

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、設計上の考慮の可否を検討する。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。

設計上の考慮の可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 Grater 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(BWR用大型キャスク(タイプ2A)の場合)又は最高使用圧0.8MPa(BWR用中型キャスク(タイプ2)及びPWR用キャスク(タイプ1)の場合)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く、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又はメッキを施し，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等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，火災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い。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。

No.	外部事象	影響	評価
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}(BWR用大型キャスク(タイプ2A)), 2,000kN^{※3}(BWR用中型キャスク(タイプ2)), 1,900kN^{※4}(PWR用キャスク(タイプ1)))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> <p>※3 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 115,100kg, 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) 1.5</p> <p>※4 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 113,000kg, 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) 1.5</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、防錆のために塗装又はメッキを施し、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等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システムで凍結が想定されるが、設備を使用しない場合はシステム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又はメッキを施し、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等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、BWR用大型キャスク（タイプ2A）の場合約 15℃、BWR用中型キャスク（タイプ2）の場合約 20℃、PWR用キャスク（タイプ1）の場合約 20℃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}(BWR用大型キャスク(タイプ2A)), 約 950トン^{※2}(BWR用中型キャスク(タイプ2)), 約 1,100トン^{※3}(PWR用キャスク(タイプ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^{※4}(BWR用大型キャスク(タイプ2A)), 約 2.0トン^{※5}(BWR用中型キャスク(タイプ2)), 約 2.4トン^{※6}(PWR用キャスク(タイプ1)))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] = $\pi \times d^2 / 4 \times \text{水深 } 200\text{m 荷重}$ d:キャスク外径 250cm, 水深 200m 荷重: 21kg/cm²</p> <p>※2 水圧荷重[kg] = $\pi \times d^2 / 4 \times \text{水深 } 200\text{m 荷重}$ d:キャスク外径 240cm, 水深 200m 荷重: 21kg/cm²</p> <p>※3 水圧荷重[kg] = $\pi \times d^2 / 4 \times \text{水深 } 200\text{m 荷重}$ d:キャスク外径 260cm, 水深 200m 荷重: 21kg/cm²</p> <p>※4 降下火砕物の堆積荷重[g] = $\pi \times d^2 / 4 \times \rho \times h$ d:キャスク外径 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> <p>※5 降下火砕物の堆積荷重[g] = $\pi \times d^2 / 4 \times \rho \times h$ d:キャスク外径 240cm 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> <p>※6 降下火砕物の堆積荷重[g] = $\pi \times d^2 / 4 \times \rho \times h$ d:キャスク外径 260cm, 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>

No.	外部事象	影響	評価
		埋没による除熱不良	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 (BWR用大型キャスク(タイプ2A)), 約 5.5m (BWR用中型キャスク(タイプ2)) 及び約 5.2m (PWR用キャスク(タイプ1))) 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。
		腐食	金属キャスクの本体表面には防錆のために塗装又はメッキを施し、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等による処置を施すことが可能である。
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	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。

No.	外部事象	影響	評価									
		埋没による除熱不良										
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}(BWR用大型キャスク(タイプ2A))、6%程度^{※3}(BWR用中型キャスク(タイプ2))、6%程度^{※4}(PWR用キャスク(タイプ1))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> <p>※3 増加する荷重 = 3.8% + 2% → 約6% 風荷重: 約76kN, 地震時の荷重2000kN → 3.8% 積雪荷重: 約2,500kg, 金属キャスク+貯蔵架台の合算重量 約130,100kg → 約2%</p> <p>※4 増加する荷重 = 4% + 2% → 6% 風荷重: 約76kN, 地震時の荷重1900kN → 4% 積雪荷重: 約2,500kg, 金属キャスク+貯蔵架台の合算重量 約128,000kg → 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^{※1}(BWR用大型キャスク(タイプ2A)), 約 770kN^{※2}(BWR用中型キャスク(タイプ2)), 約 770kN^{※3}(PWR用キャスク(タイプ1)))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>※1 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) 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> <p>※2 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) 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 13.1m², 貯蔵架台 1.3m²), ρ: 水密度 1,030kg/m³, V: 流速 10m/s</p> <p>※3 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) 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 13.0m², 貯蔵架台 1.3m²), ρ: 水密度 1,030kg/m³, V: 流速 10m/s</p>

No.	外部事象	影響	評価
		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 ($1.8 \times 10^3 \text{kN} \cdot \text{m}^{*1}$) 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 ($6.7 \times 10^3 \text{kN} \cdot \text{m}^{*2}$) 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。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 $[\text{N} \cdot \text{m}] = 1/2 \times m \times V^2$ m: 質量 $3.6 \times 10^4 \text{kg}$, V: 漂流速度 10m/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 $128,000 \text{kg}$, G: 重力加速度 9.8m/s^2, H: 落下高さ 5.3m</p>
	津波 (続き)	浸水	<p>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 (BWR用大型キャスク(タイプ2A)), 0.27MPa (BWR用中型キャスク(タイプ2) 又は 0.31MPa (PWR用キャスク(タイプ1))) を下回らないように管理している。仮想的な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く基本的安全機能を損なうおそれはない。</p>
		土砂埋没による除熱不良	<p>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。</p>
14	生物学的事象	つる植物等の繁殖による除熱不良	<p>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。</p>

No.	外部事象	影響	評価
		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。
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。

No.	外部事象	影響	評価
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。
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 5.3×10^{-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	水流による転倒 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安全機能を損なうおそれはない。

No.	外部事象	影響	評価
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>

（別 添）

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

添付していない箇所に関しては、令和 2 年 8 月 13 日付で提出した新規制基準適合性に関する資料から変更が無く、今回の変更申請としては提出しない。

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。

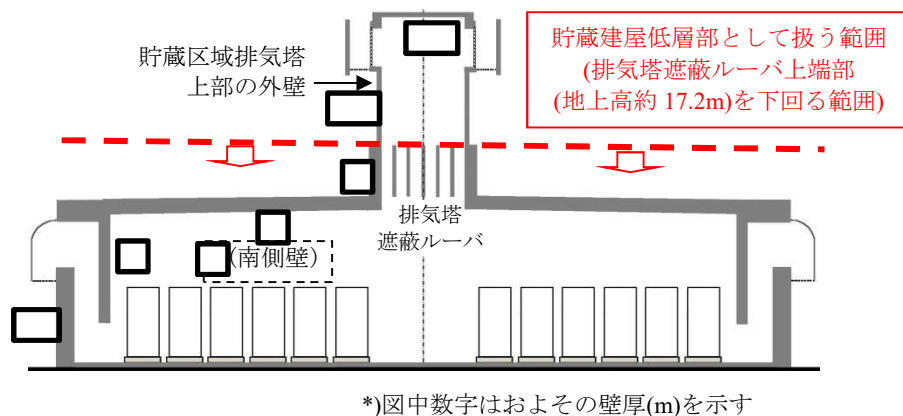
このような極端な状態を仮定した場合、敷地境界における線量の増加量は保守的に見積もって $0.20 \mu\text{Sv/h}$ 程度（増加量が最も大きい BWR 用中型キャスク（タイプ 2）の場合）と敷地境界外の公衆の線量限度 ($1\text{mSv/年} \div 0.11 \mu\text{Sv/h}$) を上回る。このような事象の発生の可能性は極めて小さいが、金属キャスクの遮蔽機能回復等により、 1mSv/年 を超えないこととする。

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敷地周辺への影響は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（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 航空機落下確率及び航空機墜落による火災評価フロー
- 別添 2 コンクリート許容温度（200℃）について
- 別添 3 軽油貯蔵タンクの地下化について

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ではなく、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(FARSITE)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。

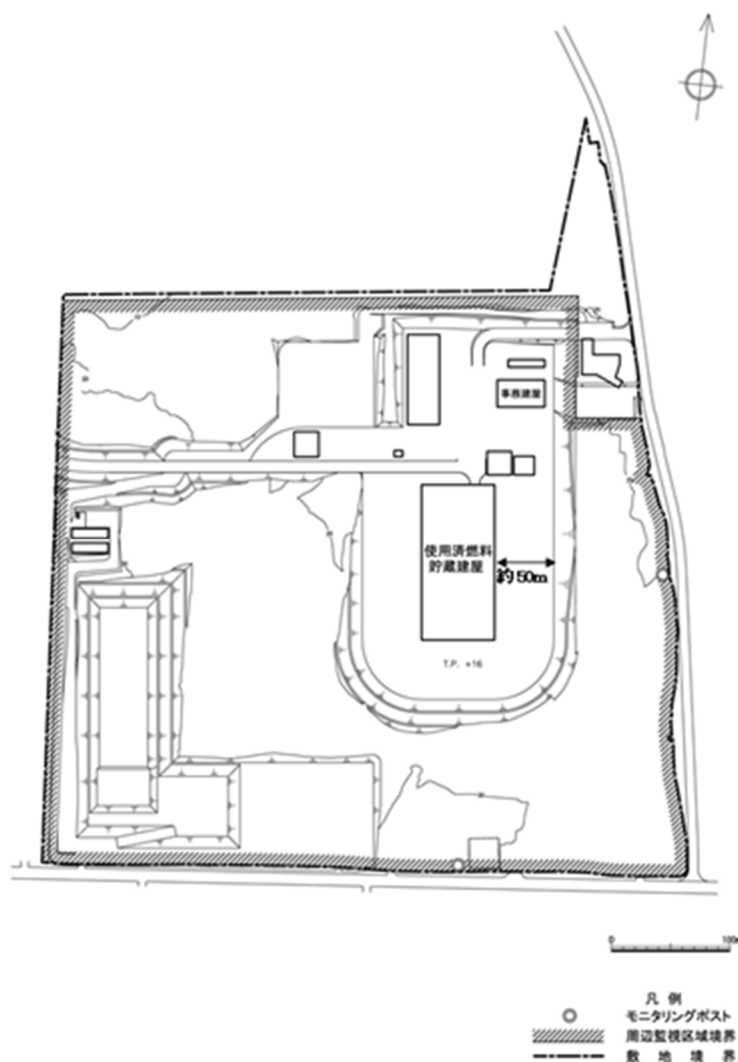
2.2.2 二次的影響評価

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

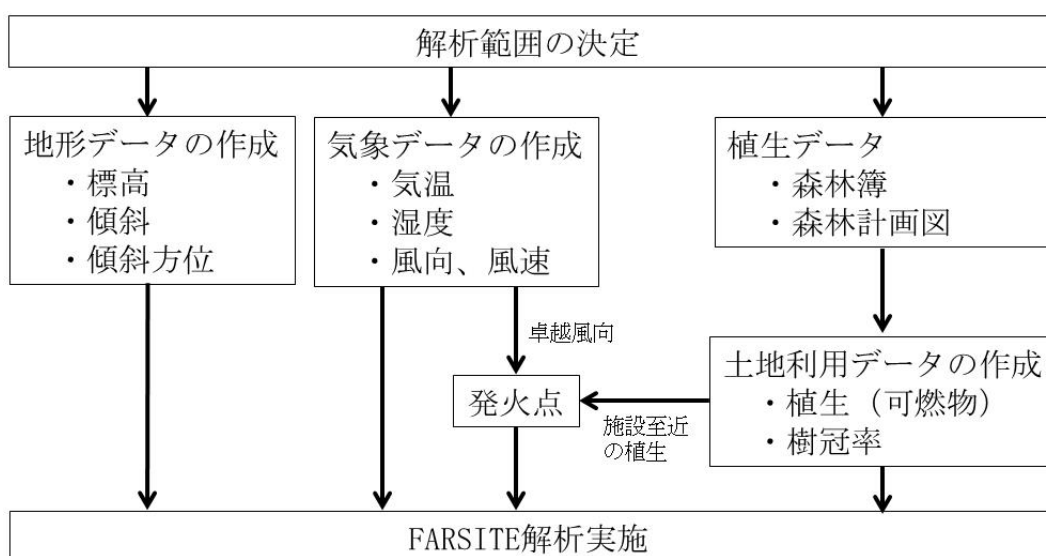
3.2.1 使用解析コード

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

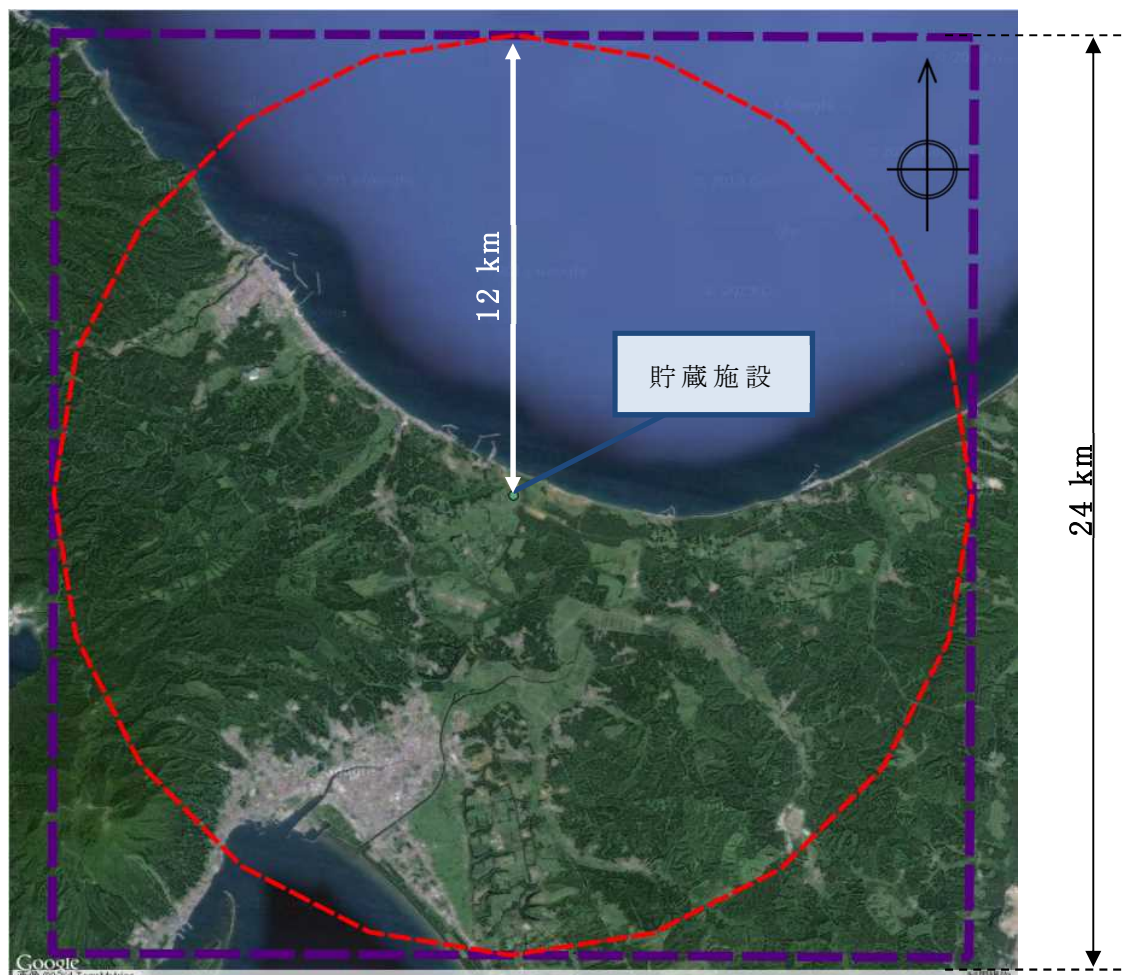
森林火災シミュレーションコード F A R S I T E により、貯蔵施設敷地外で発生する森林火災からの貯蔵建屋への影響評価の実施に際して、評価対象範囲を定めた上で必要となる入力データの作成を行った。データの作成フローについて第3図示す。



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

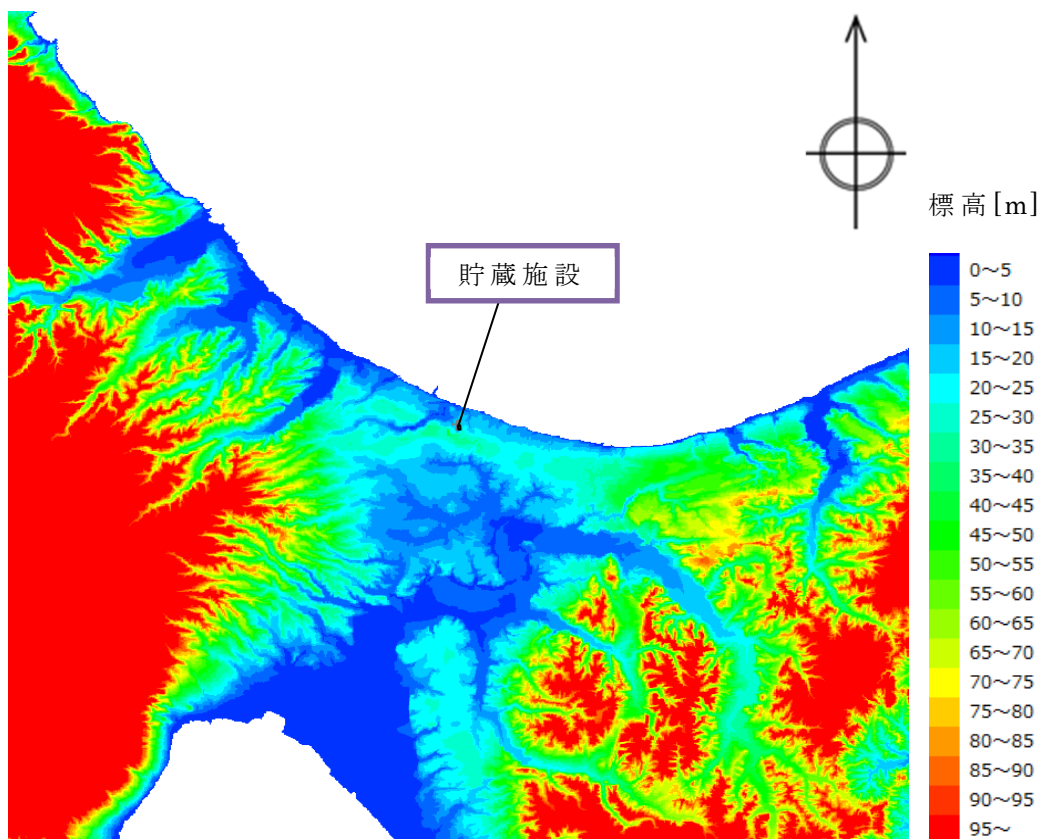
ガイドを参考とし、公開情報の中で最も空間解像度の高い 10m メッシュの標高データ(基盤地図情報 数値標高モデル, 2009 年公開)を用いた。また、公開データについて以下の修正を行った。

- ・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。

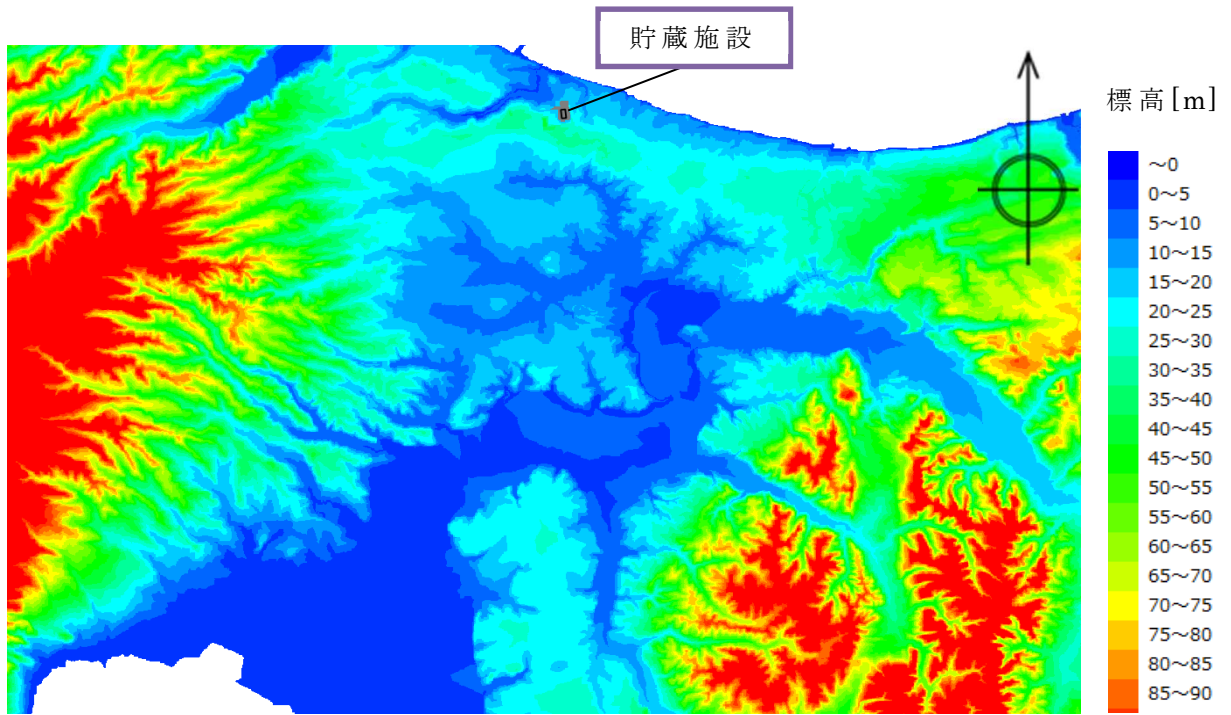
※1: 国土地理院公開ツール「地殻変動に伴う標高値補正を行う標高補正ソフトウェア

PatchJGD(標高版)」

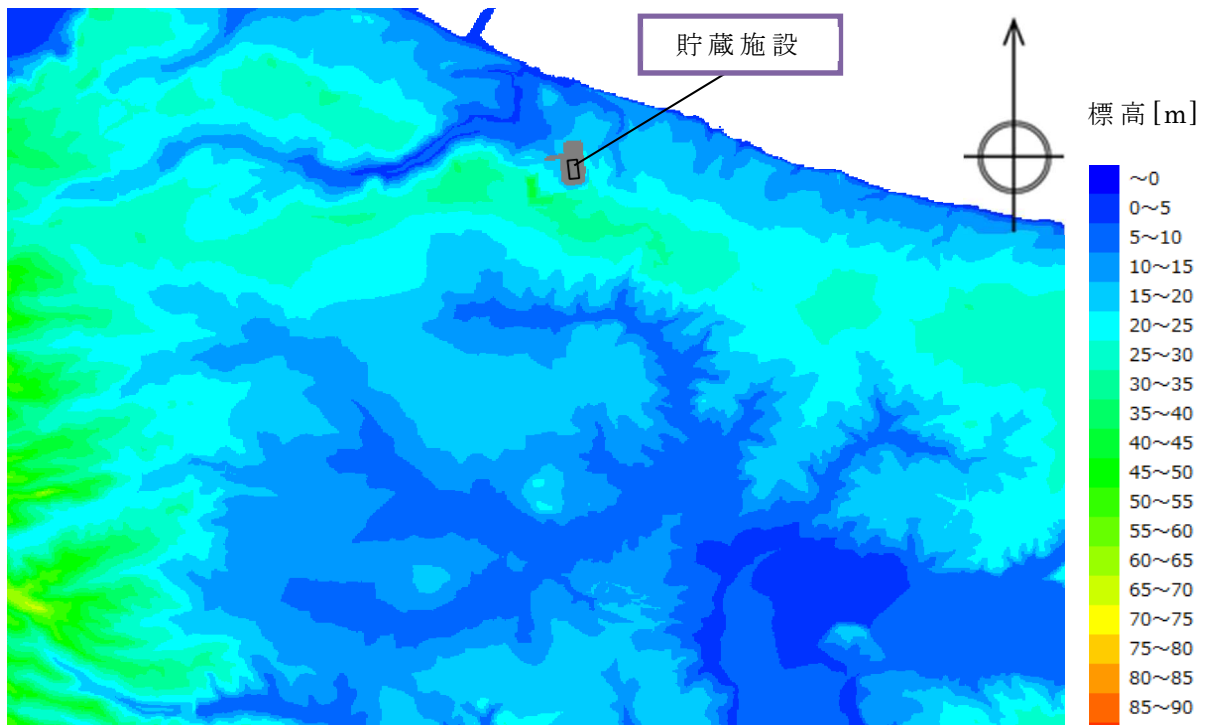
作成した標高データについて第 5 図に示す。



第 5 図 (1) 標高データ



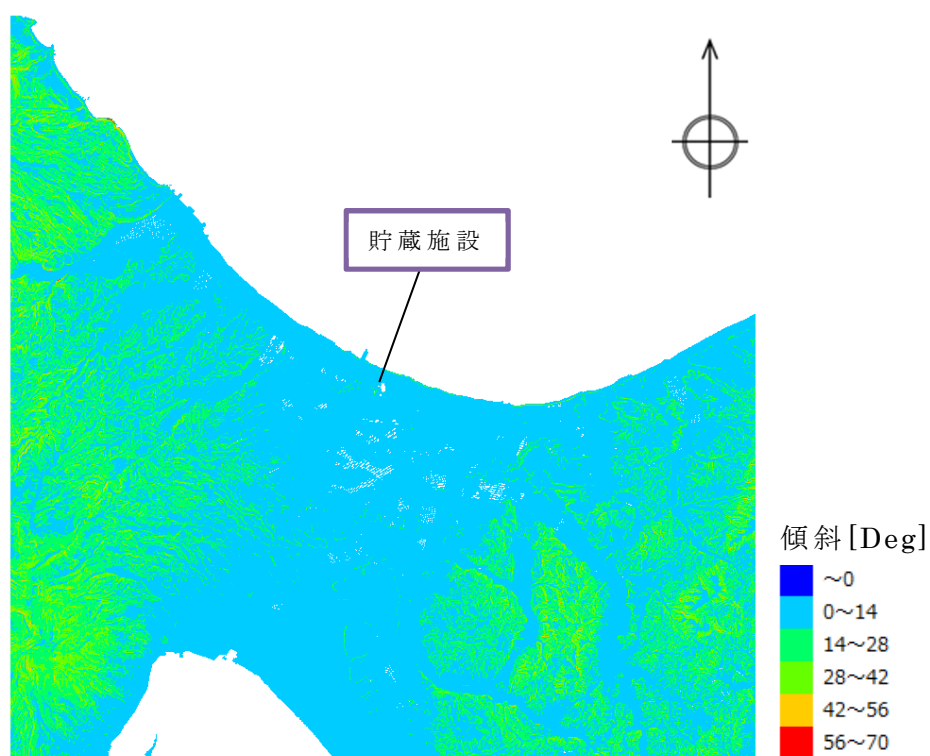
第 5 図 (2) 標高データ (拡大図)



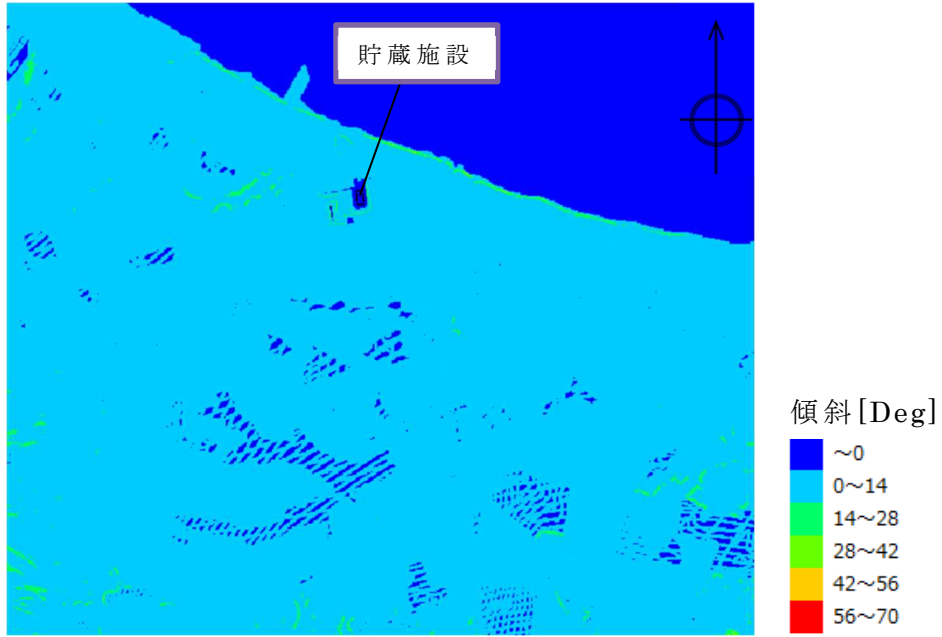
第 5 図 (3) 標高データ (拡大図)

(2) 傾斜及び傾斜方位

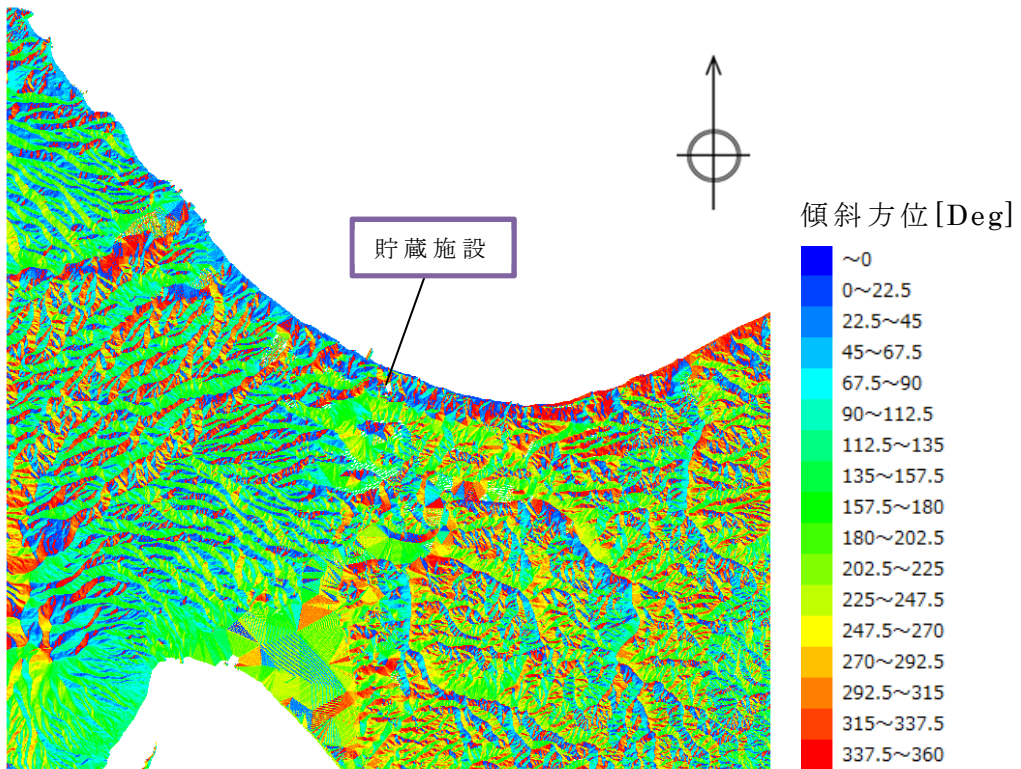
傾斜及び傾斜方位については、標高データより計算した。ただし、敷地内の法面部の傾斜については図面記載の傾斜を適用した。作成した傾斜データ、及び傾斜方位データについてそれぞれ第6図、第7図に示す。



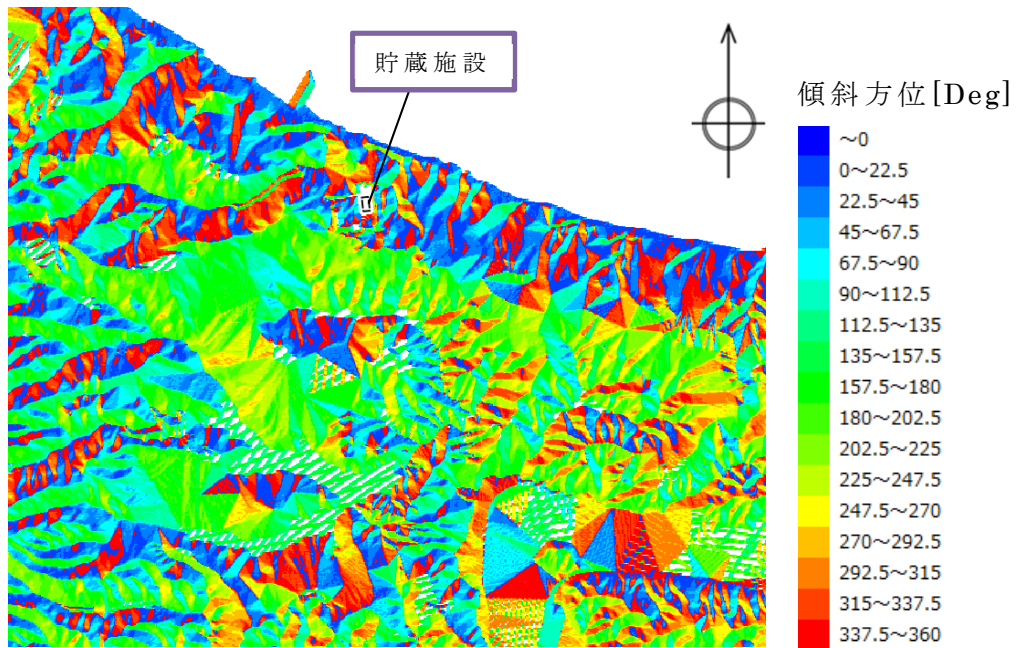
第6図(1) 傾斜データ



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

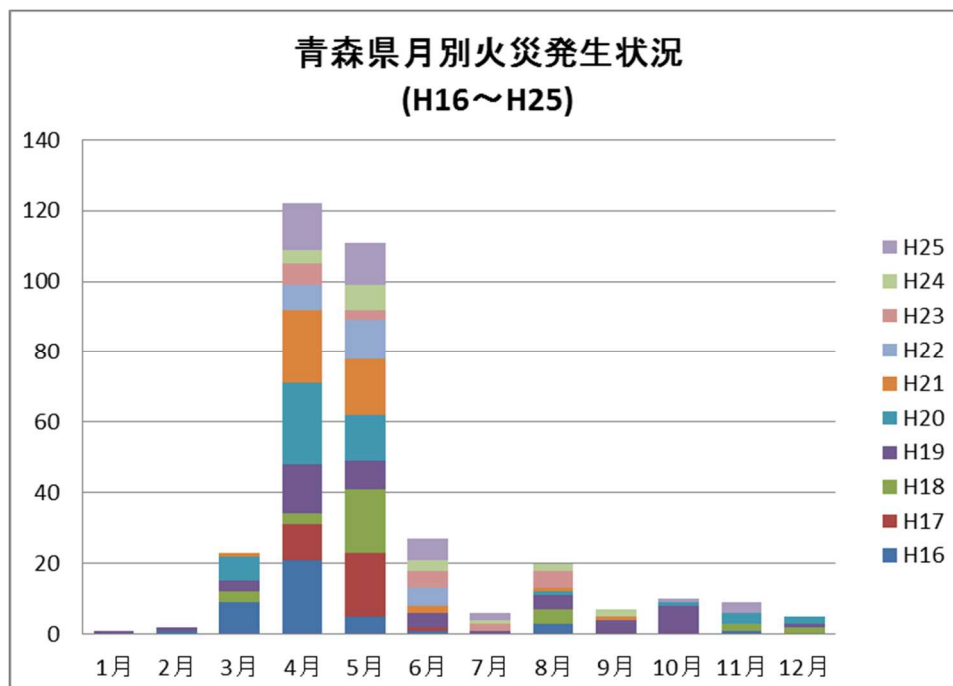
気象データの作成については、気象庁が公開している気象統計情報を用いて、貯蔵施設周辺にて起こりうる最悪の条件を検討するため、青森県内において火災発生件数の最も多い月における、貯蔵施設から至近の気象観測所の各データ（最高気温、最大風速、最小湿度）を用いて評価を実施した。

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。

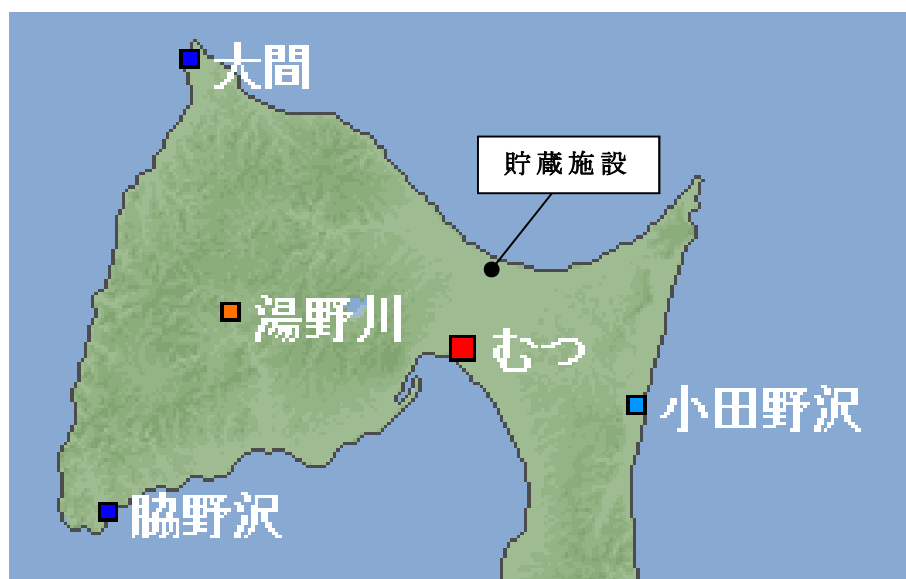
- ・むつ地域気象観測所（貯蔵施設から約8km）
観測要素：気温・降水量・風向風速・日照時間・積雪深
- ・小田野沢地域気象観測所（貯蔵施設から約18km）
観測要素：気温・降水量・風向風速・日照時間
- ・大間地域気象観測所（貯蔵施設から約33km）
観測要素：気温・降水量・風向風速・日照時間・積雪深
- ・脇野沢地域気象観測所（貯蔵施設から約42km）
観測要素：気温・降水量・風向風速・日照時間・積雪深

- ・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 (°C)

(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	1H	10H	100H	LiveH	LiveW	1HSAV	LiveH SAV	LiveW SAV	Depth	XtMoist	Dht	Lht
単位	—		Ton/ha	Ton/ha	Ton/ha	Ton/ha	Ton/ha	1/cm	1/cm	1/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質の面積/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	文献の低位発熱容量を引用				

※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，クスギ，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）

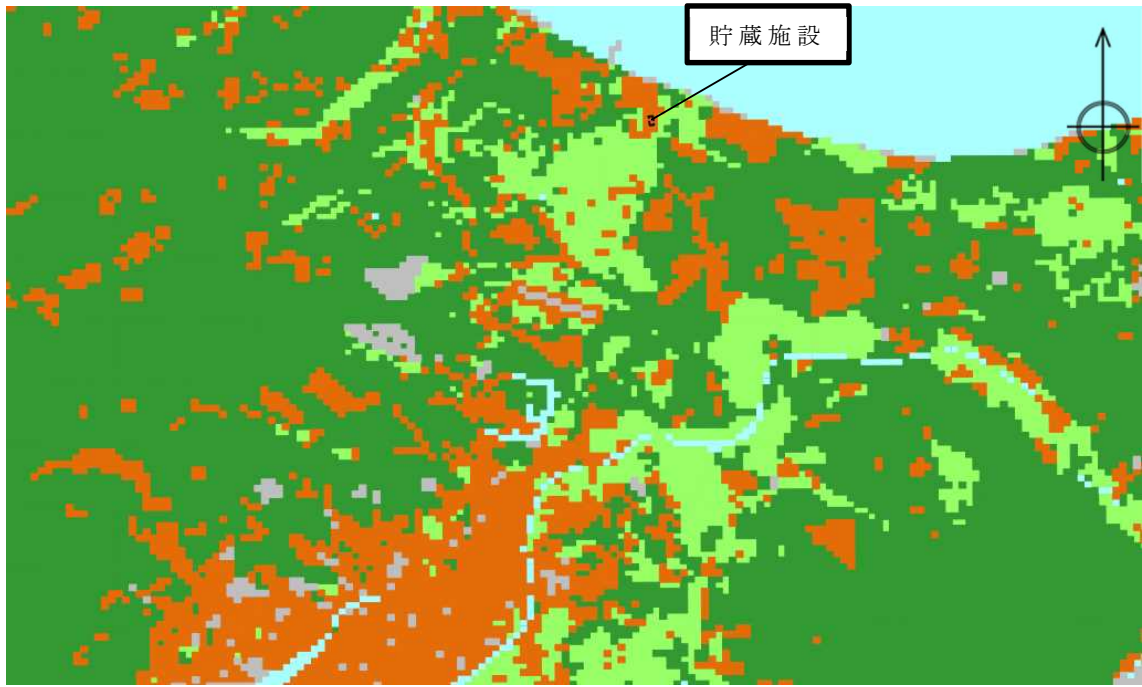
種別	定義
田	湿田・乾田・沼田・蓮田及び田とする。
その他の農用地	麦・陸稻・野菜・草地・芝地・りんご・梨・桃・ブドウ・茶・桐・はぜ・こうぞ・しゅろ等を栽培する土地とする。
森林	多年生植物の密生している地域とする。
荒地	しの地・荒地・がけ・岩・万年雪・湿地・採鉱地等で旧土地利用データが荒地であるところとする。
建物用地	住宅地・市街地等で建物が密集しているところとする
道路	道路などで、面的に捉えられるものとする。
鉄道	鉄道・操車場などで、面的にとらえられるものとする。
その他の用地	運動競技場，空港，競馬場・野球場・学校港湾地区・人工造成地の空地等とする。
河川地及び湖沼	人工湖・自然湖・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。

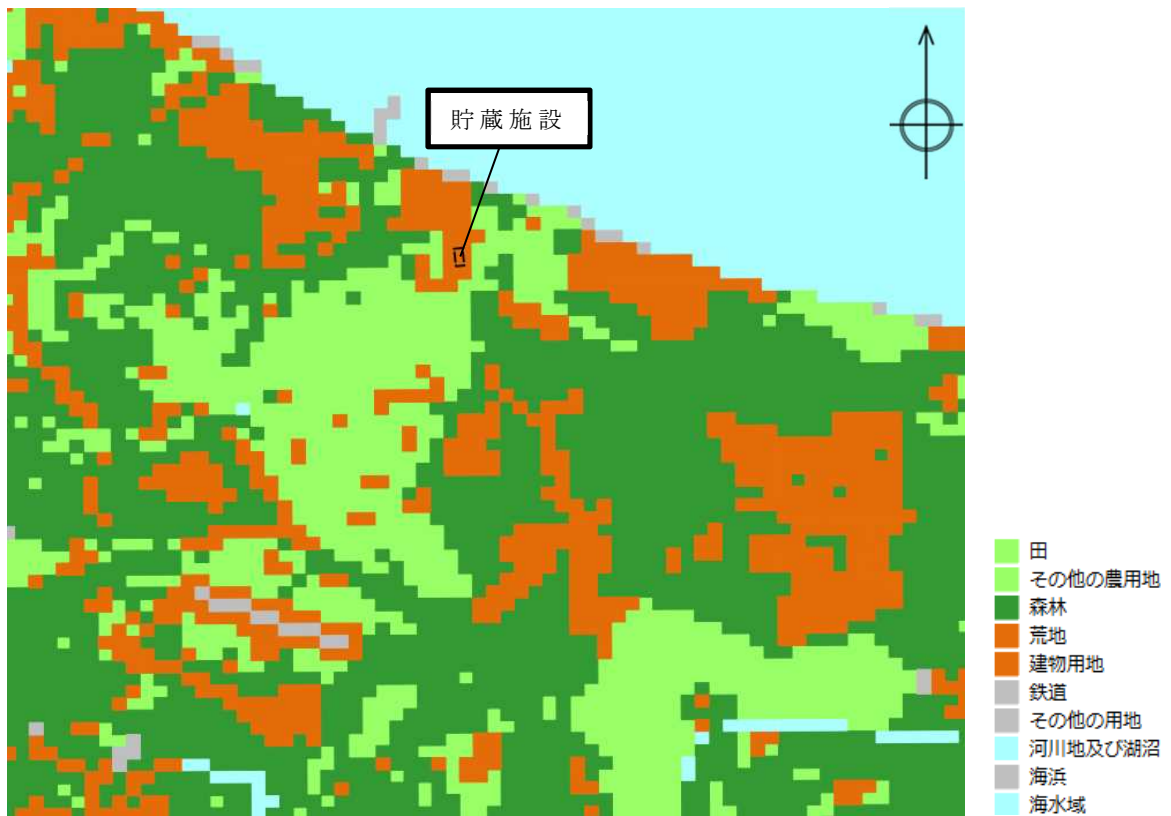
第 8 表 土地利用種別のモデル化

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。

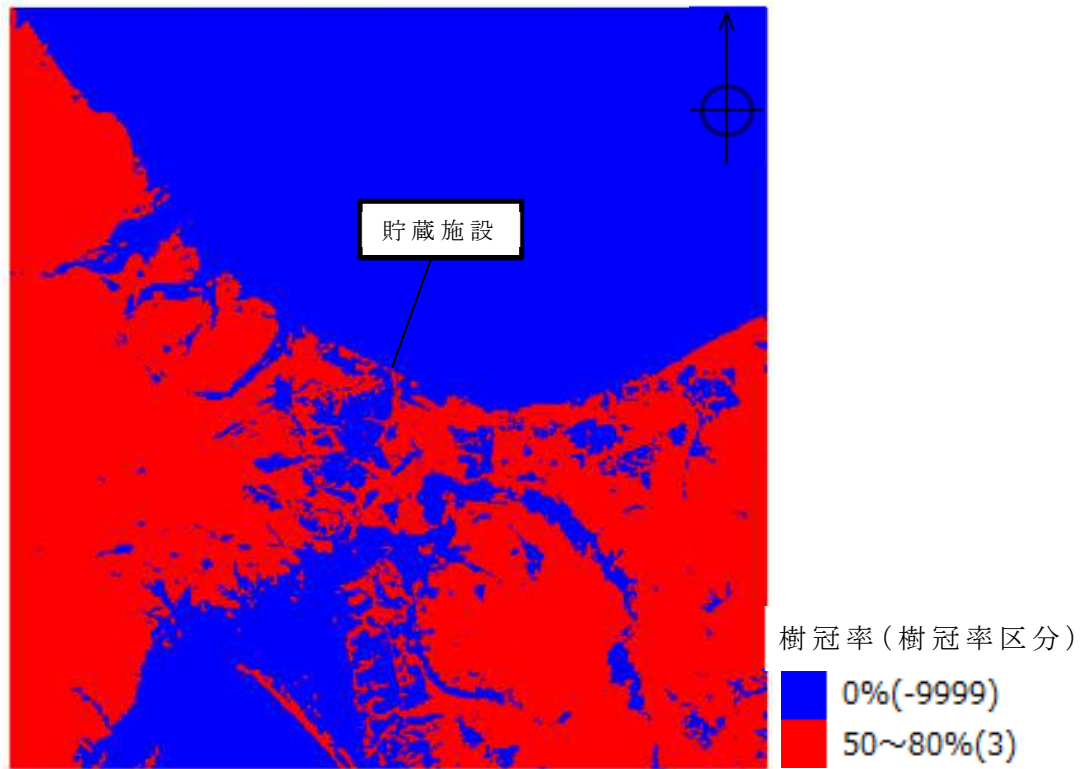
第9表 FARSITE 樹冠率カテゴリ

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

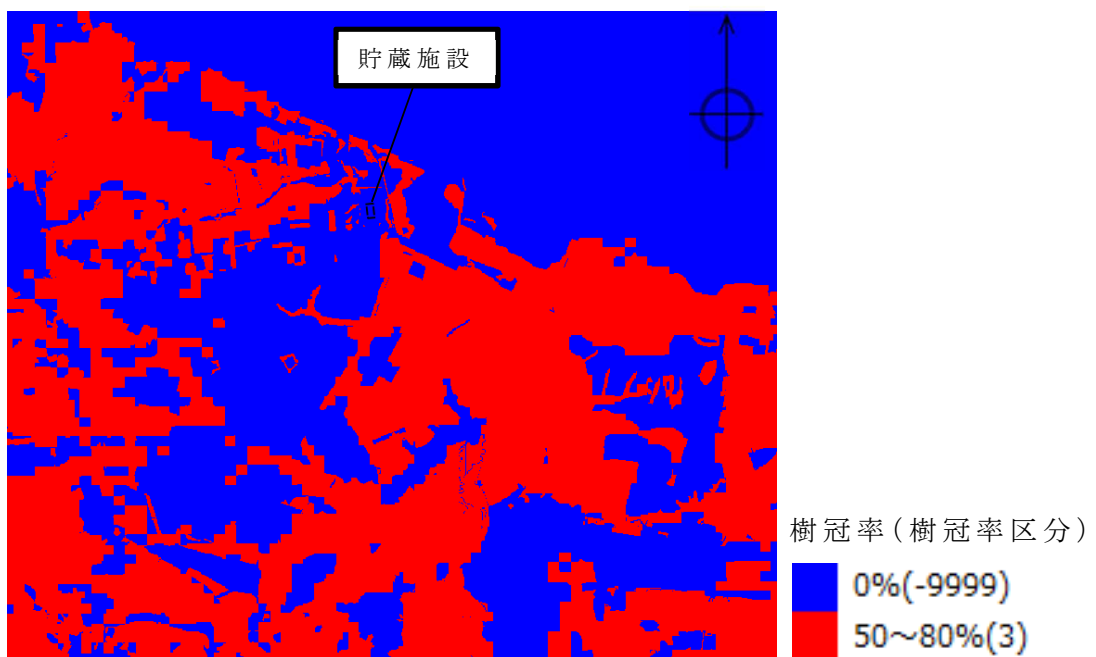
区分3と4については、第10表のとおり風速、日射の低減効果に関して区分3の方が保守的となっている。

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

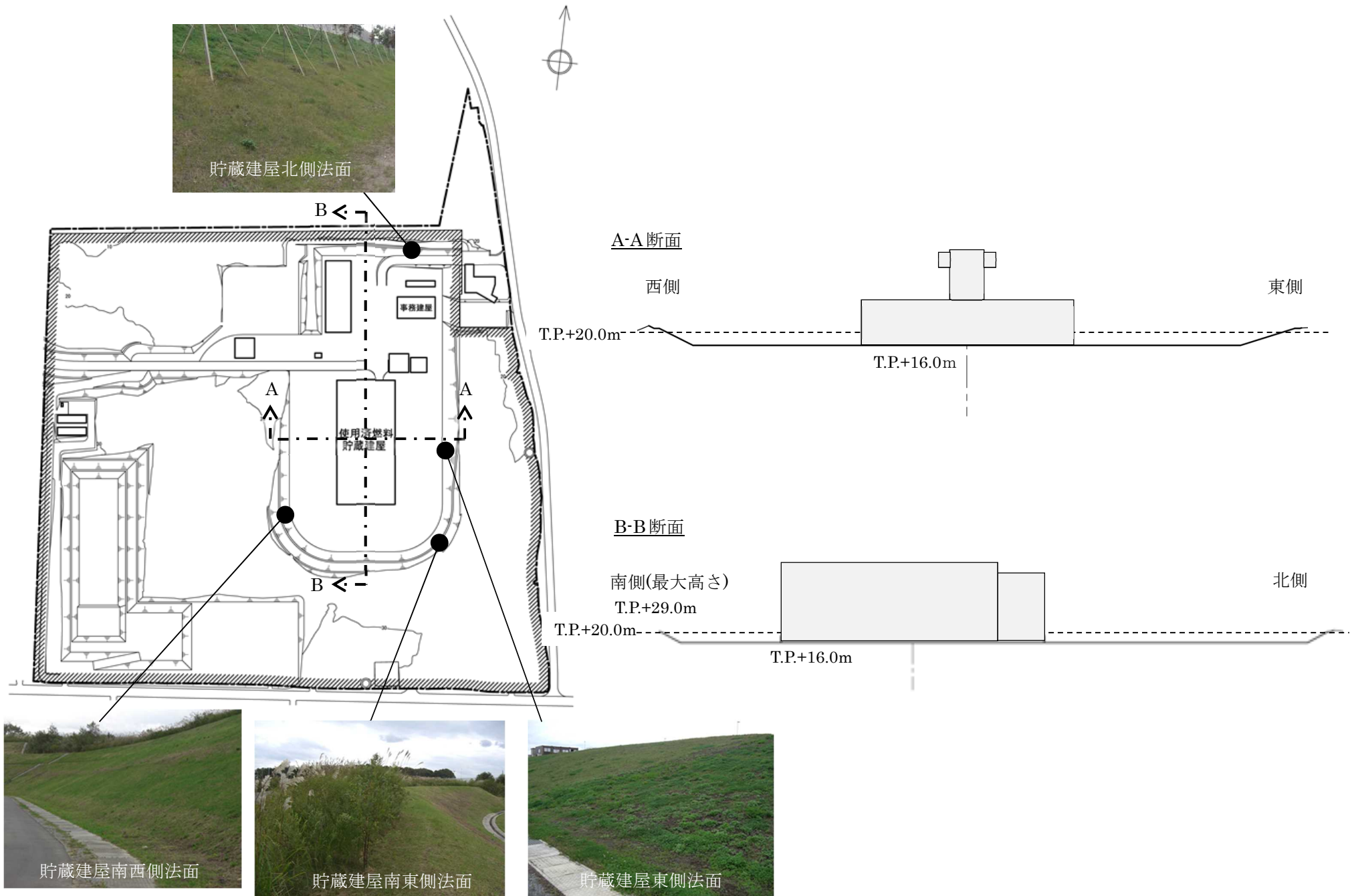
法面以外の敷地内の植生については、元が牧草地であったこともあり概ねススキ群やイネ科の牧草であった。また貯蔵建屋の西側及び敷地北西側に一部クマイザサ群が見られた。所々に見られる林については、ミズナラ群やハンノキ群の落葉広葉樹であった。

(c) 敷地周辺の植生について

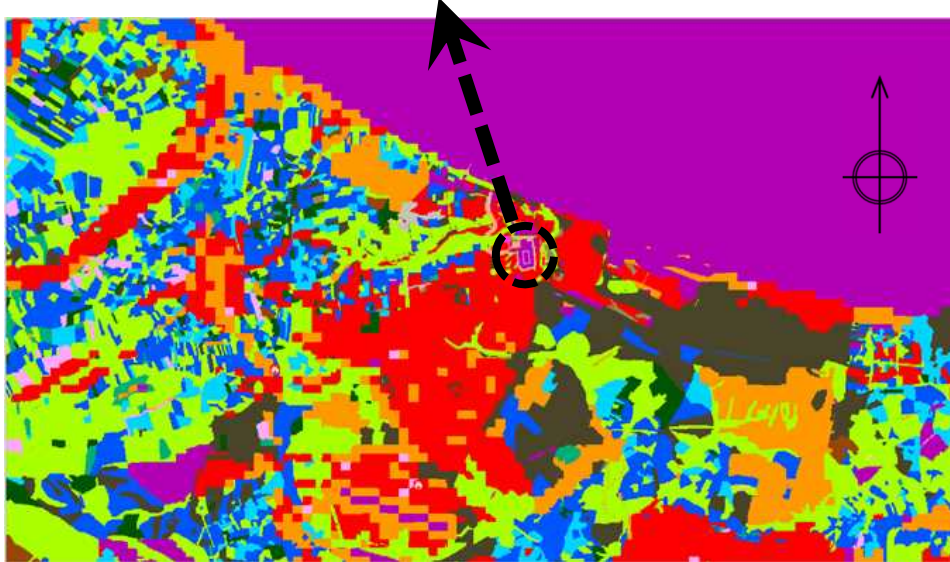
敷地周辺については、敷地の南側及び東側の道路沿いにアカマツ、クロマツの群落があり、林齢は低木群を除けば 40 年生以上であった。また、敷地の西側は一部アカマツ、クロマツ群や落葉広葉樹が見られるものの、ほとんどは畑であった。その他の植生は敷地内とほぼ同じであり概ねススキ群やイネ科の牧草であった。

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パラメータ区分	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)



貯蔵建屋北西側(法面上はススキ群)



貯蔵建屋北西側(クイナサ群)



専用道路法面(芝,法面上はハナキ群)



貯蔵建屋北側法面(芝)



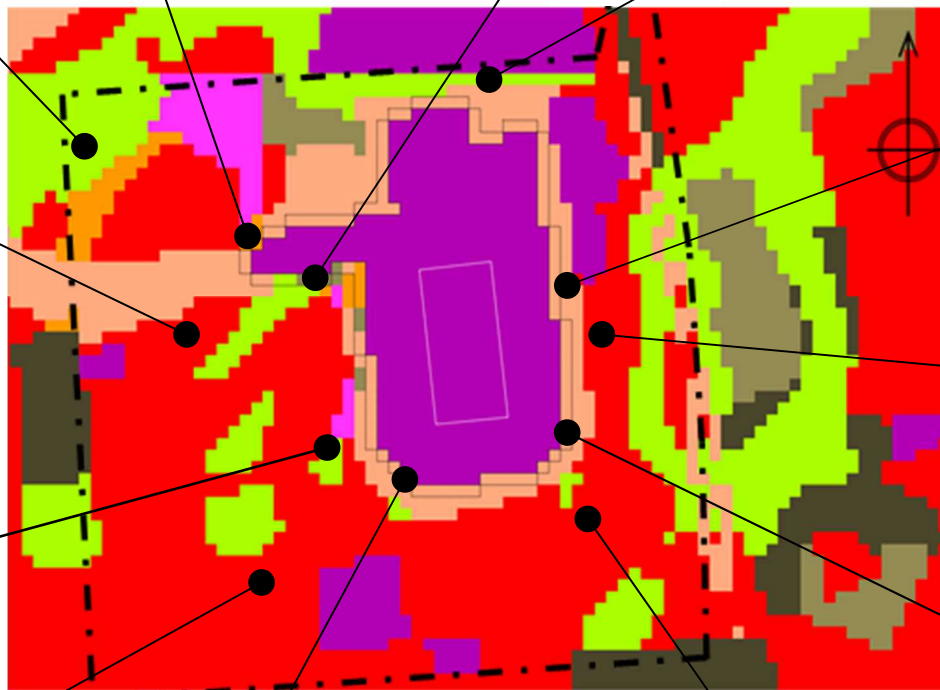
貯蔵建屋西側(牧草地とハナキ群)



貯蔵建屋西側森林(ハナキ群)



貯蔵建屋南西方向(牧草地)



貯蔵建屋東側法面(芝)



貯蔵建屋東側法面上(ススキ群)



貯蔵建屋南東側法面(芝、ススキ群)



貯蔵建屋南西側法面(芝)



貯蔵建屋南東側法面上(ススキ群)

--- : 敷地境界

第 15 図 貯蔵施設敷地内植生状況



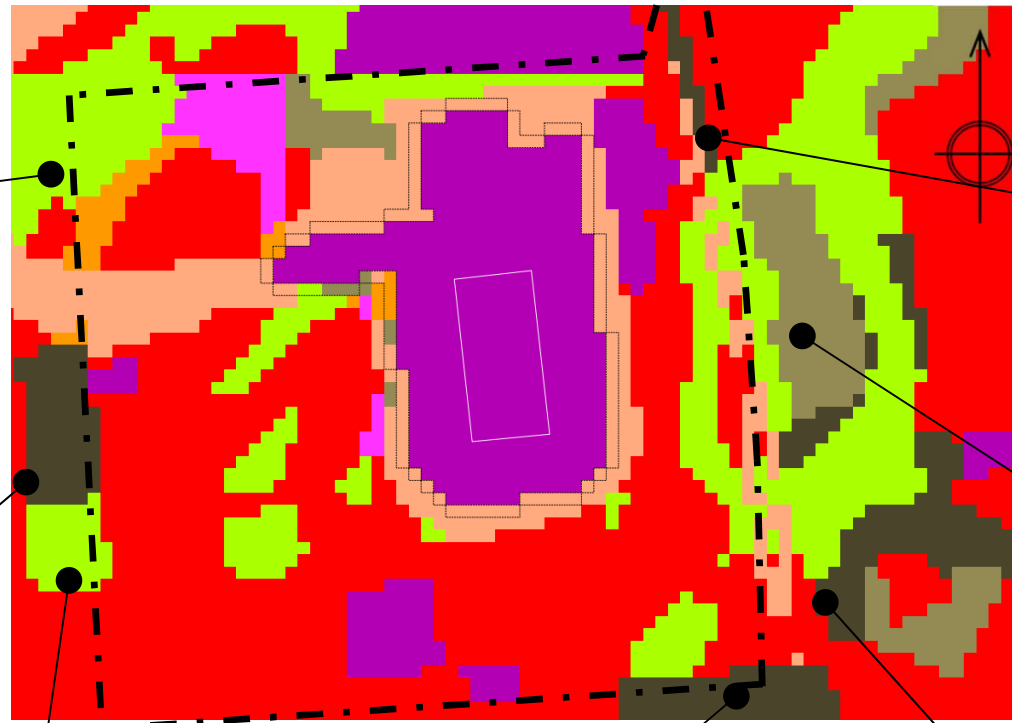
敷地北西側ミズナ群、落葉広葉樹



敷地西側(アカマツ、クロマツ群、林齢 40 年以上)



敷地西側(ハシナ群、落葉広葉樹と畑)



市道東側(アカマツ、クロマツ群、林齢 40 年以上)



市道東側(アカマツ低木群、林齢 20-30 年)



県道 266 号線南側(アカマツ、クロマツ群、林齢 40 年以上)



市道東側(アカマツ、クロマツ群、林齢 40 年以上とスギ群)

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)

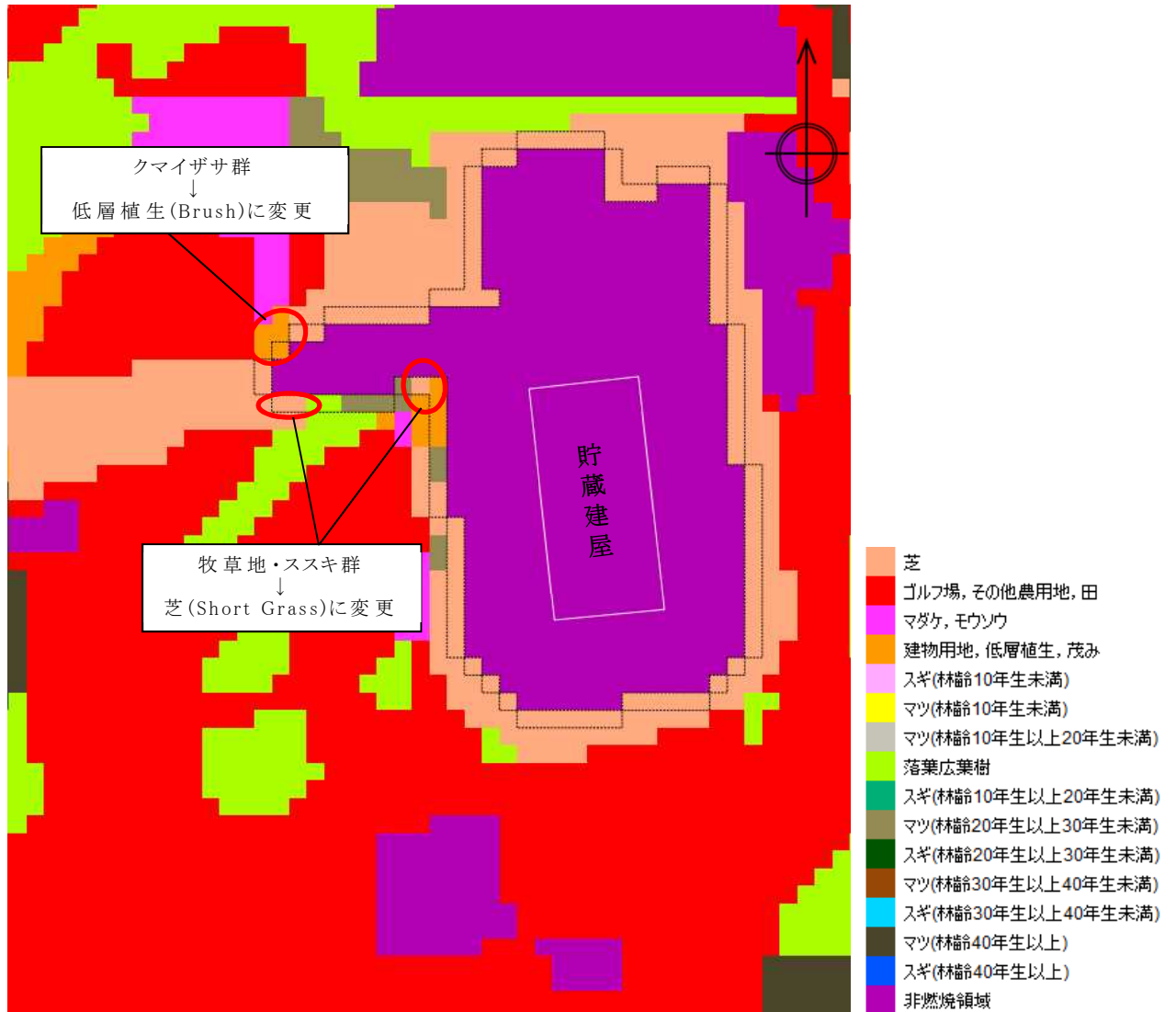
芝が生育している事務建屋周辺や法面部，及び貯蔵建屋周辺の非燃焼領域については，植生維持管理の観点及び人の往来が比較的頻繁であることから年3回の実施，敷地境界フェンス内外，市道，県道沿い，法面の草木が生育している場所については，生育状況の実績を考慮し年2回実施することとしている。

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。



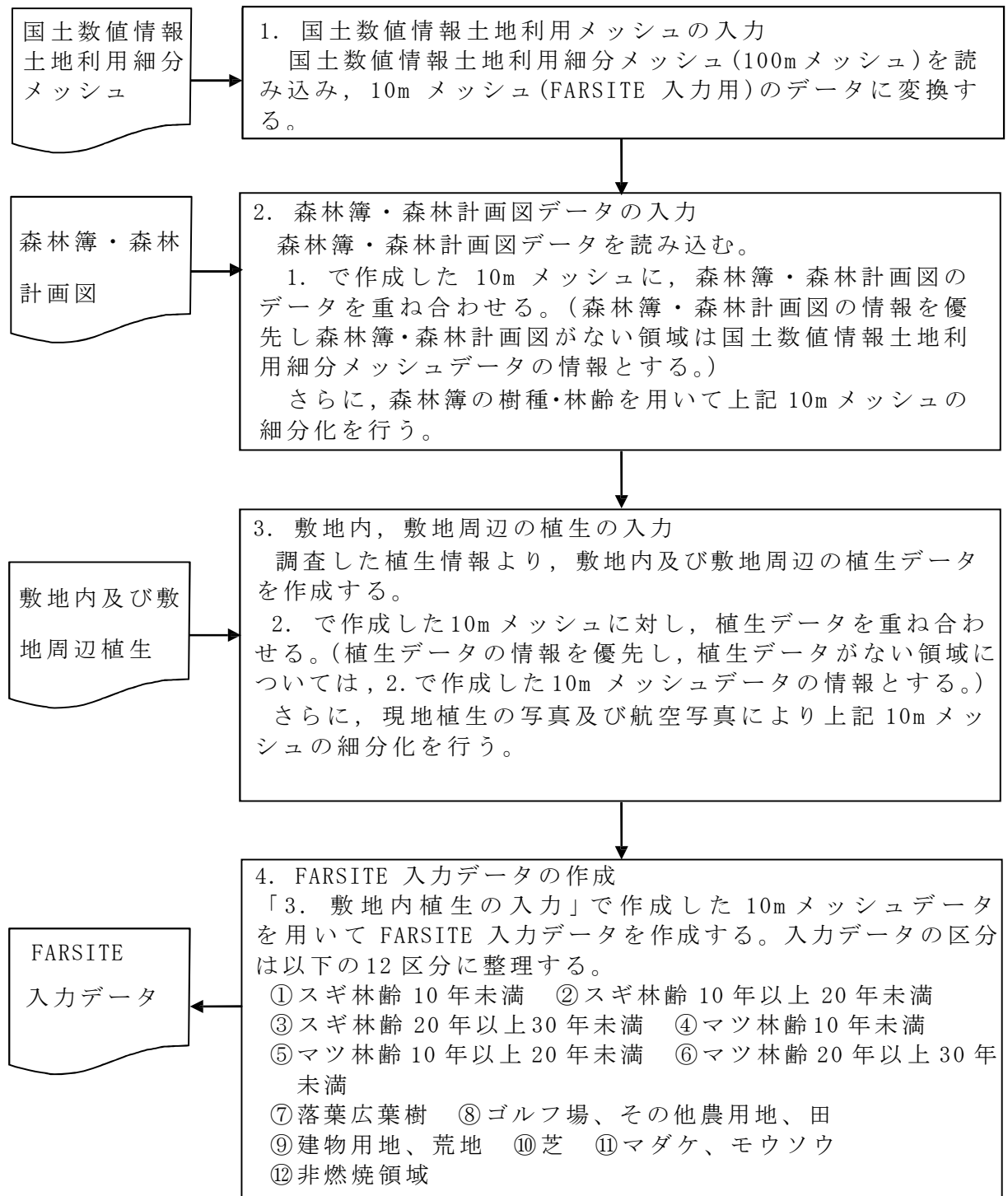
-  : 芝生育部（芝刈り、除草）
 -  : 法面（芝、背の低い草木→除草）
 -  : 敷地境界周辺（背の低い草木→除草）
 - 赤点線枠：伐採対象範囲（クマイザサ群、牧草地・ススキ群）
- 上記以外の敷地内植生（茂み、落葉広葉樹の森林）については、現状の植生を維持すべく適宜管理

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	-

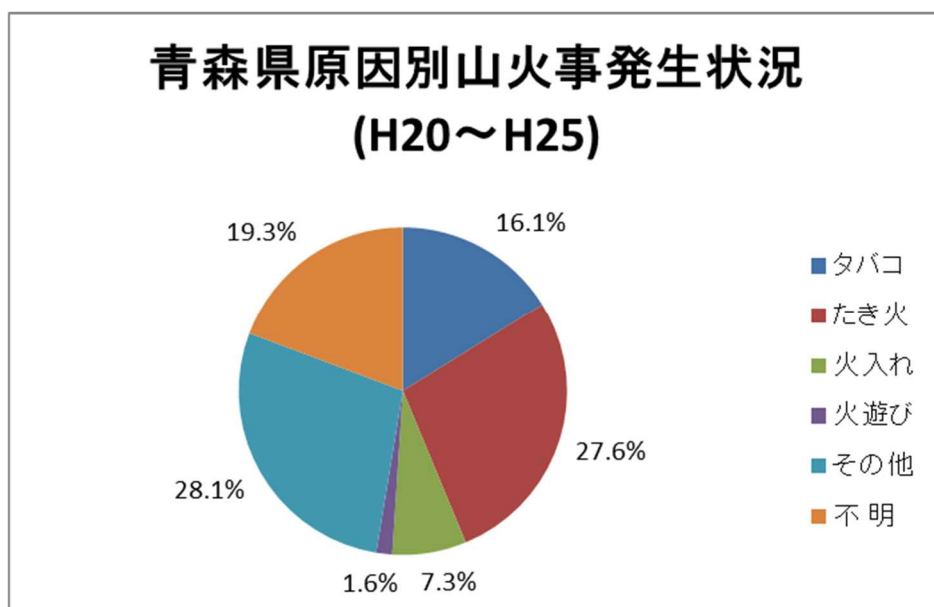
* : 「福島第一原子力発電所への林野火災に関する影響評価」 (2012 年 6 月 独立行政法人 原子力安全基盤機構)

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）

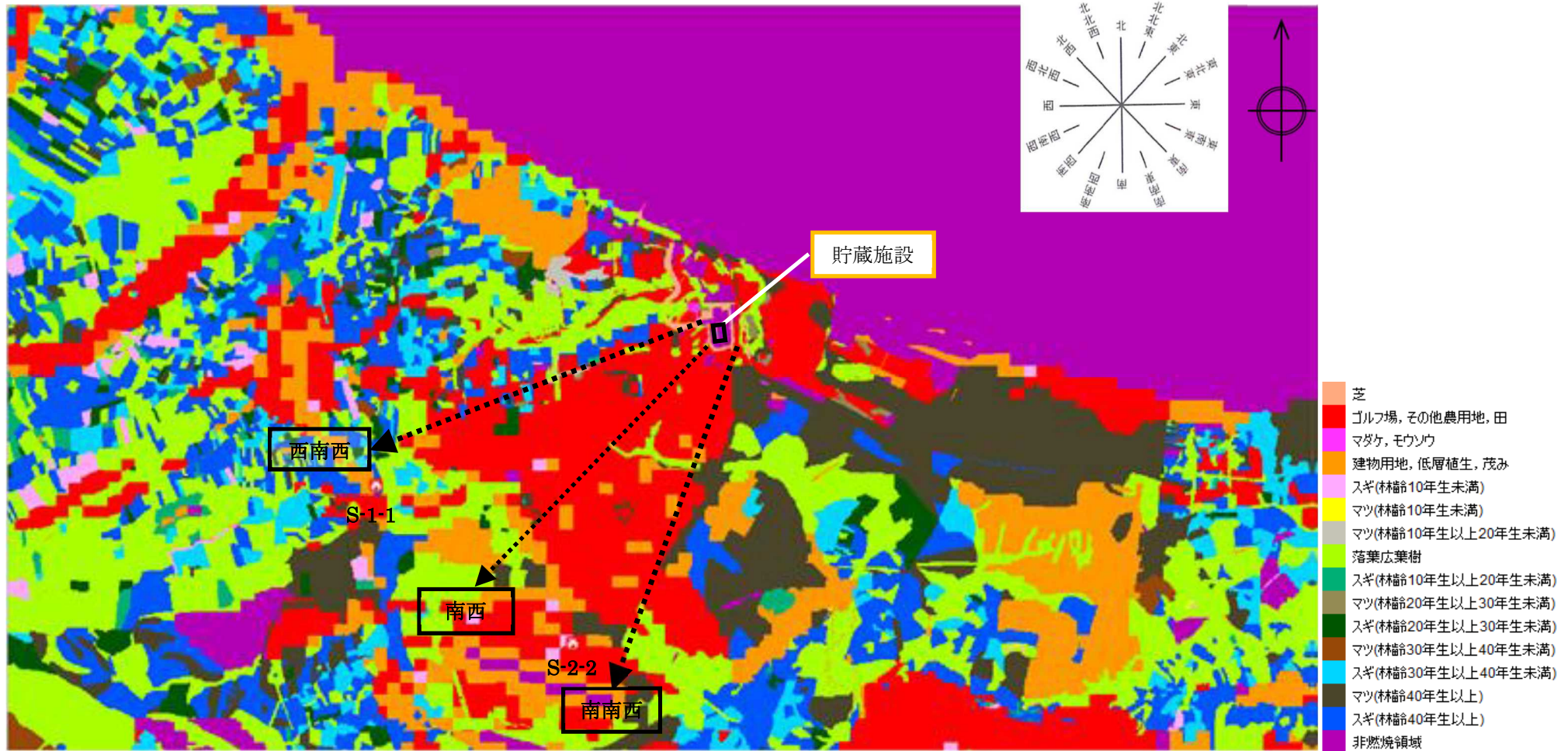
- ・貯蔵施設周辺（建屋標高 16m）はなだらかな台地であり，標高差はほとんどない。
- ・貯蔵施設の東南東～西南西は標高 30～40m 程度の丘が存在し，貯蔵施設周辺まで上り勾配となっている。
- ・西は，丘と標高の低い地形が混在し，唯一起伏のある方位である。
- ・西北西～東は海岸及び海域となっており，貯蔵施設よりも標高は低く貯蔵施設周辺に向かって上り勾配となっている。

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。

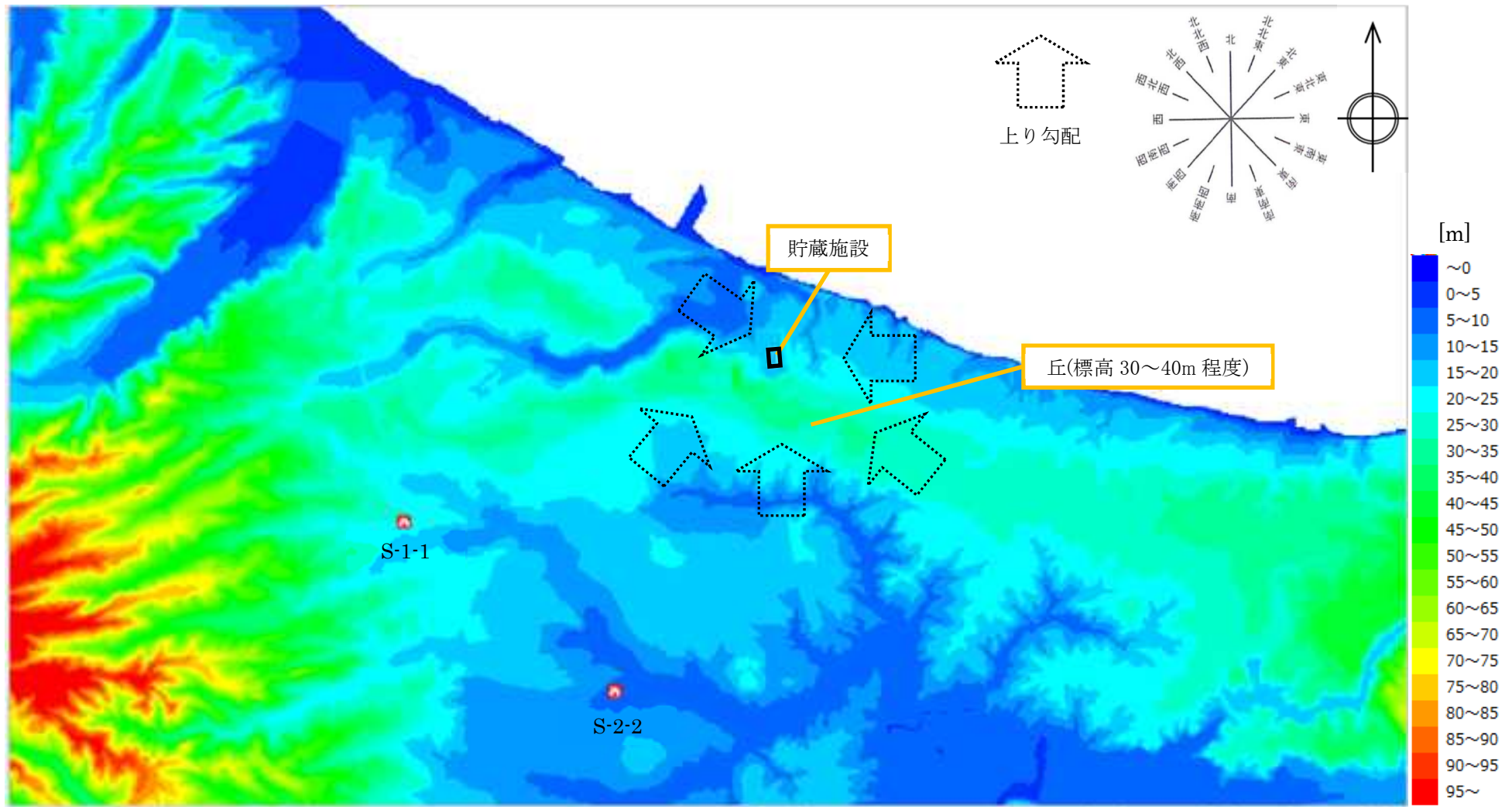
第 15 表 貯蔵施設周辺における地形及び植生の特徴

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

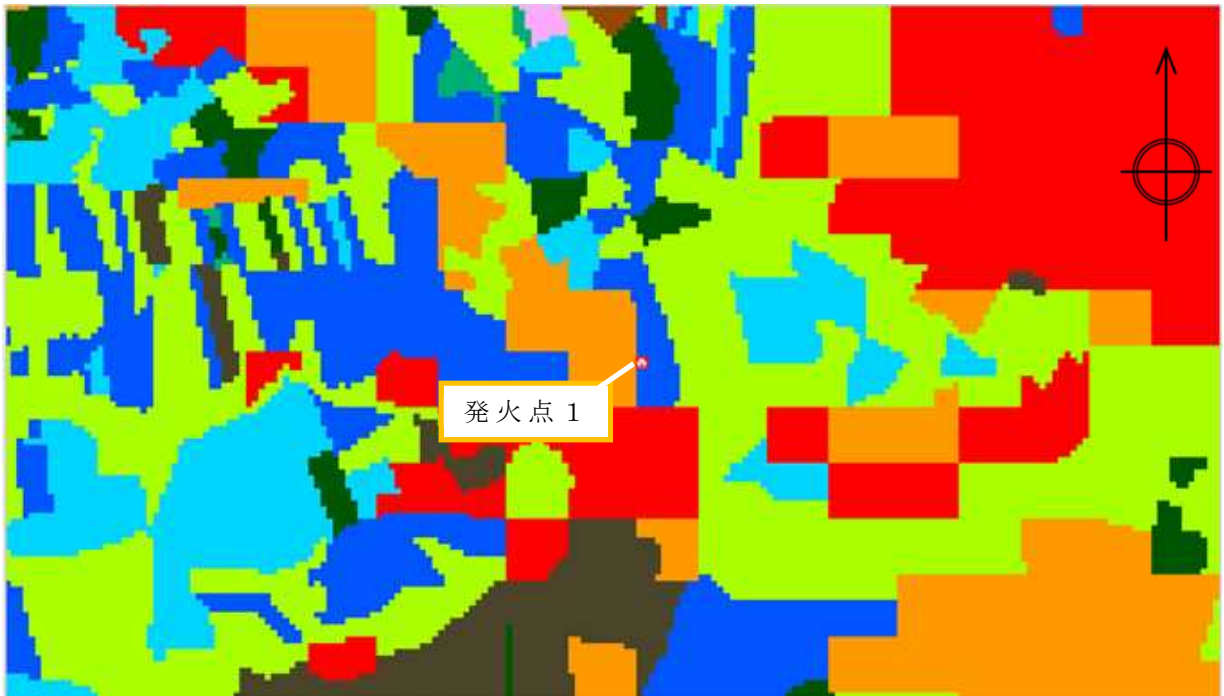
- ・発火点1と2の間となる南西方向については、植生が落葉広葉樹と低層植生の混在となっているところがあり、発火点1, 2の近傍を占める農用地の延焼より延焼速度は遅く、逆に発火点1, 2からの火災が延焼する可能性が高いと考えられる。また、出火リスクの高い集落もないことから、発火点1, 2の評価結果に包絡されるものと考えられる。

(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

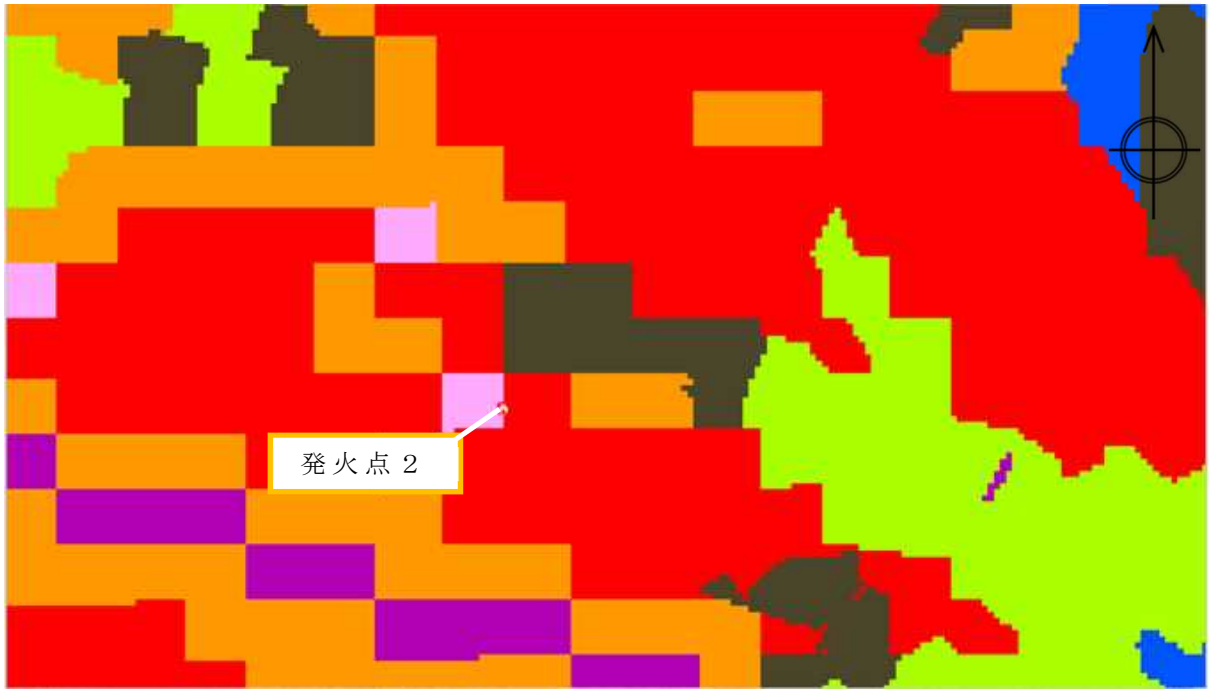
はマツ植生のみの場合より早くなり保守的な選定であると考えられる。



- 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



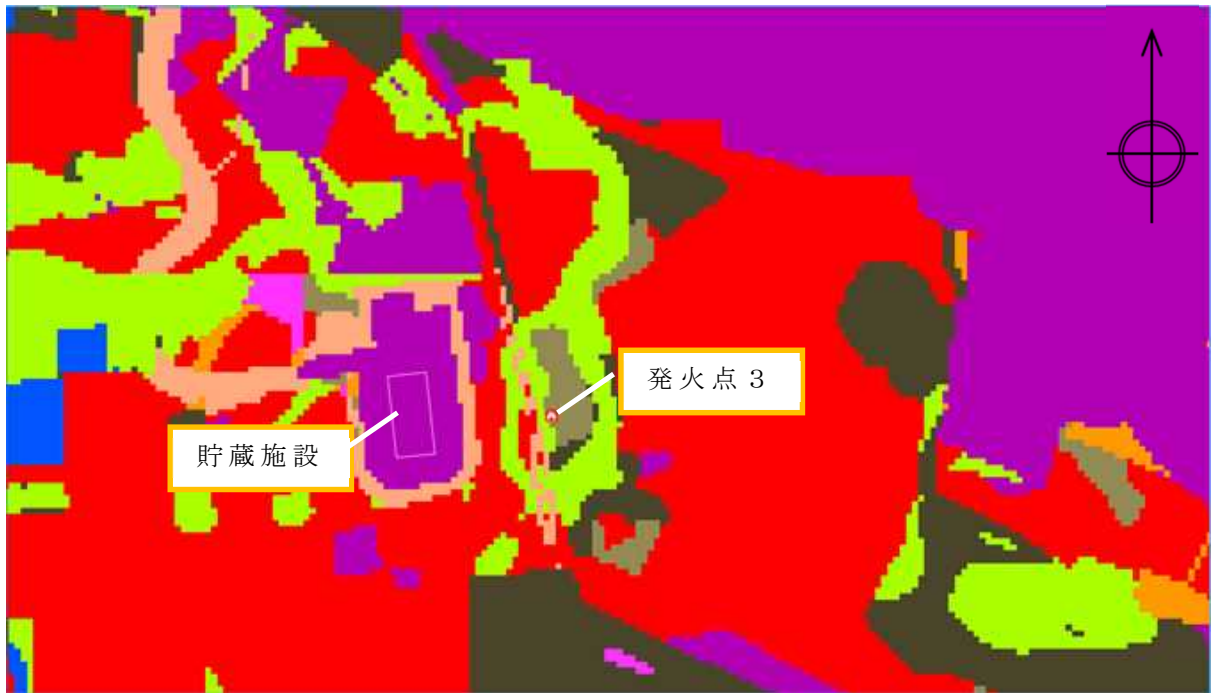
第 24 図 発火点 1 位置図 (植生図及び航空写真)



- 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 (°C)	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

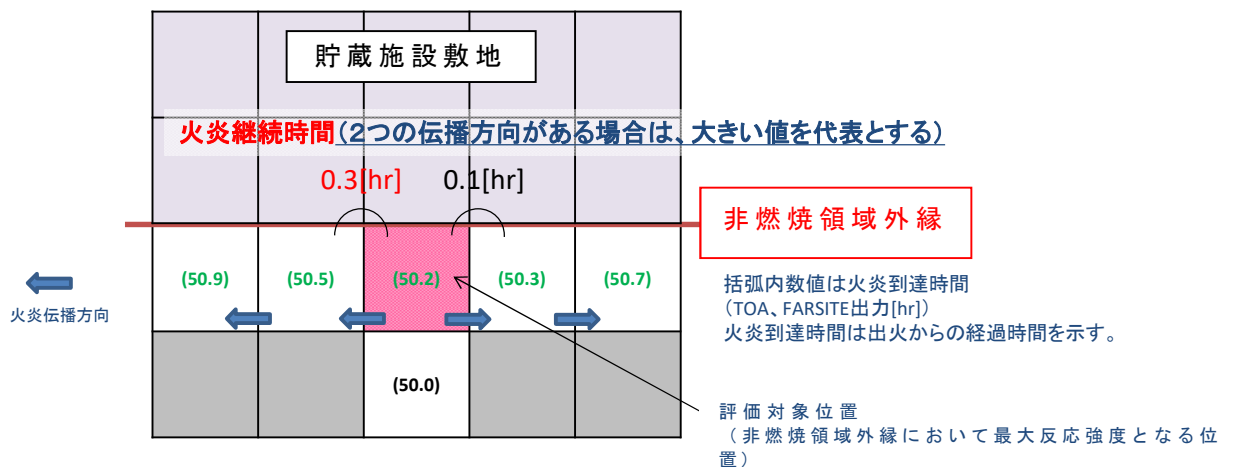
F A R S I T E から得られる各データをもとに，評価に必要な項目の算出を行った。算出項目について第 18 表に示す。

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

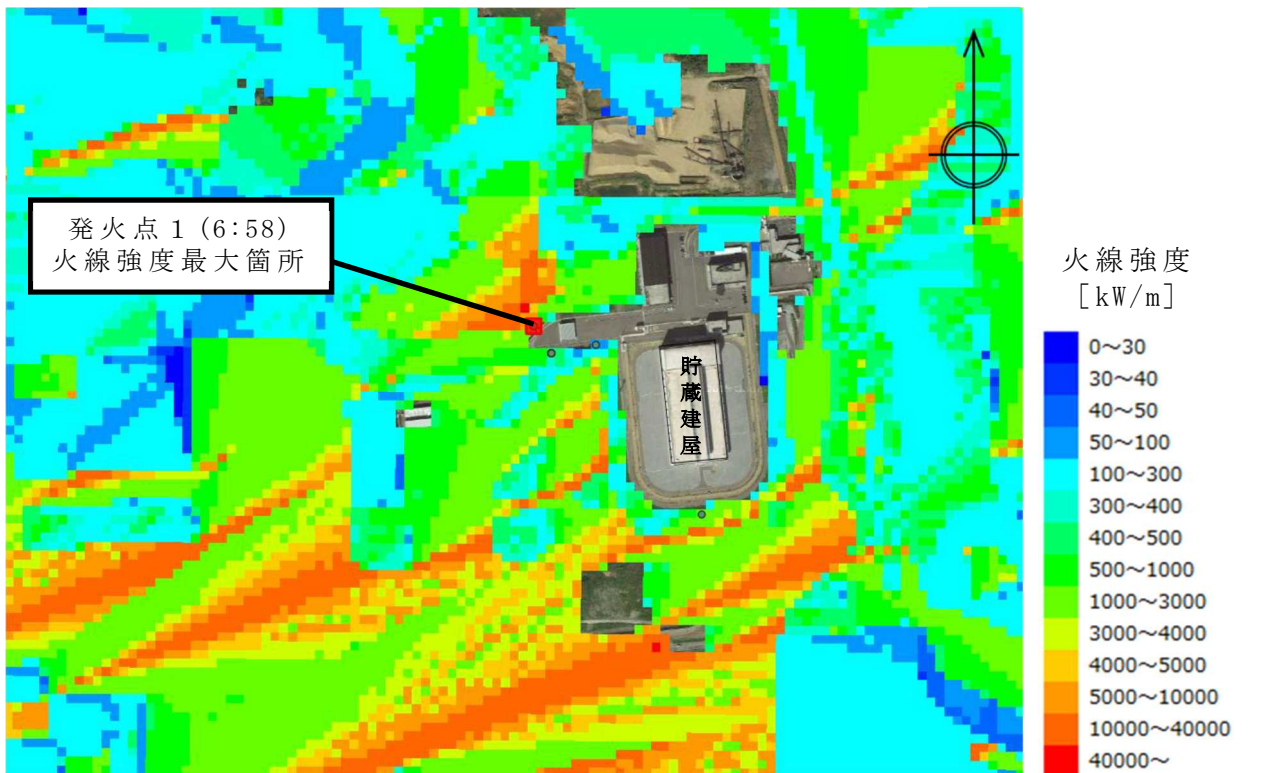
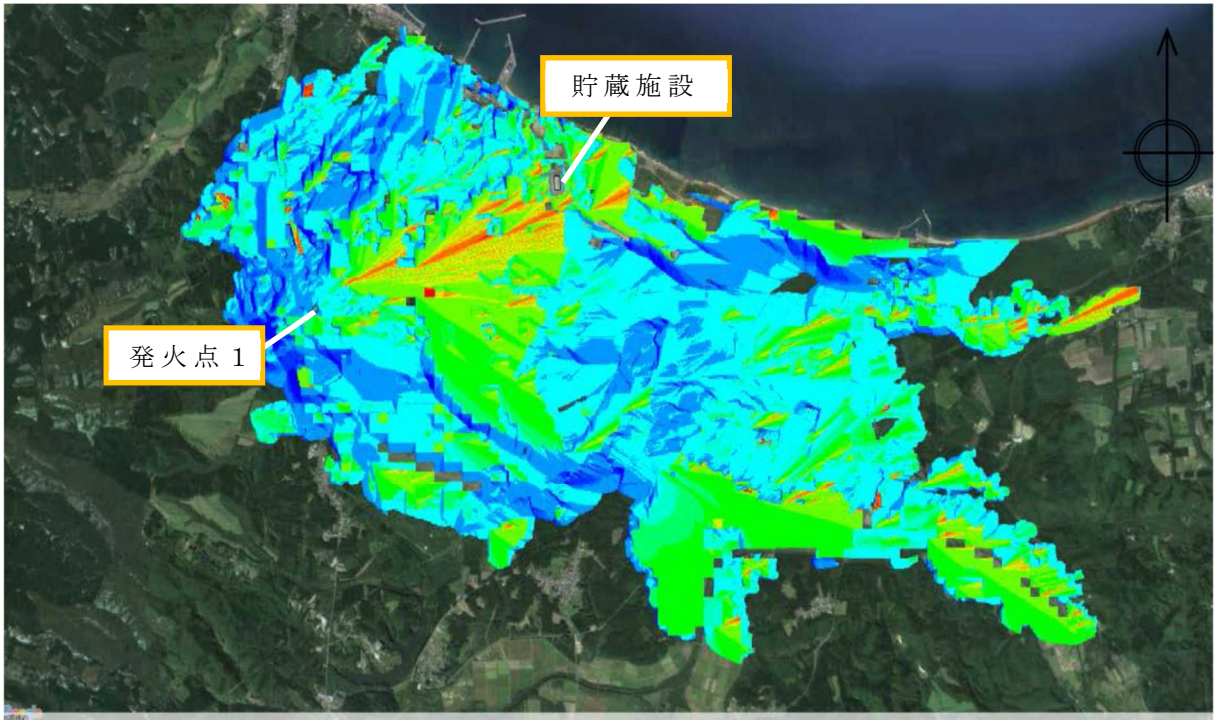
発火時刻	9:02	10:00	11:00	12:00
最大火線強度出現時刻	9:28	10:37	11:25	12:38
最大火線強度 [kW/m]	1556	1754	2016	1383
火炎到達時間 [h]	0.4	0.4	0.4	0.4

※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

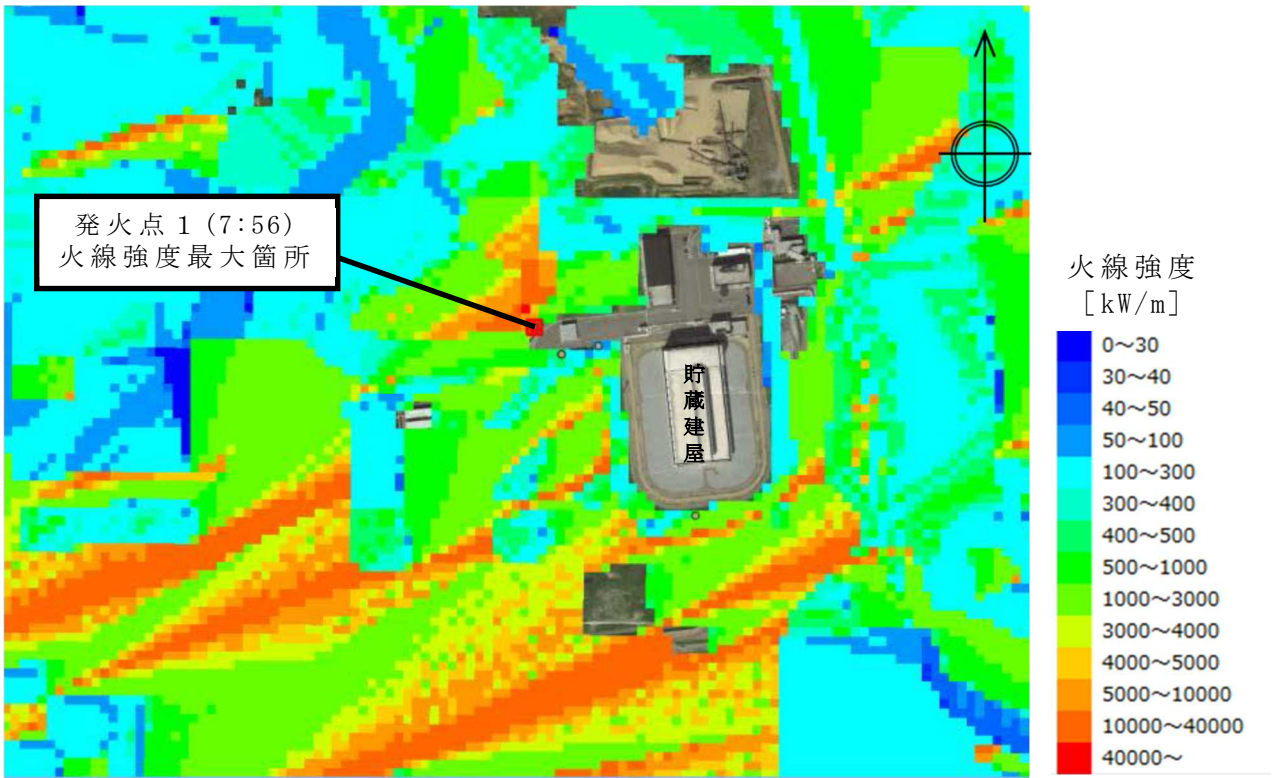
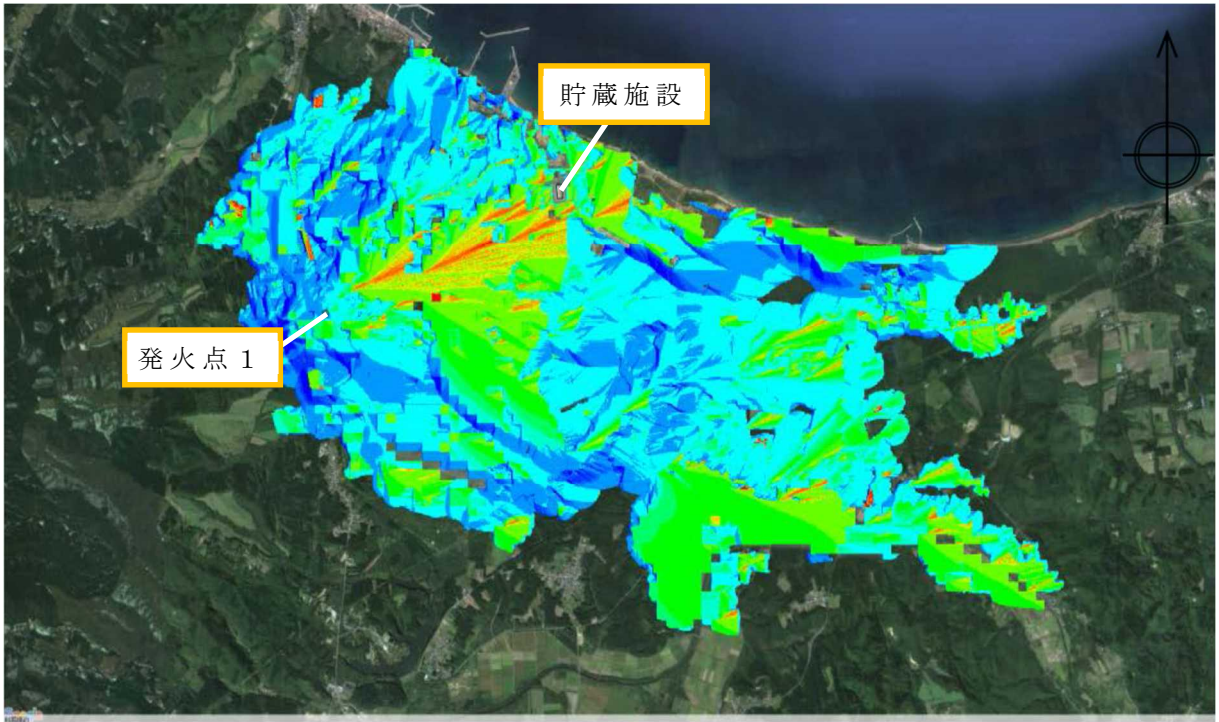
※網掛け部は各発火点における火線強度の最大値

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。

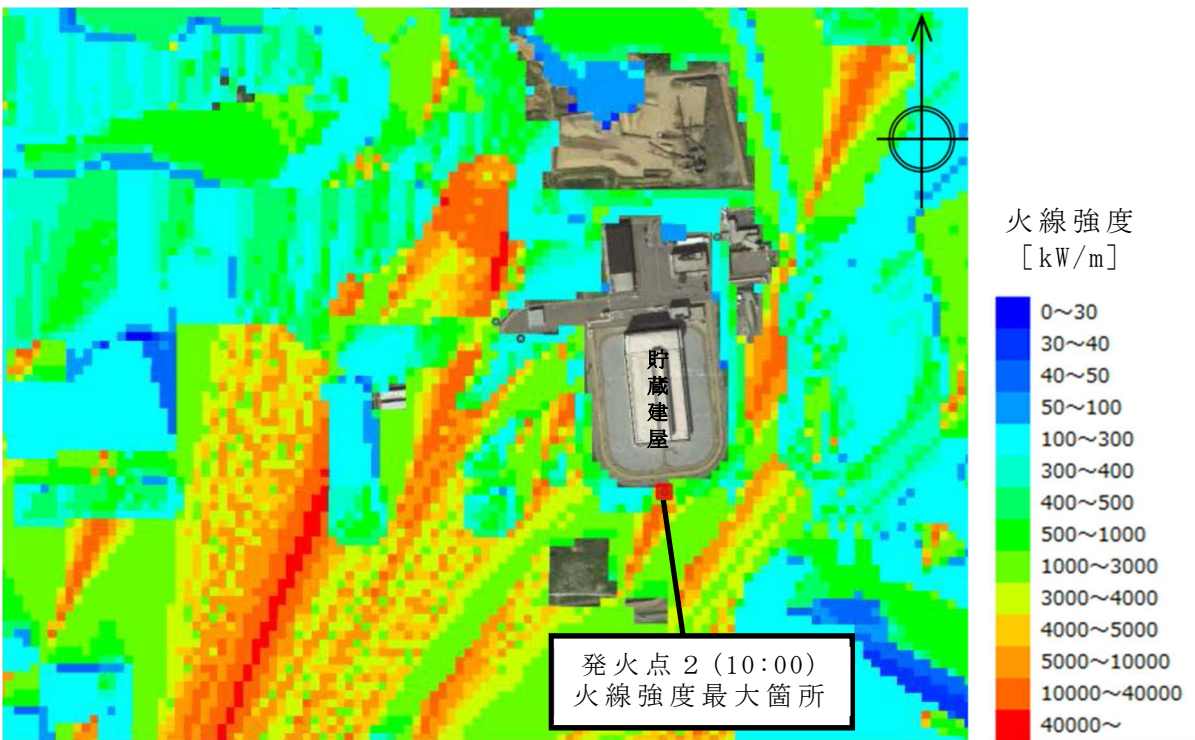
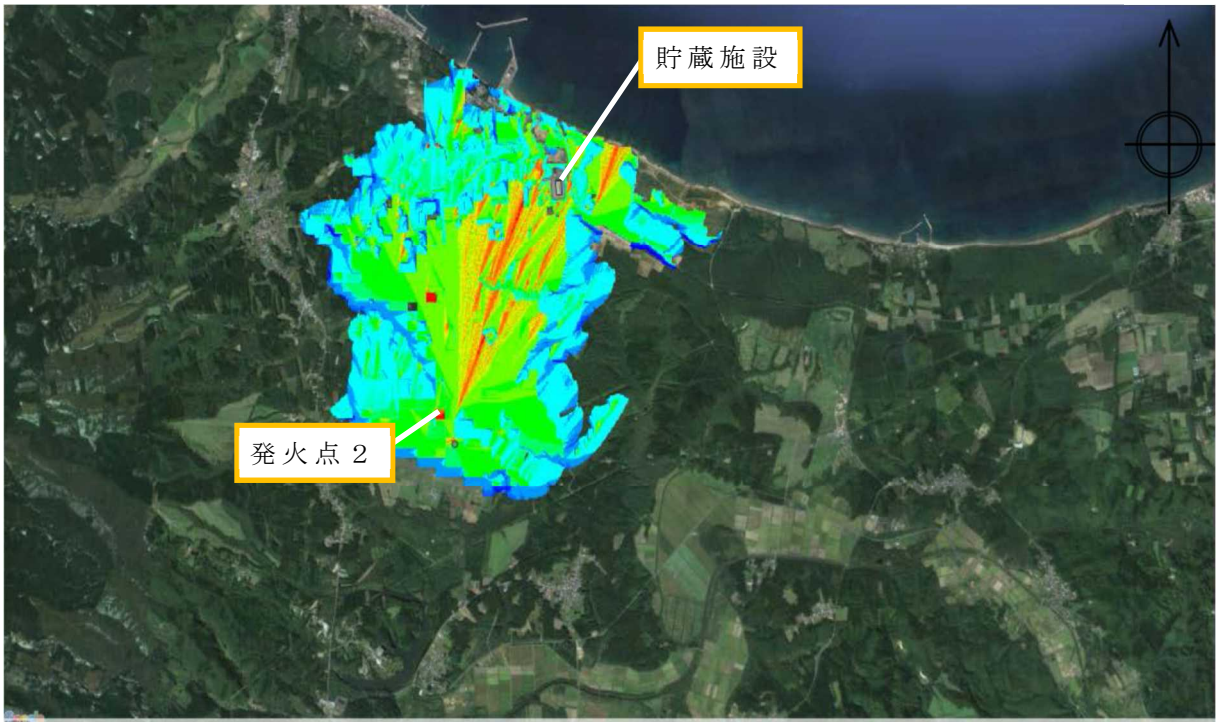
また、各発火点に対する最大火線強度分布及び最小火炎到達時間分布について第 28 図、第 29 図にそれぞれ示す。発火点 1 については、最大火線強度を発出した発火時刻 6:58、及び発火時刻 7:56 における 2 つの結果について示す。



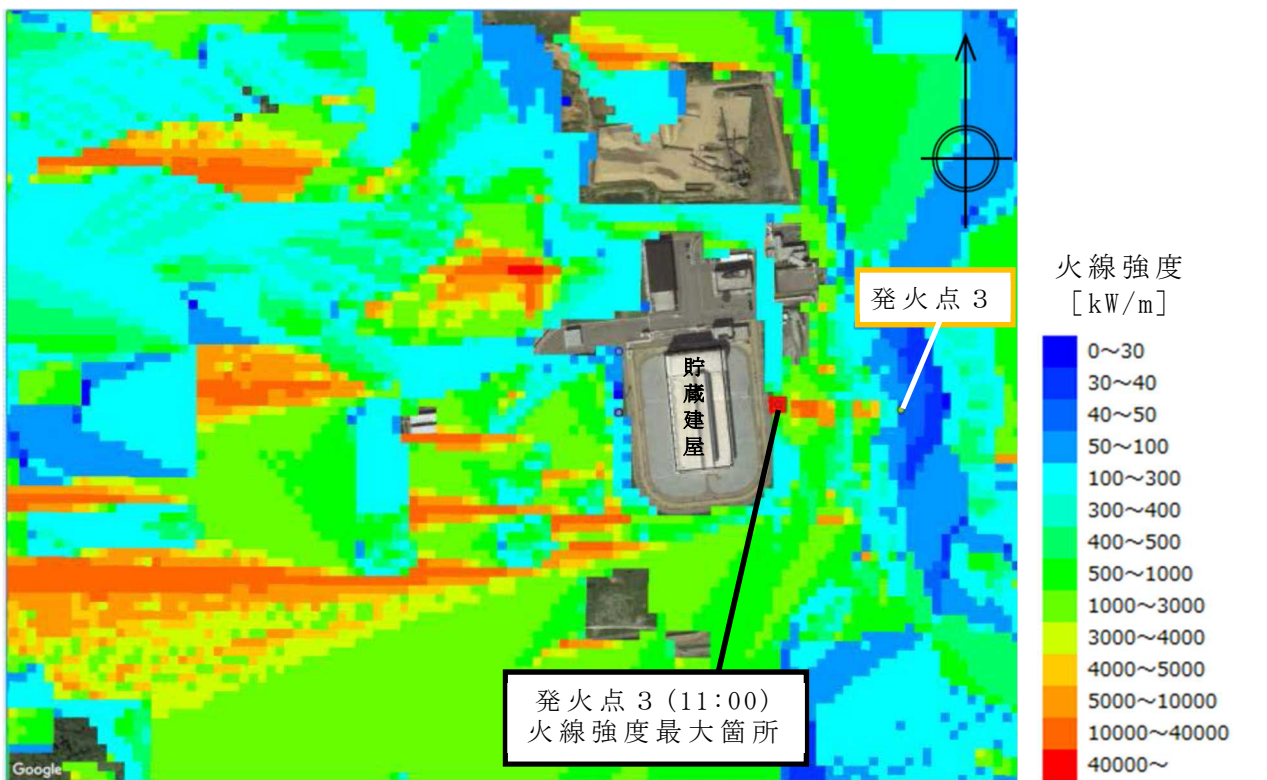
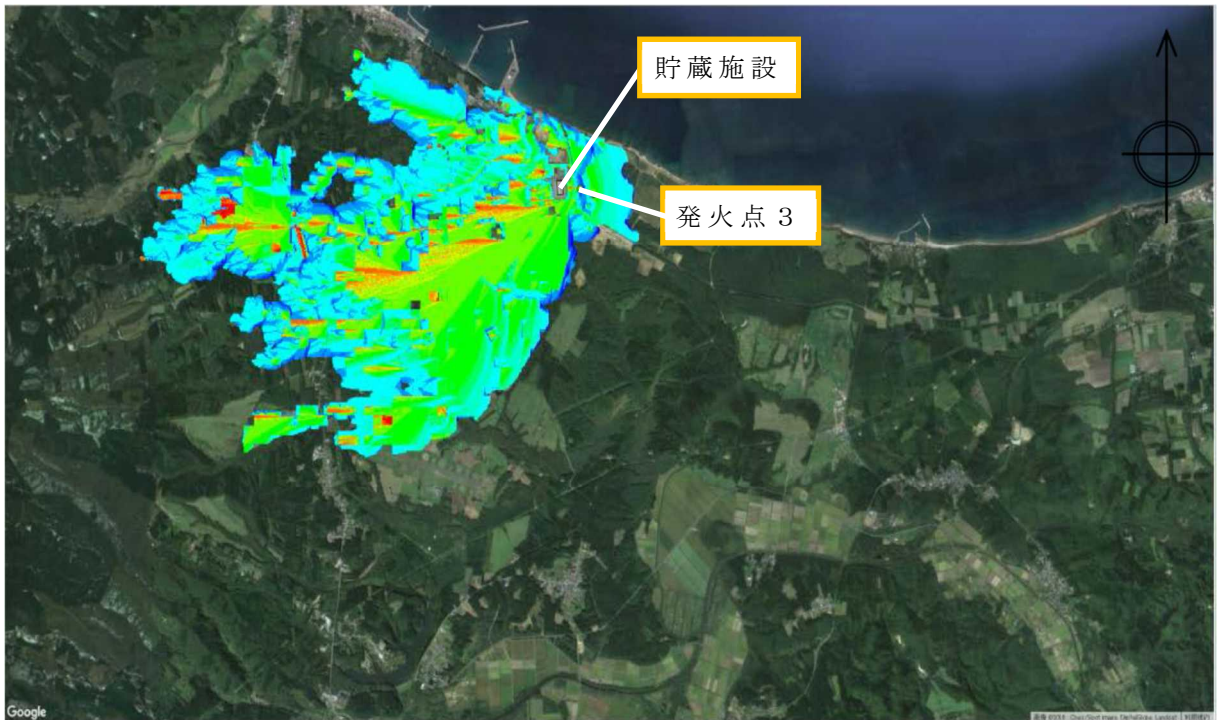
第 28 図 (1) 発火点 1 (発火時刻 : 6:58) に対する火線強度分布
 (下の図は同拡大図及び最大火線強度発生箇所)



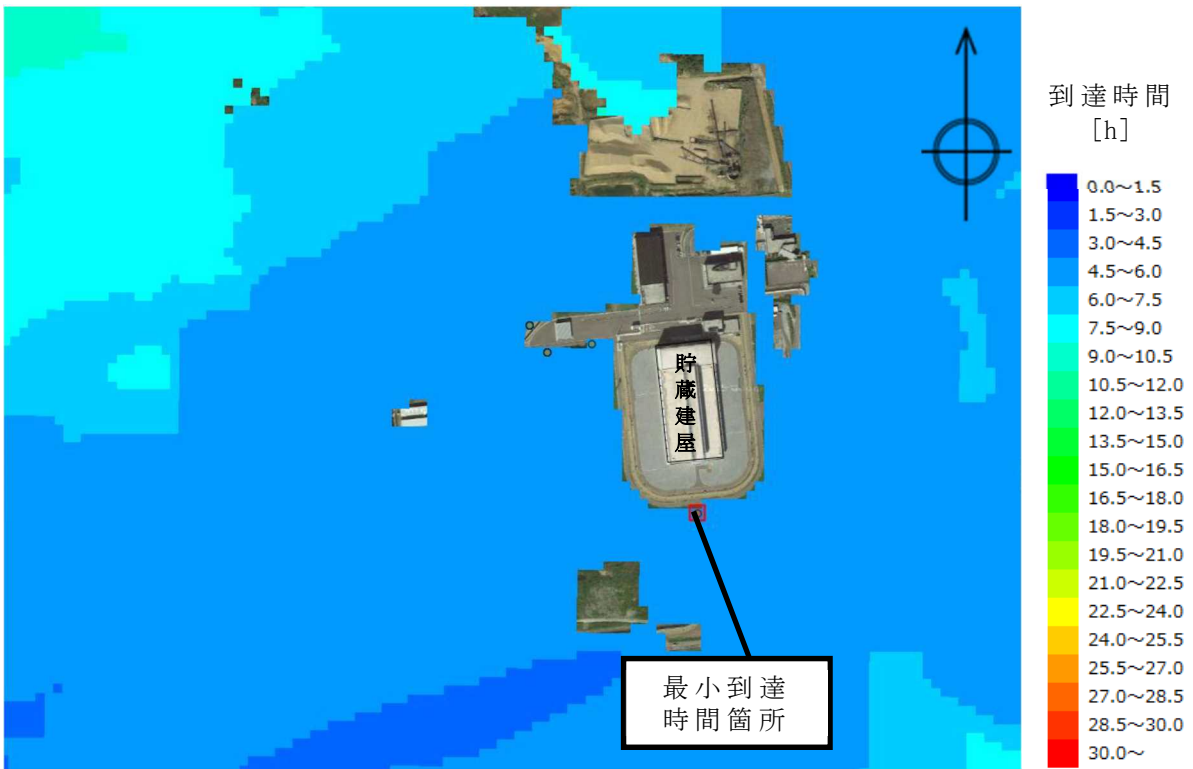
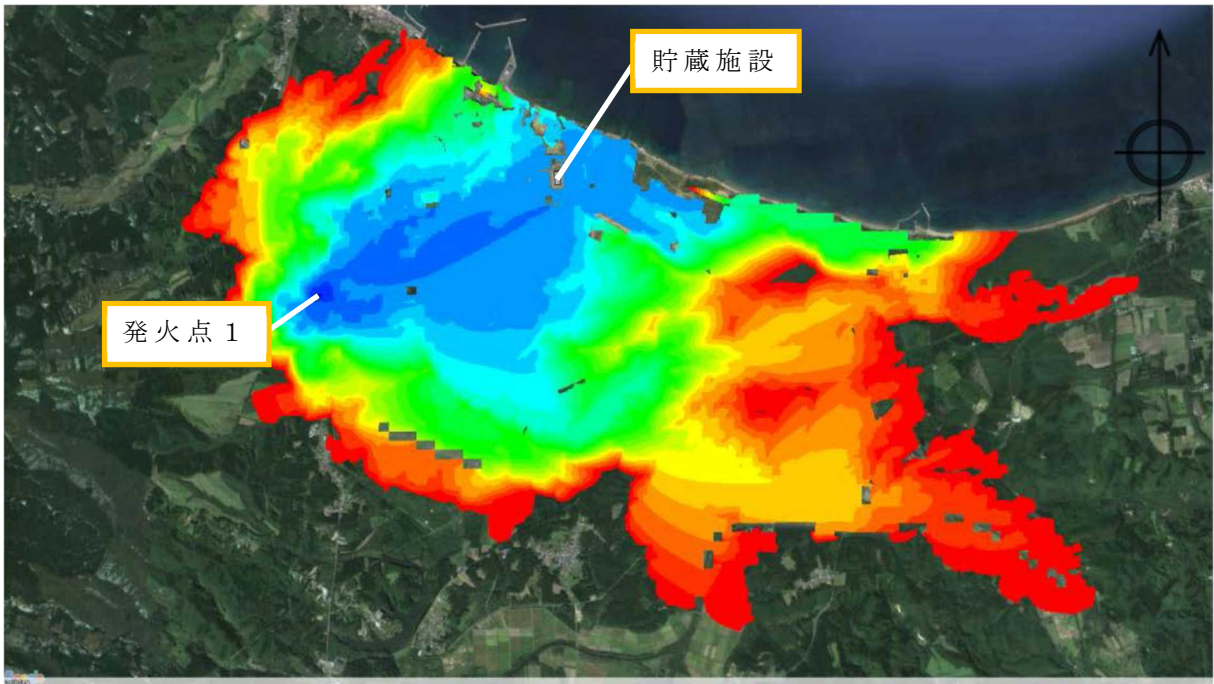
第 28 図 (2) 発火点 1 (発火時刻 : 7:56) に対する火線強度分布
 (下の図は同拡大図及び最大火線強度発生箇所)



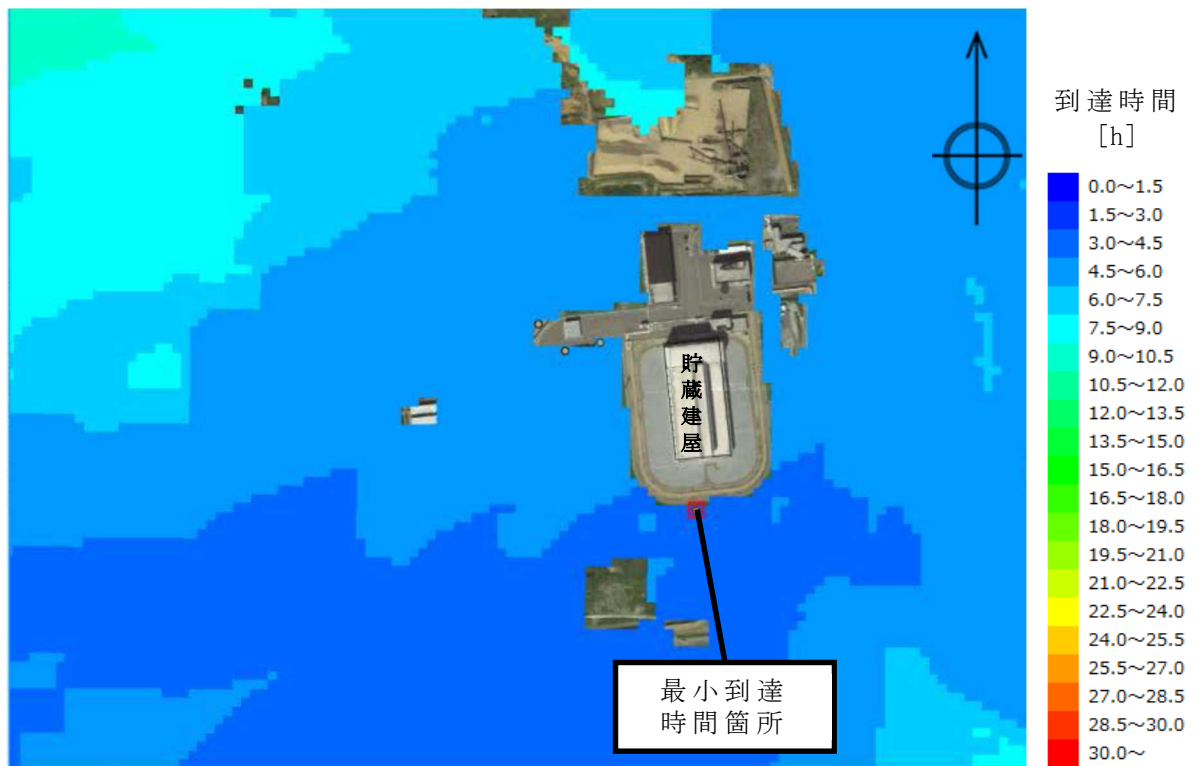
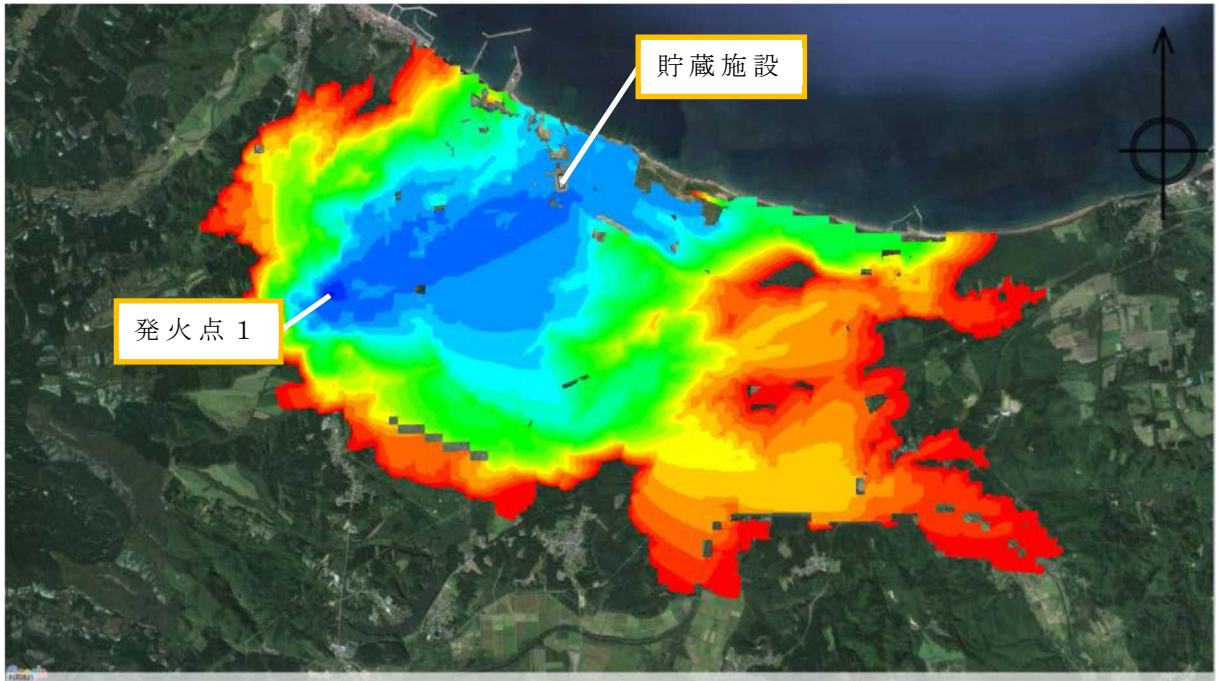
第 28 図 (3) 発火点 2 (発火時刻 : 10:00) に対する火線強度分布
 (下の図は同拡大図及び最大火線強度発生箇所)



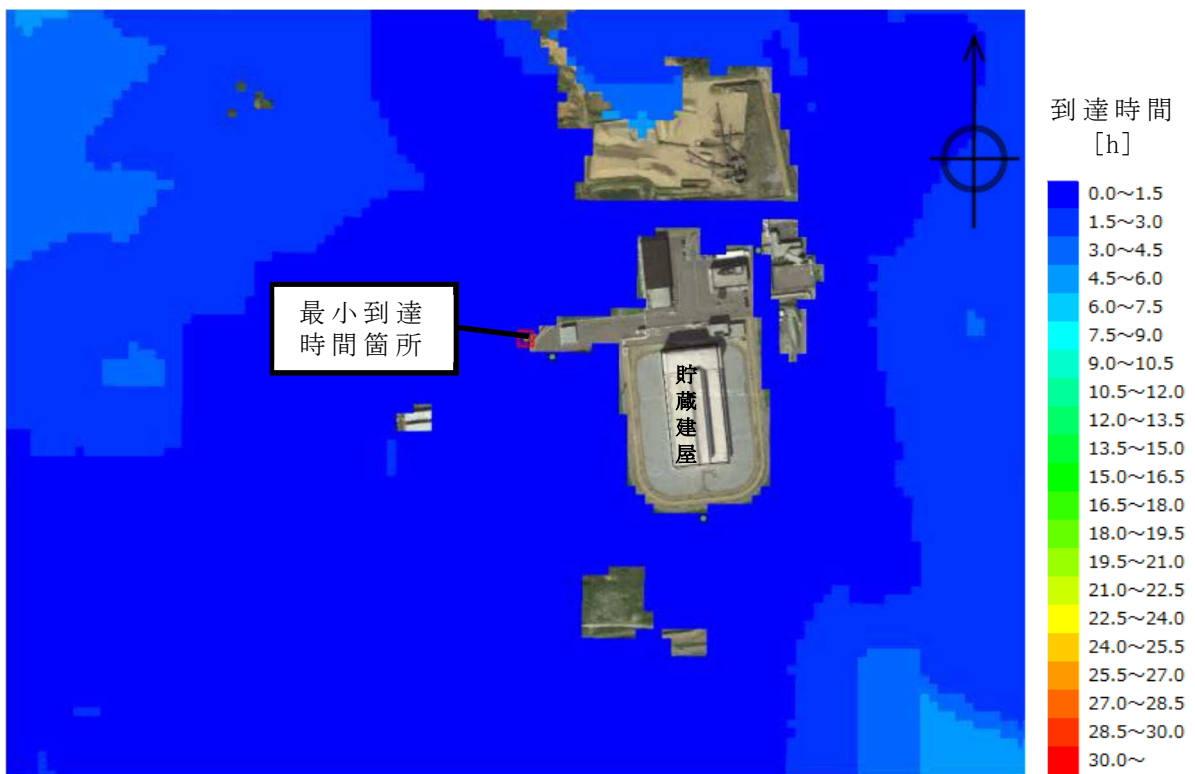
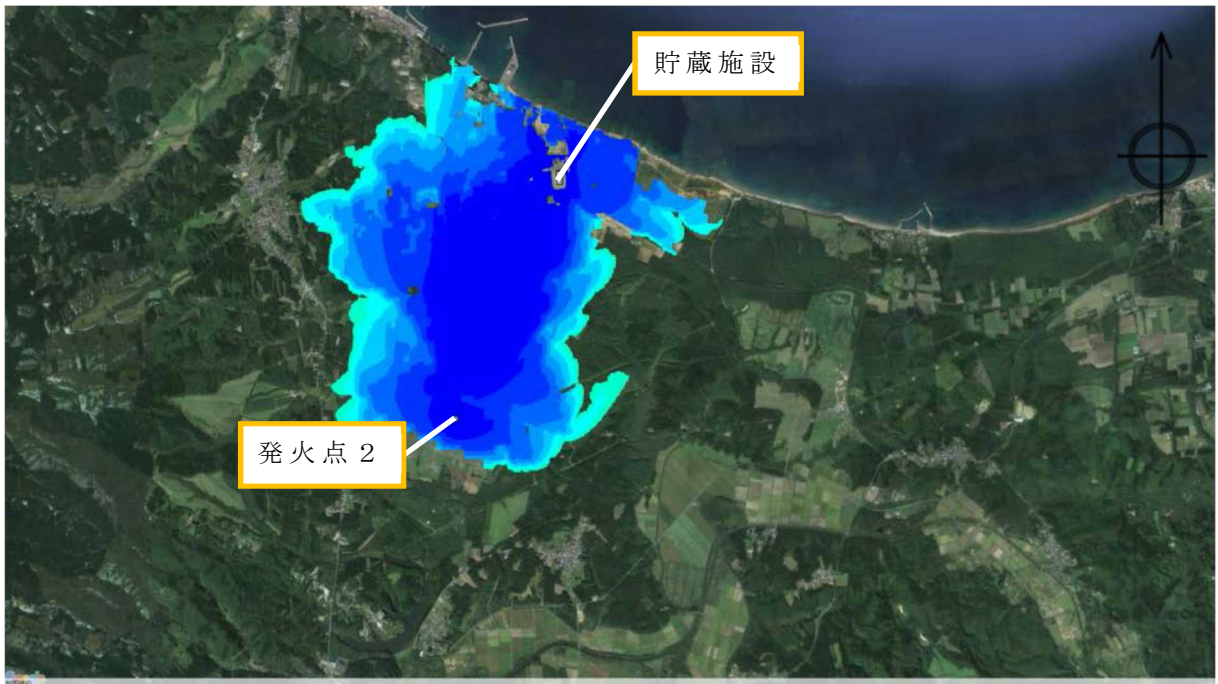
第 28 図 (4) 発火点 3 (発火時刻 : 11:00) に対する火線強度分布
(下の図は同拡大図及び最大火線強度発生箇所)



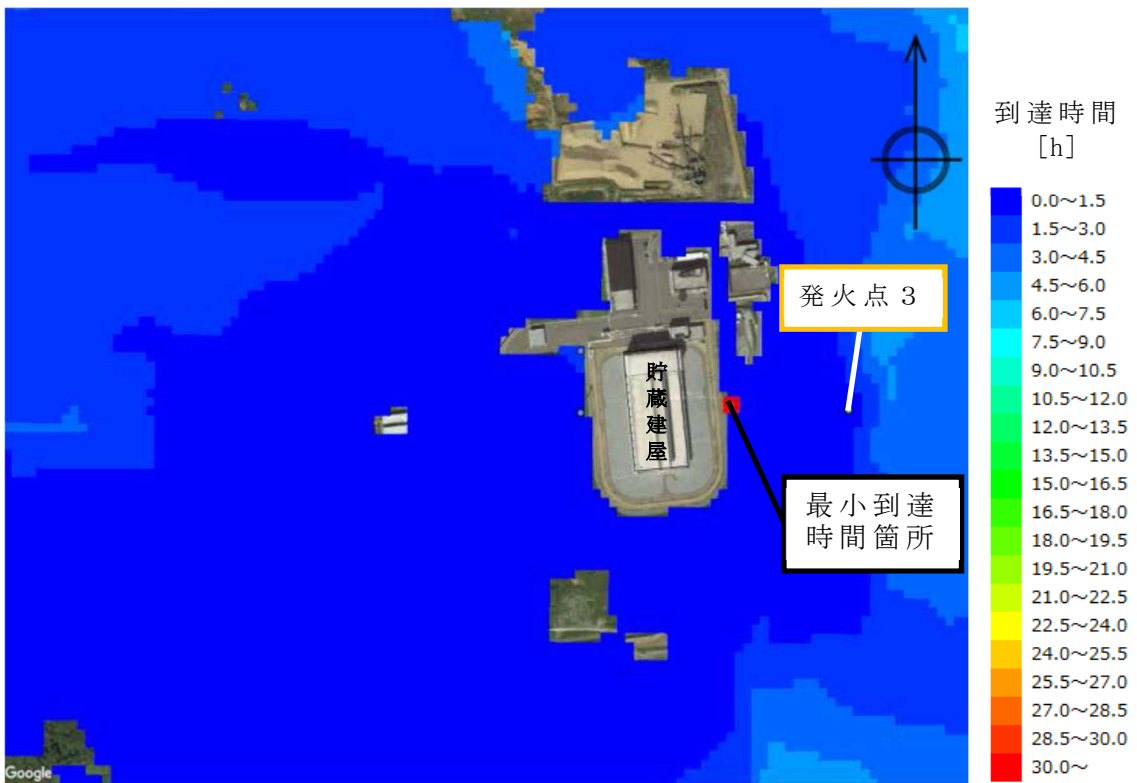
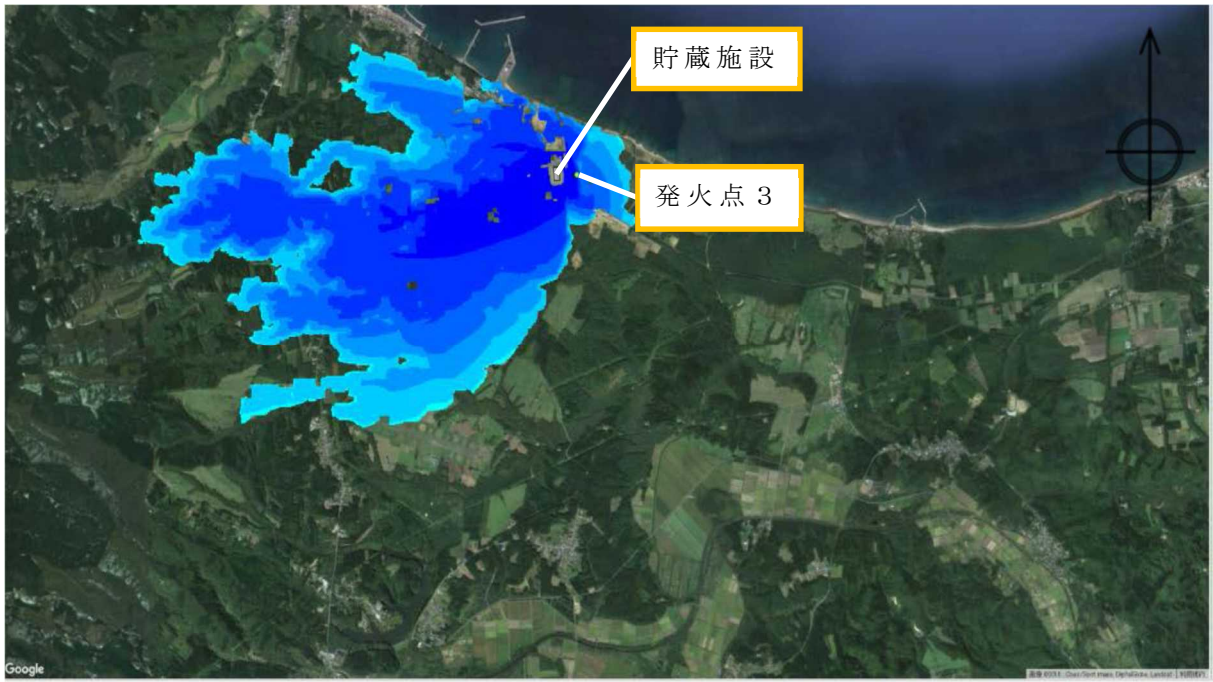
第 29 図(1) 発火点 1 (発火時刻 : 6:58) に対する火災到達時間分布
 (下の図は同拡大図及び最小到達時間発生箇所)



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。

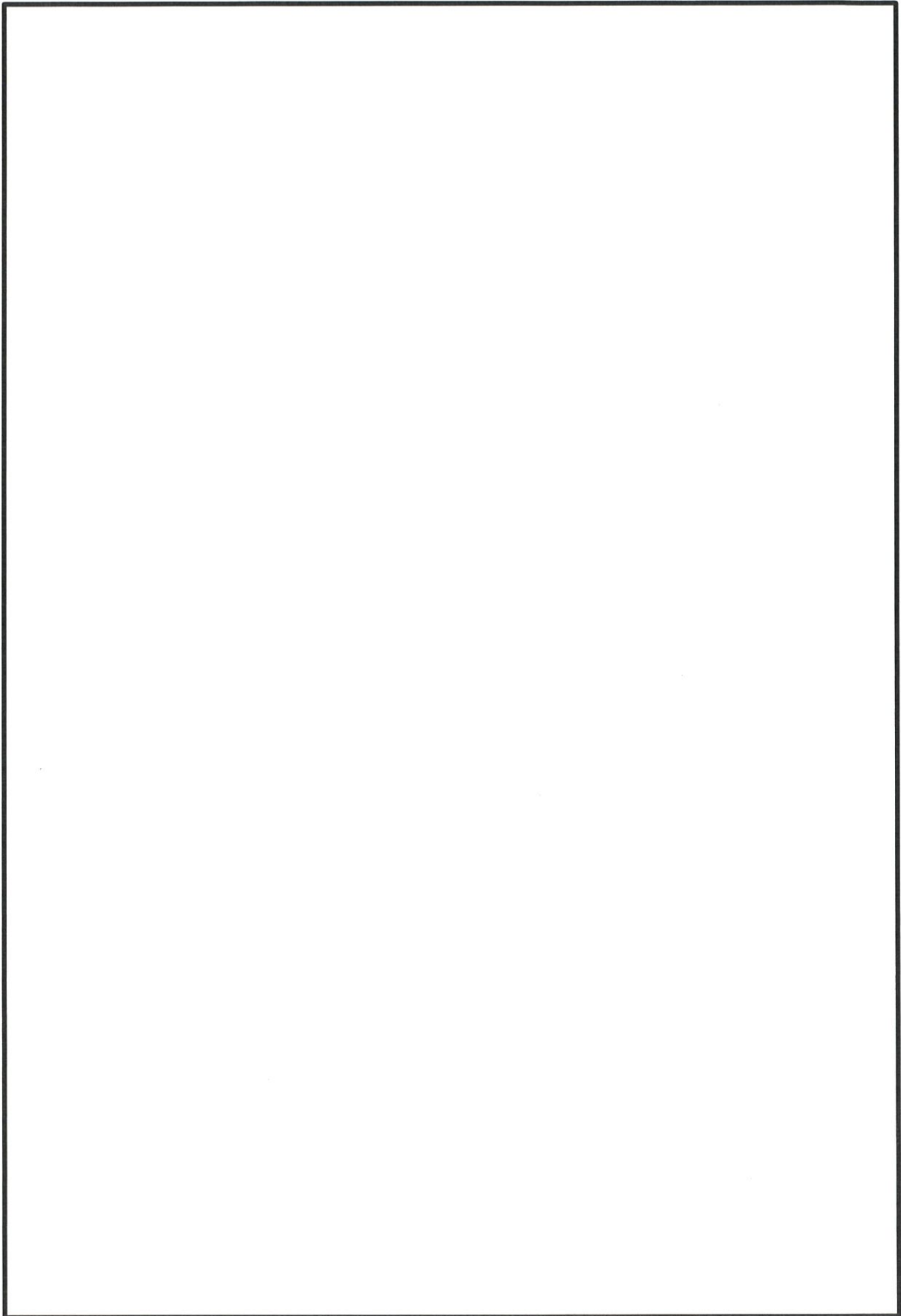
防火帯には延焼防止効果に影響を与えるような可燃物は原則設置

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。

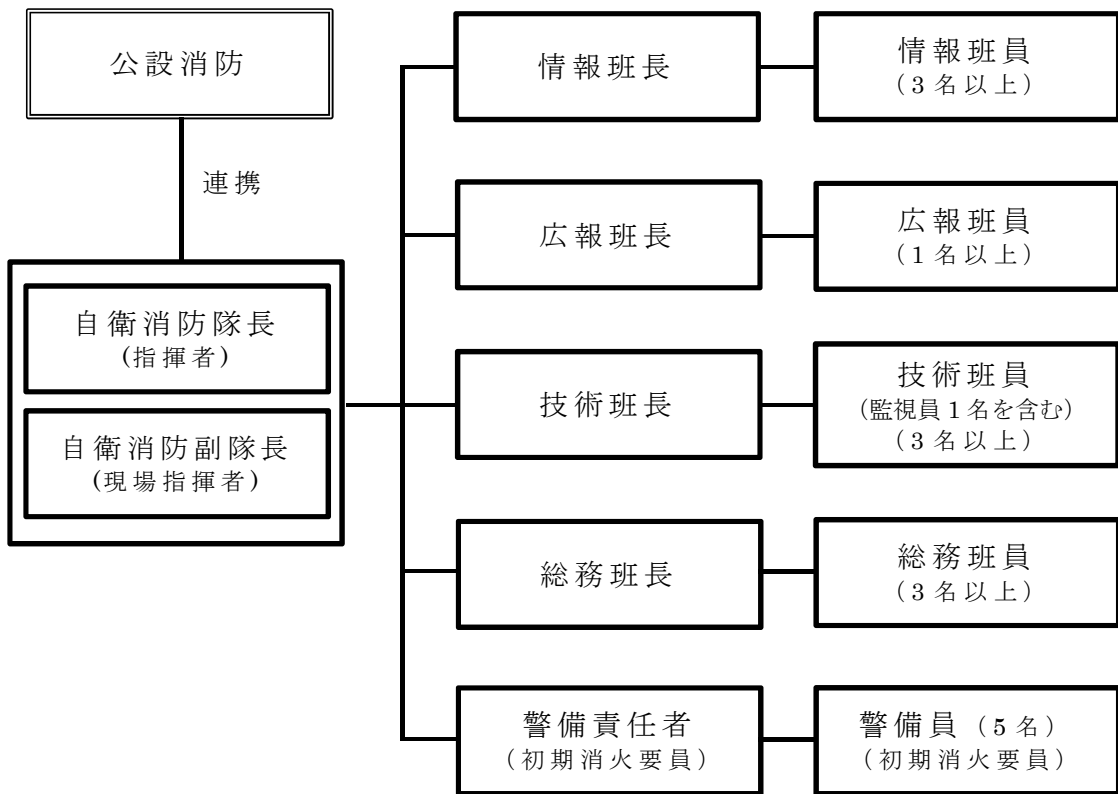
(d) 避難段階

- ・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。

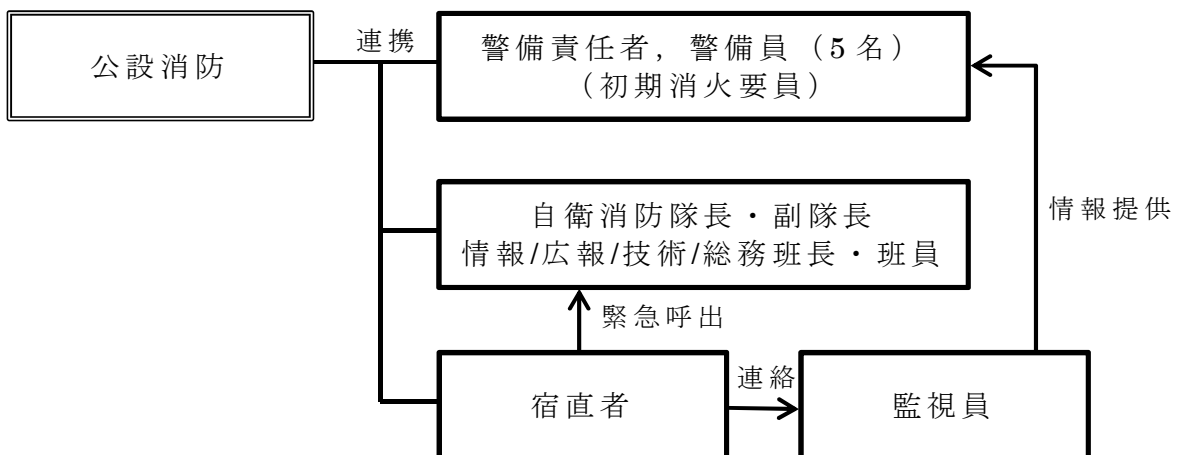
凡例 : 連携箇所



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

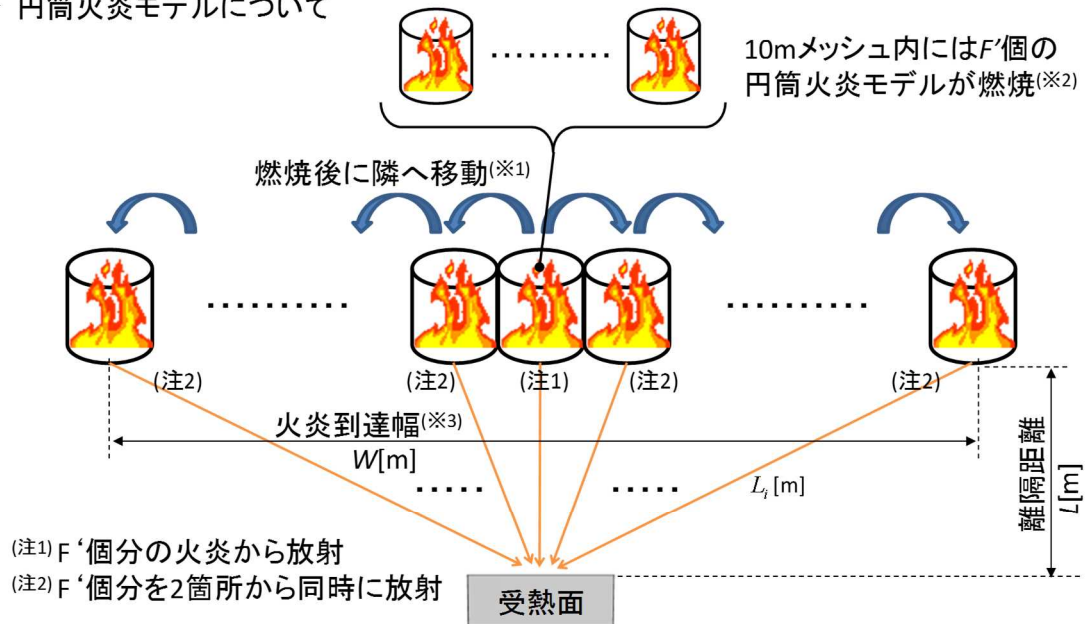
第 24 表 森林火災発生時の事前放水手順と所要時間

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



(※1) 燃焼時間は火炎継続時間とし、10mメッシュ単位で移動する。

(※2) 円筒火炎モデル数は次式で算定 $F' = \frac{10}{2R}$, $R = \frac{H}{3}$ (H: 火炎長[m])

(※3) 火炎最前線に到達した円筒火炎モデル数×格子サイズ(=10[m])

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

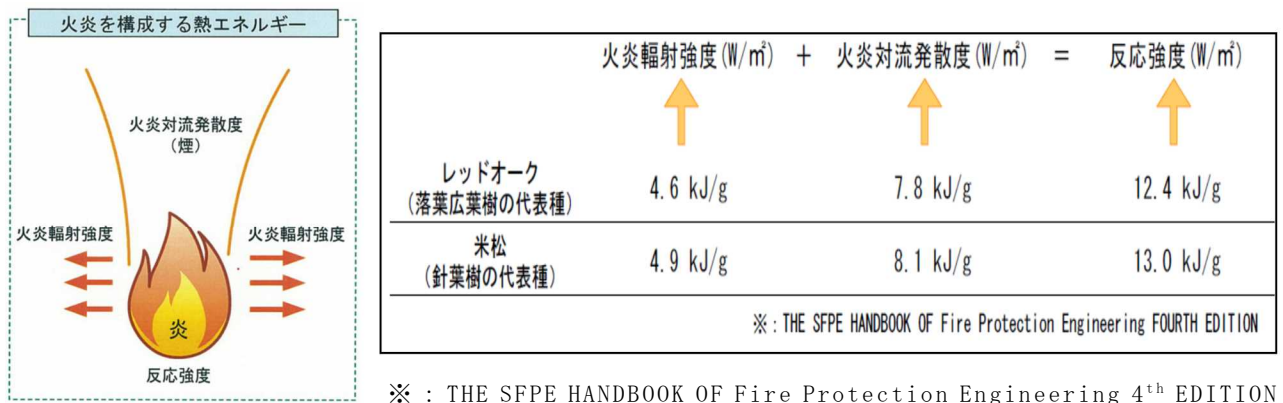
- ・ 反応強度 : I_R (W/m²)
- ・ 火炎長 : H (m)
- ・ 火炎到達幅 : W (m)
- ・ 火炎継続時間 : T_{fire} (s)

※ 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・煙として対流放出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。



※: THE SFPE HANDBOOK OF Fire Protection Engineering 4th EDITION
(SFPE:防火技術者協会(本部米国))

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。

$$\phi = \frac{1}{\pi n} \tan^{-1} \left(\frac{m}{\sqrt{n^2-1}} \right) + \frac{m}{\pi} \left[\frac{(A-2n)}{n\sqrt{AB}} \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{A(n-1)}{B(n+1)}} \right) - \frac{1}{n} \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{(n-1)}{(n+1)}} \right) \right]$$

$$A = (1+n)^2 + m^2$$

$$B = (1-n)^2 + m^2$$

$$m = H/R \div 3$$

$$n = L/R$$

$$E = R_f \cdot \phi$$

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)
火炎放射強度 (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
放射強度(kW/m ²)	形態係数×火炎放射強度	5.24	5.25	4.14	2.65

*1:反応強度に対して、米国 NFPA (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放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)。

$$-k \frac{T_1^t - T_0^t}{\Delta x} = E \quad \Rightarrow \quad T_0^t = \frac{E \Delta x}{k} + T_1^t \quad (\text{外表面温度})$$

$$-k \frac{T_{n-1}^t - T_n^t}{\Delta x} = 0 \quad \Rightarrow \quad T_n^t = T_{n-1}^t \quad (\text{内表面温度})$$

(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

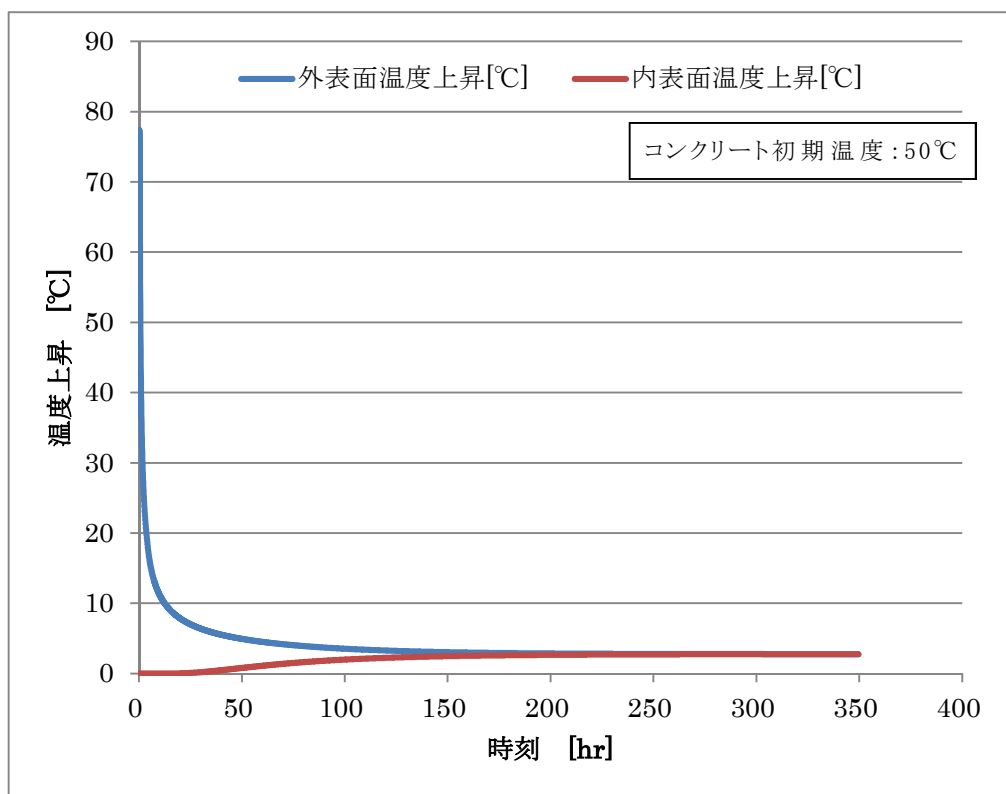
(1) 貯蔵建屋外壁温度の評価

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。

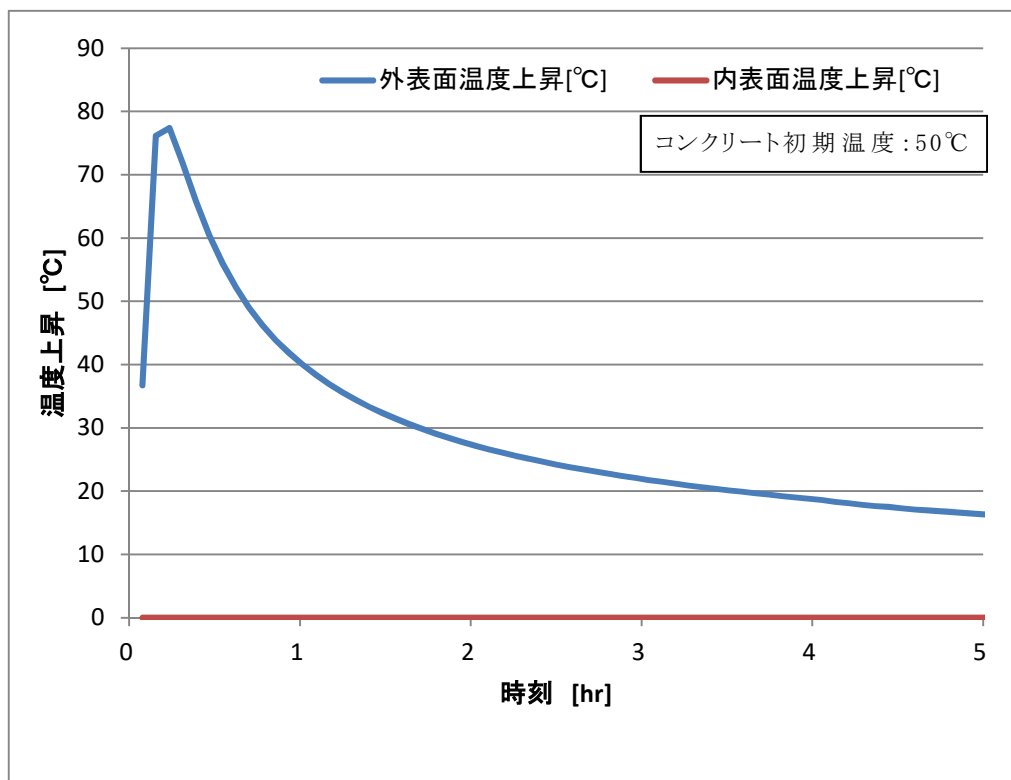
外壁温度については火災発生直後に最高温度となるが、その後輻射強度の低下に伴い徐々に低下する。これは、森林火災を円筒火炎としてモデル化した際、時間経過に伴い円筒火炎モデルが評価点より遠ざかるためである。

(2) 危険距離の評価

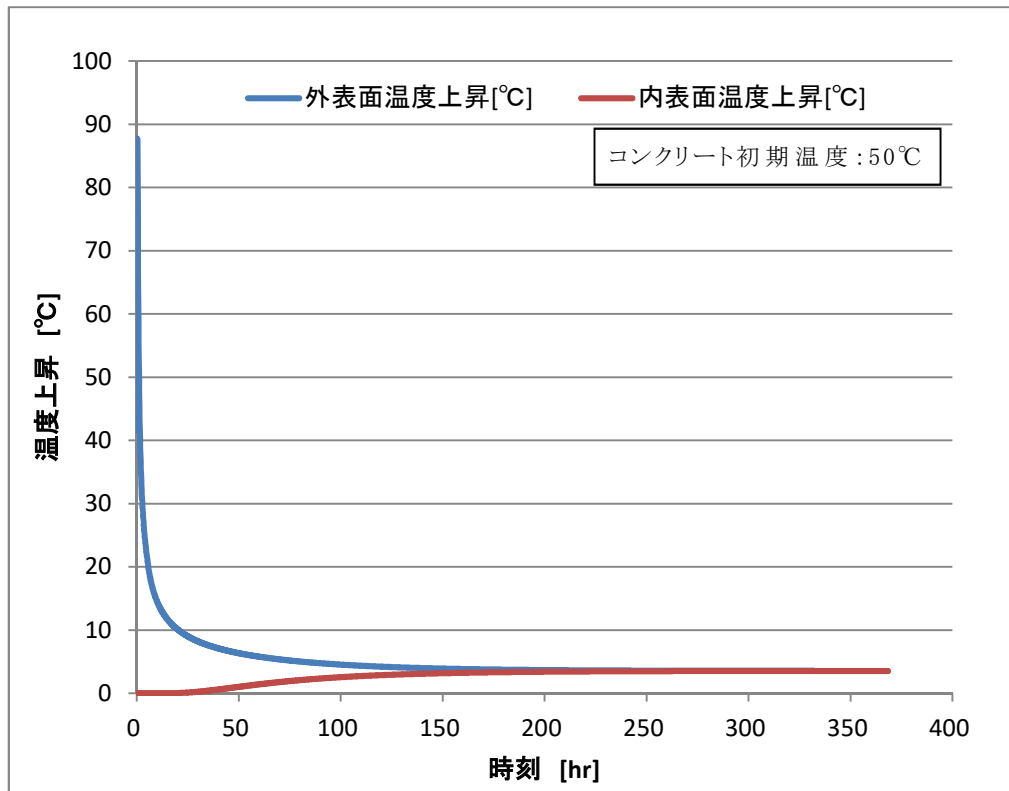
危険輻射強度から各発火点における危険距離を算出した結果、発火点1, 2, 3におけるいずれの評価結果においても必要防火帯幅である22 m以下であることから、貯蔵施設から防火帯外縁までの離隔距離については、想定される森林火災に対して評価上必要とされる危険距離以上であることを確認した。



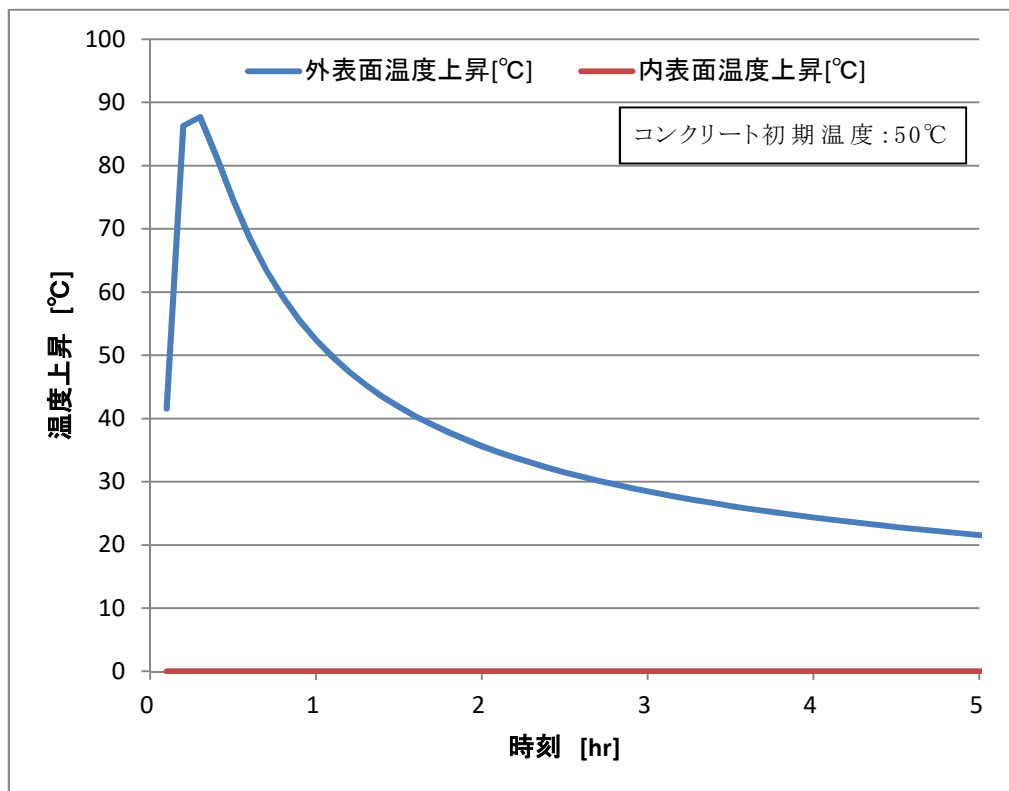
第 35 図 (1) 貯蔵建屋外壁 (内壁) 温度の時間変化 (発火点 1 (発火時刻 6:58))



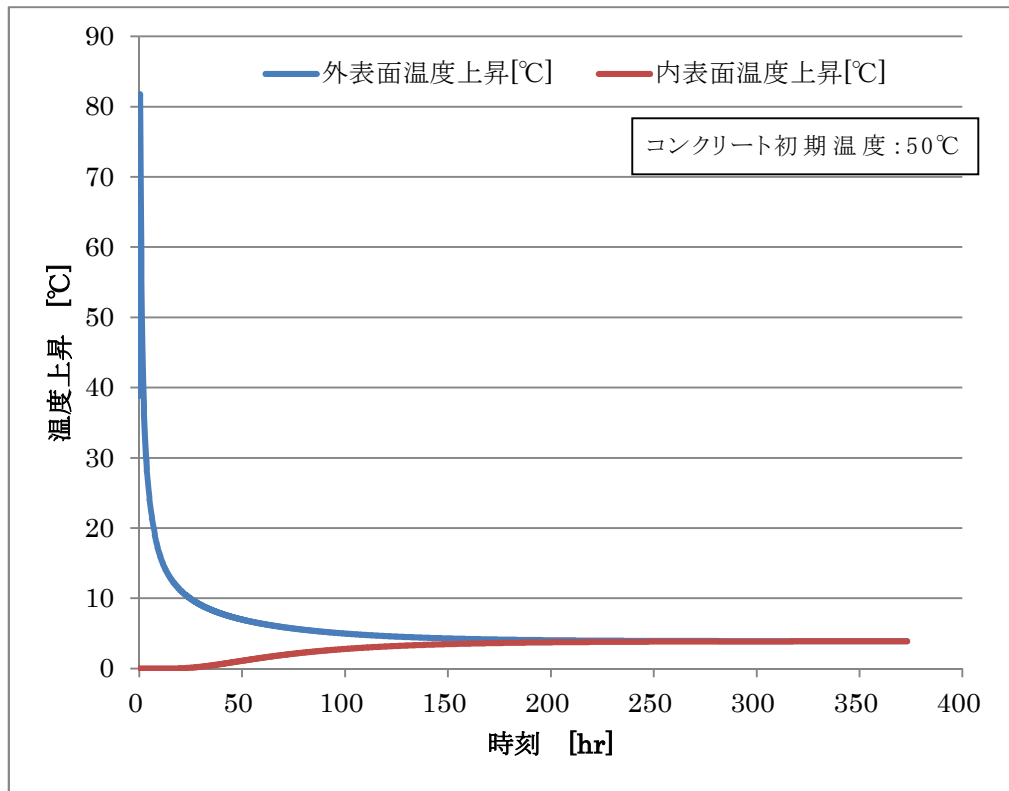
第 35 図 (2) 貯蔵建屋外壁 (内壁) 温度の時間変化 (発火点 1 (発火時刻 6:58))



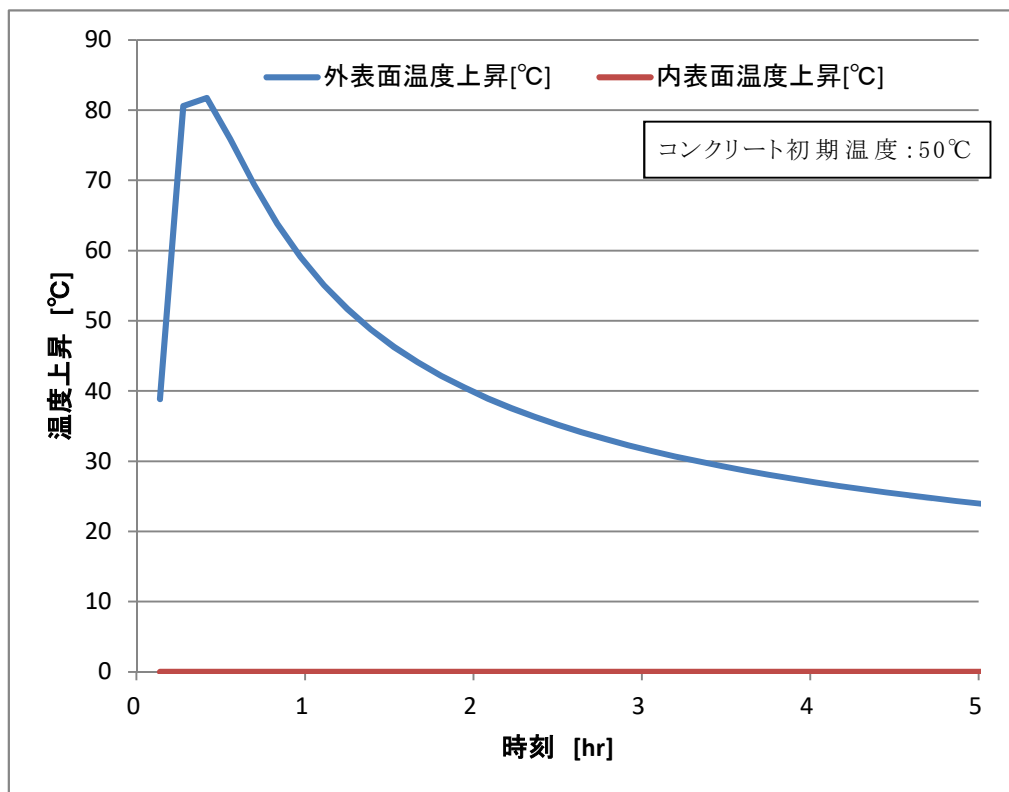
第 36 図 (1) 貯蔵建屋外壁 (内壁) 温度の時間変化
(発火点 1 (発火時刻 7:56))



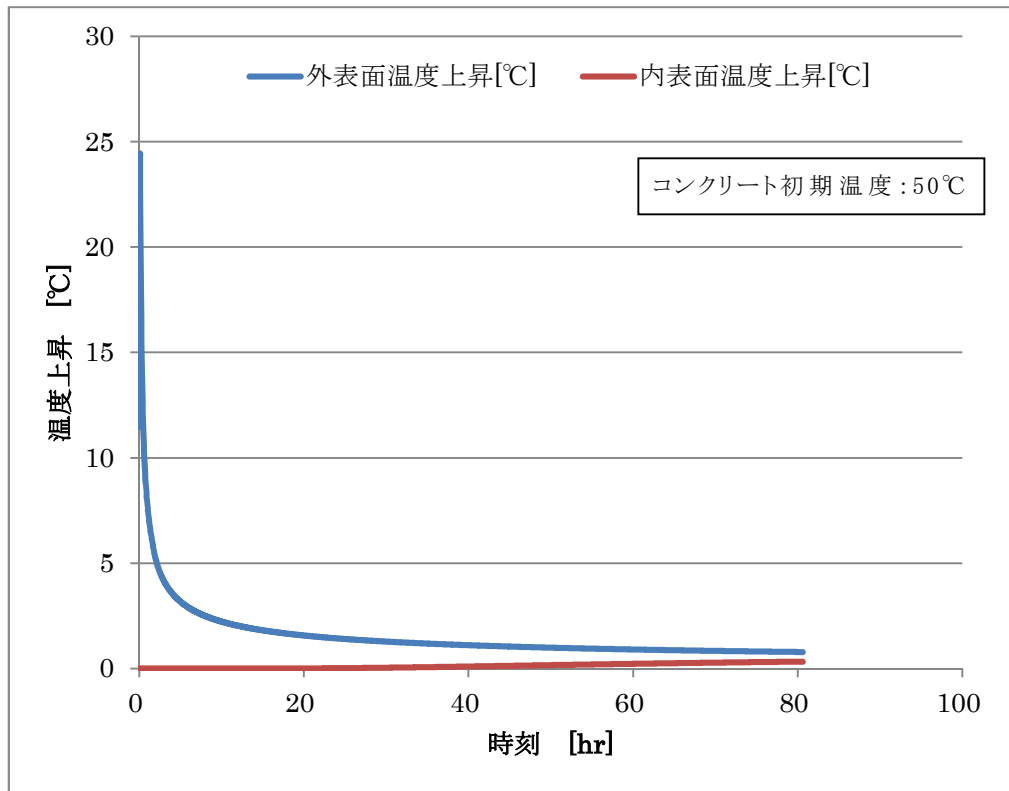
第 36 図 (2) 貯蔵建屋外壁 (内壁) 温度の時間変化
(発火点 1 (発火時刻 7:56))



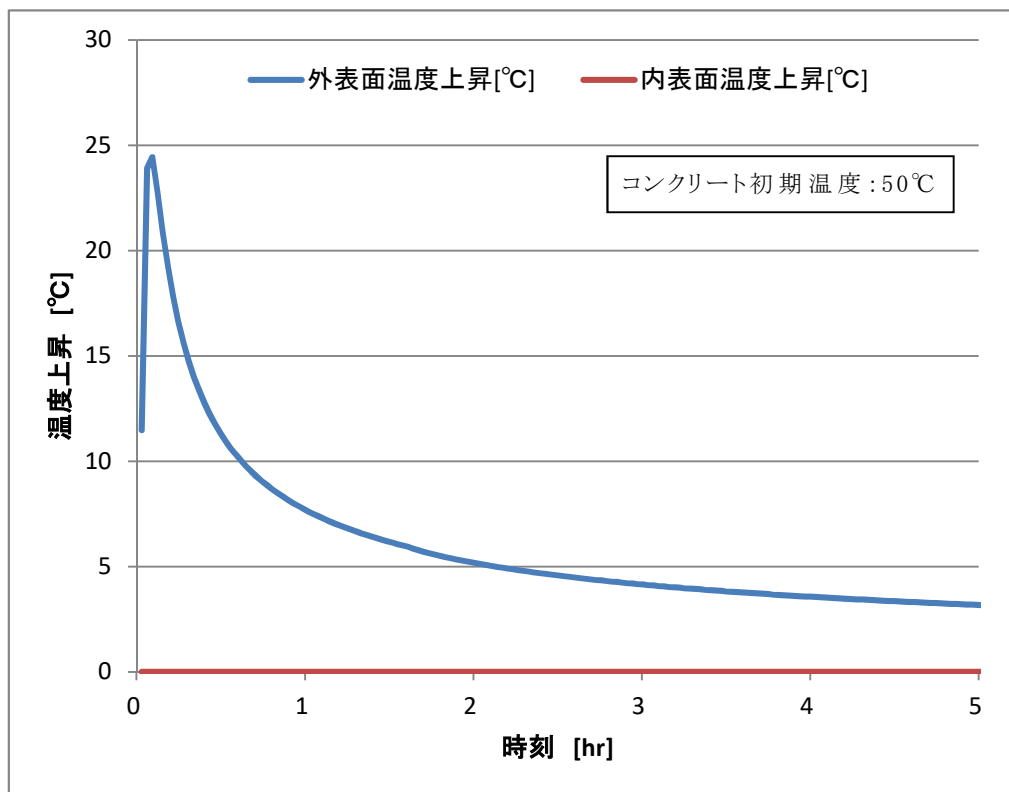
第 37 図 (1) 貯蔵建屋外壁 (内壁) 温度の時間変化 (発火点 2 (発火時刻 10:00))



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。

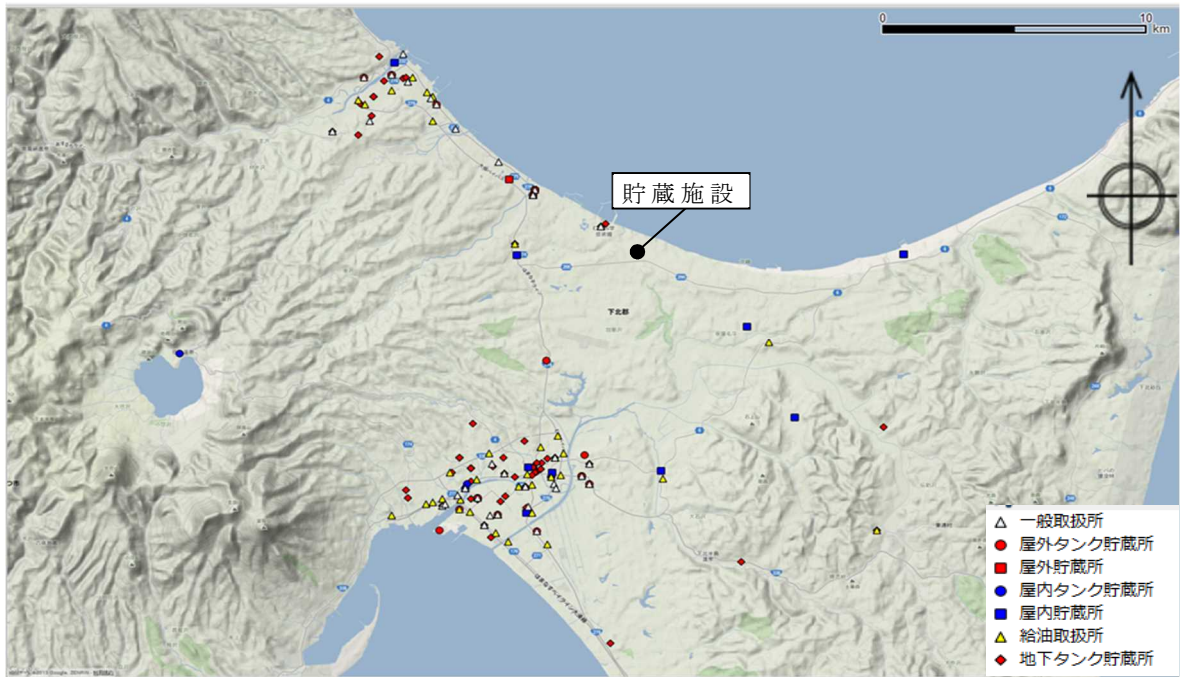
4.1.2 石油コンビナート以外の危険物貯蔵施設の火災・爆発による影響評価

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1km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3km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1kmの位置に存在するもの（貯蔵施設から1kmの距離に貯蔵量924kℓ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。

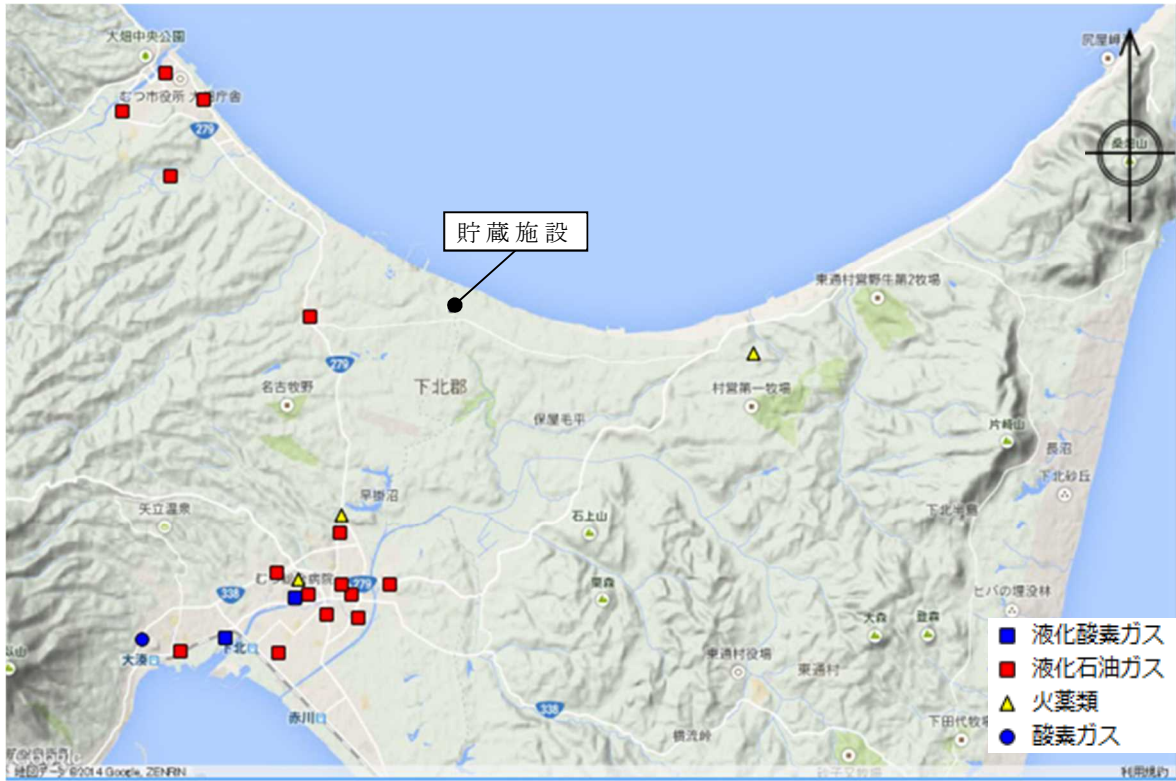
4.1.3 石油コンビナート以外の高圧ガス類貯蔵施設の火災・爆発による影響評価

4.1.3.1 評価対象施設の選定

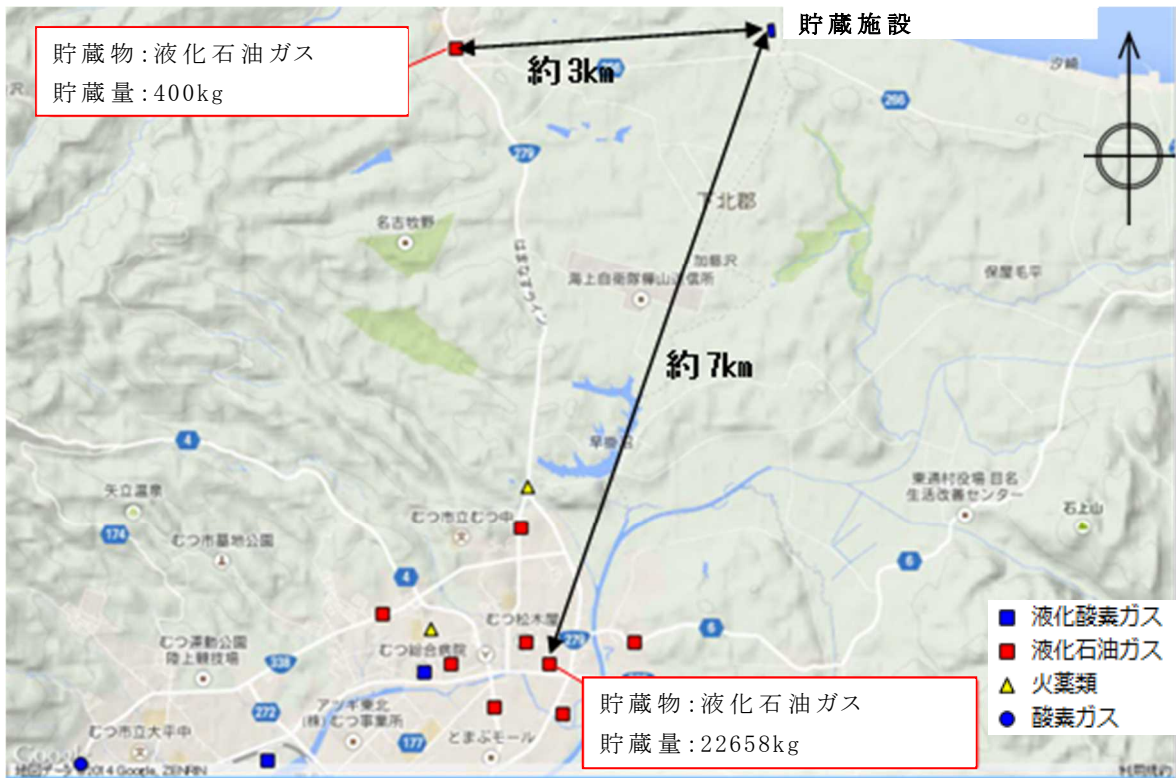
石油コンビナート以外の高圧ガス類貯蔵施設に関して、前項と同様、青森県防災消防課、及びむつ市消防本部に届出がされている当該施設について、ガイドを参考として貯蔵施設から10km圏内に位置する高圧ガス類貯蔵施設に対して、貯蔵施設に最も近い施設を抽出した。その結果、貯蔵施設から最短距離にある高圧ガス類貯蔵施設は、約3km離れた地点にある貯蔵施設であり、貯蔵量は液化石油ガス400kgであった。また、同評価対象範囲において最も貯蔵量の大きい貯蔵施設は、約7km離れた地点にある貯蔵施設であり、貯蔵量は液化石油ガス22658kgであった。

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、敷地内で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。

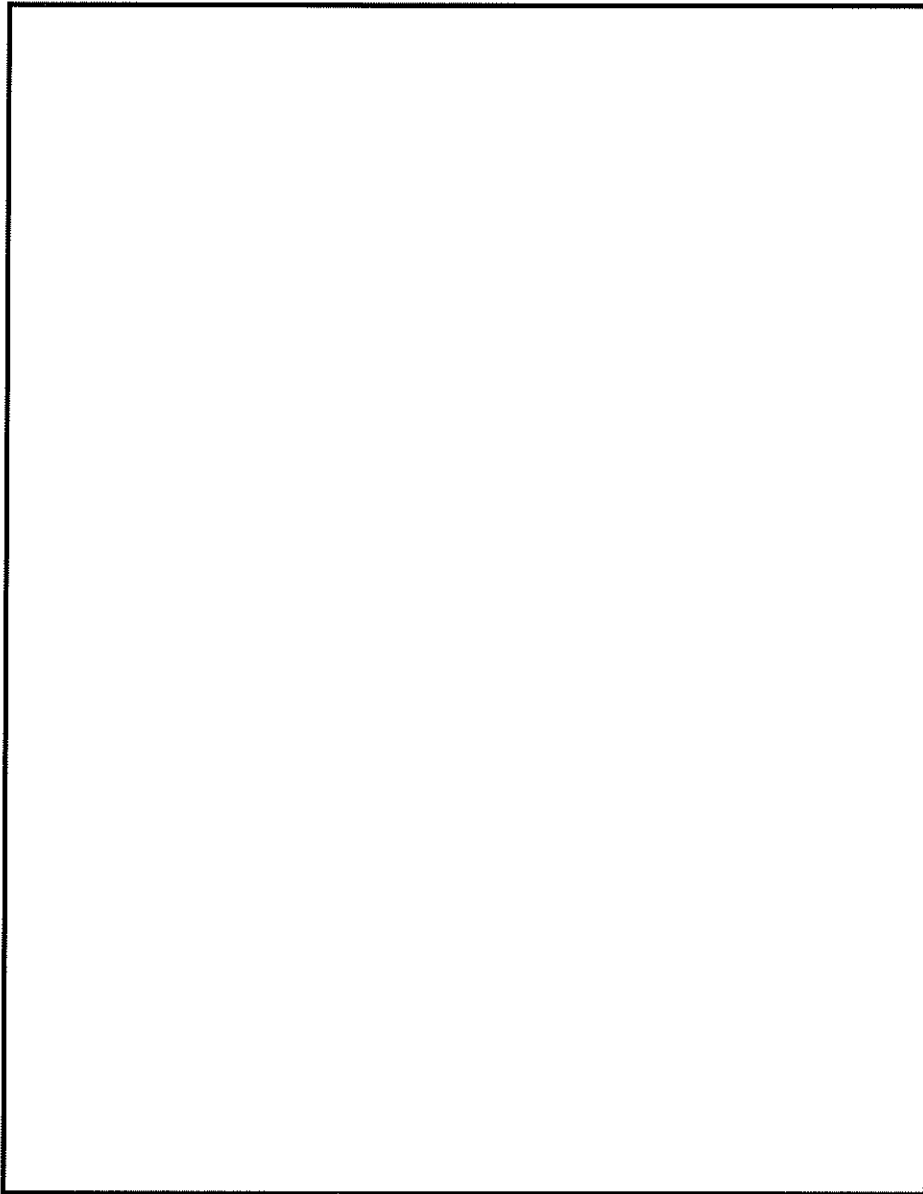
(注 3) 設置場所が至近であるため一体とみなし、容量は電源車と据置型発電機の合算値

(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)。

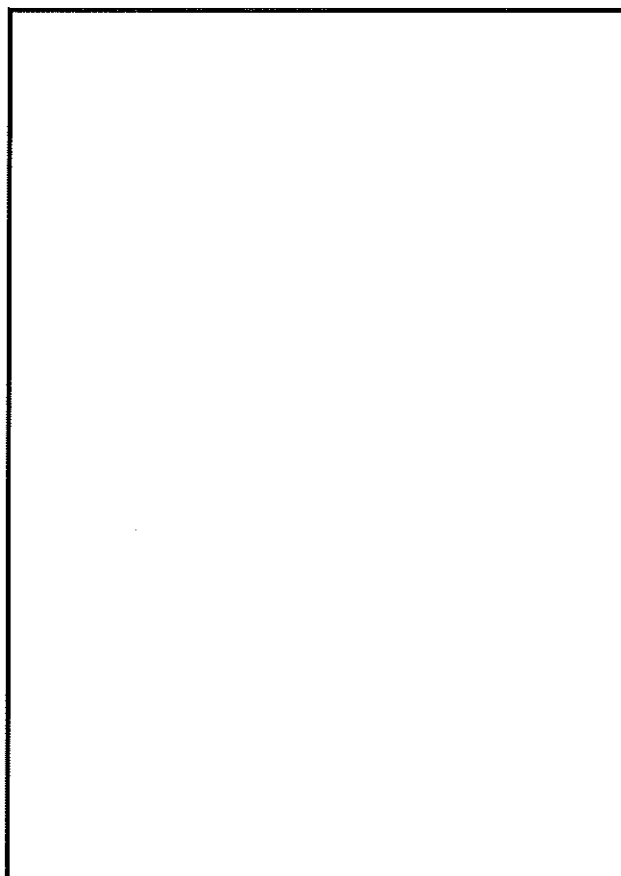
枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。



第 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：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),

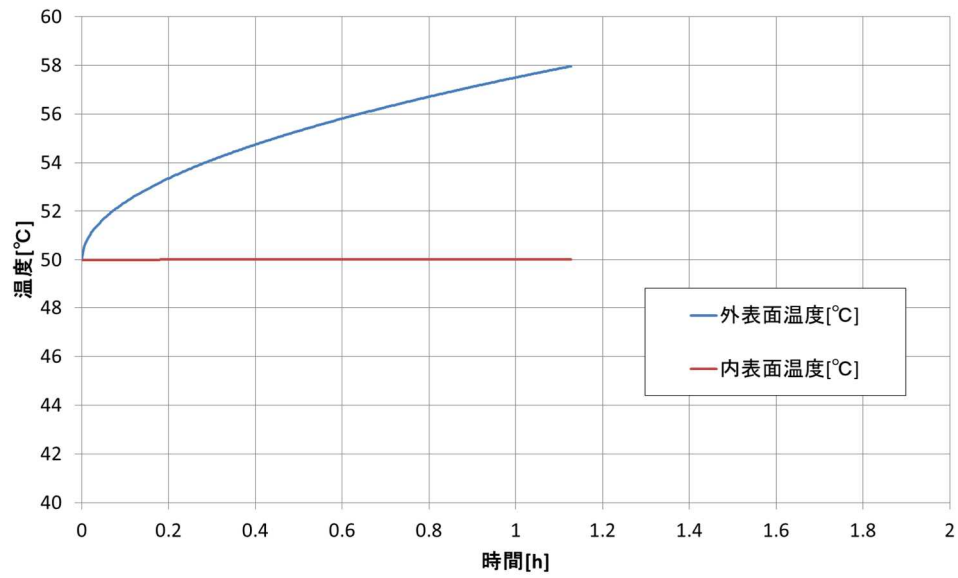
k : 熱伝導率 (W/m/K), κ : 温度拡散率 (κ = k / ρ C_p) (m²/s),

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 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。

$$\begin{aligned} \text{燃料量：電源車：軽油 + 潤滑油(車 + 発電機)} \\ = 0.25 + 0.03 + 0.0065 = 0.2865 \text{ (k}\ell\text{)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{据置型発電機：軽油 } 0.49 \text{ (kℓ)} + \text{潤滑油 } 0.061 \text{ (kℓ)} \\ & = 0.551 \text{ (kℓ)} \end{aligned}$$

$$\rightarrow \text{合計：} 0.2865 + 0.551 = 0.8375 \text{ (kℓ)}$$

火炎輻射強度：42000 (W/m ²)	※ガイド付属書 B の軽油の値
質量低下速度：0.044 (kg/m ² /s)	※NUREG-1805 の Diesel Oil の値
燃料密度：860 (kg/m ³)	※JIS K 2204-2007
燃焼面積：20.754 (m ²)	※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 ($\kappa = k / \rho C_p$) (m²/s),

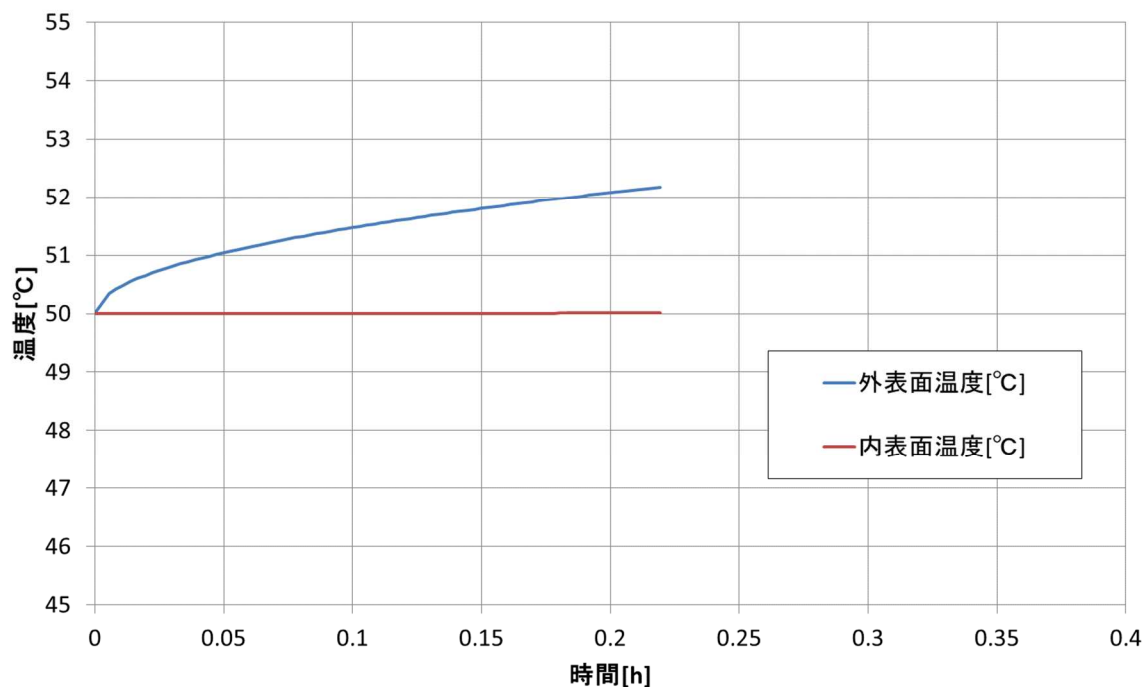
ρ : 密度 (kg/m³), C_p : 比熱 (J/kg/K)

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 3℃となり、貯蔵建屋外壁温度の評価結果は約 53℃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、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。

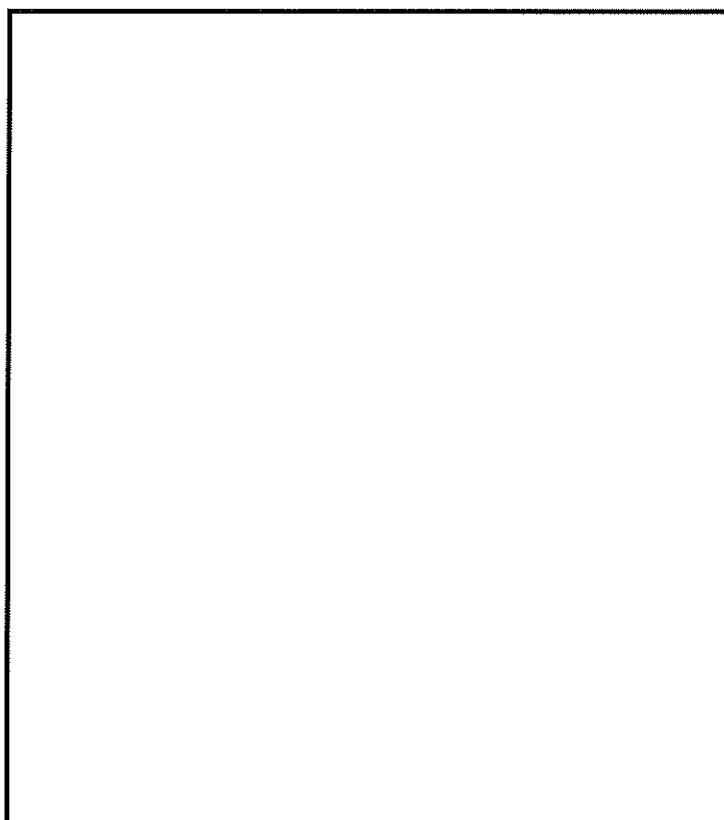
第 46 図に時間に対する温度変化を示す。



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：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。

$$t = \frac{V}{\pi R^2 \times v} = 1.08 / (60.5 \times 0.0000511) = 349.3 \Rightarrow 350 \text{ (s)}$$

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),

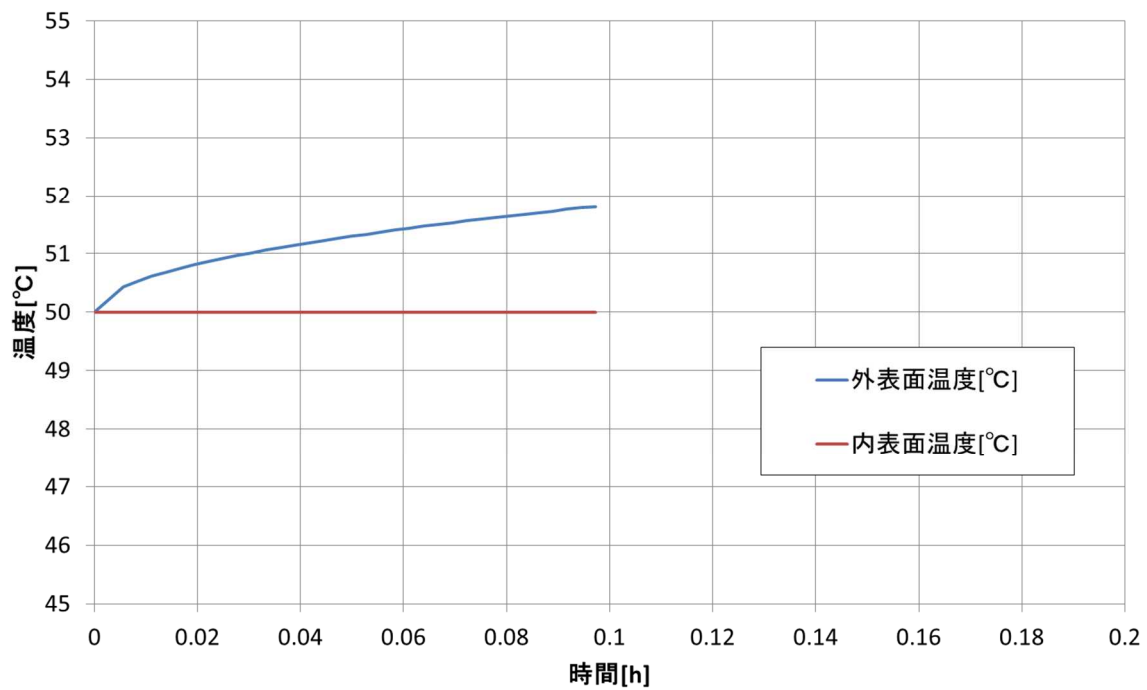
k : 熱伝導率 (W/m/K), κ : 温度拡散率 (κ = k / ρ C_p) (m²/s),

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。

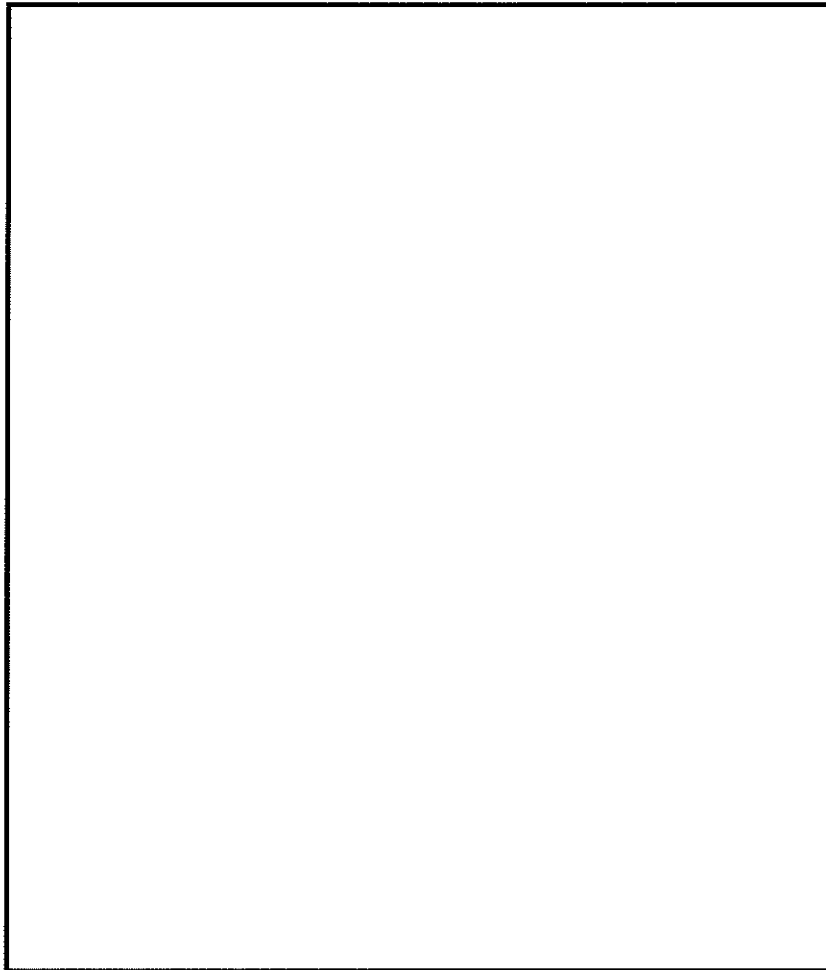
第 48 図に，時間に対する温度変化を示す。



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。



(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 ($^{\circ}\text{C}$), T_0 : 初期温度 (= $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$),

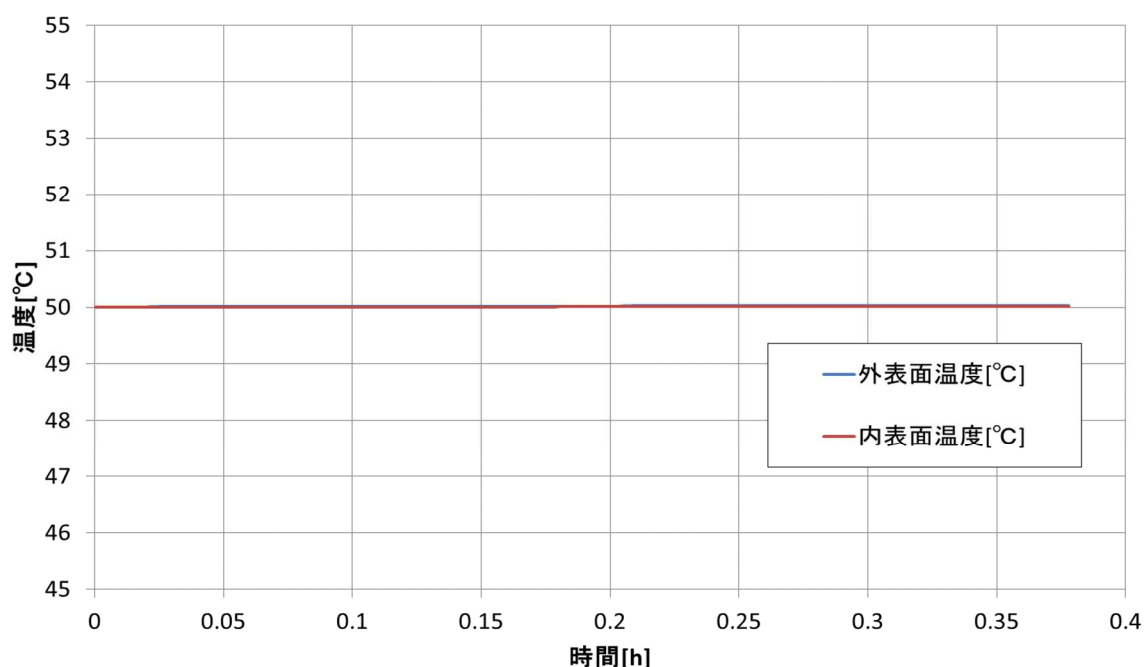
k : 熱伝導率 (W/m/K), κ : 温度拡散率 ($\kappa = k / \rho C_p$) (m^2/s),

ρ : 密度 (kg/m^3), C_p : 比熱 (J/kg/K)

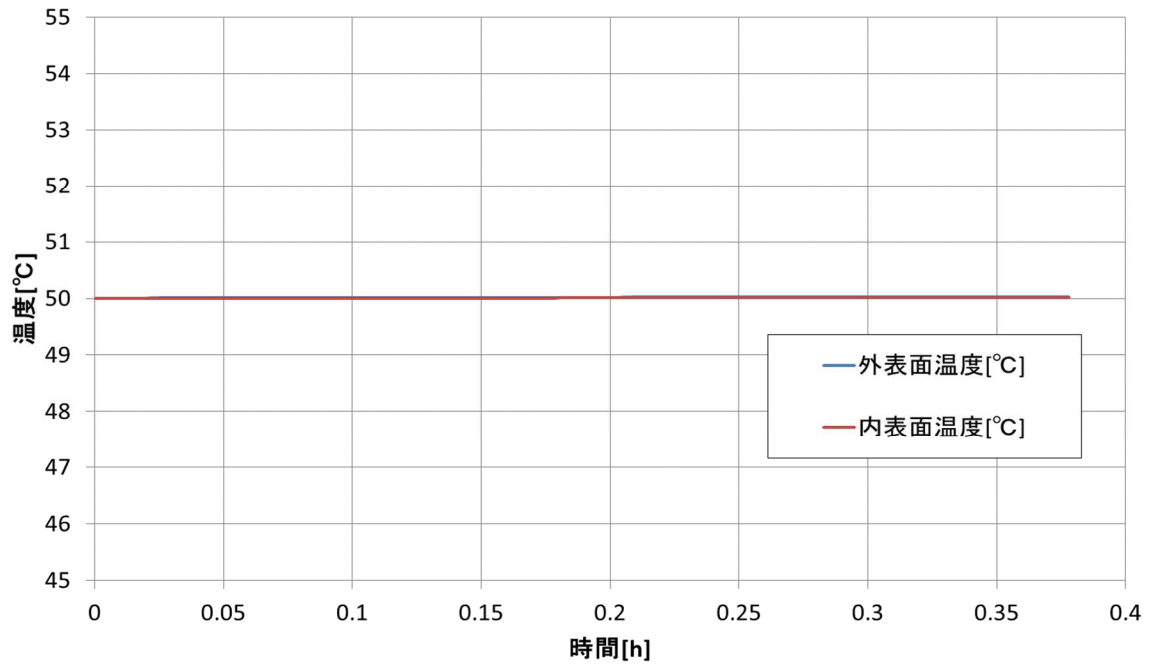
貯蔵建屋外壁初期温度を 50℃として、上式により外壁温度上昇量を評価したところ、東側、南側とも約 1℃となり、貯蔵建屋外壁温度の評価結果は約 51℃となった。

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、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)

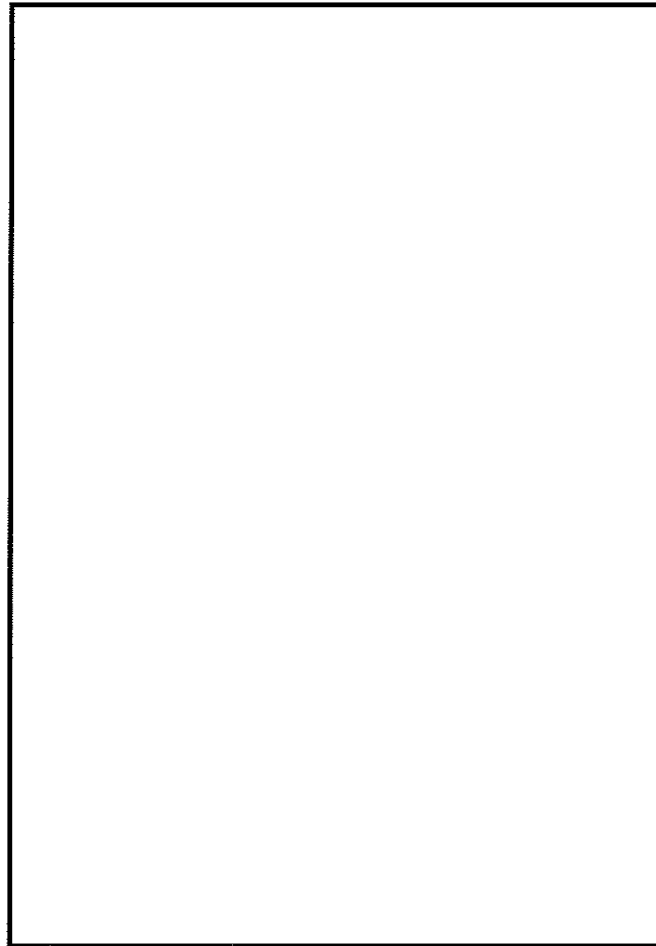


第 51 図 貯蔵建屋外壁温度変化
(モニタリングポスト用発電機 南側)

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), T_0 : 初期温度 (=50 °C),

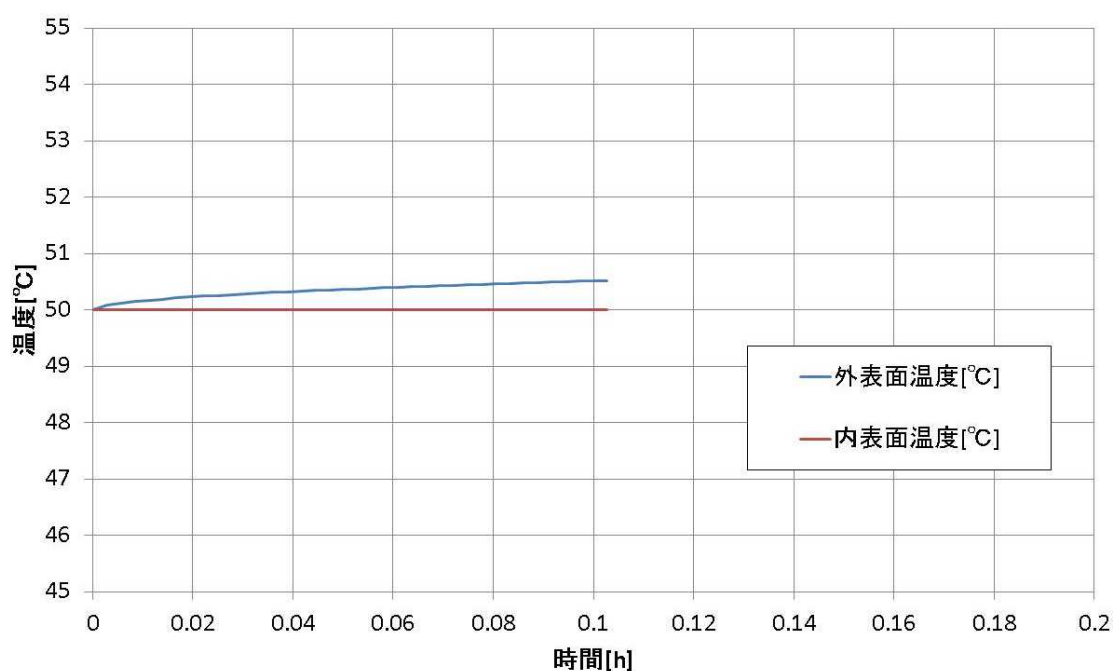
k : 熱伝導率 (W/m/K), κ : 温度拡散率 ($\kappa = k / \rho C_p$) (m²/s),

ρ : 密度 (kg/m³), C_p : 比熱 (J/kg/K)

貯蔵建屋外壁初期温度を 50℃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(平成 13～令和 2 年)」(原子力規制庁, NTEN-2023-2001, 令和 5 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、それぞれ平成 13～令和 2 年の 20 年間に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。第 29 表に示した墜落確率は「航空機落下事故に関するデータ(平成 13～令和 2 年)」のデータに基づき算出した墜落確率の値を示している。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 2022 年度の航空交通量に係る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）	$1.75 \times 10^{-10*1}$	
	有視界方式	②大型固定翼機	5.47×10^{-10}
		③その他機種*2	5.36×10^{-9}
自衛隊機又は米軍機	訓練空域外の墜落事故*3	④高高度飛行*4を行う大型固定翼機	2.49×10^{-9}
		⑤その他の機種*2	2.28×10^{-8}
	⑥基地－訓練空域往復時の墜落事故	2.13×10^{-8}	

*1:評価に当たっては、令和2年11月11日許可の事業変更許可申請書の墜落確率 (9.20×10^{-10}) 以下であるため、同許可の火災評価を用いる。

*2:小型固定翼機，大型回転翼機，小型回転翼機

*3:貯蔵施設上空には自衛隊機，米軍機の訓練空域はない

*4: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

航空機落下確率の算出から航空機墜落による火災評価のフローを別添
1 に示す。

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

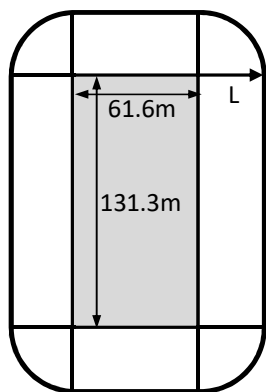
評価に当たっては、墜落確率が令和2年11月11日許可の事業変更許可申請書の墜落確率以下であり、同許可の火災評価を用いる。

「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

火炎放射強度：50000 (W/m²) ※ガイド附属書 B の灯油の値

質量低下速度：0.039 (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。

$$t = \frac{V}{\pi R^2 \times v} = 216.84 / (700 \times 0.0000464) = 6676.1 \Rightarrow 6677 \text{ (s)}$$

ここで， $v = \frac{m}{\rho} = \frac{0.039}{840} = 0.000046429 \Rightarrow 0.0000464$ ， $\pi R^2 \doteq S = 700$

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。

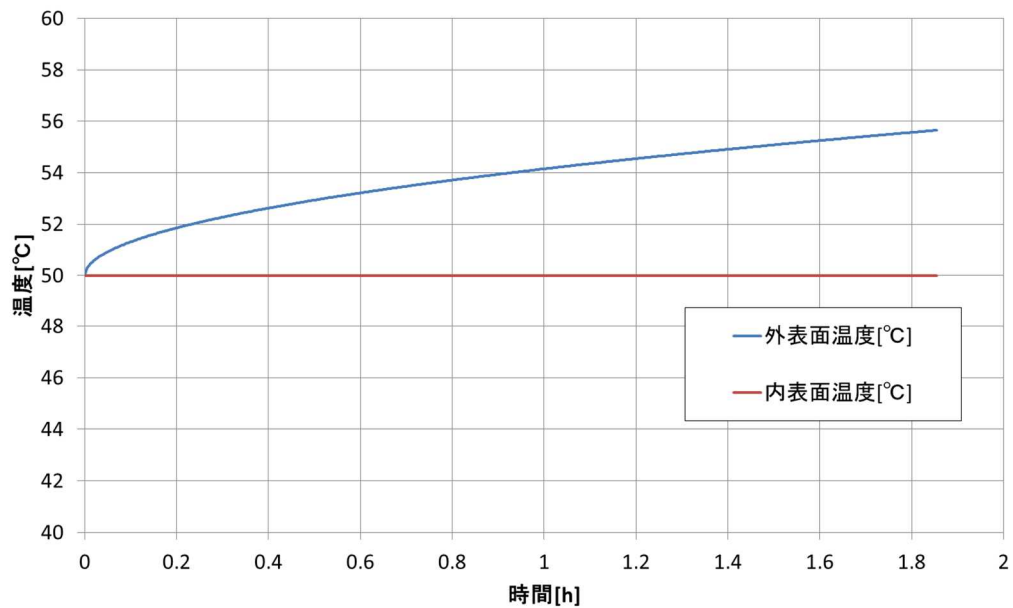
$$T(x)-T_0 = \frac{2E\sqrt{\kappa t}}{k} \left[\frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{4\kappa t}\right) - \frac{x}{2\sqrt{\kappa t}} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\kappa t}}\right) \right]$$

$T(x)$: 表面から x (m) の位置の温度 (°C), T_0 : 初期温度 (°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)

(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、

$$S = 10^{-7} / (2.49 \times 10^{-9}) \times 0.0081 \times 1000^2 = 325301.20 \text{ (m}^2\text{)}$$

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、 $L = \text{約 } 262\text{m}$ 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/m²)

※ガイド付属書 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：405.2 (m²)

※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：262 (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、0.003673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、213.03 W/m²となり、

切り上げて 約 213.1 W/m² とした。

$$E=R_f \cdot \phi = 58000 \times 0.003673 = 213.03 \Rightarrow 213.1 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

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

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。

$$t = \frac{V}{\pi R^2 \times v} = 145.04 / (405.2 \times 0.0000671) = 5334.5 \Rightarrow 5335 \text{ (s)}$$

$$\text{ここで、} v = \frac{m}{\rho} = \frac{0.051}{760} = 0.000067105 \Rightarrow 0.0000671, \pi R^2 \doteq S = 405.2$$

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),

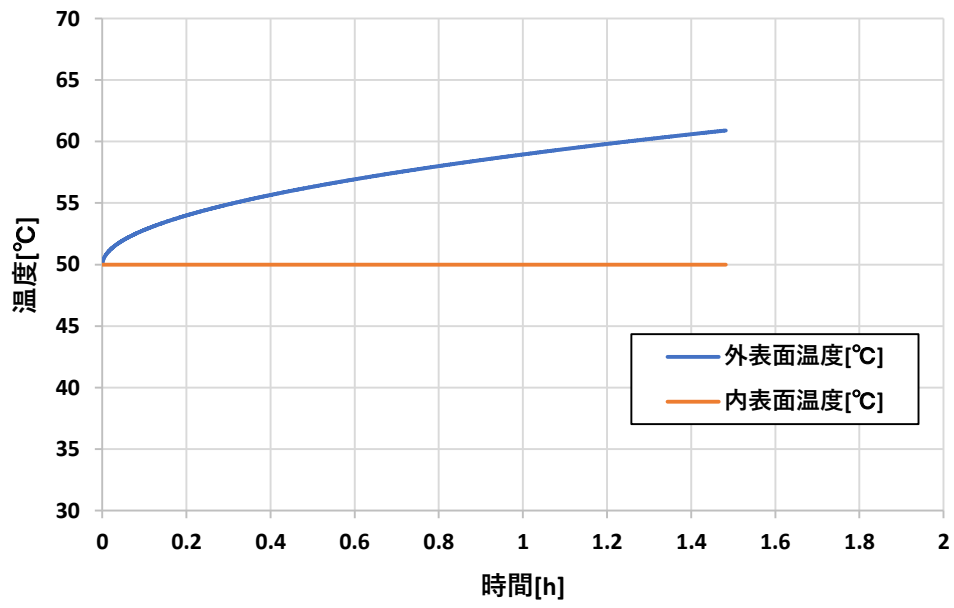
k : 熱伝導率 (W/m/K), κ : 温度拡散率 (κ = k / ρ C_p) (m²/s),

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 61°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、

$$S = 10^{-7} / (2.28 \times 10^{-8}) \times 0.0081 \times 1000^2 = 35526.32 \text{ (m}^2\text{)}$$

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、 $L = \text{約 } 50 \text{ m}$ 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：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

(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、0.01112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、644.96 W/m²となり、切り上げて約645.0 W/m²とした。

$$E=R_f \cdot \phi = 58000 \times 0.01112 = 644.96 \Rightarrow 645.0 \quad (\text{W/m}^2)$$

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

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。

$$t = \frac{V}{\pi R^2 \times v} = 14.87 / (44.6 \times 0.0000671) = 4968.8 \Rightarrow 4969 \quad (\text{s})$$

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 (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)

(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 ($^{\circ}\text{C}$), T_0 : 初期温度 ($^{\circ}\text{C}$),

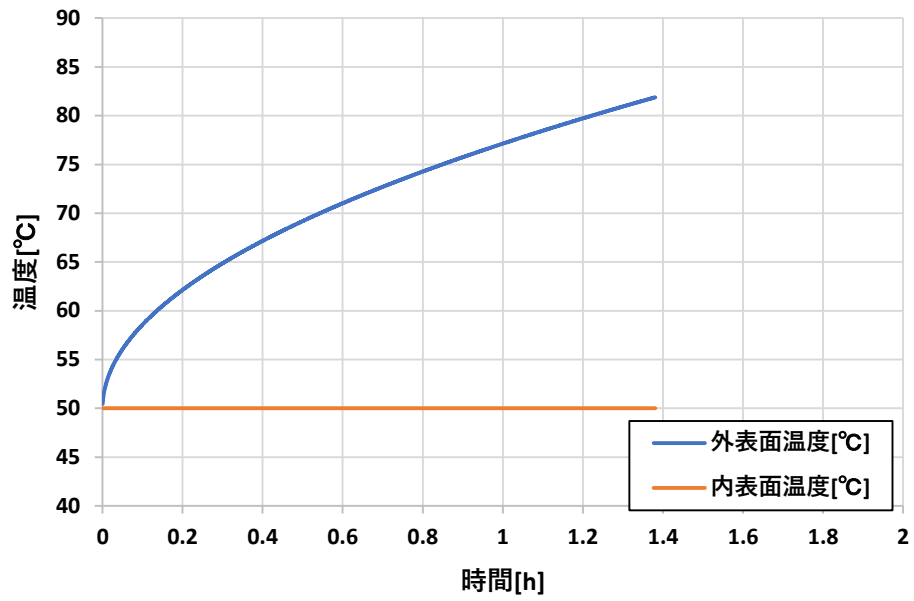
k : 熱伝導率 (W/m/K), κ : 温度拡散率 ($\kappa = k / \rho C_p$) (m^2/s),

ρ : 密度 (kg/m^3), C_p : 比熱 (J/kg/K)

(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 82°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。

$$E=R_f \cdot \phi = 50000 \times 0.01035 = 517.5 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

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, 2323.1 s となり, 切り上げて約 2324 s とした。

$$t = \frac{V}{\pi R^2 \times v} = 7.21 / (46.6 \times 0.0000666) = 2323.1 \Rightarrow 2324 \text{ (s)}$$

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),

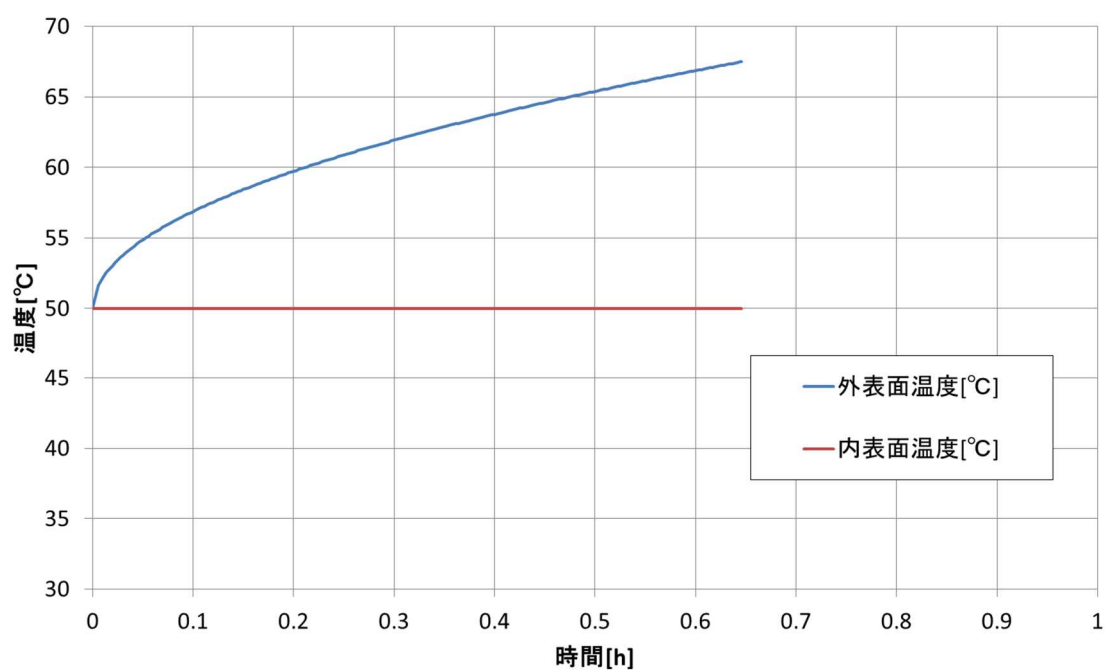
k : 熱伝導率 (W/m/K), κ : 温度拡散率 (κ = k / ρ C_p) (m²/s),

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 (訓練空域外その他の機種)	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	262	50	53
燃焼半径(m)	14.928	11.357	3.768	3.852
形態係数	0.001973	0.003673	0.0112	0.01035
輻射強度 (W/m ²)	98.7	213.1	645.0	517.5
燃焼継続時間 (s)	6677	5335	4969	2324
外壁温度(℃)	56	61	82	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(訓練空域外その他の機種)」における82℃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℃以下であることを確認した。

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	BWR 用大型キャスク (タイプ 2 A) BWR 用中型キャスク (タイプ 2) PWR 用キャスク (タイプ 1)	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	BWR 用大型キャスク (タイプ 2 A)	樹脂開発メーカーの技術資料，文献を参考にしゃへい性能の健全性が維持される評価基準値として設定。
	149	BWR 用中型キャスク (タイプ 2) PWR 用キャスク (タイプ 1)	
金属ガスケット	130	BWR 用大型キャスク (タイプ 2 A) BWR 用中型キャスク (タイプ 2) PWR 用キャスク (タイプ 1)	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	ライナあり	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。
	ライナなし	200	
		275	

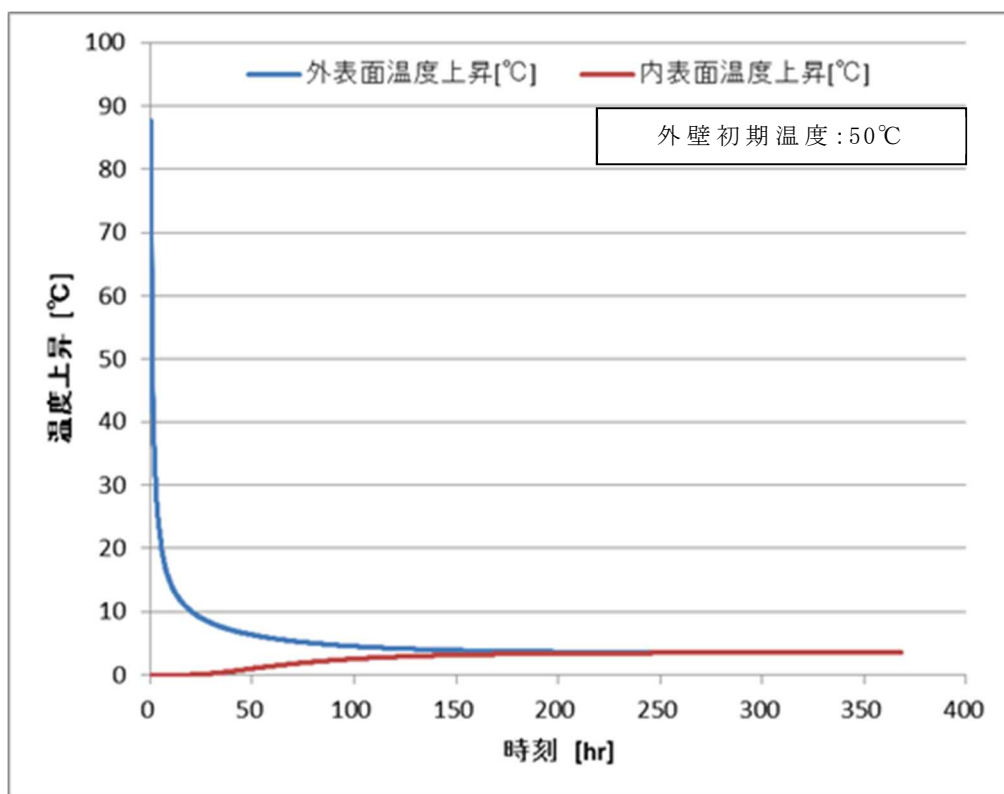
6.2 森林火災に伴う金属キャスクへの熱影響評価

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。

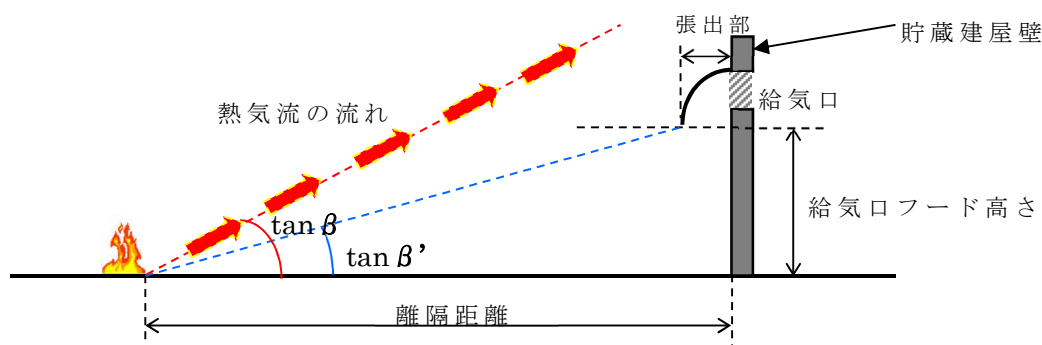
(1) 評価方針

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。

$$\tan \beta = C_t \cdot \Lambda^{-k} \cdot Fr^{-o}$$

$$Fr = U/\sqrt{D \cdot g}$$

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。

$$\Psi_{xm} \cdot \Lambda^s \cdot Fr^t = C_0 \quad \therefore \Psi_{xm} = C_0 / \Lambda^s \cdot Fr^t$$

$$\Psi_{xm} = \frac{\Delta \theta_m \cdot D^{1/3} \cdot X^{4/3}}{\left(Q^2 \cdot T_0 / C_p^2 \cdot \rho^2 \cdot g \right)^{1/3}} \quad \therefore \Delta \theta_m = \frac{\Psi_{xm} \cdot \left(Q^2 \cdot T_0 / C_p^2 \cdot \rho^2 \cdot g \right)^{1/3}}{D^{1/3} \cdot X^{4/3}} \quad (\text{K})$$

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

$$\Psi_{xm} = C_0 / \Lambda^s \cdot Fr^t = 1.32 / 1.062^{0.5} \cdot 0.731^{-0.8833} = 0.971$$

$$\begin{aligned} \Delta \theta_m &= \frac{\Psi_{xm} \cdot \left(Q^2 \cdot T_0 / C_p^2 \cdot \rho^2 \cdot g \right)^{1/3}}{D^{1/3} \cdot X^{4/3}} \\ &= \frac{0.971 \cdot \left(4112.671^2 \cdot 308.15 / 1.007^2 \cdot 1.1463^2 \cdot 9.80665 \right)^{1/3}}{2.64^{1/3} \cdot 20^{4/3}} \end{aligned}$$

$$\Rightarrow 10 \text{ K} = 10 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

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-1 から第 33 表-3 に定常状態(雰囲気温度 45℃)における 3 種類の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 3 種類の金属キャスクいずれの各部の温度(第 33 表-1 から第 33 表-3 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。

第 33 表-1 BWR 用大型キャスク (タイプ 2 A) 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	
								ライナ あり*1	ライナ なし*2
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	189
② 設計基準値	130	130	350	350	350	350	150	300	200
設計余裕(②-①)	41	45	254	265	237	208	22	41	11

*1: 新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料又は高燃焼度 8×8 燃料

*2: 新型 8×8 燃料

第 33 表-2 BWR 用中型キャスク（タイプ 2）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	底部 レジ ン	燃料 被覆管	
								ライナ あり*1	ライナ なし*2
① 雰囲気温度 45℃の定常 状態 (通常貯蔵時)	102	90	102	90	123	147	142	263	188
② 設計基準値	130	130	350	350	350	350	149	300	200
設計余裕(②-①)	28	40	248	260	227	203	7	37	12

*1: 新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料又は高燃焼度 8×8 燃料

*2: 新型 8×8 燃料

第 33 表-3 PWR 用キャスク（タイプ 1）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	底部 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)	104	92	104	92	116	141	138	203
② 設計基準値	130	130	350	350	350	350	149	275
設計余裕(②-①)	26	38	246	258	234	209	11	72

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。

$$\Delta T = Q (\text{最大崩壊熱量}) \times t (\text{断熱時間}) \div C (\text{金属キャスクの熱容量})$$

BWR 用大型キャスク (タイプ 2 A) 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。

$$\therefore \Delta T = 12.1 \times 1700 \div 41850 = 0.4915 \approx 0.5 \text{ K} = 0.5 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

BWR 用中型キャスク (タイプ 2) 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 (81 トン) のものとする。

$$\therefore \Delta T = 13.7 \times 1700 \div 37665 = 0.6183 \approx 0.7 \text{ K} = 0.7 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

PWR 用キャスク (タイプ 1) 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 (84 トン) のものとする。

$$\therefore \Delta T = 13.9 \times 1700 \div 39060 = 0.6050 \approx 0.7 \text{ K} = 0.7 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

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-1から第33表-3)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。

6.3 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)

$$\text{燃焼面積 } S = 4.97 \text{ (m}^2\text{) より}$$

$$D = 2 \sqrt{\frac{S}{\pi}} = 2.51555 \Rightarrow 2.52 \text{ (m)}$$

- ・ 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-1から第33表-3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。

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 1.5 倍程度考慮して 6500 秒間と仮定する。

1.5 倍の設定について、金属キャスクが断熱状態となる時間は火災発生（墜落）から燃料が燃え尽きるまでの時間を燃焼継続時間（航空機の燃料積載量等により設定）とした場合、火災発生から金属キャスクが断熱に至るまでには火災箇所から貯蔵建屋への熱伝搬及び貯蔵建屋雰囲気温度が金属キャスク表面温度と等しくなるまでの時間遅れがあり、金属キャスクが断熱状態となる時間 < 燃焼継続時間となる。

よって燃焼継続時間そのものの値（燃焼継続時間の 1 倍；火災の発生開始から金属キャスクが断熱状態となる）とする場合においても保守的な評価条件となり、金属キャスクが断熱状態となる時間は燃焼継続時間の 1.5 倍として設定する。

以上を踏まえると、この間の金属キャスクの温度上昇 ΔT は次式で表される。

$$\Delta T = Q (\text{最大崩壊熱量}) \times t (\text{断熱時間}) \div C (\text{金属キャスクの熱容量})$$

BWR用大型キャスク(タイプ2A)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。

$$\therefore \Delta T = 12.1 \times 6500 \div 41850 = 1.879 \approx 1.9 \text{ K} = 1.9 (\text{°C})$$

BWR用中型キャスク(タイプ2)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(81トン)のものとする。

$$\therefore \Delta T = 13.7 \times 6500 \div 37665 = 2.364 \approx 2.4 \text{ K} = 2.4 (\text{°C})$$

PWR用キャスク(タイプ1)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(84トン)のものとする。

$$\therefore \Delta T = 13.9 \times 6500 \div 39060 = 2.313 \approx 2.4 \text{ K} = 2.4 (\text{°C})$$

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 1.5 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（訓練空域外その他の機種）」の火災の熱影響による貯蔵建屋外壁外表面温度は 82℃で，内表面の温度上昇はほとんどなかった（第 57 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）」及び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（訓練空域外その他の機種）」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に基づき行った。

6.4.2.1 「自衛隊機又は米軍機（基地－訓練空域間往復時）」の熱気流の侵入に起因する貯蔵建屋内雰囲気温度の上昇評価

(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、
 $50.0 - 2.0 = 48.0$ (m)
- ・ 火災発生源と給気口フード位置を結ぶ直線の傾き ($\tan \beta'$)
 $\tan \beta' = 6.7/48 = 0.1395 \Rightarrow 0.140$
- ・ 燃焼時発熱量 ($\Delta H_{c,eff}$) : 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)

燃焼面積 $S = 46.6$ (m²) 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。

$$Q = (1 - \chi) \cdot \Delta H_{c,eff} \cdot S \cdot m \quad (\text{kW})$$

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。

$$Q = (1 - \chi) \cdot \Delta H_{c, \text{eff}} \cdot S \cdot m = (1 - 0.05) \times 43000 \times 46.6 \times 0.054 \\ = 102794.940 \quad (\text{kW})$$

(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、「自衛隊機又は米軍機（基地－訓練空域間往復時）」の墜落に伴う火災による熱気流の温度上昇は約 29℃ と評価された。

6.4.2.2 「自衛隊機又は米軍機（訓練空域外その他の機種）」の熱気流の侵入に起因する貯蔵建屋内雰囲気温度の上昇評価

(1) 評価条件

- ・ 火炎から給気口フードまでの水平距離 (X)

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 ($\Delta H_{c, \text{eff}}$) : 43500 (kJ/kg) (NUREG-1805 に記載の値)
- ・ 質量低下速度 (m) : 0.051 (kg/m²/s) (NUREG-1805 に記載の値)
- ・ 燃焼面積 (S) : 44.6 (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)

$$\text{燃焼面積 } S = 44.6 \text{ (m}^2\text{) より}$$

$$D = 2\sqrt{\frac{S}{\pi}} = 7.5357 \Rightarrow 7.54 \text{ (m)}$$

- ・ 風速 (U)

熱気流が直接給気口にあたる風速として 17.69 (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。

$$\begin{aligned} Q &= (1 - \chi) \cdot \Delta H_{c, \text{eff}} \cdot S \cdot m = (1 - 0.05) \times 43500 \times 44.6 \times 0.051 \\ &= 93997.845 \quad (\text{kW}) \end{aligned}$$

(b) 熱気流の主軸傾き角

$$Fr = U / \sqrt{D \cdot g} = 17.69 / \sqrt{7.54 \cdot 9.80665} = 2.057$$

$$\Lambda = (U \cdot D^{1/3}) / (Q \cdot g / (C_p \cdot \rho \cdot T_0))^{1/3}$$

$$= (17.69 \cdot 7.54^{1/3}) / (93997.845 \cdot 9.80665 / (1.007 \cdot 1.1463 \cdot 308.15))^{1/3}$$

$$= 2.525$$

$$\tan \beta = C_t \cdot \Lambda^{-k} \cdot Fr^{-o} = 0.37 \times 2.525^{-(9/8)} \times 2.057^{-(0.0975)} = 0.140$$

(c) 熱気流の主軸温度分布式

$$\Psi_{xm} = C_0 / \Lambda^s \cdot Fr^t = 1.32 / 2.525^{0.5} \cdot 2.057^{-0.8833} = 1.571$$

$$\Delta \theta_m = \frac{\Psi_{xm} \cdot \left(\frac{Q^2 \cdot T_0}{C_p^2 \cdot \rho^2 \cdot g} \right)^{1/3}}{D^{1/3} \cdot X^{4/3}}$$

$$= \frac{1.571 \cdot \left(\frac{93997.845^2 \cdot 308.15}{1.007^2 \cdot 1.1463^2 \cdot 9.80665} \right)^{1/3}}{7.54^{1/3} \cdot 48^{4/3}}$$

$$\Rightarrow 28 \text{ K} = 28 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

以上より、「自衛隊機又は米軍機(訓練空域外その他の機種)」の墜落に伴う火災による熱気流の温度上昇は、「自衛隊機又は米軍機(基地－訓練空域間往復時)」の墜落に伴う火災による熱気流の温度上昇約 29℃よりも低い約 28℃と評価された。

6.4.2.3 影響評価結果

航空機墜落による火災では現実には、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、「自衛隊機又は米軍機(基地－訓練空域間往復時)」の墜落に伴う火災による約 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-1 から第 33 表-3 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。

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 1.5 倍程度考慮して 10500 秒間と仮定する。

1.5 倍の設定について、金属キャスクが断熱状態となる時間は火災発生（墜落）から燃料が燃え尽きるまでの時間を燃焼継続時間（航空機の燃料積載量等により設定）とした場合、火災発生から金属キャスクが断熱に至るまでには火災箇所から貯蔵建屋への熱伝搬及び貯蔵建屋雰囲気温度が金属キャスク表面温度と等しくなるまでの時間遅れがあり、金属キャスクが断熱状態となる時間 < 燃焼継続時間となる。

よって燃焼継続時間そのものの値（燃焼継続時間の 1 倍；火災の発生開始から金属キャスクが断熱状態となる）とする場合において

も保守的な評価条件となり，金属キャスクが断熱状態となる時間は燃焼継続時間の1.5倍として設定する。

以上を踏まえると，この間の金属キャスクの温度上昇 ΔT は次式で表される。

$$\Delta T = Q (\text{最大崩壊熱量}) \times t (\text{断熱時間}) \div C (\text{金属キャスクの熱容量})$$

BWR用大型キャスク(タイプ2A)の最大崩壊熱量 Q は12.1kW，金属キャスクの熱容量 C は41850kJ/Kであるため，温度上昇 ΔT は次の計算より3.1℃となる。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)のものとしている。

$$\therefore \Delta T = 12.1 \times 10500 \div 41850 = 3.036 \approx 3.1 \text{ K} = 3.1 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

BWR用中型キャスク(タイプ2)の最大崩壊熱量 Q は13.7kW，金属キャスクの熱容量 C は37665kJ/Kであるため，温度上昇 ΔT は次の計算より3.9℃となる。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(81トン)のものとしている。

$$\therefore \Delta T = 13.7 \times 10500 \div 37665 = 3.819 \approx 3.9 \text{ K} = 3.9 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

PWR用キャスク(タイプ1)の最大崩壊熱量 Q は13.9kW，金属キャスクの熱容量 C は39060kJ/Kであるため，温度上昇 ΔT は次の計算より3.8℃となる。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（84トン）のものとしている。

$$\therefore \Delta T = 13.9 \times 10500 \div 39060 = 3.737 \approx 3.8 \text{ K} = 3.8 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

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-1から第33表-3）に比べて小さいことから、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1.5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：
 - 貯蔵建屋外壁温度の影響評価；自衛隊機又は米軍機（訓練空域外その他の機種）（対象機種：F-15）
 - 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；自衛隊機又は米軍機（基地－訓練空域間往復時）（対象機種：UH-60J）
 - 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；民間航空機（計器飛行方式）（対象機種：B747-400）

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50m以上であるのに対し、エンジン発電機の設置位置（離隔距離）は約27m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。

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：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：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) ※ガイド付属書 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。

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 61 (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

ガイド付属書 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

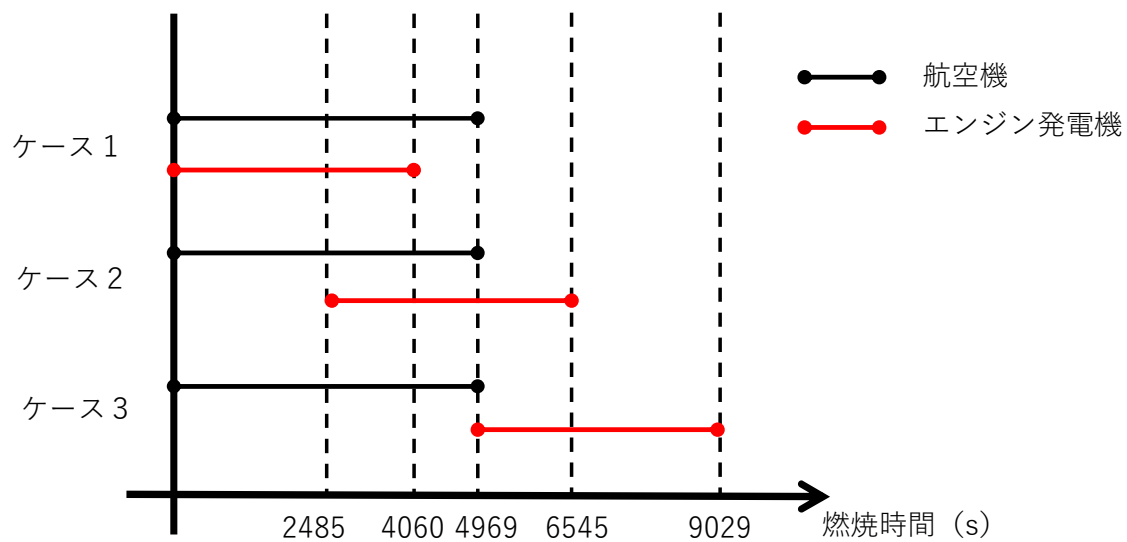
ケース3：航空機の燃料が燃え尽きた後，同時にエンジン発電機が燃焼を開始する場合

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	645.0	4969
エンジン発電機＋航空機	823.4	—

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)

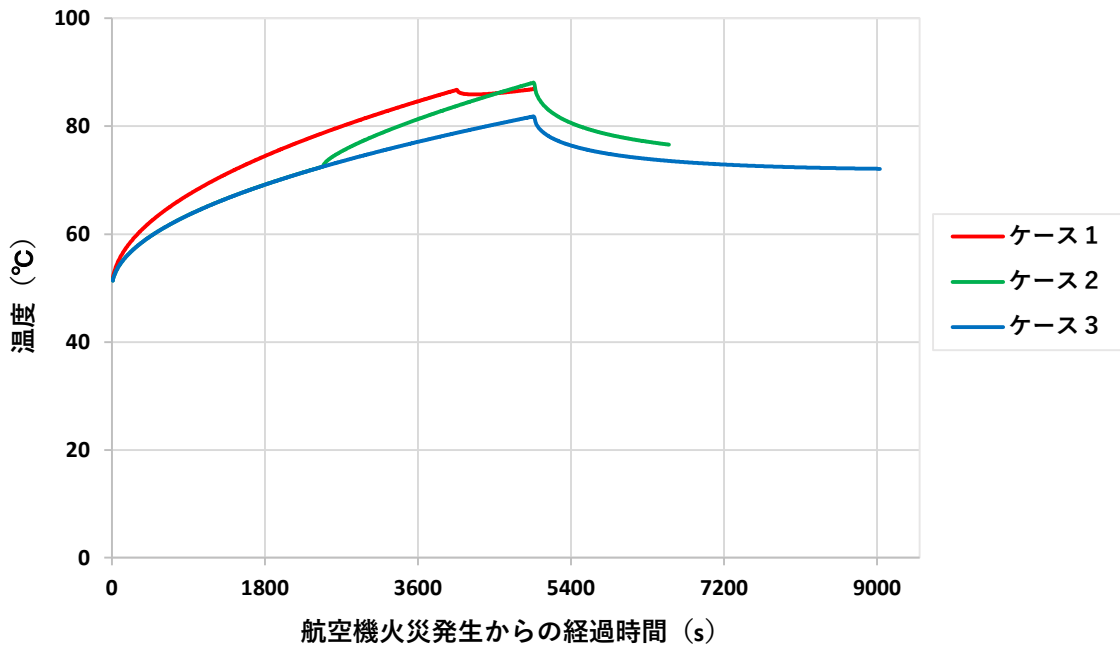
燃焼経過時間 (s)	輻射強度 (W/m ²)
0～4060	823.4
4060～4969	645.0
4969～	0

(ケース 2)

燃焼経過時間 (s)	輻射強度 (W/m ²)
0～2485	645.0
2485～4969	823.4
4969～6545	178.4
6545～	0

(ケース 3)

燃焼経過時間 (s)	輻射強度 (W/m ²)
0～4969	645.0
4969～9029	178.4
9029～	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	87
ケース 2	89
ケース 3	82

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	78
ケース 2	78
ケース 3	72

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°C 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 89°C 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（対象機種：UH-60J）墜落による火災の離隔距離は保守的に 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 ($\Delta H_{c,eff}$)

- ・ 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 $S = 46.6 \text{ (m}^2\text{)}$ 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 $S = 4.97 \text{ (m}^2\text{)}$ 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。

$$Q = (1 - \chi) \cdot \Delta H_{c, \text{eff}} \cdot S \cdot m \quad (\text{kW})$$

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。

- ・ 航空機：

$$\begin{aligned} Q_1 &= (1 - \chi) \cdot \Delta H_{c, \text{eff}} \cdot S \cdot m = (1 - 0.05) \times 43000 \times 46.6 \times 0.054 \\ &= 102794.940 \quad (\text{kW}) \end{aligned}$$

- ・ エンジン発電機

$$\begin{aligned} Q_2 &= (1 - \chi) \cdot \Delta H_{c, \text{eff}} \cdot S \cdot m = (1 - 0.05) \times 44400 \times 4.97 \times 0.044 \\ &= 9223.923 \quad (\text{kW}) \end{aligned}$$

(b) 熱気流の主軸傾き角

- ・ 航空機

$$Fr = U / \sqrt{D \cdot g} = 18.08 / \sqrt{7.71 \cdot 9.80665} = 2.079$$

$$\Lambda = (U \cdot D^{1/3}) / (Q_1 \cdot g / (C_p \cdot \rho \cdot T_0))^{1/3}$$

$$= (18.08 \cdot 7.71^{1/3}) / (102794.940 \cdot 9.80665 / (1.007 \cdot 1.1463 \cdot 308.15))^{1/3}$$

$$=2.524$$

$$\tan \beta = C_t \cdot \Lambda^{-k} \cdot Fr^{-o} = 0.37 \times 2.524^{-(9/8)} \times 2.079^{-(0.0975)} = 0.140$$

・エンジン発電機

$$Fr = U / \sqrt{D \cdot g} = 18.08 / \sqrt{2.52 \cdot 9.80665} = 3.637$$

$$\begin{aligned} \Lambda &= (U \cdot D^{1/3}) / (Q_2 \cdot g / (C_p \cdot \rho \cdot T_0))^{1/3} \\ &= (18.08 \cdot 2.52^{1/3}) / (9223.923 \cdot 9.80665 / (1.007 \cdot 1.1463 \cdot 308.15))^{1/3} \\ &= 3.883 \end{aligned}$$

$$\tan \beta = C_t \cdot \Lambda^{-k} \cdot Fr^{-o} = 0.37 \times 3.883^{-(9/8)} \times 3.637^{-(0.0975)} = 0.091$$

(c) 熱気流の主軸温度分布式

・航空機

$$\Psi_{xm} = C_0 / \Lambda^s \cdot Fr^t = 1.32 / 2.524^{0.5} \cdot 2.079^{-0.8833} = 1.586$$

$$\begin{aligned} \Delta \theta_m &= \frac{\Psi_{xm} \cdot \left(Q_1^2 \cdot T_0 / C_p^2 \cdot \rho^2 \cdot g \right)^{1/3}}{D^{1/3} \cdot X^{4/3}} \\ &= \frac{1.586 \cdot \left(102794.94^2 \cdot 308.15 / 1.007^2 \cdot 1.1463^2 \cdot 9.80665 \right)^{1/3}}{7.71^{1/3} \cdot 48^{4/3}} \end{aligned}$$

$$\Rightarrow 29 \text{ K} = 29 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

・エンジン電機

$$\Psi_{xm} = C_0 / \Lambda^s \cdot Fr^t = 1.32 / 3.883^{0.5} \cdot 3.637^{-0.8833} = 2.096$$

$$\begin{aligned} \Delta \theta_m &= \frac{\Psi_{xm} \cdot \left(Q_2^2 \cdot T_0 / C_p^2 \cdot \rho^2 \cdot g \right)^{1/3}}{D^{1/3} \cdot X^{4/3}} \\ &= \frac{2.096 \cdot \left(9223.923^2 \cdot 308.15 / 1.007^2 \cdot 1.1463^2 \cdot 9.80665 \right)^{1/3}}{2.52^{1/3} \cdot 25^{4/3}} \end{aligned}$$

$$\Rightarrow 27 \text{ K} = 27 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

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-1 から第 33 表-3 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1.5倍程度考慮して10500秒間と仮定する。

1.5倍の設定について、金属キャスクが断熱状態となる時間は火災発生（墜落）から燃料が燃え尽きるまでの時間を燃焼継続時間（航空機の燃料積載量等により設定）とした場合、火災発生から金属キャスクが断熱に至るまでには火災箇所から貯蔵建屋への熱伝搬及び貯蔵建屋雰囲気温度が金属キャスク表面温度と等しくなるまでの時間遅れがあり、金属キャスクが断熱状態となる時間<燃焼継続時間となる。

よって燃焼継続時間そのものの値（燃焼継続時間の1倍；火災の発生開始から金属キャスクが断熱状態となる）とする場合においても保守的な評価条件となり、金属キャスクが断熱状態となる時間は燃焼継続時間の1.5倍として設定する。

以上を踏まえると、この間の金属キャスクの温度上昇 ΔT は次式で表される。

$$\Delta T = Q (\text{最大崩壊熱量}) \times t (\text{断熱時間}) \div C (\text{金属キャスクの熱容量})$$

BWR用大型キャスク（タイプ2A）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。

$$\therefore \Delta T = 12.1 \times 10500 \div 41850 = 3.036 \approx 3.1 \text{ K} = 3.1 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

BWR用中型キャスク（タイプ2）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（81トン）のものとする。

$$\therefore \Delta T = 13.7 \times 10500 \div 37665 = 3.819 \approx 3.9 \text{ K} = 3.9 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

PWR用キャスク（タイプ1）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（84トン）のものとする。

$$\therefore \Delta T = 13.9 \times 10500 \div 39060 = 3.737 \approx 3.8 \text{ K} = 3.8 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

金属キャスクの各部が一樣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樣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1.5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。

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。

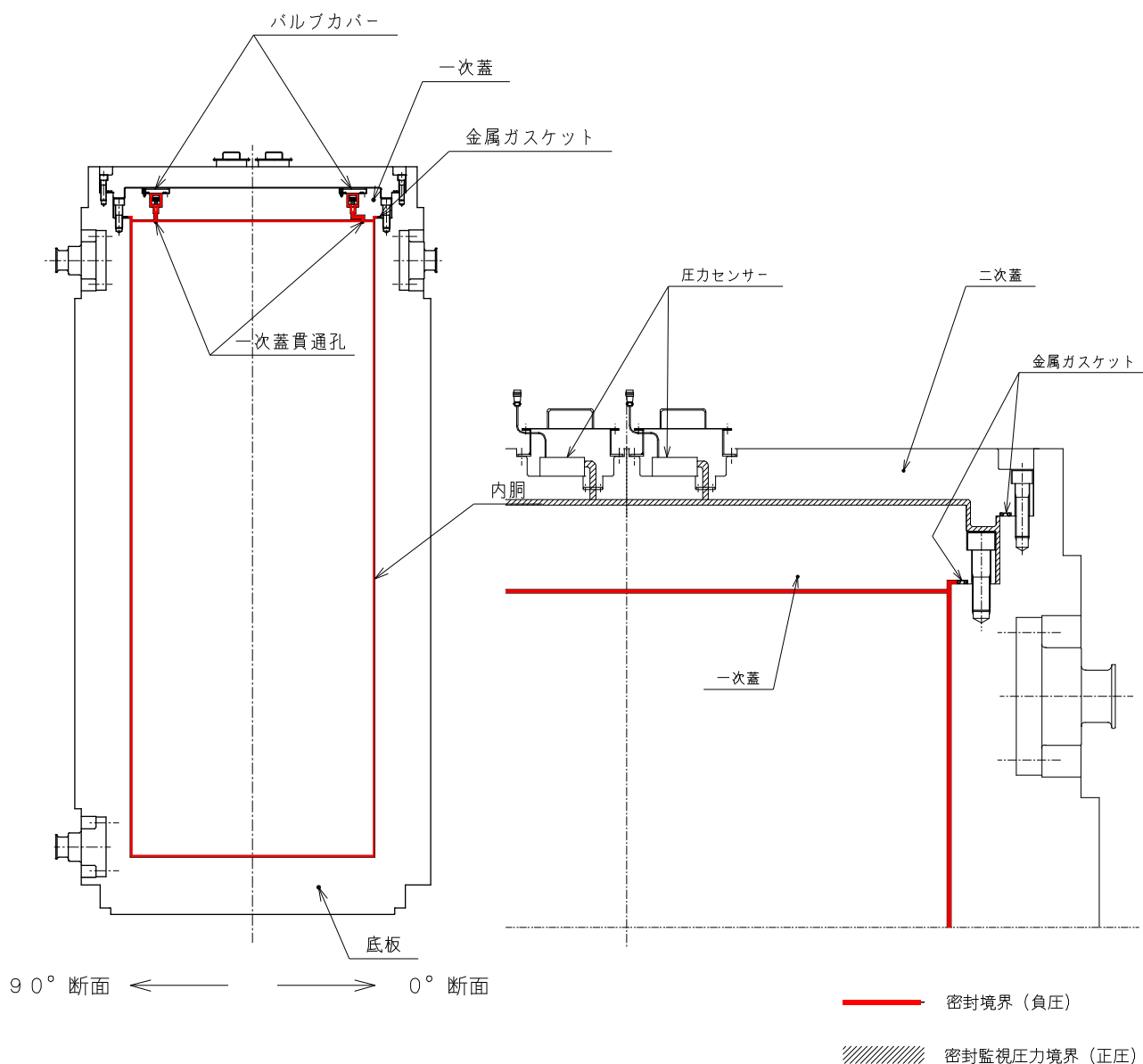
上記の配慮により金属キャスクは密封構造となっており、境界内

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)

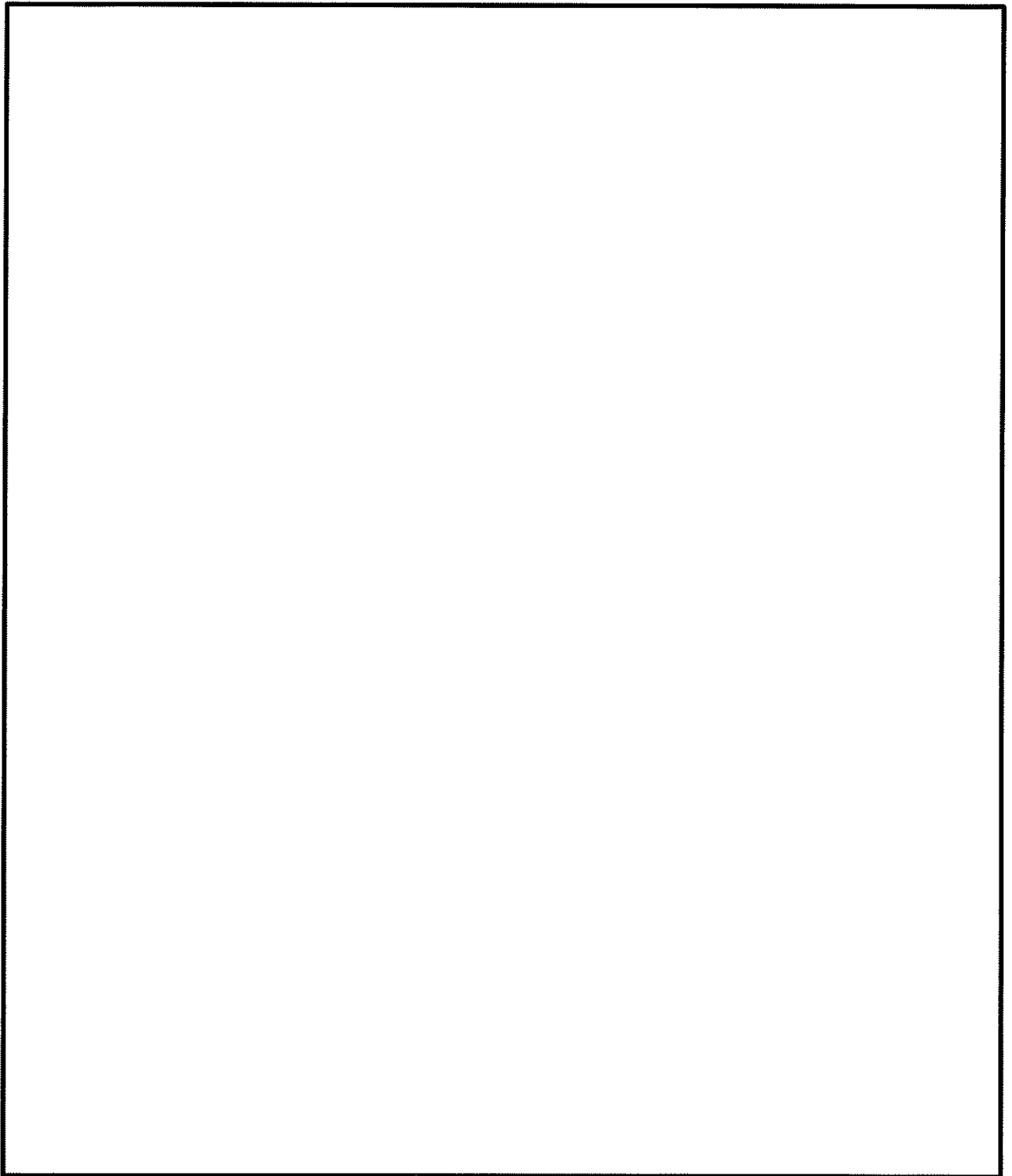
- ・耐放射線性：放射線照射量が 10^4 Gy を超えてから機械特性の変

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 解剖報-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
- (9) 「航空機落下事故に関するデータ(平成 13～令和 2 年)」(原子力規制庁, NTEN-2023-2001, 令和 5 年 3 月)

航空機落下確率及び航空機墜落による火災評価フロー

インプットデータ；
技術ノート「航空機落下事故に関するデータ（平成13～令和2年）」（原子力規制庁，令和5年3月）

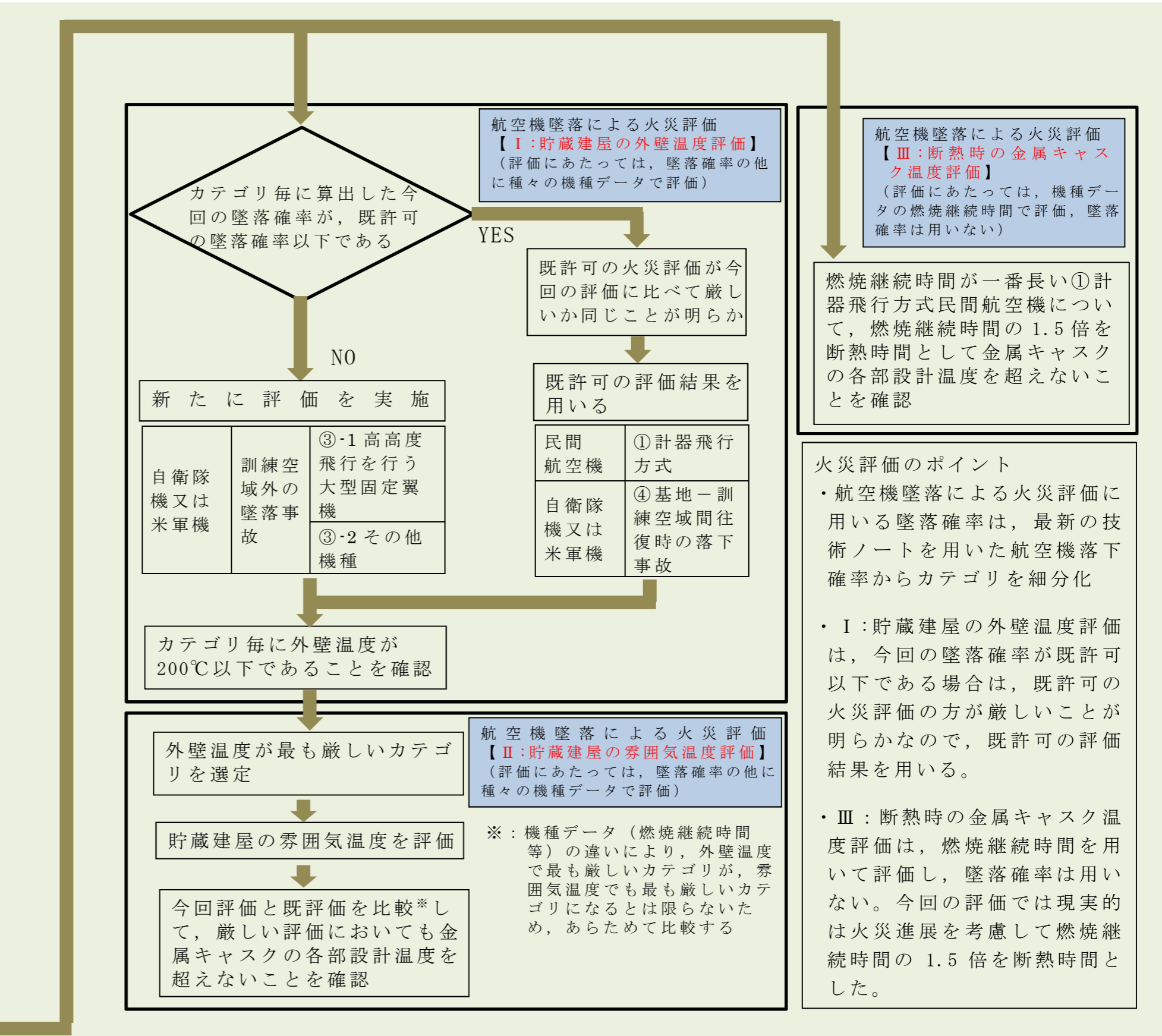
【航空機落下確率算出】
落下確率の合計値が 1×10^{-7} 以下であることを確認

カテゴリ		落下確率 (回/施設・年)
民間航空機	①計器飛行方式	約 1.75×10^{-10}
	②有視界飛行方式	約 5.91×10^{-9}
自衛隊機又は米軍機	③訓練空域外の墜落事故	約 2.53×10^{-8}
	④基地－訓練空域往復時の墜落事故	約 2.13×10^{-8}
合計		約 5.3×10^{-8}

【航空機墜落による火災評価に用いる墜落確率算出】
カテゴリ毎に貯蔵建屋の外壁温度が 200°C 以下である

カテゴリ		墜落確率 (回/施設・年)	
民間航空機	①計器飛行方式	約 1.75×10^{-10}	
	有視界飛行方式	②-1 大型固定翼機	約 5.47×10^{-10}
		②-2 その他機種	約 5.36×10^{-9}
自衛隊機又は米軍機	訓練空域外の墜落事故	③-1 高高度飛行を行う大型固定翼機	約 2.49×10^{-9}
		③-2 その他機種	約 2.28×10^{-8}
	④基地－訓練空域往復時の墜落事故		約 2.13×10^{-8}

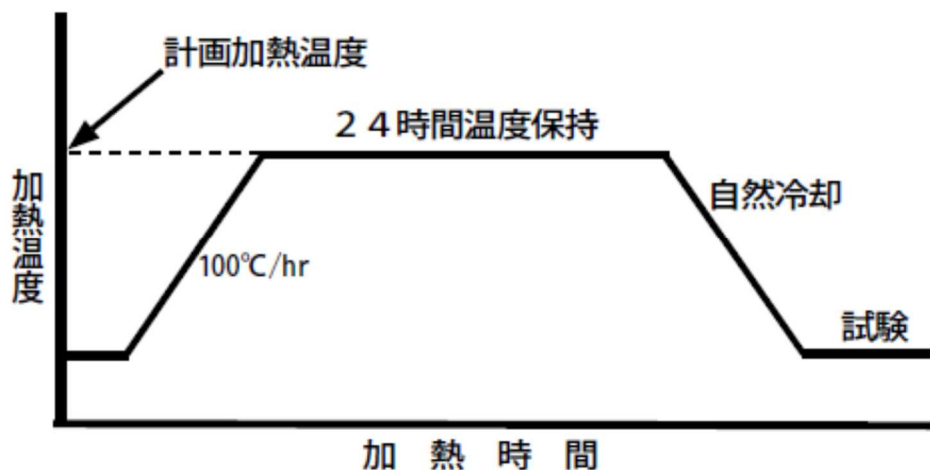
②-1, ②-2: 有視界方式民間航空機の各カテゴリについては燃料積載量等により，自衛隊機又は米軍機の訓練空域外墜落事故の同機種のカテゴリに包絡される
(合計；約 5.3×10^{-8})



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。

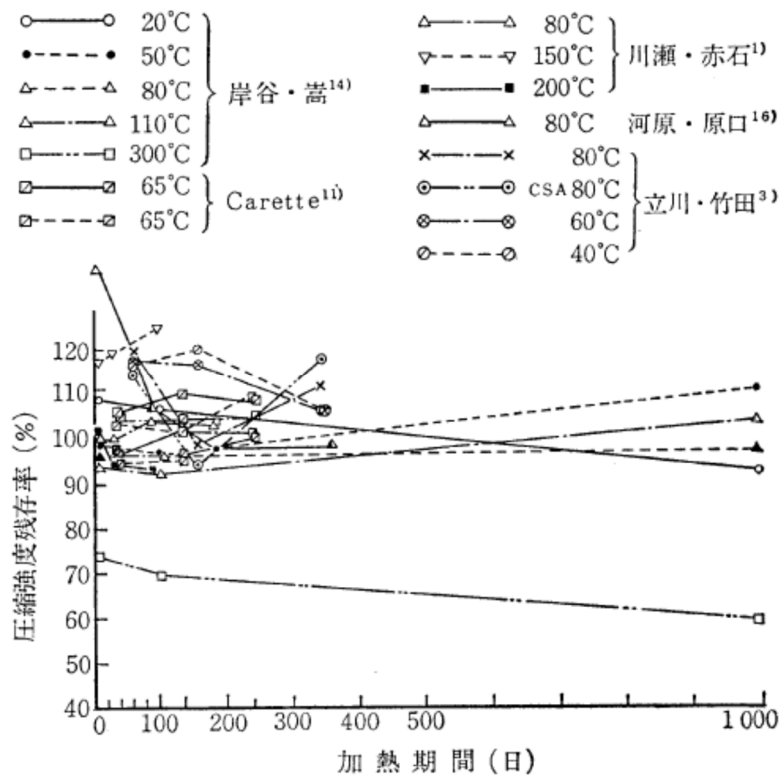
この実証試験における供試体の加熱方法については、供試体の内外温度差と供試体内の温度分布の不均一を小さくし、熱応力の影響を小さくするため 100℃/hr にてそれぞれの計画加熱温度（常温（20℃）及び 100℃～600℃まで 100℃刻みの計 7 パターン）まで加熱し、計画加熱温度到達後は供試体内部温度が均一となるようにそれぞれの計画加熱温度にて 24 時間保持させ、その後自然冷却により降温している。供試体の加熱パターンについて、別添 2 - 1 図に示す。



別添 2 - 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2-2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2-2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2-3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2-4図のとおり約2時間以内で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。

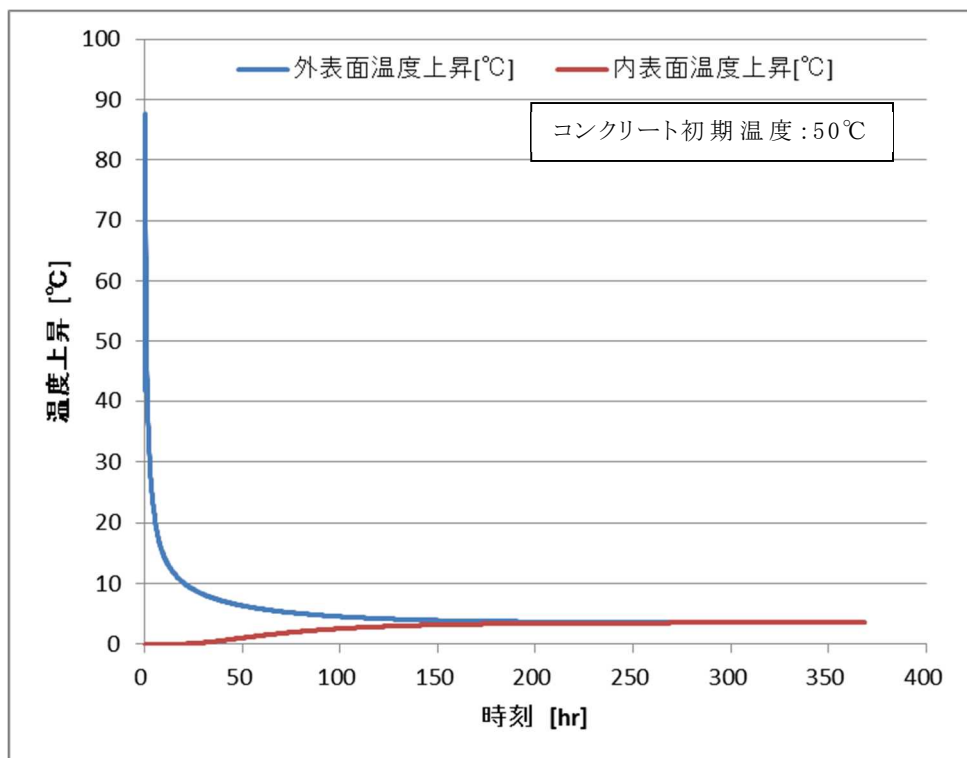
このことから、概括的にコンクリートの熱影響に対する強度については、200℃程度以下までであれば常温とほとんど変化がなく影響も少ないと考えられるため、貯蔵建屋外壁の許容温度については 200℃と定めた。

※コンクリート制限温度値(200℃)：

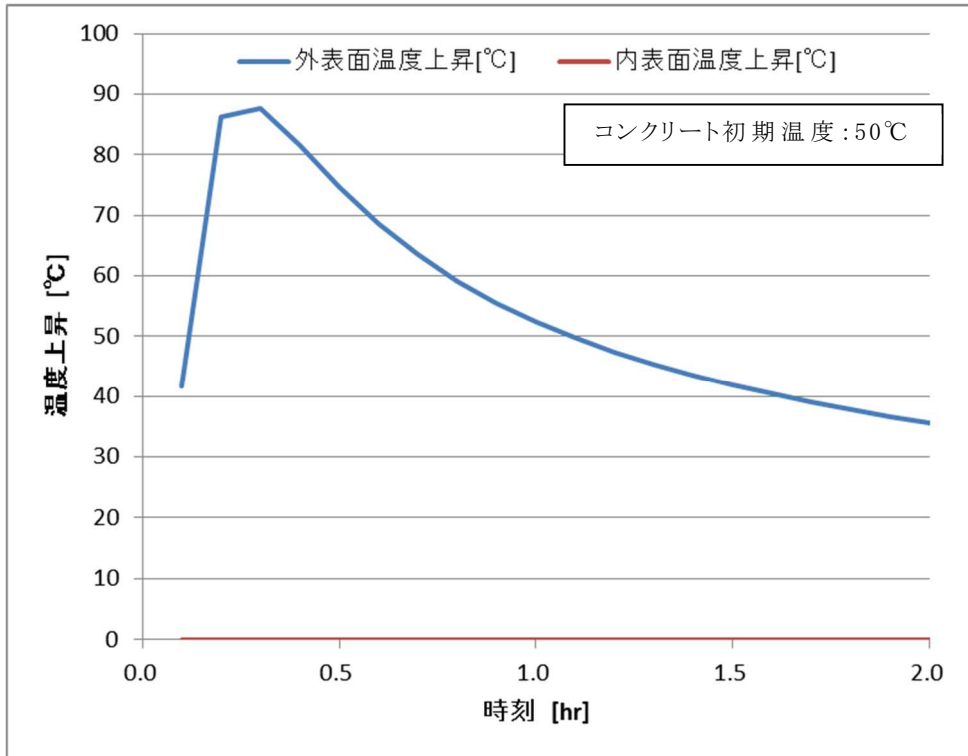
各文献値をもとにしたコンクリートの熱影響に対する温度上限値（新規制基準に対する安全審査で各事業者も採用している値）

参考文献

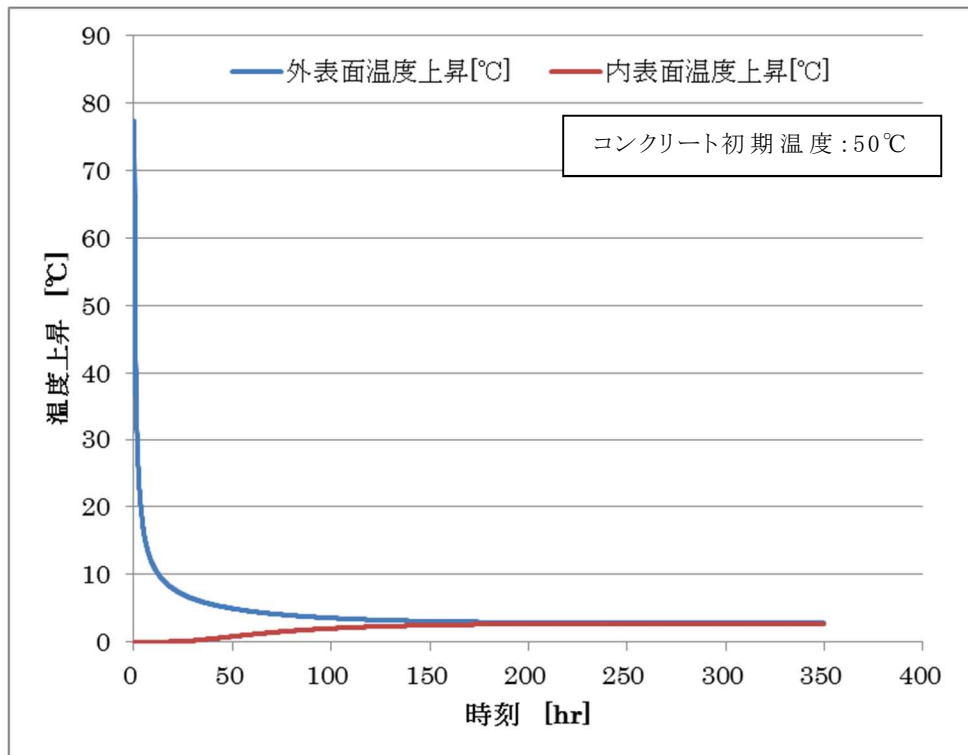
- (1) 論文「高温加熱を受けた高強度コンクリートの強度特性に関する研究」
(コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, 2003)
- (2) 論文「高温下のコンクリートの物性」(コンクリート工学 Vol.22(1984) No.3)



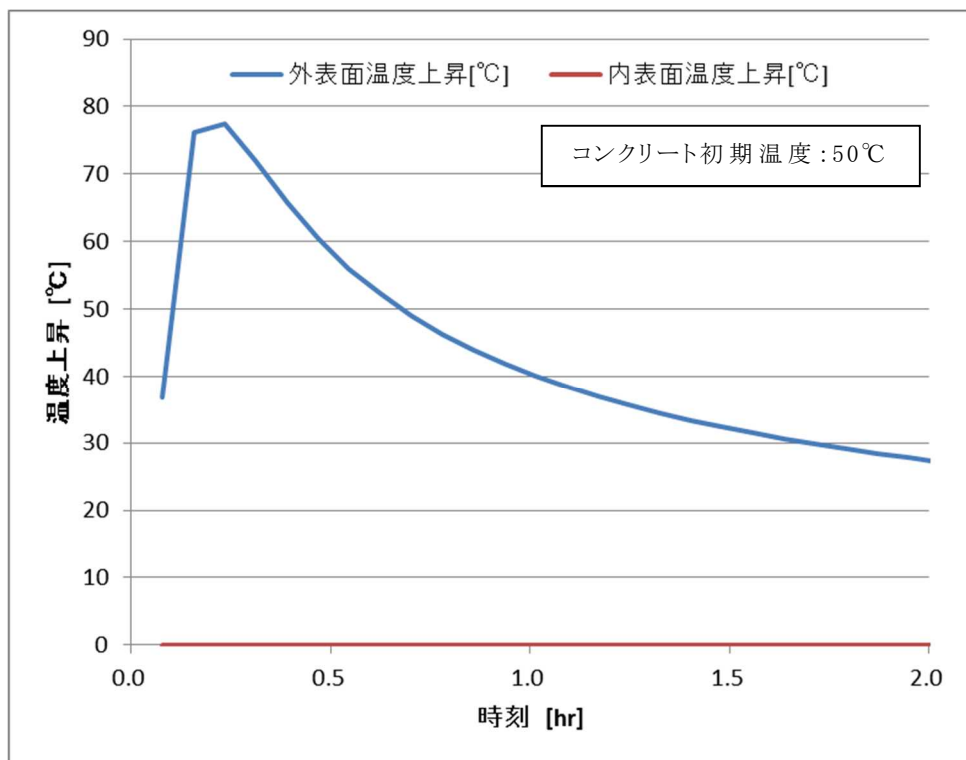
別添 2 - 3 図(1) 貯蔵建屋外壁（内壁）温度の時間変化
（発火点 1（発火時刻 7:56））



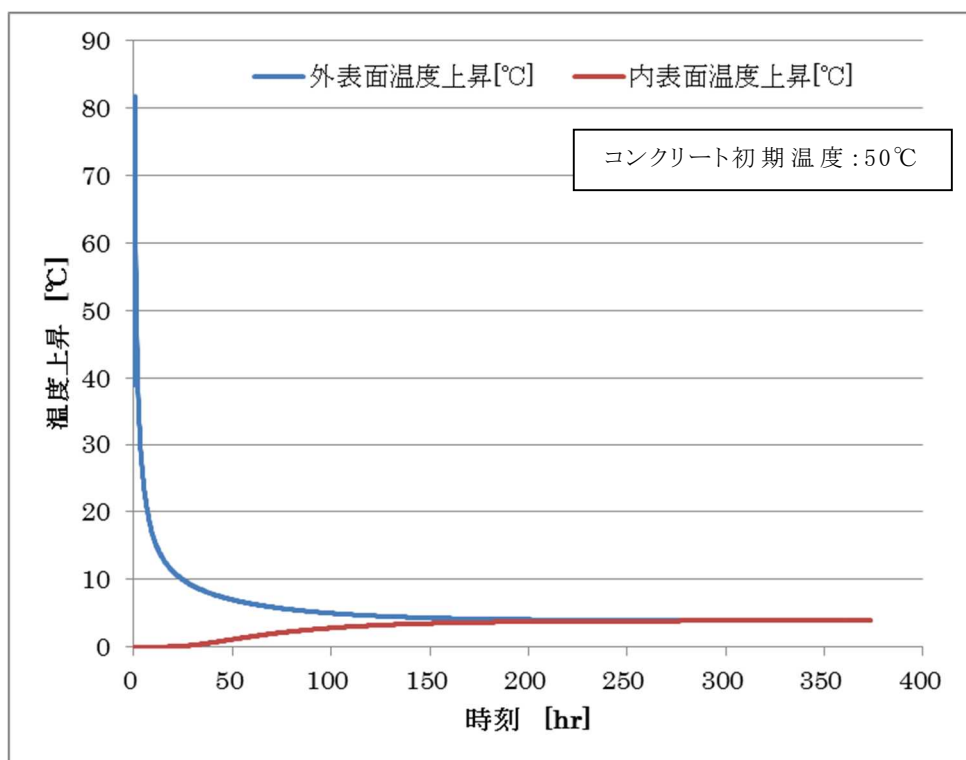
別添 2 - 3 図(2) 貯蔵建屋外壁（内壁）温度の時間変化
（発火点 1（発火時刻 7:56））



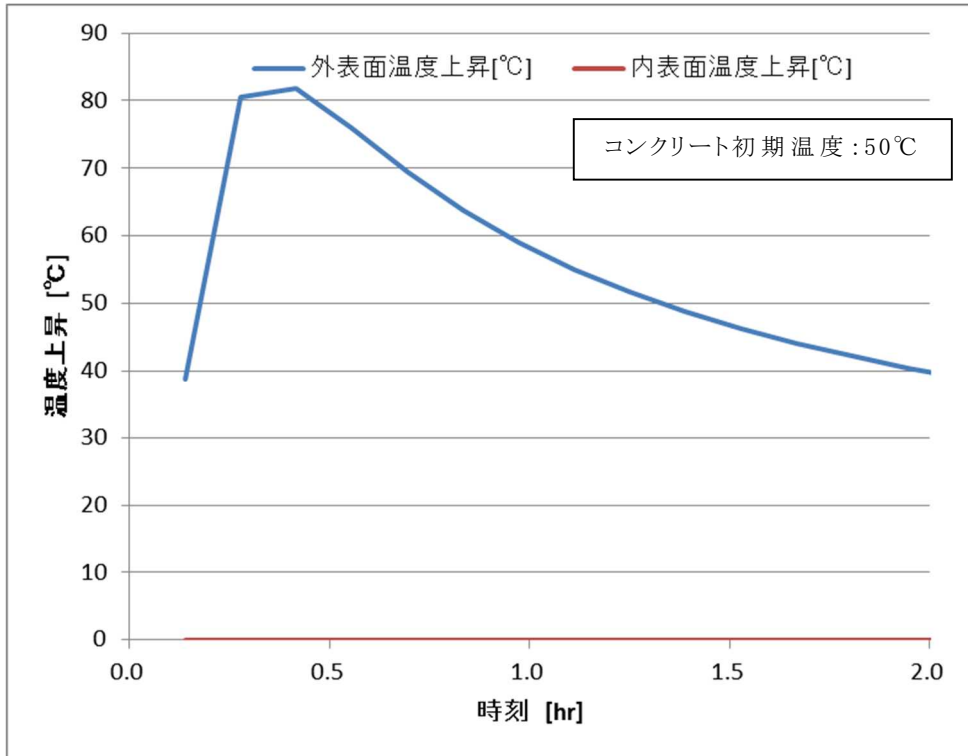
別添 2 - 4 図(1) 貯蔵建屋外壁（内壁）温度の時間変化
（発火点 1（発火時刻 6:58））



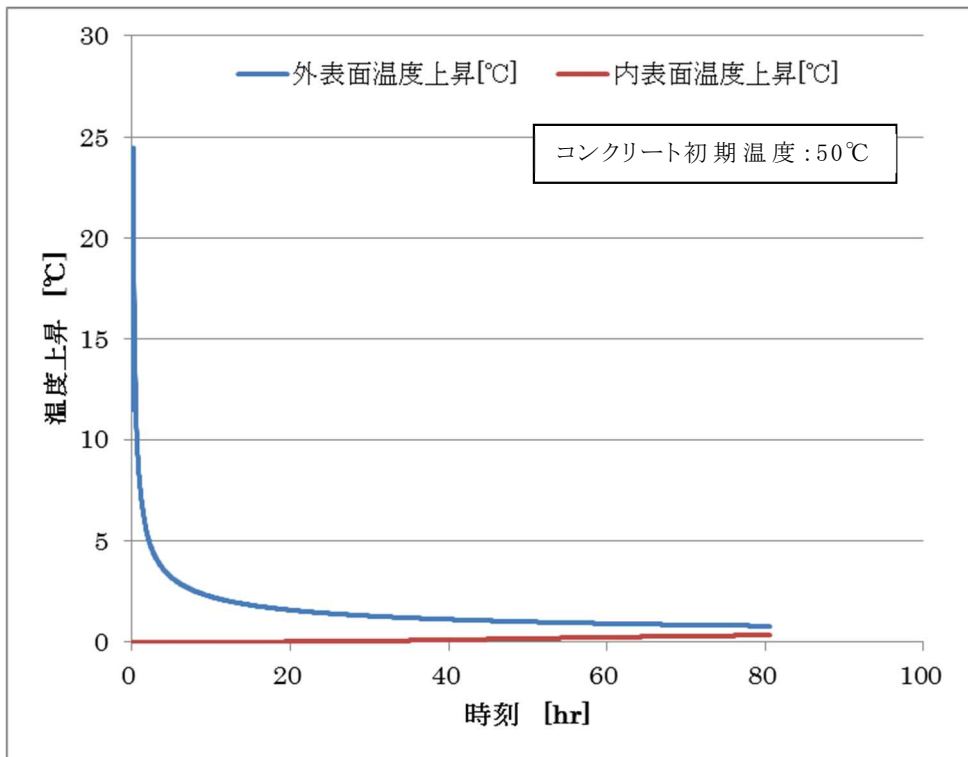
別添 2 - 4 図(2) 貯蔵建屋外壁（内壁）温度の時間変化
（発火点 1（発火時刻 6:58））



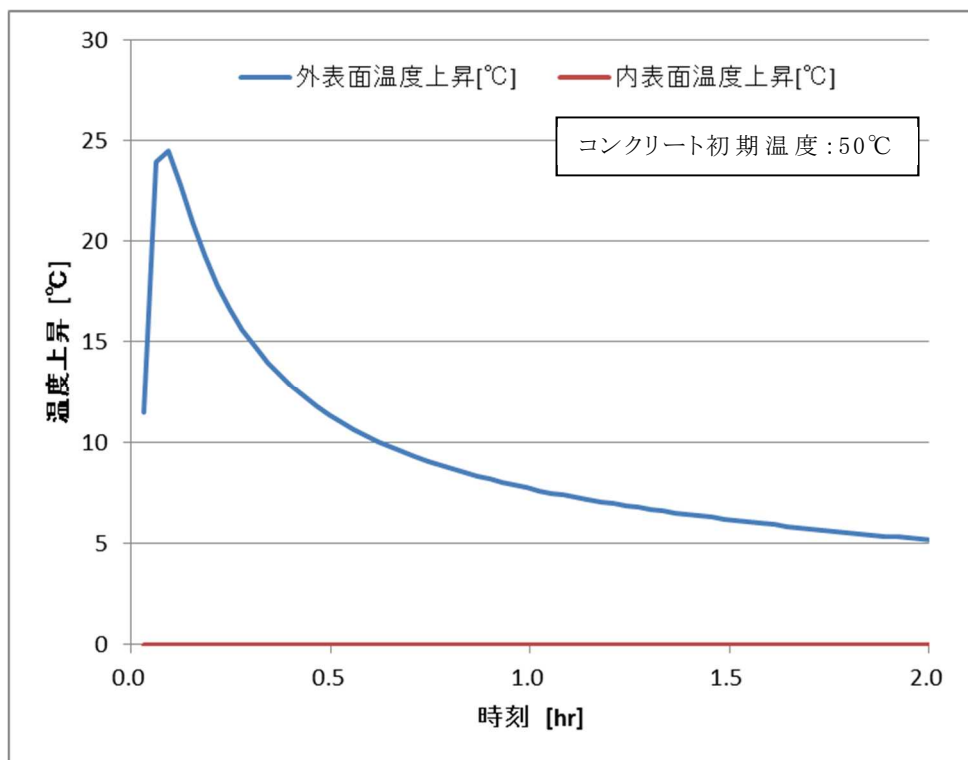
別添 2 - 4 図(3) 貯蔵建屋外壁（内壁）温度の時間変化
（発火点 2（発火時刻 10:00））



別添 2 - 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 2 - 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））



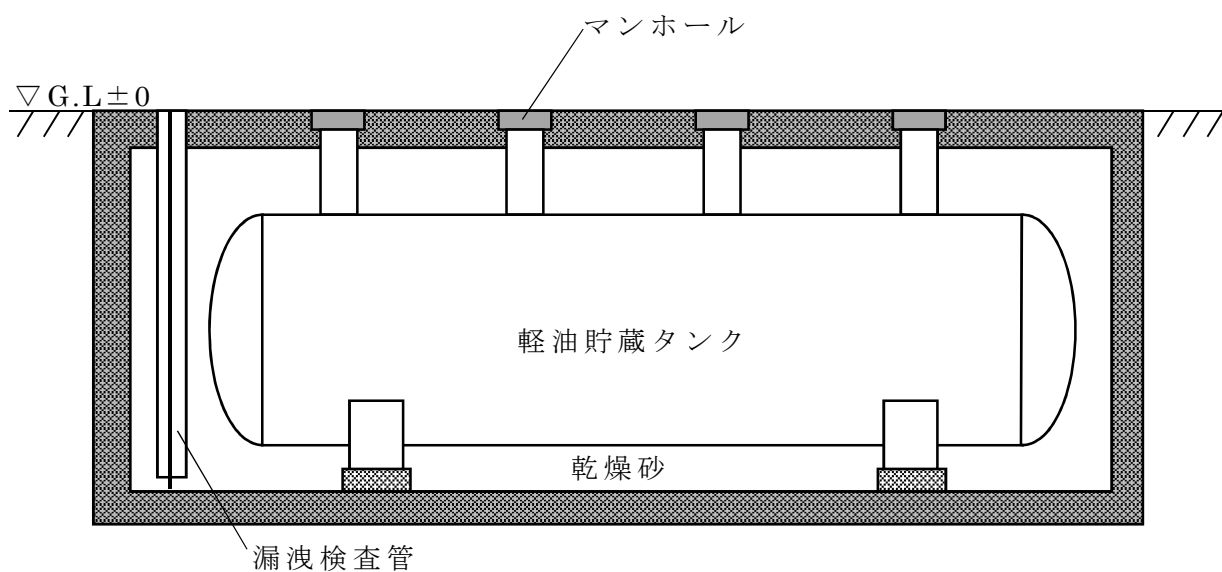
別添 2 - 4 図(6) 貯蔵建屋外壁（内壁）温度の時間変化
（発火点 3（発火時刻 11:00））

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 3 - 1 図に示す。



別添 3 - 1 図 軽油貯蔵タンクの構造概要

第 11 条 外部からの衝撃による損傷の防止（航空機落下）

<目次>

1. 設計方針
2. 施設周辺の飛行場及び航空路等
3. 航空機落下確率の評価
4. まとめ

（別 添）

別添 1 リサイクル燃料備蓄センターにおける航空機落下確率

1. 設計方針

リサイクル燃料備蓄センター周辺には、飛来物の発生の原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、最新の事故実績等⁽¹⁾⁽²⁾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 5.3×10^{-8} 回/施設・年であり、 10^{-7} 回/施設・年⁽³⁾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. 施設周辺の飛行場及び航空路等

リサイクル燃料備蓄センター周辺の飛行場、航空路等及び訓練空域等の状況は、次のとおりである。

(1) 飛行場

リサイクル燃料備蓄センター周辺の飛行場としては、本施設の北西約58kmの地点に函館空港、南約73kmの地点に米空軍及び航空自衛隊三沢基地三沢飛行場並びに三沢空港、南西約84kmの地点に青森空港、南西約17kmの地点に海上自衛隊大湊飛行場がある（第1図参照）。

これらの飛行場のうち、最も本施設に近い民間の飛行場である函館空港でも約58kmと十分に離れており、本施設は、航空路誌（AIP）等から求められる最大離着陸地点以遠に位置している。

(2) 航空路

リサイクル燃料備蓄センター上空には、広域航法（RNAV）経路「Y11」がある（第1図参照）。

(3) 訓練空域

リサイクル燃料備蓄センターは、海上自衛隊大湊飛行場と訓練空域との間に位置している（第2図参照）。米空軍及び航空自衛隊三沢基地三沢飛行場と訓練空域の間に本施設は位置しておらず、敷地上空に訓練空域も設定されていない。

また、本施設の南南東約52kmの地点には、米空軍の三沢対地訓練区域があるが、本施設から十分に離れていることから影響はない。

なお、航空機は原子力関係施設上空を飛行することを規制されている。

3. 航空機落下確率の評価

リサイクル燃料備蓄センターへの航空機の落下確率は、本施設周辺における飛行場及び航空路等の状況、これまでの事故実績等をもとに、「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（内規）」に準じて、民間航空機、自衛隊機及び米軍機を対象として別添1の通り評価した。その結果は、約 5.3×10^{-8} 回/施設・年である。

4. まとめ

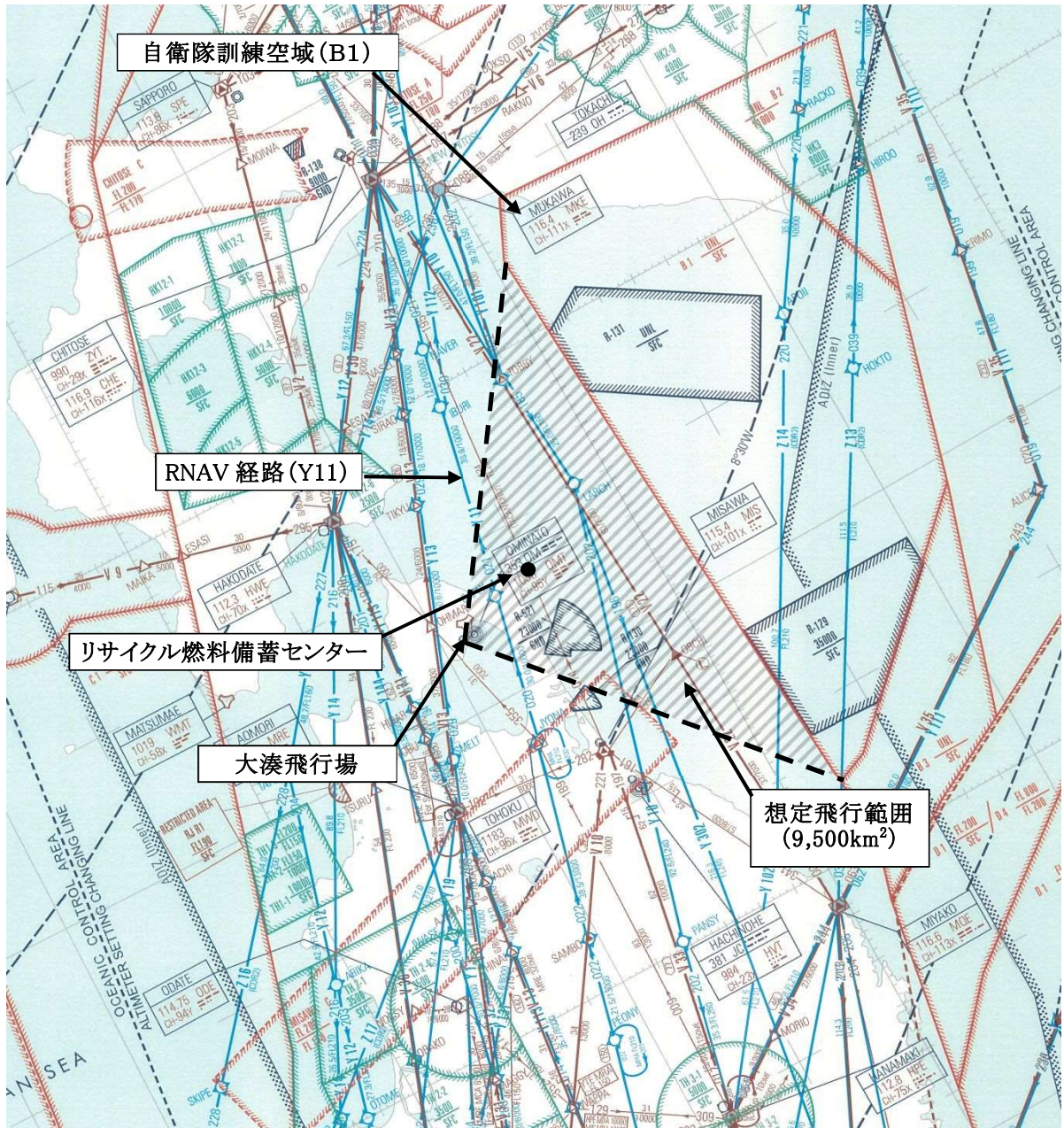
以上のように、「実用発電用原子炉施設への航空機落下確率の評価基準について（内規）」に準じて、リサイクル燃料備蓄センターにおける航空機落下確率を評価した結果は、約 5.3×10^{-8} 回/施設・年となり、判断基準として定められた 10^{-7} 回/施設・年を下回った。

したがって、リサイクル燃料備蓄センターにおいて、航空機落下等による飛来物を設計上考慮する必要はない。

参考文献

- (1) 「航空機落下事故に関するデータ(平成 13～令和 2 年)」(原子力規制庁, NTEN-2023-2001, 令和 5 年 3 月)
- (2) 「航空交通量に係るデータの提供について(回答)」(国土交通省航空局交通管制部, 国空制第 498 号, 令和 5 年 2 月 22 日)
(「11 条(航空機落下-別添 1-10)」項参照)
- (3) 「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(内規)」(平成 14・07・29 原院第 4 号, 平成 14 年 7 月 30 日原子力安全・保安院制定), (平成 21・06・25 原院第 1 号, 平成 21 年 6 月 30 日一部改正)

以上



第2図 リサイクル燃料備蓄センター周辺の訓練空域等

出典：AIP JAPAN 「エンルートチャート」より一部抜粋

リサイクル燃料備蓄センターにおける航空機落下確率

本施設周辺の飛行場及び航空路等を考慮した上で、「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（内規）」に準じて、以下の項目についてリサイクル燃料備蓄センターにおける航空機落下確率を評価した。

1. 計器飛行方式民間航空機の落下事故

「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（内規）」に準じて、飛行場での離着陸時における落下事故及び航空路等を巡航中の落下事故について、以下のとおり落下確率を求めた。

(1) 飛行場での離着陸時における落下事故

リサイクル燃料備蓄センター周辺の民間の飛行場としては、北西約 58km の地点に函館空港、南約 73km の地点に三沢空港、南西約 84km の地点に青森空港がある。航空路誌（AIP）から求められるこれらの空港の最大離着陸距離は、函館空港で約 16km（第 1 - 1 図）、青森空港で 11km（第 1 - 2 図）、三沢空港で約 13km（第 1 - 3 図）であり、本施設から飛行場までの距離に比べて短いため、離着陸時における落下事故を考慮する必要はない。

(2) 航空路等を巡航中の落下事故

本施設上空には、広域航法（RNAV）経路「Y11」がある。「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（内規）」に準じて、以下の式により当該航空路を巡航中の航空機の落下確率を求める。

広域航法（RNAV）経路「Y11」については、航法精度（±5 海里：18km）を航空路の幅とみなして用いることとする。

航法精度：航空機が経路に沿って飛行する際の航法の正確性を数値で示したもの。例えば、航法精度±5 NM とは、殆ど（95%）の飛行時間において経路中心線から 5 海里以内で飛行することを示す。

$$P_c = \frac{f_c \cdot N_c \cdot A}{W}$$

P_c : 巡航中の航空機落下確率 (回/年)

N_c : 評価対象とする航空路等の年間飛行回数

(=9,125飛行回/年=25(飛行回/日;第1表参照)×365日/年)

A : リサイクル燃料備蓄センターの標的面積 (=0.0081km²)

W : 航空路幅 (=18km)

$f_c = G_c / H_c$: 単位飛行距離当たりの巡航中の落下事故率

(=4.26×10⁻¹¹回/(飛行回・km))

G_c : 巡航中事故件数 (=0.5回^{*})

H_c : 延べ飛行距離 (=11,740,093,990飛行回・km)

^{*}: 事故件数がないため巡航中の落下事故を0.5件と設定。

上記より、航空路を巡航中の航空機の落下確率 (P_c) は、約1.75×10⁻¹⁰ (回/年) となる。

2. 有視界飛行方式民間航空機の落下事故

「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 (内規)」に準じて、全国平均の落下確率を用い、以下の式によりリサイクル燃料備蓄センターにおける落下確率を求める。

$$P_v = \frac{f_v}{S_v} (A \cdot \alpha)$$

P_v : 有視界飛行方式民間航空機の落下確率 (回/年)

f_v : 単位年当たりの落下確率 (回/年)

S_v : 全国土面積 (=37万km²)

A : リサイクル燃料備蓄センターの標的面積 (=0.0081km²)

α : 対象航空機の種類による係数

P_v の導出にあたって、大型固定翼機、小型固定翼機、大型回転翼機及び小

型回転翼機を考慮し、 f_v 及び α として下表の値を用いている。

	f_v (単位年当たりの落下確率)	α (対象航空機の種類による係数)
大型固定翼機	0.5回/20年	1.0
小型固定翼機	22回/20年	0.1
大型回転翼機	1回/20年	1.0
小型回転翼機	17回/20年	0.1

上記より、有視界飛行方式民間航空機の落下確率 (P_v) は、約 5.91×10^{-9} (回/年) となった。

3. 自衛隊機及び米軍機の落下事故

「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 (内規)」に準じて、以下のとおり落下確率を求める。

(1) 訓練区域内で訓練中及び訓練空域外を飛行中の落下事故

リサイクル燃料備蓄センターの上空には、自衛隊及び米軍の訓練空域は存在しない。したがって、「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 (内規)」に準じて、以下のとおり訓練空域外を飛行中の自衛隊機及び米軍機の落下確率を求める。

$$P_{so} = \left(\frac{f_{so}}{S_o} \right) \cdot A$$

P_{so} : 自衛隊機及び米軍機の訓練空域外での落下確率 (回/年)

f_{so} : 単位年当たりの訓練空域外落下事故率

(=15回/20年 (自衛隊機)), (=4回/20年 (米軍機))

S_o : 全国土面積から全国の陸上の訓練空域の面積を除いた面積 (km²)

(=29万km² (自衛隊機)), (=37万km² (米軍機))

A : リサイクル燃料備蓄センターの標的面積 (=0.0081km²)

上記より、訓練空域外を飛行中の自衛隊機及び米軍機の落下確率 (P_{so}) は

約 2.53×10^{-8} (回/年) となった。

(2) 基地－訓練空域間往復時の落下事故

リサイクル燃料備蓄センターは、海上自衛隊大湊飛行場と訓練空域 (B1) との往復時の飛行範囲として想定される区域に位置している。したがって、「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 (内規)」に準じて、以下の式により基地－訓練空域間往復時の落下確率を求める。なお、基地－訓練空域間には、回廊や移動経路は設定されていない。

$$P_{se} = \left(\frac{f_{se}}{S_{se}} \right) \cdot A$$

P_{se} : 自衛隊機及び米軍機の基地－訓練空域間往復時の落下確率
(回/年)

f_{se} : 単位年当たりの基地と訓練空域を往復中の落下事故率
($= 0.5^{*1}$ 回/20年)

S_{se} : 想定飛行範囲の面積 ($=$ 約 $9,500\text{km}^2$) *2

A : リサイクル燃料備蓄センターの標的面積 ($= 0.0081\text{km}^2$)

*1 : 事故件数がないため基地－訓練空域間において0.5件と設定。

*2 : 基地と訓練空域 (B1) 境界とを結ぶ三角形形状の区域面積 (第1－4図参照)。

上記より、基地－訓練空域間往復時の落下確率 (P_{se}) は、約 2.13×10^{-8} (回/年) となった。

(3) 自衛隊機及び米軍機の落下事故の総和

上記(1)及び(2)より、自衛隊機及び米軍機の落下事故の総和は約 4.66×10^{-8} となった。

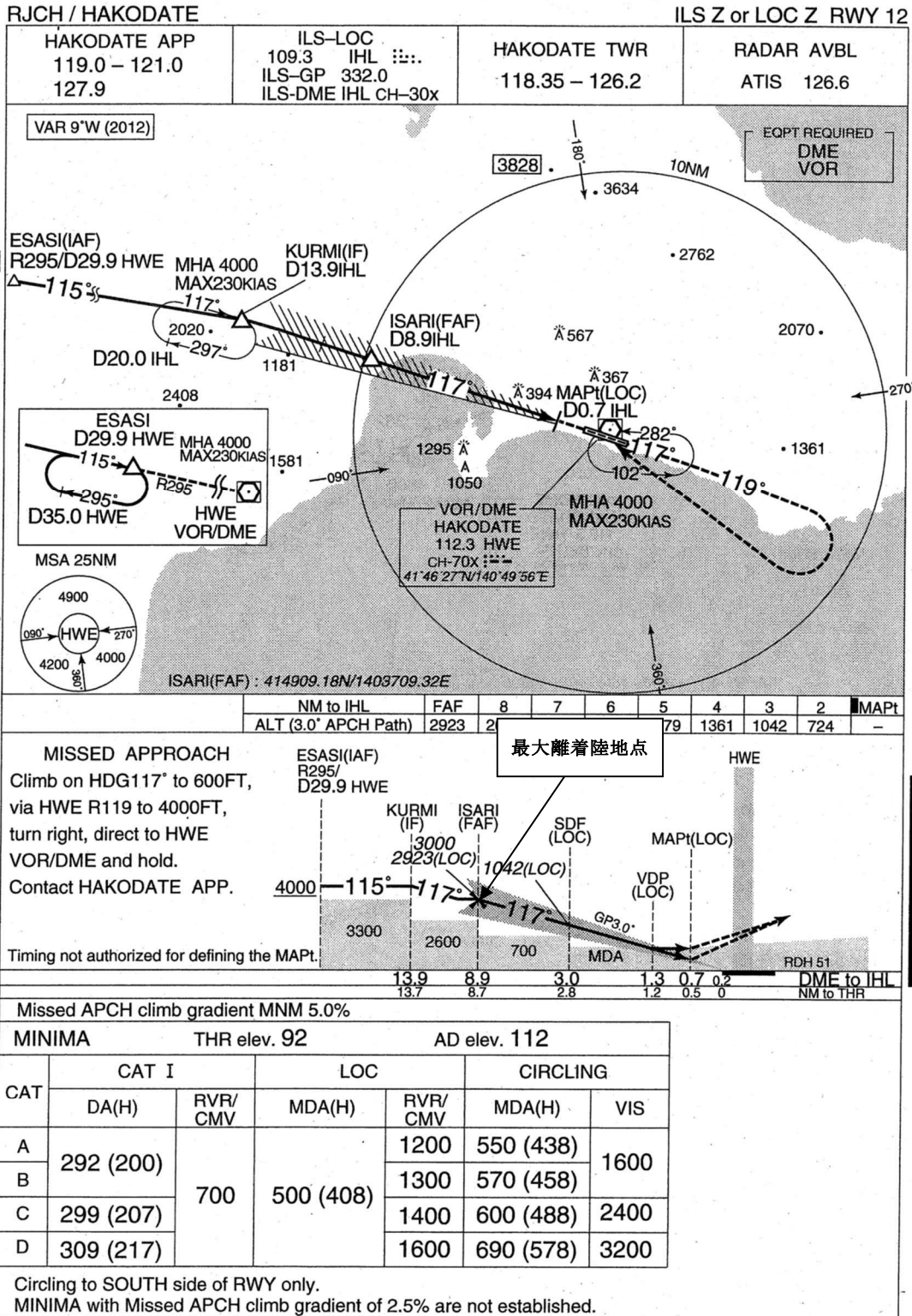
4. リサイクル燃料備蓄センターにおける航空機落下確率

リサイクル燃料備蓄センターにおける航空機落下確率は、下表のとおり、計器飛行方式民間航空機の落下確率，有視界飛行方式民間航空機の落下確率，自衛隊機及び米軍機の落下確率の和として算定され，約 5.3×10^{-8} (回／施設・年) となった。

対象航空機	落下確率 (回／施設・年)
計器飛行方式民間航空機	約 1.75×10^{-10}
有視界飛行方式民間航空機	約 5.91×10^{-9}
自衛隊機及び米軍機	約 4.66×10^{-8}
合 計	約 5.3×10^{-8}

以 上

INSTRUMENT APPROACH CHART



第 1 - 1 図 函館空港の最大離着陸地点

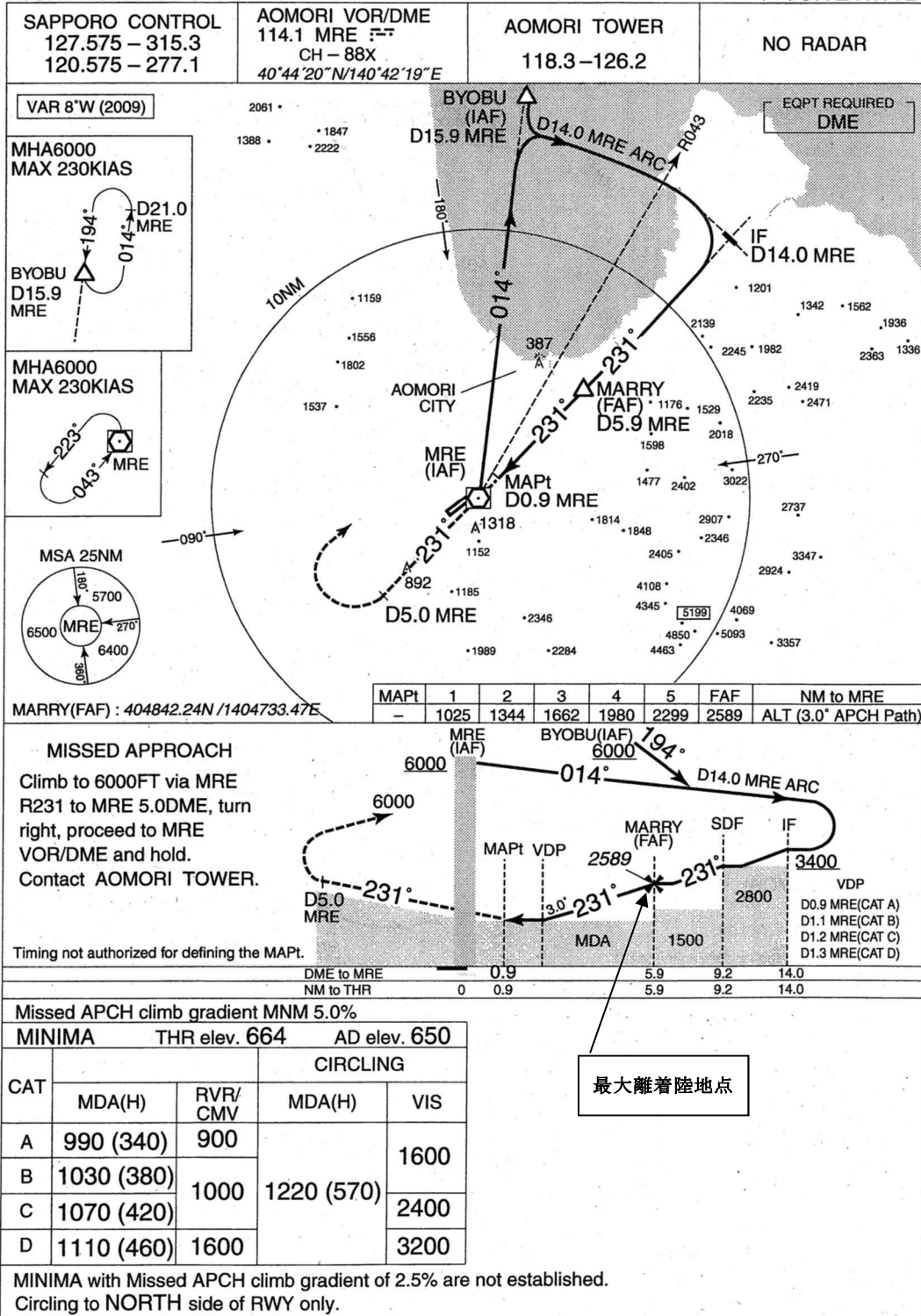
出典: AIP JAPAN 「AIP Part2 AD2 HAKODATE」より

11 条(航空機落下) - 別添 1-6

INSTRUMENT APPROACH CHART

RJSA / AOMORI

→ VOR Z RWY24



第 1 – 2 図 青森空港の最大離着陸地点

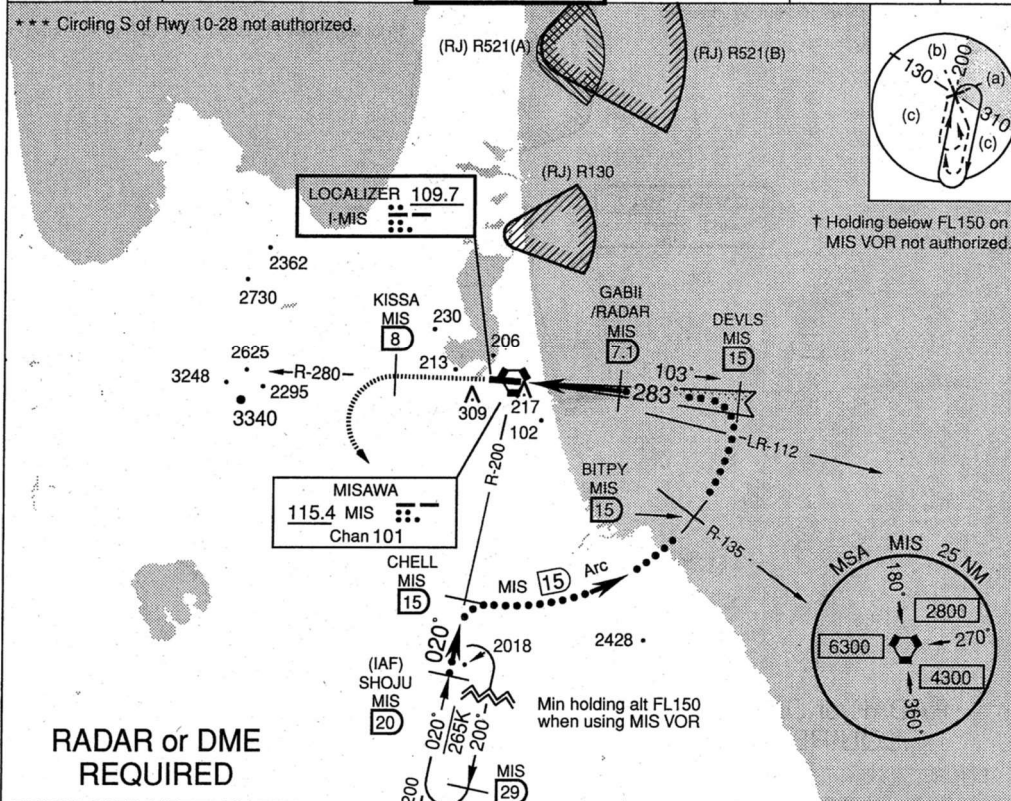
出典：AIP JAPAN 「AIP Part2 AD2 AOMORI」より

11 条(航空機落下) – 別添 1 – 7

INSTRUMENT APPROACH CHART

RJSM / MISAWA

LOC I-MIS 109.7	APCH CRS 283°	Rwy ldg THRE 94 Arpt Elev 119	HI-ILS or LOC/DME RWY28		
* When ALS inop, increase RVR to 40 and vis to 3/4 mile. ** When ALS inop, increase CAT AB RVR to 55 and vis to 1 mile, CAT CDE RVR to 60 and vis to 1 1/8 miles.		ALSIF-1	† MISSED APPROACH: Climb to 7000 on MIS VORTAC R-280 to KISSA, then climbing left turn direct SHOJU and hold. Continue climb in holding to 7000.		
ATIS ★ 128.4 315.35	MISAWA APP CON 120.7 317.8	MISAWA TOWER 118.1 315.8	GND CON 118.65 275.8	CLNC DEL 118.65 275.8	ASR/PAR



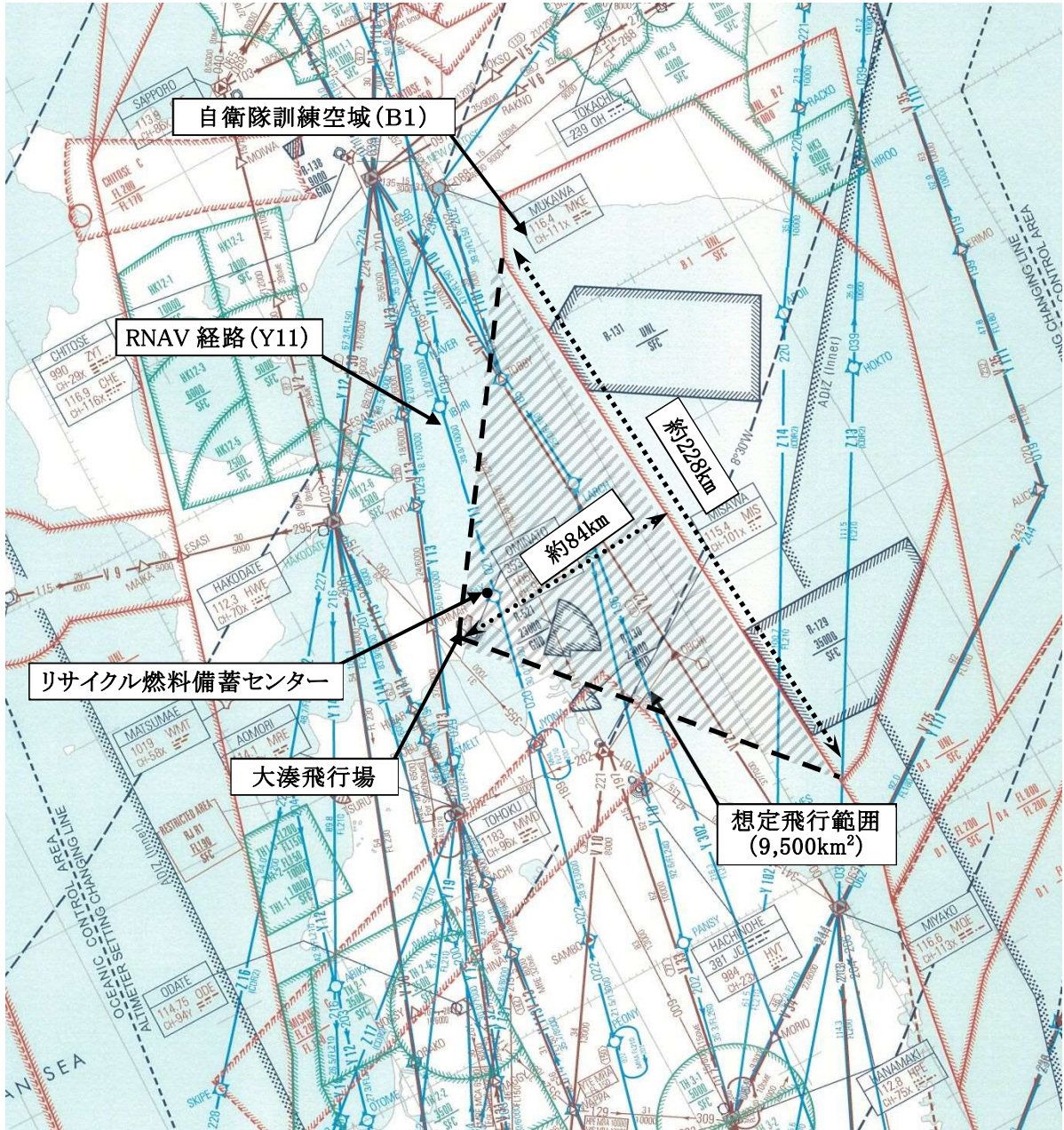
EMERG SAFE ALT 100 NM 8700		ELEV 119		THRE 94	
7000 MIS R-280	KISSA MIS B	SHOJU MIS 20	TLV FL TA 14,000	最大離着陸地点	
VORTAC	JORJE RADAR 9	GABII RADAR 7.1	DEVLS R-104 15	BITPY R-135 15	CHELL R-200 15
7 NM	6.2 NM	2000	4000	7000	FL200 7000
0.7 NM	6.2 NM	MIS 15 Arc	GS 2.50'	TCH 54	
CATEGORY	A	B	C	D	E
S-ILS 28 *	302/24		208	(200-1/2)	
S-LOC 28 **	480/24	386 (400-1/2)	480/35	386 (400-5/8)	
CIRCLING ***	580-1	461 (500-1)	580-1 1/2 461 (500-1 1/2)	680-2	561 (600-2)
HIRL Rwy 10-28					

NOTE: REPRINTING DOD FLIP

第 1 - 3 図 三沢空港の最大離着陸地点

出典: AIP JAPAN 「AIP Part2 AD2 MISAWA」より

11 条(航空機落下) - 別添 1-8



第 1 - 4 図 基地 - 訓練空域間の往復時における想定飛行範囲

出典：AIP JAPAN 「エンルートチャート」より一部抜粋

11 条(航空機落下) - 別添 1-9

本評価に関する箇所のみ公開します。

第1表 ピークデイ交通量
(航空交通量に係るデータの提供について (回答))

区間	2022年上半期神戸管轄 第一ターミナル (1月7日) 交通量	E11 (YOMA-CHE)	25
----	---------------------------------------	----------------	----

第 14 条 設計最大評価事故時の放射線障害の防止

<目 次>

(別 添)

別添 5 金属キャスク取扱時の落下・転倒事象に関する影響評価

添付していない箇所に関しては、令和 5 年 9 月 21 日付で提出した資料から変更が無く、今回の変更申請としては提出しない。

金属キャスク取扱時の落下・転倒事象に関する影響評価

1. 落下・転倒事象の想定シナリオについて

金属キャスクが落下・転倒する想定事象としては、以下に示す設計及び運用等の有効性を考慮した上で、金属キャスクの基本的安全機能への影響を確認し、万一事象が発生した場合に、公衆に対し放射線被ばくのリスクを及ぼす可能性のある事象を選定する。

(1) 金属キャスクの落下・転倒事象の発生防止対策

- a. 受入れ区域天井クレーン及びつり具は、金属キャスクの総重量を十分上回る重量に耐えることのできる強度に設計する。
- b. 受入れ区域天井クレーンのワイヤロープ、ブレーキ及びリミットスイッチは、故障を考慮して二重化する。
- c. つり具とトラニオンの取付不良を考慮して、金属キャスクを4点つりとし、水平吊具は1点、垂直吊具は2点の保持不良があっても落下しない設計とする（ただし、キャスクたて起し時は2点つり状態である）。
- d. 垂直吊具と受入れ区域天井クレーンの取付不良を考慮して、天井クレーンフックによるつり具保持の他に、安全板によりつり具を保持する設計とする（二重化）。
- e. つり具のアームを開閉する圧縮空気が喪失した場合でも、アームが金属キャスクのトラニオンから外れないフェイル・セーフ設計とする。また、トラニオン外れ防止金具を主アームに設ける。
- f. 作業要領を十分整備し、監督者の直接指揮下で金属キャスクの取扱作業を行う管理体制をとる。監督者は、金属キャスクの移送及び取扱いに関して知識を有し、教育・訓練経験を有する実務経験のあるものが従事する。

(2) 落下・転倒想定事象の選定

機器の多重化、操作員の誤操作防止対策を施すことにより、金属キャスクが落下・転倒する可能性は極めて低いと考えられる。

しかしながら、キャスクたて起こし時は2点つり状態であることから、

つり具の保持不良により金属キャスクは転倒することになる。

転倒により、金属キャスク蓋部に直接外力が作用することが想定され、閉じ込め機能が低下して公衆に対し放射線被ばくのリスクを及ぼす可能性があるため、その影響を確認するための以下の2事象を選定した。

- ① たて起こし架台支持脚への転倒（輸送用緩衝体無）
- ② 衝撃吸収材への転倒（輸送用緩衝体無）

2. 金属キャスク取扱時の落下・転倒による影響評価

影響評価手法としては、金属キャスク衝突時に構造物により吸収されるエネルギーあるいはトラニオン破断に必要な応力を評価して、金属キャスクに作用する衝撃加速度を算出し、その衝撃加速度の値が輸送規則で定める特別の試験条件（9 m落下試験）で作用する加速度を下回ることを確認する。

- ① たて起こし架台支持脚への転倒（輸送用緩衝体無）

a. 評価条件

BWR用大型キャスク（タイプ2A）及びPWR用キャスク（タイプ1）は、 たて起こし架台上での金属キャスクたて起こし作業中、直立状態から下部トラニオンを回転軸として転倒し、2つの上部トラニオンが架台支持脚へ衝突することを想定（別添5-1図参照）。

この場合、トラニオンに作用する加速度が最大となるのはトラニオンが破断に至る寸前の状態である。**BWR用大型キャスク（タイプ2A）の場合、**トラニオンの最大せん断力を評価して金属キャスクに作用する衝撃加速度を算定する。**PWR用キャスク（タイプ1）の場合、**トラニオン破断位置に作用する曲げ及びせん断によって損傷すると考え、保守的に純曲げのみにより損傷すると想定し金属キャスクに作用する衝撃加速度を算定する。**BWR用中型キャスク（タイプ2）は、**立て起こし架台上での金属キャスク立て起こし作業中、直立状態から下部トラニオンを回転軸として転倒し、胴上部が架台胴受け部へ衝突することを想定（別添5-2図参照）する。この場合、胴上部に作用する加速度が最大となるのは胴上部が圧壊に至る寸前の状態である。**BWR用中型キャスク（タイプ2）の場合、**胴上部の圧壊に至る反力を評価して金属キャスクに作用する衝撃加速度を算定する。

b. 評価結果（添付 1 参照）

BWR用大型キャスク（タイプ 2 A）に作用する衝撃加速度は約 43G となり、特別の試験条件で金属キャスクの構造評価を行う設計加速度（55～65G）を下回ることを確認した。

BWR用中型キャスク（タイプ 2）に作用する衝撃加速度は約 68G となり、特別の試験条件で金属キャスクの構造評価を行う設計加速度（74G）を下回ることを確認した。

PWR用キャスク（タイプ 1）に作用する衝撃加速度は約 65G となり、特別の試験条件で金属キャスクの構造評価を行う設計加速度（87G）を下回ることを確認した。

②衝撃吸収材への転倒（輸送用緩衝体無）

a. 評価条件

たて起こし架台上での金属キャスクたて起こし作業中、直立状態から下部トラニオンを回転軸として転倒し、金属キャスクの閉じ込め境界部近傍が床面に敷設された衝撃吸収材に直接衝突することを想定（別添 5-2 図参照）。

この場合、金属キャスクの位置エネルギーが回転系のエネルギーに変換されるとして金属キャスクの転倒エネルギーを評価し、転倒エネルギーが衝撃吸収材の変形によって全て吸収されるものとして、金属キャスクに作用する衝撃加速度を算定する。

b. 評価結果（添付 1 参照）

BWR用大型キャスク（タイプ 2 A）に作用する衝撃加速度は約 29G となり、特別の試験条件で金属キャスクの構造評価を行う設計加速度（55～65G）を下回ることを確認した。

BWR用中型キャスク（タイプ 2）に作用する衝撃加速度は約 28G となり、特別の試験条件で金属キャスクの構造評価を行う設計加速度（74G）を下回ることを確認した。

PWR用キャスク（タイプ 1）に作用する衝撃加速度は約 26G となり、特別の試験条件で金属キャスクの構造評価を行う設計加速度（87G）を下回ることを確認した。

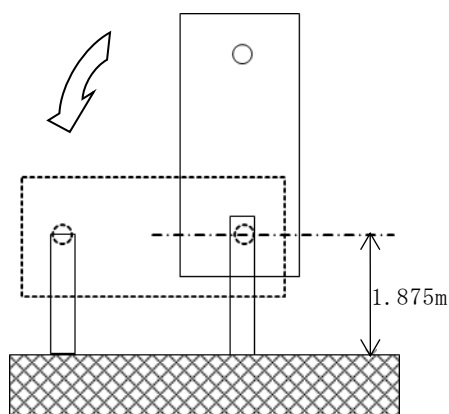
ここで、BWR用中型キャスク（タイプ2）とPWR用キャスク（タイプ1）の転倒評価については、型式証明申請での評価が、既設の衝撃吸収材の性能や金属キャスクとの位置関係の条件が適切に設定された解析の入力条件になっていることを確認した上で、再評価（再解析）はせず、型式証明申請当時の評価条件・方法・結果と同じ内容を示している。

なお、本事象は加速度の比較において特別の試験条件よりも低い値となるが、衝撃吸収材との衝突により金属キャスクの閉じ込め境界部近傍に直接外力が作用する事象であり、閉じ込め機能維持の観点から ABAQUS コードを用いた構造解析を実施した。その結果、金属キャスクの閉じ込め境界部に発生する応力は設計基準値以下となり、閉じ込め境界部の健全性を確認した。

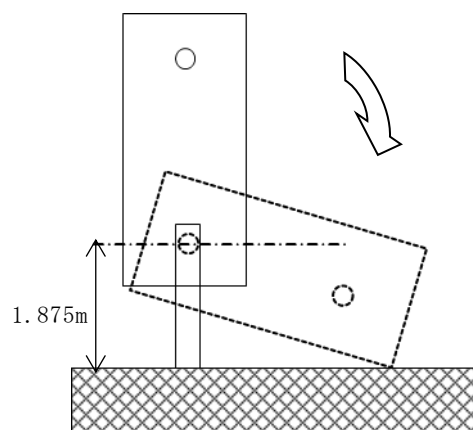
3. まとめ

金属キャスクの落下・転倒を想定したいずれの事象においても、金属キャスクに作用する衝撃加速度が特別の試験条件を下回ることを確認するとともに、②衝撃吸収材への転倒評価では構造解析を実施し、閉じ込め機能が健全であることを確認した。

以上より、金属キャスクの閉じ込め機能の健全性は維持され、公衆に放射線被ばくのリスクを及ぼすことはない。



別添5-1図 架台支持脚への
転倒条件
(BWR用大型キャスク（タイプ2A）及びPWR用キャスク（タイプ1）の場合)



別添5-2図 衝撃吸収材への
転倒条件
(BWR用中型キャスク（タイプ2）の場合)

【たて起こし架台上転倒時の衝撃加速度評価】

1. たて起こし架台支持脚への転倒（輸送用緩衝体無）の場合

支持脚を剛として考えると，トラニオンに作用する加速度が最大となるのはトラニオンが破断に至る寸前の状態であり，その最大せん断力 F はせん断ひずみエネルギー説を仮定すると以下の式で与えられる（BWR用大型キャスク（タイプ2A）の場合）。

$$F = S_u / (\sqrt{3}) \cdot A = 8.8 \times 10^6 \text{ (N)}$$

S_u : 設計引張強さ (N/mm²)

A : トラニオン断面 (せん断断面積 mm²)

また，下部トラニオンを回転中心とした転倒事象では，金属キャスク上部（蓋部）に生じる衝撃加速度 α (G) が最大となり，以下のモーメントの釣り合い式より算出され約 43G となる。

$$\frac{2}{3} \cdot L_2 \cdot \left(\frac{\alpha \cdot m \cdot L_2}{2} \right) + \frac{2}{3} \cdot L_1 \cdot \left(\frac{L_1}{L_2} \cdot \frac{\alpha \cdot m \cdot L_1}{2} \right) = 2 \cdot F \cdot L_3$$

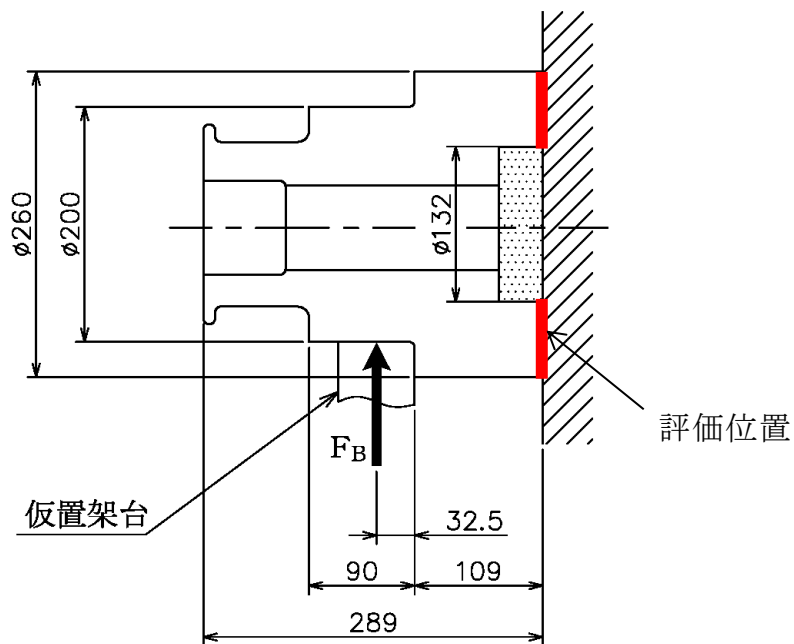
α : キャスク上端の加速度 [m/s²]

m : 単位長さあたりのキャスク質量 [約 kg/mm] (軸方向質量均一を仮定)

L_1 : キャスク底面から下部トラニオンまでの長さ [mm]

L_2 : キャスク上面から下部トラニオンまでの長さ [mm]

L_3 : トラニオン間距離 [mm]



(単位：mm)

添付1-1図 トラニオン形状図 (PWR用キャスク)

BWR用大型キャスク(タイプ2A)の場合、胴上部を剛として考えると、胴上部に作用する加速度が最大となるのは架台胴受け部が圧壊に至る寸前の状態であり、胴上部が圧壊に至る反力Fは以下の式で与えられる。

$$F = 1.5f_c \times A = 1.30 \times 10^7 \text{ (N)}$$

ここで、

$1.5f_c$: 許容圧縮応力 (MPa)

A : 架台の胴受け部の断面積 = 37930 (mm²)

次に、許容圧縮応力について検討する。

胴受け部の有効細長比 λ は、次式により与えられる。

$$\lambda = \frac{l_k}{i}$$

ここで、

l_k : 座屈長さ (一端支持他端固定) (mm)

$$l_k = 0.8 \times l = 342 \text{ (mm)}$$

l : 胴受け部の高さ = 428 (mm) (添付 1 - 2 図参照)

i : 座屈軸についての断面二次半径 (mm)

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} = 64.2 \text{ (mm)}$$

I : 断面二次モーメント = 1.57×10^8 (mm⁴)

したがって、 $\lambda = 5.33$ と算出される。

また、胴受け部の限界細長比 Λ は、次式により与えられる。

$$\Lambda = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{0.6F}}$$

ここで、

E : 胴受け部の縦弾性係数 = 2.03×10^5 (MPa)

F : 設計降伏点の 1.2 倍または

設計引張強さの 0.7 倍の値のいずれか小さい方の値

$$= 343 \text{ (MPa)}$$

したがって、 $\Lambda = 98.7$ と算出される。

胴受け部の有効細長比 λ は、限界細長比 Λ より小さいので、許容圧縮応力 $1.5f_c$ は、以下の式で求められる。

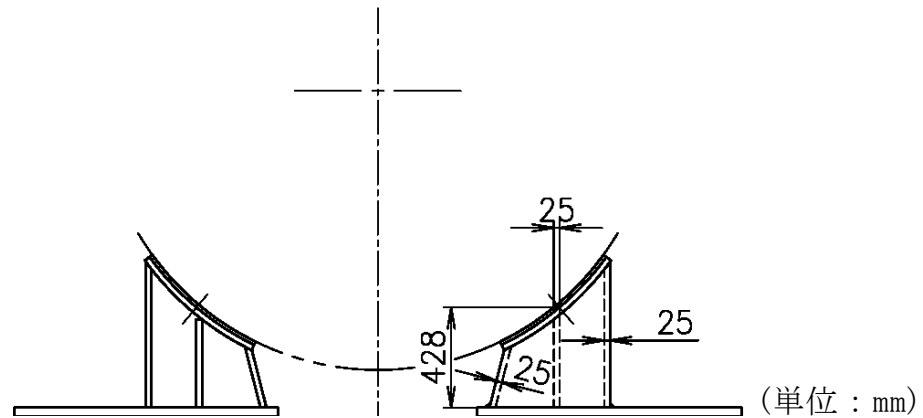
$$1.5f_c = 1.5 \times \left\{ 1 - 0.4 \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 \right\} \frac{F}{\nu}$$

ここで、

$$\nu : \nu = 1.5 + \frac{2}{3} \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 = 1.50$$

したがって、 $1.5f_c = 342$ (MPa) と算出される。

以上より、胴受け部一箇所あたりの反力 F_u は 1.30×10^7 (N) となる。



添付 1 - 2 図 架台胴受け部の形状図
(BWR用中型キャスク (タイプ 2))

また、下部トラニオンを回転中心とした転倒事象では、金属キャスク上端部（蓋部）に生じる衝撃加速度 α (G) が最大となり、以下のモーメントの釣り合い式より算出され BWR 用大型キャスク (タイプ 2 A) では約 43G, BWR 用中型キャスク (タイプ 2) では約 68G, PWR 用キャスクでは約 65G となる。

$$\frac{2}{3} \cdot L_2 \cdot \left(\frac{\alpha \cdot m \cdot L_2}{2} \right) + \frac{2}{3} \cdot L_1 \cdot \left(\frac{L_1}{L_2} \cdot \frac{\alpha \cdot m \cdot L_1}{2} \right) = 2 \cdot F \cdot L_3$$

α : キャスク上端の加速度 [m/s²]

m : 単位長さあたりのキャスク質量 (軸方向質量均一を仮定)

[] kg/mm] (BWR用大型キャスク (タイプ 2 A))

[] kg/mm] (BWR用中型キャスク (タイプ 2))

[] kg/mm] (PWR用キャスク)

L_1 : キャスク底面から下部トラニオンまでの長さ

[] mm] (BWR用大型キャスク (タイプ 2 A))

[] mm] (BWR用中型キャスク (タイプ 2))

[] mm] (PWR用キャスク)

L_2 : キャスク上面から下部トラニオンまでの長さ

[] mm] (BWR用大型キャスク (タイプ 2 A))

[] mm] (BWR用中型キャスク (タイプ 2))

[] mm] (PWR用キャスク (タイプ1))

L₃ : トラニオン間距離

[] mm] (BWR用大型キャスク (タイプ2A))

[] mm] (BWR用中型キャスク (タイプ2))

[] mm] (PWR用キャスク)

(BWR用大型キャスク (タイプ2A) では、胴受け部から下部トラニオンまでの距離)

2. 衝撃吸収材への転倒（輸送用緩衝体無）

衝撃吸収材との衝突により金属キャスクに作用する衝撃加速度 α (G)は、金属キャスクの転倒エネルギーが衝撃吸収材の変形によって全て吸収されるものとして以下の式により算出されBWR用大型キャスク（タイプ2A）では約29G、BWR用中型キャスク（タイプ2）では約28G、PWR用キャスク（タイプ1）では約26Gとなる。

$$\alpha = \frac{\sigma \cdot A}{m \cdot g}$$

σ : 木材圧力潰応力 (3MPa)

A : 貫入面積

(3.1m²) (BWR用大型キャスク (タイプ2A))

(3.53m²) (BWR用中型キャスク (タイプ2))

(3.41m²) (PWR用キャスク (タイプ1))

m : 金属キャスクの等価質量

(3.3×10⁴kg) (BWR用大型キャスク (タイプ2A))

(3.90×10⁴kg) (BWR用中型キャスク (タイプ2))

(4.03×10⁴kg) (PWR用キャスク (タイプ1))

g : 重力加速度

なお、上記評価は剛体の転倒エネルギーを一質点系の運動エネルギーに置き換えたものであり、貫入面積Aは衝撃吸収材貫入時の幾何学的形状から放物線の面積として算出した値である。

本事象は加速度の比較において特別の試験条件よりも低い値となるが、衝撃吸収材との衝突により金属キャスクの閉じ込め境界部近傍に直接外力が作用する事象であり、閉じ込め機能維持の観点からABAQUSコードを用いた構造解析を行うこととし、評価条件とする衝撃加速度に余裕をみて40Gの値を用いた。添付1-1表の評価結果に示すとおり、発生応力は設計基準値以下であることを確認した。

添付 1 - 1 表 (1 / 3) 衝撃吸収材への転倒衝突時の評価結果

(BWR用大型キャスク (タイプ 2 A))

	項 目	評価結果	設計基準	備 考
評価条件	金属キャスクに生じる加速度	約 29G	—	構造解析では余裕をみて 40G を設定。
構造強度	一次蓋閉じ込め境界部の応力強さ	約 80 MPa	186 MPa 以下	発生応力は設計降伏点以下であり，閉じ込め境界部は健全性を維持する。
	一次蓋締付ボルトの応力	約 430 MPa	848 MPa 以下	

添付 1 - 1 表 (2 / 3) 衝撃吸収材への転倒衝突時の評価結果

(BWR用中型キャスク (タイプ 2))

	項 目	評価結果	設計基準	備 考
評価条件	金属キャスクに生じる加速度	約 28G	—	構造解析では余裕をみて 40G を設定。
構造強度	一次蓋閉じ込め境界部の応力強さ	41 MPa	184 MPa 以下	発生応力は設計降伏点以下であり，閉じ込め境界部は健全性を維持する。
	一次蓋締付ボルトの応力	524 MPa	848 MPa 以下	

添付 1 - 1 表 (3 / 3) 衝撃吸収材への転倒衝突時の評価結果

(PWR用キャスク (タイプ1))

	項 目	評価結果	設計基準	備 考
評価条件	金属キャスクに生じる加速度	約 26G	—	構造解析では余裕をみて 40G を設定。
構造強度	一次蓋閉じ込め境界部の応力強さ	53 MPa	185 MPa 以下	発生応力は設計降伏点以下であり，閉じ込め境界部は健全性を維持する。
	一次蓋締付ボルトの応力	723 MPa	846 MPa 以下	

第 15 条 金属キャスク（使用済燃料集合体）

<目 次>

1. 設計方針
2. 使用済燃料集合体の健全性確保のための考慮について

(別 添)

- 別添 1 使用済燃料集合体の健全性確認について
- 別添 2 真空乾燥及び湿分管理について
- 別添 3 使用済燃料集合体の経年変化に対する措置について
- 別添 4 燃料被覆管制限温度の設定について

1. 設計方針

使用済燃料貯蔵施設で貯蔵する使用済燃料集合体は、金属キャスクに収納された状態で施設に搬入し、別の容器に詰め替えることなく貯蔵する。

金属キャスクは、使用済燃料集合体を貯蔵する機能を有するとともに、使用済燃料集合体の事業所外運搬に用いる輸送容器としての機能を併せもつ鋼製の乾式容器であり、その設計においては、設計貯蔵期間（50年間）に加えて事業所外運搬に係る期間等を考慮した十分な余裕を有する60年間の経年変化を考慮する。

基本的安全機能を維持する上で重要な金属キャスクの構成部材は、設計貯蔵期間（50年間）に加えて事業所外運搬に係る期間等を考慮した十分な余裕を有する60年間における温度、放射線等の環境及びその環境下での腐食、クリープ、応力腐食割れ等の経年変化に対して十分な信頼性のある材料を選定し、その必要とされる強度、性能を維持し、必要な安全機能を失うことのない設計とする。

金属キャスク本体内面、バスケット及び使用済燃料集合体の腐食、クリープ、応力腐食割れ等を防止するために、使用済燃料集合体を不活性ガスであるヘリウムとともに封入して貯蔵する設計とする。また、金属キャスク表面の必要な箇所には、塗装又はメッキによる防錆措置を講ずる。

2. 使用済燃料集合体の健全性確保のための考慮について

使用済燃料貯蔵施設において貯蔵する使用済燃料集合体は、東京電力株式会社及び日本原子力発電株式会社の原子炉施設において、既に許可を得ている燃焼範囲の二酸化ウラン燃料である。

設計貯蔵期間（50年間）に加えて事業所外運搬に係る期間等を考慮した十分な余裕を有する60年間を通じて、使用済燃料集合体の健全性を維持する観点から、以下の事項を考慮する。

(1) 使用済燃料集合体の収納条件

使用済燃料集合体の金属キャスクへの収納作業は、原子炉設置者が実施することから、原子炉設置者に対し、以下の収納条件を満足した作業の実施、作業記録の作成、収納配置の確認を求め、収納条件を満足していることを確認する。

- a. 金属キャスクには、原子炉での運転中のデータ、外観検査及び必要に応じ SHIPPING 検査等により健全であることを確認した使用済燃料集合体を収納する。（別添1参照）
- b. 金属キャスクは、使用済燃料集合体収納時にその内部を真空乾燥し、不活性であるヘリウムガスを適切に封入する。その際、燃料被覆管の制限温度及び周方向応力を上回らないよう金属キャスク内部の圧力、真空乾燥時間を管理するとともに真空乾燥時のクリプトンガスのモニタリングにより燃料被覆管から漏えいのないことを確認する。また、使用済燃料集合体の腐食等を防止するため、真空乾燥後の金属キャスク内部の水分は、内部ガスの質量に対して10%以下に管理する。（別添2参照）
- c. 金属キャスクには基本的安全機能及び使用済燃料集合体の健全性を維持する観点から貯蔵する燃料仕様、崩壊熱量等を満足するように、使用済燃料集合体を収納するとともに、使用済燃料集合体の種類、燃焼度に応じた配置とする。金属キャスクへの使用済燃料集合体の収納条件を第1表に示す。

(2) 経年変化要因の考慮（別添 3，別添 4 参照）

金属キャスクの設計においては、燃料被覆管の経年変化要因に対して以下の通り考慮する。

- a. 燃料被覆管のクリープについては、燃料被覆管の温度を設計評価期間における累積クリープ歪み量が 1 % を超えない温度以下とする。
- b. 燃料被覆管の水素化物再配向については、燃料被覆管の温度を水素化物再配向による機械的特性への影響がない温度以下とする。
- c. 燃料被覆管の照射硬化の回復については、燃料被覆管の温度を照射硬化の回復現象により燃料被覆管の機械的特性が著しく低下しない温度以下とする。

上記の経年変化要因を考慮し、燃料被覆管の制限温度を以下のとおりとする。

[BWR 燃料集合体]

- ・ 新型 8 × 8 燃料 200℃
- ・ 新型 8 × 8 ジルコニウムライナ燃料，高燃焼度 8 × 8 燃料 300℃

なお、上記の燃料被覆管の制限温度において、BWR 燃料被覆管の周方向応力は、水素化物再配向の制限値 70MPa 以下になる。

[PWR 燃料集合体]

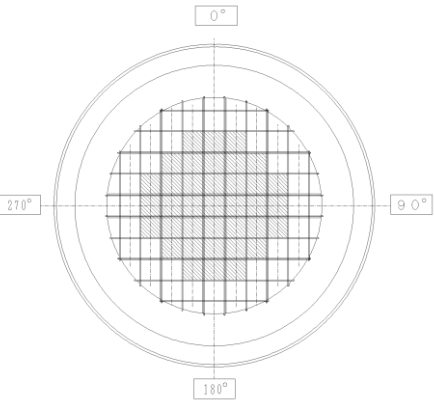
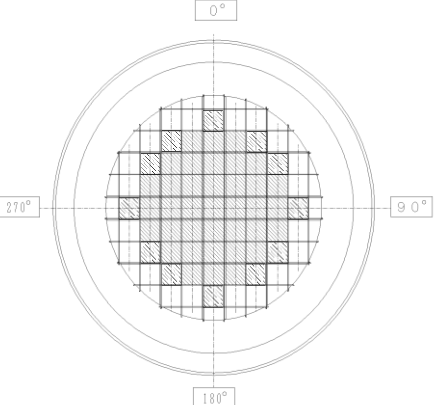
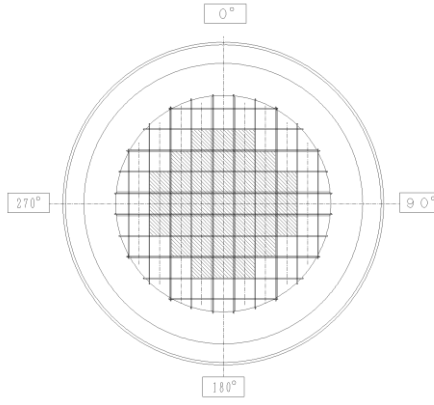
- ・ 17 × 17 燃料（39,000MWd/t 型），17 × 17 燃料（48,000MWd/t 型）
275℃

その他燃料被覆管の応力腐食割れについては、貯蔵中の使用済燃料集合体においては、ペレットの温度上昇による腐食性核分裂生成ガスの放出はなく、ペレット内ではヨウ素は CsI として安定に存在することから、SCC が発生する化学的雰囲気になっていない⁽¹⁾。また、応力については、腐食性雰囲気が整った条件での SCC 試験の結果として、ジルカロイ-2（BWR 燃料被覆管で使用される材質）、ジルカロイ-4（PWR 燃料被覆管で使用される材質）の SCC 発生のしきい応力がそれぞれ、150MPa，200MPa 程度であることが報告されており⁽¹⁾、貯蔵時の応力はこれに比べ低い。酸化及び水素

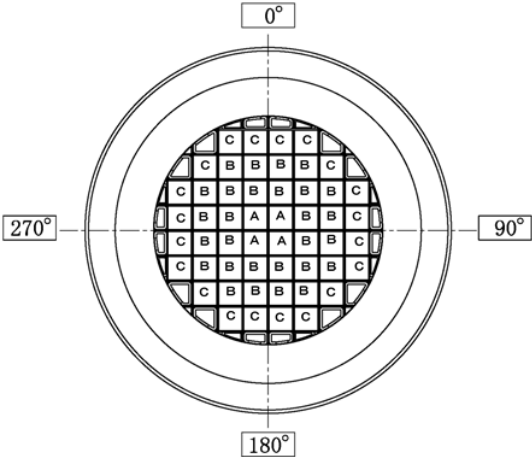
吸収については、金属キャスクの内部が不活性ガス雰囲気維持されるので、その量はわずかであり、使用済燃料集合体の健全性は確保される。

また、設計貯蔵期間（50年間）に加えて事業所外運搬に係る期間等を考慮した十分な余裕を有する60年間の中性子照射量（高速中性子を含む全エネルギー領域の中性子照射量 $\sim 10^{16}$ n/cm²程度）は原子炉内での照射量（約1 MeV以上の高速中性子照射量 $\sim 10^{22}$ n/cm²程度）と比べ十分低いため、設計上の特別な考慮は必要ない。（BWR用大型キャスク（タイプ2A）、BWR用中型キャスク（タイプ2）及びPWR用キャスク（タイプ1）の中性子照射量は第2表参照。）

第1表 (1/3) 使用済燃料集合体の収納条件

キャスクタイプ	BWR用大型キャスク (タイプ2A)		
収納する使用済燃料集合体	①新型8×8ジルコニウムライナ燃料 ②高燃焼度8×8燃料 ③新型8×8燃料		
収納配置	①のみ収納, ②のみ収納, ①及び②を収納	①及び③を収納	③のみ収納
	 <p data-bbox="517 1018 920 1082">■ : 平均燃焼度を超える使用済燃料集合体の収納範囲</p>	 <p data-bbox="1032 1018 1458 1066">■ : 新型8×8燃料を収納しない範囲</p>	 <p data-bbox="1592 1018 1995 1082">■ : 平均燃焼度を超える使用済燃料集合体の収納範囲</p>
収納物平均燃焼度	34,000MWd/t	34,000MWd/t	26,000MWd/t
収納物最高燃焼度	40,000MWd/t	34,000MWd/t	28,500MWd/t
冷却期間	18年以上	24年以上	24年以上
最大崩壊熱量 (キャスク1基あたり)	12.1kW	10.9kW	8.0kW

第1表 (2/3) 使用済燃料集合体の収納条件

キャスクタイプ	BWR用中型キャスク (タイプ2)			
収納する使用済燃料集合体	新型8×8燃料	新型8×8ジルコニウムライナ燃料	高燃焼度8×8燃料	新型8×8ジルコニウムライナ燃料及び高燃焼度8×8燃料
収納配置	 <p>A : 燃焼度がCに収納する使用済燃料集合体の燃焼度以下となる使用済燃料集合体の収納位置 B : 最高燃焼度以下の使用済燃料集合体の収納位置 C : 平均燃焼度以下の使用済燃料集合体の収納位置</p>			
収納物平均燃焼度	34,000Mwd/t	38,000Mwd/t	43,000Mwd/t	① : 38,000Mwd/t (注1) ② : 43,000Mwd/t (注1)
収納物最高燃焼度	40,000Mwd/t	40,000Mwd/t	50,000Mwd/t	① : 40,000Mwd/t (注1) ② : 50,000Mwd/t (注1)
冷却期間	22年以上	12年以上	12年以上 (注2)	12年以上 (注2)
最大崩壊熱量 (キャスク1基あたり)	8.6kW	13.7kW		

(注1) ①は新型8×8ジルコニウムライナ燃料の燃焼度である。一方、②は高燃焼度8×8燃料の燃焼度である。

(注2) ピーキングファクターの差異により、13年の場合がある。

第1表 (3/3) 使用済燃料集合体の収納条件

キャスクタイプ	PWR用キャスク (タイプ1)			
収納する使用済燃料集合体	17×17 燃料 48,000Mwd/t 型		17×17 燃料 39,000Mwd/t 型	
	A型	B型	A型	B型
収納配置	<p>①：最高燃焼度の使用済燃料集合体の収納位置(バーナブルポイズン集合体の挿入を考慮) ②：平均燃焼度の使用済燃料集合体の収納位置</p>			
収納物平均燃焼度	44,000Mwd/t		—	
収納物最高燃焼度	48,000Mwd/t		39,000Mwd/t	
冷却期間	A型：15年以上	B型：20年以上	A型：15年以上	B型：20年以上
最大崩壊熱量 (キャスク1基あたり)	13.9kW			

第2表 (1/6) 全中性子照射量
(BWR用大型キャスク (タイプ2A))

エネルギー群	上限エネルギー (eV)	中性子照射量 (n/cm ²)
1	1.492×10^7	1.02×10^{11}
2	1.220×10^7	3.56×10^{11}
3	1.000×10^7	1.09×10^{12}
4	8.180×10^6	3.71×10^{12}
5	6.360×10^6	8.12×10^{12}
6	4.960×10^6	1.05×10^{13}
7	4.060×10^6	2.31×10^{13}
8	3.010×10^6	2.45×10^{13}
9	2.460×10^6	7.64×10^{12}
10	2.350×10^6	3.52×10^{13}
11	1.830×10^6	9.12×10^{13}
12	1.110×10^6	2.95×10^{14}
13	5.500×10^5	8.74×10^{14}
14	1.110×10^5	6.04×10^{14}
15	3.350×10^3	6.28×10^{13}
16	5.830×10^2	4.44×10^{12}
17	1.010×10^2	2.45×10^{11}
18	2.900×10^1	5.98×10^9
19	1.070×10^1	2.67×10^8
20	3.060×10^0	1.14×10^8
21	1.120×10^0	2.09×10^7
22	4.140×10^{-1}	5.37×10^5
合計		2.05×10^{15}

・炉内での照射量 ($\sim 10^{22}$ n/cm²程度) は、約 1 MeV 以上の高速中性子の照射量を示すものである。

第2表 (2/6) 全中性子照射量

(BWR用中型キャスク (タイプ2) / PWR用キャスク (タイプ1) (1/5))

Gr.	上限エネルギー (eV)	中性子照射量 (n/cm ²)	
		BWR用中型キャスク (タイプ2)	PWR用キャスク (タイプ1)
1	1.964×10 ⁷	3.23×10 ⁻⁶	1.23×10 ⁻⁶
2	1.733×10 ⁷	2.02×10 ⁹	7.61×10 ⁸
3	1.691×10 ⁷	2.24×10 ⁹	8.51×10 ⁸
4	1.649×10 ⁷	7.52×10 ⁹	2.84×10 ⁹
5	1.568×10 ⁷	1.10×10 ¹⁰	4.16×10 ⁹
6	1.492×10 ⁷	9.26×10 ⁹	3.49×10 ⁹
7	1.455×10 ⁷	1.11×10 ¹⁰	4.22×10 ⁹
8	1.419×10 ⁷	1.39×10 ¹⁰	5.24×10 ⁹
9	1.384×10 ⁷	1.71×10 ¹⁰	6.48×10 ⁹
10	1.350×10 ⁷	4.83×10 ¹⁰	1.84×10 ¹⁰
11	1.284×10 ⁷	3.26×10 ¹⁰	1.25×10 ¹⁰
12	1.252×10 ⁷	3.19×10 ¹⁰	1.22×10 ¹⁰
13	1.221×10 ⁷	9.26×10 ¹⁰	3.55×10 ¹⁰
14	1.162×10 ⁷	1.30×10 ¹¹	5.00×10 ¹⁰
15	1.105×10 ⁷	1.87×10 ¹¹	7.20×10 ¹⁰
16	1.051×10 ⁷	2.45×10 ¹¹	9.44×10 ¹⁰
17	1.000×10 ⁷	3.25×10 ¹¹	1.25×10 ¹¹
18	9.512×10 ⁶	4.33×10 ¹¹	1.67×10 ¹¹
19	9.048×10 ⁶	5.58×10 ¹¹	2.15×10 ¹¹
20	8.607×10 ⁶	7.11×10 ¹¹	2.75×10 ¹¹
21	8.187×10 ⁶	8.88×10 ¹¹	3.43×10 ¹¹
22	7.788×10 ⁶	1.08×10 ¹²	4.16×10 ¹¹
23	7.408×10 ⁶	1.31×10 ¹²	5.07×10 ¹¹
24	7.047×10 ⁶	1.62×10 ¹²	6.19×10 ¹¹
25	6.703×10 ⁶	6.09×10 ¹¹	2.35×10 ¹¹
26	6.592×10 ⁶	1.34×10 ¹²	5.10×10 ¹¹
27	6.376×10 ⁶	2.34×10 ¹²	9.02×10 ¹¹
28	6.065×10 ⁶	2.69×10 ¹²	1.04×10 ¹²
29	5.770×10 ⁶	3.07×10 ¹²	1.20×10 ¹²
30	5.488×10 ⁶	3.61×10 ¹²	1.41×10 ¹²
31	5.221×10 ⁶	3.82×10 ¹²	1.48×10 ¹²
32	4.966×10 ⁶	4.28×10 ¹²	1.69×10 ¹²
33	4.724×10 ⁶	4.69×10 ¹²	1.87×10 ¹²
34	4.493×10 ⁶	1.10×10 ¹³	4.38×10 ¹²
35	4.066×10 ⁶	1.17×10 ¹³	4.65×10 ¹²

第2表 (3/6) 全中性子照射量

(BWR用中型キャスク (タイプ2) / PWR用キャスク (タイプ1) (2/5))

Gr.	上限エネルギー (eV)	中性子照射量 (n/cm ²)	
		BWR用中型キャスク (タイプ2)	PWR用キャスク (タイプ1)
36	3.679×10 ⁶	1.34×10 ¹³	5.33×10 ¹²
37	3.329×10 ⁶	7.95×10 ¹²	3.21×10 ¹²
38	3.166×10 ⁶	9.40×10 ¹²	3.79×10 ¹²
39	3.012×10 ⁶	1.01×10 ¹³	3.92×10 ¹²
40	2.865×10 ⁶	1.07×10 ¹³	4.21×10 ¹²
41	2.725×10 ⁶	1.19×10 ¹³	4.61×10 ¹²
42	2.592×10 ⁶	1.20×10 ¹³	4.54×10 ¹²
43	2.466×10 ⁶	8.92×10 ¹²	3.75×10 ¹²
44	2.385×10 ⁶	2.59×10 ¹²	1.03×10 ¹²
45	2.365×10 ⁶	2.56×10 ¹²	9.57×10 ¹¹
46	2.346×10 ⁶	4.83×10 ¹²	1.90×10 ¹²
47	2.307×10 ⁶	9.69×10 ¹²	3.59×10 ¹²
48	2.231×10 ⁶	1.35×10 ¹³	5.22×10 ¹²
49	2.123×10 ⁶	1.28×10 ¹³	5.09×10 ¹²
50	2.019×10 ⁶	1.28×10 ¹³	4.98×10 ¹²
51	1.921×10 ⁶	1.31×10 ¹³	5.10×10 ¹²
52	1.827×10 ⁶	1.59×10 ¹³	5.73×10 ¹²
53	1.738×10 ⁶	1.63×10 ¹³	5.80×10 ¹²
54	1.653×10 ⁶	1.62×10 ¹³	5.92×10 ¹²
55	1.572×10 ⁶	1.70×10 ¹³	6.07×10 ¹²
56	1.496×10 ⁶	1.83×10 ¹³	6.56×10 ¹²
57	1.423×10 ⁶	1.95×10 ¹³	6.93×10 ¹²
58	1.353×10 ⁶	1.65×10 ¹³	6.18×10 ¹²
59	1.287×10 ⁶	1.95×10 ¹³	7.07×10 ¹²
60	1.225×10 ⁶	2.20×10 ¹³	6.99×10 ¹²
61	1.165×10 ⁶	2.09×10 ¹³	7.06×10 ¹²
62	1.108×10 ⁶	3.44×10 ¹³	1.34×10 ¹³
63	1.003×10 ⁶	1.33×10 ¹³	5.15×10 ¹²
64	9.616×10 ⁵	2.46×10 ¹³	8.58×10 ¹²
65	9.072×10 ⁵	2.32×10 ¹³	7.98×10 ¹²
66	8.629×10 ⁵	2.93×10 ¹³	9.08×10 ¹²
67	8.209×10 ⁵	3.19×10 ¹³	9.87×10 ¹²
68	7.808×10 ⁵	3.63×10 ¹³	1.25×10 ¹³
69	7.427×10 ⁵	4.17×10 ¹³	1.36×10 ¹³
70	7.065×10 ⁵	4.29×10 ¹³	1.44×10 ¹³

第2表 (4/6) 全中性子照射量

(BWR用中型キャスク (タイプ2) / PWR用キャスク (タイプ1) (3/5))

Gr.	上限エネルギー (eV)	中性子照射量 (n/cm ²)	
		BWR用中型キャスク (タイプ2)	PWR用キャスク (タイプ1)
71	6.721×10 ⁵	4.70×10 ¹³	1.24×10 ¹³
72	6.393×10 ⁵	4.87×10 ¹³	1.44×10 ¹³
73	6.081×10 ⁵	4.76×10 ¹³	1.51×10 ¹³
74	5.784×10 ⁵	4.70×10 ¹³	1.42×10 ¹³
75	5.502×10 ⁵	4.79×10 ¹³	1.37×10 ¹³
76	5.234×10 ⁵	4.67×10 ¹³	1.54×10 ¹³
77	4.979×10 ⁵	7.60×10 ¹³	2.40×10 ¹³
78	4.505×10 ⁵	5.20×10 ¹³	1.73×10 ¹³
79	4.076×10 ⁵	2.88×10 ¹³	1.08×10 ¹³
80	3.877×10 ⁵	3.56×10 ¹³	1.08×10 ¹³
81	3.688×10 ⁵	8.50×10 ¹³	2.69×10 ¹³
82	3.337×10 ⁵	9.50×10 ¹³	2.65×10 ¹³
83	3.020×10 ⁵	1.17×10 ¹³	3.00×10 ¹²
84	2.985×10 ⁵	4.32×10 ¹²	1.13×10 ¹²
85	2.972×10 ⁵	8.57×10 ¹²	2.32×10 ¹²
86	2.945×10 ⁵	2.12×10 ¹³	6.15×10 ¹²
87	2.873×10 ⁵	4.13×10 ¹³	1.38×10 ¹³
88	2.732×10 ⁵	1.03×10 ¹⁴	3.55×10 ¹³
89	2.472×10 ⁵	4.97×10 ¹³	1.50×10 ¹³
90	2.352×10 ⁵	4.40×10 ¹³	1.37×10 ¹³
91	2.237×10 ⁵	4.73×10 ¹³	1.22×10 ¹³
92	2.128×10 ⁵	4.27×10 ¹³	1.06×10 ¹³
93	2.024×10 ⁵	3.98×10 ¹³	1.44×10 ¹³
94	1.926×10 ⁵	4.68×10 ¹³	1.57×10 ¹³
95	1.832×10 ⁵	5.59×10 ¹³	1.39×10 ¹³
96	1.742×10 ⁵	4.28×10 ¹³	1.13×10 ¹³
97	1.657×10 ⁵	4.25×10 ¹³	7.74×10 ¹²
98	1.576×10 ⁵	3.66×10 ¹³	7.77×10 ¹²
99	1.500×10 ⁵	3.34×10 ¹³	8.15×10 ¹²
100	1.426×10 ⁵	4.90×10 ¹³	1.21×10 ¹³
101	1.357×10 ⁵	4.89×10 ¹³	1.97×10 ¹³
102	1.291×10 ⁵	5.73×10 ¹³	2.09×10 ¹³
103	1.228×10 ⁵	4.61×10 ¹³	1.18×10 ¹³
104	1.168×10 ⁵	4.45×10 ¹³	1.49×10 ¹³
105	1.111×10 ⁵	1.06×10 ¹⁴	3.33×10 ¹³

第2表 (5/6) 全中性子照射量

(BWR用中型キャスク (タイプ2) / PWR用キャスク (タイプ1) (4/5))

Gr.	上限エネルギー (eV)	中性子照射量 (n/cm ²)	
		BWR用中型キャスク (タイプ2)	PWR用キャスク (タイプ1)
106	9.804×10 ⁴	7.96×10 ¹³	1.81×10 ¹³
107	8.652×10 ⁴	2.41×10 ¹³	7.64×10 ¹²
108	8.250×10 ⁴	3.98×10 ¹³	9.21×10 ¹²
109	7.950×10 ⁴	7.39×10 ¹³	3.29×10 ¹³
110	7.200×10 ⁴	6.78×10 ¹³	2.33×10 ¹³
111	6.738×10 ⁴	1.37×10 ¹⁴	5.43×10 ¹³
112	5.656×10 ⁴	5.04×10 ¹³	2.12×10 ¹³
113	5.248×10 ⁴	8.60×10 ¹³	3.11×10 ¹³
114	4.631×10 ⁴	6.93×10 ¹³	2.42×10 ¹³
115	4.087×10 ⁴	7.54×10 ¹³	1.73×10 ¹³
116	3.431×10 ⁴	3.25×10 ¹³	1.13×10 ¹³
117	3.183×10 ⁴	3.37×10 ¹³	3.45×10 ¹³
118	2.850×10 ⁴	9.24×10 ¹²	1.55×10 ¹³
119	2.700×10 ⁴	2.44×10 ¹³	9.77×10 ¹²
120	2.606×10 ⁴	5.27×10 ¹³	1.33×10 ¹³
121	2.479×10 ⁴	2.03×10 ¹³	6.12×10 ¹²
122	2.418×10 ⁴	1.68×10 ¹³	6.01×10 ¹²
123	2.358×10 ⁴	4.38×10 ¹³	1.81×10 ¹³
124	2.188×10 ⁴	6.60×10 ¹³	2.54×10 ¹³
125	1.931×10 ⁴	1.15×10 ¹⁴	4.24×10 ¹³
126	1.503×10 ⁴	9.40×10 ¹³	3.68×10 ¹³
127	1.171×10 ⁴	3.32×10 ¹³	1.35×10 ¹³
128	1.060×10 ⁴	4.10×10 ¹³	1.76×10 ¹³
129	9.119×10 ³	4.62×10 ¹³	2.29×10 ¹³
130	7.102×10 ³	5.40×10 ¹³	1.66×10 ¹³
131	5.531×10 ³	4.73×10 ¹³	1.49×10 ¹³
132	4.307×10 ³	2.32×10 ¹³	7.54×10 ¹²
133	3.707×10 ³	1.52×10 ¹³	4.59×10 ¹²
134	3.355×10 ³	1.33×10 ¹³	4.03×10 ¹²
135	3.035×10 ³	1.11×10 ¹³	3.36×10 ¹²
136	2.747×10 ³	4.43×10 ¹²	1.31×10 ¹²
137	2.613×10 ³	5.99×10 ¹²	1.90×10 ¹²
138	2.485×10 ³	9.79×10 ¹²	2.88×10 ¹²
139	2.249×10 ³	8.84×10 ¹²	2.60×10 ¹²
140	2.035×10 ³	1.73×10 ¹³	5.07×10 ¹²

第2表 (6/6) 全中性子照射量

(BWR用中型キャスク (タイプ2) / PWR用キャスク (タイプ1) (5/5))

Gr.	上限エネルギー (eV)	中性子照射量 (n/cm ²)	
		BWR用中型キャスク (タイプ2)	PWR用キャスク (タイプ1)
141	1.585×10 ³	1.34×10 ¹³	3.82×10 ¹²
142	1.234×10 ³	9.24×10 ¹²	2.70×10 ¹²
143	9.611×10 ²	6.85×10 ¹²	1.94×10 ¹²
144	7.485×10 ²	4.86×10 ¹²	1.32×10 ¹²
145	5.830×10 ²	3.43×10 ¹²	8.98×10 ¹¹
146	4.540×10 ²	2.42×10 ¹²	6.11×10 ¹¹
147	3.536×10 ²	1.59×10 ¹²	3.86×10 ¹¹
148	2.754×10 ²	1.04×10 ¹²	2.39×10 ¹¹
149	2.145×10 ²	6.73×10 ¹¹	1.51×10 ¹¹
150	1.670×10 ²	4.31×10 ¹¹	9.31×10 ¹⁰
151	1.301×10 ²	2.32×10 ¹¹	4.85×10 ¹⁰
152	1.013×10 ²	1.43×10 ¹¹	3.02×10 ¹⁰
153	7.889×10 ¹	7.72×10 ¹⁰	1.65×10 ¹⁰
154	6.144×10 ¹	4.39×10 ¹⁰	9.35×10 ⁹
155	4.785×10 ¹	2.24×10 ¹⁰	4.71×10 ⁹
156	3.727×10 ¹	9.89×10 ⁹	2.26×10 ⁹
157	2.902×10 ¹	5.12×10 ⁹	1.32×10 ⁹
158	2.260×10 ¹	1.46×10 ⁹	3.79×10 ⁸
159	1.760×10 ¹	7.72×10 ⁸	3.52×10 ⁸
160	1.371×10 ¹	3.64×10 ⁸	2.20×10 ⁸
161	1.068×10 ¹	1.56×10 ⁸	1.05×10 ⁸
162	8.315×10 ⁰	2.98×10 ⁷	1.97×10 ⁷
163	6.476×10 ⁰	9.43×10 ⁶	6.94×10 ⁶
164	5.044×10 ⁰	5.07×10 ⁶	9.77×10 ⁶
165	3.928×10 ⁰	2.72×10 ⁶	6.74×10 ⁶
166	3.059×10 ⁰	1.55×10 ⁶	4.46×10 ⁶
167	2.382×10 ⁰	8.06×10 ⁵	2.12×10 ⁶
168	1.855×10 ⁰	3.94×10 ⁵	8.86×10 ⁵
169	1.445×10 ⁰	1.68×10 ⁵	2.72×10 ⁵
170	1.125×10 ⁰	7.25×10 ⁴	7.27×10 ⁴
171	8.764×10 ⁻¹	3.52×10 ⁴	2.09×10 ⁴
172	6.826×10 ⁻¹	1.83×10 ⁴	6.53×10 ³
173	5.316×10 ⁻¹	1.04×10 ⁴	2.59×10 ³
174	4.140×10 ⁻¹	9.73×10 ³	2.01×10 ³
175	1.000×10 ⁻¹	1.04×10 ³	1.43×10 ²
合計		3.94×10 ¹⁵	1.34×10 ¹⁵

参考文献

- (1) 総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保全部会 核燃料サイクル安全小委員会 中間貯蔵ワーキンググループ 輸送ワーキンググループ, 「金属製乾式キャスクを用いる使用済燃料中間貯蔵施設における金属製乾式キャスクとその収納物の長期健全性について」, 総合資源エネルギー調査会 (平成 21 年 6 月 25 日)

使用済燃料集合体の健全性確認について

使用済燃料集合体の健全性確認は、以下のとおり行う。

使用済燃料搬出元の原子炉設置者（以下、「原子炉設置者」という）において、燃料集合体 1 体毎に付番された燃料番号により、各種データ（燃料タイプ、燃焼度、冷却期間、崩壊熱量等）を管理しており、定期検査時等の燃料検査の結果についても同様に管理している。

また、原子炉設置者は、原子炉冷却材中のよう素 131 の測定結果により、 SHIPPING 検査を実施した場合の検査結果について、漏えい燃料と健全な燃料を明確に区別してデータ管理している。

原子炉設置者は、収納する使用済燃料集合体の選定の際に、第一に漏えい燃料ではない燃料検査に合格した健全な使用済燃料集合体を抽出し、キャスク仕様（燃料タイプ、燃焼度、冷却期間、崩壊熱量）に合致することを確認する。

なお、原子炉設置者は、金属キャスクへの使用済燃料集合体の収納作業において、金属キャスク内部の真空乾燥時のクリプトンガスのモニタリングにより燃料被覆管からの漏えいのないことを確認する。

従って、使用済燃料集合体の健全性確認については、原子炉設置者対して、収納する使用済燃料集合体の健全性の確認結果及び真空乾燥時のクリプトンガスのモニタリング結果について記録の提出等を求め、確認する。

真空乾燥及び湿分管理について

1. 真空乾燥の温度管理方法について

原子炉設置者は使用済燃料集合体の封入後に、内部水を排水し、金属キャスク内部の真空乾燥を行う。真空乾燥中は金属キャスク内部の熱媒体とする不活性ガス（ヘリウム）がないため燃料被覆管温度が上昇するが、その後の不活性ガスの充填と真空乾燥時間を調整することにより、燃料被覆管温度の上昇を管理することができる。

現時点で想定している真空乾燥手順は、別添 2 - 1 図に示すとおり使用済燃料集合体をキャスクに収納した後、「水入り保管」を経て、「真空乾燥①」において真空乾燥時間及びキャスク内部圧力を監視し、「ヘリウム充填保管」において燃料被覆管温度の上昇を防止する。さらに「真空乾燥②」において再び真空乾燥時間及びキャスク内部圧力を監視し、真空乾燥完了後、一旦キャスク内圧を 1 気圧までヘリウム充填し湿分が管理値（10wt%）以下となっていることを確認した後、所定の圧力になるまで圧力調整（減圧）する。別添 2 - 1 図に示した真空乾燥手順における燃料被覆管温度の評価結果を別添 2 - 2 図に示す。

真空乾燥作業では、原子炉設置者は、以下に示す管理により、燃料被覆管温度の上昇防止を含む適切な管理を実施する。

- ・国内の発電所における乾式貯蔵キャスクの実績や除熱解析による燃料被覆管温度の評価結果等に基づき、真空乾燥手順（真空乾燥時間、サイクル数等）を定め、適切な作業要領を定める。
- ・作業要領に従って適切に作業を行ったことを作業記録に残すとともに、真空乾燥プロセス（真空乾燥時間、圧力）を記録し、規定の真空乾燥時間管理のもとで、真空乾燥が適切に行われたことを確認する。
- ・燃料被覆管の長期健全性を確保するため、「真空乾燥②」後のヘリウム充填状態で湿分が管理値（10wt%以下）であることを確認する。

2. 金属キャスク内部の湿分管理について

(1) 真空乾燥後の金属キャスク内部の水分濃度管理値の根拠

真空乾燥後の金属キャスク内部の水分を内部ガスの質量に対して 10wt%以下とする管理は、設計貯蔵期間（50 年間）に加えて事業所外運搬に係る期間等を考慮した十分な余裕を有する 60 年間を通じた金属キャスク内の構成部材（胴内部、バスケット等）及び使用済燃料集合体の健全性維持の観点から化学的要因による影響を防ぐことを目的としている。

具体的には、軽水炉から発生した燃料被覆管外表面の最大酸化膜厚さと酸化膜に含まれる最大水素濃度の試験結果に基づき、仮に金属キャスク内の不活性ガスに約 10wt%の水分の混入があり、その水分全てが燃料被覆管と反応したとしても燃料被覆管に形成される酸化膜厚さは $1\mu\text{m}$ 以下で、その反応で発生した水素濃度は数 ppm 程度となり、炉内照射中に形成・吸収された酸化膜厚さ・水素量に比べ無視できるほど少ないと評価されていることが根拠となっている。（添付 1 参照）

また、これまでの評価では、国内発電所での実績に基づく真空乾燥工程でのキャスク到達圧力や金属キャスクの内部温度を保守的に設定した真空乾燥不足（水分約 30wt%）を想定した燃料被覆管と構造材の腐食等の評価を行っており、仮に真空乾燥不足があった場合でも、これら部材の健全性に影響を与えることはない。（添付 2 参照）

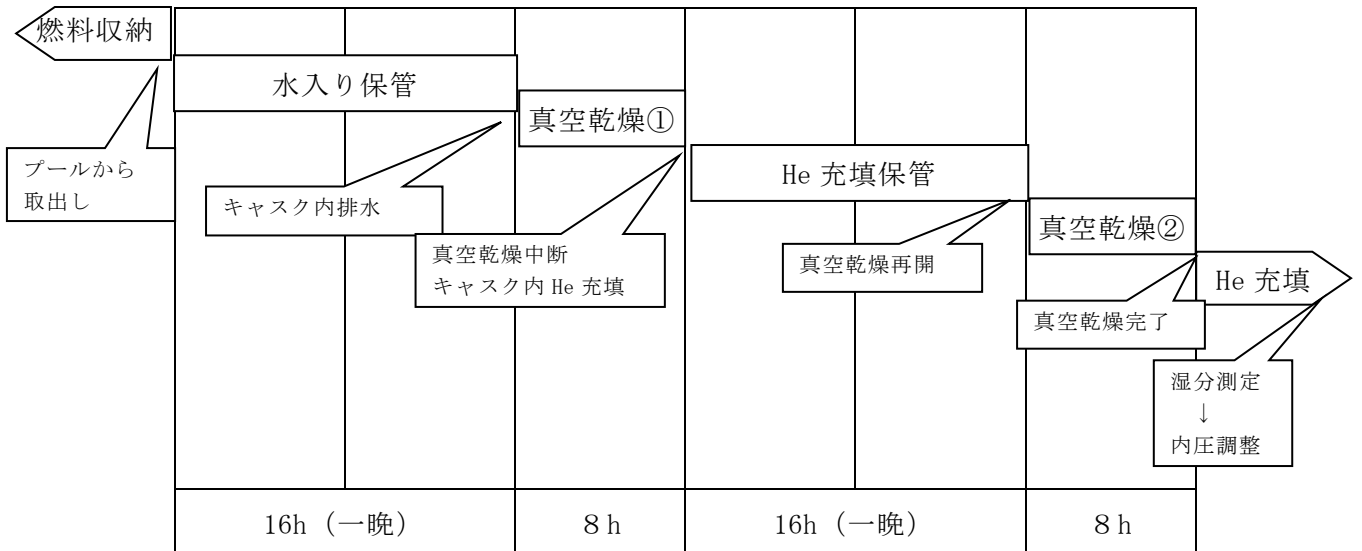
(2) 使用済燃料集合体を封入した金属キャスク内部の水分濃度の具体的な管理方法

先行の原子力発電所では、真空乾燥後の金属キャスク内の到達圧力と圧力上昇率、及び金属キャスク内部の水分濃度（10wt%以下）に対する判定基準を設け、確実な残留水分濃度の管理を行っている。

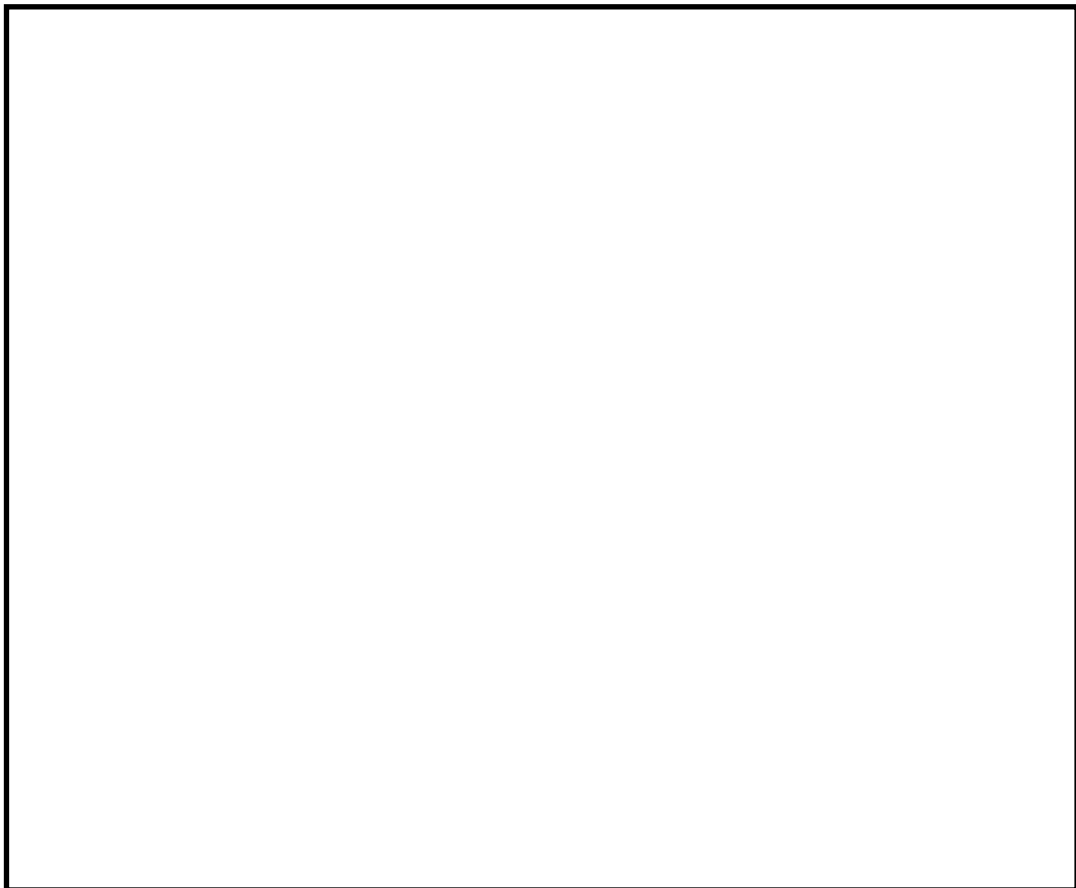
従って、金属キャスクの受入れ前に、発送元の原子力発電所で真空乾燥後の金属キャスク内部の水分濃度が 10wt%以下であることが確認された記録により、使用済燃料貯蔵施設での貯蔵に適合したものであることを確認する。

参考文献

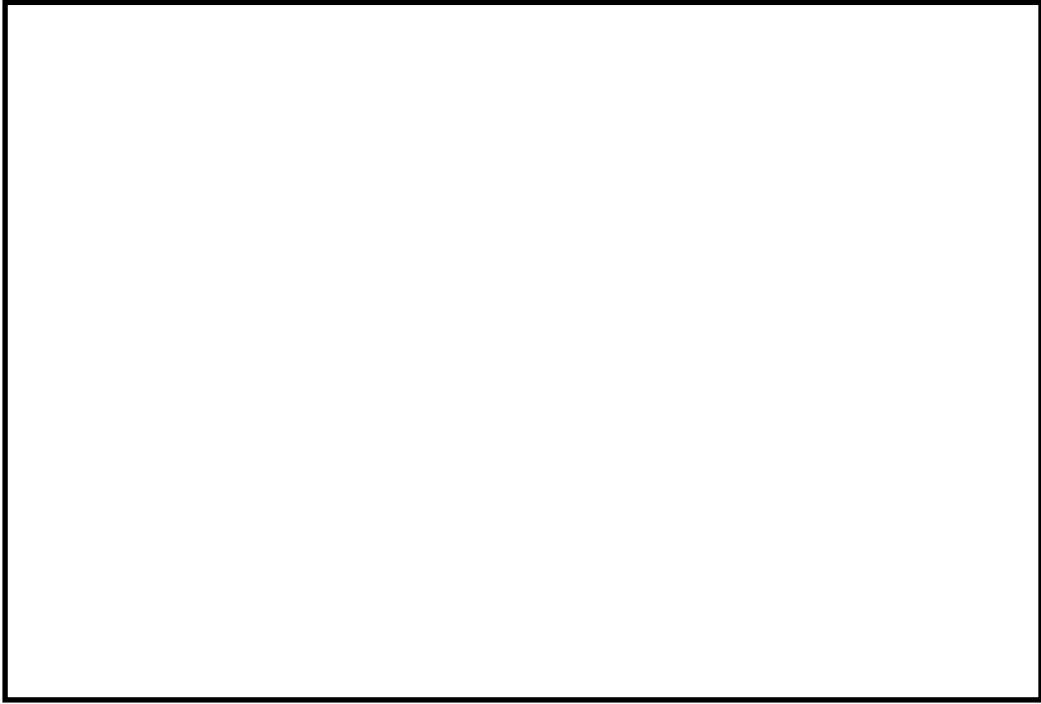
- (一社)日本原子力学会,「日本原子力学会標準 使用済燃料中間貯蔵施設用金属キャスクの安全設計及び検査基準:2010 附属書 I」(AESJ-SC-F002:2010),
(一社)日本原子力学会(2010年7月)



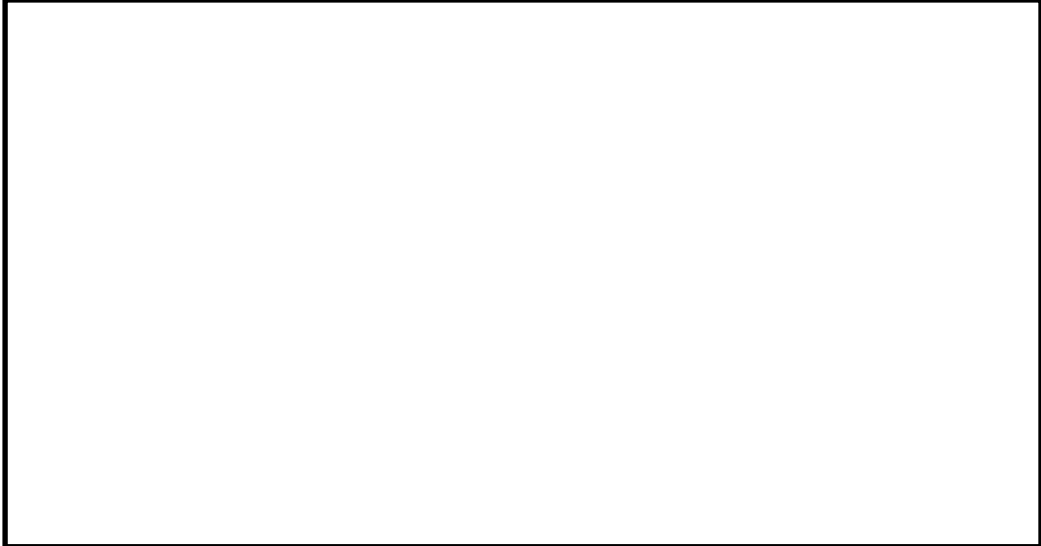
別添 2 - 1 図 真空乾燥手順例



別添 2 - 2 図 (1/3) 真空乾燥時の燃料被覆管温度の評価結果
(BWR用大型キャスク (タイプ 2 A) の例)



別添 2 - 2 図 (2/3) 真空乾燥時の燃料被覆管温度の評価結果
(BWR用中型キャスク (タイプ2) の例)



別添 2 - 2 図 (3/3) 真空乾燥時の燃料被覆管温度の評価結果
(PWR用キャスク (タイプ1) の例)

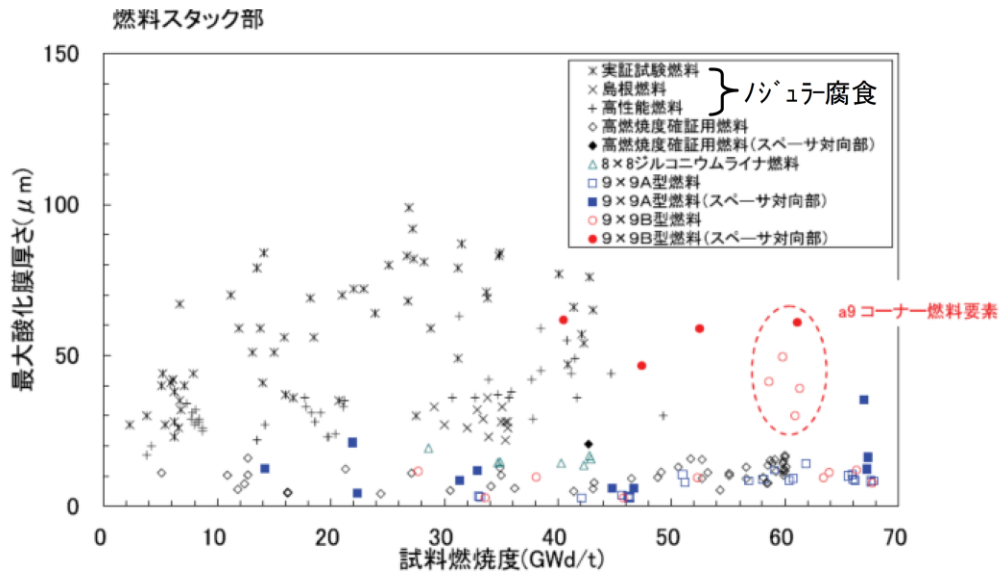
使用済燃料集合体の劣化事象に対する評価（化学的劣化）

使用済燃料集合体は、炉内での使用時に炉水との反応により燃料被覆管外表面に酸化膜が形成されており、さらに炉水との反応で発生した一部の水素を燃料被覆管中に吸収している。燃焼度 55Gwd/t までの BWR 燃料集合体及び PWR 燃料集合体による照射後試験で測定された外表面酸化膜厚さ(添付 1 - 1 図)は、BWR 燃料で一様腐食と呼ばれるほぼ均一な酸化膜厚さは最大 20 μm 程度⁽¹⁾、ノジュラー腐食と呼ばれる瘤状の酸化膜厚さは最大 100 μm 程度⁽¹⁾、PWR 燃料で最大 140 μm 程度、燃料被覆管に吸収される水素濃度(添付 1 - 2 図)は BWR 燃料で最大 300ppm 程度⁽¹⁾、PWR 燃料で最大 800ppm 程度⁽²⁾である。

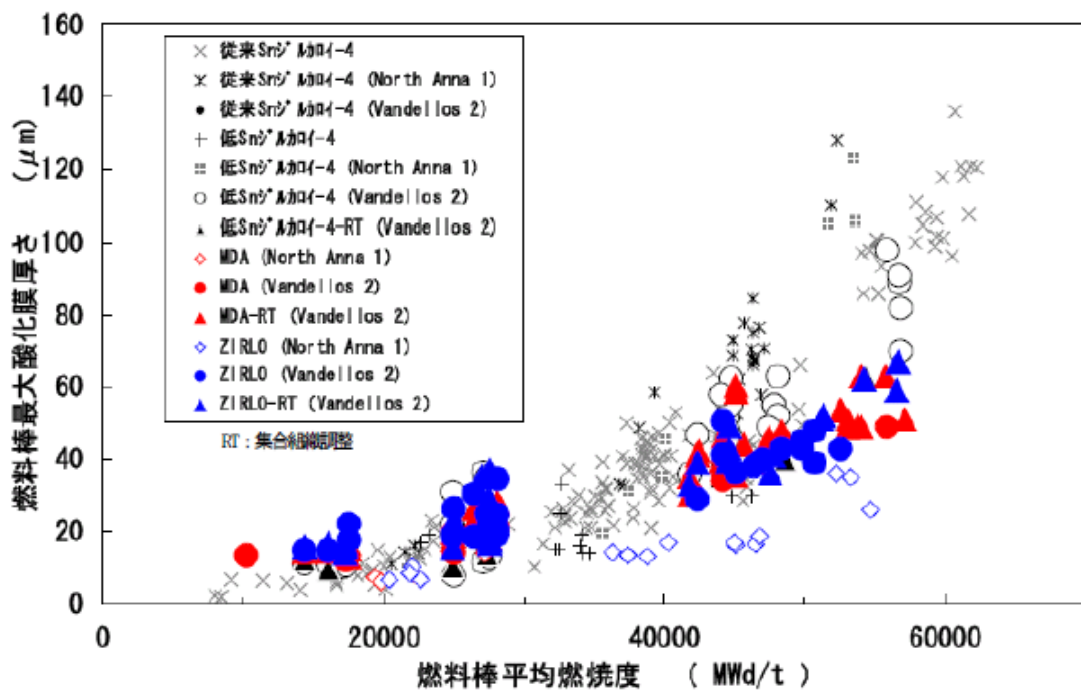
一方、金属キャスク中の使用済燃料集合体は不活性ガス雰囲気中で貯蔵されるため、酸素による燃料被覆管の酸化、発生した水素の燃料被覆管への水素吸収は進行しない。仮に、不活性ガスに約 10wt%の水分の混入があり、すべてが燃料被覆管と反応したとしても、燃料被覆管に形成される酸化膜厚さは 1 μm 以下、燃料被覆管に吸収される水素濃度は数 ppm 程度とされており⁽³⁾、炉内照射中に形成・吸収された酸化膜厚さ・水素濃度に比べて無視できるほど少ない。

経済産業省ホームページ内公開資料

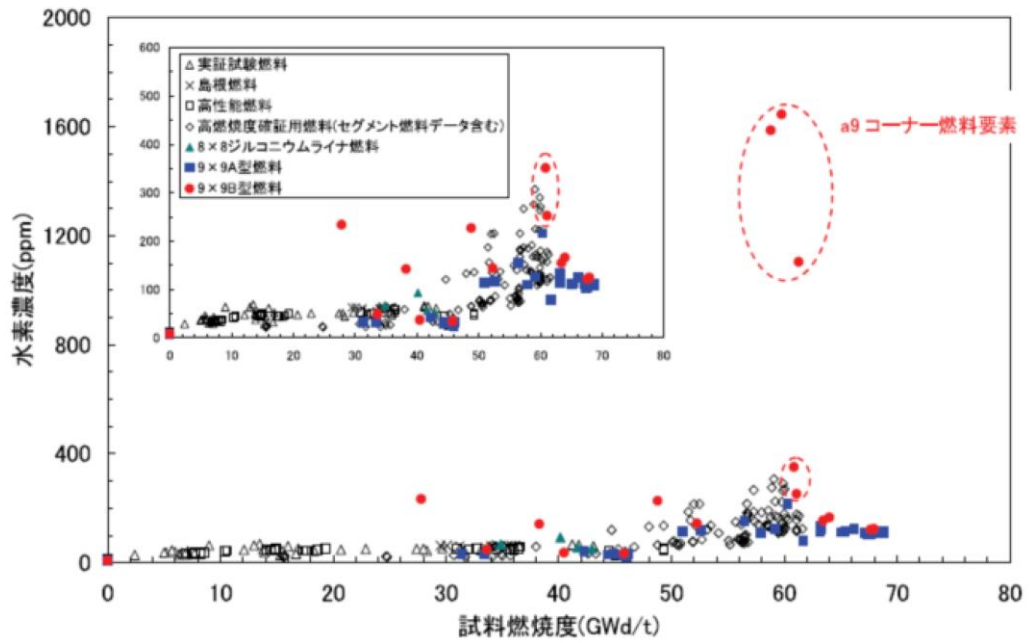
「金属製乾式キャスクを用いる使用済燃料中間貯蔵施設における金属製乾式キャスクとその収納物の長期健全性について」(平成 21 年 6 月 25 日 総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会 核燃料サイクル安全小委員会 中間貯蔵ワーキンググループ 輸送ワーキンググループ) より引用



添付 1 - 1 図 (1/2) 実機で照射された燃料被覆管外表面の酸化膜厚さ⁽¹⁾
(BWR 燃料)

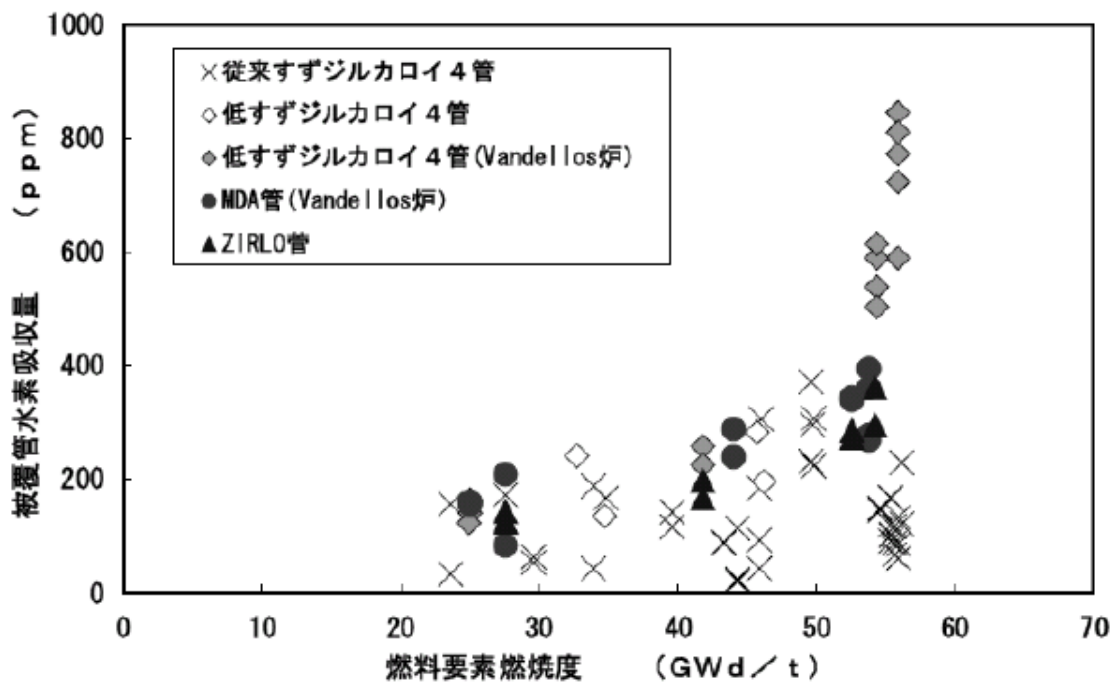


添付 1 - 1 図 (2/2) 実機で照射された燃料被覆管外表面の酸化膜厚さ⁽²⁾
(PWR 燃料)



添付 1 - 2 図 (1/2) 実機で照射された燃料被覆管の水素濃度⁽¹⁾
(BWR 燃料)

注 高燃焼度確証用燃料の下部天然ウラン領域から採取したデータは除く。



添付 1 - 2 図 (2/2) 実機で照射された燃料被覆管の水素濃度⁽²⁾
(PWR 燃料)

参考文献

- (1) 07-基炉報-0002, 「平成 18 年度高燃焼度 9 × 9 型燃料信頼性実証成果報告書 (総合評価編)」
- (2) 「平成 13 年度高燃焼度等燃料安全性試験に関する報告書 (PWR 高燃焼度燃料 総合評価編)」, (財)原子力発電技術機構
- (3) (一社)日本原子力学会, 「日本原子力学会標準 使用済燃料中間貯蔵施設用金属キャスクの安全設計及び検査基準:2010」(AESJ-SC-F002:2010), (一社)日本原子力学会 (2010 年 7 月)

真空乾燥作業ミス（真空乾燥不足）に関する影響評価

1. 真空乾燥作業ミス（真空乾燥不足）事象に関する想定シナリオ

(1) 真空乾燥の作業手順と記録の確認

金属キャスク内部の真空乾燥作業は、当社にて貯蔵する使用済燃料集合体の発送元の原子力発電所において、次のステップで実施される。（金属キャスク内部の真空乾燥手順を、別添 2 - 1 図に示す。）

- ① 使用済燃料集合体をキャスクに収納した後、「水入り保管」を経て、「真空乾燥」，「湿分測定」を行ない，金属キャスク内部の水分濃度を確認する。
- ② 真空乾燥作業が適切に実施されていることを確認するため，「真空乾燥①及び②」において真空乾燥時間及びキャスク内部圧力を監視し，さらに「真空乾燥②」後，
 - a) キャスク内部の到達圧力
 - b) 残留した水の蒸発による圧力上昇率を圧力計により監視して真空乾燥完了を判断する。
- ③ 湿分測定用の機器を用いて，「真空乾燥②」後のヘリウム充填状態で湿分が管理値（10wt%）以下であることをもって真空乾燥の最終確認とする。

発送元の原子力発電所において，上記の作業で真空乾燥不足がなかったことについて，金属キャスクの搬入前に以下の記録を入手し，確認する予定である。

- ・真空乾燥プロセス（真空乾燥時間，圧力）の管理
- ・真空乾燥後の金属キャスク内部空間の圧力及び圧力上昇率の測定
- ・真空乾燥後のヘリウム充填状態での湿分値（10wt%以下）の測定

(2) 真空乾燥不足の想定シナリオ

1. (1)の真空乾燥作業が適切に実施された場合には，真空乾燥不足の発生の可能性は低いが，

- a) 「真空乾燥②」後のヘリウム充填状態で測定する湿分測定用の機器に

において不具合等があり正確に測定されず、かつ

b) それ以前の真空乾燥プロセスで機器の不具合、管理項目の確認不足

(指示値の読み間違い等)、或いは所定の手順どおり真空乾燥プロセスが適切に実施されなかった等

が生じた場合に、真空乾燥不足に至る可能性がある。

真空乾燥不足の場合、金属キャスク内部に残留する水分により、燃料被覆管が酸化及び水素吸収により劣化し燃料健全性を損なう可能性がある。また、残留する水分により、キャスク内部の構成部材の腐食が発生する可能性がある。このため、「真空乾燥①」、「ヘリウム充填保管」まで適切に実施したが、仮に「真空乾燥②」を実施せず、かつ湿分測定機器の不具合により湿分が正確に測定されなかった場合を想定し、残留水分による燃料被覆管及び内部構造物（バスケット）に与える影響評価を以下に検討した。

2. 真空乾燥不足による影響評価

1. (2)の真空乾燥不足の想定シナリオに基づき、「真空乾燥①」終了後の過熱蒸気がそのままキャスク内部に残留したと仮定するとともに、先行の原子力発電所の作業実績に基づき「真空乾燥①」でのキャスク到達圧力やキャスク内部温度を保守的に設定し、BWR用大型キャスク（タイプ2A）を試算した結果、過熱蒸気の残留水分は約180g程度（約30wt%に相当）となる。（添付2-1表参照）

この残留水分中の酸素がすべて燃料被覆管の酸化に消費されたとして評価しても、燃料被覆管酸化膜厚さは約0.20 μ m程度であり、原子炉内で生成される燃料被覆管酸化膜厚さの10 μ m程度（添付2-1図参照）と比較しても十分に小さく、燃料被覆管の健全性に影響を与えることはない。（添付2-2表参照）

また、180gの残留水分中の水素が全て燃料被覆管に吸収されたとして評価しても、燃料被覆管中の水素濃度は5.8ppm程度であり、原子炉内で吸収される燃料被覆管の水素濃度約50ppm（添付2-2図参照）と比較しても十分に小さく、燃料被覆管の健全性に影響を与えることはない。（添付2-2表参照）

更に、BWR用大型キャスク（タイプ2A）のキャビティ内構造材の一つであるほう素添加ステンレス鋼バスケットに対する腐食影響についても同様に、残留水分中の酸素がすべてバスケット材（ステンレス鋼）より耐食性が低い炭素鋼の酸化に消費されたと評価しても、バスケット材の酸化膜厚さは約 $0.19\mu\text{m}$ であり、バスケットの健全性に影響を与えることはない。（添付2-3表参照）

BWR用中型キャスク（タイプ2）の場合、過熱蒸気の残留水分は130g程度（約40wt%に相当）となる。（添付2-4表参照）

この残留水分中の酸素がすべて燃料被覆管の酸化に消費されたとして評価しても、燃料被覆管酸化膜厚さは約 $0.11\mu\text{m}$ 程度であり、原子炉内で生成される燃料被覆管酸化膜厚さの $10\mu\text{m}$ 程度（添付2-1図参照）と比較しても十分に小さく、燃料被覆管の健全性に影響を与えることはない。（添付2-5表参照）

また、130gの残留水分中の水素が全て燃料被覆管に吸収されたとして評価しても、燃料被覆管中の水素濃度は6.3ppm程度であり、原子炉内で吸収される燃料被覆管の水素濃度約50ppm（添付2-2図参照）と比較しても十分に小さく、燃料被覆管の健全性に影響を与えることはない。（添付2-2表参照）

PWR用キャスク（タイプ1）の場合、過熱蒸気の残留水分は160g程度（約40wt%に相当）となる。（添付2-6表参照）

この残留水分中の酸素がすべて燃料被覆管の酸化に消費されたとして評価しても、燃料被覆管酸化膜厚さは約 $0.10\mu\text{m}$ 程度であり、原子炉内で生成される燃料被覆管酸化膜厚さの $100\mu\text{m}$ 程度（添付2-3図参照）と比較しても十分に小さく、燃料被覆管の健全性に影響を与えることはない。（添付2-7表参照）

また、160gの残留水分中の水素が全て燃料被覆管に吸収されたとして評価しても、燃料被覆管中の水素濃度は8.5ppm程度であり、ジルカロイの水素固溶限度約40ppm（添付2-6図の 250°C の値参照）と比較しても十分に小さく、燃料被覆管の健全性に影響を与えることはない。（添付2-7表参照）

添付 2 - 1 表 真空乾燥①終了後の残留水分量
(BWR用大型キャスク (タイプ 2A) の例)

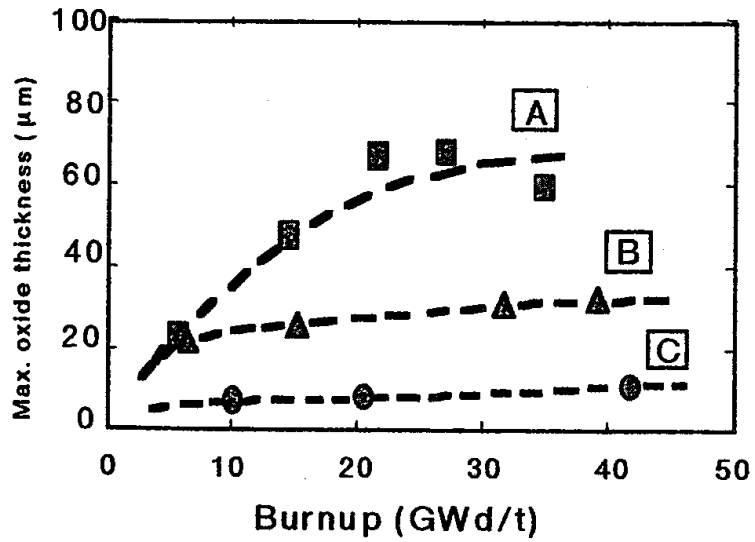
キャスク内部自由空間体積	
キャスク内部空間温度 (過熱蒸気温度)	30℃
キャスク内部空間圧力	4kPa
過熱蒸気の比体積 ⁽¹⁾	34.914m ³ /kg
真空乾燥①終了後の残留水分	173g

添付 2 - 2 表 燃料被覆管の酸化量及び水素吸収量評価例
(BWR用大型キャスク (タイプ 2A) の例)

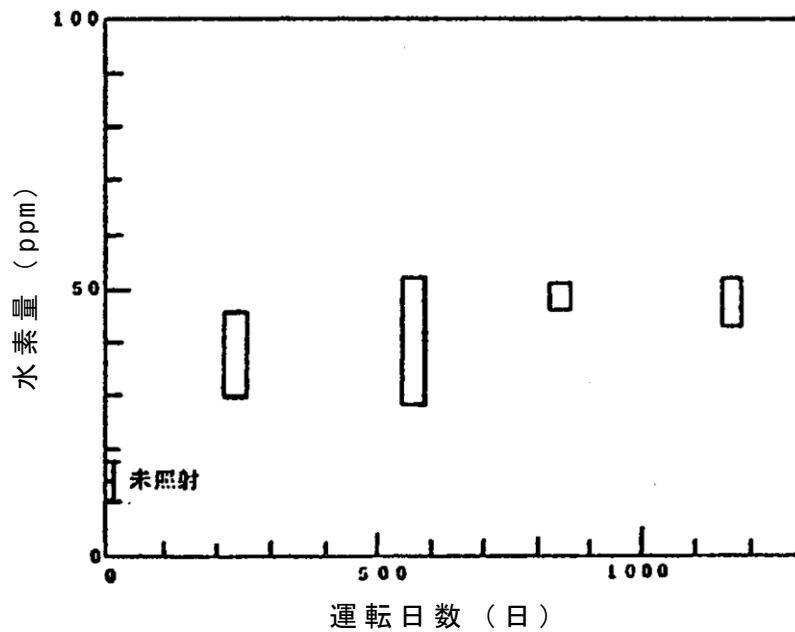
評価条件	キャスク内部自由空間体積	
	キャスク内部ガス水分質量	180g
	燃料被覆管表面積 (8 × 8 燃料, 69 体)	690m ²
	燃料被覆管酸化体積 (8 × 8 燃料, 69 体)	7.7 × 10 ⁻⁵ m ³
評価結果	燃料被覆管表面酸化膜厚さ	約 0.20 μm
	燃料被覆管中水素濃度 (水素/Zr 重量割合)	約 5.8ppm

添付 2 - 3 表 バスケット材の酸化評価例
(BWR用大型キャスク (タイプ 2A) の例)

評価条件	キャスク内部自由空間体積	
	キャスク内部ガス水分質量	180g
	バスケット表面積	249m ²
評価結果	バスケット材の表面酸化膜厚さ (Fe ₂ O ₃)	約 0.19 μm



添付 2 - 1 図 BWR用燃料被覆管酸化膜厚さの燃焼度依存性⁽²⁾
 信頼性実証試験 (A), 高性能燃料確証試験 (B) および高燃焼度
 等燃料確証試験 (C) における燃料被覆管の最大酸化膜厚さ変化



添付 2 - 2 図 BWR燃料被覆管中の水素含有量変化⁽³⁾
 信頼性実証試験の 4 サイクル照射相当 (最大約 29GWd/t 程度)

添付 2 - 4 表 真空乾燥①終了後の残留水分量
(BWR用中型キャスク (タイプ2) の例)

キャスク内部自由空間体積	
キャスク内部空間温度 (過熱蒸気温度)	30℃
キャスク内部空間圧力	4kPa
過熱蒸気の比体積 ⁽¹⁾	34.914m ³ /kg
真空乾燥①終了後の残留水分	124g

添付 2 - 5 表 燃料被覆管の酸化量及び水素吸収量評価例
(BWR用中型キャスク (タイプ2) の例)

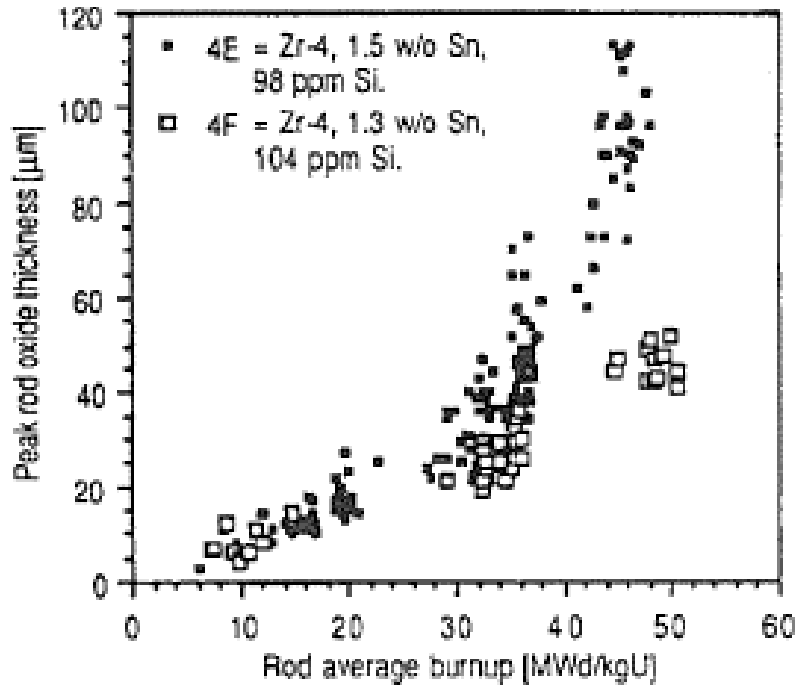
評価条件	キャスク内部自由空間体積	
	キャスク内部ガス水分質量	124g
	燃料被覆管表面積 (8×8燃料, 52体)	447m ²
	燃料被覆管酸化体積 (8×8燃料, 52体)	4.9×10 ⁻⁵ m ³
評価結果	燃料被覆管表面酸化膜厚さ	0.11 μm
	燃料被覆管中水素濃度 (水素/Zr 重量割合)	約 6.3ppm

添付 2 - 6 表 真空乾燥①終了後の残留水分量
(PWR用キャスク (タイプ1) の例)

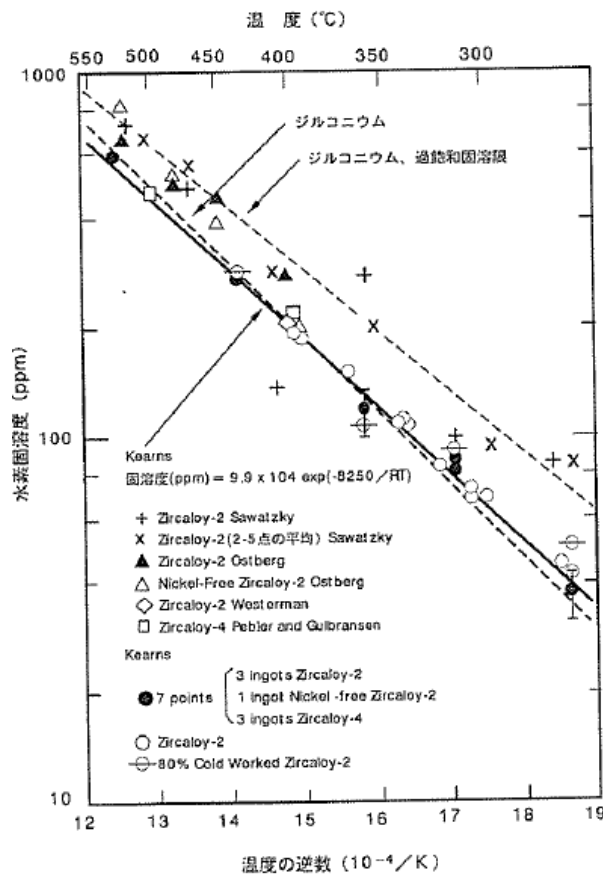
キャスク内部自由空間体積	
キャスク内部空間温度 (過熱蒸気温度)	30℃
キャスク内部空間圧力	4kPa
過熱蒸気の比体積 ⁽¹⁾	34.914m ³ /kg
真空乾燥①終了後の残留水分	155g

添付 2 - 7 表 燃料被覆管の酸化量及び水素吸収量評価例
(PWR用キャスク (タイプ1) の例)

評価条件	キャスク内部自由空間体積	
	キャスク内部ガス水分質量	155g
	燃料被覆管表面積 (17×17 燃料, 21 体)	604m ²
	燃料被覆管酸化体積 (17×17 燃料, 21 体)	6.2×10 ⁻⁵ m ³
評価結果	燃料被覆管表面酸化膜厚さ	約 0.10 μm
	燃料被覆管中水素濃度 (水素/Zr 重量割合)	約 8.5ppm



添付 2 - 3 図 PWR用燃料被覆管酸化膜厚さの燃焼度依存性⁽²⁾
 最大酸化厚さの燃料棒平均燃焼度依存性



添付 2 - 4 図 ジルカロイ中の水素固溶度⁽²⁾

参考文献

- (1) (一社)日本機械学会,「蒸気表」,(一社)日本機械学会(1999)
- (2) (財)原子力安全研究協会 軽水炉燃料のふるまい編集委員会,「軽水炉燃料のふるまい」,(財)原子力安全研究協会(平成25年3月)
- (3) 三島他,「日本原子力学会誌 Vol.29, No.2」,(一社)日本原子力学会(1987)

使用済燃料集合体の経年変化に対する措置について

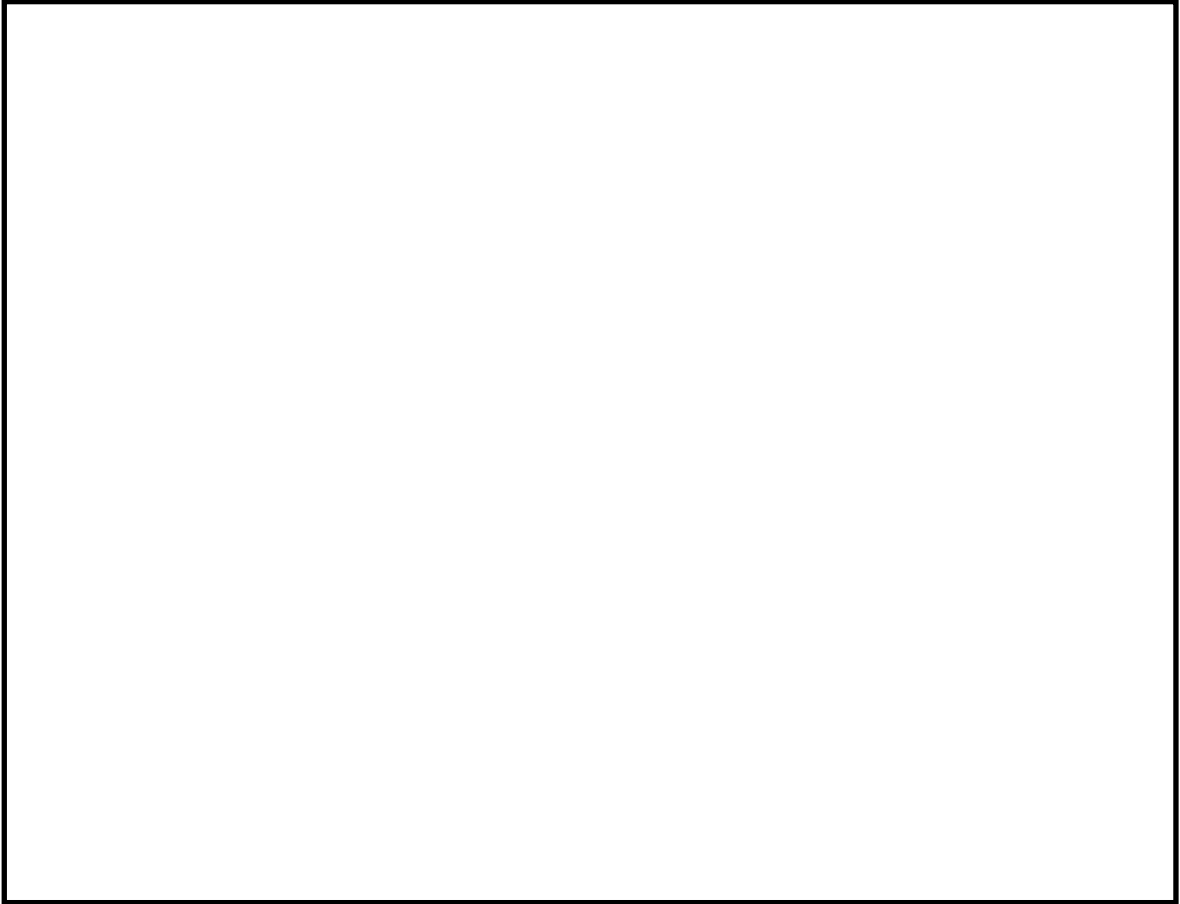
使用済燃料集合体（以下、「使用済燃料」という。）の経年変化については、化学的要因である腐食、熱的要因であるクリープ、水素化物の再配向等がある。これらの経年変化に対する措置として、使用済燃料を金属キャスクに収納する際に事業許可変更申請書の添付書類六に記載している収納条件を満たすことで、設計評価期間における使用済燃料の経年変化を抑制できるものとする。以下に使用済燃料の収納条件とその具体的な説明について示す。

収納条件①	金属キャスクには、原子炉での運転中データや必要により SHIPPING 検査などで健全であることを確認した使用済燃料を収納する。
具体的な説明	<p>①本条件は、金属キャスクにより貯蔵される使用済燃料が熱的及び化学的要因によって引き起こされる経年変化を抑制し、燃料被覆管破損の発生を防止するための前提事項。</p> <p>②使用済燃料の健全性を維持するには、燃料被覆管を破損させないようにすることにある。そのため、金属キャスクに収納される使用済燃料は、燃料被覆管の破損を誘発するような因子が認められないものであることを当該燃料の記録で予め確認することが重要となる。</p> <p>③使用済燃料の収納作業は、原子炉設置者が実施するため、リサイクル燃料備蓄センター受入の際には、金属キャスクに収納された使用済燃料が健全であることを原子炉設置者が作成した記録で確認する。</p>

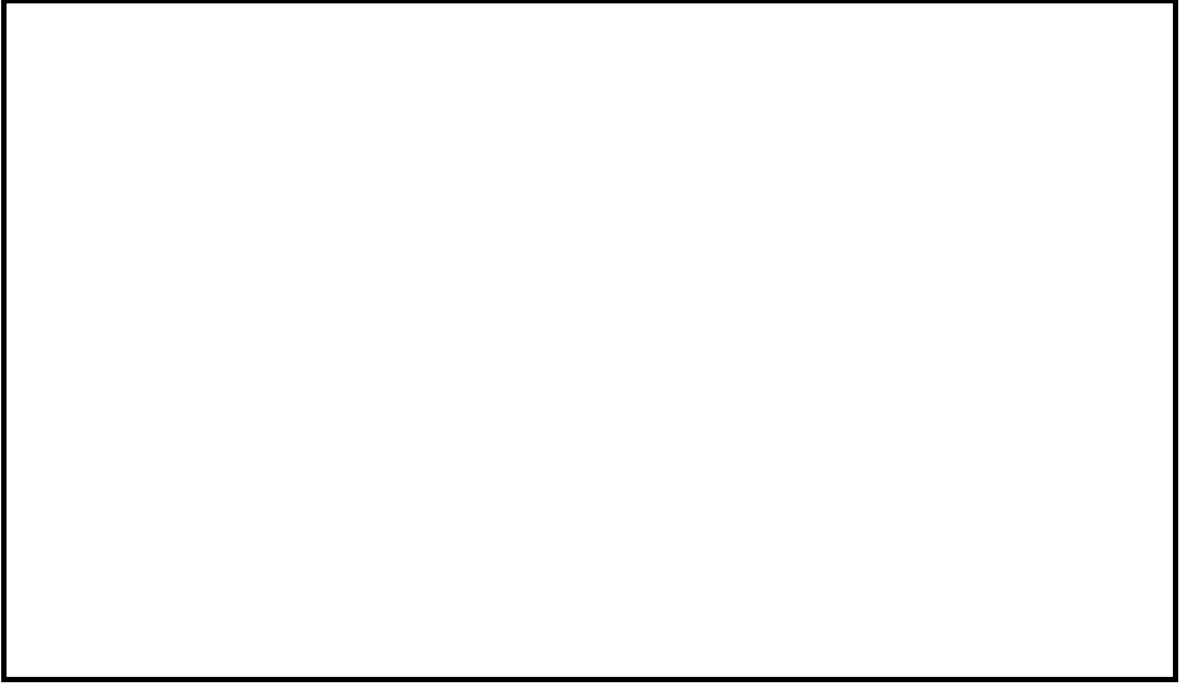
<p>収納条件 ②</p>	<p>燃料仕様，崩壊熱量などを満足するように収納するとともに，使用済燃料の種類，燃焼度に応じた配置とする。</p>
<p>具体的な 説明</p>	<p>①本条件は，熱的要因による影響(燃料被覆管のクリープ歪み，照射硬化の回復及び水素化物の再配向)の観点から，燃料被覆管破損の発生を防止するための考慮事項。</p> <p>②熱的要因による燃料被覆管の破損を防止するうえで，設計評価期間における燃料被覆管の温度を下記の制限される値以下に維持することとしている。(事業許可変更申請書 添付書類六に記載)</p> <p>[BWR燃料集合体]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・新型8×8燃料：200℃ ・新型8×8ジルコニウムライナ燃料，高燃焼度8×8燃料：300℃ <p>[PWR燃料集合体]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・17×17燃料：275℃ <p>なお，これらの制限温度は，(財)電力中央研究所や(独)原子力安全基盤機構などの研究成果⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾を基に設定している。</p> <p>③金属キャスクの除熱設計においては，収納する使用済燃料のスペック(種類，最高燃焼度，濃縮度，冷却期間)や崩壊熱量等を考慮して，金属キャスクの型式毎に除熱解析を行い，燃料被覆管の温度が上記の制限温度を下回ることを確認している。</p> <p>④実際に金属キャスクに収納される燃料被覆管の温度が制限値以下に維持するための担保としては，収納時に下記に示す設計での考慮事項のとおり仕立てられていることを確認することである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・金属キャスクの型式毎に設定した燃料スペック(種類，最高燃焼度，濃縮度，冷却期間)の使用済燃料を収納していること。 ・収納する使用済燃料の崩壊熱量の合計が金属キャスクの型式毎の最大崩壊熱量以下であること。 ・収納配置は金属キャスクの型式毎に設定した配置で，中央部に最高燃焼度燃料，外周部に平均燃焼度燃料であること。 <p>⑤なお，使用済燃料の収納作業は，原子炉設置者が実施するため，</p>

	<p>リサイクル燃料備蓄センター受入の際には、金属キャスクに収納された使用済燃料が上記④を考慮して仕立てられていることを原子炉設置者が作成する記録で確認する。</p>
<p>収納条件 ③</p>	<p>金属キャスク内部を真空乾燥し、不活性ガス（ヘリウム）を封入する。（その際、燃料被覆管の制限温度を上回らないよう金属キャスク内部の圧力、真空乾燥時間等を管理するとともに、真空乾燥時のクリプトンガスのモニタリングにより燃料被覆管から漏えいのないことを確認する。）また、真空乾燥後、金属キャスク内部の水分は、内部ガス質量に対して10%以下で管理する。</p>
<p>具体的な 説明</p>	<p>①本条件は、化学的要因による影響（燃料被覆管の腐食）の観点から燃料被覆管破損の発生を防止するための考慮事項。</p> <p>②化学的要因による燃料被覆管の破損を防止するうえで、燃料被覆管の酸化や水素吸収の進行を抑制するために、金属キャスク内部を真空乾燥し、不活性ガス雰囲気に維持することとしている。</p> <p>③真空乾燥においては、真空乾燥の評価（別添3-1図）で得られた結果を基に、金属キャスク内部の圧力、真空乾燥時間を管理することで燃料被覆管の制限温度を上回らないようにする。</p> <p>④また、残留水分については、最終のヘリウムガス充填放置時に湿分を測定して10wt/%以下であることを確認する。日本原子力学会標準⁽⁶⁾に示されているように、金属キャスク内部の残留水分を10wt%以下に制限すれば、燃料被覆管の酸化や水素吸収はわずかなものであり、燃料被覆管の健全性に影響を与えることはほとんどないものと考えられる。</p> <p>⑤金属キャスクに収納された使用済燃料が、腐食による燃料被覆管の破損を生じさせないための担保としては、収納後に行う真空乾燥、不活性ガスの封入、残留水分管理の仕立てが適切に行われていることを確認することである。</p> <p>⑥なお、上記の金属キャスクへ収納作業後の仕立て（真空乾燥、不活性ガスの封入、残留水分管理）は、原子炉設置者が実施する</p>

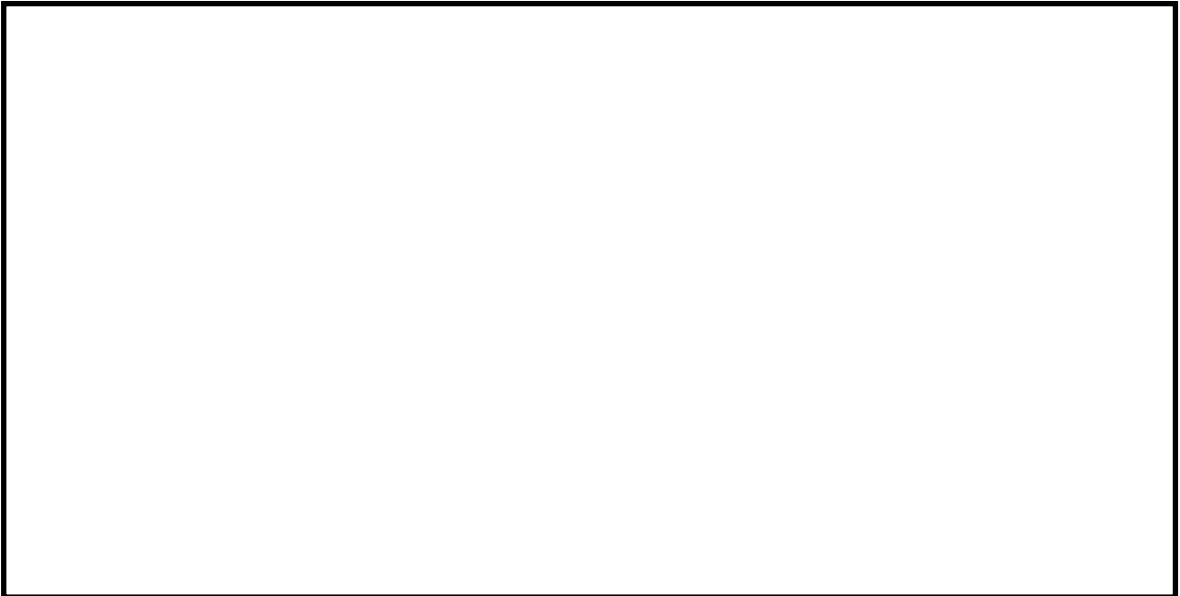
ため、リサイクル燃料備蓄センター受入の際には、適切に仕立てられていることを原子炉設置者が作成する記録で確認する。



別添 3 - 1 図 (1/3) 真空乾燥の評価結果
(BWR用大型キャスク(タイプ 2 A)の例)
[燃料収納時からの定常に至るまでの燃料温度変化]



別添 3 - 1 図 (2/3) 真空乾燥の評価結果
(BWR用中型キャスク(タイプ2)の例)
[燃料収納時からの定常に至るまでの燃料温度変化]



別添 3 - 1 図 (3/3) 真空乾燥の評価結果
(PWR用キャスク(タイプ1)の例)
[燃料収納時からの定常に至るまでの燃料温度変化]

参考文献

- (1) (財)電力中央研究所,「乾式貯蔵時の BWR 燃料被覆管許容温度の検討, T88068」, (財)電力中央研究所(平成元年 5 月)
- (2) (独)原子力安全基盤機構,「平成 15 年度 リサイクル燃料資源貯蔵施設安全解析コード改良試験(燃料の長期安全性に関する試験最終成果報告書)」, (独)原子力安全基盤機構(平成 16 年 6 月)
- (3) R. E. Einzigner R. Kohli, “Low-temperature Rupture Behavior of Zircaloy Clad Pressurized Water Reactor Spent Fuel Rods under Dry Storage Conditions”, HEDL-7400, Hanford Engineering Development Laboratory, (1983)
- (4) (独)原子力安全基盤機構,「平成 19 年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等(貯蔵燃料健全性等調査に関する試験成果報告書)」, (独)原子力安全基盤機構(平成 20 年 3 月)
- (5) (独)原子力安全基盤機構,「平成 18 年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等(貯蔵燃料長期健全性等確証試験に関する試験最終成果報告書)」, (独)原子力安全基盤機構(平成 19 年 3 月)
- (6) (一社)日本原子力学会,「日本原子力学会標準 使用済燃料中間貯蔵施設金属キャスクの安全設計及び検査基準:2010」, (一社)日本原子力学会(2010 年 7 月)

燃料被覆管制限温度の設定について

1. 使用済燃料集合体の健全性に影響を与える主な因子

(1) 累積クリープひずみについて

貯蔵中の使用済燃料集合体は不活性雰囲気中で貯蔵され、また燃料ペレット温度は運転中と比較して遥かに低い上、自重以外ほとんど荷重がかからない静的な状態で貯蔵される。このような状態で貯蔵される使用済燃料集合体では、瞬時に燃料被覆管が破損する形態は存在しないが、高温の環境下では、材料の降伏強度以下でも徐々にクリープが生じ、この変形の累積クリープひずみ量が限界を超えると破損する。したがって、設計評価期間中に破損しないレベルの累積クリープひずみとなるように燃料被覆管温度を制限する必要がある。

クリープ破損に至らない累積クリープ量の基準は、国内外の燃料被覆管クリープ破断データ等から、燃料被覆管周方向の累積クリープ量を1%以下とする。

BWR燃料被覆管の燃料棒内圧により生じる燃料被覆管の累積クリープ量の累積量は、(財)電力中央研究所の実験に基づく、下記の未照射ジルカロー2被覆管のクリープひずみ算定式⁽¹⁾により計算し、計算結果を1.43倍する。計算結果を1.43倍するのは、二次クリープ領域のクリープひずみの上側95%信頼区間が最確値の1.43倍と評価されている⁽²⁾ことによる。また、電力中央研究所の実験に基づくクリープひずみ算定式は、燃料被覆管温度が320℃～425℃、周方向応力が178MPa以下の領域で適用可能とされている。

第1項は、遷移領域におけるクリープひずみ、第2項は、定常領域におけるクリープひずみを表している。

$$\varepsilon = \varepsilon_T^S \left[1 - \exp \left\{ -\beta \left(\dot{\varepsilon}_S \cdot t \right)^n \right\} \right] + \dot{\varepsilon}_S \cdot t \quad \text{-----} \quad (1)$$

$$\dot{\varepsilon}_S = 2.1 \times 10^9 \cdot \left(\frac{E}{T} \right) \cdot \exp \left(\frac{2880\sigma}{E} \right) \cdot \exp \left(\frac{-53600}{RT} \right) \quad \text{-----} \quad (2)$$

$$\varepsilon_T^S = 5.0 \times 10^{-10} \cdot \exp(0.0428 \cdot T) \cdot (\dot{\varepsilon}_S)^{0.00543T - 2.603} \quad \text{-----} \quad (3)$$

$$\beta = 2.24 \times 10^{10} \cdot \exp(-0.0275 \cdot T) \cdot \exp \left(-1200 \left(\frac{\sigma}{E} \right) \right) \quad \text{-----} \quad (4)$$

- | | |
|---|--|
| ε : クリープひずみ (-) | ε_T^S : 飽和遷移クリープひずみ (-) |
| β : 温度及び応力の関数 (-) | $\dot{\varepsilon}_S$: 定常クリープ速度 (h^{-1}) |
| t : 時間 (h) | n : 定数 (=0.61) |
| E : ヤング率 (kgf/mm^2) | T : 絶対温度 (K) |
| R : 気体定数 ($\text{cal}/\text{mol}/\text{K}$) | σ : 応力 (kgf/mm^2) |

※上記式は元文献の単位系で示している。(S I 単位系とすると、(2)式の定数に変更となる。)

別添 4-1 図に BWR 用燃料被覆管に対する電中研の算定式の予測値と実測値との比較を示す。別添 4-1 図の (a) からは形状がよく一致していること、(b) からは 0.1% から 10% のひずみ範囲で予測値と実測値がよく一致していることがわかる。

また、照射材のクリープは、別添 4-2 図に示すように未照射材に比べ定常クリープ速度が小さいことから、燃料被覆管のクリープ評価において未照射材のクリープ式を用いて累積クリープ量を評価することは保守的である。したがって、本評価においても、電中研の未照射材に基づく算定式を用いることとする。なお、(独)原子力安全基盤機構においても同様にクリープの算定式を検討しており、電中研の算定式が保守的な結果を与えることが確認されている。

設計評価期間 60 年について計算した初期燃料被覆管温度と累積クリープひずみの関係 (一例) を別添 4-3 図に示す。累積クリープひずみ量が評価期間中に 1% を超えない燃料被覆管の初期温度は、BWR で

360°C程度となる。

金属キャスクの設計における燃料被覆管の制限温度を考慮して、BWR燃料被覆管の初期温度を300°Cとして保守的に評価しても累積クリープひずみ量1%を超えることはない（添付1～添付3参照）。

PWR燃料被覆管の燃料棒内圧により生じる燃料被覆管の累積クリープ量は、次式の（独）原子力安全基盤機構の実験に基づくジルカロイ被覆管のクリープひずみ算定式⁽²⁾により計算し、計算結果を1.55倍（燃焼度30～53GWd/t）または1.28倍（燃焼度0～30GWd/t）する。なお、1.55倍及び1.28倍はクリープひずみ量（一次クリープ＋二次クリープ）の上側95%信頼区間が最確値の1.55倍または1.28倍と評価されている⁽²⁾ことによる。また、本クリープひずみ算定式は、被覆管温度が420°C以下、周方向応力が250MPa以下において適用可能とされている。

第1項は飽和一次クリープひずみ、第2項は二次クリープひずみを表している。

$$\varepsilon = \varepsilon_p^S + \dot{\varepsilon}_s \cdot t \text{ ----- (5)}$$

$$\dot{\varepsilon}_s = \dot{\varepsilon}_{s,L} + \dot{\varepsilon}_{s,H} \text{ ----- (6)}$$

$$\dot{\varepsilon}_{s,L} = A_{s,L} \cdot \left(\frac{E}{T}\right) \cdot \left(\frac{\sigma_\theta}{E}\right)^{n_{s,L}} \cdot \exp\left(-\frac{Q_{s,L}}{RT}\right) \text{ ----- (7)}$$

（燃焼度30～53GWd/t） $A_{s,L}=4.04 \times 10^1$ (K/MPa/h), $n_{s,L}=0.48$,

$Q_{s,L}=109.9 \times 10^3$ (J/mol)

（燃焼度0～30GWd/t） $A_{s,L}=2.51 \times 10^9$ (K/MPa/h), $n_{s,L}=1.69$,

$Q_{s,L}=156.0 \times 10^3$ (J/mol)

$$\dot{\varepsilon}_{s,H} = A_{s,H} \cdot \left(\frac{E}{T}\right) \cdot \left(\frac{\sigma_\theta}{E}\right)^{n_{s,H}} \cdot \exp\left(-\frac{Q_{s,H}}{RT}\right) \text{ ----- (8)}$$

（燃焼度30～53GWd/t） $A_{s,H}=2.50 \times 10^{35}$ (K/MPa/h), $n_{s,H}=7.39$,

$Q_{s,H}=297.7 \times 10^3$ (J/mol)

（燃焼度0～30GWd/t） $A_{s,H}=1.70 \times 10^{34}$ (K/MPa/h), $n_{s,H}=6.12$,

$$Q_{s,H}=313.7 \times 10^3 \text{ (J/mol)}$$

$$\varepsilon_p^s = B_p \cdot \left(\frac{E}{T}\right) \cdot \left(\frac{\sigma_\theta}{E}\right)^{n_p} \cdot \exp\left(-\frac{Q_p}{RT}\right) \text{-----} \quad (9)$$

(燃焼度 30～53GWd/t) $B_p=6.58 \times 10^4 \text{ (K/MPa)}$, $n_p=1.29$,

$$Q_p=77.2 \times 10^3 \text{ (J/mol)}$$

(燃焼度 0～30GWd/t) $B_p=1.34 \times 10^7 \text{ (K/MPa)}$, $n_p=1.75$,

$$Q_p=80.6 \times 10^3 \text{ (J/mol)}$$

ε : クリープひずみ(-) ε_p^s : 飽和一次クリープひずみ(-)

$\dot{\varepsilon}_s$: 二次クリープ速度 (h^{-1}) t : 時間 (h)

$\dot{\varepsilon}_{s,L}$: 低応力側機構による二次クリープ速度 (h^{-1})

$\dot{\varepsilon}_{s,H}$: 高応力側機構による二次クリープ速度 (h^{-1})

σ_θ : 周応力 (MPa) E : ヤング率 ($=1.148 \times 10^5 - 59.9 \times T$) (MPa)

R : 気体定数 (8.3144 J/mol/K) T : 絶対温度 (K)

$Q_{s,H}$ 及び $n_{s,H}$: 高応力側機構二次クリープ速度の活性化エネルギー (J/mol)
及び応力指数(-)

$Q_{s,L}$ 及び $n_{s,L}$: 低応力側機構二次クリープ速度の活性化エネルギー (J/mol)
及び応力指数(-)

$A_{s,H}$: 高応力側機構による二次クリープ速度の比例定数 (K/Pa/h)

$A_{s,L}$: 低応力側機構による二次クリープ速度の比例定数 (K/Pa/h)

Q_p 及び n_p : 飽和一次クリープひずみの活性化エネルギー (J/mol) 及び応力
指数(-)

B_p : 飽和一次クリープひずみの比例定数 (K/Pa)

※上記式は元文献の単位系で示している。

別添 4-4 図に PWR 用燃料被覆管に対する原子力安全基盤機構の算定式の予測値と実測値の比較を示す。0.1% から 1% (使用済燃料被覆管) 及び 0.1% から 10% (未照射燃料被覆管) のひずみ範囲で予測値と実測値がよく一致している。

また、照射材のクリープは、別添 4－5 図に示すように未照射材に比べ定常クリープ速度が小さいことから、被覆管のクリープ評価において未照射材のクリープ式を用いて累積クリープ量を評価することは保守的である。したがって、本評価においても、未照射材に基づく算定式を用いることとする。

設計評価期間 60 年について計算した初期燃料被覆管温度と累積クリープひずみの関係（一例）を別添 4－6 図に示す。累積クリープひずみ量が評価期間中に 1 % を超えない燃料被覆管の初期温度は、PWR で 320℃ 程度となる。

金属キャスクの設計における燃料被覆管の制限温度を考慮して、PWR 燃料被覆管の初期温度を 275℃ として保守的に評価しても累積クリープひずみ量 1 % を超えることはない（添付 1～添付 3 参照）。

(2) 水素化物の再配向について

原子炉の運転中に燃料被覆管に吸収された水素は、燃料被覆管温度が低下して水素固溶度を越えた分はジルカロイ水素化物として析出する。このとき、ジルカロイ水素化物は燃料被覆管に周方向応力が作用していると応力に直角方向（燃料被覆管半径方向）に析出する性質がある。高温で燃料被覆管内圧が高く周方向応力が大きい状態から温度が低下すると、水素化物が燃料被覆管半径方向に析出して機械的特性が低下することが指摘されている。このため、貯蔵中に水素化物再配向により燃料被覆管の機械的特性が低下しない条件で設計する。

BWR 燃料の被覆管材料であるジルカロイ－2 について水素化物再配向の機械的特性への影響が調べられている。その結果、40GWd/t 型ジルコニウムライナ無燃料、50GWd/t 型ジルコニウムライナ有燃料及び 55GWd/t 型ジルコニウムライナ有燃料を対象に、水素化物再配向の起きない条件及び機械的特性に影響のない条件が別添 4－1 表に示すようにまとめられている。その結果、水素化物再配向による機械的特性に影響がない条件として、40GWd/t 型ジルコニウムライナ無燃料では周方向応力が 70MPa 以下で 200℃ 以下、50GWd/t 型及び 55GWd/t 型ジルコニウムラ

ライナ有燃料では 70MPa 以下で 300°C 以下と示されている。本キャスクの貯蔵対象燃料において、新型 8 × 8 ジルコニウムライナ燃料は最高燃焼度 40GWd/t、高燃焼度 8 × 8 燃料は最高燃焼度 50GWd/t でジルコニウムライナ有のため 50GWd/t 型及び 55GWd/t 型ジルコニウムライナ有燃料に、8 × 8 燃料、新型 8 × 8 燃料については最高燃焼度 40GWd/t でジルコニウムライナ無のため 40GWd/t 型ジルコニウムライナ無燃料に相当する。

PWR 燃料の被覆管材料であるジルカロイ-4 についても同様に水素化物再配向の機械的特性への影響が調べられており、48GWd/t 型燃料及び 39GWd/t 型燃料を対象に、水素化物再配向の起きない条件及び機械的特性に影響のない条件が別添 4-1 表に示すようにまとめられている。その結果、水素化物再配向による機械的特性に影響がない条件として、48GWd/t 型燃料及び 39GWd/t 燃料共に、周方向応力が 100MPa 以下で 275°C 以下と示されている。

以上から、水素再配向による機械的特性に影響がない温度として、BWR 燃料被覆管のジルコニウムライナ有の新型 8 × 8 ジルコニウムライナ燃料と高燃焼度 8 × 8 燃料については周方向応力が 70MPa 以下で 300°C 以下、ジルコニウムライナ無の 8 × 8 燃料、新型 8 × 8 燃料については周方向応力が 70MPa 以下で保守的に 200°C 以下、PWR 燃料被覆管については周方向応力が 100MPa 以下で 275°C 以下を設定した。

(3) 照射硬化の回復について

原子炉内での照射により燃料被覆管は硬化し、強度が未照射材のものより高くなる。したがって、燃料被覆管の強度評価においては照射硬化した燃料被覆管の強度を用いることができる。

ただし、別添 4-7 図及び別添 4-8 図に示すように、燃料被覆管が炉内温度より高い温度に一定時間以上保持されると、焼きなまし効果によって照射硬化が回復し、強度が低下する。したがって、金属キャスクに収納する燃料被覆管温度がこのような温度範囲になる場合、燃料被覆管の強度計算に当たっては、照射硬化の回復による燃料被覆管強度の低下を考慮する必要がある。

別添 4 - 9 図に示すように BWR 燃料被覆管については、300℃以下では照射硬化の回復による機械特性の著しい低下はないが、強度計算にあたっては、降伏応力の低下を回復予測式により評価する（添付 4 参照）。

一方、PWR 燃料被覆管については、305℃以下では 100 年間貯蔵しても照射硬化の回復は生じないと報告されている⁽⁷⁾。また、別添 4 - 10 図でも 300℃、3600 時間加熱した結果、照射硬化の回復の発生は認められなかったことから、PWR 燃料被覆管の強度計算にあたっては、照射硬化の回復については考慮不要である。

別添 4 - 2 表に、要因別の制限温度をまとめる。

2. まとめ

以上の検討を踏まえ、次のとおり燃料被覆管の制限を設定した。

- ・ BWR 燃料被覆管（ライナ有^{*1}） 温度 300℃，周方向応力 70MPa
- ・ BWR 燃料被覆管（ライナ無^{*2}） 温度 200℃，周方向応力 70MPa
- ・ PWR 燃料被覆管 温度 275℃，周方向応力 100MPa

* 1：新型 8 × 8 燃料ジルコニウムライナ燃料，高燃焼度 8 × 8 燃料

* 2：新型 8 × 8 燃料

【水素化物再配向】

別添 4 - 1 表 水素化物再配向試験のまとめ⁽⁴⁾

燃料被覆管の種類		機械特性が低下しない条件	
		温度	周方向応力
BWR	40GWd/t ライナ無	200℃以下	70MPa 以下
	50GWd/t ライナ有	300℃以下	70MPa 以下
	55GWd/t ライナ有	300℃以下	70MPa 以下
PWR	39GWd/t	275℃以下	100MPa 以下
	48GWd/t	275℃以下	100MPa 以下

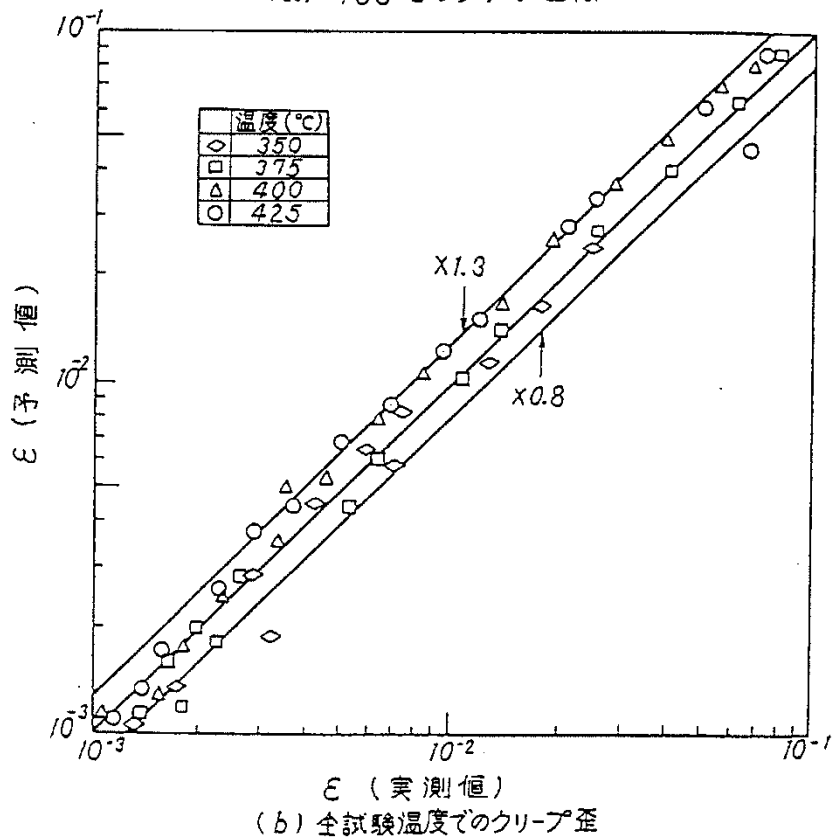
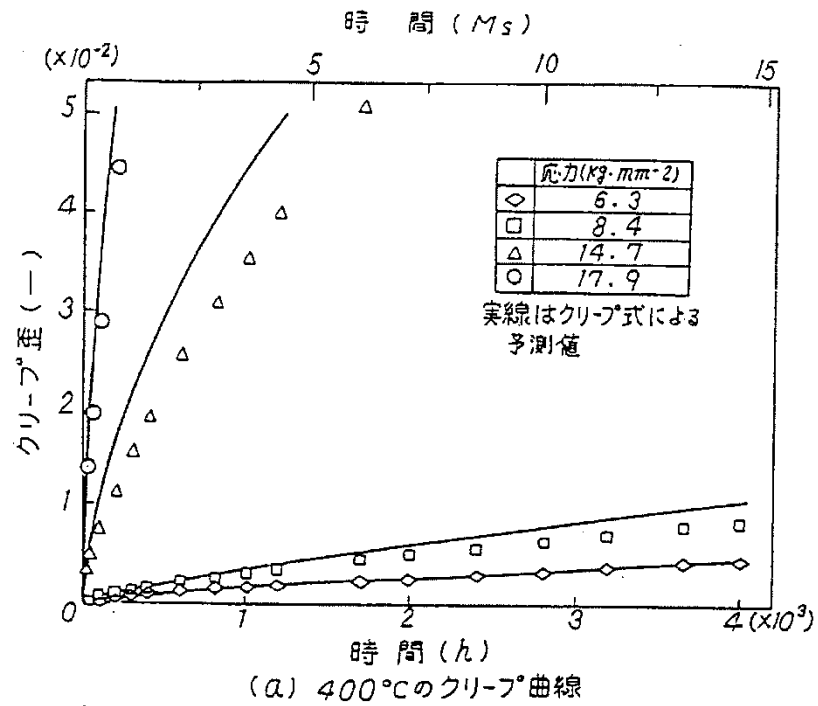
別添 4 - 2 表 各要因における制限温度

要因	BWR	PWR
累積 1 % クリープ	360℃程度 (例) 300℃	320℃程度 (例) 275℃
水素再配向 による機械強度低下*	制限温度 ライナ有 300℃ ライナ無 200℃	制限温度 275℃
照射硬化の回復による 機械特性の著しい低下	照射硬化の回復を考慮	300℃以下の 範囲では考慮不要

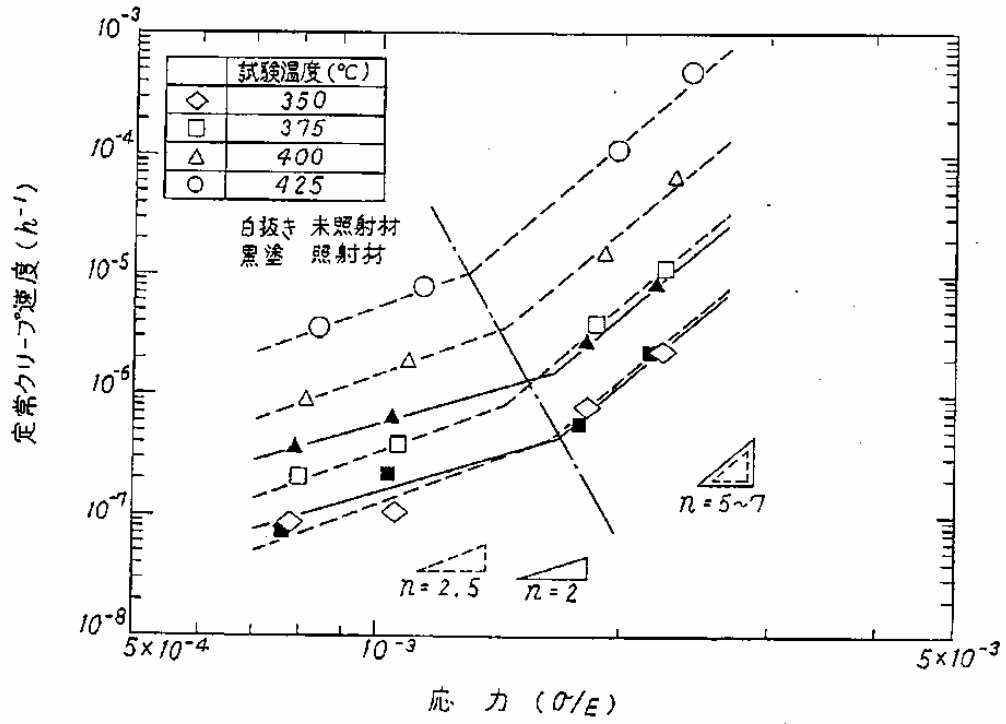
* : 燃料被覆管の制限温度において、BWR燃料被覆管の周方向応力は、制限値 70MPa 以下、PWR燃料被覆管の周方向応力は、制限値 100MPa 以下となる（添付 2 参照）。

<燃料被覆管制限温度の設定に用いたデータ>

【累積クリープ】



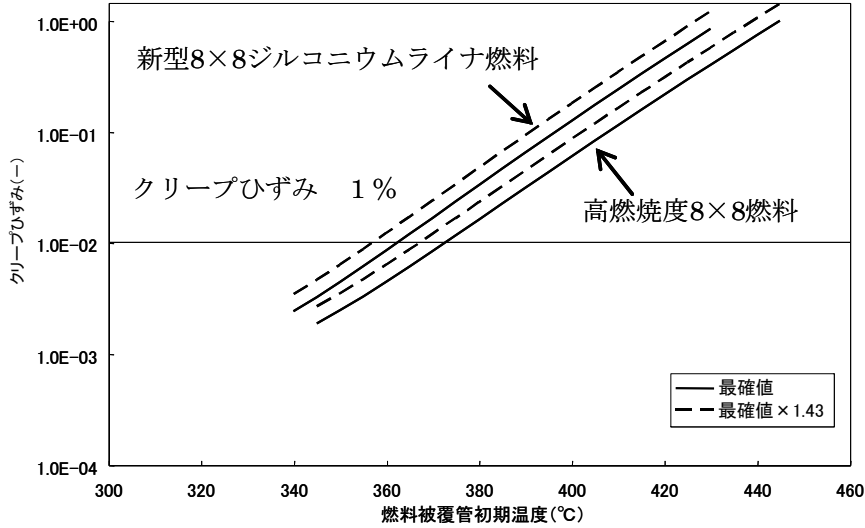
別添4-1図 クリープひずみの予測値と実測値の比較 (BWR) (1)



別添 4 - 2 図 照射材と未照射材の定常クリープ速度の比較 (BWR) ⁽¹⁾

<燃料被覆管制限温度の設定に用いたデータ>

【クリープ】



BWR 燃料評価条件

・ 新型 8 × 8 ジルコニウムライナ燃料

最大燃焼度：40GWd/t

冷却期間：18年

評価期間：60年

温度履歴：次の式により貯蔵中の温度低下を考慮

$$Ti = [(Toi - Ta) \times (Ts - Ta) / (Toi - Ta)] + Ta$$

ここに、 Ti ：時刻 i における想定温度(°C) Toi ：時刻 i における実際の温度(°C)

Ta ：貯蔵雰囲気気温度(=45°C)

Ts ：想定する温度低下履歴計算において与える貯蔵初期温度入力値(°C)

Toi ：貯蔵初期時の実際の温度(°C)

・ 高燃焼度 8 × 8 燃料

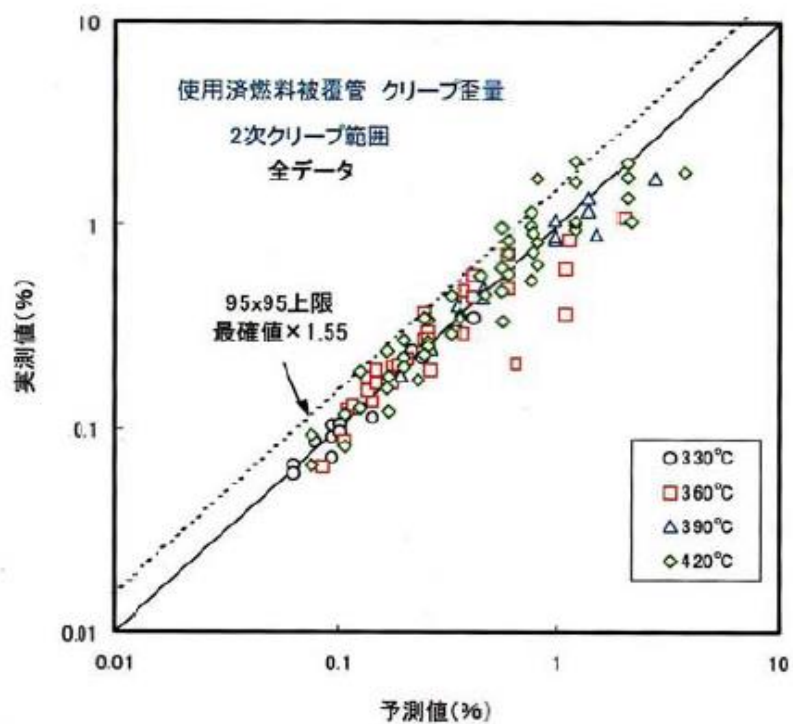
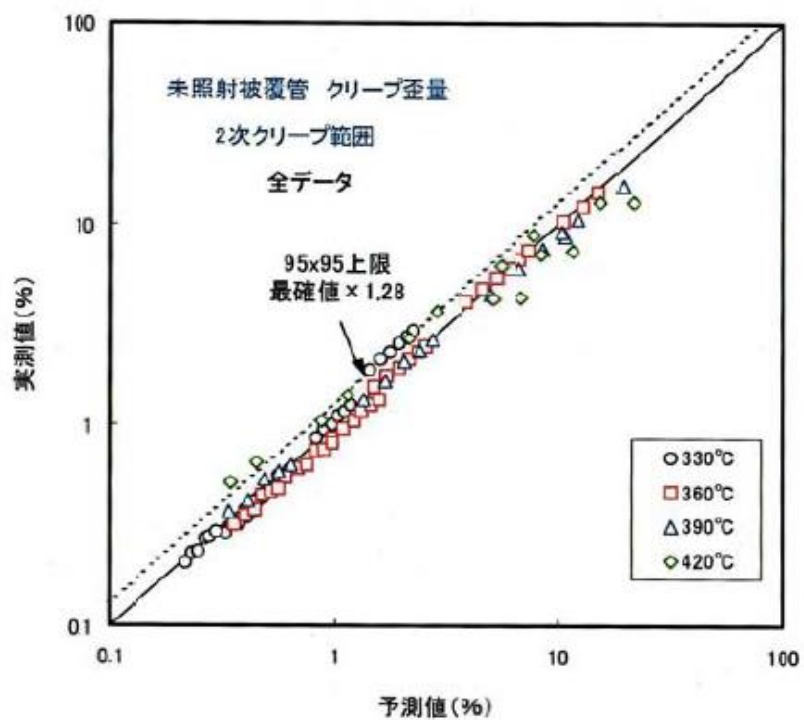
最大燃焼度：50GWd/t

冷却期間：8年

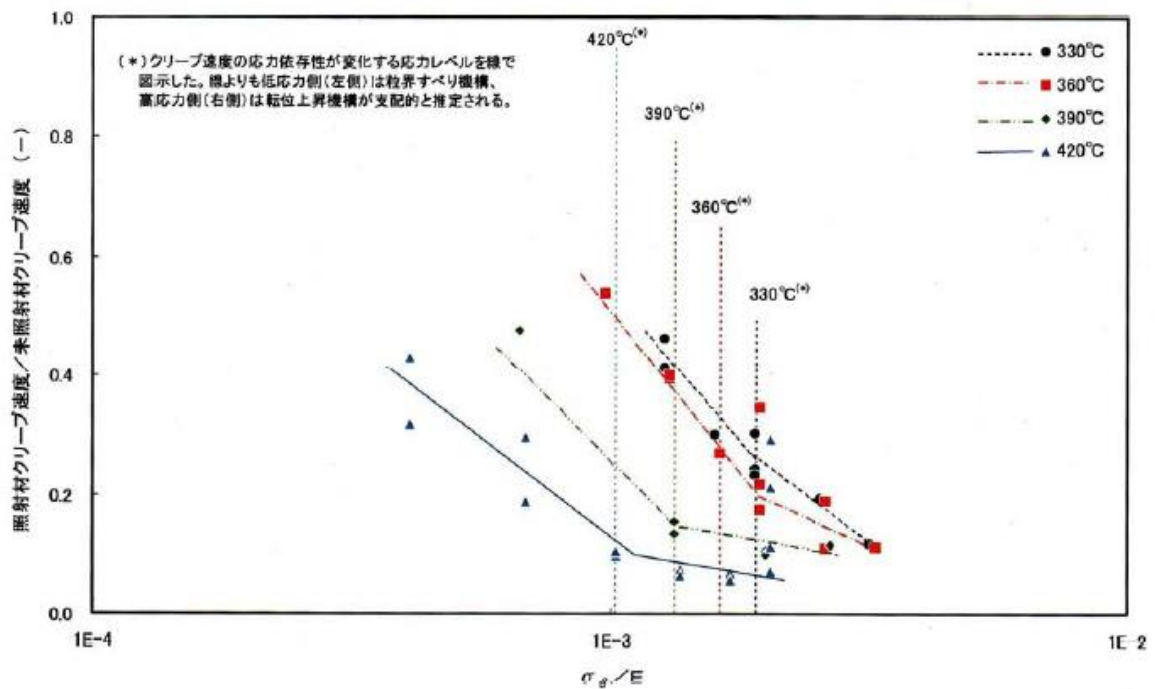
評価期間：60年

温度履歴：貯蔵中の温度低下を新型 8 × 8 ジルコニウムライナ燃料の場合と同様に考慮

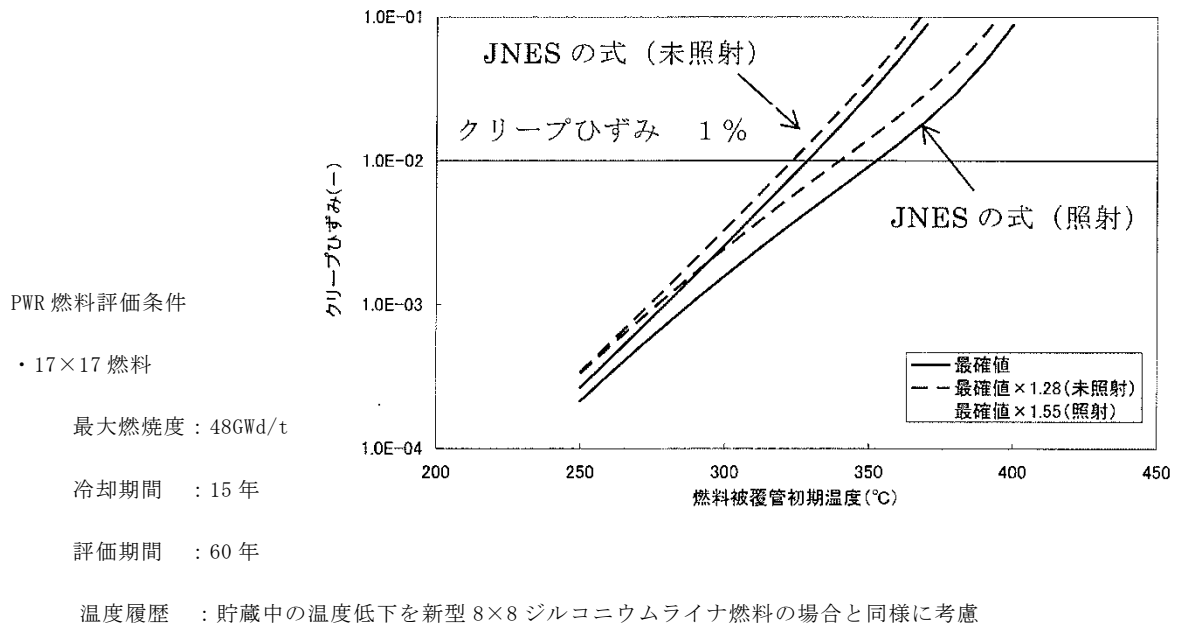
別添 4-3 図 BWR 燃料被覆管初期温度と累積クリープひずみの関係の評価例⁽³⁾



別添4-4図 クリープひずみの予測値と実測値の比較 (PWR) ⁽²⁾

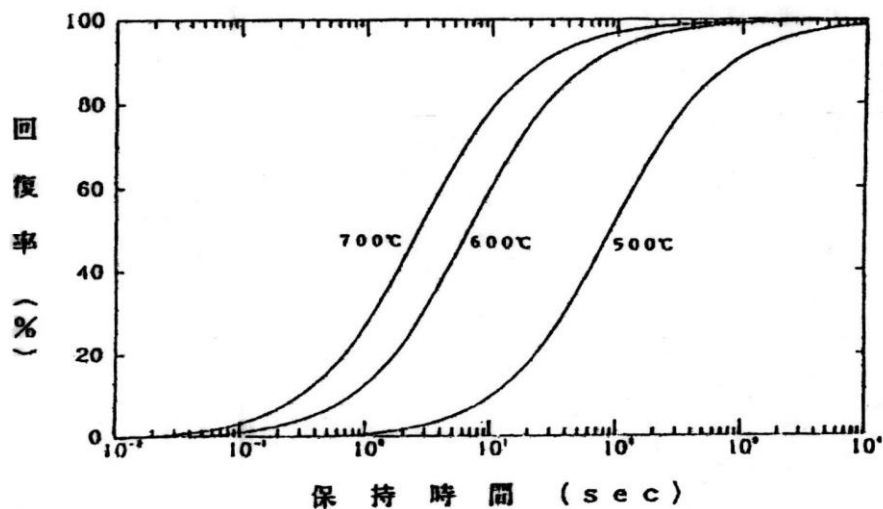


別添 4-5 図 照射材と未照射材の定常クリープ速度の比較 (PWR) ⁽²⁾

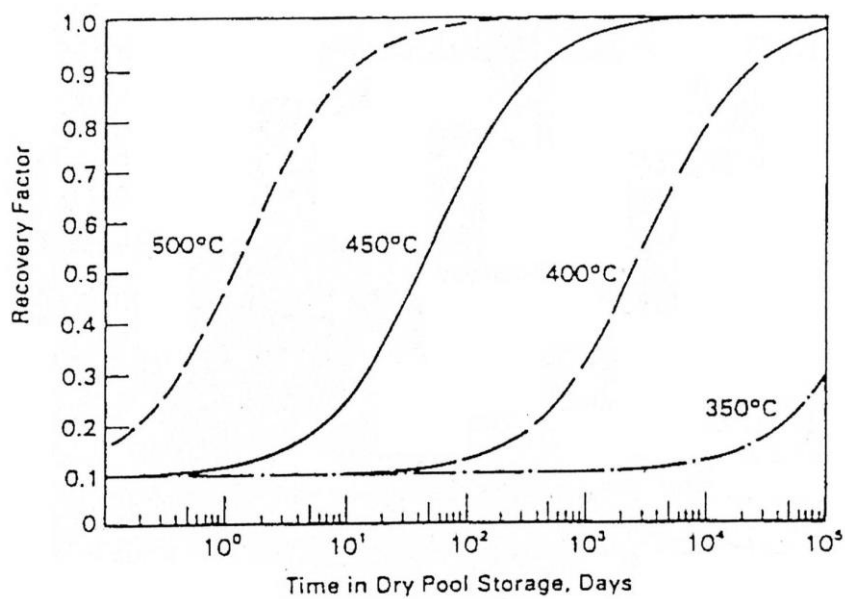


別添 4-6 図 PWR 燃料被覆管初期温度と累積クリープひずみの関係の評価例 ⁽³⁾

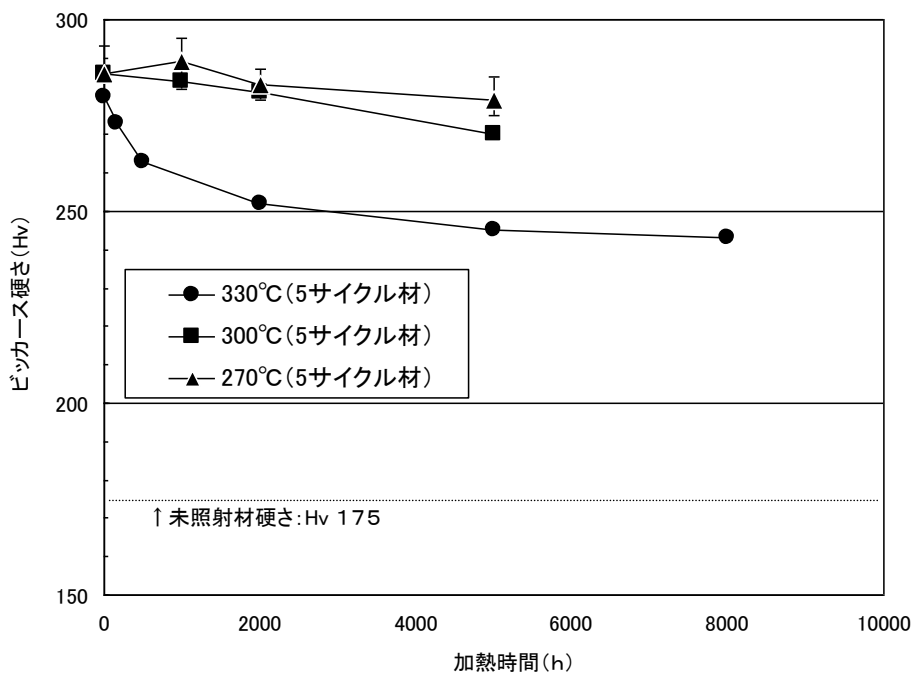
【照射硬化の回復】



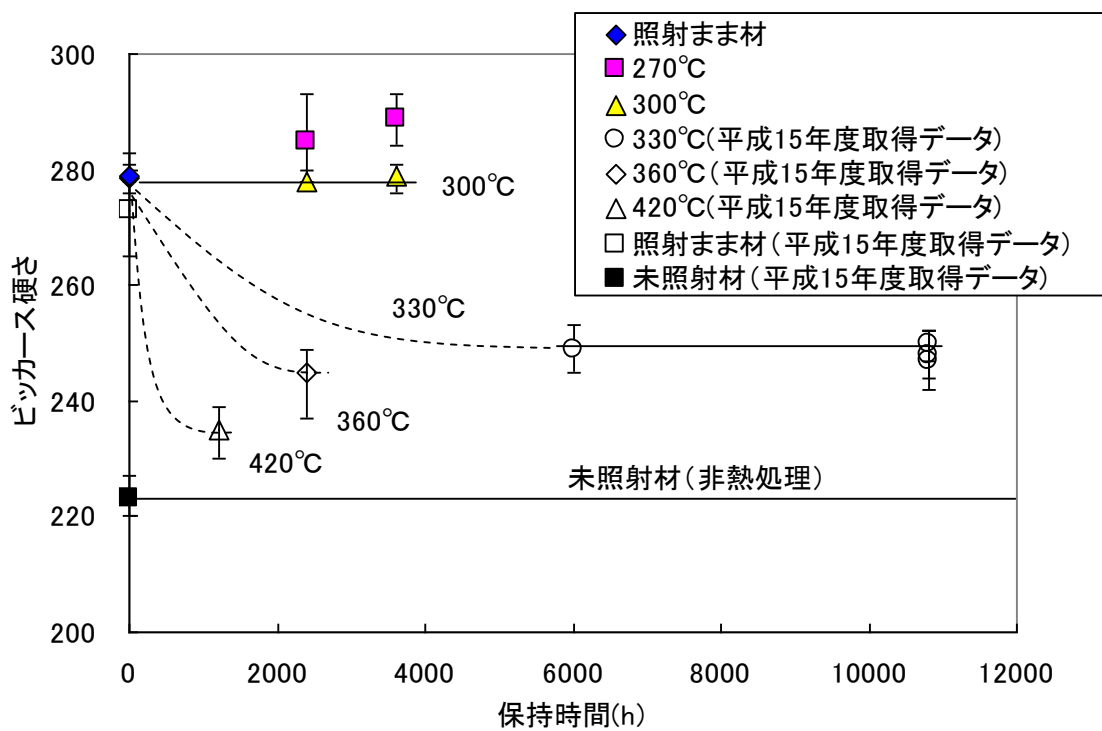
別添 4 - 7 図 燃料被覆管の照射硬化の回復率 (BWR) ⁽⁵⁾



別添 4 - 8 図 燃料被覆管の照射硬化の回復率 (PWR) ⁽⁸⁾



別添 4 - 9 図 BWR 燃料被覆管の照射硬化回復挙動⁽⁶⁾



別添 4 - 10 図 PWR 燃料被覆管の照射硬化回復挙動⁽⁶⁾

参考文献

- (1) (財)電力中央研究所, 「乾式貯蔵時の BWR 燃料被覆管許容温度の検討」 T88068, (財)電力中央研究所 (平成元年 5 月)
- (2) (独) 原子力安全基盤機構, 「平成 15 年度 リサイクル燃料資源貯蔵施設 安全解析コード改良試験 (燃料の長期安全性に関する試験最終成果報告書)」, (独) 原子力安全基盤機構 (平成 16 年 6 月)
- (3) (一社) 日本原子力学会, 「日本原子力学会標準 使用済燃料中間貯蔵施設用金属キャスクの安全設計及び検査基準:2010 附属書 P(参考)」(AESJ-SC-F002:2010), (一社) 日本原子力学会 (2010 年 7 月)
- (4) 総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保全部会 核燃料サイクル安全小委員会 中間貯蔵ワーキンググループ 輸送ワーキンググループ, 「金属製乾式キャスクを用いる使用済燃料中間貯蔵施設における金属製乾式キャスクとその収納物の長期健全性について」, 総合資源エネルギー調査会 (平成 21 年 6 月 25 日)
- (5) T.Torimaru, T.Yasuda, M.Nakatsuka, “Changes in mechanical properties of irradiated Zircaloy-2 fuel cladding due to short term annealing”, J. Nucl. Materials, Vol. 238, 169~174 (1996)
- (6) (独) 原子力安全基盤機構, 「平成 18 年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等 (貯蔵燃料長期健全性等確証試験に関する試験最終成果報告書)」, (独) 原子力安全基盤機構 (平成 19 年 3 月)
- (7) (R.E.Einzigner R.Kohli, “Low-temperature Rupture Behavior of Zircaloy Clad Pressurized Water Reactor Spent Fuel Rods under Dry Storage Conditions”, HEDL-7400, Hanford Engineering Development Laboratory, (1983)
- (8) B.A.Chin, et.al., “Deformation and Fracture Map Methodology for Predicting Cladding Behavior During Dry Storage”, PNL5998.43, Pacific Northwest Laboratory, (1986)

累積クリープひずみ量の評価例

	BWR燃料（新型8×8ジルコニウムライナ燃料/高燃焼度8×8燃料 ⁽¹⁾ ）	PWR燃料 （48GWd/t型燃料 ⁽³⁾ ）
計算条件	<ul style="list-style-type: none"> 評価温度 320℃⁽²⁾ 評価周方向応力 70MPa （添付2参照） 温度，応力 60年間一定 軸方向温度分布無視 未照射材の予測式 予測式による計算結果を 1.43 倍 	<ul style="list-style-type: none"> 評価温度 275℃ 評価フープ応力 100MPa （添付2参照） 温度，応力 60年間一定 軸方向温度分布無視 未照射材の予測式 予測式による計算結果を 1.28 倍
計算条件の妥当性	<ul style="list-style-type: none"> 設計貯蔵期間（50年間）に加えて事業所外運搬に係る期間等を考慮した十分な余裕を有する60年間を通じて、温度、応力は上記の値以下に維持されるため、評価温度、応力の設定は妥当。 貯蔵中の崩壊熱減衰に伴う温度、応力の低下を無視することは保守的な設定。 軸方向温度分布無視は保守的な設定。 未照射材の予測式を用いることは保守的。 	
計算結果	累積クリープひずみ量 0.55%	累積クリープひずみ量 0.46%

- (1) 新型8×8については、燃料被覆管制限温度が200℃と低いことから、上記対象燃料の評価に包含される。
- (2) 燃料被覆管制限温度は300℃であるが、クリープひずみ量計算式の適用可能温度範囲は320℃～425℃であるため、320℃として評価した。
- (3) 39GWd/t型燃料は、崩壊熱量が小さく温度が低いため、48GWd/t燃料の評価に包含される。

燃料被覆管に発生する応力評価について

1. 評価方法

燃料被覆管を円筒とみなすと、周方向応力 σ_{θ} は次式で表される。

$$\sigma_{\theta} = \frac{P \cdot r_m}{t} \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで、
 σ_{θ} : 燃料被覆管周方向応力 (MPa)
 P : 燃料被覆管内圧 (MPa)
 r_m : 燃料被覆管平均半径 (mm)
 t : 燃料被覆管厚 (mm)

また、燃料被覆管平均半径 r_m は、次式で表される。

$$r_m = \frac{D+t}{2} \quad \dots \dots \dots (2)$$

D : 燃料被覆管内径 (mm)

(1) 及び (2) 式より、周方向応力 σ_{θ} を求める。

2. 評価条件及び評価結果

燃料被覆管内圧 (P) *¹ と燃料被覆管のデータ *² の評価条件を用いて、「1. 評価方法」に示す式 (1) によって算定した BWR 燃料被覆管及び PWR 燃料被覆管に生じる周方向応力の評価結果を第 2-1 表「周方向応力 (MPa)」欄に示す。

* 1 : BWR 燃料については、第 3. (2) 項を踏まえて 8 MPa に設定し、PWR 燃料については、添付 2-3 図による寿命末期の燃料棒内圧 (146 kg/cm²G) を除熱解析の評価結果 (205℃) に余裕を考慮した温度 (評価温度 210℃) に換算した 11 MPa に設定。

* 2 : 燃料被覆管平均半径 (r_m) については、第 2-1 表の燃料被覆管内径 (D) と燃料被覆管厚 (t) を用いて、式 (2) によって算定する。

第2-1表 BWR及びPWR燃料被覆管に生じる周方向応力の評価条件及び評価結果

	BWR燃料			PWR燃料
	新型8×8	新型8×8 ジルコニウム ライナ	高燃焼度 8×8	48MWd/t型
燃料被覆管内径D (mm)	10.55	10.55	10.55	8.36
燃料被覆管厚t (mm)				
燃料被覆管内圧P (MPa)				
評価温度 (°C)				
周方向応力 σ_{θ} (MPa)	60以下	70以下	70以下	100以下

上記を踏まえ、BWR燃料被覆管の周方向応力として70MPa、PWR燃料被覆管の周方向応力として100MPaを設定した。

3. 評価の保守性

- (1) 燃料被覆管厚は設計厚に対し、10%の減肉を考慮して設定。なお、BWRライナ有り燃料は、保守的にライナを無視して設定。
- (2) BWR燃料の内圧は、添付2-1図に示す照射済みBWR燃料要素データ(PNL-4835⁽¹⁾)から設定。なお、米国PNLによる照射済BWR燃料棒の内圧を解析した条件は、燃焼度50GWd/tであり、国内の高燃焼度8×8燃料に相当する。BWR燃料の高燃焼度8×8燃料の寿命末期の内圧解析結果は約6.5MPa(約66kgf/cm²)である⁽²⁾。

(独)原子力安全基盤機構の調査結果によれば、9×9燃料を除いた燃料要素の内圧は、最大でも2.8MPa(20°C換算)を超えないことが報告されている(添付2-2図参照*)⁽³⁾。この値を300°Cに換算すると約5.5MPaとなり、“2.評価条件及び結果”に示す燃料被覆管内圧(□MPa)は、これに比べても安全側に設定されている。

*：添付2-2図の凡例は以下のようになっており、貯蔵する燃料タイプを包含している。

- ・実証試験燃料 : 8×8燃料
- ・島根燃料 : 8×8燃料

- ・高性能燃料 : 新型 8 × 8 燃料 (ジルコニウムライナ管を含む)
- ・高燃焼度確証用燃料 : 高燃焼度 8 × 8 燃料

- (3) 発電所の設置変更許可申請書によれば、PWR燃料の内圧は、寿命末期の評価では $146\text{kg/cm}^2\text{G}$ ($=14.4\text{MPa}$, 被覆管表面最高温度 349°C) であることが確認されている。(添付 2-3 図参照)⁽⁴⁾ この値を、除熱解析の評価結果 (MSF-21P 型の型式証明申請書⁽⁵⁾ 添付書類一, 第 1-6 表の燃料被覆管の最高温度 205°C) に余裕を考慮した評価温度 (210°C) に換算すると約 11MPa となり、燃料被覆管の最高温度 205°C の PWR 燃料の内圧に比べても安全側に設定されている。
- (4) BWR 燃料及び PWR 燃料の評価温度については、除熱解析モデルで評価した貯蔵中の燃料被覆管温度を包含した温度として設定しており保守的である。

<参考>照射済みBWR燃料要素データ (PNL-4835⁽¹⁾)

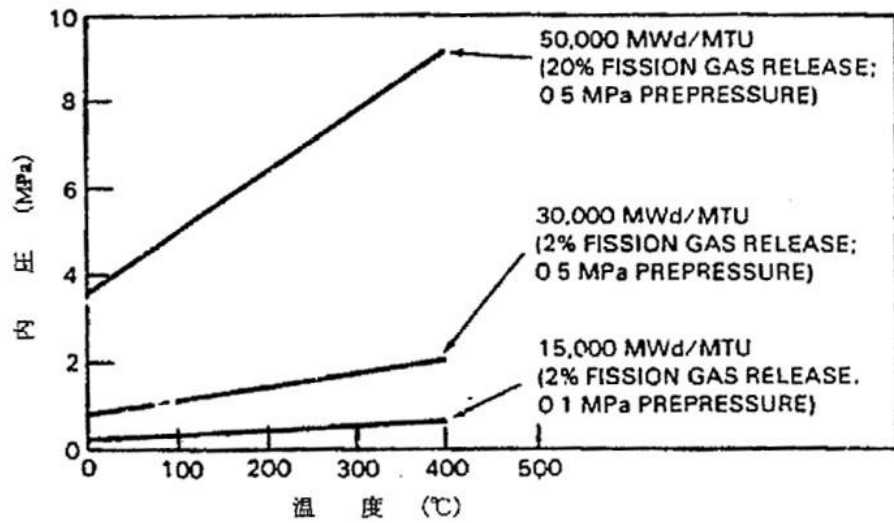
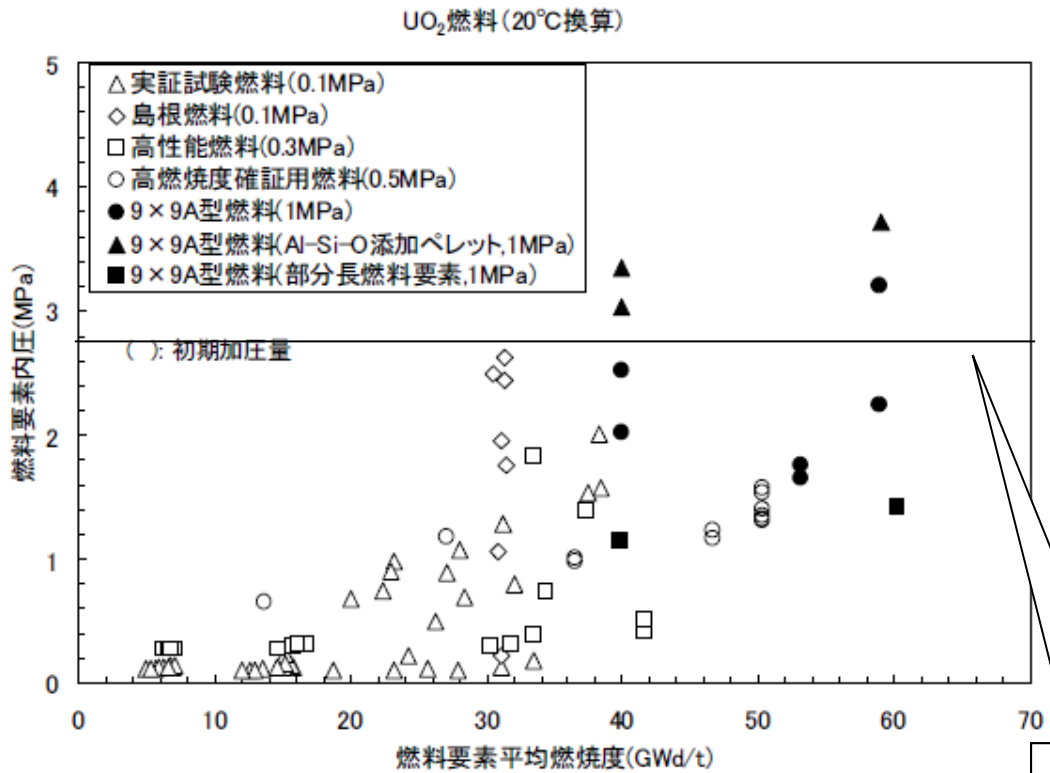


FIGURE B.2. Plenum Gas Pressure for BWR Spent Fuel Computed from Measured EOL Void Volumes and Indicated Fission as Release Assumptions (pressure/temperature relationship from GAPCON-2)

照射済みBWR燃料要素のプレナムガス圧力

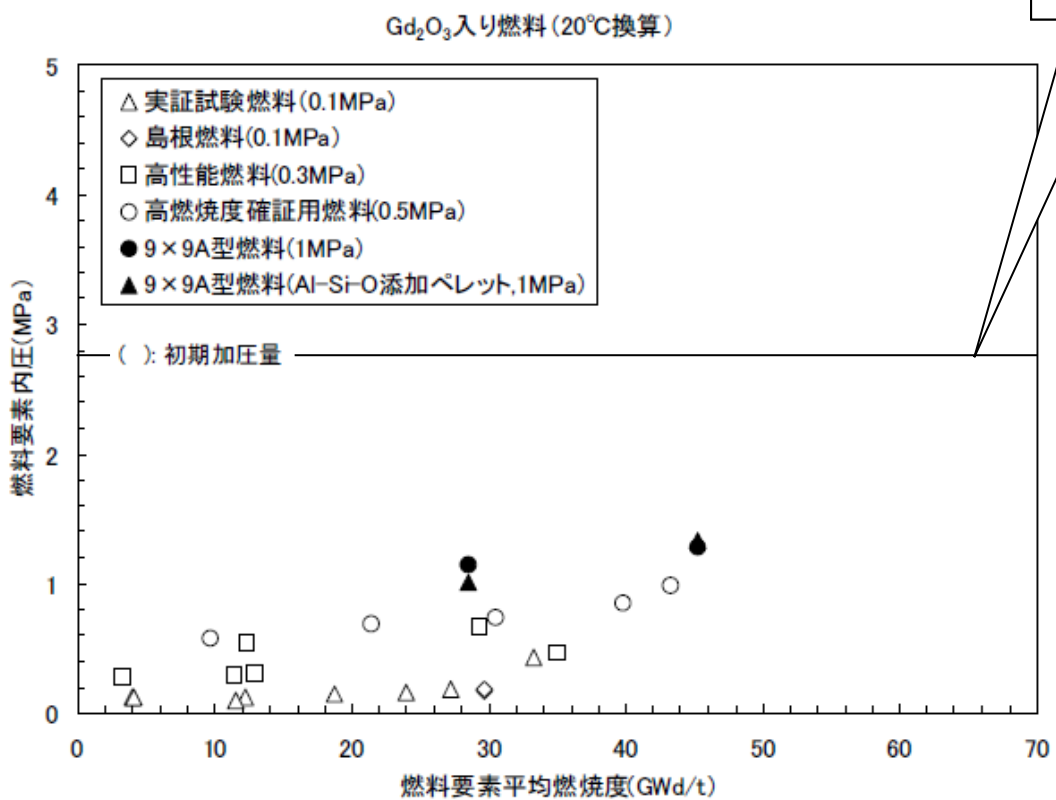
(米国 PNL が照射後試験によって得られた照射燃料棒の空隙体積測定結果から、燃焼度と FP ガス放出率をパラメータとして燃料棒内圧を解析した結果)

添付 2-1 図 照射済みBWR燃料要素のプレナムガス圧力

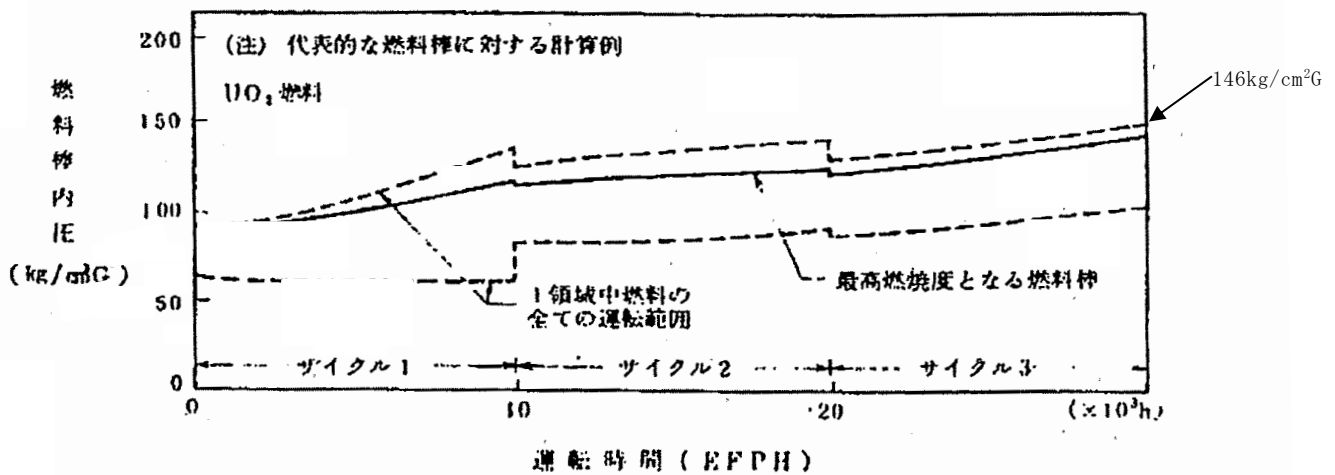


添付 2 - 2 図① UO₂燃料要素内圧の燃焼度変化 (20°C換算)

9 × 9 A 型燃料を除いた最大から 2.8MPa と読み取り



添付 2 - 2 図② Gd₂O₃入り UO₂燃料要素内圧の燃焼度変化 (20°C換算)



添付 2-3 図 燃料棒内圧の燃焼度変化
 敦賀発電所 2 号機原子炉設置変更許可申請書
 添付書類八⁽⁴⁾ 第 3.2.5(1) 図に一部加筆

参考文献

- (1) A. B. Johnson, Jr., et. al., “Technical Basis for Storage of Zircaloy-clad Spent Fuel in Inert Gases”, PNL-4835. B. 3, Pacific Northwest Laboratory, (1983)
- (2) 東京電力株式会社, 「福島第一原子力発電所 原子炉設置変更許可申請書」, 東京電力株式会社 (平成 3 年 5 月)
- (3) (独) 原子力安全基盤機構, 「平成 18 年度 高燃焼度 9 × 9 型燃料信頼性実証成果報告書 付録 1 (9 × 9 A 型燃料照射後試験結果)」, (独) 原子力安全基盤機構 (平成 19 年 12 月)

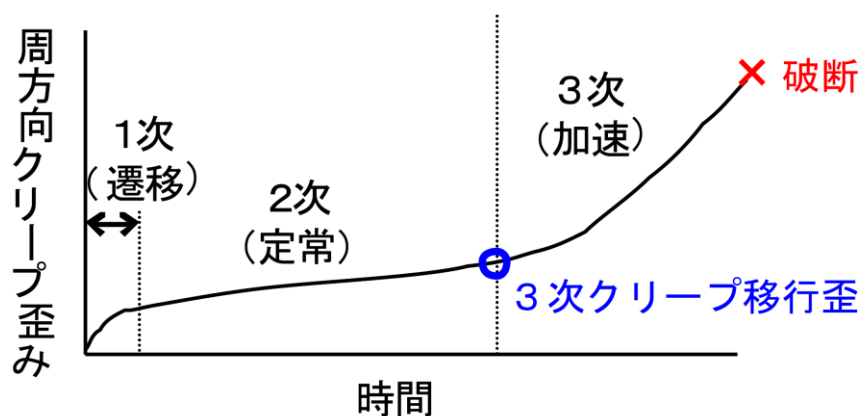
累積クリープひずみ量の根拠について

燃料被覆管のクリープ破損は、材料の降伏応力以下でも高温では徐々に塑性変形（クリープ）が生じ、この変形量（累積クリープ歪み）が限界を超えると燃料被覆管が破断する現象である。（添付 3-1 図）

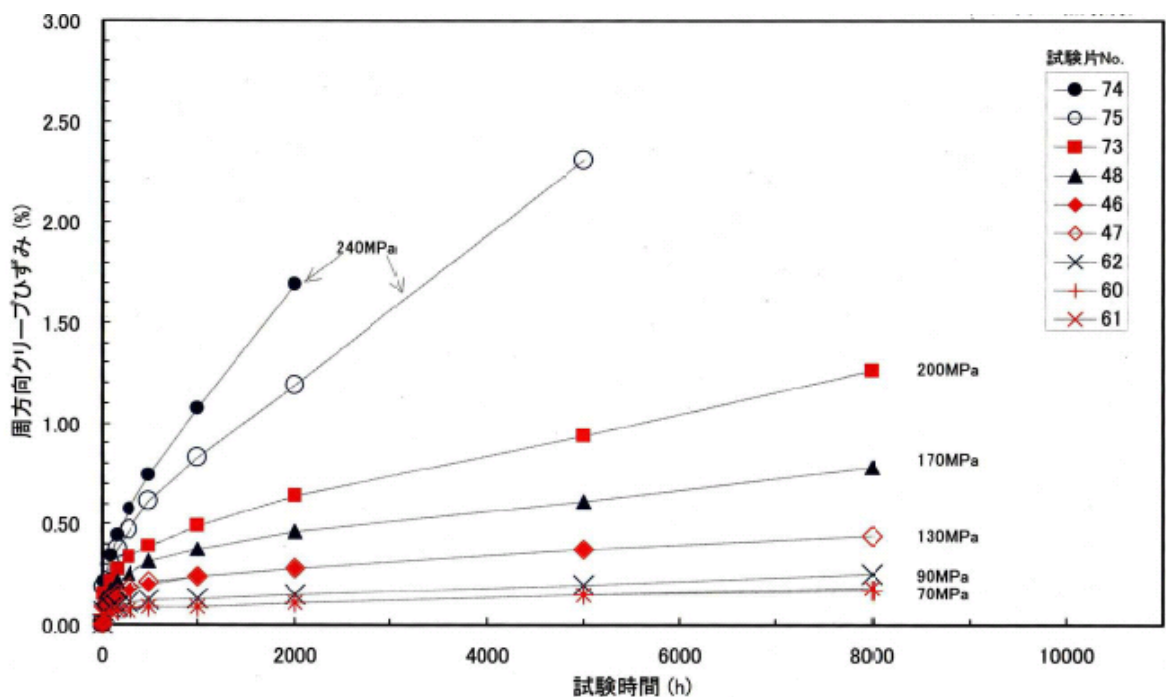
国内の軽水炉で照射された BWR 50Gwd/t のジルカロイ-2 燃料被覆管，PWR 48Gwd/t のジルカロイ-4 燃料被覆管を用いたクリープ試験の結果，燃料被覆管は 1%以上のクリープ変形能力を有する（累積クリープ歪みが 1%を超えると燃料被覆管が破損することを意味するものではない）ことが確認されている。（添付 3-2 図，添付 3-3 図）

本結果を基に，累積クリープ量が設計評価期間中に 1%を超えないことを制限としている。

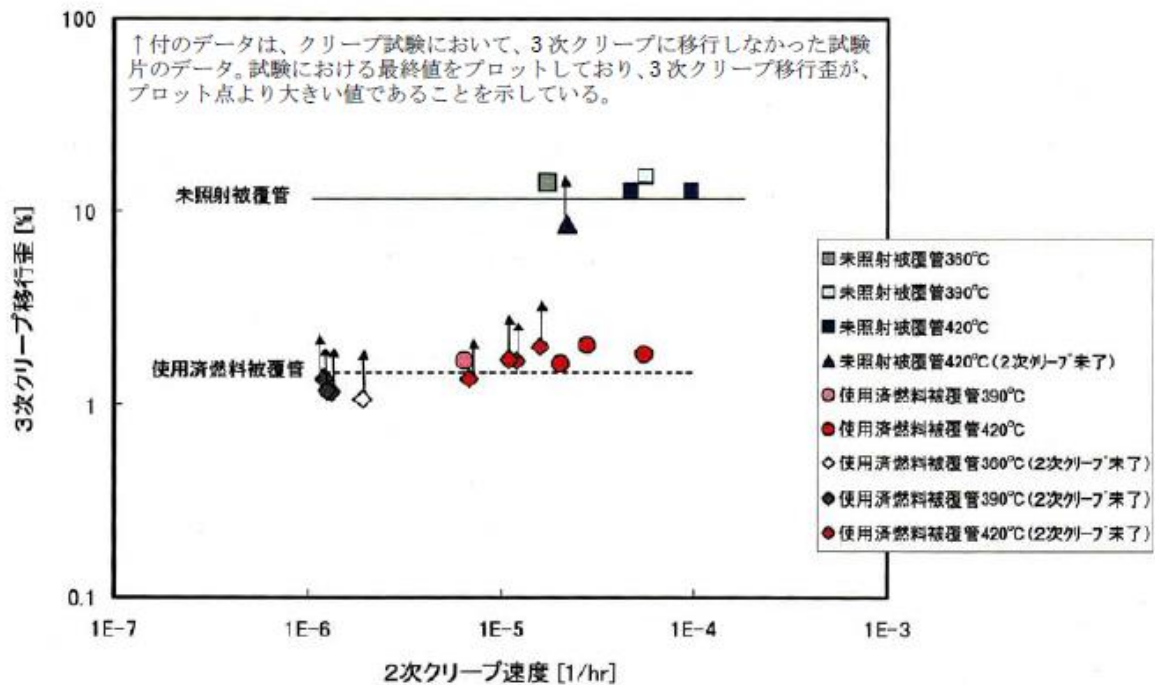
貯蔵中の地震や通常輸送中の振動・衝撃によって燃料被覆管には主に軸方向の圧縮応力や曲げ応力（～10MPa 程度）が付加されるが，軸方向の応力は燃料棒内圧により定常的に生じている応力（周方向には～70MPa 程度（BWR 燃料の場合），～100MPa 程度（PWR 燃料の場合））に比べて小さく，作用する時間も短時間であることから，これら事象による影響は小さい。



添付 3-1 図 クリープ曲線の概略⁽¹⁾



添付 3 - 2 図 BWR 燃料被覆管のクリープ曲線 (390°C) ⁽¹⁾



添付 3 - 3 図 PWR 燃料被覆管の 3 次クリープ移行歪 ⁽¹⁾

参考文献

- (1) 総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保全部会 核燃料サイクル安全小委員会 中間貯蔵ワーキンググループ 輸送ワーキンググループ「金属製乾式キャスクを用いる使用済燃料中間貯蔵施設における金属製乾式キャスクとその収納物の長期健全性について」, 総合資源エネルギー調査会 (平成 21 年 6 月 25 日)

照射硬化回復の予測評価例

1. 評価式

5 サイクル照射された燃料被覆管の照射硬化回復試験結果より，照射硬化の回復挙動は，以下のとおり定式化⁽¹⁾されている。

$$\begin{aligned} \text{照射硬化残存率} & : F = \exp(-K \cdot t)^{n_r} \\ & K = A_r \cdot \exp(-Q_r / (RT)) \\ \text{定数 } n_r & : 2.08 \times 10^{-1} \\ \text{定数 } A_r & : 1.17 \times 10^{19} \text{ (1/h)} \\ \text{活性化エネルギー } Q_r & : 2.86 \times 10^5 \text{ (J/mol)} \\ t : \text{時間 (h)}, R : \text{気体定数 (J/mol/K)}, T : \text{温度 (K)} \end{aligned}$$

(1) 「平成 15 年度 リサイクル燃料資源貯蔵施設安全解析コード改良試験（燃料の長期安全性に関する試験最終成果報告書）」式 (4.1.4)

2. 照射硬化回復考慮評価例

評価条件

BWR 燃料被覆管	: ジルカロイ - 2
貯蔵時温度	: 300°C 一定
評価期間	: 60 年間
照射硬化残存率 F	: 約 0.6
回復率 (1 - F)	: 約 0.4 (40% 回復)

第 16 条 使用済燃料の受入施設

<目 次>

1. 設計方針
2. 施設設計

(別 添)

- 別添 1 金属キャスクハンドリングフロー及びインターロック条件等について
- 別添 2 搬送台車で金属キャスクを移送中の地震対応について
- 別添 3 たて起こし架台と仮置架台の改造について
- 別添 4 衝撃吸収材の性能及び敷設範囲について

1. 設計方針

使用済燃料貯蔵施設には、金属キャスクの搬入、貯蔵、検査及び搬出に係る金属キャスクの移送及び取扱いに対して、基本的安全機能を確保できる使用済燃料の受入施設を設ける。

金属キャスクの移送及び取扱いに対して手順を定め、金属キャスクの落下防止対策、金属キャスク単独及び金属キャスク相互の衝突防止対策並びに転倒防止対策を講ずる設計とする。また、緩衝体等の移送及び取扱いに対して手順を定め、落下防止対策を講ずる設計とする。

(1) 金属キャスクの移送及び取扱い

a. 落下防止対策

(a) 受入れ区域天井クレーンによる移送及び取扱い

- i 受入れ区域天井クレーンは、金属キャスクの総重量を十分上回る重量に耐えることのできる強度に設計する。
- ii 受入れ区域天井クレーンのワイヤロープ、ブレーキ及びリミットスイッチは、故障を考慮して二重化する。
- iii 受入れ区域天井クレーンは、動力源である電気の供給が停止した場合に動作するブレーキを設ける。
- iv つり具は、圧縮空気が喪失した場合、金属キャスクが外れないフェイル・セーフ設計とする。
- v つり具の取付不良を考慮して、金属キャスクを4点つりとする（水平吊具はアーム1本の保持不良があった場合でも落下せず、垂直吊具は主アーム2本及び補アーム2本で二重化しており、主アームの保持不良があった場合でも補アームにより落下しない）。
- vi つり具の取付不良を考慮して、受入れ区域天井クレーンフックによるつり具保持の他に、安全板によりつり具を保持する設計とする。

b. 転倒防止対策

(a) 受入れ区域天井クレーンによるたて起こし時

- i 受入れ区域天井クレーンは、金属キャスクの総重量を十分上回る重量に耐えることのできる強度に設計する。

- ii 受入れ区域天井クレーンのワイヤロープ、ブレーキ及びリミットスイッチは、故障を考慮して二重化する。
 - iii つり具は、圧縮空気が喪失した場合、金属キャスクが外れないフェイル・セーフ設計とする。
 - iv 事業所外運搬に必要な緩衝体を取り外した状態で金属キャスクをつり上げる場合には、衝撃吸収材を敷設する。
- (b) 搬送台車による移送及び取扱い
- i 搬送台車は、電源喪失時や空気圧縮機の停止により動力源である圧縮空気の供給が停止した場合には、金属キャスクを着床させ衝突を防止する。
 - ii 搬送台車は障害物との接触を検知する装置を設け、衝突を防止する。また、操作員及び補助員による緊急停止機構を設ける。
 - iii 搬送台車による移送及び取扱いにおいて、急発進及び急停止による加速度又は基準地震動 S_s による加速度が作用しても、金属キャスクが転倒することのないように、速度及び浮上高さを適切に設定する。貯蔵架台は転倒しない寸法に設計する。
- c. 金属キャスク単独及び金属キャスク相互の衝突防止対策
- (a) 受入れ区域天井クレーンによる移送及び取扱い（走行、横行）
- i 受入れ区域天井クレーンのワイヤロープ、ブレーキ及びリミットスイッチは、故障を考慮して二重化する。
 - ii 受入れ区域天井クレーンは、金属キャスクをつった状態で仮置き中の金属キャスク上を通過できないように可動範囲を制限するインターロックを設け、金属キャスク相互の衝突を防止する。
- (b) 受入れ区域天井クレーンによる移送及び取扱い（つり下げ）
- i 受入れ区域天井クレーンのワイヤロープ及びブレーキは、故障を考慮して二重化する。
 - ii 金属キャスクは、貯蔵期間中に操作員の単一の誤操作により発生すると予想される貯蔵架台への衝突、金属キャスク取扱い時の仮置架台、たて起こし架台との衝突事象に対し、基本的安全機能を損なわない構造強度を有する設計とする。

(c) 搬送台車による移送及び取扱い

- i 搬送台車は、電源喪失時や空気圧縮機の停止により動力源である圧縮空気の供給が停止した場合には、金属キャスクを着床させ衝突を防止する。
- ii 搬送台車には障害物との接触を検知する装置を設け、衝突を防止する。また、操作員及び補助員による緊急停止機構を設ける。
- iii 搬送台車は、移送速度及び浮上高さを適切に設定する運用とする。
- iv 金属キャスクは、貯蔵期間中に操作員の単一の誤操作により発生すると予想される貯蔵架台への衝突、金属キャスク取扱い時の他の構造物及び機器との衝突事象に対し、基本的安全機能を損なわない構造強度を有する設計とする。

(2) 重量物の移送及び取扱い

a. 緩衝体等の落下防止対策

- (a) 受入れ区域天井クレーンは、地震荷重、自重及びつり荷荷重の適切な組合せを考慮しても強度上耐え得る設計とする。
- (b) 受入れ区域天井クレーンは、可動範囲を制限するインターロックを設ける。
- (c) 金属キャスクへの落下を防止するため、三次蓋、二次蓋及び貯蔵架台は、仮置架台に仮置き中の金属キャスク上を移送及び取扱いをしない運用とする（受入れ区域天井クレーンの荷重制限（主巻(90t)及び補巻(4.5t)）未満では、可動範囲及びつり上げ高さのインターロックが動作しない）。
- (d) 受入れ区域天井クレーンで緩衝体の移送及び取扱いをする時は、可動範囲が制限されている。進入の際には許可するスイッチを操作して、金属キャスクを仮置きしていないエリアに移送及び取扱いをする運用とする。

b. 三次蓋及び二次蓋の落下防止対策

- (a) 受入れ区域天井クレーンは、地震荷重、自重及びつり荷荷重の適切な組合せを考慮しても強度上耐え得る設計とする。
- (b) 事業所外運搬に供する三次蓋の取り付け又は取り外しの作業、及び

二次蓋金属ガスケットの交換作業を行う場合には、金属キャスク上での三次蓋及び二次蓋のつり上げ高さを適切に制限する。

(3) 誤操作及び不動作の考慮

金属キャスクの基本的安全機能を維持する観点から、作業要領を十分整備し、監督者の直接指揮下で金属キャスクの取扱作業を行う管理体制をとる。監督者は、金属キャスクの移送及び取扱いに関して知識を有し、教育・訓練実績及び実務経験のあるものが従事する。

2. 施設設計

使用済燃料の受入施設は、金属キャスクの搬入後及び搬出前の仮置き、金属キャスクの移送及び取扱い並びに検査等を行う受入れ区域天井クレーン、搬送台車等の受入設備で構成する（第1図参照）。

受入設備は、受入れ区域天井クレーン、搬送台車、圧縮空気供給設備、仮置架台、たて起こし架台（衝撃吸収材含む）及び検査架台で構成する。

キャスク輸送車両により使用済燃料貯蔵建屋受入れ区域に搬入された金属キャスクは、事業所外運搬に必要な緩衝体を取り付けた状態で、受入れ区域天井クレーンを用いて仮置架台又はたて起こし架台に設置する。仮置架台に設置された金属キャスクは、たて起こしの都度、たて起こし架台へ移送及び取扱いを行う（別添1参照）。

金属キャスクは、たて起こし架台で緩衝体を取り外し、受入れ区域天井クレーンを用いてたて起こし、金属キャスクを貯蔵架台へ設置、固定した後、搬送台車により検査架台へ移送及び取扱いを行う。

金属キャスクは、キャスク表面の外観検査、線量当量率検査等を行った後、搬送台車を用いて貯蔵区域の所定の箇所まで移送及び取扱いを行い、貯蔵架台を床面に固定して貯蔵する。

また、上記の工程を逆に行うことにより、金属キャスクを搬出する。

金属キャスクの移送及び取扱いに対して手順を定め、金属キャスクの落下防止対策、金属キャスク単独及び金属キャスク相互の衝突防止対策並びに転倒防止対策を講ずる設計とする。また、緩衝体等の移送及び取扱いに対して手順を定め、落下防止対策を講ずる設計とする。

(1) 金属キャスクの移送及び取扱い

a. 落下防止対策

(a) 受入れ区域天井クレーンによる移送及び取扱い

- i 受入れ区域天井クレーンは、金属キャスクの総重量を十分上回る重量に耐えることのできる強度に設計する。
- ii 受入れ区域天井クレーンのワイヤロープ、ブレーキ及びリミットスイッチは、故障を考慮して二重化する。

- iii 受入れ区域天井クレーンは、動力源である電気の供給が停止した場合に動作するブレーキを設ける。
 - iv つり具は、圧縮空気が喪失した場合、金属キャスクが外れないフェイル・セーフ設計とする。
 - v つり具の取付不良を考慮して、金属キャスクを4点つりとする（水平吊具はアーム1本の保持不良があった場合でも落下せず、垂直吊具は主アーム2本及び補アーム2本で二重化しており、主アームの保持不良があった場合でも補アームにより落下しない）。
 - vi つり具の取付不良を考慮して、受入れ区域天井クレーンフックによるつり具保持の他に安全板によりつり具を保持する設計とする。
- b. 転倒防止対策
- (a) 受入れ区域天井クレーンによるたて起こし時
 - i 受入れ区域天井クレーンは、金属キャスクの総重量を十分上回る重量に耐えることのできる強度に設計する。
 - ii 受入れ区域天井クレーンのワイヤロープ、ブレーキ及びリミットスイッチは、故障を考慮して二重化する。
 - iii つり具は、圧縮空気が喪失した場合、金属キャスクが外れないフェイル・セーフ設計とする。
 - iv 事業所外運搬に必要な緩衝体を取り外した状態で金属キャスクをつり上げる場合には、衝撃吸収材を敷設する。
 - (b) 搬送台車による移送及び取扱い
 - i 搬送台車は、電源喪失時や空気圧縮機の停止により動力源である圧縮空気の供給が停止した場合には、金属キャスクを着床させ衝突を防止する。
 - ii 搬送台車は、障害物との接触を検知する装置を設け、衝突を防止する。また、操作員及び補助員による緊急停止機構を設ける。
 - iii 搬送台車は、移送及び取扱い中、急発進及び急停止による加速度又は基準地震動 S_s による加速度が作用しても、金属キャスクが転倒することのないように、定格速度（10m/分）以下で、浮上高さを約5cmで移送する。貯蔵架台は転倒しない寸法に設計する。

c. 金属キャスク単独及び金属キャスク相互の衝突防止対策

(a) 受入れ区域天井クレーンによる移送及び取扱い（走行，横行）

- i 受入れ区域天井クレーンのワイヤロープ，ブレーキ及びリミットスイッチは，故障を考慮して二重化する。
- ii 受入れ区域天井クレーンは，金属キャスクをつった状態で仮置き中の金属キャスクを通過できないよう，可動範囲を制限するインターロックを設け，金属キャスク相互の衝突を防止する。

(b) 受入れ区域天井クレーンによる移送及び取扱い（つり下げ）

- i 受入れ区域天井クレーンのワイヤロープ及びブレーキは，故障を考慮して二重化する。
- ii 金属キャスクは，貯蔵期間中に操作員の単一の誤操作により発生すると予想される貯蔵架台への衝突，金属キャスク取扱い時の仮置架台及びたて起こし架台との衝突事象に対し，基本的安全機能を損なわない構造強度を有する設計とする。

(c) 搬送台車による移送及び取扱い

- i 搬送台車は，電源喪失時や空気圧縮機の停止により，動力源である圧縮空気の供給が停止した場合には，金属キャスクを着床させ衝突を防止する。
- ii 搬送台車には障害物との接触を検知し停止する装置を設け，衝突を防止する。また，操作員及び補助員による緊急停止機構を設ける。
- iii 搬送台車は，定格速度（10m／分）以下で，浮上高さを約5cmで移送する。
- iv 金属キャスクは，貯蔵期間中に操作員の単一の誤操作により発生すると予想される貯蔵架台への衝突，金属キャスク取扱い時の他の構造物及び機器との衝突事象に対し，基本的安全機能を損なわない構造強度を有する設計とする。

(2) 重量物の移送及び取扱い

a. 緩衝体等の落下防止対策

- (a) 受入れ区域天井クレーンは，地震荷重，自重及びつり荷荷重の適切な組合せを考慮しても強度上耐え得る設計とする。

(b) 受入れ区域天井クレーンは、可動範囲を制限するインターロックを設ける。

(c) 金属キャスクへの落下を防止するため、三次蓋、二次蓋及び貯蔵架台は、仮置架台に仮置き中の金属キャスク上を移送及び取扱いをしない運用とする（受入れ区域天井クレーンの荷重制限（主巻(90t)及び補巻(4.5t)）未満では、可動範囲及びつり上げ高さのインターロックが動作しない）。

(d) 受入れ区域天井クレーンで緩衝体の移送及び取扱いをする時は、可動範囲が制限されている。進入の際には許可するスイッチを操作して、金属キャスクを仮置きしていないエリアに移送及び取扱いをする運用とする。

b. 三次蓋及び二次蓋の落下防止対策

(a) 受入れ区域天井クレーンは、地震荷重、自重及びつり荷荷重の適切な組合せを考慮しても強度上耐え得る設計とする。

(b) 事業所外運搬に供する三次蓋の取り付け又は取り外しの作業、及び二次蓋金属ガスケットの交換作業を行う場合には、金属キャスク上での三次蓋及び二次蓋のつり上げ高さを10cm以下で運用する。

(3) 誤操作及び不動作の考慮

金属キャスクの基本的安全機能を維持する観点から、作業要領を十分整備し、監督者の直接指揮下で金属キャスクの取扱作業を行う管理体制をとる。監督者は、金属キャスクの移送及び取扱いに関して知識を有し、教育・訓練実績及び実務経験のあるものが従事する。

(4) 受入施設における具体的設計

a 受入れ区域天井クレーン

受入れ区域天井クレーンは、使用済燃料貯蔵建屋受入れ区域上部に設置し、受入れ区域における金属キャスクの移送及び取扱いを行う（第2図参照）。衝撃吸収材は、たて起こし架台上での転倒を考慮して敷設する。

(a) 受入れ区域天井クレーンは、金属キャスクの総重量を十分上回る重量に耐えることのできる強度に設計する。

- (b) 受入れ区域天井クレーンのワイヤロープ、ブレーキ及びリミットスイッチは、故障を考慮して二重化する。
- (c) 受入れ区域天井クレーンは、動力源である電気の供給が停止した場合に動作するブレーキを設ける。
- (d) 受入れ区域天井クレーンは、地震荷重、自重及びつり荷荷重の適切な組合せを考慮しても強度上耐え得る設計とする。
- (e) 受入れ区域天井クレーンは、金属キャスクをつった状態で仮置き中の金属キャスクを通過できないように可動範囲を制限するインターロックを設け、金属キャスク相互の衝突を防止する。
- (f) つり具は、圧縮空気が喪失した場合、金属キャスクが外れないフェイル・セーフ設計とする。
- (g) つり具の取付不良を考慮して、金属キャスクを4点つりとする（水平吊具はアーム1本の保持不良があった場合でも落下せず、垂直吊具は主アーム2本及び補アーム2本で二重化しており、主アームの保持不良があった場合でも補アームにより落下しない）。
- (h) つり具の取付不良を考慮して、受入れ区域天井クレーンフックによるつり具保持の他に安全板によりつり具を保持する設計とする。
- (i) 事業所外運搬に必要な緩衝体を取り外した状態で金属キャスクをつり上げる場合には、衝撃吸収材を敷設する（第7図参照）。

b. 搬送台車

搬送台車は、受入れ区域と貯蔵区域の間との金属キャスクの移送及び取扱いを行う（第3、4図、別添2参照）。

搬送台車は、圧縮空気供給設備から供給される圧縮空気により、金属キャスク及び貯蔵架台を揚重し、移送及び取扱いを行う設備である。

搬送台車は、エアキャスタに圧縮空気を供給し、床面とエアキャスタの間に薄い空気膜（約0.1mm）を形成させることで摩擦力を大幅に低減させ、小さな駆動力で重量物の移送及び取扱いを可能にするものである。

この方式の搬送システムは一般産業界では広く用いられており、米国ではコンクリートキャスクの搬送設備としても用いられている。

なお、金属キャスクの支持構造物である貯蔵架台は、金属キャスクの移

送及び取扱いをするためのパレットとしての機能を有しており、搬送台車のフォーク部を貯蔵架台に挿入し金属キャスクの移送及び取扱いを行う。

搬送台車は、金属キャスクの移送及び取扱いを安全かつ確実にを行うため、障害物との接触を検知し停止する装置を設け、衝突を防止する。また、操作員及び補助員による緊急停止機構を設ける。搬送台車で移送及び取扱いの際には、定格速度（10m/分）以下で、搬送台車の浮上高さを約5cmで移送する。貯蔵架台は転倒しない寸法に設計する。

搬送台車は、電源喪失時や空気圧縮機の停止により動力源である圧縮空気の供給が停止した場合には、金属キャスクを着床させ、衝突を防止する。

c. 圧縮空気供給設備

圧縮空気供給設備は、空気圧縮機、空気貯槽等から構成され搬送台車等へ圧縮空気を供給する（第5図参照）。空気貯槽には、安全弁を設置し、過圧防止対策を講じる設計とする。

d. 仮置架台

仮置架台は、搬入した金属キャスクを検査するまでの間、搬出する金属キャスクをキャスク輸送車両へ移送するまでの間及び金属キャスクの点検で、一時的に金属キャスクを仮置きするための架台である（第8図、別添3参照）。

金属キャスクの取扱いにおいて、基本的安全機能を維持するための具体的な設計は、以下のとおり行う。

- (a) 仮置架台は、地震荷重及び金属キャスク質量の適切な組合せを考慮しても強度上耐えるように設計する。
- (b) 仮置架台に設置された金属キャスクは、輸送用の緩衝体が取付けられた状態とすることを手順書に定め運用管理する。

e. たて起こし架台

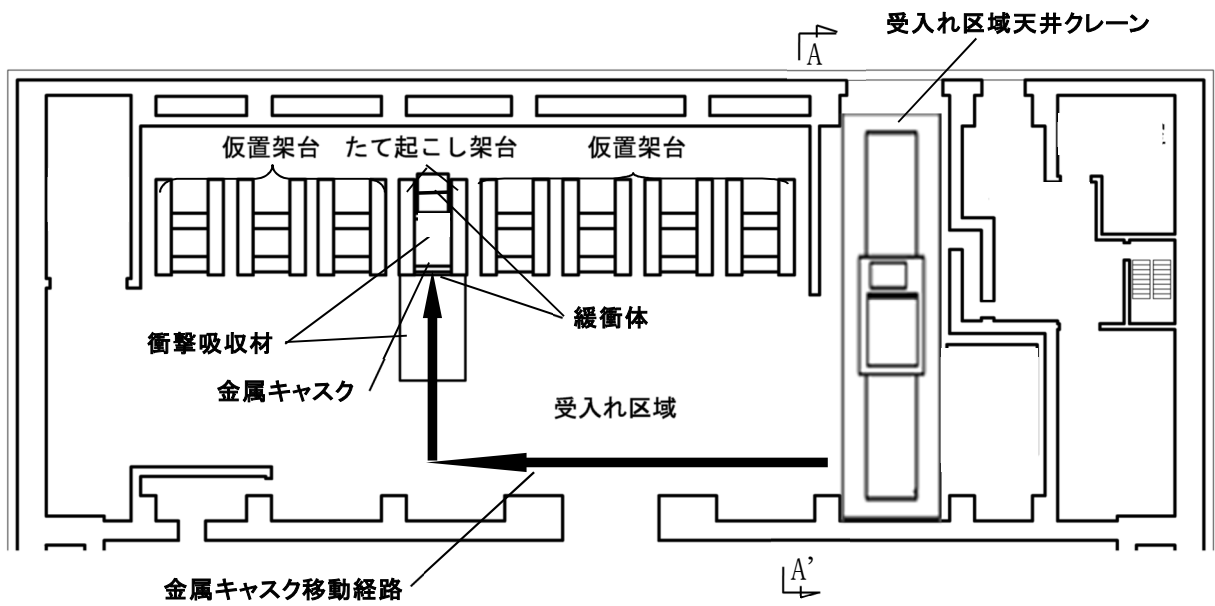
たて起こし架台は、水平状態の金属キャスクを垂直状態にたて起こすための架台である（金属キャスクの点検、搬出の場合も同様とする（第6図、別添3参照））。

金属キャスクの取扱いにおいて、基本的安全機能を維持するための具体的な設計は、以下のとおり行う。

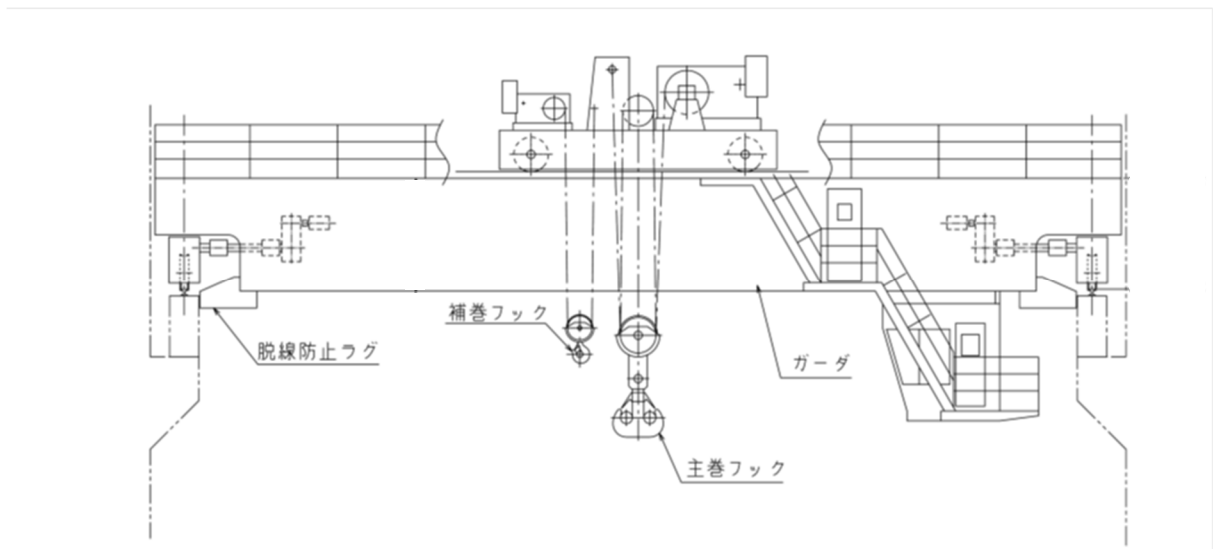
- (a) たて起こし架台は、地震荷重及び金属キャスク質量の適切な組合せを考慮しても強度上耐えるように設計する。
- (b) 万一、たて起こし時に金属キャスクが転倒しても、金属キャスクの閉じ込め機能に著しい損傷を与えないように衝撃吸収材をたて起こし架台及びその周辺に敷設する（第7図，別添4参照）。

f. 検査架台

検査架台は、金属キャスクの受入検査，施設外へ搬出するために必要な検査，三次蓋の取外し・取付，計測器の取付・取外し及び金属キャスクの点検が行える設計とする（第9図参照）。また，検査架台は作業員の足場であり，金属キャスクを直接取り扱う設備ではない。

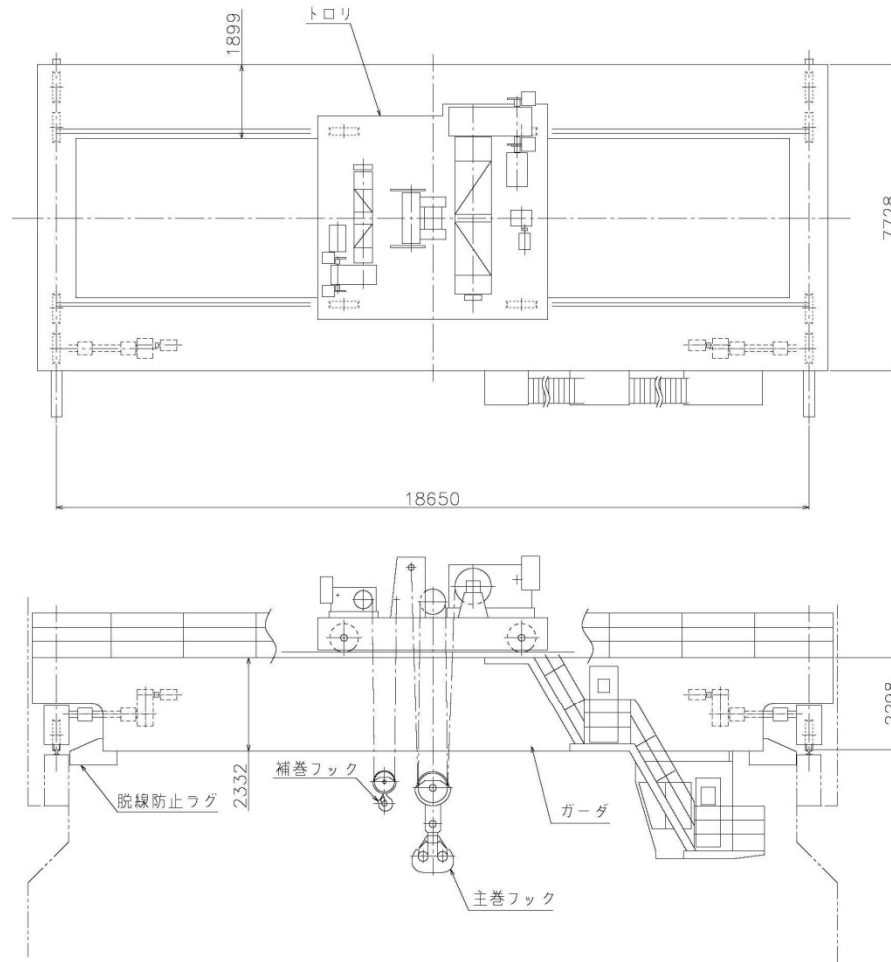


受入れ区域配置



受入れ区域天井クレーン断面 (A-A'断面)

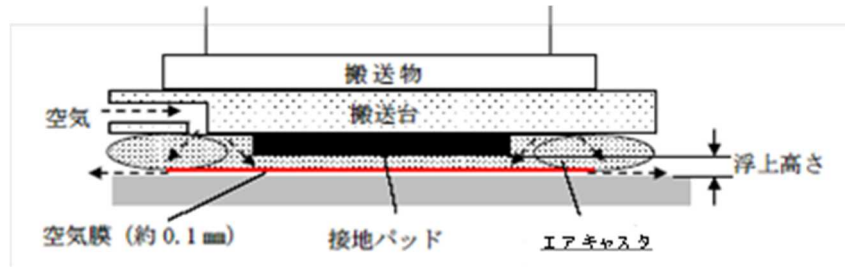
第1図 受入れ区域配置及び受入れ区域天井クレーン断面図



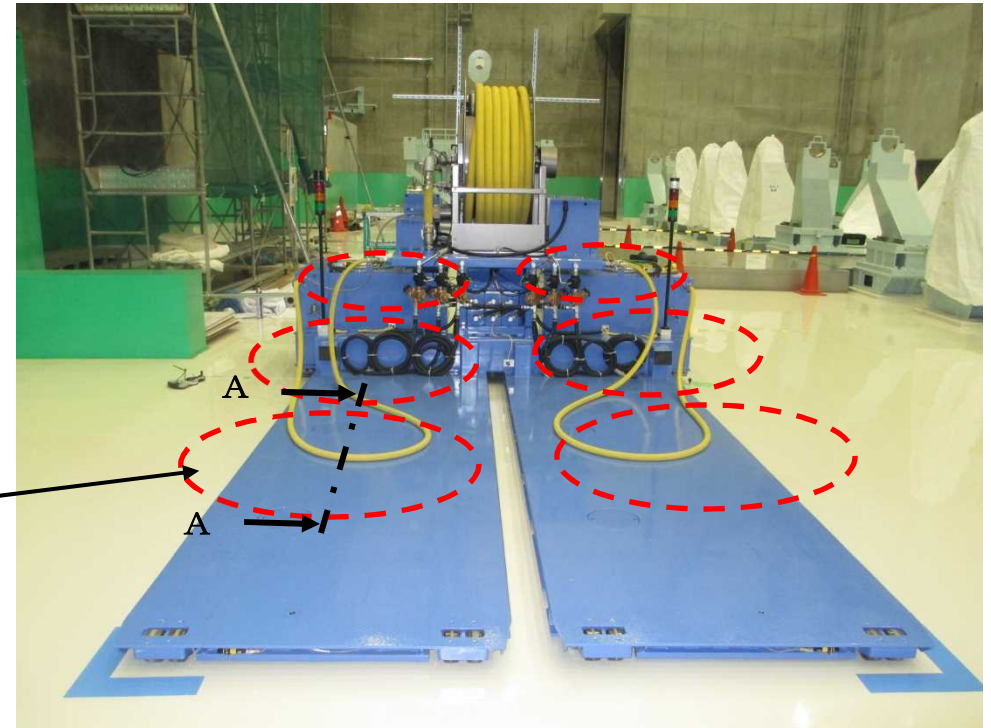
脱線防止ラグ	SS400
トロリ	SS400
ガード	SM490A
品名	材料
部品表	

注1：特記なき寸法は mm を示す。
 注2：特記なき寸法は公称値を示す。

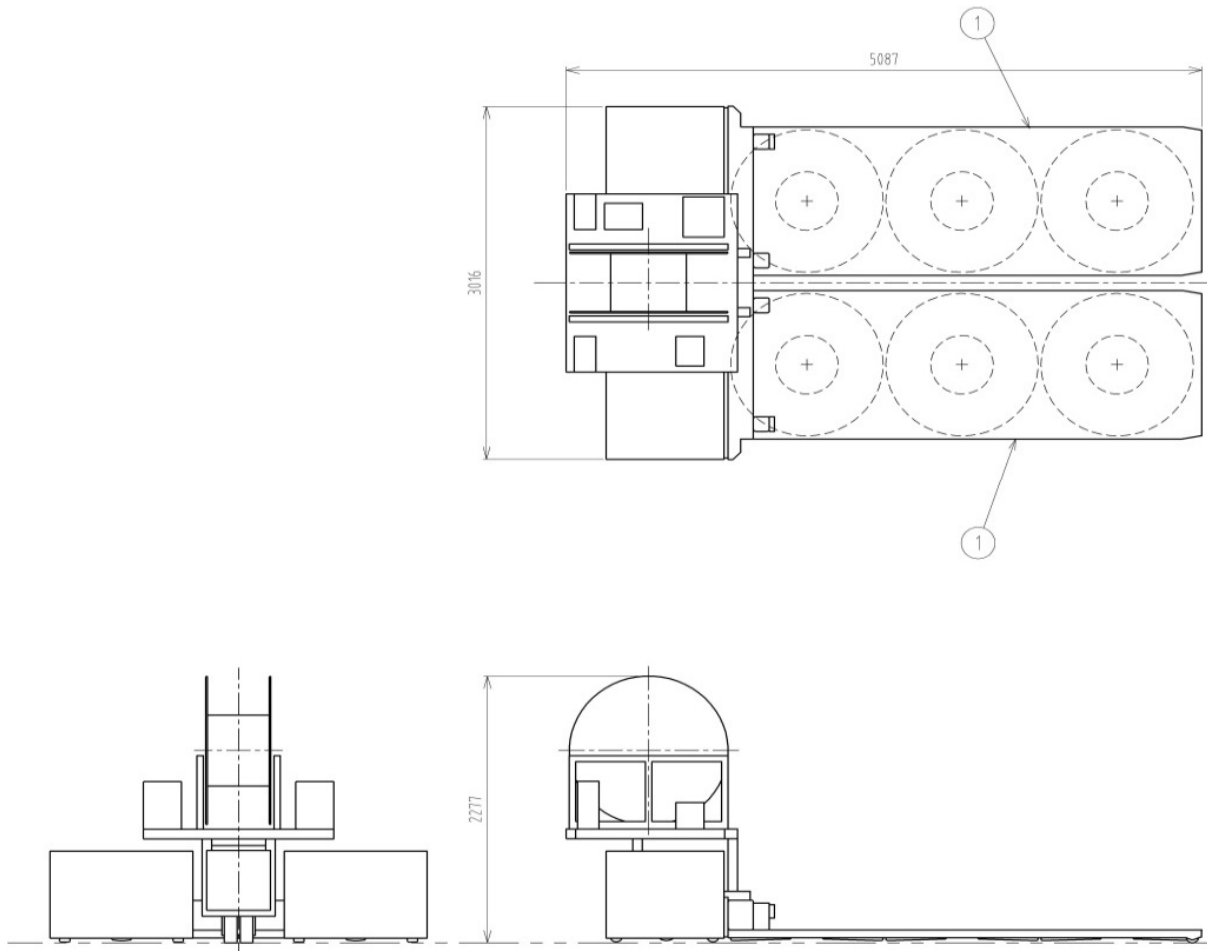
第2図 受入れ区域天井クレーン構造図



A-A 矢視



第3図 搬送台車の原理及びエアキャスタ概略位置図



1	搬送台	2	ASTM A36 (SS400相当)
番号	品名	個数	ASTM A500B (STKR400相当)
部品表			

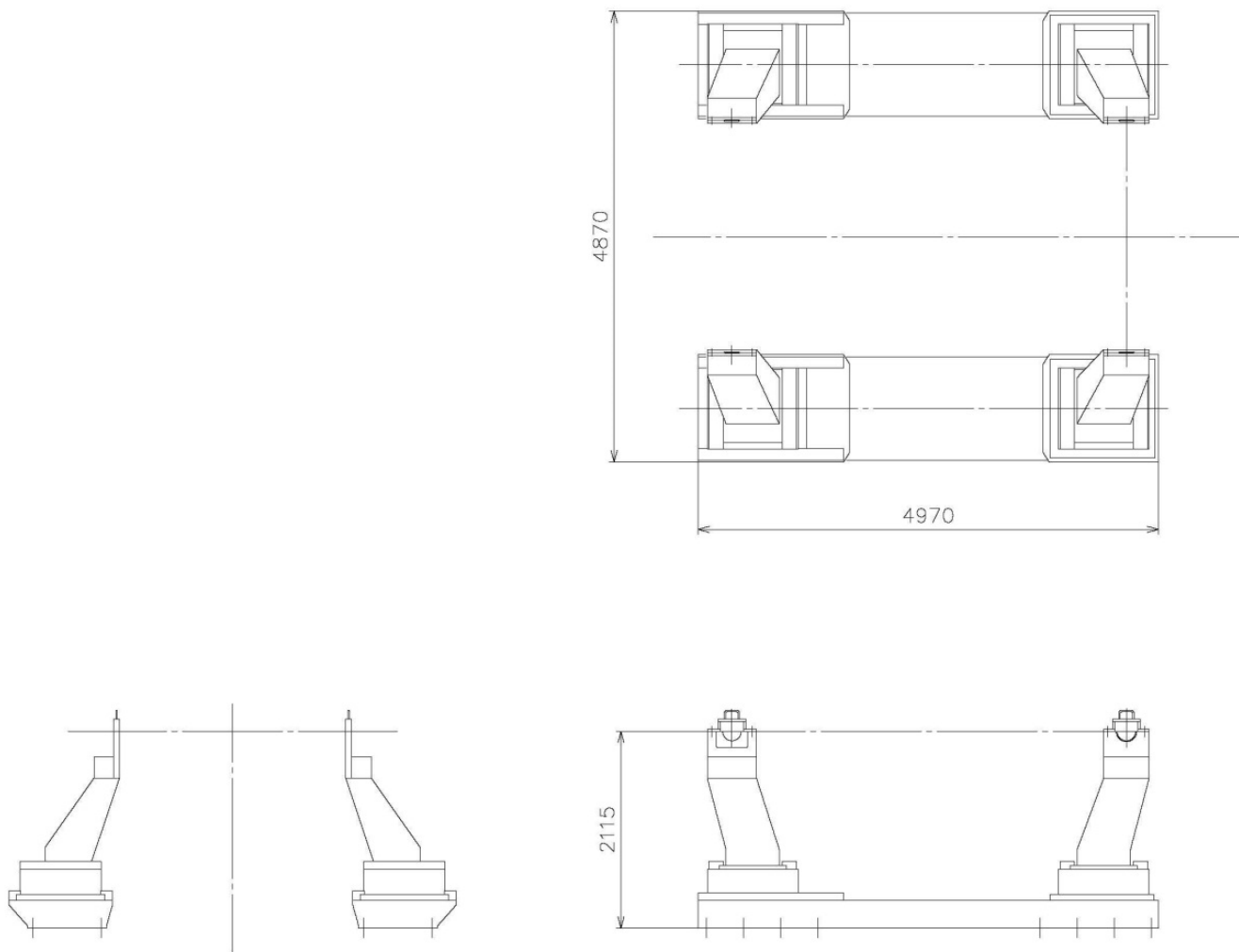
注1:特記なき寸法は mm を示す。
 注2:特記なき寸法は公称値を示す。

第4図 搬送台車構造図



2	空気貯槽	1	約 8m ³
1	空気圧縮機	1	約 40Nm ³ /min
番号	品名	数量	容量
部品表			

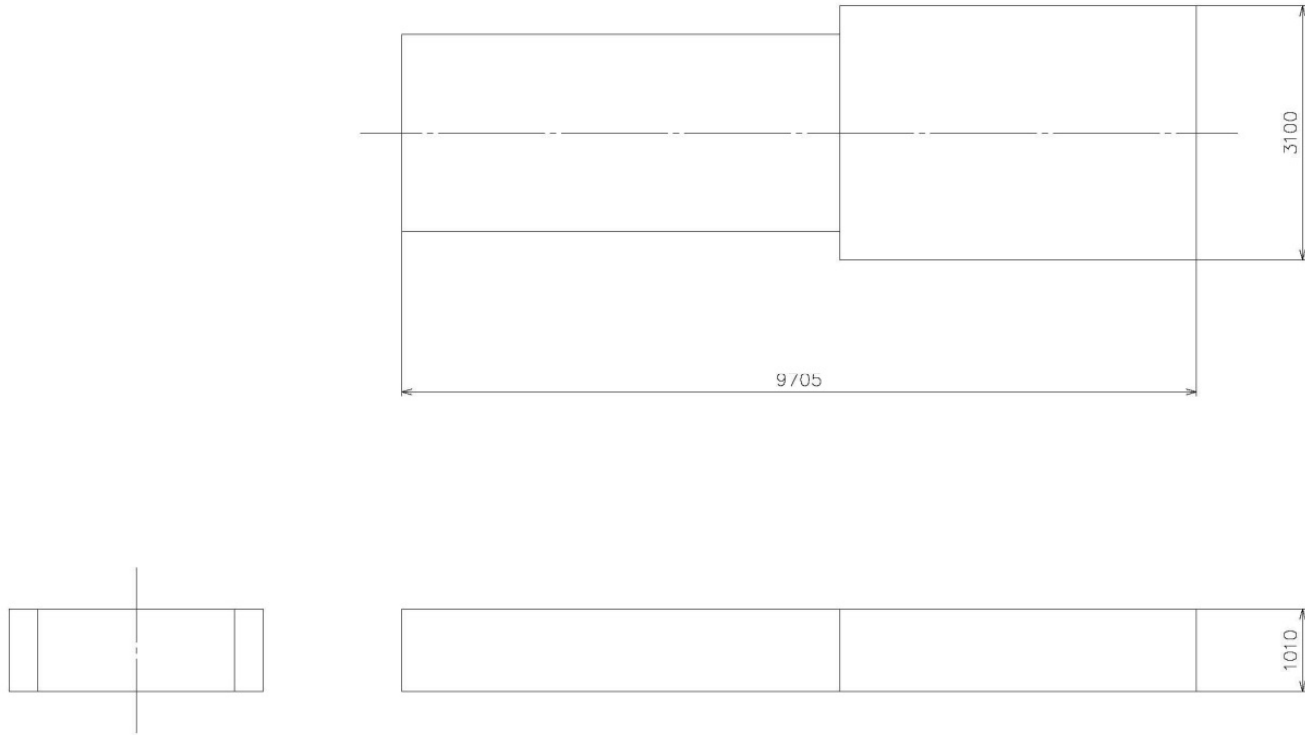
第 5 図 空気圧縮機，空気貯槽外観



本体	SM490A
品名	材料
部品表	

注1：特記なき寸法はmmを示す。
 注2：特記なき寸法は公称値を示す。

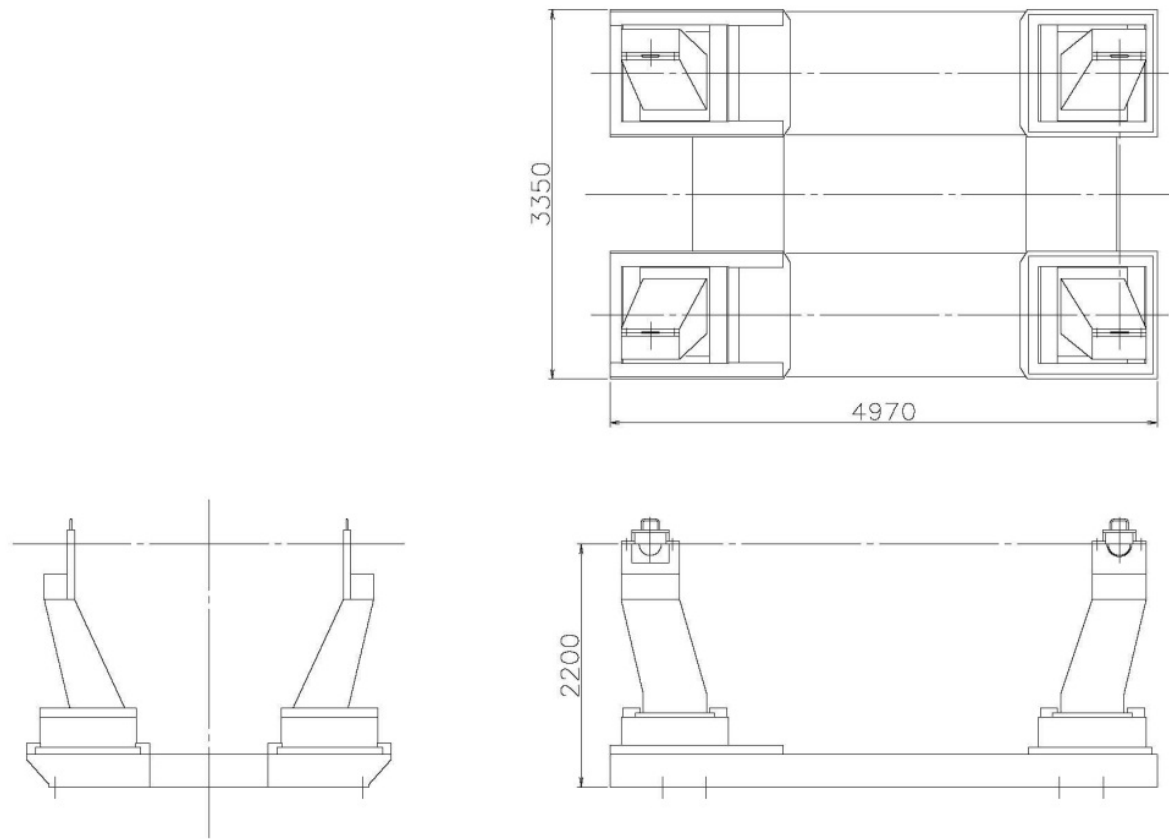
第6図 たて起こし架台構造図（例：BWR用大型キャスク（タイプ2A））



吸収材	バルサ
缶体	SUS304
品名	材料
部品表	

注1:特記なき寸法は mm を示す。
 注2:特記なき寸法は公称値を示す。

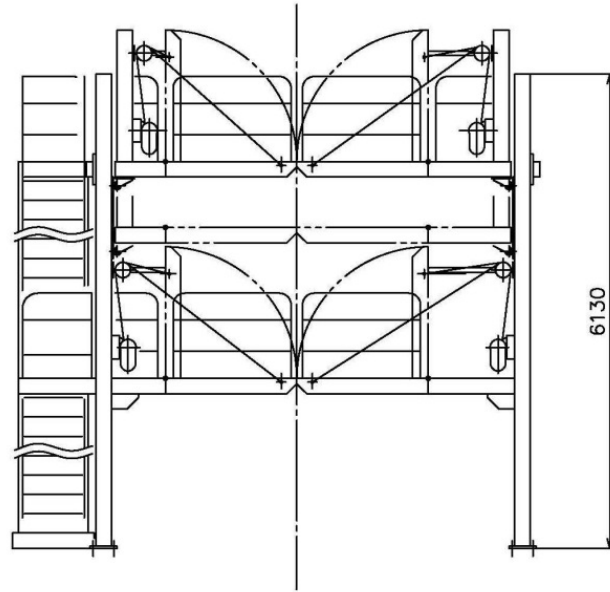
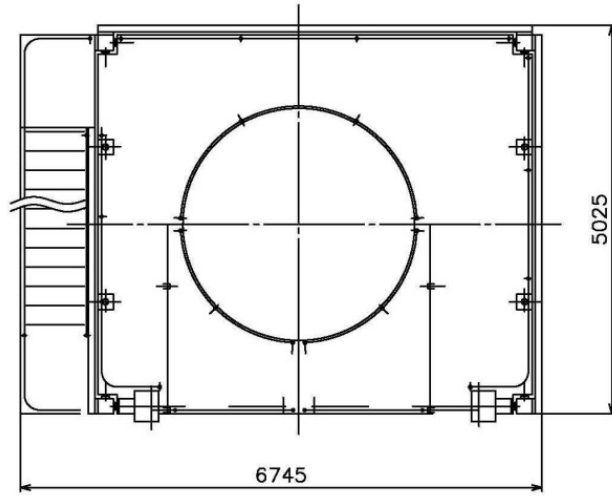
第 7 図 衝撃吸収材構造図



本体	SM490A
品名	材料
部品表	

注1: 特記なき寸法は mm を示す。
 注2: 特記なき寸法は公称値を示す。

第8図 仮置架台構造図 (例: BWR用大型キャスク (タイプ2A))



単位：mm

本体	SS400 STKR400
品名	材料
部品表	

注1:特記なき寸法は mm を示す。
注2:特記なき寸法は公称値を示す。

第9図 検査架台構造図

金属キャスクハンドリングフロー及びインターロック条件等について

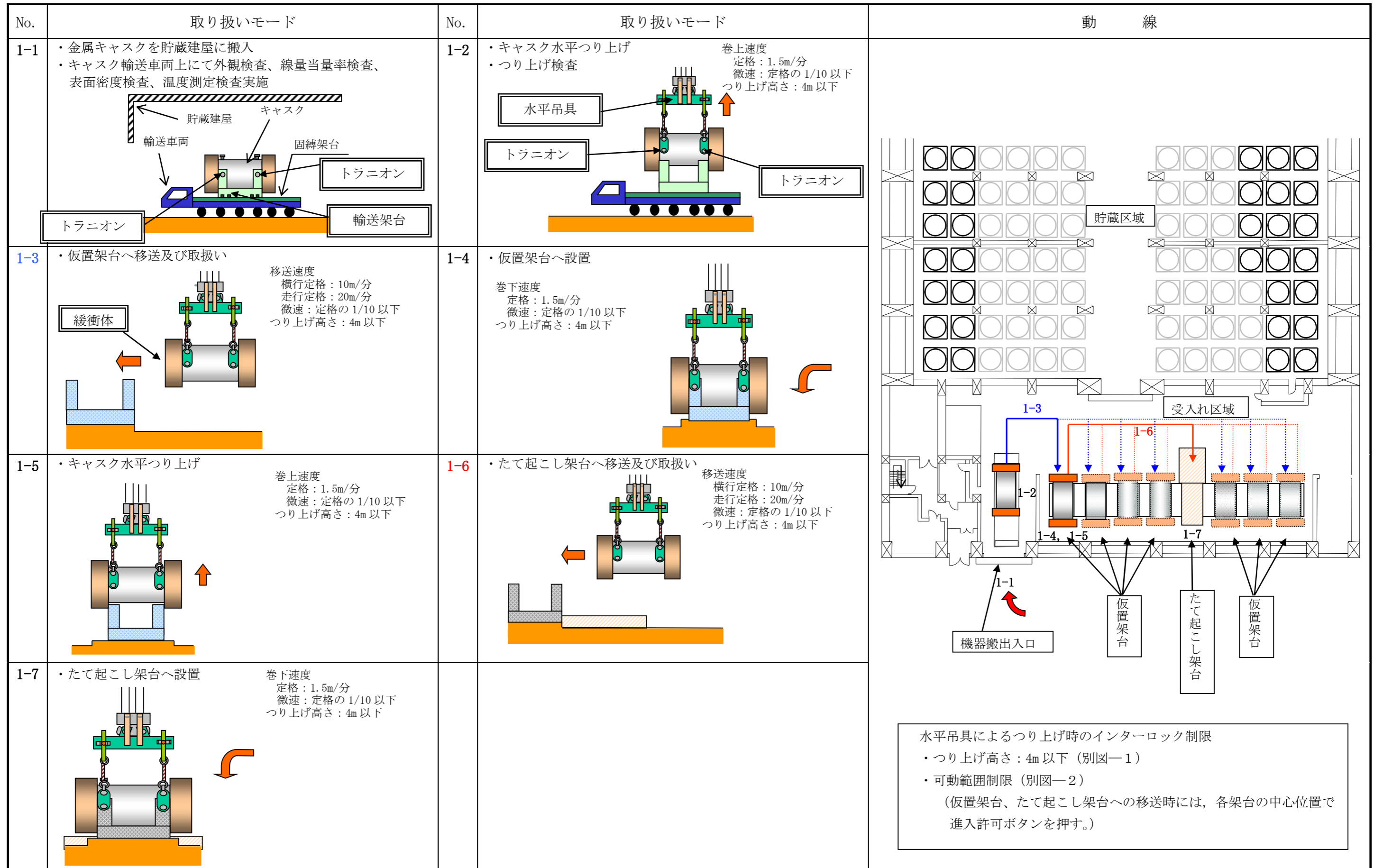
使用済燃料貯蔵施設における基本的な金属キャスクハンドリングフロー例を、下記 3 つの段階毎に、次頁以降に示す。なお、金属キャスクの衝突防止に係る設計及びつり上げ高さ制限についても、同フロー内に示す。

1. 金属キャスクの受入れ～金属キャスクの仮置き
2. 緩衝体取り外し～金属キャスクたて起こし～検査架台への移送及び取扱い
3. 検査架台～貯蔵場所への設置

また、天井クレーンのインターロックについては 16 条－別添 1－5～16 条－別添 1－8 に記載している。

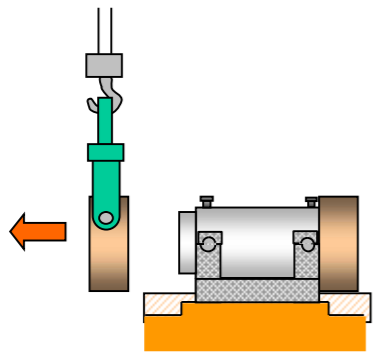
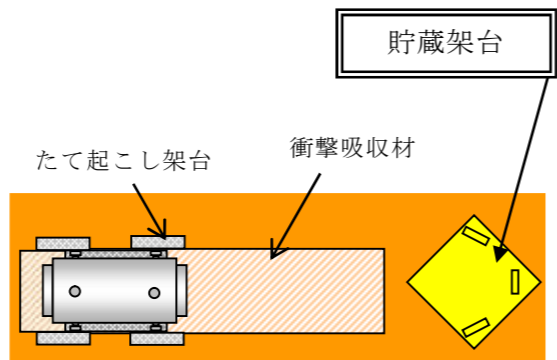
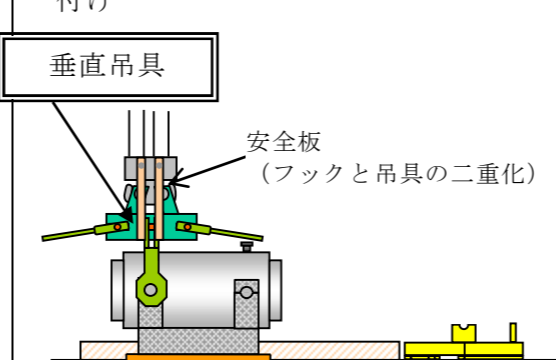
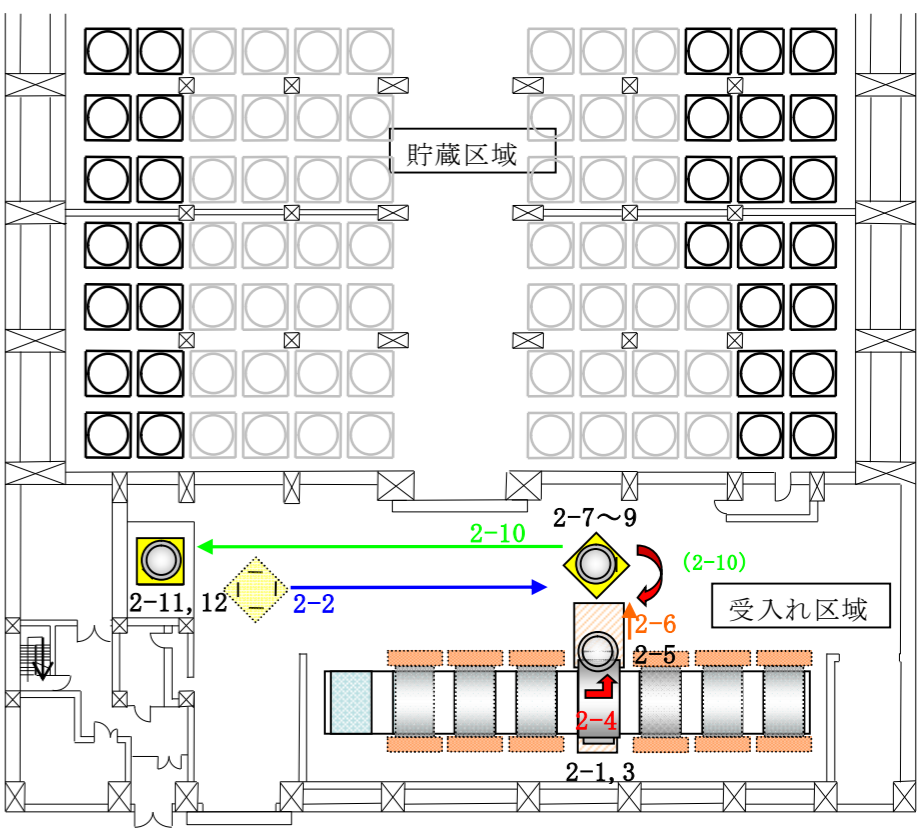
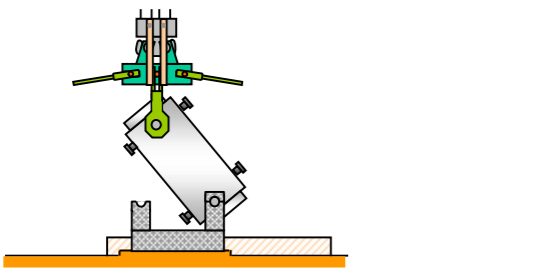
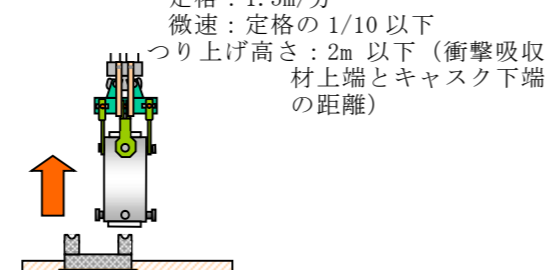
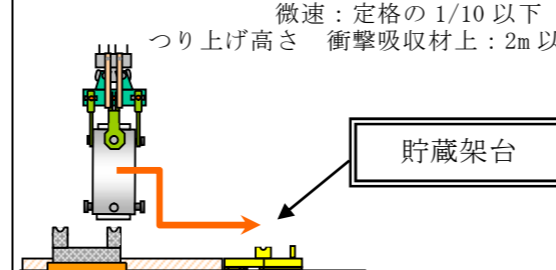
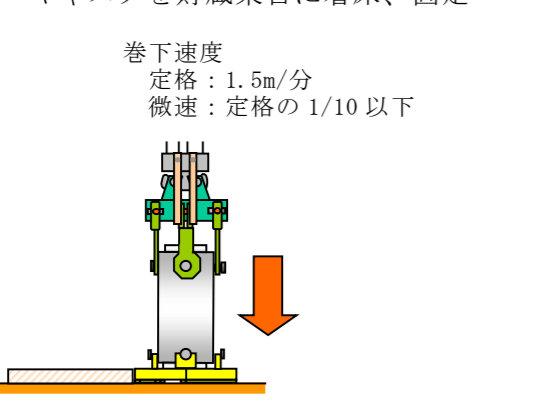
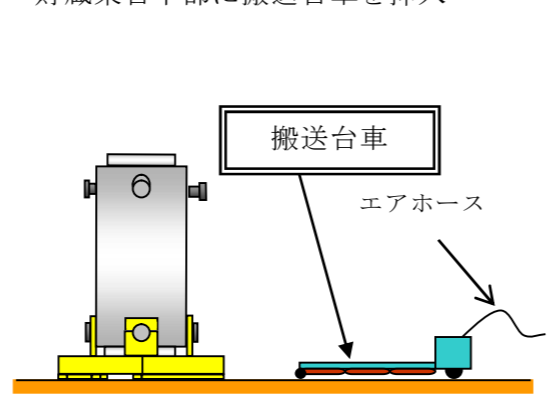
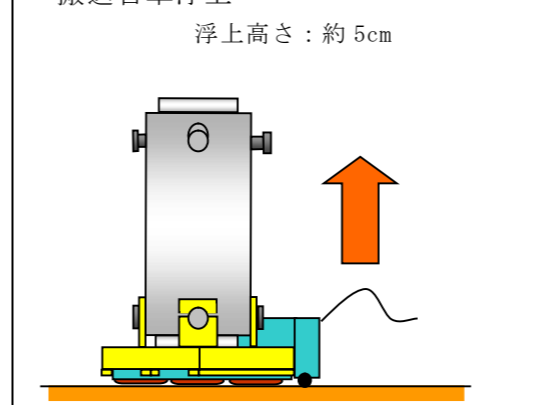
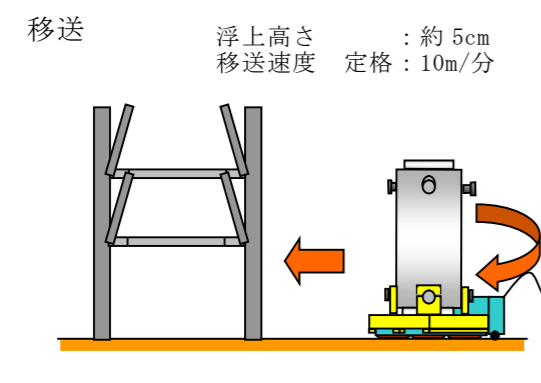
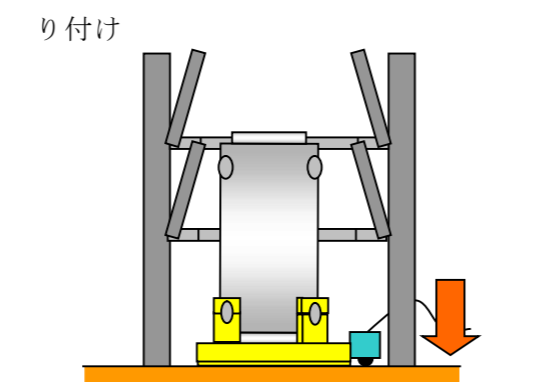
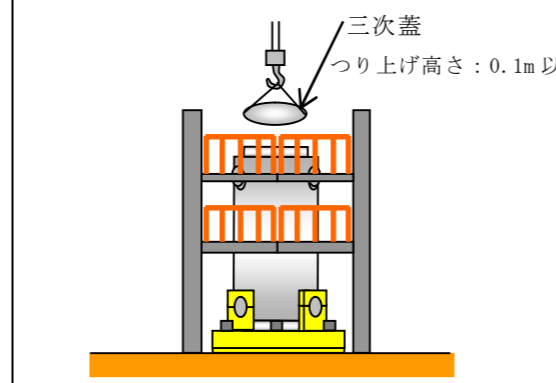
使用済燃料貯蔵施設における基本的な金属キャスクハンドリングフロー例（1 / 3）

1. 金属キャスクの受入れ～金属キャスクの仮置き



使用済燃料貯蔵施設における基本的な金属キャスクハンドリングフロー例 (2 / 3)

2. 緩衝体取り外し～金属キャスクたて起こし～検査架台への移送及び取扱い

No.	取り扱いモード	No.	取り扱いモード	No.	取り扱いモード	動線
2-1	<p>・緩衝体の取り外し</p> 	2-2	<p>・貯蔵架台をたて起こし架台付近に設置</p>  <p>貯蔵架台 たて起こし架台 衝撃吸収材</p>	2-3	<p>・吊具主アームを上部トラニオンに取り付け</p>  <p>垂直吊具 安全板 (フックと吊具の二重化)</p>	 <p>貯蔵区域 受入れ区域</p>
2-4	<p>・主アームの外れ防止金具を取り付けた後、キャスクをたて起こし</p> <p>金属キャスク転倒解析の条件 木材仕様：圧潰応力 3MPa、厚さ 1m 衝撃時加速度：約 40G</p> 	2-5	<p>・トラニオン押さえを取り外した後、キャスクをつり上げ</p> <p>・つり上げ検査</p> <p>巻上速度 定格：1.5m/分 微速：定格の 1/10 以下</p> <p>つり上げ高さ：2m 以下 (衝撃吸収材上端とキャスク下端の距離)</p> 	2-6	<p>・つり上げ高さを目視にて確認し横行・下降操作を繰り返し、貯蔵架台上まで移送</p> <p>巻下速度 定格：1.5m/分 微速：定格の 1/10 以下</p> <p>移送速度 横行定格：10m/分 微速：定格の 1/10 以下</p> <p>つり上げ高さ 衝撃吸収材上：2m 以下</p>  <p>貯蔵架台</p>	
2-7	<p>・キャスクを貯蔵架台に着床、固定</p> <p>巻下速度 定格：1.5m/分 微速：定格の 1/10 以下</p> 	2-8	<p>・貯蔵架台下部に搬送台車を挿入</p>  <p>搬送台車 エアホース</p>	2-9	<p>・搬送台車浮上</p> <p>浮上高さ：約 5cm</p> 	
2-10	<p>・旋回動作、走行動作により検査架台へ移送</p> <p>浮上高さ：約 5cm 移送速度 定格：10m/分</p> 	2-11	<p>・搬送台車着床、貯蔵架台固定ボルト取り付け</p> 	2-12	<p>・三次蓋（輸送用）の取り外し</p> <p>三次蓋 つり上げ高さ：0.1m 以下</p> 	

補巻による緩衝体つり上げ時のインターロック制限

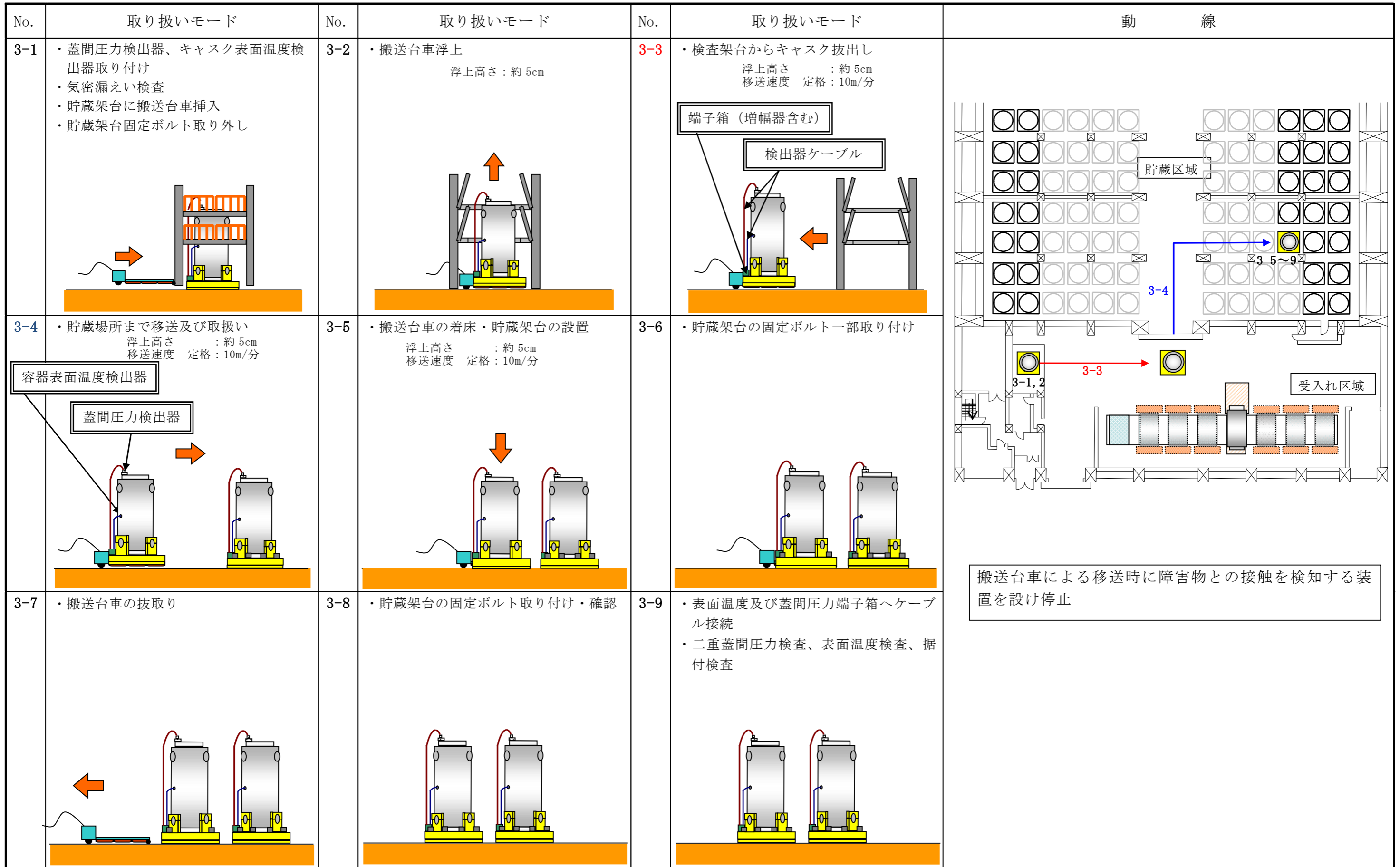
- ・可動範囲制限 (別図-3)
(可動範囲から仮置架台の設置位置を除き、たて起こし架台へは進入許可ボタンを押さない限り進入できない。)

垂直吊具によるつり上げ時のインターロック制限

- ・つり上げ高さ：2m 以下 (別図-4)
- ・可動範囲制限 (別図-4)
(たて起こし時は、金属キャスクを衝撃吸収材上方に維持するために、たて起こし架台の中心位置付近に移動を制限する。)

使用済燃料貯蔵施設における基本的な金属キャスクハンドリングフロー例 (3 / 3)

3. 検査架台～貯蔵場所への設置

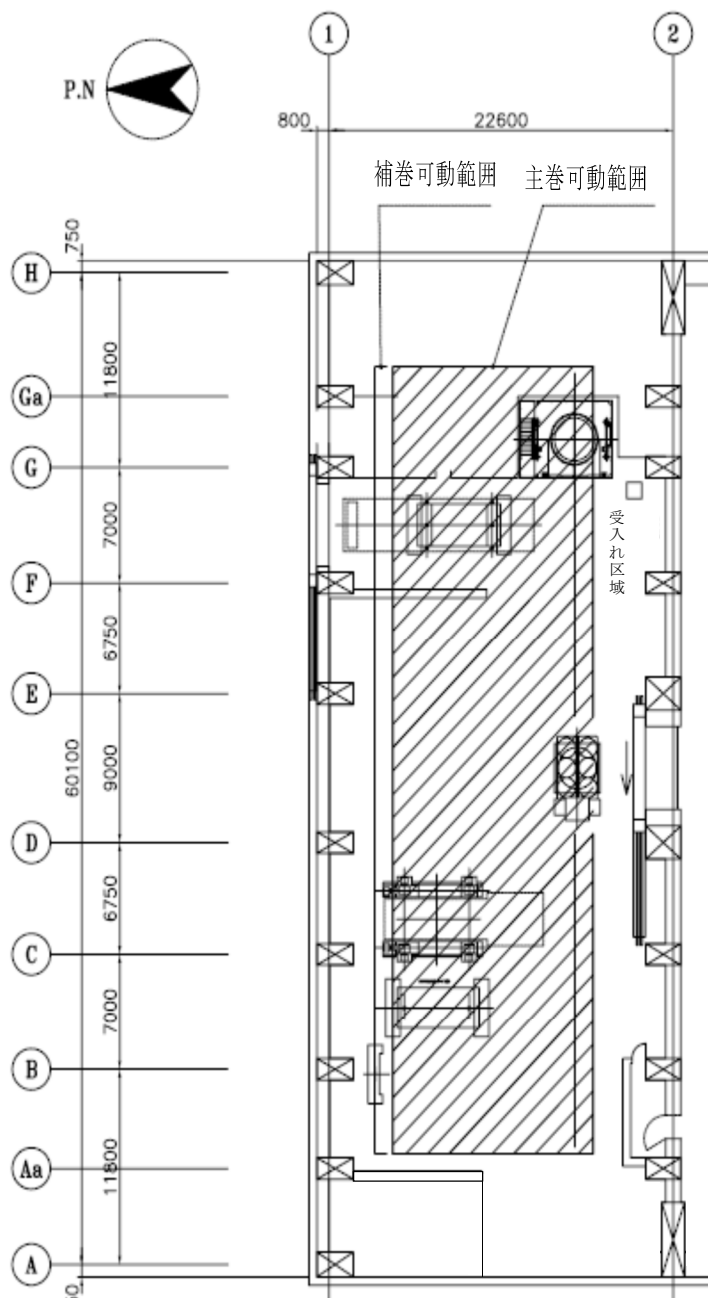


天井クレーンのインターロックについて

インターロック条件①（金属キャスク状態：横向き，水平つり）

主巻可動範囲全域において、主巻が 90t 以上の荷重を検知した場合、金属キャスク下面～建屋床面の巻上げ高さを 4 m 以下に制限。・・・別図－1 の“主巻可動範囲”と記した斜線部の範囲

注：P.N（プラントノース）は、真北から 6° 23' 西方向に設計上の北として設定されたもの

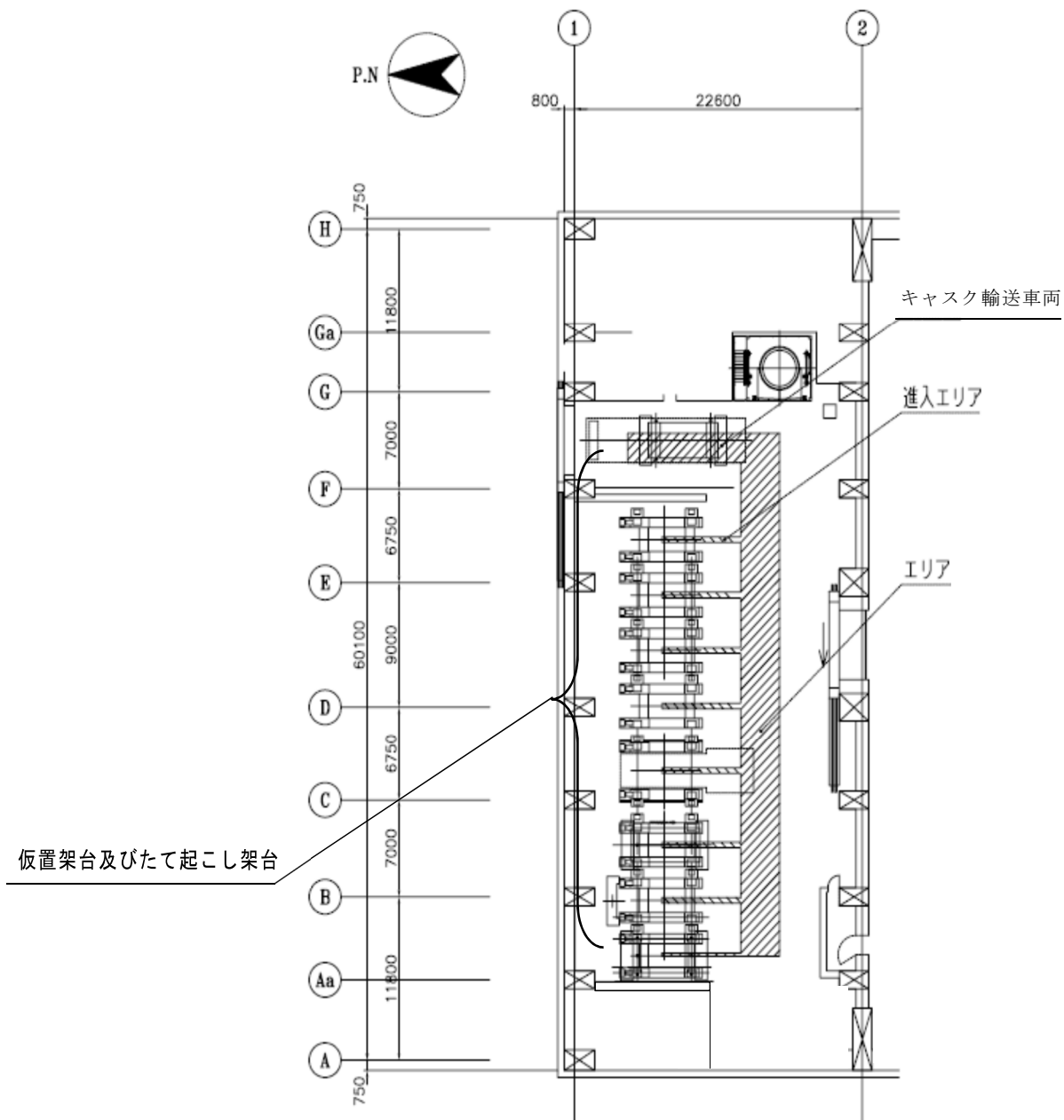


別図－1 主巻荷重 90t 以上での巻上げ高さ 4 m 以下制限の範囲

インターロック条件②（金属キャスク状態：横向き、水平つり）

主巻が 90t 以上の荷重を検知した状態では別図－２の“エリア”と記した範囲以外に走行・横行できない。また，“エリア”から仮置架台及びたて起こし架台上に進入する場合（別図－２の“進入エリア”と記した範囲）は，“進入エリア”手前の各架台の中心位置で進入を許可するスイッチを操作しなければ進入（横行）できない。（荷をつった状態で、容易に架台上に進入することを制限することで、金属キャスクが置かれている架台への接近を制限する。）

注：P.N（プラントノース）は、真北から 6° 23' 西方向に設計上の北として設定されたもの

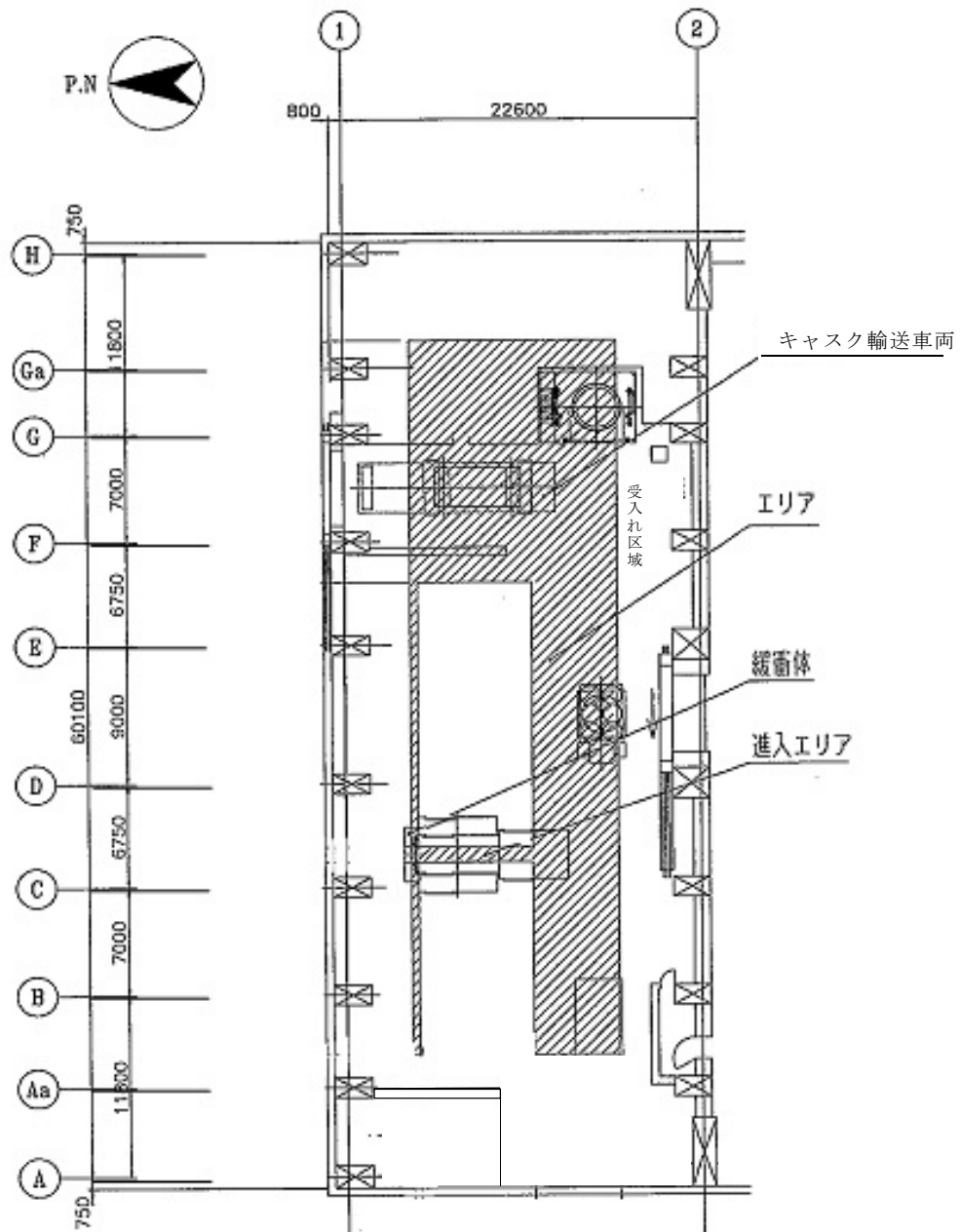


別図－２ 主巻荷重 90t 以上での走行・横行の制限の範囲

インターロック条件③（金属キャスク状態：横向き，たて起こし架台へ設置）

補巻が 4.5t 以上の荷重を検知した状態では別図－3 の“エリア”（主巻位置で標示）と記した範囲以外に走行・横行できない。また，“エリア”からたて起こし架台上に進入する場合（別図－3 の“進入エリア”と記した範囲）は，“進入エリア”手前のたて起こし架台の中心位置で進入を許可するスイッチを操作しなければ進入（横行）できない。（緩衝体をつった状態で，容易に架台上に進入することを制限することで，金属キャスクが置かれている架台への接近を制限する。）

注：P.N（プラントノース）は，真北から 6° 23′ 西方向に設計上の北として設定されたもの



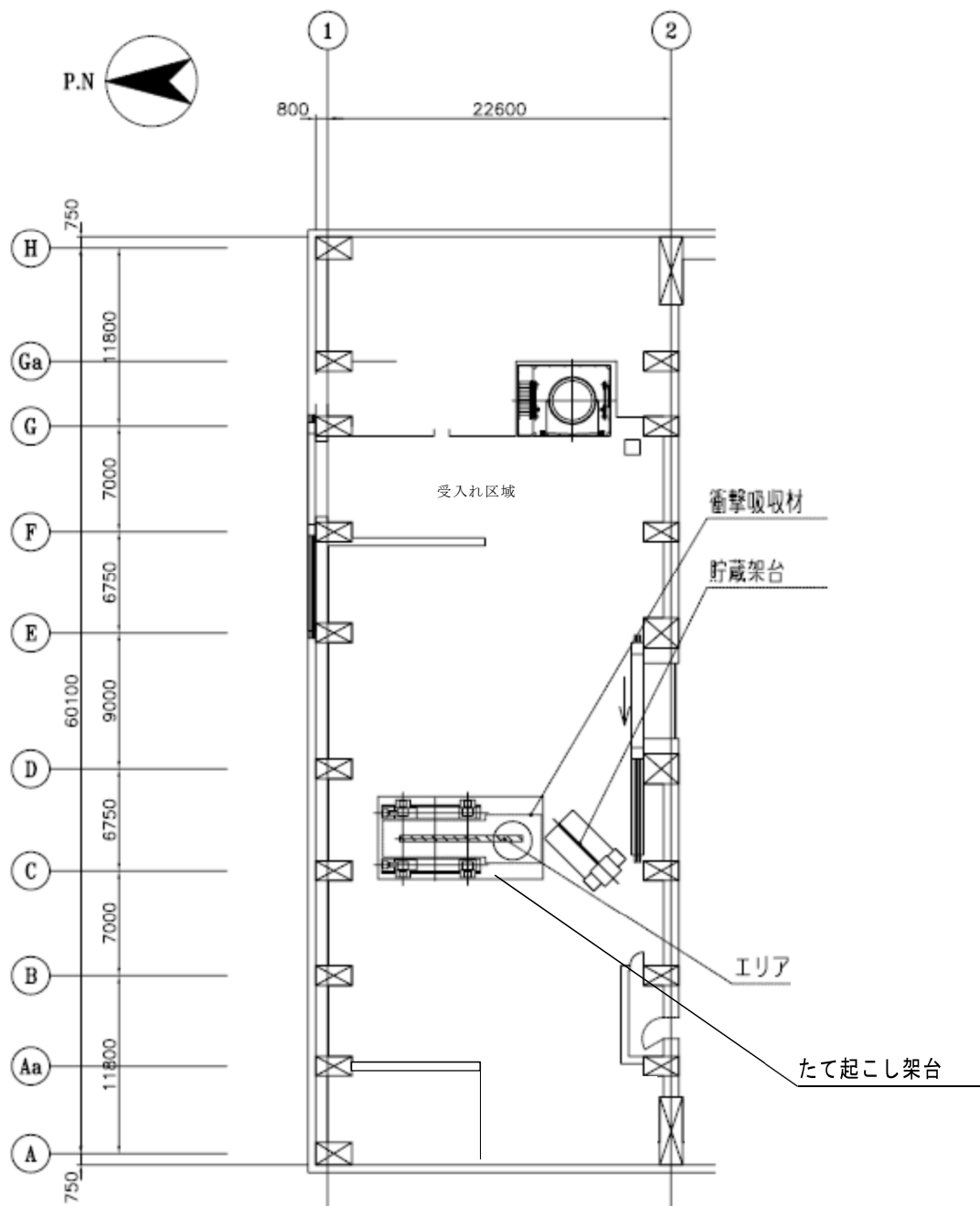
別図－3 補巻荷重 4.5t 以上での走行・横行の制限の範囲

インターロック条件④（金属キャスク状態：縦向き，垂直つり）

たて起こし架台中心上で主巻が 90t 以上の荷重を検知した場合，キャスク下面～衝撃吸収材上面の巻上げ高さを 2 m 以下に制限。・・・別図－4 の“エリア”と記した斜線部の範囲

（水平つりした金属キャスクをたて起こし架台上に移動して着座する際は，荷重が開放されるまでインターロック条件①が有効。→その後の垂直つり上げはインターロック条件④が有効となる。）

注：P.N（プラントノース）は，真北から 6° 23' 西方向に設計上の北として設定されたもの



別図－4 主巻荷重 90t 以上での巻上げ高さ 2 m 以下制限の範囲

搬送台車で金属キャスクを移送中の地震対応について

搬送台車で金属キャスクを移送中に地震が発生した場合、浮上状態では金属キャスク上部の水平加速度が検討用地震動の 1 / 2 程度に低減され、金属キャスクと貯蔵架台系の応答角度は 1.2° であり、着床状態の応答角度 4.3° より小さいことが確認されており免震効果がある。

搬送台車で金属キャスクを移送中に地震が発生した場合は、監督者の指示により、操作員又は補助員が緊急停止ボタンを操作し搬送台車を浮上・駆動させるための圧縮空気の供給を停止し搬送台車を停止させる。

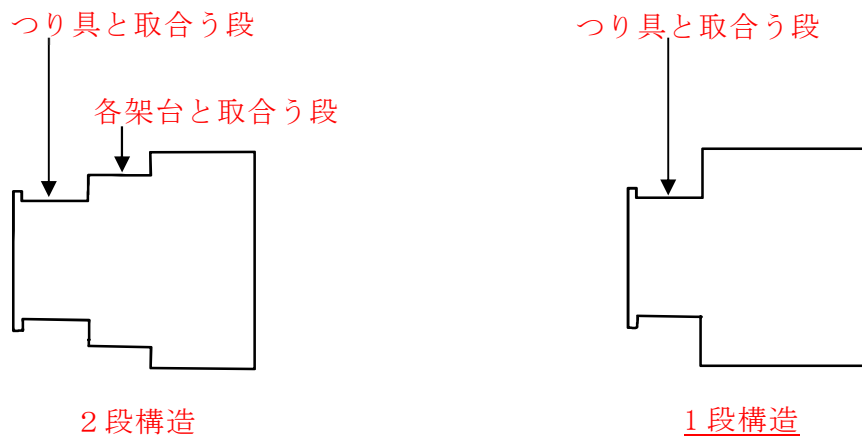
地震終了後、金属キャスク、搬送台車等の点検を行う。

たて起こし架台と仮置架台の改造について

BWR用大型キャスク（タイプ2A）とPWR用キャスク（タイプ1）の上部トラニオンは2段構造になっている一方で、BWR用中型キャスク（タイプ2）の上部トラニオンは他のキャスクと違い、1段構造になっている（別添3-1図参照）。そのため、たて起こし架台及び仮置架台7基（以下「各架台」という。）のキャスク上部側の架台支持脚の構造を、金属キャスクの上部トラニオン構造の違いに対応するように改造する。

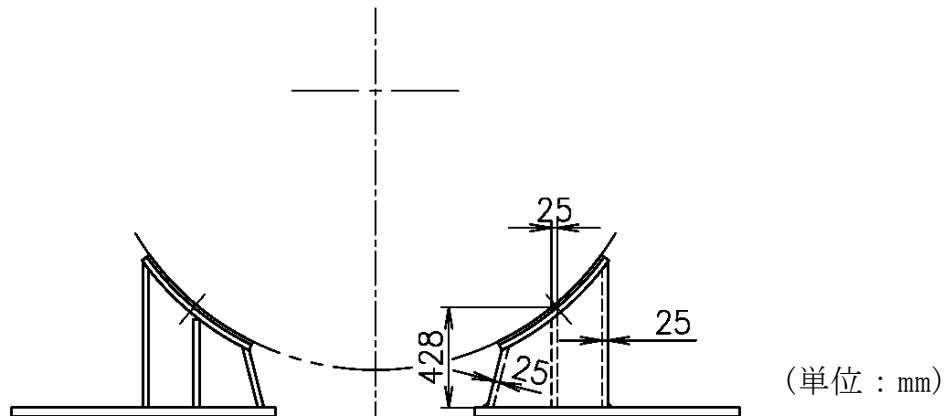
改造は、各架台の金属キャスクの上部側の架台支持脚を、BWR用中型キャスク（タイプ2）に対応する支持部として、キャスクの胴を支える構造の支持部を新たに設計・製作するものである（第6図、第8図、別添3-2図参照）。

BWR用大型キャスク（タイプ2A）やPWR用キャスク（タイプ1）を取扱う時は、既設の構造の各架台を使用し、BWR用中型キャスク（タイプ2）を取扱う時は使用する各架台の架台支持脚を新たに設計・製作する支持部に交換して使用する。



(BWR用大型キャスク(タイプ2A), (BWR用中型キャスク(タイプ2))
PWR用キャスク(タイプ1))

別添3-1図 上部トラニオン模式図

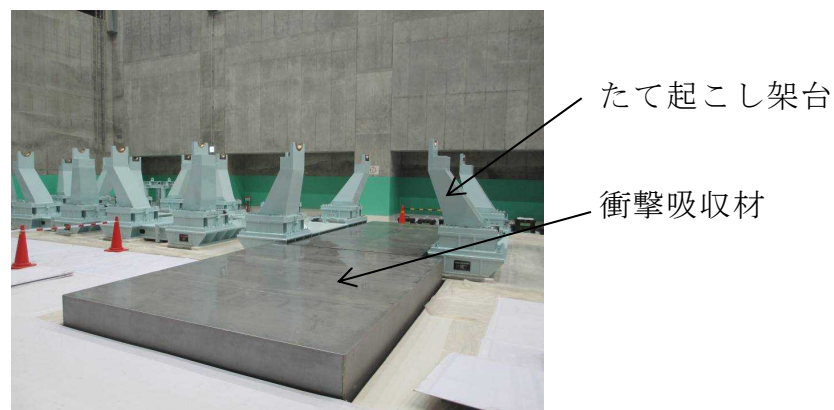


別添 3 - 2 図 架台胴受け部の形状図 (BWR用中型キャスク (タイプ 2))

衝撃吸収材の性能及び敷設範囲について

1. 敷設範囲

たて起こし架台での金属キャスクのたて起こし作業，貯蔵架台上までの移送作業を行っている際に，転倒又は落下しても金属キャスクの閉じ込め機能に著しい損傷を与えないように，たて起こし架台及びその周辺に衝撃吸収材を敷設する。別添 4－1 図に，たて起こし架台及び衝撃吸収材の敷設範囲を示す。



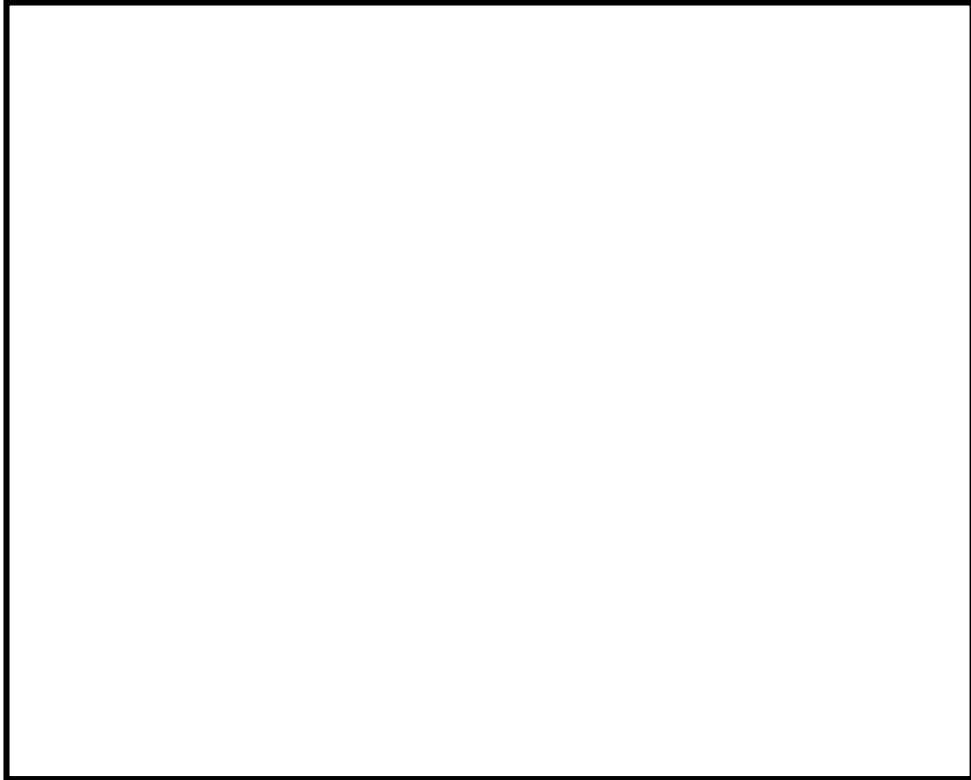
別添 4－1 図 たて起こし架台及び衝撃吸収材の敷設範囲

2. 衝撃吸収材の性能

衝撃吸収材は，衝撃吸収材の変形によって，金属キャスクの転倒あるいは落下のエネルギーを吸収することにより金属キャスクへの衝撃力を緩和させる。衝撃吸収材の圧潰応力を 3 MPa とした場合には，衝撃吸収材の厚さとして約 1 m と想定される。

衝撃吸収材に使用するバルサ材は，圧潰応力を 3 MPa とし，衝撃吸収材の厚さとして 1 m としている。

バルサ材の密度を適切に選定することで別添 4－2 図に示すような同等の吸収エネルギーを持つ応力-ひずみ特性を設定し，設計解析に用いることができる。



別添 4-2 図 木材の圧潰特性

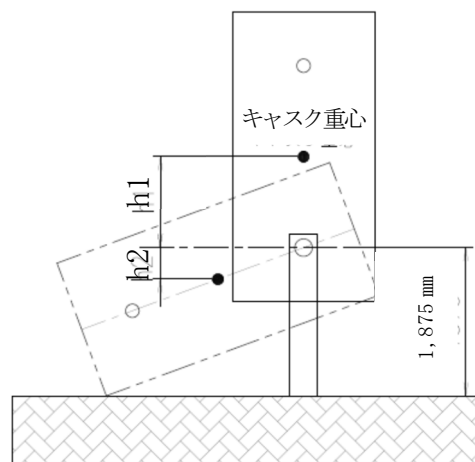
3. 衝撃吸収材の圧潰圧力 3 MPa の評価

ここでは、衝撃吸収材の圧潰応力が 3 MPa の場合に転倒で発生する衝撃加速度が金属キャスクの転倒評価事象における荷重条件である 40G 以下であることと貫入深さが衝撃吸収材の高さである 1 m 以内であることを確認する。

金属キャスクの転倒事象では、金属キャスクの位置エネルギーが回転系のエネルギーに転換されたものと考え回転速度を求める。ここで、金属キャスクの回転エネルギーと運動エネルギーを、重心の 1 質点系として表記すると、下式で表すことができる。また、金属キャスクの転倒状態を別添 4-3 図に示す。

$$\begin{aligned} \text{位置エネルギー} & : E_p = m \cdot g \cdot (h_1 + h_2) \\ \text{回転エネルギー} & : E_t = \frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega^2 \\ \text{1 質点系運動エネルギー} & : E_m = \frac{1}{2} \cdot m_{eff} \cdot V_c^2 \end{aligned}$$

- h_1 : 初期におけるキャスク重心の水平面からの高さ
- h_2 : 衝突時におけるキャスク重心の水平面からの高さ
- m : 金属キャスクの質量
- g : 重力加速度
- I : 慣性モーメント
- ω : 角速度
- m_{eff} : 金属キャスクの等価重量
- V_c : 速度



別添 4 - 3 図 金属キャスク転倒状態

下部トラニオンと金属キャスク頂端までの距離を r とすると、金属キャスクが衝撃吸収材に衝突する時の終端速度である衝突速度 V_c は、

$$V_c = \omega \cdot r = r \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot m \cdot g \cdot (h_1 + h_2)}{I}}$$

となる。また、この時の金属キャスクの等価質量 m_{eff} は、回転エネルギーと運動エネルギーの釣り合いから求めると、

$$m_{eff} = \frac{I \cdot \omega^2}{V_c^2} = \frac{I}{r^2}$$

となる。以上より、衝撃吸収材への衝突エネルギー E は、

$$E = \frac{1}{2} m_{eff} \cdot V_c^2 = m \cdot g \cdot (h_1 + h_2)$$

で表される。

衝撃吸収材との衝撃により金属キャスクに作用する衝撃加速度 α (G) は、金属キャスクの転倒エネルギーが衝撃吸収材の変形によって全て吸収されるものとして、静的な条件から以下の式により算出する。

$$\alpha = \frac{\sigma \cdot A}{m_{eff} \cdot g}$$

- σ : 衝撃吸収材圧潰応力
- A : 貫入面積
- m_{eff} : 金属キャスクの等価質量
- g : 重力加速度

上式より衝撃加速度を求めるのに必要な衝撃吸収材転倒時の貫入面積 A は、エネルギーバランスから求まる貫入体積 V の評価式と、幾何学的関係式から決定される貫入体積 V' の関係式が同様となることから求められる。

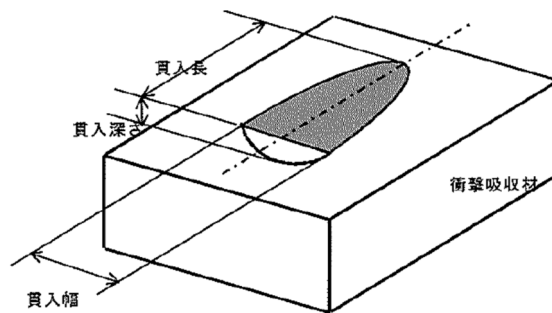
まず、エネルギーバランスから求まる貫入体積 V は以下となる。

$$V = \frac{E}{\sigma} = \frac{0.5 \cdot m_{eff} \cdot V_c^2}{\sigma}$$

- V_c : 衝撃吸収材への衝突速度

次に、貫入時の幾何学的関係式から求められる貫入体積 V' は、別添 4-4 図のとおり貫入部の面積について放物線を考慮した三角錐で近似することにより以下となる。

$$V' = \frac{1}{3} \left(\frac{2}{3} \cdot a \cdot b \right) \cdot D$$



別添 4-4 図 放物線近似した貫入面積及び貫入体積

これにより $V=V'$ としたときの貫入面積 A ，衝撃加速度 α ，貫入深さ D を求める。

評価に使用した金属キャスクのデータを別添 4-1 表に、評価結果を別添

4-2表に示す。ここで、BWR用中型キャスク（タイプ2）とPWR用キャスク（タイプ1）の転倒評価については、型式証明申請での評価が、既設の衝撃吸収材の性能や金属キャスクとの位置関係の条件が適切に設定された解析の入力条件になっていることを確認した上で、再評価（再解析）はせず、型式証明申請当時の評価条件・方法・結果と同じ内容を示している。

別添4-1表（1/3） 転倒評価におけるBWR用大型キャスク
（タイプ2A）データ

項目	データ
金属キャスク質量：m	121.0 (ton)
初期におけるキャスク重心の水平面からの高さ：h ₁	2239 (mm)
衝突時におけるキャスク重心の水平面からの高さ：h ₂	295 (mm)
慣性モーメント：I	9.52×10 ⁵ (kg・m ²)

別添4-1表（2/3） 転倒評価におけるBWR用中型キャスク（タイプ2）
データ

項目	データ
金属キャスク質量：m	118.0 (ton)
初期におけるキャスク重心の水平面からの高さ：h ₁	2330 (mm)
衝突時におけるキャスク重心の水平面からの高さ：h ₂	357 (mm)
慣性モーメント：I	9.85×10 ⁵ (kg・m ²)

別添4-1表（3/3） 転倒評価におけるPWR用キャスク（タイプ1）
データ

項目	データ
金属キャスク質量：m	116.7 (ton)
初期におけるキャスク重心の水平面からの高さ：h ₁	2161 (mm)
衝突時におけるキャスク重心の水平面からの高さ：h ₂	318 (mm)
慣性モーメント：I	8.75×10 ⁵ (kg・m ²)

別添 4-2 表 (1/3) 転倒評価結果 (BWR用大型キャスク (タイプ 2 A))

項目	評価結果
貫入面積 : A	4.07 (m ²)
衝撃加速度 : α	33.4 (G)
貫入深さ : D	739 (mm)

別添 4-2 表 (2/3) 転倒評価結果 (BWR用中型キャスク (タイプ 2))

項目	評価結果
貫入面積 : A	3.53 (m ²)
衝撃加速度 : α	28 (G)
貫入深さ : D	622 (mm)

別添 4-2 表 (3/3) 転倒評価結果 (PWR用キャスク (タイプ 1))

項目	評価結果
貫入面積 : A	3.41 (m ²)
衝撃加速度 : α	26 (G)
貫入深さ : D	600 (mm)

衝撃吸収材の圧潰応力が 3MPa の場合に、転倒で発生する衝撃加速度が金属キャスクの転倒評価事象における荷重条件である 40G 以下であることと、貫入深さが衝撃吸収材の高さである 1m 以内であることが確認できた。

第 17 条 計測制御系統施設

<目 次>

1. 設計方針
2. 施設設計
3. 試験検査
4. 代替計測

(別 添)

- 別添 1 経年変化に対する設備を設けていないことについて
- 別添 2 監視装置の構成と監視について
- 別添 3 警報設定値の考え方について
- 別添 4 閉じ込め機能の監視について
- 別添 5 除熱機能の確認について
- 別添 6 計測制御系統施設の試験検査について
- 別添 7 代替計測について

コメント回答

1. 設計方針

使用済燃料貯蔵施設は、基本的安全機能のうち、閉じ込め機能及び除熱機能が確保されていることを以下のとおり適切に監視する設計とする。

- (1) 金属キャスクの蓋部が有する閉じ込め機能を監視するために金属キャスク蓋間圧力を測定し表示する。
- (2) 使用済燃料貯蔵建屋貯蔵区域内の雰囲気温度が異常に上昇していないことを監視するために使用済燃料貯蔵建屋給排気温度を測定し表示する。
- (3) 使用済燃料集合体及び金属キャスクの温度が制限される値以下に維持されていることを評価するために必要なデータとして金属キャスク表面温度を測定し表示する。

また、計測設備は、測定データを監視盤室に表示及び記録する設計とするとともに、事務建屋でも表示する設計とする。

なお、基準設定値に達した場合は、監視盤室及び監視員が監視を行う事務建屋に警報を発報する設計とする。

使用済燃料貯蔵施設の基本的安全機能が確保されていることを監視できなくなった場合に備え、代わりに監視を行うために必要な計測器や電源設備を保有する。監視ができなくなった場合には、計測器や電源設備の設置の準備作業が整い次第、監視を再開する。

管理区域内の主要な場所にガンマ線エリアモニタと中性子線エリアモニタで構成されるエリアモニタリング設備を設ける。また、周辺監視区域境界付近にはモニタリングポストを設置する。それらの放射線レベル基準設定値に達した場合は監視盤室及び監視員が監視を行う事務建屋に警報を発報する設計とする。

使用済燃料貯蔵施設においては、金属キャスクの蓋間圧力を監視し放射性物質の放出がないことを確認することにより、事業所及びその境界付近における放射性物質濃度の監視を不要とする。

なお、安全設計上想定される事故のうち、経年変化による基本的安全機能の劣化については、金属キャスクの蓋間圧力、使用済燃料貯蔵建屋給排気温度及び貯蔵区域の放射線レベルを常に監視することにより検知する。（別添

1, 別添 2 参照)

2. 施設設計

(1) 計測設備

a. 金属キャスク蓋間圧力監視装置（以下、「蓋間圧力監視装置」という。）

蓋間圧力監視装置は、一次蓋、二次蓋間空間の圧力を監視することにより、金属キャスクの閉じ込め機能を監視する装置である。蓋間圧力監視装置は、点検中及び不具合時においても蓋間圧力を測定できるよう二系統設ける。

圧力検出器は各金属キャスクに 2 個設置し、監視盤室及び事務建屋に蓋間圧力を表示し、蓋間圧力が基準設定値以下に低下したときは、監視盤室及び事務建屋に警報を発報する。（別添 3 参照）

また、すべてのデータは監視盤室の記録装置に連続的に記録される。蓋間圧力監視装置の構成図を第 1 図に示す。

閉じ込め機能の監視を別添 4 に示す。

b. 金属キャスク表面温度監視装置（以下、「表面温度監視装置」という。）

表面温度監視装置は、金属キャスクの表面温度を監視することにより、使用済燃料貯蔵施設の除熱機能を監視する装置である。

表面温度検出器は各金属キャスク表面に 1 個取り付けられ、監視盤室及び事務建屋に表面温度を表示し、表面温度が基準設定値に達したときは、監視盤室及び事務建屋に警報を発報する。（別添 3 参照）

また、すべてのデータは監視盤室の記録装置に連続的に記録される。表面温度監視装置の構成図を第 2 図に示す。

除熱機能が維持されていることの確認は、使用済燃料貯蔵建屋貯蔵区域の給排気温度で確認する。更に金属キャスクの表面温度を確認して、異常な温度上昇がないことを確認する。（別添 5 参照）

c. 使用済燃料貯蔵建屋給排気温度監視装置（以下、「給排気温度監視装置」という。）

給排気温度監視装置は、使用済燃料貯蔵建屋貯蔵区域の給排気温度を監視することにより、使用済燃料貯蔵建屋の除熱機能を監視する装置であ

る。

給排気温度検出器は給気側に2個、排気側に24個取り付けられ、監視盤室及び事務建屋に給排気温度差及び排気温度を表示し、給排気温度差及び排気温度が基準設定値に達したときは、監視盤室及び事務建屋に警報を発報する。(別添3参照)

また、全てのデータは監視盤室の記録装置に連続的に記録される。給排気温度監視装置の構成図を第3図に示す。

(2) 警報設備

a. エリアモニタリング設備

エリアモニタリング設備は、貯蔵区域及び受入れ区域内の外部放射線に係る線量当量率を監視する装置である。

貯蔵区域には、ガンマ線エリアモニタ及び中性子線エリアモニタをそれぞれ12個及び6個設置し、受入れ区域には、ガンマ線エリアモニタ及び中性子線エリアモニタをそれぞれ1個ずつ設置し、廃棄物貯蔵室には、ガンマ線エリアモニタを1個設置する。それぞれの計測値は、監視盤室及び事務建屋に表示するとともに、外部放射線に係る線量当量率が基準設定値に達したときは、貯蔵区域、監視盤室及び事務建屋に警報を発報する。

(別添3参照)

また、全てのデータは監視盤室の記録装置に記録される。エリアモニタリング設備の構成図を第4図に示す。

b. 周辺監視区域境界付近固定モニタリング設備

周辺監視区域境界付近固定モニタリング設備は、リサイクル燃料備蓄センター周辺監視区域の空間線量率及び線量当量率を監視する装置である。

モニタリングポストAには、ガンマ線を測定対象とするNaI(Tl)シンチレーション検出器、電離箱及び中性子線を測定の対象とする³He比例計数管をそれぞれ1個設置し、モニタリングポストBには、NaI(Tl)シンチレーション検出器、電離箱をそれぞれ1個設置することにより、空間線量率又は線量当量率を連続的に監視し、監視盤室及び事務建屋に表示するとともに、空間線量率又は線量当量率が基準設定値に達したときは、監視盤室及び事務建屋に警報を発報する。(別添3参照)

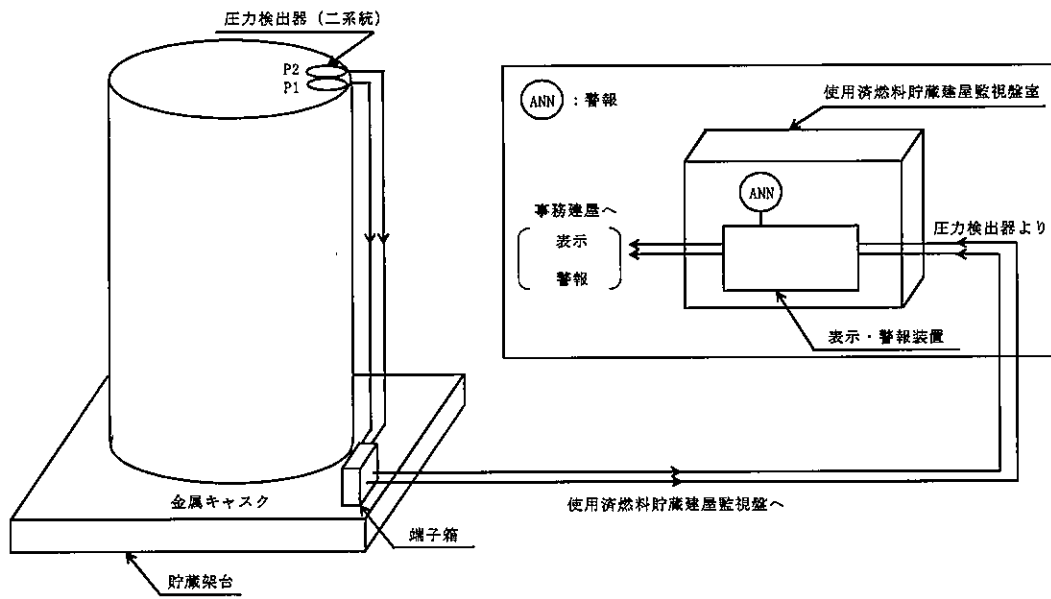
また、モニタリングポストのデータは監視盤室の記録装置に記録される。
周辺監視区域境界付近固定モニタリング設備の構成図を第5図に示す。

3. 試験検査

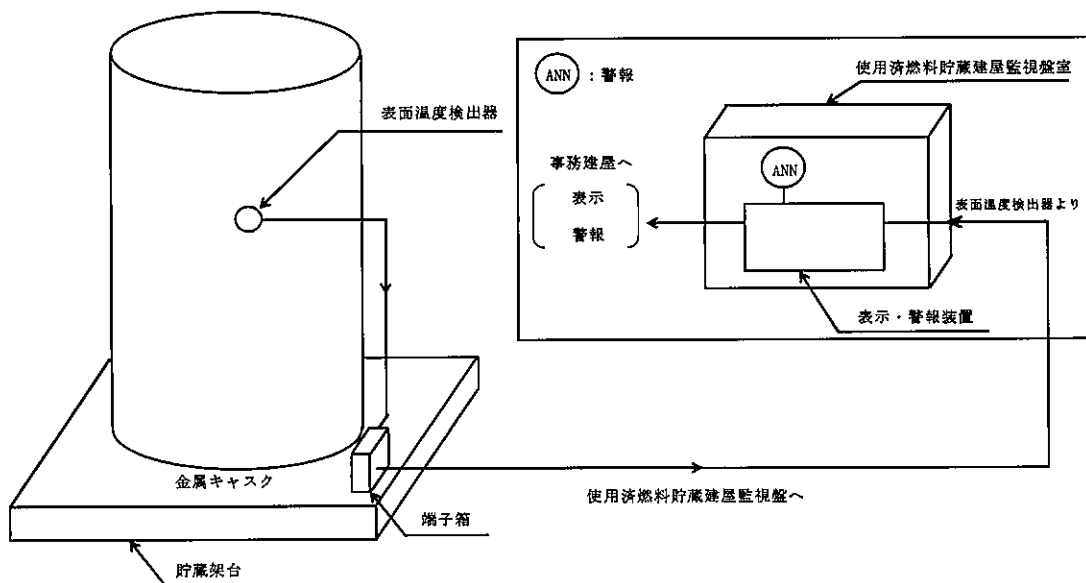
計測制御系統施設の試験検査については、別添6に示す。

4. 代替計測

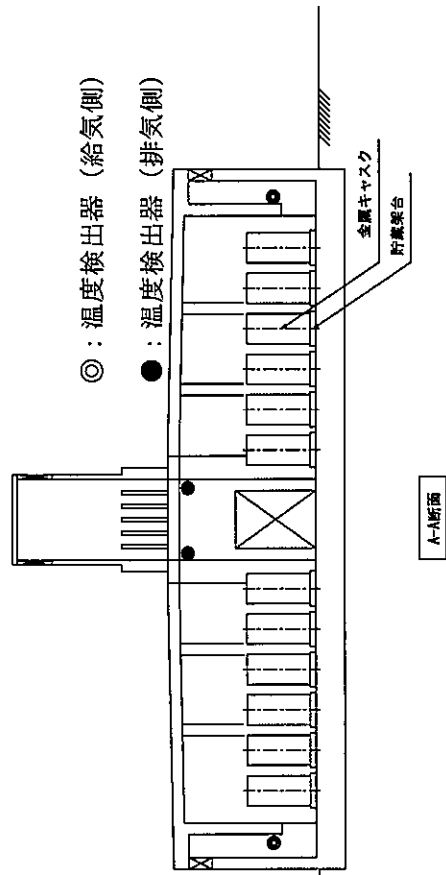
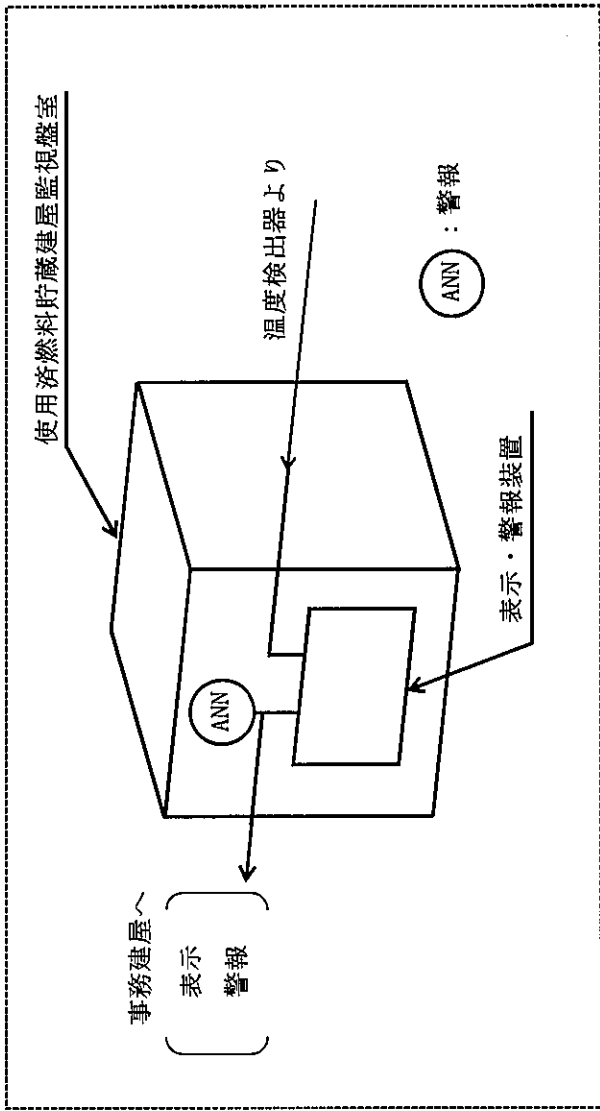
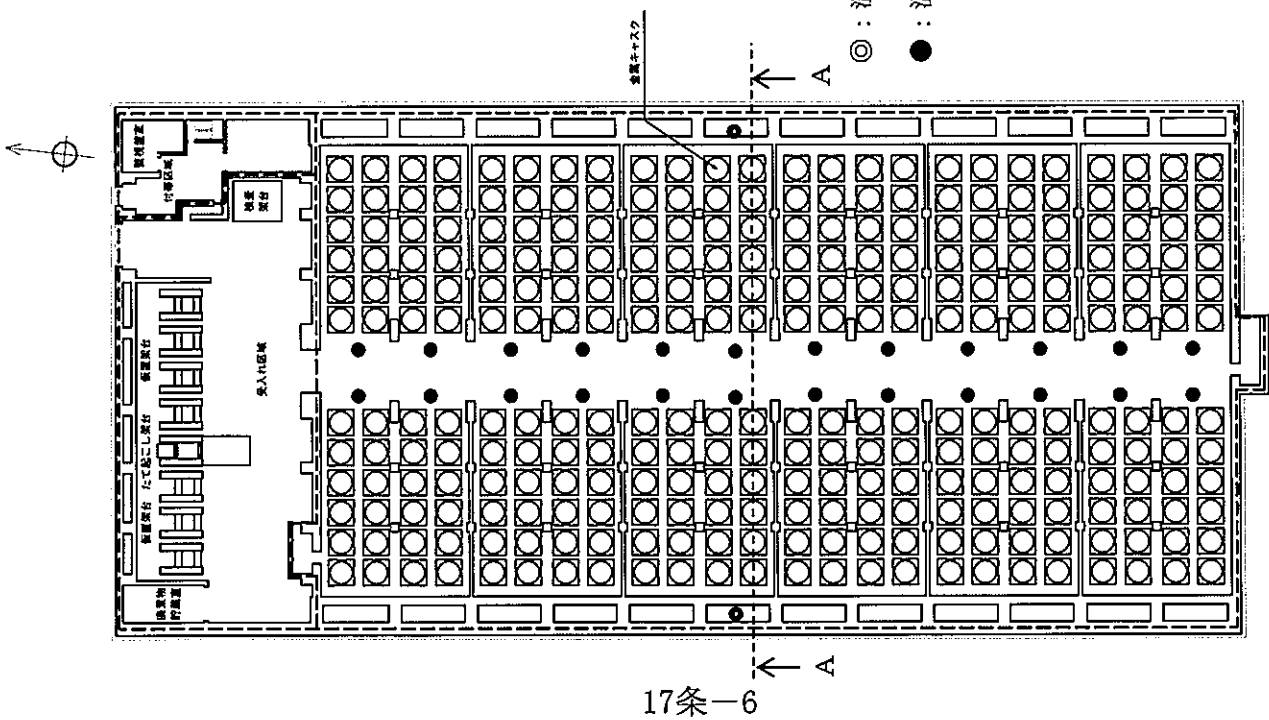
津波による計測設備，監視設備，電源設備の水没や，地震等による長期の電源喪失等，既設の計測設備，監視設備の継続使用ができなくなった場合は代替計測を行うとともに，監視員による巡視点検等を行い，基本的安全機能に異常がないことを確認する。さらに，代替計測開始後，監視が中断される前のデータと復旧後のデータとを比較し，異常がないことを確認する。（別添7参照）



第1図 蓋間圧力監視装置の構成図

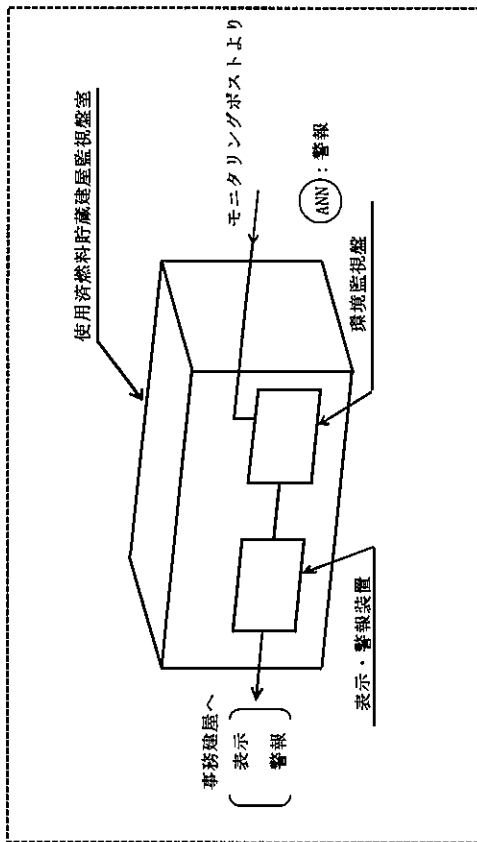
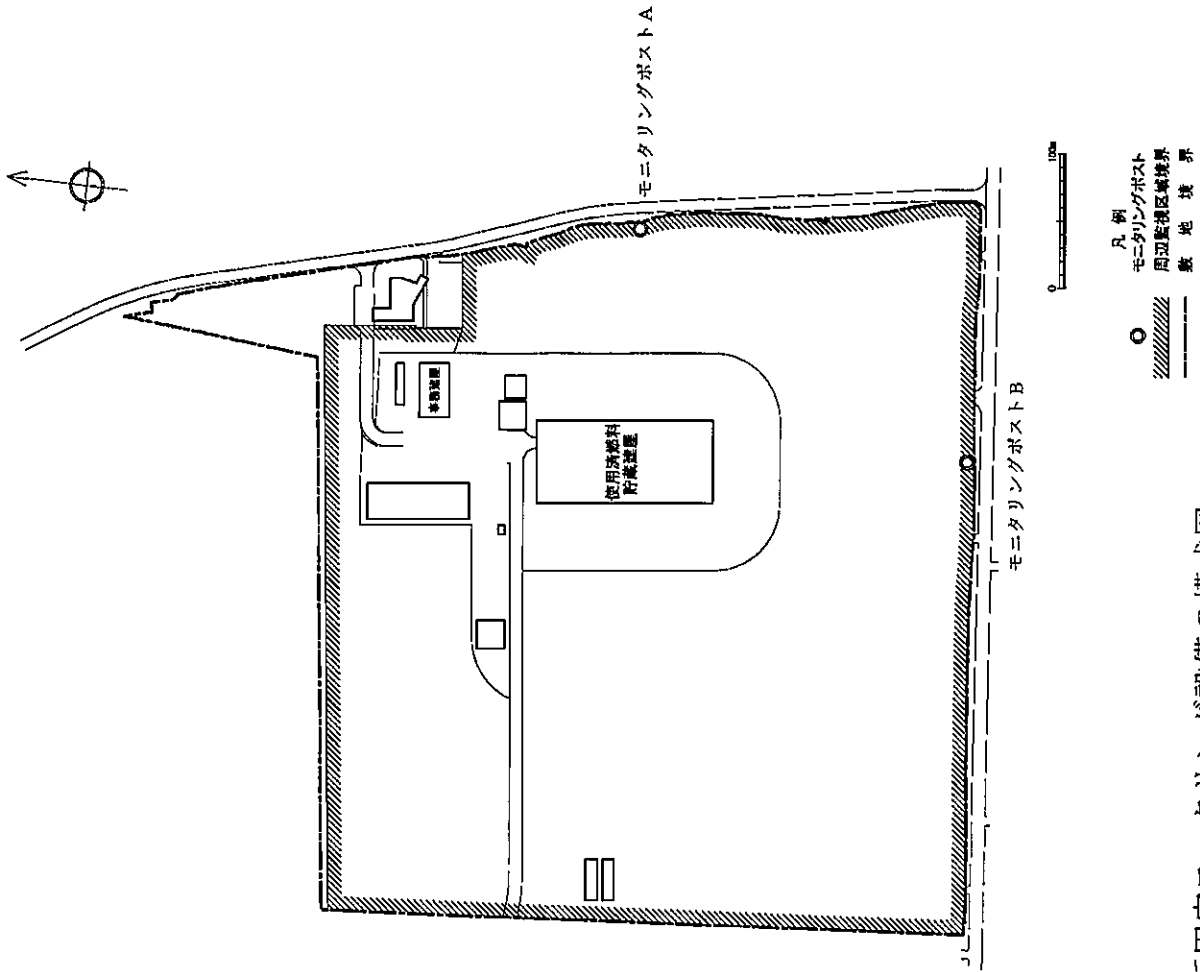


第2図 表面温度監視装置の構成図



◎ : 温度検出器 (給気側)
● : 温度検出器 (排気側)

第3図 給排気温度監視装置の構成図



第5図 周辺監視区域境界付近固定モニタリング設備の構成図

経年変化に対する設備を設けていないことについて

基本的安全機能を維持する上で重要な金属キャスクの構成部材は、設計貯蔵期間中の温度、放射線等の環境、並びにその環境下での腐食等の経年変化に対して十分な信頼性のある部材を選定し、その必要とされる強度、性能を維持し、必要な安全機能を損なうことのない設計としていることから、経年変化による基本的安全機能を損なうような著しい劣化はないため、経年変化に対する設備は設けていない。

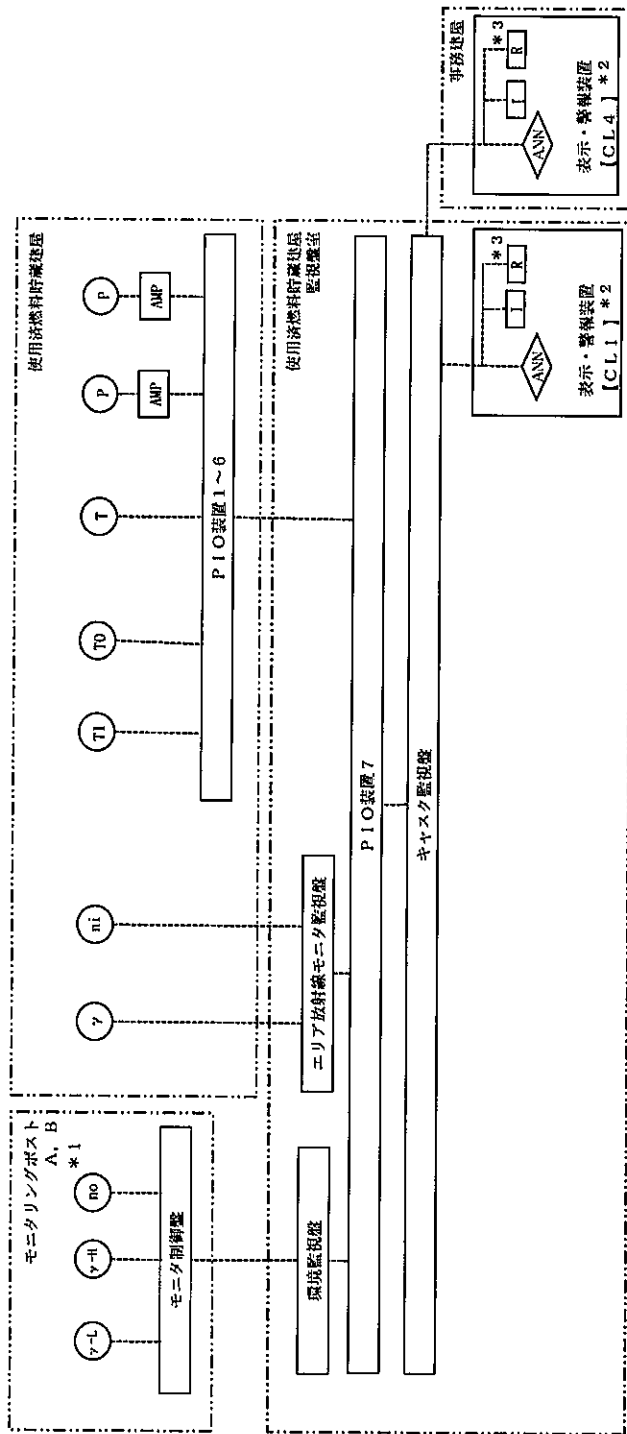
万一、異常が発生した場合でも、金属キャスク蓋間圧力、貯蔵区域の放射線レベルを常に監視していることから、基本的安全機能の劣化を検知でき、適切に処置を施すことができる。

監視装置の構成と監視について

監視装置は、表示・記録装置、警報装置、データサーバ等により構成され、監視盤室に設置する。(別添 2-1 図参照)

監視員は事務建屋に24時間常駐し、また、使用済燃料貯蔵設備本体・監視盤室等のパトロールを行うとともに、事務建屋に設置する表示装置で監視を行う。異常が発生した場合は事務建屋の警報装置で異常を検知する。また、事務建屋で監視不能な事態となった場合は、監視盤室で監視を行う。

事務建屋には表示装置及び警報装置を設置するものの、データサーバ及び表示装置等主要な機器は監視盤室に設置しており、事務建屋で監視不能な事態となった場合の監視は監視盤室で行うことから、事務建屋は規制対象にならない。



	説明	説明	
—	信号ライン		
γ-H	ガンマ線モニタ (高レンジ) [MP-A (B) 高レンジ] * 2	T	表面温度検出器
γ-L	ガンマ線モニタ (低レンジ) [MP-A (B) 低レンジ] * 2	P	蓋間圧力検出器
no	中性子線モニタ [MP-A 中性子] * 1 * 2	AMP	前置増幅器
γ	ガンマ線エリアモニタ [γ線エリアモニタ] * 2	ANN	警報
ni	中性子線エリアモニタ [中性子エリアモニタ] * 2	I	表示
TI	給排水温度検出器 (給気側)	R	記録 * 3
TO	給排水温度検出器 (排気側)		区域、部屋の境界を示す
			盤設置機器あるいは表示・警報装置

* 1 : モニタリングポストAのみ
 * 2 : [] は機器名称を示す
 * 3 : 記録紙体へ記録

別添 2-1 図 監視装置の概略系統図

警報設定値の考え方について

1. 蓋間圧力の警報設定

「別添 4 1. (2) 蓋間圧力の警報設定」を参照。

2. 表面温度の警報設定

金属キャスク表面温度の警報設定は、BWR用大型キャスク（タイプ 2 A）の場合で、貯蔵時外筒外面最高使用温度である 120℃以下、BWR用中型キャスク（タイプ 2）の場合で、貯蔵時外筒外面最高使用温度である 130℃以下に設定する。PWR用キャスク（タイプ 1）の場合で、貯蔵時外筒外面最高使用温度である 125℃以下に設定する。（添付 1，添付 2 参照）

3. 給排気温度の警報設定

(1) 排気温度の警報設定

排気温度の警報設定は、計測設備、放射線監視設備等の電気品の性能が維持できる温度である 45℃以下に設定する。

(2) 給排気温度差の警報設定

給排気温度差は、除熱機能が維持されていることを監視する目的で測定するが、給排気温度差の警報設定は、除熱解析結果における給排気温度差 10℃（給気温度=29.8℃，排気温度=40.0℃）以下の値に設定する。

4. エリアモニタリング設備の警報設定

(1) ガンマ線エリアモニタの警報設定

ガンマ線エリアモニタの警報設定は、平常時の平均的なバックグラウンドノイズの揺らぎを考慮し、バックグラウンドノイズにある程度の余裕を加えた設定を行うこととし、平均的バックグラウンドの 10 倍以内の倍数で設定する。

(2) 中性子線エリアモニタの警報設定

中性子線エリアモニタの警報設定は、「4.(1)ガンマ線エリアモニタの警報設定」と同様、平均的バックグラウンドレベルの10倍以内の倍数で設定する。

5. 周辺監視区域境界付近固定モニタリング設備の警報設定

(1) 空間線量率(ガンマ線)の警報設定

空間線量率(ガンマ線)の警報設定は、周辺監視区域外の実効線量限度または、平常時のバックグラウンドレベル(気象要因等による変動を含む。)の変動範囲を勘案し有意に放射線レベルが変化したことがわかるように設定する。

(2) 線量当量率(中性子線)の警報設定

線量当量率(中性子線)の警報設定は、「5.(1)空間線量率(ガンマ線)の警報設定」と同様に、周辺監視区域外の実効線量限度または、平常時のバックグラウンドレベル(気象要因等による変動を含む)の変動範囲を勘案し有意に放射線レベルが変化したことがわかるように設定する。

警報設定値根拠について

警報設定値根拠については、以下のとおり。

添付 1 - 1 表 警報設定値根拠

項 目 (警報設定値)	根 拠
金属キャスク表面 温度 (120℃ ^{※1} , <u>130℃</u> ^{※2} , <u>125℃</u> ^{※3})	解析値を逸脱しないことを監視する目的で、キャスクタイプ毎に貯蔵時外筒外面最高使用温度を設定。 なお、金属キャスク表面温度は、外気温の変動等を考慮しトレンド監視する。
使用済燃料貯蔵 建屋排気温度 (45℃)	計測設備、放射線監視設備等の電気品の性能が維持できる温度を設定。
使用済燃料貯蔵 建屋給排気温度差 (10℃)	除熱機能が維持されていることの使用済燃料貯蔵建屋給排気温度差の上限としての、除熱解析結果における給気温度 <u>29.8℃</u> 、排気温度40.0℃の差を設定。

※1：BWR用大型キャスク（タイプ2A）の場合

※2：BWR用中型キャスク（タイプ2）の場合

※3：PWR用キャスク（タイプ1）の場合

隣接キャスクの輻射の影響と異常検知について

高発熱量のキャスクに低発熱量のキャスクが隣接し、かつそれぞれの表面温度警報設定値が異なる場合においては、輻射の影響も考慮した警報値を設定する。

また、通常の貯蔵中に燃料が破損することは想定しにくく、臨界となって温度上昇することはない。

万一、高発熱量のキャスクに低発熱量のキャスクが隣接した場合でも、可搬型の温度測定器を用いて、輻射の影響の及ばない面の外表面温度を測定することにより、異常の検知は可能である。

また、輻射の影響がある場合においても、ある程度の貯蔵期間を経ることにより、温度影響が飽和し、温度的に安定化することにより、万が一の温度上昇事象が発生しても、トレンド管理により異常の検知は十分に可能である。

閉じ込め機能の監視について

1. 閉じ込め機能の監視

金属キャスクは、蓋部を一次蓋、二次蓋の多重の閉じ込め構造とし、一次蓋と二次蓋との空間部を正圧に維持することにより、使用済燃料集合体を内封する空間を金属キャスク外部から遮断する設計としている。また、蓋間圧力を測定することにより、閉じ込め機能について監視ができる設計としている。(添付1参照)

(1) 蓋間圧力監視装置の圧力検出部の構造及び仕様

金属キャスクの閉じ込め機能が確保されていることを適切に監視するため、蓋間圧力監視装置により、金属キャスクの蓋間圧力を測定している。

蓋間圧力監視装置の圧力検出部は、電気式圧力検出器、バルブ、閉止プラグ等で構成されている。蓋間圧力監視装置(圧力検出部)の構成図を別添4-1図に、電気式圧力検出器及びその仕様を別添4-2図に示す。

(2) 蓋間圧力の警報設定

蓋間圧力の警報設定の考え方を以下に示す。

警報設定値は、初期圧力(0.41MPa abs)に蓋部温度変化、漏えいによる低下、金属キャスク周囲温度変化による圧力変動を考慮した値から、蓋間圧力監視のための圧力障壁が確認できる大気圧上限(0.105MPa abs)の範囲とする。(添付2参照)

a. 警報設定圧力上限値の設定

初期圧力(0.41MPa abs)に蓋部温度変化、漏えいによる低下、金属キャスク周囲温度変化による圧力変動を考慮した値を警報設定圧力の上限値とする。警報設定圧力の上限値はBWR用大型キャスク(タイプ2A)の場合は約0.31MPa abs、BWR用中型キャスク(タイプ2)、PWR用キャスク(タイプ1)の場合は約0.32MPa absとなる。

b. 警報設定圧力下限値の設定

大気圧上限よりも安全側な設定として、燃料被覆管の破損という事象は想定されないが、仮想的に全数燃料破損を仮定した場合に燃料から放出さ

れるガスによる圧力上昇分を加算した金属キャスクの内部圧力を警報設定圧力の下限值とする。警報設定圧力の下限值はBWR用大型キャスク（タイプ2A）の場合は約0.23MPa abs，BWR用中型キャスク（タイプ2）の場合は約0.21MPa abs，PWR用キャスク（タイプ1）の場合は約0.29MPa absとなる。

c. 警報設定値の設定

警報設定値は、上述の警報設定圧力の上限值と下限値を考慮して設定する。警報設定値はBWR用大型キャスク（タイプ2A），BWR用中型キャスク（タイプ2）の場合は0.27MPa abs，PWR用キャスク（タイプ1）の場合は0.31MPa absとする。

(3) 蓋間圧力監視装置の校正方法

蓋間圧力監視装置の校正は、別添4-1図の閉止プラグ部に試験器（加圧器、圧力計等により構成される。）を接続し、圧力調整（減圧～加圧）を行い、表示・記録計の出力が所定の圧力になるように、電気式圧力検出器の増幅器（第1図に示す端子箱内に設置）の調整を行う。

なお、一次バルブ、二次バルブについては、点検等に伴うバルブの開閉操作の繰り返しによる弁座のシートパスが想定される。バルブ弁座のシートパスについては、二次バルブの場合は一次バルブを閉止して交換作業を行う。一次バルブの場合は二次蓋金属ガスケットの交換と同様に、蓋間圧力開放の可否を判断したうえで、蓋間圧力監視孔の金属ガスケットを含め一次バルブの交換を行う。（添付3参照）

2. 金属キャスク内部の負圧維持について

金属キャスクは、放射性物質を限定された区域に閉じ込めるため、設計貯蔵期間を通じて使用済燃料集合体を内封する空間を負圧に維持する設計としている。

蓋間圧力の経時変化が基準漏えい率を超えない低下である場合は、圧力障壁を維持するために、適宜、蓋間空間にヘリウムガスを再充填する。その際、再充填回数を把握し、過剰な充填とならないように管理することで、間接的に負圧維持を確認する。（添付4参照）

(1) 蓋間圧力低下時の確認方法

貯蔵中の金属キャスクの蓋間圧力は、蓋間圧力監視装置により監視、記録できる設計とする。

貯蔵中に蓋間圧力の低下が確認された場合、あるいは警報が発生した場合は、蓋間圧力の経時変化を確認し、基準漏えい率との比較を行うことにより、閉じ込め機能の健全性を確認する。確認の結果、閉じ込め機能が健全であると判断された場合は、蓋間空間にヘリウムガスの再充填を行う。

基準漏えい率で漏えいする場合の蓋間圧力の経時変化を別添 4-3 図に示す。

(2) 蓋間空間へのヘリウムガスの再充填の管理方法

使用済燃料貯蔵施設において蓋間空間へヘリウムガスを再充填する場合には、再充填回数を管理し、過剰な充填とならないように管理する。再充填回数を管理することで、金属キャスク内部の圧力を負圧に維持する。

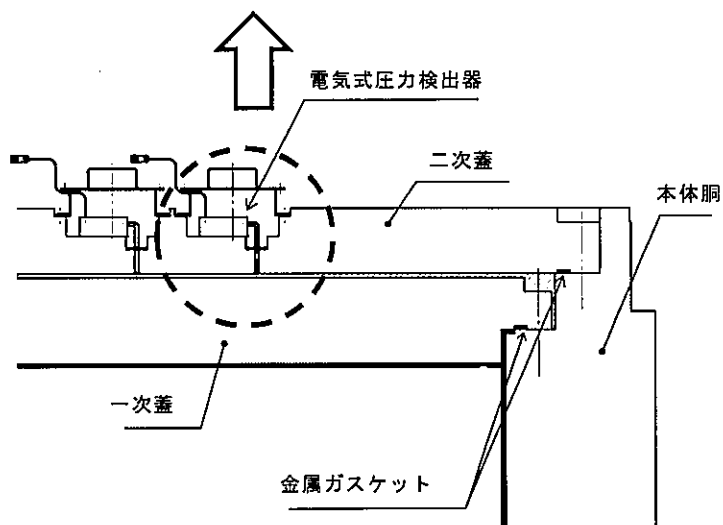
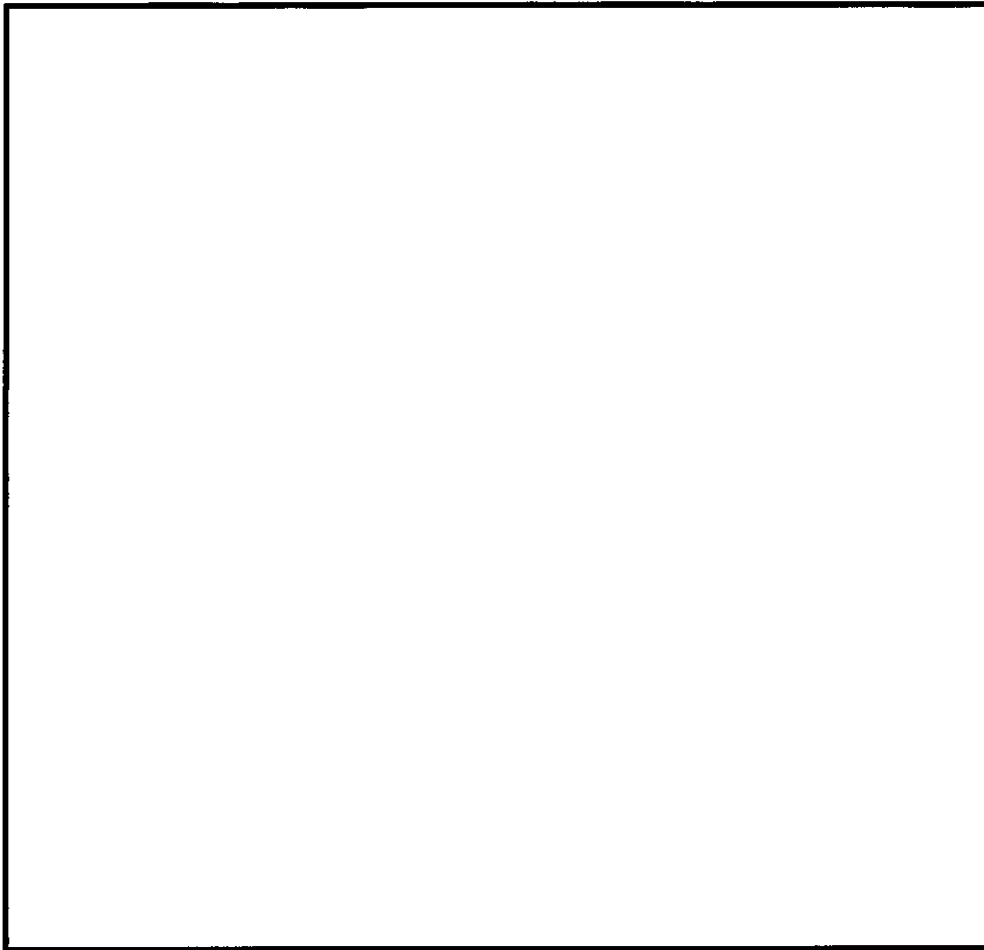
BWR用大型キャスク（タイプ 2 A）の場合、蓋間圧力が、初期圧力（0.41MPa abs）から警報設定値（0.27MPa abs）まで低下した場合に、蓋間空間にヘリウムガスを再充填すると仮定すると、約 10 回まで再充填することができる。蓋間空間に約 10 回を超える再充填が必要となる可能性が予見される場合は、金属キャスク搬出の検討を行う。

BWR用中型キャスク（タイプ 2）の場合、蓋間圧力が、初期圧力（0.41MPa abs）から警報設定値（0.27MPa abs）まで低下した場合に、蓋間空間にヘリウムガスを再充填すると仮定すると、約 6 回まで再充填することができる。蓋間空間に約 6 回を超える再充填が必要となる可能性が予見される場合は、金属キャスク搬出の検討を行う。

PWR用キャスク（タイプ 1）の場合、蓋間圧力が、初期圧力（0.41MPa abs）から警報設定値（0.31MPa abs）まで低下した場合に、蓋間空間にヘリウムガスを再充填すると仮定すると、約 10 回まで再充填することができる。蓋間空間に約 10 回を超える再充填が必要となる可能性が予見される場合は、金属キャスク搬出の検討を行う。

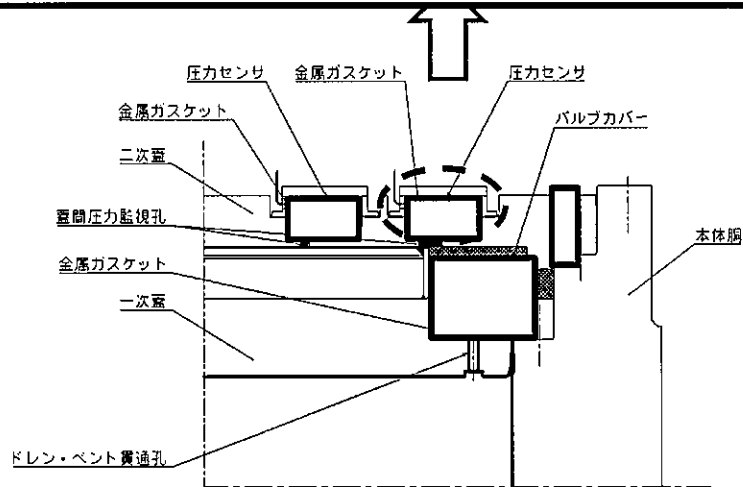
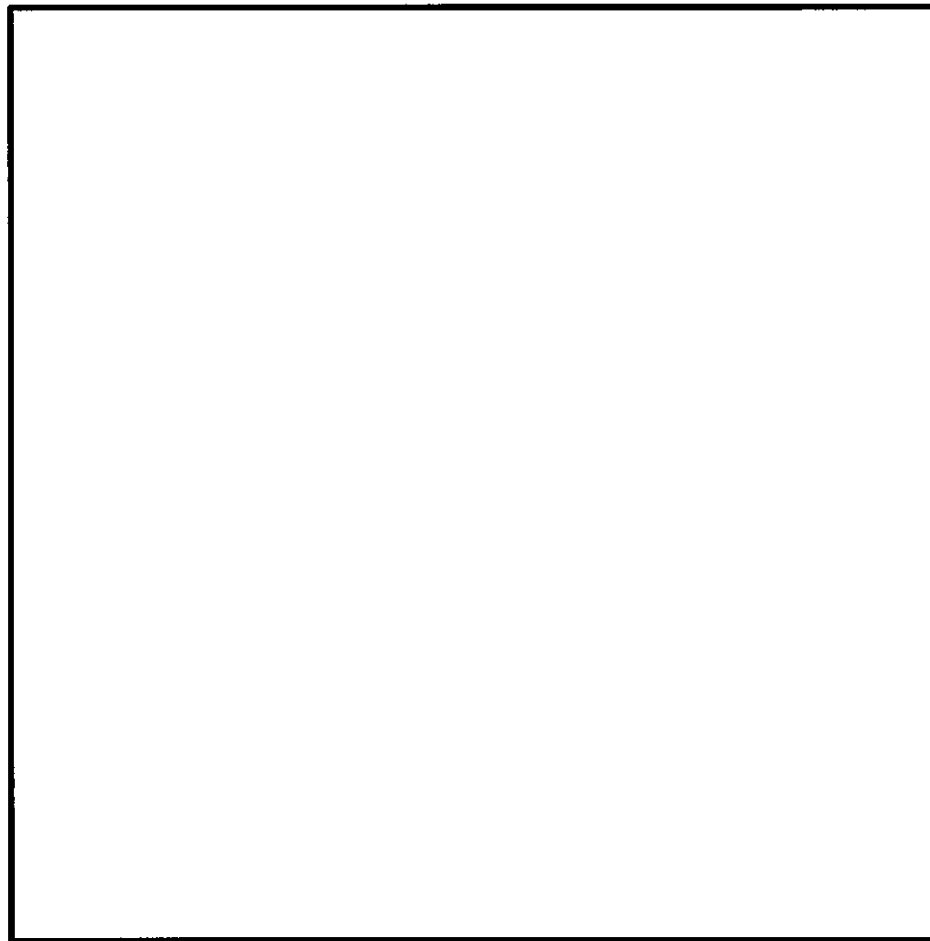
(3) 蓋間空間へのヘリウムガスの再充填方法

蓋間空間へのヘリウムガスは、別添4-1図の閉止プラグ部にヘリウム充填装置（圧力計，ヘリウムボンベ，真空ポンプ等により構成）を接続し，別添4-1図の二次バルブを開けることにより，ヘリウム充填装置から所定の圧力までヘリウムを再充填する。



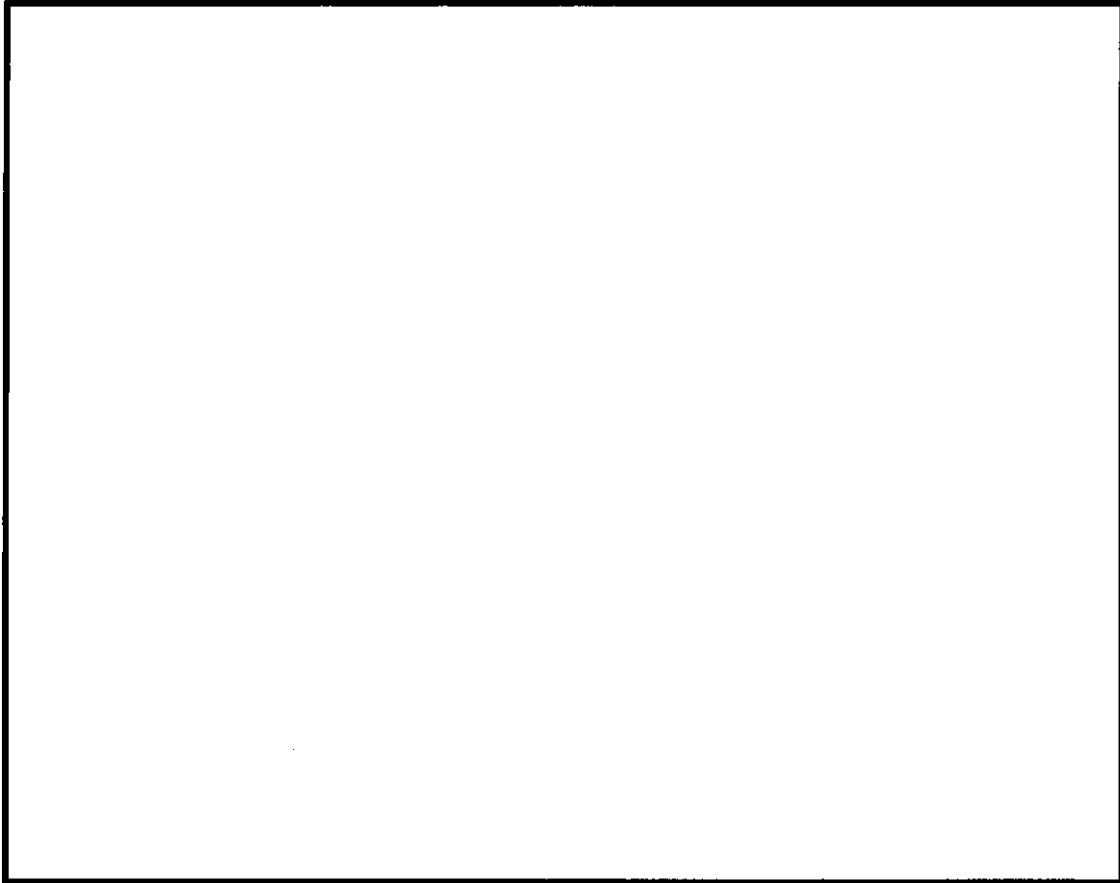
(a) BWR用大型キャスク (タイプ2A)

別添4-1図 蓋間圧力監視装置 (圧力検出部) の構成図 (1/2)



—— 閉じ込め境界(負圧: 0.08MPa (初期圧))
▨ 閉じ込め監視圧力境界(正圧: 0.41MPa (初期圧))

(b) BWR用中型キャスク (タイプ2), PWR用キャスク (タイプ1)
別添4-1 図 蓋間圧力監視装置 (圧力検出部) の構成図 (2/2)

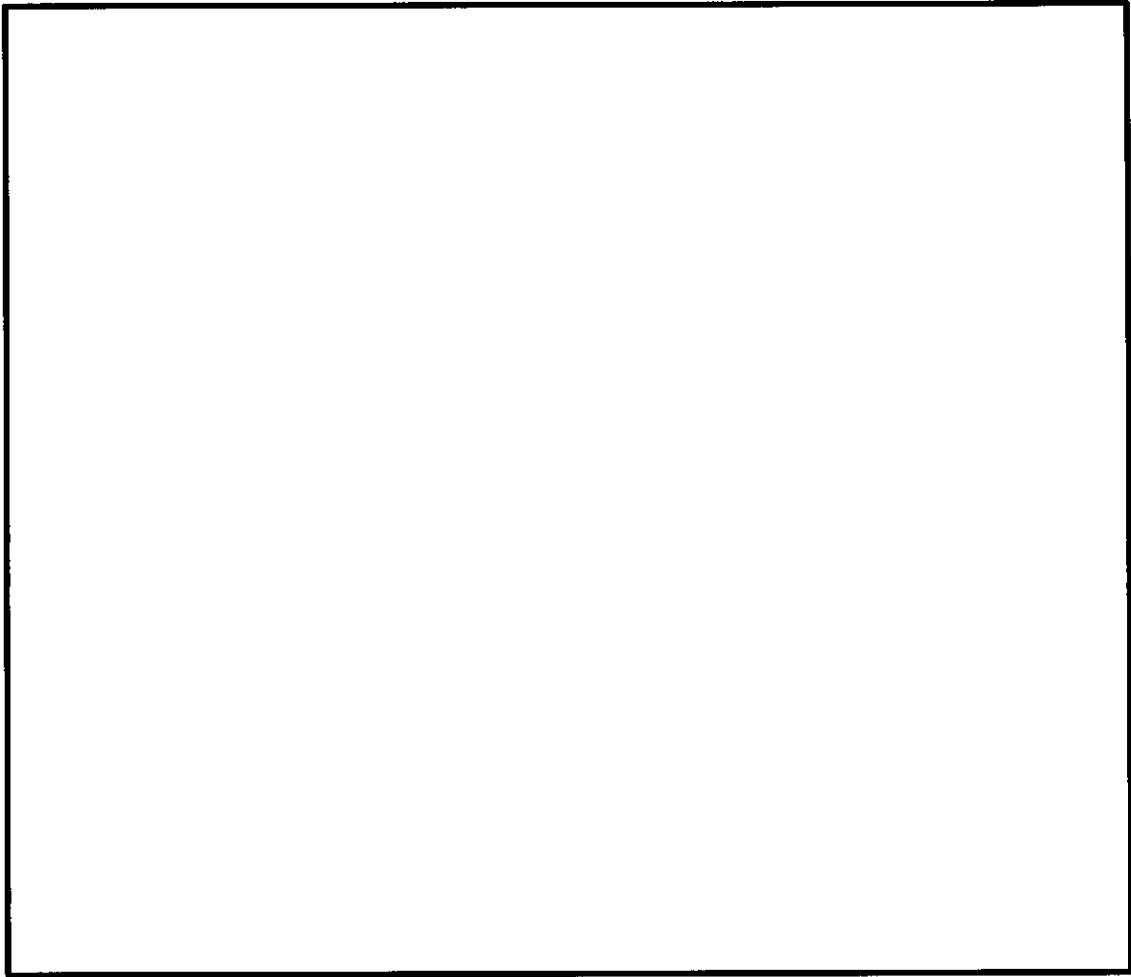


【電気式圧力検出器仕様】

- | | |
|----------------|------------------|
| ・定 格 容 量 : | 500kPa abs (絶対圧) |
| ・温 度 補 償 範 囲 : | -30 ~ 200℃ |

(a) BWR用大型キャスク (タイプ2 A)

別添4-2図 電気式圧力検出器及びその仕様 (1/2)

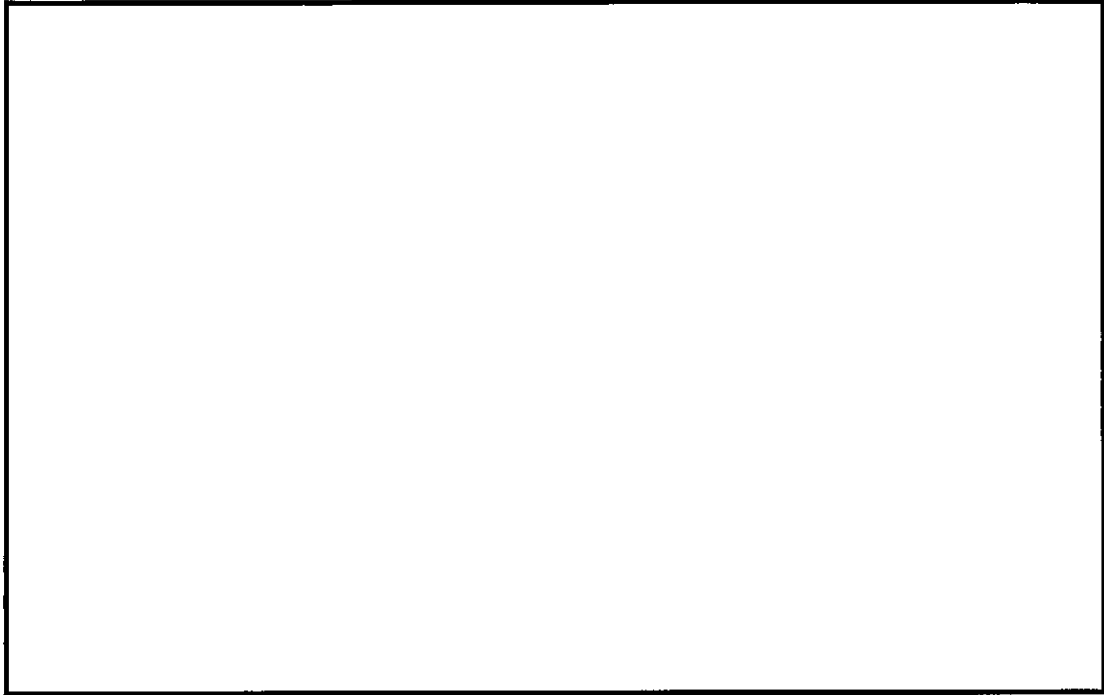


【電気式圧力検出器仕様】

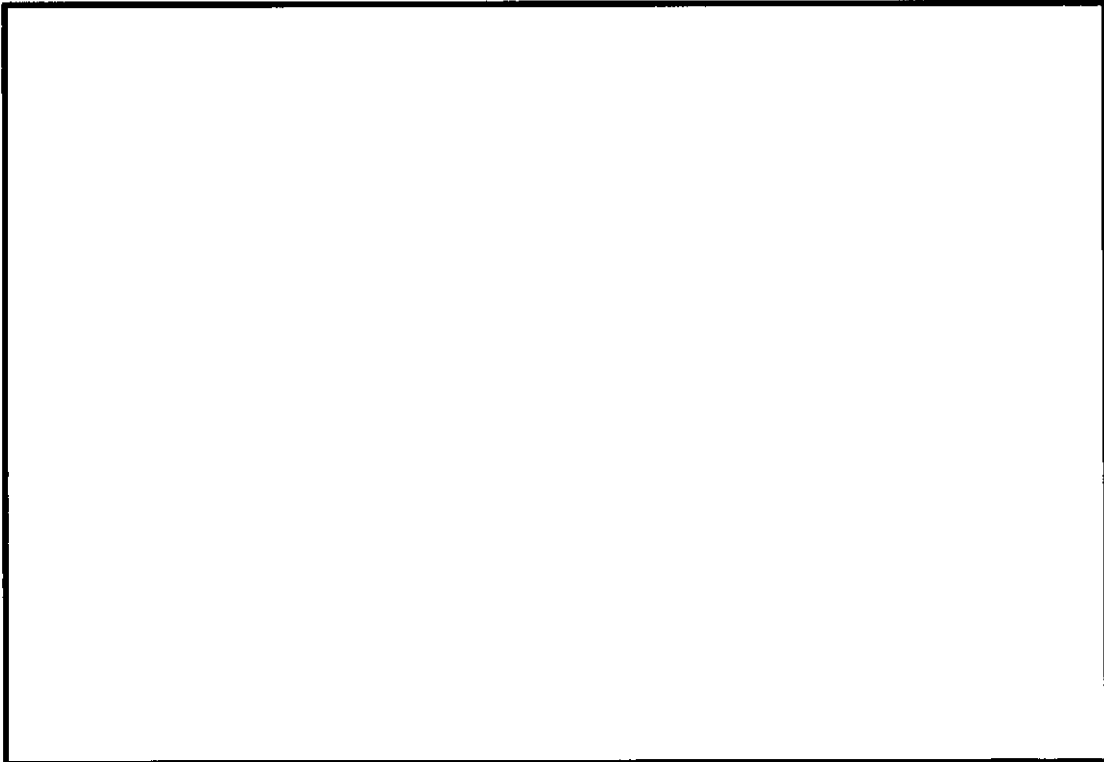
- | | |
|------------|------------------|
| ・定 格 容 量 : | 500kPa abs (絶対圧) |
| ・温度補償範囲 : | -30 ~ 200°C |

(b) BWR用中型キャスク (タイプ2) , PWR用キャスク (タイプ1)

別添4-2図 電気式圧力検出器及びその仕様 (2/2)

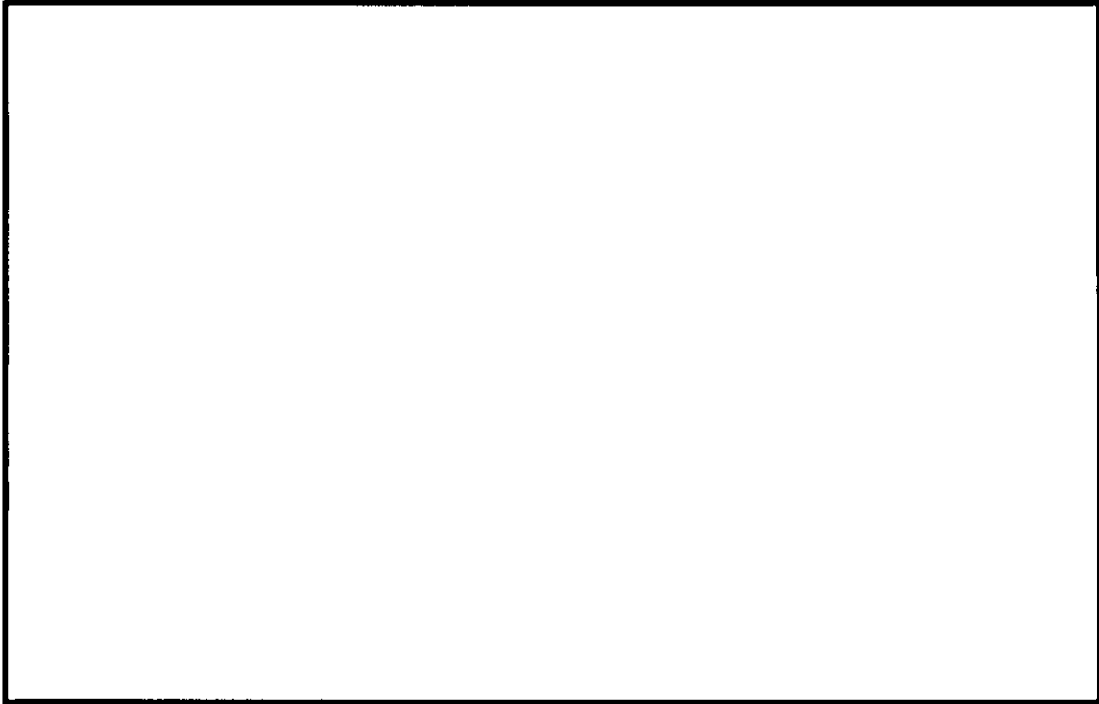


(a) BWR用大型キャスク (タイプ2A)



(b) BWR用中型キャスク (タイプ2)

別添4-3図 基準漏えい率で漏えいした場合の蓋間圧力の経時変化 (1/2)



(c) PWR用キャスク (タイプ1)

別添4-3図 基準漏えい率で漏えいした場合の蓋間圧力の経時変化 (2/2)

蓋間圧力の監視と圧力低下時の対応について

蓋間圧力については、警報の他に圧力の経時的な変化についても監視を行う。

「蓋間の圧力が急激に低下する場合」は、蓋部の閉じ込め機能の異常による漏えい率の著しい変化が有る状態（基準漏えい率を超える場合）を意味し、蓋間圧力の経時変化（圧力低下）として観測されることになる。その場合には、外部に漏れてきたヘリウムガスをスニッファープローブで吸い込み、漏れを検出する方法（ヘリウム漏れ試験（スニッファーマ））により漏えい箇所を調査し、漏えいが認められれば、二次蓋金属ガスケットの交換、蓋間圧力監視装置の継手部点検（例：増締め）もしくは部品交換を行う。

運用管理面では蓋間圧力が警報設定値に達すれば、ヘリウムの再充填を行うこととなるが、BWR用大型キャスク（タイプ2 A）の場合、蓋間空間に約 10 回、BWR用中型キャスク（タイプ2）の場合、蓋間空間に約 6 回、PWR用キャスク（タイプ1）の場合、約 10 回を超える再充填が必要となる可能性が見られる場合は、金属キャスク搬出の検討を行う。

蓋間圧力警報設定値の設定について

警報設定値は、BWR用大型キャスク（タイプ2A）、BWR用中型キャスク（タイプ2）及びPWR用キャスク（タイプ1）の場合、初期圧力（0.41MPa abs）に蓋部温度変化、漏えいによる低下、金属キャスク周辺温度変化による圧力変動を考慮した値から、蓋間圧力監視のための圧力障壁が確認できる大気圧上限（0.105MPa abs）の範囲で設定する。

以下に、BWR用大型キャスク（タイプ2A）、BWR用中型キャスク（タイプ2）及びPWR用キャスク（タイプ1）の警報設定値の設定について示す。

1. 警報設定圧力上限値の設定

蓋間圧力の警報設定圧力上限値については、閉じ込め機能の異常ではない圧力監視中に生じる経時的変化等による警報発生を避けるために、BWR用大型キャスク（タイプ2A）の場合、蓋間の初期圧力（0.41MPa abs）に蓋部温度変化、漏えいによる圧力低下、金属キャスク周囲温度変化による不確かさを考慮した値（約0.31MPa abs）を上限値とする。BWR用中型キャスク（タイプ2）、PWR用キャスク（タイプ1）の場合、蓋間の初期圧力（0.41MPa abs）に蓋部温度変化、漏えいによる圧力低下、金属キャスク周囲温度変化による不確かさを考慮した値（約0.32MPa abs）を警報設定圧力の上限値とする。

2. 警報設定圧力下限値の設定

蓋間圧力の警報設定圧力下限値については、大気圧上限よりも安全側な設定として、金属キャスク内部の初期圧力（0.08MPa abs）に、漏えいによる圧力上昇及び一次蓋シール部の密封異常による蓋間部から金属キャスク内部へのガス流入による圧力上昇、さらに、燃料被覆管の破損という事象は想定されないが、BWR用大型キャスク（タイプ2A）の場合、全数燃料破損を仮定した場合に燃料から放出されるガスによる圧力上昇を考慮した値として約0.23MPa abs、BWR用中型キャスク（タイプ2）の場合、

約 0.21MPa abs, PWR用キャスク (タイプ1) の場合, 約 0.29MPa abs を警報設定圧力の下限值とする。

3. 警報設定値の設定

添付 2 - 1 表に警報設定値と上下限值との関係を示す。警報設定値は, 上述の警報設定圧力の上限值と下限値を考慮して設定する。警報設定値は BWR用大型キャスク (タイプ2 A), BWR用中型キャスク (タイプ2) の場合は 0.27MPa abs, PWR用キャスク (タイプ1) の場合は 0.31MPa abs とする。

添付 2 - 1 表 警報設定値と上下限值との関係 (1 / 3)

(a) BWR用大型キャスク (タイプ 2 A)

圧力変動の要因	初期圧力と警報設定圧力との関係	
—	蓋間の初期圧力 : 0.41MPa	
蓋部の温度変化に伴う圧力低下	↓ (約 <input type="text"/> %) *1	崩壊熱の減衰 (貯蔵初期から 1 年間)
蓋間からの漏えいによる圧力低下	↓ (約 <input type="text"/> %) *1	リークテスト判定基準値での漏えい率で一次蓋のシール部からのインリークと二次蓋のシール部からのアウトリーク (1 年間)
周囲の温度変化に伴う圧力変化	↓ (約 <input type="text"/> %) *1	-22.4℃ (最低気温) ~ 45℃ (除熱解析の設計値)
—	警報設定圧力の上限値 : 約 0.31MPa	
—	警報設定値 : 0.27MPa	
—	警報設定圧力の下限値 : 約 0.23MPa	
燃料からの放出に伴う圧力上昇	↑ (約 <input type="text"/> %) *2	漏えい燃料の発生率 100% を仮定
蓋間ガスの流入に伴う圧力上昇	↑ (約 <input type="text"/> %) *2	蓋間ガスの全量 (1 回分)
金属キャスク内部への漏えいに伴う圧力上昇	↑ (約 <input type="text"/> %) *2	リークテスト判定基準値での漏えい率で一次蓋のシール部からのインリーク (60 年間)
—	金属キャスク内部の初期圧力 : 0.08MPa	

注記 * 1 : 圧力低下に対する各要因の比率

* 2 : 圧力上昇に対する各要因の比率

添付 2 - 1 表 警報設定値と上下限值との関係 (2 / 3)

(b) BWR用中型キャスク (タイプ 2)

圧力変動の要因	初期圧力と警報設定圧力との関係	
—	蓋間の初期圧力 : 0.41MPa	
蓋部の温度変化に伴う圧力低下	↓ (約 <input type="text"/> %) *1	崩壊熱の減衰 (貯蔵初期から 1 年間)
蓋間からの漏えいによる圧力低下	↓ (約 <input type="text"/> %) *1	リークテスト判定基準値での漏えい率で一次蓋のシール部からのインリークと二次蓋のシール部からのアウトリーク (1 年間)
周囲の温度変化に伴う圧力変化	↓ (約 <input type="text"/> %) *1	-22.4℃ (最低気温) ~ 45℃ (除熱解析の設計値)
—	警報設定圧力の上限値 : 約 0.32MPa	
—	警報設定値 : 0.27MPa	
—	警報設定圧力の下限値 : 約 0.21MPa	
燃料からの放出に伴う圧力上昇	↑ (約 <input type="text"/> %) *2	漏えい燃料の発生率 100% を仮定
蓋間ガスの流入に伴う圧力上昇	↑ (約 <input type="text"/> %) *2	蓋間ガスの全量 (1 回分)
金属キャスク内部への漏えいに伴う圧力上昇	↑ (約 <input type="text"/> %) *2	リークテスト判定基準値での漏えい率で一次蓋のシール部からのインリーク (60 年間)
—	金属キャスク内部の初期圧力 : 0.08MPa	

注記 * 1 : 圧力低下に対する各要因の比率

* 2 : 圧力上昇に対する各要因の比率

添付 2 - 1 表 警報設定値と上下限值との関係 (3 / 3)

(c) PWR用キャスク (タイプ 1)

圧力変動の要因	初期圧力と警報設定圧力との関係	
—	蓋間の初期圧力：0.41MPa	
蓋部の温度変化に伴う圧力低下	↓ (約 <input type="text"/> %) *1	崩壊熱の減衰 (貯蔵初期から 1 年間)
蓋間からの漏えいによる圧力低下	↓ (約 <input type="text"/> %) *1	リークテスト判定基準値での漏えい率で一次蓋のシール部からのインリークと二次蓋のシール部からのアウトリーク (1 年間)
周囲の温度変化に伴う圧力変化	↓ (約 <input type="text"/> %) *1	-22.4℃ (最低気温) ~ 45℃ (除熱解析の設計値)
—	警報設定圧力の上限値：約 0.32MPa	
—	警報設定値：0.31MPa	
—	警報設定圧力の下限値：約 0.29MPa	
燃料からの放出に伴う圧力上昇	↑ (約 <input type="text"/> %) *2	漏えい燃料の発生率 100% を仮定
蓋間ガスの流入に伴う圧力上昇	↑ (約 <input type="text"/> %) *2	蓋間ガスの全量 (1 回分)
金属キャスク内部への漏えいに伴う圧力上昇	↑ (約 <input type="text"/> %) *2	リークテスト判定基準値での漏えい率で一次蓋のシール部からのインリーク (60 年間)
—	金属キャスク内部の初期圧力：0.08MPa	

注記 * 1 : 圧力低下に対する各要因の比率

* 2 : 圧力上昇に対する各要因の比率

バルブの保守管理について

貫通孔及び金属ガスケットによるシール部の構成図を添付 3 - 2 図に示す。

二次蓋に装着された圧力センサは、添付 3 - 1 図に示す構造であり、受圧部には貫通部は存在しない。

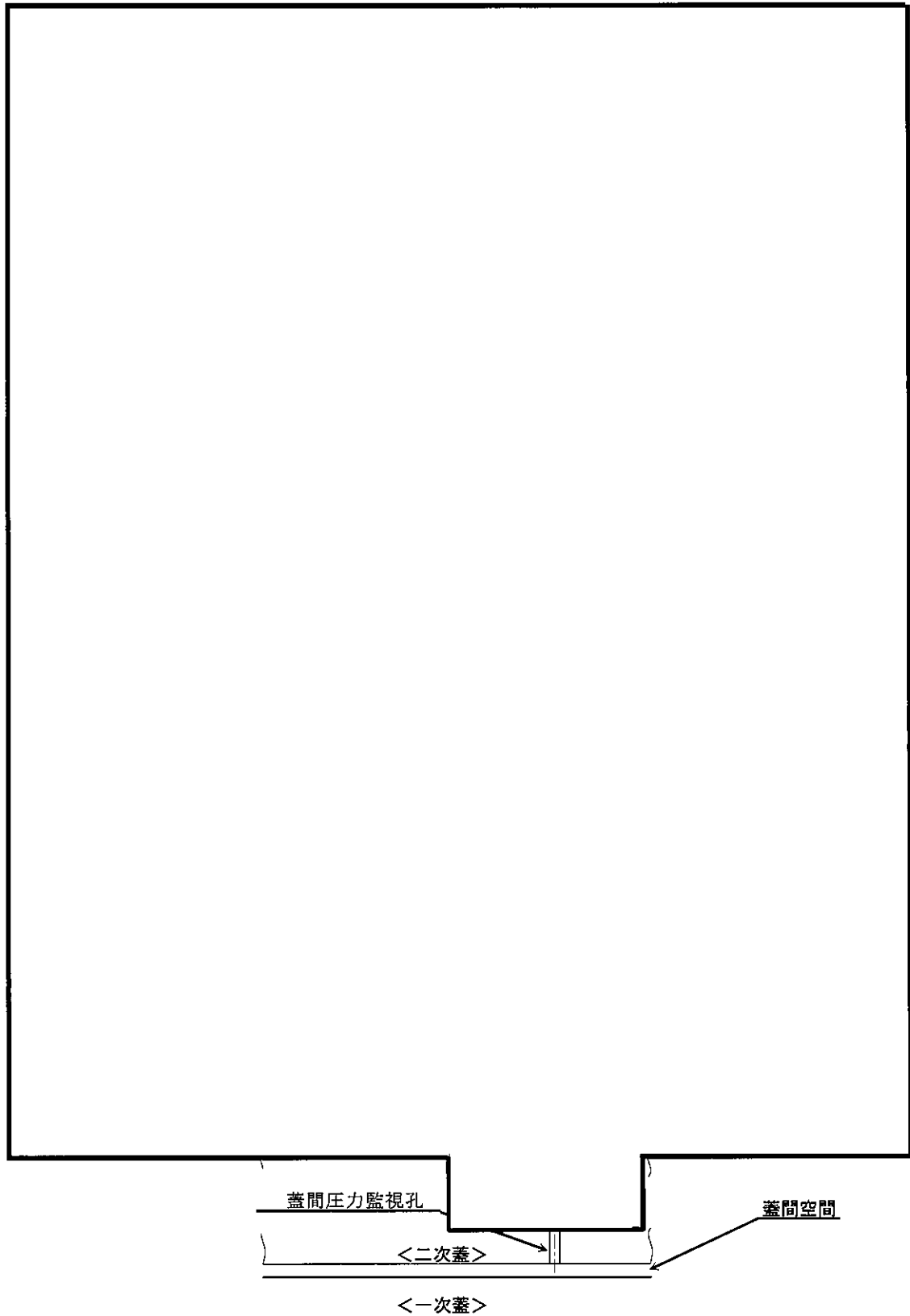
圧力センサの保守管理は校正を 1 回/年程度とし、蓋間圧力監視装置は二系統の構成になっており、圧力検出部の一次バルブを閉にすることで、一方の蓋間圧力監視装置で蓋間圧力を測定しながら、蓋間圧力を開放することなく、校正や交換等が可能である。

蓋間圧力監視装置の圧力検出部で想定される事象として、溶接部、継手部及びガスケット部からの漏えいと、点検等に伴うバルブの開閉操作の繰り返しによる弁座のシートパスがある。漏えい箇所の特特定は、外部に漏れてきたヘリウムガスをスニッファープローブで吸い込み、漏れを検出する方法（ヘリウム漏れ試験（スニッファーク法））により行う。漏えいが認められた場合には、蓋間圧力監視装置の金属ガスケット交換、継手部点検（例：増締め）もしくは部品交換を行う。

最も漏えいの可能性のある部位は、使用済燃料貯蔵施設内で組み立てる継手部で、蓋間圧力監視装置の一次バルブを閉にすることで蓋間圧力と分離できるため、漏えいが認められた場合は、継手部点検（例：増締め）や部品交換を行う。

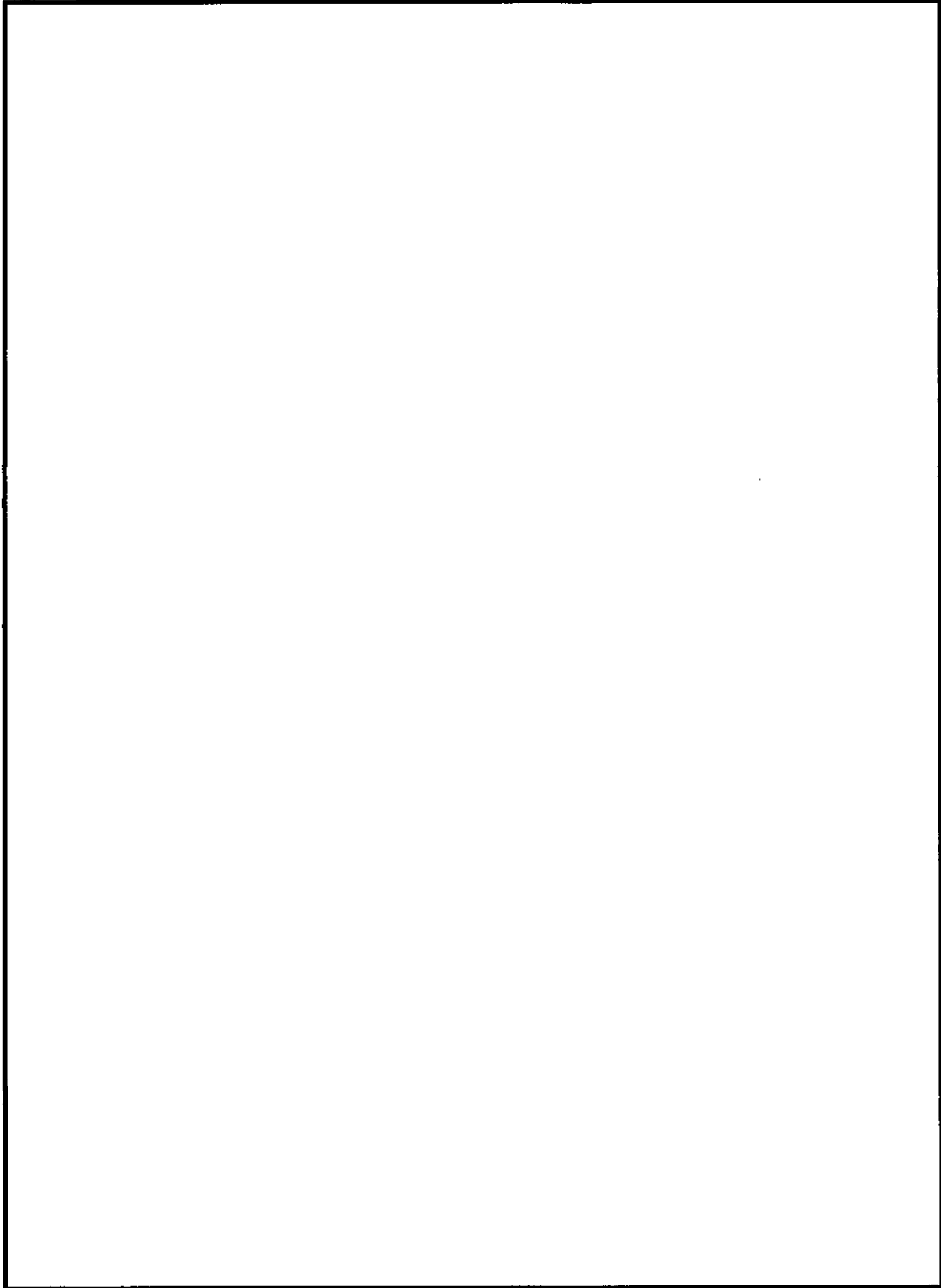
万が一、蓋間圧力監視孔の金属ガスケット部から漏えいした場合には、二次蓋金属ガスケットの交換と同様に、蓋間圧力開放の可否を判断したうえで、蓋間圧力監視孔の金属ガスケットの交換を行う。

バルブ弁座のシートパスについては、二次バルブの場合は一次バルブを閉止して交換作業を行う。一次バルブの場合は二次蓋金属ガスケットの交換と同様に、蓋間圧力開放の可否を判断したうえで、蓋間圧力監視孔の金属ガスケットを含め一次バルブの交換を行う。類似施設の例はない。

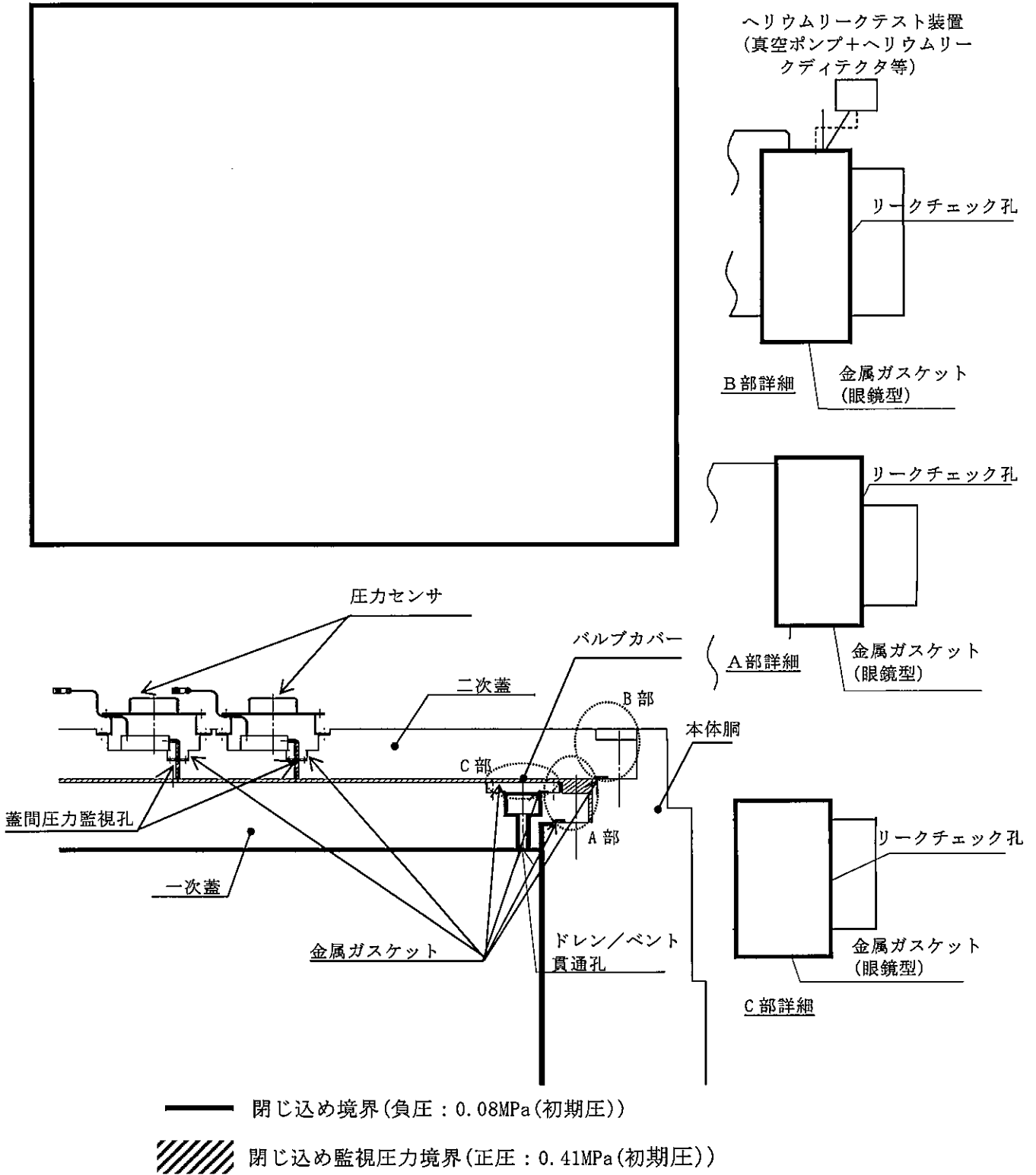


(a) BWR用大型キャスク (タイプ2A)

添付3-1図 蓋間圧力監視装置 (圧力検出部) の構成図 (1/2)



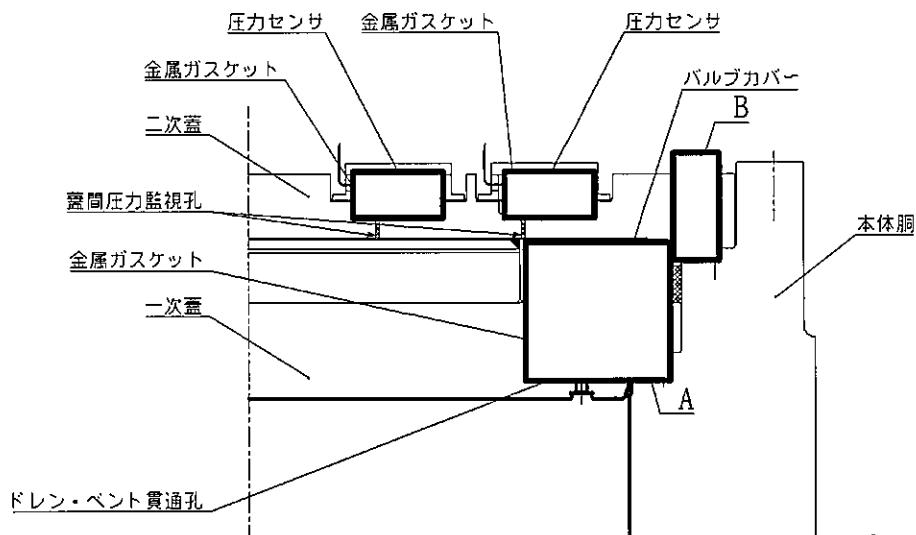
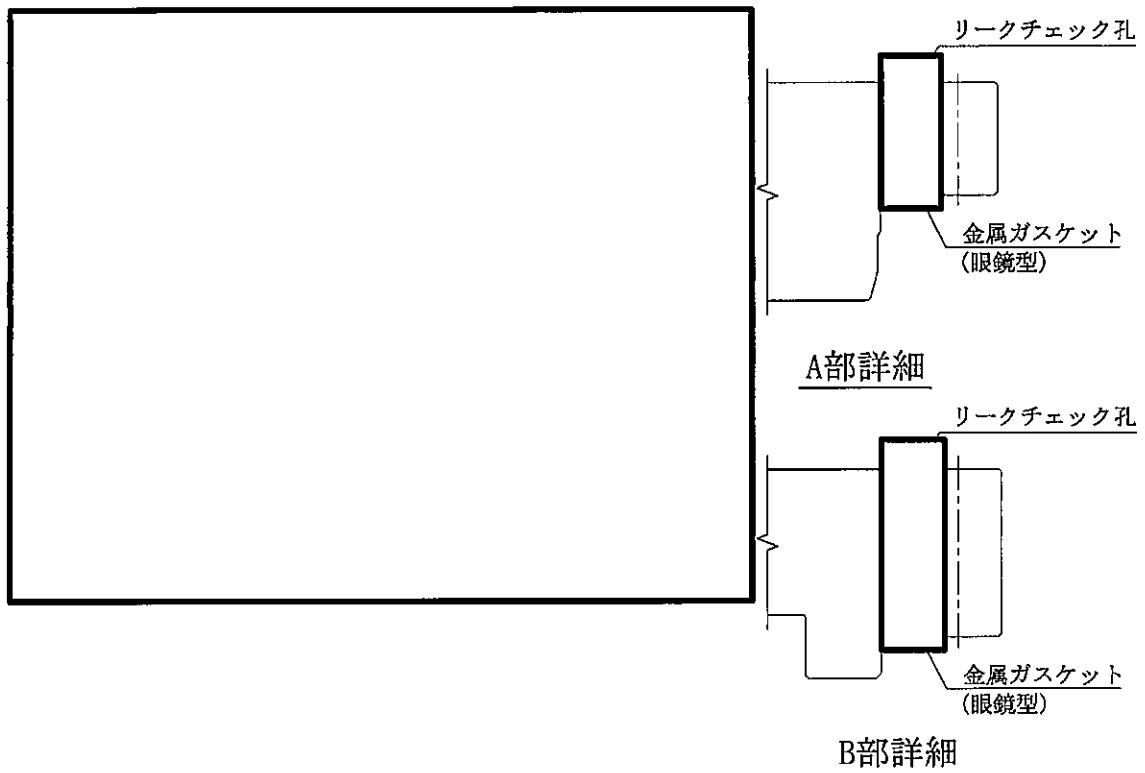
(b) BWR用中型キャスク (タイプ2) , PWR用キャスク (タイプ1)
添付3-1図 蓋間圧力監視装置 (圧力検出部) の構成図 (2/2)



(a) BWR用大型キャスク (タイプ2A)

添付3-2図 貫通孔及び金属ガスケットによるシール部の構成図 (1/3)

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。

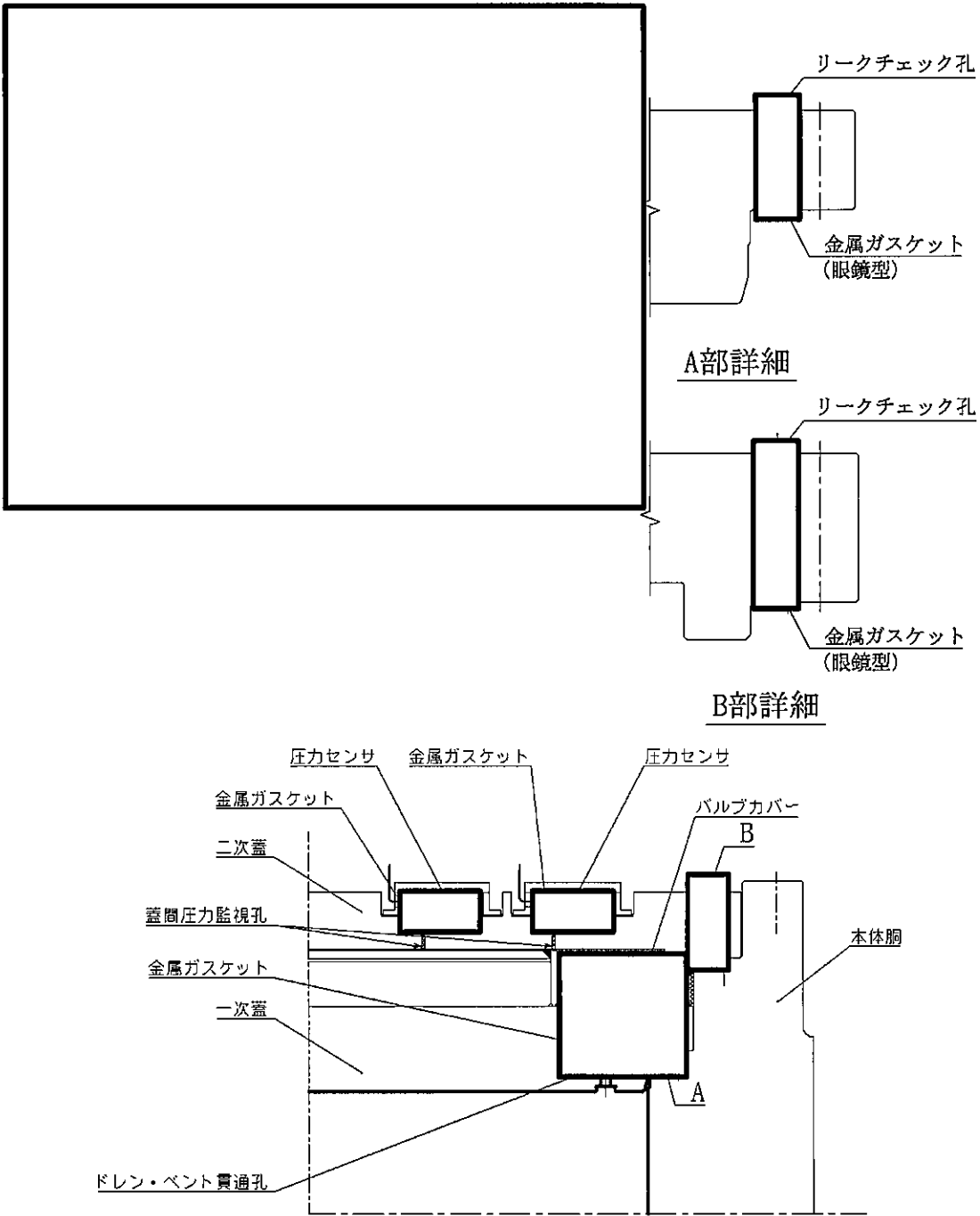


—— 閉じ込め境界(負圧: 0.08MPa (初期圧))
▨ 閉じ込め監視圧力境界(正圧: 0.41MPa (初期圧))

(b) BWR用中型キャスク (タイプ2)

添付3-2図 貫通孔及び金属ガスケットによるシール部の構成図 (2/3)

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。



—— 閉じ込め境界(負圧: 0.08MPa (初期圧))
▨ 閉じ込め監視圧力境界(正圧: 0.41MPa (初期圧))

(c) PWR用キャスク (タイプ1)

添付3-2図 貫通孔及び金属ガスケットによるシール部の構成図 (3/3)

二重蓋間圧力の監視測定と金属キャスク内部の負圧維持について

金属キャスクの蓋部は一次蓋，二次蓋の二重構造としている。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。

使用済燃料集合体は収納条件を満足した燃料であること^{※1}，国内輸送法令に従い安全に輸送が行われた金属キャスクを受け入れるため安全機能への影響は生じないこと，金属キャスク本体（密封容器）は堅固な構造であり輸送及び貯蔵期間中の外力により燃料が破損して金属キャスク内部の圧力が上昇することはないこと，また，金属キャスク本体（密封容器）は検査にて欠陥がないことを確認しており，漏えいが発生する可能性はないことから，金属キャスク内部の圧力が上昇する要因は，蓋間空間からの気体の流入のみとなる。従って，蓋間圧力を測定・監視することにより，間接的に金属キャスク内部の負圧維持を確認することができる。

蓋間圧力の経時変化が基準漏えい率を超えない低下である場合は，圧力障壁を維持するために，適宜，蓋間空間にヘリウムガスを再充填する。金属キャスク内部圧力が，初期圧力 0.08MPaabs から大気圧下限 0.097MPaabs になるまで蓋間のヘリウムガスが全て金属キャスク内部に流入したと仮定してBWR用大型キャスク（タイプ2A）の場合は約10回，BWR用中型キャスク（タイプ2）の場合は約6回，PWR用キャスク（タイプ1）の場合は約10回再充填できる。

すなわち，再充填回数を把握し，過剰な充填とならないように管理することで，間接的に負圧維持を確認できる。

※1：使用済燃料集合体が収納条件を満たしているかについて，「原子炉等規制法第59条」に則った事業所外運搬（車両運搬確認）に係る発電所発送前検査の一環として行われる収納物検査の受検記録を確認する。

除熱機能の確認について

除熱機能の確認として、日本原子力学会標準に準拠し、貯蔵開始後において「伝熱検査」の実施を予定している。

「伝熱検査」は、金属キャスクの型式ごとに、収納物の仕様及び貯蔵期間を考慮して代表キャスクを選定し、各部温度測定値又は表面温度測定記録と当該キャスクの収納物仕様、貯蔵期間及び貯蔵環境（金属キャスクの配列及び周囲温度）に基づいた温度解析値と比較する。

本検査を実施することにより、実測値が解析値と乖離していないことを確認することにより、使用済燃料を含め各部材が設計範囲内に収まっていることを間接的に確認できる。

また、警報設定値を超えるケースは想定しにくいですが、万が一金属キャスク表面温度が警報値を超えた場合でも、別添 5-1 表に示す通り、各部材の評価結果は設計基準温度に比して十分な余裕を有していることから、健全性を損なうことはない。

別添 5-1 表 設計基準温度と評価結果 [単位：℃]

	BWR 大型用		BWR 中型用		PWR 用	
	(タイプ 2 A)		(タイプ 2)		(タイプ 1)	
	設計 基準 温度	評価 結果	設計 基準 温度	評価 結果	設計 基準 温度	評価 結果
燃料被覆管	300	259 ^{※1}	300	263 ^{※2}	275	203
バスケット	300	248	350	257	250	172
密封容器	350	142	350	147	350	141
トラニオン	350	120	350	137	350	129
金属ガスケット	130	89	130	102	130	104
二次蓋	350	85	350	90	350	92

※ 1 : 新型ジルコニウムライナ燃料

※ 2 : 高燃焼度 8 × 8 燃料

計測制御系統施設の試験検査について

蓋間圧力監視装置，表面温度監視装置及び給排気温度監視装置は，法定検査に加え，保全プログラムに基づく点検が実施可能な設計とする。

蓋間圧力監視装置のうち，電気式圧力検出器及び増幅器については，加圧器等により電気式圧力検出器の検出部に加圧を行い，特性試験を行う。

また，蓋間圧力監視装置，表面温度監視装置，給排気温度監視装置は，信号入出力装置より模擬信号の入力を行い，入力信号に対する表示装置の表示，及び設定値通りに警報が発報することを当面の間，年 1 回程度確認することにより，その機能の健全性を確認する。

代替計測について

津波による計測設備，監視設備，電源設備の水没や，地震等による長期の電源喪失等，既設の計測設備，監視設備の継続使用ができなくなった場合は，代替計測を行う。

また，代替計測は，その準備完了後，1回／日程度の頻度で行う。

1. 除熱機能の確認

通常時は，金属キャスクの表面温度及び使用済燃料貯蔵建屋給排気温度を計測し，除熱機能が確保されていることを確認している。

(1) 金属キャスク表面温度

非接触式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。

(2) 給排気温度

測温抵抗体等の温度検出素子をポール等で既設給排気温度計近傍に近づけ，可搬型のデジタル温度計（表示器）に接続して，測定値を読み取る。

（別添 7－1 図参照）

2. 閉じ込め機能の確認

通常時は，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している。

(1) 金属キャスク蓋間圧力

津波で圧力検出器が浸水した場合等，圧力検出器が使用できなくなった場合には，代替の圧力検出器の取り付けが必要になる。

金属キャスク蓋部にて代替の圧力検出器の取り付けと，圧力検出器の信号を読み取るためのケーブルとデータロガー（表示器）を接続して測定値を読み取り，圧力値に換算する。

（別添 7－2 図参照）

3. 遮蔽機能の確認

通常時は、使用済燃料貯蔵建屋内はエリアモニタリング設備（エリアモニタ）で、周辺監視区域境界付近は周辺監視区域境界付近モニタリング設備（モニタリングポスト及びモニタリングポイント）で放射線の空間線量率と空間線量を計測し、遮蔽機能が確保されていることを確認している。

(1) エリアモニタリング設備

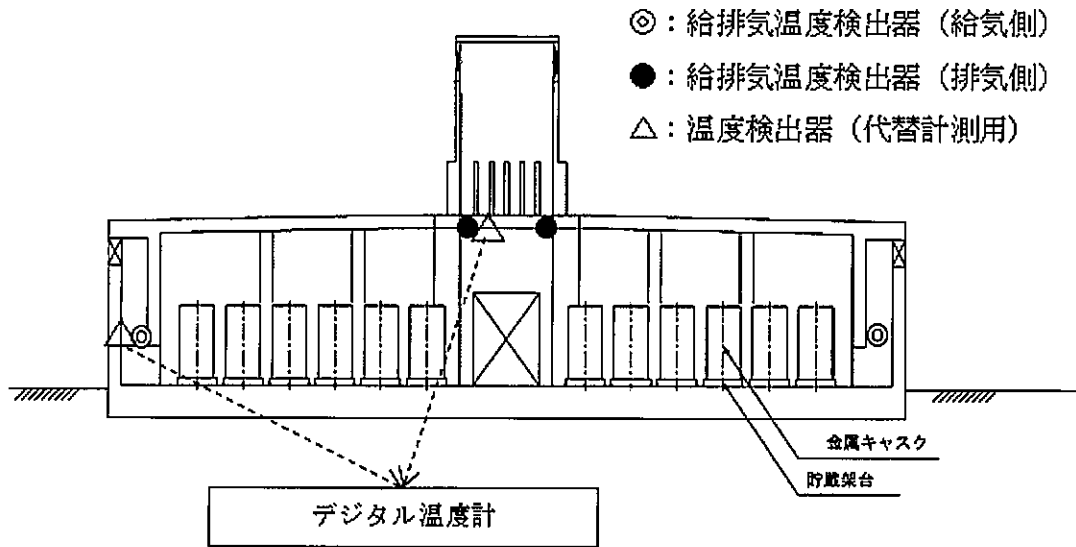
可搬型の放射線サーベイメータにより、ガンマ線と中性子を計測する。測定ポイントは通常時に測定している定点（使用済燃料貯蔵建屋内7点）とし、通常時測定値との比較により遮蔽機能の異常の判断を行う。

（別添7-3図参照）

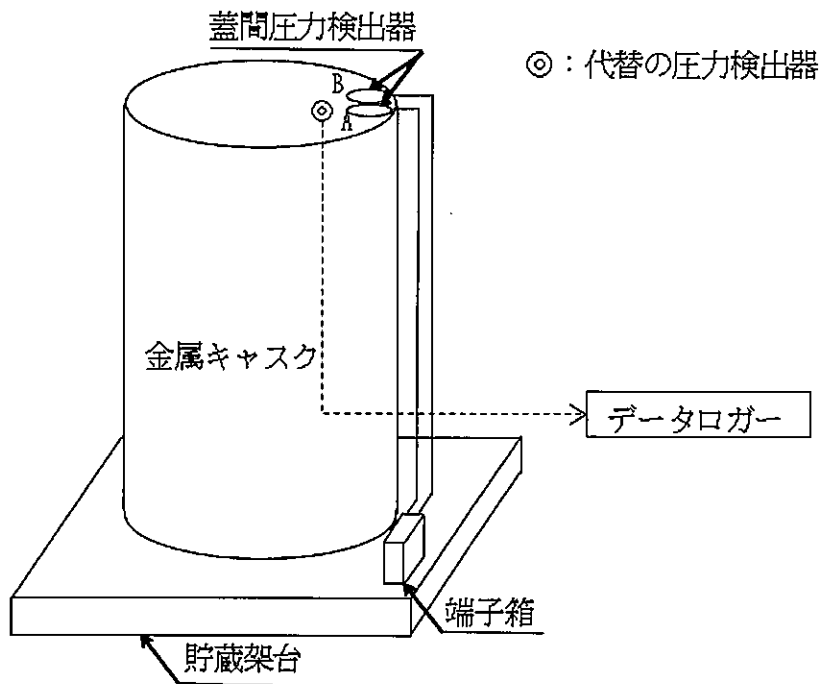
(2) 周辺監視区域境界付近モニタリング設備

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。

（別添7-4図参照）

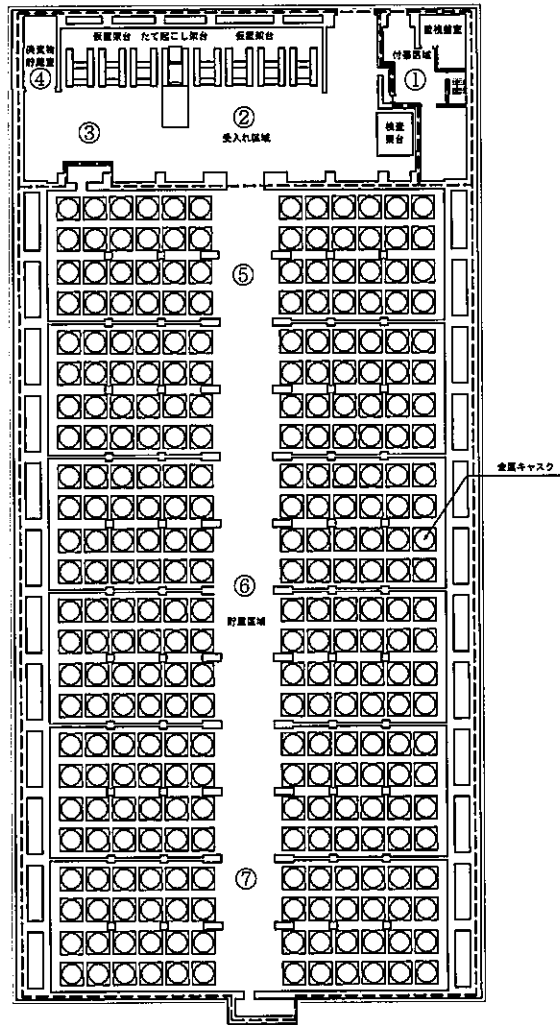


別添 7 - 1 図 給排気温度の代替計測

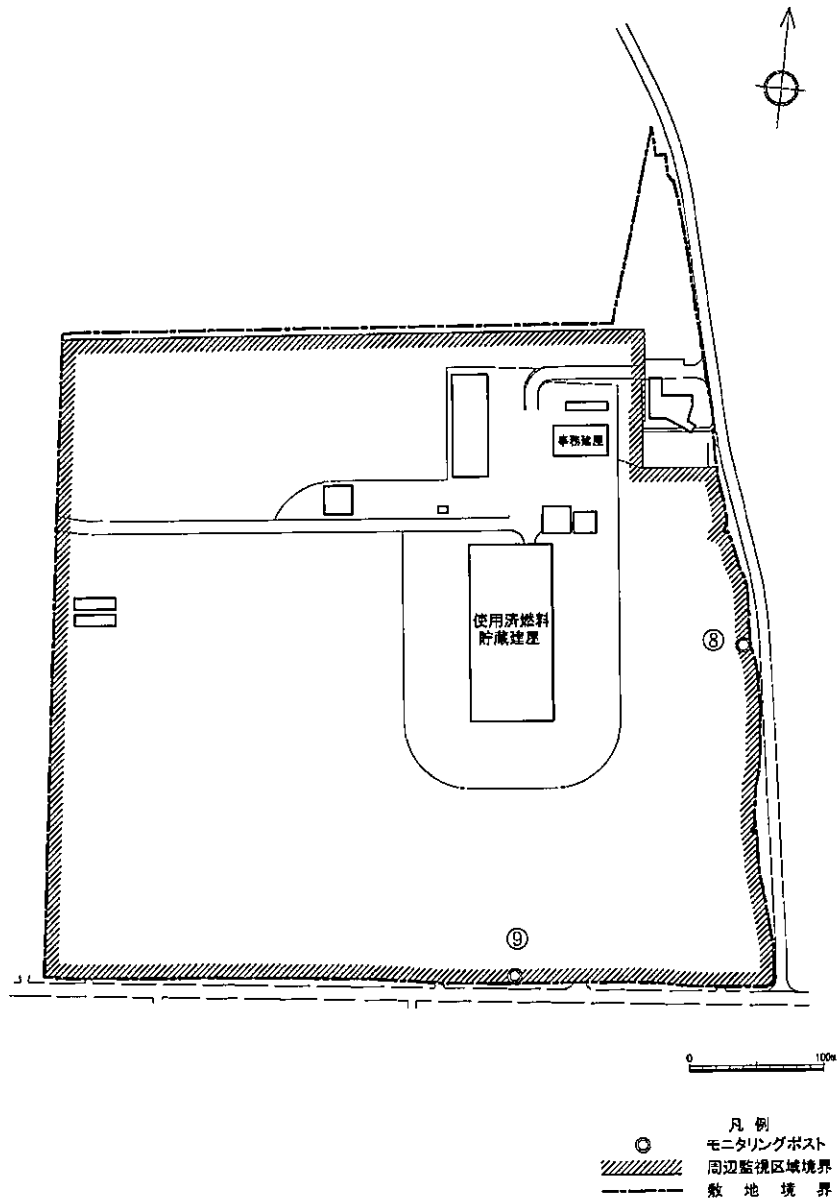


別添 7 - 2 図 金属キャスク蓋間圧力の代替計測

使用済燃料貯蔵建屋 1 階



別添 7 - 3 図 使用済燃料貯蔵建屋内の測定ポイント



別添7-4図 周辺監視区域境界付近の測定ポイント

コメント回答

- ・管理表 No. 1113-02 改訂 00 (提出日 2023 年 11 月 28 日)
- ・管理表 No. 1113-03 改訂 00 (提出日 2023 年 11 月 28 日)
- ・管理表 No. 1113-04 改訂 00 (提出日 2023 年 11 月 28 日)
- ・管理表 No. 1113-05 改訂 00 (提出日 2023 年 11 月 28 日)
- ・管理表 No. 1113-06 改訂 00 (提出日 2023 年 11 月 28 日)
- ・管理表 No. 1113-07 改訂 00 (提出日 2023 年 11 月 28 日)
- ・管理表 No. 1113-08 改訂 00 (提出日 2023 年 11 月 28 日)
- ・管理表 No. 1122-11 改訂 00 (提出日 2023 年 11 月 29 日)

以 上

リサイクル燃料貯蔵株式会社	
提出日	2023年11月28日
管理表No.	1113-02 改訂00

項目	コメント内容
計測制御系統施設 (第17条)	別添2-1図(監視装置の概略系統図)について、既許可での簡略図は間違いであったのか。変更理由は何か。

(回答)

設計進捗を踏まえて、設工認時に詳細化した概略系統図(設計及び工事の計画の変更の認可申請書 添付19-4-2-1 計装設備の全体系統図)を記載した。

以上

リサイクル燃料貯蔵株式会社		
提出日	2023年11月28日	
管理表No.	1113-03	改訂00

項目	コメント内容
計測制御系統施設 (第17条)	設計給気温度を29.5℃から29.8℃へ変更した場合の、給排気温度差警報設定値10℃に変更の必要はないか。

(回答)

適合性説明資料 第17条 計測制御系統施設

別添3 警報設定値の考え方 3.(2)項及び添付1-1表において、

- ・使用済燃料貯蔵建屋給排気温度差：10℃
- ・設計給気温度：29.5℃
- ・排気温度：40℃

と記載しており、給排気温度差10℃については、排気温度40℃－設計給気温度29.5℃から得られた給排気温度差10.5℃を保守的な整数値10℃として設定している。

今般、設計給気温度を29.5℃から29.8℃に見直したことを踏まえ、給排気温度差は、排気温度40℃－設計給気温度29.8℃より10.2℃となるが、10.2℃を保守的な警報設定値10℃としてと設定することとなるので既許可から変更はない。

但し、適合性説明資料 第17条 計測制御系統施設 別添3 警報設定値の考え方 3.(2)項及び添付1-1表に記載されている29.5℃については29.8℃に変更する。(別紙参照)

なお、今後の設計進捗を踏まえ、設計及び工事の計画の認可の段階において、警報設定値に関しても適切に設計していく。

別紙

変更前後の比較表

以上

適合性説明資料 第17条 計測制御系統施設
変更前後の比較表 (1/2)

変更前	変更後 (青字)
<p style="text-align: right;">別添3</p> <p style="text-align: center;">警報設定値の考え方について</p> <p style="text-align: center;">(中略)</p> <p>3. 給排気温度の警報設定</p> <p>(1) 排気温度の警報設定</p> <p>排気温度の警報設定は、計測設備、放射線監視設備等の電気品の性能が維持できる温度である45℃以下に設定する。</p> <p>(2) 給排気温度差の警報設定</p> <p>給排気温度差は、除熱機能が維持されていることを監視する目的で測定するが、給排気温度差の警報設定は、除熱解析結果における給排気温度差10℃(給気温度=29.5℃, 排気温度=40.0℃)以下の値に設定する。</p>	<p style="text-align: right;">別添3</p> <p style="text-align: center;">警報設定値の考え方について</p> <p style="text-align: center;">(中略)</p> <p>3. 給排気温度の警報設定</p> <p>(1) 排気温度の警報設定</p> <p>排気温度の警報設定は、計測設備、放射線監視設備等の電気品の性能が維持できる温度である45℃以下に設定する。</p> <p>(2) 給排気温度差の警報設定</p> <p>給排気温度差は、除熱機能が維持されていることを監視する目的で測定するが、給排気温度差の警報設定は、除熱解析結果における給排気温度差10℃(給気温度=<u>29.8</u>℃, 排気温度=40.0℃)以下の値に設定する。</p>

適合性説明資料 第17条 計測制御系統施設
変更前後の比較表 (2/2)

変更前	変更後 (青字)																
<p style="text-align: right;">添付1</p> <p style="text-align: center;">警報設定値根拠について</p> <p>警報設定値根拠については、以下のとおり。</p> <p style="text-align: center;">添付1-1表 警報設定値根拠</p> <table border="1" data-bbox="172 604 1202 1192"> <thead> <tr> <th>項目 (警報設定値)</th> <th>根拠</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>金属キャスク表面温度 (120℃^{※1}, 123℃^{※2}, 116℃^{※3})</td> <td>解析値を逸脱しないことを監視する目的で、キャスクタイプ毎に貯蔵時外筒外面最高使用温度を設定。 なお、金属キャスク表面温度は、外気温の変動等を考慮しトレンド監視する。</td> </tr> <tr> <td>使用済燃料貯蔵建屋排気温度 (45℃)</td> <td>計測設備、放射線監視設備等の電気品の性能が維持できる温度を設定。</td> </tr> <tr> <td>使用済燃料貯蔵建屋給排気温度差 (10℃)</td> <td>除熱機能が維持されていることの使用済燃料貯蔵建屋給排気温度差の上限としての、除熱解析結果における給気温度29.5℃、排気温度40.0℃の差を設定。</td> </tr> </tbody> </table> <p>※1：BWR用大型キャスク（タイプ2A）の場合 ※2：BWR用中型キャスク（タイプ2）の場合 ※3：PWR用キャスク（タイプ1）の場合</p>	項目 (警報設定値)	根拠	金属キャスク表面温度 (120℃ ^{※1} , 123℃ ^{※2} , 116℃ ^{※3})	解析値を逸脱しないことを監視する目的で、キャスクタイプ毎に貯蔵時外筒外面最高使用温度を設定。 なお、金属キャスク表面温度は、外気温の変動等を考慮しトレンド監視する。	使用済燃料貯蔵建屋排気温度 (45℃)	計測設備、放射線監視設備等の電気品の性能が維持できる温度を設定。	使用済燃料貯蔵建屋給排気温度差 (10℃)	除熱機能が維持されていることの使用済燃料貯蔵建屋給排気温度差の上限としての、除熱解析結果における給気温度29.5℃、排気温度40.0℃の差を設定。	<p style="text-align: right;">添付1</p> <p style="text-align: center;">警報設定値根拠について</p> <p>警報設定値根拠については、以下のとおり。</p> <p style="text-align: center;">添付1-1表 警報設定値根拠</p> <table border="1" data-bbox="1543 604 2573 1192"> <thead> <tr> <th>項目 (警報設定値)</th> <th>根拠</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>金属キャスク表面温度 (120℃^{※1}, 123℃^{※2}, 116℃^{※3})</td> <td>解析値を逸脱しないことを監視する目的で、キャスクタイプ毎に貯蔵時外筒外面最高使用温度を設定。 なお、金属キャスク表面温度は、外気温の変動等を考慮しトレンド監視する。</td> </tr> <tr> <td>使用済燃料貯蔵建屋排気温度 (45℃)</td> <td>計測設備、放射線監視設備等の電気品の性能が維持できる温度を設定。</td> </tr> <tr> <td>使用済燃料貯蔵建屋給排気温度差 (10℃)</td> <td>除熱機能が維持されていることの使用済燃料貯蔵建屋給排気温度差の上限としての、除熱解析結果における給気温度29.8℃、排気温度40.0℃の差を設定。</td> </tr> </tbody> </table> <p>※1：BWR用大型キャスク（タイプ2A）の場合 ※2：BWR用中型キャスク（タイプ2）の場合 ※3：PWR用キャスク（タイプ1）の場合</p>	項目 (警報設定値)	根拠	金属キャスク表面温度 (120℃ ^{※1} , 123℃ ^{※2} , 116℃ ^{※3})	解析値を逸脱しないことを監視する目的で、キャスクタイプ毎に貯蔵時外筒外面最高使用温度を設定。 なお、金属キャスク表面温度は、外気温の変動等を考慮しトレンド監視する。	使用済燃料貯蔵建屋排気温度 (45℃)	計測設備、放射線監視設備等の電気品の性能が維持できる温度を設定。	使用済燃料貯蔵建屋給排気温度差 (10℃)	除熱機能が維持されていることの使用済燃料貯蔵建屋給排気温度差の上限としての、除熱解析結果における給気温度29.8℃、排気温度40.0℃の差を設定。
項目 (警報設定値)	根拠																
金属キャスク表面温度 (120℃ ^{※1} , 123℃ ^{※2} , 116℃ ^{※3})	解析値を逸脱しないことを監視する目的で、キャスクタイプ毎に貯蔵時外筒外面最高使用温度を設定。 なお、金属キャスク表面温度は、外気温の変動等を考慮しトレンド監視する。																
使用済燃料貯蔵建屋排気温度 (45℃)	計測設備、放射線監視設備等の電気品の性能が維持できる温度を設定。																
使用済燃料貯蔵建屋給排気温度差 (10℃)	除熱機能が維持されていることの使用済燃料貯蔵建屋給排気温度差の上限としての、除熱解析結果における給気温度29.5℃、排気温度40.0℃の差を設定。																
項目 (警報設定値)	根拠																
金属キャスク表面温度 (120℃ ^{※1} , 123℃ ^{※2} , 116℃ ^{※3})	解析値を逸脱しないことを監視する目的で、キャスクタイプ毎に貯蔵時外筒外面最高使用温度を設定。 なお、金属キャスク表面温度は、外気温の変動等を考慮しトレンド監視する。																
使用済燃料貯蔵建屋排気温度 (45℃)	計測設備、放射線監視設備等の電気品の性能が維持できる温度を設定。																
使用済燃料貯蔵建屋給排気温度差 (10℃)	除熱機能が維持されていることの使用済燃料貯蔵建屋給排気温度差の上限としての、除熱解析結果における給気温度29.8℃、排気温度40.0℃の差を設定。																

リサイクル燃料貯蔵株式会社	
提出日	2023年11月28日
管理表No.	1113-04 改訂00

項目	コメント内容
計測制御系統施設 (第17条)	警報設定値の設定根拠である蓋間圧力変動を考慮した値は、キャスクによらず同じ値か。

(回 答)

圧力変動要因はキャスク間で差異はなく、同様の項目を設定している。圧力変動を考慮した値については、添付2-1表の通り、キャスクにより異なっている。

以 上

リサイクル燃料貯蔵株式会社	
提出日	2023年11月28日
管理表No.	1113-05 改訂00

項目	コメント内容
計測制御系統施設 (第17条)	「再充填回数の設定根拠・設定の考え方」に変更は無いか。

(回答)

再充填回数の検討内容に変更は無い。

再充填回数の検討では、先ず、貯蔵初期のキャスク内部圧力0.08MPaにおいて、蓋間圧力低下分が全てキャスク内部へインリークしたものと仮定し、キャスク内部圧力が大気圧に到達（上昇）するまでの「キャスク内部の圧力上昇量」を評価する。

ここで、「キャスク内部の圧力上昇量」の算出に際しては、大気圧や蓋間ガス温度は共通の諸元を使用するが、キャスク本体内部の空間容積等の各キャスク固有の諸元も使用して算出することから、各キャスク固有の算出結果となる。

再充填回数の算出は、各「キャスク内部の圧力上昇量」を、各蓋間圧力の低下量（「初期蓋間圧力(0.41MPa)―各警報設定圧力」）で除して算出している。

以上

リサイクル燃料貯蔵株式会社		
提出日	2023年11月28日	
管理表No.	1113-06	改訂00

項目	コメント内容
計測制御系統施設 (第17条)	蓋部の温度変化について、不確かさを考慮した値を更に変更する理由は何か。設定の考え方はどうか。

(回 答)

蓋間空間の圧力変動のうち、蓋部温度変化による圧力変動は、1年あたりの発熱量低下に伴う圧力低下を考慮して算出している。

具体的には、周囲温度、初期の蓋間温度、発熱量低下割合より1年後の蓋部温度を算出し、初期蓋間温度が1年後の蓋部温度へ低下したことによる圧力低下量を算出している。

周囲温度は、BWR用大型キャスク（タイプ2A）、BWR用中型キャスク（タイプ2）、PWR用キャスク（タイプ1）ともに4.5℃を適用しているが、初期蓋間温度、発熱量低下割合はキャスク毎に異なっているため、算出される1年後の蓋部温度もキャスク毎に差異が発生している。

この差異により、貯蔵初期から1年間経過後の、蓋部温度変化に伴う圧力低下量についても、キャスク毎に異なっている。

以 上

リサイクル燃料貯蔵株式会社	
提出日	2023年11月28日
管理表No.	1113-07 改訂00

項目	コメント内容
計測制御系統施設 (第17条)	圧力下限値 (0.21MPa、0.29MPa) とは、型式証明申請書に記載されているのか。

(回答)

警報設定値については型式証明申請の範囲外であり、型式証明申請書に警報設定に関する記載は無いと認識している。

以上

リサイクル燃料貯蔵株式会社	
提出日	2023年11月28日
管理表No.	1113-08 改訂00

項目	コメント内容
計測制御系統施設 (第17条)	添付2-1表(警報設定値と上下限值との関係)の既許可からの変更理由と、今回のキャスクの設定の考え方はどうか。

(回答)

まず、添付2-1表(1/3)のBWR用大型キャスク(タイプ2A)に関する変更は、設工認補足説明資料(設2-補-008改2_計測制御系統施設について)の第3-1表を反映したものである。

その上で、添付2-1表(2/3)のBWR用中型キャスク(タイプ2)及び添付2-1表(3/3)のPWRキャスク(タイプ1)についても、BWR用大型キャスク(タイプ2A)と同様の構成で記載(評価)した。

なお、警報設定値については型式証明申請の範囲外であり、型式証明申請書に警報設定に関する記載は無いと認識している。

別紙

添付2-1表

以上

添付2-1表 警報設定値と上下限值との関係 (1/3)

(a) BWR用大型キャスク (タイプ2A)

圧力変動の要因	初期圧力と警報設定圧力との関係	
—	蓋間の初期圧力：0.41MPa	
蓋部の温度変化に伴う圧力低下	↓ (約 <input type="text"/> %) *1	崩壊熱の減衰 (貯蔵初期から1年間)
蓋間からの漏えいによる圧力低下	↓ (約 <input type="text"/> %) *1	リークテスト判定基準値での漏えい率で一次蓋のシール部からのインリークと二次蓋のシール部からのアウトリーク (1年間)
周囲の温度変化に伴う圧力変化	↓ (約 <input type="text"/> %) *1	-22.4℃ (最低気温) ~ 45℃ (除熱解析の設計値)
—	警報設定圧力の上限値：約 0.31MPa	
—	警報設定値：0.27MPa	
—	警報設定圧力の下限値：約 0.23MPa	
燃料からの放出に伴う圧力上昇	↑ (約 <input type="text"/> %) *2	漏えい燃料の発生率 100%を仮定
蓋間ガスの流入に伴う圧力上昇	↑ (約 <input type="text"/> %) *2	蓋間ガスの全量 (1回分)
金属キャスク内部への漏えいに伴う圧力上昇	↑ (約 <input type="text"/> %) *2	リークテスト判定基準値での漏えい率で一次蓋のシール部からのインリーク (60年間)
—	金属キャスク内部の初期圧力：0.08MPa	

注記*1：圧力低下に対する各要因の比率

*2：圧力上昇に対する各要因の比率

添付 2 - 1 表 警報設定値と上下限值との関係 (2 / 3)

(b) BWR用中型キャスク (タイプ2)

圧力変動の要因	初期圧力と警報設定圧力との関係	
—	蓋間の初期圧力 : 0.41MPa	
蓋部の温度変化に伴う圧力低下	↓ (約 <input type="text"/> %) *1	崩壊熱の減衰 (貯蔵初期から1年間)
蓋間からの漏えいによる圧力低下	↓ (約 <input type="text"/> %) *1	リークテスト判定基準値での漏えい率で一次蓋のシール部からのインリークと二次蓋のシール部からのアウトリーク (1年間)
周囲の温度変化に伴う圧力変化	↓ (約 <input type="text"/> %) *1	-22.4℃ (最低気温) ~ 45℃ (除熱解析の設計値)
—	警報設定圧力の上限値 : 約 0.32MPa	
—	警報設定値 : 0.27MPa	
—	警報設定圧力の下限値 : 約 0.21MPa	
燃料からの放出に伴う圧力上昇	↑ (約 <input type="text"/> %) *2	漏えい燃料の発生率 100% を仮定
蓋間ガスの流入に伴う圧力上昇	↑ (約 <input type="text"/> %) *2	蓋間ガスの全量 (1回分)
金属キャスク内部への漏えいに伴う圧力上昇	↑ (約 <input type="text"/> %) *2	リークテスト判定基準値での漏えい率で一次蓋のシール部からのインリーク (60年間)
—	金属キャスク内部の初期圧力 : 0.08MPa	

注記 * 1 : 圧力低下に対する各要因の比率

* 2 : 圧力上昇に対する各要因の比率

添付 2 - 1 表 警報設定値と上下限值との関係 (3 / 3)

(c) PWR用キャスク (タイプ1)

圧力変動の要因	初期圧力と警報設定圧力との関係	
—	蓋間の初期圧力：0.41MPa	
蓋部の温度変化に伴う圧力低下	↓ (約 <input type="text"/> %) *1	崩壊熱の減衰 (貯蔵初期から1年間)
蓋間からの漏えいによる圧力低下	↓ (約 <input type="text"/> %) *1	リークテスト判定基準値での漏えい率で一次蓋のシール部からのインリークと二次蓋のシール部からのアウトリーク (1年間)
周囲の温度変化に伴う圧力変化	↓ (約 <input type="text"/> %) *1	-22.4℃ (最低気温) ~ 45℃ (除熱解析の設計値)
—	警報設定圧力の上限値：約 0.32MPa	
—	警報設定値：0.31MPa	
—	警報設定圧力の下限値：約 0.29MPa	
燃料からの放出に伴う圧力上昇	↑ (約 <input type="text"/> %) *2	漏えい燃料の発生率 100%を仮定
蓋間ガスの流入に伴う圧力上昇	↑ (約 <input type="text"/> %) *2	蓋間ガスの全量 (1回分)
金属キャスク内部への漏えいに伴う圧力上昇	↑ (約 <input type="text"/> %) *2	リークテスト判定基準値での漏えい率で一次蓋のシール部からのインリーク (60年間)
—	金属キャスク内部の初期圧力：0.08MPa	

注記 * 1 : 圧力低下に対する各要因の比率

* 2 : 圧力上昇に対する各要因の比率

リサイクル燃料貯蔵株式会社	
提出日	2023年11月29日
管理表 No.	1122-11

項目	コメント内容
計測制御系統施設 (第17条)	型式証明の事項をそのまま使っていない表面温度検出器の警報設定について説明すること。

(回答)

型式証明の範囲外である表面温度検出器（計測制御系統施設）の警報設定について、別紙のとおり説明する。

表面温度検出器の警報設定について

BWR用中型キャスク（タイプ2）及びPWR用キャスク（タイプ1）の金属キャスク表面温度の警報設定値については、BWR用大型キャスク（タイプ2A）と同様に「貯蔵時外筒外面最高使用温度」を設定するものとしているが、警報設定については型式証明の範囲外であり、型式証明に「貯蔵時外筒外面最高使用温度」に関する記載が無いことから、「貯蔵時外筒外面最高使用温度」については、型式指定から引用している。

また、万が一、金属キャスク表面温度が警報設定値（貯蔵時外筒外面最高使用温度）を超えた場合においても、金属キャスクの各部材の設計基準温度は警報設定値と比較して十分な余裕を有していることを示すため、BWR用中型キャスク（タイプ2）及びPWR用キャスク（タイプ1）の各部材の温度（設計基準温度及び評価結果）について型式指定から引用している。

下表1に、「第17条 計測制御系統施設」において型式指定から引用した諸元を示す。

表1 型式指定から引用した諸元

別添	章・表	引用諸元	型式指定引用箇所
別添3	2. 表面温度の警報設定	123℃	MSF-52B 型式指定申請書（三菱重工業株式会社）の添付書類5「使用済燃料等の除熱に関する説明書」に示す設計崩壊熱量17.5kWにおける解析値
		116℃	MSF-21P 型式指定申請書（三菱重工業株式会社）の添付書類5「使用済燃料等の除熱に関する説明書」に示す設計崩壊熱量15.8kWにおける解析値
	添付1-1表	123℃	MSF-52B 型式指定申請書（三菱重工業株式会社）の添付書類5「使用済燃料等の除熱に関する説明書」に示す設計崩壊熱量17.5kWにおける解析値
		116℃	MSF-21P 型式指定申請書（三菱重工業株式会社）の添付書類5「使用済燃料等の除熱に関する説明書」に示す設計崩壊熱量15.8kWにおける解析値
別添5	別添5-1表	添付「BWR 中型用（タイプ2）」欄	MSF-52B 型式指定申請書（三菱重工業株式会社）の添付書類5「使用済燃料等の除熱に関する説明書」に示す設計崩壊熱量17.5kWにおける解析値
		添付「PWR 用（タイプ1）」欄	MSF-21P 型式指定申請書（三菱重工業株式会社）の添付書類5「使用済燃料等の除熱に関する説明書」に示す設計崩壊熱量15.8kWにおける解析値

別添5-1表 設計基準温度と評価結果 [単位：℃]

	BWR大型用		BWR中型用		PWR用	
	(タイプ2A)		(タイプ2)		(タイプ1)	
	設計 基準 温度	評価 結果	設計 基準 温度	評価 結果	設計 基準 温度	評価 結果
燃料被覆管	300	259 ^{※1}	300	263 ^{※2}	275	203
バスケット	300	248	350	257	250	172
密封容器	350	142	350	147	350	141
トラニオン	350	120	350	137	350	129
金属ガスケット	130	89	130	102	130	104
二次蓋	350	85	350	90	350	92

※1：新型ジルコニウムライナ燃料

※2：高燃焼度8×8燃料

第 19 条 放射線管理施設

<目 次>

(別 添)

別添 3 放射線管理設備の試験及び検査方法について

添付していない箇所に関しては、令和 2 年 8 月 13 日付で提出した新規規制基準適合性に関する資料から変更が無く、今回の変更申請としては提出しない。

放射線管理設備の試験及び検査方法について

1. 個人管理用測定設備

個人管理用測定設備は、管理区域において放射線業務従事者が常時携帯する個人線量計を指す。

個人線量計の機能としては放射線業務従事者が受ける外部放射線量の計測と警報機能を有していることから、これらの機能を年1回確認する。

2. 放射線監視設備

放射線監視設備は、エリアモニタリング設備、周辺監視区域境界付近固定モニタリング設備、放射線サーベイ機器で構成され、以下に示す検査等を実施する。

(1) エリアモニタリング設備

使用済燃料貯蔵建屋内における線量当量率の測定・監視は、使用済燃料貯蔵建屋内にガンマ線エリアモニタと中性子線エリアモニタを設置し、監視盤室及び事務建屋で、その表示と記録の確認を行う。これらの性能の確認にあたっては、標準線源を用いた校正、模擬入力された値が監視盤室及び事務建屋で適切に表示・記録されること、並びに模擬入力により警報動作値で警報が発報することを年1回程度確認する。

(2) 周辺監視区域境界付近固定モニタリング設備

a. モニタリングポスト

周辺監視区域境界付近における空間放射線の測定・監視は、敷地東側と敷地南側にモニタリングポスト2基を設置し、監視盤室及び事務建屋で、その表示と記録の確認を行う。これらの性能の確認にあたっては、標準線源を用いた校正、模擬入力された値が監視盤室及び事務建屋で適切に表示されること、並びに模擬入力により警報動作値で警報が発報することを年1回確認する。

b. 蛍光ガラス線量計

周辺監視区域境界付近における空間放射線量（3ヶ月積算値）は、周

辺監視区域境界に沿って配置された12 地点のモニタリングポイントの収納箱に設置された蛍光ガラス線量計により測定する。この測定は、「蛍光ガラス線量計を用いた環境γ線量測定法」（平成14 年 文部科学省 放射能測定シリーズ27）に基づき実施している。

蛍光ガラス線量計については、年1 回標準線源による校正を行う。

(3) 放射線サーベイ機器

放射線サーベイ関係の主要測定器及び器具は以下の機器が対象となっており、機器毎の点検項目を設定し、年1 回の定期点検（標準線源による校正を含む）により常に使用可能な状態に整備する。

- ・ GM管サーベイメータ
- ・ 電離箱サーベイメータ
- ・ シンチレーションサーベイメータ
- ・ 中性子線用サーベイメータ
- ・ ダストサンプラ
- ・ **ガスモニタ**

(その他1) 計算コード (ABAQUS 2018HF4) について

1. はじめに

本資料は、事業変更許可申請書の作成に当たって使用した計算コード (ABAQUS 2018HF4) について補足説明するものである。

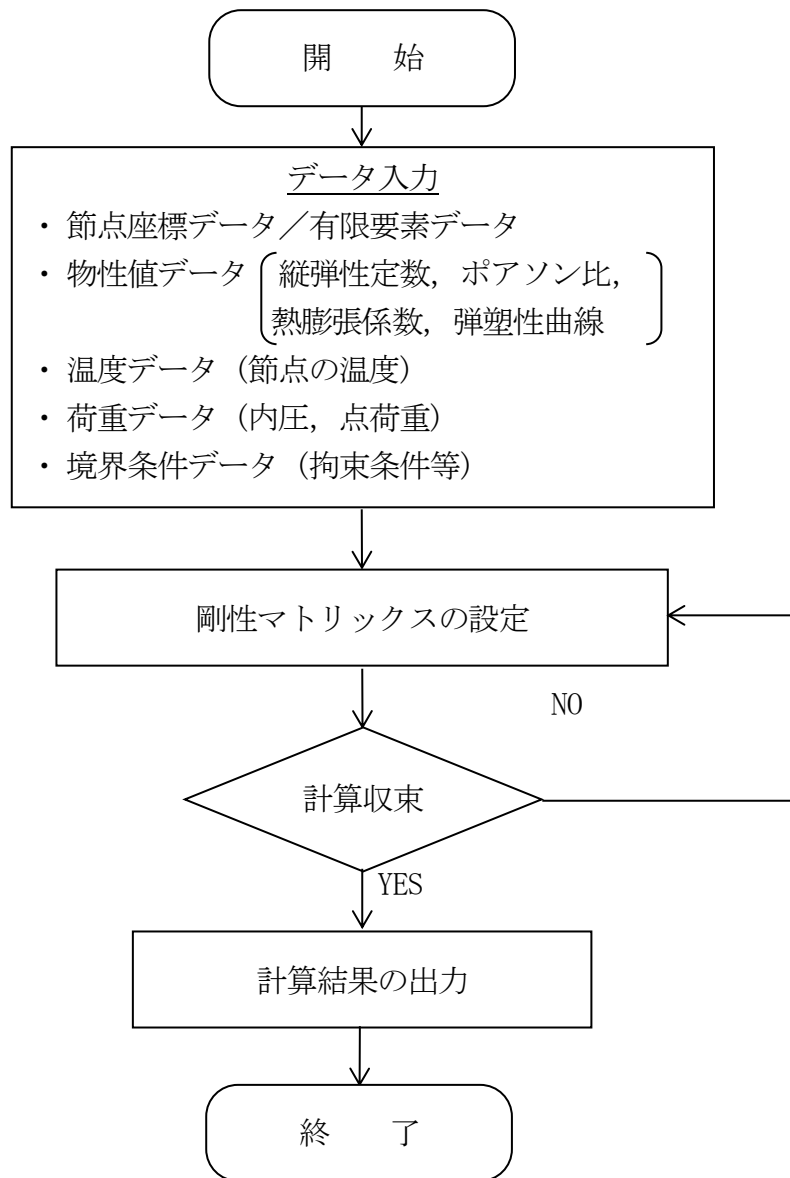
2. 解析コードの概要と妥当性

(1) 構造解析

「10条 津波による損傷の防止」及び「14条 設計最大評価事故時の放射線障害の防止」の構造解析 (静的) に関する概要と妥当性は以下のとおりである。

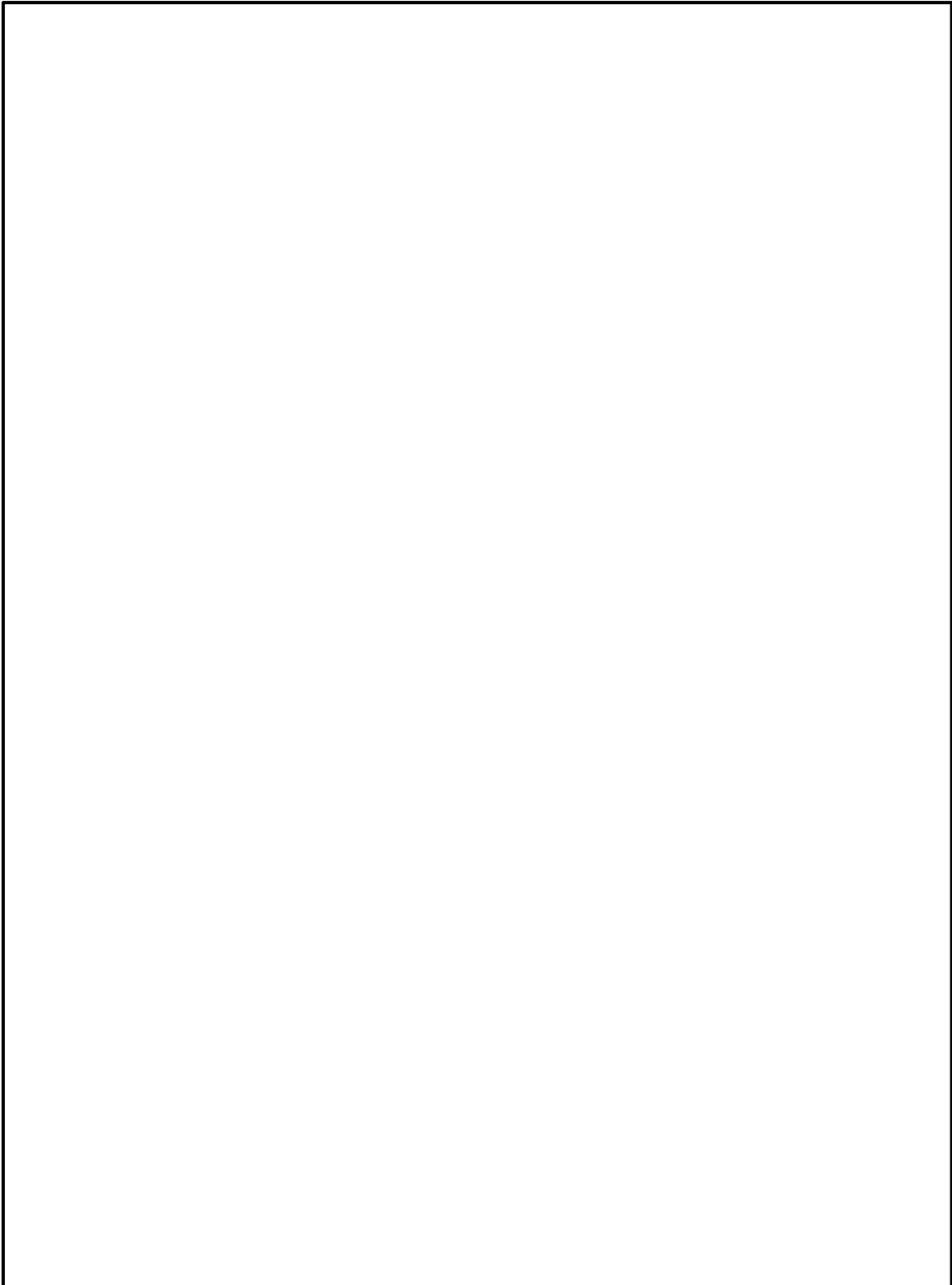
第2(1)-1表 構造解析 (静的) に対するABAQUS 2018HF4の概要と妥当性

項目 \ コード名	ABAQUS
開発機関	ダッソー・システムズ株式会社
開発時期	1978年
使用したバージョン	Ver 2018 HF4
コードの概要	<p>ABAQUSコードは、米国Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc. (現在の Dassault Systems Simulia Corp.) で開発された有限要素法に基づく応力・座屈解析等の汎用解析コードであり、輸送キャスクの応力解析等に広く用いられている。</p> <p>ABAQUSコードは、応力解析に際して以下の機能を有している。</p> <ul style="list-style-type: none"> ①弾性・弾塑性解析のいずれの解も得ることができる。 ②材料特性として時間依存、ひずみの履歴依存並びに等方性・異方性等を考慮することができる。 ③モデルの形状は1次元～3次元について取扱うことができる。 ④伝熱解析結果をそのまま境界条件として熱応力解析に用いることが可能である。 ⑤荷重条件として集中荷重、分布荷重、モーメント、加速度 (慣性力)、圧力、遠心力、コリオリ力等が取扱える。また、これら条件の時間依存、線形変化に対しても対応可能である。 <p>ABAQUSコードの構造 (応力) 解析フローを第2(1)-1図に示す。</p>
コードの検証及び妥当性確認	<p>ABAQUS 2018HF4は、応力解析に対し、これまで多くの使用実績がある。</p> <p>検証例として、内圧力を受ける厚肉円筒についての弾性解析におけるABAQUSコード解析結果と理論解の比較を第2(1)-2図に示す。</p>



第2(1)-1図 ABAQUSコードによる構造解析(静的)フロー

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。



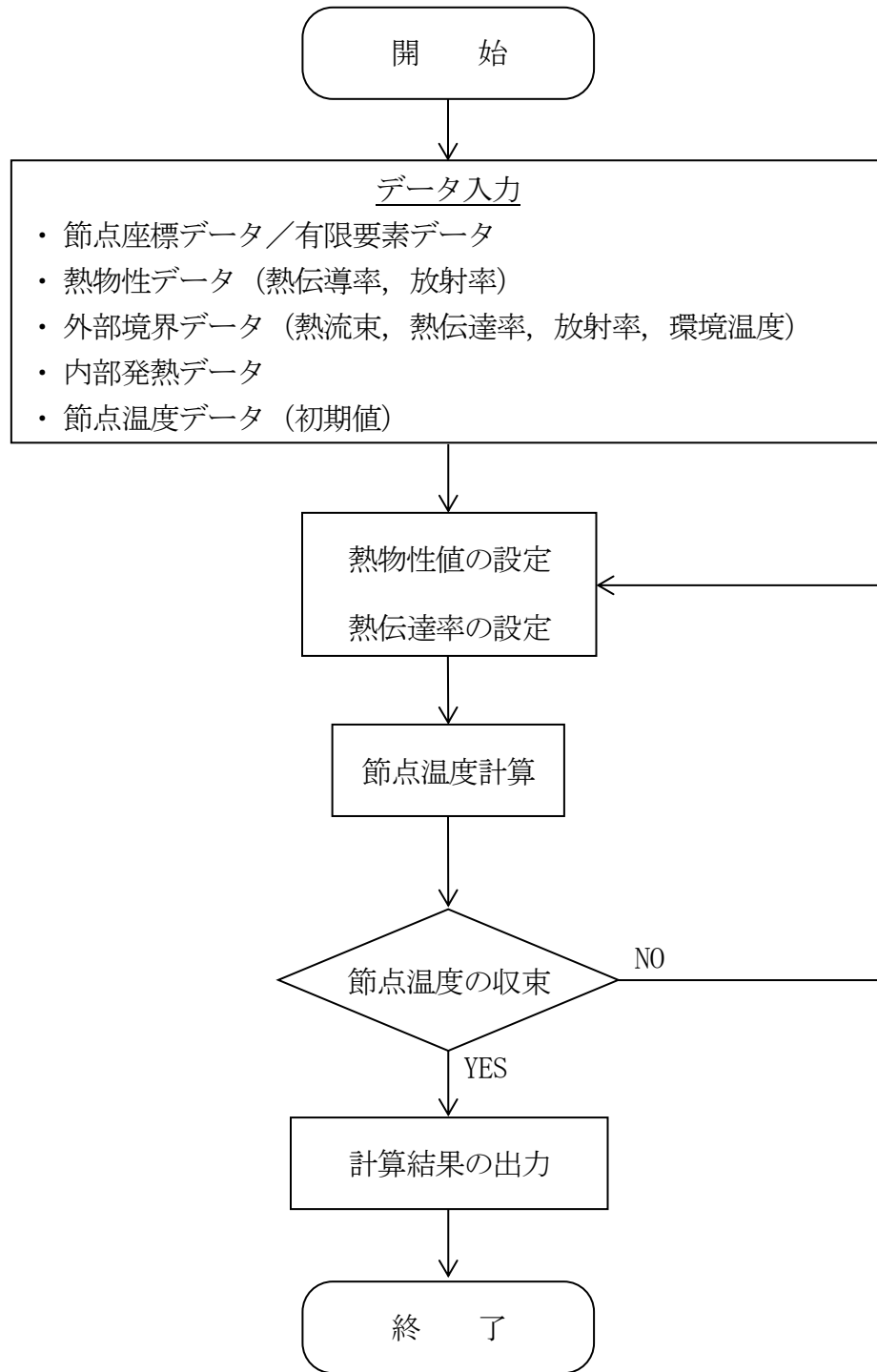
第2(1)-2 図 ABAQUS 2018HF4 による構造解析（静的）の検証例

(2) 伝熱解析

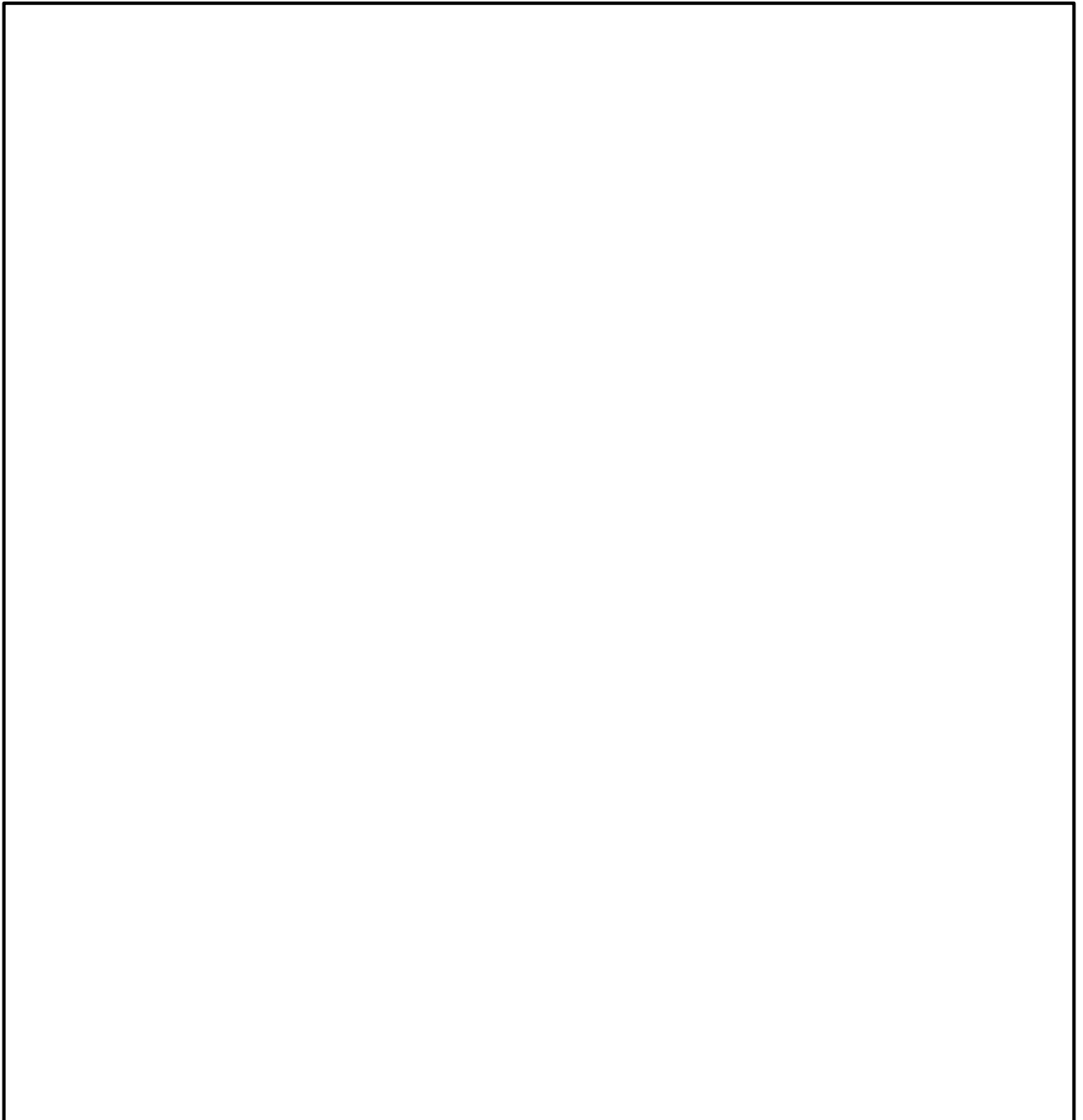
「14条 設計最大評価事故時の放射線障害の防止」の伝熱解析に関する概要と妥当性は以下のとおりである。

第 2(2)－1 表 伝熱解析に対する A B A Q U S 2018HF4 の概要と妥当性

項目	コード名	ABAQUS
開発機関		ダッソー・システムズ株式会社
開発時期		1978 年
使用したバージョン		Ver 2018 HF4
コードの概要		<p>ABAQUS コードは、米国 Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc. (現在の Dassault Systems Simulia Corp.) で開発された有限要素法に基づく伝熱解析等の汎用解析コードであり、輸送キャスクの伝熱解析等に広く用いられている。</p> <p>ABAQUS コードは、伝熱解析に際して以下の機能を有している。</p> <ol style="list-style-type: none">①定常、非定常解析のいずれの解も得ることができる。②1～3 次元の任意形状の構造に対して解くことが可能である。③初期条件（温度）は要素ごとに変化させることができ、計算ステップの自動決定も可能である。④境界条件として、時間に依存する熱流束、温度、伝導、対流及び輻射が考慮できる。⑤熱伝導率の熱物性値の温度依存が可能で、また、伝熱解析と応力解析（構造強度解析）を同時に行うことが可能なため、ギャップ間の変化による伝熱条件を変化させることができる。⑥構成物質の相変態が考慮できる。 <p>ABAQUS コードの定常計算における伝熱解析フローを第 2(2)－1 図に示す。</p>
コードの検証及び妥当性確認		<p>ABAQUS 2018HF4 は、多くの伝熱解析に使用された実績がある。また、金属キャスクの定常伝熱試験に対して A B A Q U S による解析結果と試験結果を比較・検討し、本コードの妥当性が検証されている。</p> <p>検証例として、内外に温度差がある円筒についての伝熱解析における A B A Q U S コード解析結果と理論解の比較を第 2(2)－2 図に示す。</p>



第2(2)-1図 ABAQUSコードの伝熱解析フロー図



第2(2)-2 図 ABAQUS 2018HF4 による伝熱解析の検証例

3. 既許可の事業変更許可でを使用したABAQUSからのバージョン変更について
事業変更許可申請書の作成に当たって使用したABAQUS 2018HF4は、既許可の事業変更許可でを使用したABAQUSに対し、入出力形式のオプションが増えたことによるバージョンの変更であり、既許可の事業変更許可申請書の作成に当たって使用したABAQUSによる解析結果の信頼性に影響はない。

(その他2) PWR用キャスク (タイプ1) への注排水作業時における臨界防止の
考慮について

MSF-21P 型の型式証明の審査における回答文書*を踏まえ、金属キャスク搬出先の事業者に対し、金属キャスクへの注排水作業時の注意事項を伝達する。

*：使用済燃料貯蔵施設に係る特定容器等の設計の型式証明申請質問管理表に対する回答（臨界防止関連）(L5-95HN201R3)，三菱重工業株式会社，平成28年4月20日