

リサイクル燃料備蓄センター
事業変更許可基準規則への適合性について

令和5年12月

リサイクル燃料貯蔵株式会社

本資料のうち、枠囲みの内容は、商業機密あるいは防護上の観点から公開できません。

<目次>

事業変更許可申請書における設計条件等の補足説明について

1. 燃料集合体の主要仕様及び評価条件の比較について
2. 本申請にて追加した金属キャスクの設計で想定したピーキング
ファクターの包絡性について
3. 燃料被覆管の制限値について

第3条	使用済燃料の臨界防止	提出なし
第4条	遮蔽等	
	遮蔽等（金属キャスク）	提出なし
	遮蔽等（貯蔵建屋）	
第5条	閉じ込めの機能	提出なし
第6条	除熱	
	除熱（金属キャスク）	提出なし
	除熱（貯蔵建屋）	
第7条	火災等による損傷の防止	前回提出に同じ
第9条	地震による損傷の防止	前回提出に同じ
第10条	津波による損傷の防止	
第11条	外部からの衝撃による損傷の防止	
	11-1：総括	
	11-2：竜巻	
	11-3：火山	前回提出に同じ
	11-4：外部火災	
	11-5：航空機落下	
第12条	使用済燃料貯蔵施設への人の不法な侵入等の防止	前回提出に同じ
第13条	安全機能を有する施設	前回提出に同じ
第14条	設計最大評価事故時の放射線障害の防止	
第15条	金属キャスク	
	金属キャスク（金属キャスク）	提出なし
	金属キャスク（使用済燃料集合体）	
第16条	使用済燃料の受け入れ施設	
第17条	計測制御系統施設	

第 18 条	廃棄施設	前回提出に同じ
第 19 条	放射線管理施設	
第 20 条	予備電源	前回提出に同じ
第 21 条	通信連絡設備等	前回提出に同じ
その他 1	計算コード (ABAQUS2018HF4) について	
その他 2	PWR用キャスク (タイプ 1) への注水作業時における 臨界防止の考慮について	

前回提出に同じ

令和 2 年 8 月 1 3 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資料に記載した。
なお、今回の提出資料からも除いている。

提出なし

今回の変更申請で追加する BWR 用中型キャスク (タイプ 2) 及び PWR 用キャスク (タイプ 1) は、型式証明の段階で新規規制基準適合性については説明されている内容となる。このため、今回変更申請に関連した適合性説明資料提出は発生しない。

適合性説明資料中、BWR 用大型キャスク (タイプ 2) の記載については、BWR 用大型キャスク (タイプ 2 A) に読み替えるものとする。

事業変更許可申請書における設計条件等の補足説明について

(はじめに)

事業変更許可申請書における設計条件等の補足説明項目について、「第1表 RFS事業変更許可申請の補足説明一覧」のとおり整理した。

整理の結果、設計条件等の補足説明が必要と判断した内容を以降に示す。

なお、事業変更許可申請書に記載していないが、申請に伴い変更となる事項に関する補足説明については、関連する条文の適合性説明資料に記載した。

第1表 RFS事業変更許可申請の補足説明一覧

*1：補正申請書（適合性説明資料含む。）に記載有を○，記載なしを×とした。

No.	項目	RFSにより抽出した補足説明項目	補正*1 有無	説明箇所	備考
1	収納する使用済燃料の仕様	a. 収納する燃料仕様 b. 設定した使用済燃料のピーキングファクター評価における包絡性	× ×	a. 「1. 燃料集合体の主要仕様及び評価条件の比較について」 b. 「2. 本申請にて追加した金属キャスクの設計で想定したピーキングファクターの包絡性について」	
2	全般：型式証明からの変更点の有無（型式証明をそのまま使っていない事項）	a. BWR用中型キャスク（タイプ2）：燃料仕様A，B個別に冷却期間を記載 b. 金属キャスク除熱の輻射率の設定について（型式指定の評価） c. 表面温度検出器の警報設定について	○ × ×	a. 補正申請書 本文「ハ(3) a. 使用済燃料の種類」 b. 適合性説明資料 第6条 除熱（貯蔵建屋） c. 適合性説明資料 第17条 計測制御系統施設	
3	全般：令和2年既許可で拡充した説明事項	a. 断面積ライブラリMATXS LIBによる遮蔽評価 b. 経年変化（使用済燃料被覆管）（クリープ，水素化物再配向，照射硬化の回復等）	○ ×	a. 補正申請書 添付書類六「3.3(2) 遮蔽」 b. 「3. 燃料被覆管の制限値について」	
4	全般：解析コードの妥当性	a. 除熱（貯蔵建屋）の評価で使用する計算コードのバージョン変更 b. 津波の影響評価で使用する計算コード（ABAQUS 2018HF4）	○ ×	a. 適合性説明資料 第6条 除熱（貯蔵建屋） 「3. FLUENTの検証」 b. 「(その他) 計算コード（ABAQUS 2018HF4）について」*2	
5	全般：許可からの変更点	a. 津波：建屋（受入区域）損傷時の線量評価 b. 建屋除熱評価：崩壊熱量の高いPWR用キャスク（タイプ1）で評価 c. PWR用キャスク（タイプ1）の追加に伴い貯蔵能力をBWR，PWR別に記載 d. 新知見の反映：航空機落下確率の見直しと関連する外部火災の評価 e. 記載の適正化①：本文の航空機落下確率の記載を実用炉等と整合。 f. 記載の適正化②：BWR用大型キャスク（タイプ2）の削除	○ ○ ○ ○ ○ ○	a. 補正申請書 添付書類六 1.1.7.5 線量評価 b. 補正申請書 添付書類六 2.4.1 使用済燃料貯蔵建屋 c. 補正申請書 本文「ハ(3) b. 最大貯蔵能力」 d. 補正申請書 添付書類六「1.1.10.6 火災による金属キャスクへの熱影響」， 「1.1.10.7 火災の重量による影響」 e. 補正申請書 本文「四，1.ロ. (8) b. (h) 飛来物（航空機落下等）」，補正申請書 添付書類六「1.2.10 2について(1) 飛来物」（航空機落下等） f. 補正申請書 本文「四，1.ハ. (2)，(3)」	
6	運用・管理	a. 臨界防止（PWR用キャスク）：注排水作業時において，運用管理上の要件は不要であるものの，流量計により管理すること。 b. 閉じ込め：三次蓋を取り付け，閉じ込め性能の回復を行う（取り付けることが可能な設計とすること） c. 安全機能：試験・検査及び保守・修理ができる設計	× × ×	a. 「(その他) PWR用キャスク（タイプ1）への注水作業時における臨界防止の考慮 について」*2 b. 型式証明申請書本文 四 1.「ホ その他の主要な構造」(3)項 c. (令和2年既許可*2から変更なし) *2：申請書本文 四，1.ロ.「(8) その他の主要な構造」f項	

*2：事業許可基準規則への適合性説明の設計条件に当たらないため，補足説明項目を（その他）に分類し，各条文への適合性説明資料の後に記載した。

1. 燃料集合体の主要仕様及び評価条件の比較について

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BWR用大型キャスク（タイプ2A）に収納する「燃料集合体の主要仕様」及び「各安全機能における燃料仕様の違いによる条件の比較」を以降に示す。

第1-1表 燃料集合体の主要仕様*1 (1/2)

項目		BWR用キャスクに収納する使用済燃料集合体					
金属キャスクの種類		BWR用大型キャスク (タイプ2A)			BWR用中型キャスク (タイプ2)		
燃料集合体の種類	新型8×8燃料 (RJ燃料)		新型8×8ジルコニウムラッパ燃料 (BJ燃料)	高燃焼度8×8燃料 (STEP II燃料)	新型8×8燃料 (RJ燃料)	新型8×8ジルコニウムラッパ燃料 (BJ燃料)	高燃焼度8×8燃料 (STEP II燃料)
	新型8×8燃料のみ収納	新型8×8ジルコニウムラッパ燃料と混載					
燃料材質	二酸化ウラン		二酸化ウラン	二酸化ウラン	二酸化ウラン	二酸化ウラン	二酸化ウラン
被覆管材質	ジルカロイ-2		ジルカロイ-2 (ジルコニウム内張)	ジルカロイ-2 (ジルコニウム内張)	ジルカロイ-2	ジルカロイ-2 (ジルコニウム内張)	ジルカロイ-2 (ジルコニウム内張)
燃料理論密度	約95%		約95%	約97%			
被覆管肉厚							
燃料有効長							
幅							
全長							
燃料棒配列	8×8		8×8	8×8	8×8	8×8	8×8
集合体あたりの燃料棒数	62本		62本	60本	62本	62本	60本
平均濃縮度	約3.1wt%		約3.1wt%	約3.7wt%			
ウラン重量	約180kg		約180kg	約170kg			
燃焼度	取替燃料集合体平均						
	燃料集合体最高						

図面

燃料集合体の概略構造図					(タイプ2Aに同じ)	(タイプ2Aに同じ)

*1: 2015年12月16日提出資料「RFS0023 燃料集合体の主要仕様及び評価条件の比較について」に対し、追加したキャスクタイプの主要仕様及び幅と全長の追記、記載の適正化を実施。

*2: 既許可における評価値を記載

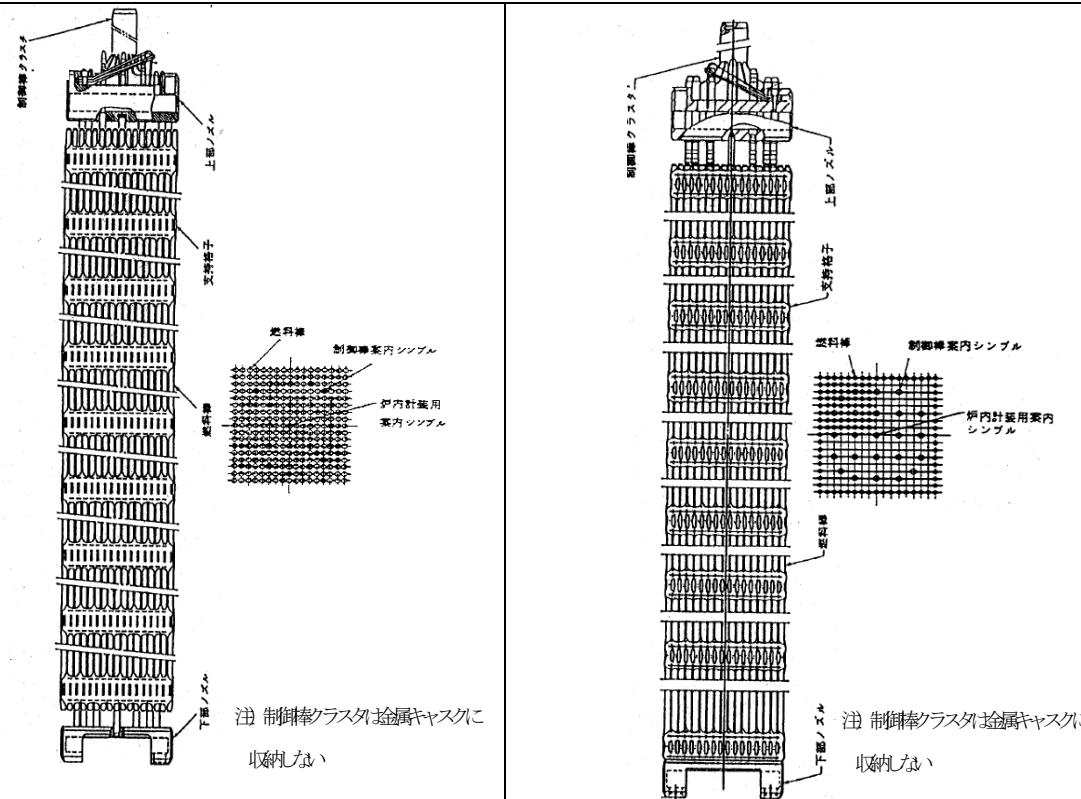
*3: 今回申請における評価の代表値を記載

第1-1表 燃料集合体の主要仕様*1 (2/2)

項目		PWR用キャスクに収納する使用済燃料集合体			
金属キャスクの種類		PWR用キャスク(タイプ1)			
燃料集合体の種類	17×17 燃料 (39,000MWd/t 型)	17×17 燃料 (48,000MWd/t 型) (STEP I 燃料)	17×17 燃料 (39,000MWd/t 型)	17×17 燃料 (48,000MWd/t 型) (STEP I 燃料)	
	A型*3	A型*3	B型*4	B型*4	
燃料材質	二酸化ウラン	二酸化ウラン	二酸化ウラン	二酸化ウラン	
被覆管材質	ジルカロイ-4	ジルカロイ-4	ジルカロイ-4	ジルカロイ-4	
燃料理論密度					
被覆管肉厚					
燃料有効長					
幅					
全長					
燃料棒配列	17×17	17×17	17×17	17×17	
集合体あたりの燃料棒数	264 本	264 本	264 本	264 本	
平均濃縮度	約 3.5wt%	約 4.2wt%	約 3.5wt%	約 4.2wt%	
ウラン重量	約 470kg	約 470kg	約 470kg	約 470kg	
燃焼度	取替燃料集合体平均	44,000MWd/t	44,000MWd/t	44,000MWd/t	
	燃料集合体最高				

図面

燃料集合体の概略構造図



*1: 2015年12月16日提出資料「RFS0023 燃料集合体の主要仕様及び評価条件の比較について」に対し、

追加したキャスクタイプの主要仕様及び幅と全長の追記、記載の適正化を実施。

*2: 今回申請における評価の代表値を記載

*3: A型は、三菱原子燃料(株)製燃料を示す。

*4: B型は、原子燃料工業(株)製燃料を示す。

第1-2表 各安全機能における燃料仕様の違いによる条件の比較*

項目			主な評価条件										考え方		
			BWR用大型キャスク (タイプ2A)				BWR用中型キャスク			PWR用キャスク					
			新型8×8燃料		新型8×8 ジルコウムラッパ 燃料と混載	新型8×8 燃料	高燃焼度 8×8燃料	新型8×8 燃料	新型8×8 ジルコウムラッパ 燃料	高燃焼度 8×8燃料	17×17燃料 (39,000Mwd/t型)	17×17燃料 (48,000Mwd/t型)		17×17燃料 (39,000Mwd/t型)	17×17燃料 (48,000Mwd/t型)
			新型8×8 燃料のみ収納	新型8×8 燃料のみ収納							A型	A型		B型	B型
機能 臨界防止	モデル バンドル	燃料本数	62本		62本	60本	62本	62本	60本	264本	264本	264本	264本	実形状	
		濃縮度	約3.1wt%		約3.1wt%	約3.7wt%	約3.3wt%	約3.3wt%	約3.67wt%	約3.5wt%	約4.2wt%	約3.5wt%	約4.2wt%	最大値**	
		燃料理論密度	約95%		約95%	約97%								実仕様	
遮へい機能	線源強度	ウラン重量	177kg		177kg	174kg								最大値	
		濃縮度	約2.9wt%		約2.9wt%	約3.4wt%								最小値	
		最高燃焼度					40,000Mwd/t	40,000Mwd/t	50,000Mwd/t	39,000Mwd/t	48,000Mwd/t	39,000Mwd/t	48,000Mwd/t	事業者側で選定	
		平均燃焼度					34,000Mwd/t	38,000Mwd/t	43,000Mwd/t	44,000Mwd/t		44,000Mwd/t		事業者側で選定	
		軸方向燃焼度分布	考慮	考慮	考慮	考慮	考慮	考慮	考慮	考慮	考慮	考慮	考慮	燃焼調査より設定	
		冷却期間					22年	12年	12年又は*	15年	15年	20年	20年	事業者側で選定	
		燃料有効部のガン線の線源強度 (キャスク1基あたり)					6.0×10 ¹⁶ photons/s	8.6×10 ¹⁶ photons/s	1.0×10 ¹⁷ photons/s	9.3×10 ¹⁶ photons/s		8.0×10 ¹⁶ photons/s		ORIGEN2コードによる燃焼計算結果	
		構造材放射化ガン線の線源強度 (キャスク1基あたり)					5.8×10 ¹³ ⁶⁰ Co:Bq	2.2×10 ¹⁴ ⁶⁰ Co:Bq	2.5×10 ¹⁴ ⁶⁰ Co:Bq	3.8×10 ¹⁴ ⁶⁰ Co:Bq*		2.5×10 ¹⁴ ⁶⁰ Co:Bq*		放射化計算式による計算結果	
全中性子源強度 (キャスク1基あたり)					1.0×10 ⁰ n/s	1.6×10 ⁰ n/s	2.5×10 ⁰ n/s	1.0×10 ⁰ n/s		8.5×10 ⁰ n/s		ORIGEN2コードによる燃焼計算結果			
閉じ込め機能	燃料被覆管内の核分裂生成ガス量	ウラン重量	177kg		177kg	174kg	180kg	180kg	174kg	470kg	470kg	470kg**	470kg**	最大値	
		濃縮度	約2.9wt%		約2.9wt%	約3.4wt%	約3.3wt%	約3.3wt%	約3.67wt%	約3.5wt%	約4.2wt%	約3.5wt%	約4.2wt%	最小値	
		平均燃焼度					34,000Mwd/t	38,000Mwd/t	43,000Mwd/t	44,000Mwd/t		44,000Mwd/t		事業者側で選定	
		冷却期間					22年	12年	12年**	15年	15年	20年	20年	事業者側で選定	
除熱機能	崩壊熱量	ウラン重量	177kg		177kg	174kg								最大値	
		濃縮度	約2.9wt%		約2.9wt%	約3.4wt%								最小値	
		最高燃焼度												事業者側で選定	
		平均燃焼度					34,000Mwd/t	38,000Mwd/t	43,000Mwd/t	44,000Mwd/t		44,000Mwd/t		事業者側で選定	
		軸方向燃焼度分布	考慮	考慮	考慮	考慮	考慮	考慮	考慮	考慮	考慮	考慮	考慮	燃焼調査より設定	
		冷却期間					22年	12年	12年	15年	15年	20年	20年	事業者側で選定	
	設計崩壊熱量 (キャスク1基あたり)	9.78kW*	13.6kW*	15.3kW	14.6kW	10.89kW	15.66kW	17.49kW	15.79kW	14.15kW	14.04kW	12.59kW	ORIGEN2コードによる燃焼計算結果		
燃料被覆管制限温度	200°C (ラッパなし)		300°C (ラッパあり)		200°C (ラッパなし)	300°C (ラッパあり)		275°C				BWR燃料がジルコウムラッパの有無により燃料被覆管温度制限が異なる			

*1: 各機能における評価条件を太枠で示す。
 *2: 新燃料仮定の条件。BWR用キャスクの冠水時の評価では無限増倍率1.3のガドリニアクレジットのモデルバンドルを使用。
 *3: B型燃料のウラン重量は450kgであるが、ORIGEN2コードによる燃焼計算では、保守的に470kgとして評価している。
 *4: バーナブルポイズン集合体の放射化線源強度を考慮している。なお、バーナブルポイズン集合体は、金属キャスク中央部に設置する。
 *5: BWR用大型キャスク (タイプ2A) では、新型8×8燃料を収納する場合に崩壊熱量を制限している。そのため、それぞれの評価条件で新型8×8燃料の燃料被覆管温度を評価している。
 *6: 軸方向燃焼度分布の差異により13年以上の場合がある。
 *7: 軸方向燃焼度分布の差異により2.80wt%の場合がある。

2. 本申請にて追加した金属キャスクの設計で想定したピーキングファクターの包絡性について

ピーキングファクター（以下、PFと称す）は、使用済燃料集合体の平均燃焼度に対する軸方向の燃焼度の比を表すものである。ここで、本申請にて追加した金属キャスクの設計で想定したピーキングファクター（以下、設計用PFと称す）は、対象とする使用済燃料集合体のPFを包絡できるよう、以下のように設定している。

(1) BWR用中型キャスク（タイプ2）の設計用PF（仕様a）^(注1)

a. 設定の考え方

- ・キャスク設計においては、燃焼度の高い使用済燃料集合体が崩壊熱量、放出放射線量ともに高いことから、設計制限となるため、燃焼度の高い取替燃料のPFを調査する。なお、高いピーキングを示す比較的低い燃焼度の使用済燃料集合体も調査の対象とする。
- ・東海第二発電所の平衡炉心の取替全燃料及び炉心末期予測評価を抽出して軸方向燃焼度を調査する。

b. 調査項目

- ・(1)に基づき既に取り出された取替燃料全てのPFを調査する。
- ・燃焼度の最も高い上位10体及びピーキングの最も高い上位10体の軸方向燃焼度を調査する。

c. 設計用PFの設定

- ・(1)及び(2)で調査したデータより各プロットを線で結び、使用済燃料集合体のPFを包絡するように設計用PFを第2-1表のとおり設定している。各データを第2-1図～第2-3図に示す^(注2)。

(注1)仕様bの設計用PFは認可済のBWR用大型キャスク（タイプ2A）と同じであるため、既許可においてPFの包絡性を確認済。ここでは仕様aの設計用PFの設定について示す。

(注2)新型8×8燃料は、使用済燃料集合体のPFの一部が設計用PFを超過している。ただし、設計で想定している燃焼度分布（PF=1が最高燃焼度40,000Mwd/t、又は平均燃焼度34,000Mwd/tとなる分布）が使用済燃料集合体の軸方向燃焼度分布を包絡しており、評価の保守性には影響しないことを確認している。詳細を別紙1に示す。

(2) PWR用キャスク（タイプ1）の設計用PF

a. 設定の考え方

- ・キャスク設計においては、燃焼度の高い使用済燃料集合体が崩壊熱量、放出放射線量ともに高いことから、設計制限となるため、燃焼度の高い取替燃料のPFを調査する。なお、高いピーキングを示す比較的低い燃焼度の使用済燃料集合体も調査の対象とする。
- ・貯蔵対象となる敦賀2号機の、燃料集合体が装荷された取替炉心を数サイクル選定し、調査を実施する。

b. 調査項目

- ・上記(1)で設定した取替炉心のサイクル末期の燃焼度、PFを調査する。
- ・各サイクル末期の集合体平均燃焼度40,000Mwd/t以上の燃料集合体を選定し、各軸方向位置におけるPFの最大値を抽出する。

c. 設計用PFの設定

- ・(1)及び(2)で調査したデータ（軸方向に60点）を線で結び、ピーキングカーブを包絡するように設計用PFを第2-2表のとおり設定している。各データを第2-4図に示す^(注)。

(注)使用済燃料集合体のPFの一部が設計用PFを超過しているが、敦賀1号機の新型8×8燃料と同様に、設計で想定している燃焼度分布が使用済燃料集合体の軸方向燃焼度分布を包絡しており、評価の保守性には影響しないことを確認している。詳細を別紙1に示す。

(3) ピーキングファクターの包絡性

(1)及び(2)のとおり設計用PFは取替燃料のPFを包絡している。一部設計用PFを超過している取替燃料のPFについても、別紙1のとおり設計用PFを換算した軸方向燃焼度分布に使用済燃料集合体の軸方向燃焼度分布が概ね包絡されていることが確認できることから、評価の保守性には影響しない。

第2-1表 BWR用中型キャスク (タイプ2) [仕様a]

燃料タイプ	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	
	ノード ^(注2)	PF	ノード	PF	ノード	PF
平均燃焼度(MWd/t)	約 34,000		約 38,000		約 43,000	
最高燃焼度(MWd/t)	40,000		40,000		50,000	
比出力(MW/t)	25.3		25.3		26.0	
照射期間(日)(平均燃焼度)	1,344		1,502		1,654	
照射期間(日)(最高燃焼度)	1,582		1,582		1,924	
初期濃縮度(wt%) ^(注1)	約 3.0		約 3.0		約 3.4	
冷却期間(年)	22		12		12年	
U重量(kg)	約 180		約 180		約 170	
軸方向ピーキングファクター	ノード ^(注2)	PF	ノード	PF	ノード	PF
上	24/24	0.6	同左		同左	
	23/24	0.9	同左		同左	
	22/24	1.1	同左		同左	
	20, 21/24	1.2	同左		同左	
	5-19/24	1.27	同左		同左	
	4/24	1.2	同左		同左	
	3/24	1.1	同左		同左	
	2/24	0.9	同左		同左	
下	1/24	0.6	同左		同左	

(注1) 収納される使用済燃料の種類ごとの最小値を用いる。

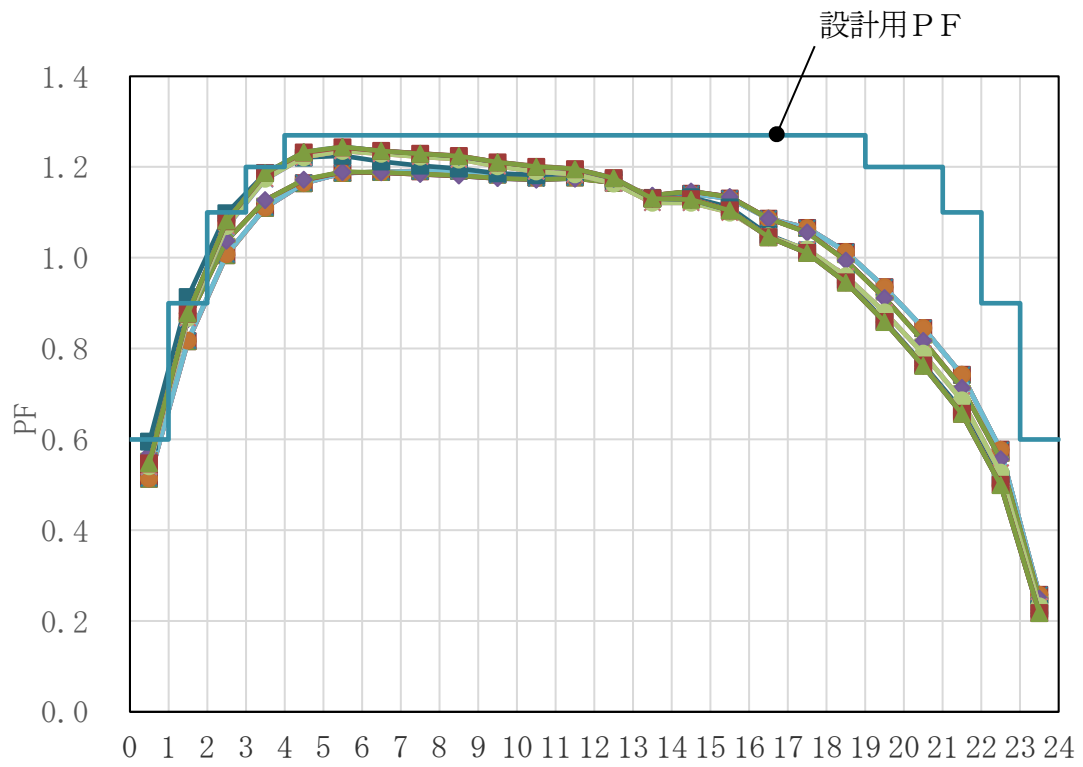
(注2) 燃料有効部を24分割したときの要素をいう。

第2-2表 PWR用キャスク (タイプ1)

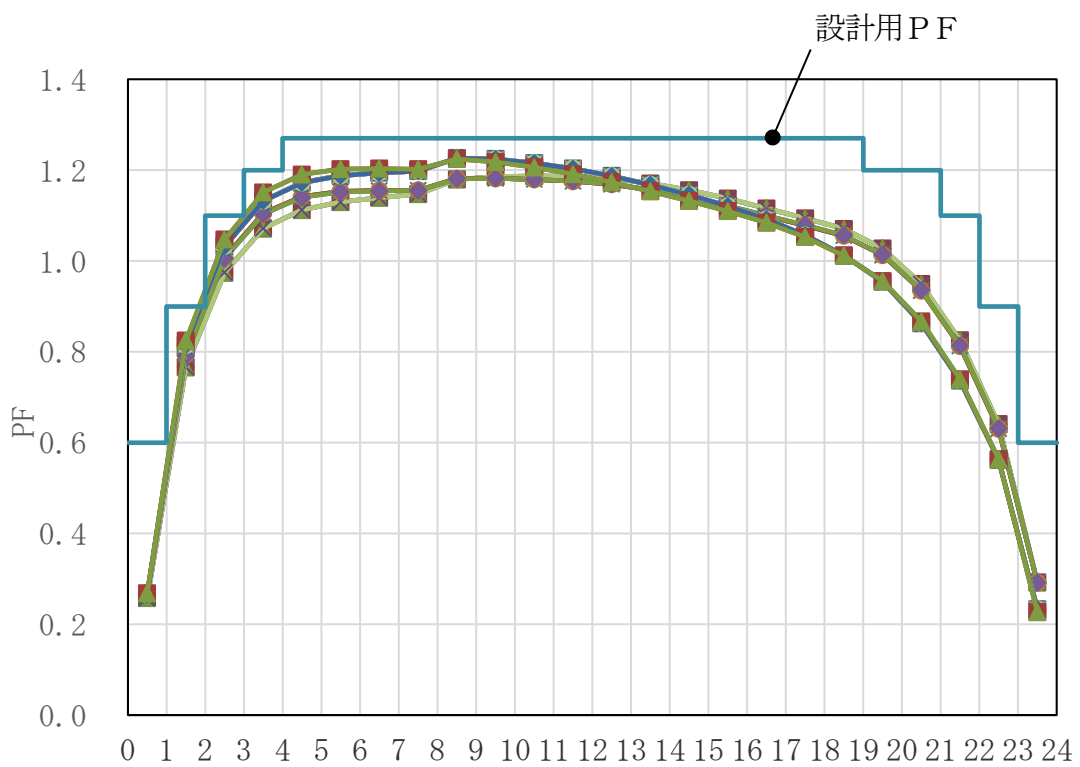
燃料タイプ	17×17 燃料 48,000MWd/t 型		17×17 燃料 39,000MWd/t 型	
	A型	B型	A型	B型
平均燃焼度 (MWd/t)	約 44,000			
最高燃焼度 (MWd/t)	48,000		39,000	
比出力 (MW/t)	38.4			
照射期間(日) (平均燃焼度)	1,146			
照射期間(日) (最高燃焼度)	1,250		1,016	
初期濃縮度 (wt%) ^(注1)	約 4.2		約 3.7	
冷却期間 (年)	15	20	15	20
U重量 (kg)	約 470			
軸方向ピーキングファクター	ノード ^(注2)	PF	ノード	PF
上	1, 2/48	0.8	同左	
	3/48	0.9	同左	
	4, 5/48	1.0	同左	
	6, 7/48	1.1	同左	
	8-42/48	1.15	同左	
	43, 44/48	1.1	同左	
	45, 46/48	1.0	同左	
	47/48	0.9	同左	
	48/48	0.8	同左	
下				

(注1) 収納される使用済燃料の種類ごとの最小値を用いる。

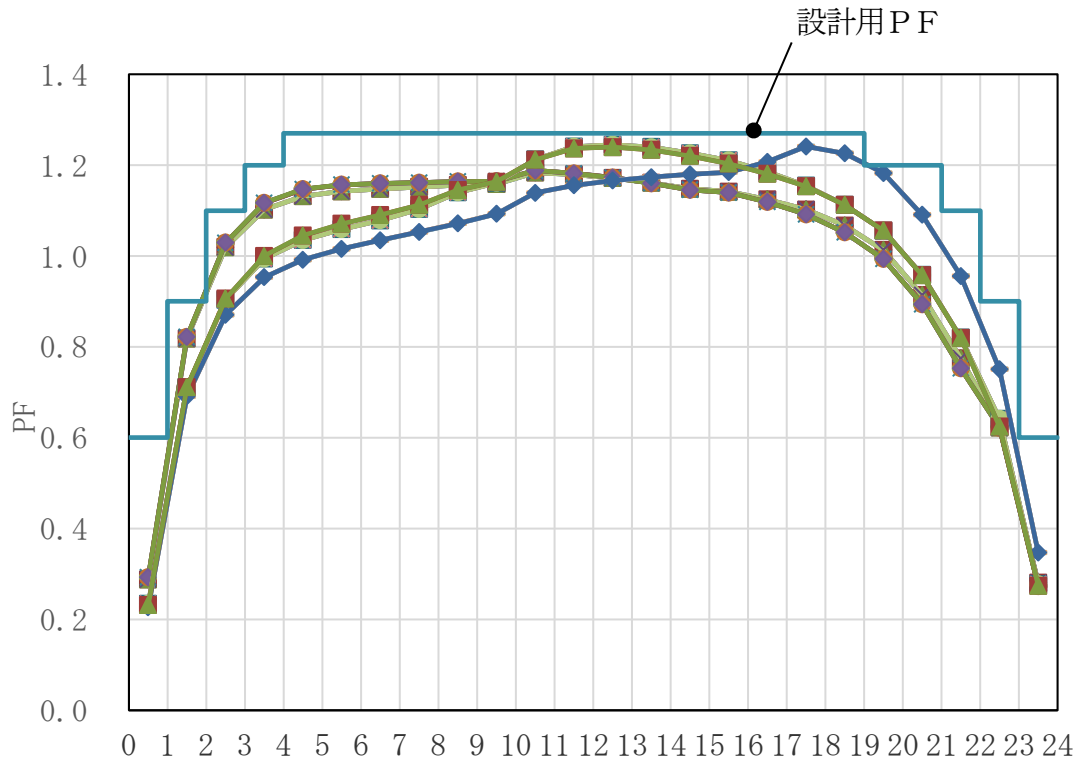
(注2) 燃料有効部を48分割したときの要素をいう。



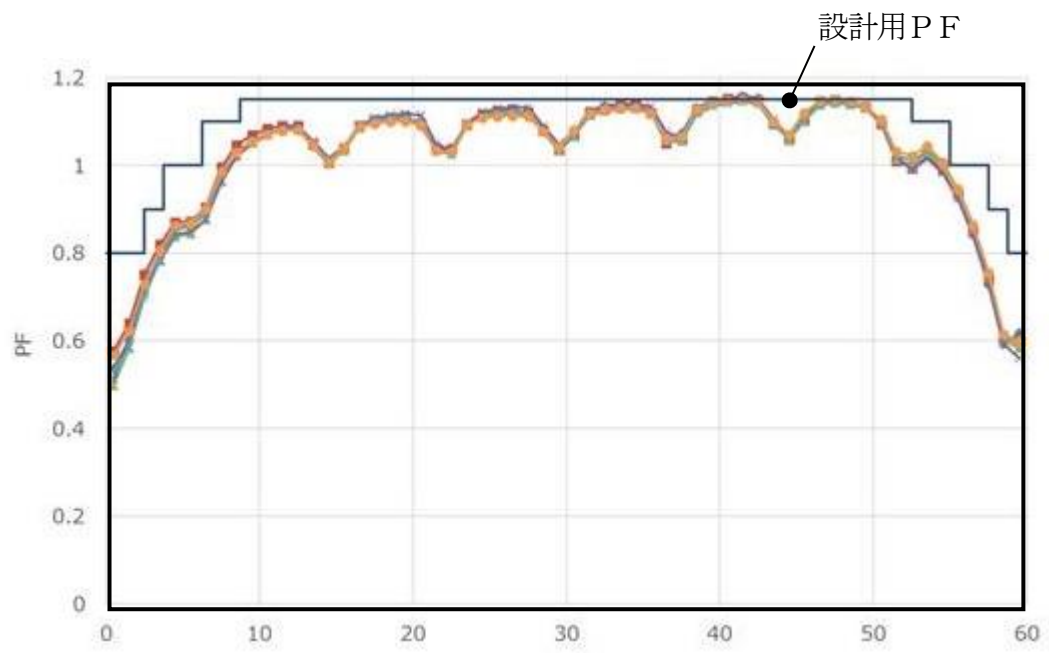
第2-1図 新型8×8燃料の設計用PF及び使用済燃料集合体のPFの比較



第2-2図 新型8×8ジルコニウムライナ燃料の設計用PF及び使用済燃料集合体のPFの比較



第2-3図 高燃焼度8×8燃料の設計用PF及び使用済燃料集合体のPFの比較



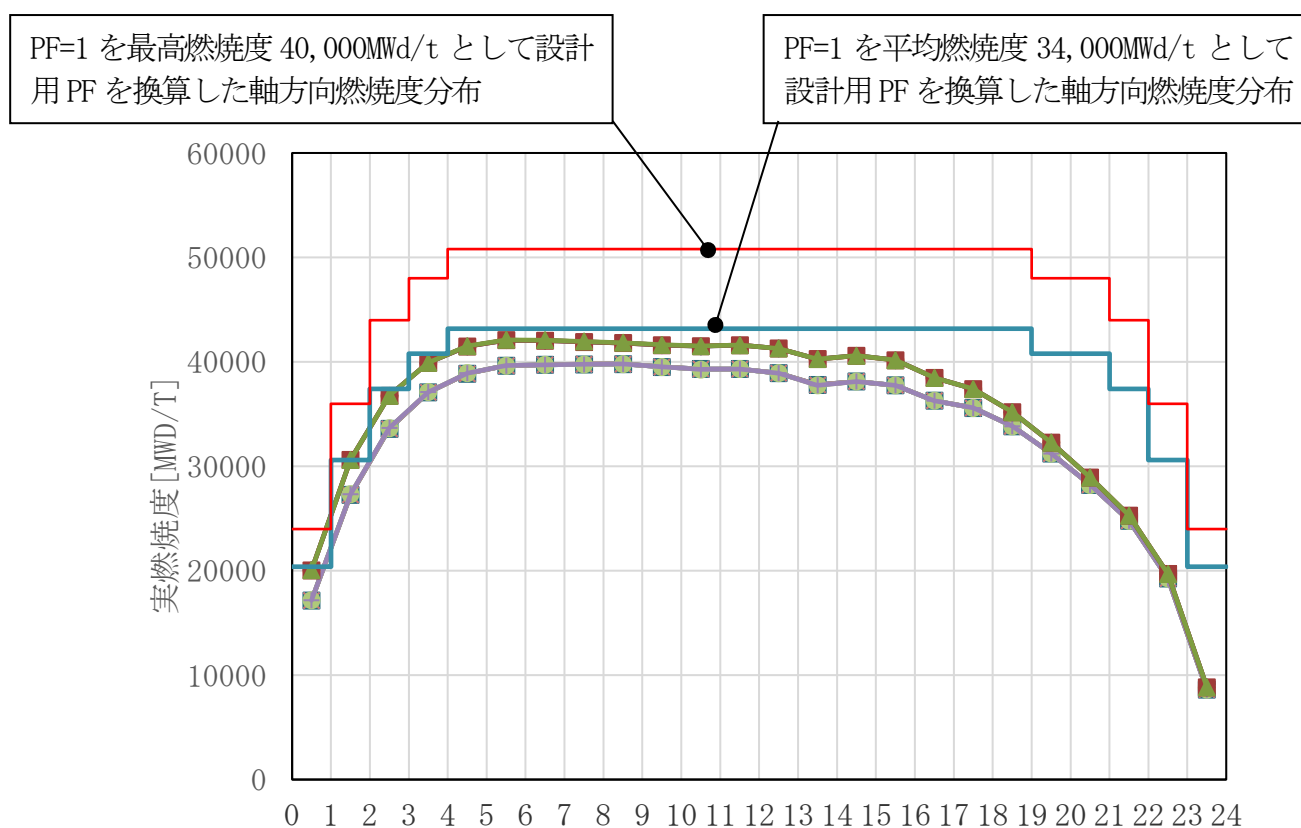
第2-4図 17×17燃料48,000Mwd/t型の設計用PF及び使用済燃料集合体のPFの比較

新型8×8燃料及び17×17燃料48,000Mwd/t型の軸方向燃焼度分布の比較結果について

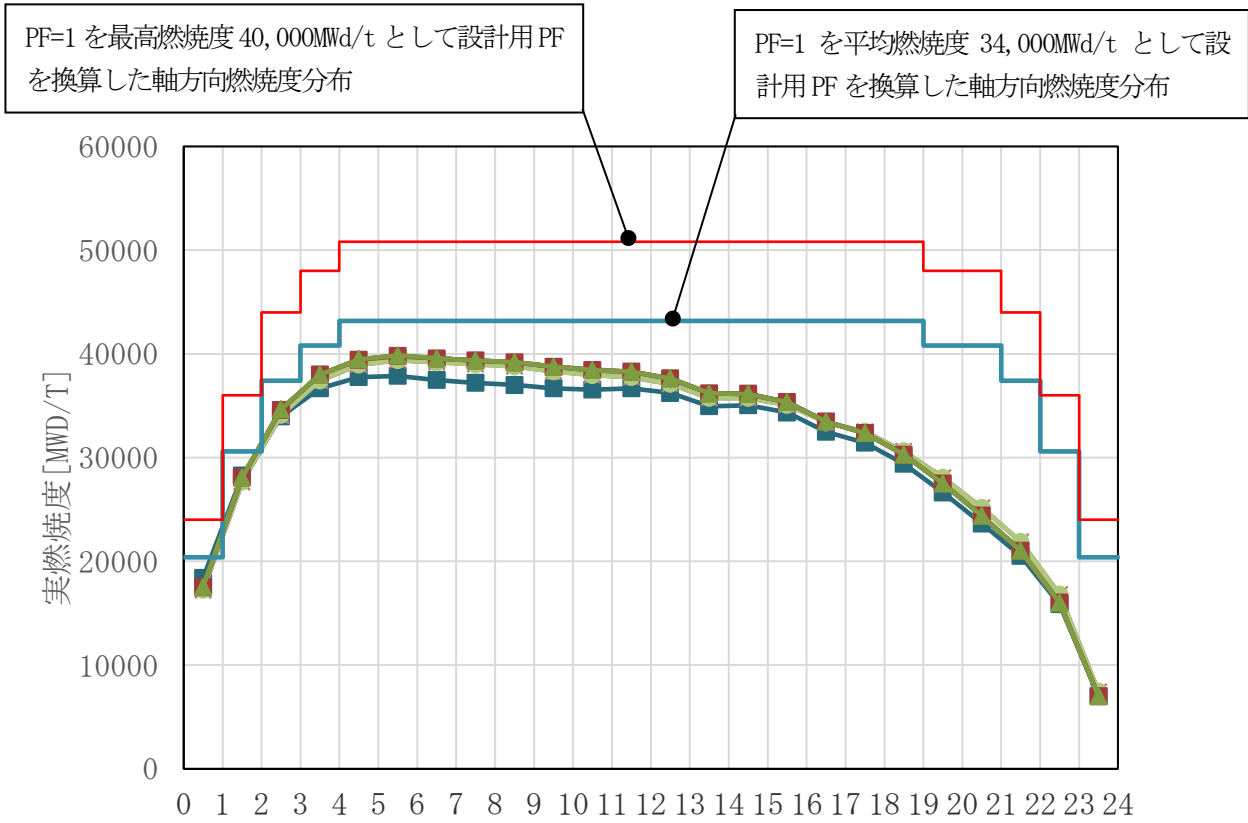
本文で述べているとおり、PFは使用済燃料集合体の平均燃焼度に対する軸方向の燃焼度の比を表すものである。そのため、除熱や遮蔽解析上は平均燃焼度が高いほど厳しい燃料であるにもかかわらず、PFの値自体は平均燃焼度が低くても高くなる場合がある。これが新型8×8燃料及び17×17燃料48,000Mwd/t型燃料のPFの一部が設計用PFを超過している理由であり、それらの燃料における評価の保守性はPFを燃焼度に換算して確認する必要がある。

ここで、新型8×8燃料の軸方向燃焼度分布の比較結果を別図1及び別図2に示す。また、17×17燃料48,000Mwd/t型の軸方向燃焼度分布の比較結果を別図3及び別図4に示す。いずれの比較結果においても、基本的に設計用PFを換算した軸方向燃焼度分布に使用済燃料集合体の軸方向燃焼度分布が概ね包絡されていることが確認できる。

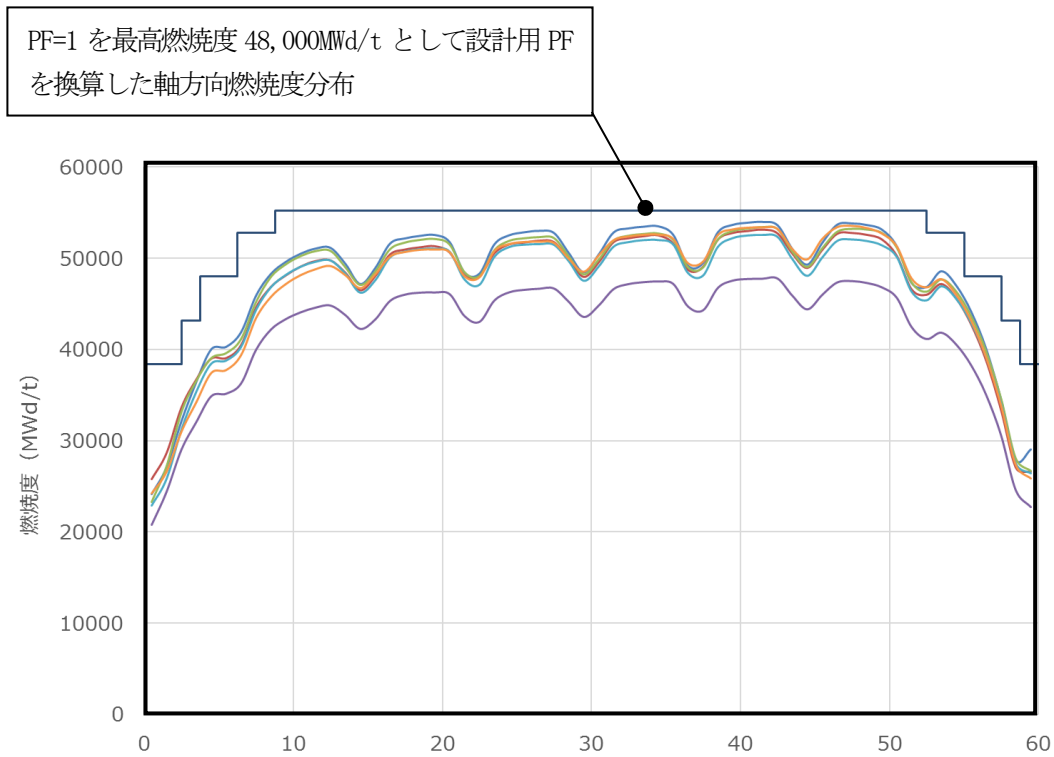
以上のことから、評価の保守性には影響しないといえる。



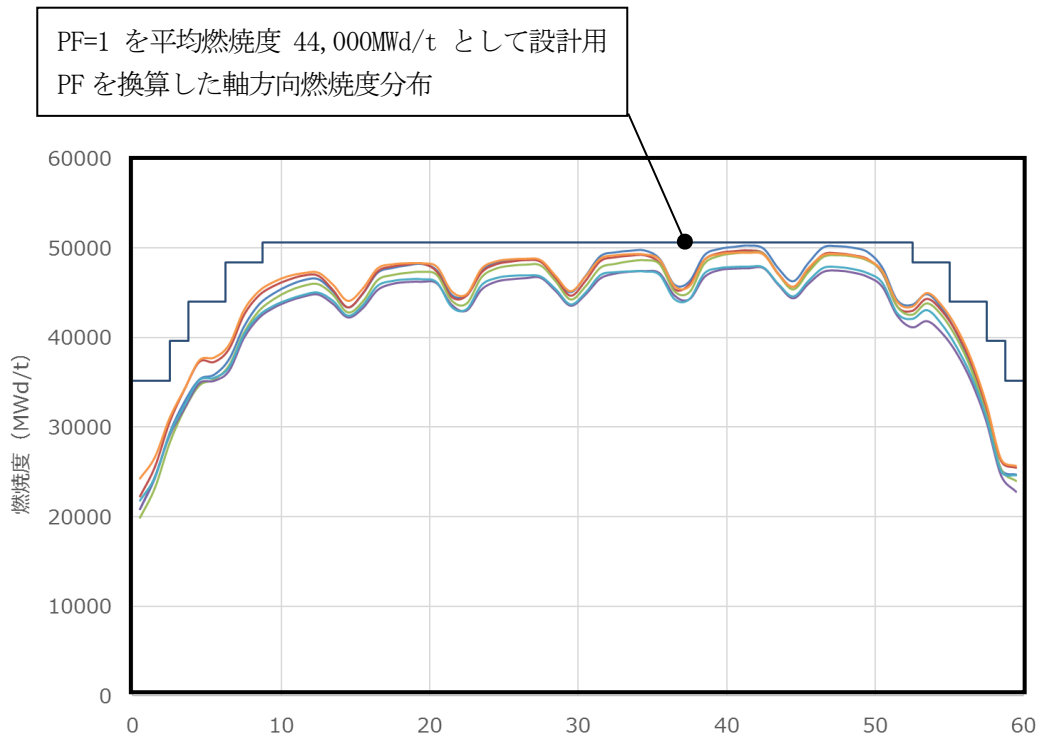
別図1 平均燃焼度上位10体及び設計に想定している軸方向燃焼度分布の比較結果



別図2 ピーキング上位 10 体及び設計に想定している軸方向燃焼度分布の比較結果



別図3 最高燃焼度領域（中央部 9 体）の使用済燃料集合体における軸方向燃焼度分布の比較結果
(燃焼度 40,000MWD/t 以上)



別図4 平均燃焼度領域（外周部 12 体）の使用済燃料集合体における軸方向燃焼度分布の比較結果（燃焼度 40,000~44,000MWd/t）

3. 燃料被覆管の制限値について

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）（以下「RFS貯蔵キャスク」という。）には、事業変更許可や型式証明の収納条件*¹、²を満足する使用済燃料を実際に収納する。RFS貯蔵キャスクに実際に収納する使用済燃料が、燃料被覆管の制限値を満足することについて、以下の通り説明する。

- *1：事業変更許可申請書本文「四、1. ハ. (3) 貯蔵する使用済燃料の種類及びその種類毎の最大貯蔵能力」
- *2：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書(MSF-52B型, L5-95HL100R2, H27.8.6) 又は(MSF-21P型, L5-95HN100R1, H28.4.27) 「3. 貯蔵する使用済燃料の種類及びその種類毎の最大貯蔵能力」

(1) 燃料被覆管の制限値について

今回申請キャスクに実際に収納する使用済燃料の燃料被覆管の制限値については、以下に示す経年変化要因を考慮して設定する。

a. 燃料被覆管のクリープ

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、PWRで320°C程度となる。

今回申請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。

また、今回申請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°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。

b. 燃料被覆管の水素化物再配向

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°C以下、50GWd/t型及び55GWd/t型ジルコニウムライナ有燃料では70MPa以下で300°C以下と示されている。（第3-1表）*³

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。（第3-1表）*³

- *3：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）

第3-1表 水素化物再配向試験のまとめ*3

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

c. 燃料被覆管の照射硬化の回復

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。

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*4 されている。また、別紙2-10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。

*4 : R. E. Einzinger 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)

d. 燃料被覆管の制限値

以上の検討を踏まえ、燃料被覆管の制限値を次のとおり設定した。

- ・ BWR燃料被覆管 (ライナ有*5) : 300℃, 周方向応力 70MPa
- ・ BWR燃料被覆管 (ライナ無*6) : 200℃, 周方向応力 70MPa
- ・ PWR燃料被覆管 (ライナ無*2) : 275℃, 周方向応力 100MPa

*5 : 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

*6 : 新型8×8燃料

(2) 実際に収納する使用済燃料の評価について

実際に収納する使用済燃料の燃料被覆管について、最高温度及び周方向応力の評価を行った結果を「第3-2表 RFS貯蔵キャスクに収納する燃料被覆管の評価結果」に示す。

第3-2表 RFS貯蔵キャスクに収納する燃料被覆管の評価結果

金属キャスク	対象となる部位	最高温度 (°C) *7, 8		周方向応力 (MPa)	
		解析値	設計基準値	評価値*9	制限値
BWR用大型キャスク (タイプ2A)	新型8×8燃料ジルコニウムライナ燃料, 高燃焼度8×8燃料の燃料被覆管	259	300	66.1	70
	新型8×8燃料の燃料被覆管	189	200	58.8	70
BWR用中型キャスク (タイプ2)	新型8×8燃料ジルコニウムライナ燃料, 高燃焼度8×8燃料の燃料被覆管	265	300	66.1	70
	新型8×8燃料の燃料被覆管	190	200	58.8	70
PWR用キャスク (タイプ1)	17×17燃料 (A型及びB型) の燃料被覆管	205	275	96.9	100

*7: 事業変更許可申請書 (RFS発官2第8号) 添付書類六, 第3.3-6表 金属キャスクの基本的安全機能に係る評価結果

*8: 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書 (MSF-52B型, L5-95HL100R2, H27.8.6) 添付書類一, 第1-5表 MSF-52B型評価結果及び同 (MSF-21P型, L5-95HN100R1, H28.4.27) 添付書類一, 第1-5表 MSF-21P型評価結果

*9: 適合性説明資料 第15条 金属キャスク (使用済燃料集合体), 別添4, 添付2「燃料被覆管に発生する応力評価について」

(3) RFS貯蔵キャスクへの使用済燃料の収納管理について

RFS貯蔵キャスクへの使用済燃料の収納については, RFS搬入前に, 事業変更許可や型式証明の収納条件を満足するように収納されたことを, 原子炉設置者が作成する記録により確認する。

(4) 燃料被覆管の健全性について

以上から, RFS貯蔵キャスクに収納する使用済燃料は燃料被覆管の制限値を超えることはない。

第4条 遮蔽等（貯蔵建屋）

<目次>

（別添）

別添1 遮蔽設計に用いる線源と評価結果

別添4 作業線量想定について

参考 貯蔵建屋が無い場合の敷地境界線量について

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。

遮蔽設計に用いる線源と評価結果

1. 金属キャスクの表面エネルギースペクトル（添付 1 参照）

解析に使用する金属キャスクの表面エネルギースペクトルについては、(財)原子力安全研究協会にて、使用済燃料貯蔵施設（金属キャスク方式）における線量評価用の表面エネルギースペクトル（以下「包絡スペクトル」という。）を、BWR 燃料用金属キャスク 10 種類、PWR 燃料用金属キャスク 4 種類の設計から得られたガンマ線及び中性子線のそれぞれの表面エネルギースペクトルに対して保守的な線量評価を与えるように作成している。本施設で使用する予定の金属キャスクと包絡スペクトルの関係を添付 1-2 図 (1)～(3) に示す。各キャスクの表面エネルギースペクトルと包絡スペクトルについてコンクリート透過率を求めたところ、包絡スペクトルは全ての設計スペクトルに対してコンクリート透過率が高いことを確認した。コンクリート透過率を表すコンクリート中の実効線量率減衰比を添付 1-3 図及び添付 1-4 図に示す。

2. 金属キャスクの線量当量率（添付 2 参照）

本施設にて使用する金属キャスクは全て輸送貯蔵兼用であることから、輸送時の線量当量率の基準を満足する。輸送時の線量当量率は金属キャスクから 1 m の距離において $100 \mu\text{Sv/h}$ 以下と定められていることから、線源条件として設定している金属キャスクの各面の平均が $100 \mu\text{Sv/h}$ と規格化したものを採用している。線源条件として設定している金属キャスクの線量分布と、本施設で使用する金属キャスクの線量当量率分布を添付 2-2 図に示す。いずれも線源条件として設定している金属キャスクの方が高い値となっている。

3. 敷地境界における線量評価結果（添付 3 参照）

金属キャスクの線源条件の保守性の評価のために、敷地境界（添付 3-6 図の 3 地点）における線量について評価したものを以下に示す。

- ・ケース A：現行評価。（包絡スペクトルを表面から 1 m の位置で $100 \mu\text{Sv/h}$ に規格化）

- ・ケースB：過去に検討した金属キャスク（以下「模擬キャスク」という。）から得られた表面エネルギースペクトルを使用。
- ・ケースC：模擬スペクトルの表面エネルギースペクトルを使用し、かつ線量当量率分布を考慮。

各々の地点での評価結果（添付3-2表）をケースAとケースBで比較した結果から、包絡スペクトルは中性子で1.2～1.4倍、ガンマ線で1.7～2.2倍程度保守側の評価となっていることを確認した。

また、ケースAとケースCで比較した結果から、現行評価は表面エネルギースペクトルと線量当量率分布の点から、8～13倍程度保守側評価となっていることを確認した。

別添1-1表 各々評価結果とケースAの比較

	ケースBとの比較 (表面エネルギースペクトルのみ考慮。)	ケースC (表面エネルギースペクトルと線量当量率分布を考慮。)
中性子線	1.2 ～ 1.4	8.3 ～ 13.9 〔ケースAは中性子 100%の結果〕
ガンマ線	1.7 ～ 2.2	

金属キャスク表面のエネルギースペクトルについて

1. 基本的考え方

本施設では、設計の異なる複数タイプの金属キャスクを使用する。また、金属キャスクは、鉄筋コンクリート造の貯蔵建屋内で貯蔵することから、金属キャスク表面のエネルギースペクトルの違い及びそれぞれのコンクリートの透過率を考慮する必要がある。

よって、本評価で使用する金属キャスク表面のエネルギースペクトルには、金属キャスク設計から得られた表面エネルギースペクトル（以下「設計スペクトル」という。）に比べ、コンクリートの透過率が高いものを設定する。

2. 選定及び妥当性評価

(1) 選定及び評価

原子力安全研究協会では、使用済燃料中間貯蔵施設（金属キャスク方式）における線量評価用の表面エネルギースペクトル（以下「包絡スペクトル」という。）を作成している。包絡スペクトルは、BWR 燃料用金属キャスク 10 種類、PWR 燃料用金属キャスク 4 種類の設計から得られたガンマ線及び中性子のそれぞれの表面エネルギースペクトルに対して、保守的な線量評価結果を与えるように作成されたものである。

本施設の線量評価において、包絡スペクトルを使用することにより、敷地境界外の線量を保守的に評価できるかどうかを確認するため、包絡スペクトル及び設計スペクトルそれぞれのコンクリート中における実効線量率の減衰割合を評価した。

包絡スペクトル作成方法及びコンクリート中の実効線量率減衰割合の評価方法を以下に示す。

a. 包絡スペクトル作成方法

(a) 収納燃料仕様

○BWR 用燃料：STEP I，STEP II

- ・ 燃焼度（最大／平均）STEP I：40,000MWd/t／33,000MWd/t

STEP II : 50,000MWd/t / 45,000MWd/t

- ・冷却期間 10年

○PWR用燃料：STEP II

- ・燃焼度（最大／平均） 55,000MWd/t / 50,000MWd/t
- ・冷却期間 10年

(b) ガンマ線包絡スペクトル

一次元輸送コード ANISN 用群定数断面積 DLC23/F のエネルギー群（1群～18群）のそれぞれのスペクトル強度を以下の通り設定する。

- ・高エネルギー側の1群のスペクトル強度を0.01，2群から8群までのスペクトル強度を0.1として，遮蔽コンクリートの減衰効果に寄与が大きいと考えられる，1群から8群までモデルキャスクのスペクトル強度を包絡し，残りの9群以下のエネルギー強度を1～18群全体の「スペクトル強度×エネルギー強度」を1に規格化するよう0.164とする（添付1-1表，添付1-1図参照）。

(c) 中性子包絡スペクトル

燃料の燃焼終了直後において中性子源として支配的な $^{242}\text{Cm}(\alpha, n)$ 反応による中性子のエネルギースペクトルとする。

なお， $\text{Cm-242}(\alpha, n)$ 反応のスペクトルは， Cm-244 自発核分裂， Pu-239 核分裂のスペクトルに比べコンクリート中の減衰割合が小さい。

(2) コンクリート中の実効線量率減衰割合の評価方法

- ・包絡スペクトル及び設計スペクトルを用いて，表面から1mの位置で $100\ \mu\text{Sv/h}$ に規格化した線源から放出されるガンマ線，中性子を無限平板（コンクリート厚さ180cm）のコンクリートに垂直入射する。コンクリートの組成は，建屋コンクリートの組成を使用する。
- ・1次元輸送計算コード（ANISN）の計算により線束（フラックス）を求め，実効線量換算係数を掛けて実効線量率とし，コンクリート厚さ0cmの位置を1としてコンクリート中での実効線量率の減衰率とする。

(3) 妥当性評価結果

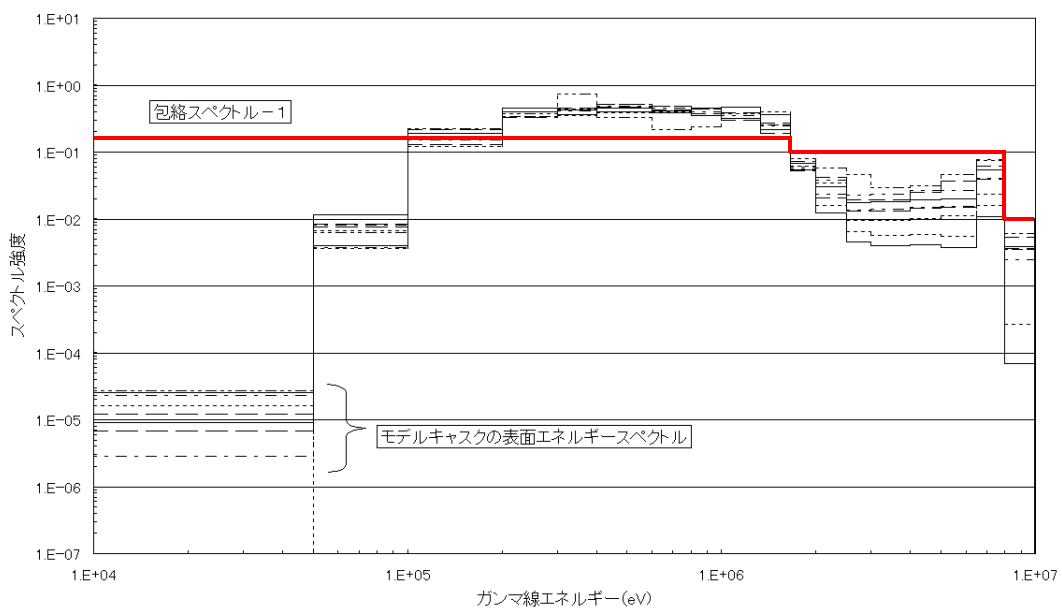
評価の結果，包絡スペクトルは，全ての設計スペクトルに比べ，コンクリートの透過率が高いことを確認している。包絡スペクトル及び設計スペ

クトルのガンマ線，中性子スペクトル分布を添付 1-2 図 (1) ~ (3) に，コンクリート中の実効線量率減衰比（側部中央）を添付 1-3 図，1-4 図に示す。

添付 1-1 表 ガンマ線包絡スペクトル

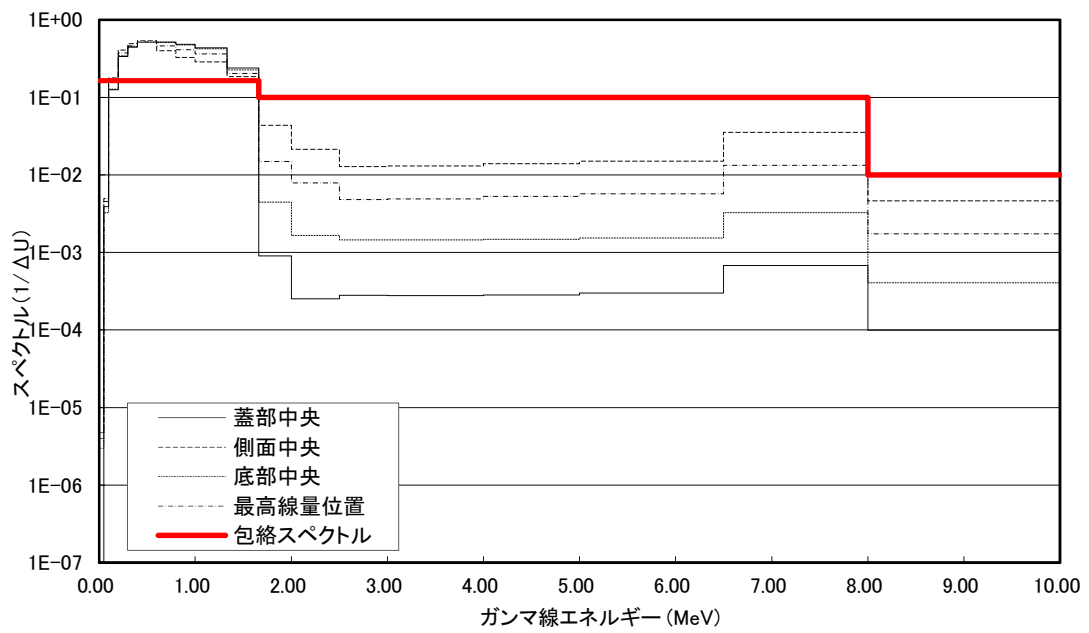
エネルギー群	エネルギー (MeV)		スペクトル (1/ΔU)	レサジー幅 ΔU	スペクトル
	上限	下限			
1	1.00E+07	8.00E+06	1.0000E-02	0.2231	2.231E-03
2	8.00E+06	6.50E+06	1.0000E-01	0.2076	2.076E-02
3	6.50E+06	5.00E+06	1.0000E-01	0.2624	2.624E-02
4	5.00E+06	4.00E+06	1.0000E-01	0.2231	2.231E-02
5	4.00E+06	3.00E+06	1.0000E-01	0.2877	2.877E-02
6	3.00E+06	2.50E+06	1.0000E-01	0.1823	1.823E-02
7	2.50E+06	2.00E+06	1.0000E-01	0.2231	2.231E-02
8	2.00E+06	1.66E+06	1.0000E-01	0.1863	1.863E-02
9	1.66E+06	1.33E+06	1.6442E-01	0.2216	3.644E-02
10	1.33E+06	1.00E+06	1.6442E-01	0.2852	4.689E-02
11	1.00E+06	8.00E+05	1.6442E-01	0.2231	3.669E-02
12	8.00E+05	6.00E+05	1.6442E-01	0.2877	4.730E-02
13	6.00E+05	4.00E+05	1.6442E-01	0.4055	6.667E-02
14	4.00E+05	3.00E+05	1.6442E-01	0.2877	4.730E-02
15	3.00E+05	2.00E+05	1.6442E-01	0.4055	6.667E-02
16	2.00E+05	1.00E+05	1.6442E-01	0.6931	1.140E-01
17	1.00E+05	5.00E+04	1.6442E-01	0.6931	1.140E-01
18	5.00E+04	1.00E+04	1.6442E-01	1.6094	2.646E-01
					1.000E+00

注：ANISN 用群定数断面積 DLC23/F を使用

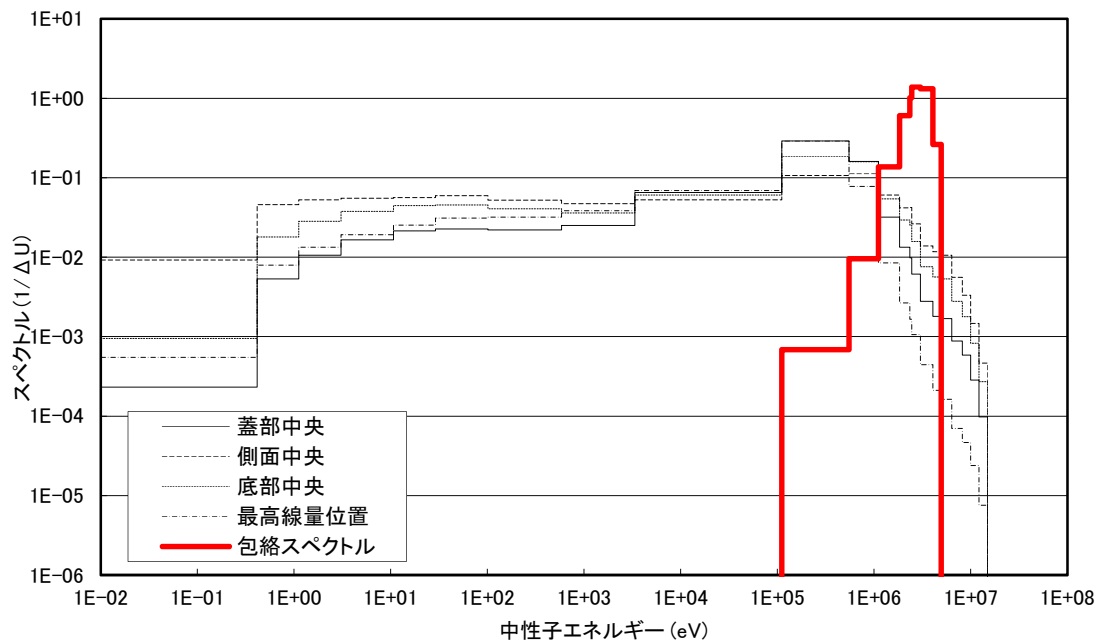


添付 1-1 図 ガンマ線スペクトル分布図

(ガンマ線)



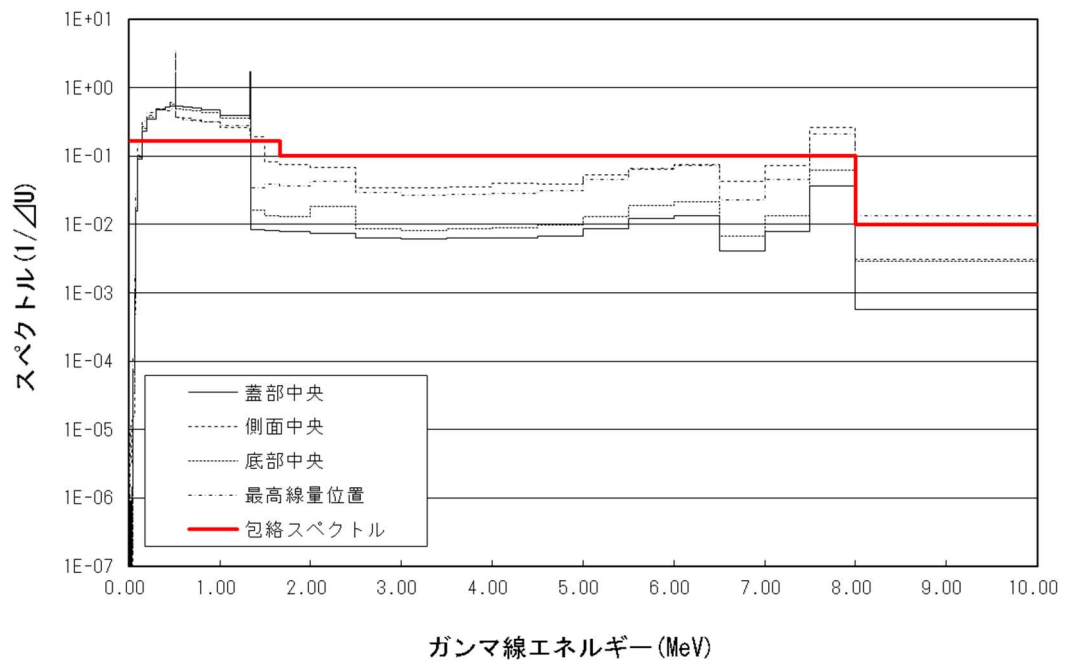
(中性子)



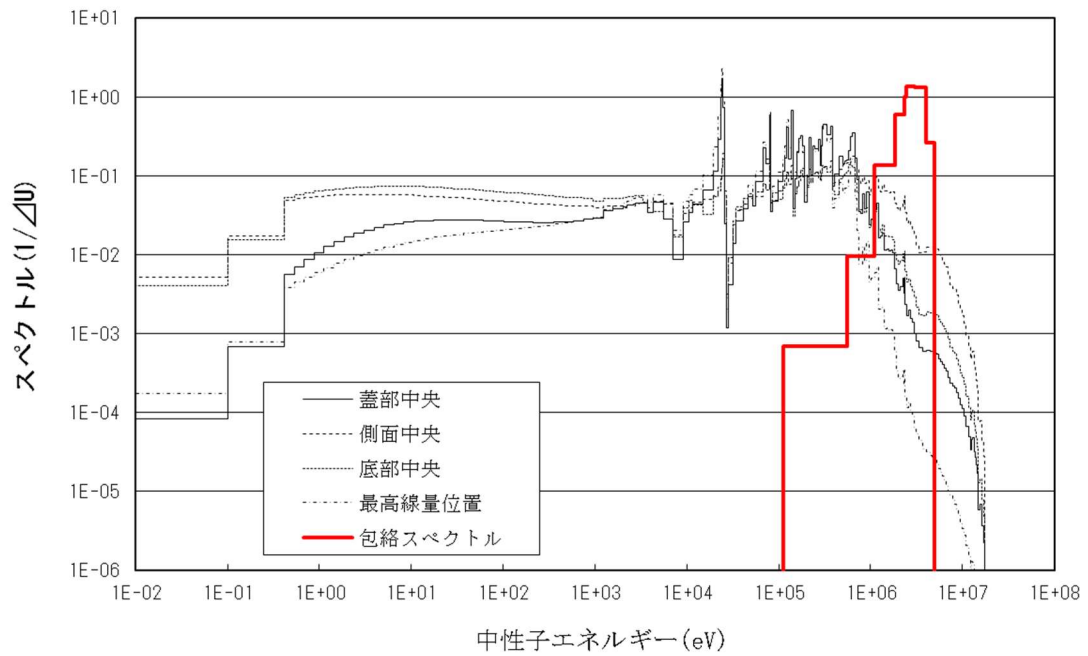
添付 1-2 図(1) 包絡スペクトル, 設計スペクトル分布図
(BWR用大型キャスク (タイプ2A))

4条(建屋)一別添1-7

(ガンマ線)

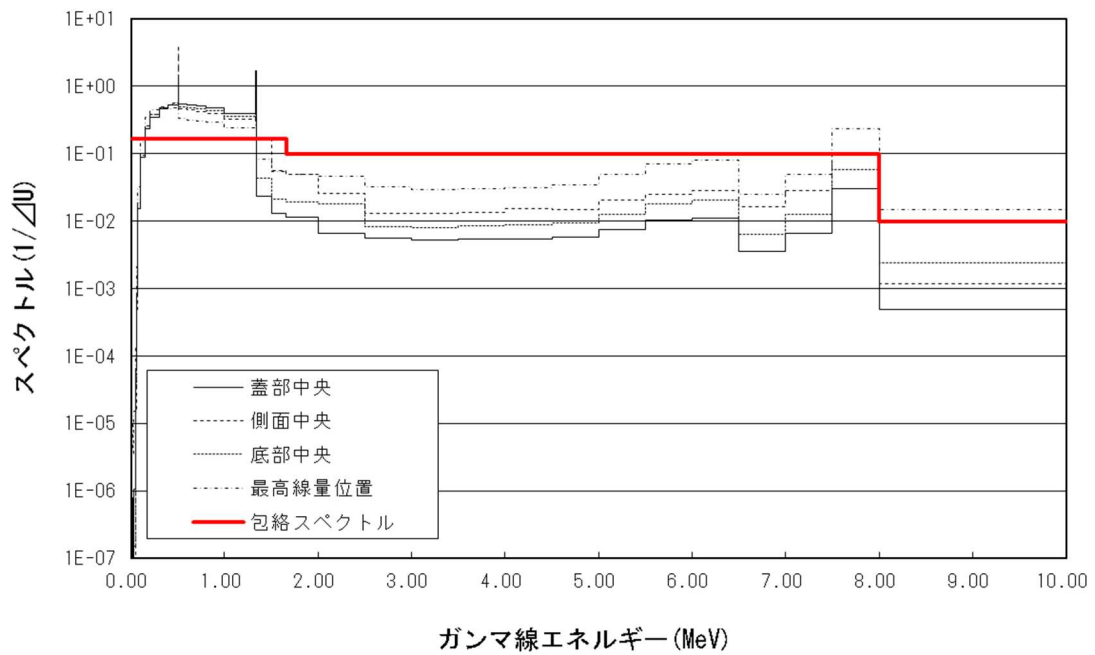


(中性子)

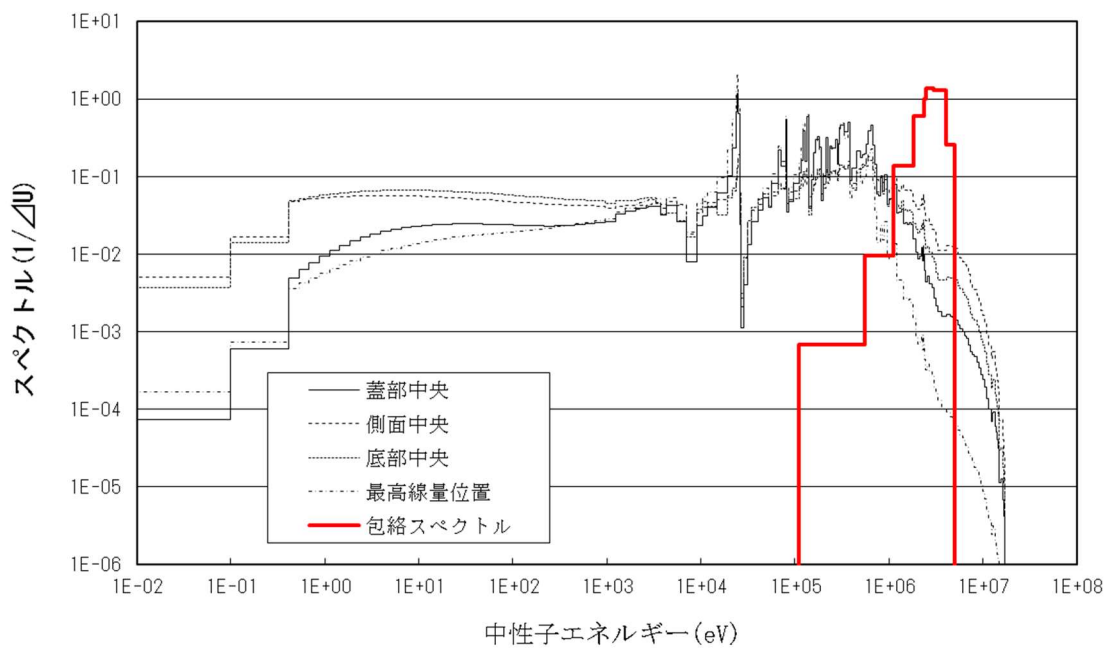


添付 1-2 図(2) 包絡スペクトル, 設計スペクトル分布図
(BWR用中型キャスク (タイプ2))

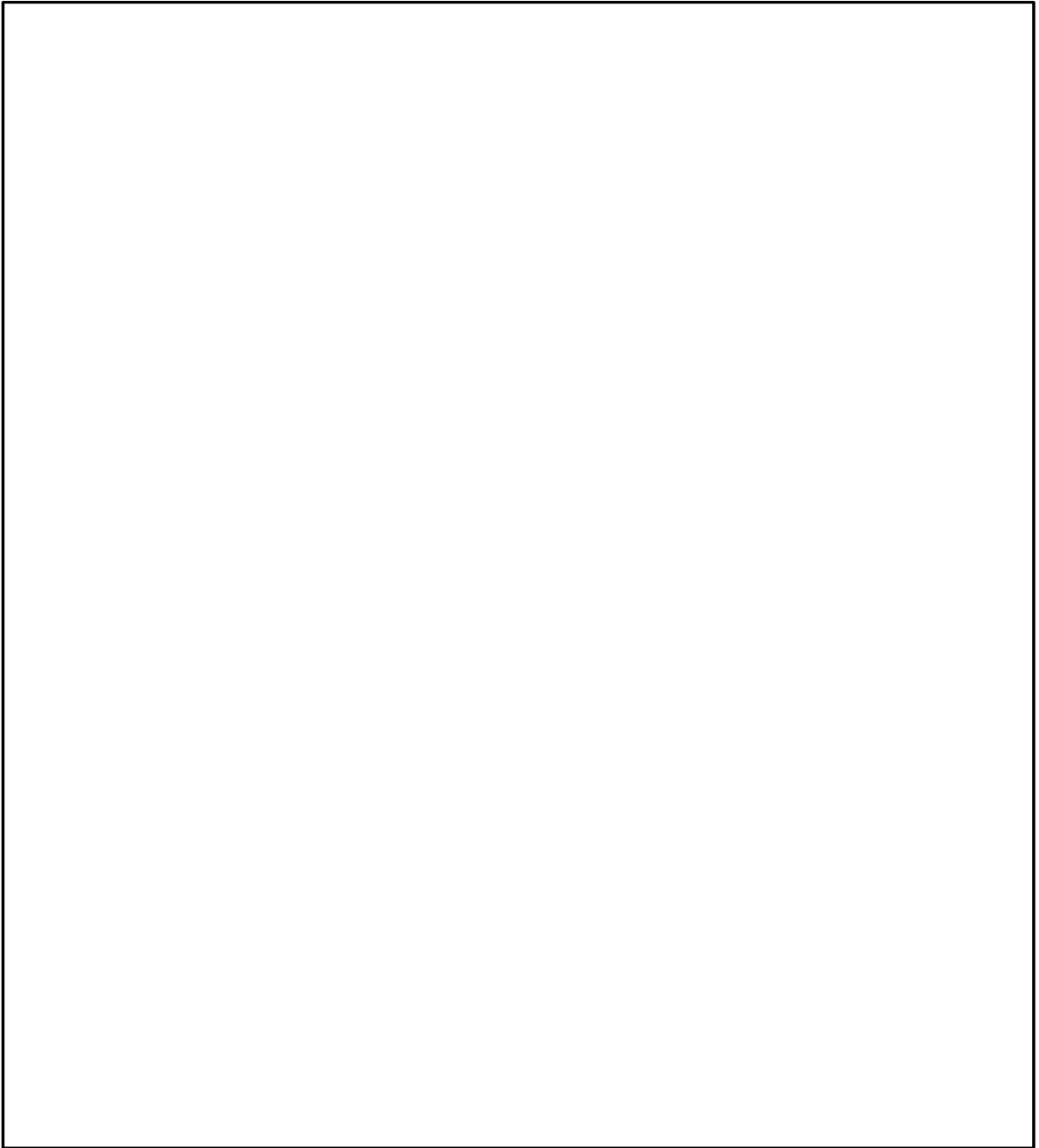
(ガンマ線)



(中性子)



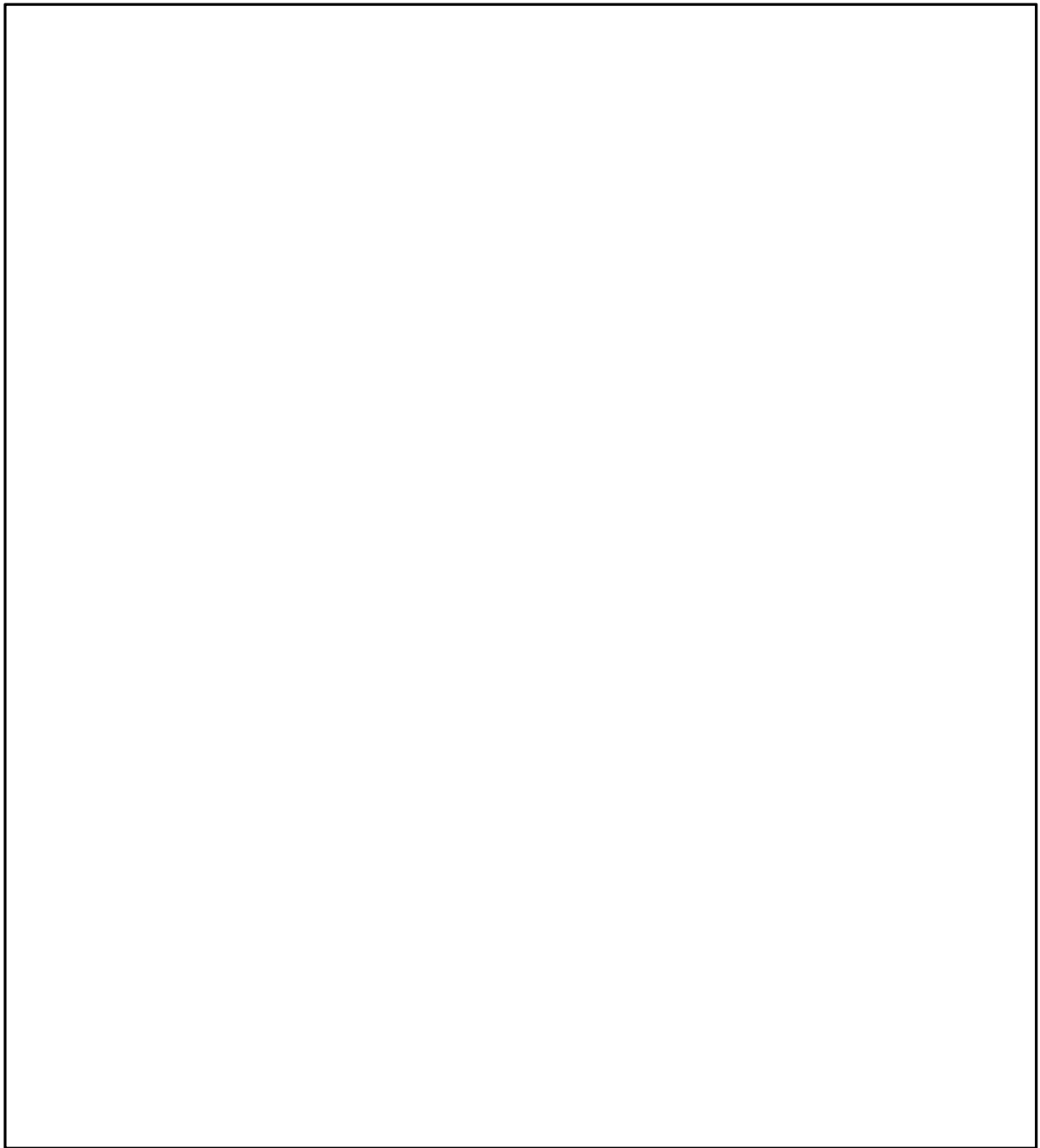
添付 1-2 図(3) 包絡スペクトル, 設計スペクトル分布図
(PWR用キャスク (タイプ1))



添付 1-3 図 コンクリート中のガンマ線の実効線量率減衰比

- (注)・コンクリート表面から厚さ 5cm 程度の範囲では、ガンマ線の後方散乱の影響により、線量が増加する。
- ・コンクリート表面から厚さ 5cm 程度の範囲では各カスクの線量は包絡スペクトルをわずかに上回っているが、遮蔽計算で用いているコンクリート厚さ 40cm 以上においては包絡スペクトルの方が線量が高い。

枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。



添付 1-4 図 コンクリート中の中性子線の実効線量率減衰比

(注)・コンクリート表面から厚さ 5cm 程度の範囲では、中性子の後方散乱の影響により、線量が増加する。

- ・コンクリート表面から厚さ 5cm 程度の範囲では各キャスクの線量は包絡スペクトルをわずかに上回っているが、遮蔽計算で用いているコンクリート厚さ 40cm 以上においては包絡スペクトルの方が線量が高い。

枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。

金属キャスクの線量当量率について

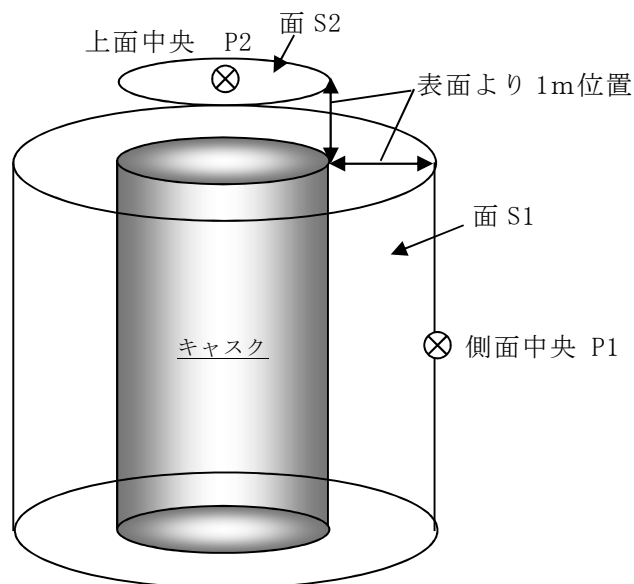
1. 基本的考え方

本施設にて使用する金属キャスクは、全て輸送貯蔵兼用の容器であり、輸送時の線量当量率の基準を満足する。よって、本評価では、本施設にて使用する全ての金属キャスクの線量条件を包絡するよう、金属キャスクの線量当量率を表面から 1 m の位置において $100 \mu\text{Sv/h}$ となるように規格化する。

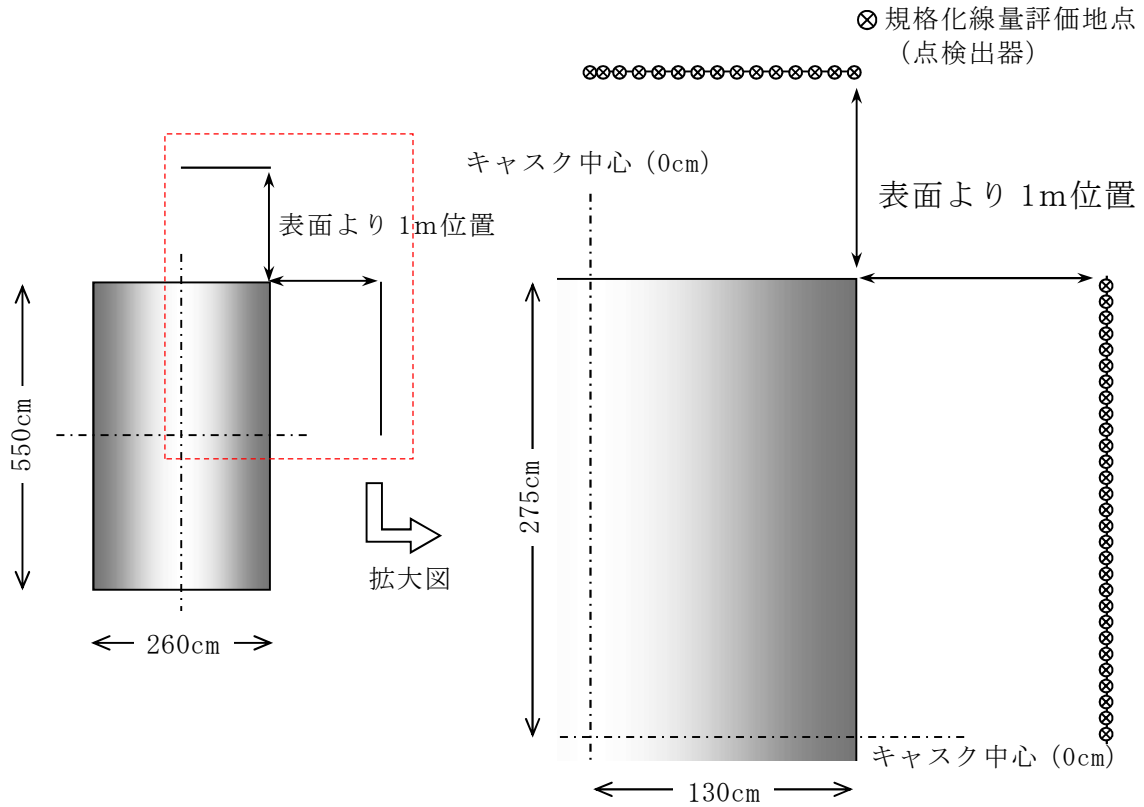
2. 線量当量率の規格化の方法

金属キャスクの線量当量率は、添付 2-1 図に示すとおり、金属キャスク側面より 1m 位置における円筒側面を S1、キャスク上面より 1m 位置における円盤を S2（下面は上面と対称）とし、各面の平均が $100 \mu\text{Sv/h}$ となるように規格化（以下「規格化線量」という。）する。この規格化線量は、基準値である $100 \mu\text{Sv/h}$ に比べ側面中央点 P1 で約 10%、上面中央点 P2 で約 20% 保守側の設定となっている。

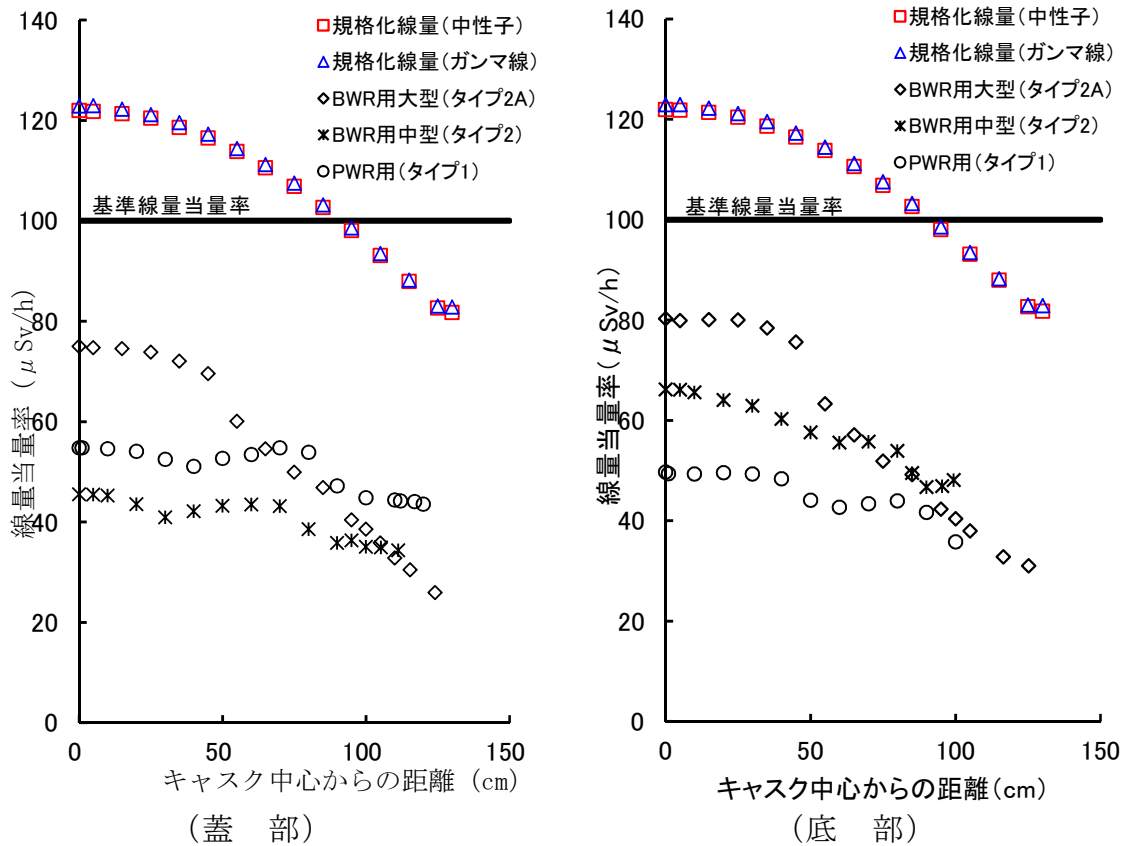
本評価の線源条件として設定している金属キャスクの規格化線量の分布と、本施設で使用する金属キャスクの線量当量率の分布を添付 2-2 図に示す。



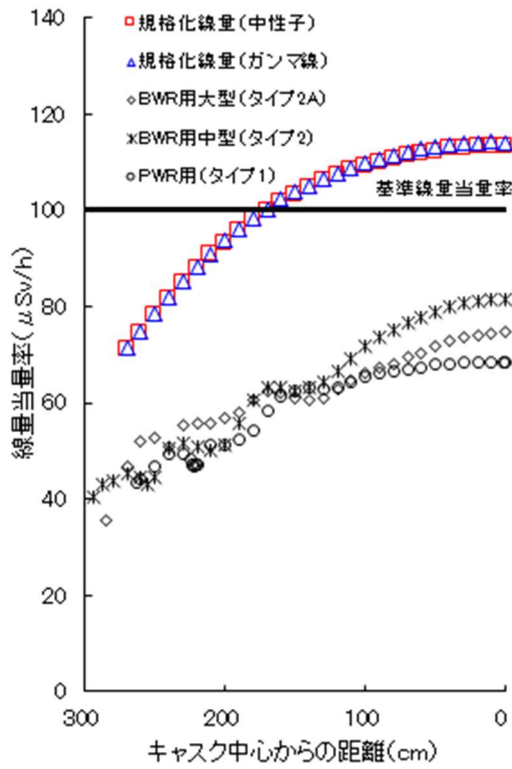
添付 2-1 図 キャスク表面線量の規格化のイメージ



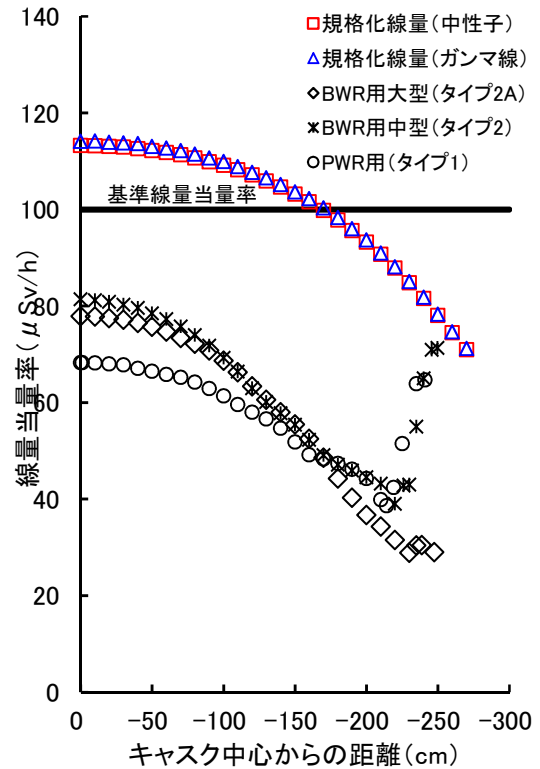
(規格化線量の計算位置)



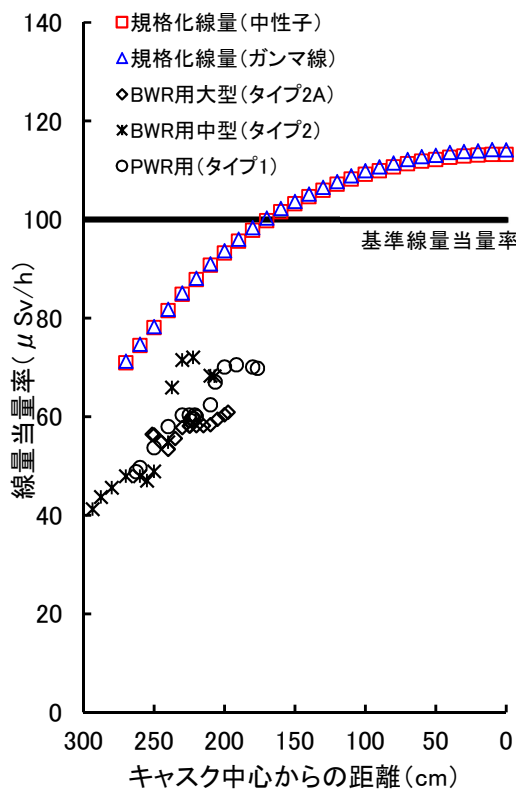
添付 2-2 図(1) 金属キャスク表面から 1m位置での線量当量率分布



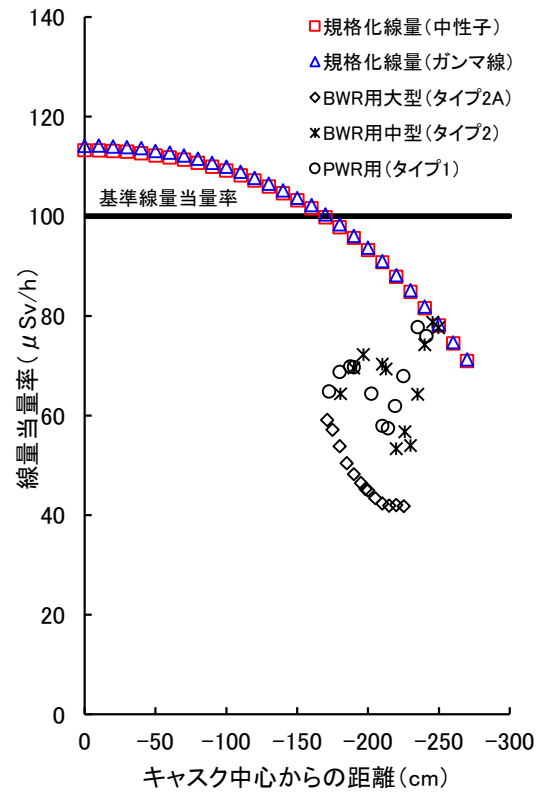
(側部上端)



(側部下端)



(上部トリニオン部)



(下部トリニオン部)

添付 2-2 図(2) 金属キャスク表面から 1 m 位置での線量当量率分布

金属キャスク線源条件の保守性について

金属キャスクの線源条件の裕度を確認するため、過去に検討した金属キャスク（以下「模擬キャスク」という。）の設計から得られたエネルギースペクトル及び線量当量率を用いて、敷地境界外における一般公衆の線量評価を実施した。

なお、本評価は平成 19 年 3 月に行った事業許可申請の前に行ったものであり、評価モデルは現行のモデルと異なるものである。

1. 評価条件

(1) 評価ケース、条件

包絡スペクトルの裕度の確認及び線源条件全体の裕度の確認を行うため、模擬キャスク設計（BWR（STEP I）用、69 体収納）を用いて、以下の 3 ケースの評価を行う。

（評価ケース）

- ・ケース A：現行評価と同一条件
- ・ケース B：模擬キャスクの設計から得られた表面エネルギースペクトルを使用（スペクトル以外は、現行評価と同一条件）
- ・ケース C：模擬キャスクの設計から得られた表面エネルギースペクトルを使用，線量当量率分布を考慮

解析コード，ライブラリ，評価モデル構造材組成等は，現行評価と同一とする。

評価ケースそれぞれの評価条件を添付 3-1 表に，模擬キャスクの評価モデルを添付 3-1 図，模擬キャスク設計から得られた表面エネルギースペクトルのコンクリート中における実効線量率の減衰割合を添付 3-2 図，添付 3-3 図に示す。また，貯蔵建屋モデルを添付 3-4 図，添付 3-5 図に示す。

(2) 計算地点

計算地点は，貯蔵建屋貯蔵区域を中心として直角東方向 190m（現行評価では 170m），直角北方向 230m，直角南方向 240m の 3 地点とする。

線量の計算地点を添付 3-6 図に示す。

2. 評価結果

評価ケースそれぞれの評価結果を添付 3-2 表に、評価結果の比較を添付 3-3 表に示す。ケース A とケース B との評価結果の比較により、包絡スペクトルは、中性子の場合で 1.2~1.4 倍、ガンマ線の場合で 1.7~2.2 倍程度保守側の評価結果を得ることができることを確認した。また、ケース A（中性子 100%）とケース C の比較により、金属キャスクの線源条件は、模擬キャスクに比べ、8 倍~13 倍程度保守側の評価結果を得ることができることを確認した。

以上より、平常時における一般公衆の線量評価に使用している金属キャスクの評価線質、線源強度（表面エネルギースペクトル、線量当量率）は、十分な保守性を有しており、線源条件として妥当なものとする。

添付 3-1 表 評価ケース

	ケース A	ケース B	ケース C
表面エネルギー スペクトル	包絡スペクトル (現行評価と同一)	模擬キャスク設計 から得られたスペ クトル	模擬キャスク設計 から得られたスペ クトル
線量当量率	表面から 1m 位置に おいて $100 \mu\text{Sv/h}$ に 規格化 (現行評価と同一)	表面から 1m 位置 において $100 \mu\text{Sv/h}$ に規格化 (現行評価と同一)	模擬キャスク設計 から得られた線量 当量率分布を考慮
キャスク モデル	$\phi 2.6\text{m} \times 5.5\text{m}$ (現行評価と同一)	$\phi 2.6\text{m} \times 5.5\text{m}$ (現行評価と同一)	$\phi 2.512\text{m} \times 5.389\text{m}$ (模擬キャスク寸 法を使用)

添付 3-2 表(1) ケースAの評価結果

評価位置	線源	評価線質	バルク線量 ($\mu\text{Sv/y}$)		ストリーミング線量($\mu\text{Sv/y}$)				小計 ¹⁾ ($\mu\text{Sv/y}$)	合計 ¹⁾ ($\mu\text{Sv/y}$)
					給気口		排気口			
			平均値	FSD	平均値	FSD	平均値	FSD		
貯蔵区域から 直角東方向 (190m)	中性子100%	中性子	6.5	0.0450	4.0	0.0424	12.0	0.0523	22.5	25.0
		2次ガンマ線	1.0	0.0310	0.6	0.0646	0.9	0.0748	2.5	
	ガンマ線100%	ガンマ線	5.4	0.0410	1.0	0.0407	0.3	0.0777	6.7	6.7
貯蔵区域から 直角北方向 (230m)	中性子100%	中性子	3.3	0.0418	0.8	0.0758	4.9	0.0413	8.9	9.4
		2次ガンマ線	0.3	0.0450	0.04	0.0896	0.2	0.0761	0.5	
	ガンマ線100%	ガンマ線	0.8	0.0370	0.01	0.0501	0.2	0.0717	0.9	0.9
貯蔵区域から 直角南方向 (240m)	中性子100%	中性子	5.6	0.0382	0.7	0.0794	4.8	0.0752	10.9	12.5
		2次ガンマ線	1.4	0.0179	0.03	0.0490	0.3	0.0438	1.7	
	ガンマ線100%	ガンマ線	7.6	0.0259	0.01	0.0409	0.2	0.0437	7.7	7.7

1) 小計, 合計値は丸め誤差により表数値合計と一致しない場合がある

(注) 本評価は平成19年3月に行った事業許可申請の前に実施したものであり, 評価モデルは現行のモデルと異なるものである。

添付 3-2 表(2) ケースBの評価結果

評価位置	線源	評価線質	バルク線量 ($\mu\text{Sv/y}$)		ストリーミング線量($\mu\text{Sv/y}$)				小計 ¹⁾ ($\mu\text{Sv/y}$)	合計 ¹⁾ ($\mu\text{Sv/y}$)
					給気口		排気口			
			平均値	FSD	平均値	FSD	平均値	FSD		
貯蔵区域から 直角東方向 (190m)	中性子100%	中性子	2.0	0.0672	3.3	0.0882	9.6	0.0903	14.9	20.1
		2次ガンマ線	1.6	0.0421	1.3	0.0598	2.3	0.0525	5.1	
	ガンマ線100%	ガンマ線	2.4	0.0475	0.4	0.0595	0.3	0.0378	3.2	3.2
貯蔵区域から 直角北方向 (230m)	中性子100%	中性子	0.9	0.0534	0.6	0.0860	3.9	0.0975	5.4	6.3
		2次ガンマ線	0.4	0.0507	0.1	0.1665	0.4	0.0771	0.9	
	ガンマ線100%	ガンマ線	0.3	0.0411	0.01	0.0594	0.1	0.0754	0.5	0.5
貯蔵区域から 直角南方向 (240m)	中性子100%	中性子	1.7	0.0471	0.6	0.0952	4.0	0.0911	6.2	9.3
		2次ガンマ線	2.5	0.0206	0.09	0.1278	0.5	0.0479	3.1	
	ガンマ線100%	ガンマ線	3.3	0.0211	0.01	0.0660	0.1	0.0576	3.4	3.4

1) 小計, 合計値は丸め誤差により表数値合計と一致しない場合がある

(注) 本評価は平成19年3月に行った事業許可申請の前に実施したものであり, 評価モデルは現行のモデルと異なるものである。

添付 3-2 表(3) ケースCの評価結果

評価位置	線源	評価線質	バルク線量 ($\mu\text{Sv/y}$)		ストリーミング線量($\mu\text{Sv/y}$)				小計 ¹⁾ ($\mu\text{Sv/y}$)	合計 ¹⁾ ($\mu\text{Sv/y}$)
			平均値	FSD	給気口		排気口			
					平均値	FSD	平均値	FSD		
貯蔵区域から 直角東方向 (190m)	中性子	中性子	0.1	0.0875	0.4	0.0966	0.9	0.0811	1.4	2.8
		2次ガンマ線	0.2	0.0132	0.2	0.0479	0.4	0.0657	0.8	
	ガンマ線	ガンマ線	0.5	0.0105	0.05	0.0285	0.07	0.0340	0.6	
貯蔵区域から 直角北方向 (230m)	中性子	中性子	0.03	0.0646	0.09	0.0874	0.4	0.0656	0.5	0.7
		2次ガンマ線	0.04	0.0545	0.02	0.0808	0.07	0.0770	0.1	
	ガンマ線	ガンマ線	0.04	0.0325	0.003	0.0241	0.02	0.0426	0.06	
貯蔵区域から 直角南方向 (240m)	中性子	中性子	0.09	0.0742	0.08	0.0583	0.4	0.0698	0.5	1.5
		2次ガンマ線	0.3	0.0164	0.01	0.0382	0.08	0.0973	0.4	
	ガンマ線	ガンマ線	0.5	0.0074	0.003	0.0292	0.02	0.0272	0.6	

1) 小計, 合計値は丸め誤差により表数値合計と一致しない場合がある

(注) 本評価は平成19年3月に行った事業許可申請の前に実施したものであり, 評価モデルは現行のモデルと異なるものである。

添付 3-3 表(1) 評価結果の比較 (ケースA/ケースB)

評価位置	線源	評価線質	バルク線量比		ストリーミング線量比				合計線量比	
			各線質	合計	給気口		排気口		各線質	合計
					各線質	合計	各線質	合計		
貯蔵区域から 直角東方向 (190m)	中性子100%	中性子	3.31	2.11	1.21	1.01	1.25	1.09	1.51	1.25
		2次ガンマ線	0.61		0.49		0.41		0.49	
	ガンマ線100%	ガンマ線	2.20		2.33		0.90		2.08	
貯蔵区域から 直角北方向 (230m)	中性子100%	中性子	3.48	2.76	1.39	1.23	1.24	1.16	1.65	1.49
		2次ガンマ線	0.81		0.38		0.39		0.56	
	ガンマ線100%	ガンマ線	2.21		1.09		0.76		1.76	
貯蔵区域から 直角南方向 (240m)	中性子100%	中性子	3.33	1.68	1.05	0.96	1.18	1.09	1.74	1.34
		2次ガンマ線	0.57		0.35		0.42		0.53	
	ガンマ線100%	ガンマ線	2.30		1.09		0.94		2.25	

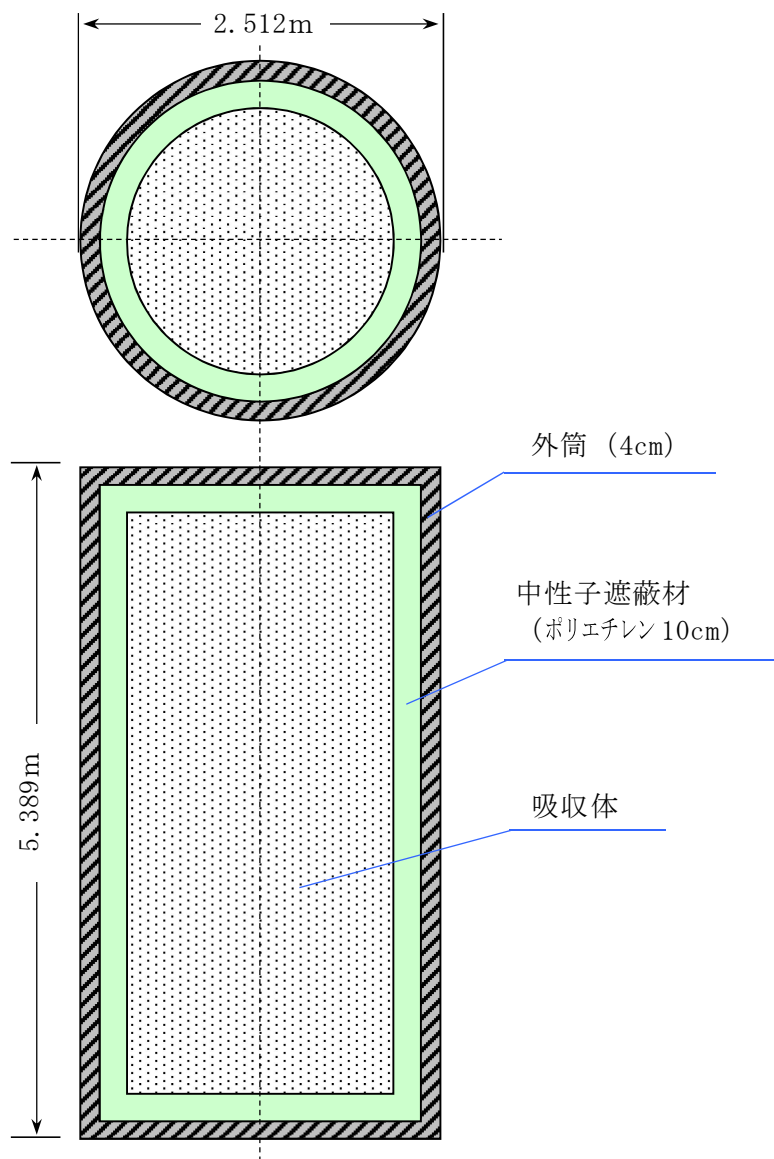
(注) 本評価は平成19年3月に行った事業許可申請の前に実施したものであり、評価モデルは現行のモデルと異なるものである。

添付 3-3 表(2) 評価結果の比較 (ケース A / ケース C)

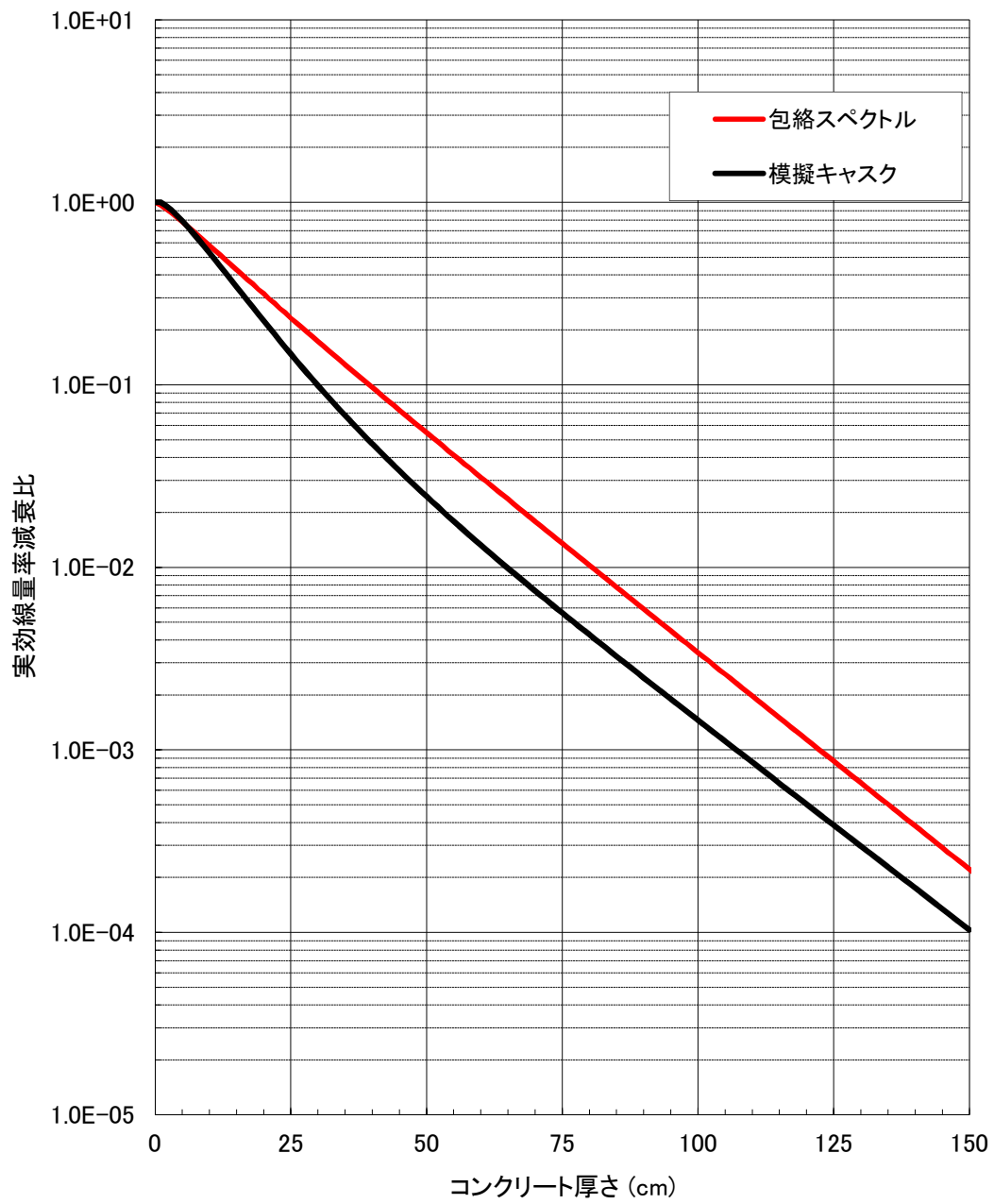
評価位置	バルク線量比	ストリーミング線量比		合計線量比
		給気口	排気口	
貯蔵区域から 直角東方向 (190m)	9.1	6.7	10.2	9.0
貯蔵区域から 直角北方向 (230m)	32.2	7.3	11.1	13.9
貯蔵区域から 直角南方向 (240m)	7.3	6.9	10.4	8.3

ケース A (中性子 100%の結果), ケース C (中性子+ガンマ線の合計値)

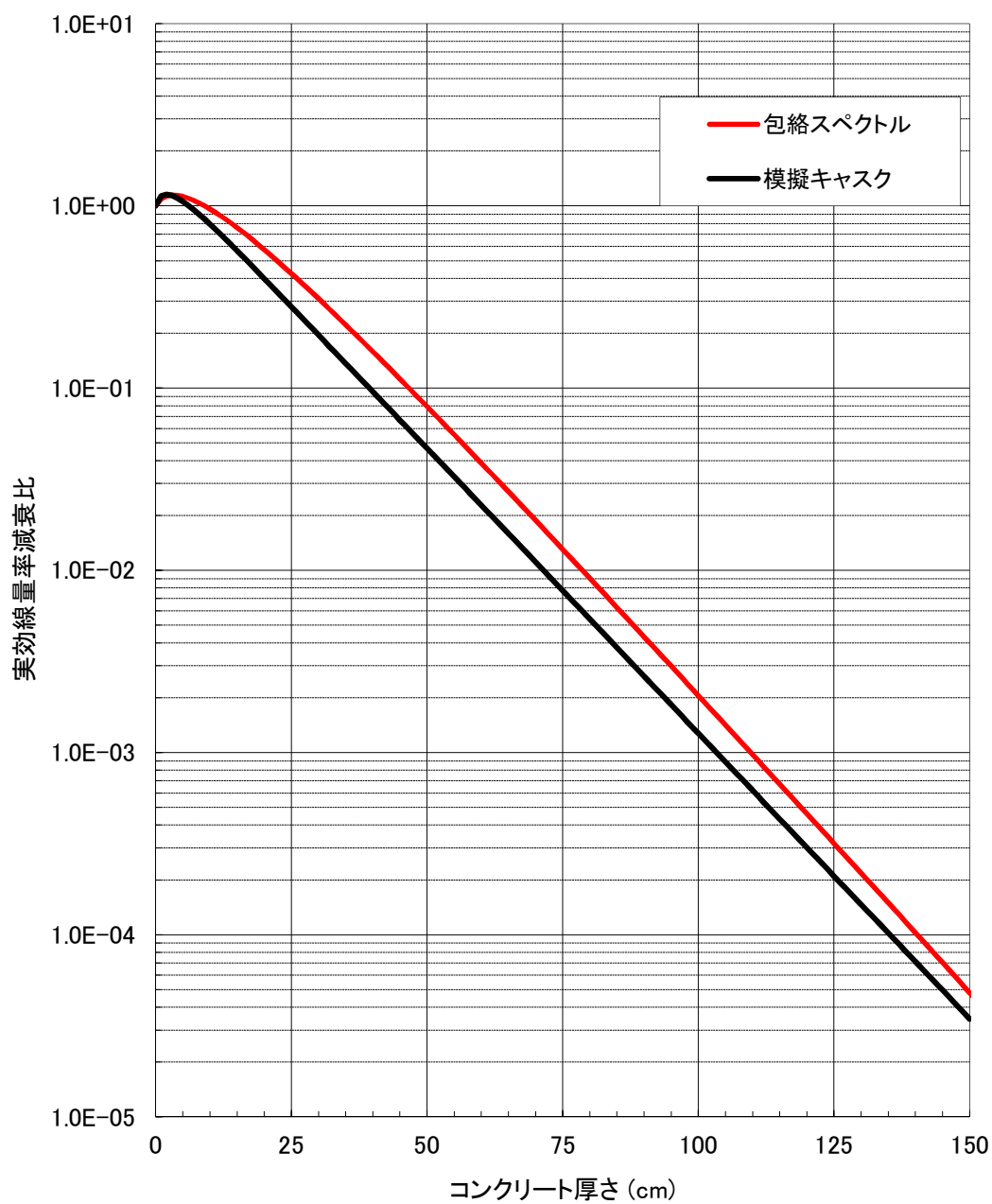
(注) 本評価は平成 19 年 3 月に行った事業許可申請の前に実施したものであり,
評価モデルは現行のモデルと異なるものである。



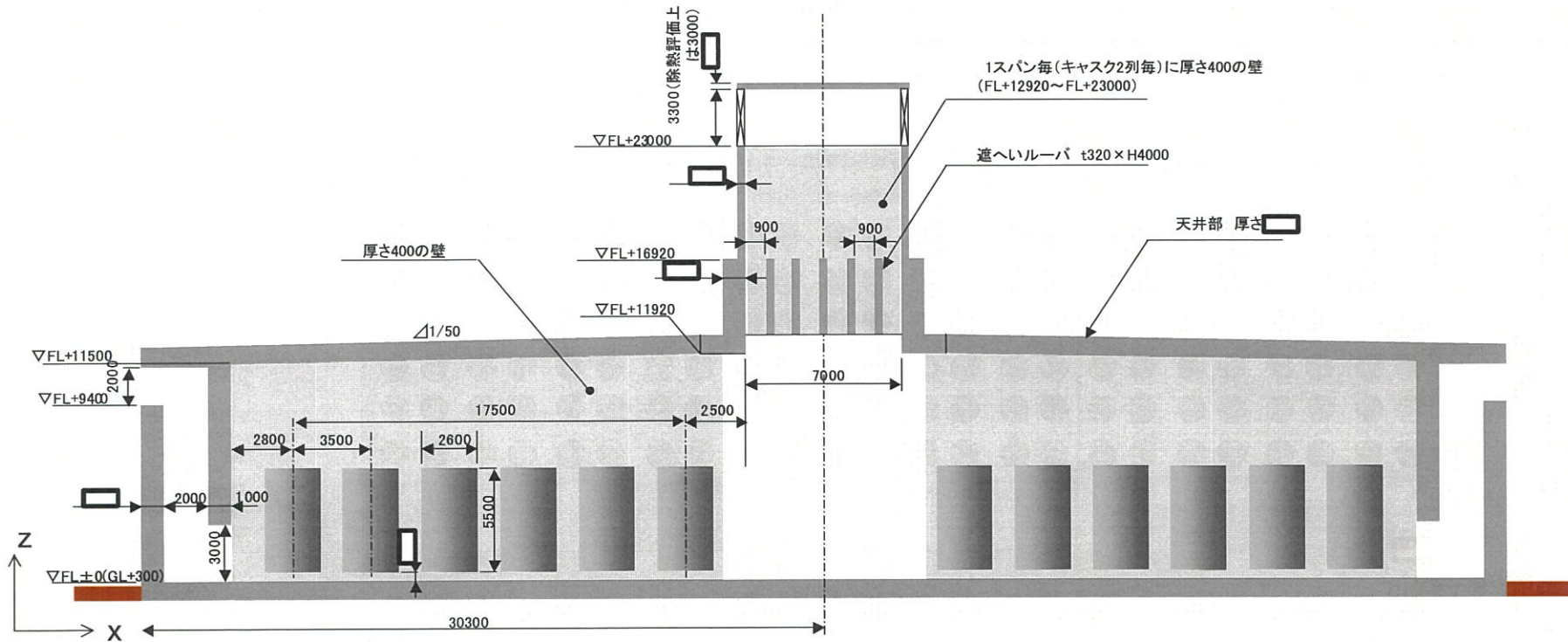
添付 3-1 図 模擬キャスクモデル (ケース C の評価で使用)



添付 3-2 図 コンクリート中の線量減衰割合 (ガンマ線)



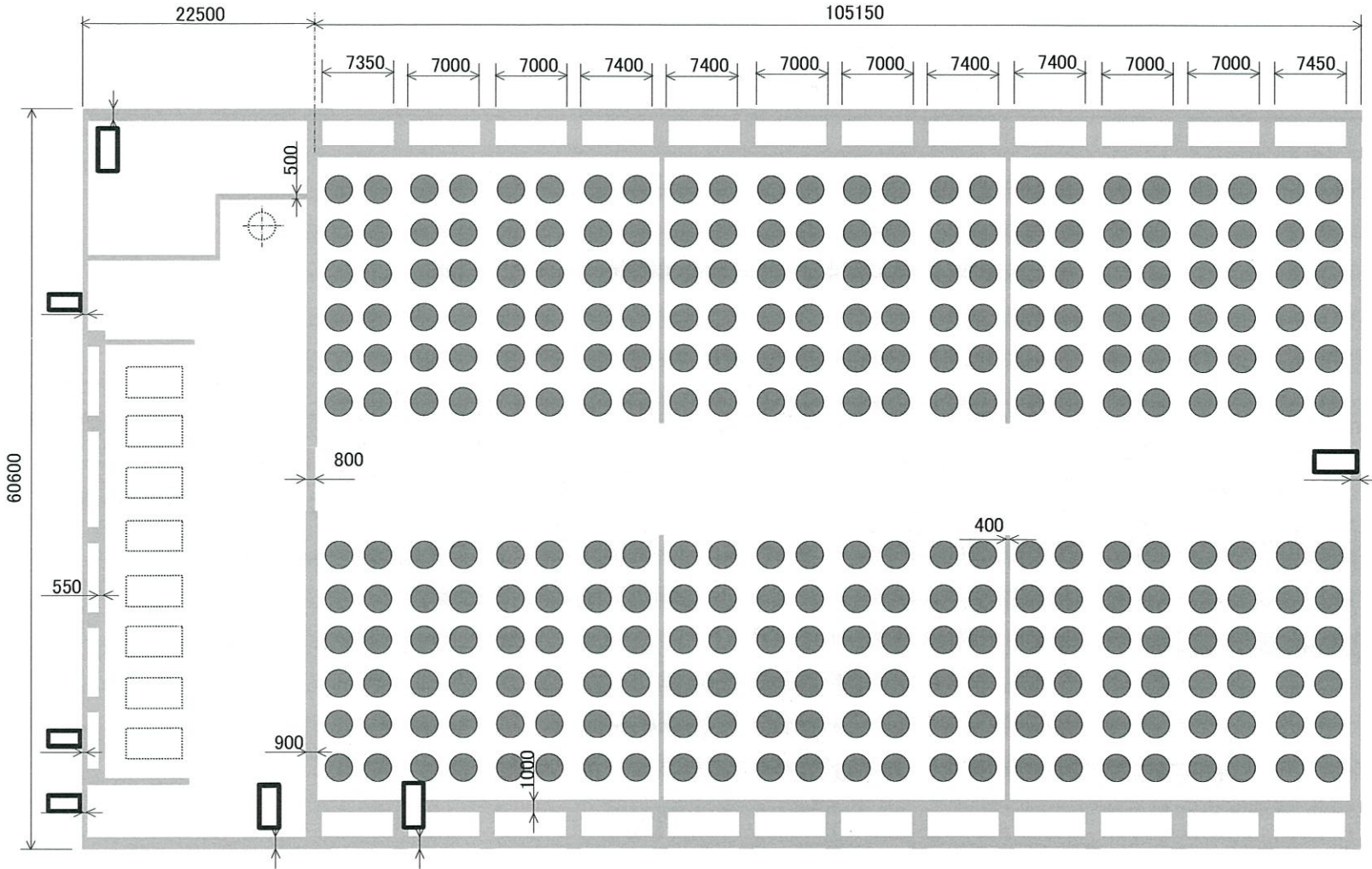
添付 3-3 図 コンクリート中の線量減衰割合 (中性子)



添付 3-4 図 貯蔵建屋モデル (貯蔵区域立面図)

枠囲みの内容は防護上の観点等から公開できません。

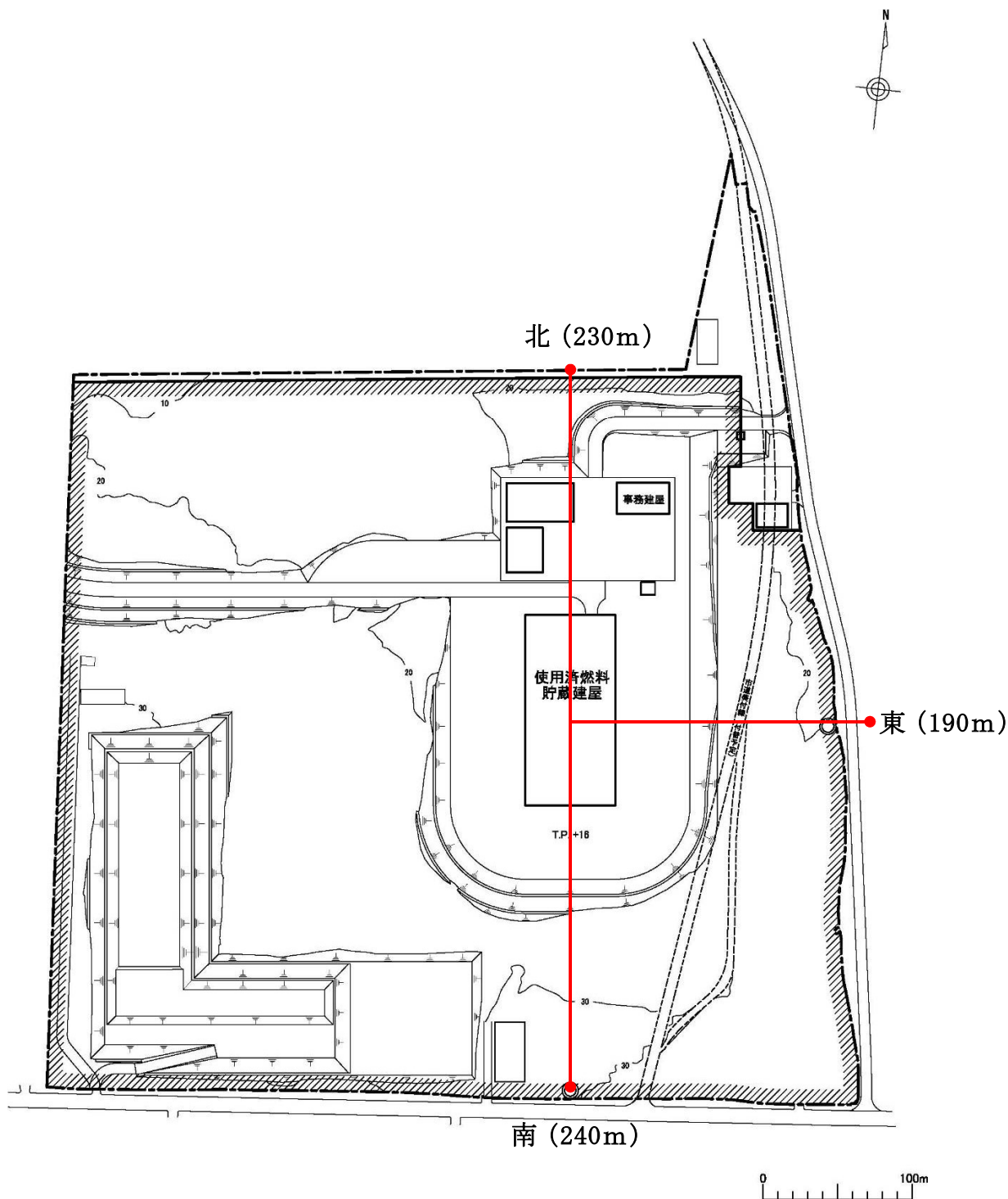
(注) 本評価は平成 19 年 3 月に行った事業許可申請の前に実施したものであり、評価モデルは現行のモデルと異なるものである。



枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。

添付 3-5 図 貯蔵建屋モデル (平面図)

(注) 本評価は平成 19 年 3 月に行った事業許可申請の前に実施したものであり、評価モデルは現行のモデルと異なるものである。



添付 3-6 図 線量の計算地点図

(注) 本評価は平成 19 年 3 月に行った事業許可申請の前に実施したものであり、評価モデルは現行のモデルと異なるものである。

作業線量想定について

1. 放射線業務従事者に対する遮蔽等に関する設計方針

貯蔵建屋は、貯蔵区域、受入れ区域、付帯区域の3つの区域に分けられる。

金属キャスクが仮置きされていない状態の受入れ区域における雰囲気線量は、貯蔵区域に配置されている金属キャスクからの影響を受けることとなる。そこで受入れ区域と貯蔵区域の間に仕切壁（コンクリート厚さ1 m）、遮蔽扉（金属キャスク搬出入口）、迷路（作業員の出入口）等を設けることにより、貯蔵区域に配置されている金属キャスクからの影響を低減して、受入れ区域における雰囲気線量が低くなるように設計する。これにより、受入れ区域に設置されている金属キャスク取扱い設備や放射線監視設備等の保守・点検作業を実施する際の作業員（放射線業務従事者）が適切に防護されると考える。

受入れ作業時の受入れ区域、貯蔵区域における雰囲気線量は、各々の区域に仮置き、または配置されている金属キャスクからの影響が支配的になるため、作業員を防護するためには区域内に遮蔽等を設ける必要がある。しかし金属キャスクの除熱性能維持の観点から、建屋内の遮蔽設計として特別な考慮はせず、入域時間制限や一時的遮蔽体の設置等、所要の防護処置を講ずる。また、必要に応じて事前に作業訓練を行うなど作業時間の短縮を図ることにより、放射線業務従事者の線量を法令で定められている線量限度（100mSv/5年、50mSv/年）を超えないようにすることはもちろんのこと、合理的に達成できる限り低減する。

2. 遮蔽基準について

貯蔵建屋内では、放射線業務従事者の関係各場所への立入頻度、滞在時間及び金属キャスクの配置を考慮した上で、遮蔽設計の基準となる線量率を建屋内の区分に応じて以下のように定め、それを満足するように設計する。（別添4-1表、別添4-1図参照）

別添 4-1 表 外部放射線に係る設計基準

区 分		外部放射線に係る 設計基準	区 域
管理区域外	A	0.0026mSv/h 以下	付帯区域
管理区域内	B	0.01mSv/h 未満	受入れ区域 貯蔵区域
	C	0.01mSv/h 以上	

※ 受入れ区域は、金属キャスクが仮置きされていない場合は区分 B となるように設計

【遮蔽区分の考え方】

区分 A：付帯区域（監視盤室，チェックポイント等）

滞在時間：500 時間/3 月間（管理区域境界の作業者）

$$1.3 \text{ (mSv)} / 500 \text{ (時間)} = 0.0026 \text{ mSv/h}$$

区分 B：金属キャスクが仮置きされていない受入れ区域

滞在時間：130 時間/3 月間（2 時間/日×65 日）

$$1.3 \text{ (mSv)} / 130 \text{ (時間)} = 0.01 \text{ mSv/h}$$

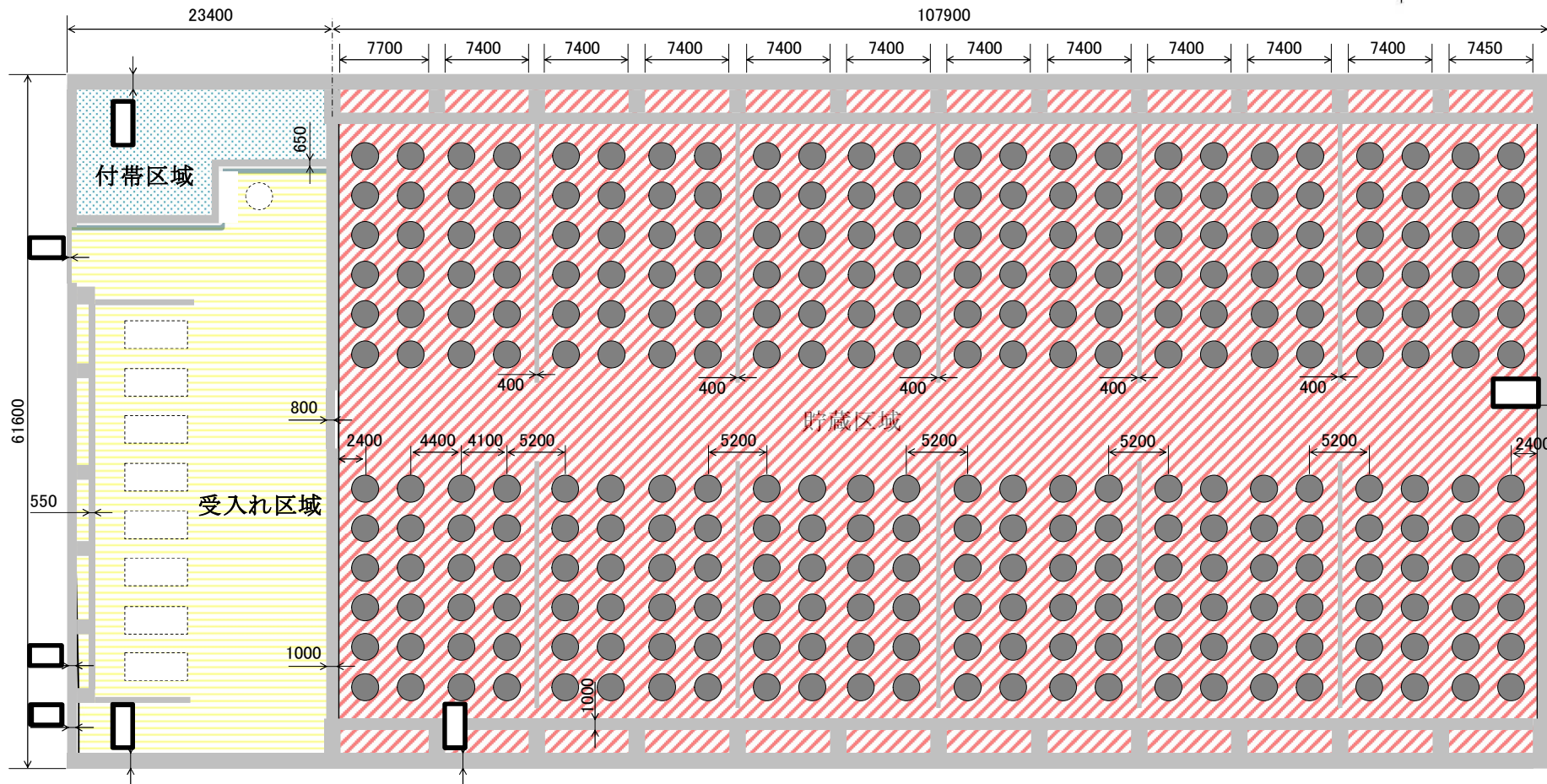
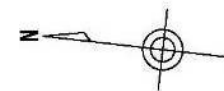
〔 機器点検等の作業時における放射線業務従事者の被ばく低減の観点から，管理区域外と同様の考え方で基準を設定。 〕

区分 C：受入れ区域，貯蔵区域




〔 金属キャスクの除熱機能維持の観点から，建屋内の遮蔽設計として特別な考慮はせず，放射線管理設備及び入域時間制限等の運用により，放射線業務従事者の線量を管理。 〕




※ 外部放射線に係る線量が1.3mSv/3月間を超える区域を管理区域として設定する。

別添 4-1 図 貯蔵建屋内の遮蔽設計区分



枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。

-  : 管理区域外 区分 A (0.0026mSv/h 以下)
-  : 管理区域内 区分 B (0.01mSv/h 未満)
-  : 管理区域内 区分 C (0.01mSv/h 以上)

-  : 金属キャスク (たて置き)
-  : 金属キャスク (受入れ作業時: 横置き)
-  : 金属キャスク (受入れ作業時: たて置き)

3. 線量想定

貯蔵区域内及び受入れ区域内における放射線業務従事者の線量を評価すると、以下のような結果（詳細は添付1参照）となる。

- ・貯蔵区域内作業：

年間滞在時間約 115 時間，雰囲気線量を前述の幾何平均値約 0.22mSv/h として評価すると，個人線量が最大となる作業で約 26mSv/年。

- ・受入れ区域内作業：

金属キャスク仮置き期間中の受入れ区域内の年間滞在時間約 24 時間，雰囲気線量を前述の幾何平均値約 0.03mSv/h として評価すると，個人線量が最大となる作業で約 0.8mSv/年。

- ・受入れ作業

年間 32 基の金属キャスクの受入れを，全て同じチーム（14 人）で行うとすると，個人線量は 33.4mSv/年。

上記の年間線量は，金属キャスク及び貯蔵建屋の遮蔽解析結果を用いて計算したため，大きな保守性を有している。実際の金属キャスク及び各作業時の線量は，解析結果を大きく下回るものと考えられる。

一例であるが，原子力発電所で構内保管されている金属キャスク（約 19 年冷却）では，金属キャスクから 1m の線量当量率は解析値の約 1 / 4 である。

個人線量計による日々の線量管理，一時的な遮蔽の利用，事前の作業訓練などにより，放射線業務従事者の線量を法令で定められている線量限度（100mSv/5 年，50mSv/年）を超えないようにすることは可能と考える。

なお，実際の管理については，保安規定・マニュアルで定める個人の被ばく管理にて行うこととしている。

貯蔵建屋における作業線量想定

1. 作業線量想定

貯蔵建屋における作業線量想定を、以下のケースに分けて行う。

- ・ 貯蔵区域内での作業
- ・ 受入れ区域内での作業
- ・ 金属キャスク搬入作業

2. 貯蔵区域内で作業する放射線業務従事者の線量管理

貯蔵区域（区分C）は、金属キャスクの除熱機能維持の観点から、雰囲気線量低減のための遮蔽は行わないため、金属キャスク付近や、貯蔵区域内の通路部等の雰囲気線量は比較的高い線量率となることが想定される。このため、監視設備の点検・校正や機器メンテナンス等のうち、金属キャスクから離れた位置での作業が可能なものは、受入れ区域等の線量率が低いエリアにて実施し、また、金属キャスク付近での作業は、一時的遮蔽の使用、入域時間制限等により、放射線業務従事者の被ばく線量を法令に定められている線量限度 100mSv/5 年以下、50mSv/年以下とすることはもちろん、合理的に達成可能な限り低くなるように努める。

参考として、放射線業務従事者の線量を法令に定められる線量限度以下に管理することの実現可能性を以下に示す。

(1) 放射線業務従事者の滞在時間

貯蔵区域（288 基貯蔵状態）にて実施する主要な作業、作業時間及び放射線業務従事者の年間滞在時間（想定）を添付 1-1 表に示す。

放射線業務従事者の貯蔵区域内における年間滞在時間は、金属キャスク監視設備等の点検・校正作業によるものが最長であり、放射線業務従事者一人あたり年間 115 時間程度と想定される。

(2) 貯蔵区域内の線量

a. 公衆の線量評価と同一の線源条件（表面から 1m での平均の線量当量率を $100 \mu\text{Sv/h}$ となるように規格化）を設定する。

- ①貯蔵区域中央通路部：約 $2.8 \times 10^2 \mu\text{Sv/h}$ （中性子 100%）
約 $1.3 \times 10^2 \mu\text{Sv/h}$ （ガンマ線 100%）
- ②貯蔵区域中央部：約 $6.0 \times 10^2 \mu\text{Sv/h}$ （中性子 100%）
約 $3.7 \times 10^2 \mu\text{Sv/h}$ （ガンマ線 100%）
- ③貯蔵区域側壁付近：約 $3.2 \times 10^2 \mu\text{Sv/h}$ （中性子 100%）
約 $1.7 \times 10^2 \mu\text{Sv/h}$ （ガンマ線 100%）

b. 金属キャスク遮蔽解析結果を考慮して線源条件を設定

金属キャスクの遮蔽解析結果から得られた線量当量率及び中性子とガンマ線の比率を用いて、前項 a. の評価結果から貯蔵区域内の線量率を算出する。

・貯蔵区域内の評価線量が最大となる金属キャスクの部位と表面から 1m での線量当量率と線質の比率

金属キャスクの部位：BWR 用中型キャスク（タイプ 2） 側部

金属キャスク表面から 1 m での線量当量率： $81.5 \mu\text{Sv/h}$

金属キャスクの線質の比率：中性子 37% ガンマ線 63%

①～③の線量は以下のように補正される。

①' 貯蔵区域中央通路部：約 $1.5 \times 10^2 \mu\text{Sv/h}$

$$\left(\begin{array}{l} \text{中性子} : 8.4 \times 10^1 \mu\text{Sv/h} \quad (280 \times 81.5 / 100 \times 0.37) \\ \text{ガンマ線} : 6.7 \times 10^1 \mu\text{Sv/h} \quad (130 \times 81.5 / 100 \times 0.63) \end{array} \right)$$

②' 貯蔵区域中央部：約 $3.7 \times 10^2 \mu\text{Sv/h}$

$$\left(\begin{array}{l} \text{中性子} : 1.8 \times 10^2 \mu\text{Sv/h} \quad (600 \times 81.5 / 100 \times 0.37) \\ \text{ガンマ線} : 1.9 \times 10^2 \mu\text{Sv/h} \quad (370 \times 81.5 / 100 \times 0.63) \end{array} \right)$$

③' 貯蔵区域側壁付近：約 $1.8 \times 10^2 \mu\text{Sv/h}$

$$\left(\begin{array}{l} \text{中性子} : 9.6 \times 10^1 \mu\text{Sv/h} \quad (320 \times 81.5 / 100 \times 0.37) \\ \text{ガンマ線} : 8.7 \times 10^1 \mu\text{Sv/h} \quad (170 \times 81.5 / 100 \times 0.63) \end{array} \right)$$

場の線量として①' ～ ③' の幾何平均を求める。

貯蔵区域内雰囲気線量： 0.22 (mSv/h)

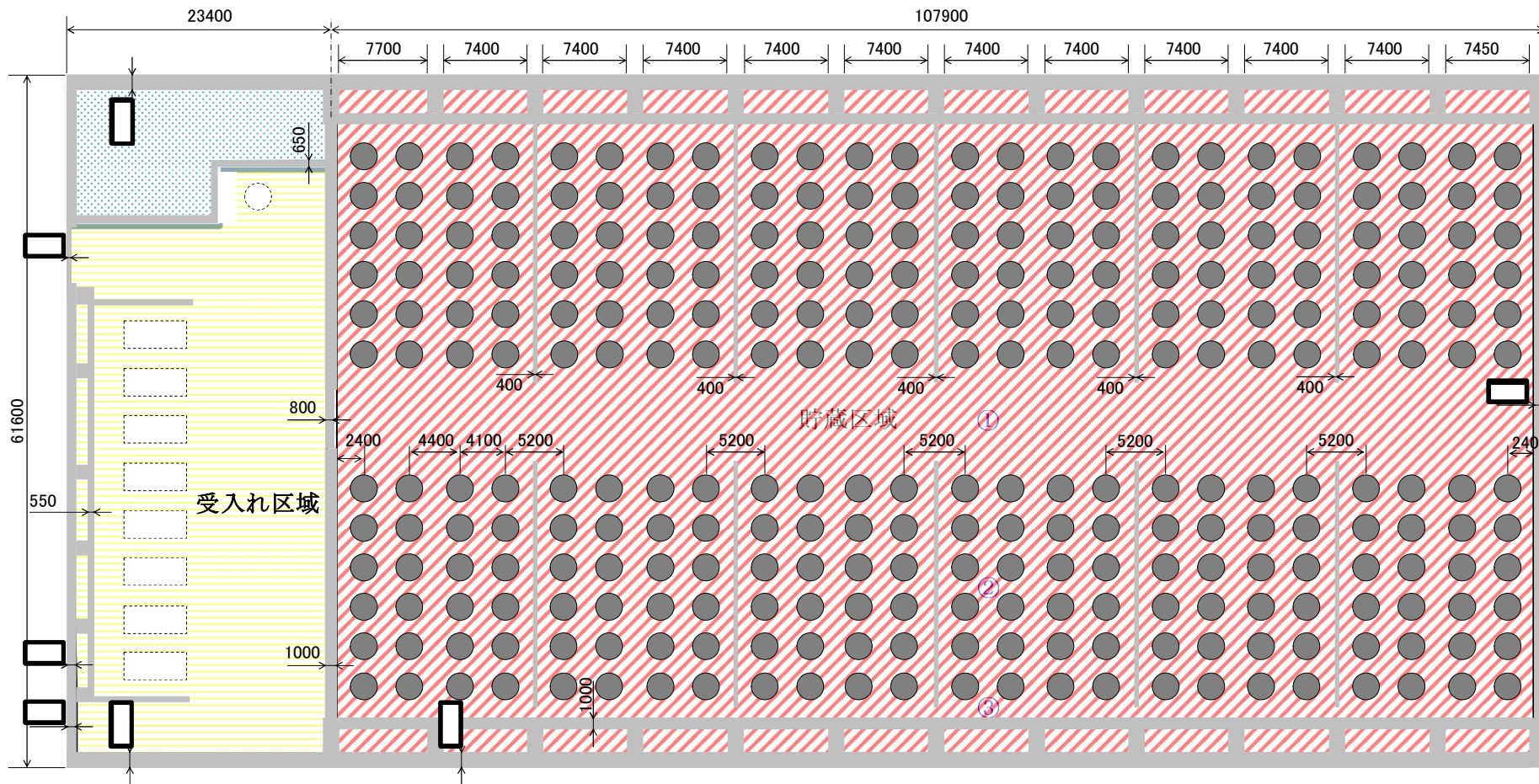
(3) 貯蔵区域内における放射線業務従事者の年間線量

放射線業務従事者の年間線量は、貯蔵区域内の年間滞在時間約 115 時間、雰囲気線量を前述の幾何平均値約 0.22mSv/h として評価すると、約 26mSv/年となる。ただし、上記の年間線量は、金属キャスク及び貯蔵建屋の遮蔽解析結果を用いて計算したため、大きな保守性を有している。実際の金属キャスク及び各作業時の線量は、解析結果を大きく下回るものと考えられること、また、作業方法の合理化、作業中における一時的遮蔽の使用、金属キャスクからの距離を確保、入域時間の制限等、放射線業務従事者の線量が合理的に達成可能な限り低くなるよう、適切な運用管理を行うことにより、放射線業務従事者の年間線量を法令に定められている線量限度 100mSv/5 年、50mSv/年を超えないように管理することは可能と考える。

なお、一例であるが、原子力発電所で構内保管されている金属キャスク（約 19 年冷却）では、金属キャスクから 1m の線量当量率は解析値の約 1 / 4 である。

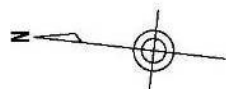
貯蔵建屋内の遮蔽設計区分を添付 1-1 図に示す。また、貯蔵建屋貯蔵区域において想定される主要作業における放射線業務従事者の作業時間を添付 1-1 表に、線量を添付 1-2 表に示す。

添付 1-1 図 貯蔵建屋内の遮蔽設計区分



- : 管理区域外 区分 A (0.0026mSv/h 以下)
- : 管理区域内 区分 B (0.01mSv/h 未満)
- : 管理区域内 区分 C (0.01mSv/h 以上)

- : 金属キャスク (たて置き)
- ①~③ : 貯蔵区域の評価位置



枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。

添付 1-1 表 貯蔵区域（288 基貯蔵状態）内における主要作業及び放射線業務従事者の年間滞在時間（想定）

作業項目	作業概要	実施頻度	作業時間（h）				従事者数（人）及び年間滞在時間（h）		
			作業 1 回あたり		年間		従事者数		年間滞在時間
巡視・点検	金属キャスク，貯蔵架台等の目視点検 給排気口の異常の有無	1 回/日	1.0	5 分/区画×12 区画	245	平日：245h (245 日/年と設定)	4	4 人交代制での対応 (1 人平均 61.3h)	61.3
					120	休祭日：120h	10	10 人交代制での対応 (1 人平均 12h)	12.0
	躯体，扉等の目視点検	1 回/月	1.0	貯蔵建屋全体を 1h と想定	12	1h×12	3	3 人×1 班	12.0
	躯体，扉等の巡視点検	1 回/年	60.0	6h/日×10 日と想定	60	60h	5	5 人×1 班	60.0
	自動火災報知設備点検 消火器点検	1 回/6 月	3.0	3h/回と想定	6	3h×2	3	3 人×1 班	6.0
設備点検・校正	蓋間圧力計点検・校正 表面温度計点検・校正	1 回/年	4.0	4h/基	1,152	4h×288 基	30	3 人×10 班交代制での対応 (1 班平均 115.2h)	115.2
	キャスク，貯蔵架台外観検査，塗装等		2.0	2h/基	576	2h×288 基	15	3 人×5 班交代制での対応 (1 班平均 115.2h)	115.2
	エリアモニタ点検・校正 (検出器の取外し・取付)		72.0	・n(取外・取付) 12h×6 箇所	72	72 h	3	3 人×1 班	72.0
			96.0	・γ(点検校正) 8h×12 箇所	96	96 h	6	3 人×2 班交代制での対応 (1 班平均 48.0h)	48.0
	給排気口温度計点検・校正		8.0	13 箇所/日と想定	16	26 箇所(8h×2)	3	3 人×1 班	16.0
	その他設備点検（通信設備，ITV 等）	6.0	6h/日と想定	6	6h	6	3 人×2 班交代制での対応 (1 班平均 3.0h)	3.0	
放射線測定	集積線量計交換 表面汚染密度測定 空气中放射性物質濃度測定（採取）	1 回/週	1.0	5 分/箇所×3 箇所 1 分/箇所×10 箇所 10 分/箇所×3 箇所	52	1h×52 (52 週/年と設定)	4	2 人×2 班交代制での対応 (1 班平均 26h)	92.0
	線量当量率測定 表面汚染密度測定 空气中放射性物質濃度測定（採取）	1 回/月	5.5	2 分/箇所×60 箇所 1 分/箇所×60 箇所 10 分/箇所×15 箇所	66	5.5h×12			
検査関連	IAEA 査察対応	2 回/年	6.0	一律 6h/日と仮定	48	12h(6h×2)	5	検査対応要員として以下 を想定。 使用済燃料取扱主任者，総 括責任者，責任者，記録者， 担当者	48.0
	定期検査対応	1 回/年				6h			
	保安検査対応	4 回/年				24h(6h×4)			
	核物質防護検査対応	1 回/年				6h			
清掃	通路及び給気口付近の簡易清掃	1 回/週	1.5	30 分/通路 60 分/給気口付近	78	1.5h×52 (52 週/年と設定)	6	3 人×2 班交代制での対応 (1 班平均 39h)	75.0
	貯蔵区域全域の清掃	1 回/月	3.0	30 分/区画×6 区画	36	3h×12			
視察対応	視察者への説明 貯蔵区域内のエスコート	2 回/月	0.2	10 分/回と想定	4.8	0.2h×24	2	説明者 エスコート	4.8

添付 1-2 表 貯蔵区域（288 基貯蔵状態）内作業における放射線業務従事者の年間線量（想定）

作業項目	作業概要	年間作業時間 (h)	従事者数 (人) 及び年間滞在時間 (h)		貯蔵区域 雰囲気線量 (mSv/h)	従事者の年間線量		
			従事者数	年間滞在時間		一人あたり (mSv)	総線量 (人・Sv)	平均 (mSv)
巡視・点検	金属キャスク, 貯蔵架台等の目視点検 給排気口の異常の有無	245	4	4人交代制での対応 (1人平均 61.3h)	0.22	13.5	0.054	15.8
		120	10	10人交代制での対応 (1人平均 12h)		2.7	0.027	
	躯体, 扉等の巡視点検	12	3	3人×1班		2.7	0.008	
	躯体, 扉等の設備点検	60	5	5人×1班		13.2	0.066	
	自動火災報知設備点検 消火器点検	6	3	3人×1班		1.4	0.004	
設備点検・校正	蓋間圧力計点検・校正 表面温度計点検・校正	1,152	30	3人×10班交代制での対応 (1班平均 115.2h)		25.4	0.761	
	キャスク, 貯蔵架台外観検査, 塗装等	576	15	3人×5班交代制での対応 (1班平均 115.2h)		23.4	0.381	
	エリアモニタ点検・校正 (検出器の取付・取外し)	72	3	3人×1班		15.9	0.048	
		96	6	3人×2班交代制での対応 (1班平均 48.0h)		10.6	0.064	
	給排気口温度計点検・校正	16	3	3人×1班		3.6	0.011	
その他設備点検 (通信設備, ITV 等)	6	6	3人×2班交代制での対応 (1班平均 3.0h)	0.7	0.004			
放射線測定	集積線量計交換 表面汚染密度測定 空气中放射性物質濃度測定 (採取)	52	4	2人×2班交代制での対応 (1班平均 26h) 上記4人にて実施	92.0	20.3	0.081	
	線量当量率測定 表面汚染密度測定 空气中放射性物質濃度測定 (採取)	66						
検査関連	IAEA 査察対応	48	5	検査対応要員として以下 を想定。 使用済燃料取扱主任者, 総 括責任者, 責任者, 記録者, 担当者	48.0	10.6	0.053	
	定期検査対応							
	保安検査対応							
	核物質防護検査対応							
清掃	通路及び給気口付近の簡易清掃	78	6	3人×2班交代制での対応 (1班平均 39h) 上記6人にて実施	75.0	16.5	0.099	
	貯蔵区域全域での清掃	36						
視察対応	視察者への説明 貯蔵区域内のエスコート	4.8	2	説明者 エスコート	4.8	1.1	0.003	

3. 受入れ区域内で作業する放射線業務従事者の線量管理

受入れ区域（金属キャスクの仮置きがない時は区分 B、金属キャスクがある場合には区分 C）は、金属キャスクの除熱機能維持の観点から、雰囲気線量低減のための遮蔽は行わないため、金属キャスクが仮置きされている期間は比較的高い雰囲気線量率となることが想定される。このため、金属キャスク付近での作業では、一時的遮蔽の使用、作業時間制限等により、放射線業務従事者の被ばく線量を法令に定められている線量限度 100mSv/5 年以下、50mSv/年以下とすることはもちろん、合理的に達成可能な限り低くなるように努める。

参考として、放射線業務従事者の線量を法令に定められる線量限度以下に管理することの実現可能性を以下に示す。

(1) 放射線業務従事者の滞在時間

発電所からの金属キャスクの受入れを以下の通り想定する。

- ・ 発電所から年間 4 回の受入れを行う。
- ・ 1 回の受入れで、金属キャスク 8 基を 2 日間で搬入する。
- ・ 受け入れた金属キャスクを検査し、貯蔵区域に移送・据付するのに必要な期間を 1 基あたり 1 日とする。

以上の想定から、金属キャスクが仮置きされている期間を、年間 40 日（＝4 回×（2 日＋1 日/基×8 基））とする。

なお、金属キャスクが仮置きされていない状態では雰囲気線量は十分低いため、被ばく評価は省略する。

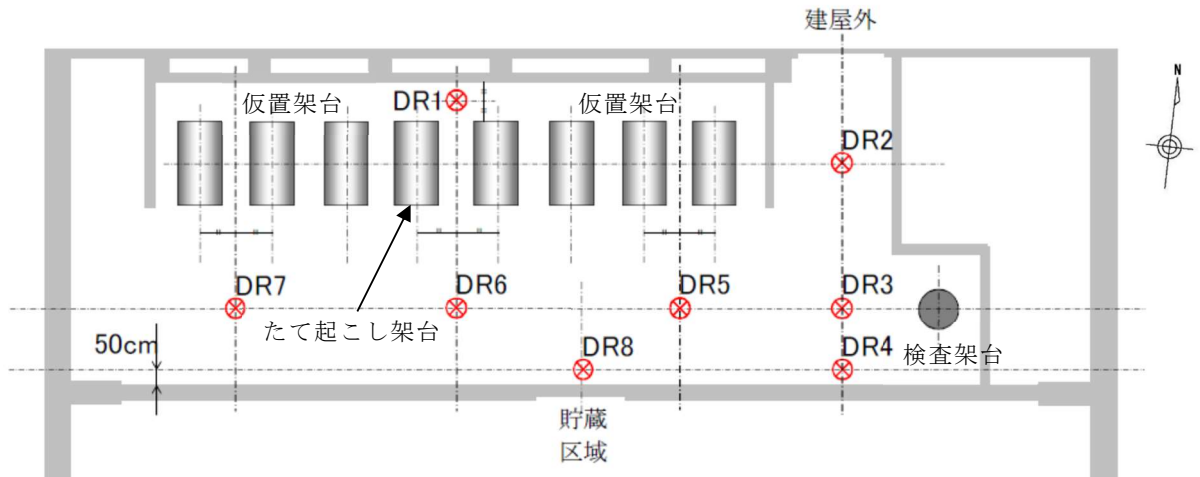
受入れ区域（金属キャスクが 1 基以上仮置き状態）にて実施する主要な作業、作業時間及び放射線業務従事者の年間滞在時間（想定）を添付 1-4 表に示す。放射線業務従事者の受入れ区域内における年間滞在時間は、検査関連（検査・査察等対応）によるものが最長であり、放射線業務従事者一人あたり年間 24 時間程度と想定される。

(2) 受入れ区域内の線量

受入れ区域の雰囲気線量の評価については、2. (2) 貯蔵区域内の線量と同様に、公衆の線量評価と同一の線源条件（表面から 1m での平均の線量当量率を 100 μ Sv/h となるように規格化）を設定する。

金属キャスクの仮置き状態については、保守的に仮置架台に7基、たて起こし架台に1基、検査架台に1基置いた状態での雰囲気線量を評価する。評価点を添付 1-2 図に、評価結果を添付 1-3 表に示す。評価結果を貯蔵区域と同様に金属キャスク解析結果を考慮した値に補正する。

受入れ区域の雰囲気線量（幾何平均値）は、0.03mSv/h と評価する。



添付 1-2 図 受入れ区域の線量評価点（キャスク 9 基仮置き状態）

添付 1-3 表 受入れ区域の線量評価結果 単位： μ Sv/h

評価点	評価線種	評価線種 100% の線量	金属キャスク解析結果を考慮した線量
DR1	n	2.2×10^2	1.4×10^2
	γ	1.4×10^2	
DR2	n	1.4×10^1	6.1×10^0
	γ	3.6×10^0	
DR3	n	6.2×10^1	3.5×10^1
	γ	3.1×10^1	
DR4	n	4.8×10^1	2.5×10^1
	γ	2.0×10^1	
DR5	n	6.4×10^1	3.6×10^1
	γ	3.3×10^1	
DR6	n	7.4×10^1	4.2×10^1
	γ	3.9×10^1	
DR7	n	6.0×10^1	3.4×10^1
	γ	3.1×10^1	
DR8	n	4.8×10^1	2.4×10^1
	γ	1.9×10^1	

DR1～DR8 の幾何平均値： 31μ Sv/h

(3) 受入れ区域内における放射線業務従事者の年間線量

放射線業務従事者の年間線量は、金属キャスク仮置き期間中の受入れ区域内の年間滞在時間約 24 時間、雰囲気線量を前述の幾何平均値約 0.03mSv/h として評価すると、約 0.8mSv/年となり、放射線業務従事者の年間線量を法令に定められている線量限度 100mSv/5 年、50mSv/年を超えないようにすることは可能と考える。

受入れ区域においてキャスク仮置き期間における想定される主要作業と放射線業務従事者の作業時間を添付 1-4 表に、線量を添付 1-5 表に示す。

添付 1-4 表 受入れ区域内における主要作業及び放射線業務従事者の年間滞在時間（想定）

作業項目	作業概要	実施頻度	作業時間 (h)				従事者数及び年間滞在時間		
			作業 1 回あたり		年間		従事者数 (人)	年間滞在時間 (h)	
巡視・点検	金属キャスク，貯蔵架台等の目視点検 給排気口の異常の有無確認	1 回/日	0.2	10 分/区画×1 区画	8	0.2h×40 日	4	4 人交代制での対応 (1 人平均 2 h)	2.0
放射線測定	線量当量率測定 集積線量計交換 表面汚染密度測定 空气中放射性物質濃度測定（採取）	1 回/週	1.0	2 分/箇所×4 箇所 5 分/箇所×3 箇所 1 分/箇所×10 箇所 10 分/箇所×3 箇所	8	1 h×8 (2 週×4 回)	4	2 人×2 班交代制での対応 (1 班平均 4h)	4.0
検査関連	IAEA 査察対応	1 回/年	6.0	一律 6h/日と仮定	24	6h	5	検査対応要員として以下 を想定。 使用済燃料取扱主任者，総 括責任者，責任者，記録者， 担当者	24.0
	定期検査対応	1 回/年				6h			
	保安検査対応	1 回/年				6h			
	核物質防護検査対応	1 回/年				6h			
清掃	通路及び給気口付近の簡易清掃	1 回/週	1.0	20 分：通路 20 分：給気口付近 20 分：各架台周り	8	1h×8 回 (2 週×4 回)	6	3 人×2 班交代制での対応 (1 班平均 2h)	4.0
視察対応	視察者への説明 貯蔵区域内のエスコート	4 回/年	0.2	10 分/回と想定	0.8	0.2h×4	2	説明者 エスコート	0.8

添付 1-5 表 受入れ区域内作業における放射線業務従事者の年間線量 (想定)

作業項目	作業概要	年間 作業時間 (h)	従事者数及び年間滞在時間		受入れ区域 雰囲気線量 (mSv/h)	従事者の年間線量			
			従事者数 (人)	年間滞在 時間 (h)		一人あたり (mSv)	総線量 (人・Sv)	平均 (mSv)	
巡視・点検	金属キャスク, 貯蔵架台等の目視点検 給排気口の異常の有無確認	8	4	4人交代制での対応 (1人平均 2h)	0.03	0.1	0.001 未満	0.3	
放射線測定	線量当量率測定 集積線量計交換 表面汚染密度測定 空气中放射性物質濃度測定 (採取)	8	4	2人×2班交代制での対応 (1班平均 4h)		0.2	0.001 未満		
検査関連	IAEA 査察対応	24	5	5人×1班で対応。 検査対応要員として以下 を想定。 使用済燃料取扱主任者, 総 括責任者, 責任者, 記録者, 担当者		24.0	0.8		0.004
	定期検査対応								
	保安検査対応								
	核物質防護検査対応								
清掃	通路及び給気口付近の簡易清掃	8	6	3人×2班交代制での対応 (1班平均 4h)	0.2	0.001			
視察対応	視察者への説明 貯蔵区域内のエスコート	0.8	2	説明者 エスコート	0.1 未満	0.001 未満			

4. 受入れ作業に従事する放射線業務従事者

(1) 放射線業務従事者の滞在時間

受入れ作業は、受入れ区域と貯蔵区域にわたって作業を行うことから、それぞれの場所における作業量を想定することとする。平成 26 年に行ったキャスク搬入訓練の状況から、作業場所毎に、作業内容、作業時間について想定し、集約した結果を添付 1-6 表に示す。

添付 1-6 表 受入れ作業の作業人工（金属キャスク 1 基あたり）

	作業人工 (人・h)	作業内容別作業員数
受入れ区域内作業	200	4 人～14 人
貯蔵区域内作業	38	5 人～14 人

(2) 受入れ作業線量

受入れ作業は、受入れ区域と貯蔵区域にわたって作業を行うことから、それぞれの場所の雰囲気線量を用いることとする。

受入れ区域での作業時の線量は、3. (2) より保守的に 9 基(仮置架台 7 基、たて起こし架台 1 基、検査架台 1 基) 置いた時の雰囲気線量 0.03mSv/h を用いる。

また、貯蔵区域内での作業時の線量は、2. (2)b より 288 基貯蔵時の雰囲気線量 0.22mSv/h を用いる。

(3) 受入れ作業における放射線業務従事者の年間線量

受入れ区域内における放射線業務従事者の年間線量は、添付 1-7 表の様に想定される。

添付 1-7 表 受入れ作業における放射線業務従事者の年間線量

作業区域	キャスク 1 基あたり		年間受入れ キャスク数 (基/年)	年間総線量 (人・mSv/年)
	作業人工 (人・h)	雰囲気線量 (mSv/h)		
受入れ区域	200	0.03	32	199.8
貯蔵区域	38	0.22		267.6
合計				467.3

貯蔵建屋が無い場合の敷地境界線量について

貯蔵建屋がない場合の敷地境界線量について、以下の条件にて解析を実施した結果、約 16mSv/年である。

(解析条件)

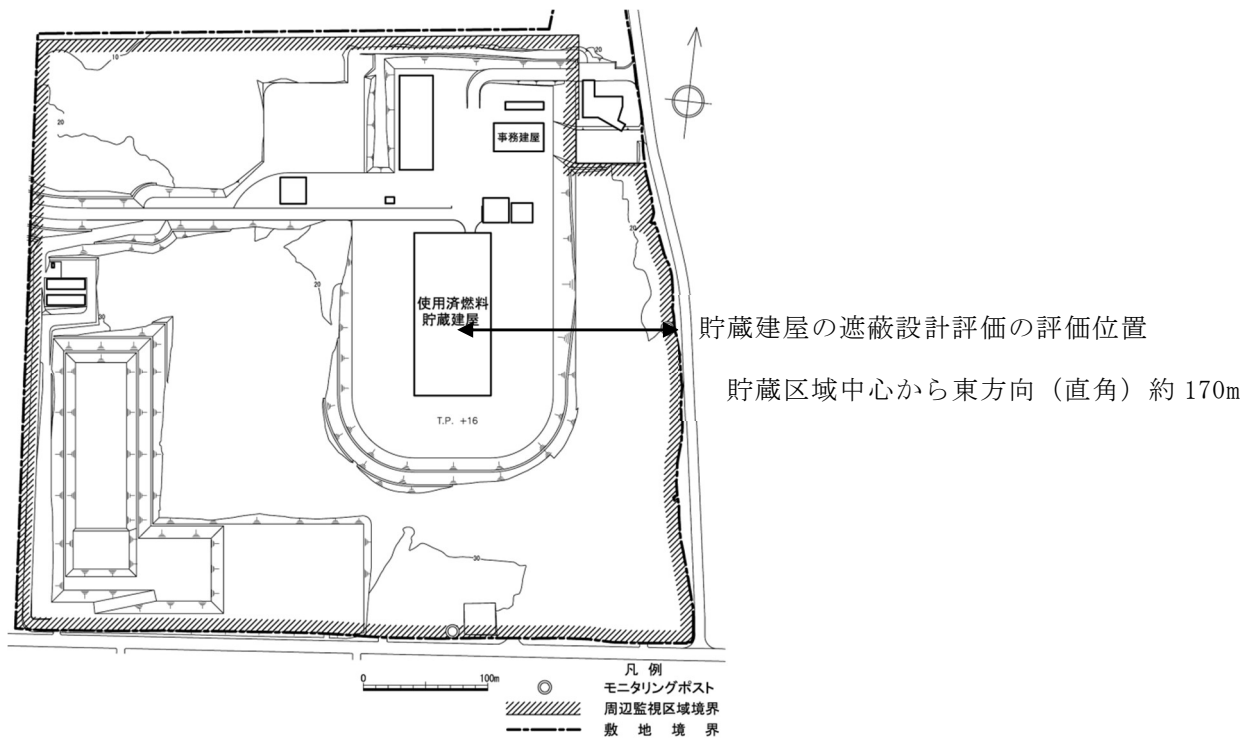
- ・金属キャスクの遮蔽評価結果に基づく現実的な線源条件を使用 (参考 1 表)
- ・貯蔵建屋の壁・天井コンクリートは考慮せず (空気に置換)
- ・上記以外の評価条件、評価方法は、貯蔵建屋遮蔽設計評価と同一

参考 1 表 線源条件の比較

	今回の評価	(参考) 貯蔵建屋の遮蔽設計評価
線源	金属キャスク遮蔽評価結果 (表面から 1 m 離れた位置における線量当量率が中性子 30.4 μ Sv/h, γ 線 51.1 μ Sv/h: BWR 用中型キャスク (タイプ 2)) と同等になるように設定	金属キャスク表面から 1 m 離れた位置における線量当量率が 100 μ Sv/h となるように規格化
評価線質	金属キャスク遮蔽評価結果に基づく中性子及び γ 線の線質を設定	中性子線 100% とした場合, γ 線 100% とした場合のそれぞれを評価し, 保守的な評価結果を使用
中性子線及び γ 線の表面エネルギースペクトル	同右	コンクリートの透過率が高い包絡スペクトルを設定

《参考》貯蔵建屋の遮蔽設計評価の条件にて評価した場合

- ・中性子線 100% での評価 : 約 34mSv/年
- ・ガンマ線 100% での評価 : 約 10mSv/年



参考 1 図 線量評価点

第6条 除熱（貯蔵建屋）

<目 次>

1. 設計方針
2. 除熱設計

（別 添）

- 別添1 使用済燃料貯蔵建屋の除熱設計について
- 別添2 使用済燃料貯蔵建屋内の定常な空気の流れを想定した三次元熱流動解析について
- 別添3 給気温度の変化等による除熱評価結果への影響について

1. 設計方針

使用済燃料貯蔵施設は、動力を用いなくて使用済燃料等の崩壊熱を適切に除去できるよう、次の方針に基づき設計を行う。

- (1) 使用済燃料貯蔵建屋は、金属キャスクの表面からの除熱を維持する観点から、使用済燃料貯蔵建屋内の雰囲気温度を低く保つことができる設計とする。なお、使用済燃料貯蔵建屋内の雰囲気温度は計測設備等の電気品の性能維持を考慮するとともに、コンクリート温度はコンクリートの基本特性に影響を及ぼさないよう、また構造材としての健全性を維持するよう考慮する。給気口及び排気口は、積雪及び降下火砕物により閉塞しないよう設計する。

2. 除熱設計

(1) 除熱構造

使用済燃料貯蔵建屋は、金属キャスク表面からの除熱を維持する観点から使用済燃料貯蔵建屋内の雰囲気温度を低く保つこと及び遮へい機能を担うための健全性を維持することから、以下の設計上の配慮を行う。

- a. 使用済燃料貯蔵建屋の受入れ区域及び貯蔵区域には、給気口及び排気口を設け、金属キャスク表面から金属キャスク周囲の空気に伝えられた熱を、その熱量に応じて生じる空気の通風力を利用して使用済燃料貯蔵建屋外へ放散できる構造とする。
- b. 適切な通風力を得るため、貯蔵区域の排気口は地上高さ約 23m に、受入れ区域の排気口は地上高さ約 20m に設ける。
- c. 給気口及び排気口には、それぞれ温度検出器を配置して使用済燃料貯蔵建屋の給排気温度を測定することにより、除熱機能が維持されていることを監視する。
- d. 給気口は、むつ特別地域気象観測所の最大積雪量 170cm に対し十分裕度のある、地上高さ約 7 m に設ける。
- e. 貯蔵区域において、金属キャスクが設置されていない区画（貯蔵区域を耐火壁、防火扉及び防火シャッタにより 6 分割した区画）については、夏季に使用済燃料貯蔵建屋内で発生する結露対策として、給気口を閉止する運用とする。

(2) 金属キャスクの配置制限

使用済燃料貯蔵建屋は、貯蔵区域における計測設備等の電気品の性能維持を考慮し、使用済燃料貯蔵建屋内の雰囲気温度が 45℃ (汎用電気品が使用可能なように考慮した温度) 以下、コンクリートの基本特性に大きな影響を及ぼすような自由水の逸散が生じない温度及び構造材としての健全性を維持するための温度を考慮し、使用済燃料貯蔵建屋のコンクリート温度が 65℃ 以下¹⁾に保たれるよう、片側の給気口から中央の排気口までの金属キャスク配置を 1 列あたり最大 6 基とする。

なお、コンクリート温度の基準値は、日本機械学会「発電用原子力設備規格 コンクリート製原子炉格納容器規格」を準用し、コンクリート物性

値に大きな影響を与えない温度として設定したものである。上記規格には、次のように示されている。

コンクリートの物性値は、一般にコンクリートの温度が 70℃程度では、コンクリートの基本特性に大きな影響を及ぼすような自由水の逸散は生じないため、養生の進んだコンクリートでは熱による変化は少ないとされている。100℃以下ではコンクリートの圧縮強度等の低下は少ない。

(3) 除熱解析

使用済燃料貯蔵建屋は、使用済燃料貯蔵建屋内の雰囲気温度を低く保つことができる設計であること及びコンクリート温度をその遮へい能力が損なわれない温度以下に保つことができる設計であることを以下の方法により評価する。

a. 伝熱形態

使用済燃料貯蔵建屋における伝熱形態は次の通りである。

- (a) 金属キャスク表面に伝えられた崩壊熱の殆どは、伝導及び対流により金属キャスク周囲の空気へ伝えられるが、一部は、輻射及び貯蔵架台を介しての伝導により使用済燃料貯蔵建屋へ伝えられる。
- (b) 使用済燃料貯蔵建屋へ伝わった熱は、躯体の伝導及び対流により外部（大気あるいは地中）に放出されるか、あるいは伝導及び対流により使用済燃料貯蔵建屋内空気に伝わり、自然換気により大気に放出される。

b. 評価方法

上記伝熱形態を踏まえ、使用済燃料貯蔵建屋の除熱評価においては、使用済燃料貯蔵建屋及び金属キャスクを一次元又は三次元で適切にモデル化し、一次元熱計算により使用済燃料貯蔵建屋内の雰囲気温度を、三次元熱流動解析コード F L U E N T を用いて使用済燃料貯蔵建屋のコンクリート温度を評価する。

使用済燃料貯蔵建屋内の雰囲気温度の評価に当たっては、使用済燃料集合体の崩壊熱が全て金属キャスク周囲の空気へ伝わるよう設定し、使用済燃料貯蔵建屋コンクリート温度の評価に当たっては、使用済燃料貯蔵建屋外壁を断熱とする。

使用済燃料貯蔵建屋の除熱評価フローを第 1 図に、除熱評価の共通条件

を第1-1表に、BWR用大型キャスク(タイプ2A)での評価条件を第1-2表に、BWR用中型キャスク(タイプ2)での評価条件を第1-3表に、PWR用キャスク(タイプ1)での評価条件を第1-4表に示す。また他の評価条件については下記(a)(b)に示す。

(a) 一次元熱計算

金属キャスク表面に伝えられた崩壊熱のすべてが周囲空気に移行するものとして使用済燃料貯蔵建屋内の雰囲気温度を算出する(第2図参照)。

評価領域、流路設定及び考慮する圧力損失要素は、金属キャスク12基(6基/列×2列)を含む、給気口から排気口までの領域とする(第3図～第5図参照)。ここで記載以外の評価方法を別添1に示す。

なお、むつ特別地域気象観測所の観測記録(1981年～2010年)によれば、最高気温の平均は8月の場合25.7℃、年間の場合13.7℃、平均気温は8月の場合21.7℃、年間の場合9.5℃である。

(b) 三次元熱流動解析

第6図に示した伝熱形態を模擬するため、三次元熱流動解析コードFLUENTを用いて、伝導、対流、輻射が共存する場の支配方程式を解き使用済燃料貯蔵建屋躯体温度を評価する。

評価条件を以下のとおりとする。なお、ここで記載以外の評価方法を別添1に、また、使用済燃料貯蔵建屋内の定常な空気の流れを想定していることについての補足を別添2に示す。

- ・金属キャスク12基(6基/列×2列)を含む、給気口から排気口までの領域とし、使用済燃料貯蔵建屋躯体として貯蔵部の側壁、垂れ壁、天井、柱、仕切り壁、基礎スラブ及び排気塔部まで、設置物として給気部設置給電盤、プルボックス類、ケーブルトレイ類等を模擬(第7図、第8図参照)。また、貯蔵区域の壁面(支柱、耐震壁、給気口側壁面)は、床面より高さ1.6mまで帯状に緑色のエポキシ塗装が施されており、床面およびそれ以外の部位はコンクリート表面である。
- ・使用済燃料貯蔵建屋外表面及び排気塔部の躯体の外表面は、コンクリート表面から外気への放熱が無いよう、断熱条件に設定(第7図、

第 8 図参照)

- ・金属キャスクの発熱は、全表面（上面、側面、底面）一様な熱流束を付与するとともに、評価において、金属キャスクと貯蔵架台並びに貯蔵架台と床との間は完全接触しているものとして評価
- ・使用済燃料貯蔵建屋基礎スラブ下端の温度は 12℃（施設建設地点での地表-2.83mにおける 2006 年 6 月～9 月の毎正時温度データの最大値）一定

(4) 除熱評価結果

除熱評価の結果、一次元熱計算において排気温度の最高値は PWR 用キャスク(タイプ 1)の解析で 41.3℃、また、三次元熱流動解析において躯体温度の最高値は PWR 用キャスク(タイプ 1)の解析で床の 60.4℃となり、使用済燃料貯蔵建屋内の雰囲気温度は 45℃以下、コンクリート温度は 65℃以下に保つことができる。

一次元熱計算による排気温度を第 2 表に、三次元熱流動解析による躯体温度の最高値を第 3 表、躯体の温度分布を第 10-1 図～第 12-5 図に示す。

また、第 4-1 表、第 4-2 表、及び第 4-3 表に一次元熱計算と三次元熱流動解析による排気温度及び空気流量の比較を示す。輻射の影響を考慮していない一次元熱計算の排気温度は、輻射の影響を考慮した三次元熱流動解析の排気温度より高くなり、より安全側の評価となっている。

なお、給気温度を BWR 用中型キャスク(タイプ 2)の解析及び PWR 用キャスク(タイプ 1)の解析において 29.8℃一定とした条件を設定しているが、仮に、29.8℃を超えるような状態となった場合でも、1 日の平均気温が 29.8℃を超えるような状況は想定されず、また、金属キャスクの熱容量が大きいことを考慮すると、給気温度の上昇による影響は限定的である。給気温度の設定の考え方等、その他の除熱評価についての補足を別添 3 に示す。

参考文献

社団法人 日本機械学会，発電用原子力設備規格 コンクリート製原子炉格納容器規格 (JSME S NE1-2003), 2003 年

第 1 - 1 表 使用済燃料貯蔵建屋の除熱評価条件(共通条件)

	一次元熱計算	三次元熱流動解析
基準温度	45℃ (使用済燃料貯蔵建屋内の雰囲気温度)	65℃ (使用済燃料貯蔵建屋のコンクリート温度)
評価領域	貯蔵区域における給気口から排気口まで(領域内には金属キャスク 12 基 (1 列あたり 6 基) を含む)	
伝熱形態	伝熱形態を区別せず，金属キャスク表面に伝えられた崩壊熱のすべてが周囲空気に移行するものと想定	金属キャスク表面に伝えられた崩壊熱が，伝導/対流/輻射により，使用済燃料貯蔵建屋コンクリートに伝えられるものと想定

第 1 - 2 表 使用済燃料貯蔵建屋の除熱評価条件

(BWR用大型キャスク(タイプ2A))

	一次元熱計算	三次元熱流動解析
設計給気温度	29.5℃ (むつ特別地域気象観測所の 2004 年～2013 年の夏季 (6 月～9 月) 毎正時温度データを用いて，高温側から 1 % の値 (超過危険率 1 %))	
金属キャスク発熱量	評価領域において 145.2kW (1 列あたり 72.6kW)	1 基あたり 12.1kW
金属キャスク寸法	(全長) 5.320m (高さ) 2.482m	

第 1 - 3 表 使用済燃料貯蔵建屋の除熱評価条件

(BWR用中型キャスク(タイプ2))

	一次元熱計算	三次元熱流動解析
設計給気温度	29.8℃ (むつ特別地域気象観測所の 2012 年～2021 年の夏季 (6 月～9 月) 毎正時温度データを用いて, 高温側から 1 % の値 (超過危険率 1 %))	
金属キャスク発熱量	評価領域において 164.4kW (1 列あたり 82.2kW)	1 基当たり 13.7kW
金属キャスク寸法	(全長) 5.479m (高さ) 2.378m	

1 - 4 表 使用済燃料貯蔵建屋の除熱評価条件

(PWR用キャスク(タイプ1))

	一次元熱計算	三次元熱流動解析
設計給気温度	29.8℃ (むつ特別地域気象観測所の 2012 年～2021 年の夏季 (6 月～9 月) 毎正時温度データを用いて, 高温側から 1 % の値 (超過危険率 1 %))	
金属キャスク発熱量	評価領域において 166.8kW (1 列あたり 83.4kW)	1 基当たり 13.9kW
金属キャスク寸法	(全長) 5.119m (高さ) 2.530m	

第2表 一次元熱計算による使用済燃料貯蔵建屋内の雰囲気温度評価結果

評価条件キャスク	評価温度	設計基準温度
BWR用大型キャスク (タイプ2A)	40.0℃	45℃
BWR用中型キャスク (タイプ2)	41.0℃	
PWR用キャスク (タイプ1)	41.3℃	

第3表 三次元熱流動解析による使用済燃料貯蔵建屋コンクリート温度の
評価結果 (最高値)

評価部位	評価温度 (最高値)			設計基準 温度
	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)	
側壁	52.7℃	54.5℃	54.8℃	65℃
支柱	54.4℃	56.8℃	57.3℃	
床	56.9℃	58.2℃	60.4℃	
天井 (梁除く)	54.5℃	55.7℃	55.8℃	
天井梁	55.6℃	55.0℃	54.8℃	

第4-1表 一次元熱計算と三次元熱流動解析の比較
(BWR用大型キャスク(タイプ2A))

	一次元熱計算	三次元熱流動解析
排気温度	40.0℃	38.3℃
空気流量	14.0kg/s	16.0kg/s

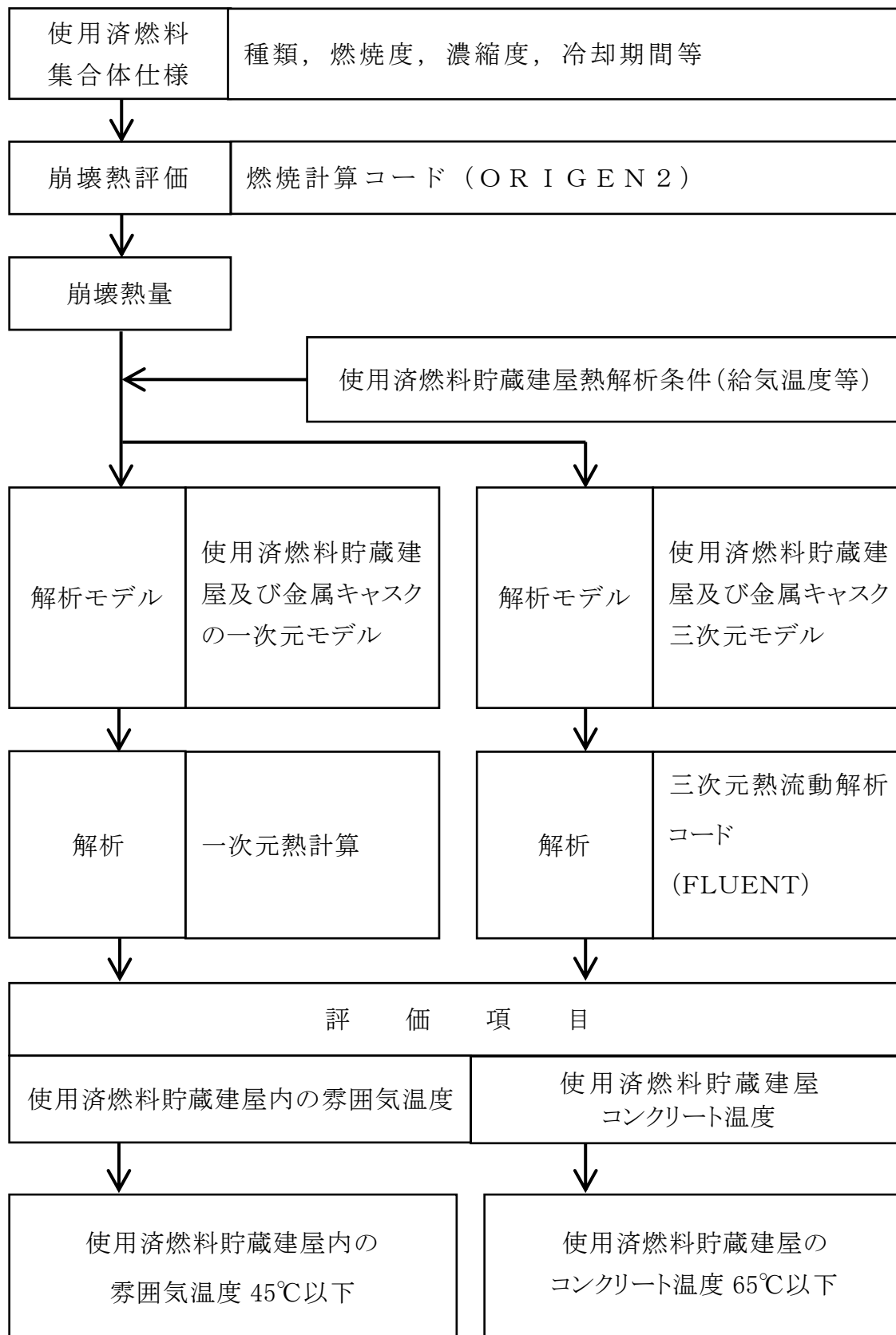
第4-2表 一次元熱計算と三次元熱流動解析の比較
(BWR用中型キャスク(タイプ2))

	一次元熱計算	三次元熱流動解析
排気温度	41.0℃	39.4℃
空気流量	14.6kg/s	16.7kg/s

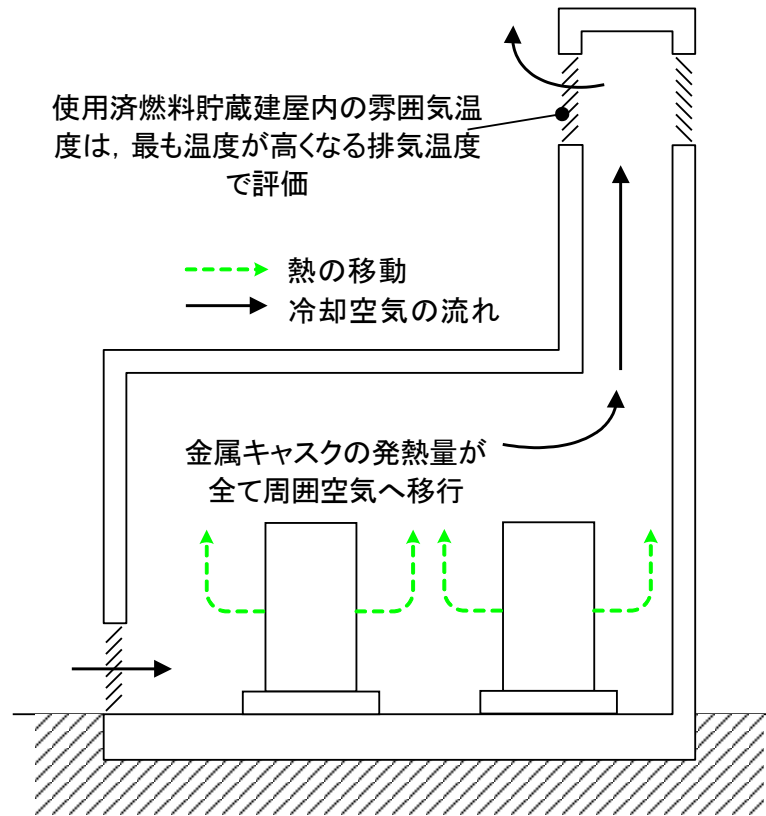
第 4 - 3 表 一次元熱計算と三次元熱流動解析の比較

(PWR 用キャスク(タイプ 1))

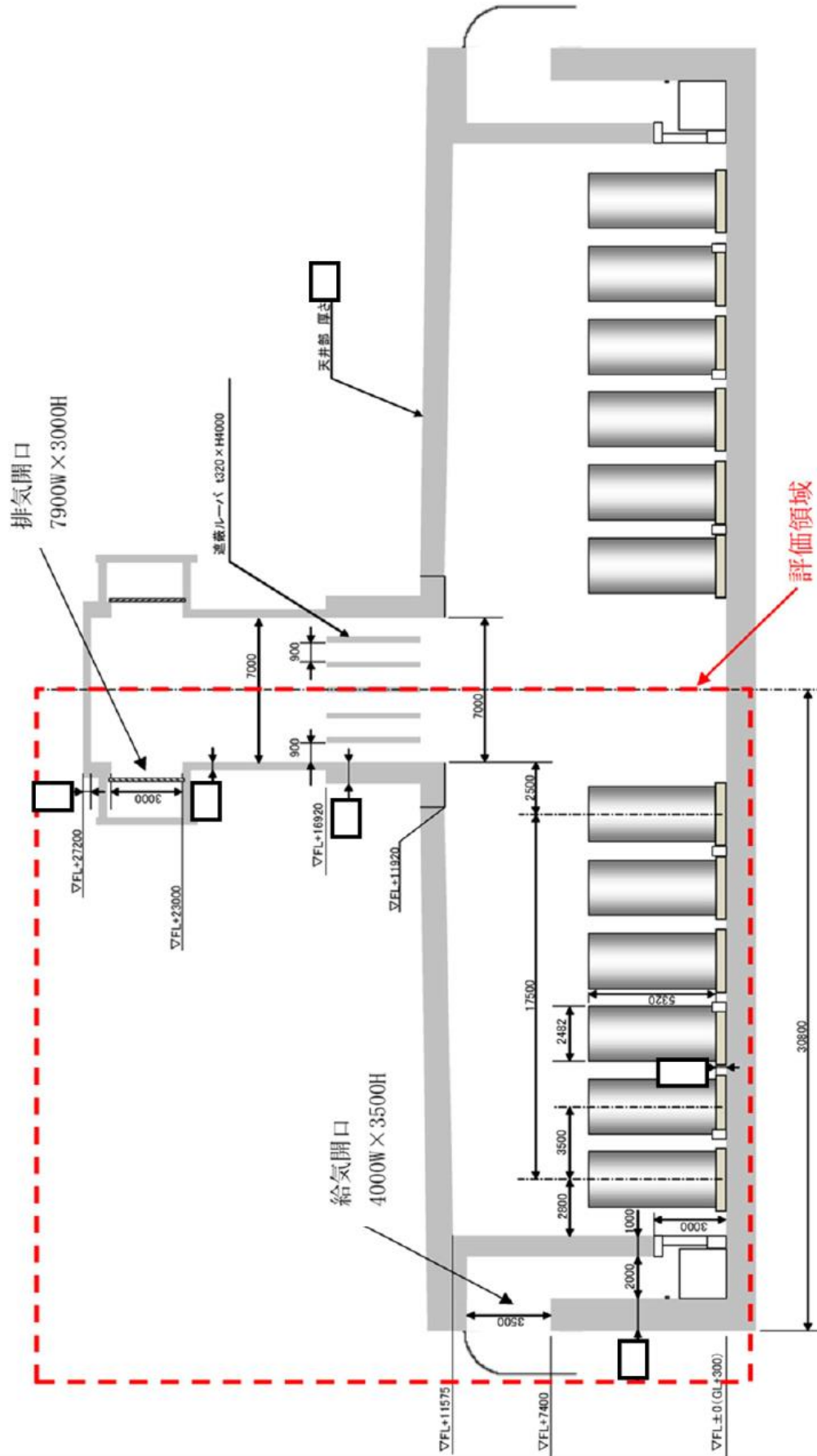
	一次元熱計算	三次元熱流動解析
排気温度	41.3℃	39.5℃
空気流量	14.4kg/s	16.8kg/s



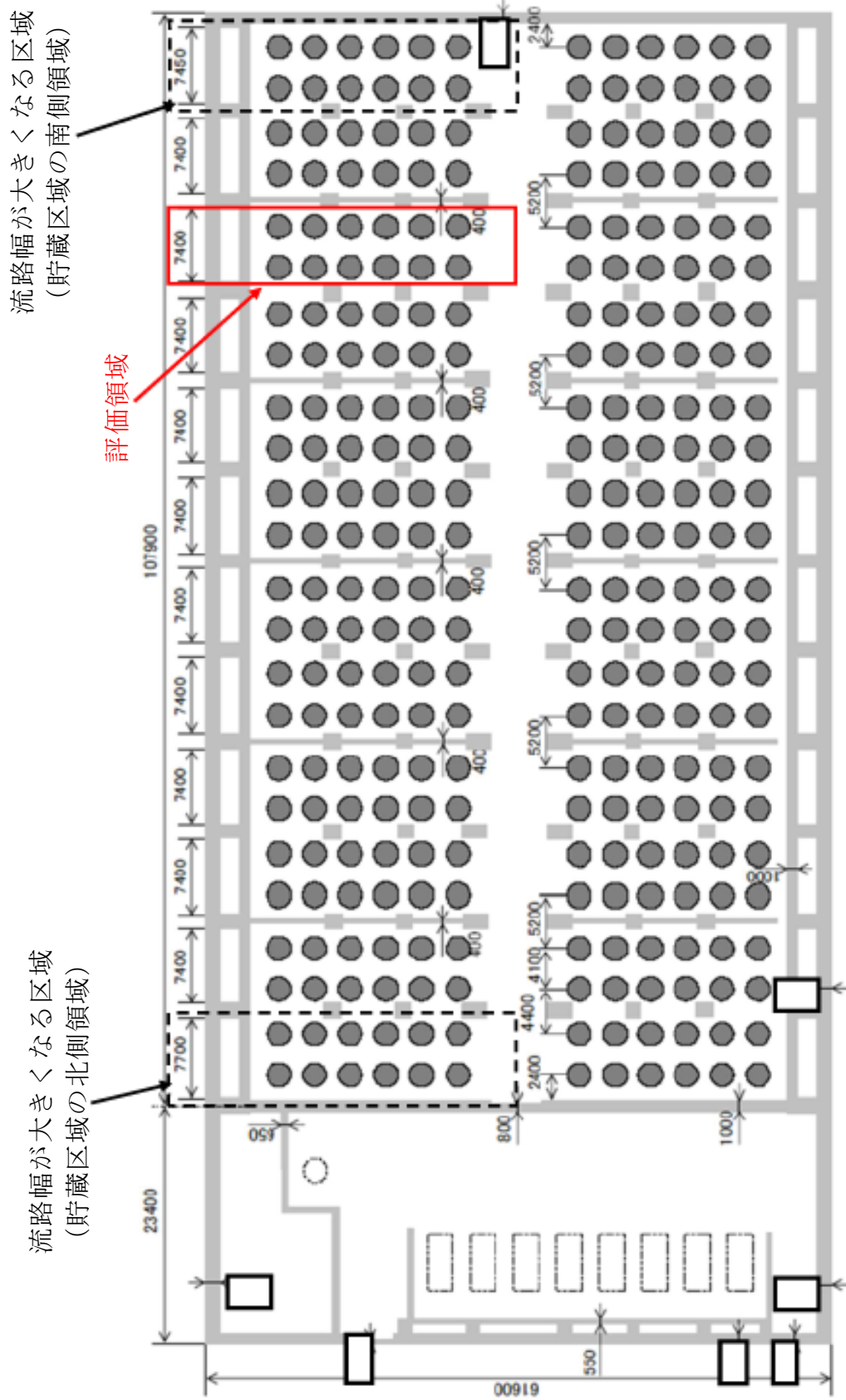
第 1 図 使用済燃料貯蔵建屋の除熱解析フロー図



第2図 一次元熱計算における使用済燃料貯蔵建屋の伝熱形態



第3図 一次元熱計算における評価領域（使用済燃料貯蔵建屋断面）

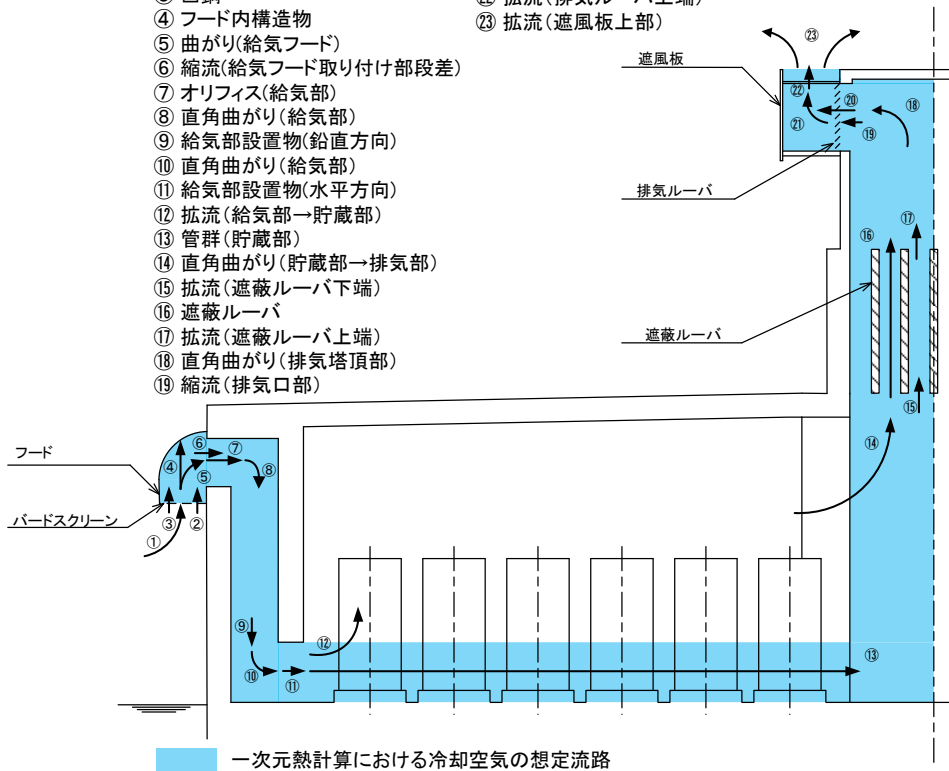


※貯蔵区域の給気口から排気口への流路形状は、一部区域（貯蔵区域の北側領域と南側領域）を除き同様であるが、冷却空気の流れを阻害する盤等の設置物の設置状況は異なる。一部区域（貯蔵区域の北側領域と南側領域）は、評価領域と比較して流路幅が大きく、設置物の設置状況も他の区域と同様の設置状況であるため、設置物が流路に対して占める割合が大きい評価領域を選定。

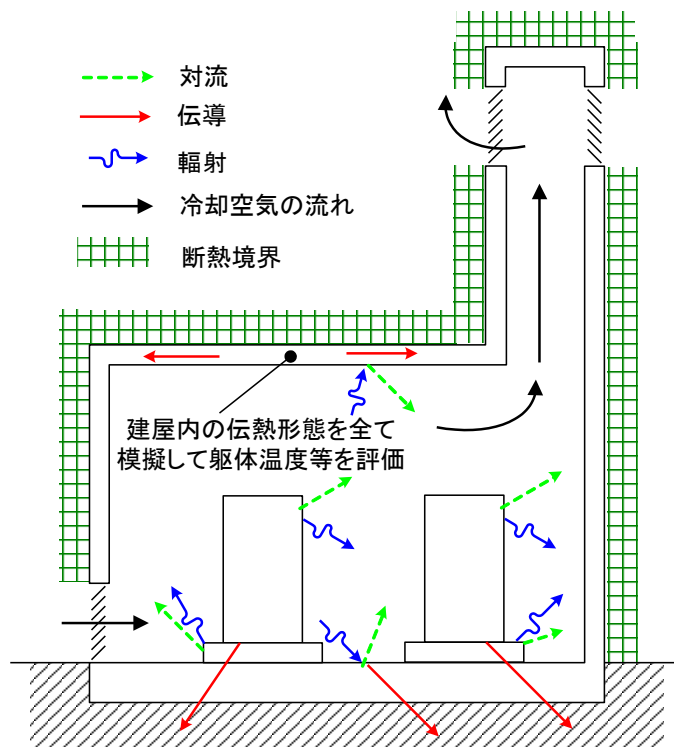
第4図 一次元熱計算における評価領域（使用済燃料貯蔵建屋平面）

- 圧力損失要素：
- ① 給気フード
 - ② バードスクリーン
 - ③ 口鋼
 - ④ フード内構造物
 - ⑤ 曲がり(給気フード)
 - ⑥ 縮流(給気フード取り付け部段差)
 - ⑦ オリフィス(給気部)
 - ⑧ 直角曲がり(給気部)
 - ⑨ 給気部設置物(鉛直方向)
 - ⑩ 直角曲がり(給気部)
 - ⑪ 給気部設置物(水平方向)
 - ⑫ 拡流(給気部→貯蔵部)
 - ⑬ 管群(貯蔵部)
 - ⑭ 直角曲がり(貯蔵部→排気部)
 - ⑮ 拡流(遮蔽ルーバ下端)
 - ⑯ 遮蔽ルーバ
 - ⑰ 拡流(遮蔽ルーバ上端)
 - ⑱ 直角曲がり(排気塔頂部)
 - ⑲ 縮流(排気口部)

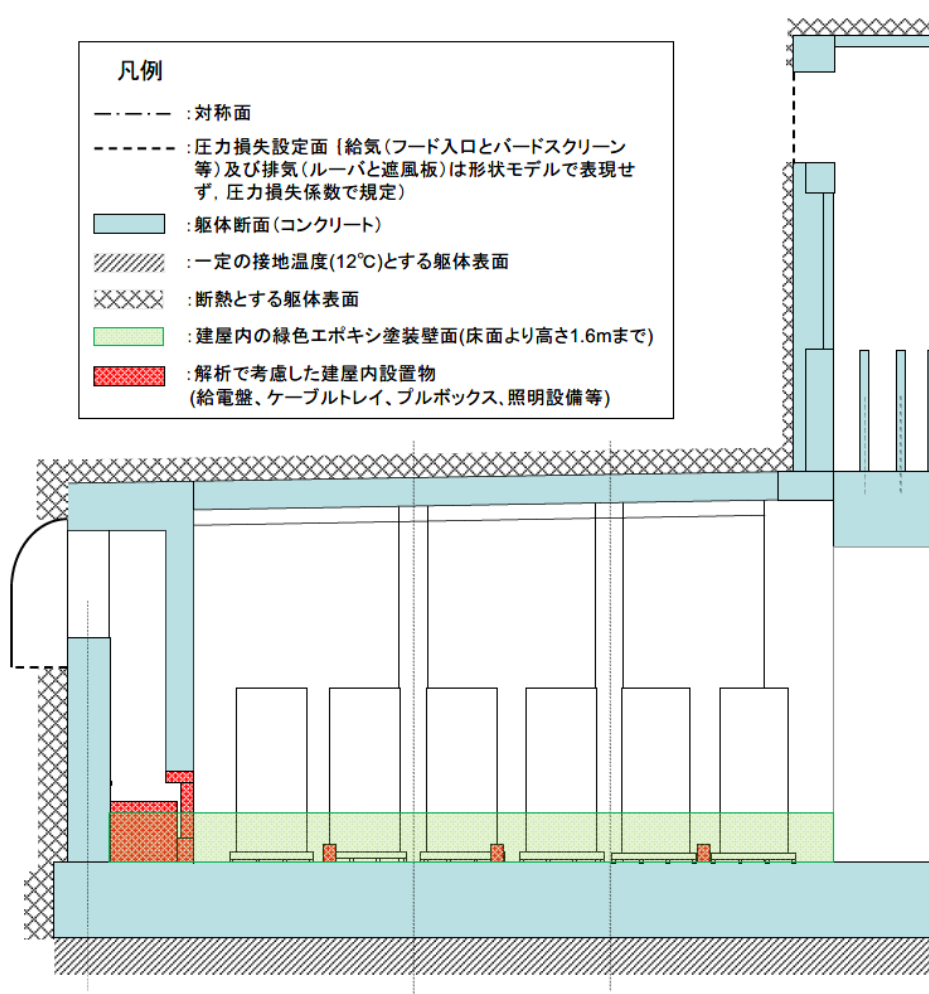
- ⑳ 排気ルーバ
- ㉑ 直角曲がり(遮風板)
- ㉒ 拡流(排気ルーバ上端)
- ㉓ 拡流(遮風板上部)



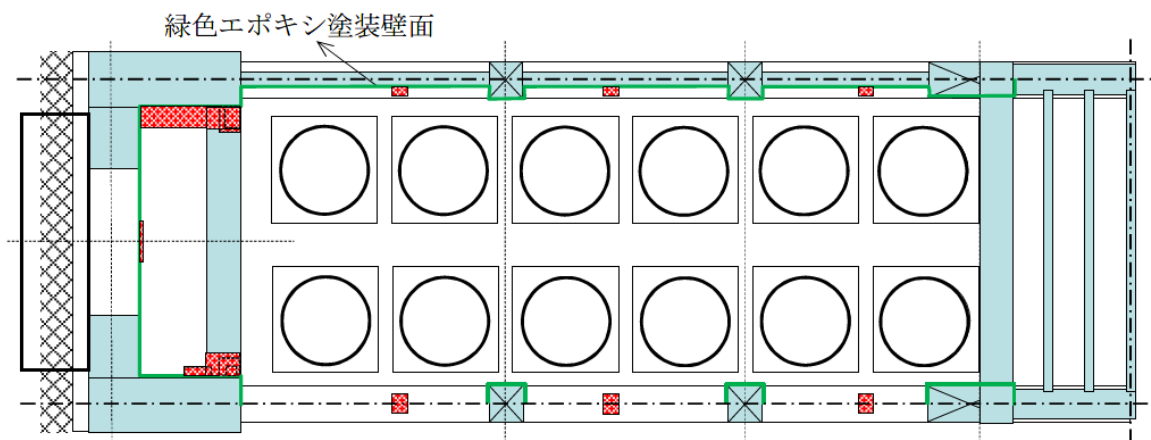
第5図 一次元熱計算における流路設定及び考慮する圧力損失要素



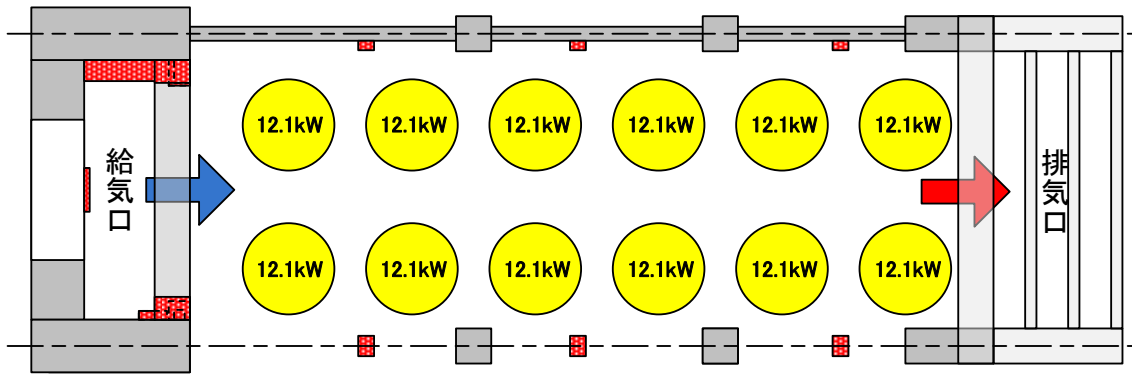
第6図 使用済燃料貯蔵建屋の伝熱形態



第7図 三次元熱流動解析の評価領域及び評価モデル
(使用済燃料貯蔵建屋断面)

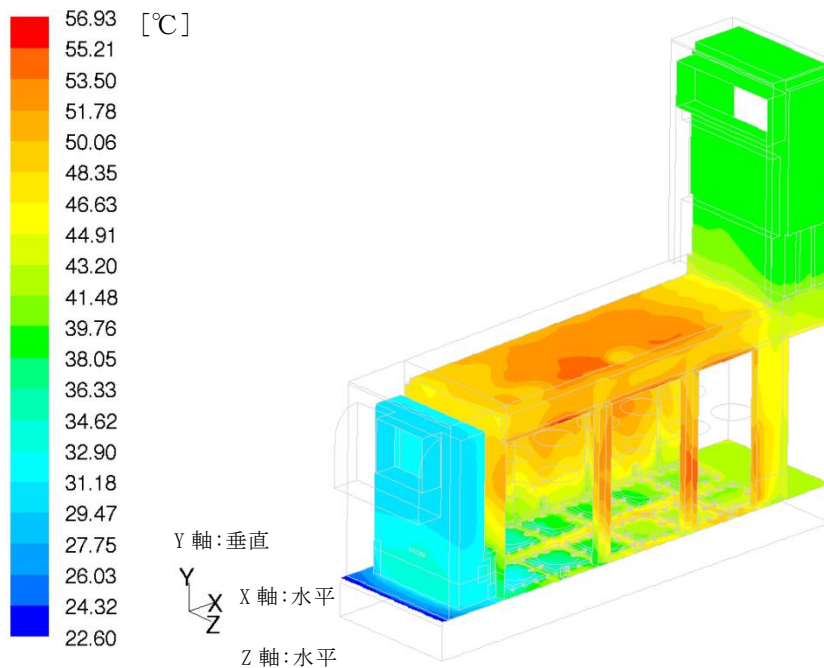


第8図 三次元熱流動解析の評価領域及び評価モデル
(使用済燃料貯蔵建屋平面)

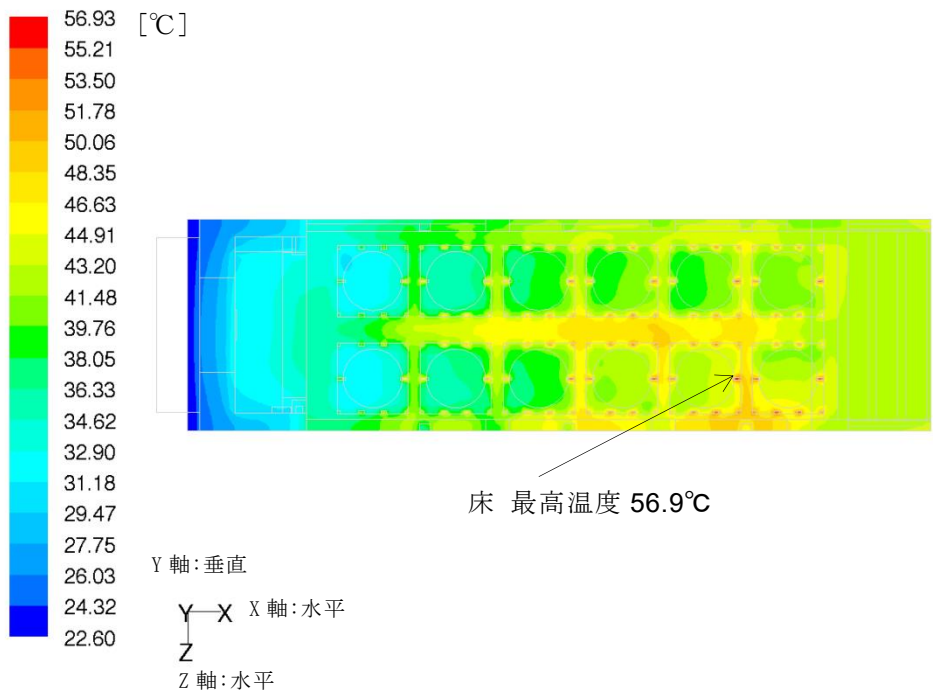


第9図 三次元熱流動解析で用いた金属キャスクの発熱量
(BWR用大型キャスク(タイプ2A)の場合)

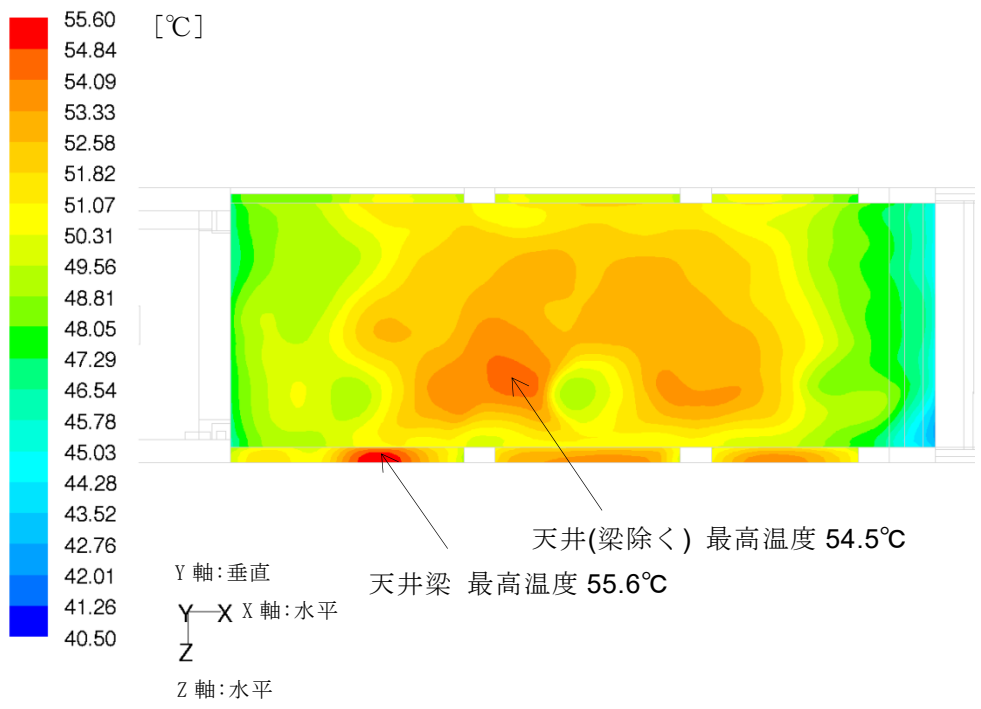
※BWR中型キャスク(タイプ2)の解析, 及びPWR用キャスク(タイプ1)の解析は, 各々評価条件で設定した金属キャスク発熱量で行う。



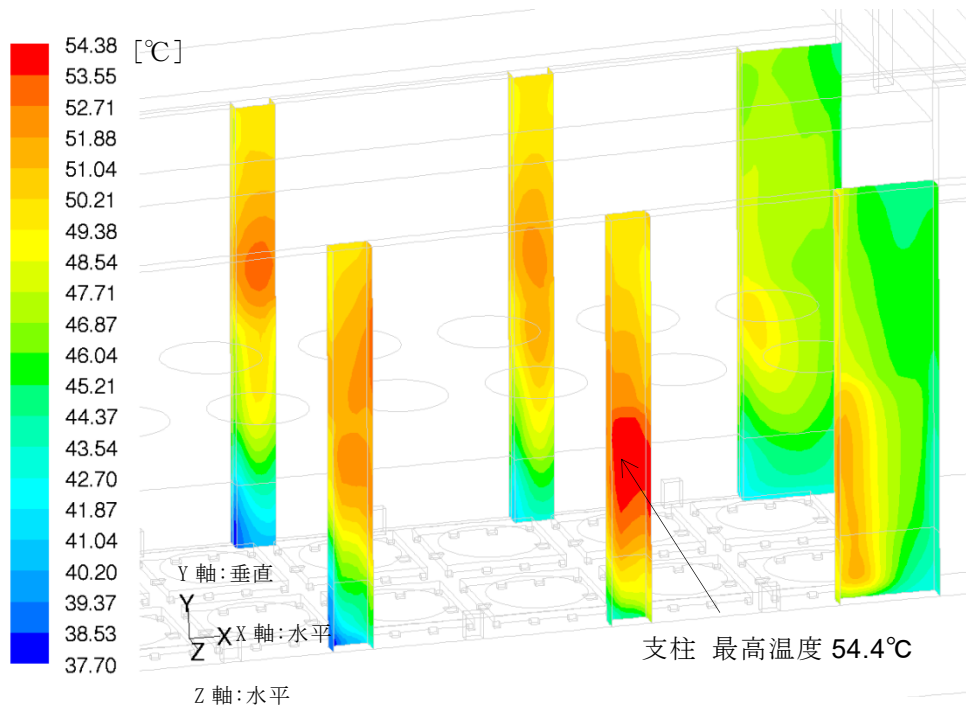
第10-1図 躯体全体(床・側壁・天井・支柱)表面温度分布
(BWR用大型キャスク(タイプ2A))



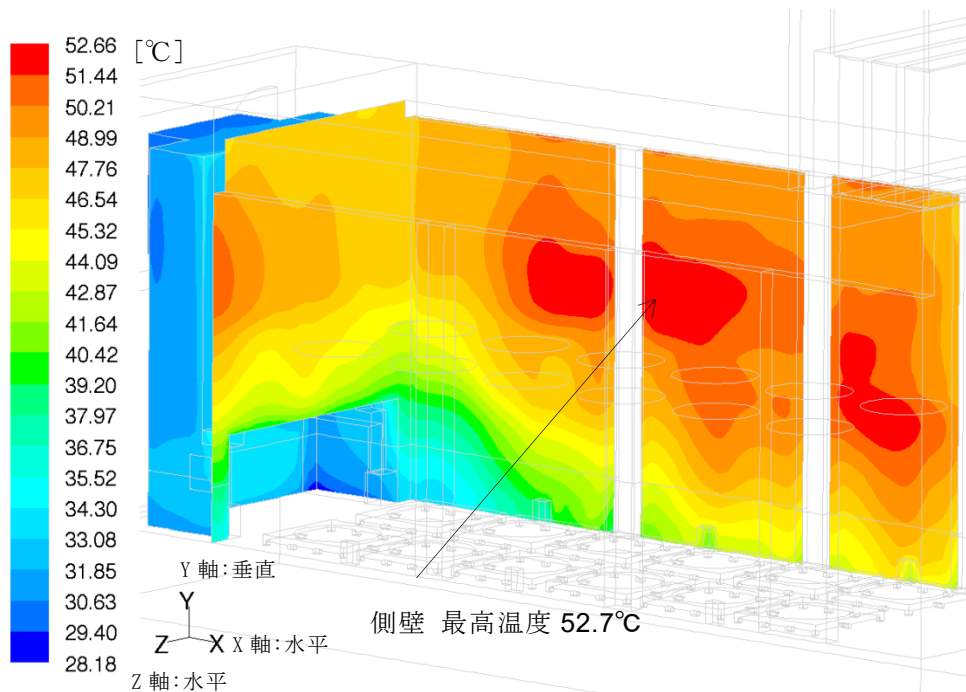
第 10-2 図 床表面温度分布
 (BWR用大型キャスク(タイプ2A))



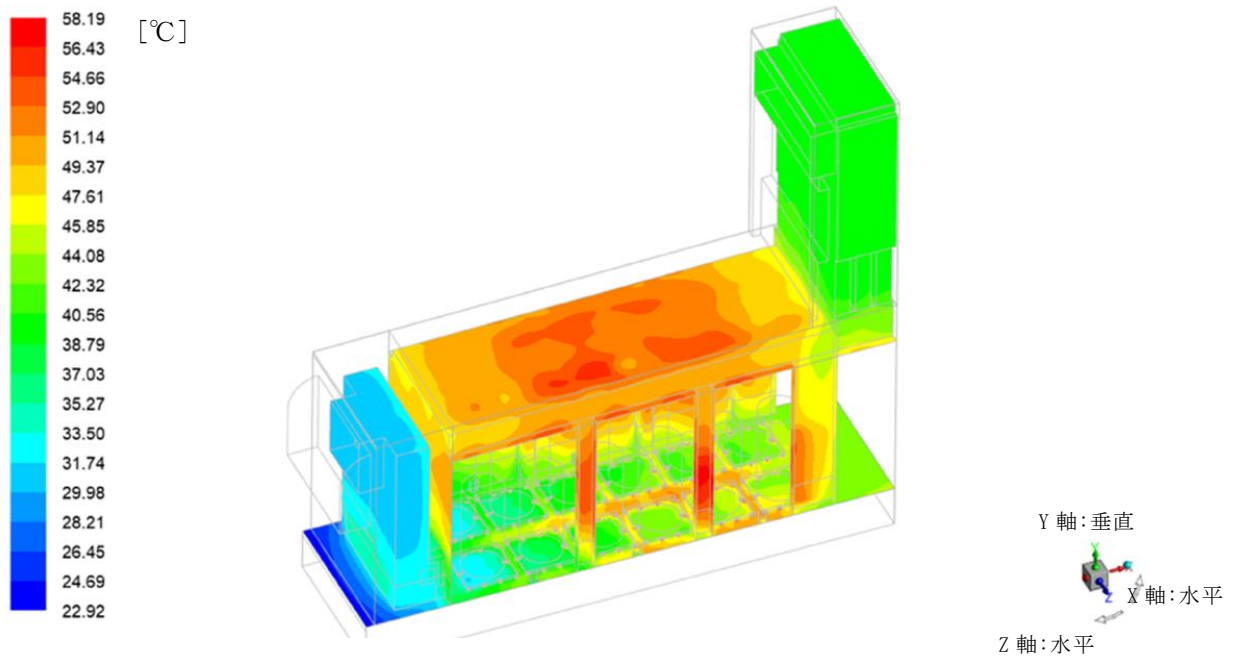
第 10-3 図 天井表面温度分布
 (BWR用大型キャスク(タイプ2A))



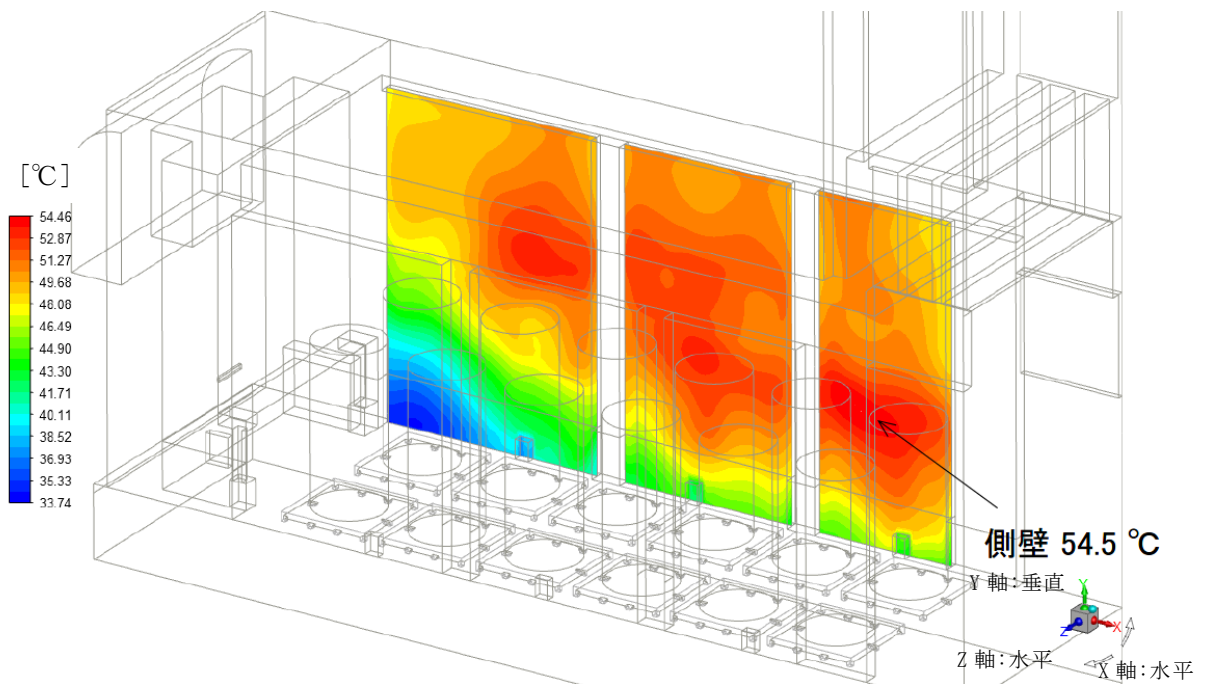
第 10-4 図 支柱表面温度分布
 (BWR 用大型キャスク (タイプ 2 A))



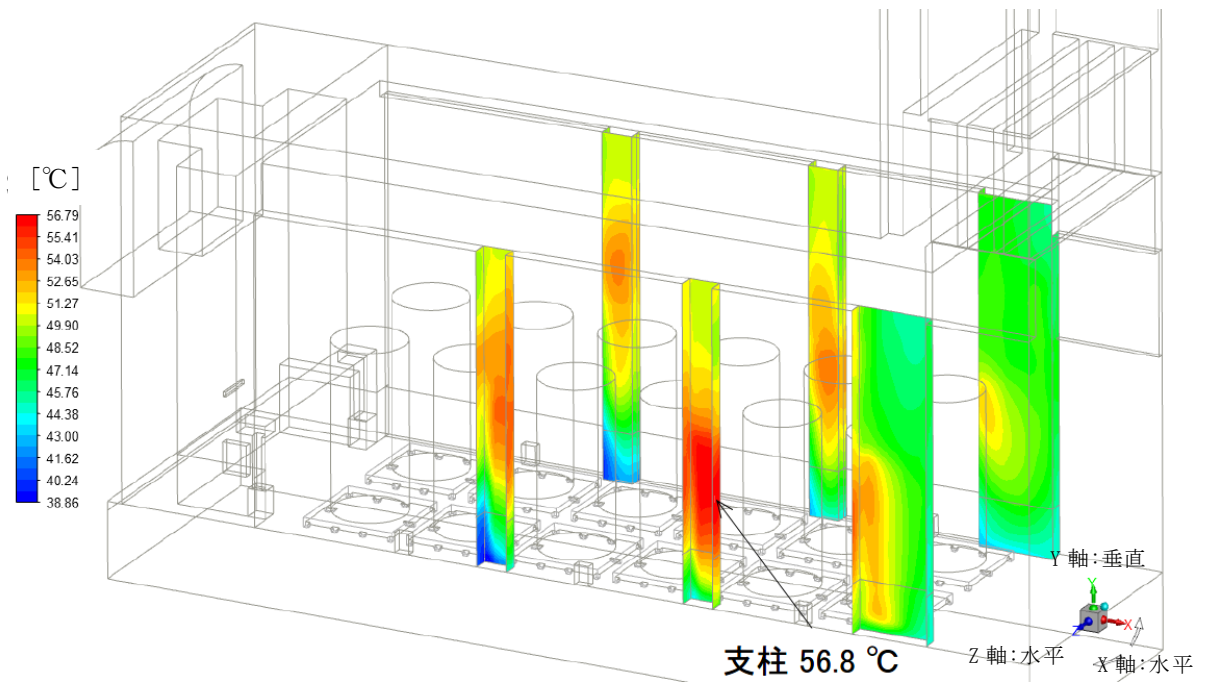
第 10-5 図 側壁・入口壁表面温度分布
 (BWR 用大型キャスク (タイプ 2 A))



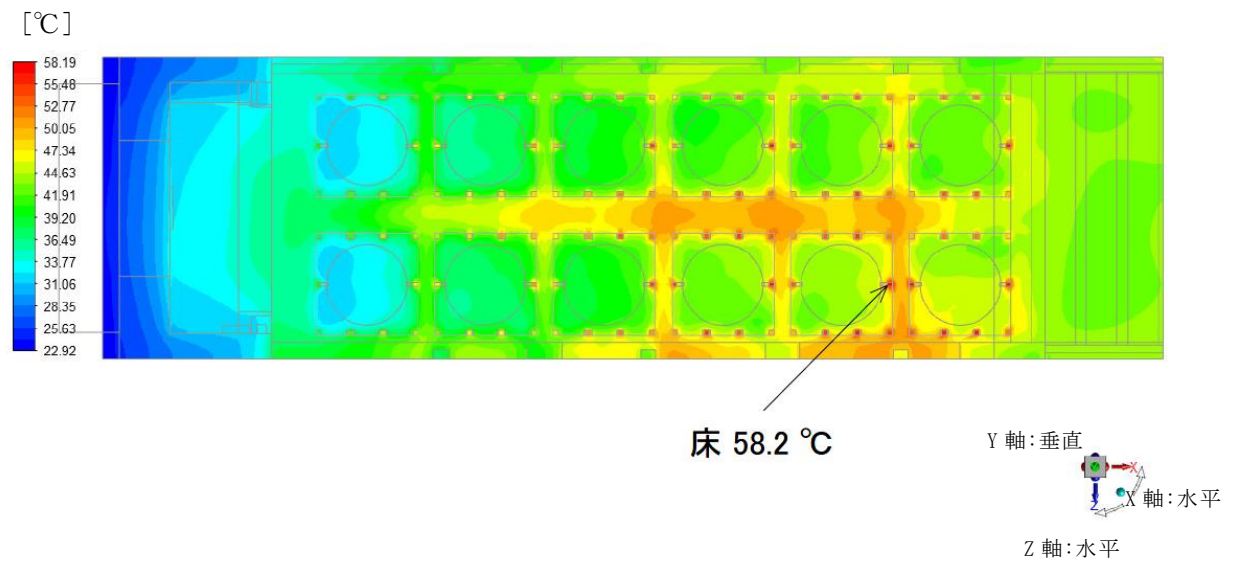
第 11-1 図 躯体全体（床・側壁・天井・支柱）表面温度分布
（BWR用中型キャスク（タイプ2））



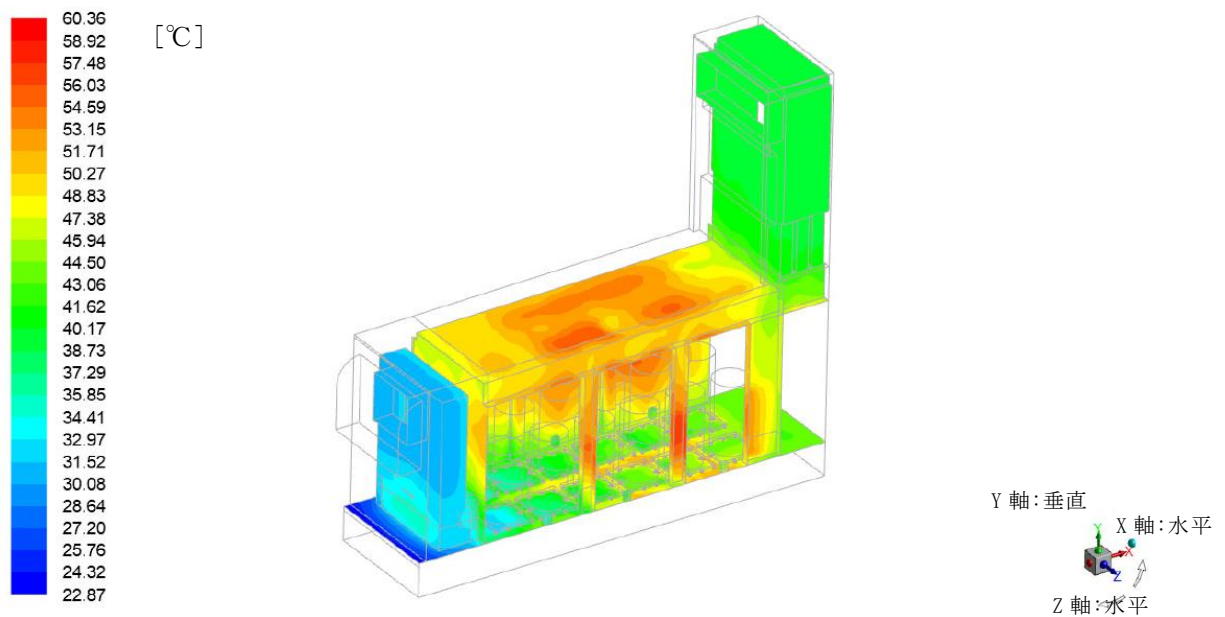
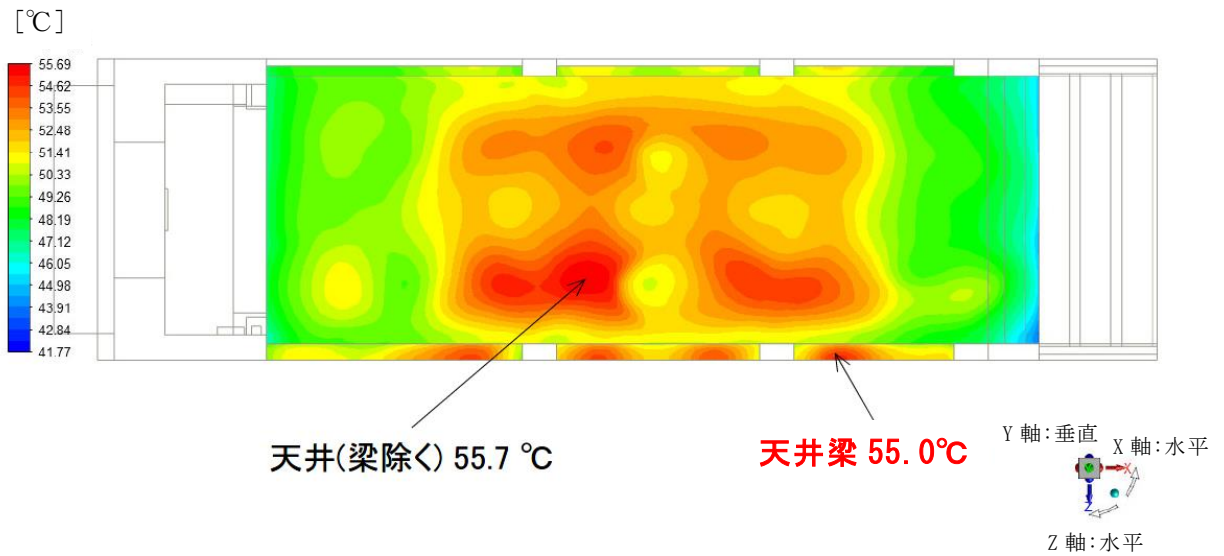
第 11-2 図 側壁表面温度分布
（BWR用中型キャスク（タイプ2））

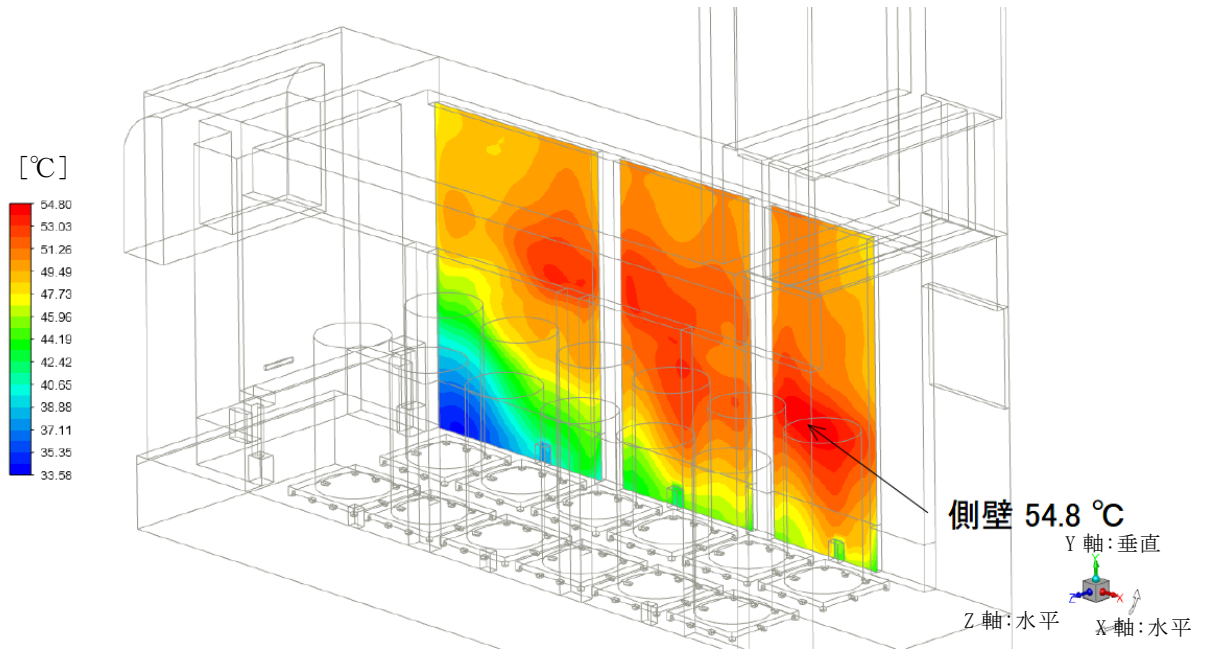


第 11-3 図 支柱表面温度分布
(BWR用中型キャスク(タイプ2))

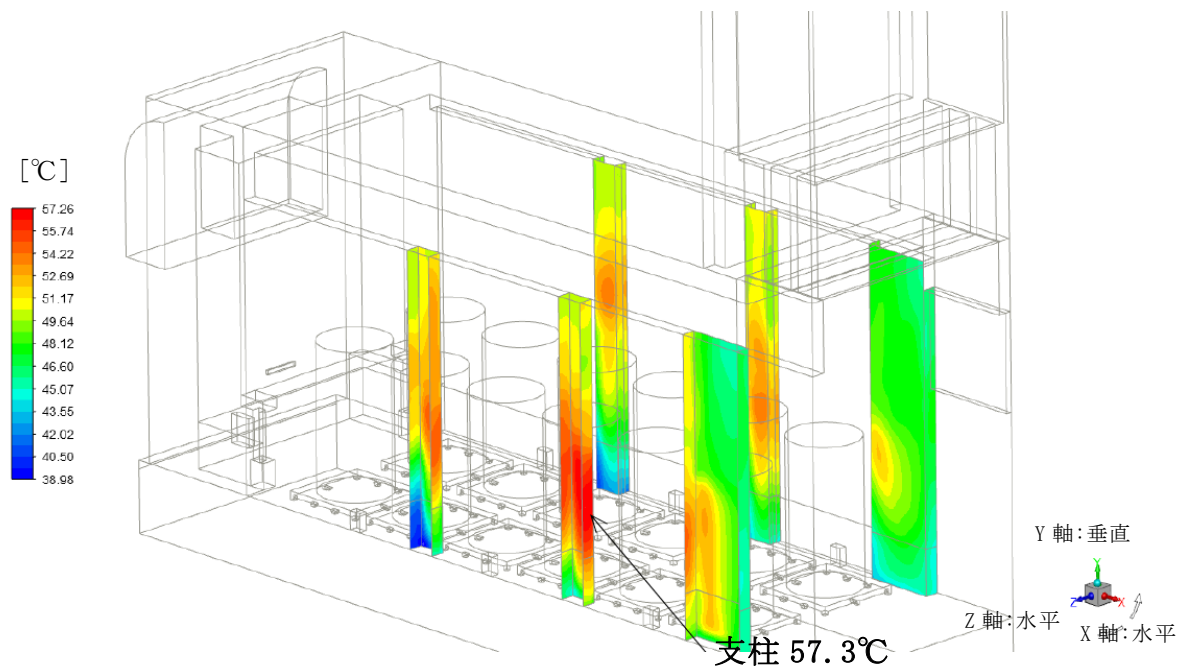


第 11-4 図 床表面温度分布
(BWR用中型キャスク(タイプ2))

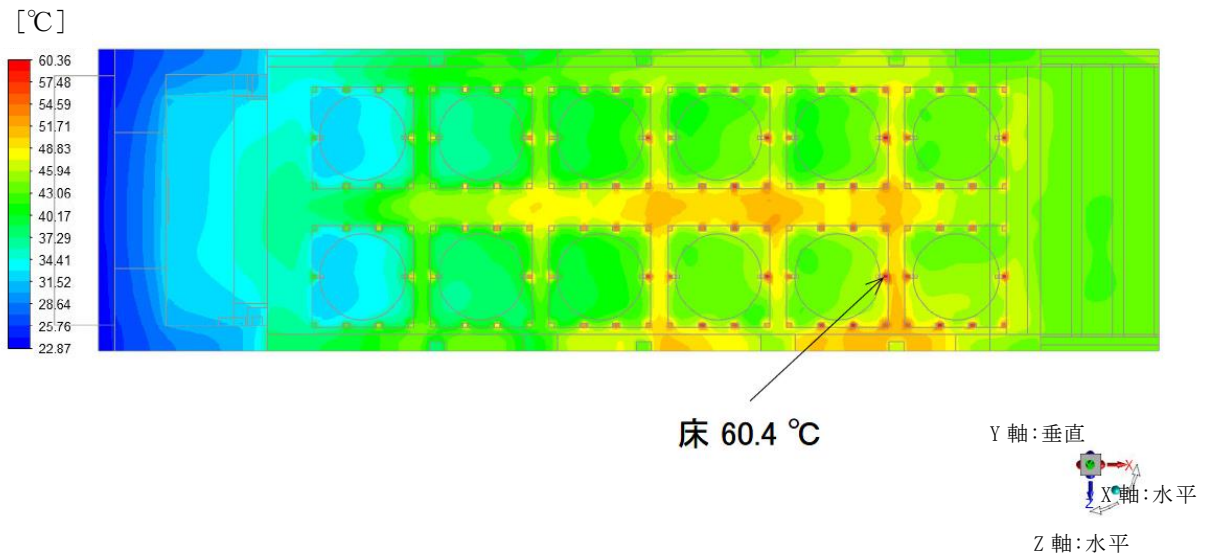




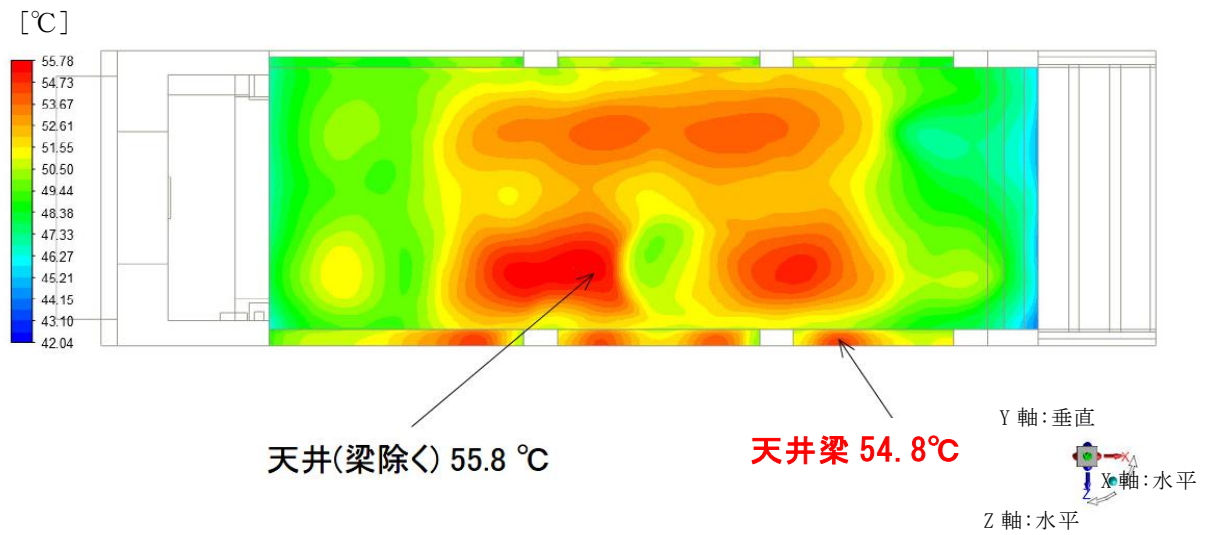
第 12-2 図 側壁表面温度分布
(PWR用キャスク(タイプ1))



第 12-3 図 支柱表面温度分布
(PWR用キャスク(タイプ1))



第 12-4 図 床表面温度分布
(PWR 用キャスク (タイプ 1))



第 12-5 図 天井表面温度分布
(PWR 用キャスク (タイプ 1))

使用済燃料貯蔵建屋の除熱設計について

1. 一次元熱計算の除熱評価方法

一次元熱計算による評価では、使用済燃料貯蔵建屋内の雰囲気温度を使用済燃料貯蔵建屋内で最も高くなる排気温度で代表する。

排気温度は、冷却方式と使用済燃料貯蔵建屋形状等から定まる換気流量で崩壊熱を除去するときの温度上昇を設計給気温度に加えることにより求まる（一次元熱評価）。

換気流量（使用済燃料貯蔵建屋内に流入する冷却空気流量）は、使用済燃料貯蔵建屋内の発熱を除去するために必要な流量 W_1 [式(1)] と、ドラフト力（通風力）及び圧力損失から求まる流量 W_2 [式(2)] とのバランス点により定まる。このバランス点を求めるため、排気温度 (T_{out}) を仮定することにより W_1 と W_2 を計算し、 $W_1=W_2$ となる排気温度を繰り返し計算により求める。

排気温度と空気流量のバランスを別添 1-1 図に示す。

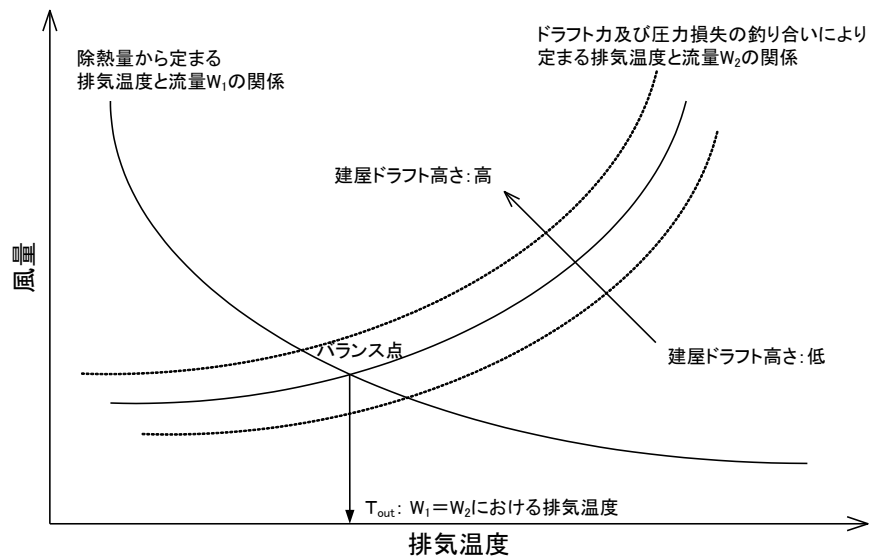
また、使用済燃料貯蔵建屋の流路における圧力損失係数及び流路面積は別添 1-1 表のとおりとなる。

$$W_1 = \frac{Q}{C_p(T_{out} - T_{in})} \dots\dots\dots (1)$$

$$W_2 = \sqrt{\frac{H(\rho_{in} - \rho_{out})g}{\sum \frac{\zeta_i}{2A_i^2 \rho_i}}} \dots\dots\dots (2)$$

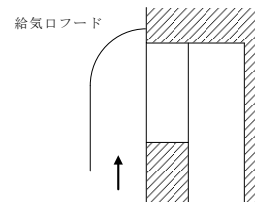
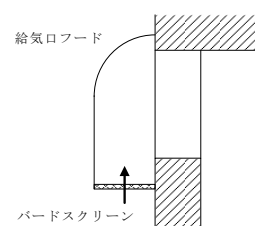
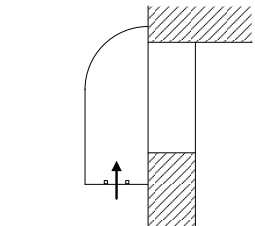
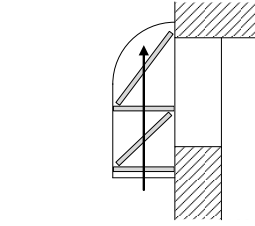
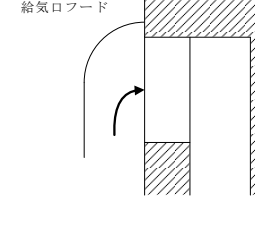
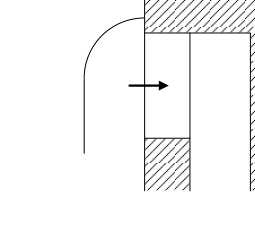
$$\rho_i = \frac{1.293}{1 + 0.00367t_i} \dots\dots\dots (3)$$

- Q : 発熱量(W)
- W : 空気の質量流量(kg / s)
- C_p : 比熱(J / kg / K)
- T_{out} : 排気温度(K)
- T_{in} : 給気温度(K)
- t_i : 場所 i における空気温度(°C)
- H : ドラフト高さ(m)
- ρ_{in} : 入口空気密度(kg / m³)
- ρ_{out} : 出口空気密度(kg / m³)
- ρ_i : 場所 i における空気密度(kg / m³)
- g : 重力加速度(m / s²)
- ζ_i : 圧力損失要素 i における圧力損失係数
- A_i : 圧力損失要素 i における流路断面積(m²)



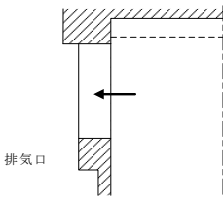
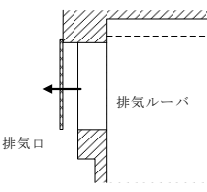
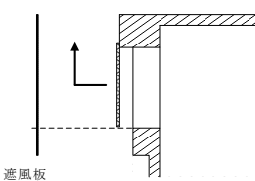
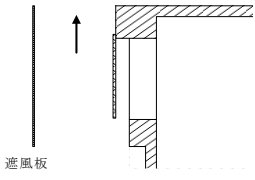
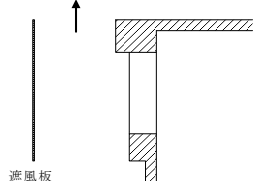
別添 1 - 1 図 一次元熱計算における排気温度と空気流量のバランス関係

別添 1 - 1 表 流路の圧力損失係数及び流路面積

No.	流路の形状	部位名称	流路面積 A_1 (m^2)	圧損係数 ζ_i	$\frac{\zeta_i}{A_1^2}$ (m^{-4})	圧損係数の出展
①		フード (給気口)	13.2	0.97	0.0056	Handbook of Hydraulic Resistance 3rd Edition
②		バード スクリーン	13.2	0.32	0.0018	Handbook of Hydraulic Resistance 3rd Edition
③		□鋼	13.2	0.38	0.0022	Handbook of Hydraulic Resistance 3rd Edition
④		フード内 構造物	13.2	0.16	0.00092	Handbook of Hydraulic Resistance 3rd Edition
⑤		曲がり (給気フード)	13.2	0.54	0.0031	Handbook of Hydraulic Resistance 3rd Edition
⑥		縮流 (給気フード 取り付け部 段差)	14.0	0.052	0.00027	技術資料 管路・ダクトの 流体抵抗 (JSME)

No.	流路の形状	部位名称	流路面積 $A_1(\text{m}^2)$	圧損係数 ζ_i	$\frac{\zeta_i}{A_1^2}(\text{m}^{-4})$	圧損係数の出展
⑦		オリフィス (給気部)	25.9	3.2	0.0048	Handbook of Hydraulic Resistance 3rd Edition
⑧		直角曲がり (給気部)	25.9	1.9	0.0028	Handbook of Hydraulic Resistance 3rd Edition
⑨		給気部 設置物 (鉛直方向)	14.8	0.086	0.00039	技術資料 管路・ダクトの 流体抵抗 (JSME)
⑩		直角曲がり (給気部→ 貯蔵部)	14.8	2.3	0.011	Handbook of Hydraulic Resistance 3rd Edition
⑪		給気部 設置物 (水平方向)	22.2	0.040	0.000081	技術資料 管路・ダクトの 流体抵抗 (JSME)
⑫		拡流 (給気部→ 貯蔵部)	22.2	1.2	0.0024	技術資料 管路・ダクトの 流体抵抗 (JSME)

No.	流路の形状	部位名称	流路面積 A_1 (m ²)	圧損係数 ζ_i	$\frac{\zeta_i}{A_1^2}$ (m ⁻⁴)	圧損係数の出展
⑬ ※		管群 (貯蔵部)	BWR用大型キャスク(タイプ2A)			Handbook of Hydraulic Resistance 3rd Edition
			8.46	1.6	0.022	
			BWR用中型キャスク(タイプ2)			
			9.02	1.6	0.020	
			PWR用キャスク(タイプ1)			
8.20	1.7	0.025				
⑭		直角曲がり (貯蔵部→ 排気部)	23.7	1.1	0.0020	Handbook of Hydraulic Resistance 3rd Edition
⑮		拡流 (遮蔽 ルーバ下端)	27.7	0.00040	5.2×10^{-7}	技術資料 管路・ダクトの 流体抵抗 (JSME)
⑯		遮蔽 ルーバ	28.2	1.1	0.0014	Handbook of Hydraulic Resistance 3rd Edition
⑰		拡流 (遮蔽 ルーバ上端)	28.2	0.0032	4.0×10^{-6}	技術資料 管路・ダクトの 流体抵抗 (JSME)
⑱		直角曲がり (排気塔 頂部)	29.8	1.3	0.0015	Handbook of Hydraulic Resistance 3rd Edition

No.	流路の形状	部位名称	流路面積 A_1 (m ²)	圧損係数 ζ_i	$\frac{\zeta_i}{A_1^2}$ (m ⁻⁴)	圧損係数の出展
⑰		縮流 (排気口部)	23.7	0.13	0.00023	技術資料 管路・ダクトの 流体抵抗 (JSME)
⑱		排気ルーバ	23.7	5.4	0.0096	排気ルーバ 通気性能試験 結果
㉑		直角曲がり (遮風板)	23.7	2.1	0.0037	Handbook of Hydraulic Resistance 3rd Edition
㉒		拡流 (排気ルー バ上端)	22.9	0.0013	2.5×10^{-6}	技術資料 管路・ダクトの 流体抵抗 (JSME)
㉓		拡流 (遮風板 上部)	23.7	1.2	0.0021	技術資料 管路・ダクトの 流体抵抗 (JSME)

※⑬に関する補足の説明を添付1に示す。

2. 三次元熱流動解析による除熱評価方法

使用済燃料貯蔵建屋内の伝熱形態を模擬するため、三次元熱流動解析コード FLUENT を用いて、伝導、対流、輻射が共存する場の支配方程式を解き使用済燃料貯蔵建屋躯体温度を評価する。

評価条件のうち、本文記載以外については下記のとおりとする。

(1) 圧力損失の模擬について

給気フード入口と給気バードスクリーン、口鋼、フード内構造物、排気ルーバ及び遮風板部（遮風板部直角曲がり、排気ルーバ上端の拡流、遮風板上部の拡流）は形状モデルで表現せず、圧力損失係数で規定する。（別添 1-1 表参照）

(2) 三次元熱流動解析における詳細解析条件

○ 使用解析コード

メッシュ作成プログラム：Gambit Ver2.3

三次元熱流動解析：

FLUENT 6.2 (BWR 用大型キャスク (タイプ 2 A))

FLUENT 2019R3 (BWR 用中型キャスク (タイプ 2))

(PWR 用キャスク (タイプ 1))

○ 乱流モデル及び浮力の考慮

乱流モデルは標準 $k-\epsilon$ モデルとし、浮力の取扱は空気の熱膨張による密度変化を体積力のみに考慮する Boussinesq 近似を用いる。

○ 輻射の解法等

輻射強度の輸送方程式を解く Discrete Ordinate 法とする。

また、固体表面は灰色体を仮定する。

○ 計算格子

評価領域の計算格子を別添 1-2 図、及び別添 1-3-1 図～別添 1-3-3 図に示す。格子数は、BWR 用大型キャスク (タイプ 2 A) の解析が 、BWR 用中型キャスク (タイプ 2) の解析が 、PWR 用キャスク (タイプ 1) の解析が となる。

○ 物性値等

空気：

- ・ BWR用大型キャスク(タイプ2 A)

伝熱工学資料第4版より, 29.5°C (302.65[K]), 1気圧の物性値を採用。

粘性率：18.76 [$\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$]

比熱：1.007 [kJ/kg/K]

プラントル数：0.717

密度：1.1665 [kg/m³]

熱伝導率：26.33 [mW/m/K]

体積膨張率：1/302.65 [1/K]

重力加速度：-9.80665 [m/s²]

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

伝熱工学資料第4版より, 29.8°C (302.95[K]), 1気圧の物性値を採用。

粘性率：18.78 [$\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$]

比熱：1.007 [kJ/kg/K]

プラントル数：0.717

密度：1.1654 [kg/m³]

熱伝導率：26.35 [mW/m/K]

体積膨張率：1/302.95 [1/K]

重力加速度：-9.80665 [m/s²]

貯蔵架台：密度, 比熱, 熱伝導率は伝熱工学資料第4版機械構造用炭素鋼 S35C を適用。放射率は伝熱工学資料第4版の白色塗装面の放射率及び「使用済燃料・混合酸化物新燃料・高レベル放射性廃棄物 輸送容器の安全設計及び検査基準：2006」のステンレス鋼 SUS304 (研磨面) の放射率より設定。

密度：7850 [kg/m³]

比熱：0.465 [kJ/kg/K]

熱伝導率：43.0 [W/m/K]

表面放射率：0.8（貯蔵架台上面／側面：塗装面）

：0.15（貯蔵架台下面：ステンレス鋼）

コンクリート：密度，比熱，熱伝導率は伝熱工学資料第4版より石灰岩コンクリート，293 [K] の物性値を採用。表面放射率は伝熱工学資料第4版コンクリート（常温）の値採用。

密度：2400 [kg/m³]

比熱：0.90 [kJ/kg/K]

熱伝導率λ：1.2 [W/m/K]

表面放射率：0.94

ただし，貯蔵区域の壁面（支柱，耐震壁，給気口側壁面）に床面より高さ 1.6mまで帯状にエポキシ塗装が為されている部位の表面放射率は，伝熱工学資料第4版の緑色塗装面（常温）の放射率より設定。

表面放射率：0.85

キャスク（表面放射率のみ）：

- ・BWR用大型キャスク（タイプ2A）

伝熱工学資料第4版の白色塗装面（常温）の放射率より設定。

表面放射率：0.8

- ・BWR用中型キャスク（タイプ2），及びPWR用キャスク（タイプ1）

MSF-52B型の型式設計特定容器等の型式指定申請書及びMSF-21P型の型式設計特定容器等の型式指定申請書より設定。

なお，型式証明申請の金属キャスクの評価においても放射率の設定は同じであり，型式証明申請書には代表的な部位の放射率が記載されている。

表面放射率（側面）：0.8

表面放射率（上面）：0.11

設置物（表面放射率のみ）

- ・ 照明設備：伝熱工学資料第4版の白色塗装面（常温）の放射率より設定。

表面放射率：0.8

- ・ 圧力変換器給電盤：伝熱工学資料第4版の白色塗装面（常温）の放射率より設定。

表面放射率：0.8

- ・ 安定器収容盤：伝熱工学資料第4版の白色塗装面（常温）の放射率より設定。

表面放射率：0.8

- ・ ケーブルトレイ(大)：Perry's Chemical Engineers Handbook 8th Edの亜鉛めっき表面(灰色)(常温)の放射率より設定。

表面放射率：0.3

- ・ プルボックス(大)：Perry's Chemical Engineers Handbook 8th Edの亜鉛めっき表面(灰色)(常温)の放射率より設定。

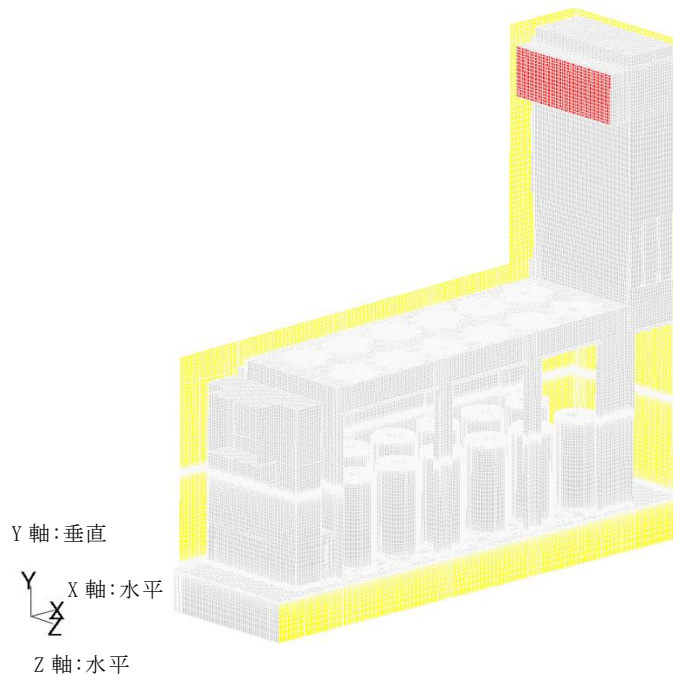
表面放射率：0.3

- ・ ケーブルトレイ(小)：Perry's Chemical Engineers Handbook 8th Edの亜鉛めっき表面(灰色)(常温)の放射率より設定。

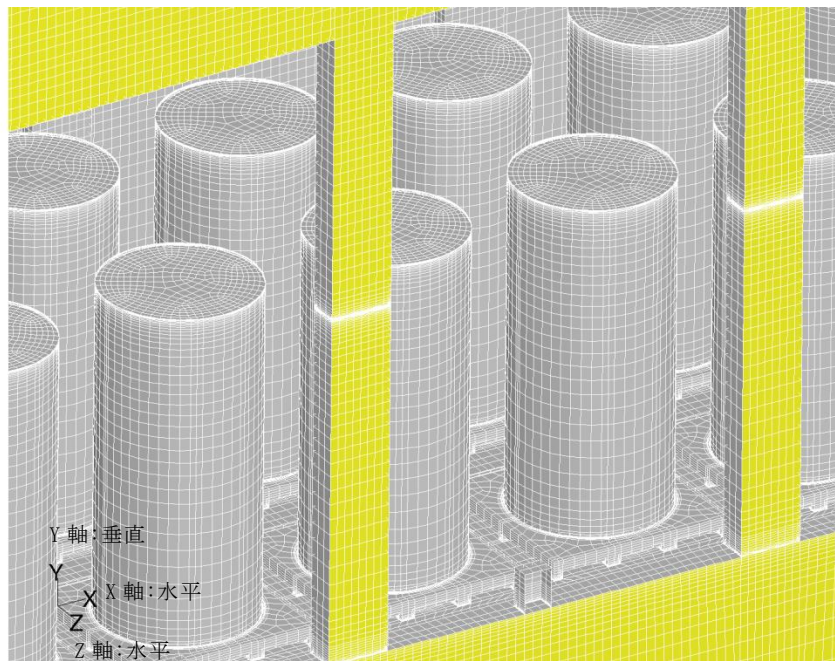
表面放射率：0.3

- ・ プルボックス(小)：Perry's Chemical Engineers Handbook 8th Edの亜鉛めっき表面(灰色)(常温)の放射率より設定。

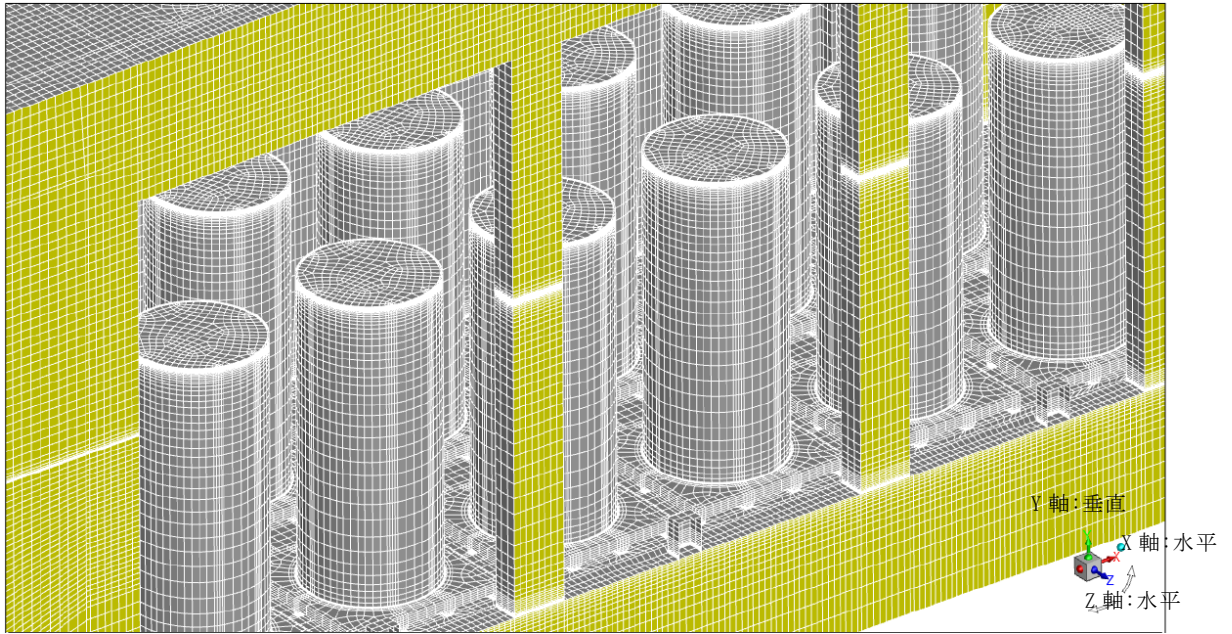
表面放射率：0.3



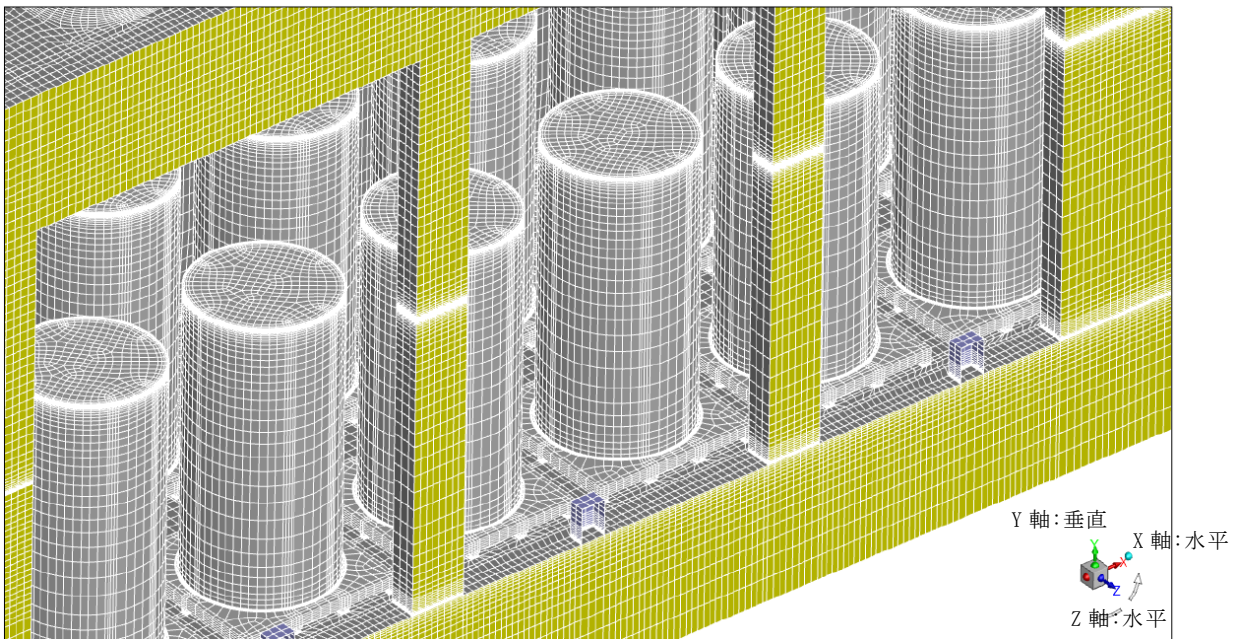
別添 1 - 2 図 三次元熱流動解析における計算格子



別添 1 - 3 - 1 図 三次元熱流動解析における計算格子
 (BWR用大型キャスク(タイプ2A)及び貯蔵架台)



別添 1-3-2 図 三次元熱流動解析における計算格子
 (BWR用中型キャスク(タイプ2)及び貯蔵架台)



別添 1-3-3 図 三次元熱流動解析における計算格子
 (PWR用キャスク(タイプ1)及び貯蔵架台)

3. F L U E N T の 検 証

(1) 概要

F L U E N T は米国の企業により開発され、非圧縮性流れから圧縮性流れ、伝熱、化学反応等の幅広い物理モデルを備える汎用三次元熱流動解析コードである。米国を中心に熱流動解析のスタンダードコードとして扱われており、国際的にも導入実績が多いコードである。原子力分野でも米国の安全審査等で多くの実績を有しており、米国の使用済燃料中間貯蔵施設や発電所内貯蔵施設の安全審査におけるコンクリートキャスクの熱流動解析においても利用されている。

そこで、東京電力(株)において電力中央研究所に委託して実施したスタック方式の施設に係る除熱実証試験¹⁾を対象とし、F L U E N T の妥当性確認解析を実施した。

以下では、その除熱実証試験の概要と妥当性確認解析の概要を示す。

(2) 除熱実証試験概要

a. 試験装置

(a) 貯蔵部及び給排気部（別添 1 - 4 図～別添 1 - 6 図参照）

- ・ 試験装置は、貯蔵部と給排気部を 1/5 スケールモデルで模擬したものであり、装置内には 4 行×6 列の計 24 基の模擬キャスクを 800mm ピッチの正方形配列で配置
- ・ 天井高さが熱流動特性に及ぼす影響を評価するため、貯蔵部の天井は上下に可動可能
- ・ 試験装置からの放熱を低減するため、側壁や床面及び天井面には断熱材を充填
- ・ 可視化のため貯蔵部の内壁を黒色に塗装
- ・ スタックは開閉式とし、スタックが開かれている場合には、自然対流条件での試験（以下「自然通風試験」という）が可能。また、閉じた場合には、スタック端に回転数を制御可能なファンを接続し、強制対流状態での試験が可能

(b) 模擬キャスク（別添 1 - 7 図参照）

- ・ 模擬キャスクは、外形 $\phi 500\text{mm} \times 1,100\text{mm}$ で、発熱能力は $0 \sim 2\text{kW/体}$
- ・ 表面からの発熱を等熱流速条件とするため、SUS 製の円筒内面にラバーヒータ（絶縁機能をもつシリコンシートに帯状ヒータをエッチングした電気式ヒータ）を貼り付け
- ・ 熱輻射を防ぐため外表面はバフ #600 相当の鏡面仕上げとし、模擬キャスク内部で対流伝熱が起きないように内部にロックウールを充填

(c) 計測装置及び計測位置（別添 1 - 8 図参照）

- ・ 模擬キャスク埋込熱電対
- ・ 貯蔵部温度計測用ツリー熱電対
- ・ 熱電対付きの風速計

b. 試験内容

はじめに予備試験を行い、貯蔵部の天井高さを 1.6m, 2.3m, 3.0m として、貯蔵部内の熱流動特性等を評価し、貯蔵部の天井高さを選定する。

予備試験の結果に基づき天井高さが決定された後、本試験を行う。本試験ではリチャードソン数 (Ri) を実規模相当施設と一致させた試験を行い、貯蔵部の温度分布、速度分布を測定する。

(3) 妥当性確認解析の概要

a. 解析条件

主な解析条件を以下に示す。

- 解析コード：FLUENT 2019R3
- 輻射の考慮：なし（実証試験では模擬キャスクの輻射を低減するため、表面を鏡面仕上げとしている）
- 乱流モデル：標準 $\kappa - \epsilon$ モデル
乱流エネルギー κ と乱流散逸率 ϵ の輸送方程式から乱流による運動量拡散、熱輸送効果を求める解法。
- 浮力の考え方：ブジネスク近似
対流のような密度不均一な流体を議論する際に、密度不均一の効果は浮力のような体積力だけについて考え、そ

の他の効果，慣性力や連続の方程式では密度を均一とする近似

- 壁面条件：解析モデルの試験建屋に相当する壁面部分は滑り無し，断熱壁として設定
- 模擬キャスク発熱面：試験条件に相当する放熱流束を一定値として与える

- 計算格子：別添 1－9 図参照

物体の空気側第 1 計算セルの厚さは，模擬キャスク表面で ，総格子数は 格子。

b. 検証解析結果

除熱実証試験における本試験の実施ケースのうち，実規模施設相当の設計条件（キャスク発熱量：20kW/基，スタック高さ：20m）を模擬したケース RUN3（天井高さ：2.3m，リチャードソン数 $Ri=5.60$ ，試験時給気温度 22.9℃）の実験結果を，検証解析結果と比較する。

別添 1－10 図に建屋内の高さ方向温度分布と速度分布の比較位置を示す。別添 1－11 図～別添 1－13 図に建屋内高さ方向温度分布の試験値と解析による計算値の比較，別添 1－14 図に建屋内高さ方向気流速度分布の試験値と解析による計算値の比較を示す。

建屋内温度分布は，高さの低い床面近傍位置において，解析値が試験値に対して低い結果となっているが，それ以外の位置においては概ね相違ない結果となっていること，また，建屋内速度分布は，解析値と試験値とが概ね相違ない結果となっていることがわかる。その他，ホットスポット（局所的な高温領域）は試験結果，解析結果でともに報告されておらず，よどみ領域はスケール試験とほぼ同じ領域に解析で再現（低温で低速の循環流領域）されていることが確認できる。除熱実証試験結果と検証解析結果の比較により，三次元熱流動解析コード FLUENT 上で標準 $\kappa-\epsilon$ 乱流モデル，ブシネスク近似を用いることで，貯蔵建屋内の伝熱流動状態を適切に模擬できると判断する。

空気温度の解析値が，試験値に対し床面近傍位置において低い結果と

なった理由は、試験の実施方針に合わせて輻射を考慮しない条件で解析を行ったためである。この場合の伝熱経路は、模擬キャスクの発熱面から空気への対流伝熱だけであり、暖められた空気は天井面近傍へと上昇していく。よって、天井面近傍は温度が高いが、床面近傍は温度の低い状態となる。一方、輻射も考慮した場合の伝熱経路は、模擬キャスク側面から床面・支柱等への輻射による下部方向への伝熱が加わるため、試験建屋下部の空気温度は上昇し易いと考えられる。

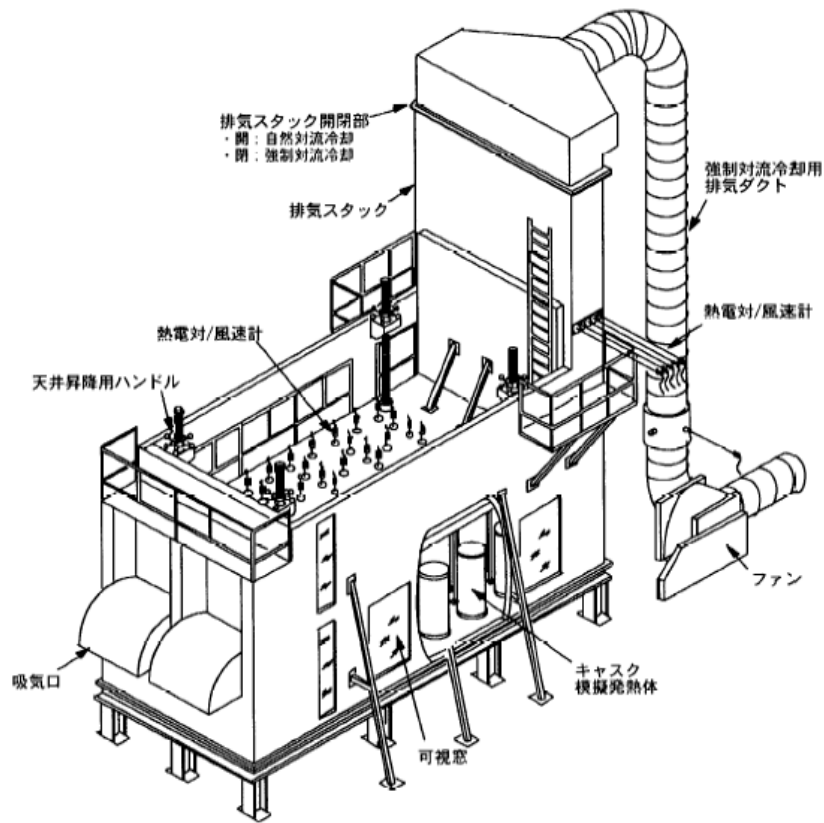
除熱実証試験では、模擬キャスク側部表面を鏡面仕上げとして模擬キャスクの輻射を低減しているが、実際には一定量の輻射伝熱（放射率 0.1 程度²⁾）が存在すると考えられ、発熱面であるキャスク側面からの輻射を受けやすい床面・支柱等が暖められ、それら暖められた床面・支柱等によって試験建屋下部の空気が加熱されると考えられる。

(4) FLUENT6.2 について

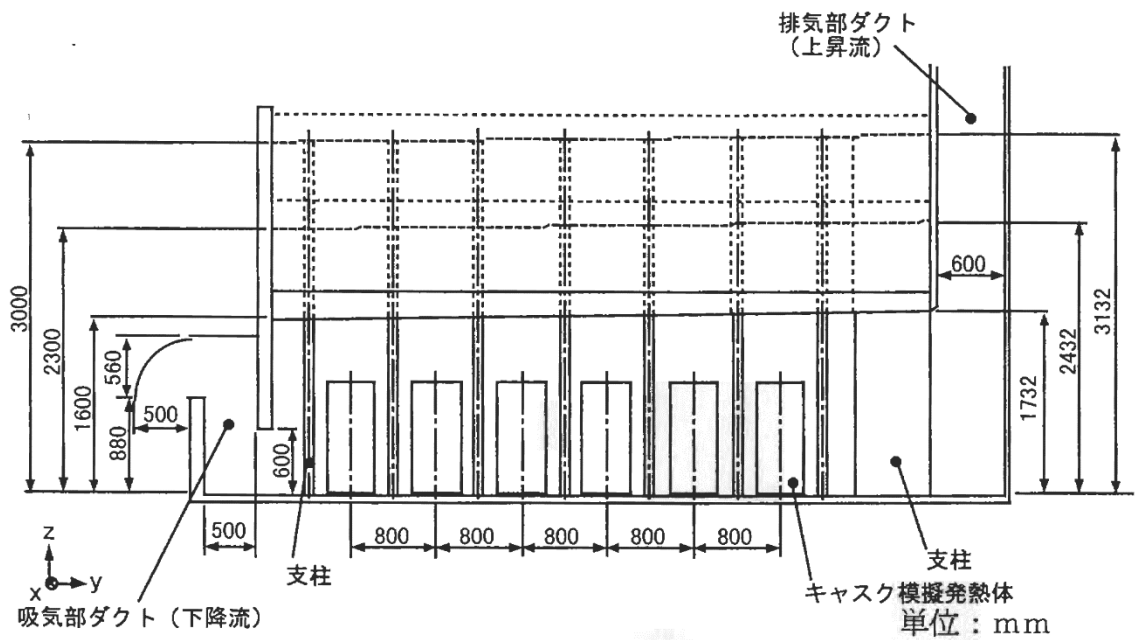
除熱評価に使用している解析コードである FLUENT6.2 と FLUENT2019R3 は、それぞれ実験との比較による検証を実施しているが、FLUENT6.2 の検証は既許可当時（令和 2 年 11 月 11 日許可）に行ったものであることを踏まえ、今回、同じ解析条件で実施した解析結果と比較した。その結果、解析結果は同等であることから、既許可で使用している FLUENT6.2 を使用した評価結果は現時点においても妥当なものと考えられる。（別添 1 - 2 表参照）

参考文献

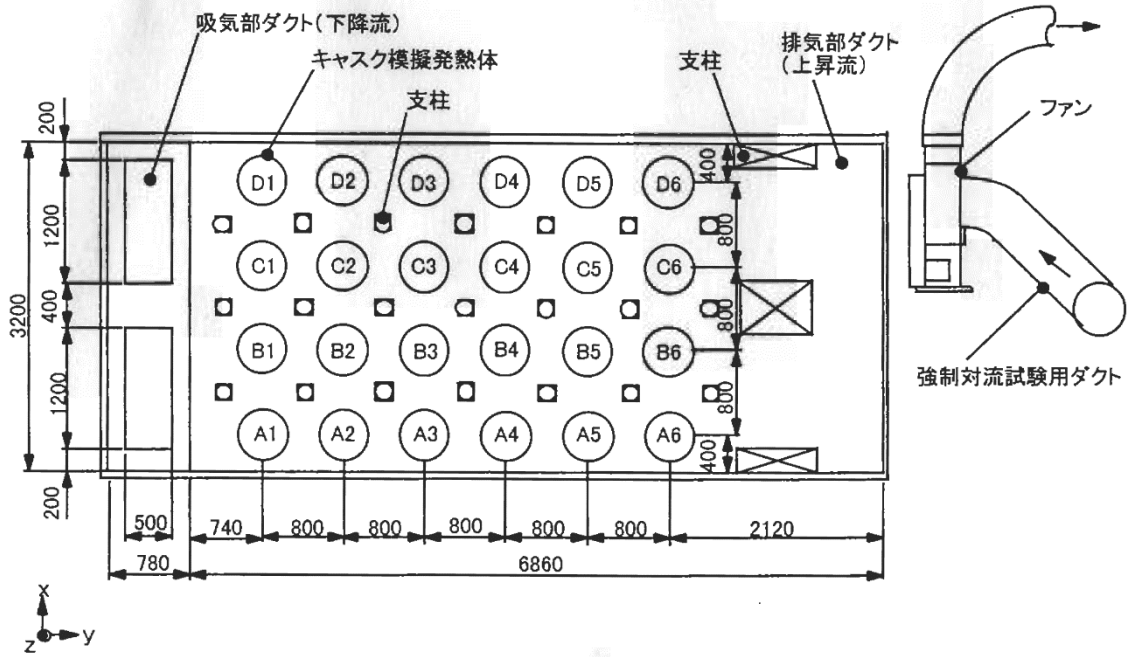
- 1) 竹田浩文・古賀智成・亘真澄・坂本和昭，キャスク貯蔵施設の除熱性能の実証に関する研究—スタック方式施設の除熱試験—依頼報告：U99505，電力中央研究所報告，2000 年
- 2) 日本機械学会，伝熱工学資料 改訂第 4 版，丸善株式会社，2003 年



別添 1 - 4 図 試験装置鳥瞰図¹⁾

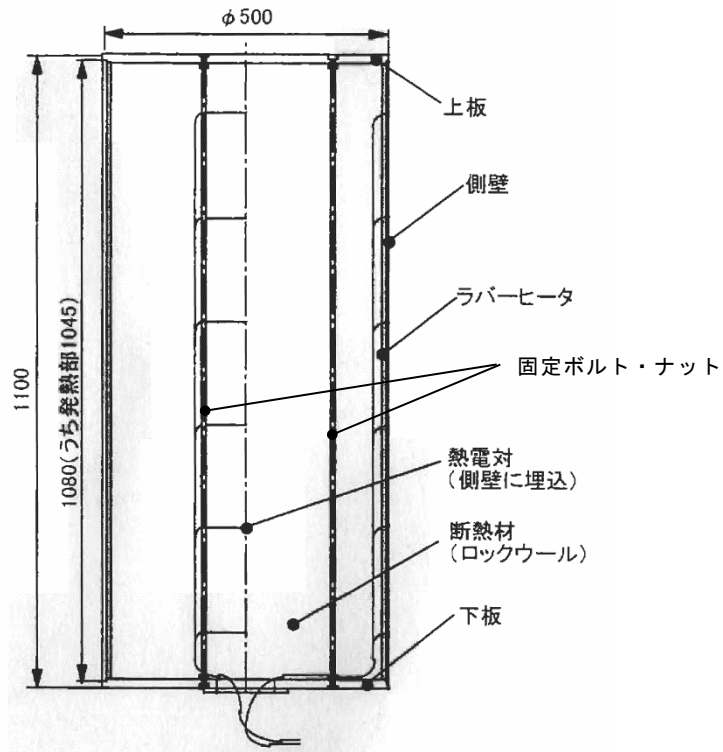


別添 1 - 5 図 試験装置の貯蔵部立断面図¹⁾

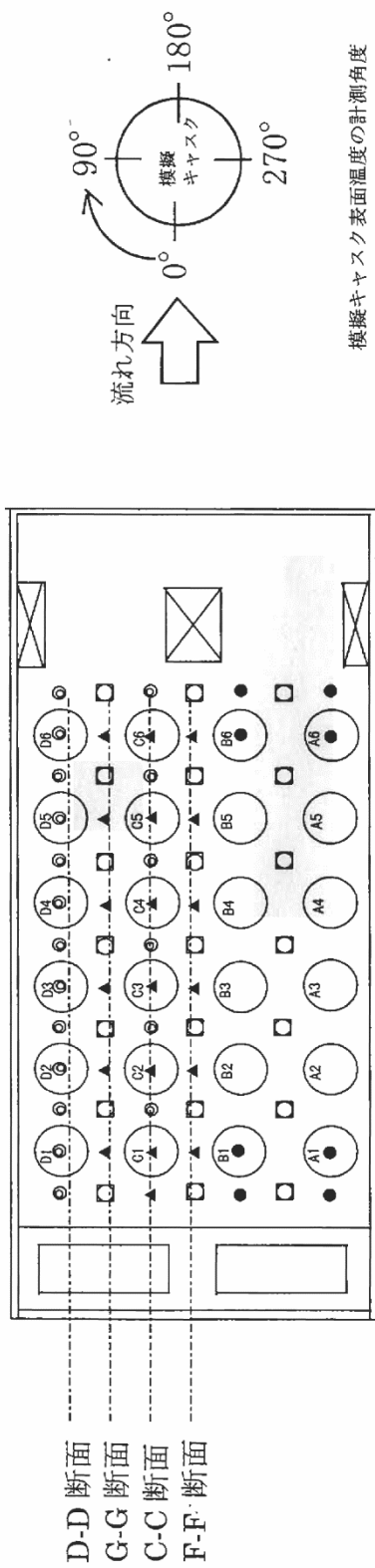


単位：mm

別添1-6図 試験装置の貯蔵部平面図¹⁾

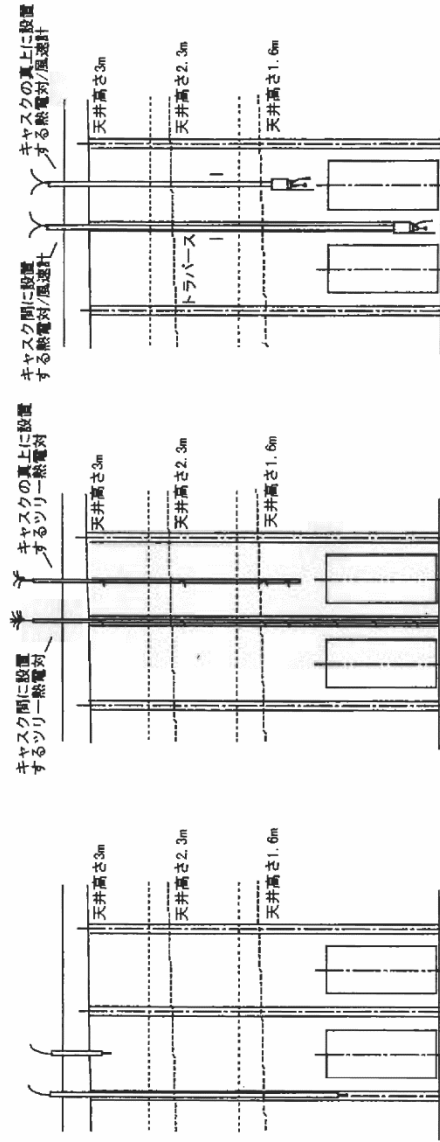


別添1-7図 模擬キャスク断面図¹⁾



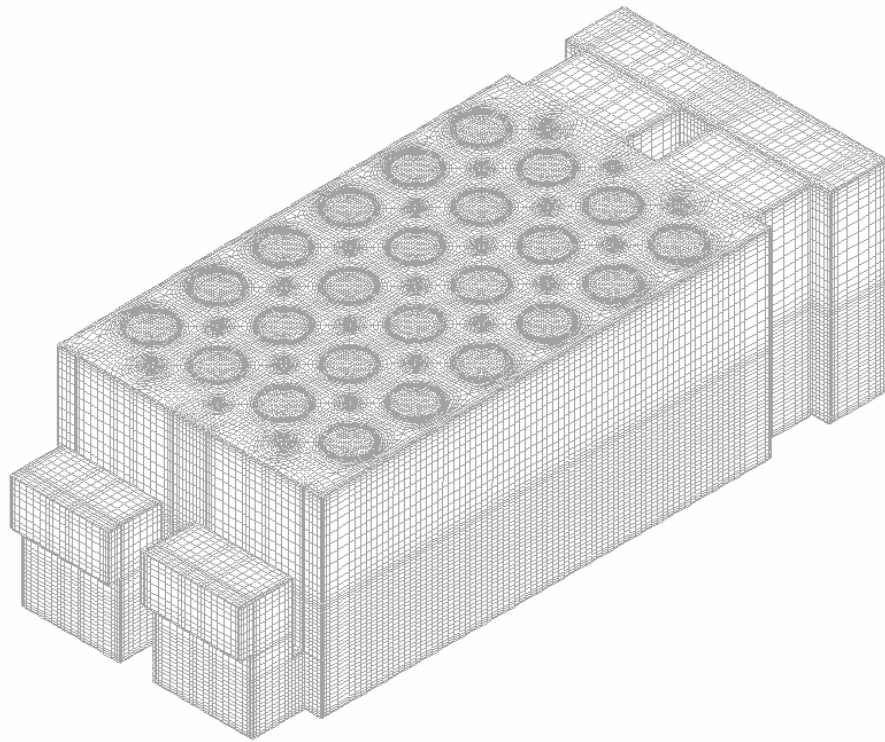
模擬キャスク表面温度の計測角度

計測装置の配置場所と装置種別

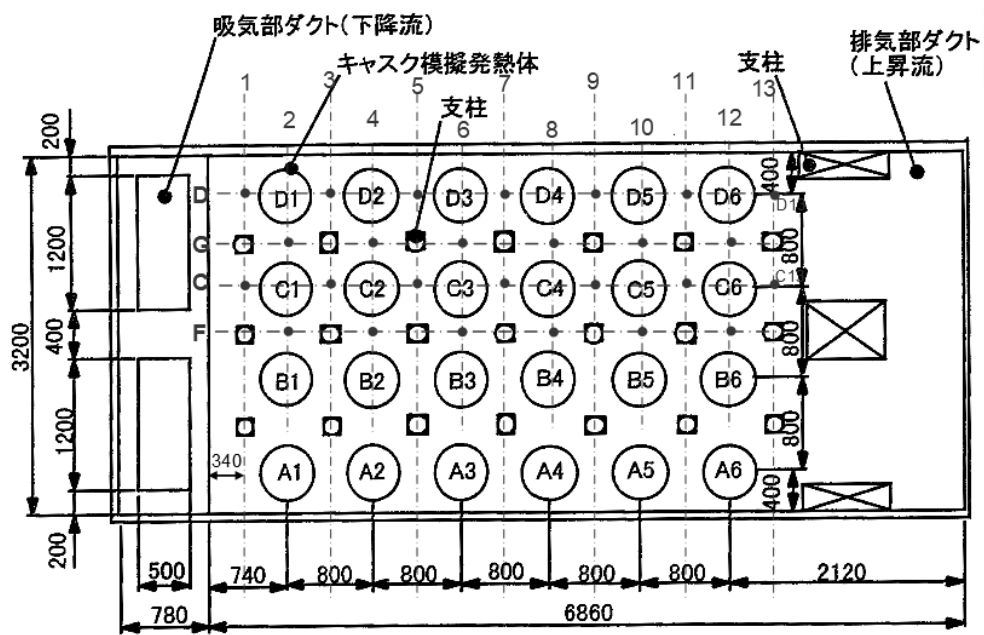


- a. 平面図で「●」で示した場所に設置した熱電対
- b. 平面図で「◎」で示した場所に設置したツリ一熱電対
- c. 平面図で「▲」で示した場所に設置した熱電対/風速計

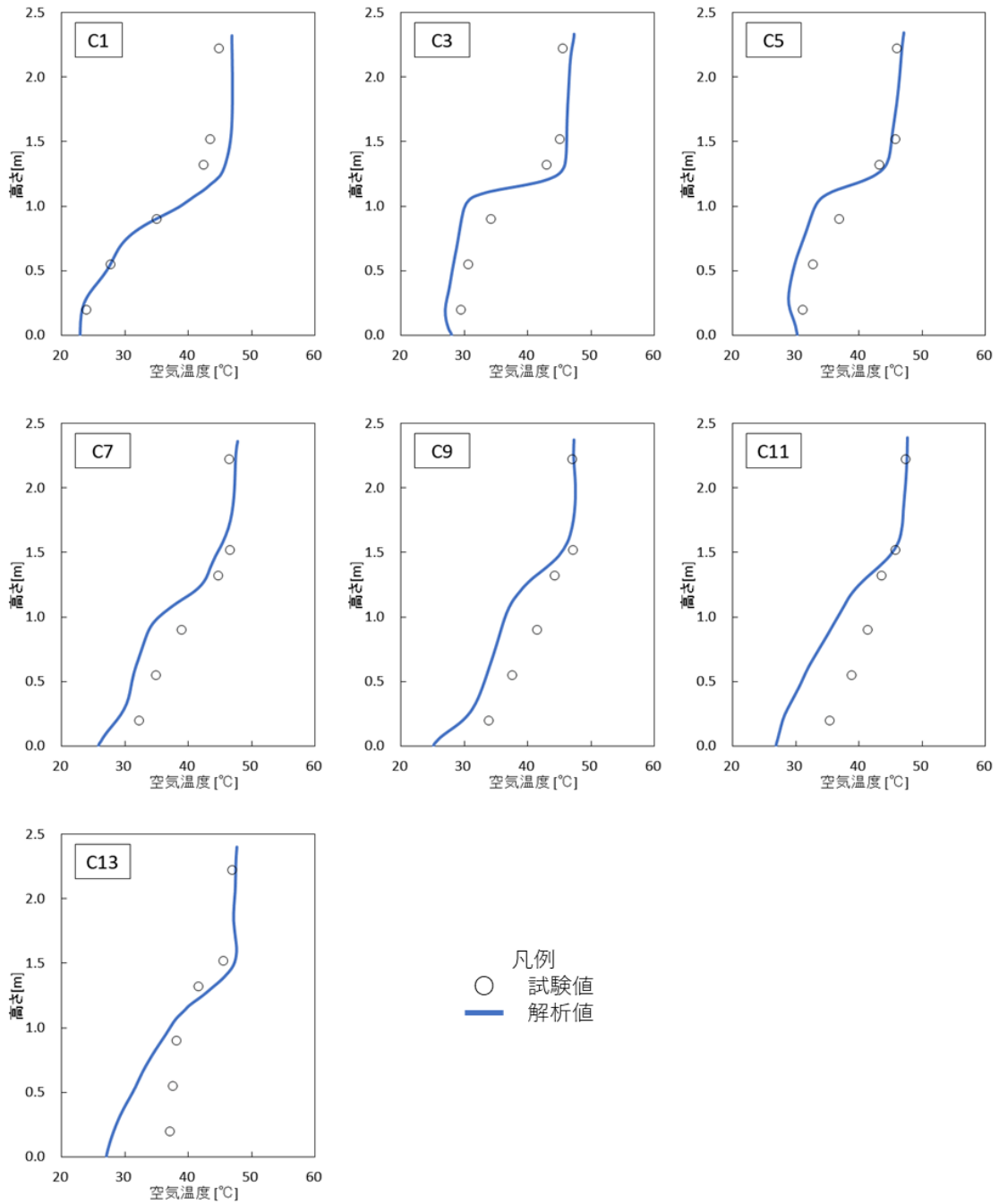
別添 1 - 8 図 計測位置 (貯蔵部) 1)



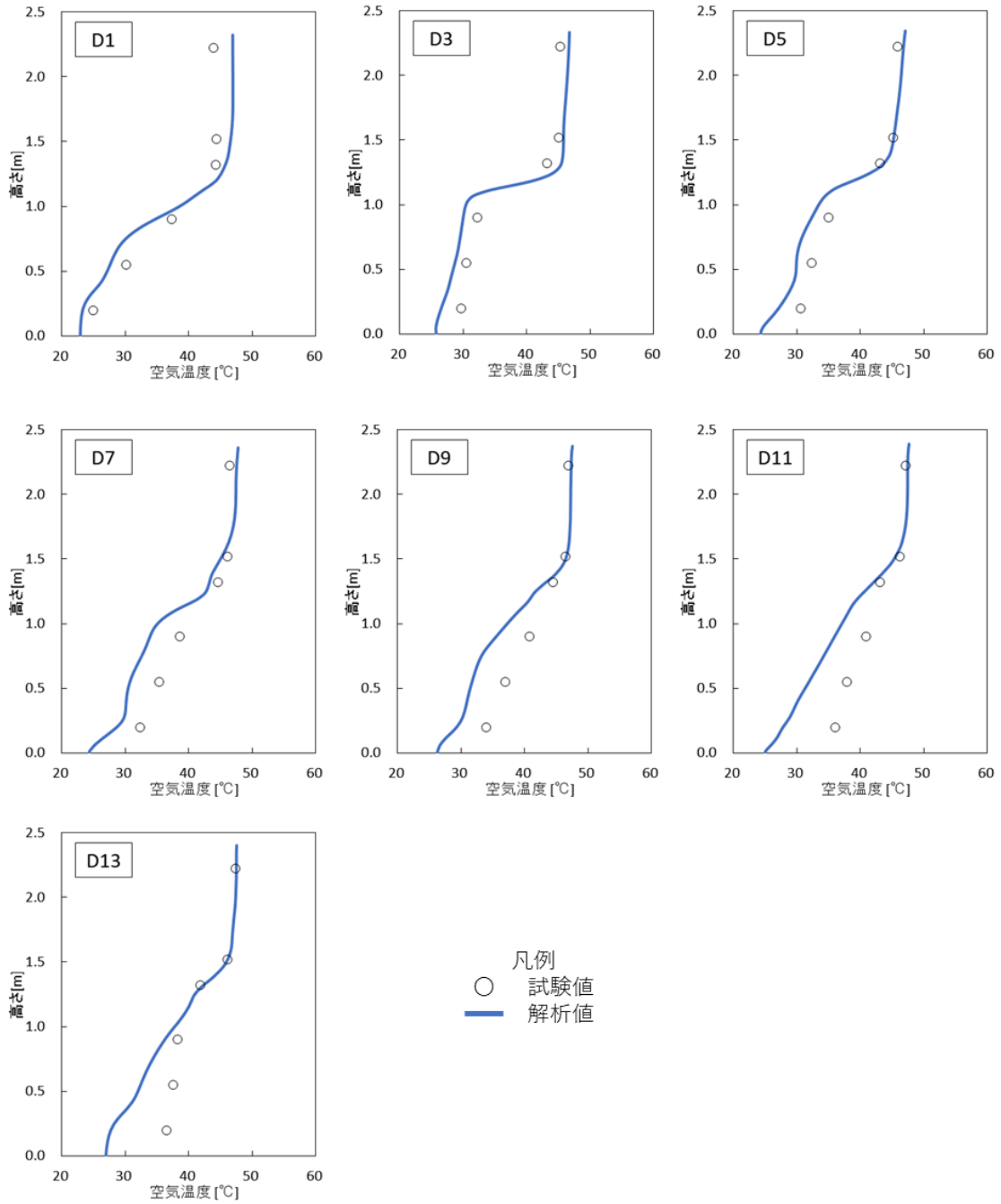
別添 1 - 9 図 妥当性確認解析の全体モデル



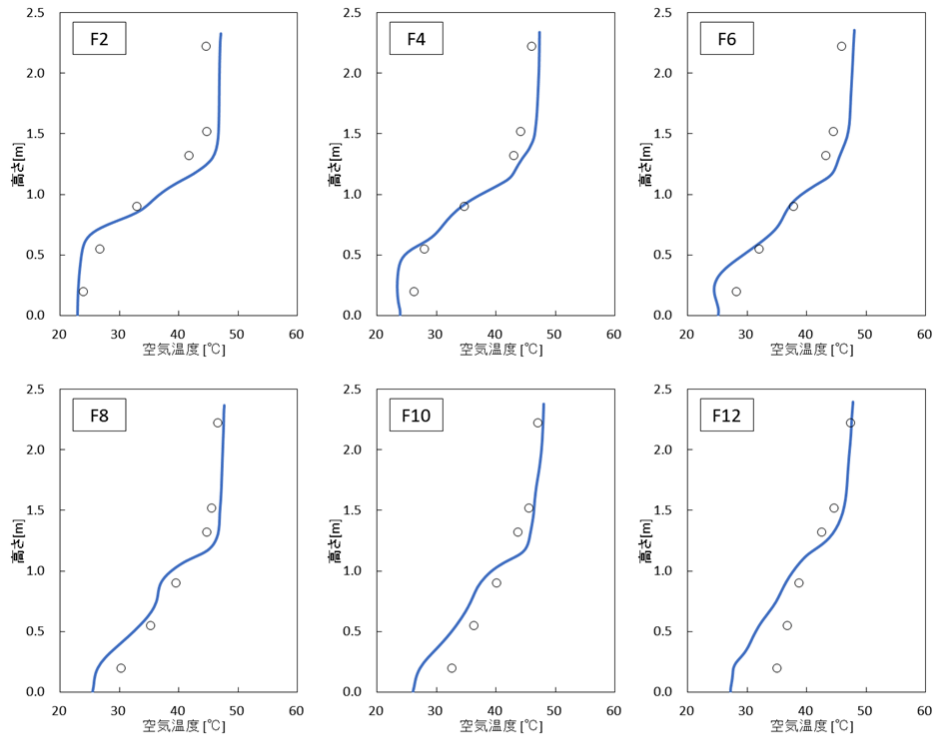
別添 1 - 10 図 建屋内高さ方向温度分布, 速度分布の比較位置
(C, D, F, G 列上の交点)



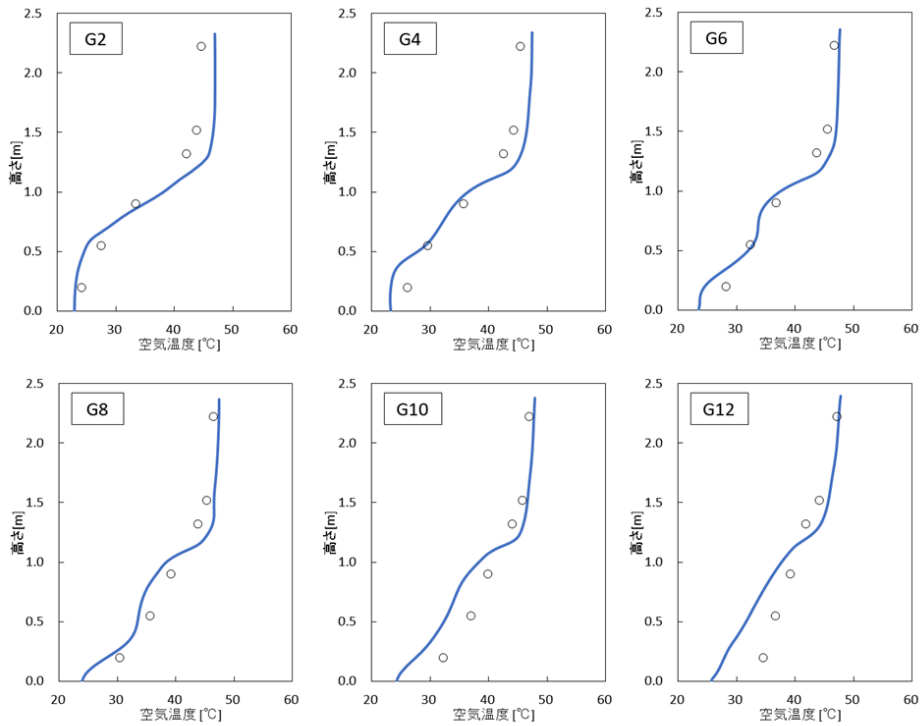
別添 1-11 図 建屋内温度分布比較 (その 1)



別添 1-12 図 建屋内温度分布 (その 2)

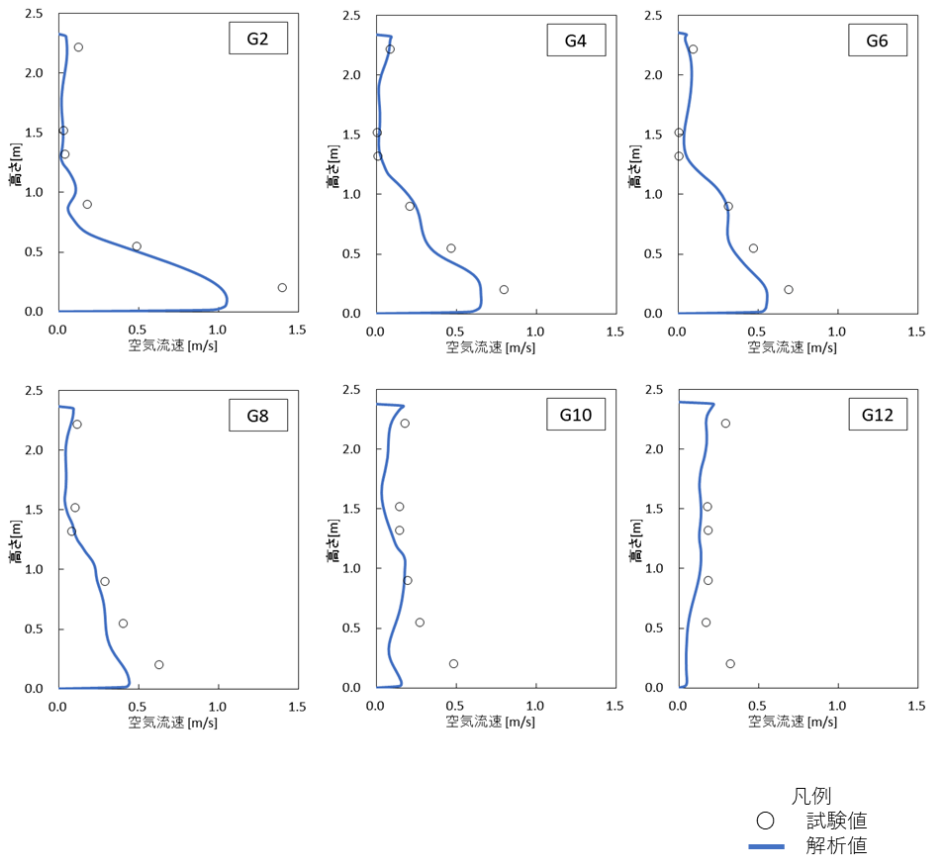
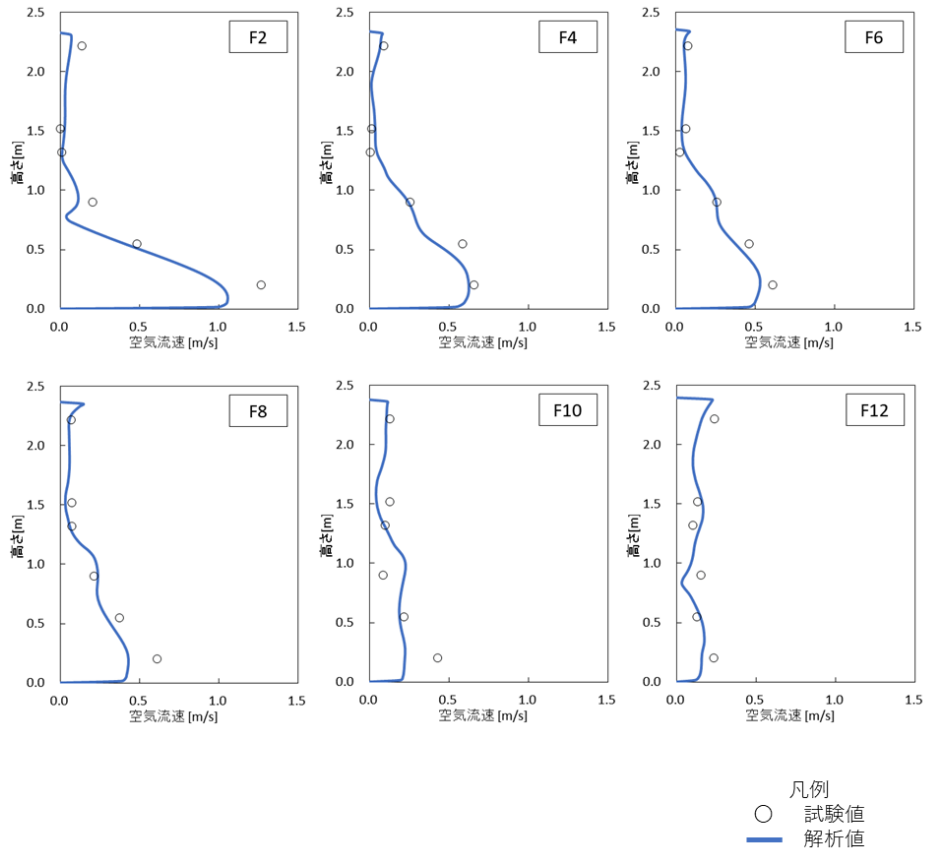


凡例
○ 試験値
— 解析値



凡例
○ 試験値
— 解析値

別添 1 - 13 図 建屋内温度分布 (その 3)



別添 1 - 14 図 建屋内速度分布比較

6 条(建屋) - 別添 1 - 24

別添 1 - 2 表 解析コードの比較評価

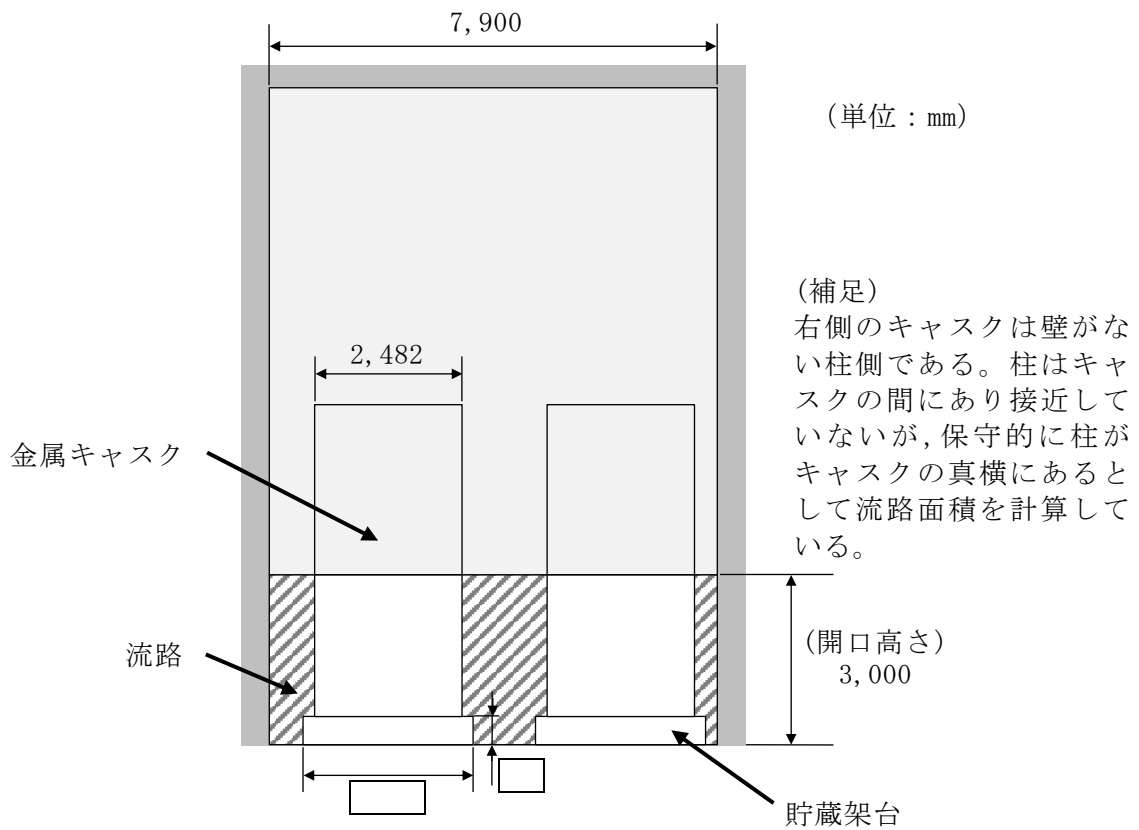
	項 目	今回実施 (A)	既実施 (B)	差 異 (A)-(B)
評価条件	解析コード	FLUENT2019R3	FLUENT6.2	
	評価対象 キャスク	BWR用大型キャスク (タイプ2A)	同左	
	金属キャスク 発熱量	1基当たり 12.1kW (合計 145.2kW)	同左	
	給気温度	29.5℃	同左	
評価結果	排気温度	38.3℃	38.3℃	±0.0℃
	空気流量	16.0kg/s	16.0kg/s	±0.0kg/s
	側壁	52.6℃	52.7℃	-0.1℃
	支柱	54.4℃	54.4℃	±0.0℃
	床	57.0℃	56.9℃	+0.1℃
	天井面 (梁除く)	54.5℃	54.5℃	±0.0℃
	天井梁	55.6℃	55.6℃	±0.0℃

添付 1

(補足) 一次熱計算における貯蔵部の流路設定について

別添 1-1 表 (流路の圧力損失係数及び流路面積)「⑪管群 (貯蔵部)」において、BWR用大型キャスク(タイプ 2 A)で一次元熱計算を実施した際の流路面積を以下に示す。

一次元熱計算における冷却空気の想定流路は、貯蔵区域への開口高さ 3000mm 以下を流路とし、そこから金属キャスク及び貯蔵架台を除いた部分を設定している。(添付 1-1 図の内、斜線部)



貯蔵区域の想定流路高さ 3,000mm の面積 :	$3,000 \times 7,900 = 23,700,000$ mm ²
貯蔵架台の投影面積 :	<input type="text"/> $\times 2 =$ <input type="text"/> mm ²
流路の金属キャスクの投影面積 :	$2,482 \times (3,000 - \text{}) \times 2 =$ <input type="text"/> mm ²
流路面積 :	$23,700,000 - \text{} - \text{} = 8,458,110$

添付 1-1 図 圧損係数における想定 (⑬管群 (貯蔵部)) の流路面積

(補足) F L U E N T 検証における模擬キャスクの輻射の考慮について

電中研試験では、模擬キャスク側部表面を鏡面仕上げとして、模擬キャスクの輻射を低減していることから、解析コードの検証解析では、輻射を考慮しない条件とした。

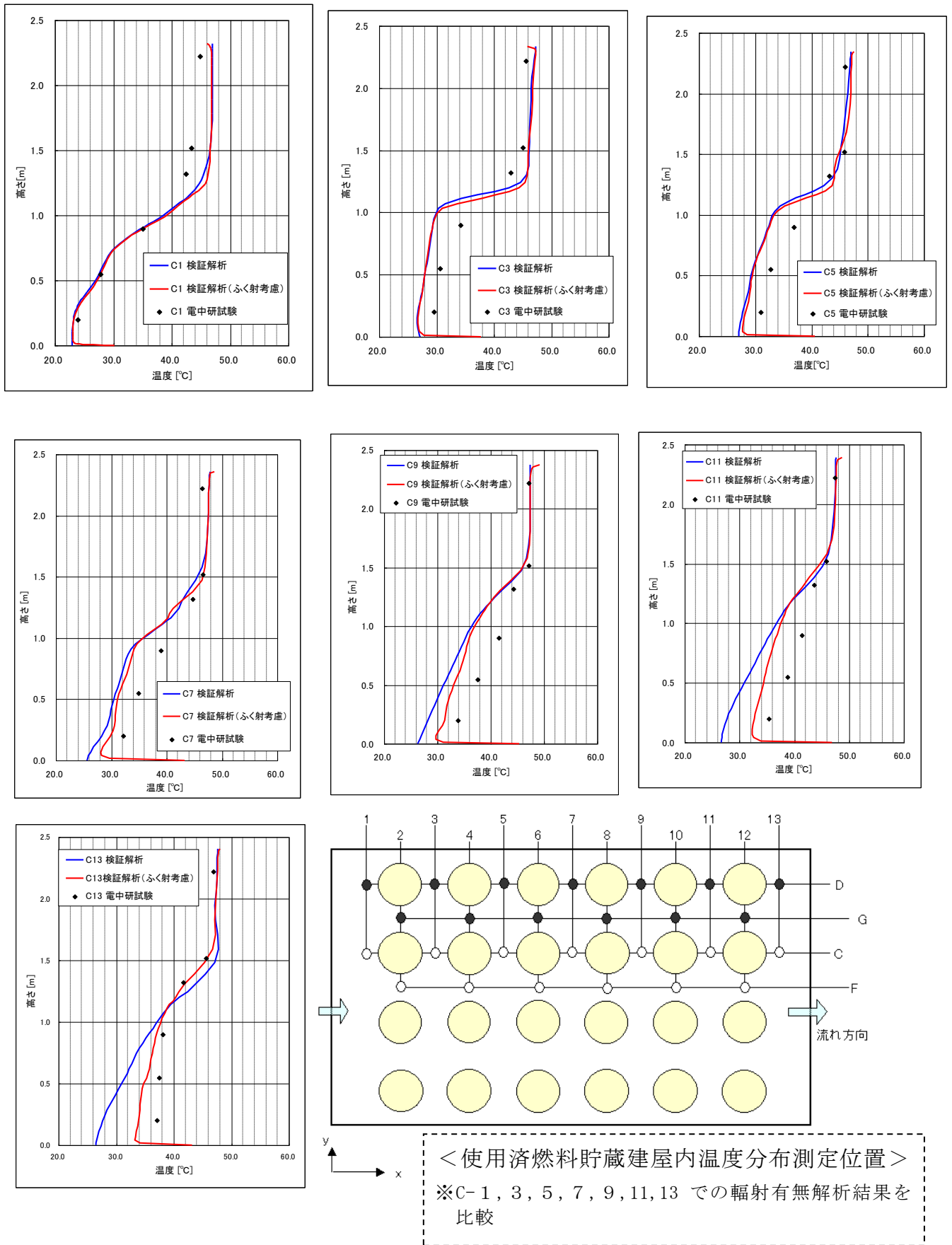
検証解析では、輻射を考慮していないので、伝熱経路が模擬キャスクから空気への伝熱となり、あたためられた空気が天井面近傍へと上昇していく。その結果、天井面近傍は温度が高く、床面近傍は温度が低くなっている。

現実には、模擬キャスクの輻射伝熱により床面があたためられ、その結果、床面近傍の空気があたためられる。輻射を考慮しない場合に比べて、床面近傍の空気の温度は高くなる。

輻射を考慮した検証解析でも、輻射伝熱により床面があたためられ、その結果、床面近傍の空気があたためられる。輻射を考慮しない場合と比べて、床面近傍の温度が高くなっている。

使用済燃料貯蔵建屋の除熱解析で、使用済燃料貯蔵建屋躯体コンクリートの最高温度は、貯蔵架台と床面の接触部である。適合性説明資料において、輻射を考慮した条件で解析している。輻射を考慮しても使用済燃料貯蔵建屋躯体コンクリートの最高温度は、65℃を超えないことを確認している。

過去、F L U E N T Ver. 6.1 検証解析での温度分布をベースに比較した際の結果を、参考として添付 2-1 図に示す。



添付 2-1 図 使用済燃料貯蔵建屋内温度分布比較

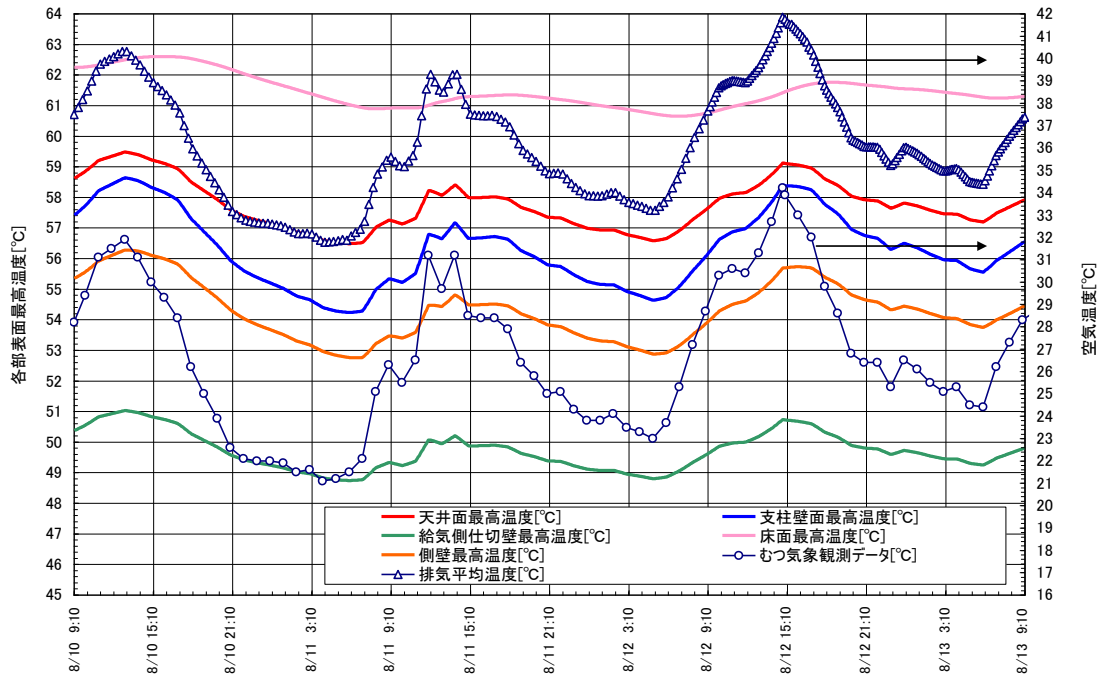
(補足) 使用済燃料貯蔵建屋内の定常な空気の流れを想定した三次元熱流動解析について

三次元熱流動解析では、定常計算によって使用済燃料貯蔵建屋躯体コンクリートの時間平均温度が恒常的に制限値を超えないことを確認している。給気温度、金属キャスク発熱量等の解析条件を保守的に設定することで、建屋躯体コンクリート温度を厳しく評価している。

例えば、給気温度については、日中一夜間の日変動や年間変動を無視して、設計給気温度が 24 時間継続するような厳しい状態で解析を行っている。

外気温度の変化を考慮した非定常解析を行い、建屋躯体温度の時間変化を追跡した結果、建屋躯体コンクリートや金属キャスクの構造材が持つ熱容量は大きく、床面の温度変動は極めて緩やかであることを確認している。例として、外気温度と使用済燃料貯蔵建屋各部のコンクリート最高温度の時間変化を追跡した結果を別添 2-1 図に示す。

使用済燃料貯蔵建屋内の流れ場の揺らぎによって生じる建屋躯体の温度変動は微小と考えられることにより、温度変動を含めたこれらの温度場は厳しい解析条件によって得られた定常状態の温度場により包絡されるものと考えられる。



別添 2 - 1 図 外気温度変動に対する使用済燃料貯蔵建屋躯体の温度変化

給気温度の変化等による除熱評価結果への影響について

給気温度等解析条件が変動した場合の除熱解析結果への評価について、下記(1)～(3)に示す。なお、本評価にあたっての金属キャスクの最大崩壊熱量や寸法等については、除熱解析結果における影響を確認する目的から以下の通りに設定した。

(1) 給気温度の設定について

BWR用中型キャスク(タイプ2)を配置した条件及びPWR用キャスク(タイプ1)を配置した条件での使用済燃料貯蔵建屋の除熱解析では、設計給気温度を29.8℃として評価している。この温度は、むつ特別地域気象観測所の2012年～2021年の夏季(6月～9月)毎正時温度データを用いて、高温側から1%の値(超過危険率1%)を用いている。1994年以降2022年度までの10年ごとの夏季(6月～9月)毎正時温度データの状況を別添3-1表に示す。

なお、除熱解析においては、日中-夜間の日変動や年間変動を無視して、設計給気温度が24時間継続するような厳しい設定として解析を行っている。また、外気温度の変化を考慮した非定常解析では、使用済燃料貯蔵建屋コンクリートや金属キャスクが持つ熱容量は大きく、設計給気温度を超える期間は長くは続かず、床面温度変動はきわめて緩やかであることを確認している。このため、外気温度が変わる都度、設計条件を変更する必要はないと考えられる。

(2) 給気部流路外壁設置の保安灯による除熱評価への影響について

給気部流路の外壁に取り付けられている保安灯は、流路断面積14.8m²(2.0m×7.4m)に対して0.0961m²(77mm×1248mm)、比率として0.65%であり、流路断面積に占める割合は小さい。過去に実施した三次元熱流動解析結果の流れ場(別添3-1図)からも、保安灯のサイズ、設置位置は貯蔵区画

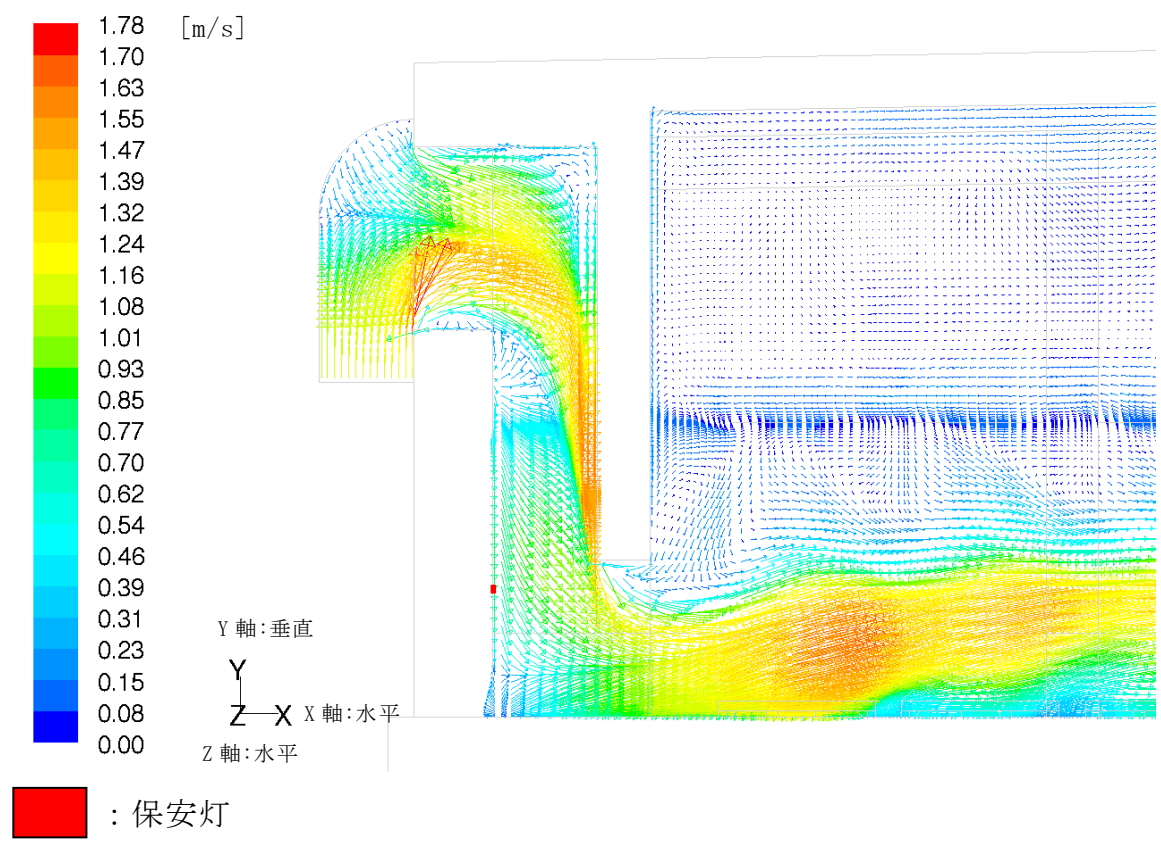
に流入する給気流れに大きな影響は与えないと考えられる。また、一次元計算において、壁に取り付けられている保安灯の消費電力が保守的に 100%熱に変わるものとして考慮しても、影響がないことを確認している。

(3) その他

受入れ区域を対象に実施した一次元熱計算の状況についても評価状況を添付 1 にて示す。一次元熱計算における受入れ区域の排気温度は、BWR 用中型キャスク（タイプ 2）で 41.0℃、PWR 用キャスク（タイプ 1）で 41.2℃となり、基準とした 45℃以下であることを確認している。

別添 3 - 1 表 環境条件の設定（給気温度）

観測期間	夏季（6月～9月）毎正時温度データを用いて 高温側から1%の値（超過危険率1%）
1994年～2003年	29.2℃
1995年～2004年	28.9℃
1996年～2005年	28.9℃
1997年～2006年	29.0℃
1998年～2007年	29.1℃
1999年～2008年	29.1℃
2000年～2009年	28.6℃
2001年～2010年	28.9℃
2002年～2011年	29.1℃
2003年～2012年	29.4℃
2004年～2013年	29.5℃
2005年～2014年	29.4℃
2006年～2015年	29.4℃
2007年～2016年	29.4℃
2008年～2017年	29.4℃
2009年～2018年	29.5℃
2010年～2019年	29.8℃
2011年～2020年	29.6℃
2012年～2021年	29.8℃
2013年～2022年	29.4℃



別添 3 - 1 図 給気部(開口中央)の流況

受入れ区域における排気温度評価について

受入れ時のみキャスクがある受入れ区域の排気温度を添付 1 - 1 表に示す。一次元熱計算における受入れ区域の排気温度は最高値が 41.2℃であり，基準温度の 45℃以下であることを確認した。

添付 1 - 1 表 受入れ区域の排気温度

評価条件キャスク	給気温度	排気温度	基準温度
BWR用大型キャスク(タイプ2A)	29.5℃	39.9℃	45℃
BWR用中型キャスク(タイプ2)	29.8℃	41.0℃	
PWR用キャスク(タイプ1)	29.8℃	41.2℃	

[評価条件]

① 評価領域，流路設定及び考慮する圧力損失要素

評価領域は，受入れ区域給気部の開口寸法が各開口部で異なるため，給気部の開口寸法が最小であるエリアを選定した（添付 1 - 1 図）。また，流路設定及び考慮する圧力損失要素を添付 1 - 2 図に示す。

② 金属キャスクの発熱量

- ・ BWR用大型キャスク(タイプ2A) 12.1kW×2基
- ・ BWR用中型キャスク(タイプ2) 13.7kW×2基
- ・ PWR用キャスク(タイプ1) 13.9kW×2基

③ 照明設備の発熱量

評価領域における照明設備の発熱量として 1.4kW を想定。

④ 金属キャスクの形状

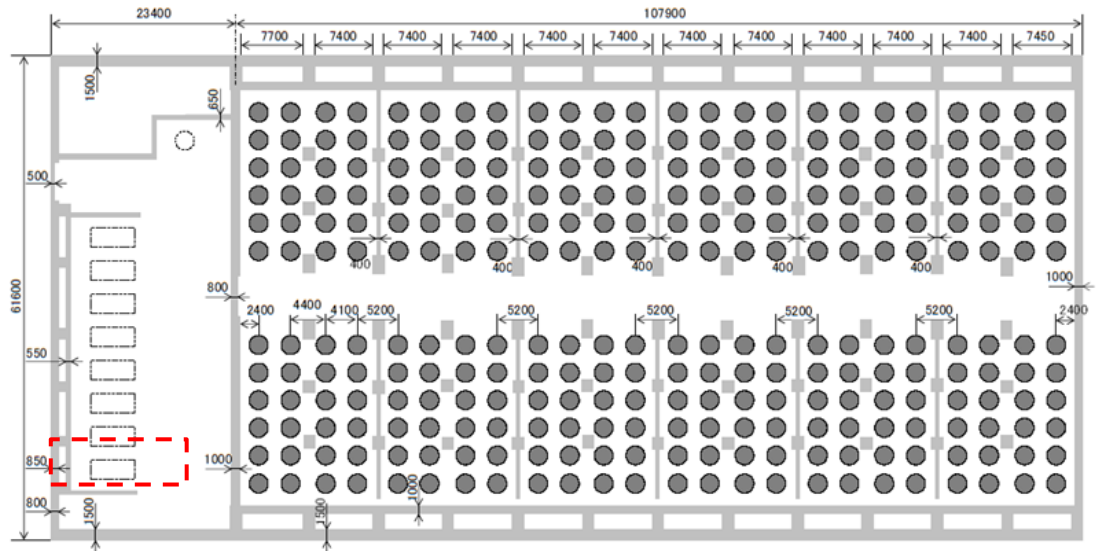
金属キャスクは，緩衝体に取り付けられた状態で受入れ区域に仮置きされるため，金属キャスクの上部および下部に円柱形状の緩衝体を想定。


⑤ 設計給気温度

- ・ BWR用大型キャスク(タイプ2A)
29.5℃一定(別添 3 - 1 表における 2004 年～2013 年の値)

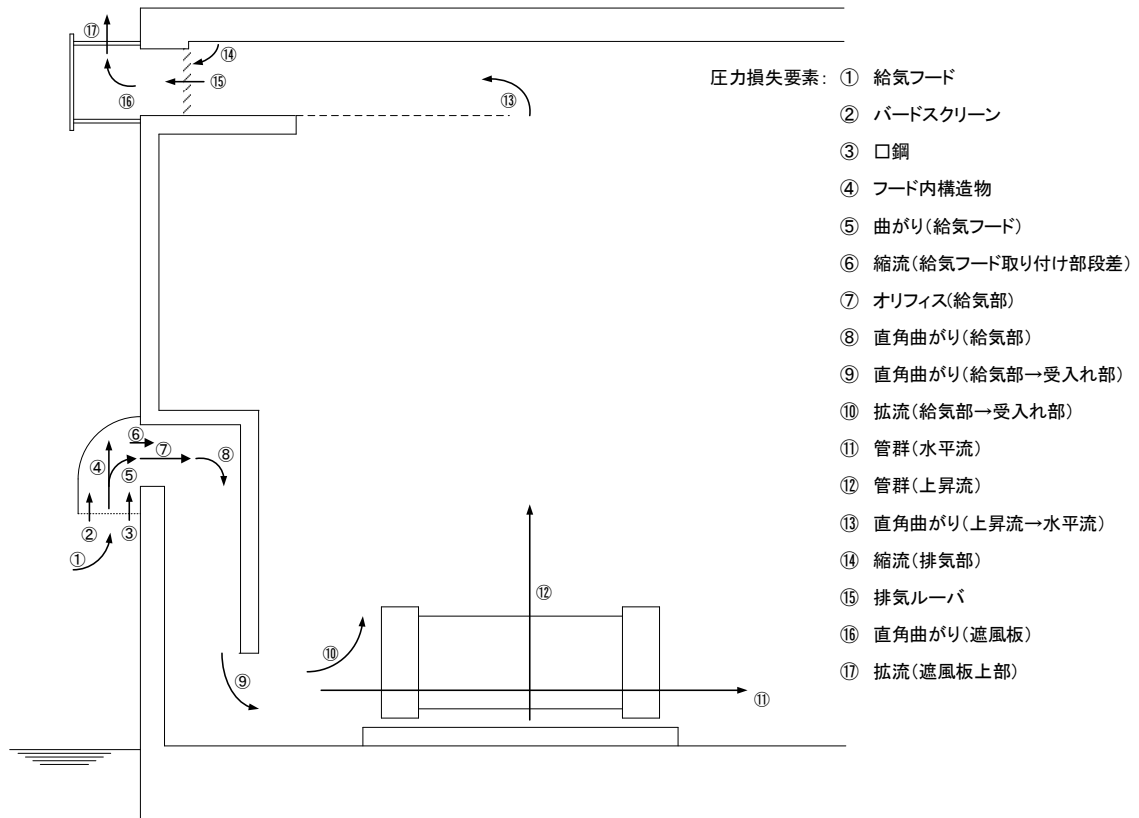
- ・BWR用中型キャスク(タイプ2), 及びPWR用キャスク(タイプ1)

29.8℃一定(別添3-1表における2012年~2021年の値)



 : 評価領域

添付1-1図 受入れ区域の評価領域



添付 1-2 図 考慮する圧力損失要素

第 10 条 津波による損傷の防止

<目 次>

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

(別 添)

- 別添 1 仮想的大規模津波による浸水状況の補足説明
- 別添 2 津波漂流物について
- 別添 3 有限要素法解析における境界条件の検討
- 別添 4 面外せん断力に対する許容値の算出方法
- 別添 5 動的解析について
- 別添 6 金属キャスクからの漏えい率について
- 別添 7 遮蔽機能復旧期間の想定について
- 別添 8 津波による波圧と地震荷重の組合せについて
- 別添 9 PWR 用キャスクの燃料棒ギャップへの核分裂生成物移行割合について

1. 設計方針

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

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

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

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

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

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

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

以下に，設計方針を踏まえた事業許可基準規則解釈の適用方針を示す。

a. 事業許可基準規則解釈第 10 条 1 について

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

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

b. 事業許可基準規則解釈第 10 条 2 及び 3 について

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

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

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

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

c. 事業許可基準規則解釈第10条4について

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

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

第1-1表に、事業許可基準規則及び同解釈の適用方針を示す。

第1-1表 事業許可基準規則及び同解釈の適用方針

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

(2) 津波防護基本方針の対象とする施設

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

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

a. 使用済燃料貯蔵設備本体（金属キャスク及び貯蔵架台）

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

b. 貯蔵建屋

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

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

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

あるが、それ以外の期間は閉鎖状態となる。

*)貯蔵建屋損傷時における確認事項

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

c. 受入施設

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

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

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

d. 津波防護施設、浸水防止設備及び津波監視設備

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

第1-2表に、津波防護基本方針の対象施設に関する適用方針を示す。

第 1-2 表 津波防護基本方針の対象施設に関する適用方針

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

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

また、貯蔵区域については、外壁及び遮蔽壁の健全性を確認する

*2) 受入れ区域の損傷に伴う落下を仮定するため対象外

*3) 津波により転倒防止に係る機能が喪失しないことから対象外

*4) 施設、設備を設置しないため対象外

(3) 敷地及び敷地周辺における地形，施設の配置等

a. 敷地及び敷地周辺の地形，標高，河川の存在

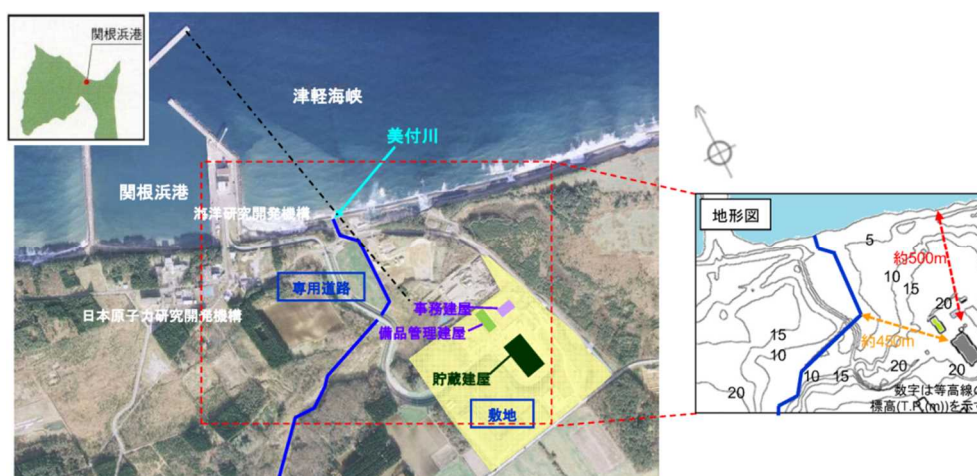
敷地及び敷地周辺の地形を第 1-3-1 図に示す。

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

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

施設は，海岸線から約 500m の離隔がある。

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



第 1-3-1 図 敷地及び敷地周辺における地形，施設の配置等

b. 敷地における施設の位置，形状等

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

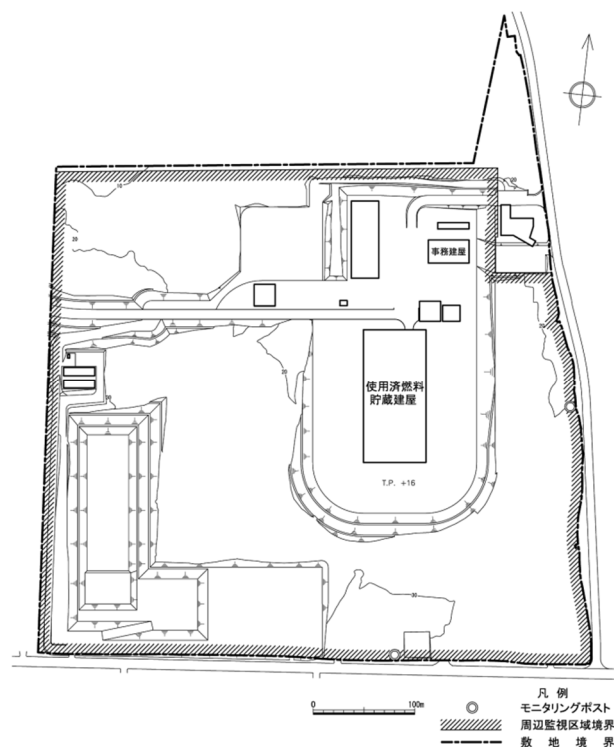
貯蔵建屋は敷地の中央から東寄りに位置する。地上 1 階で，平面が約

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

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

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

事務建屋は、貯蔵建屋の北側に位置する。



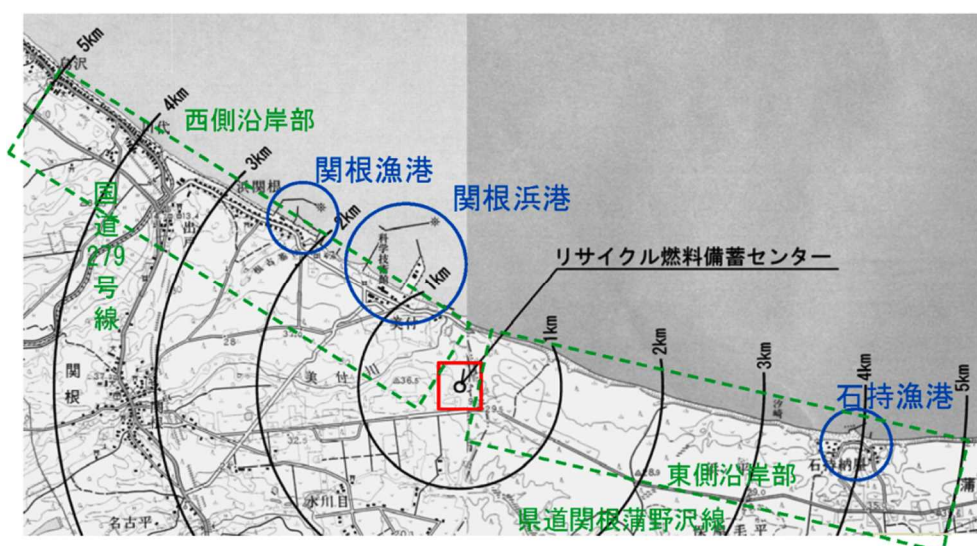
第 1-3-2 図 リサイクル燃料備蓄センター全体配置図

c. 敷地周辺の人工構造物の位置，形状等

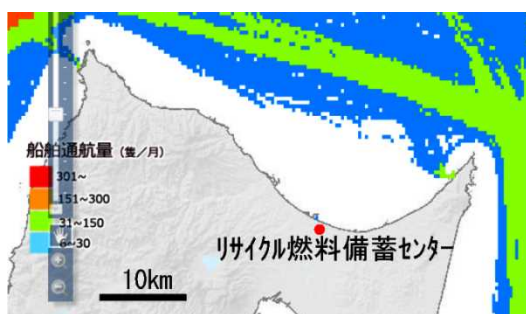
敷地周辺における主な施設の配置を第 1-3-3 図に示す。

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

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



第 1-3-3 図 敷地周辺における主な施設の配置



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

(4) 仮想的大規模津波による浸水想定等

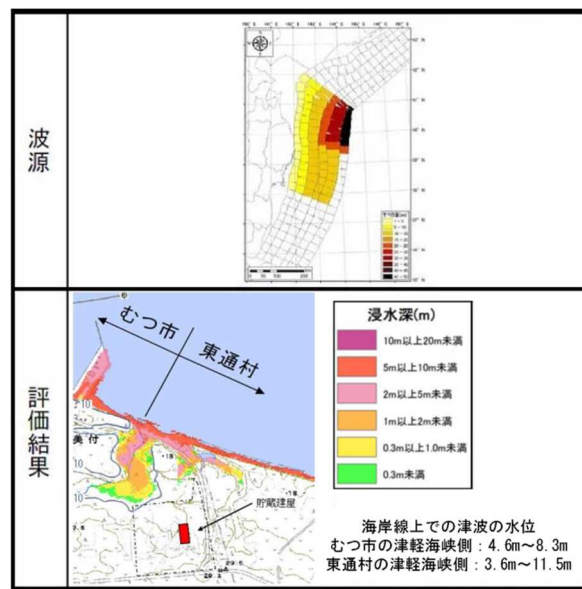
a. 仮想的大規模津波の概要

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

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

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

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



第 1-4-1 図 青森県による津波想定

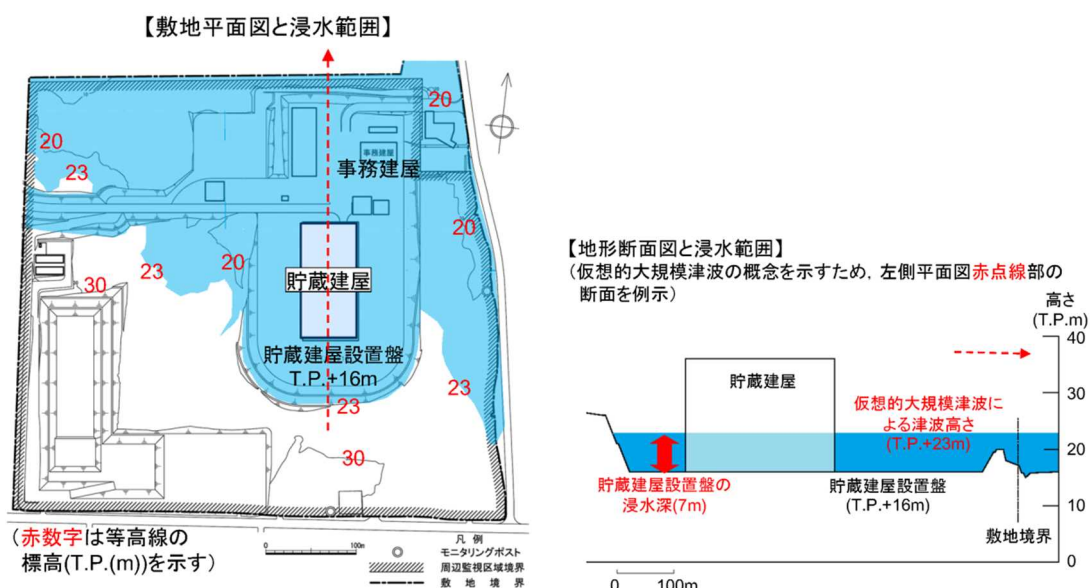
(<http://www.pref.aomori.lg.jp/kotsu/build/tunami-yosoku.html> に一部加筆)

b. 浸水範囲の考え方

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

第1-4-2図に仮想的な大規模津波による浸水範囲の概念を示す。

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



第1-4-2図 仮想的な大規模津波による浸水範囲の概念図

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

c. 入力津波について

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

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

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

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

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

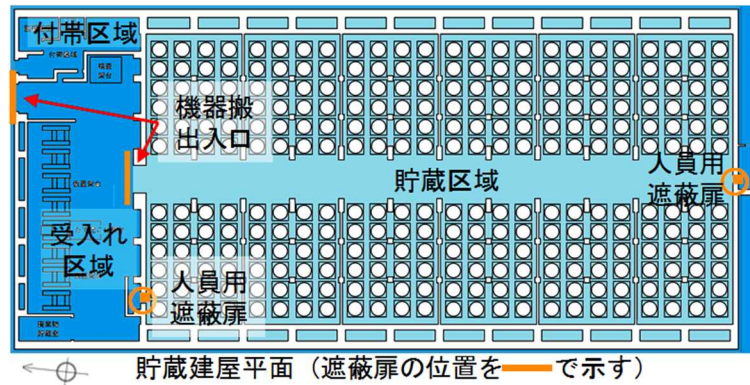
d. 貯蔵建屋内の浸水状態について

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

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

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

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



第 1-4-3 図 貯蔵建屋の機器搬出入口及び人員用遮蔽扉の位置

2. 施設の特性に応じた津波防護の基本方針

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

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

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

(1) 原子力規制庁による審査方針の反映

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

a. 金属キャスクの基本的安全機能について

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

受入れ区域の損傷に伴う落下物や津波漂流物に対して、金属キャスク

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

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

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

b. 使用済燃料貯蔵施設の遮蔽について

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

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

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

上記審査方針における適用項目の反映状況を第 2-1 表に示す。

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

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

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

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

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

「審査の状況について」*1に おける適用項目	「新規制基準適合性審査について」*2に おける適用項目	適用項目の反映状況 (【】は説明箇所を示す)
貯蔵建屋の上部構造物の落下（受入れ区域では天井クレーンの落下等）による衝撃荷重に対して基本的安全機能が維持されること（閉じ込め機能ではバウンダリの維持等）	建屋受入れ区域の損傷に伴い生じうる架 構鉄骨の落下において、金属キャスクへ の衝撃を緩和する又は回避する措置を検 討し、多重の閉じ込め構造を有する金属 キャスクの密封性能が確実に維持できる こと	受入れ区域の損傷に伴う落下物や津波漂流物に対して、金属キャスクへの衝撃の緩和・回避措置を設計としては実施しないことから、衝突を想定して金属キャスクの閉じ込め機能が維持されることを確認する（なお、自主的な取組みとして、より一層の安全性向上に向け架構鉄骨への影響緩和措置を実施する）。 受入れ区域の損傷に伴う落下物として、金属キャスクの運用状態と考えられる落下物（建屋構造材及び天井クレーン）の組合せから、金属キャスクの密封境界部への衝突荷重が大きい事象である①天井クレーンの水平姿勢キャスクへの落下及び②天井スラブの縦姿勢キャスクへの落下を衝突想定条件として設定する。 設定した衝突想定条件における衝突時の挙動に基づき、保守的に考慮した金属キャスクへの衝突荷重を入力として構造評価を実施し、衝突荷重に対し密封境界部がおおむね弾性範囲内にとどまることを確認する。
	(緩衝材等の措置無しの場合に適用) ・評価方法の妥当性	【4. 金属キャスクの閉じ込め評価】 金属キャスクの構造評価方法として、当初は動的解析を用いることとしていたが、工学式により設定した衝突荷重に基づき許認可実績のある解析コードを用いた静的解析を実施することとした。 評価に当たり、金属キャスクへの衝突荷重は落下物（天井クレーン及び天井スラブ）の衝突挙動を踏まえて保守的に設定し、密封境界部に作用する荷重が大きくなるよう分布させるとともに、保守的な結果となるよう金属キャスクの拘束条件等を考慮する。
	・横ずれ量の判定基準の妥当性	【4. 金属キャスクの閉じ込め評価】 落下物の蓋部への衝突による横ずれ量を、当初は動的解析結果に基づき設定していたが、解析に依存しない方法として金属キャスクの構造に基づく最大値を考慮し、実験的知見に基づき金属キャスクの一次蓋からの漏えい率を保守的に設定しブルームによる影響を評価することとした。
	・キャスク損傷に応じた線量評価	【4. (5)閉じ込め機能の低下による影響】 落下物（クレーンガーダ）が金属キャスクへの衝突により外筒を貫通して上部の中性子遮蔽材の一部を損傷させ、金属キャスクからの線量が増加する状況を仮定して使用済燃料貯蔵施設の遮蔽評価を実施する。 【5. 使用済燃料貯蔵施設の遮蔽評価】

*1)*2)の注釈は第 2-1 表 (1/3) 参照

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

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

*1)*2) の注釈は第 2-1 表 (1/3) 参照

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

4. 今後の審査方針

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

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

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

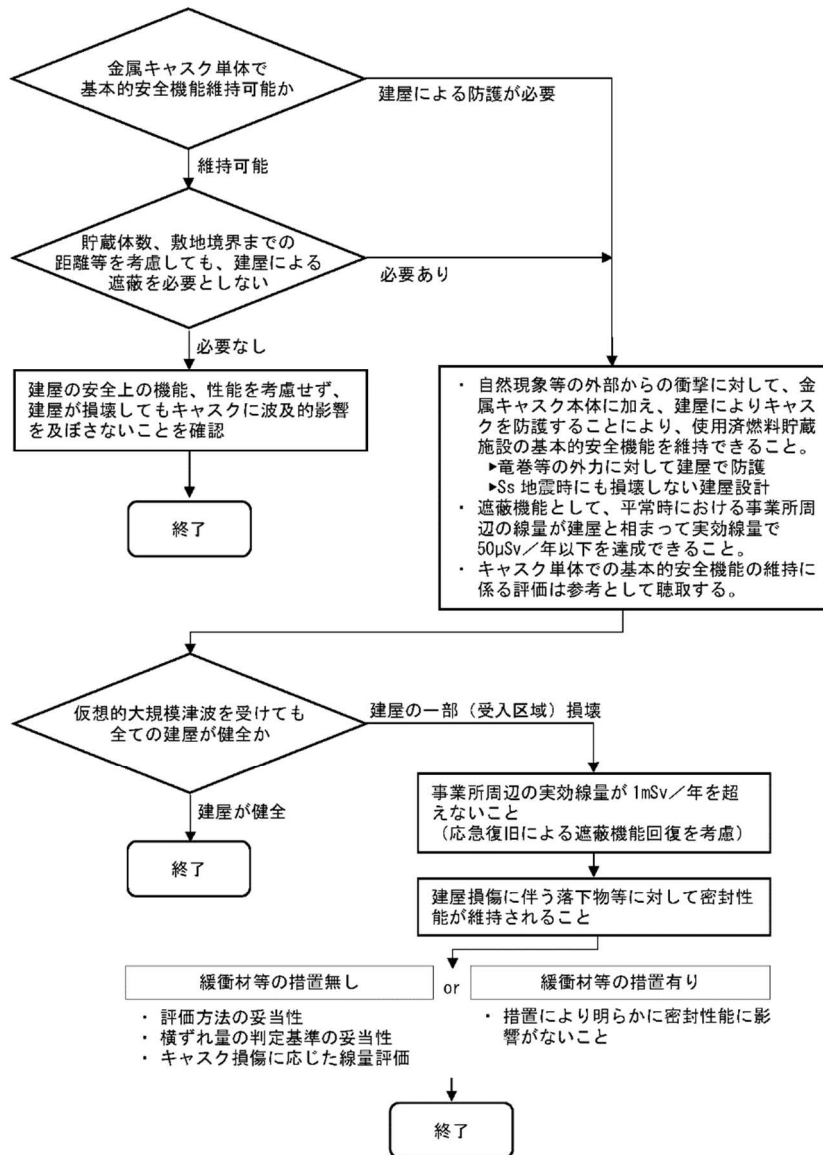
同解釈の適用に当たっては，貯蔵建屋の損傷の有無は，仮想的大規模津波に対して水深係数 3 を用いた波圧によって評価を求める。貯蔵建屋が損傷した場合の金属キャスクの基本的安全機能の評価については，貯蔵建屋の上部構造物の落下（受入れ区域では天井クレーンの落下等）による衝撃荷重に対して基本的安全機能が維持されること（閉じ込め機能ではバウンダリの維持等）を求め，また，復旧期間を含む 1 年間の公衆の実効線量が 1mSv を超えないことを求める。

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

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

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

使用済燃料貯蔵施設の建屋の取扱いに関する審査フロー



(2) 施設の特성에応じた津波防護の基本方針に基づく実施項目

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

a. 貯蔵建屋の津波波圧に対する耐性の確認

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

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

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

b. 金属キャスクの基本的安全機能の確認

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

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

(a) 閉じ込め機能の維持の確認

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

とを確認する。

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

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

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

(b) 遮蔽機能の維持の確認

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

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

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

キャスクの除熱を回復するため落下物、土砂及び津波漂流物の撤去を行う。

c. 衝撃を受けた金属キャスクの検査、試験等

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

d. 敷地内の浸水を想定した対策

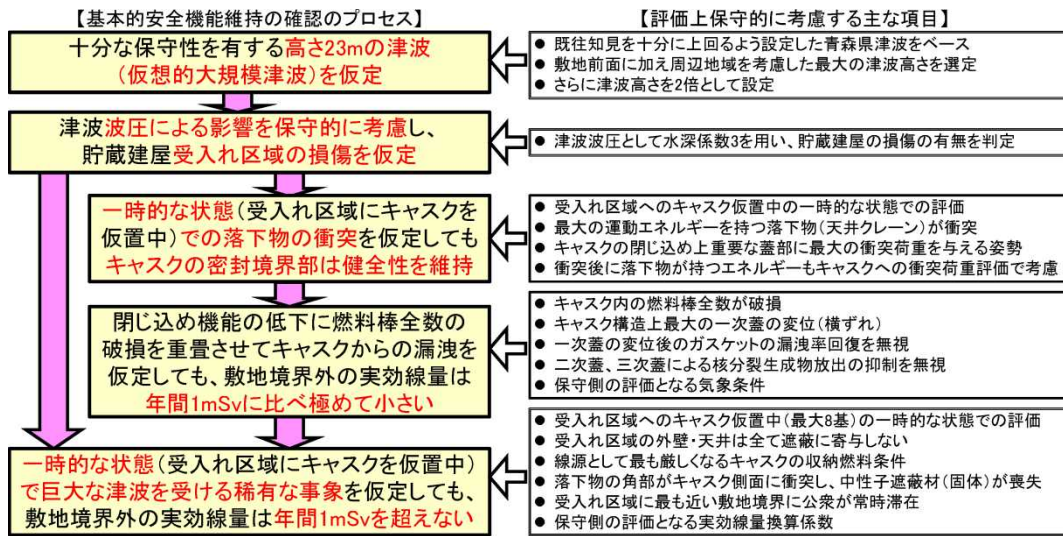
貯蔵建屋や事務建屋等主要な建屋は貯蔵建屋設置盤に設置されており、仮想的な大規模津波による敷地内の浸水を仮定することから、衝撃を受けた金属キャスクに係る対応以外にも対策を講ずる。

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

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

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

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



第 2-1 図 基本的な安全機能の維持に係る確認のプロセスと保守性

3. 貯蔵建屋の耐性評価

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

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

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

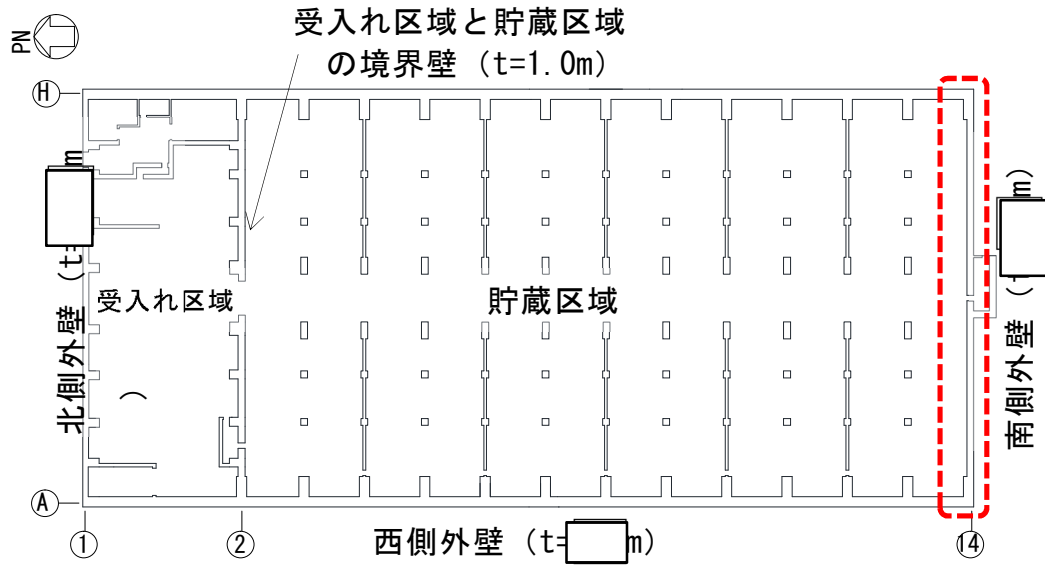
(1) 貯蔵建屋の耐性評価の考え方

a. 評価部位の考え方

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

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

枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。



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

第 3-1 図 貯蔵建屋平面図

b. 水深係数の設定

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

c. 貯蔵建屋の耐性評価

(a) 検討内容

貯蔵建屋の耐性評価として、以下の項目につき確認を行う。

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

(b) 検討方法及び判定基準

i. 貯蔵区域の外壁の健全性確認

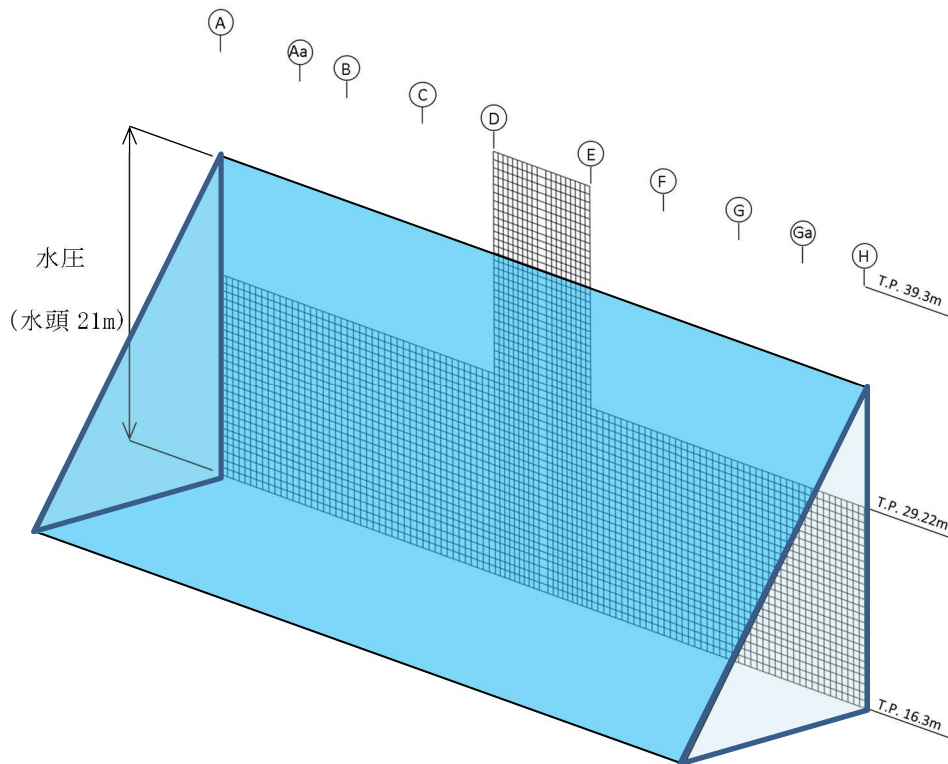
貯蔵区域の四周の外壁に採用する荷重が等しいことから、相対的に最も応力の高くなる部位を代表部位として確認を行う。

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

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

モデル化の考え方は以下のとおりである。

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



第 3-2 図 外壁に作用する荷重（貯蔵区域南側外壁）

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

ii. 貯蔵区域の遮蔽扉の健全性確認

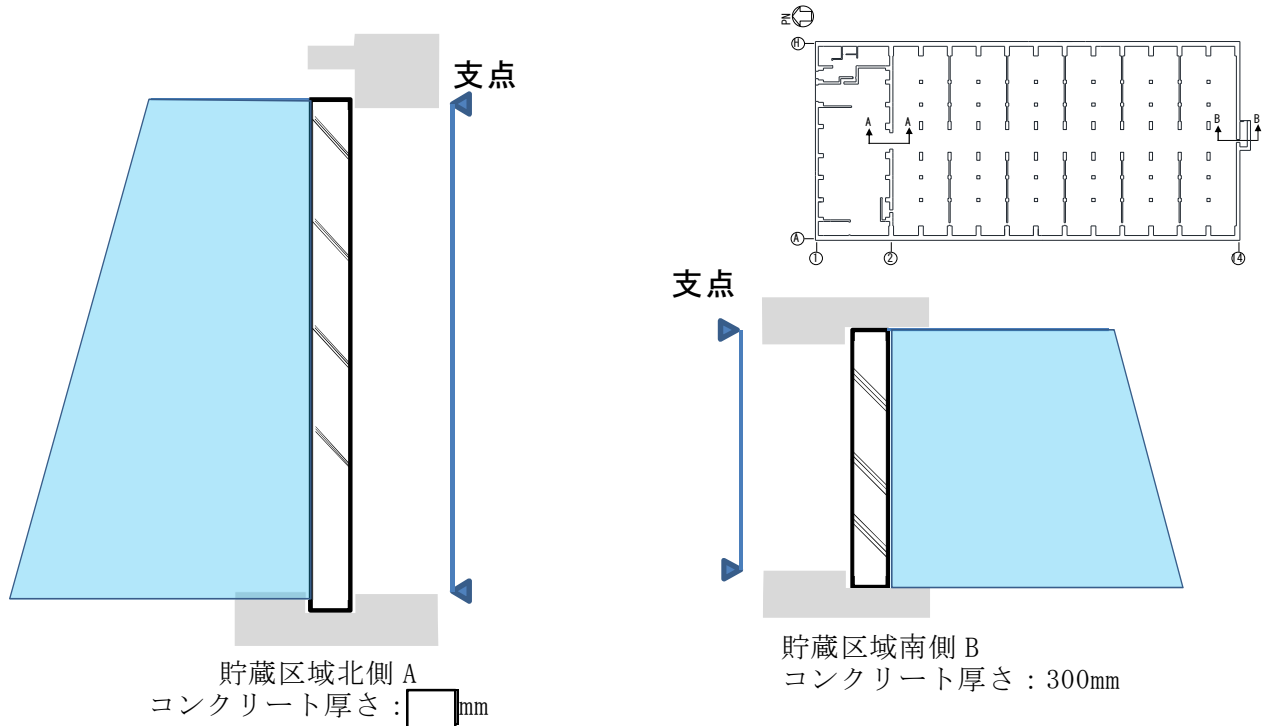
遮蔽扉（2箇所）に対して、津波による浸水深 7m に対し水深係数 3 を考慮した水圧による荷重を第 3-3 図に示すように考慮する。

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

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

判定基準に用いる許容値として、曲げモーメントにより鋼板に生

じる引張応力度として鋼板の短期許容応力度を用いる。



第 3-3 図 遮蔽扉の応力算定の考え方

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

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

- (c) 設計上考慮すべき自然現象との荷重の組合せについて

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

- i. 地震

地震については、発生可能性が小さく継続時間も短いことから津波による波圧と同時に作用する可能性が考え難いこと、仮に同時に発生しても荷重の作用方向が異なる（地震力は作用方向の耐震壁の面内せん断力で負担する設計であるが、津波波力は貯蔵建屋外壁に

直交する方向の面外方向に作用する荷重である) ことから、津波による波圧との荷重の組合せは考慮しない。

ii. 竜巻及び風（台風）

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

iii. 積雪及び降下火砕物

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

(2) 津波による貯蔵建屋耐性評価結果

a. 貯蔵区域南側外壁の健全性確認結果

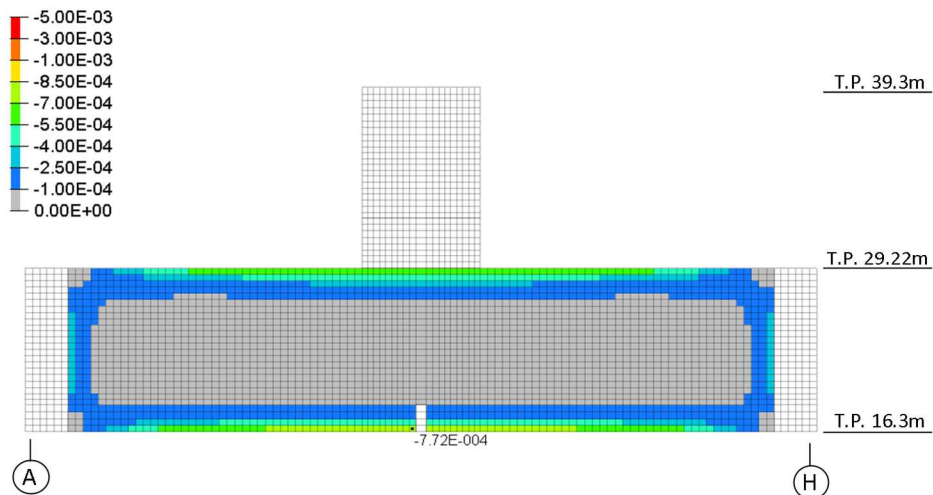
前述の弾塑性有限要素法解析により算定した、貯蔵建屋外壁に発生するひずみの評価結果を第 3-1 表及び第 3-4 図(1)～(3)に示す。コンクリートの圧縮ひずみ，鉄筋の引張ひずみ及び面外せん断力はいずれも許容値以下であり，貯蔵区域南側外壁の健全性を確認した。

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

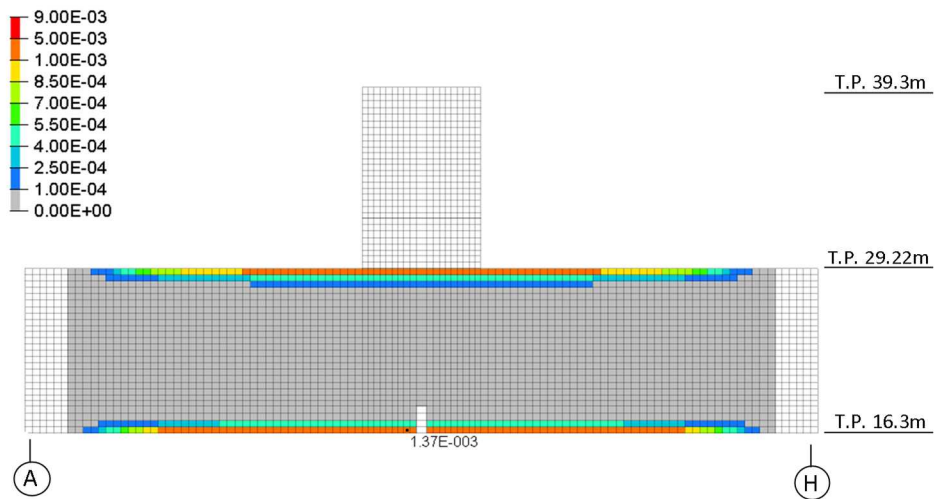
第 3-1 表 評価結果（貯蔵区域南側外壁）

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

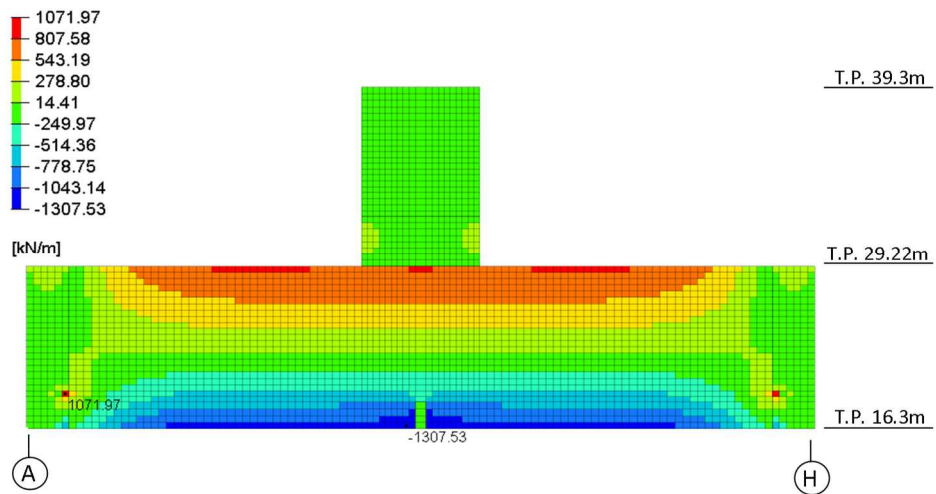
*) 面外せん断力に対する許容値の算出方法は別添 4 参照



第 3-4 図(1) コンクリート最小ひずみ分布（圧縮ひずみ）



第 3-4 図 (2) 鉄筋最大ひずみ分布 (引張ひずみ)



第 3-4 図 (3) 面外せん断力分布

b. 貯蔵区域の遮蔽扉の健全性確認結果

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

第3-2表 評価結果（貯蔵区域の遮蔽扉）

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

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

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

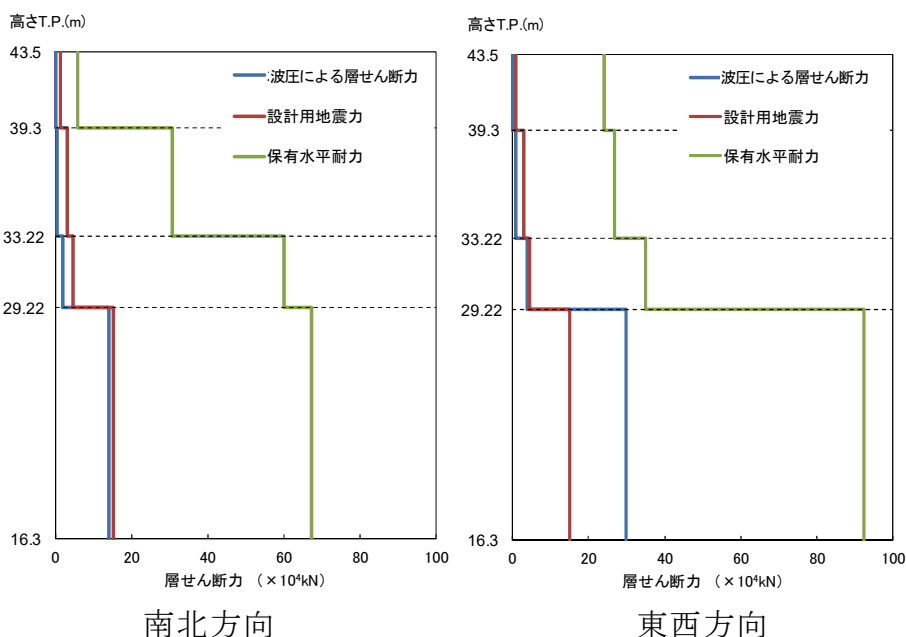
c. 津波による波圧（荷重）と設計用地震力及び保有水平耐力の比較結果

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

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

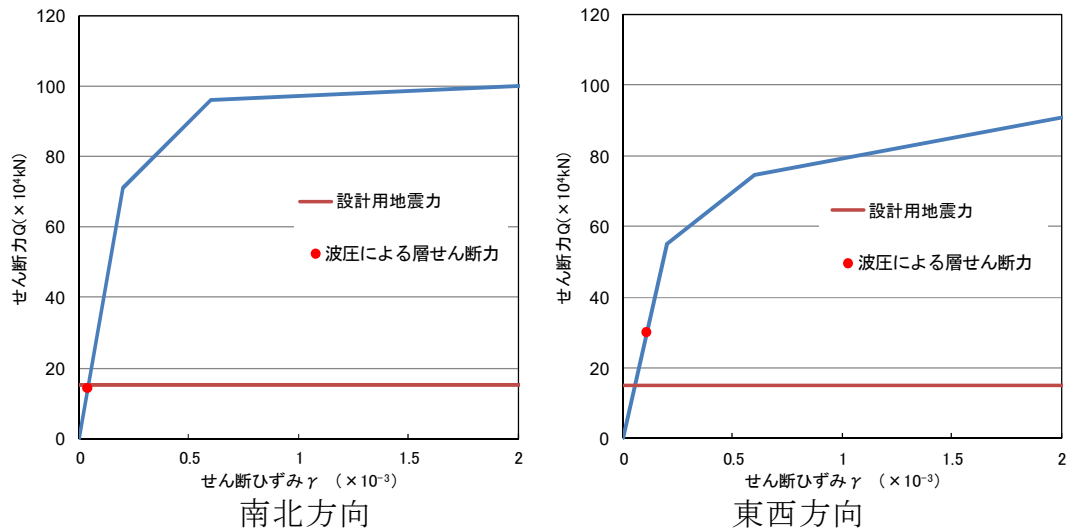
	波圧による層せん断力 ($\times 10^4 \text{kN}$)	設計用地震力* ($1.5C_i$) ($\times 10^4 \text{kN}$)	保有水平耐力* ($\times 10^4 \text{kN}$)
南北方向	14.0	15.09	67.25
東西方向	29.83	15.09	92.32

*) 設工認申請書記載値（平成22年8月27日認可済）に基づく



第3-5図 波圧による層せん断力，設計用地震力及び保有水平耐力の比較

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



*)せん断耐力は貯蔵建屋のうち、貯蔵区域の耐力である。

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

4. 金属キャスクの閉じ込め評価

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

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

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

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

(1) 閉じ込め評価の考え方

金属キャスクの閉じ込め評価については、以下の考え方に基づき実施する。

a. 落下物や津波漂流物の設定について

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

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

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

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

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

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

b. 金属キャスクの状態について

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

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

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

c. 構造評価について

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

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

d. 判定基準について

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

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

e. 金属キャスクの浸水による影響について

津波により金属キャスクの蓋部が浸水しても蓋間圧力(0.27MPaabs以上(BWR用大型キャスク(タイプ2A)の場合)、0.27MPaabs以上(BWR用中型キャスク(タイプ2)の場合))、0.31MPaabs以上(PWR用キャスク(タイプ1)の場合)であり、水深15m以上の浸水による水圧に相当)は水深7mの浸水による水圧を上回るため圧力障壁は維持される。なお、金属キャスクシール部は最大でも水深2m程度の浸水であり、金属キャスクの設置階は貯蔵建屋周囲の地盤面より高いため、標高の低い敷地の北西側から津波が引くと同時に機器搬出入口から排水されるこ

とから、長時間に亘り金属キャスク（シール部）が浸水している状態は考え難い。また津波襲来後に金属ガスケット外周部の洗浄やエアブローの対応を取ることが可能であることから、閉じ込め機能が損なわれることはないと考えられる。

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

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

(2) 衝突想定条件の設定

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

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

a. 落下物の抽出

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

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

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

b. 落下条件の整理

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

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

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

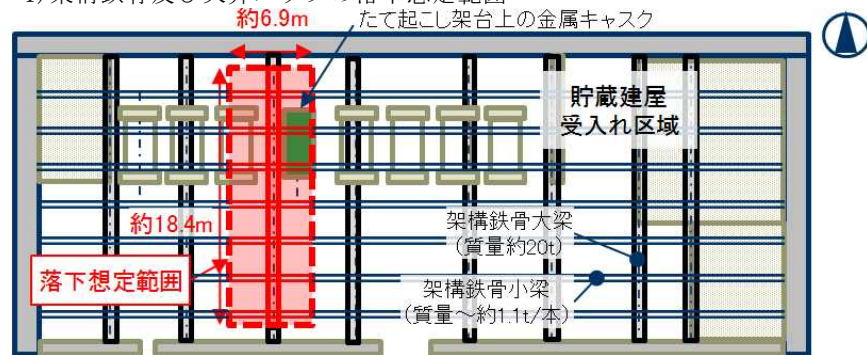
落下物	質量 (t)	落下高さ (m)	金属キャスク姿勢	金属キャスク上に落下するための条件	事象の起こりやすさ	落下エネルギー (N・m)	衝突想定条件 (代表事象) として設定
コンクリート側壁	約 73	約 7.2	水平	津波波力により受入れ区域が損傷し、たて起こし架台上の金属キャスクの上部まで伸びた柱間の北側側壁が転倒し自由落下 (金属キャスクが水平姿勢の場合の模式図を第 4-2-2 表①に示す)	北側側壁が損傷した場合、コンクリートが破損、変形して倒れ、金属キャスクへの衝突が想定される	約 5.2×10^6	— 落下エネルギーが天井クレーンの落下に比べ小さく、天井クレーンの落下で代表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

○ : 代表事象として設定

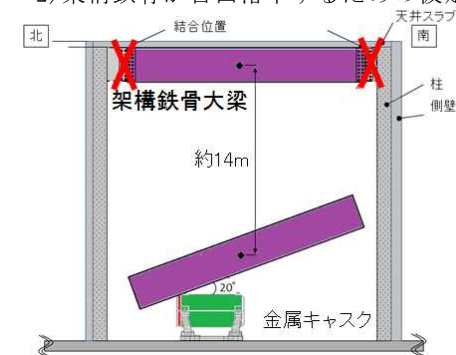
第 4-2-1 表 落下物の抽出及び金属キャスクへの衝突状態の設定 (建屋構造物) (2/2)

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

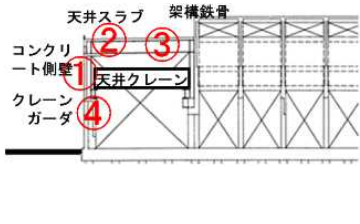
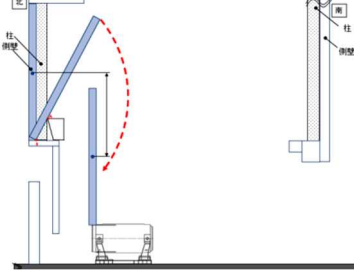
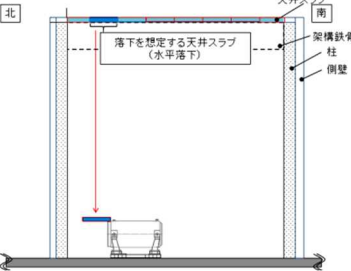
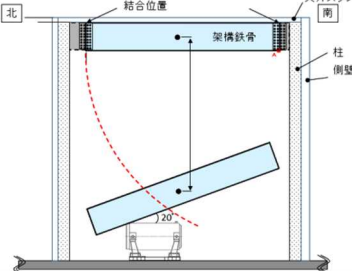
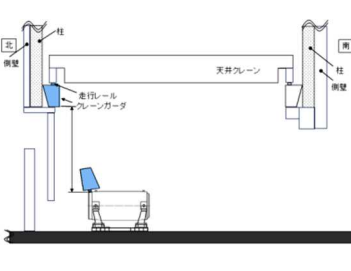
*1) 架構鉄骨及び天井スラブの落下想定範囲



*2) 架構鉄骨が自由落下するための仮定



第 4-2-2 表 落下物及び落下形態の想定 (建屋構造材)

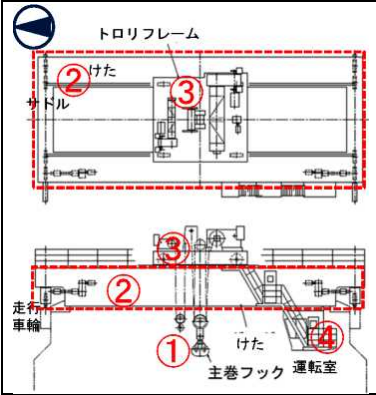
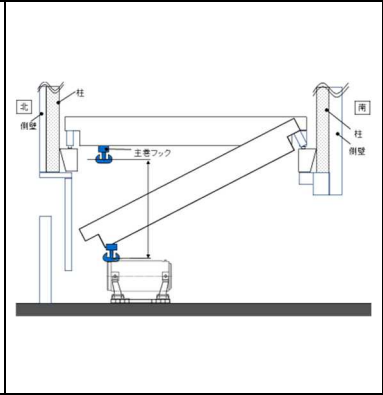
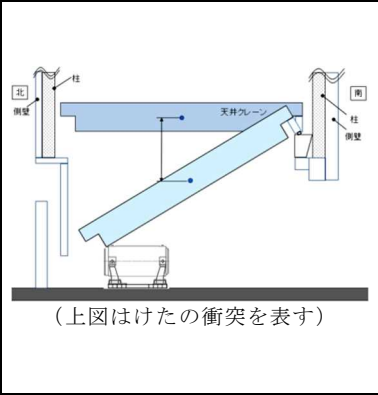
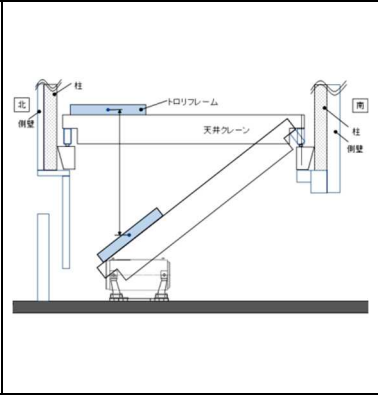
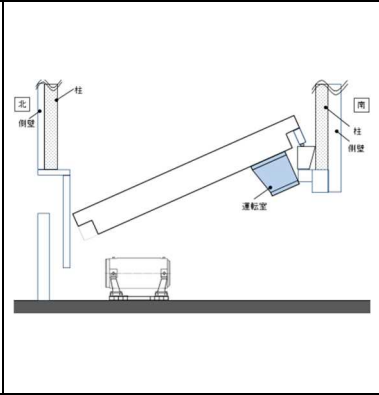
受入れ区域概略図	①コンクリート側壁	②天井スラブ (単独)	③架構鉄骨	④クレーンガーダ
				
<p>受入れ区域の構造を踏まえ、北側側壁の破損に伴う建屋構造材の落下物として以下を考慮する。</p> <p>①コンクリート側壁</p> <p>②天井スラブ (単独)</p> <p>③架構鉄骨 (受入れ区域の天井スラブを支持する梁であり、南北方向の大梁と、大梁の間に東西方向に掛けられた小梁で構成される)</p> <p>④クレーンガーダ (受入れ区域の北側及び南側に、天井クレーンの走行レールを支持するためのクレーンガーダが設置されている)</p>	<ul style="list-style-type: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

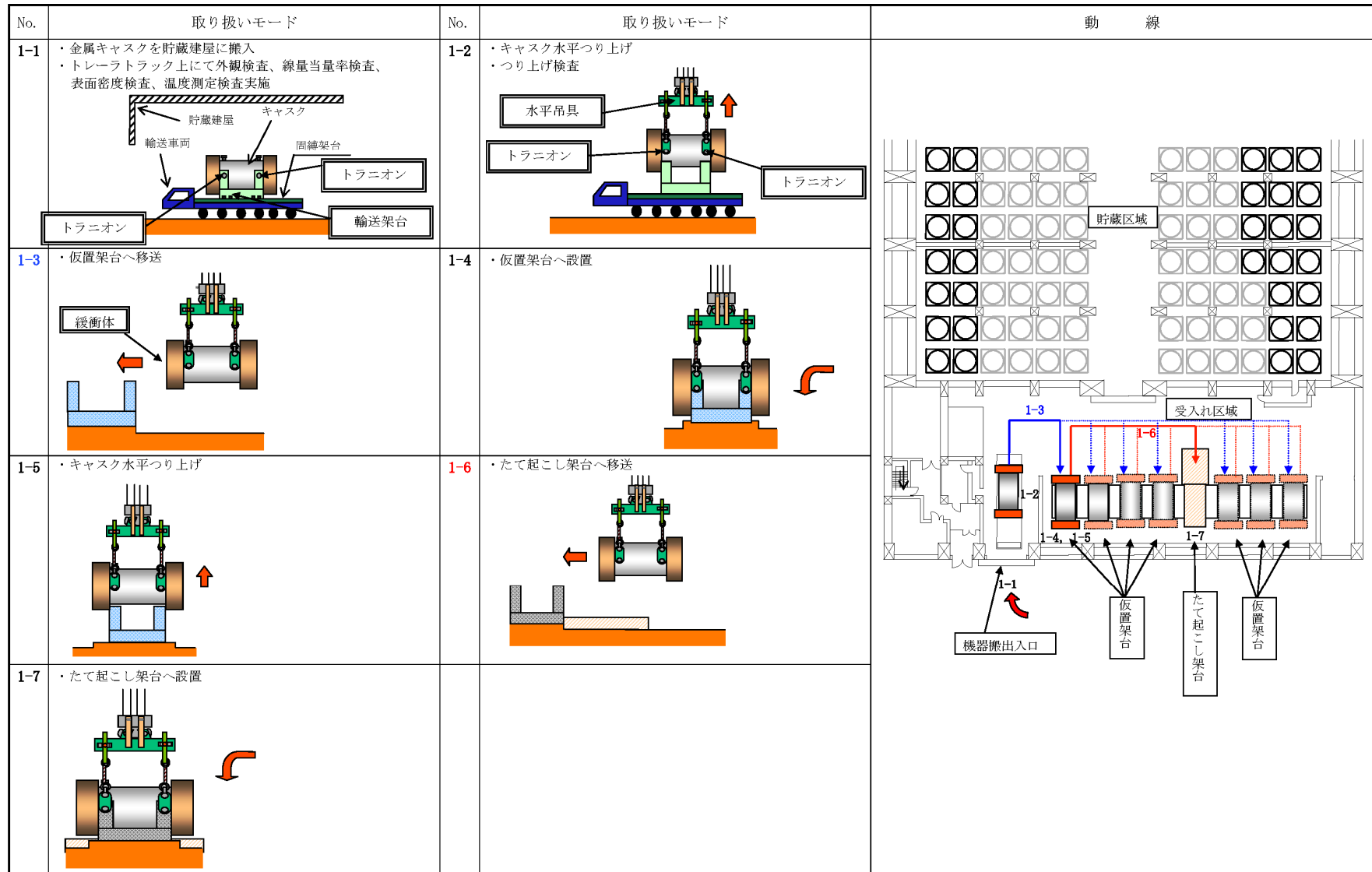
第 4-2-3 表 落下物の抽出及び金属キャスクへの衝突状態の設定（天井クレーン）

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

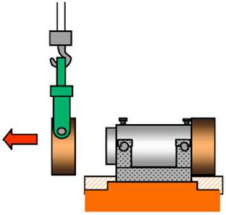
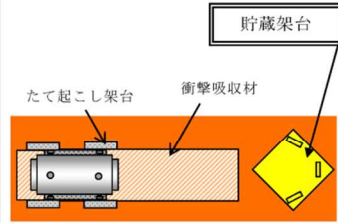
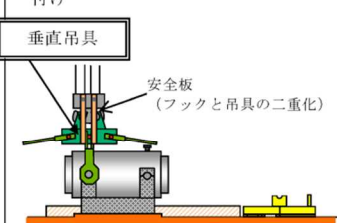
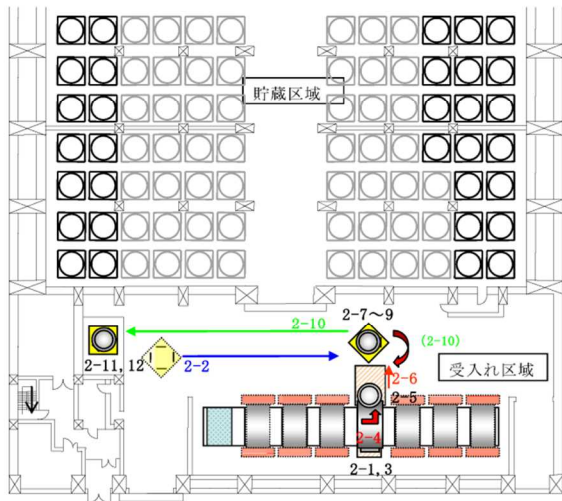
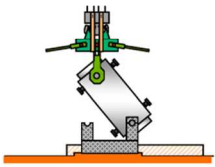
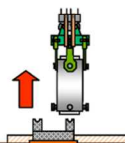
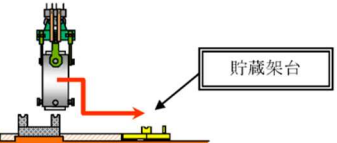
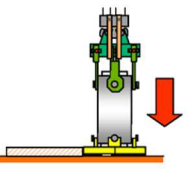
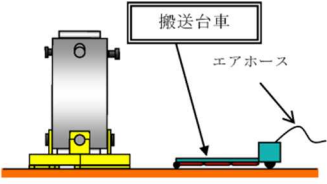
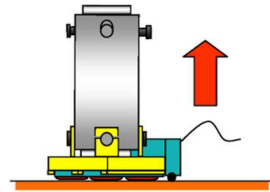
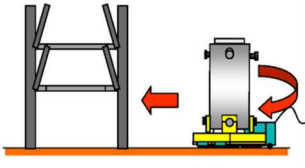
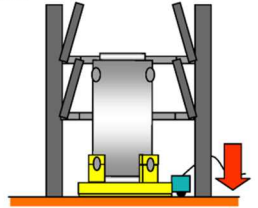
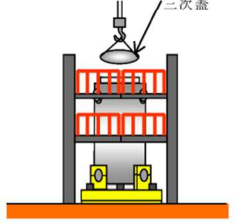
○：代表事象として設定

第 4-2-4 表 落下物及び落下形態の想定（天井クレーン）

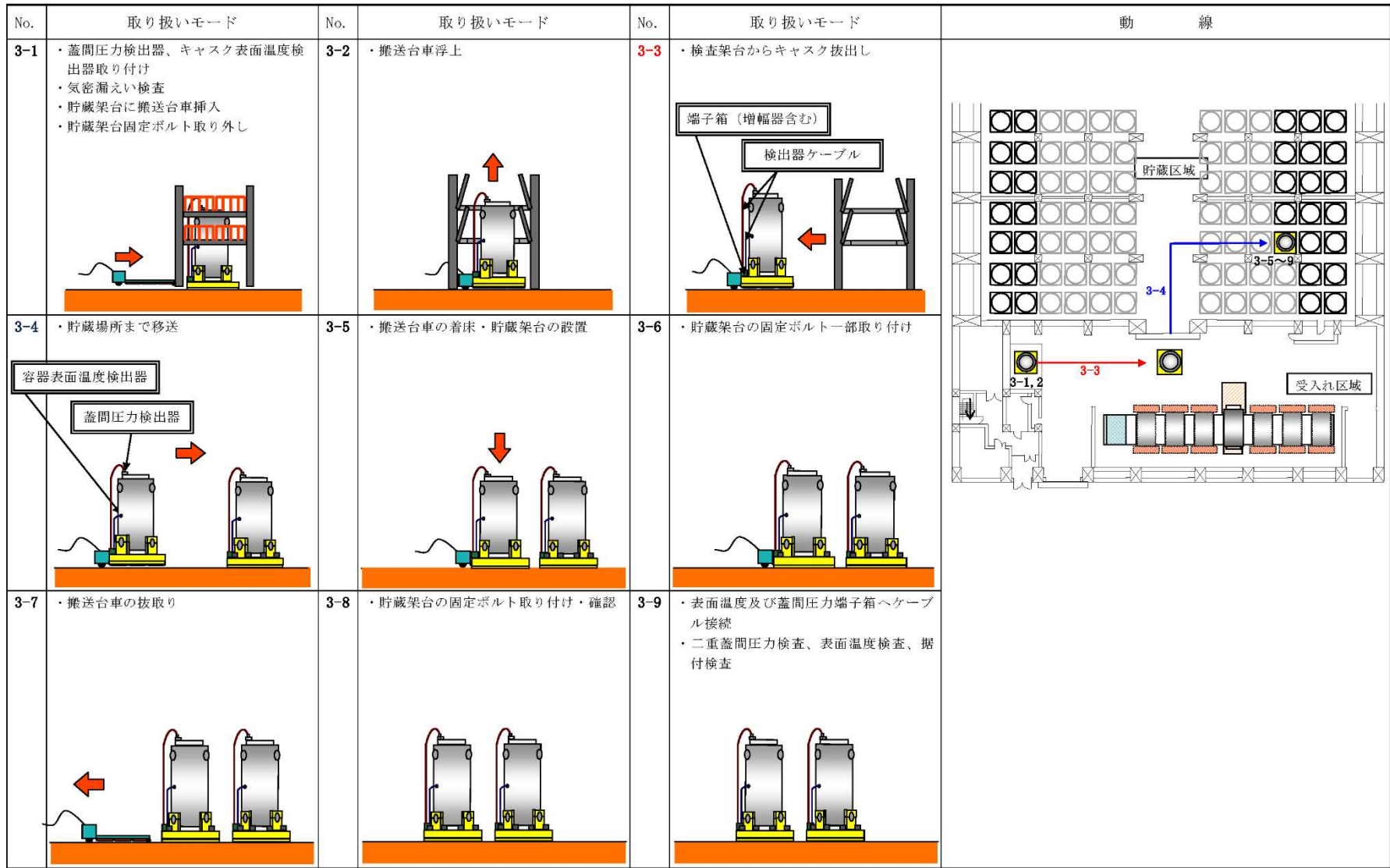
天井クレーン概略図	①主巻フック	②けた, サドル, 走行車輪	③トロリフレーム	④運転室
		 <p>(上図はけたの衝突を表す)</p>		
<p>天井クレーン構造及び落下に伴う衝突荷重の掛かり方を踏まえ、北側側壁の破損に伴う落下による衝突箇所として以下を考慮する。</p> <p>①主巻フック ②けた, サドル, 走行車輪 ③トロリフレーム ④運転室</p>	<ul style="list-style-type: none"> 金属キャスク受入時の緩衝材取り外し等の作業を行う際に、主巻フックが金属キャスク蓋部の上部に接近することから、主巻フックの落下を仮定する。 主巻フックはワイヤで天井クレ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



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

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> 	2-3	<p>・吊具主アームを上部トランニオンに取り付け</p> 	
2-4	<p>・主アームの外れ防止金具を取り付けた後、キャスクをたて起し</p> 	2-5	<p>・トランニオン押さえを取り外した後、キャスクをつり上げ ・つり上げ検査</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> 	
2-7	<p>・キャスクを貯蔵架台に着床、固定</p> 	2-8	<p>・貯蔵架台下部に搬送台車を挿入</p> 	2-9	<p>・搬送台車浮上</p> 	
2-10	<p>・旋回動作、走行動作により検査架台へ移送</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> 	

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



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

c. 衝突想定条件の設定

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

設定する衝突想定条件を第 4-2-5 表に示す

第 4-2-5 表 設定する衝突想定条件

落下物	落下物概要	金属キャスク姿勢
①天井クレーン (けた+サドル+ 走行車輪)	質量 : 約 128t 落下高さ : 約 5.3m 落下速度 : 約 10.2m/s 落下エネルギー : 約 $6.7 \times 10^6 \text{N}\cdot\text{m}$	水平姿勢 (たて起こし 架台上に仮置きされた金属 キャスク) 緩衝体なし
②天井スラブ (単独)	(BWR用大型キャスク (タイプ 2A) の場合) 質量 : 約 30t 落下高さ : 約 16.6m 落下速度 : 約 18.1m/s 落下エネルギー : 約 $4.9 \times 10^6 \text{N}\cdot\text{m}$ (BWR用中型キャスク (タイプ 2) の場合) 質量 : 約 30t 落下高さ : 約 16.5m 落下速度 : 約 18.0m/s 落下エネルギー : 約 $4.9 \times 10^6 \text{N}\cdot\text{m}$ (PWR用キャスク (タイプ1) の場合) 質量 : 約 30t 落下高さ : 約 16.8m 落下速度 : 約 18.2m/s 落下エネルギー : 約 $5.0 \times 10^6 \text{N}\cdot\text{m}$	縦姿勢 (受入れ区域内の 移送中及び検査架台上の金 属キャスク) 緩衝体なし

d. 津波漂流物による衝突条件との比較

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

仮に，貯蔵区域の遮蔽扉が開放された状態で受入れ区域が損傷しても，①損傷した受入れ区域が障壁となること，②貯蔵区域と受入れ区域との

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

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

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

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

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

第 4-2-6 表 津波漂流物による衝突条件と衝突想定条件の比較

	津波漂流物	衝突想定条件（落下物）	
品目	キャスク搬送車両	天井クレーン	天井スラブ
質量	約 36t	約 128t	約 30t
速度	<p>～約 10m/s 仮想的な大規模津波と等価なモデルによる津波解析から得られた貯蔵建屋周りの流速</p>	<p>約 10.2m/s 落下高さ約 5.3m の自由落下に基づく速度</p>	<p>(BWR用大型キャスク (タイプ 2 A) の場合) 約 18.1m/s 落下高さ約 16.6m の自由落下に基づく速度 (BWR用中型キャスク (タイプ 2) の場合) 約 18.0m/s 落下高さ約 16.5m の自由落下に基づく速度 (PWR用キャスク (タイプ 1) の場合) 約 18.2m/s 落下高さ約 16.8m の自由落下に基づく速度</p>
運動エネルギー	約 $1.8 \times 10^6 \text{N} \cdot \text{m}$	約 $6.7 \times 10^6 \text{N} \cdot \text{m}$	<p>(BWR用大型キャスク (タイプ 2 A) の場合) 約 $4.9 \times 10^6 \text{N} \cdot \text{m}$ (BWR用中型キャスク (タイプ 2) の場合) 約 $4.9 \times 10^6 \text{N} \cdot \text{m}$ (PWR用キャスク (タイプ 1) の場合) 約 $5.0 \times 10^6 \text{N} \cdot \text{m}$</p>

(3) 天井クレーンの水平姿勢キャスクへの落下による影響の評価

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

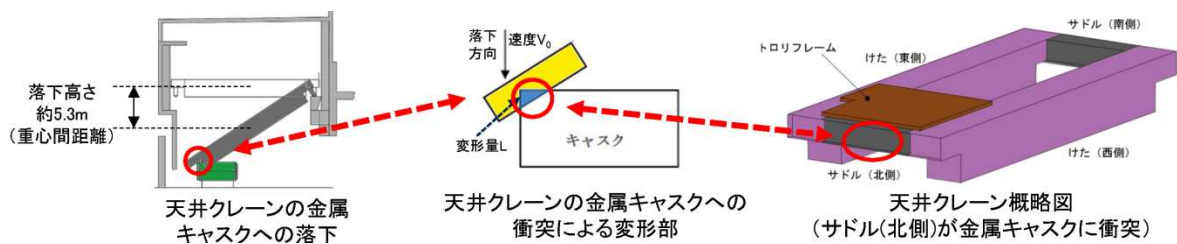
a. 衝突荷重の設定

構造評価の入力条件となる衝突荷重を、工学式に基づき設定する。

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

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

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

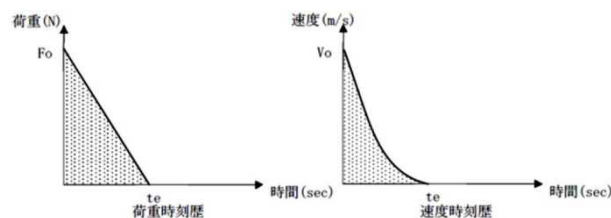


第 4-3-1 図 天井クレーンの金属キャスクへの衝突による変形 (模式図)

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

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

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



第 4-3-2 図 衝突時の荷重及び速度 (模式図)

天井クレーン落下時の荷重設定の前提条件を第 4-3-1 表に、荷重設定の結果を第 4-3-2 表にそれぞれ示す。構造評価の入力条件に使用する最大荷重 (F_0) は約 48MN (BWR 用大型キャスク (タイプ 2 A) の場合), 約 48MN (BWR 用中型キャスク (タイプ 2) の場合), 49MN (PWR 用キャスク (タイプ 1) の場合) となる。

第 4-3-1 表 天井クレーン落下時の荷重設定の前提条件

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

第 4-3-2 表 天井クレーン落下時の荷重設定の結果

項目	数値	備考
落下エネルギー	約 $7.3 \times 10^6 \text{ J}$	天井クレーンの落下高さ(5.3m) + 変形量(下記)に相当
変形量(L)	約 0.55m	単位体積当たりの塑性エネルギー×変形部の体積(変形量に基づく)が落下エネルギー(上記)と等しくなるような変形量(高さ)
荷重作用時間(t_e)	約 0.054s	変形量(L) / 衝突速度(V_0)
落下時の運動量	約 $1.3 \times 10^6 \text{ N}\cdot\text{s}$	落下物の質量(m) × 衝突速度(V_0)
最大荷重(F_0)	約 48MN (BWR用大型キャスク(タイプ2A)の場合) 約 48MN (BWR用中型キャスク(タイプ2)の場合) 約 49MN (PWR用キャスク(タイプ1)の場合)	前頁末の算出式に基づき、落下物の質量(m)、衝突速度(V_0)、荷重作用時間(t_e)を用いて $F_0 = 2mV_0/t_e$ として算出

b. 構造評価条件

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

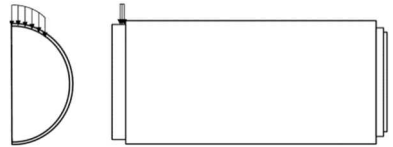
解析コードは構造解析用汎用コード ABAQUS を用いる。

a. で設定した衝突荷重を，密封境界部に作用する荷重が大きくなるよう金属キャスクの一次蓋側面に相当する範囲（BWR用大型キャスク（タイプ2A）の場合），胴フランジ側面（BWR用中型キャスク（タイプ2）の場合），胴フランジ側面（PWR用キャスク（タイプ1）の場合）に与える。

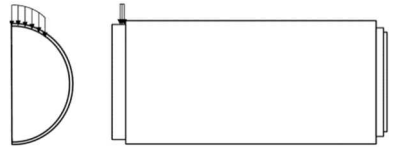
金属キャスクはたて起こし架台上の水平姿勢の全体形状を模擬し，評価結果を厳しくするよう，支持部（たて起こし架台）の変形及び三次蓋による荷重の抑制を無視する。

構造評価の条件を第4-3-3表に示す。

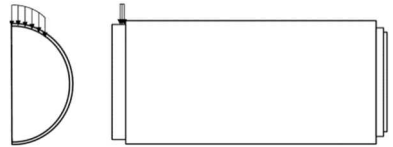
第 4-3-3 表 (1/3) 天井クレーン落下時の水平姿勢キャスク構造評価の条件
(BWR用大型キャスク (タイプ 2 A) の場合)

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

第 4-3-3 表 (2/3) 天井クレーン落下時の水平姿勢キャスク構造評価の条件
(BWR用中型キャスク (タイプ2) の場合)

項目	解析条件	備考
解析コード	ABAQUS (構造解析用汎用コード)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 米国 HKS 社 (現ダッソーシステムズ社) で開発された有限要素法に基づく構造解析用汎用コード ・ 応力解析, 熱応力解析及び伝播解析などを行うことができ, 特に非線形解析が容易に行えることが特徴 ・ 金属キャスクの応力解析, 発電用原子炉の応力解析 (原子炉容器, 炉心支持構造物, 蒸気発生器等) で多くの実績
衝突荷重の与え方	<ul style="list-style-type: none"> ・ 荷重 48MN ・ 荷重範囲は, 軸方向は胴フランジ側面, 周方向は金属キャスク直径の約 $\frac{4}{5}$ の範囲として一様分布を与える 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 荷重の値 (48MN) は衝突荷重の設定結果に基づく ・ 密封境界部 (一次蓋, 一次蓋フランジ及び一次蓋締付ボルト) に作用する荷重が大きくなるよう, 荷重範囲及び荷重分布を設定 (下図参照)  <p style="text-align: center;">衝突荷重分布の与え方 (模式図)</p>
金属キャスクのモデル	<ul style="list-style-type: none"> ・ 金属キャスクは全体形状を模擬 ・ 金属キャスクはたて起こし架台上を想定した水平姿勢 ・ 金属キャスクの支持部 (たて起こし架台) はモデル化せず, 下部トラニオン及び胴上部を固定 ・ 三次蓋がない状態を仮定 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 金属キャスクに緩衝体に取り付けられていない, たて起こし架台上を想定 (仮置架台上の金属キャスクには緩衝体に取り付けられており, 落下物の衝突に対しても蓋部を保護する上で相当の耐性を有すると考えられる) ・ 天井クレーンの衝突時の金属キャスクへの衝突荷重を大きくする観点から, 支持部 (たて起こし架台) の変形は考慮しない ・ たて起こし架台上では三次蓋が取り付けられているが, 三次蓋及び三次蓋締付ボルトにより密封境界部 (一次蓋) に作用する荷重が抑制されるため, 保守的に抑制効果を見做す

第 4-3-3 表 (3/3) 天井クレーン落下時の水平姿勢キャスク構造評価の条件
(PWR用キャスク (タイプ1) の場合)

項目	解析条件	備考
解析コード	ABAQUS (構造解析用汎用コード)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 米国 HKS 社 (現ダッソーシステムズ社) で開発された有限要素法に基づく構造解析用汎用コード ・ 応力解析, 熱応力解析及び伝播解析などを行うことができ, 特に非線形解析が容易に行えることが特徴 ・ 金属キャスクの応力解析, 発電用原子炉の応力解析 (原子炉容器, 炉心支持構造物, 蒸気発生器等) で多くの実績
衝突荷重の与え方	<ul style="list-style-type: none"> ・ 荷重 49MN ・ 荷重範囲は, 軸方向は胴フランジ側面, 周方向は金属キャスク直径の約 $\frac{4}{5}$ の範囲として一様分布を与える 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 荷重の値 (49MN) は衝突荷重の設定結果に基づく ・ 密封境界部 (一次蓋, 一次蓋フランジ及び一次蓋締付ボルト) に作用する荷重が大きくなるよう, 荷重範囲及び荷重分布を設定 (下図参照)  <p style="text-align: center;">衝突荷重分布の与え方 (模式図)</p>
金属キャスクのモデル	<ul style="list-style-type: none"> ・ 金属キャスクは全体形状を模擬 ・ 金属キャスクはたて起こし架台上を想定した水平姿勢 ・ 金属キャスクの支持部 (たて起こし架台) はモデル化せず, トラニオンを固定 ・ 三次蓋がない状態を仮定 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 金属キャスクに緩衝体に取り付けられていない, たて起こし架台上を想定 (仮置架台上の金属キャスクには緩衝体に取り付けられており, 落下物の衝突に対しても蓋部を保護する上で相当の耐性を有すると考えられる) ・ 天井クレーンの衝突時の金属キャスクへの衝突荷重を大きくする観点から, 支持部 (たて起こし架台) の変形は考慮しない ・ たて起こし架台上では三次蓋が取り付けられているが, 三次蓋及び三次蓋締付ボルトにより密封境界部 (一次蓋) に作用する荷重が抑制されるため, 保守的に抑制効果を見做す

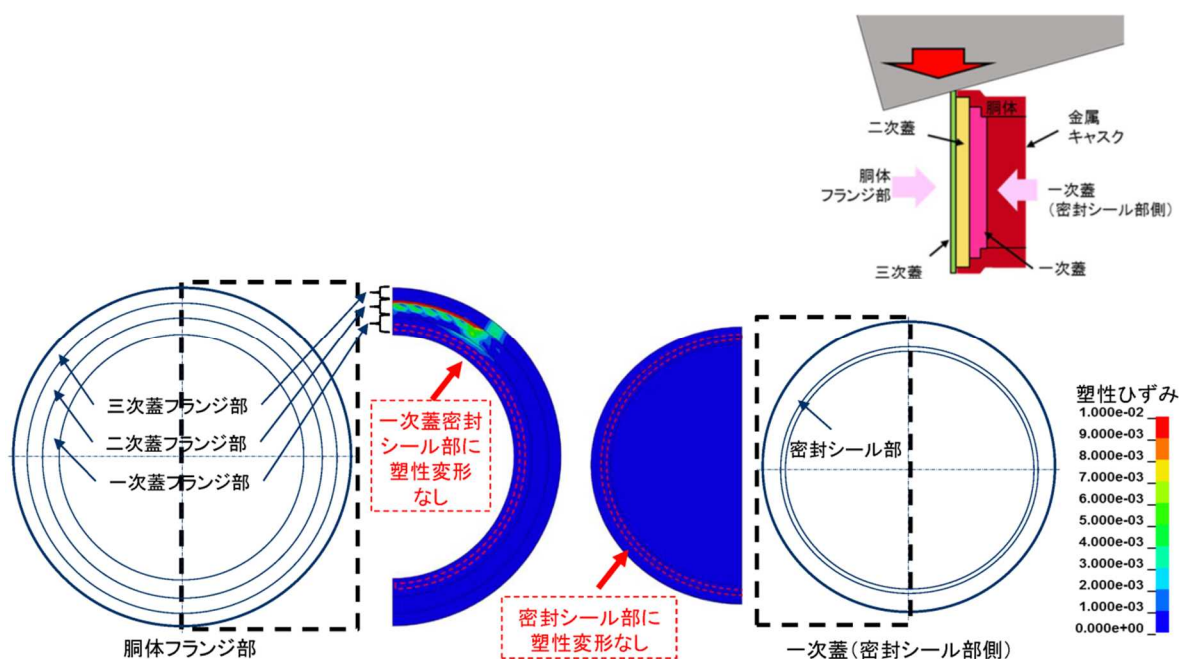
c. 評価結果

BWR用大型キャスク（タイプ2A）の評価結果を第4-3-3図（1/3）及び第4-3-4表（1/3）に示す。

ひずみに関しては、第4-3-3図（1/3）に示すとおり、胴体の二次蓋フランジ部、一次蓋フランジ部の外縁等の一部塑性変形が見られるが、一次蓋密封シール部に塑性変形は見られず、また一次蓋の密封シール部にも塑性変形は見られない。

また、応力に関しては、第4-3-4表（1/3）に示すとおり、一次蓋用締付ボルトのボルト応力は降伏応力を超えず弾性範囲に収まっている。

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



第4-3-3図（1/3） 天井クレーン落下時の水平姿勢キャスクのひずみ評価結果

（BWR用大型キャスク（タイプ2A））

第4-3-4表（1/3） 天井クレーン落下時の水平姿勢キャスクの応力評価結果
（BWR用大型キャスク（タイプ2A））

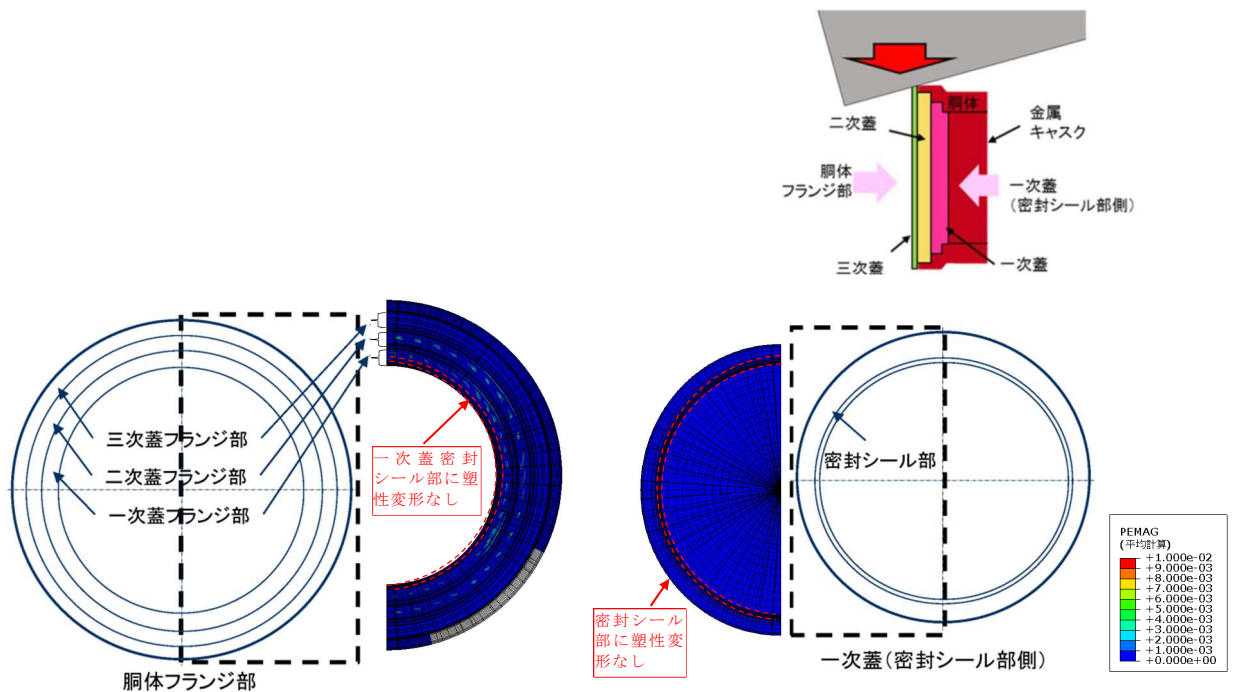
判定項目		評価結果	判定基準
ボルト応力	一次蓋締付ボルト	○ (約 735MPa)	設計降伏点 (Sy 値) 一次蓋締付ボルト 831MPa

次に、BWR用中型キャスク(タイプ2)の評価結果を第4-3-3図(2/3)及び第4-3-4表(2/3)に示す。

ひずみに関しては、第4-3-3図(2/3)に示すとおり、胴体の二次蓋フランジ部、一次蓋フランジ部の外縁等の一部塑性変形が見られるが、一次蓋密封シール部に塑性変形は見られず、また一次蓋の密封シール部にも塑性変形は見られない。

また、応力に関しては、第4-3-4表(2/3)に示すとおり、一次蓋用締付ボルトのボルト応力は降伏応力を超えず弾性範囲に収まっている。

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



第4-3-3図(2/3) 天井クレーン落下時の水平姿勢キャスクのひずみ評価結果
(BWR用中型キャスク(タイプ2))

第4-3-4表(2/3) 天井クレーン落下時の水平姿勢キャスクの応力評価結果
(BWR用中型キャスク(タイプ2))

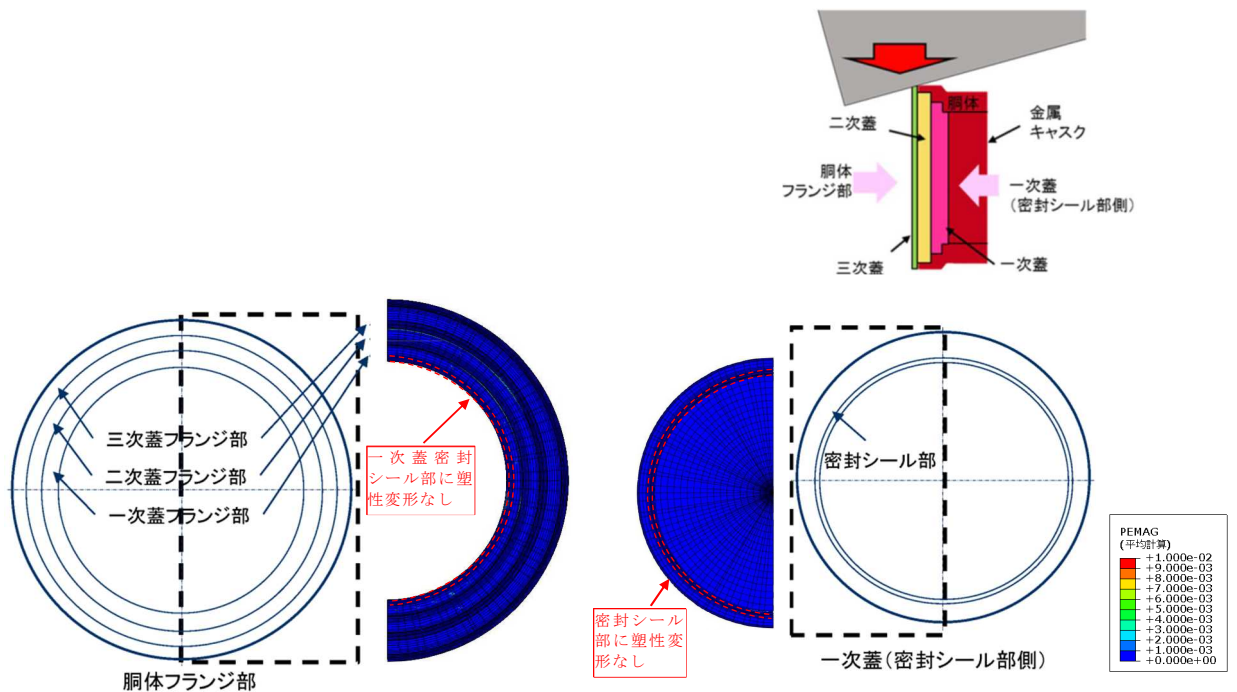
判定項目		評価結果	判定基準
ボルト応力	一次蓋締付ボルト	○ (約 613MPa)	設計降伏点 (Sy 値) 一次蓋締付ボルト 848MPa

次に、PWR用キャスク（タイプ1）の評価結果を第4-3-3図（3/3）及び第4-3-4表（3/3）に示す。

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

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

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



第4-3-3図（3/3） 天井クレーン落下時の水平姿勢キャスクのひずみ評価結果
（PWR用キャスク（タイプ1））

第4-3-4表（3/3） 天井クレーン落下時の水平姿勢キャスクの応力評価結果
（PWR用キャスク（タイプ1））

判定項目		評価結果	判定基準
ボルト応力	一次蓋締付ボルト	○ (約 774MPa)	設計降伏点 (Sy 値) 一次蓋締付ボルト 843MPa

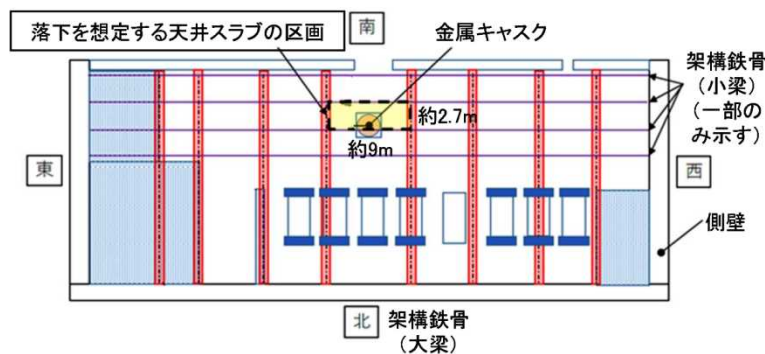
(4) 天井スラブの縦姿勢キャスクへの落下による影響の評価

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

a. 衝突荷重の設定

構造評価の入力条件となる衝突荷重を、工学式に基づき設定する。

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

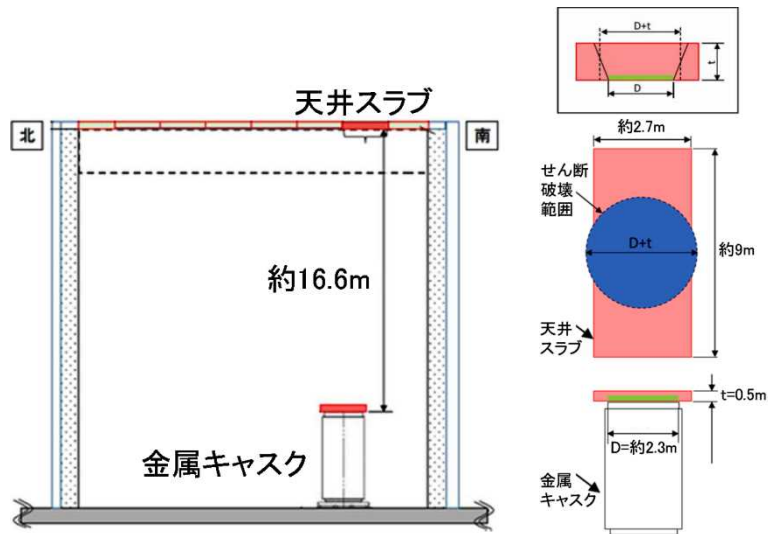


第4-4-1図 落下を想定する天井スラブ

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

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

場合に比べ荷重は小さくなると考えられる。



第 4-4-2 図 天井スラブの金属キャスクへの衝突（模式図）

天井スラブ落下時の荷重設定の前提条件を第 4-4-1 表に、荷重設定の結果を第 4-4-2 表にそれぞれ示す。構造評価の入力条件に使用する最大荷重(F_0)は約 11MN（BWR用大型キャスク（タイプ 2 A）の場合）、約 11MN（BWR用中型キャスク（タイプ 2）の場合）、約 12MN（PWR用キャスク（タイプ 1）の場合）となる。

第 4-4-1 表 (1/3) 天井スラブ落下時の荷重設定の前提条件
(BWR用大型キャスク (タイプ 2 A) の場合)

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

第 4-4-2 表 (1/3) 天井スラブ落下時の荷重設定の結果
(BWR用大型キャスク (タイプ 2 A) の場合)

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

第 4-4-1 表 (2/3) 天井スラブ落下時の荷重設定の前提条件
(BWR用中型キャスク (タイプ2) の場合)

項目	数値	備考
落下高さ	16.5m	天井スラブの通常時及び金属キャスクへの衝突時の重心高さの差
落下物の衝突速度	18.0m/s	天井スラブの落下高さ (上記) に基づく位置エネルギーを運動エネルギーと等価として算出した速度
落下物の質量	30t	受入れ区域全体で最大の区画となる天井スラブの寸法 (東西約 9m×南北約 2.7m×厚さ 0.5m) 及びコンクリート密度 (2.45t/m ³) に基づき設定
金属キャスクフランジ部上面の直径 (D)	2.2m	—
天井スラブ厚さ (t)	0.5m	—
天井スラブ強度 (σ)	2.4MPa	金属キャスクに与える荷重が大きくなるよう、原子力発電所耐震設計技術規程 (JEAC4601-2008) の許容せん断応力度 (供用状態 D) (=1.5F _c /30) に従って設定 (F _c は実強度 (=1.4×33MPa))

第 4-4-2 表 (2/3) 天井スラブ落下時の荷重設定の結果
(BWR用中型キャスク (タイプ2) の場合)

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

第 4-4-1 表 (3/3) 天井スラブ落下時の荷重設定の前提条件
(PWR用キャスク (タイプ 1) の場合)

項目	数値	備考
落下高さ	16.8m	天井スラブの通常時及び金属キャスクへの衝突時の重心高さの差
落下物の衝突速度	18.2m/s	天井スラブの落下高さ (上記) に基づく位置エネルギーを運動エネルギーと等価として算出した速度
落下物の質量	30t	受入れ区域全体で最大の区画となる天井スラブの寸法 (東西約 9m×南北約 2.7m×厚さ 0.5m) 及びコンクリート密度 (2.45t/m ³) に基づき設定
金属キャスクフランジ部上面の直径 (D)	2.4m	—
天井スラブ厚さ (t)	0.5m	—
天井スラブ強度 (σ)	2.4MPa	金属キャスクに与える荷重が大きくなるよう、原子力発電所耐震設計技術規程 (JEAC4601-2008) の許容せん断応力度 (供用状態 D) (=1.5F _c /30) に従って設定 (F _c は実強度 (=1.4×33MPa))

第 4-4-2 表 (3/3) 天井スラブ落下時の荷重設定の結果
(PWR用キャスク (タイプ 1) の場合)

項目	数値	備考
せん断荷重 (F _τ)	約 12MN	$F_{\tau} = \pi \times (D+t) \times t \times \sigma$ により算出 D : 金属キャスクフランジ部上面の直径, t : 天井スラブ厚さ, σ : 天井スラブ強度

b. 構造評価条件

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

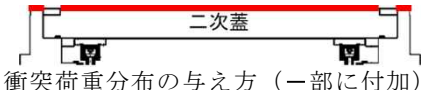
解析コードは(3)の天井クレーン落下時の構造評価と同様に、構造解析用汎用コード ABAQUS を用いる。

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


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

構造評価の条件を第 4-3-3 表に示す。


第 4-4-3 表 (1/3) 天井スラブ落下時の縦姿勢キャスク構造評価の条件
(BWR用大型キャスク (タイプ 2 A) の場合)

項目	解析条件	備考
解析コード	ABAQUS (構造解析用汎用コード)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 米国 HKS 社 (現ダッソーシステムズ社) で開発された有限要素法に基づく構造解析用汎用コード ・ 応力解析, 熱応力解析及び伝播解析などを行うことができ, 特に非線形解析が容易に行えることが特徴 ・ 金属キャスクの応力解析, 発電用原子炉の応力解析 (原子炉容器, 炉心支持構造物, 蒸気発生器等) で多くの実績
衝突荷重の与え方	<ul style="list-style-type: none"> ・ 荷重 11MN ・ 荷重範囲は二次蓋及び二次蓋フランジ部として一様分布を与える 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 荷重の値 (11MN) は衝突荷重の設定結果に基づく ・ 縦姿勢の金属キャスクへの衝突を考慮し, 荷重範囲を金属キャスク頂部とする (下図参照)  <p style="text-align: center;">衝突荷重分布の与え方 (一部に付加)</p>
金属キャスクのモデル	<ul style="list-style-type: none"> ・ 金属キャスクは全体形状を模擬 ・ 金属キャスクは貯蔵架台上を想定した縦姿勢 ・ 金属キャスクの支持部 (貯蔵架台) はモデル化せず底部を固定 ・ 三次蓋がない状態を考慮 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 縦姿勢の金属キャスクは貯蔵架台上にあるが, 衝突時の金属キャスクへの衝突荷重を大きくする観点から, 支持部 (貯蔵架台) の変形は考慮しない ・ 取扱工程上三次蓋がある状態 (検査架台まで) とない状態 (貯蔵区域への移送時) があるが, 密封境界部 (一次蓋) への荷重が厳しくなる後者の場合で評価

第 4-4-3 表 (2/3) 天井スラブ落下時の縦姿勢キャスク構造評価の条件
(BWR用中型キャスク (タイプ2) の場合)

項目	解析条件	備考
解析コード	ABAQUS (構造解析用汎用コード)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 米国 HKS 社 (現ダッソーシステムズ社) で開発された有限要素法に基づく構造解析用汎用コード ・ 応力解析, 熱応力解析及び伝播解析などを行うことができ, 特に非線形解析が容易に行えることが特徴 ・ 金属キャスクの応力解析, 発電用原子炉の応力解析 (原子炉容器, 炉心支持構造物, 蒸気発生器等) で多くの実績
衝突荷重の与え方	<ul style="list-style-type: none"> ・ 荷重 11MN ・ 荷重範囲は二次蓋及び二次蓋フランジ部として一様分布を与える 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 荷重の値 (11MN) は衝突荷重の設定結果に基づく ・ 縦姿勢の金属キャスクへの衝突を考慮し, 荷重範囲を金属キャスク頂部とする (下図参照)  <p style="text-align: center;">衝突荷重分布の与え方 (一部に付加)</p>
金属キャスクのモデル	<ul style="list-style-type: none"> ・ 金属キャスクは全体形状を模擬 ・ 金属キャスクは貯蔵架台上を想定した縦姿勢 ・ 金属キャスクの支持部 (貯蔵架台) はモデル化せず底部を固定 ・ 三次蓋がない状態を考慮 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 縦姿勢の金属キャスクは貯蔵架台上にあるが, 衝突時の金属キャスクへの衝突荷重を大きくする観点から, 支持部 (貯蔵架台) の変形は考慮しない ・ 取扱工程上三次蓋がある状態 (検査架台まで) とない状態 (貯蔵区域への移送時) があるが, 密封境界部 (一次蓋) への荷重が厳しくなる後者の場合で評価

第 4-4-3 表 (3/3) 天井スラブ落下時の縦姿勢キャスク構造評価の条件
(PWR用キャスク (タイプ1) の場合)

項目	解析条件	備考
解析コード	ABAQUS (構造解析用汎用コード)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 米国 HKS 社 (現ダッソーシステムズ社) で開発された有限要素法に基づく構造解析用汎用コード ・ 応力解析, 熱応力解析及び伝播解析などを行うことができ, 特に非線形解析が容易に行えることが特徴 ・ 金属キャスクの応力解析, 発電用原子炉の応力解析 (原子炉容器, 炉心支持構造物, 蒸気発生器等) で多くの実績
衝突荷重の与え方	<ul style="list-style-type: none"> ・ 荷重 12MN ・ 荷重範囲は二次蓋及び二次蓋フランジ部として一様分布を与える 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 荷重の値 (12MN) は衝突荷重の設定結果に基づく ・ 縦姿勢の金属キャスクへの衝突を考慮し, 荷重範囲を金属キャスク頂部とする (下図参照)  <p style="text-align: center;">衝突荷重分布の与え方 (一部に付加)</p>
金属キャスクのモデル	<ul style="list-style-type: none"> ・ 金属キャスクは全体形状を模擬 ・ 金属キャスクは貯蔵架台上を想定した縦姿勢 ・ 金属キャスクの支持部 (貯蔵架台) はモデル化せず底部を固定 ・ 三次蓋がない状態を考慮 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 縦姿勢の金属キャスクは貯蔵架台上にあるが, 衝突時の金属キャスクへの衝突荷重を大きくする観点から, 支持部 (貯蔵架台) の変形は考慮しない ・ 取扱工程上三次蓋がある状態 (検査架台まで) とない状態 (貯蔵区域への移送時) があるが, 密封境界部 (一次蓋) への荷重が厳しくなる後者の場合で評価

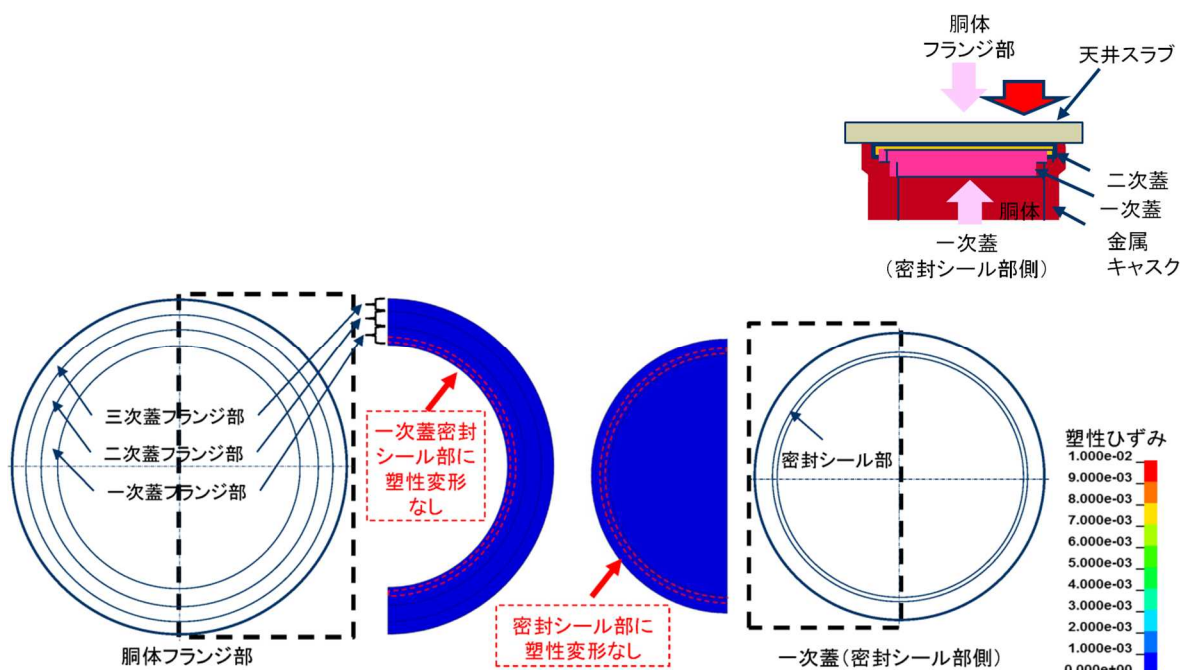
c. 評価結果

評価結果を表及び第 4-4-3 図及び第 4-4-4 表に示す。

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

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

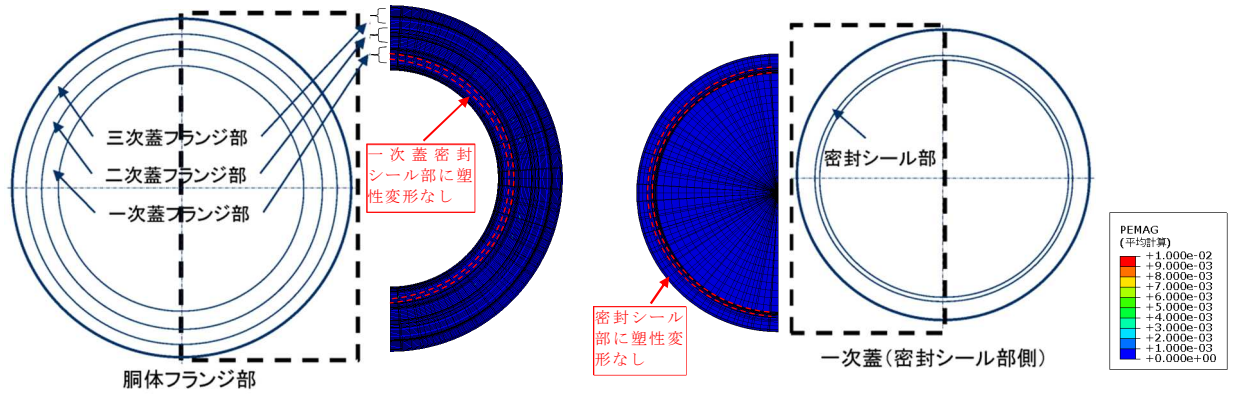
以上のことから、天井スラブ落下時の水平姿勢キャスクの密封境界部はおおむね弾性範囲にとどまることを確認した。



第 4-4-3 図 (1/3) 天井スラブ落下時の縦姿勢キャスクのひずみ評価結果 (BWR用大型キャスク (タイプ 2 A) の場合)

第 4-4-4 表 (1/3) 天井スラブ落下時の縦姿勢キャスクの応力評価結果 (BWR用大型キャスク (タイプ 2 A) の場合)

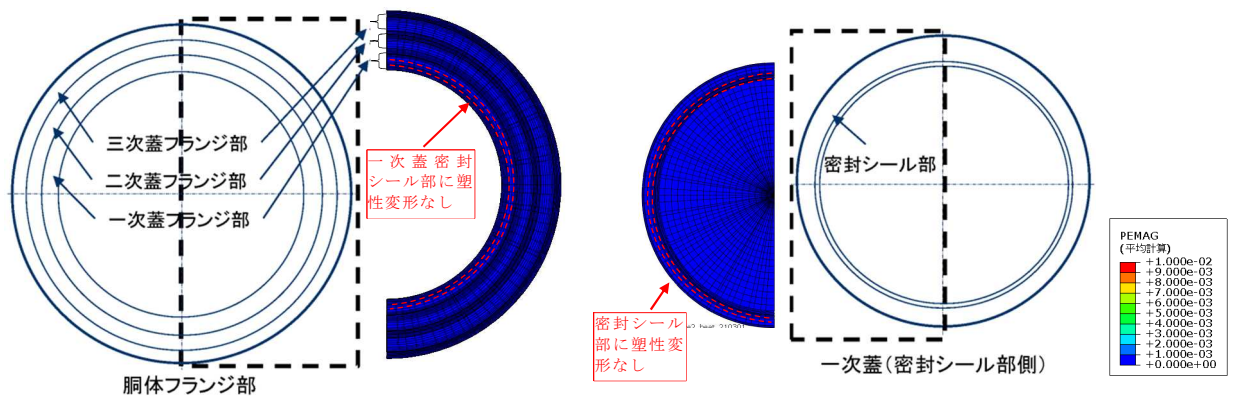
判定項目		評価結果	判定基準
ボルト応力	一次蓋締付ボルト	○ (約 263MPa)	設計降伏点 (Sy 値) 一次蓋締付ボルト 831MPa



第 4-4-3 図 (2/3) 天井スラブ落下時の水平姿勢キャスクのひずみ評価結果
(BWR用中型キャスク (タイプ2) の場合)

第 4-4-4 表 (2/3) 天井スラブ落下時の水平姿勢キャスクの応力評価結果
(BWR用中型キャスク (タイプ2) の場合)

判定項目		評価結果	判定基準
ボルト応力	一次蓋締付ボルト	○ (約 218MPa)	設計降伏点 (Sy 値) 一次蓋締付ボルト 848MPa



第 4-4-3 図 (3/3) 天井スラブ落下時の水平姿勢キャスクのひずみ評価結果
(PWR用キャスク (タイプ1) の場合)

第 4-4-4 表 (3/3) 天井スラブ落下時の水平姿勢キャスクの応力評価結果
(PWR用キャスク (タイプ1) の場合)

判定項目		評価結果	判定基準
ボルト応力	一次蓋締付ボルト	○ (約 262MPa)	設計降伏点 (Sy 値) 一次蓋締付ボルト 843MPa

(5) 閉じ込め機能の低下による影響

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

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

a. 核分裂生成物の大気中への放出量

(a) 破損燃料棒の評価

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

使用済燃料は金属キャスクの内部にあるため落下物や津波漂流物の荷重が直接作用しないことから、落下物や津波漂流物の衝突により多数の燃料棒が破損することは考え難いが、保守的に金属キャスク 1 基分の燃料集合体全数(69 体：BWR用大型キャスク(タイプ2A)の場合、52 体：BWR用中型キャスク(タイプ2)の場合、21 体：PWR用キャスク(タイプ1)の場合)の燃料棒全数が破損すると仮定する。

(b) 核分裂生成物の移行と放出量の評価

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

核分裂生成物の移行と放出量の評価は、発電炉の原子炉設置許可申請書添付書類十における「燃料集合体の落下」等の評価と同様に、燃料棒ギャップ内の希ガス及びよう素を対象として評価を行うが、金属キャスクに収納される燃料が長期の冷却期間を経過していることを踏

まえ、長半減期核種として希ガスについては Kr-85 を、よう素については I-129 をそれぞれ考慮することとし、次の仮定に基づいて行う。

- i. 金属キャスクに収納される燃料の核分裂生成物量は、収納燃料条件に基づき最も厳しい条件である平均燃焼度 34GWd/t、冷却期間 18 年（BWR 用大型キャスク（タイプ 2 A）の場合）、平均燃焼度 43GWd/t、冷却期間 12 年（BWR 用中型キャスク（タイプ 2）の場合）、平均燃焼度 44GWd/t、冷却期間 15 年（PWR 用キャスク（タイプ 1）の場合）、とする。
- ii. 燃料棒ギャップ内の核分裂生成物の量は、発電炉の原子炉停止後の時間が経過した燃料が破損した場合の評価と同様に、燃料棒内の全蓄積量に対して 30%（BWR 用大型キャスク（タイプ 2 A）及び BWR 用中型キャスク（タイプ 2）の場合）又は 10%（PWR 用大型キャスク（タイプ 1）の場合）¹⁾ とする。
- iii. 金属キャスクの一次蓋からの漏えい率は、落下物や津波漂流物の蓋部への衝突による横ずれ量として金属キャスクの構造に基づく最大値を考慮し、実験的知見に基づき保守的に $1 \times 10^{-4} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ とし、金属キャスクの内圧及び温度については初期状態に対し燃料棒からの核分裂生成物ガスの放出による熱伝導低下と圧力上昇を考慮する。なお、時間の経過による漏えい率の回復は考慮しない。
- iv. 金属キャスクの一次蓋から漏えいした核分裂生成物は大気中へ放出されるものとし、三次蓋及び二次蓋による放出の抑制効果は保守的に考慮せず、貯蔵建屋内の減衰効果についても考慮しない。
核分裂生成物放出量の評価条件を第 4-5-1 表に示す。

(c) 評価結果

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

第 4-5-1 表 (1/3) 核分裂生成物放出量の評価条件
(BWR用大型キャスク (タイプ 2 A) の場合)

事象	金属キャスクへ落下物や津波漂流物が衝突し、収納された燃料集合体の燃料棒から気体状の核分裂生成物が金属キャスク内に放出 金属キャスク内が正圧となり、落下物や津波漂流物の衝突により一次蓋のシール部から気体状の核分裂生成物が漏えいした状態を仮定
評価対象核種	希ガス (Kr-85) 及びよう素 (I-129) (長期冷却後の燃料であることを考慮し、長半減期の気体状核種を選定)
核分裂生成物の生成量	<ul style="list-style-type: none"> ・ 新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料 ・ 燃焼度 34Gwd/t (収納燃料条件 (平均燃焼度)) ・ 冷却期間 18 年 (収納燃料条件) より算出
破損燃料体数	金属キャスク 1 基分の燃料集合体全数 (69 体) の燃料棒全数の破損を仮定
燃料棒ギャップへの核分裂生成物移行割合	30%*1
金属キャスク内に放出される核分裂生成物量	希ガス (Kr-85) : 約 3.8×10^{14} Bq よう素 (I-129) : 約 4.4×10^9 Bq (核分裂生成物の生成量×破損燃料体数×燃料棒ギャップへの核分裂生成物移行割合)
金属キャスクからの漏えい量	金属キャスクからの漏えい率 : 1×10^{-4} Pa・m ³ /s ・ 落下物や津波漂流物の蓋部への衝突による横ずれ量として金属キャスクの構造に基づく最大値を考慮し、実験的知見に基づき保守的に設定 (別添 6 参照) ・ 横ずれ発生後、時間の経過による漏えい率の回復は考慮しない 金属キャスクの内圧及び温度 : 初期状態に対し燃料棒からの核分裂生成物ガスの放出による熱伝導低下と圧力上昇を考慮 ・ 設定した漏えい率に相当する漏えい孔径 : 約 1.3×10^{-5} m*2 ・ 漏えい孔長 : 約 4.6×10^{-3} m ・ 一次蓋からのガス漏えい率*3 (標準状態 : 25°C, 1 気圧) : 約 8.0×10^{-10} m ³ /s 三次蓋及び二次蓋による放出の抑制効果は保守的に考慮しない 貯蔵建屋内の減衰効果は考慮しない
放出期間	3 か月 (対応措置ないし時間の経過による漏えい率の回復により、漏えいは抑制されるものとする)

*1) 参考文献 1) の附属書 K に基づき設定

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

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

第 4-5-2 表 (1/3) 核分裂生成物放出量の評価結果
(BWR用大型キャスク (タイプ 2 A) の場合)

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

第 4-5-1 表 (2/3) 核分裂生成物放出量の評価条件
(BWR用中型キャスク (タイプ2) の場合)

事象	金属キャスクへ落下物や津波漂流物が衝突し、収納された燃料集合体の燃料棒から気体状の核分裂生成物が金属キャスク内に放出 金属キャスク内が正圧となり、落下物や津波漂流物の衝突により一次蓋のシール部から気体状の核分裂生成物が漏えいした状態を仮定
評価対象核種	希ガス (Kr-85) 及びヨウ素 (I-129) (長期冷却後の燃料であることを考慮し、長半減期の気体状核種を選定)
核分裂生成物の生成量	<ul style="list-style-type: none"> ・高燃焼度 8×8 燃料 ・燃焼度 43Gwd/t (収納燃料条件 (平均燃焼度)) ・冷却期間 12 年 (収納燃料条件) より算出
破損燃料体数	金属キャスク 1 基分の燃料集合体全数 (52 体) の燃料棒全数の破損を仮定
燃料棒ギャップへの核分裂生成物移行割合	30% ^{*1}
金属キャスク内に放出される核分裂生成物量	希ガス (Kr-85) : 約 5.1×10^{14} Bq ヨウ素 (I-129) : 約 4.1×10^9 Bq (核分裂生成物の生成量×破損燃料体数×燃料棒ギャップへの核分裂生成物移行割合)
金属キャスクからの漏えい量	金属キャスクからの漏えい率 : 1×10^{-4} Pa・m ³ /s <ul style="list-style-type: none"> ・落下物や津波漂流物の蓋部への衝突による横ずれ量として金属キャスクの構造に基づく最大値を考慮し、実験的知見に基づき保守的に設定 (別添 6 参照) ・横ずれ発生後、時間の経過による漏えい率の回復は考慮しない 金属キャスクの内圧及び温度 : 初期状態に対し燃料棒からの核分裂生成物ガスの放出による熱伝導低下と圧力上昇を考慮 <ul style="list-style-type: none"> ・設定した漏えい率に相当する漏えい孔径 : 約 1.3×10^{-5} m^{*2} ・漏えい孔長 : 約 4.6×10^{-3} m ・一次蓋からのガス漏えい率^{*3} (標準状態 : 25°C, 1 気圧) : 約 9.9×10^{-11} m³/s 三次蓋及び二次蓋による放出の抑制効果は保守的に考慮しない 貯蔵建屋内の減衰効果は考慮しない
放出期間	3 か月 (対応措置ないし時間の経過による漏えい率の回復により、漏えいは抑制されるものとする)

*1) 参考文献 1) の附属書 K に基づき設定

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

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

第 4-5-2 表 (2/3) 核分裂生成物放出量の評価結果
(BWR用中型キャスク (タイプ2) の場合)

Kr-85	約 9.0×10^{10} Bq
I-129	約 7.3×10^5 Bq

第 4-5-1 表 (3/3) 核分裂生成物放出量の評価条件
(PWR用キャスク (タイプ1) の場合)

事象	金属キャスクへ落下物や津波漂流物が衝突し、収納された燃料集合体の燃料棒から気体状の核分裂生成物が金属キャスク内に放出 金属キャスク内が正圧となり、落下物や津波漂流物の衝突により一次蓋のシール部から気体状の核分裂生成物が漏えいした状態を仮定
評価対象核種	希ガス (Kr-85) 及びヨウ素 (I-129) (長期冷却後の燃料であることを考慮し、長半減期の気体状核種を選定)
核分裂生成物の生成量	<ul style="list-style-type: none"> ・ 17×17 型燃料 ・ 燃焼度 44Gwd/t (収納燃料条件 (平均燃焼度)) ・ 冷却期間 15 年 (収納燃料条件) より算出
破損燃料体数	金属キャスク 1 基分の燃料集合体全数 (21 体) の燃料棒全数の破損を仮定
燃料棒ギャップへの核分裂生成物移行割合	10% ^{*1}
金属キャスク内に放出される核分裂生成物量	希ガス (Kr-85) : 約 1.7×10^{14} Bq ヨウ素 (I-129) : 約 1.5×10^9 Bq (核分裂生成物の生成量×破損燃料体数×燃料棒ギャップへの核分裂生成物移行割合)
金属キャスクからの漏えい量	金属キャスクからの漏えい率 : 1×10^{-4} Pa・m ³ /s <ul style="list-style-type: none"> ・ 落下物や津波漂流物の蓋部への衝突による横ずれ量として金属キャスクの構造に基づく最大値を考慮し、実験的知見に基づき保守的に設定 (別添 6 参照) ・ 横ずれ発生後、時間の経過による漏えい率の回復は考慮しない 金属キャスクの内圧及び温度 : 初期状態に対し燃料棒からの核分裂生成物ガスの放出による熱伝導低下と圧力上昇を考慮 <ul style="list-style-type: none"> ・ 設定した漏えい率に相当する漏えい孔径 : 約 1.3×10^{-5} m^{*2} ・ 漏えい孔長 : 約 4.6×10^{-3} m ・ 一次蓋からのガス漏えい率^{*3} (標準状態 : 25°C, 1 気圧) : 約 2.3×10^{-10} m³/s 三次蓋及び二次蓋による放出の抑制効果は保守的に考慮しない 貯蔵建屋内の減衰効果は考慮しない
放出期間	3 か月 (対応措置ないし時間の経過による漏えい率の回復により、漏えいは抑制されるものとする)

*1) 参考文献 1) の附属書 K に基づき設定

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

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

第 4-5-2 表 (3/3) 核分裂生成物放出量の評価結果
(PWR用キャスク (タイプ1) の場合)

Kr-85	約 5.6×10^{10} Bq
I-129	約 5.1×10^5 Bq

b. 線量評価

(a) 評価前提

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

(b) 評価方法

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

線量の評価条件を第 4-5-3 表に示す。

(c) 評価結果

上記の評価方法に基づき敷地境界外の実効線量を評価した結果を第 4-5-4 表に示す。敷地境界外における公衆の実効線量は約 $2.2 \times 10^{-4}\text{mSv}$ (BWR 用大型キャスク (タイプ 2 A) の場合)、約 $4.3 \times 10^{-5}\text{mSv}$ (BWR 用中型キャスク (タイプ 2) の場合)、約 $3.0 \times 10^{-5}\text{mSv}$ (PWR 用キャスク (タイプ 1) の場合) であり、遮蔽機能の維持の確認に係る実効線量である年間 1mSv と比べ極めて小さく無視し得る程度である。

第 4-5-3 表 線量評価条件

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

第 4-5-4 表 線量評価結果

	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)
外部被ばく(Kr-85)による 実効線量	約 $2.4 \times 10^{-5} mSv$	約 $6.4 \times 10^{-6} mSv$	約 $4.0 \times 10^{-6} mSv$
内部被ばく(I-129)による 実効線量	約 $2.0 \times 10^{-4} mSv$	約 $3.7 \times 10^{-5} mSv$	約 $2.6 \times 10^{-5} mSv$
実効線量合計	約 $2.2 \times 10^{-4} mSv$	約 $4.3 \times 10^{-5} mSv$	約 $3.0 \times 10^{-5} mSv$

(6) 結論

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

5. 使用済燃料貯蔵施設の遮蔽評価

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

(1) 遮蔽評価の条件

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

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

第 5-1 表 貯蔵区域の金属キャスクの線源条件の比較

	今回の評価	(参考) 貯蔵建屋の遮蔽設計評価
線源	金属キャスク遮蔽評価結果（側部中央の表面から 1m 離れた位置における線量当量率が第 5-3 表）の 最大のもの と同等になるように設定	金属キャスク表面から 1m 離れた位置における線量当量率が $100 \mu\text{Sv/h}$ となるように規格化
評価線質	金属キャスク遮蔽評価結果に基づく中性子及び γ 線の線質を設定	中性子 100%とした場合、 γ 線 100%とした場合のそれぞれを評価し、保守的な評価結果を使用
中性子及び γ 線の表面エネルギースペクトル	同右	コンクリートの透過率が高い包絡スペクトルを設定

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

より現実的な条件として金属キャスクの遮蔽評価結果と同等になるよう設定する。貯蔵建屋の遮蔽設計評価との比較を第5-2表に示す。また、各金属キャスクの側部中央の表面から1m離れた位置における線量当量率を第5-3表に示す。

第5-2表 受入れ区域の金属キャスクの線源条件の比較

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

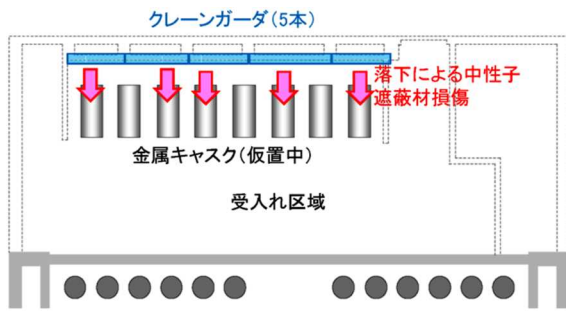
第5-3表 金属キャスクの側部中央の表面から1m離れた位置における線量当量率

	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) *
中性子線	$26.2\mu\text{Sv/h}$	$30.4\mu\text{Sv/h}$	$19.0\mu\text{Sv/h}$
ガンマ線	$51.7\mu\text{Sv/h}$	$51.1\mu\text{Sv/h}$	$49.6\mu\text{Sv/h}$
合計	$77.9\mu\text{Sv/h}$	$81.5\mu\text{Sv/h}$	$68.6\mu\text{Sv/h}$

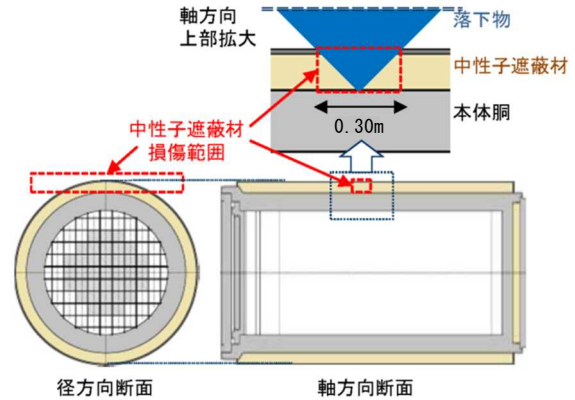
*) 断面積ライブラリ MATXS LIB-J33 を用いて評価。

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

- (a) 外筒を貫通する可能性のある落下物として「4. (2) 衝突想定条件の設定」にて抽出した落下物のうち、上面の走行レールの剛性が高く、落下時に反転して水平状態の金属キャスクの側面へ衝突する状況を仮定すると外筒を貫通する可能性が考えられるクレーンガーダを選定する。なお、閉じ込め評価で想定した落下物である天井クレーンについては外筒への衝突で塑性変形し、また天井スラブは外筒への衝突で破壊すると考えられることから、金属キャスクの外筒を貫通する可能性は小さい。
- (b) クレーンガーダは金属キャスクの仮置エリア付近に5本あることから、第5-1図に示すように1本が1基の金属キャスクの中性子遮蔽材を損傷させるものとし、クレーンガーダの落下により5基の金属キャスクの中性子遮蔽材を損傷するものとする。なお、1本のクレーンガーダが同時に複数の金属キャスクに衝突して両者の金属キャスクの中性子遮蔽材が損傷する可能性は小さいと考えられる。
- (c) クレーンガーダの衝突により、水平状態の金属キャスクの上部の中性子遮蔽材が、BWR用大型キャスク（タイプ2A）の場合、第5-2図に示すように径方向に平行に幅0.30mで損傷するものとする。中性子遮蔽材の損傷状態の前提は、外筒の貫通が起こりうる状況として落下物の角部の衝突を仮定した場合、外筒を貫通した落下物が本体胴で止まるまでに中性子遮蔽材に幅約0.30mの楔形の損傷を発生させると考えられるとする仮定に基づく。開口部の幅は約0.30mであり、遮蔽評価上は保守的に方形の損傷を仮定する。なお、BWR用中型キャスク（タイプ2）の場合には損傷幅は約0.35m、PWR用キャスク（タイプ1）の場合には損傷の幅は約0.33mとする。

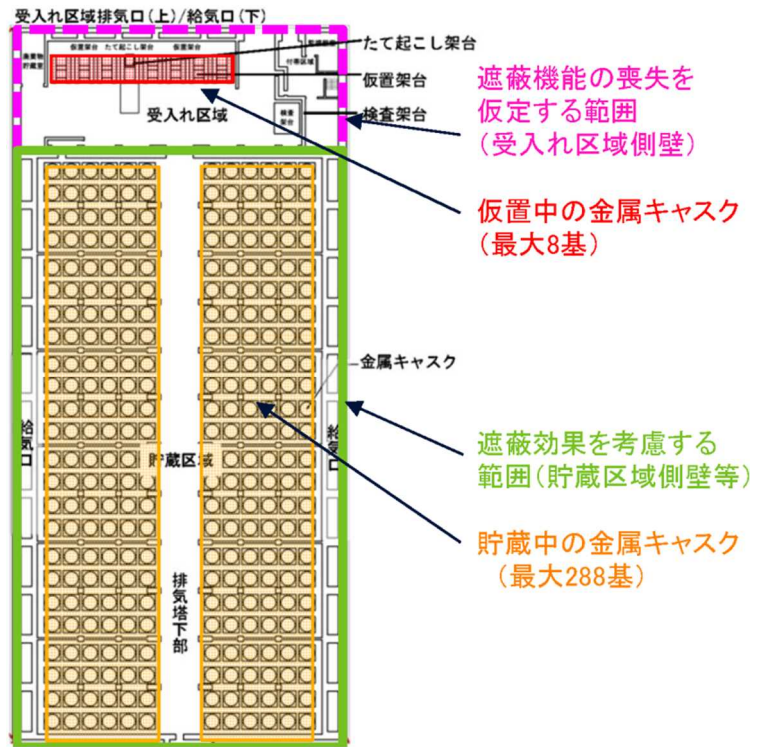


第 5-1 図 クレーンガーダの
金属キャスクへの落下



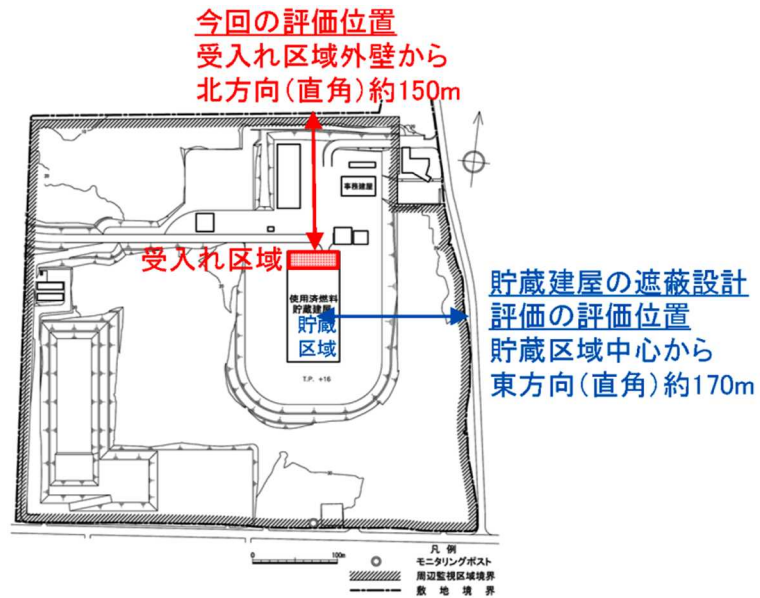
第 5-2 図 落下物による中性子
遮蔽材の損傷の仮定
(BWR 用大型キャスク (タイプ 2A) の場合)

d. 貯蔵建屋の状態は、波圧に対し受入れ区域の北側外壁が許容応力を超えることから、受入れ区域の損傷を仮定し、第 5-3 図に示すように貯蔵建屋のうち、受入れ区域の外壁（北側、東側及び西側）及び天井の遮蔽機能の喪失を仮定する。なお、受入れ区域の損傷形態を定量的に評価する上での不確かさが大きいため、相当に保守的と考えられるが、東側及び西側外壁や天井も含めて遮蔽機能が喪失するとともに、貯蔵区域の遮蔽扉が開放された状態で浸水し、津波が引くと同時に機器搬出入口から排水された後も遮蔽扉が閉鎖できない状態を仮定する。なお、遮蔽機能の回復として、受入れ区域の復旧は考慮しないが、金属キャスク損傷部の遮蔽機能の回復（追加遮蔽体の設置とともに、その前段で受入れ区域の瓦礫撤去を想定）及び貯蔵区域に通じる遮蔽扉部分の遮蔽機能の回復（遮蔽体の設置）を考慮する。復旧期間は前者を 3 か月、後者を 1 か月とする。



第 5-3 図 貯蔵建屋壁の遮蔽機能喪失の仮定

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



第5-4図 線量評価位置

遮蔽評価条件を第 5-4 表に示す。

第 5-4 表 遮蔽評価条件

項目	条件	備考
解析コード	MCNP-4C (3次元連続エネルギーモンテカルロ法コード)	「使用済燃料貯蔵建屋の遮蔽設計」における評価に用いるコードと同様
断面積ライブラリ	MCNPDLC-200/MCNPDATA	ENDF/B-VIをベースとして MCNP用に作成された内蔵ライブラリ
実効線量換算係数	ICRP Publication74 の前方-後方照射条件 (AP)	—
線源条件	<ul style="list-style-type: none"> ・ 金属キャスク基数は貯蔵区域 288 基, 受入れ区域 8 基 (最大基数)。 ・ 貯蔵区域の金属キャスクの線源強度は BWR 用中型キャスク (タイプ 2) の遮蔽評価結果と同等になるよう設定 ・ 受入れ区域の金属キャスクの線源強度は各キャスクタイプの遮蔽評価結果と同等になるよう設定。 	—
金属キャスクの状態	受入れ区域 8 基のうち 5 基については, 落下物の衝突による中性子遮蔽材の損傷を仮定	—
貯蔵建屋の状態	受入れ区域の外壁 (北側, 東側及び西側) 及び天井の遮蔽機能喪失を仮定 貯蔵区域遮蔽扉は開放状態を仮定	遮蔽扉が津波襲来時に開放されている場合を考慮
遮蔽機能の復旧期間	受入れ区域の遮蔽機能の回復は考慮しない 金属キャスク損傷部の遮蔽機能: 3 か月 貯蔵区域遮蔽扉部の遮蔽機能: 1 か月	金属キャスク損傷部については, 受入れ区域の瓦礫撤去 (期間は受入れ区域の建屋物量に基づき解体手順を踏まえて ~ 7 週間程度と想定) 後に追加遮蔽体を 1 週間程度で設置し, これらに余裕を加えて併せて 3 か月を要すると想定
線量評価点	北方向の敷地境界 (受入れ区域外壁から約 150m)	線量の寄与が大きな受入れ区域の金属キャスクに近い, 北方向の敷地境界とする

(2) 遮蔽評価の結果

当センターにて保管予定の金属キャスクは3タイプある。それぞれの金属キャスクが受入れ区域にて損傷すると想定し、敷地境界外における公衆の実効線量を評価した結果を第5-5表に示す。

BWR用中型キャスク（タイプ2）の敷地境界外における公衆の実効線量は年間1mSvを上回るが、受入れ状況を評価し、年間1mSvを超えないように受入れ基数を制限する等の運用とする。

また、BWR用大型キャスク（タイプ2A）及びPWR用キャスク（タイプ1）の敷地境界外における公衆の実効線量は年間1mSvを下回るため、受入れ基数を制限する必要はない。

第5-5表 金属キャスクのタイプ別の敷地境界外における公衆の実効線量の評価結果

	BWR用大型キャスク(タイプ2A)	BWR用中型キャスク(タイプ2) ^{*4}	PWR用キャスク(タイプ1) ^{*4}
受入れ区域に存在する金属キャスクからの実効線量(年間)	約 $7.6 \times 10^{-1} \text{mSv}^{*1}$	約 $1.3 \times 10^0 \text{mSv}^{*2}$	約 $8.9 \times 10^{-1} \text{mSv}^{*3}$
貯蔵区域に存在する金属キャスクからの実効線量(年間)	約 $2.1 \times 10^{-2} \text{mSv}$	約 $2.1 \times 10^{-2} \text{mSv}$	約 $2.1 \times 10^{-2} \text{mSv}$
実効線量合計(年間)	約 $7.8 \times 10^{-1} \text{mSv}$	約 $1.3 \times 10^0 \text{mSv}$	約 $9.1 \times 10^{-1} \text{mSv}$

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

*2)このうち金属キャスクの中性子遮蔽材損傷部からの実効線量(年間)は約 $5.1 \times 10^{-1} \text{mSv}$ である。

*3)このうち金属キャスクの中性子遮蔽材損傷部からの実効線量(年間)は約 $1.9 \times 10^{-1} \text{mSv}$ である。

*4)断面積ライブラリMATXS LIB-J33を用いて評価。

(3) 結論

仮想的な大規模津波に伴う波力による受入れ区域の損傷を仮定し、かつ受入れ区域に金属キャスクが仮置きされている一時的な状態にて落下物の衝突を考慮しても、受入れ基数を制限する等（BWR用中型キャスク（タイプ2）の場合）により、敷地境界外における公衆の実効線量が遮蔽機能の回復を考慮して年間1mSvを超えず、使用済燃料貯蔵施設の遮蔽機能が維持できることを確認した。

6. 衝撃を受けた金属キャスクの対策

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

- ・設計貯蔵期間中において，衝撃を受けた金属キャスクの基本的安全機能を確認するための検査及び試験並びに同機能を維持するために必要な保守及び修理ができる手段を講ずる。

- ・衝撃を受けた金属キャスクを使用済燃料貯蔵施設外へ搬出するための必要な確認ができる手段を講ずる。なお，搬出までの間は金属キャスクを適切に保管する。

(1) 衝撃を受けた金属キャスクの使用済燃料貯蔵施設外搬出における要求事項

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

第6-1表 BM型輸送物の技術上の基準の概要

	通常の輸送要件	一般の試験条件	特別の試験条件
未臨界性	臨界しない	臨界しない	臨界しない*
遮蔽性	表面で2mSv/h以下 (表面から1mで 0.1mSv/h以下)	表面の最大線量当量 率が著しい増加せず	表面から1mで10mSv/h 以下
密封性	—	1時間あたり、 A_2 値の 10^{-6} を超えないこと	1週間あたり、 A_2 値を超 えないこと
除熱性	—	表面温度が85℃以下、 容器の健全性を維持す る温度以下	上記を満足する前提と して、必要な部位が機 能を維持する温度以下
その他	通常の温度変化や振 動等で、健全性を維持	上記を満足する前提と して、容器が概ね弾性 範囲であること	上記を満足する前提と して、必要な部位が破 断、損傷等しないこと

*) 乾式容器では燃料破損時の未臨界性確保のため二重の水密境界を要求

使用済燃料貯蔵施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈（抜粋）

第13条（安全機能を有する施設）

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

第五条 A型輸送物に係る技術上の基準は、次の各号に掲げるものとする。

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

第六条 BM型輸送物に係る技術上の基準は、次の各号に掲げるものとする。

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

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

(2) 衝撃を受けた金属キャスクの基本的な対応方針

前章までに述べたとおり，十分な保守性を有する仮想的な大規模津波を設定し，水深係数3を用いた波圧に基づいて受入れ区域の損傷を想定し，それに伴う落下物や津波漂流物に対して金属キャスクの閉じ込め機能が維持されることを確認している。

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

衝撃を受けた金属キャスクについて，以下の対応を行う。

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

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

これにより，事業所外運搬規則第6条に基づく一般の試験条件，特別の試験条件を満足することを確認し，通常輸送により，使用済燃料貯蔵施設外へ搬出を行う。

一般の試験条件，特別の試験条件の満足を確認できない場合には，遮蔽性を確認するとともに，運搬に当たって講ずる障害防止のための措置を検討し，事業所外運搬規則第14条に定める特別措置により，使用済燃料貯蔵施設外へ搬出を行う。

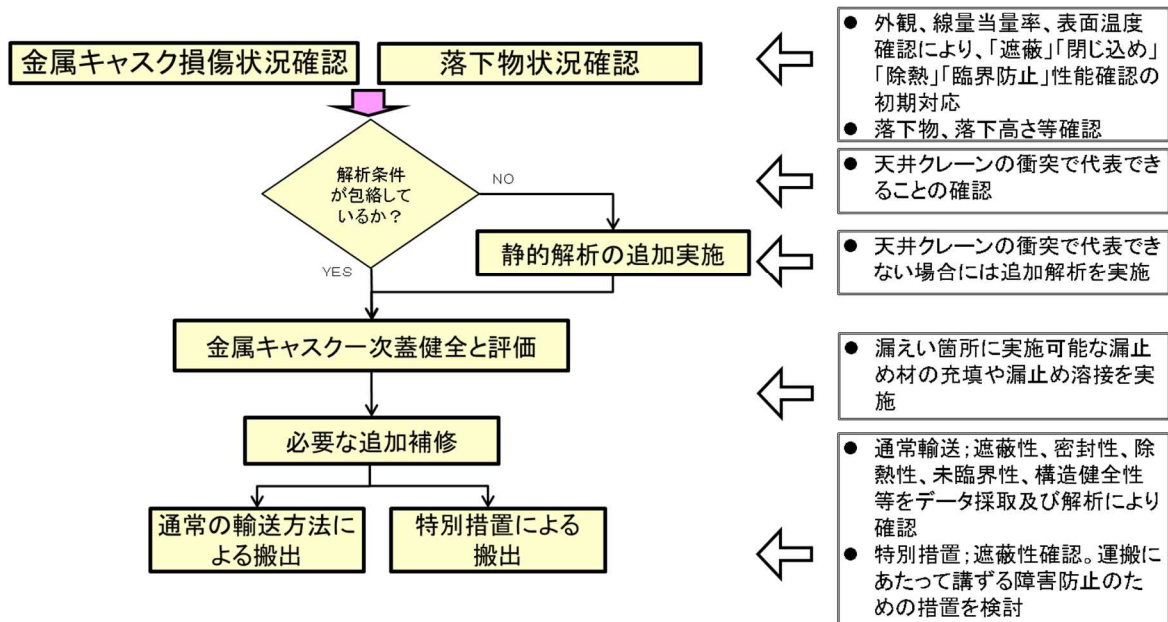
仮想的な大規模津波による受入れ区域損傷に伴う落下物の想定条件を第6-2表に示す。また，衝撃を受けた金属キャスクの基本的な対応方針（天井クレーン，天井スラブ，クレーンガード）を第6-1図(1)～(3)に示す。

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

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

ケース①の対応フロー

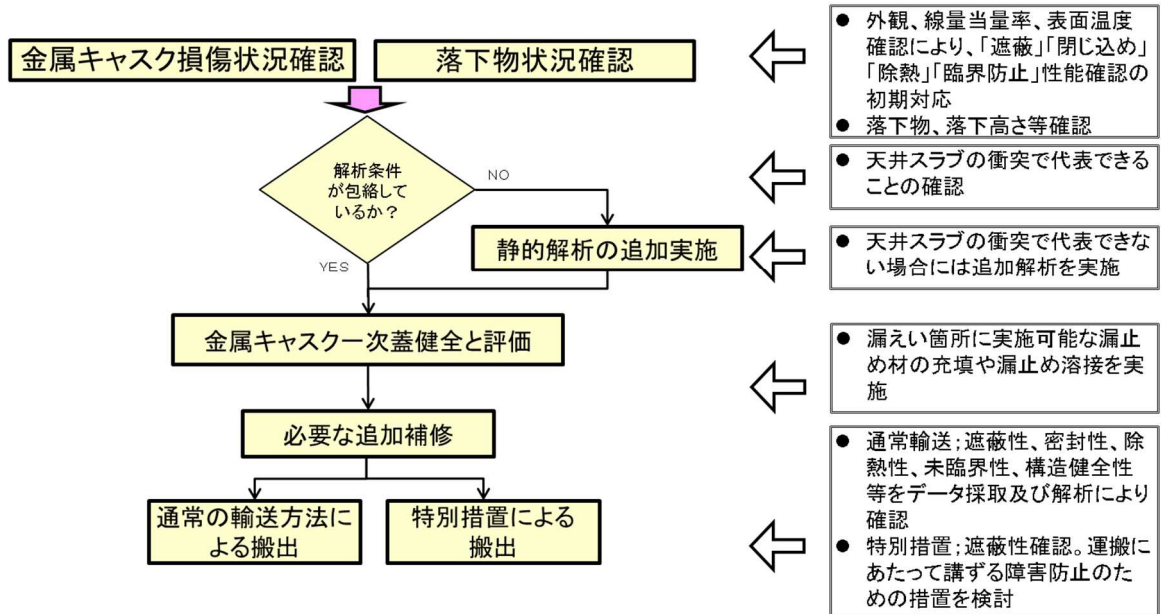
天井クレーンが、水平状態の金属キャスクに落下し、閉じ込め(密封)機能に影響のおそれ



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

ケース②の対応フロー

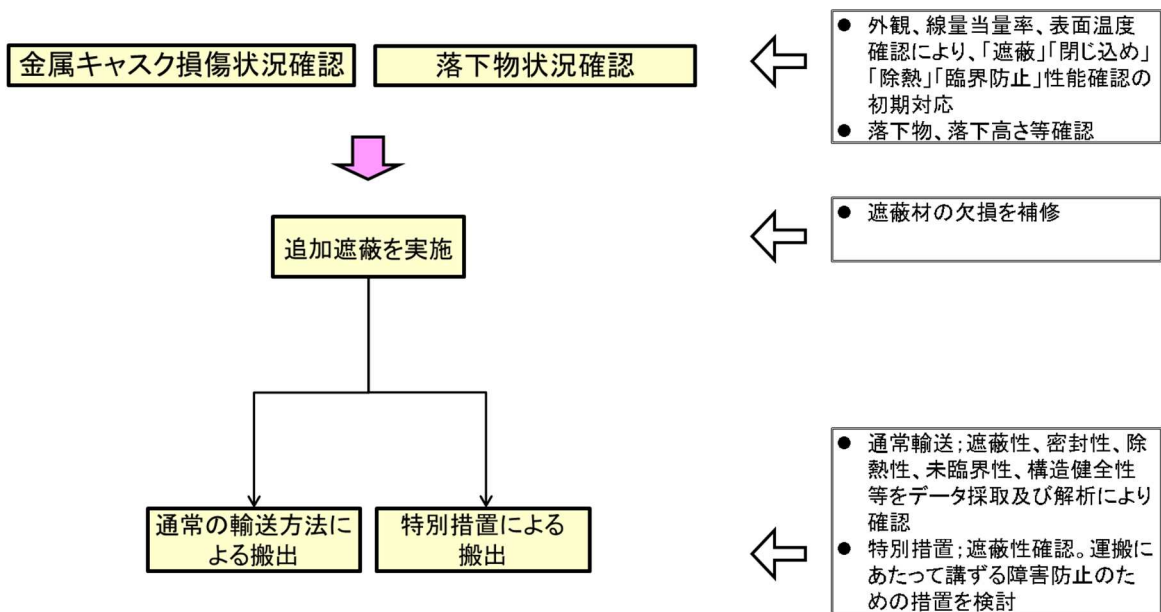
天井スラブが、縦状態の金属キャスクに落下し、密封機能に影響のおそれ



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

ケース③の対応フロー

クレーンガーダが、水平状態の金属キャスクに落下し、遮蔽機能に影響のおそれ



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

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

a. 遮蔽に係る初期確認，保守・修理，及び試験検査の対応について

(a) 初期確認

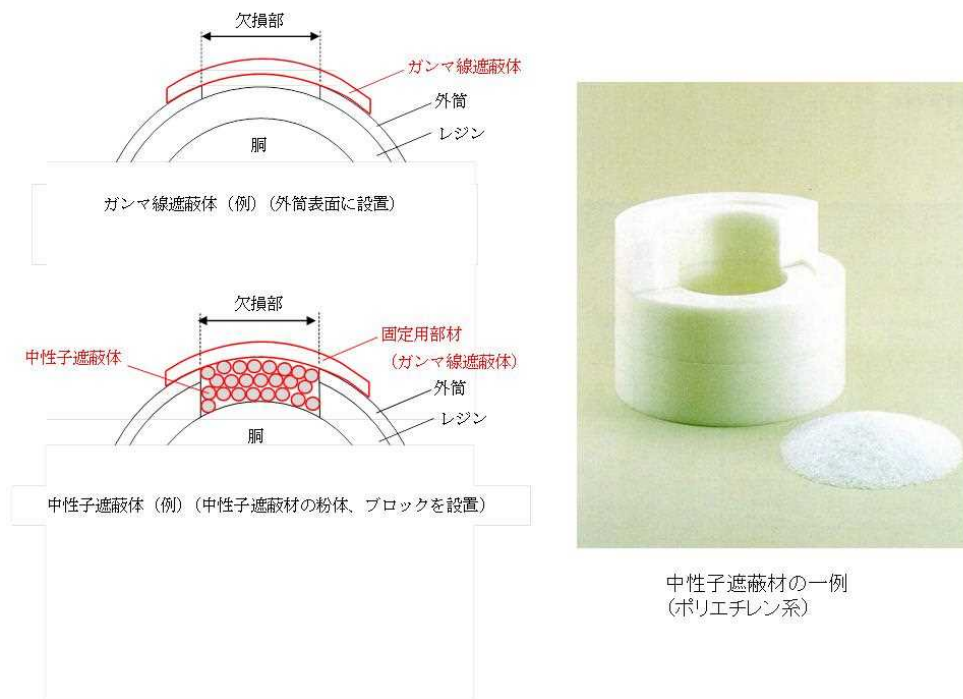
金属キャスクの損傷等により遮蔽機能が損なわれていないことの確認のため，雰囲気線量の測定として，該当する金属キャスクの周囲の線量上昇有無の確認を実施する。

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

(b) 保守・修理

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

第 6-2 図に，追加遮蔽の例を示す。



第 6-2 図 衝撃を受けた金属キャスクの追加遮蔽の例

(c) 搬出に必要な試験・検査

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

事業所外運搬規則第 14 条に基づく輸送では、金属キャスクの表面で 10mSv/h 以下を満足するように、追加遮蔽や人が近づけないような手段を講ずる。



第 6-3 図 中性子線用サーベイメータの例

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

(a) 初期確認

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

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

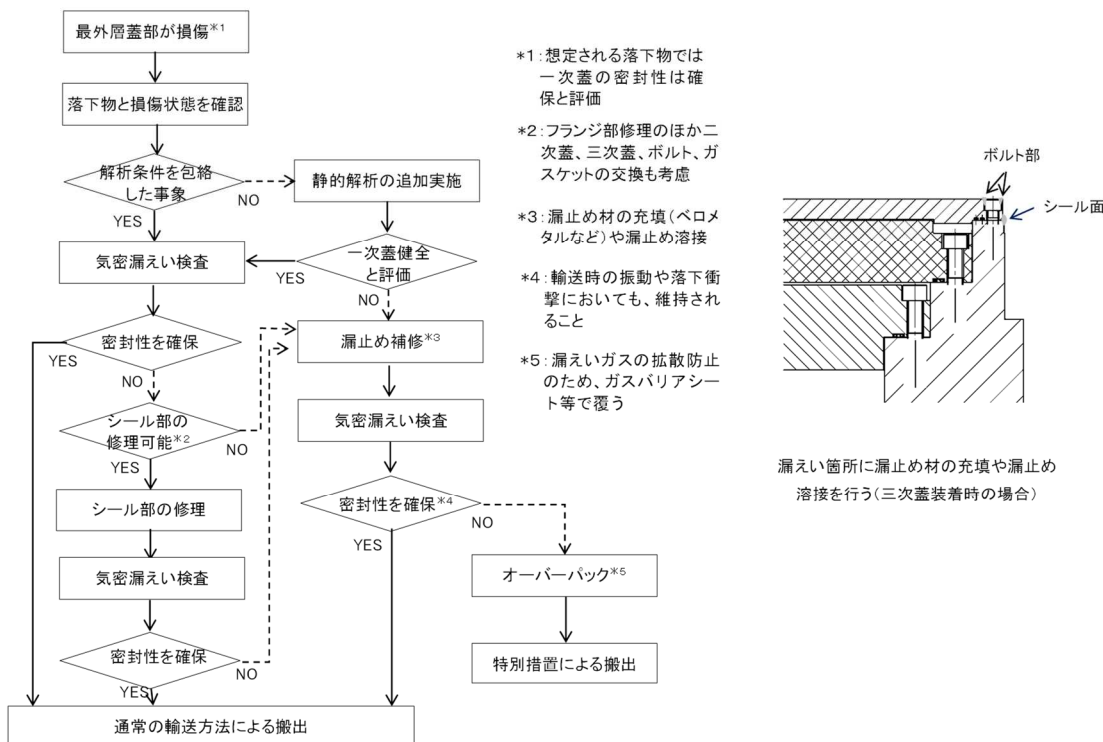
なお、最外層の蓋の気密漏えい検査については、損傷が軽微で通常の検査ができる場合は漏えい率を測定し、できない場合は「保守・修理」に移行する。

(b) 保守・修理

金属キャスクの一次蓋の密封性(敷地境界外における公衆の実効線

量が年間 1mSv に比べ極めて小さい) は確保される。

最外層の蓋に異常がある場合は、漏えい箇所に漏れ止め材の充填や漏れ止め溶接等追加補修を行う。第 6-4 図に補修フローを示す。

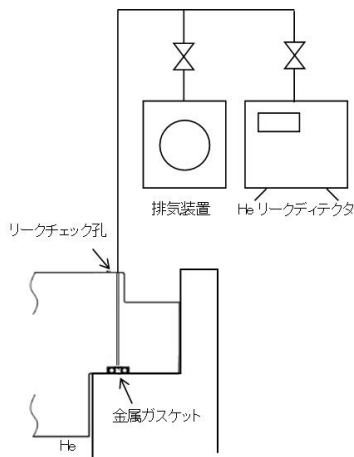


第 6-4 図 補修フロー

(c) 搬出に必要な試験・検査

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

事業所外運搬規則第 14 条に基づく輸送では、安全な運搬を確保するため放射線障害防止の措置(オーバーパッキング等の拡散防止)を講ずる。第 6-5 図に、気密漏えい検査の例を示す。



第 6-5 図 気密漏えい検査(He リーク試験)の例

c. 除熱に係る初期確認，保守・修理，及び試験検査の対応について

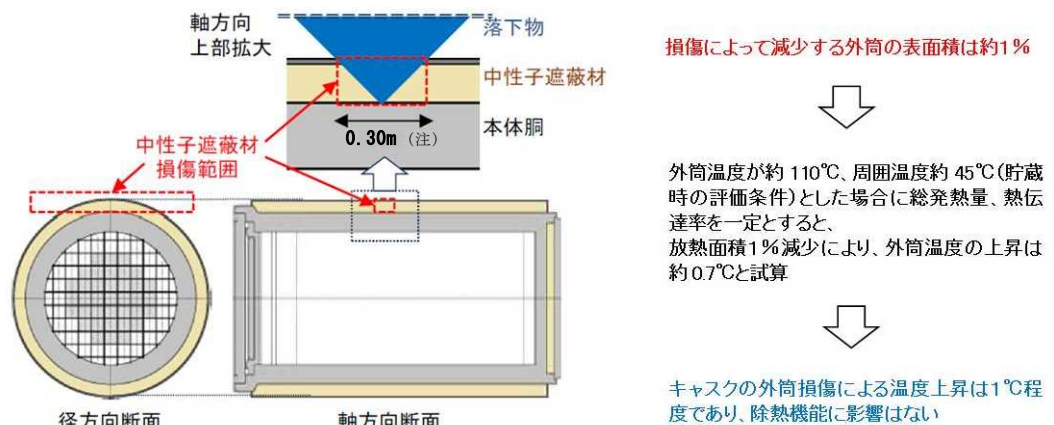
(a) 初期確認

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

(b) 保守・修理

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

状況に応じて，落下物の撤去等により周囲に空間を設けて自然対流の促進を実施する。



金属キャスクの中性子遮蔽材損傷の仮定
(BWR用大型キャスク (タイプ2A))

(注) BWR用中型キャスク (タイプ2) の場合は 0.35m, PWR用キャスク (タイプ1) の場合は 0.33m。

第6-6図 想定する損傷に伴う除熱への影響

(c) 搬出に必要な試験・検査

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

第6-7図に、可搬型温度計の例を示す。



第6-7図 可搬型温度計の例

d. 臨界防止に係る初期確認，保守・修理，及び試験検査の対応について

(a) 初期確認

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

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

(b) 保守・修理

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

(c) 搬出に必要な試験・検査

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

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

第 6-3 表 衝撃を受けた金属キャスクの基本的安全機能に係る
初期確認、保守・修理及び搬出に必要な試験・検査

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

7. 敷地内の浸水を想定した対策

貯蔵建屋や事務建屋等主要な建屋は貯蔵建屋設置盤に設置されており、仮想的な大規模津波による敷地内の浸水を仮定することから、「6. 衝撃を受けた金属キャスクの対策」で実施する対策以外にも対策を講ずる。

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

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

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

(1) 対策の全体方針

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

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

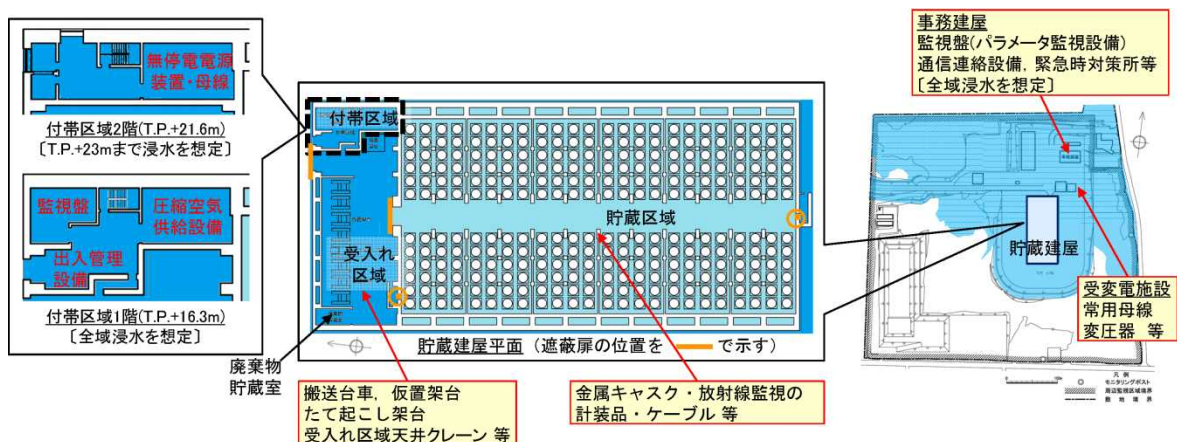
また、対応要員による基本的な安全機能維持の確認等は、津波の遡上波が到達しない標高（T. P. +30m）の敷地（以下「高台」という。）の予備緊急時対策所とする建物、可搬型計測機器、代替電源、燃料設備、資機材保管庫等を使用し対応する。予備緊急時対策所等の設置場所を第 7-1 図(2)に示す。

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

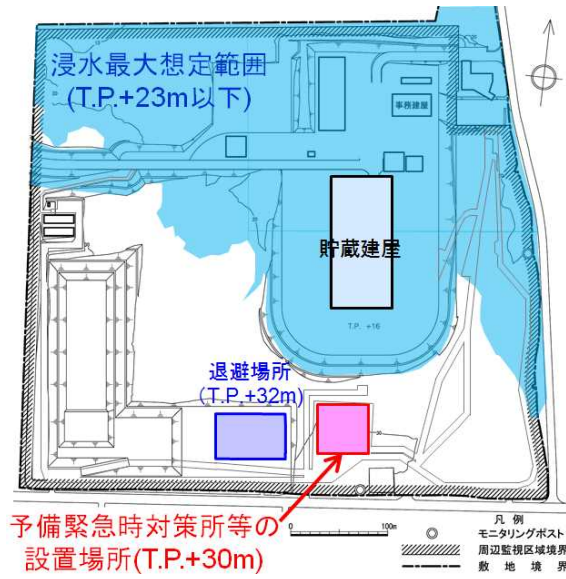
ち臨界防止機能維持については金属キャスクの設計で担保されることから、金属キャスクの基本的安全機能の維持を確認するための試験、検査の対象とする基本的安全機能は、遮蔽機能、閉じ込め機能及び除熱機能とする。

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

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



第 7-1 図(1) 主要既設設備の配置



第 7-1 図(2) 予備緊急時対策所等の設置場所

第 7-1 表 主要既設設備に対する浸水の影響及び対応

主要既設設備	主な影響	対応
<u>受入施設</u> ・天井クレーン ・搬送台車、圧縮空気供給設備 ・仮置架台、たて起こし架台、検査架台	<ul style="list-style-type: none"> 電源の喪失により天井クレーンによる移送が不能となる。 搬送台車及び圧縮空気供給設備の浸水により移送が不能となる。 	<ul style="list-style-type: none"> 金属キャスクの基本的安全機能が確保されることから、短期的な金属キャスクの移送自体は必須とはならないため、中長期的に移送・搬送手段の復旧を図る。
<u>計測制御系統施設</u> ・金属キャスク蓋間圧力監視装置 ・金属キャスク表面温度監視装置 ・貯蔵建屋給排気温度監視装置	<ul style="list-style-type: none"> 監視盤室（貯蔵建屋）の浸水、計装品・ケーブル類の浸水、電源の喪失により機能を喪失する。 	<ul style="list-style-type: none"> 基本的安全機能が確保されていることを継続的に確認するため、浸水及び機能喪失の程度に応じて、計装品やケーブル類の交換、代替計測等の手段により監視手段を確保する。 計装品・ケーブル類の予備品、代替計測機器、予備電源等を、津波が遡上しない場所に確保する。
<u>放射線管理施設</u> ・出入管理設備 ・個人管理用測定設備 ・エリアモニタリング設備 ・環境モニタリング設備	<ul style="list-style-type: none"> 付帯区域（貯蔵建屋）の浸水、電源の喪失等により、出入管理及び個人管理用測定の機能を喪失する。 監視盤室の浸水、ケーブル類の浸水、電源の喪失によりエリアモニタ、モニタリングポストの機能を喪失する。 	<ul style="list-style-type: none"> 出入管理については、人による監視の強化で対応する。 代替計測に必要な機材（サーベイメータ）や予備の個人線量計等を、津波が遡上しない場所に確保する。
<u>電気設備</u> ・変圧器、遮断器、母線等 ・無停電電源装置	<ul style="list-style-type: none"> 受変電施設、電気品室（貯蔵建屋）、ケーブル管路が浸水し、機能を喪失する。 	<ul style="list-style-type: none"> 金属キャスク監視、放射線監視、通信連絡、設備復旧等の活動に要する予備の電源を、津波が遡上しない場所に確保する。
<u>通信連絡設備等</u>	<ul style="list-style-type: none"> 事務建屋内及び監視盤室（貯蔵建屋）内の設備が浸水し、機能を喪失する。 	<ul style="list-style-type: none"> 予備の対応拠点及び機器（衛星携帯電話、無線連絡機器等）を、津波が遡上しない場所に確保する。
<u>廃棄施設</u>	<ul style="list-style-type: none"> 廃棄物貯蔵室が浸水し、ドラム缶が廃棄物貯蔵室外、敷地内及び敷地外へ漂流する可能性がある。 	<ul style="list-style-type: none"> 廃棄物の発生は通常想定されず、また発生しても極めて少量であり影響は小さいと考えられるが、漂流防止対策として、水面に浮上するドラム缶は水面に浮上できる大きさのネットで覆う。
<u>消防用設備</u>	<ul style="list-style-type: none"> 監視盤室の浸水、ケーブル類の浸水、電源の喪失により火災感知設備の機能を喪失する。 	<ul style="list-style-type: none"> 人による監視の強化で対応する。なお、既設電源が喪失している場合、貯蔵建屋内における電気火災発生の可能性は小さいと考えられる。なお、火災発生時には、津波が遡上しない場所に確保した消火器で消火する。

(2) 金属キャスク（貯蔵区域）の基本的安全機能の確認

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

a. 金属キャスクの遮蔽機能の確認手段

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

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

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

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

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

b. 金属キャスクの閉じ込め機能の確認手段

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

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

併せて周辺監視区域境界付近の線量当量率上昇がないことを可搬型計測機器にて確認し、有意な変化が認められない場合は外観目視確認結果と合わせて閉じ込め機能が損なわれていないと判断し、その後準備が整い次第仮設計器による代替計測を実施する。

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

c. 金属キャスクの除熱機能の確認手段

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

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

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

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

(3) 代替計測

a. 遮蔽機能の代替計測

通常時は、貯蔵建屋内のモニタリング設備であるエリアモニタリング設備（エリアモニタ）及び周辺監視区域境界付近固定モニタリング設備

の内モニタリングポスト2基により放射線の線量当量率を計測し、遮蔽機能が確保されていることを確認する。

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

(a) エリアモニタリング設備

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

(b) 周辺監視区域境界付近モニタリング設備

可搬型の放射線サーベイメータにより、ガンマ線と中性子を計測する。測定ポイントは通常時に測定している定点（既設モニタリングポスト所在地2点）とし、通常時測定値との比較により遮蔽機能の異常の判断を行う。なお、可搬型の放射線サーベイメータは、参考に示すモニタリングポストの計測範囲のガンマ線及び中性子の線量当量率が測定可能である。

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

使用機材は以下のとおりである。

・可搬型ガンマ線用サーベイメータ

計測方式 シンチレーション, 電離箱

数量 各1台*

・可搬型中性子線用サーベイメータ

計測方式 ^3He 比例計数管

数量 1台*

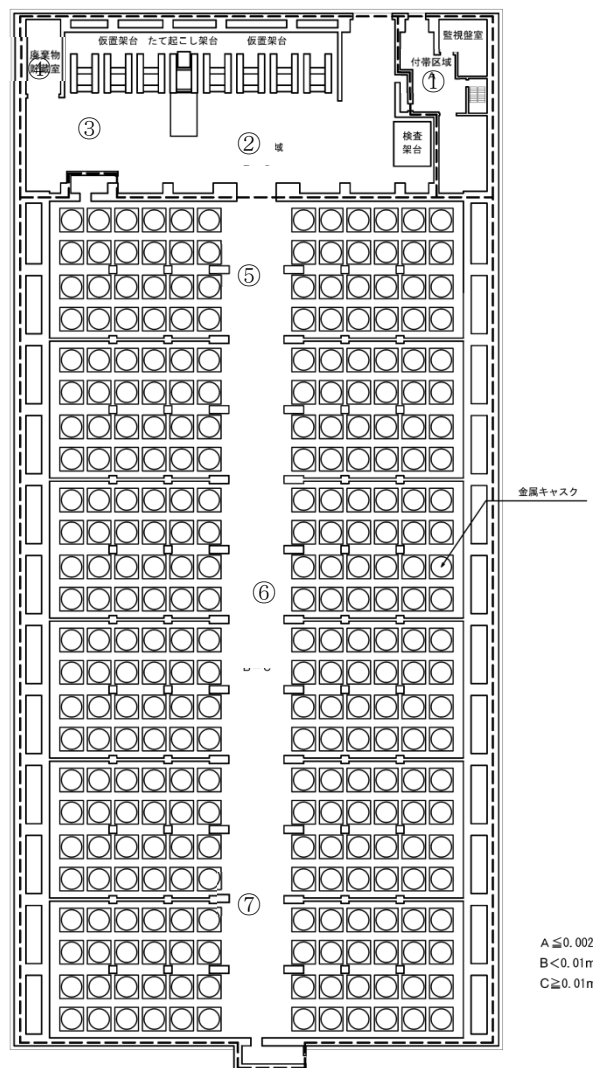
*) 点検校正のため高台資材保管庫から持ち出す場合は、通常使用してい

るサーベイメータの中から高台資材保管庫に補充する。

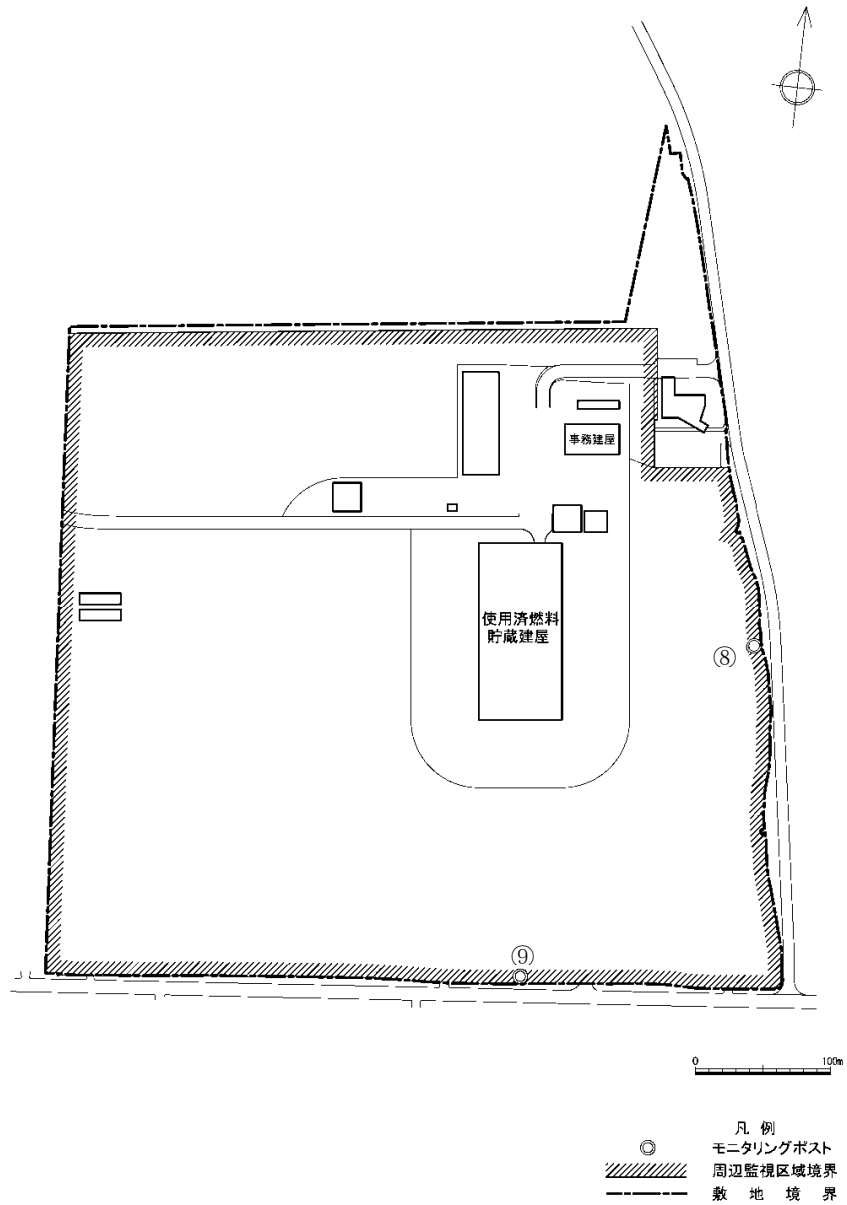
代替計測に用いる可搬型の放射線サーベイメータは、津波襲来時の浸水の影響を受けない高台の資材保管庫に保管し、速やかな確認ができるよう保管環境を維持する。

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

貯蔵建屋 1 階



第 7-2 図(1) 貯蔵建屋内の測定ポイント



第7-2図(2) 周辺監視区域境界付近の測定ポイント

(参考) モニタリングポストの計測範囲 (例)

	計測範囲
ガンマ線 (シンチレーション) (電離箱)	$10 \sim 10^4$ nGy/h
	$10^3 \sim 10^8$ nGy/h
中性子	$10^{-2} \sim 10^4$ μ Sv/h

b. 閉じ込め機能の代替計測

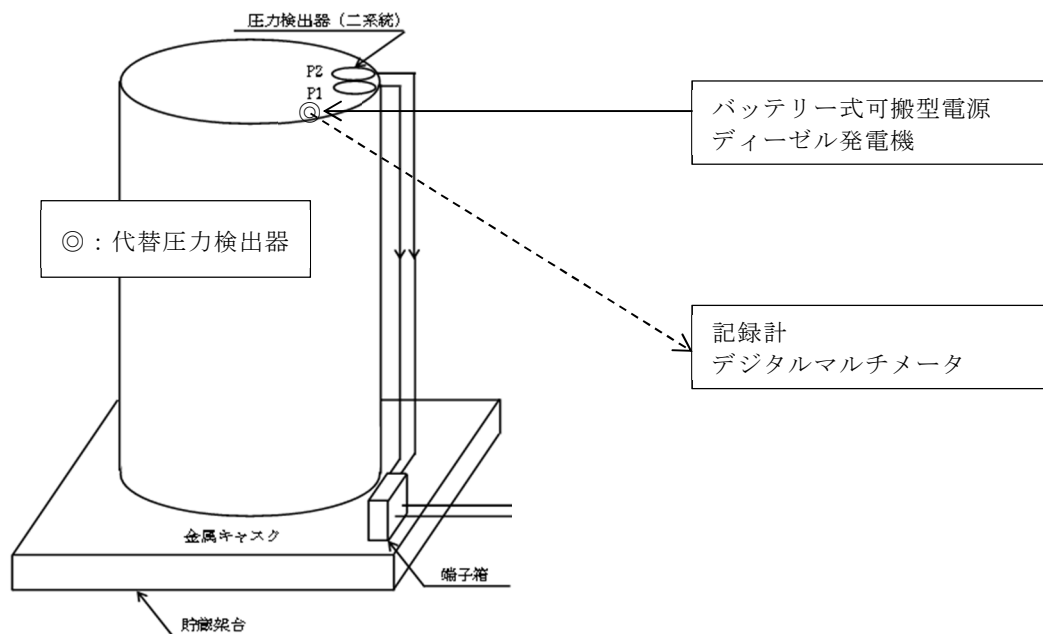
通常時は、蓋間圧力監視装置により金属キャスクの蓋間圧力を計測し、閉じ込め機能が確保されていることを確認する。

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

(a) 蓋間圧力の確認

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

金属キャスクの蓋間圧力の代替計測の概要を第 7-3 図に示す。



第 7-3 図 金属キャスクの蓋間圧力の代替計測の概要

(b) 使用機材

使用機材は以下のとおりである。

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

*1) いずれも金属キャスクの最大保管数量時

*2) 金属キャスクの保管数量に応じ変動

(c) 準備作業と期間

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

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

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

*3) 原子力発電所敷地内での輸送・貯蔵兼用乾式キャスクによる使用済燃料の貯蔵に関する規制要求の考え方(案)(原子力規制委員会使用済燃料輸送貯蔵兼用キャスク貯蔵に関する検討チーム, H29. 6. 26)

c. 除熱機能の代替計測

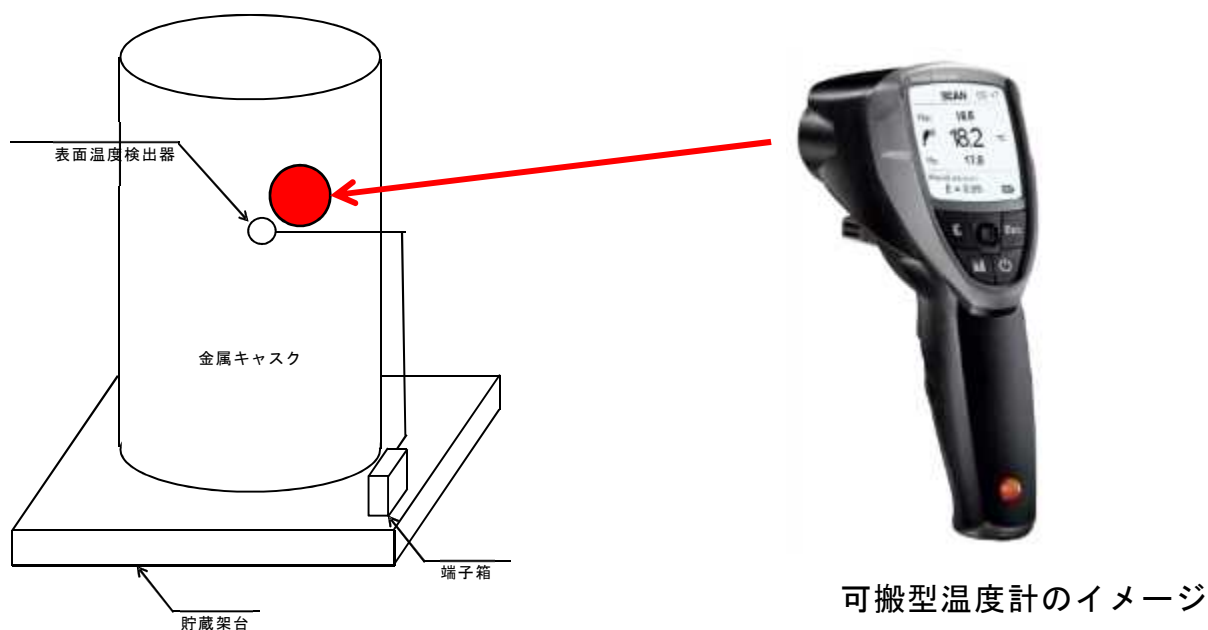
通常時は、表面温度監視装置及び給排気温度監視装置により、金属キャスク表面温度及び貯蔵建屋の給排気温度を計測し、監視盤室にて監視し、除熱機能が確保されていることを確認する。

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

(a) 金属キャスク表面温度

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

金属キャスク表面温度の代替計測の概要を第7-4図に示す。



第7-4図 金属キャスク表面温度の代替計測の概要

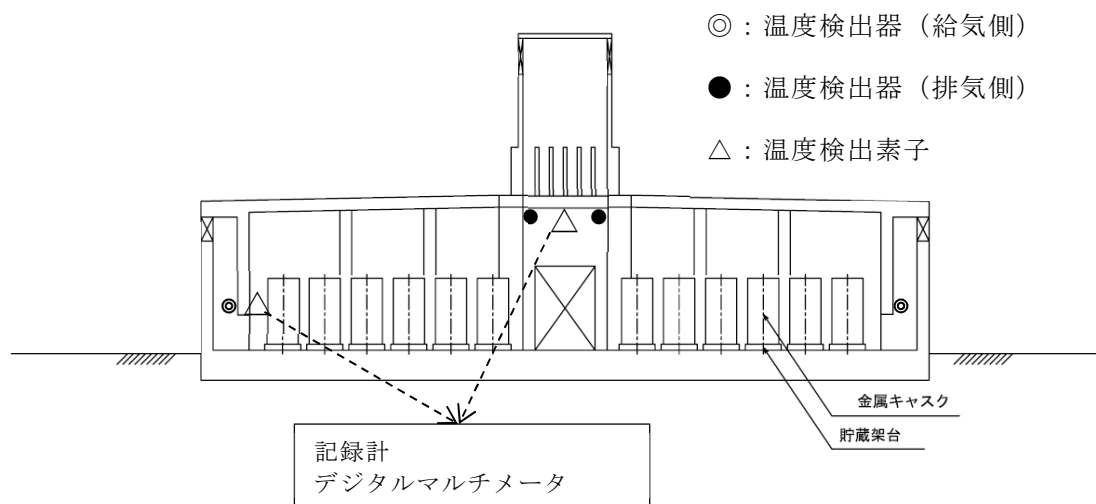
(b) 貯蔵建屋給排気温度

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

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

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

貯蔵建屋給排気温度の代替計測の概要を第7-5図に示す。



第7-5図 貯蔵建屋給排気温度の代替計測の概要

d. 代替計測時の浸水想定及び漂流物の影響

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

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

(4) 高台に設置する設備及び予め配備する資機材

a. 予備緊急時対策所

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

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



第 7-6 図 予備緊急時対策所

（イメージ）

b. 災害対応用電源

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

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

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

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

・ 電源車

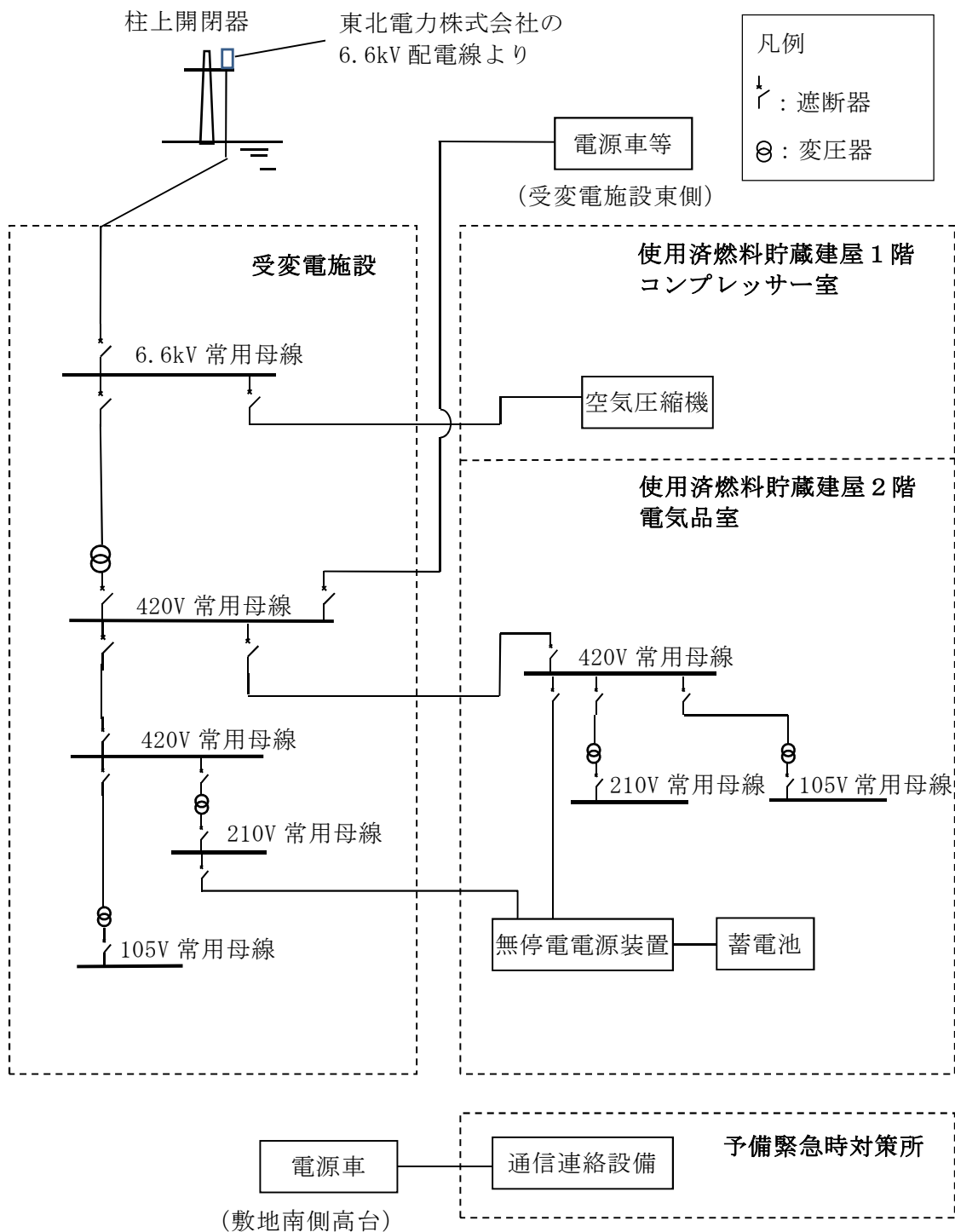
容量 250kVA

燃料 軽油

・ 可搬型ディーゼル発電機

燃料 軽油

リサイクル燃料備蓄センターの単線結線図を第7-7図に示す。



通常時、電源車は敷地南側高台に設置

外部電源喪失時には受変電施設東側に移動して給電

第7-7図 リサイクル燃料備蓄センターの単線結線図

c. 燃料設備

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

電源を喪失した場合でも、電源車等への燃料の補給を行える手段を確保する。

・燃料貯蔵タンク（地下式）

容量(ℓ) 4000/個

個数 3（うち予備1）

d. 可搬型計測機器

「(3)代替計測」に記載のとおり。

e. 通信連絡設備

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

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

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

f. 放射線管理資機材

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

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

g. 資機材保管庫

資機材保管庫としてユニットハウスまたは防災備蓄倉庫を設置する。

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

h. 重機等

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

また、復旧作業等に使用する軽油を燃料とする多目的車両を使用する。

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

i. 警報時の退避場所

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

退避人員として社員約 65 人、協力会社約 70 人を見込み、最大 200 人を想定し一次避難所として 900m²（4.5m²/人）以上を確保する。

（参考）1 都 4 県の避難所面積

- ・一次避難所における避難者 1 人当たりの収納面積：1.57～2.93m²/人
- ・二次避難所における避難者 1 人当たりの収納面積：2.15～3.98m²/人
（中央防災会議「首都直下地震避難対策等専門調査会」による「首都直下地震避難対策等専門調査会報告」避難者に係る対策の参考資料(H20.10)より）

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

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

第7-2表 敷地内の浸水を想定して実施する項目の概要

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

項 目		概 要
	警報時の退避場所	・津波の遡上波が到達しない高台に退避場所を設置

参考文献

- 1) (一社)日本原子力学会, 「日本原子力学会標準 使用済燃料・混合酸化物新燃料・高レベル放射性廃棄物輸送容器の安全設計及び検査基準: 2013」
(AESJ-SC-F006: 2013), (一社)日本原子力学会, (2014年 11月)

仮想的大規模津波による浸水状況の補足説明

1. 目的

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

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

2. 考察

(1) 等価なモデルによる浸水状況

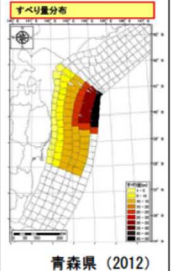
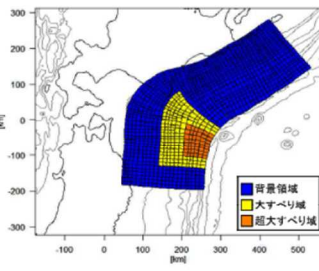
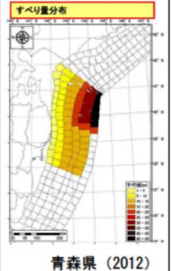
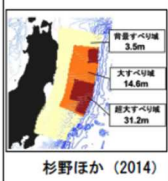
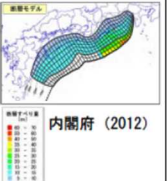
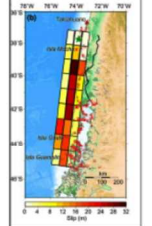
仮想的な大規模津波と等価なモデルにおける敷地沿岸の水位及び流速の経時的な変化を別添 1-3 図、敷地の水位及び流速の経時的な変化を別添 1-4 図にそれぞれ示す。また貯蔵建屋周りの水位及び流速の分布の経時的な変化並びに状況の説明を別添 1-5 図に示す。

(2) 等価なモデルによる浸水状況の考察

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

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

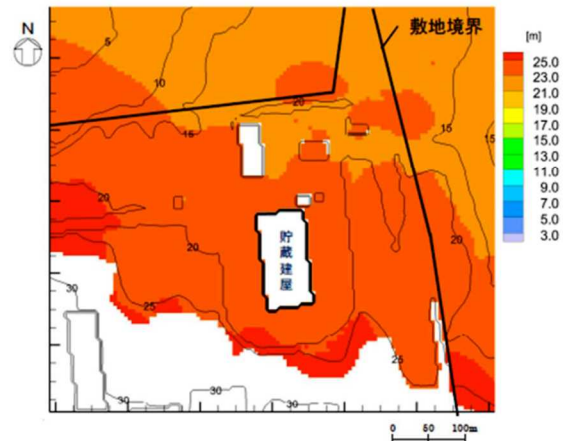
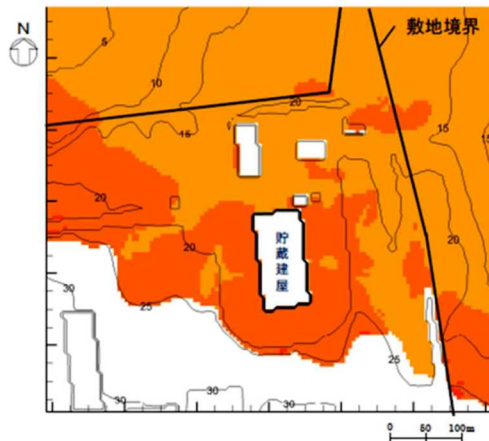
- c. 貯蔵建屋近辺において遡上波による比較的高い流速が発生する主なケースは、主に以下の2つである。
- (a) 浸水の初期段階における貯蔵建屋北西側での北西→南東方向の流れ（流速～7m/s）であり、貯蔵建屋設置盤への遡上波の流入の主成分として発生する。（別添 1-5 図のスナップショット②～③参照）
 - (b) 浸水の中期段階における貯蔵建屋外壁沿いでの発生貯蔵建屋の外壁に沿って発生する流れ（貯蔵建屋西側及び東側で北→南方向、貯蔵建屋南側で西→東方向、流速～10m/s）であり、貯蔵建屋設置盤内の拡がりを持った領域を浸水させ、水位（浸水深）を均一化する方向に発生する。（別添 1-5 図のス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

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

別添 1-1 図 検討モデルと既往知見における諸元の比較

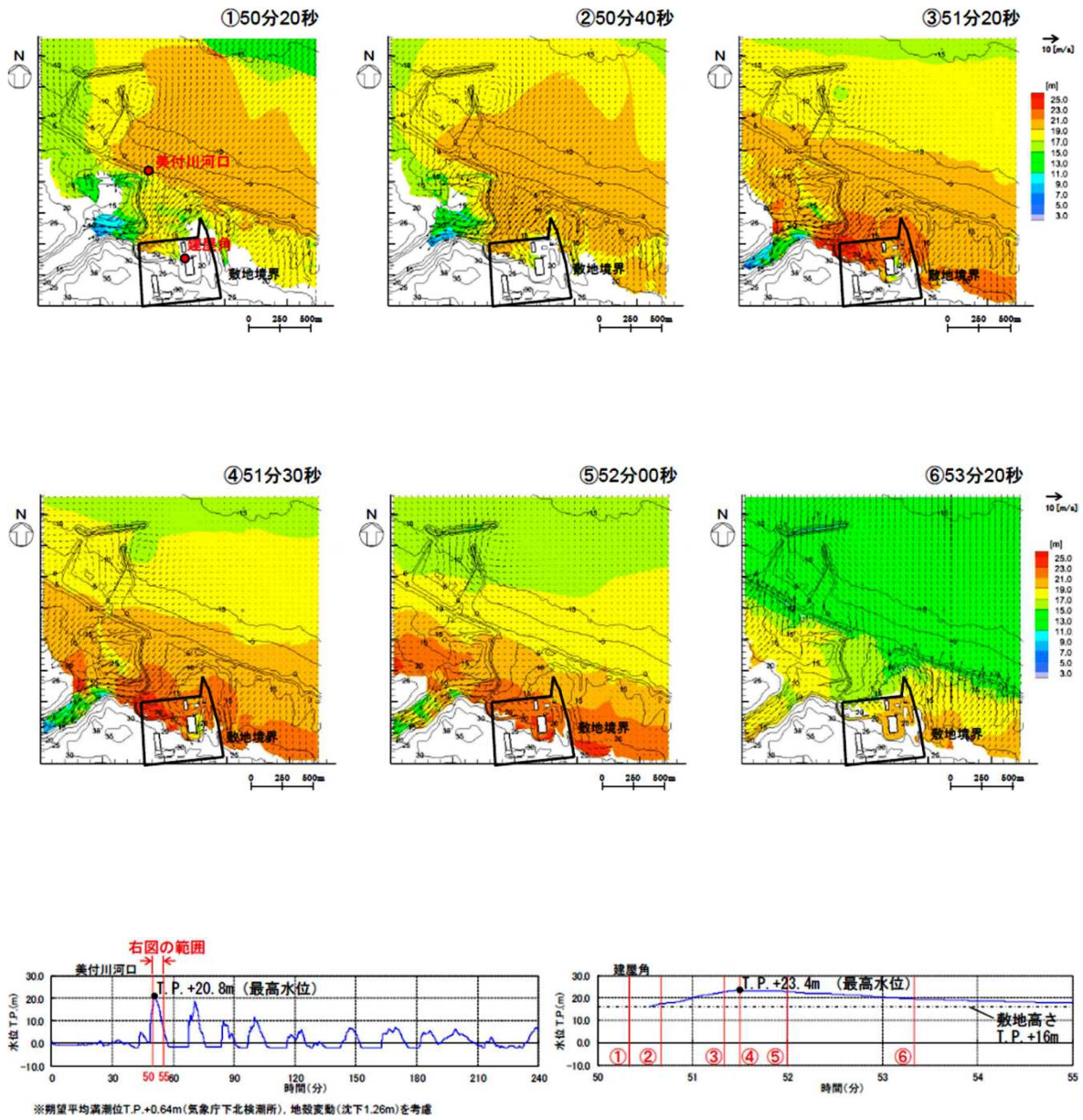
申請時の波源モデルにおけるすべり量の2.4倍
 ・平均すべり量21.7m
 ・超大すべり量86.9m

申請時の波源モデルにおけるすべり量の2.5倍
 ・平均すべり量22.6m
 ・超大すべり量90.5m

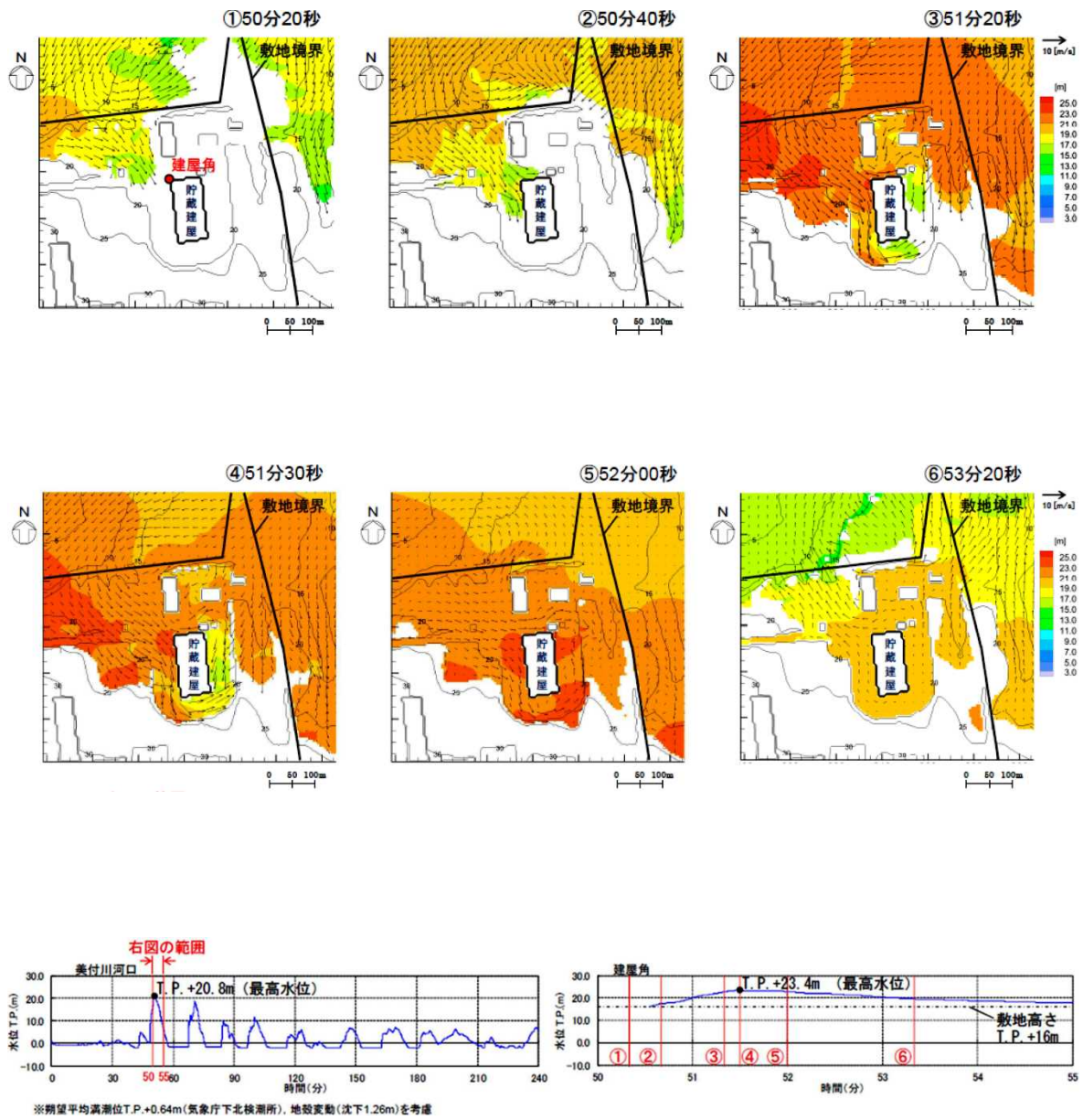


別添 1-2 図 仮想的な大規模津波と等価なモデルにおける最高水位分布*1

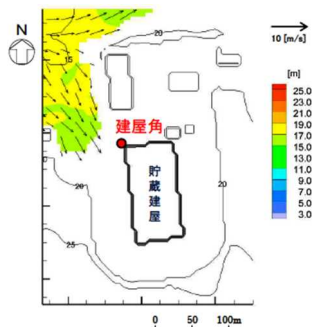
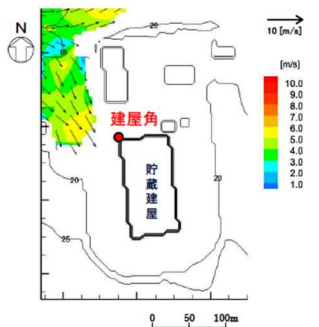
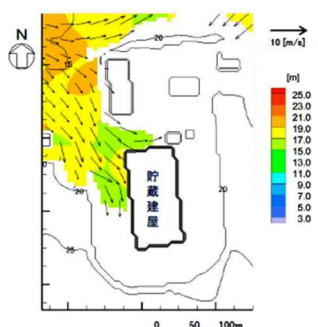
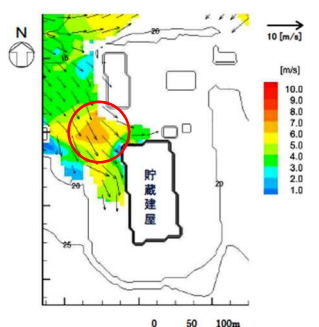
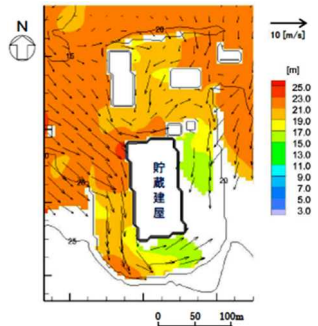
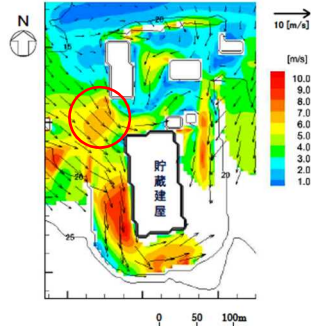
*1) 最高水位分布とは、各計算格子における全時刻歴の最高水位を図化したものである。
 *2) この解析結果は仮想的な大規模津波 23mの妥当性を検証するために実施したものである。



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



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

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

*) 矢印は流向及び流速を示す

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

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

*) 矢印は流向及び流速を示す

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

(参考) 津波解析に関する補足説明

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

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

・連続の式

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

・運動方程式

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

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

ただし、

x, y : 水平方向座標, t : 時間, g : 重力加速度,

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

h : もとの水深, η : 水位, K_{hl} : 海水の水平渦動粘性係数,

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

である。

(出典：原子力発電所の津波評価技術 2016, 平成 28 年 9 月)

津波解析の計算条件を別添 1-1 表に示す。

別添 1-1 表 津波解析の計算条件

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

津波漂流物について

1. 目的

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

2. 津波漂流物調査

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

(1) 調査方法

a. 調査の範囲

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

(a) 敷地内

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

(b) 敷地外

敷地周辺における主な施設の配置を別添 2-1 図に示す。

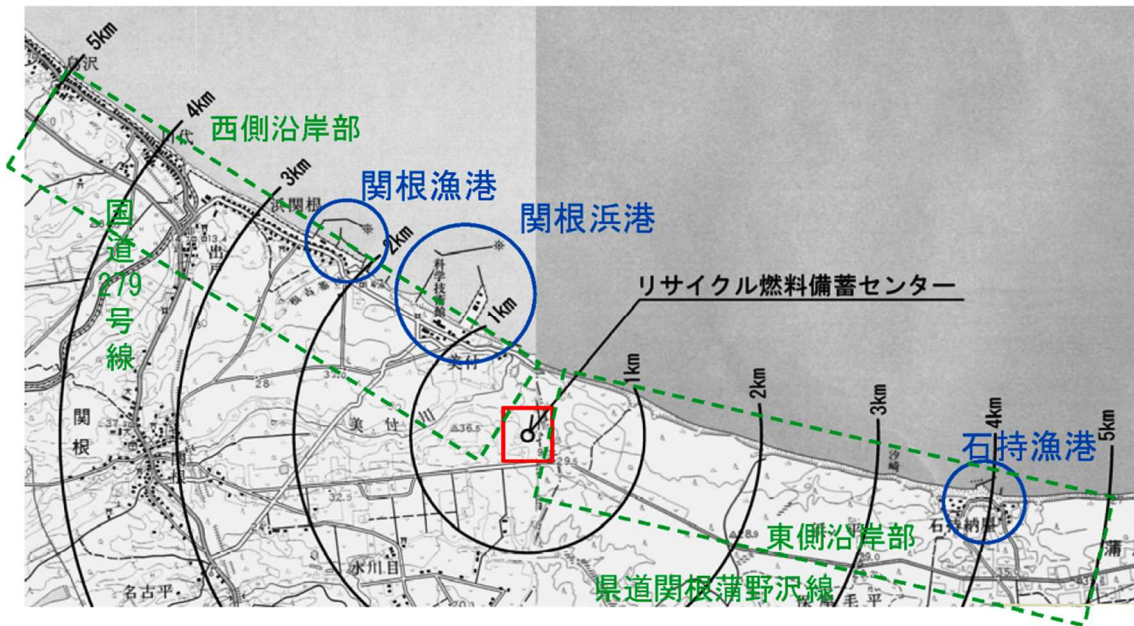
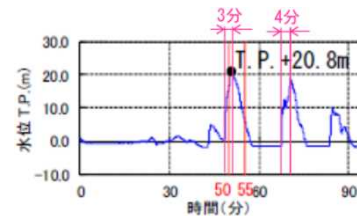
港湾施設は、日本原子力研究開発機構(JAEA)所有の関根浜港が西側約 1km に、第 1 種漁港の関根漁港が西側約 2km に、同じく石持漁港が東側約 4km にそれぞれ立地する。これらの港に寄港しない大型船舶は、別添 2-2 図に示すとおり敷地前面海域では沖合 10km 以遠を航行している。

陸上では関根浜港付近に、日本原子力研究開発機構(JAEA)青森研究開発センター及び海洋研究開発機構(JAMSTEC)むつ研究所が立地する。敷地外の西側沿岸部には国道 279 号線や市道等の道路が走り、これら

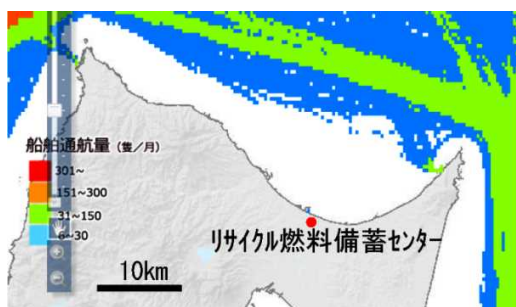
の道路沿いを中心に集落が存在する。敷地外の東側沿岸部には、海岸から約 1km 離れた内陸側の標高 30m 程度の場所を走る県道関根蒲野沢線があり、石持漁港付近を除いて海岸付近に目立った人工物はみられない。

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

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



別添 2-1 図 敷地周辺における主な施設の配置



別添 2-2 図 船舶自動識別装置搭載船の通行量実績（2014 年 11 月）
 （海上保安庁「海洋台帳」に追記）

b. 調査対象物

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

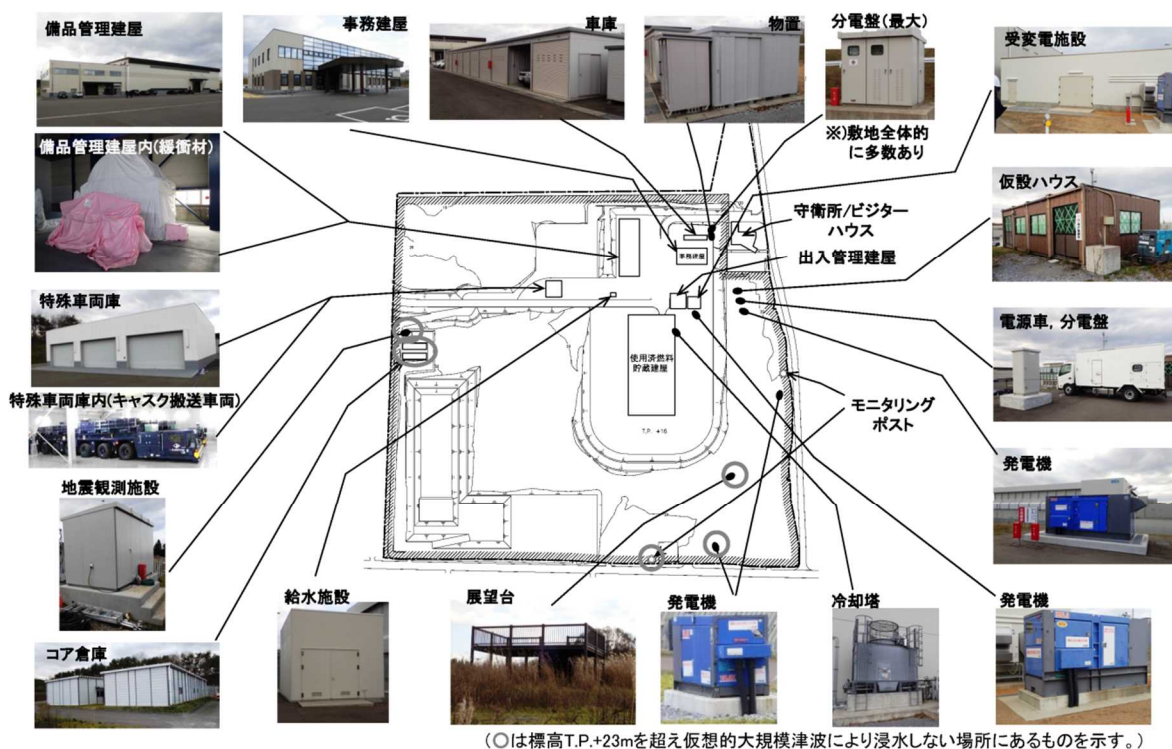
- ・船舶（海上及び陸上保管）、港湾施設（浮棧橋、浮標等）
- ・建築物、構築物（一般家屋、公共施設等（学校、郵便局、商店、集会所等）、産業施設等）
- ・タンク、コンテナ等
- ・車両（一般車両、大型車両等）

c. 調査方法

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

(2) 調査結果

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



別添 2-3 図(1) 確認された品目と確認箇所（敷地内）

3. 津波漂流物の抽出と設定

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

(1) 津波漂流物の抽出の考え方

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

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

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

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

別添 2-1 表 津波漂流物のスクリーニングの観点

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

(2) 津波漂流物の抽出

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

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

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

(3) 大型の津波漂流物として参照する物品の設定

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

別添 2-2 表(1) 調査及び抽出の結果（敷地内）

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

*)漂流物として抽出しない事由の凡例

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

別添 2-2 表(2) 調査及び抽出の結果（敷地外）

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

*1) 建築物・構築物の構造は推定を含む

*2) 漂流物として抽出しない事由の凡例は別添第 2-2 表(1)に同じ

有限要素法解析における境界条件の検討

1. 目的

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

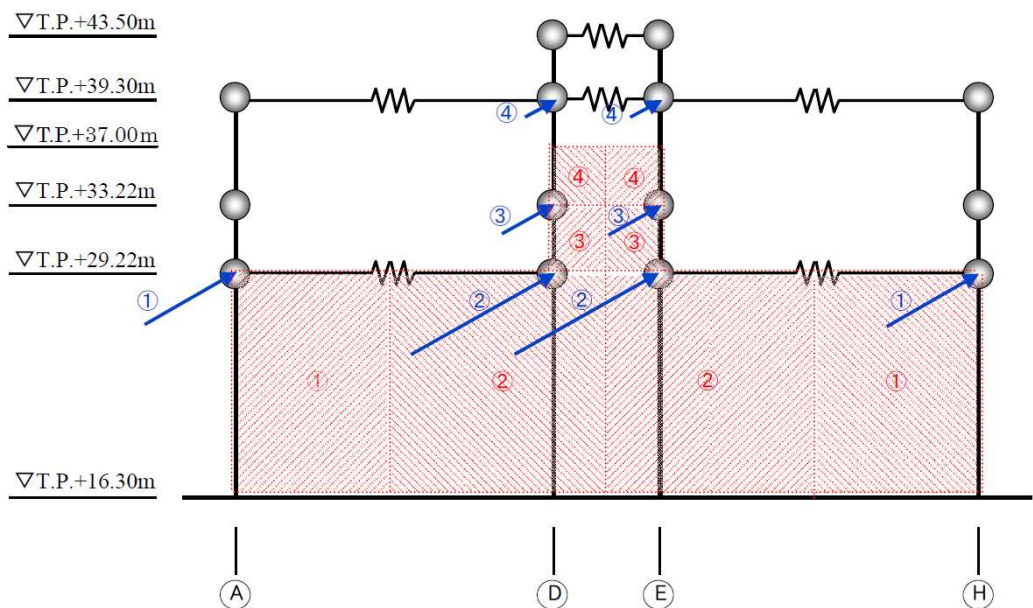
2. 外壁モデルによる解析の考え方

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

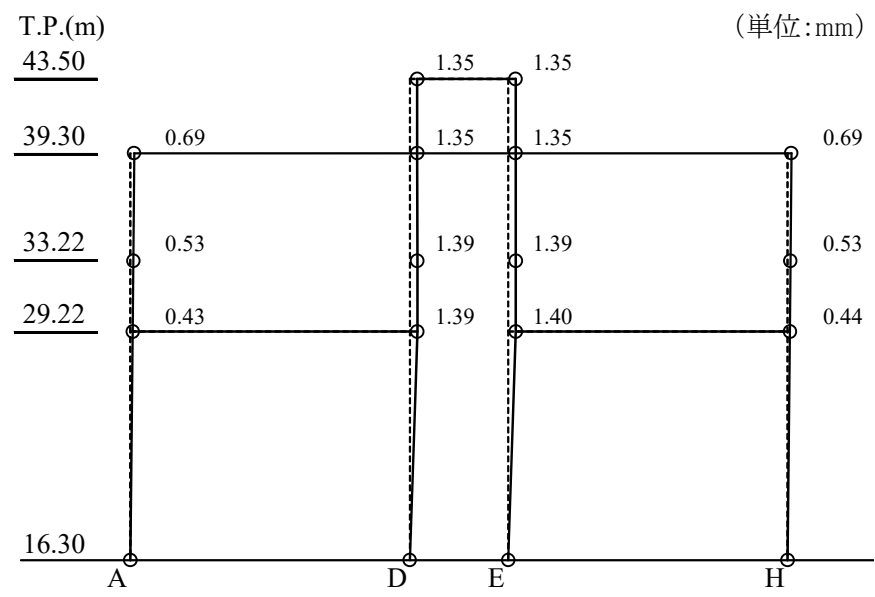
3. 波圧による貯蔵建屋南北方向の変位の算出

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

その結果、別添 3-2 図に示すような変位量が算出された。



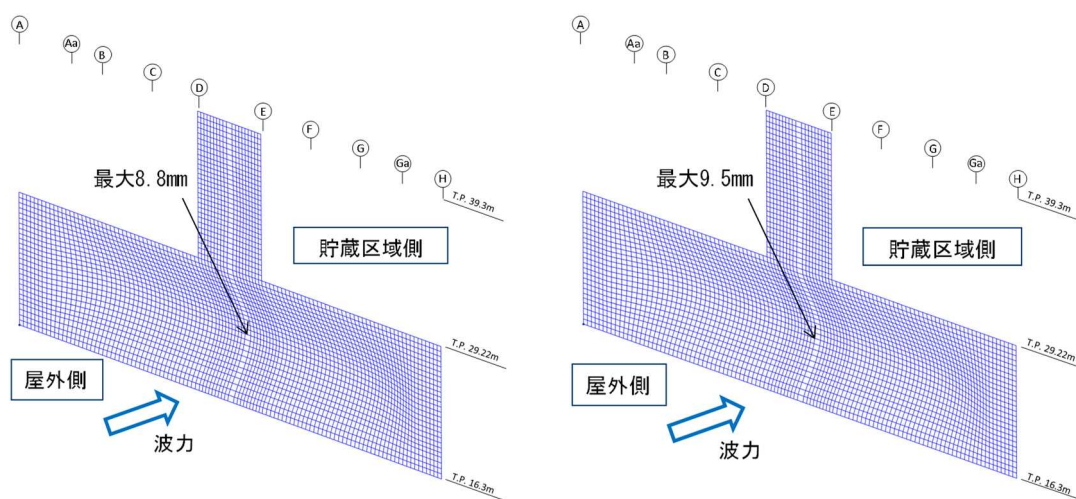
別添 3-1 図 貯蔵建屋多軸モデル及び質点に作用するする荷重



別添 3-2 図 波力による貯蔵建屋南北方向の変位

4. 境界条件の差異による解析結果の比較

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



外壁の変形状態（周辺固定）

外壁の変形状態（変位考慮）

別添 3-3 図 外壁モデル外周の境界条件による変形状態の比較

別添 3-1 表 外壁モデル外周の境界条件によるひずみ及び応力の比較

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

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

面外せん断力に対する許容値の算出方法

1. 面外せん断力に対する許容値の考え方

貯蔵建屋南側外壁の面外せん断力に対応する許容値の設定に当たっては、「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説（日本建築学会, 1999. 11）」の 15 条「梁・柱及び柱梁接合部のせん断に対する算定」に示される係数 α を用いている。

係数 α は次式により算定される。

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

ここで

α : 部材のせん断スパン比による割り増し係数

M : 部材の曲げモーメント

Q : 部材のせん断力

d : 壁の有効せい (0.9m)

2. 算定に用いた応力

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

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

別添 4-1 表 係数 α の算出に用いた曲げモーメント及びせん断力

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

動的解析について

1. 目的

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

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

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

2. 動的解析の実施

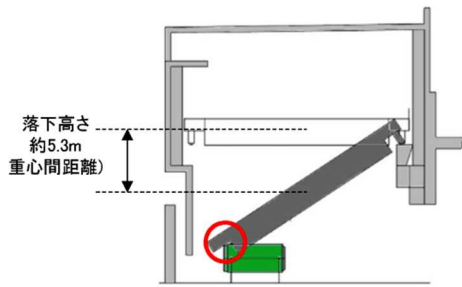
(1) 動的解析の条件

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

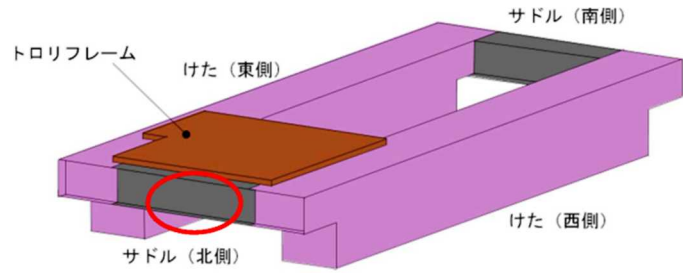
解析コードは衝撃・構造解析ソフトウェア LS-DYNA を用い、静的解析同様の天井クレーンの衝突状態（別添 5-1 図及び 5-2 図参照）の模擬や金属キャスクのモデル化を行う。

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

別添 5-1 表に動的解析の評価条件を示す。



別添 5-1 図 天井クレーンの金属キャスクへの落下状態



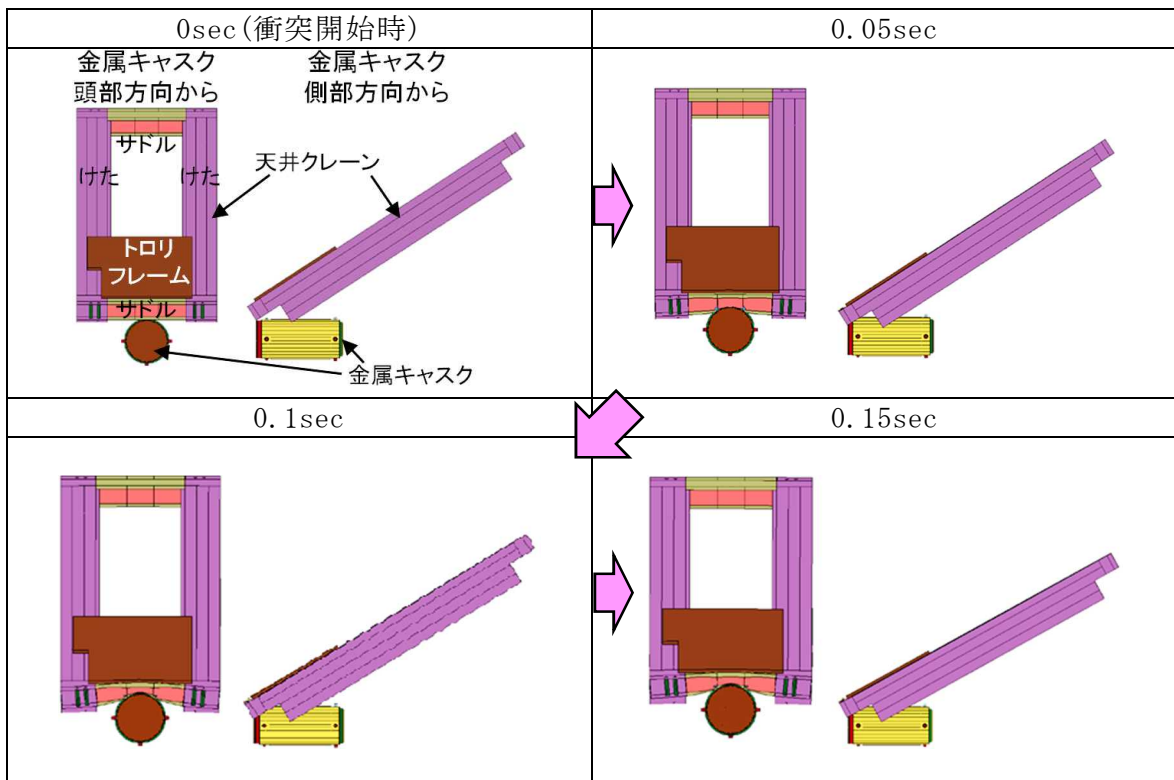
別添 5-2 図 天井クレーン概略図 (サドル (北側) が金属キャスクに衝突)

(2) 動的解析の結果

a. 全体的な挙動の確認

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

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



別添 5-3 図 金属キャスクへの衝突に伴う天井クレーンの形状変化

b. 静的解析の前提とした条件との比較

動的解析結果に基づき天井クレーンの衝突により金属キャスクに与える荷重を求めた結果は最大 6MN (BWR用大型キャスク (タイプ2A) の場合), 8MN (BWR用中型キャスク (タイプ2) の場合), 8MN (PWR用キャスク (タイプ1) の場合) であり, 静的解析の入力条件とした荷重である 48MN (BWR用大型キャスク (タイプ2A) の場合), 48MN (BWR用中型キャスク (タイプ2) の場合), 49MN (PWR用キャスク (タイプ1) の場合) (第4-3-2表参照) が大きな保守性を持っていることを確認した。

また天井クレーンのサドル (北側) の変形量は最大で約 0.42m (BWR用大型キャスク (タイプ2A) の場合), 約 0.22m (BWR用中型キャスク (タイプ2) の場合), 約 0.22m (PWR用キャスク (タイプ1) の場合) であり, 静的解析の荷重設定で用いた変形量である約 0.55m (BWR用大型キャスク (タイプ2A) の場合), 約 0.56m (BWR用中型キャスク (タイプ2) の場合), 約 0.55m (PWR用キャスク (タイプ1) の場合) (第4-3-2表参照) が保守的であることを確認した。

以上より, 静的解析の前提とした衝突時の挙動や荷重設定の妥当性を確認した。

別添 5-1 表 動的解析の評価条件(1/2)

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

別添 5-1 表 動的解析の評価条件 (2/2)

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

3. 参考評価

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

(1) 金属キャスク内に収納された燃料の健全性

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

天井クレーンの衝突により金属キャスクに与える加速度を求めた結果、金属キャスク（胴体中央）の加速度は最大でも5G程度（BWR用大型キャスク（タイプ2A）の場合）、6G程度（BWR用中型キャスク（タイプ2）の場合）、5G程度（PWR用キャスク（タイプ1）の場合）となる。

一方、照射済の燃料被覆管を用いた動的座屈試験（次頁参照）が行われており、当該試験で得られた結果に基づき燃料棒の破断に至る加速度を推定した結果、燃料棒軸方向で約980G（BWR燃料）、約1300G（PWR燃料）、燃料棒径方向で約5800G（BWR燃料）、約8200G（PWR燃料）の加速度が必要と考えられる（別添5-2表参照）。

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

別添5-2表（1/2） 動的座屈試験結果に基づく燃料棒破断に至る加速度の推定（BWR燃料）

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

別添 5-2 表 (2/2) 動的座屈試験結果に基づく燃料棒破断に至る加速度の推定
(PWR燃料)

荷重作用方向	燃料棒の破断が確認されていない荷重	試験結果より算出した破断に至る加速度	備考
燃料棒軸方向	33kN	約 1300G	燃料棒 1 本当たりの質量 約 2.5kg
燃料棒径方向	0.9kN/mm	約 8200G	燃料棒の単位長さ当たりの質量 約 6.6×10^{-4} kg/mm

(参考) 燃料棒動的座屈試験*の概要

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

使用した被覆管は使用済燃料（BWR燃料は、9×9（A型）燃料，平均燃焼度55.6GWd/t。PWR燃料は、17×17燃料，平均燃焼度51.8GWd/t。）から得たものであり，燃料棒平均高速中性子照射量(E>1MeV)は10.3×10²⁵/m²（BWR燃料），9.5×10²⁵/m²（PWR燃料）である。

試験は，軸方向動的座屈試験として燃料棒の1スパン分（約500mm：BWR燃料，約500mm：PWR燃料）を模擬した試験片に軸方向に動的荷重を与える試験及び径方向動的圧縮試験として燃料棒の一部（約150mm：BWR燃料，約100mm：PWR燃料）を模擬した試験片に径方向に動的荷重を与える試験の2種類を実施している。

BWR燃料では，軸方向荷重で～46kN，径方向荷重で～0.5kN/mmの範囲で，PWR燃料では，軸方向荷重で～33kN，径方向荷重で～0.9kN/mmの範囲で，燃料被覆管の破断が生じない結果が得られている。

5. Dynamic Load Impact Tests of Fuel Rod

5.1-1 Results of Axial Dynamic Load Impact Test (BWR)

- Shearing failure occurred.

- Sparks flew from the breakage part at 0.3 ms after maximum load.

Weight mass	3.5kg				
Impact speed	12m/s	9m/s	6m/s	3.7m/s	6m/s
Specimen type	Fuel section				Plenum section
Maximum load	60 kN	53kN	46kN	29 kN	22 kN
Pellet dispersal	18.2 g	No failure	No failure	No failure	No failure
Deformation	Spiral breakage	Bowing at lower part	No deformation	No deformation	Dog-leg at plenum part

IAEA International Conference on Management of Spent Fuel from Nuclear Power Reactors, 15-19 June 2015, Vienna, Austria

5.2-1 Results of Axial Dynamic Load Impact Test (PWR)


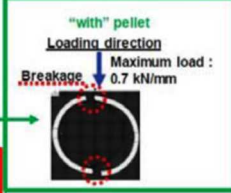





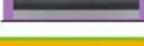
Specimen No. & type	S-1	L-3	S-2	L-2	L-1
	Short/Fuel I	Long/Fuel	Short/Fuel	Long/Fuel	Long/Plenum
Weight mass	3 kg				3 kg
Impact speed	11 m/s		8 m/s	11 m/s	11 m/s
Maximum load (With LPF of 3 kHz)	40 kN	36 kN	35 kN	33 kN	17 kN
Failure mode S:Sound F:Failure	Shearing	F	S	S	F
	Bending (high-order)	-	F	S	-
	Bending (first-order)	-	-	F	S
Crack direction	Spiral	Circumferential + Axial	Circumferential	-	Circumferential + Axial
Pellet dispersal	11.2 g	8.9 g	0.6 g	-	0 g

- Failures occurred at maximum load of 35 kN or more except L-1 (Plenum specimen).
- L-1 was failed at plenum spring area without pellet dispersal.
- After initial impact, axial load increased with compression, and high-order mode bending occurred, then first-order mode bending occurred. "Shearing failure" and "Bending failure" were observed.
- In the failed specimens, circumferential and/or spiral cracks were observed and some cracks branched in the axial direction.
- The effect of specimen length on dynamic behaviour was not observed.

IAEA International Conference on Management of Spent Fuel from Nuclear Power Reactors, 15-19 June 2015, Vienna, Austria

別添 5-4 図(1) 燃料棒軸方向試験結果

5.3 Outline of Lateral Dynamic Load Impact Test Result (BWR & PWR)

BWR Push rod dia. = 30mm	Weight mass	Impact speed	Maximum load	Pellet dispersal ^{*2}	
	2.6 kg	8 m/s	1.0 kN/mm	Failure 21.6 g	 <p>"with" pellet Loading direction Maximum load : 0.7 kN/mm Breakage</p>
	2.6 kg	4 m/s	0.7 kN/mm	Failure 0 g	
	0.6 kg	4 m/s	0.5 kN/mm	No failure	
PWR Push rod dia. = 20mm	Weight mass	Impact speed	Maximum load ^{*1}	Pellet Dispersal ^{*2}	
	3 kg	13 m/s	1.5 kN/mm	Failure 3.1 g	 <p>"without" pellet (Dynamic Ring Comp. Test Result) Maximum load : 0.1 kN/mm Breakage</p>
	3 kg	11 m/s	1.1 kN/mm	Failure 0.4 g	
	3 kg	9 m/s	0.9 kN/mm	No failure	

^{*1} With LPF of 3 kHz
^{*2} Amount of dispersed pellet at the moment of breakage + during handling

• Failure mode and strength were different between "with" pellet (lateral dynamic load impact test of fuel rod) and "without" pellet (dynamic ring compression test of cladding).
• Amount of dispersed pellet and particle size distributions were also measured.
• Influence of hydride reoriented (test results of dummy pellet specimen) is under evaluation.

別添 5-4 図(2) 燃料棒径方向試験結果

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

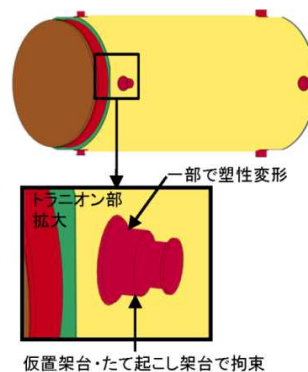
(2) 天井クレーン衝突時の金属キャスクの落下の可能性

受入れ区域で仮置中の金属キャスクは4箇所のトラニオン（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）、または、2箇所のトラニオン及び胴上部（BWR用中型キャスク（タイプ2）の場合）でたて起こし架台又は仮置架台に支持されており（別添5-5図参照）、天井クレーンが落下して衝突した場合、衝突荷重によりトラニオンが破断し金属キャスクが落下する可能性が考えられる。

静的解析は保守的に設定した衝突荷重（48MN（BWR用大型キャスク（タイプ2A）の場合）、48MN（BWR用中型キャスク（タイプ2）の場合）、49MN（PWR用キャスク（タイプ1）の場合））を定常状態で与える状況を模擬しており、本来は瞬時的な荷重である衝突荷重を定常状態で与えていることから衝突時のトラニオンの健全性を確認する上では極めて保守的な前提となっているため、動的解析の結果に基づきトラニオン部の挙動を考察する。

動的解析の結果、トラニオンのひずみは最大でも0.2%（BWR用大型キャスク（タイプ2A）の場合）、0.0005%（BWR用中型キャスク（タイプ2）の場合）、5.6%（PWR用キャスク（タイプ1）の場合）であり、天井クレーンの衝突荷重が加わっても、金属キャスクのトラニオンが破断してたて起こし架台及び仮置架台から落下する可能性は考え難い。

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



別添5-5図 金属キャスクのトラニオン部（模式図）

金属キャスクからの漏えい率について

1. 目的

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

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

2. 金属キャスクからの漏えい率の設定

(1) 漏えい率の設定の考え方

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

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

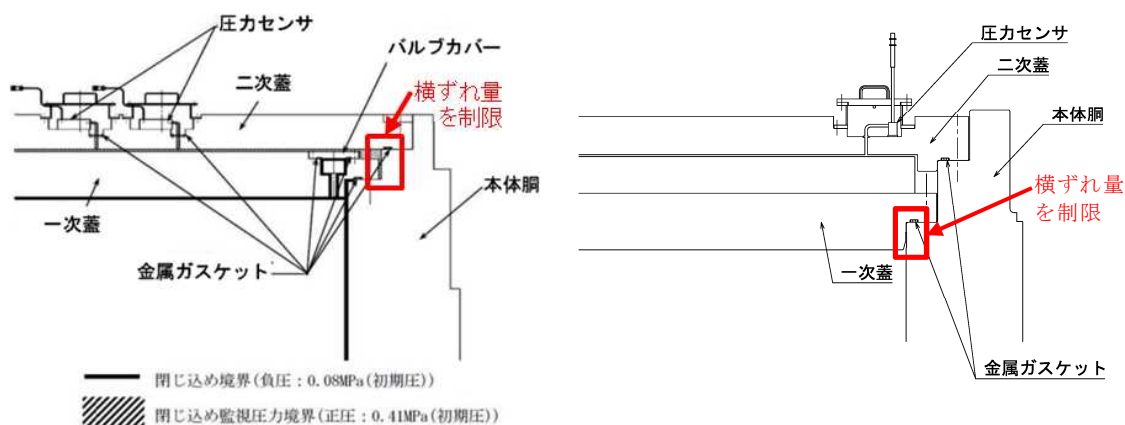
(2) 金属キャスクの構造に基づく横ずれ量の設定

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

される。

一次蓋と本体胴フランジの間隙は～2mm 程度であることから、ここでは発生する横ずれ量を 2mm と仮定する。

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



(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 6-1 図 金属キャスクのシール部詳細

(3) 横ずれ量に基づく金属キャスクからの漏えい率の設定

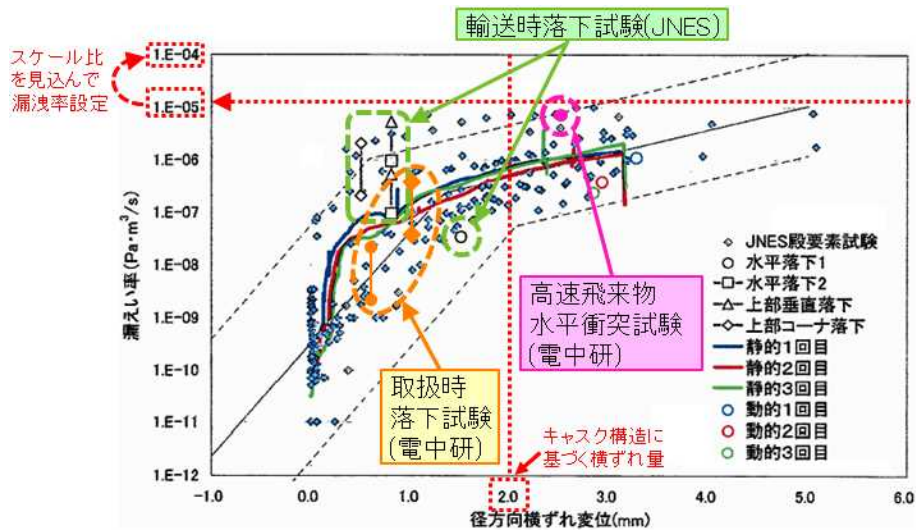
金属ガスケットの横ずれ量と漏えい率の関係はこれまで試験による実測データが蓄積されており、これらを踏まえて漏えい率を設定し、プルームによる線量の評価条件として反映する。

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

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

なお、一次蓋の口開きについては、「4. 金属キャスクの閉じ込め評価」で密封境界部がおおむね弾性範囲内と評価しており、また仮に口開きが発生

しても瞬時であることから、漏えい評価上は問題とならないと考えられる。
別添 5 で実施した動的解析の結果でも一次蓋と本体胴の相対変位は
0.01mm 未満であり、有意な結果とはなっていない。



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

(4) 金属キャスクの実衝撃試験との比較

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

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

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

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

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

別添 6-1 表 金属キャスクの実衝撃試験との諸元比較

項目	事象	衝突エネルギー	衝突荷重	備考
●今回評価の衝突想定条件	金属キャスク(水平姿勢)蓋部への天井クレーン落下	3.7×10 ⁶ N・m (BWR用大型キャスク(タイプ2 A)の場合) 2.4×10 ⁶ N・m (BWR用中型キャスク(タイプ2)の場合) 2.4×10 ⁶ N・m (PWR用キャスク(タイプ1)の場合) (金属キャスク及び天井クレーンの吸収エネルギー)	6MN (BWR用大型キャスク(タイプ2 A)の場合) 8MN (BWR用中型キャスク(タイプ2)の場合) 8MN (PWR用大型キャスクの場合) (別添5の動的解析結果に基づく)	—
●輸送時落下試験(JNES) ^{*2}	実機大キャスク(緩衝体有)の9m落下	1.2×10 ⁷ N・m	35MN (水平落下) 81MN (垂直落下)	別添 6-2 図の出典(*1)ではスケール比や経年ファクタを考慮した漏えい率(二次蓋)をプロット
●取扱時落下試験(電中研) ^{*3}	実機大キャスク(緩衝体無)のコンクリート床板への水平落下(1m)等	1.2×10 ⁶ N・m	58MN (水平落下)	漏えい率(一次蓋)を上記落下試験と同様の考え方で別添 6-2 図に加筆 スケール比: ×1/10 経年ファクタ: ×100 及び×1000
●高速飛来物水平衝突試験(電中研) ^{*4}	1/2.5スケールキャスク(縦置)の蓋部に航空機エンジン模擬の飛来物(質量316kg)を高速(57.3m/s)で衝突	8.2×10 ⁶ N・m	30MN	衝突エネルギー及び衝突荷重は実スケール相当値を記載 衝突エネルギー: ×2.5 ³ 衝突荷重: ×2.5 ² 漏えい率は実値を別添 6-2 図に加筆

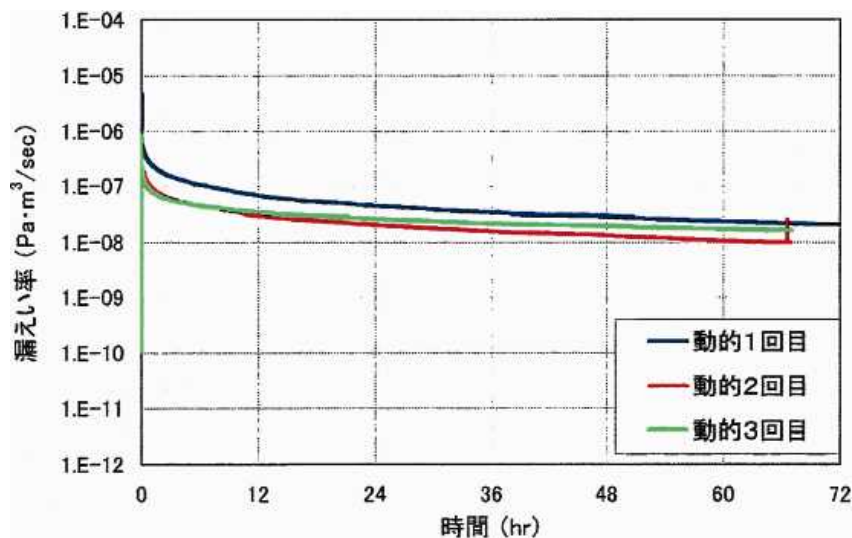
(項目欄の●の色は別添 6-2 図の加筆と合わせてある)

(5) 金属キャスクの漏えい率の保守性

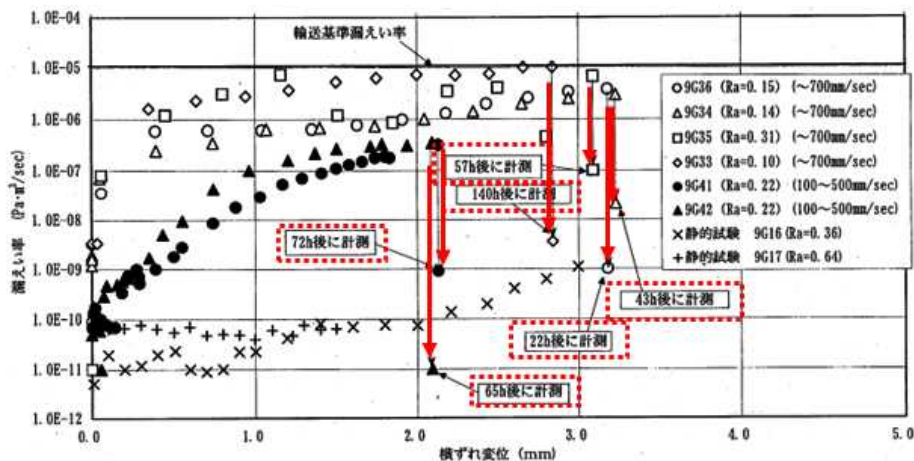
金属ガスケットの動的横ずれ試験では、別添 6-3 図(1)及び(2)に示すように、横ずれ発生後、時間の経過（数十時間程度）とともに一定程度の漏えい率の回復（おおむね 2 桁以上）がみられている。

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

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



別添 6-3 図(1) 時間の経過による漏えい率の経時変化^{*1}



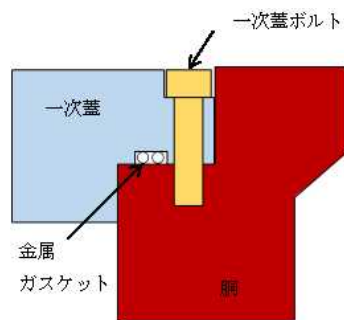
別添 6-3 図(2) 時間の経過による漏えい率の回復(*5 に加筆)

(参考) 金属ガスケットの漏えい率回復について

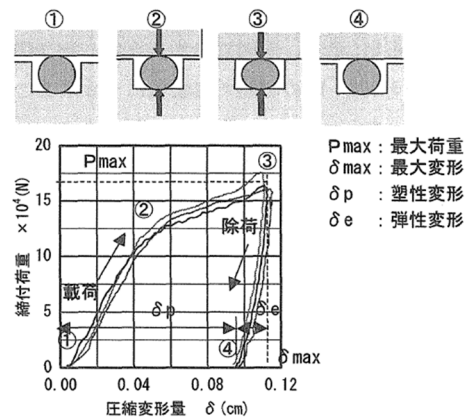
金属ガスケットは別添 6-4 図に示すように、一次蓋に設けられた溝部に取り付けられる締切型であり、金属ガスケットのつぶし代を考慮して深さを決定している。このため別添 6-5 図に示すように、一定量を超えたボルトの締付力は蓋と胴の接触部が受け持つことになるため、金属ガスケットが過度に圧縮変形することはない。

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

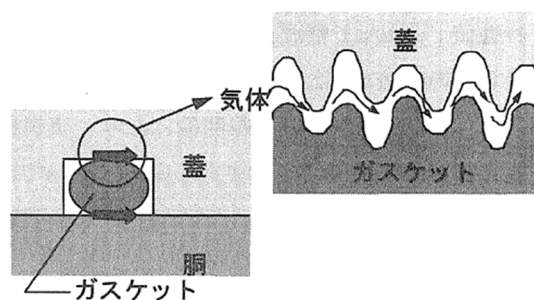
そこに荷重が作用すると、一時的に締付力が不足状態になり漏えい率は増加するが、ボルトに発生する応力が弾性範囲内であれば締付力は回復し、ガスケット接触面の状態が初期の状態と同様に隙間をアルミ材が徐々に埋めるため漏えい率は回復すると考えられている。



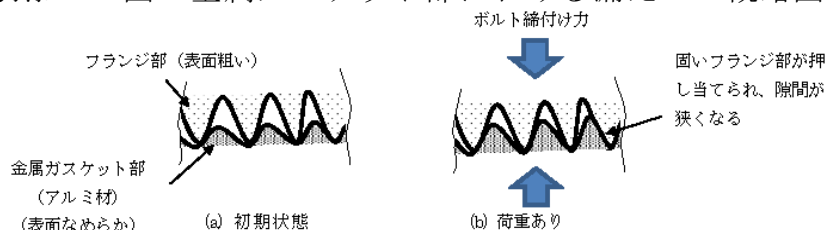
別添 6-4 図 一次蓋フランジ部 (模式図)



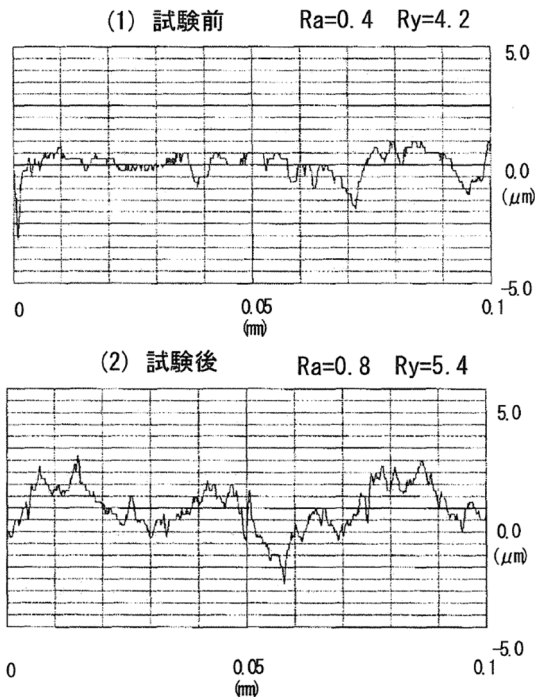
別添 6-5 図 金属ガスケットの圧縮復元特性*6



別添 6-6 図 金属ガスケット部における漏えいの概略図*6



別添 6-7 図 金属ガスケットの締付時の概念図



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

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

3. パラメータによる影響

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

(1) 漏えい率による影響

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

金属キャスクからの漏えい率を1桁増加させ $1 \times 10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ として第4.5-1 表の評価条件と同様の手法により評価すると、一次蓋からのガス漏えい率は約 $8.2 \times 10^{-9} \text{m}^3/\text{s}$ (BWR用大型キャスク(タイプ2A)の場合)、約 $6.0 \times 10^{-10} \text{m}^3/\text{s}$ (BWR用中型キャスク(タイプ2)の場合)、約 $1.4 \times 10^{-9} \text{m}^3/\text{s}$ (PWR用キャスク(タイプ1)の場合) となり、漏えい率 $1 \times 10^{-4} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ の場合(約 $8.0 \times 10^{-10} \text{m}^3/\text{s}$ (BWR用大型キャスク(タイプ2A)の場合)、約 $9.9 \times 10^{-11} \text{m}^3/\text{s}$ (BWR用中型キャスク(タイプ2)の場合))、約 $2.3 \times 10^{-10} \text{m}^3/\text{s}$ (PWR用キャスク(タイプ1)の場合) の約10倍(BWR用大型キャスク(タイプ2A)の場合)、約6倍(BWR用中型キャスク(タイプ2)の場合)、約6倍(PWR用キャスク(タイプ1)の場合)に増加する。

核分裂生成物の放出量はガス漏えい率にほぼ比例することから、核分裂生成物放出量は漏えい率 $1 \times 10^{-4} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ の場合の10倍程度(BWR用大型キャスク(タイプ2A)の場合)、6倍程度(BWR用中型キャスク(タイプ2)の場合)、6倍程度(PWR用キャスク(タイプ1)の場合)と考えられ、敷地境界外における公衆の実効線量についても同様の変動があると考えられるが、実効線量は $2 \sim 3 \times 10^{-3} \text{mSv}$ 程度(BWR用大型キャスク(タイプ2A)の場合)、 $2 \sim 3 \times 10^{-4} \text{mSv}$ 程度(BWR用中型キャスク(タイプ2)の場合)、 $1 \sim 2 \times 10^{-4} \text{mSv}$ 程度(PWR用キャスク(タイプ1)の場合)であり、 $1 \text{mSv}/\text{年}$ と比べ極めて小さいことは同様と考えられる。

(2) 燃料破損割合による影響

評価では金属キャスク1基分の燃料集合体全数(69体：BWR用大型キャスク(タイプ2A)の場合、52体：BWR用中型キャスク(タイプ2))

の場合、21体：PWR用キャスク（タイプ1）の場合）の燃料棒全数の破損を仮定する極めて保守的な条件を設定しているが、実際には金属キャスクの内部は負圧であり、ある程度の燃料棒の破損が発生しないと金属キャスク内部の負圧が維持され一次蓋からの漏えいが発生しない。

このため、金属キャスク内部が正圧となる燃料棒の破損割合を概算を行った結果、燃料集合体約18～19体相当（BWR用大型キャスク（タイプ2A）の場合）、8体相当（BWR用中型キャスク（タイプ2）の場合）、2体相当（PWR用キャスク（タイプ1）の場合）となり、金属キャスク1基分の燃料集合体数(69体)の1/4程度（BWR用大型キャスク（タイプ2A）の場合）、金属キャスク1基分の燃料集合体数(52体)の1/7程度（BWR用中型キャスク（タイプ2）の場合）、金属キャスク1基分の燃料集合体数(21体)の1/10程度（PWR用キャスク（タイプ1）の場合）を超えなければ、金属キャスク内が正圧とならず、一次蓋からの漏えいが発生しないと考えられる。

遮蔽機能復旧期間の想定について

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

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

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

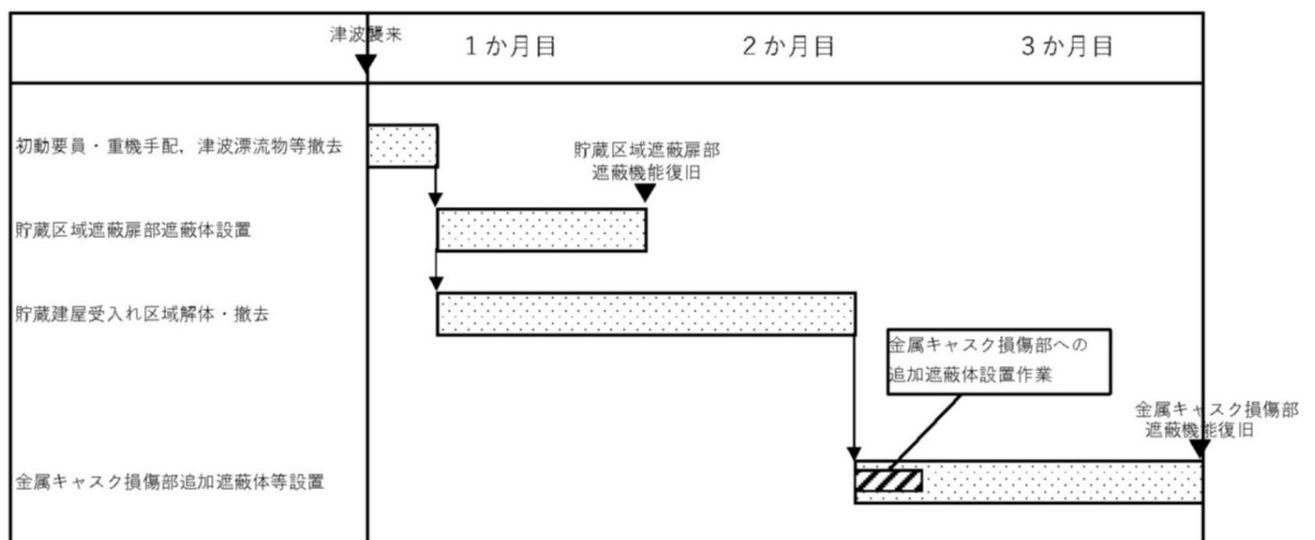
損傷した貯蔵建屋受入れ区域の解体・撤去は、金属キャスク損傷部への追加遮蔽体設置の際、その設置場所や作業安全を確保するために実施するものである。保守的に、健全な状態の受入れ区域全域を解体・撤去するものとして考え、期間としては、6 週間程度を想定している。この期間は、**解体・撤去が必要なコンクリート等の物量を保守的に設定し、解体材を金属キャスクへ落下させないように慎重に作業を行うことに伴う作業効率の低下等を考慮した上で**、貯蔵建屋の建設会社、及び解体専門会社による見積工程を基に、想定した期間である。

金属キャスク損傷部への追加遮蔽体設置の期間としては、1 週間程度を想定している。この期間は、「6. 衝撃を受けた金属キャスクの対策」の「第 6-2 図 衝撃を受けた金属キャスクの追加遮蔽の例」に示す遮蔽材の設置について、金属キャスクメーカーと共に検討し、事前準備等を行うことで合理化想定した期間である。**事前準備等としては、追加遮蔽に用いる遮蔽材の手配や、損傷して**

いる外筒への補修板の溶接に係る資機材の手配等を、損傷した貯蔵建屋受入れ区域の解体・撤去と並行して行う。また、外筒の補修板の溶接作業に要する期間については、モックアップ試験を行い確認した。

「5. 使用済燃料貯蔵施設の遮蔽評価」の評価条件における津波襲来から金属キャスク損傷部の遮蔽機能の復旧までの期間としては、損傷した貯蔵建屋受入れ区域の解体・撤去の完了までに7週間程度、金属キャスクの損傷部への追加遮蔽体等の設置に1週間程度及びこれらに余裕を加えて3か月と想定している。

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



別添 7 図 遮蔽機能復旧工程（想定）

津波による波圧と地震荷重の組合せについて

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

1. 余震の規模

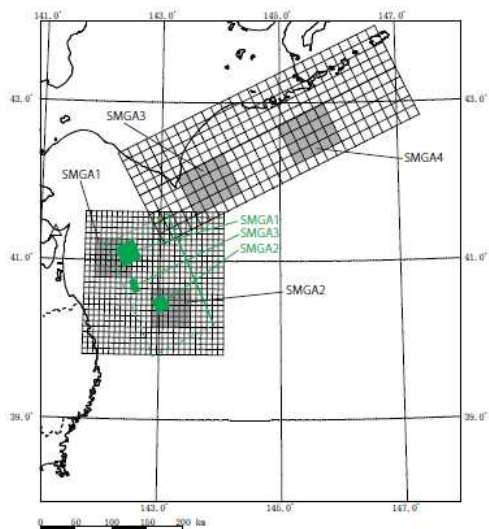
敷地の地震動を考慮する際に策定した、検討用地震の一つである「M9 プレート間地震（2011 年東北地方太平洋沖地震を踏まえた地震（Mw9.0）（三陸沖北部から根室沖の連動モデル）」を、津波評価に用いた「仮想的な大規模津波（等価な震源モデルの地震規模は Mw9.32～9.34）」と対応関係にある地震とし、余震を評価する際の本震と想定する（別添 8-1 図）。

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

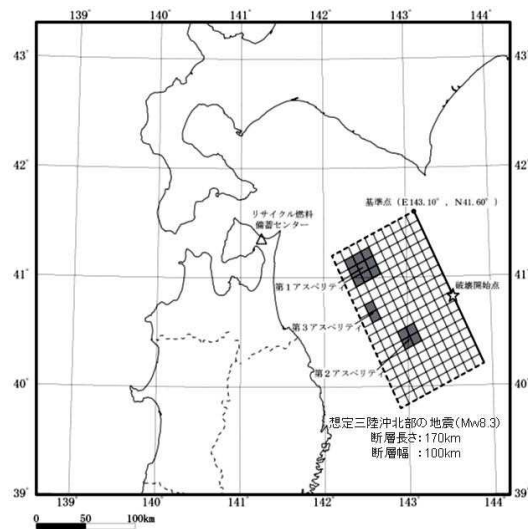
地震調査委員会の地震データを基に、過去の地震における本震の規模と最大余震の規模の関係を整理した（別添 8-1 表）。検討対象とした地震は、本震のマグニチュードが M7.0 以上で、かつ、本震と最大余震との時間間隔が 12 時間以内の地震とした。本震と余震のマグニチュードの差は 0.7～2.2 となる。これより、「想定三陸沖北部の地震（Mw8.3）」を、「M9 プレート間地震（2011 年東北地方太平洋沖地震を踏まえた地震（Mw9.0）（三陸沖北部から根室沖の連動モデル）」の余震として想定するのは妥当であると考えられる。

2. 貯蔵建屋の健全性

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



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



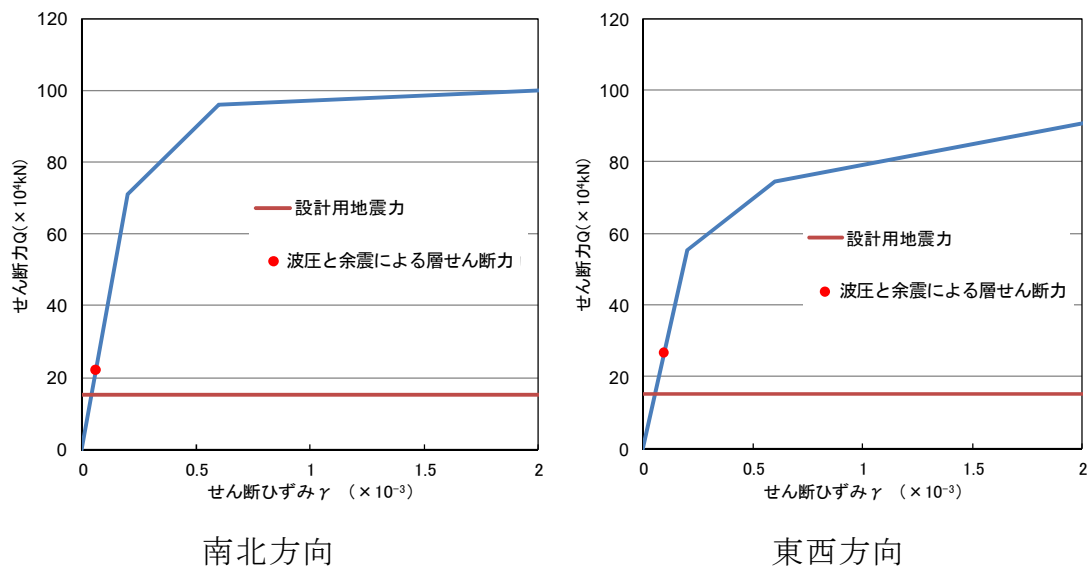
別添 8-2 図 「想定三陸沖北部の
地震 (Mw8.3)」の断層モデル図

別添 8-1 表 過去の地震における本震の規模と最大余震の規模の関係

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

※1) 気象庁マグニチュード

※2) モーメントマグニチュード Mw



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

PWR 用キャスクの燃料棒ギャップへの核分裂生成物移行割合について

第 4-5-1 表の燃料棒ギャップへの核分裂生成物移行割合については、日本原子力学会標準「使用済燃料・混合酸化物新燃料・高レベル放射性廃物輸送容器の安全設計及び検査基準：2013」(AESJ-SC-F006：2013) (以下、「学会標準」という。)の附属書K (参考) 使用済燃料被覆管の破損を想定する場合のソースタームの「K.1 放射性気体の燃料ペレットからの放出率」に、「放射性気体の燃料ペレットからの放出率を PWR 燃料棒では 10%、BWR 燃料棒では 30% とすれば十分安全側となる。ただし燃料設計及び出力により気体放出率は変化するので注意する必要がある。」との記載がある。このことから、燃料棒ギャップへの核分裂生成物移行割合を、PWR 用キャスク (タイプ 1) では 10%、その他の BWR 用キャスクでは 30% としている。

PWR 燃料棒における F P ガス放出率 10% の根拠として、学会標準では以下の文献が引用されている。

文献 1) S. Doi, S. Abeta, Y. Iriya, et al., “High Burnup Experience of PWR Fuel in Japan”, ANS Topical Meeting, Avignon, France, April 21-24, (1991)

文献 2) (財) 原子力発電技術機構, “平成 13 年度 高燃焼度等燃料安全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, 187 (2002)

試験結果を基に F P ガス放出率が最大でも 3% 以下であることが、文献 1) では「Figure 6 Fission Gas Release Data」に、文献 2) では「図 2.2.1.9-4 実機照射後の燃料要素 FP ガス放出率燃焼度依存性」に示されており (学会標準にも同じグラフが掲載)、学会標準においても 10% は保守側の設定であるとしている。また、文献 2) において、図 2.2.1.9-4 について「全体の傾向としては、燃焼度と共に F P ガス放出率が増加傾向にあるが、最大でも 3% 以下の F P ガス放出率である。」との考察がなされている。

なお、文献 1) 及び文献 2) の試験結果はいずれもパンクチャ試験によって得られたものである。これは“輸送時”及び“貯蔵時”といった状態によらず、何らかの原因で燃料棒に穴が開いた時の F P ガスの放出率を示すものであるため、貯蔵時にも適用可能な結果と考える。

文献 2) に記載されたパンクチャ試験の内容を以下に抜粋する。

「燃料要素のプレナム部に穿孔し、燃料要素内のガスを体積既知の容器に導入し、その圧力を測定する。ガス捕集後に一定圧のアルゴンガスを燃料要素内に導入して、燃料要素内自由空間部の体積を測定し、これら圧力測定値と体積測定値からガス量を決定した。また、捕集したガスの一部を採取し、ガスマスペクトロメトリーによりガス組成を分析し F P ガスの放出量を求めた。」