

リサイクル燃料備蓄センター
事業許可基準規則への適合性について

令和2年1月22日

リサイクル燃料貯蔵株式会社

<目 次>

第 3 条 使用済燃料の臨界防止

第 4 条 遮蔽等

第 5 条 閉じ込めの機能

第 6 条 除熱

第 7 条 火災等による損傷の防止

第 9 条 地震による損傷の防止

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

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

第 13 条 安全機能を有する施設

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

第 16 条 使用済燃料の受入れ施設

第 17 条 計測制御系統施設

第 18 条 廃棄施設

第 19 条 放射線管理施設

第 20 条 予備電源

第 21 条 通信連絡設備等

今回説明分

第3条 使用済燃料の臨界防止

<目次>

1. 設計方針
2. 臨界防止設計

(別添)

- 別添1 ボロン添加ステンレス鋼のボロン分布について
- 別添2 乾燥状態における臨界解析について
- 別添3 冠水状態におけるガドリニアクレジットを考慮した臨界解析について
- 別添4 バスケット格子内の燃料配置等について
- 別添5 バスケット及び使用済燃料集合体の変形の考慮要否について
- 別添6 冠水状態の水密度について

1. 設計方針

- (1) 金属キャスク単体は、その内部のバスケットの幾何学的な配置及び中性子を吸収する材料により、使用済燃料集合体を収納した条件下で、技術的にみて想定されるいかなる場合でも臨界を防止する設計とする。
- (2) 臨界防止機能の一部を構成するバスケットは、設計貯蔵期間中の放射線照射影響、腐食等の経年変化に対して十分な信頼性を有する材料を選択し、設計貯蔵期間を通じてバスケットの構造健全性が保たれる設計とする。
- (3) 金属キャスク相互の中性子干渉を考慮して完全反射条件（無限配列）として、臨界評価する。
- (4) 未臨界性に有意な影響を与える以下の因子を考慮した設計とする。

a. 配置・形状

貯蔵区域内の金属キャスクの配置、バスケットの板厚、内のり等の寸法公差、バスケット格子内の使用済燃料集合体の配置等を適切に考慮する。

金属キャスク相互の中性子干渉を考慮して完全反射条件（無限配列）としていることから、金属キャスクの滑動を考慮する必要はない。

使用済燃料貯蔵施設において、金属キャスクは、その内部が乾燥された状態であり、かつ、水が侵入することはないことから、バスケット及び使用済燃料集合体の変形により臨界となることはなく、これらの変形を考慮する必要はない。

b. 中性子吸収材の効果

以下の事項等について適切な安全裕度をもって考慮する。

- (a) 製造公差（濃度、非均質性、寸法等）
- (b) 中性子吸収に伴う原子個数密度の減少

c. 減速材（水）の影響

使用済燃料集合体を金属キャスクに収納するにあたり冠水することを設計上適切に考慮する。

d. 燃焼度クレジット

使用済燃料の燃焼に伴う反応度低下は考慮しない。なお、冠水状態の解析では、可燃性毒物による燃焼初期の反応度抑制効果を適切に考慮する。

- (5) 契約先である原子炉設置者が確認した使用済燃料集合体の収納等の状

態が貯蔵上必要な条件等を満足していることを，記録により確認する。

2. 臨界防止設計

(1) 臨界防止構造

金属キャスクは、その内部のバスケットの幾何学的な配置及び中性子を吸収する材料により、技術的にみて想定されるいかなる場合でも臨界を防止する設計とし、以下の配慮を行う。

a. 使用済燃料集合体を収納するバスケットは、格子構造とし、設計貯蔵期間（50年）に事業所外運搬に係る期間等、十分な余裕を考慮した60年間を通じて使用済燃料集合体を所定の幾何学的配置に維持する設計とする。（「第十五条 金属キャスク」参照）

b. バスケットの材料には、中性子を有効に吸収するボロンを偏在することなく添加したステンレス鋼を用いる。（別添1参照）

金属キャスクの仕様を第1表に、収納する使用済燃料集合体の仕様を第2表に、バスケット構造を第1図に示す。

(2) 臨界解析

金属キャスクの臨界解析フローを第2図に、臨界解析モデルを第3図に、臨界解析条件を第3表に、臨界解析条件の設定根拠を第4表に示す。

金属キャスク及び燃料集合体の実形状を三次元で適切にモデル化し、これまでの輸送容器と貯蔵容器での臨界解析に使用実績のある燃料棒単位セル計算を輸送計算コードXSDRNPM、中性子実効増倍率の計算をモンテカルロコードKENO-V.aで行うSCALEコードシステム（4.4a）を用いる。断面積ライブラリにはSCALEコードシステムの内蔵ライブラリデータのひとつである238群ライブラリデータを使用して中性子実効増倍率を求め0.95以下となることを確認する。

金属キャスクは多重の閉じ込め構造を有する蓋部により金属キャスク内部は外部から隔離される構造であり、金属キャスクへの使用済燃料集合体収納後に金属キャスク内部の排水及び真空乾燥が行われることから、貯蔵中の金属キャスク内部は乾燥状態であるが、原子力発電所における金属キャスクへの使用済燃料集合体収納時に冠水することから、乾状態燥及び冠水状態で評価する。

BWR燃料集合体には反応度抑制効果のある可燃性毒物が含まれているが、中性子減速材のない乾燥状態では可燃性毒物の反応度抑制効果が低下することから、乾燥状態の解析では保守的に可燃性毒物の反応度抑制効果を見逃した初期濃縮度の燃料集合体を金属キャスクに全数収納した状態を設定する（別添2参照）。冠水状態の解析では、燃料集合体の燃焼に伴う反応度の低下は考慮せず、可燃性毒物による燃焼初期の反応度抑制効果を考慮して、炉心内装荷冷温状態での燃料集合体の無限増倍率が1.3となる燃料集合体モデルを金属キャスクに全数収納した状態を設定する（別添3参照）。

また、金属キャスク相互の中性子干渉を考慮して金属キャスク周囲を完全反射条件とし、金属キャスクの無限配列を模擬することにより、使用済燃料貯蔵建屋の貯蔵容量最大に金属キャスクを配置した条件を包絡した設定とする。バスケット格子内の使用済燃料は中性子実効増倍率が最大となるように金属キャスク中心側に偏向して配置するとともに、バスケットの板厚、内のり等の寸法公差や中性子吸収材の製造公差を考慮するなど、十分な安全裕度を見込む（別添4参照）。使用済燃料貯蔵施設において、金属キャスクは、その内部が乾燥された状態であり、かつ、水が侵入することはないことから、バスケット及び使用済燃料集合体の変形により臨界となることはなく、これらの変形を考慮する必要はない（別添5参照）。

(3) 解析結果

解析結果を第5表に示す。

乾燥状態及び冠水状態での金属キャスクの中性子実効増倍率（モンテカルロ計算の統計誤差（ 3σ ）を加えたもの）は、判定基準である0.95を十分下回ることを確認した。

第1表 金属キャスクの仕様

キャスクタイプ 仕 様	BWR用大型キャスク (タイプ2)		BWR用大型キャスク (タイプ2A)	
寸法	全長：約 5.4m 外径：約 2.5m			
最大収納体数	69 体			
バスケットの材料	ボロン添加ステンレス鋼			
収納する使用済燃料 集合体の種類	新型 8×8 ジルコニウム ムライナ燃料	新型 8×8 燃料	新型 8×8 ジルコニウム ムライナ燃料	高燃焼度 8×8燃料
最高燃焼度 (MWd/t)	40,000	34,000	40,000	40,000
原子炉から取出後の 期間 (年以上)	18	24	18	18

第2表 使用済燃料集合体（BWR）の仕様

項目	単位	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
燃料材質	-	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	ジルカロイ-2
燃料理論密度	%	約95	約95	約97
被覆管肉厚	mm	約0.86	約0.86	約0.86
燃料有効長	m	約3.71	約3.71	約3.71
燃料棒配列	-	8×8	8×8	8×8
集合体あたりの 燃料棒数	本	62	62	60
U-235 初期平均 濃縮度	wt%	約3.1	約3.1	約3.7

第3表 臨界解析条件

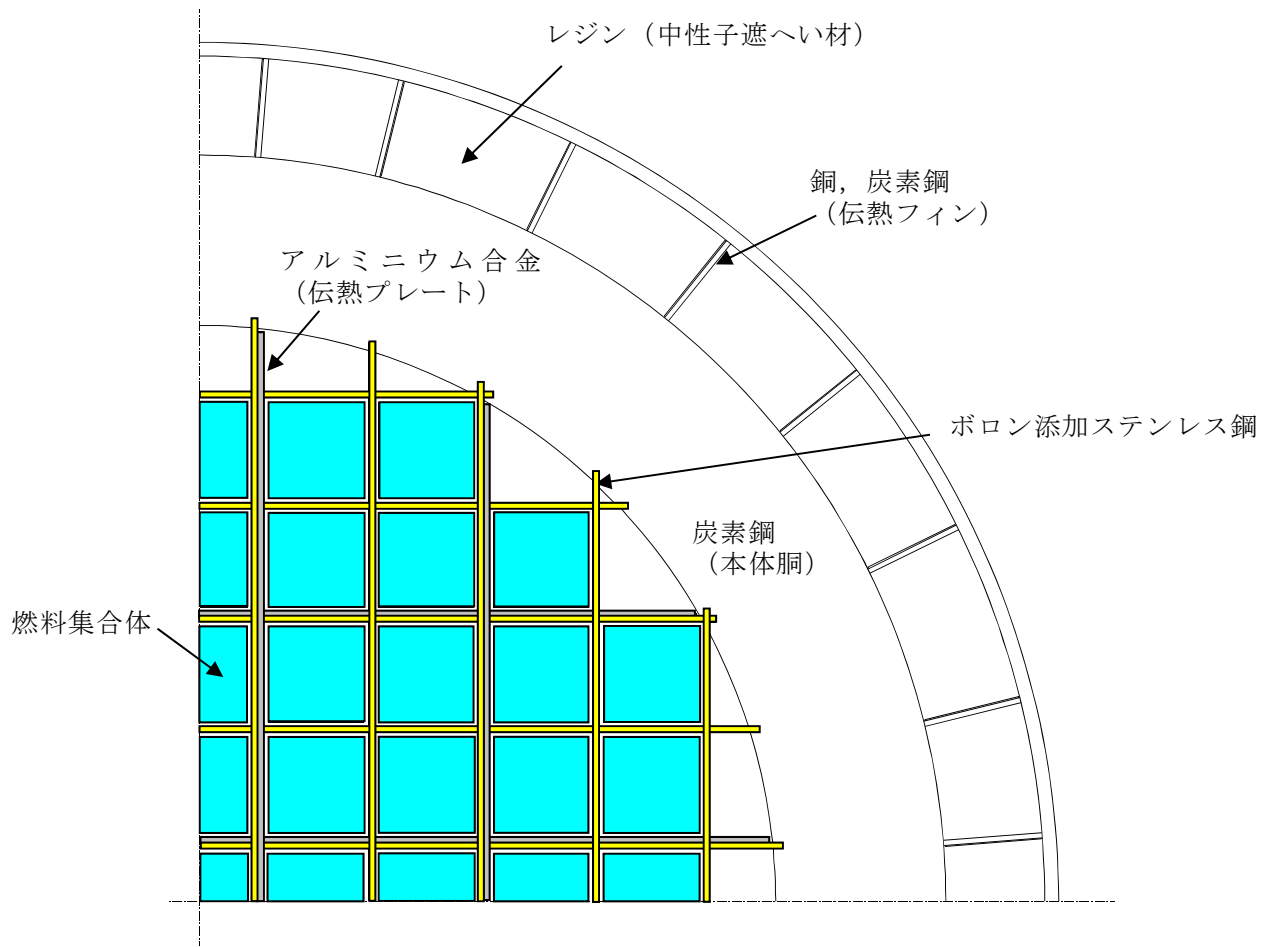
項目	乾燥状態	冠水状態
金属キャスク 内雰囲気	真空	冠水 (水密度 1.0g/cm ³)
金属キャスク 外雰囲気	真空	
収納物	可燃性毒物の反応度抑制効果を見捨てた初期濃縮度の燃料集合体 タイプ2 : 新型8×8ジルコニウムライナ燃料, 濃縮度約3.1wt% タイプ2A : 高燃焼度8×8燃料, 濃縮度約3.7wt%	濃縮度の異なる2種類の燃料棒を用いた炉心装荷冷温状態での無限増倍率が1.3となる燃料集合体モデル タイプ2 : STEP-I燃料モデルバンドル タイプ2A : STEP-II燃料モデルバンドル
収納体数	69体 (金属キャスクの最大収納体数)	
金属キャスクの配列	無限配列 (金属キャスクに外接する四角柱表面で完全反射)	
バスケット部材中の中性子吸収材含有量	ボロン添加ステンレス鋼のボロン含有率と密度を仕様上の下限から設定したボロン原子個数密度	
バスケット寸法	格子板厚 : 最小 格子内のり : 最小	
バスケット格子内の燃料配置	中心偏向配置	
チャンネルボックス	なし	あり
燃料集合体の上・下タイププレート及びプレナム部	上・下タイププレート及びプレナム部を真空に置換	上・下タイププレート及びプレナム部を水 (密度 1.0g/cm ³) に置換
金属キャスクの中性子遮蔽材	中性子遮蔽材であるレジンを真空に置換	
解析コード	SCALEシステム 4.4a ・燃料棒単位セル計算 : 輸送計算コードXSDRNPM ・臨界解析 : 臨界解析コードKENO-V. a (中性子ヒストリー数 100万) ・断面積ライブラリ : SCALEシステム 4.4a の内蔵ライブラリデータのひとつである 238 群ライブラリデータ	

第4表 臨界解析条件の設定根拠

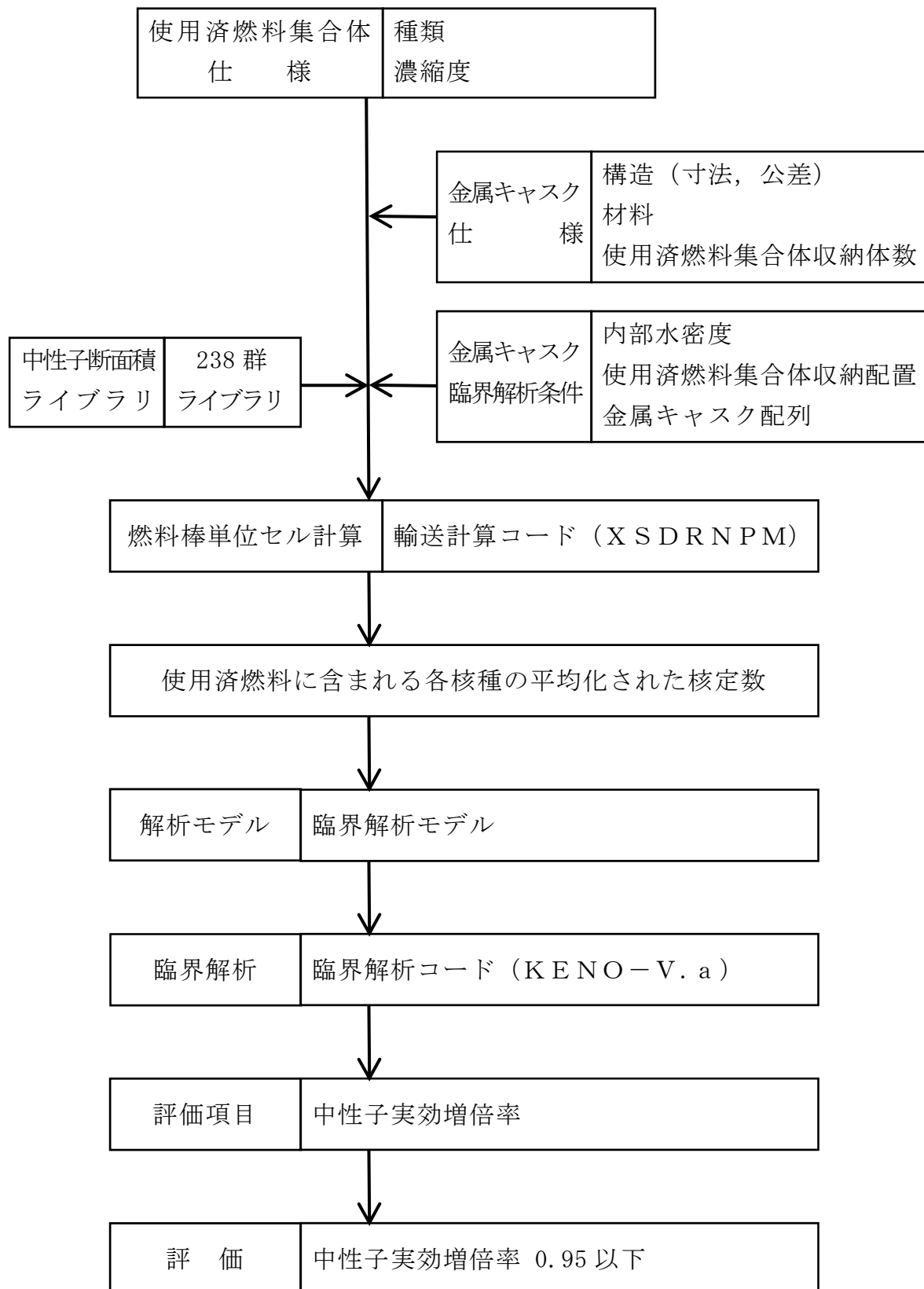
項目	乾燥状態	冠水状態
金属キャスク内雰囲気	雰囲気ガスの中性子吸収効果を見捨てる真空として設定	中性子減速効果が最大となる水密度 1.0g/cm^3 として設定(別添6参照)
金属キャスク外雰囲気	金属キャスク外部に漏れ出した中性子が吸収されることなく金属キャスクに向かうように真空として設定	
収納物	ガドリニアの存在を見捨てる、濃縮度は平均初期濃縮度の最大値とした燃料	炉心装荷冷温状態で無限増倍率は1.3未満であるが、無限増倍率が1.3となるようなモデルバンドル
	3種類の燃料集合体を収納するタイプ2Aでは、濃縮度が高い理由等から反応度が最も高くなる高燃焼度 8×8 燃料を全数装荷	
収納体数	金属キャスクの最大収納体数である69体	
金属キャスクの配列	体系計算における境界条件は金属キャスクに外接する四角柱表面で完全反射とすることにより、金属キャスクの無限配列を模擬	
バスケット部材中の中性子吸収材含有量	中性子吸収材を少なくするように仕様上の下限から設定 設計貯蔵期間(50年)に事業所外運搬に係る期間等、十分な余裕を考慮した60年間の ^{10}B の減損割合は、保守的に全中性子束を用いて評価しても $10^{-6} \sim 10^{-5}$ 程度であり影響は見捨てる(JNES 金属キャスク貯蔵技術確証試験H15最終報告では、熱中性子束で評価して 10^{-11} 程度)	
バスケット寸法	格子板厚 : 最小の方が隣接する使用済燃料集合体までの距離が短く、ボロン量も最小となり、厳しい評価 格子内のり : 格子内のり最小のモデルは、使用済燃料集合体の離隔距離が最小になり、厳しい評価	
バスケット格子内の燃料配置	チャンネルボックスの有無を含めサーベイ計算を行い、中性子実効増倍率が最大となる金属キャスク中心偏向配置	
	金属キャスク中心偏向配置 タイプ2 : 0.374 タイプ2A : 0.410 格子内中央配置 タイプ2 : 0.372 タイプ2A : 0.408	金属キャスク中心偏向配置 タイプ2 : 0.878 タイプ2A : 0.882 格子内中央配置 タイプ2 : 0.868 タイプ2A : 0.872
チャンネルボックス	隣接する使用済燃料集合体までの距離が短くなる(燃料集合体が密集する)、チャンネルボックスなしの場合の中性子実効増倍率が高い	中性子減速材である水の効果が大きくなる、チャンネルボックスありの場合の中性子実効増倍率が高い
燃料集合体の上・下タイププレート及びプレナム部	ステンレス鋼製の上・下タイププレート及びプレナム部は、鋼材の中性子吸収を見捨てる真空として設定	ステンレス鋼製の上・下タイププレート及びプレナム部は、中性子減速材である水として設定
金属キャスクの中性子遮へい材	中性子遮へい材は中性子を吸収するので、中性子遮へい材が無いと想定した方が保守的の評価となるため、中性子遮へい材(レジン)を見捨てる(真空)	

第5表 臨界防止設計に係る臨界解析結果

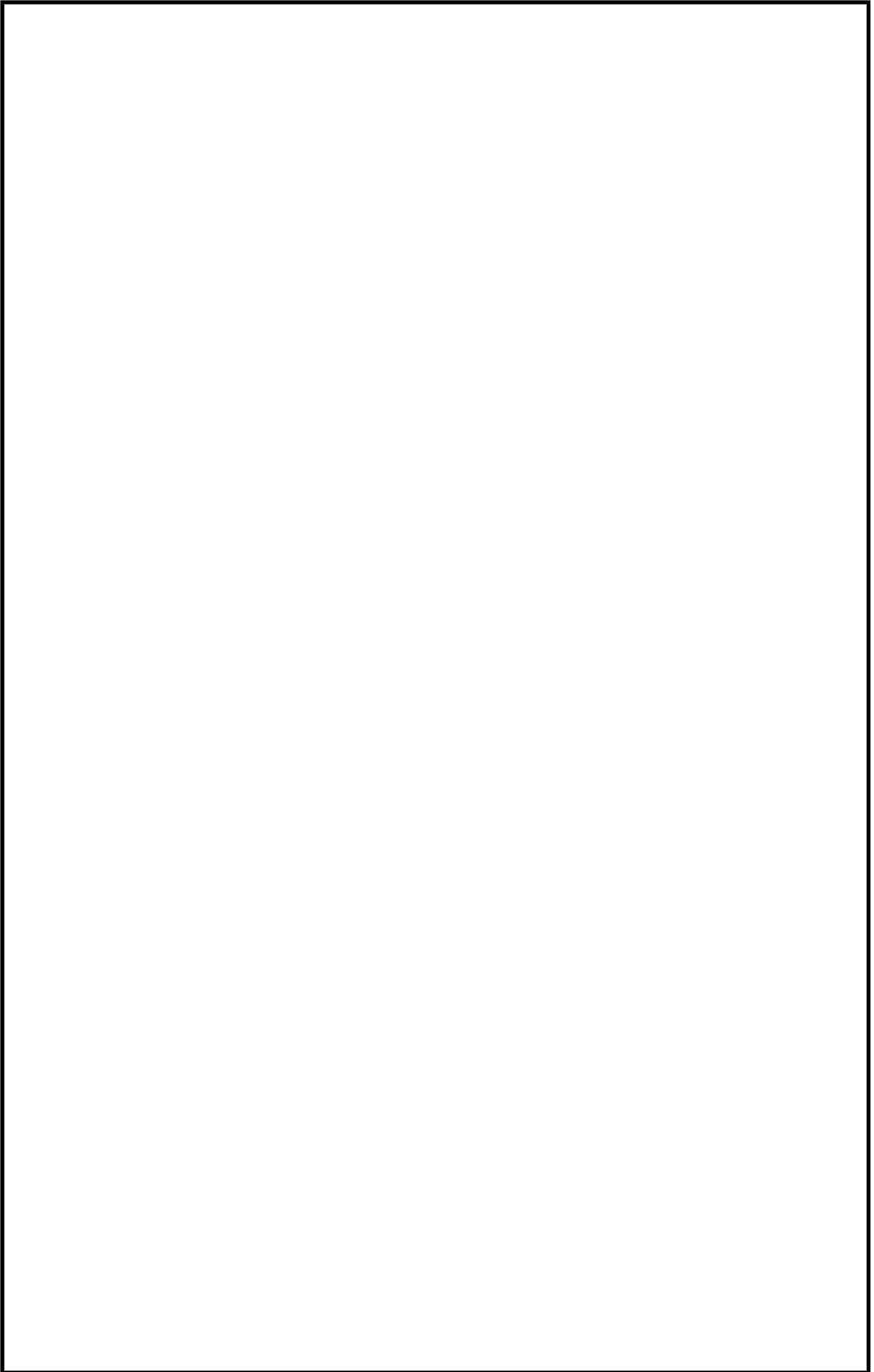
	BWR用 大型キャスク (タイプ2)	BWR用 大型キャスク (タイプ2A)
乾燥状態 (新燃料) keff+3σ	0.374 (Keff:0.37264, σ : 0.00028)	0.410 (Keff:0.40855, σ : 0.00030)
冠水状態 (カトリニアク レジット) keff+3σ	0.878 (Keff:0.87494, σ : 0.00087)	0.882 (Keff:0.87935, σ : 0.00088)
判定基準	0.95 以下	



第1図 BWR用大型キャスク (タイプ2) 及びBWR用大型キャスク (タイプ2A) のバスケット構造



第2図 金属キャスクの臨界解析フロー図



第3図 臨界解析モデル

ボロン添加ステンレス鋼のボロン分布について

ボロンの偏在や均質性に関して、バスケット材料の製造プロセスにおいて管理され、中性子吸収性能の低下を無視できると考えていることから、臨界解析において、ボロンは均等に分布し、かつ、均質であるとして評価を行っている。

別添 1-1 表に示すように、バスケット部材のボロン添加ステンレス鋼は、中性子吸収材であるボロン含有量と材料密度を仕様上の下限值から設定したボロンの原子個数密度を解析の入力値として使用している。

また、別添 1-2 表に示すように、金属キャスクで使用するボロンを添加したバスケット材料については、ボロン量、ボロンの粒子径や分散性に関して、製造時に製品のボロン量の分析や金属組織観察により確認することから、ストリーミングによる中性子吸収性能の低下を無視できると考えている。

米国の乾式キャスク貯蔵システムの「Standard Review Plan for Dry Cask Storage Systems (NUREG-1536)」(以下、SRP という。)では、臨界解析における固定式中性子吸収材の効果の考慮は、その存在や均一性が確認できる試験が行われない場合は、75%までと規定されている。また、この SRP にも適用される ISG-15「MATERIALS EVALUATION」では、吸収材が非均一な材料の場合、吸収材の粒子の自己遮へい、及び中性子が吸収材の粒子間をストリーミングすることで中性子吸収性能が低下するとしている。

これは、吸収材の粒子がマトリックス材中に不均一に分散あるいは凝集したり、粒子が大きい(例えば、 B_4C の $80\mu m$ の粒子)のために、同じ量の吸収材を含有する均一な材料に比べて、中性子吸収性能が有意に低下するという Burrus¹⁾ と Wells²⁾ の論文を参考に記載している。

一方、独立行政法人原子力安全基盤機構によるボロンクレジットに関する文献調査³⁾においては、Stanley E. Turner⁴⁾による、分離炭化ボロン粒子間のストリーミングの反応度効果に関して、寸法の小さい粒子($10-25\mu m$)を使う吸収体では、ストリーミングによる反応度への影響は無視できるという調査結果が得られている。以下に文献調査の記載を記す。

「湿式又は乾式貯蔵における実際的な利用において、BORAL*などの B_4C 粒子が比較的大きい(110–180 μm)吸収体では、ストリーミングの影響は $<0.0020 \Delta k$ である。一方、金属・セラミック複合体(メタミック)などさらに寸法の小さい粒子(10–25 μm)を使う吸収体では、基本的には無視できる程度のストリーミングによる反応度への影響が示されている。要するに、透過率では影響があるが、中性子増倍率では影響は無視できると解釈できる。」

- * ボロンを用いた中性子吸収材で、アルミニウム板二枚の間にサンドイッチ状に B_4C とアルミニウム粉末を混合した混合粉末焼結体を挟み込み圧延した板状の成形体。海外では、例えば、ステンレスに接合させて、バスケットとして使用している。

BWR用大型キャスク(タイプ2)及びBWR用大型キャスク(タイプ2A)で使用するボロンを添加したバスケット材料については、ボロン量、ボロンの粒子径や分散性に関して、バスケット製造時に製品のボロン量分析や金属組織観察により、ボロンが凝集することなく分散し、粒子径が十分小さいことの確認を行うことから、米国SRP等における考え方を適用する必要はないと考える。ボロン添加ステンレス鋼の製造及び検査について、以下に記す。

- ・ボロン添加ステンレス鋼の製造について

BWR用大型キャスク(タイプ2)及びBWR用大型キャスク(タイプ2A)は、ボロン添加ステンレス鋼(JSME S FA-CC-004)を用いる。ボロン添加ステンレス鋼の製造方法は、一般的な鋼板の方法と同様である。製造工程フローを別添1–1図に示す。ボロンは、溶解時にフェロボロンの形で必要量混合される。溶解の後、造塊工程を経て圧延を行う場合と、連続鋳造で圧延される場合がある。圧延後は、オーステナイト系ステンレス鋼と同様に固溶化熱処理(約1000–1150 $^{\circ}C$, 急冷)を行っている。

- ・ボロン添加ステンレス鋼の検査について

ボロン量、ボロンの粒子径や分散性については、製品のボロン量分析及び金属組織観察により確認する。ボロン添加ステンレス鋼の検査内容を別添1–2図に示す。試験片は、同一溶解同一熱処理のロット毎にコイルから切り出す。試験片の採取は、圧延での製造工程を考慮し、圧延条件等に

不安定要因が介在しやすいと考えられる圧延開始側と、安定した条件で製造される圧延終了側から採取する。

なお、BWR用大型キャスク（タイプ2）及びBWR用大型キャスク（タイプ2A）で使用するボロン添加ステンレス鋼は、使用済燃料ラックや輸送容器用バスケットとして製造実績が多数あり、ボロンが凝集することなく分散し、粒子径が十分小さいことが確認されている⁵⁾。

参考文献

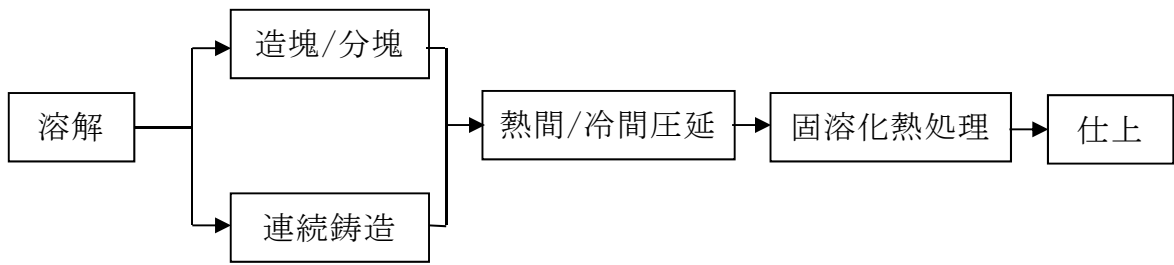
- 1) W. R. Burrus, “How Channeling between Chunks Raises Neutron Transmission through Boral”, *Nucleonics*, Vol. 16, No. 1, pp. 91-94 (1958)
- 2) A. H. Wells, et al, “Criticality Effect of Neutron Channeling Between Boron Carbide Granules in Boral for a Spent Fuel Shipping Cask”, *Transactions of the American Nuclear Society*, Vol. 54, pp. 205-206 (1987)
- 3) “平成 20 年度中間貯蔵施設基準体系整備報告書（中間貯蔵施設基準体系整備）”, (独) 原子力安全基盤機構（平成 22 年 3 月）
- 4) Turner, S. E., “Reactivity Effects of Streaming Between Discrete Boron Carbide Particles in Neutron Absorber Panels for Storage or Transport of Spent Nuclear Fuel”, *Nuclear Science and Engineering*, 151, 344 (2005)
- 5) (株) 日立製作所, 「使用済燃料貯蔵ラックの使用材料としてのボロン添加ステンレス鋼について」, HLR-061, (平成 10 年 3 月)

別添 1 - 1 表 ボロン添加ステンレス鋼のボロン濃度

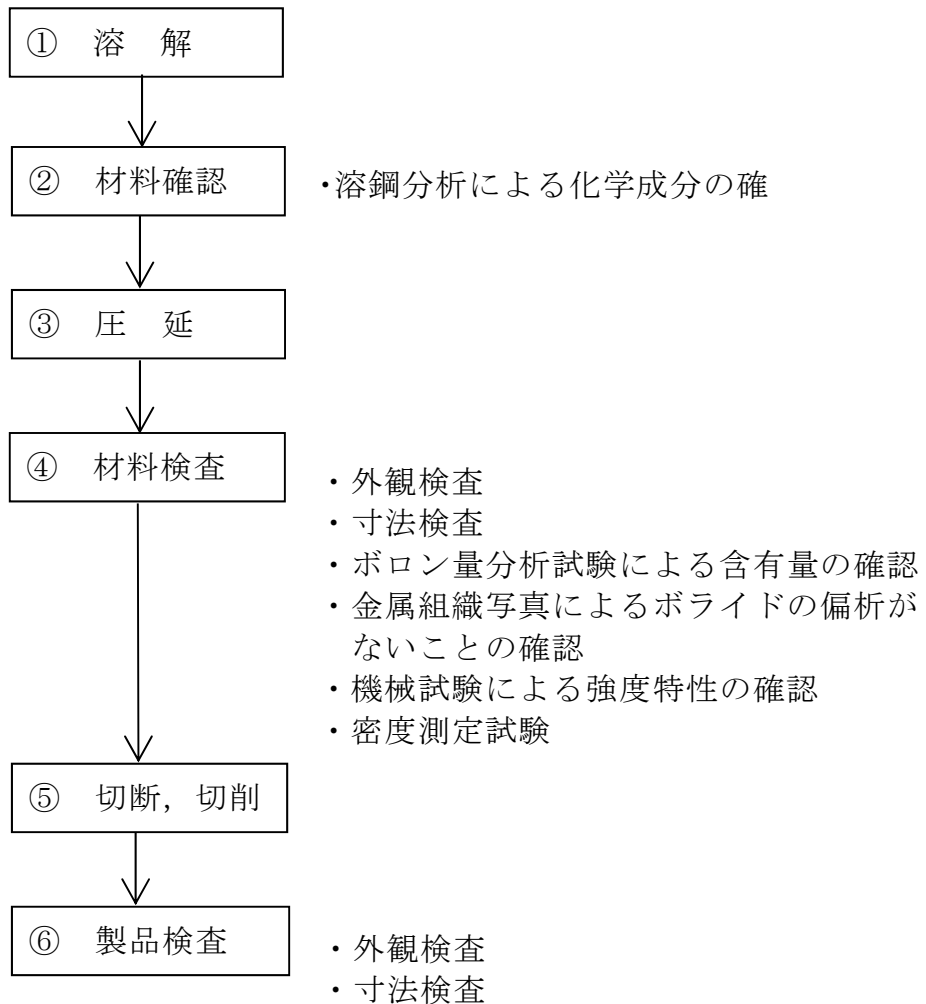
板厚	6 mm ~ <input type="text"/> mm
添加ボロン	天然ボロン (^{10}B <input type="text"/> at%)
ボロンの化学形態	ボライド (Cr, Fe) ₂ B
ボロン含有量	天然ボロン含有量 1 mass%以上 材料密度 <input type="text"/> g/cm ³ 以上
設定根拠	天然ボロン含有量は材料規格の下限値 (JSME S FA-CC-004) 材料密度は購入仕様下限値

別添 1 - 2 表 ボロンを添加したバスケット材料の製造管理

^{10}B 含有量	ボロン含有量 1 mass%以上
(担保方法)	(製品の同一ロット (同一溶鋼, 同一熱処理条件) 毎に複数箇所からボロン量分析を行い, ボロンが所定の重量以上であることを確認)
平均粒子径	約 20 μm
(担保方法)	(製品製造実績を有する製造工程管理, 製造時金属組織観察)
分散性	均一
(担保方法)	(製品製造実績を有する製造工程管理, 製造時金属組織観察)
中性子吸収能力	ボロン添加量設計仕様下限値の100%相当
(担保方法)	(ボロン含有量, 平均粒子径及び分散性に係る品質管理により中性子吸収能力を確認)
備考	<ul style="list-style-type: none"> ボロンが均一に分散し, かつ平均粒子径が小さいため, 中性子吸収性能への影響はほとんどなく, 所定の未臨界性能を確保 ボロン添加ステンレス鋼は, 使用済燃料ラックや輸送容器用バスケットとして製造実績が多数あり, ボライドが凝集することなく分散し, 粒子径が十分小さいことが確認されている。



別添 1 - 1 図 製造工程フロー



別添 1 - 2 図 検査内容

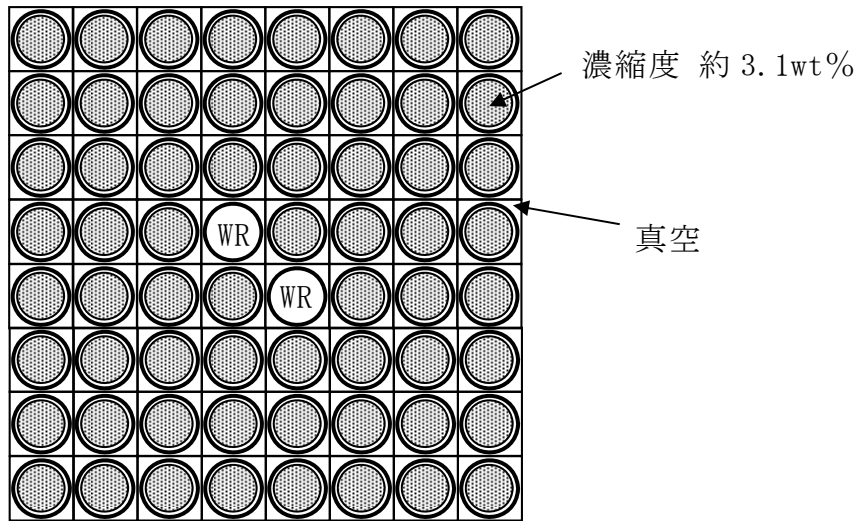
乾燥状態における臨界解析について

BWR燃料集合体には反応度抑制効果のある可燃性毒物が含まれているが、中性子減速材のない乾燥状態では可燃性毒物の反応度抑制効果が低下することから、保守的に可燃性毒物の反応度抑制効果を無視した初期濃縮度の燃料集合体を金属キャスクに全数収納した状態を設定する。

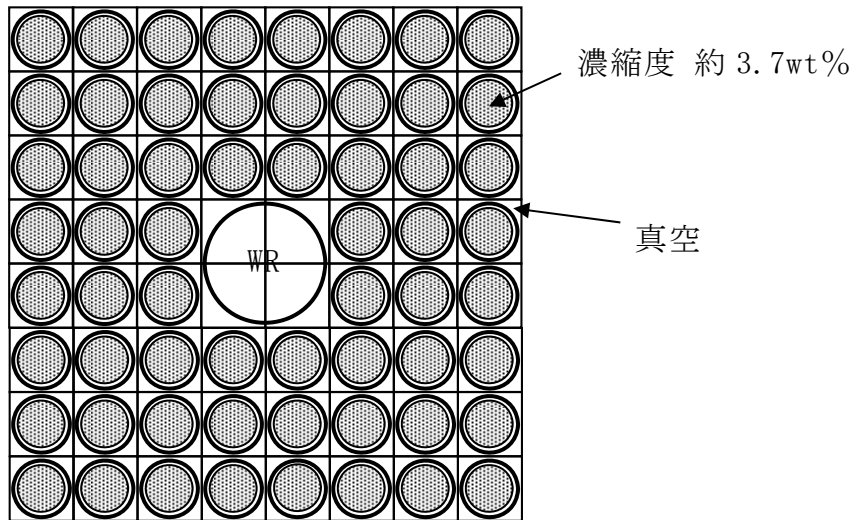
臨界解析に用いる燃料集合体の仕様を別添 2 - 1 表及び別添 2 - 1 図に示す。BWR用大型キャスク（タイプ 2）は新型 8 × 8 ジルコニウムライナ燃料のみ収納することから新型 8 × 8 ジルコニウムライナ燃料を、BWR用大型キャスク（タイプ 2 A）では 3 種類の燃料集合体を収納するが反応度が最も高くなる高燃焼度 8 × 8 燃料とし、濃縮度はそれぞれの燃料の初期濃縮度の新燃料仮定としている。

別添 2 - 1 表 乾燥状態における臨界解析用の使用済燃料集合体の仕様

項目	単位	BWR用大型キャスク (タイプ 2)	BWR用大型キャスク (タイプ 2 A)
燃料タイプ	-	新型 8 × 8 ジルコニウムライナ燃料	高燃焼度 8 × 8 燃料
燃料材質	-	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
燃料理論密度	%	95	97
燃料ペレット直径	mm	10.3	10.4
被覆管肉厚	mm	0.86	0.86
燃料有効長	mm	3708	3708
燃料棒配列	-	8 × 8	8 × 8
集合体あたりの燃料棒数	本	62	60
燃料棒ピッチ	mm	16.3	16.3
集合体の幅	mm	130.4	130.4
U-235 濃縮度	%	約 3.1	約 3.7



(a) BWR用大型キャスク（タイプ2）用



(b) BWR用大型キャスク（タイプ2A）用

別添2-1図 乾燥状態における臨界解析用の使用済燃料集合体

冠水状態におけるガドリニアクレジットを考慮した臨界解析について

1. ガドリニアクレジットを考慮した臨界解析手法の概要

BWR燃料は、余剰反応度の抑制と軸方向出力分布の調整のために、燃料ペレットに可燃性毒物であるガドリニア (Gd_2O_3) を含む設計を採用しており、格子型、濃縮度・ガドリニア設計など、プラントに対応させた多様性がある。多様性のある燃料を包括的に扱う手法として、BWR燃料の実設計を包絡する無限増倍率 (k_{∞}) を設定してモデルバンドルを作成し、BWRプラントの燃料貯蔵設備やキャスクの未臨界性設計を保守的かつ合理的に実施する方法がある。

BWR燃料は、燃料ペレットにガドリニアを含む燃料棒が組み込まれていることから、ガドリニアの燃焼に伴って k_{∞} は一旦上昇するが、現在の日本のBWR燃料においては、最大となる k_{∞} はいかなる燃料のいかなる軸方向断面においても、炉心装荷冷温状態で 1.3 を超えることがない設計になっている。

このため、臨界評価において、炉心装荷冷温状態で k_{∞} が 1.3 となるような仮想的なモデルバンドルを収納して計算を行えば安全側の評価となる。(別添 3-1 図，別添 3-2 図参照)

2. モデルバンドルの作成方法

BWR燃料は運転期間中において、出力分布及び余剰反応度の制御を濃縮度と可燃性毒物であるガドリニア設計により行えるようになっており、軸方向断面の燃焼特性は各々異なるが、運転期間中のいずれの断面においても k_{∞} が 1.3 を下回るように設計されている。また、燃料集合体は、できるだけ長期かつ高い燃焼度を取り出しながら、局所出力ピークをできるだけ少なく平坦な出力が維持できるように径方向にも濃縮度の違う燃料棒で制御している。このため、実燃料集合体の内側は高い濃縮度の燃料棒、外側には低い濃縮度の燃料棒が配置されている。この実燃料の濃縮度配分を考慮し、かつガドリニアの無い保守的な状態で臨界計算を実施できるように下記のようなモ

デルバンドルを設定している。なお、モデルバンドルはガドリニアの無い燃料でモデル化しているため、実燃料集合体よりも k_{∞} は大きい、平均濃縮度は低くなる特徴がある。

モデルバンドルの作成については、 k_{∞} が 1.3 となるモデルバンドルは、任意があって複数考えられるが、 k_{∞} が 1.3 のモデルバンドルでも k_{eff} あるいは平均濃縮度が大きくなるように設定している。参考文献 1) に、このようなガドリニアクレジットモデルバンドル作成の考え方が示されている。

別添 3-1 表に示すように、炉心装荷冷温状態の場合、内側に高濃縮度燃料棒、外側に低濃縮度燃料棒を配置したモデルバンドル (Case1) と、同一濃縮度の燃料棒を配置したモデルバンドル (Case2) は、ともに k_{∞} が 1.3 であるが、平均濃縮度に差が生じている。これは、 k_{∞} の評価では、燃料集合体からの漏えい中性子が強く影響するため、実燃料に近い内側領域の濃縮度を高めた Case1 よりも、Case2 のような低い平均濃縮度でも $k_{\infty} = 1.3$ を達成できる。

一方、キャスク体系においては、別添 3-2 表に示すように、中性子漏えいの大きい同一濃縮度分布の Case2 よりも、内側の濃縮度を高くした Case1 の方が、中性子漏えいが少ないためバスケットの中性子吸収効果が小さく、 k_{eff} が高くなる。

仮に、高濃縮度と低濃縮度と中間濃縮度の 3 種類の濃縮度を用いて、内側から高濃縮度、中間濃縮度、低濃縮度の燃料棒を配置して k_{∞} が 1.3 のモデルバンドルを作成した場合には、中間の濃縮度の燃料棒により、Case1 に比べて外側領域の濃縮度が高くなり、内側領域の濃縮度が低くなった状態 (低い平均濃縮度、中性子漏えいの大きい状態) で k_{∞} は 1.3 となる。キャスク体系においては、バスケットの中性子吸収効果が増えるため 3 種類の濃縮度を用いたモデルバンドルの方が、 k_{eff} は Case1 より低くなる。したがって、濃縮度を 2 種類としたモデルバンドルに包絡される。

以下にモデルバンドルの設定方法を示す。

- ① まず低濃縮度燃料棒を全体に配置する。
- ② 次に高濃縮度燃料棒を配置していくが、バスケットの中性子吸収効果が小さくなるように、バスケットから距離が離れた中央部から置換し

ていき、 $k_{\infty} \doteq 1.3$ となるまで繰り返す。

- ③ 最外周以外の領域全てに高濃縮度燃料棒を配置してもなお、 $k_{\infty} \doteq 1.3$ を下回る場合（別添 3-3 図(a)）には、最外周にも高濃縮度燃料棒を配置する。
- ④ ③により最外周に高濃縮度燃料棒を配置すると $k_{\infty} \doteq 1.3$ を超える場合（別添 3-3 図(b)）には、最外周の領域全てに低濃縮度燃料棒を配置し、それ以外の領域全てに高濃縮度燃料棒を配置した状態（別添 3-3 図(a)）をベースとして、最外周から 2 列目の高濃縮度燃料棒と最外周の低濃縮度燃料棒を置換することによって $k_{\infty} \doteq 1.3$ となる配置をサーベイシモデルバンドルを設定する（別添 3-3 図(c)）。

3. BWR用大型キャスク（タイプ 2）及びBWR用大型キャスク（タイプ 2 A）の冠水状態における臨界解析に用いたモデルバンドル

別添 3-3 表に示す燃料仕様にに基づき、「2. モデルバンドルの作成方法」の考え方に基づいて設定したモデルバンドルを別添 3-4 図に、このモデルバンドルの無限増倍率を別添 3-4 表に示す。

モデルバンドルの種類としては、収納する燃料タイプを考慮して 2 種類のモデルバンドルを設定した。BWR用大型キャスク（タイプ 2）では、新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料のみ収納することから、新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料をベースとした STEP-I 燃料モデルバンドルを用いて解析を行い、BWR用大型キャスク（タイプ 2 A）では、3 種類の燃料集合体を収納するが反応度が最も高くなる高燃焼度 8×8 燃料をベースとした STEP-II 燃料モデルバンドルを用いて解析を行っている。なお、モデルバンドルは、燃料仕様を考慮した最高濃縮度と最低濃縮度（公称値）の燃料棒にて、 k_{∞} が 1.3 となる仮想的なモデルバンドルを設定していることから、U-235 濃縮度の最高、最低の本数比、実際の平均濃縮度は一致しない。

モデルバンドルは、別添 3-1 図のように、1 断面の濃縮度分布から設定しており、燃料有効部の全長にわたって、濃縮度分布は一様として扱っている。実燃料では、運転時の軸方向出力分布の調整のために、濃縮度及びガドリニアは軸方向に分布*を持たせているが、モデルバンドルでは、実燃料の

濃縮度を平均化等の操作をせずに、 k_{∞} が1.3となる保守的な濃縮度分布を軸方向一様に設定している。実燃料のあらゆる軸方向の断面、運転期間（燃焼度）において、 k_{∞} は1.3以下であり、軸方向一様に k_{∞} が1.3となる濃縮度分布を設定することは、実燃料の k_{∞} を包絡しており、保守的な設定である。

なお、炉心装荷冷温状態での燃料集合体ピッチは、炉心内の最小離隔距離である約152mmとしている。キャスク体系では、厚みが約6mmのほう素が添加されたバスケット内に収納されることから燃料集合体ピッチを炉心装荷状態よりも大きい約□mmとしている。また、燃料集合体の変形は想定していない。

＊：BWR炉心燃料設計の特徴について

BWR炉心は軸方向にボイド率分布を持つことを特徴としている。炉心下部はボイド率が小さく、炉心上部はボイド率が大きいため、ボイド率の小さい（減速材の多い）炉心下部で出力が高くなり、出力分布が下方へ膨らみ易い傾向にある。炉心燃料設計では、出力が局所的に大きくならないよう、軸方向出力分布の平坦化を目的として、上下に濃縮度差をつけた上下2領域燃料が広く採用されている。また、ガドリニア設計では、運転期間中の炉心余剰反応度を適切かつ一定に保つように調整され、ガドリニア濃度が低いとガドリニアが早く燃え尽きるため k_{∞} が最大となる燃焼度時期は早くなり、ガドリニア濃度が高いとガドリニアが燃え残るため k_{∞} が最大となる燃焼度時期は遅くなる。

4. モデルバンドルの妥当性

本モデルバンドルをキャスク体系に使用することの保守性については、別添3-5図に示すようなフローに従い k_{∞} が1.3となるモデルバンドルについて、事業許可申請書における解析に用いたKENOコードと炉心設計コードを用いた比較検討を実施している。

具体的には、炉心設計コードによる実燃料の炉心装荷冷温状態での無限増倍率($k_{\infty 3}$)が1.3より小さいことを示し、モデルバンドルの炉心装荷冷温状態での炉心設計コードによる無限増倍率($k_{\infty 2}$)とKENOコードによる無限

増倍率 ($k_{\infty 1}$) の結果に差がなく、 $k_{\infty 1}$ 、 $k_{\infty 2}$ が $k_{\infty 3}$ よりも大きくなることを確認する。また、モデルバンドルのキャスク体系での KENO コードによる実効増倍率 ($keff1$)、炉心設計コードによる実効増倍率 ($keff2$) が、実燃料のキャスク体系での炉心設計コードによる実効増倍率 ($keff3$) より大きくなることを確認する。これらの結果を別添 3-5 表、別添 3-6 表に示す。別添 3-5 表に示すとおり、実燃料の炉心装荷冷温状態での無限増倍率が 1.3 を超えない設計となっており ($1.3 > k_{\infty 3}$)、モデルバンドルに対して計算コードの違いによる結果に差がなく ($k_{\infty 1} \approx k_{\infty 2}$)、モデルバンドルの炉心冷温状態での無限増倍率が、実燃料の炉心装荷冷温状態での無限増倍率より大きいことを確認している ($k_{\infty 1} > k_{\infty 3}$ 、 $k_{\infty 2} > k_{\infty 3}$)。また、キャスク体系においても、実燃料に対して、KENO コードでも炉心設計コードでも、モデルバンドルが保守性を有することを別添 3-6 表に示すとおり確認している ($keff1 > keff3$ 、 $keff2 > keff3$)。

以上のように、設定したモデルバンドルによるキャスク体系の $keff$ は、実燃料の場合よりも大きくなり、モデルバンドルは実際の燃料を包絡するとともに、保守性を有することを確認している。

参考文献

- 1) K. Kawakami, M. Matsumoto, H. Asano, T. Takakura, T. Matsumoto, T. Mochida, M. Yamaguchi, “The Use of Gadolinia Credit for Criticality Evaluation of a Spent Fuel Cask”, PATRAM’ 95
- 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（平成 12 年 12 月 資源エネルギー庁）

別添 3-1 表 モデルバンドルの例 (炉心装荷冷温状態の無限増倍率)¹⁾

	Enrichment Distribution	Kinf under Cold Core State																																																																
Case 1	<table border="1"> <tr><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>2</td><td>1</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td>1</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td>WR</td><td></td><td>1</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td>2</td></tr> <tr><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td></tr> </table> <p>1 : 4.90% (Maximum Pellet Enrichment of STEP-II Reload Fuel)</p> <p>2 : 2.10% (Minimum Pellet Enrichment of STEP-II Reload Fuel)</p> <p>Avg : 2.75%</p>	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	2	2	2	2	2	1			1	2	2	2	2	1	WR		1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1.301 (1.300 by WIMS)
2	2	2	2	2	2	2	2																																																											
2	1	2	2	2	2	2	2																																																											
2	2	1	1	1	2	2	2																																																											
2	2	1			1	2	2																																																											
2	2	1	WR		1	2	2																																																											
2	2	1	1	1	1	2	2																																																											
2	2	2	2	2	2	1	2																																																											
2	2	2	2	2	2	2	2																																																											
Case 2	<table border="1"> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td></td><td></td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>WR</td><td></td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> </table> <p>1 : 2.54%</p>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1			1	1	1	1	1	1	WR		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1.301
1	1	1	1	1	1	1	1																																																											
1	1	1	1	1	1	1	1																																																											
1	1	1	1	1	1	1	1																																																											
1	1	1			1	1	1																																																											
1	1	1	WR		1	1	1																																																											
1	1	1	1	1	1	1	1																																																											
1	1	1	1	1	1	1	1																																																											
1	1	1	1	1	1	1	1																																																											

別添 3-2 表 モデルバンドルの例 (キャスク体系の実効増倍率*)¹⁾

	Enrichment Distribution	Kinf in Cask Basket Cell																																																																
Case 1	<p>Basket channel (Boron-Stainless-Steel)</p> <table border="1"> <tr><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>2</td><td>1</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td></td><td></td><td>1</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td>WR</td><td></td><td>1</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td>2</td></tr> <tr><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td></tr> </table> <p>1 : 4.90%</p> <p>2 : 2.10%</p> <p>Avg : 2.75%</p>	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1			1	2	2	2	2	1	WR		1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0.83294
2	2	2	2	2	2	2	2																																																											
2	1	2	2	2	2	2	2																																																											
2	2	1	1	1	1	2	2																																																											
2	2	1			1	2	2																																																											
2	2	1	WR		1	2	2																																																											
2	2	1	1	1	1	2	2																																																											
2	2	2	2	2	2	1	2																																																											
2	2	2	2	2	2	2	2																																																											
Case 2	<table border="1"> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td></td><td></td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>WR</td><td></td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> </table> <p>1 : 2.54%</p>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1			1	1	1	1	1	1	WR		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.82791
1	1	1	1	1	1	1	1																																																											
1	1	1	1	1	1	1	1																																																											
1	1	1	1	1	1	1	1																																																											
1	1	1			1	1	1																																																											
1	1	1	WR		1	1	1																																																											
1	1	1	1	1	1	1	1																																																											
1	1	1	1	1	1	1	1																																																											
1	1	1	1	1	1	1	1																																																											

* : ここでは、代表的な輸送容器の単位格子を無限に配列した状態の評価

別添 3 - 3 表 解析用の使用済燃料集合体（BWR）の仕様

項目	単位	BWR用大型キャスク（タイプ2）	BWR用大型キャスク（タイプ2A）
燃料モデル	-	STEP-I 燃料 モデルバンドル （新型 8 × 8 ジル コニウムライナ燃 料ベース）	STEP-II 燃料 モデルバンドル （高燃焼度 8 × 8 燃料ベース）
燃料材質	-	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
燃料理論密度	%	95	97
燃料ペレット直径	mm	10.3	10.4
被覆管肉厚	mm	0.86	0.86
燃料有効長	mm	3708	3708
燃料棒配列	-	8 × 8	8 × 8
集合体あたりの燃料棒数	本	62	60
燃料棒ピッチ	mm	16.3	16.3
集合体の幅	mm	130.4	130.4
U-235 濃縮度	%	最高 3.9	最高 4.9
		最低 1.6	最低 2.1

別添 3 - 4 表 解析用モデルバンドルの無限増倍率

種類	濃縮度分布パターン	燃料棒本数 (本)		C/B 有 無	無限増倍率																																																																	
		高濃縮	低濃縮		k_{∞}	σ																																																																
STEP- I 燃料モ デルバ ンドル	<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td>1</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>2</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>WR</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>WR</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>2</td></tr> <tr><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td>1</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td></tr> </table> <p>1 : 高濃縮度燃料棒 3.9% 2 : 低濃縮度燃料棒 1.6%</p>	2	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2	1	1	1	2	2	2	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	WR	1	1	1	1	1	1	1	1	WR	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	2	2	2	1	1	2	2	2	34	28	有	1.30107	0.00056
2	2	2	1	1	2	2	2																																																															
2	2	2	1	1	1	2	2																																																															
2	1	1	1	1	1	2	2																																																															
1	1	1	WR	1	1	1	1																																																															
1	1	1	1	WR	1	1	1																																																															
2	2	1	1	1	1	1	2																																																															
2	2	1	1	1	2	2	2																																																															
2	2	2	1	1	2	2	2																																																															
STEP- II 燃料モ デルバ ンドル	<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>2</td><td>1</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td colspan="2">WR</td><td>1</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td colspan="2">WR</td><td>1</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td>2</td></tr> <tr><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td></tr> </table> <p>1 : 高濃縮度燃料棒 4.9% 2 : 低濃縮度燃料棒 2.1%</p>	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	WR		1	2	2	2	2	1	WR		1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	14	46	有	1.30489	0.00051
2	2	2	2	2	2	2	2																																																															
2	1	2	2	2	2	2	2																																																															
2	2	1	1	1	1	2	2																																																															
2	2	1	WR		1	2	2																																																															
2	2	1	WR		1	2	2																																																															
2	2	1	1	1	1	2	2																																																															
2	2	2	2	2	2	1	2																																																															
2	2	2	2	2	2	2	2																																																															

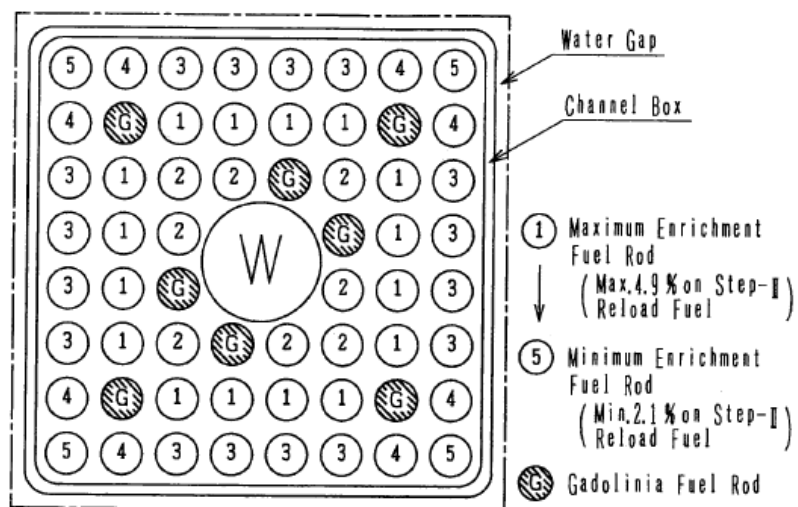
別添 3-5 表 炉心装荷冷温状態の無限増倍率に関する臨界解析一覧
(STEP-I 燃料モデルバンドルの例)

--	--	--	--	--	--

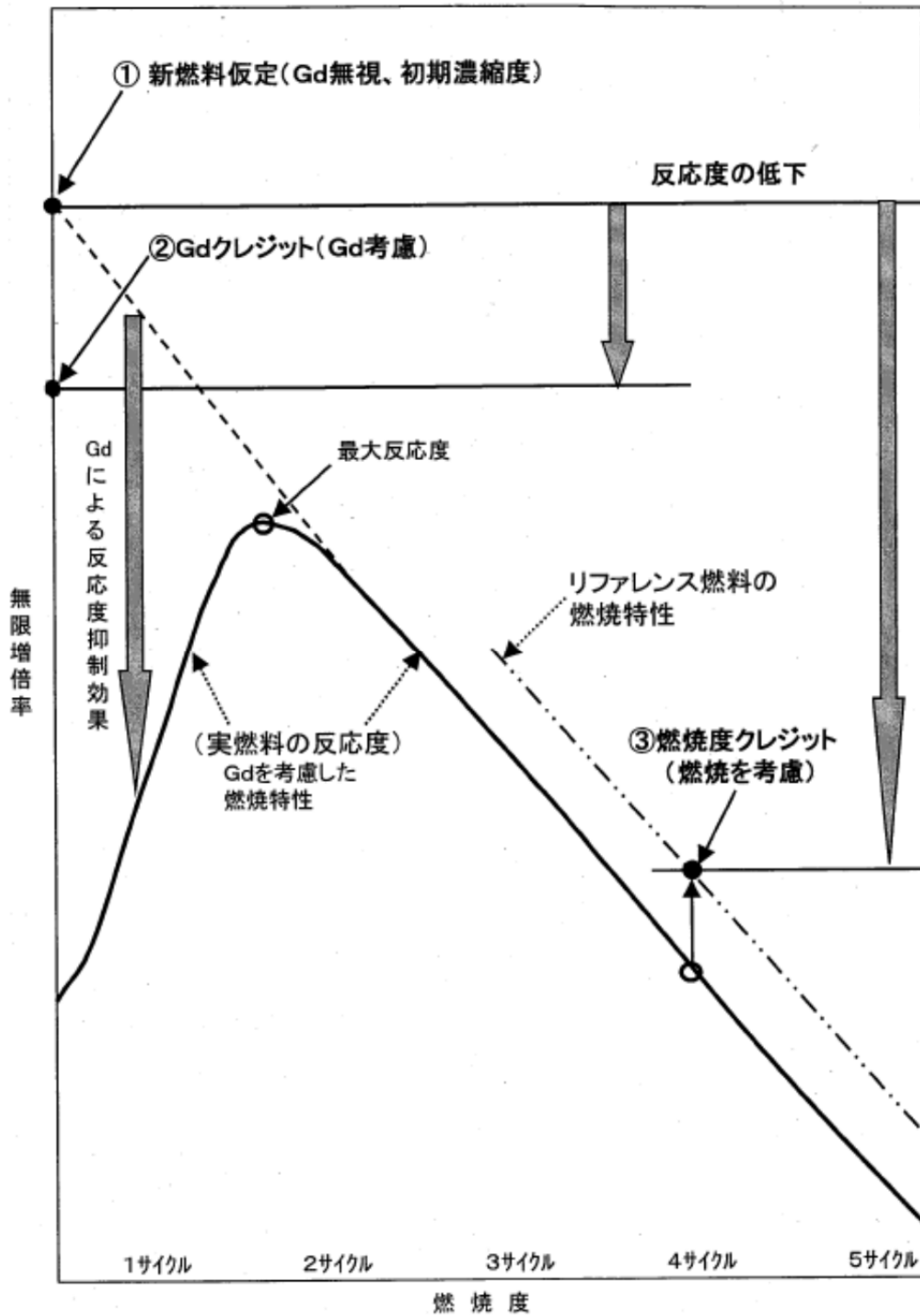
別添 3-6 表 キャスク体系の実効増倍率に関する臨界解析一覧
(BWR用大型キャスク (タイプ2) の例)

ケース	燃料集合体	体系	計算コード	計算結果	備考
1	モデルバンドル	単位バスケットセル*2 (無限配列)	KENO	keff1 =0.89528± 0.00066	0.95>keff1>keff3
2	モデルバンドル	単位バスケットセル*2 (無限配列)	炉心設計コード	keff2 []	0.95>keff2>keff3
3	実燃焼バンドル	単位バスケットセル*2 (無限配列)	炉心設計コード	keff3 []	[]

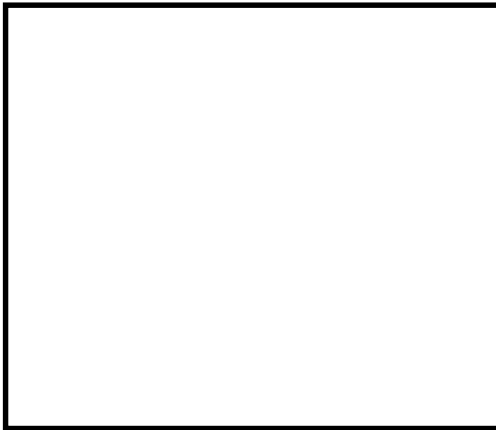
*2: BWR用大型キャスク (タイプ2) のバスケット, 内のり寸法: 製造公差最小。
キャスクの単位格子を無限に配列した状態の評価。



別添 3 - 1 図 BWR 燃料の濃縮度分布の例¹⁾
 (高燃焼度 8 × 8 燃料)

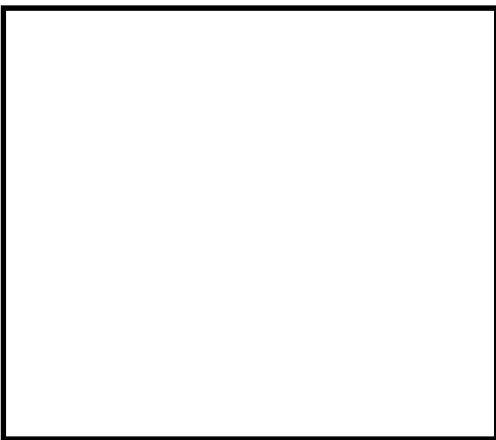


別添 3 - 2 図 BWR 燃料の反応度特性²⁾



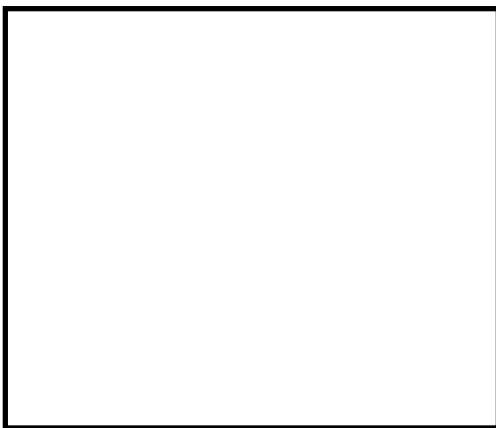
燃料棒本数

(a) 最外周以外の全てに高濃縮度燃料棒を配置



燃料棒本数

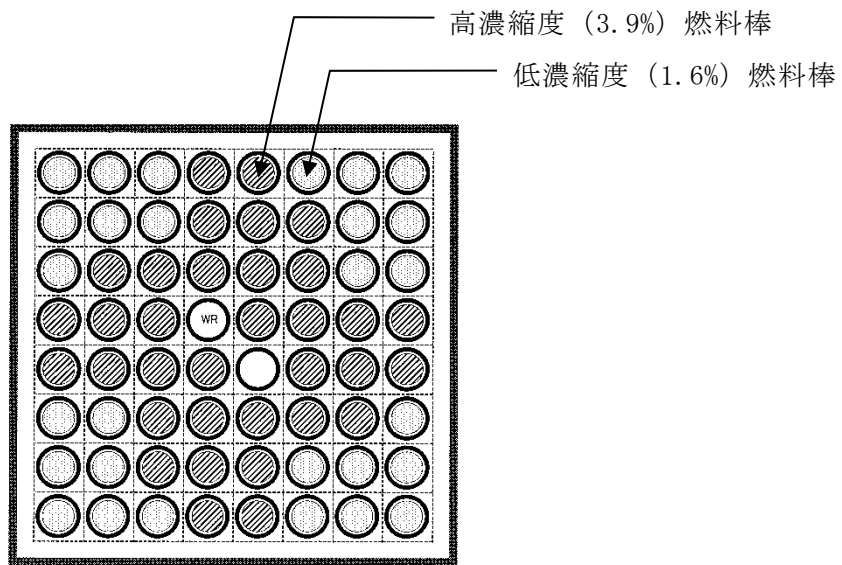
(b) 最外周の一部にも高濃縮度燃料棒を配置



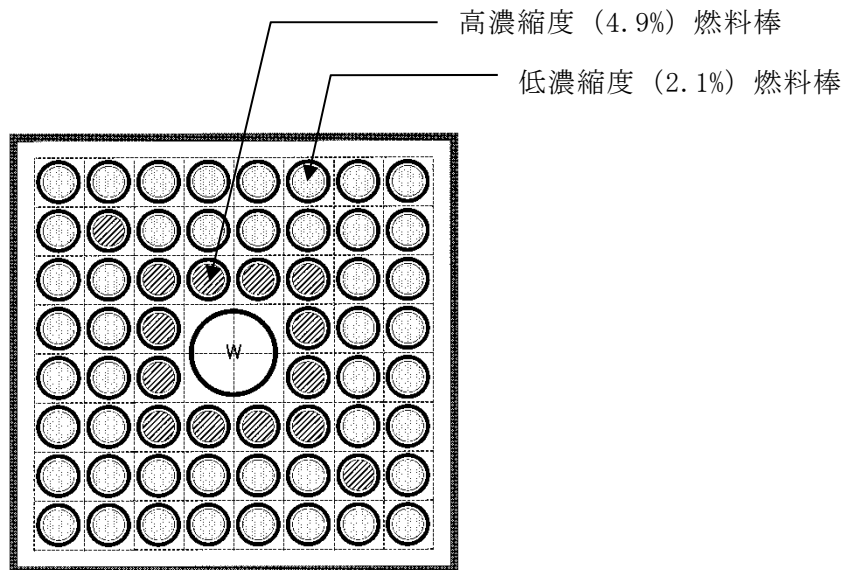
燃料棒本数

(c) 一部の最外周の低濃縮度燃料棒と最外周から2列目の高濃縮度燃料棒を置換

別添3-3図 モデルバンドル試算例



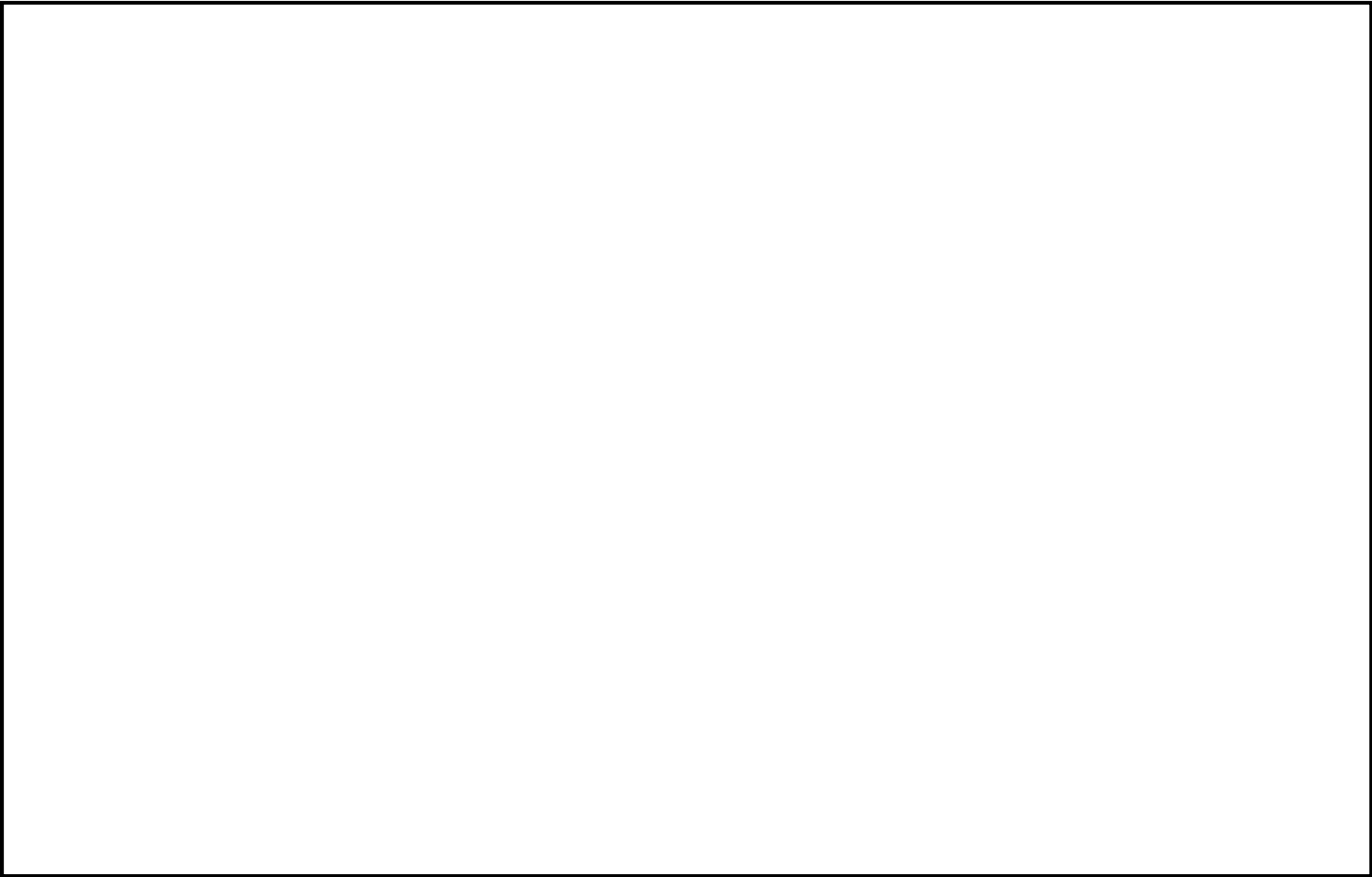
(a) STEP-I 燃料モデルバンドル(新型 8 × 8 ジルコニウムライナ燃料ベース)



(b) STEP-II 燃料モデルバンドル (高燃焼度 8 × 8 燃料ベース)

別添 3 - 4 図 解析用モデルバンドル

枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。



別添 3 - 5 図 モデルバンドル保守性の検証

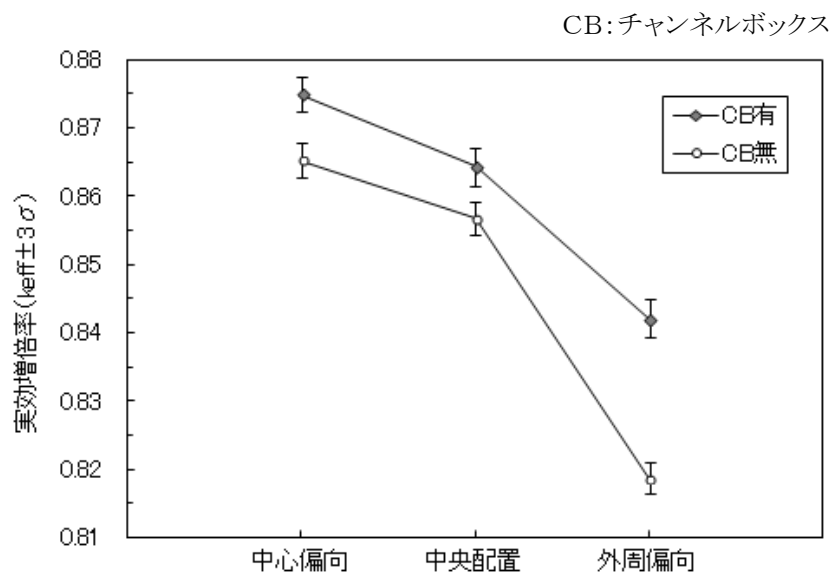
バスケット格子内の燃料配置等について

別添 4-1 図にバスケット格子内の燃料配置と中性子実効増倍率の関係を示す。別添 4-1 図に示すように、使用済燃料集合体のバスケット格子内の配置、チャンネルボックスの有と無をパラメータにして評価を行い、キャスク中心側に偏向した方が、中性子実効増倍率が大きくなることを確認している。これは、使用済燃料集合体をキャスク中心側に偏向させることで、燃料体系が稠密になり中性子密度が増加する影響と考えられる。また、チャンネルボックスの有、無によって、使用済燃料集合体とバスケットの距離が変化するため、チャンネルボックス有、無両方の評価を行い、中性子実効増倍率を確認している。

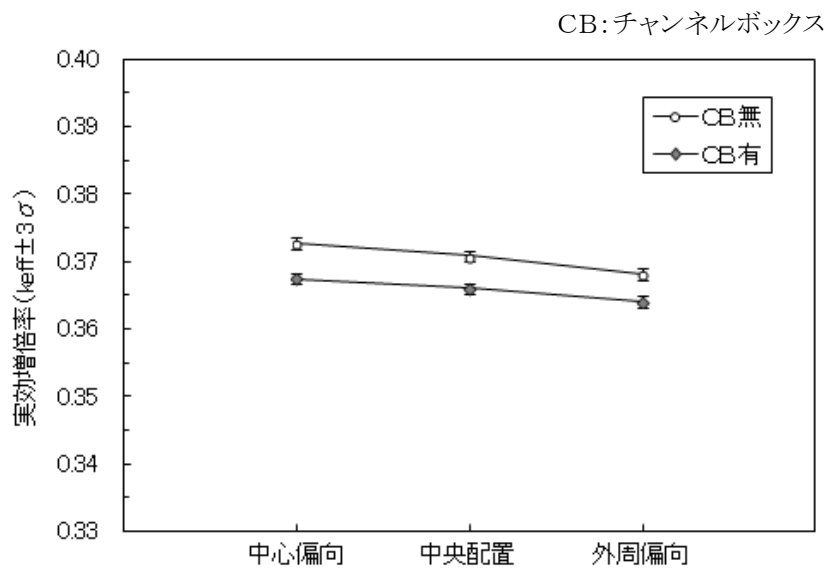
なお、別添 4-1 図は格子内のり最小の結果を記載している。これは、BWR 用大型キャスク（タイプ 2）では、格子内のり最小のモデルは燃料集合体の離隔距離が最小になり中性子実効増倍率が大きくなるためである。別添 4-1 図の乾燥状態と冠水状態のそれぞれで最大の中性子実効増倍率を与える条件において、格子内のりを最小から変化させた結果を別添 4-2 図に示す。別添 4-2 図に示すように、格子内のりが小さい方が中性子実効増倍率が大きいことを確認している。

以上のように、最適減速条件と中性子実効増倍率の関係は、バスケット材質、燃料集合体のピッチや配置、燃料集合体周囲の水（減速材）の因子の影響により複雑と考えられるため、バスケットセル内の燃料配置、バスケット格子内の公差等をパラメータとして中性子実効増倍率を確認している。

確認結果に基づき、厳しい評価結果を与える条件として、冠水状態は、格子内のり最小、燃料のセル内配置の中心偏向、チャンネルボックス有の条件、乾燥状態は、格子内のり最小、燃料のセル内配置の中心偏向、チャンネルボックス無の条件を採用している。

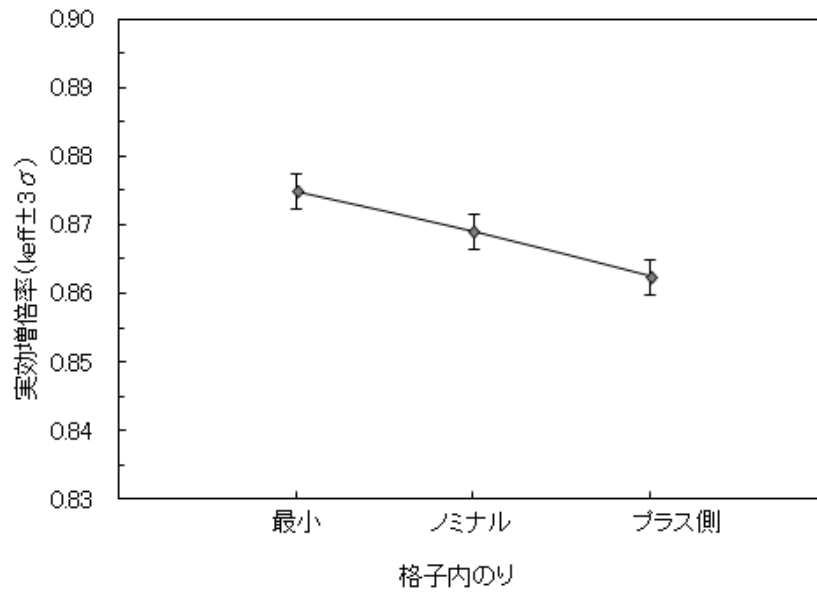


(a) 冠水状態

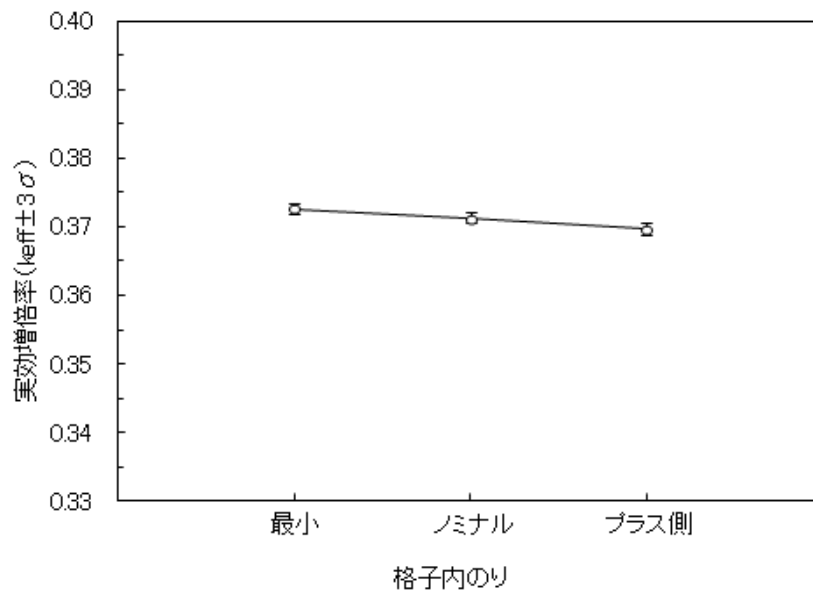


(b) 乾燥状態

別添4-1図 バスケット格子内の燃料配置と中性子実効増倍率の関係
BWR用大型キャスク (タイプ2)

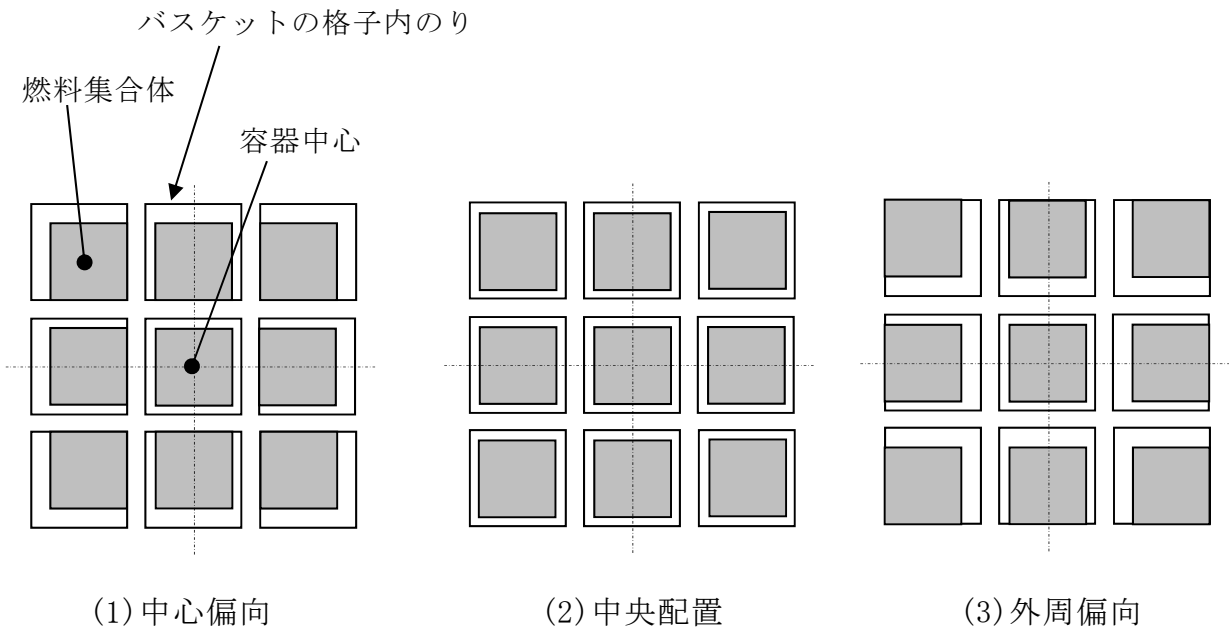


(a) 冠水状態，チャンネルボックス有

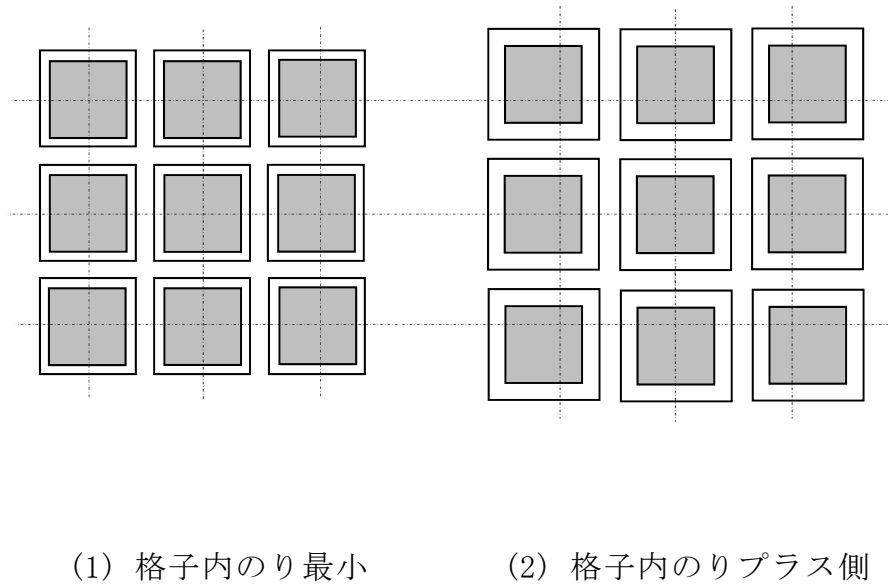


(b) 乾燥状態，チャンネルボックス無

別添 4 - 2 図 格子内のりと中性子実効増倍率の関係
(BWR用大型キャスク (タイプ 2))



別添 4 - 1 図補足 バスケット格子内の燃料配置の概念図

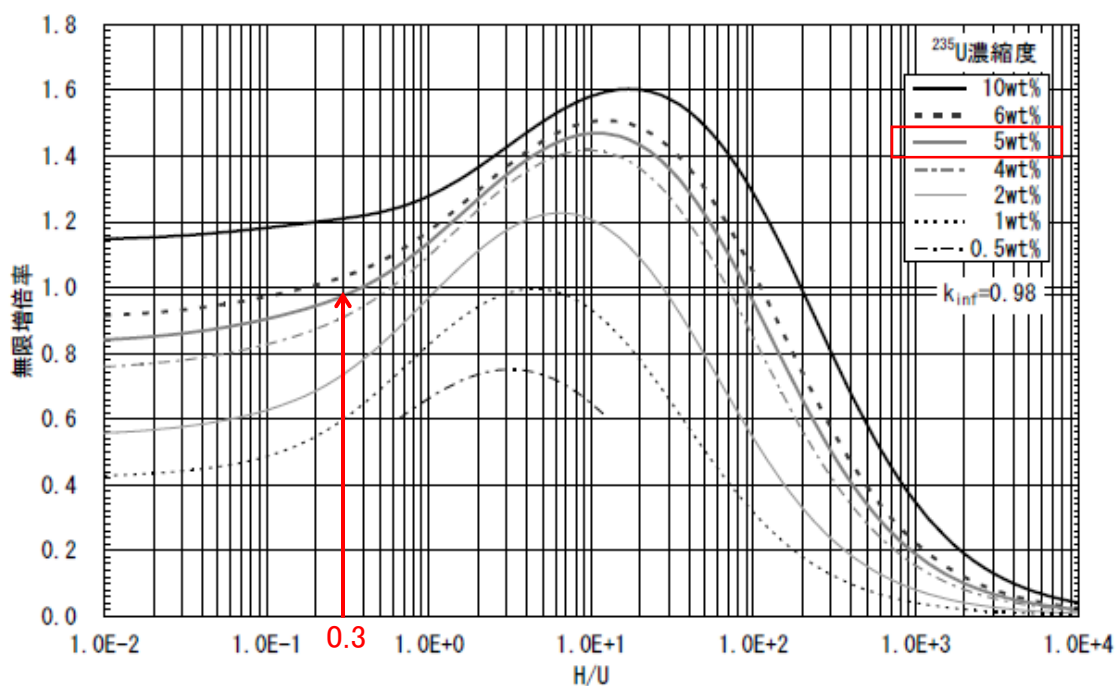


別添 4 - 2 図補足 バスケット格子内のりの概念図

バスケット及び使用済燃料集合体の変形の考慮要否について

金属キャスクに収納する使用済燃料は新燃料時でも ^{235}U 濃縮度は 5 wt% 以下であり，別添 5 - 1 図に示すように， ^{235}U 濃縮度 5 wt% の場合には水素 (H) とウラン (U) の原子個数密度比 $\text{H}/\text{U}=0.3$ 以下では臨界になることはない。

使用済燃料貯蔵施設において，金属キャスクは，その内部が乾燥された状態であり，かつ，水が侵入することはないことから，バスケット及び使用済燃料集合体の変形により臨界となることはなく，これらの変形を考慮する必要はない。



別添 5 - 1 図 均質 $\text{UO}_2\text{-H}_2\text{O}$ の無限増倍率
(臨界安全ハンドブックデータ集 第 2 版に追記)

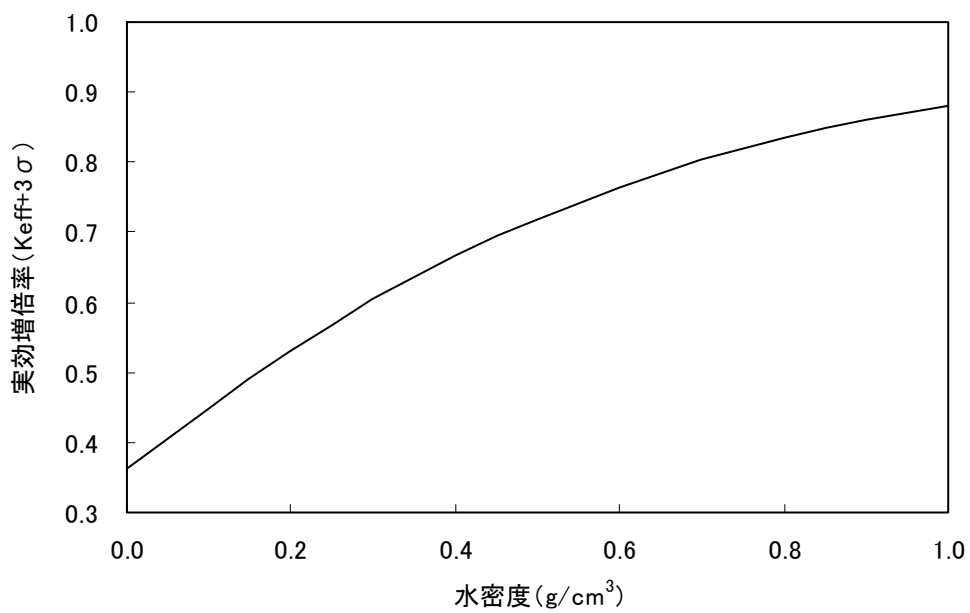
冠水状態の水密度について

別添 6 - 1 図に水密度と中性子実効増倍率の関係を示す。別添 6 - 1 図に示すように、乾燥状態 ($0.0\text{g}/\text{cm}^3$) から冠水状態 ($1.0\text{g}/\text{cm}^3$) まで、中性子実効増倍率は単調増加であり、冠水状態が臨界評価上最も厳しい条件である。

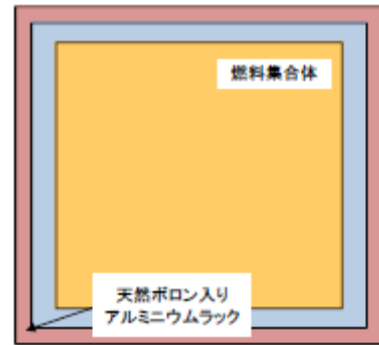
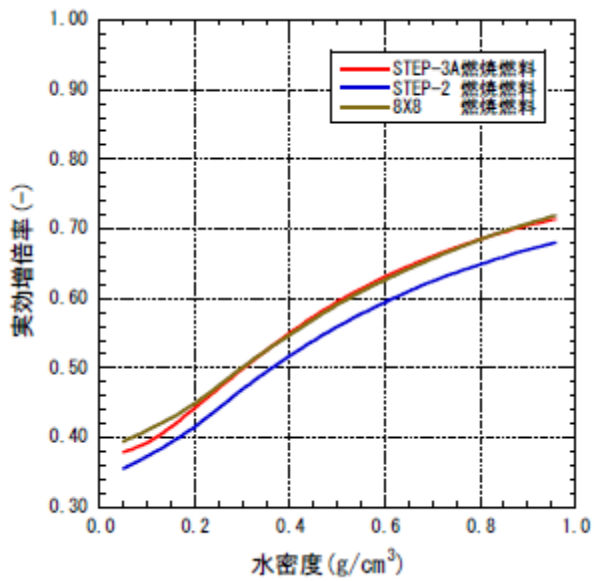
原子力発電所における燃料貯蔵設備においては、中性子吸収材を使用していない新燃料貯蔵庫は、水密度 $1.0\text{g}/\text{cm}^3$ 未満が最適減速条件に、また、中性子吸収材を使用している使用済燃料貯蔵ラックは、水密度最大の $1.0\text{g}/\text{cm}^3$ が最適減速条件になっている例がある。

バスケットに中性子吸収材を使用している金属キャスクは、使用済燃料貯蔵ラックと同じ傾向にあり、水密度 $1.0\text{g}/\text{cm}^3$ が臨界評価上最も厳しい条件となるのは、金属キャスク特有の傾向ではない。

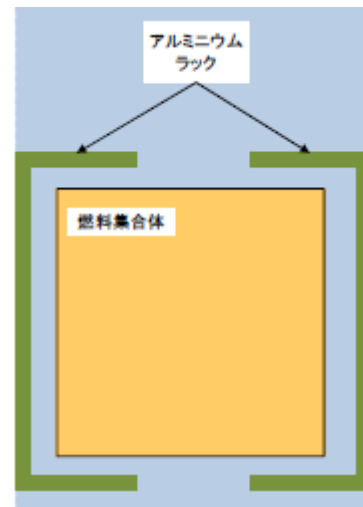
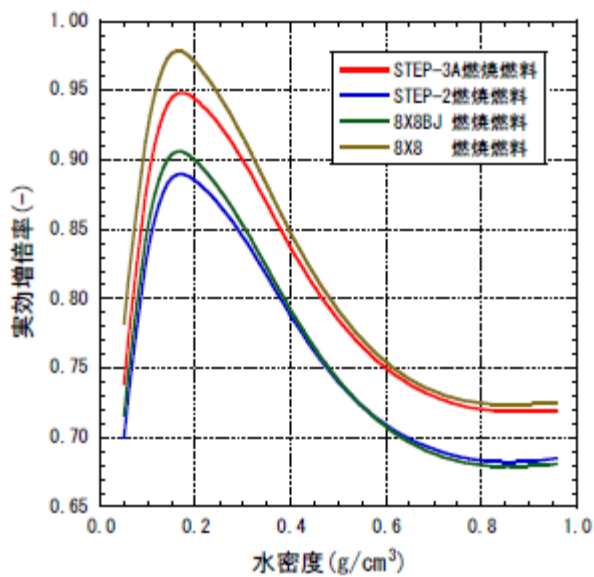
原子力発電所における燃料貯蔵設備の具体的な例として、第 4 回東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会(平成 25 年 10 月 7 日)において、3 号機燃料貯蔵ラックに対する中性子実効増倍率の検討結果が示されている。別添 6 - 2 図は、BWR 用大型キャスク (タイプ 2) のバスケットと同じように、中性子吸収材である天然ボロンを使用している板材を格子上に組んだもので、中性子吸収材の影響で減速不足状態のために、水密度最大の $1.0\text{g}/\text{cm}^3$ が最適減速条件になっている。一方で、別添 6 - 3 図は、中性子吸収材を使用していないタイプであり、水密度 $1.0\text{g}/\text{cm}^3$ 未満が最適減速条件となっている。



別添 6 - 1 図 容器内の水密度と中性子実効増倍率の関係
(BWR大型キャスク (タイプ 2))



別添 6 - 2 図 燃料貯蔵ラックの水密度と中性子実効増倍率の関係*
(天然ボロン入りアルミラックの例)



別添 6 - 3 図 燃料貯蔵ラックの水密度と中性子実効増倍率の関係*
(アルミニウムラックの例)

* : 第 4 回東京電力福島第一原子力発電所における事故の分析に係る検討会(平成 25 年 10 月 7 日) 資料 3 3 号機使用済燃料貯蔵プール内の臨界の可能性について

第4条 遮蔽等（金属キャスク）

<目次>

1. 設計方針
2. 遮蔽設計

（別添）

- 別添1 金属キャスクの遮蔽解析について
- 別添2 遮蔽解析における二次元輸送計算コードDOT3.5の妥当性について
- 別添3 BWR用大型キャスク（タイプ2A）の遮蔽評価条件等の妥当性について
- 別添4 解析に使用した基本的なデータについて
- 別添5 二次元輸送計算コードで使用する断面積ライブラリについて

1. 設計方針

使用済燃料貯蔵施設は、平常時において、直接線及びスカイシャイン線により公衆の受ける線量が「核原料物質又は核燃料物質の製錬の事業に関する規則等の規定に基づく線量限度等を定める告示」に定められている線量限度を超えないことはもとより、合理的に達成できる限り低くなるよう、金属キャスク及び使用済燃料貯蔵建屋により、十分な放射線遮蔽を講ずる設計とする。

契約先である原子炉設置者が確認した使用済燃料集合体の収納等の状態が貯蔵上必要な条件等を満足していることを、記録により確認する。金属キャスクは、設計貯蔵期間中における中性子遮蔽材の熱による遮蔽機能の低下を考慮した設計とする。

2. 遮蔽設計

(1) 遮蔽構造

金属キャスクの主要な構成材を第1表に示す。

金属キャスクは、遮蔽のために以下の設計上の配慮を行う。

- a. 金属キャスクは、ガンマ線遮蔽と中性子遮蔽の機能を有する。
- b. ガンマ線遮蔽材は、金属キャスク構造体(胴、外筒、蓋及び底板)を構成する炭素鋼等で構成する。
- c. 中性子遮蔽材は、レジンで構成する。

(2) 遮蔽解析(別添1参照)

金属キャスクの遮蔽解析においては、以下に示す線源条件に基づき、金属キャスクの表面及び表面から1mの位置における線量当量率を求め、それぞれの基準値である2mSv/h以下、100 μ Sv/h以下となることを確認する。

金属キャスクの遮蔽解析評価における保守性を第2表、不確かさの考慮を第3表、遮蔽解析フロー図を第1図、金属キャスクのモデル化の概要を第2図に示す。

a. 線源条件

使用済燃料集合体の線源強度は、燃料型式、燃焼度、濃縮度、冷却期間等を条件に燃焼計算コードORIGEN2を用いて求める。

使用済燃料集合体の構造材については、照射期間、中性子束、冷却期間等を条件に放射化計算式を用いて求める。

使用済燃料集合体の線源強度計算手法を第4表に示す。

BWR用大型キャスク(タイプ2A)の遮蔽解析評価においては、収納する使用済燃料集合体の燃焼度が高いほど中性子照射や核分裂で放射性核種が生成されるため線源強度が高くなり、また、燃焼度が同じでも、初期濃縮度が低いほど同じ出力が得られるまでにより多くの中性子が照射され中性子源となる超ウラン元素の生成が増加するため、線源強度が最も高くなるのは新型8 \times 8ジルコニウムライナ燃料となる。このため、遮蔽解析においては、BWR用大型キャスク(タイプ2)とBWR用大型キャスク(タイプ2A)の最大線量当量率を与える線源条

件は同一となる。

BWR用大型キャスク(タイプ2 A)の線源強度を第5表に、キャスク毎の収納配置及び各収納配置における使用済燃料集合体の仕様を第6表に示す。

b. 金属キャスクの線量当量率評価方法

金属キャスクの線量当量率は、金属キャスクの実形状を軸方向断面形状に基づき、蓋部や底部の遮蔽体構造や燃料集合体の軸方向領域に応じ、「a. 線源条件」に示した線源強度に基づき、二次元輸送計算コードDOT3.5(DLC-23/CASKライブラリ)を使用して求める。算出にあたっては、金属キャスクの構成材料による減衰等を考慮する。

金属キャスク表面から線量当量率の評価位置である1 mの位置までの評価にはレイエフェクトを平準化するためDOT3.5の補助コードであるSPACETRAN-IIIを用いる。(別添2参照)

燃料型式別の金属キャスクの線量当量率を第7表(1)、第7表(2)、第3図(1)、第3図(2)に示す。

BWR用大型キャスク(タイプ2 A)の遮蔽解析評価においては、いずれの部位においても高燃焼度8×8燃料全数収納時よりも新型8×8ジルコニウムライナ燃料全数収納時の線量当量率が高いことから、BWR用大型キャスク(タイプ2 A)の遮蔽評価としては、新型8×8ジルコニウムライナ燃料を全数収納した場合が最も厳しくなる。このため、遮蔽解析においては、BWR用大型キャスク(タイプ2)とBWR用大型キャスク(タイプ2 A)の線量当量率評価条件は同一となる。(別添3参照)

(3) 遮蔽解析結果

金属キャスクの遮蔽解析結果を第8表に示す。

遮蔽解析結果から、金属キャスクの表面及び表面から1 mの位置における線量当量率は、それぞれの基準値である2 mSv/h 以下、100 μ Sv/h 以下を満足している。

なお、金属キャスクの遮蔽解析に使用する断面積ライブラリとして

は、実績のある DLC-23/CASK を用いて評価しているが、別添 5 に断面積ライブラリの違いによる評価を示す。

第 1 表 金属キャスクの主な構成材*

	BWR用大型キャスク(タイプ2) BWR用大型キャスク(タイプ2A)
胴 , 底板	炭素鋼
中性子遮蔽材	レジン
伝熱フィン	炭素鋼/銅
外筒	炭素鋼
一次蓋	炭素鋼
二次蓋	炭素鋼
バスケット	ボロン添加ステンレス鋼 アルミニウム合金

※：解析に使用した基本的なデータ等については、別添 4 参照。

第2表 遮蔽解析評価の保守性

項目	内容
燃料集合体の軸方向位置	<ul style="list-style-type: none"> ・貯蔵時は燃料が底に接し、蓋－燃料間は接していないが、頭部評価モデルにおいて燃料が蓋に接した位置でモデル化することで頭部の評価を保守的に実施。
モデル化	<ul style="list-style-type: none"> ・チャンネルボックス：放射化線源強度のみ考慮し、構造材としての遮蔽効果を見捨てる保守的な組合せを仮定。 ・バスケット外周領域：燃料領域より外側のバスケットは、バスケット最外周の最小板厚の円環としてモデル化。燃料領域より外側のバスケットの物量よりも円環としてモデル化したバスケットの物量は少ない設定とした。 ・側部中性子遮蔽体領域：伝熱フィンのような小さいものが比較的多く配置されている中性子遮蔽体領域では、レジンと伝熱フィンを均質化したモデルとしている。伝熱フィンが占有する面積を考慮して、中性子遮蔽体としてのレジンの均質化密度を安全側に低下させている。また、伝熱フィンの密度をゼロとし、ガンマ線遮蔽体としての寄与を見捨ている。 ・トラニオン部：トラニオン有モデルとトラニオン無モデルで線種ごとに線量当量率を求め、トラニオン有モデルが大きい場合は、本体モデルの計算結果にその差分を加算するが、トラニオン有モデルが小さい場合は、その低下を見捨ている。
線源強度	<ul style="list-style-type: none"> ・中央部に最高燃焼度^{注1)}の燃料、外周部に平均燃焼度^{注2)}の燃料を配置している。 ・軸方向燃焼度分布を包絡する燃焼度分布を仮定しており、実際を上回る線源強度で評価。 ・収納燃料全数が線源強度は貯蔵開始時(収納物最短冷却期間)と仮定。
劣化評価	<ul style="list-style-type: none"> ・レジン系中性子遮蔽材の経年劣化評価試験結果等の知見を踏まえて、加熱に伴う熱分解によるレジンの重量減損分を遮蔽体として考慮しないこととしており、中性子遮蔽材について減損分を含まない原子個数密度を線量当量率計算に用いている。

注1)：金属キャスクに収納可能な使用済燃料集合体の燃焼度の上限。

注2)：金属キャスクに収納する使用済燃料集合体の燃焼度の平均値の上限。

第3表 遮蔽解析評価の不確かさの考慮

項目	内容
寸法公差	<ul style="list-style-type: none"> 解析モデルの各種寸法は公称値でモデル化するが、各遮蔽体の最小厚さを密度係数(最小寸法/公称寸法)としてばらつきの下限値を考慮。
材料密度	<ul style="list-style-type: none"> ばらつきを考慮して、最小密度を使用して原子個数密度を評価。

第4表 BWR使用済燃料集合体の線源強度計算手法

評価内容	評価方法	評価条件
		BWR用大型キャスク(タイプ2) BWR用大型キャスク(タイプ2A)
燃料有効部のガンマ線及び中性子	燃 焼 計 算 コ ー ド ORIGIN 2 を用い、ガ ンマ線及び中性子線 源強度を計算。使用 済燃料集合体は、中 央部に最高燃焼度の 燃料、外周部に平均 燃焼度の燃料を配置 し、軸方向に階段状 の燃焼度分布を持つ ため、これを考慮。 また、中性子につい ては実効増倍率を考 慮。	燃料型式：新型8×8ジルコニウムライ ナ燃料 ^{注)} 最高燃焼度：40,000[MWd/MTU] 平均燃焼度：34,000[MWd/MTU] 比出力：25.3[MW/MTU] 濃縮度：2.88[%](最小値) 冷却期間：18[年] ウラン重量：177[kg] ORIGIN2ライブラリ：BWR-U
燃料構造材 及びチャン ネルボック ス構造材放 射化による ガンマ線	構造材の ⁵⁹ Co含有量 に従い、放射化計算 式に基づき ⁵⁹ Coから ⁶⁰ Coへの放射化量を 計算。	放射化計算式 $A=N_0 \cdot \sigma \cdot \phi \cdot \{1-\exp(-\lambda \cdot T_1)\} \cdot \exp(-\lambda \cdot T_2)$ A：放射化核種(⁶⁰ Co)の放射能[Bq] N ₀ ：ターゲット核種(⁵⁹ Co)の個数[atoms] Σ：2,200m/sの中性子による ⁵⁹ Co反 応断面積[cm ²] Φ：炉内照射熱中性子束[n/(cm ² ・s)] Λ： ⁶⁰ Coの崩壊定数 T ₁ ：照射期間[日] T ₂ ：冷却期間[日]

注)：BWR用大型キャスク(タイプ2A)の遮蔽解析評価において、線源強度が最も高くなるのは新型8×8ジルコニウムライナ燃料となるため、遮蔽解析においては、BWR用大型キャスク(タイプ2)とBWR用大型キャスク(タイプ2A)の線量当量率評価条件は同一となる。

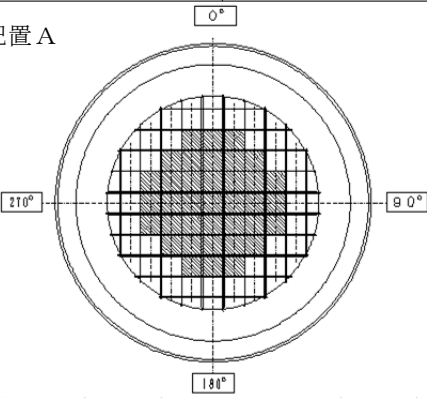
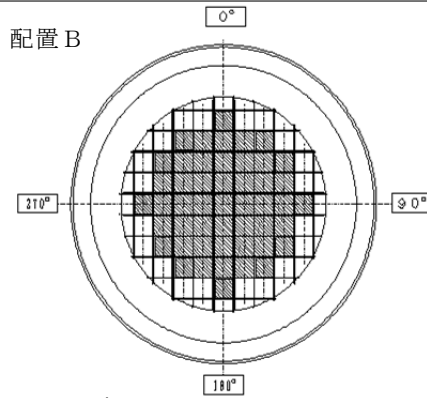
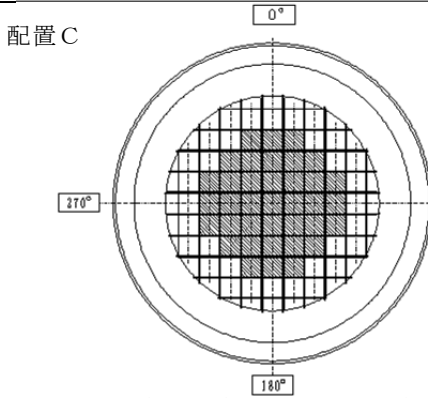
第5表 BWR用大型キャスク(タイプ2A)の線源強度

(キャスク1基あたり)

使用済燃料の種類		新型8×8ジルコニウムライナ燃料	高燃焼度8×8燃料	新型8×8ジルコニウムライナ燃料と新型8×8燃料	新型8×8燃料
線源強度 <small>注)</small>	燃料有効部のガンマ線の線源強度 (photons/s)	8.9×10^{16}	8.9×10^{16}	7.1×10^{16}	5.8×10^{16}
	構造材放射化ガンマ線の線源強度 (^{60}Co : Bq)	1.3×10^{14}	1.3×10^{14}	5.5×10^{13}	4.6×10^{13}
	全中性子源強度 (n/s)	1.4×10^{10}	1.0×10^{10}	7.5×10^9	2.9×10^9
収納配置 (第6表)		配置A	配置A	配置B	配置C

注) : 収納配置の範囲内で、最大の燃焼度の燃料を収納した場合の値。

第6表 使用済燃料集合体の収納条件

キャスクタイプ	タイプ2	タイプ2A		
収納する使用済燃料	① 新型8×8ジルコニウムライナ燃料	① 新型8×8ジルコニウムライナ燃料, ② 高燃焼度8×8燃料, ③ 新型8×8燃料		
収納配置	①のみ収納	①のみ収納, ②のみ収納, ①及び②を収納	①及び③を収納	③のみ収納
	配置A  : 平均燃焼度を超える使用済燃料集合体の収納範囲	配置B  : 新型8×8燃料を収納しない範囲	配置C  : 平均燃焼度を超える使用済燃料集合体の収納範囲	
収納物平均燃焼度	34,000MWd/t	34,000MWd/t	34,000MWd/t	26,000MWd/t
収納物最高燃焼度	40,000MWd/t	34,000MWd/t	34,000MWd/t	28,500MWd/t
冷却期間	18年以上	24年以上	24年以上	24年以上
最大崩壊熱量	12.1kW / 基	10.9kW / 基	10.9kW / 基	8.0kW / 基
収納配置と燃料仕様選定の考え方	燃焼度及び冷却期間を制限し、新型8×8ジルコニウムライナ燃料の最大崩壊熱量と線源強度を超えないような高燃焼度8×8燃料を収納する。 新型8×8ジルコニウムライナ燃料及び高燃焼度8×8燃料の被覆管制限温度は同一であることから、従来の新型8×8ジルコニウムライナ燃料の評価結果に包絡され、中央部に最高燃焼度燃料、外周部に平均燃焼度燃料を配置する。	燃焼度、冷却期間を制限し、収納配置を管理し、配置Cよりも高い燃焼度の新型8×8燃料の燃料被覆管温度の制限値を満足するように、新型8×8ジルコニウムライナ燃料と新型8×8燃料を収納する。 新型8×8ジルコニウムライナ燃料の最高燃焼度を34,000MWd/t以下に制限するとともに、中央部には新型8×8燃料を収納しない配置としている。	燃焼度及び冷却期間を制限し、新型8×8燃料をすべて収納しても、燃料被覆管温度の制限値を満足するような新型8×8燃料を収納する。燃料被覆管の温度を安全側に評価するように、平均燃焼度を超える燃料を中央部に配置している。燃焼度及び冷却期間の条件から配置Aの線量当量率を超えることはない。	

第7表(1) 新型8×8ジルコニウムライナ燃料収納時の線量当量率
(BWR用大型キャスク(タイプ2)/BWR用大型キャスク(タイプ2A))

(単位: μ Sv/h)

評 価 点			頭 部			側部中央		底 部			
			軸 方 向	径 方 向	径 方 向 (トラニオン部)			径 方 向	径 方 向 (トラニオン部)	軸 方 向	
			①	③a	③b	⑤		⑦a	⑦b	⑨	
表 面	ガンマ線	燃料有効部	7.3	0.5	0.5	11.5	95.8	1.3	24.2	9.0	3.0
		構造材放射化	692.8	132.5	110.4	153.9	0.1	12.8	63.2	139.9	19.1
		二次ガンマ線	0.5	2.0	2.1	4.1	26.9	4.6	7.8	2.5	2.3
	中 性 子	118.9	253.9	505.2	7.3	72.7	706.9	1012.5	51.5	265.9	
	合 計	819.5	388.9	618.2	176.8	195.5	725.6	1107.7	202.9	290.3	
評 価 点			②	④a	④b	⑥		⑧a	⑧b	⑩	
表 面 か ら 1 m の 位 置	ガンマ線	燃料有効部	0.5	12.9	12.9	40.5		21.2	21.2	3.9	
		構造材放射化	45.6	24.0	24.0	0.7		8.1	8.1	59.3	
		二次ガンマ線	0.2	3.1	3.1	10.5		5.3	5.3	0.9	
	中 性 子	28.7	17.3	20.9	26.2		13.4	24.5	16.2		
	合 計	75.0	57.3	60.9	77.9		48.0	59.1	80.3		

第7表(2) 高燃焼度8×8燃料収納時の線量当量率

(BWR用大型キャスク(タイプ2A))

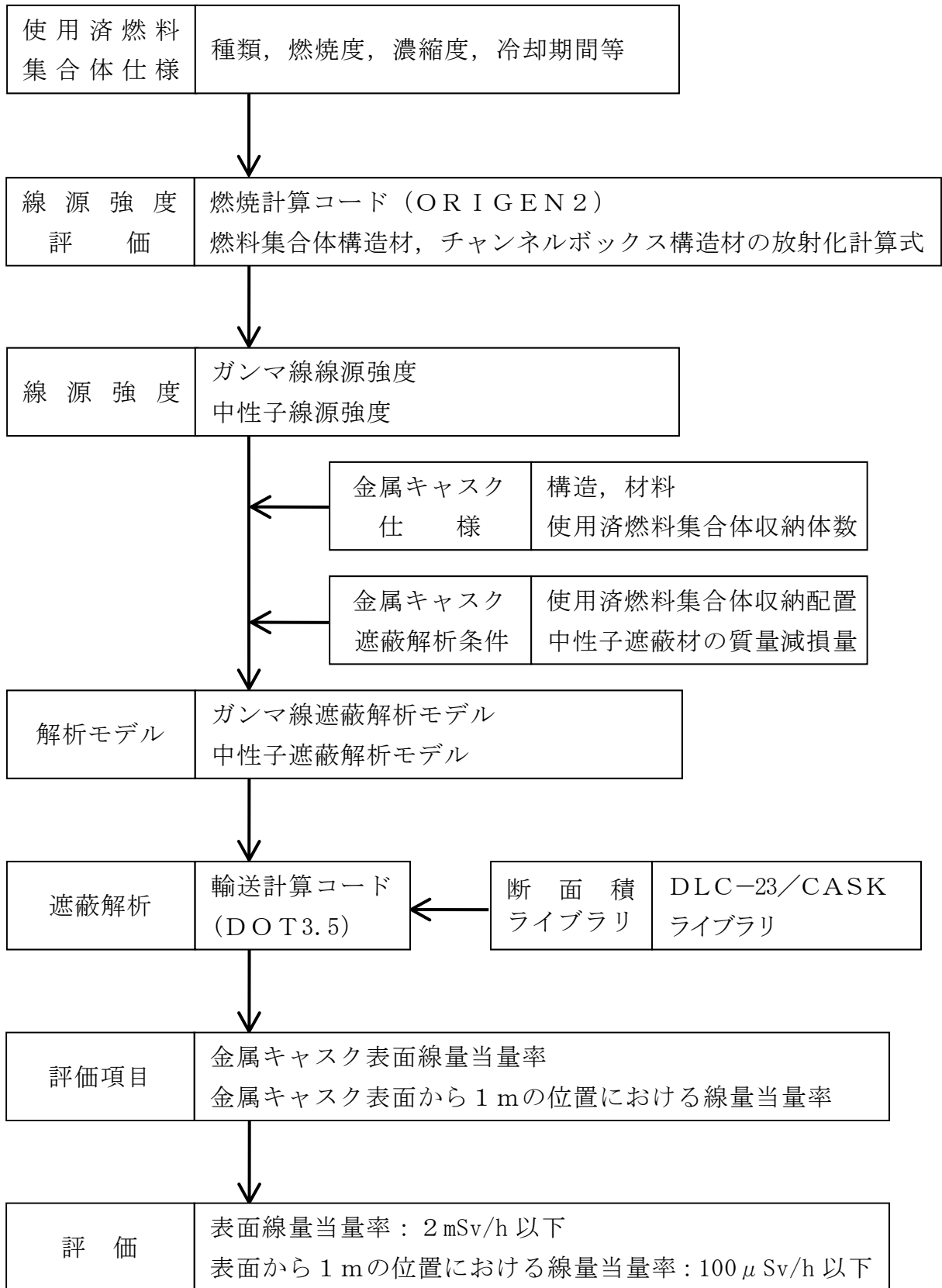
(単位: μ Sv/h)

評価点			頭部			側部中央		底部			
			軸方向	径方向	径方向 (トランニオン部)			径方向	径方向 (トランニオン部)	軸方向	
			①	③a	③b	⑤		⑦a	⑦b	⑨	
表面	ガンマ線	燃料有効部	7.2	0.5	0.5	10.8	93.2	0.9	17.9	6.7	2.2
		構造材放射化	678.6	131.0	108.9	152.5	0.1	12.6	62.0	137.2	18.8
		二次ガンマ線	0.4	1.6	1.7	3.3	19.7	2.5	4.3	1.3	1.2
	中性子	95.3	204.2	406.9	5.9	53.6	365.6	532.5	24.3	137.1	
	合計	781.5	337.3	518.0	172.5	166.6	381.6	616.7	169.5	159.3	
評価点			②	④a	④b	⑥		⑧a	⑧b	⑩	
表面から1mの位置	ガンマ線	燃料有効部	0.5	12.7	12.7	38.2		18.7	18.7	2.8	
		構造材放射化	44.6	23.7	23.7	2.0		8.0	8.0	58.5	
		二次ガンマ線	0.1	2.5	2.5	7.2		3.5	3.5	0.5	
	中性子	23.0	13.7	16.6	18.7		8.5	14.4	7.8		
	合計	68.2	52.6	55.5	66.1		38.7	44.6	69.6		

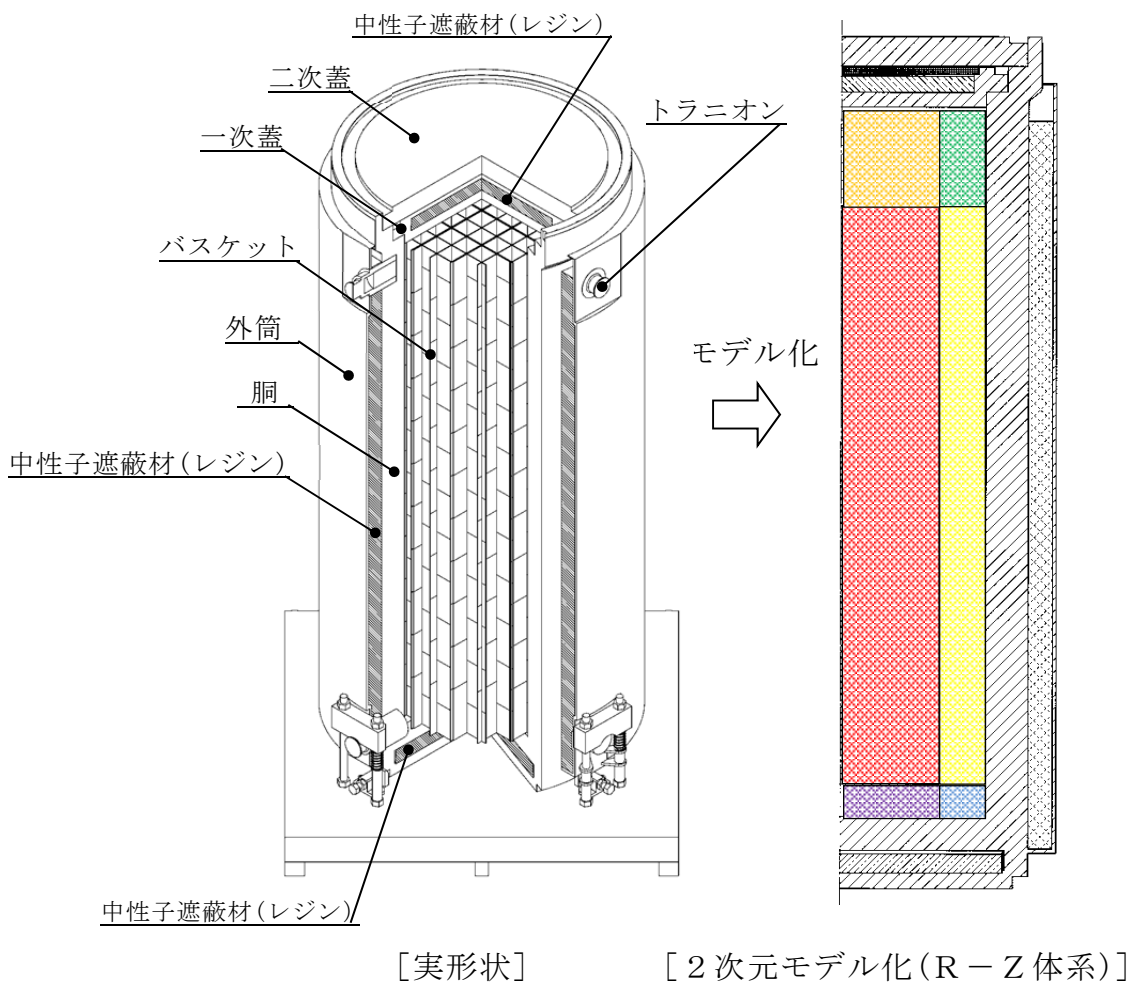
第8表 金属キャスクの遮蔽解析結果

		BWR用大型キャスク(タイプ2) BWR用大型キャスク(タイプ2A) ^{注)}
表面 ($\mu\text{Sv/h}$)	ガンマ線	95.2
	中性子	1012.5
	合計	1107.7
	基準値	2000
表面から1mの 位置 ($\mu\text{Sv/h}$)	ガンマ線	64.1
	中性子	16.2
	合計	80.3
	基準値	100

注) : BWR用大型キャスク(タイプ2A)は、構造及び遮蔽評価条件がBWR用大型キャスク(タイプ2)と同一。



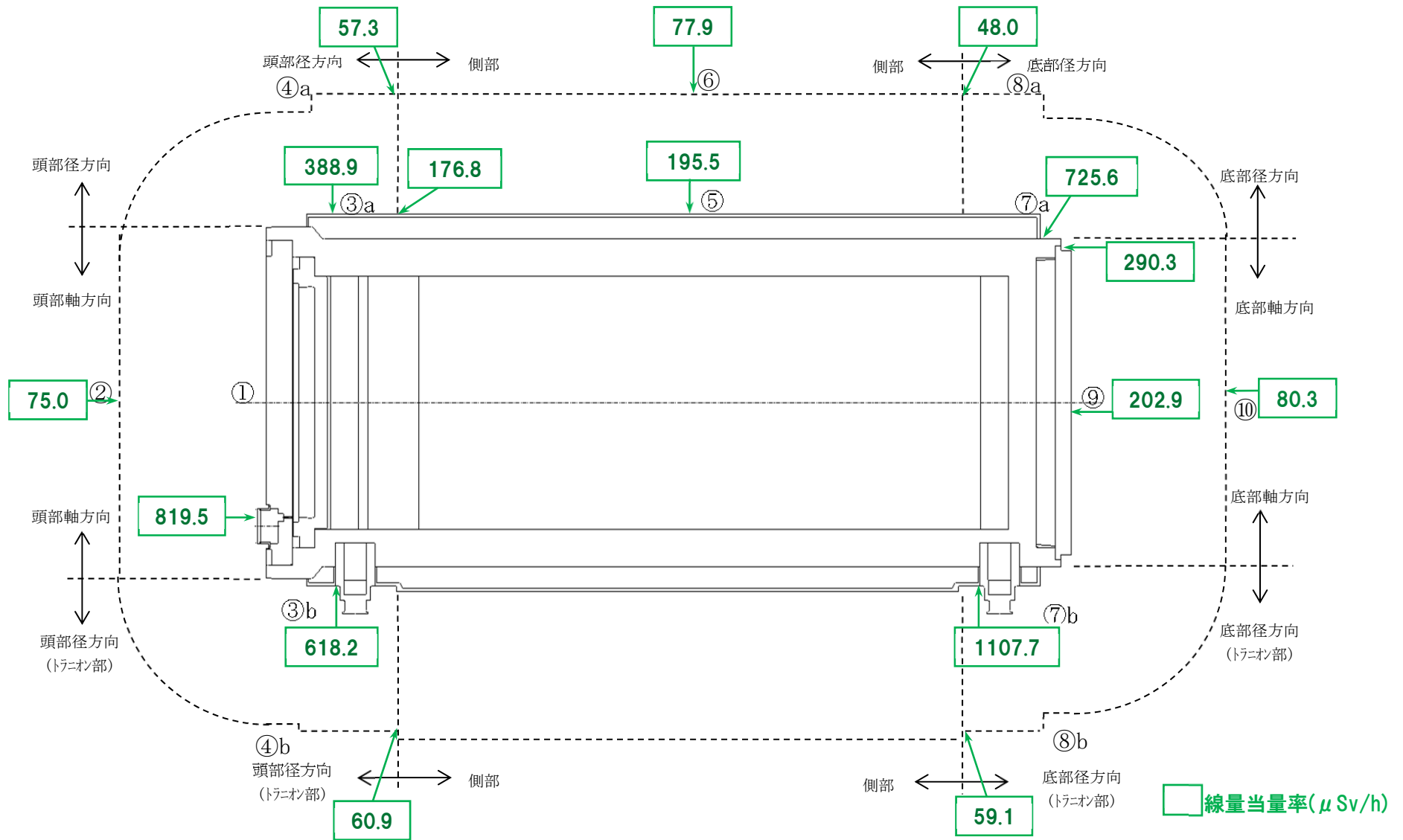
第 1 図 金属キャスクの遮蔽解析フロー図



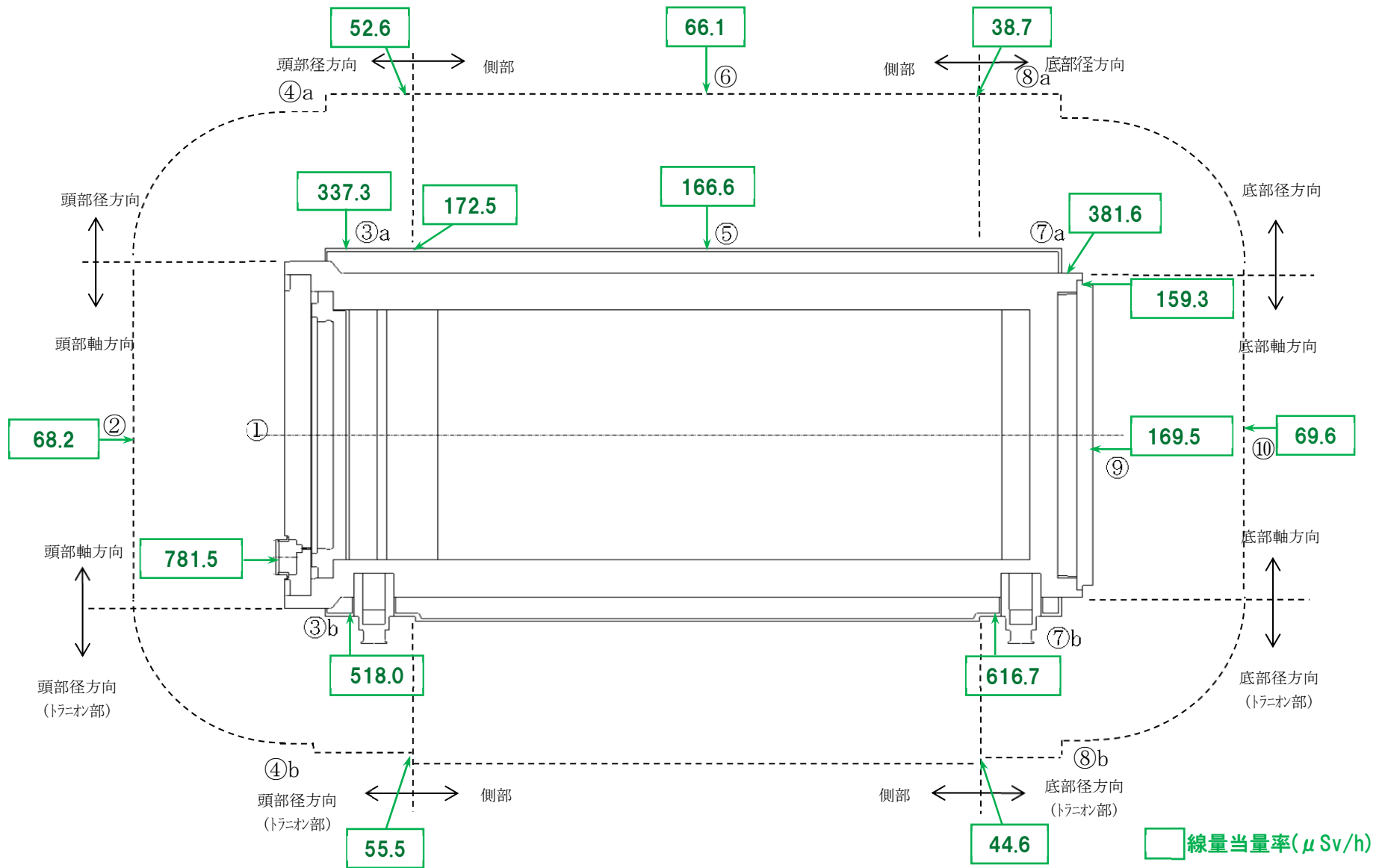
	最高燃焼度燃料上部領域		平均燃焼度燃料上部領域
	最高燃焼度燃料中央部領域		平均燃焼度燃料中央部領域
	最高燃焼度燃料下部領域		平均燃焼度燃料下部領域
	胴, 底板, 一次蓋, 二次蓋, 外筒(炭素鋼)		
	蓋部中性子しゃへい材カバー(ステンレス鋼)		
	中性子遮蔽材領域(レジン+炭素鋼+銅)		
	中性子遮蔽材領域(レジン+炭素鋼)		
	中性子遮蔽材領域(レジン)		ボイド

第2図 金属キャスクのモデル化の概要

(BWR用大型キャスク(タイプ2)/BWR用大型キャスク(タイプ2A))



第3図(1) 新型8×8ジルコニウムライナ燃料収納時の線量当量率評価位置
(BWR用大型キャスク(タイプ2) / BWR用大型キャスク(タイプ2A))



第3図(2) 高燃焼度8×8燃料収納時の線量当量率評価位置(BWR用大型キャスク(タイプ2A))

金属キャスクの遮蔽解析について

1. 使用済燃料集合体の線源強度について

使用済燃料集合体の線源強度は、「燃料有効部からのガンマ線及び中性子」, 「燃料集合体の構造材からの放射化ガンマ線」, 「BWR燃料集合体におけるチャンネルボックスからの構造材ガンマ線」に分けられる。

遮蔽計算においては、別添 1-1 図に示すとおり、使用済燃料集合体を領域分けして、領域ごとに線源強度を計算する。

ガンマ線及び中性子の線源強度(キャスク 1 基あたり)を別添 1-1 表に示す。また、燃料有効部のガンマ線のエネルギーごとの線源強度及び中性子スペクトルを別添 1-2 表、別添 1-3 表に示す。

2. 遮蔽解析のモデル化について

遮蔽機能は、従来の輸送容器等で実績のある二次元輸送計算コード DOT3.5 により、R-Z 体系の円筒型モデルで解析している。そのため、周方向に配置されたバスケットやトラニオンなどは、構造上の特徴を考慮して、均質化あるいは線束引継ぎによって評価している。

(1) 燃料領域(添付 1 参照)

燃料領域(線源領域)については、燃料とバスケットを均質化したモデルとしている。別添 1-2 図に示すとおり、燃料は中心に最高燃焼度燃料を、外周部に平均燃焼度燃料を収納するため、それぞれの占有領域と等価な面積を持つ二重円(円筒)にモデル化し、線源領域としている。

(2) バスケット外周領域

燃料領域より外側のバスケット部は、板材を組み合わせる構造であることから、バスケット最外周板厚と同一の円環としてモデル化している。燃料領域より外側のバスケットの物量よりも、円環としてモデル化したバスケットの物量の方が少なく、遮蔽体としては安全側である。(別添 1-2 図参照)

(3) 中性子遮蔽体領域

伝熱フィンのような小さなものが比較的多く配置されている中性子遮蔽体領域では、レジンと伝熱フィンを均質化したモデルとし、伝熱フィンが占有する面積を考慮して、中性子遮蔽体としてのレジンの均質化密度を安全側に低下させている。また、伝熱フィンの密度をゼロとしガンマ線遮蔽体としての寄与を無視している。(別添1-4表参照)

伝熱フィンをモデル化した場合に、中性子とガンマ線の合計最大値は、ガンマ線の寄与が大きいいため、伝熱フィン部よりもレジン部で線量当量率が大きくなっており、中性子は、伝熱フィン部で最大となっている。線量当量率が過小評価とならないことを確認している。(別添1-3図(1), 別添1-3図(2)参照)

(4) トラニオン部の評価手法

トラニオンのような一部に大きなものが配置された場合には、実形状を模擬したトラニオンを別途モデル化して評価している。

トラニオンを無視した本体モデル(トラニオン無し方向モデル)にて得られた線束を別途モデル化したトラニオンR-Z軸対称モデルの境界線源として評価する。概略図を別添1-4図に示す。トラニオン部は、トラニオン中心を通る断面でトラニオン底面及び本体の一部を含めてモデル化し、トラニオンモデルの底面で線束の引継ぎを行っている。

トラニオン部の線量当量率は、トラニオン有モデルとトラニオン無しモデルの計算結果より線種ごとの計算結果の差を求め、本体モデルの計算結果にその差異を考慮して評価する。別添1-5図(1)～別添1-5図(4)に線量当量率分布を示す。なお、トラニオンによる線量当量率の増加は、別添1-5図(5)に示すように、主にトラニオン周囲で生じており、距離が離れるにしたがって、その影響は減衰するため、表面から1mの位置における最大線量当量率を示すのは側部中央部となる。なお、本体モデルは、キャスク中央付近で二分割して評価しており、側部中央部の線量当量率には大きな方の値を採用する。(添付2参照)

3. 貯蔵期間中の遮蔽性能の低下について

金属キャスクの貯蔵期間中に受ける放射線の照射量はわずかであり、遮蔽材の特性を変化させることはない。

レジ系中性子遮蔽材の経年劣化評価試験結果等の知見を踏まえて、加熱に伴う熱分解によるレジンの重量減損分を遮蔽体として考慮しないこととしており、中性子遮蔽材について減損分を含まない原子個数密度を線量当量率計算に用いている。

4. 遮蔽解析結果について

二次元輸送計算コード DOT3.5 等を使用して求めた金属キャスク表面及び表面から 1 m の位置における線量当量率を別添 1 - 5 表に、評価点ごとの最大線量当量率を与える位置を別添 1 - 6 図に示す。（添付 3 参照）

別添 1-1 表 ガンマ線及び中性子の線源強度

(キャスク 1 基あたり)

	BWR用大型キャスク(タイプ2) BWR用大型キャスク(タイプ2A) ^{注)}
燃料有効部のガンマ線の線源強度 (photons/s)	8.9×10^{16}
構造材放射化ガンマ線の線源強度 (^{60}Co : Bq)	1.3×10^{14}
全中性子源強度 (n/s)	1.4×10^{10}

注) : BWR用大型キャスク(タイプ2A)は、遮蔽評価条件がBWR用大型キャスク(タイプ2)と同一。

別添 1-2 表 燃料有効部のガンマ線のエネルギーごとの線源強度
(BWR用大型キャスク(タイプ2)/BWR用大型キャスク(タイプ2A))
(1 基当たり)

エネルギー群数	平均エネルギー (MeV)	線源強度 (s^{-1})
1	0.01	
2	0.025	
3	0.0375	
4	0.0575	
5	0.085	
6	0.125	
7	0.225	
8	0.375	
9	0.575	
10	0.850	
11	1.25	
12	1.75	
13	2.25	
14	2.75	
15	3.5	
16	5.0	
17	7.0	
18	9.5	
合計		8.949×10^{16}

別添 1 - 3 表 中性子エネルギースペクトル

エネルギー群数	上限エネルギー (eV)	スペクトル ^{注)}
1	1.492×10^7	5.72×10^{-4}
2	1.220×10^7	2.02×10^{-3}
3	1.000×10^7	6.07×10^{-3}
4	8.180×10^6	2.00×10^{-2}
5	6.360×10^6	4.12×10^{-2}
6	4.960×10^6	5.27×10^{-2}
7	4.060×10^6	1.10×10^{-1}
8	3.010×10^6	8.74×10^{-2}
9	2.460×10^6	2.28×10^{-2}
10	2.350×10^6	1.15×10^{-1}
11	1.830×10^6	2.07×10^{-1}
12	1.110×10^6	1.89×10^{-1}
13	5.500×10^5	1.31×10^{-1}
14	1.110×10^5	1.59×10^{-2}
15	3.350×10^3	8.12×10^{-5}
16	5.830×10^2	5.89×10^{-6}
17	1.010×10^2	3.89×10^{-7}
18	2.900×10^1	5.53×10^{-8}
19	1.070×10^1	1.33×10^{-8}
20	3.060×10^0	1.88×10^{-9}
21	1.120×10^0	4.19×10^{-10}
22	4.140×10^{-1}	1.20×10^{-10}

注) ^{239}Pu の核分裂スペクトルを DLC-23/CASK ライブラリの中性子
22 群構造に振り分けたものである。

別添1-4表 金属キャスク側部中央の合計線量当量率の最大値の比較
 (BWR用大型キャスク(タイプ2)/BWR用大型キャスク(タイプ2A))
 (単位: $\mu\text{Sv/h}$)

			本手法 二次元モデル (R-Z)	伝熱フィンモデル化した場合 二次元モデル(R- θ)	
			合計最大値	合計最大値	中性子最大値
表 面	ガンマ線	燃料有効部	95.8		
		構造材放射化	0.1		
		二次ガンマ線	26.9		
	中性子	72.7			
	合計	195.5	188.0		
表面から 1mの位置	ガンマ線	燃料有効部	40.5		
		構造材放射化	0.7		
		二次ガンマ線	10.5		
	中性子	26.2			
	合計	77.9	75.0		

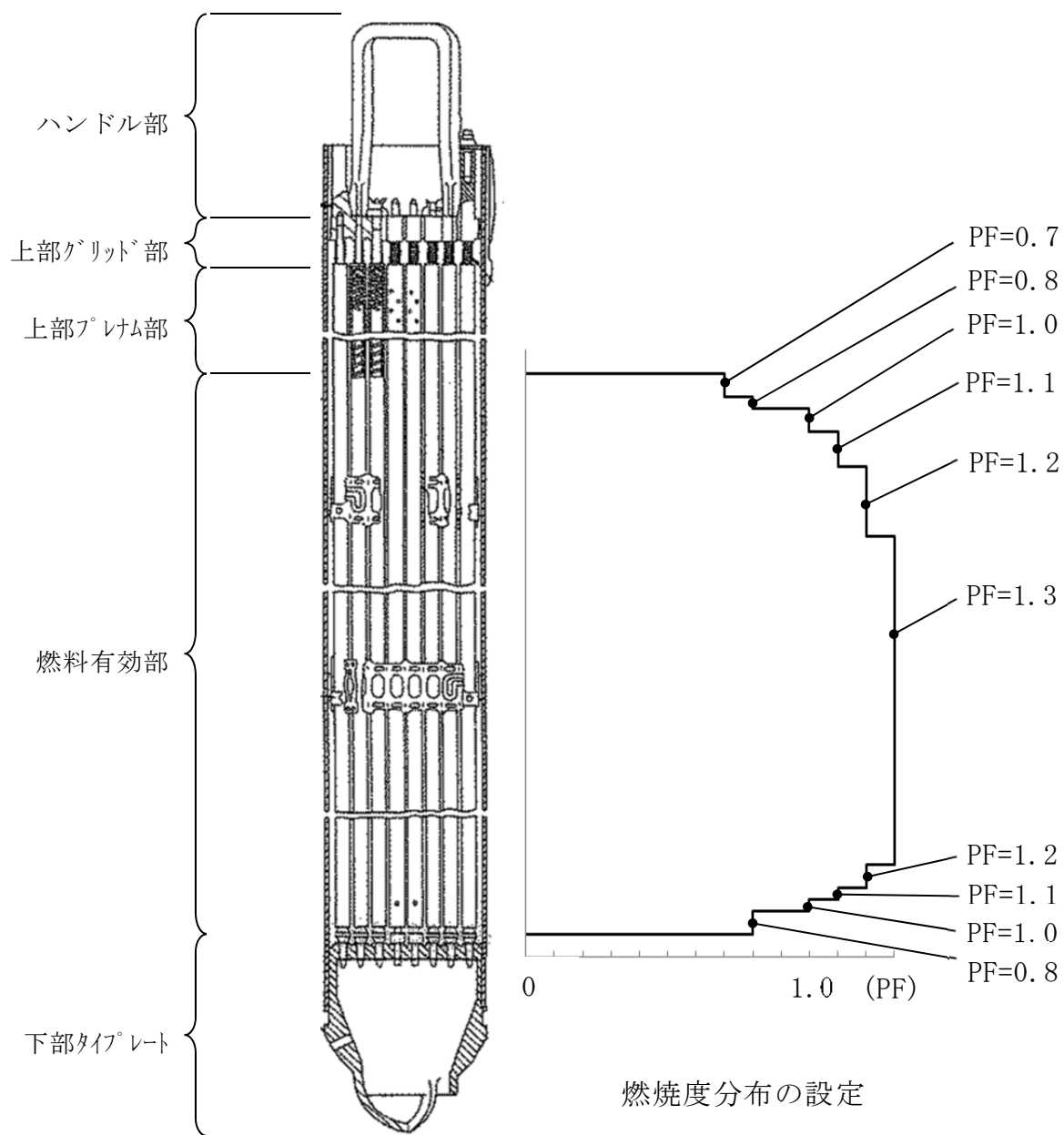
別添1-5表 貯蔵時の線量当量率(BWR用大型キャスク(タイプ2)/BWR用大型キャスク(タイプ2A))

(単位: $\mu\text{Sv/h}$)

評 価 点			頭 部			側 部 中 央	底 部		
			軸 方 向	径 方 向	径 方 向 (トランニオン部)		径 方 向	径 方 向 (トランニオン部)	軸 方 向
			①	③ a	③ b		⑤	⑦ a	⑦ b
表 面	ガン マ 線	燃料有効部	7.3	0.5	0.5	95.8	1.3	24.2	3.0
		構造材放射化	692.8	132.5	110.4	0.1	12.8	63.2	19.1
		二次ガンマ線	0.5	2.0	2.1	26.9	4.6	7.8	2.3
	中 性 子		118.9	253.9	505.2	72.7	706.9	1012.5	265.9
	合 計		819.5	388.9	618.2	195.5	725.6	1107.7	290.3
評 価 点			②	④ a	④ b	⑥	⑧ a	⑧ b	⑩
表 面 か ら 1 m の 位 置	ガン マ 線	燃料有効部	0.5	12.9	12.9	40.5	21.2	21.2	3.9
		構造材放射化	45.6	24.0	24.0	0.7	8.1	8.1	59.3
		二次ガンマ線	0.2	3.1	3.1	10.5	5.3	5.3	0.9
	中 性 子		28.7	17.3	20.9	26.2	13.4	24.5	16.2
	合 計		75.0	57.3	60.9	77.9	48.0	59.1	80.3

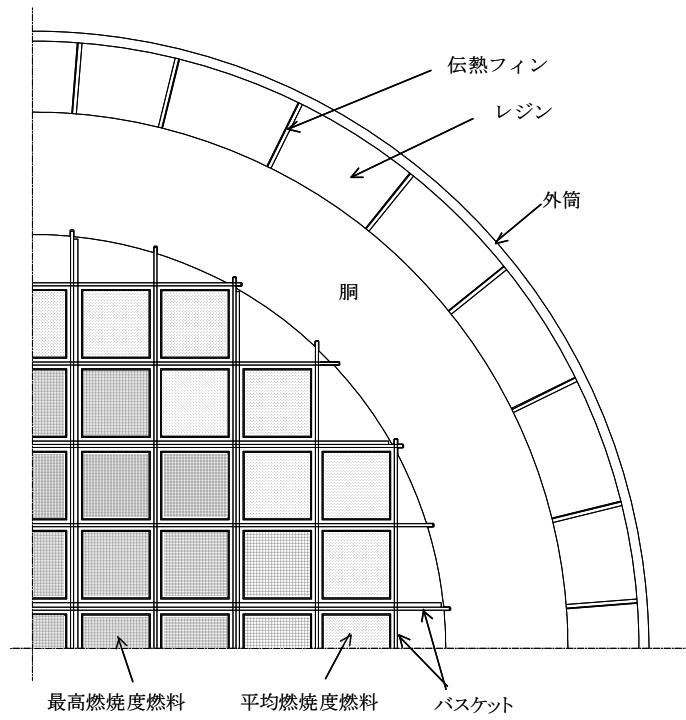
注1) : 最大値

注2) 評価点の値は、「別添1-6図」中の同じ番号の矢印位置に対応。

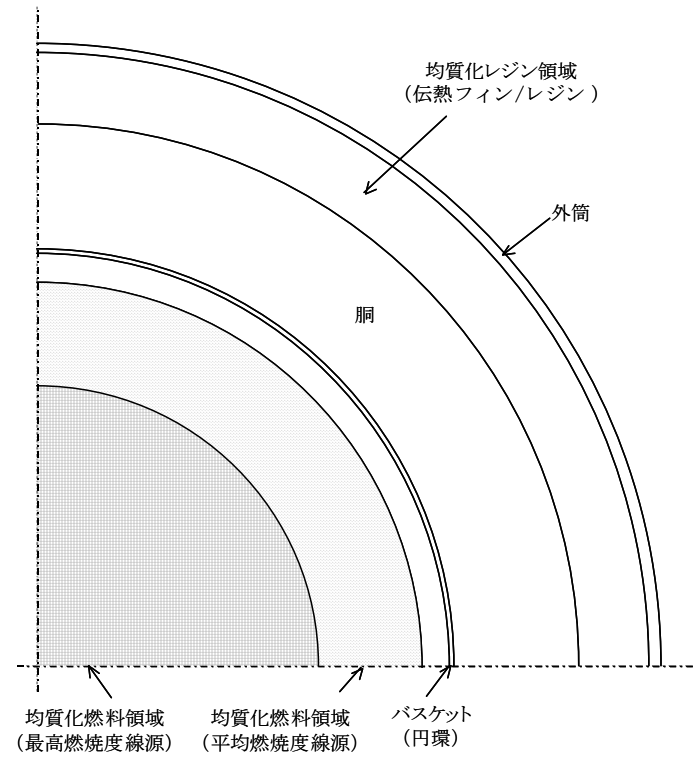
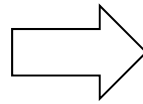


(新型 8 × 8 ジルコニウムライ付燃料の場合)

別添 1 - 1 図 BWR 使用済燃料集合体の線源強度計算に係る領域分け

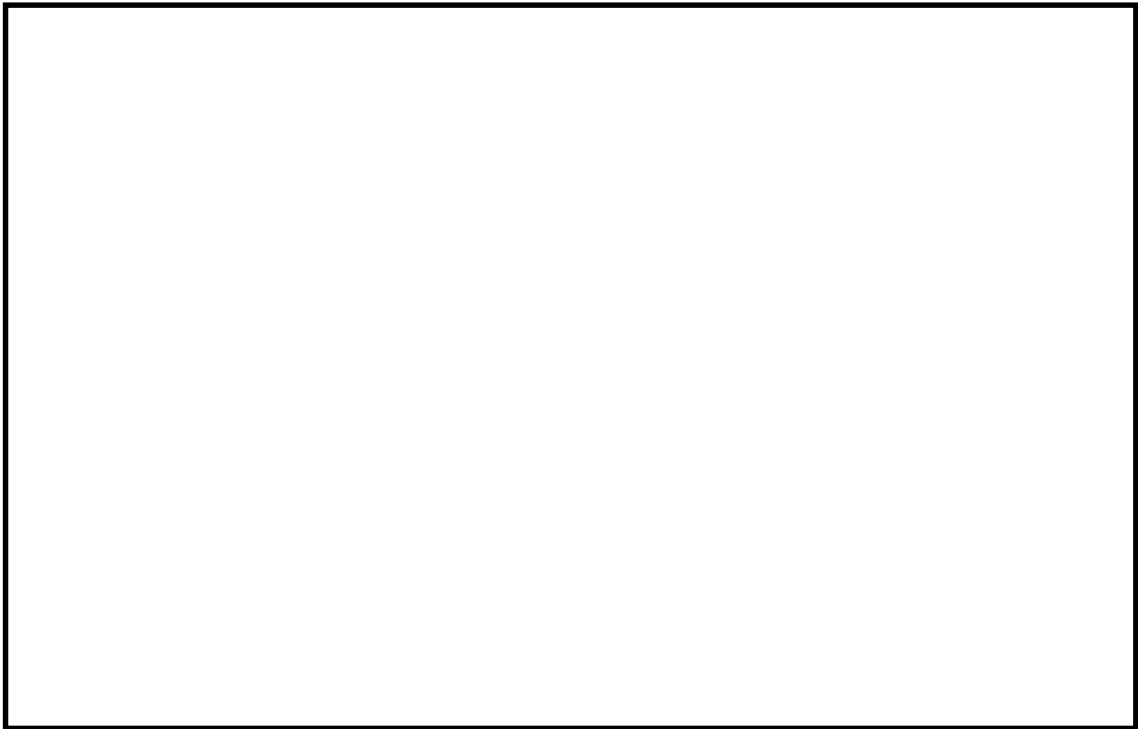


[実形状]

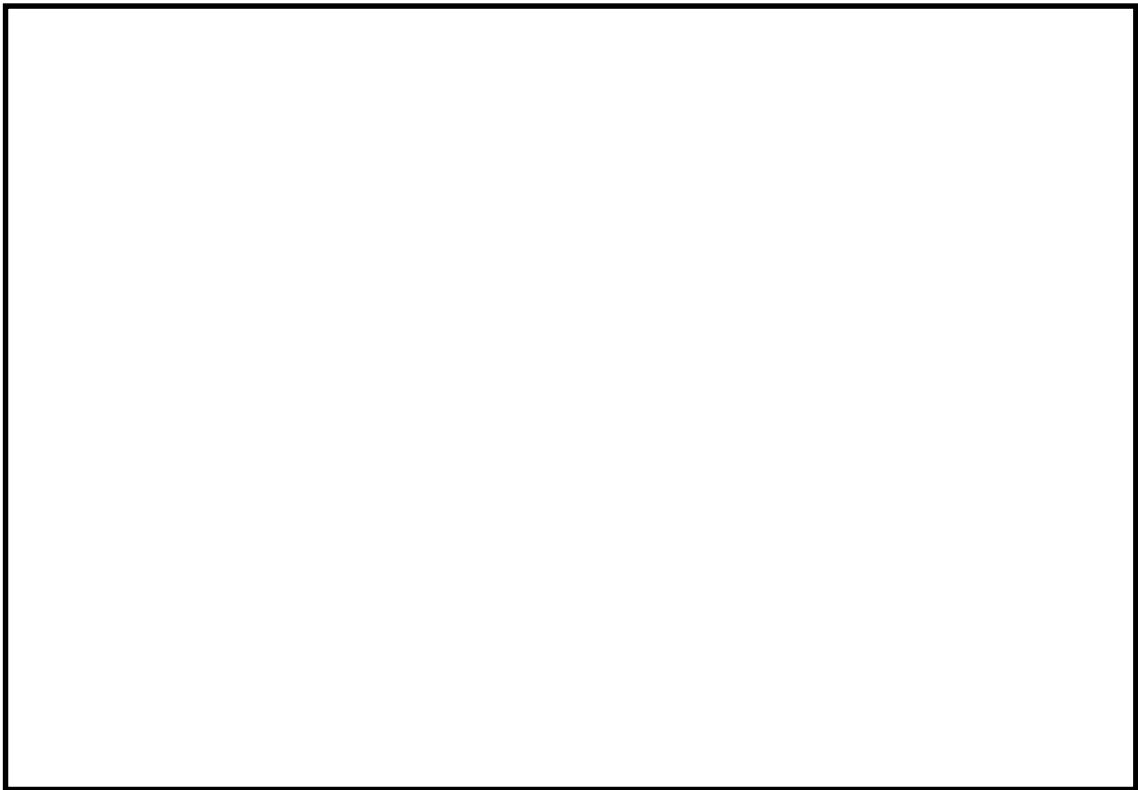


[解析モデル]

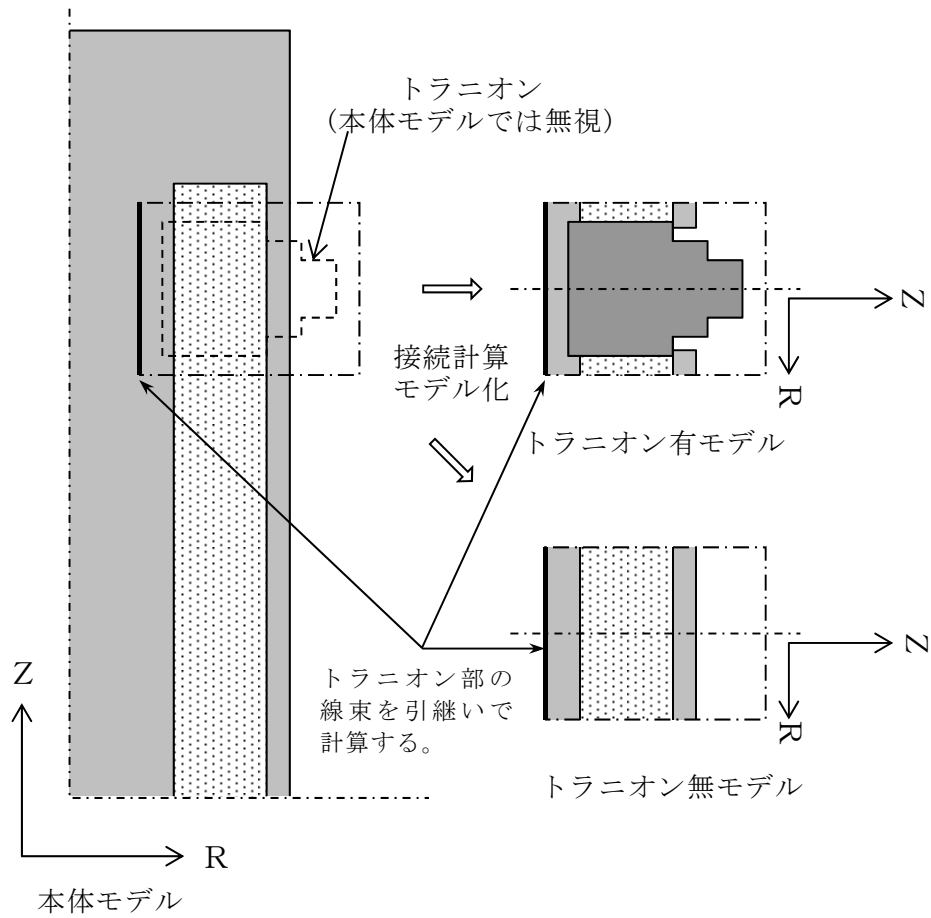
別添1-2図 キャスク中央断面の実形状と解析モデル
(BWR用大型キャスク(タイプ2) / (BWR用大型キャスク(タイプ2A)))



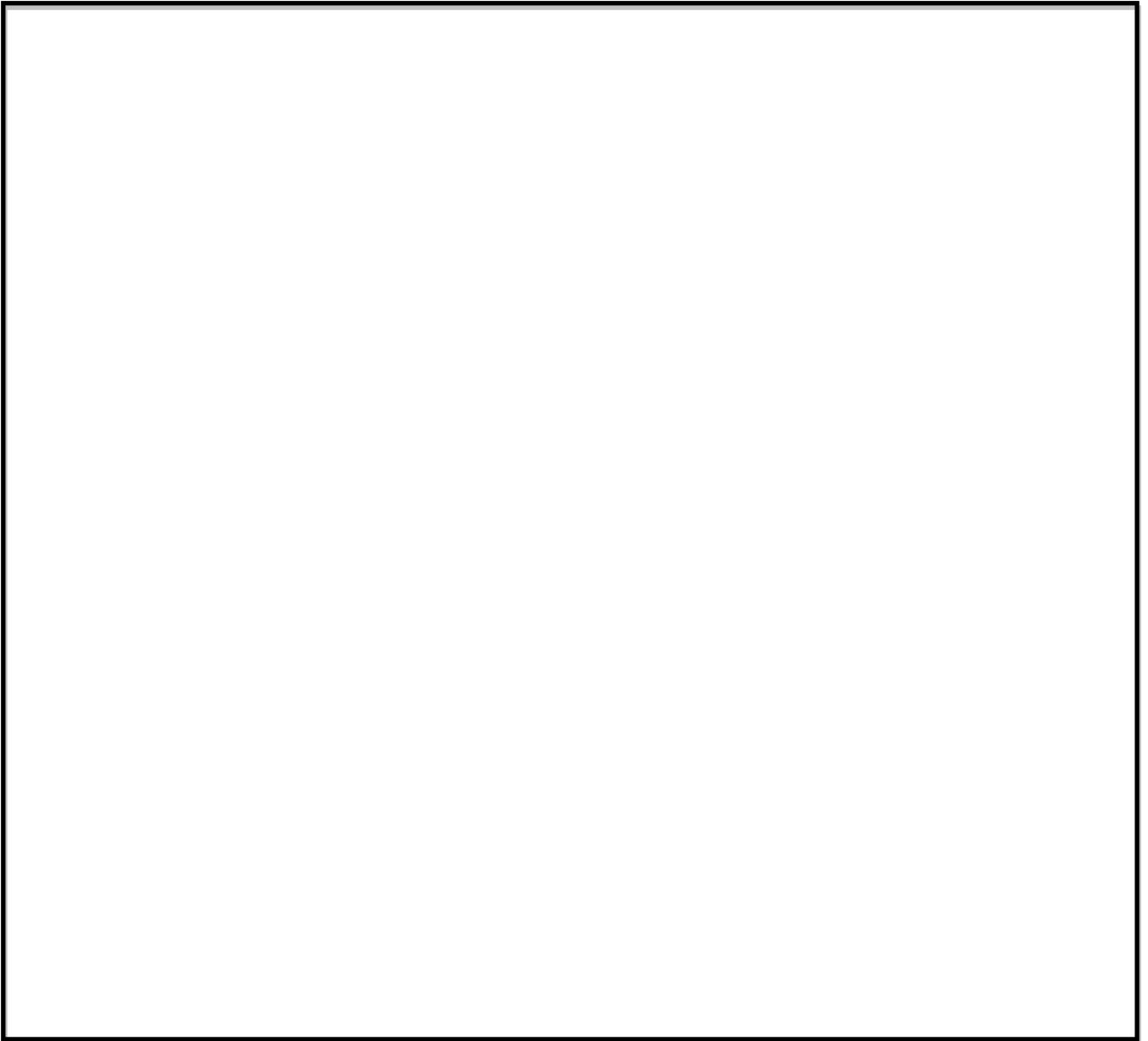
別添 1 - 3 図(1) 伝熱フィンモデル化した二次元モデル(R- θ)
(BWR用大型キャスク(タイプ2)/BWR用大型キャスク(タイプ2A))



別添 1 - 3 図(2) 二次元モデル(R- θ)によるフィン部の中性子線量当量率分布
(BWR用大型キャスク(タイプ2)/BWR用大型キャスク(タイプ2A))

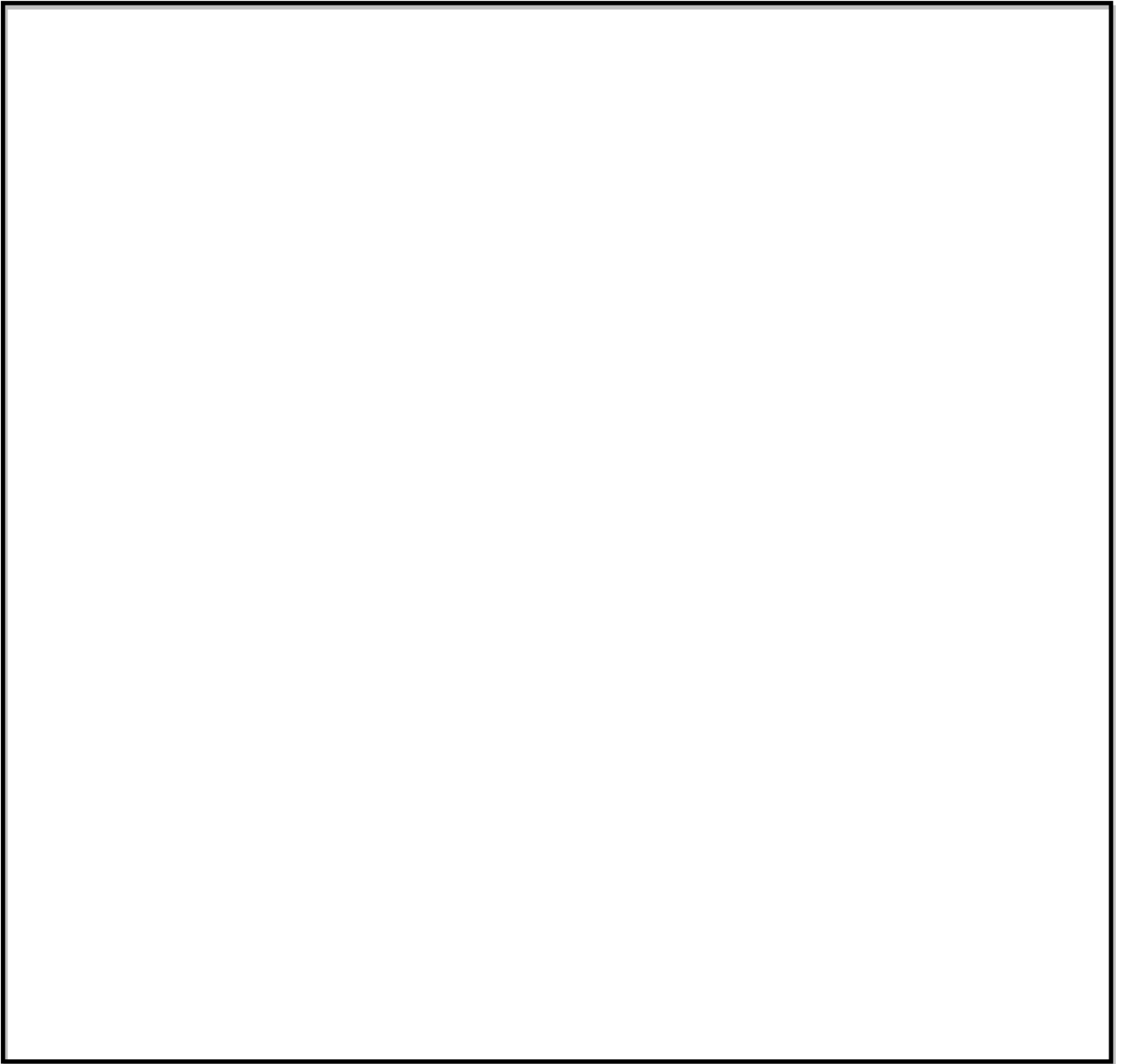


別添 1 - 4 図 トラニオン部の線束引継ぎ計算の概略図

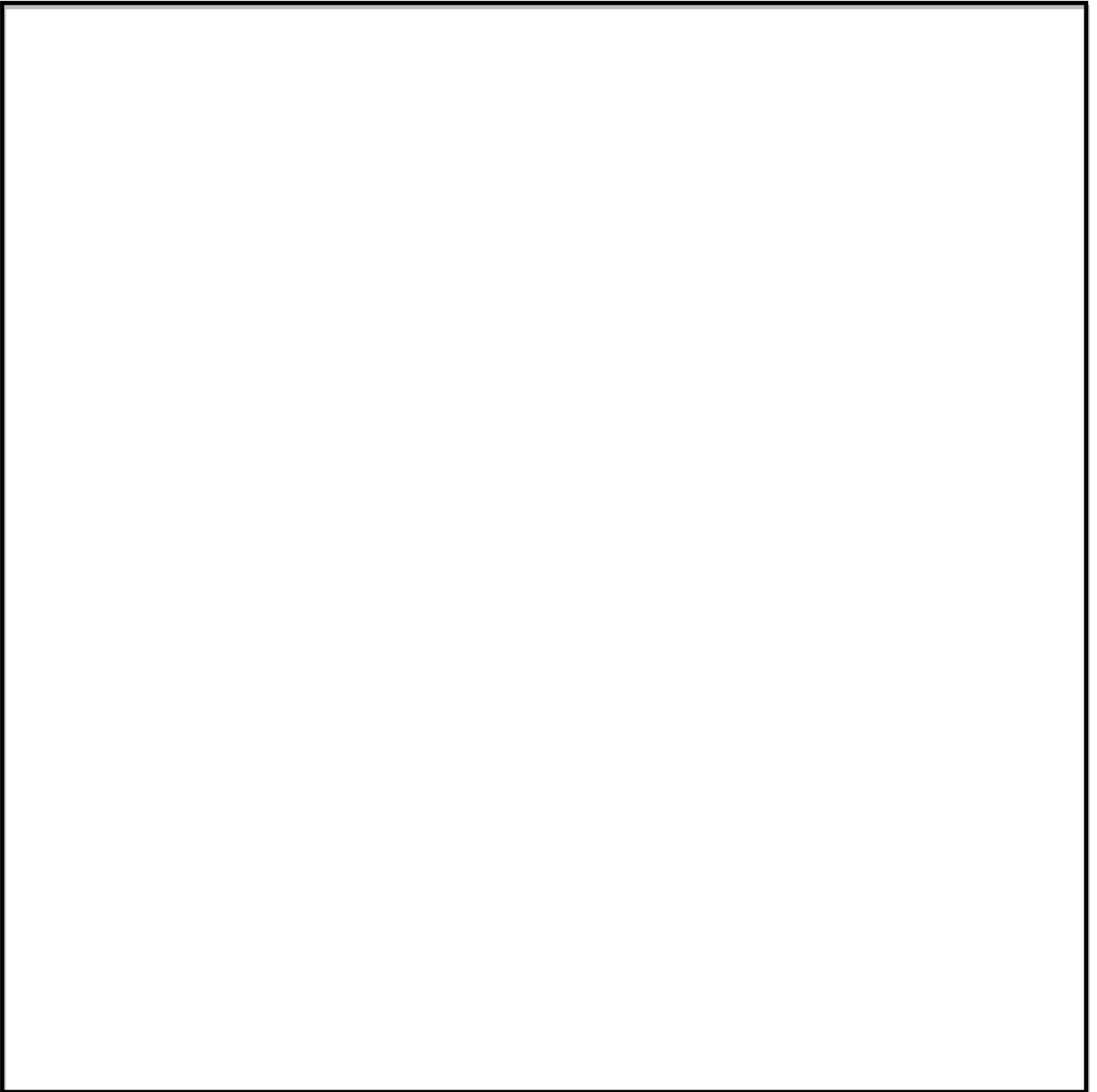


別添 1 - 5 図(1) 表面における線量当量率分布(側部方向)
(BWR用大型キャスク(タイプ2)/BWR用大型キャスク(タイプ2A))

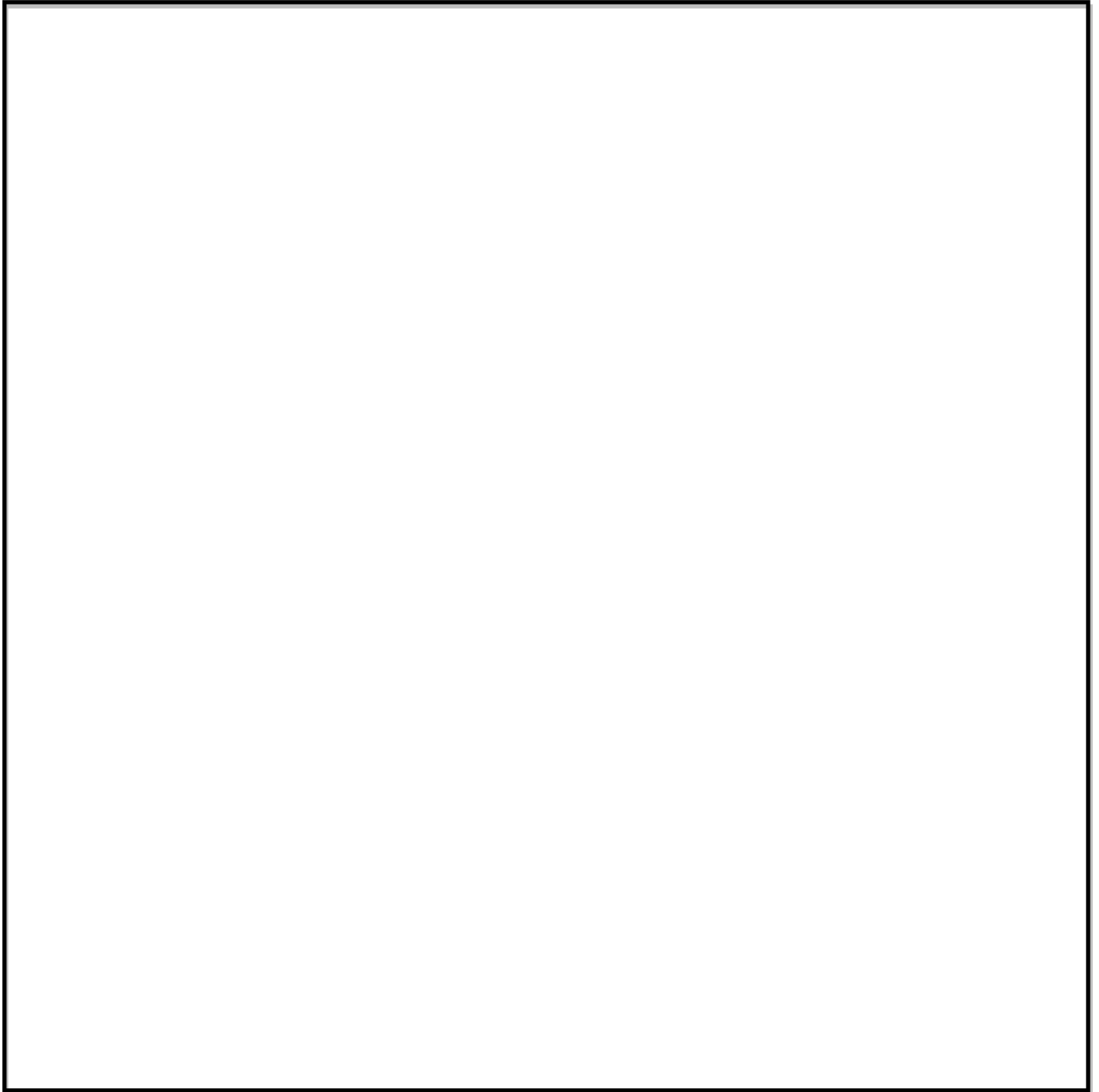
別添 1 - 5 図(2) 表面における線量当量率分布(トランニオン部近傍)
(BWR用大型キャスク(タイプ2)/BWR用大型キャスク(タイプ2A))



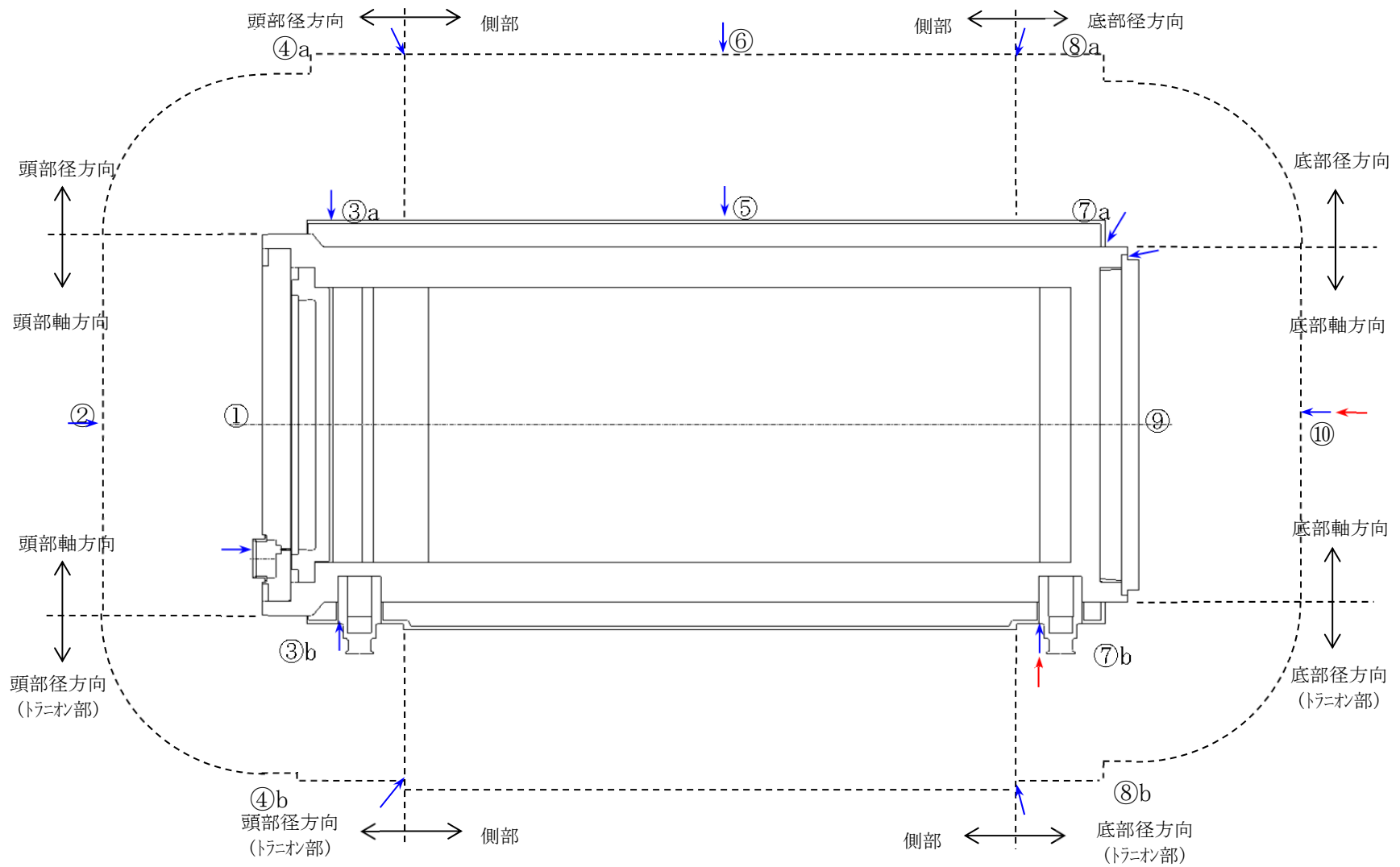
別添 1 - 5 図(3) 表面から 1 m の位置における線量当量率分布(側部方向)
(BWR 用大型キャスク(タイプ 2) / BWR 用大型キャスク(タイプ 2 A))



別添 1 - 5 図(4) 表面から 1 m の位置における線量当量率分布(トラニオン部近傍)
(BWR 用大型キャスク(タイプ 2) / BWR 用大型キャスク(タイプ 2 A))



別添 1 - 5 図(5) 表面から 1 m の位置における線量当量率分布
(BWR 用大型キャスク (タイプ 2) / BWR 用大型キャスク (タイプ 2 A))
(トランシ近傍の評価結果を保守的にそのままキャスク側部全体に重ね合わせたときの評価例)



別添1-6図 貯蔵時の線量当量率評価位置

(BWR用大型キャスク(タイプ2) / BWR用大型キャスク(タイプ2A))

→ : 表面及び表面から1mの位置における線量当量率
 → : 領域ごとの線量当量率最大位置

燃料領域の遮蔽解析の妥当性について

1. 金属キャスクの収納条件について

キャスクの収納条件では、中央部に平均燃焼度以上の燃料、外周部に平均燃焼度以下の燃料を配置している。この収納条件は、平均燃焼度を超える燃料集合体を側部線量当量率への寄与の小さい中央部に収納することで遮蔽体としての効果を期待している。

また、各領域で最大の線源強度を設定していることから、線源強度として保守性を有している。(添付 1 - 1 図参照)

線量率として、外周部の平均燃焼度燃料集合体によって中央部の最高燃焼度燃料集合体の放射線が完全に遮蔽されることはないので、総線源強度として平均燃焼度の燃料をすべて収納した場合の線量当量率を上回る。なお、収納条件の制約から外周部に平均燃焼度以上の燃料を配置することはない。

2. 遮蔽解析における収納配置及び軸方向燃焼度分布の妥当性について

(1) 収納配置の妥当性について

金属キャスクの遮蔽設計では、中央部に最高燃焼度の燃料、外周部に平均燃焼度の燃料を配置しており、軸方向については、階段状の燃焼度分布を設定している。

解析においては、最高燃焼度及び平均燃焼度に対して、階段状の分布を掛け合わせて、軸方向の燃焼度分布を考慮している。軸方向領域(ノード)のそれぞれの燃焼度から、軸方向領域(ノード)ごとの線源強度を算出している。二次元輸送計算コード DOT3.5 の解析では、最高燃焼度及び平均燃焼度の燃料に対して、軸方向領域(ノード)ごとに計算した線源強度を入力値にして、収納条件を包絡するように、線源強度を設定している。

(2) 軸方向燃焼度分布の妥当性について

収納配置及び軸方向燃焼度分布の妥当性について

軸方向燃焼度分布(ピーキングファクタ:PF)は、以下のようにして設定しており、対象とする燃料の軸方向の燃焼度分布を包絡できるようにしている。

a. PF 設定の考え方

- ・キャスク設計においては、燃焼度の高い燃料の線源強度が高く、遮蔽性能の評価で重要であるため、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燃料も調査の対象とする。
- ・貯蔵対象となる燃料が装荷されたプラントの炉型毎に代表プラントを選定し、調査を実施した。

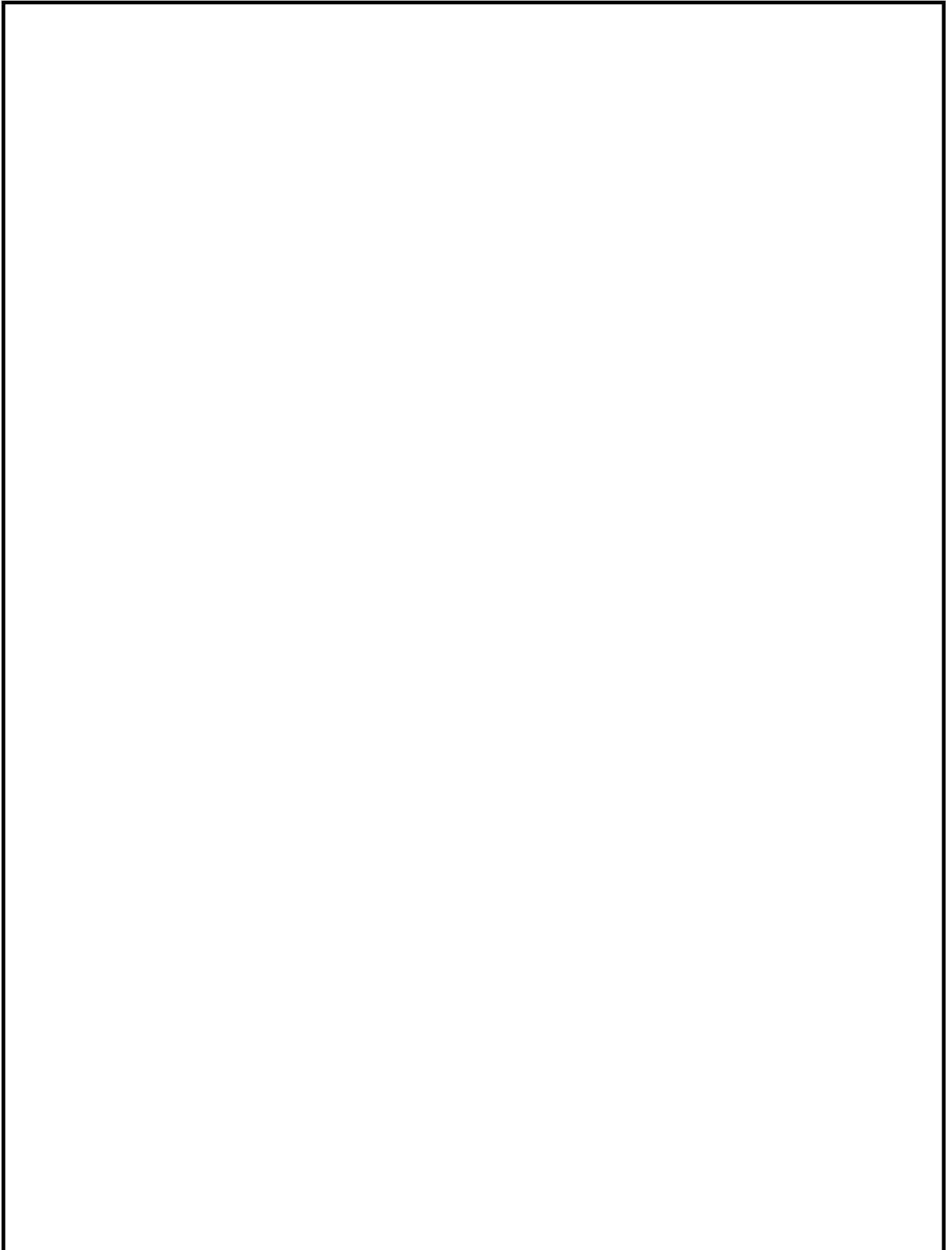
b. 調査項目

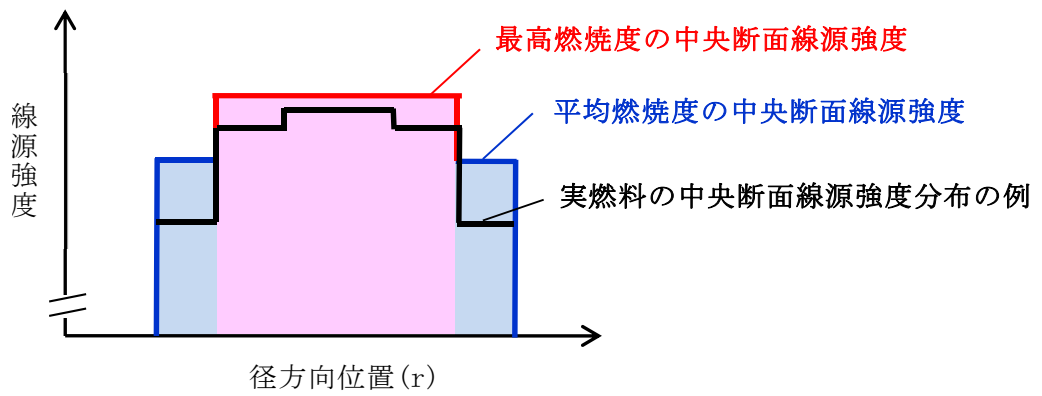
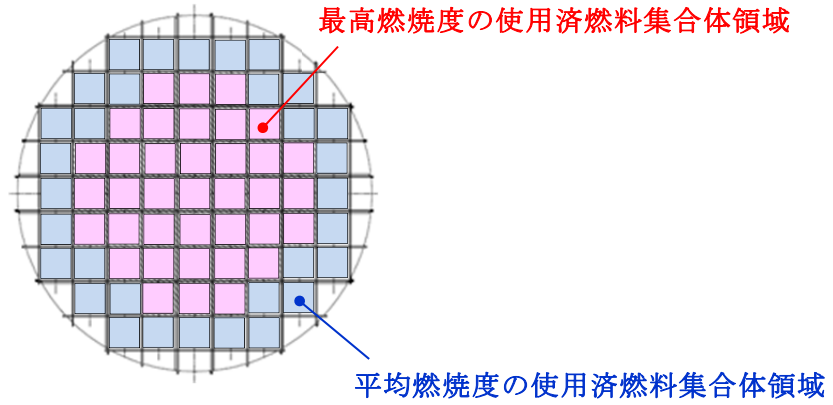
- ・ a で設定したプラントの取出燃料の燃焼度、PF を調査した。
- ・ 燃焼度の最も高い上位 10 体及びピーキングの最も高い上位 10 体の軸方向燃焼度を調査した。

c. PF の設定

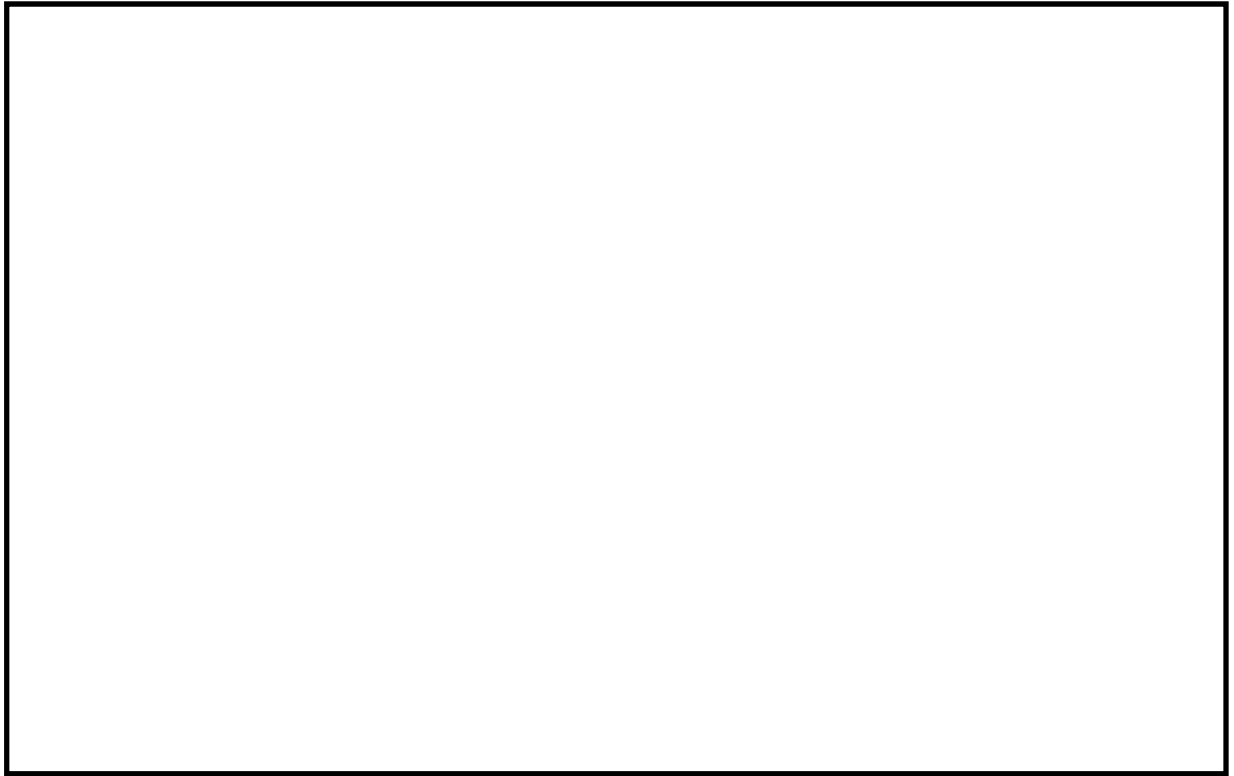
- ・ a 及び b で調査したデータから各プロットを線で結び、ピーキングを包絡するように PF を設定した。(添付 1-2 図参照)
- ・ BWR 用大型キャスク(タイプ 2)に収納する新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料の軸方向領域ごとの線源強度の算定結果の例を添付 1-1 表に示す。

添付1-1表 新型8×8ジルコニウムライナ燃料の軸方向領域毎の線源強度





添付 1 - 1 図 金属キャスクの遮蔽評価における中央断面線源強度の概念図



添付 1 - 2 図 軸方向燃焼度分布 (新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料)

トラニオン部の遮蔽解析の妥当性について

1. トラニオン部の評価方法の妥当性

表面の線量当量率が最も高くなる底部トラニオン表面を，三次元計算コード MCNP5(ライブラリ FSXLIB-J33, MCPLIB02)で計算した結果を添付 2-1 表，添付 2-1 図，添付 2-2 図に示す。二次元輸送計算コード DOT3.5 の二次元円筒モデルをつないで評価した申請値は，三次元計算結果より保守的な値となっている。

2. トラニオン部 DOT3.5 計算モデル範囲外の線量当量率の評価方法

(1) 接続位置の対応

接続位置として線束の引継ぎ面は，本体モデルの線量当量率等高線分布から放射線の流れを確認し，本体モデルの分布が保たれるようトラニオンモデルの線束引継ぎを行った。(添付 2-3 図参照)

(2) 角度束の扱い

引き継ぐ線束は，本体モデルの燃料有効部寄り(キャスク中心)の Z 方向と R 方向に平行な面の角度束をトラニオンモデルの底面(R 方向)と側部(Z 方向)の角度束に入れ替えているため，トラニオンモデルでは底部，側部とも全周にわたり線束が高い燃料有効部寄りの値になっており，トラニオン部の中心軸に対して線対称に高い線束で評価している。(添付 2-4 図参照)

(3) メッシュ分割

メッシュ分割の違いの処理に関して，本体モデルに比べてトラニオンの分割は細かく，完全に一致させることができないため，トラニオンモデルのメッシュと同じ領域にある本体モデルの線束を入力値としている。(添付 2-5 図参照)

本体モデル，トラニオン有モデルとトラニオン無しモデルの底部側の線

量当量率等高線分布(中性子)とトランニオンモデル線束引継ぎ面を添付2-3図に示す。

(4) 範囲外の線量当量率

トランニオン部DOT計算モデル範囲外の線量当量率については、添付2-6図に示すように本体モデルの線量当量率に SPACETRAN-IIIにより求めたトランニオンによる線量当量率の増加分を重ね合わせた。

添付 2 - 1 表 キャスクの底部トランニオン表面における線量当量率
 (BWR用大型キャスク(タイプ2)/BWR用大型キャスク(タイプ2A))
 (μ Sv/h)

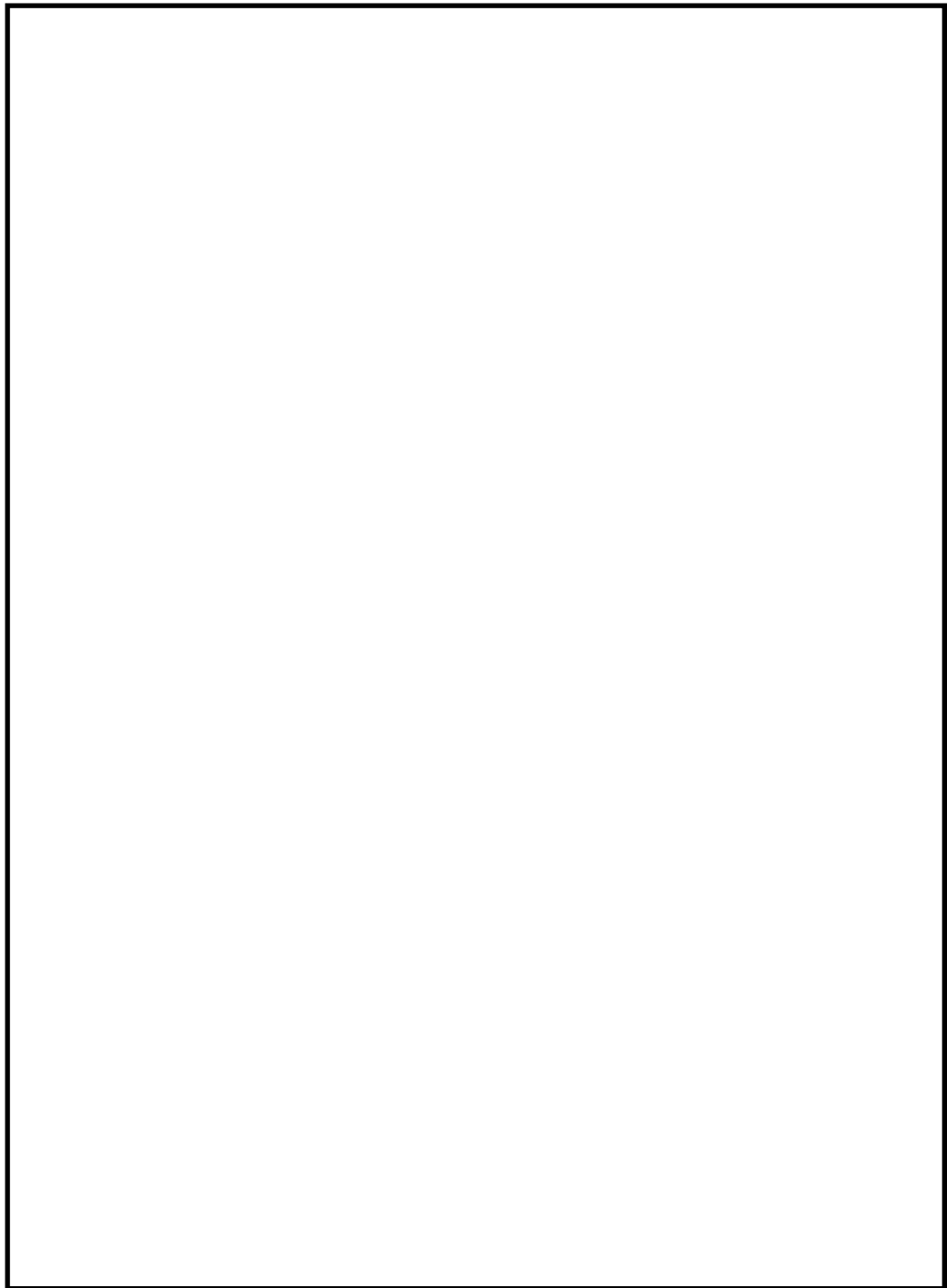
	申請値 (2次元計算)	3次元計算 ^{注1)}	
		中央値	相対標準偏差
燃料有効部ガンマ線			
構造材放射化ガンマ線			
二次ガンマ線			
中性子			
合計			
申請値に対する比 (3次元計算/申請値)			

注) : 計算条件, 計算結果

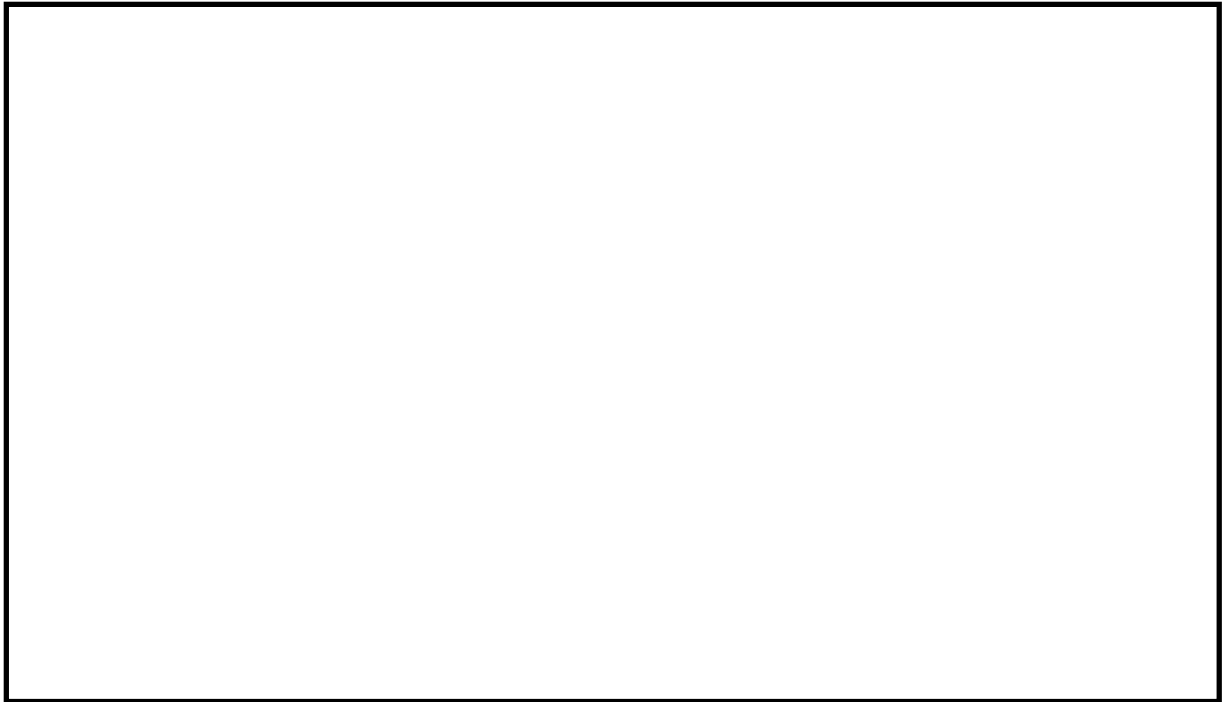
- ・ 計算コードは MCNP5, ライブラリは FSXLIB-J33 及び MCPLIB02 を使用。
- ・ 2次元円筒モデルの組み合わせを3次元でモデル化(添付2-1図参照)。
- ・ トランニオン部近傍の線量率分布を添付2-2図に示す。



添付2-1図 底部トラニオン3次元計算モデル
(BWR用大型キャスク(タイプ2)/BWR用大型キャスク(タイプ2A))



添付 2 - 2 図 表面における線量当量率分布(トラニオン部近傍)
(BWR用大型キャスク(タイプ2)/BWR用大型キャスク(タイプ2A))



a) 本体モデル

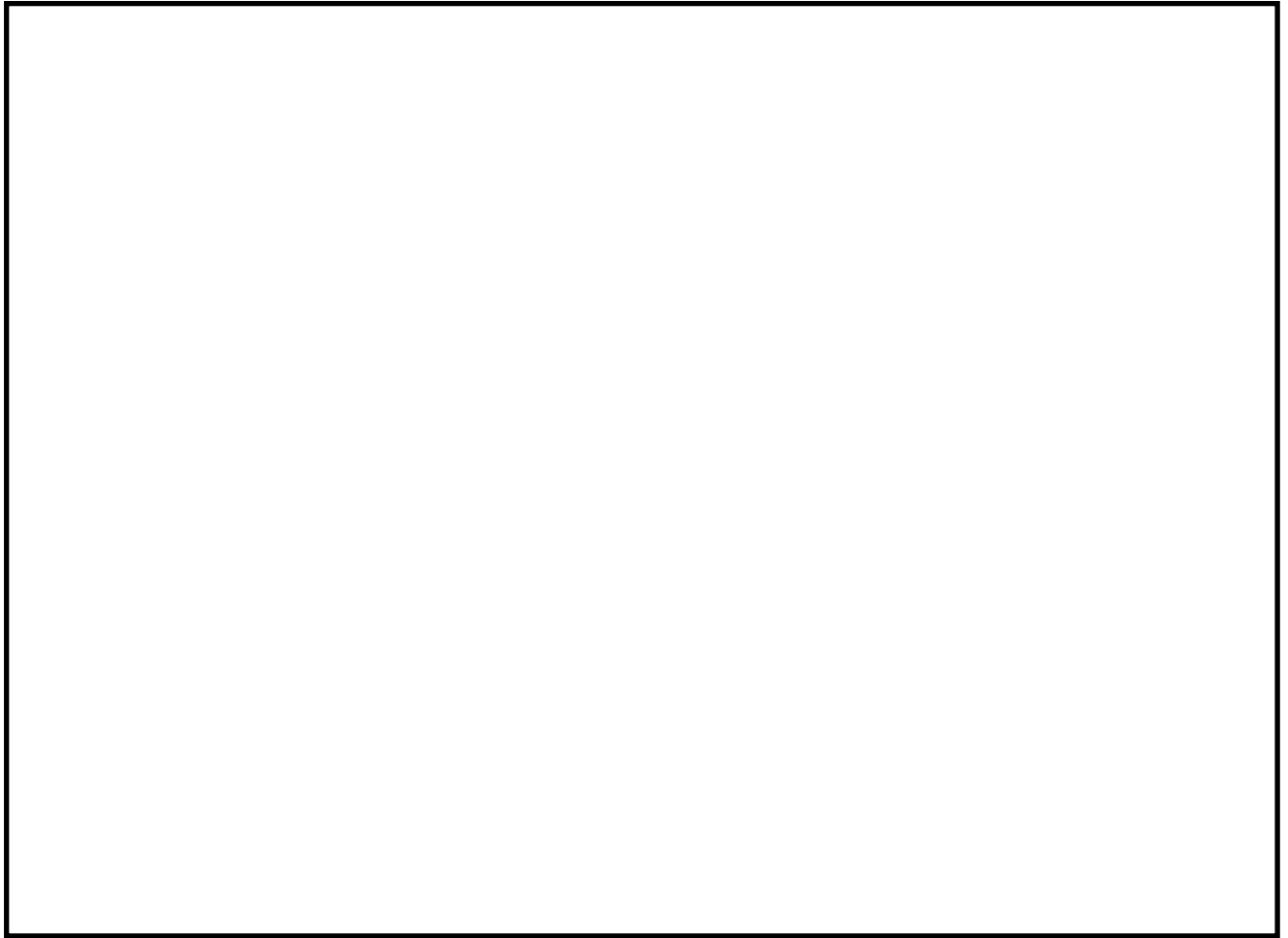
(μ Sv/h)



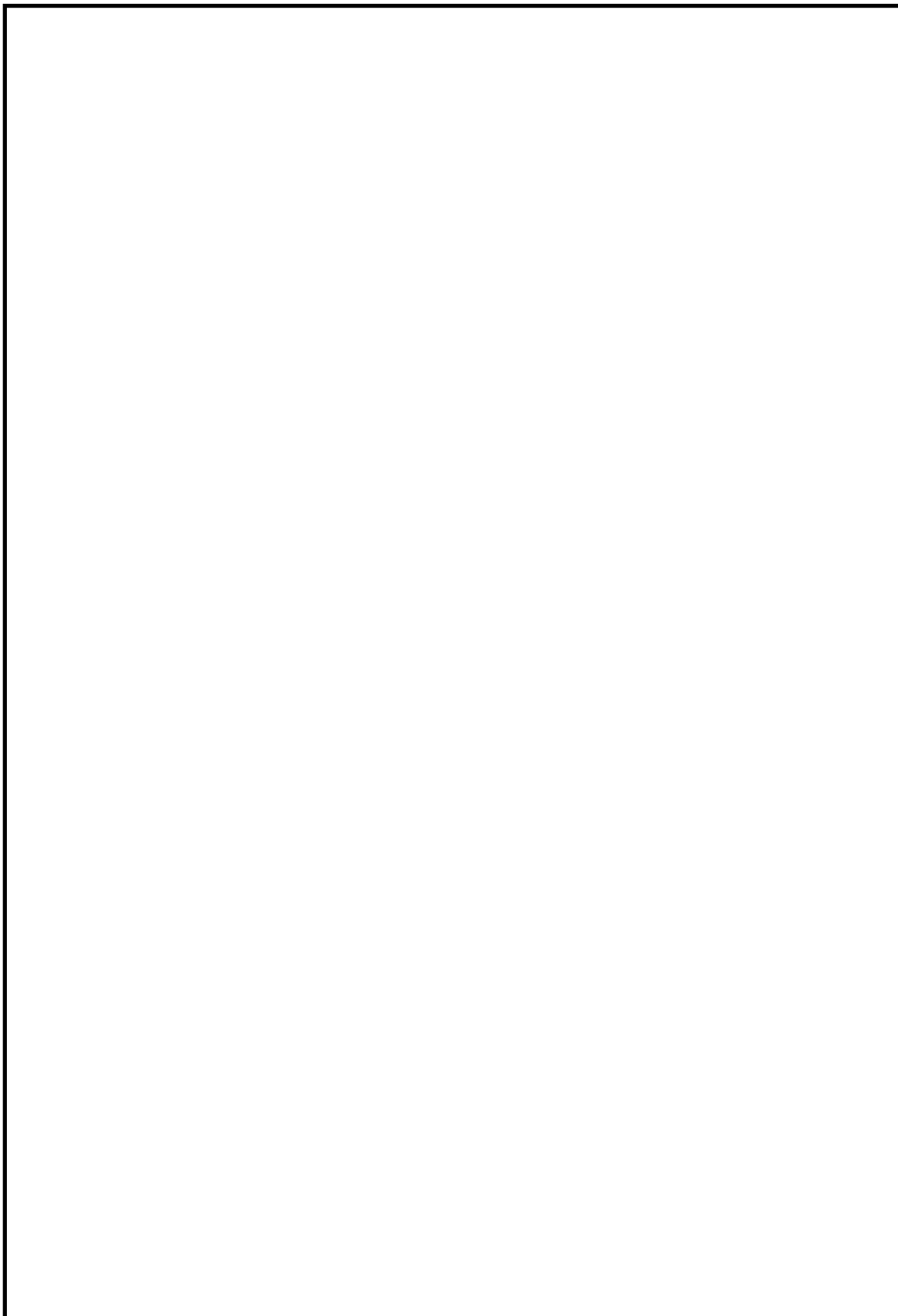
b) トラニオン有りモデル

c) トラニオン無しモデル

添付 2 - 3 図 線量当量率等高線分布(中性子)
(BWR用大型キャスク(タイプ2)/BWR用大型キャスク(タイプ2A))

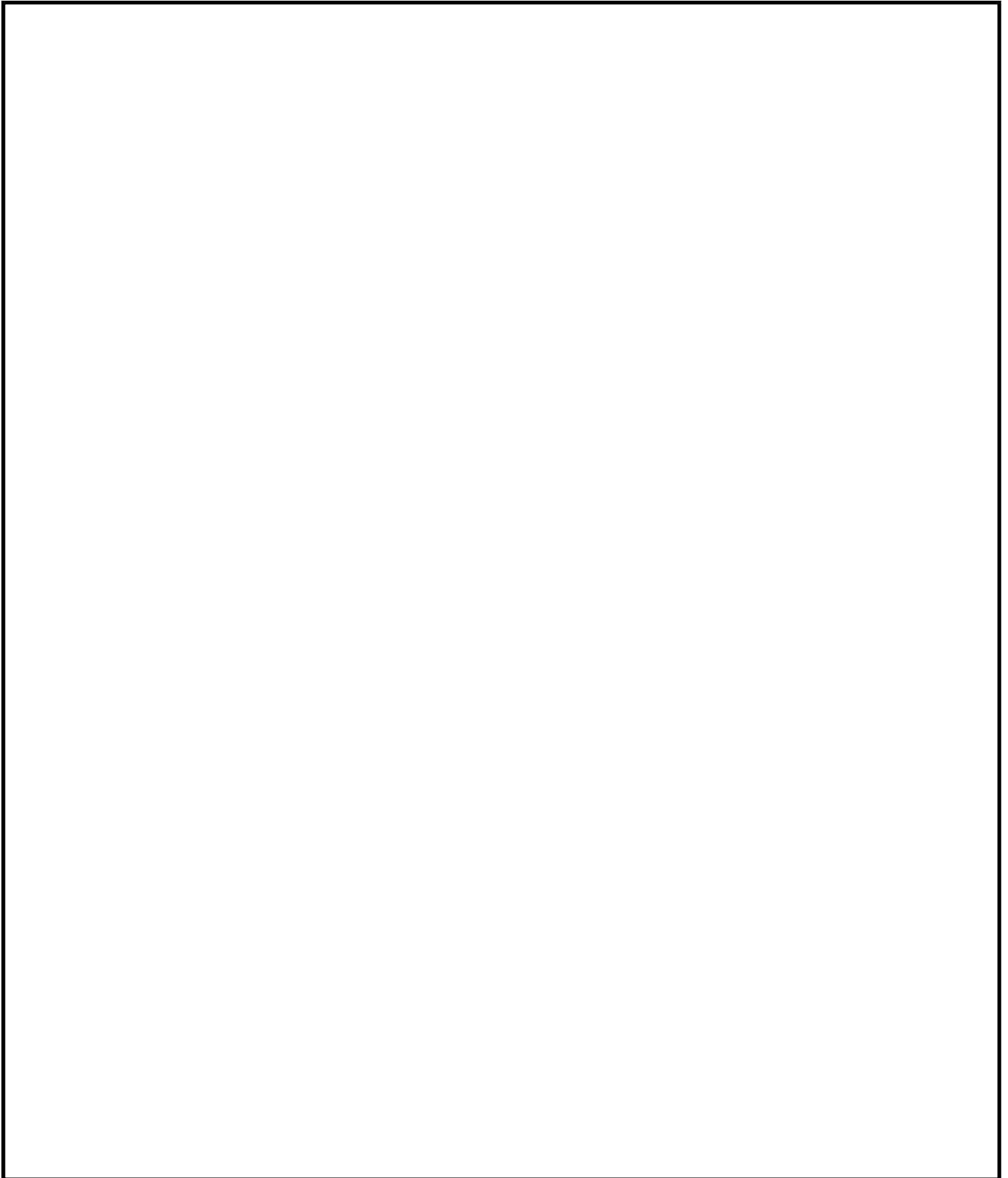


添付 2 - 4 図 トラニオン部の線束引継ぎ方法の概念図(1)
(BWR用大型キャスク(タイプ2)/BWR用大型キャスク(タイプ2A))



添付 2-5 図 トラニオン部の線束引継ぎ計算の概念図(2)
(BWR用大型キャスク(タイプ2)/BWR用大型キャスク(タイプ2A))

4条(キャスク) - 別添 1-30



添付 2 - 6 図 表面から 1 m の位置における線量当量率分布
(BWR 用大型キャスク (タイプ 2) / BWR 用大型キャスク (タイプ 2 A))

4 条 (キャスク) - 別添 1 - 31

遮蔽解析結果における線量当量率の妥当性について

線量当量率は、線源の位置と線源強度に依存し、また、線源と評価点との間遮蔽材構成に依存するため、必ずしも表面と表面から 1 m の位置における線量当量率最大となる位置は一致しない。

(1) 金属キャスク表面における線量当量率

金属キャスク表面における線量当量率は、中性子遮蔽材の欠損部である底部において最大となり、中性子が支配的となる。(別添 1 - 5 図(1)参照)

ガンマ線は、遮蔽体である容器本体が肉厚の炭素鋼で製作されており、中性子遮蔽材のような欠損部がないことから、燃料有効部の線源強度の分布に従った変化となる。

(2) 金属キャスク表面から 1 m の位置における線量当量率

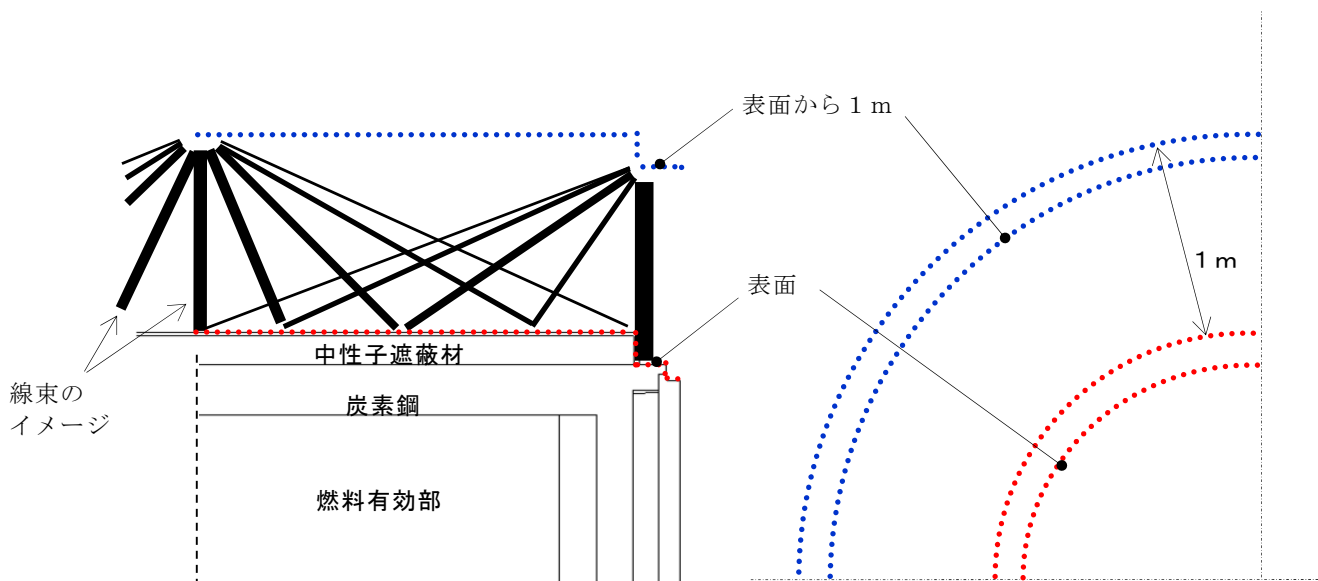
金属キャスク表面から 1 m の位置における線量当量率は、中性子遮蔽材欠損による中性子の局所ピークが緩和されるため、金属キャスクの中心部で最大となる。(別添 1 - 5 図(3)参照)

線量当量率は、燃料有効部の線源強度の分布に従った変化となり、ガンマ線が支配的となる。

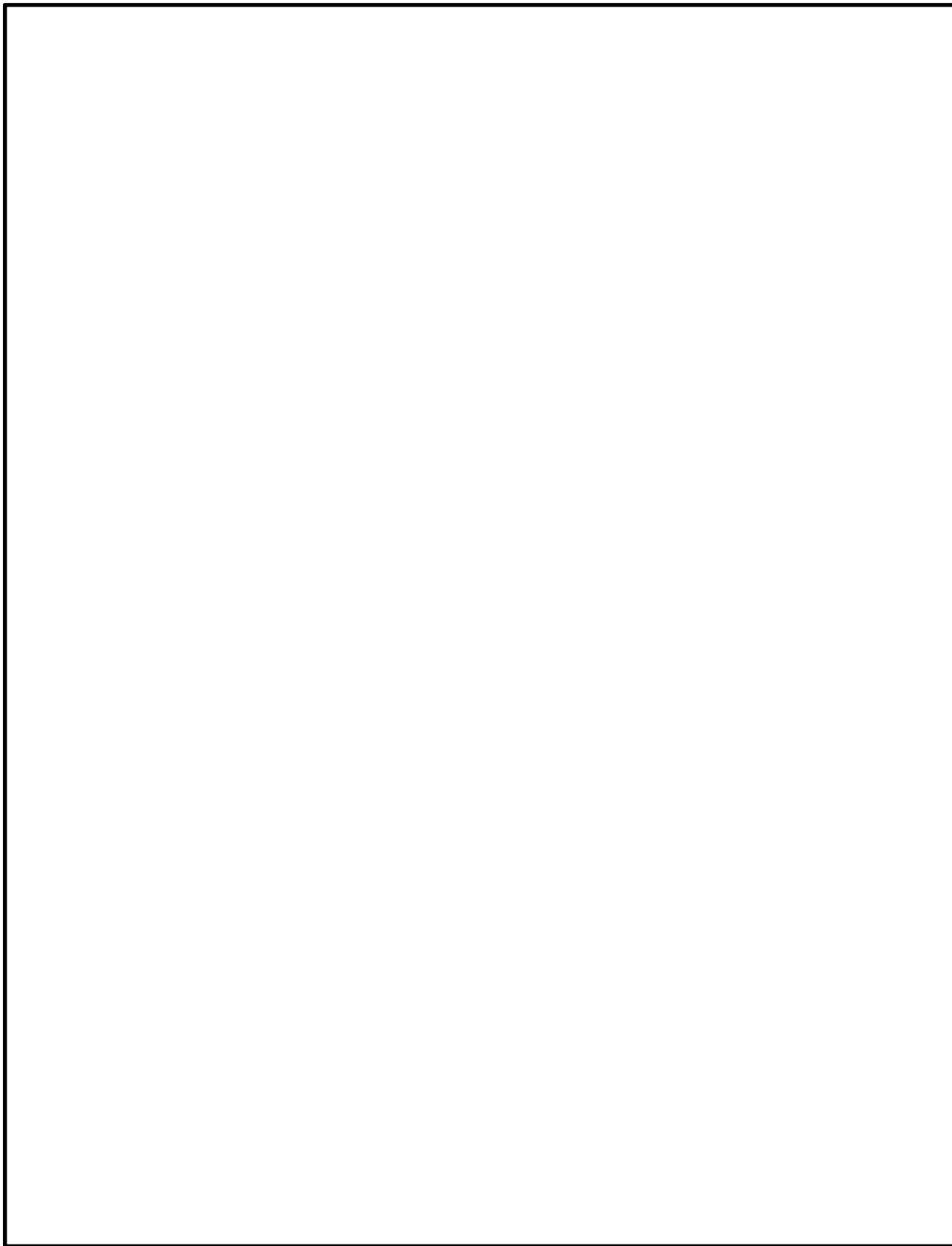
(3) 局所ピークの緩和

局所ピークの緩和については、金属キャスク表面から 1 m の位置における線量当量率において局所ピークが緩和されるのは、金属キャスクから到達するすべての線束を、評価点において足しあわせた結果、表面における線量当量率が大きい燃料有効部のガンマ線の線束の効果が大きく、中性子遮蔽材欠損による中性子の局所ピークが距離による減衰の為に小さくなったことによる。(添付 3 - 1 図～添付 3 - 3 図参照)

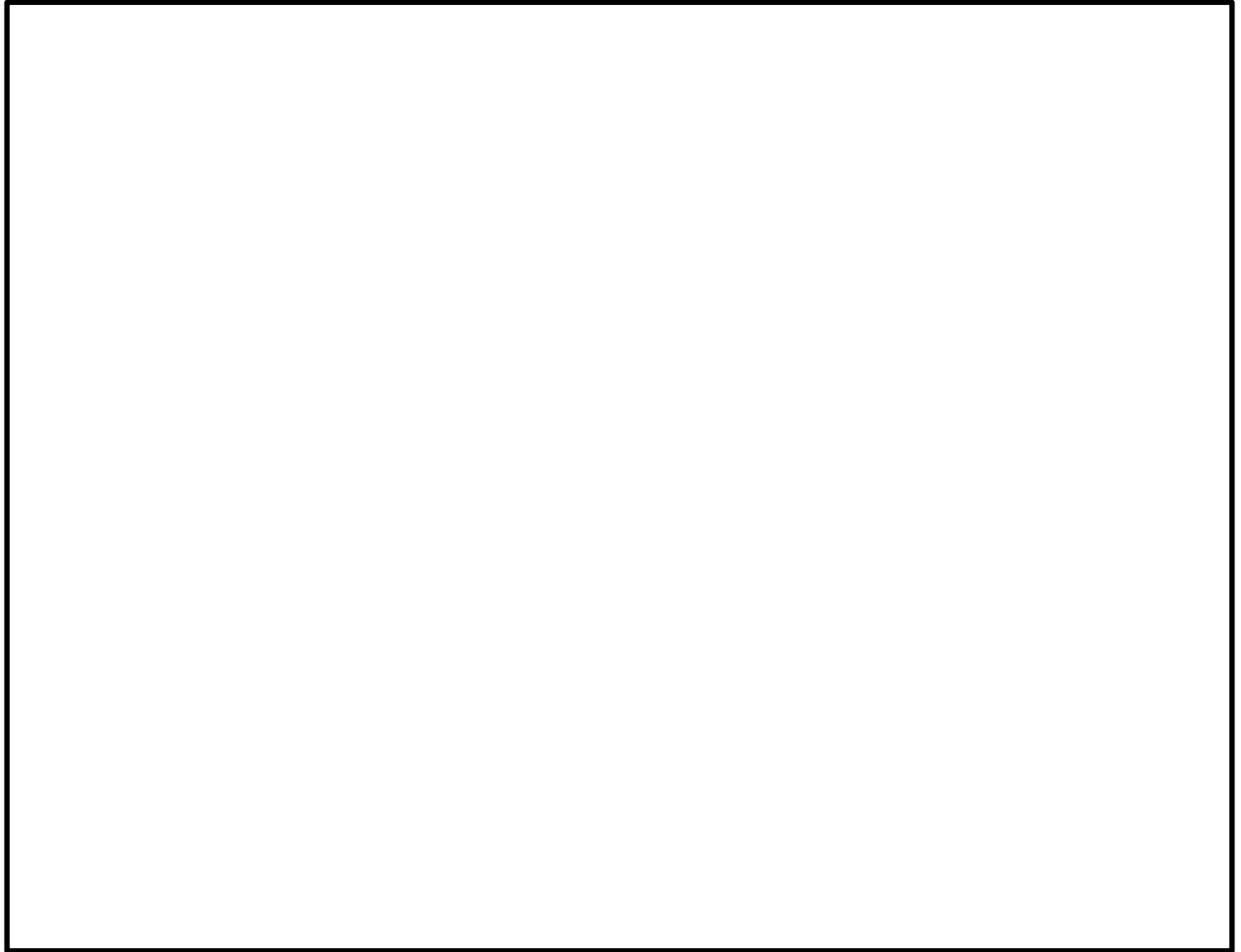
第 7 表(1)、第 7 表(2)において、表面における線量当量率は「頭部-径方向(トラニオン部)」が「頭部-径方向」に対し、2 倍近い値となっているが、表面から 1 m の位置における線量当量率は「頭部-径方向(トラニオン部)」と「頭部-径方向」の値がほぼ変わらないのも、中性子遮蔽材欠損による中性子の局所ピークが緩和される効果のためである。



添付3-1図 金属キャスク底部側の線量当量率分布
(BWR用大型キャスク(タイプ2)/BWR用大型キャスク(タイプ2A))



添付 3 - 2 図 金属キャスク底部側の線量当量率分布の詳細 (中性子)
(BWR用大型キャスク(タイプ2) / BWR用大型キャスク(タイプ2A))



通常、金属キャスク表面から 1 m の位置における線量当量率は、SPACETRAN-Ⅲにより、側部と底部方向（あるいは蓋部方向）を一括計算している。なお、別添 1 - 5 (3) の線量当量率分布はキャスクの全長分だけを記載している。

添付 3 - 3 図 SPACETRAN-Ⅲ の計算モデル (底部側)
(BWR 用大型キャスク (タイプ 2) / BWR 用大型キャスク (タイプ 2 A))

遮蔽解析における二次元輸送計算コード DOT3.5 の妥当性について

1. DOT3.5 の妥当性

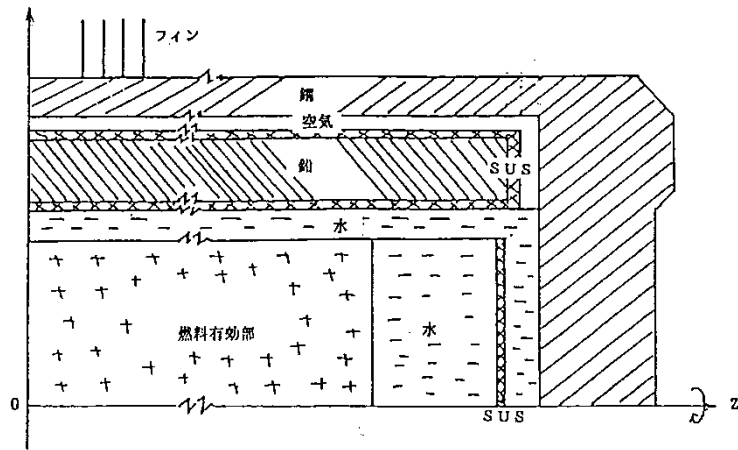
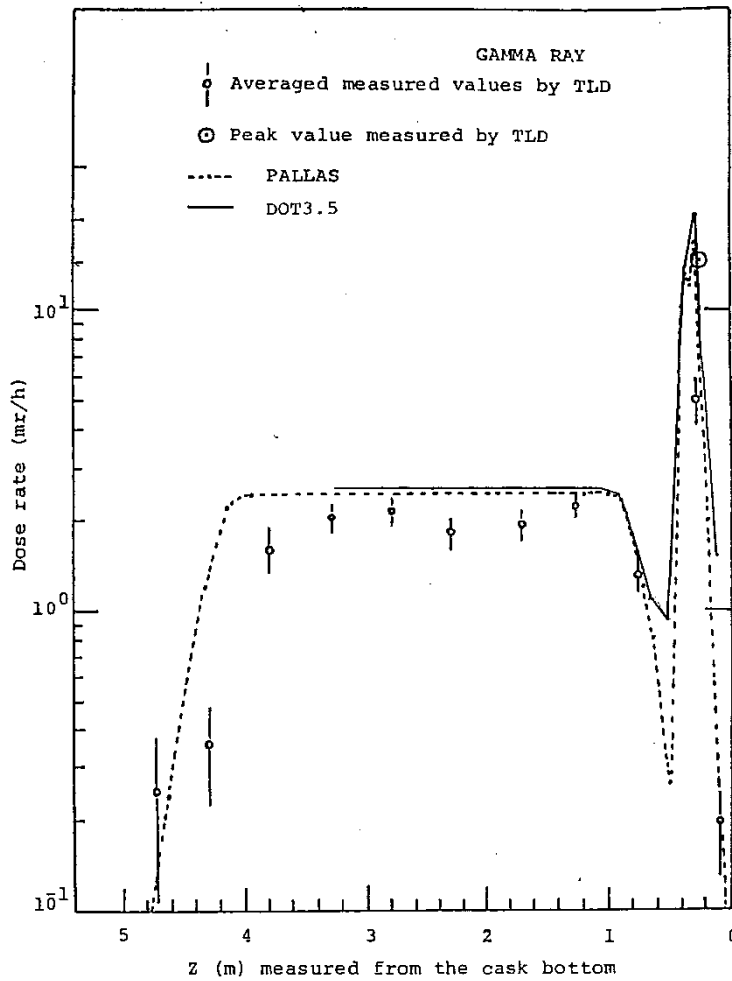
二次元輸送計算コード DOT3.5 は、原子力施設の遮蔽解析に広く用いられており、輸送キャスクの遮蔽解析においても豊富な実績がある。

ガンマ線及び中性子について DOT3.5 で解析した使用済燃料輸送キャスクの解析事例と測定値を別添 2 - 1 図(1)、別添 2 - 1 図(2)参照に示す。図から明らかなように解析値が全て測定値を上回っており、DOT3.5 はキャスク体系への適用の妥当性が検証されたものである。

なお、トラニオン部では、DOT3.5 の妥当性を確認するために三次元のモンテカルロコードによる解析を実施している。

2. SPACETRAN-III を用いた算出方法

線量当量率における各々の最大位置は、キャスクの表面と表面から 1 m の位置における線量当量率の分布を求め、最大位置を確認している。SPACETRAN-III コードでは、任意の評価点に対して、キャスク表面(DOT3.5 による評価領域の外側)からの距離による減衰を考慮して線量計算が行われる。キャスク周囲は空気領域で、放射線の散乱はほとんど発生しないため、SPACETRAN-III で回り込みは考慮しない。なお、側部方向と軸方向が重なり合う領域については、コードの中で各々の方向の計算から合成された結果として算出される。(別添 2 - 2 図参照)

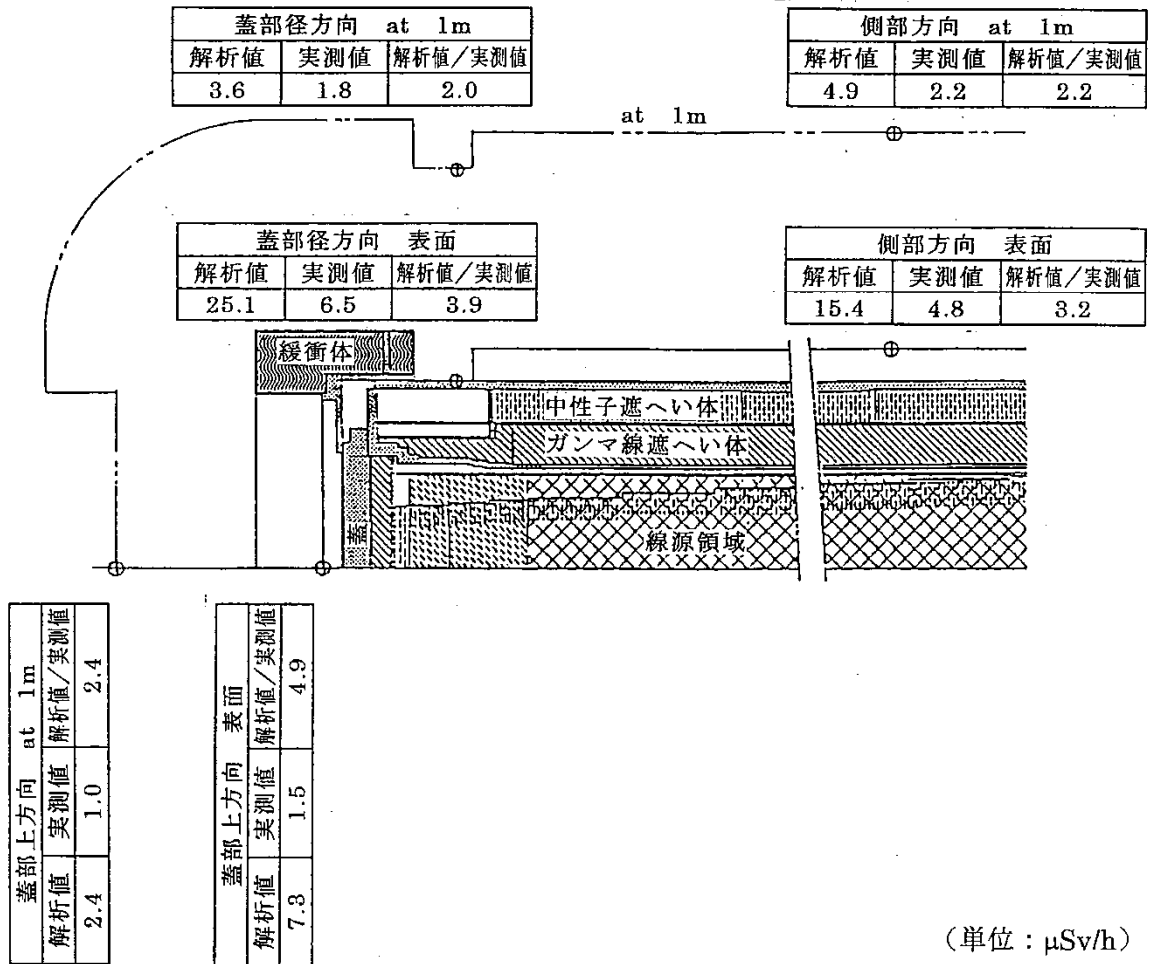


EXCELLOX 型輸送物の容器表面でのガンマ線量当量率

(第 13 基準研究部会「使用済燃料の安全輸送に関する調査研究報告書」昭和 54 年 3 月、日本造船研究協会⁽⁷⁾の PALLAS コード検証例に DOT コード解析結果を追記したものである。)

参考文献 ・日立造船株式会社、「使用済燃料乾式貯蔵設備の安全設計で使用する解析コードについて」、HZTR-02, (1997)

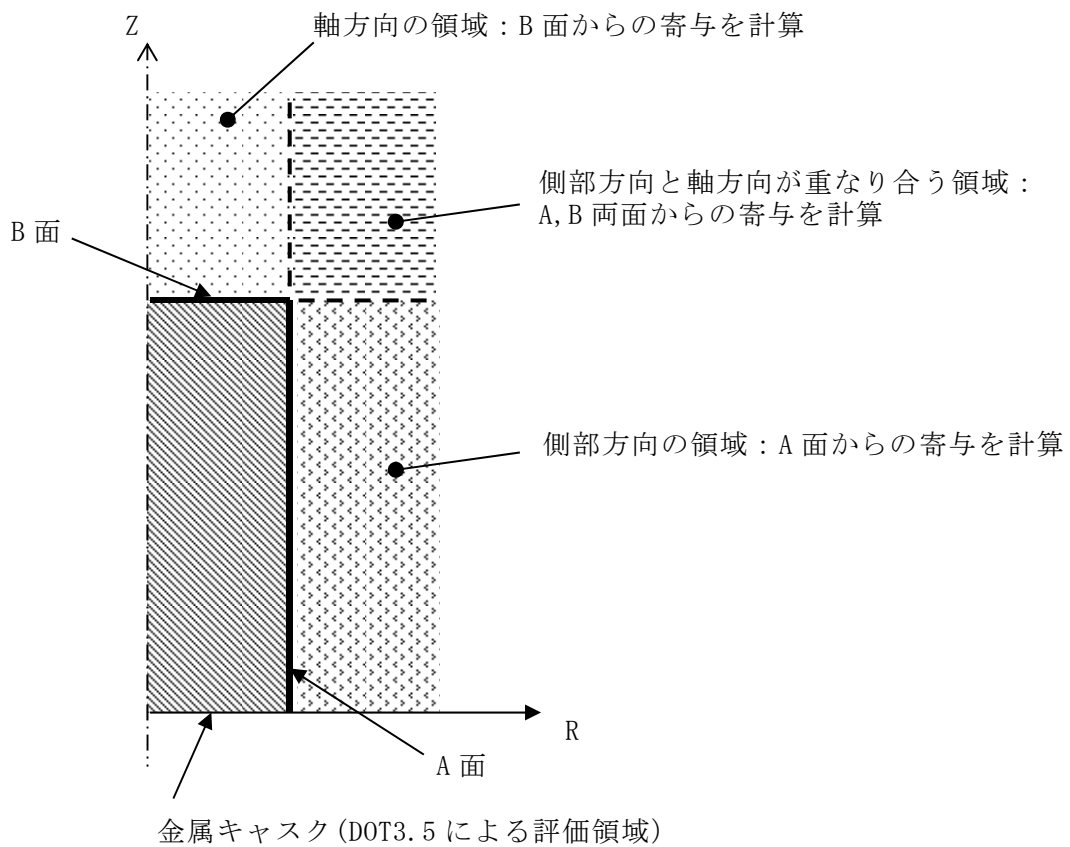
別添 2-1 図(1) ガンマ線線量当量率の DOT コードの検証例



HZ-75T 型輸送物の表面及び表面より 1m の位置での中性子線量当量率。

参考文献 ・日立造船株式会社, 「使用済燃料乾式貯蔵設備の安全設計で使用する解析コードについて」, HZTR-02, (1997)

別添 2-1 図(2) 中性子線量当量率の DOT コードの検証例



別添 2 - 2 図 SPACETRAN-IIIコードの評価体系

BWR用大型キャスク(タイプ2A)の遮蔽評価条件等の妥当性について

1. 構造及び遮蔽条件の妥当性について

BWR用大型キャスク(タイプ2A)に収納する燃焼度が同じ最高燃焼度40,000MWd/t, 平均燃焼度34,000MWd/tである新型8×8ジルコニウムライナ燃料と高燃焼度8×8燃料をそれぞれ全数収納した場合の金属キャスク表面及び表面から1mの位置における線量当量率評価にあたっては, 各燃料の軸方向燃焼度分布, 中性子実効増倍率, 燃料構造材の材質及び質量を考慮している。

いずれの部位においても高燃焼度8×8燃料全数収納時よりも新型8×8ジルコニウムライナ燃料全数収納時の線量当量率が高いことから, BWR用大型キャスク(タイプ2A)の遮蔽評価としては, 新型8×8ジルコニウムライナ燃料を全数収納した場合が最も厳しくなる。

線量当量率の評価では, 中性子実効増倍率(k_{eff} : 0.259(新型8×8ジルコニウムライナ燃料), 0.272(高燃焼度8×8燃料))を用いて中性子の増倍効果($1/(1-k_{\text{eff}})$)を考慮しているが, その効果(1.350(新型8×8ジルコニウムライナ燃料), 1.374(高燃焼度8×8燃料))の差は僅かである。従って, 中性子実効増倍率の差異による影響についても, 元々の一次中性子線源強度が高燃焼度8×8燃料と比較して4割程大きい新型8×8ジルコニウムライナ燃料の線量当量率に包絡される。

このため, BWR用大型キャスク(タイプ2A)の遮蔽評価条件は, 新型8×8ジルコニウムライナ燃料を全数収納するBWR用大型キャスク(タイプ2)の評価条件と同一となる。

解析に使用した基本的なデータについて

1. 遮蔽材の密度について

解析で使用した遮蔽材の密度は、ばらつきを考慮し、最小密度としている。

金属材料の最小密度は、文献値や購入実績を参考にして定めたメーカ設定値である。レジンの最小密度は、メーカで保証値を定めて、密度測定により保証値を下回らないことを確認している。(別添 4 - 1 表参照)

2. 遮蔽厚さについて

解析モデルの各種寸法は、公称値でモデル化している。遮蔽厚さは、各遮蔽体の最小密度に係数(最小寸法/公称寸法)を乗じることで、解析において最小厚さの評価となるようにしている。

3. 元素組成について

ガンマ線の遮蔽能力は、ほぼ密度で決まるため微量元素の影響は無視できる。

中性子の遮蔽能力は、特定の元素である水素の密度で決まり、その他の元素の寄与は少ないため、微量元素の影響は無視できる。また、組成のばらつきの影響は、無視できるレベルである。主な遮蔽材料である炭素鋼について、微量元素を無視しても線量当量率に有意な影響を与えないことを確認している。(別添 4 - 2 表～別添 4 - 4 表参照)

別添4-1表 金属キャスクの遮蔽材の密度及び元素組成
(BWR用大型キャスク(タイプ2)/BWR用大型キャスク(タイプ2A))

材料	項目	遮蔽材の密度 (g/cm ³)	元素組成 (重量%)	備考
炭素鋼		[Redacted]	Fe:100	密度：文献値や購入実績を参考に定めたメーカー設定値 組成：微量元素無視
オステナイト系 ステンレス鋼			Fe:72 Cr:19 Ni:9	密度：文献値や購入実績を参考に定めたメーカー設定値 組成：JIS G4303 [Redacted] 記載値の中央値
析出硬化系 ステンレス鋼			Fe:76 Cr:16 Ni:4 Cu:4	密度：文献値や購入実績を参考に定めたメーカー設定値 組成：JIS G4303 [Redacted] 記載値の中央値
ほう素添加 ステンレス鋼			B:1 Fe:71 Cr:19 Ni:9	密度：文献値や購入実績を参考に定めたメーカー設定値 組成：Bの組成は最小保証値 [Redacted]
アルミニウム合金			Al:100	密度：文献値や購入実績を参考に定めたメーカー設定値 組成：微量元素無視
レジン*1			—*2	密度：メーカー保証値*1 組成：メーカー保証値*1

*1：このレジンは(BWR用大型キャスク(タイプ2)/BWR用大型キャスク(タイプ2A))の製造者の開発品である。

*2：主成分とその配合比を管理している。主成分(配合比)は以下の通りである。

[Redacted]

別添 4 - 2 表 側部表面における線量当量率^{注1)}比較
 (BWR用大型キャスク(タイプ2)/BWR用大型キャスク(タイプ2A))
 (μSv/h)

計算ケース ^{注2)}								
中性子		72.7	70.1	72.3	71.1	72.6	72.6	68.0
ガンマ線	二次ガンマ線	26.9	26.6	26.8	26.5	26.9	26.9	26.4
	燃料有効部	95.8	95.6	95.6	96.2	95.8	95.7	95.8
	構造材放射化	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
合計		195.5	192.4	194.8	193.9	195.4	195.3	190.3
Fe100%に対する比 (各ケース合計 /本評価の合計)		—	0.984	0.996	0.992	0.999	0.999	0.973

注1) : 評価方法, 計算条件

- ・(BWR用大型キャスク(タイプ2)/BWR用大型キャスク(タイプ2A))の燃料中心高さ半径方向次元輸送計算を各ケースで実施し, 得られた1cm線量当量率の比を, 申請値(Fe100%の評価)に乗じて算出。^{注3)}
- ・炭素鋼の密度を保存して組成のみを変更。
- ・計算に使用している核データDLC23に含まれない は, MATXSLIB-J33 ライブラリを縮約して使用。

注2) : BWR用大型キャスク(タイプ2)/BWR用大型キャスク(タイプ2A)の胴で使用している炭素鋼の化学成分(別添4-3表参照)

注3) : BWR用大型キャスク(タイプ2)/BWR用大型キャスク(タイプ2A)の燃料中心高さ半径方向次元輸送計算結果(別添4-4表参照)

別添 4 - 3 表 炭素鋼の化学成分

((BWR用大型キャスク(タイプ2)/BWR用大型キャスク(タイプ2A)の胴)

材料名	炭素	けい素	マンガン	りん	硫黄

別添 4 - 4 表 燃料中心高さ半径方向一次元輸送計算結果 ($\mu\text{Sv/h}$)

()内は Fe:100%の結果との比

計算ケース		Fe:100%						
中性子			(0.964)	(0.994)	(0.978)	(0.999)	(0.999)	(0.936)
ガンマ線	二次ガンマ線		(0.988)	(0.998)	(0.984)	(1.000)	(0.999)	(0.980)
	燃料有効部		(0.998)	(0.998)	(1.004)	(1.000)	(0.999)	(1.000)

- ・ 構造材放射化は値が小さいため評価対象としていない。
- ・ 一次元計算であるため、燃料中心部が上下方向に無限に続く体系になり、計算結果は有限体系(R-Z)の申請値より高くなる。

二次元輸送計算コードで使用する断面積ライブラリについて

金属キャスクの遮蔽解析では、最も実績のある手法である二次元輸送計算コード DOT3.5 及び断面積ライブラリ DLC-23/CASK の組合せで評価をしている。しかし、本断面積ライブラリは特定の条件（鉄の単層透過など）では中性子線量当量率を過小評価することが文献等で知られている。

BWR用大型キャスク(タイプ2)／BWR用大型キャスク(タイプ2A)において、特定の条件で中性子線量当量率の評価が向上するとされている断面積ライブラリ MATXSLIB-J33 による評価結果が示されている^[1]。同評価によれば、金属キャスク表面における最大線量当量率は 1.811mSv/h であり 2mSv/h 以下となること、金属キャスク表面から 1 m の位置における最大線量当量率は 98.6 μ Sv/h であり 100 μ Sv/h 以下となることが、それぞれ確認されている。

別紙6-1表(1/2) 線量当量率評価結果の比較(配置(1))

(単位: μSv/h)

評価点	頭部				側中央	底部									
	軸方向	径方向		径方向 (トランニオン部)		径方向	径方向 (トランニオン部)		軸方向						
		③a	③b				⑦a	⑦b							
ライブラリ ^{*3}	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B					
ガンマ線	燃料有効部	0.1	0.1	0.5	0.3	0.5	0.3	95.8	70.6	1.3	0.9	24.2	17.5	3.0	2.0
	構造材放射化	4.9	3.9	132.5	169.7	110.4	118.2	< 0.1 ^{**}	< 0.1 ^{**}	12.8	9.8	63.2	47.6	19.1	13.3
	二次ガンマ線	0.7	0.6	2.0	2.6	2.1	2.7	26.9	38.9	4.6	7.8	7.8	10.8	2.3	3.2
中性子	188.2	296.3	253.9	347.2	505.2	770.1	72.7	87.8	706.9	1445.7	1012.5	1735.1	265.9	598.4	
合計	193.9	300.9	388.9	519.8	618.2	891.3	195.5	195.4	725.6	1464.2	1107.7 ^{**}	1811.0 ^{**}	290.3	616.9	
評価点	②				⑤				⑧						
ライブラリ ^{*3}	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	
ガンマ線	燃料有効部	0.5	0.3	12.9	8.9	12.9	8.9	40.5	29.6	21.2	15.4	21.2	15.4	3.9	2.9
	構造材放射化	45.6	45.4	24.0	20.4	24.0	20.4	0.7	0.5	8.1	6.3	8.1	6.3	53.3	44.9
	二次ガンマ線	0.2	0.2	3.1	4.3	3.1	4.3	10.5	14.3	5.3	7.3	5.3	7.3	0.9	1.0
中性子	28.7	52.7	17.3	23.0	20.9	30.5	26.2	32.2	13.4	16.7	24.5	40.8	16.2	31.4	
合計	75.0	98.6 ^{**}	57.3	56.6	60.9	64.1	77.9	76.6	48.0	45.7	59.1	69.8	50.3 ^{**}	80.2	

注記*1: “<0.1” の値は、“0.1” として合計値に合算した。

*2: 下線で示す値は、表面及び表面から 1m 離れた位置における線量当量率の最大値である。

*3: DUC-23/CASX を用いた評価を A、MATSUBI-J33 を用いた評価を B とする。

*4: A と B で評価方向ごとの最大値を与える位置が異なる(別紙6-1図参照)。A と同じ評価位置における結果を示し、O 内には B の評価位置における結果を示す。

参考文献

- [1] 日立GEニュークリア・エナジー㈱, 「補足説明資料1-2 HDP-69B(B)型の遮蔽設計に関する説明資料」, FR0-TA-0003/REV. 1, 平成30年4月

第4条 遮蔽等（貯蔵建屋）

<目 次>

1. 設計方針
2. 遮蔽設計

（別 添）

- 別添1 遮蔽設計に用いる線源と評価結果
- 別添2 直接線及びスカイシャイン線による評価について
- 別添3 貯蔵建屋の遮蔽評価について
- 別添4 作業線量想定について
- 別添5 放射線漏えいの低減措置
- 参考 貯蔵建屋が無い場合の敷地境界線量について

1. 設計方針

使用済燃料貯蔵施設は、「使用済燃料の貯蔵の事業に関する規則」に基づいて管理区域を定めるとともに、放射線業務従事者が受ける線量が「核原料物質又は核燃料物質の製錬の事業に関する規則等の規定に基づく線量限度等を定める告示」に定められた線量限度を超えないようにし、さらに、放射線業務従事者等の立入場所における線量を合理的に達成できる限り低減できるように、貯蔵区域への入口に迷路又は遮蔽扉を設ける等、遮蔽及び機器の配置を行うとともに、各場所への立入頻度、滞在時間等を制限することにより、放射線業務従事者等の被ばくを低減する。（第1表、第1図参照）

使用済燃料貯蔵建屋の遮蔽設計に当たっては、放射線業務従事者の立入頻度、滞在時間等を考慮して外部放射線に係る基準線量率を設け、これを満足するようにする。

また、事業所内の管理区域以外の人立ち入る場所における線量を低減できるよう、必要に応じて作業時間の制限等、適切な措置を講ずる。

なお遮蔽設計に用いる線源と評価結果を別添1に示す。

2. 遮蔽設計

(1) 遮蔽設備

遮蔽設備の主要仕様を第2表及び第2図に示す。

a. 遮蔽壁

遮蔽壁は、建屋側壁、天井、貯蔵区域区画壁等のコンクリート壁で構造材を兼用する。

b. 遮蔽ルーバ

遮蔽ルーバは、貯蔵建屋貯蔵区域における排気口までの経路に設けられたコンクリート製の平板で、排気口からの放射線の漏えいを低減する。

(2) 機器の配置

金属キャスクは、貯蔵建屋貯蔵区域に配置し、その入口には迷路又は遮蔽扉を設ける。

(3) 公衆の線量

貯蔵建屋貯蔵区域に収容されている金属キャスク288基からの直接線及びスカイシャイン線について評価した結果、敷地境界外における公衆の実効線量は、年間約 2.8×10^{-2} mSvであり、「核原料物質又は核燃料物質の製錬の事業に関する規則等の規定に基づく線量限度等を定める告示」(第2条)に示されている周辺監視区域外における線量限度1mSv/年、並びに、貯蔵事業許可基準規則の解釈第4条(遮蔽等)に示される 50μ Sv/年以下を十分に下回る。

直接線及びスカイシャイン線による評価の詳細を別添2に示す。

(4) 貯蔵建屋内外の線量

貯蔵建屋貯蔵区域に収容されている金属キャスク最大288基、受入れ区域に仮置きしている金属キャスク最大9基(たて起こし架台1基、仮置架台7基、検査架台1基)を適切に配置して貯蔵建屋内外の線量を評価し、その評価結果が第1表に示す外部放射線に係る基準を満足することを確認する。

なお、事業所内の管理区域以外の人が入る場所については、作業場所の外部放射線に係る線量の測定を行い、必要に応じて区画の実施、立入時間の管理等の線量低減措置を講ずることにより、当該場所に滞在する者

の線量を公衆の線量限度以下とすることはもちろん、合理的に達成できる限り低減する。

貯蔵建屋遮蔽評価の詳細を別添 3 に、放射線業務従事者の貯蔵区域内及び受入れ区域内作業及び線量想定を別添 4 に示す。

第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
	C	0.01mSv/h 以上	貯蔵区域

※ 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B区分となるように設計

【補足：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。 〕

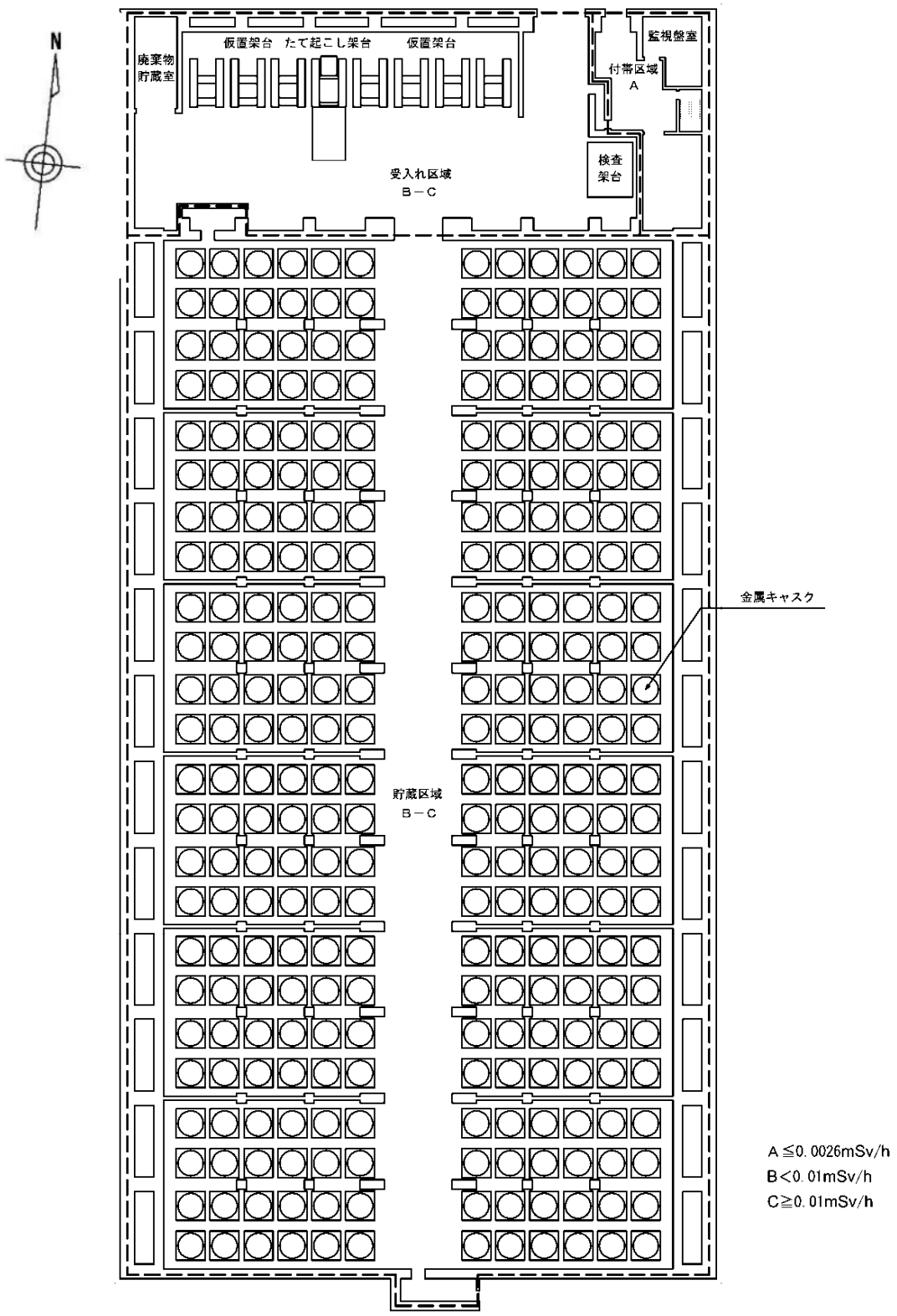
区分C：受入れ区域，貯蔵区域

〔 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。

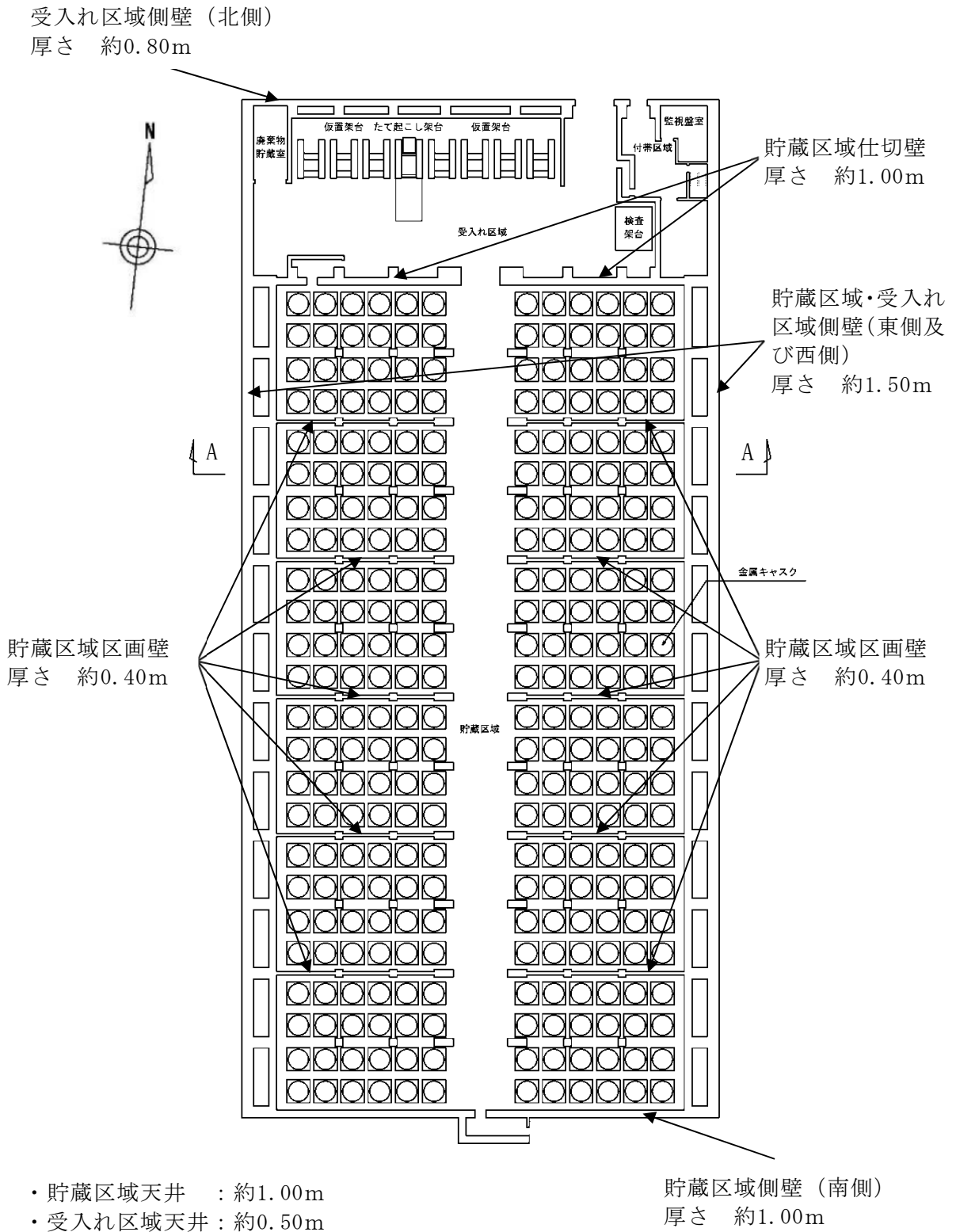
第2表 遮蔽設備の主要仕様

	主要仕様	
遮蔽壁	厚さ	約1.50m（貯蔵区域側壁（東側及び西側））
		約1.00m（貯蔵区域側壁（南側）及び天井）
		約1.50m（受入れ区域側壁（東側及び西側））
		約0.80m（受入れ区域側壁（北側））
		約0.50m（受入れ区域天井）
		約0.40m（貯蔵区域区画壁）
		約1.00m（貯蔵区域仕切壁）
	材料	コンクリート
遮蔽ルーバ	厚さ	約 0.32m
	長さ	約 4.00m
	枚数	5枚
	材料	コンクリート

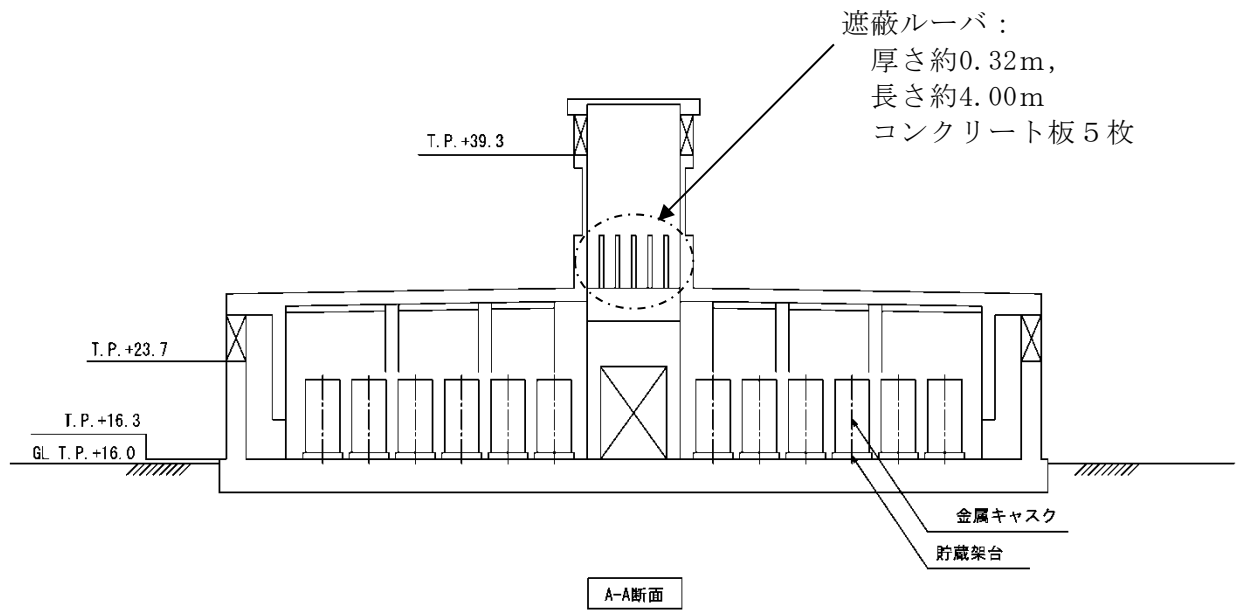


使用済燃料貯蔵建屋一階
T.P.+16.3

第1図 遮蔽設計区分概略図



第2図(1) 遮蔽設備 (遮蔽壁) の主要仕様



第2図(2) 遮蔽設備（遮蔽ルーバ）の主要仕様

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。

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，遮へい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²⁴²Cm(α,n)反応による中性子のエネルギースペクトルとする。

(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100μSv/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。
- ・コンクリート中での実効線量率の減衰率を1次元輸送計算コード（ANISN）により計算する。

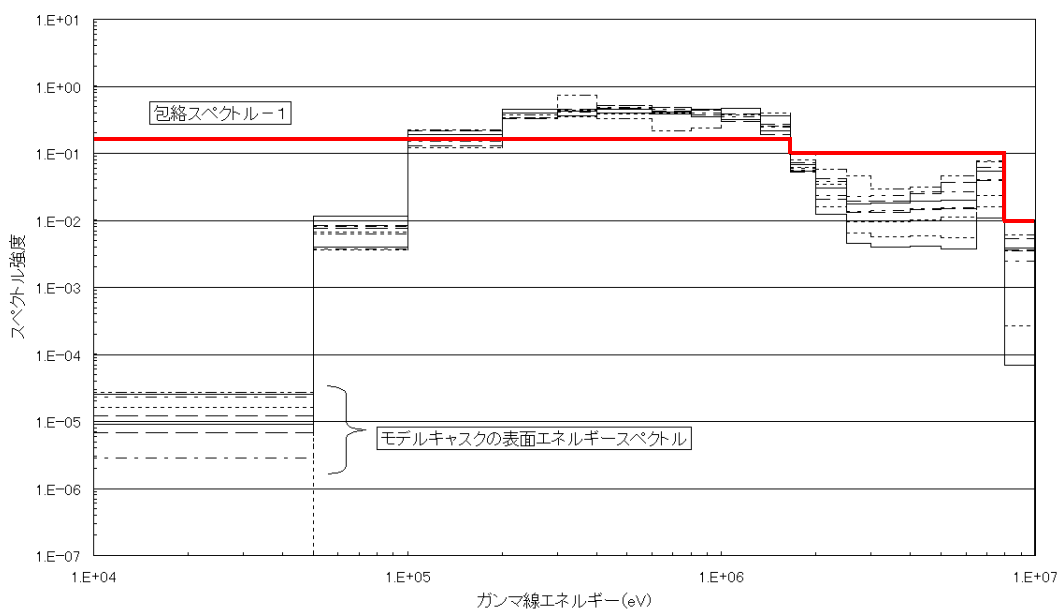
(3) 妥当性評価結果

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

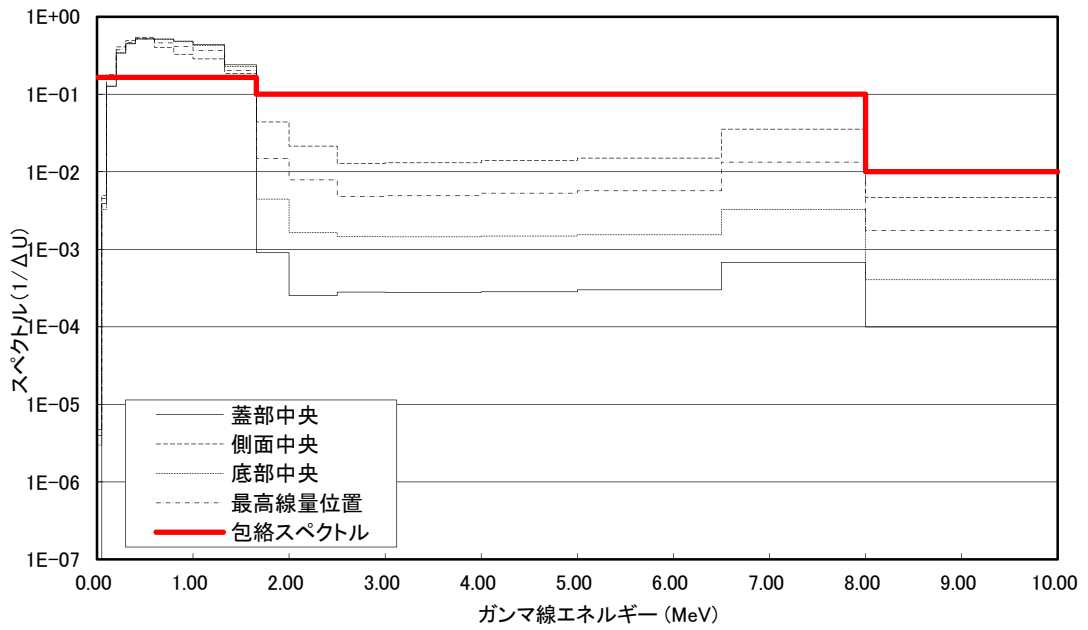
注：ANISN 用群定数断面積 DLC23/F を使用



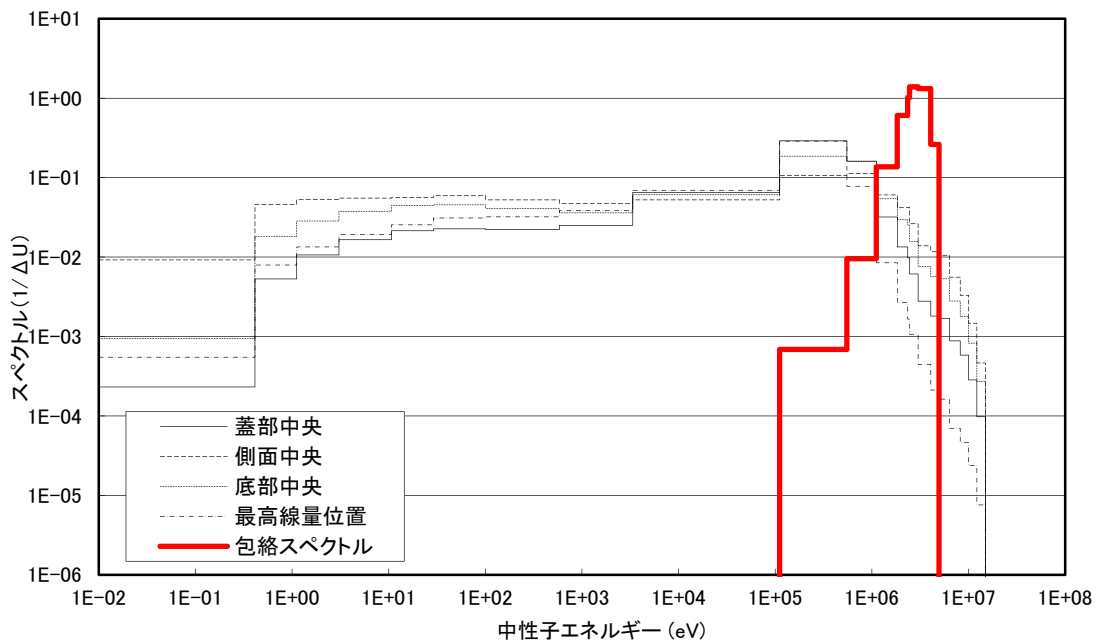
添付 1-1 図 ガンマ線スペクトル分布図

4 条(建屋)一別添 1-5

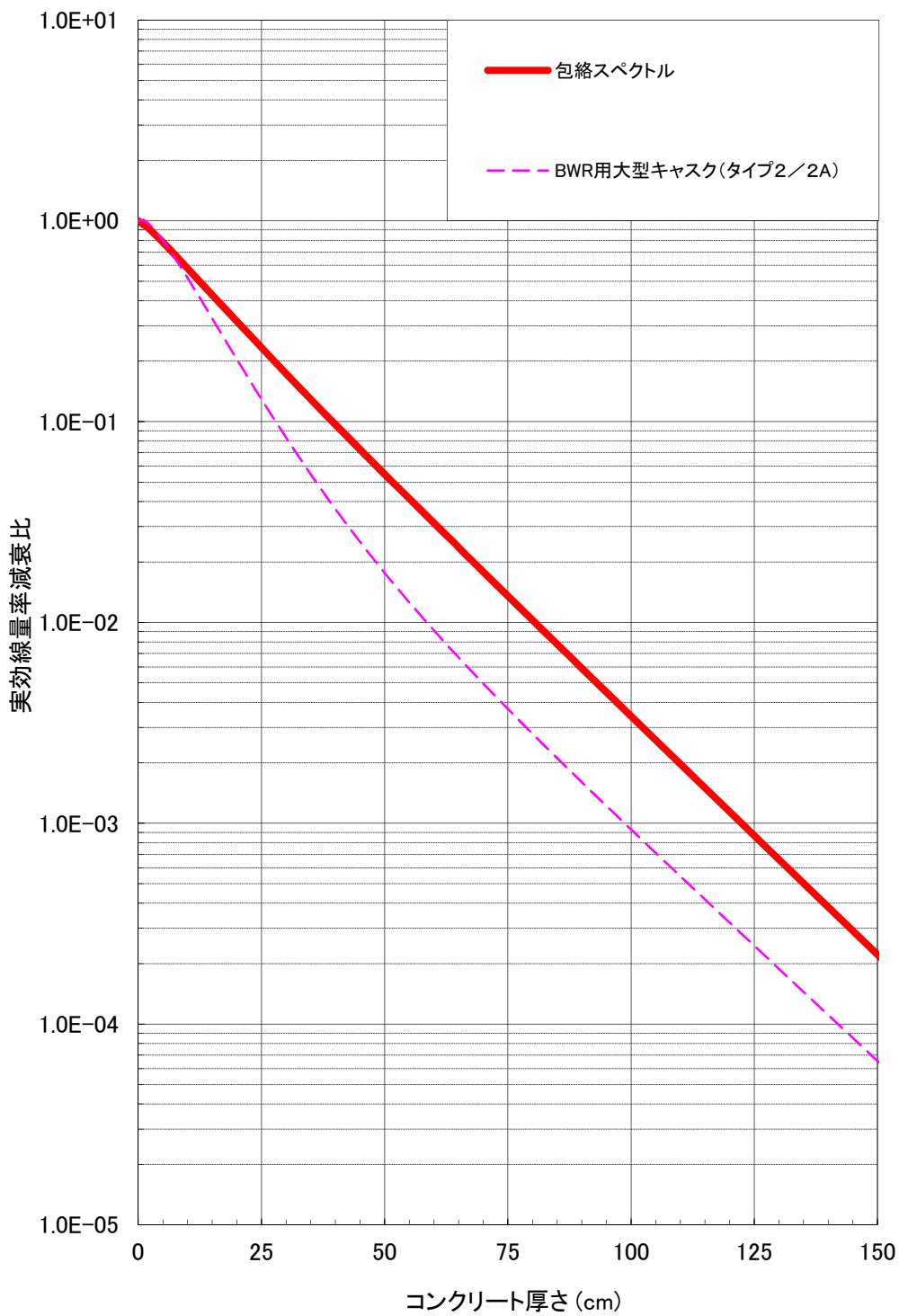
(ガンマ線)



(中性子)

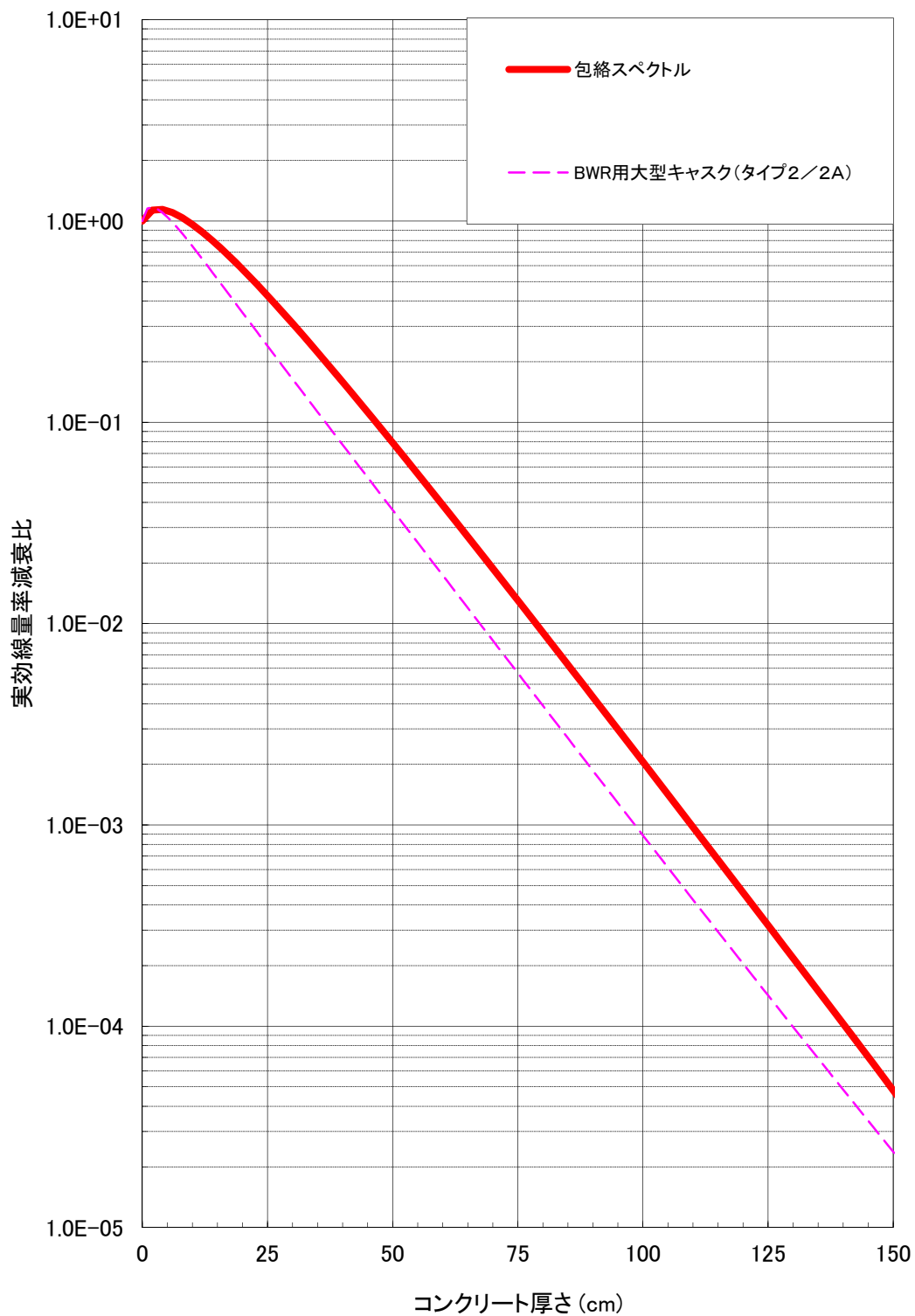


添付 1-2 図 包絡スペクトル，設計スペクトル分布図
 (BWR 用大型キャスク (タイプ 2 / 2 A))



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。



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。

金属キャスクの線量当量率について

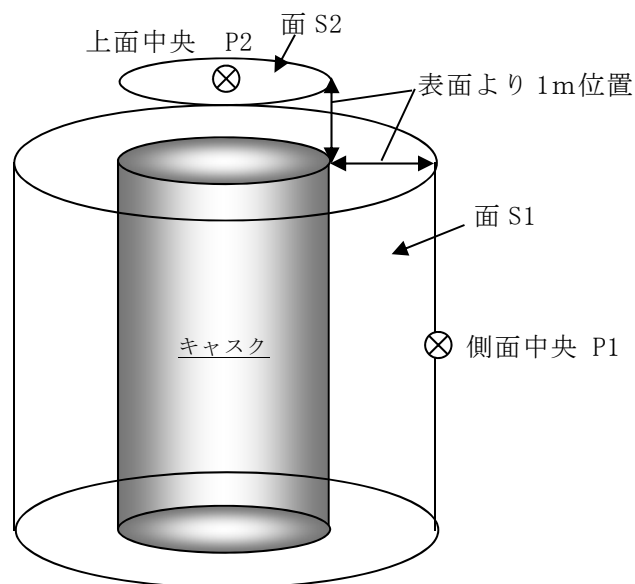
1. 基本的考え方

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。

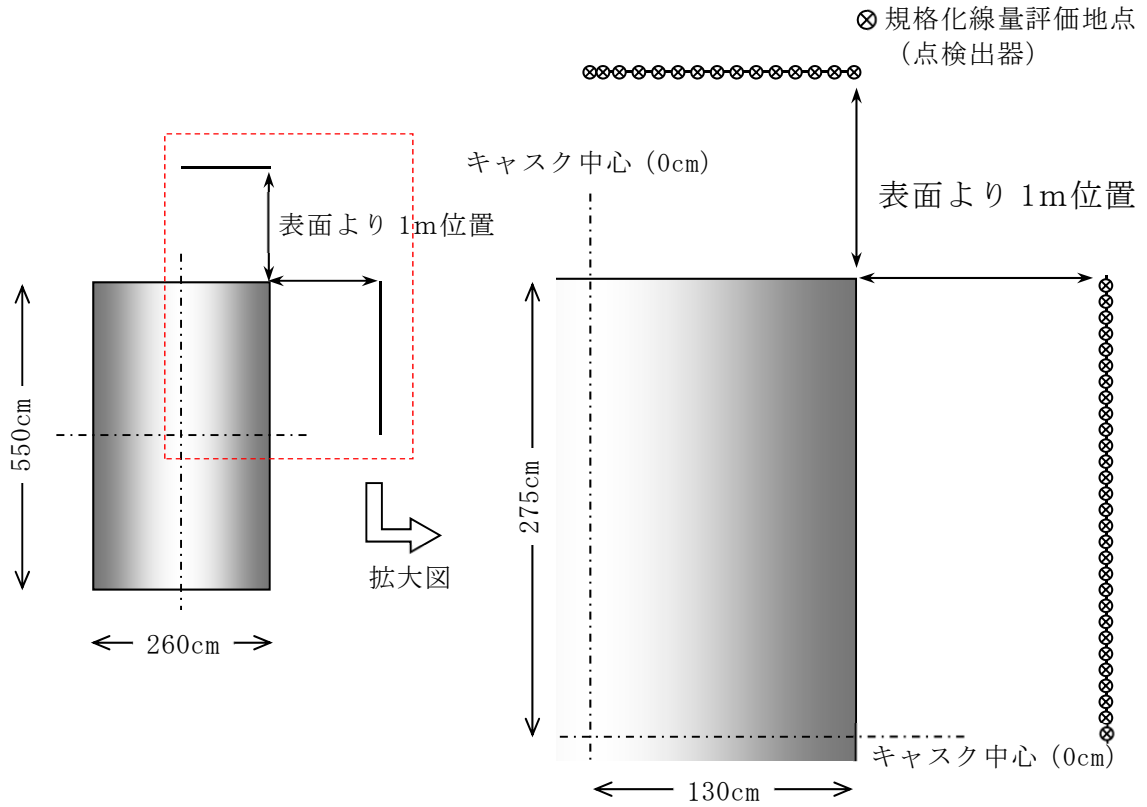
2. 線量当量率の規格化の方法

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。

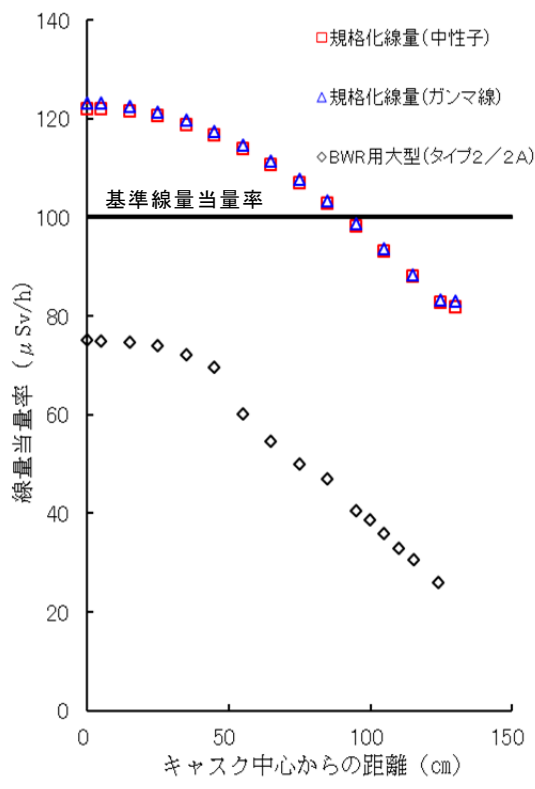
本評価の線源条件として設定している金属キャスクの規格化線量の分布と、本施設で使用する金属キャスクの線量当量率の分布を添付 2-2 図に示す。



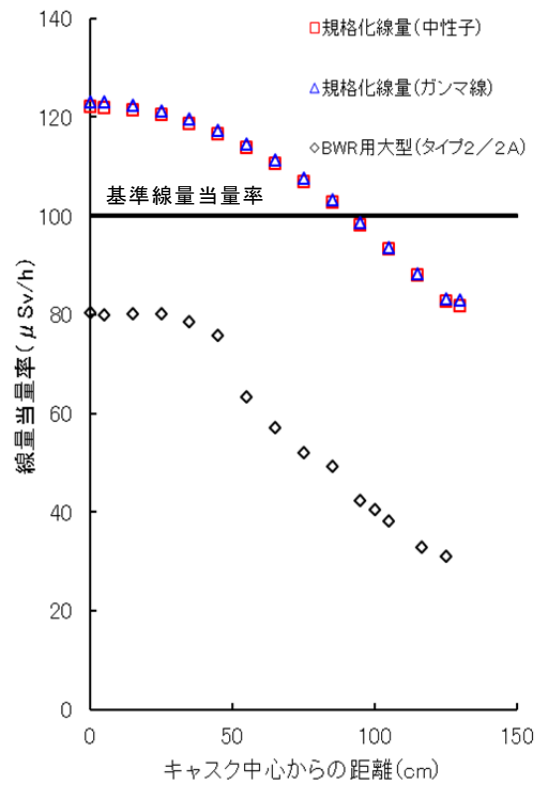
添付 2-1 図. キャスク表面線量の規格化のイメージ



(規格化線量の計算位置)

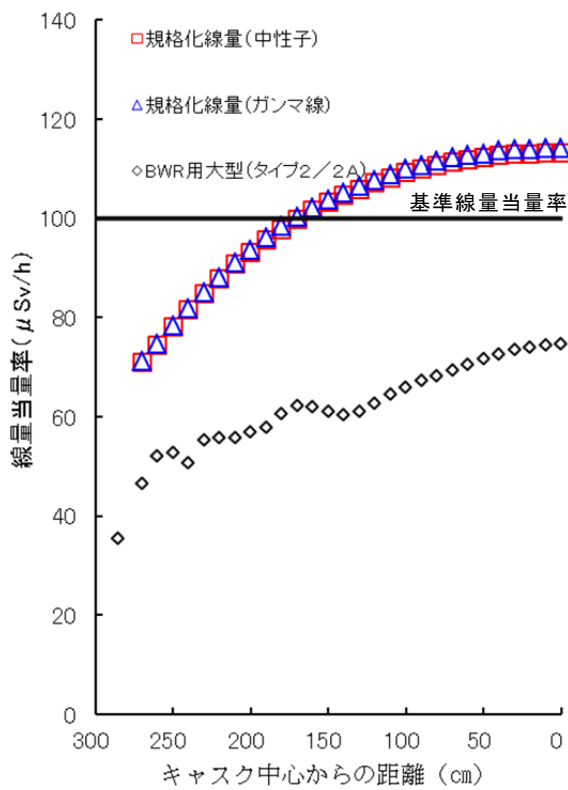


(蓋部)

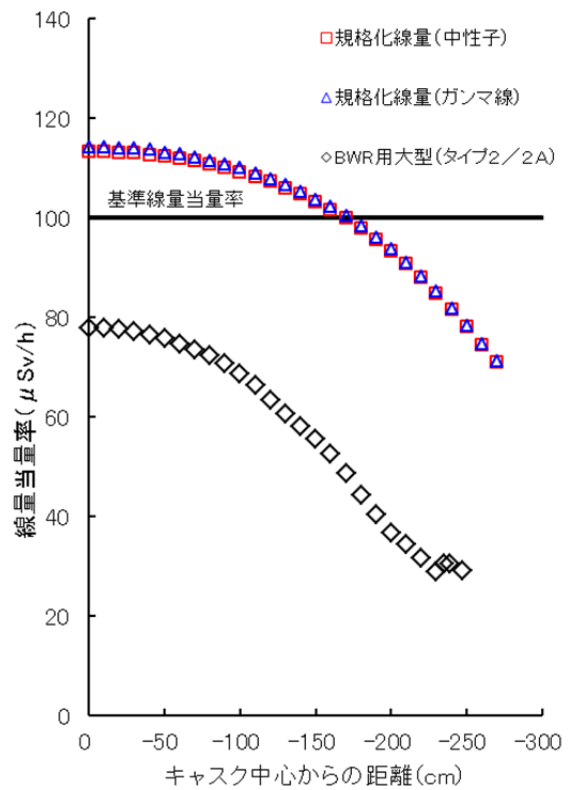


(底部)

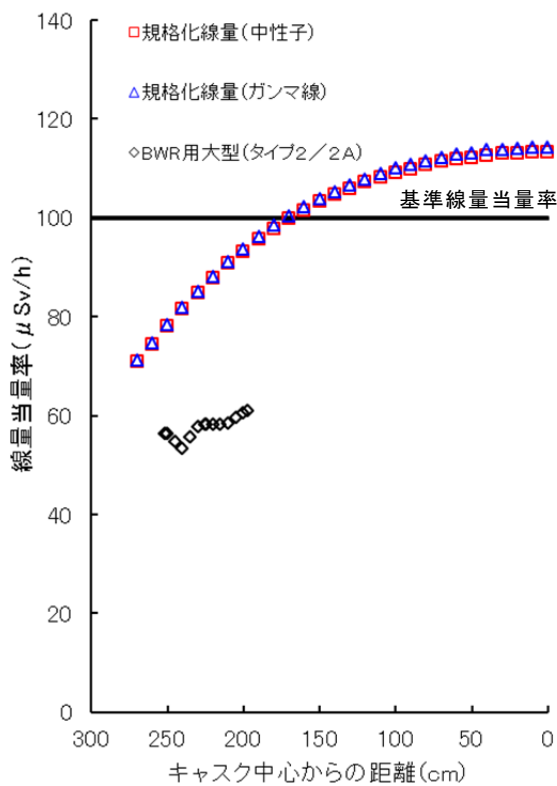
添付 2-2 図(1) 金属カスク表面から 1m 位置での線量当量率分布



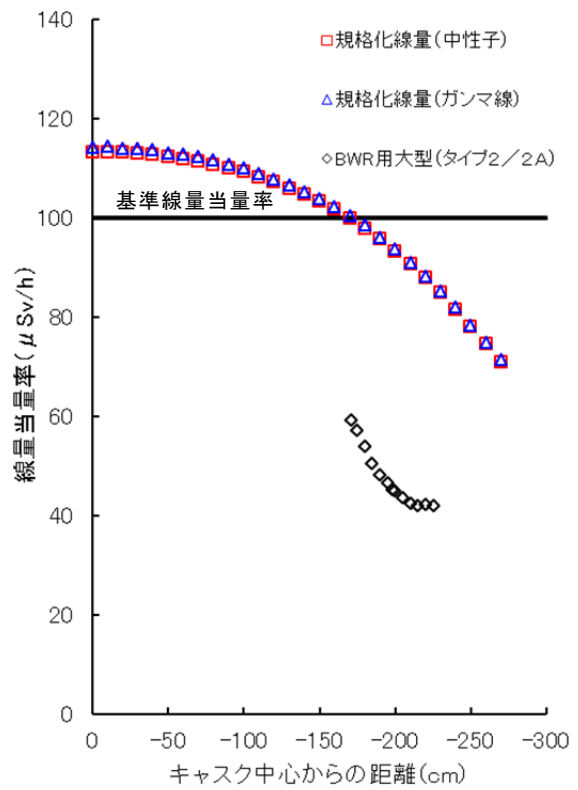
(側部上端)



(側部下端)



(上部トラニオン部)



(下部トラニオン部)

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，使用済燃料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⁾ ($\mu\text{Sv/y}$)
			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⁾ ($\mu\text{Sv/y}$)
			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	

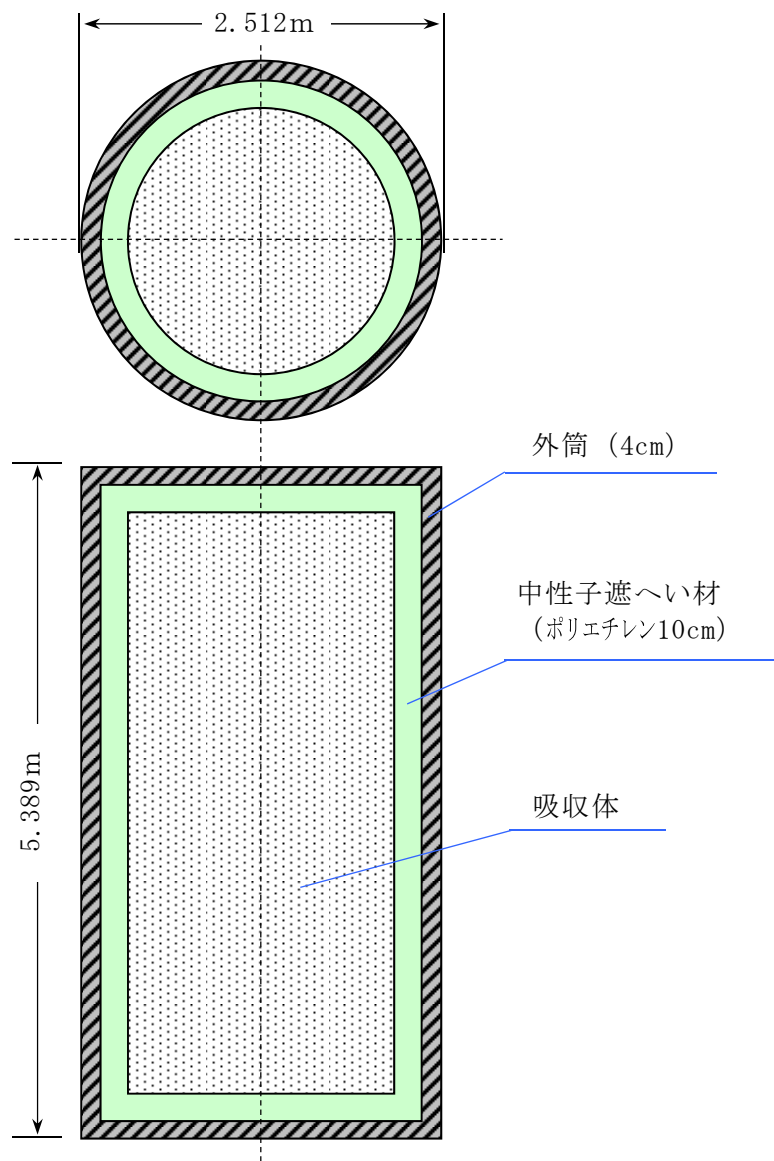
(注) 本評価は平成19年3月に行った事業許可申請の前に実施したものであり、評価モデルは現行のモデルと異なるものである。

添付 3-3 表(2) 評価結果の比較 (ケース A / ケース C)

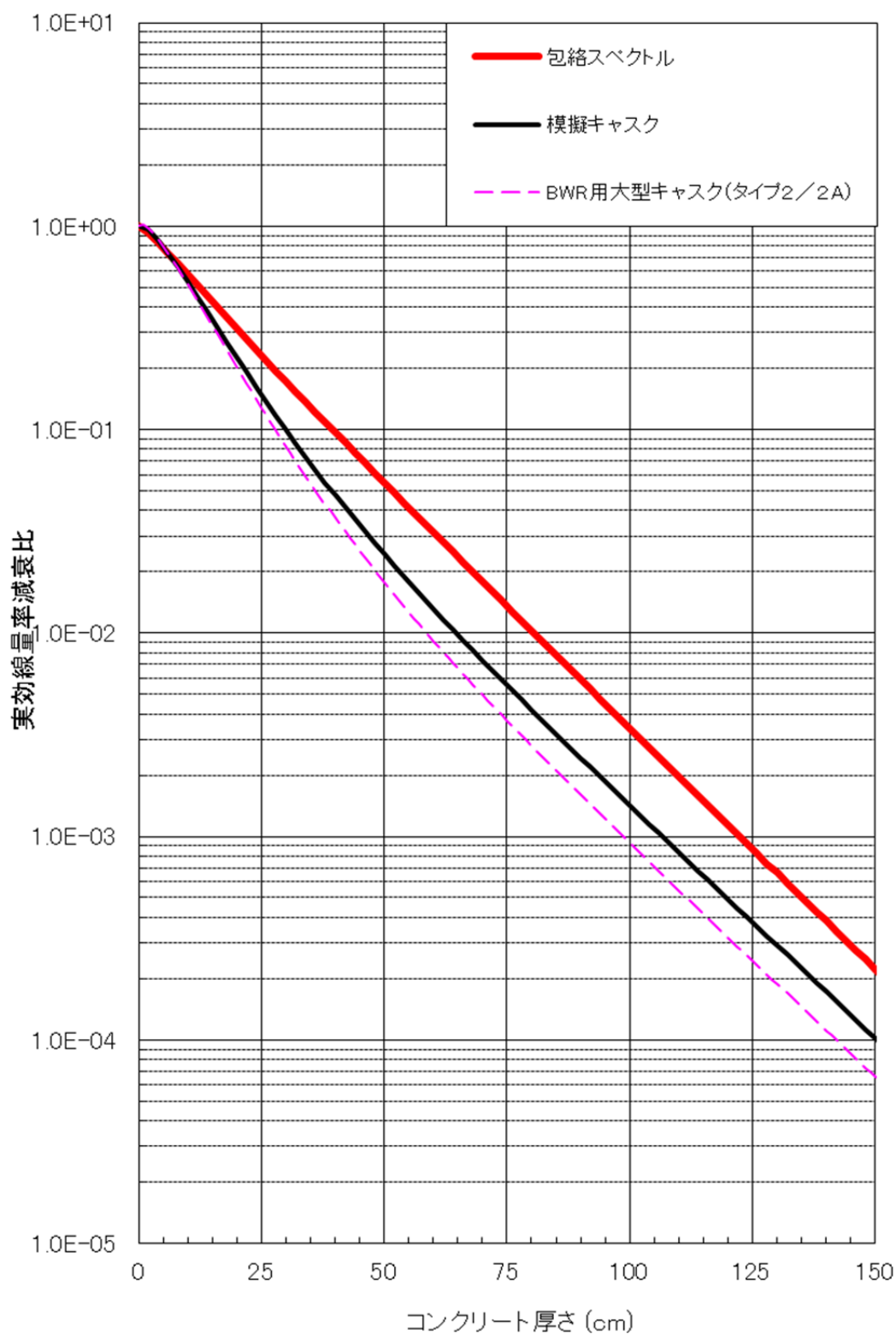
評価位置	バルク線量比	ストリーミング線量比		合計線量比
		給気口	排気口	
貯蔵区域から 直角東方向 (190m)	9.1	6.7	10.2	9.0
貯蔵区域から 直角北方向 (230m)	32.2	7.3	11.1	13.9
貯蔵区域から 直角南方向 (240m)	7.3	6.9	10.4	8.3

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)

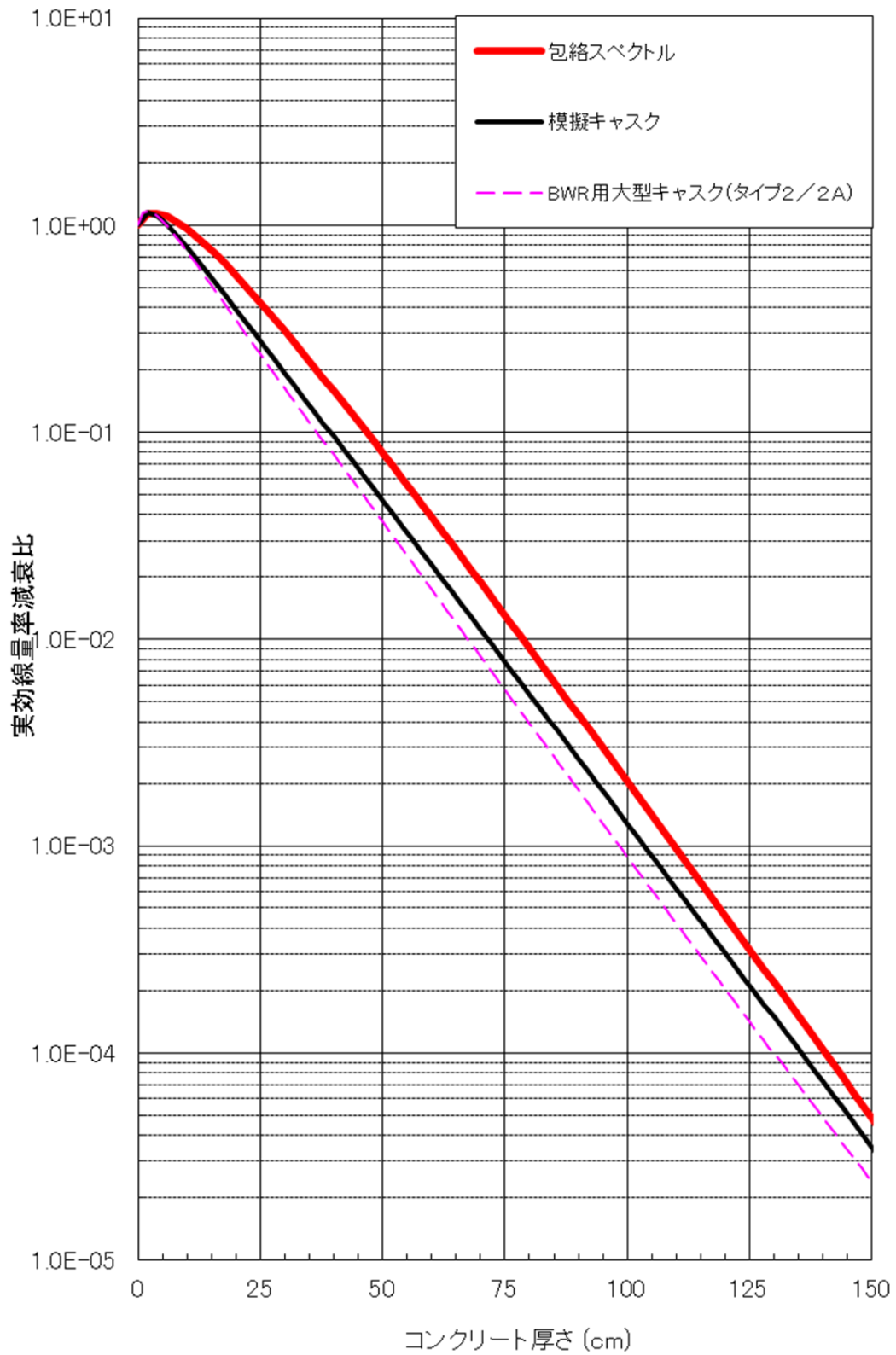
(注) 本評価は平成 19 年 3 月に行った事業許可申請の前に実施したものであり,
評価モデルは現行のモデルと異なるものである。



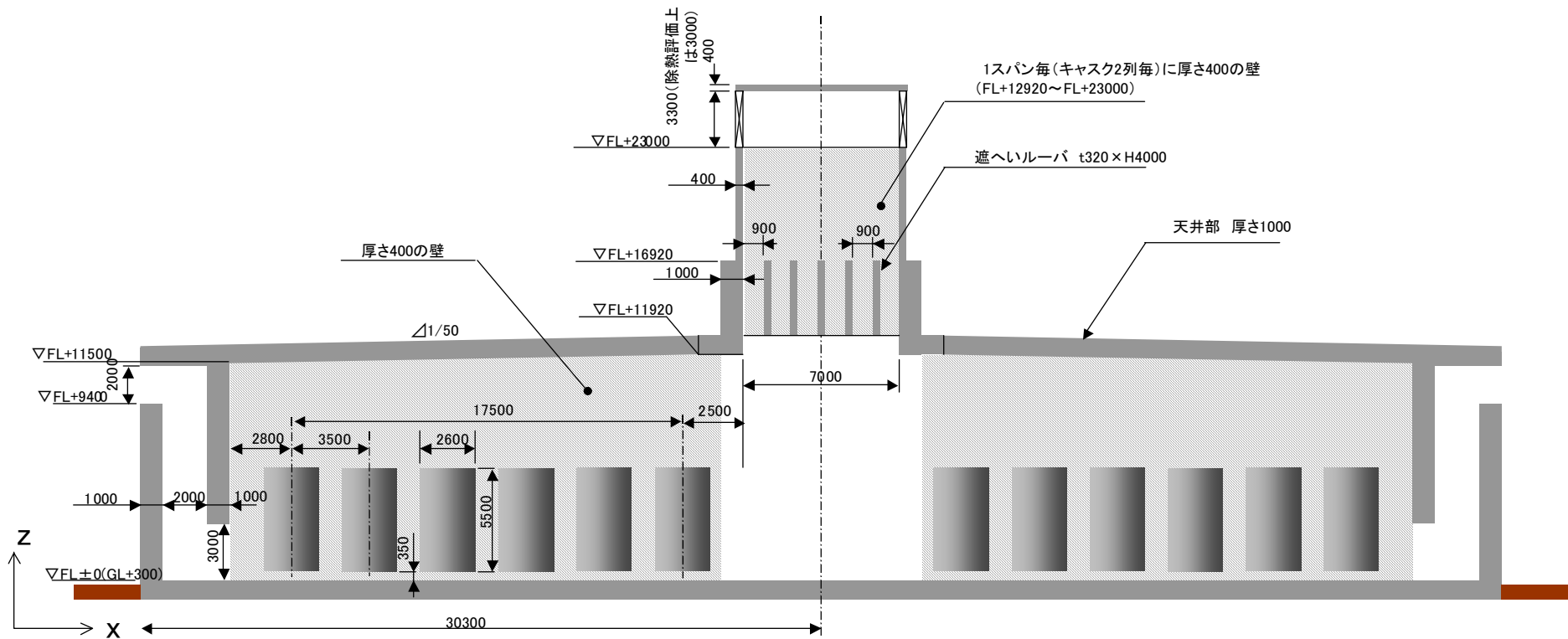
添付 3-1 図 模擬キャスクモデル (ケースCの評価で使用)



添付 3-2 図 コンクリート中の線量減衰割合 (ガンマ線)

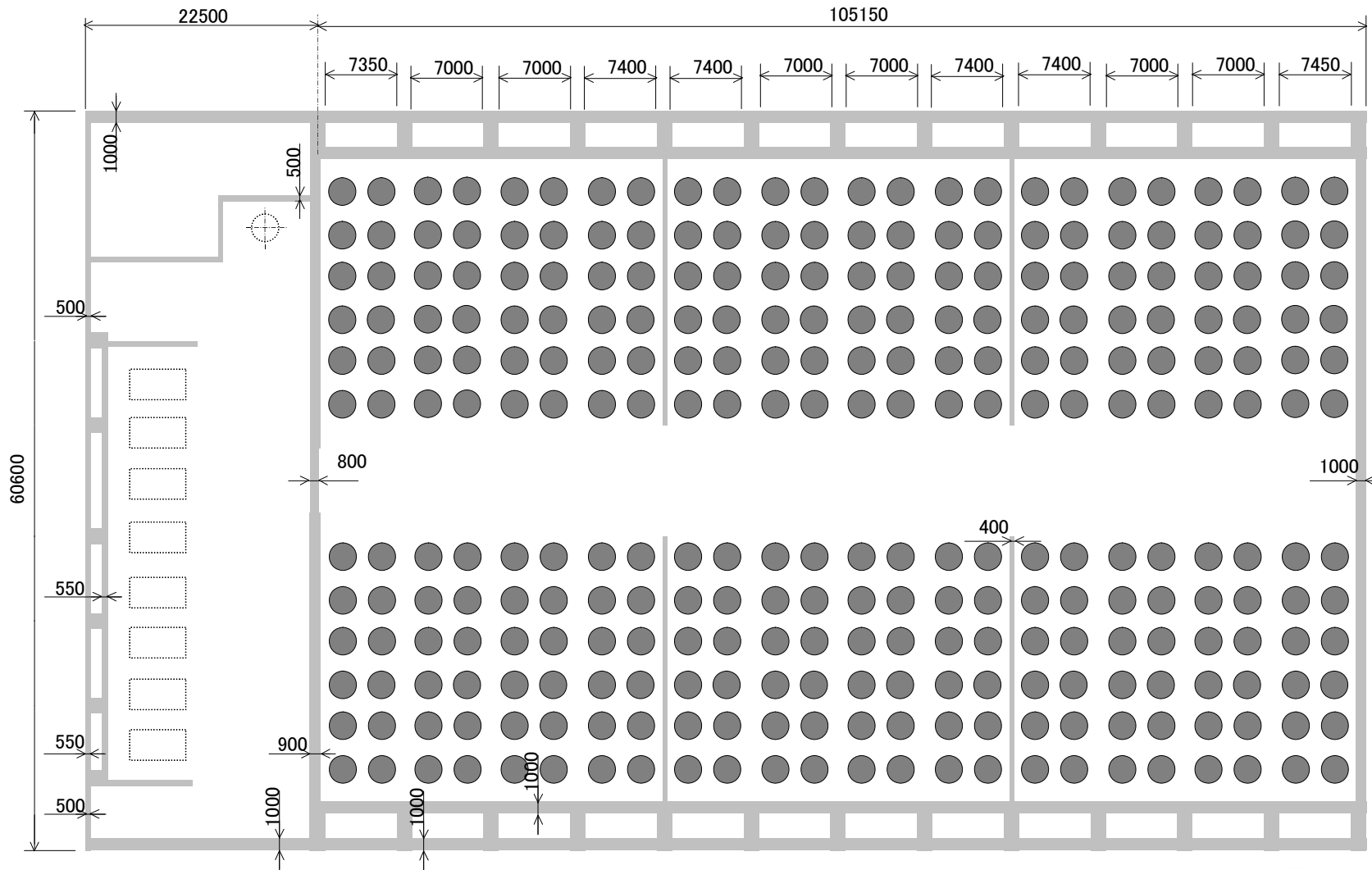


添付 3-3 図 コンクリート中の線量減衰割合 (中性子)



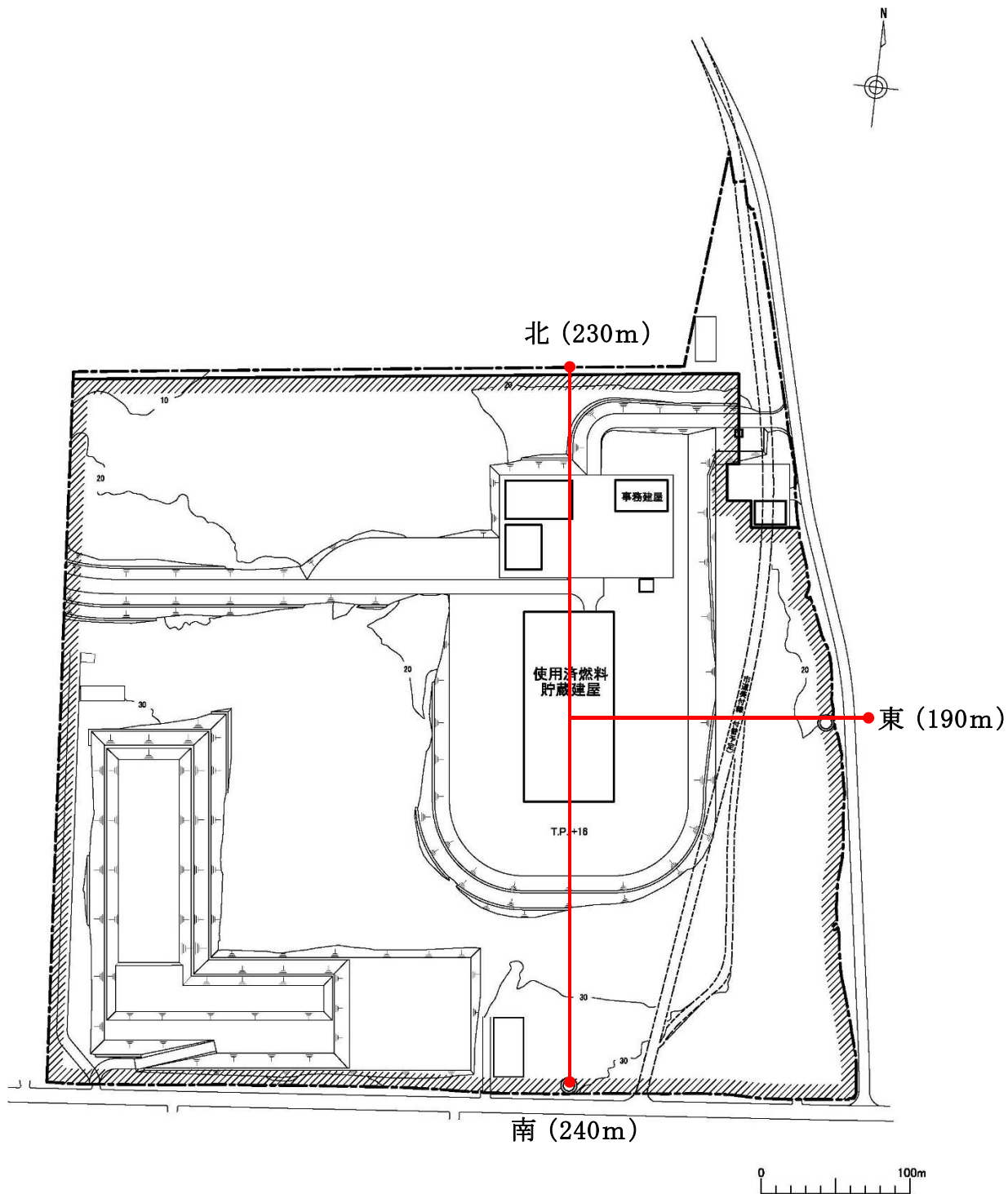
添付 3-4 図 使用済燃料貯蔵建屋モデル (貯蔵区域立面図)

(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 3-5 図 使用済燃料貯蔵建屋モデル (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。

直接線及びスカイシャイン線による評価について

貯蔵建屋に収容されている金属キャスク（線源）が放出する放射線が直接的又は空気中で散乱されて敷地境界外に到達する直接線及びスカイシャイン線について、以下のとおり評価している。

1. 評価条件，評価方法

(1) 解析コード

リサイクル燃料備蓄センターは、貯蔵建屋から敷地境界までの距離が短く、貯蔵建屋には除熱のための大きな開口部が存在することから、開口部からの中性子ストリーミング線量は敷地境界外における線量への寄与が大きくなる。また、貯蔵建屋貯蔵区域に配置する金属キャスク 288 基は、放射線を放出する線源であると同時に遮蔽体でもある（相互遮蔽効果）。

本評価では、開口部からの中性子ストリーミング線量、金属キャスク相互の遮蔽効果等を適切に評価できる MCNP コード⁽¹⁾を使用している。

- a. 解析コード：3次元連続エネルギーモンテカルロ法コード MCNP[※]-4C
- b. 断面積ライブラリ：MCNPDLC-200/MCNPDATA（ENDF/B-VIをベースとして MCNPコード用に作成された内蔵ライブラリ）

※ MCNP（MCNP：Monte Carlo N-Particle Transport Code System）は、米国 Los Alamos 国立研究所（LANL）において開発されたモンテカルロ法による中性子、ガンマ線及び中性子・ガンマ線結合系を対象とする汎用の輸送計算コードである。幾何形状の設定の自由度が大きいことや、断面積の取り扱いに連続エネルギーを採用していること等の利点があり、モンテカルロ輸送計算コードの主流なものとなっている。また、米国では、使用済燃料貯蔵施設の審査指針である NUREG-1567 において、遮蔽解析ツールとして記載されており、遮蔽設計、線量評価等で使用されている。

(2) 線源条件

金属キャスクから放出される放射線（中性子，ガンマ線）の比率，線量当量率及び金属キャスク表面のエネルギースペクトルは，設計，収納燃料条件等によりそれぞれ異なることから，線源条件は，リサイクル燃料備蓄セ

ンターで使用する金属キャスクの遮蔽解析結果を包絡するよう、以下のとおり設定する。

a. 線源

使用済燃料集合体を収納した金属キャスクとし、その基数は、事業開始以降、金属キャスクの基数及び配置がいずれの状態においても最も厳しい条件となるように、貯蔵建屋貯蔵区域に配置した 288 基とする。

b. 評価線質

金属キャスクからの放射線を全て中性子とした場合（中性子 100%）及び全てガンマ線とした場合（ガンマ線 100%）のそれぞれの線質に対して敷地境界外における実効線量を評価し、そのうち、保守的な値を公衆の線量とする。

c. 線源強度

リサイクル燃料備蓄センターでは、金属キャスクを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設定に当たっては、コンクリートの透過率を考慮し、コンクリート中の減衰割合が小さいエネルギースペクトル（以下「包絡スペクトル」という。）⁽²⁾を設定している。

包絡スペクトルは、(財)原子力安全研究協会により、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エネルギースペクトルとして、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。ガンマ線の包絡スペクトルは、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高エネルギー側（群定数断面積 DLC23/F の 1 群～8 群）について、上記 14 種類のモデルキャスクのスペクトル強度を包絡するよう設定されている。中性子の包絡スペクトルは、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 Cm-242 (α, n) 反応のスペクトルが設定されている。

金属キャスク表面の中性子エネルギースペクトルを別添 2-1 表に、ガンマ線エネルギースペクトルを別添 2-2 表に示す。

また、金属キャスクの線量当量率は、表面から 1m における位置での平均が、輸送時の線量基準値である $100 \mu\text{Sv/h}$ (1cm 線量当量率) となるように規格化している。

金属キャスク 1 基あたりの線源強度を別添 2-3 表に示す。

(3) 解析モデル

MCNP では、金属キャスク及び貯蔵建屋を三次元でモデル化している。

- a. 金属キャスクは、直径 2.6m、高さ 5.5m の円柱形状とし、散乱体として外筒 4cm、中性子遮蔽材 10cm を考慮している。また、キャスク内部は吸収体としており、吸収体に進入した中性子及びガンマ線は消去される。

金属キャスクの解析モデルを別添 2-1 図に示す。また、解析モデルの妥当性について、添付 1 に示す。なお、包絡スペクトルの妥当性については、別添 1 の添付 1 に示す。

- b. 貯蔵建屋は、躯体、給排気口等の構造を模擬してモデル化する。また、中性子の線量評価結果が保守的な値となるよう、貯蔵建屋のコンクリートは絶乾状態（自由水分を考慮しない）、貯蔵建屋内外の空気は水分量が少ない乾燥空気相当に設定している。

貯蔵建屋の解析モデルを別添 2-2 図及び別添 2-3 図に示す。

(4) 計算地点

線量の計算は、貯蔵建屋の貯蔵区域からの距離、貯蔵区域における給気口及び排気口の開口の向き、側壁等による遮蔽効果等を考慮して、貯蔵建屋の貯蔵区域からの距離が最短となる東側の敷地境界外（貯蔵建屋貯蔵区域の直角東方向）及び遮蔽壁による線量低減効果が最も小さくなる南側の敷地境界外（貯蔵建屋貯蔵区域の直角南方向）について評価している。また、参考として、貯蔵建屋貯蔵区域の直角北方向（直角西方向は直角東方向と対称であり、敷地境界外までの距離が直角東方向の方が短いため、直角西方向については省略）及び貯蔵建屋貯蔵区域中心から 16 方位の敷地境界外における線量を評価している（合計 19 地点）。

線量の計算地点を別添 2-4 図に示す。

(5) その他

リサイクル燃料備蓄センターからの放射線による評価は、バルク線量、

給気ロストリーミング線量，排気ロストリーミング線量をそれぞれ評価し，その合算値を敷地境界外の線量としている。

(6) 評価方法

「(3) 解析モデル」に示したように，金属キャスク形状，貯蔵建屋構造等を考慮し，MCNPコードを用いて計算地点における中性子束又はガンマ線束を算出している。

計算地点における中性子束又はガンマ線束からの実効線量の算出には，国際放射線防護委員会（ICRP）のPublication74の換算係数を用いている。

2. 公衆の線量評価結果

リサイクル燃料備蓄センターからの直接線及びスカイシャイン線による敷地境界外の実効線量の計算を行った結果，評価線質が中性子の場合，東側敷地境界外において最大となり，その値は年間約 2.8×10^{-2} mSvである。また，評価線質がガンマ線の場合，南側敷地境界外において最大となり，その値は年間約 6.6×10^{-3} mSvである。

敷地境界外における線量の計算結果の詳細を別添2-4表に示す。

参考文献

- (1) 小佐古敏荘，飯本武志，石川智之，坪井孝文，寺村政浩，岡村知巳，成宮祥介，研究論文“MCNPコードの金属キャスク貯蔵方式中間貯蔵施設線量評価への適用”，日本原子力学会和文論文誌，Vol. 6，No. 2，p. 225-238（2007）
- (2) 「使用済燃料中間貯蔵施設の直接線・スカイシャイン線量の評価手法について〔金属キャスク方式〕」（財団法人 原子力安全研究協会 リサイクル燃料資源貯蔵施設安全設計・評価検討専門委員会 スカイシャイン線量評価検討ワーキンググループ 平成12年3月）

別添 2-1 表 中性子エネルギースペクトル

エネルギー群	上限エネルギー (MeV)	スペクトル
1	1.492E+01	0.000E+00
2	1.220E+01	0.000E+00
3	1.000E+01	0.000E+00
4	8.180E+00	0.000E+00
5	6.360E+00	0.000E+00
6	4.960E+00	5.240E-02
7	4.060E+00	3.940E-01
8	3.010E+00	2.800E-01
9	2.460E+00	4.660E-02
10	2.350E+00	1.510E-01
11	1.830E+00	6.840E-02
12	1.110E+00	6.700E-03
13	5.500E-01	1.100E-03
14	1.110E-01	0.000E+00
15	3.350E-03	0.000E+00
16	5.830E-04	0.000E+00
17	1.010E-04	0.000E+00
18	2.900E-05	0.000E+00
19	1.070E-05	0.000E+00
20	3.060E-06	0.000E+00
21	1.120E-06	0.000E+00
22	4.140E-07	0.000E+00
*	1.000E-08	

*第 22 群の下限エネルギー

別添 2-2 表 ガンマ線エネルギースペクトル

エネルギー群	上限エネルギー (MeV)	スペクトル
1	1.000E+01	2.231E-03
2	8.000E+00	2.076E-02
3	6.500E+00	2.624E-02
4	5.000E+00	2.231E-02
5	4.000E+00	2.877E-02
6	3.000E+00	1.823E-02
7	2.500E+00	2.231E-02
8	2.000E+00	1.863E-02
9	1.660E+00	3.644E-02
10	1.330E+00	4.689E-02
11	1.000E+00	3.669E-02
12	8.000E-01	4.730E-02
13	6.000E-01	6.667E-02
14	4.000E-01	4.730E-02
15	3.000E-01	6.667E-02
16	2.000E-01	1.140E-01
17	1.000E-01	1.140E-01
18	5.000E-02	2.646E-01
**	1.000E-02	

**第 18 群の下限エネルギー

別添 2-3 表 金属キャスク 1 基あたりの線源強度

条 件	線源強度
中性子 100% の場合	8.48×10^7 [neutrons/sec・基]
ガンマ線 100% の場合	1.31×10^{10} [photons/sec・基]

別添 2-4 表 敷地境界外線量評価結果

	線源	評価線質	バルク線量 ¹⁾ (μ Sv/y)	ストリーミング線量 ¹⁾ (μ Sv/y)		小計 ²⁾ (μ Sv/y)	合計 ²⁾ (μ Sv/y)
				給気口	排気口		
貯蔵建屋貯蔵区域の直角東方向	中性子 100%	中性子	6.7	6.9	11.4	24.9	27.7
		2次ガンマ線	0.7 ※	1.1	1.2	2.8	
	ガンマ線 100%	ガンマ線	1.1	1.7	0.3	3.0	3.0
貯蔵建屋貯蔵区域の直角南方向	中性子 100%	中性子	5.3	0.9	3.5	9.6	11.3
		2次ガンマ線	1.4 ※	0.1	0.3	1.7	
	ガンマ線 100%	ガンマ線	6.5	0.05 未満	0.1	6.6	6.6

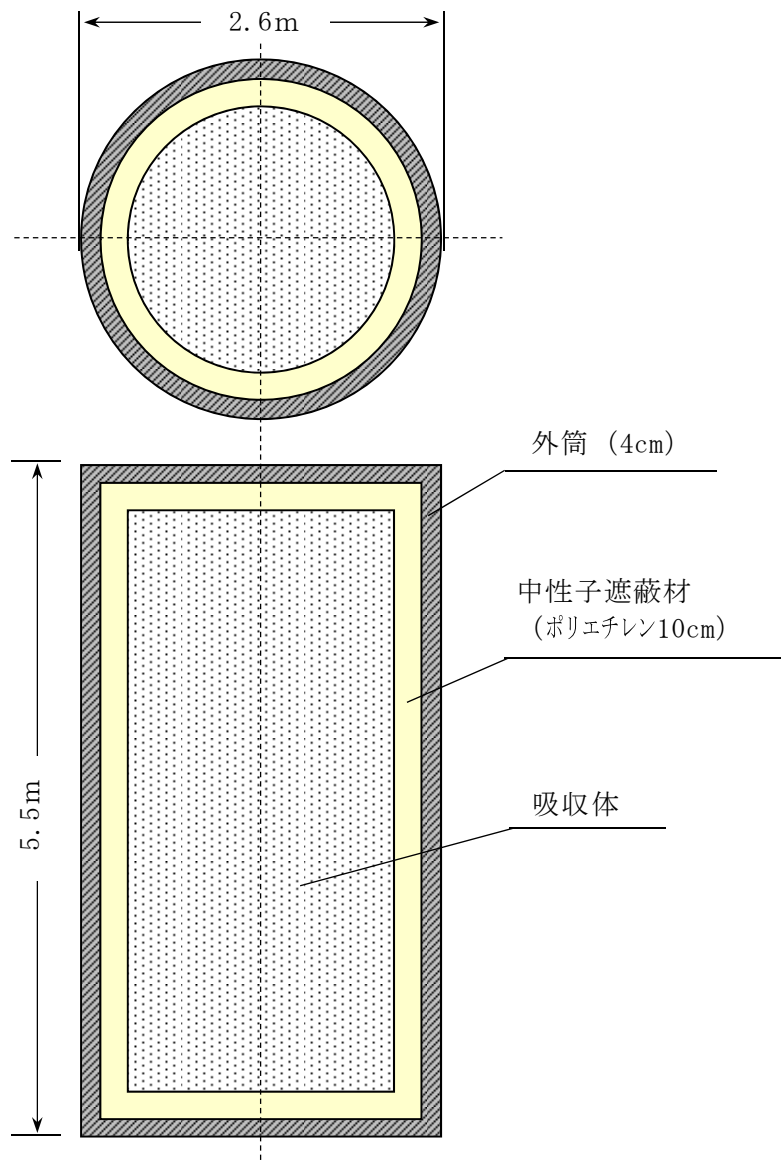
1) 0.05 未満の線量値は「0.05 未満」と表記した

2) 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

※ 貯蔵建屋遮蔽壁のコンクリート厚さの違い(東側:約1.50m, 南側:約1.00m)により, バルク線量の2次ガンマ線については, 直角南方向が高い結果となっている。

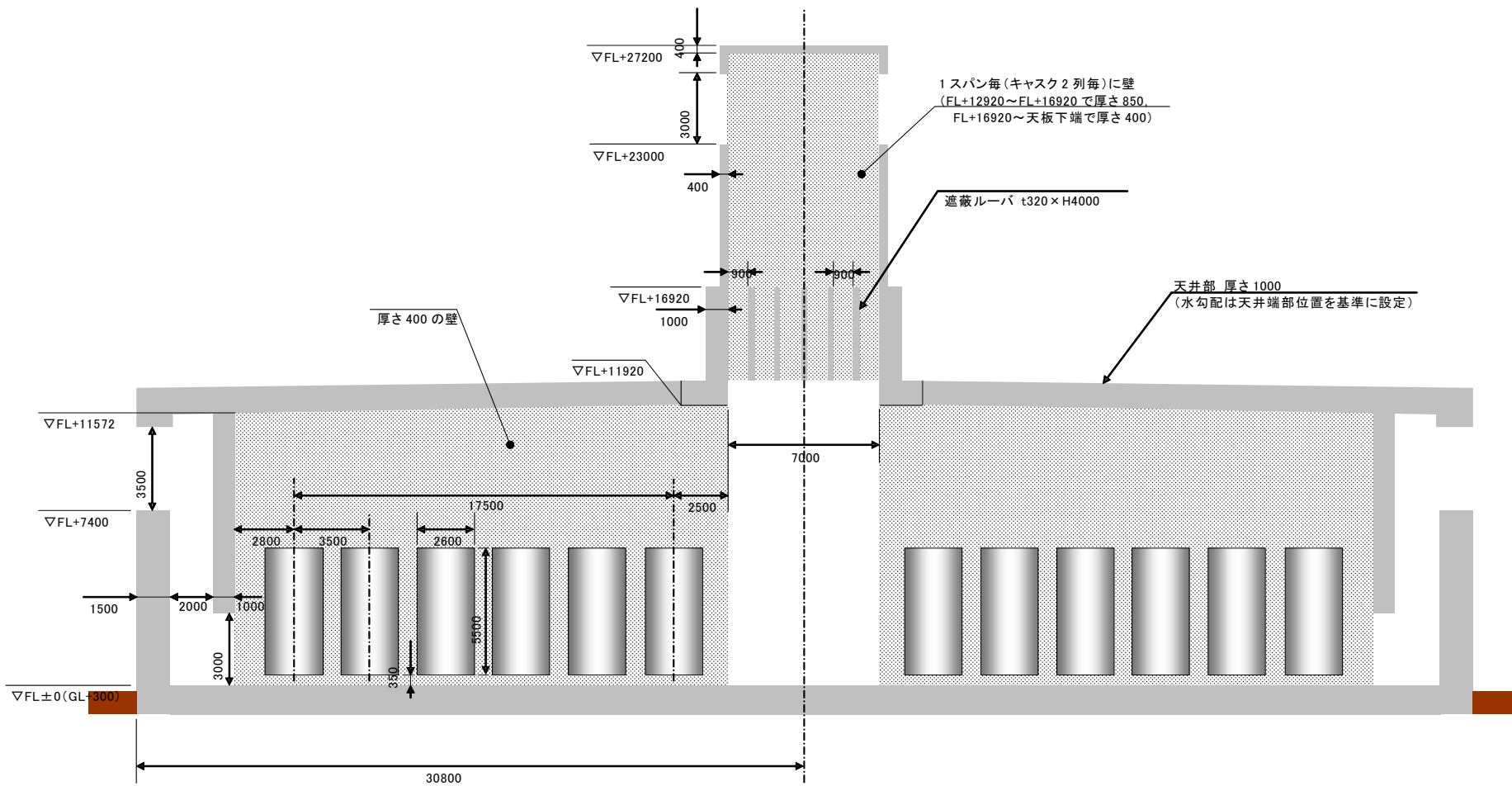
別添 2-4 表 (参考) 敷地境界外線量評価結果

計算地点	実効線量 ($\mu\text{Sv/y}$)	
	中性子 100%	ガンマ線 100%
北 (直角)	7.5	0.5
東 (直角)	27.7	3.0
南 (直角)	11.3	6.6
北	7.2	0.5
北北東	4.7	0.3
北東	16.8	1.0
東北東	26.4	2.5
東	23.5	2.6
東南東	17.6	1.3
南東	4.9	0.6
南南東	8.7	4.2
南	11.5	6.5
南南西	7.4	1.6
南西	2.3	0.2
西南西	2.9	0.4
西	3.0	0.5
西北西	2.0	0.2
北西	4.0	0.2
北北西	6.9	0.4

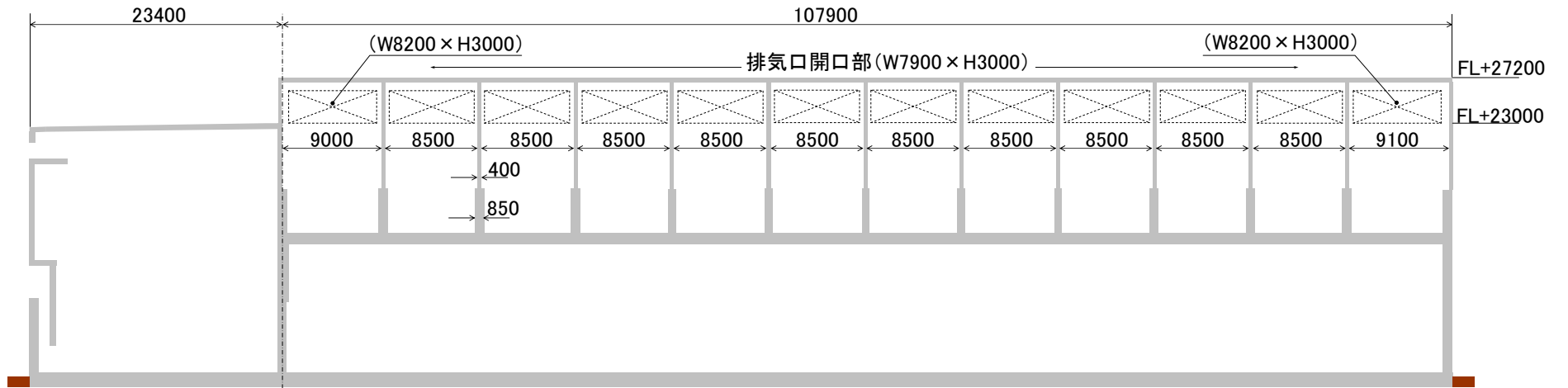


別添 2-1 図 金属キャスクモデル

4条(建屋)ー別添2ー10

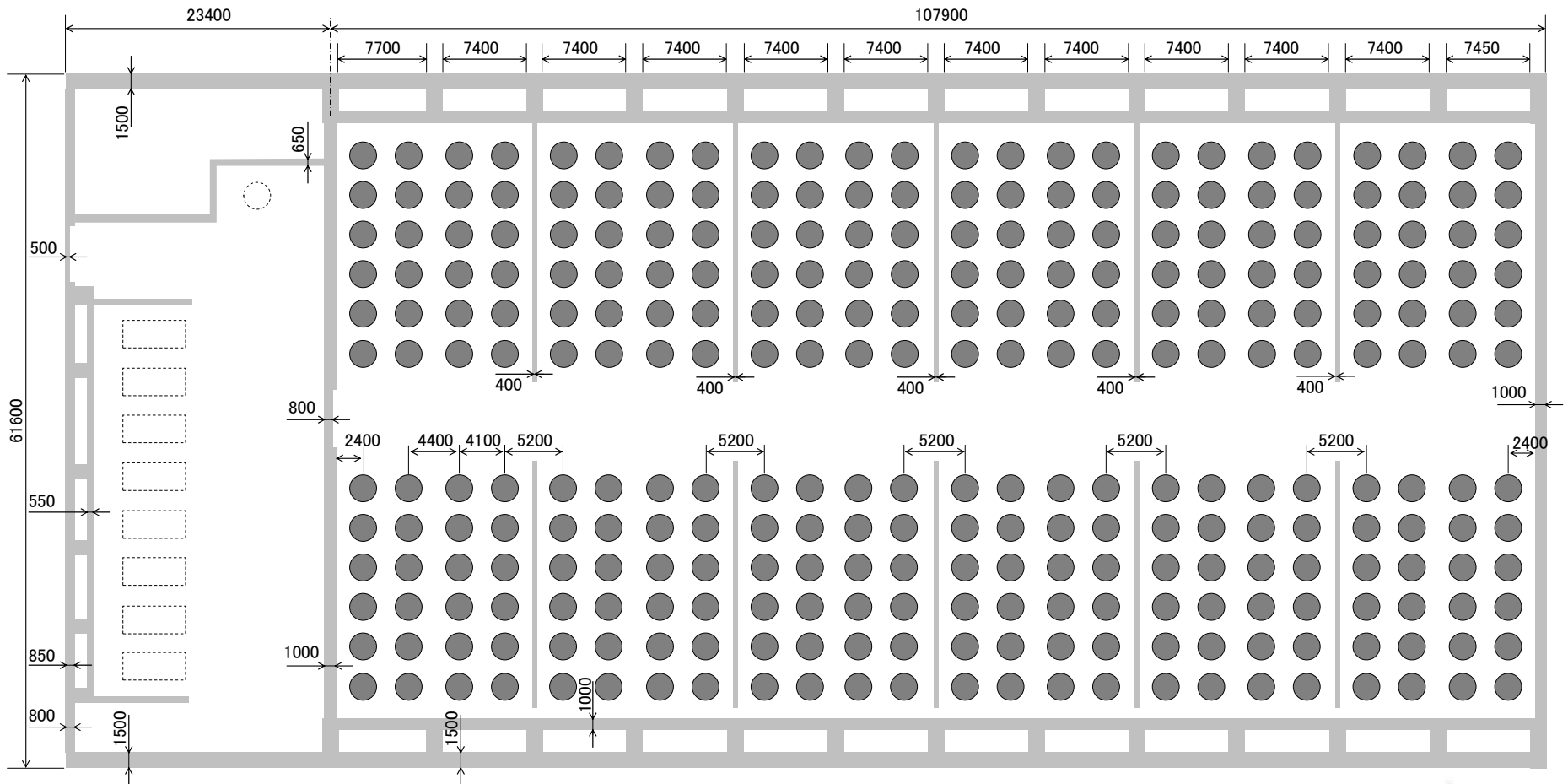


別添 2-2 図(1) 貯蔵建屋モデル (貯蔵区域 (東西方向) 立面図)

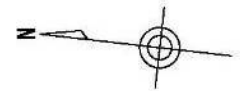


別添 2-2 図(2) 貯蔵建屋モデル (貯蔵建屋 (南北方向) 立面図)

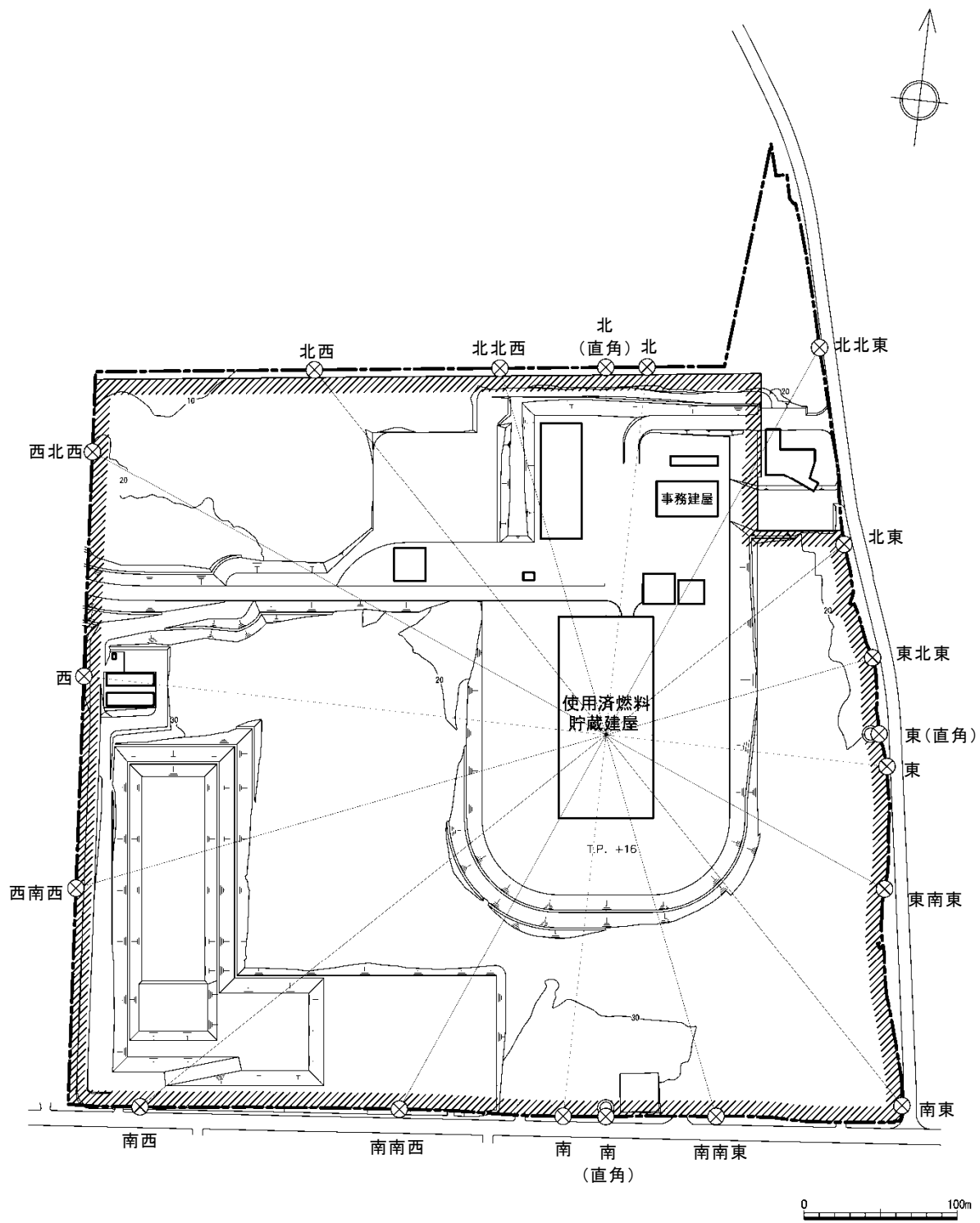
4条(建屋)一別添2-12



● : 金属キャスク (たて置き)



別添 2-3 図 貯蔵建屋モデル (平面図)



- 凡例
- モニタリングポスト
 - //// 周辺監視区域境界
 - 敷地境界
 - ⊗ 敷地境界線量計算地点

別添 2-4 図 線量の計算地点

4 条(建屋) - 別添 2-13

金属キャスクの解析モデルの妥当性について

金属キャスクは、線源であると同時に遮蔽体でもあり、金属キャスク相互の遮蔽効果が期待できる。この効果を線量評価において考慮するため、金属キャスク内部には吸収体（黒体）を設けている。

ただし、金属キャスクを全て吸収体とした場合には、建屋内の線量や敷地境界外における線量を過小評価する可能性があることから、粒子の散乱を考慮するために金属キャスクの外筒やその内側の中性子遮蔽材を模擬している。

金属キャスクモデルは、相互遮蔽効果実験⁽¹⁾（添付 2 を参照）で得られた知見をもとに、外筒厚さを 4 cm、中性子遮蔽材の厚さを 10cm、中性子遮蔽材の内側を吸収体（黒体）としている。この妥当性を確認するため、外筒厚さ、中性子遮蔽材の厚さをパラメータとした貯蔵区域内の線量評価を行っている（評価条件、評価方法は、貯蔵建屋遮蔽評価と同一。ただし、貯蔵建屋モデルは平成 19 年当時のモデルを使用。キャスクの考察のため、貯蔵建屋モデルの違いの影響はなし）。

貯蔵区域内の中性子線量評価結果（添付 1-1 表）から、相互遮蔽効果実験と同様に、下記を確認している。

- ・外筒厚さは 4 cm とすることが保守的な評価となる
- ・中性子遮蔽材の厚さは 10cm 確保すれば、それ以上厚くしても評価結果に影響は生じない

また、ガンマ線については、外筒厚さを 2 cm から 4 cm に変更しても評価結果には殆ど影響しないことを確認している。（添付 1-2 表参照）

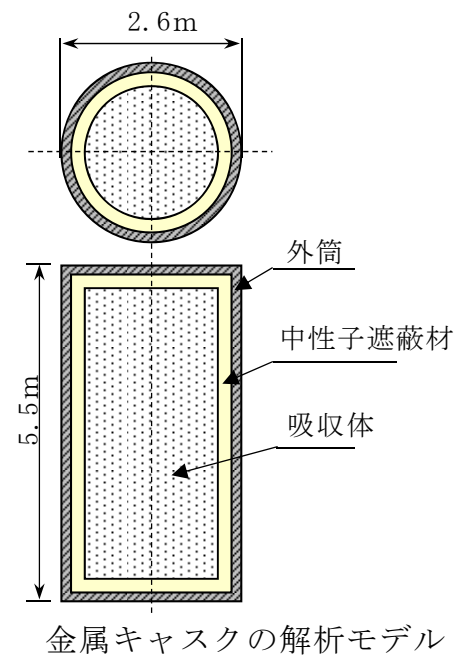
以上より、外筒 4 cm、中性子遮蔽材 10cm、中性子遮蔽材の内側を吸収体（黒体）としている金属キャスクモデルは妥当なものと考えられる。

参考文献

- (1) 小佐古敏荘，飯本武志，石川智之，坪井孝文，寺村政浩，岡村知己，成宮祥介，研究論文“MCNP コードの金属キャスク貯蔵方式中間貯蔵施設線量評価への適用”，日本原子力学会和文論文誌，Vol. 6, No. 2, p. 225-238 (2007)

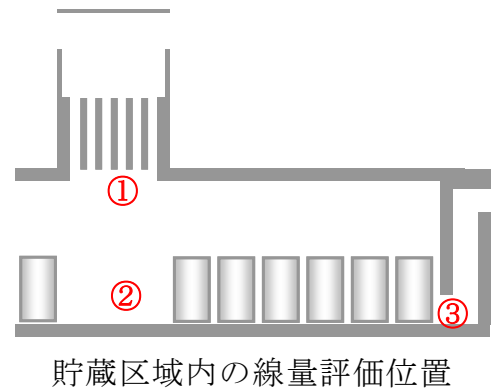
添付 1-1 表 貯蔵区域内の実効線量率（中性子）

		評価位置	実効線量率 (μ Sv/h)	
			外筒厚さ	
			2cm	4cm
中性子遮蔽材厚さ	5cm	①	365	387
		②	346	380
		③	278	295
	10cm	①	362	392
		②	355	379
		③	282	294
	20cm	①	366	389
		②	356	379
		③	282	292



添付 1-2 表 貯蔵区域内の実効線量率（ガンマ線）

評価位置	実効線量率 (μ Sv/h)	
	外筒厚さ	
	2 cm	4 cm
①	173	172
②	146	146
③	130	130



（注）使用済燃料貯蔵建屋は耐震の裕度確保の観点から設計を変更しているが、本資料の評価は設計変更前のものである。

MCNPコードの使用済燃料中間貯蔵施設線量評価への 適用に係るベンチマーク実験概要

使用済燃料中間貯蔵施設（以下「中間貯蔵施設」という。）の遮へい解析，線量評価に3次元モンテカルロ評価手法を適用することの妥当性を確認するためのベンチマーク実験，実証解析が実施されている。

ベンチマーク実験は，中間貯蔵施設の放射線経路を考慮し，金属キャスク相互遮へい効果，建屋給排気口からのダクトストリーミング，建屋側壁・天井のコンクリート深層透過について，中性子に着目して実施されている。

実証解析で使用している解析コードは，米国 Los Alamos 国立研究所 (LANL) において開発された3次元連続エネルギーモンテカルロ計算コードMCNPである。

上記ベンチマーク実験とMCNPコードによる計算結果との比較を行った結果，MCNPコードの計算精度は30%以内であることが確認されている。また，この計算精度は，現行の許認可申請等で使用されている輸送計算コードの精度と比較しても，同等又はそれ以上であり，中間貯蔵施設の遮へい設計，線量評価へ適用する手法及び解析コードとして十分な妥当性を有するとしている。

1. ベンチマーク実験概要

中間貯蔵施設の線量評価に3次元モンテカルロ評価手法を適用することの妥当性を確認するため、相互遮へい効果、ダクトストリーミング及びコンクリート深層透過の3つのベンチマーク実験が行われている。

(1) 実験施設

実験は、モスクワ物理工科大学の研究用原子炉 IRT 炉（出力 2.5MW の水プール型炉）にて行われている。実験に使用した水平実験孔（添付 2-1 図参照）の出口直径は 15cm、中心軸の高さは床上 87.5cm である。

(2) ビーム散乱体の設置（添付 2-2 図 (a) 参照）

相互遮へい効果及びダクトストリーミング実験では、水平実験孔出口にビーム散乱体（鉄、ポリエチレンを組み合わせた八角柱）を設置し、線量率分布の平坦化を図るとともに、金属キャスク表面のエネルギースペクトルを模擬している。

(3) 相互遮へい効果実験（添付 2-2 図 (b) 参照）

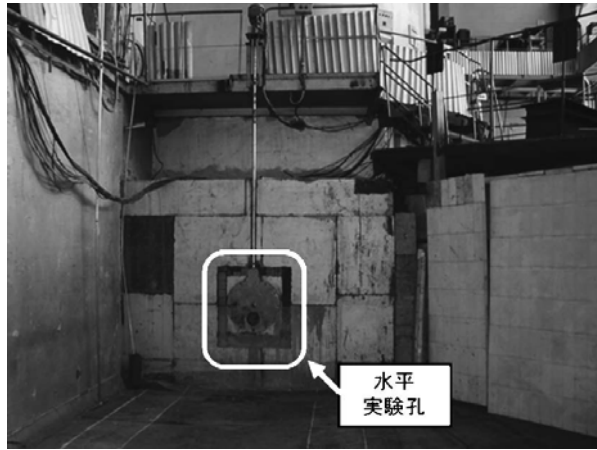
実際の金属キャスクを 1/3 スケールで模擬したキャスク（以下「模擬キャスク」という。）を線源の周囲に格子状に配列し、線量の低減効果を確認するための実験が行われている。

(4) ダクトストリーミング実験（添付 2-2 図 (c) 参照）

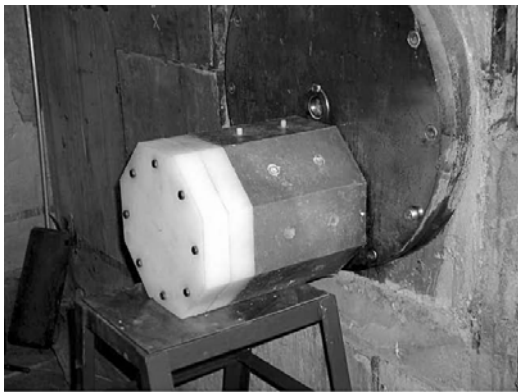
建屋給排気口部のダクト及びその内部に設置するコンクリート製ルーバを模擬し、迷路構造及びルーバによるストリーミング線量の低減効果を確認するための実験が行われている。

(5) コンクリート深層透過実験（添付 2-2 図 (d) 参照）

建屋の壁・天井部を模擬したコンクリート平板（以下「平板供試体」という。）を実験孔出口に最大 120cm まで積層し、線量の減衰効果を確認するための実験が行われている。



添付 2-1 図 実験炉の外観及び配置



(a) ビーム散乱体



(b) キャスク相互遮へい



(c) ダクトストリーミング



(d) コンクリート深層透過

添付 2-2 図 各ベンチマーク実験風景

2. 実験解析

実験解析では、米国 Los Alamos 国立研究所 (LANL) において開発された中性子、ガンマ線及び二次ガンマ線を対象とする 3次元連続エネルギーモンテカルロ計算コードMCNP4が使用されている。また、断面積ライブラリは、ENDF/B-VIをベースとしてMCNP用に作られた内蔵ライブラリが用いられている。

(1) 相互遮へい効果

模擬キャスクの配列数 (なし/1層/2層)、外筒厚さ (2 cm, 4 cm) 及び配列間隔 (140cm, 110cm) を変化させた場合の各測定点でのレムカウンタによる中性子の 1 cm 線量当量率 (以下「中性子線量率」という。) の測定値と計算値との比較がなされている。

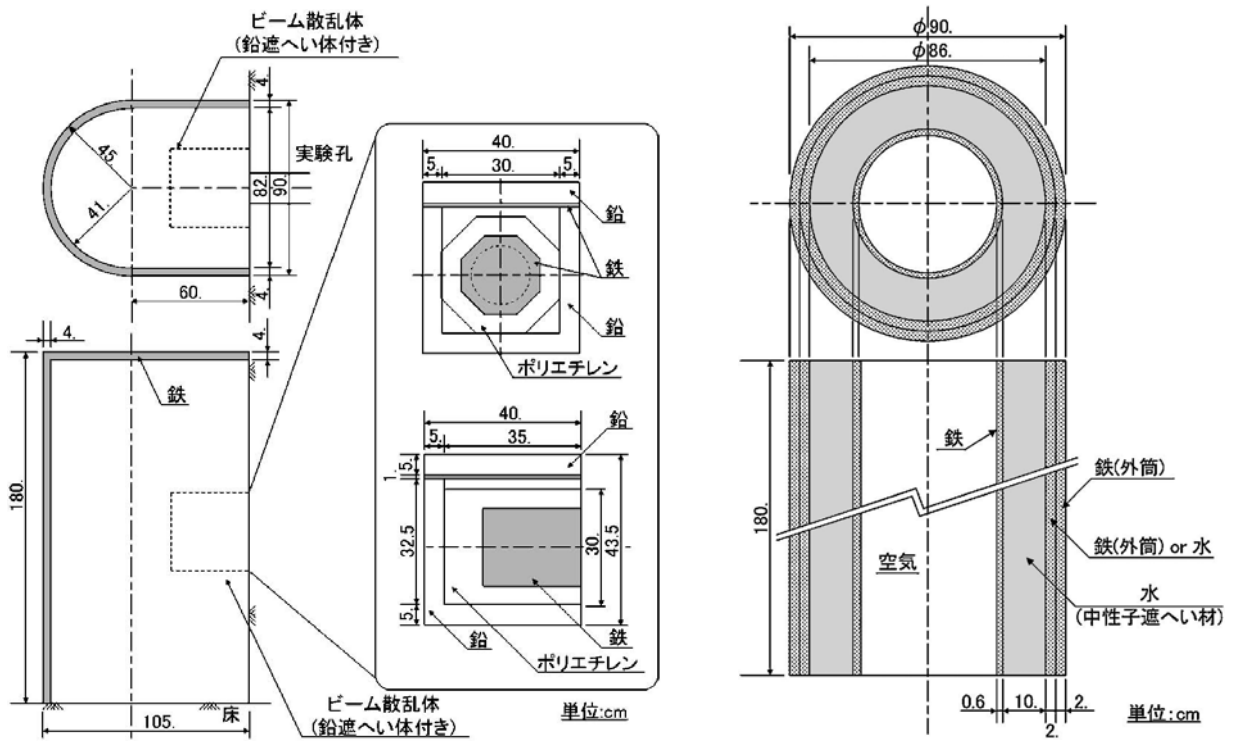
水平実験孔出口に設置したビーム散乱体をさらに鉄製半円筒のカバーで覆い、強度分布がほぼ均一となる円柱線源とされている。

模擬キャスクは、直径 90cm、高さ 180cm の円環タンク形状であり、外筒部は鉄、その内部に中性子遮へい材として水が充填されている。水の充填層厚さは、模擬キャスク表面の散乱や吸収に影響を与えない厚さとして 10cm (予備解析結果) とされている。外筒部は、2 cm 及び 4 cm 厚さを模擬できる構造とされている。

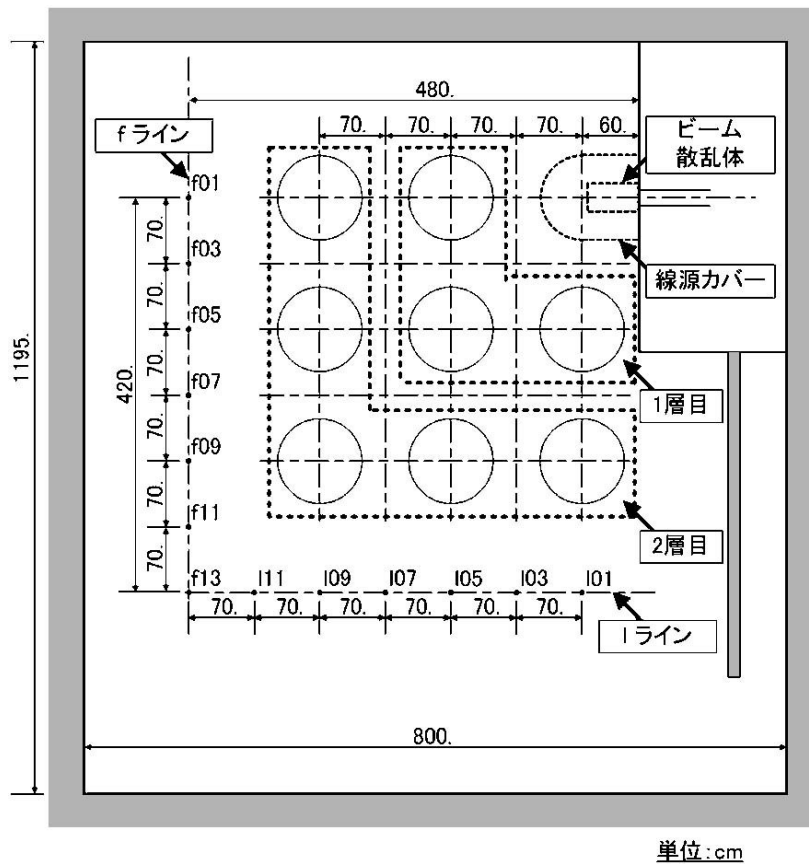
ビーム散乱体、鉄製半円筒カバー及び模擬キャスクの計算モデルを添付 2-3 図に、模擬キャスクを 2 層配列した場合の計算モデルを添付 2-4 図に示す。

実験解析の結果、模擬キャスク配列の違いによる中性子線量率の測定値と計算値は約 20%以内で一致したことが示されている。また、外筒厚さを 2 cm から 4 cm に変化させた場合、中性子線量率の測定値は 10%程度、計算値は 5 %程度増加していること、配列間隔を 140cm から 110cm に変化させた場合の配列間隔の効果を約 10%以内の精度で再現していることが示されている。

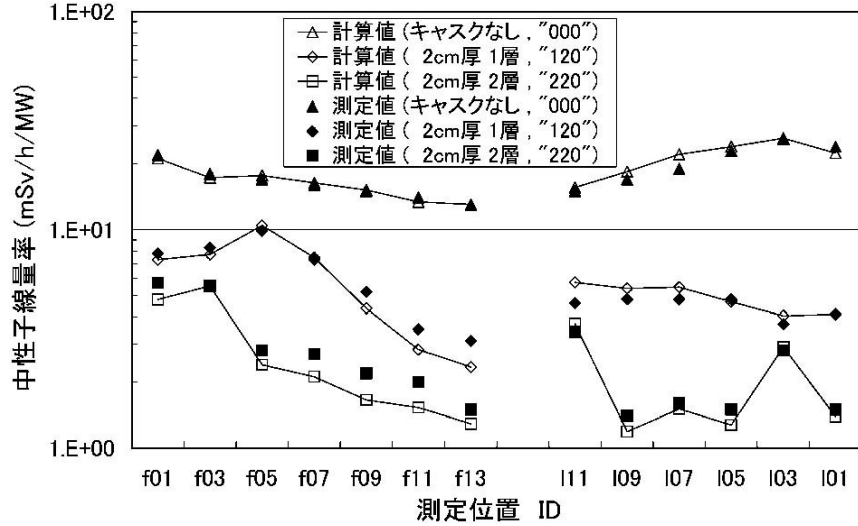
模擬キャスク配列の違いによる中性子線量率分布を添付 2-5 図に、模擬キャスク外筒厚さの違いによる中性子線量率分布を添付 2-6 図に、模擬キャスク配列間隔の違いによる中性子線量率分布を添付 2-7 図に示す。



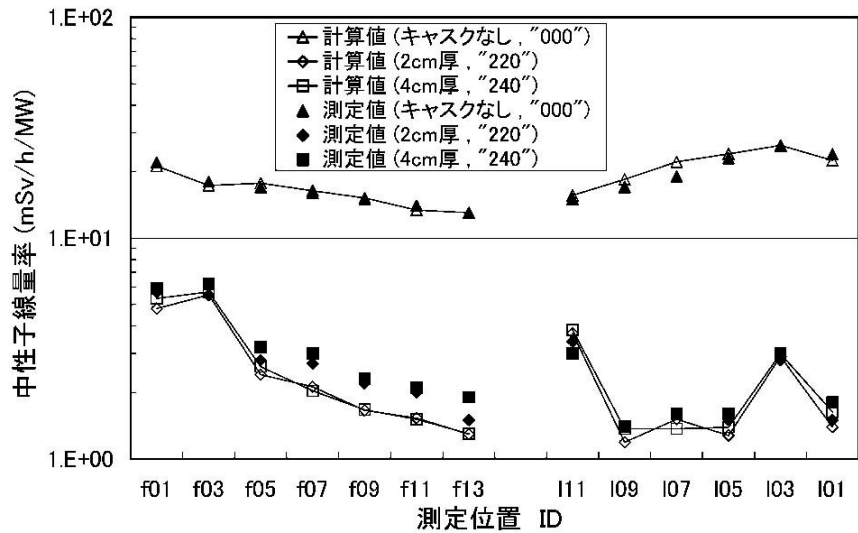
添付 2-3 図 ビーム散乱体，鉄製半円筒カバー及び模擬キャスクの計算モデル



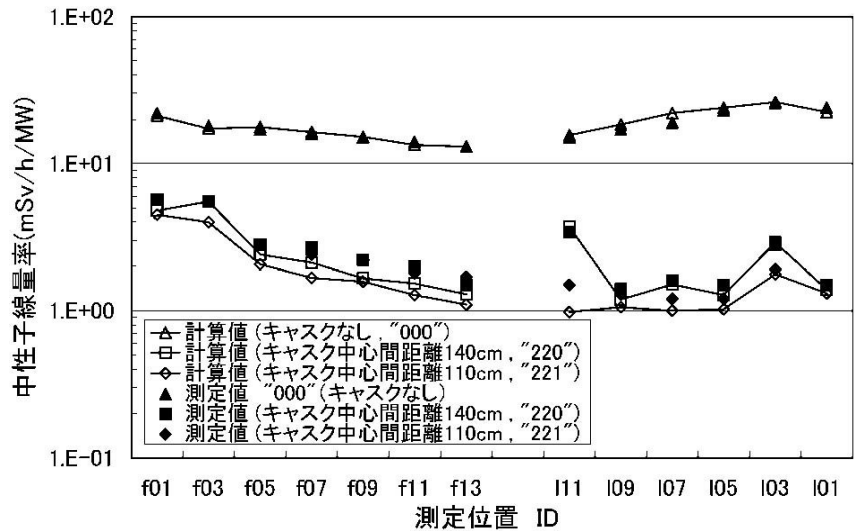
添付 2-4 図 模擬キャスクを 2 層配列した場合の計算モデル



添付 2-5 図 模擬キャスク配列の違いによる中性子線量率分布



添付 2-6 図 模擬キャスク外筒厚さの違いによる中性子線量率分布



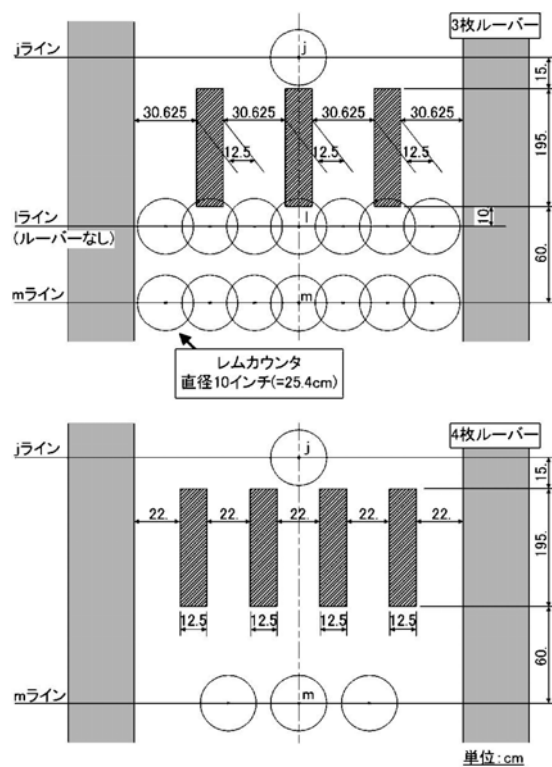
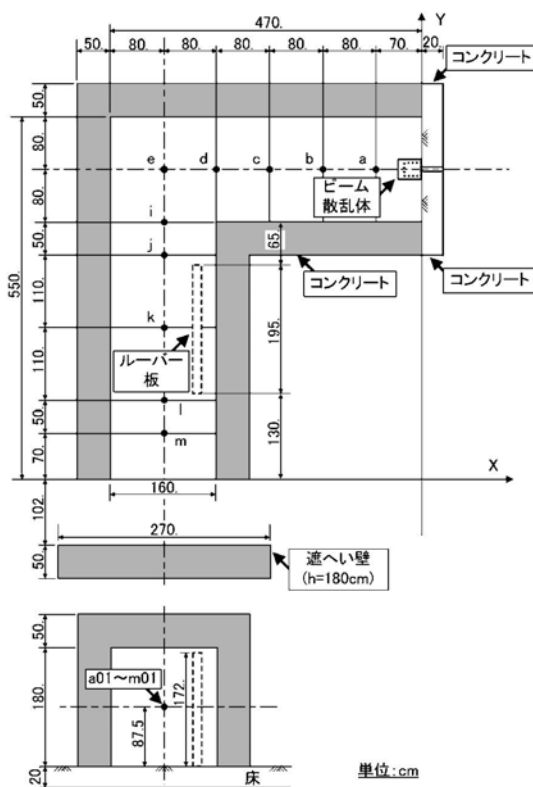
添付 2-7 図 模擬キャスク配列間隔の違いによる中性子線量率分布

(2) ダクトストリーミング実験

ダクト内における中性子線量率及びダクト内コンクリート製ルーバの枚数を変化させ、その前後での中性子線量率の測定値と計算値との比較がなされている。

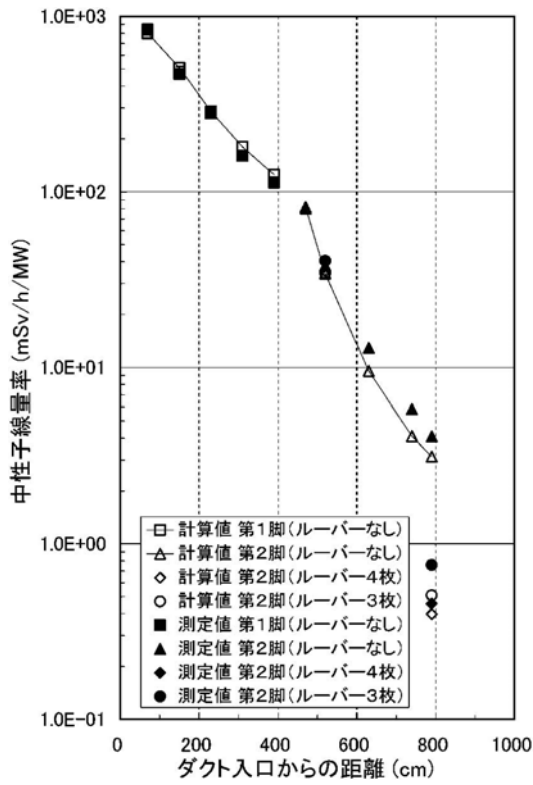
ダクトは、貯蔵施設の給排気口部のダクト形状を模擬するものとして、1回90°屈曲短形コンクリートダクトを実験孔の前に設定されている。コンクリート製ルーバは、1回屈曲ダクトの2脚目位置に設置されている。実験解析の結果、ダクト軸上及びダクト2脚目断面位置での中性子線量率の測定値と計算値は約30%以内で一致したことが示されている。

ダクトストリーミング計算モデルを添付2-8図に、ダクト内2脚目位置におけるレムカウンタ測定点を添付2-9図に、ダクト軸上及びダクト2脚目断面位置での中性子線量率を添付2-10図に示す。

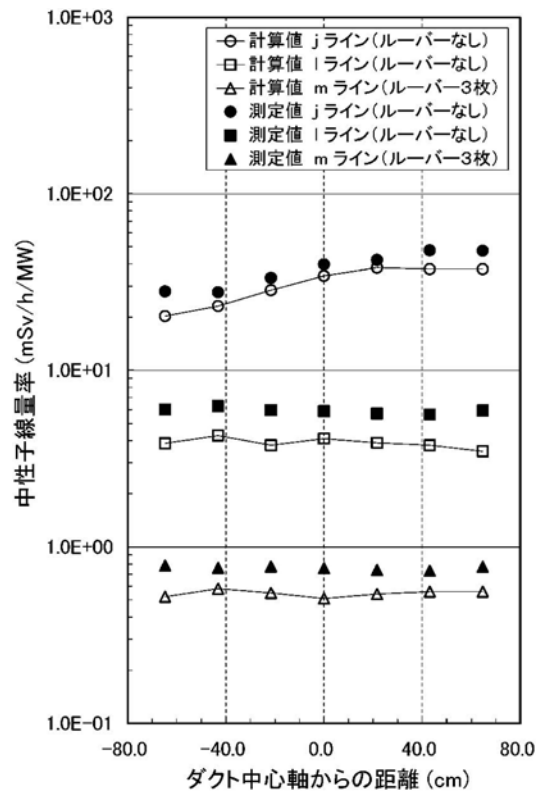


添付2-8図 ダクトストリーミング
計算モデル

添付2-9図 ダクト内2脚目位置における
レムカウンタ測定点



(ダクト軸上の中性子線量率分布)



(2脚目ダクト断面)

添付 2-10 図 ダクト軸上及びダクト 2 脚目断面位置での中性子線量当量率

(3) コンクリート深層透過

平板供試体（高さ 120cm×幅 100cm×厚さ 20cm）を複数枚積層し、コンクリート厚さを変化させた場合の各測定点でのレムカウンタによる中性子線量率の測定値と計算値とが比較されている。

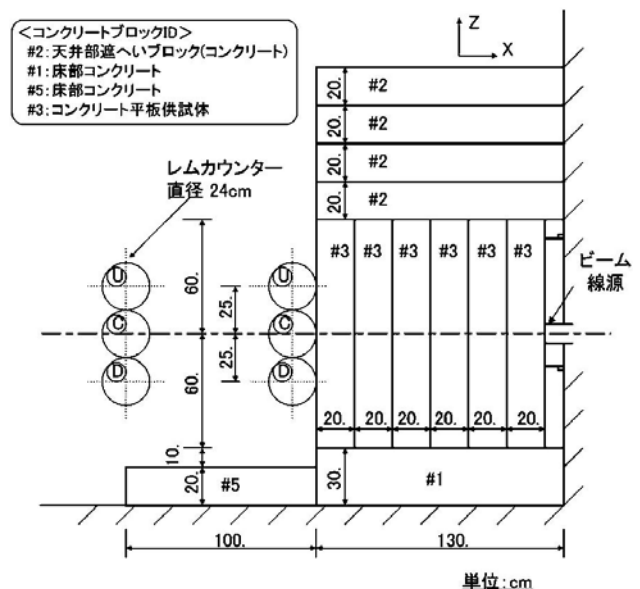
平板供試体は、通常養生のものと、加熱炉で 100℃の状態において 10 日間加熱した乾燥養生コンクリートをそれぞれ 6 枚製作されており、乾燥養生コンクリートの自由水は、通常養生コンクリートに比べ約 1/6 に減少していることが示されている。

実験解析の結果、通常養生及び乾燥養生コンクリートの中心位置における表面及び表面から 1 m の位置において、計算値と測定値は約 20% 以内で一致している。

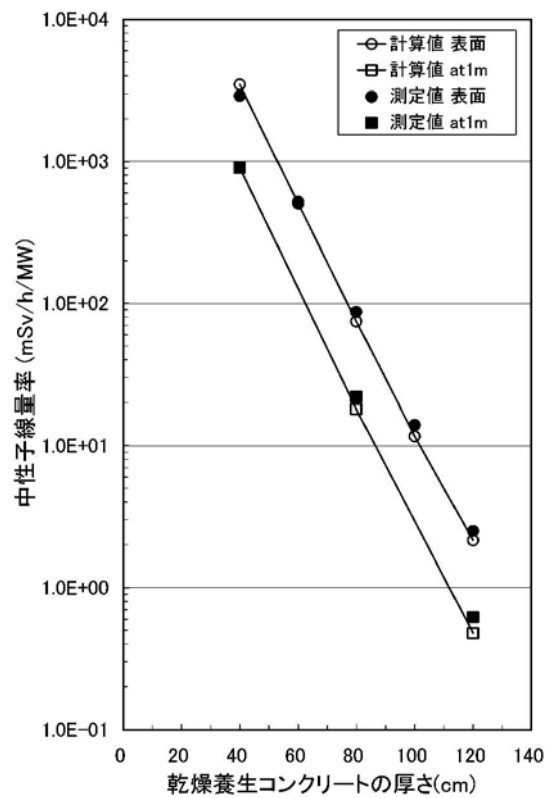
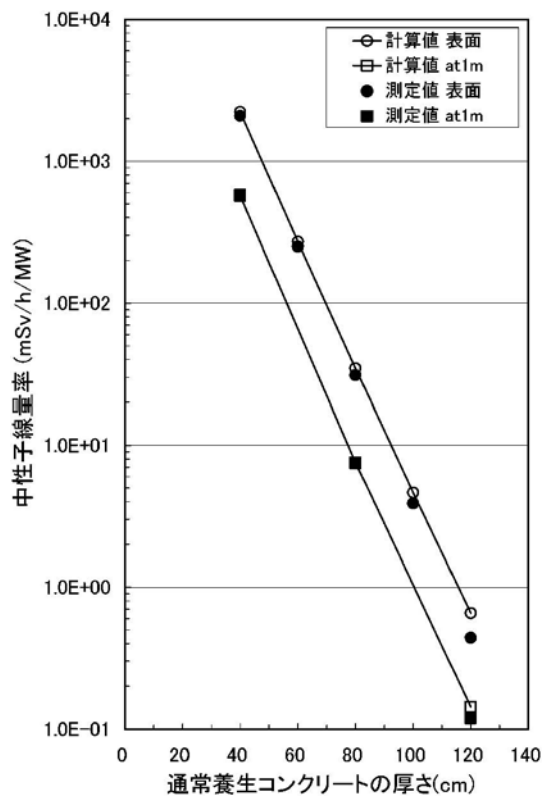
コンクリート供試体の原子個数密度を添付 2-1 表に、コンクリート深層透過計算モデルを添付 2-11 図に、通常養生及び乾燥養生コンクリートの中心位置における表面及び表面から 1 m 位置における中性子線量当量率を添付 2-12 図に示す。

添付 2-1 表 コンクリート供試体の原子個数密度

養生処理	単位: 個/cm ³			
	乾燥養生コンクリート	通常養生コンクリート		
密度 (g/cm ³)	2.13	2.12	2.20	2.18
自由水 (%)	0.52	0.40	3.10	2.72
総水分量 (%)	5.68	6.72	9.01	9.11
H	7.99E+21	9.40E+21	1.27E+22	1.28E+22
C	2.51E+21	2.37E+21	2.60E+21	2.31E+21
O	3.71E+22	3.72E+22	3.94E+22	3.89E+22
Si	1.26E+22	1.24E+22	1.22E+22	1.21E+22
Al	9.88E+20	1.02E+21	1.03E+21	1.03E+21
Fe	2.88E+20	2.61E+20	2.92E+20	3.04E+20
Ca	5.39E+21	5.39E+21	5.59E+21	5.61E+21
Mg	7.00E+20	7.28E+20	7.66E+20	8.29E+20
K	2.74E+20	2.29E+20	2.59E+20	2.44E+20
Na	1.81E+20	1.56E+20	2.07E+20	1.57E+20
Mn	1.07E+19	9.02E+18	7.24E+18	7.20E+18
S	1.61E+20	1.44E+20	1.41E+20	1.50E+20
Cl	9.00E+18	7.17E+18	2.53E+18	5.04E+18
枚数	3	3	3	3



添付 2-11 図 コンクリート深層透過計算モデル



添付 2-12 図 通常養生及び乾燥養生コンクリートの中心位置における表面及び表面から 1 m 位置における中性子線量当量率

貯蔵建屋の遮蔽評価について

1. 遮蔽能力

貯蔵建屋は、公衆及び放射線業務従事者に対して、放射線被ばく上の影響を及ぼすことのないように設計する。遮蔽材には、貯蔵建屋のコンクリート壁、遮蔽ルーバ及び遮蔽扉を用いる。

2. 遮蔽設計基準

貯蔵建屋の遮蔽設計基準を別添 3-1 表に示す。

3. 評価条件、評価方法

評価条件、評価方法は、以下に示す線源及び評価位置（計算地点）の条件を除き、別添 2（直接線及びスカイシャイン線による評価について）に同じ。

(1) 線源

- a. 貯蔵建屋貯蔵区域外壁及び同建屋受入れ区域（受入れ区域に金属キャスクが仮置きされていない場合）内の評価では、同建屋貯蔵区域に金属キャスク 288 基（最大収納基数）を配置する。
- b. 貯蔵建屋付帯区域内及び外壁並びに同建屋受入れ区域外壁の評価では、貯蔵区域に配置した金属キャスク 288 基に加え、受入れ区域に金属キャスク 9 基（たて起こし架台 1 基、仮置架台 7 基、検査架台 1 基）を配置する。

(2) 評価位置

貯蔵建屋遮蔽評価における評価位置を別添 3-1 図に示す。

4. 評価結果

貯蔵建屋の遮蔽評価結果を別添 3-2 表に示す。

本表に示すとおり、貯蔵建屋の遮蔽能力は設計基準値を満足している。また、事業所内の管理区域以外の人立ち入る場所については、定期的に行う外部放射線に係る線量測定、金属キャスクの搬入時に線量上昇が考えられる付帯区域等における外部放射線に係る線量測定及び金属キャスクの構内運搬

時の金属キャスク表面及び表面から1 mの位置における線量当量率測定（記録確認含む）を行う。当該場所に立ち入る者の線量が「核原料物質又は核燃料物質の製錬の事業に関する規則等の規定に基づく線量限度等を定める告示」に定められた線量限度（1 mSv/年）を超えるおそれがある場合には、以下のような措置を講ずることにより、線量限度を超えないように管理する。

- ・区画の設置による関係者以外の者の立ち入り制限を行う。
- ・必要に応じて一時的な管理区域の設定，遮蔽体の設置，作業時間の管理・制限等を行う。

また，運搬経路には標識を設ける等の方法により，関係者以外の者及び他の車両の立ち入りを制限する。

詳細の管理方法については，保安規定・マニュアルで定める。

別添 3-1 表 貯蔵建屋の遮蔽設計基準

区 分		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
	C	0.01mSv/h 以上	貯蔵区域

※ 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B区分となるように設計

別添 3-2 表 貯蔵建屋の遮蔽評価結果

評価位置※	線 源	評価結果	備 考
① (建屋外壁)	中性子 100%	0.00093 mSv/h	
	ガンマ線 100%	0.00011 mSv/h	
② (建屋外壁)	中性子 100%	0.00120 mSv/h	建屋外壁最大
	ガンマ線 100%	0.00023 mSv/h	
③ (受入れ区域)	中性子 100%	0.00033 mSv/h	受入れ区域最大
	ガンマ線 100%	0.00013 mSv/h	
④ (受入れ区域)	中性子 100%	0.00022 mSv/h	
	ガンマ線 100%	0.00012 mSv/h	
⑤ (付帯区域)	中性子 100%	0.00055 mSv/h	
	ガンマ線 100%	0.00018 mSv/h	
⑥ (付帯区域)	中性子 100%	0.00150 mSv/h	付帯区域最大
	ガンマ線 100%	0.00079 mSv/h	
⑦ (建屋外壁)	中性子 100%	0.00027 mSv/h	
	ガンマ線 100%	0.00015 mSv/h	

※ ①～④は、別添 3-1 図(1)参照

- ① : 貯蔵区域外壁面の西(東)面の管理区域境界の最大線量となる所
 - ② : 貯蔵区域外壁面の南面の管理区域境界の最大線量となる所
 - ③ : 貯蔵区域外壁面の北側の扉部分(遮蔽厚が薄い)
 - ④ : 貯蔵区域外壁面の北面の最大線量となる所(ただし③は除く)
- (金属キャスクの状況:貯蔵区域に 288 基貯蔵)

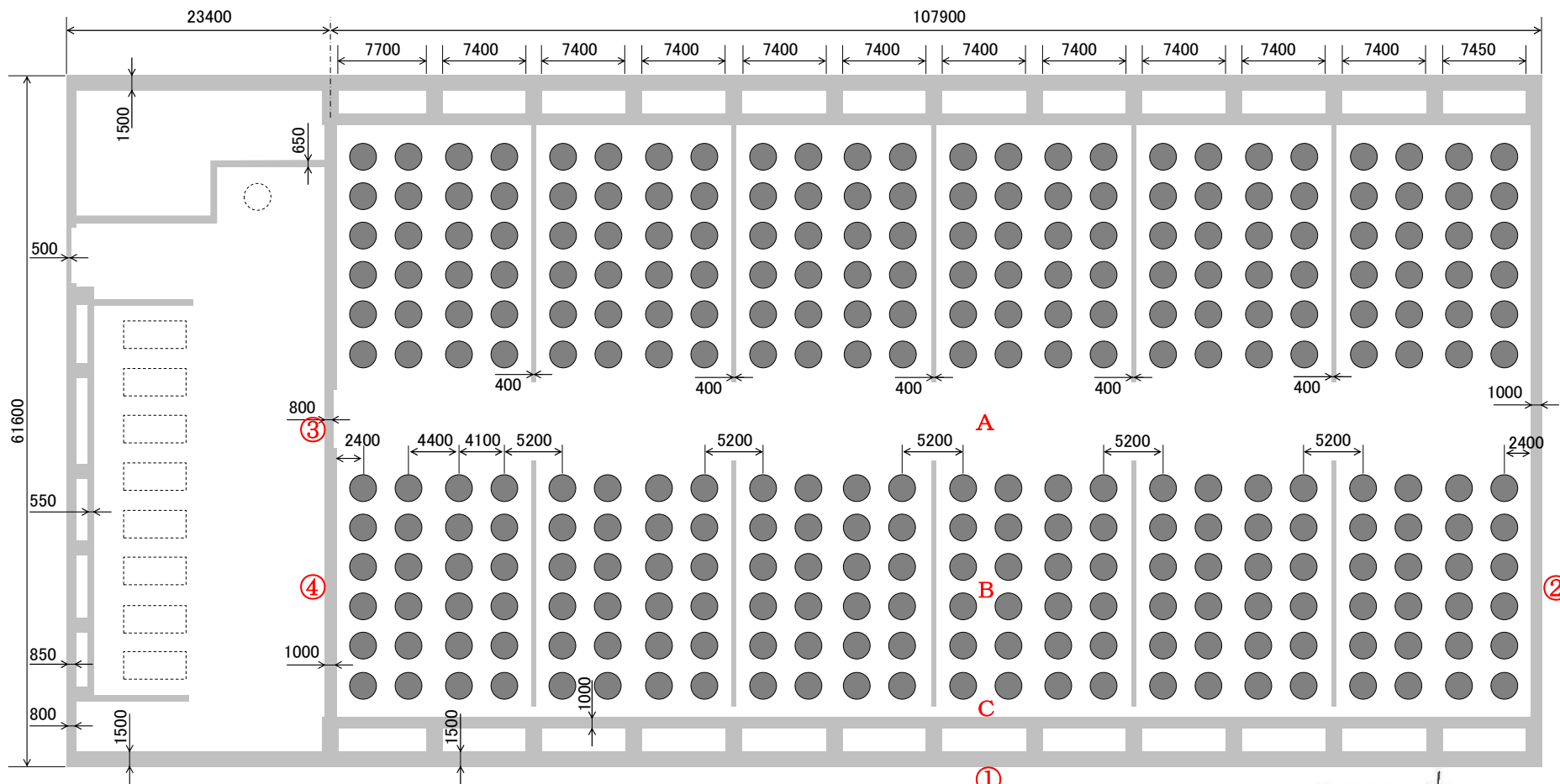
⑤～⑦は、別添 3-1 図(2)参照

- ⑤ : 管理区域境界(貯蔵区域と検査架台の両方の影響がある)
 - ⑥ : 管理区域境界(検査架台に最も近い所)
 - ⑦ : 貯蔵建屋外壁面の北面の管理区域境界の最大線量となる所
- (金属キャスクの状況:貯蔵区域に 288 基貯蔵,受入れ区域に 9 基仮置き)

別添 3-2 表 (参考) 貯蔵建屋の遮蔽評価結果 (貯蔵区域内)

評価位置	線 源	評価結果	備 考
A	中性子 100%	0.28 mSv/h	
	ガンマ線 100%	0.13 mSv/h	
B	中性子 100%	0.60 mSv/h	貯蔵区域最大
	ガンマ線 100%	0.37 mSv/h	
C	中性子 100%	0.32 mSv/h	
	ガンマ線 100%	0.17 mSv/h	

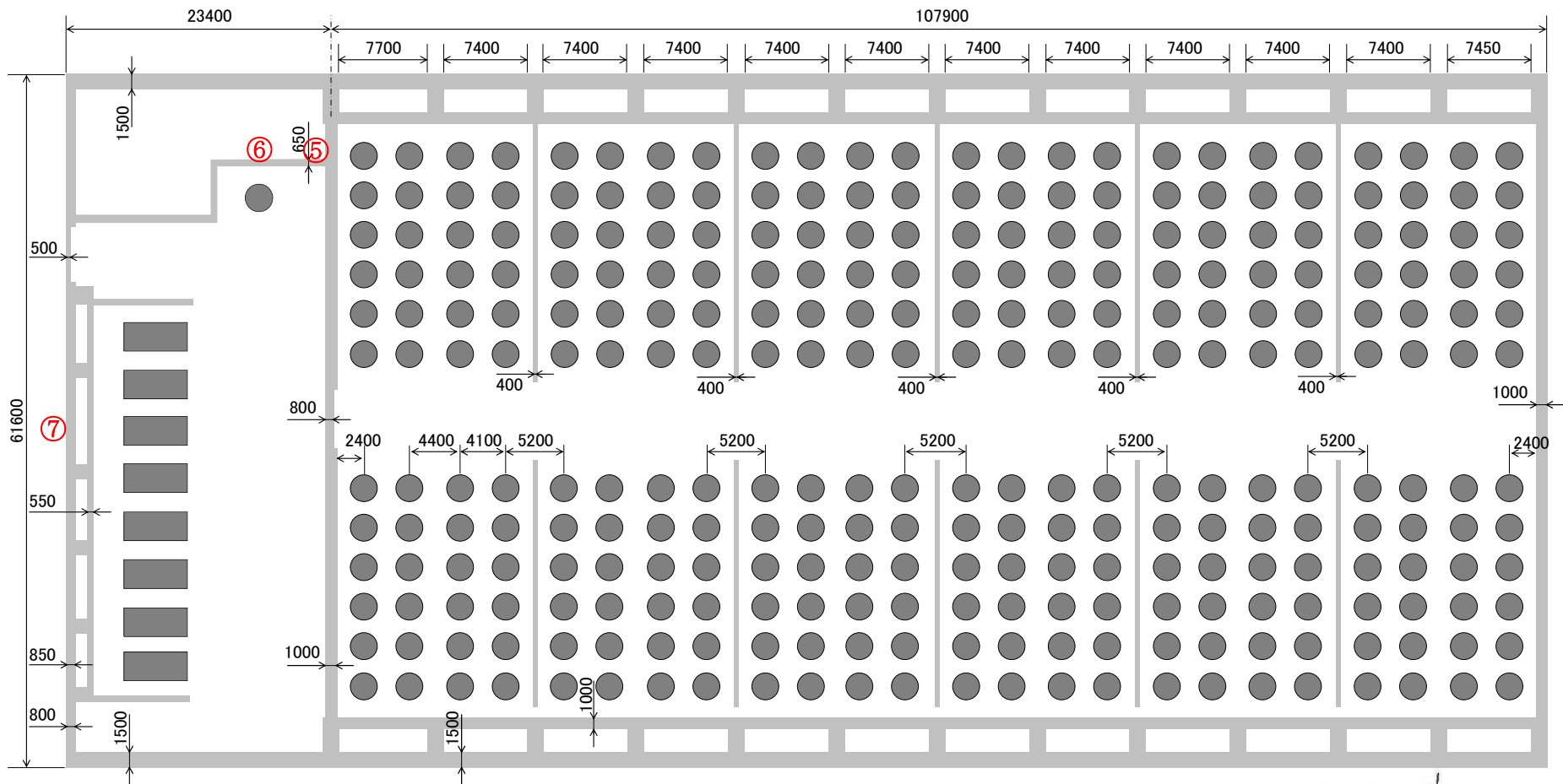
4条(建屋)―別添3―5



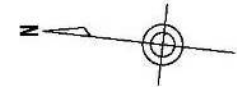
- : 金属キャスク (たて置き)
- ①～④ : 評価位置
- A～C : 評価位置(参考)

別添 3-1 図(1) 貯蔵建屋遮蔽評価における評価位置

4条(建屋)―別添3―6



- : 金属キャスク (たて置き)
- : 金属キャスク (横置き)
- ⑤~⑦ : 評価位置



別添 3-1 図(2) 貯蔵建屋遮蔽評価における評価位置

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

使用済燃料貯蔵建屋（以下「貯蔵建屋」という。）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、滞在時間等を考慮した上で、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

【遮へい区分の考え方】

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）

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

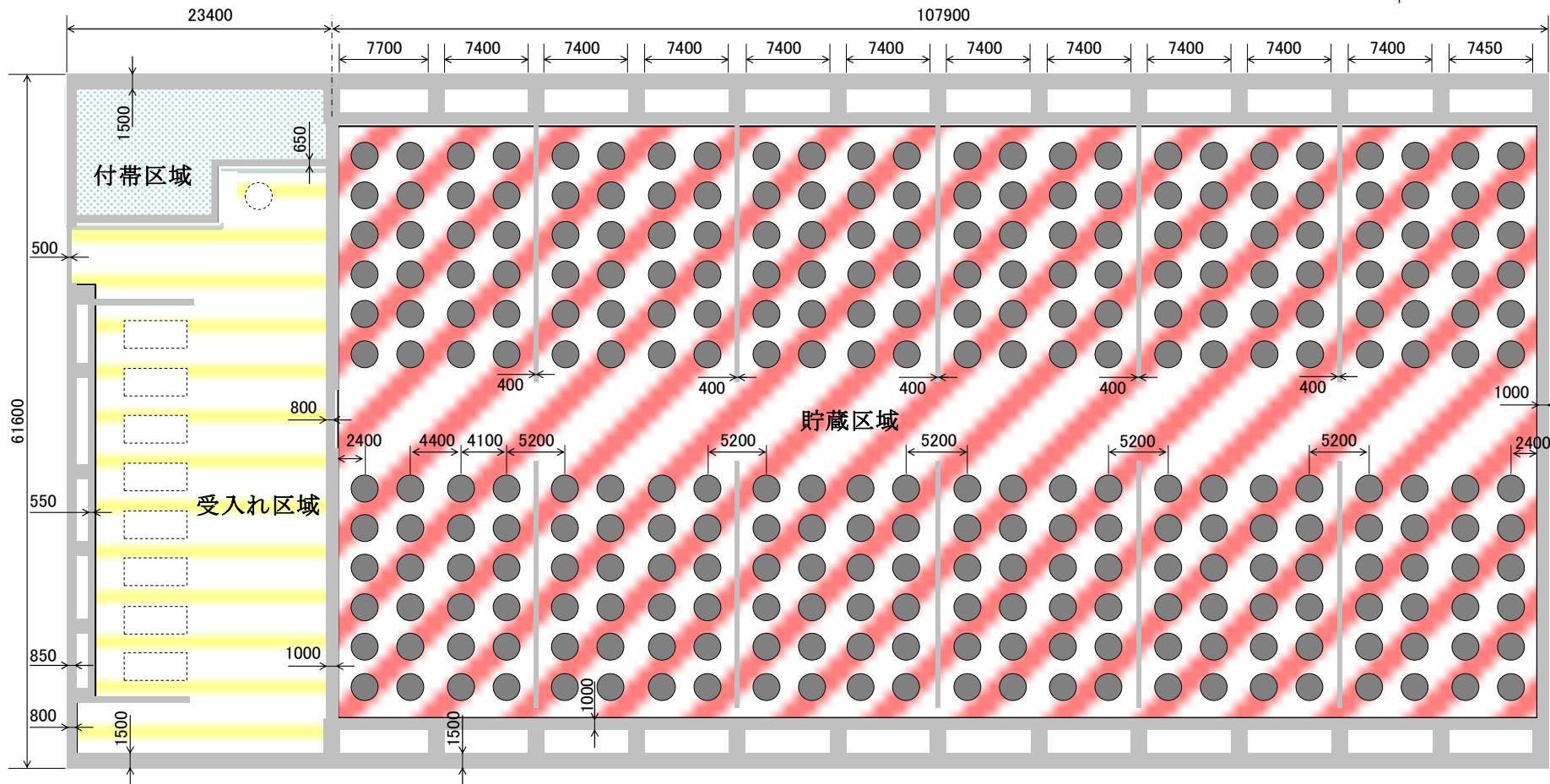
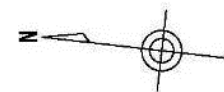
〔 機器点検等の作業時における放射線業務従事者の被ばく低減の観点から，管理区域外と同様の考え方で基準を設定。 〕

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，建屋内の遮へい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



- : 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 0.20mSv/h として評価すると，個人線量が最大となる作業で約 23mSv/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 0.7mSv/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 31.1mSv/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 用大型キャスク（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： $77.9 \mu\text{Sv/h}$

金属キャスクの線質の比率：中性子 34% ガンマ線 66%

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 $1.4 \times 10^2 \mu\text{Sv/h}$

$$\left(\begin{array}{l} \text{中性子} : 7.4 \times 10^1 \mu\text{Sv/h} \quad (280 \times 77.9 / 100 \times 0.34) \\ \text{ガンマ線} : 6.7 \times 10^1 \mu\text{Sv/h} \quad (130 \times 77.9 / 100 \times 0.66) \end{array} \right)$$

②' 貯蔵区域中央部：約 $3.5 \times 10^2 \mu\text{Sv/h}$

$$\left(\begin{array}{l} \text{中性子} : 1.6 \times 10^2 \mu\text{Sv/h} \quad (600 \times 77.9 / 100 \times 0.34) \\ \text{ガンマ線} : 1.9 \times 10^2 \mu\text{Sv/h} \quad (370 \times 77.9 / 100 \times 0.66) \end{array} \right)$$

③' 貯蔵区域側壁付近：約 $1.7 \times 10^2 \mu\text{Sv/h}$

$$\left(\begin{array}{l} \text{中性子} : 8.5 \times 10^1 \mu\text{Sv/h} \quad (320 \times 77.9 / 100 \times 0.34) \\ \text{ガンマ線} : 8.7 \times 10^1 \mu\text{Sv/h} \quad (170 \times 77.9 / 100 \times 0.66) \end{array} \right)$$

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： 0.20 (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 0.20mSv/h として評価すると、約 23mSv/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 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)	0.20	12.3	0.049	14.4
		120	10	10人交代制での対応 (1人平均 12h)		2.4	0.024	
	躯体，扉等の巡視点検	12	3	3人×1班		2.4	0.007	
	躯体，扉等の設備点検	60	5	5人×1班		12.0	0.060	
	自動火災報知設備点検 消火器点検	6	3	3人×1班		1.2	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)		23.0	0.691	
	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)		23.0	0.346	
	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		14.4	0.043	
		96	6	3人×2班交代制での対応 (1班平均 48.0h)		9.6	0.058	
	給排気口温度計点検・校正	16	3	3人×1班		3.2	0.010	
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)	0.6	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	18.4	0.074	
	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	9.6	0.048	
	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	15.0	0.090	
	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	1.0	0.002	

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。

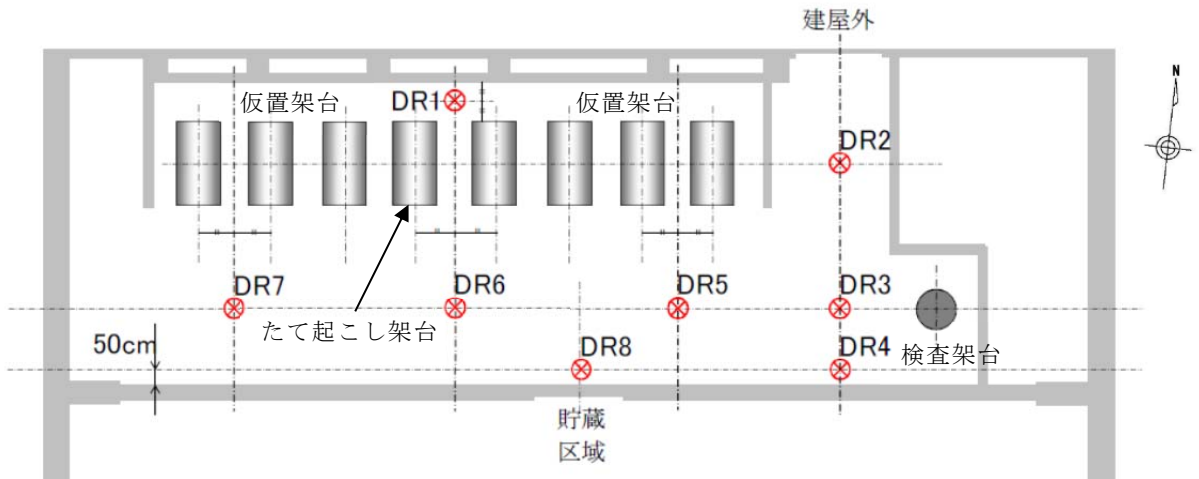
受入れ区域（金属キャスクが 1 基以上仮置き状態）にて実施する主要な作業，作業時間及び放射線業務従事者の年間滞在時間（想定）を添付 1-4 表に示す。放射線業務従事者の受入れ区域内における年間滞在時間は，検査関連（検査・査察等対応）によるものが最長であり，放射線業務従事者一人あたり年間 24 時間程度と想定される。

(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： $\mu\text{Sv/h}$

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	1.3×10^2
	γ	1.4×10^2	
DR2	n	1.4×10^1	5.6×10^0
	γ	3.6×10^0	
DR3	n	6.2×10^1	3.2×10^1
	γ	3.1×10^1	
DR4	n	4.8×10^1	2.3×10^1
	γ	2.0×10^1	
DR5	n	6.4×10^1	3.4×10^1
	γ	3.3×10^1	
DR6	n	7.4×10^1	4.0×10^1
	γ	3.9×10^1	
DR7	n	6.0×10^1	3.2×10^1
	γ	3.1×10^1	
DR8	n	4.8×10^1	2.2×10^1
	γ	1.9×10^1	

DR 1 ~ DR 8 の幾何平均値： $29 \mu\text{Sv/h}$

(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 0.7mSv/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	0.2	
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)		0.1	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	0.7		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)	0.1	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 0.20mSv/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	192.0
貯蔵区域	38	0.20		243.2
合計				435.2

仮に、14人で本作業を行うものとする、一人あたりの線量は

$$435.2 \text{ (人} \cdot \text{mSv/年)} \div 14 \text{ (人)} = 31.1 \text{ (mSv/年)}$$

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。また、作業時間や作業人工についても低減の余地はあるものとする。

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、作業の習熟、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。

5. まとめ

放射線業務従事者の線量は、場の線量、個人の被ばく歴を考慮して合理的な作業計画を策定し、必要に応じて、当該区域への立入制限、入域時間制限等を行うことにより、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。

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。

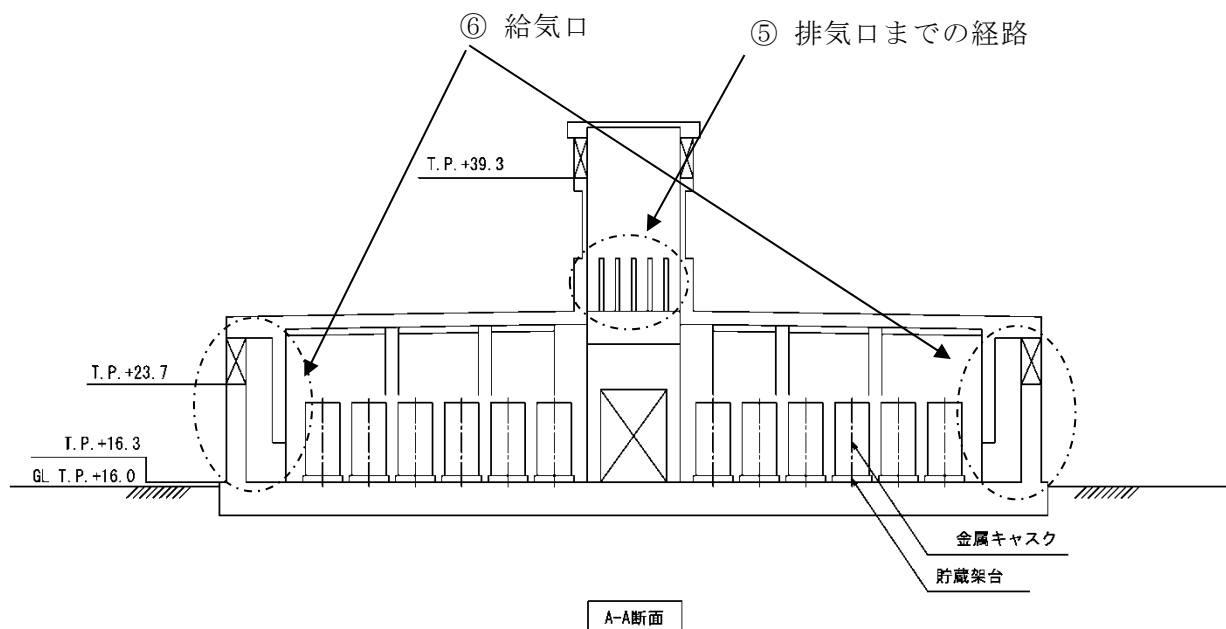
以上

放射線漏えいの低減措置

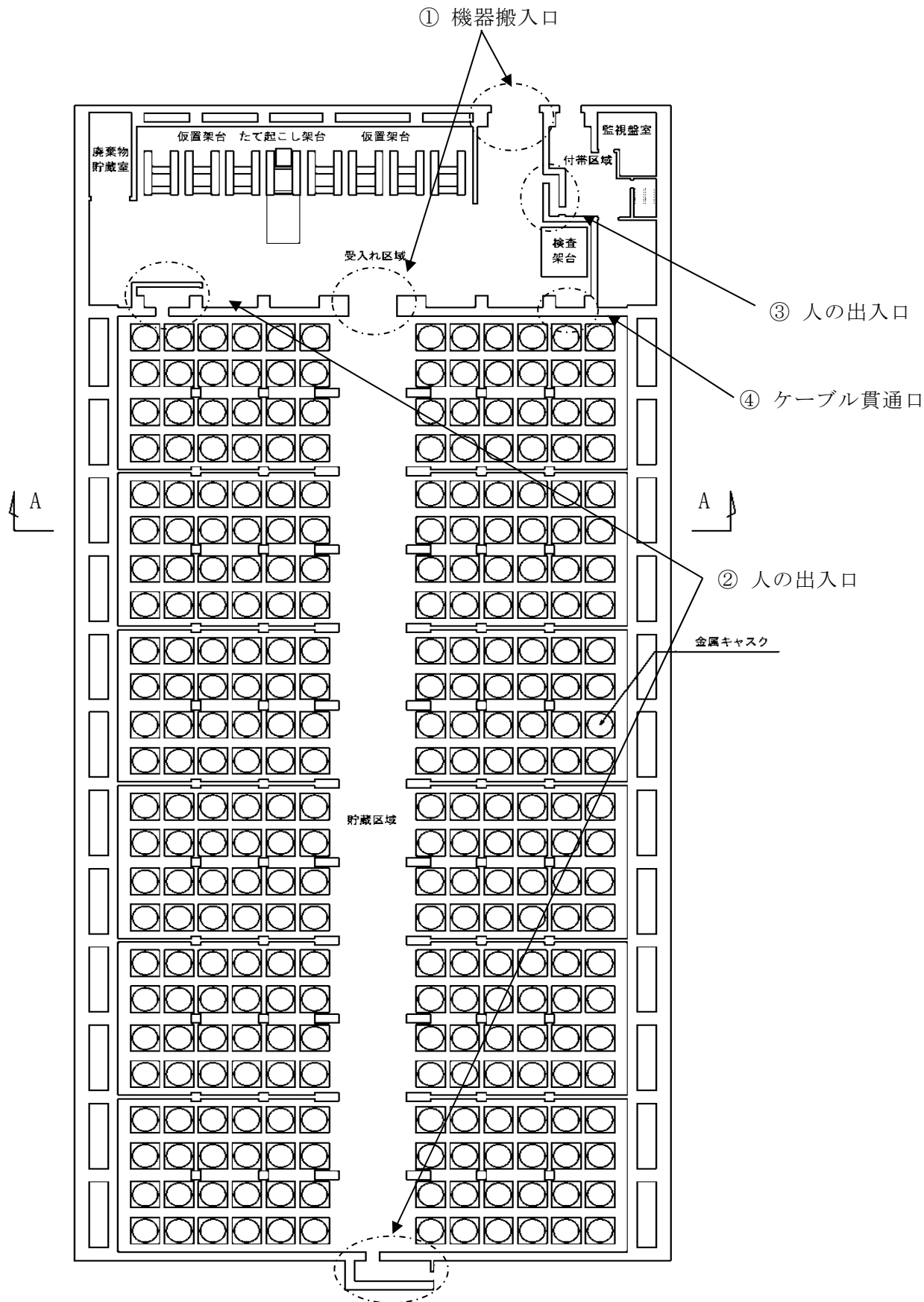
「遮蔽設備に開口部又は配管その他貫通部がある場合は、必要に応じ放射線漏えいの低減措置を講ずる」としている。具体的な貫通部箇所及び措置内容には以下の通りである。

貯蔵建屋の機器搬入口、人の出入口（貯蔵区域 2 箇所、受入れ区域 1 箇所）、貯蔵区域から受入れ区域へのケーブル貫通口（3 箇所）が該当し、以下の対策を実施している。

- ①. 機器搬入口：遮蔽扉の設置
- ②. 人の出入口：迷路構造＋遮蔽扉
- ③. 人の出入口：迷路構造
- ④. ケーブル貫通口：鉛毛マットによる貫通部の隙間を埋める
- ⑤. 排気口までの経路：遮蔽ルーバの設置
- ⑥. 給気口：迷路構造の設置



添付 5-1 図 放射線漏えいの低減措置



添付 5-2 図 放射線漏えいの低減措置

貯蔵建屋が無い場合の敷地境界線量について

貯蔵建屋が無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 14mSv/年である。

(解析条件)

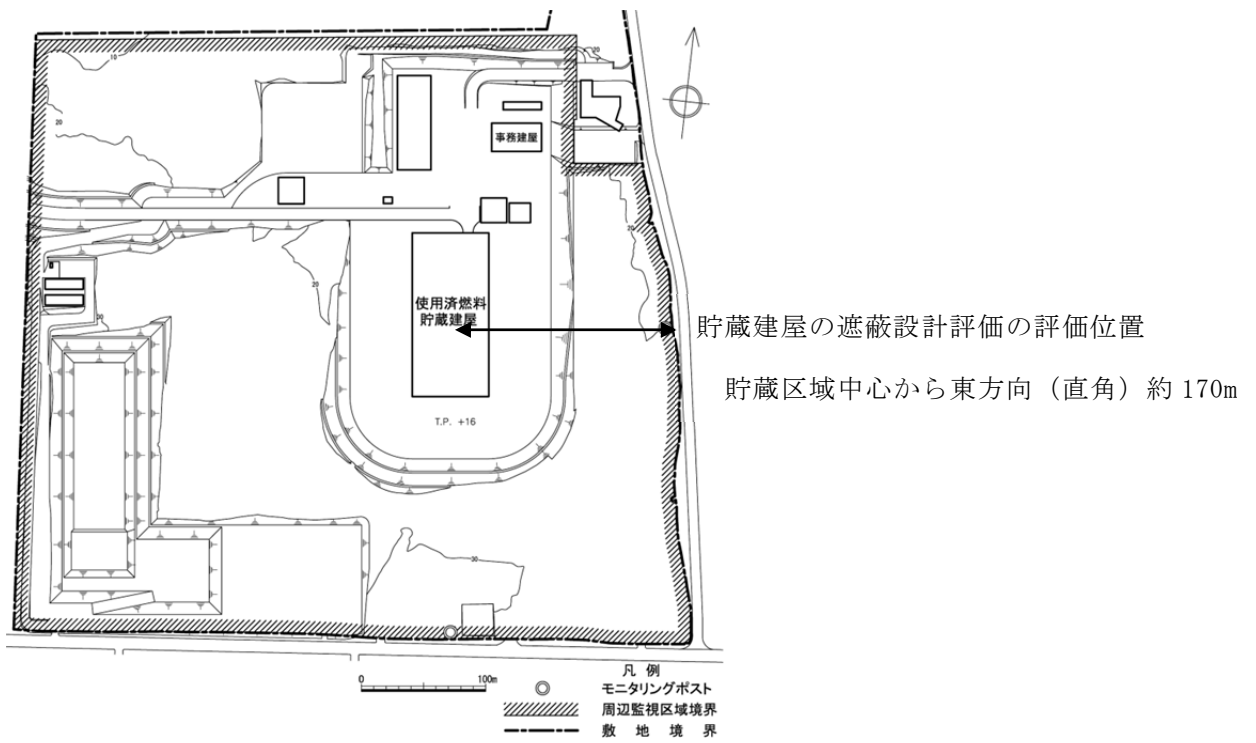
- ・金属キャスクの遮蔽評価結果に基づく現実的な線源条件を使用 (参考 1 表)
- ・貯蔵建屋の壁・天井コンクリートは考慮せず (空気に置換)
- ・上記以外の評価条件、評価方法は、貯蔵建屋遮蔽設計評価と同一

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 26.2 μ Sv/h, γ 線 51.7 μ Sv/h) と同等になるように設定	金属キャスク表面から 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5条 閉じ込めの機能

<目次>

1. 設計方針
2. 閉じ込め設計
3. 閉じ込め性能評価の考え方
4. 閉じ込め性能評価結果

(別添)

- 別添1 蓋部の閉じ込め機能異常時の対応について
- 別添2 基準漏えい率の評価方法とその結果
- 別添3 金属ガスケットの性能について

1. 設計方針

使用済燃料貯蔵施設は、放射性物質を限定された区域に閉じ込める機能を有する設計とするため、以下の設計を行うものとする。

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

また、使用済燃料集合体及びバスケットの健全性を維持するため、金属キャスクの内部の空間を不活性雰囲気を保つ設計とする。

- (2) 金属キャスクは、蓋部を一次蓋、二次蓋の多重の閉じ込め構造とし、一次蓋と二次蓋との空間部を正圧に維持することにより、使用済燃料集合体を内封する空間を金属キャスク外部から隔離する設計とする。また、一次蓋と二次蓋との空間部の圧力を測定することにより、閉じ込め機能について監視ができる設計とする。金属キャスクの構造上、漏えいの経路となり得る蓋及び蓋貫通孔のシール部には金属ガスケットを用いることにより長期にわたって閉じ込め機能を維持する設計とする。

- (3) 金属キャスクは、貯蔵期間中及び貯蔵終了後において、収納された使用済燃料の検査等のために蓋を開放しないことを前提としているため、万一の蓋部の閉じ込め機能の異常に対して、二次蓋の閉じ込め機能に異常がある場合には、二次蓋の金属ガスケットを交換し、一次蓋の閉じ込め機能に異常がある場合には、金属キャスクに蓋を追加装着できる構造を有すること等、閉じ込め機能の修復性を考慮した設計とする。

- (4) 使用済燃料貯蔵施設では、平常時に放射性廃棄物は発生しないため、放射性廃棄物の処理施設を設置しない。

- (5) 放射性廃棄物の廃棄施設は、廃棄物による汚染の拡大を防止するため、使用済燃料貯蔵建屋受入れ区域の独立した区画内に設け、また、廃棄物貯蔵室の出入口にはせきを設ける構造とする。

2. 閉じ込め設計

(1) 閉じ込め構造

金属キャスクは、放射性物質を限定された区域に閉じ込めるため、以下の配慮を行う。

- a. 金属キャスクは、本体胴及び蓋部により使用済燃料集合体を内封する空間を外部から隔離し、設計貯蔵期間を通じて負圧に維持する。
- b. 金属キャスクは、蓋部を一次蓋及び二次蓋の多重の閉じ込め構造とし、その蓋間をあらかじめ正圧とし圧力障壁を形成することにより、放射性物質を金属キャスク内部に閉じ込める。また、使用済燃料集合体を内封する空間に通じる貫通孔のシール部は一次蓋に設ける。
- c. 蓋及び蓋貫通孔のシール部には、長期にわたって閉じ込め機能を維持する観点から金属ガスケットを用いる。金属ガスケットの漏えい率は、設計貯蔵期間を通じて、蓋間の空間に充填されているヘリウムガスが蓋間の圧力を一定とした条件下で使用済燃料集合体を内封する空間側に漏えいし、かつ、燃料被覆管からの核分裂生成ガスの放出を仮定しても、使用済燃料集合体を内封する空間を負圧に維持できるように設定し、その漏えい率を満足していることを気密漏えい検査により確認する。

なお、蓋間の圧力が徐々に低下する場合には、適宜、蓋間空間にヘリウムガスを再充填する。その際、累積のヘリウム充填量を管理し、過剰な充填とならないようにする。

- d. 金属キャスクは、万一の蓋部の閉じ込め機能の異常に対して、三次蓋を追加装着できる構造を有する。

金属キャスクの閉じ込め構造を第1図に、シール部詳細を第2図に、金属ガスケット構造を第3図に示す。

(2) 閉じ込め機能の監視

金属キャスクの閉じ込め機能が確保されていることを適切に監視するため、金属キャスクの蓋間圧力を測定するとともに、監視盤室に表示、記録する。

蓋間圧力が基準設定値より低下したときは、監視盤室等必要な箇所に

警報を発するようにする。

蓋間圧力監視装置は、点検中等においても蓋間圧力を測定できるように二系統設ける。

蓋間圧力監視装置の構成を第4図に示す。

(3) 閉じ込め機能の異常に対する措置（具体的な措置を別添1に示す）

蓋間の圧力に異常が生じた場合でも、あらかじめ金属キャスク内部を負圧に維持するとともに、蓋間の圧力を正圧としているので、内部の気体が外部に流出することはない。

蓋間圧力の監視により蓋間の圧力が急激に低下し、閉じ込め機能に異常が認められた場合、以下のとおり対応する。

- a. 圧力監視系の点検を行い、圧力監視系からの漏えいが認められた場合には、漏えい箇所の特定制を行い、当該箇所を修復の上貯蔵を継続する。
- b. 圧力監視系に漏えいがなく、金属ガスケットの漏えいと考えられる場合には、二次蓋金属ガスケットの漏えい試験を行う。漏えい試験の結果、二次蓋に漏えいが認められた場合には、キャスク内部が負圧に維持されていることを間接的に確認し、さらに、蓋間圧力の低下の状況及び測定した二次蓋漏えい率より一次蓋の健全性を確認の上、二次蓋の金属ガスケットを交換し、閉じ込め機能を修復して貯蔵を継続する。
- c. 二次蓋金属ガスケットの漏えい試験の結果、二次蓋に漏えいが認められず、一次蓋の閉じ込め機能が異常であると考えられる場合には、金属キャスクに三次蓋を追加装着し、搬出のために必要な記録とともに、契約先に引き渡す。

閉じ込め機能の異常時の対応手順を第5図に示す。

3. 閉じ込め性能評価の考え方

金属キャスクの閉じ込め評価フローを第6図に示す。金属キャスクの閉じ込め性能評価においては、以下の考え方に基づき評価する。(具体的な評価方法を別添2に示す。)

- a. 閉じ込め性能評価では、設計貯蔵期間(50年間)に事業所外運搬に係る期間等、十分な余裕を考慮した60年間(以下「設計評価期間」という。)にわたって金属キャスク内部の負圧を維持できる漏えい率(基準漏えい率)を求める。
- b. 漏えい率は、シールされる流体、シール部温度及び漏えいの上流側と下流側の圧力に依存する。したがって、金属キャスク内部圧力変化は、蓋間圧力と金属キャスク内部圧力の圧力差のもとで、ある漏えい率をもつシール部を通して金属キャスク内部へ流入する気体の漏えい量を積分することによって求められる。
- c. 金属キャスクの閉じ込め評価の基準となる基準漏えい率は、設計評価期間にわたって金属キャスク内部の負圧が維持できるように設定され、使用する金属ガスケットが確保可能な閉じ込め性能を満足していることを確認する。
- d. 基準漏えい率を求めるにあたっては、金属キャスク内部の圧力を保守的に評価するため、蓋間圧力は一定とし、蓋間空間のガスは一次蓋から金属キャスク内部側にのみ漏えいするものとして漏えい率の計算を行う。また、大気圧は、気象変化による圧力変動を考慮した値 $9.7 \times 10^4 \text{ Pa}$ を用いる。金属キャスク内部空間の圧力の算定においては、使用済燃料の破損率として、米国の使用済燃料集合体の乾式貯蔵中における漏えい燃料発生率(約0.01%)及び日本の軽水炉における漏えい燃料発生率(0.01%以下)を考慮し、保守的な値として0.1%を想定する。
- e. なお、発電所搬出前の気密漏えい検査で確認される漏えい率の判定基準(リークテスト判定基準)は、基準漏えい率を下回るように設定する。

4. 閉じ込め性能評価結果

BWR用大型キャスク（タイプ2）及びBWR用大型キャスク（タイプ2 A）とも基準漏えい率は、 $2.4 \times 10^{-6} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ になる。

金属ガスケットの性能は、金属キャスクのシール部は比較的高温下にあるため、長期貯蔵中のクリープによる金属ガスケットの応力緩和を考慮した上で評価する必要がある。応力緩和による漏えい率の影響については、(財)電力中央研究所で実施の長期密封性能試験結果を通じて、金属ガスケットの漏えい率とラーソンミラーパラメータ（以下「LMP」という。）の関係として第7図に整理されている。

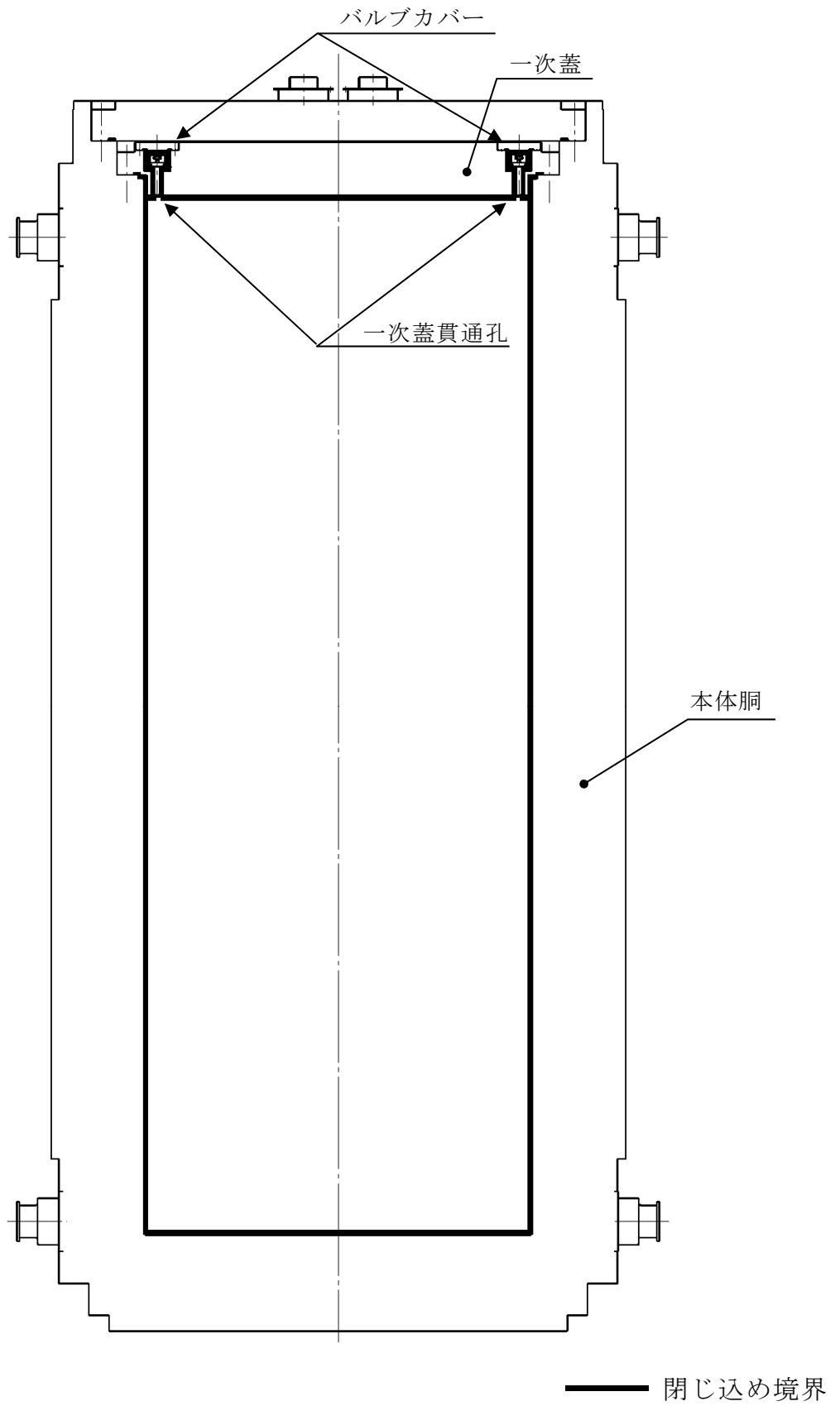
金属キャスクの除熱評価における金属ガスケット部の制限温度は 130°C としており、設計評価期間(60年間)を考慮したLMPは第7図（破線）に示す。

第7図より、金属ガスケットのLMPが約 11×10^3 を超えないように設計すれば、応力緩和を考慮しても初期の漏えい率が維持でき、設計評価期間を通じて $10^{-10} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 以下を確保できるとの結果が得られている。

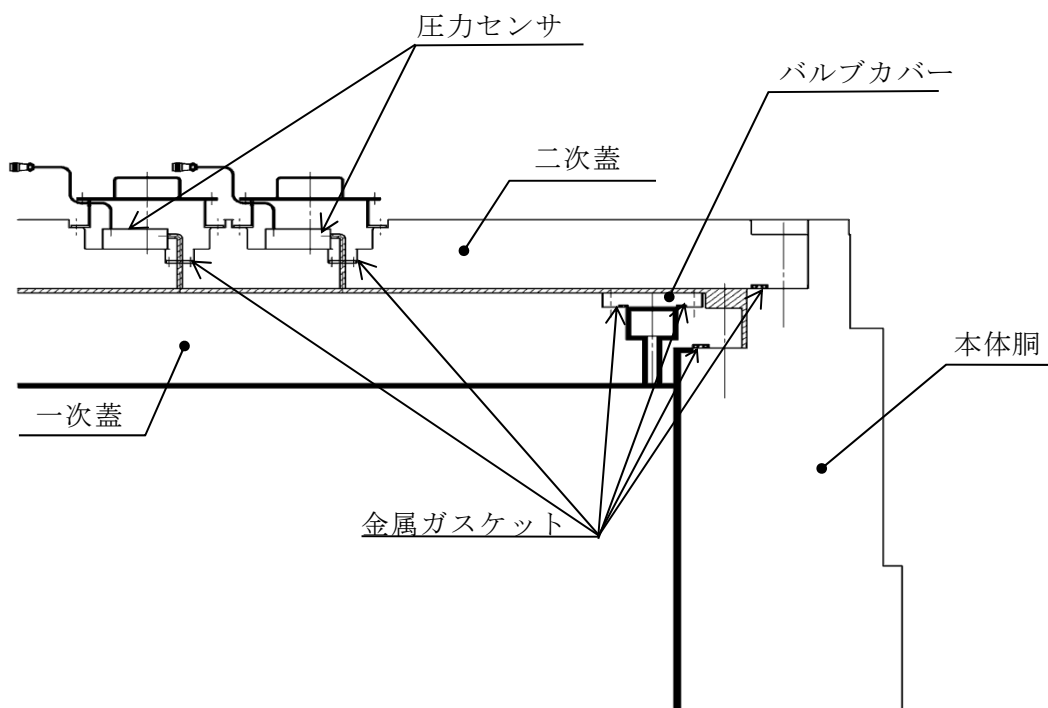
更に、第8図に示す(財)電力中央研究所で実施の実規模のキャスクの蓋モデルによる長期密封性能試験結果において、試験開始から約18年6ヶ月（平成2年10月から平成21年3月）経過した二次蓋閉じ込め部の漏えい率に変化はなく、試験開始時と同等の閉じ込め性能を保持することが確認されている。また、東海第二発電所の乾式貯蔵容器の調査において、約7年間経過した金属ガスケットの一次蓋密封性能は、貯蔵初期と同程度（ $10^{-10} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 程度）の知見が得られている¹⁾。

BWR用大型キャスク（タイプ2）及びBWR用大型キャスク（タイプ2 A）で使用する金属ガスケットの設計漏えい率は、使用環境を考慮しても基準漏えい率（ $2.4 \times 10^{-6} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ）を満足する。（別添3参照）。

なお、実際に使用する一次蓋、二次蓋の金属ガスケットが所定の漏えい率を満足することは、発電所搬出前の気密漏えい検査において、基準漏えい率を下回るように設定したリークテスト判定基準を満足することを確認する。



第1図 金属キャスクの閉じ込め構造



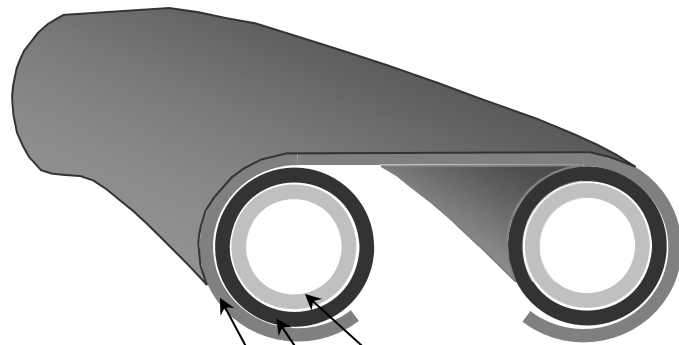
— 閉じ込め境界(負圧：0.08MPa(初期圧))

▨ 閉じ込め監視圧力境界(正圧：0.41MPa(初期圧))

第2図 金属キャスクのシール部詳細



断面イメージ

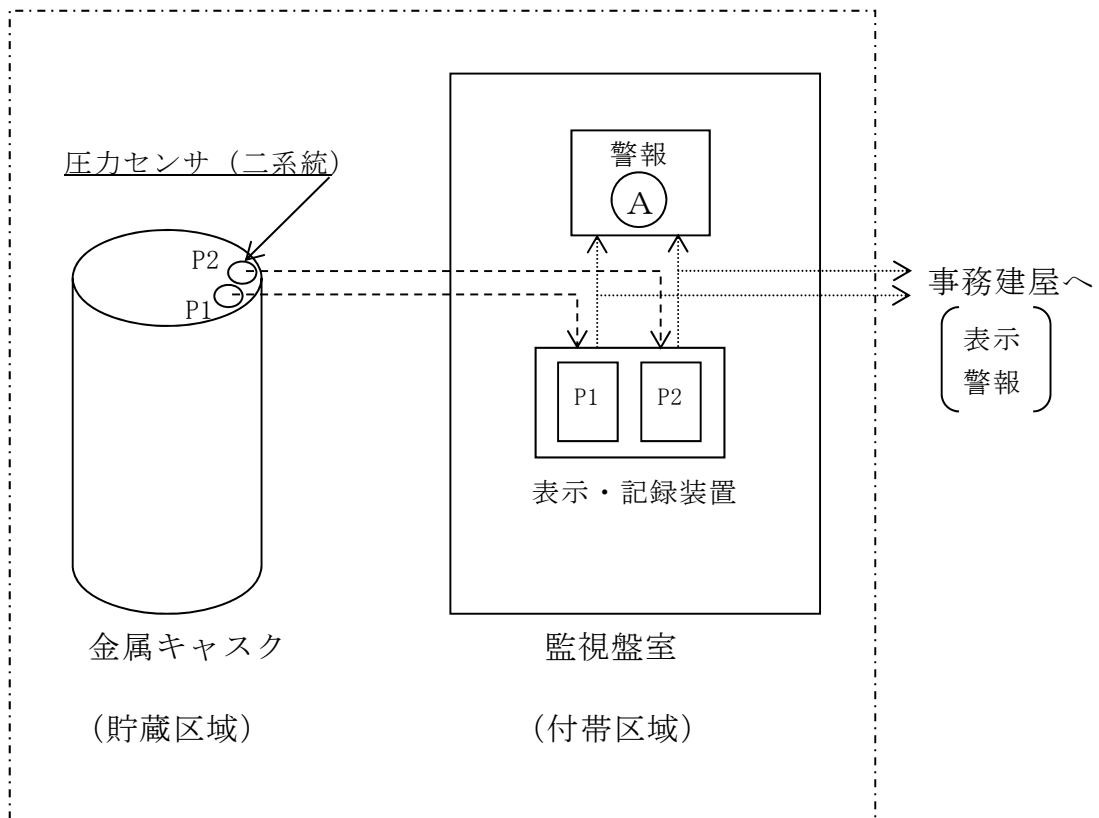


コイルスプリング (インコネル)

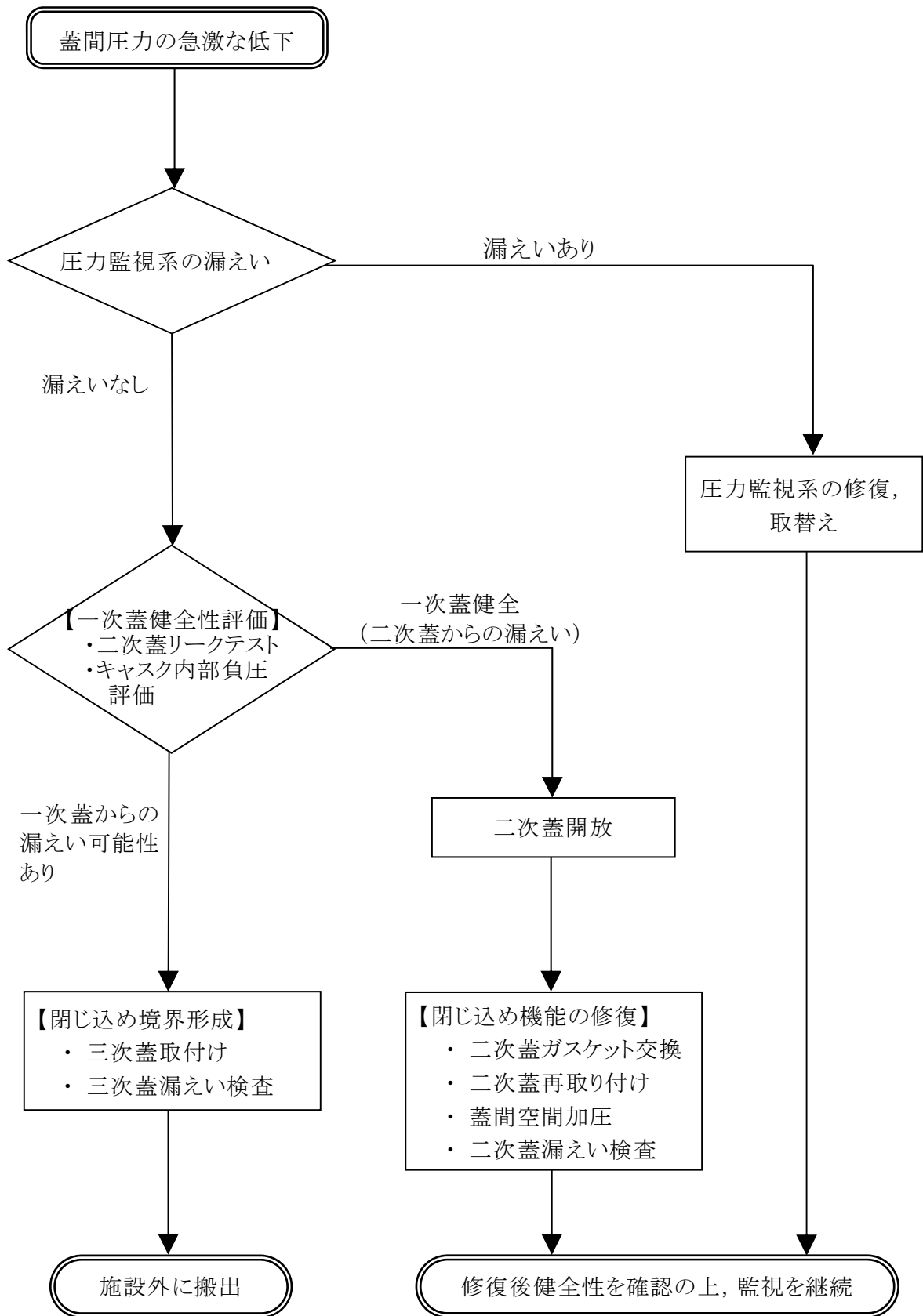
内被材 (インコネル)

外被材 (アルミニウム)

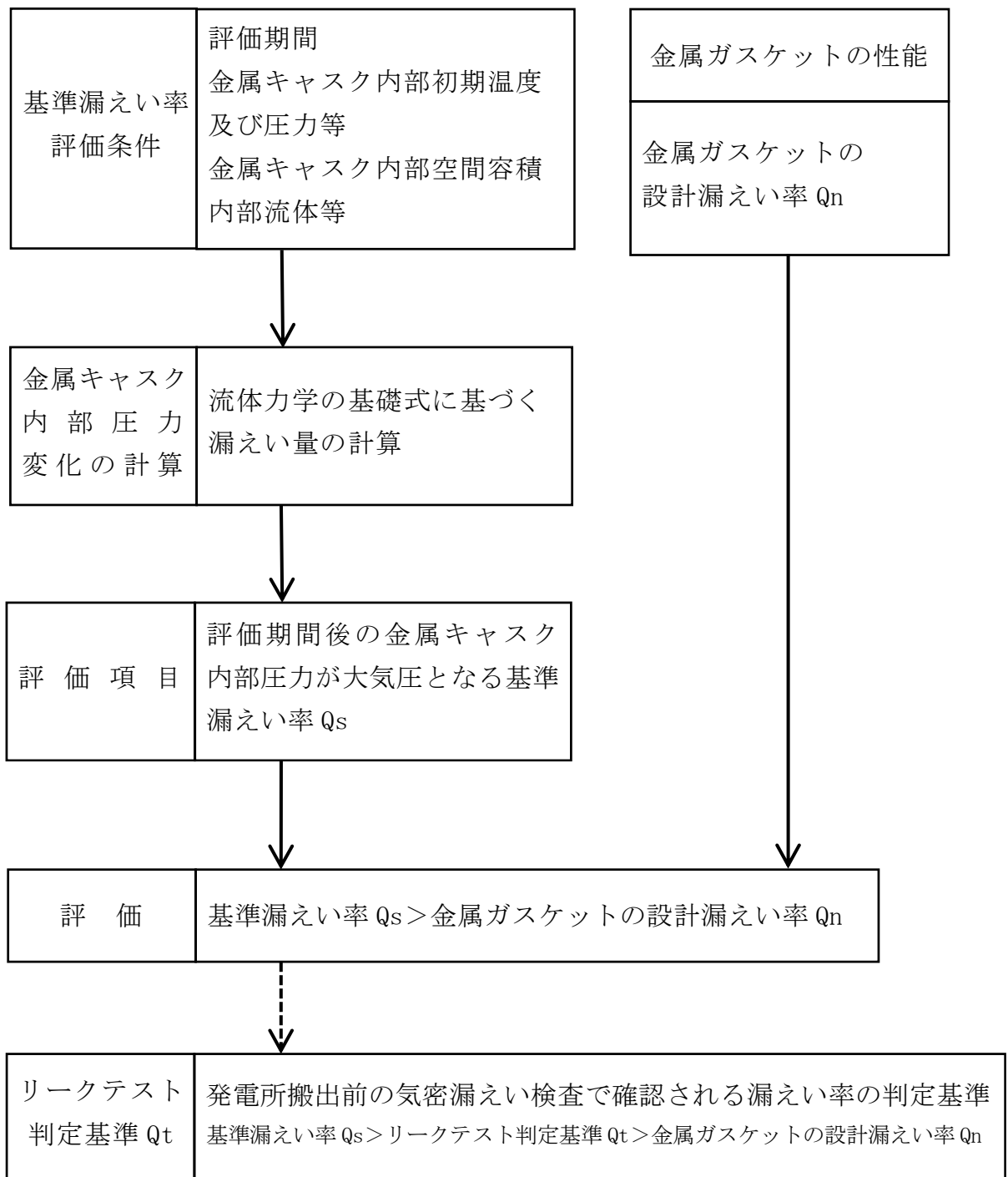
第3図 金属ガスケット構造



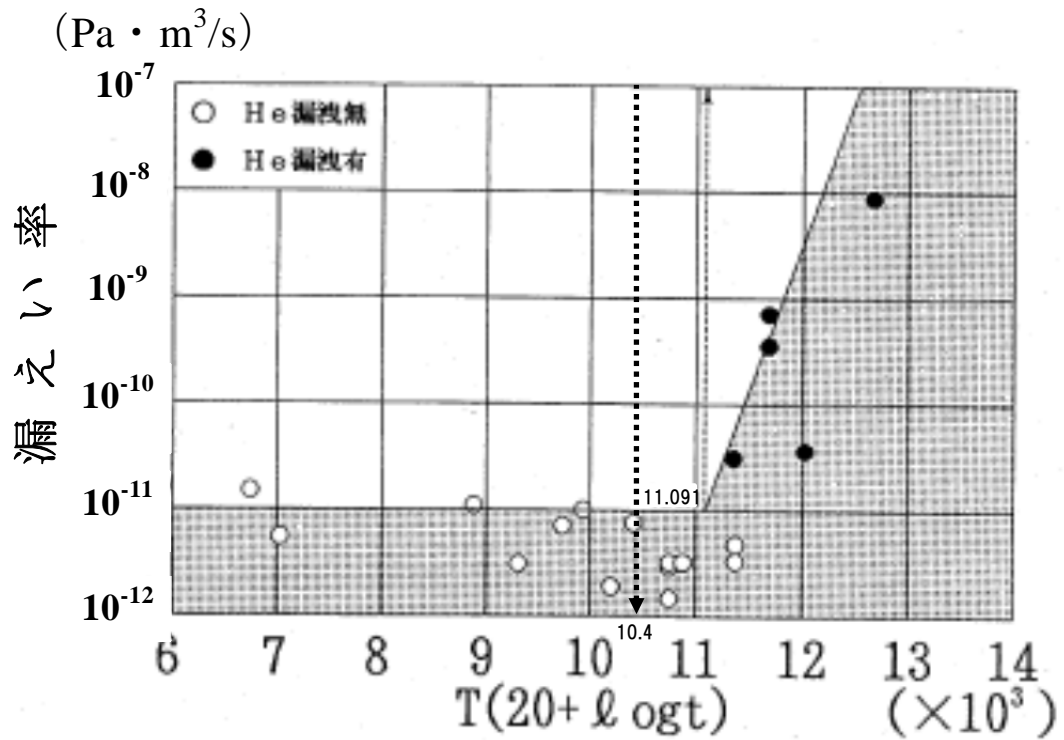
第4図 蓋間圧力監視装置の構成



第5図 閉じ込め機能異常時の対応手順



第6図 金属キャスクの閉じ込め評価フロー



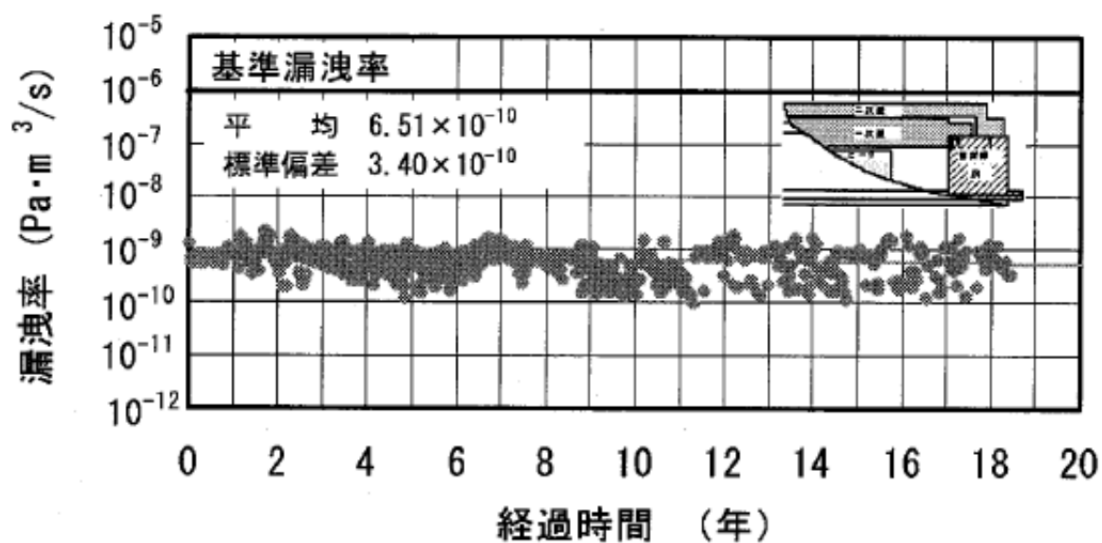
$$LMP = T \cdot (20 + \log t)$$

T : 温度 (K)

t : 時間 (h)

第7図 金属ガスケットの漏えい率と LMP ²⁾

《130℃, 60年間の LMP = 10.4 × 10³》



第8図 金属ガスケット（二次蓋）の長期密封性能試験結果
 （漏えい率の経時変化）²⁾

参考文献

- 1) 総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会 核燃料サイクル安全小委員会 中間貯蔵ワーキンググループ 輸送ワーキンググループ,「金属製乾式キャスクを用いる使用済燃料中間貯蔵施設における金属製乾式キャスクとその収納物の長期健全性について」, (平成 21 年 6 月 25 日)
- 2) (一社)日本原子力学会,「日本原子力学会標準 使用済燃料中間貯蔵施設用金属キャスクの安全設計及び検査基準:2010」(AESJ-SC-F002:2010), (一社)日本原子力学会, (2010 年 7 月)

蓋部の閉じ込め機能異常時の対応について

1. 蓋間圧力低下時の対応

蓋間圧力については、警報の他に圧力の経時的な変化についても監視を行う。

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

「徐々に圧力が低下する場合」とは、通常の状態（基準漏えい率以下）を意味し、蓋間圧力の低下は年単位で非常にゆっくりした変化であることから、運用管理面では蓋間圧力が警報設定値に達すれば、ヘリウムの再充填を行うこととなる。

蓋間空間に約 10 回を超える再充填が必要となる可能性が予見される場合は、金属キャスク搬出の検討を行う。

(1) 蓋間圧力監視装置からの漏えい時の対応

蓋間圧力監視装置（圧力検出部）の構成図（表示、記録装置を除く）を別添 1-1 図に示す。

蓋間圧力監視装置の圧力検出部で漏えいの可能性がある部位としては、溶接部、継手部及びガスケット部を想定している。外部に漏れてきたヘリウムガスをスニッファープローブで吸い込み、漏れを検出する方法（ヘリウム漏れ試験（スニッファーク法））により、漏えい箇所の特定を行う。漏えいが認められた場合には、蓋間圧力監視孔の金属ガスケット交換、継手部点検（例：増締め）もしくは部品交換を行う。（添付 1 参照）

(2) 蓋部からの漏えい時の対応

事業許可基準規則への適合及び貯蔵事業における万全の安全確保のために、閉じ込め機能の修復性を考慮した設計としている。(添付2参照)

万一、二次蓋金属ガスケットの漏えいが考えられる場合には、二次蓋金属ガスケットの漏えい試験を行う。蓋間にはヘリウムが充填されているため、ヘリウム漏れ試験により、漏えい確認ができる。

金属ガスケットは眼鏡型構造になっており、その内側に連通しているリークチェック孔に、ヘリウムリークテスト装置をつなぎ、内部を吸引することで、蓋間側の金属ガスケット(内側)のヘリウム漏れの検出を行う。

万一、二次蓋に漏えいが認められた場合には、金属キャスク内部が負圧に維持されていること及び一次蓋の健全性を確認の上、二次蓋の金属ガスケットを交換し、閉じ込め機能を修復して貯蔵を継続する。(添付3参照)

二次蓋に漏えいが認められず、一次蓋の閉じ込め機能が異常であると考えられる場合には、金属キャスクに蓋を追加装着し、搬出のために必要な記録とともに、契約先に引き渡す。

一次蓋及び二次蓋を貫通する孔については、別添1-2図に示す。

2. 再充填に係る基準

(1) 再充填を行う基準

蓋間圧力が警報設定値(0.27MPa)まで低下した場合に再充填を行う。

蓋部の漏えい率が基準漏えい率程度の漏えいであると仮定した場合の蓋間空間の圧力低下の推移を別添1-3図に示す。この場合約□年で警報設定値に達し、圧力障壁を維持するために、蓋間空間にヘリウムを再充填することが必要となる。

(2) 再充填の管理基準(過剰な充填となる基準)

キャスク内部圧力が0.08MPa(初期圧力:負圧)から0.097MPa(大気圧下限)になるまで蓋間のヘリウムガスが全て金属キャスク内部に流入したと仮定すると、蓋間累積圧力低下量は□MPaと評価出来ることから、□で約10回再充填できる。

蓋間累積圧力低下量 MPa は、以下のようなになる。

$$\Delta P_o \times V_o / T_o = \Delta P_1 \times V_1 / T_1$$

V_o : キャスク内部容積 (m^3)

V_1 : 蓋間容積 (m^3)

T_o : キャスク内部温度 (K)

T_1 : 蓋間温度 (K)

ΔP_o : キャスク内部圧力上昇量 (MPa)

ΔP_1 : 蓋間圧力の累積圧力低下量 (MPa)

$$\Delta P_1 = \Delta P_o \times V_o / T_o \times T_1 / V_1$$

$$= \span style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 460px; height: 20px; vertical-align: middle;">$$

参考までに、別添 1 - 4 図に東海第二発電所の実績相当（貯蔵開始時の初期圧力及び貯蔵開始から 7 年後に調査した際の一次蓋漏えい率 $9.0 \times 10^{-11} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ より試算）での評価を示す。実際の運用では、貯蔵期間中の蓋間空間へのヘリウム再充填は不要と考えられる。あわせて、何らかの異常により一次蓋と二次蓋の漏えい率が基準漏えい率の 5 倍に増加した場合の蓋間圧力の低下挙動を示す。漏えい率の著しい変化は蓋間圧力の経時変化として観測されることになる。

3. 負圧維持管理

金属キャスクの蓋部は一次蓋、二次蓋の二重構造としている。金属キャスク内部は負圧とし、蓋間空間はあらかじめ正圧とすることにより、圧力障壁を設ける。

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

認することができる。(添付4参照)

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

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

なお、閉じ込め機能に係る設計及び管理・運用について添付5に示す。

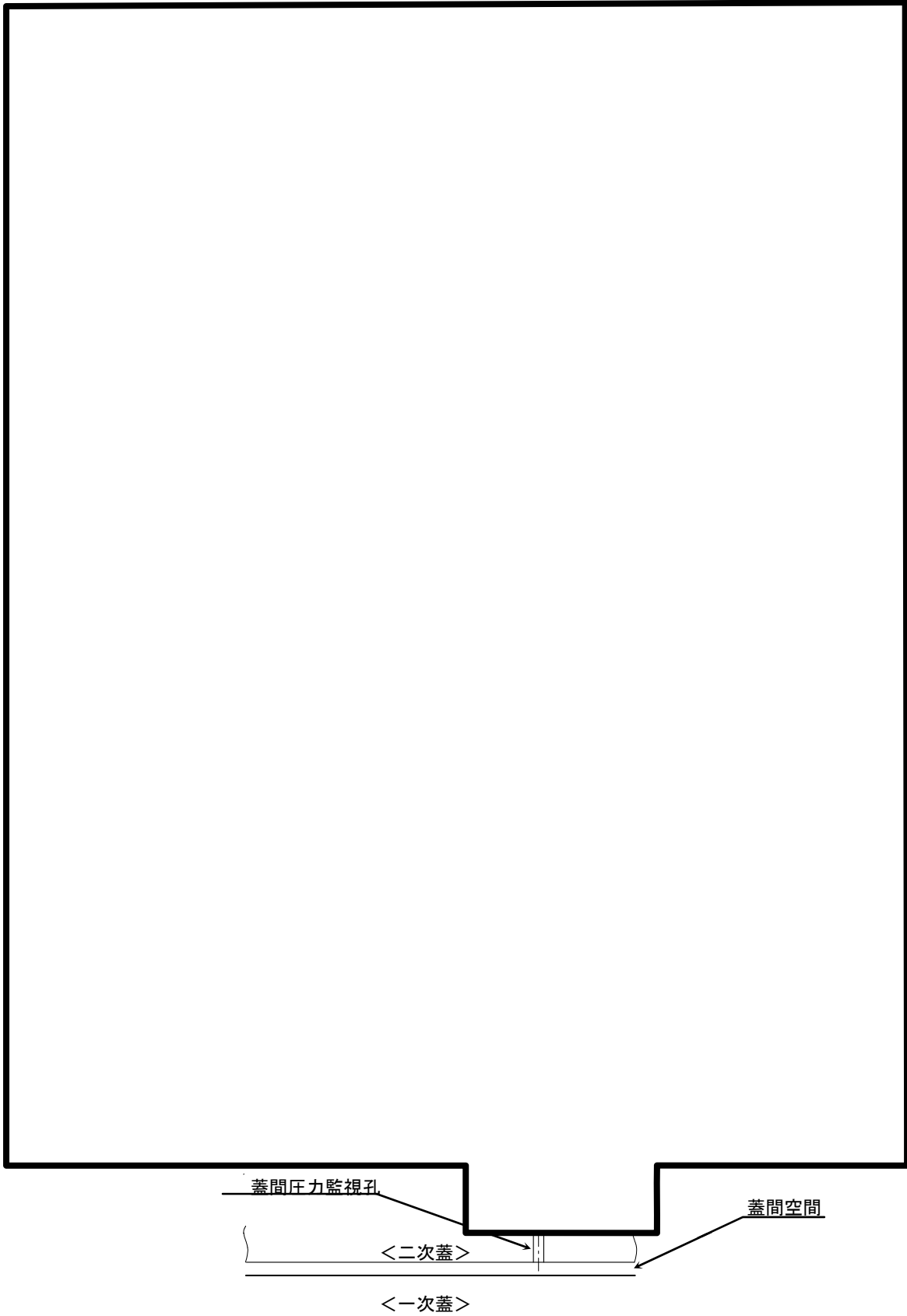
※1：使用済燃料集合体が収納条件を満たしているかについて、原子炉等規制法第59条に則った事業所外運搬（車両運搬確認）に係る発電所発送前検査の一環として行われる収納物検査の受検記録を確認する。

4. 三次蓋の取付及び搬出（添付6，添付7参照）

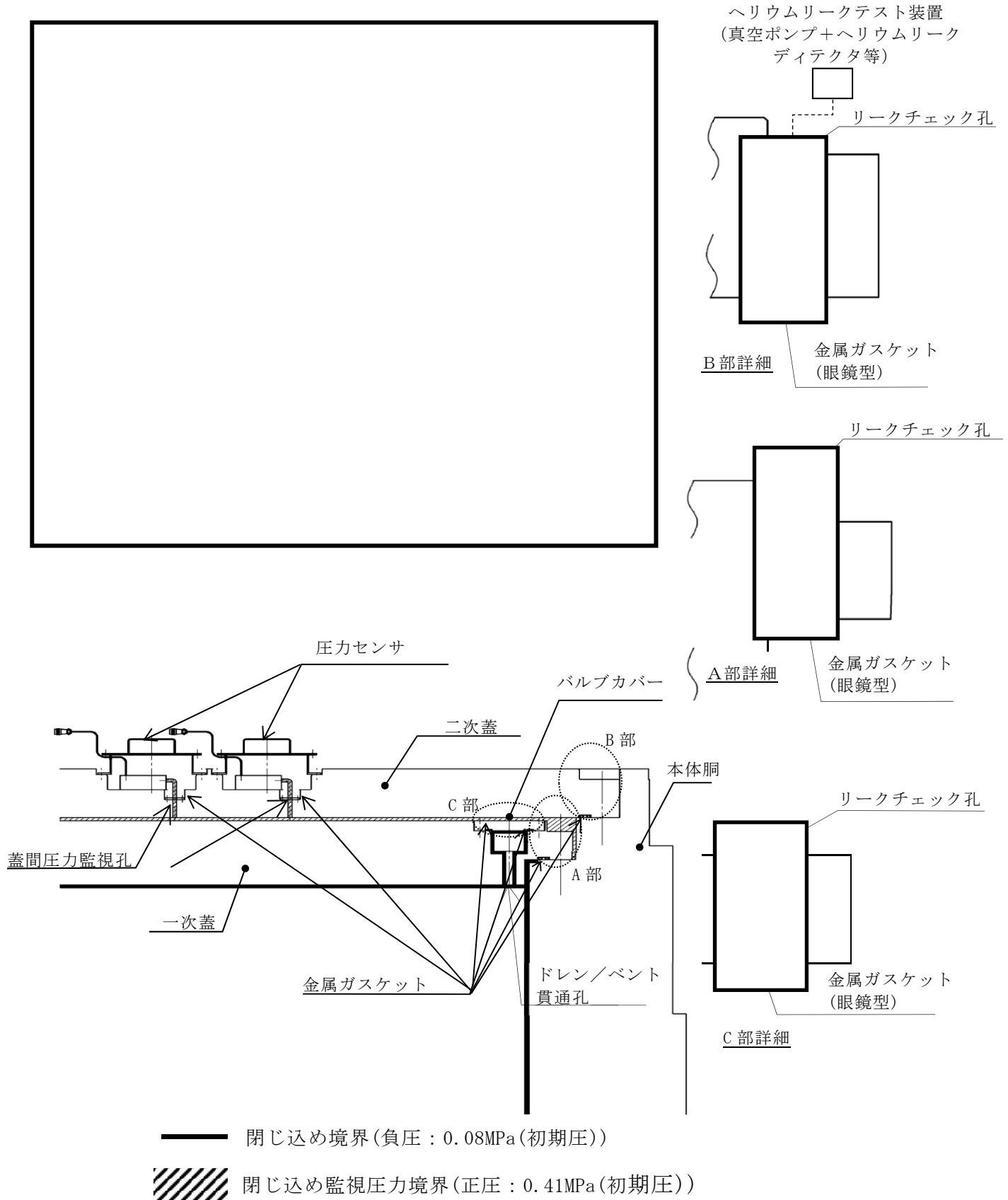
金属キャスクは、万一の蓋部の閉じ込め機能の異常に対して、三次蓋を追加装着できる構造を有する。一次蓋の漏えい率が基準漏えい率を超えると判断される場合は、使用済燃料貯蔵施設では一次蓋を開放しないことから、貯蔵前・後の輸送と同じように三次蓋を装着することで、輸送に必要な放射性物質の密封境界を再形成し、搬出する。

搬出に当たっては、三次蓋を取り付け、気密漏えい検査等輸送に必要な検査を行い、構外輸送の基準に適合することを確認し、施設外に搬出する。

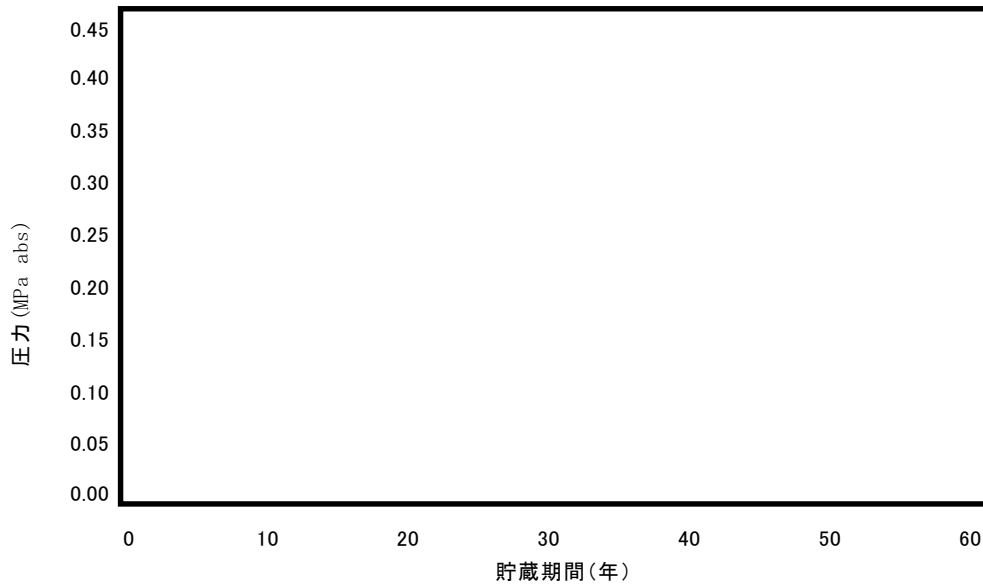
なお、施設から搬出までの間は、輸送物の状態で貯蔵施設内の受入れ区域に仮置きする。



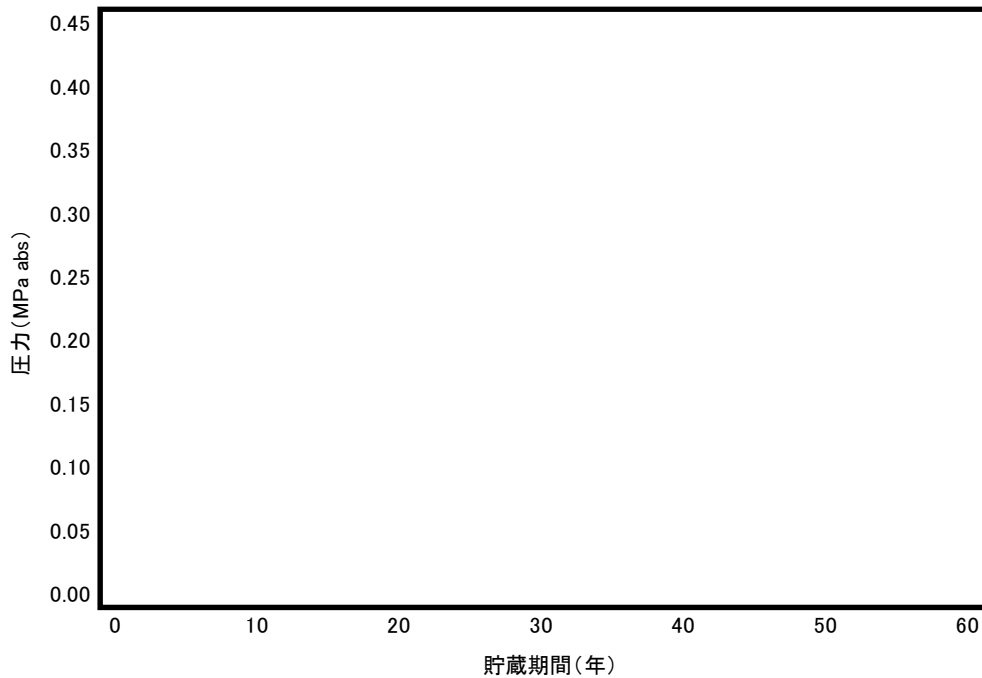
別添 1 - 1 図 蓋間圧力監視装置（圧力検出部）の構成図
（BWR用大型キャスク（タイプ2），（タイプ2A））



添1-2図 貫通孔及び金属ガスケットによるシール部の構成図
(BWR用大型キャスク(タイプ2), (タイプ2A))



別添 1 - 3 図 基準漏えい率程度で漏えいした場合の蓋間圧力の経時変化
(BWR用大型キャスク (タイプ2) , (タイプ2A))



別添 1 - 4 図 蓋間圧力の経時変化 (基準漏えい率の影響)
(BWR用大型キャスク (タイプ2) , (タイプ2A))

蓋間圧力監視装置のバルブの保守管理について

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

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

最も漏えいの可能性のある部位は、貯蔵施設内で組み立てる継手部で、蓋間圧力監視装置の一次バルブを閉にすることで蓋間圧力と分離できるため、漏えいが認められた場合は、継手部点検（例：増締め）や部品交換を行う。万が一、蓋間圧力監視孔の金属ガスケット部から漏えいした場合には、二次蓋金属ガスケットの交換と同様に、蓋間圧力開放の可否を判断したうえで、蓋間圧力監視孔の金属ガスケットの交換を行う。

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

蓋部の閉じ込め機能に影響を及ぼす可能性のある要因と発生防止策

事業許可基準規則への適合性及び貯蔵事業における万全の安全確保のために、万一、蓋部の閉じ込め機能の異常による漏えい率の著しい変化があるような状態（基準漏えい率を超えているような状態）に対して、二次蓋の閉じ込め機能に異常がある場合には、二次蓋の金属ガスケットを交換し、一次蓋に異常がある場合には、金属キャスクに蓋を追加装着できる構造とする等、閉じ込め機能の修復性を考慮した設計としている。閉じ込め機能に影響を及ぼす可能性のある要因（添付 2-1 表）に対しては、発生防止策をとることから、その発生の可能性はきわめて低い。

貯蔵期間中は、金属キャスクの蓋間圧力を監視することより長期的な影響が生じたとしても、閉じ込め機能の低下を検知できる構造となっている。

添付2-1表 閉じ込め機能に影響を及ぼす可能性のある要因及び発生防止策

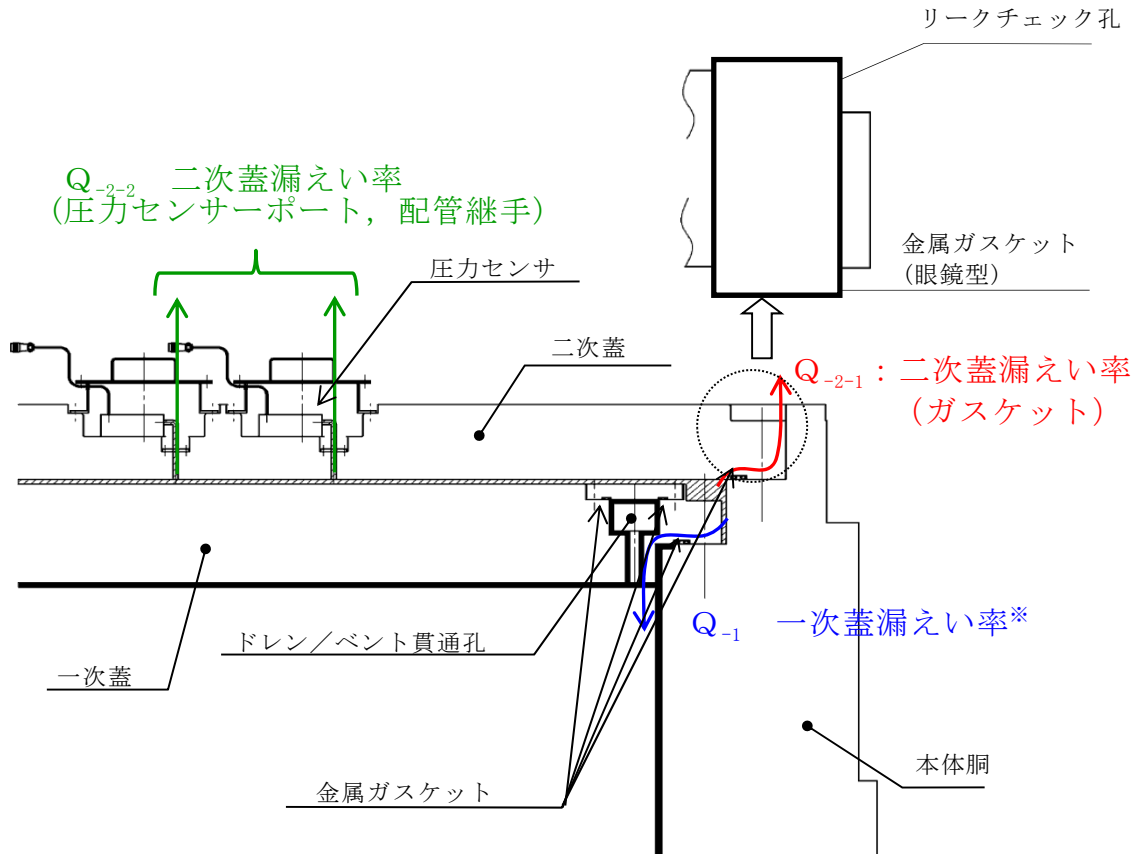
異常状態	要因	発生防止策	
		作業手順	検査・監視
蓋部（一次蓋又は二次蓋）の漏えい率の著しい変化	金属ガスケット取付不良	<ul style="list-style-type: none"> 適切な作業要領が定められていることの当社による確認 原子炉設置者による金属ガスケット装着前のシール面等に異物がないことの確認 	<ul style="list-style-type: none"> 原子炉設置者による発電所搬出前の気密漏えい検査による確認 当社による貯蔵中の金属キャスク蓋間圧力監視により、閉じ込め機能低下を検知可能
	締付ボルト取付不良	<ul style="list-style-type: none"> 適切な作業要領が定められていることの当社による確認 原子炉設置者による蓋ボルト締付け時におけるトルク管理 	
	金属ガスケットの水分による腐食	<ul style="list-style-type: none"> 適切な作業要領が定められていることの当社による確認 原子炉設置者による以下の確認 <ol style="list-style-type: none"> 真空乾燥プロセス記録管理（真空乾燥時間、圧力）により、真空乾燥が適切に行われたことの確認 真空乾燥後のヘリウムを充填した状態で湿分測定を行い、実際に水分を確認 残留水分除去の徹底（仕立て時の隙間等へのエアブローや拭き取り等） 	

添付 3

一次蓋の健全性確認の基本的考え方

蓋間圧力の低下の状況及び測定した二次蓋漏えい率より一次蓋の健全性を確認する基本的な考え方を添付 3 - 1 図に示す。

- Q : 全体漏えい率 ※蓋間圧力降下をもとに算出
- Q_{-1} : 一次蓋漏えい率 (測定不可)
- Q_{-2} : 二次蓋漏えい率 ($Q_{-2-1} + Q_{-2-2}$) ※ヘリウムリークテスト装置により実測
- Q_{-2-1} : 二次蓋ガスケット漏えい率
- Q_{-2-2} : 圧力センサーポート (配管継手含む)漏えい率
- $Q = Q_{-1} + Q_{-2}$
- $Q_{-1} = Q - Q_{-2}$ ※一次蓋漏えい率が判定基準を満足していることを確認する。

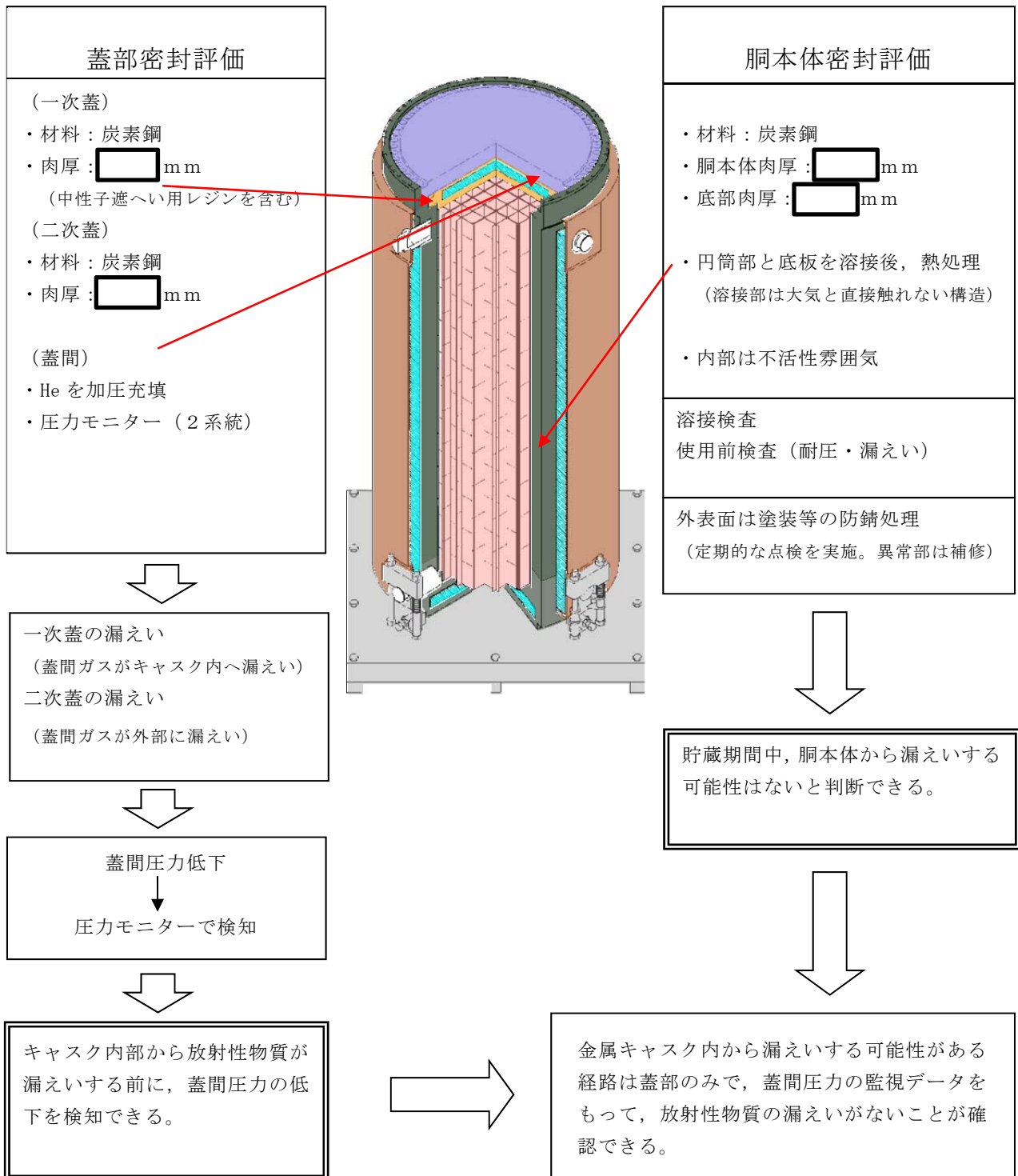


※ 一次蓋漏えい率 Q_{-1} = 一次蓋ガスケット漏えい率 + ドレン/ベント貫通孔ガスケット漏えい率

添付 3 - 1 図 確認の基本的な考え方

金属キャスクの密封性能維持について

金属キャスクは胴本体に一次蓋及び二次蓋が取付いた状態で、内部は不活性雰囲気にし、外面は塗装等の防錆処理を行った上で貯蔵する。金属キャスクは使用材料が炭素鋼であり、十分な肉厚がある構造となっており、外気に晒される閉じ込め境界を形成する溶接部が存在せず、外面は定期的な点検を行うことから、貯蔵している金属キャスクから漏えいする可能性がある経路は蓋部の金属ガスケットのみである。あらかじめ、金属キャスク内部を負圧に維持するとともに、蓋間の圧力を正圧とし、蓋間圧力を監視することにより、放射性物質の漏えいがないことが確認できる。(添付 4 - 1 図参照)



添付4-1図 BWR用大型キャスク (タイプ2), (タイプ2A) 金属キャスクの密封性能維持

閉じ込め機能に係る設計及び管理・運用

閉じ込め機能に係る設計方針，設計内容，管理・運用を整理し，添付 5－1 表に示す。

添付 5－1 表 設計及び管理・運用について

1. 設計方針	2. 具体的な設計内容	3. 具体的な管理・運用方法
<ul style="list-style-type: none"> ・使用済燃料貯蔵施設での放射線業務従事者に対し，放射線被ばく上の影響を及ぼすことのないよう，使用済燃料集合体が内包する放射性物質を適切に閉じ込め。 ・バスケット及び使用済燃料集合体の健全性を維持するために，金属キャスクの内部の空間を不活性雰囲気保持。 	<p>(1) 蓋及び蓋貫通孔のシール部には長期間にわたって閉じ込め性能を維持する観点から耐熱性，耐腐食性を有し，耐久性の高い金属ガスケットを採用。</p> <p>(2) 金属キャスク本体を堅固な構造とし，蓋部は一次蓋，二次蓋の二重構造，金属キャスク内部を負圧に維持し，一次蓋と二次蓋との蓋間空間を正圧とすることにより圧力障壁を設ける。また，キャスク内部及び蓋間空間を不活性雰囲気に保持。</p>	<p>(1) (2) キャスクキャビティ内の不活性雰囲気維持管理</p> <ul style="list-style-type: none"> ・金属ガスケットの仕様，長期密封性試験によるシール性能の確認 ・受入れ時に気密漏えい検査を実施 ・不活性雰囲気維持管理
	<p>(3) 蓋間空間の圧力を監視することにより，閉じ込め機能低下を検出できる構造。</p>	<p>(3) 蓋間圧力監視の管理・運用</p> <ul style="list-style-type: none"> ・使用済燃料集合体は収納条件を満たした燃料であること※¹，国内輸送法令に従い安全に輸送が行われた金属キャスクを受け入れるため安全機能への影響は生じないこと，キャスク本体（密封容器）は堅固な構造であり，輸送及び貯蔵期間中に

		<p>外力により燃料が破損してキャスク内部の圧力が上昇することはないこと、また、キャスク本体（密封容器）は検査にて欠陥がないことを確認しており、漏えいが発生する可能性はないことから、キャスク内部の圧力が上昇する要因は、蓋間空間からの気体の流入のみとなる。従って、蓋間圧力を測定・監視することにより、間接的にキャスク内部の負圧維持を確認することが可能</p> <ul style="list-style-type: none"> ・蓋間圧力監視装置が点検中等においても閉じ込め機能の異常を監視できるよう蓋間圧力監視装置を二系統並列に設定 ・万一の閉じ込め機能の異常を検知するため、適切に蓋間圧力の警報設定値を設定 ・蓋間圧力監視装置の定期的な点検（定期的な圧力センサーの校正）
	<p>(4) 万一の蓋部閉じ込め機能の異常に対して、三次蓋を追加装着できる構造。</p>	<p>(4) 万一の蓋部閉じ込め機能の異常に対する処置</p> <ul style="list-style-type: none"> ・漏えい箇所の特定 ・三次蓋装着による施設外搬出または二次蓋金属ガスケット交換

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

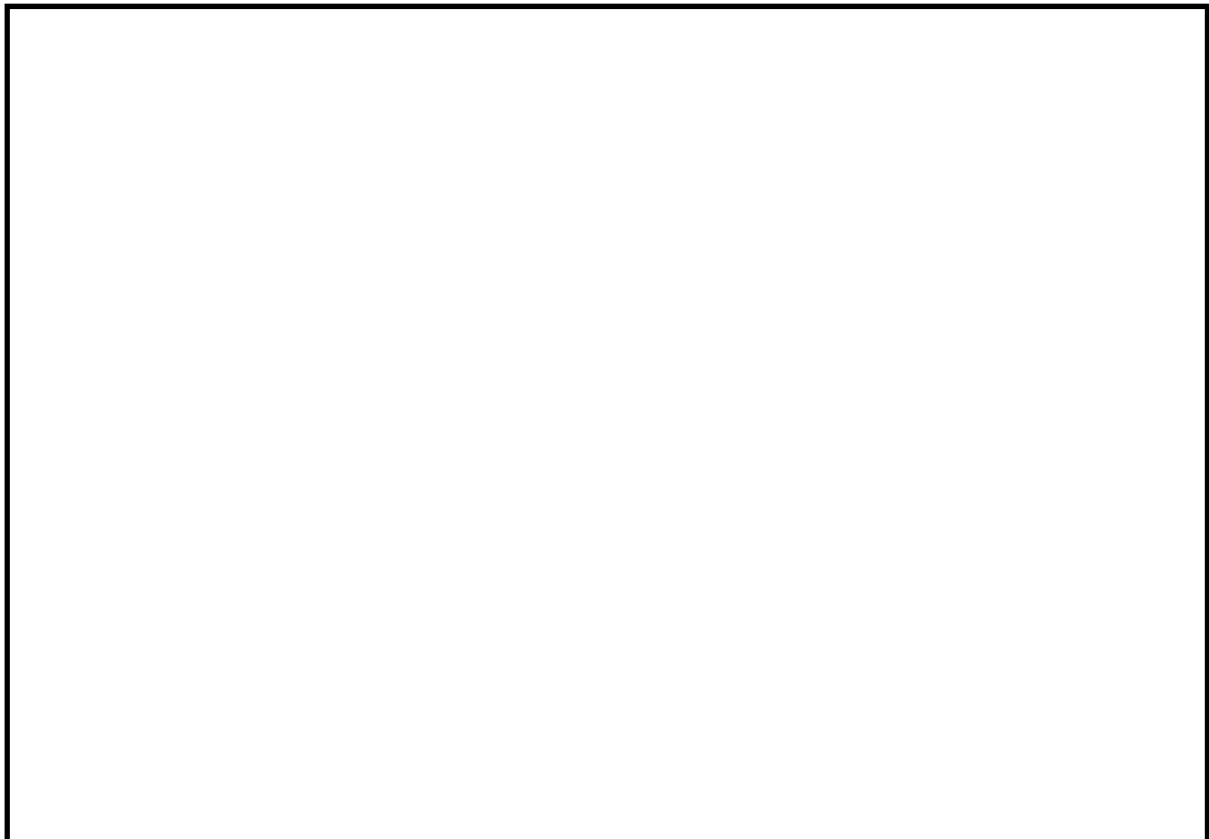
添付 6

三次蓋の構造とシール方法について

三次蓋の具体的な設計及び構造としては、三次蓋はボルトで本体上部のフランジに取り付けられ、接合面には蓋側にOリングの溝が設けられており、Oリングにより輸送物としての密封境界を形成する。三次蓋の構造の例を添付 6 - 1 図に示す。

三次蓋の密封性能はOリングの耐熱性能¹⁾から、1年以上の維持は可能であり、搬出までの間仮置き可能である。

輸送時の密封境界（BWR用大型キャスク（タイプ2）、（タイプ2A））は収納物を収納する胴、底板及び三次蓋から構成される。この様態で輸送容器としての承認を得ることになる。



添付 6 - 1 図 三次蓋の構造（BWR用大型キャスク（タイプ2）、（タイプ2A））

1)：電力中央研究所報告「U97101 輸送キャスク密封装置の耐熱限界性能の評価」（平成10年3月）

三次蓋の取付け及び搬出手順について

1. 搬出方法の概要

使用済燃料貯蔵施設からの搬出方法の概要は以下のとおり。添付 7-1 図に搬出方法の概略図を示す。

(1) 輸送準備作業

- 1) 金属キャスクに三次蓋を取付ける。
- 2) 搬送台車で検査架台から受入れ区域へ移動する。
- 3) 金属キャスクを受入れ区域天井クレーンで、搬送台車からたて起こし架台へ移動する。
- 4) 受入れ区域天井クレーンで、金属キャスクに上・下部緩衝体を取り付ける。

(2) 輸送作業

- 1) 金属キャスクを受入れ区域天井クレーンで、たて起こし架台から輸送車両へ積載する。
- 2) 発送前検査（外観，表面密度，線量当量率，収納物，温度測定，未臨界，気密漏えい等）で，核燃料輸送物設計承認書の記載を満足することを確認する。
- 3) 金属キャスクに近接防止金網を取り付ける。

(3) 船積み

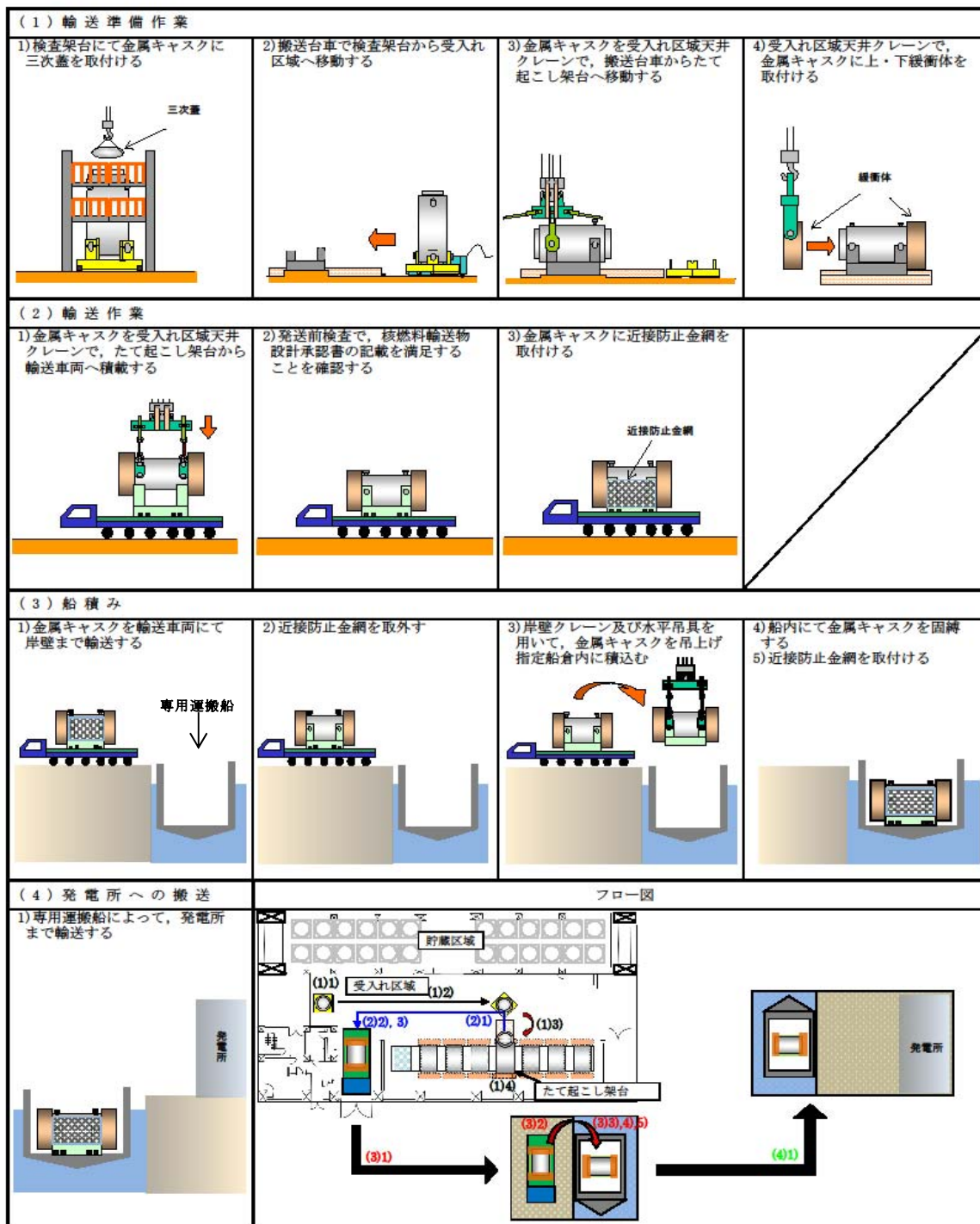
- 1) 金属キャスクを輸送車両にて岸壁まで輸送する。
- 2) 近接防止金網を取り外す。
- 3) 岸壁クレーン及び水平吊具を用いて，金属キャスクを吊り上げ，専用運搬船の指定船倉内に積み込む。
- 4) 船内にて金属キャスクを固縛する。
- 5) 近接防止金網を取り付ける。

(4) 発電所への輸送

- 1) 専用運搬船によって，発電所まで輸送する。

2. 搬出手続き

金属キャスクの搬出手続きには、原子炉設置者による専用運搬船の手配、官庁への申請手続きを行い、準備できしだい速やかに搬出する。また、受入れ先は、現時点では、搬出元の電力会社であるが契約先と協議することになる。



添付 7 - 1 図 使用済燃料貯蔵施設からの搬出方法の概略

基準漏えい率の評価方法とその結果

1. 評価方法

金属キャスクの基準漏えい率計算フローを別添 2 - 1 図に示す。BWR 用大型キャスク（タイプ 2），（タイプ 2 A）の評価条件を別添 2 - 1 表に示す。（添付 1 参照）

- ① 金属キャスクの閉じ込め境界の漏えい率 Q_0 を設定する。この漏えい率は、使用済燃料の貯蔵開始時のシール部圧力、温度条件での金属キャスクの閉じ込め境界（一次蓋）全箇所からの漏えい率の合計値として設定する。
- ② 金属キャスク内部圧力の変化は、ボイル・シャルルの法則に基づき、以下のように求める。

$$\frac{dPd}{dt} = \frac{Q}{Vd} \cdot \frac{Td}{T} \quad \text{②-1}$$

ここで、

dPd : 金属キャスク内部圧力の変化 (Pa)

Td : 金属キャスク内部代表温度 (K)

Q : 金属キャスク内部圧力 Pd のときのシール部の漏えい率 ($\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$)

T : シール部の代表温度 (K)

Vd : 金属キャスク内空間容積 (m^3)

t : 時間 (s)

また、ここで漏えい率 Q は以下のクヌッセンの式で求められる。

$$\left. \begin{aligned} Q &= L \cdot Pa \\ L &= (Fe + Fm) \cdot (Pu - Pd) \\ Fe &= \frac{\pi}{128} \times \frac{D_0^4}{a \cdot \mu} \\ Fm &= \frac{\sqrt{2\pi \cdot R_0}}{6} \times \frac{D_0^3 \sqrt{\frac{T}{M}}}{a \cdot Pa} \end{aligned} \right\} \quad \text{②-2}$$

ここで、

- Q : 漏えい率 (Pa・m³/s)
L : 圧力 Pa における体積漏えい率 (m³/s)
Fe : 連続流の流動伝導係数 (m³/ (Pa・s))
Fm : 自由分子流の流動伝導係数 (m³/ (Pa・s))
Pu : 上流側の圧力 (Pa)
Pd : 下流側の圧力 (Pa)
D₀ : 漏えい孔長(m) (②-2 式で、初期内部圧力 Pd₀,
初期漏えい率 Q₀として求める。)
a : 漏えい孔長(m)
Pa : 流れの平均圧力 (Pa), Pa=(Pu+Pd)/2
μ : ガスの粘性係数 (Pa・s)
T : ガスの温度 (K)
M : ガスの分子量 (kg/mol)
R₀ : ガス定数 (8.314472J/(mol K))

このクヌッセンの式は、次のようにして用いる。

金属キャスクの初期内部圧力が Pd₀, 蓋間圧力が Pu₀, シール部の代表温度が T₀ のときの初期漏えい率が Q₀ であるとし、クヌッセンの式にこれらの値を代入して相当漏えい孔径 D₀ を求める。同じシールにおいて内部圧力が Pd₁, 蓋間圧力が Pu₁, シール部の代表温度が T₁ に変化したときの漏えい率 Q₁ は、相当漏えい孔径 D₀ が変化しないものとして、クヌッセンの式にこれら圧力、温度を代入して求めることができる。

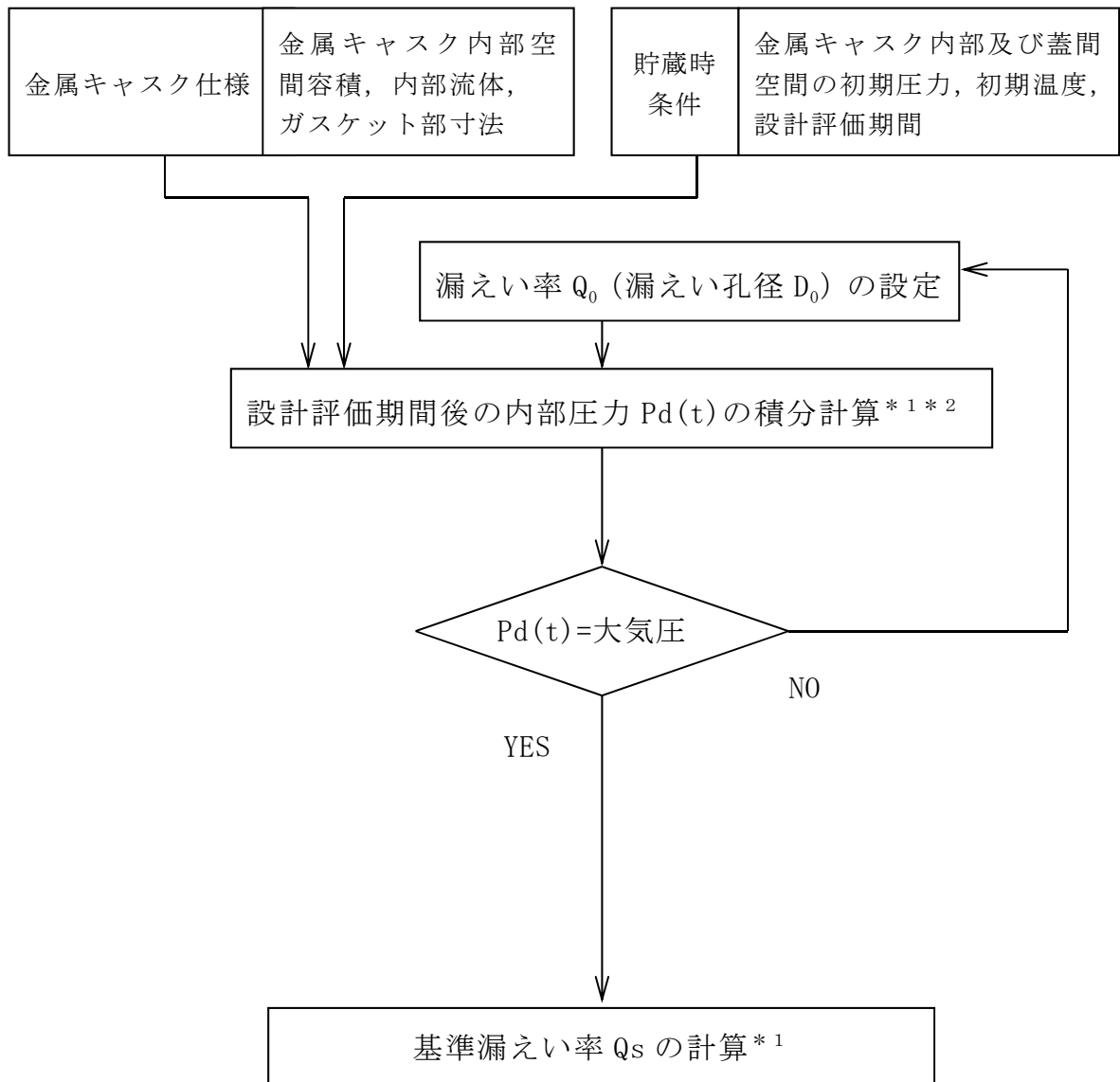
- ③ 金属キャスク初期内部圧力 Pd₀, 蓋間圧力一定として、②-1 の式を時間 t で積分することにより、ある時間 t における金属キャスク内部圧力 Pd を求める。
- ④ ③により求めた設計評価期間経過後の金属キャスク内部圧力 Pdf が正圧の場合はより小さな漏えい率 Q₀ を、負圧の場合はより大きい漏えい率 Q₀ を設定して、①～③を繰り返す。設計評価期間経過後の金属キャスク内部圧力が使用済燃料の破損 (0.1%) (添付 2, 添付 3

参照)によるガス放出に伴う圧力上昇分を考慮し、大気圧となる相当漏えい孔径 D_0 を求める。なお、大気圧は標準大気圧 (101325Pa (0.101MPa)) から気象変化による圧力変動を考慮した値 $9.7 \times 10^4 \text{Pa abs}$ を用いる。

- ⑤ D_0 より②-2式を用いて、基準漏えい率 Q_s を求める。基準漏えい率は、標準状態における漏えい率に換算する。
- ⑥ リークテスト判定基準としては、設計評価期間経過後にさらに蓋間空間ガスの流入を仮定しても金属キャスク内部圧力が負圧に維持できるように設定する。

2. 評価結果

「1. 評価方法」に基づき評価した結果、BWR用大型キャスク (タイプ2)、BWR用大型キャスク (タイプ2A) とともに別添2-2表の通り基準漏えい率は $2.4 \times 10^{-6} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 、リークテスト判定基準は $1.6 \times 10^{-6} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ となる。



* 1 : クヌッセンの式に基づく計算

* 2 : ボイル・シャルルの法則に基づく計算

別添 2 - 1 図 基準漏えい率計算フロー

別添 2 - 1 表 閉じ込め評価条件
(BWR用大型キャスク (タイプ 2), (タイプ 2 A))

項 目		評価条件
圧力	金属キャスク内部 (初期)	8.0×10^4 Pa abs
	蓋間空間 (初期)	4.1×10^5 Pa abs
	大気圧	9.7×10^4 Pa abs (注 1)
空間容積	金属キャスク内部 (注 2)	約 <input type="text"/> m ³
	蓋間空間	約 <input type="text"/> m ³
温度	金属キャスク内部 (注 3)	259 °C
	漏えい気体 (注 4)	-22.4 °C
内部気体		ヘリウム
設計評価期間		60 年

(注 1) 封入された使用済燃料の破損 (0.1%) によるガス放出に伴う圧力上昇分を別途考慮する。

(注 2) 金属キャスク内部の全空間容積から燃料集合体及びバスケットの体積を除いた空間容積を示す。

(注 3) 燃料集合体最高温度を保守的に設定した値を示す。

(注 4) 金属キャスク周囲最低温度を示す。

別添 2 - 2 表 閉じ込め評価結果
(BWR用大型キャスク (タイプ 2), (タイプ 2 A))

項 目	基準漏えい率 (Pa · m ³ /s)	リークテスト判定基準 (Pa · m ³ /s)
漏えい率	2.4×10^{-6}	1.6×10^{-6}

基準漏えい率の評価の詳細

BWR用大型キャスク（タイプ2）、BWR用大型キャスク（タイプ2A）の基準漏えい率及びリークテスト判定基準の評価の詳細を以下に示す。

金属キャスクの閉じ込め評価の基準となる基準漏えい率は、設計評価期間中に金属キャスク内部の負圧が維持できる漏えい率として定義される。したがって、設計評価期間後に金属キャスク内部圧力が大気圧となるシール部の漏えい率が基準漏えい率である。

漏えい率は、日本原子力学会標準¹⁾に基づき、以下の①、②式から求めている。時間dtの間に金属キャスク内部の圧力がdPdだけ変化する漏えい率をQとすれば、金属キャスク内空間容積は一定であることから、金属キャスク内部圧力の時間変化は、温度の違いを考慮してボイル・シャルルの法則により次式で与えられる。

$$\frac{dPd}{dt} = \frac{Q}{Vd} \cdot \frac{Td}{T} \quad \text{①}$$

ここで、

dPd：金属キャスク内部圧力の変化（Pa）

Td：金属キャスク内部代表温度（K）

Q：金属キャスク内部圧力Pdのときのシール部の漏えい率（Pa・m³/s）

T：シール部の代表温度（K）

Vd：金属キャスク内空間容積（m³）

t：時間（s）

また、漏えい率Qは以下のクヌッセンの式で求められる。

$$\left. \begin{aligned} Q &= L \cdot Pa \\ L &= (Fe + Fm) \cdot (Pu - Pd) \\ Fe &= \frac{\pi}{128} \times \frac{D_0^4}{a \cdot \mu} \\ Fm &= \frac{\sqrt{2\pi} \cdot R_0}{6} \times \frac{D_0^3 \sqrt{\frac{T}{M}}}{a \cdot Pa} \end{aligned} \right\} \quad \text{②}$$

ここで、

- Q : 漏えい率 (Pa・m³/s)
- L : 圧力Paにおける体積漏えい率 (m³/s)
- Fe : 連続流の流動伝導係数 (m³/(Pa・s))
- Fm : 自由分子流の流動伝導係数 (m³/(Pa・s))
- Pu : 上流側の圧力 (Pa)
- Pd : 下流側の圧力 (Pa)
- D₀ : 漏えい孔径 (m)
- a : 漏えい孔長 (m)
- Pa : 流れの平均圧力 (Pa), Pa = (Pu+Pd) / 2
- μ : ガスの粘性係数 (Pa・s)
- T : ガスの温度 (K)
- M : ガスの分子量 (kg/mol)
- R₀ : ガス定数 (J/(mol・K))

②式を①式に代入すると

$$\frac{dPd}{dt} = \frac{Td}{Vd \cdot T} \times \left\{ \frac{1}{2} Fe \cdot (Pu^2 - Pd^2) + Fm \cdot Pa \cdot (Pu - Pd) \right\} \quad ③$$

蓋間圧力(上流側の圧力) Pu (Pa) を一定として、③式を時間tで積分すれば、ある時間tにおける金属キャスク内部圧力 Pd = Pd(t) が得られる。つまり、

$$Pd(t) = \frac{Pu \cdot \{ Fe' \cdot (Pu + Pd_0) + Fm' \} - (Fe' \cdot Pu + Fm') \cdot (Pu - Pd_0) \cdot \exp\left\{ -\frac{Td \cdot (2Fe' \cdot Pu + Fm')}{Vd \cdot T} \cdot t \right\}}{Fe' \cdot (Pu + Pd_0) + Fm' + Fe' \cdot (Pu - Pd_0) \cdot \exp\left\{ -\frac{Td \cdot (2Fe' \cdot Pu + Fm')}{Vd \cdot T} \cdot t \right\}} \quad ④$$

ここで、

$$Fe' = \frac{1}{2} Fe = \frac{1}{2} \times \frac{\pi}{128} \times \frac{D_0^4}{a \cdot \mu}$$

$$Fm' = Fm \cdot Pa = \frac{\sqrt{2\pi \cdot R_0}}{6} \times \frac{D_0^3 \sqrt{T}}{a \cdot Pa} \times Pa = \frac{\sqrt{2\pi \cdot R_0}}{6} \times \frac{D_0^3 \sqrt{T}}{a}$$

である。

④式に、BWR用大型キャスク（タイプ2）、（タイプ2A）について

T_d : キャスク内部代表温度 (K) (532.15K (259°C) : 評価値 (内部気体最高温度))

T : シール部の代表温度 (K) (250.75K (-22.4°C) : 設計値 (最低気温))

V_d : 金属キャスク内空間容積 (m^3) (m^3 : 設計値)

P_u : 上流側 (蓋間) の圧力 (Pa) ($4.1 \times 10^5 Pa$: 設計値 (初期圧力一定))

P_{d_0} : 下流側 (金属キャスク内部) の圧力の初期圧力 (Pa) ($8.0 \times 10^4 Pa$: 設計値)

a : 漏えい孔長 (m) (m : 設計値 (金属ガスケット断面径10mm))

μ : Heの粘性係数 ($Pa \cdot s$) ($1.77 \times 10^{-5} Pa \cdot s$: 文献値²⁾ (-22.4°Cの値))

M : Heの分子量 (kg/mol) ($4.002602 \times 10^{-3} kg/mol$: 文献値³⁾)

R_0 : ガス定数 ($J/(mol \cdot K)$) ($8.314472 J/(mol \cdot K)$: 文献値³⁾)

t : 設計評価期間 (60年 = $60 \times 365.25 \times 24 \times 60 \times 60 \text{ sec} = 1.893456 \times 10^9 \text{ sec}$)

を代入して、金属キャスク内部圧力 P_d が0.1%の燃料破損¹⁾によるガス放出を想定した圧力上昇を考慮しても負圧を維持できる圧力となる漏えい孔径を繰り返し計算により求める。

ここで、0.1%の燃料破損によるガス放出を想定した圧力上昇 ΔP は、次のとおり求められる。

$$\Delta P = P_{He} + P_{FP}$$

ここで、

P_{He} : 初期封入ガス分圧 (Pa)

P_{FP} : FPガス分圧 (Pa)

金属キャスク内空間の初期封入ガス分圧 P_{He} 、FPガス分圧 P_{FP} は次のとおり求められる。

$$P_{He} = P_0 \times \frac{V_p}{V_d + V_p} \times \frac{T_d}{T_0}$$

$$P_{FP} = \frac{m \times R_0 \times T_d}{V_d}$$

ここで、

新型 8 × 8 燃料， 新型 8 × 8 ジルコニウムライナ燃料を例にすると、

P_0 : 燃料棒初期内圧 (Pa) (Pa : 設計値)

V_P : 放出ガス体積 (m^3)

$$V_P = V_{P0} \times n \times N \times \alpha$$

V_{P0} : 燃料棒プレナム体積 (m^3 /本) (m^3 /本 : 設計値)

n : 燃料棒本数 (本) (62本 : 設計値)

N : 収納体数 (体) (69体 : 設計値)

α : 燃料棒破損率 (－) (0.001 : 原子力学会標準¹⁾)

V_d : 金属キャスク内空間容積 (m^3) (m^3 : 設計値)

T_d : キャスク内部代表温度 (K) (532.15 K (259°C) : 評価値 (内部気体最高温度))

T_0 : 燃料棒初期封入時温度 (K) (K (°C) : 設計値)

m : 放出FPガス量 (mol)

$$m = M_g \times N \times \alpha \times \beta$$

M_g : ガス生成量 (mol/体) (mol/体 : 燃焼計算コードORIGEN2による評価値)

β : ガス放出率 (－) (0.3 : 原子力学会標準⁴⁾)

R_0 : ガス定数 (J/(mol・K)) (8.314472J/(mol・K) : 文献値³⁾)

0.1%の燃料破損によるガス放出を想定した圧力上昇は約0.2 kPa (Paを丸め) となる。同様に、高燃焼度 8 × 8 燃料で0.1%の燃料破損によるガス放出を想定した圧力上昇を求めると約 kPa (Paを丸め) となる。

漏えい孔径を繰り返し計算により求めると、漏えい孔径 D_0 は以下のとおりとなる。

$$Pd(t=60年) = 9.7 \times 10^4 - \text{} \times 10^3 \text{ Pa} = \text{} \times 10^4 \text{ Pa} \text{ のとき, } D_0 = \text{} \text{ m}$$

また、リークテスト判定基準としては、0.1%の燃料破損によるガス放出を想定した圧力上昇及び設計評価期間経過後にさらに蓋間空間ガスの金属キャスク内部への流入を仮定した圧力上昇を考慮した許容圧力 (MPa) においても負圧を維持できる値とする。基準漏えい率と同様に計算すると、以下のようになる。

$$Pd(t=60年) = \text{} \text{ Pa} \text{ のとき, 漏えい孔径: } D_0 = \text{} \text{ m}$$

次に、標準大気圧における基準漏えい率とリークテスト判定基準を算出する。
標準状態の算出条件を添付 1 - 1 表に示す。

添付 1 - 1 表 標準状態の算出条件

項 目	評 価 条 件	備 考
圧 力	上流側圧力 : 0.101 MPa 下流側圧力 : 0 MPa [abs]	大気圧
温 度	25°C	
内 部 気 体	ヘリウム 分子量 : 4.002602×10^{-3} kg/mol 粘性係数 : 1.98×10^{-5} Pa·s (25°C)	

基準漏えい率 Q_s は、先に得られた漏えい孔径 $D_0 = \boxed{}$ mの漏えい孔に対して、添付 1 - 1 表の条件をクヌッセンの式 (②式) に代入することで求められる。

$$Q_s = 2.4 \times 10^{-6} \text{ (Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s)}$$

また、リークテスト判定基準 Q_t も同様に、漏えい孔径 $D_0 = \boxed{}$ mの漏えい孔に対して、添付 1 - 1 表の条件をクヌッセンの式 (②式) に代入することで求められる。

$$Q_t = 1.6 \times 10^{-6} \text{ (Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s)}$$

参考文献

- 1) (一社)日本原子力学会,「日本原子力学会標準 使用済燃料中間貯蔵施設用金属キャスクの安全設計及び検査基準:2010」(AESJ-SC-F002:2010), (一社)日本原子力学会, (2010年7月)
- 2) (一社)日本機械学会,「伝熱工学資料 改訂第4版」, (一社)日本機械学会
- 3) 「国立天文台編 理科年表 平成19年」, 丸善(株), (2006)
- 4) (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)

使用済燃料の破損の仮定について

閉じ込め性能評価での基準漏えい率の算出に当たっては、日本原子力学会標準¹⁾に基づき使用済燃料破損率0.1%を用いている。使用済燃料破損率0.1%は、米国の使用済燃料集合体の乾式貯蔵中における漏えい燃料の発生率(約0.01%)と日本の軽水炉における漏えい燃料発生率(約0.01%以下)を考慮し保守的な値として定めたものである。

① 米国の漏えい燃料発生率(約0.01%)について¹⁾

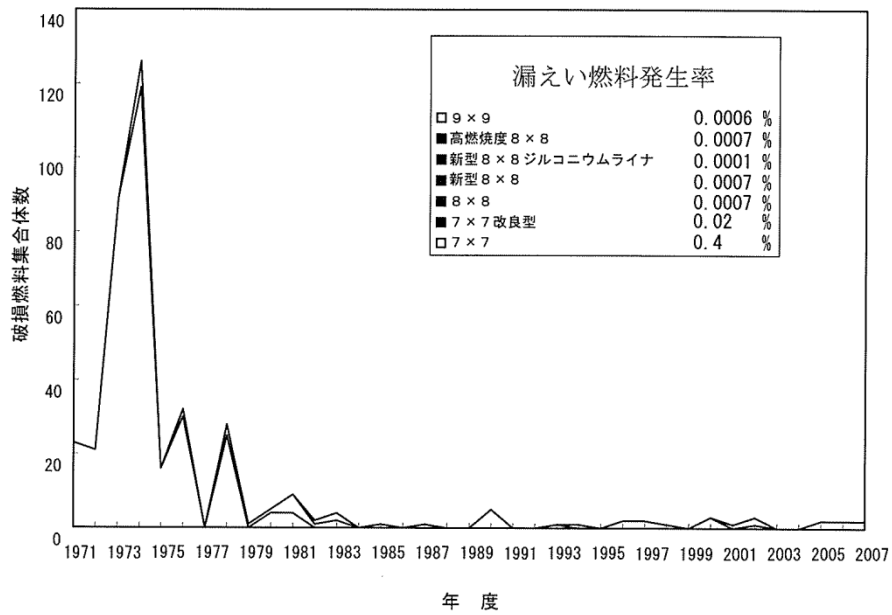
米国にて実施された使用済燃料の長期貯蔵時の健全性試験の結果、通常燃料を貯蔵した場合に2本の燃料棒に漏えいが生じていたとPNNL-11576²⁾により報告されている。試験対象の燃料棒は約16700本であることから、燃料の破損率を約0.01%としている。

② 日本の軽水炉における漏えい燃料発生率(0.01%以下)について¹⁾

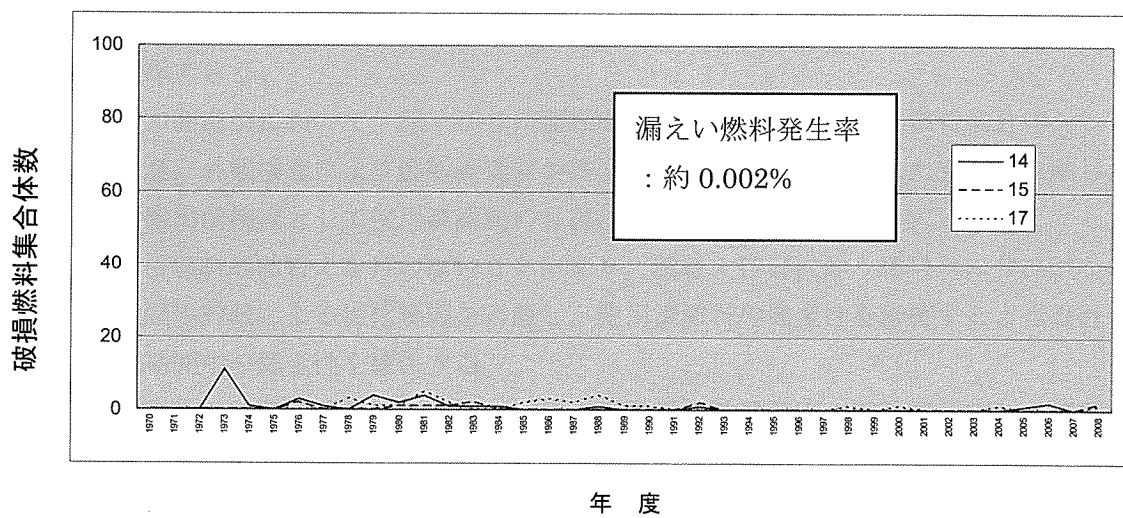
日本においては、発電所内の貯蔵容器の抜取調査では、燃料の漏えいは認められていないが、運転中の漏えい燃料発生確率は、BWR燃料で約0.01%(添付2-1図参照:東京電力株式会社の集計データ)、PWR燃料で約0.002%(添付2-2図参照:関西電力株式会社の集計データ)である。

米国の基準では、NRC発行のInterim Staff Guidance (ISG)-1³⁾「機能に基づく中間貯蔵及び輸送における使用済燃料の状態分類」に規定されているとおり、ピンホールやヘアクラックのある漏えい燃料であっても非損傷燃料として扱っており、このような使用済燃料についてあらかじめ収納されることを考慮している(添付2-3図参照)。

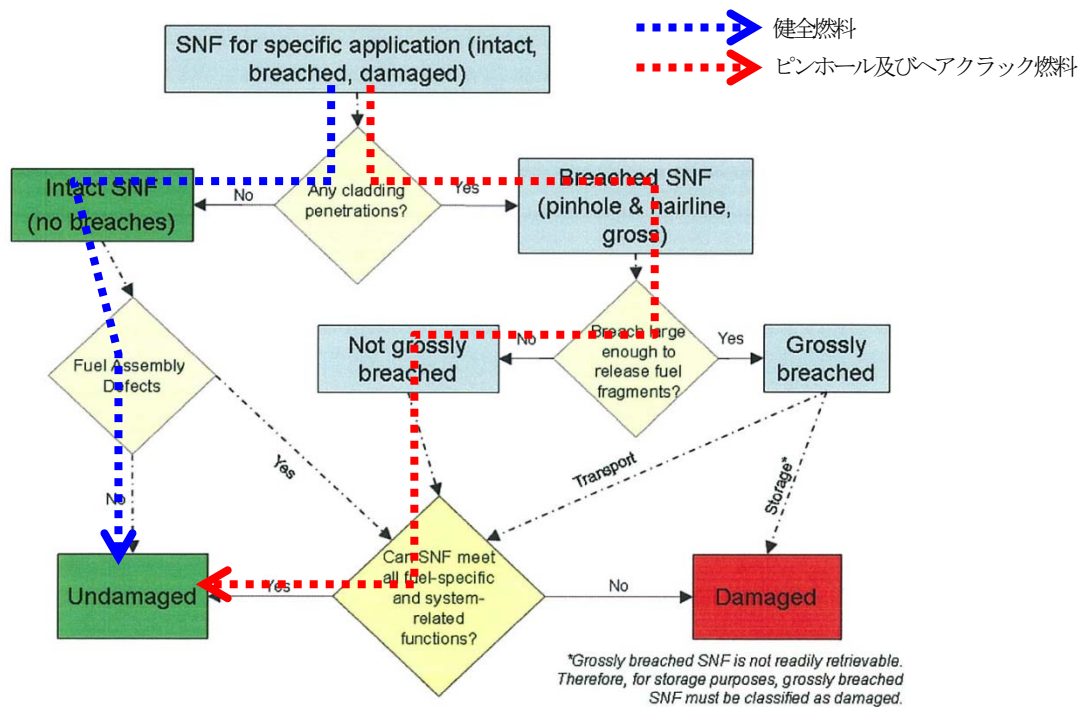
一方、我が国においては、金属キャスクで貯蔵する使用済燃料集合体は健全性を確保した使用済燃料集合体であり、金属キャスクに収納する時点において、健全であることを、運転中のデータ、 SHIPPING 検査等により確認することとしており、漏えい燃料は収納されることはない。



添付 2 - 1 図 国内の BWR 燃料の破損実績¹⁾



添付 2 - 2 図 国内の PWR 燃料の破損実績¹⁾



添付 2 - 3 図 米国における使用済燃料の状態分類³⁾

参考文献

- 1) (一社)日本原子力学会, 「日本原子力学会標準 使用済燃料中間貯蔵施設用金属キャスクの安全設計及び検査基準: 2010」 (AESJ-SC-F002: 2010), (一社)日本原子力学会, (2010年7月)
- 2) M. A. McKinnon, A. L. Doherty, “Spent Nuclear Fuel Integrity During Dry Storage - Performance Tests and Demonstrations”, PNNL-11576, June 1997
- 3) Interim Staff Guidance (ISG)-1, “Classifying the Condition of Spent Nuclear Fuel for Interim Storage and Transportation Based on Function”

添付 3

貯蔵中の使用済燃料被覆管の応力評価

基準地震動に対し、貯蔵中の使用済燃料集合体の形状及び閉じ込め機能の維持については、S_s地震力が作用する場合の使用済燃料の被覆管に生じる応力を評価し確認する。

以下に当該評価結果を示す。同評価結果より、使用済燃料集合体の閉じ込め機能は維持される。

1. 応力計算

S_s地震力が作用する場合に生じる応力は、鉛直方向荷重による圧縮応力 σ_c (MPa)、水平方向荷重による曲げ応力 σ_b (MPa) 及び内圧による各方向応力 $\sigma_z, \sigma_r, \sigma_\theta$ (MPa) である。S_s地震力が作用する場合において最大応力強さS (MPa) は、内面に生じるので内面のみ評価する。

(1) 鉛直方向荷重により生じる圧縮応力

鉛直方向荷重により生じる圧縮応力は、次式で与えられる。

$$\sigma_c = -\frac{W \cdot G_2}{A} \dots \dots \dots (1.1)$$

ここで、

W : 燃料被覆管最下端で負担する質量 (= kg)

G₂ : 鉛直方向加速度 (m/s²)

$$G_2 = (1 + C_v) \cdot G$$

C_v : 鉛直方向設計震度 (=0.87)

G : 重力加速度 (=9.80665 m/s²)

A : 燃料被覆管の断面積 (mm²)

$$A = \frac{\pi}{4} \cdot (d_o^2 - d_i^2)$$

d_o : 燃料被覆管の外径 (mm)

d_i : 燃料被覆管の内径 (mm)

(2) 水平方向荷重により生じる曲げ応力

燃料被覆管は支持格子により支持される連続梁とみなすことができ、1つの支持スパン内の部分を考えると両端固定梁となる。したがって、水平方向荷重により生じる最大曲げ応力は、次式で与えられる。

$$\sigma_b = \frac{M \cdot d_o}{2 \cdot I} \dots\dots\dots (1.2)$$

$$M = \frac{1}{12} \cdot (W_f + W_c) \cdot G_1 \cdot \ell^2 \dots\dots\dots (1.3)$$

$$I = \frac{\pi}{64} \cdot (d_o^4 - d_i^4) \dots\dots\dots (1.4)$$

ここで、

M : 曲げモーメント (N・mm)

G₁ : 水平方向加速度 (m/s²)

$$G_1 = C_H \cdot G$$

C_H : 水平方向設計震度 (=1.40)

G : 重力加速度 (=9.80665 m/s²)

I : 断面二次モーメント (mm⁴)

W_f : ペレット単位長さ当たりの質量 (kg/mm)

W_c : 燃料被覆管単位長さ当たりの質量 (kg/mm)

ℓ : 支持スパン (mm)

d_o : 燃料被覆管外径 (mm)

d_i : 燃料被覆管内径 (mm)

(3) 内圧による各方向応力

内圧P_oにより生じる各方向応力は、以下の式で与えられる。

$$\sigma_z = \frac{P_o}{(K^2 - 1)} \dots\dots\dots (1.5)$$

$$\sigma_r = \frac{-(K^2/R^2 - 1) \cdot P_o}{(K^2 - 1)} \dots\dots\dots (1.6)$$

$$\sigma_{\theta} = \frac{(K^2/R^2 + 1) \cdot P_o}{(K^2 - 1)} \dots\dots\dots (1.7)$$

ここで、

σ_z : 軸方向応力 (MPa)

σ_r : 半径方向応力 (MPa)

σ_{θ} : 周方向応力 (MPa)

P_o : 内圧 (MPa abs)

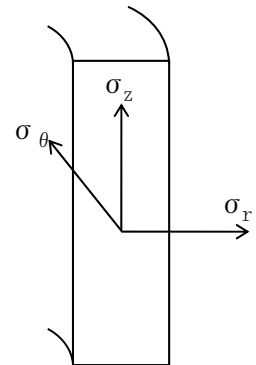
$K = b / a$

b : 燃料被覆管外半径 $= \frac{d_o}{2}$ (mm)

a : 燃料被覆管内半径 $= \frac{d_i}{2}$ (mm)

$R = r / a$ (内面においては $R = 1$)

r : 評価位置 ($a \leq r \leq b$)



(4) 応力強さ

鉛直方向荷重により生じる圧縮応力、水平方向荷重により生じる曲げ応力及び内圧により生じる各方向応力から求まる応力強さは、以下の式で与えられる。

$$S = \text{Max}\{ |\sigma_{rL} - \sigma_{\theta L}|, |\sigma_{\theta L} - \sigma_{zL}|, |\sigma_{zL} - \sigma_{rL}| \} \dots\dots\dots (1.8)$$

ここで、

$$\sigma_{rL} = \sigma_r$$

$$\sigma_{\theta L} = \sigma_{\theta}$$

$$\sigma_{zL} = \sigma_c - \sigma_b + \sigma_z$$

評価条件を添付 3-1 表に、前述の諸式を用いて計算した結果を添付 3-2 表に示す。燃料被覆管に発生する応力は降伏応力以下である。

添付 3 - 1 表 S s 地震力が作用する場合の燃料被覆管の応力評価条件

項目	値
ペレット単位長さ当たりの質量： W_f (kg/mm)	<input type="text"/>
燃料被覆管単位長さ当たりの質量： W_c (kg/mm)	<input type="text"/>
支持スパン： l (mm)	<input type="text"/>
燃料被覆管外径： d_o (mm)	12.3
燃料被覆管内径： d_i (mm)	<input type="text"/>
内圧： P_o (MPa abs)	<input type="text"/>

添付 3 - 2 表 S s 地震力が作用する場合の燃料被覆管の応力評価結果

(単位：MPa)

部位	計算値	降伏応力※
燃料被覆管	70	313

※：燃料被覆管材料（ジルカロイ-2）の 260℃における照射後の降伏応力 568 MPa¹⁾に燃料被覆管の照射硬化の回復を保守的に考慮した値

参考文献

- 1) (独)原子力安全基盤機構, 「平成 18 年度 高燃焼度 9 × 9 型燃料信頼性実証成果報告書 (総合評価編)」, (独)原子力安全基盤機構

金属ガスケットの性能について

1. 漏えい率とラーソンミラーパラメータとの関係

(財)電力中央研究所で実施された金属ガスケットの長期密封性能試験の結果として、初期の密封性能が保持できる温度と時間が整理されている。漏えい率とラーソンミラーパラメータ(以下「LMP」という。)の関係は材料定数 $C=20$ として別添3-1図の通りとなっている。金属キャスクの除熱評価における制限温度は 130°C であり、初期温度を 130°C として、崩壊熱の減衰を無視して、LMPが 11×10^3 となる時間を求めると約2000年となる。

2. 金属ガスケットの断面径、直径等の影響

(財)電力中央研究所での長期密封性能試験の金属ガスケット仕様及びリサイクル燃料備蓄センターで使用する金属ガスケット仕様の比較を別添3-1表に示す。併せて、参考として使用済燃料の所内での乾式貯蔵の実績がある東京電力(株)福島第一原子力発電所、日本原子力発電(株)東海第二発電所で使用されている金属ガスケットの仕様も示す。

以下のとおり一部相違点はあるが、リサイクル燃料備蓄センターで使用する金属ガスケットについては、金属キャスクの使用済燃料集合体を内封する空間を負圧に維持できる閉じ込め性能を有する。

(1) 金属ガスケットのタイプと材質

リサイクル燃料備蓄センターで使用する金属キャスクに適用される金属ガスケットのタイプと材質は、(財)電力中央研究所の長期密封性能試験^{1), 2), 3)}の金属ガスケットと同じである。

(2) 断面径の違い

(財)電力中央研究所での長期密封性能試験^{1), 2)}によれば、断面径5.5mmの金属ガスケットにおいて、初期の閉じ込め性能を保持できる限界のLMPは 11.0×10^3 とされている。

また、(財)電力中央研究所での実規模のキャスク蓋部モデルによる長期密封性能試験³⁾によれば、断面径6.1mmの金属ガスケットにおいて、温

度が 130～140℃一定に保たれた状態で、約 18 年 6 ヶ月にわたって漏えい率がほとんど変化しないことが確認されている。(別添 3-2 図参照)

金属ガスケットによる気密性は、ボルトによる蓋とフランジの締付けで圧縮された金属ガスケットの外被がガスケット内部のコイルスプリングの反力によって蓋及び本体胴フランジに密着することで確保される。コイルスプリングは締め付けにより楕円変形する。したがって、断面径が大きいほどフランジへの外被の密着面積は広範囲に得られる。断面径の違いについては、原子力発電技術機構で行われた断面径 10 mm, 3.3 mm, 2 mm の金属ガスケットの密封性能試験⁴⁾において、断面径が大きいものほど高い LMP 値まで漏れにくい傾向があることが報告されている。

また、原子力発電技術機構で行った断面径 10mm の金属ガスケットの密封性能試験⁴⁾では、LMP が 11.9×10^3 までにおいて、この間で漏えいの有意な増加がないことが確認されている。(別添 3-3 図参照)

リサイクル燃料備蓄センターで使用する金属ガスケットの断面径は 5.6mm, 10mm であり、(財)電力中央研究所の試験と同等の閉じ込め性能を有する。

(3) 直径（フープ径）の違い

金属ガスケットの直径（フープ径）においては、ガスケットの周方向に同一の漏えい孔が等間隔に存在すると考えれば、漏えい率はガスケットの周長に比例する。

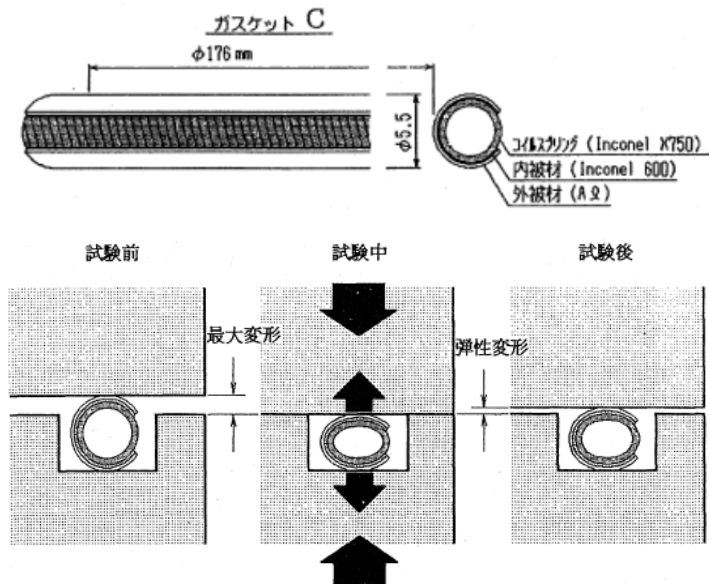
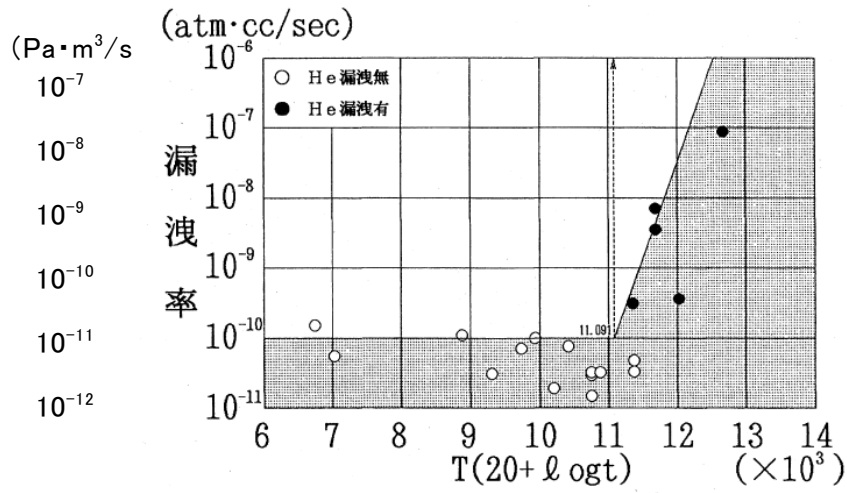
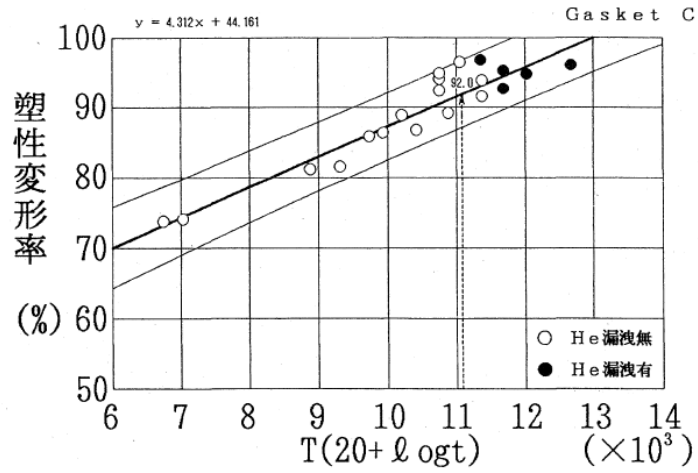
(財)電力中央研究所の密封性能試験に関する論文¹⁾には、フープ径を縮尺したガスケット試験の漏えい率及び実機模レベルのガスケットの漏えい率の比較から、漏えい率は周長比に比例するとの考えが示され、また、原子力発電技術機構の密封性能試験に関する報告書⁵⁾にも、漏えい率は、試験と実機との相関は周長比で補正する必要があることが示されている。

リサイクル備蓄センターで使用する金属ガスケットは漏えい率が周長に比例することを考慮しても、十分な閉じ込め性能を有する。なお、(財)電力中央研究所の実規模キャスク蓋部モデル試験の漏えい率を周長比倍した結果を評価例に示す。

(評価例) 周長比倍の漏えい率

(財) 電力中央研究所の金属ガスケット [mm]	リサイクル燃料備蓄センターで使用予定の金属ガスケット [mm]	周長比 ^{注1)}	最大漏えい率 [Pa・m ³ /s]	(参考) 基準漏えい率 [Pa・m ³ /s]
Di 1767	Di 約 1950	約 110%	$6.51 \times 10^{-10} \Rightarrow$ 約 7.2×10^{-10}	2.4×10^{-6}

注1：リサイクル燃料備蓄センターで使用予定の金属ガスケットと(財)電力中央研究所の実規模キャスク蓋部モデル試験で使用の金属ガスケットの周長比



$$\text{塑性変形率 (\%)} = \frac{\text{最大変形} - \text{弾性変形}}{\text{最大変形}} \times 100$$

別添 3-1 図 金属ガスケット塑性変形率及び漏えい率と LMP の関係²⁾

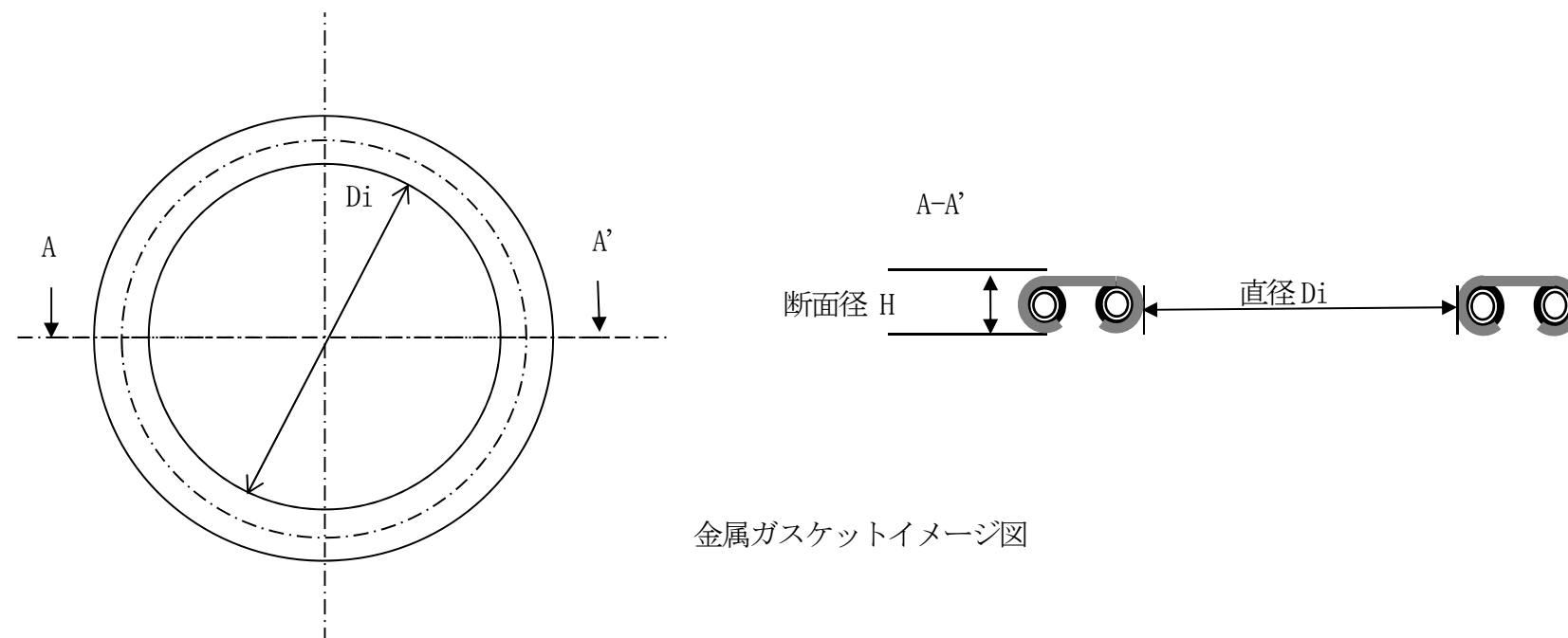
(φ5.5 A1 外被ガスケット)

別添3-1表 金属ガスケット仕様比較

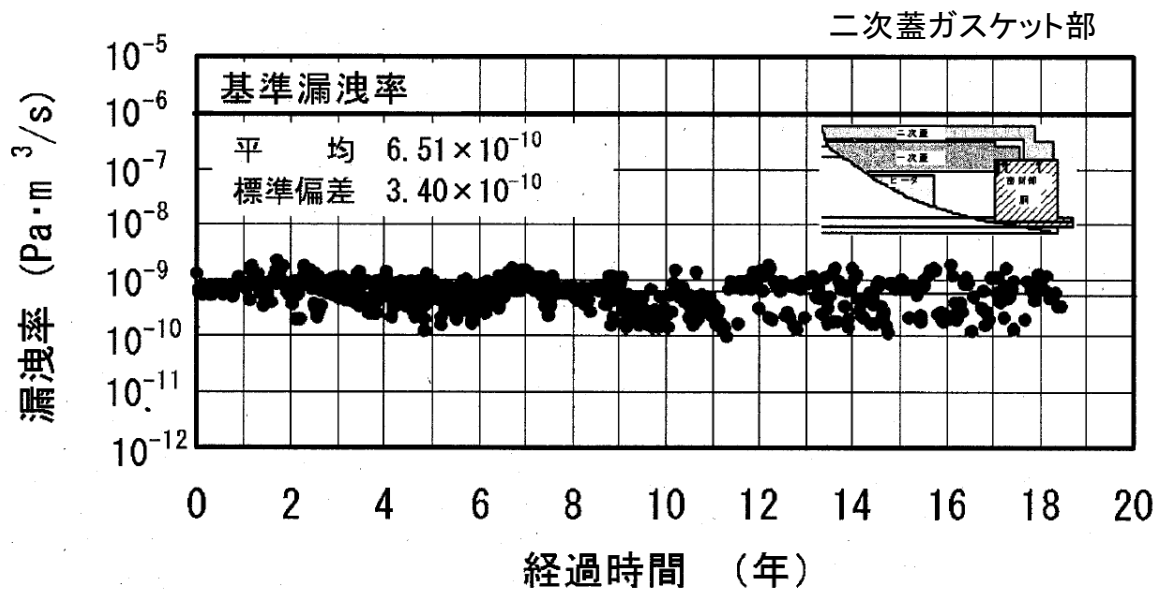
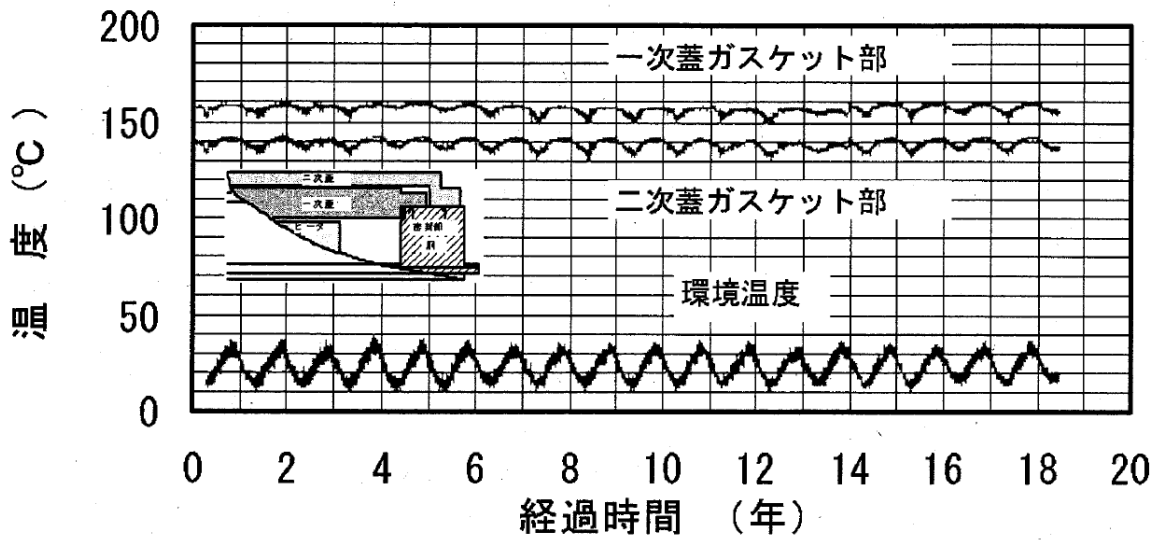
項目	(財) 電力中央研究所の 長期密封性能試験		リサイクル燃料備蓄センター	相違点に対する評価
	試験 ^{1), 2)}	実規模 ³⁾		
タイプ	二重被覆コイルスプリング型中空金属ガスケット		二重被覆コイルスプリング型中空金属ガスケット	相違なし
材質	外被：アルミニウム合金 内被：ニッケル基合金 スプリング：ニッケル基合金		外被：アルミニウム合金 内被：ニッケル基合金 スプリング：ニッケル基合金	相違なし
断面径 H [mm]	一次蓋	5.5 (部位の区分はない)	—	10
	二次蓋		6.1	10
	バルブカバー		—	5.6
直径 Di [mm]	一次蓋	176 (単線径) (部位の区分はない)	—	～ 1700 程度
	二次蓋		1767	～ 1950 程度
	バルブカバー		—	～ 100 程度

(参考)

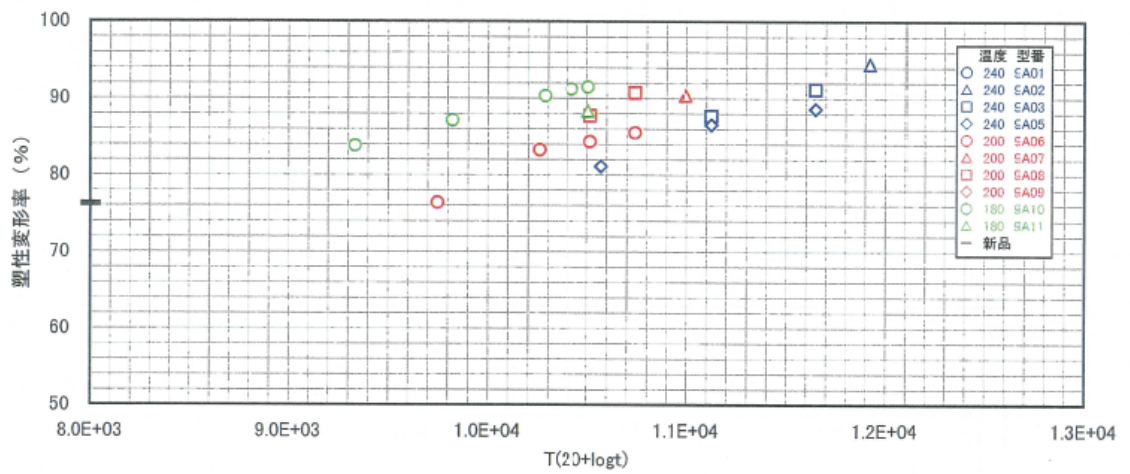
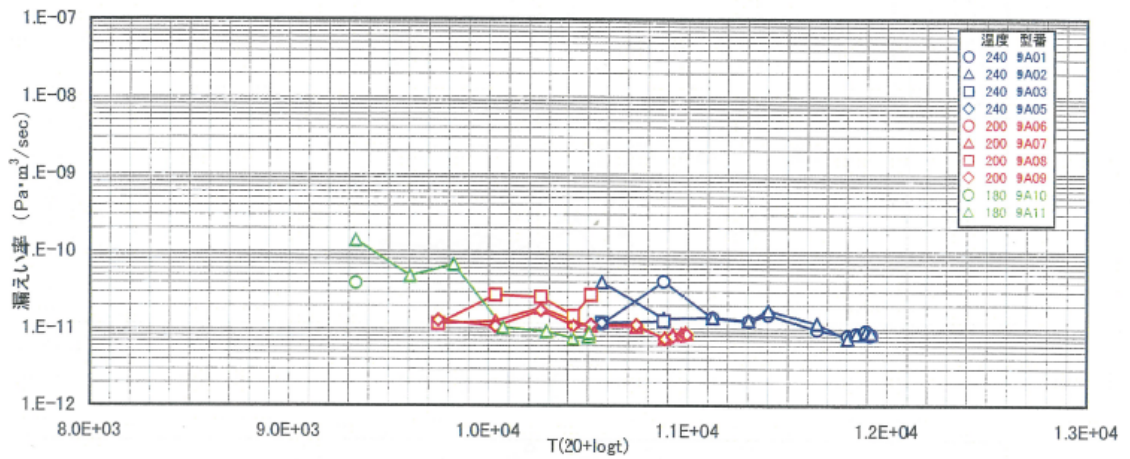
項目	東京電力(株) 福島第一原子力発電所		日本原子力発電(株) 東海第二発電所	
	乾式貯蔵キャスク (大型)	乾式貯蔵キャスク (中型)		
タイプ	二重被覆コイルスプリング型中空金属ガスケット		二重被覆コイルスプリング型中空金属ガスケット	
材質	外被：アルミニウム合金 内被：ニッケル基合金 スプリング：ニッケル基合金		外被：アルミニウム合金 内被：ニッケル基合金 スプリング：ニッケル基合金	
断面径 H [mm]	一次蓋	6.1	6.1	
	二次蓋	6.1	6.1	
	バルブカバー等	4.0	4.0	
直径 Di [mm]	一次蓋	1497	1277	1600
	二次蓋	1947	1727	1840
	バルブカバー等	82	82	93



金属ガスケットイメージ図



別添3-2図 実機大のキャスク蓋部モデルを使用した長期密封試験³⁾
 (φ6.1 Al外被ガスケット)



別添 3-3 図 金属ガスケット塑性変形率及び漏えい率と LMP の関係⁴⁾
(φ10 A1 外被ガスケット)

参考文献

- 1) 加藤, 伊藤, 三枝, 「使用済燃料貯蔵キャスクの長期密封性能評価手法の開発」, 日本原子力学会誌, Vol. 38, No. 6 (1996),
- 2) (財)電力中央研究所, 「使用済燃料貯蔵容器用ガスケットの長期密封特性」, U92009, (財)電力中央研究所, (平成4年7月)
- 3) (財)電力中央研究所, 「平成20年度リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等(中間貯蔵設備等長期健全性等試験のうち貯蔵設備長期健全性等調査)報告書」, (財)電力中央研究所, (平成21年3月)
- 4) (財)原子力発電技術機構, 「平成12年度リサイクル燃料資源貯蔵技術確証試験(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, (平成13年3月)
- 5) (独)原子力安全基盤機構, 「平成15年度金属キャスク貯蔵技術確証試験報告書」, (独)原子力安全基盤機構, (平成16年6月)

第6条 除熱（金属キャスク）

<目 次>

1. 設計方針
2. 金属キャスクの除熱設計
3. 評価結果

（別 添）

別添1 金属キャスクの除熱解析モデルについて

別添2 金属キャスクの除熱設計について

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集合体の崩壊熱を適切に除去できるよう、以下の設計を行うものとする。

- (1) 金属キャスクは、使用済燃料集合体の健全性を維持する観点から、使用済燃料集合体の崩壊熱を金属キャスク表面に伝え、周囲空気等に伝達することにより除去できる設計とする。

燃料被覆管の温度は、設計貯蔵期間を通じて使用済燃料の健全性を維持する観点から、燃料被覆管の累積クリープ量が1%を超えない温度、照射硬化の回復現象により燃料被覆管の機械的特性が著しく低下しない温度及び水素化物の再配向による燃料被覆管の機械的特性の低下が生じない温度以下となるように制限する。

- (2) 金属キャスクは、基本的安全機能を維持する観点から、設計貯蔵期間を通じてその構成部材の健全性が保たれるよう規格又は試験等で確認された温度範囲にあるように設計する。
- (3) 契約先である原子炉設置者が確認した使用済燃料集合体の収納等の状態が貯蔵上必要な条件等を満足していることを、記録により確認する。

2. 金属キャスクの除熱設計

(1) 評価基準

金属キャスクの除熱機能の評価基準は、以下のとおりである。(第1表参照)

a. 燃料被覆管

燃料被覆管の温度は、健全性を維持するために定める下記の制限温度を超えないこと。

・BWR使用済燃料集合体の燃料被覆管制限温度

新型8×8燃料 200℃¹⁾

新型8×8ジルコニウムライナ燃料，高燃焼度8×8燃料
300℃¹⁾

b. 金属キャスク構成部材

基本的な安全機能及び構造強度を有する部材は、健全性が維持できる下記の制限温度を超えないこと。

・金属キャスク構成部材の制限温度

胴，外筒及び蓋部 350℃²⁾

中性子遮蔽材 150℃³⁾

金属ガスケット 130℃⁴⁾

バスケット 300℃⁵⁾

(2) 使用済燃料集合体の収納条件

除熱機能維持の観点から、設計貯蔵期間を通じて燃料被覆管の温度を低く保つことができる設計とし、使用済燃料集合体の収納条件は以下のとおりである。使用済燃料集合体の収納作業は、原子炉設置者が実施することから、原子炉設置者に対して、収納条件を満足した作業の実施、作業記録の作成等を求める。

a. 金属キャスクには、原子炉内での運転中のデータ、 SHIPPING 検査等により健全であることを確認した使用済燃料集合体を収納する。

b. 金属キャスクは、使用済燃料集合体収納時にその内部を真空乾燥し、不活性ガスであるヘリウムガスを封入する。その際、使用済燃料集合体の燃料被覆管温度が制限温度を上回らないように運用管理するとともに乾燥作

業時のクリプトンガスのモニタリングにより燃料被覆管から漏えいのないことを確認する。

- c. 金属キャスクには、貯蔵する燃料仕様、最大崩壊熱量等を満足するように使用済燃料集合体を収納するとともに必要に応じて収納配置等を管理する。第2表にBWR用大型キャスク（タイプ2）及びBWR用大型キャスク（タイプ2A）の各収納配置における使用済燃料集合体の仕様を示す。

BWR用大型キャスク（タイプ2）には、「新型8×8ジルコニウムライナ燃料」のみを収納し、中央部に平均燃焼度を超える燃料集合体を配置する。

BWR用大型キャスク（タイプ2A）には、「新型8×8ジルコニウムライナ燃料」と被覆管制限温度が同一（300℃）の「高燃焼度8×8燃料」と、制限温度が低い（200℃）「新型8×8燃料」を追加収納することから、燃料仕様、収納配置等を制限した収納管理を行う。

なお、「新型8×8ジルコニウムライナ燃料」と「高燃焼度8×8燃料」を収納する場合を「配置A」、「新型8×8ジルコニウムライナ燃料」と「新型8×8燃料」を混載する場合を「配置B」、「新型8×8燃料」のみを収納する場合を「配置C」とした収納配置としている。

(3) 除熱構造

金属キャスクは、除熱のために以下の設計上の配慮を行っている。具体的な構造を第1図に示す。

- a. 金属キャスクの内部には、強度部材のバスケットプレート（ボロン添加ステンレス鋼）と熱伝導率の高い伝熱プレート（アルミニウム合金）で構成されたバスケットを設け、その中に使用済燃料集合体を収納する。
- b. 金属キャスク内における使用済燃料集合体を内封する空間には、熱伝導率の高いヘリウムガスを充填し、熱伝達を高める。
- c. 熱伝導率の低い中性子遮蔽材（レジン）の側部胴体内部には、炭素鋼及び銅からなる伝熱フィンを設け、熱伝導性能を向上させる。
- d. 除熱機能の監視のため、金属キャスクの表面温度を測定する。

(4) 除熱解析

金属キャスクが使用済燃料集合体の崩壊熱を適切に除去する設計であることを以下の方法により解析する。(別添1参照)

除熱解析フローを第2図に、除熱解析時の保守性を第3表に示す。

a. 伝熱形態

使用済燃料集合体から発生した崩壊熱は、バスケットからヘリウムガス等の伝導及びふく射により金属キャスク表面に伝えられ、対流及びふく射により金属キャスク周囲の空気に伝えられる。さらに金属キャスク本体胴の外側には中性子遮蔽材が設けられ、レジンのような熱伝導率の低い中性子遮蔽材を用いる場合は伝熱フィンを設け、伝熱性能を向上させる。なお、ヘリウムガス対流効果による金属キャスク端部付近温度への影響は比較的小さいため、評価上は対流を考慮していない。具体的な伝熱形態を第3図に示す。

b. 使用済燃料集合体の崩壊熱評価方法

使用済燃料集合体の崩壊熱は、燃料型式、燃焼度、濃縮度、冷却年数等を条件として燃焼計算コードORIGEN2を使用して核種の生成、崩壊及びそれに基づく発熱量を計算する。(別添2参照)

ここで、金属キャスクに収納できる使用済燃料集合体の崩壊熱量の総量を最大崩壊熱量とし、除熱設計上、保守的に使用済燃料集合体の軸方向の燃焼度分布を考慮した崩壊熱量を設計崩壊熱量とする。

c. 金属キャスク各部の温度評価方法

金属キャスクの各部の温度は、使用済燃料集合体の崩壊熱及び金属キャスク周囲温度等を条件として、金属キャスクの実形状をモデル化し、有限要素法コードABAQUSを使用して求める。

金属キャスクの各部温度評価に当たっては、以下の2種類の熱解析モデルを用いる。

(a) 全体モデル : 軸方向温度解析(金属キャスク本体、金属ガスケット等の温度評価)(第4図参照)

(b) 輪切りモデル : 半径方向温度解析(金属キャスク本体、バスケット等の温度評価)(第5図参照)

また、金属キャスク周囲の境界条件を第4表に示す。

d. 燃料被覆管の温度解析方法

燃料被覆管の温度は、使用済燃料集合体の崩壊熱と輪切りモデルで求められたチャンネルボックス又はバスケットの温度を条件として、燃料集合体及びチャンネルボックス又はバスケットの実形状をモデル化し、有限要素法コードABAQUSを使用して求める。

燃料被覆管の温度評価は、燃料集合体モデルで解析を行う(第6図参照)。

3. 評価結果

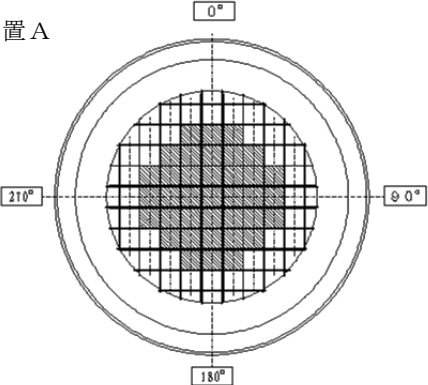
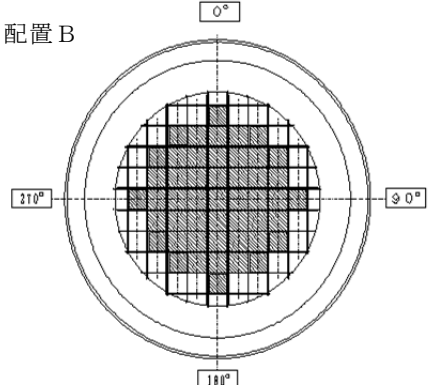
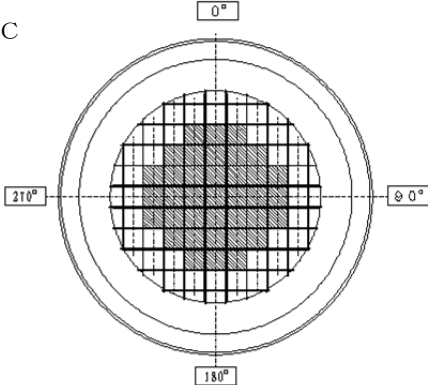
金属キャスクの除熱解析結果を第5表及び第7図に示す。

解析の結果、BWR用大型キャスク(タイプ2)及びBWR用大型キャスク(タイプ2A)とも、収納する燃料集合体の燃焼度及び冷却期間を制限し、収納配置を管理することで、燃料被覆管温度及び金属キャスクの構成部材の各部温度が評価基準値を満足しており、金属キャスクは、使用済燃料集合体の崩壊熱を適切に除去する設計となっていることを確認した。

第1表 評価基準値の考え方

材 料	評価基準値の考え方
燃料被覆管	<p>機械的特性の低下を防止する観点から、水素化物再配向及び照射硬化回復による機械的特性の低下が見られない制限温度として、300℃(ライナあり)及び200℃(ライナなし)を設定。</p> <p>また、クリープ変形防止の観点からは、判断基準として累積クリープ量が1%を超えない温度であることを確認している。</p>
炭素鋼(本体胴, 一次蓋, 二次蓋)	<p>JSME 設計・建設規格で定めている温度範囲の上限値(350℃)を評価基準値と設定。除熱解析の結果、各部材の評価温度は基準値よりも十分に低く、また、クリープの影響が考えられる温度領域(約285~315℃)よりも低いため、クリープを考慮する必要はない。</p>
中性子遮蔽材	<p>樹脂開発メーカーの技術資料、文献等を参考に遮蔽性能の健全性が維持される評価基準値として150℃以下を設定。(ただし、設計評価期間中の経年変化により僅かに重量減損が生じるため、遮蔽評価上、保守的に重量減損を考慮している。)</p>
金属ガスケット	<p>金属ガスケットの長期健全性について文献等の調査を実施。その結果、高温時の健全性について、ラーソンミラーパラメータ(LMP)を用いた評価では、150℃で長期間の閉じ込め機能が期待できること、また、長期密封性能試験では、130~140℃一定の状態での閉じ込め機能が維持できることを確認しているため、評価基準値を130℃以下と設定。</p>
バスケット	<p>JSME 金属キャスク構造規格のバスケット用ボロン添加ステンレス鋼の事例規格で定めている温度範囲の上限値(300℃)を評価基準値と設定。除熱解析の結果、バスケットの評価温度は基準値以下であること、また、クリープの影響が考えられる温度領域(約285~290℃)よりも低いため、クリープを考慮する必要はない。</p>

第2表 BWR用大型キャスク（タイプ2，タイプ2A）の収納配置及び各収納配置における使用済燃料集合体の仕様

キャスクタイプ	タイプ2	タイプ2A		
収納する使用済燃料	① 新型8×8ジルコニウムライナ燃料	① 新型8×8ジルコニウムライナ燃料， ② 高燃焼度8×8燃料， ③ 新型8×8燃料		
収納配置	①のみ収納	①のみ収納， ②のみ収納， ①及び②を収納	①及び③を収納	③のみ収納
	配置A  ■：平均燃焼度を超える使用済燃料集合体の収納範囲	配置B  ■：新型8×8燃料を収納しない範囲	配置C  ■：平均燃焼度を超える使用済燃料集合体の収納範囲	
収納物平均燃焼度	34,000MWd/t	34,000MWd/t	34,000MWd/t	26,000MWd/t
収納物最高燃焼度	40,000MWd/t	34,000MWd/t	34,000MWd/t	28,500MWd/t
冷却期間	18年以上	24年以上	24年以上	24年以上
最大崩壊熱量	12.1kW / 基	10.9kW / 基	10.9kW / 基	8.0kW / 基
収納配置と燃料仕様の選定の考え方	燃焼度及び冷却期間を制限し，新型8×8ジルコニウムライナ燃料の最大崩壊熱量と線源強度を超えないような高燃焼度8×8燃料を収納する。 新型8×8ジルコニウムライナ燃料及び高燃焼度8×8燃料の被覆管制限温度は同一であることから，従来の新型8×8ジルコニウムライナ燃料の評価結果に包絡され，中央部に最高燃焼度燃料，外周部に平均燃焼度燃料を配置する。	燃焼度，冷却期間を制限し，収納配置を管理し，配置Cよりも高い燃焼度の新型8×8燃料の燃料被覆管温度の制限値を満足するように，新型8×8ジルコニウムライナ燃料と新型8×8燃料を収納する。 新型8×8ジルコニウムライナ燃料の最高燃焼度を34,000MWd/t以下に制限するとともに，中央部には新型8×8燃料を収納しない配置としている。	燃焼度及び冷却期間を制限し，新型8×8燃料をすべて収納しても，燃料被覆管温度の制限値を満足するような新型8×8燃料を収納する。燃料被覆管の温度を安全側に評価するように，平均燃焼度を超える燃料を中央部に配置している。燃焼度及び冷却期間の条件から配置Aの線量当量率を超えることはない。	

第3表 除熱解析時の保守性

No.	項目	内容	影響
1	崩壊熱量	軸方向燃焼度分布を包絡する崩壊熱分布として実際よりも大きい設計崩壊熱量で評価。(約 27%増)	最大崩壊熱量を保存して中心部温度を保守的に評価するよりも、設計崩壊熱量で評価した方がさらに保守的な温度が得られる。(各部材 10～20℃程度高い)
2	キャスク底部の境界条件	実際には貯蔵架台に接触しているキャスク底部を断熱条件として評価。	キャスク全体、特に底部中性子遮蔽材の温度をより高く評価。(10℃程度高い)
3	周囲空気温度	金属キャスクの周囲空気温度を 45℃ 一定として評価。ただし、キャスク間の輻射による温度上昇は考慮してない。	キャスク全体の温度を数度高く評価。(貯蔵建屋の排気温度:約 40℃)
4	軸方向への熱の移動の考慮方法	輪切りモデルでは全体モデルと等価になるように軸方向への熱の移動を考慮しているが、中央部の燃料領域では軸方向を断熱として評価。	本解析(全体モデル/輪切りモデル)と三次元モデル解析結果を比較した結果、各部位の温度は保守的であることを確認。(燃料領域の温度が8℃程度高い)
5	ギャップの考慮	バスケット構造により実際は接触する箇所を非接触とし、保守的なギャップをモデル化して評価。	バスケットの各構造部材の温度をより高く評価。(5℃程度高い)

第4表 金属キャスク周囲の境界条件

項目		入力	
境界条件	環境温度	対流	45℃（貯蔵区域内の電気品等の使用を考慮）
		ふく射	65℃（コンクリート強度を考慮した制限温度）
境界条件	天井及び床面ふく射率	0.8（コンクリート表面塗装）	
境界条件	キャスク表面ふく射率	0.8（外筒を白系塗装）	
境界条件	キャスク側部 表面熱伝達率	Jakob 垂直平面の乱流自然対流熱伝達の式(※) $h = 0.129 \lambda \left(\frac{g \beta \Delta t}{\nu^2} \times Pr \right)^{1/3}$	
境界条件	キャスク上向き 面表面熱伝達率	加熱水平上面の乱流自然対流熱伝達の式(※) $h = 0.13 \lambda \left(\frac{g \beta \Delta t}{\nu^2} \times Pr \right)^{1/3}$	
境界条件	キャスク下向き 面表面熱伝達率	加熱水平下面の層流自然対流熱伝達の式(※) $h = 0.6 \lambda / D \left(\frac{g \beta \Delta t}{\nu^2} \times D^3 \times Pr \right)^{1/5}$	
境界条件	底部熱移動	断熱	

※ h : 熱伝達率 (W/m²/K), λ : 熱伝導率 (W/m/K), D : 平板の幅 (m), g : 重力加速度 (m/s²),
β : 体積膨張係数 (1/K), ν : 動粘性係数 (m²/s), Pr : プラントル数 (-),
Δt : 温度差 (K)

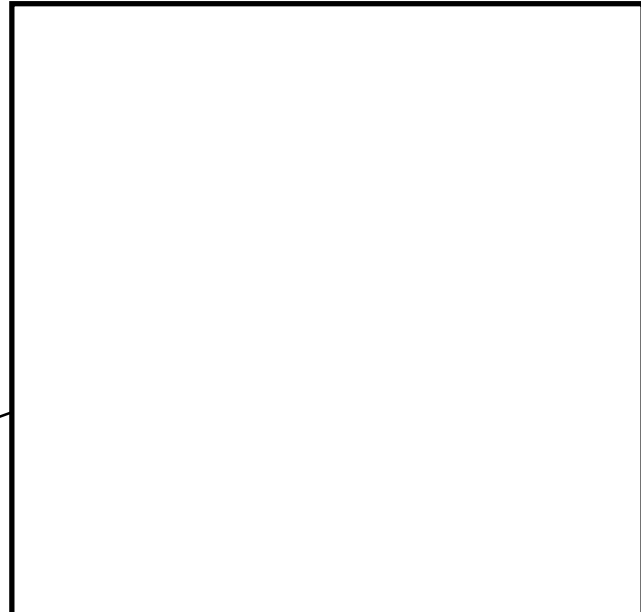
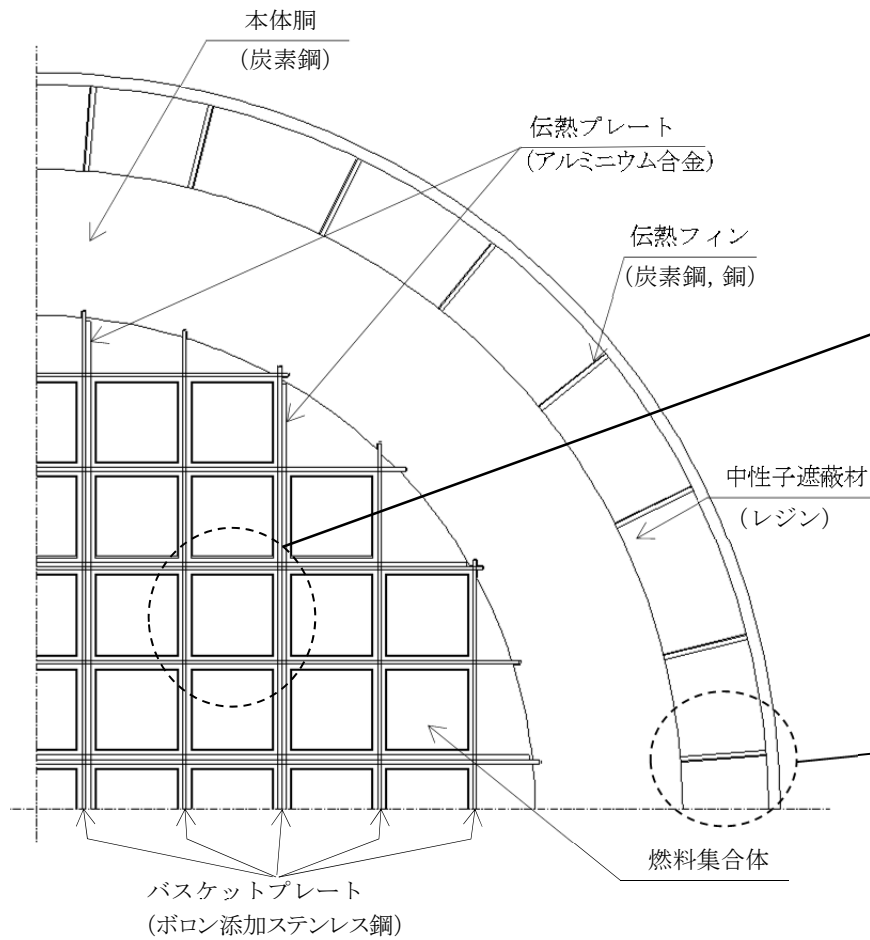
第5表 金属キャスクの除熱解析結果

		BWR用大型キャスク					評価基準値	備考
		タイプ2		タイプ2A				
		新型8×8ジルコニウムライナ燃料	新型8×8ジルコニウムライナ燃料	高燃焼度8×8燃料	新型8×8ジルコニウムライナ燃料と新型8×8燃料	新型8×8燃料		
設計崩壊熱量		15.3kW	同左(最大値)	14.6kW	13.6kW	9.78kW	—	軸方向の燃焼度分布を包絡するように設定
最大崩壊熱量		12.1kW			10.9kW	8.0kW	—	—
燃料被覆管温度		259℃ BWR燃料 (ライナあり)	同左(最大値)	(注)	189℃(最大値) BWR燃料 (ライナなし)	185℃ BWR燃料 (ライナなし)	300℃以下 ¹⁾ BWR燃料(ライナあり) 200℃以下 ¹⁾ BWR燃料(ライナなし)	燃料被覆管の健全性が維持される制限温度
金属キャスク各部最高温度	本体胴	142℃(炭素鋼)	同左(最大値)	(注)	(注)	(注)	350℃以下 ²⁾ (炭素鋼)	構造強度の健全性が維持される制限温度
	一次蓋	96℃(炭素鋼)	同左(最大値)	(注)	(注)	(注)		
	二次蓋	85℃(炭素鋼)	同左(最大値)	(注)	(注)	(注)		
	中性子遮蔽材(レジン)	128℃	同左(最大値)	(注)	(注)	(注)	150℃以下 ³⁾	中性子遮蔽材の性能が維持される制限温度
	金属ガスケット	89℃	同左(最大値)	(注)	(注)	(注)	130℃以下 ⁴⁾	閉じ込め機能が維持される制限温度
	バスケット	248℃ (ボロン添加ステンレス鋼)	同左(最大値)	(注)	(注)	(注)	300℃以下 ⁵⁾ (ボロン添加ステンレス鋼)	構造強度の健全性が維持される制限温度
収納配置		配置A	配置A	配置A	配置B	配置C	—	—

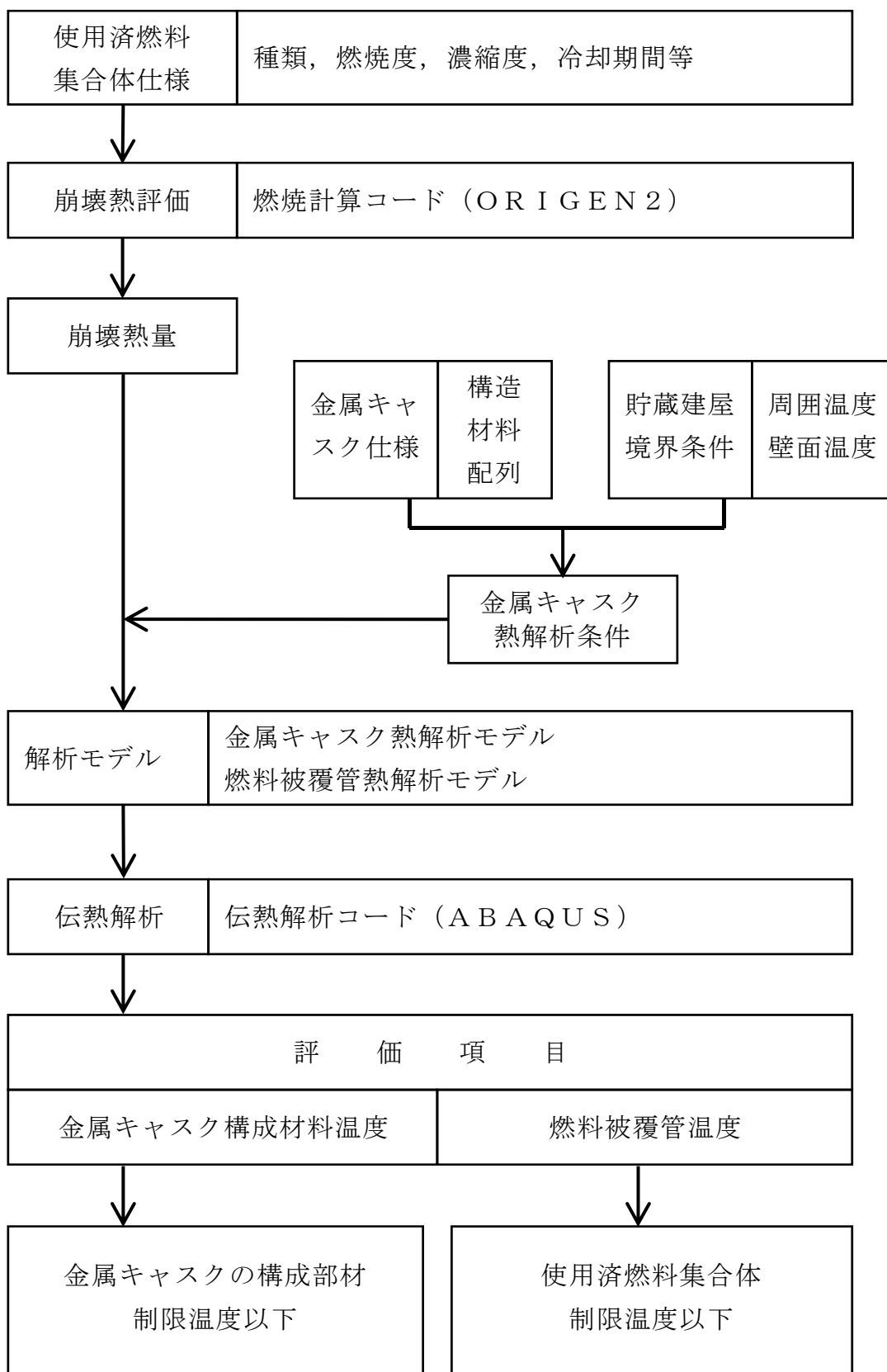
(注) : 設計崩壊熱量が最大である新型8×8ジルコニウムライナ燃料を収納した状態で各部温度が最大値となる。

なお、冷却期間は18年(配置A)及び24年(配置B, C)を前提。

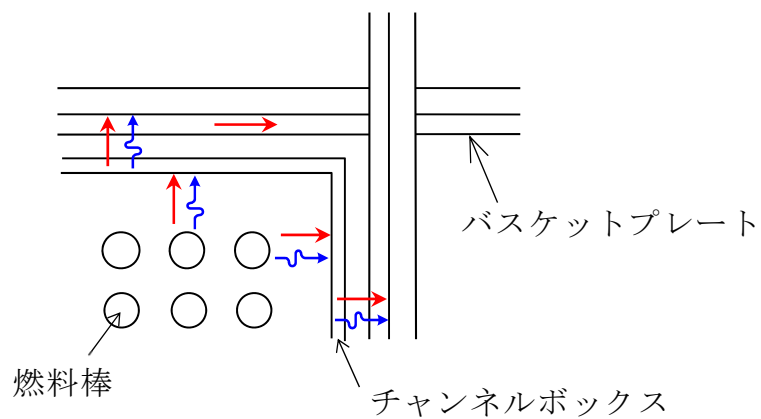
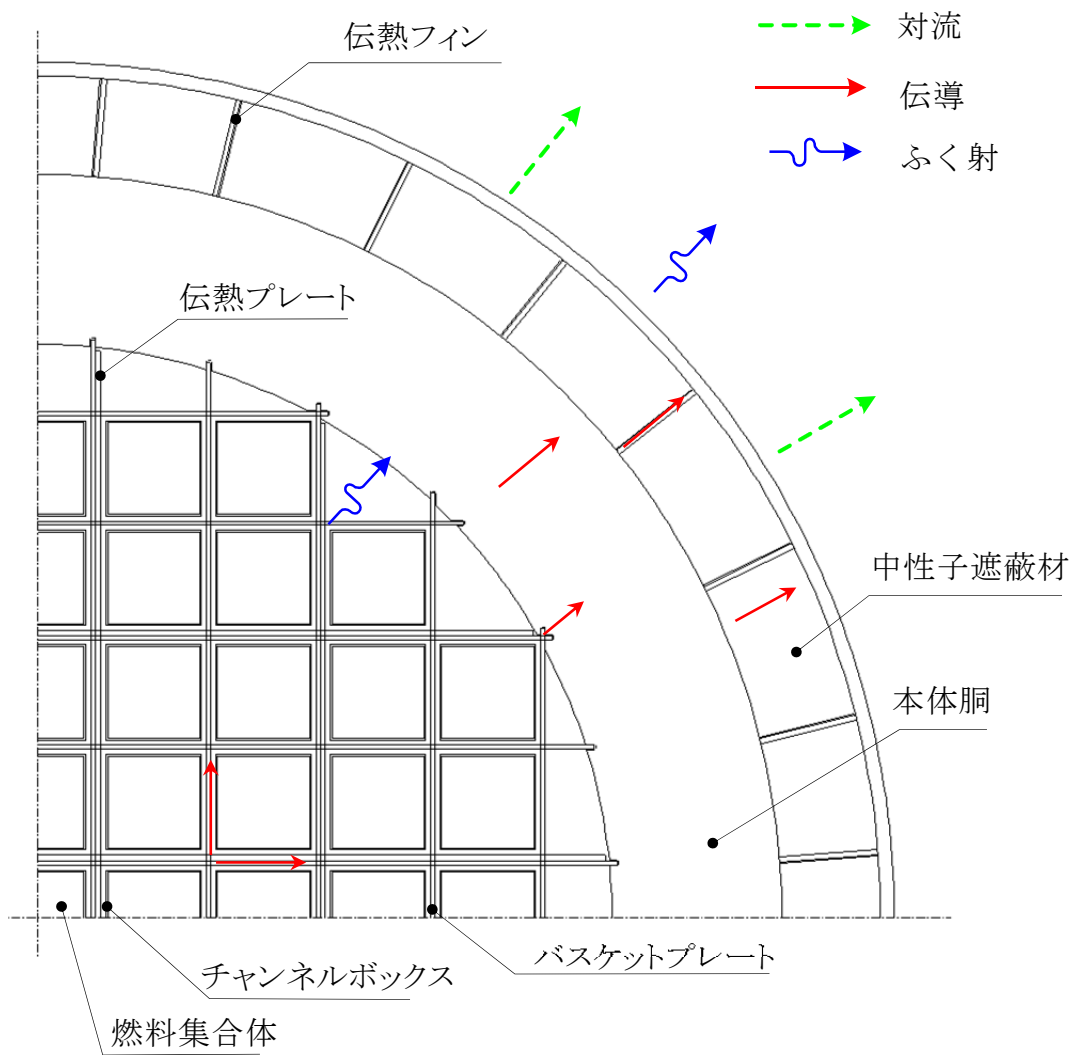
枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。



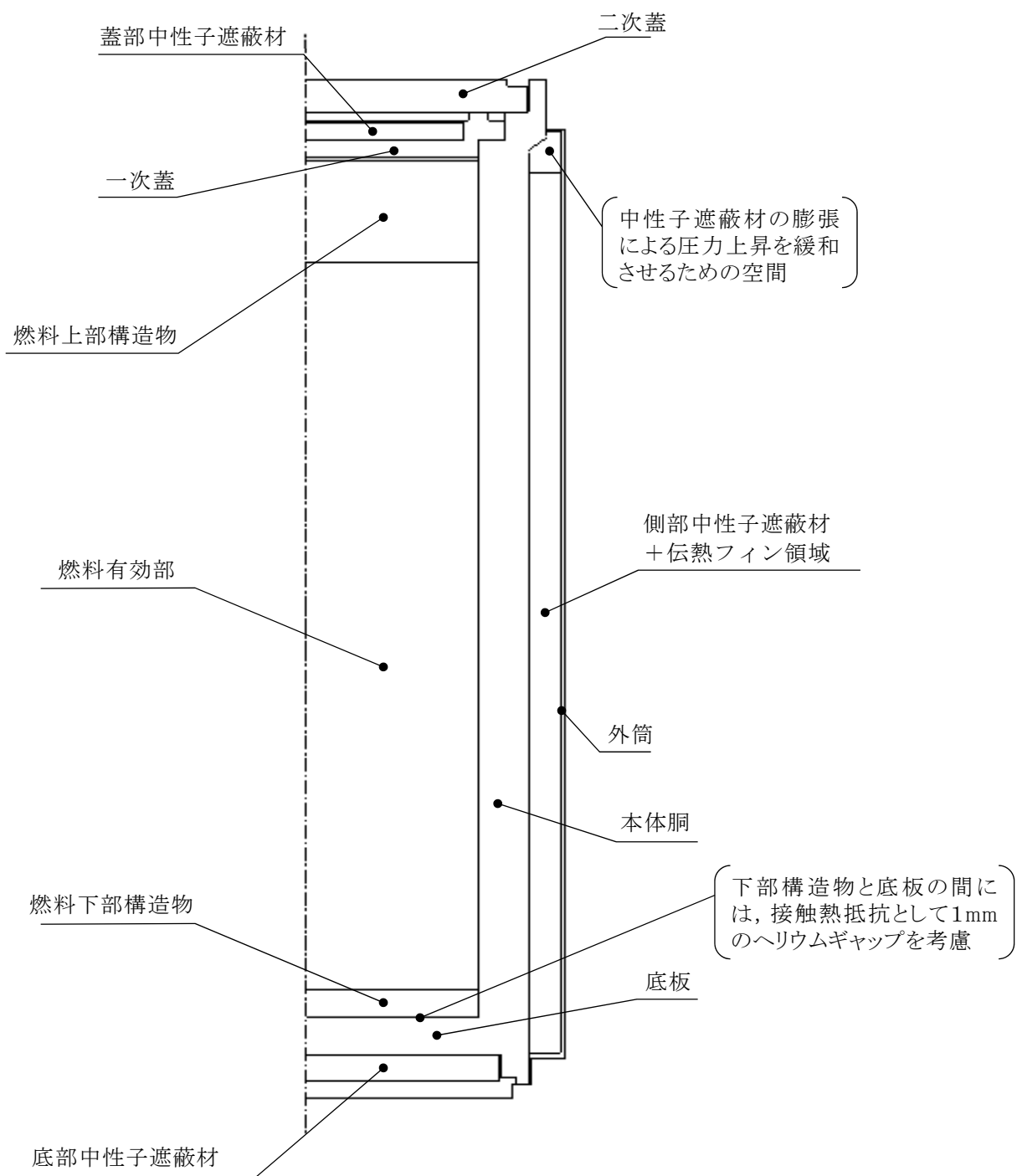
第1図 金属キャスクの除熱構造図
(BWR用大型キャスク(タイプ2) / BWR用大型キャスク(タイプ2A))



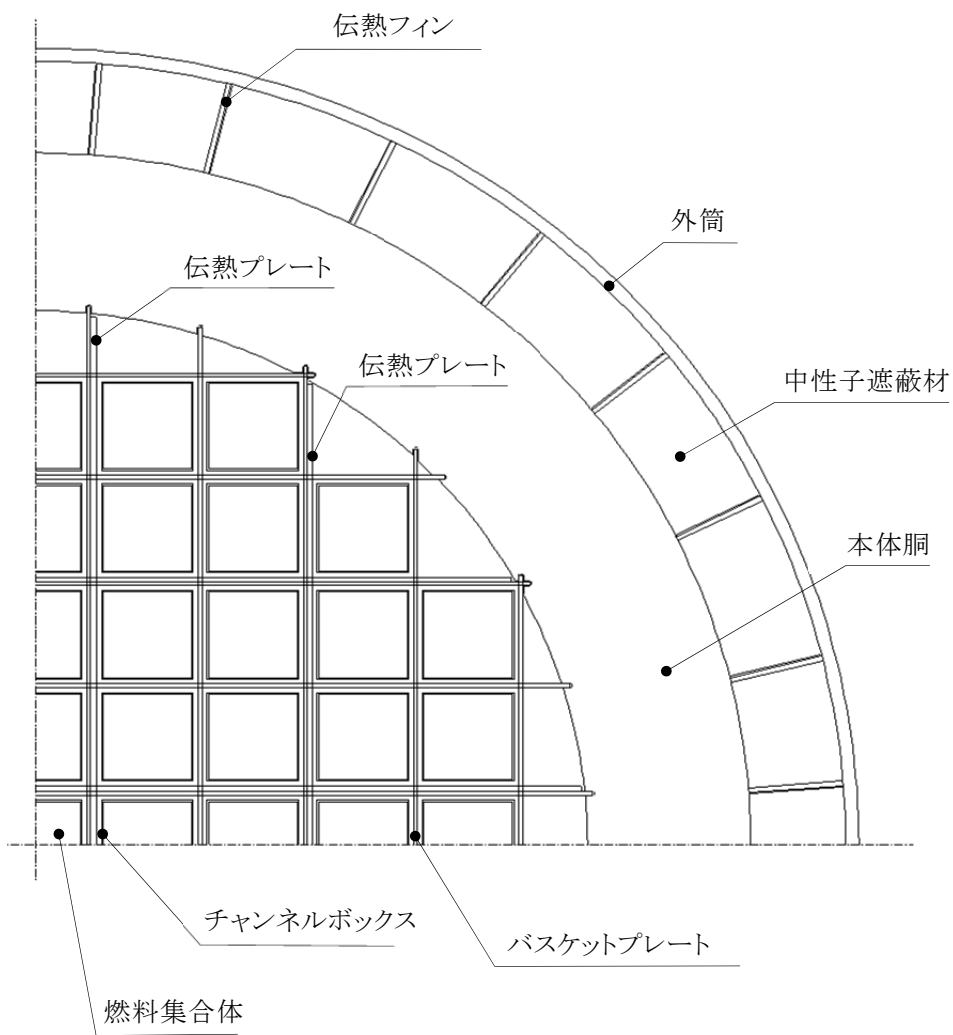
第2図 金属キャスクの除熱解析フロー図



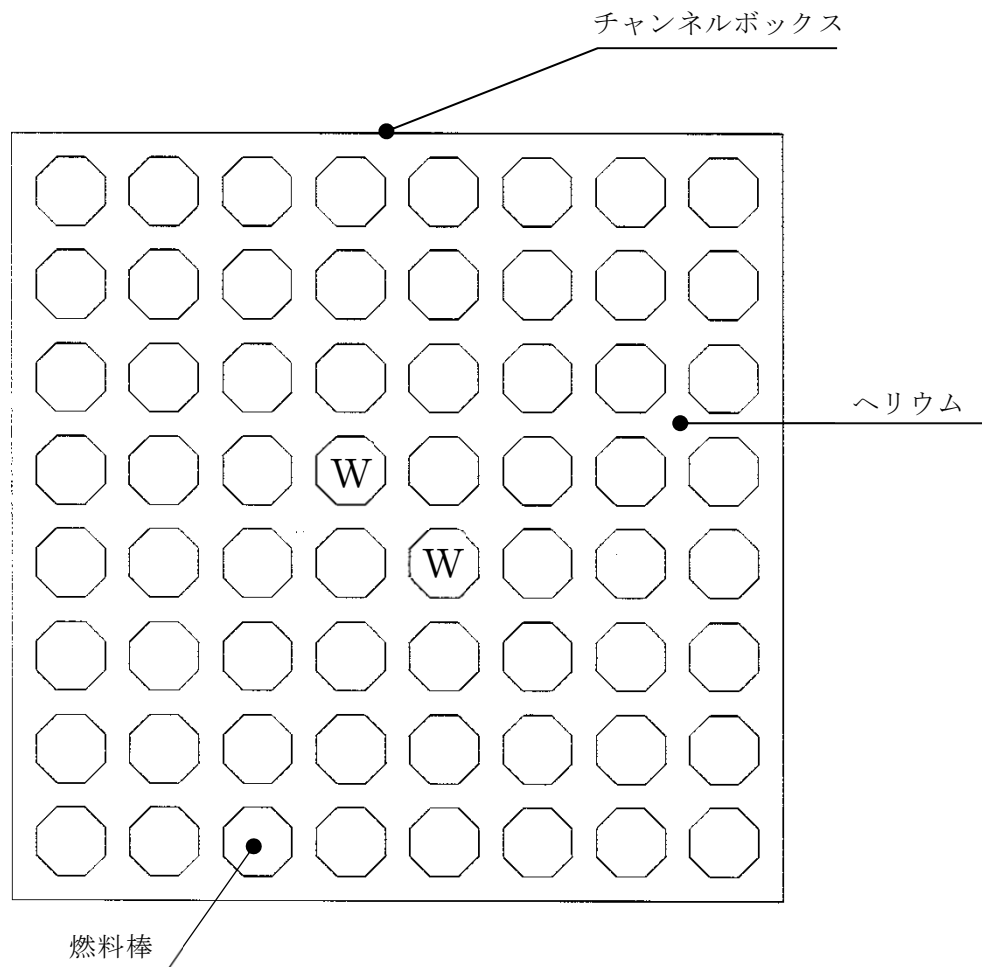
第3図 金属キャスクの伝熱形態
(BWR用大型キャスク(タイプ2)／BWR用大型キャスク(タイプ2A))



第4図 全体モデル図
 (BWR用大型キャスク(タイプ2) / BWR用大型キャスク(タイプ2A))

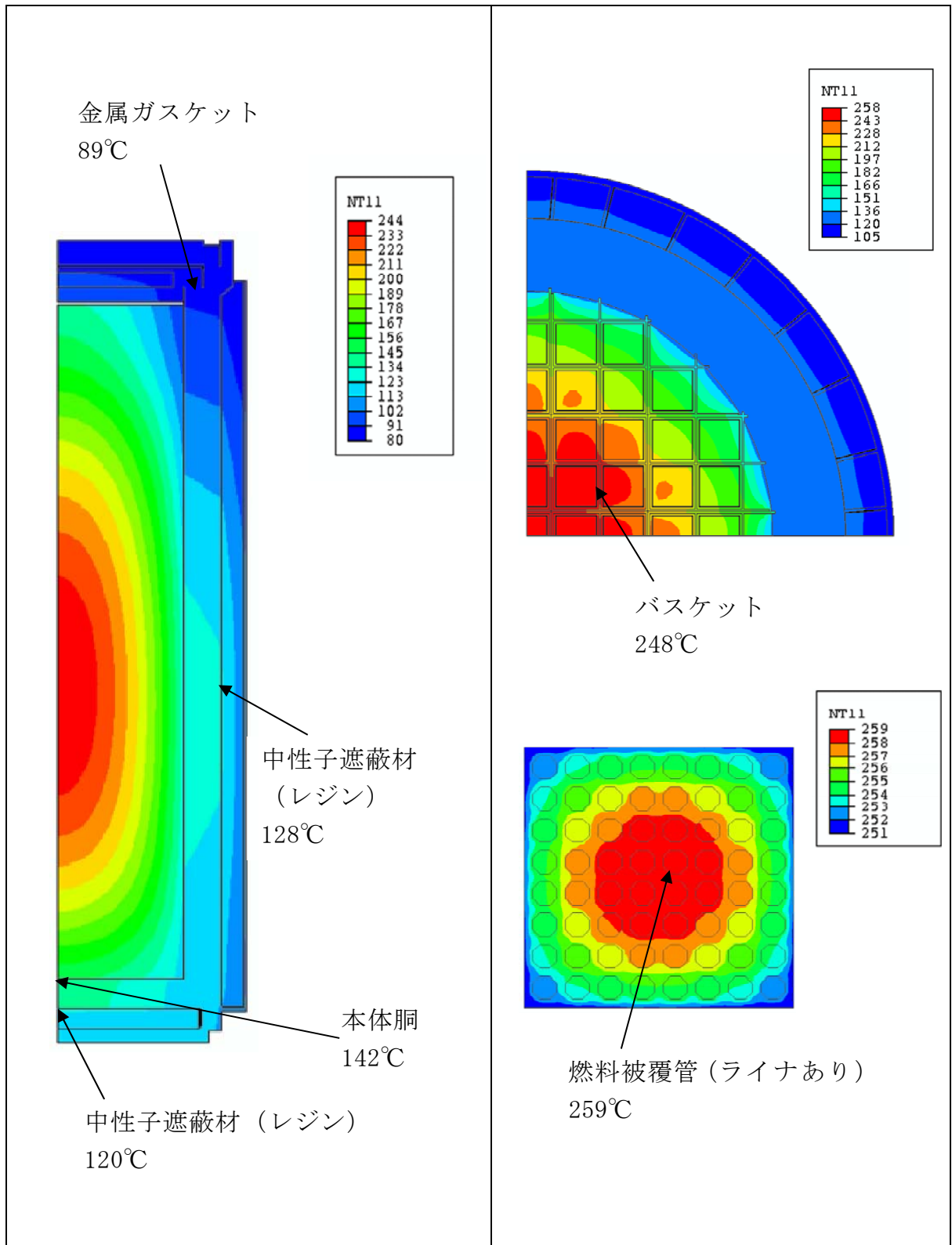


第5図 輪切りモデル形状図
 (BWR用大型キャスク(タイプ2) / BWR用大型キャスク(タイプ2A))

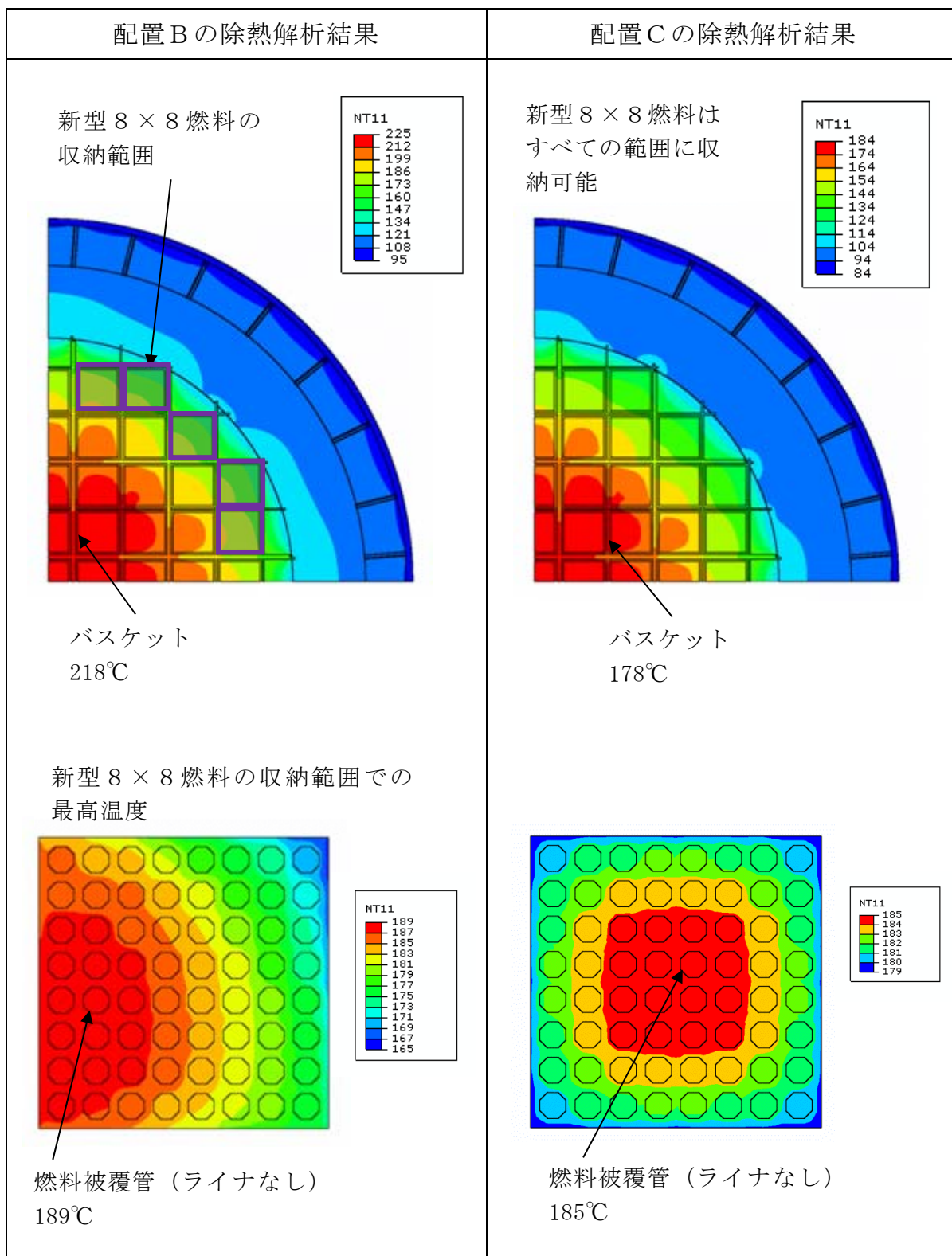


注) Wはウォーターロッドであり，発熱はない。

第6図 燃料集合体モデル
 (BWR用大型キャスク(タイプ2)／BWR用大型キャスク(タイプ2A))



第7図(1) 金属キャスクの除熱解析結果(配置A)
(BWR用大型キャスク(タイプ2)/BWR用大型キャスク(タイプ2A))



第7図(2) 金属キャスクの除熱解析結果(配置B, C)
(BWR用大型キャスク (タイプ2A))

参考文献

- 1) (社)日本原子力学会, “日本原子力学会標準 使用済燃料中間貯蔵施設用 金属キャスクの安全設計及び検査基準: 2010”, AESJ-SC-F002:2010, (2010)
- 2) (社)日本機械学会, “使用済燃料貯蔵施設規格 金属キャスク構造規格(2007年版)” JSME S FA1-2007, (2007)
- 3) N. Kumagai, M. Kamoshida, K. Fujimura, et.al., “Optimization of fabrication condition of metal cask neutron shielding part which applied simulation of curing behavior of epoxy resin”, Proc. the 15th Int. Symp. on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials (PATRAM2007), Miami, Florida, USA, Oct. 21-26, 2007, (2007)
- 4) (財)電力中央研究所, 「平成 20 年度リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等(中間貯蔵設備等長期健全性等試験のうち貯蔵設備長期健全性等調査) 報告書」, (財)電力中央研究所, (平成 21 年 3 月)
- 5) (社)日本機械学会, “使用済燃料貯蔵施設規格 金属キャスク構造規格(2007年版) JSME S FA1-2007, 事例規格 バスケット用ボロン添加ステンレス鋼板 B-SUS304P-1 に関する規定” JSME S FA-CC-004, (2009)

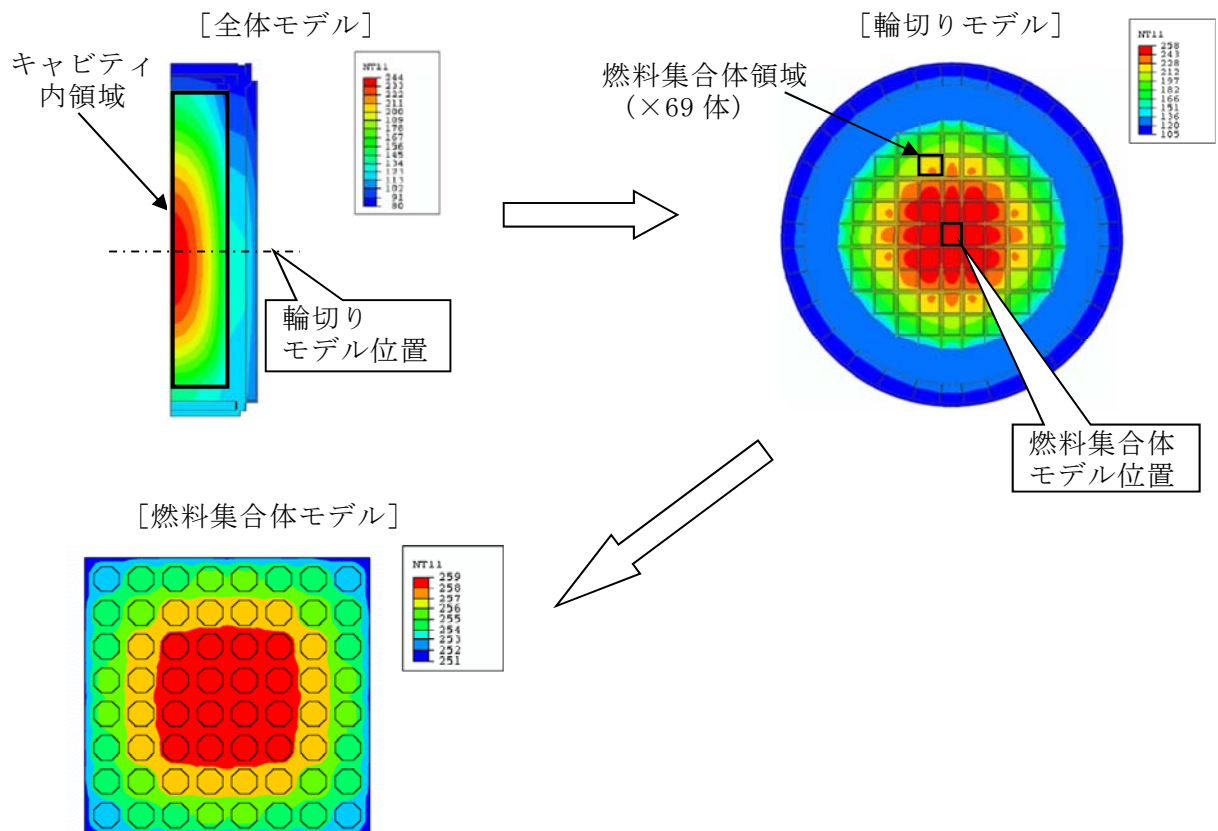
金属キャスクの除熱解析モデルについて

1. 除熱解析のモデル化

金属キャスクの除熱解析は全体モデル→輪切りモデル→燃料集合体モデルのフローで実施する。除熱解析フローの概念図を別添 1 - 1 図に示す。

全体モデルでは、キャビティ内領域を均質化して解析をしていることから、燃料やバスケットの詳細な温度分布を評価することが出来ない。そこで、全体モデルで最も温度が高くなるキャスク中央部断面を抽出して、キャビティ内領域をより詳細にモデル化した輪切りモデルを使った解析を実施する。

一方、輪切りモデルは燃料集合体領域を均質化して解析をしていることから、燃料集合体内部の詳細な温度分布評価が出来ない。そこで、燃料被覆管温度を保守的に評価するために、最も温度の高い燃料集合体領域において、燃料集合体モデルを使った解析を実施して燃料被覆管の最高温度を評価する。除熱解析フローの概念図を別添 1 - 1 図に示す。



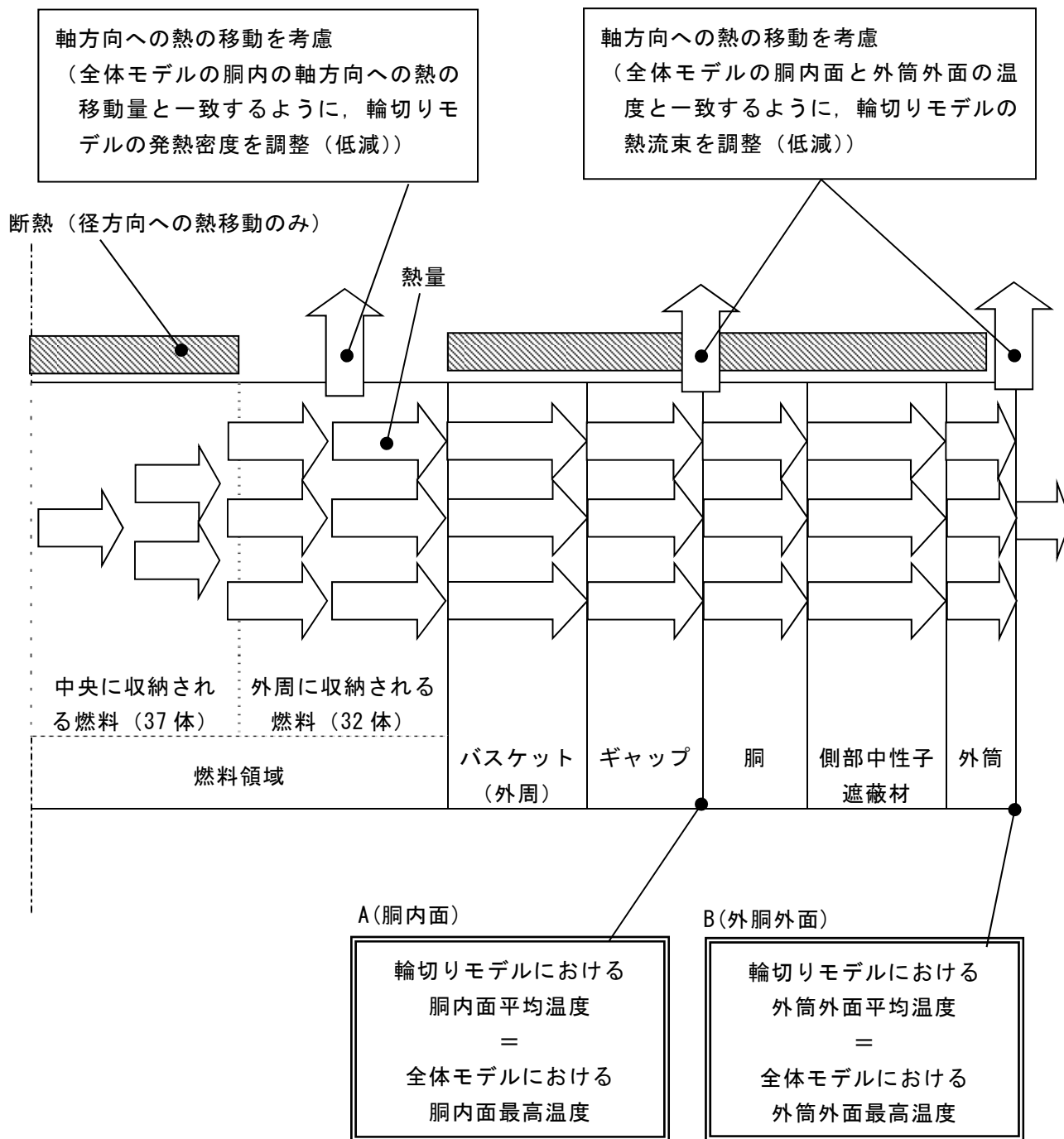
別添1-1図 除熱解析フロー概念図(BWR用大型キャスク(タイプ2))

2. 輪切りモデルの軸方向への熱移動

輪切りモデルの解析では、全体モデルの解析結果に基づいて軸方向への熱の移動を考慮している。すなわち、全体モデルで最も温度が高くなる中央部断面を抽出して輪切りモデルによる評価を実施している。この場合、輪切りモデルの軸方向への熱移動を考慮することにより全体モデルの結果と等価となるような調整を実施している。調整方法は以下のとおり。(別添1-2図参照)

全体モデルの胴内の軸方向への熱の移動量と一致するように、輪切りモデルの燃料領域外周部の発熱密度を調整する。また、輪切りモデルの胴内面と外筒外面の温度が、全体モデルの胴内面と外筒外面の温度と一致するように、輪切りモデルの熱流束を低減するよう調整する。

なお、燃料領域において、発熱密度を調整する領域を平均燃焼度以下の燃料がある外周部領域のみとすることで、最高燃焼度燃料がある中心部燃料領域の最高温度が高くなるよう保守的に評価するモデルとしている。



別添 1 - 2 図 輪切りモデルにおける軸方向への熱移動のモデル化概念図
(BWR用大型キャスク (タイプ2))

3. 解析手法の妥当性

金属キャスクの除熱評価に用いている、二次元の全体モデル及び輪切りモデルを組み合わせた解析手法（以下「現手法」という。）の妥当性を確認するため、三次元モデルを用いた除熱解析を実施している。

三次元モデル解析では現手法のモデル化とは異なり、個々の燃料集合体を直方体形状としてモデル化し、さらにバスケット領域を均質化することなくモデル化している（輪切りモデルを軸方向へ延長）。これにより軸方向及び径方向への熱移動は実形状に即した評価が可能となるため、三次元モデルと現手法による解析結果を比較することにより、現手法の妥当性が確認できる。

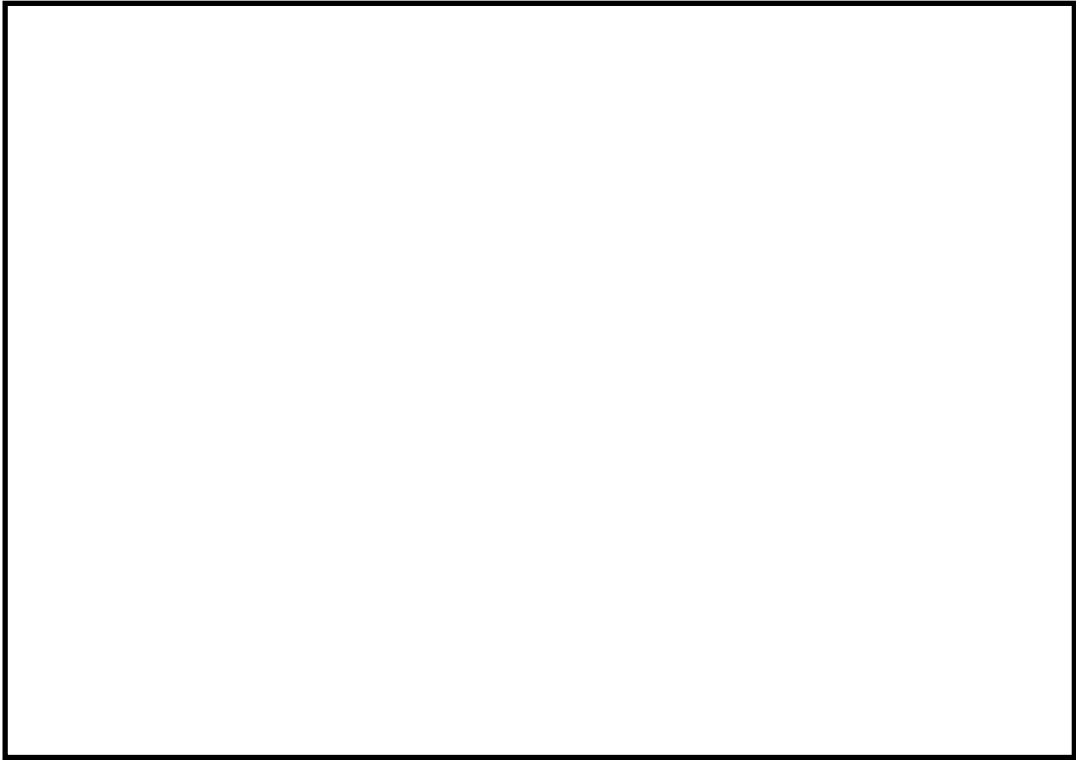
三次元モデルによる解析結果と現手法（全体モデル／輪切りモデル）による解析結果の比較を別添 1－1 表と別添 1－3 図に示す。

三次元モデルを用いた解析の結果、各評価部位の温度は、現手法と同等又は低い温度結果が得られており、現手法が軸方向の熱の逃げを適切に考慮し、保守的な評価をしていることを確認した。

別添 1－1 表 三次元モデルと現手法とによる解析結果の比較

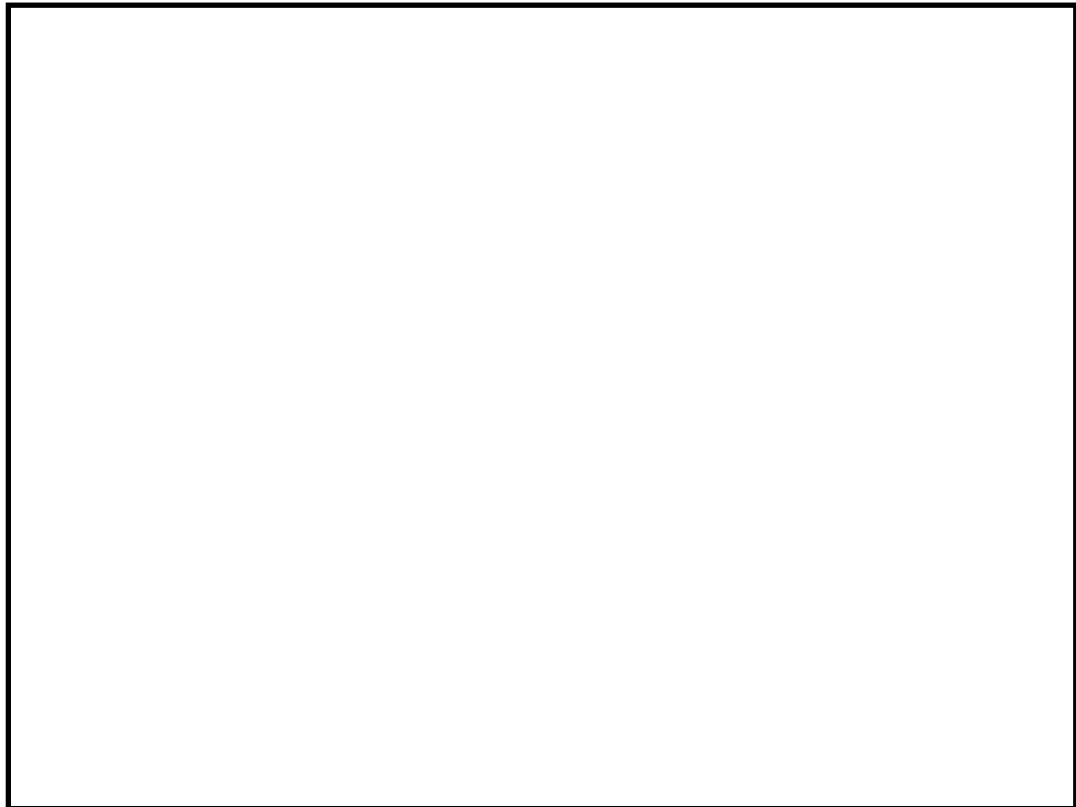
（BWR用大型キャスク（タイプ2））

評価部位	最高温度解析結果(°C)	
	三次元	現手法
側部中性子遮蔽材(④)	127	128
本体胴（側部）(③)	134	135
バスケット(②)	243	248
燃料均質化領域(①)	251	259



三次元モデル

(燃料領域の最高温度評価断面)



全体モデル

輪切りモデル

別添1-3図 三次元モデルと全体モデル/輪切りモデルによる解析結果の比較
(BWR用大型キャスク(タイプ2))

6条(キャスク)ー別添1-5

金属キャスクの除熱設計について

1. 使用済燃料集合体の崩壊熱評価

(1) 燃焼計算条件 (ORIGEN2)

使用済燃料集合体の崩壊熱の計算に用いる燃料仕様に基づく燃焼計算条件を別添 2 - 1 表～別添 2 - 2 表に示す。(添付参照)

別添 2 - 1 表 BWR用大型キャスク (タイプ 2)

燃料タイプ	8 × 8 BJ	
平均燃焼度 (MWD/MTU)	34000	
最高燃焼度 (MWD/MTU)	40000	
比出力 (MW/MTU)	25.3	
照射期間 (日) (平均燃焼度)	1344	
照射期間 (日) (最高燃焼度)	1582	
濃縮度 (%)	2.88	
冷却期間 (年)	18	
U重量 (kg)	177	
軸方向ピーキングファクタ	ノード	PF
上	1, 2/48	0.7
	3/48	0.8
	4, 5/48	1.0
	6-8/48	1.1
	9-14/48	1.2
	15-42/48	1.3
	43, 44/48	1.2
	45/48	1.1
	46/48	1.0
下	47, 48/48	0.8
ライブラリ	BWR-U	

凡例：8 × 8 BJ：新型 8 × 8 ジルコニウムライナ燃料

別添 2-2 表 BWR用大型キャスク (タイプ 2 A)

燃料タイプ	8×8RJ		8×8BJ		8×8STEP2	
平均燃焼度(MWD/MTU)	26000	—	34000		34000	
最高燃焼度(MWD/MTU)	28500	34000	40000		40000	
比出力(MW/MTU)	25.3		同左		26.2	
照射期間(日)(平均燃焼度)	1344		同左		1298	
照射期間(日)(最高燃焼度)	1582		同左		1527	
濃縮度(%)	2.88		同左		3.35	
冷却期間(年)	24		18		18	
U重量(kg)	177		同左		174	
軸方向ピーキングファクタ	ノード	PF	ノード	PF	ノード	PF
上	1,2/48	0.7	同左		1,2/48	0.7
	3/48	0.8	同左		3,4/48	0.9
	4,5/48	1.0	同左		5,6/48	1.1
	6-8/48	1.1	同左		7-12/48	1.2
	9-14/48	1.2	同左		13-40/48	1.3
	15-42/48	1.3	同左		41,42/48	1.2
	43,44/48	1.2	同左		43,44/48	1.1
	45/48	1.1	同左		45,46/48	0.9
	46/48	1.0	同左		47,48/48	0.7
下	47,48/48	0.8	同左		—	—
ライブラリ	BWR-U					

凡例： 8×8RJ：新型8×8燃料

8×8BJ：新型8×8ジルコニウムライナ燃料

8×8STEP2：高燃焼度8×8燃料

(2) 使用済燃料集合体の軸方向の燃焼度分布について

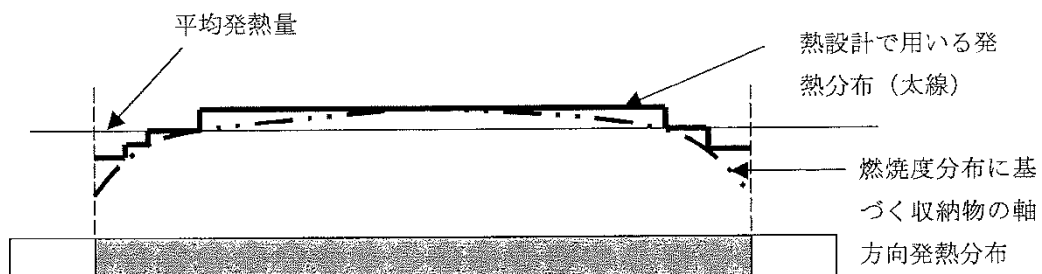
使用済燃料集合体は、下図の二点鎖線で示すように、軸方向の燃焼度分布により中央領域で高く、両端部では低くなる崩壊熱（発熱）分布を有する。除熱設計では、軸方向の崩壊熱部で崩壊熱分布をほぼ包絡できるように、別添 2-1 図の太い実線で示すように崩壊熱量を階段状に安全側に設定している。このため、除熱設計で使用している崩壊熱量（以下「設計崩壊熱量」という。）は本来の最大崩壊熱量より大きくなる。

< BWR 用大型キャスク（タイプ 2，2A） >

$$\begin{aligned} \text{[最大崩壊熱量]} &= \text{[平均燃焼度燃料集合体 1 体当たりの崩壊熱量} \\ &\text{(平均燃焼度の O R I G E N 2 計算結果)]} \times 1.05 \times \text{収納体数} \\ &= 0.1670 \text{ kW/体} \times 1.05 \times 69 \text{ 体} \\ &= 12.10 \text{ kW 以下} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{[設計崩壊熱量]} &= \text{[軸方向燃焼度分布を包絡した平均燃焼度燃料集} \\ &\text{合体 1 体当たりの発熱量 (軸方向燃焼度分布を包絡した O R I G E N} \\ &\text{2 計算結果)]} \times 1.05 \times \text{収納体数} \\ &= 0.2118 \text{ kW/体} \times 1.05 \times 69 \text{ 体} \\ &= 15.34 \text{ kW} \end{aligned}$$

除熱解析においては O R I G E N 2 コードの計算結果に 5% の裕度を見込んでいる。



別添 2-1 図 使用済燃料の軸方向発熱分布と設計発熱分布の関係

(出典：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：2006」AESJ-SC-F006：2006 附属書 46(参考))

(3) 除熱設計に用いた崩壊熱量

別添 2 - 3 表のとおり，除熱設計上は，使用済燃料の軸方向の燃焼度分布を考慮して，最大崩壊熱量の約 1.27 倍 (B/A) の崩壊熱量を仮定して設計している。

別添 2 - 3 表 除熱設計に用いた崩壊熱量

	最大崩壊熱量* ¹ (A)	設計崩壊熱量* ² (B)	比率* ³ (B/A)
BWR 用大型キャスク (タイプ 2)	12.1kW	15.34kW	約 1.27
BWR 用大型キャスク (タイプ 2 A)	12.1kW	15.34kW	約 1.27

- ※ 1 最大崩壊熱量とは，当該金属キャスク 1 基に収納できる使用済燃料集合体の崩壊熱量の総量をいう。
- ※ 2 設計崩壊熱量とは，除熱設計上，保守的に使用済燃料集合体の軸方向の燃焼度分布を考慮した崩壊熱量をいう。
- ※ 3 設計崩壊熱量の裕度を単に比率で表したもの。(除熱設計では安全側に評価するために設計崩壊熱量は金属キャスク本来の最大崩壊熱量より大きい。)

2. 金属キャスク構成部材の温度評価基準値

基本的安全機能及び構造強度を有する部材は，健全性が維持できる温度を超えないこと。具体的には別添 2 - 4 表のとおり。

別添 2 - 4 表 金属キャスク構成部材の温度評価基準値

構成部材	温度評価基準値
炭素鋼	350°C ¹⁾
中性子遮蔽材 (レジン)	150°C ²⁾
金属ガスケット	130°C ³⁾
バスケット (ボロン添加ステンレス鋼)	300°C ⁴⁾

参考文献

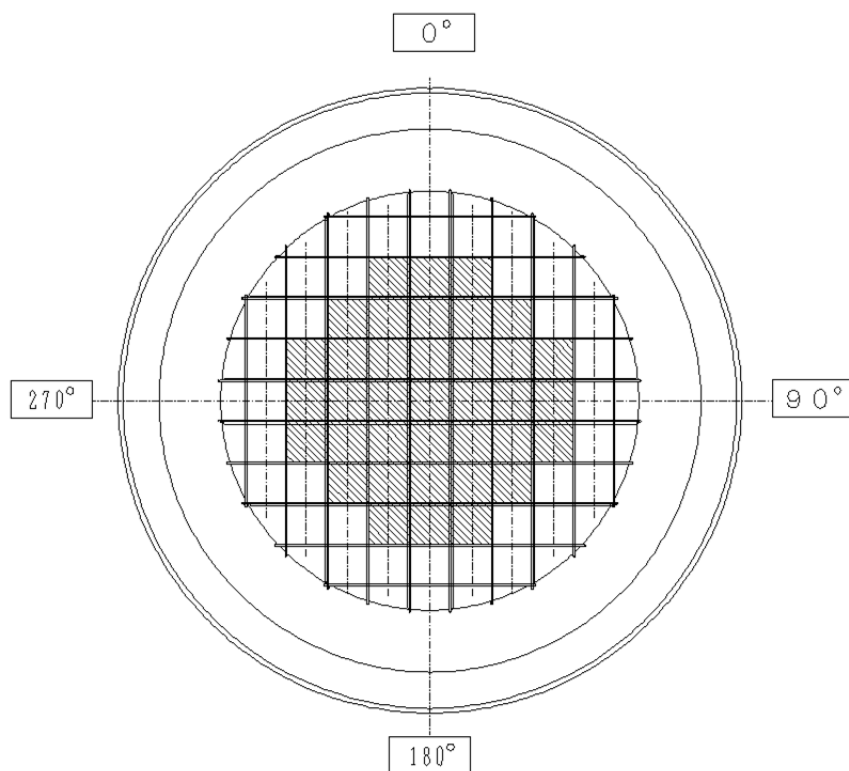
- 1) “発電用電子力設備規格 設計・建設規格<第 I 編 軽水炉規格>”, 社団法人 日本機械学会, JSME S NC1-2005 (2007 年追補版を含む), (2007)
- 2) N. Kumagai, M. Kamoshida, K. Fujimura, et.al., “Optimization of fabrication condition of metal cask neutron shielding part which applied simulation of curing behavior of epoxy resin”, Proc. the 15th Int. Symp. on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials (PATRAM2007), Miami, Florida, USA, Oct. 21-26, 2007, Ab. #256 (2007)
- 3) “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”, 平成 20 年 3 月, 財団法人 電力中央研究所
- 4) “使用済燃料貯蔵施設規格 金属キャスク構造規格 (2007 年版)”, 社団法人 日本機械学会, JSME S FA1-2007, 事例規格 バスケット用ボロン添加ステンレス鋼板 B-SUS304P-1 に関する規定 FA-CC-004 (2009)


3. 金属キャスクに収納する使用済燃料集合体の収納配置について

除熱機能に関する評価で考慮した使用済燃料集合体の種類，燃焼度等に応じた収納配置を以下に示す。

(1) BWR用大型キャスク（タイプ2）

BWR用大型キャスク（タイプ2）には，新型8×8ジルコニウムライナ燃料のみを収納し，平均燃焼度を超える使用済燃料集合体は，別添2-2図に示す範囲に収納するものとする。



 : 平均燃焼度を超える使用済燃料集合体の収納範囲

別添2-2図 使用済燃料集合体の収納配置
(BWR用大型キャスク（タイプ2）)

(2) BWR用大型キャスク（タイプ2A）

使用済燃料集合体は、各場合に応じて、別添2-3図(1)～別添2-3図(3)に示す範囲に収納するものとする。各場合における使用済燃料集合体の仕様を別添2-5表に示す。

別添2-3図(2)及び別添2-3図(3)の配置による除熱解析結果を別添2-3図(4)に示す。

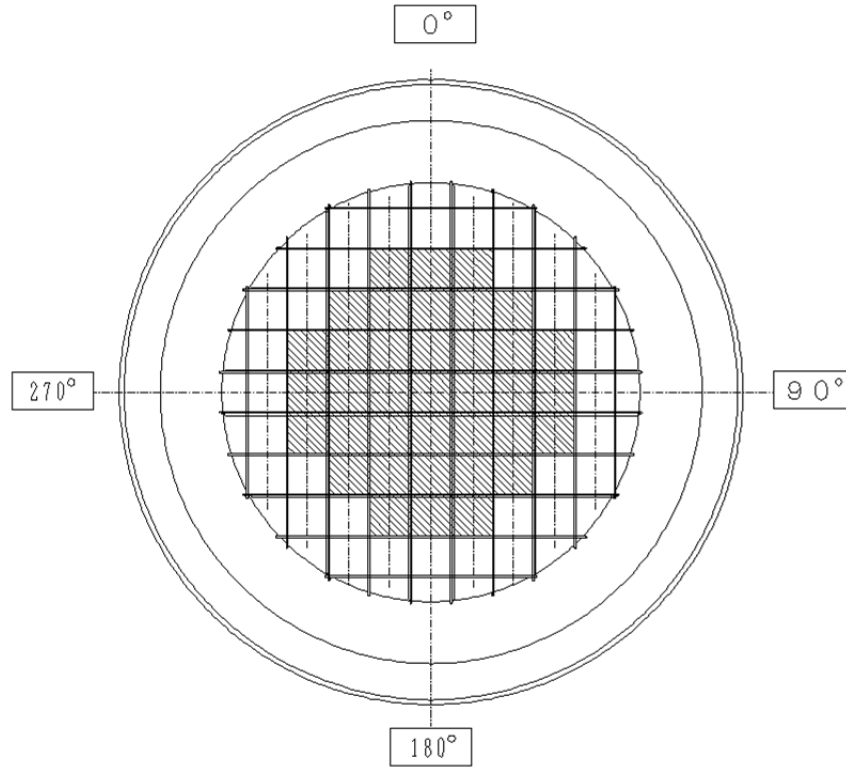
別添2-5表 BWR用大型キャスク（タイプ2A）に収納する
各場合における使用済燃料集合体の仕様


	8×8RJ	8×8RJ	8×8BJ	8×8STEP2
		8×8BJ		
平均燃焼度	26,000MWD/MTU 以下	—	34,000MWD/MTU 以下	34,000MWD/MTU 以下
最高燃焼度	28,500MWD/MTU 以下	34,000MWD/MTU 以下	40,000MWD/MTU 以下	40,000MWD/MTU 以下
冷却期間	24年以上	24年以上	18年以上	18年以上
収納配置	別添2-3図(3)	別添2-3図(2)	別添2-3図(1)	

凡例 8×8RJ：新型8×8燃料

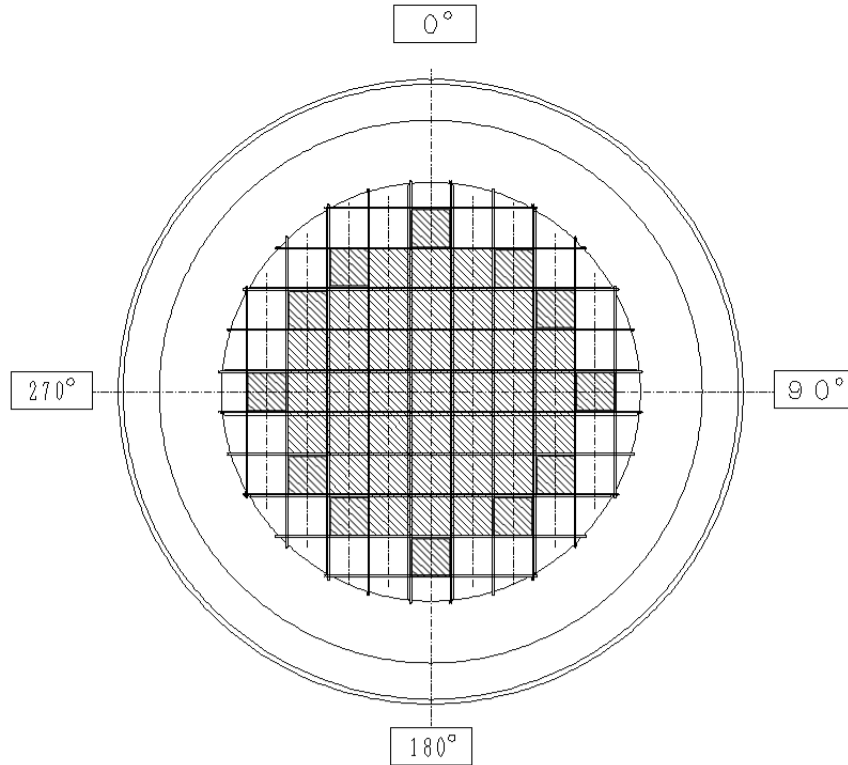
8×8BJ：新型8×8ジルコニウムライナ燃料


8×8STEP2：高燃焼度8×8燃料



 : 平均燃焼度を超える使用済燃料集合体の収納範囲

別添 2 - 3 図 (1) 使用済燃料集合体の収納配置
 (BWR 用大型キャスク (タイプ 2 A))
 (新型 8 × 8 ジルコニウムライナ燃料及び
 高燃焼度 8 × 8 燃料を収納する場合)

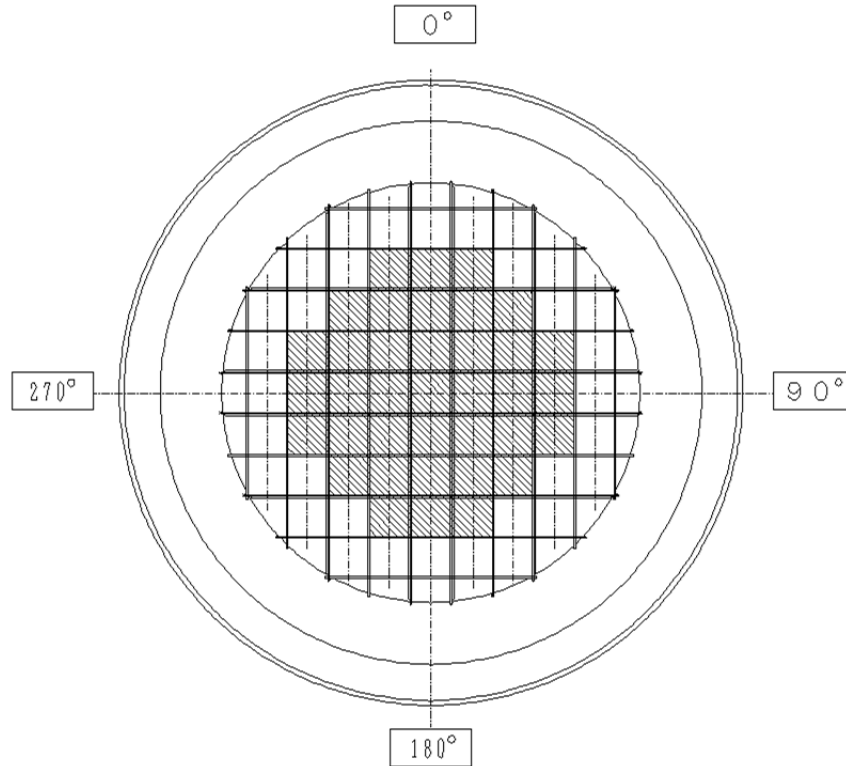



 : 新型 8 × 8 燃料を収納しない範囲 (収納する新型 8 × 8 ジルコニウムライナ燃料は, 燃焼度 34,000MWD/MTU 以下, 冷却期間 24 年以上とする)

別添 2 - 3 図 (2) 使用済燃料集合体の収納配置

(BWR 用大型キャスク (タイプ 2 A))

(新型 8 × 8 燃料及び新型 8 × 8 ジルコニウムライナ燃料を収納する場合)

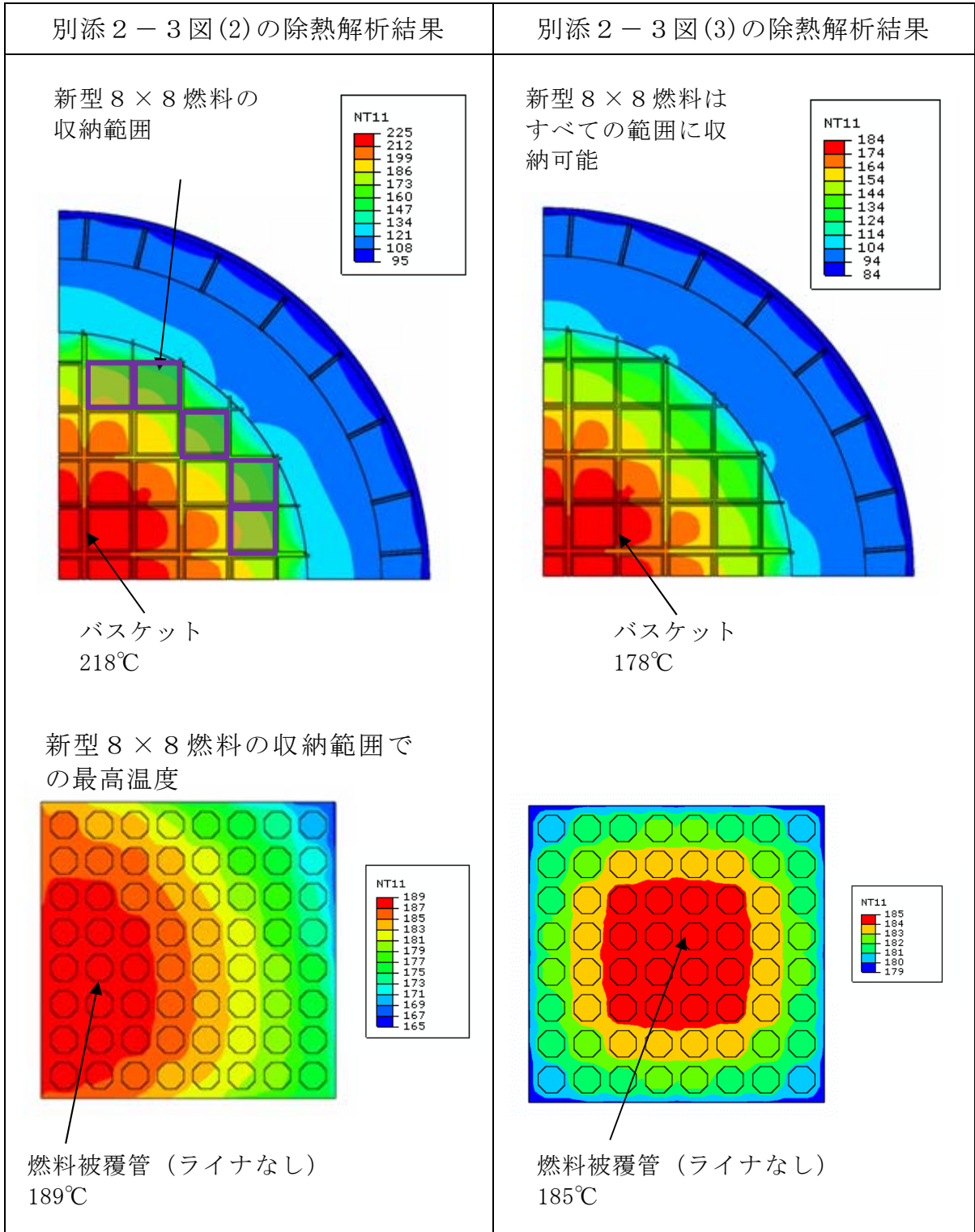


 : 燃焼度 26,000MWD/MTU を超え, 燃焼度 28,500MWD/MTU を下回る使用済燃料集合体の収納範囲 (平均燃焼度を 26,000MWD/MTU 以下とする)

別添 2 - 3 図 (3) 使用済燃料集合体の収納配置

(BWR用大型キャスク (タイプ 2A))

(新型 8 × 8 燃料のみを収納する場合)



別添 2 - 3 図(4) 別添 2 - 3 図(2)及び別添 2 - 3 図(3)の収納配置における
除熱解析結果

設計で用いる燃料集合体の燃焼度について

1. 「最高燃焼度」及び「平均燃焼度」について

燃料集合体は軸方向の燃焼度分布を有しており、個々の燃料集合体の燃焼度を示す場合は、この軸方向の燃焼度分布から求められる平均の値を燃焼度としている。

「最高燃焼度」及び「平均燃焼度」についても、これら個々の燃料集合体の燃焼度をもとに設定したものである。

- (a) 「最高燃焼度」については、金属キャスクに収納している全ての燃料集合体それぞれの燃焼度が「最高燃焼度」を超えていないこと、すなわち、個々の燃料集合体の燃焼度の上限値として「最高燃焼度」を設定している。

$$\text{MAX(収納する個々の燃料集合体の燃焼度)} \leq \text{最高燃焼度}$$

- (b) 「平均燃焼度」については、金属キャスクに収納している全ての燃料集合体に対する燃焼度の平均値が「平均燃焼度」を超えていないこと、すなわち、キャスク内の全燃料集合体から求められる燃料集合体1体当たりの燃焼度の平均値の上限値として「平均燃焼度」を設定している。

$$\frac{\sum \text{収納する個々の燃料集合体の燃焼度}}{\text{キャスク内収納燃料集合体数}} \leq \text{平均燃焼度}$$

2. 設計で用いる燃料集合体の燃焼度について

これら最高燃焼度、平均燃焼度がキャスク本体、建屋等の設計解析上どの部分に用いられているかを添付－1表に纏めた。

添付-1表 設計で用いる燃料集合体の燃焼度について

項目		除熱評価 (発熱量)			遮蔽評価 (線源強度)		
		貯蔵建屋	金属キャスク		貯蔵建屋	金属キャスク	
燃焼度	PF*1		全体モデル	輪切りモデル	燃料集合体モデル		
平均	PF=1	●					
	考慮		●	●			●
最高	考慮			●	●		●
その他						●*2	
解析対象		金属キャスク周囲の空気温度及びコンクリート温度	金属キャスク蓋・底部の部位 (金属ガスケット, 蓋部中性子遮蔽材等) の温度	金属キャスク中央断面部の部位 (バスケット, 側部中性子遮蔽材等) の温度	金属キャスク中央断面部の燃料被覆管温度	一般公衆の線量, 貯蔵建屋内外の線量	金属キャスク表面と表面から1mの線量当量率
モデルの考え方		収納された燃料集合体の合計発熱量が, 金属キャスクの最大崩壊熱量 (Q) となる。(図1参照)	収納された燃料集合体のPFを考慮した合計発熱量が, 金属キャスクの設計崩壊熱量 (Q _D) となる。(図2参照)	評価部位の温度を保守的に評価するために, PF最大となる軸方向位置で最高燃焼度燃料を中心に集中配置。(図3参照)	最大の発熱量 (PF最大の最高燃焼度燃料) を設定する。	*2: 敷地境界外の線量が保守的になるように線源強度を設定する。	設けた収納配置の範囲で最大の線源強度を各領域に設定する。(図4参照)

*1: PF (ピーキングファクタ: 燃焼度の偏りの程度を表す)

q_{rf} : 平均燃焼度の実燃料の発熱量分布

q_{ave} : 平均燃焼度 (PF=1) に基づく平均発熱量

最大崩壊熱量 (Q) = $q_{ave} \times n$ (収納体数)

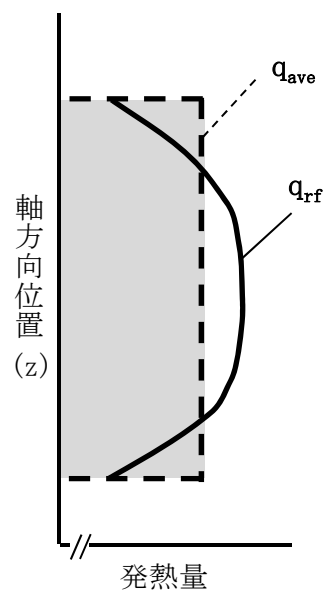


図1 貯蔵建屋の除熱評価における燃料集合体発熱量の概念図

$q_{ave}(PF)$: PFを考慮した平均燃焼度に基づく発熱量分布

$q_{ave}(PF)$: 軸方向どの位置でも q_{rf} を包絡するように設定

設計崩壊熱量 (Q_D) = $q_{ave}(PF) \times n$ (収納体数)

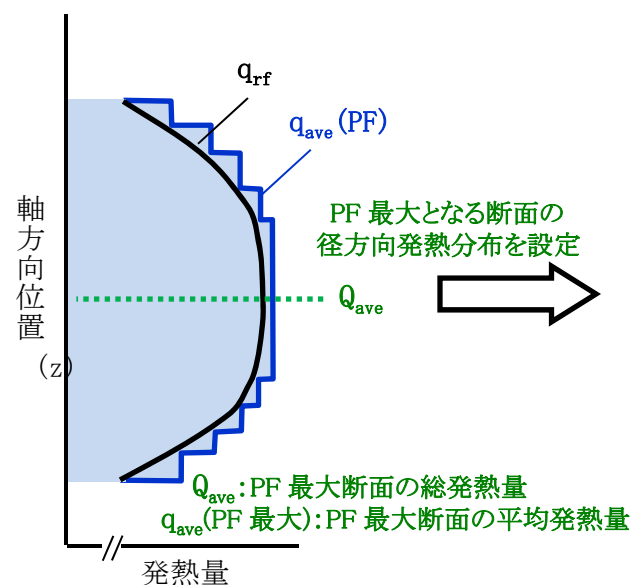


図2 金属キャスクの除熱評価における軸方向発熱量の概念図 (全体モデル: R-Z 体系)

$q_{max}(PF)$: PFを考慮した最高燃焼度に基づく発熱量分布

収納配置例
 ■ 最高燃焼度の燃料: n_m
 □ 平均燃焼度以下の燃料: n_a (合計発熱量を保存)

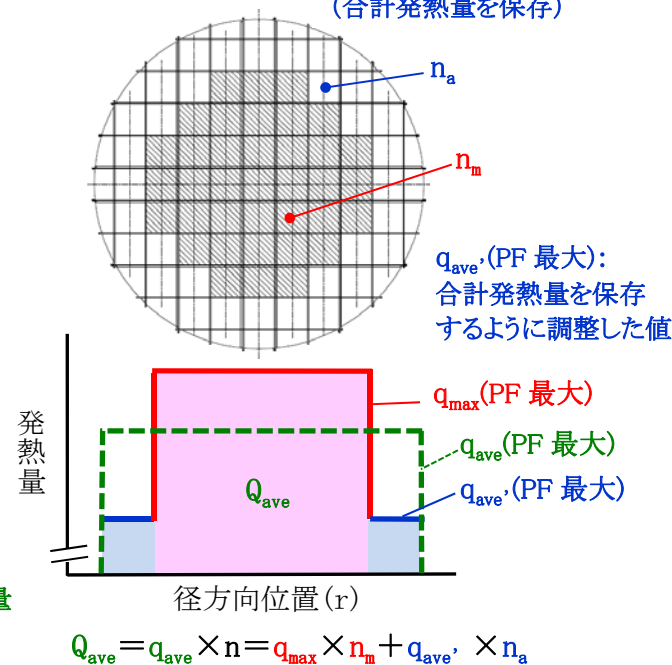


図3 金属キャスクの除熱評価におけるPF最大部断面発熱量の概念図 (輪切りモデル)

$f_{ave}(PF)$: PFを考慮した平均燃焼度に基づく線源強度分布

$f_{max}(PF)$: PFを考慮した最高燃焼度に基づく線源強度分布

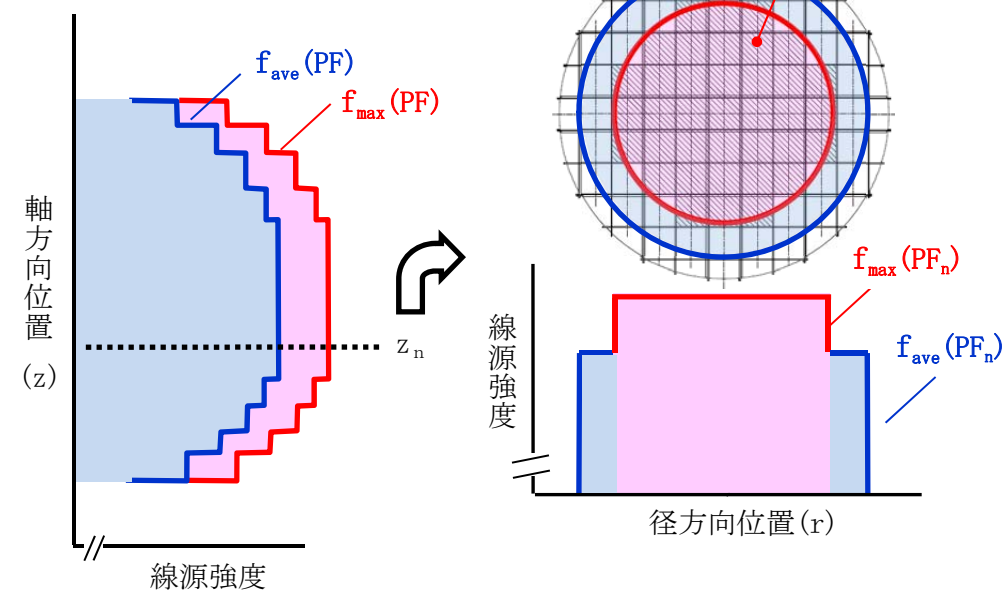


図4 金属キャスクの遮蔽評価における線源強度の概念図 (R-Z 体系)

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 貯蔵建屋の除熱設計について
- 別添2 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集合体の崩壊熱を適切に除去できるよう、以下の設計を行うものとする。

- (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、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。また、給気口及び排気口は、積雪等により閉塞しないよう設計する。

2. 除熱設計

(1) 除熱構造

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建屋内周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. 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（貯蔵区域を耐火壁等により 6 分割した区画）については、夏季に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

貯蔵建屋は、貯蔵区域における計測設備、放射線監視設備等の電気品の性能維持を考慮し、金属キャスク周囲空気温度が 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、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

貯蔵建屋は、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

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、ふく射及び貯蔵架台を介しての伝導により貯蔵建屋へ伝えられる。
- (b) 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、貯蔵建屋の除熱評価においては、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金属キャスク周囲空気温度を、三次元熱流動解析コード F L U E N T 6.2 を用いて貯蔵建屋のコンクリート温度を評価する。

金属キャスク周囲空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に伝わるよう設定し、貯蔵建屋コンクリート温度の評価に当たっては、貯蔵建屋外壁を断熱とする。

貯蔵建屋の除熱評価フローを第 1 図に示す。

(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金属キャスクの周囲空気温度を算出する（第 2 図参照）。

ここで、評価条件は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 に示す。

- ・評価領域，流路設定及び考慮する圧力損失要素

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。第 3 図～第 5 図参照

- ・金属キャスク発熱量

評価領域における金属キャスクの総発熱量として 145.2kW（1 列あたり 72.6kW）に設定

- ・金属キャスク寸法

（直径）2.482m×（高さ）5.320mの円柱形状で模擬

- ・設計給気温度

29.5℃一定（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 %）

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 F L U E N T 6.2 を用いて，伝導，対流，ふく射が共存する場の支配方程式を解き建屋躯体温度を評価する。

ここで，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，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，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。
- ・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）

- ・金属キャスクは、（直径）2.482m×（高さ）5.320mの円柱形状で模擬
- ・金属キャスクの発熱は、12.1kW/基×6基×2列（第9図参照）、全表面（上面、側面、底面）一様な熱流束を付与するとともに、評価に於いては、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
- ・設計給気温度は、29.5℃一定
- ・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

一次元熱計算と三次元熱流動解析における主な評価条件を第1表にまとめて示す。

(4) 除熱解析結果

除熱解析の結果、一次元熱計算においては、排気温度は40.0℃、また、三次元熱流動解析においては、躯体温度の最高は床で56.9℃となり、貯蔵区域の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基とした金属キャスクの合計発熱量を72.6kWとすることで、金属キャスク周囲空気温度は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図～第14図に示す。

また、第4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。ふく射の影響を考慮していない一次元熱計算の排気温度は、ふく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、使用済燃料貯蔵建屋の除熱解析では、給気温度を29.5℃一定とした条件を設定しており、仮に、29.5℃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29.5℃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

- 1) 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表 使用済燃料貯蔵建屋の除熱解析条件

	一次元熱計算	三次元熱流動解析
基準温度	45℃（金属キャスク周囲空気温度）	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／ふく射により，貯蔵建屋コンクリートに伝えられるものと想定
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2表 一次元熱計算による金属キャスク周囲空気温度評価結果

評価対象	評価温度	設計基準温度
金属キャスク 周囲空気温度	40.0℃	45℃

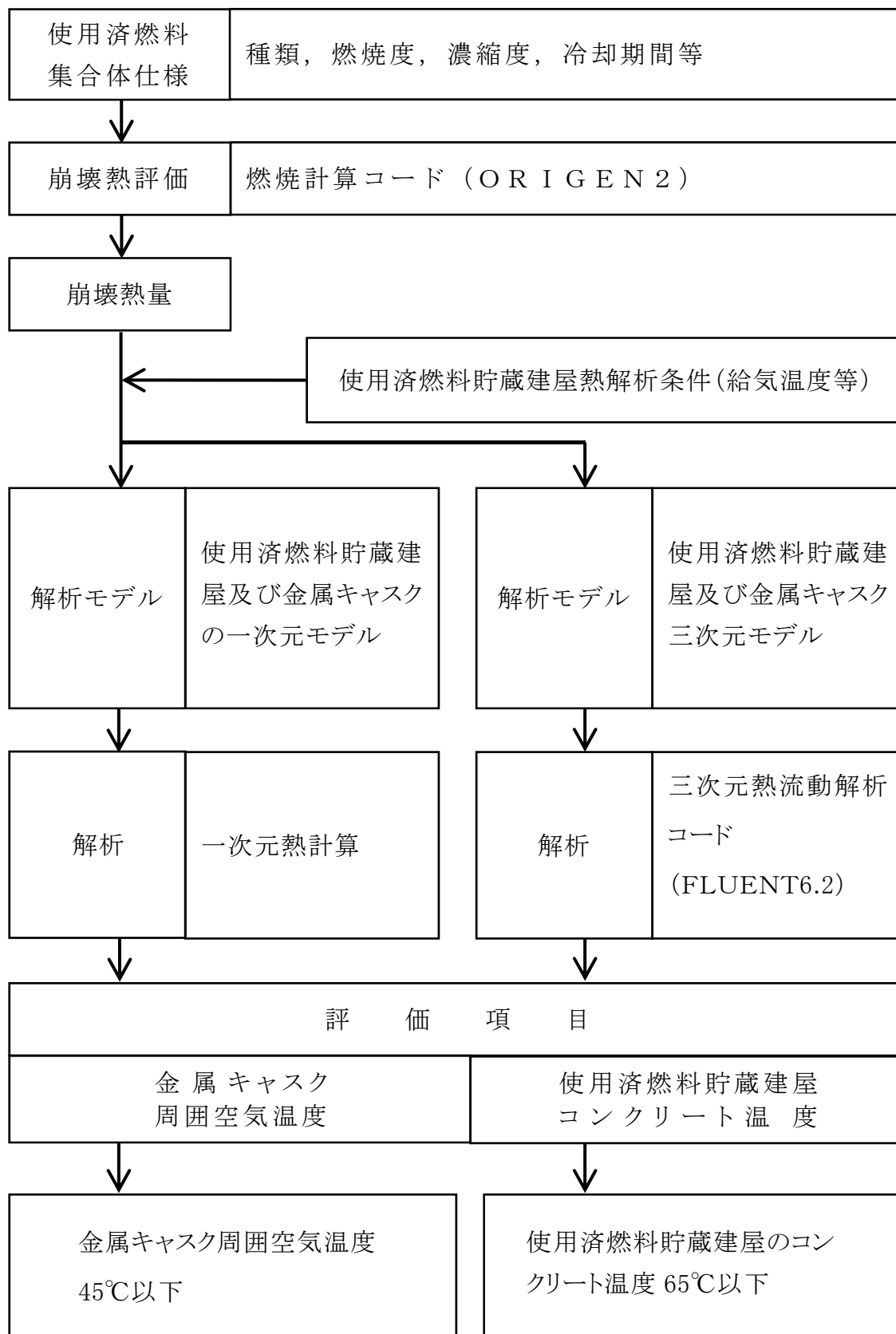
第3表 三次元熱流動解析による使用済燃料貯蔵建屋
コンクリート温度の評価結果（最高値）

評価部位	評価温度（最高値）	設計基準温度
側壁	52.7℃	65℃
支柱	54.4℃	
床	56.9℃	
天井（梁除く）	54.5℃	
天井梁	55.6℃	

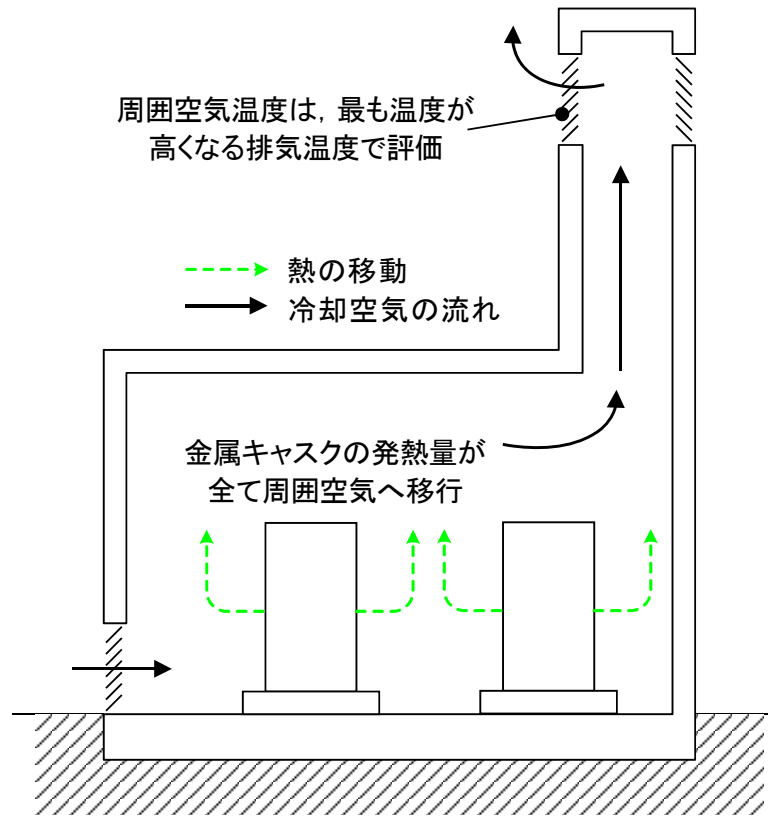
第4表 一次元熱計算と三次元熱流動解析の比較

	一次元熱計算 ^{注1)}	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

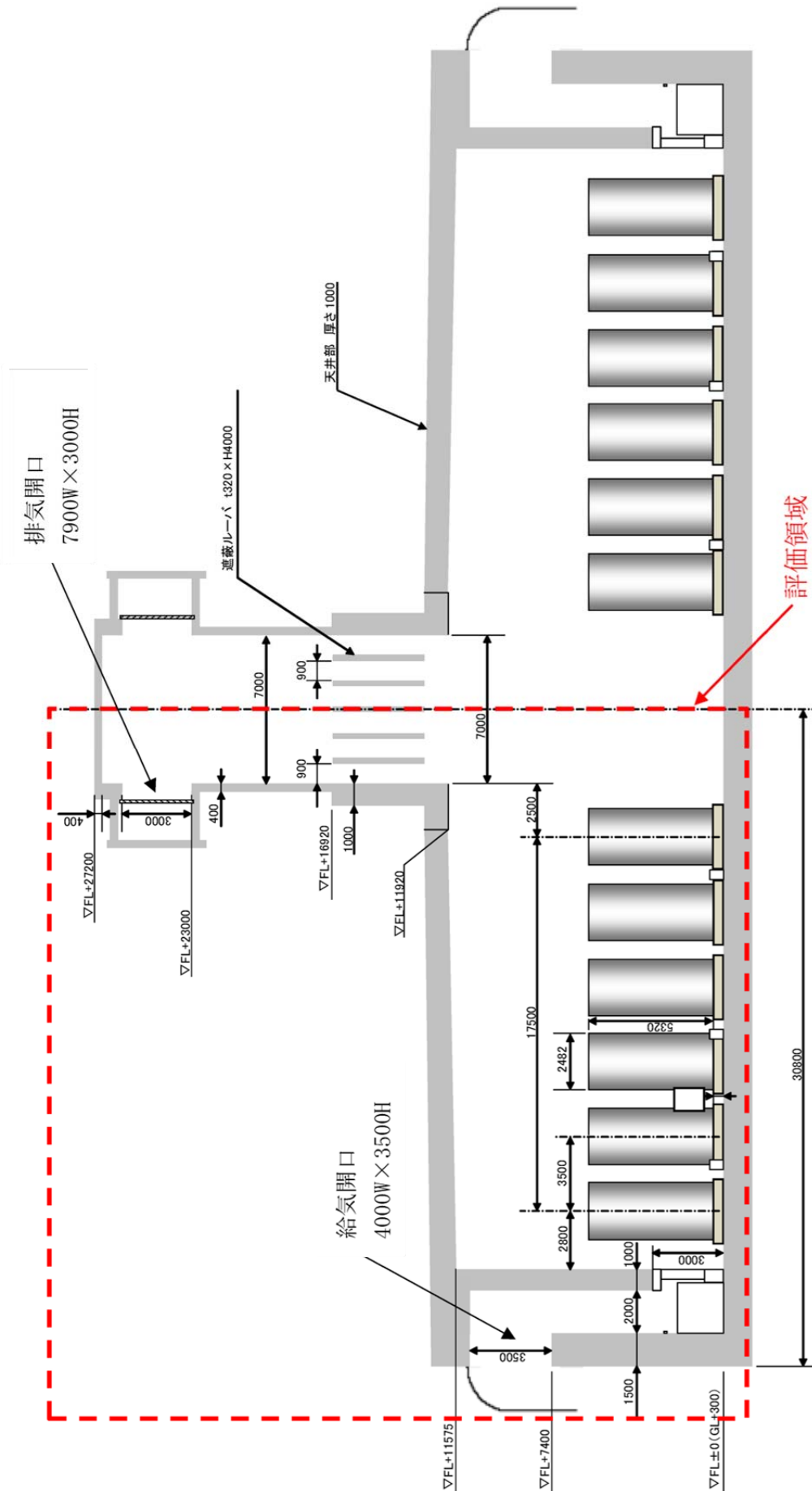
注1) 一次元熱計算は、三次元熱流動解析との比較から1列あたり（金属キャスク6基）の総発熱量を72.6kWとしたときの排気温度及び空気流量



第 1 図 使用済燃料貯蔵建屋の除熱解析フロー図



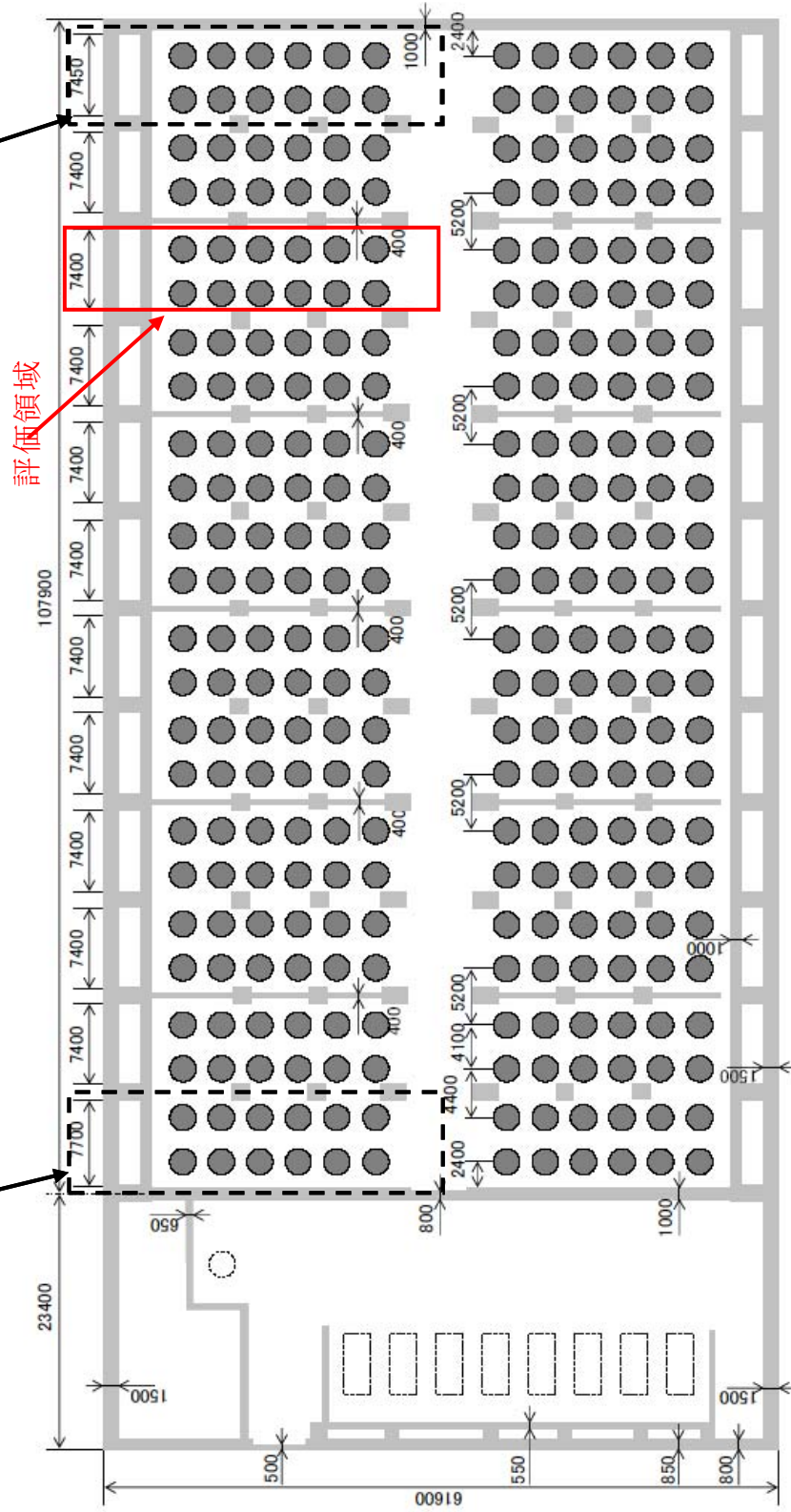
第 2 図 一次元熱計算における貯蔵建屋の伝熱形態



第3図 一次元熱計算における評価領域（建屋断面）

流路幅が大きくなる区域
(貯蔵区域の南側領域)

流路幅が大きくなる区域
(貯蔵区域の北側領域)

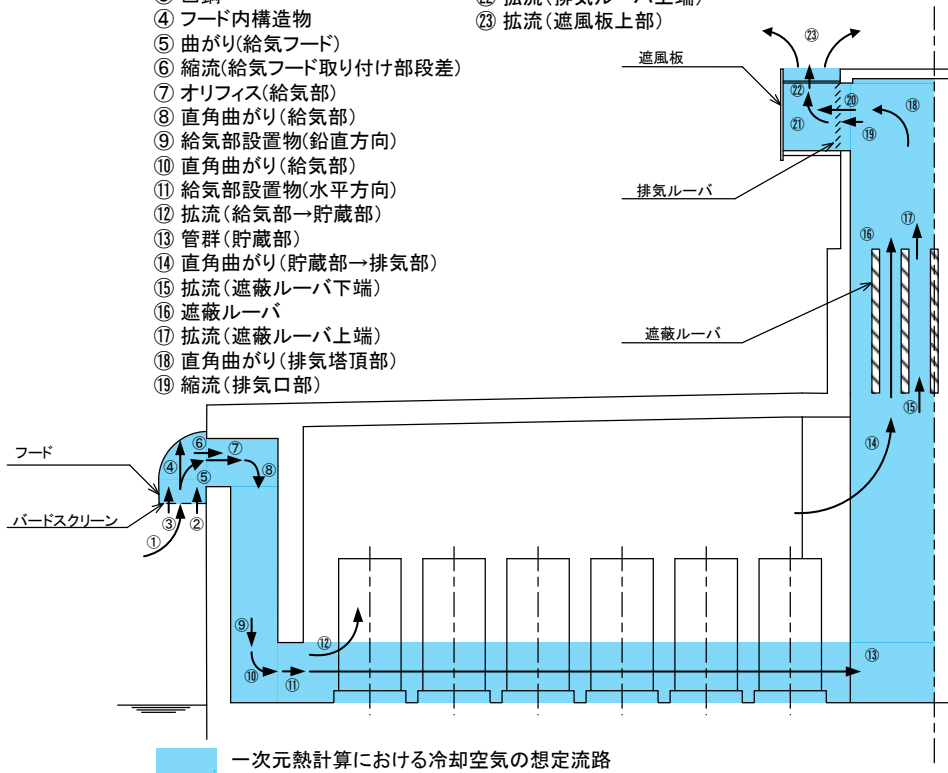


※貯蔵区域の給気口から排気口への流路形状は、一部区域（貯蔵区域の北側領域と南側領域）を除き同様であるが、冷却空気の流れを阻害する盤等の設置物の設置状況は異なる。一部区域（貯蔵区域の北側領域と南側領域）は、評価領域と比較して流路幅が大きく、設置物の設置状況も他の区域と同様の設置状況であるため、設置物が流路に対して占める割合が大きい評価領域を選定。

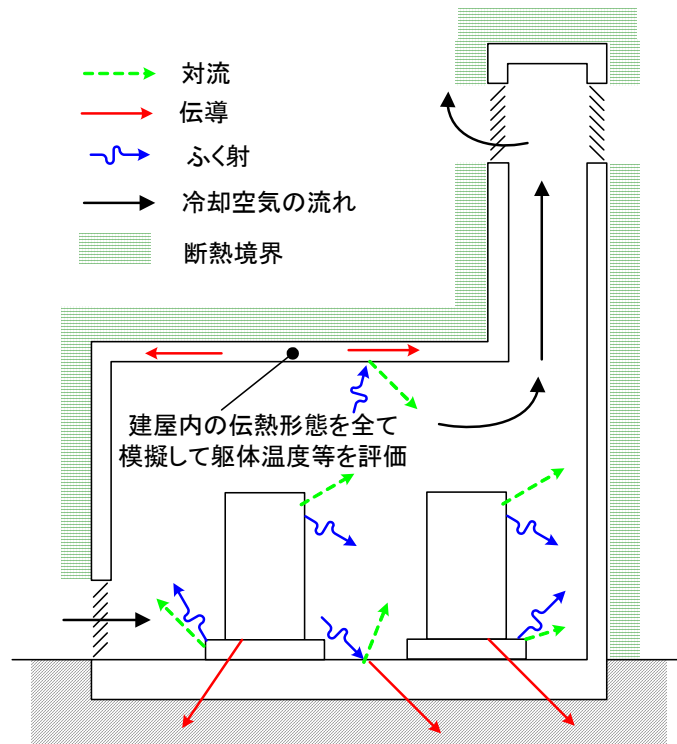
第4図 一次元熱計算における評価領域（建屋平面）

- 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)

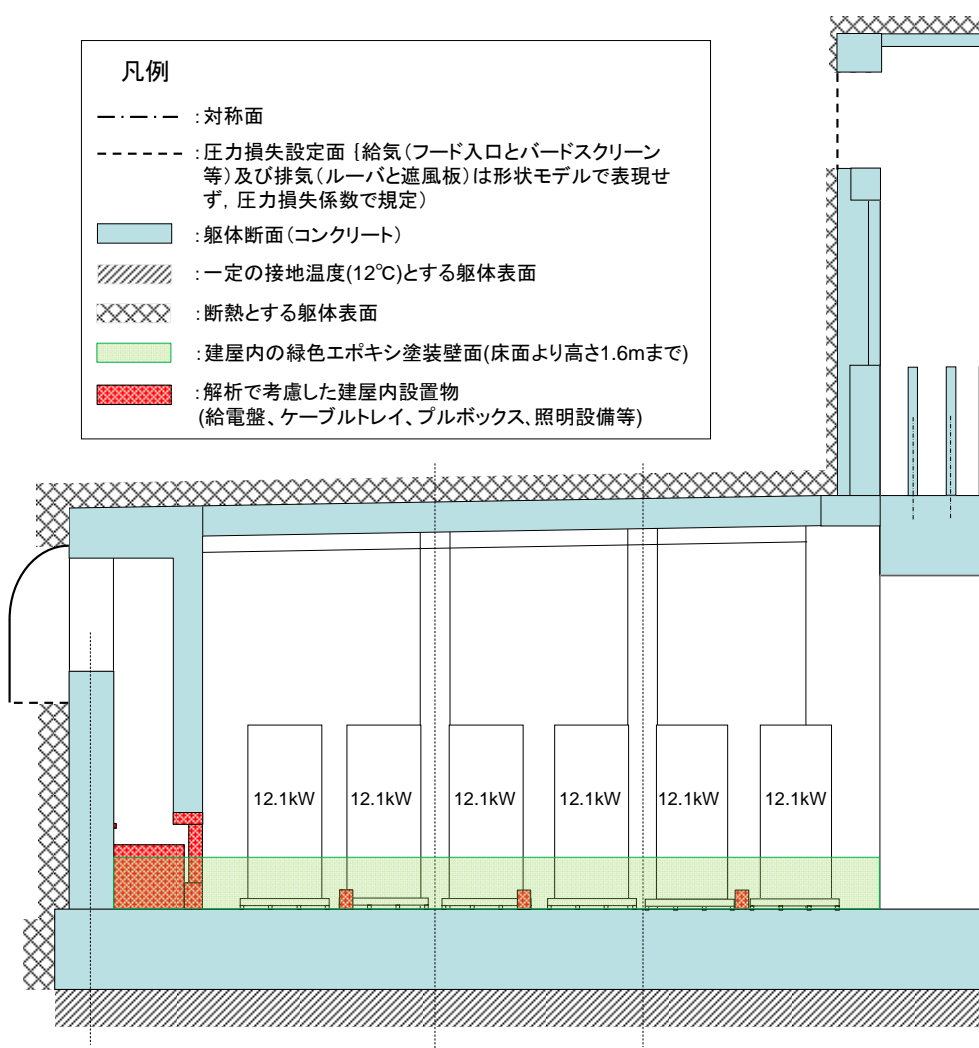
- ⑳ 排気ルーバ
- ㉑ 直角曲がり(遮風板)
- ㉒ 拡流(排気ルーバ上端)
- ㉓ 拡流(遮風板上部)



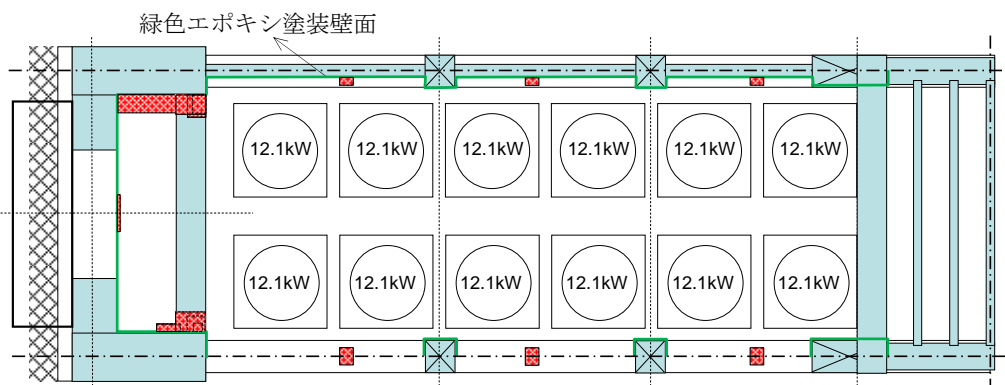
第5図 一次元熱計算における流路設定及び考慮する圧力損失要素



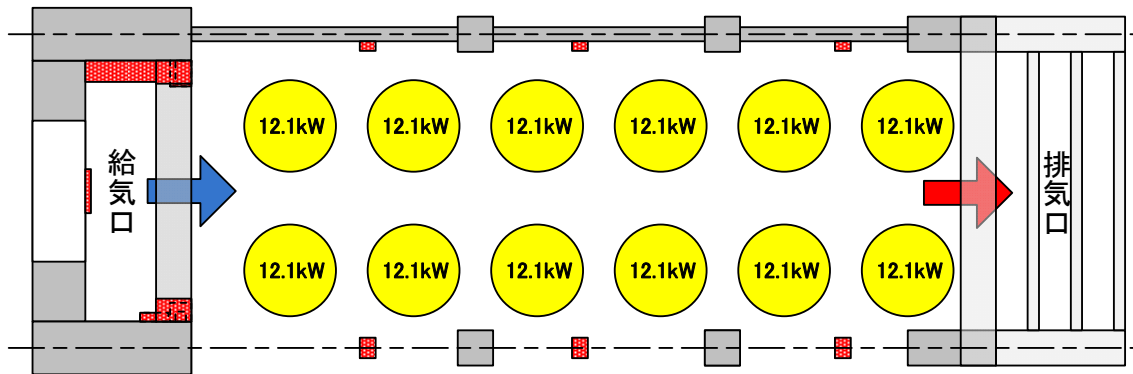
第6図 貯蔵建屋の伝熱形態



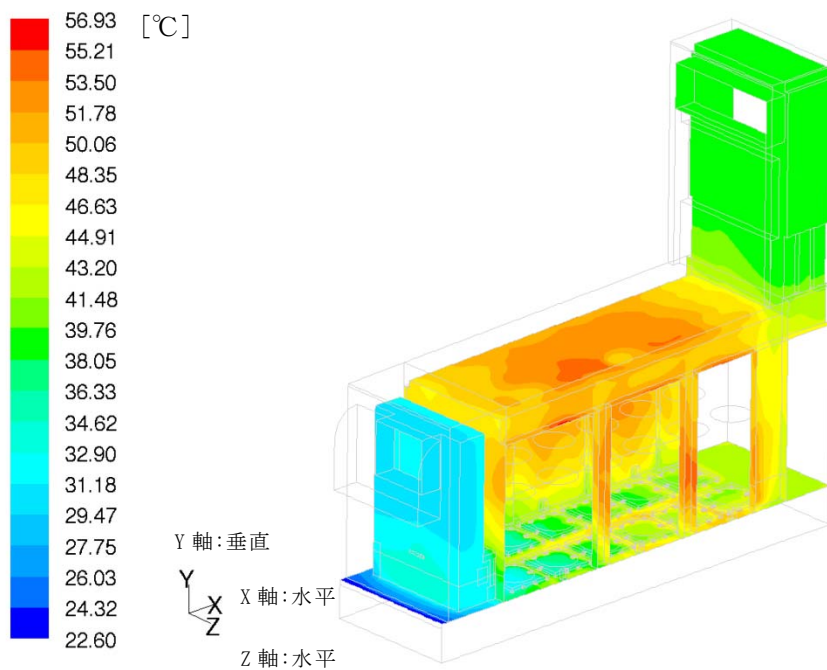
第7図 三次元熱流動解析の評価領域及び評価モデル(貯蔵建屋断面)



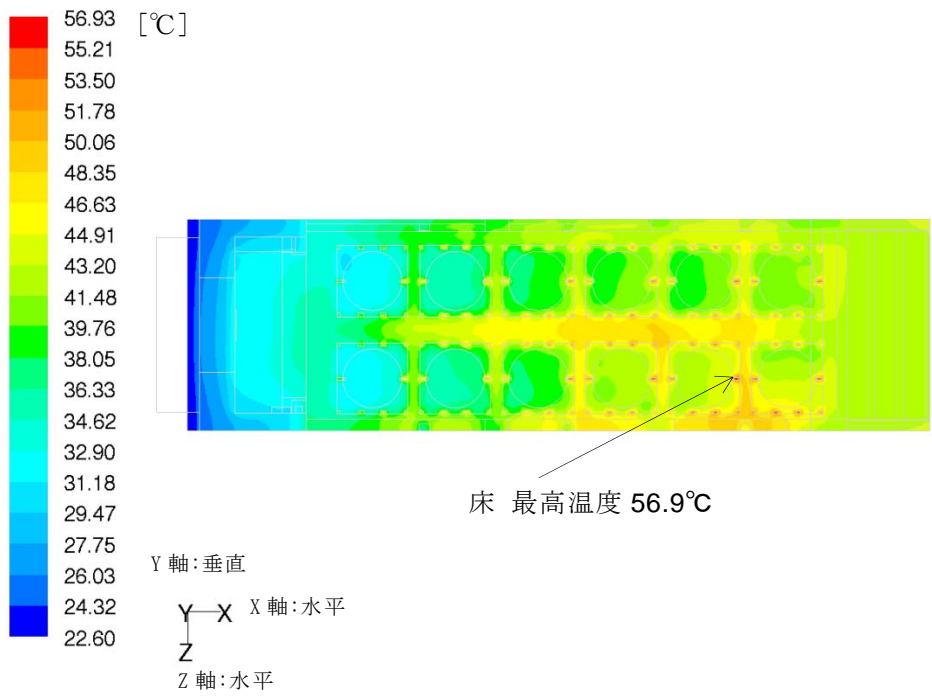
第8図 三次元熱流動解析の評価領域及び評価モデル(貯蔵建屋平面)



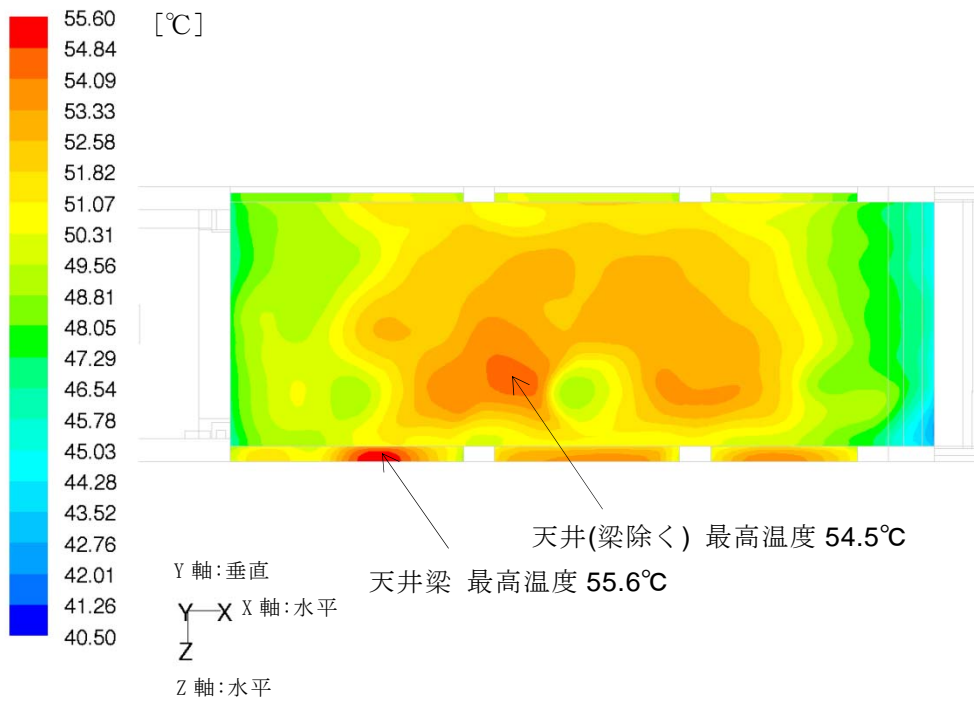
第9図 三次元熱流動解析で用いた金属キャスクの発熱量



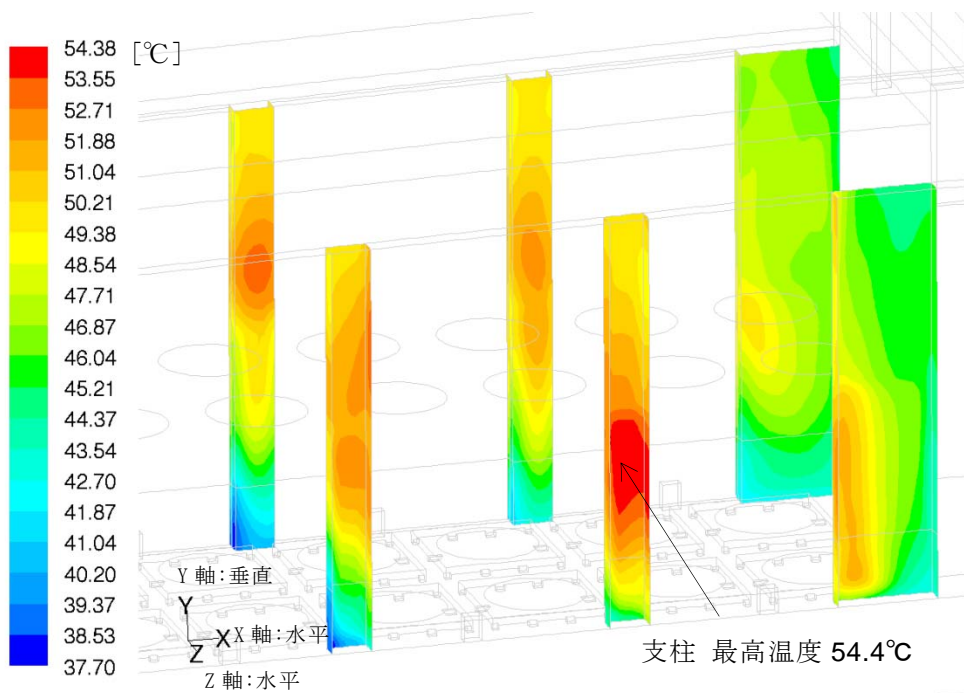
第10図 躯体全体（床・側壁・天井・支柱）表面温度分布



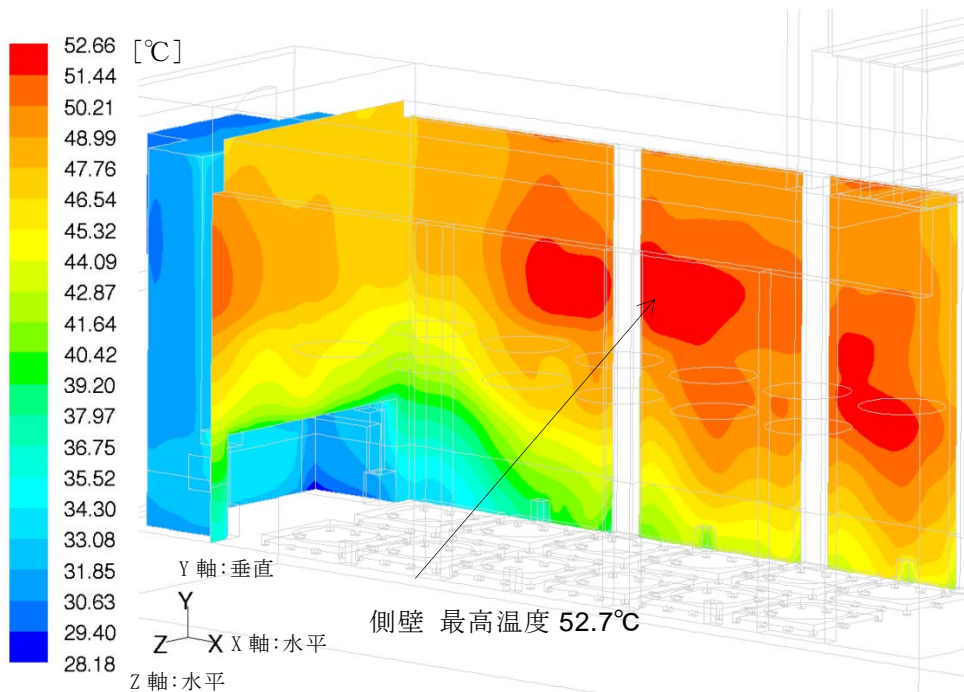
第 11 図 床表面温度分布



第 12 図 天井表面温度分布



第 13 図 支柱表面温度分布



第 14 図 側壁・入口壁表面温度分布

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、金属キャスクの周囲空気温度を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(建屋内に流入する冷却空気流量)は、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。

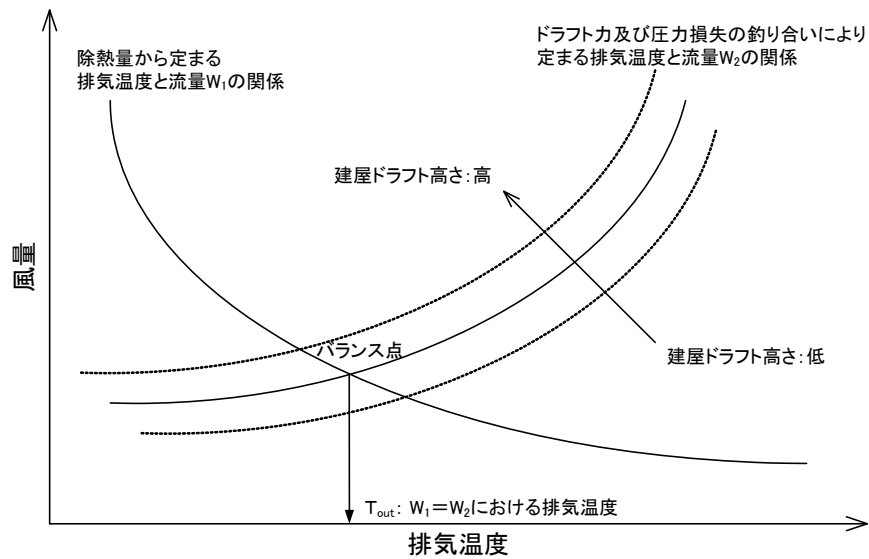
また、本貯蔵建屋の流路における圧力損失係数及び流路面積は別添 1-1 表のとおりとなる。

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

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

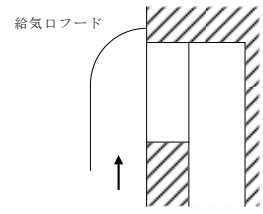
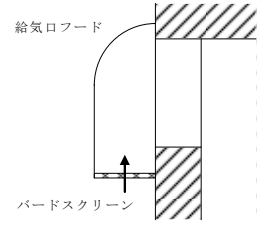
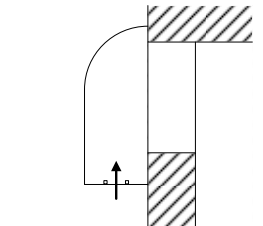
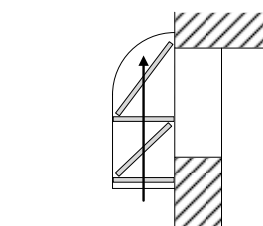
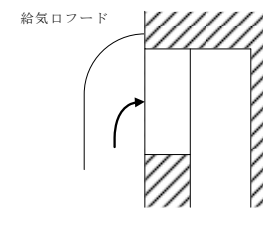
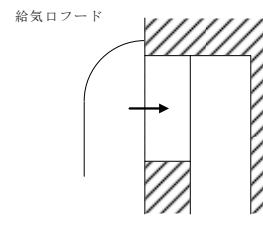
$$\rho_i = \frac{1.293}{1 + 0.00367t_i} \dots\dots\dots (3)$$

- 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)

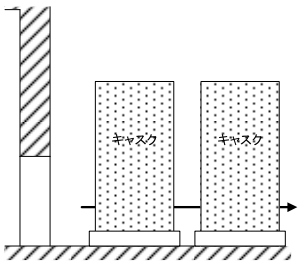
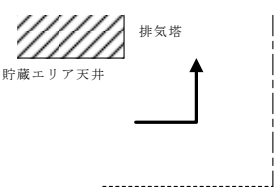
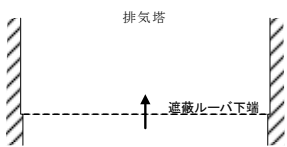
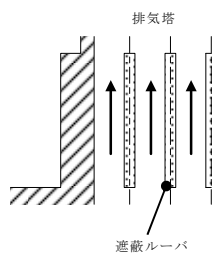
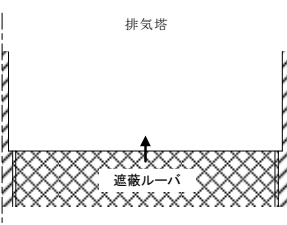
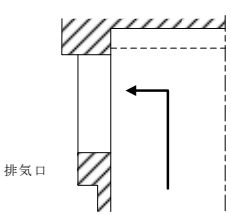


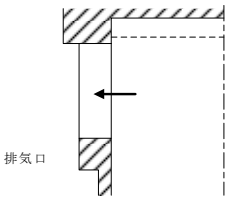
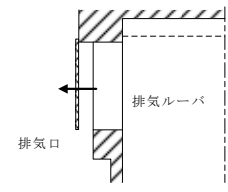
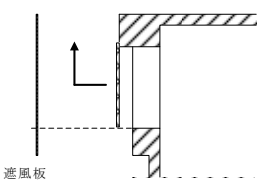
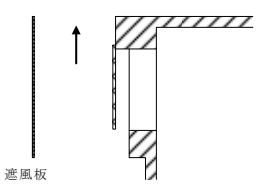
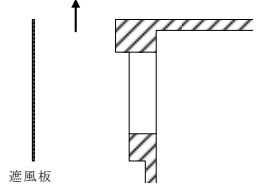
別添 1 - 1 図 一次元熱計算における排気温度と空気流量のバランス関係

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 (m^2)	圧損係数 ζ_i	$\frac{\zeta_i}{A_1^2}$ (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)	8.46	1.6	0.022	Handbook of Hydraulic Resistance 3rd Edition
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
⑱		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)
㉓		排気ルーバ	23.7	5.4	0.0096	排気ルーバ 通気性能試験 結果
㉔		直角曲がり (遮風板)	23.7	2.1	0.0037	Handbook of Hydraulic Resistance 3rd Edition
㉕		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)
㉖		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)

※⑱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

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 F L U E N T を用いて、伝導、対流、ふく射が共存する場の支配方程式を解き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：F L U E N T Ver.6.2

○ 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。

○ ふく射の解法等

ふく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～別添 1 - 3 図に示す。格子数は となる。

○ 物性値等

空気：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 [μ Pa·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]

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）：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

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。

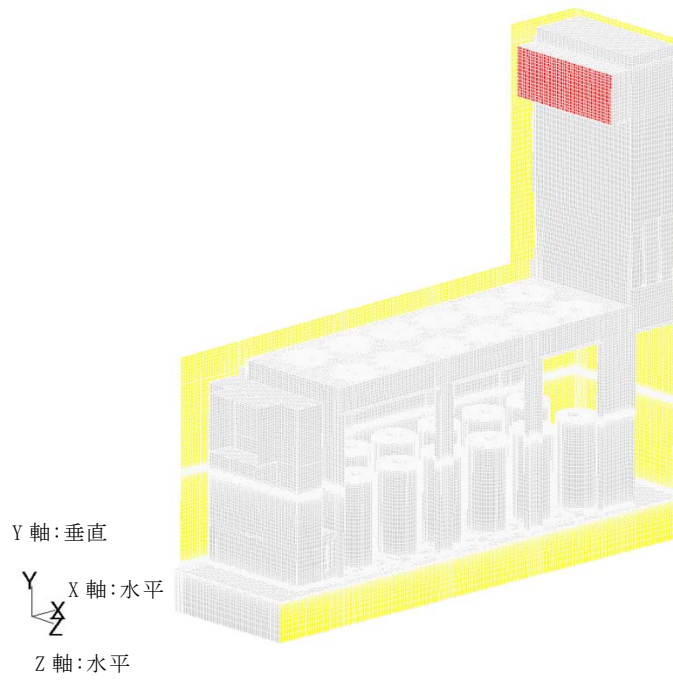
表面放射率：0.3

- ・ 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。

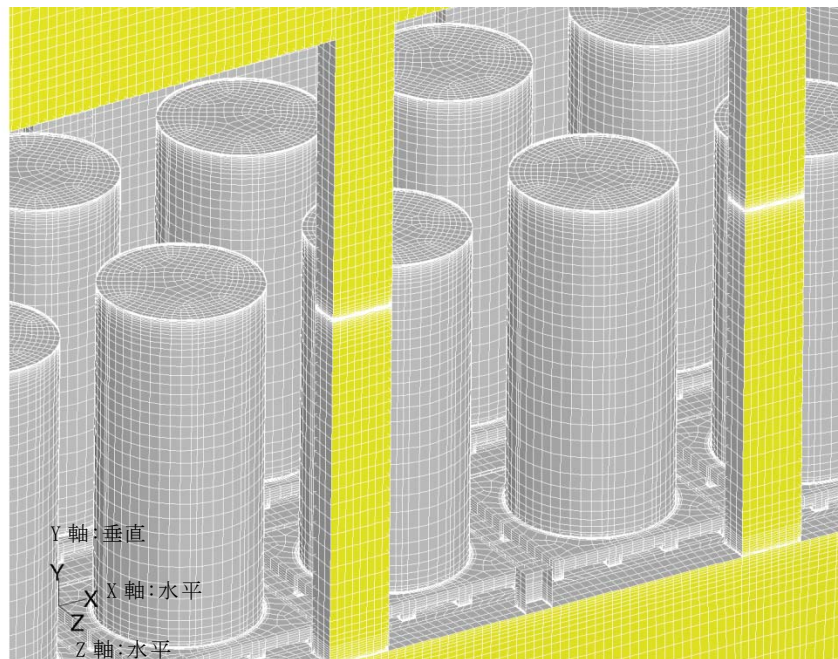
表面放射率：0.3

- ・ 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 図 三次元熱流動解析における計算格子
(金属キャスク及び貯蔵架台)

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、非圧縮性流れから低圧縮性流れ、高圧縮性流れまで取り扱うことのできる汎用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
- ・ 熱ふく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 Ri 数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 Ver. 6.1
- ふく射の考慮：なし（実証試験では模擬キャスクのふく射を低減するため、表面を鏡面仕上げとしている）
- 乱流モデル： $\kappa - \varepsilon$ モデル
 κ （乱流エネルギー）と ε （乱流消散率）の輸送方程式から乱流粘性を求める解法。二方程式乱流モデル
- 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、密度不均一の効果を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

○ 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

別添 1 - 10 図に建屋内温度分布比較位置、別添 1 - 11 図に建屋内速度分布比較位置を示す。別添 1 - 12 図～別添 1 - 15 図に建屋内温度分布の試験値と解析による計算値の比較、別添 1 - 16 図～別添 1 - 18 図に建屋内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、ホットスポットは試験、解析とも共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。

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た理由は、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ふく射を低減しているが、ふく射伝熱（放射率 0.1 程度²⁾）は存在すると考えられ、ふく射伝熱により床面・支柱等が暖められ、暖められた床面・支柱等より空気が加熱される。（添付 2 参照）

一方、今回の FLUENT 検証解析が、試験装置内の流況及び模擬キャスク表面温度について、試験データを物理的に妥当に再現できることの確認を主眼に実施したものであり、模擬キャスク表面温度を保守的に評価するため、ふく射を考慮しない条件で解析している。

ふく射を考慮しない場合の伝熱経路は、模擬キャスクから空気への伝熱であり、あたた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く、床面近傍は温度の低い状態となる。

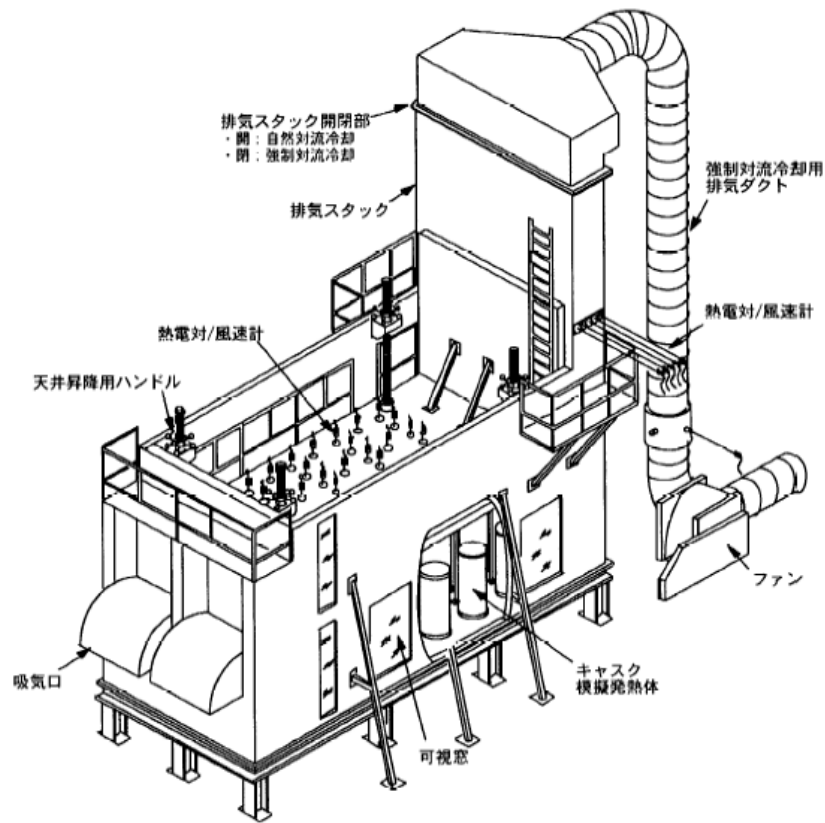
ふく射を考慮した場合の伝熱経路は、床面・支柱等へのふく射による伝熱が加わることとなる。ただし、模擬キャスクの発熱量等その他の設定条件は変更されていないため、熱バランスに変更はなく、排気温度は変わらない。

模擬キャスク側面からのふく射の影響は、距離が近く、立体角の大きい床面へ影響が大きく、ふく射を考慮しない場合と比較し、床面近傍の空気温度は高くなるが、天井面近傍の空気温度への影響は小さい。(添付2参照)

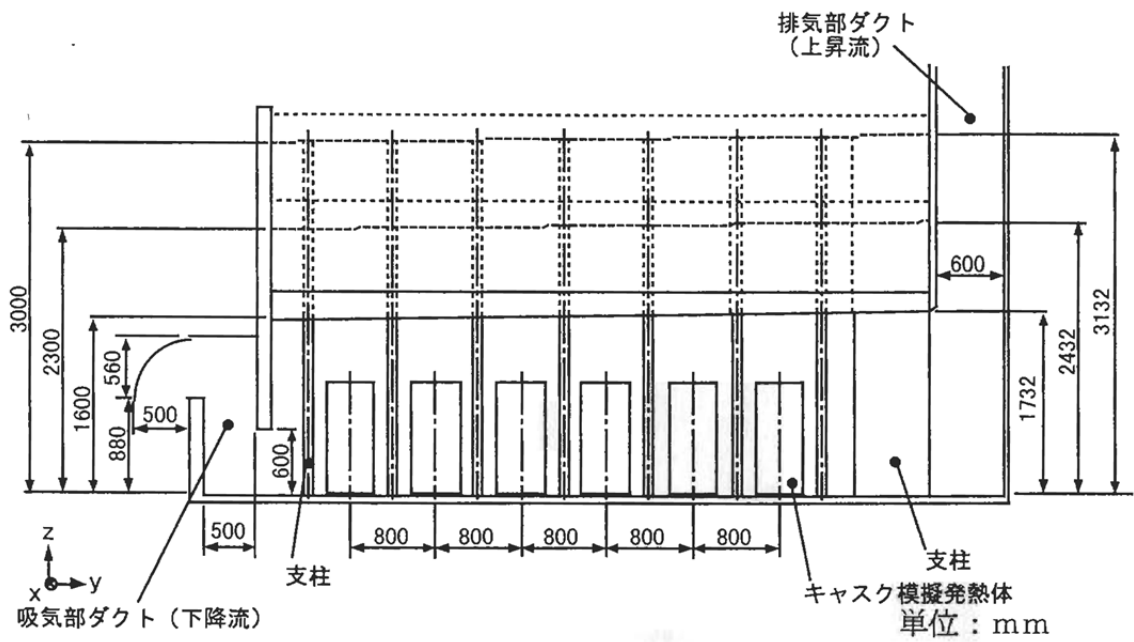
これらより、三次元熱流動解析コード：FLUENT，乱流モデル： $k-\epsilon$ モデル，浮力の取扱：ブジネスク近似，金属キャスク表面の空気側第1格子幅：により，建屋内の流況，温度分布の熱伝達特性を模擬できると判断する。

参考文献

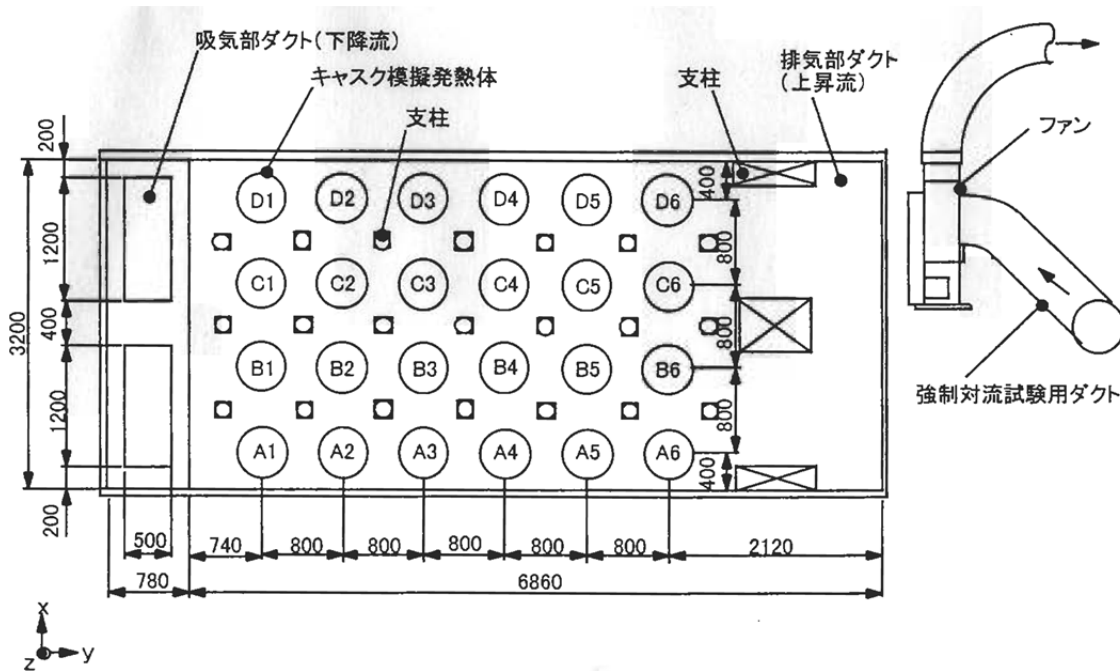
- 1) 竹田浩文・古賀智成・亘真澄・坂本和昭，キャスク貯蔵施設の除熱性能の実証に関する研究－スタック方式施設の除熱試験－依頼報告：U99505，電力中央研究所報告，2000年
- 2) 日本機械学会，伝熱工学資料 改訂第4版，丸善株式会社，2003年



別添 1 - 4 図 試験装置鳥瞰図

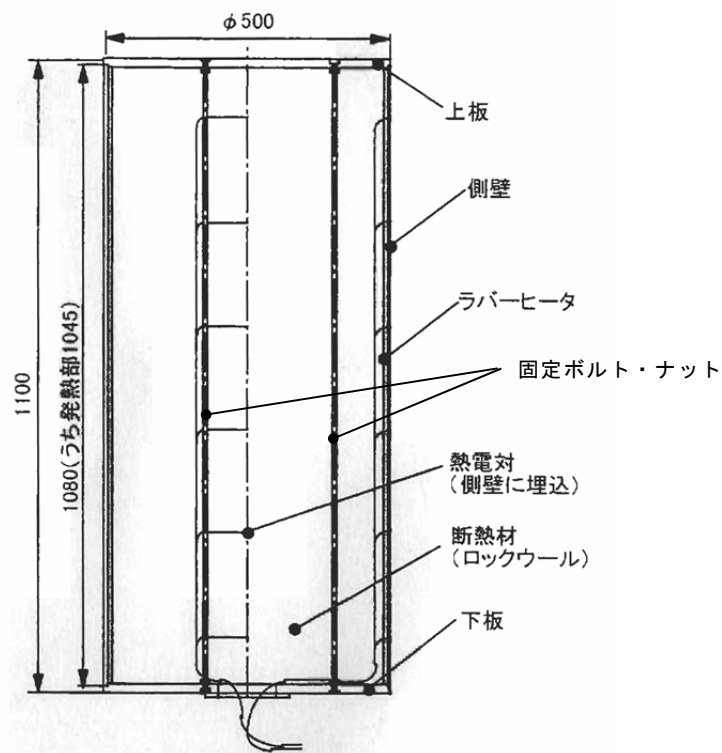


別添 1 - 5 図 試験装置の貯蔵部立断面図

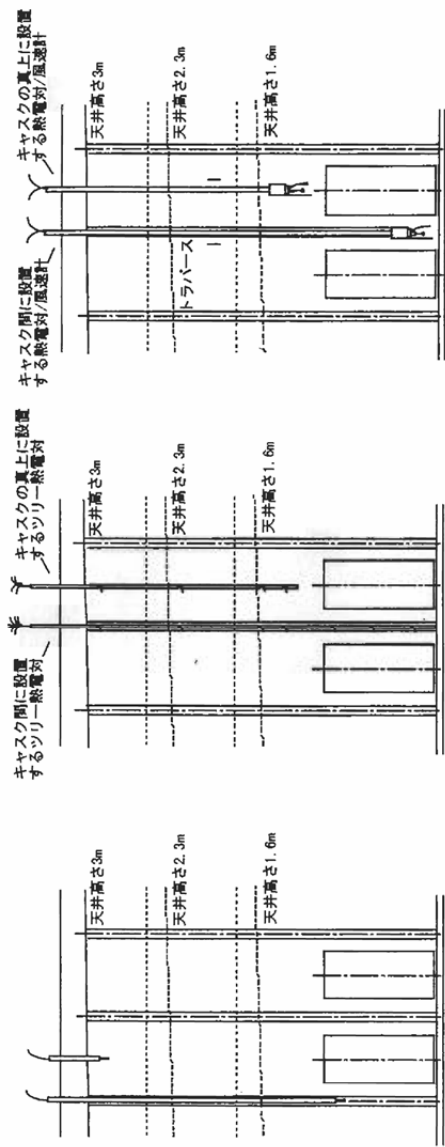
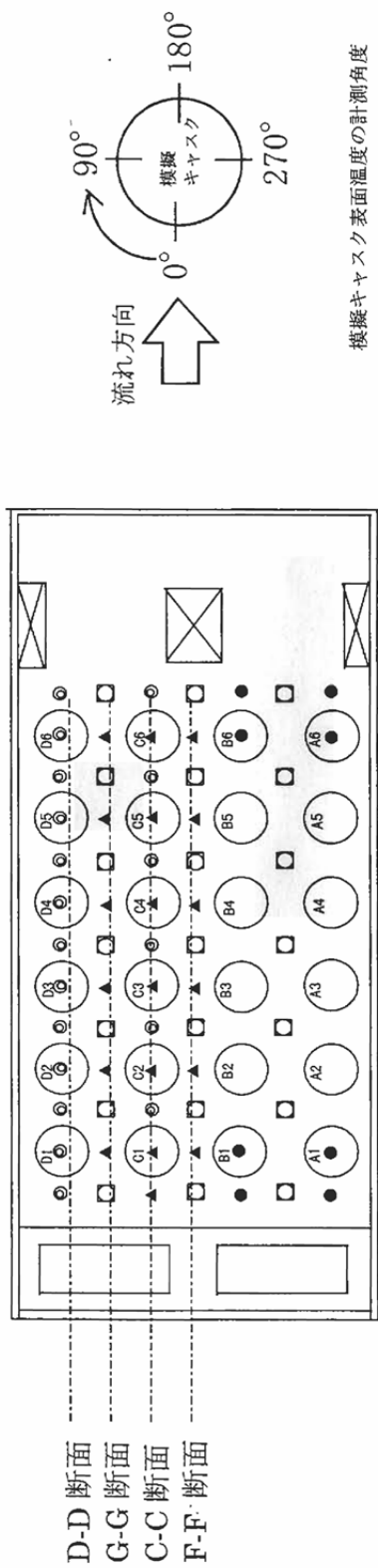


単位：mm

別添1-6図 試験装置の貯蔵部平面図

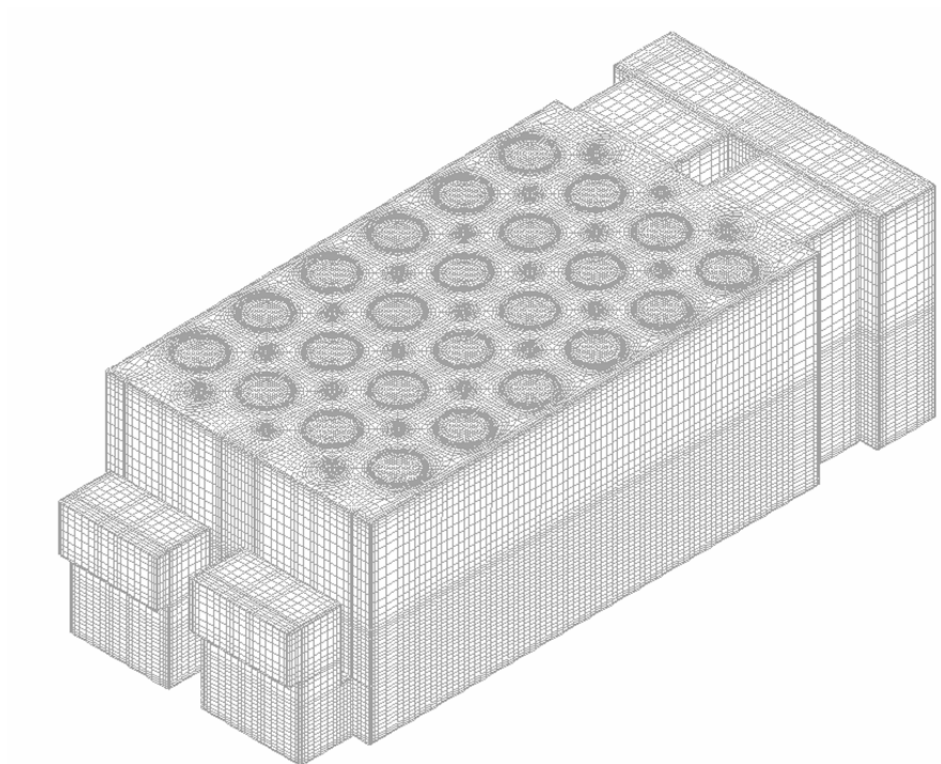


別添1-7図 模擬キャスク断面図

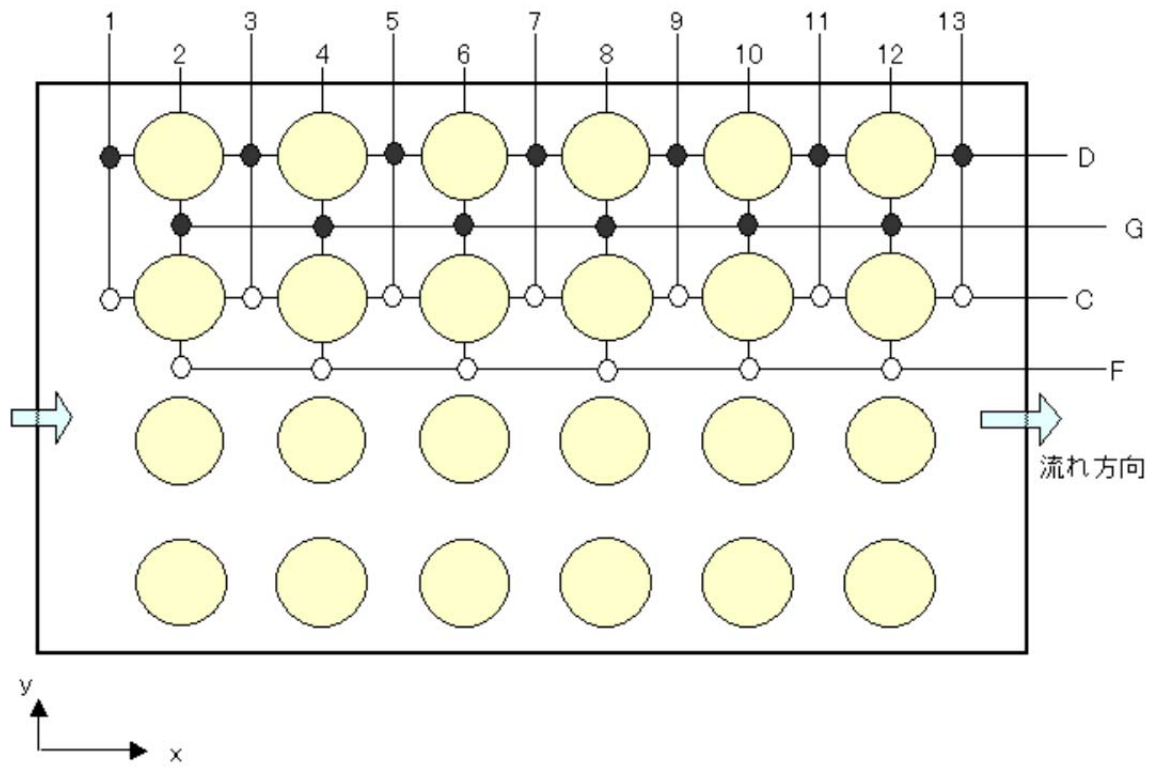


- a. 平面図で「●」で示した場所に設置した熱電対
- b. 平面図で「◎」で示した場所に設置したツリ熱電対
- c. 平面図で「▲」で示した場所に設置した熱電対/風速計

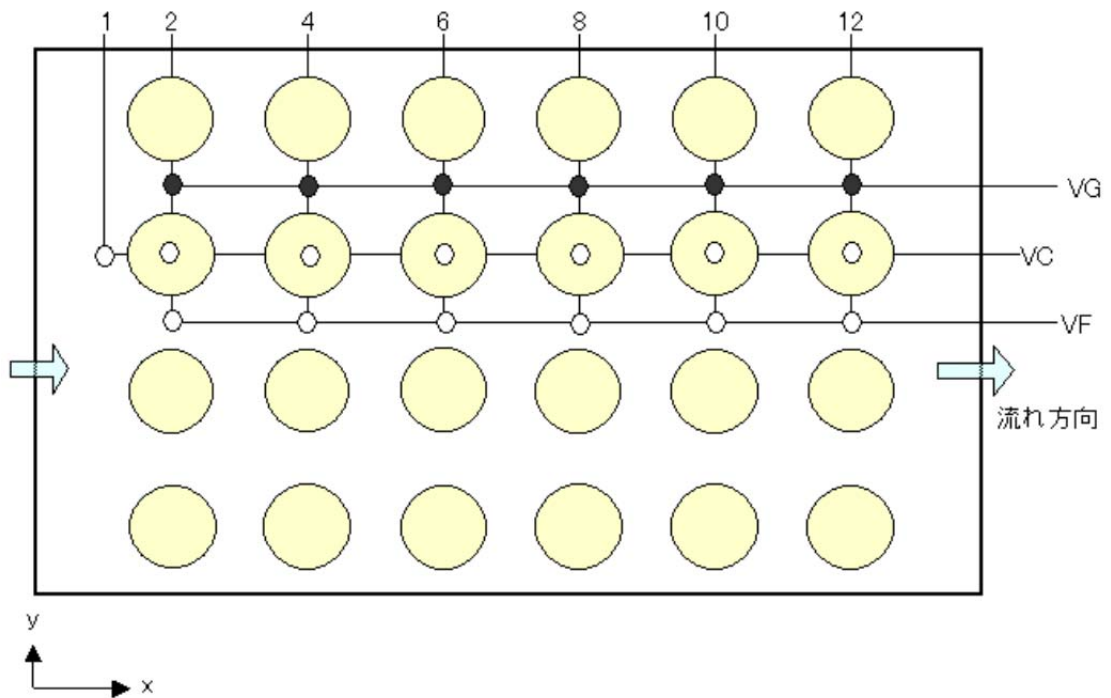
別添 I - 8 図 計測位置 (貯蔵部)



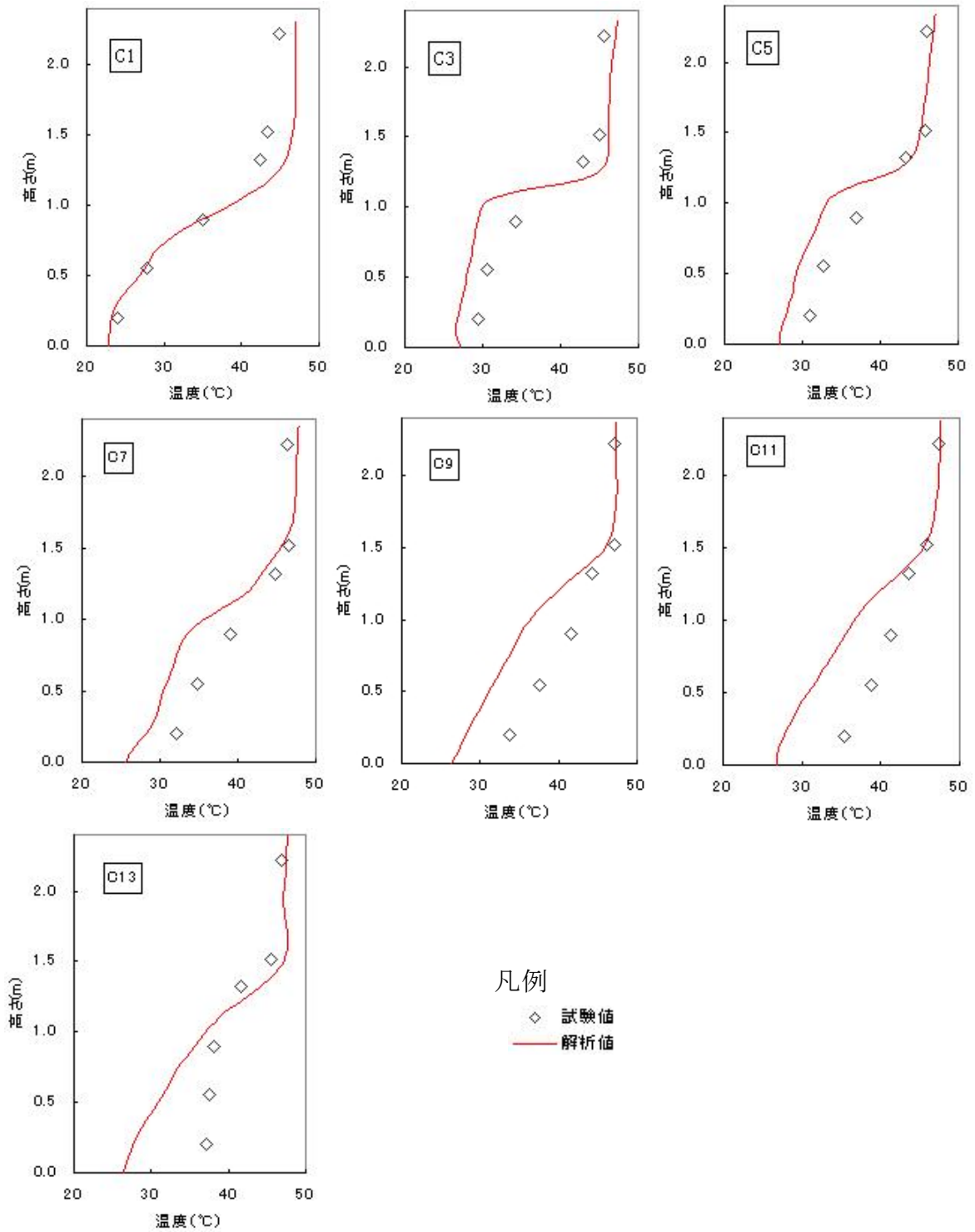
別添 1 - 9 図 妥当性確認解析の全体モデル



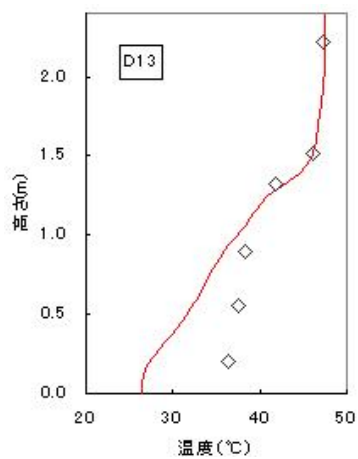
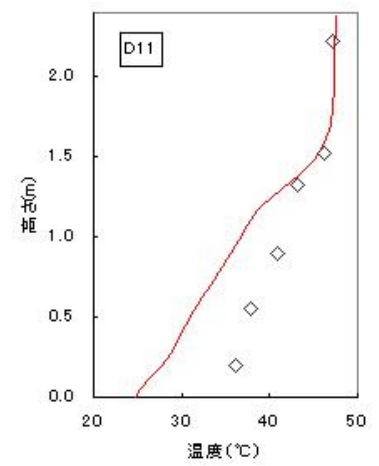
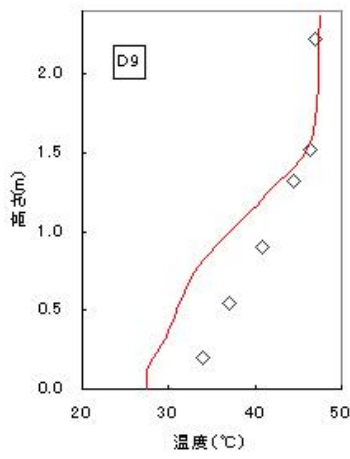
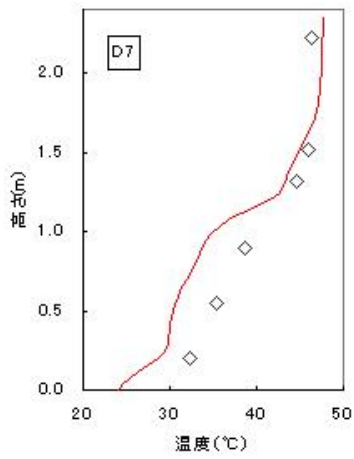
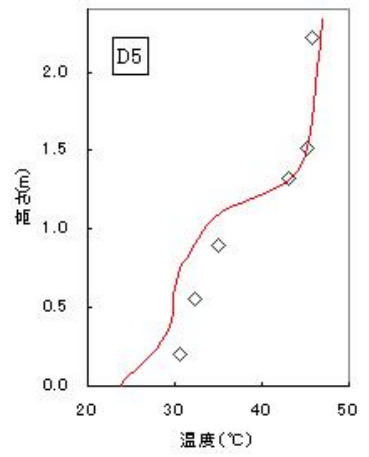
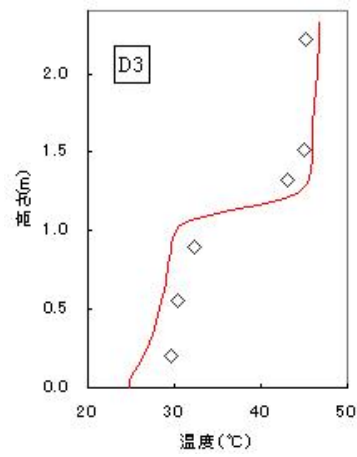
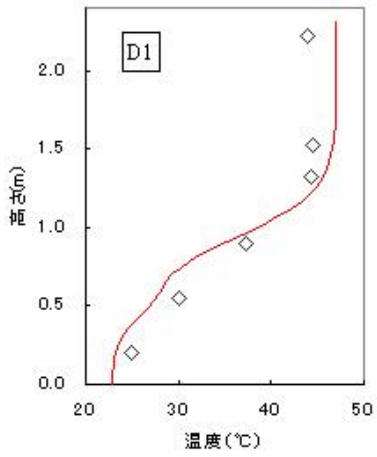
別添 1 - 10 図 建屋内温度分布比較位置



別添 1 - 11 図 建屋内速度分布比較位置

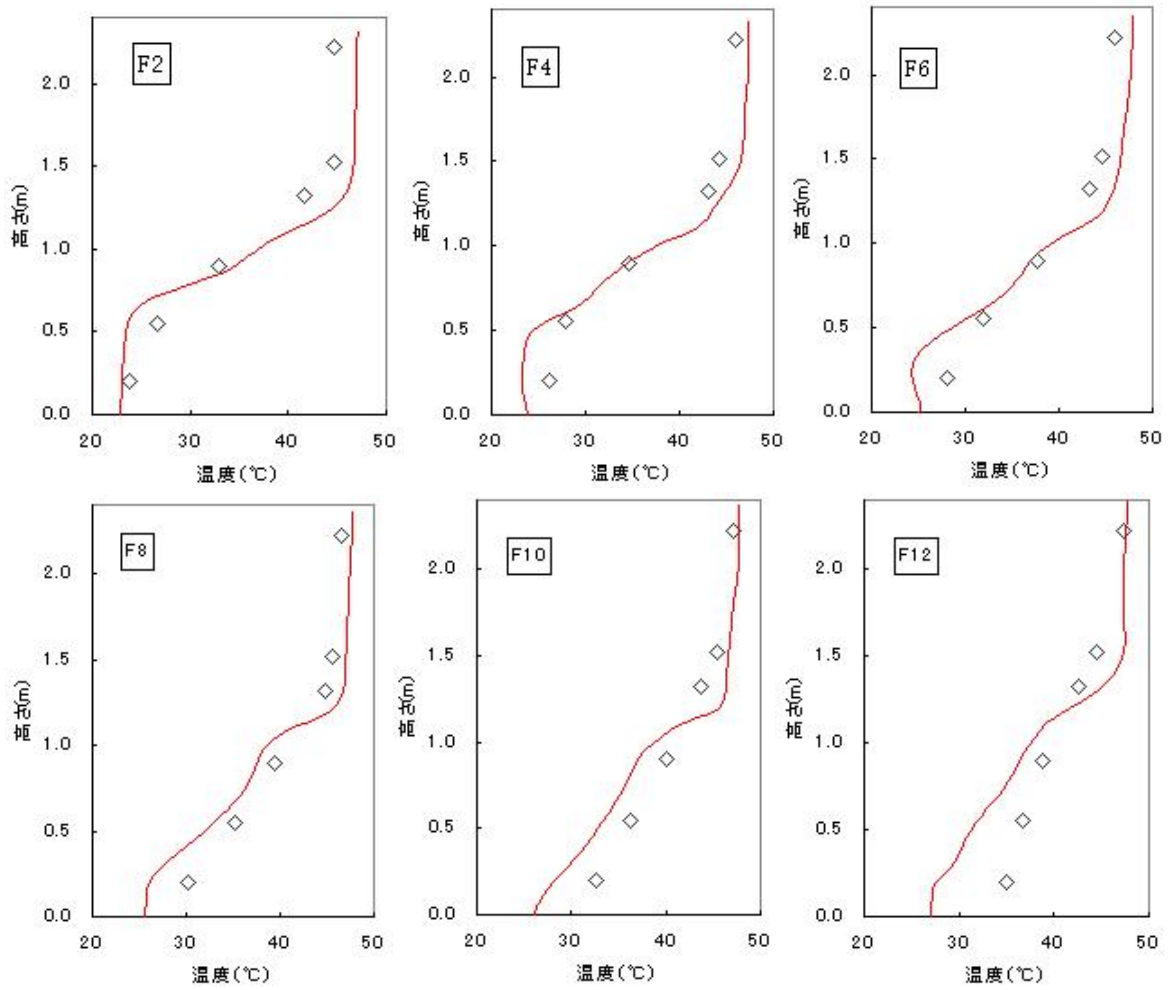


別添 1 - 12 図 建屋内温度分布比較 (その 1)



凡例
 ◇ 試験値
 — 解析値

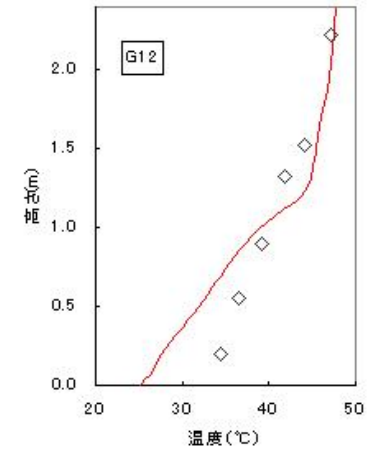
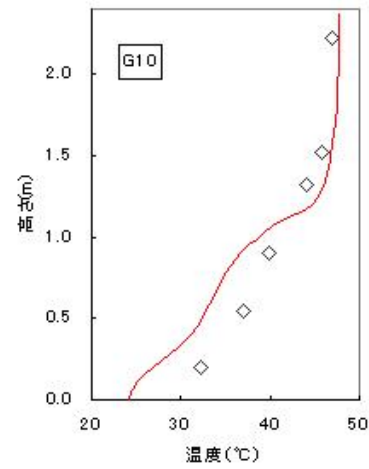
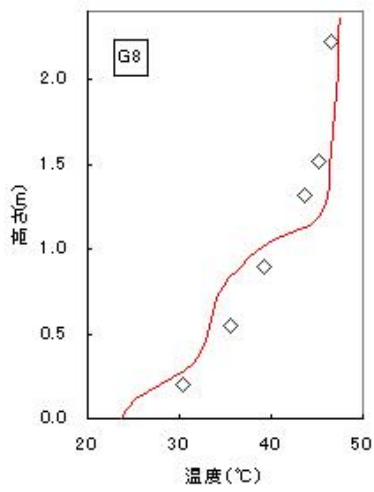
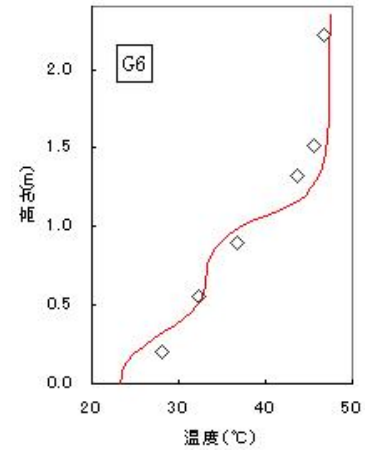
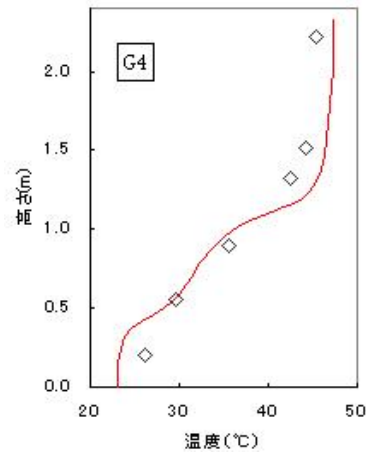
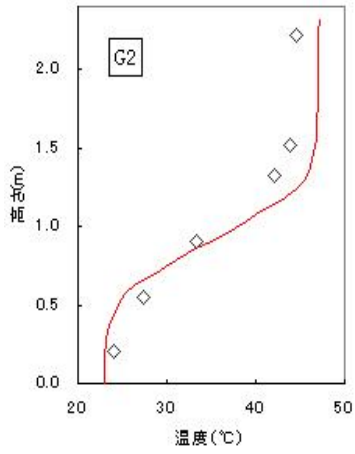
別添 1 - 13 図 建屋内温度分布 (その 2)



凡例

- ◇ 試験値
- 解析値

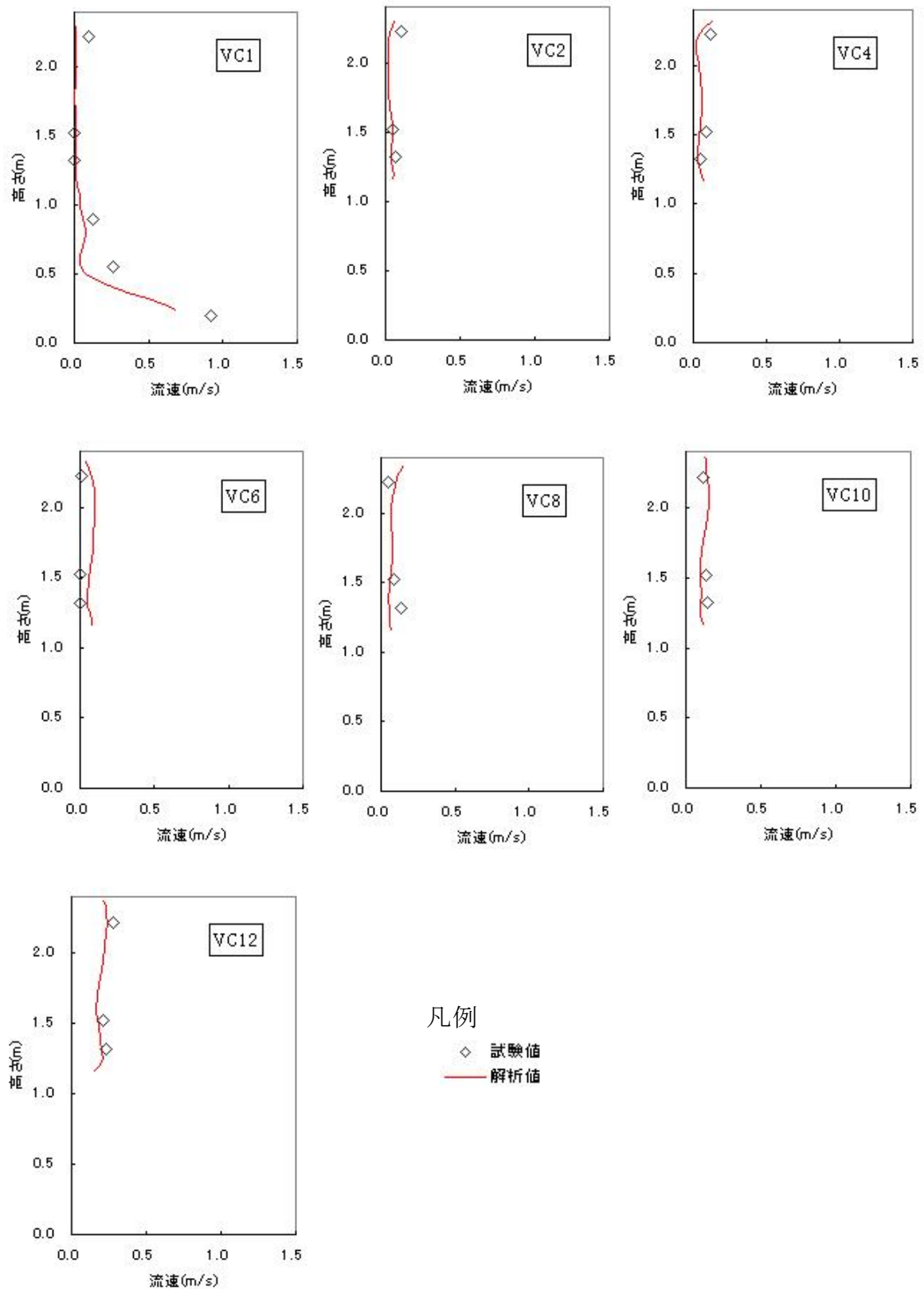
別添 1-14 図 建屋内温度分布 (その 3)



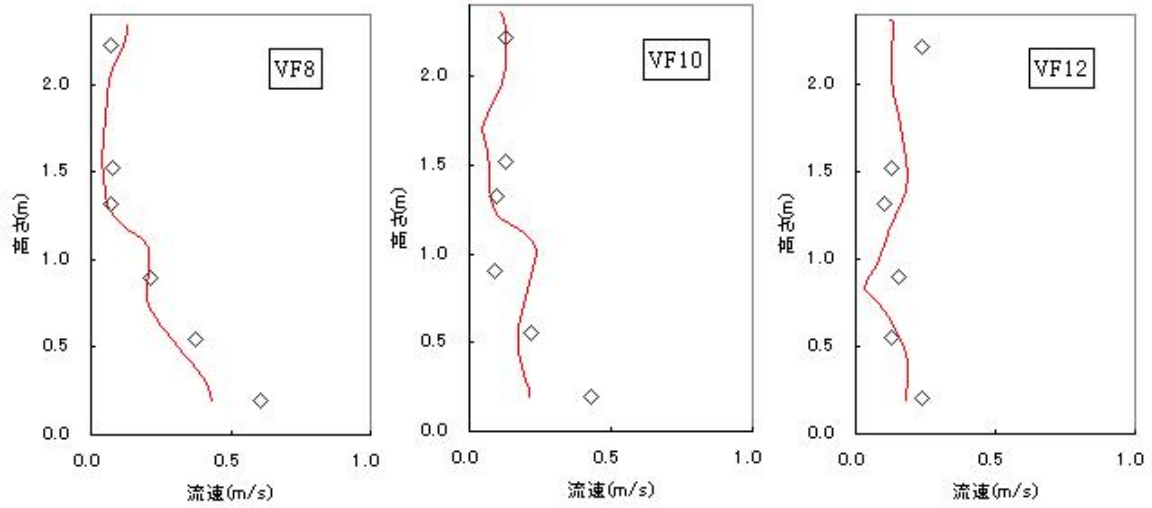
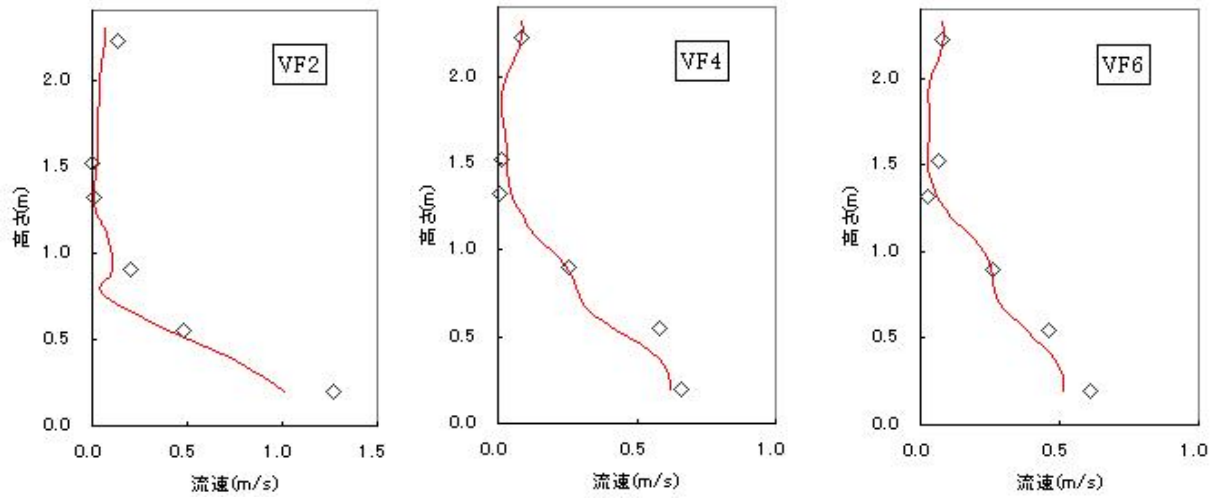
凡例

- ◇ 試験値
- 解析値

別添 1-15 図 建屋内温度分布 (その 4)



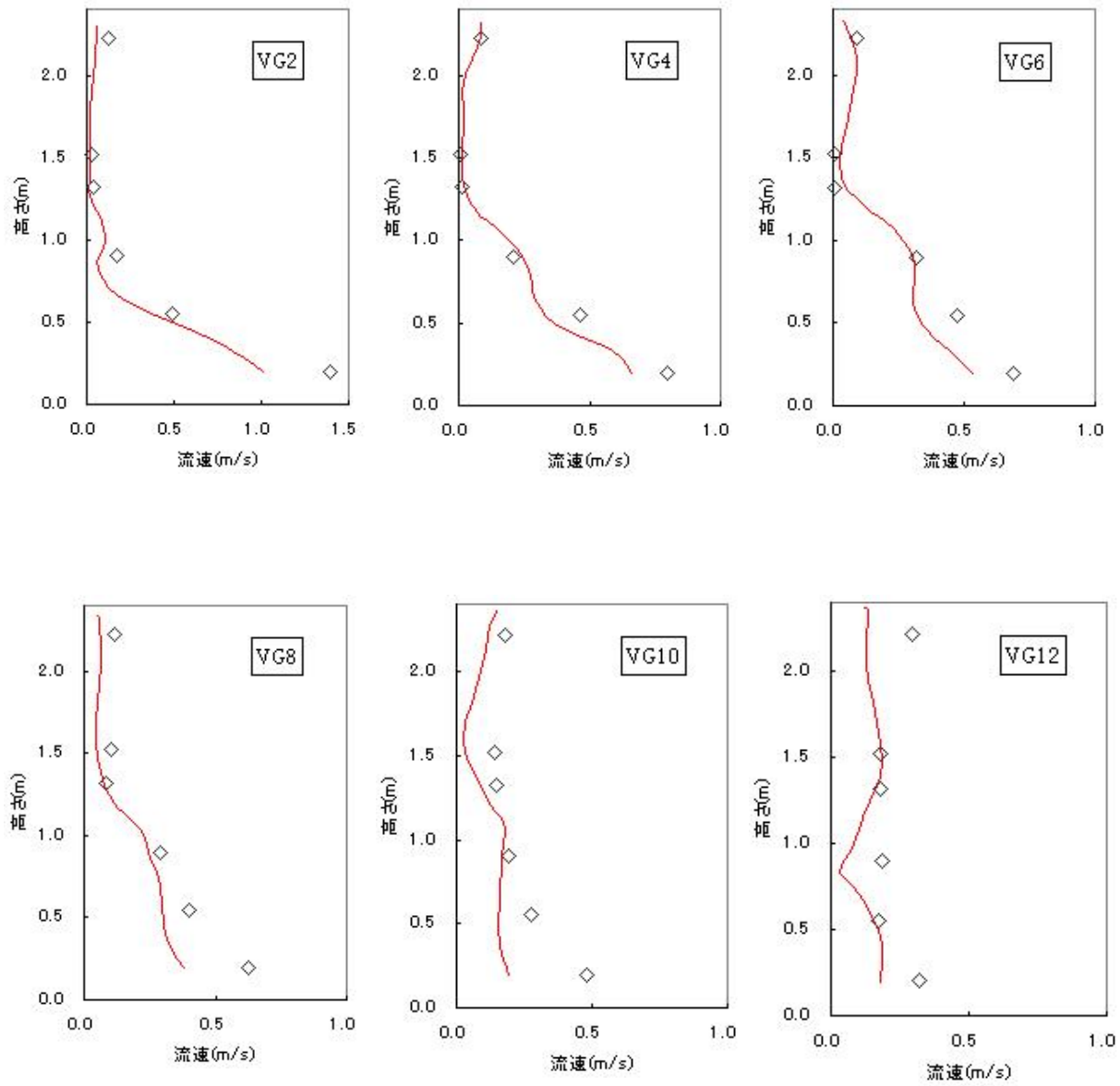
別添 1 - 16 図 建屋内速度分布比較 (その 1)



凡例

- ◇ 試験値
- 解析値

別添 1-17 図 建屋内速度分布比較 (その 2)



凡例

- ◇ 試験値
- 解析値

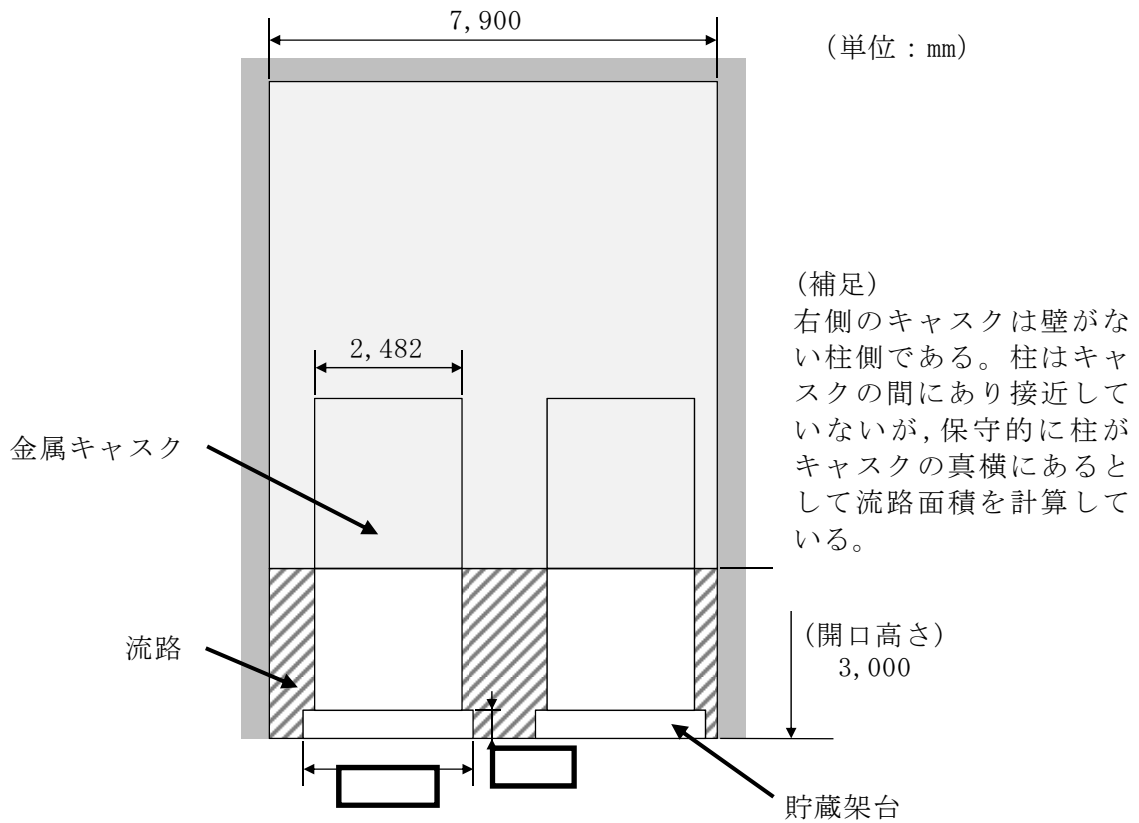
別添 1 - 18 図 建屋内速度分布比較 (その 3)

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)における「①管群 (貯蔵部)」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"/> × 2 = <input type="text"/> mm ²
流路の金属キャスクの投影面積 :	$2,482 \times (3,000 - \text{}) \times 2 = \text{}$ 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 (①管群 (貯蔵部)) の流路面積

(補足) FLUENT 検証における模擬キャスクのふく射の考慮について

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、模擬キャスクのふく射を低減していることから、解析コードの検証解析では、ふく射を考慮しない条件とした。

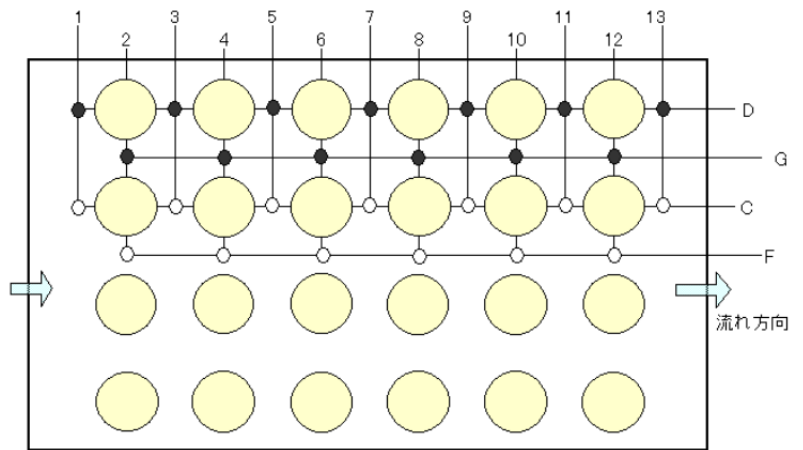
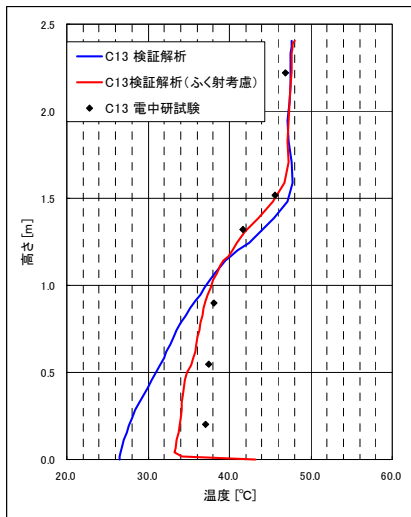
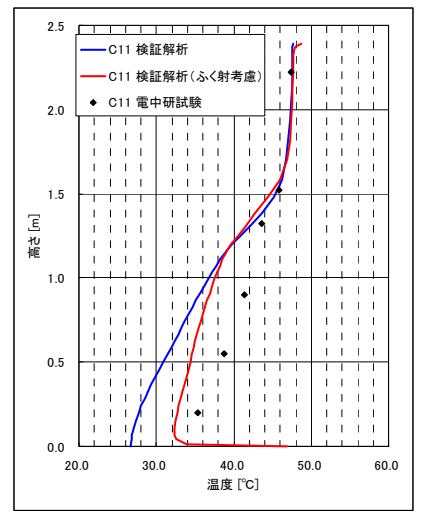
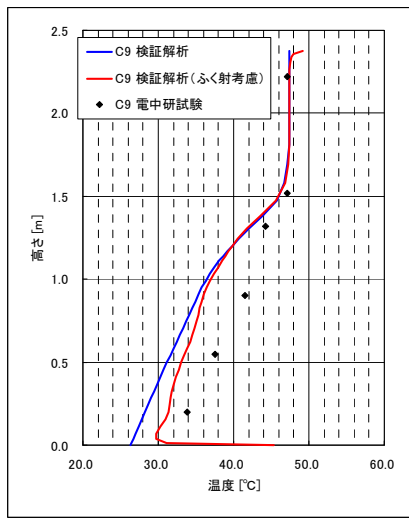
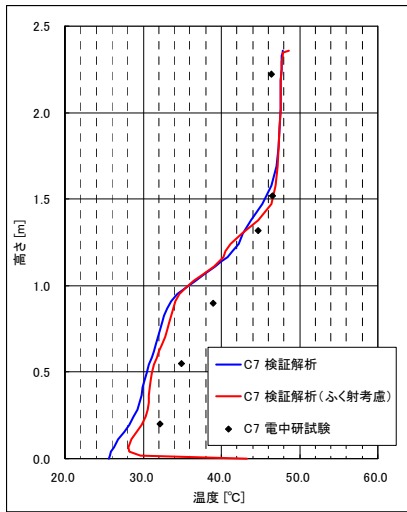
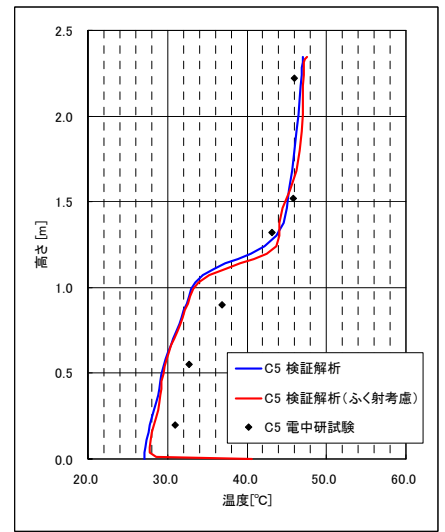
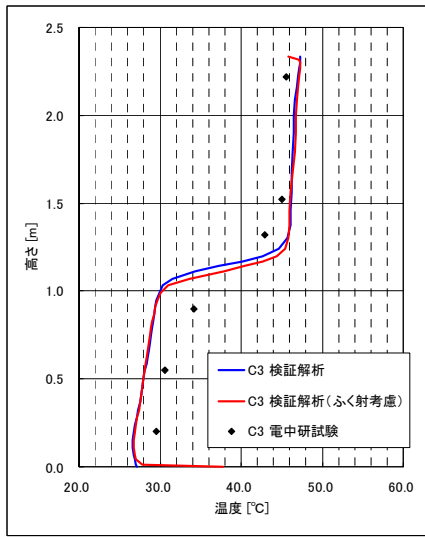
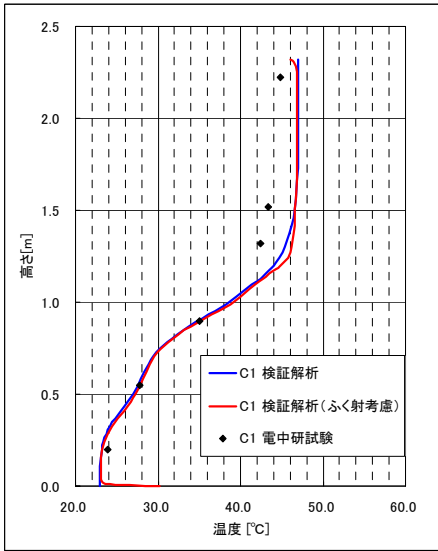
検証解析では、ふく射を考慮していないので、伝熱経路が模擬キャスクから空気への伝熱となり、あたためられた空気が天井面近傍へと上昇していく。その結果、天井面近傍は温度が高く、床面近傍は温度が低くなっている。

現実には、模擬キャスクのふく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。ふく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。

ふく射を考慮した検証解析でも、ふく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。ふく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。

建屋の除熱解析で、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、ふく射を考慮した条件で解析している。ふく射を考慮しても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。

別添 1 - 12 図をベースに比較した結果を、参考として添付 2 - 1 図に示す。



＜建屋内温度分布測定位置＞
 ※C-1, 3, 5, 7, 9, 11, 13 でのふく射有無解析結果を比較

添付 2-1 図 建屋内温度分布比較

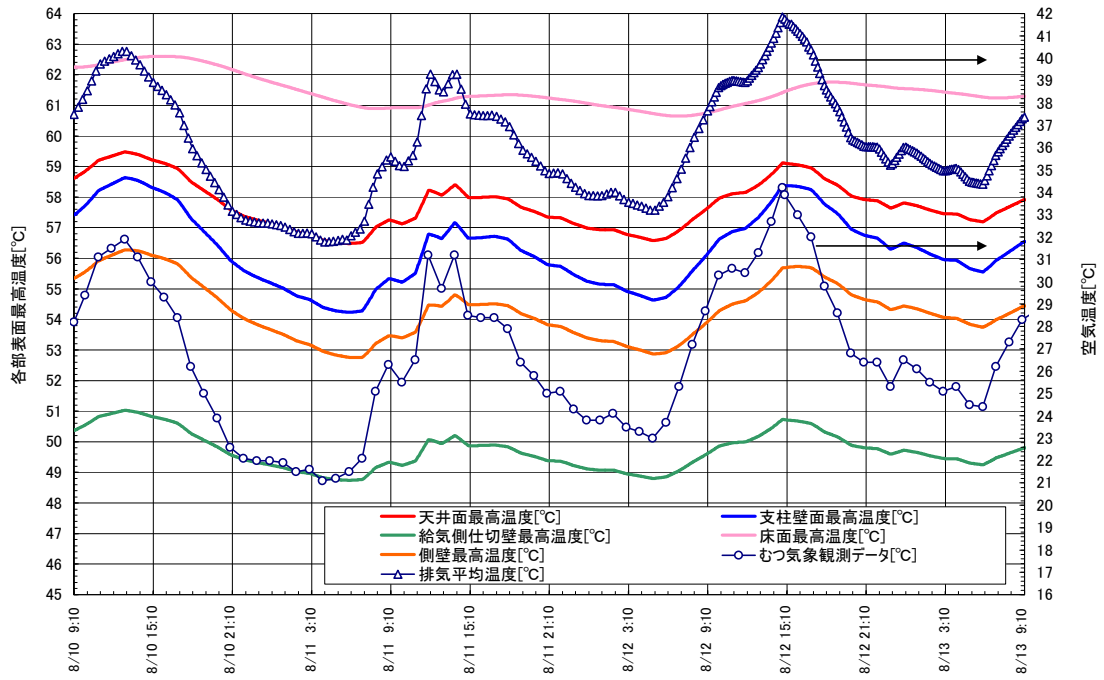
(補足) 貯蔵建屋内の定常な空気の流れを想定した三次元熱流動解析について

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

貯蔵建屋の除熱解析では、設計給気温度を 29.5℃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 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 %）を用いている。1994 年以降 2016 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、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

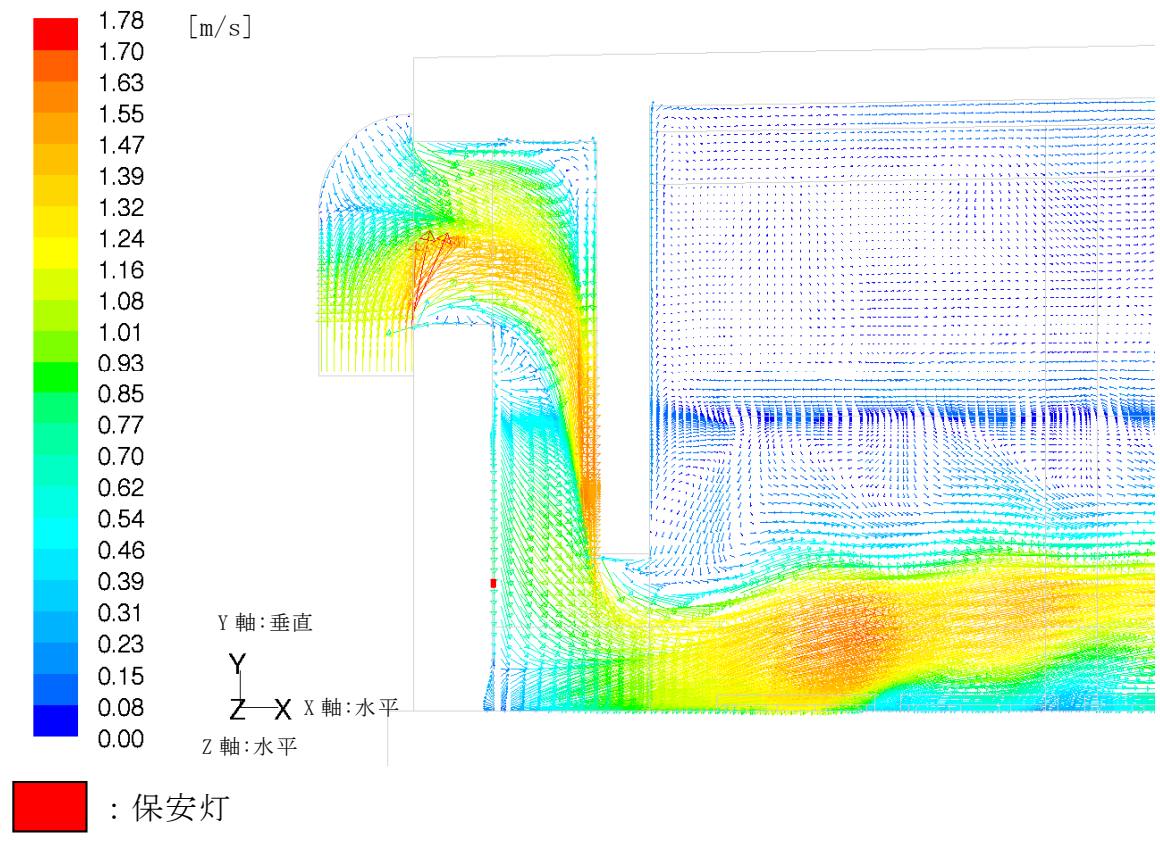
給気部流路の外壁に取り付けられている保安灯は、流路断面積 14.8m²(2.0m×7.4m)に対して 0.0961m²(77mm×1248mm)、比率として 0.65%であり、流路断面積に占める割合は小さい。過去に実施した三次元熱流動解析結果の流れ場(別添 3 - 1 図)からも、保安灯のサイズ、設置位置は貯蔵区画に流入する給気流れに大きな影響は与えないと考えられる。また、一次元計算において、壁に取り付けられている保安灯の消費電力が保守的に 100%熱に変わるものとして考慮しても、影響がないことを確認している。

(3) その他

受入れ区域の状況についても評価状況を添付にて示す。一次元熱計算における受入れ区域の排気温度は 39.9℃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℃



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 3 - 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 39.9℃であり、基準温度の 45℃以下であることを確認した。

添付 3 - 1 表 受入れ区域の排気温度

評価領域	給気温度	排気温度	基準温度
受入れ区域	29.5℃	39.9℃	45℃

[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 3 - 1 図）。また、流路設定及び考慮する圧力損失要素を添付 3 - 1 図に示す。

② 金属キャスクの発熱量

評価領域における金属キャスクの総発熱量として 12.1kW×2 基を想定。

③ 照明設備の発熱量

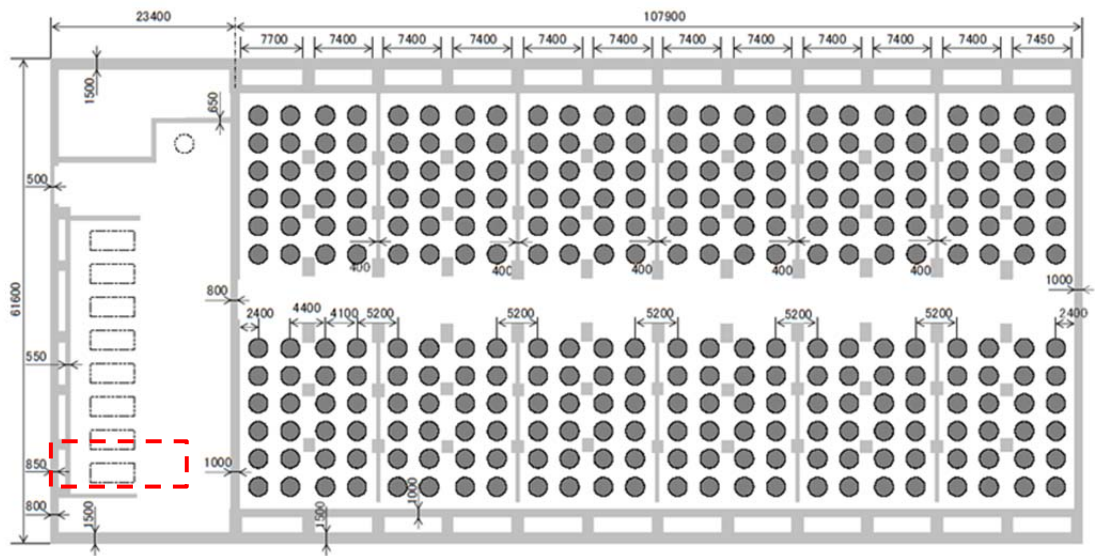
評価領域における照明設備の発熱量として 1.4kW を想定。

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、BWR 中型キャスクの上部および下部に円柱形状の緩衝体を想定。

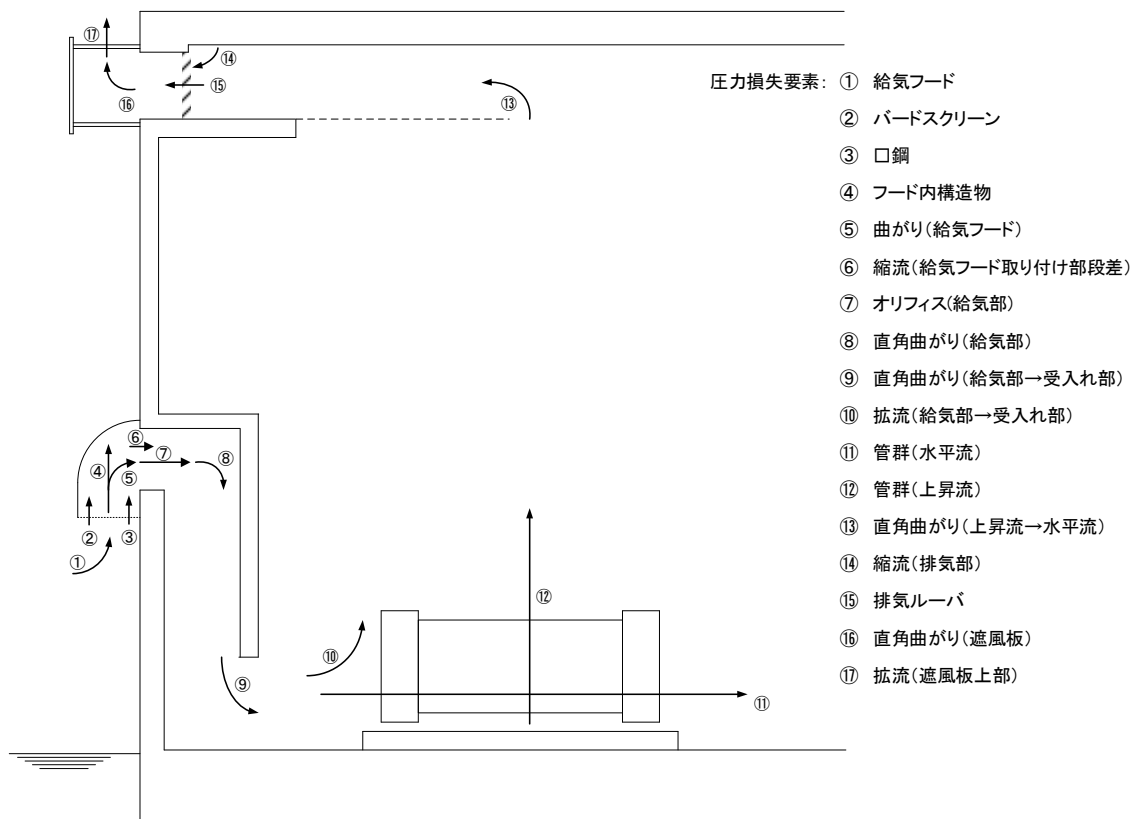
⑤ 設計給気温度

29.5℃一定とした。むつ特別地域気象観測所の 2004 年～2013 年の夏季（6 月から 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%）。



：評価領域

添付 3-1 図 受入れ区域の評価領域



添付 3-2 図 考慮する圧力損失要素

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

<目 次>

1. 設計方針
2. 人の不法な侵入等の防止措置
3. 爆発性又は易燃性を有する物件等の持ち込みの防止措置
4. 特定核燃料物質の不法な移動及び持ち出しの防止措置
5. 不正アクセス行為の防止措置

1. 設計方針

使用済燃料貯蔵施設への人の不法な侵入，郵便物等による施設外からの爆発物や有害物質の持込み及び不正アクセス行為（サイバーテロを含む。）に対し，これを防護するため，核物質防護対策として以下の措置を講じた設計とする。

(1) 人の不法な侵入の防止措置

- a. 区域を設定し，区域の境界を物理的障壁により区画し，侵入防止及び出入管理を行うことができる設計とする。
- b. 探知施設を設け，警報，映像監視等，集中監視する設計とする。
- c. 外部との通信連絡設備を設け，関係機関等との通信連絡を行うことができる設計とする。
- d. 防護された区域内においても，施錠管理により，使用済燃料貯蔵施設及び特定核燃料物質の防護のために必要な設備又は装置の操作に係る情報システムへの不法な侵入を防止する設計とする。

(2) 爆発性又は易燃性を有する物件等の持込みの防止措置

- a. 区域を設定し，区域の境界を物理的障壁により区画し，侵入防止及び出入管理を行うことができる設計とする。
- b. 区域の出入口において，使用済燃料貯蔵施設に不正に爆発性又は易燃性を有する物件その他人に危害を与え，又は他の物件を損傷するおそれがある物件の持込み（郵便物等による施設外からの爆発物及び有害物質の持込みを含む。）が行われないように物品の持込み点検を行うことができる設計とする。

(3) 特定核燃料物質の不法な移動及び持ち出しの防止措置

- a. 区域を設定し，区域の境界を物理的障壁により区画し，侵入防止及び出入管理を行うことができる設計とする。
- b. 探知施設を設け，警報，映像監視等，集中監視する設計とする。

(4) 不正アクセス行為（サイバーテロを含む。）の防止措置

- a. 使用済燃料貯蔵施設及び特定核燃料物質の防護のために必要な設備又は装置の操作に係る情報システムについては，電気通信回路を通じた当該情報システムに対する外部からのアクセスを遮断する設計とする。

2. 人の不法な侵入等の防止措置（第1図参照）

使用済燃料貯蔵施設への人の不法な侵入を未然に防止するため使用済燃料貯蔵施設周辺に柵を多重に設け、その内側に堅固な障壁の使用済燃料貯蔵建屋を配置する。柵は自立式の立入制限区域境界柵及び周辺防護区域境界柵で構成する。

立入制限区域境界柵はコンクリート製又は鋼製、周辺防護区域境界柵は鋼製で人が容易に侵入できない高さ及び構造とする。

使用済燃料貯蔵施設への常時立入者及び常時立入者以外の者に対して、身分及び立入りの必要性を確認のうえ立入りを認めたことを証明するIDカード等を発行し、これを立入りの際に所持させ、立入りの間は、常に胸部等の容易に確認できる部位に取り付けさせる。



3. 爆発性又は易燃性を有する物件等の持ち込みの防止措置

使用済燃料貯蔵施設に不正に爆発性又は易燃性を有する物件その他人に危害を加え、又は施設等に対する妨害破壊行為の用に供され得る物件が持ち込まれることを防止するため、立入制限区域境界において車両検査及び手荷物検査を実施する。



業務用の車両については、立入制限区域及び周辺防護区域に立ち入る車両について、必要性を確認のうえ立入りを認めたことを証明する証明書等を発行し、これを立入りの際に掲示させ、車両内外の検査を実施してから定められた場所に駐車させる。

4. 特定核燃料物質の不法な移動及び持ち出しの防止措置

使用済燃料貯蔵施設で貯蔵する特定核燃料物質を収納した金属キャスクの不法な移動及び持ち出し防止を以下のように実施する。

4.1 金属キャスクを移動する際の対応

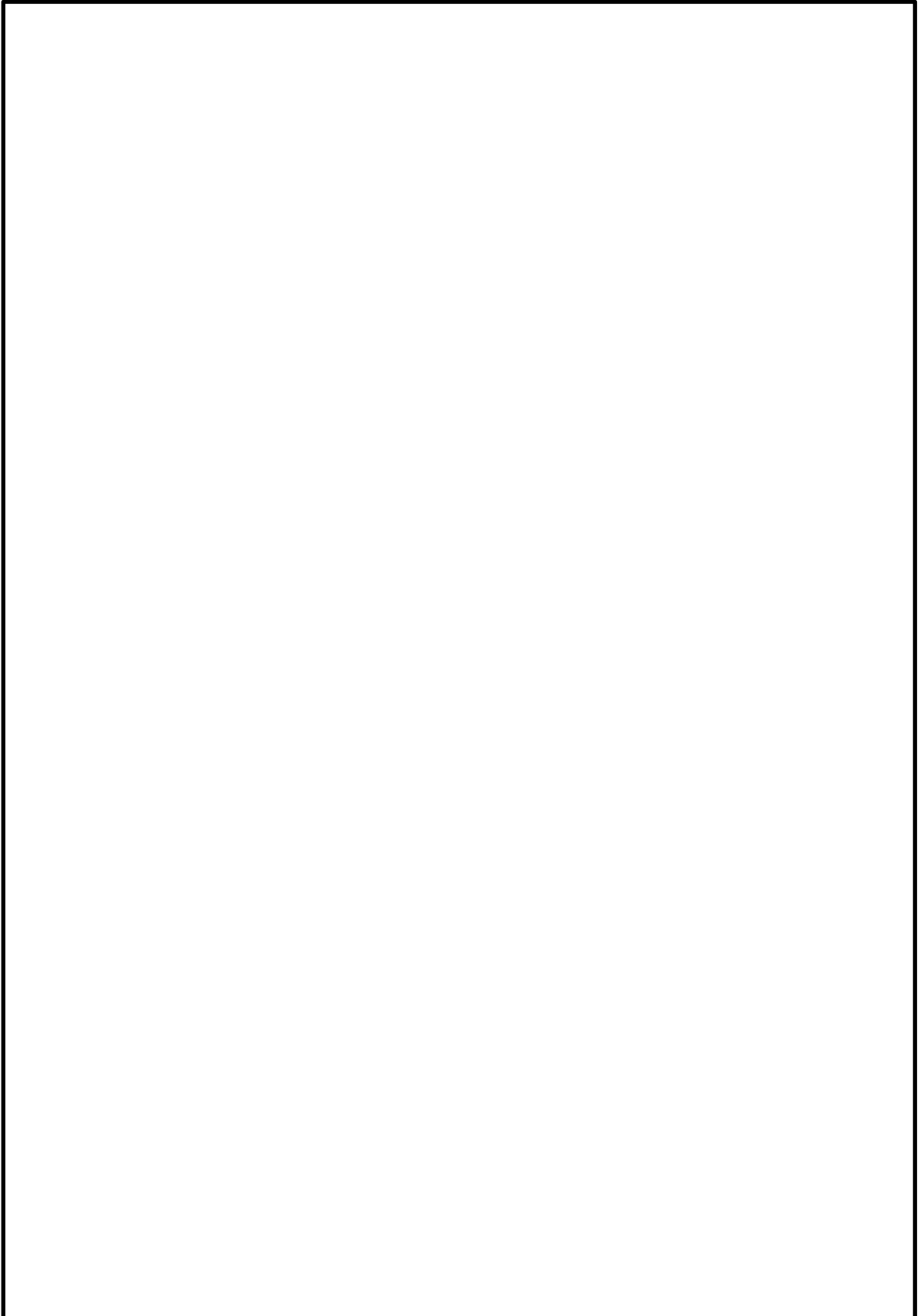
A large rectangular box with a black border, completely empty, indicating that the content for this section has been redacted.

4.2 外部の人による金属キャスクの不法な移動への対応

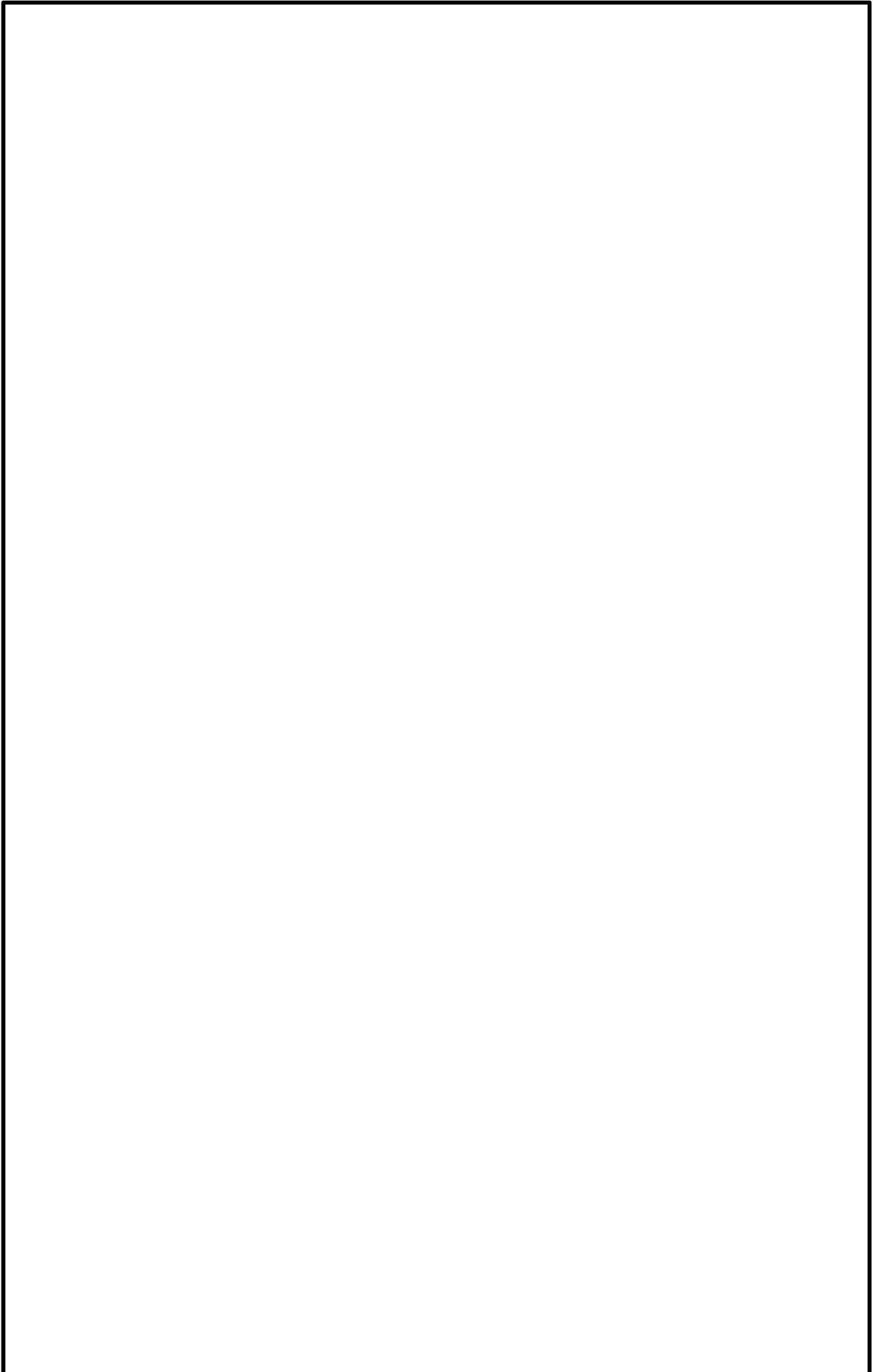
A large rectangular box with a black border, completely empty, indicating that the content for this section has been redacted.

4.3 敷地内の人による金属カスクの不法な移動への対応

(1) 人の出入管理



(2) 車両及び持込物品の出入管理



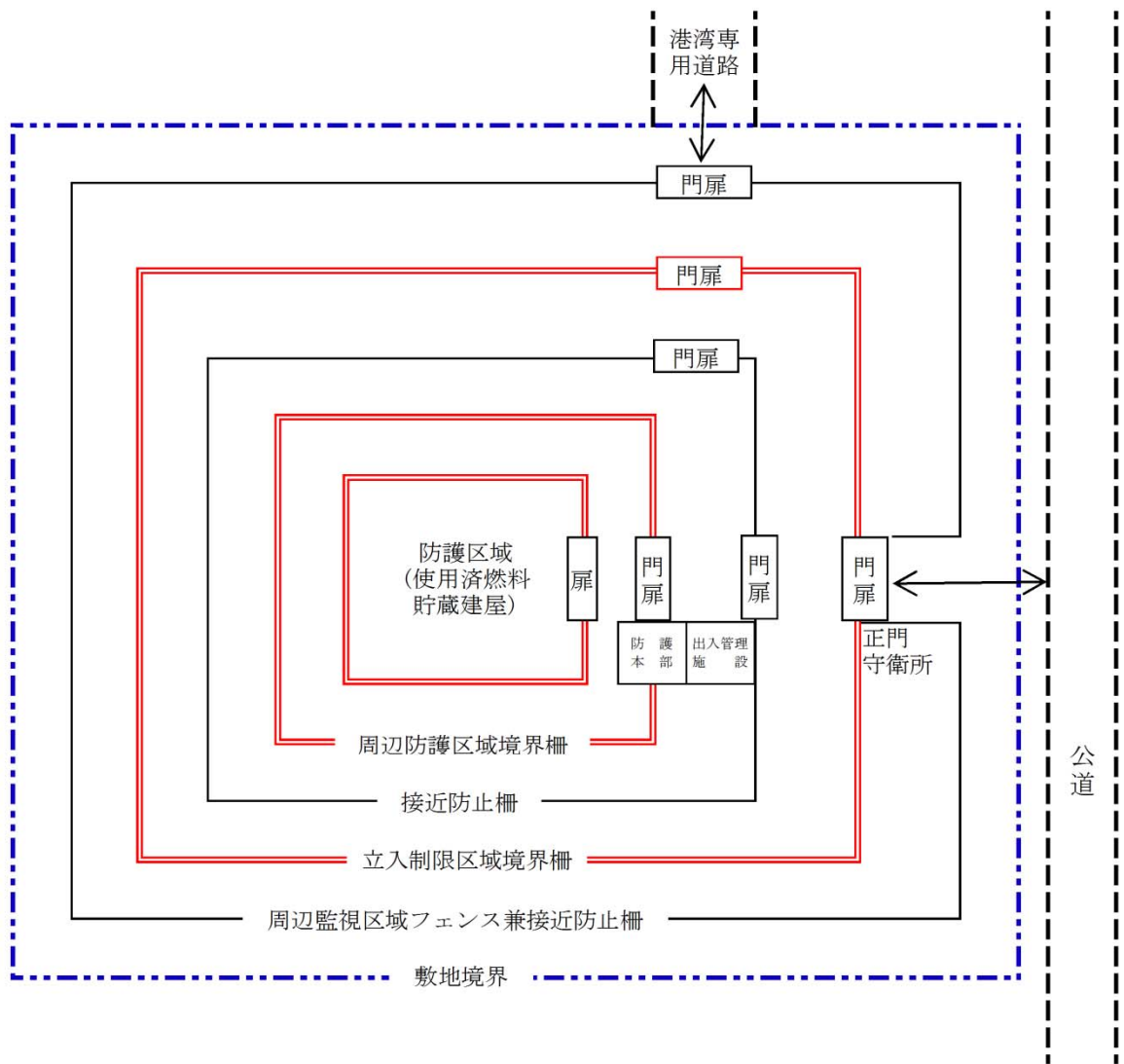


(3) 作業管理及び監視等

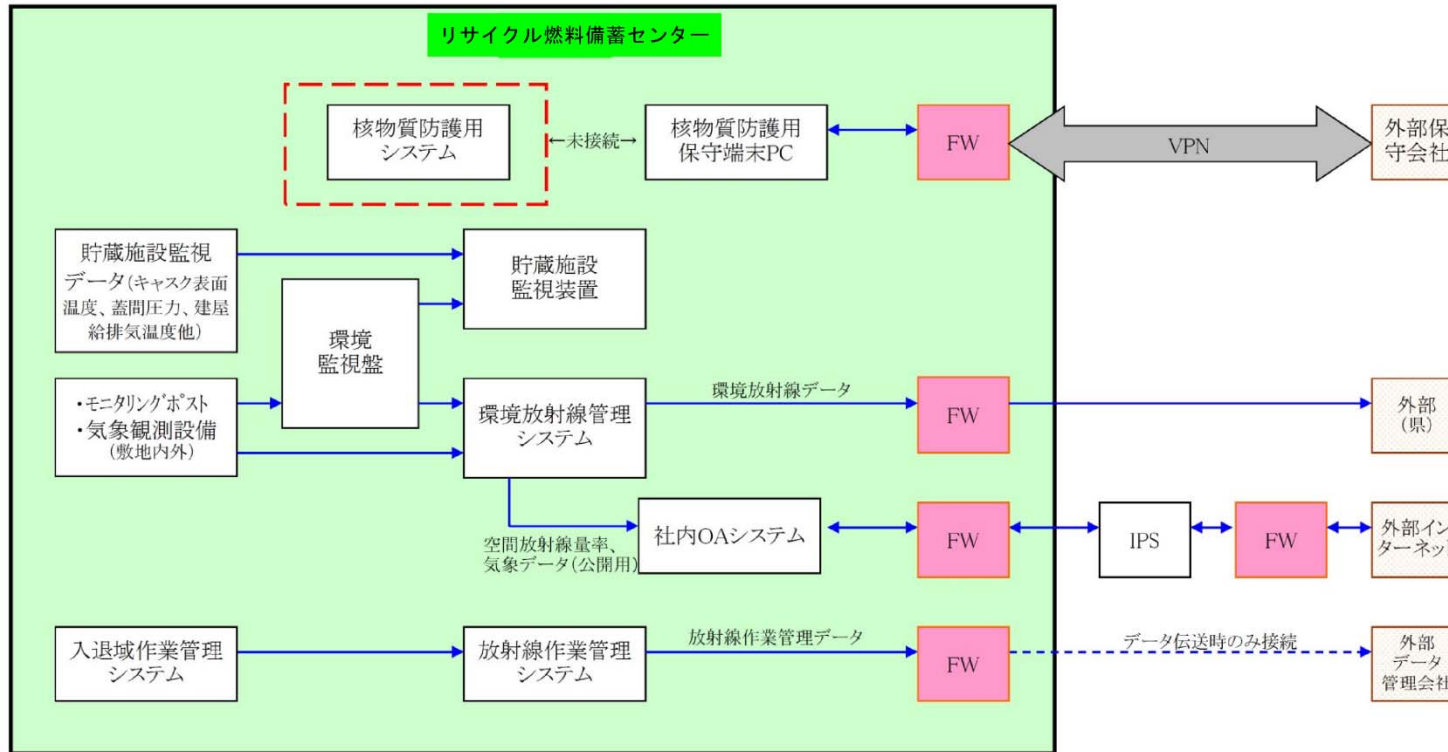


5. 不正アクセス行為の防止措置（第2図参照）





第1図 不法侵入等防止設備構成概念図



凡例:

物理的に遮断
(接続なし)

FW:Fire Wall

VPN:Virtual Protection Network(専用回線)

IPS:intrusion Protection System(内部ネットワーク防御システム)

第2図 情報システム防護概念図

第 13 条 安全機能を有する施設

<目 次>

1. 設計方針
2. 施設設計

(別 添)

- 別添 1 金属キャスクの保守及び修理
- 別添 2 金属キャスクの検査
- 別添 3 受入れ区域天井クレーン及び搬送台車の点検
- 別添 4 金属キャスクの受入れから貯蔵までの工程

1. 設計方針

- (1) 使用済燃料貯蔵施設の安全機能を有する施設（基本的安全機能を確保する上で必要な施設，その他の安全機能を有する施設）は，本施設以外の原子力施設との間で共用するものはない。

なお，安全機能を有する施設（基本的安全機能を確保する上で必要な施設，その他の安全機能を有する施設）は以下のとおり。

基本的安全機能を確保する上で必要な施設は，金属キャスク，貯蔵架台，使用済燃料貯蔵建屋，受入れ区域天井クレーン，搬送台車をいう。

その他の安全機能を有する施設は，仮置架台，たて起こし架台，圧縮空気供給設備，検査架台，計測制御系統施設，放射性廃棄物の廃棄施設，放射線管理施設，電気設備，通信連絡設備，消防用設備，不法侵入等防止設備をいう。

- (2) 使用済燃料貯蔵施設のその他の安全機能を有する施設に属する液体廃棄物と固体廃棄物の廃棄施設（廃棄物貯蔵室）は共用している。廃棄物貯蔵室は，汚染の拡大を防止するため使用済燃料貯蔵建屋受入れ区域に設け，内部の床面及び壁面の一部についてエポキシ樹脂系塗料で塗装を施す。

なお，液体廃棄物の発生はないが，万一発生したとしても微量であり，固体廃棄物と別のドラム缶に入れ保管廃棄することで共用による安全性は損なわない。

- (3) 金属キャスクの設計，材料の選定，製作，工事及び検査は，原則として国内法規に基づく適切な規格及び基準によるものとする。また，十分な使用実績があり信頼性の高い国外の規格，基準等に準拠する。

- (4) 金属キャスクは，設計貯蔵期間を通じて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設計とする。また，金属キャスクを本施設外へ搬出するために必要な確認ができる設計とする。

- (5) 金属キャスク取扱設備は，受入れ区域天井クレーン及び搬送台車であり，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，試験，保守及び修理ができる設計とする。

2. 施設設計

- (1) 基本的安全機能を確保する上で必要な施設及びその他の安全機能を有する施設について

事業許可基準解釈第9条の2において、「基本的安全機能を確保する上で必要な施設」及び「その他の安全機能を有する施設」は、以下のように定義されている。

事業許可基準解釈第9条

2 第9条第2項に規定する「地震の発生によって生ずるおそれがある使用済燃料貯蔵施設の安全機能の喪失に起因する放射線による公衆への影響の程度」とは、地震により発生するおそれがある使用済燃料貯蔵施設の安全機能の喪失（地震に伴って発生するおそれがある津波及び周辺斜面の崩壊等による安全機能の喪失を含む。）及びそれに続く放射線による公衆への影響を防止する観点から、各施設の安全機能が喪失した場合の影響の相対的な程度をいう。使用済燃料貯蔵施設は、その程度に応じて、以下のよう

一 基本的安全機能を確保する上で必要な施設

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

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

二 その他の安全機能を有する施設

安全機能を有する施設のうち、上記一に属する施設以外の施設をいう。

上記の各々の定義に基づいて使用済燃料貯蔵施設の安全機能について整理すると第1表のとおり、「安全機能を有する施設」は事業許可基準規則の適用を受ける施設であり、「基本的安全機能を確保する上で必要な施設」に該当する施設は以下のとおりである。

- a. 金属キャスク
- b. 貯蔵架台
- c. 使用済燃料貯蔵建屋
- d. 受入れ区域天井クレーン
- e. 搬送台車

(2) 安全機能を確保するための設計

使用済燃料貯蔵施設は、本施設以外の原子力施設との間で共用するものはない。また、使用済燃料貯蔵施設は、本施設内の安全機能を有する施設に属する液体廃棄物と固体廃棄物の廃棄施設（廃棄物貯蔵室）を共用している。廃棄物貯蔵室は、汚染の拡大を防止するため使用済燃料貯蔵建屋受入れ区域に設け、内部の床面及び壁面の一部についてエポキシ樹脂系塗料で塗装を施す。

なお、液体廃棄物の発生はないが、万一発生したとしても微量であり、固体廃棄物と別のドラム缶に入れ保管廃棄することで共用による安全性は損なわない。

使用済燃料貯蔵施設は、設計貯蔵期間を通じて、当該施設の安全性を確保するために必要な施設・機器の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設計としている。

具体的には、以下のとおりである。

a. 金属キャスク

貯蔵前の金属キャスク及び貯蔵後搬出前の金属キャスクの基本的安全機能が維持されていることを確認するための外観検査、線量当量率検査等並びに必要な保守及び修理を行えるよう、受入れ区域に検査架台を設ける。（別添1参照）

検査架台の構造図を第1図に示す。検査架台は、たて置き状態の金

属キャスクの側面及び蓋部にアクセスでき、金属キャスクの種類に応じ、作業床が昇降する構造である。

また、貯蔵時の金属キャスクの基本的安全機能が維持されていることを確認するための外観検査等を行えるよう配置する。機器配置図を第2図に示す。

使用済燃料貯蔵施設において、「使用済燃料中間貯蔵施設用金属キャスクの安全設計及び検査基準：2010；原子力学会標準」を参考に計画している金属キャスクの基本的安全機能が維持されていることの検査項目を第2表、第3表に示す。（別添2参照）

b. 貯蔵架台

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に金属キャスク貯蔵時に貯蔵架台の外観検査が行えるよう配置する。

c. 使用済燃料貯蔵建屋

使用済燃料貯蔵建屋は、建屋自体が担っている基本的安全機能のうち遮蔽機能及び除熱機能を損なうことがないように建屋各部へのアクセスが可能で保守及び修理が行える設計としている。

d. 受入れ区域天井クレーン

金属キャスク取扱設備である受入れ区域天井クレーンは、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に、必要な検査及び試験並びに保守及び修理ができる設計としている。具体的には、クレーン等安全規則により義務づけられている年次点検、月例点検、作業前点検が支障なく出来るよう保守性を考慮した設計としている。（別添3参照）

受入れ区域天井クレーンは、金属キャスクを吊った状態で仮置き中の金属キャスク上を通過できないようインターロックを設けるとともに、上げ高さを制限する。（別添4参照）

e. 搬送台車

金属キャスク取扱設備である搬送台車は、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に、必要な検査及び試験並びに保守及び修理ができる設計としている。具体的には、年次点検、作業

前点検が支障なく出来るよう保守性を考慮した設計としている。(別添
3 参照)

第1表 使用済燃料貯蔵施設の設備・機器の安全機能を有する施設について（1/4）

設備・機器名称	事業許可申請本文*1	事業許可申請添付*2	設備・機器の持つ機能	安全機能を有する施設 (事業許可基準規則 第13条, 第2条 「安全機能」の定義)		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条の2)		事業許可基準規則に対する適合性															
				「安全機能」とは、使用済燃料貯蔵施設の安全性を確保するために必要な機能をいう。		基本的安全機能を有する施設及びその機能喪失により基本的安全機能を損なうおそれがある施設をいい、少なくとも次の施設を含む。 ①使用済燃料貯蔵設備本体（金属キャスク等） ②使用済燃料の受入れ施設（その機能喪失により、金属キャスクが有する基本的安全機能を損なうおそれがないことが明らかであるものを除く）		第三条 (臨界防止)	第四条 (遮蔽)	第五条 (閉じ込め)	第六条 (除熱)	第七条 (火災等)	第九条 (地震)	第十一条 (外部衝撃)	第十二条 (不法侵入)	第十三条 (安全機能)	第十五条 (キャスク)	第十六条 (受入施設)	第十七条 (計測制御)	第十八条 (廃棄施設)	第十九条 (放射線管理)	第二十条 (予備電源)	第二十一条 (通信設備等)
				評価	理由	評価	理由																
使用済燃料貯蔵設備本体	金属キャスク	○	○	・臨界防止機能（使用済燃料が臨界に達することを防止する機能） ・遮蔽機能（公衆又は従事者に放射線障害を及ぼすことのないよう、金属キャスクに封入された使用済燃料等からの放射線を遮蔽する機能） ・閉じ込め機能（公衆又は従事者に放射線障害を及ぼすことのないよう、金属キャスクに封入された使用済燃料等を閉じ込める機能） ・除熱機能（使用済燃料の健全性及び金属キャスクを構成する部材の健全性を維持するよう、金属キャスクに封入された使用済燃料等の崩壊熱を除去する機能）	○	・基本的安全機能を有する施設であり、使用済燃料貯蔵施設の安全性を確保するために必要な機能を有する。	○	・基本的安全機能を有する施設であることから「基本的安全機能を確保する上で必要な施設」に該当する。	・臨界防止	・事業所周辺の線量低減 ・放射線障害防止	・閉じ込め	・崩壊熱除去	・火災発生防止	・耐震	・自然現象対応	—	・検査・試験、保守・修理	・金属キャスク	—	—	—	—	—
	貯蔵架台	○	○	・金属キャスクを床面に固定するための支持構造物としての機能	○	・貯蔵時等の金属キャスクの転倒防止のための支持構造物であり、使用済燃料貯蔵施設の安全性を確保するために必要な機能を有する。	○	・貯蔵時等の金属キャスクの転倒防止機能を喪失することにより、金属キャスクの基本的安全機能を損なうおそれがあることから「基本的安全機能を確保する上で必要な施設」に該当する。	—	—	—	—	・火災発生防止	・耐震	・自然現象対応	—	・検査・試験、保守・修理	—	—	—	—	—	—
使用済燃料の受入施設	受入れ区域天井クレーン	○	○	・金属キャスクを吊り上げ、トレートラック、仮置架台及びたて起こし架台との間を移送をする機能	○	・使用済燃料の受入れ施設であり、金属キャスクの落下等を防止する機能を有しており、使用済燃料貯蔵施設の安全性を確保するために必要な機能を有する。	○	・使用済燃料の受入れ施設であり、金属キャスクの落下等を防止することにより、金属キャスクの基本的安全機能を損なうおそれがあることから「基本的安全機能を確保する上で必要な施設」に該当する。	—	—	—	—	・火災発生防止	・耐震	・自然現象対応	—	・検査・試験、保守・修理	—	・受入施設	—	—	—	—
	搬送台車	○	○	・貯蔵架台に固定された金属キャスクを受入れ区域と貯蔵区域との間を移送する機能	○	・使用済燃料の受入れ施設であり、金属キャスクの転倒等を防止する機能を有しており、使用済燃料貯蔵施設の安全性を確保するために必要な機能を有する。	○	・使用済燃料の受入れ施設であり、金属キャスクの転倒等の防止機能を喪失することにより、金属キャスクの基本的安全機能を損なうおそれがあることから「基本的安全機能を確保する上で必要な施設」に該当する。	—	—	—	—	・火災発生防止	・耐震	・自然現象対応	—	・検査・試験、保守・修理	—	・受入施設	—	—	—	—
	圧縮空気供給設備	○	○	・搬送台車等を駆動するための圧縮空気を供給する機能	○	・受入れ区域と貯蔵区域との間の金属キャスク移送時に搬送台車等の駆動用圧縮空気を供給するための施設であり、安全性を確保するために必要な機能を有する。	×	・受入れ区域と貯蔵区域との間の金属キャスク移送時に搬送台車等の駆動用圧縮空気を供給するための施設であり、圧縮空気供給設備が破損しても金属キャスクの基本的安全機能に影響を与えないように搬送台車等の設計を行っていること等により、当施設の機能喪失が基本的安全機能へ影響を及ぼすことはないことから、「基本的安全機能を確保する上で必要な施設」に該当しない。	—	—	—	—	・火災発生防止	・耐震	・自然現象対応	—	・検査・試験、保守・修理	—	・受入施設	—	—	—	—

凡例

*1：事業許可申請本文

○：主要な設備及び機器の種類に記載 △：使用済燃料貯蔵施設の位置、構造及び設備の説明に記載

*2：事業許可申請添付

○：設備の主要仕様に記載 △：主要設備の説明文に記載

第1表 使用済燃料貯蔵施設の設備・機器の安全機能を有する施設について（4/4）

設備・機器名称	事業許可申請本文*1	事業許可申請添付*2	設備・機器の持つ機能	安全機能を有する施設 (事業許可基準規則 第13条, 第2条 「安全機能」の定義)		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条の2)		事業許可基準規則に対する適合性																		
				評価	理由	評価	理由	第三条 (臨界防止)	第四条 (遮蔽)	第五条 (閉じ込め)	第六条 (除熱)	第七条 (火災等)	第九条 (地震)	第十一条 (外部衝撃)	第十二条 (不法侵入)	第十三条 (安全機能)	第十五条 (キャスク)	第十六条 (受入施設)	第十七条 (計測制御)	第十八条 (廃棄施設)	第十九条 (放射線管理設)	第二十条 (予備電源)	第二十一条 (通信設備等)			
																								「安全機能」とは、使用済燃料貯蔵施設の安全性を確保するために必要な機能をいう。	基本的安全機能を有する施設及びその機能喪失により基本的安全機能を損なうおそれがある施設をいい、少なくとも次の施設を含む。 ①使用済燃料貯蔵設備本体（金属キャスク等） ②使用済燃料の受入れ施設（その機能喪失により、金属キャスクが有する基本的安全機能を損なうおそれがないことが明らかであるものを除く）	
その他使用済燃料貯蔵設備の附属施設	電気設備	○	○	・使用済燃料貯蔵施設の操作、監視等に必要電源を供給する機能 ・外部電源喪失時に無停電電源装置から電源を供給する機能	○	・使用済燃料貯蔵施設の監視機能等各負荷に電源を供給するための施設であり、安全性を確保するために必要な機能を有する。	×	・使用済燃料貯蔵施設の監視機能等各負荷に電源を供給するための施設であり、金属キャスク取扱時に電気設備が破損しても、金属キャスクの基本的安全機能に影響を与えないようにクレーン、搬送台車の設計を行っていること等により、当施設の機能喪失が基本的安全機能へ影響を及ぼすことはないことから「基本的安全機能を確保する上で必要な施設」に該当しない。	—	—	—	—	—	・火災発生防止	・耐震	・自然現象対応	—	—	—	—	—	—	—	・予備電源	—	
	通信連絡設備	○	○	・リサイクル燃料備蓄センター内外の必要箇所との連絡を行う機能	○	・非常時においてリサイクル燃料備蓄センターの内部・外部へ連絡するための施設であり、安全性を確保するために必要な機能を有する。	×	・非常時においてリサイクル燃料備蓄センターの内部・外部へ連絡するための施設であり、当施設の機能喪失が基本的安全機能へ影響を及ぼすことはないことから、「基本的安全機能を確保する上で必要な施設」に該当しない。	—	—	—	—	—	・火災発生防止	・耐震	・自然現象対応	—	—	—	—	—	—	—	—	・通信連絡設備	
	消防用設備	○	○	・使用済燃料貯蔵施設において火災発生時に検知し、警報を発生する機能 ・使用済燃料貯蔵施設において火災発生時に消火活動するための機能	○	・使用済燃料貯蔵施設における火災の発生防止および影響緩和のための施設であり、安全性を確保するために必要な機能を有する。	×	・使用済燃料貯蔵施設における火災の発生防止および影響緩和のための施設であり、当施設の機能喪失が基本的安全機能へ影響を及ぼすことはないことから、「基本的安全機能を確保する上で必要な施設」に該当しない。	—	—	—	—	—	・火災発生防止 ・火災発生検知 ・火災の消火	・耐震	・自然現象対応	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	不法侵入等防止設備	△	△	・使用済燃料貯蔵施設への人の不法な侵入を防止する機能 ・使用済燃料貯蔵施設への危険物の持ち込みを防止する機能	○	・使用済燃料貯蔵施設への人の不法な侵入防止、危険物の持ち込み防止のための施設であり、安全性を確保するために必要な機能を有する。	×	・使用済燃料貯蔵施設への人の不法な侵入防止、危険物の持ち込み防止のための施設であり、当施設の機能喪失が基本的安全機能へ影響を及ぼすことはないことから、「基本的安全機能を確保する上で必要な施設」に該当しない。	—	—	—	—	—	・火災発生防止	・耐震	・自然現象対応	・不法侵入防止	・検査・試験、保守・修理	—	—	—	—	—	—	—	—

凡例

*1：事業許可申請本文

○：主要な設備及び機器の種類に記載 △：使用済燃料貯蔵施設の位置、構造及び設備の説明に記載

*2：事業許可申請添付

○：設備の主要仕様に記載 △：主要設備の説明文に記載

第2表 金属キャスクについて検査段階ごとに行う検査項目

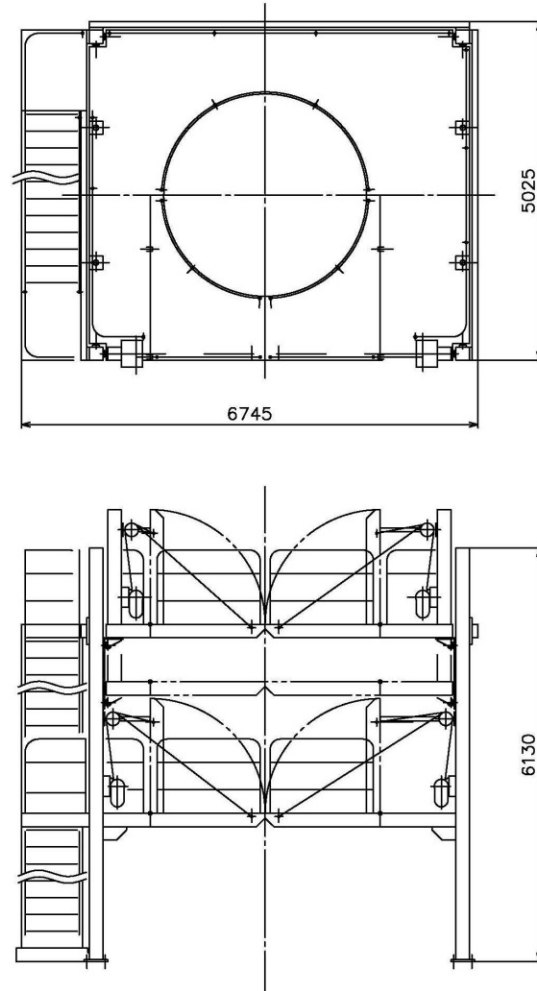
検査の段階		貯蔵前検査	貯蔵期間中検査		貯蔵後搬出前
確認項目	検査で確認する機能 検査項目	貯蔵	貯蔵	輸送 * 1	輸送 * 2
全般	外観検査	◎	◎	○	◎
密封機能	気密漏えい検査	○	—	○	◎
	圧力測定検査	○	—	—	○
	二重蓋間圧力検査	◎	○	—	—
遮蔽機能	遮蔽性能検査	—	□	○	—
	線量当量率検査	◎	—	—	◎
臨界防止機能	未臨界検査	○	○	○	○
除熱機能	伝熱検査	—	□	○	—
	温度測定検査	—	—	—	◎
	表面温度検査	◎	◎	—	—
構造強度	吊上げ検査	◎	—	○	◎
	重量検査	○	—	—	○
	据付検査	◎	—	—	—
使用済燃料	収納物検査	○	○	—	○
その他	表面密度検査	◎	—	—	◎

◎：直接確認するもの ○：記録確認によるもの □：代表キャスクについて直接確認するもの —：検査対象外

* 1, * 2：核燃料輸送物設計承認申請者が実施 * 1：輸送機能維持検査と同じ

第3表 貯蔵期間中検査の具体的検査内容

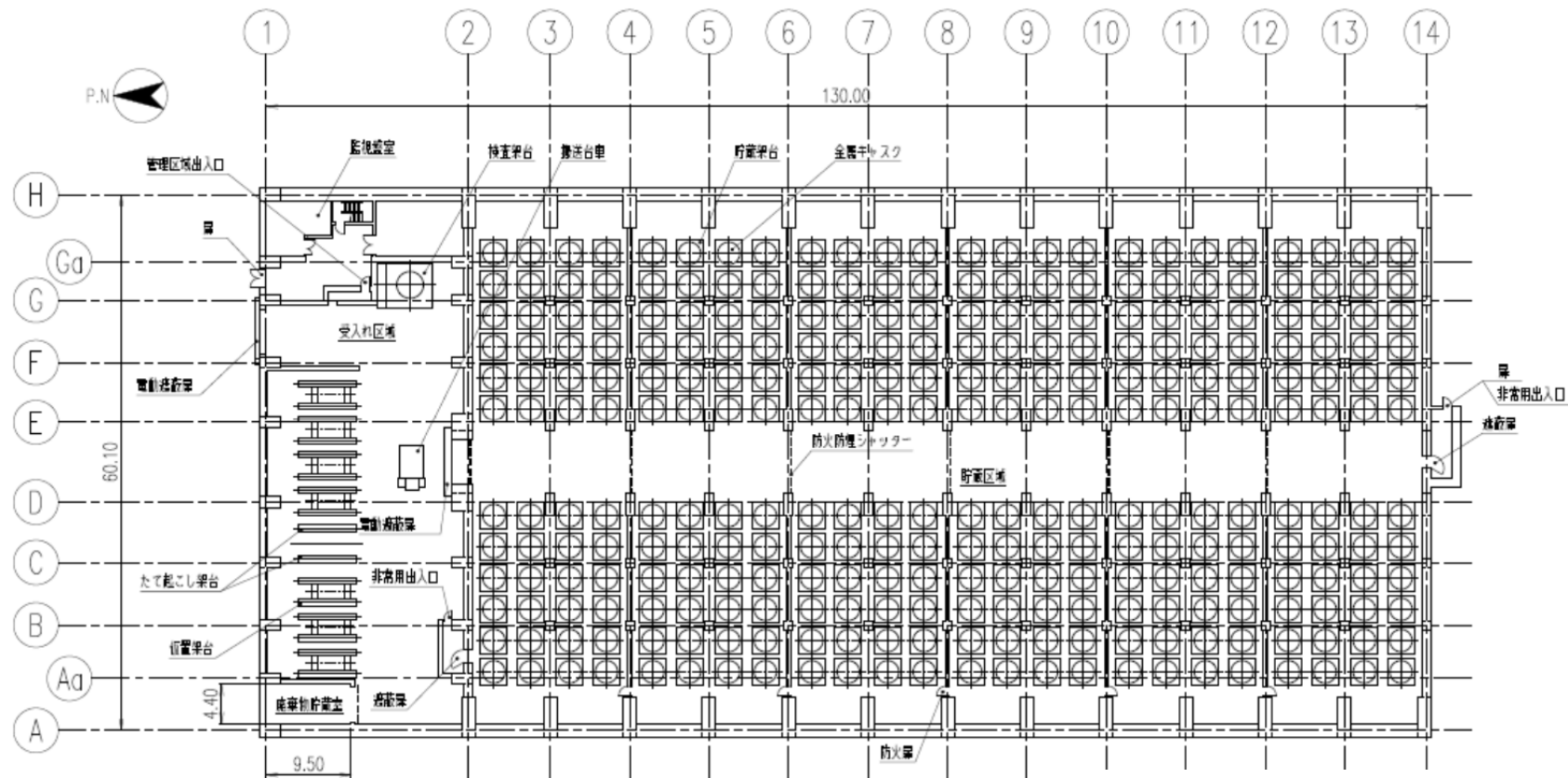
確認項目	検査内容	具体的方法
全般	外観検査	目視により，基本的な安全機能及び構造強度に影響する汚れ，傷，変形又は損傷がないことを確認する。
密封機能	二重蓋間圧力検査	二重蓋間圧力の連続モニタリング記録が，規定する圧力範囲内であることを確認する。
遮蔽機能	遮蔽性能検査	収納物仕様，貯蔵期間に基づいた線量当量率解析値と測定値を比較し測定値が解析値を上回らないことを確認する（代表キャスク）。
臨界防止機能	未臨界検査	発電所搬出前検査の未臨界検査記録及び貯蔵前検査の収納物検査記録，並びに貯蔵期間中の二重蓋間圧力検査記録，表面温度検査記録及び外観検査記録により，未臨界性能に影響がないことを確認する。
除熱機能	伝熱検査	収納物仕様，貯蔵期間及び貯蔵環境に基づいた温度解析値と測定値を比較し測定値が解析値を上回らないことを確認する（代表キャスク）。
	表面温度検査	貯蔵場所において，代表点として金属キャスク本体中央部の表面温度を測定し，規定する設計時の評価温度を超えないことを確認する。



注1：特記なき寸法は mm を示す。

注2：特記なき寸法は公称値を示す。

第1図 検査架台構造図



T.P. + 16.3

- 注1：特記なき寸法はmを示す
- 注2：「T.P.」は東京湾平均海面を示す
- 注3：金属キャスク最大貯蔵時を示す
- 注4：P.N(プラントノース)は、真北から6° 23' 西方向に設計上の北として設定されたもの

第2図 機器配置図

金属キャスクの保守及び修理

<前提>

金属キャスクには、動的な機器が無く基本的にはメンテナンスフリーな設計となっている。

貯蔵施設も、自然換気方式を採用しており、外気が直接貯蔵区域に流入することから、結露が発生する。

それ故、金属キャスク本体には、防錆を目的とし、炭素鋼を用いる部位には塗装を施し、他の部位にはステンレス鋼を使用している。

<保守>

金属キャスク本体に汚れ、腐食、傷等が目視により確認された場合には、塗装、手入れを行う。また、貯蔵時において金属キャスクを固縛するために使用されるトラニオンについては、傷等が発生した場合に手入れを行う。

<修理>

蓋部の閉じ込め機能の異常に対して、二次蓋に漏えいが認められた場合には、金属キャスクの内部が負圧に維持されていること及び一次蓋の健全性を確認の上、二次蓋の金属ガスケットを交換する。

金属キャスクの検査

日本原子力学会標準「使用済燃料中間貯蔵施設用金属キャスクの安全設計及び検査基準：2010」に準拠し、以下の検査を実施する予定である。

1. 全般

外観検査：目視により、金属キャスクの基本的安全機能及び構造強度が維持されていることを確認する。

2. 密封機能

二重蓋間圧力検査：二重蓋間圧力の連続モニタリングの記録を確認する。

3. 臨界防止機能

未臨界検査：発電所搬出前検査の未臨界検査記録及び貯蔵前検査の収納物検査記録並びに二重蓋間圧力検査記録、表面温度検査記録及び外観検査記録により確認する。

4. 遮蔽機能

遮蔽性能検査：金属キャスクの型式ごとに、収納物の仕様及び貯蔵期間を考慮して代表キャスクを選定し、他のキャスクからの線量の寄与が無視又は補正できる状態で、金属キャスクの表面における γ 線量当量率及び中性子線量当量率をサーベイメータで測定し、当該金属キャスクの収納物仕様及び貯蔵期間に基づいた解析値と比較する。

5. 除熱機能

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

表面温度検査：貯蔵場所において、代表点として金属キャスク本体中央部の表面の温度を測定する。

受入れ区域天井クレーン及び搬送台車の点検

【受入れ区域天井クレーン】

受入れ区域天井クレーンの点検は、クレーン等安全規則により、1年に1回の自主検査（年次点検）の他に、1月に1回の自主検査（月例点検）及びその日の作業を開始する前の点検（作業前点検）が義務づけられている。

<年次点検>

クレーン等安全規則では荷重試験のみが求められているが、自主的にクレーンの各部分の構造及び機能についての点検を行う（分解点検を実施）。また、2年に1回は所轄労働基準監督署立ち会いによる性能検査を受検する。性能検査では、年次点検の分解点検報告書の他に、月例点検、作業前点検の報告書についても確認される。

<月例点検>

月例点検では、以下の項目について点検を行う。

- ・ 巻過防止装置その他の安全装置、過負荷警報装置その他の警報装置、ブレーキ及びクラッチの異常の有無
- ・ ワイヤロープ及びつりチェーンの損傷の有無
- ・ フック等の損傷の有無
- ・ 配線、集電装置、配電盤、コントローラ等の異常の有無

<作業前点検>

その日の作業開始前に、以下の項目について点検を行う。

- ・ 巻過防止装置、ブレーキ、クラッチ及びコントローラの機能
- ・ ランウェイの上及びトロリが横行するレールの状態
- ・ ワイヤロープが通っている箇所の状態

【搬送台車】

搬送台車の点検は、1年に1回程度の自主点検の他に、その日の作業を開始する前の点検（作業前点検）を実施する。

<自主点検>

自主点検では、以下の項目について点検を行う。

- ・ 外観点検（装置全般及びバッテリーを対象とした変形，割れ，損傷の有無，接続部の緩みの有無，塗装の状況）
- ・ 寸法点検（搬送台車高さ及び幅）
- ・ 員数点検（付属品）
- ・ 漏えい点検（エアキャスタ系統及びドライブユニット）
- ・ 作動点検（単体動作及びインターロック）

<作業前点検>

その日の作業開始前に、以下の項目について点検を行う。

- ・ 外観点検（主要構成機材の有意な傷，破損の有無）
- ・ 組み合わせ点検（機器接続語）
- ・ 機器単体点検（ホースリール及びドライブユニット）
- ・ インターロック点検（誤操作防止インターロック及び警告灯・警報機動作確認）
- ・ 緊急停止時の動作確認（緊急停止スイッチ及びコントロールペダント）
- ・ 無負荷走行点検

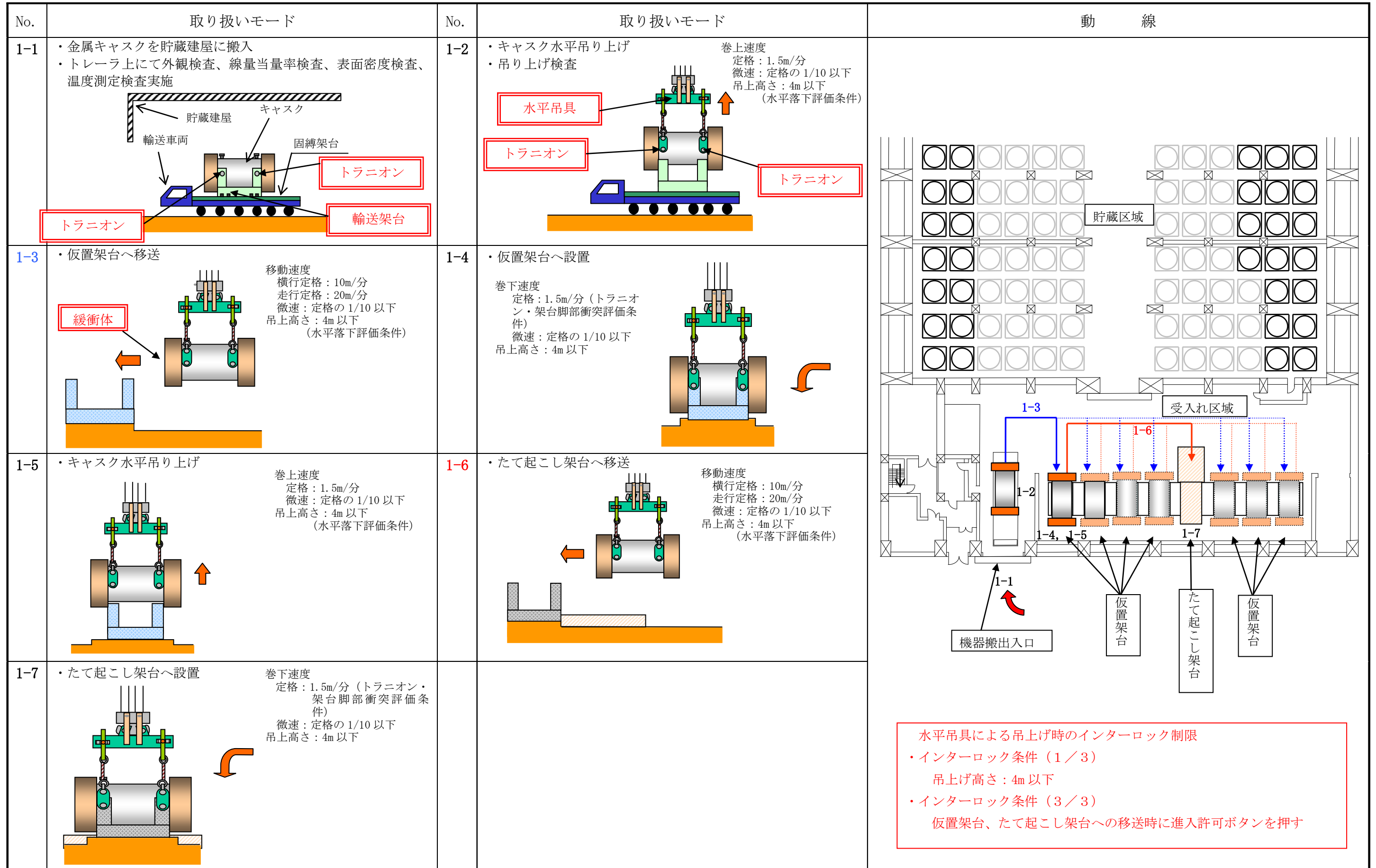
金属キャスクの受入れから貯蔵までの工程

金属キャスクの受入れから貯蔵までの工程及び金属キャスクに対する試験及び検査について、「使用済燃料貯蔵施設における基本的な金属キャスクハンドリングフロー例(1/3)～(3/3)」に詳細を示す。

受入れ区域天井クレーンのインターロック条件については、「第16条 使用済燃料の受入施設 別添 1 金属キャスクハンドリングフロー及びインターロック条件等について」(インターロック条件(1/3)～(3/3) 16条一別添 1-5～16条一別添 1-7)に記載している。

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

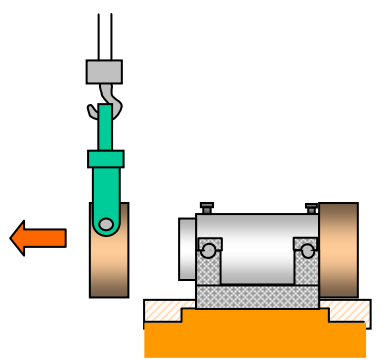
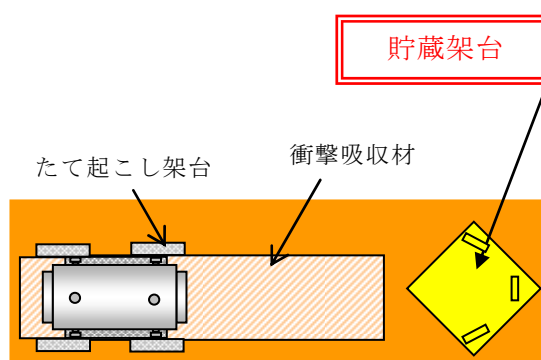
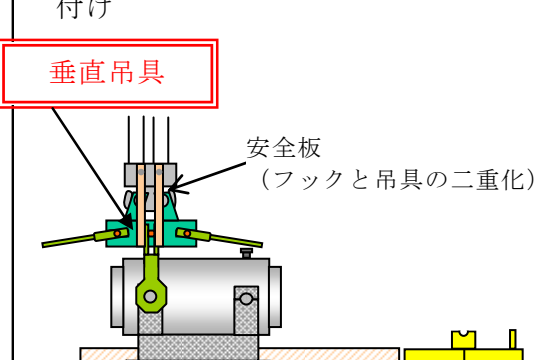
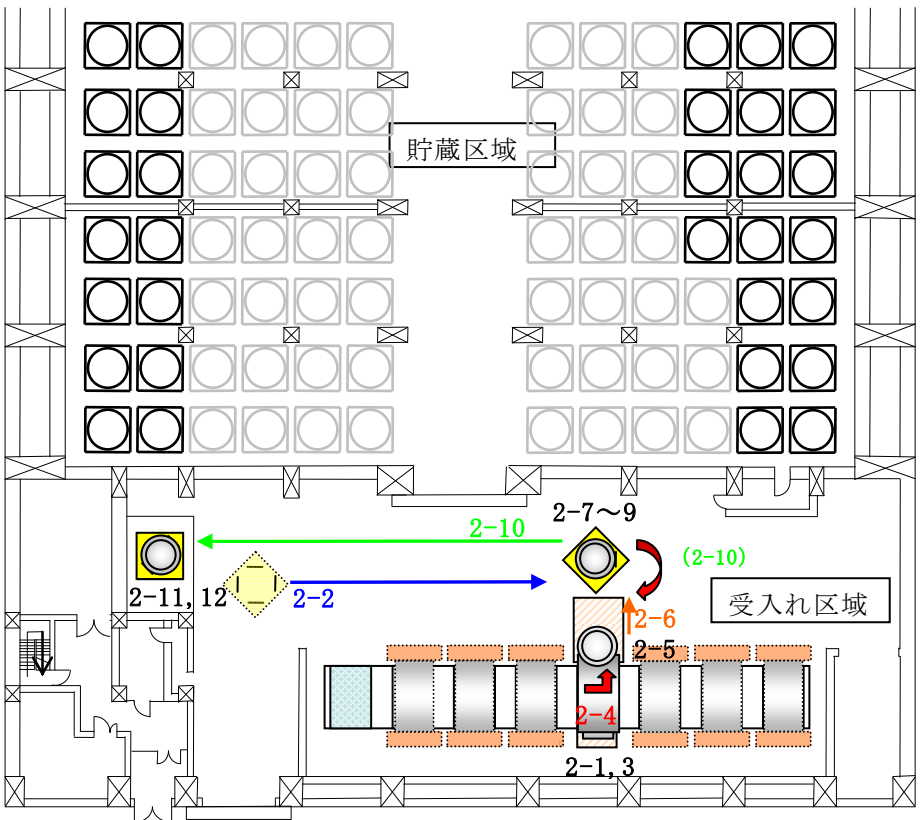
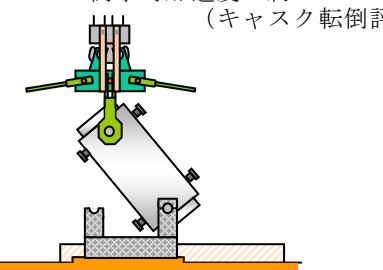

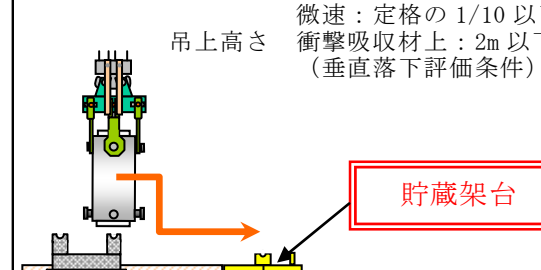
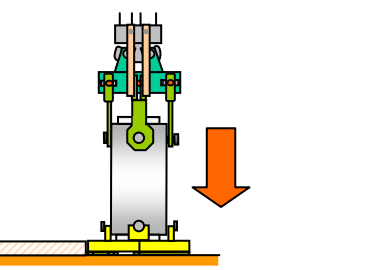
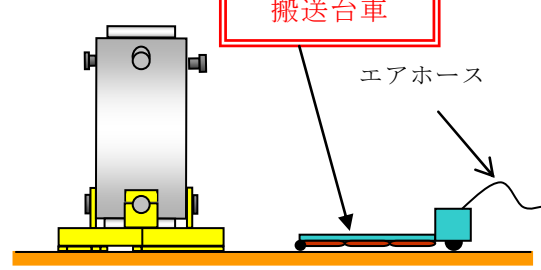
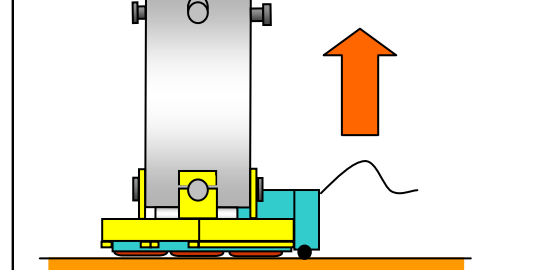
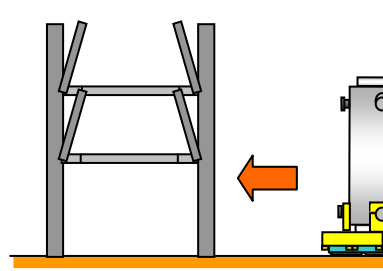
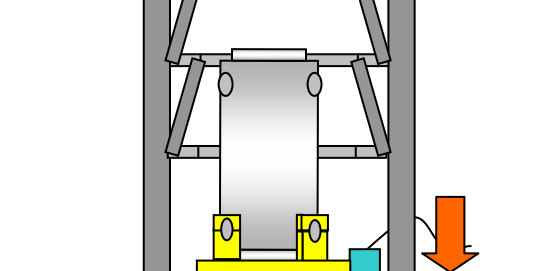
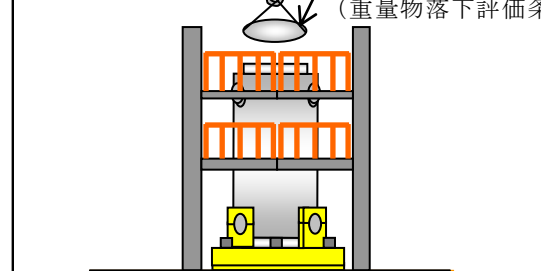
1. 金属キャスクの受け入れ～金属キャスクの仮置き



※検査実施場所については、今後の検討により変更となる場合がある。

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

2. 緩衝体取り外し～金属キャスクたて起こし～検査架台への移送

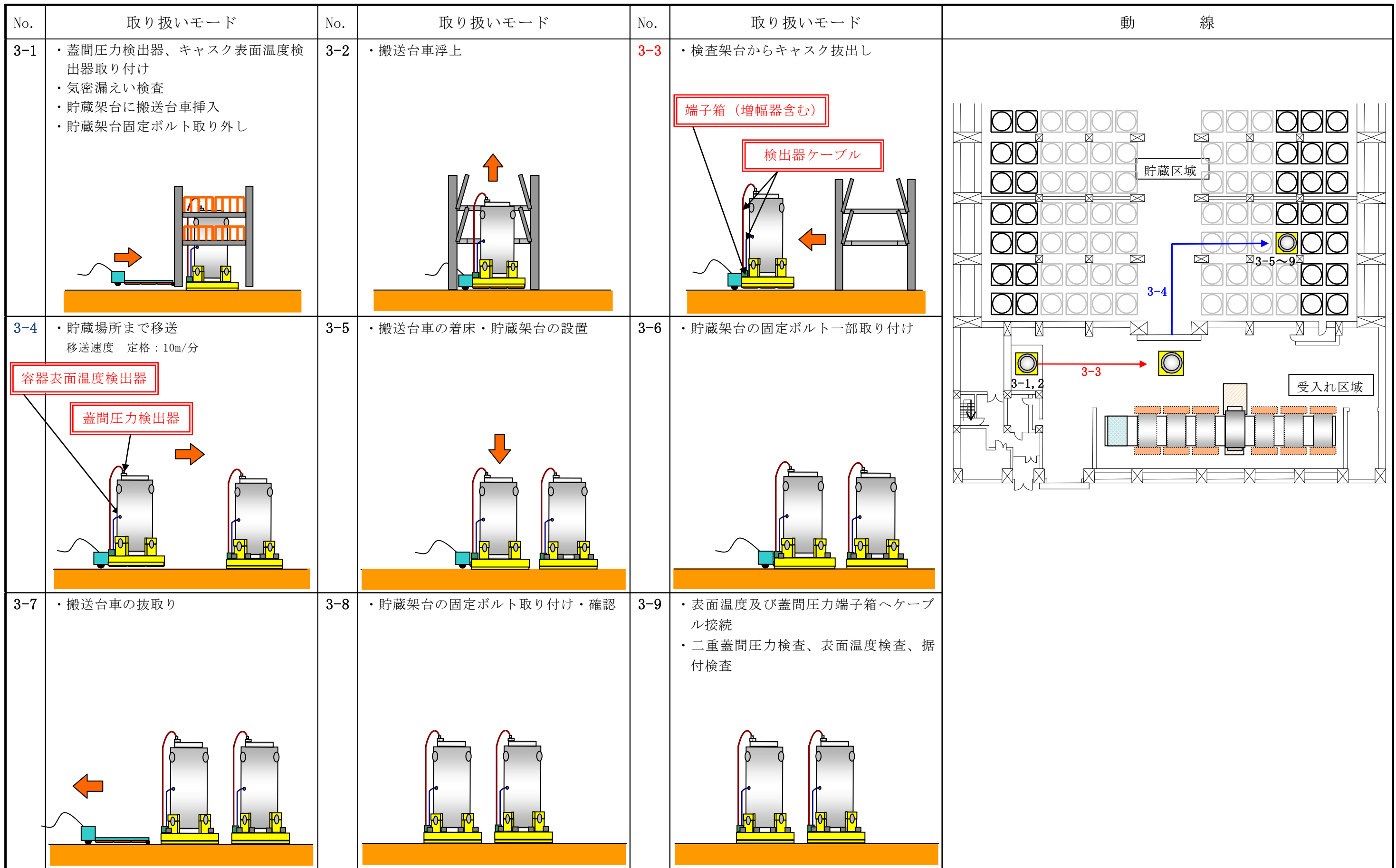
No.	取り扱いモード	No.	取り扱いモード	No.	取り扱いモード	動線
2-1	・緩衝体の取り外し 	2-2	・貯蔵架台をたて起こし架台付近に設置 	2-3	・吊具主アームを上部トラニオンに取り付け 	
2-4	・主アームの外れ防止金具を取り付けた後、キャスクをたて起こし 金属キャスク転倒解析の条件 木材仕様：圧潰応力 3MPa、厚さ 1m 衝撃時加速度：約 40G (キャスク転倒評価条件) 	2-5	・トラニオン押さえを取り外した後、キャスクを吊上げ ・吊り上げ検査 巻上速度 定格：1.5m/分 微速：定格の 1/10 以下 吊上高さ：2m 以下 (衝撃吸収材上端とキャスク下端の距離) (垂直落下評価条件) 	2-6	・吊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 巻下速度 定格：1.5m/分 微速：定格の 1/10 以下 移動速度 横行定格：10m/分 微速：定格の 1/10 以下 吊上高さ 衝撃吸収材上：2m 以下 (垂直落下評価条件) 	
2-7	・キャスクを貯蔵架台に着床、固定 巻下速度 定格：1.5m/分 (異常着床評価条件) 微速：定格の 1/10 以下 	2-8	・貯蔵架台下部に搬送台車を挿入 	2-9	・搬送台車浮上 	
2-10	・旋回動作、走行動作により検査架台へ移送 移送速度 定格：10m/分 	2-11	・搬送台車着床、貯蔵架台固定ボルト取り付け 	2-12	・三次蓋 (輸送用) の取り外し 三次蓋 吊上高さ：0.1m 以下 (重量物落下評価条件) 	

垂直吊具による吊上げ時のインターロック制限
 ・インターロック条件 (2 / 3)
 吊上げ高さ：2m 以下

※検査実施場所については、今後の検討により変更となる場合がある。

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

3. 検査架台～貯蔵場所への設置



※検査実施場所については、今後の検討により変更となる場合がある。

第 15 条 金属キャスク（金属キャスク）

<目 次>

1. 設計方針
2. 経年変化要因に対する考慮

（別 添）

- 別添 1 レジンの熱分解による重量減損と放出される生成物による周囲部材への腐食影響について
- 別添 2 金属キャスク構成部材のクリープ影響について
- 別添 3 金属キャスク本体と伝熱フィンの接合部の除熱機能への影響評価について
- 別添 4 レジンの重量減損量を劣化パラメータで整理することの妥当性について
- 別添 5 申請キャスク[BWR用大型キャスク(タイプ2)及び(タイプ2A)]に使用するレジンの熱, 放射線照射による重量減損の影響について
- 別添 6 原子力発電所構内で貯蔵中の使用済燃料乾式貯蔵容器の金属ガスケット調査結果について
- 別添 7 金属ガスケットの経年変化におけるクリープ考慮について

1. 設計方針

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

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

基本的安全機能を維持する上で重要な金属キャスクの構成部材は、設計貯蔵期間中の温度、放射線等の環境、並びにその環境下での腐食、クリープ、応力腐食割れ等の経年変化に対して十分な信頼性のある材料を選定し、その必要とされる強度、性能を維持し、必要な安全機能を失うことのない設計とする。また、金属キャスク本体内面、バスケット及び使用済燃料集合体の腐食等を防止するために、使用済燃料集合体を不活性ガスであるヘリウムとともに封入して貯蔵する設計とする。

2. 経年変化要因に対する考慮

金属キャスクに使用する個々の部材について、長期貯蔵（設計貯蔵期間の50年に対し、評価期間は60年）における環境条件（腐食、熱、放射線照射）の影響を考慮して、文献や試験データに基づき、経年変化の影響を検討している。金属キャスクを構成する部材毎に検討した具体的評価内容を第1表に示す。なお、各部材はBWR用大型キャスク（タイプ2）及び（タイプ2A）ともに同じである。

また、金属キャスクは、金属キャスク内面、バスケット及び使用済燃料集合体の腐食等を防止するために、使用済燃料集合体収納時にその内部空間を真空乾燥し、不活性ガスであるヘリウムを適切に封入し、使用済燃料集合体を貯蔵する。

第1表 金属キャスクの構成部材の健全性に対する評価について (1/4)

部位及び材料	要因	主な評価の観点	各部位及び材料の経年変化に係わるデータ	設計条件	評価
キヤスク本体 ① ※1 【部位】 本体胴(内面/外面) 外筒(内面) 一次蓋 二次蓋(内面) 一次蓋ボルト 【材料】 炭素鋼 合金鋼	腐食	●構造強度: 腐食による構造強度の低下	<ul style="list-style-type: none"> 本体胴(内面)については、1%燃料破損相当の燃料棒内ガス中のヨウ素ガスを含む実機模擬環境における、低合金鋼の最大腐食速度により、60年間の腐食量を推定しても0.5mm程度¹⁾。 中性子遮蔽材(レジン)に接する部位(本体胴(外面), 外筒(内面))については、レジンの熱分解によって放出される生成物の大部分は水分であり、レジンの熱分解によって放出される生成物を全て水分として60年間の腐食量を推定しても0.2mm程度。(別添1) 	[使用環境] ・ヘリウム雰囲気 ・レジン接触 [材料厚] ・本体胴中央: <input type="text"/> mm ・外筒: <input type="text"/> mm ・一次蓋: <input type="text"/> mm ・二次蓋: <input type="text"/> mm	<ul style="list-style-type: none"> ヘリウムガス環境下の各部位(本体胴(内面), 一次蓋, 二次蓋(内面), 一次蓋ボルト)は、不活性雰囲気維持される限り腐食の影響はない。仮に1%燃料破損相当の燃料棒内ガスの存在を考慮した場合の腐食を考慮しても極わずかなものであり、実用上の影響はない。 レジンに接する部位(本体胴(外面), 外筒(内面))は、レジンの熱分解で放出される生成物を全て水分とした場合の腐食を考慮しても極わずかなものであり、実用上の影響はない。(別添1)
	熱	●構造強度: 熱によるクリープ変形や高温脆化に伴うき裂・破損	・クリープ変形を起こす温度領域の境界として、融点(絶対温度)の1/3~1/2以上とされている。(別添2)	[使用環境温度] ・除熱解析による最高温度(142℃)以下	<ul style="list-style-type: none"> 当該材料における融点(絶対温度)の1/3の温度は、クリープ領域になく、クリープや金属組織変化の影響はない。(別添2) 低温側の脆化に関しても設計上考慮しており、JSME 金属キャスク構造規格による破壊靱性の要求に従って破壊靱性試験を行い、判定基準に適合することを確認している。(試験条件に現地の過去最低気温である-22.4℃から保守的に設定した最低温度-25℃を用いている。)
	照射	●構造強度: 照射による機械的特性の劣化	・炭素鋼, 低合金鋼の脆性遷移温度の増加と照射量の関係は、中性子照射量が 10^{16} n/cm ² までは顕著な脆化はみられない。(第1図, 第2図)	[放射線照射量] ・ 10^{13} n/cm ² ~ 10^{15} n/cm ² (60年間一定) ^{※3}	<ul style="list-style-type: none"> 使用環境における中性子照射量は 10^{16} n/cm² 以下であり、遷移温度が増加するレベルになく、材料の機械的特性に影響はない。
溶接金属部	腐食	●構造強度: 腐食による構造強度の低下	・上記, 母材の記載事項は、溶接部も含めたものであり母材と同じ。	上記, 母材と同じ。	上記, 母材と同じ。
本体胴(内面/外面) 一次蓋(上面) 外筒(内面) *溶接部位は, 第3図	熱	●構造強度: 熱によるクリープ変形や高温脆化に伴うき裂・破損	・本体胴に用いる材料(炭素鋼)は、母材と溶接部の機械的特性試験 ⁴⁾ が行われており、母材, 溶接金属部及び溶接熱影響部の衝撃試験と破壊靱性試験ではその結果に大きな差異はない。	上記, 母材と同じ。	<ul style="list-style-type: none"> 本体胴は、JSME 金属キャスク構造規格で密封容器の溶接部に要求されている溶接後熱処理により溶接部の材質改善(残留応力の軽減, 溶接熱影響部及び溶接金属の軟化, 靱性の回復, 溶接部の組織改善)を図るとともに、溶接後熱処理された試験片を用いて機械試験(継手引張試験, 型曲げ試験, 破壊靱性試験)を行い、母材と同等以上の強度であることを確認しているため、溶接金属部も母材と同等とみることができる。 各部位は、クリープや金属組織に変化が生じない領域の温度であり、熱による影響はない。 キャスク本体と伝熱フィンとの接合部は、伝熱フィン溶接部が部分的に未溶着であっても除熱機能への影響はない。(別添3)
	照射	●構造強度: 照射による機械的特性の劣化	・国内軽水炉の原子炉圧力容器鋼材(監視試験片)の照射脆化解析データ(第4図)によると、母材, 熱影響部及び溶接金属部の脆性遷移温度の増加と照射量の関係はほぼ同じ傾向にあるが、金属キャスクに用いる材料(炭素鋼)の脆性遷移温度の増加と照射量の関係(第1図)は、原子炉圧力容器鋼材と同じ傾向にあるため、金属キャスクの溶接金属部についても同じ傾向であることが推定される。なお、遷移温度の増加が大きくなっていくのは中性子照射量が 10^{16} n/cm ² 以上である。	上記, 母材と同じ。	上記, 母材と同じ。

第1表 金属キャスクの構成部材の健全性に対する評価について (2/4)

部位及び材料	要因	主な評価の観点	各部位及び材料の経年変化に係わるデータ	設計条件	評価	
キ ャ ス ク 本 体 ② ※2	腐食	●構造強度: 腐食による構造強度の低下	・各種金属材料の16年間の海浜大気暴露試験結果から、最も定常腐食速度の大きい炭素鋼のデータ(21 μm/年)で60年間の腐食量を推定しても1.26 mm程度。(第2表)	[使用環境] ・外気(海塩粒子雰囲気) ・結露水 [材料厚] ・外筒: <input type="text"/> mm ・二次蓋: <input type="text"/> mm [防錆処理] ・外表面塗装。ただし、二次蓋ボルトは、メッキ等	・塗装やメッキの防錆被膜は経年的に劣化するが、巡視点検等の定期的な点検により外表面の状態把握をすることが可能である。また、状態把握により劣化兆候がみられた場合は補修することで防錆被膜を維持することが可能である。 ・塗装やメッキによる防錆効果を考慮しないとしても、腐食量は材料厚と比較して実用上の影響はない。	
		熱	●構造強度: 熱によるクリープ変形や高温脆化に伴うき裂・破損	キャスク本体①の母材の熱と同じ。		
		照射	●構造強度: 照射による機械的特性の劣化	キャスク本体①の母材の照射と同じ。		
溶接金属部 本体胴(外面) 外筒(外面) *溶接部位は、 第3図	腐食	●構造強度: 腐食による構造強度の低下	上記、母材の腐食影響評価に含まれる。			
	熱	●構造強度: 熱によるクリープ変形や高温脆化に伴うき裂・破損	上記、母材の熱影響評価に含まれる。		・当該部は外気に暴露された状態で、キャスク本体①の使用環境よりも更に温度が低くなる環境にあるため、熱による影響はない。	
	照射	●構造強度: 照射による機械的特性の劣化	上記、母材の照射影響評価に含まれる。		・当該部はキャスク本体①の部位よりも更に照射量が小さくなる環境にあるため、照射の影響はない。	
伝熱フィン 【材料】 炭素鋼(銅クラッド鋼)	腐食	●除熱機能: 腐食によるき裂・破損	・中性子遮蔽材(レジン)に接する部位は、レジンの熱分解によって放出される生成物が全て水分として、60年間の腐食量を推定しても0.2mm程度。(別添1)	[使用環境] ・本体胴(外面)と外筒(内面)間の閉鎖空間 ・レジンと接触	・レジンの熱分解によって放出される生成物が全て水分とした場合でも実用上問題となる腐食はない。(別添1)	
	熱	●除熱機能: 熱によるクリープ変形や高温脆化に伴うき裂・破損	・クリープ変形を起こす温度領域の境界として、融点(絶対温度)の1/3~1/2以上とされている。(別添2)	[使用環境温度] ・除熱解析による最高温度(128℃)以下	・当該材料における融点(絶対温度)の1/3の温度は、クリープ領域になく、クリープや金属組織変化の影響はない。(別添2)	
	照射	●除熱機能: 照射による機械的特性の劣化	・炭素鋼、低合金鋼の脆性遷移温度の増加と照射量の関係は、中性子照射量が10 ¹⁶ n/cm ² までは顕著な脆化は認められない。(第1図、第2図)	[放射線照射量] ・10 ¹³ n/cm ² ~10 ¹⁵ n/cm ² (60年間一定) ^{※3}	・使用環境における中性子照射量は10 ¹⁶ n/cm ² 以下であり、遷移温度が増加するレベルになく、材料の機械的特性に影響はない。	

第1表 金属キャスクの構成部材の健全性に対する評価について (3/4)

部位及び材料	要因	主な評価の観点	各部位及び材料の経年変化に係わるデータ	設計条件	評価
バスケット 【材料】 ボロン添加ステンレス鋼	腐食	●構造強度: 腐食による構造強度の低下	・1%燃料破損相当の燃料棒内ガス中のヨウ素ガスを含む実機模擬環境におけるバスケット材(ボロン添加ステンレス鋼)の最大腐食速度により、60年間の腐食量を推定しても30μm程度 ¹⁾ 。	[使用環境] ・ヘリウム雰囲気 [材料厚] ・□mm	・不活性雰囲気維持される限り腐食の影響はない。仮に1%燃料破損相当の燃料棒内ガスの存在を考慮した場合の腐食は極わずかなものであり、実用上の影響はない。
	熱	●構造強度: 熱によるクリープ変形や高温脆化に伴うき裂・破損	・クリープ変形を起こす温度領域の境界として、融点(絶対温度)の1/3~1/2以上とされている。(別添2)	[使用環境温度] ・除熱解析による最高温度(248℃)以下 [ボロン添加量] ・1wt%程度	・当該材料における融点(絶対温度)の1/3の温度は、クリープ領域になく、クリープや金属組織変化の影響はない。(別添2) なお、1wt%程度のボロンを添加したステンレス鋼は、燃料プール用ラック、輸送キャスク等で十分な使用実績を有している。 ・低温側の脆化に関する設計上の考慮は、キャスク本体①と同じ。
	照射	●未臨界機能: 中性子照射によるボロン減損 ●構造強度: 照射による機械的特性の劣化	[未臨界機能] ・B-10の60年間の貯蔵中の減損割合は、保守的に全中性子束を用いて評価しても10 ⁻⁶ 程度。 ・H15年度金属キャスク貯蔵技術確証試験最終報告(JNES)では、熱中性子束で評価して10 ⁻¹¹ 程度。 [構造強度] ・中性子照射量が10 ¹⁸ n/cm ² までは顕著な脆化は認められない。(第5図) ・1wt%程度のボロン添加量において、ボロン添加ステンレス鋼の照射による機械的強度への影響の程度は、照射量の大小に差異はない。(第6図、第7図)	[放射線照射量] ・10 ¹⁴ n/cm ² ~10 ¹⁶ n/cm ² (60年間一定) ^{※3} [ボロン添加量] ・1wt%程度	・B-10の減損割合は無視できる程度であり、照射影響による未臨界機能に係る経年変化を考慮する必要はない。 ・使用環境における中性子照射量は、機械的的特性に変化がみられる値より2桁以上小さく、ボロン添加による照射影響は無視できる程度のため、材料の機械的的特性に影響はない。
中性子遮蔽材 【材料】 エポキシ系レジン	熱・腐食	●遮蔽機能: 化学成分の変化や重量減少	・エポキシ系レジンの高温熱分解試験(半年程度)結果によれば、170℃以下では長期使用可能。また、重量減損は温度によらず3600h辺りで飽和(2~3wt%)し、5000hに到達するまでに有意な変化はみられない。(別添1) ・熱分解によりレジンから放出されるガス成分は、水、二酸化炭素、炭化水素(微量のエタン、アセトン等で金属腐食性なし)、水素で、その大部分が水分である。(別添1) ・長期貯蔵期間におけるレジンの重量減損量については、劣化パラメータ(ラーソンミラーパラメータ)にて整理が可能である。(別添4)	[使用環境温度] ・除熱解析による最高温度(128℃)以下 [使用環境] ・密閉・閉鎖環境 [設計減損率] ・~3%程度(減衰考慮)	・遮蔽解析においては、レジン系中性子遮蔽材の経年劣化評価試験結果等の知見を踏まえて、熱分解によるレジンの重量減損分を遮蔽体として考慮せずに遮蔽機能への影響を保守的に評価しているため、レジンの重量減損による遮蔽機能の低下はない。 なお、BWR用大型キャスク(タイプ2)及び(タイプ2A)に使用するレジン(メーカー開発品)の熱による重量減損評価を別添5に示す。
	照射	●遮蔽機能: 化学成分の変化や重量減少	・加熱と照射の影響評価によれば、照射の影響は加熱に比べわずかであり、照射の影響は主要ではない。(別添5)	[放射線照射量] ・10 ³ Gy~10 ⁴ Gy程度 (60年間、一部減衰考慮)	・使用するメーカー開発品レジンの加熱試験結果と照射中加熱試験結果を比較すると、重量減損率にほとんど差異がないため、照射による重量減損を考慮する必要はない。 なお、BWR用大型キャスク(タイプ2)及び(タイプ2A)に使用するレジン(メーカー開発品)の照射による重量減損評価を別添5に示す。

第1表 金属キャスクの構成部材の健全性に対する評価について（4/4）

部位及び材料	要因	主な評価の観点	各部位及び材料の経年変化に係わるデータ	設計条件	評価
金属ガスケット 【材料】 ニッケル基合金 アルミニウム	腐食	●閉じ込め機能： 腐食による閉じ込め機能の低下	<ul style="list-style-type: none"> 蓋部縮小モデルにおける約3年間の塩水噴霧試験では、漏えい率に変化はない⁹⁾¹⁰⁾。 発電所(福島第一サイトおよび東海第二サイト)に貯蔵中の使用済燃料乾式貯蔵容器に装着されている金属ガスケットの調査では、金属ガスケットの密封性は健全であった。(別添6) 	[使用環境] ・一次蓋及び二次蓋内側：ヘリウム雰囲気 ・二次蓋外側：外気(海塩粒子雰囲気) ・結露水	<ul style="list-style-type: none"> 一次蓋用の金属ガスケットと二次蓋用の金属ガスケット内側面は、不活性ガスであるヘリウム雰囲気が維持される限り腐食しない。 二次蓋用の外側面は、実環境より厳しい状況(塩水噴霧)においても漏えい率に変化はないため、実機の使用環境において閉じ込め機能への影響はない。
	熱	●閉じ込め機能： 熱による塑性変形およびクリープに伴う閉じ込め機能の低下	<ul style="list-style-type: none"> クリープ変形を起こす温度領域の境界として、融点(絶対温度)の1/3～1/2以上とされている。(別添2) 外被材であるアルミニウムは、常温以上でクリープが発生しやすい性向にあるが、長期密封特性試験¹²⁾や密封境界部の経年劣化影響評価試験¹⁾によって、塑性変形率と漏えい率の温度・時間の依存性についてラーソンミラーパラメータ(LMP)による整理が有効であることが確認されている。 高温時の健全性についてラーソンミラーパラメータ(LMP)で評価すると、150℃で100年以上閉じ込め機能を維持可能¹¹⁾。 長期密封性能試験¹²⁾において130～140℃(18年程度)で閉じ込め性能維持。 	[使用環境温度] ・除熱解析による最高温度(89℃)以下	<ul style="list-style-type: none"> 当該材料における融点(絶対温度)の1/3の温度は、ニッケル基合金についてはクリープ領域になく、クリープや金属組織変化の影響はないが、アルミニウムはクリープ領域にある。(別添2)しかし、金属ガスケットの長期密封性評価に用いているLMPは、長期貯蔵中のクリープによる応力緩和が考慮されており、60年間の閉じ込め機能は維持できる。(別添7) 初期の閉じ込め機能($1 \times 10^{-10} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$以下)を保持できる限界のLMPは、使用する金属ガスケットの場合、約11×10^3となる。金属キャスクの除熱評価における金属ガスケットの制限温度は130℃以下であり、初期温度を130℃(除熱解析結果の最高温度は89℃であるが、保守的に130℃とする。)として崩壊熱の減衰を無視して、LMPで11×10^3となる時間を求めると約2000年となる。
	照射	●構造強度： 閉じ込め機能はガスケット部材の機械的性質に依存するため、照射による強度、弾性、脆化等の機械的性質影響	<ul style="list-style-type: none"> ニッケル基合金は、中性子照射量が$7.7 \times 10^{21} \text{n/cm}^2$程度で機械的性質が変化する傾向¹³⁾。 アルミニウムは、中性子照射量が10^{21}n/cm^2程度以下では、顕著な機械的性質の変化はない。(第8図) 	放射線照射量： 10^{15}n/cm^2 程度 (60年間一定) ^{※3}	<ul style="list-style-type: none"> 照射量は各材料の機械的性質変化が認められる値より十分小さい。

※1 キャスク本体①は、貯蔵状態において外気に触れない部位とする。

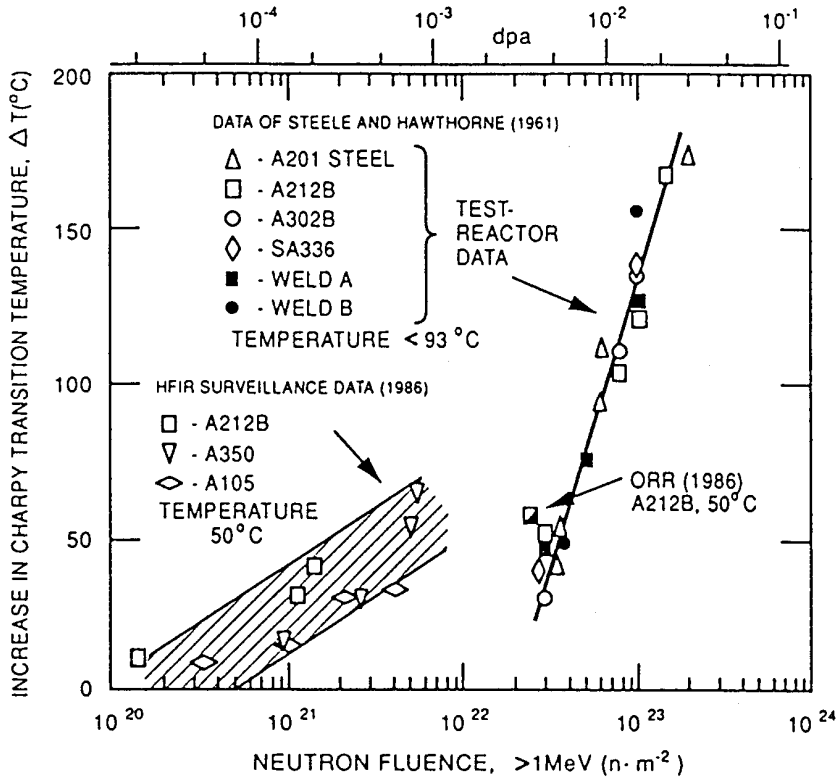
※2 キャスク本体②は、貯蔵状態において外気に触れる部位とする。

※3 中性子束は経年と共に指数関数的に減衰するが、各部材の中性子照射量の評価においては、貯蔵開始時の全中性子束について減衰を考慮せずに保守的に60年間一定としたもの。

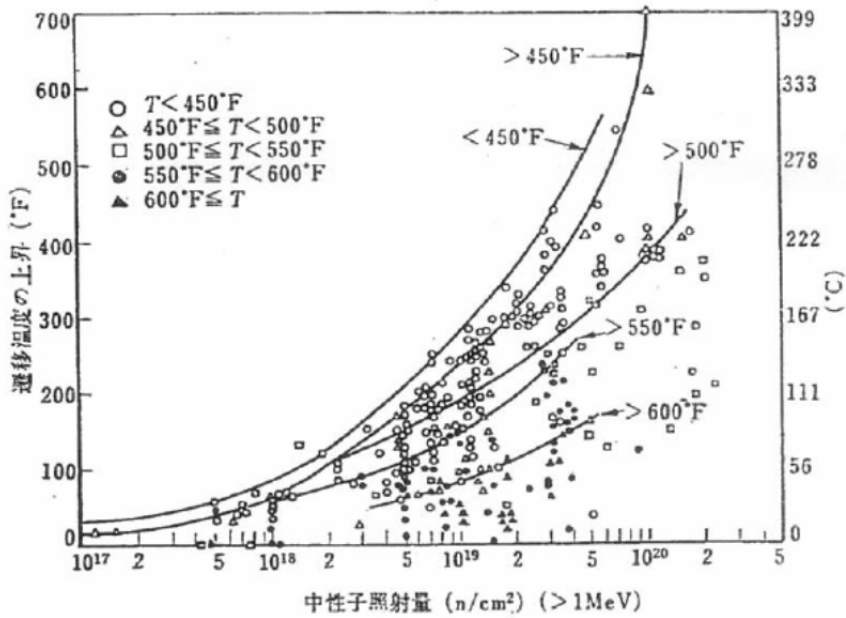
第2表 各種金属材料の大気暴露試験結果⁶⁾

供 試 材 料		海 浜 大 気 ^①					内 陸 大 気 ^②				
種 類	合 金	腐食量 (g/m ²)	平均 侵食 深さ (μm)	定常 腐食 速度 (μm/yr)	孔 食 深 さ		腐食量 (g/m ²)	平均 侵食 深さ (μm)	定常 腐食 速度 (μm/yr)	孔 食 深 さ	
					平均 ^③ (mm)	最大 (mm)				平均 ^③ (mm)	最大 (mm)
アルミニウム	1100	8	3	<0.25	<0.13	<0.13	5	2	<0.25	<0.13	<0.13
	6061-T6	8	3	<0.25	<0.13	<0.13	6	2	<0.25	<0.13	<0.13
	Alclad 2024-T6	9	3	<0.25	<0.13	<0.13	5	2	<0.25	<0.13	<0.13
非鉄金属 (純金属)	鉛(99.9%)	228	20	1.3	<0.13	<0.13	161	14	1.0	<0.13	<0.13
	ニッケル(99%)	26	3	<0.25	<0.13	<0.13	21	3	<0.25	<0.13	<0.13
	銅(99.9%)	173	19	0.8	<0.13	<0.13	60	7	0.25	<0.13	<0.13
	亜鉛(99.5%)	294	41	1.8	<0.13	<0.13	98	14	0.8	<0.13	<0.13
非鉄金属 (合金)	モネル(70Ni-30Cu)	49	6	0.25	<0.13	<0.13	30	4	<0.25	<0.13	<0.13
	銅ニッケル(70Cu-30Ni)	93	10	0.5	<0.13	<0.13	62	7	0.5	<0.13	<0.13
	アルミ青銅(95Cu-5Al)	84	10	0.5	<0.13	<0.13	52	6	0.25	<0.13	<0.13
	70/30黄銅(70Cu-30Zn)	72	8	0.5	<0.13	<0.13	54	6	0.25	<0.13	<0.13
鉄 鋼	炭素鋼(0.25C)	3149	402	21	1.30	3.12	2277	290	14	0.56	0.84
	含銅鋼(0.22C-0.3Cu)	2710	345	19	0.76	1.68	1863	237	15	(4)	(4)
	低合金鋼(Corten)	1596	204	10	0.46	0.89	851	108	4.6	0.46	0.69
ステンレス鋼	302(18Cr-8Ni)	3	0.5	<0.25	<0.13	<0.13	0	0	0	<0.13	<0.13
	316(18Cr-13Ni-2.3Mo)	0	0	0	<0.13	<0.13	0	0	0	<0.13	<0.13

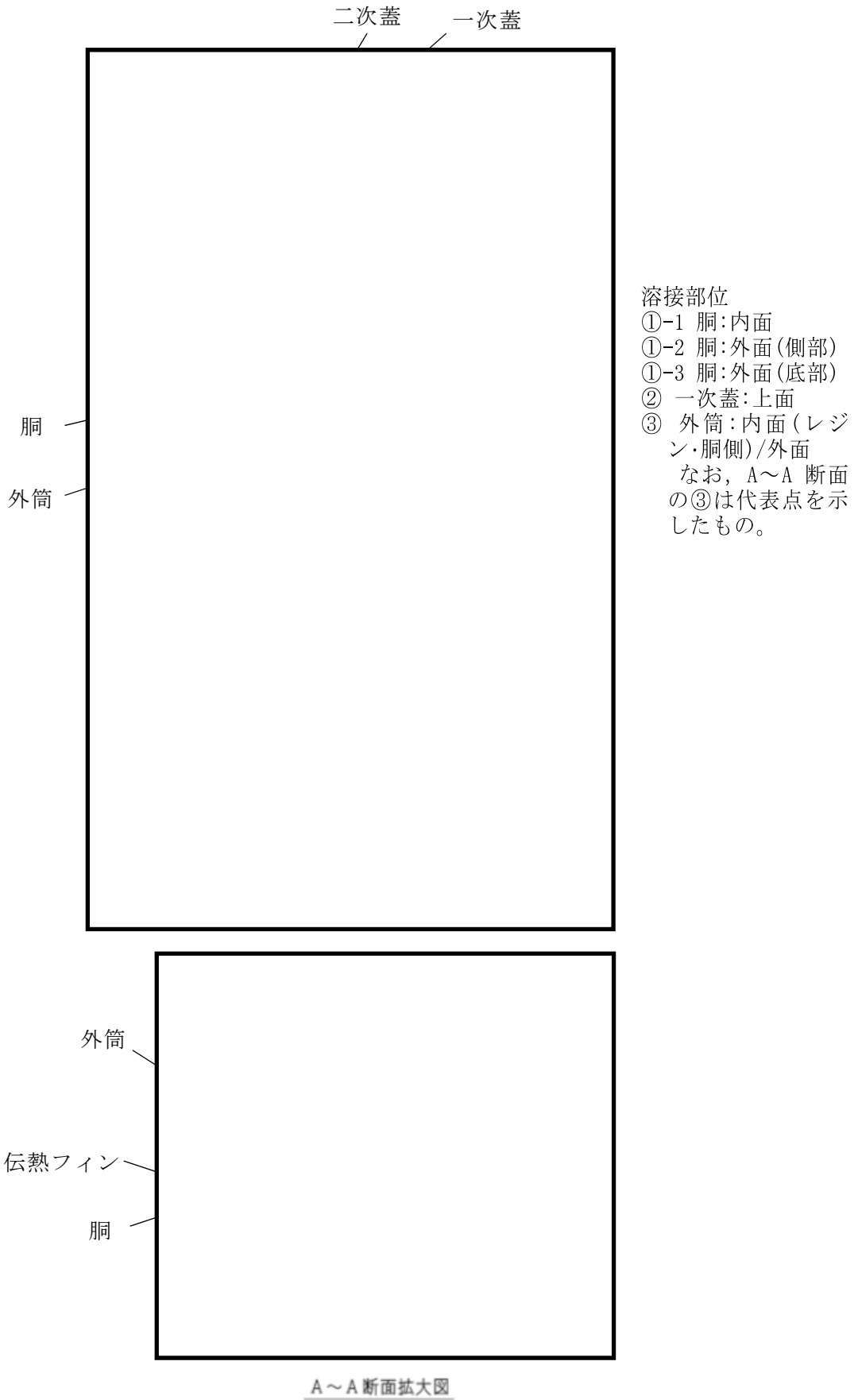
注. (1) ばく露場所：Limon Bay (パナマ運河地帯) (2) ばく露場所：Miraflores Locks (パナマ運河地帯) 海岸から8km
 (3) 最も深い20個の平均 (4) データなし



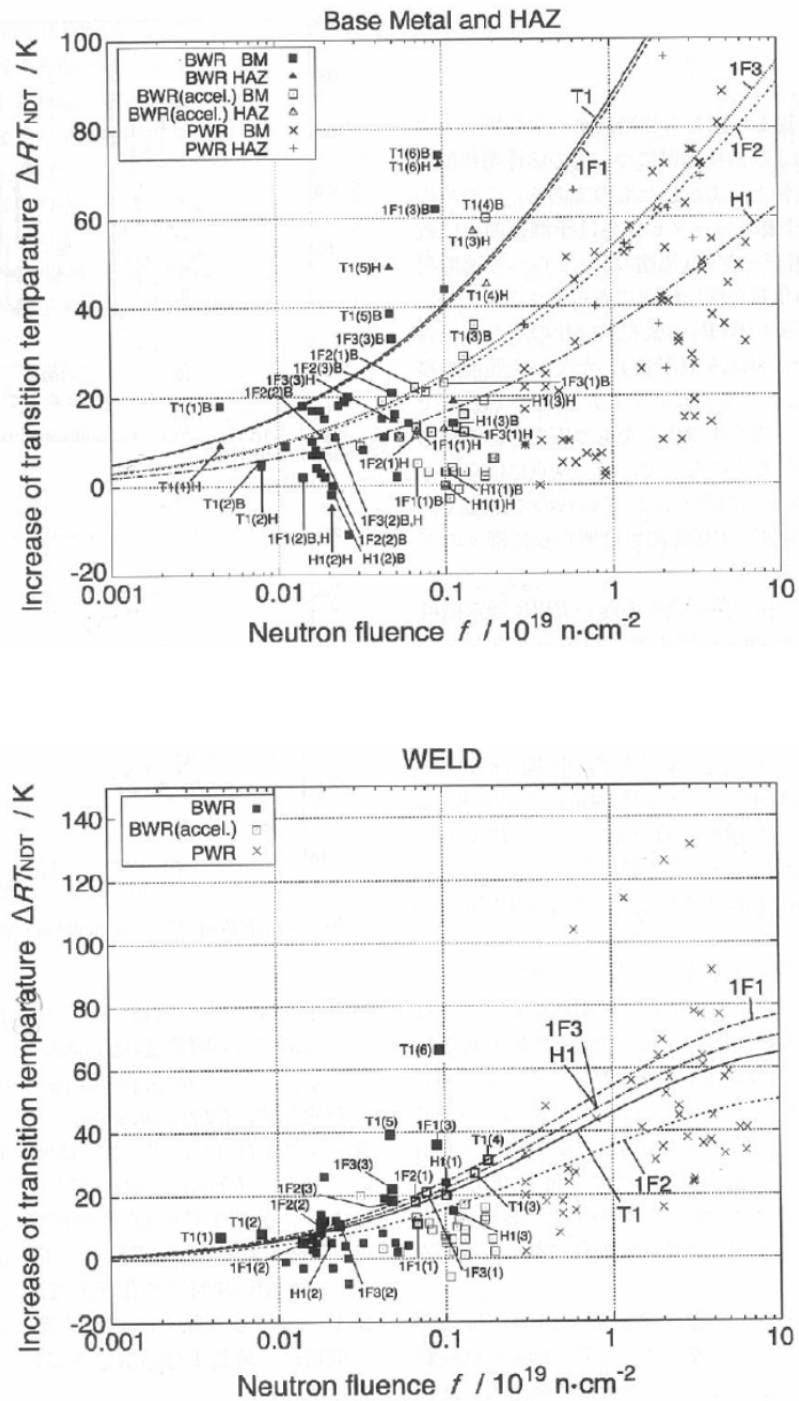
第1図 炭素鋼・低合金鋼のシャルピー遷移温度増加と照射量 (n/m^2) の関係²⁾
 (図中の照射量の単位 $1 n/m^2$ は、 $1 \times 10^{-4} n/cm^2$)



第2図 低合金鋼の中性子照射の影響評価結果³⁾

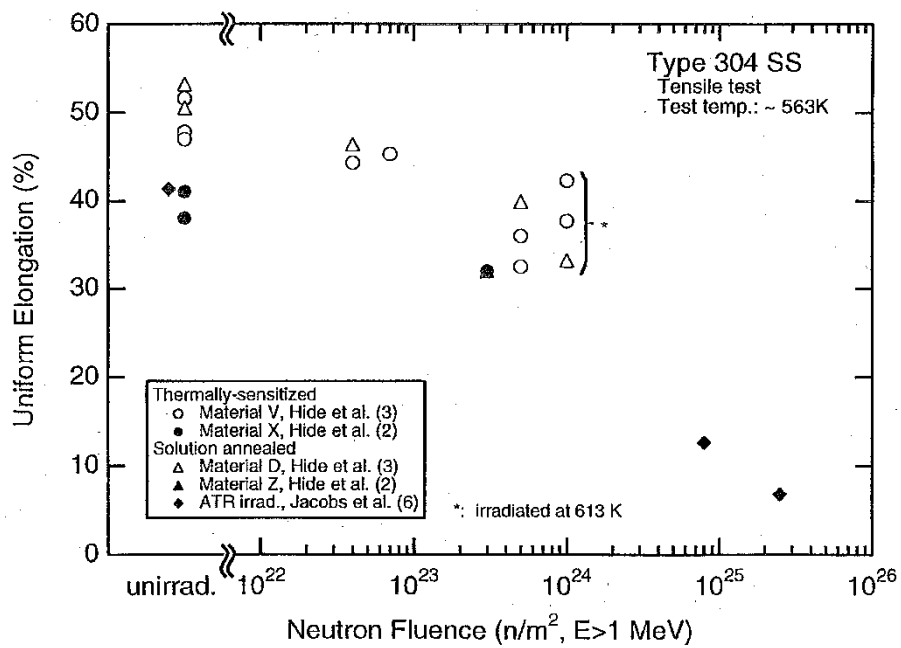
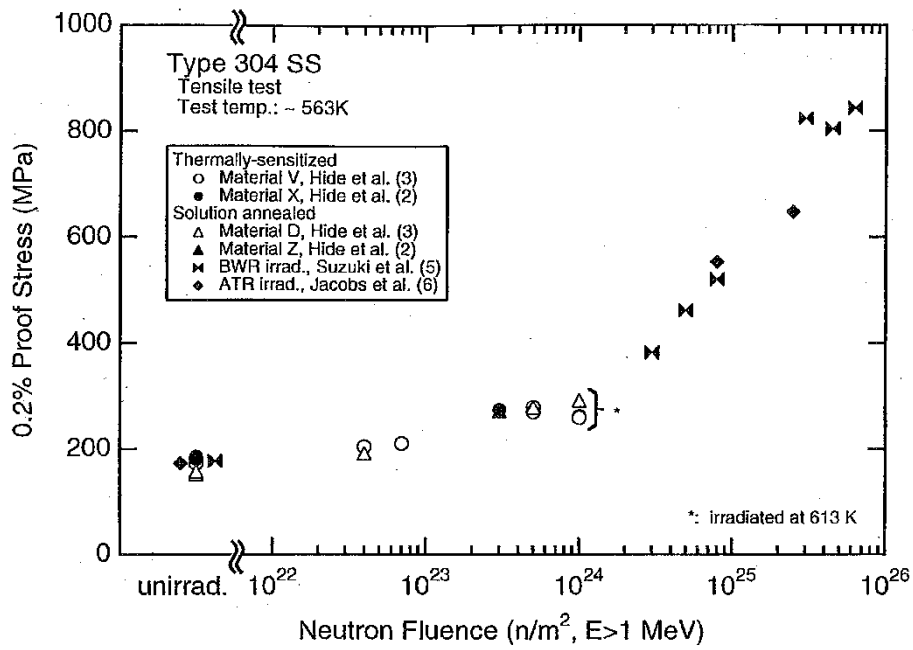


第3図 キャスク本体の溶接部

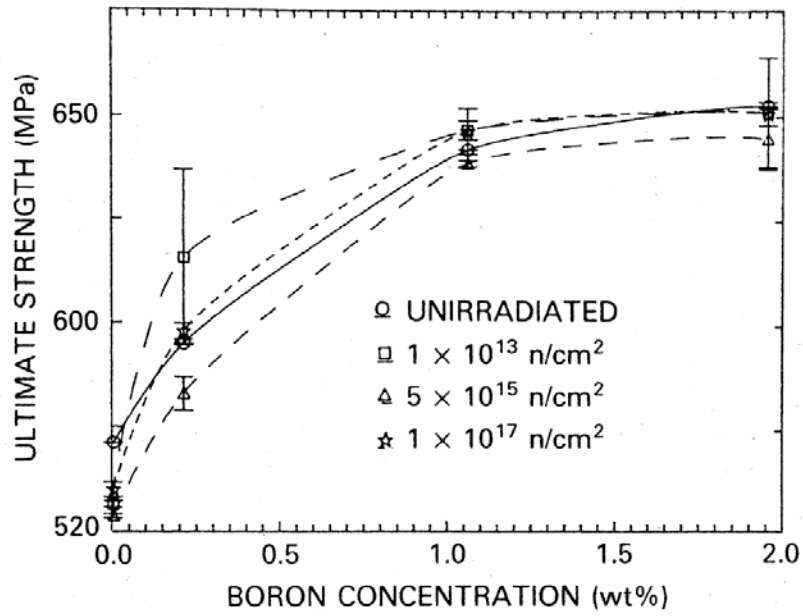


第4図 压力容器鋼材の脆性遷移温度増加と照射量⁵⁾

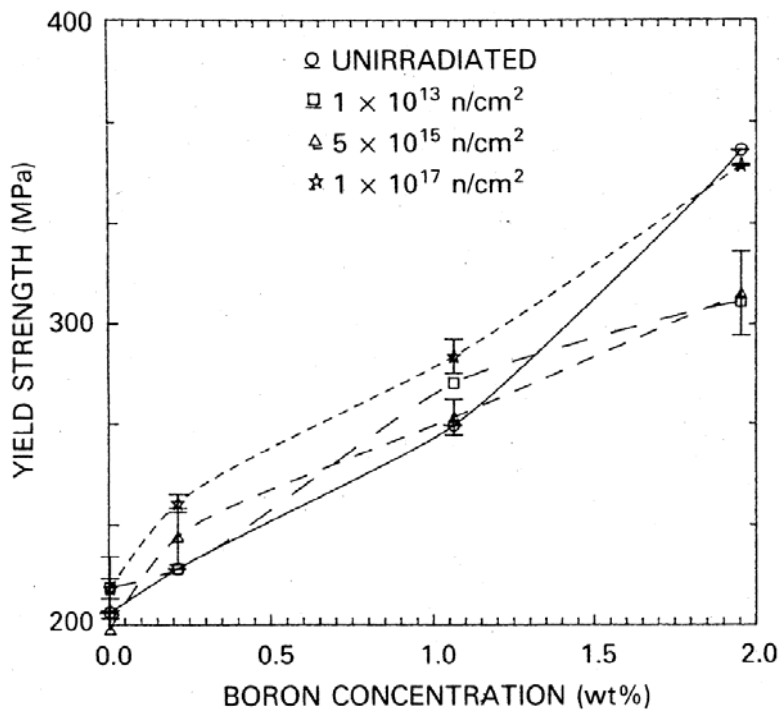
- ・国内軽水炉のデータプロットおよび敦賀-1, 福島第一-1~3, 浜岡-1を照射脆化予測式により曲線で示したもの
- ・中性子照射量の単位を n/cm² に換算すると 0.001×10¹⁹n·cm⁻² は 10¹⁶n/cm²



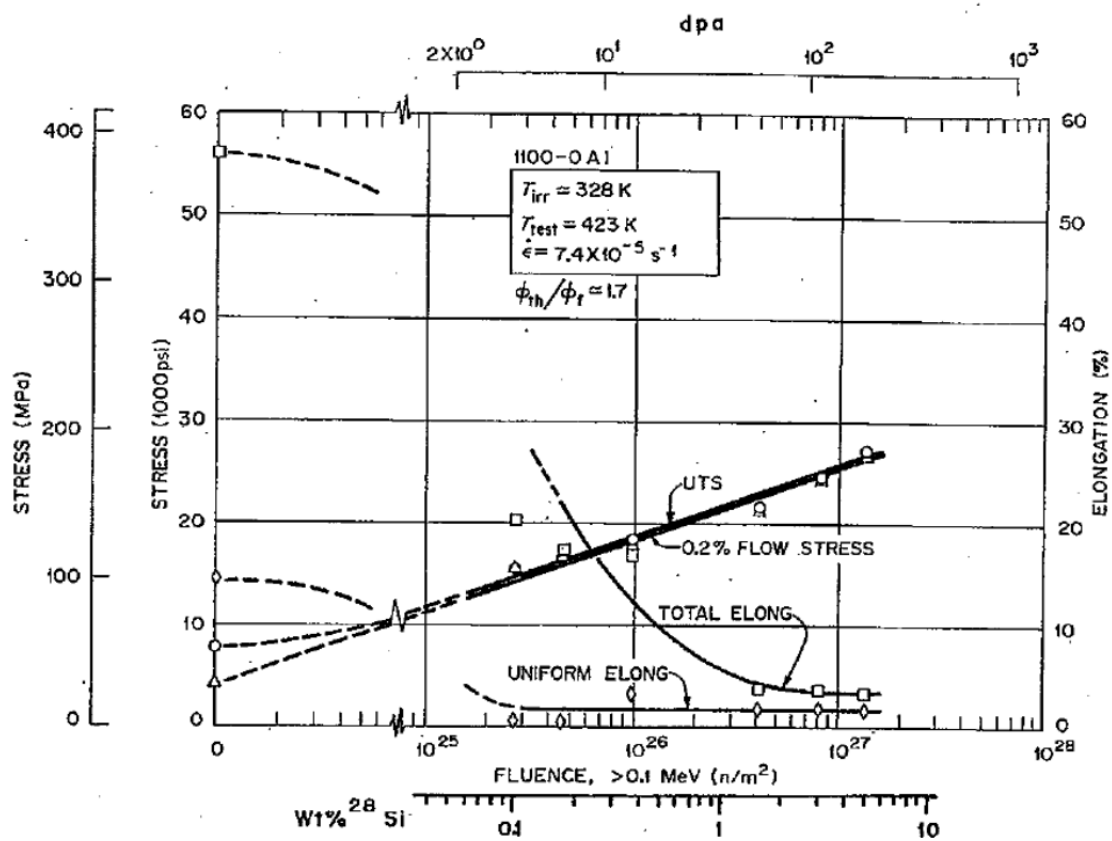
第5図 ステンレス鋼の中性子照射の影響評価結果⁷⁾



第6図 未照射と照射のボロン添加ステンレス鋼の引張強さ⁸⁾



第7図 未照射と照射のボロン添加ステンレス鋼の0.2%耐力⁸⁾



第8図 アルミニウム合金の中性子照射の影響評価結果 (1000系)¹⁴⁾

参考文献

- 1) (独)原子力安全基盤機構, 「平成 15 年度 金属キャスク貯蔵技術確証試験 最終報告」, (独)原子力安全基盤機構, (平成 16 年 6 月)
- 2) K. Farrell, et al., “An evaluation of low temperature radiation embrittlement mechanisms in ferritic alloys”, Journal of Nuclear Materials, Vol.210, 268-281(1994)
- 3) 長谷川正義, 「原子炉材料ハンドブック」, 長谷川正義, 三島良績編, 日刊工業新聞社, 東京, p662 (1977)
- 4) (独)原子力安全基盤機構, 「平成 21 年度 中間貯蔵施設基準体系整備事業報告書(中間貯蔵施設基準体系整備)」, (独)原子力安全基盤機構, (平成 23 年 3 月)
- 5) 日本金属学会, 「国内沸騰水型原子炉圧力容器鋼材における照射脆化-監視試験データの解析-」, 日本金属学会誌, 第 72 巻 第 4 号, p261-267 (2008)
- 6) (社)軽金属協会, 「アルミニウムハンドブック (第 4 版)」, (社)軽金属協会, p60 (1990)
- 7) (財)電力中央研究所, 「304 ステンレス鋼の SCC 特性に及ぼす中性子照射効果(その 2) - 熱鋭敏化材の SCC 感受性に及ぼす照射影響 -」, (財)電力中央研究所, (平成 9 年 6 月)
- 8) S. E. Soliman, et al., “Neutron effects on borated stainless steel”, Nuclear Technology Vol.96 (1991)
- 9) (株)日本原子力情報センター, 「使用済燃料貯蔵技術の現状と課題」, (株)日本原子力情報センター, (1998 年 1 月 13 日)
- 10) A. Kosaki, et al., “Advanced R&D on Spent Fuel Storage -Spent Fuel Burn-up Fuel and Spent MOX (Mixed-Oxide:Pu and U) Fuel-”, The 14th Annual Spent Fuel Management Seminar, Washington, D.C., Jan.29-31 (1997)
- 11) (財)電力中央研究所, 「使用済燃料貯蔵容器用ガスケットの長期密封特性」, (財)電力中央研究所, (平成 4 年 7 月)
- 12) (財)電力中央研究所, 「平成 20 年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術調査

等（中間貯蔵設備等長期健全性確証等試験のうち貯蔵設備長期健全性等調査）報告書」，（財）電力中央研究所，（平成 21 年 3 月）

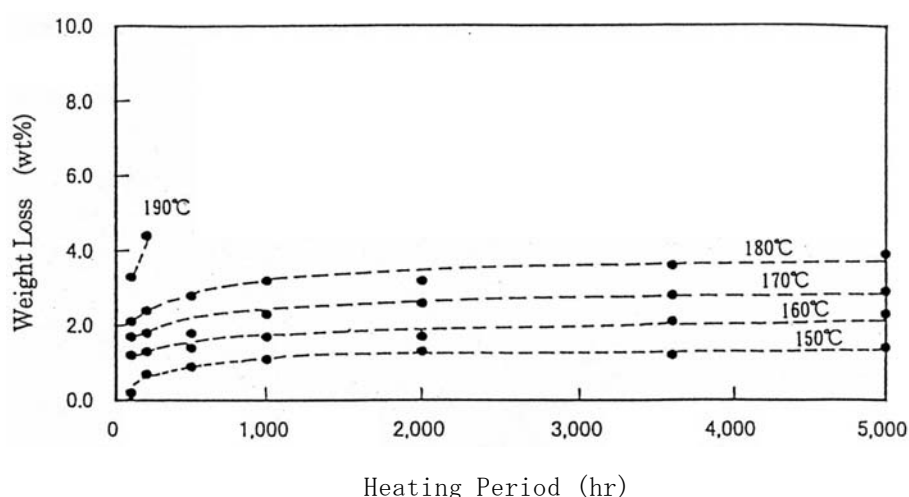
- 13) M. J. Mills, “Deformation and Fracture Characteristics for Irradiate Inconel X-750” , Nuclear Technology, American Nuclear Society, Vol. 73, 102 (1986)
- 14) K. Farrel and A. E. Richt, “ Microstructure and tensile of heavy irradiation 1100-0 aluminum” Effects of Radiation on Structural Materials, ASTM STP 683, 427-439(1979)

レジンの熱分解による重量減損と
放出される生成物による周囲部材への腐食影響について

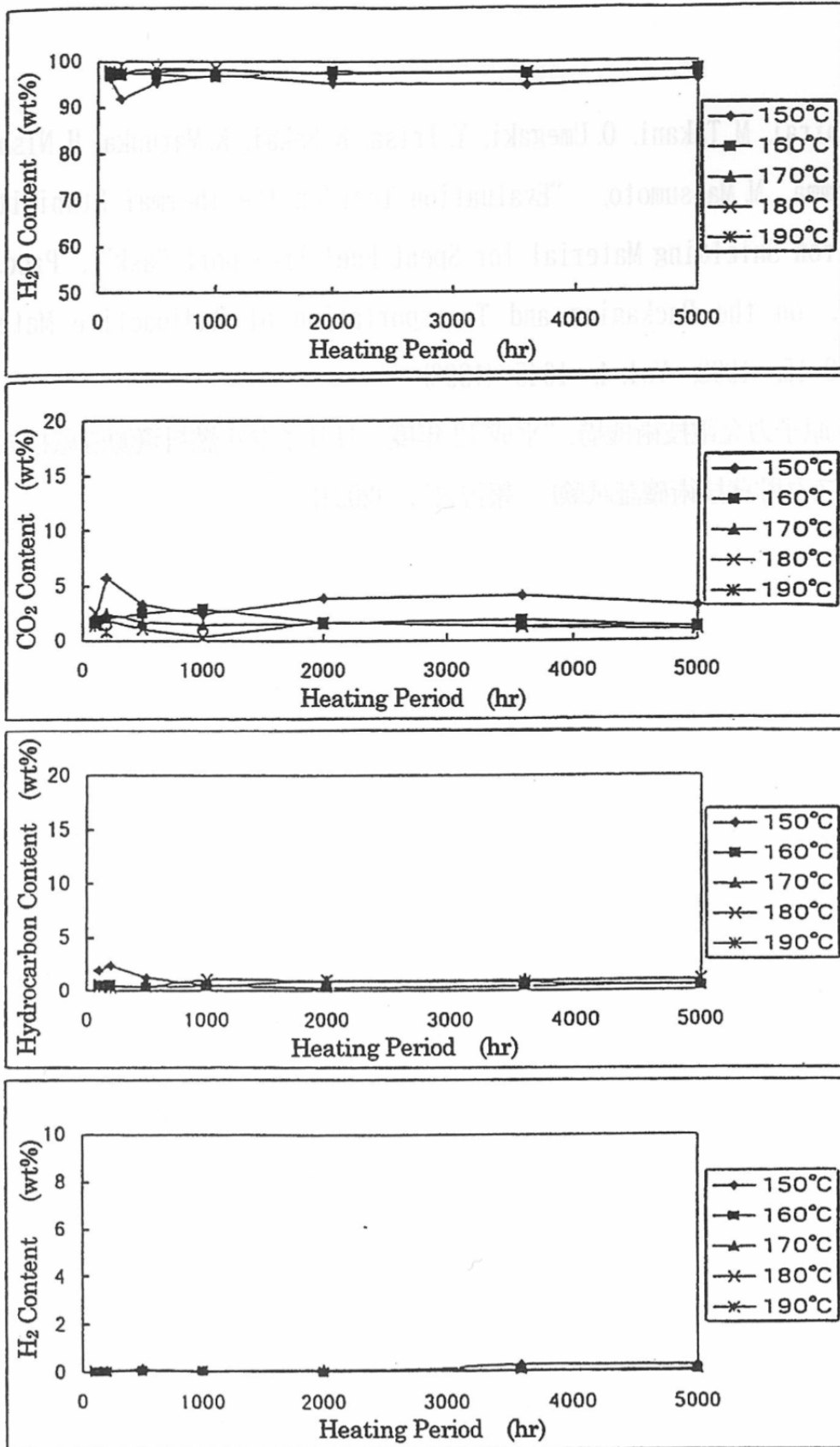
実機のレジン保持空間環境を模擬したエポキシ系レジン(NS-4-FR)の密閉系の環境における連続加熱試験により確認された重量減損率を別添1-1図に、放出ガス成分の分析結果を別添1-2図に示す。

重量減損率(別添1-1図)は、180℃以下では試験開始後に時間と共に増加するが、徐々に増加割合は減少し、5000時間に到達するまでに有意な変化は見られなくなり、170℃以下では5000時間でも3wt%以下であることが確認されている。また、熱分解によりレジンから放出されるガス成分(別添1-2図)は、水、二酸化炭素、炭化水素(微量のエタン、アセトン等^[2]で金属腐食性なし)、水素で、その大部分が水分であることが確認されている。なお、BWR用大型キャスク(タイプ2)及び(タイプ2A)に使用されるメーカー開発品のレジンについても加熱試験後のガス分析により、放出される生成物がNS-4-FRと同様であり大部分が水分であることが確認されている。

これらのことから、レジン周囲の金属キャスク部材の腐食において、主因となるものは水分であると考えられる。



別添1-1図 エポキシ系レジンの連続加熱試験における重量減損率^[1]



別添1-2図 エポキシ系レジンの連続加熱試験における放出ガス分析結果^[1]

そこで、レジンの熱分解による重量減損分を全て水分とし、全てが放出されて炭素鋼^{※1}と反応すると仮定して設計評価期間(60年間)におけるレジン周囲部材の腐食量を算出すると、別添1-1表に示すとおりにわずかなものであり、レジン周囲部材への影響は問題となるものではないと考える。

さらに、下記理由を考慮すると実際のレジンの重量減損は少なく、有意な腐食影響はほとんど生じないものと考えられる。

- ・連続加熱試験では均一加熱条件であるのに対して、実機では温度勾配があるために加熱条件として緩和される方向であること。
- ・レジン材料が本来吸湿性を有しており、レジンの高温部で発生した水分は低温部で吸収されることが推定される^[3]こと。

別添1-1表 レジンの熱分解による腐食量評価

金属キャスク種類	腐食量 ^{※2}	部材厚さに対する腐食厚さ割合
BWR用大型(タイプ2)	0.2mm程度	胴 : <input type="text"/> %程度 外筒 : <input type="text"/> %程度 伝熱フィン : <input type="text"/> %程度

※1 伝熱フィンには銅も使用されているが、銅は鉄よりも貴(不活性)な金属で鉄よりも耐食性があるため、銅より鉄が先に腐食すること(参考1-1参照)から考慮しないものとする。

※2 腐食量評価を参考1-2に示す。


参考文献

- [1] S. Shirai, M. Takani, O. Umegaki, Y. Iriya, K. Sakai, K. Maruoka, H. Nishioka, O. Kadota, Y. Momma, M. Matsumoto, "Evaluation Test on the Thermal Stability of Resin as Neutron Shielding Material for Spent Fuel Transport Cask", Proc. the 12th Int. Conf. on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials, Paris, May10-15, 1998, Vol. 4, 1645 (1998)
- [2] 原燃輸送(株), 「使用済燃料等の輸送容器に用いられる中性子しゃへい材(NS-4-FR)の連続加熱評価試験」, 原燃輸送(株), NFT-TR-97001, (1997)
- [3] (独)原子力安全基盤機構, 「平成15年度 金属キャスク貯蔵技術確証試験最終報告」, (独)原子力安全基盤機構, (2004)

参考 1-1 : 金属の耐食性

下表に示すように、単体金属には化学的に活性の高い(イオン化傾向の高い)金属(卑な金属)と安定な(イオン化傾向の低い)金属(貴な金属)があり、貴な金属ほど錆や腐食に強い金属である。

表 2.3 金属の熱力学的貴/卑と耐食性との対応¹⁾

熱力学的 貴/卑		イオン化反応	E° (V vs. SHE)		実環境中耐食性
貴	卑				
↑	金	Au/Au ³⁺	1.5		Au 高
	パラジウム	Pd/Pd ²⁺	0.99		Ti ↑
	銀	Ag/Ag ⁺	0.80		Pd
	銅	Cu/Cu ²⁺	0.34		Zr
	鉛	Pb/Pb ²⁺	-0.13		Ag
	ニッケル	Ni/Ni ²⁺	-0.25		Cu
	コバルト	Co/Co ²⁺	-0.28		Al
	鉄	Fe/Fe ²⁺	-0.44		Cr
	亜鉛	Zn/Zn ²⁺	-0.76		Fe
	クロム	Cr/Cr ³⁺	-0.74		Ni
	マンガン	Mn/Mn ²⁺	-1.19		Co
	ジルコニウム	Zr/Zr ²⁺	-1.54		Pb
	アルミニウム	Al/Al ³⁺	-1.66		Zn
	チタン	Ti/Ti ²⁺	-1.63		Mg ↓
↓	卑	マグネシウム	Mg/Mg ²⁺	-2.37	Mn 低

参考文献

- 1) (社)腐食防食協会編, 「材料環境学入門」, 丸善, (1993)

参考 1-2 : レジン劣化生成物の水分による腐食量評価
(BWR用大型キャスク (タイプ2))

レジンは加熱により、水分を主とした劣化生成物が生じる。劣化生成物を全て水とし、胴外面・伝熱フィン・外筒内面の腐食量を算出する。腐食量の算出にあたっては、残留水分が全て腐食に消費されるものとし、均一に腐食した場合の腐食厚さを求める。

1. 水分量の設定

60年間のレジンの重量減損は wt % (最高温度/中央値/閉鎖系/温度履歴考慮) と算出される。したがって、レジンの重量減損量を wt% とし、その全てが水とした場合、単位長さ当たりのレジン重量 kg/cm から、単位長さ当たりに生じる水重量は g/cm と求められる。ここで、水の分子量 18.01528 g/mol から、 g/cm の水の単位長さ当たりの mol 数 N_{H_2O} は mol/cm となる。

2. 腐食量評価

胴及び外筒は炭素鋼で構成される。また、伝熱フィンは、銅と炭素鋼で構成されるが、高湿度雰囲気では炭素鋼が腐食し、銅はほとんど腐食しないため、炭素鋼の腐食量を求める。なお、炭素鋼は鉄 100% とする。鉄の酸化反応を、 $2Fe + 3H_2O \rightarrow 3H_2 + Fe_2O_3$ とすると、単位長さ当たりの酸化される鉄の重量 m_{Fe} (g/cm) は以下の式より求められる。

$$m_{Fe} = \frac{2}{3} N_{H_2O} \times M_{Fe} \quad (2.1 \text{ 式})$$

ここで、 M_{Fe} : 鉄の原子量 (g/mol), 55.845 g/mol

N_{H_2O} : 単位長さ当たりに生じる水の mol 数

(2.1 式) より単位長さ当たりの水のモル数は mol/cm であることから、単位長さ当たりの酸化される鉄の重量は g/cm と求められる。

したがって、腐食厚さ t (cm) は、以下の式で求められる。

$$t = \frac{(m_{Fe} / \rho_{Fe})}{S} \quad (2.2 \text{ 式})$$

ここで、 ρ_{Fe} : 鉄の密度 (g/cm^3), $7.85 \text{ g}/\text{cm}^3$

S : 単位長さ当たりの胴外面・伝熱フィン (炭素鋼面) ・
外筒内面の表面積 (cm^2/cm)

$$S = \text{胴外径} \times \pi + \text{伝熱フィン幅} \times \text{枚数} + \text{外筒内径} \times \pi$$



一様に腐食するとすれば, (2.2 式) より腐食厚さは約 0.22mm と求められる。



金属キャスク構成部材のクリープ影響について

金属材料のクリープ変形は、材料がおかれる環境（応力、温度）及び時間が関連し、応力・温度が高いほどひずみ（クリープ変形）は大きくなり、クリープ破断する時間が短いことが知られている。金属キャスクに使用する構成部材のクリープの評価は、以下のとおりである。

金属キャスク構成部材の温度は、除熱設計における熱解析にて各部材の温度を算出している。金属工学では金属材料がクリープ変形を起こす温度領域の境界として、融点（絶対温度）の $1/3 \sim 1/2$ 以上とされており、それ以下の低い温度領域においてはクリープによる変形量が無視できるほどに小さいため、クリープが問題視されることは少ないとされている。（ $1/3$ の場合の参考文献例としては、参考文献[1][2]）

一方、応力については、構造強度設計における応力解析にて熱解析での温度を考慮して構成部材の応力を算出し、各供用状態における構造部材の応力強さが JSME 金属キャスク構造規格で要求される許容応力以下であることを評価している。

貯蔵時の金属キャスク構成部材の温度と応力を別添 2 - 1 表、別添 2 - 2 表に示す。熱解析結果の各部材の温度（最高温度）は、各金属材料がクリープ変形を起こす温度の最低温度（融点（絶対温度）の $1/3$ ）と比較しても十分低く、クリープ変形が発生する領域には達しない。一方、応力は許容応力よりも十分小さく、かつ温度がクリープ発生領域にないことから、当該構成部材においてはクリープに応力を考慮する必要がないレベルである。

さらに、貯蔵期間の経過につれて使用済燃料集合体の崩壊熱ならびに構成部材の温度が一途に低下する方向にあることから、貯蔵期間を上回る設計評価期間（60 年間）における金属キャスク構成部材のクリープは無視できるレベルにある。

なお、金属ガスケット材については、外被材であるアルミニウムがクリープ発生の温度領域にあるが、クリープによる応力緩和が考慮された設計であることから貯蔵期間を上回る設計評価期間（60 年間）における金属キャスクの閉じ

込め機能を維持できる。(別添7参照) また、バスケットの材料であるボロン添加ステンレス鋼は、ボロンの添加により、母材中の金属間化合物が分散析出することでクリープ特性が改善されること^[1]が知られているが、上記に記載のとおり除熱解析によるバスケット材の温度(最高温度)は、クリープ領域にないことや発生応力も非常に小さいことから、クリープの考慮は無視できる。

別添2-1表 貯蔵時の金属キャスク構成部材の温度

部位	材料	解析温度 (最高温度) (°C)	融点の1/3 (K)	融点 ^{※2} (K)
本体胴	炭素鋼	142	約 560~590 (約 285~315°C)	約 1670~1770 ^{※3} (約 1400~1500°C)
一次蓋		96		
二次蓋		85		
外筒		113		
一次蓋ボルト	合金鋼	89		
二次蓋ボルト		85		
伝熱フィン ^{※1}	炭素鋼	128		
バスケット	ボロン添加 ステンレス鋼	248	約 560~565 (約 285~290°C)	約 1670~1690 (約 1400~1420°C)
金属ガスケット	ニッケル基合金	89	約 550~570 (約 275~300°C)	約 1660~1700 (約 1390~1430°C)
	アルミニウム		約 311 (約 38°C)	約 933 (約 660°C)

※1 伝熱フィンは炭素鋼と銅からなるクラッド鋼で、銅は伝熱部材(非強度部材)である。

※2 金属元素の融点は元素毎の融点については明確であるが、複数の元素から成る材料の融点は、成分により異なることから融点に幅が生じる。また、炭素鋼の場合、一般的に炭素の含有量でグループ化して表す。

各材料の融点は以下による。

日本機械学会編, 機械工学便覧 B. 応用編, B4 材料学・工業材料, 丸善(1998)
アルミニウムハンドブック(第6版), (社)日本アルミニウム協会(2001)
幡野 佐一, 梅川 雪夫, 工業材料便覧, 丸善(1981)

※3 キャスクに使用する炭素鋼の部材は全て同じ材料ではないが、全て低炭素鋼に該当する。また、使用する合金鋼の融点は低炭素鋼と同程度である。

別添 2 - 2 表 貯蔵時の金属キャスク構成部材の応力
(Ss 地震力が作用する場合(供用状態 Ds))

部位	材料	応力強さ又は応力 ^{※1} (MPa)	設計基準(許容応力) ^{※2} (MPa)
本体胴	炭素鋼	37	183
一次蓋		61	183
二次蓋		18	236
外筒		61	247
一次蓋ボルト	合金鋼	337	831
二次蓋ボルト		274	848
バスケット	ボロン添加 ステンレス鋼	6	437

※1 設工認の計算値より代表値を記載。(外筒と伝熱フィンは、外筒の伝熱フィン結合部の曲げ応力を評価。)

※2 金属キャスク構造規格に基づく設計基準。

参考文献

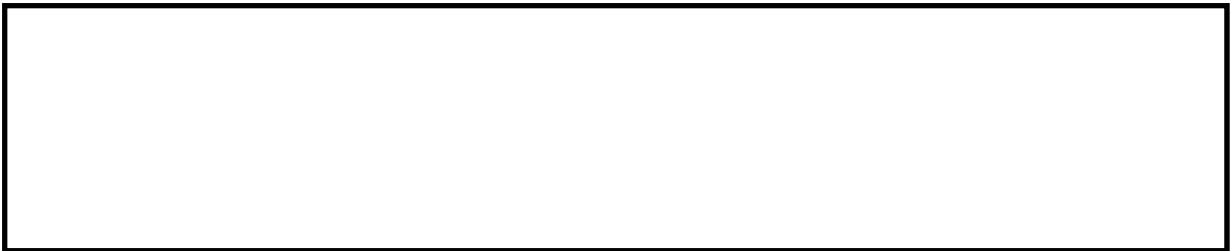
- [1] ステンレス協会, 「ステンレス鋼便覧(第3版)」, 日刊工業新聞社, (1995)
- [2] 木村一弘, 「耐熱鋼のクリープ破断寿命予測」, 日本金属学会誌, 第 73 巻 第 5 号, (2009)

別添 3

金属キャスク本体と伝熱フィンの接合部の除熱機能への影響評価について

以下にBWR用大型キャスク（タイプ2）及び（タイプ2A）のキャスク本体と伝熱フィンの接合部について伝熱パス不良時の影響について説明する。

キャスク本体と伝熱フィンの接合部の構造を別添3-1図に示す。伝熱フィンは、側部レジンが充填される胴（炭素鋼）と外筒（炭素鋼）の間に設置されて、その間の伝熱を促進する。



熱解析において、支配的な伝熱パス^{※1}や非接触部^{※2}や構造が複雑な部位^{※3}を考慮して、別添3-2図のようにモデル化している。別添3-2図のB部（胴との接合部）とE部（外筒との接合部）の熱伝導率をパラメータにして、貯蔵状態における胴の最高温度を求めた結果を別添3-1表に示す。伝熱フィン接合部の溶接が部分的に未溶着である状態として、伝熱フィン接合部の溶接が半分しか溶着していない場合を仮定しても、温度上昇は□℃程度であり、伝熱フィン溶接部が部分的に未溶着であっても、除熱機能への影響はない。



注記： ※1

※2

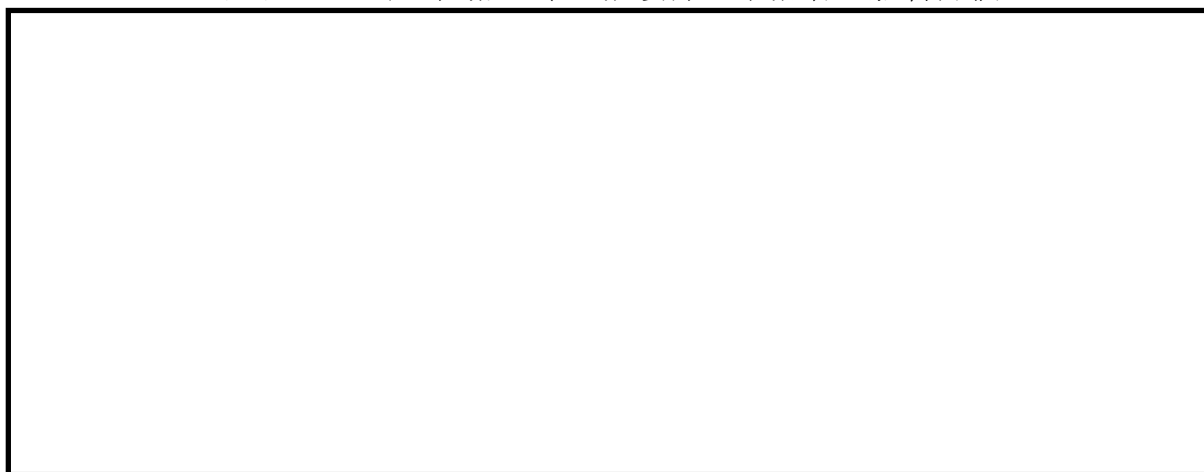
※3

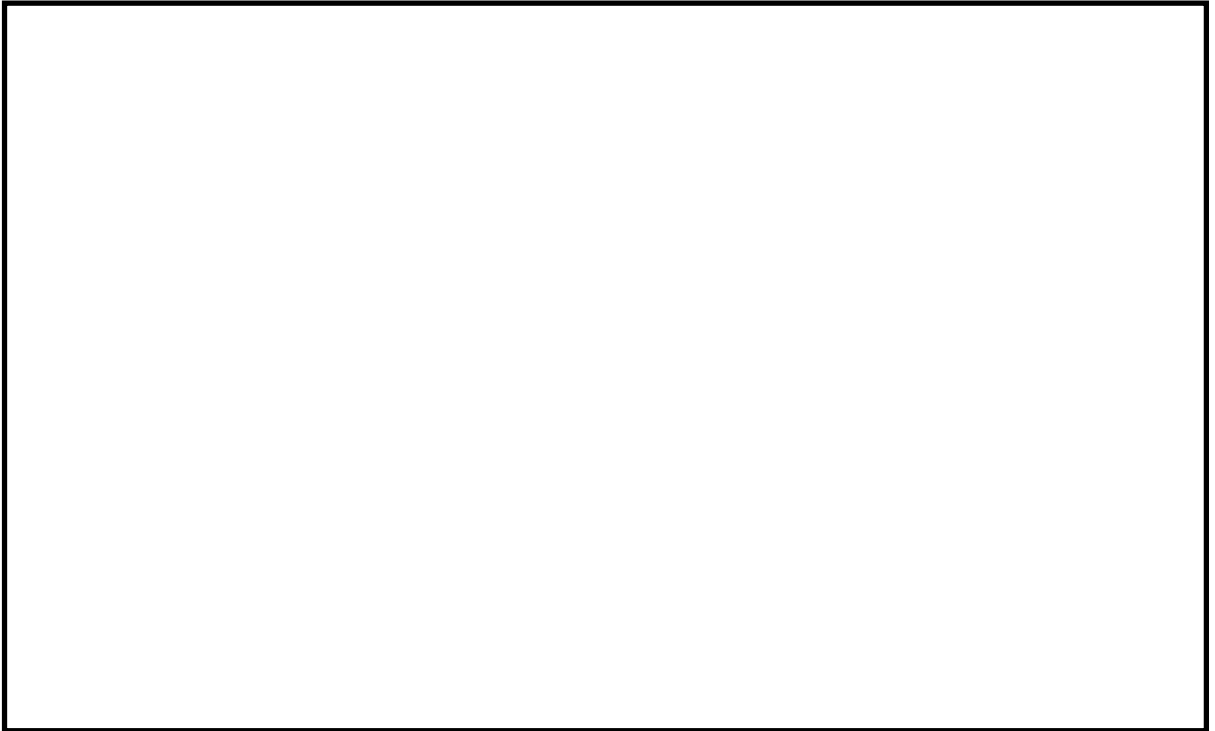




別添 3 - 1 図 キャスク本体と伝熱フィン接合部の構造

別添 3 - 1 表 伝熱フィン溶接部の未溶着の影響評価





別添 3 - 2 図 伝熱フィン接合部の熱解析モデル

レジンの重量減損量を劣化パラメータで整理することの妥当性について

劣化パラメータによる劣化評価は、国際電気標準規格（IEC-216）において多くの電気絶縁材料の寿命評価について成立するとされる経験式、及び多くの樹脂材料で重量減損が加熱時間の対数に比例するとの実験事実に基づいて構成された手法である。

劣化寿命： t に至るまでの反応速度： r にアレニウスの式^{*}を仮定すると、

$$r = A \cdot \exp(-Q/RT)$$

A: 頻度因子

Q: 活性化エネルギー

R: 気体定数

T: 絶対温度

※アレニウスの式
 化学反応速度 k と絶対温度 T との関係を表したもので、ある温度での化学反応の速度を予測する

$$k = A \cdot \exp(-E/RT)$$

k: 化学反応速度

A: 頻度因子

E: 活性化エネルギー

R: 気体定数

T: 絶対温度

ここで、 $r = \Delta x / \Delta t$ (x は寿命に関する特性値) とおき、時間積分すれば、

$$1/t = A' \cdot \exp(-Q/RT)$$

ここで、 $A' = A/x$

したがって、 $T(\ln(A') + \ln(t)) = Q/R$ 、式を簡略化すると、

$$T(C + \ln(t)) = \text{Const} \quad \text{あるいは} \quad T(C + \log(t)) = \text{Const}$$

温度と劣化寿命が一つの関係式で表されることを利用し、高温短時間の試験データから、より低温長時間の劣化寿命を予測することができる。上記の関係式は、温度の異なる金属のクリープ破断データが $C=20$ 前後の値^[1]で整理され、プラスチックのクリープ破断データでは $C=10 \sim 25$ の値^[2]で、材料の種類によって変化する。これらの関係はラーソン・ミラー・パラメータ (LMP) として知られている。レジンの重量減損率の評価は、同様の考察からある重量減損率に至るまでの時間と温度を一つの関係式(ここでは、劣化パラメータと呼ぶ)で表し、試験データに基づき a, b, C の定数を定めたものである。

[ラーソン・ミラー・パラメータ]

$$LMP = T \cdot (C + \log(t))$$

T: 絶対温度 (K)

t: 時間 (hr)

C: 定数

[劣化パラメータによる重量減損率の算定式]

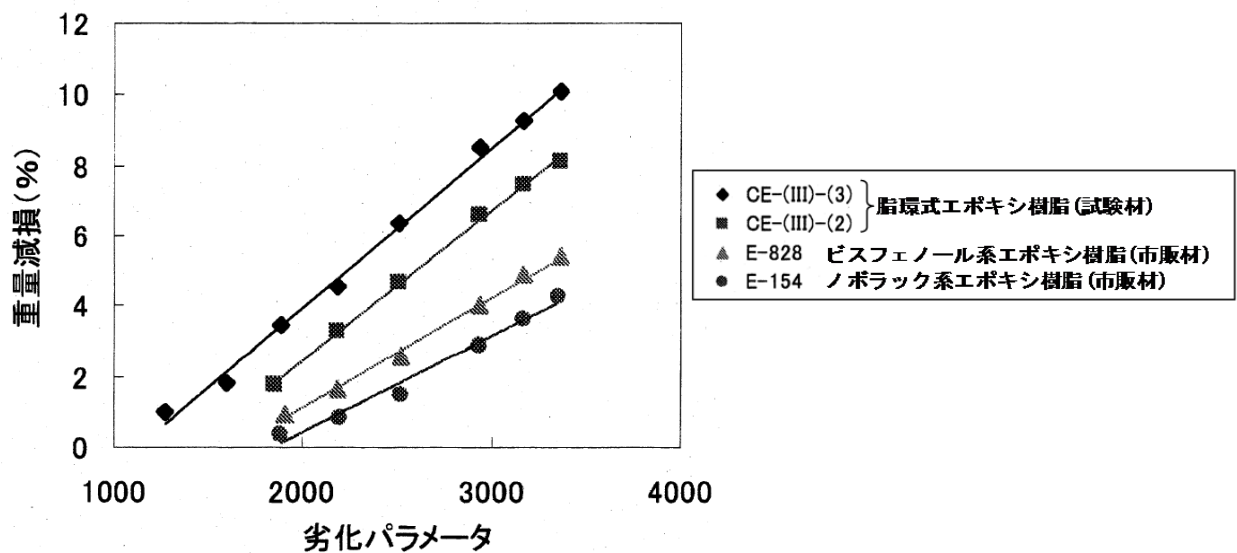
$$\Delta w = a \cdot T \cdot (C + \ln(t)) + b$$

T: 絶対温度 (K)

t: 時間 (hr)

a, b, C: 定数

(財) 原子力発電技術機構では、別添 4-1 図に示すように複数種類のレジ
ン（樹脂）の重量減損について劣化パラメータの適用性について検討し、重量
減損の整理に適用可能であることを確認している^[3]。



(加熱温度一条件/200°Cのため、C=0 と仮定)

(重量減損率が加熱時間の対数に比例)

別添 4-1 図 文献[4]を用いた整理^[3]

参考文献

- [1] F. R. Larson and J. Miller, ” A Time-Temperature Relationship for Rupture and Creep Stresses” , Transactions of the ASME, Vol.74, p765-775 (1952)
- [2] 早川浄, 「高分子材料の寿命評価・予測法」, アイピーシー, p205, (1994)
- [3] (財)原子力発電技術機構, 「平成 13 年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術確証試験 (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, p262-263, pE3-6, (2002)
- [4] M. Tokizawa, H. Okada, N. Wakabayashi, ” Novel cycloaliphatic epoxy resins. II. Curing reaction with BF_3MEA and its cured properties.” , J. Appl. Polym. Sci., Vol.50, p882, (2003)

申請キャスク[BWR用大型キャスク（タイプ2）及び（タイプ2A）]
に使用するレジンの熱、放射線照射による重量減損の影響について

BWR用大型キャスク（タイプ2）及び（タイプ2A）に使用する中性子遮蔽材(レジンはメーカー開発品のレジンであるが、(独)原子力安全基盤機構((財)原子力発電技術機構)により行われたレジンの経年劣化評価試験の結果・知見に基づき、加熱試験及び照射試験を実施し重量減損率の評価を行うとともに、照射による重量減損への影響がないことを確認したものである。

加熱試験は、最高 170℃、最長 15000 時間が実施（別添 5－1 図参照）され、そのデータによりレジンの重量減損と劣化パラメータの関係が別添 5－2 図のように整理され、貯蔵期間中の重量減損量の評価に使用している。

なお、加熱試験を実施した範囲で劣化パラメータを整理していることから、使用温度が 170℃以下であれば劣化パラメータを用いたレジンの重量減損率の算定式が利用可能である。

重量減損率 Δw (閉鎖系)は、劣化パラメータにより次式で表される。

$$\Delta w = 0.83 \times 10^{-3} \times E_p - 11.1$$

ここで、

Δw : レジンの重量減損率 (%)

E_p : 劣化パラメータ

$$= T \times (24.2 + \ln(t))$$

T : レジン温度 (K)

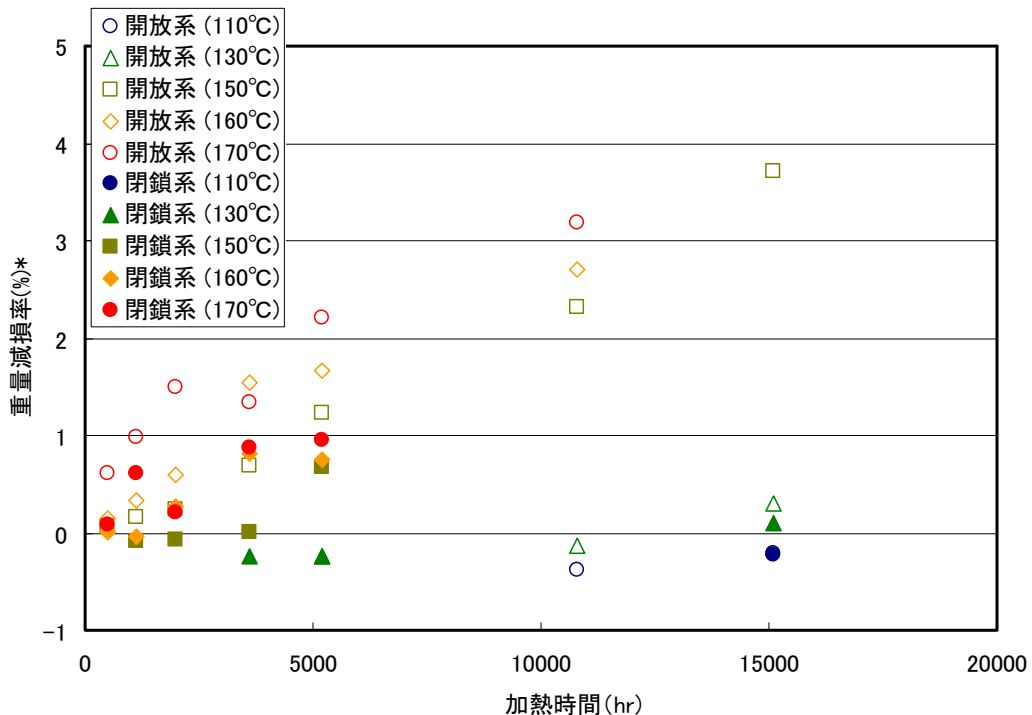
t : レジン加熱時間 (h)

長期貯蔵期間中は、使用済燃料の発熱量の低下に伴いレジンの温度も低下する。レジンの重量減損率算定に当たって、貯蔵初期の最高温度を用い温度一定として貯蔵期間中の重量減損率を算定する方法もあるが、実態に合った合理的な算定方法として貯蔵中のレジンの温度低下を考慮する。温度低下を考慮する際には、温度が時間変化することを考慮した劣化パラメータ E_p を算出（時間区分毎の温度における換算加熱時間を算出し、時間区分毎の加熱時間換算値を

累積のうえ、 E_p 算出に適用する。時間区分のイメージを別添5-3図に示す。) したうえで、重量減損率の算定式を適用する。

なお、レジンは部位(蓋部、側部、底部)により異なるが、レジンの最高温度を用いて保守的に算定する。貯蔵期間中のレジン最高温度を別添5-2表に示す。

BWR用大型キャスク(タイプ2)及び(タイプ2A)では、設計評価期間の重量減損率 Δw は約 %と算定される。また、安全側に95%の信頼度を考慮した場合の重量減損率 Δw は %となる。遮蔽解析ではこれを丸めて %の重量減損があるとして評価している。



*) 重量減損率はN数6の平均値

別添5-1図 レジンの加熱試験における重量減損率(メーカー開発品) [2]

[BWR用大型キャスク(タイプ2)及び(タイプ2A)]

(文献記載の試験データを再構成したもの)

加熱試験後(密閉系: 150°C × 3600 h)のガス分析により、レジンから発生する主要生成物が水蒸気、炭素ガスであることを確認している。

[別添5-1図の補足説明]

1. 出典[1]文献で行われた加熱試験との試験条件比較について

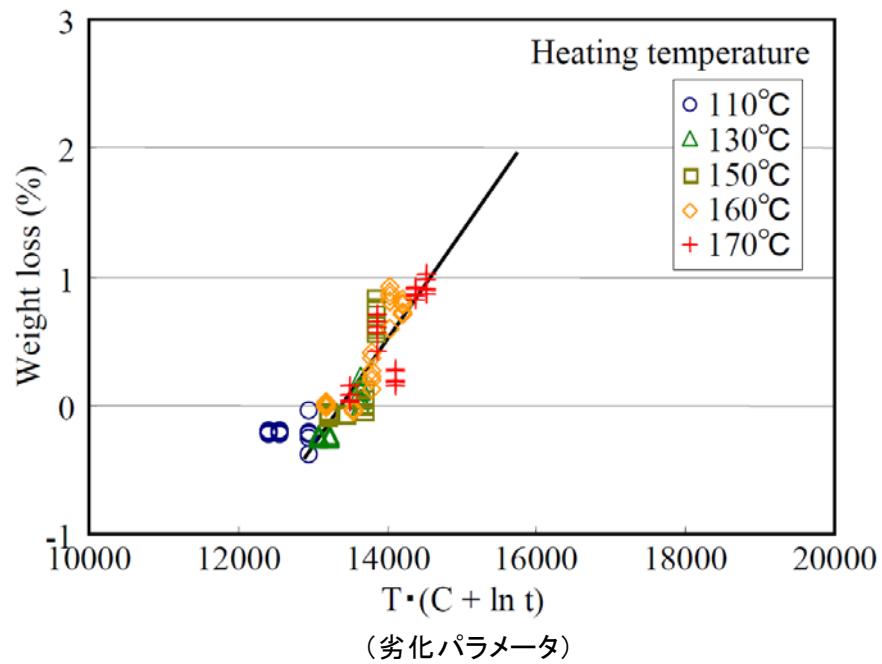
別添5-1表に示すとおり、メーカー開発品の加熱試験は引用文献[1]の加熱試験と同様な条件で実施されている。なお、加熱の重量減損は比表面積（単位体積当たりの表面積）が大きいほど進行する（反応は拡散が支配的）と考えられ、小片による試験は実機に比べて保守的な条件となる。

別添5-1表 加熱重量減損の試験条件の比較

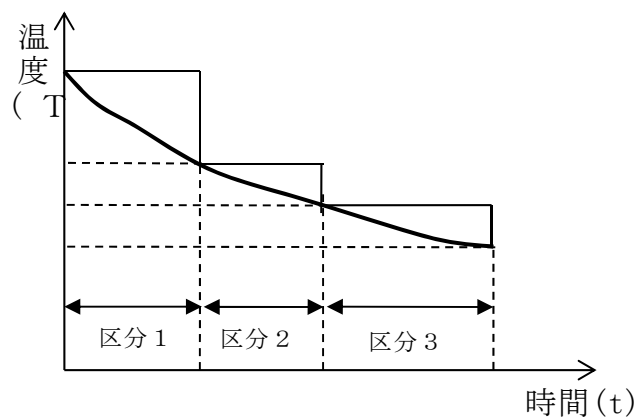
条件	出典[1]の加熱試験	メーカー開発品の加熱試験
対象レジン	エポキシ系 (NS-4-FR)	エポキシ系 (メーカー開発)
加熱環境	開放系, 閉鎖系, 密封系	開放系, 閉鎖系
試験片寸法	φ2cm×7cmH	同左
1条件あたりのN数	2あるいは3	6
温度	130, 150, 170℃	110, 130, 150, 160, 170℃
時間	最長 15000 h	最長 15000 h

2. 加熱試験での重量減損のマイナス分について

レジンの加熱による重量減損は、樹脂を構成する水素や炭素が雰囲気中の酸素によって酸化され、低分子量の酸化生成物が離脱することと、添加材の水酸化アルミニウムを構成する水和物の一部が分解・揮発することで進行する。別添5-1図の結果は、試験温度が低い場合は酸化による重量増加が進み、時間経過に伴い離脱や分解・揮発が有意になってくるが、試験温度が高い場合は離脱や分解・揮発が有意になり、重量減損が増加する傾向を示すものである。



別添5-2図 レジンの重量減損と劣化パラメータの関係（メーカー開発品）^[2]
 [BWR用大型キャスク（タイプ2）及び（タイプ2A），閉鎖系]



別添5-3図 レジン温度低下と時間区分のイメージ

別添 5 - 2 表 貯蔵期間中のレジン最高温度

(BWR用大型キャスク (タイプ 2) および (タイプ 2 A))

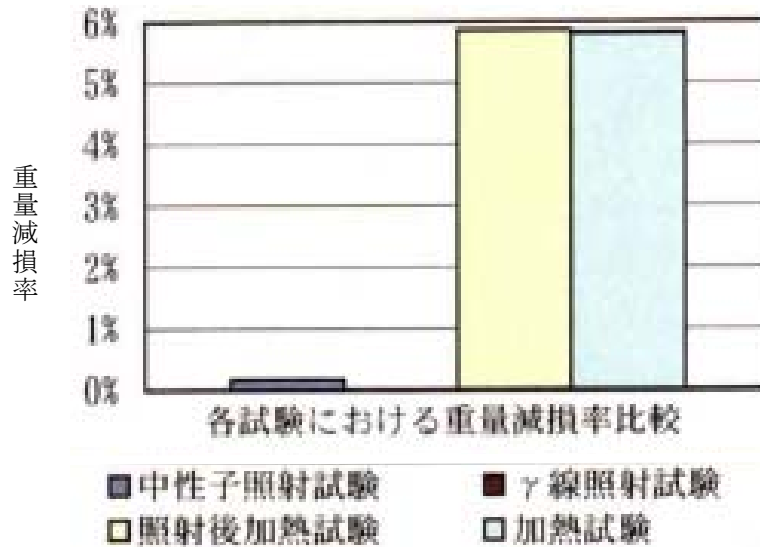
貯蔵期間 (年)	蓋部 (°C)	側部 (°C)	底部 (°C)
0	95	128	120
2			
5			
10			
20			
40			
60			

また、照射における重量減損への影響については、加熱と照射の重量減損率に対する影響評価から照射による重量減損は加熱に比べて極わずかであることが参考文献[1]で確認されている。

別添 5 - 4 図に示すとおり、照射試験結果を加熱試験及び照射後加熱試験結果と比較すると、重量減損率が 2 桁異なるレベルのオーダーであり、照射単体での減損の影響はわずかなものである。また、加熱試験結果と照射後加熱試験結果を比較した場合も照射の影響はわずかであり、照射は主要な劣化要因ではない。

BWR用大型キャスク (タイプ 2) 及び (タイプ 2 A) に使用するメーカ開発品レジンの照射に対する影響については、別添 5 - 5 図に示すように、 γ 線照射中加熱試験と加熱試験を比較すると、重量減損率において有意な差は生じておらず、エポキシ系レジン (NS-4-FR) と同様の傾向にあり、照射は主要な劣化要因ではない。

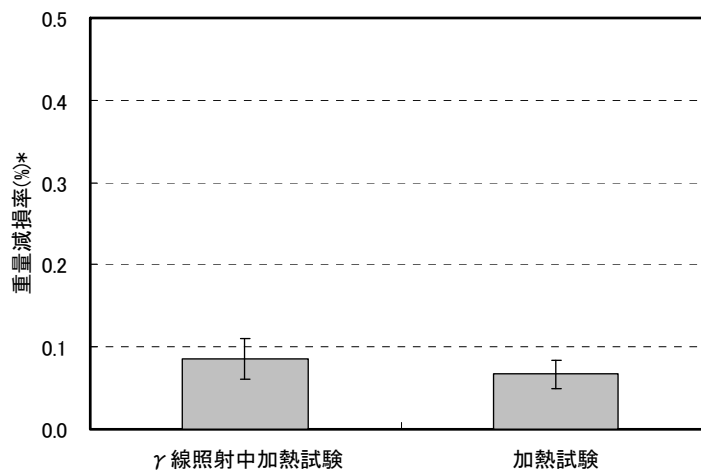
これらのことから、レジン温度を考慮して設計における重量減損率を保守的に定めれば安全上問題ないと判断できる。



別添 5 - 4 図 エポキシ系レジンの各試験における重量減損率比較^[1]

(加熱試験条件：開放系 照射試験条件：閉鎖系)

試験条件：(中性子照射量) 1.5×10^{15} n/cm² [吸収線量換算： $1.7 \sim 3.9 \times 10^4$ Gy],
 (ガンマ線照射量) 3.9×10^4 Gy,
 (加熱) 170°C × 15,000h *照射量は計画値
 注) 中性子照射試験及びガンマ線照射試験の重量減損率は、実際の結果の 10 倍の
 数値で表示したもの。



各試験における重量減損率比較

*) 重量減損率は N 数 6 の平均値

別添 5 - 5 図 エポキシ系レジンの各試験における重量減損率 (メーカー開発品)^[2]

[BWR用大型キャスク (タイプ2) 及び (タイプ2A)]

(加熱条件：開放系, 照射試験条件：開放系)

試験条件：(ガンマ線照射量) 5.6×10^4 Gy, (加熱) 140°C × 500h

参考文献

- [1] (独)原子力安全基盤機構, 「平成 15 年度 金属キャスク貯蔵技術確証試験 最終報告書」, (独)原子力安全基盤機構, (2004)
- [2] N. Kumagai, M. Kamoshida, K. Fujimura, et.al., “Optimization of fabrication condition of metal cask neutron shielding part which applied simulation of curing behavior of epoxy resin”, Proc.the 15th Int. Symp. on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials (PATRAM2007), Miami, Florida, USA, Oct. 21-26, 2007, (2007)

原子力発電所構内で貯蔵中の使用済燃料乾式貯蔵容器の
金属ガスケット調査結果について

発電所において乾式貯蔵容器を用いた使用済燃料集合体の一部貯蔵を開始したのは、福島第一原子力発電所は 1995 年 9 月から、東海第二発電所は 2001 年 12 月からである。

乾式貯蔵容器に収納し、貯蔵されている使用済燃料集合体の健全性と金属ガスケット(一次蓋)の健全性調査が、福島第一原子力発電所で 3 回(2000 年, 2005 年, 2013 年), 東海第二発電所で 1 回(2009 年)実施されており、金属ガスケットおける調査結果は以下の通りである。(別添 6 - 1 図参照)

[福島第一原子力発電所]

① 2000 年調査

一次蓋金属ガスケット表面の一部に白色化が確認されているが、蓋開放前に実施の気密漏えい試験では基準漏えい率を満足していること、開放後のシール面に異常が見られていないことから、密封機能は健全であったと評価している。

なお、白色化が見られた原因として、金属キャスク仕立て作業において一次蓋フランジ部のプール水除去が不十分であったため、残留した水分が貯蔵期間中に金属ガスケット被覆材のアルミニウムに水和酸化物の被膜を生成させたものと判断。この教訓として金属キャスク仕立て作業では、残留水分除去を徹底することを改善事項としている。

② 2005 年調査

一次蓋金属ガスケット表面全体に白色化が確認されているが、蓋開放前に実施の気密漏えい試験では基準漏えい率を満足していること、開放時のシール面に異常が見られていないことから、密封機能は健全であったと評価している。

なお、全面に白色化が見られた原因として、調査のために貯蔵容器をプー

ル内へ沈めた際に一次蓋を開放するまでに数日間要していた(2000年調査時と異なる所)ことからプール水との長時間の接触が水和酸化物の被膜生成を促進させたものと判断。この教訓として、状況調査におけるプール内での一次蓋開放に当たっては、乾式貯蔵容器をプール内に長時間滞在させないことを留意事項としている。

③ 2013年調査




東北地方太平洋沖地震による津波の影響を受けているため、状況確認のための点検を実施している。点検の結果、金属ガスケットの気密漏えい及び外観に異常は確認されず、密封機能は健全であったと評価している。(別添6-2図参照)

[東海第二発電所]

① 2009調査

東海第二発電所における使用済燃料集合体を乾式貯蔵容器へ収納後の仕立て作業は、福島第一原子力発電所が実施した2000年調査における改善事項を踏まえて行われた後、本調査実施までの間貯蔵されてきた。また、本調査においても福島第一原子力発電所の2005年調査における留意事項を踏まえて実施されている。調査の結果、金属ガスケットの気密漏えい及び外観に異常は確認されず、密封機能は健全であったと評価している。なお、金属ガスケット表面の白色化が見られなかったことは、福島第一原子力発電所の調査における改善事項や留意事項の有効性が確認されたものと評価している。

別添6-1表 一次蓋金属ガスケットの調査結果^[1]

	福島第一原子力発電所		東海第二発電所
	2000年調査	2005年調査	2009年調査
写真			
調査結果	<ul style="list-style-type: none"> ・金属ガスケットの表面の一部に白色化を確認^{*4} ・シール面に異常なし 	<ul style="list-style-type: none"> ・金属ガスケットの表面に白色化を確認^{*4} ・シール面に異常なし 	<ul style="list-style-type: none"> ・金属ガスケットに異常なし ・シール面に異常なし (赤茶色に見える部分は、照明の反射によるもの)

*4：福島第一原子力発電所の2000年の状況調査においては、金属ガスケットの表面の一部に白色化が確認されているが、気密漏えい試験により基準漏えい率を満足しており、貯蔵期間中に必要とされる密封機能は健全であった。

また、同発電所の2005年の状況調査においては、金属ガスケットの表面の一部に白色化が確認されているが、この白色化は状況調査のため施設内乾式貯蔵容器をプールへ搬入した際に発生したものであり、貯蔵期間中に発生したものではありません。

なお、上記状況調査後に行った再現試験により、金属ガスケットの表面の白色化は、金属ガスケットの被覆材であるアルミニウムがプール水と接触して生成される水和酸化物の皮膜によるものであったこと及びこの皮膜の厚さは数日間のプール水との接触で約5 μ mで飽和状態となることが確認されている。

【一次蓋金属ガスケット本体フランジ面との当たり面】



【一次蓋金属ガスケット溝との当たり面】



別添6-1図 中型乾式キャスク 金属ガスケット状況^[2]

参考文献

- [1] 総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会，核燃料サイクル安全小委員会 中間貯蔵ワーキンググループ 輸送ワーキンググループ，「金属製乾式キャスクを用いる使用済燃料中間貯蔵施設における金属製乾式キャスクとその収納物の長期健全性について」，（平成21年6月25日）
- [2] 東京電力株式会社，「福島第一原子力発電所 既設乾式貯蔵キャスクの点検報」，東京電力株式会社，（平成25年5月31日）

金属ガスケットの経年変化におけるクリープ考慮について

長期貯蔵における金属ガスケットの経年劣化影響については、(財)電力中央研究所が実施した長期密封特性試験(応力緩和試験)や(独)原子力安全基盤機構((財)原子力発電技術機構)が実施した密封境界部の経年劣化影響評価試験(応力緩和試験)により、高温下で長時間使用すると、ガスケット自身のクリープによって塑性変形の増加分だけ弾性変形が減少して密封性能に影響を及ぼすことが、参考文献[1][2]等で明らかにされている。長期貯蔵における金属ガスケットの経年劣化は荷重低下、形状変化として知られているが、金属ガスケット構成材料のクリープ性向は別添7-1表に示すとおりで、貯蔵期間中の使用環境温度(89℃以下)を考慮すれば、これらは外被材であるアルミニウムのクリープ変形が主要因であると考えられている。

別添7-1表 金属ガスケットの構成材料のクリープ性向^[2]

ガスケットの構成	材料仕様	融点 (T _m)	T=0.3T _m	T=0.5T _m
外被材	アルミニウム (A1050P-0)	660℃ (933K)	7℃ (280K)	194℃ (467K)
内被材 コイルバネ	Ni基合金 (インコル)	1453℃ (Ni) (1726K)	245℃ (518K)	590℃ (863K)

注記) クリープが生じる相対温度 (T/T_m) は、一般にT/T_m ≥ 0.3~0.5以上とされる。T_m: 融点

- ▶ 外被材(アルミニウム)は7~194℃以上の長期間でクリープが発生する傾向にある。
- ▶ 内被材及びコイルバネ(インコル)は245~590℃以上の長期間でクリープが発生する傾向にある。

クリープ等の熱活性化に伴う現象は、反応速度論に用いられるアレニウスの式(a)が適用でき、LMPの算出式(b)はこのアレニウスの式から導出されるため、LMPにより温度・時間パラメータとして整理が可能である。(アレニウスの式からLMPの式への導出は、別添4参照。)

$$r = A \cdot \exp(-Q/RT) \quad \dots (a)$$

r: 反応速度(ここではクリープ過程における歪速度に相当),

Q: 活性化エネルギー(kcal/mol),

A:定数, R:気体定数, T:絶対温度(K)

$$LMP=T(C+\log(t)) \quad \dots (b)$$

T:絶対温度(K), C:定数, t:時間(hr)

別添7-2表に(財)電力中央研究所が実施した長期密封特性試験(応力緩和試験)の試験条件と試験結果を,別添7-1図にLMPを用いて整理した試験結果を示す。

LMPを使用して塑性変形率と漏えい率を整理した結果,①塑性変形率とLMPが比例関係にあること,②あるLMP値を超えると漏えい率が増加することから,塑性変形率(別添7-2図参照)と漏えい率の温度・時間の依存性についてLMPによる整理が有効であることが確認されている。

以上のことから,金属ガスケットの長期密封性評価に用いているLMPは,試験で得られたデータや知見から整理したものであり,長期貯蔵中のクリープによる応力緩和が考慮されている。

別添 7-2 表 長期密封特性試験の試験条件と試験結果^[1]

(文献のデータから GASKET C*を抜粋して整理したもの)

*GASKET C:コイルスプリング材, 内被材:インコネル外被材:アルミニウム合金

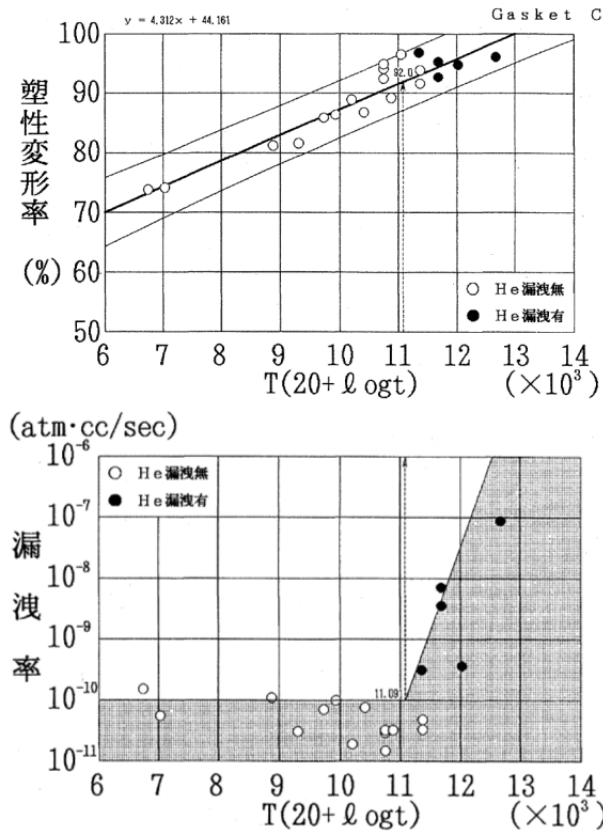
[長期密封性能試験]: 密封性能の経時変化を確認

試験条件			試験結果		
温度 (°C)	時間 (hour)	L. M. P. (×10 ³) C=20	塑性変形率 (%)	試験前漏洩率 (atm・cc/sec)	試験後漏洩率 (atm・cc/sec)
20	1,000	6.739	73.8	8.10×10 ⁻¹¹	1.46×10 ⁻¹⁰
	10,000	7.032	74.1	3.17×10 ⁻¹¹	5.47×10 ⁻¹¹
150	10	8.883	81.2	7.87×10 ⁻¹¹	1.10×10 ⁻¹⁰
	100	9.306	81.6	2.98×10 ⁻¹¹	3.08×10 ⁻¹¹
	1,000	9.729	85.9	6.99×10 ⁻¹¹	7.03×10 ⁻¹¹
	10,000	10.152	88.9	7.81×10 ⁻¹¹	1.90×10 ⁻¹¹
200	10	9.933	86.4	7.72×10 ⁻¹¹	1.03×10 ⁻¹⁰
	100	10.406	86.8	6.01×10 ⁻¹¹	7.52×10 ⁻¹¹
	1,000	10.879	89.2	1.24×10 ⁻¹⁰	3.22×10 ⁻¹¹
	10,000	11.352	96.8	9.03×10 ⁻¹¹	3.06×10 ⁻¹⁰

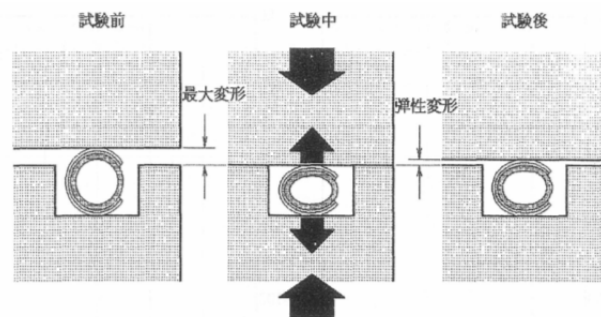
- ・温度: ガasket近傍の環境温度(最高)と推定される 150°Cの他に室温(20°C)と厳しい条件(高温側)で 200°Cを設定。
- ・時間: 応力緩和は比較的短期間に発生することを考慮して, 最長 10,000hr. に設定。

[応力緩和特性試験(加速試験)]: 温度・時間依存性を確認

試験条件				試験結果		
L.M.P. (×10 ³) C=20	温度 (°C)	時間 (hour)	備考	塑性変形率 (%)	試験前漏洩率 (atm・cc/sec)	試験後漏洩率 (atm・cc/sec)
10.753	200	542	150°C・262,800hr に相当	94.1	8.91×10 ⁻¹⁰	2.93×10 ⁻¹¹
10.754	220	65		92.4	9.18×10 ⁻¹¹	1.47×10 ⁻¹¹
11.367	240	144	200°C・10,000hr に相当	93.9	4.73×10 ⁻¹⁰	4.79×10 ⁻¹¹
11.367	230	370		91.6	4.15×10 ⁻¹⁰	3.32×10 ⁻¹¹
11.683	240	595	200°C・50,000hr に相当	92.7	1.96×10 ⁻¹⁰	3.55×10 ⁻⁹
11.683	250	218		95.3	1.13×10 ⁻¹⁰	7.05×10 ⁻⁹
12.024	250	977	200°C・262,800hr に相当	94.8	1.19×10 ⁻¹⁰	3.67×10 ⁻¹⁰
12.670	285	504		96.1	4.32×10 ⁻¹⁰	8.70×10 ⁻⁸



別添 7 - 1 図 塑性変形率及び漏洩率と LMP の関係^[1]



$$\text{塑性変形率 (\%)} = \frac{\text{最大変形} - \text{弾性変形}}{\text{最大変形}} \times 100$$

最大変形：初期締付量

弾性変形：復元量

別添 7 - 2 図 塑性変形率の定義^[1]

参考文献

- [1] (財)電力中央研究所, 「使用済燃料貯蔵容器用ガスケットの長期密封特性」, (財)電力中央研究所, (平成 4 年 7 月)
- [2] (独)原子力安全基盤機構, 「平成 15 年度 金属キャスク貯蔵技術確証試験 最終報告書」, (独)原子力安全基盤機構, (2004)

第 15 条 金属キャスク（使用済燃料集合体）

<目 次>

1. 設計方針
2. 使用済燃料集合体の健全性確保のための考慮について

(別 添)

- 別添 1 使用済燃料集合体の健全性確認について
- 別添 2 真空乾燥及び湿分管理について
- 別添 3 使用済燃料集合体の経年変化に対する措置について
- 別添 4 使用済燃料集合体被覆管制限温度の設定について
- 別添 5 申請キャスク[BWR用大型キャスク(タイプ2)及び(タイプ2A)]
に使用するレジンの熱，放射線照射による重量減損の影響について
- 別添 6 原子力発電所構内で貯蔵中の使用済燃料乾式貯蔵容器の金属ガス
ケット調査結果について

1. 設計方針

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

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

基本的安全機能を維持する上で重要な金属キャスクの構成部材は、設計貯蔵期間中の温度、放射線等の環境、並びにその環境下での腐食、クリープ、応力腐食割れ等の経年変化に対して十分な信頼性のある材料を選定し、その必要とされる強度、性能を維持し、必要な安全機能を失うことのない設計とする。また、金属キャスク本体内面、バスケット及び使用済燃料集合体の腐食等を防止するために、使用済燃料集合体を不活性ガスであるヘリウムとともに封入して貯蔵する設計とする。

2. 使用済燃料集合体の健全性確保のための考慮について

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

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

(1) 使用済燃料集合体の収納条件

使用済燃料集合体の金属キャスクへの収納作業は、原子炉設置者が実施することから、原子炉設置者に対し、以下の収納条件を満足した作業の実施、作業記録の作成等を求める。

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

(2) 経年変化要因の考慮（別添 3，別添 4 参照）

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

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

上記の経年変化要因を考慮し，使用済燃料集合体の燃料被覆管の制限温度を以下のとおりとする。

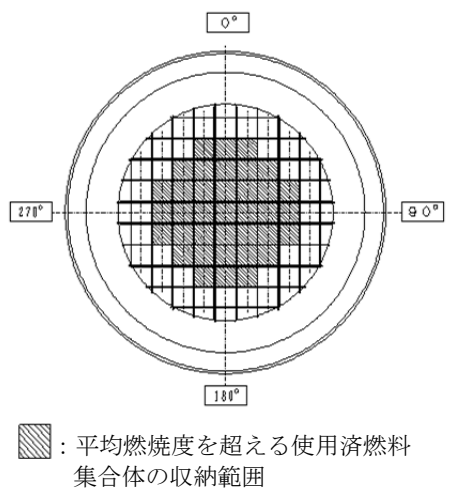
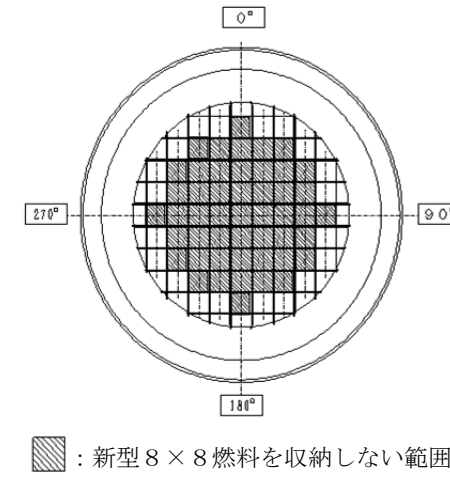
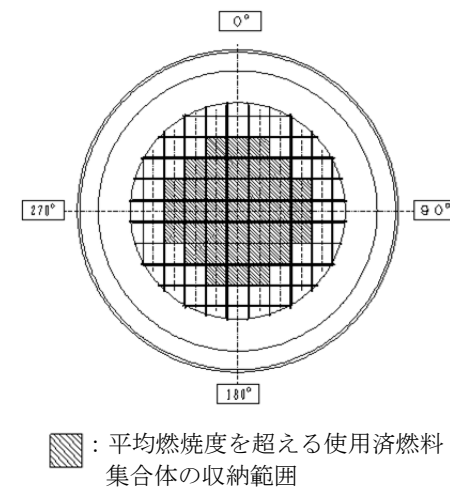
- ・ 新型 8 × 8 燃料 200℃
- ・ 新型 8 × 8 ジルコニウムライナ燃料，高燃焼度 8 × 8 燃料 300℃

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

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

また、設計貯蔵期間（50年間）に事業所外運搬に係る期間等、十分な余裕を考慮した60年間の中性子照射量（高速中性子を含む全エネルギー領域の中性子照射量 $\sim 10^{16}$ n/cm²程度）は原子炉内での照射量（約1 MeV以上の高速中性子照射量 $\sim 10^{22}$ n/cm²程度）と比べ十分低いため、設計上の特別な考慮は必要ない。（第2表参照）

第1表 使用済燃料集合体の収納条件

キャスクタイプ	タイプ2	タイプ2A		
収納する使用済燃料	①新型8×8ジルコニウムライナ燃料	①新型8×8ジルコニウムライナ燃料 ②高燃焼度8×8燃料 ③新型8×8燃料		
収納配置	①のみ収納	①のみ収納, ②のみ収納, ①及び②を収納	①及び③を収納	③のみ収納
				
収納物平均燃焼度	34,000MWd/t	34,000MWd/t	34,000MWd/t	26,000MWd/t
収納物最高燃焼度	40,000MWd/t	34,000MWd/t	34,000MWd/t	28,500MWd/t
冷却期間	18年以上	24年以上	24年以上	24年以上
最大崩壊熱量 (キャスク1基あたり)	12.1kW	10.9kW	10.9kW	8.0kW

第2表 全中性子照射量

(BWR用大型キャスク (タイプ2) /BWR用大型キャスク (タイプ2A))

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

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

参考文献

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

使用済燃料集合体の健全性確認について

使用済燃料集合体の健全性確認は、以下のとおり行う。

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

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

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

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

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

真空乾燥及び湿分管理について

1. 真空乾燥の温度管理方法について

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

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

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

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

2. 金属キャスク内部の湿分管理について

(1) 真空乾燥後の金属キャスク内部の水分濃度管理値の根拠

真空乾燥後の金属キャスク内部の水分を内部ガスの質量に対して10wt%以下とする管理は、設計貯蔵期間を通じた金属キャスク内の構成部材（胴内部、バスケット等）及び使用済燃料の健全性維持の観点から化学的要因による影響を防ぐことを目的としている。

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

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

(2) 使用済燃料を封入した金属キャスク内部の水分濃度の具体的管理方法

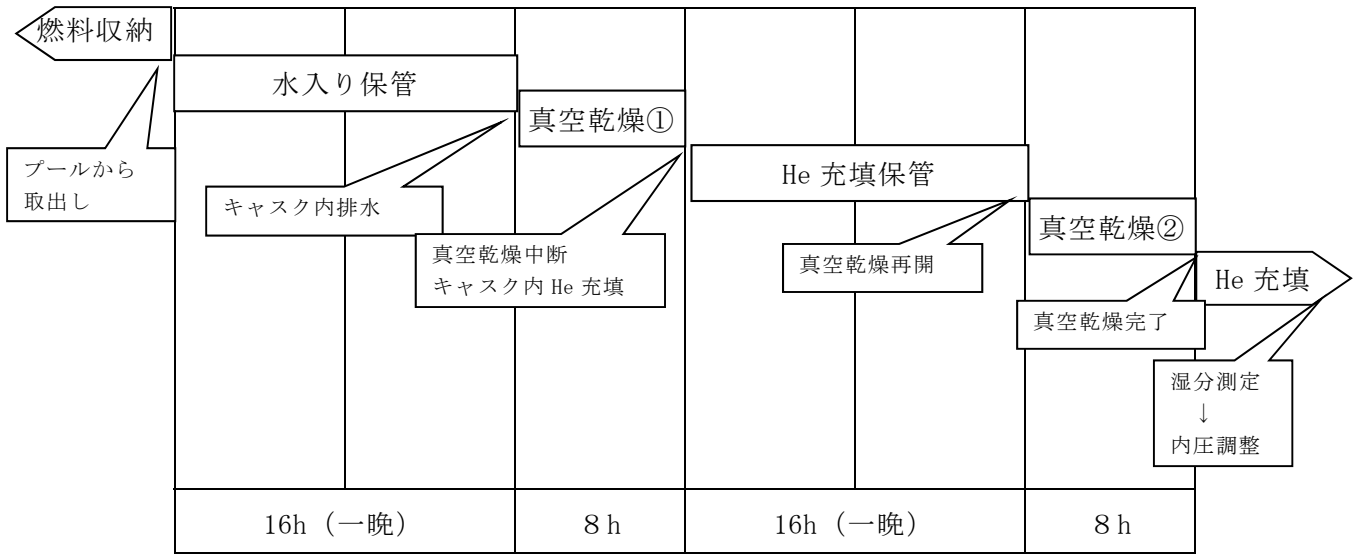
先行の原子力発電所では、真空乾燥後の金属キャスク内の到達圧力と圧力上昇率、及び金属キャスク内部の水分濃度（10wt%以下）に対する判定基準を設け、確実な残留水分濃度の管理を行っている。

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

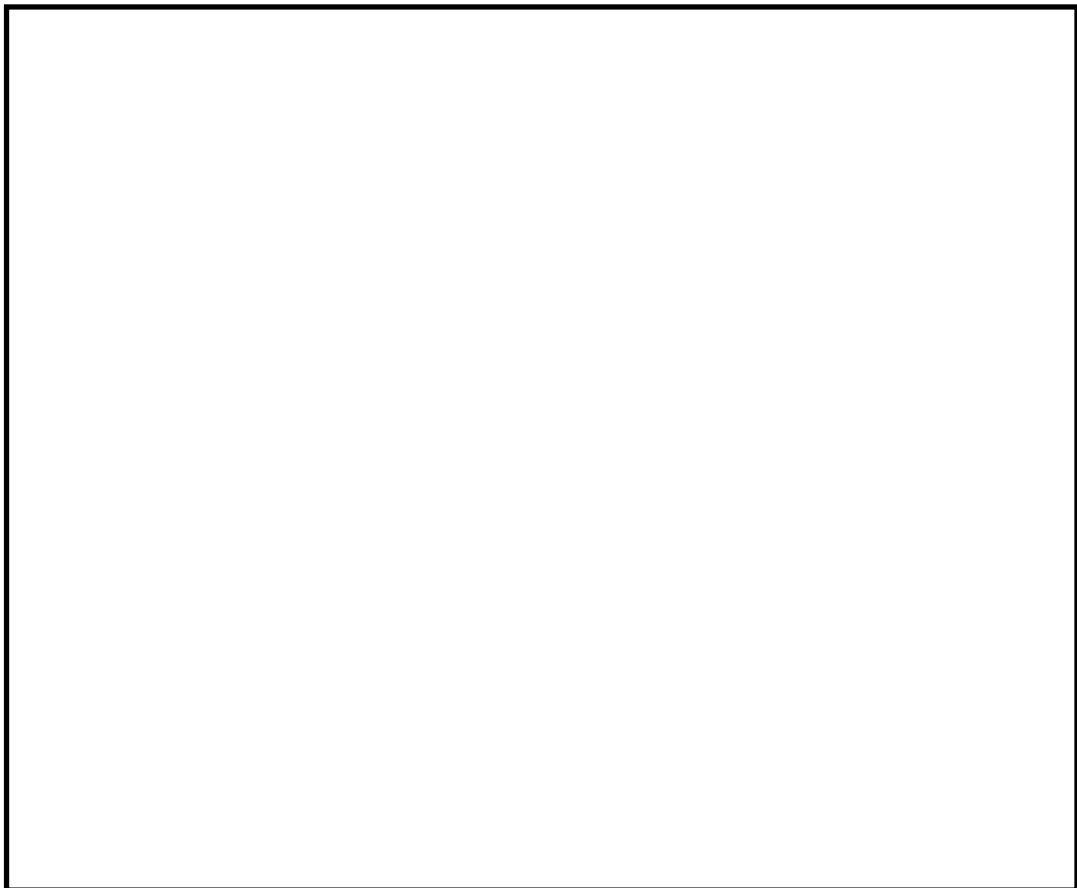
参考文献

(一社)日本原子力学会、「日本原子力学会標準 使用済燃料中間貯蔵施設用金

属キャスクの安全設計及び検査基準：2010 付属書 I」(AESJ-SC-F002:2010),
(一社) 日本原子力学会 (2010 年 7 月)



別添 2 - 1 図 真空乾燥手順例



別添 2 - 2 図 真空乾燥時の被覆管温度の評価結果
(BWR用大型キャスク (タイプ 2) の例)

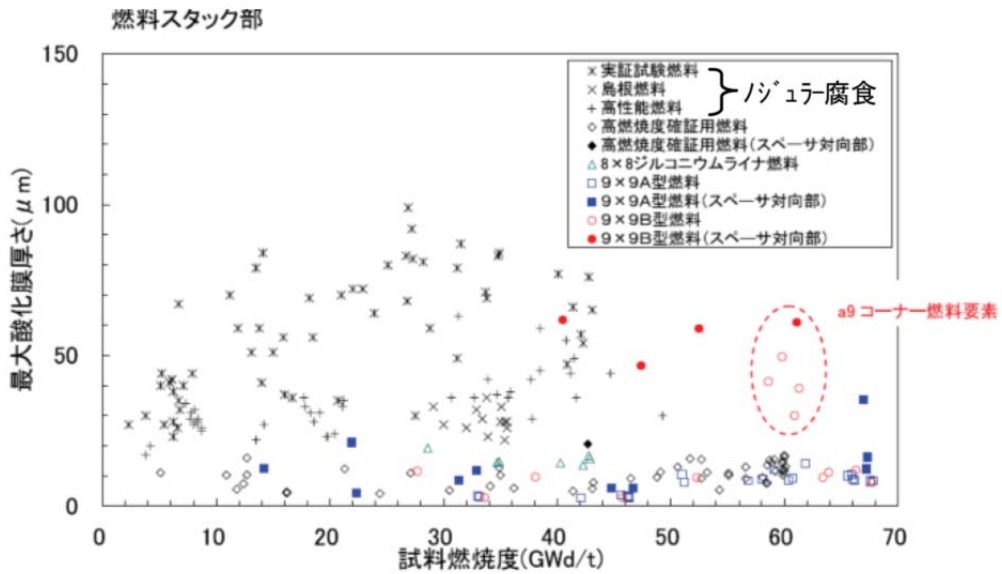
使用済燃料の劣化事象に対する評価（化学的劣化）

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

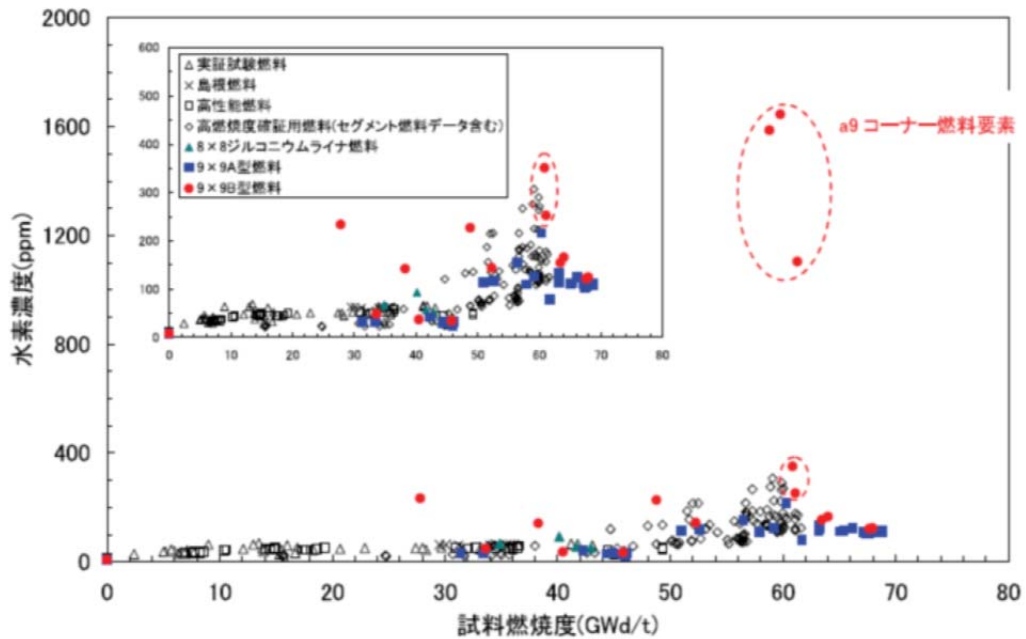
一方、金属キャスク中の使用済燃料は不活性ガス雰囲気中で貯蔵されるため、酸素による燃料被覆管の酸化、発生した水素の燃料被覆管への水素吸収は進行しない。仮に、不活性ガスに約 10wt%の水分の混入があり、すべてが燃料被覆管と反応したとしても、燃料被覆管に形成される酸化膜厚さは $1\mu\text{m}$ 以下、燃料被覆管に吸収される水素濃度は数 ppm 程度とされており⁽²⁾、炉内照射中に形成・吸収された酸化膜厚さ・水素濃度に比べて無視できるほど少ない。

経済産業省ホームページ内公開資料

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



添付 1 - 1 図 実機で照射された燃料被覆管外表面の酸化膜厚さ⁽¹⁾



添付 1 - 2 図 実機で照射された燃料被覆管の水素濃度⁽¹⁾

注 高燃焼度確証用燃料の下部天然ウラン領域から採取したデータは除く。

参考文献

- (1) 07-基炉報-0002, 「平成 18 年度高燃焼度 9 × 9 型燃料信頼性実証成果報告書 (総合評価編)」
- (2) (一社)日本原子力学会, 「日本原子力学会標準 使用済燃料中間貯蔵施設用金属キャスクの安全設計及び検査基準:2010」(AESJ-SC-F002:2010), (一社)日本原子力学会 (2010 年 7 月)

真空乾燥作業ミス（真空乾燥不足）に関する影響評価

1. 真空乾燥作業ミス（真空乾燥不足）事象に関する想定シナリオ

(1) 真空乾燥の作業手順と記録の確認

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

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

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

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

(2) 真空乾燥不足の想定シナリオ

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

- a) 「真空乾燥②」後のヘリウム充填状態で測定する湿分測定用の機器にお

いて不具合等があり正確に測定されず、かつ

b) それ以前の真空乾燥プロセスで機器の不具合、管理項目の確認不足（指示値の読み間違い等）、或いは所定の手順どおり真空乾燥プロセスが適切に実施されなかった等

が生じた場合に、真空乾燥不足に至る可能性がある。

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

2. 真空乾燥不足による影響評価

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

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

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

参照)

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

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

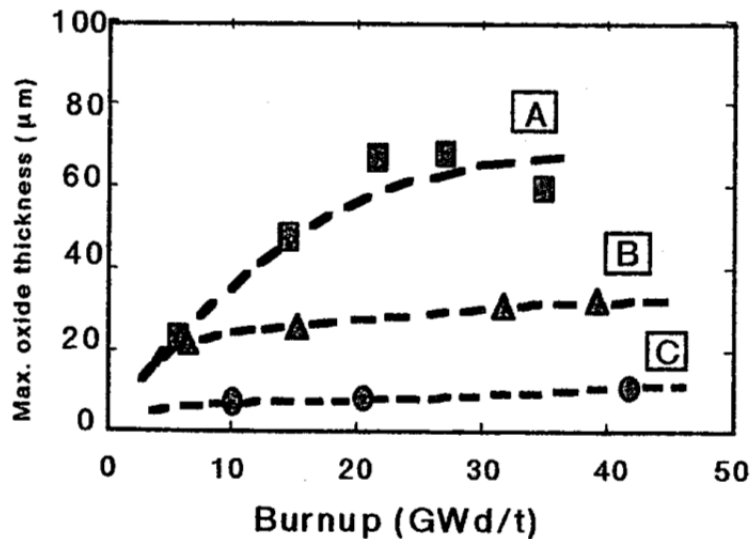
キャスク内部自由空間体積	
キャスク内部空間温度 (過熱蒸気温度)	30℃
キャスク内部空間圧力	4kPa
過熱蒸気の比体積 ⁽¹⁾	34.914m ³ /kg
真空乾燥①終了後の残留水分	173g

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

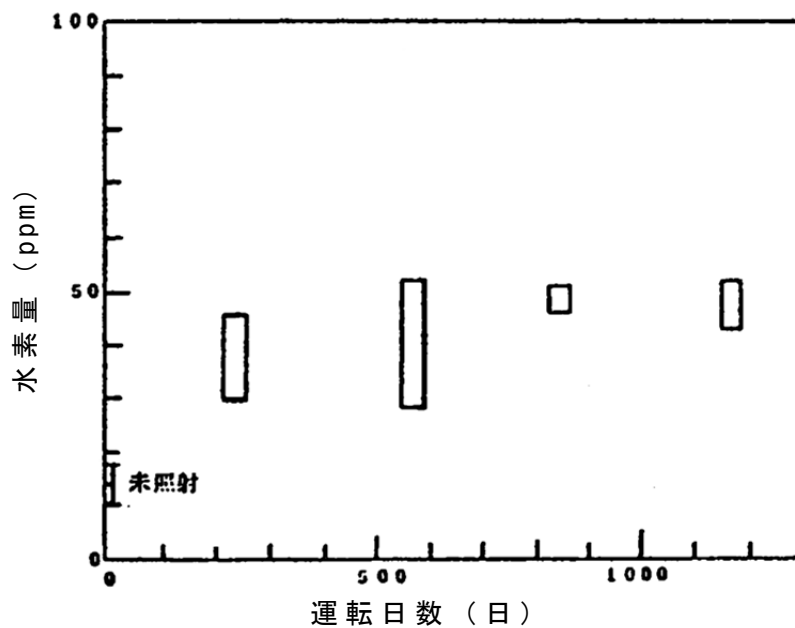
評価条件	キャスク内部自由空間体積	
	キャスク内部ガス水分質量	180g
	燃料被覆管表面積 (8×8燃料, 69体)	690m ²
	燃料被覆管酸化体積 (8×8燃料, 69体)	7.7×10 ⁻⁵ m ³
評価結果	燃料被覆管表面酸化膜厚さ	約 0.20 μm
	燃料被覆管中水素濃度 (水素/Zr 重量割合)	約 5.8ppm

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

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



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



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

参考文献

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

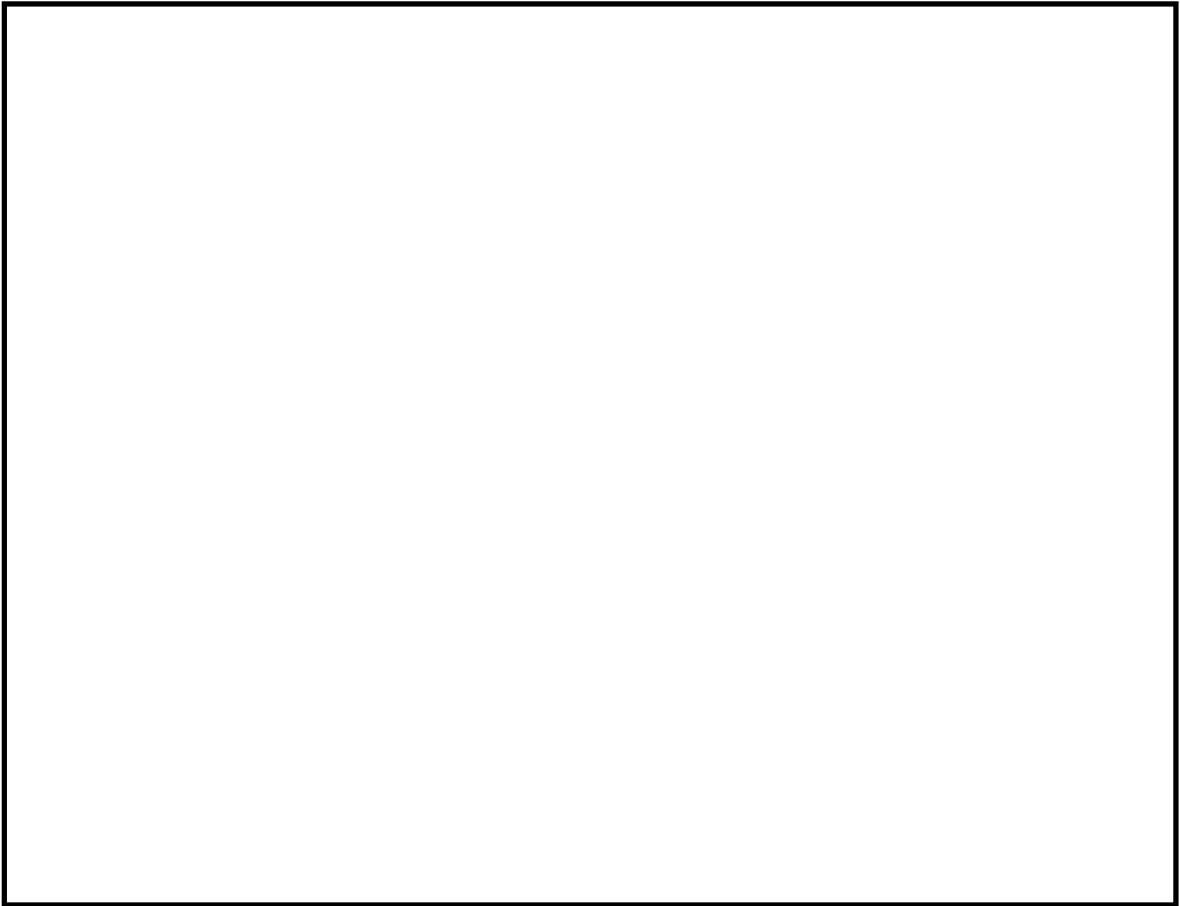
使用済燃料集合体の経年変化に対する措置について

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

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

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

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



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

参考文献

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

使用済燃料集合体被覆管制限温度の設定について

1. 使用済燃料集合体の健全性に影響を与える主な因子

(1) 累積クリープひずみについて

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

360°C程度となる。

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

(2) 水素化物の再配向について

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

BWR燃料の被覆管材料であるジルカロイ-2について水素化物再配向の機械的特性への影響が調べられている。その結果、40GWd/t型ジルコニウムライナ無燃料、50GWd/t型ジルコニウムライナ有燃料及び55GWd/t型ジルコニウムライナ有燃料を対象に、水素化物再配向の起きない条件及び機械的特性に影響のない条件が別添4-1表に示すようにまとめられている。その結果、水素化物再配向による機械的特性に影響がない条件として、40GWd/t型ジルコニウムライナ無燃料では周方向応力が70MPa以下で200°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。本キャスクの貯蔵対象燃料において、新型8×8ジルコニウムライナ燃料は最高燃焼度40GWd/t、高燃焼度8×8燃料は最高燃焼度50GWd/tでジルコニウムライナ有のため50GWd/t型及び55GWd/t型ジルコニウムライナ有燃料に、8×8燃料、新型8×8燃料については最高燃焼度40GWd/tでジルコニウムライナ無のため40GWd/t型ジルコニウムライナ無燃料に相当する。

以上から、水素再配向による機械的特性に影響がない温度として、BWR燃料被覆管のジルコニウムライナ有の新型8×8ジルコニウムライ

ナ燃料と高燃焼度 8 × 8 燃料については周方向応力が 70MPa 以下で 300℃ 以下、ジルコニウムライナ無の 8 × 8 燃料、新型 8 × 8 燃料については周方向応力が 70MPa 以下で保守的に 200℃ 以下を設定した。

(3) 照射硬化の回復について

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

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

別添 4-5 図に示すように BWR 燃料被覆管については、300℃ 以下では照射硬化の回復による機械特性の著しい低下はないが、強度計算にあたっては、降伏応力の低下を回復予測式により評価する（添付 4 参照）。

別添 4-2 表に、要因別の制限温度をまとめる。

2. まとめ

以上の検討を踏まえ、次のとおり制限温度を設定した。

- ・ BWR 燃料被覆管（ライナ有^{*1}） 300℃
- ・ BWR 燃料被覆管（ライナ無^{*2}） 200℃

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

* 2 : 新型 8 × 8 燃料

【水素化物再配向】

別添 4 - 1 表 水素化物再配向試験のまとめ(BWR)⁽⁴⁾

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

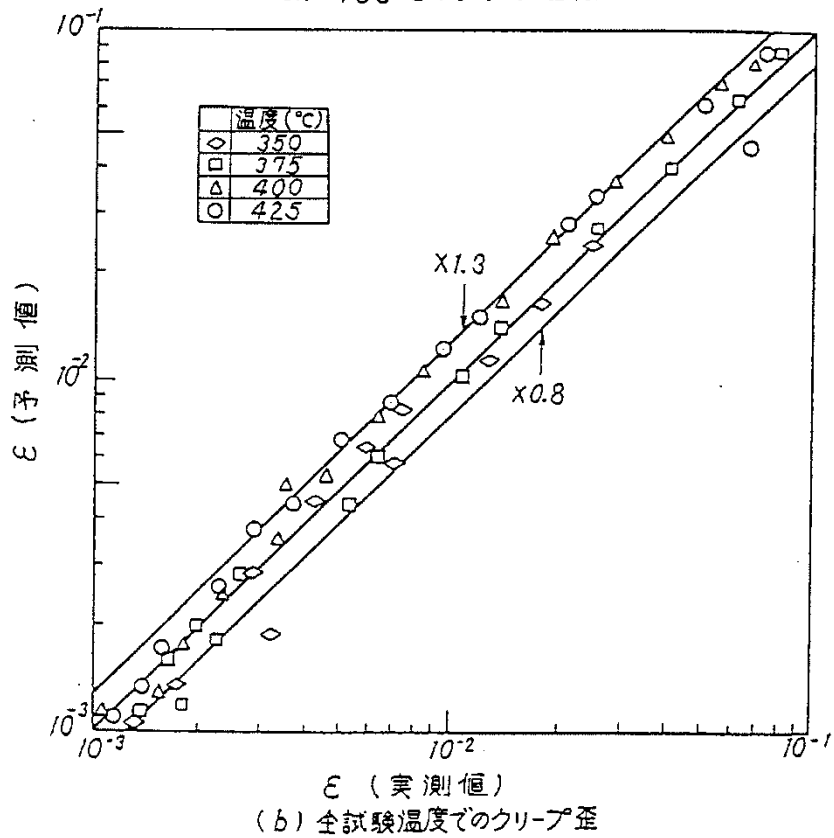
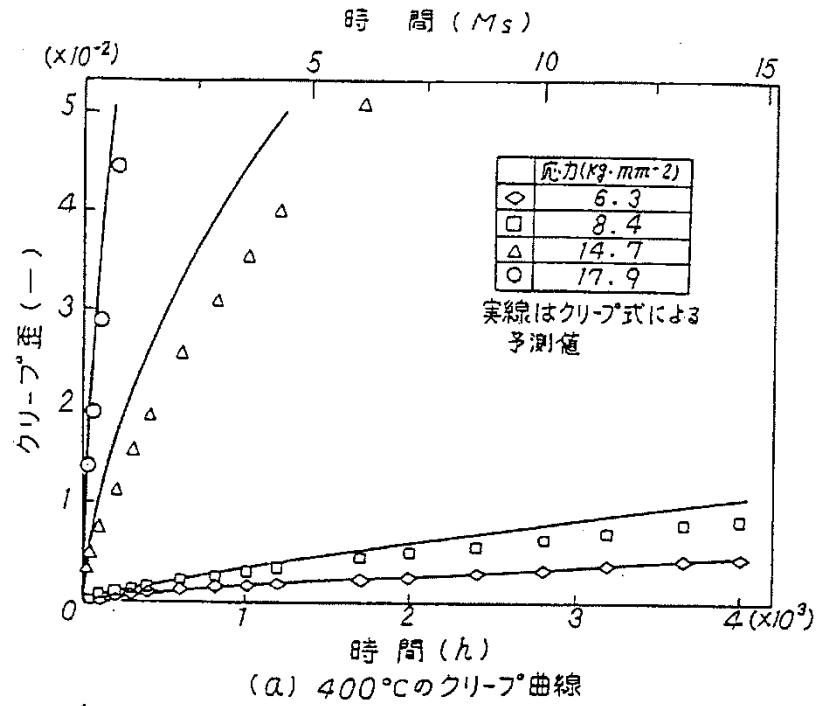
別添 4 - 2 表 各要因における制限温度

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

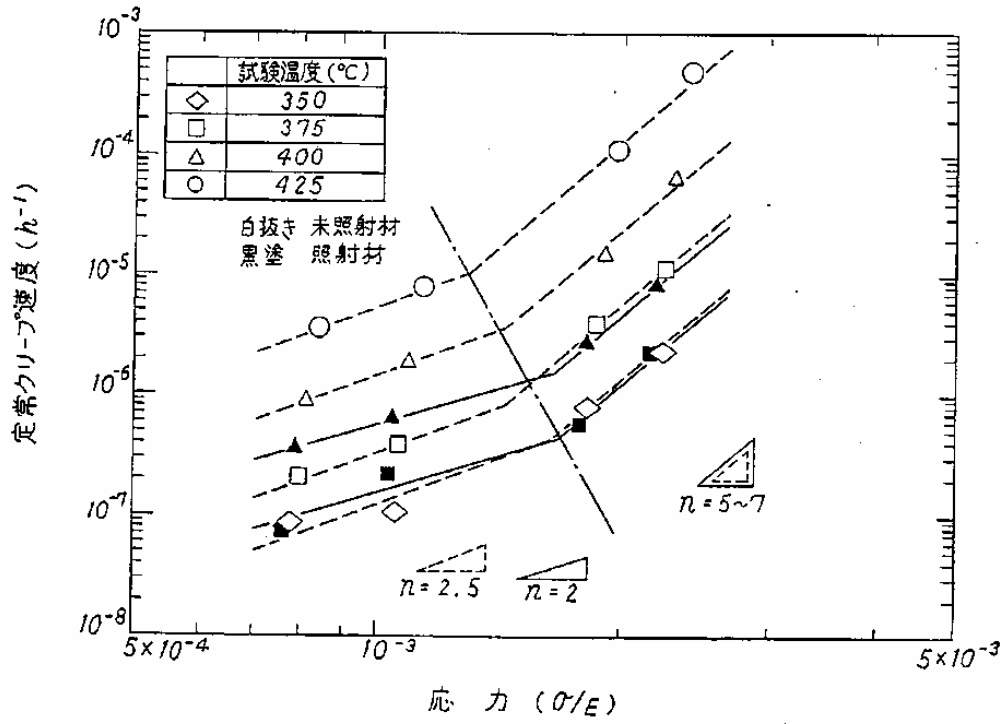
* : 燃料被覆管の制限温度において, BWR 燃料被覆管の周方向応力は, 制限値 70MPa 以下となる (添付 2 参照)。

<使用済燃料被覆管制限温度の設定に用いたデータ>

【累積クリープ】



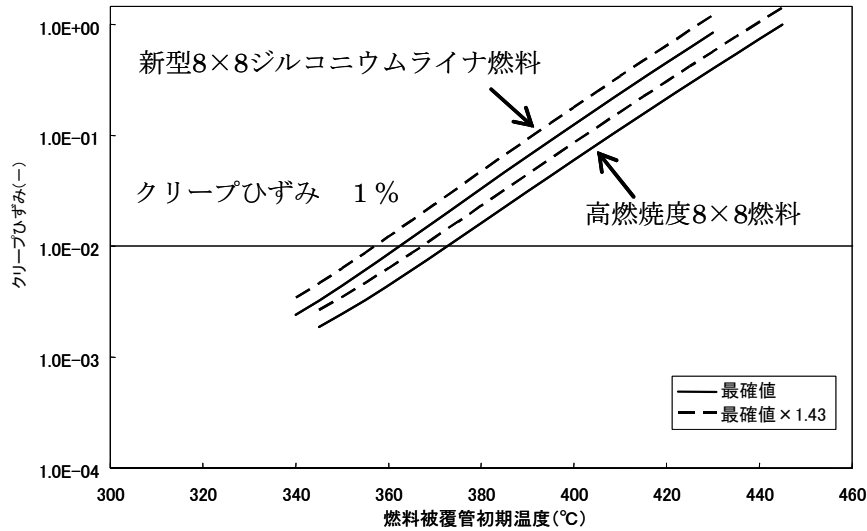
別添4-1図 クリープひずみの予測値と実測値の比較⁽¹⁾



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

<使用済燃料被覆管制限温度の設定に用いたデータ>

【クリープ】



BWR 燃料評価条件

・ 新型 8 × 8 ジルコニウムライナ燃料

最大燃焼度：40GWd/t

冷却期間：18年

評価期間：60年

温度履歴：次の式により貯蔵中の温度低下を考慮

$$Ti = [(Toi - Ta) \times (Ts - Ta) / (To1 - Ta)] + Ta$$

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

Ta ：貯蔵雰囲気温度(=45°C)

Ts ：想定する温度低下履歴計算において与える貯蔵初期温度入力値(°C)

$To1$ ：貯蔵初期時の実際の温度(°C)

・ 高燃焼度 8 × 8 燃料

最大燃焼度：50GWd/t

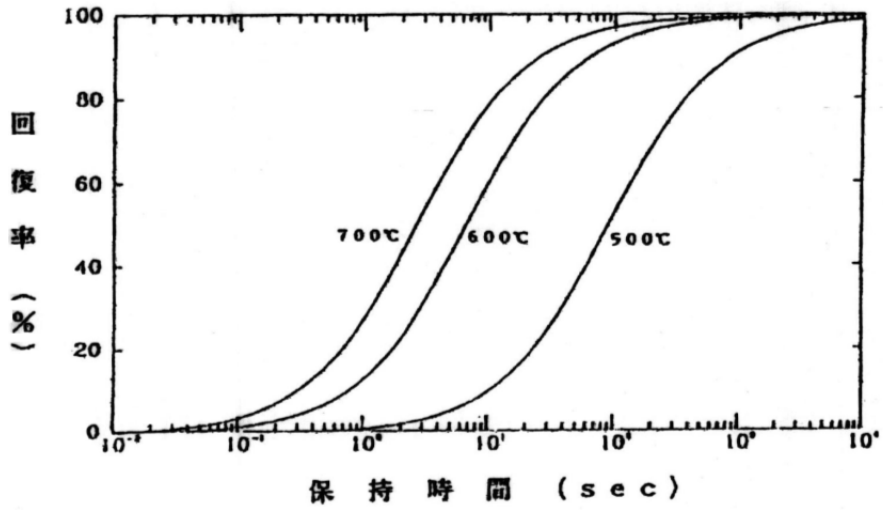
冷却期間：8年

評価期間：60年

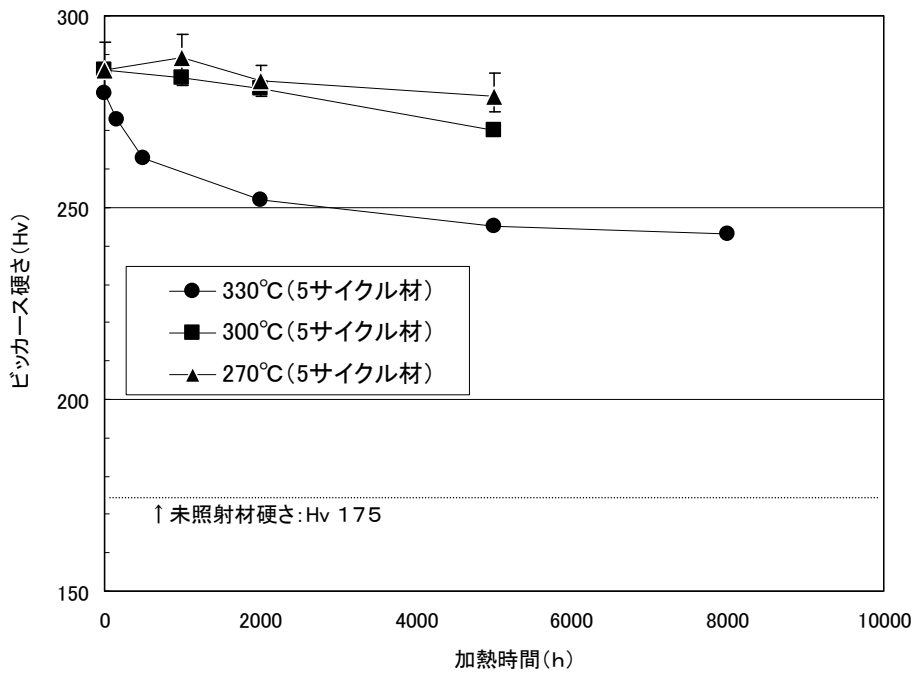
温度履歴：貯蔵中の温度低下を新型 8 × 8 ジルコニウムライナ燃料の場合と同様に考慮

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

【照射硬化の回復】



別添 4 - 4 図 燃料被覆管の照射硬化の回復率 (BWR)⁽⁵⁾



別添 4 - 5 図 BWR 燃料被覆管の照射硬化回復挙動⁽⁶⁾

参考文献

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

累積クリープひずみ量の評価例

	BWR 燃料（新型 8 × 8 ジルコニウムライナ燃料/高燃焼度 8 × 8 燃料 ⁽¹⁾ ）
計算条件	<ul style="list-style-type: none"> ・ 評価温度 320℃⁽²⁾ ・ 評価周方向応力 70MPa（添付 2 参照） ・ 温度，応力 60 年間一定 ・ 軸方向温度分布無視 ・ 未照射材の予測式 ・ 予測式による計算結果を 1.43 倍
計算条件の妥当性	<ul style="list-style-type: none"> ・ 設計貯蔵期間を通じて，温度，応力は上記の値以下に維持されるため，評価温度，応力の設定は妥当。 ・ 貯蔵中の崩壊熱減衰に伴う温度，応力の低下を無視することは保守的な設定。 ・ 軸方向温度分布無視は保守的な設定。 ・ 未照射材の予測式を用いることは保守的。
計算結果	累積クリープひずみ量 0.55%

(1) 新型 8 × 8 については，燃料被覆管制限温度が 200℃と低いことから，上記対象燃料の評価に包含される。

(2) 燃料被覆管制限温度は 300℃であるが，クリープひずみ量計算式の適用可能温度範囲は 320℃～425℃であるため，320℃として評価した。

添付 2

燃料被覆管に発生する応力評価例

1. 評価方法

被覆管を円筒とみなすと、周方向応力 σ_{θ} は次式で表される。

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

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

また、被覆管平均半径 r_m は、次式で表される。

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

D : 被覆管内径 (mm)

(1) 及び (2) 式より、周方向応力 σ_{θ} を求める。

2. 評価条件及び結果

	BWR 燃料		
	新型 8 × 8	新型 8 × 8 ジルコニウムライナ	高燃焼度 8 × 8
被覆管内径 (mm)			
被覆管厚 (mm)			
被覆管内圧 (MPa)			
評価温度 (°C)	300	300	300
周方向応力 (MPa)	60 以下	70 以下	70 以下

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

3. 評価の保守性

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

(独) 原子力安全基盤機構の調査結果によれば、9×9 燃料を除いた燃料要素の内圧は、最大でも 2.8MPa (20℃換算) を超えないことが報告されている (添付 2-1 図参照*)⁽³⁾。この値を 300℃に換算すると約 5.5MPa となり、“2. 評価条件及び結果” に示す被覆管内圧 (□MPa) は、これに比べても安全側に設定されている。

* : 添付 2-1 図の凡例は以下のようになっており、貯蔵する燃料タイプを包含している。

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

- (3) BWR燃料の評価温度については、保守的な除熱解析モデルで評価した貯蔵中の燃料被覆管温度を大きく包含した温度として設定しており保守的である。

<参考>照射済みBWR燃料要素データ (PNL-4835⁽¹⁾)

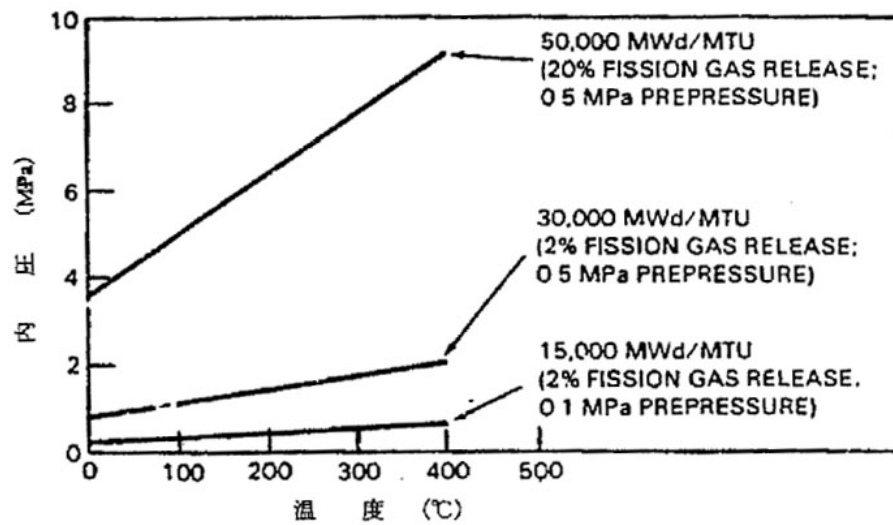
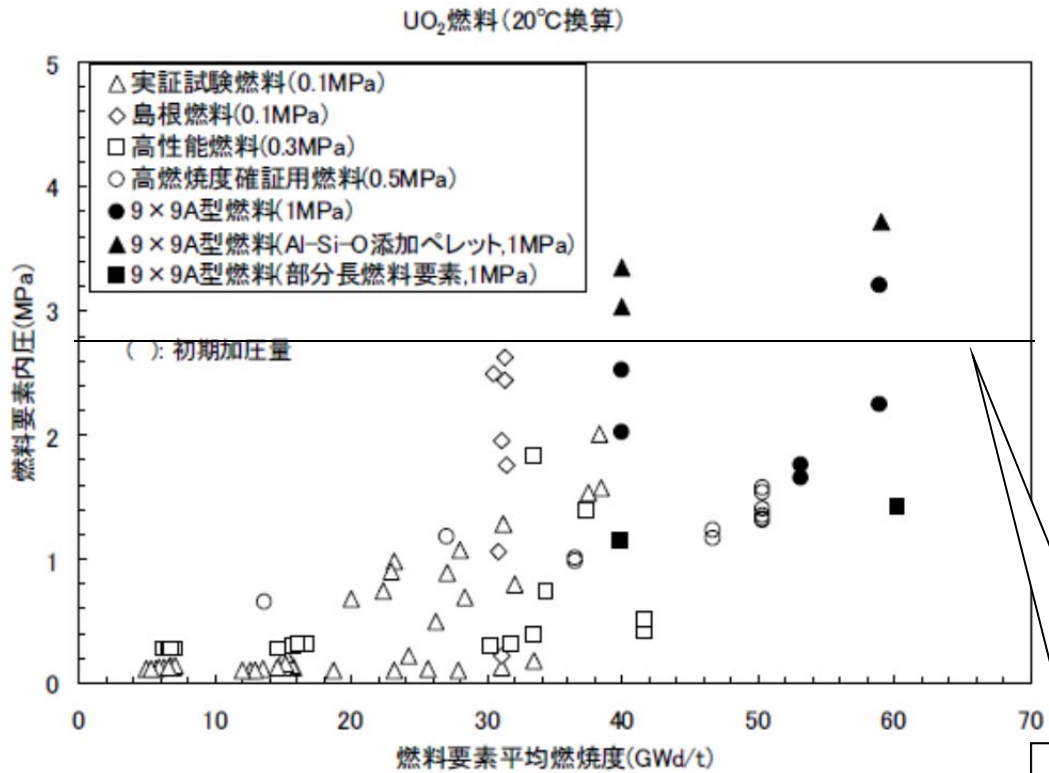


FIGURE B.2. Plenum Gas Pressure for BWR Spent Fuel Computed from Measured EOL Void Volumes and Indicated Fission as Release Assumptions (pressure/temperature relationship from GAPCON-2)

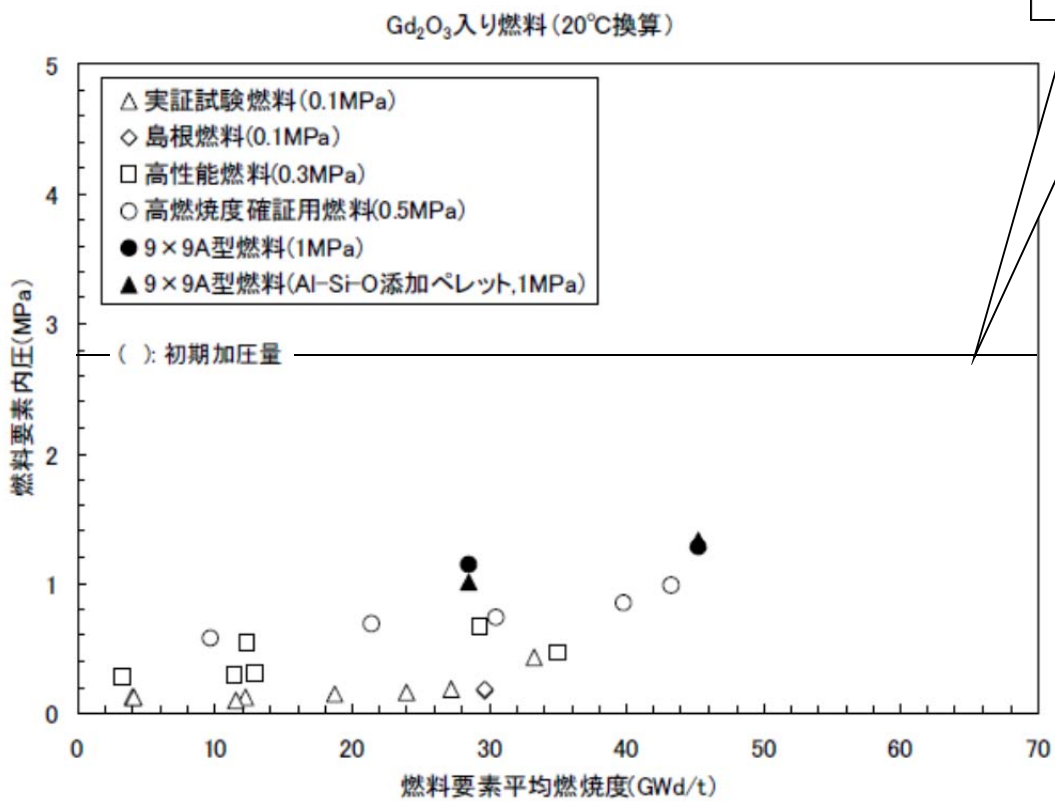
照射済みBWR燃料要素のプレナムガス圧力

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



添付 2 - 1 図① UO₂燃料要素内圧の燃焼度変化 (20°C換算)

9 × 9 A 型燃料を除いた最大から 2.8MPa と読み取り



添付 2 - 1 図② Gd₂O₃入り UO₂燃料要素内圧の燃焼度変化 (20°C換算)

参考文献

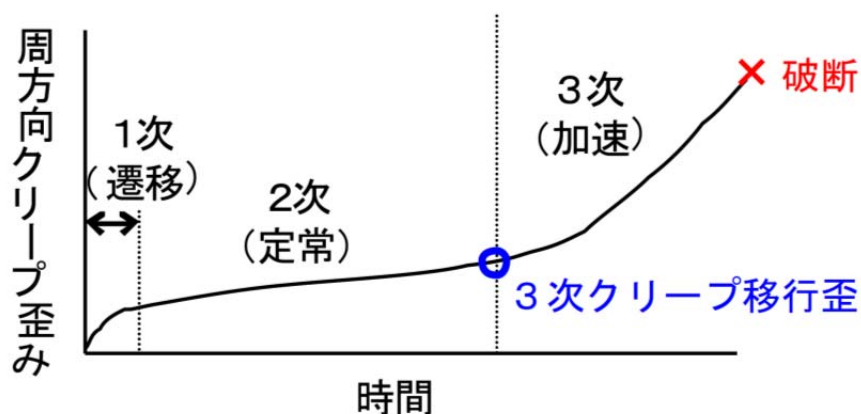
- (1) A. B. Johnson, Jr. , et.al., “Technical Basis for Storage of Zircaloy-clad Spent Fuel in Inert Gases” , PNL-4835. B.3, Pacific Northwest Laboratory, (1983)
- (2) 東京電力株式会社, 「福島第一原子力発電所 原子炉設置変更許可申請書」, 東京電力株式会社 (平成 3 年 5 月)
- (3) (独) 原子力安全基盤機構, 「平成 18 年度 高燃焼度 9 × 9 型燃料信頼性実証成果報告書 付録 1 (9 × 9 A 型燃料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

累積クリープひずみ量の根拠について

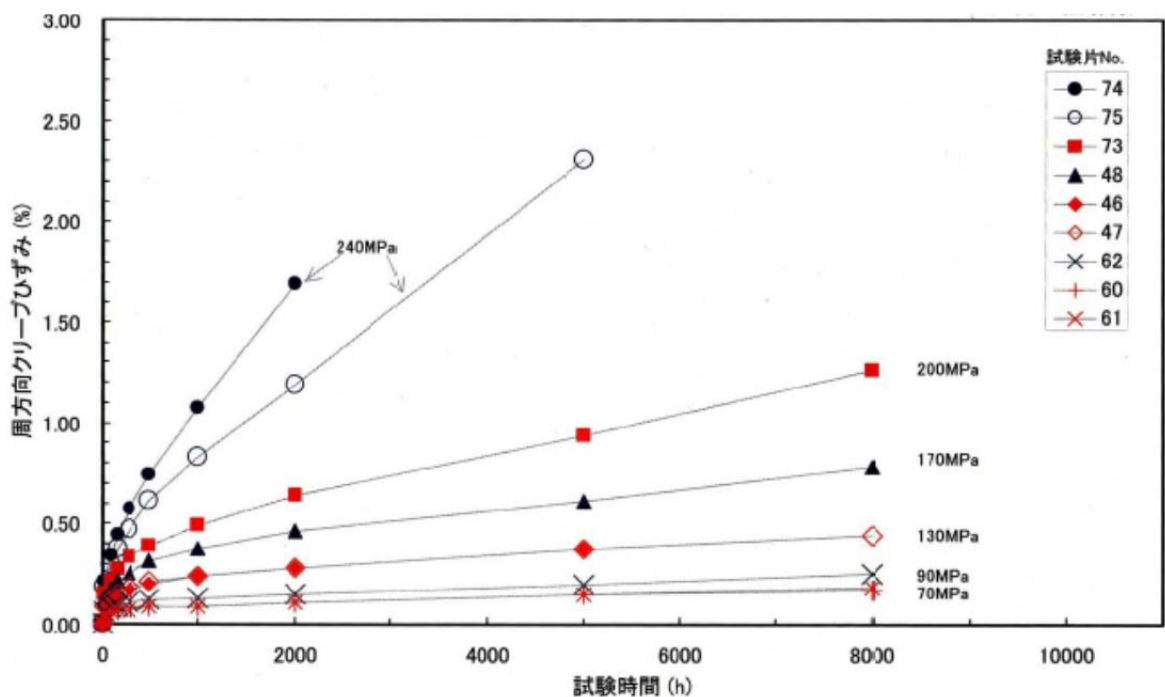
燃料被覆管のクリープ破損は、材料の降伏応力以下でも高温では徐々に塑性変形（クリープ）が生じ、この変形量（累積クリープ歪み）が限界を超えると燃料被覆管が破断する現象である。（添付 3 - 1 図）

国内の軽水炉で照射された BWR 50Gwd/t のジルカロイ - 2 燃料被覆管を用いたクリープ試験の結果、燃料被覆管は 1% 以上のクリープ変形能力を有する（累積クリープ歪みが 1% を超えると燃料被覆管が破損することを意味するものではない）ことが確認されている。（添付 3 - 2 図）本結果を基に、累積クリープ量が設計評価期間中に 1% を超えないことを制限としている。

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



添付 3 - 1 図 クリープ曲線の概略⁽¹⁾



添付3-2図 BWR被覆管のクリープ曲線(390°C) (1)

参考文献

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

照射硬化回復の予測評価例

1. 評価式

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

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

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

2. 照射硬化回復考慮評価例

評価条件

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

第 16 条 使用済燃料の受入施設

<目 次>

1. 設計方針
2. 施設設計

(別 添)

- 別添 1 金属キャスハンドリングフロー及びインターロック条件等について
- 別添 2 搬送台車で金属キャスクを運搬中の地震対応について
- 別添 3 衝撃吸収材の性能及び敷設範囲について

1. 設計方針

使用済燃料貯蔵施設は、金属キャスクの移動に対して基本的安全機能を確保する観点から、以下の対策を講ずる設計とする。

- (1) 受入れ区域天井クレーン及び搬送台車は、地震荷重等の適切な組合せを考慮しても強度上耐え得る設計とする。
- (2) 受入れ区域天井クレーン
 - a. つりワイヤ、ブレーキ、リミットスイッチを二重化する。
 - b. 電気の供給が停止した場合に動作するブレーキを使用し、金属キャスクの落下を防止する。
 - c. 金属キャスクを吊った状態で、仮置き中の金属キャスク上を通過できないように可動範囲を制限するインターロックを設ける。
 - d. 金属キャスクの吊上げ高さを制限するインターロックを設ける。
- (3) 搬送台車
 - a. 金属キャスク・構築物への接近を検知する装置により衝突を防止するインターロックを設ける。
 - b. 電源喪失時や空気圧縮機の停止により動力源である圧縮空気の供給が停止した場合には、金属キャスクを着床させ衝突を防止する。
- (4) 受入れ区域天井クレーン及び搬送台車は、操作員の誤操作を考慮した設計とする。
- (5) 作業要領を十分整備し、監督者の直接指揮下で金属キャスクの取扱作業を行う管理体制をとる。監督者は、金属キャスクの移動に関して知識を有し、教育・訓練経験を有する実務経験のあるものが従事する。
- (6) 万一、金属キャスクの落下・衝突等が発生した場合においても、金属キャスクに著しい損傷を与えないように以下の対策を講ずる設計とする。
 - a. 金属キャスクの吊上げ高さ制限及び受入れ区域天井クレーンの荷重による可動範囲を制限するインターロックを設ける。
 - b. 搬送台車で移送の際には、定格速度（10m／分）以下で移送する。また、搬送台車の浮上高さを約5 cmに設定する。
 - c. 事業所外運搬に必要な緩衝体をたて起こし架台にて取り外し、受入れ区域天井クレーンにて金属キャスクを吊上げる場合には、床面に衝撃吸収

材を敷設する。

2. 施設設計

使用済燃料貯蔵施設は、金属キャスクの搬入、貯蔵及び搬出に係る金属キャスクの移動に対して、事業開始以降、金属キャスクを順次搬入してから全ての金属キャスクを貯蔵後搬出するまで、いずれの状態においても基本的安全機能を維持するように設計する。

(1) 金属キャスクの取扱い（別添1参照）

使用済燃料貯蔵建屋における金属キャスクの取扱いは、以下のとおり行う。

トレーラトラックにより使用済燃料貯蔵建屋受入れ区域に搬入された金属キャスクは、事業所外運搬に必要な緩衝体を取り付けた状態で受入れ区域天井クレーンを用いて仮置架台又はたて起こし架台に設置する。仮置架台に設置された金属キャスクは、たて起こしの際、たて起こし架台へ移送する。受入れ区域配置及び受入れ区域天井クレーン断面図を第1図に示す。

金属キャスクは、たて起こし架台で緩衝体を取り外し、受入れ区域天井クレーンを用いてたて起こす。貯蔵架台と金属キャスクを固定した後、搬送台車により検査架台へ移送する。

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

また、上記の工程を逆に行うことにより、金属キャスクを搬出する。

(2) 貯蔵施設における具体的設計

a. 受入れ区域天井クレーン

受入れ区域天井クレーンは、使用済燃料貯蔵建屋受入れ区域上部に装備し、受入れ区域における金属キャスクの取扱い、移送等を行う設備である。

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

- ・受入れ区域天井クレーンは、構造強度の観点から、地震荷重等の適切な組み合わせを考慮しても強度上耐え得るように設計する。
- ・受入れ区域天井クレーンは、つりワイヤ、ブレーキ、リミットスイッチを二重化する。

- ・動力源である電気の供給が停止した場合に動作するブレーキを使用し、金属キャスクを保持する設計とすることで、金属キャスクの落下を防止する。
- ・金属キャスクを吊った状態で仮置き中の金属キャスク上を通過できないように可動範囲を制限するインターロックを設け、落下による衝突を防止する。
- ・金属キャスクが、仮置架台、たて起こし架台及び貯蔵架台への着床時に、基本的安全機能に影響を与えないように微速の巻き下げ速度で運用する。
- ・フックとクレーントロリの衝突を防止するため、巻過防止のリミットスイッチを設ける。
- ・金属キャスクの吊上げ高さを制限するインターロックを設ける。
- ・金属キャスクのたて起こしを行っている時に、地震が発生した場合はたて起こし作業を直ちに中断する。その後、金属キャスク、受入れ区域天井クレーン、垂直吊具等の点検を行う。受入れ区域天井クレーンは、耐震クラス B (Ss) であり支持機能は維持される。
受入れ区域天井クレーン構造図を第 2 図に示す。

b. 搬送台車（空気圧縮機、空気貯槽等含む）

搬送台車は空気圧縮機から空気貯槽等を介して供給される圧縮空気により、金属キャスク及び貯蔵架台を揚重し、移送を行う設備である。

搬送台車は、エアキャスタに圧縮空気を供給し、床面とエアキャスタの間に薄い空気膜（約 0.1mm）を形成させることで摩擦力を大幅に低減させ（第 3 図参照）、小さな駆動力で重量物の搬送を可能にするものである。この方式の搬送システムは一般産業界では広く用いられており、米国ではコンクリートキャスクの搬送設備としても用いられている。

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

- ・搬送台車は、構造強度の観点から、地震荷重等の適切な組み合わせを考慮しても強度上耐え得るように設計する。（別添 2 参照）
- ・搬送台車による金属キャスクの移送を安全かつ確実にを行うために操作員による誤操作等を想定し、補助員によっても緊急停止できる機構を設け

るとともに、他の金属キャスク・構築物等への接近を検知する装置により、衝突を防止するインターロックを設ける。

- ・電源喪失時や空気圧縮機の停止により動力源である圧縮空気の供給が停止した場合には、金属キャスクを着床させ、衝突を防止する。
- ・空気貯槽に安全弁を設置し、加圧防止対策を講じる設計とする。搬送台車構造図を第4図、空気圧縮機、空気貯槽の外形写真を図5に示す。

c. たて起こし架台

たて起こし架台は、水平状態の金属キャスクを垂直状態にたて起こすための架台である。

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

- ・たて起こし架台は、構造強度の観点から、地震荷重等の適切な組み合わせを考慮しても強度上耐え得るように設計する。
- ・万一、たて起こし時に金属キャスクが転倒しても、金属キャスクの閉じ込め機能に著しい損傷を与えないように衝撃吸収材をたて起こし架台及びその周辺に敷設する。(別添3参照)

たて起こし架台構造図を第6図に、衝撃吸収材構造図を第6図に示す。

d. その他受入れ施設

(a) 仮置架台

仮置架台は、搬入した金属キャスクを検査するまでの間及び搬出する金属キャスクをトレーラトラックへ移送するまでの間等一時的に金属キャスクを仮置きするための架台である。

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

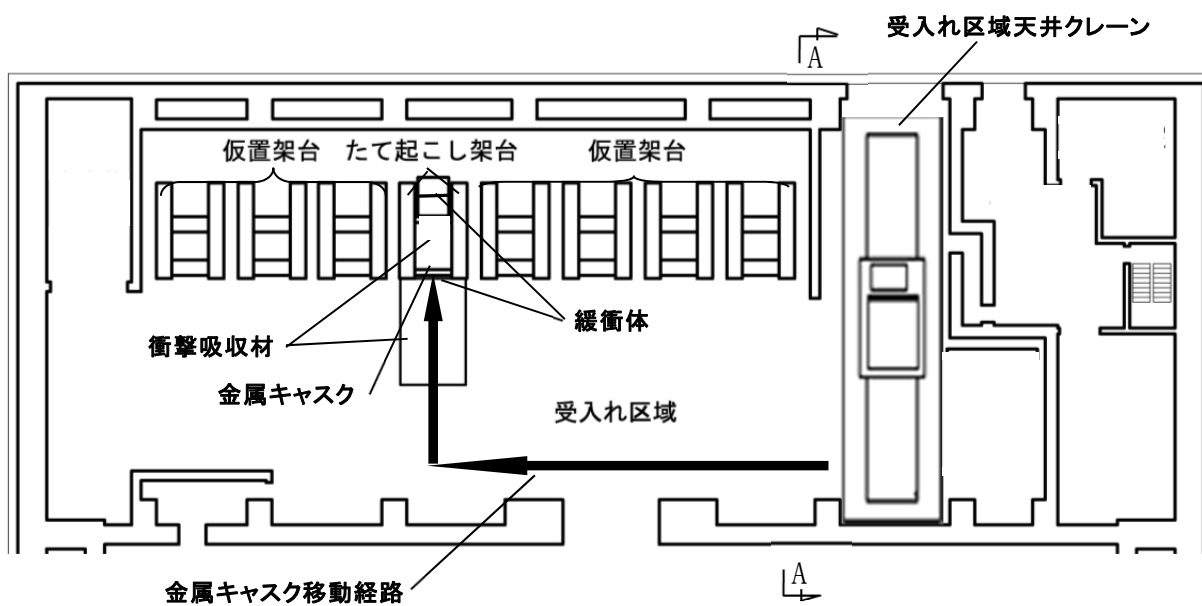
- ・仮置架台は、構造強度の観点から、地震荷重等の適切な組み合わせを考慮しても強度上耐え得るように設計する。
- ・仮置架台に設置された金属キャスクは、輸送用の緩衝体が取付けられた状態とすることを厳格に手順書に定め運用管理する。

仮置架台構造図を第8図に示す。

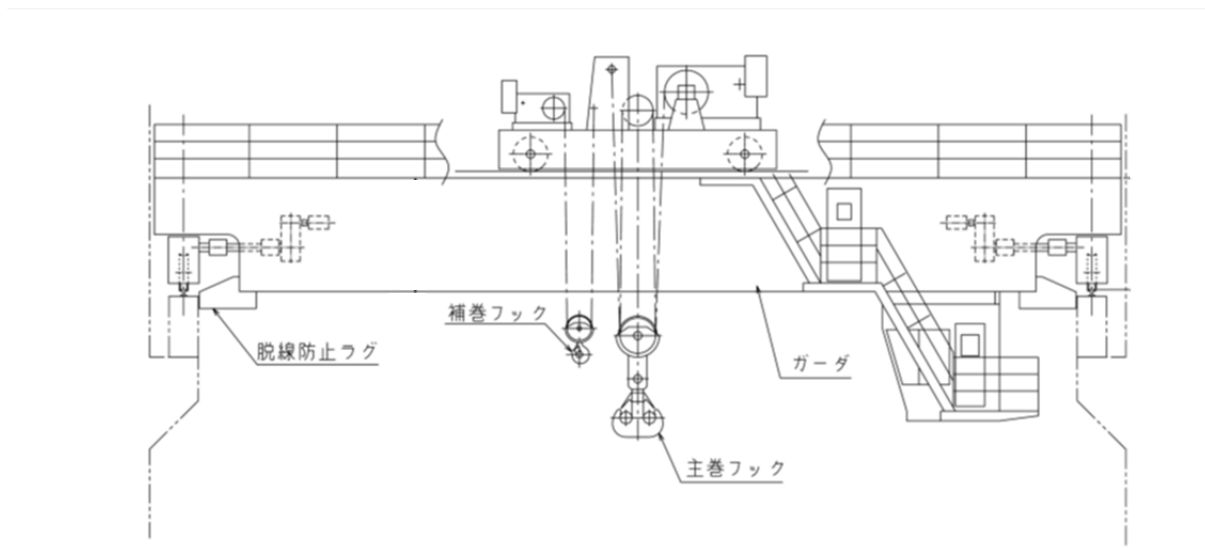
(b) 検査架台

検査架台は、金属キャスクの受入れ検査、三次蓋の取外し、計測器の取付け等を行うための作業員の足場である。したがって、検査架台は、受入れ設備ではあるが、金属キャスクを直接取り扱う設備ではない。

検査架台構造図を第9図に示す。

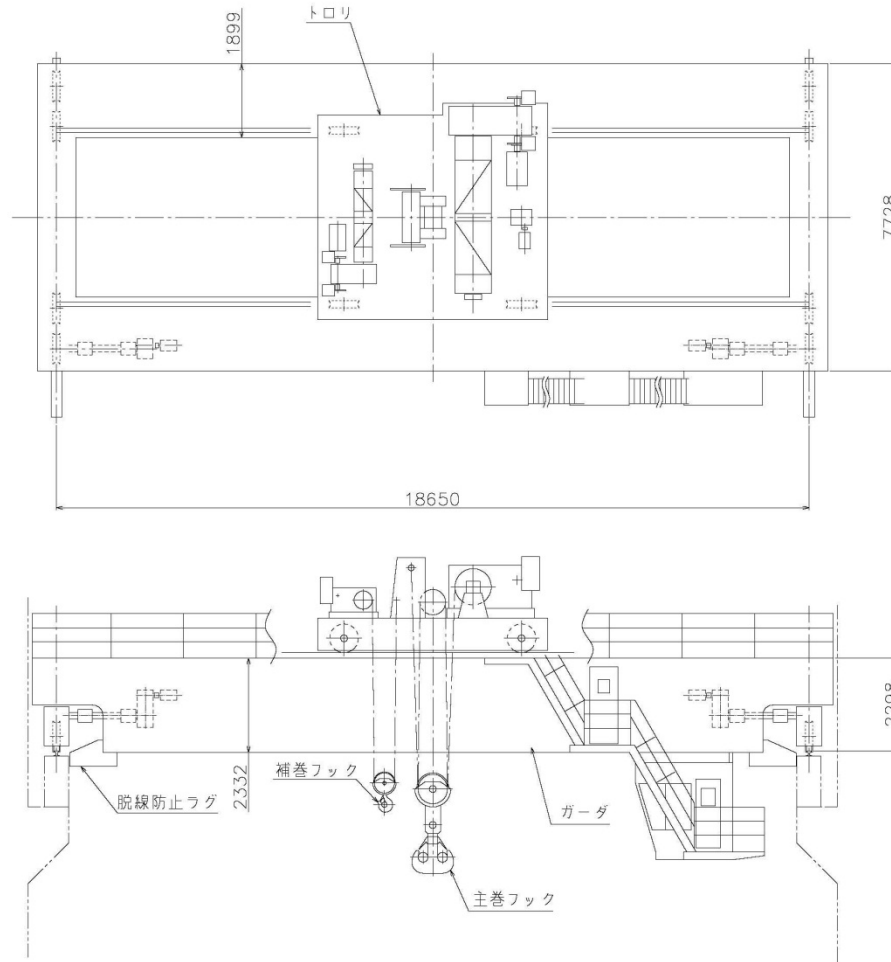


受入れ区域配置



受入れ区域天井クレーン断面 (A-A 断面)

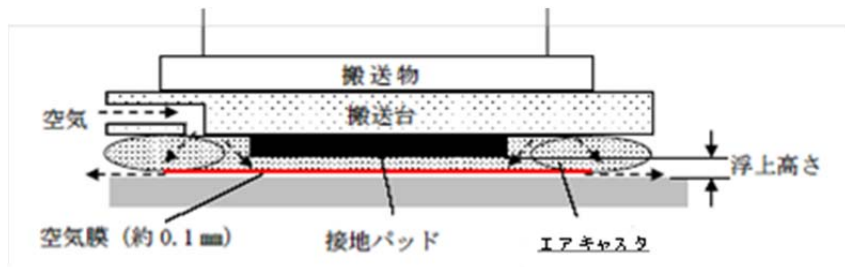
第 1 図 受入れ区域配置及び受入れ区域天井クレーン断面図



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

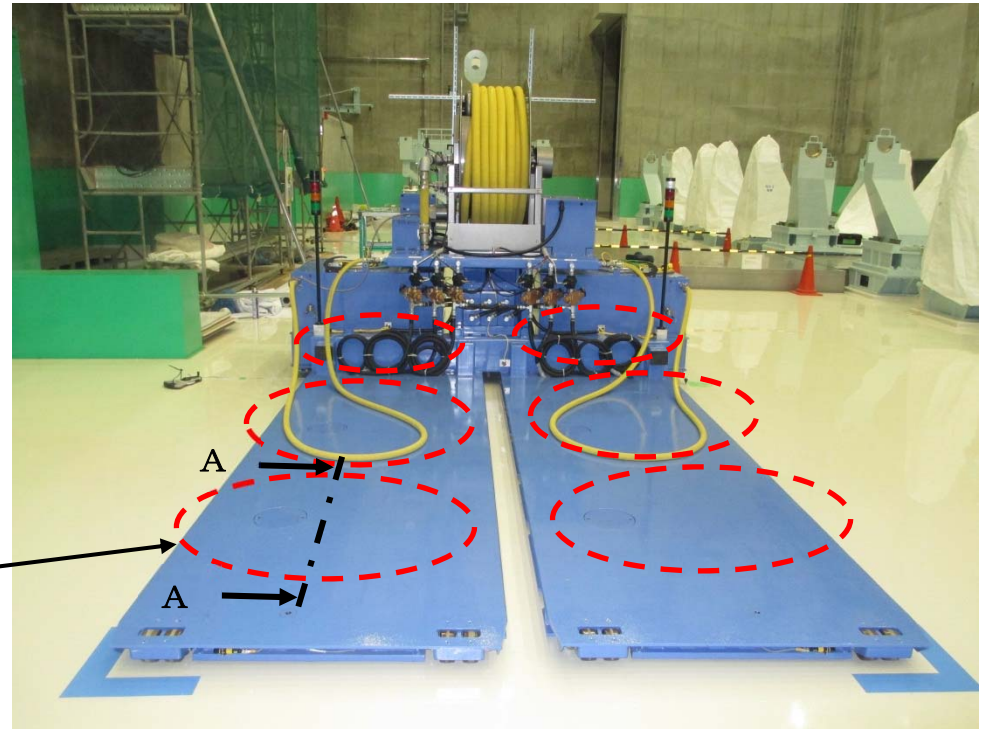
注1：特記なき寸法は mm を示す。
 注2：特記なき寸法は公称値を示す。

第2図 受入れ区域天井クレーン構造図

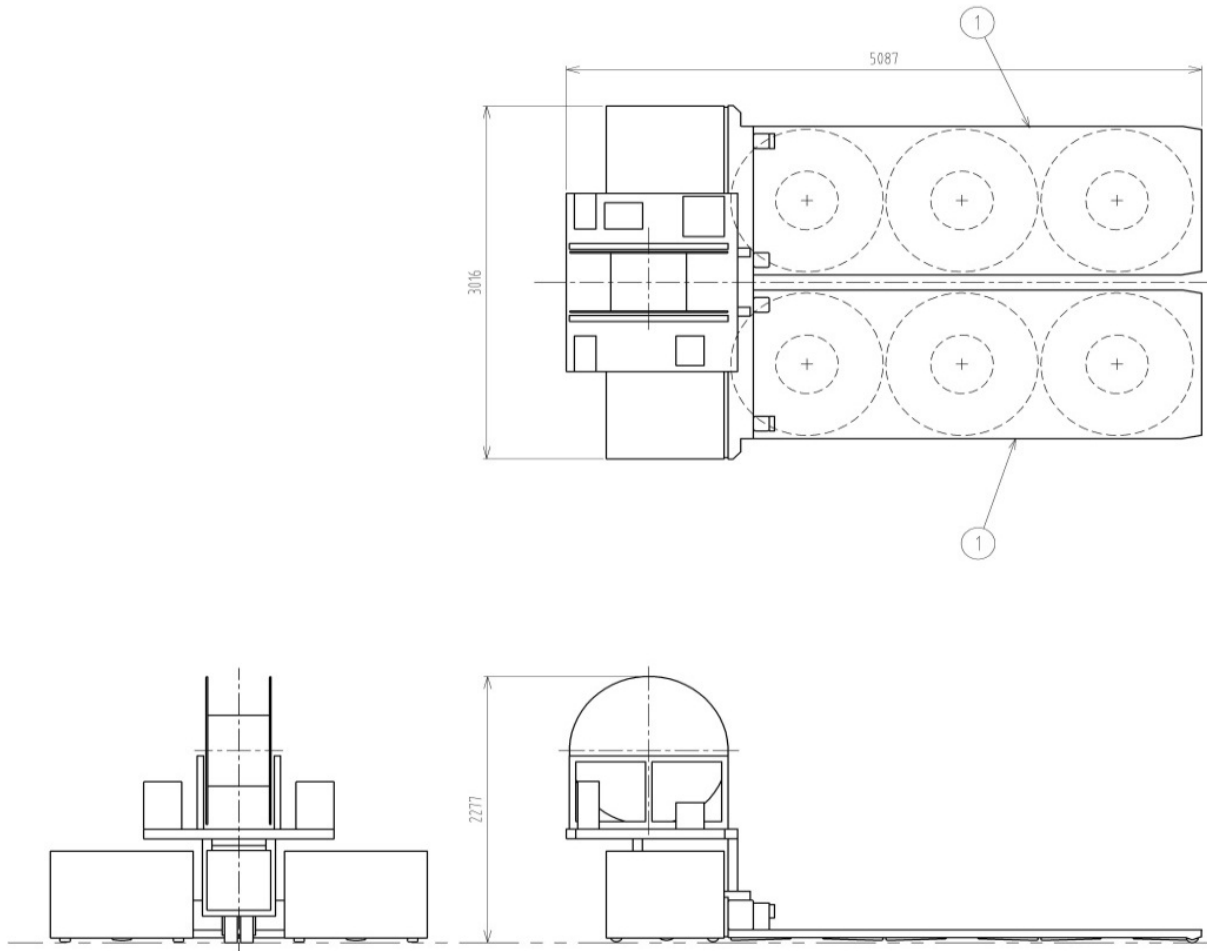


A-A矢視

エアキャスタ



第3図 搬送台車の原理及びエアキャスタ概略位置図



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

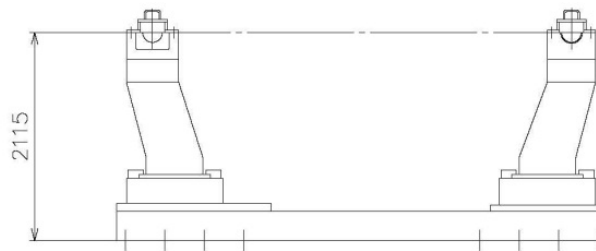
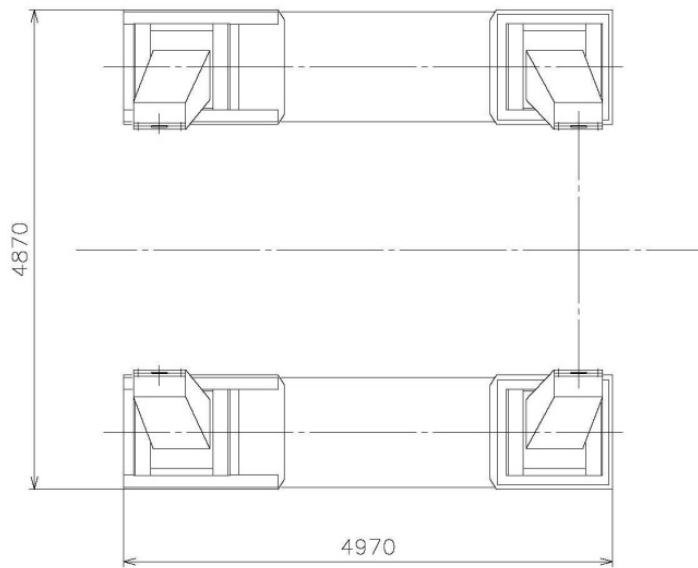
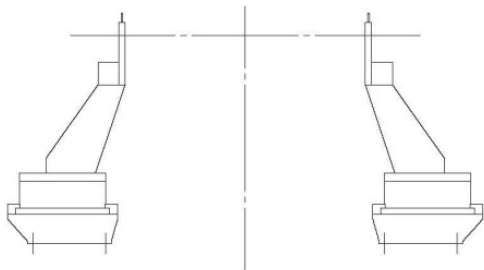
注1:特記なき寸法は mm を示す。
 注2:特記なき寸法は公称値を示す。

第4図 搬送台車構造図



2	空気貯槽	1	約 8m ³
1	空気圧縮機	1	約 40m ³ /min (通常)
番号	品名	台数	容量
部品表			

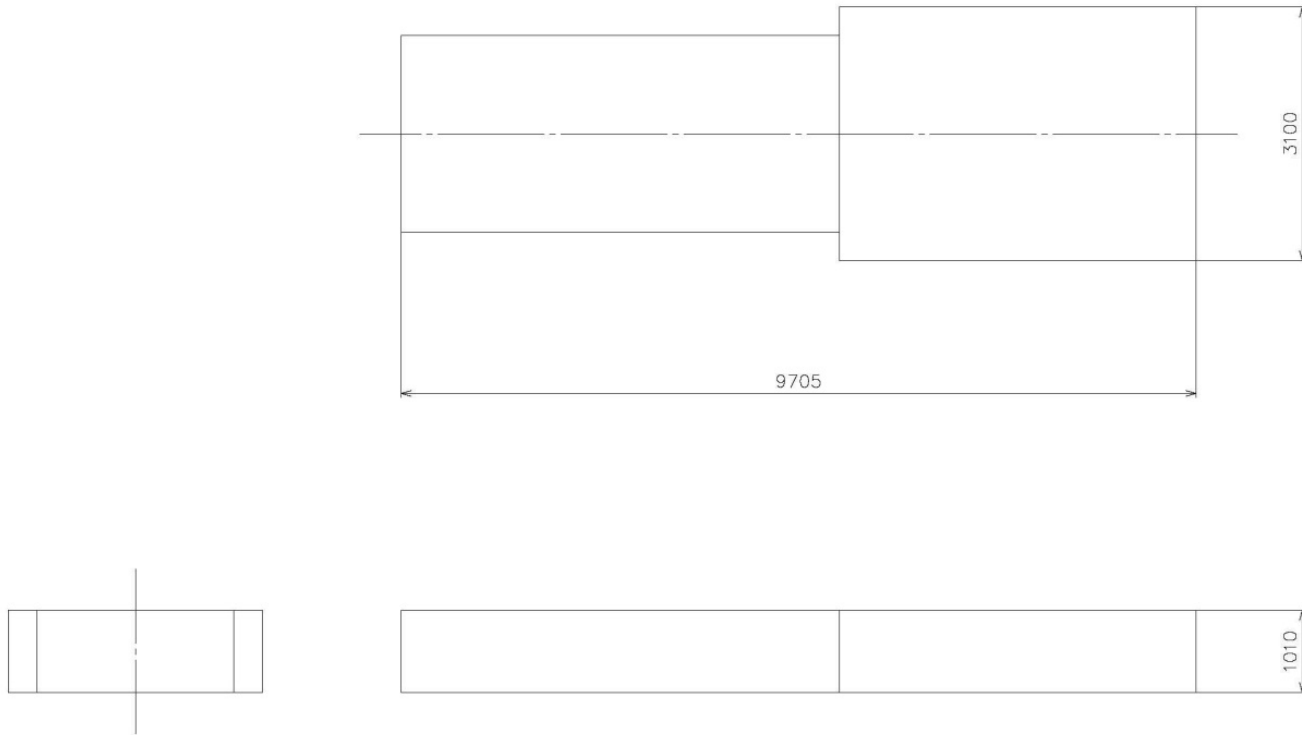
第 5 図 空気圧縮機, 空気貯槽外形写真



本体	SM490A
品名	材料
部品表	

注1：特記なき寸法はmmを示す。
 注2：特記なき寸法は公称値を示す。

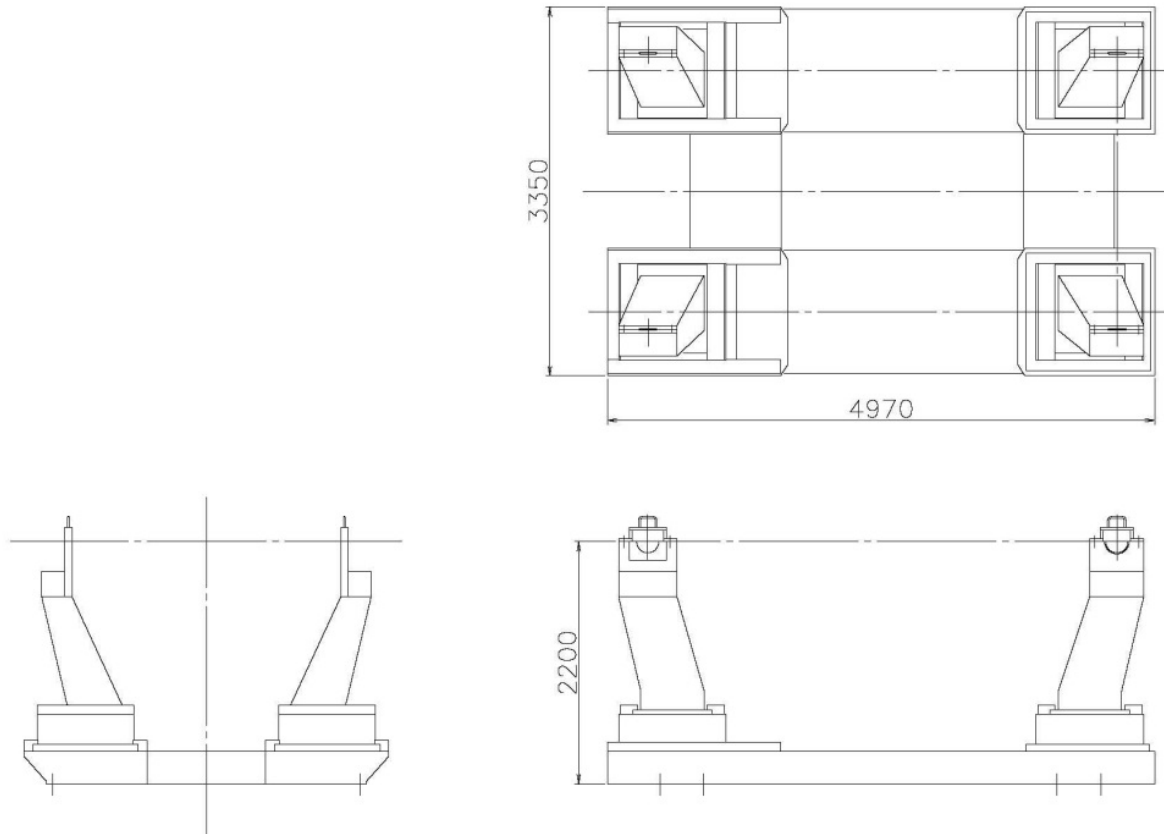
第6図 たて起こし架台構造図



吸収材	バルサ
缶体	SUS304
品名	材料
部品表	

注1:特記なき寸法は mm を示す。
 注2:特記なき寸法は公称値を示す。

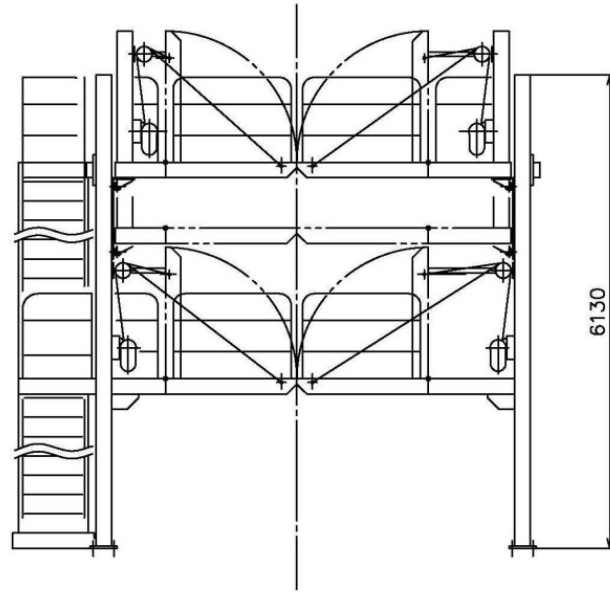
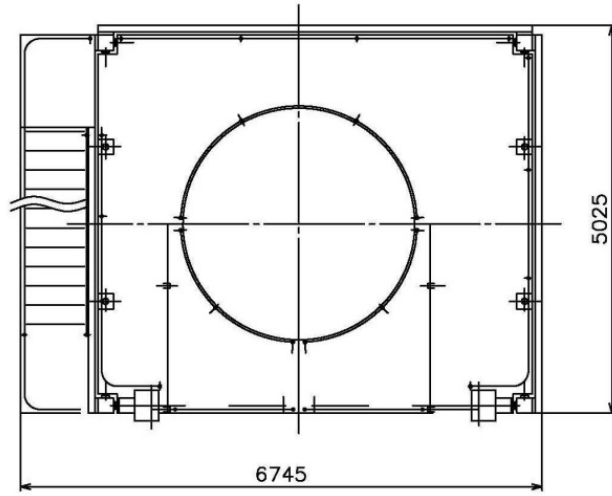
第 7 図 衝撃吸収材構造図



本体	SM490A
品名	材料
部品表	

注1:特記なき寸法は mm を示す。
 注2:特記なき寸法は公称値を示す。

第 8 図 仮置架台構造図



単位：mm

本体	SS400 STKR400
品名	材料
部品表	

注1:特記なき寸法は mm を示す。
注2:特記なき寸法は公称値を示す。

第9図 検査架台構造図

金属キャスクハンドリングフロー及びインターロック条件等について

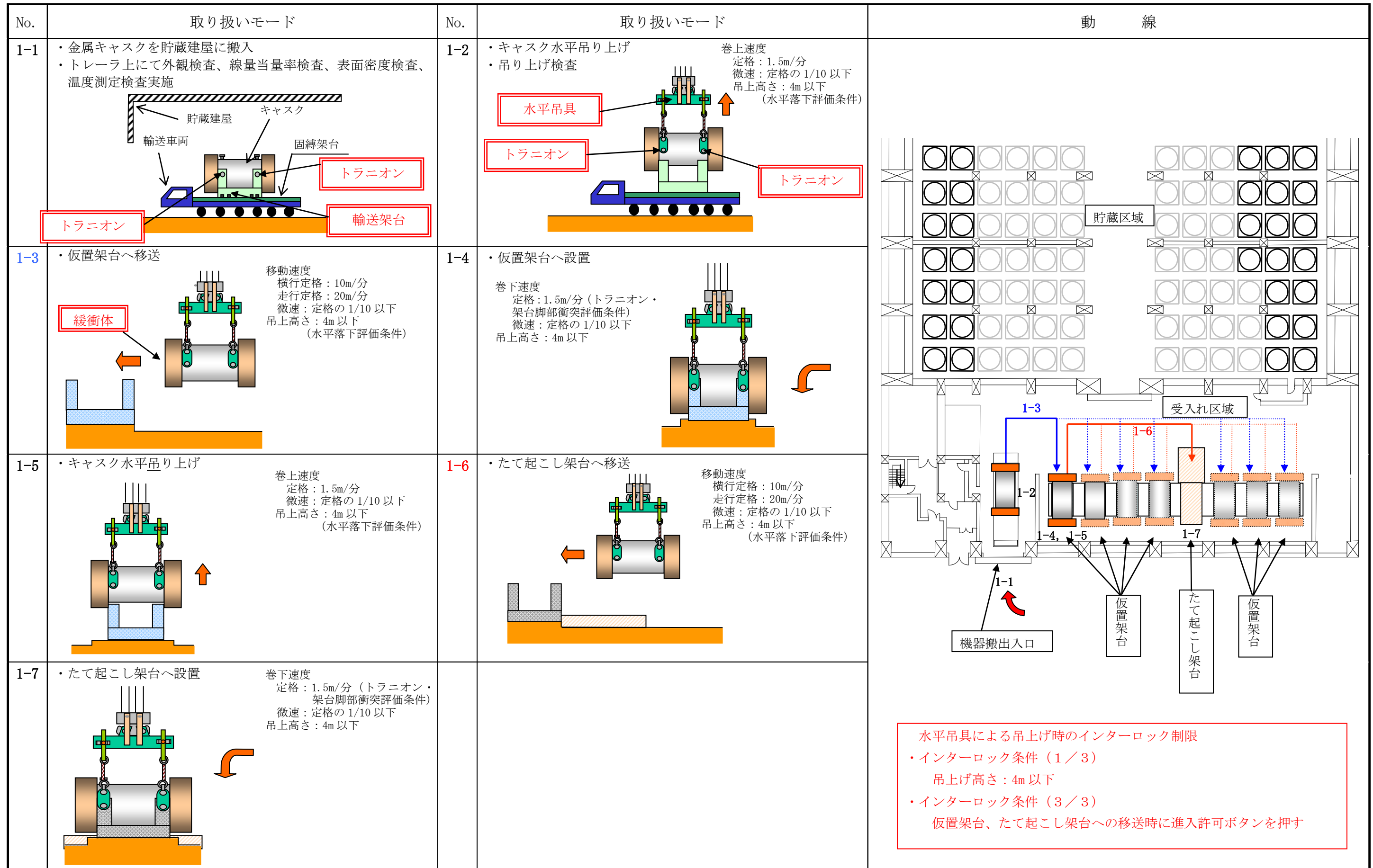
使用済燃料貯蔵施設における基本的な金属キャスクハンドリングフロー例を、下記 3 つの段階毎に、次頁以降に示す。なお、金属キャスクの衝突防止に係る設計及び吊上げ高さ制限についても、同フロー内に示す。

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

また、天井クレーンの移動エリア制限について、「インターロック条件（1 / 3）～（3 / 3）」に詳細を示す。

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

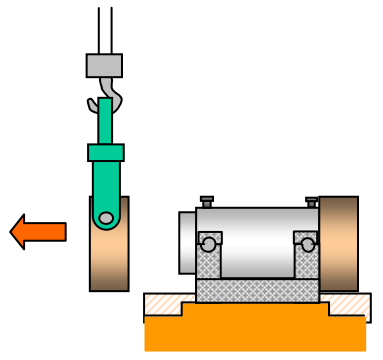
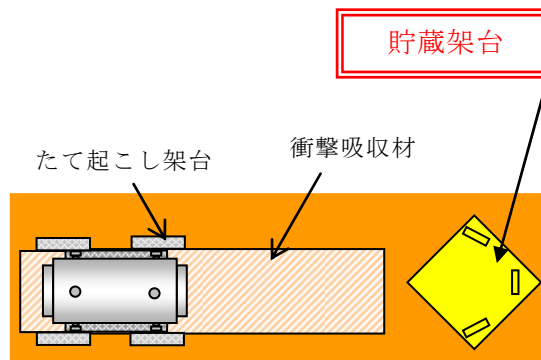
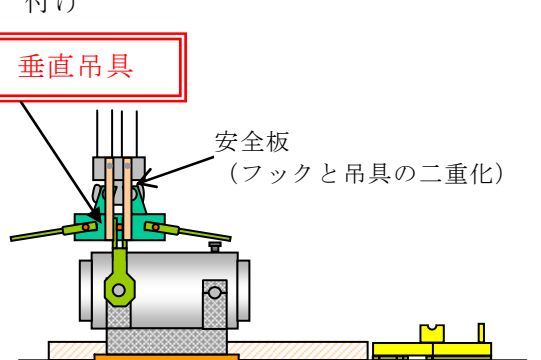
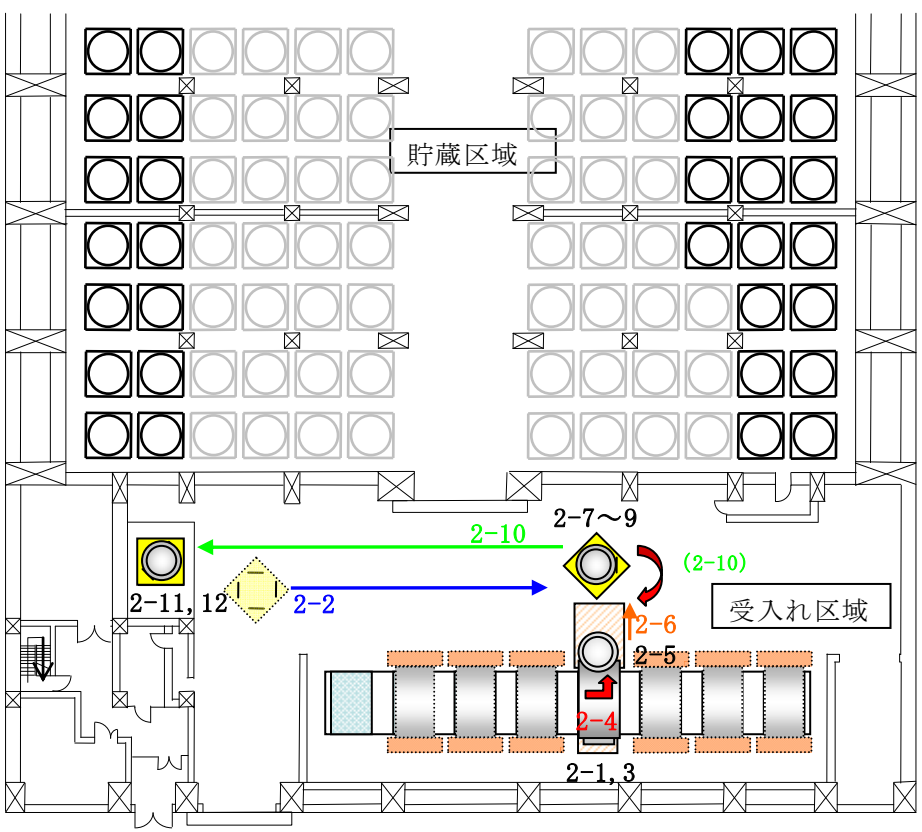
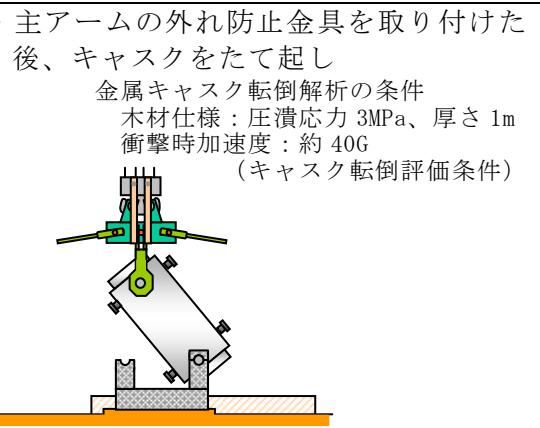
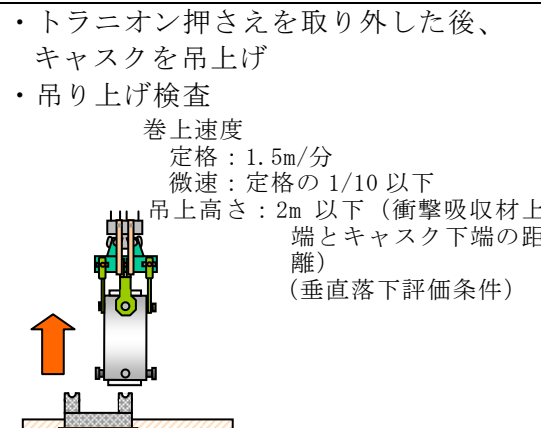
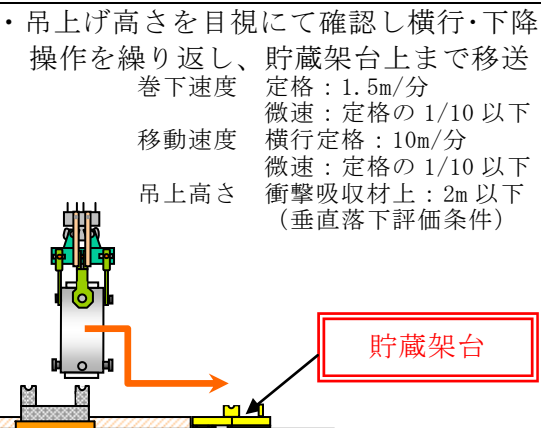
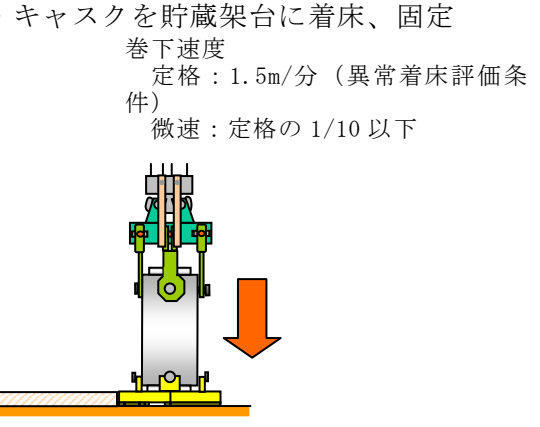
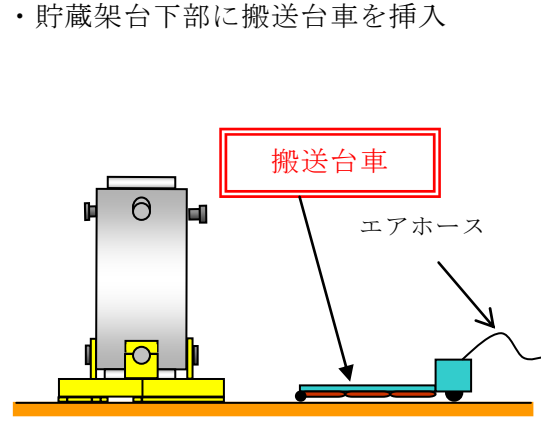
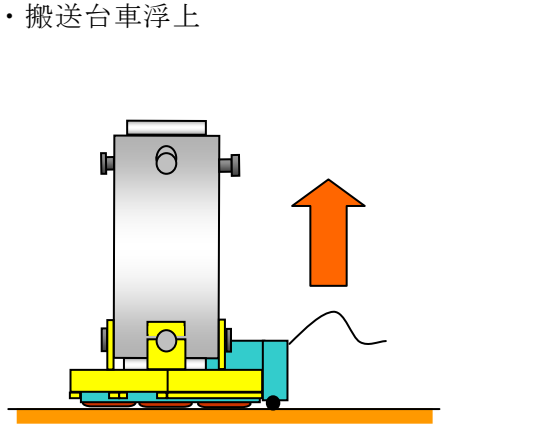
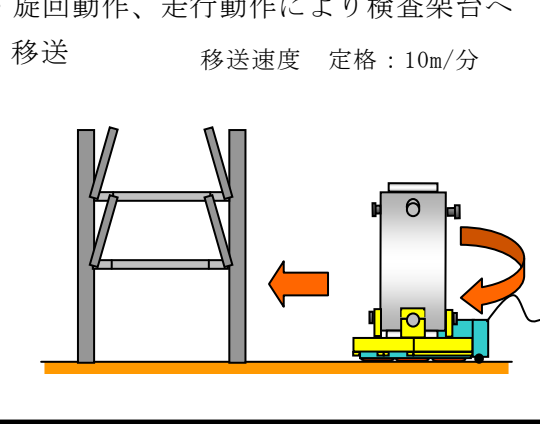
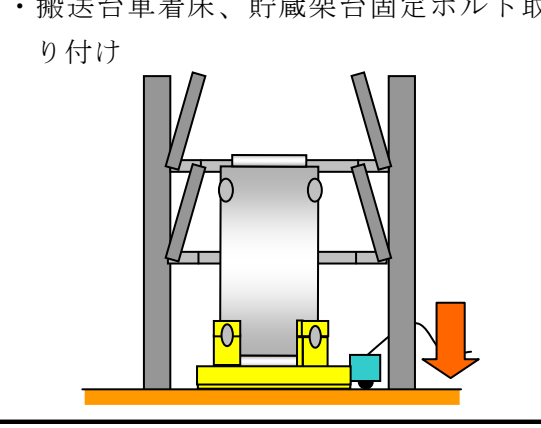
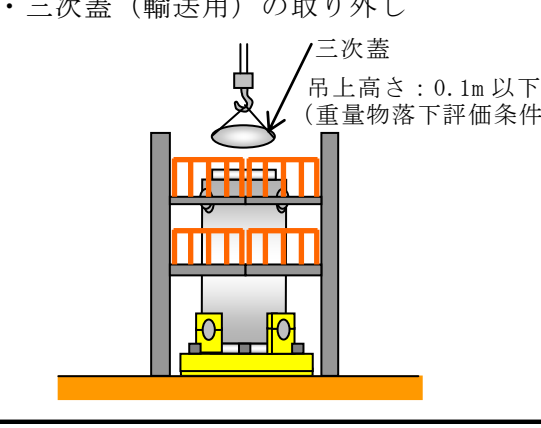
1. 金属キャスクの受け入れ～金属キャスクの仮置き



※検査実施場所については、今後の検討により変更となる場合がある。

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

2. 緩衝体取り外し～金属キャスクたて起こし～検査架台への移送

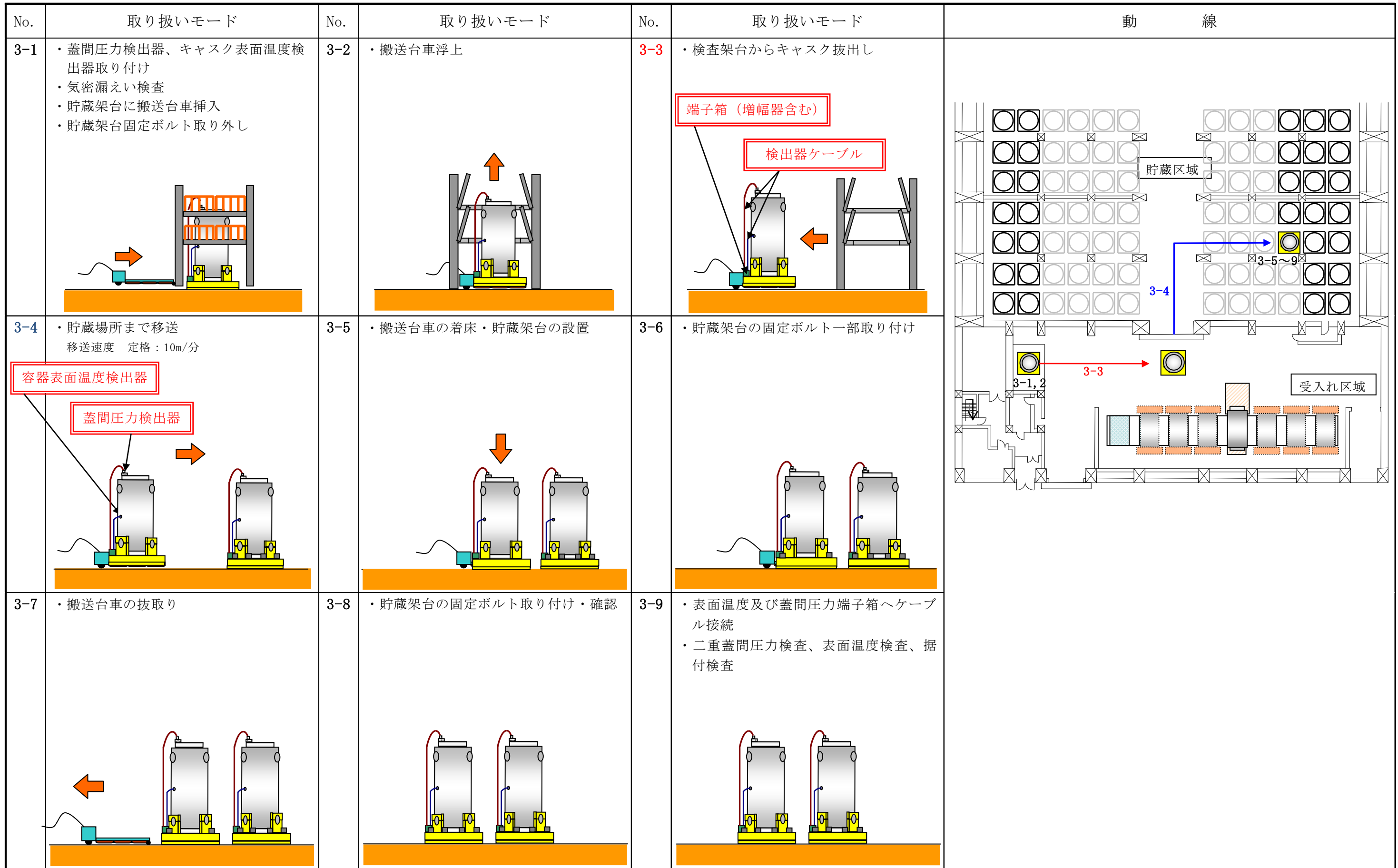
No.	取り扱いモード	No.	取り扱いモード	No.	取り扱いモード	動線
2-1	・緩衝体の取り外し 	2-2	・貯蔵架台をたて起こし架台付近に設置 貯蔵架台 たて起こし架台 衝撃吸収材 	2-3	・吊具主アームを上部トラニオンに取り付け 垂直吊具 安全板 (フックと吊具の二重化) 	
2-4	・主アームの外れ防止金具を取り付けた後、キャスクをたて起こし 金属キャスク転倒解析の条件 木材仕様：圧潰応力 3MPa、厚さ 1m 衝撃時加速度：約 40G (キャスク転倒評価条件) 	2-5	・トラニオン押さえを取り外した後、キャスクを吊上げ ・吊り上げ検査 巻上速度 定格：1.5m/分 微速：定格の 1/10 以下 吊上高さ：2m 以下 (衝撃吸収材上端とキャスク下端の距離) (垂直落下評価条件) 	2-6	・吊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 巻下速度 定格：1.5m/分 微速：定格の 1/10 以下 移動速度 横行定格：10m/分 微速：定格の 1/10 以下 吊上高さ 衝撃吸収材上：2m 以下 (垂直落下評価条件) 	
2-7	・キャスクを貯蔵架台に着床、固定 巻下速度 定格：1.5m/分 (異常着床評価条件) 微速：定格の 1/10 以下 	2-8	・貯蔵架台下部に搬送台車を挿入 搬送台車 エアホース 	2-9	・搬送台車浮上 	
2-10	・旋回動作、走行動作により検査架台へ移送 移送速度 定格：10m/分 	2-11	・搬送台車着床、貯蔵架台固定ボルト取り付け 	2-12	・三次蓋 (輸送用) の取り外し 三次蓋 吊上高さ：0.1m 以下 (重量物落下評価条件) 	

垂直吊具による吊上げ時のインターロック制限
 ・インターロック条件 (2 / 3)
 吊上げ高さ：2m 以下

※検査実施場所については、今後の検討により変更となる場合がある。

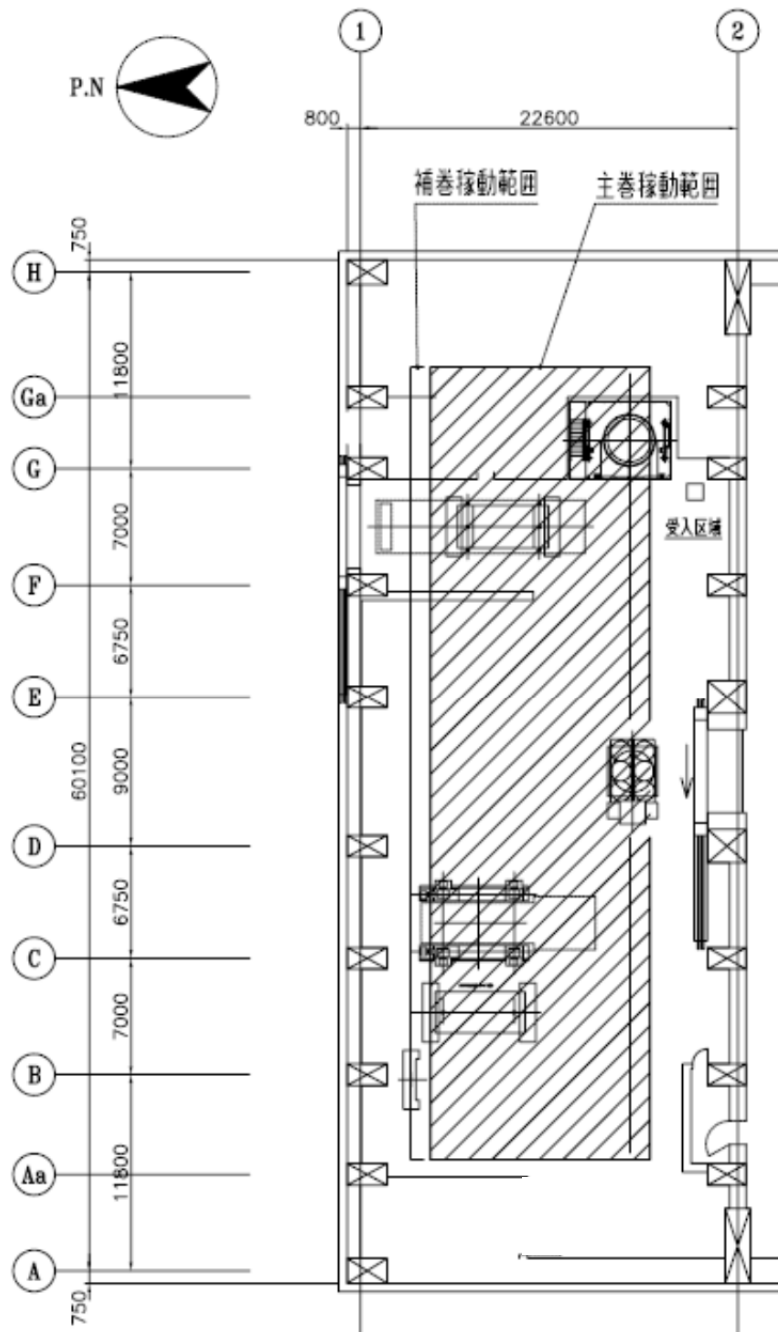
使用済燃料貯蔵施設における基本的な金属キャスクハンドリングフロー例（3 / 3）

3. 検査架台～貯蔵場所への設置



※検査実施場所については、今後の検討により変更となる場合がある。

インターロック条件 (1 / 3)
 (水平吊具で 4m 以上巻き上げられない)



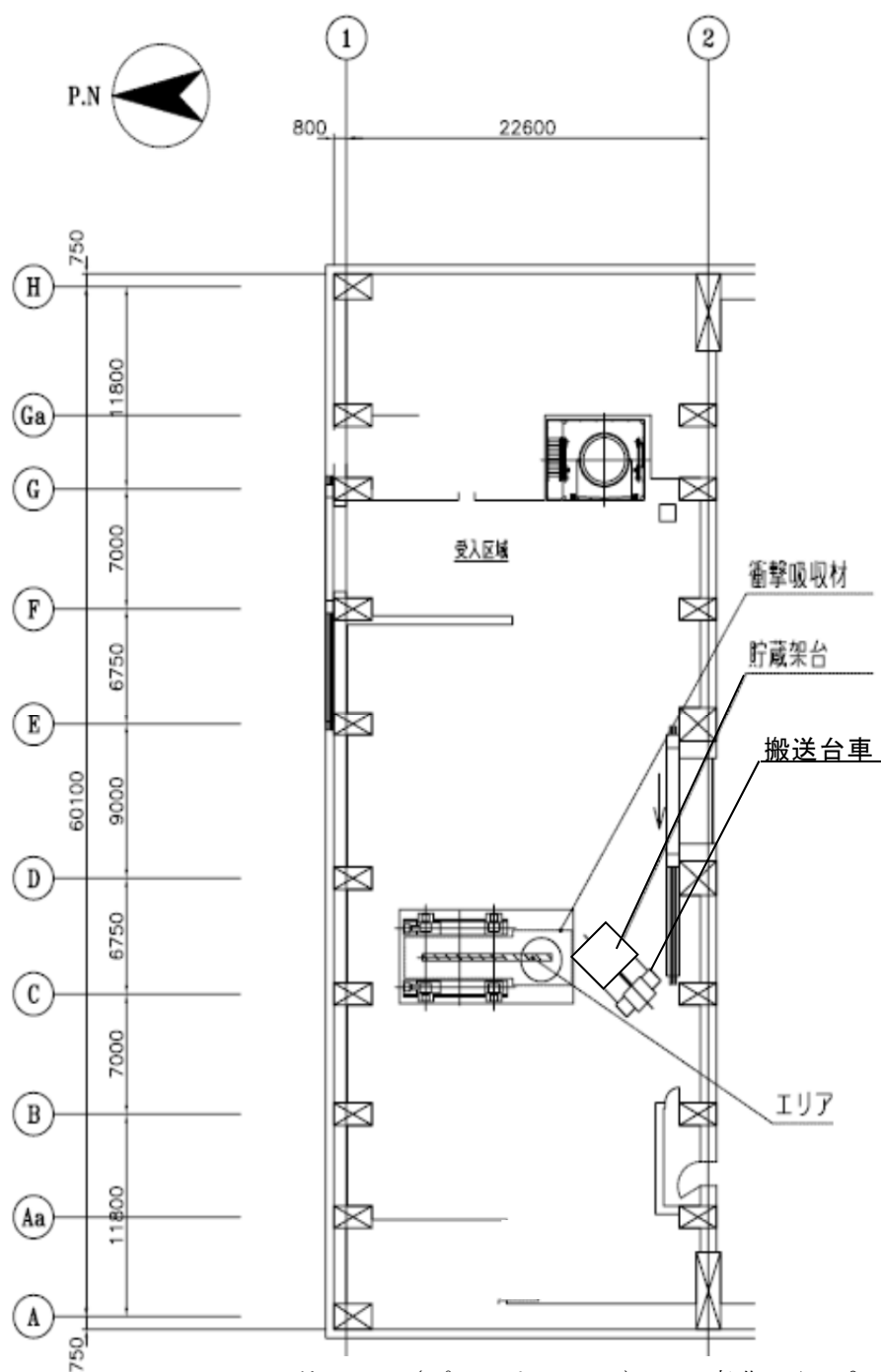
注：P.N (プラントノース) は、真北から $6^{\circ} 23'$ 西方向に設計上の北として設定されたもの

- (1) 主巻可動範囲全域において、吊上げ高さを 4 m に制限するインターロックを設ける。(荷重を検知してからの巻き上げ高さを制限する)

トレーラエリア及び仮置架台上にて、荷重を検知した場合、吊上げ高さを 4 m とする。

インターロック条件 (2 / 3)

(垂直吊具で 2m 以上巻き上げられない)

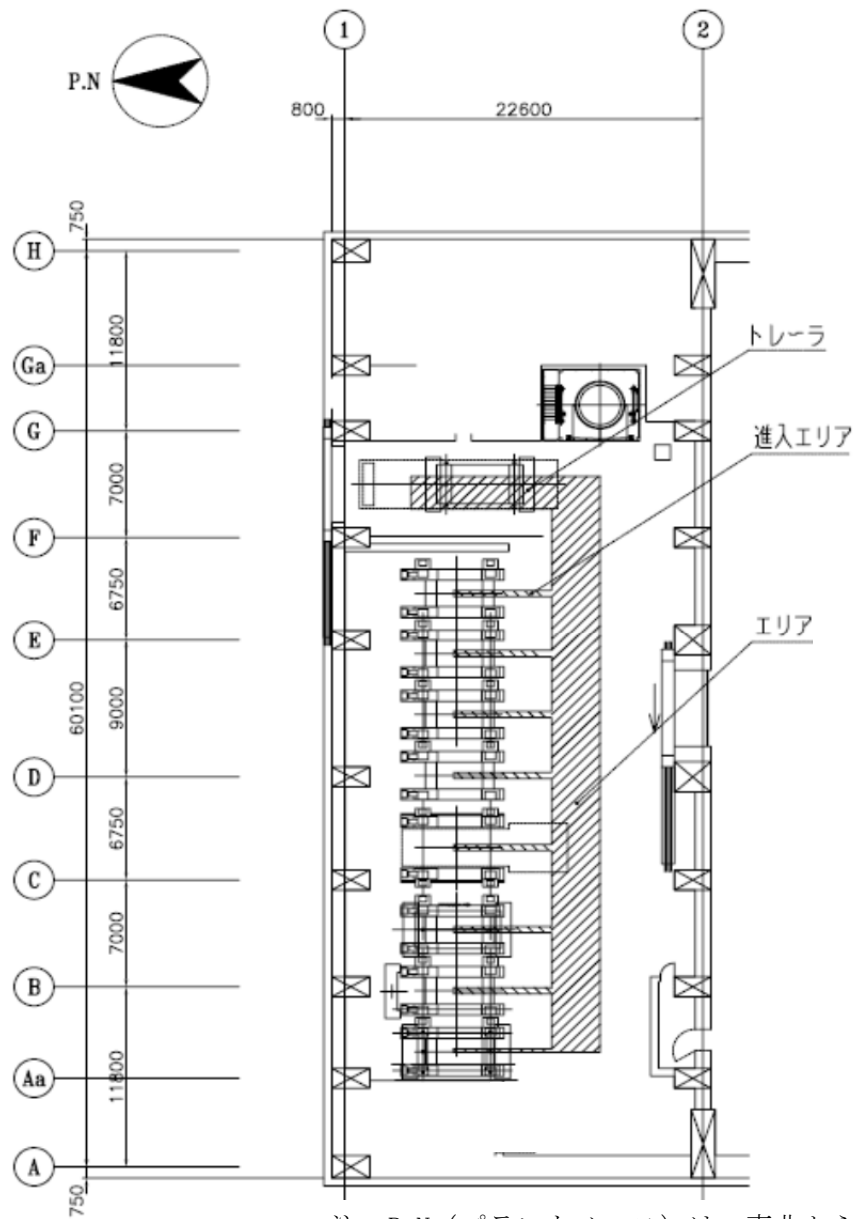


注：P.N (プラントノース) は、真北から 6° 23' 西方向に設計上の北として設定されたもの

- (2) 上記エリアにおいて、吊上げ高さを 2 m に制限するインターロックを設ける。(荷重を検知してからの巻き上げ高さを制限する)
たて起こし架台上にて、荷重を検知した場合、吊上げ高さを 2 m とする。

インターロック条件（3 / 3）

（容器上に進入禁止）



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

- (3) 上記進入エリアからのみ、仮置架台及びたて起こし架台に進入できるインターロックを設ける。（荷重を検知した状態では、移動範囲を制限する。この状態で巻き上げ高さの制限もある）

進入エリアに進入する際には、複数の作業員により、架台上にキャスクがないことを確認したうえで、進入許可ボタンを押すことにより、進入エリアへ進入することができる。ボタンが押されなければ、進入エリアへ進入できない。

搬送台車で金属キャスクを運搬中の地震対応について

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

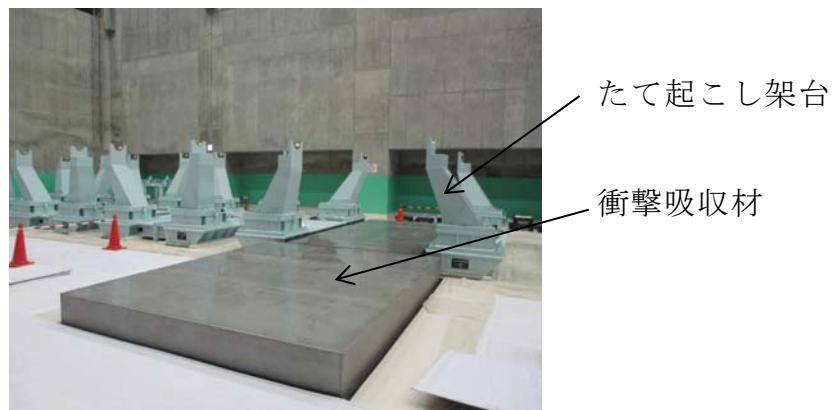
搬送台車で金属キャスクを運搬中に地震が発生した場合は、監督者の指示により、運転員又は補助員が緊急停止ボタンを操作し搬送台車を浮上・駆動させるための圧縮空気の供給を停止し搬送台車を停止させる。

地震終了後、金属キャスク、搬送台車等の点検を行う。

衝撃吸収材の性能及び敷設範囲について

1. 敷設範囲

たて起こし架台での金属キャスクのたて起こし作業，貯蔵架台上までの移動作業を行っている際に，転倒あるいは落下しても金属キャスクの閉じ込め機能に著しい損傷を与えないように，たて起こし架台及びその周辺に衝撃吸収材を敷設する。別添 3 - 1 図に，たて起こし架台及び衝撃吸収材の敷設範囲を示す。



別添 3 - 1 図 たて起こし架台及び衝撃吸収材の敷設範囲

2. 衝撃吸収材の性能

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

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

バルサ材の密度を適切に選定することで別添 3 - 2 図に示すような同等の吸収エネルギーを持つ応力-ひずみ特性を設定し，設計解析に用いることができる。



別添 3 - 2 図 木材の圧潰特性

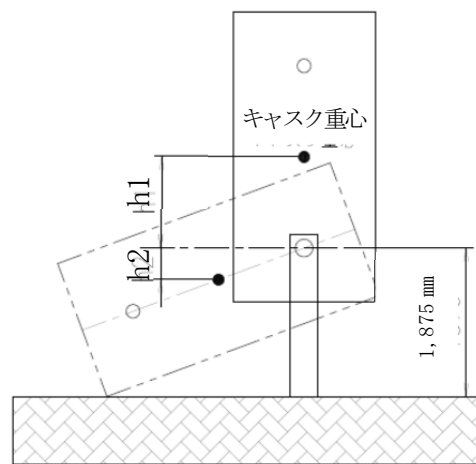
3. 衝撃吸収材の圧潰圧力 3 MPa の評価

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

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

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

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



別添 3 - 3 図 金属キャスク転倒状態

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

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

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

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

となる。以上より、衝撃吸収材への衝突エネルギー E は、

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

で表される。

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

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

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

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

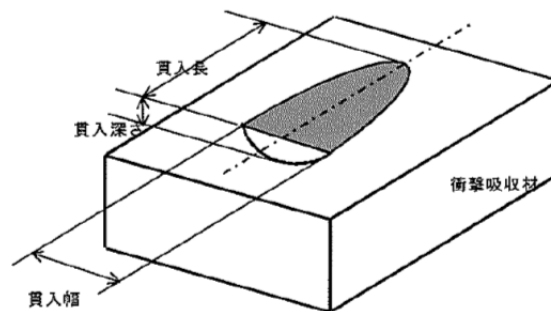
まず、エネルギーバランスから求まる貫入体積 V は以下となる。

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

- V_c : 衝撃吸収材への衝突速度

次に、貫入時の幾何学的関係式から求められる貫入体積 V' は、別添 3-4 図のとおり貫入部の面積について放物線を考慮した三角錐で近似することにより以下となる。

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



別添 3-4 図 放物線近似した貫入面積及び貫入体積

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

評価に使用した BWR 用大型キャスク (タイプ 2) のデータを別添 3-1

表に、評価結果を別添 3 - 2 表に示す。

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

項目	データ
金属キャスク質量 : m	121.0 (ton)
初期におけるキャスク重心の水平面からの高さ : h_1	2239 (mm)
衝突時におけるキャスク重心の水平面からの高さ : h_2	295 (mm)
慣性モーメント : I	9.52×10^5 (kg · m ²)

別添 3 - 2 表 転倒評価結果

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

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

第 17 条 計測制御系統施設

<目 次>

1. 設計方針
2. 施設設計
3. 試験検査
4. 代替計測

(別 添)

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

1. 設計方針

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

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

また、測定データを監視盤室に表示及び記録する設計とする。なお、基準設定値を超えたときは、監視盤室及び監視員が監視を行う事務建屋に警報を出す設計とする。

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

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

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

なお、安全設計上想定される事故のうち、経年変化による基本的安全機能の劣化については、金属キャスクの蓋間圧力、使用済燃料貯蔵建屋給排気温度及び貯蔵区域の放射線レベルを常に監視することにより検知する。（別添1，別添2参照）

2. 施設設計

(1) 計測設備

a. 蓋間圧力監視装置

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

圧力検出器は各金属キャスクに2個設置し、貯蔵建屋監視盤室及び事務建屋に蓋間圧力を表示し、蓋間圧力が設定値まで低下した時点で貯蔵建屋監視盤室及び事務建屋に警報を発する。(別添3参照)

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

閉じ込め機能の監視を別添4に示す。

b. 表面温度監視装置

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

表面温度検出器は各金属キャスク表面に1個取り付けられ、貯蔵建屋監視盤室及び事務建屋に表面温度を表示し、表面温度が設定値まで上昇した時点で貯蔵建屋監視盤室及び事務建屋に警報を発する。(別添3参照)

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

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

c. 給排気温度監視装置

給排気温度監視装置は、貯蔵建屋の給排気温度を監視することにより、貯蔵建屋の除熱機能を監視する装置である。

給排気温度検出器は給気側に2個、排気側に24個取り付けられ、貯蔵建屋監視盤室及び事務建屋に給排気温度差及び排気温度を表示し、給排気温度差及び排気温度が設定値まで上昇した時点で貯蔵建屋監視盤室及び事務建屋に警報を発する。(別添3参照)

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

(2) 警報設備

a. エリアモニタリング設備

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

貯蔵区域には、ガンマ線エリアモニタ及び中性子線エリアモニタをそれぞれ12個及び6個設置し、受入れ区域には、ガンマ線エリアモニタ及び中性子線エリアモニタをそれぞれ1個ずつ設置し、廃棄物貯蔵室には、ガンマ線エリアモニタを1個設置する。それぞれの計測値は、貯蔵建屋監視盤室及び事務建屋に表示するとともに、外部放射線に係る線量当量率が設定値まで上昇した時点で貯蔵区域、貯蔵建屋監視盤室及び事務建屋に警報を発する。(別添3参照)

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

b. 周辺監視区域境界付近固定モニタリング設備

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

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

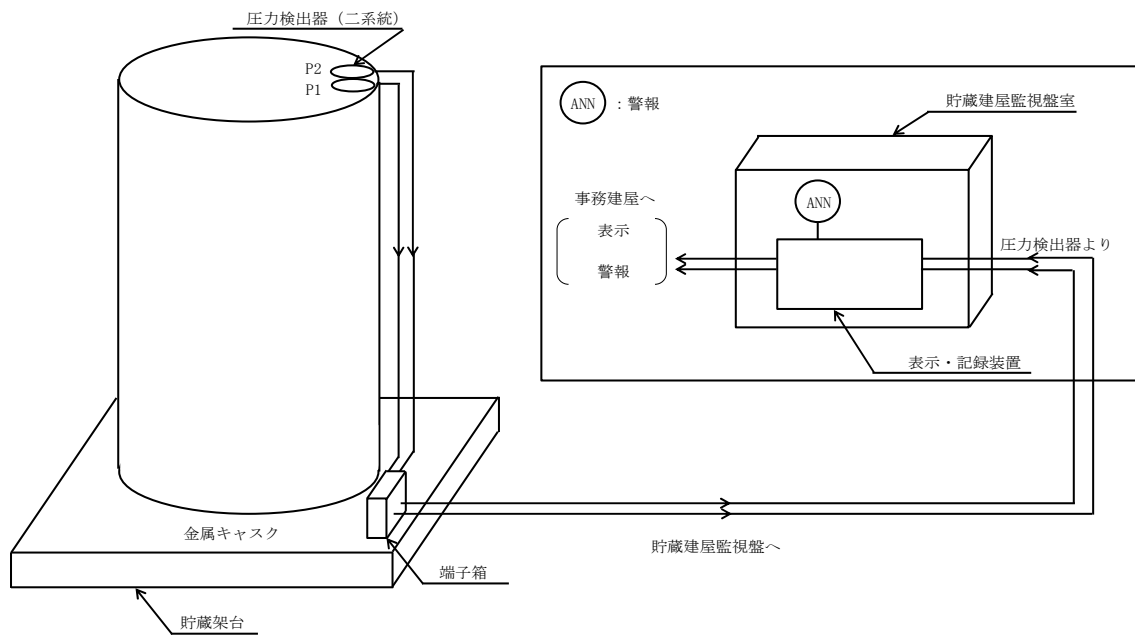
また、モニタリングポストのデータは貯蔵建屋監視盤室の記録装置に記録される。周辺監視区域境界付近固定モニタリング設備の構成図を第5図に示す。

3. 試験検査

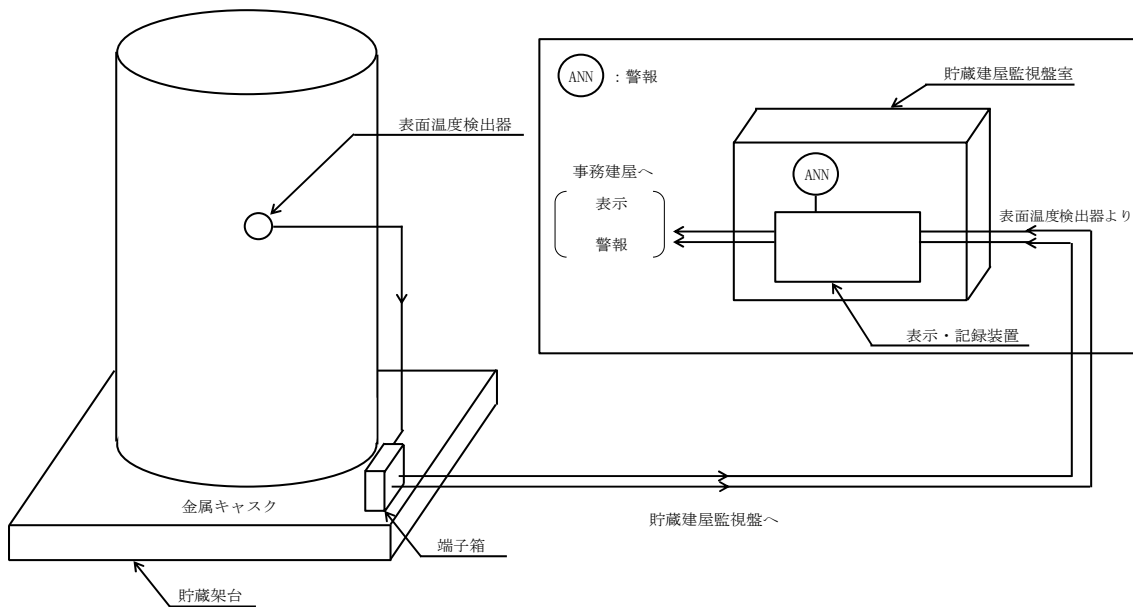
計測制御系統施設の試験検査については、別添6に示す。

4. 代替計測

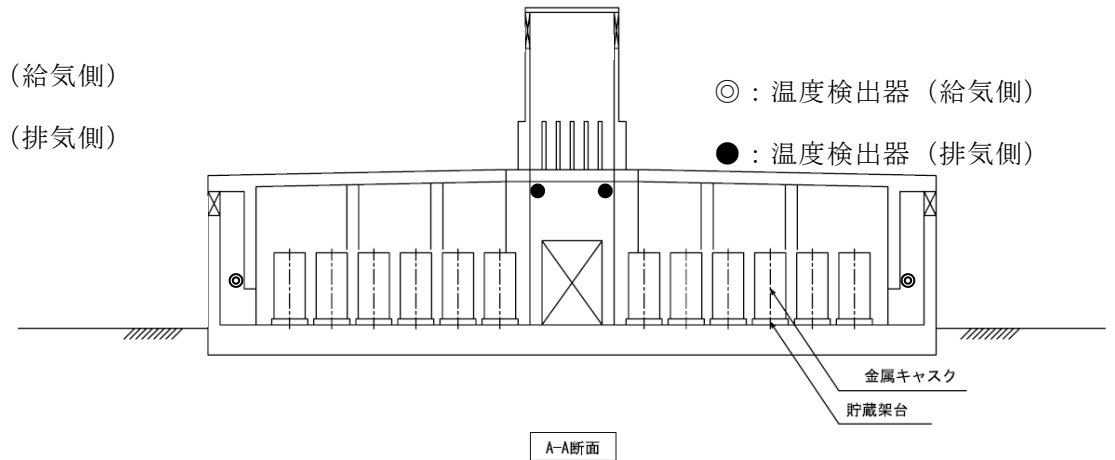
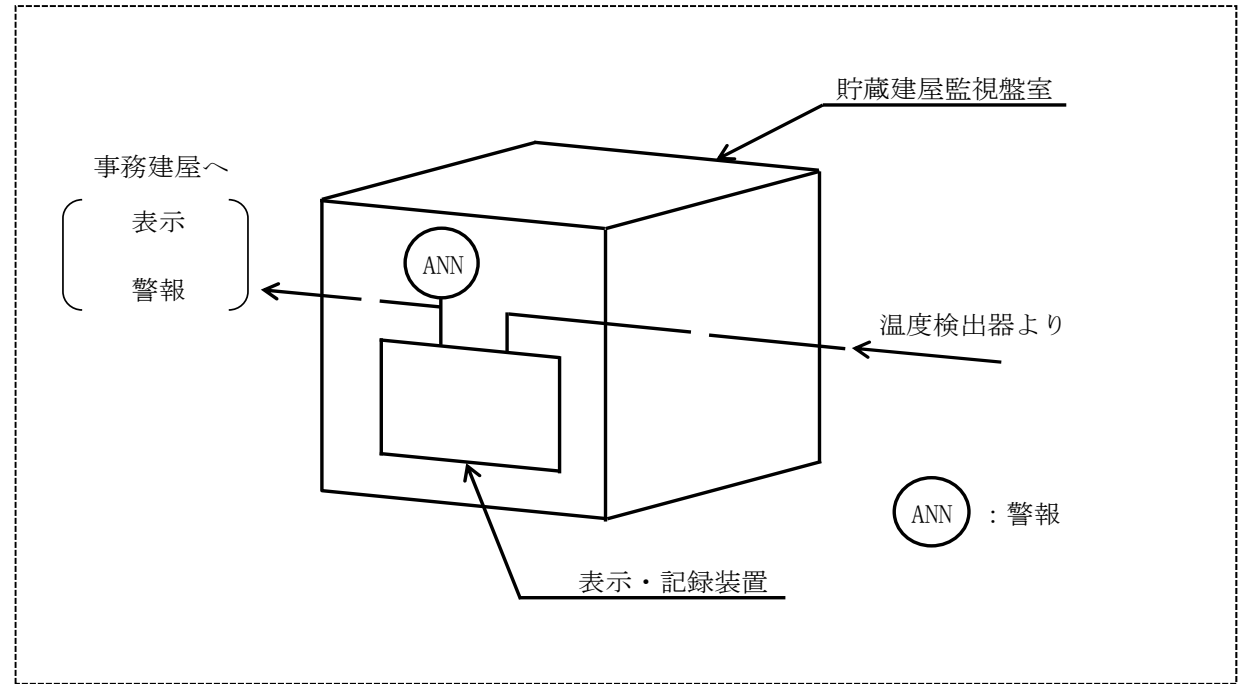
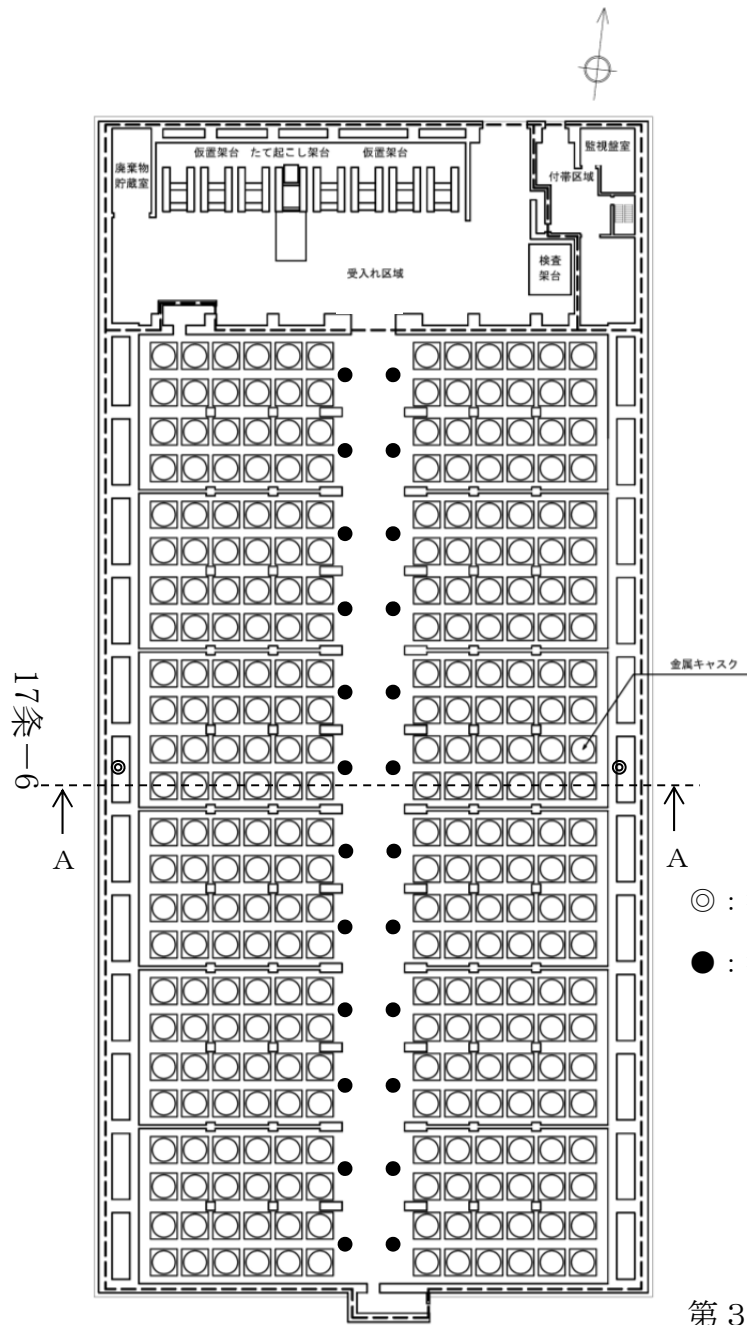
津波による計測設備，監視設備，電源設備の水没や，地震等による長期の電源喪失等，既設の計測設備，監視設備の継続使用ができなくなった場合は代替計測を行うとともに，監視員等による巡視等を行い，基本的安全機能に異常がないことを確認する。さらに，代替計測開始後，監視が中断される前のデータと復旧後のデータとを比較し，異常がないことを確認する。（別添7参照）



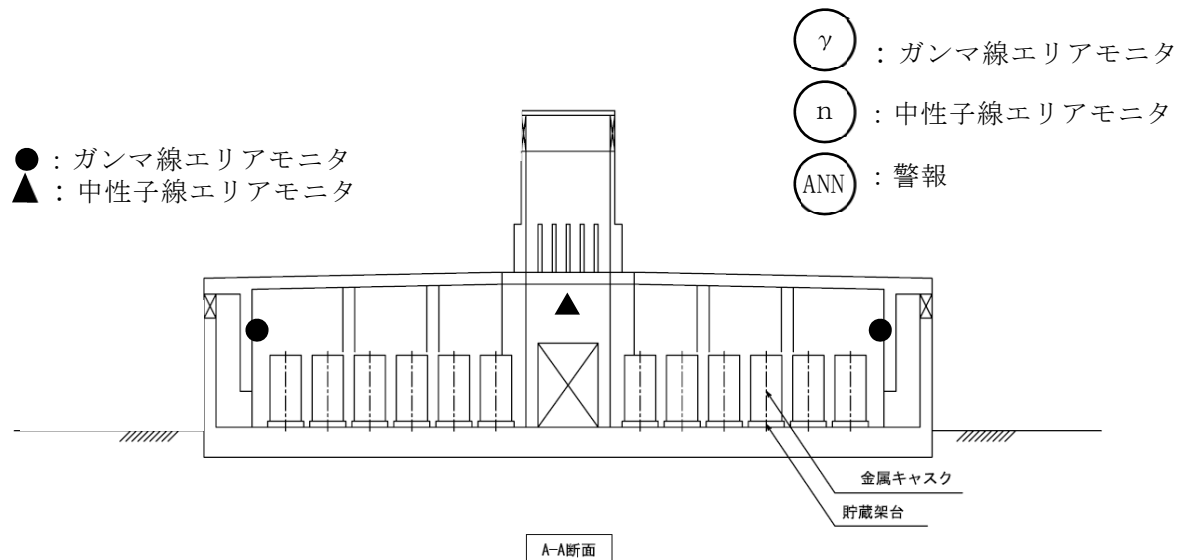
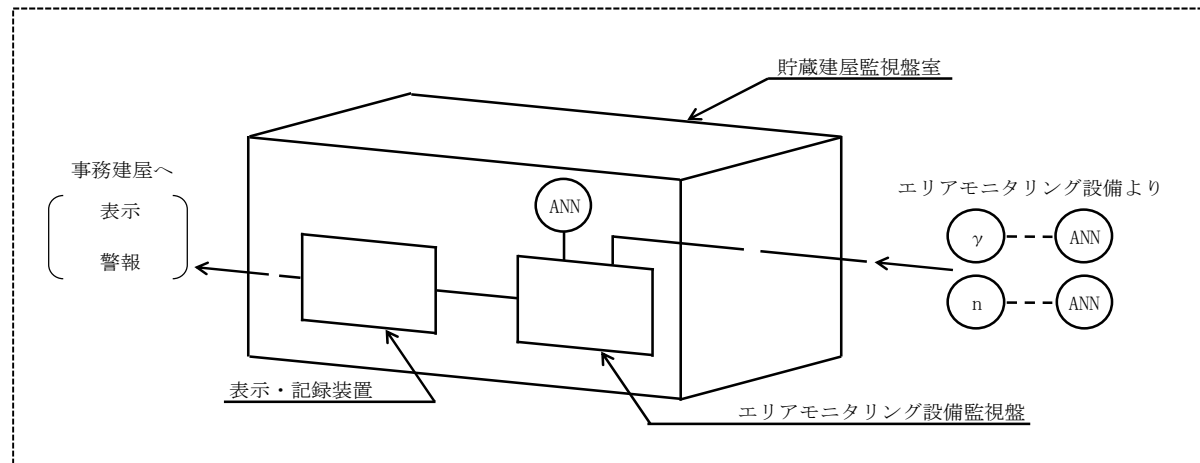
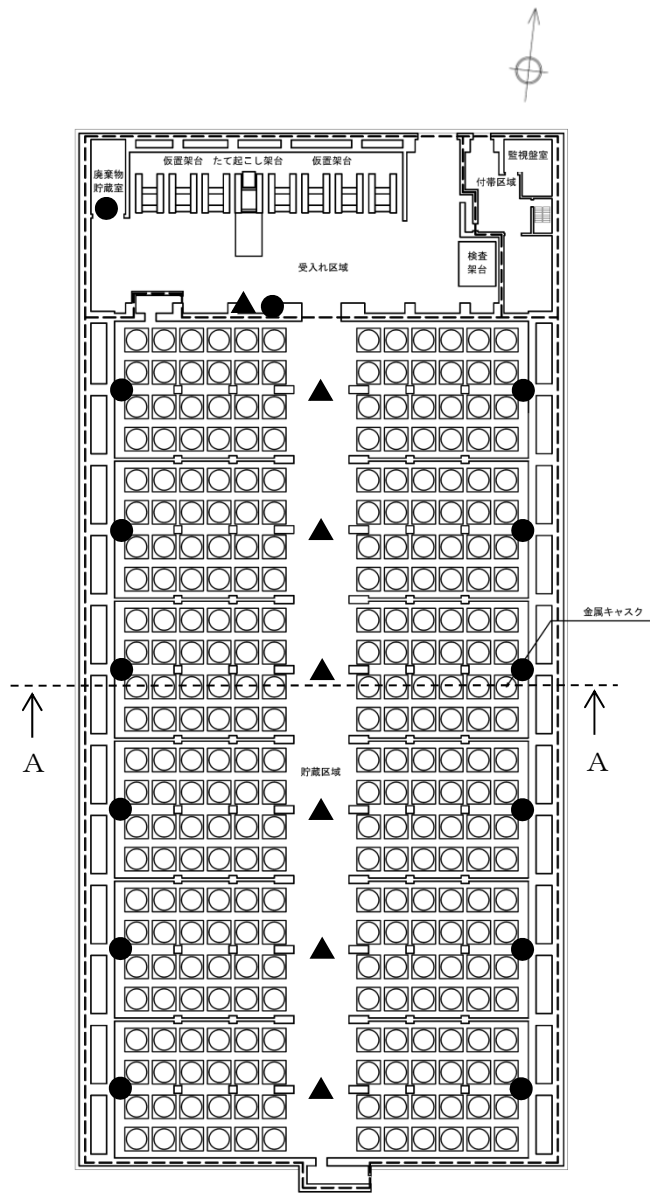
第 1 図 蓋間圧力監視装置の構成図



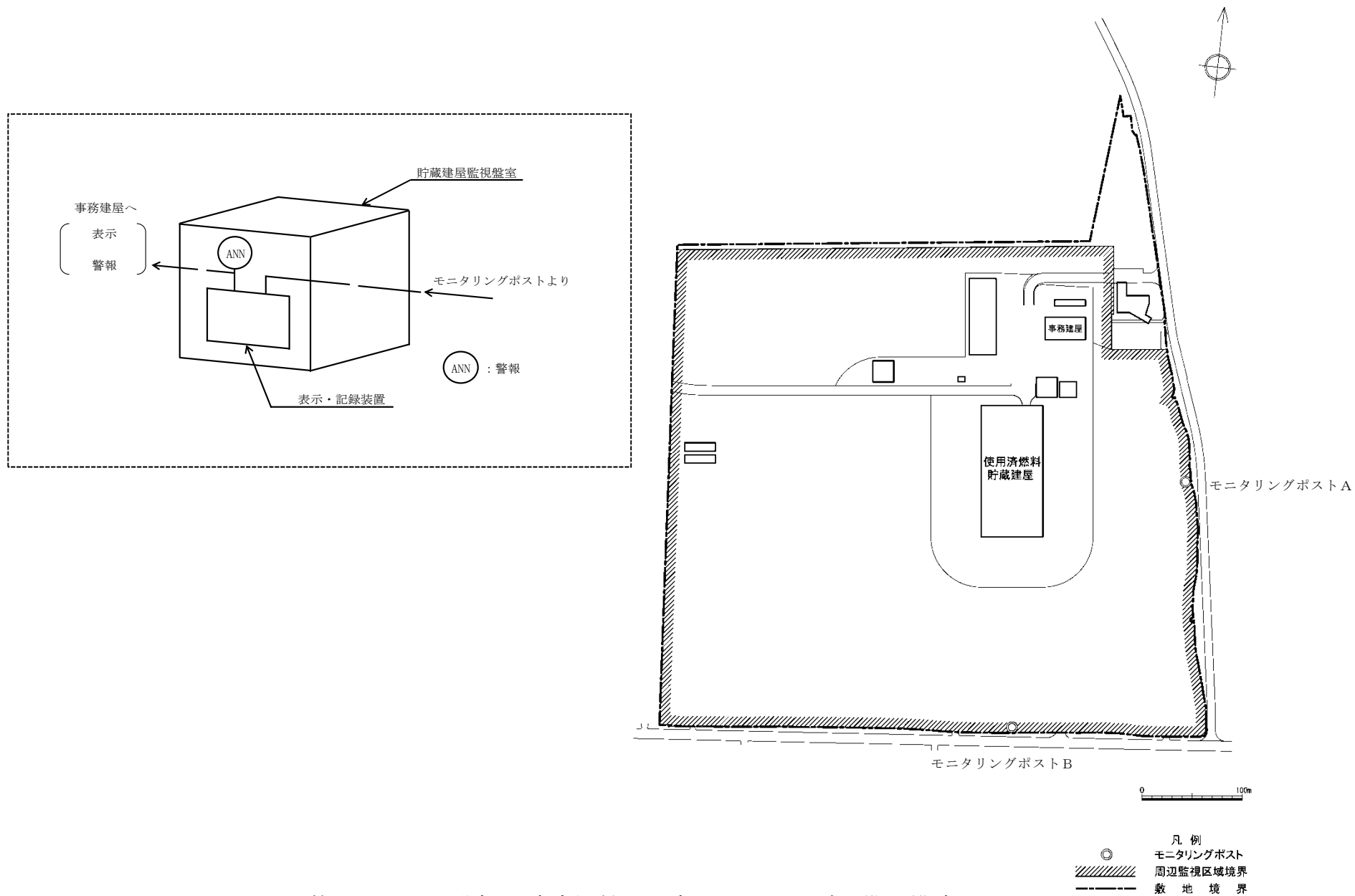
第 2 図 表面温度監視装置の構成図



第3図 給排気温度監視装置の構成図



第4図 エリアモニタリング設備の構成図



第5図 周辺監視区域境界付近固定モニタリング設備の構成図

経年変化に対する設備を設けていないことについて

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

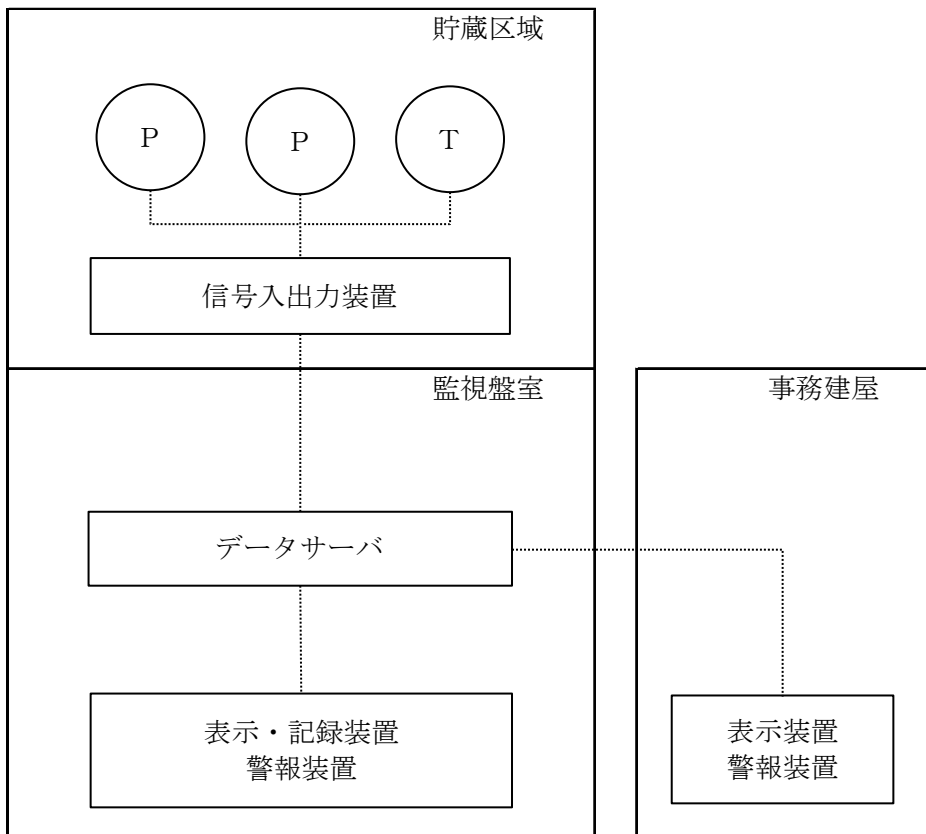
万一、異常が発生した場合でも、金属キャスク蓋間圧力、貯蔵区域の放射線レベルを常に監視していることから、基本的安全機能の劣化を検知でき、適切に処置を施すことができる。

監視装置の構成と監視について

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

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

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



凡例

- P : 金属キャスク蓋間圧力検出器
- T : 金属キャスク表面温度検出器

別添 2 - 1 図 監視装置の概略系統図

警報設定値の考え方について

1. 蓋間圧力の警報設定

別添 4 1. (2) 蓋間圧力の警報設定を参照。

2. 表面温度の警報設定

キャスク表面温度の警報設定は、BWR用大型キャスク（タイプ2）の場合で、貯蔵時外筒外面最高使用温度（設工認解析値）である120℃以下に設定する。（添付1，添付2参照）

3. 給排気温度の警報設定

(1) 排気温度の警報設定

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

(2) 給排気温度差の警報設定

給排気温度差は、除熱機能が維持されていることを監視する目的で測定するが、給排気温度差の警報設定は、除熱解析結果における給排気温度差10℃（給気温度=29.5℃，排気温度=40.0℃）以下の値に設定する。

4. エリアモニタリング設備の警報設定

(1) ガンマ線エリアモニタの警報設定

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

(2) 中性子線エリアモニタの警報設定

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

5. 周辺監視区域境界付近固定モニタリング設備の警報設定

(1) 空間線量率(ガンマ線)の警報設定

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

(2) 線量当量率(中性子線)の警報設定

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

警報設定値根拠について

警報設定値根拠については、以下のとおり。

添付 1 - 1 表 警報設定値根拠

項 目 (警報設定値)	根 拠
キャスク表面温度 (120℃※)	<p>解析値を逸脱しないこと監視する目的で、キャスクタイプ毎に貯蔵時外筒外面最高使用温度（設工認解析値）を設定。</p> <p>なお、キャスク表面温度は、外気温の変動等を考慮しトレンド監視する。</p> <p>※BWR用大型キャスク（タイプ2，2A）の場合</p>
建屋排気温度 (45℃)	計測設備，放射線監視設備等の電気品の性能が維持できる温度を設定。
建屋給排気温度差 (10℃)	除熱機能が維持されていることの建屋給排気温度差の上限としての，除熱解析結果における給気温度29.5℃，排気温度40.0℃の差を設定。

隣接キャスクのふく射の影響と異常検知について

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

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

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

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

閉じ込め機能の監視について

1. 閉じ込め機能の監視

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

(1) 蓋間圧力監視装置の圧力検出部の構造及び仕様

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

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

(2) 蓋間圧力の警報設定

蓋間圧力の警報設定の考え方を以下に示す。

警報設定値は，BWR 用大型キャスク（タイプ 2）の場合，初期圧力（0.41MPa abs）に蓋部温度変化，漏えいによる低下，金属キャスク周囲温度変化及び計器誤差による圧力変動を考慮した値から，蓋間圧力監視のための圧力障壁が確認できる大気圧上限（0.105MPa abs）の範囲とする。

（添付 2 参照）

a. 警報設定圧力上限値の設定

初期圧力（0.41MPa abs）に蓋部温度変化，漏えいによる低下，金属キャスク周囲温度変化及び計器誤差による圧力変動を考慮した値を警報設定圧力の上限値とする。警報設定圧力の上限値は約 0.31MPa abs となる。

b. 警報設定圧力下限値の設定

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

れるガスによる圧力上昇分を加算した金属キャスクの内部圧力を警報設定圧力の下限值とする。警報設定圧力の下限值は約 0.23MPa abs となる。

c. 警報設定値の設定

警報設定値は、上述の警報設定圧力の上限值と下限値を考慮して設定する。警報設定値は 0.27MPa abs とする。

(3) 蓋間圧力監視装置の校正方法

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

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

2. 金属キャスク内部の負圧維持について

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

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

(1) 蓋間圧力低下時の確認方法

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

貯蔵中に蓋間圧力の低下が確認された場合、あるいは警報が発生した場合は、蓋間圧力の経時変化を確認し、基準漏えい率との比較を行うことに

より、閉じ込め機能の健全性を確認する。確認の結果、閉じ込め機能が健全であると判断された場合は、蓋間空間にヘリウムガスの再充填を行う。

基準漏えい率で漏えいする場合の蓋間圧力の経時変化を別添 4 - 3 図に示す。

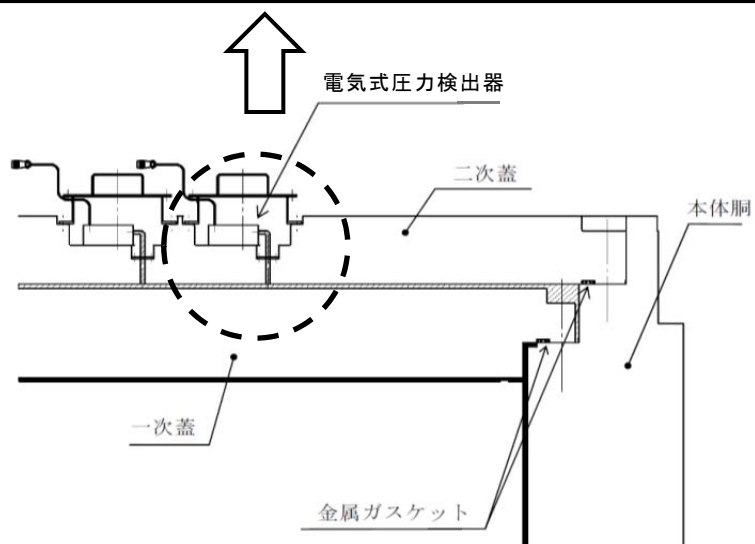
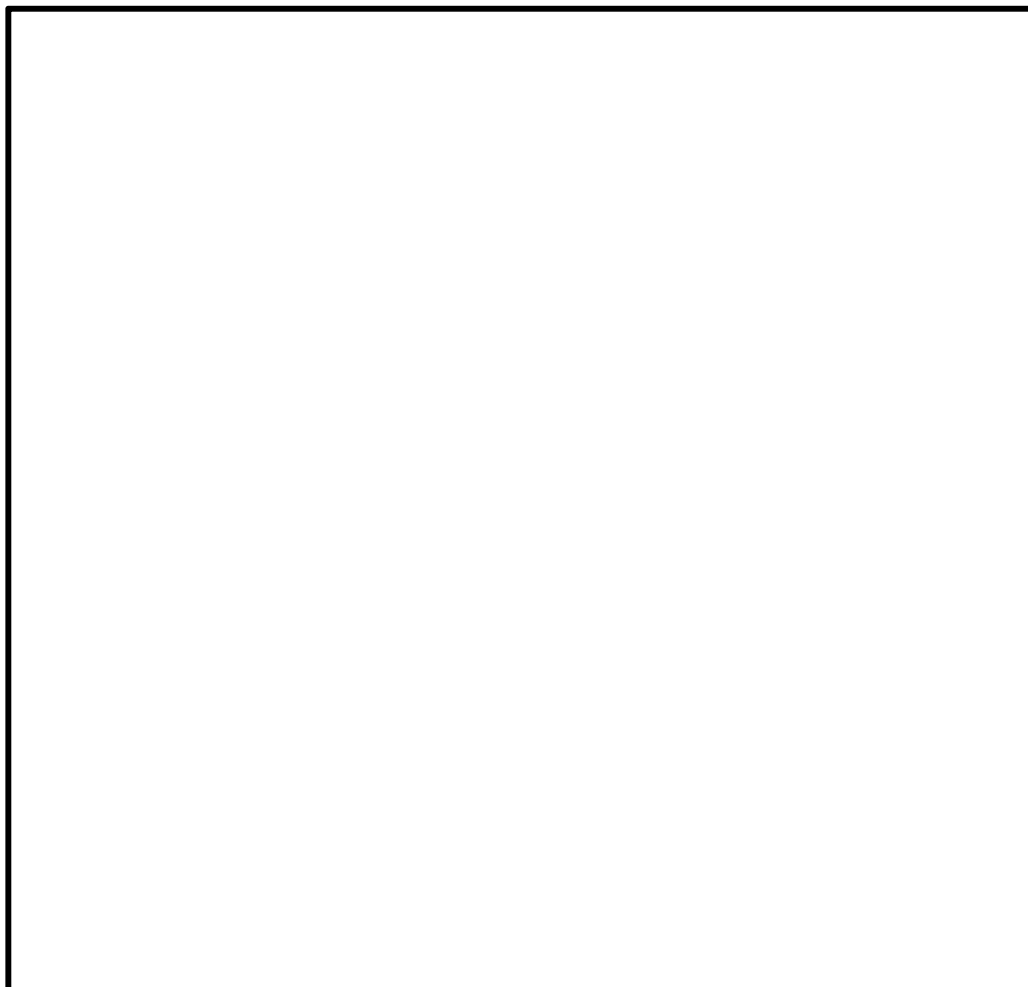
(2) 蓋間空間へのヘリウムガスの再充填の管理方法

貯蔵施設において蓋間空間へヘリウムガスを再充填する場合には、再充填回数を管理し、過剰な充填とならないように管理する。再充填回数を管理することで、金属キャスク内部の圧力を負圧に維持する。BWR用大型キャスク（タイプ2）の場合、蓋間圧力が、初期圧力（0.41MPa abs）から警報設定値（0.27MPa abs）まで低下した場合に、蓋間空間にヘリウムガスを再充填すると仮定すると、約10回まで再充填することができる。

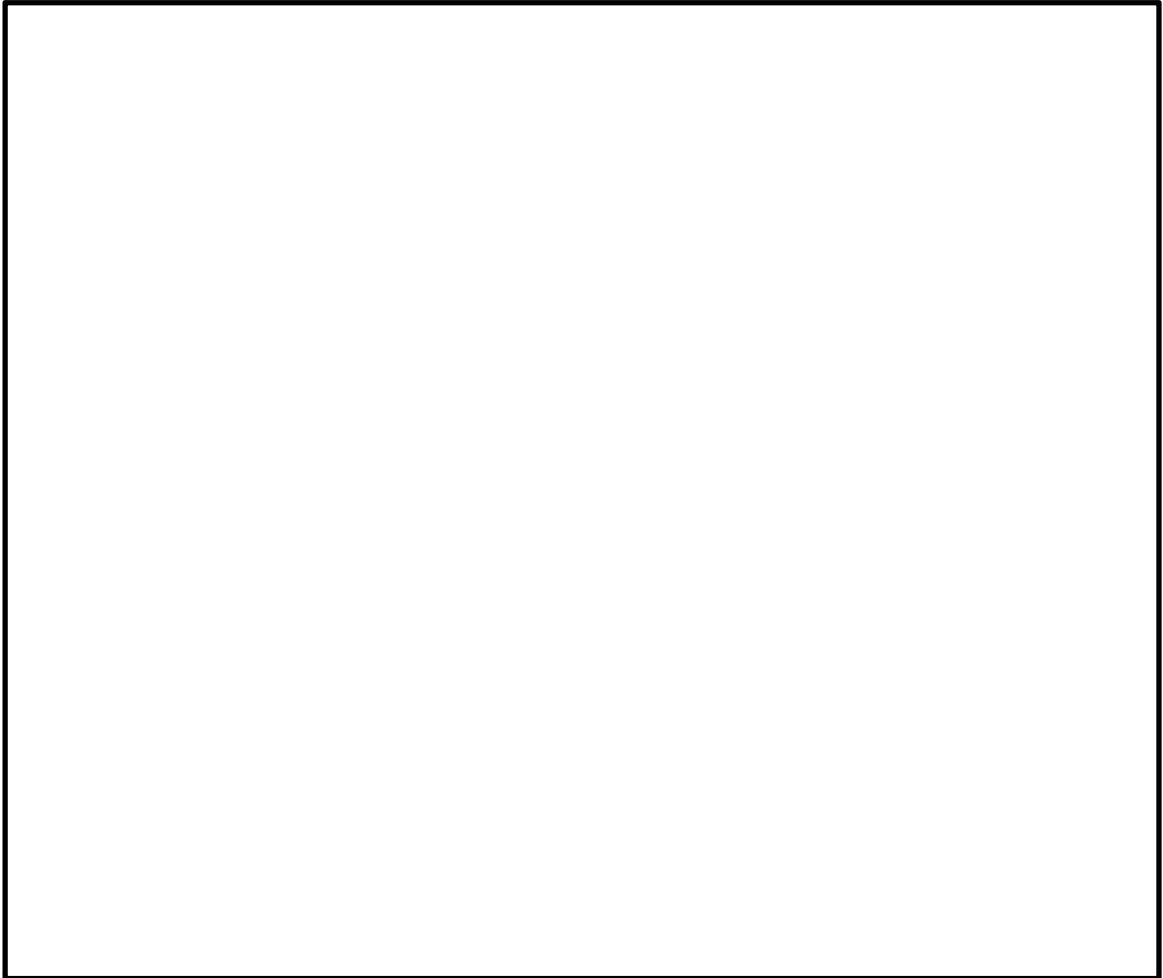
蓋間空間に約10回を超える再充填が必要となる可能性が予見される場合は、キャスク搬出の検討を行う。

(3) 蓋間空間へのヘリウムガスの再充填方法

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



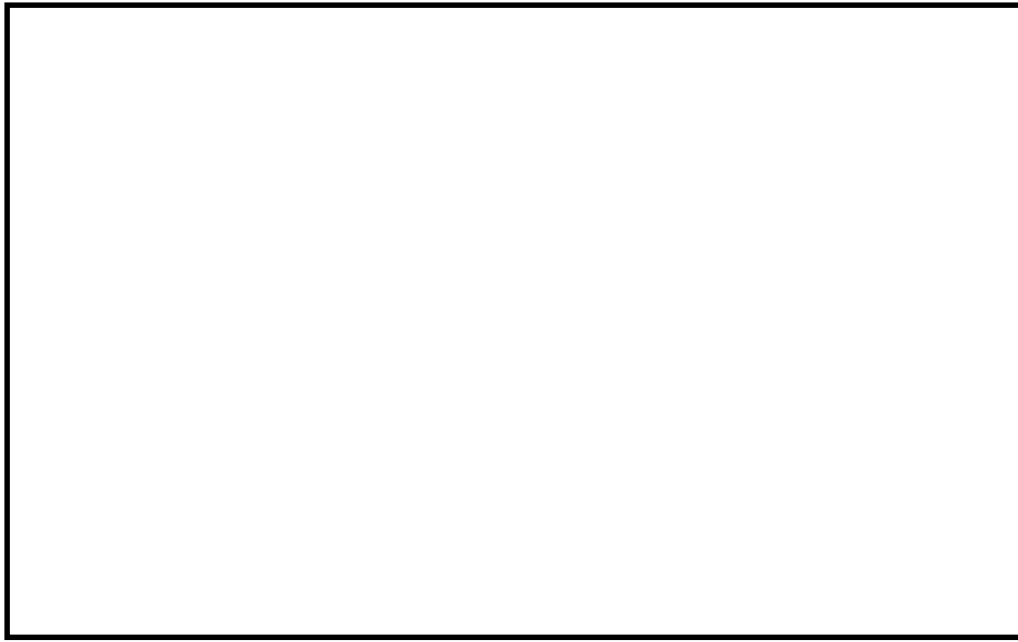
別添 4 - 1 図 蓋間圧力監視装置（圧力検出部）の構成図
（BWR用大型キャスク（タイプ2），BWR用大型キャスク（タイプ2A））



【電気式圧力検出器仕様】

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

別添 4 - 2 図 電気式圧力検出器及びその仕様
(BWR用大型キャスク (タイプ 2), BWR用大型キャスク (タイプ 2 A))



別添 4 - 3 図 基準漏えい率で漏えいした場合の蓋間圧力の経時変化
(BWR用大型キャスク (タイプ 2), BWR用大型キャスク (タイプ 2 A))

蓋間圧力の監視と圧力低下時の対応について

蓋間圧力については、警報の他に圧力の経時的な変化についても監視を行う。

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

運用管理面では蓋間圧力が警報設定値に達すれば、ヘリウムの再充填を行うこととなるが、蓋間空間に約 10 回を超える再充填が必要となる可能性が预见される場合は、キャスク搬出の検討を行う。

蓋間圧力警報設定値の設定について

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

以下に，BWR用大型キャスク（タイプ2，タイプ2A）の警報設定値の設定について示す。

1. 警報設定圧力上限値の設定

蓋間圧力の警報設定圧力上限値については，閉じ込め機能の異常ではない圧力監視中に生じる経時的変化等による警報発生を避けるために，蓋間の初期圧力（0.41MPa abs）に蓋部温度変化，漏えいによる圧力低下，金属キャスク周囲温度変化及び計器誤差による不確かさを考慮した値（約0.31MPa abs）を警報設定圧力の上限値とする。

2. 警報設定圧力下限値の設定

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

3. 警報設定値の設定

添付2-1表に警報設定値と上下限值との関係を示す。警報設定値は，上述の警報設定圧力の上限値と下限値を考慮して設定する。警報設定値は0.27MPa absとする。

添付 2 - 1 表 警報設定値と上下限值との関係

圧力変動の要因	初期圧力と警報設定圧力との関係	
—	蓋間の初期圧力：0.41MPa	
蓋部の温度変化	↓ (約 <input type="text"/> %)	崩壊熱の減衰 (貯蔵初期から 1 年間)
周囲の温度変化	↓ (約 <input type="text"/> %)	-22.4℃ (最低気温) ~ 45℃ (除熱解析の設計値)
蓋間からの漏えい	↓ (約 <input type="text"/> %)	リークテスト判定基準値での漏えい率で一次蓋と二次蓋のシール部からのアウトリーク (1 年間)
計器誤差	↓ (約 <input type="text"/> %)	圧力監視装置の総合精度
—	警報設定圧力の上限値：約 0.31MPa	
—	警報設定値：0.27MPa	
—	警報設定圧力の下限値：約 0.23MPa	
燃料からの放出	↑ (約 <input type="text"/> %)	漏えい燃料の発生率 100% を仮定
蓋間圧力の流入	↑ (約 <input type="text"/> %)	1 回分の全量
キャスク内部への漏えい	↑ (約 <input type="text"/> %)	リークテスト判定基準値での漏えい率で一次蓋のシール部からのインリーク (60 年間)
—	キャスク内部の初期圧力：0.08MPa	

バルブの保守管理について

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

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

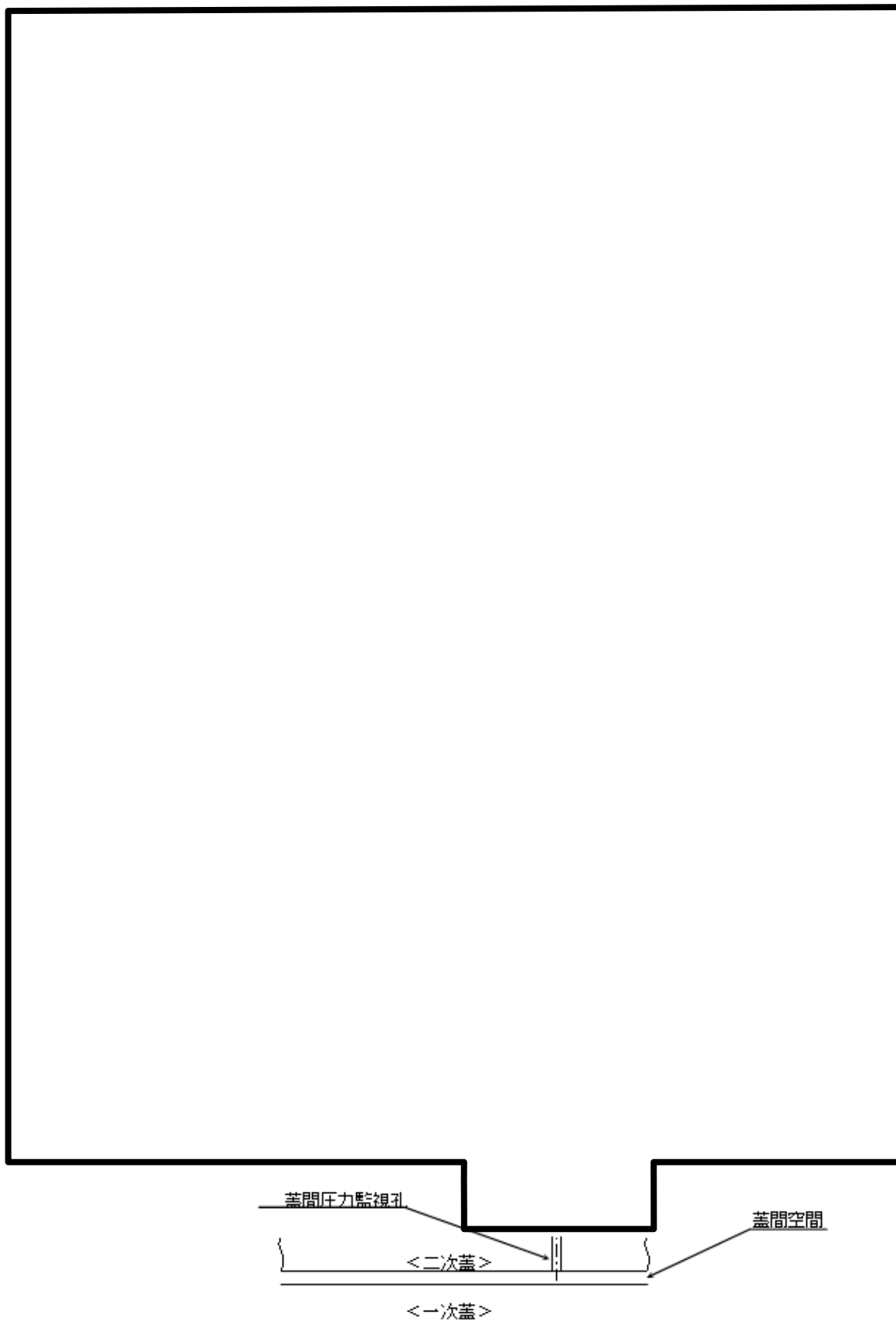
圧力センサの保守管理は校正を 1 回/年程度とし、蓋間圧力監視装置は二系統の構成になっており、圧力検出部の一次バルブを閉にすることで、一方の蓋間圧力監視装置で蓋間圧力を測定しながら、蓋間圧力を開放することなく、校正や交換等が可能である。

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

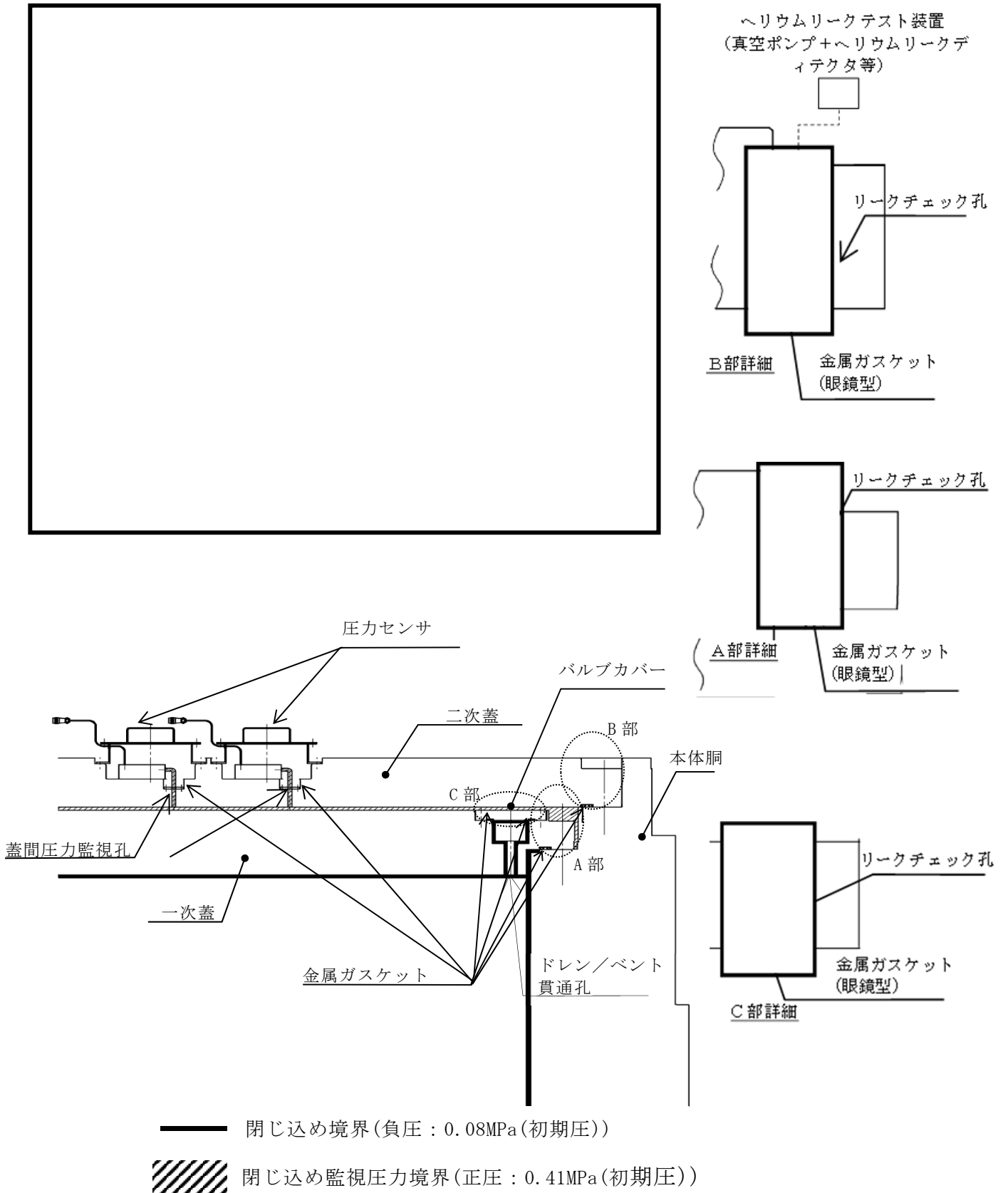
最も漏えいの可能性のある部位は、貯蔵施設内で組み立てる継手部で、蓋間圧力監視装置の一次バルブを閉にすることで蓋間圧力と分離できるため、漏えいが認められた場合は、継手部点検（例：増締め）や部品交換を行う。

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

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



添付 3 - 1 図 蓋間圧力監視装置（圧力検出部）の構成図
（BWR用大型キャスク（タイプ2））



添付 3-2 図 貫通孔及び金属ガスケットによるシール部の構成図

(BWR用大型キャスク (タイプ2))

二重蓋間圧力の監視測定とキャスク内部の負圧維持について

金属キャスクの蓋部は一次蓋，二次蓋の二重構造としている。金属キャスク内部は負圧とし，蓋間空間はあらかじめ正圧とすることにより，圧力障壁を設ける。

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

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

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

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

除熱機能の確認について

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

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

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

また、警報設定値を超えるケースは想定しにくいですが、万が一キャスク表面温度が警報値を超えた場合でも、下記の通り、各部材の評価結果は設計基準温度に比して十分な余裕を有していることから、健全性を損なうことはない。

別添 5 - 1 表 設計基準温度と評価結果

(BWR大型タイプ2の場合)

	設計基準温度	評価結果
燃料被覆管※	300℃	259℃
密封容器	350℃	142℃
バスケット	300℃	248℃
トラニオン	350℃	120℃
二次蓋	350℃	85℃
金属ガスケット	130℃	89℃

※新型ジルコニウムライナ燃料

計測制御系統施設の試験検査について

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

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

代替計測について

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

また，代替計測は，その準備完了後，1回／日程度の頻度で行う。

1. 除熱機能の確認

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

(1) 金属キャスク表面温度

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

(2) 給排気温度

測温抵抗体等の温度検出素子をポール等で既設給排気温度計近傍に近づけ，出力信号をデジタルマルチメータあるいは記録計に接続して，測定値を読み取る。

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。

2. 閉じ込め機能の確認

通常時は，金属キャスクの蓋間圧力を計測し，閉じ込め機能が確保されていることを確認している。

(1) 金属キャスク蓋間圧力

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

金属キャスク蓋部にて代替の圧力検出器の取付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。

バッテリー型可搬式電源，ディーゼル発電機等を電源として用いる。

なお，貯蔵キャスクが多数になった場合，非常に多くの仮設ケーブルの布設が必要となり作業量が膨大となることが予想されることから，合理化の検討をすすめる予定である。

3. 遮蔽機能の確認

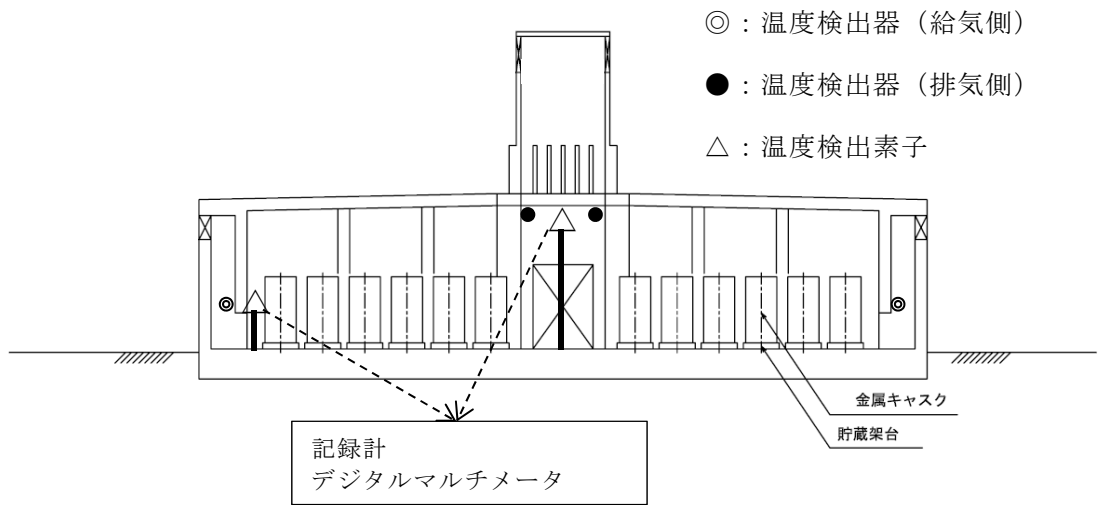
通常時は，貯蔵建屋内はエリアモニタリング設備（エリアモニタ）で，周辺監視区域境界付近は周辺監視区域境界付近モニタリング設備（モニタリングポスト及びモニタリングポイント）で放射線の空間線量率と空間線量を計測し，遮蔽機能が確保されていることを確認している。

（1）エリアモニタリング設備

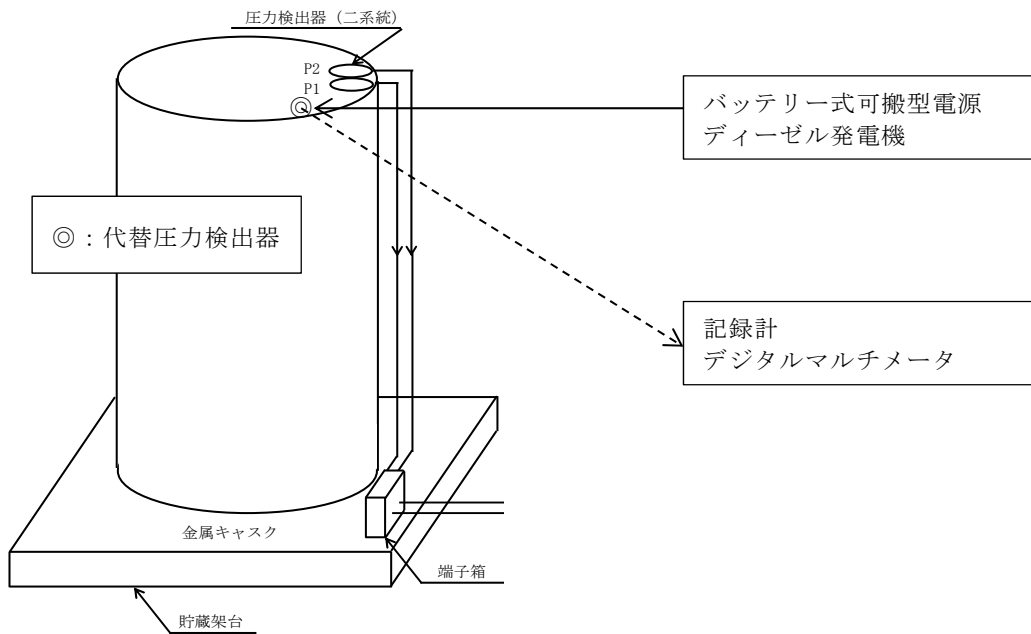
可搬式の放射線サーベイメータにより，ガンマ線と中性子を計測する。測定ポイントは通常時に測定している定点（貯蔵建屋内7点）とし，通常時測定値との比較により遮蔽機能の異常の判断を行う。

（2）周辺監視区域境界付近モニタリング設備

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

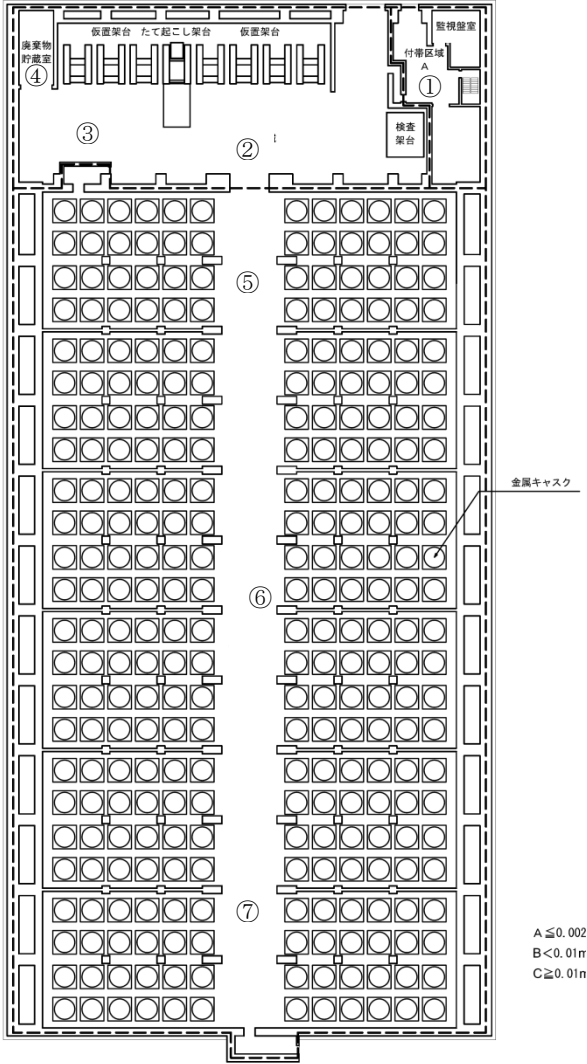


別添 7 - 1 図 給排気温度の代替計測

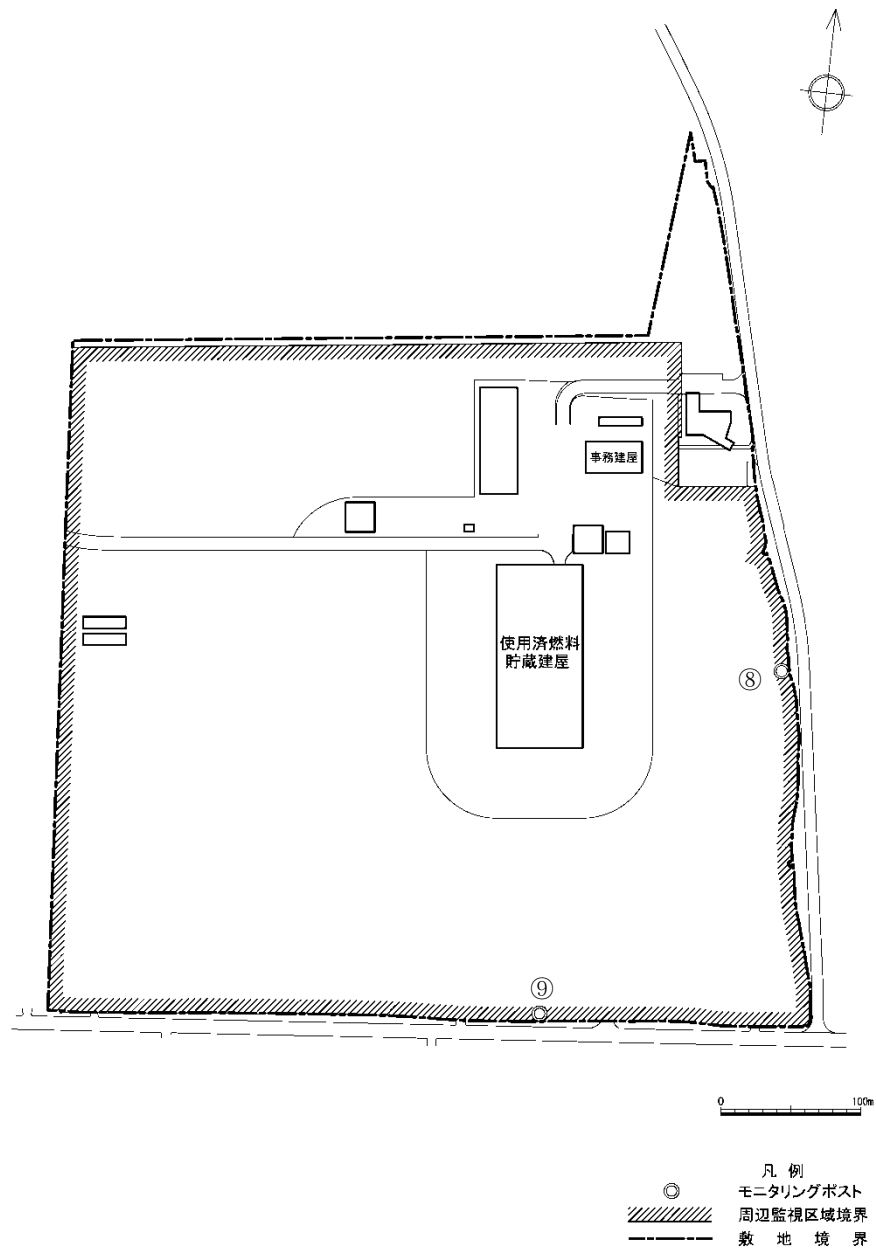


別添 7 - 2 図 金属キャスク 蓋間圧力の代替計測

貯蔵建屋 1階



別添 7 - 3 図 貯蔵建屋内の測定ポイント



別添 7 - 4 図 周辺監視区域境界付近の測定ポイント

第 18 条 廃棄施設

<目 次>

1. 設計方針
2. 廃棄物貯蔵室の設計

(別 添)

- 別添 1 廃棄物貯蔵室内のせきの構造について
- 別添 2 廃棄物貯蔵室内部の塗装について
- 別添 3 廃棄物貯蔵室の保管廃棄容量について
- 別添 4 廃棄物貯蔵室内のドラム缶配置について

1. 設計方針

使用済燃料貯蔵施設は、平常時に発生する放射性廃棄物はないことから、放射性廃棄物処理する能力を有する廃棄施設はない。

ただし、搬入した金属キャスク等の表面に法令に定める管理区域に係る値を超える放射性物質が検出された場合等は、除染に使用した水等の液体廃棄物及びウエス等の固体廃棄物はドラム缶、ステンレス製の容器等に封入した後、廃棄物貯蔵室に保管廃棄する。

なお、液体廃棄物の発生はないが、万一発生したとしても微量であり、固体廃棄物と別のドラム缶に入れ保管廃棄することで共用による安全性は損なわない。

放射性廃棄物を保管廃棄する施設として廃棄物貯蔵室を設置し、廃棄物による汚染の拡大を防止するため、使用済燃料貯蔵建屋受入れ区域の独立した区画内に設け、出入口にはせきを設ける構造とする。

また、廃棄物貯蔵室では、著しい漏えいの発生はないが、巡視点検にて漏えいを発見できる構造とする。

廃棄物貯蔵室は、平常時に発生する放射性廃棄物はないが、仮に1年間に搬入する金属キャスク2基に原子力発電所と同様の除染を行う場合に発生する200ℓドラム缶量は10年間で80本から100本程度に対して、200ℓドラム缶約100本相当を保管廃棄する能力を有し、貯蔵容量は十分であるが、必要がある場合には増設を考慮する。

2. 廃棄物貯蔵室の設計

(1) 放射性廃棄物の保管廃棄施設（廃棄物貯蔵室）は、廃棄物による汚染の拡大防止を考慮した設計とする。また、漏えいを生じたときの漏えい検出及び漏えい拡大防止を考慮した設計とする。

a. 廃棄物貯蔵室は、廃棄物による汚染の拡大を防止するため、使用済燃料貯蔵建屋受入れ区域の独立した区画内に設ける。

廃棄物貯蔵室の位置、寸法を第1図に示す。

b. 廃棄物貯蔵室の出入口に高さ10cmのせきを設ける構造（別添1参照）とする。

c. 放射性液体廃棄物の発生はないが、万一発生しても廃棄物貯蔵室に保管廃棄する量は微量であり、著しい漏えいの発生はないため漏えい検知装置は不要であるが、事業者自主として漏えい検知装置を設置し、漏えいを検知した時点で貯蔵建屋監視盤室及び事務建屋に警報を発する。

d. 廃水が浸透することによる汚染の拡大を防止するために、廃棄物貯蔵室内部の床面及び床面から1,600mmの高さまでの壁面について、エポキシ樹脂系塗料で塗装を施す。（別添2参照）

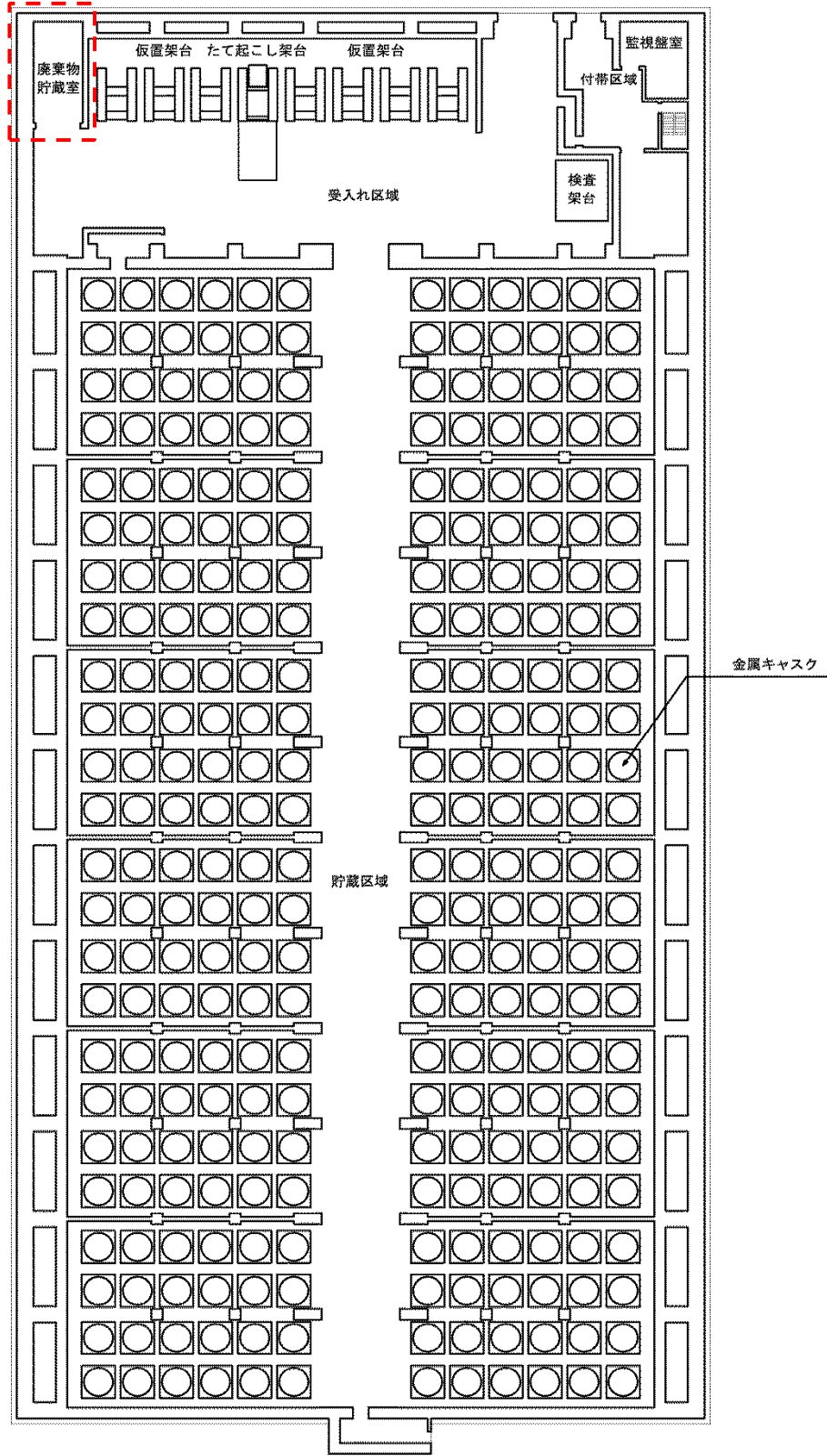
e. 貯蔵建屋内で結露水の発生や雨水の侵入があった場合は、貯蔵建屋内に設けた側溝を通じて、ドレンサンプに受入れる構造としており、ドレンサンプ水は、放射線管理に基づくサーベイを実施し、放射能が検出されないことを確認し施設外へ排水する。

廃棄物貯蔵室は、室内入口側にせきを設けており、廃棄物貯蔵室内で結露水の発生があった場合に、廃棄物貯蔵室内から外部へ漏れない構造としており、側溝を通じて、ドレンサンプに受入れることはない。また、結露水の発生があった場合は、放射線管理に基づくサーベイを実施し、放射能が検出されないことを確認し施設外へ排水する。

f. 放射性液体廃棄物の発生はないが、万一発生したとしても微量であり、放射性固体廃棄物と別のドラム缶に入れ保管廃棄することで共用による安全性は損なわない。

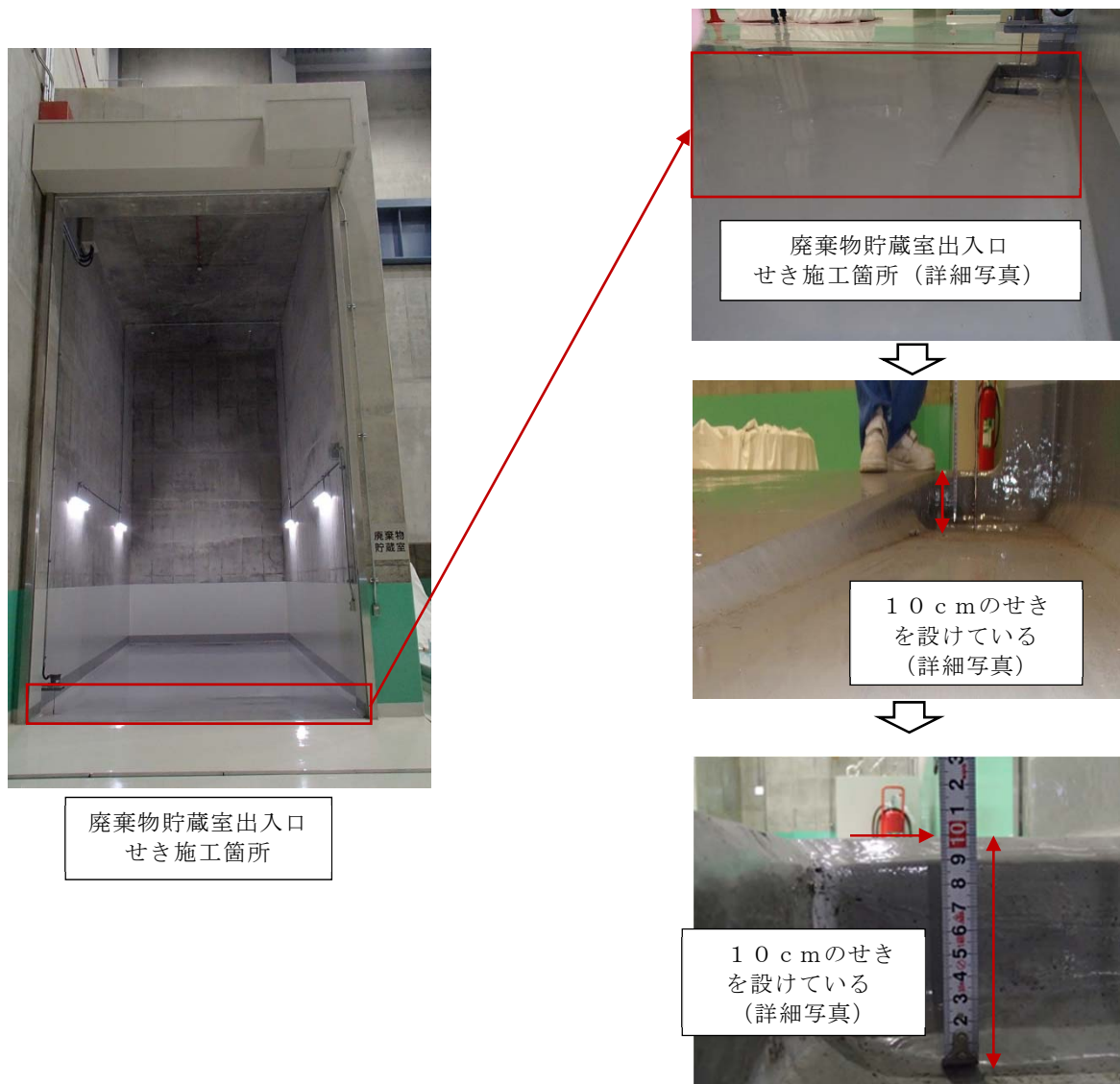
- (2) 廃棄物貯蔵室は、2000ドラム缶約100本相当を保管廃棄する能力を有する設計とする。(別添4参照)
- a. 廃棄物貯蔵室では、200リットルドラム缶約100本相当を3段積みとして、転倒防止対策を実施する。ドラム缶配置概念図を別添4-1図に示す。
 - b. 液体廃棄物ドラム缶の貯蔵については、転倒による漏えいを防止する観点から床に近い最下段に配置することとし、液体廃棄物を貯蔵するドラム缶は、腐食を考慮した仕様とする。
 - c. 貯蔵ドラム缶の管理については、巡視点検にて貯蔵ドラム缶の目視点検を実施するとともに漏えいのないことを確認する。
 - d. 必要がある場合には増設を検討する。

廃棄物貯蔵室 (4.4m × 9.5m × 8.5m (高さ))



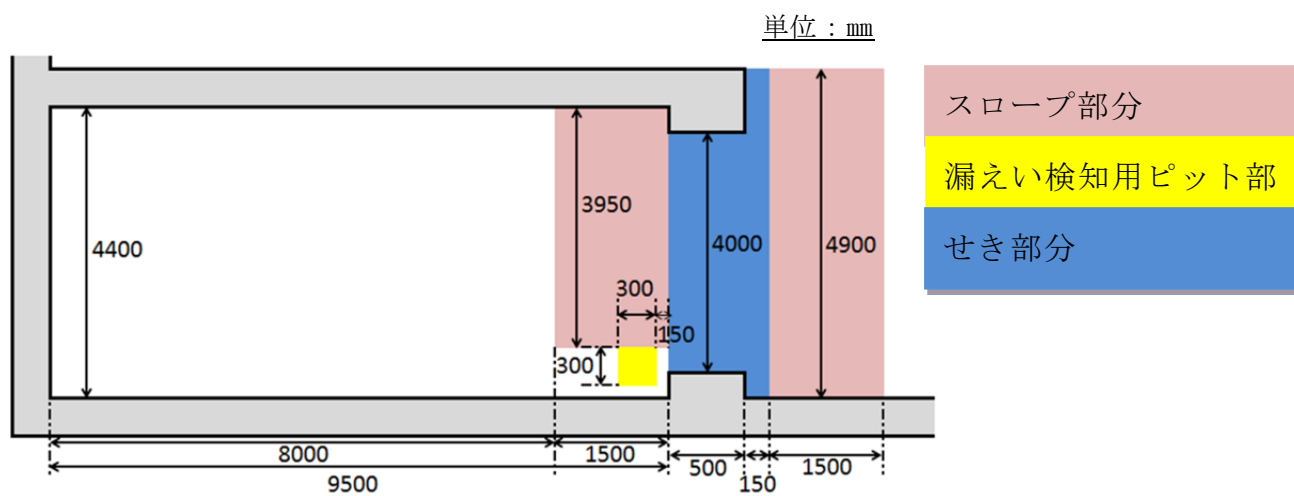
第 1 図 廃棄物貯蔵室の位置，寸法

廃棄物貯蔵室内のせきの構造について

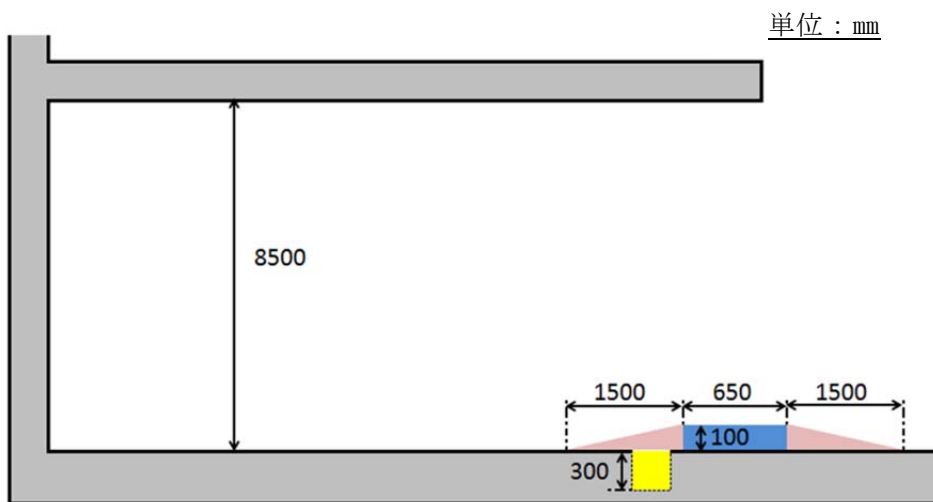


別添 1 - 1 図 廃棄物貯蔵室内のせきの構造

【平面図】



【断面図】



別添 1 - 2 図 廃棄物貯蔵室内平面図及び断面図

廃棄物貯蔵室内部の塗装について

廃棄物貯蔵室内部の壁面は、万一、ドラム缶内の液体廃棄物が漏れた場合に、液体廃棄物がコンクリートの床、壁に浸透することによる汚染の拡大を防止するために、エポキシ樹脂系塗料にて塗装し、塗装の高さを 1,600mm で施工している。



別添 2 - 1 図 廃棄物貯蔵室内部壁面塗装高さ

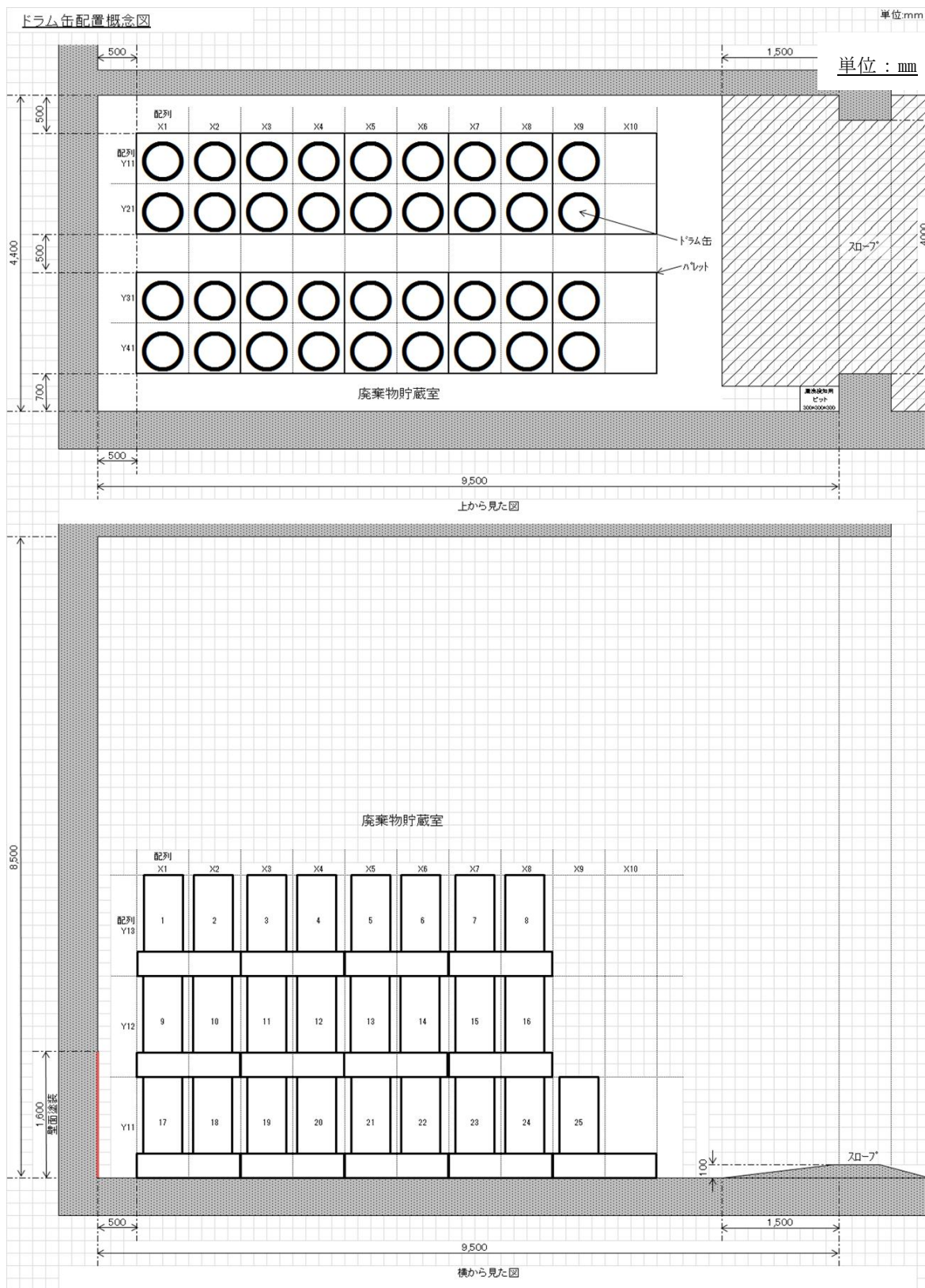
廃棄物貯蔵室の保管廃棄容量について

使用済燃料貯蔵施設では、平常時に発生する放射性廃棄物はない。ただし、搬入した金属キャスクの表面に汚染が確認された場合等には、除染に使用した水、ウエス、ゴム手袋等が放射性廃棄物として発生する可能性があるため、これらの放射性液体廃棄物及び放射性固体廃棄物をドラム缶、ステンレス製の容器等に封入して保管廃棄できるよう、2000ドラム缶約100本相当を保管廃棄する能力を有する廃棄物貯蔵室を設ける。

保管廃棄の容量については、原子力発電所において金属キャスク 1 基を使用済燃料プールから引き上げた後の除染作業で発生する放射性廃棄物は、2000ドラム缶換算で4～5本程度（紙ウエス4000～5000、散水量約2000）であり、仮に1年間に受け入れる金属キャスクのうち2基に原子力発電所と同様の除染作業が必要な汚染があったとしても、発生する放射性廃棄物（2000ドラム缶換算）は10年間で80本～100本であることから、廃棄物貯蔵室は十分な容量を有している。

今後の放射性廃棄物の発生量の状況を踏まえて、必要がある場合には保管廃棄施設の容量を再検討し、増設について検討を行う。

廃棄物貯蔵室内のドラム缶配置について



別添 4 - 1 図 ドラム缶配置概念図

第 19 条 放射線管理施設

<目 次>

1. 基本的考え方
2. 設計方針
3. 放射線管理施設の設計
4. 試験検査

(別 添)

- 別添 1 モニタリングポスト，モニタリングポイントの設置位置と基数について
- 別添 2 エリアモニタリング設備及び周辺監視区域境界付近固定モニタリング設備で監視を行う放射線のモニタリング箇所，表示するモニタリング情報について
- 別添 3 放射線管理設備の試験及び検査方法について
- 別添 4 バックグラウンドや金属キャスクの設置基数に応じたエリアモニタの警報設定値の設定について

1. 基本的考え方

金属キャスクは、使用済燃料集合体を内封する空間に通じる貫通孔を一次蓋に設け、蓋部の二重の閉じ込め構造により放射性物質を限定された区域に閉じ込める設計とするとともに、金属キャスクの蓋間圧力を蓋間圧力監視装置により連続して測定し、監視盤室に表示及び記録するとともに、事務建屋でも監視が行えるよう表示を行う。また、蓋間圧力監視装置は、点検中等においても蓋間圧力を測定できるよう二系統設ける。

使用済燃料貯蔵施設は、平常時に発生する放射性廃棄物はなく、万一、放射性廃棄物が発生した場合には、ドラム缶等の容器に封入して廃棄物貯蔵室に保管廃棄する設計としており、放射性廃棄物の環境への放出は行わない。

使用済燃料貯蔵施設は、その設計に即し、発生が想定され得る金属キャスクの落下・転倒等、基本的安全機能に著しい影響を及ぼす可能性のある事象について評価しても、放射性物質の放出には至らない。

以上より、金属キャスクの蓋間圧力を監視することにより放射性物質の放出がないことを確認するため、事業所及びその境界付近における放射性物質の濃度の監視は不要である。

異常事象発生時の放射線監視及び測定については、監視盤室及び事務建屋で、平常時と同様にエリアモニタリング設備、周辺監視区域境界付近固定モニタリング設備により監視等を行う。また、これらが使用できない場合等、必要に応じて放射線サーベイ機器により測定を行う。

以上より、使用済燃料貯蔵施設では、外部放射線に係る線量当量を管理、監視するための放射線管理施設を設ける設計とする。

2. 設計方針

- (1) 放射線業務従事者等の出入管理のため、チェックポイント等を設ける。
また、放射線業務従事者等の個人被ばく管理のため、外部放射線に係る線量当量を測定する個人線量計を備える。

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

金属キャスクは、蓋部の多重の閉じ込め構造により放射性物質を限定された区域に閉じ込める設計とし、金属キャスクの蓋間圧力を測定して閉じ込め機能を監視する。

放射性廃棄物は、ドラム缶等の容器に封入して廃棄物貯蔵室に保管廃棄する設計とする。したがって、使用済燃料貯蔵施設には放射性廃棄物の放出口等はなく、外部放射線に係る線量当量を監視する。

以上より、金属キャスクの蓋間圧力を監視することにより放射性物質の放出がないことを確認するため、事業所及びその境界付近における放射性物質の濃度の監視は不要である。

リサイクル燃料備蓄センター内外の放射線監視のために、エリアモニタリング設備、周辺監視区域境界付近固定モニタリング設備等を設置し、平常時及び放射線レベルが上昇するような事故時に必要箇所をモニタリングでき、必要な情報は監視盤室及び事務建屋に表示できる設計とする。

放射線監視の具体例は以下のとおりである。

- a. 金属キャスクの蓋間圧力を蓋間圧力監視装置により連続して測定し、監視盤室及び事務建屋に表示する。また、蓋間圧力が基準設定値より低下したときは監視盤室及び事務建屋に警報を出す。
- b. 使用済燃料貯蔵建屋貯蔵区域内、受入れ区域内及び廃棄物貯蔵室内の放射線レベルをエリアモニタリング設備により測定し、監視盤室及び事務建屋に表示する。また、放射線レベル基準設定値を超えたときは監視盤室及び事務建屋に警報を出す。
- c. 周辺監視区域境界付近には、空間放射線量率を連続的に監視するためのモニタリングポスト、空間放射線量を監視するための蛍光ガラス線量計を設ける。(別添 1 参照)

- (3) 管理区域における線量当量率，空気中の放射性物質の濃度及び床面等の放射性物質の表面密度を放射線業務従事者等が安全に認識できるよう，チェックポイント及び事務建屋等の適当な箇所に表示する。（別添2参照）

3. 放射線管理施設の設計

(1) 出入管理，個人被ばく管理の設備

放射線業務従事者等の放射線被ばくの監視及び管理のため，出入管理設備及び個人管理用測定設備を設ける。

a. 出入管理設備

使用済燃料貯蔵建屋内に設定する管理区域への立入りは，チェックポイントを通る設計としており，ここで放射線業務従事者等の出入管理を行う。

なお，金属カスクの搬出入に際しては，必要に応じて使用済燃料貯蔵建屋の機器搬出入口で放射線業務従事者等の出入管理を行う。

チェックポイントの位置を第1図に示す。

b. 個人管理用測定設備

放射線業務従事者等の線量管理のため，外部放射線による線量当量を測定する個人線量計を備える。

(2) 放射線監視設備

放射線監視設備は，エリアモニタリング設備，周辺監視区域境界付近固定モニタリング設備，放射線サーベイ機器で構成する。

a. エリアモニタリング設備

使用済燃料貯蔵建屋の貯蔵区域及び受入れ区域内にガンマ線エリアモニタと中性子線エリアモニタとを設置して，外部放射線に係る線量当量率の監視を行う。

エリアモニタによる外部放射線に係る線量当量率は，使用済燃料貯蔵施設の監視員等が巡視点検等の際に確認できるよう監視盤室に表示及び記録するとともに，事務建屋でも監視が行えるよう表示を行う。また，放射線レベル基準設定値を超えたときは監視盤室及びエリアモニタ設置場所付近並びに事務建屋に警報を発する。

外部電源系の機能喪失時には，無停電電源装置及び電源車等により電気が供給される。

ガンマ線エリアモニタの仕様を第1表，中性子線エリアモニタの仕様を第2表，エリアモニタリング設備の構成図を第2図に示す。

b. 周辺監視区域境界付近固定モニタリング設備

リサイクル燃料備蓄センター周辺監視区域境界付近の空間放射線量率を連続的に監視するためのモニタリングポスト、空間放射線量を監視するためのモニタリングポイントを設ける。

モニタリングポストは、連続的に空間放射線量率を測定し、使用済燃料貯蔵施設の監視員等が巡視点検等の際に確認できるよう監視盤室に表示及び記録するとともに、事務建屋でも監視が行えるよう表示を行う。また、放射線レベル基準設定値を超えたときは監視盤室及び事務建屋に警報を発する。

外部電源系の機能喪失時には、無停電電源装置及び電源車等により電気が供給される。

モニタリングポストの仕様を第3表、モニタリングポイントの仕様を第4表、モニタリングポスト及びモニタリングポイントの設置位置を第3図、モニタリングポスト構成図を第4図に示す。

c. 放射線サーベイ機器

外部放射線に係る線量当量率、必要に応じて空気中の放射性物質濃度及び表面汚染密度を測定監視するために、放射線サーベイ機器を設ける。

測定は、外部放射線に係る線量当量率については携帯用の各種サーベイメータにより、空気中の放射性物質濃度については、サンプリング法により、また、表面汚染密度については、サーベイメータ又はスミヤ法による放射能測定によって行う。

(3) 測定結果等の表示

管理区域における線量当量率、空気中の放射性物質の濃度及び床面等の放射性物質の表面密度等を定期的又は必要の都度測定し、その結果を放射線業務従事者等が管理区域入域前に安全に認識でき、必要に応じて適切な放射線防護具類が準備できるよう、チェックポイント及び事務建屋等の適当な箇所に表示する。また、モニタリングポストによる測定結果については、当社のホームページに掲載する。

4. 試験検査

放射線管理設備の試験検査について、別添3に示す。

第1表 ガンマ線エリアモニタの仕様

検出器	半導体検出器
検出器の個数	12 (貯蔵区域) 1 (受入れ区域) 1 (廃棄物貯蔵室)
計測対象	線量当量率
計測範囲	1 ~ 10 ⁴ μSv/h
使用環境温度	0℃ ~ 45℃
表示箇所	監視盤室及び事務建屋

注 : 警報設定値は、測定範囲内で適切に設定する。
(別添4参照)

第2表 中性子線エリアモニタの仕様

検出器	³ He 比例計数管
検出器の個数	6 (貯蔵区域) 1 (受入れ区域)
計測対象	線量当量率
計測範囲	10 ⁻² ~ 10 ⁴ μSv/h
使用環境温度	-10℃ ~ 45℃
表示箇所	監視盤室及び事務建屋

注 : 警報設定値は、測定範囲内で適切に設定する。
(別添4参照)

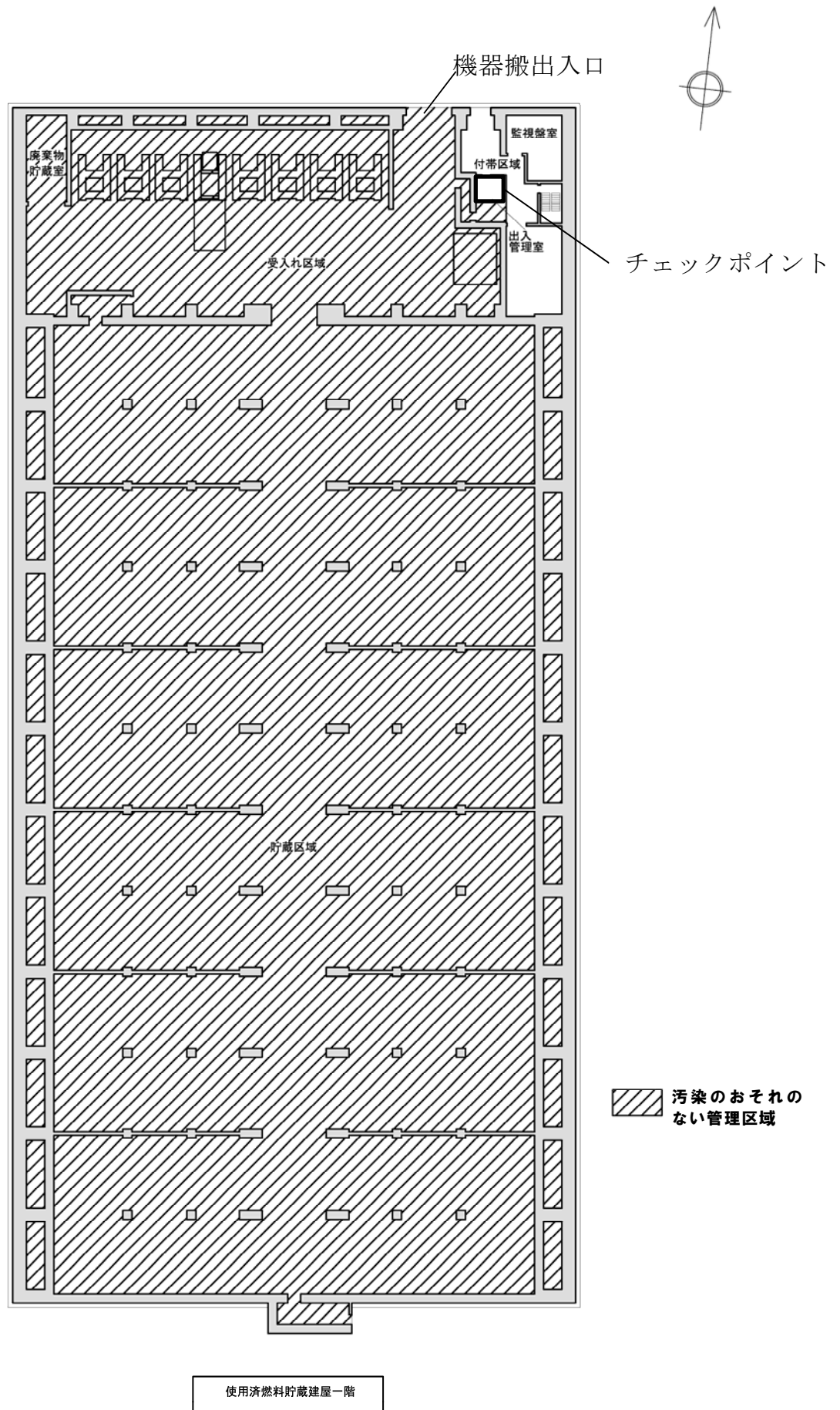
第3表 モニタリングポストの仕様

検出器	NaI(Tl)シンチレーション 検出器	電離箱	³ He 比例計数管
検出器の個数	2	2	1
計測対象	空間線量率	空間線量率	線量当量率
計測範囲	10 ⁻² ~10 ⁴ nGy/h	10 ³ ~10 ⁸ nGy/h	10 ⁻² ~10 ⁴ μSv/h
使用環境温度	-10~45℃	-10~45℃	-10~40℃
表示箇所	監視盤室及び 事務建屋	監視盤室及び 事務建屋	監視盤室及び 事務建屋
取付箇所	モニタリングポストA モニタリングポストB	モニタリングポストA モニタリングポストB	モニタリングポストA

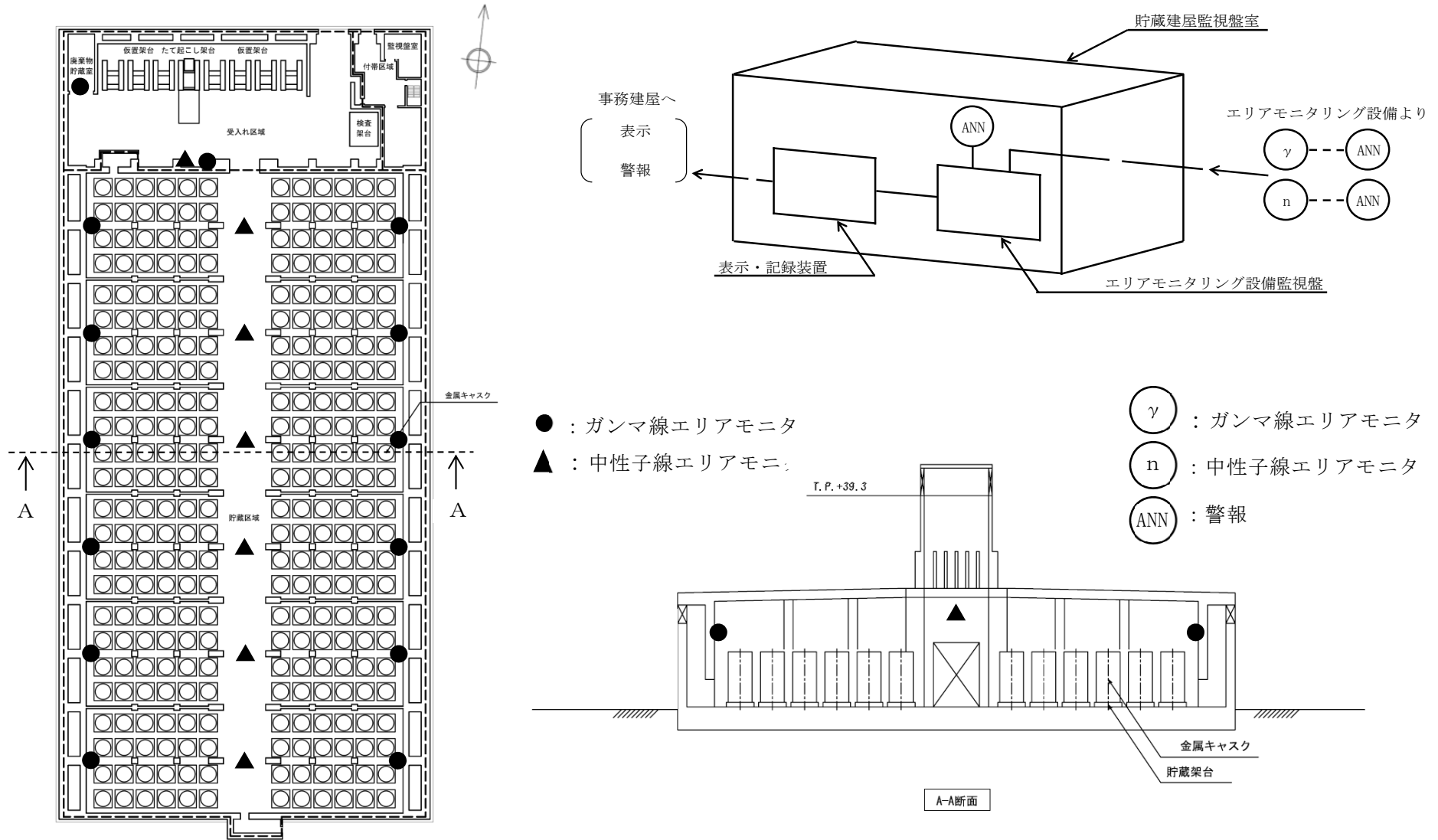
注：警報設定値は、測定範囲内で適切に設定する。(別添4参照)

第4表 モニタリングポイントの仕様

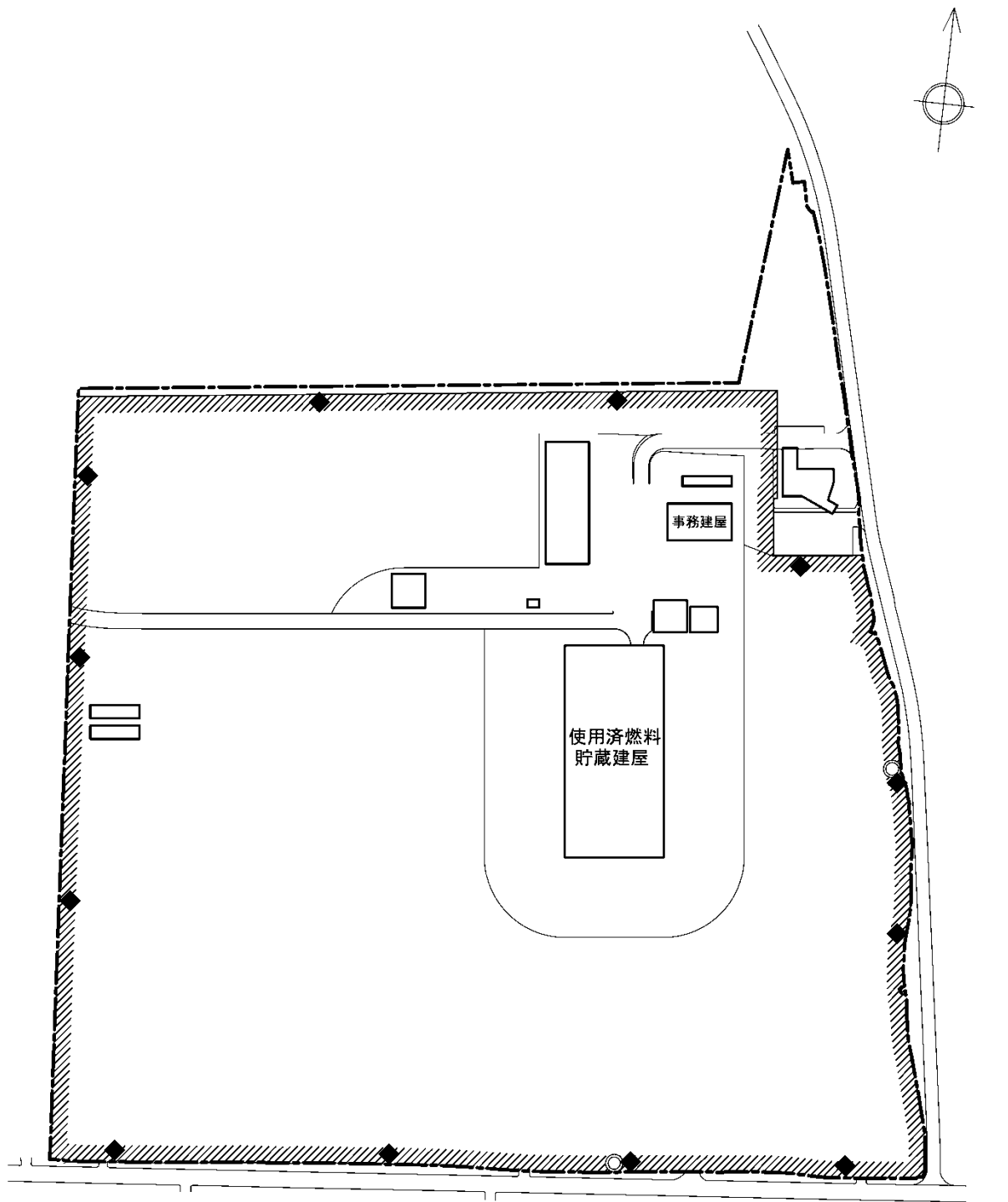
検出器	蛍光ガラス線量計
設置箇所数	12
計測対象	線量当量
取付箇所	各モニタリングポイント



第1図 チェックポイントの位置



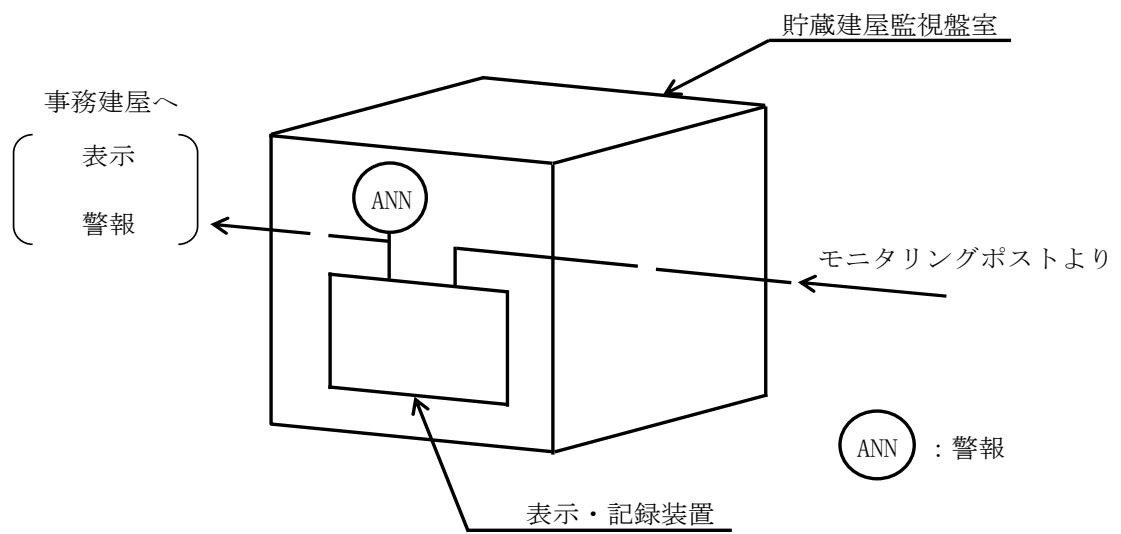
第2図 エリアモニタリング設備の構成図



0 100m

- 凡例
- ◎ モニタリングポスト
 - //// 周辺監視区域境界
 - 敷地境界
 - ◆ モニタリングポイント

第3図 モニタリングポスト・モニタリングポイントの設置位置図



第4図 モニタリングポスト構成図

モニタリングポスト、モニタリングポイントの 設置位置と基数について

周辺監視区域境界付近における空間放射線のモニタリングは、モニタリングポストによる空間放射線量率の連続的な測定とモニタリングポイントによる空間放射線量（3ヶ月積算値）の測定を行い、周辺監視区域境界の放射線量に異常がないことの確認に資することを目的としている。

ここで、モニタリングポストによる測定とモニタリングポイントによる測定は、各々、以下のような特徴を有していることから、これらの特徴を踏まえ、両者を組み合わせて適切に配置することにより、リサイクル燃料備蓄センターに起因する空間放射線を監視する。

[モニタリングポストによる測定]

比較的短時間の変動の監視が可能であることから、異常の早期発見と原因調査に役立つ。

[モニタリングポイントによる測定]

比較的簡便に、精度よく空間放射線量の積算値を求めることが可能。

これらを踏まえ、リサイクル燃料備蓄センターにおけるモニタリングポスト、モニタリングポイントの設置位置と設置基数については、以下のとおりとする。

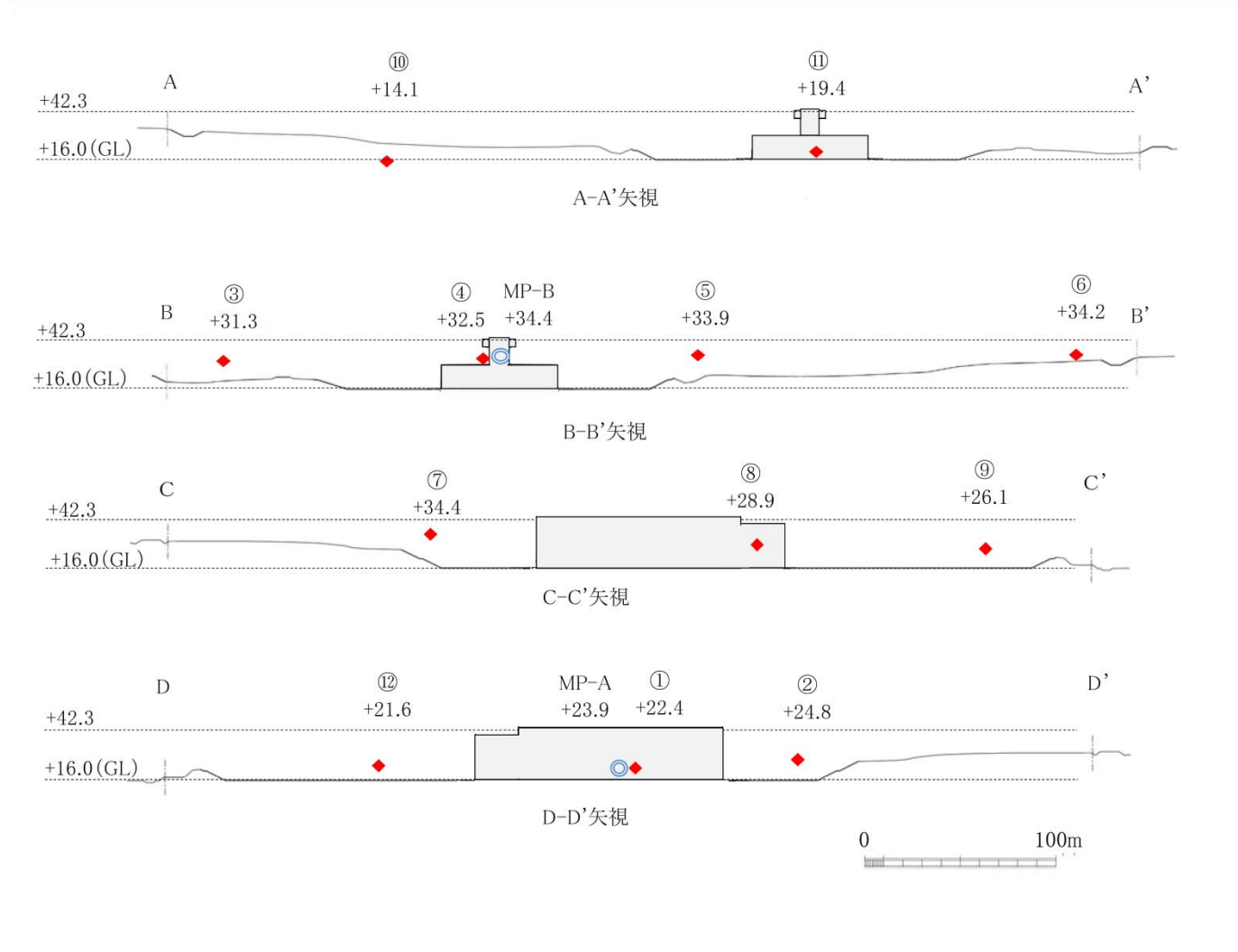
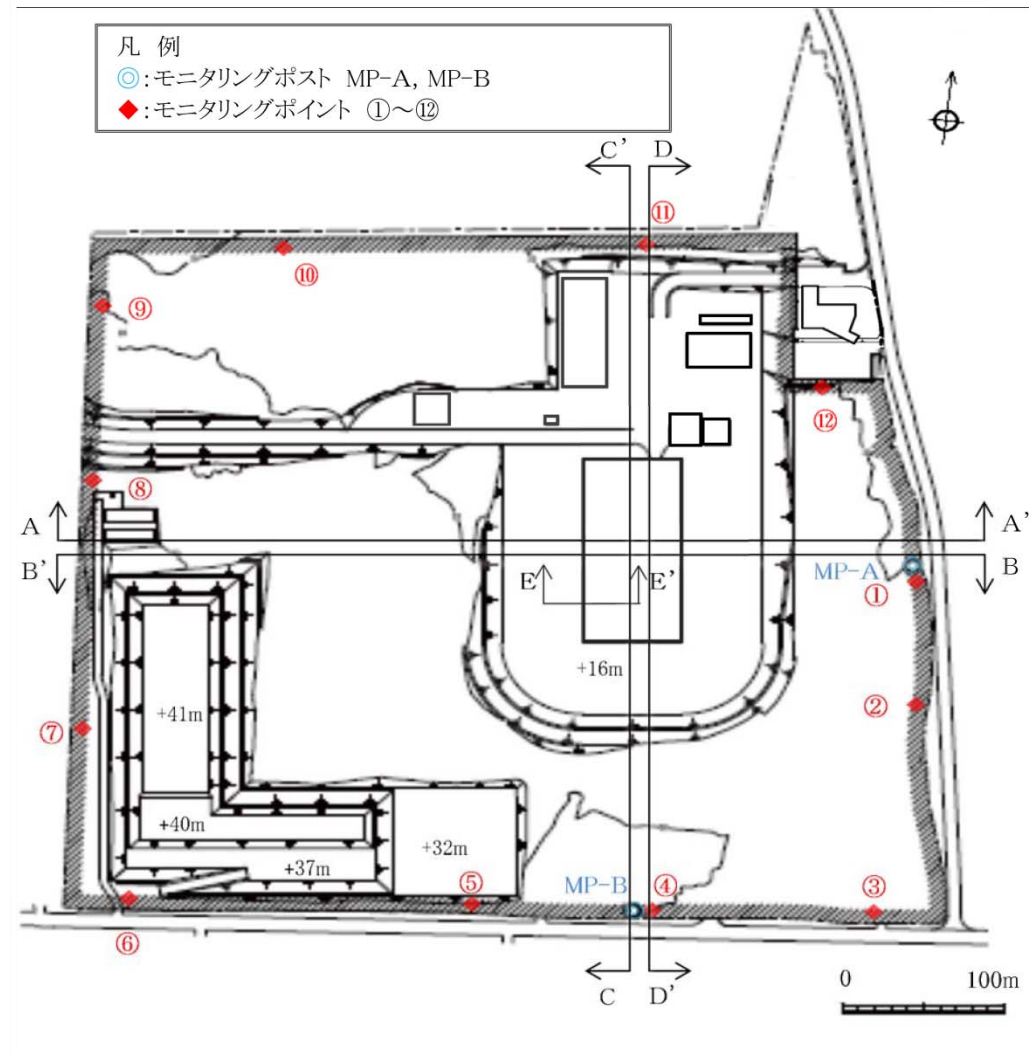
1. モニタリングポスト

リサイクル燃料備蓄センターからの直接線、スカイシャイン線による線量は、施設からの距離が遠くなるに従って減少することから、施設からの距離、使用済燃料貯蔵建屋の構造、平常時における一般公衆の年間線量等を考慮して、モニタリングポストの設置位置を選定している。具体的には、平常時の直接線、スカイシャイン線による一般公衆の線量は、使用済燃料貯蔵建屋の排気口の開口の向きや貯蔵区域中心から敷地境界までの距離を評価し、使用済燃料貯蔵建屋の貯蔵区域中心から敷地境界までの距離が最短となる東側敷地境界外において中性子線が最大となることから、東側の周辺監視区域境界付近にモニタリングポスト1基を設置する。また、使用

済燃料貯蔵建屋の構造により、遮蔽壁の厚さの違いによるガンマ線の遮蔽効果は、同建屋の南側が最も小さくなることから、南側の周辺監視区域境界付近にモニタリングポスト1基を設置する。使用済燃料貯蔵建屋の排気口とモニタリングポストとの相対的な設置高さについて、別添1-1図に示す。

2. モニタリングポイント

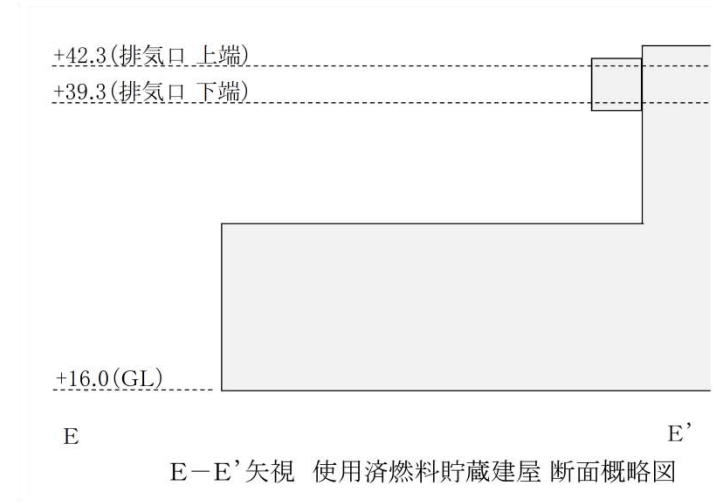
モニタリングポイントは、施設周辺の集落の状況、地形等を考慮し、周辺監視区域境界に沿って、計12地点に設定する。使用済燃料貯蔵建屋の排気口とモニタリングポイントとの相対的な設置高さについて、別添1-1図に示す。



記載数値は東京湾平均海面(T.P.)を基準とする。
(単位:m)

使用済燃料貯蔵建屋	モニタリングポイント												モニタリングポスト	
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	MP-A	MP-B
+42.3(排気口 上端) +39.3(排気口 下端) +16.0(GL)	+22.4	+24.8	+31.3	+32.5	+33.9	+34.2	+34.4	+28.9	+26.1	+14.1	+19.4	+21.6	+23.9	+34.4
+45.0														
+40.0														
+35.0														
+30.0														
+25.0														
+20.0														
+15.0														
+10.0														

使用済燃料貯蔵建屋の排気口とモニタリングポスト・モニタリングポイントとの設置高さの比較



E-E' 矢視 使用済燃料貯蔵建屋 断面概略図

別添 1-1 図 造成地形概略図を用いたモニタリングポスト・モニタリングポイントとの設置高さの比較図

エリアモニタリング設備及び周辺監視区域境界付近固定モニタリング設備で監視を行う放射線のモニタリング箇所，表示するモニタリング情報について

1. エリアモニタリング設備

エリアモニタリング設備は，放射線業務従事者の作業環境の状況把握及び放射線防護への情報提供，並びに金属キャスクの遮蔽機能の監視を目的として設置しており，連続して線量当量率を測定する。

放射線業務従事者の作業環境の状況把握の観点では，人が立ち入る代表的なエリアの放射線レベルを，金属キャスクの遮蔽機能の監視の観点では，貯蔵場所における放射線レベルの変動を確認する。したがって，線量当量率が最大となる位置での測定を意図しているものではない。

貯蔵区域のエリアモニタの設置位置は，床面からの高さを金属キャスクよりも低い位置にした場合，エリアモニタに近い金属キャスクが他の金属キャスクからの放射線を遮蔽することとなるため，比較的広い範囲でのモニタリングが可能となるように，金属キャスクよりも高い位置にエリアモニタリング設備を設置する。

受入れ区域のエリアモニタの設置位置は，仮置架台に置かれるキャスクからの線量当量率を測定することから，計測が遮られない位置とする。

廃棄物貯蔵室のエリアモニタの設置位置は，廃棄物を貯蔵した場合でもアクセスできる位置とし，床面からの高さは，廃棄物を貯蔵した場合に廃棄物で遮蔽されない高さ及び施工上可能な最大の高さとする。

なお，使用済燃料貯蔵建屋内の放射線レベル及び放射線レベルの変動の確認には，エリアモニタリング設備による測定結果の他に定期的及び必要に応じて実施する放射線サーベイ機器による測定結果も用いる計画である。なお，使用済燃料貯蔵施設は，平常時に発生する放射性廃棄物はなく，万一，放射性廃棄物が発生した場合には，ドラム缶等の容器に封入して廃棄物貯蔵室に保管廃棄する設計である。したがって，放射性廃棄物の放出口等はなく，放射性物質の放出管理の観点からは，放射性廃棄物の放出の経路における放射性物質の濃度等の監視は不要である。

金属キャスクは、設計貯蔵期間を通じて遮蔽機能を維持するよう設計されること及び使用済燃料集合体は臨界にはなり得ないことから、通常考えられる線量の変動要因は、自然放射線の変動、気象条件の変化であり、放射線業務従事者の作業環境の把握は、放射線サーベイ機器による測定でも対応可能である。

ただし、金属キャスクの遮蔽機能の健全性及び一般公衆への影響を確認する観点から、使用済燃料貯蔵建屋貯蔵区域内の複数個所にガンマ線及び中性子線エリアモニタを設置し、連続して線量を測定する。

平常時における一般公衆の線量評価結果では、中性子については構造が比較的単純な排気口からのストリーミングによる寄与が大きく、ガンマ線については、建屋躯体や給排気経路の構造物を透過するバルク、給気ロスストリーミングによる寄与が大きくなる。したがって、中性子線用エリアモニタについては、排気口に通ずる経路付近、ガンマ線用エリアモニタについては、貯蔵区画壁により仕切られたブロック単位の側壁にそれぞれ設置する。

エリアモニタによる外部放射線に係る線量当量率は、監視盤室で表示及び記録するとともに、事務建屋でも監視が行えるよう表示を行う。放射線レベル基準設定値を超えたときは監視盤室及び事務建屋に警報を発する。外部電源系の機能喪失時には、無停電電源装置及び電源車により電気が供給される。

2. 周辺監視区域境界付近固定モニタリング設備

周辺監視区域境界付近固定モニタリング設備は、周辺監視区域境界付近における放射線量を監視する目的で設置している。周辺監視区域境界付近固定モニタリング設備で監視を行う放射線のモニタリング箇所や、表示するモニタリング情報について別添 2-1 表に示す。

モニタリング箇所の選定について、モニタリングポストは、平常時の直接線、スカイシャイン線による敷地境界外の実効線量の計算結果より、ガンマ線が最大となる周辺監視区域境界付近の南側に 1 基、中性子線が最大となる周辺監視区域境界付近の東側に 1 基設置する。モニタリングポイン

トは、施設周辺の集落の状況、地形等を考慮し、周辺監視区域境界付近に設置する。

モニタリング情報について、モニタリングポストでは、周辺監視区域境界付近の空間放射線量率を連続的に測定するとともに、原子力災害対策特別措置法 10 条、15 条で定める通報基準に対する線量値の上昇があった場合の放射線量の変化の監視を行う。周辺監視区域境界付近の南側、東側に設置したモニタリングポストでは、ガンマ線の測定を行う。また、東側に設置したモニタリングポストでは、中性子線の測定も行うことができる。測定値は表示箇所に伝送され、監視を可能とする。モニタリングポイントでは、周辺監視区域境界付近の空間放射線量を測定し、「核原料物質又は核燃料物質の製錬の事業に関する規則等の規定に基づく線量限度等を定める告示」で定める周辺監視区域外の 1 年間の線量限度を超えないことを確認する。

別添 2-1 表 周辺監視区域境界付近固定モニタリング設備について

	モニタリングポスト	モニタリングポイント
モニタリング箇所	周辺監視区域境界付近の 2 箇所	周辺監視区域境界付近の 12 箇所
モニタリング情報	周辺監視区域境界付近の空間放射線量率	周辺監視区域境界付近の空間放射線量
モニタリング方法	連続的な監視	3 月積算
検出器	<ul style="list-style-type: none"> ・ NaI (Tl) シンチレータ ・ 電離箱 ・ ³He 比例計数管 (中性子線用) 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 蛍光ガラス線量計
表示箇所	監視盤室及び事務建屋	なし (線量計に蓄積された線量情報をリーダーで読取り)

3. 表示するモニタリング情報

管理区域における線量当量率、空気中の放射性物質の濃度及び床面等の放射性物質の表面密度等を定期的または必要の都度測定し、その結果を放射線業務従事者等が安全に確認できるように、チェックポイント及び事務建屋等の適当な箇所に表示する。

放射線管理設備の試験及び検査方法について

1. 個人管理用測定設備

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

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

2. 放射線監視設備

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

(1) エリアモニタリング設備

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

(2) 周辺監視区域境界付近固定モニタリング設備

a. モニタリングポスト

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

b. 蛍光ガラス線量計

周辺監視区域境界付近における空間放射線量（3ヶ月積算値）は、周

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

蛍光ガラス線量計については、年1 回標準線源による校正を行う。

(3) 放射線サーベイ機器

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

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

バックグラウンドや金属キャスクの設置基数に応じた
エリアモニタの警報設定値の設定について

エリアモニタの警報設定値については、原子力発電所放射線モニタリング指針 (JEAG4606-2017) に基づき平均的バックグラウンドレベルの10倍以内の倍数で設定する。また、平均的バックグラウンドレベルは、金属キャスクの設置基数により変動することが予想されることから、金属キャスク搬入の都度、平均的バックグラウンドレベルの評価を行い、適切に警報設定値を設定する。

モニタリングポストでの空間放射線の測定は、2012年3月より開始しており現在はデータを蓄積している段階である。モニタリングポストを設置する周辺監視区域境界付近のバックグラウンドレベルの設定にあたっては、原子力発電所放射線モニタリング指針 (JEAG 4606-2017) に基づき、事業開始前までのバックグラウンドデータの変動範囲を勘案し設定する。

第 20 条 予備電源

<目 次>

1. 設計方針
2. 施設設計

(別 添)

- 別添 1 消防用設備及び退避用照明の設計方針について
- 別添 2 無停電電源装置の水素対策について
- 別添 3 無停電電源装置の試験検査について
- 別添 4 無停電電源装置の負荷について
- 別添 5 無停電電源装置の給電時間について

1. 設計方針

使用済燃料貯蔵施設は、使用済燃料集合体を金属キャスクに収納した状態で静的に貯蔵する施設であり、基本的安全機能を金属キャスクが自己完結的に有していることから、外部電源系統からの電気の供給が停止した場合においても、基本的安全機能に直接影響を及ぼすおそれはない。ただし、基本的安全機能が維持されていることの監視を継続して行うために、金属キャスクの閉じ込め機能と除熱機能を監視する設備、放射線監視設備の設備・機器を作動し得るのに十分な容量を有した無停電電源装置を設ける設計とする。

また、無停電電源装置は、万一の火災等の非常時においても緊急通信・連絡設備の設備・機器を作動し得るのに十分な容量を有するものとする。

更に、無停電電源装置の給電可能時間を超える停電が発生した場合のために電源車等を有し、監視と通信・連絡を継続するために電源車等から無停電電源装置に電気を供給する設計とする。電源車等に燃料を補給するために軽油タンクを設ける。

なお、消防用設備及び退避用照明は、「消防法」及び所轄消防署協議に基づく設計とする。（別添1参照）

2. 施設設計

(1) 電気設備の概要

リサイクル燃料備蓄センターの電力は、東北電力株式会社の 6.6kV 回線から受電し、受変電施設に設置される 6.6kV 常用母線に接続され空気圧縮機等の負荷に給電する。また、変圧器により 420V に降圧した後、使用済燃料貯蔵建屋付帯区域 2 階の電気品室内に設置される 420V 常用母線等より各負荷へ給電する。外部電源喪失時には、無停電電源装置より計測設備、放射線監視設備及び通信連絡設備等へ給電する。無停電電源装置の給電可能時間を超える停電が発生した場合は電源車等から無停電電源装置に電気を供給する。

ケーブル、ケーブルトレイ及び電線管材料には可能な限り不燃性又は難燃性のものを使用し、必要に応じ延焼防止塗料を使用する。ケーブルの難燃性は IEEE383（垂直トレイ燃焼試験）等の規格に適合したものとする。さらに、ケーブルトレイ等が障壁を貫通する場合には、火災対策上、障壁効果を低減させないよう対策を施す。

リサイクル燃料備蓄センターの電気系統概略図を第 1 図に、受変電施設内配置概略図を第 2 図に示す。

(2) 無停電電源装置

a. 無停電電源装置の設置場所

無停電電源装置は、原子炉施設において設置している直流電源（蓄電池）と同等で、十分な実績、信頼性を有するものとし、使用済燃料貯蔵建屋付帯区域 2 階電気品室内に設置する。（別添 2 参照）

無停電電源装置は定期的な試験検査を実施し、健全性を確認する。（別添 3 参照）

無停電電源装置単線結線概略図を第 3 図に、無停電電源装置の設置位置概略図を第 4 図に示す。

b. 無停電電源装置の容量

無停電電源装置は、金属キャスクの基本的安全機能が維持されていることを監視する設備や非常時において緊急通信・連絡するための設備に電気を供給する設備である。

無停電電源装置から電気を供給する設備は以下の通り。

(a) 基本的安全機能が維持されていることを監視する設備

① 計測設備

- ・ 蓋間圧力監視装置（閉じ込め機能）
- ・ 表面温度監視装置（除熱機能）
- ・ 給排気温度監視装置（除熱機能）
- ・ 表示・記録装置

② 放射線監視設備

- ・ エリアモニタリング設備
- ・ 周辺監視区域境界固定モニタリング設備

(b) 緊急時に通信・連絡するための設備

- ・ 通信連絡設備
- ・ 放送設備
- ・ 社内電話設備
- ・ 送受話器

(c) その他の設備

- ・ 入退域管理装置

無停電電源装置の容量は、これらの設備の設計容量の合計値よりも大きい容量（30kVA）としている。各設備の実際の消費電力は設計容量を超えないことから、無停電電源装置は十分な容量を有することになる。（別添4参照）

また、今後の既設設備のリプレース等に伴い設計容量の超過が見込まれる場合には、各設備の実際の消費電力等も参考にしたうえで無停電電源装置の容量を超過しないことを確認する。

なお、ガンマ線エリアモニタ等を暖めるヒータは無停電電源装置の負荷には含まれない。ヒータ電源は105V 常用母線から給電される。停電によるヒータ停止時には、気温等を確認し、必要に応じ電源車等から給電する。

c. 無停電電源装置の給電時間について

無停電電源装置から各負荷への給電可能時間は8時間としており、こ

れを超える停電が発生した場合には、電源車等からの給電に切替え、監視を継続する。

(3) 電源車等

a. 電源車等の設置場所について

電源車等の設置位置概略図を第5図に示す。

b. 電源車等の容量について

電源車等の容量は、無停電電源装置の給電可能時間を超える停電が発生した場合に、計測設備、放射線監視設備の監視機能、通信連絡設備等の負荷容量を基に設定し、十分な容量を有する。

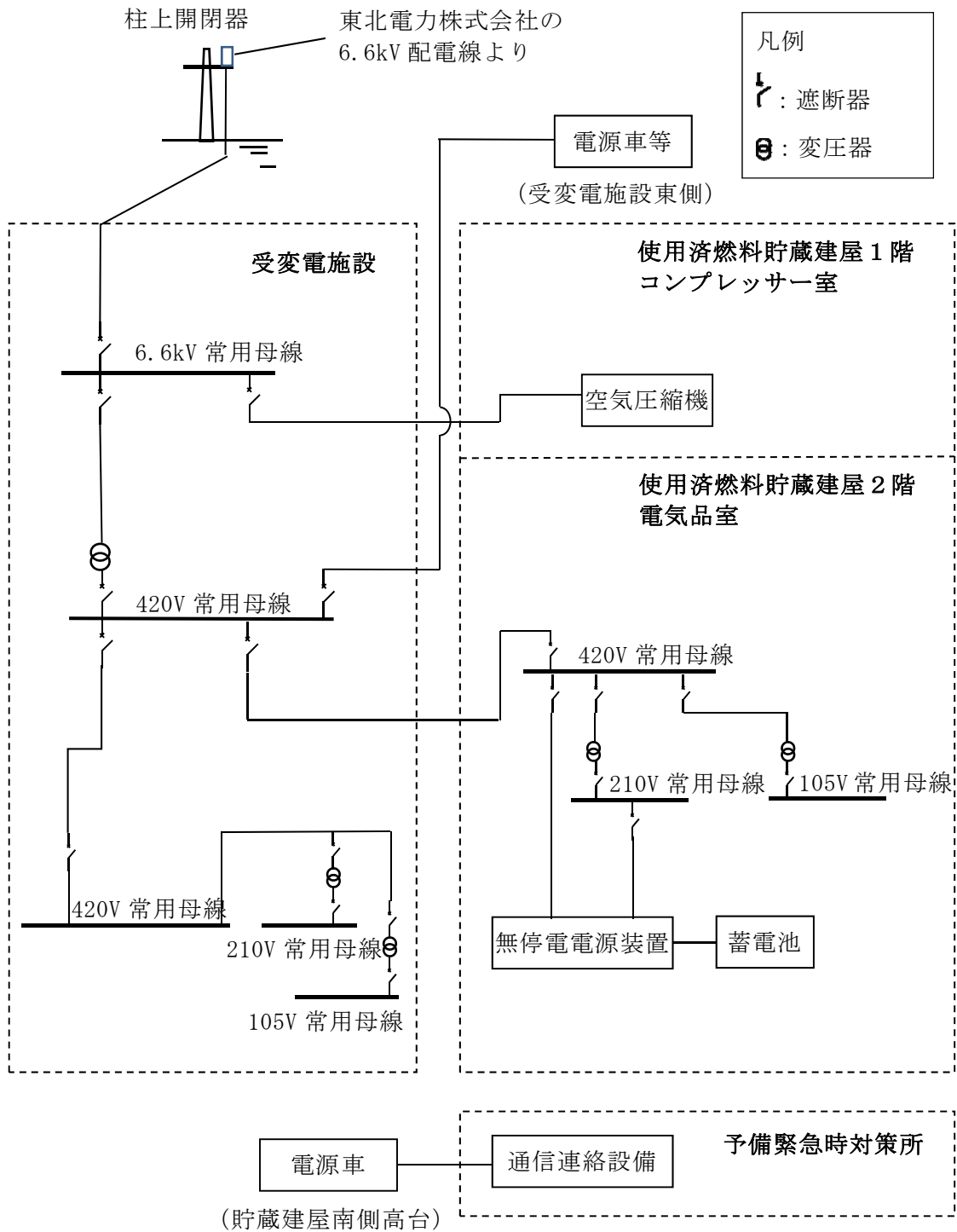
電源車の容量 : 250kVA

据置型発電機[※]の容量 : 270kVA

※厳冬期の運用は除く

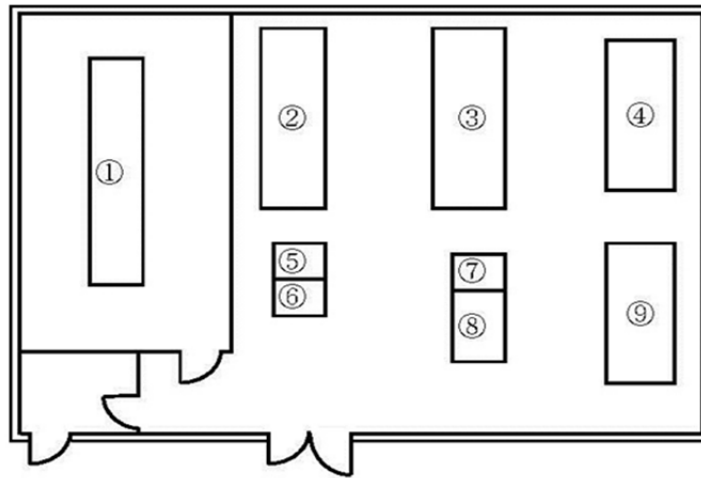
c. 電源車等の給電時間

電源車等から各負荷への給電時間は24時間以上としており、無停電電源装置、電源車等の組み合わせにより約72時間の給電を可能とするため、敷地内に軽油タンクを設ける。



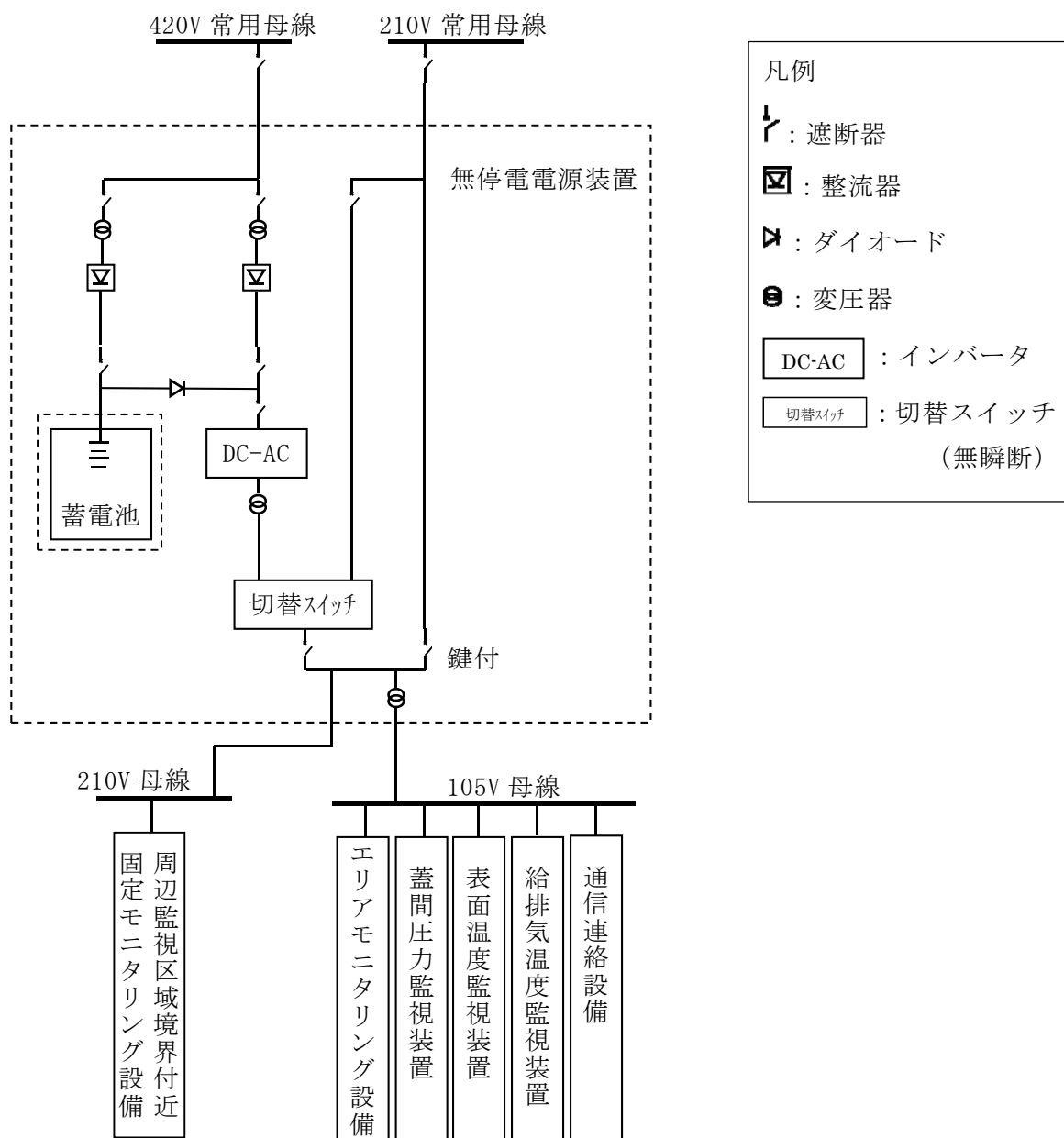
通常時、電源車は貯蔵建屋南側高台に設置
 外部電源喪失時には受変電施設東側に移動して給電

第 1 図 リサイクル燃料備蓄センター電気系統概略図

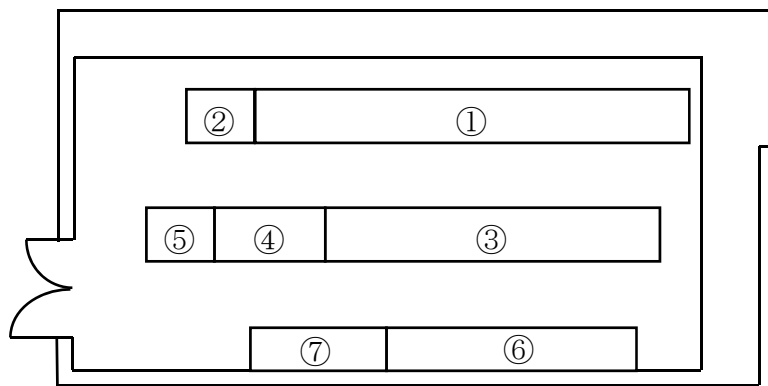
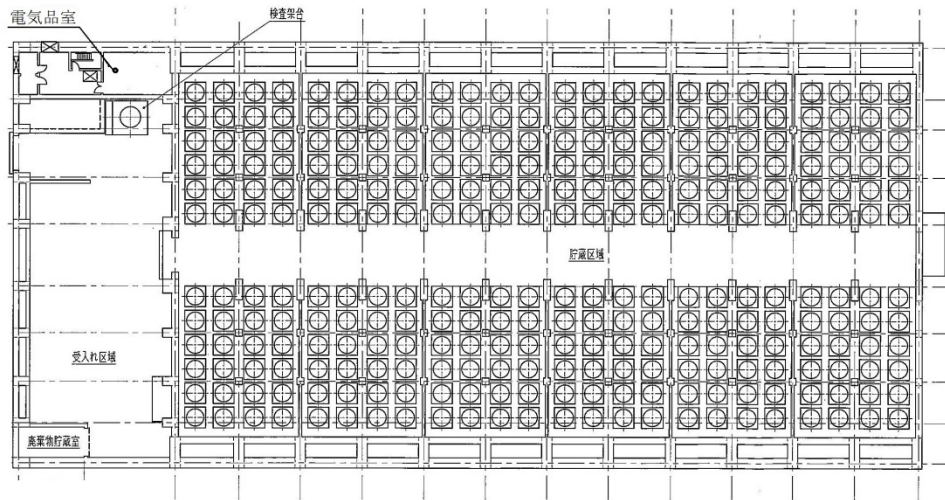


配置図番号	装置名称	盤名称
①	蓄電池	(盤なし)
②	共用無停電電源装置	充電器盤
		無停電電源装置 (インバータ盤)
		無停電電源装置 (バイパス入力盤)
		無停電電源装置 (出力盤)
③	420V 常用母線	420V P/C
④	電圧変動抑制装置	電圧変動抑制装置
⑤	進相コンデンサ	進相コンデンサ
⑥	高調波抑制装置	高調波抑制装置
⑦	直流電源装置	直流電源装置
⑧	420V 常用母線	420V 電源盤
⑨	6.6kV 常用母線	6.6kV M/C

第 2 図 受変電施設内配置概略図

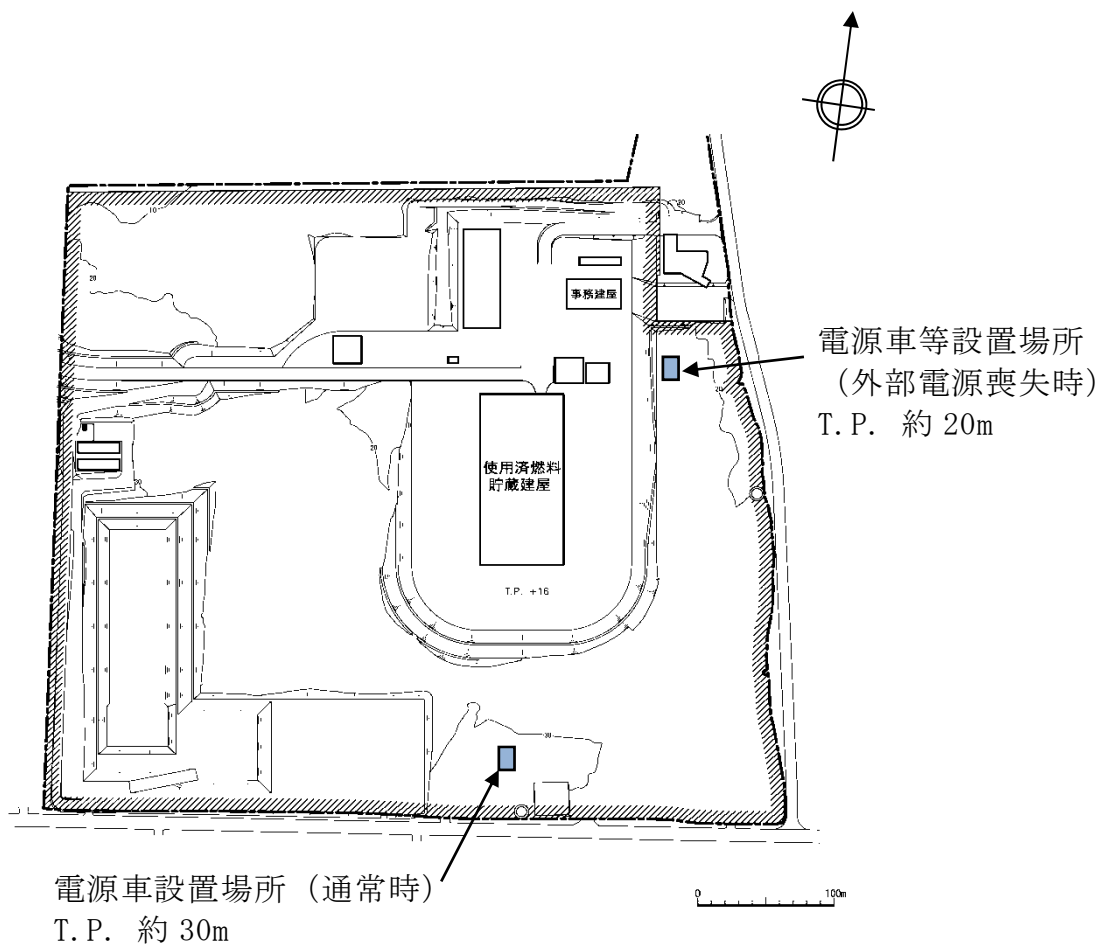


第3図 無停電電源装置単線結線概略図



配置図番号	装置名称	盤名称
①	蓄電池	無停電電源装置（蓄電池盤）
②	210V 常用母線	210V 電源盤
③	無停電電源装置	充電器盤
		無停電電源装置（整流器盤）
		無停電電源装置（インバータ盤）
		無停電電源装置（出力盤）
④	照明用電源盤	照明用電源盤（210V フィーダ盤）
		照明用電源盤（105V フィーダ盤）
⑤	105V 常用母線	105V 電源盤
⑥	420V 常用母線	420V コントロールセンタ
⑦	無停電分電盤	貯蔵建屋無停電分電盤

第4図 無停電電源装置の設置位置概略図



※津波襲来時に備え、電源車は常時貯蔵建屋南側の高台(T.P. 30m)に設置する。

外部電源喪失時には、電源車を受変電設備東側 (T.P. 約 20m) へ移動し給電する。

第5図 電源車等の設置位置概略図

消防用設備及び退避用照明の設計方針について

消防用設備及び退避用照明については消防法に基づき設計しているが、一部の設備については所轄消防署との協議により変更することが認められている。具体的な設計方針を別添 1-1 表に示す。

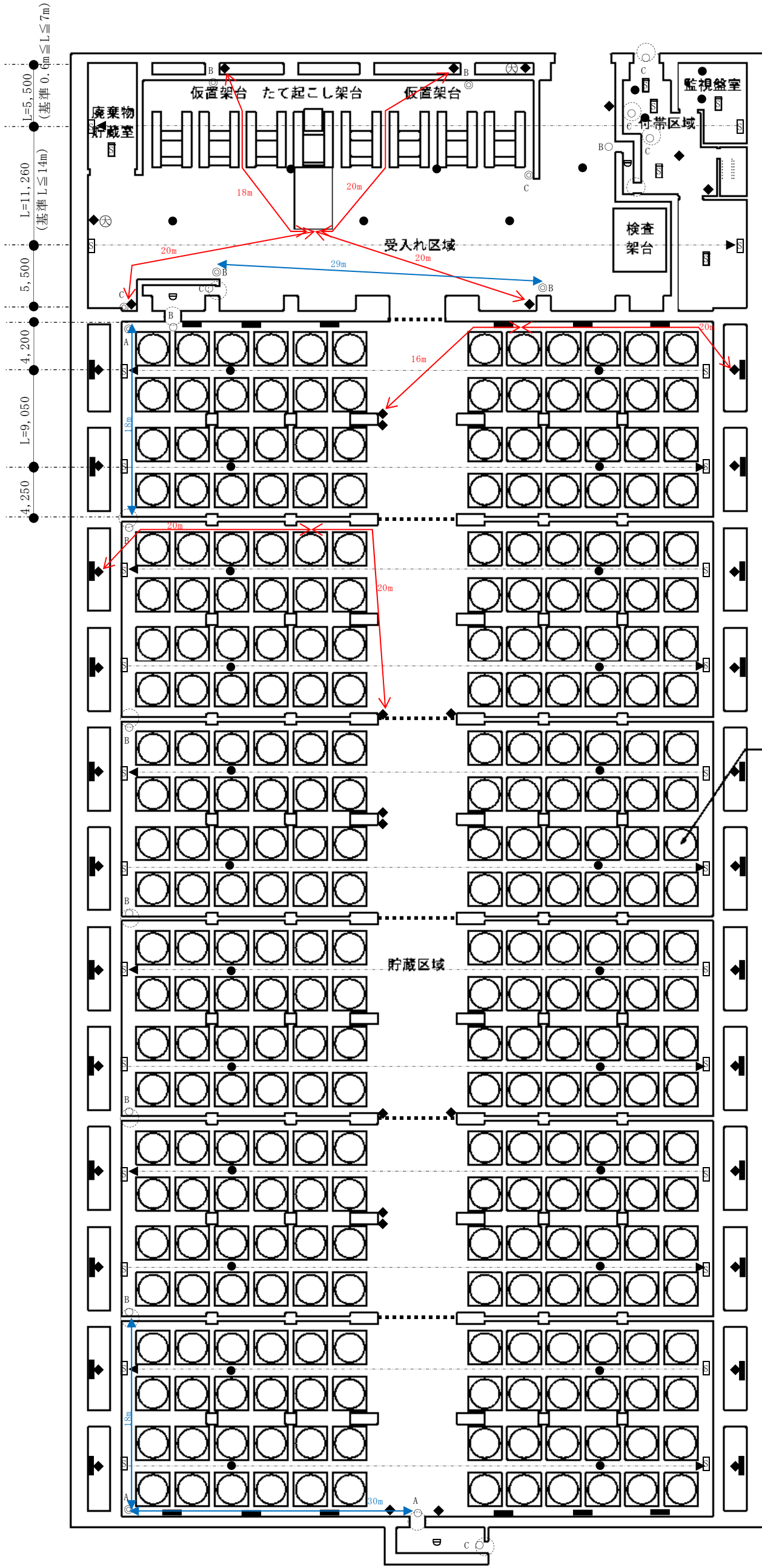
貯蔵区域内の通路誘導灯（停電時には 20 分間以上点灯）は、所轄消防署との協議により共用無停電電源装置（自主設備、8 時間給電）より給電される保安灯照明器具を設置することにより、一部の設置が免除されている。

別添 1 - 1 表 消防法令, 規則, 及び所轄消防署協議に基づく設計方針について

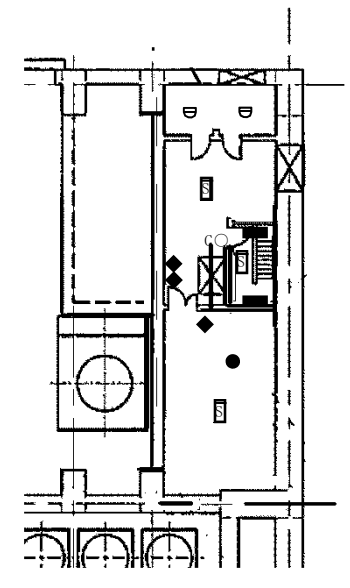
法令番号	法令項目	法令	規則, 技術基準, 又は消防署協議	設計方針
法 17 条	消防用設備等の設置, 維持	「倉庫」としての適用を受ける。 「消防用設備等」を設置し維持する。	—	—
施行令 6 条	防火対象物の指定	別表第 1 「(14) 倉庫」として取扱う。	—	—
施行令 10 条	消火器具に関する基準	・延べ面積が 150m ² 以上のもの ・建築物の地階, 無窓階又は 3 階以上の階で, 床面積が 50m ² 以上のもの 上記に該当するため, 技術上の基準に従い「消火器具」を設置する。	・消防法別表 1 「(14) 倉庫」で「主要構造部を耐火構造とし, かつ, 壁・天井の室内に面する部分の仕上げが難燃材料のもの」の場合は以下の通り。 ①消火器具の設置(規 6-1・2): 能力単位の数値の合計数 \geq (延面積又は床面積) / 200m ² =延面積 8,030m ² / 200m ² =41 ②歩行距離(規 6-6): 各部分から歩行距離 20m 以内に設置	①受入れ区域: 能力単位 3 × 7 台 + 能力単位 10 (大型) × 2 台 = 能力単位 41 貯蔵区域: 能力単位 3 × 36 台 = 能力単位 108 合計: 能力単位 149 (>41) ②各部分から歩行距離 20m 以内に消火器を設置する。 別添 1 - 1 図 参照
施行令 11 条	屋内消火栓設備に関する基準	・延べ面積が 1,400m ² 以上 (準耐火構造で内装制限したもの) のもの ・建築物の地階, 無窓階又は 4 階以上の階で床面積が 300m ² 以上のもの 上記に該当するため設置が必要であるが, 施行令 11-4 より「動力消防ポンプ設備」を設置する場合は除外。	—	「動力消防ポンプ設備」を設置するため設置除外。
施行令 12 条	スプリンクラー設備に関する基準	ラック式倉庫, 11 階以上の階の用に該当しないため設置対象外とする。	—	—
施行令 13 条	水噴霧消火設備等を設置すべき防火対象物	指定可燃物を貯蔵, 駐車のために該当しないため設置対象外とする。	—	—
施行令 19 条	屋外消火栓設備に関する基準	1 階又は 1 階及び 2 階部分の床面積の合計が ・準耐火建築物の場合 6,000m ² 以上 上記に該当するため設置が必要であるが, 施行令 19-4 より「動力消防ポンプ設備」を設置する場合は除外。	—	「動力消防ポンプ設備」を設置するため設置除外。

法令番号	法令項目	法令	規則, 技術基準, 又は消防署協議	設計方針
施行令 20 条	動力消防ポンプ設備に関する基準	<ul style="list-style-type: none"> ・屋内消火栓設備, 屋外消火栓設備の設置対象物のため「動力消防ポンプ」の設置適用を受ける。 ①動力消防ポンプの配置(施行令 20-4-4) 水源の直近の場所に常置する。ただし, 自動車により牽引されるものは水源からの歩行距離が 1,000m 以内の場所に常置することとしてよい。 ②規格放水量(施行令 20-3) 屋外消火栓設備の設置を必要とするもの: 0.4m³/分以上 ③水源の配置(施行令 20-4-1) 規格放水量 0.5m³/分以上のもの: 水平距離(半径) ≤ 100m ④消防用ホースの長さ(施行令 20-4-2) 規格放水量 0.5m³/分以上のもの: 水平距離(半径) ≤ 100m ⑤水源の水量(施行令 20-4-3) 規格水量で 20 分間放水できる水量以上とする。ただし水量が 20m³ 以上となる場合は 20m³ としてよい。 	④について 消防署協議により最大水平歩行距離を有効に消火できるホース長を確保すること。(最大水平歩行距離は約 160m)	<ul style="list-style-type: none"> ①事務建屋北側車庫に設置する。水源から最大水平歩行距離 300m (<1,000m) ②規格放水量 1.0m³/分 (>0.4m³/分) ③貯蔵建屋は半径 100m の円内に包含されるよう, 水源を建屋南北に配置する。 ④20m 消火ホース 10 本用意し水平歩行距離 200m とする。(>160m) ⑤40m³/基を 2 基設置 = 80m³ (>20m³ ← 規格放水量 1.0m³/分 × 20 分 = 20m³) 別添 1 - 2 図 参照
施行令 21 条	自動火災報知設備に関する基準	<ul style="list-style-type: none"> ・延べ面積が 500m² 以上のもの ・建築物の地階, 無窓階又は 3 階以上の階で, 床面積が 300m² 以上のもの 上記に該当するため「自動火災報知設備」を設置する。	<ul style="list-style-type: none"> ①受信機: 常時監視員がいる場所に受信機を設置する。 ②感知器: 大空間部は光電式分離型感知器, 小空間部は煙感知器, 湿気が滞留する場所は熱感知器を設置する。 消防署協議により, <ul style="list-style-type: none"> ①受信機については, 出入管理建屋に設置し, 貯蔵建屋内には表示器を設置する。 ②感知器については, センタータワー部, 給気風洞部には感知器の設置は不要。 	<ul style="list-style-type: none"> ①受信機を出入管理建屋と事務建屋に設置し, 表示機を貯蔵建屋監視盤室に設置する。 ②受入れ区域・貯蔵区域: 光電分離型感知器, 前室: 熱感知器, その他室: 煙感知器を設置する。 ただし, センタータワー部, 給気風洞部には設置しないものとする。 別添 1 - 1 図, 別添 1 - 2 図 参照
施行令 23 条	消防機関へ通報する火災報知設備に関する基準	<ul style="list-style-type: none"> ・延べ面積が 1,000m² 以上のもの 上記に該当するため「消防機関へ通報する火災報知設備」を設置する。	—	出入管理建屋に電話機を設置する。 別添 1 - 1 図 参照

法令番号	法令項目	法令	規則, 技術基準, 又は消防署協議	設計方針
施行令 24 条	非常用警報器具又は非常用警報設備に関する基準	無人のため設置対象外とする。	—	—
施行令 25 条	避難器具に関する基準	無人のため設置対象外とする。	—	—
施行令 26 条	誘導灯及び誘導標識に関する基準	・地階, 無窓階の部分には避難口誘導灯, 通路誘導灯を設置 上記に該当するため, 「誘導灯」を設置する。	①規 28-3 より避難口誘導灯はC級以上, 通路誘導灯はC級以上 ②消防協議により, 保安灯照明器具 (共用無停電電源装置 (自主設備) から給電) を設置することにより, 貯蔵区域内の通路誘導灯は設置免除。	①②により避難口誘導灯はA級(60m)・B級(30m)・C級(15m), 通路誘導灯はA級(20m)・B級(15m)・C級(10m)を設置する。(カッコ内は有効距離を示す。)ただし, ②により貯蔵区域内は特定防火設備を通過する西側のみに誘導灯を設置する。 別添 1-1 図 参照
施行令 27 条	消防用水に関する基準	・敷地面積 20,000m ² 以上あり, かつ1階及び2階の床面積の合計が ・耐火建築物の場合 15,000m ² 以上 ・準耐火建築物の場合 10,000m ² 以上のもの 上記に該当しないため, 設置対象外。	—	—
施行令 28 条	排煙設備に関する基準	防火対象物が「(14)倉庫」であり該当しないため, 設置対象外。	—	—
施行令 28 条の2	連結散水設備に関する基準	・地階の床面積の合計が 700m ² 以上のもの 上記に該当しないため, 設置対象外。	—	—
施行令 29 条	連結散水管に関する基準	・地階を除く階数が7以上 ・又は地階を除く階数が5以上で延べ面積が 6,000m ² 以上のもの 上記に該当しないため, 設置対象外。	—	—
施行令 29 条の2	非常用コンセント設備に関する基準	・地階を除く階数が11以上に設置が必要 上記に該当しないため, 設置対象外。	—	—



(使用済燃料貯蔵建屋 1階平面図 T.P. +16.3m)



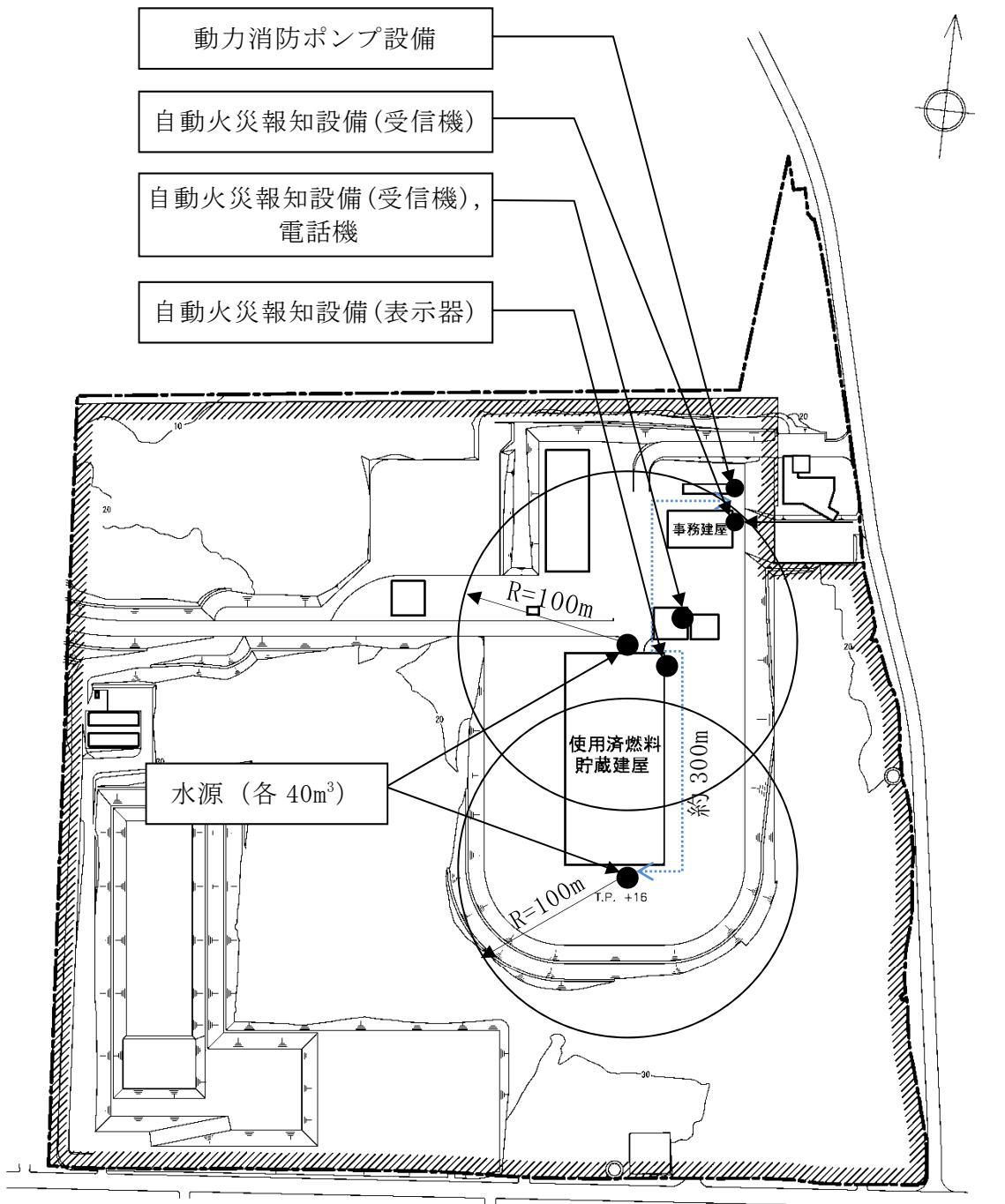
(2階平面図 T.P. +21.6m)

○光電分離型感知器の高さ基準
【受入れ区域】
 感知器高さ $h=19,000$, 天井高さ $H=22,200$
 $\rightarrow h \approx 0.85H > 0.8H$ (基準)
【貯蔵区域】
 感知器高さ $h=9,800$, 天井高さ $H=11,500$
 $\rightarrow h \approx 0.85H > 0.8H$ (基準)

金属キャスク

- 【凡例】**
- 保安灯 (天井)
 - 保安灯 (壁)
 - 避難口誘導灯 (壁)
 - ◎ 通路誘導灯 (壁)
 - ↔ 歩行距離
 - ⋯ 防火シャッター
 - ⌈ S ⌋ 光電分離型感知器
 - 避難経路の扉
 - > 光電分離型光軸
 - ◆ 消火器 (大: 大型)
 - ⌈ H ⌋ 熱感知器
 - ⌈ S ⌋ 煙感知器

別添 1 - 1 図 消防用設備等配置図 (貯蔵建屋内)



別添 1 - 2 図 消防用設備等配置図 (貯蔵建屋外)

無停電電源装置の水素対策について

無停電電源装置の蓄電池は水素ガスが発生し難い構造である制御弁式据置型鉛蓄電池を使用する。制御弁式据置型鉛蓄電池は浮動充電中には充電エネルギーはすべて充電のために消費され水素ガスは発生しない。充電終期以降では、充電エネルギーは水の電気分解に消費され陽極板から酸素ガスが発生し、その酸素ガスは陰極板、電解液と反応し陰極板の一部を放電状態とし、陰極板からの水素ガス発生を抑える構造とする。

電気品室は換気空調設備により換気する。

無停電電源装置の試験検査について

無停電電源装置の機能が維持されていることを確認するため、模擬信号の入力等により警報確認試験及びインターロック確認試験を1回／年程度実施する。

警報確認試験：

無停電電源装置の各警報要素を電氣的に模擬することにより、所定の警報、表示灯が動作することを確認する。

インターロック確認試験：

無停電電源装置の保護動作条件を電氣的に模擬することにより、所定の動作を確認する。

無停電電源装置の負荷について

別添 4 - 1 表 無停電電源装置負荷概要

設 備		負 荷	設計容量*
計測設備	蓋間圧力監視装置	信号入出力装置 1 ~ 6	4.32kVA
	表面温度監視装置	信号入出力装置 7	0.59kVA
	給排気温度監視装置	圧力変換器給電盤 1 ~ 6	3.60kVA
	表示・記録装置	キャスク監視盤	2.53kVA
		表示・記録装置 (監視盤室)	0.18kVA
		表示・記録装置 (モニタールーム)	0.18kVA
		表示・記録装置 (宿直前室)	0.18kVA
		表示・記録装置 (緊急対策室)	0.18kVA
			小計 11.76kVA
放射線監視設備	エリアモニタリング設備	エリア放射線モニタ監視盤	2.00kVA (0.55kVA)
	周辺監視区域境界付近固定	環境監視盤	2.00kVA (0.24kVA)
	モニタリング設備	モニタリングポスト電源盤 (MP-A)	2.50kVA (1.44kVA)
		モニタリングポスト電源盤 (MP-B)	3.00kVA (1.93kVA)
		光変換器	0.30kVA
		小計 9.80kVA (4.46kVA)	
通信連絡設備	放送設備	放送設備	1.60kVA
	社内電話設備	社内電話設備	1.20kVA
	送受話器	送受話器	2.00kVA
		小計 4.80kVA	
その他	入退域管理装置	入退域管理装置 1	0.50kVA (0.42kVA)
	将来設置機器	入退域管理装置 2	0.50kVA (0.17kVA)
		線量計充電器・設定器	0.47kVA (0.38kVA)
		将来設置機器	1.25kVA
			小計 2.72kVA (2.22kVA)
合計			29.08kVA (23.24kVA)

* () 内は工場での消費電力測定検査の実績値、あるいは実績値を一部含む値

無停電電源装置の給電時間について

無停電電源装置の給電時間については、敷地周辺での過去の停電時間（昭和 62 年から平成 22 年 2 月において最長約 5 時間）及び原子炉施設（BWR）における蓄電池の給電時間（8 時間）を考慮して 8 時間とした。

一方、東日本大震災では 8 時間を超える（約 24 時間）停電が発生していることから、長時間にわたる停電対策として無停電電源装置と連携して電源車等による給電を実施する。無停電電源装置及び電源車等により 24 時間以上の給電が可能な運用、燃料補給体制を構築する。

第 21 条 通信連絡設備等

<目 次>

1. 設計方針
2. センター内の通信連絡設備等
3. センター外との通信連絡設備
4. 避難通路等

(別 添)

- 別添 1 通信連絡設備全般について
- 別添 2 センター内外の連絡事象および連絡体制について
- 別添 3 通信連絡設備の試験・検査について
- 別添 4 センター外必要箇所との連絡について
- 別添 5 保安灯の照度や設置位置について

1. 設計方針

リサイクル燃料備蓄センター内の通信連絡設備は、監視盤室、事務建屋及びその他建屋内外の各所に必要に応じて通信連絡できるように、異なる機器で構成された送受話器及び社内電話設備を設置し、事故時に迅速な連絡を可能にするとともに、監視盤室及び事務建屋からリサイクル燃料備蓄センター内に居る全ての人に対して的確に指示及び警報を発することができる設計とする。

リサイクル燃料備蓄センターと事業所外必要箇所との通信連絡設備は、異なる手段により通信連絡できるように加入電話設備及び衛星携帯電話を設ける設計とする。

使用済燃料貯蔵建屋には、通常の照明用の電源が喪失した場合においても、その機能を失うことのない退避用の照明を設備し、かつ、単純、明確及び永続性のある標識のついた安全退避通路を確保する。

2. センター内の通信連絡設備等（第1図，第2図参照）

2.1 センター内通信連絡設備

センター内通信連絡設備は，それぞれ異なる機器で構成された送受話器，社内電話設備により多様性を確保する設計とする。（別添1，別添2参照）

2.1.1 送受話器

送受話器は，ハンドセット，パケット交換機，放送設備，スピーカから構成され，事務建屋及び監視盤室のほか，その他建屋内外のセンター内各所に設置したハンドセットを通じ，相互に必要な指示・連絡が可能な設計とする。

(1) ハンドセット

- a. ハンドセットとは，設置個所から他の設置個所等へ送受話する機器をいう。
- b. ハンドセットは，事務建屋及び監視盤室のほか，その他建屋内外のセンター内各所に設置する。
- c. ハンドセットの電源は，パケット交換機から給電する。

(2) パケット交換機

- a. パケット交換機とは，ハンドセットを制御し，他のハンドセット及び放送設備と接続する中継通信機器をいう。
- b. パケット交換機は，事務建屋及び監視盤室に設置している。
- c. パケット交換機の電源は，無停電電源装置から給電する。

(3) 放送設備

- a. 放送設備は，センター内各所へスピーカにより放送する機器をいう。
- b. 放送設備は事務建屋に設置する。放送設備に付属する警報装置を事務建屋，監視盤室及び予備緊急時対策所に設置する。
- c. 放送設備の電源は，無停電電源装置から給電する。

(4) スピーカ

- a. スピーカは，事務建屋及び監視盤室のほか，その他建屋内外のセンター内各所に設置する。
- b. スピーカの電源は，放送設備から給電する。

2.1.2 社内電話設備

社内電話設備は、固定電話機、PHS端末、PHS基地局、電話交換機から構成され、事務建屋及び監視盤室のほか、その他建屋内外のセンター内各所から固定電話機、PHS端末を通じ、相互に必要な指示・連絡が可能な設計とする。

(1) 固定電話機

- a. 固定電話機は、電話交換機と有線で接続し、送受話する機器をいう。
- b. 固定電話機は、事務建屋及び監視盤室のほか、その他建屋内のセンター内各所に設置する。
- c. 固定電話機の電源は、電話交換機から給電する。

(2) PHS端末

- a. PHS端末は、PHS基地局と無線で接続し、送受話する機器をいう。
- b. PHS端末は、センター員に配備する。
- c. PHS端末の電源は、本体内蔵の蓄電池から給電する。
- d. PHS端末は、試験検査を実施する。(別添3参照)

(3) PHS基地局

- a. PHS基地局は、電話交換機と有線で接続し、PHS端末と無線で接続する中継通信機器をいう。
- b. PHS基地局は、事務建屋及び監視盤室のほか、その他建屋内外のセンター内各所に設置する。
- c. PHS基地局の電源は、電話交換機から給電する。

(4) 電話交換機

- a. 電話交換機は、固定電話機、PHS端末及びPHS基地局を制御する機器をいう。
- b. 電話交換機は事務建屋に設置する。
- c. 電話交換機の電源は、無停電電源装置から給電する。

2.2 警報装置

警報装置は、放送設備と接続し、事務建屋、監視盤室及び予備緊急時対策所から警報を発することが可能な設計とする。

3. センター外との通信連絡設備（第1図参照）

3.1 センター外通信連絡設備

センター外通信連絡設備には、事故時に迅速な通信連絡を行うことができるように、加入電話設備のほか衛星携帯電話を有し、センター外必要箇所と通信連絡が可能な設計とする。（別添1，別添2，別添4参照）

3.1.1 加入電話設備

加入電話設備は、電気通信事業者が提供する公衆交換電話網であって、公衆交換電話網に加入する施設外の任意の場所と相互に通信連絡が可能な設計とする。

(1) 加入電話設備

- a. 加入電話設備のセンター外への通信伝送装置は、事務建屋に設置する。
- b. 加入電話回線には、輻輳による使用制限を受けない電気通信事業者による災害時優先電話を設定しているものを有する。

3.1.2 衛星携帯電話

センター外通信連絡設備としての衛星携帯電話は、施設外の必要箇所と通信連絡が可能な設計とする。

(1) 衛星携帯電話

- a. 衛星携帯電話は、衛星と無線で接続し、送受話する機器をいう。
- b. 衛星携帯電話は、事務建屋他、監視盤室及び予備緊急時対策所に設置する。
- c. 衛星携帯電話の電源は、本体内蔵の蓄電池から給電する。
- d. 衛星携帯電話は、試験検査を実施する。（別添3参照）

4. 避難通路等（第3図，第4図，別添5参照）

使用済燃料貯蔵建屋には，退避用の照明として誘導灯，保安灯を設置する。また，単純明確及び永続性のある標識として誘導灯を設置して安全退避通路を確保する。

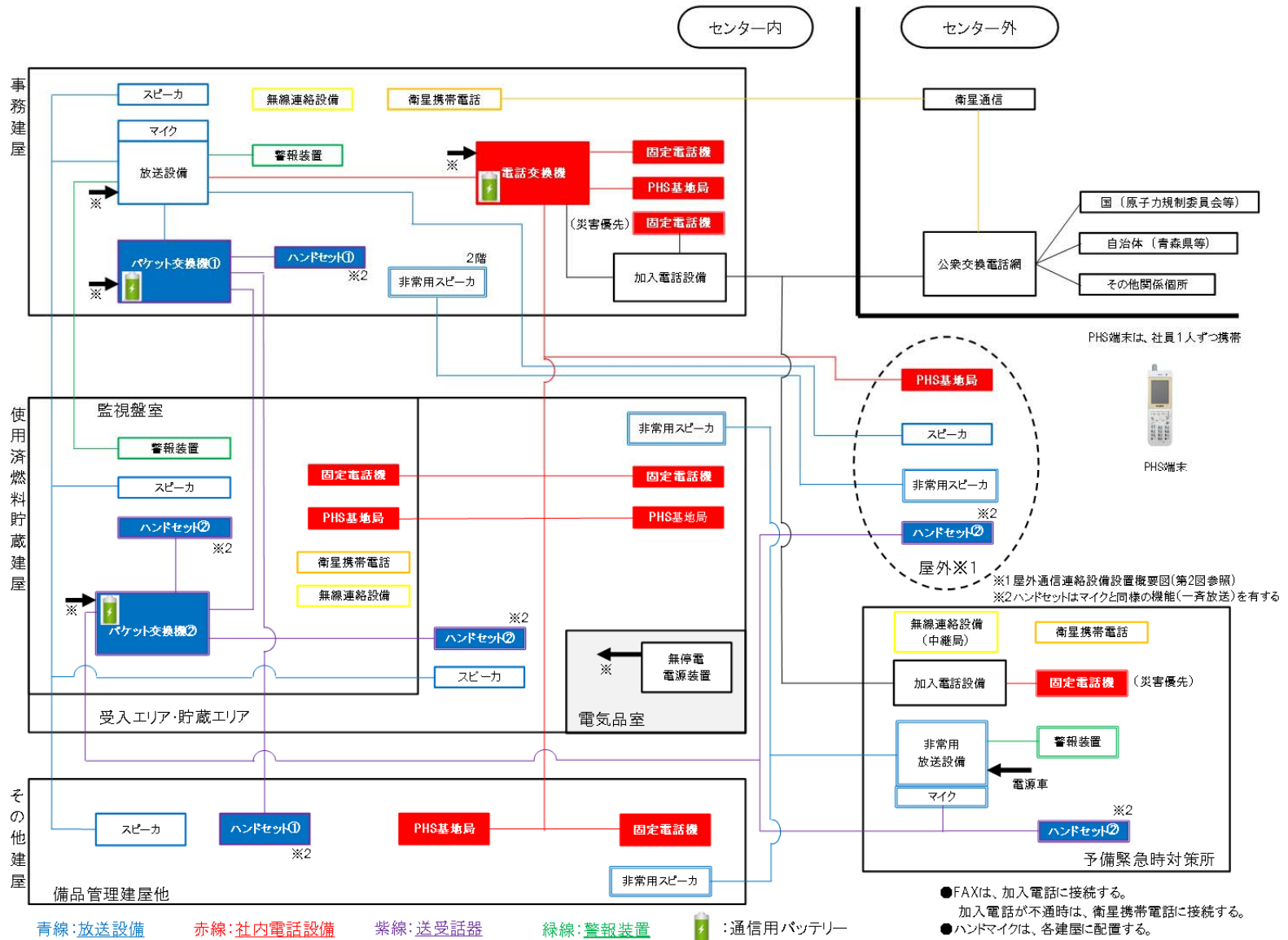
なお，第3図，第4図のとおり，貯蔵区域から退避する場合，天井に保安灯があるため，キャスク架台間から西側へ移動する通路を確認できる。次に，通路から西側を視野すると，通路延長線上に壁の保安灯が視認できる。理由は，人の目線より高く，且つ給気口下がり壁下端より低い位置に設置するため，避難上の視認性は十分である。

4.1 通路誘導灯と保安灯

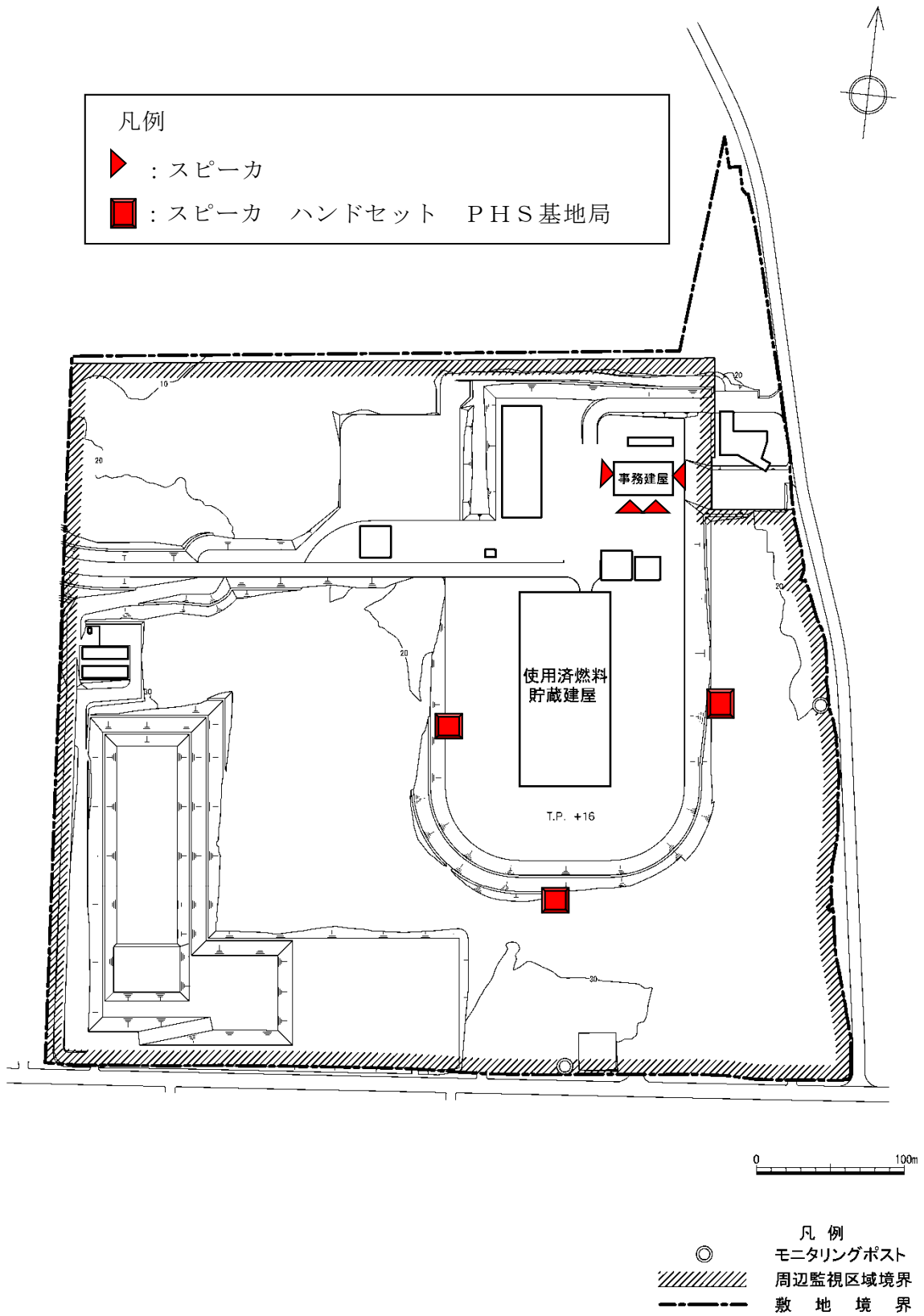
使用済燃料貯蔵建屋には，通常の照明用電源が喪失した場合においても，蓄電池から給電する通路誘導灯と共用無停電電源装置（自主設備）から給電する保安灯を設置する。

4.2 避難口誘導灯の設置と安全退避通路

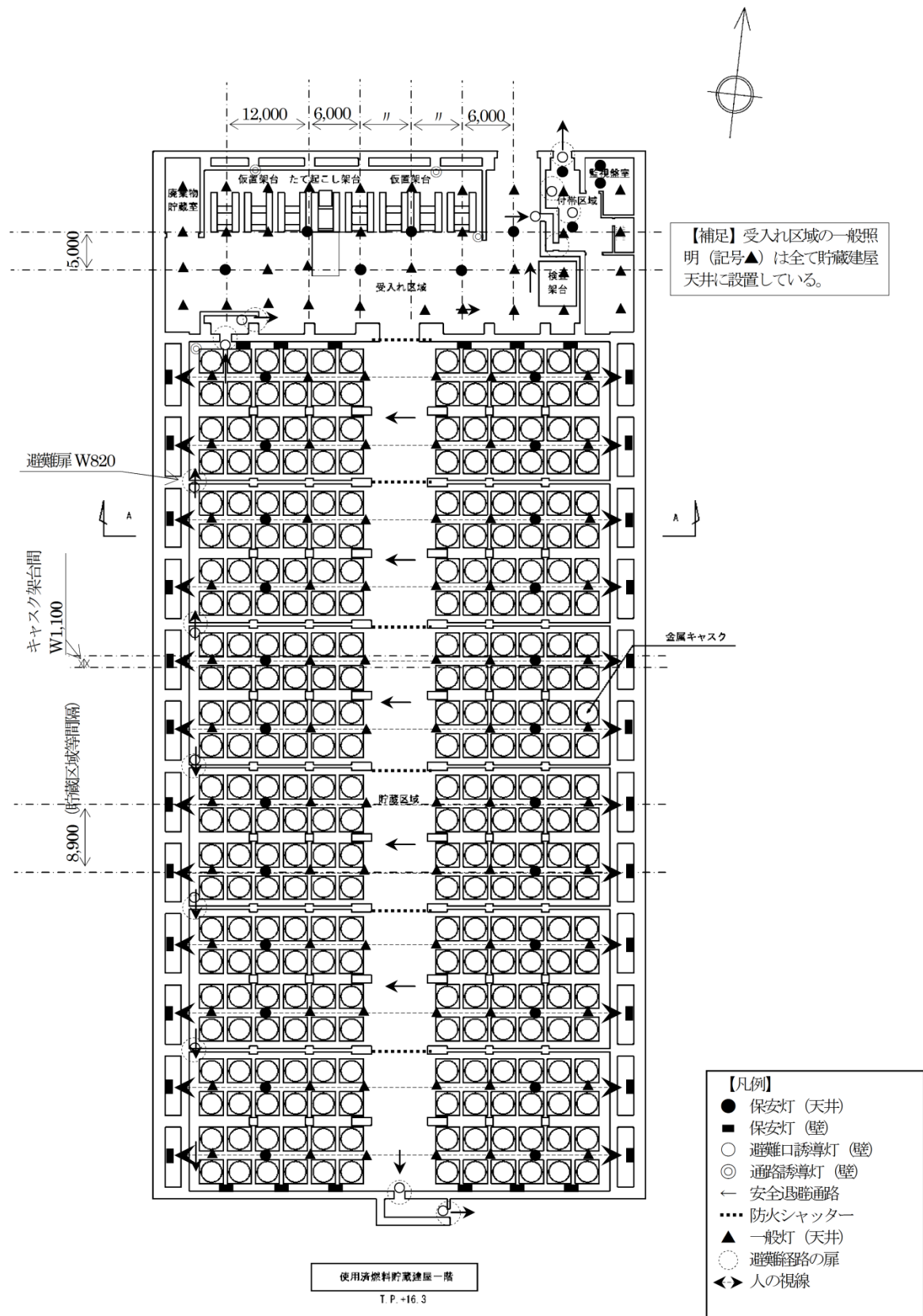
使用済燃料貯蔵建屋には，通常の電源が喪失した場合においても，蓄電池から給電する避難口誘導灯を設置し，安全退避通路を確保する。



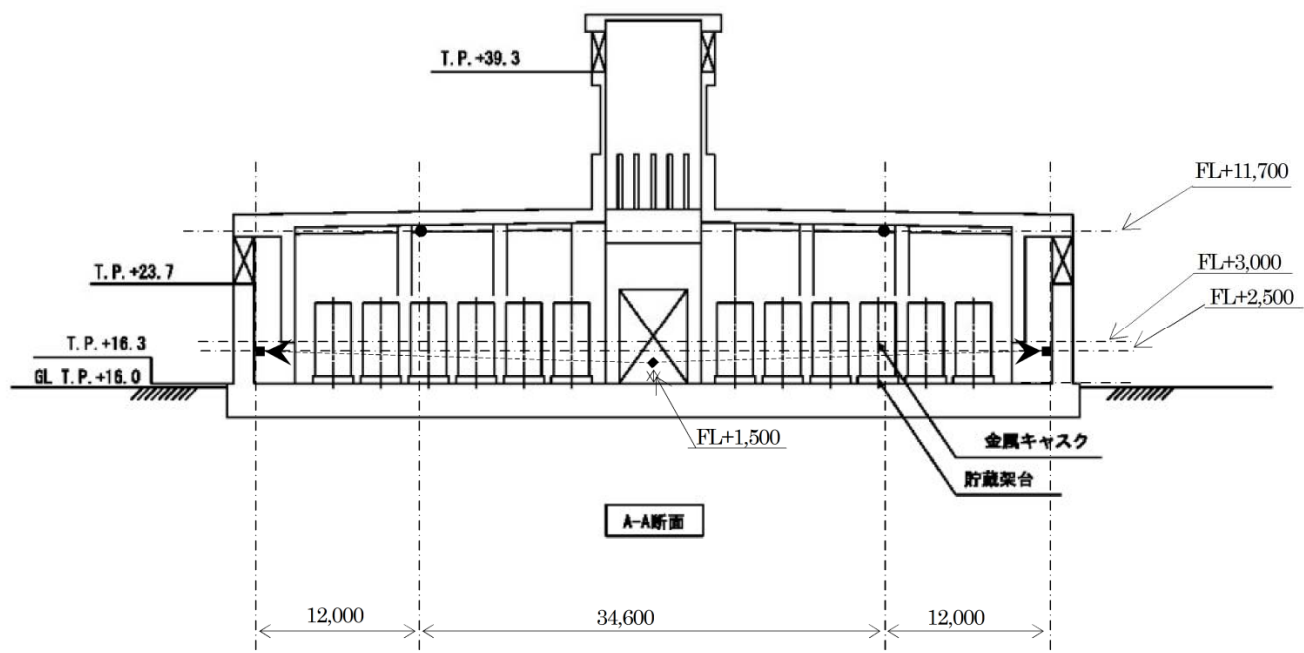
第1図 通信連絡設備概要



第 2 図 屋外通信連絡設備設置概要図



第3図 避難通路等設置位置図（キャスク有り）



第4図 避難通路等設置位置図 (A-A断面図) (キャスク有り)

通信連絡設備全般について

通信連絡設備は、センター内に連絡するために内線電話機能やページング機能（送受話器・社内電話設備を使用）や警報装置（サイレンを鳴動する装置）を設ける。また、衛星携帯電話及び無線連絡設備を設けて安全設計上想定する事故時に確実に連絡できるようにする。

また、センター外必要箇所との連絡については、加入電話設備（災害時優先電話等）及び加入電話設備接続の F A X 並びに衛星携帯電話及び衛星携帯電話接続の F A X というそれぞれ異なる手段による通信連絡ができる設計とし、安全設計上想定される事故発生時にも確実に連絡できるものとする。（別添 1-1 表，別添 1-3 表，別添 1-4 表参照）

これらの通信連絡設備の電源についても、商用電源の供給停止時に電源を給電できるよう無停電電源装置や通信用バッテリー、蓄電池等を備える。（別添 1-2 表参照）

別添1-1表 通信連絡設備を使用して連絡する事項と故障時の対応

	通信連絡設備を使用して連絡する想定事象	平常時（第1図）	安全設計上想定される事故発生時	
			電源喪失	設備故障
リサイクル燃料備蓄センター内	<ul style="list-style-type: none"> 地震・火災等が発生した場合 注意報，警報（台風・竜巻・風雪等）が発令された場合 金属キャスクの落下等，想定される事象等が発生した場合 所内に連絡しなければならない事項が発生した場合 	<ul style="list-style-type: none"> 送受信器 社内電話設備 警報装置 衛星携帯電話 無線連絡設備 	各設備の電源及び代替電源設備にて対応 （別添1-2表参照）	各設備の多様性（異なる設備）にて対応 （別添1-3表，別添1-4表参照）
リサイクル燃料備蓄センター外	<ul style="list-style-type: none"> 使用済燃料の貯蔵の事業に関する規則 第43条の十三 事故故障等の報告等が発生した場合 原子力災害対策特別措置法 第10条 原子力防災管理者の通報義務等が発生した場合 その他，所内に連絡しなければならない事項が発生した場合（保障措置・安全協定等） 	<ul style="list-style-type: none"> 加入電話設備 衛星携帯電話 		

別添 1-2 表 代替電源設備の供給可能時間を超えた場合の通信連絡設備の対応について

	主要設備		電源	代替電源設備	代替電源設備以上の停電時の対応
センター内の通信連絡設備	送受信器	ハンドセット	パケット交換機より供給	なし	衛星携帯電話・無線連絡設備・人によるハンドマイク等で代替
		パケット交換機	商用電源	無停電電源装置※ ¹ 通信用バッテリー※ ²	
		放送設備	商用電源	無停電電源装置※ ¹	
		スピーカ	放送設備より供給	なし	
	社内電話設備	固定電話機	電話交換機より供給	なし	
		電話交換機	商用電源	無停電電源装置※ ¹ 通信用バッテリー※ ²	
		PHS端末	蓄電池	蓄電池	
		PHS基地局	電話交換機より供給	なし	
	警報装置	警報装置	放送設備より供給	なし	
	衛星携帯電話	衛星携帯電話	蓄電池	蓄電池	
無線連絡設備	携帯型無線通話装置	蓄電池	蓄電池 乾電池※ ³	可搬型バッテリー，可搬型発電機等で充電または乾電池を交換することにより機能維持	
センター外の通信連絡設備	加入電話設備	加入電話	電気通信事業者の局舎より供給	なし	加入電話回線不通の場合は衛星携帯電話にて代替
	衛星携帯電話	衛星携帯電話	蓄電池	蓄電池	可搬型バッテリー，可搬型発電機等で充電することにより機能維持

※ 1 : 無停電電源装置により 8 時間通話可能。

※ 2 : 通信用バッテリーより， 8 時間通話可能。

※ 3 : 予備の乾電池を使用して， 3 日間の連続通話が可能。

別添1-3表 通信連絡手段と代替連絡手段

	設備名	通信連絡方法	使用機器	代替手段
センター内の通信連絡設備	送受話器	一斉放送(ページング)	放送設備, パケット交換, ハンドセット, スピーカ	<ul style="list-style-type: none"> ・故障の場合, 社内電話設備 ・人によるハンドマイク等による伝達
		内線電話	パケット交換機, ハンドセット	<ul style="list-style-type: none"> ・故障の場合, 社内電話設備 ・衛星携帯電話および無線連絡設備 ・人によるハンドマイク等による伝達
	社内電話設備	一斉放送(ページング)	放送設備, 電話交換機, 固定電話機, PHS端末, スピーカ	<ul style="list-style-type: none"> ・故障の場合, 送受話器 ・人によるハンドマイク等による伝達
		内線電話	電話交換機, 固定電話機, PHS端末	<ul style="list-style-type: none"> ・故障の場合, 送受話器 ・衛星携帯電話および無線連絡設備 ・人によるハンドマイク等による伝達
	警報装置	警報(サイレン)	放送設備, 警報装置, スピーカ	<ul style="list-style-type: none"> ・人によるハンドマイク等による伝達
	無線連絡設備	無線連絡	携帯型無線連絡設備	<ul style="list-style-type: none"> ・人によるハンドマイク等による伝達
センター外の通信連絡設備	加入電話設備	加入電話	メタル回線電話(災害時優先電話含む), 固定電話機	<ul style="list-style-type: none"> ・衛星携帯電話
		FAX	メタル回線電話(災害時優先電話含む), FAX	<ul style="list-style-type: none"> ・衛星携帯電話
		加入電話	電話交換機経由メタル回線電話, 固定電話機	<ul style="list-style-type: none"> ・衛星携帯電話
		FAX	電話交換機経由メタル回線電話, FAX	<ul style="list-style-type: none"> ・衛星携帯電話
	衛星携帯電話	衛星携帯電話	衛星携帯電話	<ul style="list-style-type: none"> ・加入電話設備
		FAX	衛星携帯電話, FAX	<ul style="list-style-type: none"> ・加入電話設備

別添1-4表 通信連絡設備の設置台数

	主要設備		通信回線	設置台数	設置場所	備考
センター内の通信連絡設備	送受話器	ハンドセット	有線	約 30 台	事務建屋他: 14 台 貯蔵建屋: 14 台 予備緊急時対策所: 2 台	
	社内電話設備	固定電話機	有線	約 50 台	事務建屋他: 43 台 貯蔵建屋: 5 台 予備緊急時対策所: 2 台	
		PHS端末	無線	約 100 台	社員 1 人ずつ及び協力会社に配備	
	警報装置	警報装置	有線	3 台	事務建屋他: 1 台 貯蔵建屋: 1 台 予備緊急時対策所: 1 台	
	衛星携帯電話	衛星携帯電話 ※1	無線	15 台	事務建屋他: 6 台 貯蔵建屋: 2 台 予備緊急時対策所: 7 台	事故時, 貯蔵建屋内監視盤室の通話は, 屋外アンテナにて監視盤室内で通話可能.
	無線連絡設備	携帯型無線連絡設備	無線	25 台	事務建屋他: 8 台 貯蔵建屋: 3 台 予備緊急時対策所: 14 台	
センター外の通信連絡設備	加入電話設備	加入電話	有線	15 台	事務建屋他: 11 台 貯蔵建屋: 2 台 予備緊急時対策所: 2 台	
		FAX	有線	2 台	事務建屋他: 8 台 予備緊急時対策所: 14 台	加入電話不通時は, 衛星携帯電話に接続
	衛星携帯電話	衛星携帯電話 ※1	無線	15 台	事務建屋他: 6 台 貯蔵建屋: 2 台 予備緊急時対策所: 7 台	事故時, 貯蔵建屋内監視盤室の通話は, 屋外アンテナにて監視盤室内で通話可能.
		FAX	無線	2 台	事務建屋他: 8 台 予備緊急時対策所: 14 台	

※1: センター内用とセンター外用で共用。

センター内外の連絡事象および連絡体制について

1. センター内連絡事象

センター内連絡事象として、以下を想定する。(別添 1-1 表参照)

- ・地震、火災等が発生した場合
- ・注意報、警報(台風、竜巻、風雪等)が発令された場合
- ・金属キャスクの落下等、想定される事象等が発生した場合
- ・所内に連絡しなければならない事項が発生した場合

上記事象が発生した場合、事象発見者(担当GM等)は連絡責任者に報告し、連絡責任者がセンター内連絡を行う。(別添 2-1 図参照)

役割は以下のとおり。

○事象発見者(担当GM等)は、以下の対応者等をいう。

(貯蔵GM等)

- ・監視員による監視・・・交替で 24 時間常駐し、貯蔵建屋内状況監視・パトロール・気象等の情報収集等を行うことにより異常を発見する。

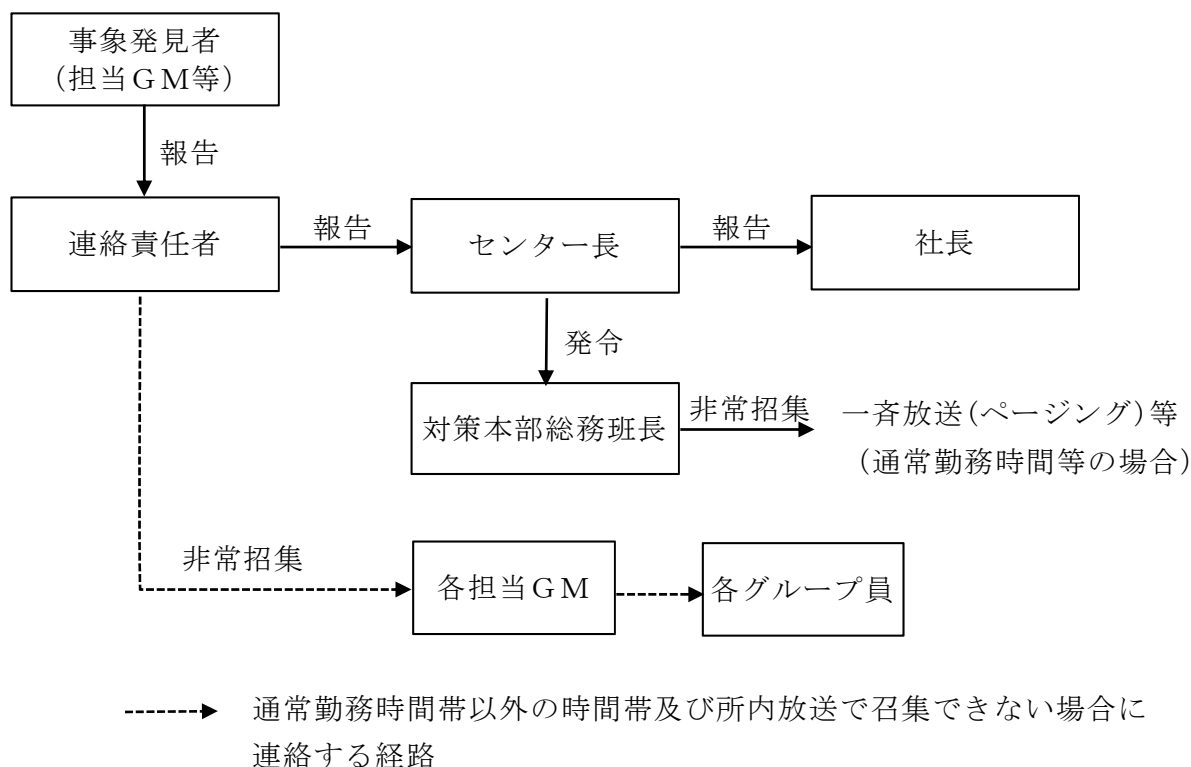
(防災安全GM等)

- ・警備員による監視・・・交替で 24 時間常駐し、火災報知器・侵入などの検知により異常を発見する。

○連絡責任者は、以下の対応者等をいう。

- ・技術安全部長等・・・平日日中の事故時等に対応する連絡責任者。
作業指示・センター内報告・センター外連絡を統括する。
- ・宿直者・・・休祝日および平日夜間に常駐し、事故時等に対応する連絡責任者。
センター内報告・センター外へ連絡を行うとともに統括する。

センター内の連絡手段は、常時携帯している P H S 端末(社内電話設備)または、ハンドセット(送受話器)を主に使用し連絡を行う。通信連絡設備に影響がある災害の場合は、多様性を確保している設備の中から使用可能な設備を使用し連絡を行うが、最終手段は人によるハンドマイク等で連絡を行う。



別添 2-1 図 事故発生時の社内連絡経路 (対策本部を設置した場合の例)

2. センター外連絡事象

センター外連絡事象は以下を想定する。(別添 1-1 表参照)

- ・使用済燃料の貯蔵の事業に関する規則
第 4 3 条の十三 事故故障等の報告等が発生した場合
- ・原子力災害対策特別措置法
第十条 原子力防災管理者の通報義務等が発生した場合
- ・その他、センター外に連絡しなければならない事項が発生した場合

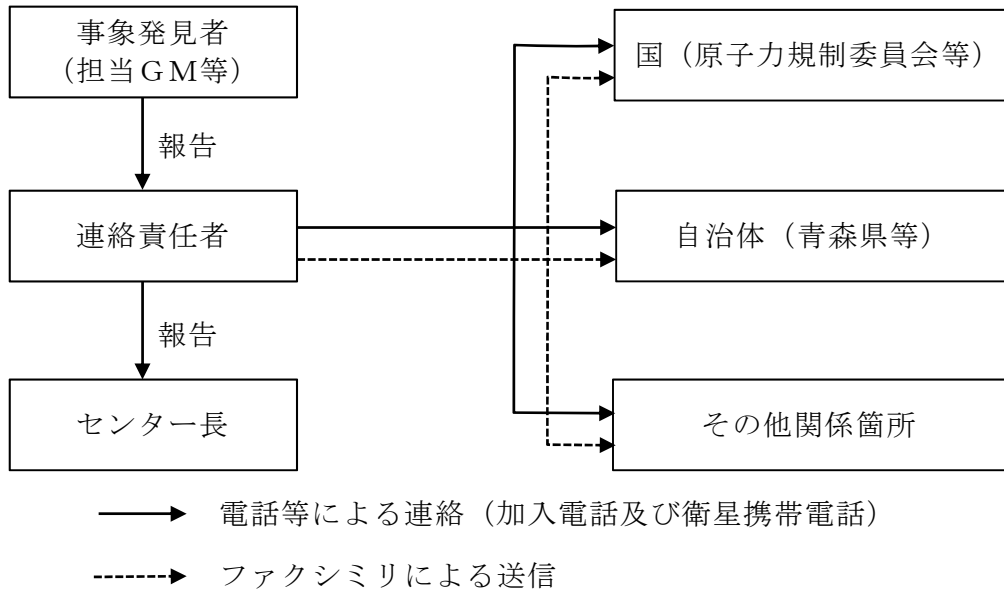
○上記事象が発生した場合の連絡手段

事故発生初期の連絡は、事象発見者(担当GM等)は連絡責任者に報告し、連絡責任者が関係機関へ連絡を行う。(別添 2-2 図参照)

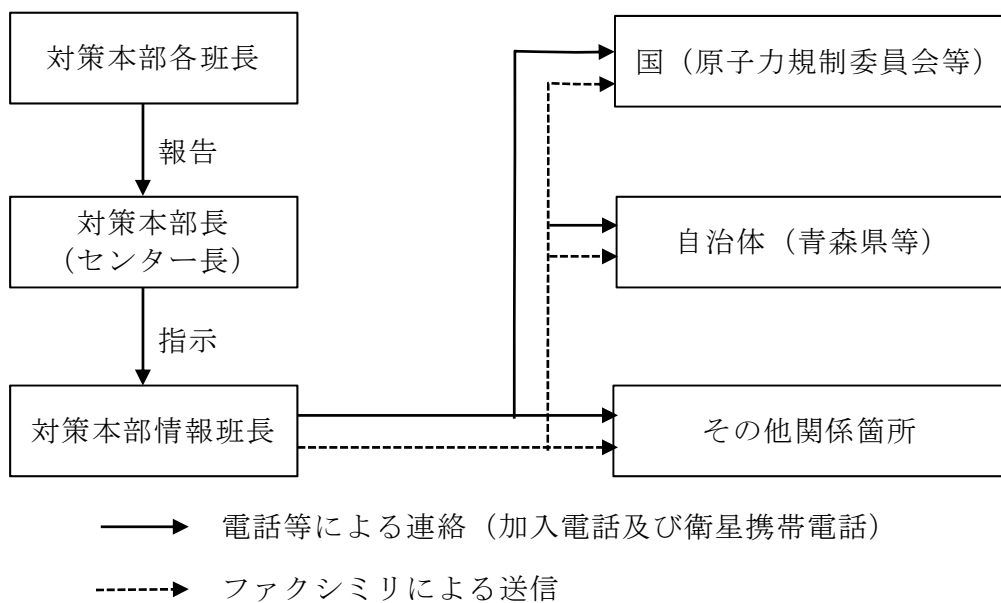
対策本部を設置した場合の連絡は、対策本部各班長が対策本部長へ事象

報告し、対策本部長が対策本部情報班長へ指示を出し関係機関へ連絡を行う。(別添 2-3 図参照)

センター外への連絡手段は、加入電話設備 (FAX 送信含む)、衛星携帯電話を利用し関係機関に連絡する。通信連絡設備に影響がある災害の場合は、多様性を確保している設備の中から使用可能な設備を使用し連絡を行う。



別添 2-2 図 事故発生初期の連絡経路



別添 2-3 図 事故発生時の連絡経路 (対策本部を設置した場合の例)

通信連絡設備の試験・検査について

通信連絡設備について、「試験検査」を実施する。

試験検査内容は、外観点検，通話通信確認，数量確認を1回／年の頻度で実施する。

(対象機器)

P H S 端末，衛星携帯電話，無線連絡設備

(試験検査項目)

- ・ 外観点検 : 損傷がないこと
- ・ 通話通信確認 : 発信が可能であること
 着信が可能であること
 通話可能であること
- ・ 数量確認 : 必要数あることを確認する

センター外必要箇所との連絡について

センター外必要箇所との連絡については、加入電話設備(災害時優先電話等)及び加入電話設備接続の F A X並びに衛星携帯電話及び衛星携帯電話接続の F A Xというそれぞれ異なる手段による通信連絡ができる設計としており、音声連絡及び F A X送信も行える設備を設けている。

F A Xにて伝送する内容・連絡先・使用設備は、以下とする。

- ・記載内容 : 件名, 発生日時, 状況等
- ・連絡先 : 国, 自治体, その他関係箇所
- ・使用設備 : 加入電話設備より F A X送付を行う。

加入電話設備不通の場合, 衛星携帯電話に接続し F A X送付(発信)を行う。

保安灯の照度や設置位置について

保安灯による床面設計照度は、受入エリア・貯蔵エリアとも 1 lx 以上である。床面設計照度根拠は建築基準法施行令第 126 条の 4（設置）に従うが、本建屋は居室がないため非常用の照明装置の設置義務はなく法令上床面設計照度は要求されない。しかしながら、停電時、安全に避難することを想定し建築基準法施行令第 126 条の 5（構造）の非常用の照明装置を使用した場合の床面設計照度 1 lx 以上に準拠している。

また、設置位置については、第 3 図、第 4 図のとおりで、平面的には天井の一般照明と保安灯を格子状に配列することを基本として設置しており、停電時、保安灯のみの点灯でも床面設計照度が 1 lx 以上となるよう保安灯の台数・配置を決定している。

避難通路の幅については、キャスク貯蔵架台間が 110 cm、避難経路扉最小有効幅は 82 cm である。その他の保安灯の間隔、高さは、第 3 図、第 4 図に記載のとおりである。