		
11	トンネルや掘削による地面の陥没，崩壊	○							
12	飛来物（航空機落下等）	○				○	○	○	○
13	ダムの崩壊	○			○	○			○
14	河川の決壊	○			○				
15	軍事施設事故	○			○	○			
16	有毒ガス	○					○		○
17	電磁的障害								○

※ 第1表参照

(2) 設計上考慮すべき事象の選定基準

(1)で抽出した事象について、リサイクル燃料備蓄センターにおいて設計上考慮すべき事象を選定するため、海外原子力発電所での評価手法^{*}を参考として、第4表に示す除外基準を設定した。

※ ASME/ANS RA-Sa-2009 "Addenda to ASME/ANS RA-S-2008 Standard for Level 1/ Large Early Release Frequency Probabilistic Risk Assessment for Nuclear Power Plant Applications"

第4表 考慮すべき事象の除外基準

基準	補足
基準1： 発生が極低頻度と判断される事象	隕石落下のような発生頻度が低い事象は考慮すべき事象の対象外とする。
基準2： 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	リサイクル燃料備蓄センター周辺において明らかに起こり得ない事象及び基本的安全機能に影響を与えるほど近接した場所では発生しない事象は対象外とする。
基準3： 事象の進展が緩慢で対策を講じることができる事象	事象発生時のリサイクル燃料備蓄センターへの影響の進展が緩慢であって、影響の緩和又は排除の対策を容易に講じることが出来る事象は対象外とする。
基準4： 使用済燃料貯蔵施設の基本的安全機能に影響を与えない事象	事象が発生しても、リサイクル燃料備蓄センターへの影響が極めて限定的で基本的安全機能を喪失するような影響には繋がらない事象は対象外とする。
基準5： 他事象に包含できる事象	リサイクル燃料備蓄センターに対する影響が同様とみなせる事象については、相対的に影響が大きいと判断される事象に包含して合理的に検討する。

(3) 設計上考慮すべき事象の選定結果

(2)で設定した基準に基づき、使用済燃料貯蔵施設において設計上考慮すべき事象を選定した結果を第5表及び第6表に示す。

「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」(第十一条)に該当する「想定される自然現象(地震及び津波を除く。)」として下記を選定した。

- ・ 風(台風)
- ・ 竜巻
- ・ 低温・凍結
- ・ 降水
- ・ 積雪
- ・ 落雷
- ・ 火山の影響
- ・ 森林火災

また、人為事象として下記を選定した。

- ・ 飛来物(航空機落下等)
- ・ 爆発
- ・ 近隣工場等の火災

なお、「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)に挙げられている事象については、設計上の考慮要否について検討の対象とする。

第5表 事象の選定結果（自然現象）

No.	事象 ^{※1}	除外基準 ^{※2}					選定結果 ^{※3}	選定理由
		基準1	基準2	基準3	基準4	基準5		
1	風（台風）						○	地域特性を踏まえて風（台風）に関する影響評価を行う。
2	竜巻						○	地域特性を踏まえて竜巻に関する影響評価を行う。
3	降水						○	降水に起因する腐食防止のため塗装を施す。
4	高気温		レ				×	基本的安全機能に影響を与えるような高気温が長時間継続することはない。 （最寄りの気象官署の夏季の超過危険率1%温度（29.5℃）が24時間継続でも除熱機能を損なわないと評価）
5	低温・凍結						○	地域特性を踏まえて低温・凍結に関する影響評価を行う。金属キャスクの凍結は想定されないが、屋外設備では空気圧縮機の冷却水システムで凍結が想定されることから、設備を使用しない場合はシステムの水抜きを行う。また、冬季に設備を使用する場合は凍結防止の措置を講じた上で使用する

No.	事象 ^{※1}	除外基準 ^{※2}					選定結果 ^{※3}	選定理由
		基準1	基準2	基準3	基準4	基準5		
6	極限的な気圧				レ		×	気圧により、基本的安全機能を損なうおそれはない。 (キャスク内圧力は真空から最高使用圧 1.0MPa で設計しており、著しい気圧変動があっても構造強度に影響はなく、閉じ込め機能は維持される)
7	積雪						○	地域特性を踏まえて積雪に関する影響評価を行う。
8	着氷・着雪				レ		×	給排気口やバードスクリーンの構造から、着氷・着雪により給排気口は閉塞せず、基本的安全機能を損なうおそれはない。
9	氷結				レ		×	基本的安全機能の維持に水を必要としないため、基本的安全機能を損なうおそれはない。
10	ひょう					レ	×	竜巻による影響評価(飛来物による衝撃荷重)に包含される。
11	干ばつ				レ		×	基本的安全機能の維持に水を必要としないため、基本的安全機能を損なうおそれはない。
12	砂嵐		レ				×	施設周辺に砂漠がないため発生しない。

No.	事象※ ¹	除外基準※ ²					選定結果※ ³	選定理由
		基準1	基準2	基準3	基準4	基準5		
13	日射影響		レ				×	長時間継続することはない、貯蔵中は金属キャスクに直接日が当たらない。また使用済燃料貯蔵建屋への日射影響が金属キャスクの除熱へ影響を及ぼさないことを確認していることから、基本的安全機能を損なうおそれはない。
14	霧				レ		×	設備に影響を及ぼさないため、基本的安全機能を損なうおそれはない。
15	霜				レ		×	設備に影響を及ぼさないため、基本的安全機能を損なうおそれはない。
16	落雷						○	貯蔵中は使用済燃料貯蔵建屋内の金属キャスクに落雷することはないが、使用済燃料貯蔵建屋への落雷が想定されることから、金属キャスクの基本的安全機能に影響が波及しないよう同建屋に避雷設備を設ける。
17	隕石	レ					×	隕石が衝突する可能性は極めて小さい。
18	火山の影響						○	地域特性を踏まえて火山に関する影響評価を行う。
19	雪崩		レ				×	施設周辺に基本的安全機能に影響を及ぼすような雪崩を発生させる急斜面はないため、発生しない。

No.	事象 ^{※1}	除外基準 ^{※2}					選定結果 ^{※3}	選定理由
		基準1	基準2	基準3	基準4	基準5		
20	洪水		レ				×	施設周辺に施設に影響を及ぼすような洪水を起こすような河川はない。
21	地表面の浸食		レ				×	敷地内及び施設周辺は、浸食により基本的安全機能に影響を及ぼすような河川に面していないため、発生しない。
22	地滑り		レ				×	使用済燃料貯蔵建屋付近の斜面法尻と同建屋との距離は50m以上確保されていることから、安定性評価の対象となる周辺斜面は存在しない。
23	陥没		レ				×	地形・地質の状況から陥没が生じることはない。
24	地震						(○)	第九条 地震による損傷の防止にて評価を行う。
25	地盤の安定性						(○)	第八条 使用済燃料貯蔵施設の地盤にて評価を行う。
26	地盤の液状化		レ				×	使用済燃料貯蔵建屋支持地盤には液状化の対象となる地層はないことを確認している。
27	地下水による影響				レ		×	地下水が基本的安全機能に影響を及ぼすことはない。

No.	事象 ^{※1}	除外基準 ^{※2}					選定結果 ^{※3}	選定理由
		基準1	基準2	基準3	基準4	基準5		
28	波浪		レ				×	使用済燃料貯蔵施設の造成高は標高16mであり、かつ、敷地前面の海岸からの離隔は約500mあることから、波浪の影響を受けない。
29	高潮		レ				×	使用済燃料貯蔵施設の造成高は標高16mであり、かつ、敷地前面の海岸からの離隔は約500mあることから、高潮の影響を受けない。
30	津波						(○)	第十条 津波による損傷の防止にて評価を行う。
31	海岸浸食		レ				×	敷地前面の海岸からの離隔は約500mあり、影響を受けない。また海岸の浸食は進展が遅いことから補強工事により浸食を食い止めることができる。そのため、基本的安全機能を損なうおそれはない。
32	生物学的事象			レ			×	給気口及び排気口の閉塞の観点及び電源喪失の観点からは、貯蔵施設は、使用済燃料集合体を金属キャスクに収納した状態で静的に貯蔵する施設であり、電源喪失により基本的安全機能が損なわれるおそれはない。
33	自然発生的な火災					レ	×	森林火災による影響評価に包含される。
34	異常高温、気圧による火災					レ	×	森林火災による影響評価に包含される。

No.	事象※ ¹	除外基準※ ²					選定結果※ ³	選定理由
		基準1	基準2	基準3	基準4	基準5		
35	森林火災						○	地域特性を踏まえて森林火災に関する影響評価を行う（検討には「高気温」、「風」の影響も考慮する）。
36	有毒ガス		レ				×	敷地内に湿地帯や埋立てた場所など発生要因がない。また火山ガスが敷地に滞留する地形ではない。
37	静振		レ				×	施設は湖沼及び湾に面していないため、発生しない。

※1 の事象は、「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）に例示されている事象（考察対象）

※2 第4表参照

※3 ○ : 選定した事象

(○) : 「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」（第十一条）以外の条文に対する事象

× : 発生する可能性を検討した結果、考慮する必要がないと判断した事項

第6表 事象の選定結果(人為によるもの(故意によるものを除く。))

No.	事象 ^{※1}	除外基準 ^{※2}					選定結果 ^{※3}	選定理由
		基準1	基準2	基準3	基準4	基準5		
1	外部火災					レ	×	森林火災による影響評価に包含される。
2	近隣工場等の火災 ・爆発						○	近隣の危険物貯蔵施設の火災及び航空機落下による火災が発生しても使用済燃料貯蔵建屋外壁表面の温度がコンクリート許容温度以下となる設計とする。
3	工業施設事故		レ				×	施設周辺に事故により基本的安全機能に影響を及ぼすような工業施設はない。
4	有害物質の放出		レ				×	施設周辺に有害物質を貯蔵もしくは火災により発生させる施設はなく、また、幹線道路からも離れていることから考慮の必要はない。
5	船舶の衝突		レ				×	リサイクル燃料備蓄センターの敷地は、標高約20m～約30mのなだらかな台地に位置し、造成高は標高16mである。また、敷地前面の海岸から約500mの位置にあり、十分な離隔を確保していることから、船舶の衝突を考慮する必要はない。
6	輸送機関の事故による火災・爆発		レ				×	施設周辺に事故による火災・爆発により基本的安全機能に影響を及ぼすような輸送機関はない。

No.	事象 ^{※1}	除外基準 ^{※2}					選定結果 ^{※3}	選定理由
		基準1	基準2	基準3	基準4	基準5		
7	輸送機関の事故		レ				×	施設周辺に事故により基本的安全機能に影響を及ぼすような輸送機関はない。
8	爆発						○	施設周辺の高圧ガス類貯蔵施設の爆発を考慮し、必要な離隔距離を確保する設計とする。
9	パイプライン事故		レ				×	施設周辺にパイプラインはない。
10	軍事施設からのミサイル		レ				×	施設周辺に軍事施設はない（第2図参照）。
11	トンネルや掘削による地面の陥没，崩壊		レ				×	敷地内で地面の陥没や崩壊を生ずるようなトンネルや掘削は行われていない。
12	飛来物（航空機落下等）						○	リサイクル燃料備蓄センター周辺には、飛来物の発生の要因となり得る工場はない。また、使用済燃料貯蔵建屋への航空機の落下確率は、10-7回/施設・年以下であり、航空機落下を考慮する必要はない。
13	ダムの崩壊		レ				×	リサイクル燃料備蓄センター周辺には、ダムの崩壊により影響を及ぼすような河川はないことから、ダムの崩壊を考慮する必要はない。（第2図参照）。
14	河川の決壊		レ				×	施設周辺に決壊により浸水を発生させるような河川はない。
15	軍事施設事故		レ				×	施設周辺に軍事施設はない（第2図参照）。

No.	事象 ^{※1}	除外基準 ^{※2}					選定結果 ^{※3}	選定理由
		基準1	基準2	基準3	基準4	基準5		
16	有毒ガス		レ				×	金属キャスク貯蔵期間中は金属キャスク及び各設備の点検，保守及び巡視の実施時以外に貯蔵建屋に人員が常駐することはなく，火災に伴う有毒ガスの流入時には貯蔵建屋内の人員は迅速に避難することから，有毒ガスに対する貯蔵建屋の居住性を考慮する必要はない。
17	電磁的障害				レ		×	使用済燃料貯蔵施設は，使用済燃料集合体を金属キャスクに収納した状態で静的に貯蔵する施設であり，電磁干渉や無線電波干渉によって基本的安全機能を損なうことはないことから，電磁的障害を考慮する必要はない。

※1 の事象は，「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)に例示されている事象(考察対象)

※2 第4表参照

※3 ○ : 選定した事象

(○) : 「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」(第十一条)以外の条文に対する事象

× : 発生する可能性を検討した結果，考慮する必要がないと判断した事項

3. 選定した事象に関する考察

選定した事象及び「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）に例示されている事象について、以下に考察する。

3.1 想定される自然現象（地震及び津波を除く。）に対する考察

(1) 洪水

敷地の地形及び表流水の状況から判断して、敷地が洪水による被害を受けることは考えられない。

(2) 風（台風）

敷地付近で観測された最大瞬間風速は、むつ特別地域気象観測所での観測記録（1936年～2012年）によれば38.9m/s（1961年5月29日）、函館海洋気象台での観測記録（1940年～2012年）によれば46.5m/s（1999年9月25日）であるが、風荷重に対する設計は、地方毎に過去の台風の記録及び文献を考慮した建築基準法に基づく風速34m/sで行う。

なお、リサイクル燃料備蓄センターは敷地前面の海岸からの離隔は約500mであることから、海風による塩害の可能性は否定できないが、金属キャスクのフランジ面の保護・防錆及び異物混入防止の観点から自主的に金属キャスクの二次蓋上部に対策を施し、また、蓋間圧力を常時監視することにより閉じ込め機能を確認することから、基本的安全機能を損なうおそれはない。

(3) 竜巻

外部事象防護施設は、最大風速100m/sの竜巻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ために、竜巻飛来物の発生防止対策及び竜巻防護対策を行う。

a. 竜巻飛来物の発生防止対策

屋外において飛散するおそれのある資機材及び車両については、飛来時の運動エネルギー等を評価し、外部事象防護施設への影響の有無を確認する。外部事象防護施設へ影響を及ぼす大型の資

機材及び車両については、飛散防止措置として、固縛、固定又は退避を実施する。具体的には、大型の資機材について固縛、固定の措置を実施し、また、設計飛来物（ワゴン車）を超える大きさの車両については、固縛または車両退避の措置を実施する。

b. 竜巻防護対策

金属キャスクに対しては、竜巻飛来物が使用済燃料貯蔵建屋の開口部を通過して衝突する可能性は極めて低く、また、飛来物の衝突を仮定しても基本的安全機能への影響は小さいため、竜巻による直接的な影響を考慮する必要はない。

その上で、使用済燃料貯蔵建屋に対しては、金属キャスクを内包する外殻の施設として、基準竜巻、設計竜巻及び設計荷重を適切に設定して、構造健全性を維持することにより基本的安全機能を損なわない設計とする。

また、設計飛来物が貯蔵建屋に衝突したとしても、貫通、裏面剥離の発生により、使用済燃料貯蔵施設の基本的安全機能を損なわない設計とする。

竜巻は積乱雲や積雲に伴って発生する現象であり、積乱雲の発達時に竜巻と同時に発生する可能性がある自然現象は、落雷、積雪、ひょう及び降水であるが、設計上考慮する竜巻の発生頻度が極めて低いこと及びこれらの自然現象の組合せにより発生する荷重は設計竜巻荷重に包含されることから、荷重の組み合わせは考慮しない。

なお、竜巻の作用時間は極めて短時間であること、積雪の荷重は冬季に発生し、積雪荷重の大きさや継続時間は除雪を行うことで低減できることから、発生頻度が極めて小さい設計竜巻の風荷重と積雪荷重による荷重が同時に発生し、貯蔵建屋に影響を与えることは考えにくいため、組み合わせを考慮しない。竜巻が冬季に襲来する場合は竜巻通過前後に降雪を伴う可能性はあるが、上昇流の竜巻本体周辺では、竜巻通過時に雪は降らない。また、下降流の竜巻通過時や竜巻通過前に積もった雪の大部分は竜巻の

風により吹き飛ばされ、雪による荷重は十分小さく設計竜巻荷重に包絡される。

(4) 低温・凍結

敷地付近で観測された最低気温は、むつ特別地域気象観測所での観測記録（1935年～2012年）によれば -22.4°C （1984年2月18日）、函館海洋気象台での観測記録（1873年～2012年）によれば -19.4°C （1900年2月14日）である。金属キャスク及び屋外機器で凍結のおそれのあるものに対しては、これらの観測値を参考にして設計を行う。

金属キャスクの凍結は想定されないが、屋外設備では空気圧縮機の冷却水系統で凍結が想定されることから、設備を使用しない場合は系統の水抜きを行うとともに、冬季に設備を使用する場合は凍結防止の措置を講じた上で使用する

(5) 降水

敷地付近で観測された日降水量の最大値は、むつ特別地域気象観測所での観測記録（1935年～2012年）によれば 162.5mm （1981年8月22日）、函館海洋気象台での観測記録（1873年～2012年）によれば 176.0mm （1939年8月25日）である。さらに1時間降水量の最大値（むつ特別地域気象観測所： 51.5mm （1973年9月24日）、函館海洋気象台： 63.2mm （1939年8月25日））を考慮し、使用済燃料貯蔵建屋は降水に対して基本的安全機能を損なわない設計とする。

また、金属キャスクは本体表面には防錆のために塗装を施し、さらに、自主的に二次蓋上部に対策を施すこと、使用済燃料集合体からの崩壊熱により金属キャスク表面に恒常的に結露が発生する状態が継続することは考え難いことから、表面に結露しても基本的安全機能を損なうことはない。

万一、金属キャスク表面に錆が発生しても、その進展は緩慢であるため、巡視や定期的に行う外観検査により、錆染みや塗装面の割れを確認し、基本的安全機能が損なわれる前に補修塗装によ

る処置を施すことが可能である。

なお、建屋上部の排気口開口部からの降水が想定されるが、排気口開口部からの降水は、金属キャスクの貯蔵位置との関係から、金属キャスクに直接影響を与えることは想定されない。

(6) 積雪

敷地付近で観測された最深積雪は、むつ特別地域気象観測所での観測記録（1935年～2012年）によれば170cm（1977年2月15日）であるが、函館海洋気象台での観測記録（1873年～2012年）によれば91cm（2012年2月27日）である。したがって、これらの観測記録に基づき積雪荷重を設定し、使用済燃料貯蔵建屋は、積雪荷重に対して、構造健全性を維持することにより基本的安全機能を損なわない設計とするとともに、あらかじめ手順を定め除雪を実施する。

なお、使用済燃料貯蔵建屋の貯蔵区域及び受入れ区域の給気口フード下端の位置は地上高さ約6m、排気口の位置は地上高さ約23mであり、積雪により給気口及び排気口が閉塞されることはない。

(7) 落雷

使用済燃料貯蔵建屋は、落雷による火災発生を防止するため、避雷設備を設ける設計としている。避雷対策を施した施設内に金属キャスクを貯蔵することから、落雷により基本的安全機能を損なうおそれはない。

(8) 地滑り

敷地付近で過去における地滑りによる被害の記録はない。また、敷地付近の地形及び地質の状況から判断して、地滑りに対する特別な考慮は不要である。

(9) 火山の影響

敷地周辺の火山については、その活動性や敷地との位置関係から判断して、設計対応不可能な火山事象が使用済燃料貯蔵施設に影響を及ぼす可能性は十分小さい。ただし、恐山については過去

のマグマ噴火に伴う火砕物密度流が敷地に到達していることから、火山影響評価の根拠が維持されていることの確認を目的として供用期間中の火山活動モニタリングを実施する。

火山活動モニタリングの結果、観測データに有意な変化があった場合は、火山専門家及び火山活動評価委員の助言を踏まえ、最新の科学的知見に基づき可能な限りの対処を行うこととする。

降下火砕物（火山灰）としては、敷地近傍で確認された火山灰を考慮することとし、火山灰堆積量を30cmに設定する。また、必要に応じて、降下火砕物の除去及び点検の対応を行い、基本的安全機能が損なわれることがないように、適切な処置を講ずる。

主な対処方針を以下に示す。

- ① 火山活動のモニタリング強化
- ② 使用済燃料を収納した金属キャスクの搬入停止
- ③ 使用済燃料を収納した金属キャスクの搬出

(10) 生物学的事象

生物学的事象として、つる植物等の植物による給気口及び排気口の閉塞、鳥等の小動物による給気口及び排気口の閉塞及びネズミ等の小動物による電源喪失が考えられる。植物による給気口及び排気口の閉塞は事象の進展が緩慢であり、定期的な巡視により防止が可能である。鳥等の小動物による給気口及び排気口の閉塞についても事象の進展は緩慢であり、自主的にバードスクリーン及び排気ルーバを設置するとともに定期的な巡視により防止が可能である。また、使用済燃料貯蔵施設は、使用済燃料集合体を金属キャスクに収納した状態で静的に貯蔵する施設であり、電源喪失により基本的安全機能が損なわれるおそれはない。

(11) 森林火災

想定される森林火災については、使用済燃料貯蔵施設周辺の植生、過去10年間の気象条件を調査し、使用済燃料貯蔵施設から直線距離10kmの間に発火点を設定し、森林火災シミュレーション解析コード（F A R S I T E）を用いて影響評価を実施し、森林火

災の延焼を防ぐための手段として防火帯を設け，火炎が防火帯外縁に到達するまでの時間，使用済燃料貯蔵建屋外壁への熱影響及び危険距離を評価し，必要な防火帯幅，使用済燃料貯蔵建屋との離隔距離を確保することにより，使用済燃料貯蔵建屋の基本的安全機能を損なわない設計とする。

また，火災の影響により使用済燃料貯蔵建屋内の雰囲気温度や空気の流れの状態が変化し，金属キャスクに影響を及ぼすことが考えられるため，火災による影響を考慮しても，金属キャスクの基本的安全機能を損なうことはない。

3.2 人為事象に対する考察

(1) 飛来物（航空機落下等）

リサイクル燃料備蓄センター周辺には，飛来物の発生の要因となり得る工場はないことから，工場からの飛来物を考慮する必要はない。また，航空機落下については，これまでの事故実績をもとに，民間航空機，自衛隊機及び米軍機が使用済燃料貯蔵施設へ落下する確率を評価した。その結果は約 5.1×10^{-8} 回/施設・年であり， 10^{-7} 回/施設・年を下回る。したがって，航空機落下を考慮する必要はない。

(2) ダムの崩壊

リサイクル燃料備蓄センター周辺には，ダムの崩壊により影響を及ぼすような河川はない（第2図参照）ことから，ダムの崩壊を考慮する必要はない。

(3) 爆発

リサイクル燃料備蓄センターから最も近い石油コンビナートは40km以上離れており（第1図参照），爆発を考慮する必要はない。また，リサイクル燃料備蓄センター周辺の高圧ガス類貯蔵施設の爆発については，使用済燃料貯蔵建屋から高圧ガス類貯蔵施設までの離隔距離を，貯蔵される高圧ガスの種類及び貯蔵量から算出した危険限界距離以上確保することにより，使用済燃料貯蔵施設

の基本的安全機能を損なわない設計とする。

(4) 近隣工場等の火災

リサイクル燃料備蓄センター周辺における近隣の産業施設の危険物貯蔵施設の火災及びリサイクル燃料備蓄センター敷地内の危険物貯蔵設備の火災については、算出される輻射強度に基づき、使用済燃料貯蔵建屋外壁の表面温度をコンクリート許容温度以下とすることにより、使用済燃料貯蔵建屋の基本的安全機能を損なわない設計とする。

航空機墜落による火災については、使用済燃料貯蔵建屋を中心として墜落確率が 10^{-7} 回/施設・年に相当する標的面積をもとにした離隔距離を算出して墜落地点とし、使用済燃料貯蔵建屋外壁の表面温度をコンクリート許容温度以下とすることにより、使用済燃料貯蔵建屋の基本的安全機能を損なわない設計とする。

また、火災の影響により使用済燃料貯蔵建屋内の雰囲気温度や空気の流れの状態が変化し、金属キャスクに影響を及ぼすことが考えられるため、火災による影響を考慮しても、金属キャスクの基本的安全機能を損なわない設計とする。

(5) 有毒ガス

リサイクル燃料備蓄センター周辺には、石油コンビナート（第1図参照）等の有毒物質を貯蔵する固定施設はなく、陸上輸送用の可動施設についても、幹線道路から使用済燃料貯蔵施設は離れている。また、金属キャスク貯蔵期間中は金属キャスク及び各設備の点検、保守及び巡視の実施時以外に使用済燃料貯蔵建屋に人員が常駐することはなく、外部火災に伴う有毒ガスの流入時には使用済燃料貯蔵建屋内の人員は迅速に避難することから、有毒ガスに対する使用済燃料貯蔵建屋の居住性を考慮する必要はない。

(6) 船舶の衝突

リサイクル燃料備蓄センターの敷地は、標高約20m～約30mのなだらかな台地に位置し、造成高は標高16mである。また、敷地前面の海岸から約500mの位置にあり、十分な離隔が確保されてい

ることから、船舶の衝突を考慮する必要はない。

(7) 電磁的障害

使用済燃料貯蔵施設は、使用済燃料集合体を金属キャスクに収納した状態で静的に貯蔵する施設であり、電磁干渉や無線電波干渉によって基本的安全機能を損なうことはないため、電磁的障害を考慮する必要はない。

なお、上記「想定される自然現象」及び人為事象については、施設運用開始後に定期的な評価にて、必要な都度、確認する予定である。

4. 自然現象の組合せについて

4.1 想定される自然現象

使用済燃料貯蔵施設において設計上考慮すべき自然現象（地震及び津波を除く。）として2.にて選定した以下の8事象について、組合せの検討を実施する。

- ・ 風（台風）
- ・ 竜巻
- ・ 低温・凍結
- ・ 降水
- ・ 積雪
- ・ 落雷
- ・ 火山の影響（降下火砕物）
- ・ 森林火災

なお、3.1にて考察を行った自然現象のうち、使用済燃料貯蔵施設の基本的安全機能を損なうおそれがない事象（洪水、地滑り及び生物学的事象）については組合せの検討対象から除外した。

また、地震、津波及び降下火砕物を除く火山の影響に関する組合せについては、各々の項目について検討を行うこととする。

4.2 重畳を考慮すべき自然現象の組合せの基本的な考え方

重畳を考慮すべき自然現象の組合せを抽出する上では、基本的には以下の観点から検討を行うこととする。

(1) 使用済燃料貯蔵施設の基本的安全機能への影響の現れ方（影響モード）

- ・ 複数の自然現象の影響モードについて

影響モードが異なる場合、複数の自然現象を重畳させても影響は変わらないため、自然現象の重畳を考慮する必要はない。

- ・ 複数の自然現象の影響モードが同じ場合、影響の大きさ及び方向性について

一方の自然現象による影響が他方の自然現象による影響に比

べて小さく後者で代表できる場合、両者の組合せによる影響は代表事象による影響を大きく上回るものではなく、両者の自然現象の重畳を考慮する必要性は小さい。

また、一方の自然現象による影響が他方の自然現象による影響を相殺する方向に働く場合、両者の組合せによる影響は各々の自然現象が単独で発生した場合の影響を下回るため、両者の自然現象の重畳を考慮する必要はない。

(2) 自然現象が同時に発生する可能性

- ・自然現象の間の従属性について

互いに従属性が高い自然現象については、同時に発生する可能性が考えられるため、重畳を考慮する必要がある。

一方、同時に発生する可能性が合理的に考えられない自然現象については、重畳を考慮する必要はない（例えば、森林火災と積雪の組合せのような場合が該当する）。

- ・各々の自然現象の発生頻度、継続時間について

発生可能性が小さく継続時間も短い自然現象は、同時に影響を及ぼす可能性が非常に小さいと考えられるため、これらの自然現象の重畳を考慮する必要性は小さい（例えば、地震と竜巻の組合せのような場合が該当する）。

4.3 重畳を考慮すべき自然現象の組合せの抽出手順

使用済燃料貯蔵施設に要求される基本的安全機能の性質及び選定した個別自然現象の性質に鑑みて、4.2にて示した基本的な考え方にに基づき、ここでは以下の手順により、使用済燃料貯蔵施設における重畳を考慮すべき自然現象の組合せを抽出する。

(a) 4.1にて挙げた各々の自然現象について、影響モードを整理する。

(b) (a)にて実施した影響モードの整理を元に、影響モードが同じ自然現象をグループ化する。

(c) (b)にてグループ化された自然現象の各々の組合せにつき、

基本的な考え方にて示した「影響の大きさ及び方向性」及び「自然現象が同時に発生する可能性」の両面から検討し、重畳を考慮すべき自然現象の組合せを抽出する。

4.4 影響モードの整理

4.3(a)に基づき、4.1にて挙げた自然現象の各々について影響モードを整理した。結果を第7表に示す。

第7表 事象に対する影響モード

事象	影響モード	備考
風（台風）	荷重（水平）	風圧力に伴う荷重による使用済燃料貯蔵建屋の損傷が想定される。
竜巻	荷重（水平）	風圧力に伴う荷重，飛来物の衝突荷重による使用済燃料貯蔵建屋の損傷が想定される。
低温・凍結	温度	貯蔵時の金属キャスク使用温度を下回る可能性がある。
降水	腐食	降水及び結露による腐食が想定される。
積雪	荷重（垂直） 閉塞	積雪荷重による使用済燃料貯蔵建屋の損傷が想定される。また，給排気口閉塞による除熱機能の阻害が想定される。
落雷	火災	使用済燃料貯蔵建屋への落雷による影響で火災が発生した場合，影響が金属キャスクに波及するおそれがある。
火山の影響	荷重（垂直） 閉塞	降下火砕物荷重による使用済燃料貯蔵建屋の損傷が想定される。また，給排気口閉塞による除熱機能の阻害が想定される。
森林火災	温度	除熱機能に影響を及ぼすおそれがある。

4.5 影響モードによる自然現象のグループ化

4.3(b)に基づき、影響モードの同じ自然現象を以下のようにグループ化した。

- ・使用済燃料貯蔵建屋荷重（水平方向）：風（台風）及び竜巻
- ・使用済燃料貯蔵建屋荷重（垂直方向）：積雪及び火山
- ・使用済燃料貯蔵建屋給排気口の閉塞：積雪及び火山
- ・使用済燃料貯蔵建屋及び金属キャスクの温度：低温・凍結，落雷及び森林火災

なお、降水による金属キャスクの本体表面の腐食は、組み合わせを考慮する荷重は発生しない。

4.6 重畳を考慮すべき自然現象の組合せの抽出

4.3(c)に基づき、4.5にてグループ化した自然現象の組合せにつき、「影響の大きさ及び方向性」及び「自然現象が同時に発生する可能性」の両面から検討し、重畳を考慮すべき自然現象の組合せを抽出する。

- ・使用済燃料貯蔵建屋荷重（水平方向）：風（台風）及び竜巻

使用済燃料貯蔵建屋への荷重の面では、風（台風）による影響は竜巻による影響に比べて小さく、両者の組合せは竜巻による影響に包含されるため、重畳を考慮する必要はない。

- ・使用済燃料貯蔵建屋荷重（垂直方向）：積雪及び火山

使用済燃料貯蔵建屋への荷重の面では、影響が重畳する可能性がある。

- ・使用済燃料貯蔵建屋の給排気口の閉塞：積雪及び火山

使用済燃料貯蔵建屋の給排気口の閉塞の面では、影響が重畳する可能性がある。しかしながら、給気口フード下端の位置は地上高さ約6m、排気口の位置は地上高さ約23mであり十分に高く、降下火砕物（最大30cm）と積雪（最大170cm）が重畳しても、給気口及び排気口が堆積物によって閉塞することはない。また、給気口

にはフードを、排気口には遮風板が設置されているため、積雪や降下火砕物で閉塞するおそれはない。

- ・使用済燃料貯蔵建屋及び金属キャスクの温度：低温・凍結，落雷及び森林火災

使用済燃料貯蔵建屋及び金属キャスクの温度に与える影響の面では，低温・凍結は温度を低下させる方向に，一方落雷による火災及び森林火災は温度を上昇させる方向に働くため，両者が同時に発生した場合，一方の自然現象による影響が他方の自然現象による影響を相殺する方向に働き，各々の自然現象が単独で発生した場合の影響を下回るため，両者の重畳を考慮する必要はない。

以上の結果，第8表のように整理され，

- ・積雪，風（台風）及び降下火砕物の使用済燃料貯蔵建屋への影響を選定した。

第8表 自然現象の組合せ

	風 (台風)	竜巻	低温 ・凍結	降水	積雪	落雷	火山の 影響	森林 火災	備考
荷重 (水平)	□	□		—					風（台風）の影響は竜巻に包含される。
荷重 (垂直)	○ ※1			—	○		○		
閉塞				—	△		△		給排気口の高さは，十分な余裕がある。また給排気口には対策済み。
温度			×	—		×		×	

△：評価・対策済みの組合せ

□：影響が片方の事象に包含される組合せ

×：影響が逆の組合せ

○：重畳の評価が必要な組合せ

－：組み合わせを考慮する荷重が発生しない事象

※1 風(台風)は水平方向の荷重に分類されるが、積雪及び降下火砕物が堆積した状態での風(台風)影響を考慮し、設計上荷重の重畳を考慮

※2 雷撃の影響による火災を想定

4.7 積雪、風(台風)及び降下火砕物の使用済燃料貯蔵建屋への影響

使用済燃料貯蔵建屋は、最寄りの気象官署の観測記録(2012年まで)の積雪の深さの月最大値での荷重を考慮して設計し、降下火砕物と積雪の堆積が重畳した場合においても、構造健全性が維持される。また、降下火砕物と積雪の堆積が重畳した場合の風(台風)荷重の影響を考慮しても、構造健全性が維持される。

なお、可能性は低いものの、積雪状態で降下火砕物が堆積して構造設計で考慮した荷重を上回ることはないように、必要な資機材を確保するとともに、体制及び手順を整備し、降下火砕物の降灰時の点検及び除灰の対応を適切に実施する方針とする。

以 上



(Googleマップをもとに作成)

第 1 図 青森県石油コンビナート等特別防災区域



(Googleマップをもとに作成)

第 2 図 最寄りのダム・軍事基地

【参考】 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

No.	外部事象	影響	評価
1	風(台風)	風圧による転倒	風(台風)で考慮している最大風速(46.5m/s)は、「2. 竜巻」で考慮している最大風速(100m/s)より小さいことから、「2. 竜巻」の「風圧による転倒」の評価に包含される。
		飛来物の衝突	風(台風)による飛来物の衝突については、「2. 竜巻」の「飛来物の衝突」の評価に包含される。
		塩害腐食	リサイクル燃料備蓄センターの敷地前面の海岸からの離隔は約 500mであることから、海風による塩害の可能性は否定できないが、金属キャスクのフランジ面の保護・防錆及び異物混入防止を目的とした二次蓋上部への自主的対策を施す。また、蓋間圧力を常時監視することにより閉じ込め機能を確認することから、基本的安全機能を損なうおそれはない。
2	竜巻	風圧による転倒	<p>貯蔵中の金属キャスクは貯蔵架台に固定されており、最大風速 100m/s の竜巻により水平方向に作用する力(約 76kN※¹)は基準地震動の水平方向地震力(約 2,200kN※²)よりも小さいことから、竜巻の風圧により転倒することはない。</p> <p>※1 風荷重 [N] = $1/2 \times \rho \times V^2 \times A \times C_d$ ρ: 空気密度 1.2kg/m³, V: 風速 100m/s, A: 投影断面積 18m²(直径 3m×高さ 6m で概算), C_d: 抗力係数 0.70(ℓ/d(長さ/直径) = 0.68 に裕度をもって 0.7)</p> <p>※2 既存水平地震力 [N] = $(m_c + m_s) \times G \times CH$ m_c: 金属キャスク質量 118,300kg, m_s: 貯蔵架台質量 15,000kg, G: 重力加速度 9.8m/s², CH: 水平方向設計震度(水平 2 方向考慮) 1.67</p>

No.	外部事象	影響	評価
	竜巻 (続き)	飛来物の衝突	<p>設計飛来物として最も大きい運動エネルギーを持つワゴン車 ($2.8 \times 10^3 \text{kN} \cdot \text{m}^{*1}$) の運動エネルギーは、「津波による建屋損傷時の落下物影響評価」で想定している天井クレーン落下時の運動エネルギー ($6.7 \times 10^3 \text{kN} \cdot \text{m}^{*2}$) よりも小さいため、「津波による建屋損傷時の落下物影響評価」に包含される。</p> <p>なお、竜巻飛来物の発生を防止するため、資機材及び車両に対し、想定される飛散挙動を考慮して、大型の資機材について固縛又は固定の措置を実施し、設計飛来物であるワゴン車を超える大きさの車両について固縛や車両退避の措置を実施する。</p> <p>※1 運動エネルギー $[\text{N} \cdot \text{m}] = 1/2 \times m \times V^2$ m: 質量 1,970kg, V: 最大水平速度 53m/s</p> <p>※2 落下エネルギー $[\text{N} \cdot \text{m}] = m \times G \times H$ m: 天井クレーン質量 128,000kg, G: 重力加速度 9.8m/s^2, H: 落下高さ 5.3m</p>
3	降水	浸水	敷地付近で観測された降水量を考慮し、排水路を設けて雨水が敷地内に滞留しないようにすることから、金属キャスクが浸水するおそれはない。
		腐食	金属キャスクの本体表面には、防錆のために塗装を施し、また、二次蓋上部への自主的対策を施すことにより腐食の発生を防止する。万一、金属キャスク表面に錆が発生しても、その進展は緩慢であるため、巡視や定期的に行う外観検査により、錆染みや塗装面の割れを確認し、基本的安全機能が損なわれる前に補修塗装による処置を施すことが可能である。

No.	外部事象	影響	評価
4	低温・凍結	低温脆性	<p>金属キャスクの発熱を考慮すると凍結は想定されない。また、敷地付近で観測された最低気温（-22.4℃）においても、構成部材にき裂及び破損が生じることのない材料選定を含めた金属キャスク設計を行うことから、低温により基本的安全機能を損なうおそれはない。</p> <p>なお、その他の設備では、空気圧縮機の冷却水系統で凍結が想定されるが、設備を使用しない場合は系統の水抜きを行うこと及び冬季に設備を使用する場合は凍結防止の措置を講じた上で使用する。</p>
5	積雪	積雪荷重	<p>金属キャスクは輸送容器としての強化浸漬試験（200m相当の水頭圧）に対して耐えられるように設計されており、敷地付近で観測された最深積雪を踏まえて設定した170cmの積雪荷重を考慮しても、金属キャスクの構造健全性を損なうおそれはない。</p>
		腐食	<p>金属キャスクの本体表面には防錆のために塗装を施し、また、二次蓋上部への自主的対策を施すことにより腐食の発生を防止している。万一、金属キャスク表面に錆が発生しても、その進展は緩慢であるため、巡視や定期的に行う外観検査により、錆染みや塗装面の割れを確認し、基本的安全機能が損なわれる前に補修塗装による処置を施すことが可能である。</p>
6	直射日光	入熱による金属キャスク部材の温度上昇	<p>輸送の一般の試験条件における太陽熱放射有無によるキャスク構成部材の温度評価ではその差は約15℃であり、この程度の温度上昇ではキャスク構成部材の健全性を損なう温度には達しないため、キャスクの基本的安全機能を損なうおそれはない。</p>
7	落雷	雷撃	<p>使用済燃料貯蔵施設に避雷設備を設けることで、金属キャスクの基本的安全機能を損なうおそれはない。</p>

No.	外部事象	影響	評価
8	火山の影響	堆積荷重	<p>金属キャスクは輸送容器としての強化浸漬試験（水深200m相当の荷重 約 1,000トン※¹）に対して耐えられるように設計されており，文献調査，地質調査及び降下火砕物シミュレーションの結果を踏まえて設定した層厚30cmの降下火砕物の堆積荷重（約 2.2トン※²）を考慮しても，金属キャスクの構造健全性を損なうおそれはない。</p> <p>※1 水圧荷重[kg] = $\pi \times d^2 / 4 \times$ 水深 200m 荷重 d:キャスク外径 250cm, 水深 200m 荷重:21kg/cm²</p> <p>※2 降下火砕物の堆積荷重[g]= $\pi \times d^2 / 4 \times \rho \times h$ d:キャスク外形 250cm, ρ:降下火砕物密度（湿潤状態）1.5g/cm³, h:降下火砕物堆積層厚（設計基準値）30cm</p>
		埋没による除熱不良	<p>想定している降下火砕物の層厚 30cm よりも金属キャスクの貯蔵架台高さの方が高く，貯蔵架台上にも降下火砕物が堆積するとしても幅は 40cm 程度以下であり，厚さも金属キャスクの全長約 5.4mに対して 30cm といずれも小さく，降下火砕物への伝熱も期待できることや，必要に応じて除灰を行うことにより，基本的安全機能を損なうおそれはない。</p>
		腐食	<p>金属キャスクの本体表面には防錆のために塗装を施し，また，自主的に対策を施すとともに，降灰時には除灰を行うことにより腐食の発生を防止する。万一，金属キャスク表面に腐食が発生しても，その進展は緩慢であるため，巡視や定期的に行う外観検査により，錆染みや塗装面の割れを確認し，基本的安全機能が損なわれる前に補修塗装による処置を施すことが可能である。</p>

No.	外部事象	影響	評価									
9	洪水	水没	敷地の地形及び表流水の状況から判断して、敷地が洪水による被害を受けることは考えられないことから、洪水に対する特別な考慮は不要である。									
10	地すべり	土砂による転倒 埋没による除熱不良	敷地付近で過去における地すべりによる被害の記録はない。また、敷地付近の地形及び地質の状況から判断して、地すべりに対する特別な考慮は不要である。									
11	地震	地震力による転倒	<p>金属キャスクは基準地震動により転倒しない設計としており、基準地震動時の発生荷重と許容値の比率は0.83^{*1}であり17%程度の余裕がある。使用済燃料貯蔵建屋なしの場合として風荷重と積雪荷重又は降下火砕物の堆積荷重の重畳を考慮しても、増加する荷重は約6%程度^{*2}であり17%程度の余裕と比較して小さいため、金属キャスクの健全性は保たれ転倒することはない。</p> <p>※1 基準地震動時の発生荷重と許容値の比率 $= (7.607 / 8.944)^2 + (2.184 / 6.923)^2 = 0.83,$ 裕度約17%</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>基準地震動時の発生荷重</th> <th>許容値</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>引張荷重 [N]</td> <td>7.607×10^5</td> <td>8.944×10^5</td> </tr> <tr> <td>せん断荷重 [N]</td> <td>2.184×10^5</td> <td>6.923×10^5</td> </tr> </tbody> </table> <p>(厳しくなるコンクリートでのボルト1本あたり)</p> <p>※2 増加する荷重 = 3.5% + 2% → 約6% 風荷重: 約76kN, 地震時の荷重2200kN → 約3.5% 積雪荷重: 約2,500kg, 金属キャスク+貯蔵架台の合算重量 約133,300kg → 約2%</p>		基準地震動時の発生荷重	許容値	引張荷重 [N]	7.607×10^5	8.944×10^5	せん断荷重 [N]	2.184×10^5	6.923×10^5
	基準地震動時の発生荷重	許容値										
引張荷重 [N]	7.607×10^5	8.944×10^5										
せん断荷重 [N]	2.184×10^5	6.923×10^5										

No.	外部事象	影響	評価
12	地盤の安定性	地盤の安定性が損なわれることによる転倒	使用済燃料貯蔵建屋が設置されている場合でも十分に支持できる地盤に施設を設けているため、使用済燃料貯蔵建屋がない場合でも地盤の安定性が損なわれるおそれはない。
13	津波	波圧による転倒	<p>貯蔵中の金属キャスクは貯蔵架台に固定されており、仮想的な大規模津波で想定される水流により水平方向に作用する力(流速 10m/s で約 780kN[*])は基準地震動の水平方向地震力(約 2,200kN)よりも小さいことから、津波の波圧により転倒することはない。</p> <p>※ 抗力 [N] = $1/2 \times C_d \times A_c \times \rho \times V^2$ (金属キャスク) + $1/2 \times C_d \times A_c \times \rho \times V^2$ (貯蔵架台)</p> <p>C_d: 抗力係数(金属キャスク(円柱) 1.0, 貯蔵架台(平板) 1.4), A_c: 鉛直方向断面積(金属キャスク 13.2m², 貯蔵架台 1.3m²), ρ: 水密度 1,030kg/m³, V: 流速 10m/s</p>
		漂流物の衝突	<p>漂流物として最も大きい運動エネルギーを持つトレーラトラックの運動エネルギー(1.8×10³kN・m^{**1})は、「津波による建屋損傷時の落下物影響評価」で想定している天井クレーン落下時の運動エネルギー(6.7×10³kN・m^{**2})よりも小さいため、「津波による建屋損傷時の落下物影響評価」に包含される。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から、考慮すべき漂流物とはならない。</p> <p>※1 運動エネルギー [N・m] = $1/2 \times m \times V^2$ m: 質量 3.6×10⁴kg, V: 漂流速度 10m/s</p> <p>※2 落下エネルギー [N・m] = $m \times G \times H$ m: 天井クレーン質量 128,000kg, G: 重力加速度 9.8m/s², H: 落下高さ 5.3m</p>

No.	外部事象	影響	評価
	津波 (続き)	浸水	二次蓋と一次蓋の蓋間は正圧としており、貯蔵中に蓋間圧力の低下がみられた場合にはHeガスを再充填し、0.27MPaを下回らないように管理している。仮想的大規模津波で想定する7m程度の浸水があったとしても蓋間圧力を上回ることはないため、金属キャスクの内部に水が浸入することはない基本的安全機能を損なうおそれはない。
		土砂埋没による除熱不良	水分を含んだ土砂が金属キャスクの熱を奪うため、短期的に除熱不良となることはなく、また、土砂の撤去を行うため、基本的安全機能を損なうおそれはない。
14	生物学的 事象	つる植物等の繁殖による除熱不良	つる植物等の繁殖は事象の進展が緩慢であり、定期的な巡視を行うことにより、基本的安全機能が損なわれる前に除草の対処が可能である。
		小動物による信号ケーブル及び電源ケーブルの切断	金属キャスクは静的に貯蔵する設備であり、小動物により信号ケーブル及び電源ケーブルの損傷が生じたとしても基本的安全機能を損なうおそれはない。
15	森林火災	輻射熱による金属キャスク部材の温度上昇	障壁の設置や離隔距離の拡大といった対策を行うことにより、金属キャスクの基本的安全機能を損なうおそれはない。

No.	外部事象	影響	評価
16	近隣工場等の火災	輻射熱による金属キャスク部材の温度上昇	使用済燃料貯蔵建屋外壁温度評価では、近隣の産業施設の火災による輻射よりも森林火災による輻射の方が使用済燃料貯蔵建屋外壁温度が高くなる結果が得られており、使用済燃料貯蔵建屋なしの場合の金属キャスクの温度上昇も同じ輻射による温度上昇であることから、近隣の産業施設の火災よりも森林火災による金属キャスクの温度上昇は高くなるため、「15. 森林火災」の評価に包含される。
17	船舶の衝突	船舶の衝突	リサイクル燃料備蓄センターの敷地は、標高約 20m～約 30mのなだらかな台地に位置し、造成高は標高 16mであり、かつ、敷地前面の海岸から約 500mの位置にあり、十分な離隔が確保されていることから、船舶の衝突を考慮する必要はない。
18	爆発	爆風による転倒	リサイクル燃料備蓄センターから最も近い石油コンビナートは 40km 以上離れており、爆発を考慮する必要はない。 また、リサイクル燃料備蓄センター周辺の高圧ガス類貯蔵施設の爆発については、貯蔵される高圧ガスの種類及び貯蔵量から算出した危険限界距離（人体に対して影響を与えない爆風圧となる距離）90m に対し、金属キャスクから高圧ガス類貯蔵施設までの離隔距離が 3,000m のため、金属キャスクの基本的安全機能を損なうおそれはない。

No.	外部事象	影響	評価
19	飛来物 (航空機 落下等)	飛来物の 衝突	飛来物の発生の原因となり得る工場はリサイクル燃料 備蓄センター周辺にないことから、工場からの飛来物を 考慮する必要はない。 航空機落下については、これまでの事故実績をもとにし た民間航空機、自衛隊機及び米軍機が使用済燃料 貯蔵施設へ落下する確率は約 5.1×10^{-8} 回/施設・年 であり、防護設計の要否判断基準の 10^{-7} 回/施設・年 を下回っており、航空機落下を考慮する必要はない。
20	ダムの崩 壊	水流により 転倒 ----- 漂流物の 衝突	リサイクル燃料備蓄センター周辺には、ダムの崩壊によ り影響を及ぼすような河川はないことから、ダムの崩壊を 考慮する必要はない。
21	有毒ガス	監視不能	外部火災により有毒ガスが発生しても、使用済燃料貯 蔵建屋がない場合は金属キャスク周辺に有毒ガスが滞 留する可能性は低いことから、基本的安全機能を損な うことはない。なお、有毒ガス発生により監視員が退避し たとしても、金属キャスクは静的に貯蔵されることから基 本的な安全機能を損なうおそれはない。
22	電磁的障 害	監視不能	金属キャスクは、動力を用いないで自然換気により除熱 を行い静的に貯蔵する設備であることから、電磁干渉や 無線電波干渉によって基本的な安全機能を損なうおそれ はない。

注) 建屋ありの外部事象影響評価を行った際と同様に、種々の資料を参考にして網羅的に抽出した事象の中から、リサイクル燃料備蓄センター周辺では起こりえない事象を除いて、考慮すべき事象を選定した。なお、考慮不要とした事象でも、「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)に例示されている事象(表示) についての評価も行った。

は、建屋有無で評価内容が変わらない事象

第 11 条 外部からの衝撃による損傷の防止（竜巻）

<目 次>

1. 設計方針
2. 竜巻に対する防護
3. 竜巻検討地域の設定
4. 基準竜巻・設計竜巻の設定
5. 竜巻影響評価

（別 添）

- 別添 1 気象モデルの概要
- 別添 2 分析対象事例の個別概要
- 別添 3 竜巻飛来物に関する現地調査について
- 別添 4 飛散評価手法について
- 別添 5 外部事象防護施設に対する竜巻飛来物の衝突による影響について

1. 設計方針

外部事象防護施設は、最大風速 100m/s の竜巻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ために、竜巻飛来物の発生防止対策及び竜巻防護対策を行う。

- ・ 竜巻飛来物の発生防止対策

屋外において飛散するおそれのある資機材及び車両については、飛来時の運動エネルギー等を評価し、外部事象防護施設への影響の有無を確認する。外部事象防護施設へ影響を及ぼす大型の資機材及び車両については、飛散防止措置として、固縛、固定又は退避を実施する。

- ・ 竜巻防護対策

金属キャスクに対しては、竜巻飛来物が使用済燃料貯蔵建屋（以降「貯蔵建屋」という。）の開口部を通過して衝突する可能性は極めて低く、また、飛来物の衝突を仮定しても基本的安全機能への影響は小さいため、竜巻による直接的な影響を考慮する必要はない。

その上で、貯蔵建屋に対しては、金属キャスクを内包する外殻の施設として、基準竜巻、設計竜巻及び設計荷重を適切に設定し、設計荷重に対して、構造健全性を維持することにより基本的安全機能を損なわない設計とする。

また、設計飛来物が貯蔵建屋に衝突したとしても、貫通、裏面剝離の発生により、使用済燃料貯蔵施設の基本的安全機能を損なわない設計とする。

竜巻は積乱雲や積雲に伴って発生する現象であり、積乱雲の発達時に竜巻と同時に発生する可能性がある自然現象は、落雷、積雪、ひょう及び降水であるが、設計上考慮する竜巻の発生頻度が極めて低いこと及びこれらの自然現象の組合せにより発生する荷重は設計竜巻荷重に包含されることから、荷重の組み合わせは考慮しない。

2. 竜巻に対する防護

2.1 竜巻防護施設に関するガイドと関連法令との関係

使用済燃料貯蔵施設（以下「貯蔵施設」という。）における外部事象防護施設については、関連する規則とガイドの定義を考慮して決定する。

ガイドにおいては、設計対象施設として「竜巻防護施設」「基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド」の耐震設計上の重要度分類における耐震Sクラスの設計を要求される設備（系統、機器）、建屋及び構築物等、及び「竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設」（当該施設の破損等により竜巻防護施設に波及的影響を及ぼして安全機能を喪失させる可能性が否定できない施設、又はその施設の特定の区画（竜巻防護施設を内包する区画））を規定している。また、ガイドにおける解説2.1において、「竜巻防護施設の外殻となる施設等（竜巻防護施設を内包する建屋・構築物等）による防護機能によって、設計竜巻による影響を受けないことが確認された施設については、設計対象から除外できる」との規定がある。

一方、基準規則では、第九条において地震に対して基本的安全機能が損なわれるおそれのないものであることが要求されており、同解釈第9条第2項及び第3項において基本的安全機能を確保する上で必要な施設及び耐震設計に関して規定されている。

ガイドの記載に対する基準規則の規定との関係について以下に示す。

ガイド (2.1 設計対象施設)	基本的安全機能を確保する上で必要な施設(基準規則の解釈第9条2)		耐震クラス (基準規則の解釈第9条の3 → 実用炉設置許可基準解釈第4条3)	ガイド(解説2.1 設計対象施設)
(1)竜巻防護施設 (耐震Sクラス)	金属キャスク	①使用済燃料貯蔵設備本体 (金属キャスク等)	Sクラス	竜巻防護施設の外殻となる施設(使用済燃料貯蔵建屋)に内包される施設
(2)竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設	貯蔵架台	②使用済燃料の受入れ施設(その機能喪失により、金属キャスクが有する基本的安全機能を損なうおそれがないことが明らかであるものを除く。)		
	受入れ区域 搬送台車			
	使用済燃料貯蔵建屋	(その機能喪失により基本的安全機能の遮蔽及び除熱機能の一部を損なうおそれがあるため)	—	

2.2 外部事象防護施設

貯蔵施設においては、竜巻防護施設としては耐震Sクラスの設計を要求される設備である金属キャスクが該当し、波及的影響を及ぼし得る施設としては、貯蔵時に金属キャスクを固縛する貯蔵架台、受入れ区域天井クレーン、搬送台車、及び金属キャスクを含むこれらの設備を内包する貯蔵建屋が該当すると考えられる。ただし、貯蔵架台においては、金属キャスクと一体で貯蔵状態となるため、耐震設計上は金属キャスクと同等の耐震Sクラスとしている。

これらのうち、基本的安全機能を有する金属キャスク、また、金属キャスクを内包し遮へい機能及び除熱機能の一部を担う貯蔵建屋を外部事象防護施設（以下「防護施設」という。）とする。

なお、ガイドにおける解説2.1において、「竜巻防護施設の外殻となる施設等(竜巻防護施設を内包する建屋・構築物等)による防護機能によって、設計竜巻による影響を受けないことが確認された施設については、設計対象から除外できる」と規定されており、この考え方に基づくと、受入れ区域天井クレーン及び搬送台車については、これらの設備を内包する貯蔵建屋の防護機能を評価することにより設計竜巻による影響を受けないことを確認した上で、防護施設から除外するものとする。

したがって、防護施設を金属キャスク及び貯蔵建屋とし、基準竜巻、設計竜巻及び設計荷重を適切に設定することで、竜巻によってこれらがもつ基本的安全機能を損なわない設計とする。

2.3 関連規則（抜粋）

(1) 使用済燃料貯蔵施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則

・ 第十一条（外部からの衝撃による損傷の防止） 第一項

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ものでなければならない。

・ 規則第十一条の解釈 第二項

2 第一項及び第二項に規定する「基本的安全機能を損なわないもの」とは、以下の設計をいう。

一 使用済燃料貯蔵施設を構成する金属キャスクが、必要に応じてその他の構築物、系統及び機器と相まって、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。

二 貯蔵建屋を設置する場合には、外部からの衝撃によって貯蔵建屋が損傷したとしても、次の事項を満足すること。

①金属キャスクが有する基本的安全機能に影響が波及しないこと。

・ 第九条（地震による衝撃による損傷の防止） 第一項， 第二項， 第三項

使用済燃料貯蔵施設は、地震力に十分に耐えることができるものでなければならない。

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

3 使用済燃料貯蔵施設は、その供用中に当該使用済燃料貯蔵施設に大きな影響を及ぼすおそれがある地震による加速度によって作用する地震力に対して基本的安全機能が損なわれるおそれがないものでなければならない。

・ 規則第九条の解釈 第二項， 第三項

2 第九条第二項に規定する「地震の発生によって生ずるおそれがある使用済燃料貯蔵施設の安全機能の喪失に起因する放射線による公衆への影響の程度」とは、地震により発生するおそれがある使用済燃料貯蔵施設の安全機能の喪失(地震に伴って発生するおそれがある

津波及び周辺斜面の崩壊等による安全機能の喪失を含む。)及びそれに続く放射線による公衆への影響を防止する観点から、各施設の安全機能が喪失した場合の影響の相対的な程度をいう。使用済燃料貯蔵施設は、その程度に応じて、以下のように分類するものとする。

一 基本的安全機能を確保する上で必要な施設

基本的安全機能を有する施設及びその機能喪失により基本的安全機能を損なうおそれがある施設をいい、少なくとも次の施設を含む。

- ①使用済燃料貯蔵設備本体（金属キャスク等）
- ②使用済燃料の受入れ施設（その機能喪失により、金属キャスクが有する基本的安全機能を損なうおそれがないことが明らかであるものを除く。）
- ③津波防護機能を有する設備（以下、「津波防護施設」という）及び浸水防止機能を有する設備（以下、「浸水防止設備」という。）
- ④敷地における津波監視機能を有する施設（以下、「津波監視設備」という。）

二 その他の安全機能を有する施設

安全機能を有する施設のうち、上記一に属する施設以外の施設をいう。

3 第九条第一項に規定する「地震力に十分に耐えること」を満たすために、使用済燃料貯蔵施設の耐震設計に当たっては、以下の方針によること。

一 基本的安全機能を確保する上で必要な施設（使用済燃料貯蔵設備本体に限る。）

- ①「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈」（原規技発第 1306193 号（平成 25 年 6 月 19 日原子力規制委員会決定））（以下、「実用炉設置許可基準解釈」という。）第四条三の一を準用すること。

貯蔵時に金属キャスクを床等に固定しない場合は、上記の規定にかかわらず、金属キャスクは、地震力による転倒等によって作用する衝撃力等に対して、おおむね弾性状態に留まる範囲で

耐えること。

- 二 基本的安全機能を確保する上で必要な施設（使用済燃料貯蔵設備本体，津波防護施設，浸水防止設備及び津波監視設備を除く。）及びその他の安全機能を有する施設

①実用炉設置許可基準解釈第四条三の二又は三を準用すること。

2.4 ガイド「2.1 設計対象施設」における記載

- ・ 竜巻防護施設：

「基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド」の耐震設計上の重要度分類における耐震Sクラスの設計を要求される設備(系統・機器)及び建屋・構築物等とする。

(ガイド「解説 2.1 設計対象施設」における記載(抜粋))：

設計竜巻荷重は，基準地震動 S_s による地震荷重と同様に施設に作用するものと捉え，設計対象施設は，耐震設計上の重要度分類を引用して，耐震Sクラス施設及び耐震Sクラス施設に波及的影響を及ぼし得る施設とした。ただし，竜巻防護施設の外壳となる施設等(竜巻防護施設を内包する建屋・構築物等)による防護機能によって，設計竜巻による影響を受けないことが確認された施設については，設計対象から除外できる。

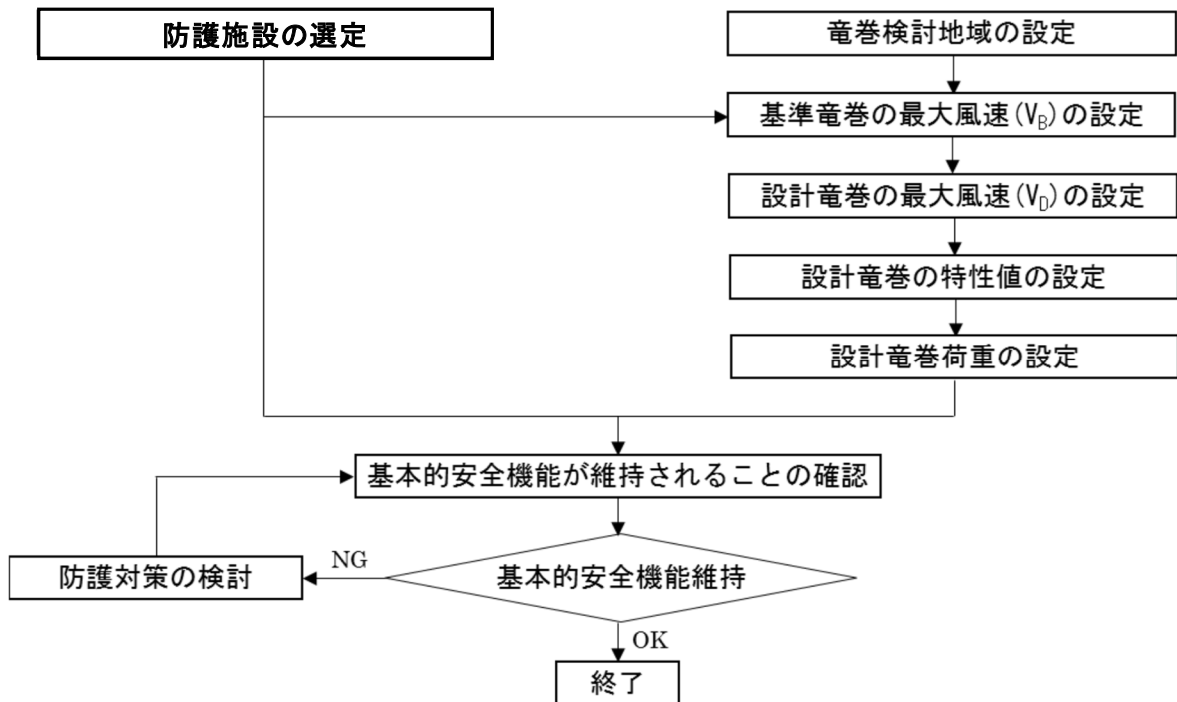
- ・ 竜巻防護施設に波及的影響を及ぼし得る施設：

当該施設の破損等により竜巻防護施設に波及的影響を及ぼして安全機能を喪失させる可能性が否定できない施設，又はその施設の特定の区画*。

*: 竜巻防護施設を内包する区画

2.5 評価の基本的な考え方

ガイドに基づき基準竜巻、設計竜巻及び設計竜巻荷重を適切に設定するとともに、考慮すべき設計荷重に対して、抽出した防護施設の構造健全性評価を行い、必要に応じて対策を行うことで基本的安全機能が維持されていることの確認を行う。以下に竜巻影響評価の基本フローを示す。



2.6 防護施設に作用する荷重

以下に示す設計竜巻荷重を適切に設定する。

(1) 風圧力による荷重

設計竜巻の最大風速による荷重

(2) 気圧差による荷重

設計竜巻における気圧低下によって生じる防護施設の内外の気圧差による圧力荷重

(3) 飛来物の衝突荷重

設計竜巻によって防護施設に衝突し得る飛来物（以下「設計飛来物」という。）が防護施設に衝突する際の衝突荷重

3. 竜巻検討地域の設定

3.1 竜巻検討地域の設定

3.1.1 貯蔵施設周辺における竜巻の発生状況

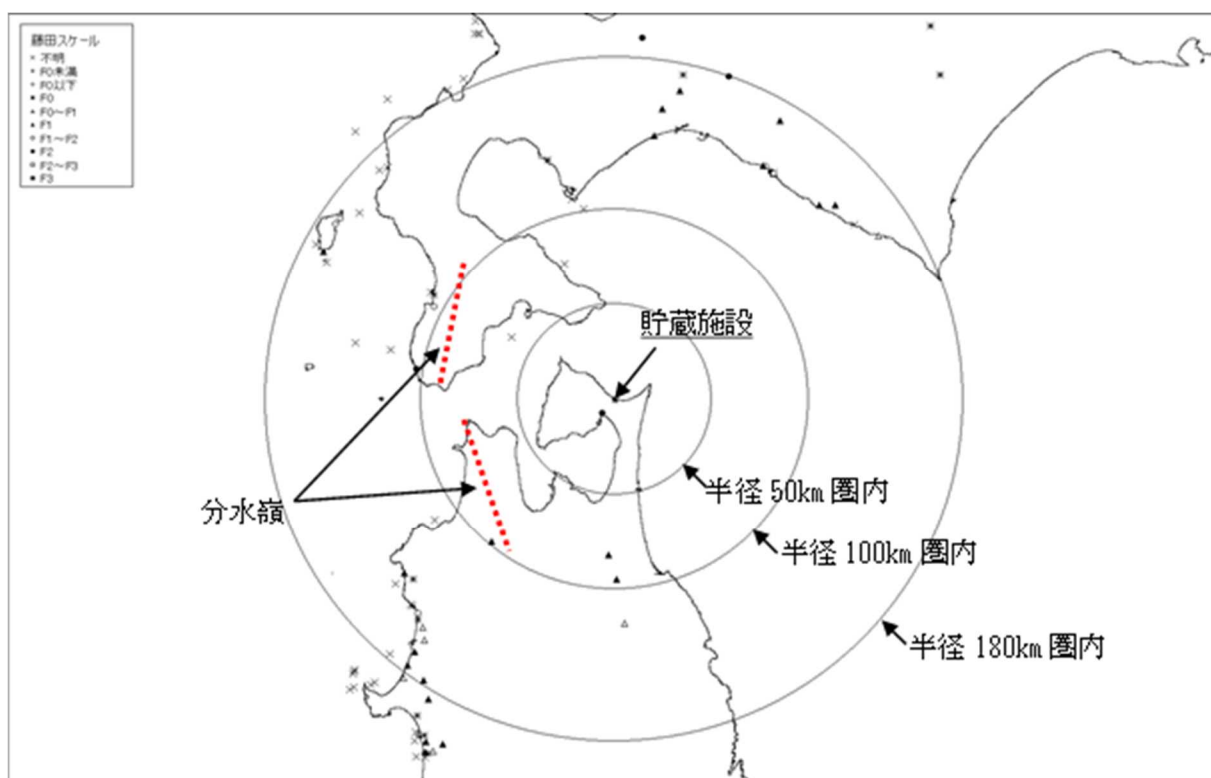
貯蔵施設が立地する地域は青森県北部の下北半島に位置し、施設は陸奥湾と津軽海峡の間の狭隘な地点の津軽海峡側に立地している。青森県は、八甲田山系を境にして西側の日本海側気候区と東側の太平洋側気候区に分けられるが、津軽海峡に面した下北半島や津軽半島北部は低温と強風（やませ）を特徴とした独立の気候区を形成している。貯蔵施設が立地する地域は太平洋側に近く、冬は降雪の特徴などから日本海側の気候の影響も若干ありうるが、ほぼ太平洋側の気候区分に該当する。

貯蔵施設の近辺における竜巻の発生状況について、気象庁が公開している「竜巻等の突風データベース（1961年～2012年6月）」（以下、「気象庁竜巻データベース」という。）をもとに、IAEA基準（METEOROLOGICAL AND HYDROLOGICAL HAZARDS IN SITE EVALUATION FOR NUCLEAR INSTALLATIONS No. SSG-18 2011）で示された一般的な対象評価範囲10万km²を目安として、貯蔵施設を中心とした半径約180km圏内の地域における1961年～2012年6月での竜巻発生状況について確認した。その結果を第1図に示す。半径180km圏内については、ガイドにおいてIAEAの基準で目安としている10万km²圏に相当するものである。

竜巻の発生状況については、気象庁においても採用している突風の強さを示す「藤田スケール」（以下、「Fスケール」という。第1表参照。）で区別した。調査した範囲においては、全般的に竜巻の発生数は少なく、特に貯蔵施設から半径50～100km内の近辺においては過去に発生した竜巻は少ない。

第1表 藤田スケール（気象庁HPより作成）

スケール	Fスケールによる風速 (m/s)	想定される被害
F0	17-32	軽微な被害
F1	33-49	中程度の被害
F2	50-69	大きな被害
F3	70-92	重大な被害
F4	93-116	ほぼ全壊に近い壊滅的な被害
F5	117-142	完全な破壊



第1図 貯蔵施設近辺における過去の竜巻発生状況(Fスケール別)

調査範囲において発生した竜巻のうち、最大のものはスケール F2 である以下の2つであった。

- ・2004年10月22日16時50分 北海道 日高支庁門別町 F2[※]
- ・1965年09月05日11時40分 青森県 むつ市
(F2)[※] (別添2 11項参照)

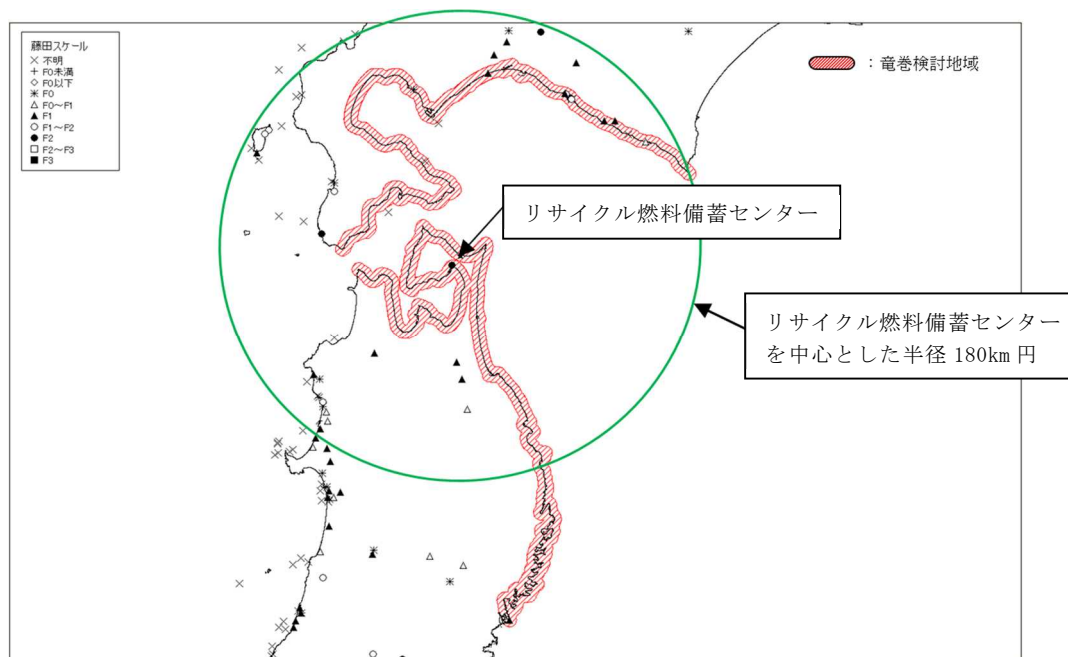
※ F スケールは、ア) 被害の詳細な情報等から推定できたもの、イ) 文献等からの引用または被害のおおまかな情報等から推定したものがあり、F2以上の事例ではア) とイ) を区別し、イ) の場合には値を括弧で囲んでいる。(気象庁HPより抜粋)

3.1.2 竜巻検討地域の設定

貯蔵施設に対する竜巻検討地域については、ガイド及びガイド解説を参考に、貯蔵施設が立地する地域と気象条件の類似性、また貯蔵施設近辺における竜巻の発生状況も鑑み以下の点を考慮して検討を行った。

- ・ IAEA の基準を参考とし、貯蔵施設を中心とした半径 180 km (約 10 万 km²) の範囲を目安とする。
- ・ 日本海側と太平洋側では気象条件が異なることを考慮して、北海道南部及び東北地方北部の太平洋側を候補とする。
- ・ 竜巻検討地域の端部境界については、分水嶺等を参考に設定する。
- ・ 貯蔵施設は海岸線から約 500m の地点に立地しているため、ガイドを参考に海岸線から陸側 5 km 及び海側 5 km の範囲を設定する。

その結果、北海道南部の太平洋側（白神岬～襟裳岬）及び東北地方の太平洋側（青森県竜飛岬～宮城県御崎岬）の海岸線に沿った海側 5 km 及び陸側 5 km の地域（面積約 13200 km²）を竜巻検討地域として設定することとした（第 2 図）。



3.2 竜巻検討地域設定の妥当性確認

設定した竜巻検討地域設定の妥当性について、以下の観点から確認を実施した。

- (1) 総観場の分析に基づく地域特性の検討
- (2) 過去の竜巻集中地域に基づく地域特性の検討
- (3) 突風関連指数に基づく地域特性の検討

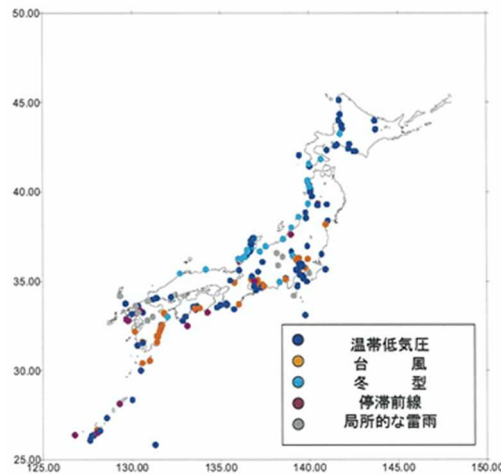
ガイド及びガイド解説を参考とし、竜巻発生要因となる気象条件（総観場）を確認する観点から、(1)及び(2)の分析により地域特性を確認し、竜巻検討地域を設定した。また、一般的に大気現象は時空間スケールの階層構造が見られ、ある大気現象はスケールの小さな現象を内包しているため、大きな竜巻の発生要因となる気象場（以下、「環境場」という。）の形成のし易さを把握する観点から、(3)の分析により竜巻の発生スケールに近いメソスケールの環境場が有する地域性と齟齬がないことについても確認した。

3.2.1 総観場の分析に基づく地域特性の検討

竜巻は、台風、前線、低気圧等様々なパターンで発生する。「竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究」（独立行政法人原子力安全基盤機構が東京工芸大学に委託した研究の成果、以下、「東京工芸大委託成果」という。）によると、第3図に示すように、停滞前線や温帯低気圧起因の竜巻は日本全国で起こっているが、台風起因の大きな竜巻は太平洋側で多く発生している。

竜巻の発生要因に基づく地形性としては、青森県太平洋側から岩手県における竜巻の発生状況は、日本海側や茨城県以南の太平洋側における発生状況と特徴が異なっている。東北地方の日本海側の地域においては、秋田県から山形県の海岸線沿いに竜巻の発生が集中している地域がある。また、宮城県以南の太平洋側の地域においては台風による竜巻の発生がみられるが、これらと比較し貯蔵施設の位置する東北地方北部の太平洋側沿岸付近及び海上においては竜巻の発生はほとんどなく、台風起因によるものはない。同様に本州の日本海側においても台風起因の竜巻は発生していない。一方、冬型起因の竜巻は、本州および北海道の日本海側や北海道の南側で多く発生している。また海を

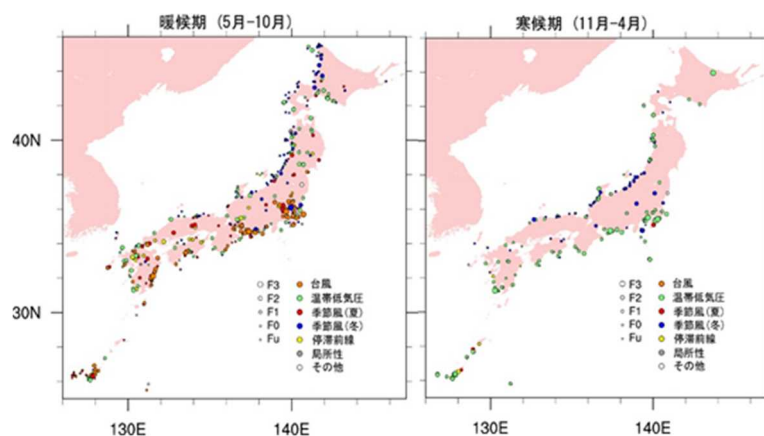
挟んだ対岸の北海道南部では、温帯低気圧や冬型気圧配置による竜巻が比較的多く発生している。



(東京工芸大委託成果より)

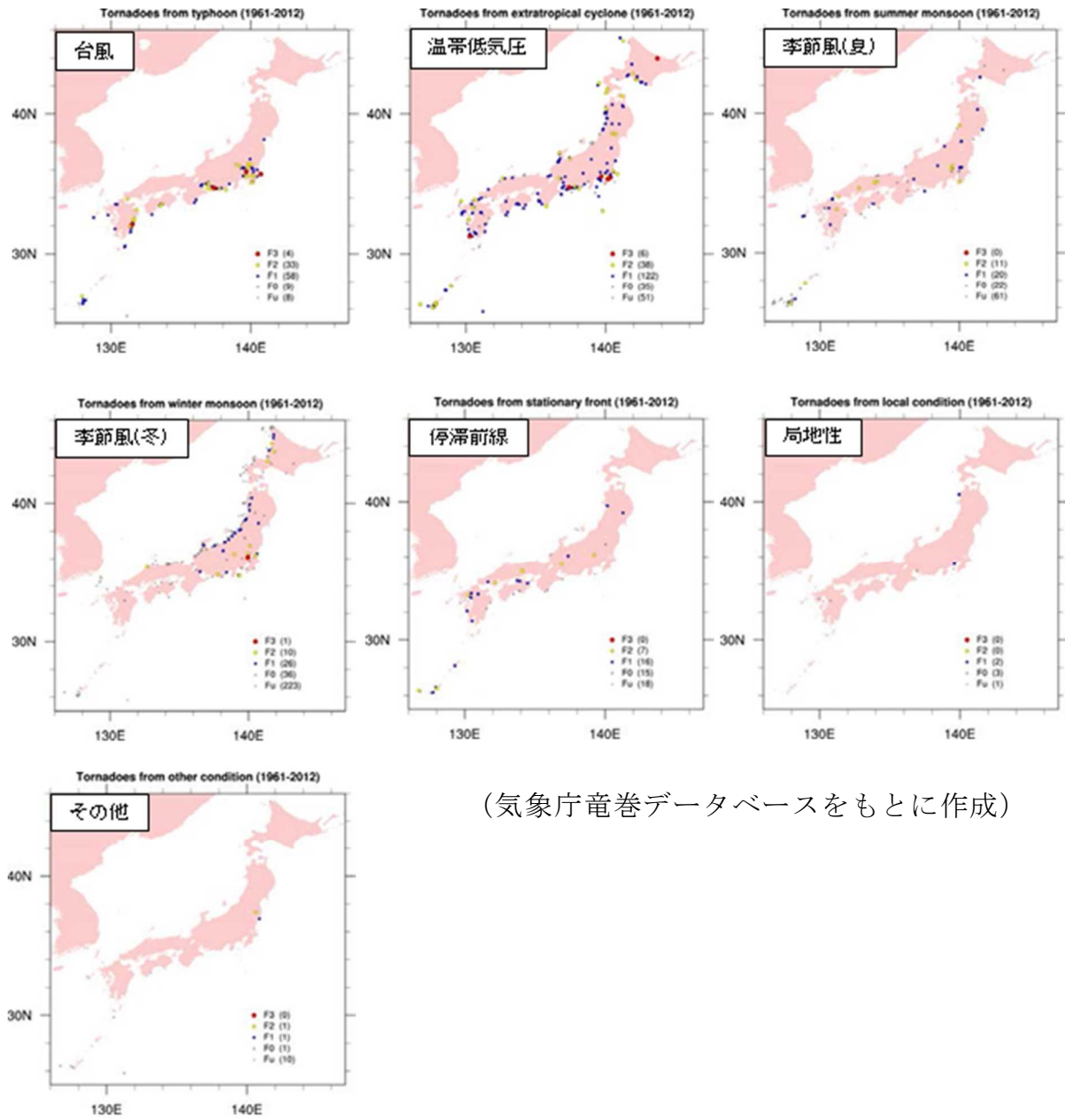
第3図 1997年～2006年までの10年間における原因別竜巻発生場所

気象庁竜巻データベースでは、竜巻を発生させた総観場（発生時の気象条件）について約40種に分類しているが、ガイド及びガイド解説を参考に、竜巻を発生させる親雲の発生要因を考慮して7種に再編し、発生分布の特徴を分析した。竜巻を発生させる総観場について竜巻の発生要因に基づく暖候期及び寒候期における発生分布、及び発生要因別の発生分布についてそれぞれ第4図、第5図に、また発生要因別の特徴について第2表にそれぞれ示す。



(気象庁竜巻データベースをもとに作成)

第4図 竜巻の発生要因別地域分布（暖候期・寒候期別）



(気象庁竜巻データベースをもとに作成)

第5図 竜巻の発生要因別地域分布 (要因別)

第2表 総観場の分類による竜巻の発生要因別の地域分布の特徴

総観場	気象庁竜巻データベースにおける	発生分布の特徴
台風	台風	台風を取り巻く雲により発生。関東以西の太平洋側(特に東～南方向に開けた地域)で発生頻度が高く，F3 スケールの強い竜巻も多い。
温帯低気圧	南岸低気圧，日本海低気圧，二つ玉低気圧，東シナ海低気圧，オホーツク海低気圧，その他(低気圧)，寒冷前線，温暖前線，閉塞前線	寒気と暖気が接して傾圧不安定による組織的な雲が形成する環境場。全国的に発生頻度が高いが，特に南からの下層の暖気流が山岳等で遮られない関東以西の太平洋側で比較的多い。F3 スケールの竜巻も見られる。
季節風(夏)	暖気の移流，熱帯低気圧，湿舌(暖湿流)，太平洋高気圧	主に暖気流により親雲が形成される環境場。関東以西の太平洋側や内陸を中心に，全国的に発生している。
季節風(冬)	寒気の流れ，気圧の谷，大陸高気圧，季節風	大気の上層部に北～西からの寒気が流入することにより大気の状態が不安定になり，竜巻の親雲が形成される環境場。日本海側や関東以北で発生頻度が高い。
停滞前線	停滞前線，梅雨前線，前線帯，不安定線，その他(前線)	南からの暖湿流により親雲が形成される環境場。関東以西の太平洋側や内陸で発生頻度が高い。
局地性	局地性擾乱，雷雨(熱雷)，雷雨(熱雷を除く)，地形効果，局地性降水	局地的な大気の循環により親雲が形成される環境場。主に内陸で発生頻度が高い。
その他	移動性高気圧，中緯度高気圧，オホーツク海高気圧，帯状高気圧，その他(高気圧)，大循環異常，その他	上記のいずれにもあてはまらない環境場。発生頻度は低い。

分析の結果、竜巻発生要因となる気象条件の観点で、以下のような地域特性があることについて確認した。

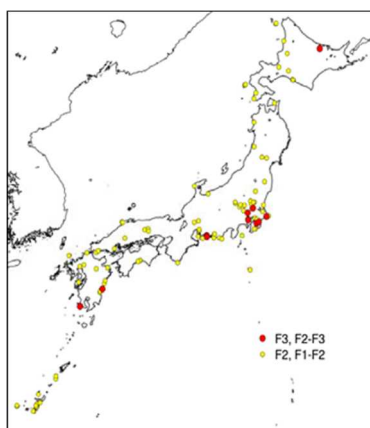
①竜巻の発生に関しては、年間を通じて暖候期(5月～10月)と寒候期(11月～4月)とに分けると、台風等の影響もあり暖候期の方が発生数が多い。(第4図)

②関東以西の太平洋側では台風起因の大きな竜巻が多く発生しているのに対し、九州を除く日本海側地域や関東以北の太平洋側及び北海道では発生していない。(第5図(台風))また、台風は北上するにつれて衰弱しやすい特性を有していることから、仮に台風起因の竜巻が発生した場合も、規模の大きな竜巻の発生可能性は低いと考えられる。

③温帯低気圧や夏の季節風に起因する竜巻は全国で発生しているが、F3規模の竜巻は主に関東以西の太平洋側での発生が多い。北海道北東部(佐呂間地区)で発生したF3規模竜巻については温帯低気圧に伴う寒冷前線の影響が強く、また局地的な影響もあるため特異な事例と考えられる。(第5図(温帯低気圧)、(季節風(夏)))

④冬の季節風に起因する竜巻は九州を除く日本海側地域に多く発生しているが、規模的にはF3竜巻の発生は未だ確認されておらず、F2竜巻が1件発生している。(第5図(季節風(冬)))

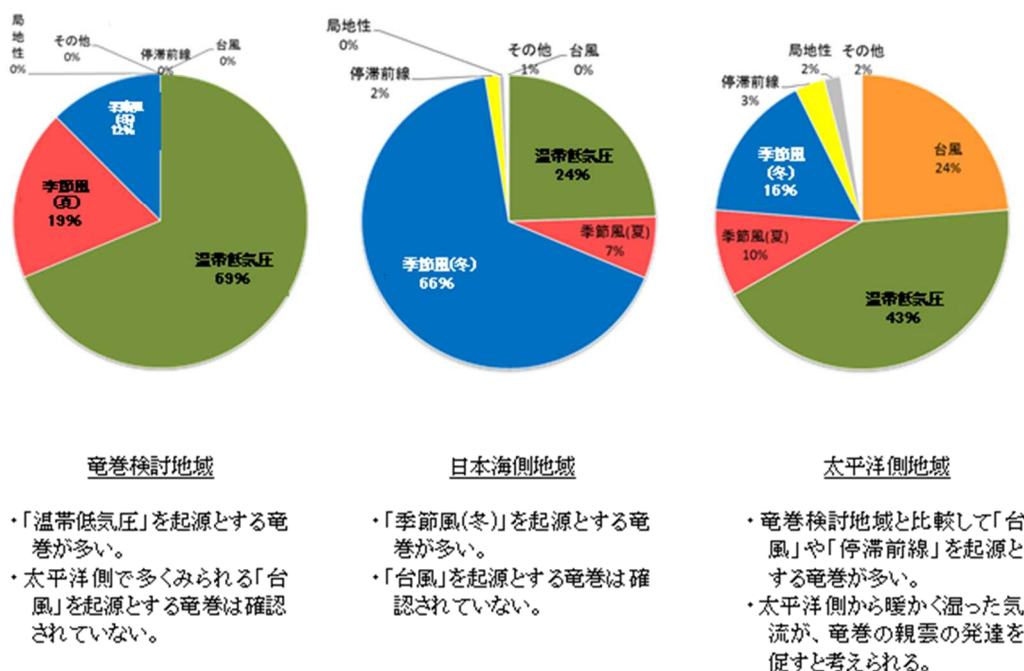
また、第6図にF2以上の竜巻発生箇所について示す。上記③で述べたとおり、F3レベルの大規模な竜巻は佐呂間地区を除き主に関東以西の太平洋側で発生していることが確認できた。



第6図 F2以上の竜巻発生箇所

第7図に、竜巻検討地域と太平洋側及び日本海側との竜巻の総観場の特徴の比較についてそれぞれ示す。竜巻検討地域における発生要因は、太平洋側と似て温帯低気圧による要因がもっとも多くなっているが、太平洋側での大きな要因である台風を起因とする竜巻は発生していない。また、日本海側の総観場とも違っている。

この図に示すとおり、日本海側と太平洋側では竜巻発生要因となる総観場が大きく異なっているが、竜巻検討地域についてはそのどちらにも当てはまらず、どちらかといえばやや太平洋側の総観場に似ているといえることから、竜巻検討地域の設定において日本海側地域を除いて設定したことに対する妥当性について確認することができたと考えられる。



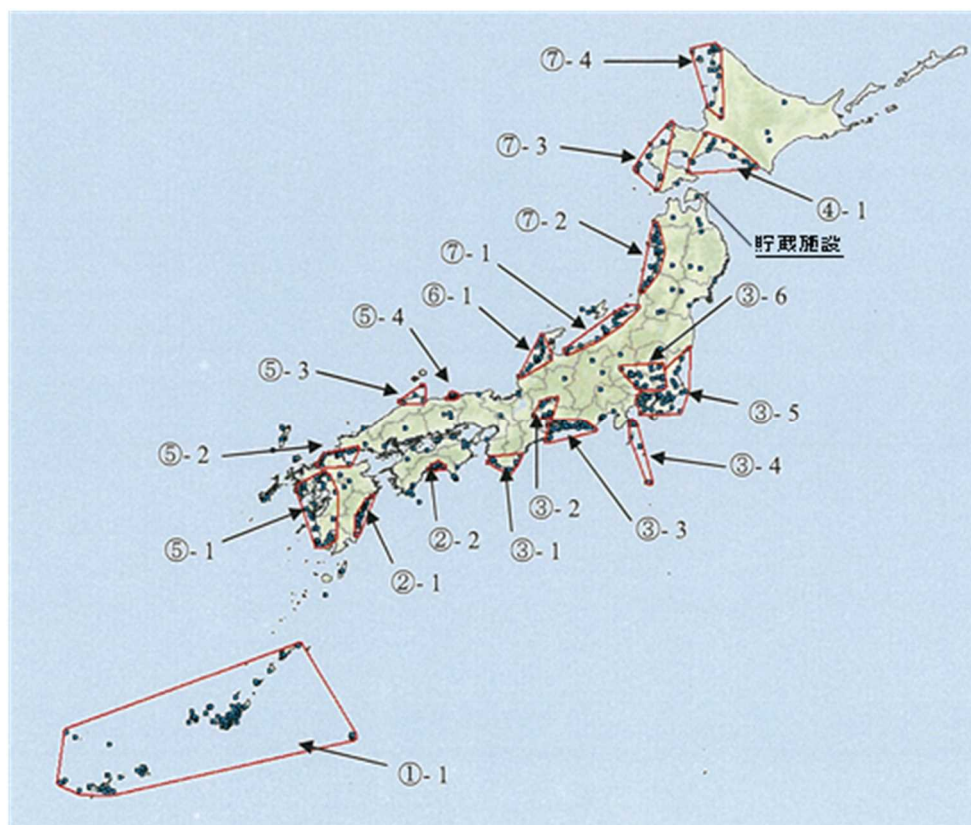
第7図 竜巻の総観場の特徴の比較

3.2.2 過去の竜巻集中地域に基づく地域特性の検討

貯蔵施設が立地する地域は、津軽海峡側の海岸線の近く(海岸線から約500m)であり、ガイドにおける解説3.2に示された、「海岸線から陸側及び海側それぞれ5kmの範囲を目安に竜巻検討地域を設定する」旨の記述は貯蔵施設の立地条件に当てはまっていると考えられる。

日本で竜巻が集中する地域については、ガイド解説において、全国19個の

竜巻集中地域が示されている（第8図）。貯蔵施設が立地する地域は日本全国規模で見ると竜巻の発生は比較的少ない地域であり，19個の竜巻集中地域からも離れている。



（東京工芸大委託成果より）

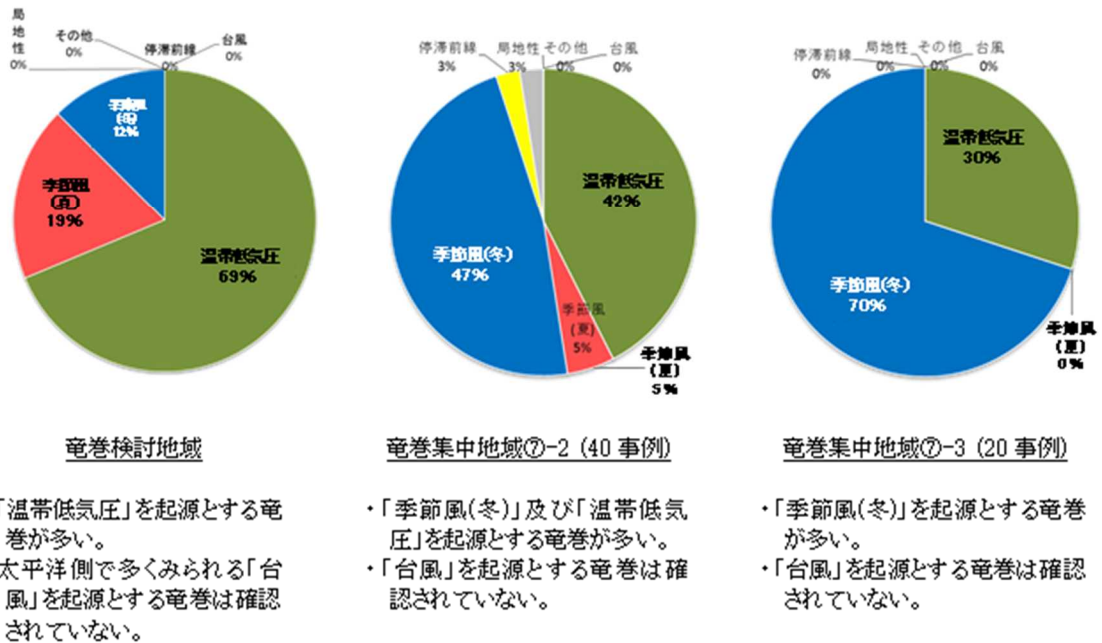
第8図 竜巻発生地点と竜巻が集中する19個の地域

貯蔵施設を中心とする半径180 km圏内において，竜巻検討地域に近い⑦-2及び⑦-3の地域における総観場の特徴について第9図に示す。気象庁竜巻データベースによると，1961年から2012年6月の51.5年間に発生が確認された竜巻の個数は竜巻集中地域⑦-2で40事例，竜巻集中地域⑦-3で20事例であり，この期間に観測されているもっとも規模の大きな竜巻はF2であった。

竜巻集中地域⑦-2で発生した竜巻の総観場は，“季節風(冬)”が47%，“温帯低気圧”が42%を占め，また竜巻集中地域⑦-3で発生した竜巻の総観場は，“季節風(冬)”が70%，“温帯低気圧”が30%の2つの要素のみとなっており，“季節風(冬)”と“温帯低気圧”の比率が高い。これらの地域では，寒気にとまって

発生した親雲に起因した竜巻が多いと推測できる。また、両地域とも日本海側にあたるため、太平洋側で多くみられる台風起源の竜巻は今のところ確認されておらず、第9図の日本海側地域と総観場が似ている一方、竜巻検討地域の総観場とは異なっている。

以上の分析結果からも、竜巻検討地域の設定において日本海側を除いたことに対する妥当性を確認できたと考える。



第9図 各地域の竜巻発生要因に関する総観場の特徴

3.2.3 突風関連指数による地域特性の検討

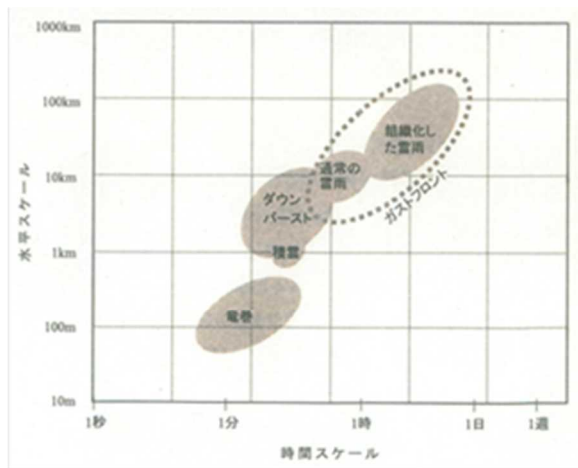
突風関連指数は、総観場での検討に加え、大きな被害をもたらす強い竜巻の発生要因となる環境場の形成のし易さについての地域特性を検討するため、気象庁や米国国立気象局(NWS: National Weather Service)における現業においても竜巻探知・予測に活用されている。また、竜巻の発生しやすさを数値的に示すことができるため、この突風関連指数を用いて地域特性の検討を行った。

3.2.3.1 大気現象におけるスケールについて

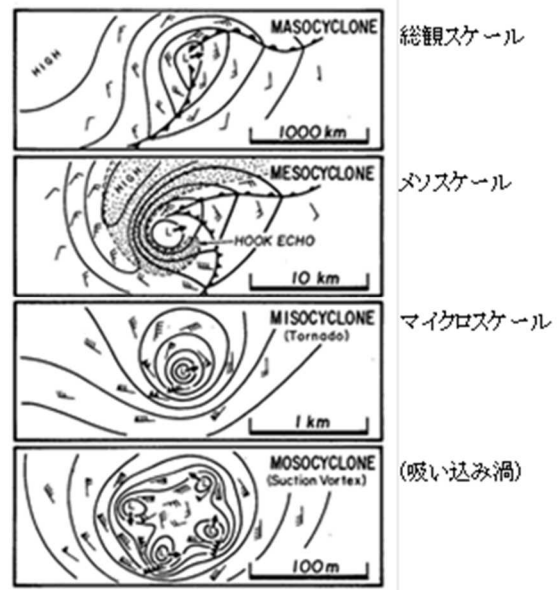
一般的に、大気現象の水平方向の広がりのことを「水平スケール」といい、寿命や周期は「時間スケール」という。第 10 図は雷雨とその関連事象の時空間スケールの関係を表したものである。個々の積雲の時空間スケールは 1 km・10 分程度であり、発達・組織化（マルチセル化・スーパーセル化）すると 10～100 km・数時間～半日程度にまで大きくなる。それに対し、竜巻の時空間スケールは数分・100 m 程度である。

竜巻の発生メカニズムを考える際、時空間スケールの階層構造が重要となる（第 11 図）。ある大気現象は、スケールのより小さな現象を内包しており、竜巻の場合、竜巻の漏斗雲内の気流は数十 m～数百 m 規模（マイクロスケールと呼ばれる(Orlanski 1975)；第 11 図では “MISOCYCLONE” と記載）の現象であるのに対し、竜巻を引き起こすもとの積乱雲である親雲のスケールは数 km～数十 km 規模（メソスケールと呼ばれる。第 11 図では “MESOCYCLONE” と記載）である。台風、低気圧、前線等のいわゆる総観場は、数百 km～数千 km 規模（総観スケールと呼ばれる。第 11 図では “MASOCYCLONE” と記載）として扱われる。また、竜巻内部には吸い込み渦（第 11 図では “Suction Vortex” と記載）と呼ばれるさらに強い渦が形成されることもある。

このように、竜巻の発生にはさまざまなスケールの現象が介在し、異なるスケールの現象が相互作用しているため、竜巻の発生頻度や強度の地域性は複数の時空間スケールで検討する必要がある。気象学における現状として、観測データの欠如や数値シミュレーション技術の不十分さから、マイクロスケールの現象の理解は難しく未知なメカニズムもあると認識されている。一方、総観場の観点ではさまざまなパターンで竜巻が発生していることがわかっており、「日本海側では台風性竜巻の発生が確認されていない」ことや、地域に応じて総観場の割合が異なる等の分析結果が得られている。しかし、例えば寒冷前線起因の F3 竜巻は実際に発生している（1990 年茂原竜巻や 2006 年佐呂間竜巻等）が、寒冷前線自体は国内どこでも通過しうるため、ある地域において F3 竜巻が発生し難いことを総観場の分析結果だけで示すのは難しいと考えられる。



第 10 図 雷雨とその関連現象の時空間スケール(大野 2001)



第 11 図 竜巻発生時の渦の多重構造(Fujita 1981)

そこで、マイクロスケールで発生する竜巻現象を包含する環境場として、親雲の水平スケールに対応するメソスケールの環境場を対象として、F3 規模以上の竜巻の発生に適した環境場の地域性について検討する。メソスケールに対しては、気象レーダーや数値気象モデルを用いて得られた知見は比較的豊富に得られている。例えば、F3 規模以上の竜巻は、大気不安定や上空風の強い鉛直シア（高度による風向・風速の差）によるスーパーセルと呼ばれる特有な気流・降水構造を有する巨大な積乱雲を伴うこと等が判明している。

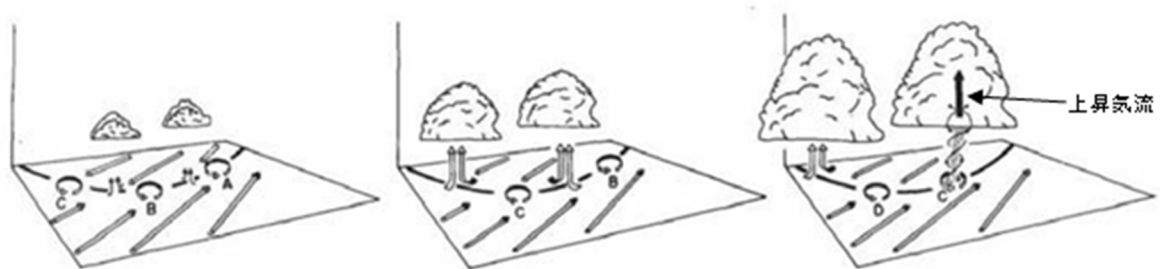
過去の既往文献や、国内外で発生した大きな竜巻を対象とした発生環境場に関する解析結果をもとに、不確かさも考慮して突風関連指数の閾値を設定し、長期間にわたる気象データにおいて、その閾値を超過する頻度を算出し、得られた頻度分布において定性的に十分に差があるかどうかを観点として地域性の有無を考察した。

3.2.3.2 竜巻の発生メカニズム

竜巻の主な発生メカニズムは、二つに大別されると考えられている。一つは気温・湿度や風向・風速が急変する局地的な前線（寒気団と暖気団との境界線）に伴って生じた渦が上昇流によって持ち上げられ、引き伸ばされて竜巻となるもので、比較的寿命が短く強い竜巻になりにくいとされている。もう一つは

前述した「スーパーセル」と呼ばれる、鉛直軸回りに回転する継続した上昇気流域（メソサイクロン）を伴った非常に巨大な積乱雲に伴って竜巻が発生するものである。スーパーセル内では、下降流域と上昇流域が分離されるため、巨大な積乱雲が長時間持続する傾向にある。近年、ドップラーレーダーによる解析を基にした竜巻の事例調査が進んだことにより、大きな被害をもたらす強い竜巻の多くはスーパーセルに伴って発生することが判明している。スーパーセルを伴う場合、大気下層の鉛直シアに伴って渦管が形成され、それが上昇流によって数 km 上空まで持ち上がるとメソサイクロンができ、その下部に竜巻が発生する。現状、竜巻を直接予測することは困難であるが、大規模竜巻の発生と関係が深いスーパーセルの発生環境を予測することにより竜巻発生を間接的に予測できる。

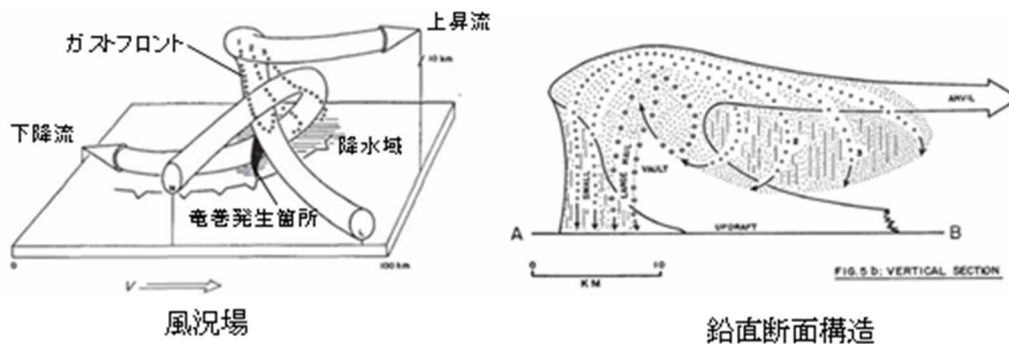
局地的な前線に伴う竜巻の発生、及びスーパーセルを伴った竜巻の発生概念図について、第 12 図、第 13 図にそれぞれ示す。



- ①局地前線上の地表付近で水平シアにより複数の渦が形成
- ②前線の上空で対流雲が発達
- ③対流雲が渦の上空に移動したとき上昇流により渦が引き伸ばされて竜巻が発生

第 12 図 局地前線に伴う竜巻の発生機構に関する概念図

(Wakimoto and Wilson 1989)



風況場図では、上昇流と下降流の関係に加え降水域(斜線の範囲)、ガスフロント(点線)、及び竜巻(黒塗り部)を表現している

第 13 図 スーパーセル型雷雨の構造 (Browning 1964)

3.2.3.3 気象庁での突風関連指数の適用状況

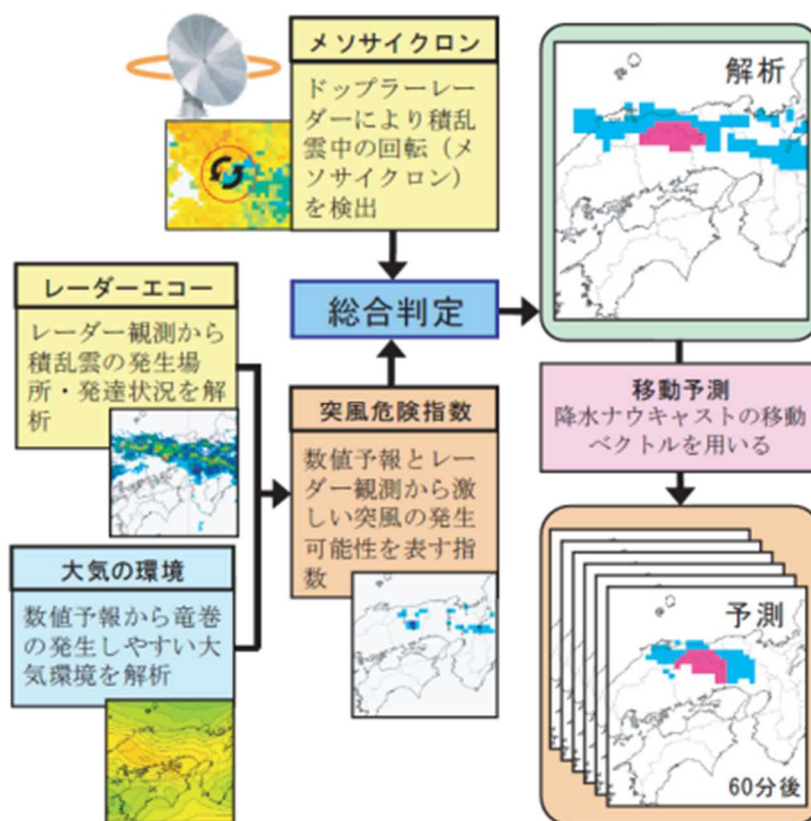
突風関連指数は、竜巻やダウンバーストなどの突風が発生しやすい大気の状態を数値予報資料を用いて表した指数であり、大気の熱的な不安定性や上空風の強い鉛直シア（高度による風向・風速の差）などから算出する。気象庁では平成 20 年 3 月から、低気圧の発達等に関して半日から 1 日程度前に発表する予告的な気象情報において、11 種類の突風関連指数を算出し、竜巻やダウンバースト等の激しい突風が発生する可能性があるると予測される場合には、当気象情報において注意喚起することとした。

その後、気象庁では竜巻等の突風の予測プロダクトとして、平成 22 年 5 月より竜巻発生確度ナウキャスト情報の提供を開始した。竜巻発生確度ナウキャストは、竜巻の発生確度を 10km 格子単位で解析し、「竜巻が今にも発生する（または発生している）可能性の程度」（発生確度）を 10 分毎に解析した結果をもとに、降水域の移動ベクトル等を用いて 1 時間先まで発生確度を予測する。発生確度の解析は、以下の二つの技術を組み合わせて実施している。

- ・気象ドップラーレーダー観測によるメソサイクロン（親雲）検出技術
- ・メソ数値予測（MSM）を用いた突風危険指数の算出技術

竜巻発生確度ナウキャストにおけるデータ等の流れを第 14 図に示す。竜巻

発生確度ナウキャストは最新の観測・解析データをもって短いリードタイムの予測を迅速に行うことを主目的としており，レーダープロダクトに重みを置いている。また，小さな竜巻も見逃しなく予測できるような説明変数として突風関連指数を選択している。



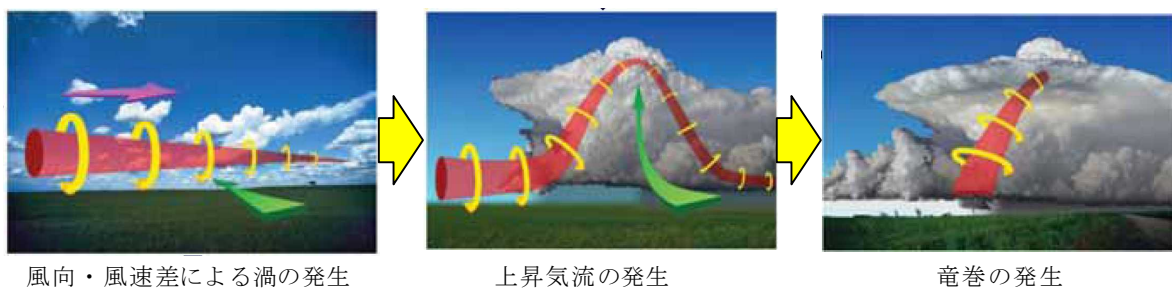
(突風危険指数:突風関連指数と気象レーダー観測データをもとに算出)

第 14 図 竜巻発生確度ナウキャストの解析・予測技術の流れ

3.2.3.4 検討に用いる突風関連指数について

気象庁においては，低気圧の発達等に関して 11 種類の突風関連指数を算出し激しい突風等の予測に活用しているが，このうちスーパーセルの発生環境を把握する指標として CAPE (Convective Available Potential Energy: 対流有効位置エネルギー)，SReH (Storm Relative Helicity: ストームの動きに相対的なヘリシティ)，EHI (Energy Helicity Index) 等が活用されている。これらの突風関連指数を用いて竜巻の地域特性に関する検討を実施した。

竜巻の発生メカニズムについて第 15 図に示す。スーパーセルが発生しやすい環境場として、大気下層の鉛直シアと、強い上昇気流を起こすきっかけとしての不安定な大気場が必要である。本検討では、大気的不安定度を表す指標として、「CAPE」、鉛直シアに伴って発生する水平渦度が親雲に取り込まれる度合いを表す指標として「SReH」を採用し、両者の指標が同時に高くなる頻度について、地域的な特徴を確認する分析を行った。また、両者を掛け合わせた指標である「EHI」による分析も行い、SReH 及び CAPE の同時超過頻度分析との比較を行った。SReH, CAPE, EHI については、竜巻の発生実態を解明する研究において国内外で広く利用され、竜巻発生環境場との関連づけ等の知見が多く蓄積されており、気象庁での竜巻予測に用いる突風関連指数の中でも主な指標として紹介されているため、本検討を行う上でも妥当なものと考えられる。SReH, CAPE 及びその複合指数である EHI について以下に示す。



第 15 図 竜巻の発生メカニズム

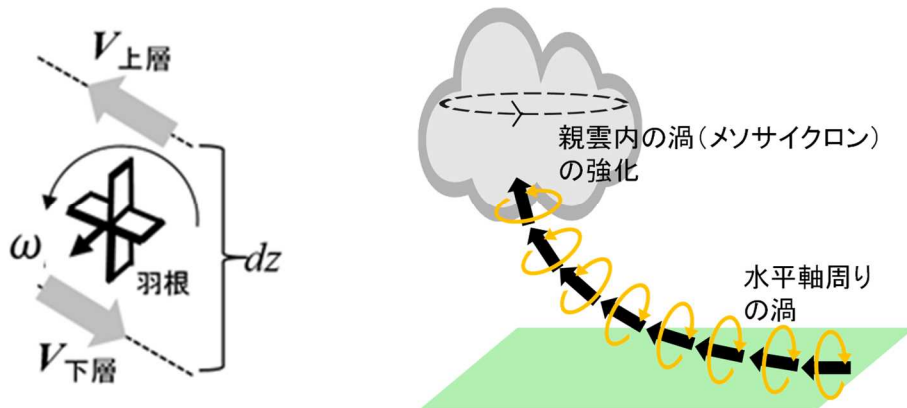
(1) SReH (Storm Relative Helicity : ストームの動きに相対的なヘリシティ)

風の鉛直シア（高度方向の風向・風速差）に伴って発生する大気の水平渦度が親雲に取り込まれる度合いを示し、値が大きいほど積乱雲がスーパーセルに発達しやすい。（第 16 図）

$$\text{SReH} = \int_{\text{地上}}^{\text{高度}3\text{km}} (\mathbf{V} - \mathbf{C}) \cdot \boldsymbol{\omega} dz$$

\mathbf{V} : 水平風速ベクトル \mathbf{C} : ストームの移動速度

$\boldsymbol{\omega}$: 鉛直シアに伴う水平渦度



水平渦度生成に関する模式図

水平渦度の親雲への輸送に関する模式図

第 16 図 SReH の算出概念

SReH の値は、上端高度の違いによって値が変わる。上端を地上から 3 km とした場合、そのほとんどが地上から 1 km までの大気によるヘリシティであるという指摘 (Rasmussen 2003) があるが、1 km 高さは夏場では境界層高さ (雲底高度) 程度と低めであるため、本検討では多くの既往検討と同様に 3 km とする。

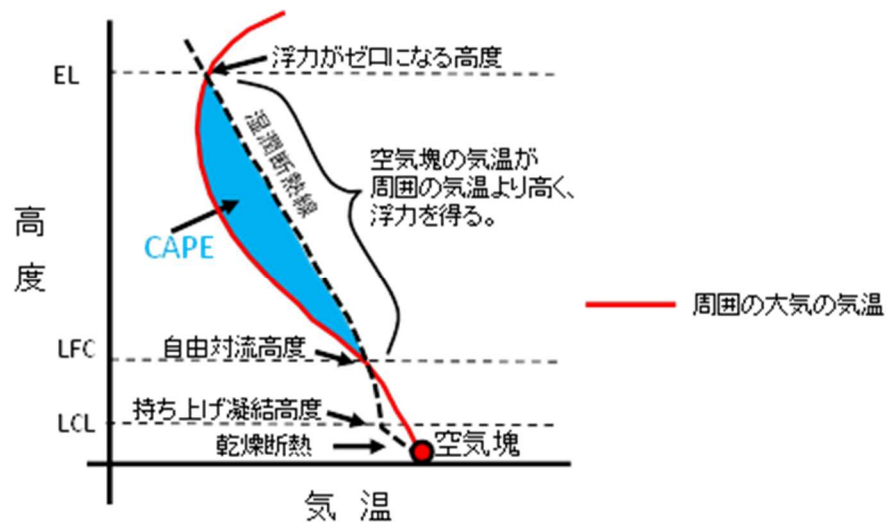
(2) CAPE (Convective Available Potential Energy: 対流有効位置エネルギー)

上昇気流の発達しやすさを表し、値が大きいほど背の高い積乱雲に発達しうるため、大気不安定度の指標となる。(第 17 図)

$$CAPE = \int_{LFC}^{EL} g \frac{\theta_e(z) - \theta_e(z)}{\theta_e(z)} dz$$

g : 重力加速度 θ_e' : 下層の空気塊を持ち上げた際の相当温位*

θ_e : ストーム周囲の相当温位* dz : 鉛直方向の層厚



第 17 図 CAPE の算出概念

CAPE の値は、持ち上げる空気塊の性質によって変わる。地表から 500 m 程度上空までの平均的な性質を持つ空気塊を持ち上げたときの MLCAPE (Mean Layer CAPE) がよく用いられる。本検討では、地表から 500 m 上空までで最も不安定な空気塊を持ち上げたときの MUCAPE (Most Unstable CAPE) を用いており、大気下層に冷気がありその上空で対流が発生する場合を考慮することができる。このような場合、MLCAPE では安定な大気とみなされることにより CAPE 値が非常に小さくなる傾向にある。

*:相当温位について

温位とは、ある空気塊を断熱的に基準圧力 1000 hPa に戻したときの絶対温度であり、下式に示すように気温 T と気圧 p に関する量である。

2つの空気塊を比較した場合、温位の高い空気塊は軽く上昇しやすく(不安定であり)、単位体積中に含みうる水蒸気量が多いため、大きな積乱雲の発生につながる。相当温位は、空気塊に含まれる水蒸気の持っている潜熱(水蒸気が凝結する際に空気塊の温度が上昇)の影響も考慮された温位である。

$$\theta = T \left(\frac{1000}{p} \right)^{\frac{R}{C_p}} \quad (R: \text{気体定数}, C_p: \text{定圧比熱})$$

(3) EHI (Energy Helicity Index)

SReH と CAPE の複合的な突風関連指数。スーパーセルや竜巻の発生し易さを経験的に指標化したもので、米国では CAPE 単独や SReH 単独に比べると竜巻発生との相関関係が高いとされている。

$$EHI = \frac{SReH \times CAPE}{160000}$$

3.2.3.5 突風関連指数の地域特性

竜巻発生時の環境場（風向・風速，気温，気圧，水蒸気量等）を数値気象モデルにより解析し，その解析結果をもとに突風関連指数を算出する。解析には WRF モデル（Weather Research and Forecasting model，別添 1）と呼ばれる数値気象モデルを用い，（一財）電力中央研究所（以下，電中研という）による長期高解像度再解析データセット（橋本ら 2013）と同様の条件で，ネスティングと呼ばれる技法を用いて，水平解像度 15km で解析した結果をもとに水平解像度 5 km の解析結果を得た。なお，30 分間隔で計算結果を出力し，当時の天気図や気象レーダー画像等を参考にして竜巻発生時刻と解析結果における降雨域の通過時刻との違いや，対応する降雨域の有無を確認することにより，計算結果に大きな問題がないことを確認した。

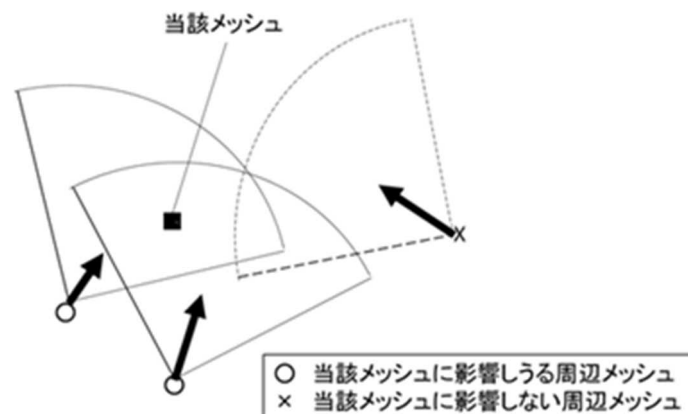
分析対象事例は第 3 表に示す過去に発生した F3 竜巻（1987 年以前の F2-F3 竜巻は除く），1988 年以降に日本海側で発生した F1-F2，及び F2 竜巻とした（F3 竜巻は 5 事例，F2-F3 竜巻は 1 事例，F2 竜巻は 3 事例，F1-F2 竜巻は 1 事例）。1987 年以前に発生した竜巻については，初期値・境界値データとして使用している ECMWF ERA40 の水平空間分解能が約 250 km と粗いために，竜巻通過時刻や発生箇所が実際に比べてずれる場合があるため本検討では対象としていない。ただし，F3 竜巻に対しては 1987 年以前の竜巻に対しても解析を行い，計算結果の適切性を確認している。なお，対象事例に対して適切性が低いことを理由に除外した事例はない。

第3表 分析対象事例概要

発生日時	季節	発生地点	F スケール	SReH (m^2/s^2)	最大 CAPE (J/kg)	EHI
2012/05/06 12:35	暖候期	茨城県常総市	F3	270	2115	3.57
2006/11/07 13:23	寒候期	北海道網走支庁佐呂間町	F3	714	813	3.63
1999/09/24 11:07	暖候期	愛知県豊橋市	F3	403	2459	6.20
1990/12/11 19:13	寒候期	千葉県茂原市	F3	649	1201	4.88
1971/07/07 07:50	暖候期	埼玉県浦和市	F3	337	1746	3.68
1990/02/09 15:15	寒候期	鹿児島県枕崎市	F2-F3	745	373	1.74
1991/06/12 13:30	暖候期	富山県魚津市	F2	227	1358	1.93
1990/04/06 02:55	寒候期	石川県羽咋郡富来町	F2	484	889	2.69
1989/03/16 19:20	寒候期	島根県簸川郡湖陵町	F2	329	430	0.89
1999/11/25 15:40	寒候期	秋田県山本郡八森町	F1-F2	363	1222	2.78

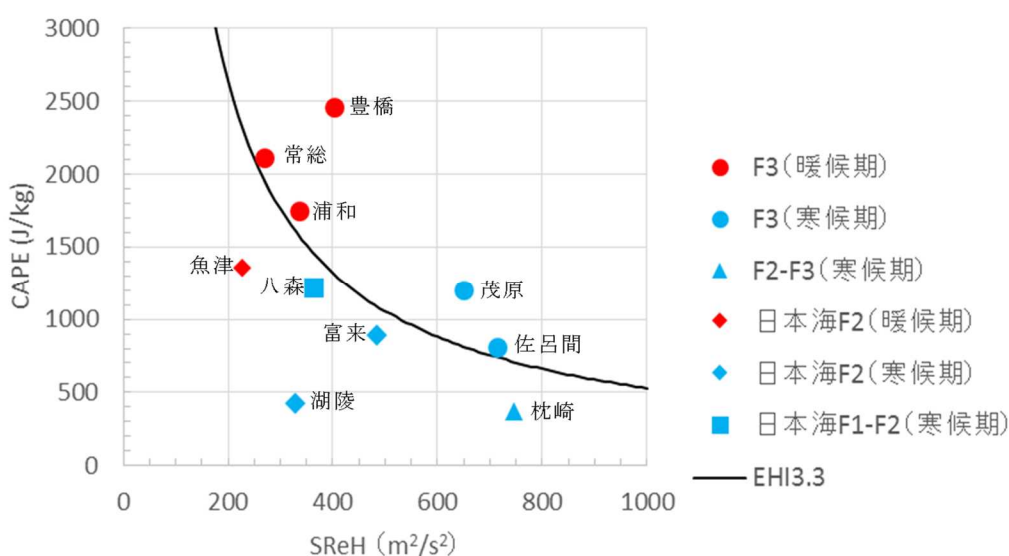
(暖候期：5月～10月 寒候期：11月～4月)

第3表中のSReHと最大CAPEの値は、発生地点を中心とした東西・南北100km四方内の最大値である。最大CAPEの算出にあたっては、雲物理過程により擾乱（竜巻を伴う積乱雲）が発生すると、発生前の大気不安定な状況が解消されCAPE値が小さくなるため、周辺のCAPE値の大きな空気塊が当該メッシュに向かって流入することを考慮した方法（Rasmussen and Blanchard (1998)）を参考に、メッシュ周辺の最大CAPE値を当該メッシュのCAPE値とした。このとき、各格子点に対して、地上～500 m高度までの平均風向を算出し、その風向に対して当該地点から風下側に半径15km、風向を中心に±45度の扇形の範囲を影響範囲とした。（第18図）この最大値が最大CAPEにあたる。このように算定することにより、周辺のCAPE値の大きな空気塊が当該メッシュを含むスーパーセルに向かって流入することを考慮できる。



第18図 最大CAPE値の算出方法概念図

第3表における SReH と最大 CAPE の値について、竜巻のカテゴリ別にプロットしたものを第19図に示す。F3 竜巻においては、暖候期と寒候期で CAPE の大きさが大きく異なっており、寒候期では暖候期に比べて値が小さいが、SReH が非常に大きい傾向が見られる。また、日本海側の F2 規模竜巻の発生環境場では小さな指数値の下でも竜巻が発生しているという点において、F3 規模竜巻の発生環境場との違いが見られる。EHI に対しては、概ね 3.5 程度を超える場合に F3 竜巻が発生している。



第19図 SReH と最大 CAPE の関係

対象とした 10 事例を分析した結果から、以下の傾向が見られる。(別添2)

- ① F3 竜巻事例では、共通して SReH と最大 CAPE の両方が大きく、太平洋側からの暖湿流の流入が見られた。寒候期（11月～4月）に発生した事例では CAPE が暖候期（5月～10月）に比べて小さいが、SReH が非常に大きく大気不安定度の小ささを補っているようである。
- ② 今回分析した F2-F3 竜巻時の発生環境場は、CAPE（大気不安定度）が F3 竜巻発生時に比べてかなり低かった。F2 規模と F3 規模とで風速レベルで違いが大きいため、本検討において F2-F3 竜巻を F3 竜巻と混合して扱うべきではないと考えられる。
- ③ F2 竜巻でも SReH は F3 竜巻事例と同レベルの大きさになりうる。冬季の西高東低型の気圧配置下での日本海上での気団変質時、寒冷前線通過時、

暖候期の場合は対馬海峡から日本海に向かって空気塊が流れ込む時に大気がやや不安定な状況が見られたが、多くの事例で大気不安定度は F3 竜巻発生時よりも小さかった。不安定度が大きかった事例もあるが、その場合 SReH が小さくなく、両指数が共に大きくなる状況は見られなかった。

これらの結果から、SReH として $250\sim 300\text{ m}^2/\text{s}^2$ 程度以上、(最大) CAPE として暖候期において 1600 J/kg 、寒候期において 600 J/kg 程度以上の環境場において F3 竜巻が発生しているとみなすことができる。EHI に対しては、3.5 程度を超える場合に F3 竜巻が発生しているが、この場合季節に分けずに通年単位で分析できる可能性がある。

分析対象とした F3 竜巻はほとんどが太平洋側での発生であり、大きな竜巻を引き起こすスーパーセルの発生要因の指標である SReH と CAPE については、太平洋側で発生した F3 竜巻では SReH と CAPE の両方（あるいは複合指数である EHI）が大きな値をとる傾向があると考えられる。また、これまでに発生した国内における全ての F3 竜巻（5 事例）は、スーパーセルを伴っていたことが報告されている。このことから、上記 SReH と CAPE それぞれの値を参考に閾値を設け、その閾値を同時に超える頻度（以下、「同時超過頻度」という。）を分析することにより、スーパーセルに伴って発生するような大規模な竜巻の発生環境を観点とした地域性を見出すことができると考えられる。

3.2.3.6 突風関連指数の同時超過頻度による地域性の検討

過去に発生した竜巻に対する環境場を分析した結果では、国内で（太平洋側で）発生した F3 竜巻では、SReH と最大 CAPE の両方が大きな値をとる傾向が見られた。このため、SReH と CAPE それぞれに対してある閾値を設け、その閾値を同時に超える同時超過頻度を分析することにより国内最大規模 F3、あるいはそれ以上の規模の竜巻発生を観点とした地域性について検討した。

突風関連指数の地域性を見出すには、詳細なメッシュ間隔でかつ長期間のデータが必要であるため、ヨーロッパ中期予報センター (ECMWF) の再解析データ ERA-Interim (1989 年以降；水平分解能約 70 km) および ERA40 (1989 年まで；水平分解能約 250 km) をもとに、気象モデルを用いて数値的に環境場

を解析したデータセット（橋本ら 2011）を用いた。当データセットは、気象庁と電中研が共同で作成した JRA-25 再解析データ（Onogi et al. 2007）よりも 5 km・1 時間毎と時空間解像度が細かく、豪雨事例の再現性も高まっている（橋本ら 2013）。本検討では、1961 年から 2010 年までの 50 年間にわたって 1 時間毎に解析されたデータを用いた。ECMWF の再解析データは、地球温暖化予測を目的として世界的に広く活用されており、最も精度が高いものと認識されている。しかし、空間分解能が非常に粗いため、物理的ダウンスケーリング手法として WRF モデルを用いた長期再解析により 5 km メッシュの環境場を算出してデータセットを作成し、本データセットで解析されている上空風、気温、気圧等の気象データを用いて SReH と CAPE の値を 1 時間毎・5 km メッシュで算出した。50 年間にわたるデータサンプル数は各メッシュに対して約 4.4×10^5 個存在することとなる。

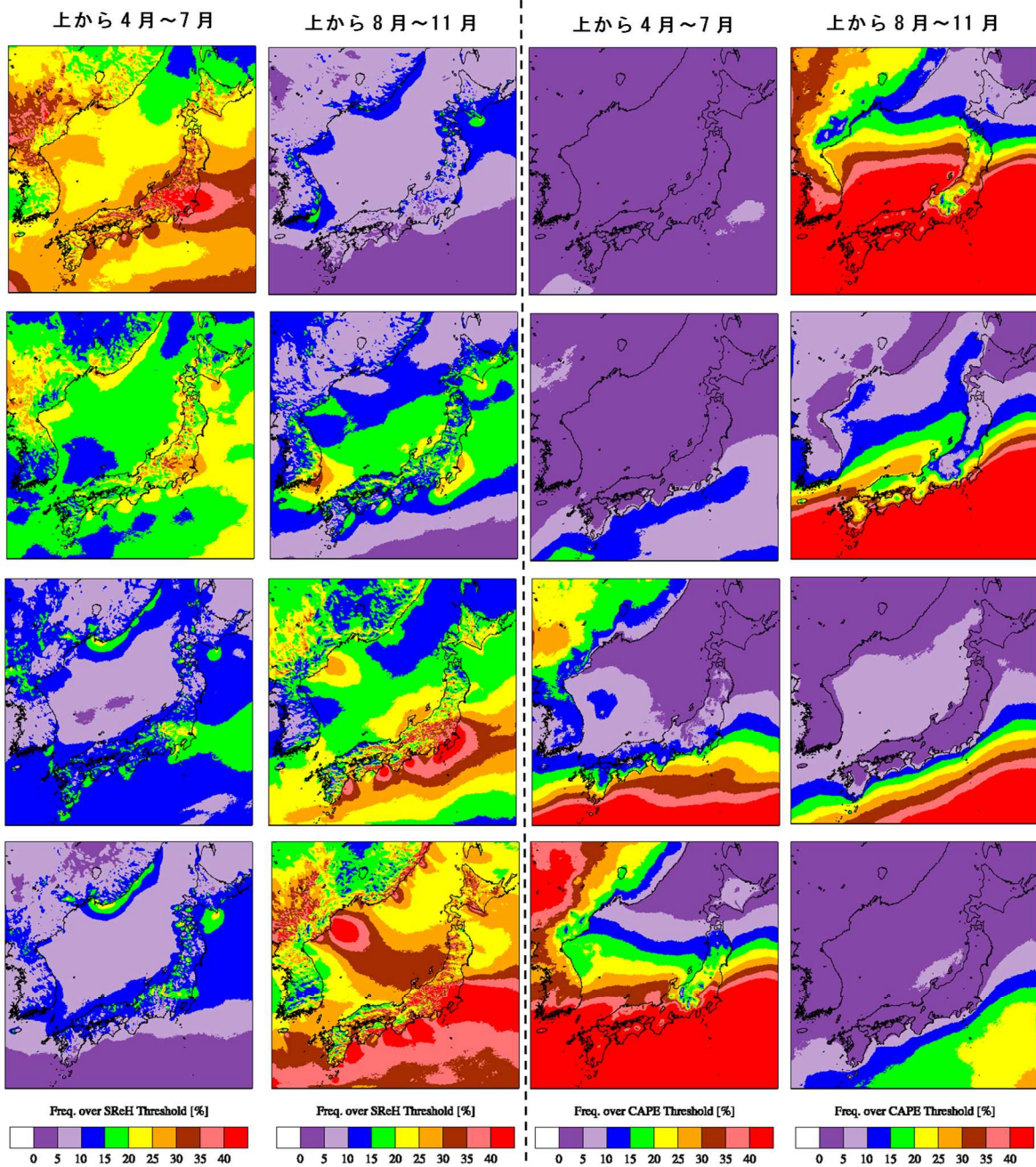
また、F3 竜巻の発生環境場の特徴として、寒候期（11 月～4 月）に発生した竜巻の CAPE が暖候期（5 月～10 月）に比べて小さく、SReH が高い傾向にあった。第 20 図に、4 月から 11 月までの期間において、SReH の閾値を $150 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 、CAPE の閾値を 250 J/kg に設定し、各格子点について両指数が同時に閾値を超過する頻度（同時超過頻度；全体の母数に対する割合（%））について月別に算出した結果について示す。ここでは小さな閾値を設定しているため、スーパーセルだけではなく小さな雷雨発生の環境場も捕捉することとなる。

SReH に対しては、日本海および沿岸域では寒候期に頻度が大きく、大きな値をとる傾向が示されており、関東平野及び北海道日高山脈周辺では年間を通じて他地域に比べて高い頻度を有している。また 7 月については全体的に低い値となっている。

一方、CAPE に対しては寒候期で低い値をとり、暖候期で高い値をとる傾向が見られ、緯度依存性が見られる。この緯度依存性は、熱帯域ほど暖かく高い雲ができやすいことと関係している。CAPE については季節・緯度依存性が強く、南に行くほど暖かい季節になるほど絶対値が大きくなっており、超過頻度を検討する上では、この特徴を踏まえる必要がある。

閾値が変わると第 20 図で見られる頻度分布もそれに応じて変わると考えられるが、相対的な頻度の大小関係はある程度保持される。国内最大規模である

F3 の竜巻は太平洋側沿岸の平野部で発生しているが、CAPE の値は基本的に南に行くほど高い値をとるため、CAPE の地域性とは整合しない（例えば、沖縄では F3 竜巻は発生していない）。また、日本海側で F3 竜巻が発生していない点から SReH においても整合しない。このことから、少なくともどちらかの指数だけでは F3 竜巻発生地点の地域傾向を説明することはできないと考えられるため、SReH と最大 CAPE の関係性（第 19 図）から、両方の指数を考慮した場合に説明づけられるか否かがポイントとなる。



月別 SReH 超過頻度分布 (閾値: 150 m²/s²)

月別 CAPE 超過頻度分布 (閾値: 250 J/kg)

第 20 図 月別の SReH 及び CAPE の超過頻度分布

第 19 図で示した SReH と最大 CAPE との関係性を踏まえ、SReH の閾値を 250 m²/s²、CAPE の閾値を 1600 J/kg(暖候期)、及び 600 J/kg(寒候期)として暖候期・寒候期別に同時超過頻度を算出した結果について第 21 図に示す。また、第 22 図に、気象庁竜巻データベースで確認された F2 規模以上の竜巻の発生

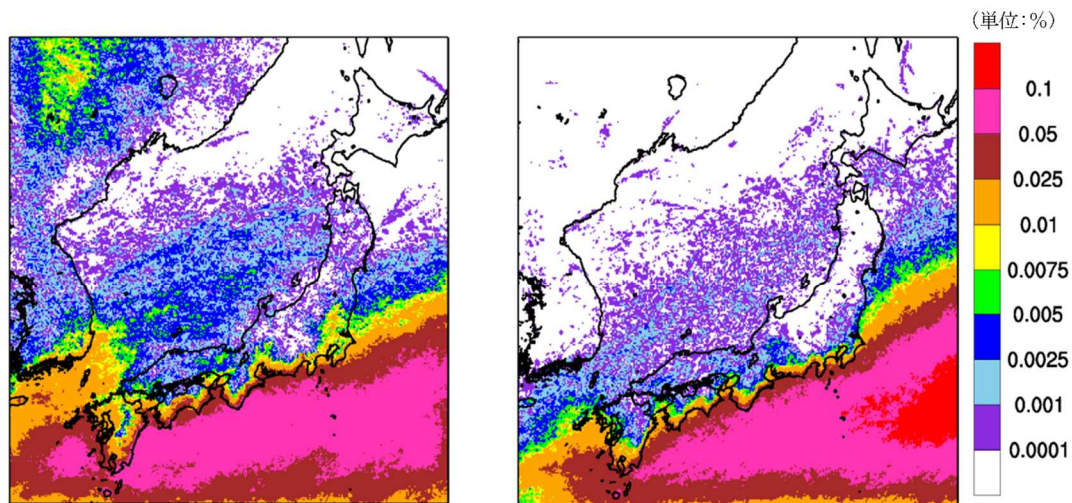
箇所について併せて示す。この発生箇所と頻度分布とを比較すると、頻度が0.01%前後の領域について発生箇所との対応性が高いことが確認できる。

暖候期においては、同時超過頻度 0.01%前後の地域が茨城県以西の太平洋側および九州の沿岸域の平野部に広がっており、超過頻度の高い地域はF3規模の竜巻の発生箇所を包含していることから、超過頻度の高い地域でF3規模以上の竜巻発生に適した環境場が整いやすいことが示されているが、対して日本海側や下北半島を含む東北地方太平洋側といった北日本地域における超過頻度の値は、1～2桁以上小さな値となっており、F3規模の竜巻の発生が未だに確認されていないことと対応している。

また、寒候期の超過頻度分布では、頻度の高い地域が暖候期より南側にシフトしているが、F3竜巻発生箇所がより沿岸に近い地点に限られていることと対応している。全体的に暖候期に見られる傾向と同様であり北日本での超過頻度の値は西日本より低い値となっている。またF3規模竜巻の発生数に季節間の差が見られないことも反映されている。

このように、過去のF3竜巻発生時の環境場の解析結果を踏まえて設定したSReHとCAPEの閾値を両方超過する頻度の分布は、実際のF3竜巻の発生箇所の傾向と整合していると考えられる。

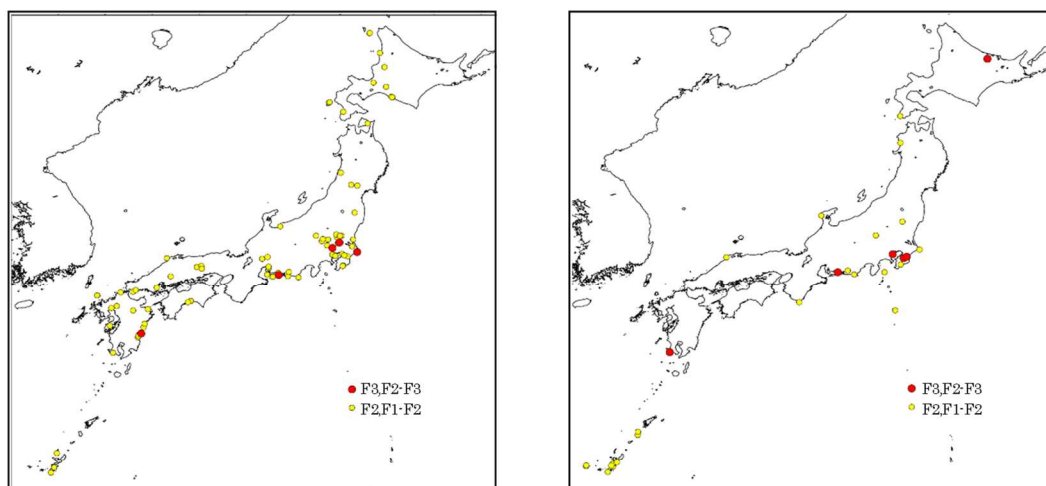
同時超過頻度分布は、閾値を「超過する」という意味において、F3規模あるいはそれ以上の規模の竜巻が発生するのに適した環境場の生起しやすさを表現していると解釈できると考える。この分布では、日本列島の縦横中央部に位置する高標高山岳（九州山地、四国山地、中国山地、中央アルプス等）を境として頻度が大きく異なっており、これらの山岳によって太平洋側からの暖気流が遮断される効果が大きな竜巻の発生に影響していることも示唆されている。



暖候期(5~10月)

寒候期(11~4月)

第21図 F3規模以上を対象としたSReH, CAPE同時超過頻度分布



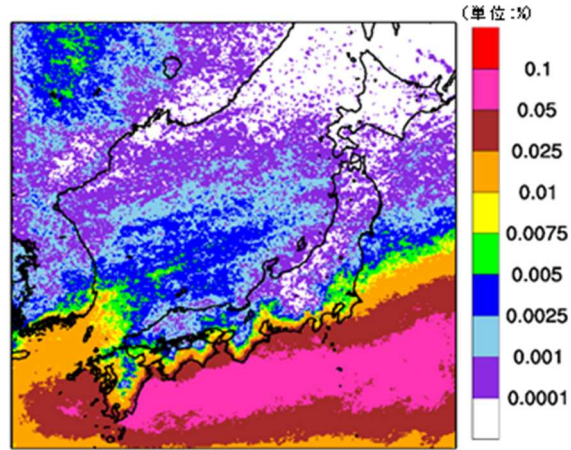
暖候期(5~10月)

寒候期(11~4月)

(気象庁竜巻データベースより作成)

第22図 F2規模以上(F1-F2を含む)の発生箇所

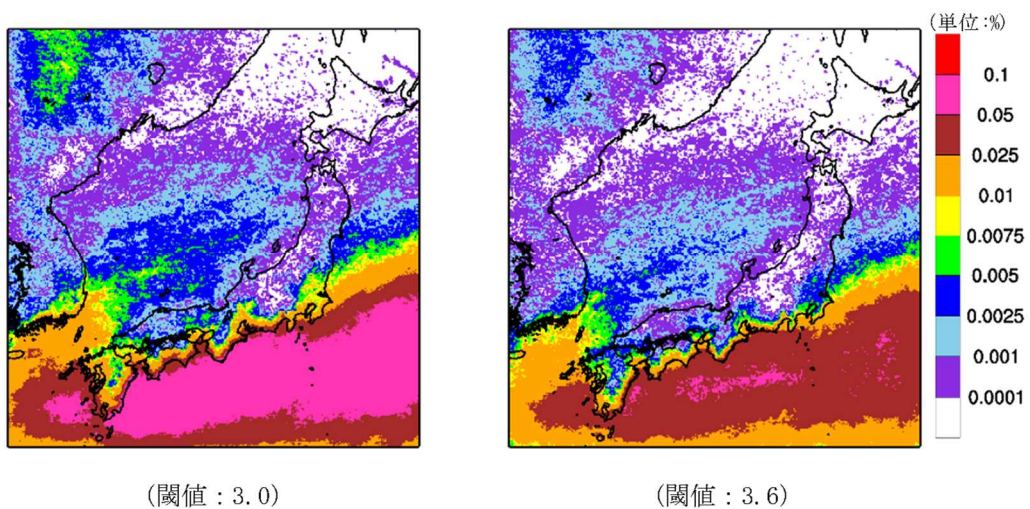
EHIについても、SReHとCAPEと同様に閾値を設け超過頻度について分析した。EHIの閾値については、過去のいずれのF3事例においてもEHIが概ね3.5程度を越えていることから(第3表)、それを包含する値としてEHI = 3.3と設定した。このときのEHIの超過頻度分布について第23図に示す。暖候期と寒候期を分けず通年単位で閾値を設定したため、分布は暖候期と寒候期の中間的な傾向を示している。



第23図 EHIの超過頻度分布(EHI閾値:3.3)

以上より、CAPE, SReH, EHI について F3 以上を想定した特定の閾値を設けた場合の分析を実施したが、突風関連指数については不確実性が存在するため、EHI=3.0 及び 3.6 と設定した場合の超過頻度分布についても作成し、同様の地域性が現れることを確認した。(第 24 図)

閾値を 3.6 にした場合、関東平野内での F3 竜巻の発生箇所を包含しておらず、値として大きすぎることをわかる。一方、閾値を 3.0 にすると、対馬海峡からの暖気流入に対応して島根県沖付近まで高い値(超過頻度分布の 0.01%前後以上)が見られるようになる。いずれの閾値においても、日本海側沿岸域及び竜巻検討地域を含む北日本と、太平洋側沿岸域との差は維持されている。

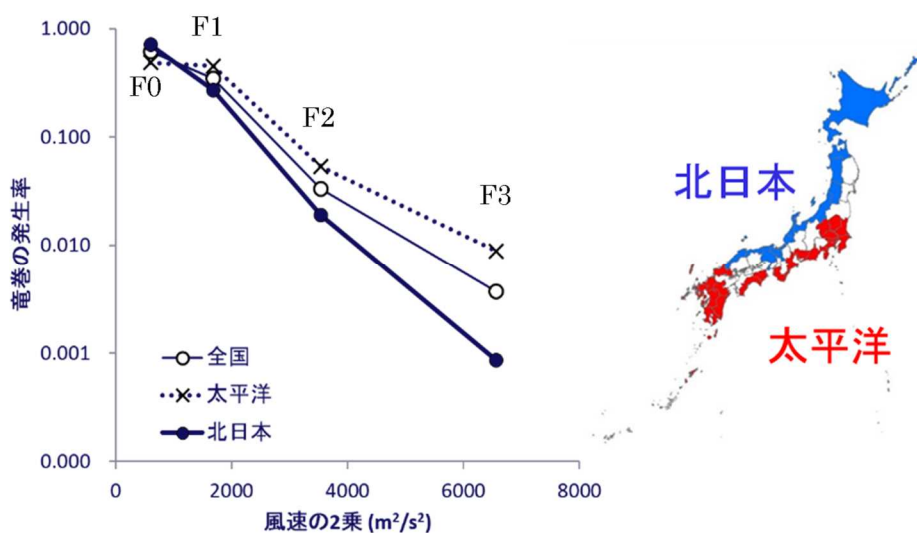


第 24 図 EHI の超過頻度分布(閾値:3.0, 3.6)

第 21 図より、国内最大規模の F3 竜巻が発生するのに適した環境場が形成

される頻度には地域差があることがわかった。この分布形態から実際に F3 規模の竜巻を考慮すべき地域を特定するには確率論的な議論が必要であり、ガイドで記載されている年超過確率 10^{-5} や、米国の評価ガイド等 (Ramsdell and Rishel 2007, U. S. NRC 2007) で記載されている年超過確率 10^{-7} を参考として必要となる風速レベルを考慮する必要があると考えられる。

第 25 図は、ハザード評価と同様に海上 F 不明竜巻を按分して各 F スケール竜巻の 51.5 年間 (1961 年～2012 年 6 月) の擬似発生数を分析し、F スケール毎に発生率 (対象 F スケールの発生数 / 擬似発生数) を地域別にプロットしたものである。太平洋側と北日本とでは竜巻の全発生数に大差はないことから、この発生率で対象 F スケール竜巻の発生しやすさを概ね把握することができる。F スケールが大きくなるほど指数的に頻度が低減しているが、F3 規模の発生率は、茨城県以西の太平洋側・九州沿岸では、その他の地域に比べ 1 桁程度発生率が高くなっており、突風関連指数の分析結果と整合していると考えられる。また、日本海側沿岸や東北太平洋側・下北半島では F3 竜巻が発生していないためさらに頻度が小さくなることが予想できる。



第 25 図 各 F スケールの発生率

突風関連指数による大規模な竜巻形成につながる環境場の発生頻度分析を行った結果、貯蔵施設の立地地域は、茨城県以西の太平洋沿岸よりも1～2桁以下の頻度となることが分かった。

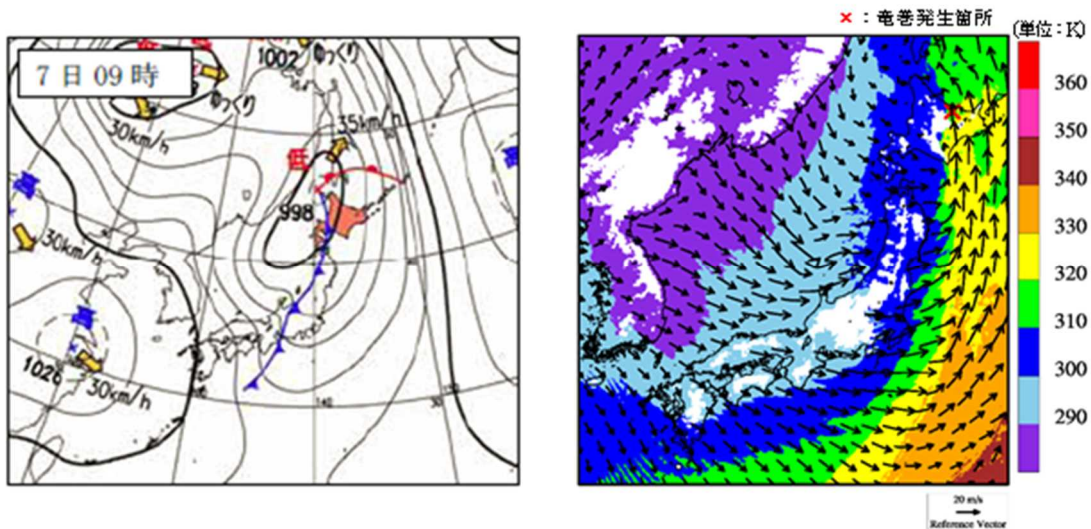
これより、スーパーセルに伴って発生するF3規模の大規模な竜巻の発生しやすい環境場の発生頻度分布の観点からも、設定した竜巻検討地域は茨城県以西の太平洋沿岸と比較して地域特性に大きな違いがあることが明らかになってきた。

3.2.4 佐呂間町で発生した竜巻について

突風関連指数を用いた解析結果から、F3規模以上の竜巻が発生しやすいとされる地域がほぼ判明したが、そのエリアに含まれていない北海道網走支庁佐呂間町において2006年11月7日にF3竜巻が発生している（以下、「佐呂間竜巻」という。）。佐呂間竜巻は、太平洋沿岸で発生した竜巻と比較すると、以下の点で異なっている。

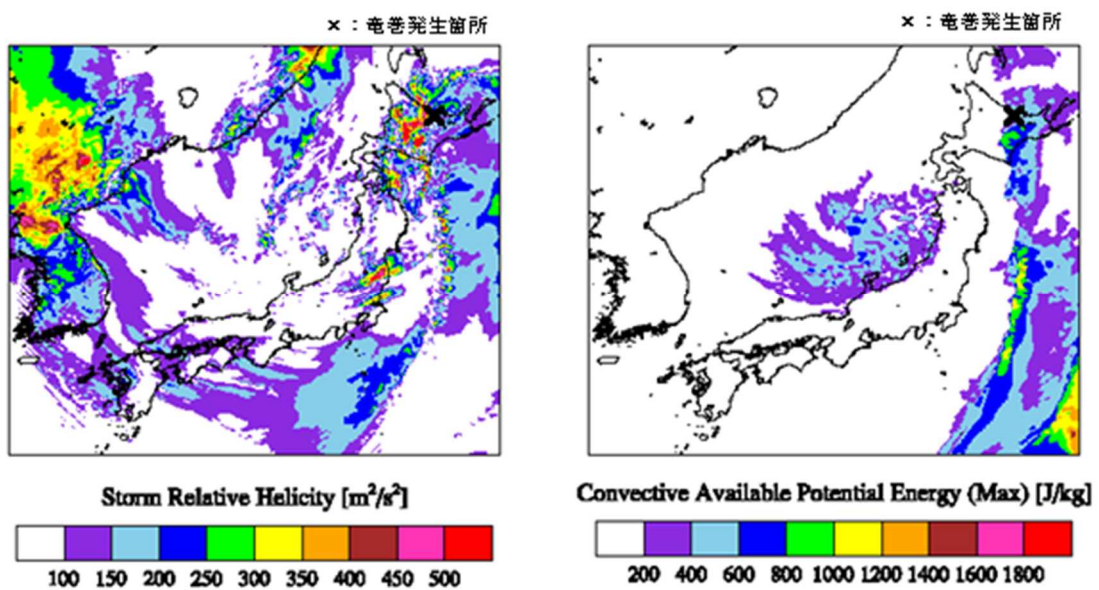
- ・国内で唯一内陸部（丘陵地の麓）において発生した竜巻である。
- ・F3竜巻としては継続時間（1分）と移動距離（約1.4km）が非常に短かった。

第26図に、佐呂間竜巻発生時の天気図及び500m高度における風向、風速及び相当温位の分布について示す。佐呂間竜巻の発生した地域は、太平洋側からの暖湿流が小高い丘を越えて流入するような地形になっており、平野部の冷気流とぶつかることにより大きな上層・下層間の風向差が生じる環境場となっていた。竜巻が発生した2006年11月7日には、第26図の天気図に示すように北海道の北の海上で猛烈に発達しつつある低気圧から南北にのびる寒冷前線が西から東に通過しており、寒冷前線の西側では北西～西よりの冷たい風（青、紫等の寒色系）が、東側では南よりの暖かい風（黄、緑等の暖色系）が吹いており、気温差と風の収束により積乱雲が発生・発達しやすい状況にあったと考えられる。



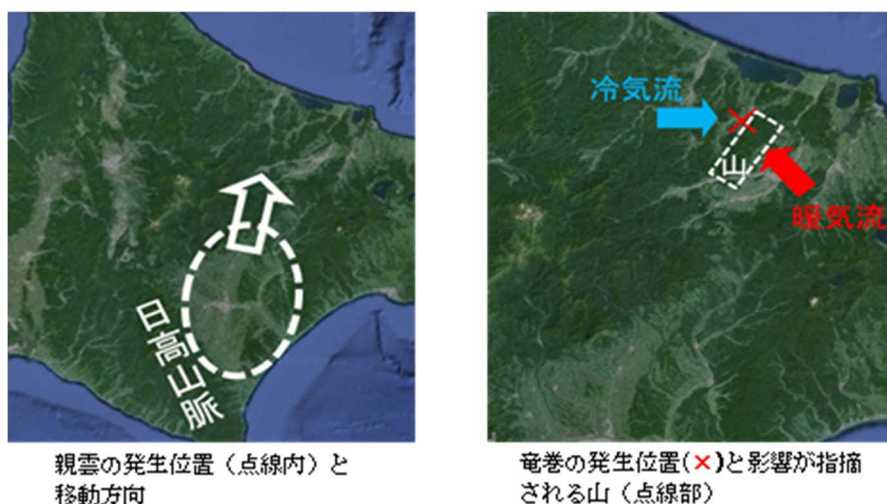
第 26 図 佐呂間竜巻発生時天気図及び風向，風速，相当温位の分布(海拔 500m 高度)

また，第 27 図に SReH 及び最大 CAPE について示す。道東やオホーツク海沿岸地方には太平洋側から暖かく，不安定な空気塊が流入している。第 27 図に示すように大気不安定度は道東の中でも南側で高くなっており，非常に高い風のシア（高い SReH）と相まって親雲が発達しやすい状況が解析されている。なお，同日に，周辺地域において 2 個の小さな竜巻も発生した。日本海側の中でも能登半島周辺より北側で季節風が吹き込み，大気がやや不安定になっている（CAPE が高めている）が，SReH が低いので道東やオホーツク海沿岸地方の状況とは異なると思われる。



第 27 図 佐呂間竜巻発生時の SReH 及び最大 CAPE

このような状況下において、寒冷前線の東側の暖域内である日高山脈東側において、山を越えた冷気流と太平洋側の暖気流がぶつかる地点で雲頂の高い発達した積乱雲が発生し、ここで発生した親雲が日高山脈沿いに北上しながら持続的に発達していき、佐呂間地域でF3規模の竜巻を形成するに至ったものと考えられる。(第28図)



第28図 親雲の発生箇所と移動方向及び竜巻の発生箇所

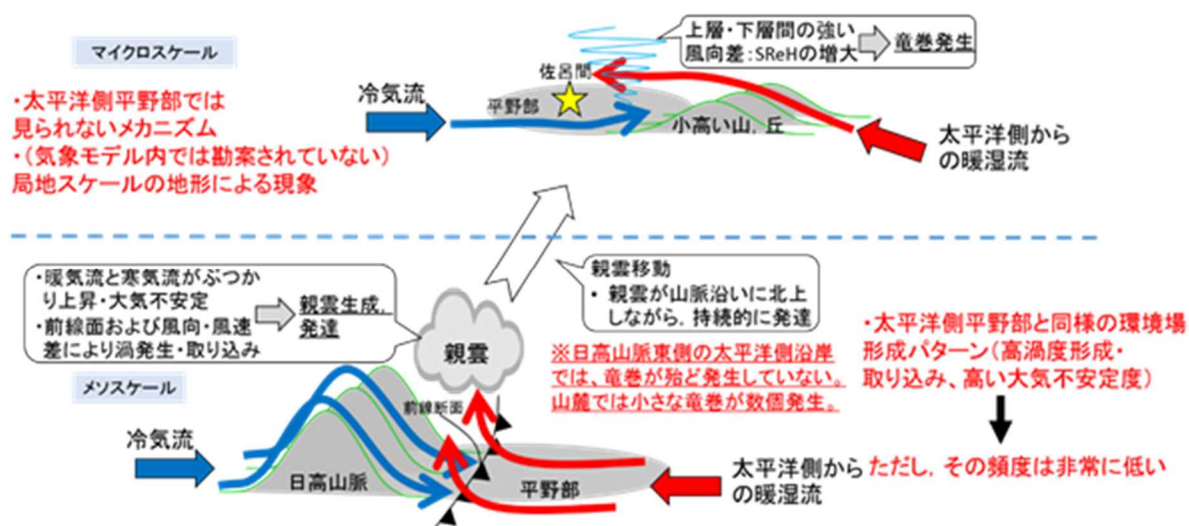
佐呂間竜巻の発生メカニズムについて、図2-27のように模式的に示す。第26図に示したように、当竜巻発生時においては太平洋側からの段気流が道東・オホーツク地方に流入している環境下で高いSReHを伴う寒冷前線が通過しており、先に検討したSReHとCAPEの関係(第19図)で示すように、SReH、CAPEともに一定の高さを保持していた。この点においては、太平洋側で過去に発生したF3竜巻の環境場の特徴と同様の特徴を有すると考えられる。ただし、CAPEについては、第27図に示したように、SReHとは異なり降水域が発達した日高山脈の東側に広く高い値をとっているわけではなかった。また、加藤(2008b)らの周辺地形によるマイクロスケールの環境場の解析結果から、以下のとおり発生位置の南東側、風上側に位置する尾根状地形による影響が竜巻発生に寄与していることが指摘されている。

「下層での鉛直シアの強化は、ガストフロントの前面下層の気圧低下による水平風加速に加えて、強い鉛直渦度生成領域の風上(南南東)側に南南西～北北東に伸びる最大標

高 600 m 以上で幅 10 km ほどの尾根による山岳波の影響を少なからず受けている。実際の竜巻発生位置の風上側にも同様な尾根が存在していることから、佐呂間竜巻は地形の影響を受けて発生したと考えられる。」

マイクロスケールの効果は環境場では考慮できない（解像できない）ため、この影響により両指数の値は特に SReH において第 19 図でプロットした結果よりも高まっている可能性が高いと考えられる。

オホーツク海沿岸地方は、北海道の中でも F2 規模以上の竜巻であれば本州北日本と同等の頻度で環境場が形成されやすい地域であるが、F3 規模以上の竜巻に対しては環境場が形成されがたい、つまり F3 規模に至る程度に大気不安定な空気塊の流入と高渦度を有した総観場の通過が同時に発生する頻度が極めて低い。佐呂間竜巻が地形影響を受けていることを踏まえると、竜巻発生を観点とした気候としては、この地域で F3 規模の竜巻発生に適した環境場は極めて生起しがたく、佐呂間竜巻発生時においても F3 規模竜巻の発生には（特に最大 CAPE においては）微妙な環境場であったが、近隣の周辺地形の影響を強く受けて F3 規模の竜巻発生に至ったと解釈するのが妥当であると考えられる。



第 29 図 佐呂間竜巻の発生メカニズムに関する模式図

このように、佐呂間竜巻の発生メカニズムは、太平洋側沿岸域にて発生している F3 竜巻のメカニズムとは大きく異なっており、竜巻の持続時間・被害域長さも大きく異なっていることから、この竜巻は、基準竜巻設定で対象としている地域性・空間スケールよりも局地的・小さな空間スケールを有する地形影響を受けたものであると考えられる。このことから、佐呂間竜巻のような竜巻が発生するかどうかについては、当時の環境場（総観場(寒冷前線)、気流場、大気不安定度)と周辺地形の類似性を確認すればよいと考えられる。確認のポイントとしては、第 29 図よりこれまでに検討した環境場の分析結果を踏まえ以下の 2 点が考えられる。

- ・太平洋側からの暖湿流が高標高山岳等に遮断されずに直接流入しうる地域である。
- ・近隣地形（数 km 程度四方の範囲）において、（太平洋側からの）暖気流の流入方向に尾根状の丘・山（凡そ標高 600m 以上、幅 10km 程度）が存在すること。

貯蔵施設周辺の地形を考慮すると、太平洋側からの暖気流が直接流入してくる方位（施設の南東方向）には該当するような尾根状の山等は存在せず、また沿岸は津軽海峡側に面しているため太平洋からの暖気流が直接流入することも考えにくい。このことから、貯蔵施設周辺の地形から佐呂間竜巻と同様な竜巻が発生するような状況は考えにくい。

以上の検討結果より、竜巻発生要因及び発生する竜巻の規模には地域性があることが確認され、その観点から貯蔵施設の竜巻検討地域として、北海道南部から東北地方の太平洋側沿岸を竜巻検討地域として設定することは妥当であることが確認できたと考えられる。

参考文献

- (1)Bluestein, H. B., 2013: Severe Convective Storms and Tornadoes. Springer, 456 pp.
- (2)Brady, R. H., and E. J. Szoke, 1989: A case study of nonmesocyclone tornado development in northeast Colorado: similarities to waterspout formation. *Mon. Wea. Rev.*, 843-856.
- (3)Browning, K. A., 1964: Airflow and precipitation trajectories within severe local storms which travel to the right of the winds. *J. Atmos. Res.*, 21, 634-639.
- (4)Bunkers, M. J., B. A. Klimowski, J. W. Zeitler, R. L. Thompson, and M. L. Weisman, 2000: Predicting supercell motion using a new hodograph technique. *Wea. Forecasting*, 15, 61-79.
- (5)Burgess, D. W., M. A. Magsig, J. Wurman, D. C. Doswell, and Y. Richardson, 2002: Radar observations of the 3 May 1999 Oklahoma City tornado. *Wea. Forecasting*, 17, 456-471.
- (6)Chuda, T., and H. Niino, 2005: Climatology of environmental parameters for mesoscale convections in Japan. *J. Meteor. Soc. Japan*, 83, 391-408.
- (7)Davies, J. M., 1993: Hourly helicity, instability, and EHI in forecasting supercell tornadoes. 17th Conf. on Severe Local Storms, St. Louis, MO, Amer. Meteor. Soc., 107-111.
- (8)Davis-Jones, R., D. Burgess, and M. Foster, 1990: Test of helicity as a tornado forecast parameter. 16th Conf. on Severe Local Storms, Kananaskis Park, AB., Canada, Amer. Meteor. Soc., 588-592.
- (9)Doswell III, C. A., and J. S. Evans, 2003: Proximity sounding analysis for derechos and supercells: an assessment of similarities and differences. *Atmos. Res.*, 67-68, 117-133.
- (10)Dotzek, N., M. V. Kurgansky, J. Grieser, B. Feuerstein, and P. Nevir, 2005: Observational evidence for exponential tornado intensity distributions over specific kinetic energy. *Geophys. Res. Letters*,

- 32, L24813, doi:10.1029/2005GL024583.
- (11)Fujita, T. T., 1981: Tornadoes and downbursts in the context of generalized planetary scale. *J. Atmos. Sci.*, 38, 1511-1534.
- (12)Klemp, J. B., and R. B. Wilhelmson, 1978: Simulations of right- and left-moving storms produced through storm splitting. *J. Atmos. Sci.*, 35, 1097-1110.
- (13)Lee, B. D., and R. B. Wilhelmson, 1997: The numerical simulation of nonsupercell tornadogenesis. Part II: Evolution of a family of tornadoes along a weak outflow boundary. *J. Atmos. Sci.*, 54, 2387-2415.
- (14)Mashiko, W., H. Niino, and T. Kato, 2009: Numerical simulation of tornadogenesis in an outer-rainband minisupercell of typhoon Shanshan on 17 September 2006. *Mon. Wea. Rev.*, 137, 4238-4260.
- (15)Moncrieff, M., and M. J. Miller, 1976: The dynamics and simulation of tropical cumulonimbus and squall lines. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 102, 373-394.
- (16)Noda, A. T., and H. Niino, 2010: A numerical investigation of a supercell tornado: Genesis and vorticity budget. *J. Meteor. Soc. Japan*, 88, 135-159.
- (17)Onogi, K., J. Tsutsui, H. Koide, M. Sakamoto, S. Kobayashi, H. Hatsushika, T. Matsumoto, N. Yamazaki, H. Kamahori, K. Takahashi, S. Kadokura, K. Wada, K. Kato, R. Oyama, T. Ose, N. Mannoji and R. Taira, 2007: The JRA-25 Reanalysis. *J. Meteor. Soc. Japan*, 85, 369-432.
- (18)Orlanski, I., 1975: A rational subdivision of scales for atmospheric processes. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 56, 527-530.
- (19)Ramsdell, J. V. Jr., and J. P. Rishel, 2007: Tornado climatology of the contiguous United States. NUREG/CR-4461, Revision 2.
- (20)Rasmussen, E. N.: 2003: Refined supercell and tornado forecast parameters. *Wea. Forecasting*, 18, 530-535.

- (21) Rasmussen, E. N., and D. Blanchard, 1998: A baseline climatology of sounding-derived supercell and tornado forecast parameters. *Wea. Forecasting*, 13, 1148-1164.
- (22) Roberts, R. D., and J. W. Wilson, 1995: The genesis of three nonsupercell tornadoes observed with dual-Doppler radar. *Mon. Wea. Rev.*, 123, 3408-3436.
- (23) Rotunno, R., and J. B. Klemp, 1985: On the rotation and propagation of simulated supercell storms. *J. Atmos. Sci.*, 42, 271-292.
- (24) Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, W. Wang, and J. G. Powers: A description of the advanced research WRF version 2. NCAR Tech. Note, NCAR/TN-468+STR, 88 pp., 2005.
- (25) Suzuki, O., H. Niino, H. Ohno, and H. Nirasawa, 2000: Tornado-producing mini supercells associated with Typhoon 9019. *Mon. Wea. Rev.*, 128, 1868-1882.
- (26) Trapp, R. J., 2013: *Mesoscale-Convective Processes in the Atmosphere*. Cambridge, 346 pp.
- (27) U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION: REGULATORY GUIDE 1.76, 2007: Design-Basis Tornado and Tornado Missiles for Nuclear Power Plants, Revision 1.
- (28) Wakimoto, R. M., and J. W. Wilson, 1989: Non-supercell tornadoes. *Mon. Wea. Rev.*, 117, 1113-1140.
- (29) 飯塚義浩, 加治屋秋実, 2011: 数値予報資料から求めた竜巻に関連する大気環境指数の統計的検証. *天気*, 58, 19-30.
- (30) 大野久雄, 2001: *雷雨とメソ気象*. 東京堂出版, 309 pp.
- (31) 原子力規制委員会, 「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」(原規技発第13061911号, 2013年6月19日)
- (32) 加藤輝之, 2008a: 竜巻発生の環境場に関する研究(I) - 竜巻をもたらす発生環境に関する統計的研究 -, 平成19年度科学技術振興調整費 重要政策課題への機動的対応の推進, 6-12.
- (33) 加藤輝之, 2008b: 竜巻発生の環境場に関する研究(III) - スーパーセルを

- 伴う竜巻の発生機構の研究－，平成 19 年度科学技術振興調整費 重要政策課題への機動的対応の推進，39-44.
- (34) 杉本聡一郎，野原大輔，平口博丸，2014a：国内既往最大規模の竜巻を対象とした発生頻度の地域性について．2014 年度保全学会年次学術講演会，395-402.
- (35) 杉本聡一郎，野原大輔，平口博丸，2014b：突風関連指数を用いた大きな竜巻の発生環境場の地域性に関する検討．2014 年度日本気象学会春季大会講演予稿集，B464.
- (36) 瀧下洋一，2011：竜巻発生確度ナウキャスト・竜巻注意情報について－突風に関する防災気象情報の改善－．測候時報，78，57-93.
- (37) 東京工芸大学：平成 21～22 年度原子力安全基盤調査研究(平成 22 年度)「竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究」平成 23 年 2 月
- (38) 新野 宏，2007：竜巻．天気，54，933-936.
- (39) 橋本篤，平口博丸，豊田康嗣，中屋耕，2011：温暖化に伴う日本の気候変化予測（その 1）－気象予測・解析システム NuWFAS の長期気候予測への適用性評価－．電力中央研究所報告 N10044，22pp.
- (40) 橋本篤，平口博丸，田村英寿，服部康男，松梨史郎，2013：領域気候モデルを用いた過去 53 年間の気象・気候再現．電力中央研究所報告，N13004，18 pp.

4. 基準竜巻・設計竜巻の設定

基準竜巻の設定にあたっては、ガイド及びガイド解説に基づき、過去に発生した竜巻の規模、頻度、最大風速の年超過確率等を考慮して適切に設定することとし、日本において過去に発生した竜巻による最大風速(V_{B1})、及び竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速(V_{B2})とを比較し、風速の大きい値を基準竜巻の最大風速(V_B)として設定する。これに、貯蔵施設及び周辺の立地条件による地形効果を考慮して設計竜巻の最大風速(V_D)を設定する。

4.1 過去に発生した竜巻による最大風速について

4.1.1 竜巻データの整理

気象庁竜巻データベース(1961年～2012年6月)をもとに、過去の竜巻データについて調査した。これに以下の処理を実施することによりデータの整理を行った。

- ・気象庁竜巻データベースには、年代別、都道府県別等のコンテンツがあるが、都道府県別のデータには詳細情報(特に発生及び消滅地点の緯度経度情報等)の記載がないデータもあり、竜巻検討地域での発生を正確に把握するため、年代別の事例一覧より、詳細情報の記載があるデータのみを考慮する。
- ・気象庁竜巻データベースのデータには、現象区別において竜巻以外の突風データがあるため、現象区別が「竜巻」「竜巻または漏斗雲」「竜巻またはダウンバースト」であるものについて抽出する。
- ・竜巻風速のレンジについては、前述したFスケールを参照とする。

4.1.2 竜巻データによる最大風速の抽出

整理した過去の竜巻発生データより、日本において過去に発生した竜巻の最大風速はF3規模であった(第4表)。これより、日本において過去に発生した竜巻による最大風速(V_{B1})はF3スケールの最大風速である92 m/sとなる。

第4表 日本で過去に発生した最大竜巻の一覧

発生日時	発生場所				藤田 スケール
	緯度	経度	都道府県	市町村	
2012年05月06日 12時35分	36度6分38秒	139度56分44秒	茨城県	常総市	F3
2006年11月07日 13時23分	43度58分39秒	143度42分12秒	北海道 網走支庁	常呂郡 佐呂間町	F3
1999年09月24日 11時07分	34度42分4秒	137度23分5秒	愛知県	豊橋市	F3
1990年12月11日 19時13分	35度25分27秒	140度17分19秒	千葉県	茂原市	F3
1971年07月07日 07時50分	35度52分45秒	139度40分13秒	埼玉県	浦和市	(F3)
1990年02月09日 15時15分	31度15分38秒	130度16分35秒	鹿児島県	枕崎市	(F2-F3)

藤田スケールは、ア) 被害の詳細な情報等から推定できたもの、イ) 文献等からの引用または被害のおおまかな情報等から推定したもの、があり、F2以上の事例ではア) とイ) を区別し、イ) の場合には値を括弧で囲んでいる。

4.1.3 最大風速の設定

3.1.2における発生竜巻の抽出の結果、設定した竜巻検討地域内で1961年～2012年6月に発生事例として把握された竜巻の総数は16個であった。(第5表)

このうち、最も大きな規模のものはFスケールにおけるF2(50 m/s～69 m/s)である。

一方、竜巻影響評価ガイドの原則に従い、日本で過去(1961年～2012年6月)に発生した最大規模のものは、4.1.2の第4表よりF3(70m/s～92m/s)である。

前者は、基準竜巻の設定に用いたデータが過去の記録に基づくものであること及び突風関連指数による解析は相対的な傾向を把握するためのものであることを踏まえ、保守性を考慮し後者の最大風速92 m/sを採用し、 $V_{B1}=92$ m/sとする。

第5表 竜巻検討地域内で1961年～2012年6月に観測された竜巻

No.	現象 区別	発生日時	発生場所			Fスケール	被害幅 (m)	被害長さ (km)	総観場
			緯度(北緯)	経度(東経)	都道府県				
(F2相当)									
1	竜巻	1965年09月05日11時40分	41度17分30秒	141度40分15秒	青森県	むつ市	20～35	1.5～2.0	閉塞前線
2	竜巻	1980年10月31日09時30分	42度25分30秒	142度13分24秒	北海道日高支庁	沙流郡門別町	不明	不明	閉塞前線
3	竜巻	1994年10月05日06時35分	42度27分29秒	142度10分23秒	北海道日高支庁	沙流郡門別町	20～30	2.5～3.0	寒冷前線
4	竜巻	2004年10月22日16時50分	42度25分53秒	142度12分42秒	北海道日高支庁	沙流郡門別町	不明	0.4～0.5	寒冷前線, 暖気の移流
(F1相当)									
5	竜巻	1992年08月07日16時04分	38度51分30秒	141度40分15秒	宮城県	本吉郡唐桑町	300～400	0.6～0.7	局地性じょう乱, 雷雨(熱雷)
6	竜巻	1994年10月05日06時15分	42度27分43秒	142度9分39秒	北海道日高支庁	沙流郡門別町	50～60	1	寒冷前線
7	竜巻	1997年10月07日12時50分	42度36分13秒	141度29分9秒	北海道胆振支庁	苫小牧市	200～300	2.5	雷雨(熱雷を除く) 暖気の移流, 寒気の移流
8	竜巻	2006年10月11日22時30分	42度16分34秒	142度30分32秒	北海道日高支庁	新ひだか町	30	0.5	寒冷前線
9	竜巻	2006年10月11日22時15分	42度16分40秒	142度36分21秒	北海道日高支庁	新ひだか町	30	0.4	寒冷前線
10	竜巻	2006年11月07日11時40分	42度25分37秒	142度13分22秒	北海道日高支庁	沙流郡日高町	20～100	2.5	寒冷前線, 暖気の移流
11	竜巻	2008年11月07日08時50分	42度8分1秒	142度52分21秒	北海道日高支庁	様似郡様似町	10～20	0.7	寒冷前線
(F0相当)									
12	竜巻	2005年10月02日19時30分	42度29分25秒	140度49分52秒	北海道胆振支庁	伊達市	不明	0.4～0.5	寒冷前線
(陸上不明)									
13	竜巻	2006年11月07日11時20分	42度25分43秒	142度13分38秒	北海道日高支庁	沙流郡日高町	不明	不明	寒冷前線
(海上不明)									
14	竜巻	2003年09月29日14時40分	42度11分0秒	142度43分21秒	北海道日高支庁	(海上)	不明	不明	気圧の谷
15	竜巻	2007年10月04日07時50分	42度18分10秒	140度58分40秒	北海道胆振支庁	(海上)	不明	不明	気圧の谷, 暖気の移流 地形効果
16	竜巻	2007年10月17日07時45分	42度0分0秒	140度56分0秒	北海道渡島支庁	(海上)	不明	不明	気圧の谷, 寒気の移流

藤田スケールは、ア) 被害の詳細な情報等から推定できたもの、イ) 文献等からの引用または被害のおおまかな情報等から推定したもの、があり、F2以上の事例ではア)とイ)を区別し、イ)の場合には値を括弧で囲んでいる。F0～F1の事例では、ア)とイ)の区別は行っていない。

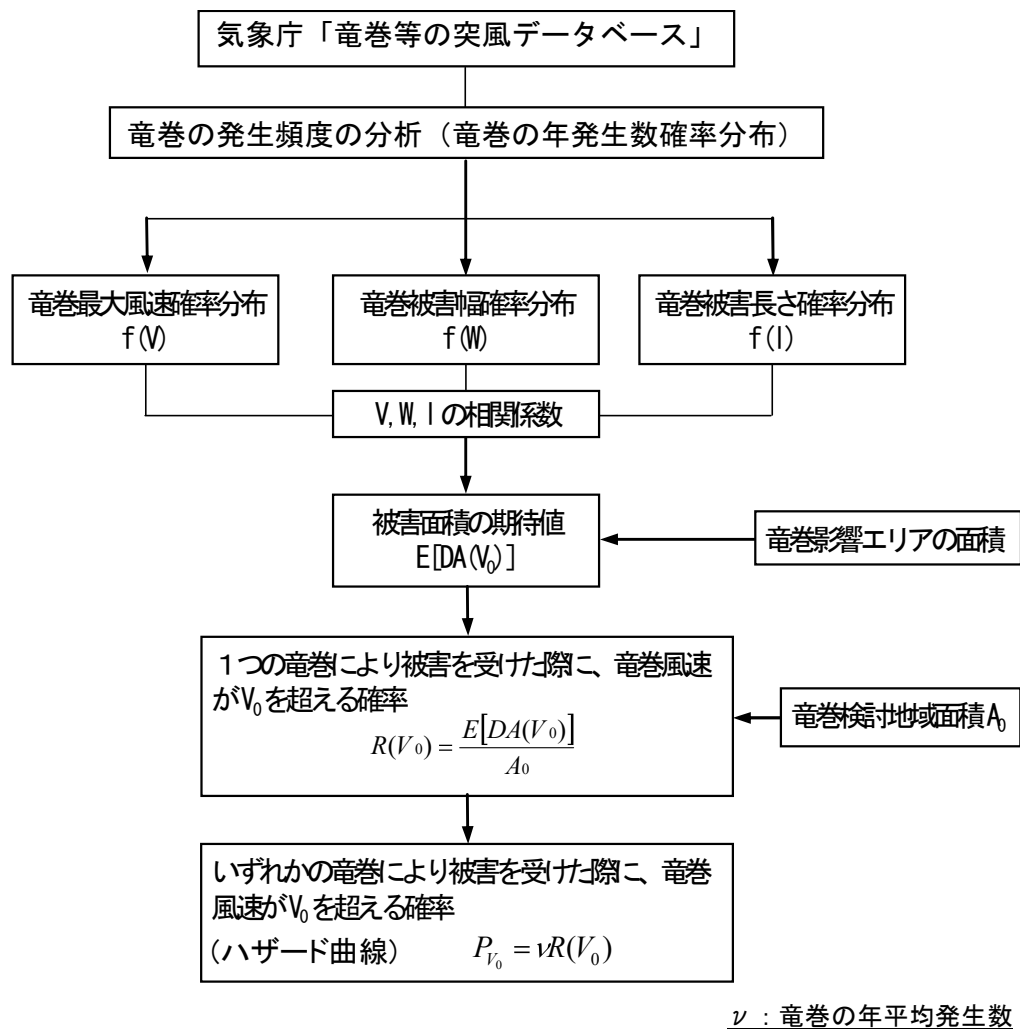
4.2 竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速について

竜巻最大風速のハザード曲線については、ガイドに基づき、竜巻に遭遇しかつ竜巻がある風速以上になる確率モデルの推定法 (Wen & Chu 及び Garson et. al) に基づいて算定した。

また、算定にあたっては東京工芸大委託成果についても併せて参考とした。

4.2.1 ハザード曲線の評価フロー

第 30 図に評価のフローについて示す。本評価は、竜巻の発生頻度の分析、竜巻風速・被害幅・被害長さの確率分布及び相関係数の算定、ならびにハザード曲線の算定によって構成されている。



第 30 図 竜巻ハザード曲線の評価フロー

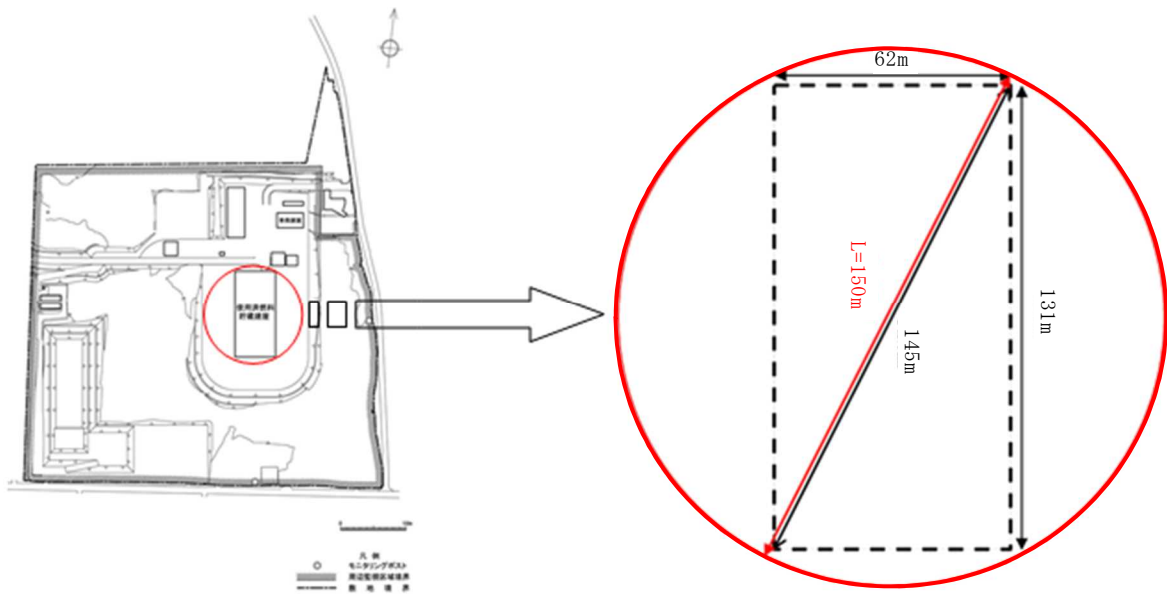
4.2.2 Wen & Chu 及び Garson et. Al の確率モデル推定法

ガイドに基づく Wen & Chu 及び Garson et. Al の確率モデル推定法の概要は以下のとおり。

- ・竜巻影響エリアは、代表幅を直径とする円形状とする。
- ・竜巻年発生数、竜巻風速評価等それぞれに対するデータについては、気象庁竜巻データベースをもとに整理した過去の竜巻発生データによるものとする。
- ・年発生数確率は、以下の2通りについて評価する。
 - ① 1 km に細分化された領域ごとに評価された年発生確率のうち最大値とする場合
 - ② 10km の幅で確率を評価した場合
- ・竜巻の風速特性は、いずれの場合も 10km 幅で抽出した観測データをもとにする。抽出した観測データから最大風速、長さ、幅の対数値の平均、分散共分散行列を算定する。竜巻の大きさを表す特性の確率分布は、これら平均、分散共分散行列に基づいた多変量正規分布に従うものとする。
- ・最大風速、長さ、幅の対数値の平均及び分散共分散行列、竜巻影響エリアの大きさをもとに、風速に依存する期待値を評価する。
- ・得られた年発生確率に期待値を乗じ、ハザード曲線を得る。
- ・得られたハザード曲線において、 10^{-5} での風速を読み取り、竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 (V_{B2})とする。

4.2.3 竜巻影響エリアの大きさ

竜巻影響エリアは、施設の代表幅を直径とする方向性を持たない円形状（第31 図中の赤線枠内）とする。その代表幅 L は、外部事象防護施設である貯蔵建屋の第 31 図に示す領域約 131m × 約 62m の対角線長さ約 145 m を保守的に考慮して、 $L = 150 \text{ m}$ と設定する。



第 31 図 竜巻影響エリア(代表幅 150m)の設定根拠

4.2.4 竜巻の年発生数の確率分布の設定

竜巻の年発生数の確率分布の設定においては，過去の観測データが少ないこと，また，観測年代によって精度が異なることから，下記のとおりを設定する。

(1) 適用データ

気象庁竜巻データベースより，竜巻検討地域における 1961 年～2012 年 6 月までの竜巻発生データ（16 個）を用いる。

(2) 竜巻の発生頻度の補正

気象庁竜巻データベースは，1961 年以降の発生竜巻がデータベース化されているが，観測体制が段階的に強化され，特に 2007 年以降で発生数が非常に多く，海上竜巻の増加も顕著である。

これより，ハザード曲線評価に用いるデータの観測期間を以下の①～③の 3 期間に分け，各年代において F スケールごとに統計量（竜巻発生数，年間平均発生数，標準偏差）を算定する。

- ① 2007 年～2012 年 6 月（5.5 年間）
- ② 1991 年～2012 年 6 月（21.5 年間）
- ③ 1961 年～2012 年 6 月（51.5 年間）

算定結果について第6表に示す。竜巻検討地域内では、1961年以降の51.5年間で16個の竜巻が観測されている。そのうち、F2が4個、F1が7個、F0が1個、大きさ不明が4個である。

第6表 竜巻検討地域において過去に観測された竜巻に関する統計量

			F3	F2	F1	F0	小計	陸上不明	海上不明	合計
過去に観測された竜巻	1961-2012.6 51.5年間	期間内個数	0	4	7	1	12	1	3	16
		年平均	0.00	0.08	0.14	0.02	0.23	0.02	0.06	0.31
		標準偏差	0.00	0.27	0.49	0.14	0.58	0.14	0.31	0.73
	1991-2012.6 21.5年間	期間内個数	0	2	7	1	10	1	3	14
		年平均	0.00	0.09	0.33	0.05	0.47	0.05	0.14	0.65
		標準偏差	0.00	0.30	0.72	0.22	0.81	0.22	0.47	1.01
	2007-2012.6 5.5年間	期間内個数	0	0	1	0	1	0	2	3
		年平均	0.00	0.00	0.18	0.00	0.18	0.00	0.36	0.55
		標準偏差	0.00	0.00	0.43	0.00	0.43	0.00	0.85	0.86

気象庁の観測データは1961年から記録が始まり、その後観測精度が1991年、2007年に段階的に変わっている。その結果、F0やFスケール不明の多くは2007年以降の5.5年間に観測されている。また、F1は半数以上が1991年以降に観測されている。F2以上については、規模が大きいため観測体制が変わったことによる観測数への影響はないと考えられる。

これらを勘案して、以下に示す観測体制が変えられたことによる以下の補正を行い、推定51.5年間の統計量を評価する。

(a) F2以上の竜巻については、被害規模が大きく見逃されることが少なかったとして、1961年以降の全期間の統計量をもとにする。

→F3：0個， F2：4個 （観測期間：51.5年）

(b) F1の竜巻については、観測体制が整備された1991年以降の年間発生数がそれ以前の30年間の発生数を上回ることから、1991年以降の統計量をもとにする。

→F1：7個 （観測期間：21.5年）

(c) F0 及び大きさ不明の竜巻については、観測体制が強化される以前は被害が小さく見逃された可能性が大きいことから、観測体制が強化された2007年以降の統計量をもとにする。

→F0：0個， 陸上不明：0個， 海上不明：2個 （観測期間：5.5年）

(d) 51.5年間の発生数について、各統計量の観測期間との比率からFスケール毎に推計する。個数であるため、小数点以下については切り上げて整数値とする。

→F3：0個（ $0 \times 51.5 / 51.5 = 0$ ）

F2：4個（ $4 \times 51.5 / 51.5 = 4$ ）

F1：17個（ $7 \times 51.5 / 21.5 = 16.77$ ）

F0：0個（ $0 \times 51.5 / 5.5 = 0$ ）

陸上不明：0個（ $0 \times 51.5 / 5.5 = 0$ ）

海上不明：19個（ $2 \times 51.5 / 5.5 = 18.73$ ）

(e) 海上竜巻でFスケール不明の場合、被害痕跡等が残っていないため、そのFスケールを推定することは難しい。そこで、沿岸部近傍では竜巻の発生状況については陸上と海上で変わらないと仮定し、Fスケール不明の海上竜巻については、陸上のFスケール別発生比率で按分する。個数であるため、小数点以下については切り上げて整数値とする。

→(d)で推定した51.5年間の海上竜巻発生数19個について、陸上竜巻の51.5年間のFスケール別発生数の比で按分する。（F3：0個，

F2：4個， F1：17個， F0：0個）

F2：4個（ $19 \times 4 / (4 + 17) = 3.62$ ）

F1：16個（ $19 \times 17 / (4 + 17) = 15.38$ ）

(f) (e)の算出結果を、各Fスケールで発生した竜巻発生数に加算する。

→F3：0個， F2：8個（ $4 + 4$ ）， F1：33個（ $17 + 16$ ）， F0：0個

以上の補正を行った推定 51.5 年間の統計量について第 6 表に追記のうえ、第 7 表として示す。

第 7 表 推定 51.5 年間の竜巻についての発生数に関する統計量

			F3	F2	F1	F0	小計	陸上不明	海上不明	合計
過去に観測された竜巻	1961-2012.6 51.5 年間	期間内個数	0	4	7	1	12	1	3	16
		年平均	0.00	0.08	0.14	0.02	0.23	0.02	0.06	0.31
		標準偏差	0.00	0.27	0.49	0.14	0.58	0.14	0.31	0.73
	1991-2012.6 21.5 年間	期間内個数	0	2	7	1	10	1	3	14
		年平均	0.00	0.09	0.33	0.05	0.47	0.05	0.14	0.65
		標準偏差	0.00	0.30	0.72	0.22	0.81	0.22	0.47	1.01
	2007-2012.6 5.5 年間	期間内個数	0	0	1	0	1	0	2	3
		年平均	0.00	0.00	0.18	0.00	0.18	0.00	0.36	0.55
		標準偏差	0.00	0.00	0.43	0.00	0.43	0.00	0.85	0.86
51.5 年間での換算値		期間内個数	-	-	17	0		0	19	-
推定 51.5 年間の竜巻	推定 51.5 年間 (陸上竜巻)	期間内個数	0	4	17	0	21			
		年平均	0.00	0.08	0.33	0.00	0.41			
		標準偏差	0.00	0.27	0.72	0.00	0.77			
	海上不明分の振り分け	比率	0.00	0.19	0.81	0.00	1.00			
		期間内個数	0	4	16	0	20			
	推定 51.5 年間 (全竜巻)	期間内個数	0	8	33	0	<u>41</u>			
		年平均	0.00	0.16	0.64	0.00	<u>0.80</u>			
標準偏差		0.00	0.38	1.01	0.00	<u>1.08</u>				

※表中の網掛け部は、気象庁による観測体制が変えられたことによる補正を施す元となるデータ

竜巻検討地域において、51.5 年間で 16 個の竜巻が観測されたことに対し 41 個の竜巻が発生したと推定した。また、F1, F2 の観測数はそれぞれ 17 個及び 4 個であったが、F スケール不明の竜巻を振り分けたため 33 個及び 8 個と推定した。

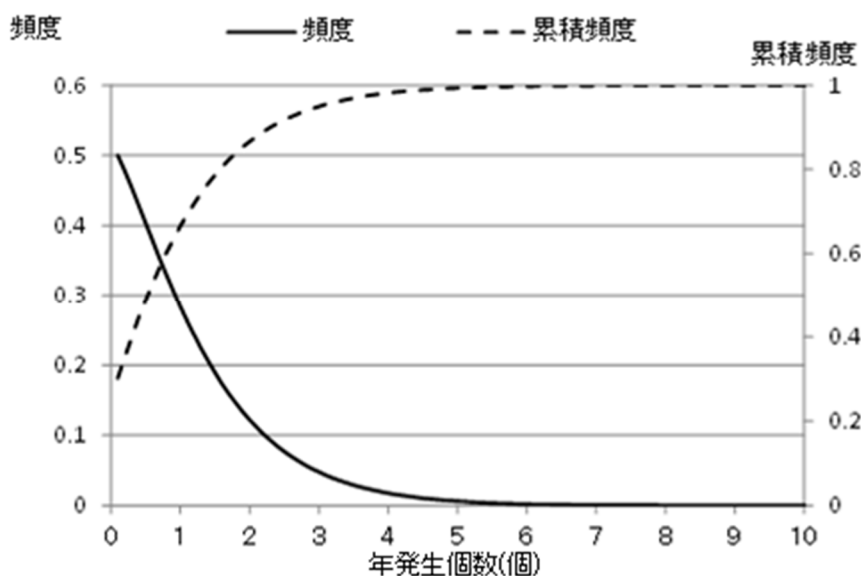
(3) 年発生数の確率密度分布の設定

竜巻は、その発生が多い年がある一方で全く発生していない年が続く場合があり、発生数の変動が大きい。このような特徴を考慮し、東京工芸大委託成果を参考としてポリヤ分布による推定 51.5 年間の発生数 41 個の年平均値(0.80)及び標準偏差(1.08)に対する分布状況について確認した。その

結果を第 32 図に示す。

ガイド解説においては、少なくとも 1 km 範囲毎に竜巻の年発生数の確率分布を算定するとしている。しかし、1 km 範囲に分けると各範囲における竜巻発生数のデータが少なくなり、統計的な傾向分析を実施するための十分なデータ数が得られず、1 km 範囲ごとにハザード曲線を算定した場合その精度の低下が懸念される。本検討においては、今回採用した F スケール不明の海上竜巻に対する取扱いにより、F2 竜巻は 4 個観測されたことに対して 8 個発生したものと推定しており、保守性を確保しているものとする。

以上から、基本的には竜巻検討地域における陸側 5 km 及び海側 5 km の計 10 km 幅でのデータをもとにポリヤ分布により年発生数の確率密度分布を求めることとする。竜巻風速の確率密度分布についても同様とする。



第 32 図 竜巻の年発生数をポリヤ分布で適合させた結果

4.2.5 竜巻最大風速，被害幅，被害長さの確率分布の設定

(1) 被害幅，被害長さに関する統計量

竜巻発生数と同様に推定 51.5 年間のデータをもとにした，被害幅，被害長さに関する統計量を第 8 表及び第 9 表に示す。被害幅，被害長さの分析に利用可能なデータ数は，風速 (F スケール) がわかるデータに比べて少ないため，先に作成した推定 51.5 年間の竜巻発生数と対応した被害幅，被害長さの統計量の分析は，以下の手順で行った。

- (a) 観測データ数を確保するために，1961 年以降の被害幅，被害長さデータをもととし，そのデータを F スケールごとに仕分ける。
- (b) 各 F スケールに対し，上記で抽出された被害幅や被害長さのデータを大きい順に並び替え，51.5 年間の発生数分だけ繰り返しサンプリングを行い，推定 51.5 年間のデータとする。観測データ数の整数倍とならない個数分については大きな値から順にサンプルする。

(例) 被害幅データのサンプリング (被害長さデータについても同様)

F2：期間内 2 個のデータを推定期間内 8 個となるまで計 4 回サンプリング

F1：期間内 7 個のデータを推定期間内 33 個となるまで計 4 回サンプリングし，残りの 5 個 (33-7×4) は値の大きい方から 5 個サンプリングして計 33 個のデータとする。

- (c) 推定 51.5 年間のデータについて，統計量 (平均値と標準偏差) を求める。

第 8 表 竜巻の被害幅の統計量

		F3	F2	F1	F0	合計
1961-2012.6 51.5 年間	期間内個数	0	2	7	0	9
	年平均 (m)	0	33	134	0	112
	標準偏差 (m)	0	4	153	0	140
推定 51.5 年間 (全竜巻)	期間内個数	0	8	33	0	41
	年平均 (m)	0	33	141	0	120
	標準偏差 (m)	0	3	145	0	137

第9表 竜巻の被害長さの統計量

		F3	F2	F1	F0	合計
1961-2012.6 51.5年間	期間内個数	0	3	7	1	11
	年平均(km)	0.00	1.83	1.19	0.50	1.30
	標準偏差(km)	0.00	1.26	0.92	0.00	0.99
推定 51.5年間 (全竜巻)	期間内個数	0	8	33	0	41
	年平均(km)	0.00	2.00	1.23	0.00	1.38
	標準偏差(km)	0.00	1.04	0.87	0.00	0.94

(2) 最大風速，被害幅，被害長さの相関係数

相関係数は，過去に発生した竜巻での，最大風速，被害幅，被害長さの関係を評価することから，繰り返しサンプリングを行った推定 51.5 年間のデータではなく，過去の観測データをもとにその対数値の相関係数を評価する。評価結果を第 10 表に示す。

第 10 表(1) 最大風速・被害幅・被害長さの対数値の相関係数

相関係数の値*	最大風速	被害幅	被害長さ
最大風速	1.000	0.000**	0.394
幅	—	1.000	0.239
長さ	—	—	1.000

* 相関係数マトリクスは対称であるため右上半分のみ値を示し，対角項はその定義から 1.000 とした。

** 負の値-0.340（無相関）であったため保守側に 0.000 とした。

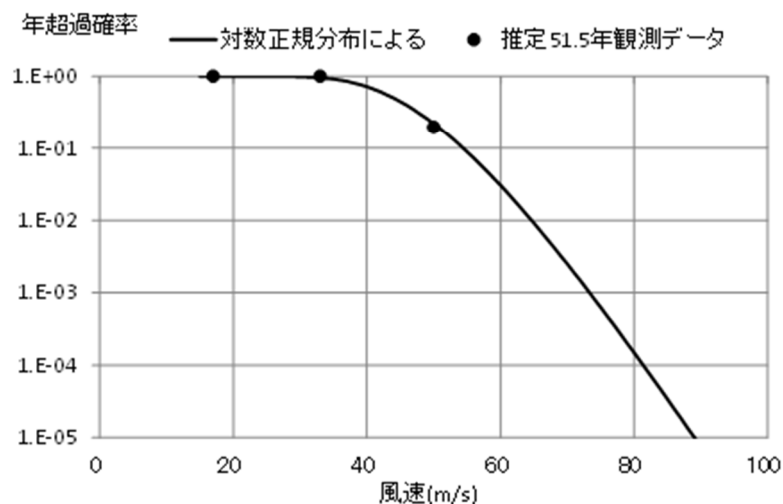
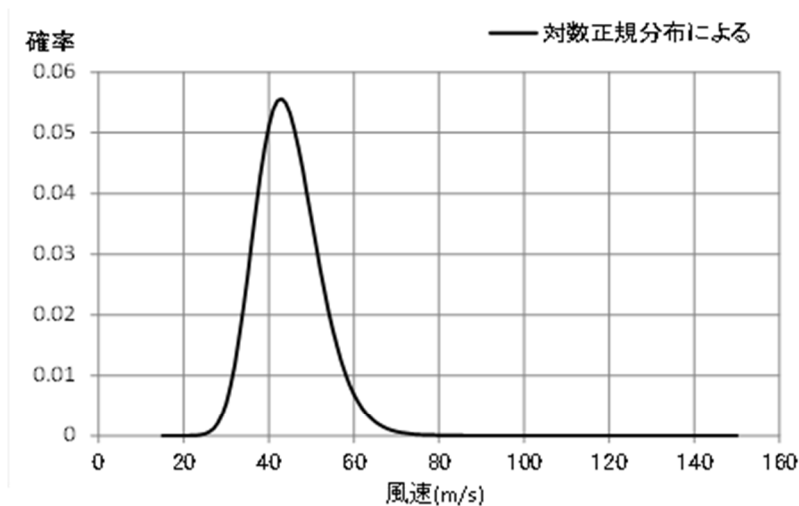
第 10 表(2) 相関係数算定に用いた組合せデータ数

データ数	最大風速	被害幅	被害長さ
最大風速	—	9	11
幅	—	—	9
長さ	—	—	—

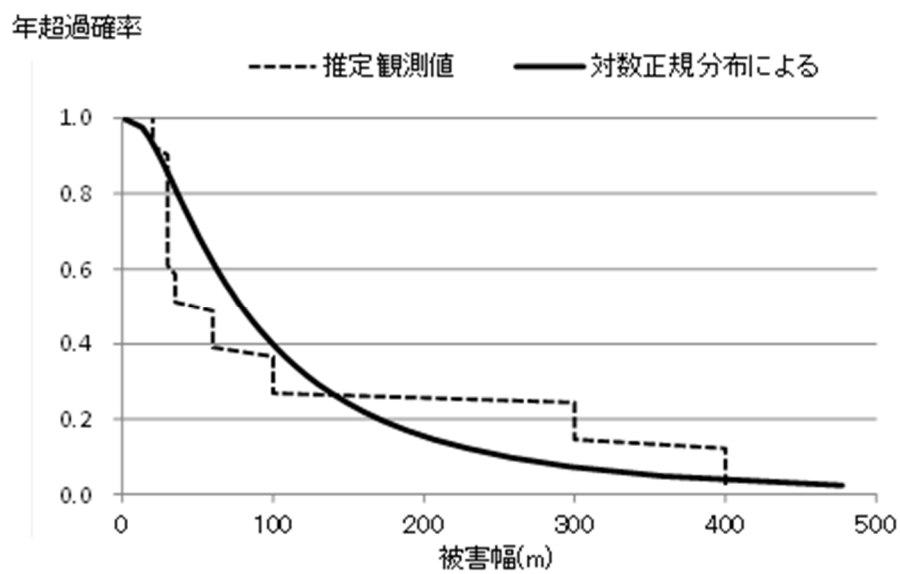
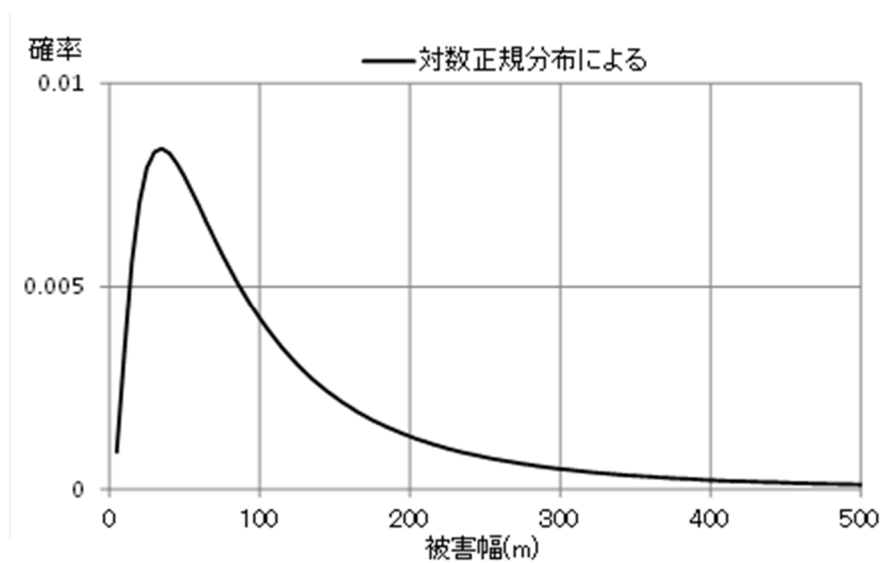
竜巻検討地域においては，最大風速と被害長さの間で 0.39 程度，被害幅と被害長さの間で 0.24 程度の相関が認められた。また，最大風速と被害幅の間は負の値となり逆相関となっている。これは，F1 の被害幅の平均値が約 140 m であるのに対し，F2 の被害幅が約 30 m と小さいことが原因と考えられる。負の値となった相関係数については，保守的に無相関として，値は 0 とした。

(3) 最大風速, 被害幅, 被害長さの確率分布

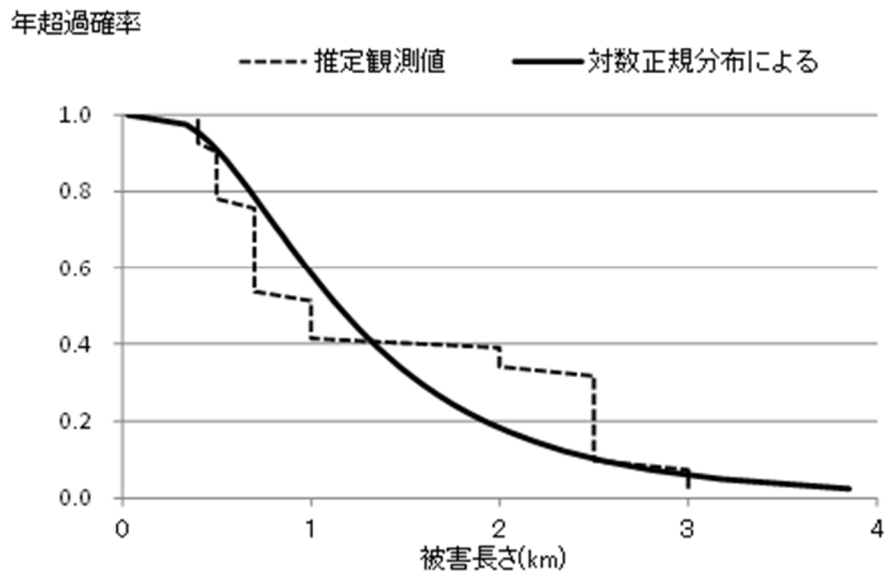
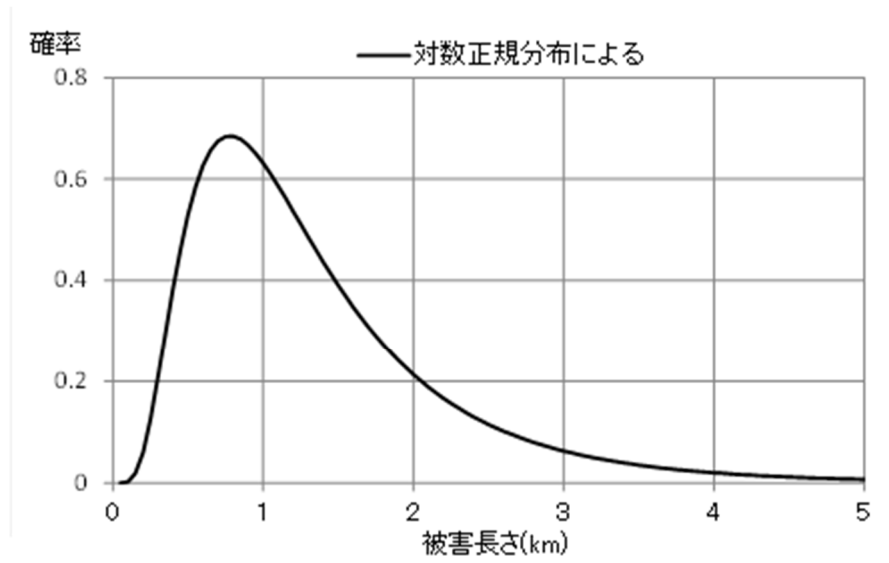
最大風速, 被害幅, 被害長さは, 前記で評価した統計量を有する対数正規分布に従うものとする。それぞれが独立であるとした場合の確率分布と年超過確率について, 第 33 図～第 35 図に示す。最大風速の年超過確率は観測結果がトレースでき, 風速の大きいエリアにおいても不自然な形となっていないことが確認できる。また, 竜巻の被害幅及び長さの年超過確率についても観測結果を概ねトレースしていることが確認でき, 確率密度分布からは中央値近くの値が生じる可能性が高いこと, 非常に大きな値における発生確率が低いことが確認できる。



第 33 図 竜巻風速の確率密度分布 (上) と年超過確率 (下)



第 34 図 竜巻の被害幅の確率密度分布（上）と年超過確率（下）



第 35 図 竜巻の被害長さの確率密度分布（上）と年超過確率（下）

4.2.6 竜巻最大風速のハザード曲線の算定

前記で設定した竜巻の年発生数の確率分布及び最大風速の確率分布をもとに、東京工芸大委託成果を参考とし、以下に示すとおり Garson et al. の方法に沿ってハザード曲線の評価を実施した。

(1) 評価方法

D を検討対象構造物が風速 V_0 以上の竜巻に遭遇する事象とし、ある竜巻が対象構造物を襲い、その竜巻の風速が V_0 以上となる確率を $R(V_0)$ とする。また、ある竜巻の風速が V_0 以上となる面積を $DA(V_0)$ とする。また、その期待値を $E[DA(V_0)]$ にて表す。

- ・前記に基づき、竜巻の最大風速 V 、被害幅 w 、被害長さ l の統計値から、次式の対数正規分布型の確率分布を与える。

$$f(V, w, l) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi})^3 |\Sigma|^{1/2}} \frac{1}{Vwl} \exp\left(-\frac{1}{2}(\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu})^T \Sigma^{-1}(\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu})\right)$$

$$\text{ここで、 } \mathbf{x} = \begin{Bmatrix} \ln(V) \\ \ln(w) \\ \ln(l) \end{Bmatrix}, \quad \boldsymbol{\mu} = \begin{Bmatrix} \mu_V \\ \mu_w \\ \mu_l \end{Bmatrix}, \quad \Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_V^2 & \sigma_V \sigma_w \rho_{Vw} & \sigma_V \sigma_l \rho_{Vl} \\ \sigma_V \sigma_w \rho_{Vw} & \sigma_w^2 & \sigma_w \sigma_l \rho_{wl} \\ \sigma_V \sigma_l \rho_{Vl} & \sigma_w \sigma_l \rho_{wl} & \sigma_l^2 \end{bmatrix}$$

T : 転置行列

\mathbf{x} : 最大風速、被害幅、被害長さの対数値 $\ln(V)$ 、 $\ln(w)$ 、 $\ln(l)$ によるベクトル

$\boldsymbol{\mu}$: 各統計値から評価した最大風速、被害幅、被害長さの対数値の平均からなるベクトル

Σ : $\ln(V)$ 、 $\ln(w)$ 、 $\ln(l)$ から評価した、標準偏差 σ_V 、 σ_w 、 σ_l と相関係数 ρ_{Vw} 、 ρ_{wl} 、 ρ_{Vl} からなる分散共分散行列

- ・得られた平均と分散共分散行列をもとに、竜巻影響エリアの代表幅を考慮し、次式にて、期待値 $E[DA(V_0)]$ を評価する。

$$\begin{aligned} E[DA(V_0)] &= \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty W(V_0) l f(V, w, l) dV dw dl + L \int_0^\infty \int_0^\infty l f(V, l) dV dl \\ &\quad + L \int_0^\infty \int_0^\infty W(V_0) f(V, w) dV dw + S \int_0^\infty f(V) dV \end{aligned}$$

ここで、

L : 竜巻影響エリアの代表幅(約 150 m)

S : 竜巻影響エリアの面積(約 17672 m²)

$f(V,l)$, $f(V,w)$, $f(V)$: $f(V,w,l)$ をもとに各成分を抽出した関数

- 上記の式の右辺第1項は、竜巻の被害幅と被害長さの積(被害面積)を示しており、点構造物に対する被害に対応する。第2項は被害長さと構造物寸法の積、第3項は被害幅と構造物寸法の積であり、面構造物あるいは線状構造物の被害面積を示す。第4項は建物面積に依存する項である。また、無限大までの積分の上限については、幅、長さは対数値の平均 + 4σ(標準偏差)までとし、風速は 120 m/s までとする。
- 被災領域内には、竜巻の被害幅 w のうち風速が V_0 を超える部分の幅を与える次式を考慮する。

$$W(V_0) = \left(\frac{V_{\min}}{V_0} \right)^{1/1.6} w$$

ここで、 V_{\min} は被害が発生し始める風速であり“gale intensity velocity” と呼ばれている。米国国立気象局 NWS においては 34~47 ノット (17.5~24.2m/s) と定義されており、日本の気象庁が使用している風力階級では、風力8が疾強風 (gale: 17.2~20.7m/s, 小枝が折れ風に向かって歩けない)、風力9が大強風 (strong gale: 20.8~24.4m/s, 瓦が飛び煙突が折れる) と分類されている。以上を参考にし、 $V_{\min} = 25$ m/s と設定する。

- 竜巻検討地域の面積 A_0 及び上記の期待値 $E[DA(V_0)]$ から、対象構造物が竜巻による被害を受け、その竜巻の風速が V_0 以上となる確率 $R(V_0)$ を次式にて評価する。

$$R(V_0) = \frac{E[DA(V_0)]}{A_0}$$

- ・発生数がポリヤ分布に従うものとし、年超過確率 P_{V_0} を次式にて評価する。

$$P_{V_0} = 1 - [1 + \beta v R(V_0)]^{-1/\beta} = 1 - [1 - \frac{1}{\beta} (\beta v R(V_0)) + \dots]$$

$$\approx v R(V_0) = \frac{v}{A_0} E[DA(V_0)] = p E[DA(V_0)]$$

ここで、

$$\beta = (\sigma^2 - v) / v^2$$

v : 年平均発生数

σ : 年発生数の標準偏差

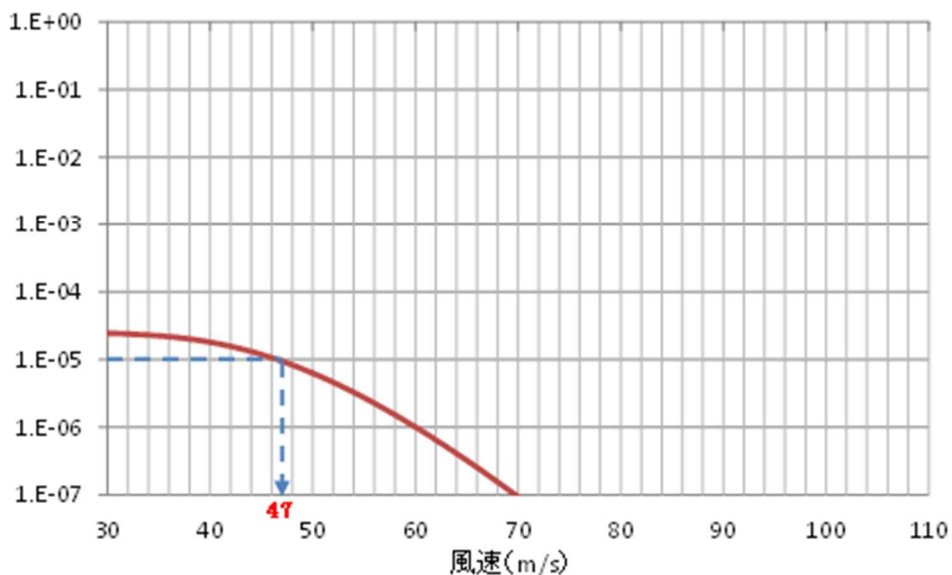
p ($=v/A_0$) : 単位面積当たりの年被災確率

(2) 評価結果

評価したハザード曲線について第 36 図に示す。

このハザード曲線において、年超過確率が 10^{-5} となるときの竜巻風速を読み取る。

年超過確率



第 36 図 竜巻検討地域 10km 幅でのハザード曲線

4.2.7 年超過確率に対応する竜巻最大風速の設定

4.2.6にて得られたハザード曲線より、年超過確率 10^{-5} での風速を読み取り、ハザード曲線による最大風速とする。

これより、竜巻検討地域（10 km幅）でのハザード曲線による最大風速は、47 m/sとなる。

4.2.8 竜巻検討地域内1 km幅での発生状況を考慮した場合

前項までは、竜巻検討地域10 km幅にかかる竜巻をもとに最大風速を評価した。ここでは、ハザード曲線の保守性を持たせるために、竜巻検討地域を1 km幅に区切った場合について算定する。算定は、陸側0 km～1 km及び陸側1 km～2 kmの場合とする。（それ以外の領域ではサンプル数が少なく算定できないため）また、被害長さの統計量は、竜巻の発生地点から消滅地点までの直線が当該1 km幅にかかる長さをもとに算定する。発生地点と消滅地点が同一の場合は、被害長さは0とする。

算定に用いた諸元について第11表及び第12表に示す。なお、いずれのケースにおいても、相関係数については、10 km幅にかかる竜巻で算定した値（第9表）を用いる。

算定したハザード曲線について、10 km幅でのハザード曲線と重ね合わせた図を第37図に示す。得られたハザード曲線において 10^{-5} での風速値を読み取ると、陸側0 km～1 kmで55 m/s、陸側1 km～2 kmで50 m/sとなり、陸側0～1 kmでの風速値55 m/sの方が大きい値であることから、竜巻検討地域内1 km幅におけるハザード曲線による最大風速は、55 m/sとなる。

第 11 表 陸側 0 km～1 km での統計量

(a) 発生数

			F3	F2	F1	F0	小計	陸上 不明	海上 不明	合計
過去 に観 測さ れた 竜巻	1961-2012.6 51.5 年間	期間内個数	0	4	5	1	10	1	0	11
		年平均	0.00	0.08	0.10	0.02	0.19	0.02	0.00	0.21
		標準偏差	0.00	0.27	0.30	0.14	0.45	0.14	0.00	0.50
	1991-2012.6 21.5 年間	期間内個数	0	2	5	1	8	1	0	9
		年平均	0.00	0.09	0.23	0.05	0.37	0.05	0.00	0.42
		標準偏差	0.00	0.30	0.43	0.22	0.59	0.22	0.00	0.67
	2007-2012.6 5.5 年間	期間内個数	0	0	1	0	1	0	0	1
		年平均	0.00	0.00	0.18	0.00	0.18	0.00	0.00	0.18
		標準偏差	0.00	0.00	0.43	0.00	0.43	0.00	0.00	0.43
推定 51.5 年間 の竜 巻	推定 51.5 年間 (陸上竜巻)	期間内個数	0	4	12	0	16			
		年平均	0.00	0.08	0.23	0.00	0.31			
		標準偏差	0.00	0.27	0.43	0.00	0.51			
	推定 51.5 年間 (全竜巻)	期間内個数	0	4	12	0	16			
		年平均	0.00	0.08	0.23	0.00	0.31			
		標準偏差	0.00	0.27	0.43	0.00	0.51			

※表中の網掛け部は、気象庁による観測体制が変えられたことによる補正を施す元となるデータ

(b) 被害幅

		F3	F2	F1	F0	合計
1961-2012.6 51.5 年間	期間内個数	0	2	5	0	7
	年平均	0	33	176	0	135
	標準偏差	0	4	165	0	152
推定 51.5 年間 (全竜巻)	期間内個数	0	4	12	0	16
	年平均(m)	0	33	205	0	162
	標準偏差(m)	0	3	158	0	156

(c) 被害長さ

		F3	F2	F1	F0	合計
1961-2012.6 51.5 年間	期間内個数	0	3	5	1	9
	年平均(km)	0.00	0.82	0.87	0.26	0.79
	標準偏差(km)	0.00	0.29	0.29	0.00	0.32
推定 51.5 年間 (全竜巻)	期間内個数	0	4	12	0	16
	年平均(km)	0.00	0.87	0.91	0.00	0.90
	標準偏差(km)	0.00	0.26	0.28	0.00	0.27

第 12 表 陸側 1 km～2 km での統計量

(a) 発生数

			F3	F2	F1	F0	小計	陸上 不明	海上 不明	合計
過去 に観測 された 竜巻	1961-2012.6 51.5 年間	期間内個数	0	2	3	1	6	0	0	6
		年平均	0.00	0.04	0.06	0.02	0.12	0.00	0.00	0.12
		標準偏差	0.00	0.20	0.31	0.14	0.38	0.00	0.00	0.38
	1991-2012.6 21.5 年間	期間内個数	0	1	3	1	5	0	0	5
		年平均	0.00	0.05	0.14	0.05	0.23	0.00	0.00	0.23
		標準偏差	0.00	0.22	0.47	0.22	0.53	0.00	0.00	0.53
	2007-2012.6 5.5 年間	期間内個数	0	0	0	0	0	0	0	0
		年平均	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		標準偏差	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
推定 51.5 年間の 竜巻	推定 51.5 年間 (陸上竜巻)	期間内個数	0	2	8	0	10			
		年平均	0.00	0.04	0.16	0.00	0.19			
		標準偏差	0.00	0.20	0.47	0.00	0.51			
	推定 51.5 年間 (全竜巻)	期間内個数	0	2	8	0	10			
		年平均	0.00	0.04	0.16	0.00	0.19			
		標準偏差	0.00	0.20	0.47	0.00	0.51			

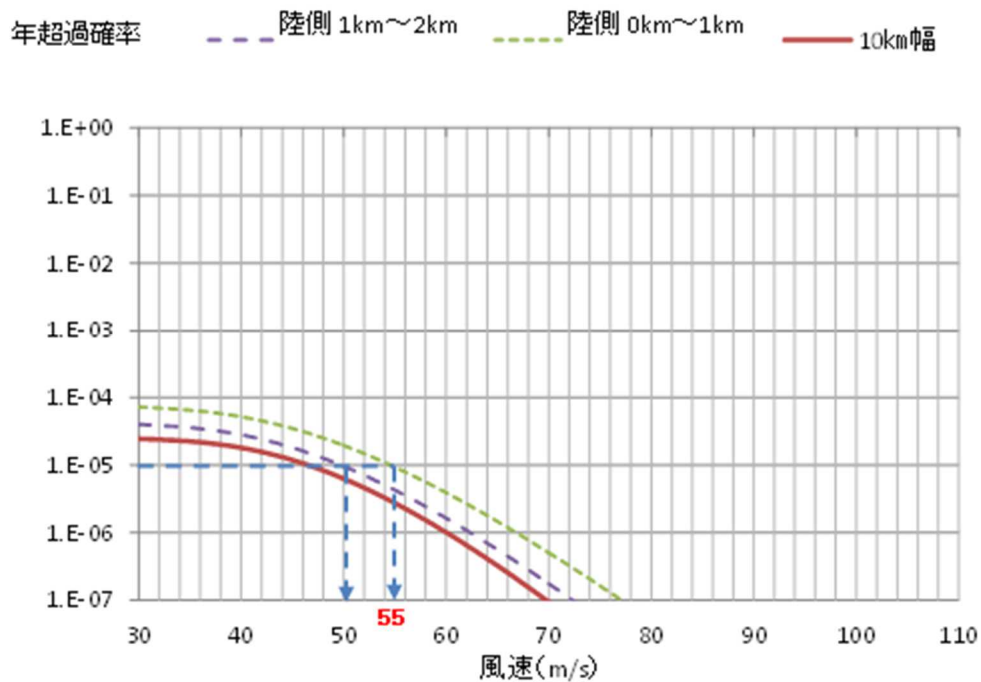
※表中の網掛け部は、気象庁による観測体制が変えられたことによる補正を施す元となるデータ

(b) 被害幅

		F3	F2	F1	F0	合計
1961-2012.6 51.5 年間	期間内個数	0	2	3	0	5
	年平均	0	33	143	0	99
	標準偏差	0	4	140	0	116
推定 51.5 年間 (全竜巻)	期間内個数	0	2	8	0	10
	年平均(m)	0	33	158	0	133
	標準偏差(m)	0	4	122	0	119

(c) 被害長さ

		F3	F2	F1	F0	合計
1961-2012.6 51.5 年間	期間内個数	0	2	3	1	6
	年平均(km)	0.00	0.71	0.86	0.16	0.69
	標準偏差(km)	0.00	0.53	0.34	0.00	0.42
推定 51.5 年間 (全竜巻)	期間内個数	0	2	8	0	10
	年平均(km)	0.00	0.71	0.91	0.00	0.87
	標準偏差(km)	0.00	0.53	0.28	0.00	0.31



第 37 図 竜巻検討地域 1 km 幅でのハザード曲線

第 37 図のハザード曲線より，竜巻検討地域 1 km 幅において年超過確率が 10^{-5} となるときの竜巻風速を読取った結果，55 m/s となった。

これより，年超過確率が 10^{-5} となるときの最大風速は以下のとおりとなる。

年超過確率 10^{-5}	竜巻検討地域内 10 km 幅における最大風速 (m/s)	47
	竜巻検討地域内 1 km 幅における最大風速 (m/s)	55

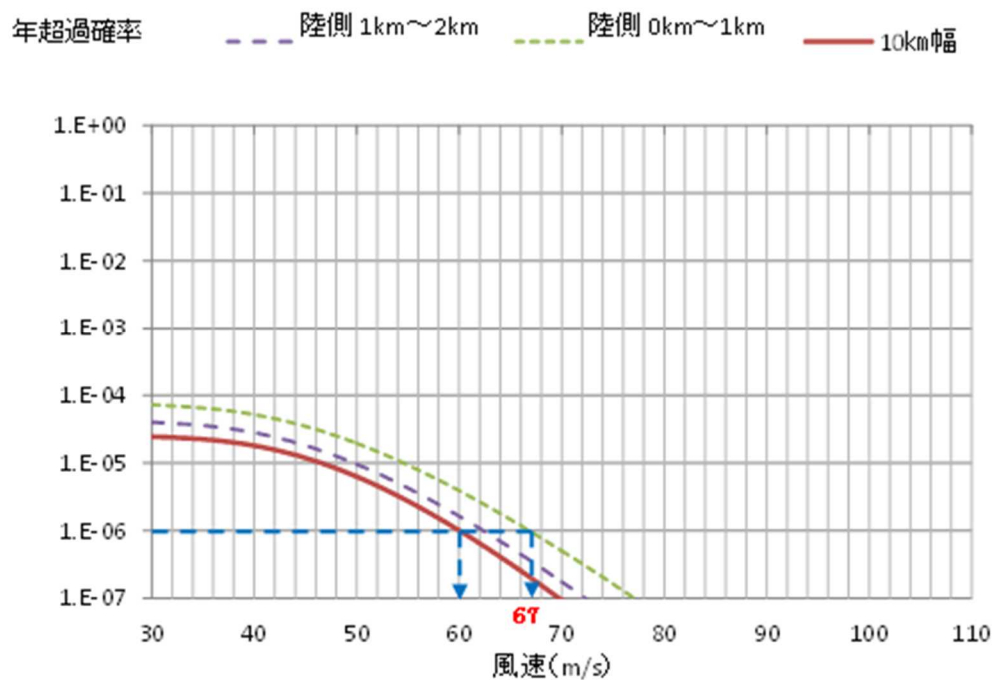
これより，竜巻検討地域内 1 km 幅を考慮すると，年超過確率が 10^{-5} となるときの最大風速は，55m/s となる。

4.3 基準竜巻の最大風速 (V_B) の設定

日本において過去に発生した竜巻による最大風速 $V_{B1} = 92\text{m/s}$ 及び竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 $V_{B2} = 55\text{ m/s}$ を比較すると，大きい風速は 92 m/s となる。

ハザード曲線の算出にあたって使用した竜巻の統計データの不確実性につ

いては、前項までの検討により、F スケール不明の海上竜巻の発生数は、陸上竜巻の F スケール別発生比率で按分して取り扱っているが、竜巻検討地域の設定に伴う竜巻ハザード曲線算出のためのデータの不確実性（竜巻検討地域内で発生した竜巻 16 個のうち 4 個が規模不明であること）等の観点から、参照する年超過確率について 10^{-5} から一桁下げた年超過確率 10^{-6} に相当する風速を考慮する。



第 38 図 竜巻検討地域 10km 幅及び 1 km 幅でのハザード曲線
(年超過確率 10^{-6} における風速の読取り)

第 38 図より、年超過確率 10^{-6} における最大風速は以下のとおりとなる。

年超過確率 10^{-6}	竜巻検討地域内 10 km 幅における最大風速 (m/s)	60
	竜巻検討地域内 1 km 幅における最大風速 (m/s)	67

これより、年超過確率を 10^{-6} としたときの最大風速は、竜巻検討地域内 1 km 幅における最大風速 67m/s が最大となるが、先に設定した日本において過去に発生した竜巻による最大風速 $V_{B1} = 92\text{m/s}$ より小さい値となった。このため、

年超過確率 10^{-6} を考慮した場合においても基準竜巻の最大風速 V_B は算出した V_{B1} と V_{B2} のうち大きい方の値とすることから $V_B = 92 \text{ m/s}$ となる。

気候変動を完全に予測することは難しいため、今後も最新のデータ・知見をもって気候変動の影響に注視し、必要に応じて見直しを実施していくものとする。

竜巻の最大風速の算定結果

項目	最大風速[m/s]
日本において過去に発生した竜巻による最大風速 V_{B1}	92
竜巻最大風速のハザード曲線による最大風速 V_{B2}	67
基準竜巻の最大風速 V_B	92

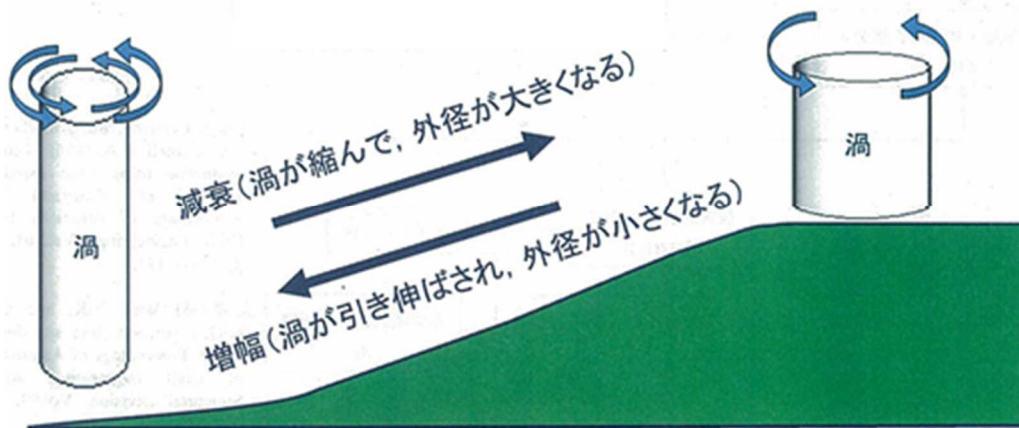
4.4 設計竜巻の最大風速 (V_D) の設定

貯蔵施設が立地する地域の特性として、周辺の地形や竜巻の移動方向を考慮して、基準竜巻の最大風速の割り増しの有無を検討し、設計竜巻の最大風速を設定する。

4.4.1 地形効果による竜巻風速への影響

地形効果が竜巻強度に及ぼす影響に関する知見として、地形起伏による影響について既往の研究において示されており、その知見を踏まえて貯蔵施設周辺の地形効果による竜巻の増幅可能性について検討する。

竜巻のような回転する流れでは、角運動量保存則により「回転の中心からの距離」及び「周方向の回転速度」の積が一定になるという性質がある。そのため、第 39 図に示す通り竜巻の渦が上り斜面を移動する時、基本的に渦は弱まり、下り斜面を移動する時には強まる。



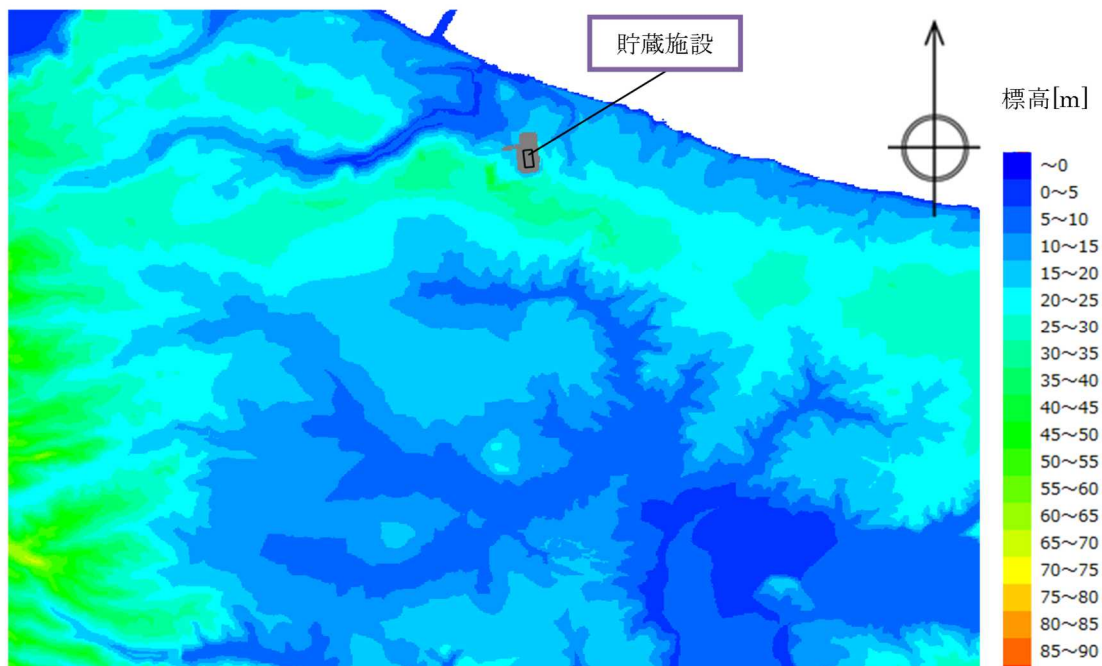
第 39 図 竜巻旋回流の地形影響に関する模式図

4.4.2 貯蔵施設周辺の地形

貯蔵施設周辺の地形（標高図）について第 40 図に示す。貯蔵施設が立地する敷地は、北側が津軽海峡に面し、海側を除く三方を一部の森林を含むなだらかな台地に囲まれた標高 20m 前後の丘陵地である。

貯蔵施設周辺で発生する竜巻については、地形が平坦な海側から敷地に入る場合、貯蔵施設敷地自体も平坦であるため竜巻が増幅することはないと考えられる。また、敷地南側の平地で竜巻が発生し、その竜巻が海側に向かって移動し敷地内に入る場合、竜巻はなだらかな丘陵を越える必要があるが、この場合の地形効果による増幅は、丘陵がなだらかであるため竜巻の増幅・減衰はないか、もしくは丘陵の上り勾配と下り勾配で相殺されると考えられる。

このことから、貯蔵施設においては地形効果による竜巻の増幅を考慮する必要はないと考えられる。



第40図 貯蔵施設周辺の標高データ

4.4.3 設計竜巻の最大風速の設定

以上の検討により、貯蔵施設においては地形効果による竜巻の増幅を考慮する必要はないと考えられることから、設計竜巻の最大風速 V_D については基準竜巻の最大風速 $V_B = 92 \text{ m/s}$ と同等とし、 $V_B = V_D = 92 \text{ m/s}$ と設定する。

4.5 設計竜巻荷重を設定するための特性値の設定

設計竜巻荷重を設定するための竜巻の特性値については、設定した設計竜巻の最大風速に基づいて算出する。前項までの評価で、設計竜巻の最大風速 V_D については 92 m/s と設定したが、将来的な気候変動を完全に予測することは難しく、例えば、地球温暖化の影響により台風の強度が強まる傾向が考えられ、竜巻の規模や発生数が増加することが予想される。また、設計及び運用に保守性を持たせることを考慮して 100 m/s と設定した。

設定した最大風速 (100 m/s) における特性値について、ガイドの手法をもとに下記の式に基づいて算出した。それぞれの算出結果について第13表に示す。

① 竜巻の移動速度 V_T (m/s)

$$V_T = 0.15 \cdot V_D$$

V_D (m/s) : 竜巻の最大風速

② 竜巻の最大接線風速 V_{Rm} (m/s)

$$V_{Rm} = V_D - V_T$$

③ 竜巻の最大接線風速が生じる位置での半径 R_m

$$R_m = 30 \text{ (m)}$$

④ 竜巻の最大気圧低下量 ΔP_{max}

$$\Delta P_{max} = \rho \cdot V_{Rm}^2$$

ρ : 空気密度 (1.22 kg/m³)

⑤ 竜巻の最大気圧低下率 $(dp/dt)_{max}$

$$(dp/dt)_{max} = (V_T/R_m) \cdot \Delta P_{max}$$

第13表 荷重設定竜巻の特性値

荷重設定最大風速 V_D (m/s)	移動速度 V_T (m/s)	最大接線風速 V_{Rm} (m/s)	最大接線風速半径 R_m (m)	最大気圧低下量 ΔP_{max} (hPa)	最大気圧低下率 $(dp/dt)_{max}$ (hPa/s)
100	15	85	30	89	45

参考文献

- (1)Garson R.C., Morla-Catalan J. and Cornell C.A.: “Tornado Desing Winds Based on Risk,” J. Structural Div., ASCE, Vol. 101, No.9 1883-1897, (1975).
- (2)Y.K.Wen and S.L.Chu: “Tornado Risks and Desgin Wind Speed,” J. Structural Div., ASCE, Vol. 99, 2409-2421, (1973).
- (3)気象庁ホームページ:「竜巻等の突風データベース:年代別事例一覧:2012年6月以前の事例を掲載」2013.5.22更新
(<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/tornado/index.html>)
- (4)原子力規制委員会:「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」(原規技発第13061911号,2013年6月19日)
- (5)東京工芸大学:「竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究」平成21~22年度原子力安全基盤調査研究(平成22年度),平成23年2月
- (6)独立行政法人原子力安全基盤機構:「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド(案)及び解説」平成25年10月

5. 竜巻影響評価

5.1 概要

本章では、以下のとおり設計荷重を設定し、竜巻による影響評価を実施する。

(1) 金属キャスクへの竜巻影響の考え方

a. 竜巻飛来物の衝突による荷重

竜巻飛来物が金属キャスクに影響を及ぼす可能性は極めて小さいと考えられるが、念のため、竜巻飛来物の金属キャスクへの衝突を仮定し、影響を考察する。

(2) 貯蔵建屋の設計竜巻荷重

設計竜巻荷重として、竜巻影響評価ガイドに基づき以下の荷重を設定する。

a. 竜巻飛来物の衝突による荷重

b. 竜巻の風圧力による荷重

c. 気圧低下に伴う建屋内外の気圧差による荷重

d. 複合荷重（設計竜巻荷重の組み合わせ）

e. 設計竜巻荷重と組み合わせる荷重（常時作用する荷重，自然現象）

(3) 竜巻随件事象に対する評価

5.2 設計荷重の設定

5.2.1 金属キャスクへの竜巻影響の考え方

竜巻影響評価ガイドでは、設計飛来物として①大きな運動エネルギーをもつ飛来物，②施設の貫入抵抗を確認するための固い飛来物，及び③開口部等を通過することができる程度に小さくて固い飛来物を設定することとしている。

設計飛来物を設定する上では、リサイクル燃料貯蔵センターの特性を考慮する必要があることから、リサイクル燃料備蓄センターにおける基本的安全機能との関連を踏まえた、設計飛来物を設定する上での考え方を以下に整理する。

5.2.1.1 竜巻飛来物の衝突による荷重

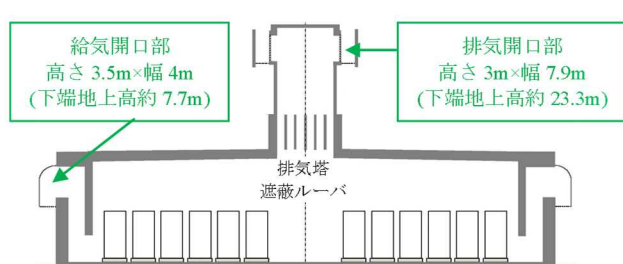
竜巻飛来物が金属キャスクの基本的安全機能に影響を与える可能性としては、貯蔵建屋の開口部を通過した飛来物が貯蔵建屋内に置かれた金属キャスクに衝突し、金属キャスクの閉じ込め機能または遮蔽機能に影響を与える場合が考えられる。

このため、上記の③にあたる、開口部等を通過する飛来物について検討を行う。

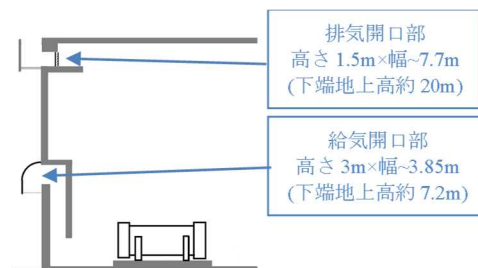
貯蔵建屋内で金属キャスクが存在する場所としては貯蔵区域及び受入れ区域があり、各々の区域に除熱のための空気を循環させる給気口及び排気口を有している。貯蔵区域及び受入れ区域の断面図を第 41 図及び第 42 図(貯蔵区域給気口、受入れ区域給気口及び貯蔵区域排気口)については、以下の通り侵入した飛来物が金属キャスクに影響を及ぼす可能性は考え難い。

- ・貯蔵区域給気口及び受入れ区域給気口：給気口フード及び垂れ壁を持つ迷路構造となっており、仮に飛来物が開口部から侵入しても、迷路構造により運動エネルギーが大幅に減衰される。
- ・貯蔵区域排気口：排気塔の鉛直方向に遮蔽ルーバが設置されており、飛来物が排気塔内に侵入しても、排気塔の外壁や遮蔽ルーバへの衝突で運動エネルギーが大幅に減衰され、また排気塔直下には金属キャスクを貯蔵しない。

また、受入れ区域排気口についても、金属キャスクに影響を及ぼすような飛来物が侵入する可能性は以下の理由から極めて小さく（下記の事象が重畳する確率は 10^{-6} を下回ると考えられる）、設計竜巻レベルの大規模な竜巻が発生する可能性がそもそも極めて小さい(10^{-6} /年以下)ことと併せると、竜巻による飛来物が開口部を通過し金属キャスクに影響を及ぼす可能性は極めて小さく、その確率は設計基準事象として考慮する必要のあるレベルを大幅に下回るものと考えられる。



第41図 貯蔵区域断面図
(東西方向)



第42図 受入れ区域断面図
(南北方向)

- ・敷地周辺の交通量は極めて少ないことから*1、敷地外を走行中の車両が竜巻に巻き込まれて飛散物となる可能性は極めて小さい。

*1 敷地周辺の車両通行頻度は小型車で10分/台、大型車で1時間/台程度となる。敷地近辺の区間(300mとする)に自動車が増在する時間の割合は約1/23となる。

- ・自動車の交通量：小型車139台/日、大型車24台/日
(H22年度全国道路・街路交通情勢調査：県道266号関根蒲野沢線の24h自動車類交通量データ)
 - ・自動車の速度：46km/h (同調査：同区間の平均旅行速度データ)
- 近辺の区間(300mとする)に自動車が増在する時間の割合：
 $(139+24) \text{台/日} \times (300\text{m} \div 46\text{km/h}) / 24\text{h} \approx 4.4 \times 10^{-2}$ (約1/23)

- ・受入れ区域排気口は地上高さ約20mに設置されており、大型の飛来物が当該高さに達する可能性は小さい。
- ・敷地周辺道路からの飛来物を考えた場合でも、敷地周辺道路からみた受入れ区域排気口の立体角は極めて小さい*2ことから、敷地周辺からの飛散物が受入れ区域排気口の方向に飛散する可能性は極めて小さい。

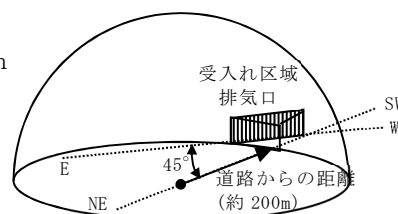
*2 敷地周辺道路から受入れ区域排気口を望む立体角の割合は、受入れ区域排気口のみかけの面積と、距離を半径とする半球の表面積との比として表される。受入れ区域排気口は貯蔵建屋北側に開いており、また敷地東側道路は南北方向に走っていることから、立体角が大きくなる場合として貯蔵建屋北東方向からの飛来を考えると(第47図の(NE)参照)、立体角の割合は以下のように表される。

- ・受入れ区域排気口を敷地周辺道路から見た角度：45°
(第47図の(NE)参照)
- ・敷地周辺道路間－受入れ区域排気口間の距離：200m
(第47図の(NE)参照)
- ・受入れ区域排気口の寸法：合計幅29m×高さ1.5m

以上より、立体角の割合は

$$\Omega / 2\pi r^2 = (29\text{m} \times 1.5\text{m} \times \sin 45^\circ) / (2\pi \times (200\text{m})^2)$$

$$\approx 1.2 \times 10^{-4} \text{ (約 } 1/8200 \text{)}$$



- ・受入れ区域排気口の高さ(約1.5m)は乗用車の高さとほぼ同程度であり、金属キャスクに影響を与えるようなサイズの大きな塊状の飛来物が支障なしに受入れ区域排気口を通過するのは、寸法の観点から困難である。

- ・金属キャスクが受入れ区域排気口近傍にある期間は、基本的に搬入作業中または搬出作業中に限定されており、竜巻による飛来物が開口部から侵入するタイミングで金属キャスクが受入れ区域に置かれている可能性は小さい*3。

*3 例えば、金属キャスク 1 基が受入れ区域に滞在する期間を受入れ時 1 日/基、払出し時 1.5 日/基とすると、貯蔵期間のうち金属キャスクが受入れ区域に滞在する期間の割合は、 $(1+1.5) \text{日/基} \times 288 \text{基} / 50 \text{年} \approx 3.9 \times 10^{-2}$ (約 1/25) となる。

- ・受入れ区域排気口近傍における金属キャスクの設置状態は、基本的には輸送状態と同様に三次蓋及び緩衝体に取り付けられた状態（搬入の場合、緩衝体が外されるのは金属キャスクのたて起こし実施前、三次蓋が外されるのは検査架台への移動後であり、タイミングは限定されている）であり、受入れ区域排気口から侵入した飛来物の衝突に対しても、蓋部の閉じ込め機能は保護されている。

これらの条件が重畳する確率は極めて小さく、設計竜巻（最大風速 100m/s）を超える竜巻の年発生確率が 10^{-6} 以下であり大規模な竜巻発生の可能性が極めて小さいこととあわせると、竜巻飛来物が受入れ区域の排気口を通過し金属キャスクに衝突して基本的安全機能に影響を及ぼす可能性はない。

以上より、基本的安全機能の観点から、貯蔵建屋に内包される金属キャスクへの竜巻による直接的な影響として、飛来物の衝突を考慮する必要はない。

なお、念のために可能性の前提を無視し、飛来物が受入れ区域排気口を通過して金属キャスクの胴部に落下した場合を仮定し、その影響を別添 5 にて考察する。

5.2.2 貯蔵建屋の設計竜巻荷重

貯蔵建屋は竜巻防護施設である金属キャスクを内包する施設であり、設計竜巻荷重の影響が内包する金属キャスクの基本的安全機能へ波及しないことを確認するため、荷重を保守的に見積もる観点で設計飛来物を設定する。

竜巻飛来物による金属キャスクへの直接的な影響については 5.2.1.1 にて検討していることから、貯蔵建屋への影響を確認するための設計飛来物としては、竜巻影響評価ガイドに示す設計飛来物のうち、大きな運動エネルギーをも

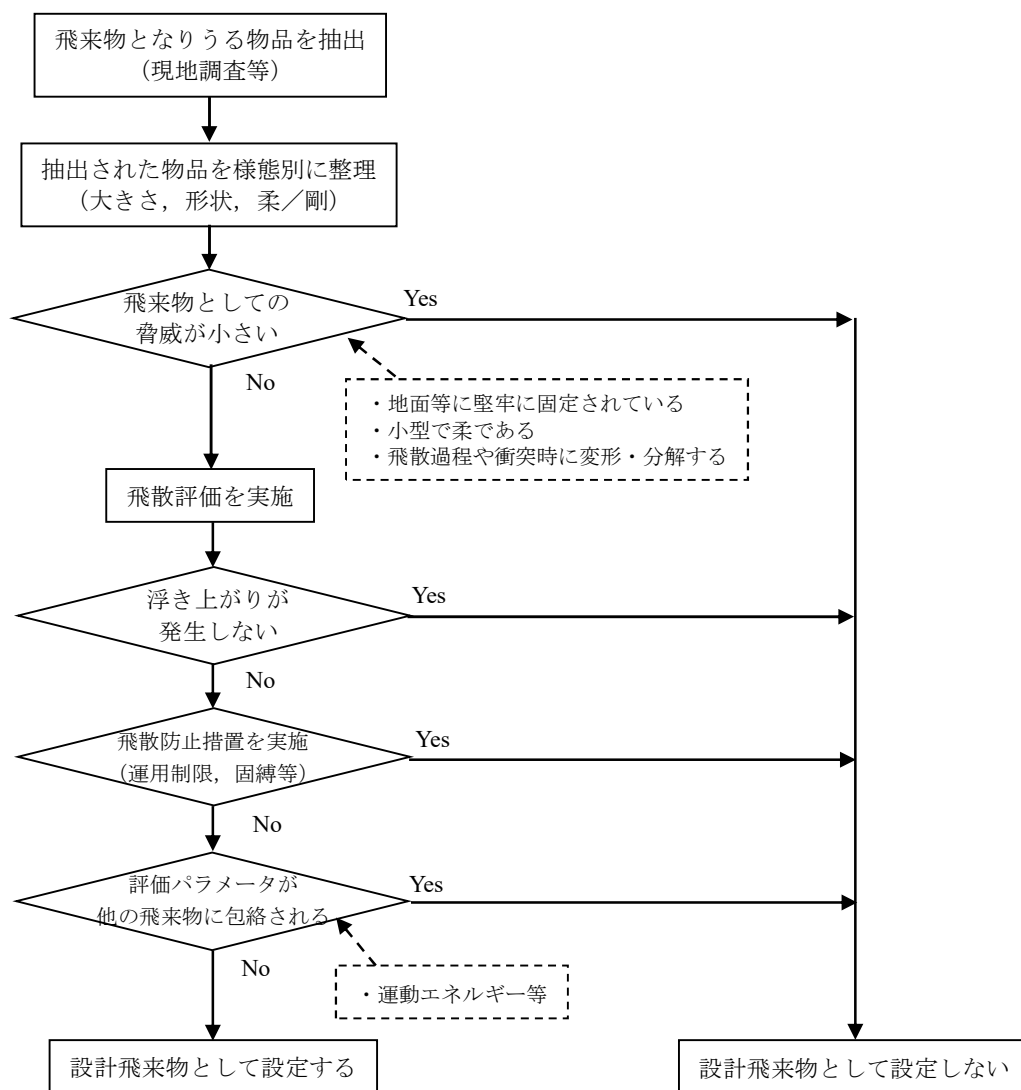
つ飛来物，及び施設の貫入抵抗を確認するための固い飛来物を選定することとする。なお，設計飛来物を設定する上では，内包する金属キャスクが有する基本的安全機能への影響を踏まえて設定するものであることに留意する。

5.2.2.1 竜巻飛来物の衝突による荷重

竜巻防護の観点から飛散防止措置（固縛，固定及び退避）実施に加え，貯蔵施設の特性を考慮して設計飛来物を設定する。

(1) 設計飛来物の設定フロー

敷地内外における竜巻飛来物となりうる物品を網羅的に調査し，それらの中から代表性を持たせた設計飛来物を第 43 図に基づき設定する。



第 43 図 設計飛来物の設定フロー

(2) 設計飛来物の候補の選定

a. 飛来物調査の実施及び物品の分類

使用済燃料貯蔵施設における飛来物に関する現地調査を、平成 25 年 10 月及び平成 27 年 10 月に実施した。調査は、敷地内及び貯蔵建屋を中心とした敷地外を対象に、常設物、仮設物のうち飛来物となり得る物品、及び二次飛来物を抽出した（調査状況の詳細については別添 3 に示す）。

さらに、飛来物に関する現地調査の結果を踏まえ、地面等に堅牢に固定されておらず飛来物となる可能性があるものとして確認された物品に関して、物品のサイズ（大、中、小）、剛／柔及び形状（棒状、板状、塊状）の特徴を踏まえて分類した。

確認された物品、及びそれらの物品を分類した結果を第 14 表に示す。

第 14 表 物品の種類別の整理及び抽出の結果

			棒状	板状	塊状
①	小	柔	八木アンテナ	パラボラアンテナ 照明灯 標識 看板	カラーコーン 社名看板 スピーカー ゴミ袋(雑草) テレビカメラ 消火器
②	小	剛	鋼製パイプ 境界標	側溝グレーチング 集水柵グレーチング コンクリート板(小) マンホール蓋	砂利 U字溝 石 閃光灯
③	中	柔	—	プラスチック板 アルミ梯子 折板(屋根, 庇) 遮風板(穴開スチール) シャッター ガラス窓 押出成形板 換気/防雪フード アルミガラリ/ルーバ	—
④	中	剛	鋼製材	コンクリート板(大) コンクリート板(ガイド) 敷鉄板	—
⑤	大	柔	ドラム缶	—	コンテナ 軽自動車 トラック 物置 乗用車 バス 電源車 ワゴン 電源車 キャスク輸送車両

(*)下線は、竜巻影響評価ガイドに示されている飛来物

b. 分類結果に基づく飛散評価対象のスクリーニング

5.2.2.1 (2). a にて分類した結果に基づき、飛散評価の対象とする物品のスクリーニングを実施する。

スクリーニングについては5.2.2.1 (2).aにて実施した①～⑤の分類毎に実施することとし、各々の分類に対して、以下の考え方により飛散評価の対象とするか否かを選定する。

①サイズが小さく柔な物品

飛散時の運動エネルギーが小さく、かつ衝突しても飛散物自体が柔であるため、衝突する対象に対して大きな影響を及ぼさないと判断されることから、飛散評価の対象としない。

②サイズが小さいが剛な物品

飛来物となった場合の速度が大きい場合、衝突時に飛散物が持つ運動エネルギーのほとんどは衝突対象に与えられ、衝突する対象の局所的な損傷をもたらす可能性があると考えられることから、飛散評価の対象とする。

③サイズが中程度で柔な物品

飛散の過程や対象物への衝突の際に飛散物自体が変形・分解することにより、飛散過程や衝突の際に飛散物が持つ運動エネルギーの多くは飛散物自体の変形や分解により失われ、衝突する対象に対して大きな影響を及ぼさないと判断されることから、飛散評価の対象としない。

④中サイズで剛な物品

鋭利な先端をもつ場合は壁に貫入する可能性があり、また衝突破損による二次的な影響も懸念されることから、飛散評価の対象とする。

⑤比較的柔だが大きい飛来物

飛散の過程や対象物への衝突の際に飛散物自体が変形・分解することにより、飛散過程や衝突の際に飛来物が持つ運動エネルギーの多くは飛来物自体の変形や分解により失われるものの、飛散物自体の持つ運動エネルギーが大きいため、衝突する対象に対して与える運動エネルギーが大きく、影響を及ぼす可能性があると考えられることから、飛散評価の対象とする。

以上より、②、④及び⑤に含まれる物品を飛散評価の対象とする。

(3) 物品の飛散評価及び設計飛来物の選定

a. 飛散評価の対象とする物品

飛散評価の対象とする物品は、5.2.2.1 (2).b にて候補として選定しスクリーニングを行った結果から抽出した物品とする。対象とする具体的な物品及び評価に用いる諸元（寸法，質量及び空力パラメータ）を第 17 表に示す。

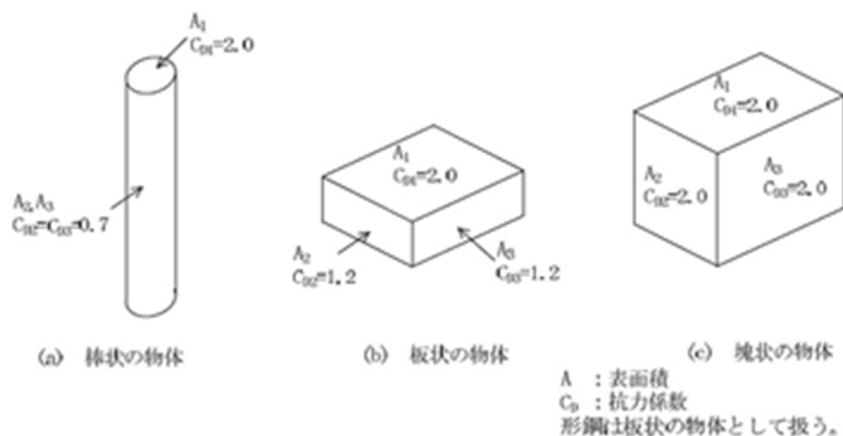
なお，飛来物の空力パラメータ $C_D A/m$ (m^2/kg) については，現地調査の結果から抽出された物品については既往文献*に基づき次式によって算定し，また竜巻影響評価ガイドに示されている物品については既往文献*に記載されている値を用いる。

$$C_D A/m = \frac{1}{3} (C_{D1}A_1 + C_{D2}A_2 + C_{D3}A_3) / m$$

ここで， C_D ：抗力係数（既往文献*に基づき第 44 図の値を用いる）

A ：表面積(m^2)， m ：質量(kg)

(*)平成 21～22 年度原子力安全基盤調査研究（平成 22 年度）竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究（平成 23 年 2 月，東京工芸大学）



第 44 図 抗力係数

第 15 表 飛散評価の対象とする物品と評価に用いる諸元

品目		寸法(m)	質量 m(kg)	空力 パラメータ $C_D A/m(m^2/kg)$	
剛	棒状	鋼製パイプ(ガイド)	長さ×直径×直径 (2×0.05×0.05)	8.4	0.0057
		鋼製材(ガイド)	長さ×幅×奥行 (4.2×0.3×0.2)	135	0.0065
		境界標	長さ×幅×奥行 (0.8×0.1×0.1)	19.2	0.0023
剛	塊状	砂利	長さ×幅×高さ (0.03×0.03×0.03)	0.062	0.0288
		石	長さ×幅×高さ (0.15×0.15×0.15)	7.8	0.0058
		閃光灯	長さ×幅×高さ (0.52×0.26×0.4)	37	0.0080
		U字溝	長さ×幅×高さ (1×0.2×0.4)	98	0.0046
剛	板状	側溝グレーチング	長さ×幅×厚さ (1×0.3×0.02)	8	0.0261
		集水枡グレーチング	長さ×幅×厚さ (0.7×0.7×0.06)	37	0.0097
		コンクリート板(大)	長さ×幅×厚さ (1.4×0.7×0.15)	353	0.0022
		コンクリート板(ガイド)	長さ×幅×厚さ (1.5×1×0.15)	540	0.0022
		コンクリート板(小)	長さ×幅×厚さ (0.6×0.6×0.05)	43.2	0.0061
		敷鉄板(大)	長さ×幅×厚さ (6×1.5×0.03)	2133	0.0029
		敷鉄板(小)	長さ×幅×厚さ (1.8×0.9×0.02)	256	0.0043
		マンホール蓋	直径×直径×厚さ (0.65×0.65×0.02)	52.4	0.0044
柔	棒状	ドラム缶	直径×直径×高さ (0.6×0.6×0.9)	21	0.0213
	塊状	コンテナ(ガイド)	長さ×幅×奥行 (2.4×2.6×6)	2300	0.0105
		物置	長さ×幅×高さ (3.6×2.6×2.4)	507	0.0316
		軽自動車	長さ×幅×高さ (3.4×1.5×1.8)	1000	0.0092
		乗用車	長さ×幅×高さ (4.8×1.8×1.5)	1510	0.0082
		ワゴン車	長さ×幅×高さ (5.4×1.9×2.3)	1970	0.0091
		トラック(ガイド)	長さ×幅×高さ (5×1.9×1.3)	4750	0.0026
		バス	長さ×幅×高さ (11.9×2.5×3.6)	13000	0.0042
		電源車	長さ×幅×高さ (6.6×2.2×2.8)	8000	0.0033
		キャスク輸送車両	長さ×幅×高さ (12.5×3.2×1.6)	36000	0.0012

b. 飛散評価に用いる竜巻の特性

飛散評価に用いる竜巻の特性は、設計荷重を評価するための竜巻として「風圧力の設定」及び「気圧低下によって生じる評価対象施設内外の気圧差による圧力の設定」と同様に、荷重設定最大風速を 100m/s として竜巻影響評価ガイドに基づき設定した特性を用いる。評価に用いる竜巻の特性を第 16 表に示す。

第16表 評価に用いる竜巻の特性

荷重設定 最大風速	移動速度	最大接線 風速	最大接線 風速半径
100m/s	15m/s	85m/s	30m

飛散評価にあたっては、第 16 表に示した竜巻の特性に基づいて風速場を設定し、設定した風速場の中での物品の飛散挙動（飛散距離及び浮き上がり高さ）を評価する。具体的には、風速場（風速の空間分布及び時間変化）、物品の諸元（寸法、質量、空力パラメータ）及び初期位置を入力条件として、竜巻による風を受ける物体の挙動を運動方程式により解き、出力として得られた物体の位置及び速度に基づき、評価に用いるパラメータ（浮き上がりが発生する場合の飛散距離、浮き上がり高さ、飛散速度、運動エネルギー）を算出する。飛散評価手法の詳細については別添 4 に示す。

なお、飛散評価に用いる風速場としては、飛散物による衝撃荷重（飛散速度、運動エネルギー等）を保守的に見積もる観点から、基本的にランキン渦モデルに基づく風速場に基づくこととするが、設計飛来物の設定にあたっては、他の風速場モデルや実際の竜巻による災害事例も考慮に入れた上で設定を実施することとする。

またここでは、衝撃荷重の大きさを示す指標として、評価対象が貯蔵建屋であることから、コンクリートが裏面剥離を起こす限界厚さを用いることとする。コンクリートの裏面剥離限界厚さは、NEI 07-13 “Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Designs” (Rev. 7, 2009) に示す Chang 式（下記）により求める。

$$s = 1.84 \times \alpha_s \times \left\{ \frac{V_0}{V} \right\}^{0.13} \times \frac{(WV^2/980)^{0.4}}{d^{0.2} f_c^{0.4}}$$

ここで、

s : 裏面剥離限界厚さ (cm)

V_0 : 基準速度 (6096cm/s)

V : 飛来物の衝突速度 (cm/s)

W : 飛来物の重量 (kgf)

d : 飛来物の直径 (cm)

f_c : コンクリートの圧縮強度 (kgf/cm²)（設計基準強度を用いる）

α_s : 低減係数（柔飛来物 0.6, 剛飛来物 1.0）

c. 飛散評価結果

5.2.2.1.(3).aで飛散評価の対象とした物品について、5.2.2.1.(3).bに示す方法にて評価した飛散挙動（飛散距離及び浮き上がり高さ）及び衝撃荷重（飛散速度、運動エネルギー及びコンクリート裏面剥離限界厚さ）を第17表に示す。

ここで飛散挙動評価（飛散距離及び浮き上がり高さ）については、初期高さを0 mとして評価し、敷地内及び敷地外の貯蔵建屋周辺との標高差に伴う影響については、後段の「5.2.2.1(3).d 飛散評価に基づいた設計飛来物の設定」の設定の段階において、必要に応じ検討を加える。また衝撃荷重（飛散速度、運動エネルギー及びコンクリート裏面剥離限界厚さ）については初期高さを40 mとして評価を行っているが、水平最大速度や運動エネルギー、コンクリート裏面剥離限界厚さについては初期高さを0 mとして評価した場合でも変わらない。

なお、表記の便宜上、後段の「5.2.2.1(3).d 飛散評価に基づいた設計飛来物の設定」にて実施する設計飛来物としての設定の有無も併せて同表に示す。

第 17 表 物品の飛散評価結果及び設計飛来物としての設定 (1/2: 剛である物品)

品目	寸法 (m)	質量 m (kg)	空カパラ メータ $C_D A / m$ (m^2/kg)	飛散 距離 (m)	浮き 上がり 高さ (m)	ランキン渦モデルに基づく評価 ⁽¹⁾		運動エネルギー $m \cdot V_{Hmax}^2 / 2$ (kJ/m)	コンクリート 表面剝離 限界厚さ (cm)	設計飛来物として設定の有無 除外する場合、その理由 (1)浮き上がらない(2)飛散防止措置をとる (3)他の飛来物に包絡される	
						水平最 大速度 $M \cdot V_{Hmax}$ (m/s)	鉛直最 大速度 $M \cdot V_{Vmax}$ (m/s)				
棒状	鋼製パイプ (ガイド) ⁽²⁾	長さ×直径×直径 2×0.05×0.05	0.0057	0	0	—	—	—	—	浮き上がらないため除外 (1)	
	鋼製材 (ガイド) ⁽²⁾	長さ×幅×奥行 4.2×0.3×0.2	0.0065	10	1	51	34	180	40	設計飛来物として設定 ○	
塊状	塊界標	長さ×幅×奥行 0.8×0.1×0.1	0.0023	0	0	—	—	—	—	浮き上がらないため除外 (1)	
	砂利	長さ×幅×高さ 0.03×0.03×0.03	0.0288	30	1	68	15	0.15	4	浮き上がりが発生するが、運動エネルギー 一が鋼製材に包絡されるため除外 (3)	
	石	長さ×幅×高さ 0.15×0.15×0.15	0.0058	10	1	48	27	9	14	浮き上がりが発生するが、運動エネルギー 一が鋼製材に包絡されるため除外 (3)	
	閃光灯	長さ×幅×高さ 0.52×0.26×0.4	0.0080	20	1	52	27	51	23	浮き上がりが発生するが、運動エネルギー 一が鋼製材に包絡されるため除外 (3)	
	U字溝	長さ×幅×高さ 1×0.2×0.4	0.0046	10	1	46	25	110	32	浮き上がりが発生するが、運動エネルギー 一が鋼製材に包絡されるため除外 (3)	
	側溝 グレーチング	長さ×幅×厚さ 1×0.3×0.02	0.0261	20	1	67	17	18	20	浮き上がりが発生するが、運動エネルギー 一が鋼製材に包絡されるため除外 (3)	
	集水槽 グレーチング	長さ×幅×厚さ 0.7×0.7×0.06	0.0097	10	1	54	26	54	26	浮き上がりが発生するが、運動エネルギー 一が鋼製材に包絡されるため除外 (3)	
板状	コンクリート 板(大)	長さ×幅×厚さ 1.4×0.7×0.15	0.0022	0	0	—	—	—	—	浮き上がらないため除外 (1)	
	コンクリート 板(ガイド) ⁽²⁾	長さ×幅×厚さ 1.5×1×0.15	0.0022	0	0	—	—	—	—	浮き上がらないため除外 (1)	
	コンクリート 板(小)	長さ×幅×厚さ 0.6×0.6×0.05	0.0061	10	0	49	27	52	27	浮き上がりが発生するが、運動エネルギー 一が鋼製材に包絡されるため除外 (3)	
	敷鉄板(大)	長さ×幅×厚さ 6×1.5×0.03	0.0029	0	0	—	—	—	—	浮き上がらないため除外 (1)	
	敷鉄板(小)	長さ×幅×厚さ 1.8×0.9×0.02	0.0043	0	0	—	—	—	—	浮き上がらないため除外 (1)	
					0	0	—	—	—	—	浮き上がらないため除外 (1)
	マンホール蓋	直径×直径×厚さ 0.65×0.65×0.02	0.0044	0	0	—	—	—	—	浮き上がらないため除外 (1)	

(1)アジタモデルに基づく飛散評価の結果、浮き上がると評価された物品について記載している。

(2)竜巻影響評価ガイドに示す物品の水平最大速度及び鉛直最大速度に関しては、竜巻影響評価ガイドに示す値と評価値のうち大きい方を示す。

第 17 表 物品の飛散評価結果及び設計飛来物としての設定 (2/2: 柔である物品)

品目	寸法 (m)	質量 m (kg)	空力パラメータ $C_D A/m^2$ (kg)	飛散距離 (m)	浮き上がり高さ (m)	水平最大速度 $M V_{Hmax}$ (m/s)	鉛直最大速度 $M V_{Vmax}$ (m/s)	運動エネルギー $m M V_{Hmax}^2 / 2$ (kJm)		コンクリート 裏面剝離 限界厚さ (cm)	設計飛来物として設定の有無 除外する場合は、その理由 (1)浮き上がらない(2)飛散防止措置をとる (3)他の飛来物に包絡される
								フジタモデル	ランキン渦モデルに基づく評価*		
棒状											
ドラム缶	直径×直径×高さ 0.6×0.6×0.9	21	0.0213	160	11	64	19	42	12	浮き上がりが発生するが、飛散防止措置を行うため除外	× (2)
コンテナ (ガイド)*2	長さ×幅×奥行 2.4×2.6×6	2300	0.0105	190	18	60	40	4200	52	浮き上がりが発生するが、飛散防止措置を行うため除外	× (2)
物置	長さ×幅×高さ 3.6×2.6×2.4	507	0.0316	230	36	69	16	1300	32	浮き上がりが発生するが、飛散防止措置を行うため除外	× (2)
軽自動車	長さ×幅×高さ 3.4×1.5×1.8	1000	0.0092	150	8	53	27	1500	38	浮き上がりが発生するが、運動エネルギーがワゴン車に包絡されるため除外	× (3)
乗用車	長さ×幅×高さ 4.8×1.8×1.5	1510	0.0082	100	5	52	27	2100	44	浮き上がりが発生するが、運動エネルギーがワゴン車に包絡されるため除外	× (3)
ワゴン車	長さ×幅×高さ 5.4×1.9×2.3	1970	0.0091	160	12	53	27	2800	47	設計飛来物として設定 (貯蔵建屋低層部を対象)	○
トラック (ガイド)*2	長さ×幅×高さ 5×1.9×1.3	4750	0.0026	0	0	—	—	—	—	浮き上がりがないため除外	× (1)
バス	長さ×幅×高さ 11.9×2.5×3.6	13000	0.0042	100	6	45	25	14000	83	浮き上がりが発生するが、飛散防止措置を行うため除外	× (2)
電源車	長さ×幅×高さ 6.6×2.2×2.8	8000	0.0033	40	2	43	25	7400	69	浮き上がりが発生するが、飛散防止措置を行うため除外	× (2)
キヤスク 輸送車両	長さ×幅×高さ 12.5×3.2×1.6	36000	0.0012	0	0	—	—	—	—	浮き上がりがないため除外	× (1)

(*1)フジタモデルに基づく飛散評価の結果、浮き上がると評価された物品について記載している。

(*2)竜巻影響評価ガイドに示す物品の水平最大速度及び鉛直最大速度に関しては、竜巻影響評価ガイドに示す値と評価値のうち大きい方を示す。

d. 飛散評価に基づいた設計飛来物の設定

(a) 設計飛来物の設定の考え方

5.2.2.1(3).cにて実施した飛散評価の結果に基づき、竜巻影響評価ガイドに示す①大きな運動エネルギーをもつ飛来物及び②施設の貫入抵抗を確認するための固い飛来物につき、第43図の設定フローにおける以下の3つの観点から設定を実施する。

i 浮き上がらない物品については、設計飛来物から除外する。

飛散評価の結果浮き上がらないと評価された物品については、設計飛来物から除外する。

浮き上がらない物品としては、鋼製パイプ、コンクリート板（ガイド）、敷鉄板、トラック、キャスク輸送車両等が該当する。

ii 浮き上がりが発生する物品のうち飛散防止措置を行うものについては、設計飛来物から除外する。

竜巻に対する飛散防止の方法としては、物品の持ち込み制限や建屋内への保管、固縛、固定及び必要に応じた車両の避難が考えられる。

現状においても、防護管理及び災害発生防止の観点から物品管理が行われており、少なくとも飛散物として貯蔵建屋への脅威となるような一定以上の大きさを持った機材や車両が敷地内、特に貯蔵建屋近傍の屋外に非管理状態のまま放置されることはなく、また必要に伴い機材を仮置する機会が限定されていることと併せ、潜在的な飛散物の発生は一定程度抑制されていると考えられる。

しかしながら、飛散評価結果やiiiにおける包絡性の検討結果を踏まえ、竜巻に対する防護の観点から飛散防止を図ることが望ましいと考えられる物品については、飛散防止措置を行うことにより設計飛来物から除外する。

iii 評価パラメータが他の飛来物に包絡される物品については、設計飛来物から除外する。

設計評価の観点からは、保守性を維持しつつ設計飛来物の設定を

合理的に行うことが望ましいことから、ある物品の評価パラメータがより厳しい他の物品の評価パラメータに包絡される場合は、当該物品を設計飛来物からは除外する。

評価パラメータとして基本的には運動エネルギー及びコンクリート裏面剥離限界厚さを用いるが、ある物品を他の物品で包絡できるか否かは、飛散挙動（飛散距離及び浮き上がり高さ）や形状（剛／柔，棒状／板状／塊状）等の要因も含めて考慮し、必要に応じ設計飛来物として包絡する側の物品の条件に反映する。

(b) 設計飛来物の設定

ここでは、5.2.2.1(3).dに示す考え方に基づく設計飛来物の具体的な設定過程を示す。

i 施設の貫入抵抗を確認するための固い飛来物

ここでは竜巻影響評価ガイドにおける「施設の貫入抵抗を確認するための固い飛来物」を設定するため、剛である物品を対象として設計飛来物の設定を行う。

剛である物品のうち浮き上がりが発生するものとして、鋼製材，砂利，石，グレーチング，コンクリート板(小)等があるが，これらの物品の中で鋼製材の運動エネルギーが最も大きく他の物品の運動エネルギーを包絡できること，及び鋼製材の形状が棒状であり塊状や板状の物品と比べ衝突時により大きな貫入力を持つと考えられることから，剛である物品を包絡する設計飛来物として，鋼製材を設定する。

棒状や塊状の物品は形状の面から風による抗力を受けにくく，また板状の物品でも剛で重量のある物品が地面に置かれている場合，浮き上がりに十分な揚力を得るための周囲の空気流の変動は生じ難いと考えられること，及び飛散しやすい物体の姿勢が維持され難いと考えられることから，竜巻の風により持ち上げられ高く飛ばされる状況は考え難い。

鋼製材以外の物品（石，閃光灯，グレーチング等）も含め，剛で

ある物品の飛散距離は高々30 m 程度，浮き上がり高さは高々1m 程度の評価結果であり，初期高さの影響（貯蔵建屋周辺の法面上からの飛散等）を考慮しても，貯蔵建屋上層部に衝突する可能性は極めて小さいことから，設計飛来物の衝突を考慮する範囲は，貯蔵建屋低層部（具体的には，貯蔵区域排気塔下部の遮蔽ルーバ上端に相当する地上約 17.2 m を下回る部位：第 45 図，第 46 図参照）とする。

貯蔵建屋のうち衝突に対する強度上の裕度が小さい部位としては，前述した設計飛来物の衝突を考慮する範囲からは外れるが，貯蔵区域排気塔上部の外壁(厚さ約 40 cm)がある(第 45 図，第 46 図参照)。鋼製材の衝突に対するコンクリート裏面剥離限界厚さは保守的に評価しても約 40 cm であり当該部分のコンクリートに裏面剥離は生じない結果である。

ii 大きな運動エネルギーをもつ飛来物

ここでは竜巻影響評価ガイドにおける「大きな運動エネルギーをもつ飛来物」を設定する上で，①の対象とした剛である物品に対し，柔である物品を対象として設計飛来物の設定を行う。

柔である物品として，車両（乗用車，バス等），コンテナ，物置等がある。これらのいずれも柔一塊状（または棒状）の物品であり，また①にて施設の貫入抵抗を確認するための固い飛来物を設定していることから，ここでは主として運動エネルギーの観点から設計飛来物を設定することとする。

(i) 軽自動車，乗用車，ワゴン車

これらの比較的小型の車両は貯蔵建屋からの飛散距離範囲内の台数が比較的多いと考えられ，竜巻襲来時の退避を十分に行うことができない可能性があることから，設計飛来物として考慮する。ワゴン車の運動エネルギーがこれらの車両の中では最も大きく，軽自動車や乗用車の運動エネルギーはワゴン車に包絡されることから，ワゴン車を設計飛来物として設定する。

これらの車両については貯蔵建屋上層部に衝突する可能性は極め

て小さいと考えられることから、設計飛来物の衝突を考慮する範囲は、貯蔵建屋低層部（具体的には、貯蔵区域排気塔下部の遮蔽ルーバ上端に相当する地上約 17.2 m を下回る部位：第 45 図, 第 46 図参照）とする。設計飛来物の衝突を考慮する範囲を貯蔵建屋低層部に限定していることについては、以下の点からも妥当と考えられる。

- ・飛散評価に用いる竜巻の最大風速は 100 m/s としているが、規模の面からは F3 竜巻(風速 70~92 m/s)を若干上回る程度である。一方、F-スケールにおける F3 竜巻の状況として” cars lifted off the ground”（「自動車は地面から浮上する」）とあること、及び国内における F3 竜巻である佐呂間竜巻(2006. 11. 7)等の被害状況においても自動車はほぼ元の原型を留めていることから、自動車が十数 m 以上の高さまで浮き上がった状況は考え難い。
- ・米国 NRC の Regulatory Guide 1.76 においては、設計飛来物としての自動車が 9.1m(30ft)以下に影響を及ぼすこととしている。
- ・これらの車両については、評価でも浮き上がり高さが小さい(~12 m)結果となっている。

貯蔵建屋のうち衝突に対する強度上の裕度が小さい部位としては、前述した設計飛来物の衝突を考慮する範囲からは外れるが、貯蔵区域排気塔上部の外壁(厚さ約 40 cm)がある(第 45 図, 第 46 図参照)。ワゴン車の衝突に対するコンクリート裏面剥離限界厚さは保守的に評価して約 47 cm であり裏面剥離限界の評価値を超えているが、コンクリート貫通限界厚さ*(約 22 cm)に対しては十分な余裕があるため貫通が生じることはない。

なお、周辺道路を走行中の車両が竜巻により飛散する場合として、貯蔵建屋周辺と敷地周辺道路の高低差を考慮して飛散距離を評価した結果を第 18 表に示す。軽自動車及びワゴン車で飛散距離が貯蔵建屋—敷地周辺道路間の距離と同程度、もしくは若干上回るケースがあるが、飛散物の浮き上がり高さが最大となるのは貯蔵建屋の手前であり、飛来物の軌道を考慮すると、前述した設計飛来物の衝突

を考慮する範囲である貯蔵建屋低層部を超えた個所に飛来物が衝突する可能性は小さい（第 48 図参照）。

* 鉄筋コンクリート貫通限界厚さについても、裏面剥離限界厚さと同様に NEI 07-13（4.2 参照）に示されている方法により求める。貫通限界厚さは Degen 式（下記）により求める。

$$1.52 < \frac{x}{d} \leq 13.42 \text{ の場合, } e = \alpha_e \left(0.69 + 1.29 \left(\frac{x}{d} \right) \right) d, \quad \frac{x}{d} \leq 1.52 \text{ の場合, } e = \alpha_e \left\{ 2.2 \left(\frac{x}{d} \right) - 0.3 \left(\frac{x}{d} \right)^2 \right\} d$$

貫入深さは、修正 NDRC 式（下記）により求める。

$$\frac{x}{d} \geq 2 \text{ の場合, } \frac{x}{d} = 2 \left\{ \frac{12145}{\sqrt{f_c}} N \cdot d^{0.2} \cdot D \left(\frac{V}{1000} \right)^{1.8} \right\}^{0.5}, \quad \frac{x}{d} < 2 \text{ の場合, } \frac{x}{d} = \frac{12145}{\sqrt{f_c}} N \cdot d^{0.2} \cdot D \left(\frac{V}{1000} \right)^{1.8} + 1$$

ここで、

e : 貫通限界厚さ (cm)

x : 貫入深さ (cm)

d : 飛来物の直径 (cm)

V : 飛来物の衝突速度 (cm/s)

D : 飛来物の密度 W/d^3 (kgf/cm³)

W : 飛来物の重量 (kgf)

f_c : コンクリートの圧縮強度 (kgf/cm²) (設計基準強度を用いる)

N : 飛来物の先端形状係数 (平坦 0.72, 鈍い 0.84, 球状 1.00, 非常に鋭い 1.14)

α_e : 低減係数 (柔飛来物 0.65, 剛飛来物 1.0)

(ii) バス，電源車

バス及び電源車は飛来物としての運動エネルギーが大きく，設計飛来物として設定したワゴン車を上回っていることから，飛散防止措置を行うことが適切と考えられる。

敷地内を運行するバス（大型のトラックを含む）及び電源車については，台数が限定されており，飛散防止措置（退避に備えた運転手の待機，固縛）を必要に応じてとることとする。

なお，敷地周辺道路を走行中のバスが竜巻により飛散する場合については，貯蔵建屋周辺と敷地周辺道路との高度差を考慮しても飛散距離は貯蔵建屋－敷地周辺道路間の距離を下回っており（第 47 図及び第 18 表参照），バスが周辺道路から飛来して貯蔵建屋に到達する可能性は小さい。バスの貯蔵建屋への衝突を仮定した場合，コンクリート壁の裏面剥離限界厚さ（約 83 cm）は貯蔵建屋低層部の一部の壁厚を上回る（第 45 図，第 46 図参照）が，コンクリート壁に裏面剥離が発生してもコンクリート片が金属キャスクに影響を与える可能性は極めて小さい。またバスの衝突に対するコンクリート壁の貫通限界厚さ（約 43 cm）は貯蔵建屋排気塔上部の壁厚を上回るが，国内における F3 竜巻である佐呂間竜巻（2006. 11. 7）等の被害状況からも，バスが長距離を高く飛んで貯蔵建屋排気塔上部に衝突する可能性は現実的に考え難い。

以上より，バス及び電源車は設計飛来物から除外する。

(iii) コンテナ，物置，ドラム缶

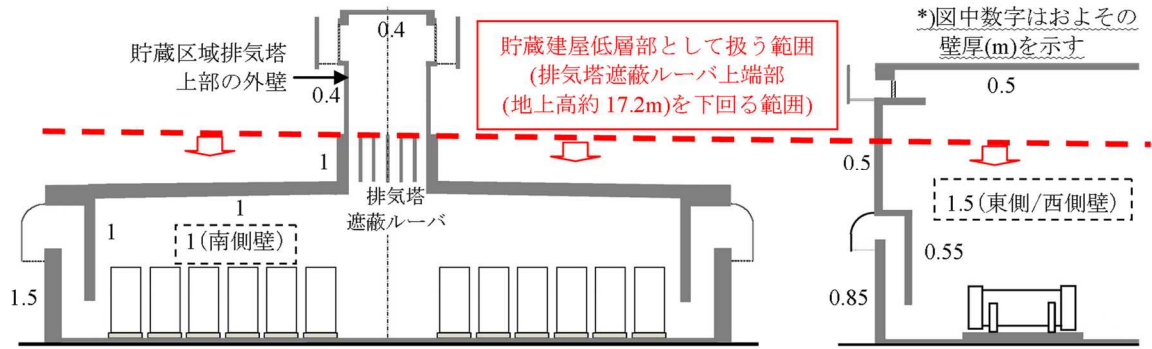
これらの物品は比較的大きな飛散距離及び浮き上がり高さを持っており，またコンテナは運動エネルギーが設計飛来物として設定したワゴン車を上回っていることから，飛散防止措置を行うことが適切と考えられる。

これらの物品はいずれも固定ないし半固定状態で維持されるものであり，飛散防止措置（固縛・固定）を原則としてとることとする。

なお，これらの物品が敷地周辺道路付近に設置される可能性は小

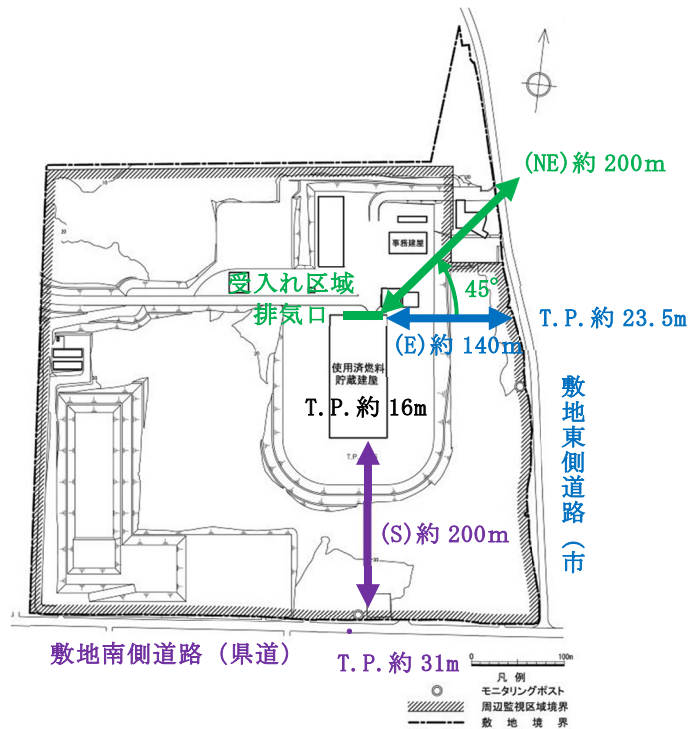
さいことから、竜巻の襲来により敷地周辺道路から飛来して貯蔵建屋に到達する可能性は小さい。

以上より、コンテナ、物置及びドラム缶は設計飛来物から除外する。



第 45 図 貯蔵区域断面図
(東西方向)

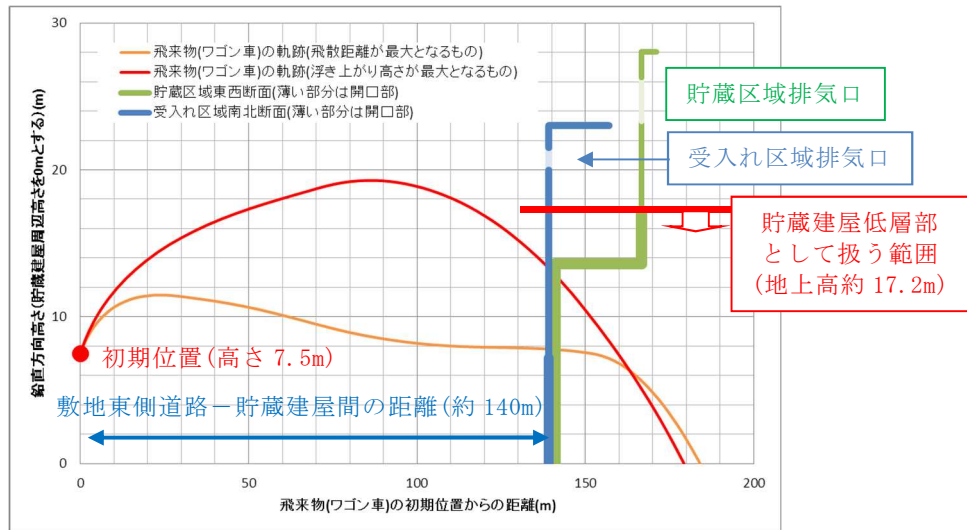
第 46 図 受入れ区域断面
(南北方向)



第 47 図 貯蔵建屋と周辺道路の位置関係

第 18 表 初期高さによる飛散距離への影響

	飛散距離の評価値(m)		
	初期高さ 0m	初期高さ 7.5m 貯蔵建屋周囲一敷地東側 道路の標高差相当	初期高さ 15m 貯蔵建屋周囲一敷地南 側道路の標高差相当
軽自動車	150	180	200
乗用車	100	130	150
ワゴン車	160	190	200
バス	100	130	150
参考		第 47 図の (E) : 敷地東側 道路までの距離約 140m	第 47 図の (S) : 敷地南 側 道路までの距離約 200m



第 48 図 ワゴン車の飛散挙動

- ・敷地東側道路(貯蔵建屋周辺との高低差約 7.5m)を初期高さとした飛散評価結果における飛散距離と高さの関係を示す
- ・貯蔵建屋及び貯蔵区域/受入れ区域排気口の位置を、高さを揃えて図上に示した

(4) 設定した設計飛来物のまとめ

(1)～(3)における検討の結果，設定した設計飛来物を第19表に示す。

第19表 設定した設計飛来物

品目	鋼製材 (ガイド)	ワゴン車
寸法(m)	長さ×幅×奥行 4.2×0.3×0.2	長さ×幅×高さ 5.4×1.9×2.3
質量(kg)	135	1970
水平最大速度(m/s)	51	53
鉛直最大速度(m/s)	34	27
(参考)運動エネルギー (kJ)	180	2800
備考	設計飛来物の衝突を考慮する 範囲は貯蔵建屋低層部とする	設計飛来物の衝突を考慮する 範囲は貯蔵建屋低層部とする

5.2.2.2 竜巻の風圧力による荷重

竜巻により貯蔵建屋に作用する荷重として「風圧力による荷重」,「気圧差による荷重」及び「設計飛来物による衝撃荷重」を下式により算出する。

$$W_w = q \cdot G \cdot C \cdot A$$

ここで,

W_w : 風圧力による荷重

q : 設計用速度圧

G : ガスト影響係数 (=1.0)

C : 風力係数 (施設の形状や風圧力が作用する部位 (屋根, 壁の形状, 勾配) に応じて設定する。)

A : 貯蔵建屋の受圧面積

$$q = (1/2) \cdot \rho \cdot V^2$$

ここで,

ρ : 空気密度

V : 最大風速

ただし, 竜巻による最大風速は, 一般的には水平方向の風速として算定されるが, 鉛直方向の風圧力に対してぜい弱と考えられる部位が存在する場合には, 鉛直方向の最大風速等に基づいて算出した鉛直方向の風圧力についても考慮した設計とする。

5.2.2.3 気圧低下に伴う貯蔵建屋内外の気圧差による荷重

竜巻における気圧低下によって生じる外部事象防護施設内外の気圧差による圧力 (W_p) は, 気圧低下量 (ΔP) の最大値に基づき設定する。

貯蔵建屋は給気口及び排気口が外気に開放された構造であり, 建屋内外の気圧差は生じにくいと考えられるが, 保守的に気圧差による圧力荷重が最も大きくなる「閉じた施設」を仮定し, 内外気圧差による圧力荷重 (W_p) を下式により算出する。

$$W_p = \Delta P_{\max} \cdot A$$

ΔP_{\max} : 最大気圧低下量 (89hPa)

A : 施設の受圧面積

5.2.2.4 設計飛来物による衝撃荷重

飛来物の衝突方向及び衝突面積を考慮して設計飛来物が貯蔵建屋に衝突した場合の影響が大きくなるように衝撃荷重を算出する。

5.2.2.5 複合荷重（設計竜巻荷重の組み合わせ）

外部事象防護施設の評価に用いる設計竜巻荷重は、竜巻の風圧力による荷重（ W_w ）、竜巻による気圧差による荷重（ W_p ）、及び設計飛来物による衝撃荷重（ W_M ）を組み合わせた複合荷重とし、下式により算出する。

なお、竜巻防護施設（金属キャスク）を内包する貯蔵建屋に対し、設計竜巻荷重の影響が内包する金属キャスクの基本的安全機能へ波及しない設計とするため、 W_{T1} 及び W_{T2} の両荷重をそれぞれ作用させる。

$$W_{T1} = W_p$$

$$W_{T2} = W_w + 0.5 \cdot W_p + W_M$$

W_{T1} , W_{T2} : 竜巻による複合荷重

W_w : 竜巻の風圧力による荷重

W_p : 竜巻による気圧差による荷重

W_M : 設計飛来物による衝撃荷重

5.2.2.6 設計竜巻荷重と組み合わせる荷重（常時作用する荷重，自然現象）

(1) 外部事象防護施設に常時作用する荷重

外部事象防護施設に常時作用する荷重を適切に組み合わせる。

(2) 竜巻以外の自然現象による荷重

積乱雲の発達時に竜巻と同時発生する可能性がある自然現象は、落雷、積雪、ひょう及び降水であるが、これらの現象との組み合わせにより発生する荷重は、設計竜巻荷重に包絡されることから、設計竜巻荷重と組み合わせる荷重として考慮しない。

- ・落雷：竜巻と落雷が同時に発生する場合においても、落雷による影響は雷撃であり、竜巻による荷重とは影響が異なる。
- ・積雪：竜巻の作用時間は極めて短時間であること、積雪の荷重は冬季

に発生し、積雪荷重の大きさや継続時間は除雪を行うことで低減できることから、発生頻度が極めて小さい設計竜巻の風荷重と積雪荷重による荷重が同時に発生し、貯蔵建屋に影響を与えることは考えにくいため、組み合わせを考慮しない。リサイクル燃料備蓄センターの立地地域においては、竜巻が冬季に襲来する場合は竜巻通過前後に降雪を伴う可能性はあるが、上昇流の竜巻本体周辺では、竜巻通過時に雪は降らない。また、下降流の竜巻通過時や竜巻通過前に積もった雪の大部分は竜巻の風により吹き飛ばされ、雪による荷重は十分小さく設計竜巻荷重に包絡される。

- ・ひょう：ひょうは積乱雲から降る直径5mm以上の氷の粒であり、仮に直径10cm程度の大型のひょうを想定した場合でも、その質量は約0.5kgである。竜巻とひょうが同時に発生する場合においても、直径10cm程度のひょうの終端速度は59m/s、運動エネルギーは約0.9kJであり、設計飛来物の運動エネルギーと比べ十分小さく、ひょうの衝突による荷重は設計竜巻荷重に包絡される。また、貯蔵建屋は鉛直方向に開口部を持たないため、ひょうが貯蔵建屋内に侵入することはない。
- ・降水：竜巻と降水が同時に発生する場合においても、降水により屋外施設に荷重の影響を与えることはなく、また、降水による荷重は十分小さいため、設計竜巻荷重に包絡される。

5.2.3 竜巻随件事象に対する評価

竜巻随件事象は、過去の竜巻被害状況及びリサイクル燃料備蓄センターの施設配置から、想定される事象として、火災、溢水及び外部電源喪失を抽出し、事象が発生した場合の影響評価を行ない、基本的安全機能が損なわれないことを確認した。

5.2.3.1 火災

竜巻随件事象として、リサイクル燃料備蓄センターの敷地内の危険物貯蔵設備が竜巻飛来物の衝突により破損し危険物が漏えいして発生する火災及び

竜巻飛来物となった車両の積載燃料が漏えいして発生する火災が考えられる。

敷地内に設置する危険物貯蔵設備については、使用済燃料貯蔵施設がこれらの火災を想定しても基本的安全機能を損なわない設計とすることを確認している。

また、竜巻飛来物となった車両の火災については、燃料の量が限定されていることから敷地内に設置する危険物貯蔵設備に比べても影響は小さく、自衛消防隊が消火器や動力消防ポンプによる消火活動を行うことから、使用済燃料貯蔵施設が基本的安全機能を損なうことはない。

5.2.3.2 溢水

使用済燃料貯蔵施設は自然換気により使用済燃料集合体の崩壊熱を除去する設計であり、崩壊熱除去に水を使用しないこと及び貯蔵建屋近辺に大規模な溢水源がないことから、竜巻により、使用済燃料貯蔵施設の基本的安全機能に影響を及ぼすような溢水は発生しない。

5.2.3.3 外部電源喪失

使用済燃料貯蔵施設は、使用済燃料集合体を金属キャスクに収納した状態で静的に貯蔵する施設であることから、竜巻により外部電源系統からの電気の供給が停止しても、使用済燃料貯蔵施設の基本的安全機能に直接影響を及ぼすおそれはない。なお、計測設備、放射線監視設備、通信連絡設備及び入退域管理装置に対しては、外部電源喪失時には貯蔵建屋内に設置する無停電電源装置から給電し、給電時間を超える場合は電源車からの給電又は代替計測により監視を継続する。

5.2.4 評価手順及び飛散防止措置

屋外において飛散するおそれのある資機材及び車両については、飛来時の運動エネルギー等を評価し、外部事象防護施設への影響の有無を確認する。外部事象防護施設へ影響を及ぼす大型の資機材及び車両については、飛散防止措置として、固縛、固定又は退避を実施することとし、これらについて、あらかじめ定める手順に従って対応する。

気象モデルの概要

解析には WRF モデル (Weather Research and Forecasting model) と呼ばれる数値気象モデルを用いている。WRF モデルは、気象力学・物理現象を数値モデル化したメソスケール (竜巻の親雲の水平スケールに対応する水平方向 2km～20km 程度) の気象要素を解析できるコミュニティモデルとして世界的に利用されているモデルである。

主な計算条件は別添 1 - 1 表に示すとおりであり、電中研による長期高解像度再解析データセット (橋本ら 2013) と同様の条件を採用しており、ネスティングと呼ばれる技法を用いて、水平解像度 15 km で解析した結果をもとに水平解像度 5 km の解析結果を得る。これにより、粗い水平空間分解能 (ECMWF ERA-Interim: 約 70 km, ECMWF ERA-40: 約 250 km) の初期・境界値データから詳細メッシュの環境場を解析することができる。

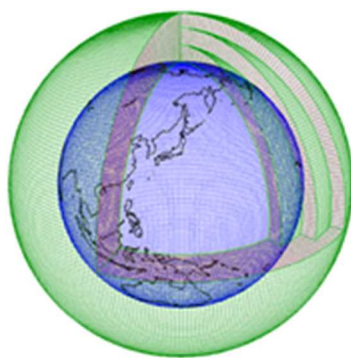
このモデルにより当時の環境場を解析 (再現) し、それをもとに突風関連指数を算出している。

水平グリッド間隔	15 km (親領域), 5 km (子領域)
鉛直層数	35
積分時間間隔	90 秒 (親領域), 30 秒 (子領域)
モデル上端気圧	50 hPa
初期・境界値データ	ECMWF-Interim (1989 年～), ERA40 (～1988 年)
ネスティング	フィードバック有
積雲対流スキーム	Kain-Fritsch (親領域のみ)
雲物理スキーム	Morrison 2-moment (両領域)
接地層スキーム	2-D Smagorinsky (両領域)
境界層スキーム	YSU (両領域)
地表面スキーム	Noah LSM (両領域)
放射スキーム (長波)	RRTM (両領域)
放射スキーム (短波)	Dudhia (両領域)

別添 1 - 1 表 WRF モデルセットアップの概要

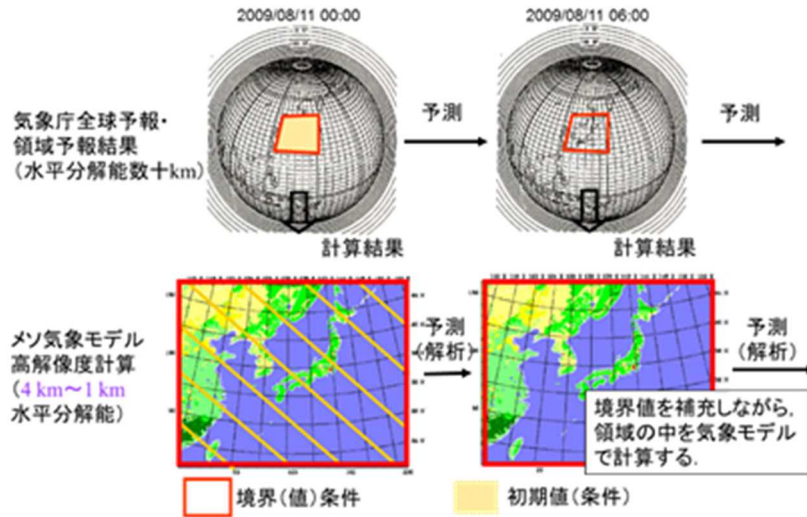
気象モデルとは、物理・力学的法則に基づいて、物理量の時間変化を計算機により数値的に解くために各諸過程を概念化したもので、気象庁による日々の気象予報もこの気象モデルを用いて実施されている。別添 1 - 1 図のように計算対象領域を 3 次元格子で覆い、各格子点上で気圧、風などの物理量を定義する。観測データや気象庁等の解析・予報結果をもとに計算開始時刻の物理量を決めて、計算領域境界部の値を時々刻々変化させながら（別添 1 - 2 図）、運動方程式、熱力学方程式、連続式、および水分量の保存式等を数値積分すると、将来時刻における気象要素の値が計算される。各方程式中の運動量や熱・水のソース・シンク項は各物理過程によって生み出される（例えば、水蒸気から水滴が生成されるとその潜熱が熱力学方程式中のソースとなる）が、気象モデルでは別添 1 - 3 図に示すような物理過程がモデル化され、力学系の各保存式のソルバーと連携している。

この種の気象モデルは、放射性汚染気塊の輸送量計算にも使用されており、WSPEEDI-II (Worldwide version of System for Prediction of Environmental Emergency Dose Information ; 世界版緊急時環境線量情報予測システム第 2 版) では、本検討に用いた WRF モデルの前身に位置づけられる MM5 (PSU/NCAR Mesoscale Model version 5 ; Dudhia 1993) が環境場の入力情報の作成に用いられている（山澤ら 1997）。WRF モデルは、MM5 の力学系・物理モデル共に大幅な改良が加えることにより開発されたものであり、現在米国においては気象の現業・研究の両面で活用されている。また、わが国を含めた諸外国においても広く活用されている。

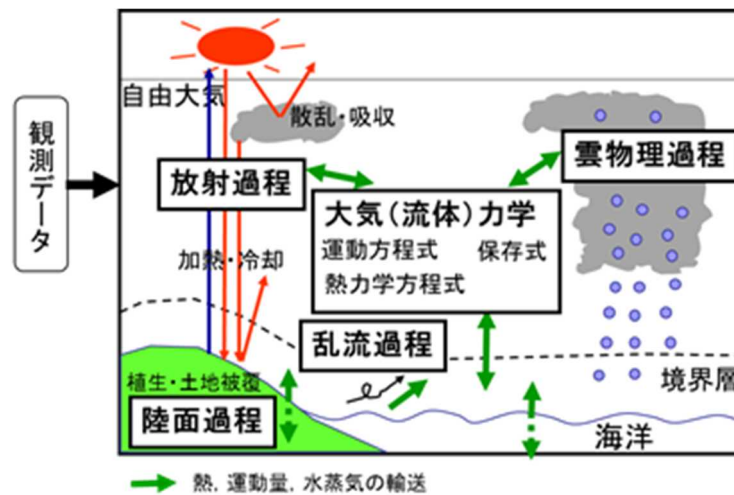


別添 1 - 1 図 計算グリッド構造の例

(気象庁ホームページ <http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/whitep/1-3-1.html> より)



別添 1 - 2 図 気象モデルを用いた解析・予測計算の流れの概念図
(気象庁全球モデルを例に)



別添 1 - 3 図 気象モデルを用いた計算の模式図

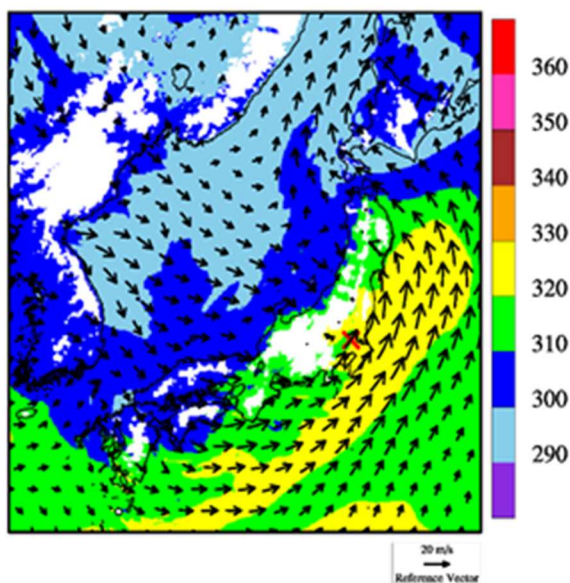
参考文献

- (1)Dudhia, J., 1993: A nonhydrostatic version of the Penn State-NCAR mesoscale model: validation tests and simulation of an Atlantic cyclone and cold front. Mon. Wea. Rev., 121, 1493-1513.
- (2)山澤弘実, 茅野政道, 永井晴康, 古野朗子, 1997: 緊急時環境線量情報予測システム (世界版) WSPEEDI の開発と検証. 日本原子力学会誌, 39, 881-892.

分析対象事例の個別概要

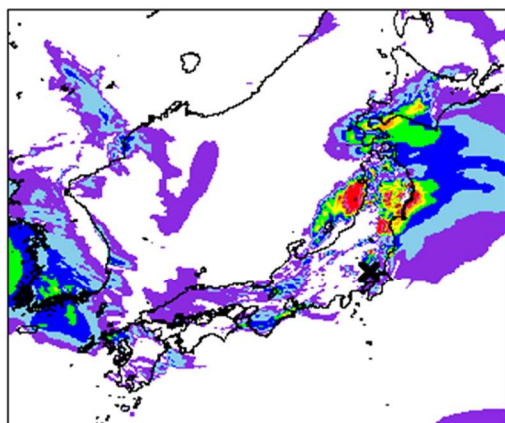
1. 2012/05/06 (茨城県常総市) F3 事例 (気圧の谷・寒気移流)

太平洋側から南西風が吹き込む一方、大陸・日本海側側から寒気を伴う北よりの風が吹いており風のシアと大気不安定度が高まっている。SReH の値は東日本の太平洋側で非常に高いが、関東平野周辺では CAPE が非常に高く、3 個の竜巻がほぼ同時に発生した。

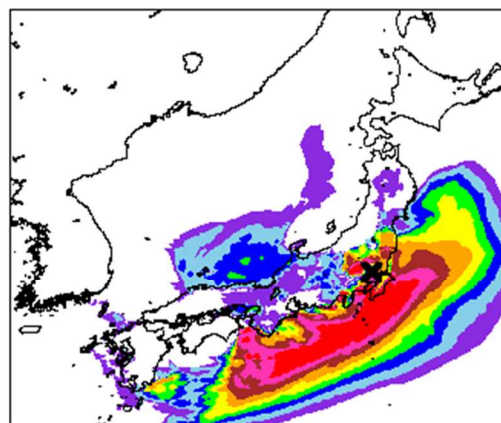
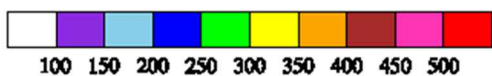


別添 2-1 図 2012/05/06 F3 事例における環境場と突風関連指数 (左) 500 m 高度における風向・風速および相当温位 (単位: K)

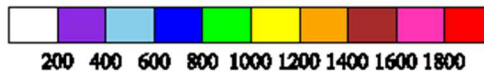
(左下) SReH, (右下) 最大 CAPE



Storm Relative Helicity [m^2/s^2]

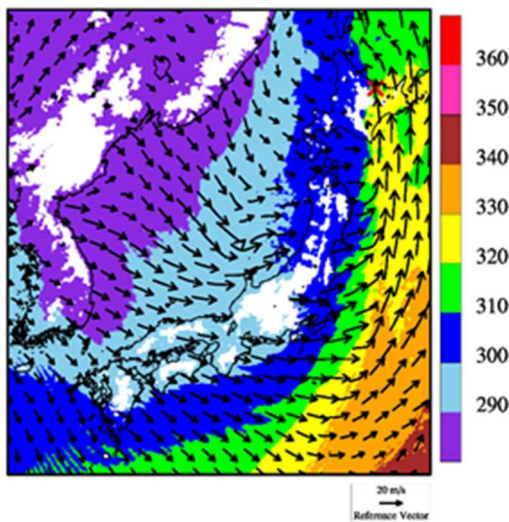


Convective Available Potential Energy (Max) [J/kg]



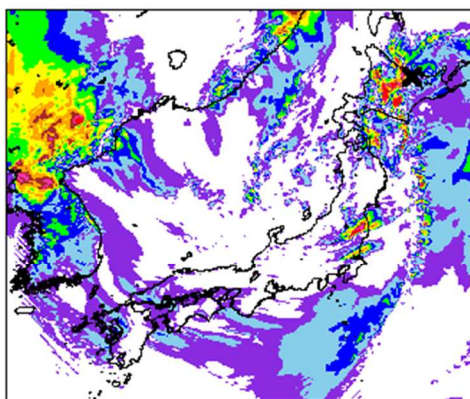
2. 2006/11/07(北海道網走支庁佐呂間町) F3 事例 (寒冷前線・暖気の移流) (佐呂間竜巻)

寒冷前線の西側では北西～西よりの冷たい風 (寒色系) が、東側では南よりの暖かい風 (暖色系) が吹いており、気温差と風の収束により積乱雲が発生・発達しやすい状況にある。特に、道東・オホーツク地方には太平洋から暖かく、不安定な空気塊が流入している。大気不安定度は道東の中でも南側で高くなっており、非常に高い風のシア (高い SReH) と相まって親雲が発達しやすい状況が解析されている。なお、同日に、周辺地域において2個の小さな竜巻も発生した。日本海側の中でも能登半島周辺より北側で季節風が吹き込み、大気がやや不安定になっている (CAPE が高めになっている) が、SReH が低く、道東・オホーツク海地方の状況とは異なる。

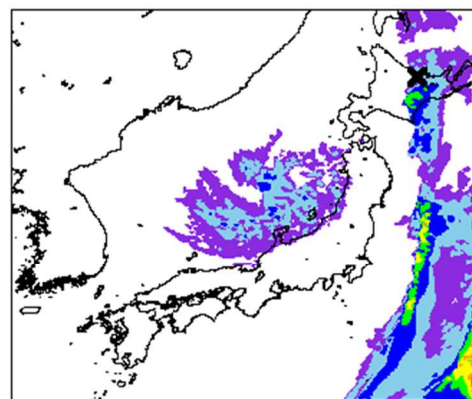
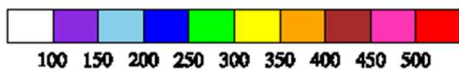


別添 2-2 図 2006/11/07 F3 事例における環境場と突風関連指数 (左) 500 m 高度における風向・風速および相当温位 (単位: K)

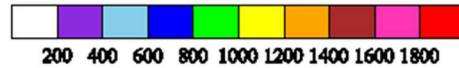
(左下) SReH, (右下) 最大 CAPE



Storm Relative Helicity [m^2/s^2]

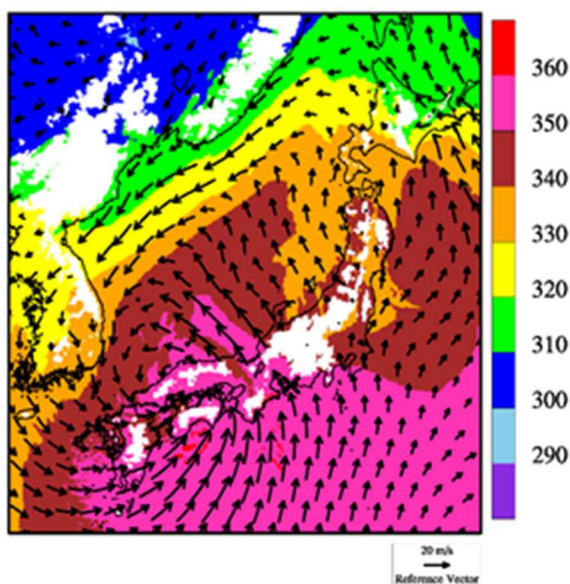


Convective Available Potential Energy (Max) [J/kg]

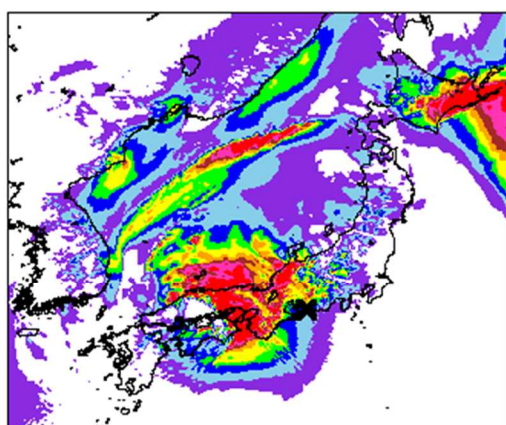


3. 1999/09/24(愛知県豊橋市) F3 事例 (台風)

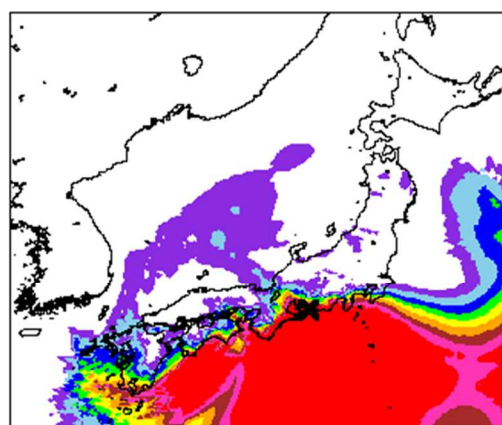
台風中心は隠岐の南西沖にあり、四国東部・紀伊半島の沿岸部および濃尾平野では、台風中心から遠く離れているが、太平洋側からの非常に不安定な暖湿流が流れ込み (CAPE が非常に大きく)、SReH も高くなっている。濃尾平野では4個の竜巻 (F1: 2個, F2: 1個, F3: 1個) が発生した。台風中心が日本海側にあり、日本海側の SReH は太平洋側に比べて決して小さくはないが、不安定度は格段に小さいのが見てとれる。



別添 2-3 図 1999/09/24 F3 事例における環境場と突風関連指数 (左) 500 m 高度における風向・風速および相当温位 (単位: K)
(左下) SReH, (右下) 最大 CAPE



Storm Relative Helicity [m^2/s^2]
100 150 200 250 300 350 400 450 500

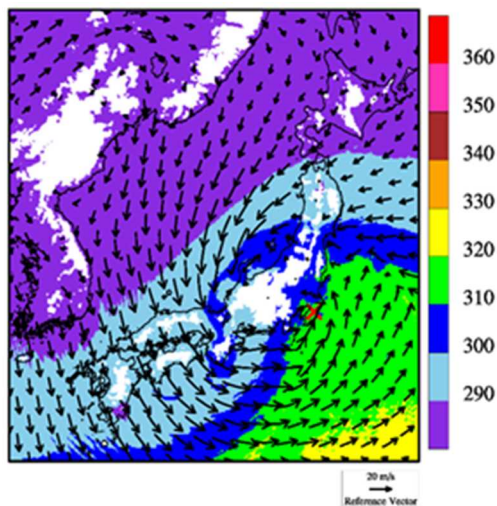


Convective Available Potential Energy (Max) [J/kg]
200 400 600 800 1000 1200 1400 1600 1800

4. 1990/12/11(千葉県茂原市) F3 事例 (暖気の移流・気圧の谷, 寒冷前線)

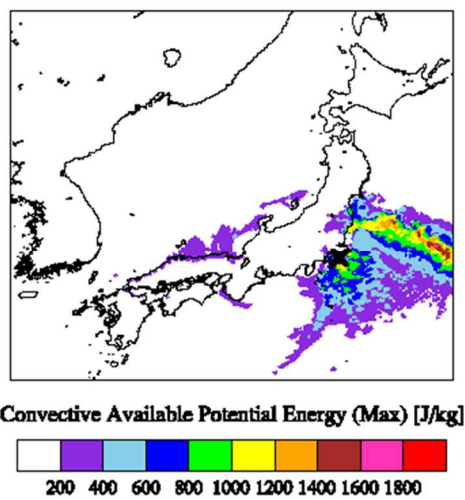
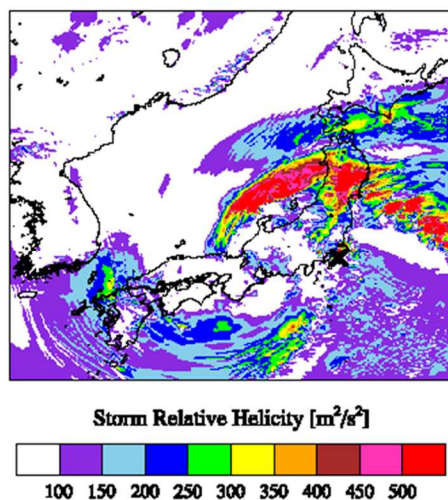
房総半島と日本海に低気圧があり, 房総半島の低気圧からは南西方向に寒冷前線が伸びている。そのため, 寒冷前線および房総半島にある低気圧を境に温位差が大きくなっている (寒色系と暖色系 (緑色) の境が明瞭である)。房総半島には低気圧中心に向かって暖かく, 不安定な空気塊が流入しており, 房総半島では局所的に SReH の値も高い (×でやや見づらい)。房総半島周辺では大小7個の竜巻が発生した。

日本海側の低気圧をとりまくように, 特に北側で SReH が非常に高くなっているが, 温位が低く, CAPE の値も小さくなっている。一方, 福島県沖に CAPE の高い領域が見られるが, SReH の値は大きくなく, 相当温位も比較的 low, 房総半島周辺とは状況が異なる。



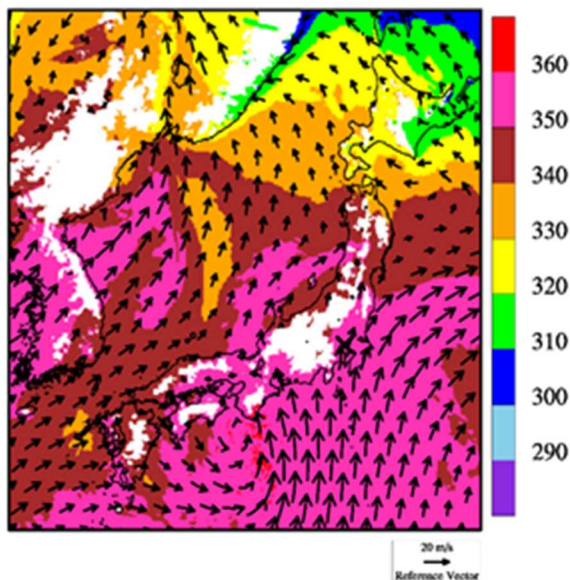
別添 2-4 図 1990/12/11 F3 事例における環境場と突風関連指数 (左) 500 m 高度における風向・風速および相当温位 (単位: K)

(左下) SReH, (右下) 最大 CAPE



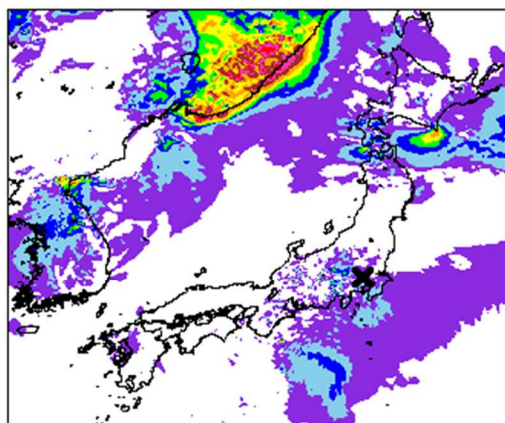
5. 1971/07/07(埼玉県浦和市) F3 事例 (台風)

台風を中心は紀伊半島の南西沖にあり、中部から東日本にかけては、太平洋側から非常に CAPE が高く、不安定な空気塊が流入している。SReH は、3. で示した豊橋竜巻ほど大きくはないが、発生地点周辺では SReH が比較的高くなっており(×でやや見づらい)、SReH と CAPE の両方が共に大きい環境場となっていた。

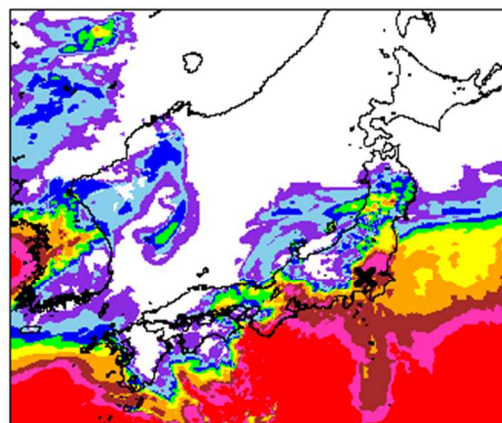
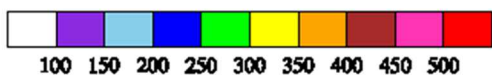


別添 2-5 図 1971/07/07 F3 事例における環境場と突風関連指数 (左) 500 m 高度における風向・風速および相当温位 (単位: K)

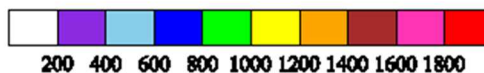
(左下) SReH, (右下) 最大 CAPE



Storm Relative Helicity [m^2/s^2]

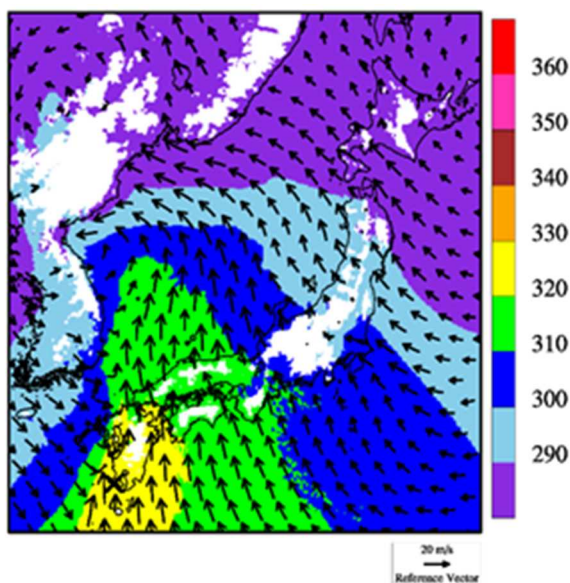


Convective Available Potential Energy (Max) [J/kg]

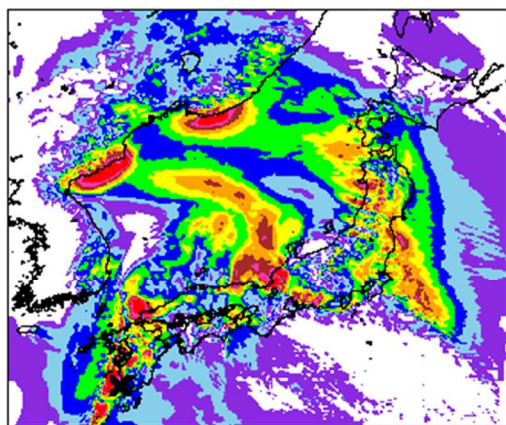


6. 1990/02/19(鹿児島県枕崎市) F2-F3 事例(寒冷前線・暖気の移流・その他(低気圧))

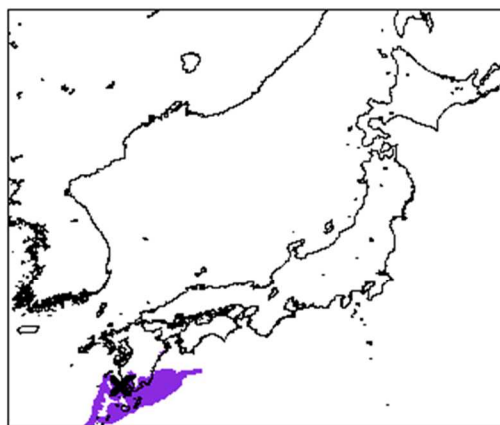
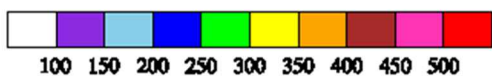
朝鮮半島東部の沖合にある低気圧から寒冷前線と温暖前線が伸び、九州から近畿にかけては比較的暖かい気流が太平洋側から流入している。その中でも発生地点周辺には最も暖かい空気塊が流入しており、鹿児島県南部では局所的に CAPE の値がやや高くなっている。しかし、CAPE 値は F3 竜巻事例に見られるほど高くない。一方、寒冷前線に沿って SReH が非常に高かった。不安定性にやや欠けていたのが、F3 規模には至らなかった理由の一つであると考えられる。



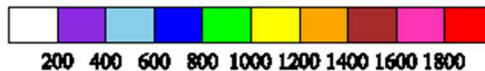
別添 2-6 図 1990/02/19 F2-F3 事例における環境場と突風関連指数(左) 500 m 高度における風向・風速および相当温位(単位: K)(左下) SReH, (右下) 最大 CAPE



Storm Relative Helicity [m^2/s^2]

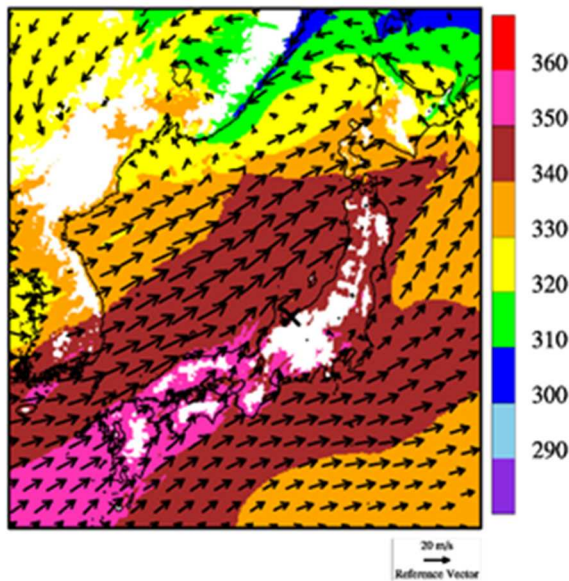


Convective Available Potential Energy (Max) [J/kg]



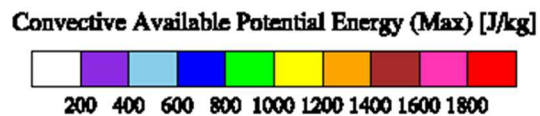
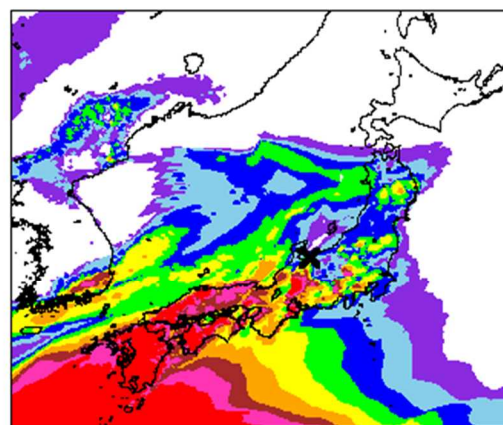
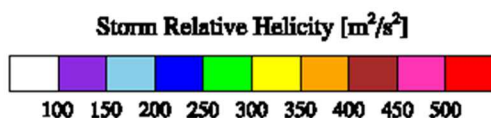
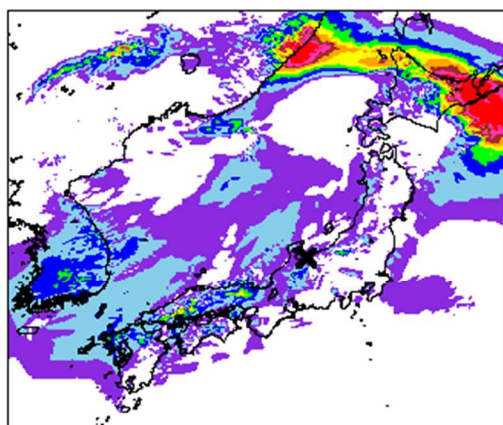
7. 1991/06/12(富山県魚津市) 日本海側 F2 事例 (寒冷前線・局地性擾乱)

日本海側沿岸に沿って寒冷前線があり、その北側では西南西の風が吹いている。空気塊の暖かさとしては太平洋側と同等のもの(茶色)が、対馬海峡から日本海に入り込んでおり、青森県沖まで到達している。ただし、大気不安定度は暖候期には大きくなく、寒冷前線南側の九州から近畿にかけての不安定度(CAPE 分布の赤い領域)と比べるとかなり小さい。SReH の値も特段高い傾向は見られず、F3 発生時の環境場とは様相が異なる。



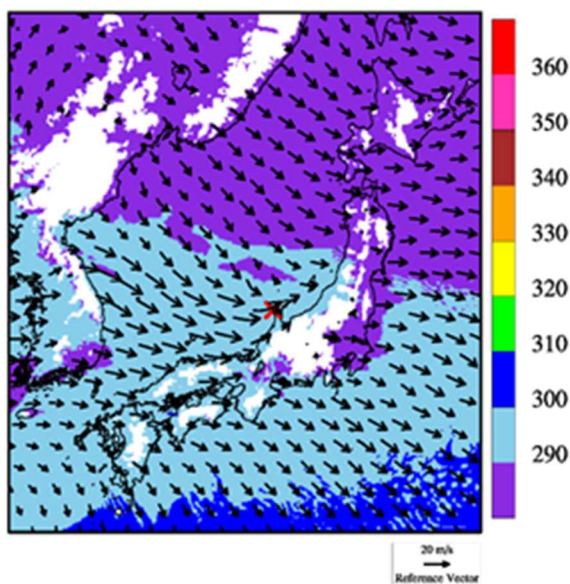
別添 2-7 図 1991/06/12 F2 事例における環境場と突風関連指数(左) 500 m 高度における風向・風速および相当温位(単位: K)

(左下) SReH, (右下) 最大 CAPE

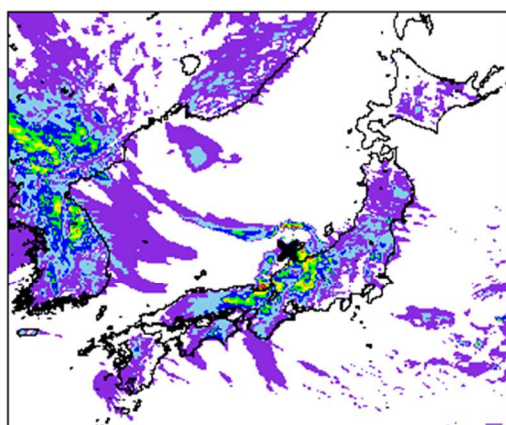


8. 1990/04/06 (石川県羽咋郡富来町) 日本海側 F2 事例 (オホーツク海低気圧・気圧の谷)

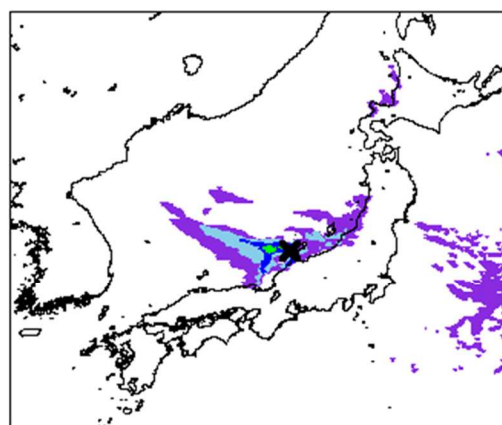
オホーツク海にある低気圧と九州の南西海上にある高気圧との間で、西高東低の気圧配置となっており、朝鮮半島東部から季節風が能登半島から敦賀湾に向かって流れ込んでいる。冬季によく見られる状況といえる。能登半島周辺での不安定度の高さは、海上で寒気が暖められて大気が不安定になったことが原因であり、SReH も高めである。特に能登半島周辺では高い。不安定化のメカニズムは異なるが、2. で示した佐呂間竜巻と似た環境場になっている。ただし、SReH が佐呂間竜巻に比べて4割程度低く、これがF3規模に達しなかった理由の一つであると考えられる。



別添 2-8 図 1990/04/06 F2 事例における環境場と突風関連指数 (左) 500 m 高度における風向・風速および相当温位 (単位: K) (左下) SReH, (右下) 最大 CAPE



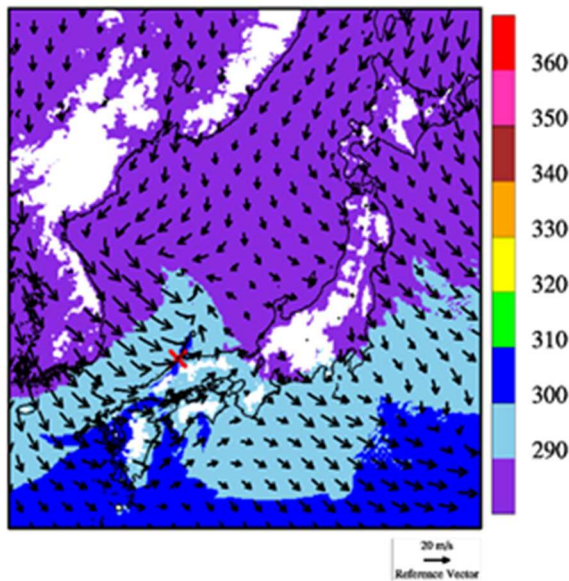
Storm Relative Helicity [m^2/s^2]
100 150 200 250 300 350 400 450 500



Convective Available Potential Energy (Max) [J/kg]
200 400 600 800 1000 1200 1400 1600 1800

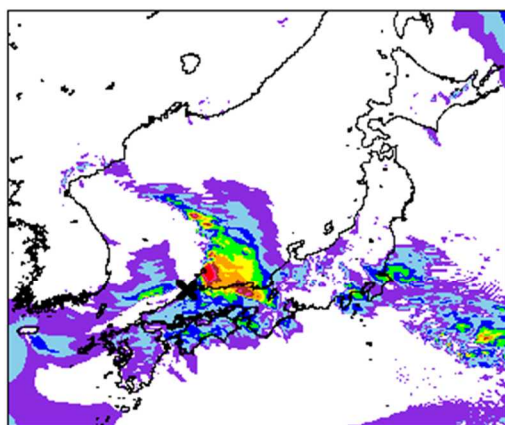
9. 1989/03/16(島根県簸川郡湖陵町) 日本海側 F2 事例 (局地性擾乱・寒気の移流)

西高東低の弱い冬型の気圧配置にあり、朝鮮半島から寒気が流入している。島根県の沖で渦状の流れが形成されており、SReH がかなり高くなっている。しかし、やや不安定な大気になっているものの、他の日本海側 F2 事例よりもさらに不安定度が低くなっており、環境場の観点では、F3 規模まで発達するには不安定度合が欠如していたと考えられる。

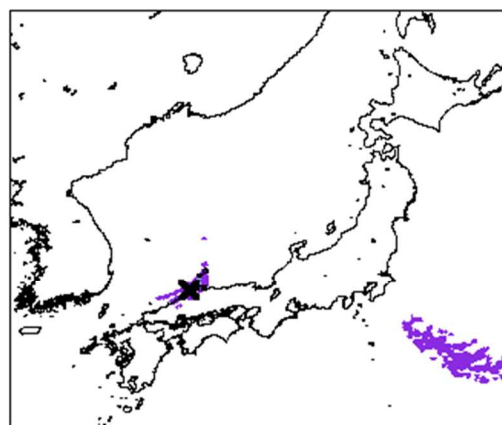


別添 2-9 図 1989/03/16 F2 事例における環境場と突風関連指数 (左) 500 m 高度における風向・風速および相当温位 (単位: K)

(左下) SReH, (右下) 最大 CAPE



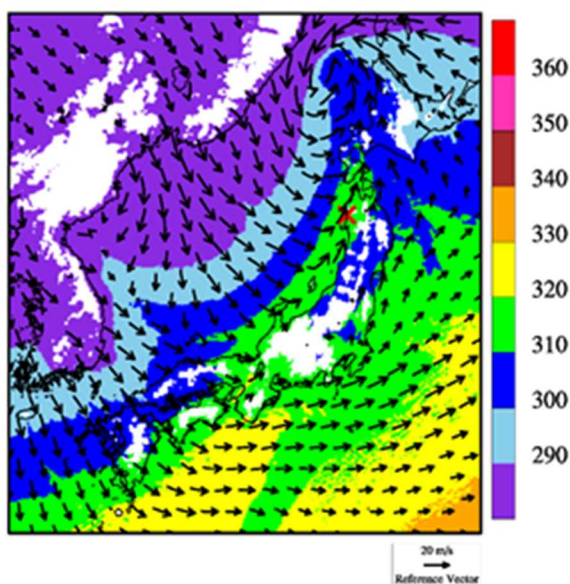
Storm Relative Helicity [m^2/s^2]
100 150 200 250 300 350 400 450 500



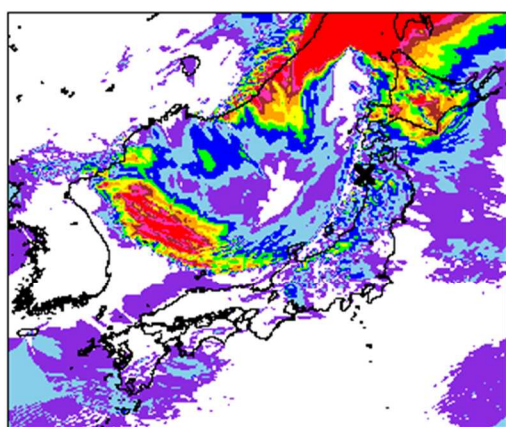
Convective Available Potential Energy (Max) [J/kg]
200 400 600 800 1000 1200 1400 1600 1800

10. 1999/11/25(秋田県山本郡八森町) 日本海側 F1-F2 事例(日本海低気圧・寒冷前線)

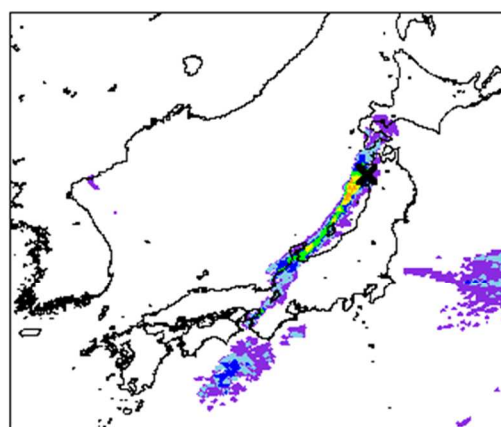
北海道の西海上にある低気圧から延びた寒冷前線が日本海沿岸を通過した際に発生した。寒冷前線上では温位のコントラスト(青色と緑色)が明瞭であり、寒冷前線に沿った地域の中でも発生地点周辺は SReH が比較的高く、CAPE の高い範囲の北端部に位置している。CAPE の大きさは、寒候期に発生した F3 竜巻事例を上回ったが、SReH は低かった。



別添 2-10 図 1999/11/25 F1-F2 事例における環境場と突風関連指数(左) 500 m 高度における風向・風速および相当温位(単位: K)
(左下) SReH, (右下) 最大 CAPE



Storm Relative Helicity [m^2/s^2]
100 150 200 250 300 350 400 450 500

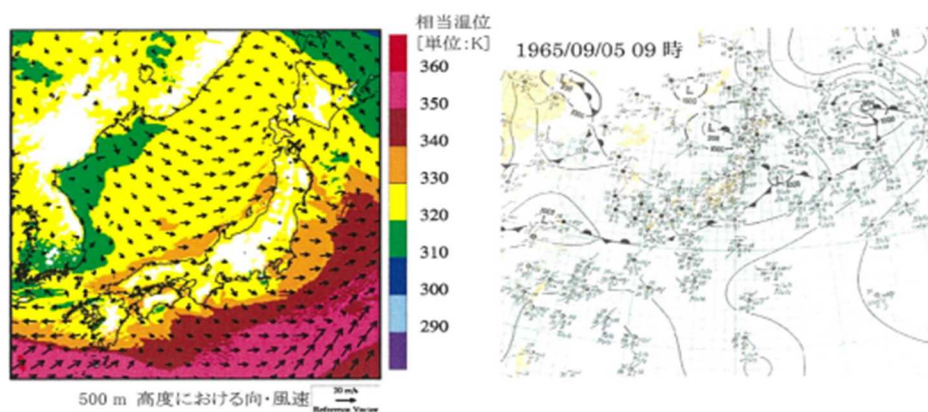


Convective Available Potential Energy (Max) [J/kg]
200 400 600 800 1000 1200 1400 1600 1800

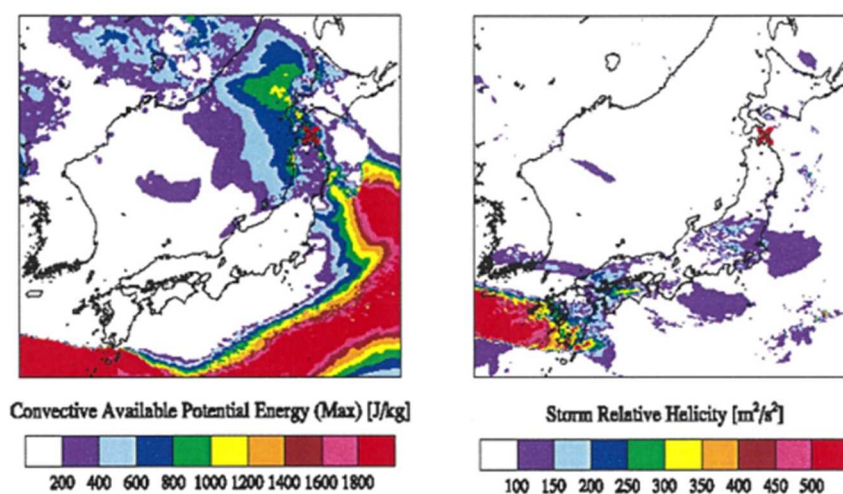
11. むつ市で発生した F2 竜巻について

東北太平洋側の東方沖の低気圧から伸びる前線で風向きが変わっていると同時に、前線の南側に不安定な暖かい空気塊が存在し CAPE 値が大きい。一方、北海道南西沖の低気圧の西側においても CAPE 値からやや不安定であることが見てとれる。しかし、二つの低気圧の間に位置する下北半島では、CAPE 値がそれほど大きくない。また、低気圧の中心を結ぶ閉塞前線上で風向の変化が見られ、この前線の通過時に竜巻が発生したものと推測されるが、SReH の分布からは顕著な渦度の高さは見られない。

発生日時	発生場所	F スケール	総観場
1965/09/05 11:40	青森県むつ市大平地区	(F2)	閉塞前線



別添 2-11 図(1) 風向・風速及び相当温位(左図)と天気図(右図, 気象庁 HP より)



別添 2-11 図(2) CAPE(左図)と SReH(右図)

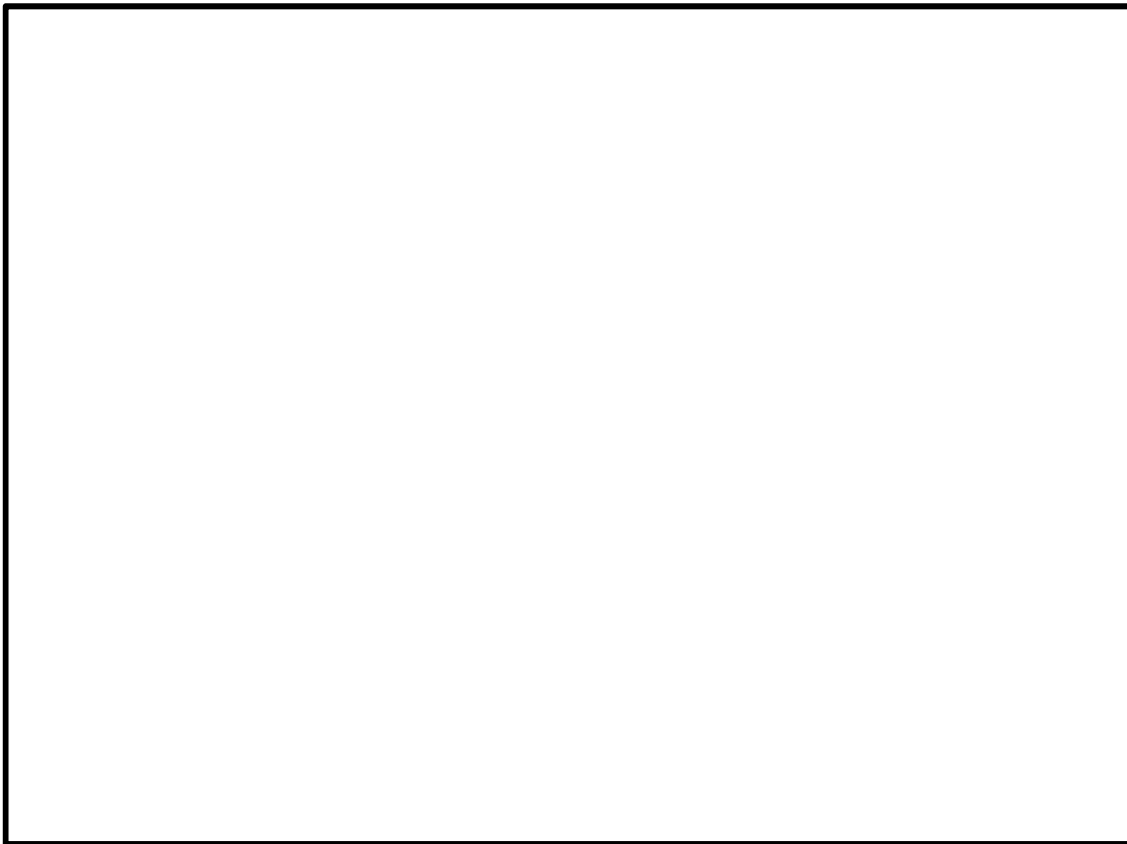
別添 3

竜巻飛来物に関する現地調査について

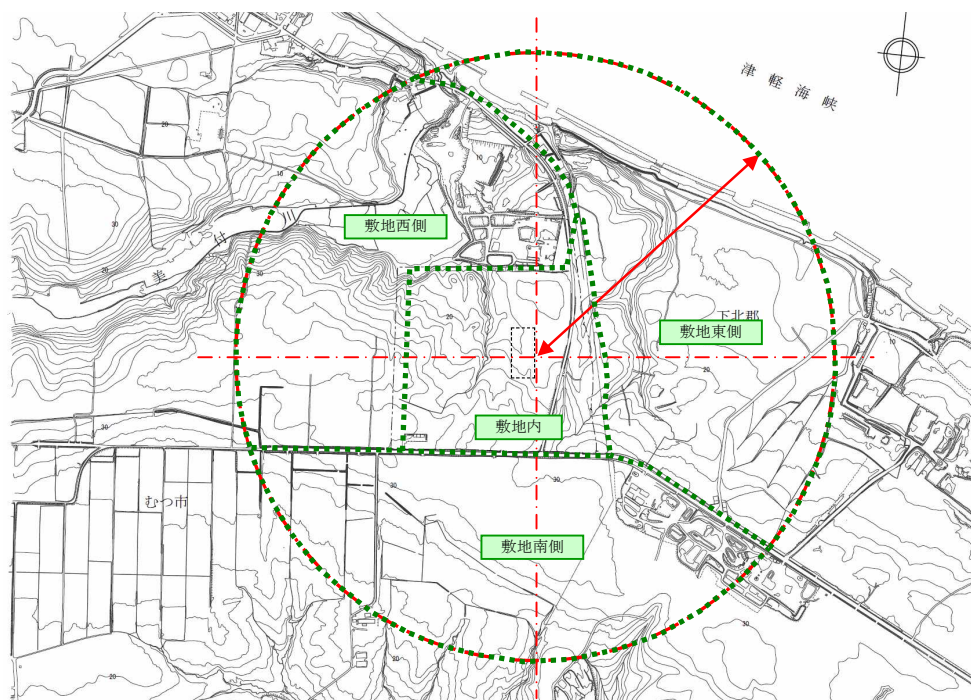
使用済燃料貯蔵施設において想定される竜巻による飛来物を調査し特定することを目的とし、竜巻飛来物に関する現地調査を平成 25 年 10 月 10 日～11 日、及び平成 27 年 10 月 29 日に実施した。

調査は、敷地内及び敷地外（貯蔵建屋を中心として半径 800m 程度の範囲）を対象としたが、敷地内については、貯蔵建屋に近接しており貯蔵建屋への影響が大きいと考えられる敷地内の物品をより詳細に調査する観点から、敷地内を対象に、調査対象範囲を事務建屋、車庫等 15 エリアに分割して、また敷地外については調査対象範囲を 3 エリアに分割し、各エリアにて目視により、常設物、仮設物のうち飛来物となりうる物品、及び二次飛来物（設置状況等から風圧や飛散による被害を受けて飛来物となりうる物）を抽出した。

敷地内の調査エリアを別添 3－1 図に、また敷地外の調査エリアを別添 3－2 図にそれぞれ示す。



別添 3－1 図 飛来物を特定するための調査エリアの位置（敷地内）



別添3-2図 飛来物を特定するための調査エリアの位置（敷地外）

現地調査を行った結果を調査エリア毎に示す。なお、調査により確認された物品を各々の写真に付記している。

(1) 調査エリア A：事務建屋

		
<p>ガラス窓, 社名看板, 乗用車 フラッグポール[固定]</p>		<p>(屋上) 押出成形板, アルミルーバ, 室外機[固定]</p>
		
<p>(屋上) アルミ梯子, アルミルーバ</p>	<p>(屋上) 八木アンテナ, パラボラアンテナ</p>	<p>(屋上) 閃光灯</p>
		
<p>(屋上) 社名看板</p>	<p>(屋上) 扉[固定], U字溝</p>	<p>室外機[固定], 扉[固定], ガラス窓</p>
		
<p>ボックス型スピーカー</p>	<p>丸型スピーカー</p>	<p>(事務建屋北側) 物置</p>
		
<p>(事務建屋北側) 境界標</p>		

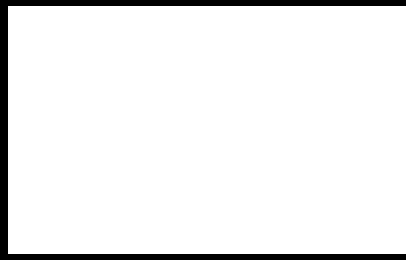
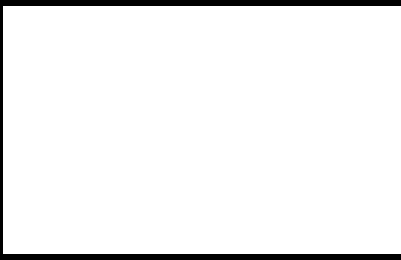
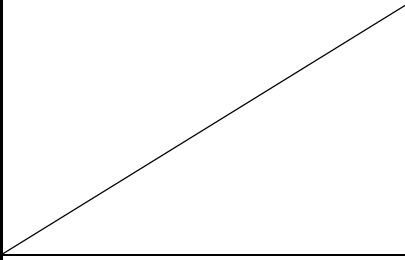
(2) 調査エリア B : 車庫

		
シャッター, 折板 (屋根), 消火器	物置	受変電設備[固定], 消火器

(3) 調査エリア C : 受変電設備

		
発電機[固定], 看板, 消火器, 扉[固定], 室外機[固定]	換気フード	扉[固定]

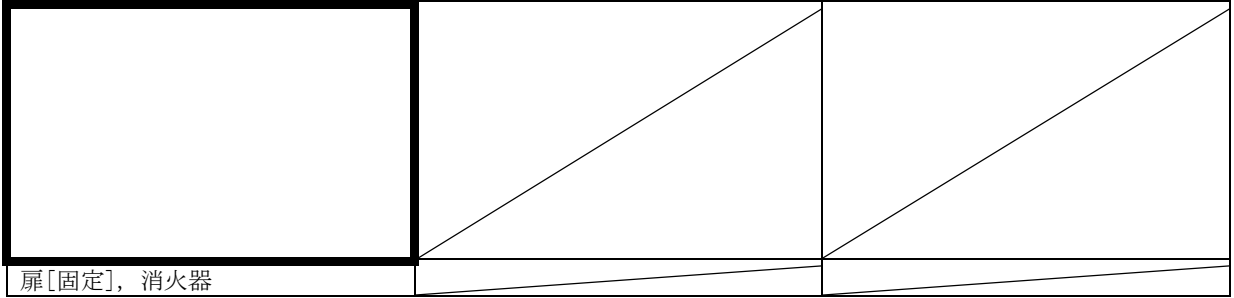
(4) 調査エリア D : 給水施設

		
(北側) 扉[固定], ガラス窓	(南側) 扉[固定], 換気フード	

(5) 調査エリア E : 特殊車両車庫

		
シャッター	折板 (屋根), 外壁 (押出成形板)	キャスク輸送車両

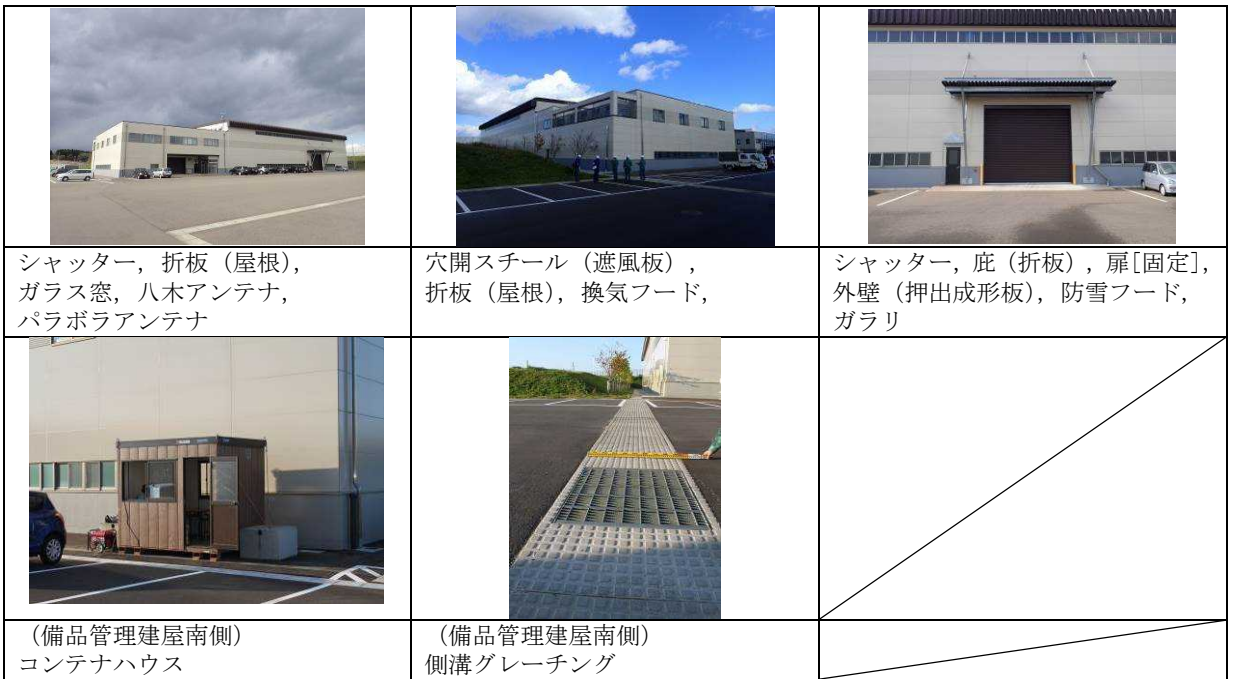
(6) 調査エリア F：地震観測小屋



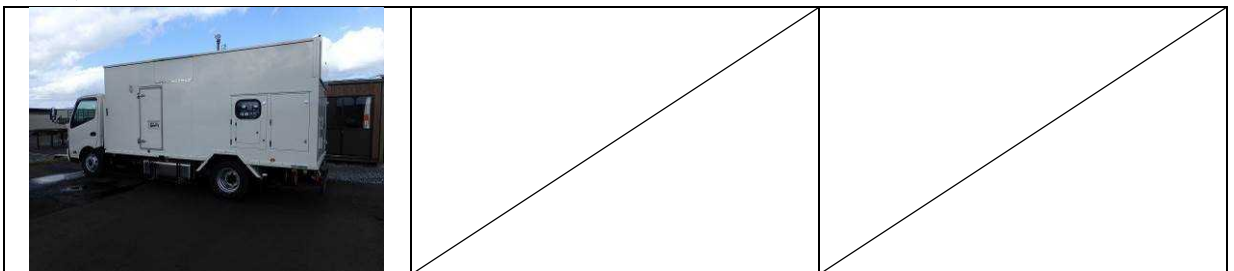
(7) 調査エリア G：コア倉庫



(8) 調査エリア H：備品管理建屋



(9) 調査エリア I：電源車



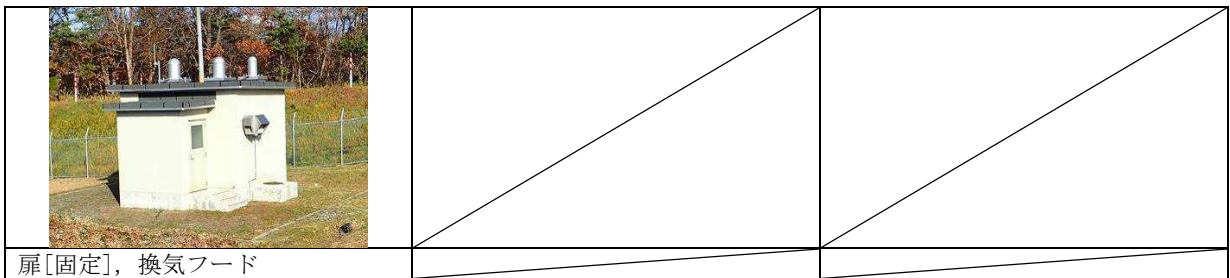
(10) 調査エリア J : 展望台



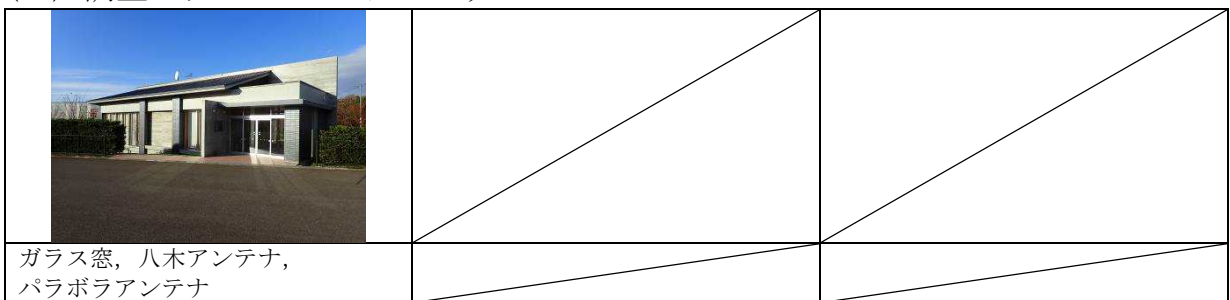
(11) 調査エリア K : 出入管理建屋



(12) 調査エリア L : (東側) モニタリングポスト



(13) 調査エリア M : ビジターハウス







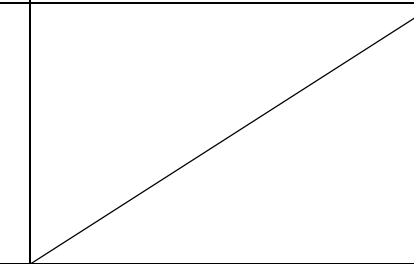
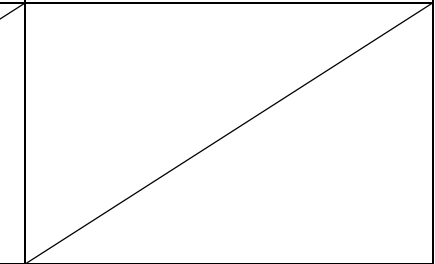


(14) 調査エリア N：貯蔵建屋

遮風板 (押出形成版), 換気フード, 社名看板, アルミガラリ	(貯蔵建屋東側) 集水枒グレーチング	(貯蔵建屋南側) コンクリート板 (集水枒蓋)
(貯蔵建屋西側) プラスチック板 (敷板)	(貯蔵建屋西側) 鋼製パイプ	(貯蔵建屋西側) ゴミ袋 (雑草)
(貯蔵建屋西側) コンクリート板 (集水枒蓋)	(貯蔵建屋西側) カラーコーン	(貯蔵建屋南側) 砂利

(15) 調査エリア 0：一般部

閃光灯	標識	照明灯

(16) その他 (敷地外)

		
<p>(敷地外西側) 集水枡グレーチング</p>	<p>(キャスク搬出入道路) マンホール蓋</p>	<p>(キャスク搬出入道路) 側溝グレーチング</p>
		
<p>(敷地外南側) 集水枡グレーチング</p>		

飛散評価手法について

1. 風速場モデル（ランキン渦モデル）

- ・非常に簡易な式で上空の水平方向の風速場を表現できる
 - －半径方向風速及び上昇風速は，飛来物評価のため接線風速に係数を掛ける形で付加
- ・風速は半径にのみ依存（高さに依存しない）
- ・上昇流は全領域で存在する（地面からも風の吹き出しが存在する）
 - －保守的ではあるが，特に地上の物体の挙動を評価する上で，実現象からの乖離が著しくなる

無次元座標 $r = R / R_m$

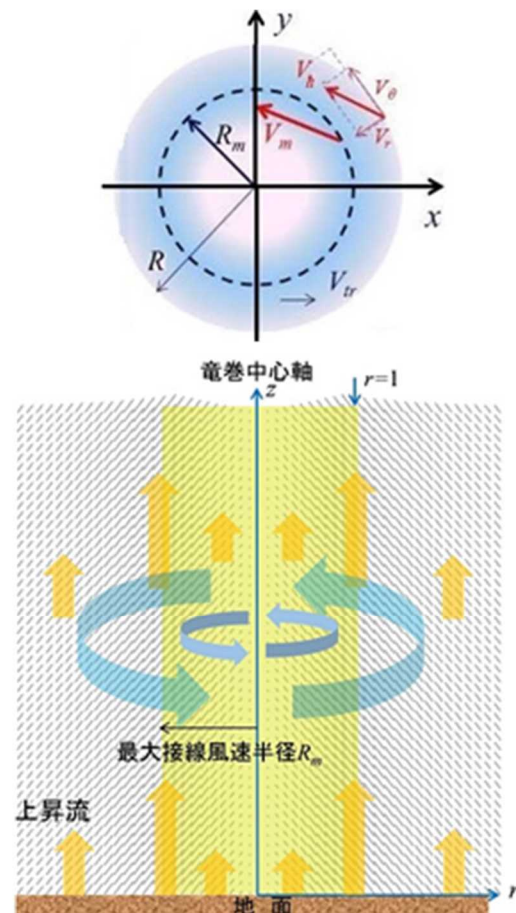
接線風速 $V_\theta = \frac{2V_m}{\sqrt{5}} F_r(r)$

$$F_r(r) = \begin{cases} r & (r < 1) \\ 1/r & (r \geq 1) \end{cases}$$

半径方向風速 $V_r = -\frac{1}{2} V_\theta$

上昇風速 $V_z = \frac{2}{3} V_\theta$

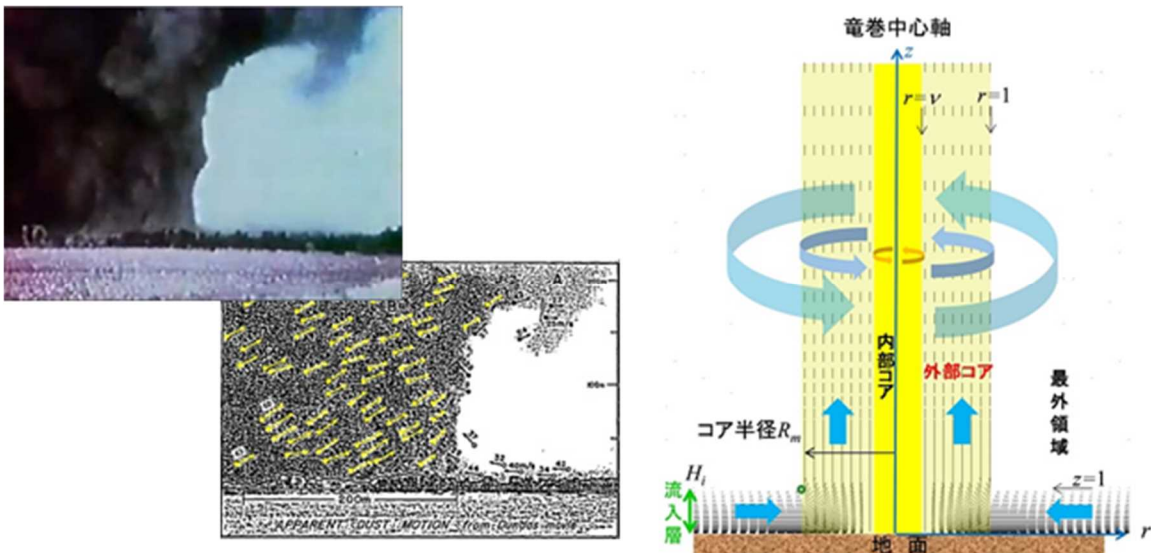
水平方向風速 $V_h = \sqrt{V_\theta^2 + V_r^2} = V_m F_r(r)$



Simiu, E. and Cordes, M., Tornado-Borne Missile Speeds, NBSIR 76-1050, 1976

2. 風速場モデル (フジタモデル)

- ・実観測に基づいて考案されたモデルであり、実際に近い風速場構造を表現
 - －半径方向に3領域 (内部コア, 外部コア, 最外領域),
 - 高さ方向に2領域 (流入層, 非流入層)
 - －地表面付近での竜巻中心に向かう強い水平方向流, 及び外部コアにおける上昇流を表現
- ・比較的簡易な代数式により, 高さ方向の風速分布や上昇風速も含めて風速場を表現できる
 - －地表面付近の風速場をより良く表現しており, 地上にある物体の挙動評価に適する



無次元座標 $r = R/R_m, \quad z = Z/H_i$

接線風速 $V_\theta = F_r(r)F_h(z)V_m$

$$F_r(r) = \begin{cases} r & (r < 1) \\ 1/r & (r \geq 1) \end{cases} \quad F_h(z) = \begin{cases} z^k & (z < 1) \\ \exp(-k(z-1)) & (z \geq 1) \end{cases}$$

$$V_r = \begin{cases} 0 & (r \leq v) \\ \frac{V_\theta \tan \alpha_0}{1-v^2} \left(1 - \frac{v^2}{r^2}\right) & (v < r < 1) \\ V_\theta \tan \alpha_0 & (r \geq 1) \end{cases}$$

$$\tan \alpha_0 = \begin{cases} -A(1-z^{1.5}) & (z < 1) \\ B\{1 - \exp(-k(z-1))\} & (z \geq 1) \end{cases}$$

上昇風速

$$V_z = \begin{cases} \frac{3}{28} \frac{\eta V_m}{1-v^2} A(16z^{7/6} - 7z^{8/3}) & (z < 1) \\ \frac{\eta V_m B \exp(-k(z-1))}{k(1-v^2)} \{2 - \exp(-k(z-1))\} & (z \geq 1) \end{cases}$$

k_0, k, v, η, A, B は定数

Fujita, T. T., Workbook of Tornadoes and High Winds for Engineering Applications, U. Chicago, 1978

3. 竜巻による風を受ける物体の挙動

・飛来物の運動方程式

$$\frac{d\mathbf{V}_M}{dt} = \frac{\rho C_D A}{2 m} |\mathbf{V}_w - \mathbf{V}_M| (\mathbf{V}_w - \mathbf{V}_M) - g\mathbf{k} + L\mathbf{k}$$

┌──────────①──────────┐ ② ③

\mathbf{V}_M : 飛来物の速度ベクトル
 \mathbf{V}_w : 飛来物位置での風速ベクトル
 \mathbf{k} : 鉛直上向きベクトル
 ρ : 空気密度
 g : 重力加速度
 m : 飛来物の質量
 C_D : 飛来物の抗力係数
 A : 飛来物の見付面積

・各々の加速度の成分

①物体が空気から受ける力(抗力) : 物体がランダムに回転し、各面が均等に風を受けると仮定

$$\text{抗力係数} \times \text{見付面積} : C_D A = \frac{1}{3} (C_{Dx} A_x + C_{Dy} A_y + C_{Dz} A_z)$$

②重力

③物体の上下面での空気の流れの差による生じる力(揚力)

$$\text{揚力加速度} : L = \frac{\rho C_L a}{2 m} |\mathbf{V}_w - \mathbf{V}_M|_{x,y}^2 f\left(\frac{Z}{d}\right)$$

C_L : 地面での揚力係数
 a : 地上に置かれた物体の見付面積

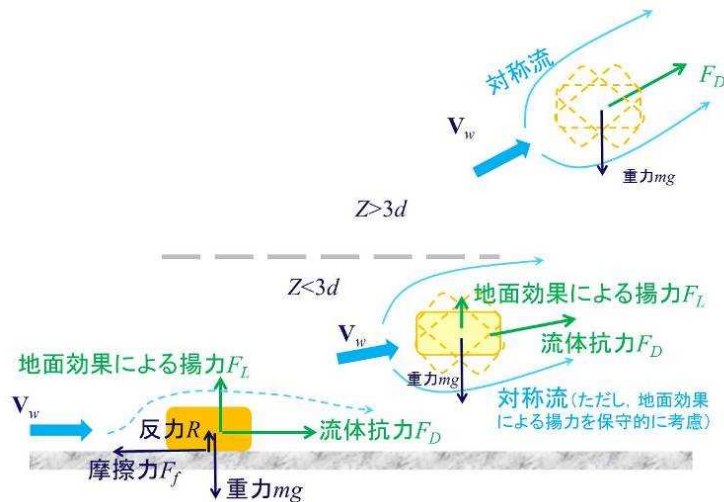
—揚力の生じ方は、物体と地面の接触状態に依存(接触面が大きければ揚力は生じにくい)

—接触状態を実際に確認するのは難しいことから、揚力を大きく見積もるため、地上にある物体にも揚力が作用すると仮定

—物体と地面の距離が近い場合、揚力が生じる方向に空気の流れが地面の影響を受ける(地面効果)ため、実験に基づき係数を設定

$$f\left(\frac{Z}{d}\right) = \frac{1 - Z/3d}{1 + Z/d} (Z \leq 3d), \quad 0 (Z > 3d), \quad Z = z - \frac{d}{2}$$

(物体の高さが0の場合に1、寸法(高さ)の3倍の場合に0となる)



江口讓，杉本聡一郎，服部康男，平口博丸，竜巻による物体の浮上・飛来解析コード TONBOS の開発，電力中央研究所 研究報告 N14002，2014.

- ・物体が揚力により浮き上がる際の挙動を理論的に評価するのは難しい
(物体の傾き，物体表面に生じる圧力の分布等まで模擬するのは現実的ではない)
- ・これに準ずる方法として，物体が浮き上がりやすくなる（すなわち，揚力が大きくなる）ように係数(C_{La})を設定することで，飛散挙動の保守的な取扱いが可能になる
- ・一方，抗力係数×見付面積($C_D A$)と揚力係数×見付面積(C_{La})の関係は， $C_D A > C_{La}$ が成立
→係数として，揚力係数×見付面積(C_{La})に代わり抗力係数×見付面積($C_D A$)を用いることで，物体が浮き上がりやすくなる評価とすることが可能

$$\text{揚力加速度： } L = \frac{\rho C_D A}{2 m} |\mathbf{V}_w - \mathbf{V}_M|_{x,y}^2 f\left(\frac{Z}{d}\right)$$

C_DA と C_La の比較

	C _D A	C _L a
円柱*(直径 D, 長さ L)	約 0.47DL	~0.2DL
自動車*(Dodge Dart)	約 129ft ²	約 48.7ft ²
自動車**(セダン, 1/6 模型)	約 12.1m ²	約 7.8m ²
自動車**(ミニバン, 1/6 模型)	約 14.6m ²	約 7.9m ²



・浮き上がりの判定

- 揚力が重力を上回った場合に浮き上がりが発生
- 上記と同様に、揚力係数×見付面積(C_La)よりも大きな抗力係数×見付面積(C_DA)を用いることで、物体が浮き上がり始める風速(V_w)の条件が小さくなり、物体の浮き上がりを保守的に判定することが可能

$$\frac{\rho C_{L}a}{2m} V_w^2 > g \quad \Rightarrow \quad \frac{\rho C_{D}A}{2m} V_w^2 > g$$

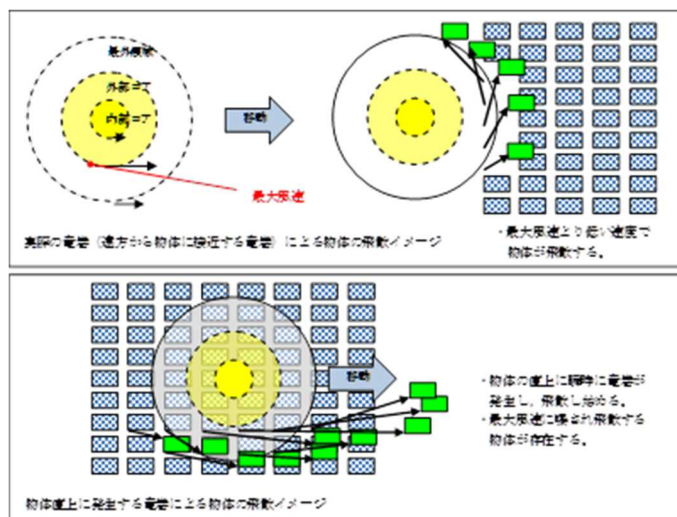
*EPRI, Wind Field and Trajectory Models for Tornado-Propelled Objects, report NP-748, 1978.

**Schmidlin, T., Hammer, B., King, P., Ono, Y., Miller, L. S. and Thumann, G., Unsafe at any (wind) speed?

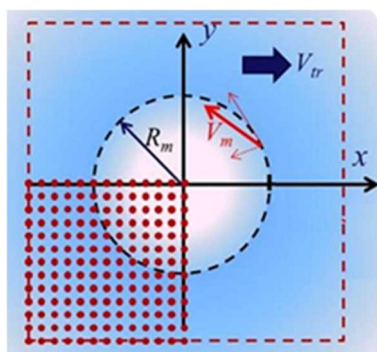
-Testing the stability of motor vehicles in severe winds-, Vol.83, No.12, pp.1821-1830, 2002.

4. 多点配置の手法による不確かさを考慮した保守性

- ・ 竜巻が物体に与える速度の不確かさを考慮するため、多点配置の手法を採用
 - － 竜巻周囲に仮想的に多数個の評価対象物品を配置し各々につき評価を実施
 (初期竜巻中心を中心とし、一辺が竜巻半径の4倍の正方形の領域に 51×51 個の物体を配置)
 - － 評価値 (速度, 高さ, 距離) として, 飛散させた物体のうち最大となるものを選択
- ・ 実際の竜巻は遠方から物体に近づくため, 最大風速より低い風速に曝され飛散
- ・ 物体の直上に竜巻を発生させる設定とすることで, 実際より厳しい結果を与える



飛散の比較イメージ



多点配置のイメージ

5. モデルの実事例との比較 ①F-スケールとの比較

- ・ F-スケール：竜巻等の突風により発生した建築物や車両等の被害状況から、竜巻風速を推定するために考案された指標
- ・ F-スケールで示されている自動車の被災状況と各スケールに対応する最大風速 (69m/s, 92m/s, 116m/s) を用いた自動車の飛散解析結果とを比較
- ・ 自動車の飛散評価結果は各スケールに対応する自動車の被災状況と概ね合致

F-スケールで示されている自動車の飛散状況

F-スケール	風速 (m/s)	自動車の被災状況
F2	50-69	cars blown off highway (自動車が道路からそれる)
F3	70-92	cars lifted off the ground (自動車が地面から浮上する)
F4	93-116	cars thrown some distances or rolled considerable distances (自動車がある距離を飛ばされる, または, かなりの距離を転がる)

自動車の飛散評価結果

F-スケールとの対応	最大水平風速 (m/s)	竜巻接線風速 (m/s)	竜巻移動速度 (m/s)	計算結果		
				速度 (m/s)	距離 (m)	高さ (m)
F2	69	59	10	1.0	1.4	0
F2*	89	59	30	23	25	0.9
F3	92	79	13	23	34	1.1
F4	116	99	17	42	59	3.1

(*)自動車の走行を考慮し、竜巻の移動速度を増大させた場合

江口讓, 杉本聡一郎, 服部康男, 平口博丸, 竜巻による物体の浮上・飛来解析コード TONBOS の開発, 電力中央研究所 研究報告 N14002, 2014. 他

6. モデルの実事例との比較 ②Gland Gulf 原子力発電所の竜巻事例

- ・ 建設中の Grand Gulf 原子力発電所(米国ミシシッピ州)に竜巻が来襲(1978. 4. 17)
- ・ 建設中の冷却塔内部に設置されていたクレーンが倒壊し, 冷却塔の一部が破損する等の被害
- ・ 竜巻による物品の飛散状況が定量的に分かる事例として, 資材置き場におけるパイプの散乱状況が報告されている
 - －パイプを収納した木箱(一部は二段重ね)は浮上せずに転倒し, パイプが周辺7~9mに散乱(Pieces of pipe were scattered over the area, but none traveled more than 25-30 ft.)
 - －パイプはコンクリート・石綿製, 長さ8ft, 直径(内径)8in.
 - －通過時の竜巻規模はF2と考えられている



Grand Gulf 原子力発電所資材置き場におけるパイプの散乱状況

"Courtesy of Hathi Trust"

<http://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=mdp.39015037472209#view=1up;seq=65>

7. モデルの実事例との比較 ②Gland Gulf 原子力発電所の竜巻事例

- ・パイプの飛散状況に対して、飛散評価を実施
 - －竜巻条件：設計竜巻風速 67m/s, 最大接線風速 53.6m/s, 移動速度 13.4m/s, コア半径 45.7m
 - －飛来物条件：直径(外径)9in. (0.2286m), 物体高さ 0.229m, 密度 1700kg/m³, 飛行定数 C_DA/m 0.0080m²/kg
 - －初期配置：物体個数 51×51 個を、竜巻半径の 4 倍を一辺とする正方形内 (x, y=[-2R_m, +2R_m]) に等間隔配置
- ・飛散評価の結果、パイプがほとんど飛散せず、木箱が倒れた影響で散らばったと思われる状況と概ね合致
- ・なお、ランキン渦モデルにより評価した場合、飛散距離や最大水平速度で実際の状況と比較して過度に保守的な評価結果

Grand Gulf 原子力発電所のパイプの飛散計算結果

風速場モデル	初期物体高さ	計算結果 (TONBOS)		
		飛散距離	飛散高さ ^{*2}	最大水平速度
フジタモデル	1m	1.2m	0.0m	4.9m/s
ランキン渦モデル	1m ^{*1}	42.6m	0.34m	30.7m/s
	40m	227m	0.34m	40.9m/s

*1：地上付近の風速場を模擬できていないが、比較のため同条件とした

*2：初期物体高さからの飛散高さ

日本保全学会原子力規制関連事項検討会，原子力発電所の竜巻影響評価について－設計風速および飛来物速度の評価－，2014.9.9

8. モデルの実事例との比較 ③佐呂間の竜巻事例

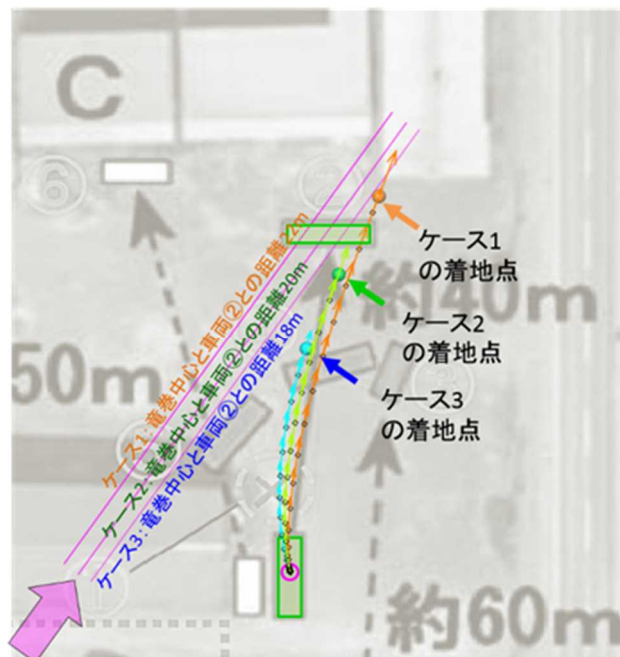
- ・北海道網走支庁佐呂間町で竜巻が発生(2006. 11. 7)
- ・4tトラックは約40m移動(初期位置と移動位置が判明している)



佐呂間竜巻(2006. 11. 7)による被災状況: 工事事務所敷地内の車両被災
 (竜巻経路 → を追加)

9. モデルの実事例との比較 ③佐呂間の竜巻事例

- ・トラックに対し，車両と竜巻中心との距離を変化させて飛散評価を実施
 - －竜巻条件：設計竜巻風速 92m/s，最大接線風速 70m/s，移動速度 22m/s，コア半径 20m
 - －飛来物条件：車両長さ 8.1m，車両幅 2.24m，車両高さ 2.5m，車両重量 4000kg，飛行定数 $C_D A/m$ 0.0056m²/kg
(車種不明のため，三菱ふそう PA-FK71D の仕様とした)
 - －初期配置：竜巻中心からの距離は 18m，20m，22m の 3 ケースを実施
(竜巻は遠方から物体に近づくが，風速 60m/s 以下では浮上しない)
- ・軌跡は竜巻中心との位置関係に依存するが，各ケースとも飛散方向が実際の方
向と概ね合致
- ・特に車両と竜巻中心との距離を 20m としたケースでは，飛散距離もほぼ正確
に再現
- ・地上に設置された状況からの飛散挙動が再現できることを確認



佐呂間竜巻での 4 t トラックの飛散計算結果

日本保全学会原子力規制関連事項検討会，原子力発電所の竜巻影響評価について－設計風速および飛来物速度の評価－，2014.9.9

10. モデルの実事例との比較 ③佐呂間の竜巻事例

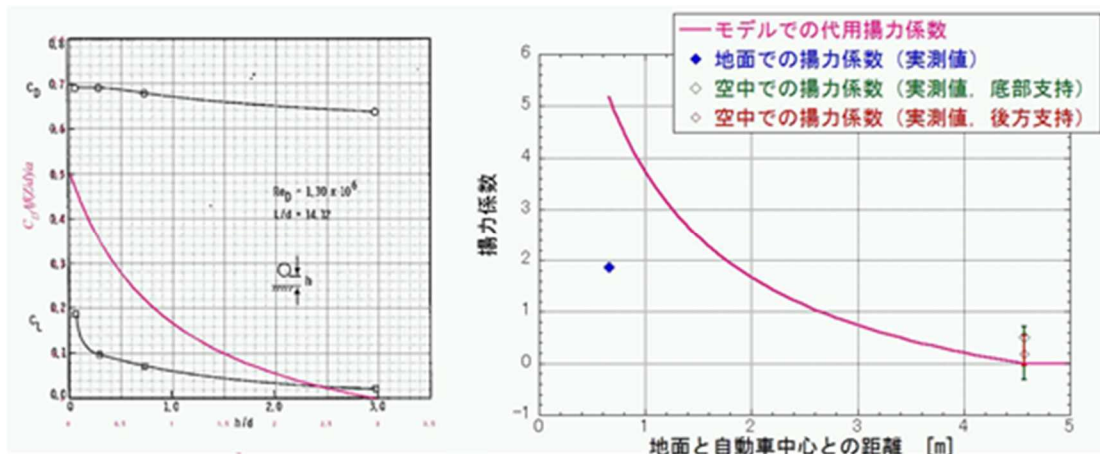
(多点配置を考慮した飛来物評価)

- 多点配置を考慮した飛来物評価で佐呂間竜巻における4tトラックの被災事例を評価し、実際の被災状況と結果を比較
- パイプの飛散状況に対して、飛散評価を実施
 - － 竜巻条件：設計竜巻風速 92m/s，最大接線風速 78m/s，移動速度 14m/s，コア半径 30m
 - － 飛来物条件：三菱ふそう PA-FK71D の仕様（前に同じ）
 - － 初期配置：物体個数 51×51 個を，竜巻半径の 4 倍を一辺とする正方形内 ($x, y = [-2R_m, +2R_m]$) に等間隔配置
- 多点配置を考慮した飛散評価結果と実際の被災状況を比較した結果，保守性の観点からも妥当な結果が得られている
 - － 最大飛散速度：36m/s (130 km/h) →被災後もほぼ元の外形を留めており，実速度は評価結果をはるかに下回ると推察
 - － 最大飛散高さ：3.6m →乗員 2 名が幸い存命で救出されており，トラックが 3.6m 以上の高所から落下したとは考え難い
 - － 最大飛散距離：63.4m →実際の飛散距離(約 40m)を上回る

江口讓，杉本聡一郎，服部康男，平口博丸，原子力発電所での竜巻飛来物速度の合理的評価法，日本機械学会論文集，vol.81，No.823，2015

11. 今回用いた飛散評価手法の保守性 ①揚力係数の設定による保守性

- ・揚力を大きく見積もることによる，飛散評価上の影響
 - －初期状態（物体は地上に存在）では，浮き上がるかどうか
 - －浮き上がりやすい判定を行うことで，本来飛散しない条件の物体でも評価上飛散を発生させる
 - －飛散状態（物体は空中に存在）では，どれだけ浮き上がって飛散距離が長くなるか
 - －浮き上がることで滞空時間が長くなり，飛散距離が増加
 - －高さ方向に風速分布を持つ場合，高度を増すことでより周囲の風速（鉛直/水平）が増加して物体が加速され，飛散速度や飛散距離，浮き上がり高さが増加
- ・風洞実験の結果等を踏まえ，大きな揚力係数を設定することで揚力をより大きく見積もり，保守的な評価を実施



(円柱の場合)

(自動車の場合)

設定した揚力係数(抗力係数で代用)の、実際の揚力係数との比較

EPRI, Wind Field and Trajectory Models for Tornado-Propelled Objects, report NP-748, 1978.に基づく

12. 今回用いた飛散評価手法の保守性 ②多点配置の手法による保守性

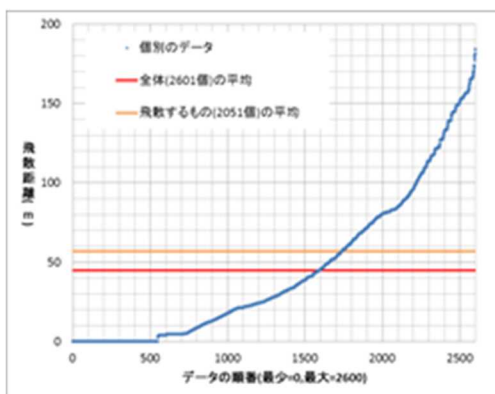
・多点配置(51×51=2601 個)の手法における評価結果の分布例

－飛散距離：最大値は平均(飛散するものの)の約3倍

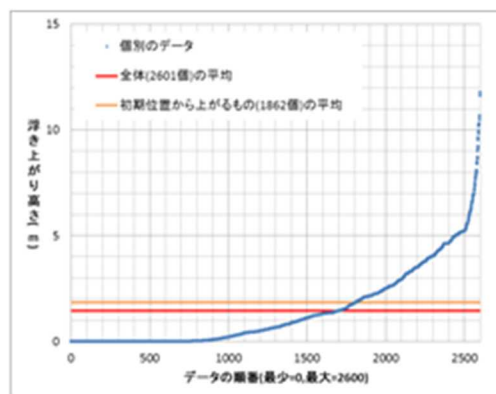
－浮き上がり高さ：最大値は平均(初期位置から上がるものの)の約6倍

→多点配置の手法により、竜巻が物体に与える速度の不確かさを考慮

－竜巻中心から見て進行方向後ろ側からの飛散のような、現実性の小さいケース(竜巻の進行に伴い風速がピークを過ぎてから飛散)も含めて評価を行っている



飛散距離の分布



浮き上がり高さの分布

- ・ワゴン車
- ・初期高さ 7.5m
- ・風速場はフジタモデル

設計竜巻に対する風速設定(100m/s)の保守性ともあわせ、飛散評価全体として一定の保守性を確保した評価となっている。

外部事象防護施設に対する竜巻飛来物の衝突による影響について

1. 金属キャスク

金属キャスクの外筒の板厚は約 2cm であり、重量のある、または鋭い物体が外筒上に落下した場合、外筒が貫通し、外筒により覆われている中性子遮蔽材（レジン）の一部が失われる可能性がありうることから、遮蔽機能が低下する場合を考える。なお、本体胴の板厚は約 25cm であり、本体胴の貫通に至るまでには大きな余裕があることから、金属キャスクの閉じ込め機能には影響しない。

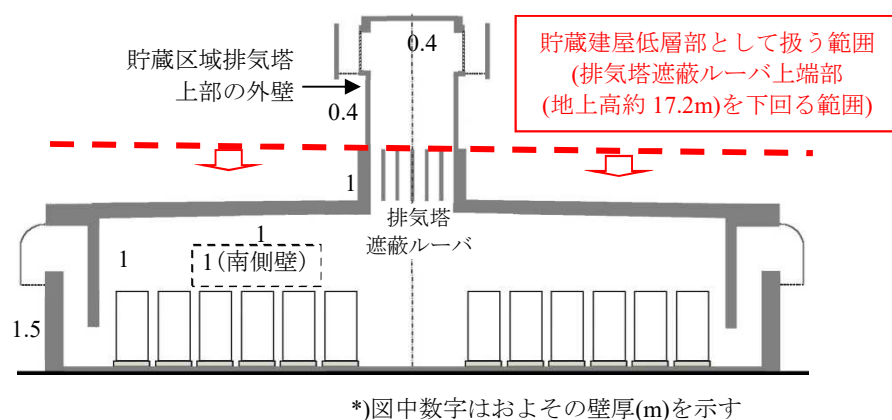
金属キャスク外筒への物体の落下により破損する中性子遮蔽材の範囲は一部に限定されると考えられるが、遮蔽機能の低下による影響を把握するため、非現実的ではあるが金属キャスクの全体にわたり中性子遮蔽材が完全に失われた極端な状態を仮定する。

このような場合を仮定しても金属キャスク周囲の線量は、核燃料輸送物としての特別の試験条件（輸送物の安全性を評価する観点から輸送法令に基づき想定する過酷な条件）を対象とした遮蔽解析（1m 貫通試験）の結果に基づき保守的に見積もっても 9mSv/h 程度（金属キャスク表面から 1m の位置）であり、特別の試験条件における設計基準（10mSv/h）を下回っている。また、敷地境界における線量の増加量は保守的に見積もっても $0.07 \mu\text{Sv/h}$ 程度と周辺監視区域外における線量限度（ $1\text{mSv/年} \div 0.11 \mu\text{Sv/h}$ ）を下回る値であり、著しい増加とはならない。なお、貯蔵中に金属キャスクの中性子遮蔽材が損傷するような事象が仮に生じた場合、輸送にあたっては輸送物としての適切な対処を行った上で実施する。

このように、金属キャスクへの竜巻飛来物の衝突については、そもそも可能性が極めて小さい状況で、極端に保守的な状態を仮定しても遮蔽機能の低下は設計基準の範囲内に留まり、また敷地周辺への影響も極めて小さいことから、竜巻飛来物が金属キャスクの基本的安全機能に直接影響する可能性は極めて小さく、貯蔵建屋の開口部を通過する飛来物を設定する必要はないと考えられる。

2. 使用済燃料貯蔵建屋

現実的には、竜巻飛来物の衝突により使用済燃料貯蔵建屋の基本的安全機能を損なうことはないが、仮に竜巻飛来物の衝突により貯蔵区域排気塔上部の外壁に裏面剥離が発生したとしても、排気塔直下には金属キャスクを貯蔵しないことから、落下したコンクリート片が金属キャスクに衝突して影響を及ぼす可能性は小さく、また補修により建屋壁の遮蔽機能の復旧を図れることから、使用済燃料貯蔵建屋の基本的安全機能に影響はない。(別添5-1図参照)



別添5-1図 貯蔵区域断面図(東西方向)

第 11 条 外部からの衝撃による損傷の防止（火山）

<目 次>

1. 設計方針
2. 立地評価
3. 影響評価
4. 火山モニタリング
5. 手順及び運用

1. 設計方針

(1) 敷地周辺の火山については、その活動性や敷地との位置関係から判断して、設計対応不可能な火山事象が使用済燃料貯蔵施設（以下「貯蔵施設」という。）に影響を及ぼす可能性は十分小さい。ただし、恐山については過去のマグマ噴火に伴う火砕物密度流が敷地に到達していることから、火山影響評価の根拠が維持されていることを継続的に確認することを目的として火山活動のモニタリングを実施する。

モニタリングの結果、観測データに有意な変化があった場合は、火山専門家及び火山活動評価委員の助言を踏まえ、最新の科学的知見に基づき可能な限りの対処を行うこととする。

降下火砕物（火山灰）としては、敷地近傍で確認された火山灰を考慮することとし、火山灰堆積量を30cmに設定する。また、降下火砕物の堆積状況に応じて、降下火砕物（火山灰）の除去を行い、基本的安全機能が損なわれることがないように、適切な処置を講ずる。

(2) 使用済燃料貯蔵建屋（以下「貯蔵建屋」という。）に対する荷重の観点から、積雪、風（台風）及び火山の影響（降下火砕物）の重畳を考慮することとし、貯蔵施設の基本的安全機能を損なわないよう設計及び運用にて考慮する。

2. 立地評価

文献調査の結果、地理的領域の第四紀火山として55火山を抽出する。次に、将来の活動が否定できない火山として24火山を抽出する。

設計対応不可能な火山事象（火砕物密度流，溶岩流，岩屑なだれ他，新しい火口の開口及び地殻変動）のうち，恐山の火砕物密度流については，過去最大規模の火砕物密度流が敷地に到達している。

恐山の活動は，古恐山と新恐山の活動に大別され，その間に約20万年の休止期間が存在する。現在は約8万年前から継続する熱水活動期である。

地球物理学的調査などの結果から，深さ20km以浅には大規模なマグマ溜まりが存在する可能性は小さく，深部から連続する火道も認められない。

以上より，恐山は現在も熱水活動が生じているものの，マグマ噴火に伴う火砕物密度流が施設に影響する可能性は十分に小さい。

ただし，過去のマグマ噴火に伴う火砕物密度流が施設に到達していることから，火山影響評価の根拠が維持されていることを継続的に確認することを目的として供用期間中のモニタリングを行う。

具体的には，貯蔵施設は監視対象火山を恐山火山とし，火山専門家からなる火山活動評価委員会を設置し，火山活動のモニタリングの主なものとして，地震活動，地殻変動及び火山ガス状況を監視・定期評価することとする。

火山モニタリングにおいて，観測データに有意な変化があった場合は，火山専門家及び火山活動評価委員の助言を踏まえ，最新の科学的知見に基づき可能な限りの対処を行う。

3. 影響評価

3.1 外部事象防護施設

貯蔵施設においては、金属キャスクが基本的安全機能を有する設備に該当し、また、金属キャスクを内包する貯蔵建屋は、遮蔽機能及び除熱機能の一部を担っている設備であることから基本的安全機能を有する設備に該当する。

これより、貯蔵施設における外部事象防護施設（以下「防護施設」という。）を、金属キャスク及び貯蔵建屋とし、降下火砕物によってこれらがもつ基本的安全機能を損なわない設計とする。

以上により、降下火砕物の侵入によって、基本的安全機能を損なう動的機器はない。

3.2 降下火砕物の設計条件及び特徴

(1) 降下火砕物の設計条件

貯蔵施設の敷地において考慮する降下火砕物の諸元として、文献調査、地質調査をもとに160km圏内外の火山活動状況から抽出した結果、恐山、北海道駒ヶ岳、十和田の3火山が抽出された。3火山を対象に降下火砕物シミュレーションを行った結果から、恐山火山の降下火砕物による最大堆積層厚30cmを設計上考慮すべき降下火砕物堆積層厚とする。

また、密度については、恐山宮後テフラから採取した試料の密度試験結果を踏まえ $1.5\text{g}/\text{cm}^3$ （湿潤状態）とする。

(2) 降下火砕物の特徴

各種文献の調査結果より、降下火砕物は以下の特徴を有する。

- a. 火山ガラス片、鉱物結晶片から成る⁽¹⁾。ただし、砂よりもろく硬度は低い⁽²⁾。
- b. 硫酸等を含む腐食性のガス（以下「腐食性ガス」という。）が付着している⁽¹⁾。ただし、金属腐食研究の結果より、直ちに金属腐食を生じさせることはない⁽³⁾。
- c. 水に濡れると導電性を生じる⁽¹⁾。
- d. 湿った降下火砕物は乾燥すると固結する⁽¹⁾。
- e. 降下火砕物粒子の融点は約 $1,000^{\circ}\text{C}$ であり、一般的な砂に比べ低い⁽¹⁾。

3.3 降下火砕物による影響因子

降下火砕物の特徴及び防護施設の構造，設置状況，気候及び地域特性を考慮し，降下火砕物が直接及ぼす影響（以下「直接的影響」という。）とそれ以外の影響（以下「間接的影響」という。）として選定する。

(1) 直接的影響

a. 荷重

貯蔵建屋の上に堆積した降下火砕物による静的負荷を考慮する。

b. 粒子の衝突

降下火砕物は微小な鉱物結晶であり，その衝突による貯蔵建屋への影響については，「リサイクル燃料備蓄センター 事業許可基準規則への適合性について（第11条 外部からの衝撃による損傷の防止（竜巻）」で設定している設計飛来物の影響に包絡されることから，粒子の衝突の影響を考慮する必要はない。

c. 閉塞

貯蔵建屋内に收容される金属キャスクの表面からの除熱を維持する観点から，建屋内の雰囲気温度を低く保つことができるよう，換気のための給気口及び排気口を設ける。貯蔵建屋の給気口及び排気口は，降下火砕物による閉塞を考慮する。

d. 摩耗

防護施設には動的機器はないことから，摩耗の影響を考慮する必要はない。

e. 腐食

貯蔵建屋内に收容される金属キャスクに対して，降下火砕物に付着した腐食性ガスが接することにより接触面を腐食させることを考慮する。

f. 大気汚染

基本的安全機能の確保のために，監視盤室に監視員が常駐する必要がないことから，大気汚染の影響を考慮する必要はない。

g. 水質汚染

基本的安全機能の確保のために水を用いないことから，水質汚染の影響を考慮する必要はない。

h. 絶縁低下

基本的安全機能の確保のために必要な電気系機器及び計測制御系機器がないことから、絶縁低下の影響を考慮する必要はない。

(2) 間接的影響

a. 外部電源喪失

使用済燃料貯蔵施設は、金属キャスクを静的に保管する施設であり、降下火砕物により送電網が損傷し外部電源が喪失した場合においても貯蔵施設の基本的安全機能を損なうことはなく、外部電源喪失時には無停電電源装置及び電源車から計測設備、放射線監視設備の監視機能、通信連絡設備等の必要な負荷に給電できる。したがって、外部電源喪失の影響は考慮する必要はない。

b. 交通の途絶

基本的安全機能の確保のために、外部からの支援を必要とする機器はないことから、交通の途絶の影響は考慮する必要はない。

3.4 降下火砕物の影響に対する設計

降下火砕物の影響として「3.3 降下火砕物による影響因子」で選定した影響因子により、貯蔵施設の基本的安全機能を損なわないよう、以下の設計とする。

(1) 荷重

貯蔵建屋の許容荷重が、降下火砕物による荷重に対して、構造健全性を維持することにより基本的安全機能を損なわない設計とする。なお、建築基準法における積雪の荷重の考え方に準拠し、降下火砕物の除去を適切に行うことから、降下火砕物の荷重を短期に生じる荷重とし、建築基準法による短期許容応力度を許容限界とする。

評価に当たっては、以下の荷重の組合せ及び建築基準法との関係性を考慮する。

a. 貯蔵建屋に常時作用する荷重

貯蔵建屋に作用する荷重として自重及び積載荷重の常時作用する荷重を考慮する。

b. その他の自然現象の影響を考慮した荷重の組合せ

降下火砕物と組合せを考慮すべき火山以外の自然現象は、荷重の影響において風（台風）及び積雪であり、降下火砕物との荷重と重畳させる。

以下、主な評価結果として、

降下火砕物に対する貯蔵建屋屋根の評価結果（第1表）、及び降下火砕物と積雪の重畳に対する貯蔵建屋屋根の評価結果（第2表）を示す。

いずれにおいても、貯蔵建屋の構造健全性は維持される。

第1表 降下火砕物に対する貯蔵建屋屋根の評価結果

（単位：N/m²）

対象建屋	①降下火砕物による堆積荷重(30 cm・湿潤1.5g/cm ³)	②許容堆積荷重*	判定
受入区域屋根	4,500	12,700	可 (①<②)
貯蔵区域屋根	4,500	17,900	可 (①<②)
センタータワー屋根	4,500	11,300	可 (①<②)

*許容堆積荷重:使用している材料の許容応力度の比1.5[短期/長期]に基づき、設計で考慮されている常時荷重（自重，積載荷重，積雪荷重）から算出

第2表 降下火砕物と積雪の重畳に対する貯蔵建屋屋根の評価結果

(単位：N/m²)

対象建屋	①降下火砕物による 堆積荷重(30 cm・湿潤 1.5g/cm ³)	②積雪荷重 (170 cm・0.3 g/cm ³)	③=①+②	④許容 堆積荷重*	判定
受入区域屋根	4,500	5,100	9,600	12,700	可 (③<④)
貯蔵区域屋根	4,500	5,100	9,600	17,900	可 (③<④)
センタータワー 屋根	4,500	5,100	9,600	11,300	可 (③<④)

*許容堆積荷重:使用している材料の許容応力度の比1.5[短期/長期]に基づき、設計で考慮されている常時荷重(自重,積載荷重,積雪荷重)から算出

なお、可能性は低いものの、積雪状態で降下火砕物が堆積して構造設計で考慮する荷重を上回ることはないように、管理基準・対応手順を社内マニュアルに定めて、除雪・除灰を行う。

(2) 閉塞

貯蔵建屋の給気口に自主的に設置するバードスクリーン、及び排気口に自主的に設置する排気ルーバは、降下火砕物の粒径より十分に大きな格子とするとともに、貯蔵区域の給気口はフード下端の位置を地上高さ約6m、排気口は地上高さ約23mと降下火砕物の堆積厚さを考慮した十分に高い位置に設けることにより、給気口及び排気口は降下火砕物により閉塞しない設計とする。

なお、給気口にはフードを、排気口には遮風板を設置することにより、降下火砕物が給気口及び排気口から貯蔵建屋へ侵入しにくい構造とする。

(3) 腐食

金属腐食研究の結果によると降下火砕物によって直ちに金属腐食を生じることはないが、金属キャスク外表面の塗装及び自主的に二次蓋上部に対策を施し、短期での腐食により基本的安全機能を損なわない設計とする。

なお、給気口にはフードを、排気口には遮風板を設置することにより、降下火砕物が給気口及び排気口から貯蔵建屋へ侵入しにくい構造とする。

4. 火山モニタリング

(1) 恐山の評価

恐山については、火山フロントに位置する第四紀火山であり、噴気活動が認められ、ランクCの活火山に分類されている。また、敷地において、過去最大規模の噴火に伴う火砕流堆積物が確認されているため、詳細な調査を実施した。

恐山火山は、釜臥山を含む外輪山を形成した溶岩流の噴出を主体とする古恐山火山（約146万年前～約68万年前）と、約20万年程度の非活動期を挟んで現在の新恐山火山の活動期（約48年前以降）に大別される。

新恐山火山では、約48万年前～8万年前の期間はマグマが直接関与した活動であるが、8万年前～現在までの期間ではマグマが直接関与しない活動（熱水活動）が継続している。

なお、恐山火山の最後の噴火は6～8万年前の宮後テフラ（水蒸気噴火）である。

現在の恐山火山は、地震活動は非常に低調であり、また継続的な地形変位の累積を示す地殻変動も認められない。

また、宇曾利山湖北岸の地獄谷周辺では典型的な熱水活動（沸騰水の噴出）が継続しているが、噴気調査によれば、マグマが直接関与する活動である可能性は小さい。

また、地震波トモグラフィ解析結果からも、深さ20 km以浅には大規模なマグマ溜りが存在する可能性は小さい。

以上のように、恐山火山は、設計対応不可能な火山事象が、施設に影響を及ぼす可能性は十分小さいが、過去のマグマ噴火に伴う火砕物密度流が敷地に到達していることから、火山影響評価の根拠が維持されていることを継続的に確認することを目的として供用期間中のモニタリングを行う。

(2) 火山モニタリング

恐山については、公的な機関による火山関連の観測が行われていないため、当社として「地殻変動データ」、「地震観測データ」、「噴火口の状況や火山ガスの観測」などの火山モニタリングを独自に実施している。

また、社内に火山の専門家からなる火山活動評価委員会を設置し、定期的に火山モニタリングの結果を報告し、指導を仰いでいる。

また、常時モニタリングをしている、「地殻変動データ」、「地震観測データ」について有意な変化があるかどうかを判断する監視基準を設定する。

(3) モニタリングの監視基準

モニタリングの監視基準は、「地震観測データ」、「地殻変動データ」より、以下のように設定し、有意な変化があるかどうかを判断する。

- ・ 恐山噴気地帯を中心とする半径 5 k m 圏内の地震発生数が 10 回/月を超えた場合
- ・ 恐山(湯坂)を基点とする 4 基線の基線長変化で、2 測線同時に一週間連続で監視基準値を超えた場合(監視基準値は、前年データの $\pm 3 \sigma$ を超えた場合に、有意な変化があると判断)
- ・ 恐山(湯坂)を基点とする 4 基線の比高で、観測記録の 7 日移動平均が 2 測線同時に一週間連続で監視基準値を超えた場合(比高の管理基準については、季節間変動と思われるデータの揺らぎが大きいので、前年の 7 日移動平均との差分データの $\pm 3 \sigma$ を超えた場合に、有意な変化があると判断)

(4) 処置

前記(3)の 3 つの状態の変化のうち、いずれか一つの事象が認められた場合、当社は直ちに火山活動評価委員会を緊急招集する。

火山専門家及び火山活動評価委員の助言を踏まえ、最新の科学的知見に基づき可能な限りの対処を行う。主な対処方針を以下に示す。

- ・ 火山活動のモニタリング強化
- ・ 使用済燃料を収納した金属キャスクの搬入停止
- ・ 使用済燃料を収納した金属キャスクの搬出

5. 手順及び運用

降下火砕物の降灰後，点検及び除灰の対応を適切に実施するため，以下に係る手順及び運用（除灰）を社内マニュアルに定める。

- (1) 防護施設への影響を確認するための点検を実施する。
- (2) 点検によって降下火砕物の付着が確認された箇所について，付着した降下火砕物の分析を行うとともに，除去を実施する。
- (3) 降下火砕物の堆積や積雪により貯蔵建屋の構造設計で考慮した荷重を上回ることがないように，建屋に堆積した降下火砕物及び積雪の除去を実施する。

参考文献

- (1) 広域的な火山防災対策に係る検討会（第3回）（資料2），内閣府, 2012
- (2) 武若耕司，シラスコンクリートの特徴とその実用化の現状，コンクリート工学，Vol. 42，2004
- (3) 出雲茂人，末吉秀一他，火山環境における金属材料の腐食，防食技術Vol. 39，1990

第 11 条 外部からの衝撃による損傷の防止（外部火災）

<目 次>

1. 設計方針
2. 外部事象防護施設と具体的な評価内容
3. 森林火災に対する影響評価について
4. 近隣の産業施設等の火災・爆発に対する影響評価について
5. 航空機墜落による火災の影響評価について
6. 火災による金属キャスクへの影響について
7. 火災の重畳による影響評価について
8. ばい煙及び有毒ガスの影響評価について

（別 添）

- 別添 1 コンクリート許容温度（200℃）について
- 別添 2 軽油貯蔵タンクの地下化について
- 別添 3 航空機墜落確率の最新化による外部火災評価への影響について

1. 設計方針

(1) 森林火災

想定される森林火災については、使用済燃料貯蔵施設周辺の植生、過去10年間の気象条件を調査し、使用済燃料貯蔵施設から直線距離10kmの間に発火点を設定し、森林火災シミュレーション解析コード（F A R S I T E）を用いて影響評価を実施し、森林火災の延焼を防ぐための手段として防火帯を設け、火炎が防火帯外縁に到達するまでの時間、使用済燃料貯蔵建屋外壁への熱影響及び危険距離を評価し、必要な防火帯幅、使用済燃料貯蔵建屋との離隔距離を確保することにより、使用済燃料貯蔵建屋の基本的安全機能を損なわない設計とする。

また、火災の影響により使用済燃料貯蔵建屋内の雰囲気温度や空気の流れの状態が変化し、金属キャスクに影響を及ぼすことが考えられるため、火災による影響を考慮しても、金属キャスクの基本的安全機能を損なうことはない。

(2) 爆発

リサイクル燃料備蓄センターから最も近い石油コンビナートは40km以上離れており、爆発を考慮する必要はない。また、リサイクル燃料備蓄センター周辺の高圧ガス類貯蔵施設の爆発については、使用済燃料貯蔵建屋から高圧ガス類貯蔵施設までの離隔距離を、貯蔵される高圧ガスの種類及び貯蔵量から算出した危険限界距離以上確保することにより、使用済燃料貯蔵施設の基本的安全機能を損なわない設計とする。

(3) 近隣工場等の火災

リサイクル燃料備蓄センター周辺における近隣の産業施設の危険物貯蔵施設の火災及びリサイクル燃料備蓄センター敷地内の危険物貯蔵設備の火災については、算出される輻射強度に基づき、使用済燃料貯蔵建屋外壁の表面温度をコンクリート許容温度以下とすることにより、使用済燃料貯蔵建屋の基本的安全機能を損なわない設計とする。

航空機墜落による火災については、使用済燃料貯蔵建屋を中心として墜落確率が 10^{-7} 回/施設・年に相当する標的面積をもとにした離隔距離を算出して墜落地点とし、使用済燃料貯蔵建屋外壁の表面温度をコンクリート許容温度以下とすることにより、使用済燃料貯蔵建屋の基本的安全機能を損なわない設計とする。

また、火災の影響により使用済燃料貯蔵建屋内の雰囲気温度や空気の流れの状態が変化し、金属キャスクに影響を及ぼすことが考えられるため、火災による影響を考慮しても、金属キャスクの基本的安全機能を損なうことはない。

(4) 有毒ガス

リサイクル燃料備蓄センター周辺には、石油コンビナート等の有毒物質を貯蔵する固定施設はなく、陸上輸送用の可動施設についても、幹線道路から使用済燃料貯蔵施設は離れている。また、金属キャスク貯蔵期間中は金属キャスク及び各設備の点検、保守及び巡視の実施時以外に使用済燃料貯蔵建屋に人が常駐することはなく、外部火災に伴う有毒ガスの流入時には使用済燃料貯蔵建屋内の人員は迅速に避難することから、有毒ガスに対する使用済燃料貯蔵建屋の居住性を考慮する必要はない。

2. 外部事象防護施設と具体的な評価内容

考慮すべき外部火災及びその具体的な評価内容については第1表のとおりとする。

第1表 考慮すべき外部火災及びその具体的評価内容

火災種別	考慮すべき火災	評価内容	評価項目	
森林火災	リサイクル燃料備蓄センター敷地外 10km 以内に発火点を設定した使用済燃料貯蔵建屋に迫る森林火災	<ul style="list-style-type: none"> 森林火災シミュレーション解析コード (F A R S I T E) を用いた森林火災評価 森林火災評価に基づく外部事象防護施設の熱影響評価 	<ul style="list-style-type: none"> 防火帯幅評価 熱影響評価 危険距離評価 	二次的影響(ばい煙, 有毒ガス)評価
近隣の産業施設, 石油コンビナート及びリサイクル燃料備蓄センター敷地内の危険物貯蔵設備の火災・爆発	リサイクル燃料備蓄センター敷地外 10km 以内の近隣の産業施設, 石油コンビナートの火災・爆発	<ul style="list-style-type: none"> リサイクル燃料備蓄センター敷地外の近隣の産業施設, 石油コンビナートについてリサイクル燃料備蓄センターとの距離, 地形, 燃料種類及び燃料貯蔵量を考慮した防護施設の影響評価 	<ul style="list-style-type: none"> 熱影響評価 危険限界距離評価 	
	リサイクル燃料備蓄センター敷地内の危険物貯蔵設備の火災	<ul style="list-style-type: none"> リサイクル燃料備蓄センター敷地内の危険物貯蔵設備火災による外部事象防護施設の熱影響評価 	<ul style="list-style-type: none"> 熱影響評価 	
航空機墜落による火災	リサイクル燃料備蓄敷地への航空機墜落時の火災	<ul style="list-style-type: none"> 墜落を想定する航空機に相当する火災を想定した外部事象防護施設の熱影響評価 	<ul style="list-style-type: none"> 熱影響評価 	

2.1 外部事象防護施設

外部火災に対する防護施設については、外部火災の影響を受けた場合その設備のもつ基本的安全機能を喪失し、安全性の確保が損なわれるおそれのあるものを対象とする。

「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条第2項において、「基本的安全機能を損なわないもの」について以下のとおり定めている。

- 一 使用済燃料貯蔵施設を構成する金属キャスクが，必要に応じてその他の構築物，系統及び機器と相まって，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。
- 二 貯蔵建屋を設置する場合には，外部からの衝撃によって貯蔵建屋が損傷したとしても，次の事項を満足すること。
 - ①金属キャスクが有する基本的安全機能に影響が波及しないこと。
 - 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（金属キャスクの除熱機能を損なわない機能）が回復可能であること。
 - ③上記②の復旧期間において，事業所周辺の公衆に対して放射線障害を及ぼさないこと。

貯蔵施設において，使用済燃料は金属キャスク内に貯蔵されるが，使用済燃料自体は基本的安全機能を有する設備ではなく，これを安全に貯蔵するための金属キャスクが基本的安全機能を有する設備に該当するものである。

また，金属キャスクの基本的安全機能を確保する上で必要な施設，及びその他安全機能を有する施設を内包する使用済燃料貯蔵建屋（以下，「貯蔵建屋」という。）は，遮蔽機能及び除熱機能の一部を担っている施設であり基本的安全機能を確保する上で必要な施設である。

したがって，金属キャスク及び貯蔵建屋を外部事象防護施設（以下，「防護施設」という。）とし，これらがもつ安全確保に必要な機能が外部火災によって損なわれないことを評価することとする。

2.2 影響評価内容

2.2.1 熱影響評価

金属キャスクについては貯蔵期間中は貯蔵建屋にて保管され貯蔵建屋の外壁によって保護されていることから，金属キャスクを内包

する貯蔵建屋に関して、建屋の外壁に対する熱影響評価（貯蔵建屋外壁温度がコンクリートの許容温度である 200℃以下であることを確認する）を実施することにより貯蔵建屋の安全機能が損なわれないことを確認する。

貯蔵建屋については自然換気構造であり、外気が直接取り入れられる構造となっているため、外部火災により熱せられた外気が建屋内に侵入する懸念を考慮して、建屋内の雰囲気温度と金属キャスク各部（ガスケット、レジン、胴、燃料被覆管）の温度を比較することにより金属キャスクの安全性が確保されることを評価するとともに、防火帯幅の確保及び火災発生時の消火活動体制について確認する。

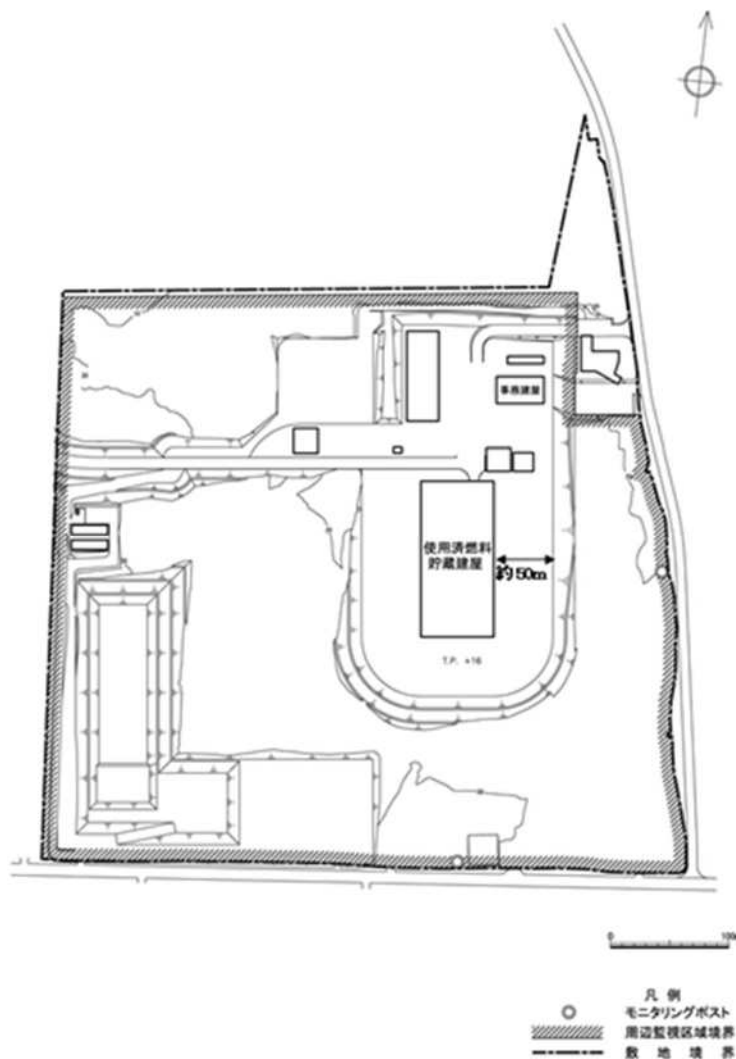
2.2.2 二次的影響評価

外部火災による二次的影響としては、外部火災により発生するばい煙及び有毒ガスによる影響が考えられる。これらについては、火災による上昇気流により上空に運ばれることを考慮すると、ばい煙及び有毒ガスが貯蔵建屋の近辺に滞留する可能性は小さいと考えられるが、貯蔵建屋の構造が自然換気方式であるため、ばい煙及び有毒ガスが直接建屋内に侵入することが考えられることから、ばい煙及び有毒ガスに対する建屋内の金属キャスク及びその他の設備への影響について評価を実施する。また、居住性の評価については、金属キャスク貯蔵期間中の貯蔵建屋の貯蔵区域は金属キャスク及び各設備の点検、保守及び巡視の実施時以外に人が常駐することはないが、事務建屋において貯蔵状況の監視のため 24 時間警備員による監視体制をとることとしており、火災発生時には貯蔵建屋内の監視盤室に移動の上監視を継続することとしていることから、監視継続のための人的な居住性の影響についても評価を実施する。

3. 森林火災に対する影響評価について

3.1 貯蔵施設敷地内及び周辺の状況

貯蔵施設は、下北半島の津軽海峡側のほぼ中央部に位置し、周囲の敷地はなだらかな台地からなっている。敷地周辺はもともと牧草地帯であったことから敷地外には安全関連施設はない。また、貯蔵建屋は敷地内のほぼ中央に位置し、約 50m ほど離れた地点から法面となっており法面までの敷地には植物は生育していない。さらに法面の終端地点までにも背の低い草木以外際立って植物は生育していない。敷地の東側には道路をはさんで森林が存在しているが、貯蔵建屋のからの距離は約 100m 以上離れている。第 1 図に敷地概況図、第 2 図に敷地周辺の航空写真についてそれぞれ示す。



第 1 図 貯蔵施設敷地概況図



第2図 貯蔵施設敷地周辺航空写真(Google Mapをもとに作成)

3.2 評価方法及び評価結果

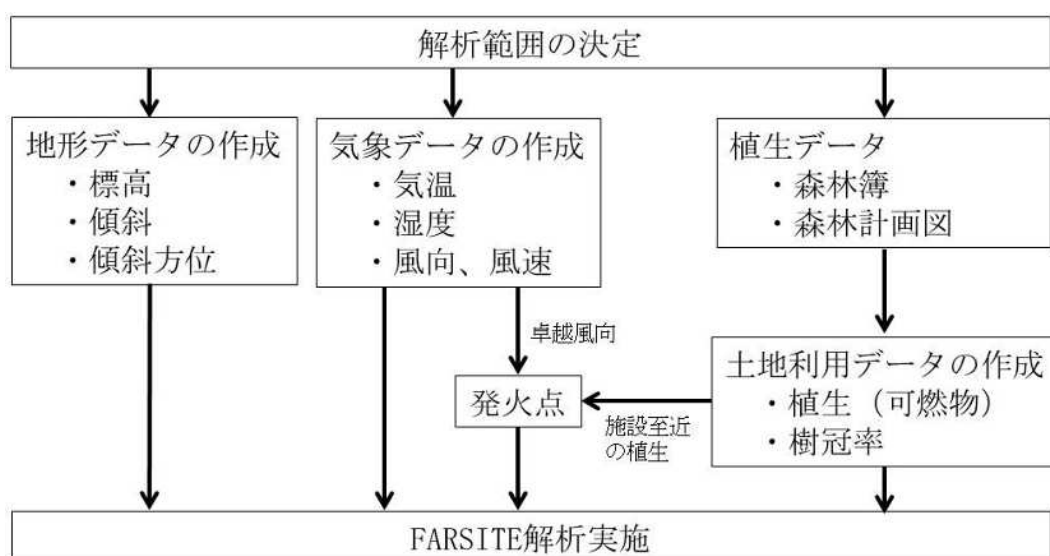
3.2.1 使用解析コード

森林火災評価にあたっては、「原子力発電所の外部火災影響評価ガイド」（以下、「ガイド」という。）に基づき下記の解析コードを使用した。

「森林火災シミュレーション解析コード F A R S I T E (Fire Area Simulation)」は、米国農務省（U S D A ） Forest Service で開発された世界で最も高性能かつ広く用いられている森林火災シミュレーションモデルの一つであり、米国内の森林火災評価において実践的に利用されている。

3.2.2 F A R S I T E 入力データの作成

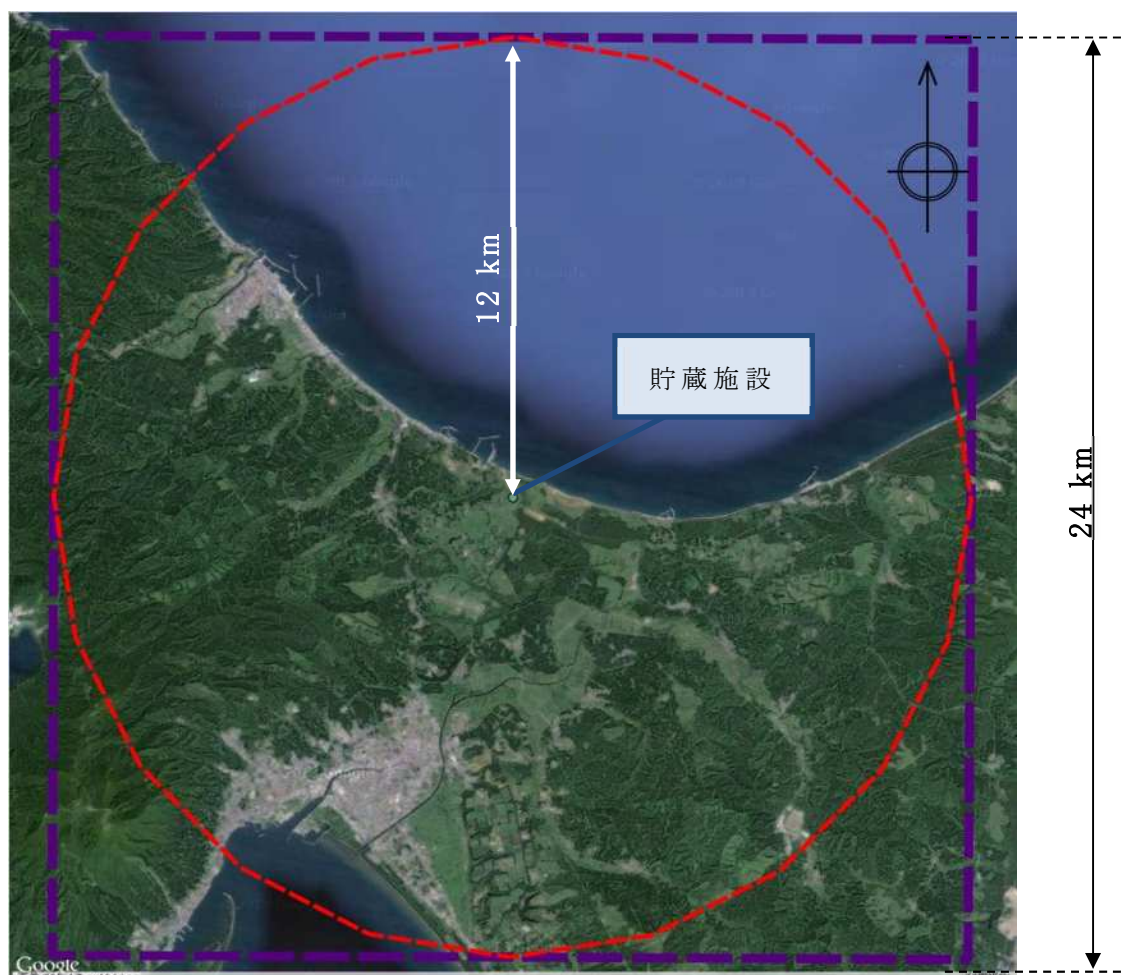
森林火災シミュレーションコード F A R S I T E により、貯蔵施設敷地外で発生する森林火災からの貯蔵建屋への影響評価の実施に際して、評価対象範囲を定めた上で必要となる入力データの作成を行った。データの作成フローについて第3図示す。



第3図 F A R S I T E 解析までの入力データ作成フロー

3.2.2.1 解析範囲

対象とする解析範囲は、ガイドを参考とし貯蔵施設より直線距離10kmを保守的に考慮して貯蔵施設の東西12km、及び南北12kmの正方形範囲とした。（第4図紫枠内）



第4図 解析対象範囲

3.2.2.2 地形データの作成

貯蔵施設周辺の現地の地形状況を可能な限り現実的に模擬するため、公開されている情報の中でより詳細なデータを用いて、標高、傾斜、傾斜方位の地形データを決定した。

(1) 標高

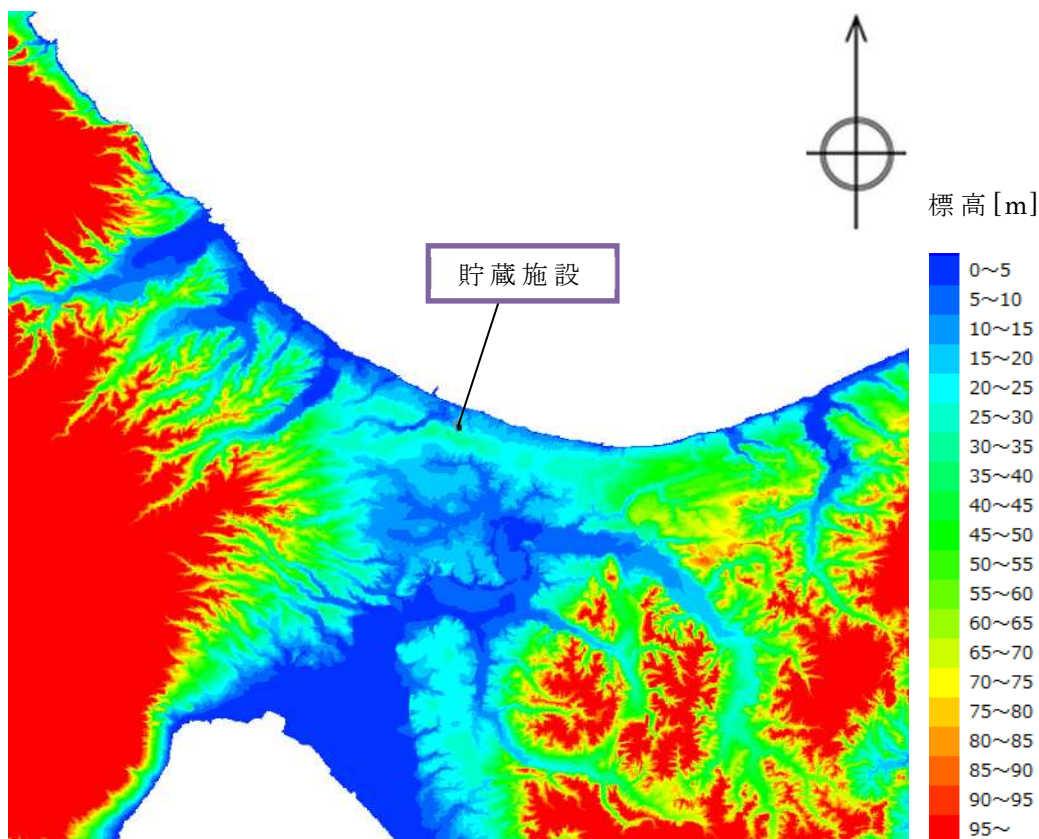
ガイドを参考とし、公開情報の中で最も空間解像度の高い 10m メッシュの標高データ(基盤地図情報 数値標高モデル, 2009 年公開)を用いた。また、公開データについて以下の修正を行った。

- ・東北地方太平洋沖地震に伴う地盤沈下の影響について、国土地理院公開の補正パラメータ^{※1}により考慮した。
- ・施設標高については、施設敷地図面における標高を適用した。

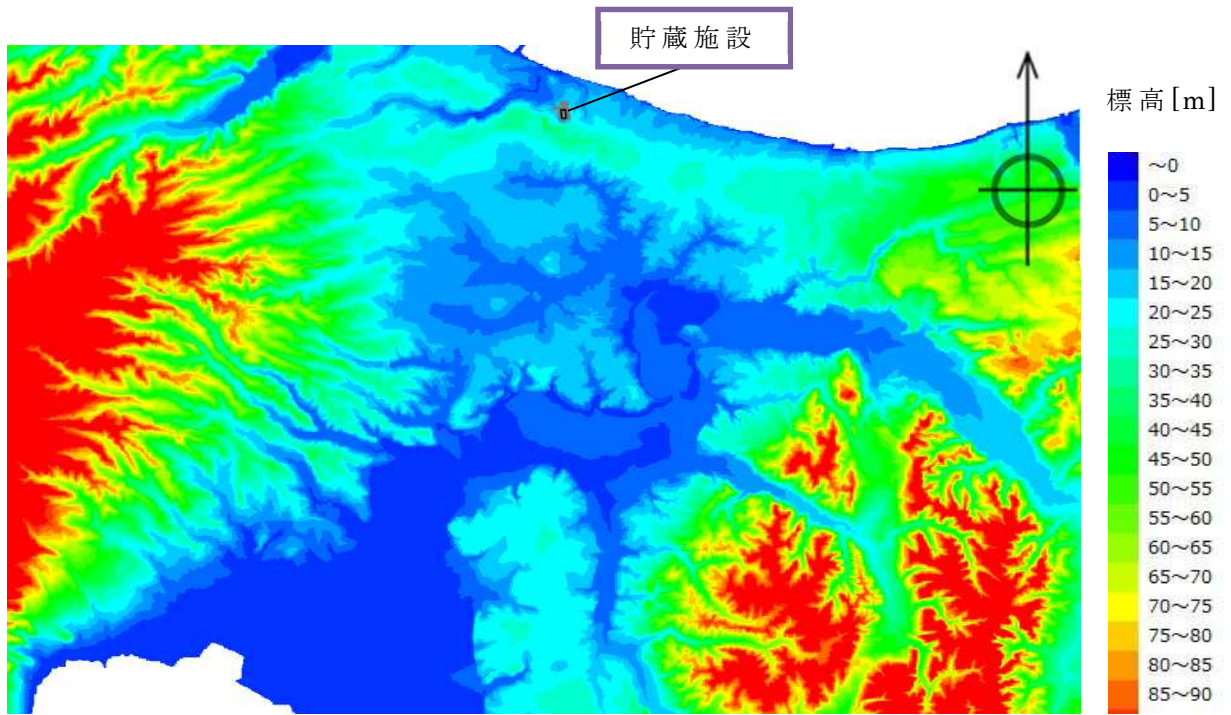
※1: 国土地理院公開ツール「地殻変動に伴う標高値補正を行う標高補正ソフトウェア

PatchJGD(標高版)」

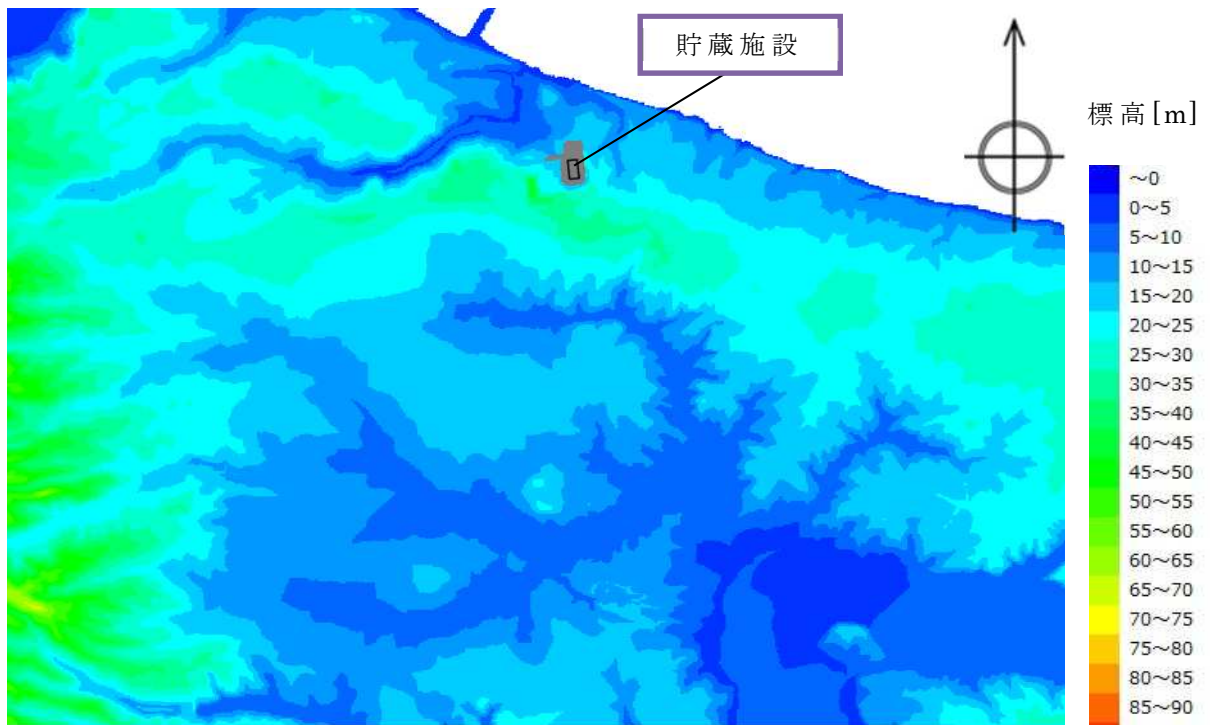
作成した標高データについて第 5 図に示す。



第 5 図 (1) 標高データ



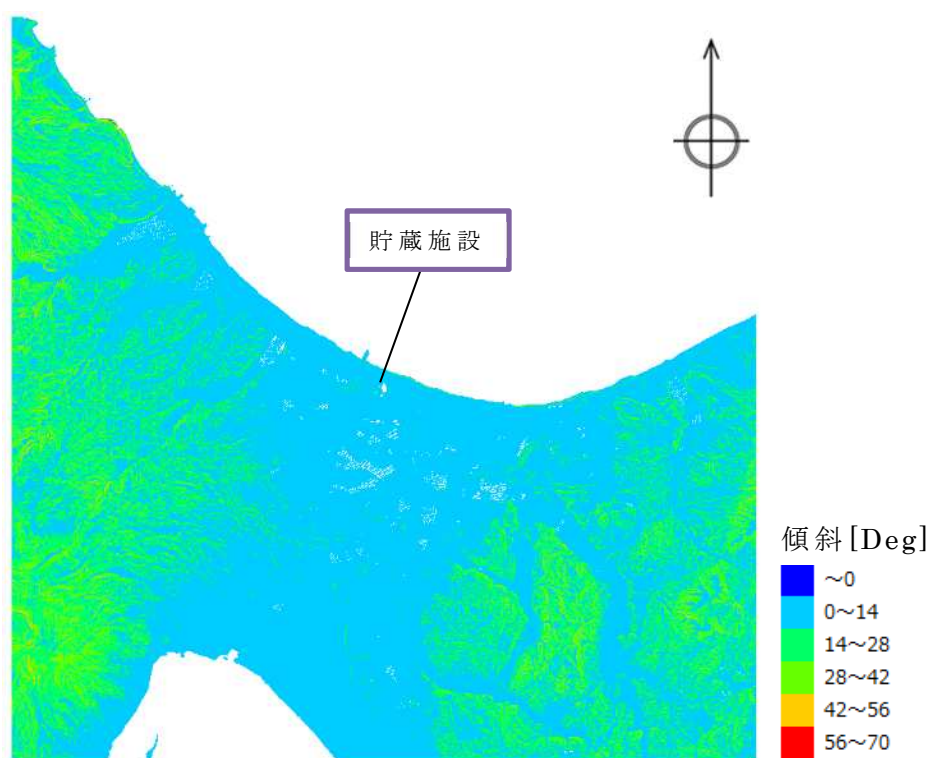
第 5 図 (2) 標高データ (拡大図)



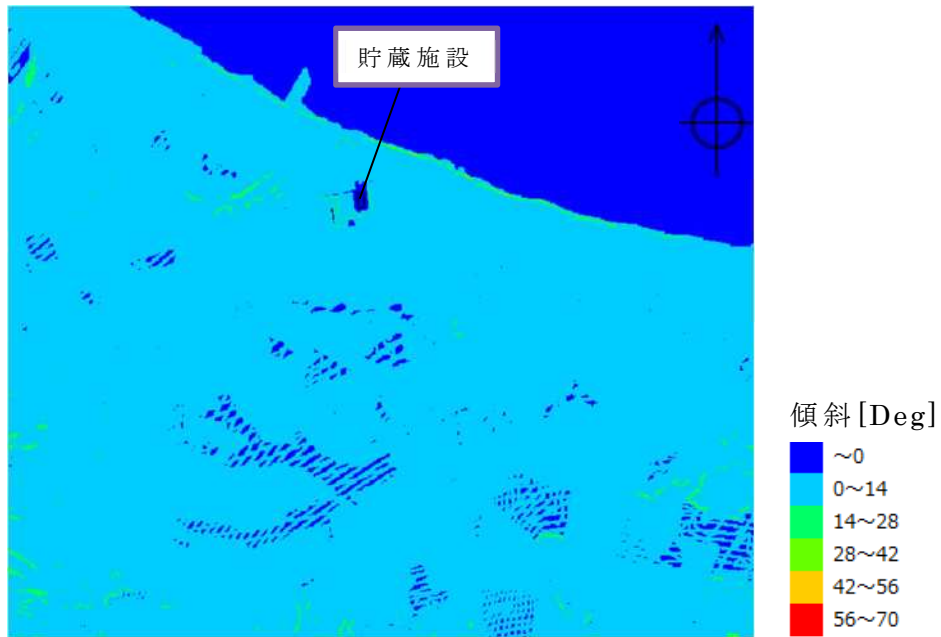
第 5 図 (3) 標高データ (拡大図)

(2) 傾斜及び傾斜方位

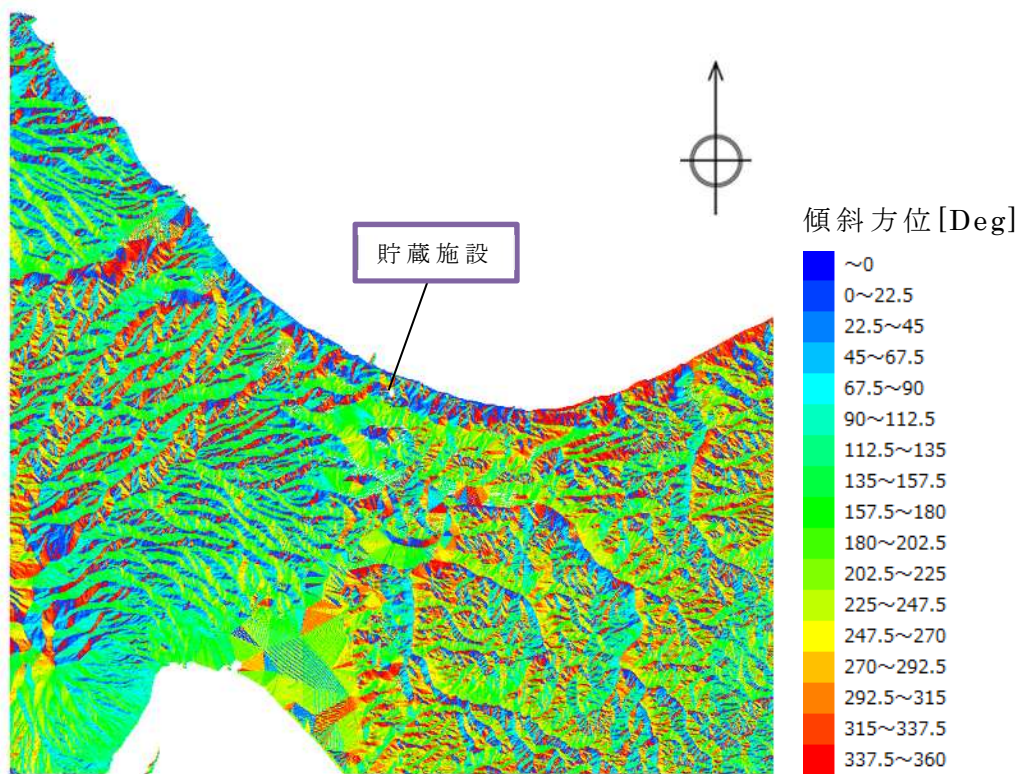
傾斜及び傾斜方位については、標高データより計算した。ただし、敷地内の法面部の傾斜については図面記載の傾斜を適用した。作成した傾斜データ、及び傾斜方位データについてそれぞれ第6図、第7図に示す。



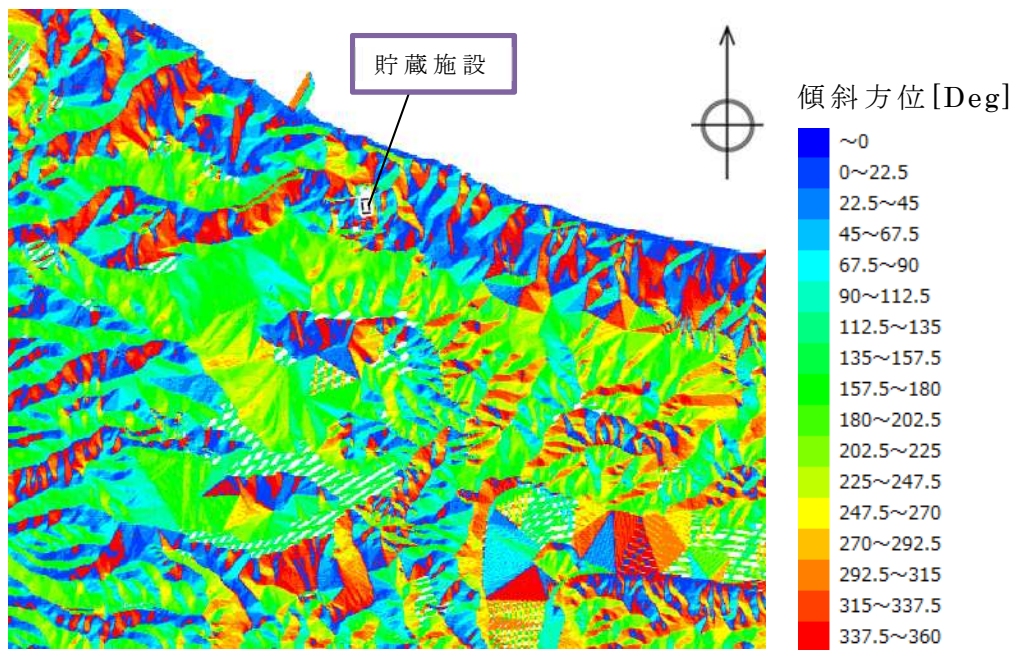
第6図(1) 傾斜データ



第 6 図 (2) 傾斜データ (拡大図)



第 7 図 (1) 傾斜方位データ



第 7 図 (2) 傾斜方位データ (拡大図)

3.2.2.3 気象データの作成

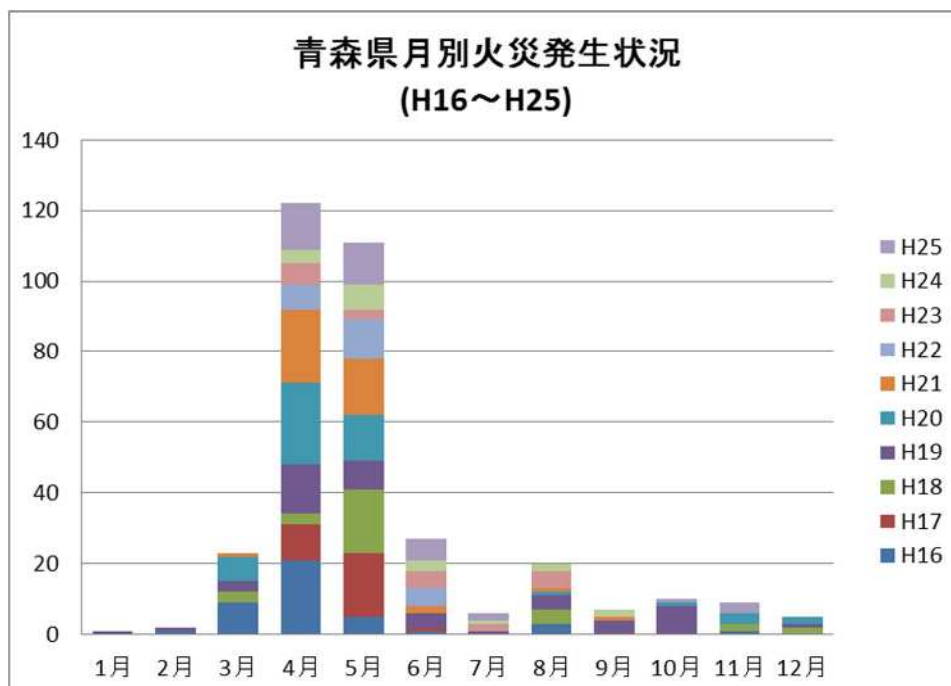
気象データの作成については、気象庁が公開している気象統計情報を用いて、貯蔵施設周辺にて起こりうる最悪の条件を検討するため、青森県内において火災発生件数の最も多い月における、貯蔵施設から至近の気象観測所の各データ（最高気温、最大風速、最小湿度）を用いて評価を実施した。

データの評価期間については、ガイドを参考とし至近の過去10年間として、2004年～2013年（平成16年～平成25年）の10年間とした。

(1) 火災発生件数対象月

青森県内の上記10年間における月別の火災発生件数は第8図のとおりであり、発生件数では4月が120件超と最も多い月ではある。しかしながら、翌5月についても110件程度と比較的多く、また3月から8月までの期間で見ても7月を除けば他の月より比較的件数が多い。

これらの結果を考慮し、気象データ評価の対象月としては、3月から8月までの6ヶ月間を対象とすることとした。



第8図 青森県月別火災発生件数（青森県防災HPより）

(2) 対象気象観測所

貯蔵施設から最も近い観測所はむつ観測所であり約8km離れている。しかし、貯蔵施設周辺にはさらに以下の4つの地域観測所（小田野沢、大間、脇野沢、湯野川）があり、いずれの観測所も施設から50km圏内に位置しているため、これらの観測所のデータを踏まえて評価を実施した。貯蔵施設周辺の気象観測所の位置について第9図に示す。各観測所における観測項目については以下のとおり。

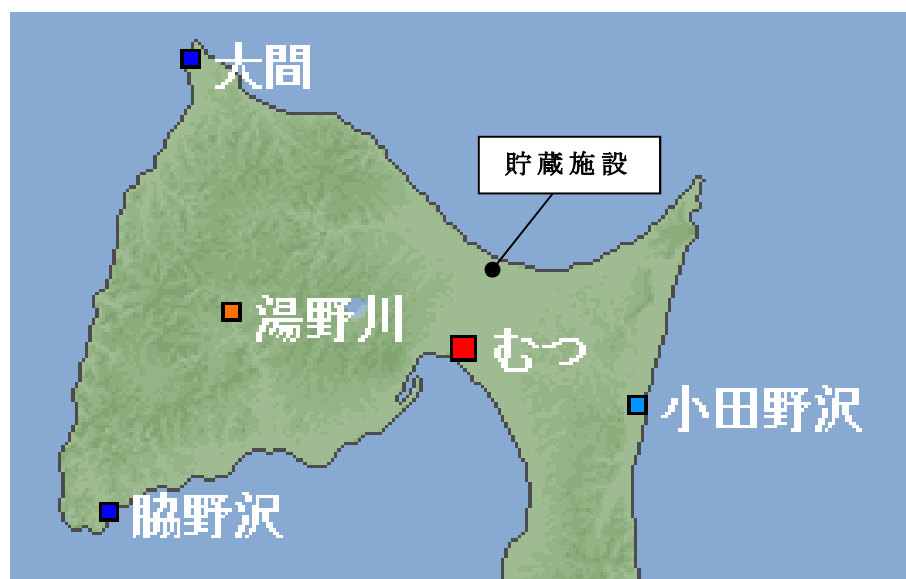
- ・むつ地域気象観測所（貯蔵施設から約8km）
観測要素：気温・降水量・風向風速・日照時間・積雪深
- ・小田野沢地域気象観測所（貯蔵施設から約18km）
観測要素：気温・降水量・風向風速・日照時間
- ・大間地域気象観測所（貯蔵施設から約33km）
観測要素：気温・降水量・風向風速・日照時間・積雪深
- ・脇野沢地域気象観測所（貯蔵施設から約42km）
観測要素：気温・降水量・風向風速・日照時間・積雪深

- ・湯野川地域気象観測所（貯蔵施設から約 23km）

観測要素：降水量

湯野川観測所については，観測要素が降水量のみであるため除外した。

また，貯蔵施設においても 2012 年 5 月より気象観測を開始しており，データの取得期間が短期間ではあるが評価の一助として参考とした。



第 9 図 貯蔵施設周辺の気象観測所位置図（気象庁HPより）

(3) 気象データの作成

2004年から2013年までの10年間における各気象観測所の3月から8月までのそれぞれの観測データの最大値について第2表に示す。これらの結果より、上記期間における各観測要素の最大値は次のとおりとなった。

- ・最高気温：34.7（℃）（むつ観測所7月）
- ・最小湿度：13（%）（むつ観測所4月）
- ・最大風速：19（m/s）（小田野沢観測所5月）
- ・最大風速時風向：西南西

評価の結果、各観測所の立地条件により観測データの傾向に違いは見られるものの、最高気温、最小湿度及び最大風速時風向についてはむつ観測所のデータが最大値となっており、貯蔵施設から最も近い当観測所のデータを用いることはほぼ妥当であるものと考えられる。

風向についてはむつ観測所における最大風速時風向のうち最多である西南西を設定する。また、風向はそれぞれの地域特性によって左右されるものであり、最多風向のデータにおいては特に夏季期間に東方向からの風も比較的多い結果となっている。最大風速についても下北半島の突端(大間)や太平洋側(小田野沢)で風速が強い時期がある。これらの観測所の結果において、風速の強い時期はその多くが東方向との結果となったが、最多風向については敷地内の観測データも考慮した上で南南西と設定した。

また、東方向からの風についても、施設の東側には森林が近接しており、東方向からの風の影響も無視できないものと判断し、貯蔵施設特有の条件として東についても風向として設定することとした。

以上の結果を考慮して、卓越風向として西南西、南南西を設定した。また、東も風向として設定した。気象データとしては最高気温 34.7℃、最小湿度 13%、最大風速 19m/s とした。

第 2 表 各気象観測所観測データ

・各気象観測所データは 2004 年～2013 年の 10 年間における各月の最大または最小値
 ・参考の RFS データは 2012 年 5 月～2013 年 12 月までの各月の最大値
 (*: 4 月の最高気温データは装置点検により欠損していたため 2014 年 4 月の値を記載)

最高気温(℃)

(参考)

	むつ	小田野沢	脇野沢	大間	RFS(2012-2013)
3月	17.4	19.7	16.4	16.3	16.0
4月	22.2	20.6	21.2	21.1	20.6*
5月	26.1	24.5	26.2	23.3	22.9
6月	29.4	29.7	29.6	24.9	26.1
7月	34.7	33.0	33.1	32.5	29.5
8月	34.5	34.2	33.6	30.8	31.1

最小湿度(%) (小田野沢, 脇野沢, 大間については観測記録なし)

	むつ	小田野沢	脇野沢	大間
3月	17	—	—	—
4月	13	—	—	—
5月	15	—	—	—
6月	19	—	—	—
7月	33	—	—	—
8月	35	—	—	—

最大風速(m/s)

(参考)

	むつ	小田野沢	脇野沢	大間	RFS(2012-2013)
3月	14.4	16.3	12.5	16.5	18.9
4月	13.4	13.8	14.6	16.4	14.4
5月	15.4	19.0	13.2	15.1	11.6
6月	11.3	12.9	14.0	12.3	10.5
7月	10.2	17.2	12.5	12.6	12.7
8月	12.3	11.0	12.0	10.8	13.5

最大風速時風向

	むつ	小田野沢	脇野沢	大間
3月	西南西	西南西	東	西南西
4月	西南西	西	東	西南西
5月	西南西	西南西	東	南西
6月	西南西	西南西	東	西南西
7月	南西	西南西	東	西南西
8月	西	南西	東	西南西

最多風向

(参考)

	むつ	小田野沢	脇野沢	大間	RFS(2012-2013)
3月	南西	西	西	西	南南西
4月	南南西	西	西	西南西	南南西
5月	南南西	南東	東	東	南
6月	北北東	南東	東	東北東	南
7月	南南西	南東	東	東北東	南
8月	北北東	南東	西北西	東北東	南

3.2.2.4 土地利用データの作成

(1) 可燃物パラメータの設定

可燃物パラメータについては、「福島第一原子力発電所への林野火災に関する影響評価」(2012年6月 独立行政法人原子力安全基盤機構) (以下, J N E S 報告書という) を参考として設定した。

- ・ 森林については樹種, 林齢で細分化し, 可燃物パラメータは J N E S 報告書に基づき設定した。可燃物パラメータの設定根拠について第3表に示す。
- ・ 敷地内に存在する芝生については, 維持管理されるものとして芝 (Short Grass) として分類 (F A R S I T E デフォルト植生)
- ・ 田, ゴルフ場, その他農用地については高い草 (Tall Grass) として分類 (F A R S I T E デフォルト植生)
- ・ 建物用地, 荒地については延焼しにくいものと考えられるが, 保守性を考慮して茂み (Brush) として分類 (F A R S I T E デフォルト植生)
- ・ マダケ・モウソウは樹高が低く, 森林と区分されないことから低層植生 (Chaparral) に分類 (F A R S I T E デフォルト植生)

上記に基づき分類を整理した植生区分について第4表に示す。また, 林齢による燃料区分の細分化について第5表に示す。

第3表 可燃物パラメータ (JNES 報告書より抜粋)

(資) 表 B-7 FARSITE への追加植生タイプ

(※後藤他(2005) 「日本で発生する山火事の強度の検討—Rothermelの延焼速度予測モデルを用いた Byramの火線強度の推定—)

パラメータ	FMOD	下草の有無	IH	IOH	IOOH	LiveH	LiveW	IHSAV	LiveH SAV	LiveW SAV	Depth	XtMoist	DHt	LHt
単位	—		Ton/ha	Ton/ha	Ton/ha	Ton/ha	Ton/ha	l/cm	l/cm	l/cm	cm	%	J/kg	J/kg
意味	モデル番号		1時間以内に乾燥する木質のfuel量	10時間以内に乾燥する木質のfuel量	4日以内に乾燥する木質のfuel量	生きた草(herbaceous)のfuel量	生きた木質(woody)のfuel量	1時間以内に乾燥する木の表面積/積	生きた草の表面積/積	生きた木質の表面積/体積	林床可燃物の深さ	1時間以内に乾燥する木質で延焼が止まる水分量(ほぼ25~35%)	枯死可燃物(dead)の熱容量	生体可燃物(live)の熱容量
スギ(林齢10年生未満)	14	有	6.75	4.48	11.23	0	15.71	60.51	59	48	182.9	32	20963	20963
スギ(林齢10年生)	15	有	4.48	2.24	1.12	0	41.706947	60.51	59	48	182.9	32	20963	20963
スギ(林齢20年生)	16	有	4.48	2.24	1.12	0	108.180934	60.51	59	48	182.9	32	20963	20963
スギ(林齢30年生)	17	無	1.66	0	0	0	196.7316466	60.51	59	48	6.1	32	20963	20963
スギ(林齢40年生以上)	18	無	1.66	0	0	0	249.4683718	60.51	59	48	6.1	32	20963	20963
マツ(林齢10年生未満)	19	有	6.75	4.48	11.23	0	15.71	70.44	59	48	182.9	31	19958	19958
マツ(林齢10年生)	20	有	6.75	4.48	11.23	0	44.24034483	70.44	59	48	182.9	31	19958	19958
マツ(林齢20年生)	21	有	4.48	2.24	1.12	0	75.03323077	70.44	59	48	182.9	31	19958	19958
マツ(林齢30年生)	22	無	4.48	2.24	1.12	0	102.5613619	70.44	59	48	6.1	31	19958	19958
マツ(林齢40年生以上)	23	無	1.66	0	0	0	130.1950275	70.44	59	48	6.1	31	19958	19958
落葉広葉樹(28種)	24	有	6.75	4.48	11.23	0	62.65811065	149.48	59	48	182.9	25	18524	18524
備考	1~13	広葉樹林並びにスギ(林齢30年生未満)及びマツ(林齢30年生未満)に下草が存在することを仮定	森林簿等に基づき、胸高直径(m)ごとに、木質の面積当たり質量の平均値を以下の式により得る。 密度(kg/m ³)×材積(m ³)/面積(ha)		NFFL FUEL MODELの「Timber litter」デフォルト値を引用	枯死率を0%と仮定し、木質の面積当たり質量の平均値を用いる。	文献の表面積-体積比を引用	NFFL FUEL MODELの「Timber litter」デフォルト値を引用	下草有のタイプは、NFFL FUEL MODELの「Chaparral (6 feet)」デフォルト値、下草無のタイプは、NFFL FUEL MODELの「Hardwood litter」デフォルト値をそれぞれ引用	文献の限界含水比を引用	文献の低位発熱量を引用			

※1HSAVの値は整数で入力するため小数点切上げ

※落葉広葉樹(28種)の1HSAVは入力上限値130を適用

第4表 森林可燃物の設定（FARSITE 植生設定）

植生	FARSITE パラメータ設定の考え方	FARSITE パラメータ区分
スギ, ヒノキ, ヒバ	スギとして森林簿記載の林齢ごとに分類	スギ ^{※1}
アカマツ, クロマツ, カラマツ, トドマツ, 他針葉樹 ^{※1}	マツとして森林簿記載の林齢ごとに分類	マツ ^{※1}
ナラ, キリ, クリ, ハンノキ, ブナ, カエデ, カツラ, ケヤキ, センノキ, ウダイカンバ, ミズナラ, イタヤ, コナラ, クヌギ, 他広葉樹	落葉広葉樹として分類	落葉広葉樹 ^{※1}
マダケ, モウソウ	低層植生 (Chaparral ^{※2})	マダケ, モウソウ
ゴルフ場, その他農用地, 田, 高い草	高い草 (Tall Grass ^{※2})	ゴルフ場, その他農用地, 田
建物用地, 荒地	茂み (Brush ^{※2})	建物用地, 荒地
芝	芝 (Short Grass ^{※2})	芝

※1 J N E S 報告書に基づく植生

※2 F A R S I T E デフォルト植生

上記以外の「道路」「鉄道」「海浜」「その他の用地」「河川地及び湖沼」「海水域」「伐採地跡」「未立木地」については、植生はないものとして非燃焼領域として設定した。

第5表 林齢で細分化する燃料区分

燃料区分	樹種区分	林齢区分 (林齢)	説明
27	1	0 (0~9)	スギ (10年生未満)
31	1	10 (10~19)	スギ (10年生)
33	1	20 (20~29)	スギ (20年生)
35	1	30 (30~39)	スギ (30年生)
37	1	40 (40~)	スギ (40年生以上)
28	2	0 (0~9)	マツ (10年生未満)
29	2	10 (10~19)	マツ (10年生)
32	2	20 (20~29)	マツ (20年生)
34	2	30 (30~39)	マツ (30年生)
36	2	40 (40~)	マツ (40年生以上)
30	3	- -	落葉広葉樹 [*]

※ J N E S 報告書に基づき、落葉広葉樹について、一般に高齢で下草の状況は林齢によってほとんど変化がないことを考慮し、林齢に依存しない可燃物パラメータとする

一般的に、林齢 40 年以上の森林（マツ，スギ）は，下草がほとんど存在せず延焼がしにくくなることを保守的に考慮して，J N E S 報告書考察を参考とし森林簿の林齢について第 6 表のとおり読み替えを行った。

第 6 表 林齢の読み替え

森林簿記載の林齢	読み替え後の林齢
林齢 10 年生未満	林齢 10 年生未満
林齢 10 年生以上 20 年生未満	林齢 10 年生以上 20 年生未満
林齢 20 年生以上 30 年生未満	林齢 20 年生以上 30 年生未満
林齢 30 年生以上 40 年生未満	
林齢 40 年生以上	

(2) 土地利用データの作成

貯蔵施設周辺の森林領域以外の植生については，ガイドを参考とし現地状況をできるだけ模擬するため，公開情報の中でも高い空間解像度である 100m メッシュの土地利用データを用いて確認を行った。（使用公開データ：国土数値情報 土地利用細分メッシュ，2009 年度）土地利用データについては，第 7 表に示す土地利用種別に応じて，樹種及び樹冠率のモデル化を行った。

第7表 土地利用種別（国土地理院HPより）

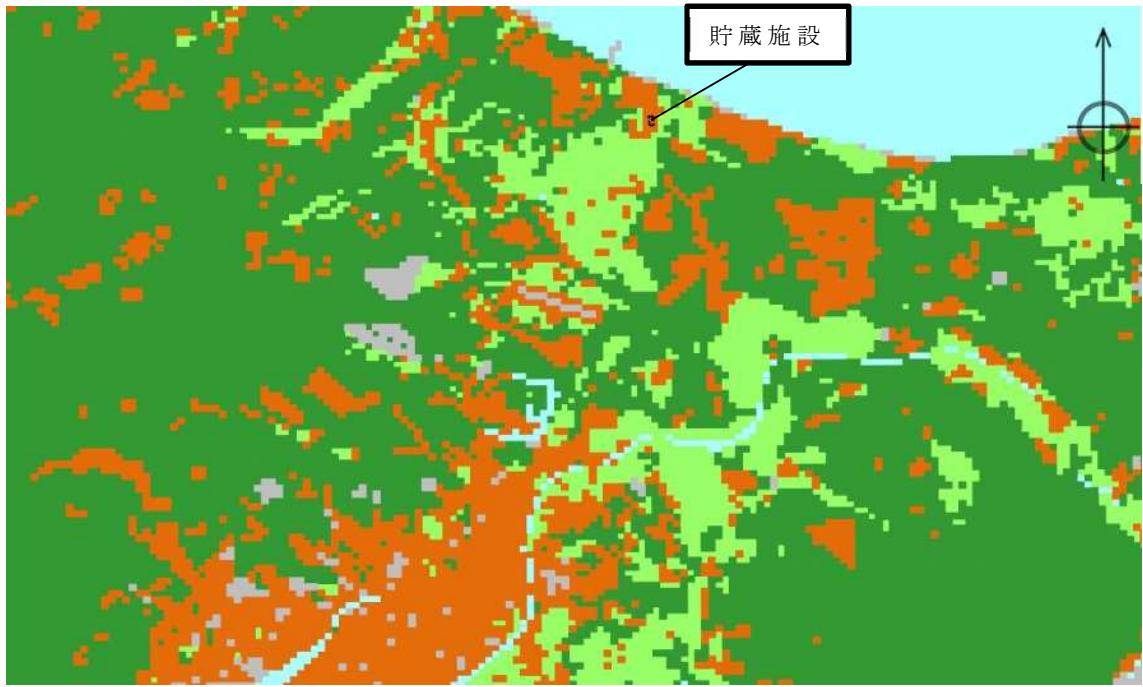
種別	定義
田	湿田・乾田・沼田・蓮田及び田とする。
その他の農用地	麦・陸稻・野菜・草地・芝地・りんご・梨・桃・ブドウ・茶・桐・はぜ・こうぞ・しゅろ等を栽培する土地とする。
森林	多年生植物の密生している地域とする。
荒地	しの地・荒地・がけ・岩・万年雪・湿地・採鉱地等で旧土地利用データが荒地であるところとする。
建物用地	住宅地・市街地等で建物が密集しているところとする
道路	道路などで、面的に捉えられるものとする。
鉄道	鉄道・操車場などで、面的にとらえられるものとする。
その他の用地	運動競技場，空港，競馬場・野球場・学校港湾地区・人工造成地の空地等とする。
河川地及び湖沼	人工湖・自然湖・池・養魚場等で平水時に常に水を湛えているところ及び河川・河川区域の河川敷とする。
海浜	海岸に接する砂，れき，岩の区域とする。
海水域	隠頭岩，干潟，シーバースも海に含める。
ゴルフ場	ゴルフ場のゴルフコースの集まっている部分のフェアウェイ及びラフの外側と森林の境目を境界とする。

可燃物パラメータの設定方針に基づき整理した土地利用種別ごとのモデル化の一覧について第8表に示す。また，第10図に貯蔵建屋周辺の土地利用種別について示す。

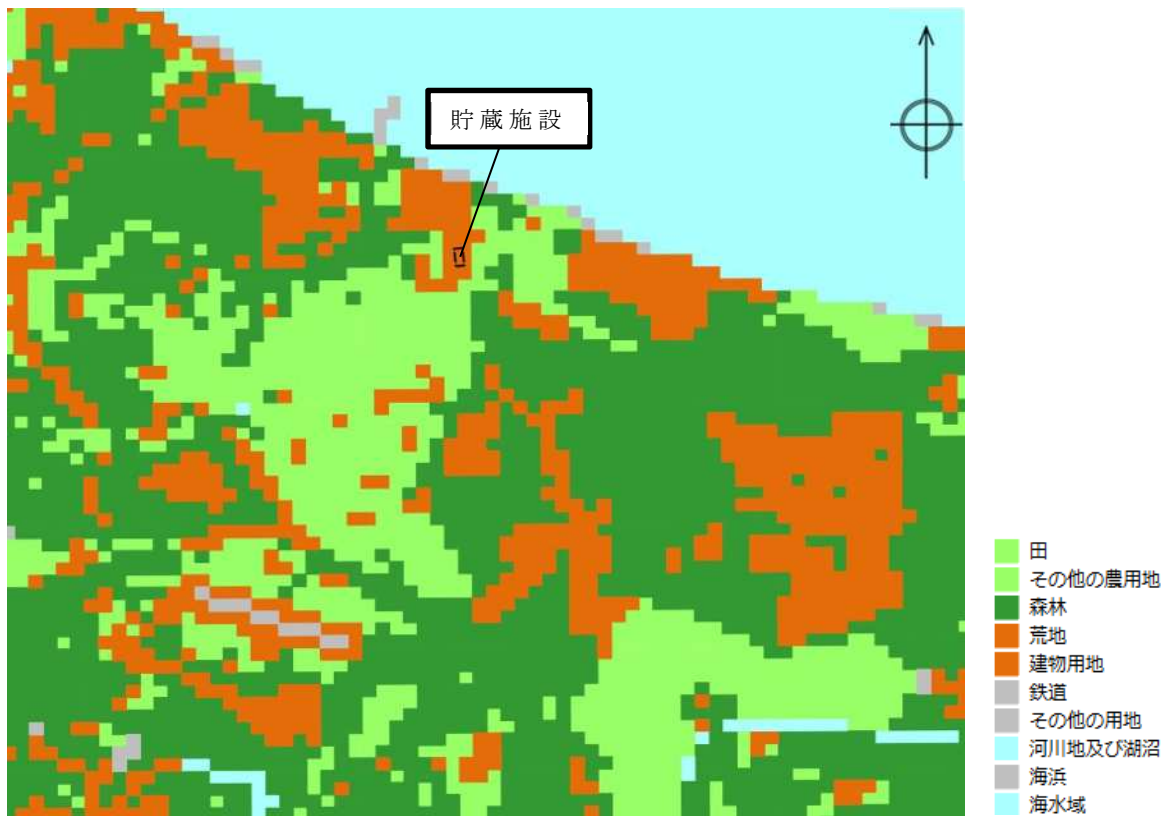
第 8 表 土地利用種別のモデル化

コード (土地利用区分)	燃料モデル (燃料区分)
田	高い草 (3)
その他の農用地	高い草 (3)
森林	森林簿の樹種・林齢により細分化 (0)
荒地	低層植生, 茂み (5)
建物用地	低層植生, 茂み (5)
道路	非燃焼領域 (99)
鉄道	非燃焼領域 (99)
その他の用地	非燃焼領域 (99)
河川地及び湖沼	非燃焼領域 (99)
海浜	非燃焼領域 (99)
海水域	非燃焼領域 (99)
ゴルフ場	高い草 (3)

- ・ ()内は F A R S I T E に内蔵される区分値
- ・ 「田」, 「その他の農用地」は J N E S 報告書に基づき, 高い草を適用
- ・ 「森林」はガイドに従い, 森林簿 (樹種, 林齢) に基づき細分化する
- ・ 「建物用地」は「住宅地等の建物が密集している地域」であり延焼しづらいと想定されるが, 住宅地の植生が低密度で分布していると想定し, 低層植生 (Brush) を適用
- ・ 「荒地」は「しの地や湿地」を含むことから燃焼領域とし, J N E S 報告書に基づき低層植生 (Brush) を適用
- ・ 「道路」「鉄道」は樹木等はないため, 非燃焼領域を適用
- ・ 「その他の用地」は「運動競技場, 空港, 人口造成地の空き地」で植生はないため, 非燃焼領域を適用
- ・ 「河川地及び湖沼」, 「海水域」は植生がないため, 非燃焼領域を適用
- ・ 「海浜」は「砂地や岩」であり植生はないため, 非燃焼領域を適用
- ・ 「ゴルフ場」は J N E S 報告書に基づき, 高い草を適用
- ・ 「森林」の樹冠率は J N E S 報告書に基づき, F A R S I T E 区分「3」を適用 (樹冠率 50~80%)
- ・ 「森林」以外の領域 (高い草, 茂み) の樹冠率は不明であるが, どちらも保守性を考慮して 0%を適用する



第 10 図(1) 土地利用種別



第 10 図(2) 土地利用種別 (拡大図)

(3) 樹冠率データの作成

樹冠率は、上空から森林を見た場合の平面上の樹冠が占める割合をいい、FARSITEでは、実際の森林状況による自然現象を可能な限り反映するため、樹冠率の割合が高くなると、風速の低減、地面草地への日照の低減の影響により火災が延焼しにくくなる。

FARSITEにおいては、第9表に示すとおり、樹冠率を4つのカテゴリに区分しいずれかを設定するようになっており、今回の評価においては植生調査データにより森林と定義できる区分3、4のうち保守的に区分3を設定した。その他の土地利用区分については、樹冠率0%(区分-9999)とした。作成した樹冠率データについて第11図に示す。

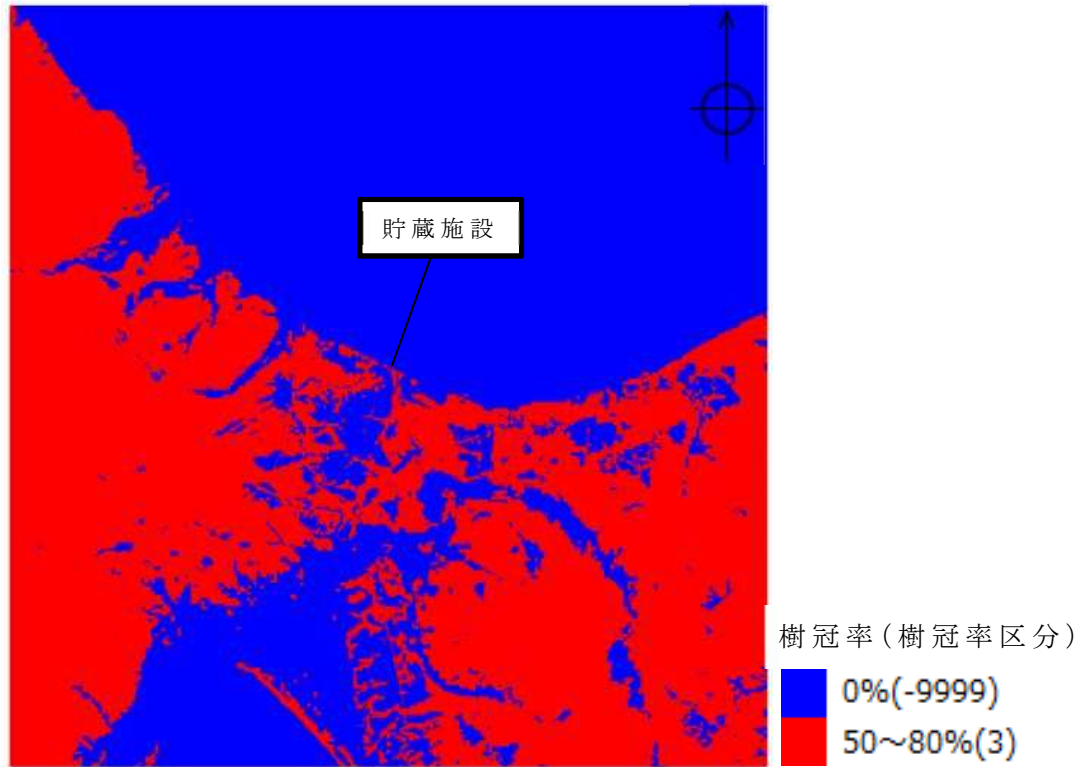
第9表 FARSITE 樹冠率カテゴリ

FARSITE 区分	樹冠率(%)	備考
1	～ 20	
2	21 ～ 50	非森林を含む領域
3	51 ～ 80	一般的な森林
4	81 ～ 100	原生林を含む森林

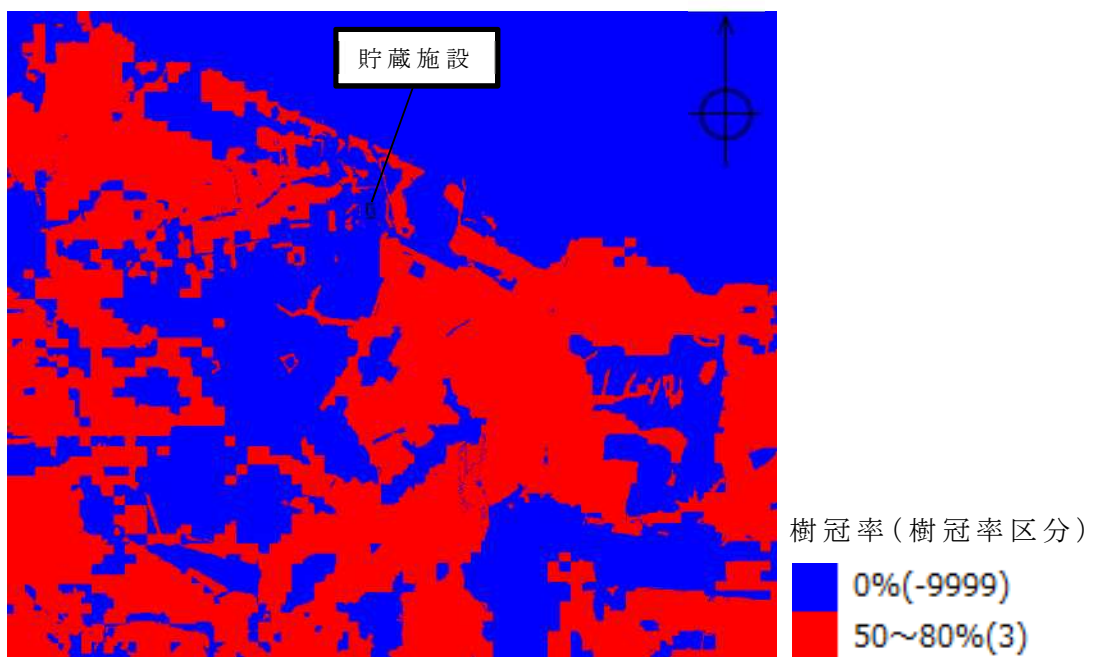
区分3と4については、第10表のとおり風速、日射の低減効果に関して区分3の方が保守的となっている。

第10表 樹冠率カテゴリ区分3、4の風速、日射の低減効果

FARSITE 区分	風速低減効果	日照低減効果
3	風速が弱まりにくい	地面下草が燃えやすい
4	風速が弱まる	地面下草が燃えにくい



第 11 図 (1) 樹冠率データ



第 11 図 (2) 樹冠率データ (拡大図)

3.2.2.5 植生データの作成

(1) 貯蔵施設周辺の植生

貯蔵施設敷地周辺における森林の植生については、ガイドを参考とし森林簿、森林計画図のデータをもとに確認した。第12図に、森林簿、森林計画図をもとに航空写真を重ね合わせることで作成した森林図について示す。

使用したむつ市及び東通村の森林簿、森林計画図の資料については、国有林については林野庁東北森林管理局（下北森林管理署）、民有林については青森県農林水産部林政課よりそれぞれ受領したものである。



第12図 敷地周辺の森林図（Google Mapをもとに作成）

また、植生入力に使用した森林簿（民有林）の例について第11表に示す。敷地周辺はそのほとんどが民有林であるが、森林簿データが電子情報でまとめられておりデータ量が膨大であるため、例として森林図中の黄色部に該当する森林簿データについて抜粋して示す。第11表中の黄色網掛け部が第12図の黄色部に該当す

るものである。

森林領域以外については、土地利用データに基づき植生データの作成を行った。

(2) 貯蔵施設敷地内及び敷地周辺の植生

敷地内及び敷地周辺の植生については、敷地造成時の植生状況との比較をもとに現地調査も含めて実施した。植生調査については、現状敷地内の緑化維持業務を受託しており、敷地周辺の植生に詳しい環境事業専門会社に委託し実施した。当社は、環境事業専門会社として数十年の実績があり、調査者についても環境アセスメント士、造園施工管理技士の国家資格を保有し、植生調査に関し適切な力量を有していることを確認している。

(a) 法面の植生について

第 13 図に法面の傾斜状況及び植生について示す。法面の最大高さは 13m であり、斜面勾配は最大で 1 : 2 となっている。法面一体については敷地造成時に芝の種子を吹き付けており、芝の植生となっている。

(b) 敷地内の植生について

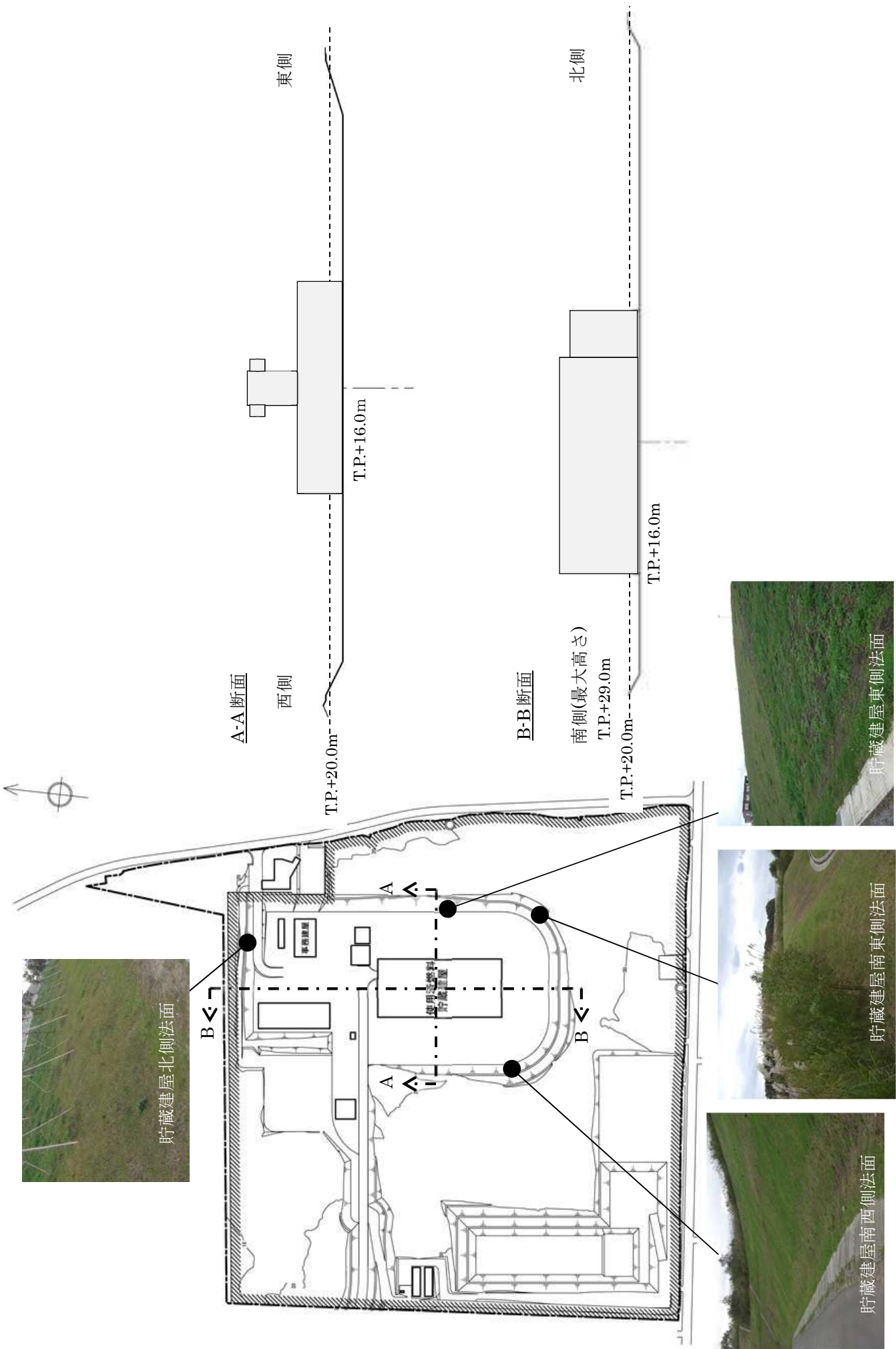
法面以外の敷地内の植生については、元が牧草地であったこともあり概ねススキ群やイネ科の牧草であった。また貯蔵建屋の西側及び敷地北西側に一部クマイザサ群が見られた。所々に見られる林については、ミズナラ群やハンノキ群の落葉広葉樹であった。

(c) 敷地周辺の植生について

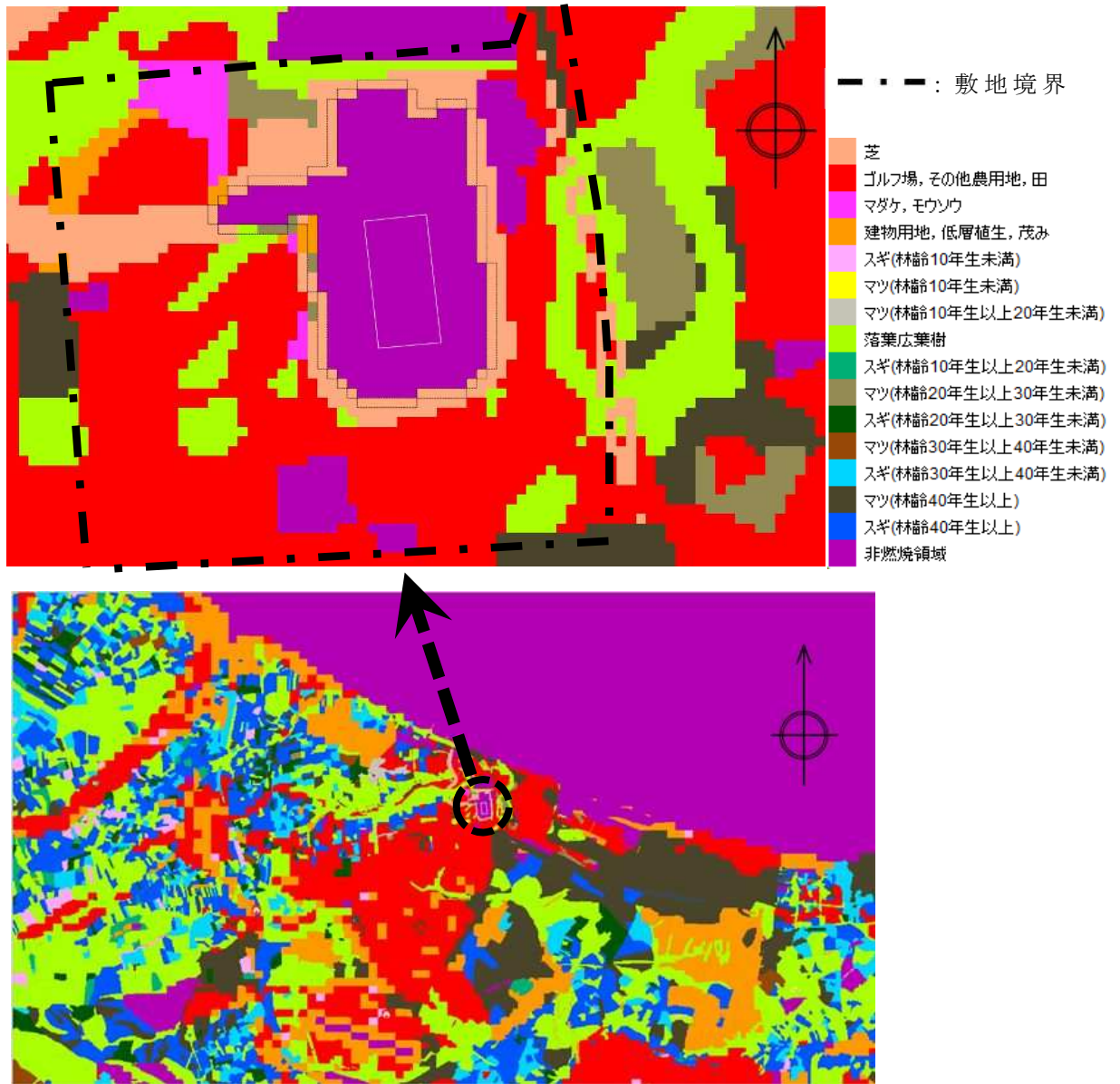
敷地周辺については、敷地の南側及び東側の道路沿いにアカマツ、クロマツの群落があり、林齢は低木群を除けば 40 年生以上であった。また、敷地の西側は一部アカマツ、クロマツ群や落葉広葉樹が見られるものの、ほとんどは畑であった。その他の植生は敷地内とほぼ同じであり概ねススキ群やイネ科の牧草であった。

以上の結果をもとに作成した植生図について第 14 図に示す。また、現地写真と合わせた敷地内及び敷地周辺の植生図について第

15 図， 第 16 図にそれぞれ示す。

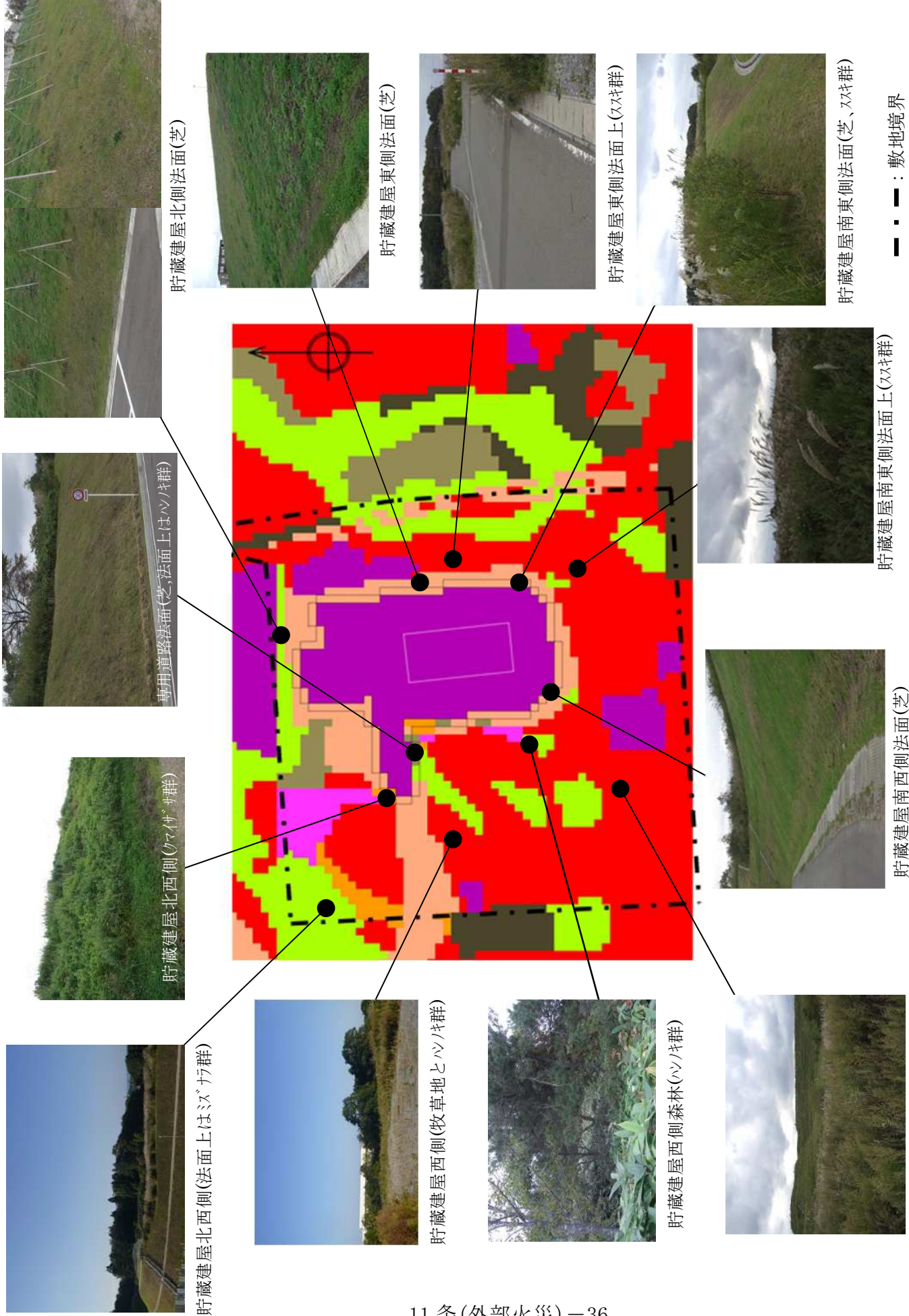


第13図 法面の傾斜状況及び植生

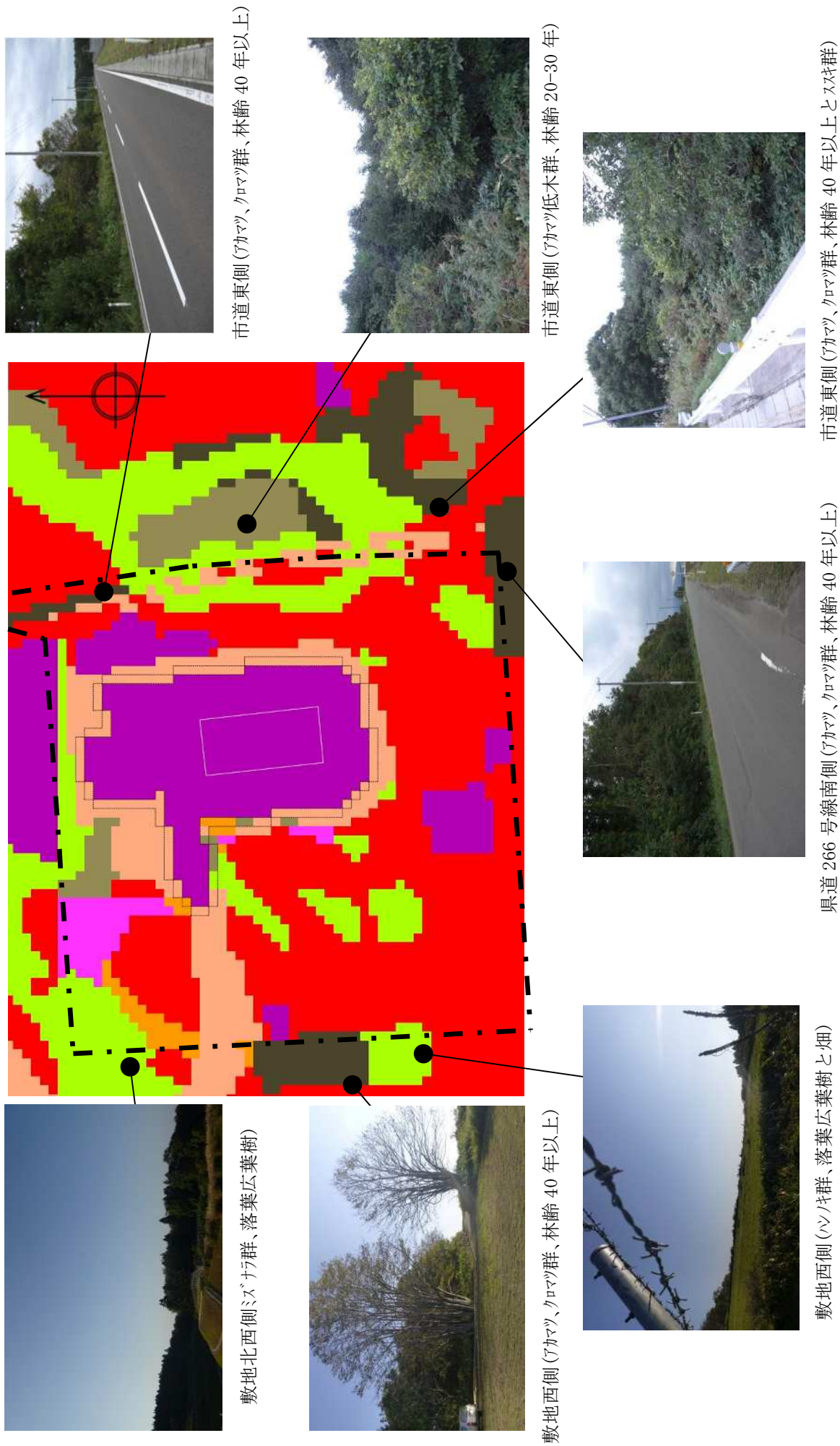


色	植生による分類	FARSITE へのラメータ区分	備考
■	ハンノキ群, ミズナラ群	落葉広葉樹	
■	ススキ群, 牧草地(イネ科群)	ゴルフ場, その他農用地, 田	Tall Grass(高い草: 約 76cm)
■	クマイザサ群	マダケ, モウソウ	Chaparral(茂み: 約 183cm)
■	ノイバラ群	建物用地, 低層植生, 茂み	Brush(低層植生: 約 60cm)
■	アカマツ, クロマツ群	マツ	
■	アカマツ低木群	マツ	
■	芝草(法面)	芝	Short Grass(低い草: 約 30cm)
■	非燃焼領域	非燃焼	

第 14 図 貯蔵施設敷地内及び周辺の植生図 (詳細及び拡大図)



第 15 図 貯蔵施設敷地内植生状況



第16図 貯蔵施設敷地周辺植生状況

— · — : 敷地境界

(3) 敷地内の植生管理について

冬季期間（12月～翌5月）を除き、敷地内の植生管理については、第12表の頻度にて定期的実施するとともに、期間中月1回の頻度で巡回管理を行い、草木の巡視を行い現状の植生を維持するため軽度な復旧作業を実施することとしている。

第12表 植生管理のための巡視頻度及び作業内容

場所	頻度(期間中)	実施内容
事務建屋，貯蔵建屋 周辺(法面)	3回	芝刈り・除草・集草・搬出
通路(フェンス内)	2回	除草・集草・搬出
通路(フェンス外)	2回	除草・集草・搬出
市道沿い	2回	除草・集草・搬出
県道沿い	2回	除草・集草・搬出
上記以外の敷地内植生	適宜	除草・枝払い (現状の植生の維持管理)

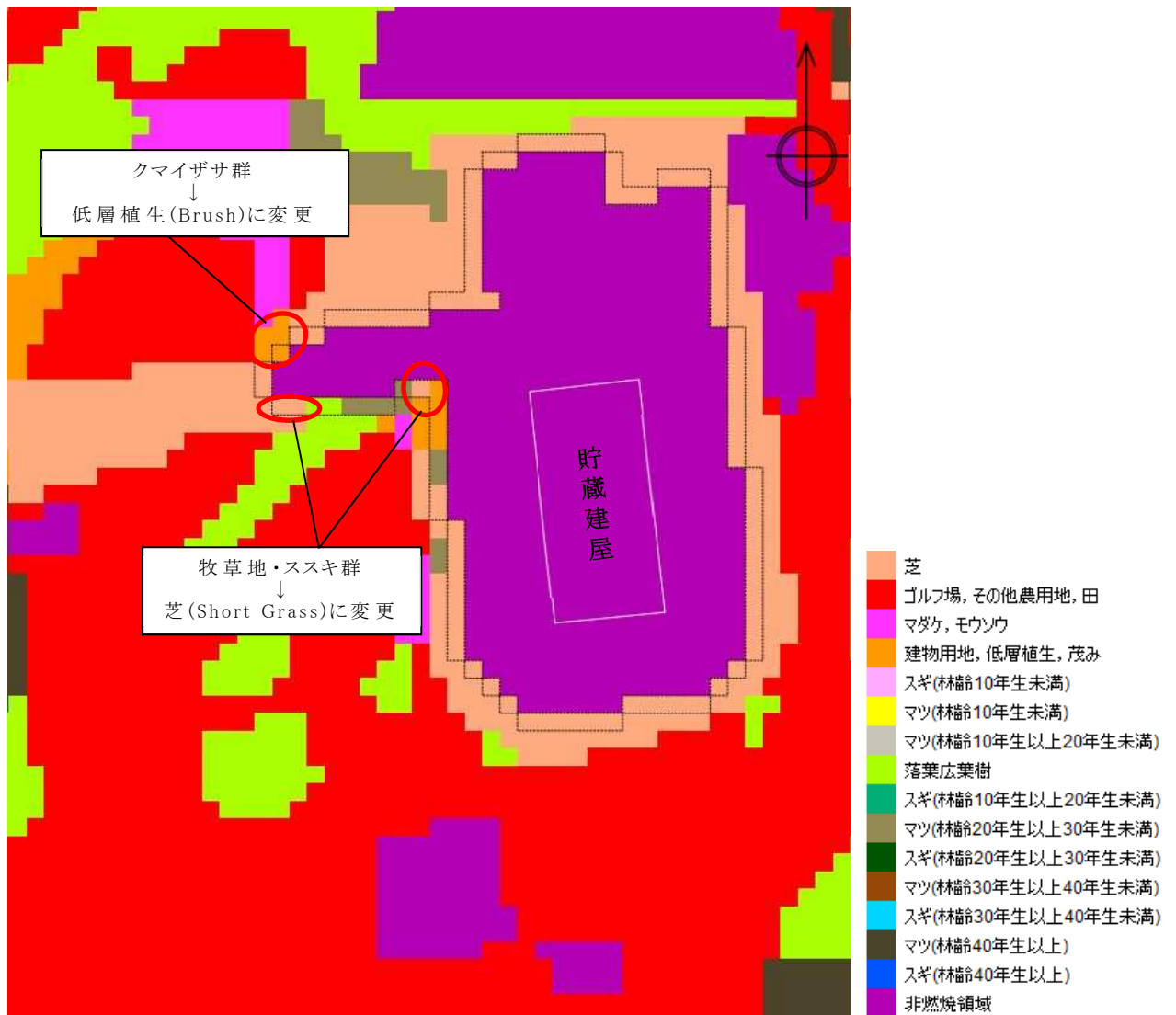
芝が生育している事務建屋周辺や法面部，及び貯蔵建屋周辺の非燃焼領域については，植生維持管理の観点及び人の往来が比較的頻繁であることから年3回の実施，敷地境界フェンス内外，市道，県道沿い，法面の草木が生育している場所については，生育状況の実績を考慮し年2回実施することとしている。

また，植生調査の結果，現状の植生管理対象区域外にある下記植生については，火災影響評価の観点から伐採管理が必要であることが判明した。

- ・貯蔵建屋北西部（非燃焼領域西側張出し部）のクマイザサ群（マダケ・モウソウ）
- ・貯蔵建屋西側法面上際近辺の牧草地・ススキ群（草高約76cmのTall Grass）

伐採措置については，事業開始前までに適切に実施することとする。本措置によりクマイザサ群については低層植生（草高約60cmのBrush），牧草地・ススキ群については芝（草高約30cmのShort Grass）

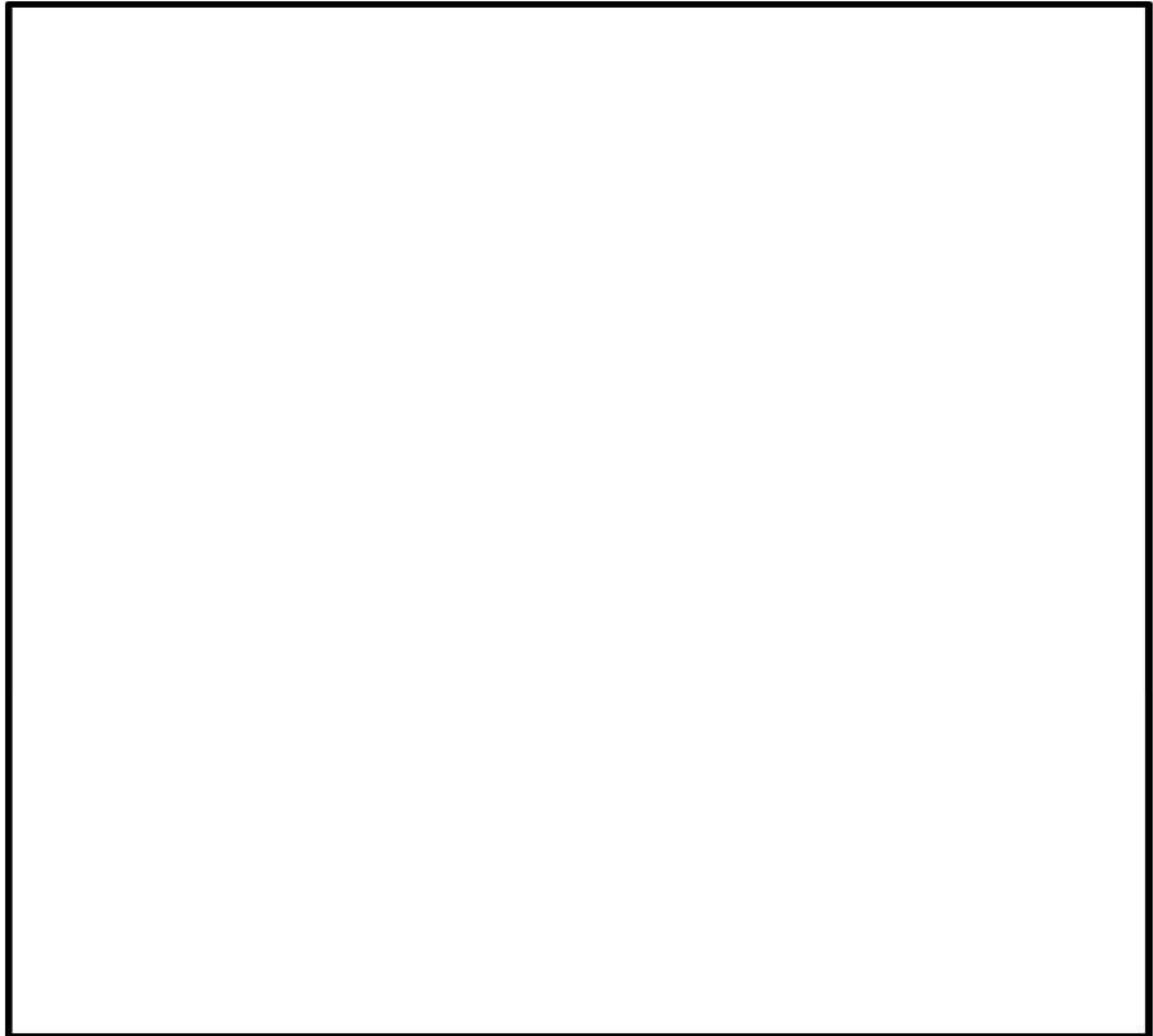
の植生とし、以降定期的にこの植生を維持・管理していくこととする。伐採措置後の敷地内の植生について第 17 図に示す（第 14 図の上図の抜粋再掲）。図中の赤枠で囲んだ部分が、伐採措置を施した後の植生を示している。






第 17 図 伐採措置後の敷地内植生

また、第 18 図に植生管理対象区域について示す。植生調査の結果、敷地周辺の植生については敷地造成前、遡れば戦後からほとんど変わっていないことを確認しており、今後の伐採措置後の経年的な植生の変化を考慮しても、全般的に大きく変化することはないと考え

られるが、今回の火災影響評価結果に影響を与えることのないよう、検討した敷地内の植生については伐採措置後の管理も含め現状を今後も維持すべく、適宜状況を監視しながら管理していくこととする。



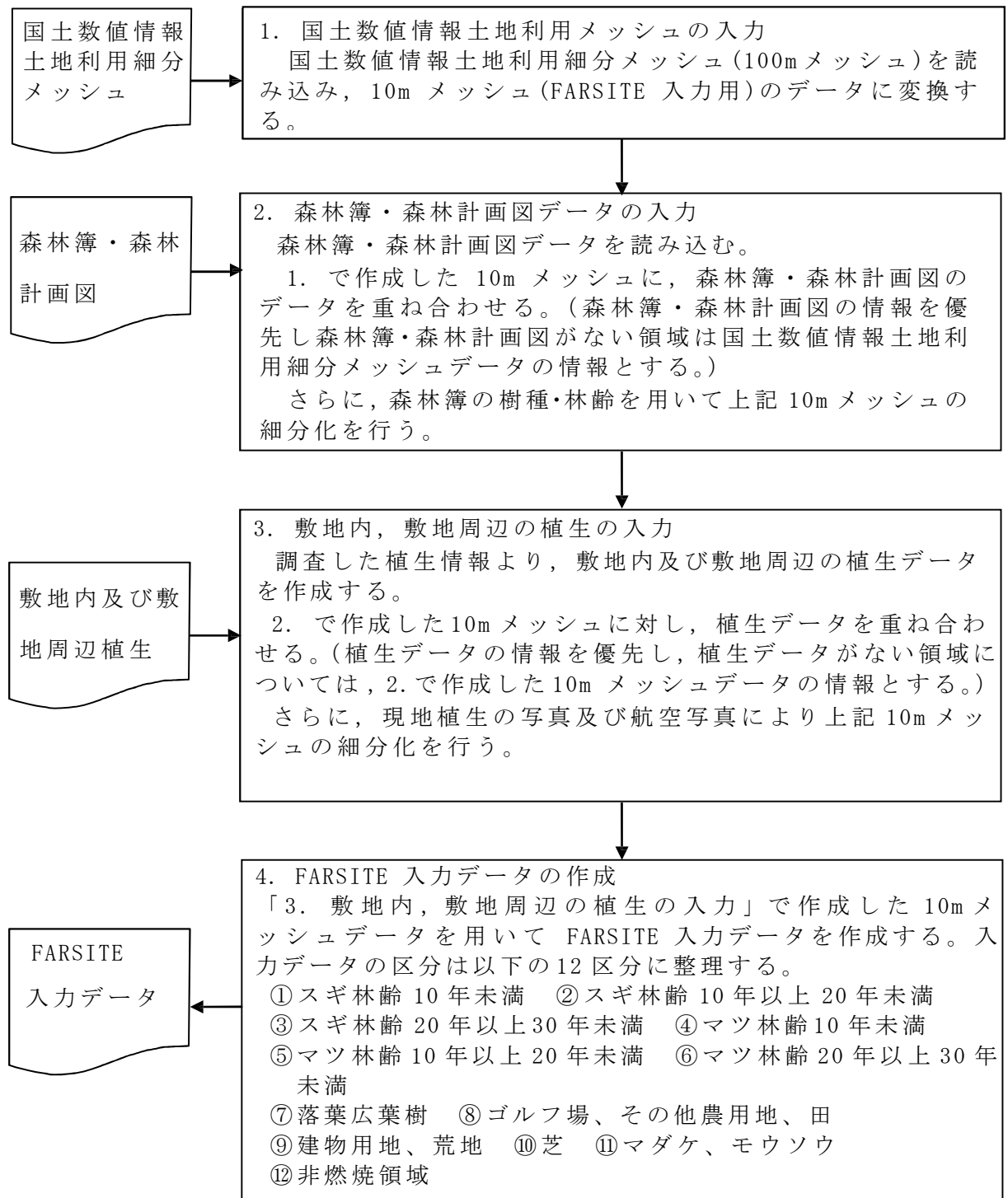
-  : 芝生育部（芝刈り、除草）
 -  : 法面（芝、背の低い草木→除草）
 -  : 敷地境界周辺（背の低い草木→除草）
 - 赤点線枠：伐採対象範囲（クマイザサ群、牧草地・ススキ群）
- 上記以外の敷地内植生（茂み、落葉広葉樹の森林）については、現状の植生を維持すべく適宜管理

第 18 図 敷地内の植生管理対象区域

(4) F A R S I T E 入力条件の設定について

前項で作成した植生データの入力にあたっては，国土数値情報土地利用細分メッシュを 10m メッシュ(F A R S I T E 入力用)のデータに変換し，これに森林簿，森林計画図のデータを照合して入力した。敷地内及び敷地周辺については，調査した植生情報をもとに作成した植生図のデータを 10m メッシュのデータに照合して入力した。このようにして作成した 10m メッシュデータをもとに，F A R S I T E への入力データを作成した。

第 19 図に F A R S I T E 入力条件の具体的な設定手順，また第 13 表に土地利用情報と F A R S I T E 入力データとの関係についてそれぞれ示す。



第19図 FARSITE入力条件の設定手順

第 13 表 (1) 土地利用情報と F A R S I T E 入力データとの関係

	土地利用	FARSITE 入力データ		備考
		区分	樹種	
国土数値情報 土地利用細分 メッシュ	田	⑧	ゴルフ場, その他 農用地, 田	FARSITE の Tall Grass (高い草: 約 76cm)として 分類(Tall Grass は草地 の中で最も保守的なパラ メータ)
	その他農用地			
	森林	森林簿及び森林計画図に 従い樹種・林齢毎に設定		-
	荒地	⑨	建物用地, 低層植 生, 茂み	延焼しづらいと想定さ れるが, 保守的に FARSITE の Brush(低層 植生: 約 60cm)として分 類
	建物用地			
	道路	⑫	非燃焼領域	-
	鉄道			
	その他の用地			
	河川地及び湖 沼			
	海浜			
海水域				
ゴルフ場	⑧	ゴルフ場, その他 農用地, 田	FARSITE の Tall Grass (高い草: 約 76cm)として 分類	

第 13 表 (2) 土地利用情報と F A R S I T E 入力データとの関係

	樹種	FARSITE 入力データ		備考
		区分	樹種	
森簿・林森 林計画 図	スギ林齢 10 年未満	①	スギ林齢 10 年未満	FARSITE の初期設定にないため林齢及び樹種に応じた JNES 報告書*の可燃物パラメータを設定
	スギ林齢 10 年以上 20 年未満	②	スギ林齢 10 年以上 20 年未満	
	スギ林齢 20 年以上 30 年未満	③	スギ林齢 20 年以上 30 年未満	
	スギ林齢 30 年以上 40 年未満			
	スギ林齢 40 年以上			
	マツ林齢 10 年未満	④	マツ林齢 10 年未満	
	マツ林齢 10 年以上 20 年未満	⑤	マツ林齢 10 年以上 20 年未満	
	マツ林齢 20 年以上 30 年未満	⑥	マツ林齢 20 年以上 30 年未満	
	マツ林齢 30 年以上 40 年未満			
	マツ林齢 40 年以上			
	落葉広葉樹	⑦	落葉広葉樹	
マダケ, モウソウ	⑪	マダケ, モウソウ	FARSITE の Chaparral (茂み: 約 183cm) として分類	
敷地内 植生	芝草	⑩	芝	FARSITE の Short Grass (低い草: 約 30cm) として分類
	高い草 (ススキ群, 牧草地)	⑧	ゴルフ場, その他農用地, 田	FARSITE の Tall Grass (高い草: 約 76cm) として分類
	クマイザサ群	⑪	マダケ, モウソウ	FARSITE の Chaparral (茂み: 約 183cm) として分類
	荒地 (ノイバラ群)	⑨	建物用地, 低層植生, 茂み	FARSITE の Brush (低層植生: 約 60cm) として分類
	落葉広葉樹 (ハンノキ群, ミズナラ群)	⑦	落葉広葉樹	落葉広葉樹用のパラメータを設定
	非燃焼領域	⑫	非燃焼領域	-

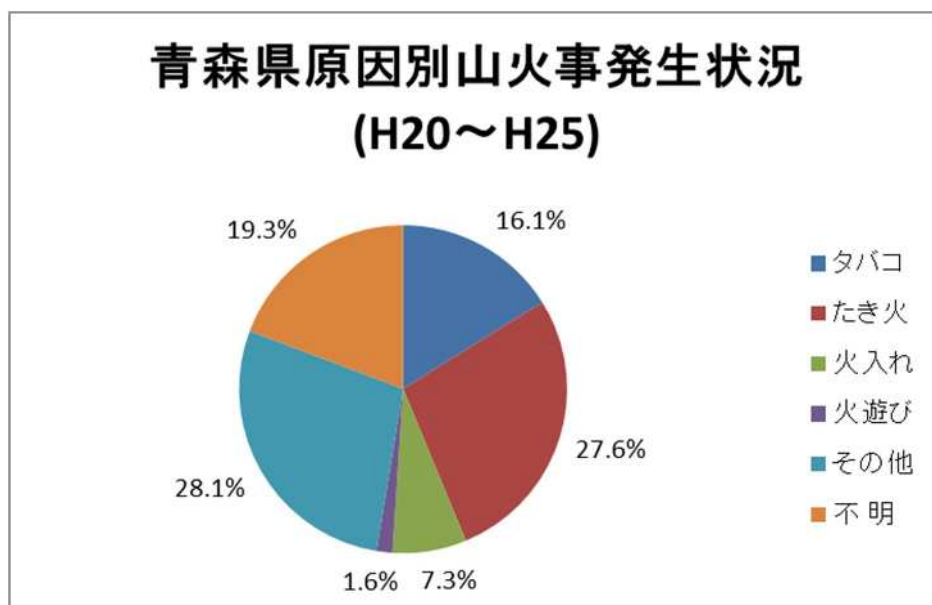
* : 「福島第一原子力発電所への林野火災に関する影響評価」 (2012 年 6 月 独立行政法人 原子力安全基盤機構)

3.2.2.6 発火点の設定

発火点の設定にあたっては、ガイドを参考とし、貯蔵施設から直線距離 10km の範囲内において、気象条件の選定結果に基づく卓越風向や、人為的行為を考慮した道路沿いや田、建物を踏まえて設定した。

(1) 発火点の設定方針

- ・貯蔵施設からの各方位直線距離 10km の範囲内で、出火リスクがある箇所を発火点候補として抽出する。
- ・上記発火点候補のうち、貯蔵施設周辺までの地形及び植生の特性を考慮し、保守的な結果となる方位を選定し、発火点を設定する。
- ・設定にあたっては、卓越風向、及び青森県における森林火災の発生原因の調査結果（第 20 図参照）を踏まえた人為的行為による火災の発生頻度が高いと想定される地域（主要道路沿い及び集落）を考慮する。



(青森県防災HPより)

第 20 図 青森県原因別山火事発生状況（平成 20 年～25 年）

(2) 発火点候補の選定

貯蔵施設から各方位へ直線距離 10km の範囲内で出火が想定される発火点候補について次のとおり検討を行った。

(a) 東～南南東

- ・南東方向に位置するガソリンスタンドは県道 6 号線沿いであり，火の不始末による出火が想定される。(E-1)
- ・南南東方向に位置する貯蔵施設から最も近い集落内にある東通村役場目名生活改善センター周辺は，県道 6 号線沿いでもあり人為的行為による出火全般が想定される。(E-2)

(b) 南～西南西

- ・西南西方向に位置する貯蔵施設から最も近い集落である名子地区は，集落が存在する国道 279 号線沿いであり，人為的行為による出火全般が想定される。(S-1, S-1-1)
- ・南南西方向に位置する早掛沼公園は，人が多く集結することを考慮すると，花火・たき火による出火が想定される。(S-2, S-2-1)
- ・南南西方向に位置する海上自衛隊樺山送信所の北側に位置する森林は，道路沿いで周囲に農用地が存在し，火入れ・たき火による出火が想定される。(S-2-2)
- ・南方向に位置する荒矢沢，沢畑地区は，道路沿いに集落が存在しており，人為的行為による出火全般が想定される。(S-3)

(c) 西～西北西

- ・西北西方向に位置する石神温泉は，宿泊施設で国道 279 号線沿いであり人為的行為による出火全般が想定される。(W-1)
- ・西方向に位置する関根地区は国道 279 号線沿いに集落が存在しており，人為的行為による出火全般が想定される。(W-2)

(d) 北西～東北東

- ・津軽海峡に面する海域であり出火のリスクはない。

以上の結果をまとめて第 14 表に、またそれぞれの発火点候補の位置について第 21 図に示す。

第 14 表 貯蔵施設からの方位別発火点候補

直線距離10km間にある発火点候補地			出火 リスク	出火リスクの詳細
方角	番号	位置		
東～南南東	E-1	ガソリンスタンド	○	県道6号線沿いにあるガソリンスタンドであり、火の不始末による出火が想定される。
	E-2	東通村役場目名生活改善センター周辺	○	人が集まる施設で県道6号線沿いであり、人為的行為による出火全般が想定される。
南～西南西	S-1	名子地区	○	民家等の集落が存在する国道279号線沿いであり、人為的行為による出火全般が想定される。
	S-1-1	名子地区森林境界付近	○	
	S-2	早掛沼公園内	○	公園であり人が多く集結することを考慮すると、花火・たき火による出火が想定される。
	S-2-1	早掛沼公園付近森林内	○	
	S-2-2	海上自衛隊樺山送信所付近	○	道路沿いであり、周囲には農用地が存在し火入れ・たき火による出火が想定される。
	S-3	荒矢沢、沢畑地区	○	民家等の集落が存在する道路沿いであり、人為的行為による出火全般が想定される。
西～西北西	W-1	石神温泉	○	人が集まる宿泊施設で国道279号線沿いであり、人為的行為による出火全般が想定される。
	W-2	関根地区	○	民家等の集落が存在する国道279号線沿いであり、人為的行為による出火全般が想定される。
北西～東北東	-	-	×	津軽海峡に面する海域であり出火のリスクはない。



第 21 図 発火点候補位置

(3) 保守的な発火点の方位の選定

森林火災影響評価に関しては、発火点から貯蔵施設の間の地形及び植生が評価結果に影響を与えると考えられるため、(2)で検討した発火点候補から以下を考慮して保守的な発火点の方位を選定する。

- ・地形の効果では、上り勾配の方が延焼速度が速くなる。
- ・植生では、農用地（F A R S I T E区分における『ゴルフ場，その他農用地，田』）が延焼速度が速く，風下以外に火炎が速く延焼して火災の規模が大きくなる可能性が高い。また，森林については平地と比較して延焼速度が遅く，かつ林齢が高くなるほど延焼は遅くなる。

貯蔵施設周辺の植生の特徴については以下のとおりである。（第22図）

- ・貯蔵施設の北西～東北東は海域であり非燃焼領域である。
- ・貯蔵施設の南南西～西南西はほぼ農用地となっている。
- ・それ以外の方位は森林植生，農用地，荒地が混在しており，農用地より延焼速度は遅くなる。また，荒地については延焼速度が農用地より遅く森林より速い。

貯蔵施設周辺の地形の特徴については以下のとおりである。（第23図）

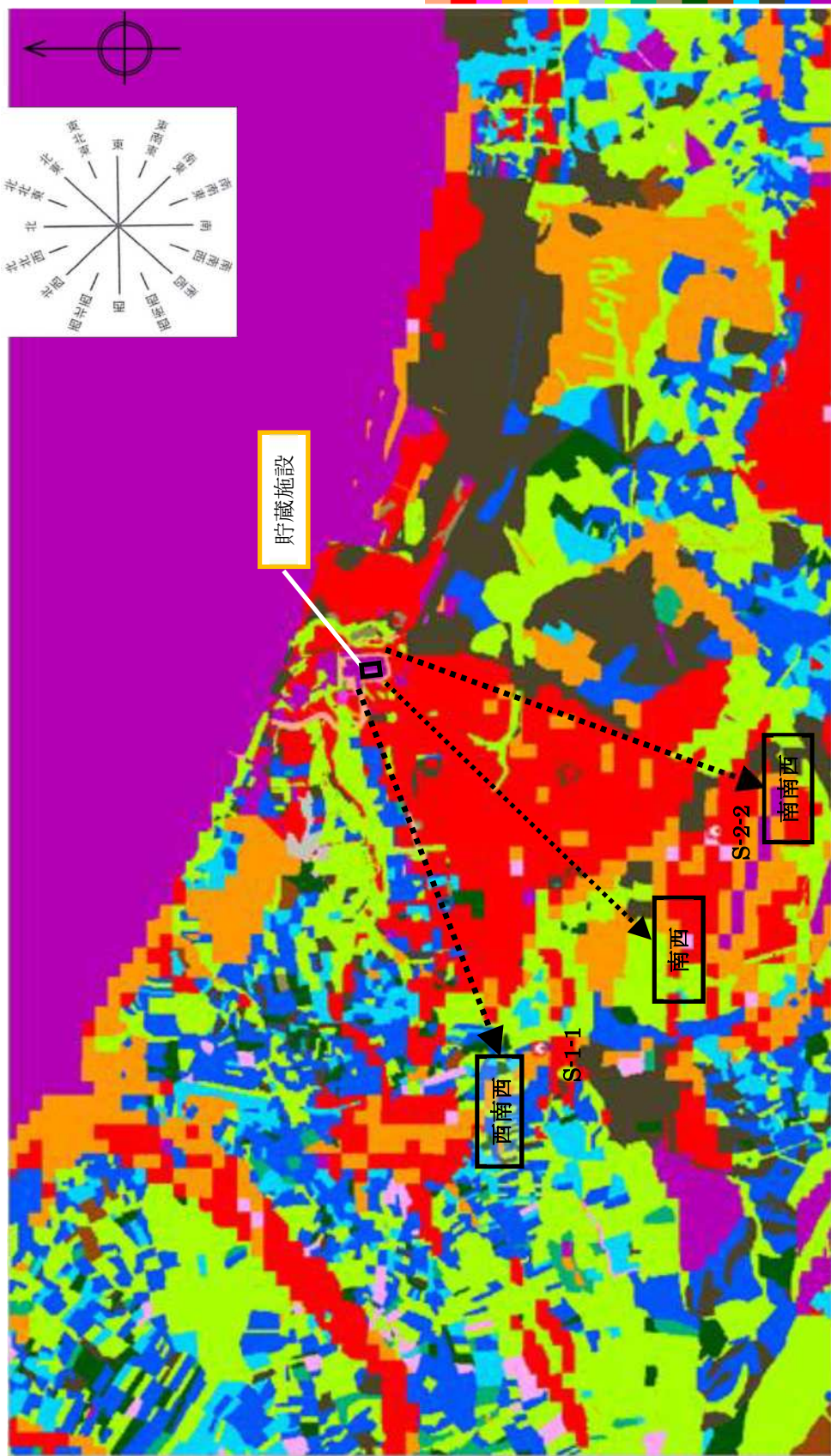
- ・貯蔵施設周辺（貯蔵建屋標高16m）はなだらかな台地であり，標高差はほとんどない。
- ・貯蔵施設の東南東～西南西は標高30～40m程度の丘が存在し，貯蔵施設周辺まで上り勾配となっている。
- ・西は，丘と標高の低い地形が混在し，唯一起伏のある方位である。
- ・西北西～東は海岸及び海域となっており，貯蔵施設よりも標高は低く貯蔵施設周辺に向かって上り勾配となっている。

以上の結果をまとめて第 15 表に示す。これより、最も保守的は方位は西南西～南南西となり、またこれらは卓越風向でもあることから西南西～南南西を発火点の貯蔵施設からの方位として選定する。

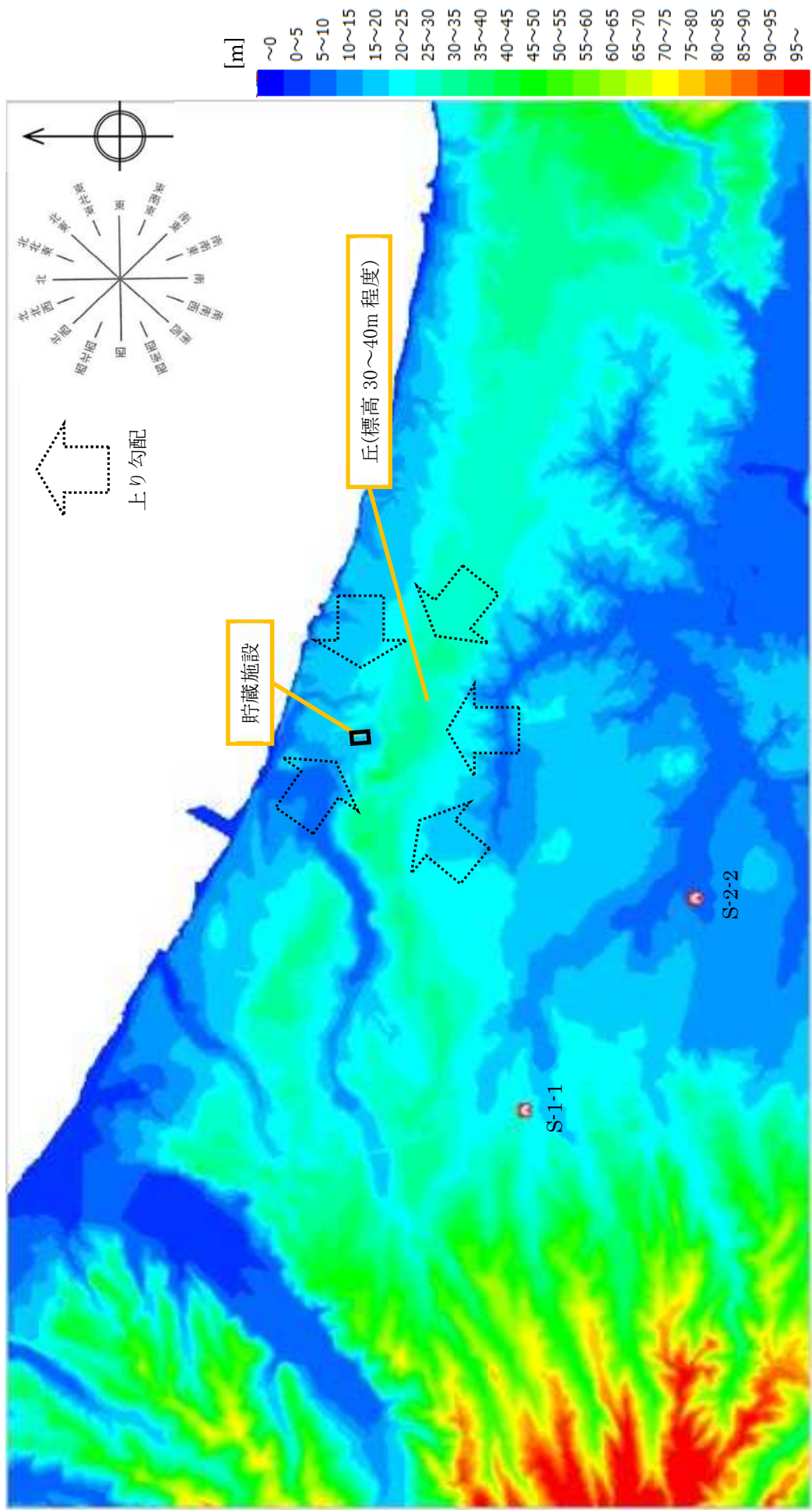
第 15 表 貯蔵施設周辺における地形及び植生の特徴

方位	気象条件より 選定した風向	地形の特徴	植生の特徴
北西		×(海域(非燃焼領域)であり延焼の可能性はない)	
北北西			
北			
北北東			
北東			
東北東			
東	レ	○(標高:低, 上り勾配)	△(複数植生が混在)
東南東		△(標高:中程度, 平坦)	
南東		○(近傍は標高:中程度, 上り 勾配)	
南南東			
南			
南南西	レ		○(農用地)
南西			
西南西	レ		
西		△(起伏がある)	△(複数植生が混在)
西北西		○(標高:低, 上り勾配)	

(○ : 保守性大 △ : 保守性中 × : 保守性小)



第 22 図 貯蔵施設周辺の植生



第23 図 貯蔵施設周辺の標高

(4) 発火点の選定

(3)において選定した方位（西南西～南南西）に基づき，当該方位に属する発火点候補のうち最も保守的と考えられる以下の発火点1，2について設定した。

(a) 西南西（発火点1）

- ・選定した発火点候補のうち，西南西方向の発火点は名子地区(S-1)及び名子地区森林境界(S-1-1)の2箇所であるが，火災がより延焼しやすいと考えられる名子地区森林境界(S-1-1)を発火点1として選定した。(第24図)
- ・隣接している森林植生はスギ(林齢40年生以上)であり，その先は落葉広葉樹と農用地が広がっている。また，貯蔵施設から約3km離れており貯蔵施設に向かって上り勾配となっているため，火災が拡がりやすく保守的な評価が可能と考えられる。名子地区集落周辺において発火点を移動させても植生や地形に大きな差はないことから，評価結果に大きな差が出ることはないと考えられる。

(b) 南南西（発火点2）

- ・選定した発火点候補のうち，南南西方向の発火点は早掛沼公園内(S-2)，早掛沼公園付近森林内(S-2-1)及び海上自衛隊樺山送信所付近道路沿いの森林境界(S-2-2)の3箇所であるが，海上自衛隊樺山送信所は滑走路跡地で非燃焼領域となっており，早掛沼公園はそこからさらに貯蔵施設より遠方となるため，早掛沼公園付近からの火災の延焼の際に影響を及ぼすものと考えられる。このため，海上自衛隊樺山送信所付近(S-2-2)を発火点2として選定した。(第25図)
- ・隣接している森林植生はスギ(林齢10年生未満)と農用地であり，道路沿いでもあることから出火のリスクも考えられ延焼のしやすい条件と考えられる。貯蔵施設からは約2.5km離れてお

り、西南西と同様貯蔵施設に向かって上り勾配となっているため、火災も拡がりやすく保守的な評価が可能と考えられる。発火点2の周辺の植生や地形についても大きな差はないことから、発火点の移動により評価結果に大きな差は出ることはないと考えられる。

(c) 南西方向について

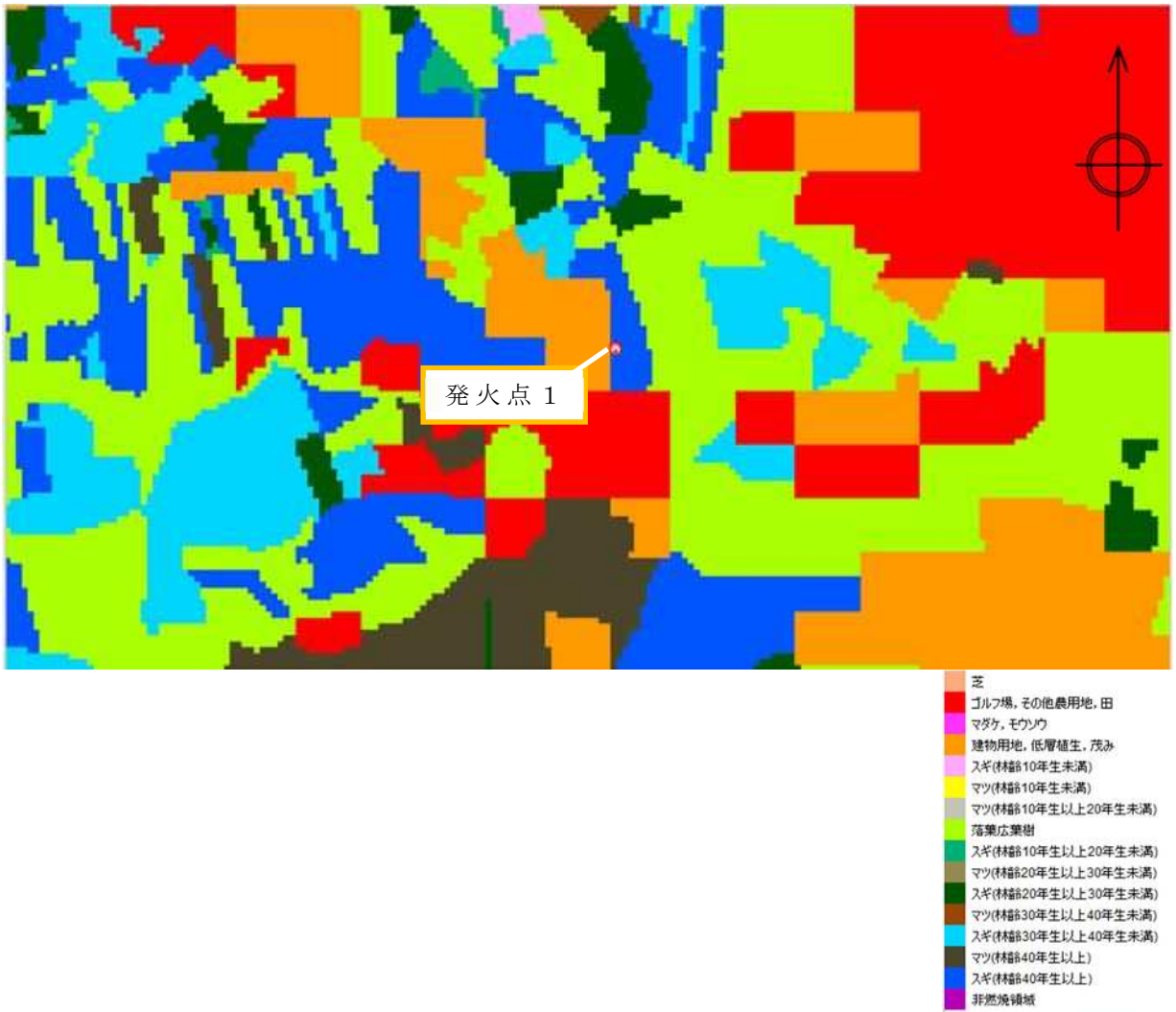
- ・発火点1と2の間となる南西方向については、植生が落葉広葉樹と低層植生の混在となっているところがあり、発火点1,2の近傍を占める農用地の延焼より延焼速度は遅く、逆に発火点1,2からの火災が延焼する可能性が高いと考えられる。また、出火リスクの高い集落もないことから、発火点1,2の評価結果に包絡されるものと考えられる。

(5) 追加発火点の選定（東：発火点3）

貯蔵施設東側については、市道を挟んで至近に森林（マツ）が存在し、卓越風向ではないが季節により強い風が吹く時期もあることから、貯蔵施設特有の立地条件に鑑み東側の地点について設定した。

- ・貯蔵施設近隣から発火した場合、防火帯周辺に火災が到達するまでの時間が短くなり、火災による影響も大きくなることが考えられる。
- ・発火点候補の検討時における東側～南南東の発火点については、出火リスクはあるものの貯蔵施設から5km以上離れており植生状況も複数の植生が混在している状態であるため、貯蔵施設に至近の東側の森林からの出火という特有の条件を鑑みて、貯蔵施設東側の森林内を発火点3として設定した。（第26図）
- ・東側に位置する森林は、貯蔵施設東側で市道にも近く、人為的行為による出火が想定される。
- ・貯蔵施設からは約200m離れており、森林内の植生の境界（マツ（林齢20-30年生）と落葉広葉樹）を選定したことから延焼速度

はマツ植生のみの場合より早くなり保守的な選定であると考えられる。



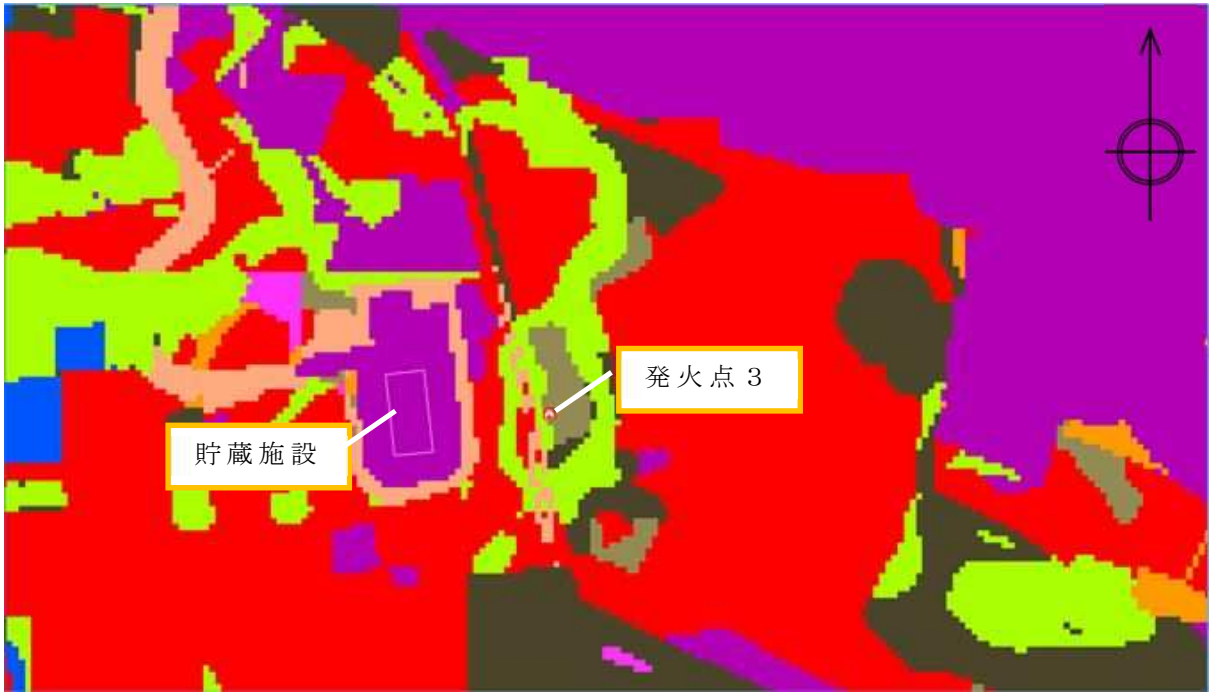
第 24 図 発火点 1 位置図（植生図及び航空写真）



- 芝
- ゴルフ場, その他農用地, 田
- マダケ, モウソウ
- 建物用地, 低層植生, 茂み
- スギ(林齢10年生未満)
- マツ(林齢10年生未満)
- マツ(林齢10年生以上20年生未満)
- 落葉広葉樹
- スギ(林齢10年生以上20年生未満)
- マツ(林齢20年生以上30年生未満)
- スギ(林齢20年生以上30年生未満)
- マツ(林齢30年生以上40年生未満)
- スギ(林齢30年生以上40年生未満)
- マツ(林齢40年生以上)
- スギ(林齢40年生以上)
- 非燃焼領域



第 25 図 発火点 2 位置図 (植生図及び航空写真)



- 芝
- ゴルフ場, その他農用地, 田
- マダケ, モウソウ
- 建物用地, 低層植生, 茂み
- スギ(林齢10年生未満)
- マツ(林齢10年生未満)
- マツ(林齢10年生以上20年生未満)
- 落葉広葉樹
- スギ(林齢10年生以上20年生未満)
- マツ(林齢20年生以上30年生未満)
- スギ(林齢20年生以上30年生未満)
- マツ(林齢30年生以上40年生未満)
- スギ(林齢30年生以上40年生未満)
- マツ(林齢40年生以上)
- スギ(林齢40年生以上)
- 非燃焼領域



第 26 図 発火点 3 位置図 (植生図及び航空写真)

3.2.3 F A R S I T Eによる森林火災影響評価

3.2.3.1 F A R S I T E入出力データ

3.2.2において評価した入力条件をもとに、森林火災影響評価に必要な評価項目についてF A R S I T Eによる解析計算を実施した。F A R S I T Eへの入力データについて第16表に示す。

第16表 F A R S I T Eへの入力データ

入力項目		入力値	備考
気象データ	風向	西南西	発火点1（卓越風向）
		南南西	発火点2（卓越風向）
		東	発火点3（貯蔵施設特有条件）
	風速(km/h)	69	周辺4観測所過去10年間の3～8月における最大値
	気温(℃)	35	
湿度(%)	13	周辺4観測所過去10年間の3～8月における最小値	
植生データ	場所	—	現地調査, 航空写真で特定した樹種毎の植生場所
	樹種	12区分	植生調査で特定した情報を入力 ①スギ林齢10年未満, ②スギ林齢10年以上20年未満, ③スギ林齢20年以上30年未満, ④マツ林齢10年未満, ⑤マツ林齢10年以上20年未満, ⑥マツ林齢20年以上30年未満, ⑦落葉広葉樹, ⑧Tall Grass(ゴルフ場, その他農用地, 田) ⑨Brush(建物用地, 荒地), ⑩Short Grass(芝), ⑪Chaparral(マダケ, モウソウ), ⑫非燃焼領域
	林齢	6区分	植生調査データに基づき, スギ, マツについて, 10年生未満, 10年生以上20年生未満, 20年生以上30年生未満の計6区分を設定
	樹冠率	区分3	針葉樹, 落葉広葉樹の森林については保守的な樹冠率区分3(一般的な森林)を入力し, それ以外は樹冠率0%とした。
土地利用種別データ, 地形データ	森林以外の土地	—	国土地理院データにより森林以外の建物, 河川等を再現
	地形, 標高	—	国土地理院データにより標高, 地形(傾斜角, 傾斜方向)を再現

F A R S I T E への入力にあたり，整数値に直す必要のあるものについては保守側に切り上げ，または単位換算を施した。

また，F A R S I T E からの出力データについて第 17 表に示す。

第 17 表 F A R S I T E からの出力データ

出力項目		内容
FARSITE 出力データ	火線強度 (kW/m)	火炎前線からの単位時間に放出される熱量。火炎の最前線における最大値を採用（防火帯幅の算出）
	火炎長 (km/h)	火炎の高さ。火炎最前線における値を採用（円筒火炎モデルの形態係数の算出）
	火炎到達時間 (h)	出火から火炎が火炎最前線に到達するまでの時間のうち最小値を採用（火災継続時間の算出）
	反応強度 (kW/m ²)	単位面積当りの熱放出速度。火炎の最前線における最大値を採用（火炎輻射強度の根拠となる火災規模）
	延焼速度 (m/s)	火炎の延焼する速度。火線強度の最大値の発生位置における値を採用
	単位面積当り 熱量(kJ/m ²)	単位面積当りの放出熱量。火線強度の最大値の発生位置における値を採用

3.2.3.2 最大火線強度及び火炎到達時間の算出

(1) 火炎継続時間の算出

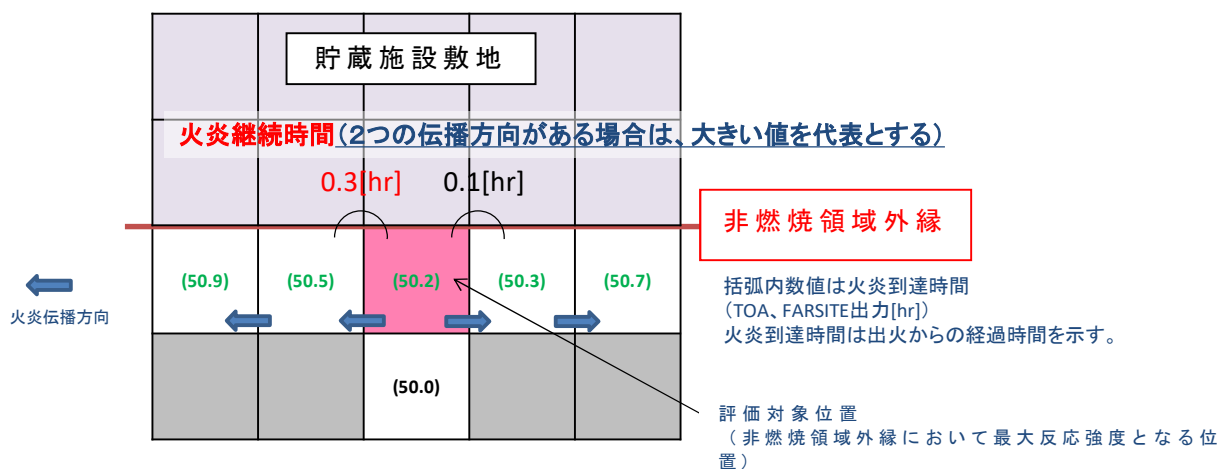
F A R S I T E から得られる各データをもとに，評価に必要な項目の算出を行った。算出項目について第 18 表に示す。

第 18 表 F A R S I T E 出力データより算出されるデータ

算出項目	内容, 算出方法
防火帯幅 (m)	火線強度から, ガイドに基づき Alexander and Fogarty の手法により評価
火炎輻射強度 (kW/m ²)	反応強度に対して, 米国 NFPA の係数 (針葉樹の反応強度と火炎輻射強度の割合) である 0.377 を乗じて算出。
FARSITE 出力データより算出されるデータ 火炎継続時間 (h)	FARSITE 上のメッシュにおける火炎継続時間。発火点毎の解析における最大反応強度発生位置の火炎が隣接する位置 (火炎伝播方向) 伝播するまでの時間の差。
火炎到達幅 (m)	貯蔵施設から見た火炎の最前線における火炎前線の長さ。円筒火炎モデル火炎到達セル数×セル幅 (=10m) を火炎到達幅として算出。
燃焼半径 (m)	ガイドに基づき, 火炎長/3 として算出。

このうち, 火炎継続時間については F A R S I T E 上の 10m メッシュにおいて貯蔵建屋から見た火炎の最前線 (貯蔵建屋を囲む非燃焼領域の外縁) における最大反応強度発生位置から火炎が隣接する位置 (隣のメッシュ) に伝播するまでの時間を火炎継続時間とした。火炎は両隣のメッシュに伝播する場合は, 伝播までの時間が大きい方を採用した。概念図について第 27 図に示す。

評価対象位置 (最大反応強度発生位置) で隣接位置 (火炎伝播方向) における到達時間の差を火炎継続時間として算定



第 27 図 火炎継続時間の概念図

(2) 発火時刻の感度解析による最大火線強度及び火炎到達時間の評価

森林火災影響評価において F A R S I T E による解析を実施する場合、F A R S I T E への入力条件として気象条件、植生条件、土地・地形条件とともに日射についても考慮している。

F A R S I T E の解析における気象条件においては、気温は最高気温で一定、湿度は最小湿度で一定としており、時間の経過に伴い変化する日射量が可燃物の水分量（燃えやすさ）に影響することにより火線強度の値に影響を与えることから、日射の影響がもっとも大きくなると考えられる日中の時間帯（概ね 10 時～15 時の間）に火災の影響が最も大きくなるものと考えられる。

このため、この時間帯に火災が評価対象場所（燃焼領域と非燃焼領域の境界）に到達するよう発火時刻を設定し、得られた F A R S I T E の解析結果から火線強度の最大値及びそのときの火炎到達時間について評価を実施する。さらに、日射量が最大となるよう雲量 0（雲なし）、可燃物の水分量が少なくなるよう降雨量 0（降雨なし）を条件として追加し解析結果に保守性を持たせることとする。

設定した発火点 1，2，3 において森林火災が発生した場合を想定し、発火時刻を変更した感度解析により F A R S I T E にて算出した各発火点における最大火線強度及び火炎到達時間についてそれぞれ評価した結果を第 19 表に示す。

第 19 表(1) 発火点 1 における最大火線強度及び火炎到達時間

発火時刻	5:01	6:58	7:56	9:00	10:00	10:58
最大火線強度出現時刻	10:18	11:43	12:41	13:27	14:27	15:28
最大火線強度 [kW/m]	4292	6775	6217	5916	4059	3588
火炎到達時間 [h]	5.1	4.6	4.4	4.2	4.2	4.3

第 19 表(2) 発火点 2 における最大火線強度及び火炎到達時間

発火時刻	9:00	10:00	11:00	11:56	13:00
最大火線強度出現時刻	10:05	11:02	12:02	12:58	14:05
最大火線強度 [kW/m]	2431	2904	2783	2550	2463
火炎到達時間 [h]	0.8	0.8	0.7	0.7	0.8

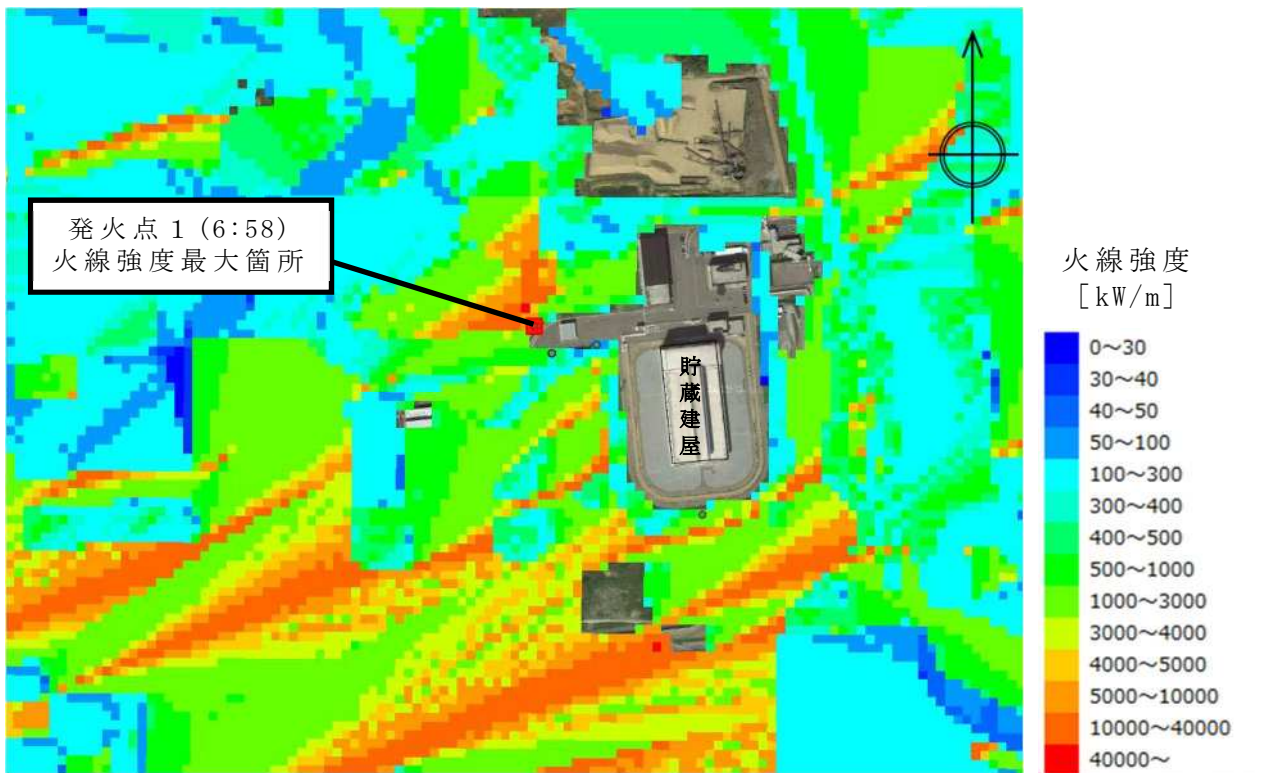
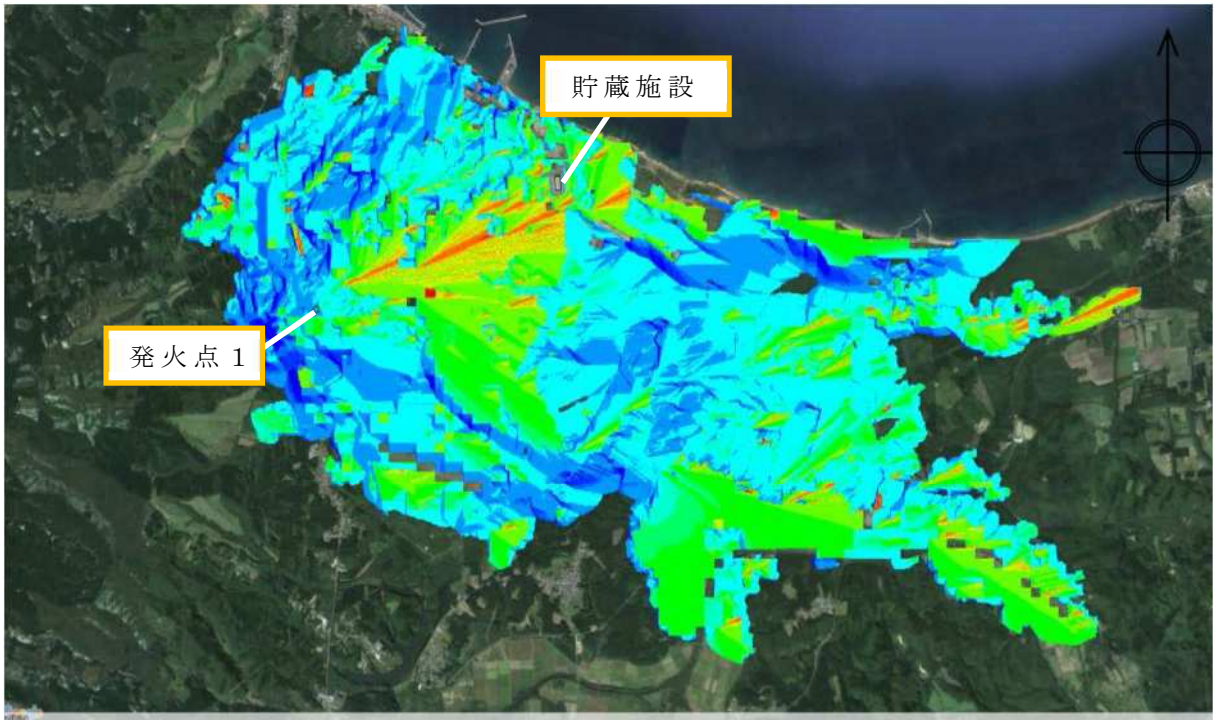
第 19 表(3) 発火点 3 における最大火線強度及び火炎到達時間

発火時刻	9:02	10:00	11:00	12:00
最大火線強度出現時刻	9:28	10:37	11:25	12:38
最大火線強度 [kW/m]	1556	1754	2016	1383
火炎到達時間 [h]	0.4	0.4	0.4	0.4

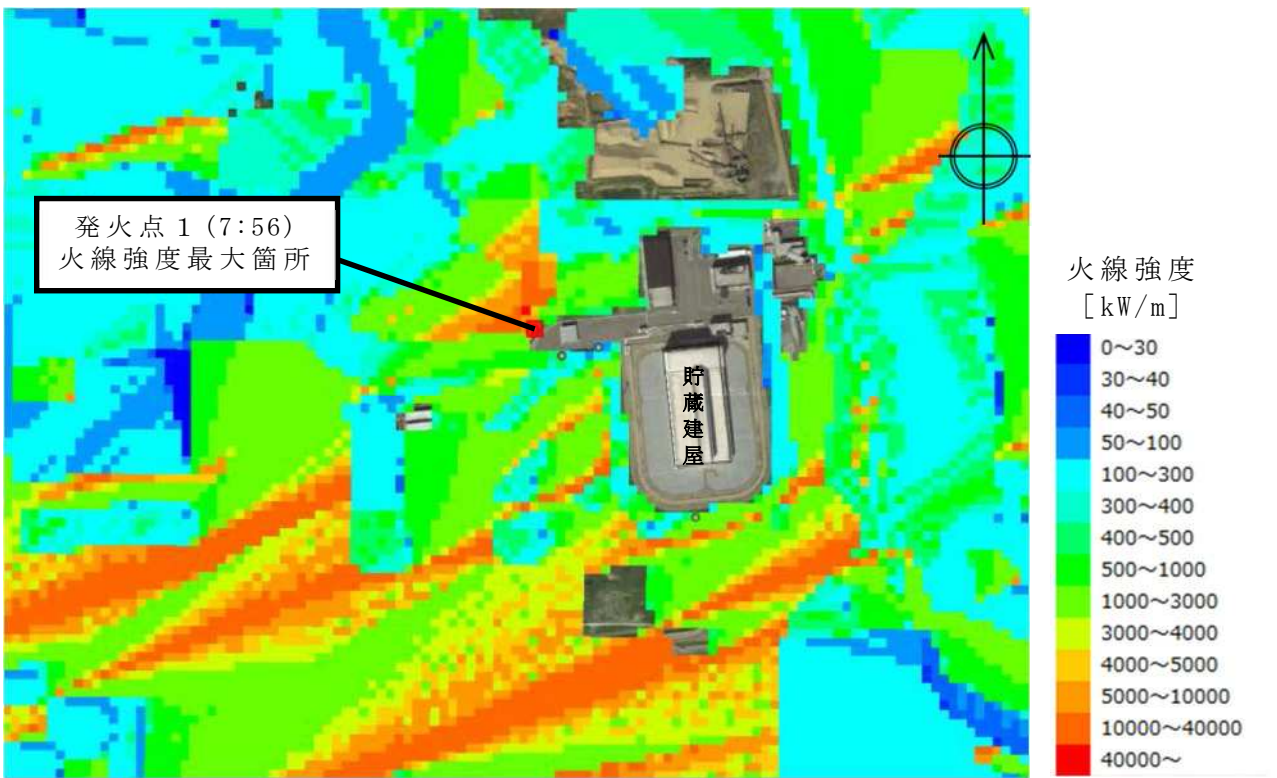
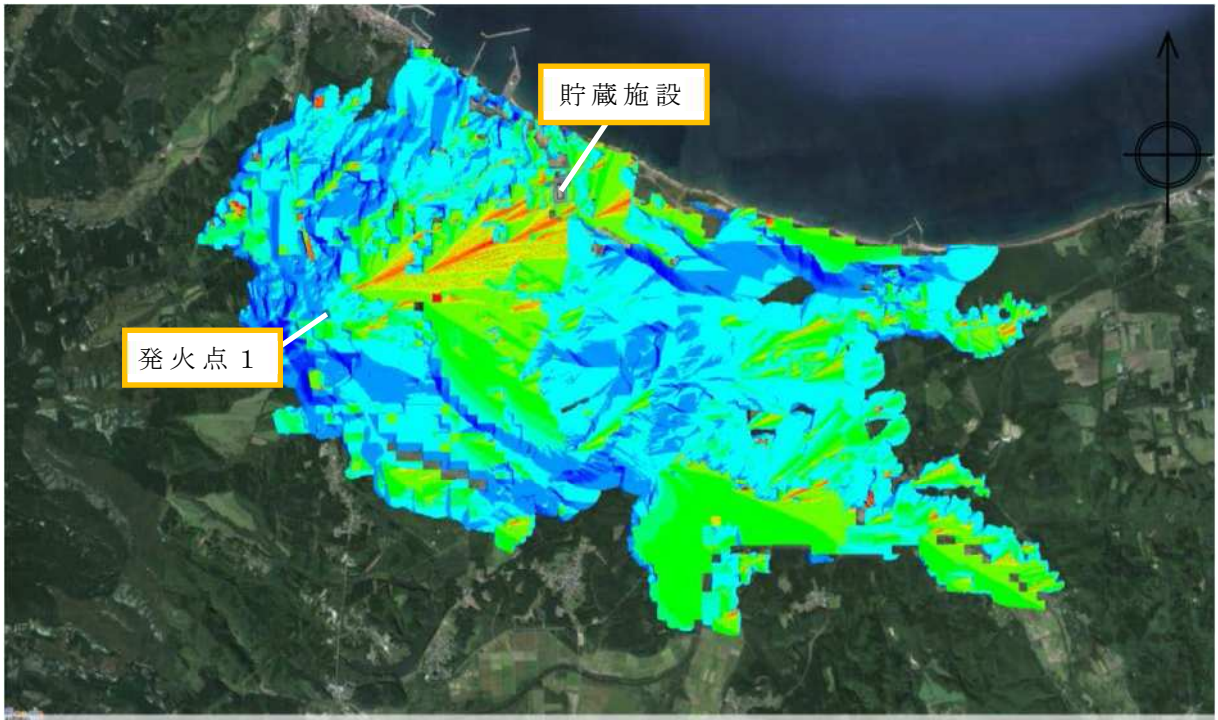
※火炎到達時間については保守的に小数第二位以下切下げ
 ※網掛け部は各発火点における火線強度の最大値

評価の結果、発火時刻については若干のずれはあるが、最大火線強度の値は概ね日中の 10 時～15 時に発出している結果となった。この結果より、最大火線強度の値は発火点 1 で発火時刻 6:58 における 6775 kW/m となった。

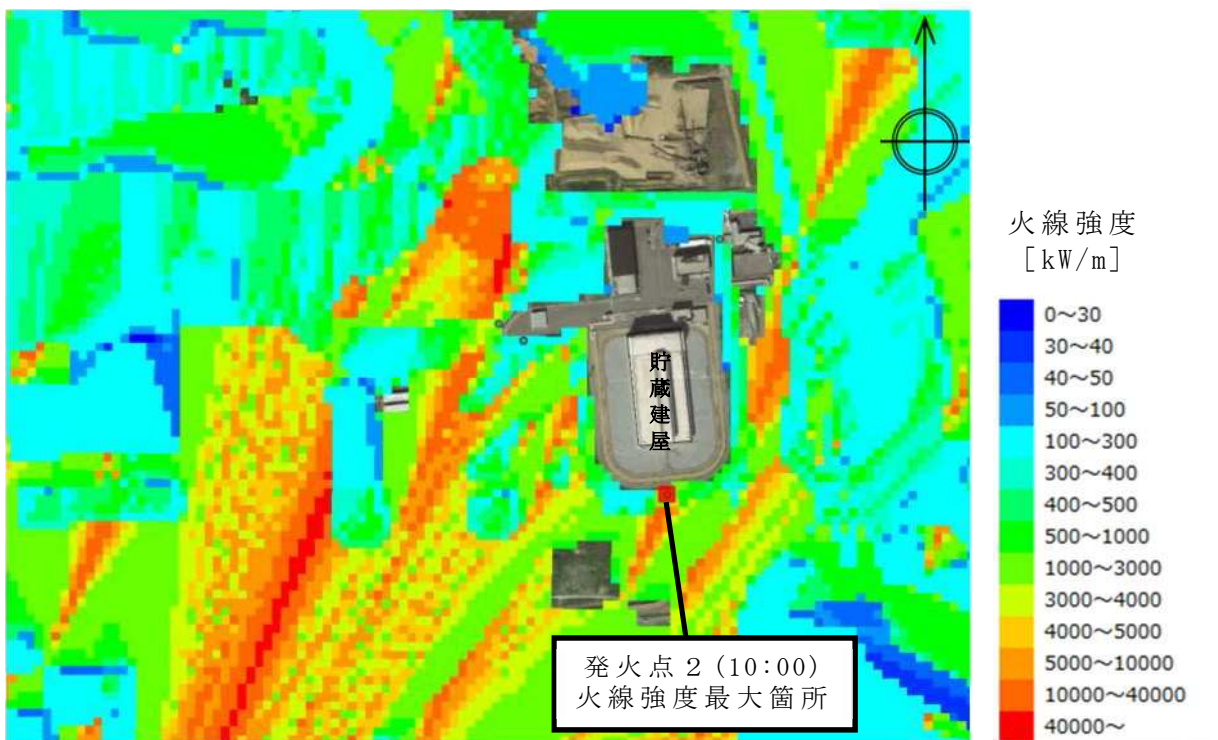
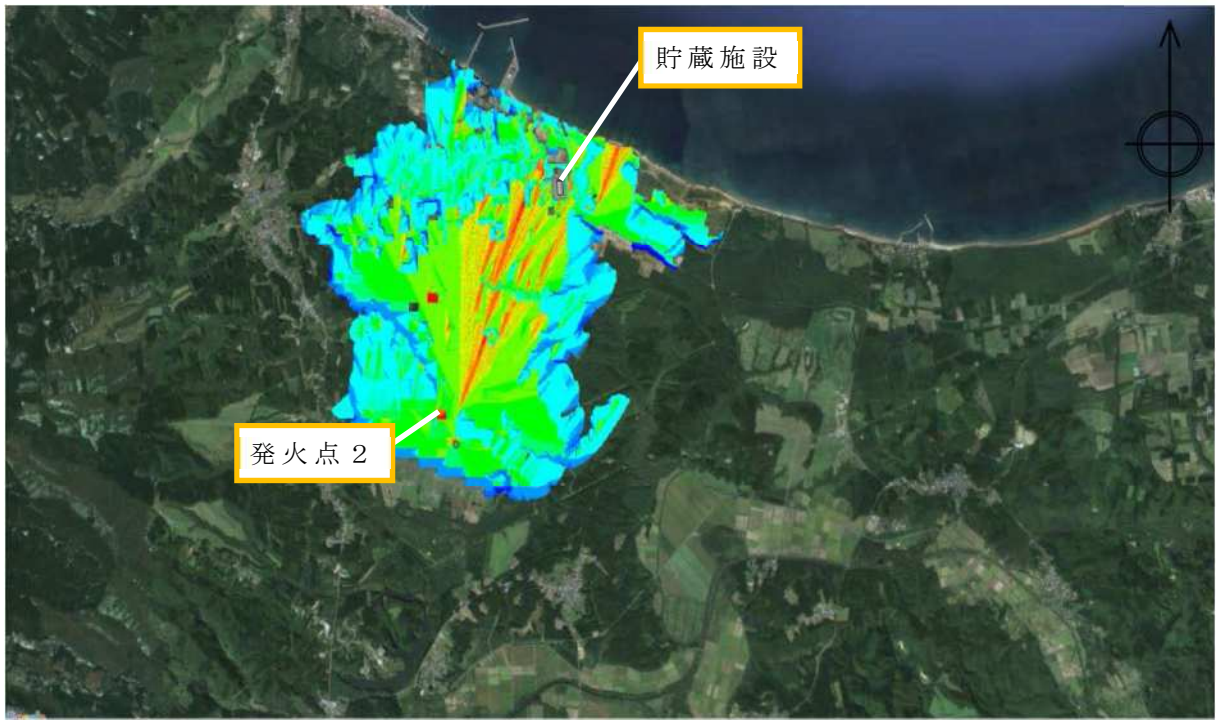
また、各発火点に対する最大火線強度分布及び最小火炎到達時間分布について第 28 図、第 29 図にそれぞれ示す。発火点 1 については、最大火線強度を発出した発火時刻 6:58、及び発火時刻 7:56 における 2 つの結果について示す。



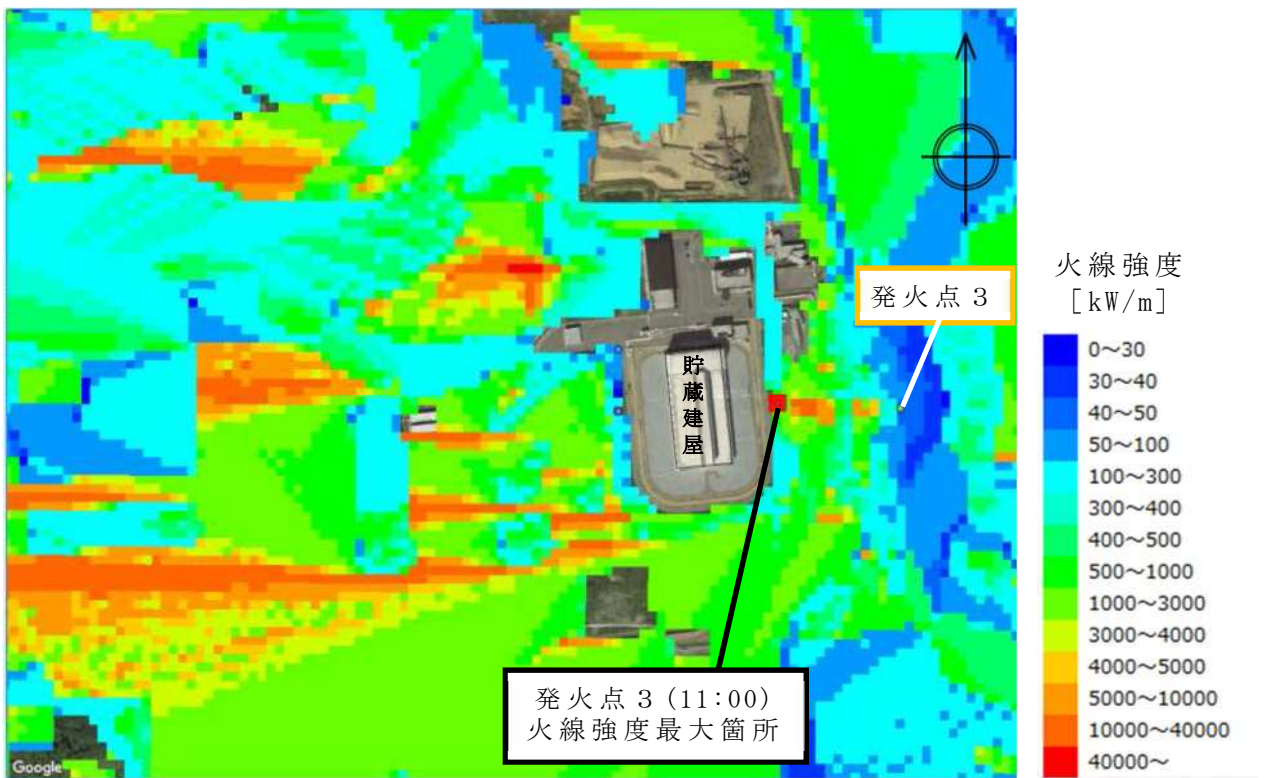
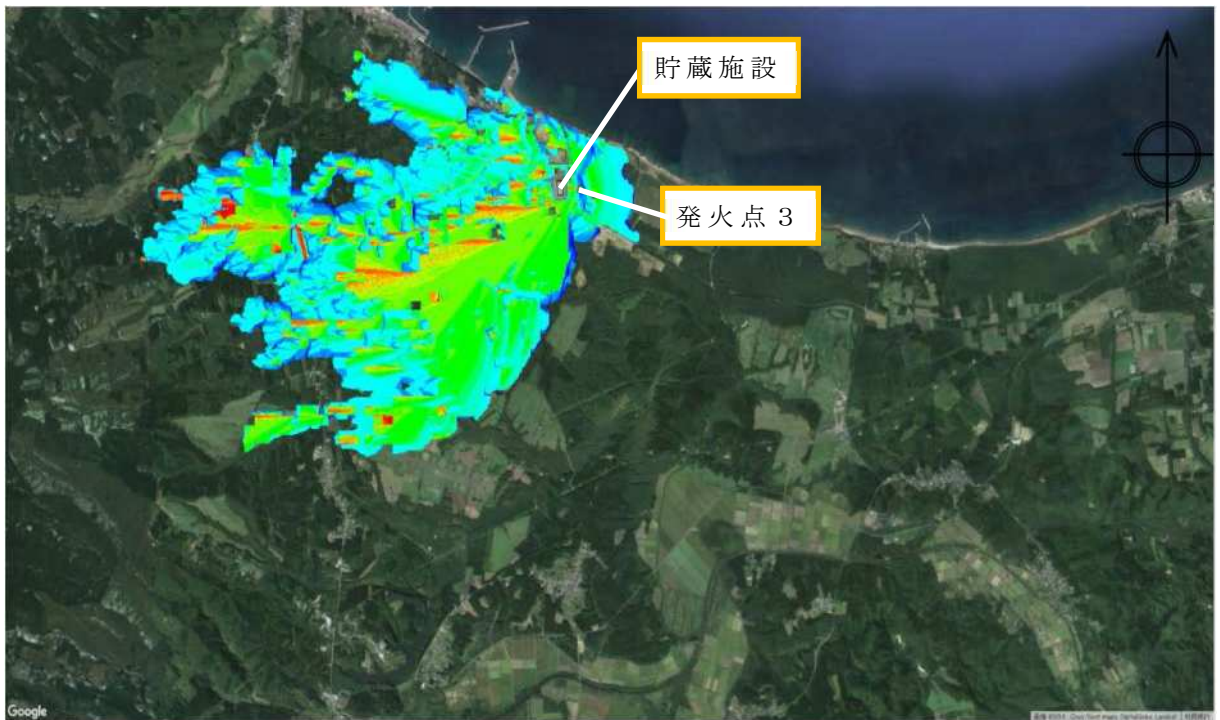
第 28 図 (1) 発火点 1 (発火時刻 : 6:58) に対する火線強度分布
 (下の図は同拡大図及び最大火線強度発生箇所)



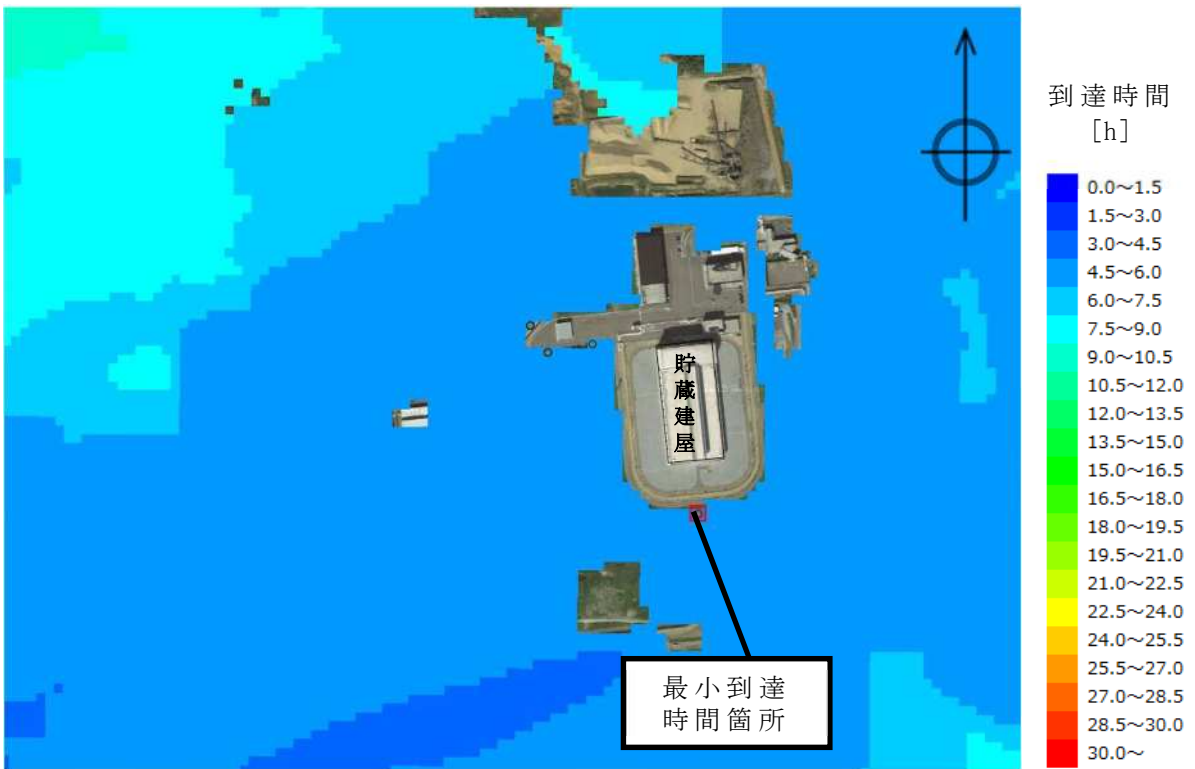
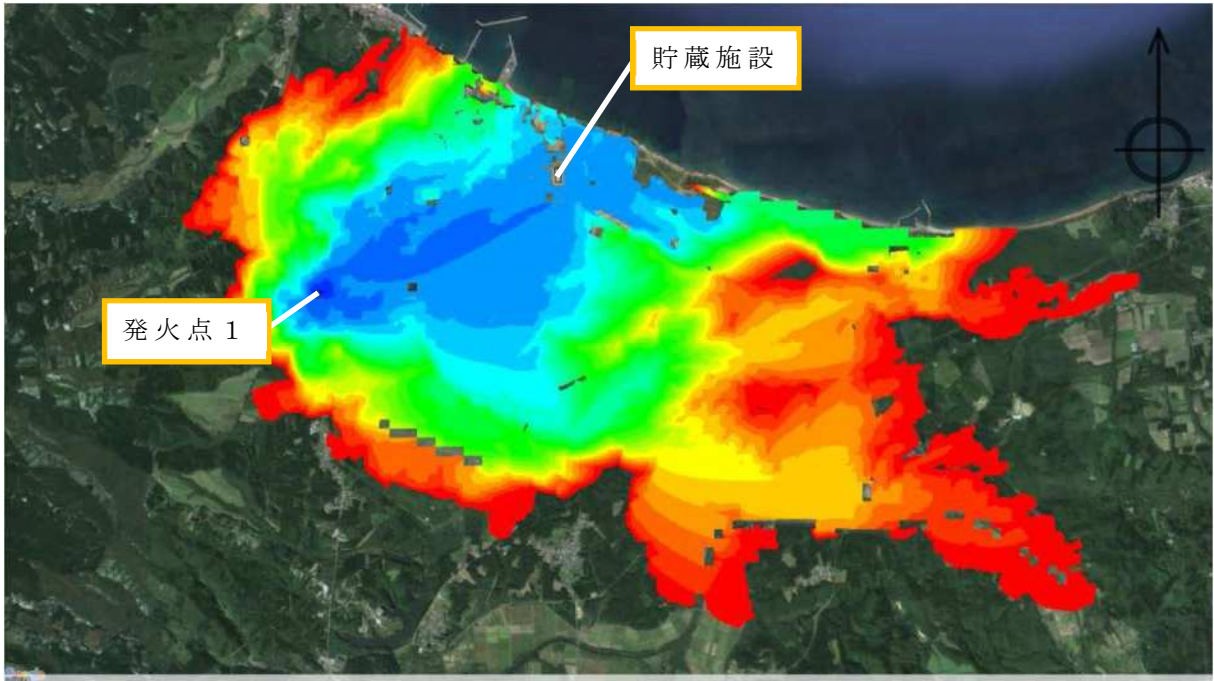
第 28 図 (2) 発火点 1 (発火時刻 : 7:56) に対する火線強度分布
 (下の図は同拡大図及び最大火線強度発生箇所)



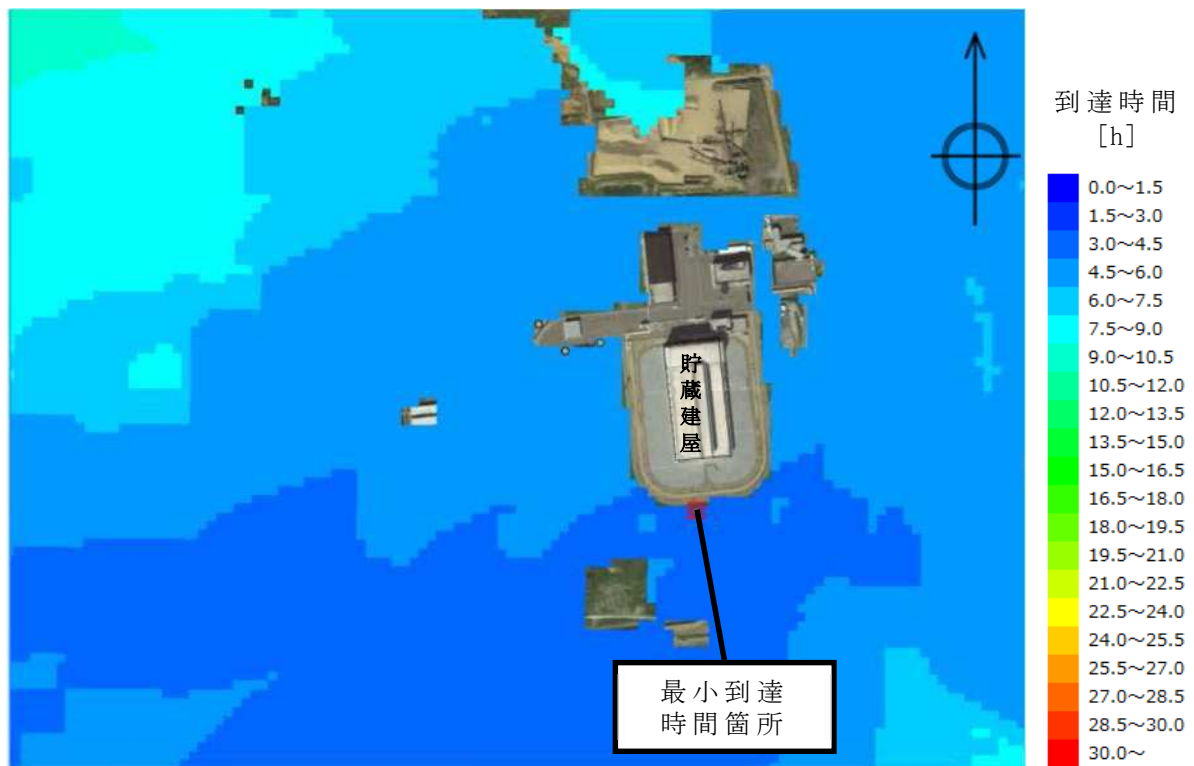
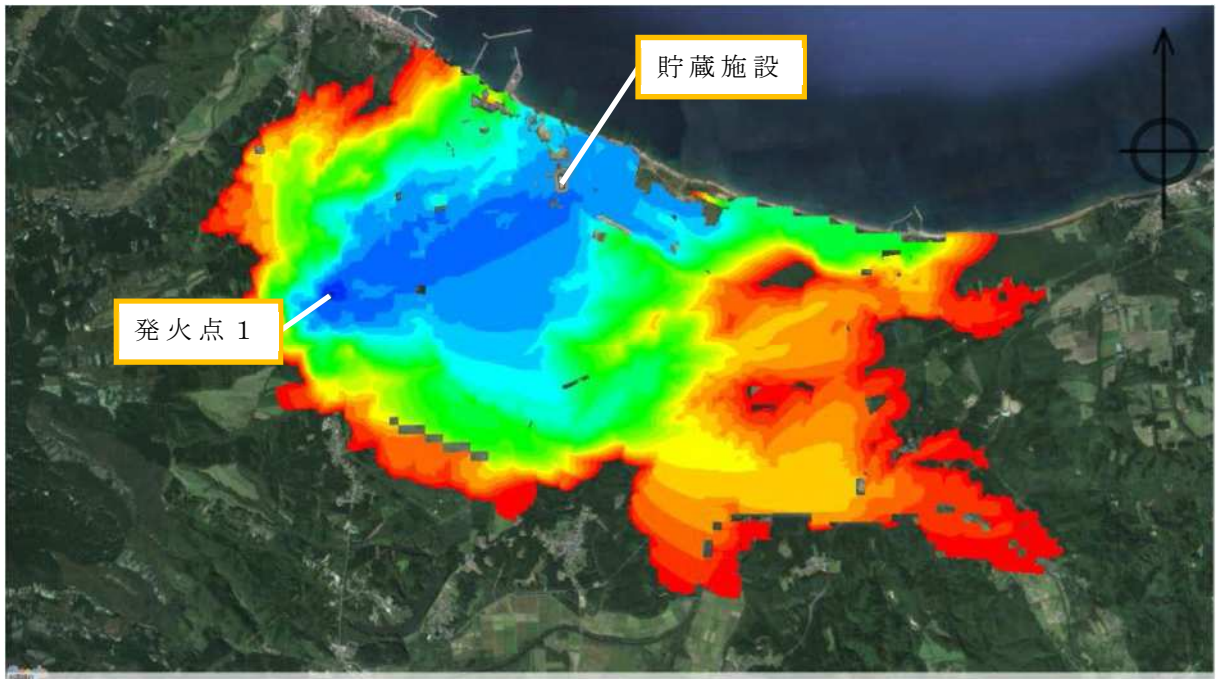
第 28 図 (3) 発火点 2 (発火時刻 : 10:00) に対する火線強度分布
 (下の図は同拡大図及び最大火線強度発生箇所)



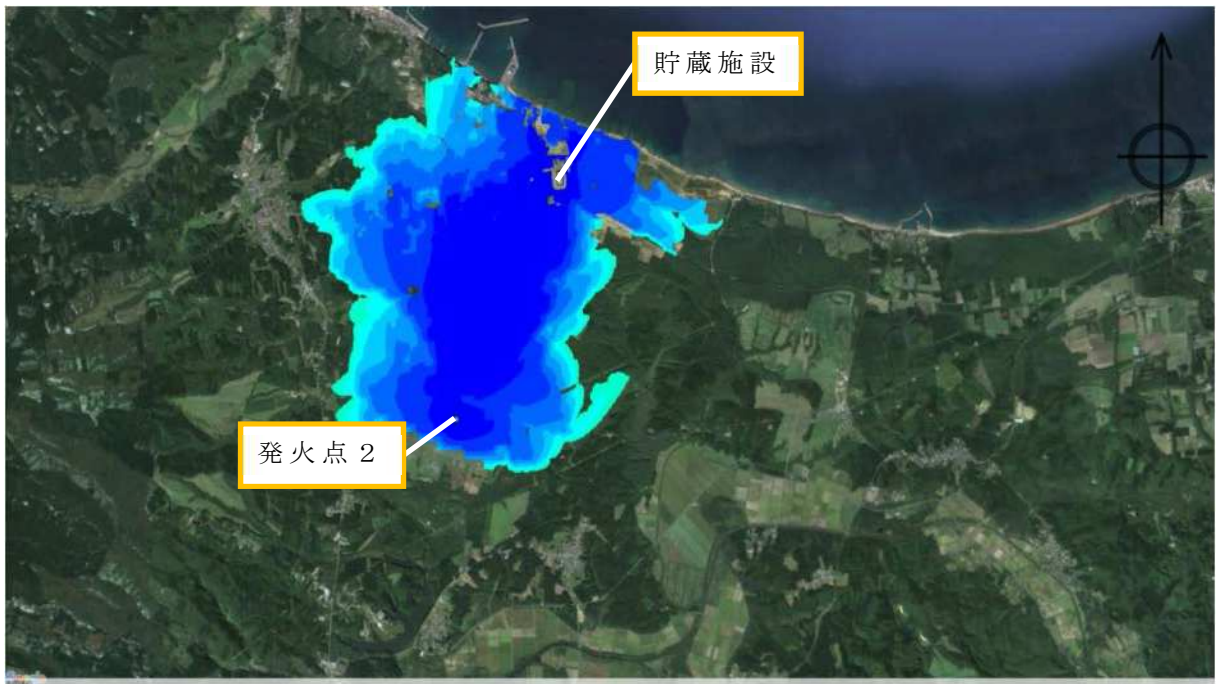
第 28 図 (4) 発火点 3 (発火時刻 : 11:00) に対する火線強度分布
 (下の図は同拡大図及び最大火線強度発生箇所)



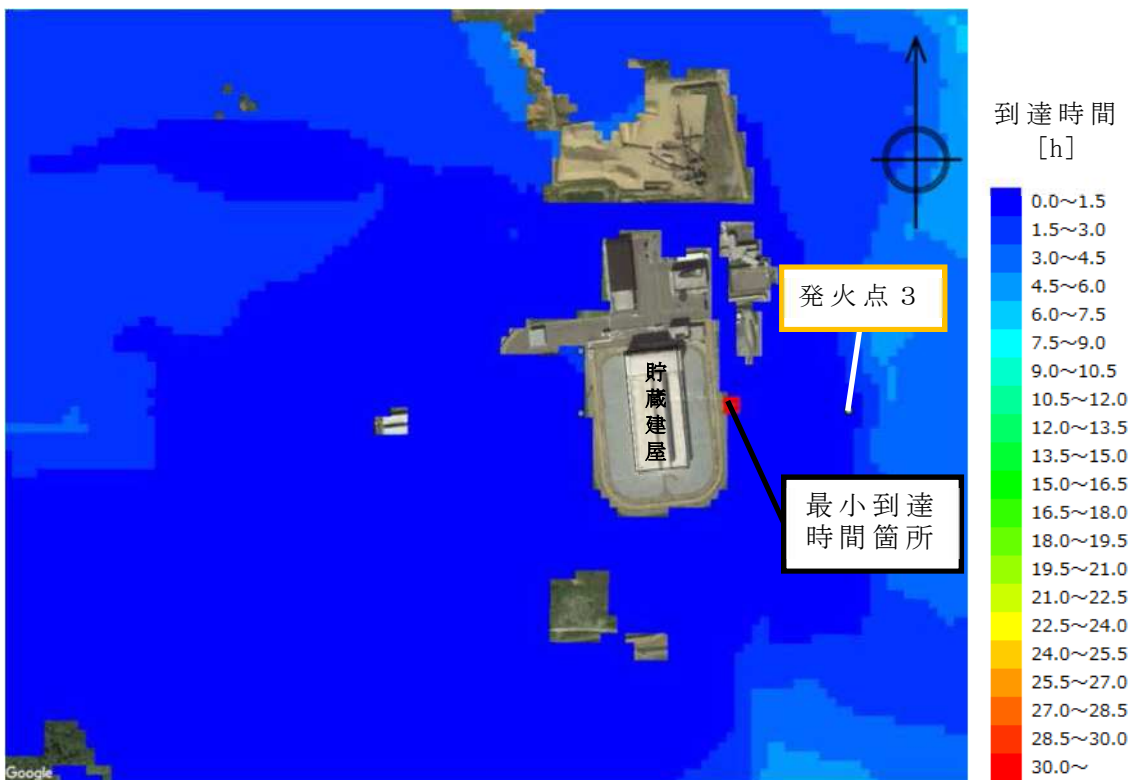
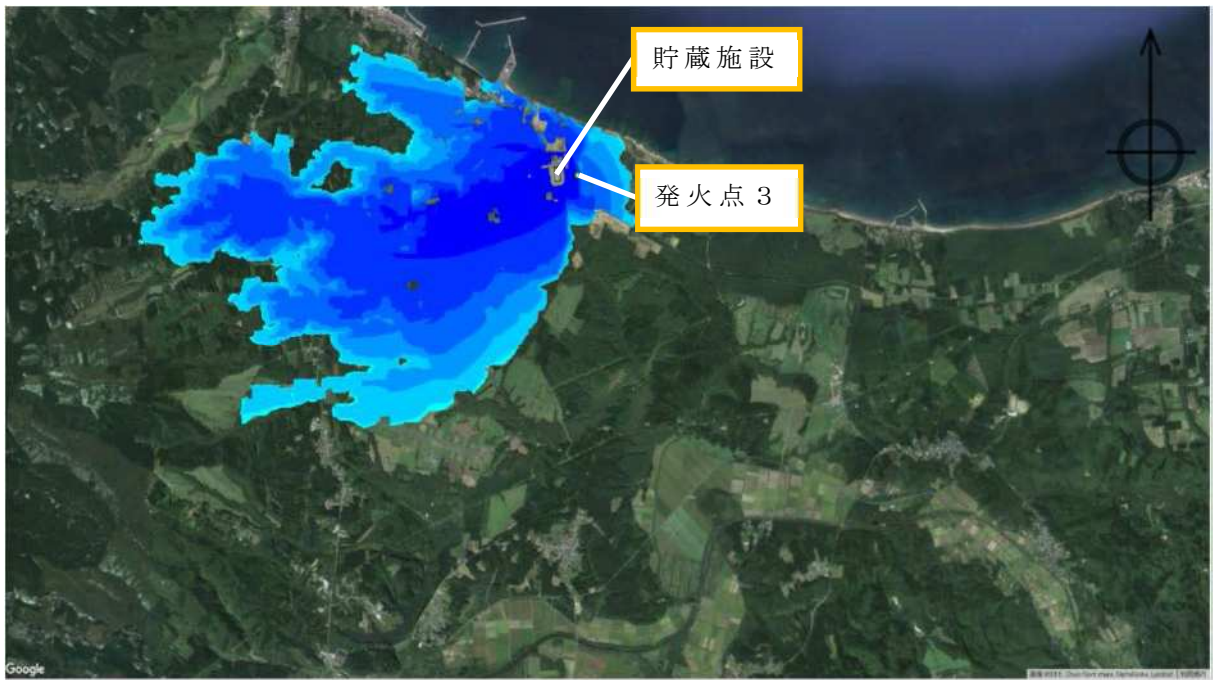
第 29 図 (1) 発火点 1 (発火時刻 : 6:58) に対する火災到達時間分布
 (下の図は同拡大図及び最小到達時間発生箇所)



第 29 図 (2) 発火点 1 (発火時刻 : 7:56) に対する火災到達時間分布
 (下の図は同拡大図及び最小到達時間発生箇所)



第 29 図 (3) 発火点 2 (発火時刻 : 10:00) に対する火災到達時間分布
 (下の図は同拡大図及び最小到達時間発生箇所)



第 29 図 (4) 発火点 3 (発火時刻 : 11:00) に対する火災到達時間分布
(下の図は同拡大図及び最小到達時間発生箇所)

3.2.3.3 防火帯の設定

防火帯の設定にあたっては、森林火災の延焼を防止することを目的として、防護施設である貯蔵建屋を囲み、かつ燃焼物や消火活動に支障をきたす機器、設備及び物品が設置されていない範囲を考慮して設定する。

第 19 表で示した 3 箇所の発火点における最大火線強度は、発火点 1 の 6775 kW/m であり、この値をもとにガイドによる“Alexander and Fogarty”の手法にて必要防火帯幅の評価を行った。評価にあたっては、保守的に風上に樹木がある場合を想定した評価を実施した。第 20 表に、ガイドより引用した火線強度と最小防火帯幅の関係について示す。

第 20 表 風上に樹木が有る場合の火線強度と最小防火帯幅の関係
(火炎の防火帯突破確率 1%)

火線強度 (kW/m)	500	1000	2000	3000	4000	5000	10000	15000	20000	25000
防火帯幅(m)	16	16.4	17.4	18.4	19.3	20.2	24.9	29.7	34.4	39.1

(外部火災影響評価ガイドより)

貯蔵施設において評価上必要となる防火帯幅は上記の表の網掛け部の数値より約 21.9 m と推定し、必要防火帯幅については 22 m と設定した。評価した防火帯幅をもとに設定した防火帯の設置位置図について第 30 図に示す。

必要防火帯幅 22 m を考慮し、貯蔵建屋及びこれに近接する各設備（出入管理建屋、受変電施設、エンジン発電機）を取り囲む幅 22 m のエリアを想定したが、このエリアは図中の薄紫色で示したアスファルト舗装が施された非燃焼領域に大部分が包絡されるものであり、貯蔵建屋の東西及び南側における防火帯はこの非燃焼領域の外縁から 22 m の幅としている。また、森林火災で評価した各発火点に対する最大火線強度の値については、いずれも非燃焼領域の外縁における評価値である。

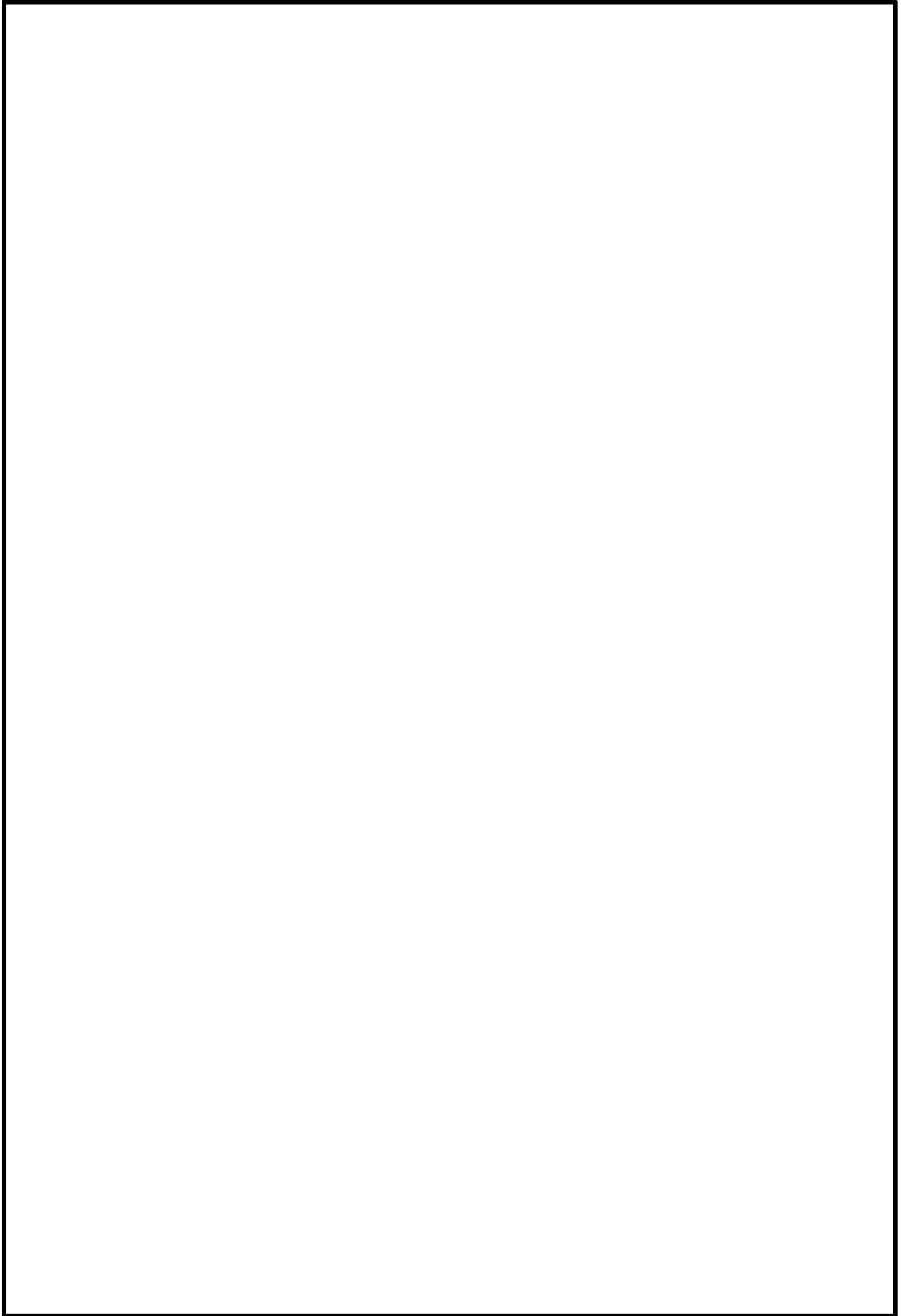
防火帯には延焼防止効果に影響を与えるような可燃物は原則設置

しない方針であるが，法令の要求等によりやむをえず防火帯内に可燃物を含む機器，設備及び物品を設置する場合は必要最小限の機器，設備及び物品とし，防火帯の延焼防止効果を損なわない設計とする。また，防火帯に一部かかる草地については除草により延焼防止を図ることとし，防火帯管理の観点より必要に応じてモルタル施工等の措置を施すとともに，防火帯における道路部は区分線等で明確に区分する。

防火帯の設定において敷地内道路配置や地形形状を考慮して設定したことから，防火帯内の一部に他の法令要求等による少量の可燃物を含む機器が存在する。このため防火帯内に設置された機器，設備及び物品の延焼防止効果への影響の有無を考慮し，必要な対策を講ずる設計とする。

第 21 表に防火帯内に設置される機器，設備及び物品の対応方針，及び第 22 表に防火帯内における可燃物の設置状況を示す。なお，森林火災発生時には防火帯に沿った消火活動を実施することとしており，防火帯上の少量の可燃物による延焼が発生したとしても延焼防止は可能であり，防火帯内側の防護対象施設に影響を与える事はない。

なお、防火帯については，定期的な点検を実施するとともに，点検結果に基づき適切に維持管理する。



第 30 図 防火帯及び非燃焼領域位置図

第 21 表 防火帯内に設置される機器等の評価及び管理方針

分 類		機器・設備・物品	評価及び管理方針
不燃性の機器・設備・物品		① 柵 ② コンクリート柱 ③ 鋼製ポール	火災により延焼しないため、防火帯の延焼防止効果に影響を与えないことから、対策不要
可燃物を含む機器・設備・物品	局所的な設置	① 照明灯 ② 盤	全ての可燃物が金属製の箱及び柱の中にあ り、火災が外部に拡大して防火帯の延焼防止 効果に影響を与えることがないことから対策 不要
		③ 端子箱類 ④ 監視カメラ	金属で覆われていない少量の可燃物による火 災は局所的な火災となるため、防火帯の延焼 防止効果に影響を与えないことから対策不要
防火帯を横断して設置		① ケーブル	埋設化により防火帯の延焼防止効果に影響を 与えないことから対策不要

第 22 表 (1) 防火帯内における可燃物の設置状況

分類		機器・設備・物品	機器設置状況
可燃物を含む機器・設備・物品	局所的な設置	① 照明灯	
		② 盤	

第 22 表 (2) 防火帯内における可燃物の設置状況

分類		機器・設備・物品	機器設置状況
可燃物を 含む機 器・設 備・物 品	局所的な 設置機器	③ 端子箱類	
		④ 監視カメラ	
	防火帯を 横断して 設置	① ケーブル	

3.2.3.4 F A R S I T Eによる算出結果

発火点1, 2, 3におけるF A R S I T Eによる算出結果について第23表に示す(火線強度, 火炎到達時間については再掲)。各評価値については保守的に記載値の1つ下の小数点桁について切り上げ, または切り捨て処理を実施したものである。

第23表 F A R S I T Eによる算出結果一覧

項目	評価方法	発火点1 (6:58)	発火点1 (7:56)	発火点2 (10:00)	発火点3 (11:00)
火線強度(kW/m)	非燃焼領域外縁における最大値	6775	6217	2904	2016
反応強度(kW/m ²)	非燃焼領域外縁における最大値	1016.1	948.0	986.9	1122.9
火炎長(m)	最大反応強度位置における値	1.3	1.4	1.1	0.6
火災到達時間(h)	非燃焼領域縁における最小値	4.6	4.4	0.8	0.4
延焼速度(m/s)	最大火線強度位置における値	0.75	0.70	1.98	1.39
単位面積当り熱量 (kJ/m ²)	最大火線強度位置における値	9033	9008	1472	1456

3.2.3.5 森林火災発生時の貯蔵施設の対応

森林火災影響評価の結果に基づき, 森林火災が発生した場合の貯蔵施設の対応について検討した。

(1) 火炎到達時間について

森林火災評価結果より, 火炎の到達時間で最短のものは貯蔵施設東側の発火点3からの火炎で約0.4時間 ⇒ 約24分で貯蔵建屋周りの防火帯を含む非燃焼領域に達する予想となった。

非燃焼領域の存在により, 森林火災が貯蔵建屋まで達することはなく直接影響を及ぼすことはないと考えられるが, 森林火災の状況に応じて防火帯付近へ事前放水を実施し, 火炎の到達までに防護のための措置を講ずる。

貯蔵施設においては, 施設内の火災に対応するための自衛消防隊を組織しており, 24時間体制で監視, 巡視, 初期消火及び事前放水に対応する。自衛消防隊の体制図を第31図に示す。

(2) 森林火災の覚知から火炎到達までの対応について

(a) 森林火災発生覚知段階

敷地周辺の森林火災発生については以下の方法で覚知する。

・ 地元自治体の防災情報

むつ市で提供している気象，火災，防犯等の防災情報を電子メールで配信する「むつ市防災かまふせメール」に，自衛消防隊各班長に貸与する社給携帯のメールアドレスを登録し，火災発生情報の内容を配信の都度確認し発生場所を特定する。この火災発生情報は，敷地周辺地域の場合は約 10 分程度で配信されており，鎮火の情報についても配信されている。

・ 公設消防及び警察からの連絡

・ 敷地内巡視及び監視時における発見

(b) 火炎が敷地近傍に迫るまでの段階

・ 現場状況の確認

自衛消防隊員（自衛消防副隊長，警備員）が，森林火災発生場所の状況を確認する。

・ 気象状況の確認

敷地内気象観測設備のデータにより風向及び風速を確認するとともに，気象庁のホームページ等により気象状況の予測データを確認する。

・ 敷地内の監視カメラを森林火災現場方向に向け，モニタで確認する。

・ 森林火災の対応準備を実施する。

①動力消防ポンプを防火帯の外側の防火水槽に設置し，ホースを火炎の接近方向に展張して緑地に事前放水する。また，状況に応じて枯草及び枯枝を撤去する。

②構内作業を中止する。また，火災の対応に必要な要員以外の者を貯蔵建屋から退出させるとともに，敷地の門扉を閉鎖し立入制限措置を行う。

- ③公設消防の出入管理及び誘導を行う。
- ④非燃焼領域及び防火帯内に可燃物がある場合は、状況に応じて撤去または搬出を行う。
- ⑤非燃焼領域の外側にある車両及び可燃性物品がある場合には、状況に応じて敷地外に移動または搬出を行う。

(c) 火炎が敷地境界を越えて防火帯近傍に迫るまでの段階

- ・動力消防ポンプを防火帯の内側の防火水槽に移動し、ホースを火炎の接近方向に展張して貯蔵建屋の外壁及び防火帯内設置設備に事前放水する。
- ・動力消防ポンプを使用する者は、消防服（防火服）を装着し、状況に応じて防護マスク、空気呼吸器（セルフエアセット）及びガス検知器・濃度計を用いて対応する。

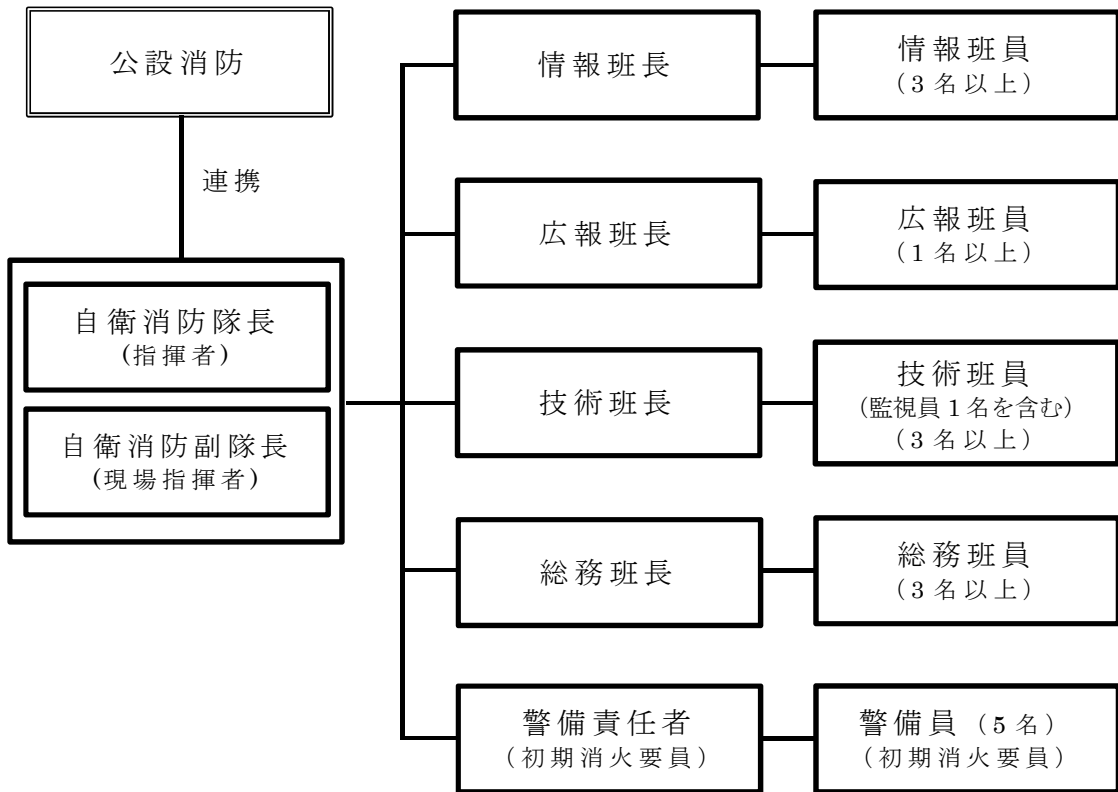
(d) 避難段階

- ・森林火災が想定外に続くことにより、人命に危険がおよぶ可能性がある場合は、火炎の接近方向と逆方向の、安全が確保できる場所まで一時的に避難する。

森林火災発生から火炎到達までの事前放水手順及び所要時間について第 24 表に示す。検討の結果、火災の覚知から事前放水の開始までは約 20 分で対応することが可能であることを確認した。森林火災影響評価における最短の火炎到達時間は、発火点 3 からの火炎であり、約 24 分で防火帯外縁に達するが、発火点 3 は貯蔵施設東側約 200m の森林内であり、火災の発生も容易に覚知しやすいことから、火炎到達前に事前放水を開始可能であると考えられる。

なお、消火活動に関する自衛消防隊の総合的な訓練を定期的に実施する。

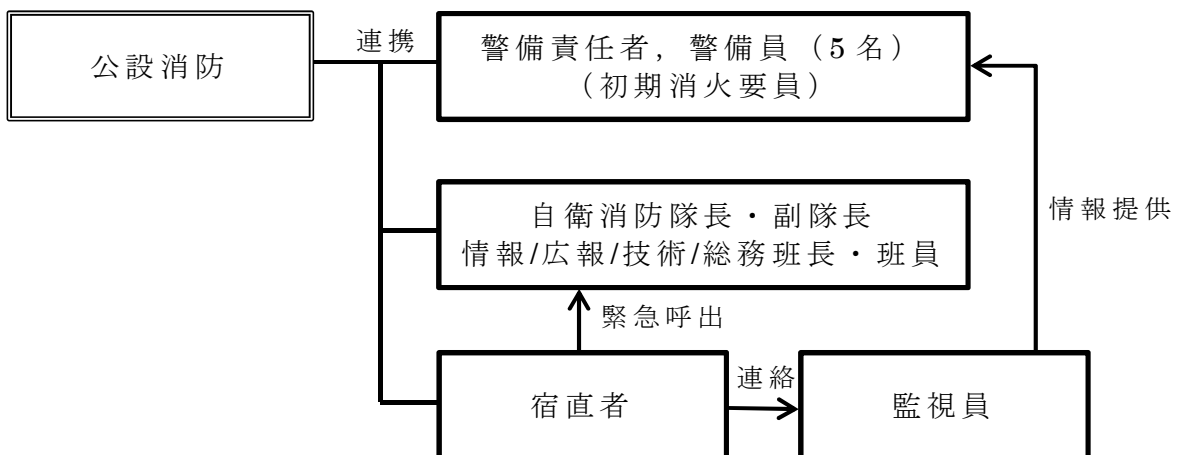
凡例 : 連携箇所



第 31 図 (1) 自衛消防隊体制図

平日通常時間帯及び緊急呼出後の自衛消防隊体制

凡例 : 連携箇所



第 31 図 (2) 自衛消防隊体制図

平日夜間及び休祝祭日の自衛消防隊体制

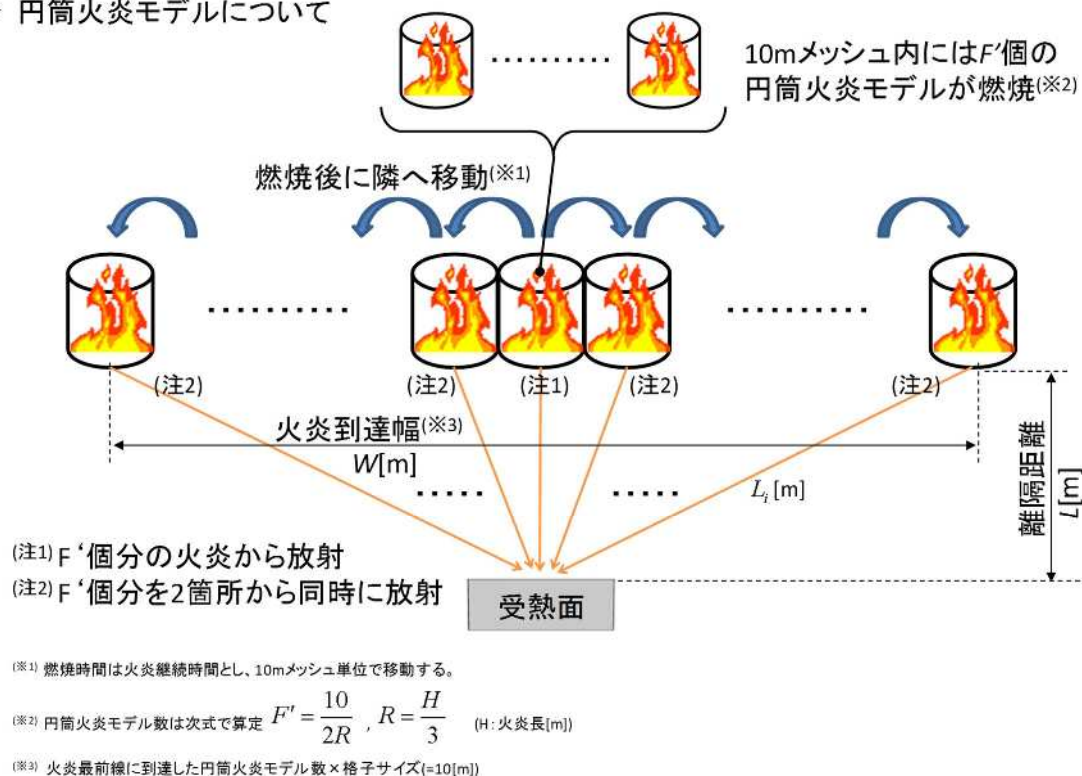
第 24 表 森林火災発生時の事前放水手順と所要時間

手順	内 容	所要時間(分)		
		0	10	20
火災発生	火災覚知から事前放水開始判断 ・発火点 1：西南西方向 3 km 先、 火炎到達時間 4.2 時間 ・発火点 2：南南西方向 2.5 km 先、火炎到達時間 0.8 時間(48 分) ・発火点 3：東側方向 200m 先、 火炎到達時間 0.4 時間(24 分) 敷地内から目視可能,即時判断			
火災発見 ～放水指 示	警備責任者からの指示により 警備員が展開			
出動～放 水準備	動力消防ポンプ準備(2人) 動力消防ポンプ運転後,1人は 消防ホース展張に移動する。			
	消防ホース展張(3人) 防火帯東側から南側に消防ホ ースを展張する。 (20m/巻×20本)			
放水開 始	火炎の方向に応じて防火帯外 側の法面に放水する。 ・動力消防ポンプ操作(1人) ・筒先(放水)操作(1人) ・同上補助兼消火責任者(1人) ・消防ホース展張補助(2人)			

3.2.3.6 円筒火炎モデルによる森林火災影響評価

前項で評価した F A R S I T E 出力値に基づき、森林火災影響評価に必要な各項目について算出した。評価にあたっては、ガイドを参考とし火災を円筒火炎としてモデル化し、この円筒火炎モデルが評価した火炎到達幅の分だけ横一列に並ぶものとして評価を実施した。円筒火炎モデルの概念図について第 32 図に示す。

▶ 円筒火炎モデルについて



第 32 図 森林火災影響評価における円筒火炎モデルの概念図

以下に、評価手順について示す。

(1) F A R S I T E による出力結果から以下のパラメータを抽出

- ・ 反応強度： I_R (W/m²)
- ・ 火炎長：H (m)
- ・ 火炎到達幅：W (m)
- ・ 火炎継続時間： T_{fire} (s)

※ 火炎長及び火炎継続時間は各 F A R S I T E 解析における最大反応強度位置（非燃焼領域外縁）における値

※ 火炎到達幅は非燃焼領域外縁で延焼したセル数×10 (m)（メッシュサイズ）で算定

(2) 反応強度 I_R から火炎輻射強度 R_f を算出

- ・火炎輻射強度は、各発火点毎の F A R A S I T E 解析における最大反応強度を用いて算出する。
- ・火炎輻射強度の算出にあたっては、反応強度は炎から輻射として放出される熱エネルギーと火炎・煙として対流放散される熱エネルギーから求められることから、反応強度に対する火炎輻射強度の割合を求め、火炎輻射強度を算出する。
- ・このため、第 33 図に従い反応強度に対する火炎輻射強度の割合を算出した。



第 33 図 反応強度に対する火炎輻射強度の割合

- ・反応強度と火炎輻射強度の割合を算出した結果、落葉広葉樹は 0.371 であり、針葉樹は 0.377 であった。このため数値の大きい 0.377 を火炎輻射強度の割合として算出し、反応強度に 0.377 を乗ずることにより火炎輻射強度を算出した。

$$\rightarrow R_f = I_R \times 0.377$$

(3) 貯蔵建屋壁面における輻射強度の算出

算出した火炎長と燃焼半径を有する円筒火炎が第 32 図のとおり、火炎到達幅の分だけ横一列に並ぶものとし、離隔距離分だけ離れた位置にある円筒火炎から燃焼開始後、火炎継続時間経過後に隣接す

るセル（セル幅 10m）に延焼するものとして評価を実施した。

火炎から任意の位置にある受熱点における輻射強度に関しては、ガイドを参考とし円筒火炎モデルにおける円筒モデル 1 個の形態係数 ϕ を算出し、これを火炎輻射強度と乗ずることにより輻射強度 E を算出した。

$$\phi = \frac{1}{\pi n} \tan^{-1} \left(\frac{m}{\sqrt{n^2-1}} \right) + \frac{m}{\pi} \left[\frac{(A-2n)}{n\sqrt{AB}} \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{A(n-1)}{B(n+1)}} \right) - \frac{1}{n} \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{(n-1)}{(n+1)}} \right) \right]$$

$$A = (1+n)^2 + m^2$$

$$B = (1-n)^2 + m^2$$

$$m = H/R \doteq 3$$

$$n = L/R$$

$$E = R_f \cdot \phi$$

ϕ : 形態係数, H : 火炎長 (m), L : 離隔距離 (m),

E : 輻射強度 (W/m^2), R_f : 火炎輻射強度 (W/m^2), R : 燃焼半径 (m)

さらに、10m メッシュ内に燃焼半径から算出した F' 個の円筒火炎が存在するものとして、上記で算出した輻射強度に円筒火炎数を乗じて貯蔵建屋の輻射強度を算出する。

$$E = F' \cdot R_f \cdot \phi_0 \quad (\text{中心位置の火炎})$$

$$E = 2 \cdot F' \cdot R_f \cdot \phi_i \quad (\text{中心以外の火炎, 両隣に移動後})$$

前項で評価した F A R S I T E 出力値、及び提示した式を用いて算出した森林火災影響評価に必要な各項目の算出結果について第 25 表に示す。各評価値については、前項と同様保守的に 1 つ下の小数点桁について切り上げ、または切り捨て処理を実施したものである。

第 25 表 森林火災影響評価に必要な項目の算出結果

項目	評価方法	発火点1 (6:58)	発火点1 (7:56)	発火点2 (10:00)	発火点3 (11:00)
火炎輻射強度 (kW/m ²)	発火点毎の解析における最大反応強度に米国 NFPA の係数 0.377 を乗じて算出 ^{*1}	384	358	373	424
火炎継続時間(h)	発火点毎の解析における最大反応強度発生位置の火炎が隣接する位置(火炎伝播方向)に伝播するまでの時間の差 ^{*2}	0.08	0.1	0.14	0.04
火炎到達幅(m)	非燃焼領域外縁で延焼したセル数×10m で算出 ^{*2}	1050	1050	1050	1050
燃焼半径(m)	火炎長/3	0.5	0.5	0.4	0.2
輻射強度(kW/m ²)	形態係数×火炎輻射強度	5.24	5.25	4.14	2.65

*1:反応強度に対して, 米国 N F P A (National Fire Protection Association) の “SFPE HANDBOOK of Fire Protection Engineering” における針葉樹の反応強度と火炎輻射強度の割合に関する係数 0.377 を乗じて算出

*2:ガイドに基づき火災を円筒火炎モデルとし, 火炎到達幅の分だけ円筒火炎モデルが横一列に並ぶものとして評価した

3.2.4 森林火災に対する貯蔵建屋外壁の熱影響評価

3.2.4.1 評価条件

森林火災影響評価の実施に関し，使用した入力パラメータについて以下に示す。

- ・ 離隔距離：22 m
- ・ 外壁厚み：1 m（貯蔵建屋外壁で最も薄い箇所の厚さ）
- ・ 外壁コンクリート許容温度：200 °C
- ・ 外壁コンクリート初期温度：50 °C
- ・ 外壁コンクリート物性（伝熱工学資料 第5版）
密度： 2400 (kg/m³)
比熱： 900 (J/kg/K)
熱伝導率：1.2 (W/m/K)

貯蔵建屋はコンクリート製であるため，判断基準となる許容温度としては，一般的にコンクリートの強度にほとんど影響がないとされている 200°C（保守的にコンクリートの圧縮強度が変化しない温度を想定）とした。（別添1）

また貯蔵建屋は自然循環構造となっており，建屋の除熱設計において，建屋内の雰囲気温度は貯蔵区域における計測設備，放射線監視設備等の電気品の性能維持を考慮した 45°C以下となるよう設計されている。このため，建屋外壁の初期温度については，本値及び F A R S I T E への入力条件としても考慮したむつ観測所において観測開始以降最高値となる 34.7°C及び日射による温度上昇を保守的に考慮し，50°Cと設定した。

3.2.4.2 貯蔵建屋外壁表面における熱影響評価について

(1) 貯蔵建屋外壁温度の算出

貯蔵建屋の外壁温度は，次式に示す次元非定常熱伝導方程式を解くことにより評価した。

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right)$$

T : 温度 (K) ρ : 密度 (kg/m³) C_p : 比熱 (J/kg/K)

k : 熱伝導率 (W/m/K) E : 輻射強度 (W/m²/K) L : 厚さ (m)

上式は、伝熱工学資料第5版に記載の式を一次元に簡略化したものである。森林火災時の熱影響評価においては、火炎からの輻射強度が一定値とならないため一般的に上式の解析解が存在しないことから、上式を有限差分法により導出した以下の離散式について、熱影響の評価式として用いた。

$$\frac{T_i^{t+\Delta t} - T_i^t}{\Delta t} = \alpha \frac{T_{i+1}^t - 2T_i^t + T_{i-1}^t}{\Delta x^2}$$

α = k / ρ · C_p t : 時間 i : 空間に対するインデックス

評価に際して、貯蔵建屋の外壁を厚さ方向に有数個 (n 個) のメッシュに分割し、外壁表面をインデックス 0、内壁表面をインデックス n として各インデックスにおける温度を算出した。評価のモデルについて第 34 図に示す。



第 34 図 評価モデル概念図

上記モデルにおいて、計算点 i における時刻 t + Δt の温度について以下の式で算出した。

$$T_i^{t+\Delta t} = T_i^t + \alpha \frac{\Delta t}{\Delta x^2} (T_{i+1}^t - 2T_i^t + T_{i-1}^t)$$

外壁の外表面温度については、輻射強度 E を考慮し次式 (フーリ

エの熱伝導の式) で算出し、メッシュ毎に隣り合うインデックスにおける温度から次の時刻の温度を算出していき、内表面温度まで算出した。この時、外壁内表面での熱流束はないものとする(断熱状態)。

$$\begin{aligned}
 -k \frac{T_1^t - T_0^t}{\Delta x} = E &\Rightarrow T_0^t = \frac{E \Delta x}{k} + T_1^t && \text{(外表面温度)} \\
 -k \frac{T_{n-1}^t - T_n^t}{\Delta x} = 0 &\Rightarrow T_n^t = T_{n-1}^t && \text{(内表面温度)}
 \end{aligned}$$

(2) 危険距離の算出

ガイドを参考とし、前項で算出した輻射強度が森林火災による輻射熱に対する貯蔵施設の危険輻射強度以下となるよう、危険距離を確保するものとする。火災の、火炎から任意の位置にある点(受熱点)の輻射強度は、火炎輻射強度に形態係数を掛けた値になる。

$$E = R_f \cdot \phi$$

ϕ : 形態係数, E : 輻射強度 (W/m^2), R_f : 火炎輻射強度 (W/m^2)

次の式から形態係数 ϕ を求め、 $\phi > \phi_t$ なるように危険距離を算出する。

$$\phi_t = \frac{1}{\pi n} \tan^{-1} \left(\frac{m}{\sqrt{n^2 - 1}} \right) + \frac{m}{\pi} \left[\frac{(A - 2n)}{n\sqrt{AB}} \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{A(n-1)}{B(n+1)}} \right) - \frac{1}{n} \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{(n-1)}{(n+1)}} \right) \right]$$

$$A = (1+n)^2 + m^2$$

$$B = (1-n)^2 + m^2$$

$$m = H/R \doteq 3$$

$$n = L_t/R$$

L_t : 危険距離 (m), H : 火炎長 (m), R : 燃焼半径 (m)

ϕ_t は、各円筒火炎モデルの形態係数を合計した値であり、 $\phi_t = (\phi_i + \phi_{i+1} + \phi_{i+2} + \dots)$ となる。また、 $(i + (i+1) + (i+2) + \dots + (i+x))$ の円筒火炎モデル数の合計は F' 個となる。

3.2.4.3 評価結果

発火点 1, 2, 3 における熱影響評価結果について第 26 表に示す。

各評価値については、前項と同様保守的に 1 つ下の小数点桁について切り上げ、または切り捨て処理を実施したものである。また、外壁及び内壁の温度については、設定した建屋外壁初期温度 50℃を加算した値である。

また、第 35 図～第 38 図に発火点別の建屋外壁温度上昇量の評価結果の時間変化グラフを示す。各図において (2) のグラフは、(1) のグラフの X 軸 (時間軸) を 5 時間まで拡大したものである。

第 26 表 貯蔵建屋の熱影響評価

項目	発火点 1 (6:58)	発火点 1 (7:56)	発火点 2 (10:00)	発火点 3 (11:00)
外壁外表面温度(℃)	128	138	132	75
外壁内表面温度(℃)	53	54	54	51
危険輻射強度(kW/m ²)	9.87	8.83	7.41	20.87
危険距離(m)	15	16	16	7

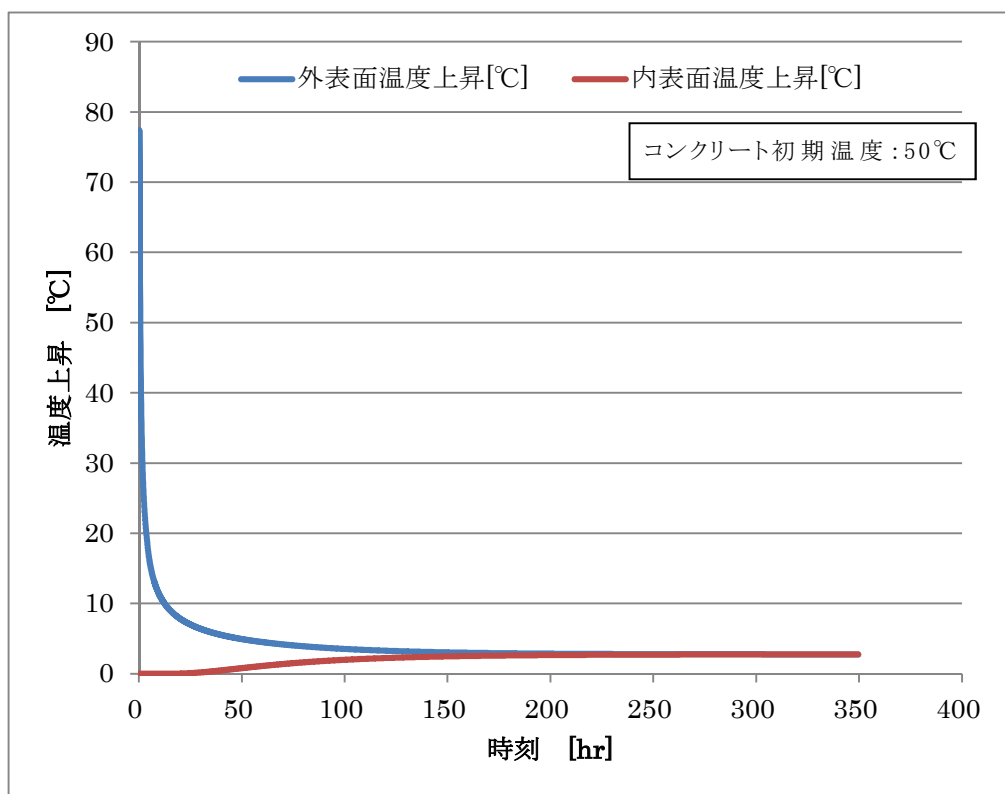
(1) 貯蔵建屋外壁温度の評価

森林火災による熱影響評価の流れに従って温度評価を実施したところ、貯蔵建屋外壁の初期温度を 50℃とした場合の外壁の最高温度は、F A R S I T E の解析結果のうち、最も貯蔵建屋への熱影響が大きくなる反応強度を出力した発火点 1 における発火時刻 7:56 の評価で 138℃程度となり、許容温度 200℃以下であることを確認した。

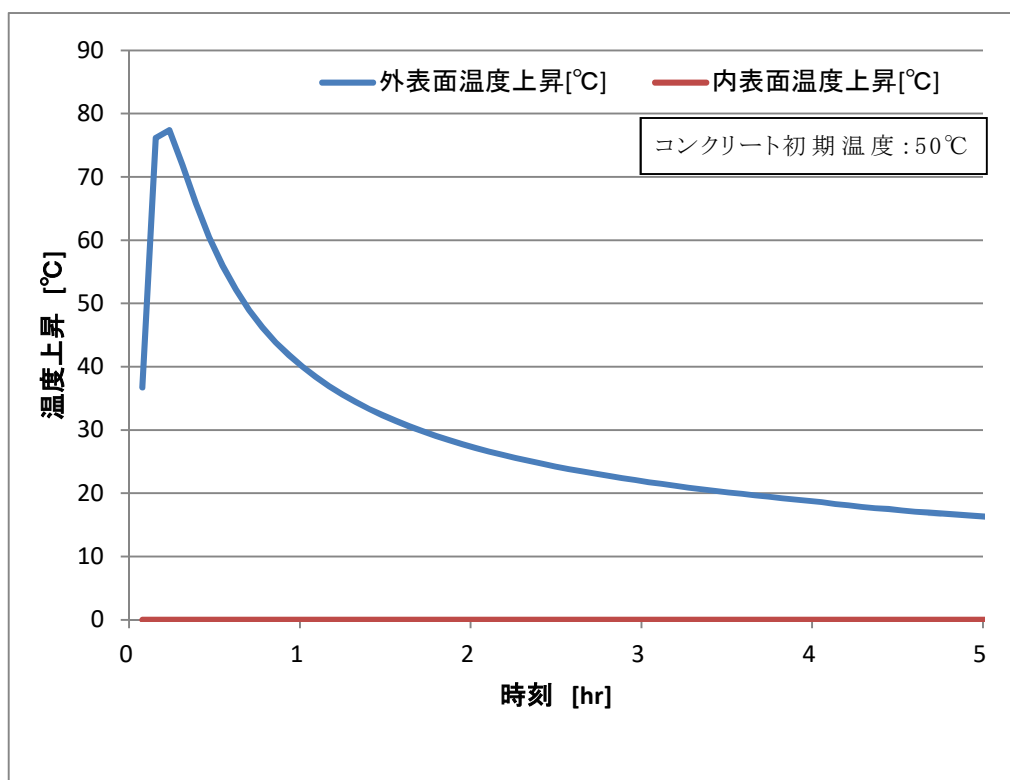
外壁温度については火災発生直後に最高温度となるが、その後輻射強度の低下に伴い徐々に低下する。これは、森林火災を円筒火炎としてモデル化した際、時間経過に伴い円筒火炎モデルが評価点より遠ざかるためである。

(2) 危険距離の評価

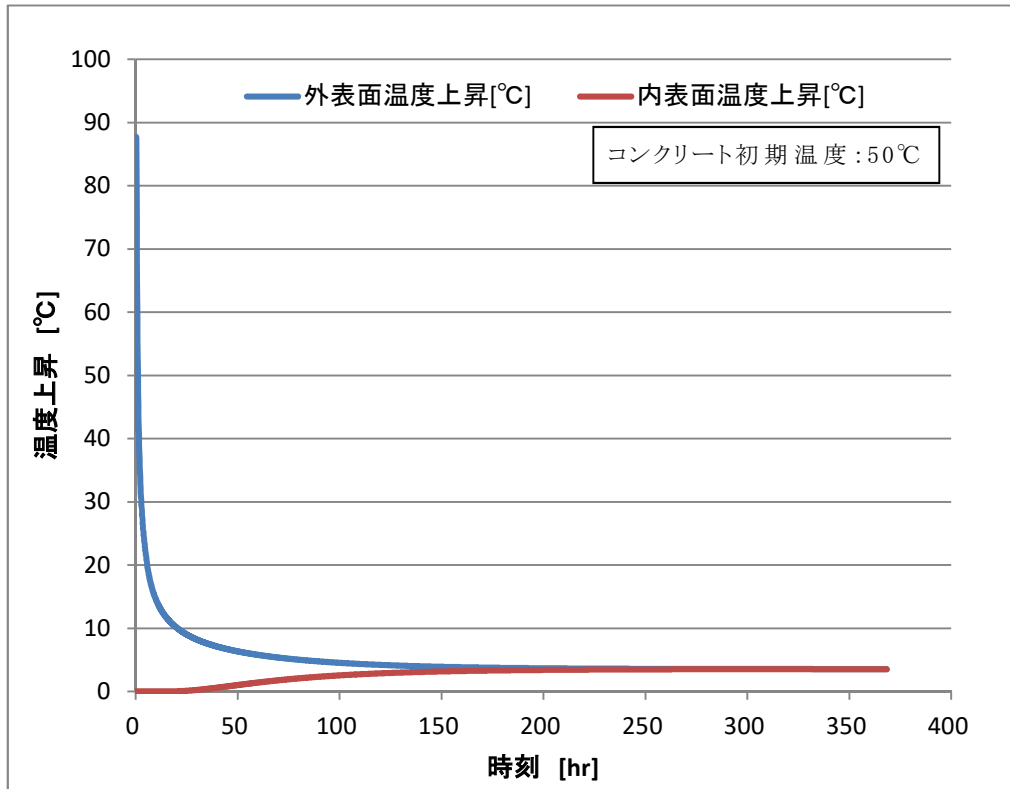
危険輻射強度から各発火点における危険距離を算出した結果、発火点1, 2, 3におけるいずれの評価結果においても必要防火帯幅である22 m以下であることから、貯蔵施設から防火帯外縁までの離隔距離については、想定される森林火災に対して評価上必要とされる危険距離以上であることを確認した。



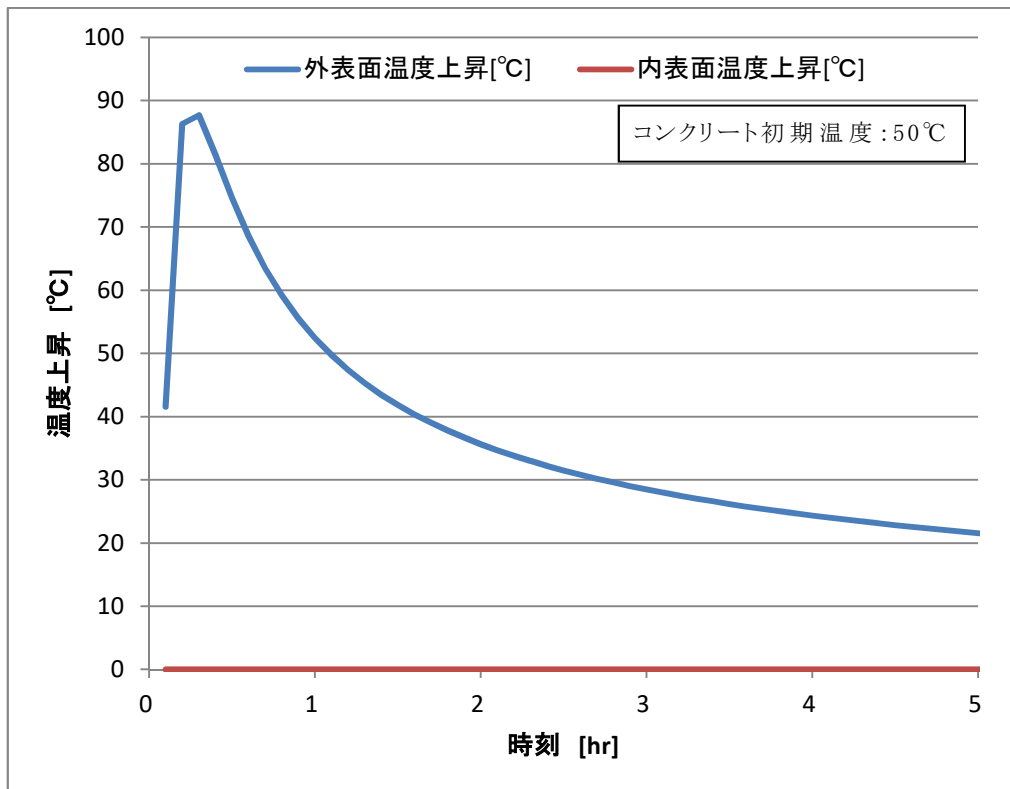
第 35 図 (1) 貯蔵建屋外壁 (内壁) 温度の時間変化 (発火点 1 (発火時刻 6:58))



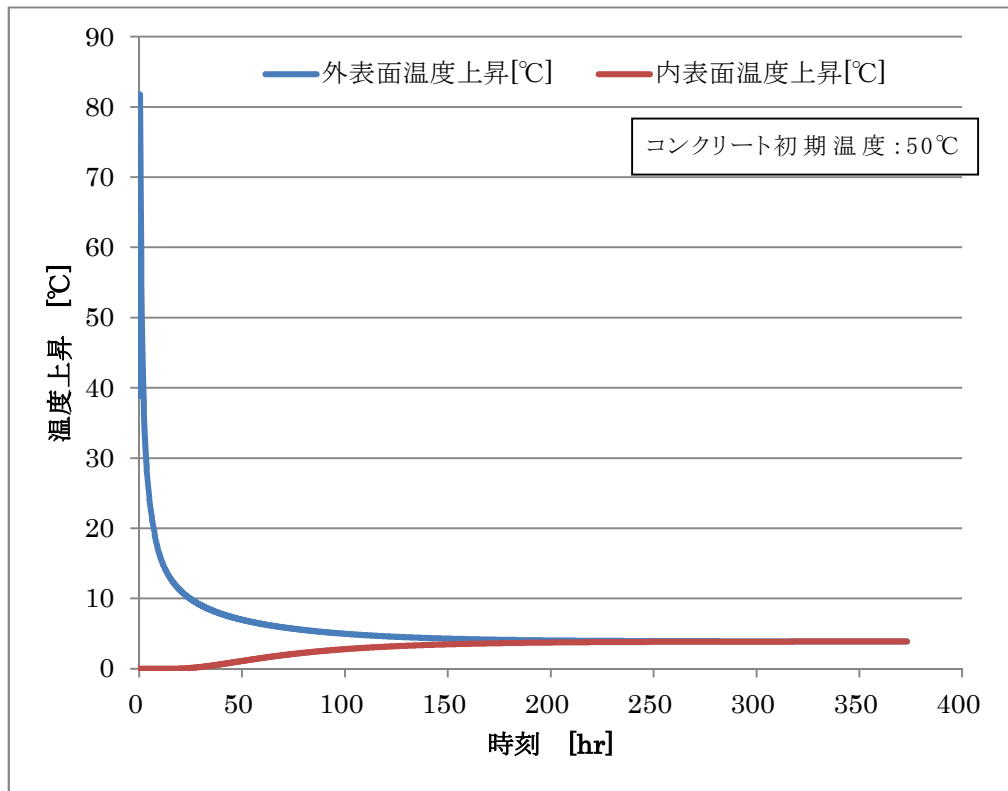
第 35 図 (2) 貯蔵建屋外壁 (内壁) 温度の時間変化 (発火点 1 (発火時刻 6:58))



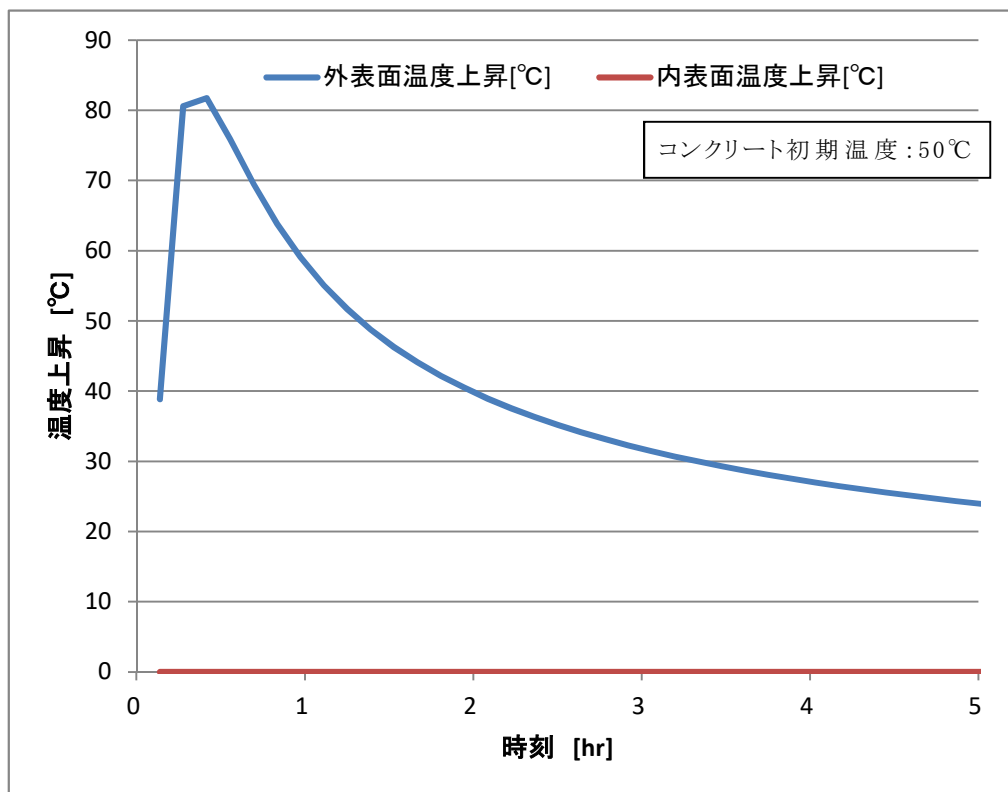
第 36 図 (1) 貯蔵建屋外壁 (内壁) 温度の時間変化
(発火点 1 (発火時刻 7:56))



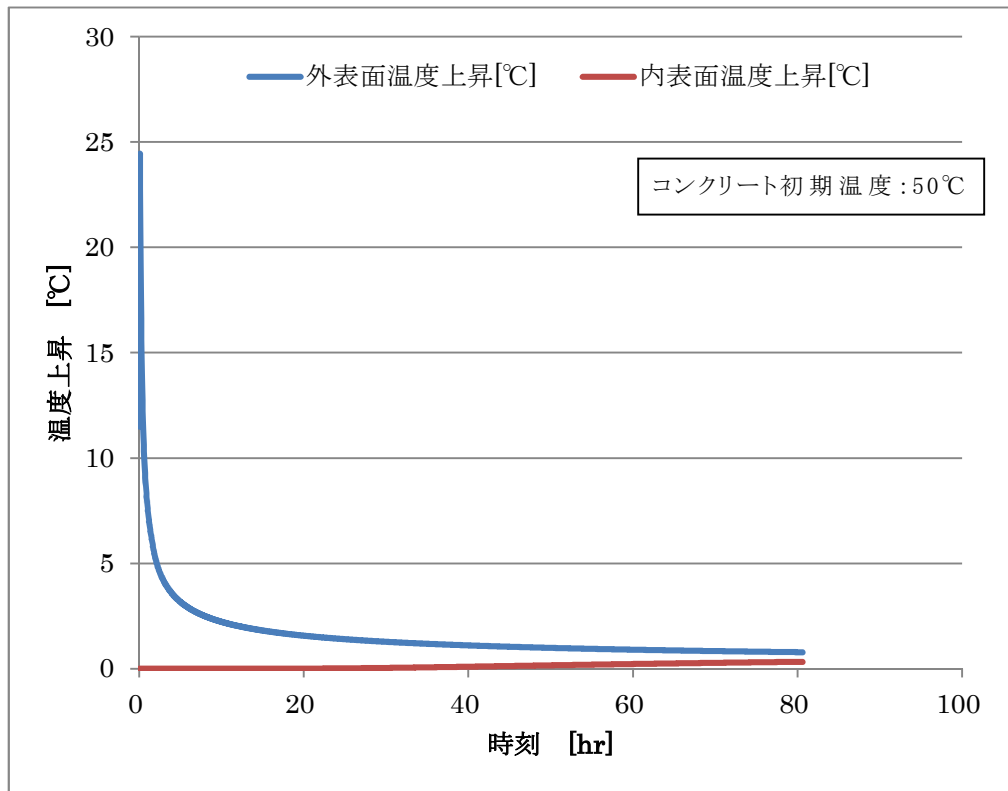
第 36 図 (2) 貯蔵建屋外壁 (内壁) 温度の時間変化
(発火点 1 (発火時刻 7:56))



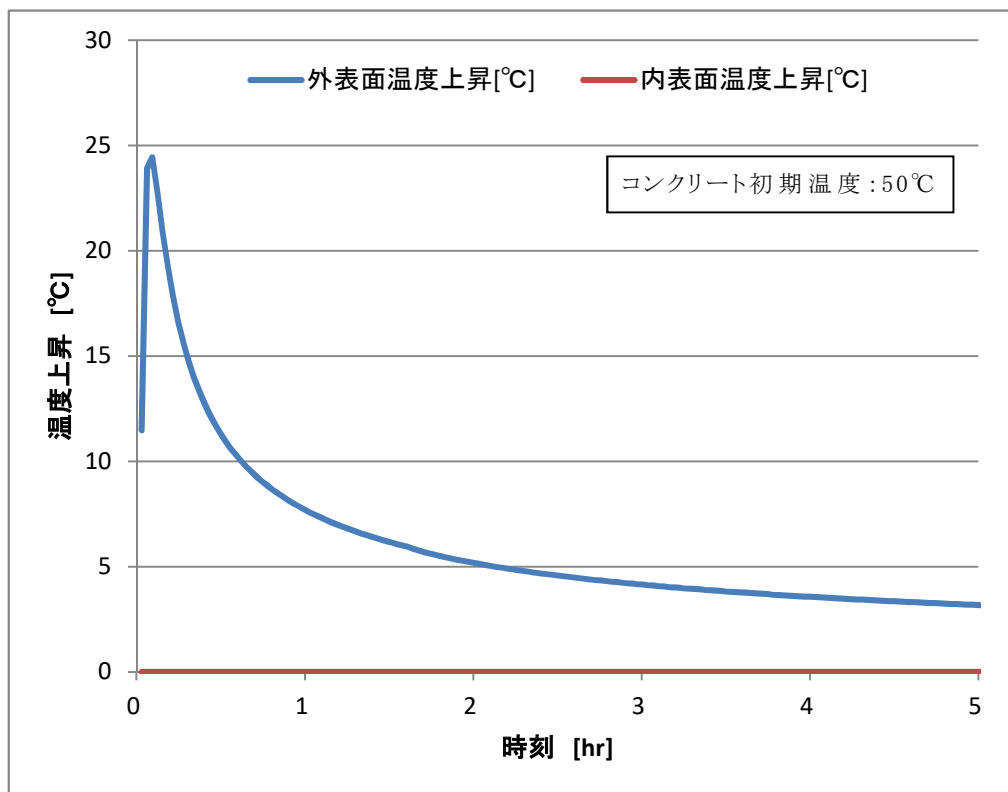
第 37 図 (1) 貯蔵建屋外壁 (内壁) 温度の時間変化 (発火点 2 (発火時刻 10:00))



第 37 図 (2) 貯蔵建屋外壁 (内壁) 温度の時間変化 (発火点 2 (発火時刻 10:00))



第 38 図 (1) 貯蔵建屋外壁 (内壁) 温度の時間変化 (発火点 3 (発火時刻 11:00))



第 38 図 (2) 貯蔵建屋外壁 (内壁) 温度の時間変化 (発火点 3 (発火時刻 11:00))

4. 近隣の産業施設等の火災・爆発に対する影響評価について

4.1 近隣の産業施設等の火災・爆発評価

4.1.1 石油コンビナート等に関する評価

青森県内において、石油コンビナート等災害防止法第二条第二項に基づく「青森県石油コンビナート等防災計画（青森県石油コンビナート等防災本部 策定：昭和 52 年 3 月 3 日 最終修正：平成 23 年 3 月 24 日）第 1 章総則，第 4 節特別防災区域の範囲 4 頁から 11 頁」によれば、石油コンビナート等特別防災区域を指定する政令（昭和 51 年政令第 192 号）及び石油コンビナート等特別防災区域に係る区域の指定（昭和 51 年通商産業省・自治省告示第 1 号）で指定されている青森県の区域は次のとおりである。（第 39 図）



第 39 図 青森県石油コンビナート等特別防災区域
(Google Map をもとに作成)

ガイドにおける石油コンビナート等の評価対象範囲は、貯蔵施設より火災評価で半径 10km 以内，ガス爆発で南北及び東西 10km としてお

り、最も至近のむつ小川原地区についても 40km 以上隔離していることから、貯蔵施設から 10km 以内に石油コンビナート等の施設はないことを確認した。

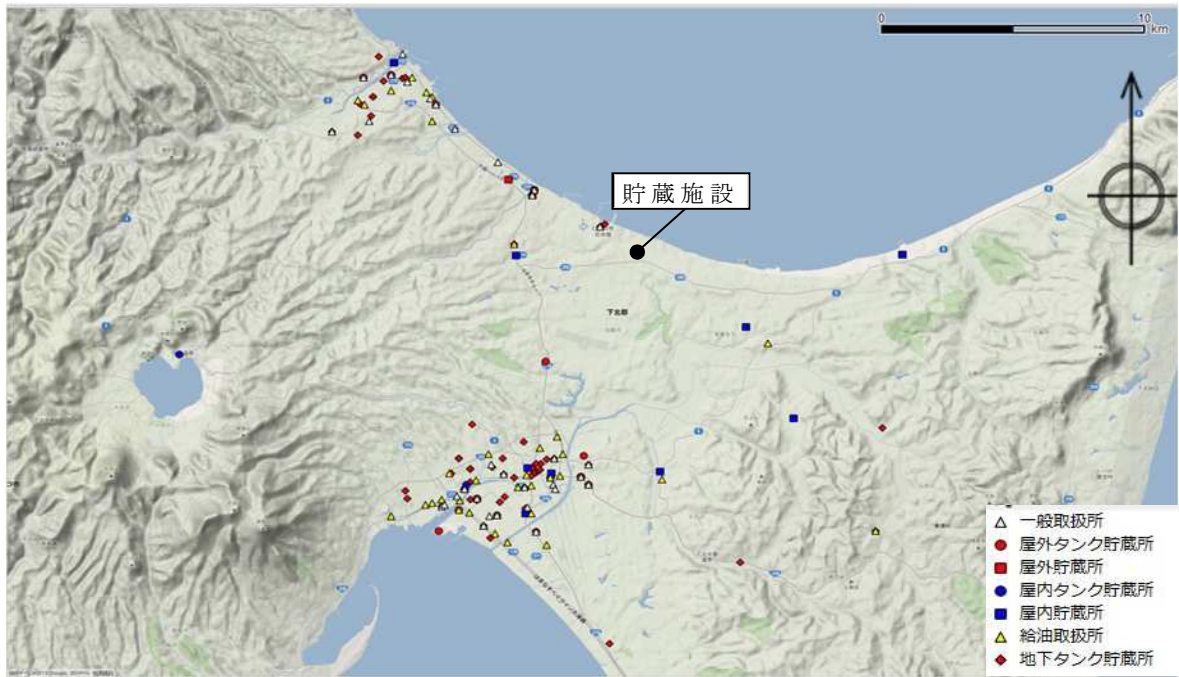
4.1.2 石油コンビナート以外の危険物貯蔵施設の火災・爆発による影響評価

4.1.2.1 評価対象施設の選定

石油コンビナート以外の危険物貯蔵施設については、青森県防災消防課、及びむつ市消防本部に届出がされている当該施設について調査を行い、ガイドを参考として貯蔵施設から 10km 圏内に位置する敷地外の危険物貯蔵施設に対して、貯蔵施設に最も近い施設を抽出した。その結果、貯蔵施設から最短距離にある危険物貯蔵施設は、約 1 km 離れた地点にある貯蔵施設（地下タンク貯蔵所）であり、貯蔵物は第三石油類（重油）27kℓであった。また、同評価対象範囲において最も貯蔵量の大きい危険物貯蔵施設は、約 3 km 離れた地点にある貯蔵施設（屋外タンク貯蔵所）であり、その貯蔵物は第二石油類（灯油）924kℓであった。

これより、本評価においては、貯蔵施設から 10km 圏内における最大貯蔵量となる危険物貯蔵施設と同等のタンクが貯蔵施設から最も近い距離 1 km の位置に存在するもの（貯蔵施設から 1 km の距離に貯蔵量 924 kℓの危険物貯蔵施設が存在するもの）と仮定し、これに火災が発生した場合の貯蔵施設への影響評価を実施した。

貯蔵施設からの上記危険物貯蔵施設の位置関係について第 40 図に示す。評価対象範囲において最も貯蔵量の多い危険物貯蔵施設が貯蔵施設に最も近い距離の位置に存在するものと仮定して評価を実施することは、条件的に最も厳しい評価となり、十分に保守的な評価である。



(a) 10km 圏内全体図

第 40 図(1) 貯蔵施設から 10km 圏内の危険物貯蔵施設の位置



(b) 施設周辺部拡大図



(c) 最大量石油類貯蔵施設付近拡大図 (図(b)点線枠部)

第 40 図(2) 貯蔵施設から 10km 圏内の危険物貯蔵施設の位置

4.1.2.2 評価方法及び評価結果

(1) 火災発生源に関する入力データ

燃料の種類：灯油

燃料量：924 (kl)

火炎輻射強度：50000 (W/m²) ※ガイド付属書 B の灯油の値

質量低下速度：0.039 (kg/m²/s) ※NUREG-1805*の Kerosene の値

燃料密度：820 (kg/m³) ※NUREG-1805 の Kerosene の値

防油堤面積：900 (m²) ※航空写真に基づき概算
(第 40 図(c)赤枠内)

*：米国 NRC における定量的な火災防護に関する危険分析方法

(2) 貯蔵建屋に関する入力データ

貯蔵建屋からの離隔距離：1000 (m)

貯蔵建屋外壁の熱的物性：

密度：2400 (kg/m³)

比熱：900 (J/kg/K)

熱伝導率：1.2 (W/m/K)

※伝熱工学資料 第 5 版の石灰岩コンクリートの値

(3) 評価方法

ガイド付属書 B「石油コンビナート等火災・爆発の原子力発電所への影響評価について」を参考とし、以下の手順で実施した。

(a) 燃焼半径の算出

防油堤面積と同じ面積を持つ円を底面とする円筒火炎を想定して下記の式に基づき算出したところ、16.926 m となった。

$$R = \sqrt{S/\pi} = \sqrt{900/\pi} = 16.9257 \Rightarrow 16.926 \quad (\text{m})$$

R：燃焼半径(m)，S：防油堤面積(=燃焼面積)(m²)

(b) 形態係数の算出

下記の式に基づき，円筒火炎に対する形態係数の算出方法に従って算出したところ，0.0005536 となった。

$$\phi = \frac{1}{\pi n} \tan^{-1} \left(\frac{m}{\sqrt{n^2-1}} \right) + \frac{m}{\pi} \left[\frac{(A-2n)}{n\sqrt{AB}} \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{A(n-1)}{B(n+1)}} \right) - \frac{1}{n} \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{(n-1)}{(n+1)}} \right) \right]$$

$$A = (1+n)^2 + m^2$$

$$B = (1-n)^2 + m^2$$

$$m = H/R$$

$$n = L/R$$

ϕ : 形態係数，H : 火炎長 (m)，L : 離隔距離 (=1000 m)

(c) 輻射強度の算出

下記の式に基づき算出したところ，27.7 W/m² となった。

$$E = R_f \cdot \phi = 50000 \times 0.0005536 = 27.68 \Rightarrow 27.7 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

E : 輻射強度 (W/m²)，R_f : 火炎輻射強度 (W/m²)

(d) 燃焼継続時間の算出

下記の式に基づき算出したところ，21615 s となった。

$$t = \frac{V}{\pi R^2 \times v} = 924 / (900 \times 0.0000475) = 21614.1 \Rightarrow 21615 \text{ (s)}$$

ここで， $v = \frac{m}{\rho} = \frac{0.039}{820} = 0.000047561 \Rightarrow 0.0000475$ ，

$$\pi R^2 = 900.0332 \Rightarrow 900$$

t : 燃焼継続時間 (s)，V : 燃料量 (m³)，v : 燃焼速度 (m/s)，

m : 質量低下速度 (kg/m²/s)， ρ : 燃料密度 (kg/m³)

(4) 貯蔵施設への影響評価結果

(a) 貯蔵建屋外壁温度の評価

(3)にて求めたパラメータにより，伝熱工学資料第5版に記載の半無限固体の非定常温度分布の式を用いて，貯蔵建屋外壁温度分布を評価した。

$$T(x)-T_0 = \frac{2E\sqrt{\kappa t}}{k} \left[\frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{4\kappa t}\right) - \frac{x}{2\sqrt{\kappa t}} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\kappa t}}\right) \right]$$

$T(x)$: 表面から x (m) の位置の温度 (°C), T_0 : 初期温度 (=50 °C),
 k : 熱伝導率 (W/m/K), κ : 温度拡散率 ($\kappa = k / \rho C_p$) (m²/s),
 ρ : 密度 (kg/m³), C_p : 比熱 (J/kg/K)

貯蔵建屋外壁初期温度を 50°C とし、上式により外壁外表面温度上昇量を評価したところ、約 3°C となり、外壁外表面温度の評価結果は約 53°C となった。

本評価結果はコンクリート許容温度である 200°C を下回っており、これにより敷地外の危険物貯蔵施設の火災に関して貯蔵建屋への影響はないことを確認した。

(b) 危険距離の評価

火災による貯蔵建屋外壁温度が許容温度である 200°C となる際の貯蔵建屋からの離隔距離を危険距離として評価した。外壁初期温度 50°C を考慮すると、このときの外壁外表面温度上昇量は $200 - 50 = 150$ °C となり、この時点での危険輻射強度は 1440.6 W/m² と算出される。この値より危険距離は約 138m と算出された。

評価した敷地外の危険物貯蔵施設から貯蔵建屋までの離隔距離は 1000m であることから、想定される敷地外の危険物貯蔵施設からの火災に対して評価上必要とされる危険距離以上であることを確認した。

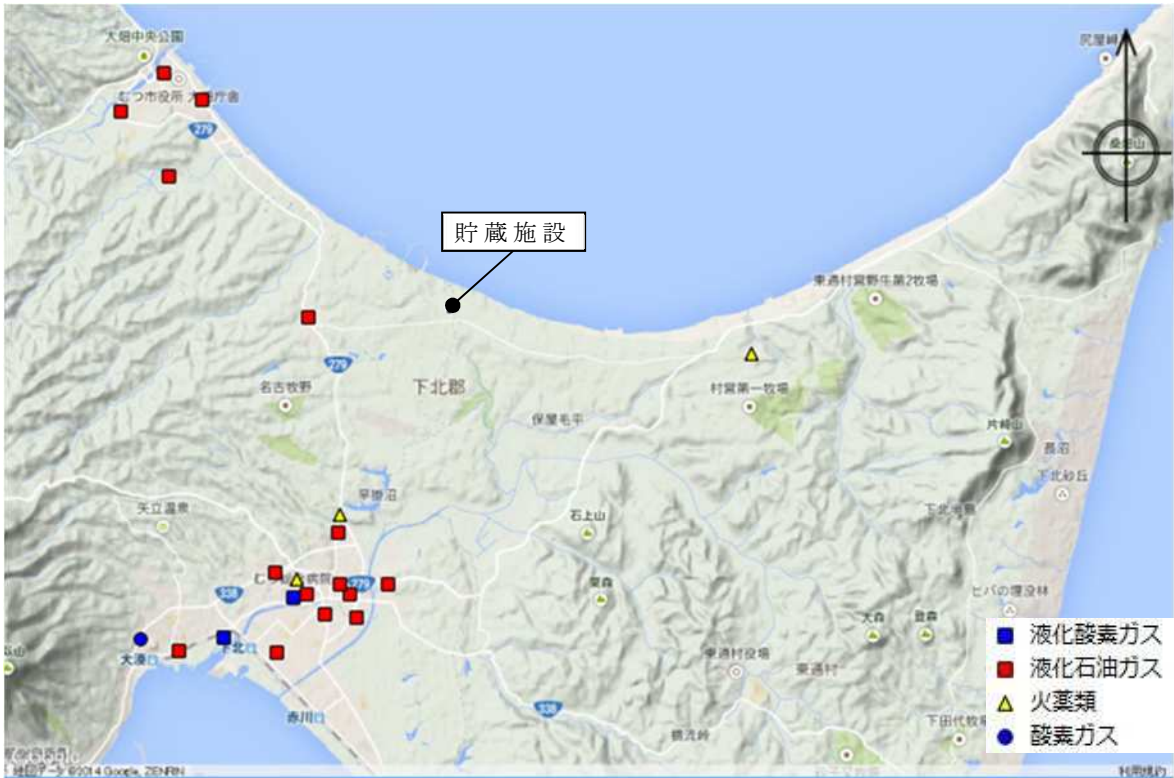
4.1.3 石油コンビナート以外の高圧ガス類貯蔵施設の火災・爆発による影響評価

4.1.3.1 評価対象施設の選定

石油コンビナート以外の高圧ガス類貯蔵施設に関して、前項と同様、青森県防災消防課、及びむつ市消防本部に届出がされている当該施設について、ガイドを参考として貯蔵施設から10km圏内に位置する高圧ガス類貯蔵施設に対して、貯蔵施設に最も近い施設を抽出した。その結果、貯蔵施設から最短距離にある高圧ガス類貯蔵施設は、約3km離れた地点にある貯蔵施設であり、貯蔵量は液化石油ガス400kgであった。また、同評価対象範囲において最も貯蔵量の大きい貯蔵施設は、約7km離れた地点にある貯蔵施設であり、貯蔵量は液化石油ガス22658kgであった。

これより、本評価においては、貯蔵施設から10km圏内における最大貯蔵量となる高圧ガス類貯蔵施設と同等の貯蔵量をもつタンクが、貯蔵施設から最も近い距離3kmの位置に存在するもの（貯蔵施設から3kmの距離に貯蔵量22658kgの高圧ガス類貯蔵施設が存在するもの）と仮定し、これがガス爆発を起こした場合の貯蔵施設への影響評価を実施した。

貯蔵施設からの上記高圧ガス類貯蔵施設の位置関係について第41図に示す。評価対象範囲において最も貯蔵量の多い高圧ガス類貯蔵施設が貯蔵施設に最も近い距離の位置に存在するものと仮定して評価を実施することは、条件的に最も厳しい評価となり、十分に保守的な評価である。



(a) 10km 圏内全体図



(b) 施設周辺部拡大図

第 41 図 貯蔵施設から 10km 圏内の高圧ガス類貯蔵施設の位置

4.1.3.2 評価方法及び評価結果

(1) 火災発生源に関する入力データ

気象条件：無風状態

貯蔵ガス：液化石油ガス（プロパン）

貯蔵ガス K 値^{※1}：888 ×1000（ガイドより引用）

貯蔵量：22658（kg）

貯蔵設備 W 値^{※2}：4.76（貯蔵量(t)の平方根）

爆発形態：高圧ガスの漏えい後，引火によりガス爆発が発生

※1:K 値はコンビナート等保安規定第 5 条別表第二に掲げる数値

※2:W 値は重量 1 t 以上のガスが貯蔵されているタンクであれば(貯蔵量)^{1/2}を，1 t 未満のタンクであれば貯蔵量(t)とする。

(2) 評価方法

ガイド付属書 B「石油コンビナート等火災・爆発の原子力発電所への影響評価について」を参考とし，以下の手順で実施した。

(a) 危険限界距離の算出

下記の式に基づき，危険限界距離を算出した。

$$X=0.04\lambda\sqrt[3]{K\times W}$$

X：危険限界距離

λ：換算距離：14.4（m・kg^{-1/3}）（ガイドより引用）

K：石油類の定数

W：設備定数

この式に，対象となる高圧ガス類貯蔵施設に係る数値を代入して算出すると

$$X=0.04\times 14.4\times\sqrt[3]{888\times 1000\times 4.76}=93.2\text{ (m)}$$

となり，危険限界距離は約 90m となった。

(3) 貯蔵施設への影響評価結果

ガイドに基づき，想定される高圧ガス類貯蔵施設のガス爆発に対して，当該施設から貯蔵施設までの離隔距離が，評価上必要とされる危険限界距離以上であることを確認する。

貯蔵施設から当該高圧ガス類貯蔵施設までの離隔距離は約 3000m であり，算出した危険限界距離は約 90m であることから，離隔距離は，想定される敷地外危険物貯蔵設備からのガス爆発に対して評価上必要とされる危険限界距離以上であることを確認した。

4.2 敷地内の危険物貯蔵設備に対する火災評価

4.2.1 評価の考え方

貯蔵施設敷地内には、第 27 表に示す設備を設置する。また、敷地内の危険物貯蔵設備の配置を第 42 図に示す。これらの設備は危険物を内包することから、火災を想定した貯蔵建屋外壁への熱影響評価を実施する。評価方法については、4.1.2.2 と同様に行う。

第 27 表 貯蔵施設敷地内の危険物貯蔵設備

設備名		燃料種別	容量(kℓ)	離隔距離 (m)
エンジン発電機		軽油 (注 2)	1.031	27
電源車・据置型発電機 (注 1)		軽油 (注 2)	0.8375 (注 3)	70
キャスク輸送車両		軽油 (注 2)	1.08 (注 4)	107
モニタリング ポスト用 発電機	敷地東側	軽油 (注 2)	0.0696	138
	敷地南側	軽油 (注 2)	0.0696	164
電源車		軽油 (注 2)	0.2865	100 (注 5)
軽油貯蔵タンク(地下式)		軽油	12	－(注 6)

(注 1) 電源車については通常敷地南側の予備緊急時対策所付近に配備するが、外部電源喪失時は据置型発電機の位置に移動し使用するため合わせて評価した。

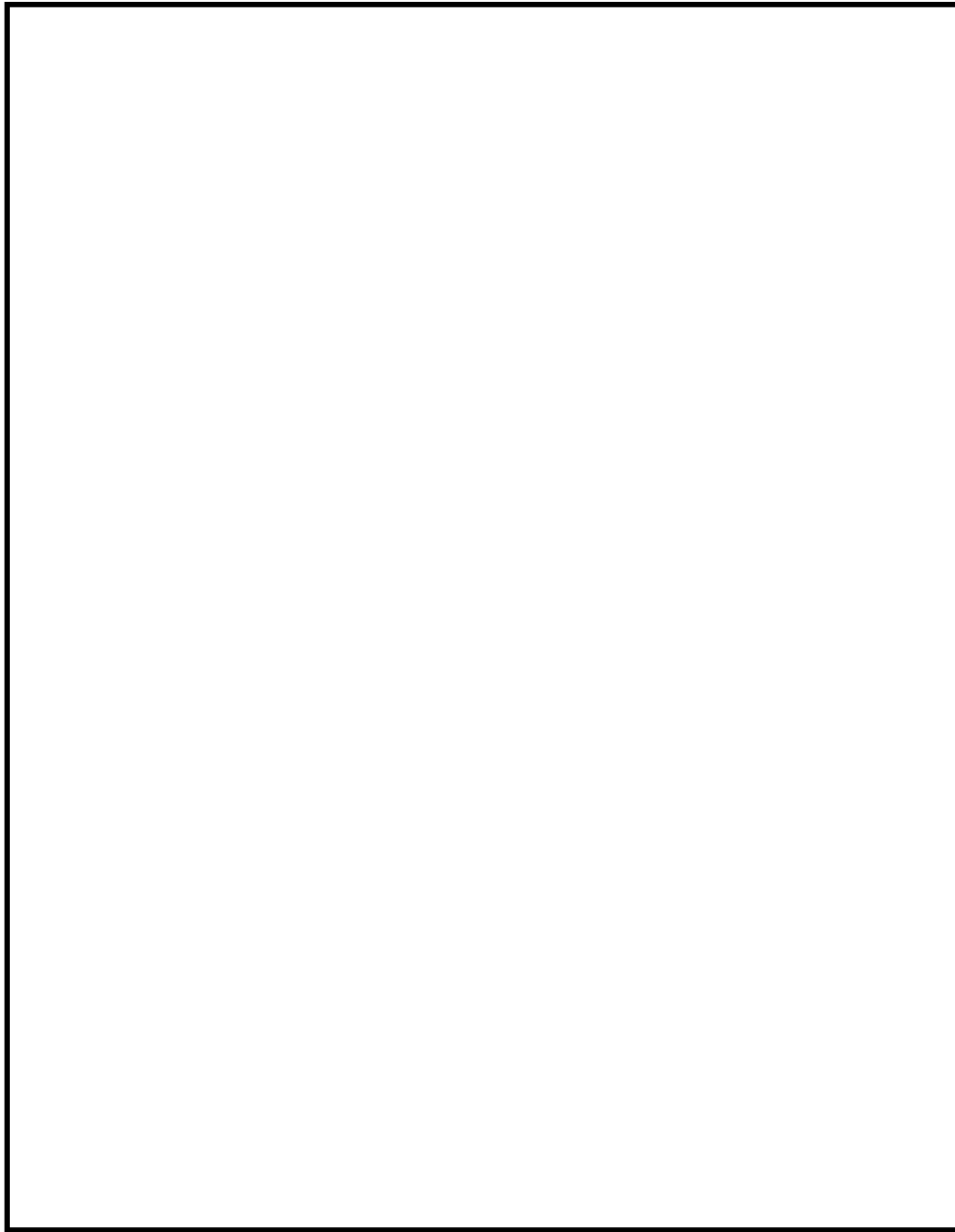
(注 2) 保守的に軽油と潤滑油を合わせて全て軽油とみなした。

(注 3) 設置場所が至近であるため一体とみなし、容量は電源車と据置型発電機の合算値

(注 4) キャスク輸送車両 2 両分の合算値

(注 5) 予備緊急時対策所を設置する高台のレイアウト上最も貯蔵建屋に近接する距離を保守的に設定した。

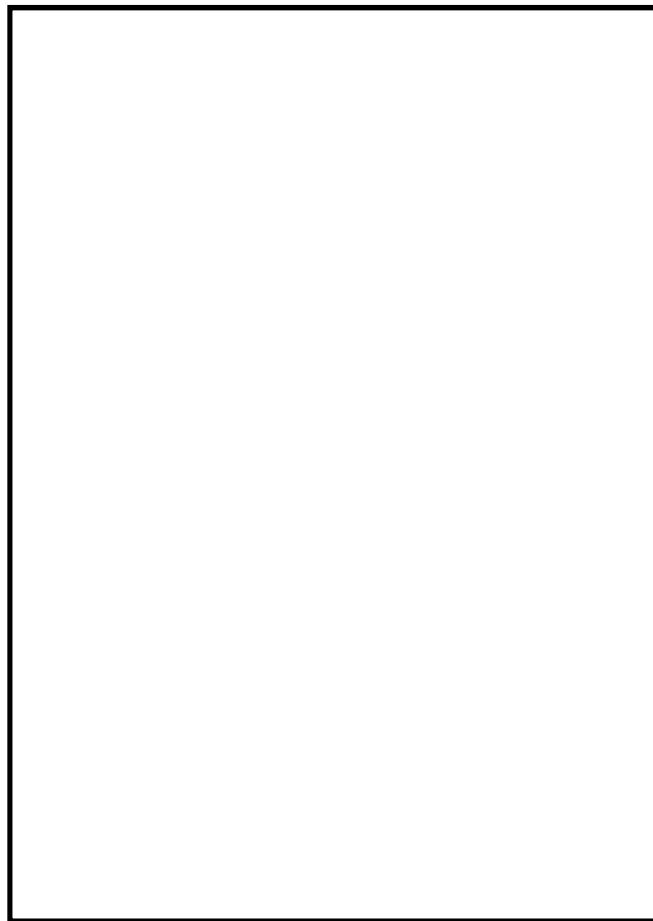
(注 6) 軽油貯蔵タンク(地下式)は外部火災評価の対象外とする(別添 2 参照)。



第 42 図 敷地内の危険物貯蔵設備の設置場所

4.2.2 エンジン発電機の火災評価

貯蔵施設においては、核物質防護設備用として施設の長時間停電に対応する設備である非常用発電機としてエンジン発電機1基を設けている（第43図）。この発電機には、発電機本体に燃料用としての軽油タンク及びエンジン潤滑油タンクが内蔵されており、本設備から火災が発生した際の影響評価を行った。



第43図 エンジン発電機設置位置

(1) 火災発生源に関する入力データ

燃料の種類：軽油及び潤滑油であるが、保守性を考慮してすべて軽油とみなした。

燃料量：軽油 0.99 (kℓ) + 潤滑油 0.041 (kℓ) = 1.031 (kℓ)

火災輻射強度：42000 (W/m²) ※ガイド付属書Bの軽油の値

質量低下速度：0.044 (kg/m²/s) ※NUREG-1805 の Diesel Oil の値

燃料密度：860 (kg/m³) ※JIS K 2204-2007

燃焼面積：4.97 (m²) ※エンジン発電機の全長×全幅

(2) 貯蔵建屋に関する入力データ

貯蔵建屋からの離隔距離：27.3 → 27 (m)

貯蔵建屋外壁の熱的物性：

密度：2400 (kg/m³)

比熱：900 (J/kg/K)

熱伝導率：1.2 (W/m/K)

※伝熱工学資料第5版の石灰岩コンクリートの値

(3) 評価方法

ガイド付属書 B「石油コンビナート等火災・爆発の原子力発電所への影響評価について」に従って、以下の手順で実施した。

(a) 燃焼半径の算出

燃焼面積と同じ面積を持つ円を底面とする円筒火炎を想定して算出したところ、1.258 m となった。

$$R = \sqrt{S/\pi} = \sqrt{4.97/\pi} = 1.258 \quad (\text{m})$$

R：燃焼半径(m)，S：燃焼面積(m²)

(b) 形態係数の算出

下記の式に基づき、円筒火炎に対する形態係数の算出方法に従って算出したところ、0.004247 となった。

$$\phi = \frac{1}{\pi n} \tan^{-1} \left(\frac{m}{\sqrt{n^2-1}} \right) + \frac{m}{\pi} \left[\frac{(A-2n)}{n\sqrt{AB}} \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{A(n-1)}{B(n+1)}} \right) - \frac{1}{n} \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{(n-1)}{(n+1)}} \right) \right]$$

$$A = (1+n)^2 + m^2$$

$$B = (1-n)^2 + m^2$$

$$m = H/R$$

$$n=L/R$$

ϕ : 形態係数, H : 火炎長 (m), L : 離隔距離 (m)

(c) 輻射強度の算出

下記の式に基づき算出したところ 178.374 W/m² となり, 切り上げて約 178.4 W/m² とした。

$$E=R_f \cdot \phi = 42000 \times 0.004247 = 178.374 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

E : 輻射強度 (W/m²), R_f : 火炎輻射強度 (W/m²)

(d) 燃焼継続時間の算出

下記の式に基づき算出したところ 4059.6 s となり, 切り上げて約 4060 s とした。

$$t = \frac{V}{\pi R^2 \times v} = 1.031 / (4.97 \times 0.0000511) = 4059.6 \Rightarrow 4060 \text{ (s)}$$

$$\text{ここで, } v = \frac{m}{\rho} = \frac{0.044}{860} = 0.000051163 \Rightarrow 0.0000511, \pi R^2 \doteq S = 4.97$$

t : 燃焼継続時間 (s), V : 燃料量 (m³), v : 燃焼速度 (m/s),

m : 質量低下速度 (kg/m²/s), ρ : 燃料密度 (kg/m³)

(4) 貯蔵施設への影響評価結果

(a)～(d)にて求めたパラメータにより, 伝熱工学資料第5版に記載の半無限固体の非定常温度分布の式を用いて, 貯蔵建屋外壁温度分布を評価した。

$$T(x)-T_0 = \frac{2E\sqrt{\kappa t}}{k} \left[\frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{4\kappa t}\right) - \frac{x}{2\sqrt{\kappa t}} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\kappa t}}\right) \right]$$

T(x): 表面から x (m) の位置の温度 (°C), T₀: 初期温度 (=50 °C),

k : 熱伝導率 (W/m/K), κ : 温度拡散率 ($\kappa = k / \rho C_p$) (m²/s),

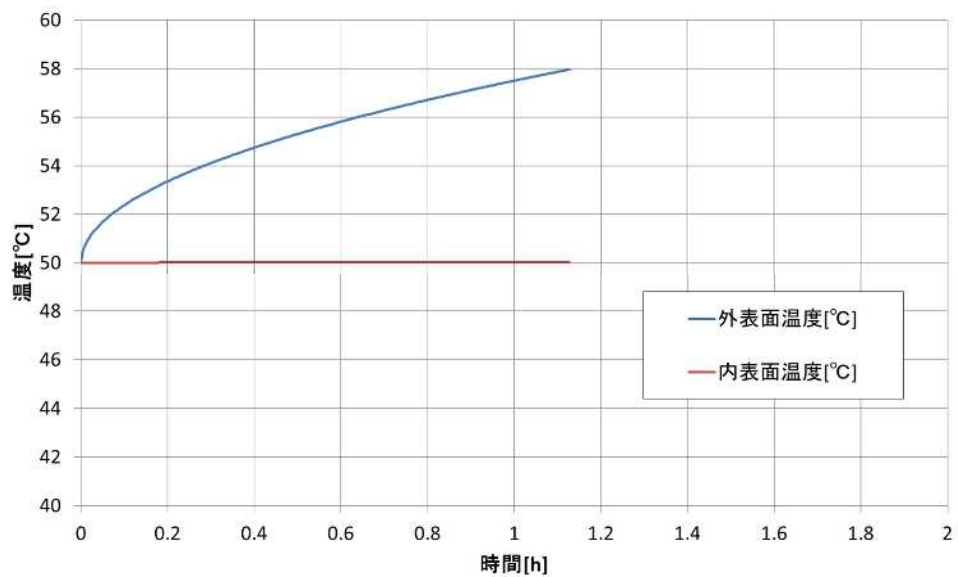
ρ : 密度 (kg/m³), C_p : 比熱 (J/kg/K)

貯蔵建屋外壁初期温度を 50°C として, 上式により外壁温度上昇量を評価したところ, 約 8°C となり, 貯蔵建屋外壁温度の評価結果は約 58°C となった。

本評価結果はコンクリート許容温度である 200°C を下回っており,

これによりエンジン発電機からの火災に関して貯蔵建屋への影響はないことを確認した。

第 44 図に時間に対する温度変化を示す。



第 44 図 貯蔵建屋外壁温度変化（エンジン発電機）

4.2.3 電源車及び据置型発電機の火災評価

貯蔵施設においては、事業者の自主的な取組みとして電気設備に電源車を接続することが可能な設計とし、無停電電源装置の給電可能時間を超える長時間の停電が発生した場合におけるバックアップとして電源車1台及び据置型発電機を設置することとしている（第45図）。この電源車及び据置型発電機に付随している燃料用の軽油タンク及びエンジン潤滑油タンクから火災が発生した際の影響評価を行った。電源車は法面の上部に設置されているが、本評価では貯蔵建屋と同標高に設置されているものと仮定して評価を実施した。



第45図 電源車及び据置型発電機設置位置

(1) 火災発生源に関する入力データ

燃料の種類：軽油及び潤滑油であるが、保守性を考慮してすべて軽油とみなした。

燃料量：電源車：軽油 + 潤滑油(車 + 発電機)

$$= 0.25 + 0.03 + 0.0065 = 0.2865 \text{ (k}\ell\text{)}$$

据置型発電機：軽油 0.49 (kℓ) + 潤滑油 0.061 (kℓ)

$$= 0.551 \text{ (k}\ell\text{)}$$

$$\rightarrow \text{合計} : 0.2865 + 0.551 = 0.8375 \text{ (k}\ell\text{)}$$

火炎輻射強度：42000 (W/m²) ※ガイド付属書 B の軽油の値

質量低下速度：0.044 (kg/m²/s) ※NUREG-1805 の Diesel Oil の値

燃料密度：860 (kg/m³) ※JIS K 2204-2007

燃焼面積：20.754 (m²) ※電源車及び据置型発電機の寸法
合計より算出

(2) 貯蔵建屋に関する入力データ

貯蔵建屋からの離隔距離：70 (m)

貯蔵建屋外壁の熱的物性：

密度：2400 (kg/m³)

比熱：900 (J/kg/K)

熱伝導率：1.2 (W/m/K)

※伝熱工学資料第 5 版の石灰岩コンクリートの値

(3) 評価方法

ガイド付属書 B「石油コンビナート等火災・爆発の原子力発電所への影響評価について」を参考とし、以下の手順で実施した。

(a) 燃焼半径の算出

電源車及び据置型発電機の面積と同じ面積を持つ円を底面とする円筒火炎を想定して算出したところ、2.571 m となった。

$$R = \sqrt{S/\pi} = \sqrt{20.754/\pi} = 2.571 \text{ (m)}$$

R：燃焼半径(m)，S：燃焼面積(m²)

(b) 形態係数の算出

下記の式に基づき、円筒火炎に対する形態係数の算出方法に従っ

て算出したところ，0.002632 となった。

$$\phi = \frac{1}{\pi n} \tan^{-1} \left(\frac{m}{\sqrt{n^2-1}} \right) + \frac{m}{\pi} \left[\frac{(A-2n)}{n\sqrt{AB}} \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{A(n-1)}{B(n+1)}} \right) - \frac{1}{n} \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{(n-1)}{(n+1)}} \right) \right]$$

$$A = (1+n)^2 + m^2$$

$$B = (1-n)^2 + m^2$$

$$m = H/R$$

$$n = L/R$$

ϕ : 形態係数, H : 火炎長 (m), L : 離隔距離 (m)

(c) 輻射強度の算出

下記の式に基づき算出したところ 110.544 W/m² となり，切り上げて約 110.6 W/m² とした。

$$E = R_f \cdot \phi = 42000 \times 0.002632 = 110.544 \Rightarrow 110.6 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

E : 輻射強度 (W/m²), R_f : 火炎輻射強度 (W/m²)

(d) 燃焼継続時間の算出

下記の式に基づき算出したところ 789.7 s となり，切り上げて約 790 s とした。

$$t = \frac{V}{\pi R^2 \times v} = 0.8375 / (20.754 \times 0.0000511) = 789.7 \Rightarrow 790 \text{ (s)}$$

ここで, $v = \frac{m}{\rho} = \frac{0.044}{860} = 0.000051163 \Rightarrow 0.0000511$, $\pi R^2 \doteq S = 20.754$

t : 燃焼継続時間 (s), V : 燃料量 (m³), v : 燃焼速度 (m/s),

m : 質量低下速度 (kg/m²/s), ρ : 燃料密度 (kg/m³)

(4) 貯蔵施設への影響評価結果

(a) ~ (d) にて求めたパラメータにより，伝熱工学資料第 5 版に記載の半無限固体の非定常温度分布の式を用いて，貯蔵建屋外壁温度分布を評価した。

$$T(x) - T_0 = \frac{2E\sqrt{\kappa t}}{k} \left[\frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{4\kappa t}\right) - \frac{x}{2\sqrt{\kappa t}} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\kappa t}}\right) \right]$$

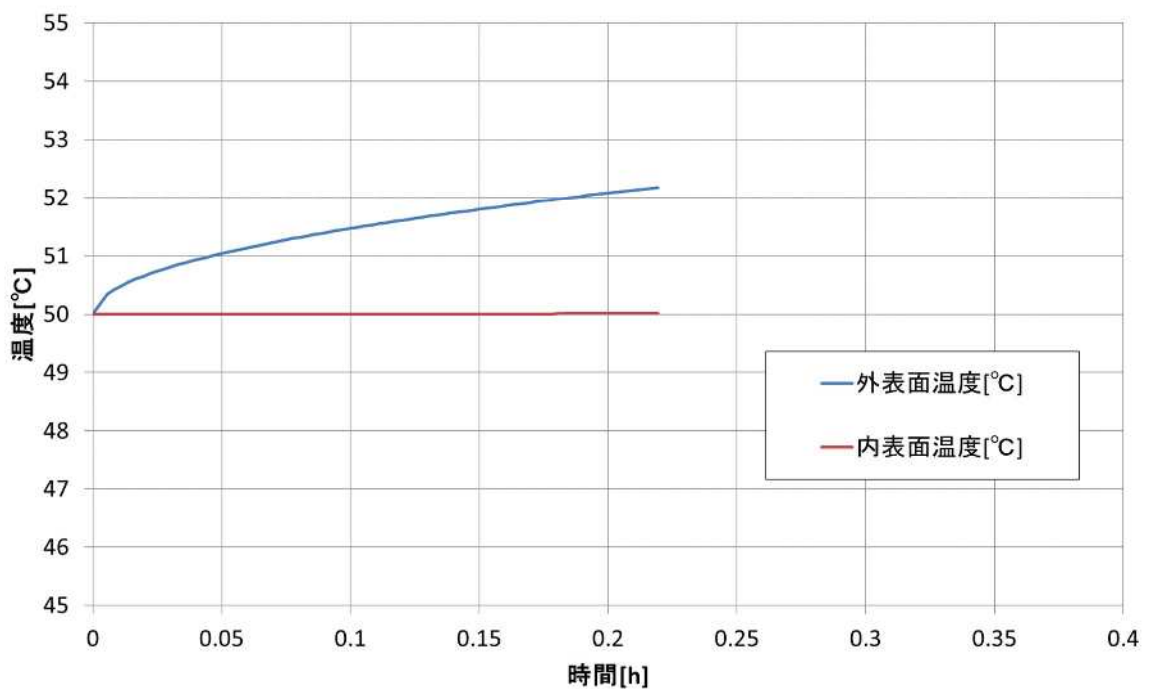
T(x) : 表面から x (m) の位置の温度 (°C), T₀ : 初期温度 (=50 °C),

k : 熱伝導率 (W/m/K), κ : 温度拡散率 ($\kappa = k / \rho C_p$) (m^2/s),
 ρ : 密度 (kg/m^3), C_p : 比熱 (J/kg/K)

貯蔵建屋外壁初期温度を $50^{\circ}C$ として, 上式により外壁温度上昇量を評価したところ, 約 $3^{\circ}C$ となり, 貯蔵建屋外壁温度の評価結果は約 $53^{\circ}C$ となった。

本評価結果はコンクリート許容温度である $200^{\circ}C$ を下回っており, これにより電源車及び据置型発電機からの火災に関して貯蔵建屋への影響はないことを確認した。

第 46 図に時間に対する温度変化を示す。



第 46 図 貯蔵建屋外壁温度変化 (電源車及び据置型発電機)

4.2.4 キャスク輸送車両の火災評価

貯蔵施設敷地内の特殊車両庫には、キャスク搬送用の特殊車両として、キャスク輸送車両（6軸48輪式自走式ディーゼルエンジン車）2両が常時特殊車両庫に配備される予定となっている（第47図）。この車両に付随している燃料用の軽油タンク及びエンジン潤滑油タンクから火災が発生した際の影響評価を行った。



第47図 特殊車両庫設置位置

(1) 火災発生源に関する入力データ

燃料の種類：軽油及び作動油であるが、保守性を考慮してすべて軽油とみなした。

燃料量：1.08 (kℓ)

(燃料タンク 0.3 (kℓ) + 作動油タンク 0.24 (kℓ)) × 2

火炎輻射強度：42000 (W/m²) ※ガイド付属書Bの軽油の値

質量低下速度：0.044 (kg/m²/s) ※NUREG-1805のDiesel Oilの値

燃料密度：860 (kg/m³)

※JIS K 2204-2007

燃焼面積：60.5 (m²)

※車両の寸法より算出

(全長 9.48m, 全幅 3.19m) × 2 台)

(2) 貯蔵建屋に関する入力データ

貯蔵建屋からの離隔距離：107 (m)

貯蔵建屋外壁の熱的物性：

密度：2400 (kg/m³)

比熱：900 (J/kg/K)

熱伝導率：1.2 (W/m/K)

※伝熱工学資料第5版の石灰岩コンクリートの値

(3) 評価方法

ガイド付属書 B「石油コンビナート等火災・爆発の原子力発電所への影響評価について」を参考とし、以下の手順で実施した。

(a) 燃焼半径の算出

車両 2 両の面積と同じ面積を持つ円を底面とする円筒火炎を想定して算出したところ、4.389 m となった。

$$R = \sqrt{S/\pi} = \sqrt{60.5/\pi} = 4.389 \quad (\text{m})$$

R：燃焼半径(m)，S：燃焼面積(m²)

(b) 形態係数の算出

下記の式に基づき、円筒火炎に対する形態係数の算出方法に従って算出したところ、0.003287 となった。

$$\phi = \frac{1}{\pi n} \tan^{-1} \left(\frac{m}{\sqrt{n^2-1}} \right) + \frac{m}{\pi} \left[\frac{(A-2n)}{n\sqrt{AB}} \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{A(n-1)}{B(n+1)}} \right) - \frac{1}{n} \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{(n-1)}{(n+1)}} \right) \right]$$

$$A = (1+n)^2 + m^2$$

$$B = (1-n)^2 + m^2$$

$$m = H/R$$

$$n=L/R$$

ϕ : 形態係数, H : 火炎長 (m), L : 離隔距離 (m)

(c) 輻射強度の算出

下記の式に基づき算出したところ 138.054 W/m² となり, 切り上げて約 138.1 W/m² とした。

$$E=R_f \cdot \phi = 42000 \times 0.003287 = 138.054 \Rightarrow 138.1 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

E : 輻射強度 (W/m²), R_f : 火炎輻射強度 (W/m²)

(d) 燃焼継続時間の算出

下記の式に基づき算出したところ 349.3 s となり, 切り上げて約 350 s とした。

$$t = \frac{V}{\pi R^2 \times v} = 1.08 / (60.5 \times 0.0000511) = 349.3 \Rightarrow 350 \text{ (s)}$$

$$\text{ここで, } v = \frac{m}{\rho} = \frac{0.044}{860} = 0.000051163 \Rightarrow 0.0000511, \pi R^2 \doteq S = 60.5$$

t : 燃焼継続時間 (s), V : 燃料量 (m³), v : 燃焼速度 (m/s),

m : 質量低下速度 (kg/m²/s), ρ : 燃料密度 (kg/m³)

(4) 貯蔵施設への影響評価結果

(a)～(d)にて求めたパラメータにより, 伝熱工学資料第5版に記載の半無限固体の非定常温度分布の式を用いて, 貯蔵建屋外壁温度分布を評価した。

$$T(x) - T_0 = \frac{2E\sqrt{\kappa t}}{k} \left[\frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{4\kappa t}\right) - \frac{x}{2\sqrt{\kappa t}} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\kappa t}}\right) \right]$$

T(x) : 表面から x (m) の位置の温度 (°C), T₀ : 初期温度 (=50 °C),

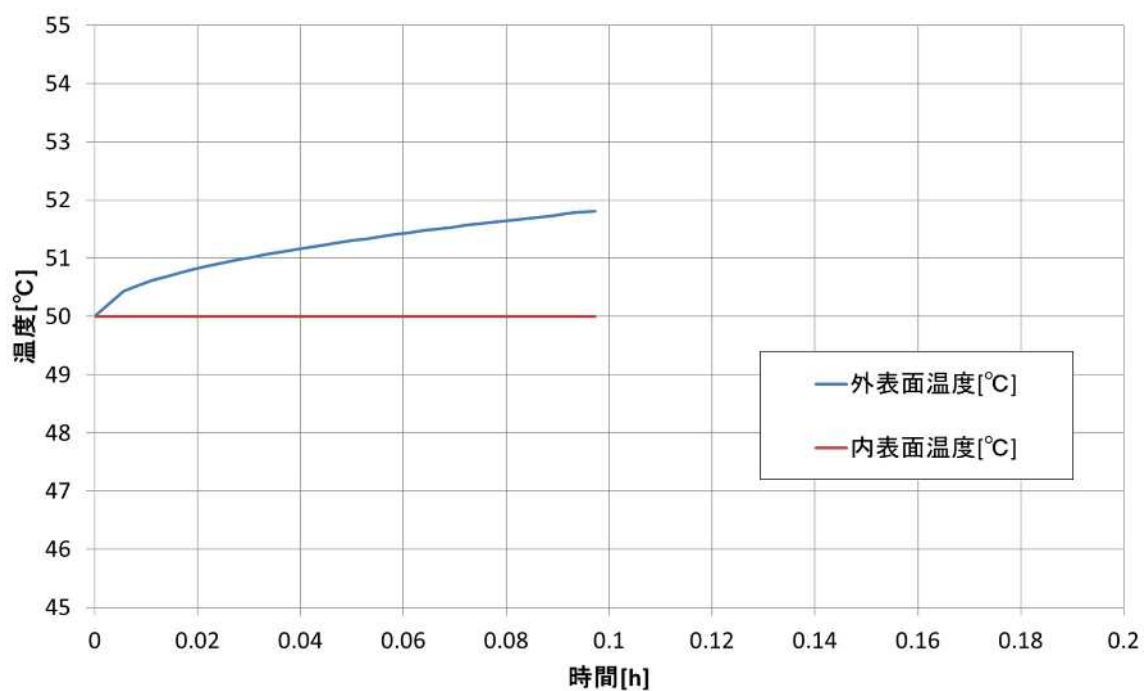
k : 熱伝導率 (W/m/K), κ : 温度拡散率 ($\kappa = k / \rho C_p$) (m²/s),

ρ : 密度 (kg/m³), C_p : 比熱 (J/kg/K)

貯蔵建屋外壁初期温度を 50°C とし, 上式により外壁温度上昇量を評価したところ, 約 2°C となり, 貯蔵建屋外壁温度の評価結果は約 52°C となった。

本評価結果はコンクリート許容温度である 200°Cを下回っており、これによりキャスク輸送車両からの火災に関して貯蔵建屋への影響はないことを確認した。

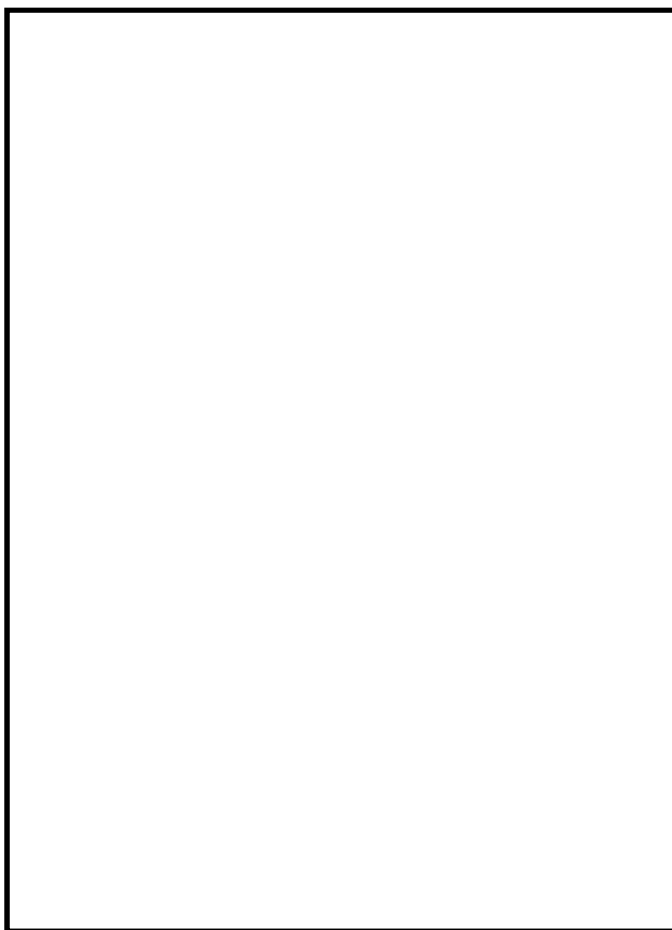
第 48 図に、時間に対する温度変化を示す。



第 48 図 貯蔵建屋外壁温度変化（キャスク輸送車両）

4.2.5 モニタリングポスト用発電機の火災評価

貯蔵施設においては，周辺監視区域境界に外部放射線監視のためのモニタリングポスト（MP）が2箇所（貯蔵建屋東側及び南側）設置されており，常時監視のため発電機（据置型ディーゼル発電機）がそれぞれ備え付けられている（第49図）。この発電機に付随している燃料用の軽油タンク及びエンジン潤滑油タンクから火災が発生した際の影響評価を行った。なお，設置されている発電機は同型式のものである。いずれのMPも法面の上部に設置されているが，本評価では貯蔵建屋と同標高に設置されているものと仮定して評価を実施した。



第49図 モニタリングポスト用発電機設置位置

(1) 火災発生源に関する入力データ（東側，南側とも同じ）

燃料の種類：軽油及び潤滑油であるが，保守性を考慮してすべて

軽油とみなした。

燃料量：0.0696 (kℓ)

(燃料タンク 0.062 (kℓ) + 潤滑油タンク 0.0076 (kℓ))

火炎輻射強度：42000 (W/m²) ※ガイド付属書 B の軽油の値

質量低下速度：0.044 (kg/m²/s) ※NUREG-1805 の Diesel Oil の値

燃料密度：860 (kg/m³) ※JIS K 2204-2007

燃焼面積：1.001 (m²) ※発電機の寸法より算出

(2) 貯蔵建屋に関する入力データ

貯蔵建屋からの離隔距離：東側 138 (m)

南側 164 (m)

貯蔵建屋外壁の熱的物性：

密度：2400 (kg/m³)

比熱：900 (J/kg/K)

熱伝導率：1.2 (W/m/K)

※伝熱工学資料第 5 版の石灰岩コンクリートの値

(3) 評価方法

ガイド付属書 B「石油コンビナート等火災・爆発の原子力発電所への影響評価について」を参考とし、以下の手順で実施した。

(a) 燃焼半径の算出

燃焼面積と同じ面積を持つ円を底面とする円筒火炎を想定して算出したところ、東側、南側とも 0.565 m となった。

$$R = \sqrt{S/\pi} = \sqrt{1.001/\pi} = 0.565 \quad (\text{m})$$

R：燃焼半径(m)， S：燃焼面積(m²)

(b) 形態係数の算出

下記の式に基づき、円筒火炎に対する形態係数の算出方法に従って算出したところ、東側： 3.212×10^{-5} 、南側： 2.273×10^{-5} と

なった。

$$\phi = \frac{1}{\pi n} \tan^{-1} \left(\frac{m}{\sqrt{n^2-1}} \right) + \frac{m}{\pi} \left[\frac{(A-2n)}{n\sqrt{AB}} \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{A(n-1)}{B(n+1)}} \right) - \frac{1}{n} \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{(n-1)}{(n+1)}} \right) \right]$$

$$A = (1+n)^2 + m^2$$

$$B = (1-n)^2 + m^2$$

$$m = H/R$$

$$n = L/R$$

ϕ : 形態係数, H : 火炎長 (m), L : 離隔距離 (m)

(c) 輻射強度の算出

下記の式に基づき算出したところ,

東側 : $E = R_f \cdot \phi = 42000 \times 3.212 \times 10^{-5} = 1.3490 \text{ W/m}^2$ となり,
切り上げて約 1.4 W/m^2 とした。

南側 : $E = R_f \cdot \phi = 42000 \times 2.273 \times 10^{-5} = 0.9547 \text{ W/m}^2$ となり,
切り上げて約 1.0 W/m^2 とした。

E : 輻射強度 (W/m^2), R_f : 火炎輻射強度 (W/m^2)

(d) 燃焼継続時間の算出

下記の式に基づき算出したところ 1360.7 s となり, 切り上げて約 1361 s とした。

$$t = \frac{V}{\pi R^2 \times v} = 0.0696 / (1.001 \times 0.0000511) = 1360.7 \Rightarrow 1361 \text{ (s)}$$

ここで, $v = \frac{0.044}{860} = 0.000051163 \Rightarrow 0.0000511$, $\pi R^2 \doteq S = 1.001$

t : 燃焼継続時間 (s), V : 燃料量 (m^3), v : 燃焼速度 (m/s),

m : 質量低下速度 ($\text{kg/m}^2/\text{s}$), ρ : 燃料密度 (kg/m^3)

(4) 貯蔵施設への影響評価結果

(a) ~ (d) にて求めたパラメータにより, 伝熱工学資料第5版に記載の半無限固体の非定常温度分布の式を用いて, 貯蔵建屋外壁温度分布を評価した。

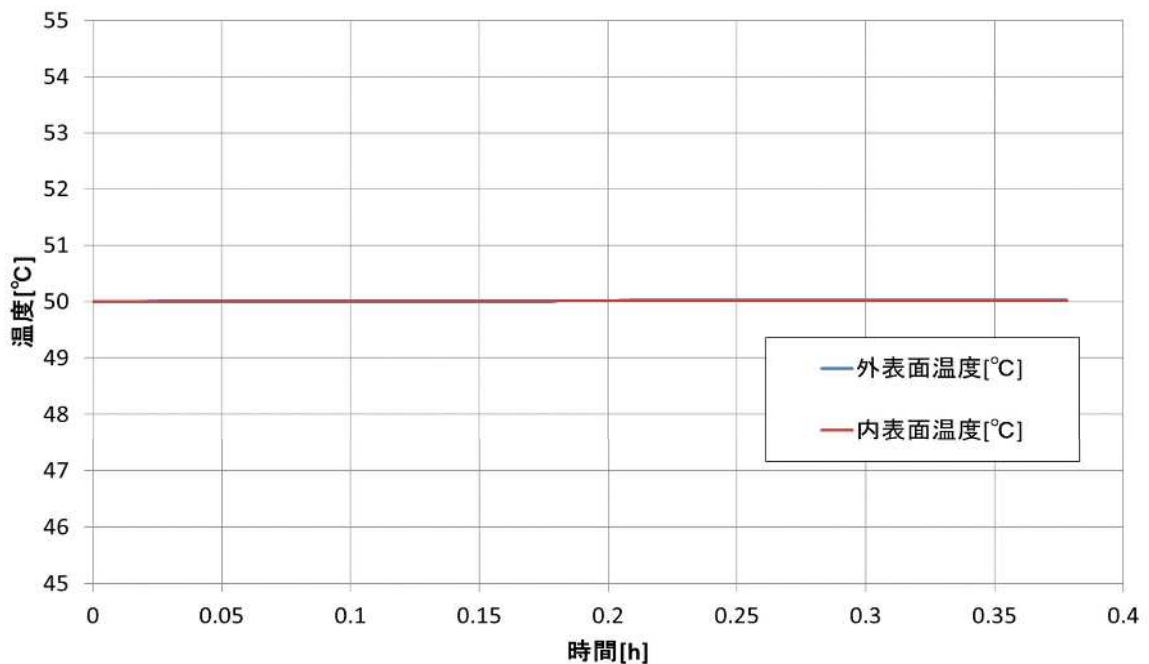
$$T(x)-T_0 = \frac{2E\sqrt{\kappa t}}{k} \left[\frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{4\kappa t}\right) - \frac{x}{2\sqrt{\kappa t}} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\kappa t}}\right) \right]$$

$T(x)$: 表面から x (m) の位置の温度 (°C), T_0 : 初期温度 (=50 °C),
 k : 熱伝導率 (W/m/K), κ : 温度拡散率 ($\kappa = k / \rho C_p$) (m²/s),
 ρ : 密度 (kg/m³), C_p : 比熱 (J/kg/K)

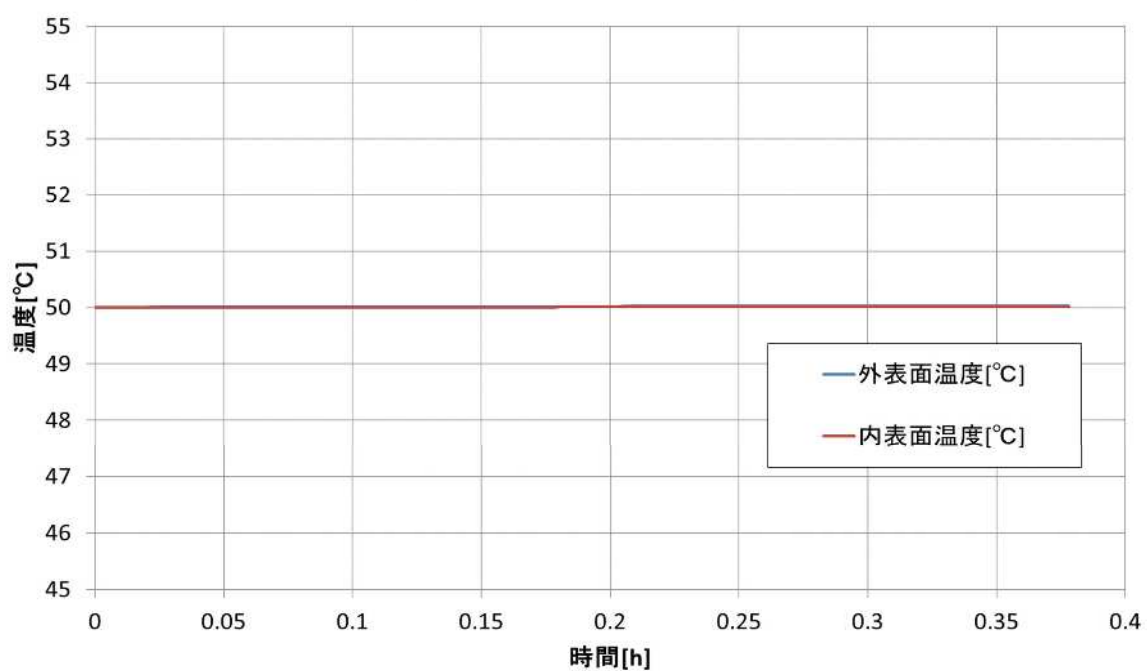
貯蔵建屋外壁初期温度を 50°C とし、上式により外壁温度上昇量を評価したところ、東側、南側とも約 1°C となり、貯蔵建屋外壁温度の評価結果は約 51°C となった。

本評価結果はコンクリート許容温度である 200°C を下回っており、これによりモニタリングポスト用発電機からの火災に関して貯蔵建屋への影響はないことを確認した。

第 50 図、第 51 図に、時間に対する温度変化を示す。



第 50 図 貯蔵建屋外壁温度変化
(モニタリングポスト用発電機 東側)

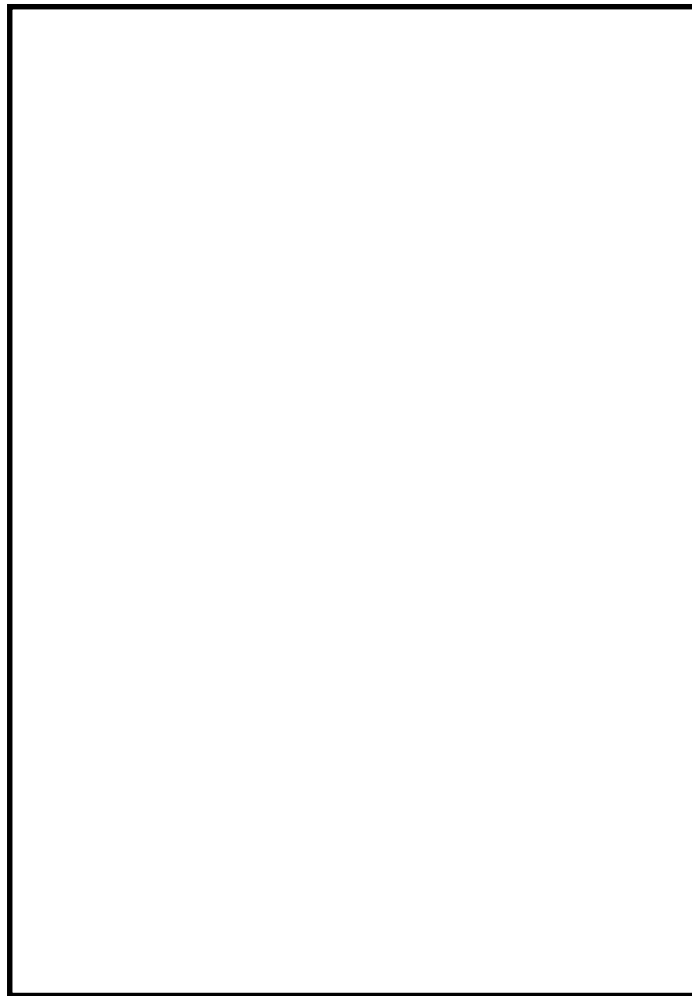


第 51 図 貯蔵建屋外壁温度変化
 (モニタリングポスト用発電機 南側)

4.2.6 電源車の火災評価

貯蔵建屋南側の敷地高台に予備緊急時対策所を設置する。4.2.3で評価した電源車及び据置発電機の電源車を、通常時には予備緊急時対策所の設置場所に配備する予定である。第52図に示すとおり貯蔵建屋と電源車の距離は少なくとも100m以上離れた位置になるため、離隔距離を100mとして影響評価を行った。

また、設置位置は貯蔵建屋より標高の高い地点であるが、本評価ではいずれも貯蔵建屋と同標高に設置されているものと仮定して評価を実施した。



第52図 電源車配備予定位置

(1) 火災発生源に関する入力データ

燃料の種類：軽油及び潤滑油であるが、保守性を考慮してすべて軽油とみなした。

燃料量：0.2865 (kℓ) (0.25+0.03+0.0065=0.2865)

火炎輻射強度：42000 (W/m²) ※ガイド付属書 B の軽油の値

質量低下速度：0.044 (kg/m²/s) ※NUREG-1805 の Diesel Oil の値

燃料密度：860 (kg/m³) ※JIS K 2204-2007

燃焼面積：14.874 (m²) ※電源車の寸法より算出

(2) 貯蔵建屋に関する入力データ

貯蔵建屋からの離隔距離：100 (m)

貯蔵建屋外壁の熱的物性：

密度：2400 (kg/m³)

比熱：900 (J/kg/K)

熱伝導率：1.2 (W/m/K)

※伝熱工学資料第5版の石灰岩コンクリートの値

(3) 評価方法

ガイド付属書 B「石油コンビナート等火災・爆発の原子力発電所への影響評価について」を参考とし、以下の手順で実施した。

(a) 燃焼半径の算出

燃焼面積と同じ面積を持つ円を底面とする円筒火炎を想定して算出したところ、2.176 m となった。

$$R = \sqrt{S/\pi} = \sqrt{14.874/\pi} = 2.176 \quad (\text{m})$$

R：燃焼半径(m)， S：燃焼面積(m²)

(b) 形態係数の算出

下記の式に基づき、円筒火炎に対する形態係数の算出方法に従って算出したところ、0.0009175 となった。

$$\phi = \frac{1}{\pi n} \tan^{-1} \left(\frac{m}{\sqrt{n^2-1}} \right) + \frac{m}{\pi} \left[\frac{(A-2n)}{n\sqrt{AB}} \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{A(n-1)}{B(n+1)}} \right) - \frac{1}{n} \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{(n-1)}{(n+1)}} \right) \right]$$

$$A = (1+n)^2 + m^2$$

$$B = (1-n)^2 + m^2$$

$$m = H/R$$

$$n = L/R$$

ϕ : 形態係数, H : 火炎長 (m), L : 離隔距離 (m)

(c) 輻射強度の算出

下記の式に基づき算出したところ, 38.535 W/m²となり, 切り上げて 38.6 W/m²とした。

$$E = R_f \cdot \phi = 42000 \times 0.0009175 = 38.535 \Rightarrow 38.6 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

E : 輻射強度 (W/m²), R_f : 火炎輻射強度 (W/m²)

(d) 燃焼継続時間の算出

下記の式に基づき算出したところ 376.9 s となり, 切り上げて約 377 s とした。

$$t = \frac{V}{\pi R^2 \times v} = 0.2865 / (14.874 \times 0.0000511) = 376.9 \Rightarrow 377 \text{ (s)}$$

ここで, $v = \frac{m}{\rho} = \frac{0.044}{860} = 0.000051163 \Rightarrow 0.0000511$, $\pi R^2 \doteq S = 14.874$

t : 燃焼継続時間 (s), V : 燃料量 (m³), v : 燃焼速度 (m/s),

m : 質量低下速度 (kg/m²/s), ρ : 燃料密度 (kg/m³)

(4) 貯蔵施設への影響評価結果

(a)～(d)にて求めたパラメータにより, 伝熱工学資料第5版に記載の半無限固体の非定常温度分布の式を用いて, 貯蔵建屋外壁温度分布を評価した。

$$T(x) - T_0 = \frac{2E\sqrt{\kappa t}}{k} \left[\frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{4\kappa t}\right) - \frac{x}{2\sqrt{\kappa t}} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\kappa t}}\right) \right]$$

T(x) : 表面から x (m) の位置の温度 (°C), T₀ : 初期温度 (=50 °C),

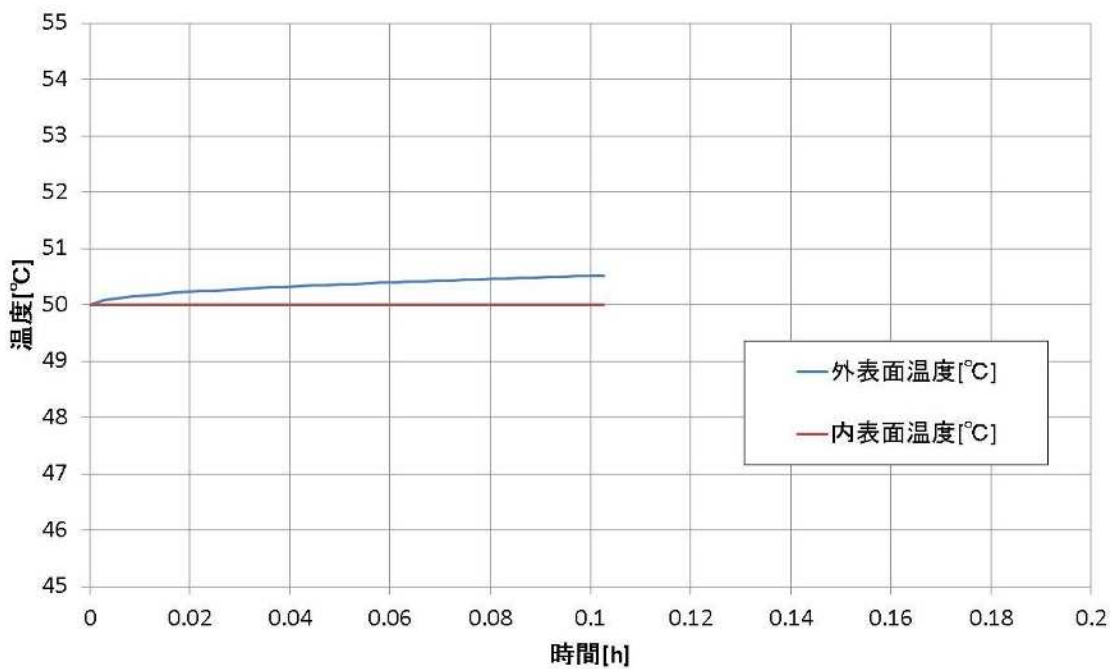
k : 熱伝導率 (W/m/K), κ : 温度拡散率 ($\kappa = k / \rho C_p$) (m²/s),

ρ : 密度 (kg/m³), C_p : 比熱 (J/kg/K)

貯蔵建屋外壁初期温度を 50℃として, 上式により外壁温度上昇量を評価したところ, 約 1℃となり, 貯蔵建屋外壁温度の評価結果は約 51℃となった。

本評価結果はコンクリート許容温度である 200℃を下回っており, 電源車からの火災に関して貯蔵建屋への影響はないことを確認した。

第 53 図に, 時間に対する温度変化を示す。



第 53 図 貯蔵建屋外壁温度変化 (電源車)

4.2.7 評価結果まとめ

前項までに評価した, 敷地内の各危険物貯蔵設備における火災に対する評価結果について, まとめて第 28 表に示す。

第 28 表 敷地内危険物貯蔵設備における火災評価結果

対象設備 パラメータ	エンジン 発電機	電源車及び 据置型発電機	キャスク輸送 車両 (2両)	MP用 発電機		電源車
				東側	南側	
貯蔵建屋か らの離隔距 離(m)	27	70	107	138	164	100
燃 焼 半 径 (m)	1.258	2.571	4.389	0.565		2.176
形態係数	0.004247	0.002632	0.003287	3.212×10^{-5}	2.273×10^{-5}	0.0009175
輻 射 強 度 (W/m ²)	178.4	110.6	138.1	1.4	1.0	38.6
燃 焼 継 続 時 間(s)	4060	790	350	1361		377
外 壁 温 度 (°C)	58	53	52	51	51	51

評価結果より、敷地内危険物貯蔵設備の火災においては貯蔵建屋から最も近い離隔距離であるエンジン発電機からの火災が最も厳しい評価結果となったが、貯蔵建屋外壁の許容温度をいずれも下回っていることを確認した。

5. 航空機墜落による火災の影響評価について

5.1 評価の考え方

航空機墜落による火災の貯蔵建屋への影響評価については、ガイド附属書 C「原子力発電所の敷地内への航空機墜落による火災の影響評価について」に基づき評価を実施した。

評価対象とする航空機の選定については、「航空機落下事故に関するデータの整備」（独立行政法人 原子力安全基盤機構，JNES/SAE08-01208 解部報-0012，平成 20 年 3 月）のデータをもとに，過去の国内における墜落事故の実績を，航空機の種類，飛行形態に応じてカテゴリ別に分類する。具体的には，民間航空機については計器飛行方式（大型固定翼機）と有視界飛行方式（大型固定翼機，小型固定翼機，大型回転翼機，小型回転翼機），自衛隊機又は米軍機については大型／小型固定翼機，大型／小型回転翼機を訓練空域内／外及び基地から訓練空域への往復時のカテゴリに分けて，それぞれ S62～H18 の 20 年間における事故件数を調査した。事故件数が 0 の場合は，保守的に件数を 0.5 とした。ただし，自衛隊機又は米軍機では訓練空域外を飛行中の事故，基地－訓練空域往復中の事故があり，民間航空機とはその発生状況が必ずしも同一ではないこと，また自衛隊機又は米軍機の中においても機種により飛行形態が同一でないと考えられることから，これらの状況も踏まえて自衛隊機又は米軍機については攻撃性の少ない高高度飛行を行う大型固定翼機とそれ以外の機種を分けてカテゴリ分けを実施した。

これらカテゴリ別の事故件数から，それぞれの墜落確率を求めた結果について第 29 表に示す。計器飛行方式の民間航空機の墜落確率の算出にあたっては貯蔵施設上空にかかる航空路の延べ飛行距離が必要であるため，国土交通省の航空輸送統計年報（S63～H19 分）のデータをもとに積算を行った。また，貯蔵施設上空には自衛隊機又は米軍機の訓練空域はないことから，訓練空域内の墜落事故については除外した。

第 29 表 カテゴリ別の航空機墜落確率の一覧

カテゴリ		墜落確率 (回／施設・年)	
民間航空機	①計器飛行方式（大型固定翼機）	9.20×10^{-10}	
	有視界方式	②大型固定翼機	1.09×10^{-9}
		③その他機種*1	1.11×10^{-8}
自衛隊機又は米軍機	訓練空域外の墜落事故*2	④高高度飛行*3を行う大型固定翼機	1.79×10^{-9}
		⑤その他の機種*1	1.52×10^{-8}
	⑥基地－訓練空域往復時の墜落事故	2.13×10^{-8}	

*1:小型固定翼機，大型回転翼機，小型回転翼機

*2:貯蔵施設上空には自衛隊機，米軍機の訓練空域はない

*3:高度 5 万フィート以上の飛行（空中給油機，哨戒機）

墜落のカテゴリについては上記のとおり①～⑥の 6 つに分類したが、このうち有視界方式民間航空機における②大型固定翼機，及び③その他の機種（小型固定翼機，大型回転翼機，小型回転翼機）については、いずれも自衛隊機又は米軍機の訓練空域外墜落事故における機種④及び⑤と同等あるいは燃料量の小さい機種であり，墜落確率もそれぞれ自衛隊機又は米軍の確率より小さいことから，有視界方式民間航空機の各カテゴリについては，より墜落確率の高い自衛隊機又は米軍機の訓練空域外墜落事故の同機種のカテゴリに包絡されるものとした。（②は④に包絡，③は⑤に包絡）

したがって，航空機墜落確率におけるカテゴリについてはさらに以下の 4 つに分類した。

- ① 民間航空機（計器飛行方式）の墜落事故
- ④ 自衛隊機又は米軍機（訓練空域外のうち高高度飛行を行う大型固定翼機）の墜落事故（民間航空機（有視界方式）のうち大型固定翼機を包絡）
- ⑤ 自衛隊機又は米軍機（訓練空域外のうちその他の機種）の墜落事故（民間航空機（有視界方式）のうちその他機種を包絡）
- ⑥ 自衛隊機又は米軍機（基地－訓練空域間往復時）の墜落事故

分類した4つのカテゴリにおいて、燃料積載量が最大となる機種をそれぞれ選定した。評価対象とする航空機の選定結果について第30表に示す。

第30表 評価対象航空機の選定結果

評価項目	民間航空機 (計器飛行方式)	自衛隊機又は 米軍機 (訓練空域外 高高度飛行)	自衛隊機又は 米軍機 (訓練空域外そ 他の機種)	自衛隊機又は 米軍機 (基地-訓練 空域間往復時)
対象航空機	B747-400	KC-767(注1)	F-15(注2)	UH-60J(注3)

(注1) ボーイング767型機を母機とした空中給油・輸送機(航空自衛隊に配備)

(注2) 制空戦闘機(米空軍, 航空自衛隊に配備)

(注3) 海上自衛隊大湊飛行場に現状配備されている機種で最大の燃料搭載量となる救難ヘリコプター

5.2 評価方法及び評価結果

5.2.1 民間航空機(計器飛行方式)の墜落事故の火災評価

5.2.1.1 墜落地点の想定

(1) 標的面積

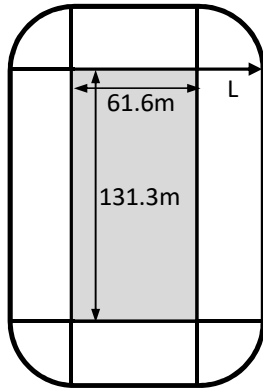
「実用発電用原子炉施設への航空機落下確率の評価基準について」に基づき、墜落確率 10^{-7} (回/炉・年) に相当する標的面積を算出する。貯蔵建屋の標的面積は 0.0081 km^2 であることから、航空機の墜落確率が 10^{-7} (回/炉・年) となる標的面積 S を算出すると、

$$S = 10^{-7} / (9.20 \times 10^{-10}) \times 0.0081 \times 1000^2 = 880434.79 \text{ (m}^2\text{)}$$

となる。

(2) 離隔距離

前項で求めた標的面積より、第54図に示すように離隔距離を算出したところ、 $L = \text{約 } 469 \text{ m}$ となった。



$$\pi L^2 + 2(131.3 + 61.6)L + 131.3 \times 61.6 = S$$

これをLについて解くと

$$L = \frac{-(131.3 + 61.6) + \sqrt{(131.3 + 61.6)^2 - \pi(131.3 \times 61.6 - S)}}{\pi}$$

となる。

第 54 図 離隔距離算出のイメージ

5.2.1.2 火災影響評価

(1) 火災発生源に関する入力データ

想定機種：ボーイング 747-400

燃料の種類：JET A-1

燃料量：216.84 (kℓ) ※ボーイングジャパン web サイト記載値

火災輻射強度：50000 (W/m²) ※ガイド付属書 B の灯油の値

質量低下速度：0.039 (kg/m²/s) ※NUREG-1805 の灯油の値

燃料密度：840 (kg/m³) ※JIS K 2209-1991 の JET A-1 の値

燃焼面積：700 (m²) ※ボーイング社ホームページ資料「747-400 Airplane Characteristics for Airport Planning」記載の同型機の機体図面より主翼底面積及び主翼部分の胴体下部及び水平尾翼部分を足したものを燃焼面積とした。

(2) 貯蔵建屋に関する入力データ

貯蔵建屋からの離隔距離 469 (m)

貯蔵建屋外壁の熱的物性：

密度：2400 (kg/m³)

比熱：900 (J/kg/K)

熱伝導率：1.2 (W/m/K)

※伝熱工学資料第 5 版の石灰岩コンクリートの値

(3) 評価方法

ガイド附属書 C「原子力発電所の敷地内への航空機墜落による火災の影響評価について」に従って、以下の手順で実施した。

(a) 燃焼半径の算出

燃焼面積と同じ面積を持つ円を底面とする円筒火炎を想定して算出したところ、14.928 m となった。

$$R = \sqrt{S/\pi} = \sqrt{700/\pi} = 14.928 \text{ (m)}$$

R : 燃焼半径 (m), S : 燃焼面積 (m²)

(b) 形態係数の算出

ガイドに従い、円筒火炎に対する形態係数の算出方法に従って算出したところ、0.001973 となった。

$$\phi = \frac{1}{\pi n} \tan^{-1} \left(\frac{m}{\sqrt{n^2-1}} \right) + \frac{m}{\pi} \left[\frac{(A-2n)}{n\sqrt{AB}} \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{A(n-1)}{B(n+1)}} \right) - \frac{1}{n} \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{(n-1)}{(n+1)}} \right) \right]$$

$$A = (1+n)^2 + m^2$$

$$B = (1-n)^2 + m^2$$

$$m = H/R$$

$$n = L/R$$

ϕ : 形態係数, H : 火炎長 (m), L : 離隔距離 (m)

(c) 輻射強度の算出

ガイドに従い、次式により算出したところ、98.65 W/m² となり、切り上げて 約 98.7 W/m² とした。

$$E = R_f \cdot \phi = 50000 \times 0.001973 = 98.65 \Rightarrow 98.7 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

E : 輻射強度 (W/m²), R_f : 火炎輻射強度 (W/m²)

(d) 燃焼継続時間の算出

ガイドに従い、次式により算出したところ、6676.1 s となり、切り上げて 約 6677s とした。

$$t = \frac{V}{\pi R^2 \times v} = 216.84 / (700 \times 0.0000464) = 6676.1 \Rightarrow 6677 \text{ (s)}$$

$$\text{ここで, } v = \frac{m}{\rho} = \frac{0.039}{840} = 0.000046429 \Rightarrow 0.0000464, \quad \pi R^2 \doteq S = 700$$

t : 燃焼継続時間 (s), V : 燃料量 (m³), v : 燃焼速度 (m/s),

m : 質量低下速度 (kg/m²/s), ρ : 燃料密度 (kg/m³)

(e) 外壁温度の算出

伝熱工学資料第5版に記載の半無限固体の非定常温度分布の式を用いて外壁温度分布を評価した。

$$T(x) - T_0 = \frac{2E\sqrt{\kappa t}}{k} \left[\frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{4\kappa t}\right) - \frac{x}{2\sqrt{\kappa t}} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\kappa t}}\right) \right]$$

T(x) : 表面から x(m) の位置の温度 (°C), T₀ : 初期温度 (°C),

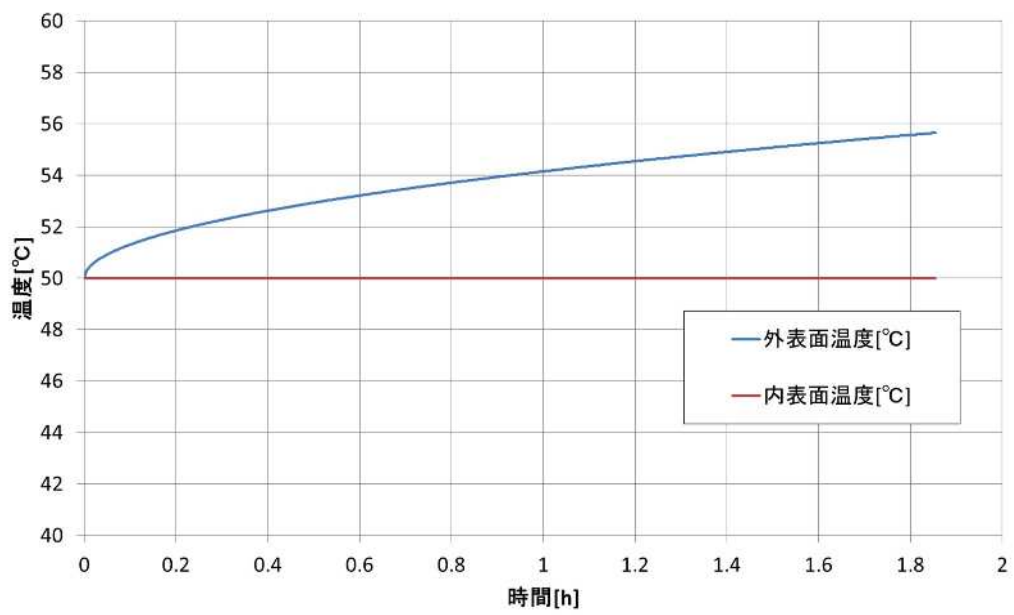
k : 熱伝導率 (W/m/K), κ : 温度拡散率 (κ = k / ρ C_p) (m²/s),

ρ : 密度 (kg/m³), C_p : 比熱 (J/kg/K)

(4) 貯蔵建屋への影響評価

計器飛行方式民間航空機の墜落事故による火災に関して貯蔵建屋への影響評価を行ったところ、貯蔵建屋外壁の最高温度は約 56°C となり許容温度である 200°C を下回ることを確認した。

第 55 図に時間に対する温度変化を示す。



第 55 図 貯蔵建屋外壁温度変化（計器飛行方式民間航空機）

5.2.2 自衛隊機又は米軍機（訓練空域外のうち高高度飛行を行う機種） の墜落事故の火災評価

5.2.2.1 墜落地点の想定

(1) 標的面積

「実用発電用原子炉施設への航空機落下確率の評価基準について」に基づき、墜落確率 10^{-7} （回／炉・年）に相当する標的面積を算出する。貯蔵建屋の標的面積は 0.0081 km^2 であることから、航空機の墜落確率が 10^{-7} （回／炉・年）となる標的面積 S を算出すると、

$$S = 10^{-7} / (1.79 \times 10^{-9}) \times 0.0081 \times 1000^2 = 452513.97 \text{ (m}^2\text{)}$$

となる。

(2) 離隔距離

前項で求めた標的面積より、第 54 図に示すとおり離隔距離を算出したところ、 $L = \text{約 } 319\text{m}$ となった。

5.2.2.2 火災影響評価

(1) 火災発生源に関する入力データ

想定機種：KC-767

燃料の種類：JP-4

燃料量：145.04 (kℓ)

※世界航空機年鑑 2012-2013 記載値

火炎輻射強度：58000 (W/m^2)

※ガイド付属書 B のガソリンの値

質量低下速度：0.051 ($\text{kg/m}^2/\text{s}$)

※NUREG-1805 の JP-4 の値

燃料密度：760 (kg/m^3)

※NUREG-1805 の JP-4 の値

燃焼面積：405.2 (m^2)

※ボーイング社ホームページ資料「767 Airplane Characteristics for Airport Planning」記載の同型機の機体図面より主翼底面積及び胴体下部を燃焼面積と想定し面積を算出した

(2) 貯蔵建屋に関する入力データ

貯蔵建屋からの離隔距離：319 (m)

貯蔵建屋外壁の熱的物性：

密度：2400 (kg/m³)

比熱：900 (J/kg/K)

熱伝導率：1.2 (W/m/K)

※伝熱工学資料第5版の石灰岩コンクリートの値

(3) 評価方法

ガイド附属書C「原子力発電所の敷地内への航空機墜落による火災の影響評価について」に従って、以下の手順で実施した。

(a) 燃焼半径の算出

燃焼面積と同じ面積を持つ円を底面とする円筒火炎を想定して算出したところ、11.357 mとなった。

$$R = \sqrt{S/\pi} = \sqrt{405.2/\pi} = 11.357 \quad (\text{m})$$

R：燃焼半径(m)，S：燃焼面積 (m²)

(b) 形態係数の算出

ガイドに従い、円筒火炎に対する形態係数の算出方法に従って算出したところ、0.002472となった。

$$\phi = \frac{1}{\pi n} \tan^{-1} \left(\frac{m}{\sqrt{n^2-1}} \right) + \frac{m}{\pi} \left[\frac{(A-2n)}{n\sqrt{AB}} \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{A(n-1)}{B(n+1)}} \right) - \frac{1}{n} \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{(n-1)}{(n+1)}} \right) \right]$$

$$A = (1+n)^2 + m^2$$

$$B = (1-n)^2 + m^2$$

$$m = H/R$$

$$n = L/R$$

ϕ ：形態係数，H：火炎長 (m)，L：離隔距離 (m)

(c) 輻射強度の算出

ガイドに従い、次式により算出したところ、143.376 W/m²となり、切り上げて約143.4 W/m²とした。

$$E=R_f \cdot \phi = 58000 \times 0.002472 = 143.376 \Rightarrow 143.4 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

E : 輻射強度 (W/m²), R_f : 火炎輻射強度 (W/m²)

(d) 燃焼継続時間の算出

ガイドに従い, 次式により算出したところ, 5334.5 s となり, 切り上げて約 5335 s とした。

$$t = \frac{V}{\pi R^2 \times v} = 145.04 / (405.2 \times 0.0000671) = 5334.5 \Rightarrow 5335 \text{ (s)}$$

ここで, $v = \frac{m}{\rho} = \frac{0.051}{760} = 0.000067105 \Rightarrow 0.0000671$, $\pi R^2 \doteq S = 405.2$

t : 燃焼継続時間 (s), V : 燃料量 (m³), v : 燃焼速度 (m/s),

m : 質量低下速度 (kg/m²/s), ρ : 燃料密度 (kg/m³)

(e) 外壁温度の算出

伝熱工学資料第5版に記載の半無限固体の非定常温度分布の式を用いて外壁温度分布を評価した。

$$T(x) - T_0 = \frac{2E\sqrt{\kappa t}}{k} \left[\frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{4\kappa t}\right) - \frac{x}{2\sqrt{\kappa t}} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\kappa t}}\right) \right]$$

T(x) : 表面から x(m) の位置の温度 (°C), T₀ : 初期温度 (°C),

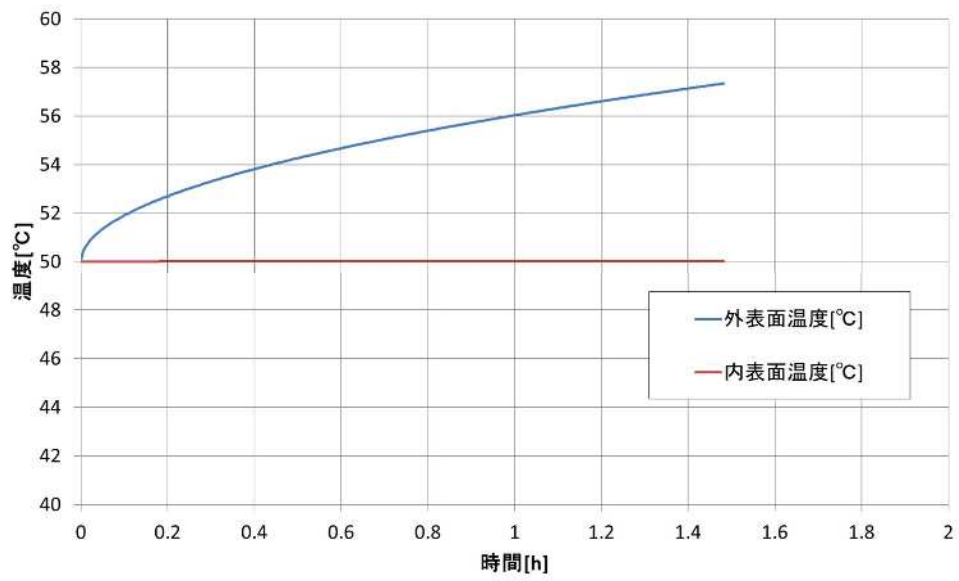
k : 熱伝導率 (W/m/K), κ : 温度拡散率 (κ = k / ρ C_p) (m²/s),

ρ : 密度 (kg/m³), C_p : 比熱 (J/kg/K)

(4) 貯蔵建屋への影響評価

自衛隊機又は米軍機 (訓練空域外のうち高高度飛行を行う機種) の墜落事故による火災に関して貯蔵建屋への影響評価を行ったところ, 貯蔵建屋外壁の最高温度は約 58°C となり許容温度である 200°C を下回ることを確認した。

第 56 図に時間に対する温度変化を示す。



第 56 図 貯蔵建屋外壁温度変化（訓練空域外(高高度飛行)）

5.2.3 自衛隊機又は米軍機（訓練空域外のうちその他の機種）の墜落事故の火災評価

5.2.3.1 墜落地点の想定

(1) 標的面積

「実用発電用原子炉施設への航空機落下確率の評価基準について」に基づき、墜落確率 10^{-7} （回／炉・年）に相当する標的面積を算出する。貯蔵建屋の標的面積は 0.0081 km^2 であることから、航空機の墜落確率が 10^{-7} （回／炉・年）となる標的面積 S を算出すると、

$$S = 10^{-7} / (1.52 \times 10^{-8}) \times 0.0081 \times 1000^2 = 53289.47 \text{ (m}^2\text{)}$$

となる。

(2) 離隔距離

前項で求めた標的面積より、第 54 図に示すように離隔距離を算出したところ、 $L = \text{約 } 73 \text{ m}$ となった。

5.2.3.2 火災影響評価

(1) 火災発生源に関する入力データ

想定機種：F-15

燃料の種類：JP-4

燃料量：14.87 (kℓ) ※航空ジャーナル 2 月号増刊 F-15 イーグル
(航空ジャーナル社 昭和 55 年 2 月 5 日発行) 記載値

火炎輻射強度：58000 (W/m^2) ※ガイド付属書 B のガソリンの値

質量低下速度：0.051 ($\text{kg/m}^2/\text{s}$) ※NUREG-1805 の JP-4 の値

燃料密度：760 (kg/m^3) ※NUREG-1805 の JP-4 の値

燃焼面積：44.6 (m^2) ※航空ジャーナル 2 月号増刊 F-15 イーグル記載の図面より算出した。

(2) 貯蔵建屋に関する入力データ

貯蔵建屋からの離隔距離：73 (m)

貯蔵建屋外壁の熱的物性：

密度：2400 (kg/m³)

比熱：900 (J/kg/K)

熱伝導率：1.2 (W/m/K)

※伝熱工学資料第5版の石灰岩コンクリートの値

(3) 評価方法

ガイド附属書C「原子力発電所の敷地内への航空機墜落による火災の影響評価について」に従って、以下の手順で実施した。

(a) 燃焼半径の算出

燃焼面積と同じ面積を持つ円を底面とする円筒火炎を想定して算出したところ、3.768 mとなった。

$$R = \sqrt{S/\pi} = \sqrt{44.6/\pi} = 3.768 \text{ (m)}$$

R：燃焼半径(m)，S：燃焼面積 (m²)

(b) 形態係数の算出

ガイドに従い、円筒火炎に対する形態係数の算出方法に従って算出したところ、0.005217となった。

$$\phi = \frac{1}{\pi n} \tan^{-1} \left(\frac{m}{\sqrt{n^2-1}} \right) + \frac{m}{\pi} \left[\frac{(A-2n)}{n\sqrt{AB}} \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{A(n-1)}{B(n+1)}} \right) - \frac{1}{n} \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{(n-1)}{(n+1)}} \right) \right]$$

$$A = (1+n)^2 + m^2$$

$$B = (1-n)^2 + m^2$$

$$m = H/R$$

$$n = L/R$$

ϕ ：形態係数，H：火炎長 (m)，L：離隔距離 (m)

(c) 輻射強度の算出

ガイドに従い、次式により算出したところ、302.586 W/m²となり、切り上げて約302.6 W/m²とした。

$$E = R_f \cdot \phi = 58000 \times 0.005217 = 302.586 \Rightarrow 302.6 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

E : 輻射強度 (W/m²), R_f : 火炎輻射強度 (W/m²)

(d) 燃焼継続時間の算出

ガイドに従い、次式により算出したところ、4968.8 s となり、切り上げて約 4969 s とした。

$$t = \frac{V}{\pi R^2 \times v} = 14.87 / (44.6 \times 0.0000671) = 4968.8 \Rightarrow 4969 \text{ (s)}$$

$$\text{ここで、} v = \frac{0.051}{760} = 0.000067105 \Rightarrow 0.0000671, \pi R^2 \doteq S = 44.6$$

t : 燃焼継続時間 (s), V : 燃料量 (m³), v : 燃焼速度 (m/s),

m : 質量低下速度 (kg/m²/s), ρ : 燃料密度 (kg/m³)

(e) 外壁温度の算出

伝熱工学資料第5版に記載の半無限固体の非定常温度分布の式を用いて外壁温度分布を評価した。

$$T(x) - T_0 = \frac{2E\sqrt{\kappa t}}{k} \left[\frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{4\kappa t}\right) - \frac{x}{2\sqrt{\kappa t}} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\kappa t}}\right) \right]$$

T(x) : 表面から x (m) の位置の温度 (°C), T₀ : 初期温度 (°C),

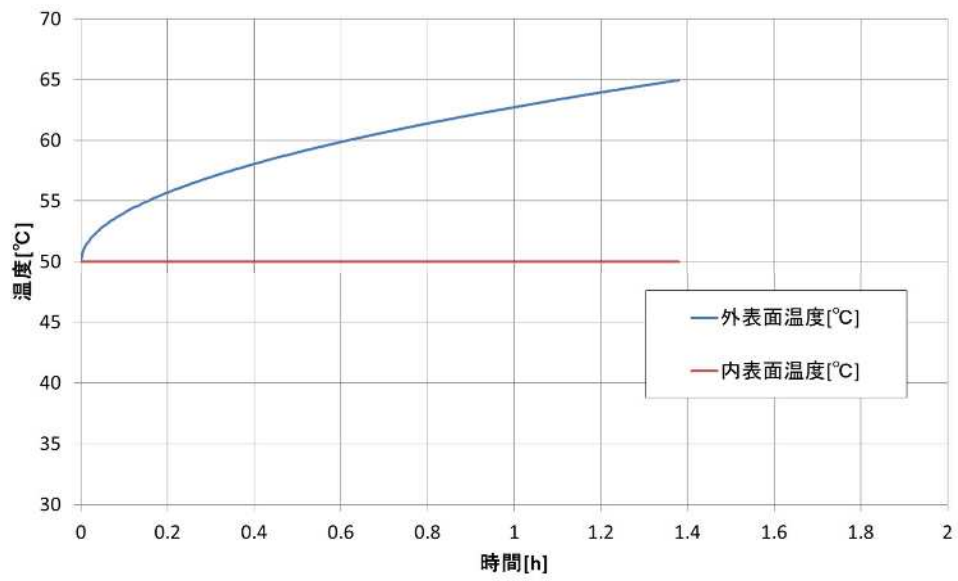
k : 熱伝導率 (W/m/K), κ : 温度拡散率 (κ = k / ρ C_p) (m²/s),

ρ : 密度 (kg/m³), C_p : 比熱 (J/kg/K)

(4) 貯蔵建屋への影響評価

自衛隊機又は米軍機（訓練空域外のうちその他の機種）の墜落事故による火災に関して貯蔵建屋への影響評価を行ったところ、貯蔵建屋外壁の最高温度は約 65°C となり許容温度である 200°C を下回ることを確認した。

第 57 図に、時間に対する温度変化を示す。



第 57 図 貯蔵建屋外壁温度変化（訓練空域外（その他機種））

5.2.4 自衛隊機又は米軍機（基地-訓練空域間往復時）の墜落事故の火災評価

5.2.4.1 墜落地点の想定

(1) 標的面積

「実用発電用原子炉施設への航空機落下確率の評価基準について」に基づき、墜落確率 10^{-7} (回/炉・年) に相当する標的面積を算出する。貯蔵建屋の標的面積は 0.0081 km^2 であることから、航空機の墜落確率が 10^{-7} (回/炉・年) となる標的面積 S を算出すると、

$$S = 10^{-7} / (2.13 \times 10^{-8}) \times 0.0081 \times 1000^2 = 38028.17 \text{ (m}^2\text{)}$$

となる。

(2) 離隔距離

前項で求めた標的面積より、第 54 図に示すように離隔距離を算出したところ、 $L = \text{約 } 53 \text{ m}$ となった。

5.2.4.2 火災影響評価

(1) 火災発生源に関する入力データ

想定機種：UH-60J

燃料の種類：JP-5

燃料量：7.21 (kℓ) ※(最大離陸重量-空虚重量)/燃料密度
= 燃料量とした

火炎輻射強度：50000 (W/m²) ※ガイド付属書 B の灯油の値

質量低下速度：0.054 (kg/m²/s) ※NUREG-1805 の JP-5 の値

燃料密度：810 (kg/m³) ※NUREG-1805 の JP-5 の値

燃焼面積：46.6 (m²) ※保守的に全長×全幅＝燃焼面積とした

(2) 貯蔵建屋に関する入力データ

貯蔵建屋からの離隔距離：53 (m)

貯蔵建屋外壁の熱的物性：

密度：2400 (kg/m³)

比熱：900 (J/kg/K)

熱伝導率：1.2 (W/m/K)

※伝熱工学資料 第5版の石灰岩コンクリートの値

(3) 評価方法

ガイド附属書 C「原子力発電所の敷地内への航空機墜落による火災の影響評価について」に従って、以下の手順で実施した。

(a) 燃焼半径の算出

燃焼面積と同じ面積を持つ円を底面とする円筒火炎を想定して算出したところ、3.852 m となった。

$$R = \sqrt{S/\pi} = \sqrt{46.6/\pi} = 3.852 \quad (\text{m})$$

R：燃焼半径 (m)，S：燃焼面積 (m²)

(b) 形態係数の算出

ガイドに従い、円筒火炎に対する形態係数の算出方法に従って算出したところ、0.01035 となった。

$$\phi = \frac{1}{\pi n} \tan^{-1} \left(\frac{m}{\sqrt{n^2-1}} \right) + \frac{m}{\pi} \left[\frac{(A-2n)}{n\sqrt{AB}} \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{A(n-1)}{B(n+1)}} \right) - \frac{1}{n} \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{(n-1)}{(n+1)}} \right) \right]$$

$$A = (1+n)^2 + m^2$$

$$B = (1-n)^2 + m^2$$

$$m = H/R$$

$$n = L/R$$

ϕ ：形態係数，H：火炎長 (m)，L：離隔距離 (m)

(c) 輻射強度の算出

ガイドに従い、次式により算出したところ、約 517.5 W/m² とした。

$$E = R_f \cdot \phi = 50000 \times 0.01035 = 517.5 \quad (\text{W/m}^2)$$

E : 輻射強度 (W/m²), R_f : 火炎輻射強度 (W/m²)

(d) 燃焼継続時間の算出

ガイドに従い, 次式により算出したところ, 2323.1 s となり, 切り上げて約 2324 s とした。

$$t = \frac{V}{\pi R^2 \times v} = 7.21 / (46.6 \times 0.0000666) = 2323.1 \Rightarrow 2324 \text{ (s)}$$

$$\text{ここで, } v = \frac{m}{\rho} = \frac{0.054}{810} = 0.000066667 \Rightarrow 0.0000666, \pi R^2 \doteq S = 46.6$$

t : 燃焼継続時間 (s), V : 燃料量 (m³), v : 燃焼速度 (m/s),

m : 質量低下速度 (kg/m²/s), ρ : 燃料密度 (kg/m³)

(e) 外壁温度の算出

「伝熱工学資料 第5版」に記載の半無限固体の非定常温度分布の式を用いて外壁温度分布を評価した。

$$T(x) - T_0 = \frac{2E\sqrt{\kappa t}}{k} \left[\frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{4\kappa t}\right) - \frac{x}{2\sqrt{\kappa t}} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\kappa t}}\right) \right]$$

T(x) : 表面から x(m) の位置の温度 (°C), T₀ : 初期温度 (°C),

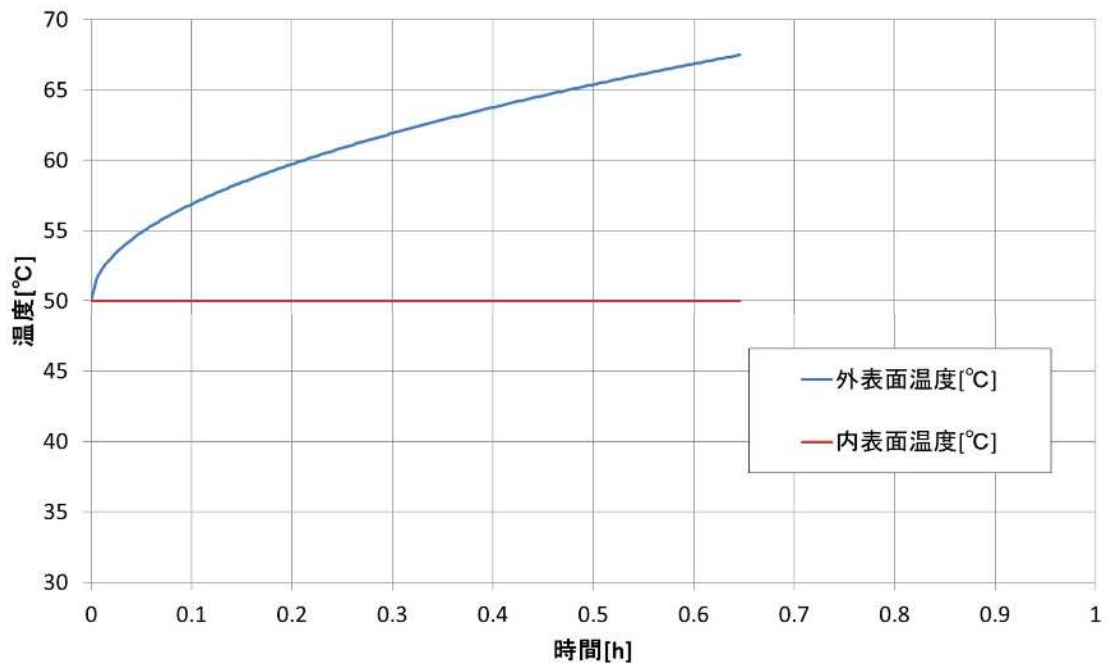
k : 熱伝導率 (W/m/K), κ : 温度拡散率 (κ = k / ρ C_p) (m²/s),

ρ : 密度 (kg/m³), C_p : 比熱 (J/kg/K)

(4) 貯蔵建屋への影響評価

自衛隊機又は米軍機 (基地-訓練空域間往復時) の墜落事故による火災に関して貯蔵建屋への影響評価を行ったところ, 貯蔵建屋外壁の最高温度は約 68°C となり許容温度である 200°C を下回ることを確認した。

第 58 図に時間に対する温度変化を示す。



第 58 図 貯蔵建屋外壁温度変化（基地－訓練空域間往復時）

5.2.5 評価結果まとめ

以上，4つのカテゴリ別の評価結果一覧について，第31表に示す。

第31表 評価結果まとめ

評価項目	民間航空機 (計器飛行方式)	自衛隊機又は米 軍機 (訓練空域外高 高度飛行)	自衛隊機又は米 軍機 (訓練空域外そ 他の機種)	自衛隊機又は米 軍機 (基地－訓練空 域間往復時)
離隔距離(m)	469	319	73	53
燃焼半径(m)	14.928	11.357	3.768	3.852
形態係数	0.001973	0.002472	0.005217	0.01035
輻射強度(W/m ²)	98.7	143.4	302.6	517.5
燃焼継続時間(s)	6677	5335	4969	2324
外壁温度(°C)	56	58	65	68

火災影響評価結果より，貯蔵建屋外壁の表面温度が最高値となるものは，「自衛隊機又は米軍機(基地－訓練空域間往復時)」における68°Cであり，当該最高値においてもコンクリートの許容温度である200°C以下であることを確認した。

なお，この時の離隔距離は約53mとなったが，保守的に50m(事業変更許可申請書(平成26年1月15日申請)記載値)とした場合の外壁温度について評価した結果，輻射強度は581 kW/m²，外壁温度は約70°Cとなり許容温度200°C以下であることを併せて確認した。

6. 火災による金属キャスクへの影響について

6.1 評価の考え方

外部火災に関して、森林、敷地外危険物貯蔵施設、敷地内危険物貯蔵設備及び航空機墜落のそれぞれの要因に対して個別に評価を実施し、いずれも貯蔵建屋に影響のないことを確認したが、貯蔵建屋は自然換気構造であり、火災の影響によって貯蔵建屋内の雰囲気温度や空気の流れの状態の変化が金属キャスクに影響を及ぼすことが考えられる。

輻射熱による貯蔵建屋外壁温度評価以外に、各外部火災（森林、敷地外危険物貯蔵施設、敷地内危険物貯蔵設備及び航空機墜落）による貯蔵建屋内雰囲気温度の上昇量や金属キャスクの温度上昇量を算出し、金属キャスクの各部の温度と比較することで基本的安全機能に影響を及ぼすことのないことを確認する。評価対象とする各火災の評価結果については、それぞれ最も厳しい評価結果を用いる。火災により貯蔵建屋内の雰囲気が加熱される過程及び温度や空気の流れの変化による金属キャスクの温度が上昇する過程については、以下が考えられる。

- ・貯蔵建屋外壁内表面からの熱伝達に起因する貯蔵建屋内雰囲気温度上昇による金属キャスクの温度上昇
- ・熱気流の侵入に起因する貯蔵建屋内雰囲気温度の上昇による金属キャスクの温度上昇
- ・貯蔵建屋内の空気の流れが変化した場合の金属キャスクの温度上昇

これらの過程についてそれぞれ貯蔵建屋内雰囲気温度の上昇量又は金属キャスクの温度上昇量の評価を行い、上昇後の雰囲気温度が金属キャスクに与える影響について評価を実施した。本評価について、貯蔵建屋では受入れ区域にも金属キャスクが存在するが、貯蔵区域には最大 288 基の金属キャスクが貯蔵されるのに対し、受入れ区域では最大でも 8 基しか金属キャスクが存在しないことから熱的に厳しい貯蔵

区域に貯蔵される金属キャスクを代表として本評価を実施した。

また、金属キャスク各部材の評価基準について、第 32 表に示す。

第 32 表 金属キャスク各部の評価基準

評価部位	評価基準値 (°C)	設定根拠
胴，外筒，蓋	350	日本機械学会(JSME)設計・建設規格で定めている温度範囲の上限値を評価基準値として設定。
中性子遮蔽材	150	樹脂開発メーカーの技術資料，文献を参考にしやへい性能の健全性が維持される評価基準値として設定。
金属ガスケット	130	金属ガスケットの長期健全性に関する文献から，長期間の閉じ込め機能が維持できる値として設定。
燃料被覆管	300	機械的特性の低下を防止する観点から，水素化物再配向及び照射硬化回復による機械的特性の低下が見られない制限温度として設定。

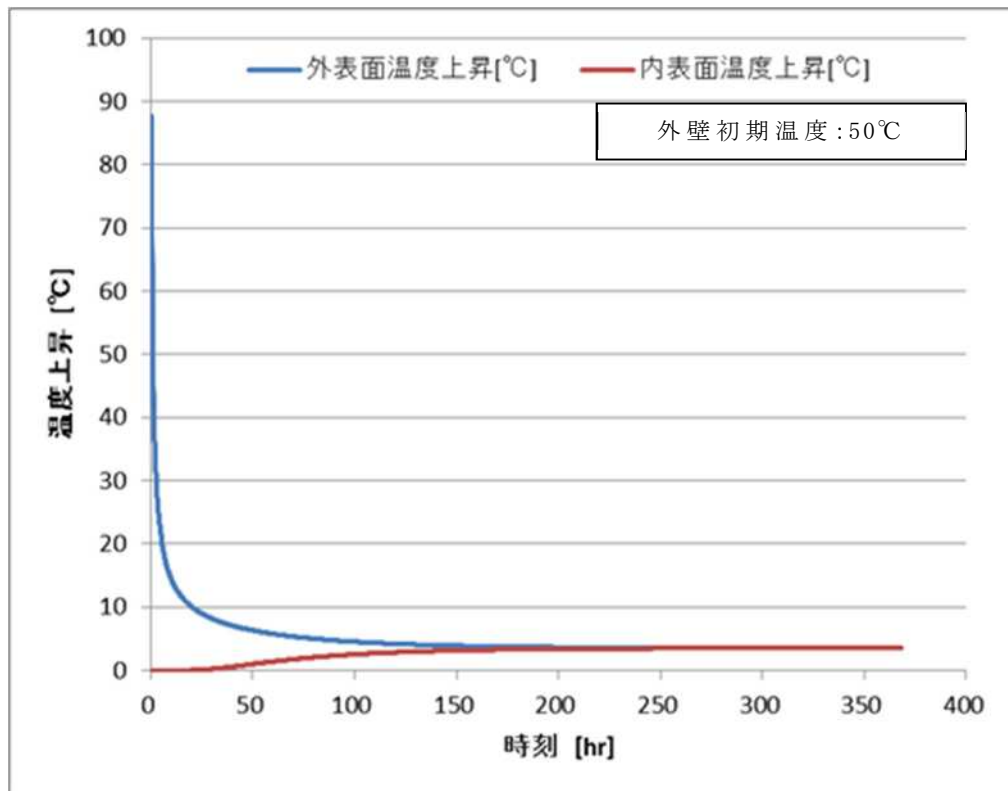
6.2 森林火災に伴う金属キャスクへの熱影響評価

6.2.1 貯蔵建屋外壁内表面からの熱伝達に起因する貯蔵建屋内雰囲気温度上昇による金属キャスクへの影響

森林火災による火炎からの輻射熱により貯蔵建屋外壁温度が上昇し、外壁内表面からの熱伝達による貯蔵建屋内の雰囲気温度上昇を考える。

貯蔵建屋外壁は大きな熱容量を持っているため、貯蔵建屋外壁の外表面での温度上昇が内表面の温度に変化をもたらすまでには大きな時間遅れが伴う。外部火災による貯蔵建屋外壁への熱影響評価において、外壁温度が最も厳しい結果となった森林火災評価の発火点1（発火時刻 7:56）における外壁の温度変化を第 59 図に示す。貯蔵建屋外壁の内表面の温度上昇は極めて緩やかであり、火災収束後の貯蔵建屋外壁からの放熱を無視した評価でも、100 時間以上の時間を経て最大でも 5℃未満程度の上昇に留まっている。貯蔵建屋内雰囲気への放熱を考慮しても貯蔵建屋内雰囲気の温度上昇量も同程度と考えられる。

このため、外部火災の影響による外壁内表面温度上昇はわずかであることから、貯蔵建屋外壁内表面からの熱伝達による貯蔵建屋内の雰囲気温度上昇は無視できると考えられる。



第 59 図 森林火災による貯蔵建屋外壁（外表面，内表面）温度上昇の時間変化（発火点 1（発火時刻 7:56））

6.2.2 熱気流の侵入に起因する貯蔵建屋内雰囲気温度の上昇による金属キャスクへの影響

貯蔵建屋は自然換気構造であるため，森林火災により発生する熱気流が周囲の風況の影響により貯蔵建屋に向かうことが想定される。その場合，熱気流が給気口を通じて直接建屋内に侵入することで建屋内雰囲気温度が上昇することが考えられるため，熱気流の影響による雰囲気温度上昇についても評価を実施した。

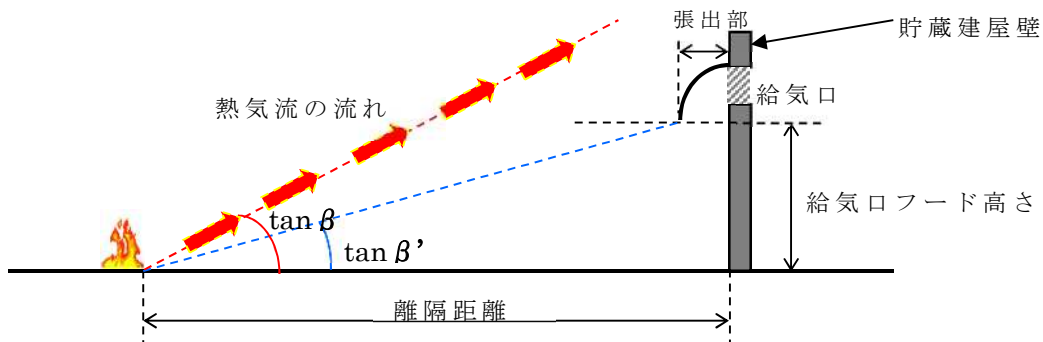
(1) 評価方針

火災源から発生した熱気流が風により直接給気口から侵入することで冷却空気入口温度が上昇する事象を想定する。

第 60 図に評価の概念図を示す。森林火災からの火災による熱気流の主軸傾き角 ($\tan \beta$) が，火災発生源と給気口フード下端とを結ぶ直線の傾き角 ($\tan \beta'$) より大きい場合は，熱気流は貯蔵建屋上方へ拡散し建屋内雰囲気温度への影響はないが，本評価においては保守的

に熱気流が直接給気口に当たる ($\tan \beta = \tan \beta'$) 場合を想定し、その際の風速を設定する。

現実的には発火点の位置や上昇気流、また気象条件の影響も考慮すれば火災からの熱気流が全て給気口に到達し侵入することは考えられないが、本評価においては保守的に評価結果より得られた離隔距離に最大火線強度となる火災源を置き、発生する熱気流が直接給気口に侵入するような風速を設定して評価した。



第 60 図 評価概念図

(2) 評価条件

(a) 物性値

森林火災評価において作成した気象データの最高気温での空気の物性値 (35°C, 1 気圧) の値とする。

比熱 : 1.007 (kJ/kg/K)

密度 : 1.1463 (kg/m³)

(b) 貯蔵建屋に関するデータ

- ・ 給気口フード高さ

6.7 (m)

- ・ 火炎から給気口フードまでの水平距離

給気口フードの張出しは 2 m であるため、火災影響評価による離隔距離より 2 m 減じた値となる。

22 - 2 = 20 (m)

- ・ 火災発生源と給気口フード位置を結ぶ直線の傾き ($\tan \beta'$)

$$\tan \beta' = 6.7/20 = 0.335$$

(c) 熱気流の主軸傾き角及び温度評価に係るパラメータ

・ 周囲空気温度 (T_0)

森林火災評価において作成した気象データの内最高気温を周囲空気温度とする。

$$T_0 = 34.7 \doteq 35 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

・ 風速 (U)

森林火災評価における最大火線強度の発生位置については、貯蔵建屋を取り囲む防火帯を含む非燃焼領域の外縁であり、貯蔵建屋から 22 m 以上離隔している位置であるが、保守的に必要防火帯幅として算出した離隔距離 22 m を採用し、貯蔵建屋から 22 m 離れた地点で最大火線強度をもつ火災が発生したと想定し、この位置における火災による熱気流が給気口に直接当たるような風速を求めた。(第 60 図において $\tan \beta = \tan \beta'$ となるときの風速) その結果、 $U = 3.72 \text{ (m/s)}$ となった。

(d) 熱源寸法 (D)

外壁温度が最大となった森林火災評価結果 (発火点 1 (発火時刻 7:56)) における燃焼面積から等価直径を算定する。

$$D = \sqrt{F' \cdot \pi \cdot R^2} = \sqrt{11.2782 \times \pi \times 0.4433333^2} = 2.64 \text{ (m)}$$

$$\text{円筒火炎個数}^{*1} : F' \text{ (個)} \quad (F' = 10/2R)$$

$$\text{燃焼半径}^{*2} : R \text{ (m)}$$

※1: 10m メッシュ内に燃焼半径から算出した F' 個の火炎が存在するものとして算定

※2: FARSITE 評価で得られた火炎長に 1/3 を乗じて算出した値

(e) 熱気流の主軸傾き角

佐賀の有風時の火災による熱気流の主軸傾き角式⁽⁷⁾を用いる。

$$\tan \beta = C_t \cdot \Lambda^{-k} \cdot Fr^{-\alpha}$$

$$Fr = U/\sqrt{D \cdot g}$$

ここで、

実験定数⁽⁷⁾ : $C_t (= 0.37)$ (-)

風速の無次元パラメータ : $\Lambda = (U \cdot D^{1/3}) / (Q \cdot g / (C_p \cdot \rho \cdot T_0))^{1/3}$

フルード数 : $Fr = U / \sqrt{D \cdot g}$ ($D = 2.64$ (m))

重力加速度 : $g (= 9.80665 \text{ m/s}^2)$

周囲空気温度 : $T_0 (= 308.15 \text{ K})$

風速 : $U \Rightarrow \tan \beta = C_t \cdot \Lambda^{-k} \cdot Fr^{-o} = \tan \beta'$ となる U

密度 : $\rho (= 1.1463 \text{ kg/m}^3)$

比熱 : $C_p (= 1.007 \text{ kJ/kg/K})$

発生熱量 : Q (kW)

実験定数⁽⁷⁾ : $k (= 9/8)$

実験定数⁽⁷⁾ : $o (= -0.0975)$

(f) 熱気流の主軸温度分布式

佐賀の有風時の火災による熱気流の主軸温度分布式⁽⁷⁾を用いる。

$$\Psi_{xm} \cdot \Lambda^s \cdot Fr^t = C_0 \quad \therefore \Psi_{xm} = C_0 / \Lambda^s \cdot Fr^t$$

$$\Psi_{xm} = \frac{\Delta \theta_m \cdot D^{1/3} \cdot X^{4/3}}{\left(\frac{Q^2 \cdot T_0}{C_p^2 \cdot \rho^2 \cdot g} \right)^{1/3}} \quad \therefore \Delta \theta_m = \frac{\Psi_{xm} \cdot \left(\frac{Q^2 \cdot T_0}{C_p^2 \cdot \rho^2 \cdot g} \right)^{1/3}}{D^{1/3} \cdot X^{4/3}} \quad (\text{K})$$

ここで、

温度上昇量 : $\Delta \theta_m$ (K)

温度に関する無次元数 : Ψ_{xm}

風下方向位置 : $X (= 20 \text{ m})$

実験定数⁽⁷⁾ : $C_0 (= 1.32)$

実験定数⁽⁷⁾ : $s (= 1/2)$

実験定数⁽⁷⁾ : $t (= -0.8833)$

(3) 評価結果

(a) 発生熱量

FARSITE で得られた火炎輻射強度 R_f^{*3} より火炎対流発散度を算出する。

火炎対流発散度 (I_{conv}) = 反応強度 (I_R) - 火炎輻射強度 (R_f)

得られた火炎対流発散度に燃焼面積を乗じて発生熱量を算出する。

$$Q = I_{conv} \cdot F' \cdot \pi \cdot R^2 \quad (\text{kW})$$

$$I_R = R_f / 0.377 \quad (0.377 : \text{米国 NFPA の係数(火炎輻射強度算出に用いた係数)})$$

$$\therefore I_{conv} = R_f \times (1 - 0.377) / 0.377 = 590.573 \quad (\text{kW/m}^2)$$

$$\begin{aligned} \therefore Q &= I_{conv} \cdot F' \cdot \pi \cdot R^2 = 590.573 \times 11.2782 \times \pi \times 0.4433333^2 \\ &= 4112.671 \quad (\text{kW}) \end{aligned}$$

※3: FARSITE 評価で得られた反応強度 I_R に 0.377 を乗じて算出した値

(b) 熱気流の主軸傾き角

$$Fr = U / \sqrt{D \cdot g} = 3.72 / \sqrt{2.64 \cdot 9.80665} = 0.731$$

$$\begin{aligned} \Lambda &= (U \cdot D^{1/3}) / (Q \cdot g / (C_p \cdot \rho \cdot T_0))^{1/3} \\ &= (3.72 \cdot 2.64^{1/3}) / (4112.671 \cdot 9.80665 / (1.007 \cdot 1.1463 \cdot 308.15))^{1/3} \\ &= 1.062 \end{aligned}$$

$$\tan \beta = C_t \cdot \Lambda^{-k} \cdot Fr^{-o} = 0.37 \times 1.062^{-(9/8)} \times 0.731^{-(0.0975)} = 0.335$$

(c) 熱気流の主軸温度分布式

$$\Psi_{xm} = C_0 / \Lambda^s \cdot Fr^t = 1.32 / 1.062^{0.5} \cdot 0.731^{-0.8833} = 0.971$$

$$\begin{aligned} \Delta \theta_m &= \frac{\Psi_{xm} \cdot \left(\frac{Q^2 \cdot T_0}{C_p^2 \cdot \rho^2 \cdot g} \right)^{1/3}}{D^{1/3} \cdot X^{4/3}} \\ &= \frac{0.971 \cdot \left(\frac{4112.671^2 \cdot 308.15}{1.007^2 \cdot 1.1463^2 \cdot 9.80665} \right)^{1/3}}{2.64^{1/3} \cdot 20^{4/3}} \end{aligned}$$

$$\Rightarrow 10 \text{ K} = 10 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

以上より、森林火災による熱気流の温度上昇は約 10℃と評価された。

現実には、火災源から発生した熱気流が貯蔵建屋の給気口に侵入するような風向及び風速の一定の条件が火災継続時間を通じて維持されるとは考えられないこと、また、貯蔵建屋は大きな空間体積を持っており熱気流の侵入から建屋内雰囲気温度の上昇までには一定の時間遅れがあることから、火災による熱気流の温度上昇が直ちに建屋内雰囲気温度の上昇に繋がることは考えられないが、森林火災により発生する熱気流の侵入による温度上昇量は最大でも約 10℃である。

ここで、第 33 表に定常状態（雰囲気温度 45℃）における金属キャスク各部の最大温度評価結果を示す。貯蔵建屋内雰囲気温度が 10℃上昇したと仮定した場合 55℃となるが、定常状態における金属キャスク各部の温度(第 33 表の①)の値を上回らないことから、この値を超えて金属キャスクが周囲空気により熱せられることはなく除熱は妨げられないため、基本的安全機能に影響を与えるような金属キャスクの温度上昇をもたらすことはない。

第 33 表 金属キャスク各部の温度評価結果（最大値(℃)）

評価条件	一次蓋 金属ガス ケット	二次蓋 金属ガス ケット	一次 蓋	二次 蓋	外筒	胴	側部 レジン	燃料 被覆 管
① 雰囲気温度 45℃の定常状 態(通常貯蔵 時)	89	85	96	85	113	142	128	259
② 設計基準値	130	130	350	350	350	350	150	300
設計余裕(②-①)	41	45	254	265	237	208	22	41

6.2.3 貯蔵建屋内の空気の流れが変化した場合の金属キャスクへの影響

外部火災の影響により貯蔵建屋内の空気の流れが変化した場合として、現実には考えにくい貯蔵建屋外壁内表面からの伝熱や熱気流の侵入による貯蔵建屋内雰囲気温度の上昇において前述の評価結

果を超える熱影響により金属キャスクの温度と雰囲気温度が等しくなり、貯蔵建屋内のドラフト力が失われて金属キャスク表面における対流及び金属キャスク表面からの輻射が失われた状態を仮定する。

この場合、金属キャスクへの影響のうち最も保守的な状態として金属キャスクからの放熱が失われ断熱状態となり、金属キャスク内の使用済燃料から発生する崩壊熱が全て金属キャスクの温度上昇に使われたものとして、金属キャスクの温度上昇を評価する。

金属キャスクが断熱状態となる時間を、森林火災評価において最も長い燃焼継続時間となった発火点 2（発火時刻 11:00）における 540 秒間を保守的に 3 倍程度考慮して 1700 秒間と仮定すると、この間の金属キャスクの温度上昇 ΔT は次式で表される。

$$\Delta T = Q (\text{最大崩壊熱量}) \times t (\text{断熱時間}) \div C (\text{金属キャスクの熱容量})$$

$$Q : 12.1 \text{ kW}, \quad t : 1700 \text{ s}, \quad C : 41850 \text{ kJ/K}$$

ここで、金属キャスクの熱容量は、比較的熱容量が大きく温度が上昇しにくい中性子遮蔽材及び評価対象ではない内部収納物（使用済燃料）を除いて、保守的に熱容量が小さい炭素鋼（90 トン）のものとする。

$$\therefore \Delta T = 12.1 \times 1700 \div 41850 = 0.4915 \approx 0.5 \text{ K} = 0.5 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

金属キャスクの各部が一様にこの温度上昇分昇温するとした場合、定常状態における金属キャスク各部の温度の設計余裕（第 33 表）に比べて非常に小さいことから、金属キャスクの各部への影響はなく基本的な安全機能に影響をもたらすような金属キャスクの温度上昇は考えられない。

実際に金属キャスクが断熱状態になった場合、金属キャスク内部の材質の違い及び構造により一様な温度上昇にはならないと考えられるが、金属キャスクを熱容量が低い（温度が上昇しやすい）炭素鋼とみなしていること、断熱時間を外部火災の火災継続時間の 3 倍

としていることから実際に断熱状態になった場合の金属キャスクの各部の温度上昇量の不確定性を本評価で十分包絡できると考えられる。

6.3 敷地内危険物貯蔵設備の火災に伴う金属キャスクへの熱影響評価

6.3.1 貯蔵建屋外壁内表面からの熱伝達に起因する貯蔵建屋内雰囲気温度上昇による金属キャスクへの影響

6.2.1 のとおり，外部火災評価の内，貯蔵建屋外壁温度評価結果が最も厳しい結果となった森林火災（発火点 1（発火時刻 7：56））による熱影響でも貯蔵建屋外壁外表面温度 138℃に対し，外壁内表面温度は 5℃程度の上昇であった。

一方，敷地内危険物貯蔵設備の火災での貯蔵建屋外壁外表面温度評価で最も厳しい結果となったエンジン発電機の火災の熱影響による貯蔵建屋外壁外表面温度は 58℃で，内表面の温度上昇はほとんどなかった（第 44 図）。

したがって，森林火災（発火点 1（発火時刻 7：56））に包絡されるため，外壁内表面からの熱伝達による貯蔵建屋内の雰囲気温度上昇は無視できると考えられる。

6.3.2 熱気流の侵入に起因する貯蔵建屋内雰囲気温度の上昇による金属キャスクへの影響

貯蔵建屋は自然換気構造であるため，火災により発生する熱気流が周囲の風況の影響により貯蔵建屋に向かうことが想定される。その場合，熱気流が給気口を通じて直接建屋内に侵入することで建屋内雰囲気温度が上昇することが考えられるため，熱気流の影響による雰囲気温度上昇についても評価を実施した。ここでは，熱気流の給気口への侵入の可能性の観点から，貯蔵建屋からの距離が近く，かつ貯蔵建屋と同じ高さに設置されているエンジン発電機からの火災について評価を行った。また評価については，森林火災について評価した方法と同様の考え方に基づき行った。

(1) 評価条件

- ・ 火炎から給気口フードまでの水平距離
給気口フードの張り出し部が 2 m であることから, $27.0 - 2.0 = 25.0$ (m)
- ・ 火災発生源と給気口フード位置を結ぶ直線の傾き ($\tan \beta'$)
 $\tan \beta' = 6.7 / 25 = 0.2680 \Rightarrow 0.268$
- ・ 燃焼時発熱量 ($\Delta H_{c, \text{eff}}$) : 44400 (kJ/kg) (NUREG-1805 に記載の値)
- ・ 質量低下速度 (m) : 0.044 (kg/m²/s) (NUREG-1805 に記載の値)
- ・ 燃焼面積 (S) : 4.97 (m²)
- ・ 熱源寸法 (D)
燃焼面積から等価直径を算定する。(有効桁数小数点第 3 位で切り上げ)
燃焼面積 $S = 4.97$ (m²) より
$$D = 2 \sqrt{\frac{S}{\pi}} = 2.51555 \Rightarrow 2.52 \text{ (m)}$$
- ・ 風速 (U)
熱気流が直接給気口にあたる風速として 6.34 (m/s) とした。

(2) 評価結果

(a) 発生熱量

燃焼時発熱量及び質量低下速度, 燃焼面積より次式を用いて発生熱量を算出する。

$$Q = (1 - \chi) \cdot \Delta H_{c, \text{eff}} \cdot S \cdot m \quad (\text{kW})$$

ここで, χ は全発熱量のうち輻射として環境へ放射される熱量比 (放射分率) であり, 給気温度が保守的に評価されるように実験結果⁽⁸⁾から得られている最小値として 0.05 を採用した。算出した発生熱量は以下のとおり。

$$\begin{aligned} Q &= (1 - \chi) \cdot \Delta H_{c, \text{eff}} \cdot S \cdot m = (1 - 0.05) \times 44400 \times 4.97 \times 0.044 \\ &= 9223.923 \quad (\text{kW}) \end{aligned}$$

(b) 熱気流の主軸傾き角

$$Fr = U / \sqrt{D \cdot g} = 6.34 / \sqrt{2.52 \cdot 9.80665} = 1.275$$

$$\begin{aligned} \Lambda &= (U \cdot D^{1/3}) / (Q \cdot g / (C_p \cdot \rho \cdot T_0))^{1/3} \\ &= (6.34 \cdot 2.52^{1/3}) / (9223.923 \cdot 9.80665 / (1.007 \cdot 1.1463 \cdot 308.15))^{1/3} \\ &= 1.362 \end{aligned}$$

$$\tan \beta = C_t \cdot \Lambda^{-k} \cdot Fr^{-o} = 0.37 \times 1.362^{-(9/8)} \times 1.275^{-(0.0975)} = 0.268$$

(c) 熱気流の主軸温度分布式

$$\Psi_{xm} = C_0 / \Lambda^s \cdot Fr^t = 1.32 / (1.362^{0.5} \cdot 1.275^{-0.8833}) = 1.402$$

$$\begin{aligned} \Delta \theta_m &= \frac{\Psi_{xm} \cdot \left(Q^2 \cdot T_0 / C_p^2 \cdot \rho^2 \cdot g \right)^{1/3}}{D^{1/3} \cdot X^{4/3}} \\ &= \frac{1.402 \cdot \left(9223.923^2 \cdot 308.15 / (1.007^2 \cdot 1.1463^2 \cdot 9.80665) \right)^{1/3}}{2.52^{1/3} \cdot 25^{4/3}} \Rightarrow 18 \text{ K} = 18 \text{ (}^\circ\text{C)} \end{aligned}$$

以上より，エンジン発電機からの火災による熱気流の温度上昇は約18℃と評価された。

現実には，火災源から発生した熱気流が貯蔵建屋の給気口に侵入するような風向及び風速の一定の条件が火災継続時間を通じて維持されるとは考えられないこと，また，貯蔵建屋は大きな空間体積を持っており熱気流の侵入から建屋内雰囲気温度の上昇までには一定の時間遅れがあることから，火災による熱気流の温度上昇が直ちに建屋内雰囲気温度の上昇に繋がることは考えられないが，敷地内危険物貯蔵設備の火災により発生する熱気流の侵入による温度上昇量は最大でも約18℃である。

ここで，貯蔵建屋内雰囲気温度が定常状態（雰囲気温度45℃）から18℃上昇したと仮定した場合63℃となるが，定常状態における金属キャスク各部の温度（第33表の①）の値を上回らないことから，この値を超えて金属キャスクが雰囲気により熱せられることはなく除熱は妨

げられないため、基本的な安全機能に影響を与えるような金属キャスクの温度上昇をもたらすことはない。

6.3.3 貯蔵建屋内の空気の流れが変化した場合の金属キャスクへの影響

外部火災の影響により貯蔵建屋内の空気の流れが変化した場合として、現実には考えにくい貯蔵建屋外壁内表面からの伝熱や熱気流の侵入による貯蔵建屋内雰囲気温度の上昇において前述の評価結果を超える熱影響により金属キャスクの温度と雰囲気温度が等しくなり、貯蔵建屋内のドラフト力が失われて金属キャスク表面における対流及び金属キャスク表面からの輻射が失われた状態を仮定する。

この場合、金属キャスクへの影響のうち最も保守的な状態として金属キャスクからの放熱が失われ断熱状態となり、金属キャスク内の使用済燃料から発生する崩壊熱が全て金属キャスクの温度上昇に使われたものとして、金属キャスクの温度上昇を評価する。

金属キャスクが断熱状態となる時間を、燃焼継続時間が最大となるエンジン発電機火災の燃焼継続時間 4060 秒間を保守的に 3 倍程度考慮して 13000 秒間と仮定すると、この間の金属キャスクの温度上昇 ΔT は次式で表される。

$$\Delta T = Q (\text{最大崩壊熱量}) \times t (\text{断熱時間}) \div C (\text{金属キャスクの熱容量})$$

$$Q : 12.1 \text{ kW}, \quad t : 13000 \text{ s}, \quad C : 41850 \text{ kJ/K}$$

ここで、金属キャスクの熱容量は、比較的熱容量が大きく温度が上昇しにくい中性子遮蔽材及び評価対象ではない内部収納物（使用済燃料）を除いて、保守的に熱容量が小さい炭素鋼（90 トン）のものとする。

$$\therefore \Delta T = 12.1 \times 13000 \div 41850 = 3.759 \approx 3.8 \text{ K} = 3.8(^{\circ}\text{C})$$

金属キャスクの各部が一様にこの温度上昇分昇温するとした場合、

定常状態における金属キャスク各部の温度の設計余裕（第 33 表）に比べて非常に小さいことから，金属キャスクの各部への影響はなく基本的安全機能に影響をもたらすような金属キャスクの温度上昇は考えられない。

実際に金属キャスクが断熱状態になった場合，金属キャスク内部の材質の違い及び構造により一様な温度上昇にはならないと考えられるが，金属キャスクを熱容量が低い（温度が上昇しやすい）炭素鋼とみなしていること，断熱時間を外部火災の火災継続時間の 3 倍としていることから実際に断熱状態になった場合の金属キャスクの各部の温度上昇量の不確定性を本評価で十分包絡できると考えられる。

6.4 航空機墜落による火災に伴う金属キャスクへの熱影響評価

6.4.1 貯蔵建屋外壁内表面からの熱伝達に起因する貯蔵建屋内雰囲気温度上昇による金属キャスクへの影響

6.2.1 のとおり，外部火災評価の内，貯蔵建屋外壁温度評価結果が最も厳しい結果となった森林火災（発火点 1（発火時刻 7：56））による熱影響でも貯蔵建屋外壁外表面温度 138℃に対し，外壁内表面温度は 5℃程度の上昇であった。

一方，航空機墜落による火災での貯蔵建屋外壁外表面温度評価で最も厳しい結果となった「自衛隊機又は米軍機（基地－訓練空域往復時）」の火災の熱影響による貯蔵建屋外壁外表面温度は 68℃で，内表面の温度上昇はほとんどなかった（第 58 図）。

したがって，森林火災（発火点 1（発火時刻 7：56））に包絡されるため，外壁内表面からの熱伝達による貯蔵建屋内の雰囲気温度上昇は無視できると考えられる。

6.4.2 熱気流の侵入に起因する貯蔵建屋内雰囲気温度の上昇による金属キャスクへの影響

貯蔵建屋は自然換気構造であるため，火災により発生する熱気流が周囲の風況の影響により貯蔵建屋に向かうことが想定される。その場合，熱気流が給気口を通じて直接建屋内に侵入することで建屋内雰囲気温度が上昇することが考えられるため，熱気流の影響による雰囲気温度上昇についても評価を実施した。ここでは，熱気流の給気口への侵入の可能性の観点から，貯蔵建屋からの距離が近い「自衛隊機又は米軍機（基地－訓練空域間往復時）」について評価を行った。また評価については，森林火災について評価した方法と同様の考え方に基づき行った。

(1) 評価条件

- ・火災から給気口フードまでの水平距離

給気口フードの張り出し部が 2 m であることから、

$$50.0 - 2.0 = 48.0 \text{ (m)}$$

- ・ 火災発生源と給気口フード位置を結ぶ直線の傾き ($\tan \beta'$)
$$\tan \beta' = 6.7/48 = 0.1395 \Rightarrow 0.140$$
- ・ 燃焼時発熱量 ($\Delta H_{c, \text{eff}}$) : 43000 (kJ/kg) (NUREG-1805 に記載の値)
- ・ 質量低下速度 (m) : 0.05 (kg/m²/s) (NUREG-1805 に記載の値)
- ・ 燃焼面積 (S) : 46.6 (m²)
- ・ 熱源寸法 (D)

燃焼面積から等価直径を算定する。(有効桁数小数点第 3 位で切り上げ)

$$\text{燃焼面積 } S = 46.6 \text{ (m}^2\text{) より}$$

$$D = 2\sqrt{\frac{S}{\pi}} = 7.7028 \Rightarrow 7.71 \text{ (m)}$$

- ・ 風速 (U)

熱気流が直接給気口にあたる風速として 18.08 (m/s) とした。

(2) 評価結果

(a) 発生熱量

燃焼時発熱量及び質量低下速度、燃焼面積より次式を用いて発生熱量を算出する。

$$Q = (1 - \chi) \cdot \Delta H_{c, \text{eff}} \cdot S \cdot m \quad (\text{kW})$$

ここで、 χ は全発熱量のうち輻射として環境へ放射される熱量比 (放射分率) であり、給気温度が保守的に評価されるように実験結果⁽⁸⁾ から得られている最小値として 0.05 を採用した。算出した発生熱量は以下のとおり。

$$\begin{aligned} Q &= (1 - \chi) \cdot \Delta H_{c, \text{eff}} \cdot S \cdot m = (1 - 0.05) \times 43000 \times 46.6 \times 0.054 \\ &= 102794.940 \quad (\text{kW}) \end{aligned}$$

(b) 熱気流の主軸傾き角

$$Fr = U / \sqrt{D \cdot g} = 18.08 / \sqrt{7.71 \cdot 9.80665} = 2.079$$

$$\Lambda = (U \cdot D^{1/3}) / (Q \cdot g / (C_p \cdot \rho \cdot T_0))^{1/3}$$

$$= (18.08 \cdot 7.71^{1/3}) / (102794.940 \cdot 9.80665 / (1.007 \cdot 1.1463 \cdot 308.15))^{1/3}$$

$$= 2.524$$

$$\tan \beta = C_t \cdot \Lambda^{-k} \cdot Fr^{-o} = 0.37 \times 2.524^{-(9/8)} \times 2.079^{-(0.0975)} = 0.140$$

(c) 熱気流の主軸温度分布式

$$\Psi_{xm} = C_0 / \Lambda^s \cdot Fr^t = 1.32 / 2.524^{0.5} \cdot 2.079^{-0.8833} = 1.586$$

$$\Delta \theta_m = \frac{\Psi_{xm} \cdot \left(\frac{Q^2 \cdot T_0}{C_p^2 \cdot \rho^2 \cdot g} \right)^{1/3}}{D^{1/3} \cdot X^{4/3}}$$

$$= \frac{1.586 \cdot \left(\frac{102794.94^2 \cdot 308.15}{1.007^2 \cdot 1.1463^2 \cdot 9.80665} \right)^{1/3}}{7.71^{1/3} \cdot 48^{4/3}}$$

$$\Rightarrow 29 \text{ K} = 29 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

以上より、航空機墜落に伴う火災による熱気流の温度上昇は約29°Cと評価された。

現実には、火災源から発生した熱気流が貯蔵建屋の給気口に侵入するような風向及び風速の一定の条件が火災継続時間を通じて維持されるとは考えられないこと、また、貯蔵建屋は大きな空間体積を持っており熱気流の侵入から建屋内雰囲気温度の上昇までには一定の時間遅れがあることから、火災による熱気流の温度上昇が直ちに建屋内雰囲気温度の上昇に繋がることは考えられないが、航空機墜落に伴う火災により発生する熱気流の侵入による温度上昇量は最大でも約29°Cである。

ここで、貯蔵建屋内雰囲気温度が定常状態（雰囲気温度45°C）から29°C上昇したと仮定した場合74°Cとなるが、定常状態における金属キャスク各部の温度（第33表の①）の値を上回らないことから、この値を超えて金属キャスクが雰囲気により熱せられることはなく除熱は妨げられないため、基本的な安全機能に影響を与えるような金

属キャスクの温度上昇をもたらすことはない。

6.4.3 貯蔵建屋内の空気の流れが変化した場合の金属キャスクへの影響

外部火災の影響により貯蔵建屋内の空気の流れが変化した場合として、現実には考えにくい貯蔵建屋外壁内表面からの伝熱や熱気流の侵入による貯蔵建屋内雰囲気温度の上昇において前述の評価結果を超える熱影響により金属キャスクの温度と雰囲気温度が等しくなり、貯蔵建屋内のドラフト力が失われて金属キャスク表面における対流及び金属キャスク表面からの輻射が失われた状態を仮定する。

この場合、金属キャスクへの影響のうち最も保守的な状態として金属キャスクからの放熱が失われ断熱状態となり、金属キャスク内の使用済燃料から発生する崩壊熱が全て金属キャスクの温度上昇に使われたものとして、金属キャスクの温度上昇を評価する。

金属キャスクが断熱状態となる時間を、燃焼継続時間が最大となる「①民間航空機（計器飛行方式）」の燃焼継続時間 6677 秒間を保守的に 3 倍程度考慮して 21000 秒間と仮定すると、この間のキャスクの温度上昇 ΔT は次式で表される。

$$\Delta T = Q (\text{最大崩壊熱量}) \times t (\text{断熱時間}) \div C (\text{金属キャスクの熱容量})$$

$$Q : 12.1 \text{ kW}, \quad t : 21000 \text{ s}, \quad C : 41850 \text{ kJ/K}$$

ここで、金属キャスクの熱容量は、比較的熱容量が大きく温度が上昇しにくい中性子遮蔽材及び評価対象ではない内部収納物（使用済燃料）を除いて、保守的に熱容量が小さい炭素鋼（90 トン）のものとする。

$$\therefore \Delta T = 12.1 \times 21000 \div 41850 = 6.072 \approx 6.1 \text{ K} = 6.1 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

金属キャスクの各部が一様にこの温度上昇分昇温するとした場合、定常状態における金属キャスク各部の温度の設計余裕（第 33 表）に

比べて非常に小さいことから、金属キャスクの各部への影響はなく基本的安全機能に影響をもたらすような金属キャスクの温度上昇は考えられない。

実際に金属キャスクが断熱状態になった場合、金属キャスク内部の材質の違い及び構造により一様な温度上昇にはならないと考えられるが、金属キャスクを熱容量が低い（温度が上昇しやすい）炭素鋼とみなしていること、断熱時間を外部火災の火災継続時間の3倍としていることから実際に断熱状態になった場合の金属キャスクの各部の温度上昇量の不確定性を本評価で十分包絡できると考えられる。

7. 火災の重畳による影響評価について

7.1 評価の考え方

火災の重畳については、貯蔵施設敷地外における火災どうし及び貯蔵施設敷地内における火災どうしがそれぞれ同時に発生した場合を考慮する。このため、敷地外については森林火災と近隣の産業施設の火災の重畳、敷地内については敷地内危険物貯蔵設備と航空機墜落による火災の重畳についてそれぞれ評価を行った。

7.2 森林火災と近隣の産業施設（敷地外危険物貯蔵施設）の火災の重畳による影響評価

森林火災評価における発火点と、近隣の産業施設の火災・爆発評価にて評価対象とした敷地外危険物貯蔵施設の立地点は貯蔵施設からの方位が異なるため、森林火災の誘発による敷地外危険物貯蔵施設の火災は考えにくいですが、偶発的にこれらの火災が重畳して発生した場合の影響について考察を行った。

7.2.1 火災による貯蔵建屋外壁への影響及び加熱された貯蔵建屋外壁内表面からの熱伝達

森林火災の場合については、最大で外壁外表面温度は138℃となり、温度上昇量は約90℃となったが、外壁内表面温度の上昇は極めて緩やかであり、貯蔵建屋外壁内表面からの熱伝達による貯蔵建屋内の雰囲気温度上昇についてはほとんど無視できる。

一方、敷地外危険物貯蔵施設の火災については、輻射による貯蔵建屋外壁外表面温度の上昇は約3℃程度と、森林火災における評価結果に比べてはるかに小さい。

このことから、森林火災と敷地外危険物貯蔵施設の火災を重畳させた場合でも、その影響については森林火災単独の場合とほぼ同様であり、貯蔵建屋外壁及び金属キャスクの基本的安全機能への影響は無視できる。

7.2.2 熱気流の侵入に起因する貯蔵建屋内雰囲気温度の上昇による 金属キャスクへの影響

火災による熱気流が給気口を通じて直接建屋内に侵入することで建屋内雰囲気温度が上昇することが考えられるが、森林火災の場合については熱気流による温度上昇量を約 10 °C と評価しており、熱気流の侵入による貯蔵建屋内の雰囲気温度の上昇がこれを上回ることはない。

一方、敷地外危険物貯蔵施設については、評価対象施設の貯蔵建屋からの離隔距離は約 1 km と遠く離れており、この場所から発生した熱気流が直接給気口に当たるような状況は想定しにくく影響はない。

このことから、火災により生じる熱気流の給気口からの侵入について、森林火災と敷地外危険物貯蔵施設の火災を重畳させても、森林火災単独の場合における影響を上回らないと考えられる。

以上より、森林火災と敷地外危険物貯蔵施設の火災を重畳させた場合でも、影響については森林火災単独の場合とほぼ同様であり、金属キャスクのもつ基本的安全機能への影響はない。

7.3 敷地内危険物貯蔵設備の火災と航空機墜落による火災の重畳による影響評価

敷地内危険物貯蔵設備の火災と航空機墜落による火災に対する影響評価についても、それぞれ個別の評価においていずれも貯蔵建屋への影響はないことを確認しているが、これらの事象が重畳した場合個別の評価結果より厳しい結果となることが予測されるため、重畳による評価を実施した。評価対象については、航空機墜落、及び敷地内危険物貯蔵設備による火災とも、最も厳しい評価結果となった下記事象を採用した。

- ・敷地内危険物貯蔵設備による火災：エンジン発電機
- ・航空機墜落による火災：自衛隊機又は米軍機（基地-訓練空域往復時）（対象機種：UH-60J）

上記において、航空機墜落による火災の評価結果より離隔距離が約53 mであるのに対し、エンジン発電機の設置位置（離隔距離）は約27 mであることから、航空機が直接エンジン発電機上に墜落することは考えにくい。このことから、重畳の状況としては航空機の墜落により発生した火災がエンジン発電機の火災を誘発することにより重畳火災となった場合の影響評価について実施した。航空機墜落による火災における離隔距離については保守的に事業許可申請書記載値である50 mで評価を行った。

7.3.1 貯蔵建屋外壁温度の影響評価

(1) 火災発生源に関する入力データ

- ・エンジン発電機による火災

燃料の種類：軽油及び潤滑油であるが、保守性を考慮してすべて軽油とみなした。

燃料量：軽油 0.99 (kℓ) + 潤滑油 0.041 (kℓ) = 1.031 (kℓ)

火災輻射強度：42000 (W/m²) ※ガイド付属書Bの軽油の値

質量低下速度：0.044 (kg/m²/s) ※NUREG-1805 の Diesel Oil の値

燃料密度：860 (kg/m³) ※JIS K 2204-2007

燃焼面積：4.97 (m²) ※エンジン発電機の全長×全幅

・航空機墜落による火災

想定機種：UH-60J

燃料の種類：JP-5

燃料量：7.21 (kℓ) ※(最大離陸重量－空虚重量)／燃料密度

火炎輻射強度：50000 (W/m²) ※ガイド附属書Bの灯油の値

質量低下速度：0.054 (kg/m²/s) ※NUREG-1805 の JP-5 の値

燃料密度：810 (kg/m³) ※NUREG-1805 の JP-5 の値

燃焼面積：46.6 (m²) ※全長×全幅

7.3.2 貯蔵建屋に関する入力データ

貯蔵建屋からの離隔距離：エンジン発電機による火災 27 (m)

航空機墜落による火災 50 (m)

貯蔵建屋外壁の熱的物性：

密度：2400 (kg/m³)

比熱：900 (J/kg/K)

熱伝導率：1.2 (W/m/K)

※伝熱工学資料 第5版の石灰岩コンクリートの値

7.3.3 評価方法

ガイド附属書C「原子力発電所の敷地内への航空機墜落による火災の影響評価について」を参考とし、評価を実施した。

- ・貯蔵建屋外壁温度は、森林火災評価と同様、一次元非定常熱伝導方程式を差分法により解くことで評価した。
- ・航空機が墜落し火災が発生することによって、発電機の燃料タンクの火災が誘発される状況を考慮するにあたり、以下の3ケースについて考察した。

ケース1：航空機とエンジン発電機が同時に燃焼開始する場合

ケース 2：航空機の燃料の半分が燃焼後，エンジン発電機が燃焼を開始する場合

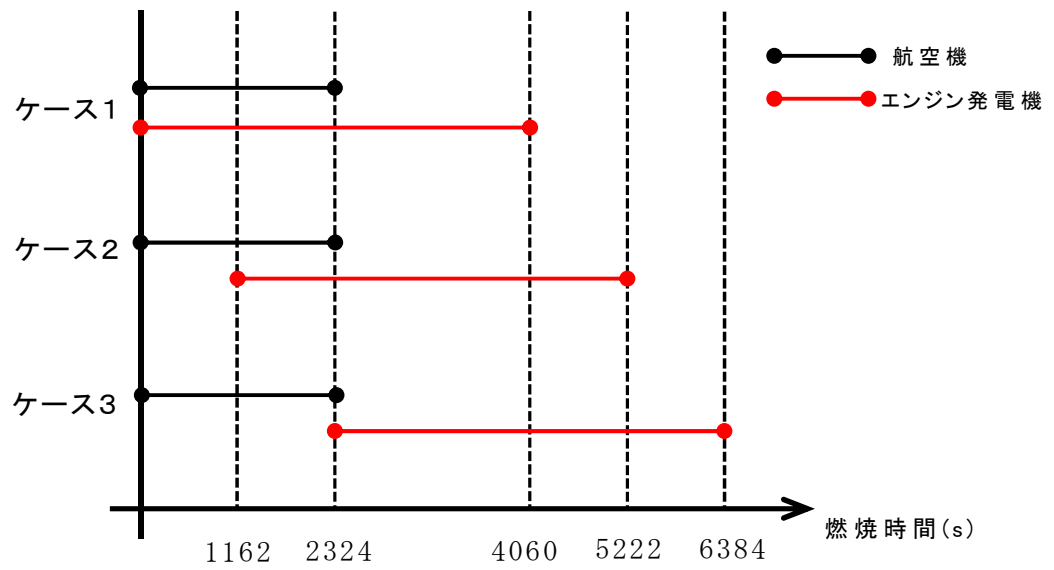
ケース 3：航空機の燃料が燃え尽きた後，同時にエンジン発電機が燃焼を開始する場合

航空機墜落による火災，及びエンジン発電機による火災評価結果における輻射強度と燃焼継続時間について第 34 表に示す。

第 34 表 エンジン発電機及び航空機墜落による火災評価結果

	輻射強度 (W/m ²)	燃焼継続時間 (s)
エンジン発電機による火災	178.4	4060
航空機墜落による火災	581.0	2324
エンジン発電機＋航空機	759.4	—

また，2つの火災の燃焼時間の関係を表した模式図について第 61 図に示す。



第 61 図 エンジン発電機及び航空機墜落による火災における
燃焼時間の模式図

各ケースにおける燃焼経過時間と輻射強度の関係については第 35 表のとおりである。各ケースにおける貯蔵建屋外壁温度評価結果は第 62 図のとおりである。

第 35 表 各ケースにおける燃焼経過時間と輻射強度の関係

(ケース 1)

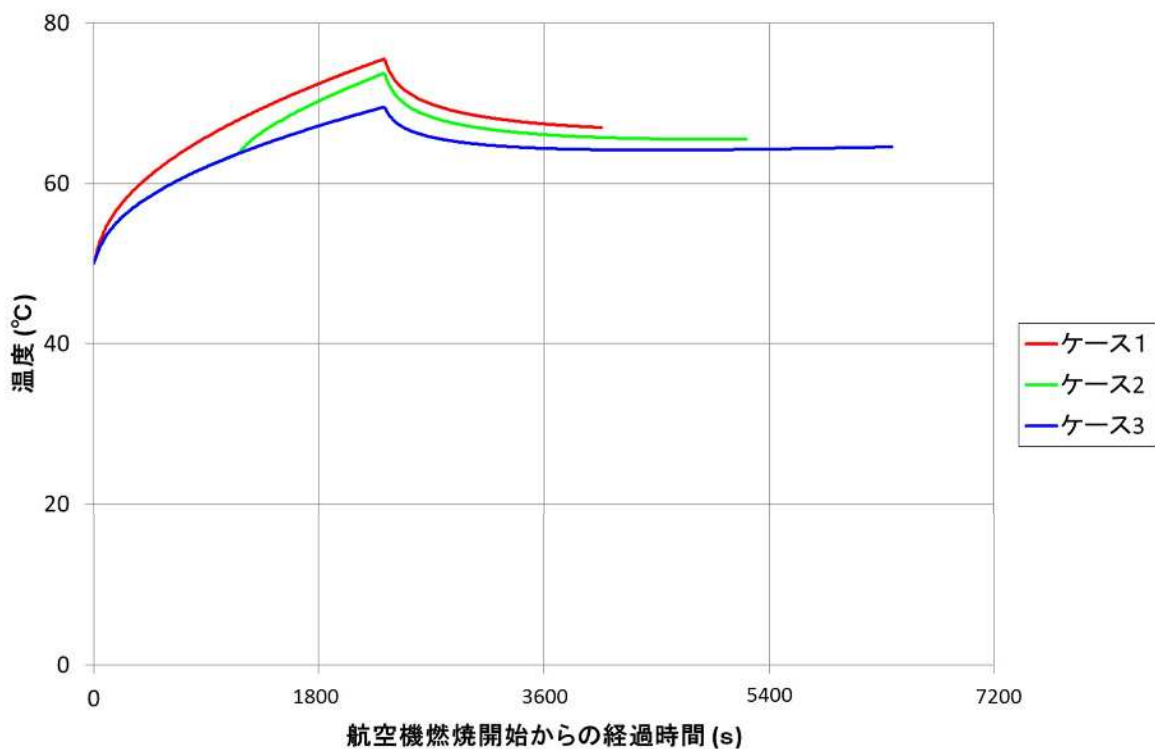
燃焼経過時間 (s)	輻射強度 (W/m ²)
0～2324	759.4
2324～4060	178.4
4060～	0

(ケース 2)

燃焼経過時間 (s)	輻射強度 (W/m ²)
0～1162	581.0
1162～2324	759.4
2324～5222	178.4
5222～	0

(ケース 3)

燃焼経過時間 (s)	輻射強度 (W/m ²)
0～2324	581.0
2324～6384	178.4
6384～	0



第 62 図 火災重畳による貯蔵建屋外壁の温度変化

第 62 図において、温度は外壁初期温度 50℃を加算した値であり、外壁温度の最大はいずれのケースも航空機墜落による火災の燃焼が終了した時間となっている。これらの最大値について、第 36 表に示す。

第 36 表 各ケースにおける貯蔵建屋外壁面最高温度

	温度 (°C)
ケース 1	76
ケース 2	74
ケース 3	70

以上の結果より、いずれのケースにおいてもコンクリートの許容温度である 200℃以下であることが確認でき、航空機墜落による火災と敷地内危険物貯蔵設備の火災が重畳した場合においても貯蔵建屋外壁への影響はないことを確認した。

7.3.4 貯蔵建屋外壁内表面からの熱伝達に起因する貯蔵建屋内雰囲気温度上昇による金属キャスクへの影響

火災からの輻射熱により貯蔵建屋外壁温度が上昇し、外壁内表面からの熱伝達による貯蔵建屋内の雰囲気温度上昇については、航空機墜落による火災単独の場合、エンジン発電機の火災単独の場合のいずれの場合も貯蔵建屋外壁の内表面の温度上昇はほとんど生じていない（第44図，第58図）。また、両者の重畳による外壁外表面温度は最大で約76℃であることから、6.2.1のとおり、森林火災（発火点1（発火時刻7:56））に包絡されるため、外壁内表面からの熱伝達による貯蔵建屋内の雰囲気温度上昇は無視できる。

7.3.5 熱気流の侵入に起因する貯蔵建屋内雰囲気温度の上昇による金属キャスクへの影響

各火災単独の評価結果よりエンジン発電機による火災の離隔距離は27 m、航空機墜落による火災の離隔距離は50 mであることから、航空機がエンジン発電機上に墜落することは想定できないため、航空機の墜落により発生した火災がエンジン発電機の火災を誘発する場合を想定すると、発生した熱気流は給気口において混合されて流入する。混合された熱気流の温度は重畳することなく凡そ各発火源の熱気温度を平均した温度になると考えられるため、両火災の評価を合算した場合よりも発火源別の評価の方がより保守的な結果になる。

航空機墜落及びエンジン発電機による火災の熱気流が直接給気口フードに当たる流速での温度評価を実施したところ、航空機火災の温度上昇のほうが大きかった。そこで、エンジン発電機についても、航空機火災において給気口に直接当たる場合の流速で計算を実施した。

(1) 評価条件

(a) 火災から給気口フードまでの水平距離

給気口フードの張り出し部が 2 m であることから

- ・ 航空機 : $50.0 - 2.0 = 48.0$ (m)
- ・ エンジン発電機 : $27.0 - 2.0 = 25.0$ (m)

(b) 火災発生源と給気口フード位置を結ぶ直線の傾き ($\tan \beta'$)

- ・ 航空機 : $\tan \beta' = 6.7/48 = 0.1395 \Rightarrow 0.140$
- ・ エンジン発電機 : $\tan \beta' = 6.7/25 = 0.2680 \Rightarrow 0.268$

(c) 燃焼時発熱量 ($\Delta H_{c, \text{eff}}$)

- ・ 航空機 : 43000 (kJ/kg) (NUREG-1805 に記載の値)
- ・ エンジン発電機 : 44400 (kJ/kg) (NUREG-1805 に記載の値)

(d) 質量低下速度 (m)

- ・ 航空機 : 0.054 (kg/m²/s) (NUREG-1805 に記載の値)
- ・ エンジン発電機 : 0.044 (kg/m²/s) (NUREG-1805 に記載の値)

(e) 燃焼面積 (S)

- ・ 航空機 : 46.6 (m²)
- ・ エンジン発電機 : 4.97 (m²)

(f) 熱源寸法 (D)

燃焼面積から等価直径を算定する。(有効桁数小数点第 3 位で切り上げ)

- ・ 航空機 : 燃焼面積 $S = 46.6$ (m²) より

$$D = 2\sqrt{\frac{S}{\pi}} = 7.7028 \Rightarrow 7.71 \text{ (m)}$$

- ・ エンジン発電機 : 燃焼面積 $S = 4.97$ (m²) より

$$D = 2\sqrt{\frac{S}{\pi}} = 2.51555 \Rightarrow 2.52 \text{ (m)}$$

(g) 風速 (U)

評価結果の厳しくなった航空機の主軸が直接給気口にあたる 18.08 (m/s) とした。

(2) 評価結果

(a) 発生熱量

燃焼時発熱量及び質量低下速度，燃焼面積より次式を用いて発生熱量を算出する。

$$Q=(1-\chi)\cdot\Delta H_{c,eff}\cdot S\cdot m \quad (\text{kW})$$

ここで， χ は全発熱量のうち輻射として環境へ放射される熱量比（放射分率）であり，給気温度が保守的に評価されるように実験結果⁽⁸⁾から得られている最小値として 0.05 を採用した。算出した発生熱量は以下のとおり。

・ 航空機：

$$\begin{aligned} Q_1 &= (1-\chi)\cdot\Delta H_{c,eff}\cdot S\cdot m = (1-0.05)\times 43000\times 46.6\times 0.054 \\ &= 102794.940 \quad (\text{kW}) \end{aligned}$$

・ エンジン発電機

$$\begin{aligned} Q_2 &= (1-\chi)\cdot\Delta H_{c,eff}\cdot S\cdot m = (1-0.05)\times 44400\times 4.97\times 0.044 \\ &= 9223.923 \quad (\text{kW}) \end{aligned}$$

(b) 熱気流の主軸傾き角

・ 航空機

$$\begin{aligned} Fr &= U/\sqrt{D\cdot g} = 18.08/\sqrt{7.71\cdot 9.80665} = 2.079 \\ \Lambda &= (U\cdot D^{1/3})/(Q_1\cdot g/(C_p\cdot \rho\cdot T_0))^{1/3} \\ &= (18.08\cdot 7.71^{1/3})/(102794.940\cdot 9.80665/(1.007\cdot 1.1463\cdot 308.15))^{1/3} \\ &= 2.524 \end{aligned}$$

$$\tan \beta = C_t\cdot \Lambda^{-k}\cdot Fr^{-o} = 0.37\times 2.524^{-(9/8)}\times 2.079^{-(0.0975)} = 0.140$$

・ エンジン発電機

$$\begin{aligned} Fr &= U/\sqrt{D\cdot g} = 18.08/\sqrt{2.52\cdot 9.80665} = 3.637 \\ \Lambda &= (U\cdot D^{1/3})/(Q_2\cdot g/(C_p\cdot \rho\cdot T_0))^{1/3} \\ &= (18.08\cdot 2.52^{1/3})/(9223.923\cdot 9.80665/(1.007\cdot 1.1463\cdot 308.15))^{1/3} \\ &= 3.883 \end{aligned}$$

$$\tan \beta = C_t\cdot \Lambda^{-k}\cdot Fr^{-o} = 0.37\times 3.883^{-(9/8)}\times 3.637^{-(0.0975)} = 0.091$$

(c) 熱気流の主軸温度分布式

・ 航空機

$$\Psi_{xm} = C_0 / \Lambda^s \cdot Fr^t = 1.32 / 2.524^{0.5} \cdot 2.079^{-0.8833} = 1.586$$

$$\Delta \theta_m = \frac{\Psi_{xm} \cdot \left(Q_1^2 \cdot T_0 / C_p^2 \cdot \rho^2 \cdot g \right)^{1/3}}{D^{1/3} \cdot X^{4/3}}$$

$$= \frac{1.586 \cdot \left(102794.94^2 \cdot 308.15 / 1.007^2 \cdot 1.1463^2 \cdot 9.80665 \right)^{1/3}}{7.71^{1/3} \cdot 48^{4/3}}$$

$$\Rightarrow 29 \text{ K} = 29 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

・ エンジン電機

$$\Psi_{xm} = C_0 / \Lambda^s \cdot Fr^t = 1.32 / 3.883^{0.5} \cdot 3.637^{-0.8833} = 2.096$$

$$\Delta \theta_m = \frac{\Psi_{xm} \cdot \left(Q_2^2 \cdot T_0 / C_p^2 \cdot \rho^2 \cdot g \right)^{1/3}}{D^{1/3} \cdot X^{4/3}}$$

$$= \frac{2.096 \cdot \left(9223.923^2 \cdot 308.15 / 1.007^2 \cdot 1.1463^2 \cdot 9.80665 \right)^{1/3}}{2.52^{1/3} \cdot 25^{4/3}}$$

$$\Rightarrow 27 \text{ K} = 27 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

以上より、エンジン発電機火災と航空機墜落による火災が重畳した場合の熱気流の温度上昇は最大で約 29℃と評価された。現実には、火災源から発生した熱気流が貯蔵建屋の給気口に侵入するような風向及び風速の一定の条件が火災継続時間を通じて維持されるとは考えられないこと、また、貯蔵建屋は大きな空間体積を持っており熱気流の侵入から建屋内雰囲気温度の上昇までには一定の時間遅れがあることから、火災による熱気流の温度上昇が直ちに建屋内雰囲気温度の上昇に繋がることは考えられないが、エ

ンジン発電機火災と航空機墜落による火災により発生する熱気流の侵入による温度上昇量は最大でも約 29℃である。ここで、貯蔵建屋内雰囲気温度が定常状態（雰囲気温度 45℃）から 29℃上昇したと仮定した場合 74℃となるが、定常状態における金属キャスク各部の温度（第 33 表の①）の値を上回らないことから、この値を超えて金属キャスクが雰囲気により熱せられることはなく除熱は妨げられないため、基本的安全機能に影響を与えるような金属キャスクの温度上昇をもたらすことはない。

7.3.6 貯蔵建屋内の空気の流れが変化した場合の金属キャスクへの影響

外部火災の影響により貯蔵建屋内の空気の流れが変化した場合として、現実には考えにくい貯蔵建屋外壁内表面からの伝熱や熱気流の侵入による貯蔵建屋内雰囲気温度の上昇において前述の評価結果を超える熱影響により金属キャスクの温度と雰囲気温度が等しくなり、貯蔵建屋内のドラフト力が失われて金属キャスク表面における対流及び金属キャスク表面からの輻射が失われた状態を仮定する。

この場合、金属キャスクへの影響のうち最も保守的な状態として金属キャスクからの放熱が失われ断熱状態となり、金属キャスク内の使用済燃料から発生する崩壊熱が全て金属キャスクの温度上昇に使われたものとして、金属キャスクの温度上昇を評価する。

金属キャスクが断熱状態となる時間を、エンジン発電機火災（4060 秒間）と航空機墜落による火災のうち燃焼継続時間が最大となる場合（①民間航空機（計器飛行方式）による火災：6677 秒間）で、燃焼継続時間の長い 6677 秒間を保守的に 3 倍程度考慮して 21000 秒間と仮定すると、この間のキャスクの温度上昇 ΔT は次式で表される。

$$\Delta T = Q (\text{最大崩壊熱量}) \times t (\text{断熱時間}) \div C (\text{金属キャスクの熱容量})$$

$$Q : 12.1 \text{ kW}, \quad t : 21000 \text{ s}, \quad C : 41850 \text{ kJ/K}$$

ここで、金属キャスクの熱容量は、比較的熱容量が大きく温

度が上昇しにくい中性子遮蔽材及び評価対象ではない内部収納物（使用済燃料）を除いて，保守的に熱容量が小さい炭素鋼（90 トン）のものとする。

$$\therefore \Delta T = 12.1 \times 21000 \div 41850 = 6.072 \approx 6.1 \text{ K} = 6.1 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

金属キャスクの各部が一様にこの温度上昇分昇温するとした場合，定常状態における金属キャスク各部の温度の設計余裕（第 33 表）に比べて非常に小さいことから，金属キャスクの各部への影響はなく基本的安全機能に影響をもたらすような金属キャスクの温度上昇は考えられない。

実際に金属キャスクが断熱状態になった場合，金属キャスク内部の材質の違い及び構造により一様な温度上昇にはならないと考えられるが，金属キャスクを熱容量が低い（温度が上昇しやすい）炭素鋼とみなしていること，断熱時間を外部火災の火災継続時間の 3 倍としていることから実際に断熱状態になった場合の金属キャスクの各部の温度上昇量の不確定性を本評価で十分包絡できると考えられる。

$$\therefore \Delta T = 12.1 \times 21000 \div 41850 = 6.072 \approx 6.1 \text{ K} = 6.1 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

この温度上昇は，定常状態における金属キャスク温度の設計余裕（第 33 表）に比べても小さく，基本的安全機能に影響をもたらすような金属キャスクの温度上昇はない。

8. ばい煙及び有毒ガスの影響評価について

8.1 評価の考え方

外部火災により発生するばい煙及び有毒ガスについては、火災による上昇気流により上空に運ばれることを考慮すると、ばい煙及び有毒ガスが貯蔵建屋の周辺に滞留する可能性は低いと考えられるが、万一ばい煙及び有毒ガスが貯蔵建屋内の侵入した際に、貯蔵建屋及び金属キャスクに与える影響について評価を実施する。

貯蔵建屋内には、金属キャスク以外に、金属キャスクを取扱う上で必要な各設備（天井クレーン、搬送台車）やエリアモニタの検知器といった設備が存在するが、いずれもばい煙や有毒ガスによって金属キャスクの基本的安全機能に直接影響を及ぼす設備はない。貯蔵建屋内に侵入したばい煙については、建屋の構造上長時間滞留することは考えにくく、金属キャスクを含む建屋内の各設備に大きな影響を与えることはないものと考えられる。また、短時間でもばい煙や有毒ガスの環境に晒された金属キャスクや各設備に対する長期的な影響についても、貯蔵建屋内の状況の常時監視や毎日の巡視点検、及び定期的な設備の詳細点検・保守の実施により都度異常の有無を確認することができ、安全性を確保できるものと考えられる。

有毒ガスについては、外部火災により発生すると考えられる物質においては、IDLH*対象物質である一酸化炭素(CO)、二酸化炭素(CO₂)、二酸化硫黄(SO₂)、二酸化窒素(NO₂)が考えられるが、これらは人体に対する影響を左右するものであり、また腐食性のある二酸化硫黄については、長時間の環境下に晒された場合貯蔵建屋内の検知器や電源端子箱に影響を及ぼす可能性も考えられるが、通常の点検や保守で対処可能であることから、有毒ガスに対する影響評価に対しては考慮する必要はない。

また、貯蔵建屋内で発生する火災に関し、ケーブル被覆管の燃焼により塩化水素が発生する可能性があるが、金属キャスクに接続されるケーブルを含めキャスク周辺のケーブルについては難燃性ケーブルを

使用するため火災の可能性は低く，万一発火した場合においても貯蔵建屋内に常備しているセルフエアセットや酸素ボンベ，防護マスクといった防護装置を装着の上迅速な消火活動が可能であることから，塩化水素ガスに関しても特に考慮する必要はない。

これより，貯蔵建屋内の金属キャスク以外の設備については外部火災に対する影響評価は考慮する必要はない。

*:IDLH(Immediately Dangerous to Life of Health)

30分暴露によって生命及び健康に直ちに危険を及ぼす環境空気中の物質の濃度限度値，脱出を妨げる目や呼吸器への刺激の予防も考慮されている。発電炉の安全審査においても，中央制御室の居住性への影響評価で対象とされている物質。

なお，事務建屋及び備品管理建屋の一部は従業員の執務のためのものであり，基本的安全機能を有する設備に対し直接操作を行うことにより当該機能を維持する設備は設置されておらず人員が常駐する必要はない。外部火災発生の際には，事務建屋内の人員は速やかに避難することで危険を回避することができることから，事務建屋については外部火災に対する影響評価について考慮する必要はないものとする。また，出入管理建屋，受変電設備建屋及び備品管理建屋については，いずれも常時人が常駐することではなく，また基本的安全機能を有する設備に対し直接操作を行うことにより当該機能を維持する設備は設置されていないため，外部火災に対する影響評価について考慮する必要はない。

8.4 影響評価結果

8.4.1 貯蔵建屋への影響評価

外部火災によるばい煙については貯蔵建屋の給排気口より侵入することが考えられるが，ばい煙の粒子径は一般的にはマイクロメートル(μm)のオーダーであるため，外部からのばい煙等の付着により給排気口が閉塞される可能性は極めて低い。

また，貯蔵建屋の給気口の位置は地上高さ約6m，排気口の位置は地

上高さ約 23m であり，さらに給気口にフード，排気口に遮風板が設置されている。これらの設置高さについては，過去の気象観測記録による最大積雪量 170cm^{*1}，及び降下火砕物最大堆積層厚約 30cm^{*2}と比較しても十分高い位置にあり，ばい煙等を含む異物の堆積による給排気口の閉塞はない。

*1：むつ特別地域気象観測所の積雪観測記録（1935年～2007年）における最大積雪量（1977年2月15日）

*2：洞爺火山灰による最大堆積層厚
（*1,*2とも「使用済燃料貯蔵事業許可申請書」添付書類八 記載値）

また，給排気口の開口寸法の仕様について，第37表に示す。

第37表 貯蔵建屋給排気口の仕様

		開口寸法	仕様
給気口	貯蔵区域	幅約 4000mm × 高さ約 3500mm (片壁面あたり 12 箇所，計 24 箇所設置)	・防雪フード設置(防鳥網 φ 1.5mm × 20mm 格子，地上面からフード下端までの高さ約 6700mm)
	受入れ区域	幅計約 15000mm × 高さ約 3000mm	・防雪フード設置(防鳥網 φ 1.5mm × 20mm 格子，地上面からフード下端までの高さ約 6200mm)
排気口	貯蔵区域	幅約 8000mm × 高さ約 3000mm (片壁面あたり 12 箇所，計 24 箇所設置)	・遮風板設置(ガラリメッシュ約 30mm 幅，地上面から遮風板下端までの高さ約 22700mm)
	受入れ区域	幅計約 28000mm × 高さ約 1300mm	・遮風板設置(ガラリメッシュ約 30mm 幅，地上面から遮風板下端までの高さ約 19300mm)

8.4.2 金属キャスクへの影響評価

貯蔵建屋内に侵入したばい煙の熱による金属キャスクへの影響については，ばい煙の建屋内への侵入から短時間の場合は，建屋内の安全が確認でき次第速やかに金属キャスクやその他の設備の状況について点検を実施し，必要に応じて清掃を実施することにより安全性を確保できる。

貯蔵建屋内に侵入したばい煙，有毒ガスについては，建屋の構造上長時間滞留することは考えにくく，金属キャスクを含む建屋内の各設

備に大きな影響を与えることはないものと考えられる。また、短時間でもばい煙や有毒ガスの環境に晒された金属キャスクや各設備に対する長期的な影響についても、貯蔵建屋内の状況の常時監視や毎日の巡視点検、及び定期的な設備の詳細点検・保守の実施により都度異常の有無を確認することができ、安全性を確保できることから、外部火災に対する二次的影響の評価についてはばい煙及び有毒ガスによる評価を実施することとする。

8.4.2.1 金属キャスクの閉じ込め機能について

金属キャスクについては、放射性物質を限定された空間に閉じ込めるための以下の配慮がなされている。

- ① 蓋及び蓋貫通孔のシール部には長期間にわたって閉じ込め性能を維持する観点から耐熱性、耐食性を有し、耐久性の高い金属ガスケットを用いる。
- ② 金属キャスク本体を堅固な構造とし、蓋部は一次蓋、二次蓋の二重蓋構造とする。閉じ込め境界は、本体胴、一次蓋、バルブカバー及び金属ガスケットとする。また、本体胴、一次蓋、二次蓋、バルブカバー、圧力センサ及び金属ガスケットからなる空間を閉じ込め監視圧力境界とする。
- ③ 金属キャスク内部は負圧とし、蓋間空間はあらかじめ正圧とすることにより圧力障壁を設ける。
- ④ 蓋間空間の圧力を監視することにより、万一、いずれかの金属ガスケットに漏えいが生じた場合、閉じ込め機能低下が検出できる構造とする。この場合でも、金属キャスク内部の負圧は維持され、内部気体が直接大気中に放出されることはない。
- ⑤ 万一の蓋部の閉じ込め機能の異常に対して、蓋を追加装着できる構造とすることで、閉じ込め機能の修復性を考慮する。

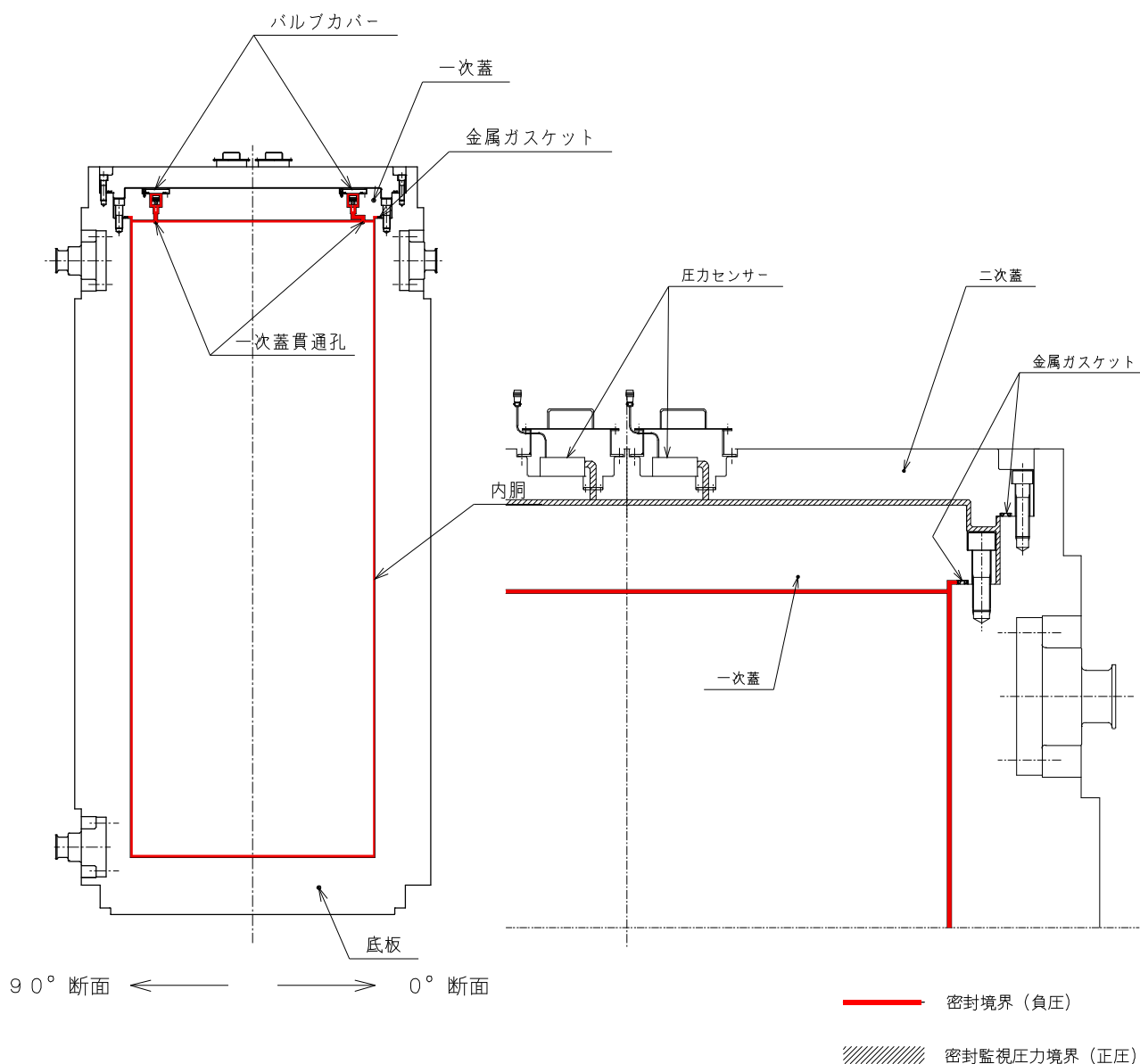
上記の配慮により金属キャスクは密封構造となっており、境界内

部を負圧にすることで閉じ込め機能を保っている。金属キャスクの密封境界部について第 63 図に示す。

金属キャスクへのばい煙、有毒ガスの影響については、金属キャスク本体へのばい煙の付着あるいは二次蓋と金属キャスク本体の間隙から侵入し二次蓋の金属ガスケットに付着することが考えられるが、金属キャスク本体については、外気に触れる部材において塗装による防錆処置を施してあり、直接外気に触れる外筒、二次蓋の塗装には、耐食性のほかに耐放射線性・汚染除去性・耐熱水性が求められる原子力プラントでは多く使用されているエポキシ樹脂系塗料が用いられている。同じく外気に触れる蓋ボルトには耐摩耗性に優れたメッキを施してある。このため、ばい煙や腐食性のある有毒ガスに対しても影響はないものとする。なお、塗装の防錆効果を考慮せずキャスク本体素材である炭素鋼の全面腐食を仮定して評価したところ、数 mm 程度（60 年間）の減肉であり実用上問題となる腐食量にはならない結果となったことを確認している。

また、貯蔵状態においては、二次蓋の上面について傷や汚れの対策を施すとともに、海塩粒子の付着や異物の侵入を抑制する。

さらに、貯蔵期間中は定期的に外観検査を行い、塗装表面の都度清掃や、傷などがつき金属表面が露出した場合は補修塗装を行う計画であることから、ばい煙及び有毒ガスによる金属キャスクへの影響はないものと判断する。



第 63 図 金属キャスクの密封境界部

8.4.2.2 三次蓋取付フランジ部の保護について

金属キャスクの貯蔵期間中は，下記の目的のため金属キャスクの二次蓋上部に対策を施すこととしている。自主的に実施する対策の例として，二次蓋上部への保護カバーの設置が考えられる。

- ①三次蓋取付フランジ部（ゴムOリングシール面と蓋取り合い面で構成）は，貯蔵後輸送時の密封境界を形成する部分であり，傷

防止及び防錆処理の観点から保護が必要である。

- ②二次蓋端面と本体側二次蓋取り合い面（嵌め合い部）の隙間への異物混入防止及び防錆処理面の保護，及び二次蓋ボルト取付部への異物混入防止とボルト着座部の保護のために，二次蓋ボルト部を覆うような構造とする。
- ③現場における定期点検において柔軟な確認作業が行えるよう，保護カバーを設置する場合は容易に取外しが可能な構造，寸法，重量とする。

以上の理由から，保護カバーを設置する場合，その材料には軽量のエンジニアリングプラスチックを使用することとしている。保護カバーの設置概要図について第 64 図に示す。三次蓋フランジ面に装着後は，ズレ防止のため三次蓋ボルト穴にピンを設置する。また，その取扱い性を考慮し人力でも取り扱えるように分割式とし，容易に取外しが可能な設計とする。

したがって，金属キャスクの保守点検時における二次蓋のボルト穴や三次蓋シール面の確認時においても，保護カバーがその実施に影響することはない。

使用を予定しているエンジニアリングプラスチックは，MC ナイロン（登録商標）という名称であるナイロン 6（ $\{CO-(CH_2)_5-NH\}_n$ ）と呼ばれるポリアミド樹脂であり，重合法及び成形方法を改善した大形素材で，機械的強度や耐油性に優れ汎用的に使用されている。以下に，その特徴を示す。

- ・耐熱性：連続使用温度 120℃ に対し，貯蔵中の蓋部温度は 90℃ 程度であることから耐熱性が問題となることはない。
- ・耐燃性：JIS による酸素指数(22%以下が可燃性)は 26%であり可燃性材ではなく，また ASTM D635（燃焼速度試験）において自己消火性*を有する材料と定義されている。

(*自己消火性：単独で燃焼を継続しない性質)

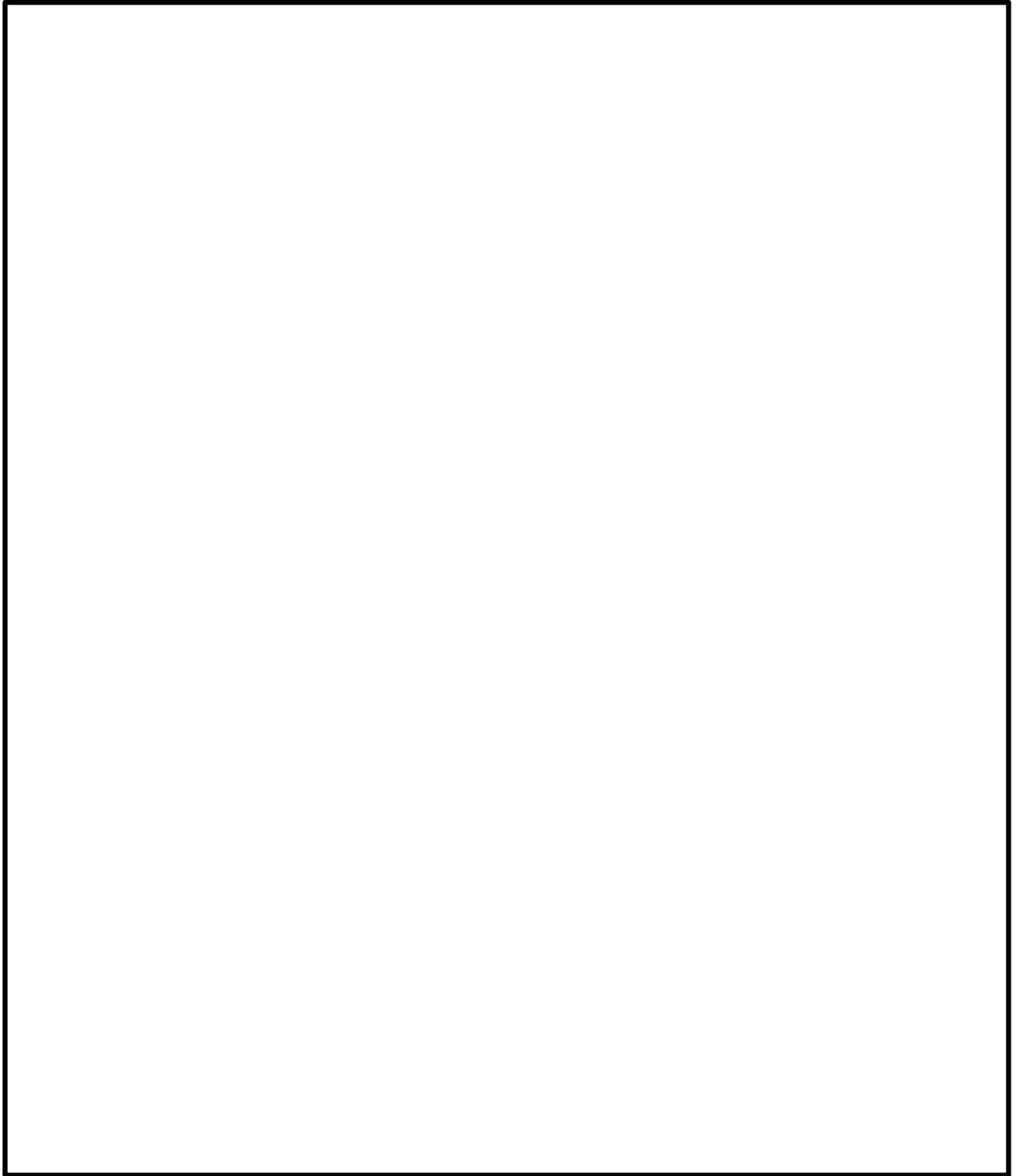
- ・耐放射線性：放射線照射量が 10^4 Gy を超えてから機械特性の変

化が見られるが、貯蔵中（50年間）の当該部の照射量は最大で 10^2 Gy 程度であることから50年間の貯蔵においても放射線による劣化が問題となることはない。

- ・ 耐候性：材料メーカーの3年間の屋外試験で紫外線や雨に晒しても有意な劣化がなかったことが確認されており、耐候性に優れている。
- ・ 耐錆性：三次蓋取付フランジ部のシート面の錆に対しては、海風による錆発生を低減でき、またシート面に接する部分についても樹脂であることから異種金属の接触による錆発生（腐食）もない。

金属キャスクは、貯蔵期間中は自然換気構造である貯蔵建屋にて保管されるが、保護カバーは上記の特徴をもつ材料を用いているため、貯蔵建屋内にばい煙が侵入した場合においても、貯蔵中の金属キャスクに影響を及ぼすことはない。

枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。



第 64 図 金属キャスク保護カバー設置概要図

8.5 居住性への影響評価

貯蔵建屋及び事務建屋の居住性の影響については、外部火災により発生する有毒ガスに対する評価となる。外部火災により発生すると考えられる有毒ガスについては、IDLH 対象物質である一酸化炭素(CO)、二酸化炭素(CO₂)、二酸化硫黄(SO₂)、二酸化窒素(NO₂)が考えられるが、これらは人体に対する影響を左右するものである。

貯蔵建屋については、金属キャスク貯蔵期間中は金属キャスク及び各設備の点検、保守の実施時以外に人が常駐することはない、火災発生時には建屋内の人員は迅速に安全な場所に避難することにより危険を回避することができることから、居住性への影響については考慮する必要はない。

事務建屋は従業員の執務のための建屋であり、基本的安全機能を有する設備に対し直接操作を行うことにより当該機能を維持する設備は設置されておらず人員が常駐する必要はない。外部火災発生の際には、事務建屋内の人員は速やかに避難することで危険を回避することができることから、事務建屋については外部火災に対する居住性への影響については考慮する必要はないものとする。

貯蔵建屋や事務建屋からの避難の際、有毒ガスの影響が懸念される場合でも、貯蔵施設内に設置されている防護マスク、空気呼吸器（セルフエアセット）により対処することができる。

以上より、外部火災による有毒ガスに対する居住性への影響はない。

参考文献

- (1) 原子力規制委員会「原子力発電所の外部火災影響評価ガイド」
(平成 25 年 6 月)
- (2) 青森県石油コンビナート等防災計画 (平成 23 年 2 月修正)
- (3) 日本機械学会「伝熱工学資料 改訂第 5 版」
- (4) 「実用発電用原子炉施設への航空機落下確率の評価基準について (平成 21・06・25 原院第 1 号 (平成 21 年 6 月 30 日原子力安全・保安院一部改正))」(原子力安全・保安部会, 原子炉安全小委員会)
- (5) 「航空機落下事故に関するデータの整備」(独立行政法人 原子力安全基盤機構, JNES/SAE08-012 08 解部報-0012, 平成 20 年 3 月)
- (6) 国土交通省 H P 「航空輸送統計調査 年報」(昭和 63 年～平成 19 年分)
<http://www.mlit.go.jp/k-toukei/syousaikensaku.html>
- (7) 「正方形熱源の風下における温度分布 (佐賀武司)」(東北工業大学紀要 I 理工学編 第 16 号 1996)
- (8) 自治省消防庁消防研究所「大規模石油タンクの燃焼に関する研究報告書」(H11/9)p7 Figure 1.2

コンクリート許容温度（200℃）について

コンクリートの熱影響に対する圧縮強度については、実証試験の結果⁽¹⁾より 200℃程度以下までであれば常温の状態とほとんど変化がなく、影響も少ないことが確認されている。

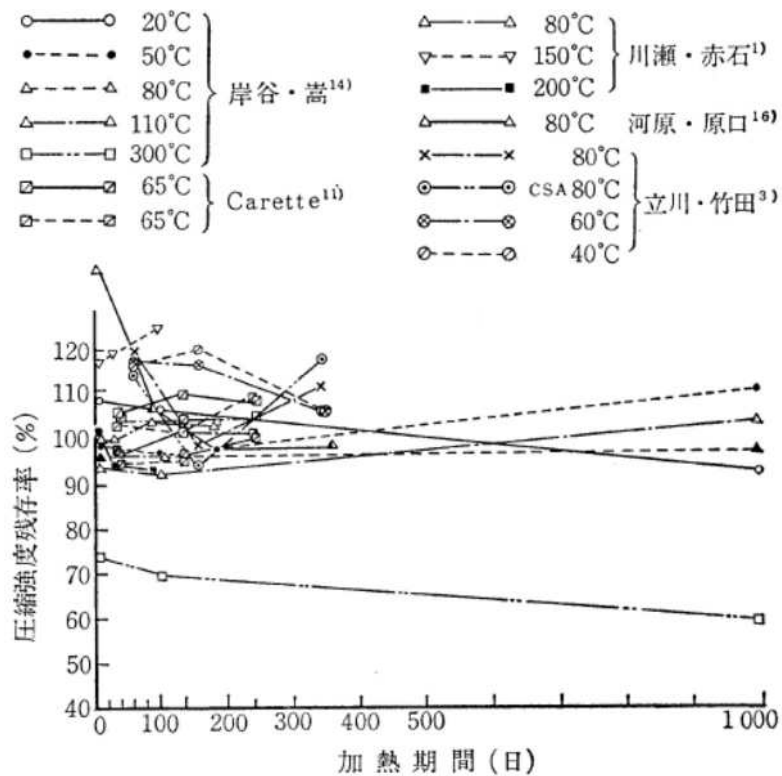
この実証試験における供試体の加熱方法については、供試体の内外温度差と供試体内の温度分布の不均一を小さくし、熱応力の影響を小さくするため 100℃/hr にてそれぞれの計画加熱温度（常温（20℃）及び 100℃～600℃まで 100℃刻みの計 7 パターン）まで加熱し、計画加熱温度到達後は供試体内部温度が均一となるようにそれぞれの計画加熱温度にて 24 時間保持させ、その後自然冷却により降温している。供試体の加熱パターンについて、別添 1 - 1 図に示す。



別添 1 - 1 図 コンクリート供試体加熱パターン

加熱後の供試体については、加熱温度 300℃までは外観上の変化も認められなかったことから、コンクリート温度 200℃において 24 時間保持した状態でもコンクリートの強度については異常がないことが確認できる。

また、他の論文⁽²⁾においても、コンクリート材料の耐熱性を評価する場合には、加熱温度のほかに加熱期間が問題になるとしており、各実験結果を比較した上で、加熱期間が100日以下の短期である場合には、加熱期間が短い方が圧縮強度の低下はより少ないものと評価している（別添1-2図）ことから、上記、コンクリート温度200℃において24時間保持した状態でもコンクリートの強度については異常がないことの妥当性を示しているものと考えられる。



別添1-2図 加熱期間と圧縮強度残存率の関係

一方、森林火災によって外壁表面温度が最高で約138℃となった場合（発火点1（発火時刻7:56）における評価結果）のコンクリート温度上昇に対する時間変化については、別添1-3図に示すとおり2時間以内に加熱前の温度に戻ることが確認されることから、24時間と比較しても十分短時間であることが確認できる。また、その他の発火点（1（発火時刻6:58）、2、3）における評価結果に対しても別添1-4図のとおり約2時間以内に加熱前の温度に戻ることが確認されること

から、同様に 24 時間と比較して十分短時間であることが確認できる。

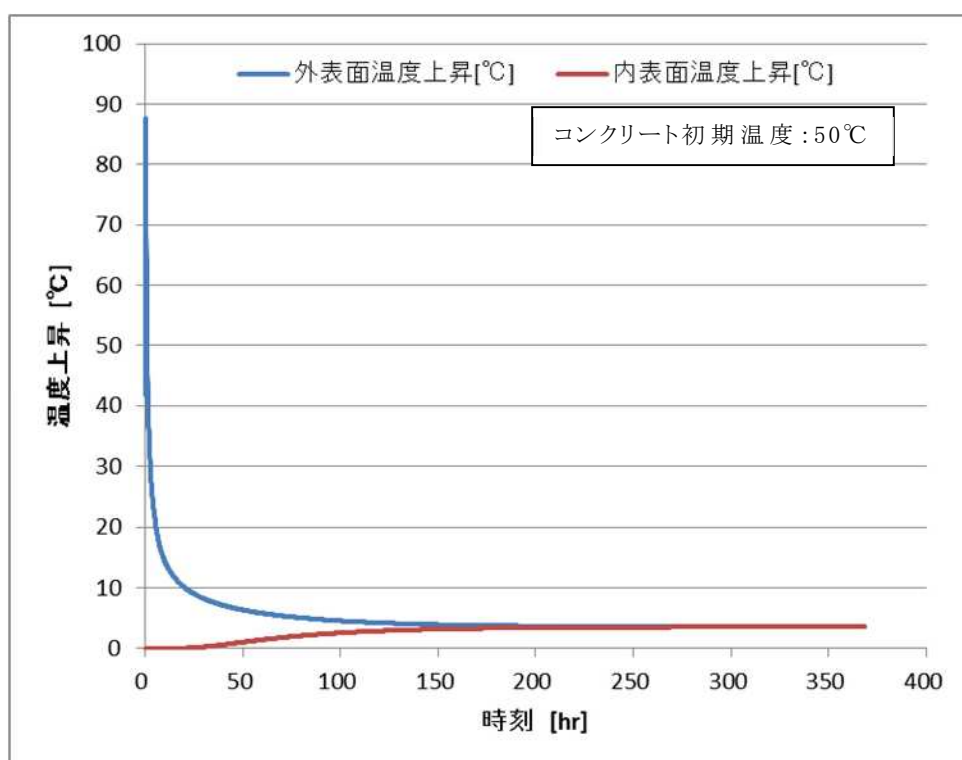
このことから、概括的にコンクリートの熱影響に対する強度については、200℃程度以下までであれば常温とほとんど変化がなく影響も少ないと考えられるため、貯蔵建屋外壁の許容温度については 200℃と定めた。

※コンクリート制限温度値(200℃)：

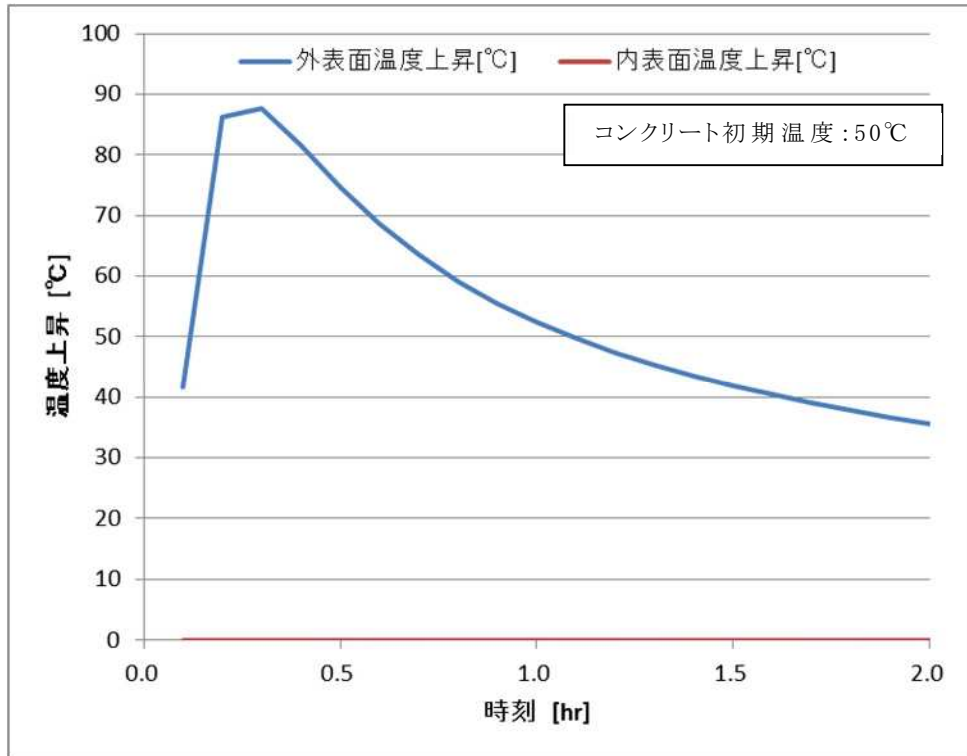
各文献値をもとにしたコンクリートの熱影響に対する温度上限値（新規制基準に対する安全審査で各事業者も採用している値）

参考文献

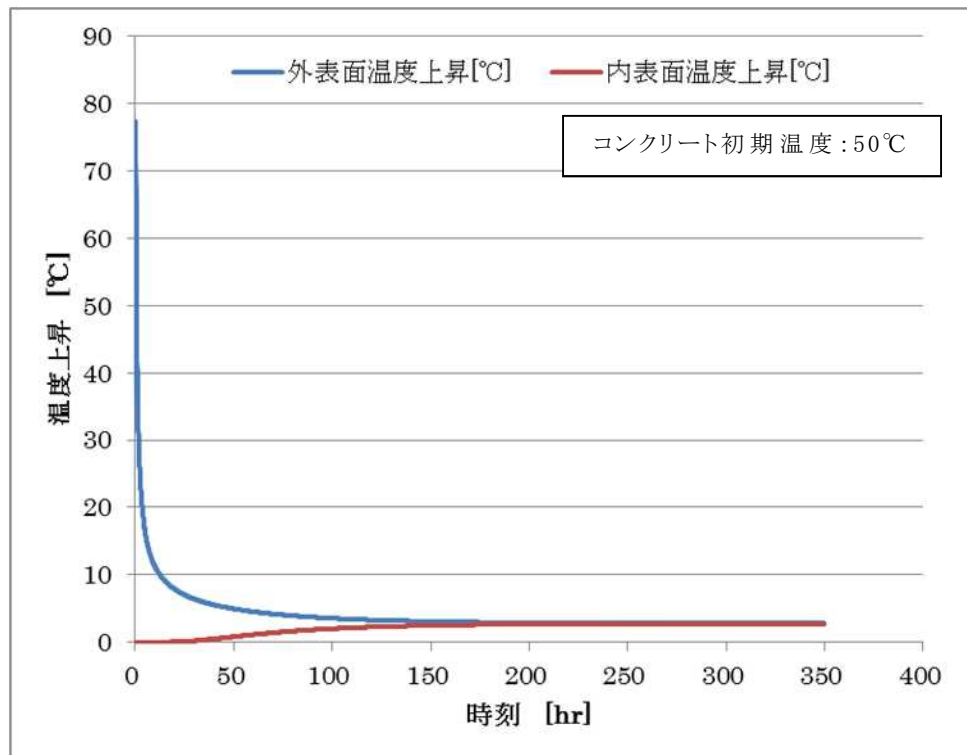
- (1) 論文「高温加熱を受けた高強度コンクリートの強度特性に関する研究」
(コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, 2003)
- (2) 論文「高温下のコンクリートの物性」(コンクリート工学 Vol.22(1984) No.3)



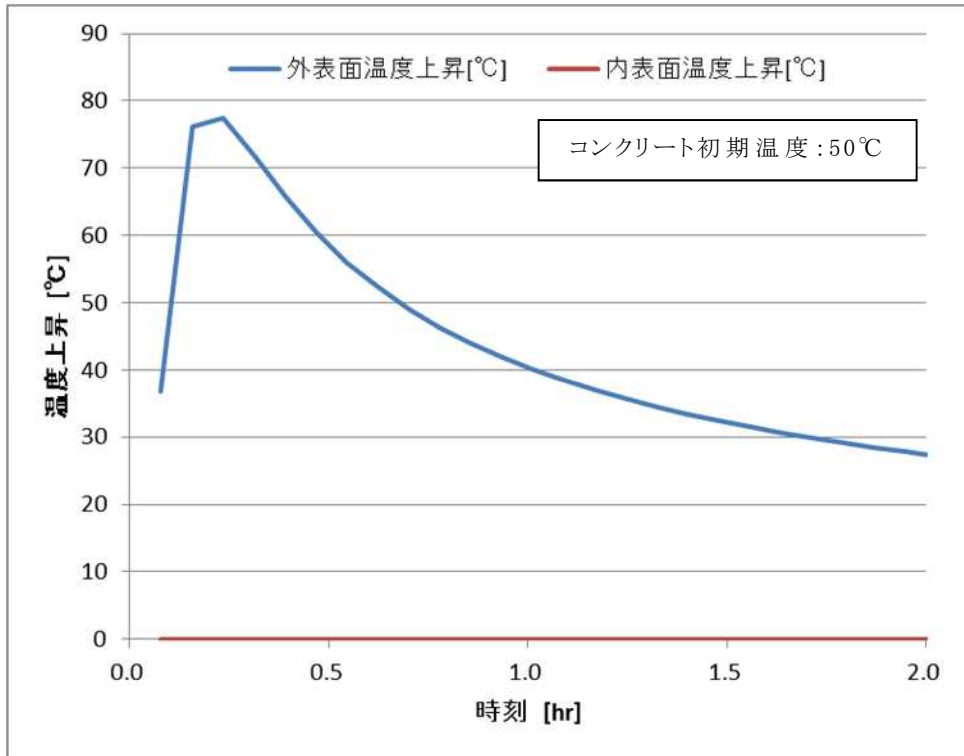
別添 1 - 3 図(1) 貯蔵建屋外壁（内壁）温度の時間変化
（発火点 1（発火時刻 7:56））



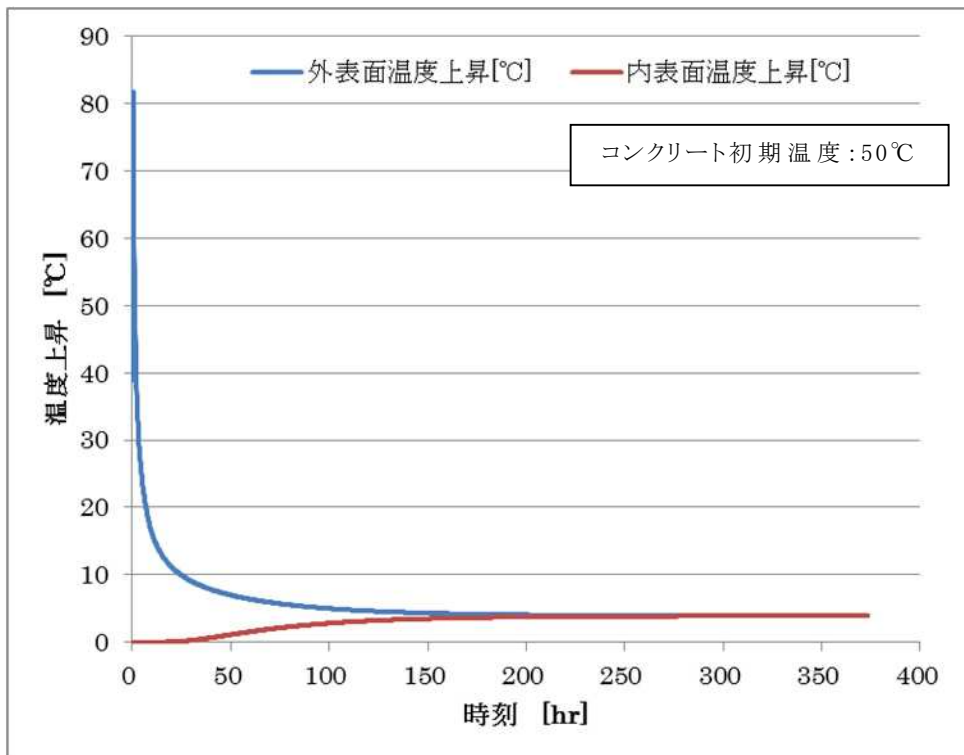
別添 1 - 3 図(2) 貯蔵建屋外壁（内壁）温度の時間変化
（発火点 1（発火時刻 7:56））



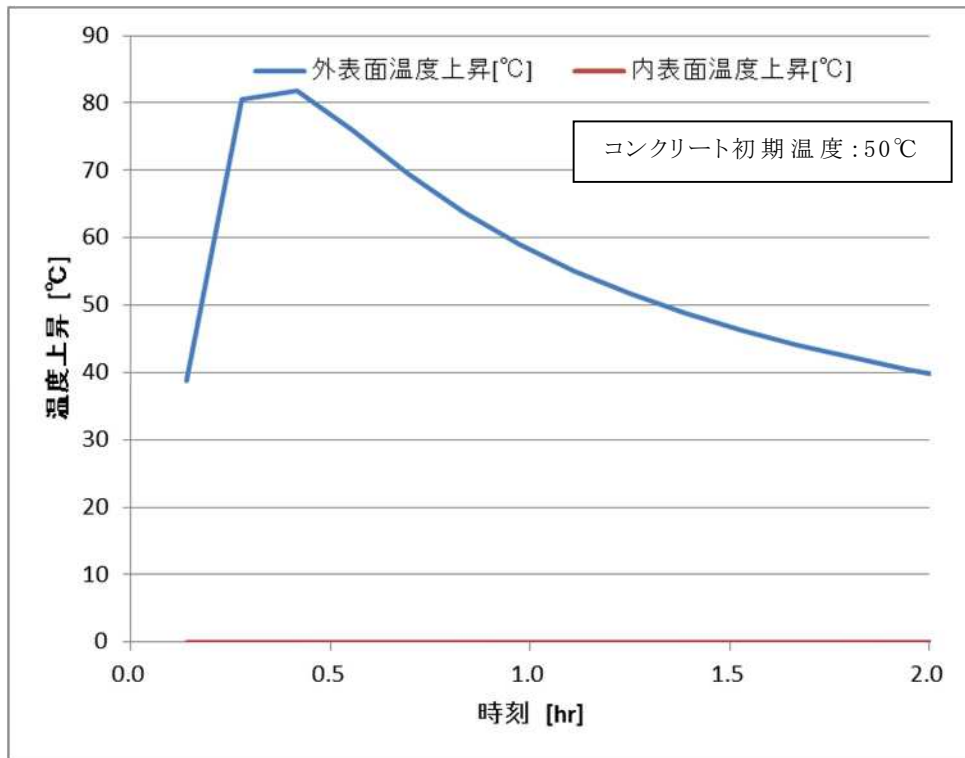
別添 1 - 4 図(1) 貯蔵建屋外壁（内壁）温度の時間変化
（発火点 1（発火時刻 6:58））



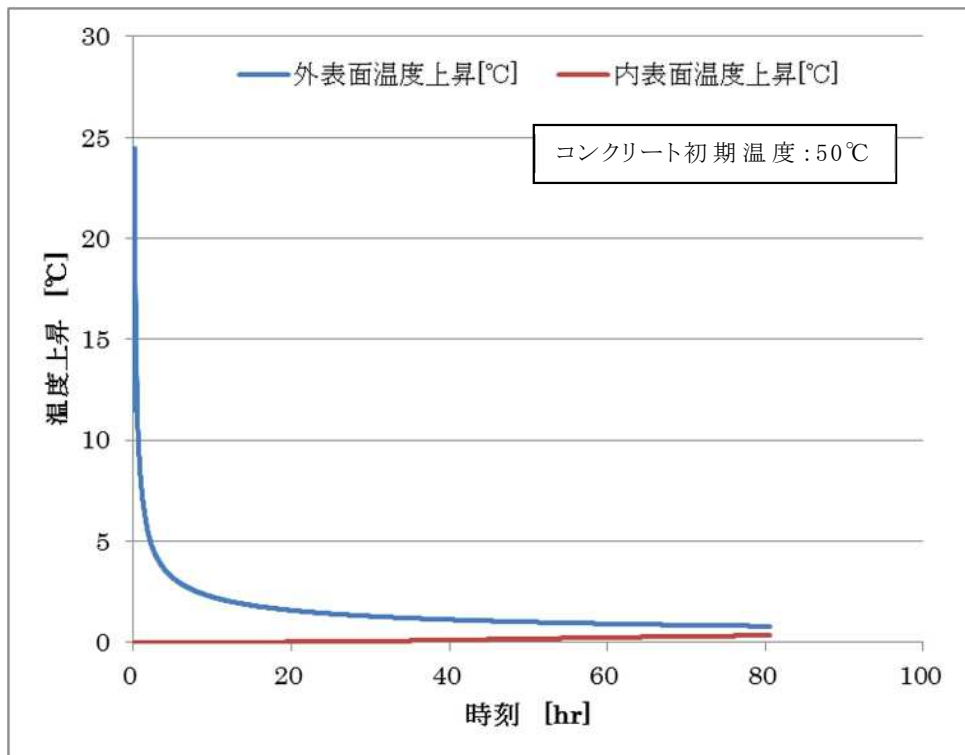
別添1-4図(2) 貯蔵建屋外壁（内壁）温度の時間変化
（発火点1（発火時刻 6:58））



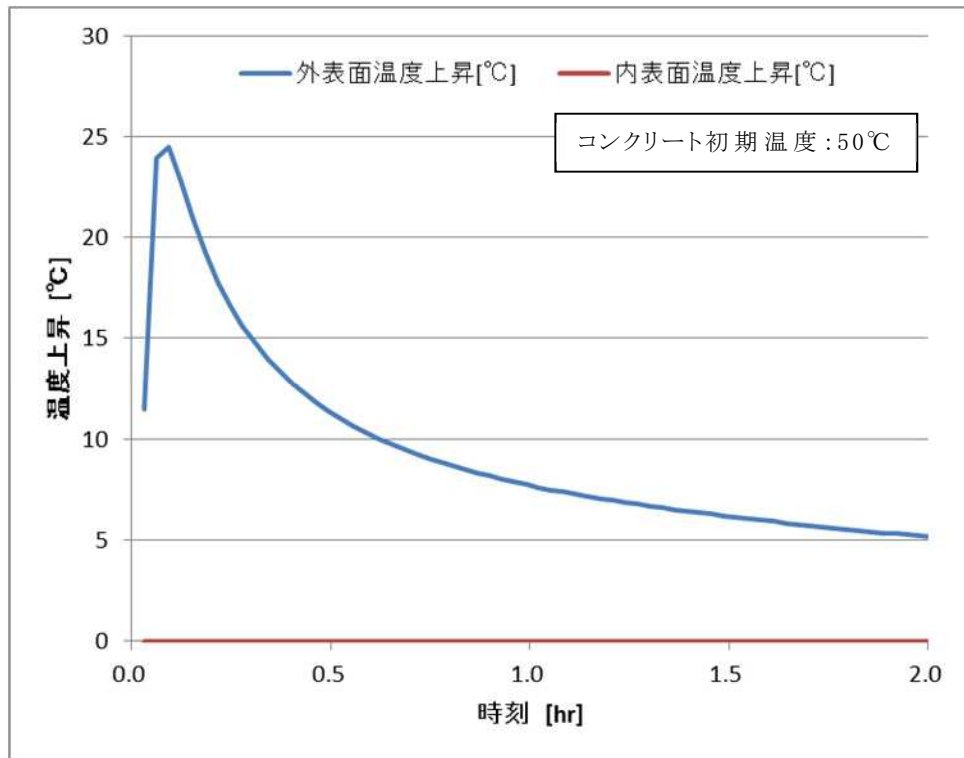
別添1-4図(3) 貯蔵建屋外壁（内壁）温度の時間変化
（発火点2（発火時刻 10:00））



別添 1 - 4 図(4) 貯蔵建屋外壁（内壁）温度の時間変化
（発火点 2（発火時刻 10:00））



別添 1 - 4 図(5) 貯蔵建屋外壁（内壁）温度の時間変化
（発火点 3（発火時刻 11:00））



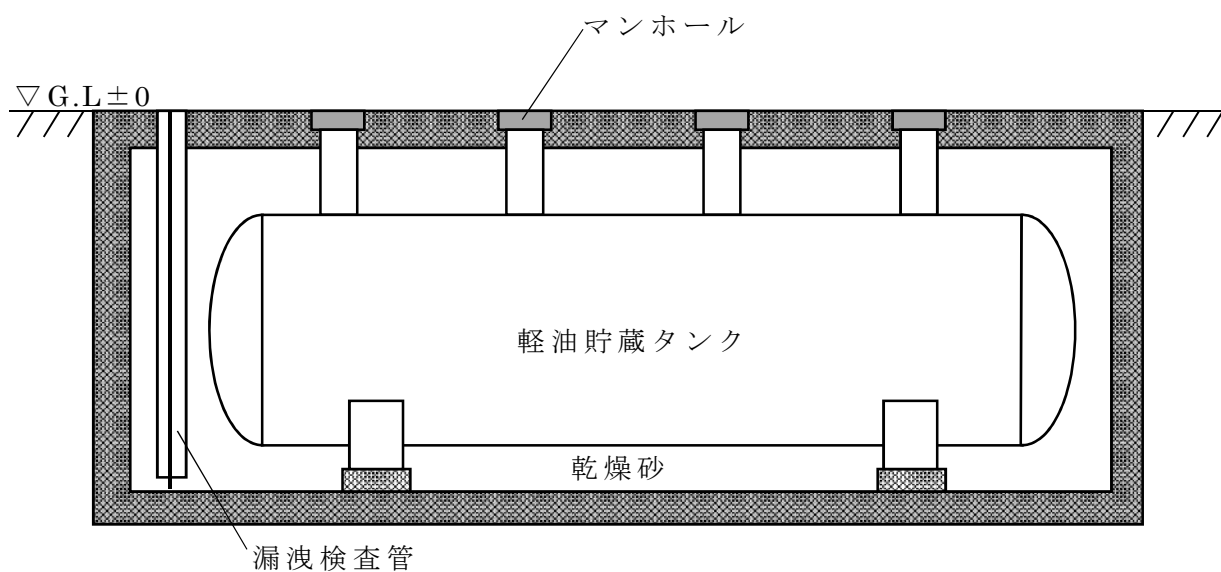
別添 1 - 4 図(6) 貯蔵建屋外壁（内壁）温度の時間変化
（発火点 3（発火時刻 11:00））

軽油貯蔵タンクの地下化について

軽油貯蔵タンクは、「危険物の規則に関する政令」及び「危険物の規制に関する規則」に適合する地下タンク貯蔵所として設計するため、地表面で火災が発生する可能性は低い。

また、タンク地上部のマンホールも含め、地上で発生する火炎からの輻射熱の影響を受けない構造とする。

以上から、軽油貯蔵タンクは、外部火災源の対象から除外する。軽油貯蔵タンクの構造概要図を別添 2 - 1 図に示す。



別添 2 - 1 図 軽油貯蔵タンクの構造概要

航空機墜落確率の最新化による外部火災評価への影響について

1. 航空機墜落確率の再評価

航空機墜落による外部火災評価に用いたカテゴリ毎の航空機墜落確率について、NRA 技術ノート「航空機落下事故に関するデータ（平成10～29年）」（NTEN-2019-2001）に基づき再評価した。別添3-1表に外部火災評価に用いた墜落確率との比較を示す。

「自衛隊機又は米軍機（訓練空域外のうちその他の機種）の墜落事故」のみわずかではあるが墜落確率が上昇した。その他のカテゴリについては、既評価と同等か若干低い結果となった。

したがって、航空機墜落による火災評価についてのみ別添3-1表の墜落確率にて貯蔵建屋外壁温度評価を実施し、影響を確認する。

別添3-1表 カテゴリ毎の航空機墜落確率の比較

カテゴリ		墜落確率（回／施設・年）	
		既評価	再評価
民間航空機	計器飛行方式（大型固定翼機）	9.20×10^{-10}	9.11×10^{-10}
自衛隊機又は 米軍機	訓練空域 外の墜落 事故	高高度飛行を行う大型 固定翼機	1.79×10^{-9}
		その他の機種	1.52×10^{-8}
	基地－訓練空域往復時の墜落事故	2.13×10^{-8}	2.13×10^{-8}

2. 自衛隊機又は米軍機（訓練空域外のうちその他の機種）の墜落事故による外部火災再評価

2.1 墜落地点の想定

(1) 標的面積

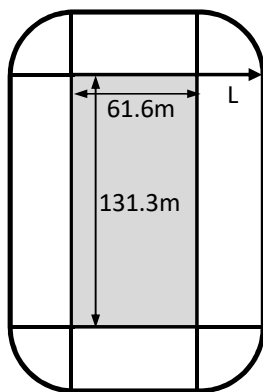
「実用発電用原子炉施設への航空機落下確率の評価基準について」に基づき、墜落確率 10^{-7} (回/炉・年) に相当する標的面積を算出する。貯蔵建屋の標的面積は 0.0081 km^2 であることから、航空機の墜落確率が 10^{-7} (回/炉・年) となる標的面積 S を算出すると、

$$S = 10^{-7} / (1.59 \times 10^{-8}) \times 0.0081 \times 1000^2 = 50943.40 \text{ (m}^2\text{)}$$

となる。

(2) 離隔距離

前項で求めた標的面積より、別添 3-1 図に示すように離隔距離を算出したところ、 $L = \text{約 } 70 \text{ m}$ となった。



$$\pi L^2 + 2(131.3 + 61.6)L + 131.3 \times 61.6 = S$$

これをLについて解くと

$$L = \frac{-(131.3 + 61.6) + \sqrt{(131.3 + 61.6)^2 - \pi(131.3 \times 61.6 - S)}}{\pi}$$

となる。

別添 3-1 図 離隔距離計算イメージ

2.2 火災影響評価

(1) 火災発生源に関する入力データ

想定機種：F-15

燃料の種類：JP-4

燃料量：14.87 (kℓ) ※航空ジャーナル 2 月号増刊 F-15 イーグル
 (航空ジャーナル社 昭和 55 年 2 月 5 日発
 行) 記載値
 火炎輻射強度：58000 (W/m²) ※ガイド附属書 B のガソリンの値
 質量低下速度：0.051 (kg/m²/s) ※NUREG-1805 の JP-4 の値
 燃料密度：760 (kg/m³) ※NUREG-1805 の JP-4 の値
 燃焼面積：44.6 (m²) ※航空ジャーナル 2 月号増刊 F-15 イー
 グル記載の図面より算出した。

(2) 貯蔵建屋に関する入力データ

貯蔵建屋からの離隔距離：70 (m)

貯蔵建屋外壁の熱的物性：

密度：2400 (kg/m³)

比熱：900 (J/kg/K)

熱伝導率：1.2 (W/m/K)

※伝熱工学資料第 5 版の石灰岩コンクリートの値

(3) 評価方法

ガイド附属書 C「原子力発電所の敷地内への航空機墜落による火災の影響評価について」に従って、以下の手順で実施した。

(a) 燃焼半径の算出

燃焼面積と同じ面積を持つ円を底面とする円筒火炎を想定して算出したところ、3.768 m となった。

$$R = \sqrt{S/\pi} = \sqrt{44.6/\pi} = 3.768 \text{ (m)}$$

R：燃焼半径 (m)，S：燃焼面積 (m²)

(b) 形態係数の算出

ガイドに従い、円筒火炎に対する形態係数の算出方法に従って算出したところ、0.005675 となった。

$$\phi = \frac{1}{\pi n} \tan^{-1} \left(\frac{m}{\sqrt{n^2-1}} \right) + \frac{m}{\pi} \left[\frac{(A-2n)}{n\sqrt{AB}} \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{A(n-1)}{B(n+1)}} \right) - \frac{1}{n} \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{(n-1)}{(n+1)}} \right) \right]$$

$$A = (1+n)^2 + m^2$$

$$B = (1-n)^2 + m^2$$

$$m = H/R$$

$$n = L/R$$

ϕ : 形態係数, H : 火炎長 (m), L : 離隔距離 (m)

(c) 輻射強度の算出

ガイドに従い, 次式により算出したところ, 329.15 W/m² となり, 切り上げて 約 329.2 W/m² とした。

$$E = R_f \cdot \phi = 58000 \times 0.005675 = 329.15 \Rightarrow 329.2 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

E : 輻射強度 (W/m²), R_f : 火炎輻射強度 (W/m²)

(d) 燃焼継続時間の算出

ガイドに従い, 次式により算出したところ, 4968.8 s となり, 切り上げて約 4969 s とした。

$$t = \frac{V}{\pi R^2 \times v} = 14.87 / (44.6 \times 0.0000671) = 4968.8 \Rightarrow 4969 \text{ (s)}$$

ここで, $v = \frac{m}{\rho} = \frac{0.051}{760} = 0.000067105 \Rightarrow 0.0000671$, $\pi R^2 \doteq S = 44.6$

t : 燃焼継続時間 (s), V : 燃料量 (m³), v : 燃焼速度 (m/s)

(e) 外壁温度の算出

伝熱工学資料第5版に記載の半無限固体の非定常温度分布の式を用いて外壁温度分布を評価した。

$$T(x) - T_0 = \frac{2E\sqrt{\kappa t}}{k} \left[\frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{4\kappa t}\right) - \frac{x}{2\sqrt{\kappa t}} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\kappa t}}\right) \right]$$

T(x) : 表面から x(m) の位置の温度 (°C), T₀ : 初期温度 (°C),

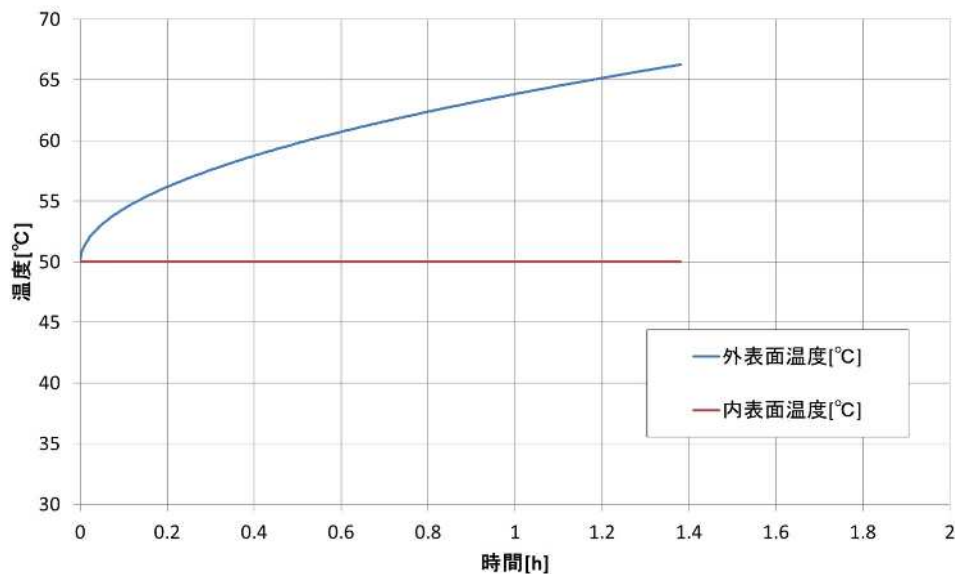
k : 熱伝導率 (W/m/K), κ : 温度拡散率 (=k/ρC_p) (m²/s),

ρ : 密度 (kg/m³), C_p : 比熱 (J/kg/K)

(4) 貯蔵建屋への影響評価

自衛隊機又は米軍機（訓練空域外のうちその他の機種）の墜落事故による火災に関して貯蔵建屋への影響評価を行ったところ、建屋外壁の最高温度は約 67℃となり、既評価よりも約 2℃ほど上昇した結果となった。また、外壁の許容温度である 200℃を下回ることを確認した。

別添 3 - 2 図に、時間に対する温度変化を示す。



別添 3 - 2 図 貯蔵建屋外壁温度変化（訓練空域外（その他機種））

2.3 まとめ

最新の墜落確率を用いた「自衛隊機又は米軍機（訓練空域外のうちその他の機種）の墜落事故」による火災の貯蔵建屋外壁温度評価結果は、既評価（65℃）に対し約 2℃高い約 67℃となった。既評価の航空機墜落による火災の中で最も厳しい「自衛隊機又は米軍機（基地-訓練空域間往復時）の墜落事故」の火災評価（68℃）に包絡されることを確認した。

最新の航空機墜落確率を全カテゴリに適用した場合、「自衛隊機又は米軍機（訓練空域外のうちその他の機種）の墜落事故」による火災の評価は、墜落確率が増加したことで離隔距離が短くなることにより、保守的な結果になるが、「民間航空機（計器飛行方式）の墜落事故」の

火災評価のみわずかではあるが墜落確率が減少したことで離隔距離が長くなるため、既評価に比べて非保守的な評価となる。

しかし、前述のとおり、最新の墜落確率による「自衛隊機又は米軍機（訓練空域外のうちその他の機種）」の評価結果は、既評価の中で最も厳しい「自衛隊機又は米軍機（基地-訓練空域間往復時）の墜落事故」の火災に包絡される結果となることから、既評価は、網羅性、代表性の観点から航空機墜落事故による火災評価として保守的である。

なお、熱気流の侵入による貯蔵建屋雰囲気温度上昇による金属キャスクへの影響評価や敷地内危険物貯蔵設備との火災の重畳による影響評価については、最も厳しい「自衛隊機又は米軍機（基地-訓練空域間往復時）の墜落事故」を基に評価している。