

リサイクル燃料備蓄センター設工認
設 1-補-005-01
2021 年 5 月 21 日

リサイクル燃料備蓄センター
設計及び工事の計画の変更認可申請書
(補足説明資料)

第 1 回設工認申請書

基本的安全機能の補足説明

(臨界の防止, 閉じ込めの機能, 除熱, 遮蔽)

令和 3 年 5 月

リサイクル燃料貯蔵株式会社

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

記載ケース1に基づく説明書（案）

目次

1. はじめに	1
2. 施設の設計方針	1
3. 基本設計方針の事業の変更許可との整合性	2
4. 分割第1回設工認申請書の基本的安全機能の 基本設計方針に関する説明方針	3

1. はじめに

本資料は、リサイクル燃料備蓄センター（以下「施設」という。）の分割第1回設工認申請書について、技術基準規則の条文に基づき施設共通として記載した基本的安全機能の基本設計方針について説明するものである。

2. 施設の設計方針

事業の変更許可に基づき、施設の基本的安全機能については、以下の通り設計する方針である。なお、以下については分割第1回設工認申請書の適合性確認対象設備である電気設備の設工認の設計上考慮する必要はないとともに、電気設備の設工認の設計が影響を与えるものではない。

(1) 使用済燃料の臨界防止（技術基準規則第五条）

使用済燃料貯蔵設備本体（以下「金属キャスク」という。）によって必要な機能を確保する（分割第1回設工認申請書「別添Ⅰ 1. 基本設計方針」の「1.1.1 使用済燃料の臨界防止」に記載の通り）。

(2) 閉じ込めの機能（同第十一条）

金属キャスクによって必要な機能を確保する（分割第1回設工認申請書「別添Ⅰ 1. 基本設計方針」の「1.1.2 閉じ込めの機能」に記載の通り）。

(3) 除熱（同第十六条）

金属キャスク及びその他使用済燃料貯蔵設備の附属施設のうち使用済燃料貯蔵建屋（以下「貯蔵建屋」という。）によって必要な機能を確保する（分割第1回設工認申請書「別添Ⅰ 1. 基本設計方針」の「1.1.3 除熱」に記載の通り）。

(4) 遮蔽（同第二十一条）

金属キャスク及び貯蔵建屋によって必要な機能を確保する（分割第1回

設工認申請書「別添Ⅰ 1. 基本設計方針」の「1.1.4 遮蔽」に記載の通り)。

3. 基本設計方針の事業の変更許可との整合性

施設の基本的安全機能のうち使用済燃料の臨界防止に関する基本設計方針については、分割第1回設工認申請書「添付書類 1-1 使用済燃料貯蔵施設の事業変更許可申請書「本文(四号)」との整合性に関する説明書」の「1. 使用済燃料貯蔵施設の位置、構造及び設備 ロ. 使用済燃料貯蔵施設の一般構造 (1) 使用済燃料の臨界防止に関する構造」に記載の通り、事業の変更許可と整合している。

施設の基本的安全機能のうち閉じ込めの機能に関する基本設計方針については、分割第1回設工認申請書「添付書類 1-1 使用済燃料貯蔵施設の事業変更許可申請書「本文(四号)」との整合性に関する説明書」の「1. 使用済燃料貯蔵施設の位置、構造及び設備 ロ. 使用済燃料貯蔵施設の一般構造 (2) 閉じ込めの機能」に記載の通り、事業の変更許可と整合している。

施設の基本的安全機能のうち除熱に関する基本設計方針については、分割第1回設工認申請書「添付書類 1-1 使用済燃料貯蔵施設の事業変更許可申請書「本文(四号)」との整合性に関する説明書」の「1. 使用済燃料貯蔵施設の位置、構造及び設備 ロ. 使用済燃料貯蔵施設の一般構造 (3) 除熱」に記載の通り、事業の変更許可と整合している。

施設の基本的安全機能のうち遮蔽に関する基本設計方針については、分割第1回設工認申請書「添付書類 1-1 使用済燃料貯蔵施設の事業変更許可申請書「本文(四号)」との整合性に関する説明書」の「1. 使用済燃料貯蔵施設の位置、構造及び設備 ロ. 使用済燃料貯蔵施設の一般構造 (4) 遮蔽」に記載の通り、事業の変更許可と整合している。

以上から、施設の基本的安全機能については事業の変更許可と整合している。

4. 分割第 1 回設工認申請書の基本的安全機能の基本設計方針に関する説明方針

基本的安全機能を有する金属キャスク及び貯蔵建屋は、分割第 2 回設工認申請書の適合性確認対象設備として記載するため、基本的安全機能の基本設計方針に関する説明については、第 2 回設工認申請書に添付する「基本的安全機能に関する説明書」に記載する。

以 上

記載ケース 2 に基づく記載（案）

目次

1. 目的	1
2. 施設の一般構造	1
3. 使用済燃料貯蔵設備本体の安全設計	1
3. 1 安全設計の概要	1
3. 2 構成部材の安全設計	2
3. 3 収納燃料について	2
4. 使用済燃料の臨界防止の基本設計方針について	4
4. 1 設計方針	4
4. 2 臨界防止設計	6
5. 閉じ込めの機能の基本設計方針について	11
5. 1 設計方針	11
5. 2 閉じ込め設計	13
5. 3 閉じ込め性能評価の考え方	15
6. 除熱の基本設計方針について	22
6. 1 除熱（貯蔵建屋）	22
6. 2 除熱（金属キャスク）	35
7. 遮蔽の基本設計方針について	50
7. 1 遮蔽（貯蔵建屋）	50
7. 2 遮蔽（金属キャスク）	58

事業の変更許可申請書（2020.8.14 付け RFS 発官 2 第 8 号）からの加筆箇所を下線で示す。

1. 目的

本資料は、使用済燃料貯蔵設備本体のうち基本的安全機能を有する金属キャスクは分割第 2 回申請の対象設備であることを踏まえ、分割第 1 回申請書に記載した基本的安全機能の基本設計方針が技術基準に適合する方針であることを説明するものである。

2. 施設の一般構造

使用済燃料貯蔵施設は、使用済燃料貯蔵設備本体、使用済燃料の受入施設、計測制御系統施設等からなり、各設備は、使用済燃料貯蔵建屋に収容する。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、使用済燃料貯蔵設備本体である金属キャスクに収納する。

使用済燃料貯蔵施設のうち、主要な施設である使用済燃料貯蔵建屋は、鉄筋コンクリート造（一部鉄骨鉄筋コンクリート造及び鉄骨造）とする。敷地の整地地面は、標高 16m とする。ただし、本標高は東京湾平均海面（T.P.）を基準としたものである。

使用済燃料貯蔵施設は、「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」（以下「原子炉等規制法」という。）等の関係法令の要求を満足するとともに、適切と認められる規格等に準拠するように設計する。

金属キャスクは、基本的安全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持つ容器とする。

3. 使用済燃料貯蔵設備本体の安全設計

3. 1 安全設計の概要

使用済燃料貯蔵設備本体は、技術基準規則第五条（臨界の防止）、第十一条（閉じ込めの機能）、第十六条（除熱）及び第二十一条（遮蔽）に適合する基本的安全機能を有する金属キャスクと、金属キャスクを床面に固定するための貯蔵架台で構成する。

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るため、その設計においては、設計貯蔵期間（50年間）に加えて事業所外運搬に係る期間等を考慮した十分な余裕を有する60年間の経年変化を考慮する。金属キャスクを用いることにより、使用済燃料貯蔵施設に搬入された後も使用済燃料集合体を別の容器に詰め替えることなく貯蔵を行う。

3. 2 構成部材の安全設計

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

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

3. 3 収納燃料について

貯蔵する使用済燃料の多様性を合理的に確保するため、使用済燃料貯蔵設備本体に収納する使用済燃料集合体を第3-1表の通り変更する。

第3-1表 収納燃料の変更前後比較

比較項目	変更前	変更後	備考
収納する燃料の種類	新型8×8ジルコニウムライナ燃料	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	
収納する使用済燃料 集合体の最高燃焼度	40,000 MWd/t	配置A：40,000 MWd/t 配置B：34,000 MWd/t 配置C：28,500 MWd/t	
原子炉から取り出して 金属キャスクに収納する までの期間	18年以上	配置A：18年以上 配置B：24年以上 配置C：24年以上	

配置A：新型8×8ジルコニウムライナ燃料のみを収納する場合，高燃焼度8×8燃料のみを収納する場合，又は
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

配置B：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

配置C：新型8×8燃料のみを収納する場合

4. 使用済燃料の臨界防止の基本設計方針について

4. 1 設計方針

使用済燃料貯蔵施設は、使用済燃料が臨界に達するおそれがないよう次の方針に基づき臨界防止設計を行う。

- (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、原子力発電所において使用済燃料集合体収納時に冠水すること等技術的に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（50 年間）に加えて事業所外運搬に係る期間等を考慮した十分な余裕を有する 60 年間における放射線照射影響，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定し，原子力発電所において使用済燃料集合体収納時に冠水すること等技術的に想定されるいかなる場合でも臨界防止上有意な変形を起こさない設計とする。金属キャスク内部のバスケットにより，適切な使用済燃料集合体間隔を保持し，使用済燃料集合体を相互に近接しないよう，使用済燃料集合体を所定の幾何学的配置に維持する構造とし，設計貯蔵期間（50 年間）に加えて事業所外運搬に係る期間等を考慮した十分な余裕を有する 60 年間を通じてバスケットの構造健全性が保たれる設計とする。
- (3) 使用済燃料集合体を収納した金属キャスクを，使用済燃料貯蔵建屋の貯蔵容量最大に収納した条件下で，金属キャスクの搬入から搬出までの全工程において，金属キャスク相互の中性子干渉を考慮し，金属キャスクの取扱時に金属キャスクが相互に近接すること等技術的に想定されるいかなる場合でも，中性子実効増倍率を 0.95 以下となるよう設計する。
- (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，バスケットの形状，バスケット格子内の使用済燃料集合体の配置等において適切な安全裕度を考慮する。

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。

金属キャスク内部が乾燥された状態では、バスケット及び使用済燃料集合体の変形による実効増倍率の変化はわずかであり、未臨界性評価に有意な影響を与えることはない。

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

使用済燃料集合体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) 使用済燃料集合体を金属キャスクに収納するに当たっては，臨界評価で考慮した因子についての条件又は範囲を逸脱しないよう，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を満足していることを，記録により確認する。

4. 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）に加えて事業所外運搬に係る期間等を考慮した十分な余裕を考慮した 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。
- 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。

(2) 臨界解析

金属キャスクの臨界解析フローを第 4-1 図に、臨界解析条件を第 4-1 表に、臨界解析条件の設定根拠を第 4-2 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、その値が解析コードの精度、解析の裕度を考慮して、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。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。

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集合体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。

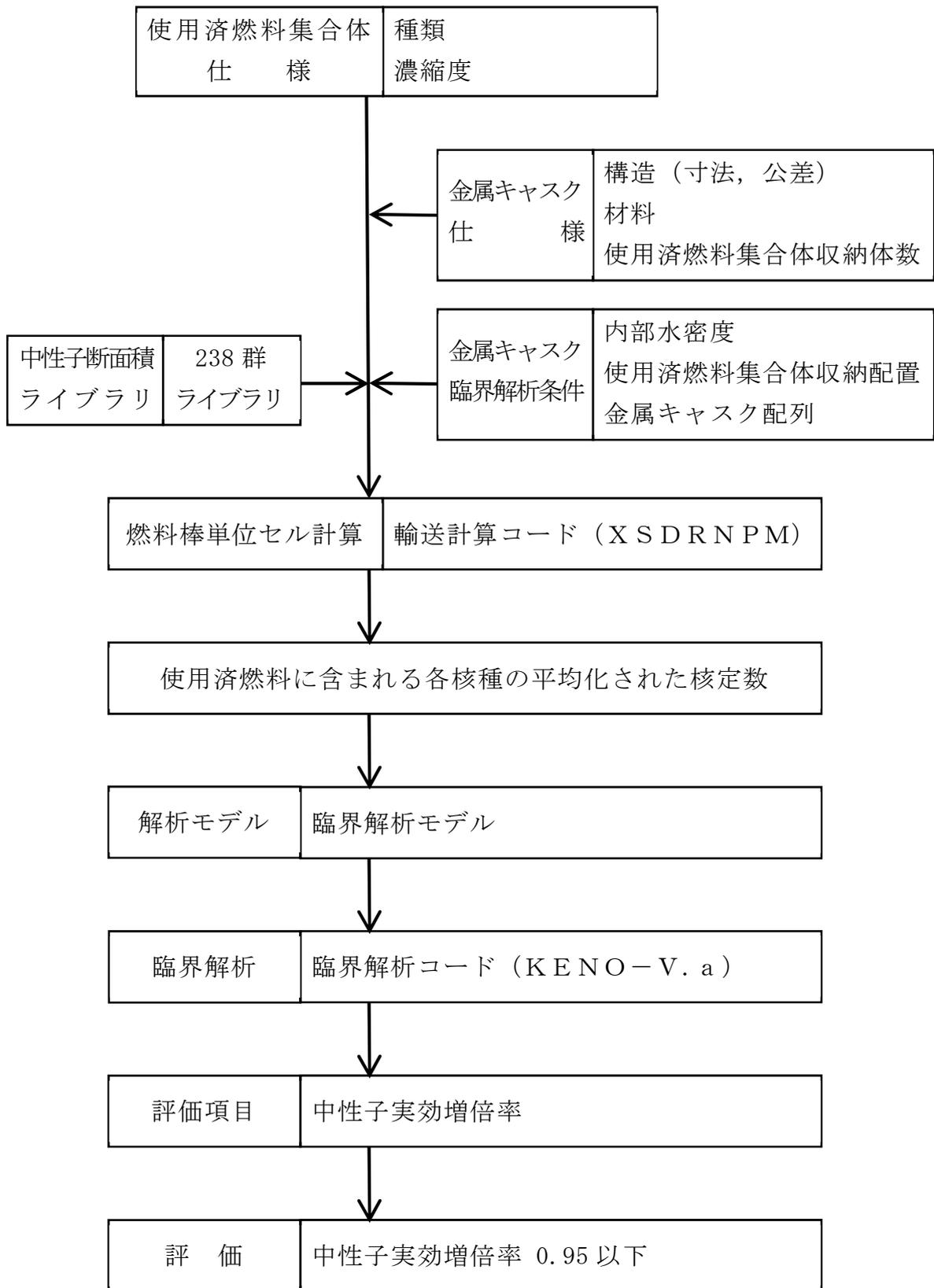
なお、貯蔵中のように金属キャスク内部が乾燥された状態では、バスケット及び使用済燃料集合体の変形による実効増倍率の変化は僅かであり、未臨界性評価に有意な影響を与えることはない。

第4-1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 視し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XSDRNP ・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4-2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
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)に加えて事業所外運搬に係る期間等を考慮した十分な余裕を有する60年間の ^{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 $10^{-6} \sim 10^{-5}$ 程度であり影響は無視できる(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	
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4-1図 金属キャスクの臨界解析フロー図

5. 閉じ込めの機能の基本設計方針について

5. 1 設計方針

使用済燃料貯蔵施設は、使用済燃料等を限定された区域に適切に閉じ込めるため、次の方針に基づき閉じ込め設計を行う。

- (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（50年間）に加えて事業所外運搬に係る期間等を考慮した十分な余裕を有する60年間を通じて使用済燃料集合体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集合体の検査等のために一次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。

なお、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は、除染に使用した水及び除染液の液体廃棄物並びにウエス等の固体廃棄物はドラム缶、ステンレス製の密封容器に入れた後、廃棄物貯蔵室に保管廃棄する。

- (5) 放射性廃棄物の廃棄施設は、廃棄物による汚染の拡大防止を考慮し、廃棄物貯蔵室を受入れ区域の独立した区画に設け、放射性廃棄物をドラム缶、ステンレス製等の密封容器に入れ、保管廃棄可能な設計とする。また、漏えいが生じたときの漏えい拡大防止を考慮し、廃棄物貯蔵室の出入口にはせきを設ける構造とするとともに、床及び腰壁は、廃水が浸透し難い材料で仕上げる設計とする。

なお、仮想的大規模津波による使用済燃料貯蔵建屋の損傷に備え、廃棄物貯蔵室内に保管廃棄しているドラム缶、ステンレス製等の密封容器が廃棄物貯蔵室外、敷地内及び敷地外への漂流を防止するためドラム缶、ステンレス製等の密封容器を固縛する漂流防止対策を講ずる。漂流防止対策として、水面に浮上するドラム缶は水面に浮上できる大きさのネットで覆い、また、浮上しないステンレス製等の密封容器は深水圧に耐える構造とする。

5. 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（50年間）に加えて事業所外運搬に係る期間等を考慮した十分な余裕を有する60年間を通じて負圧に維持する。
- 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（50年間）に加えて事業所外運搬に係る期間等を考慮した十分な余裕を有する60年間を通じて、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の概略を第5-1図に、シール部の概略を第5-2図に、金属ガスケット構造の概略を第5-3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、監視盤室及び事務建屋に警報を発するようにする。

蓋間圧力監視装置は、点検中及び不具合時においても蓋間圧力を測定できるよう二系統設ける。

蓋間圧力監視装置の構成イメージを第5-4図に示す。

(3) 閉じ込め機能の異常に対する措置

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。

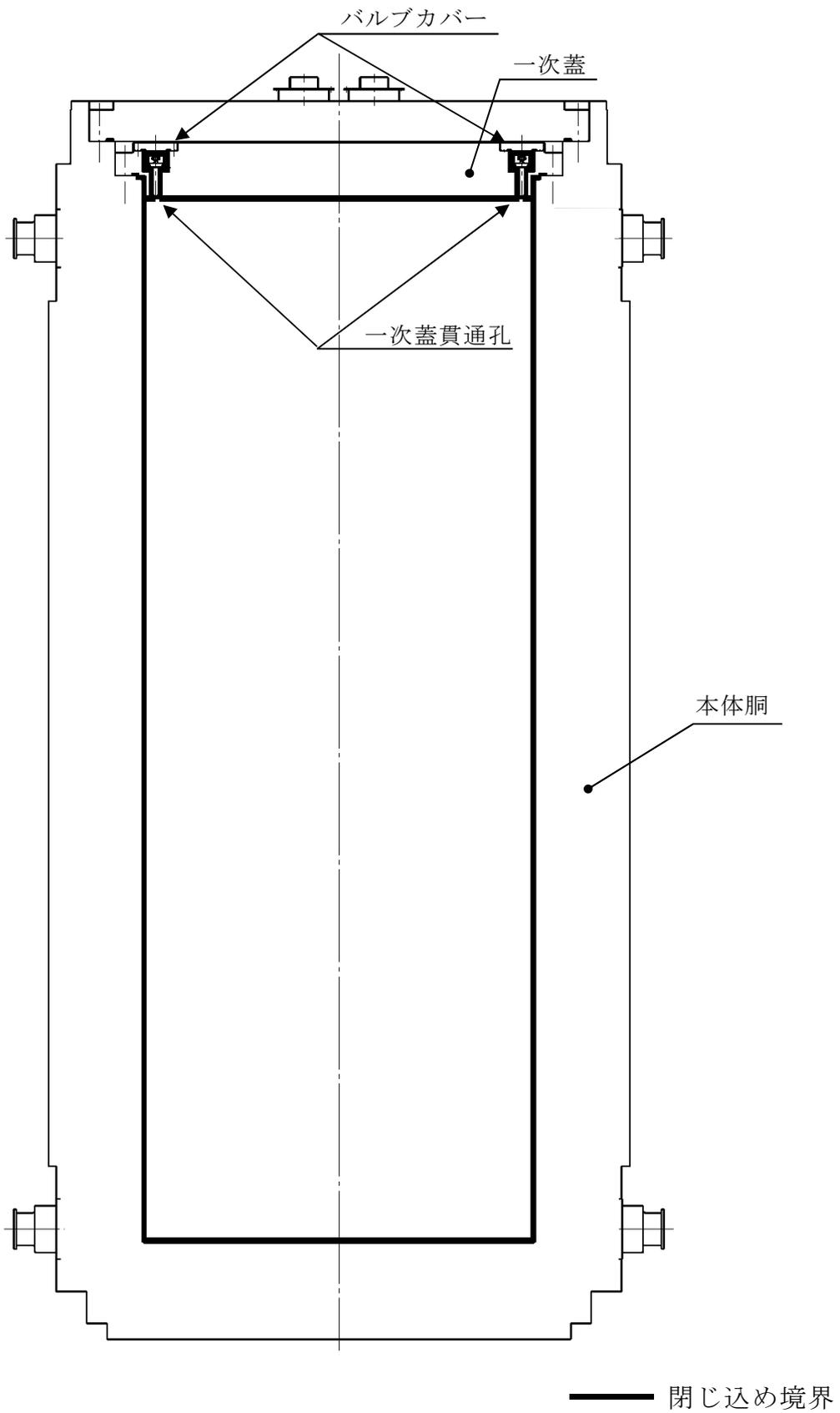
- a. 圧力監視系の点検を行い、圧力監視系からの漏えいが認められた場合には、漏えい箇所の特定制を行い、当該箇所を修復の上貯蔵を継続する。
- b. 圧力監視系に漏えいがなく、金属ガスケットの漏えいと考えられる場合には、二次蓋金属ガスケットの漏えい試験を行う。漏えい試験の結果、二次蓋に漏えいが認められた場合には、金属キャスク内部が負圧に維持されていることを間接的に確認し、さらに、蓋間圧力の低下の状況及び測定した二次蓋漏えい率より一次蓋の健全性を確認の上、二次蓋の金属ガスケットを交換し、閉じ込め機能を修復して貯蔵を継続する。
- c. 二次蓋金属ガスケットの漏えい試験の結果、二次蓋に漏えいが認められず、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。なお、搬出までの間は金属キャスクを適切に保管する。

閉じ込め機能の異常時の対応手順を第5-5図に示す。

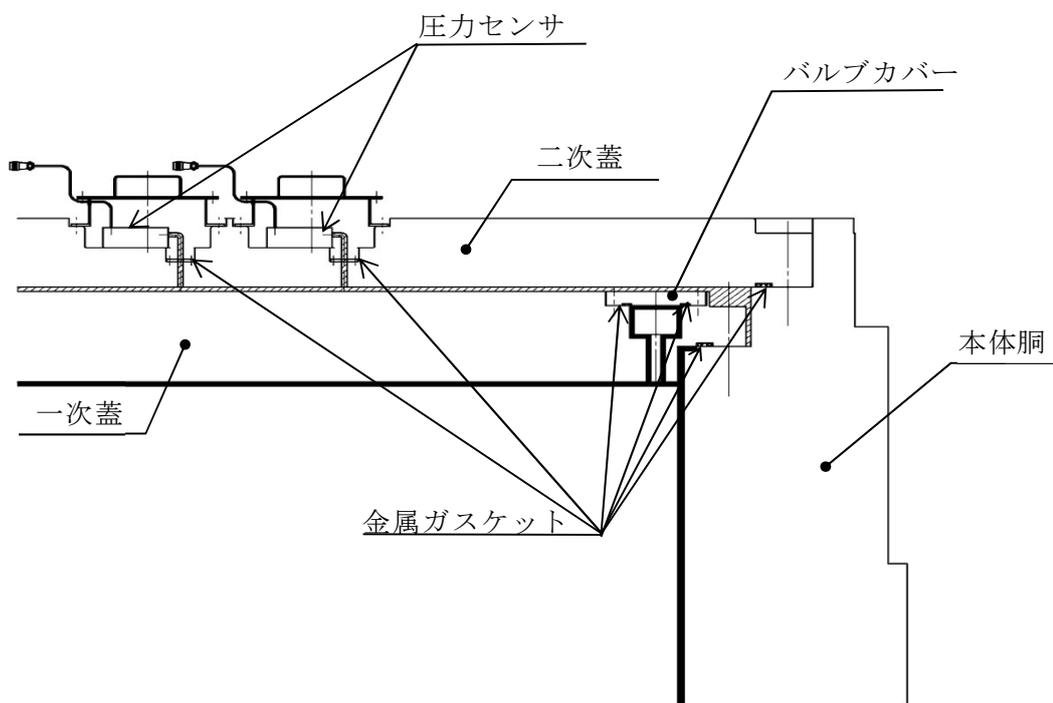
5. 3 閉じ込め性能評価の考え方

金属キャスクの閉じ込め評価フローを第5-6図に示す。金属キャスクの閉じ込め性能評価においては、以下の考え方にに基づき評価する。

- a. 閉じ込め性能評価では、設計貯蔵期間（50年間）に加えて事業所外運搬に係る期間等を考慮した十分な余裕を有する60年間（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 9.7×10^4 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。



第5-1図 金属キャスクの閉じ込め構造の概略



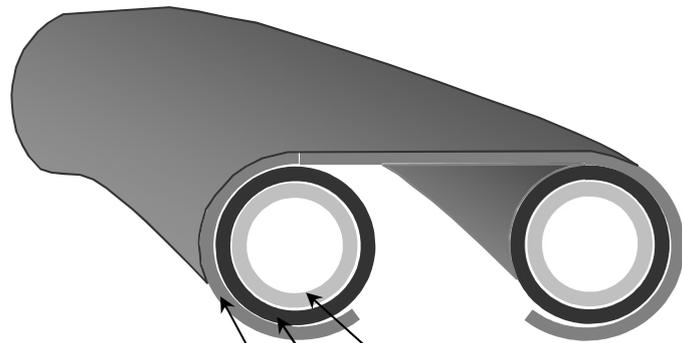
— 閉じ込め境界(負圧：0.08MPa(初期圧))

▨ 閉じ込め監視圧力境界(正圧：0.41MPa(初期圧))

第5-2図 金属キャスクのシール部の概略



断面イメージ

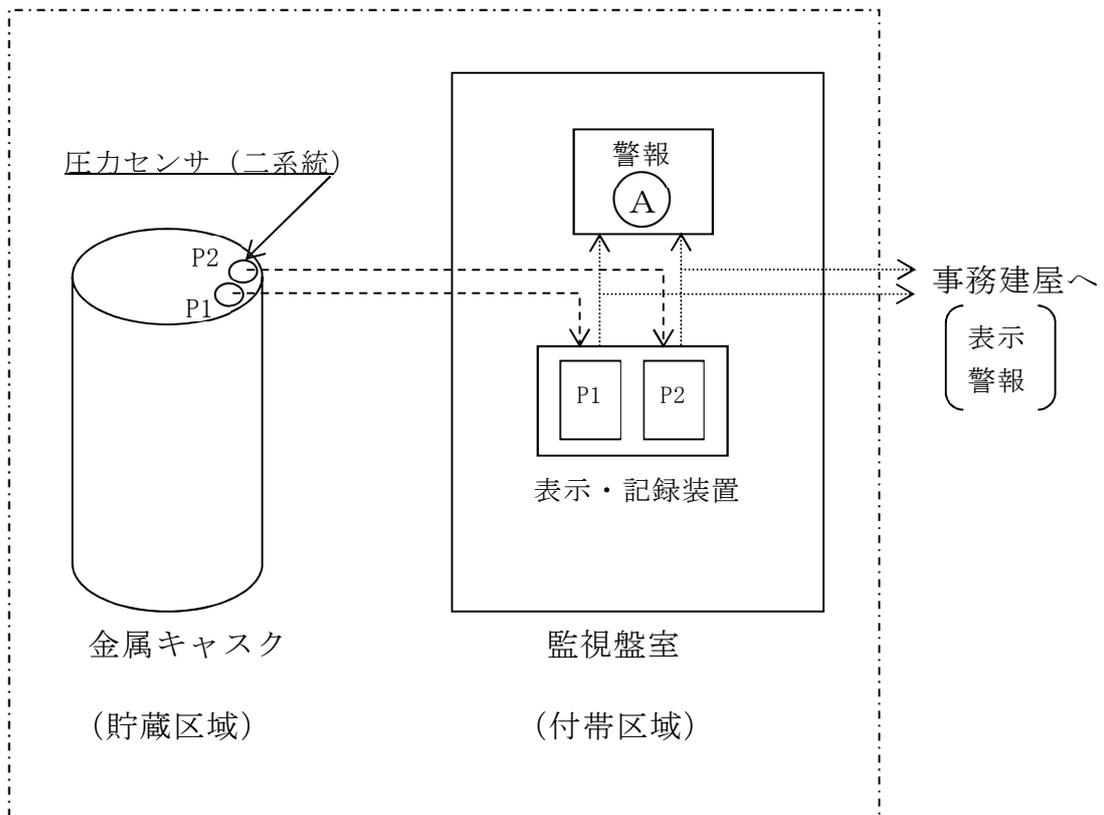


コイルスプリング（インコネル）

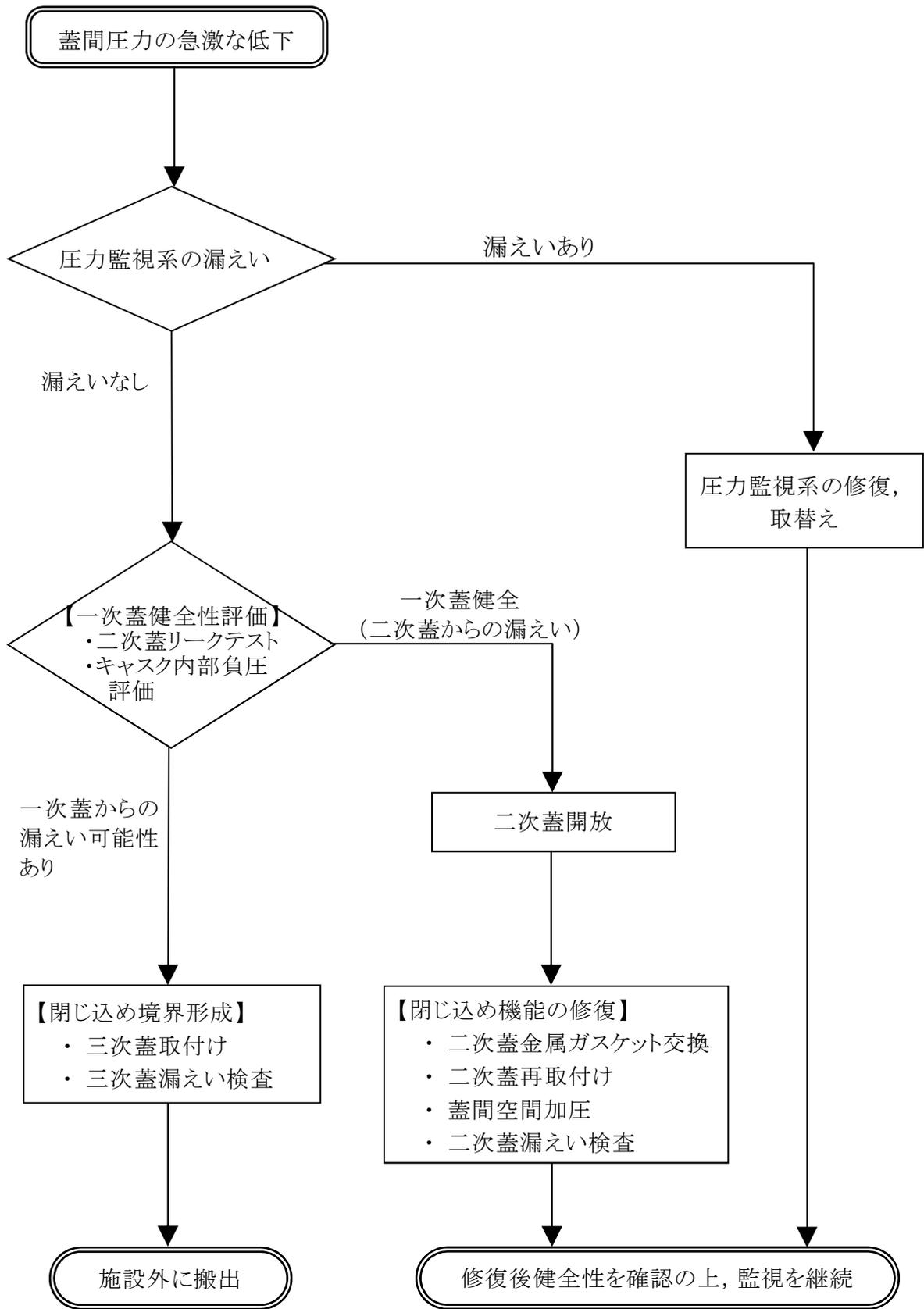
内被材（インコネル）

外被材（アルミニウム）

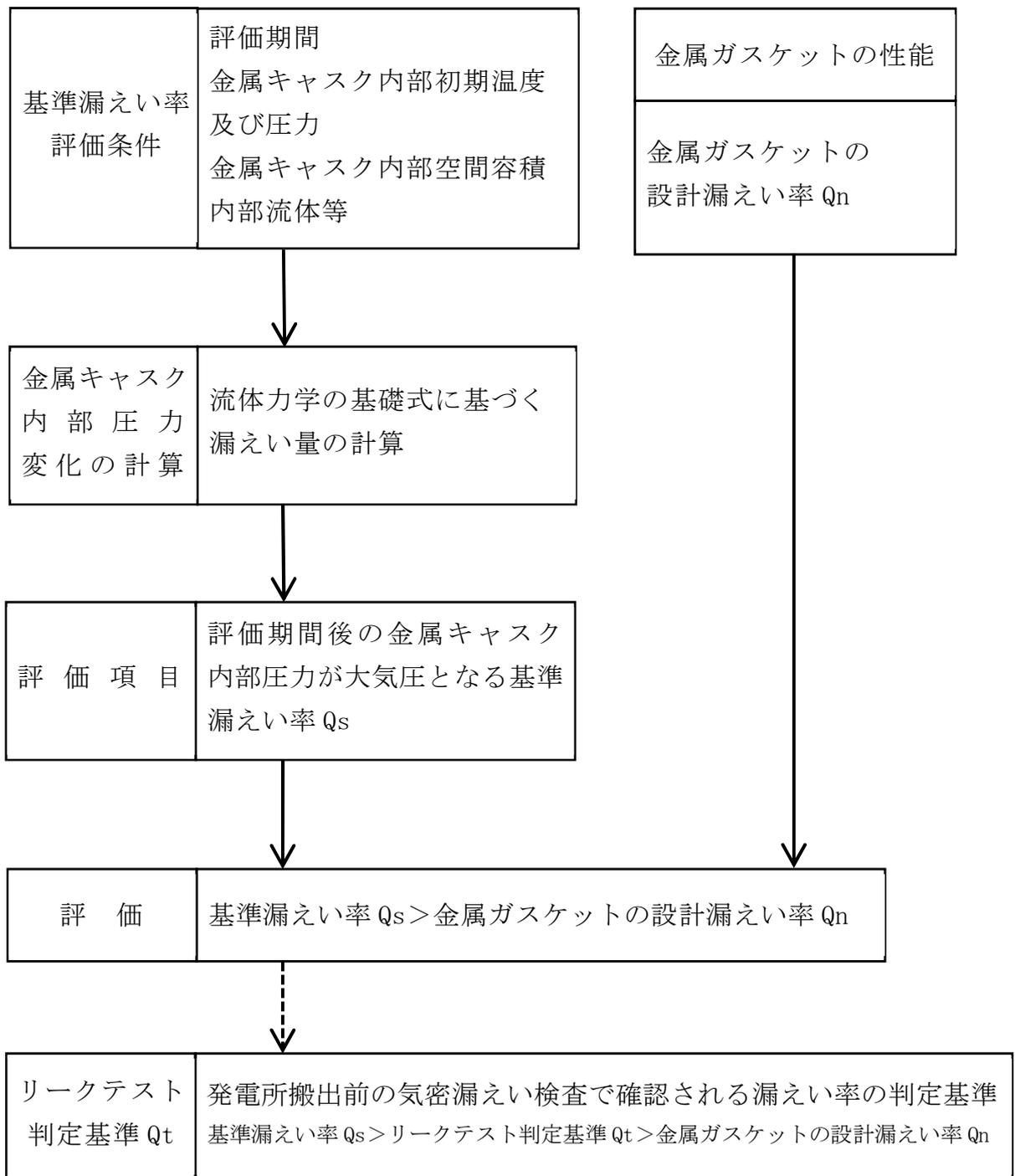
第5-3図 金属ガスケット構造の概略



第5-4図 蓋間圧力監視装置の構成イメージ



第 5 - 5 図 閉じ込め機能異常時の対応手順



第5-6図 金属キャスクの閉じ込め評価フロー

6. 除熱の基本設計方針について

6. 1 除熱（貯蔵建屋）

6. 1. 1 設計方針

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

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

6. 1. 2 除熱設計

(1) 除熱構造

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

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

耐火壁，防火扉及び防火シャッタにより 6 分割した区画) については，夏季に使用済燃料貯蔵建屋内で発生する結露対策として，給気口を閉止する運用とする。

(2) 金属キャスクの配置制限

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

なお，コンクリート温度の基準値は，日本機械学会「発電用原子力設備規格 コンクリート製原子炉格納容器規格」を準用し，コンクリート物性値に大きな影響を与えない温度として設定したものである。上記規格には，次のように示されている。

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

(3) 除熱解析

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

a. 伝熱形態

使用済燃料貯蔵建屋における伝熱形態は次の通りである。

- (a) 金属キャスク表面に伝えられた崩壊熱の殆どは，伝導及び対流により金属キャスク周囲の空気へ伝えられるが，一部は，輻射及び貯蔵架台を介しての伝導により使用済燃料貯蔵建屋へ伝えられる。

- (b) 使用済燃料貯蔵建屋へ伝わった熱は、躯体の伝導及び対流により外部（大気あるいは地中）に放出されるか、あるいは伝導及び対流により使用済燃料貯蔵建屋内空気に伝わり、自然換気により大気に放出される。

b. 評価方法

上記伝熱形態を踏まえ、使用済燃料貯蔵建屋の除熱評価においては、使用済燃料貯蔵建屋及び金属キャスクを一次元又は三次元で適切にモデル化し、一次元熱計算により使用済燃料貯蔵建屋内の雰囲気温度を、三次元熱流動解析コード F L U E N T 6.2 を用いて使用済燃料貯蔵建屋のコンクリート温度を評価する。

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

使用済燃料貯蔵建屋の除熱評価フローを第 6. 1 - 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使用済燃料貯蔵建屋内の雰囲気温度を算出する（第 6. 1 - 2 図参照）。

ここで、評価条件は以下のとおりとする。

- ・ 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 6. 1 - 3 図～第 6. 1 - 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. 1-6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FLUENT6.2を用いて、伝導、対流、輻射が共存する場の支配方程式を解き使用済燃料貯蔵建屋躯体温度を評価する。

ここで、評価条件を以下のとおりとする。

- ・金属キャスク12基(6基/列×2列)を含む、給気口から排気口までの領域とし、使用済燃料貯蔵建屋躯体として貯蔵部の側壁、垂れ壁、天井、柱、仕切り壁、基礎スラブ及び排気塔部まで、設置物として給気部設置給電盤、プルボックス類、ケーブルトレイ類等を模擬(第7図、第8図参照)。また、貯蔵区域の壁面(支柱、耐震壁、給気口側壁面)は、床面より高さ1.6mまで帯状に緑色のエポキシ塗装が施されており、床面およびそれ以外の部位はコンクリート表面である。
- ・使用済燃料貯蔵建屋外表面及び排気塔部の躯体の外表面は、コンクリート表面から外気への放熱が無いよう、断熱条件に設定(第6. 1-7図、第6. 1-8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6-1-9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
- ・使用済燃料貯蔵建屋基礎スラブ下端の温度は12℃(施設建設地点での地表-2.83mにおける2006年6月～9月の毎正時温度データの最大値)一定

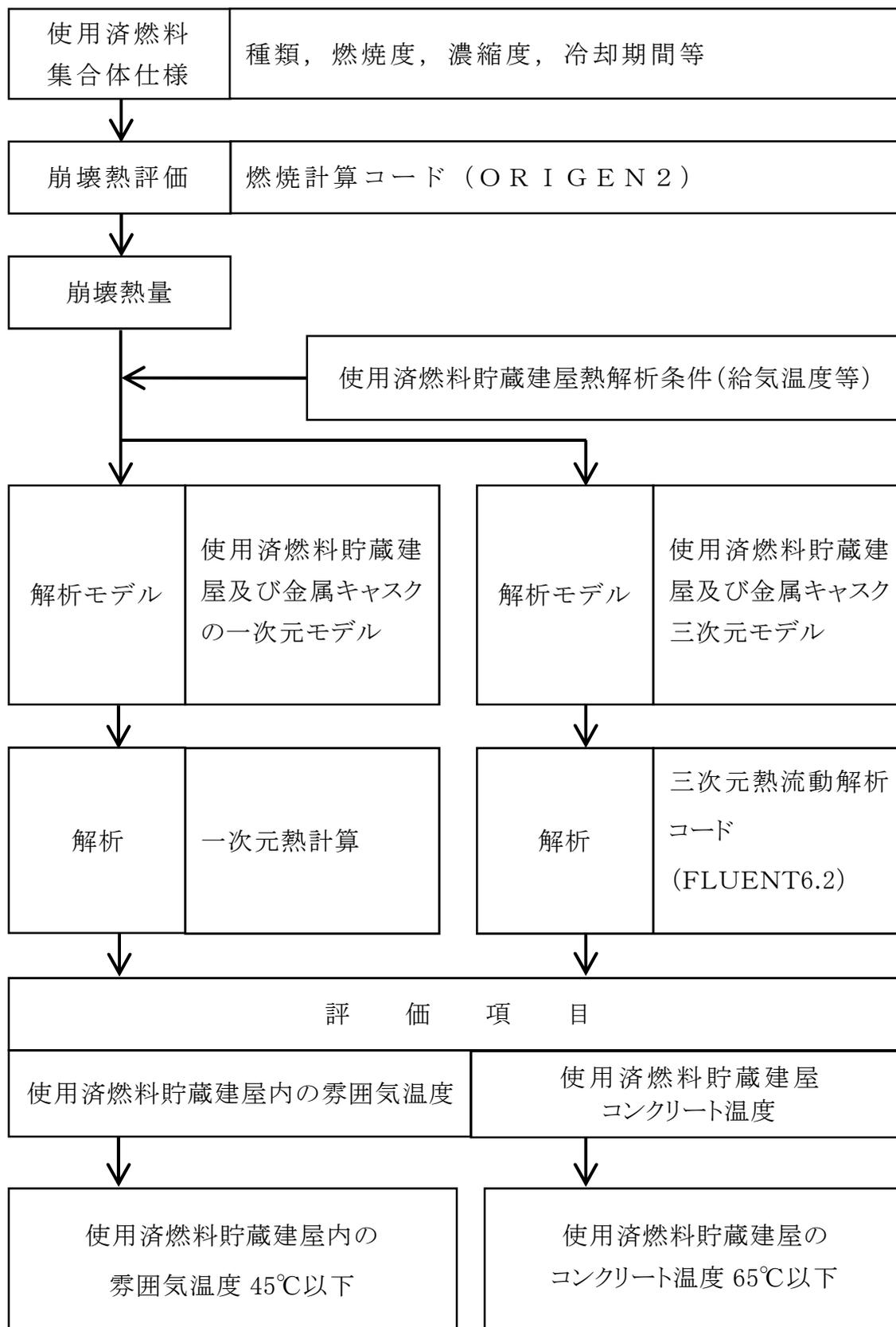
一次元熱計算と三次元熱流動解析における主な評価条件を第1表にまとめ示す。

参考文献

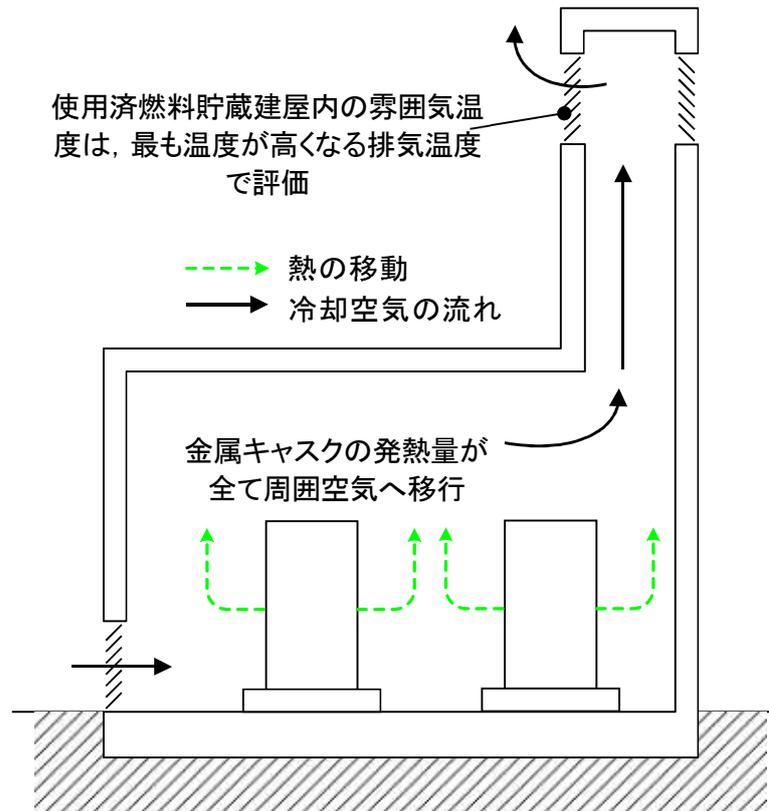
- 1) 社団法人 日本機械学会, 発電用原子力設備規格 コンクリート製原子炉格納容器規格 (JSME S NE1-2003), 2003年

第6. 1-1表 使用済燃料貯蔵建屋の除熱解析条件

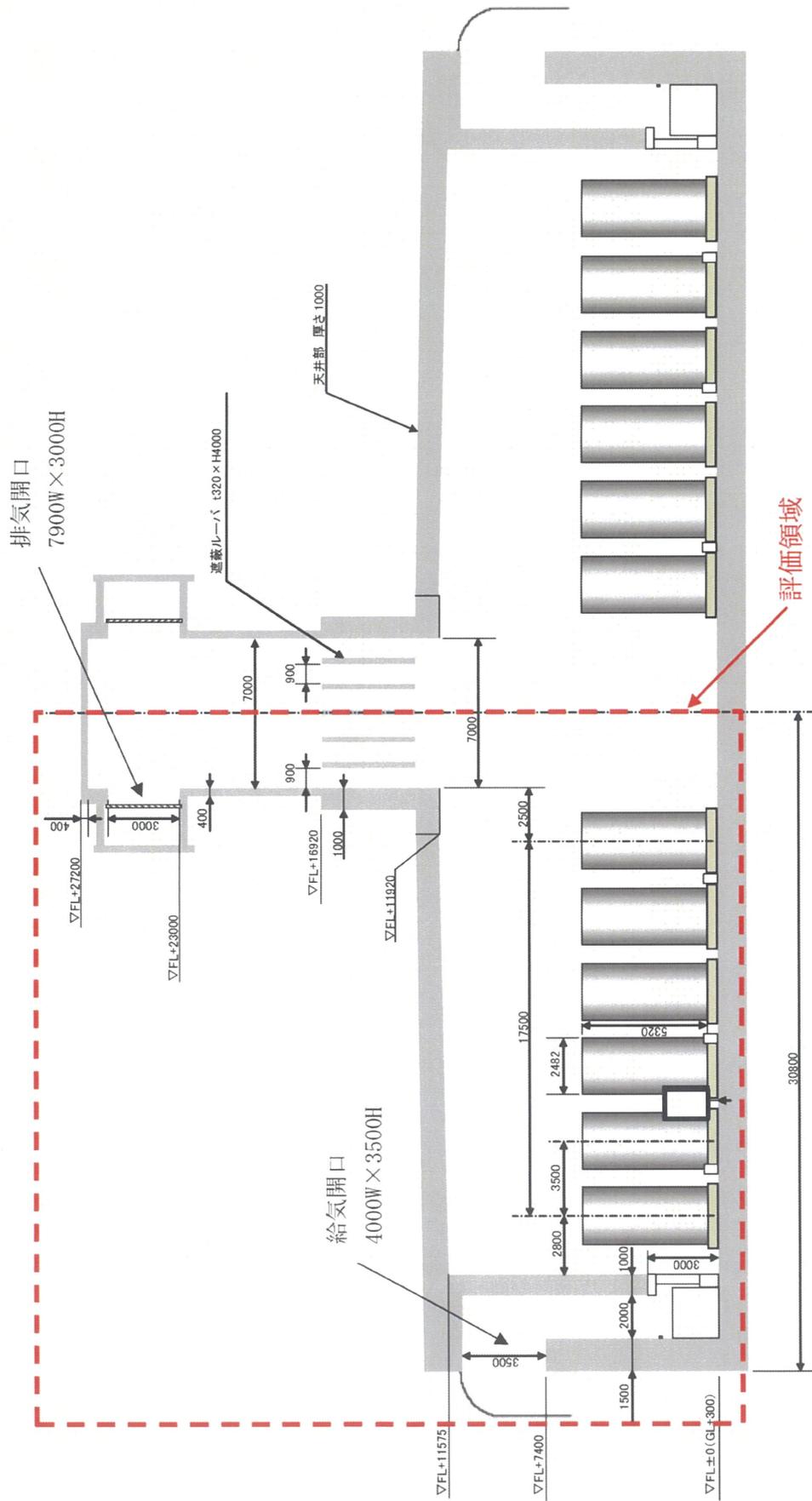
	一次元熱計算	三次元熱流動解析
基準温度	45℃（使用済燃料貯蔵建屋内の雰囲気温度）	65℃（使用済燃料貯蔵建屋のコンクリート温度）
評価領域	貯蔵区域における給気口から排気口まで（領域内には金属キャスク12基（1列あたり6基）を含む）	
伝熱形態	伝熱形態を区別せず，金属キャスク表面に伝えられた崩壊熱のすべてが周囲空気に移行するものと想定	金属キャスク表面に伝えられた崩壊熱が，伝導／対流／輻射により，使用済燃料貯蔵建屋コンクリートに伝えられるものと想定
設計給気温度	29.5℃（むつ特別地域気象観測所の2004年～2013年の夏季（6月～9月）毎正時温度データを用いて，高温側から1%の値（超過危険率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



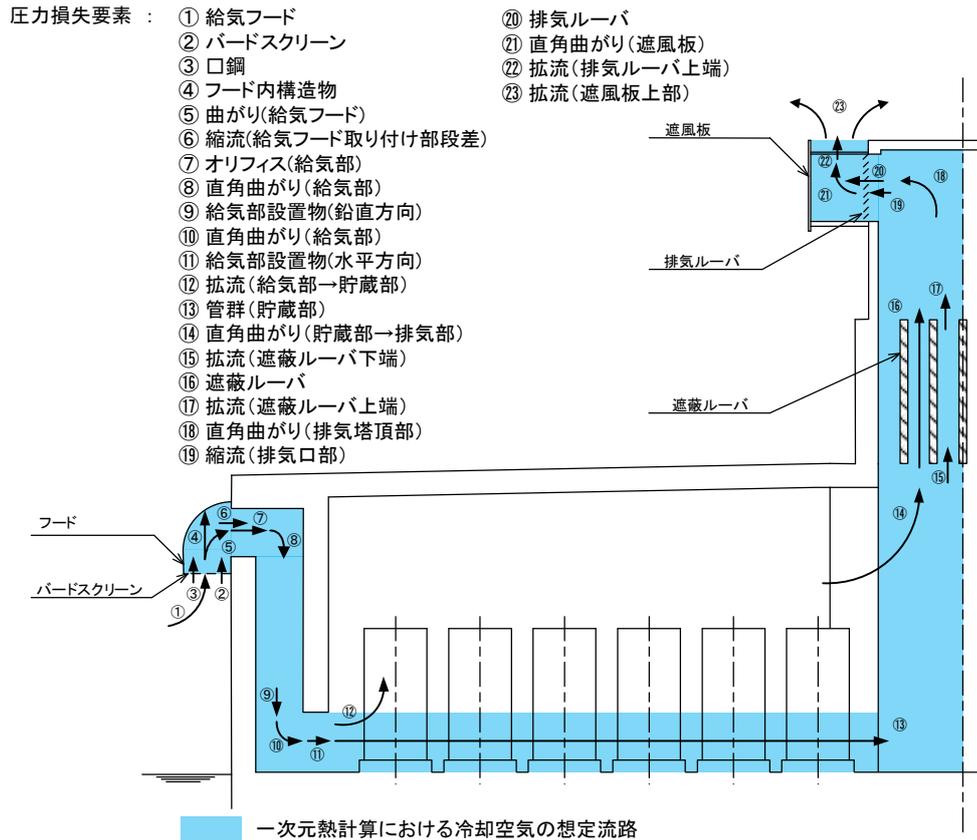
第6. 1 - 1 図 使用済燃料貯蔵建屋の除熱解析フロー図



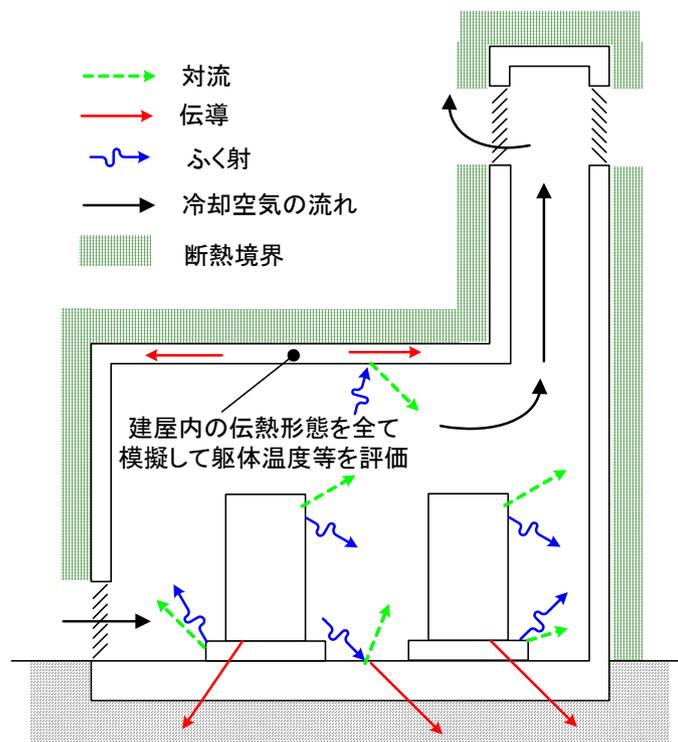
第 6 . 1 - 2 図 一次元熱計算における使用済燃料貯蔵建屋の伝熱形態



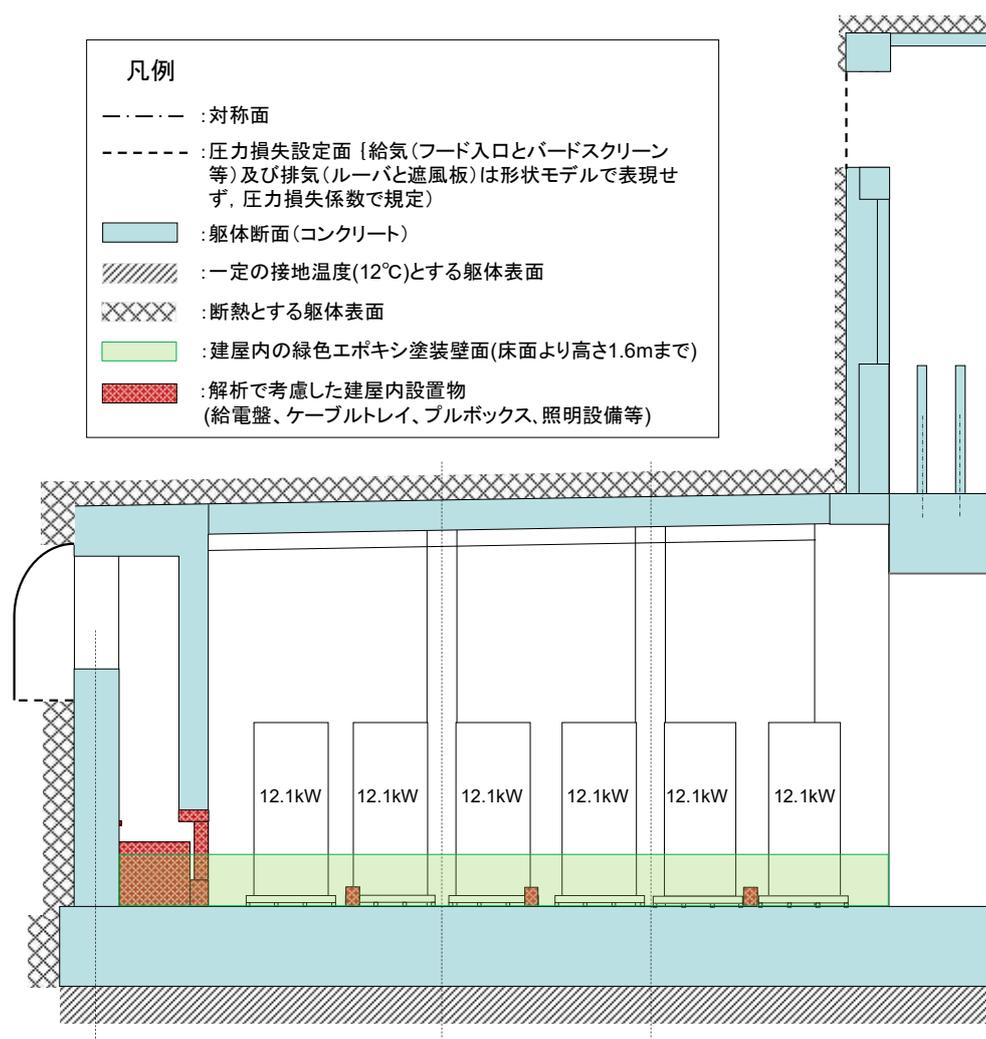
第 6 . 1 - 3 図 一次元熱計算における評価領域 (使用済燃料貯蔵建屋断面)



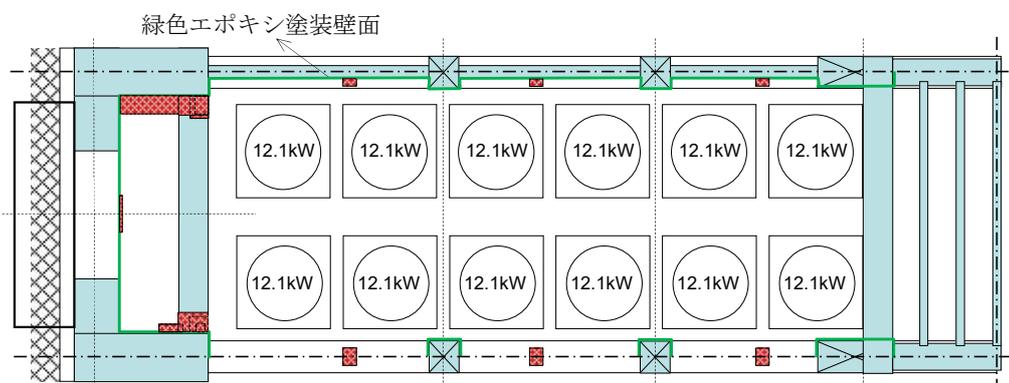
第 6. 1 - 5 図 一次元熱計算における流路設定及び考慮する圧力損失要素



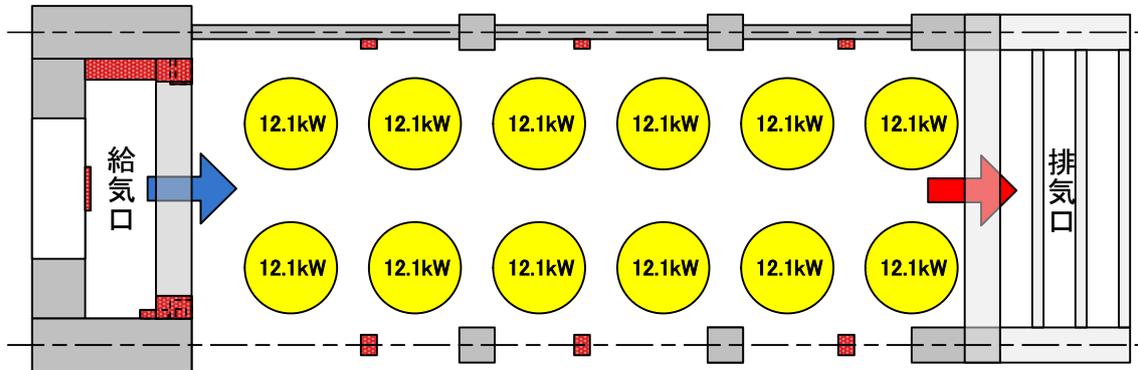
第 6. 1 - 6 図 使用済燃料貯蔵建屋の伝熱形態



第6. 1-7図 三次元熱流動解析の評価領域及び評価モデル
(使用済燃料貯蔵建屋断面)



第6. 1-8図 三次元熱流動解析の評価領域及び評価モデル
(使用済燃料貯蔵建屋平面)



第6. 1-9図 三次元熱流動解析で用いた金属キャスクの発熱量

6. 2 除熱（金属キャスク）

6. 2. 1 設計方針

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

- (1) 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、使用済燃料貯蔵建屋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（50 年間）に加えて事業所外運搬に係る期間等を考慮した十分な余裕を有する 60 年間を通じて使用済燃料集合体の健全性を維持する観点から、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（50 年間）に加えて事業所外運搬に係る期間等を考慮した十分な余裕を有する 60 年間を通じてその構成部材の健全性が保たれる温度範囲にあるよう設計する。
- (3) 使用済燃料集合体を金属キャスクに収納するに当たっては、除熱機能に関する評価で考慮した使用済燃料集合体の燃焼度に応じた配置の条件又は範囲を逸脱しないよう、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を満足していることを、記録により確認する。

6. 2. 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6.2-1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（50年間）に加えて事業所外運搬に係る期間等を考慮した十分な余裕を有する60年間を通じて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、収納配置の確認を求める。

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、燃料被覆管の制限温度

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6. 2-2表に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2A）には、「新型8×8ジルコニウムライナ燃料」と燃料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う。

- 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。

除熱解析フローを第6. 2-1図に、除熱解析時の保守性を第6. 2

－ 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輻射により金属キャスク表面に伝えられ、対流及び輻射により金属キャスク周囲の空気、使用済燃料貯蔵建屋に伝えられる。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 6－2－2 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 ORIGEN 2 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。

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、金属バスケット等の温度評価）（第 6. 2－3 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 6. 2－4 図参照）

また、金属キャスク周囲の境界条件を第 6. 2－4 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，使用済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6.2-5図参照）。

第6. 2-1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℃)よりも低いいため、クリープを考慮する必要はない。</p>

第6. 2-2表 BWR用大型キャスク（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2A		
収納する使用済燃料集合体	①新型8×8ジルコニウムライナ燃料， ②高燃焼度8×8燃料， ③新型8×8燃料		
収納配置	①のみ収納，②のみ収納， ①及び②を収納	①及び③を収納	③のみ収納
	<p>配置A</p> <p>■：平均燃焼度を超える使用済燃料集合体の収納範囲</p>	<p>配置B</p> <p>■：新型8×8燃料を収納しない範囲</p>	<p>配置C</p> <p>■：平均燃焼度を超える使用済燃料集合体の収納範囲</p>
収納物平均燃焼度	34,000MWd/t	34,000MWd/t	26,000MWd/t
収納物最高燃焼度	40,000MWd/t	34,000MWd/t	28,500MWd/t
冷却期間	18年以上	24年以上	24年以上
最大崩壊熱量	12.1kW / 基	10.9kW / 基	8.0kW / 基
収納配置と燃料仕様の選定の考え方	<p>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。</p> <p>新型8×8ジルコニウムライナ燃料及び高燃焼度8×8燃料の燃料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。</p>	<p>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。</p> <p>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。</p>	<p>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。</p>

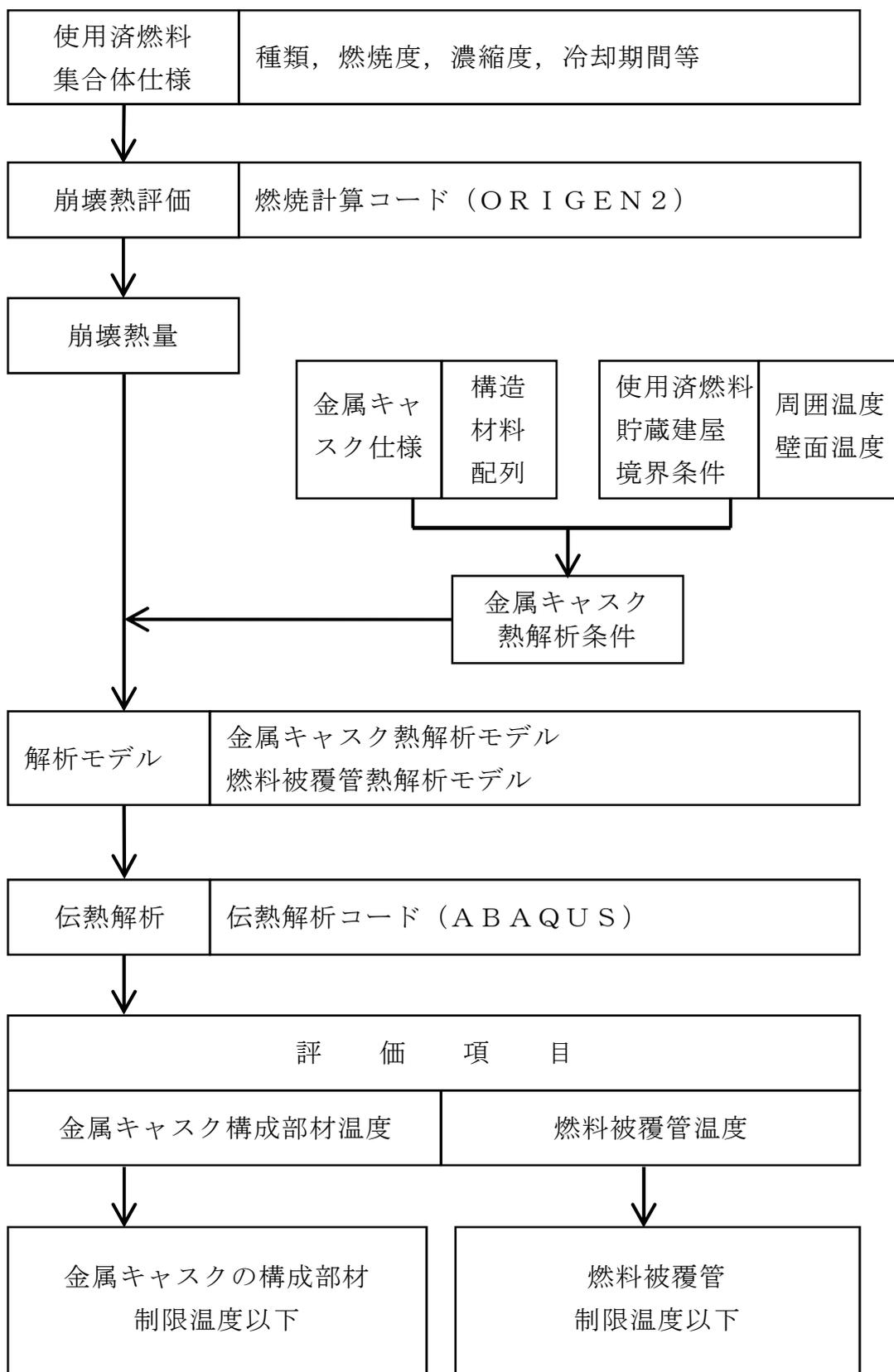
第6. 2-3表 除熱解析時の保守性

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する。	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。
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する。	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される。
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いない。	キャスク全体の温度を数度高く評価される。
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する。	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する。
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する。	バスケットの各構造部材の温度をより高く評価される。

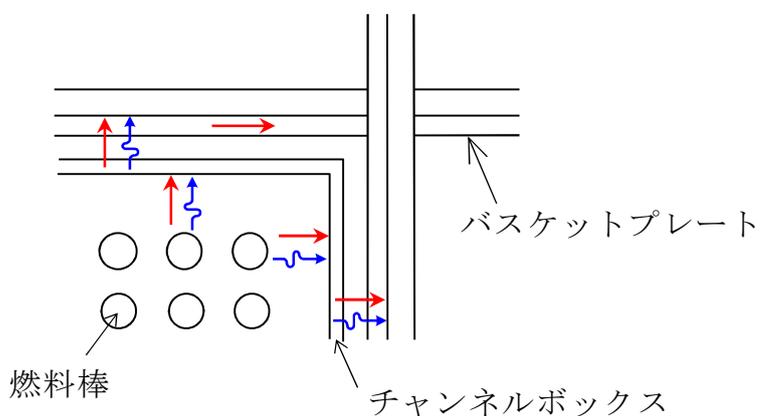
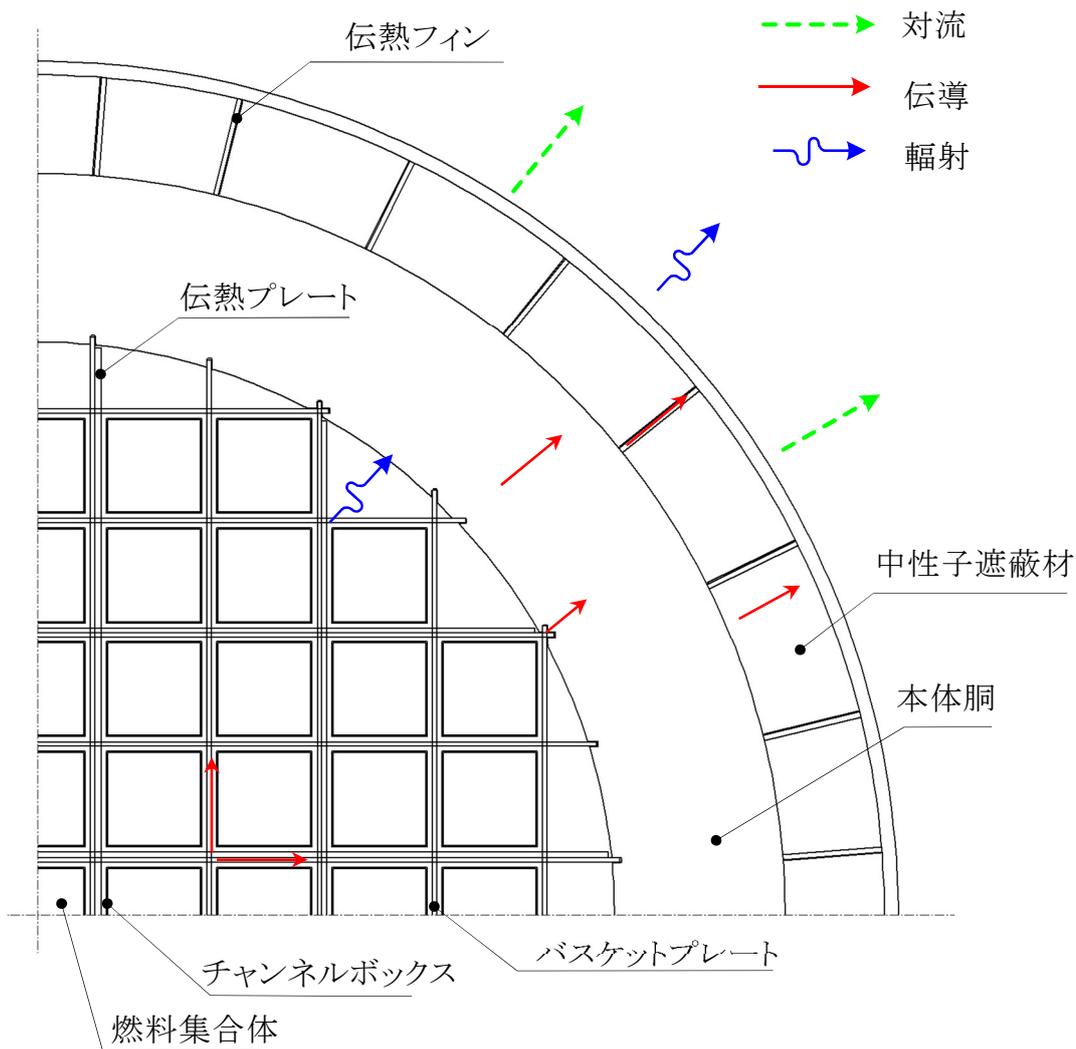
第6. 2-4表 金属キャスク周囲の境界条件

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）
		輻射 65℃（コンクリート強度を考慮した制限温度）
境界条件	天井及び床面輻射率	0.8（コンクリート表面塗装）
境界条件	キャスク表面輻射率	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

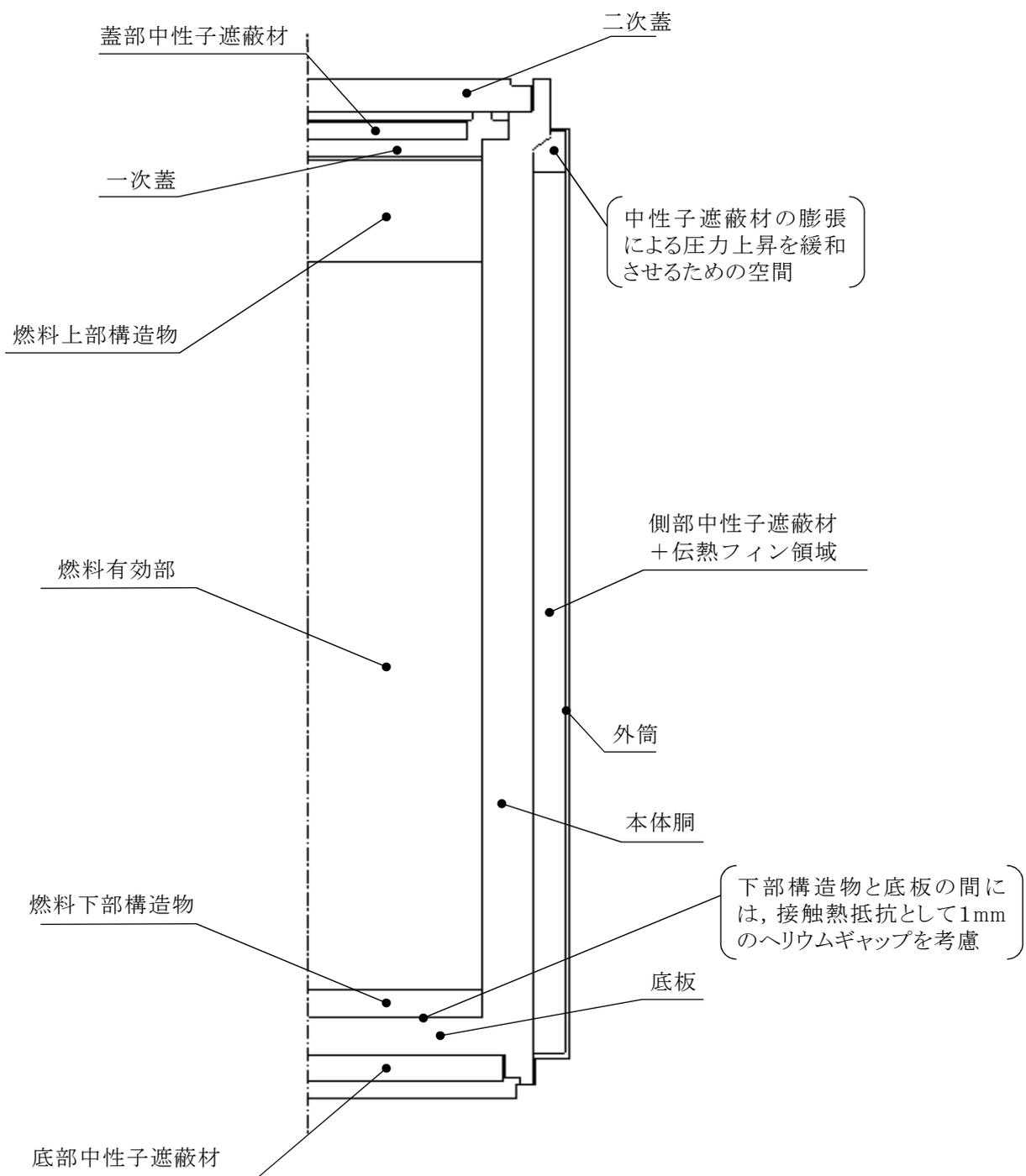
※ h : 熱伝達率 (W/m²/K), λ : 熱伝導率 (W/m/K), D : 平板の幅 (m), g : 重力加速度 (m/s²),
β : 体積膨張係数 (1/K), ν : 動粘性係数 (m²/s), Pr : プラントル数 (-),
Δt : 温度差 (K)



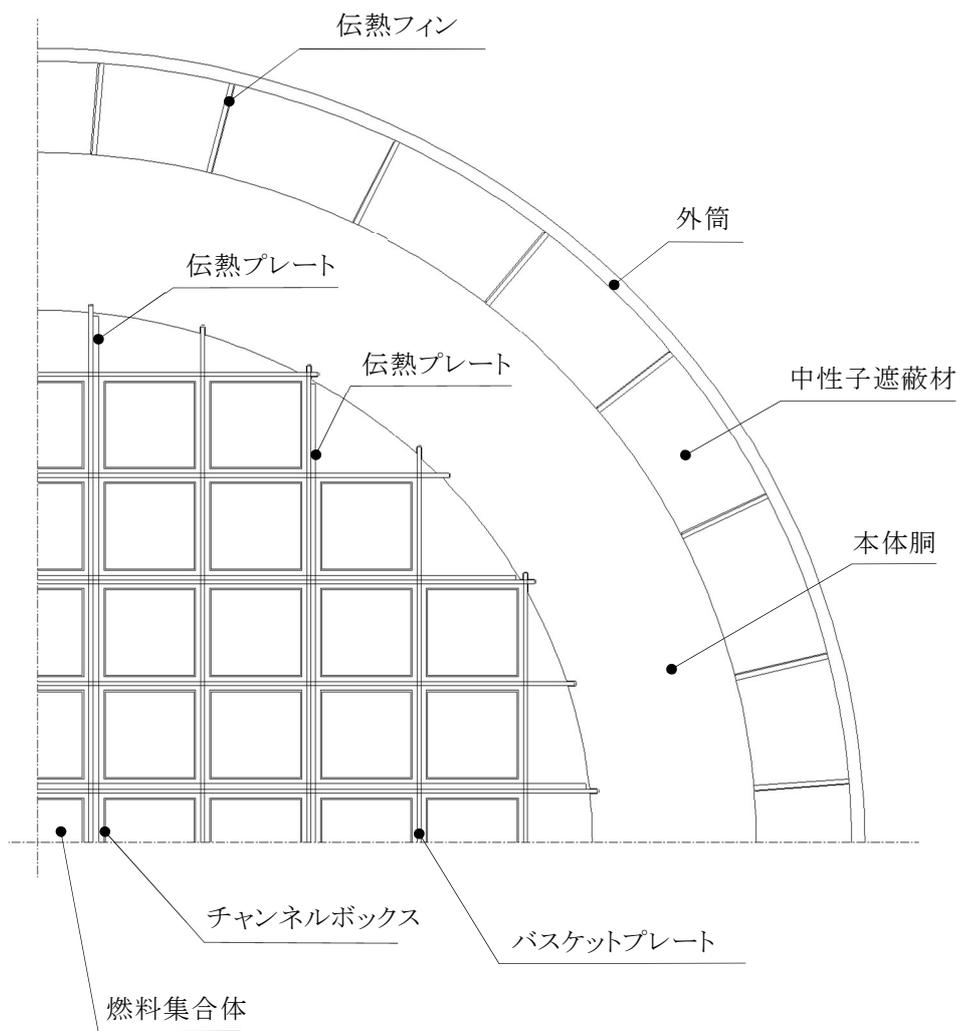
第 6 . 2 - 1 図 金属キャスクの除熱解析フロー図



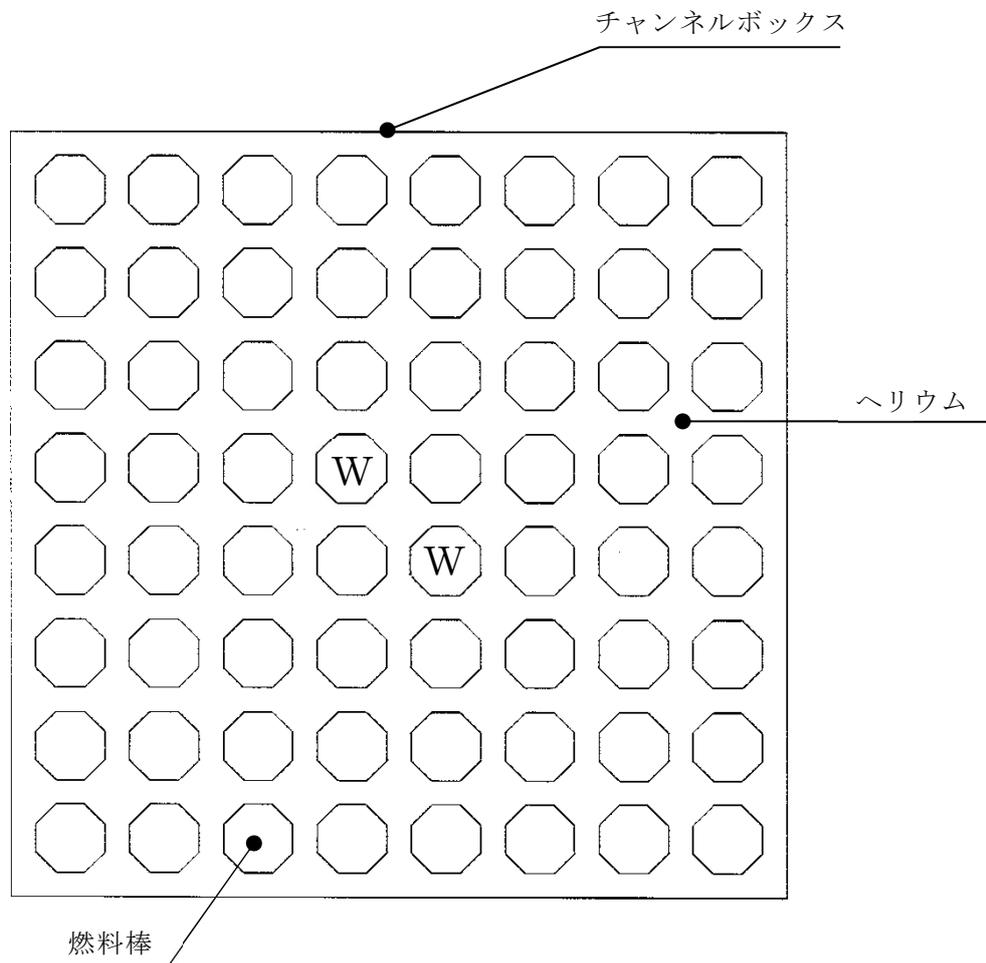
第6. 2-2図 金属キャスクの伝熱形態
(BWR用大型キャスク(タイプ2A))



第6. 2-3図 全体モデル概念図



第 6 . 2 - 4 図 輪切りモデル形状概念図



注) Wはウォーターロッドであり，発熱はない。

第6. 2-5図 燃料集合体モデル (概念)

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」, (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)

7. 遮蔽の基本設計方針について

7. 1 遮蔽等（貯蔵建屋）

7. 1. 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、放射線業務従事者及び一時立入者（以下「放射線業務従事者等」という。）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、使用済燃料貯蔵建屋に遮蔽壁及び遮蔽ルーバを設け、また、貯蔵区域への入口に迷路又は遮蔽扉を設けて、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、滞在時間及び立入エリア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7-1-1表，第7-1-1図参照）

使用済燃料貯蔵建屋（以下「貯蔵建屋」という。）の遮蔽設計に当たっては、放射線業務従事者の立入頻度、滞在時間及び立入エリア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合理的に達成できる限り低くし公衆の線量限度以下に低減できるよう、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、作業時間の制限等、適切な措置を講ずる。

7. 1. 2 遮蔽設計

(1) 遮蔽設備

遮蔽設備の主要仕様を第7. 1-2表及び第7. 1-2図に示す。

a. 遮蔽壁

遮蔽壁は、貯蔵建屋側壁，天井，貯蔵区域区画壁及び貯蔵区域仕切壁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) 遮蔽設備の貫通部の措置

貯蔵建屋には、貯蔵区域から受入れ区域へのケーブル貫通口がある。放射線の漏えいを防止するため、鉛毛マットにより貫通部の隙間を埋める措置を講ずる。ケーブル貫通部を第7. 1-3図に示す。

(4) 公衆の線量

貯蔵建屋貯蔵区域に收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する。

(5) 貯蔵建屋内外の線量

貯蔵建屋貯蔵区域に收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7. 1-1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立ち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，被ばくに対する注意喚起といった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。

第7. 1-1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。 〕

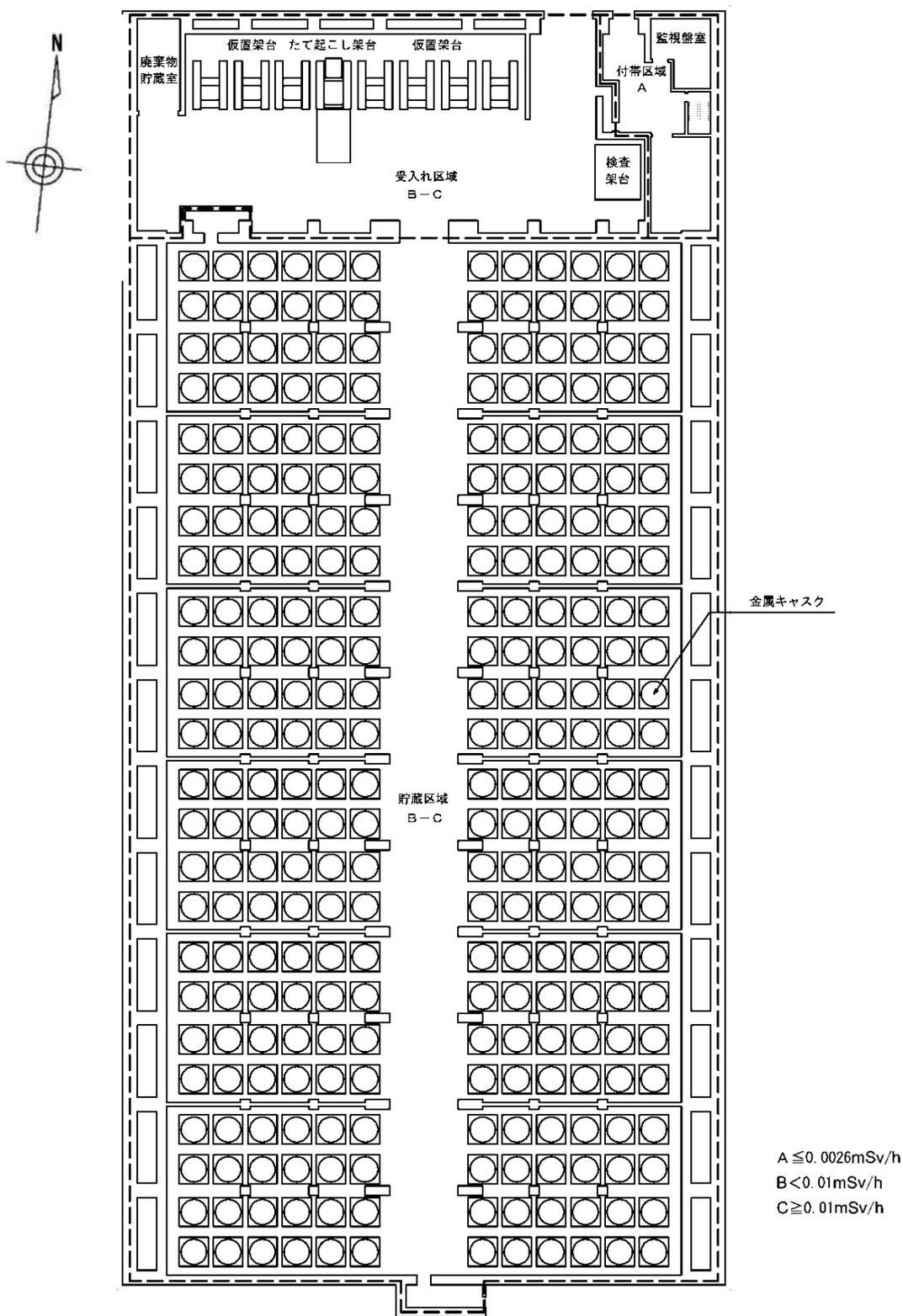
区分C：受入れ区域，貯蔵区域

〔 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7. 1-2表 遮蔽設備の主要仕様

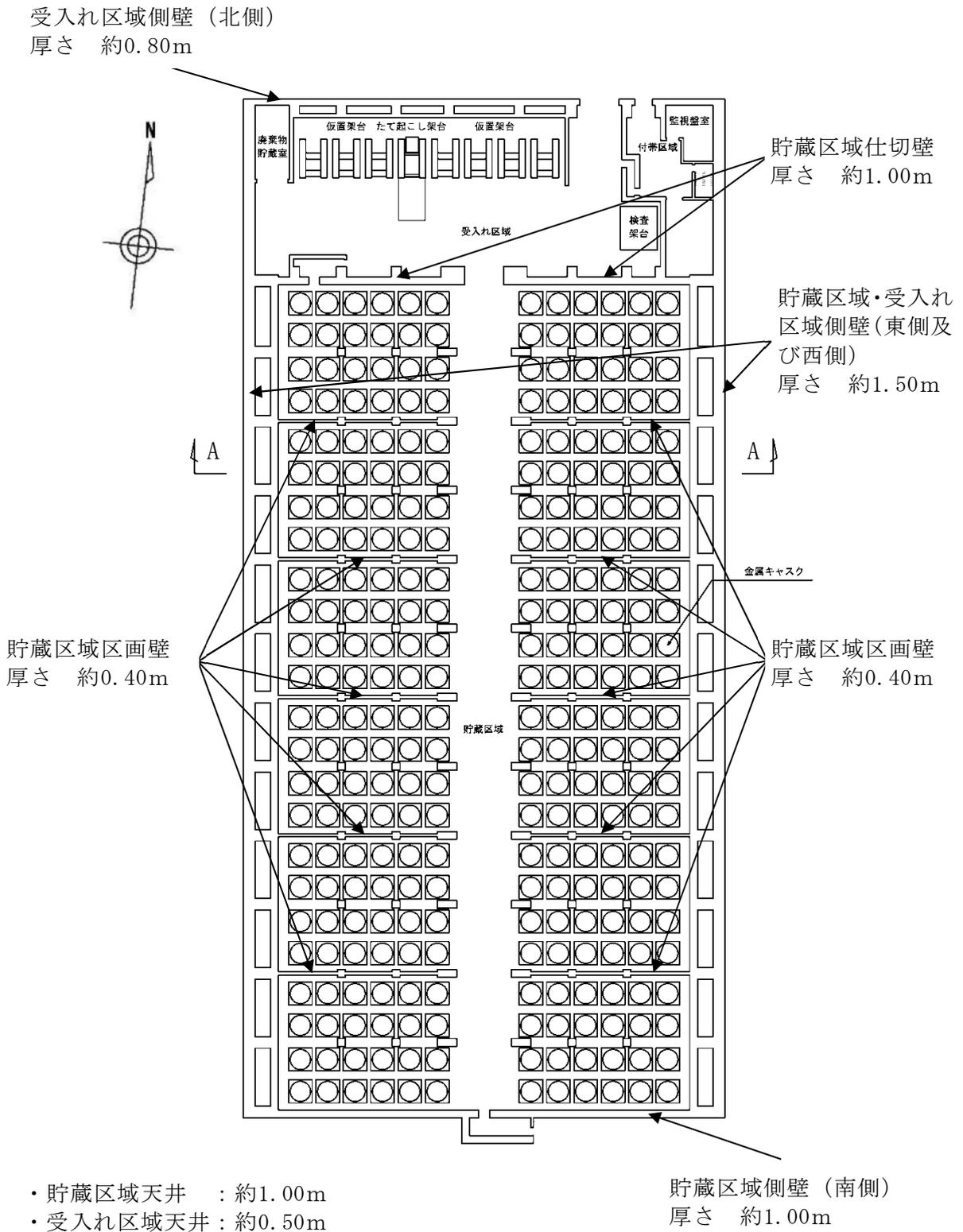
		主要仕様	
遮蔽壁	厚さ	約1.50m (貯蔵区域側壁 (東側及び西側))	
		約1.00m (貯蔵区域側壁 (南側) 及び天井)	
		約1.50m (受入れ区域側壁 (東側及び西側))	
		約0.80m (受入れ区域側壁 (北側))	
		約0.50m (受入れ区域天井)	
		約0.40m (貯蔵区域区画壁)	
		約1.00m (貯蔵区域仕切壁)	
	材料	コンクリート	
遮蔽ルーバ	厚さ	約 0.32m	
	長さ	約 4.00m	
	枚数	5枚	
	材料	コンクリート	



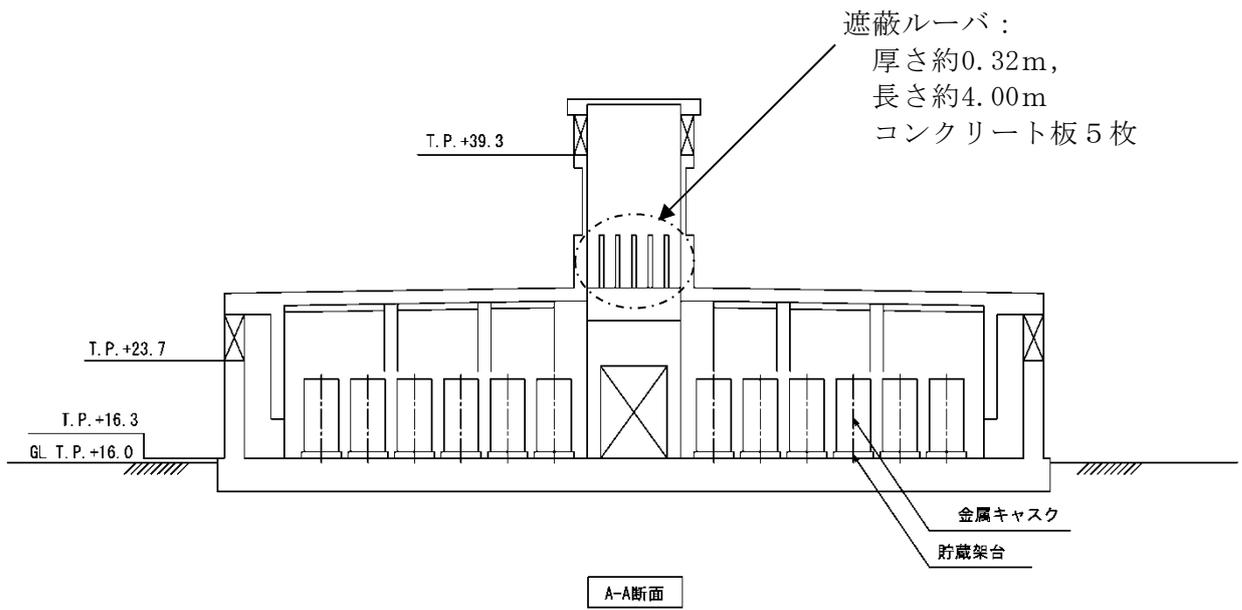
使用済燃料貯蔵建屋一階

T.P.+16.3

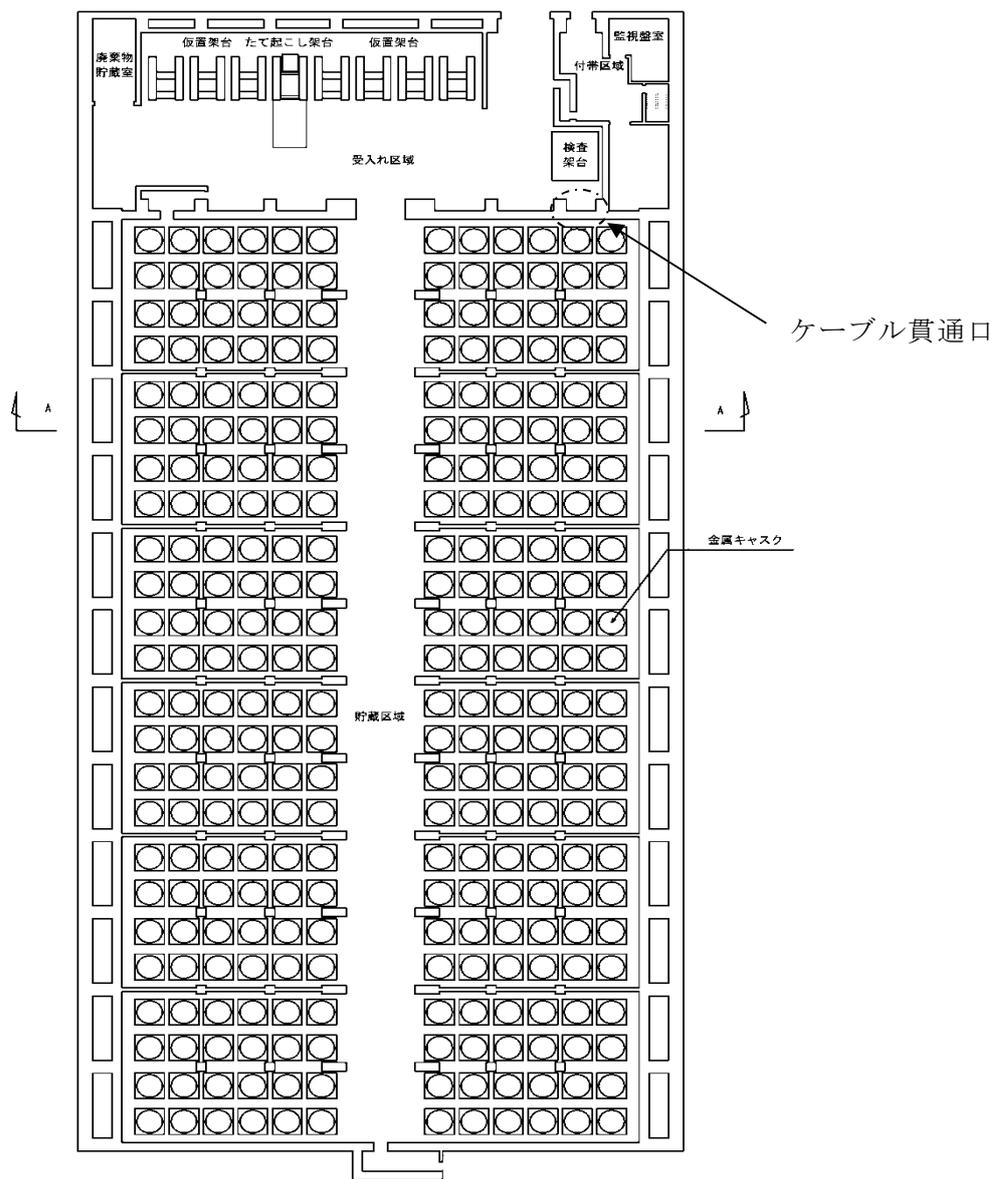
第7. 1-1 図 遮蔽設計区分概略図



第7. 1 - 2 図(1) 遮蔽設備（遮蔽壁）の主要仕様



第7. 1 - 2 図(2) 遮蔽設備 (遮蔽ルーバ) の主要仕様



A

A

第7. 1 - 3 図 ケーブル貫通口

7. 2 遮蔽等（金属キャスク）

7. 2. 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（実効線量で $50\mu\text{Sv/年}$ 以下）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。

金属キャスクは、使用済燃料集合体からの放射線をガンマ線遮蔽材及び中性子遮蔽材により遮蔽する設計とする。また、設計貯蔵期間（50 年間）に加えて事業所外運搬に係る期間等を考慮した十分な余裕を有する 60 年間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ても十分な遮蔽性能を有する設計とする。

使用済燃料集合体を金属キャスクに収納するに当たっては、遮蔽機能に関する評価で考慮した使用済燃料集合体の燃焼度に応じた当該使用済燃料集合体の配置の条件又は範囲を逸脱しないよう、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を満足していることを、記録により確認する。

7. 2. 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7. 2-1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

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1 m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2 mSv/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7. 2-2表、不確かさの考慮を第7. 2-3表、遮蔽解析フロー図を第7. 2-1図、金属キャスクのモデル化の概要を第7. 2-2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7. 2-4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使用済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。

第 7. 2 - 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 A)
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

第7. 2-2表 遮蔽解析評価の保守性

項目	内容
使用済燃料集合体の軸方向位置	<ul style="list-style-type: none"> ・貯蔵時は使用済燃料集合体が底に接し，蓋－使用済燃料集合体間は接しないが，頭部評価モデルにおいて使用済燃料集合体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する。
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する。 ・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し，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する。 ・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する。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る。 ・トランニオン部：トランニオン有モデルとトランニオン無モデルで線種ごとに線量当量率を求め，トラン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，トランニオン有モデルが小さい場合は，その低下は見捨てる。
線源強度	<ul style="list-style-type: none"> ・中央部に最高燃焼度^{注1)}の使用済燃料集合体，外周部に平均燃焼度^{注2)}の使用済燃料集合体を配置する。 ・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する。 ・収納燃料集合体全数が線源強度は貯蔵開始時(収納物最短冷却期間)と仮定する。
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，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。

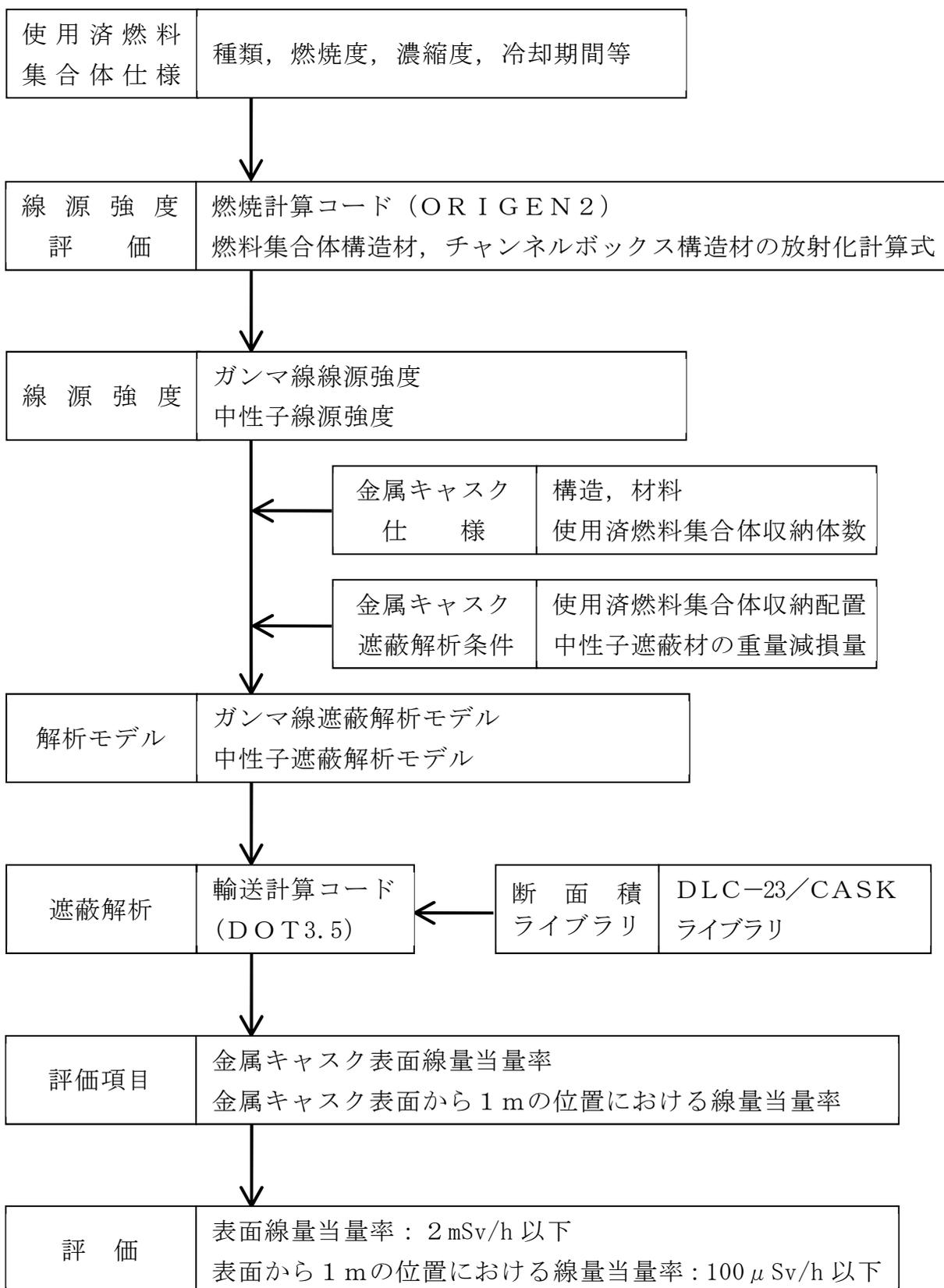
注2)：金属キャスクに収納する使用済燃料集合体の燃焼度の平均値の上限。

第7. 2-3表 遮蔽解析評価の不確かさの考慮

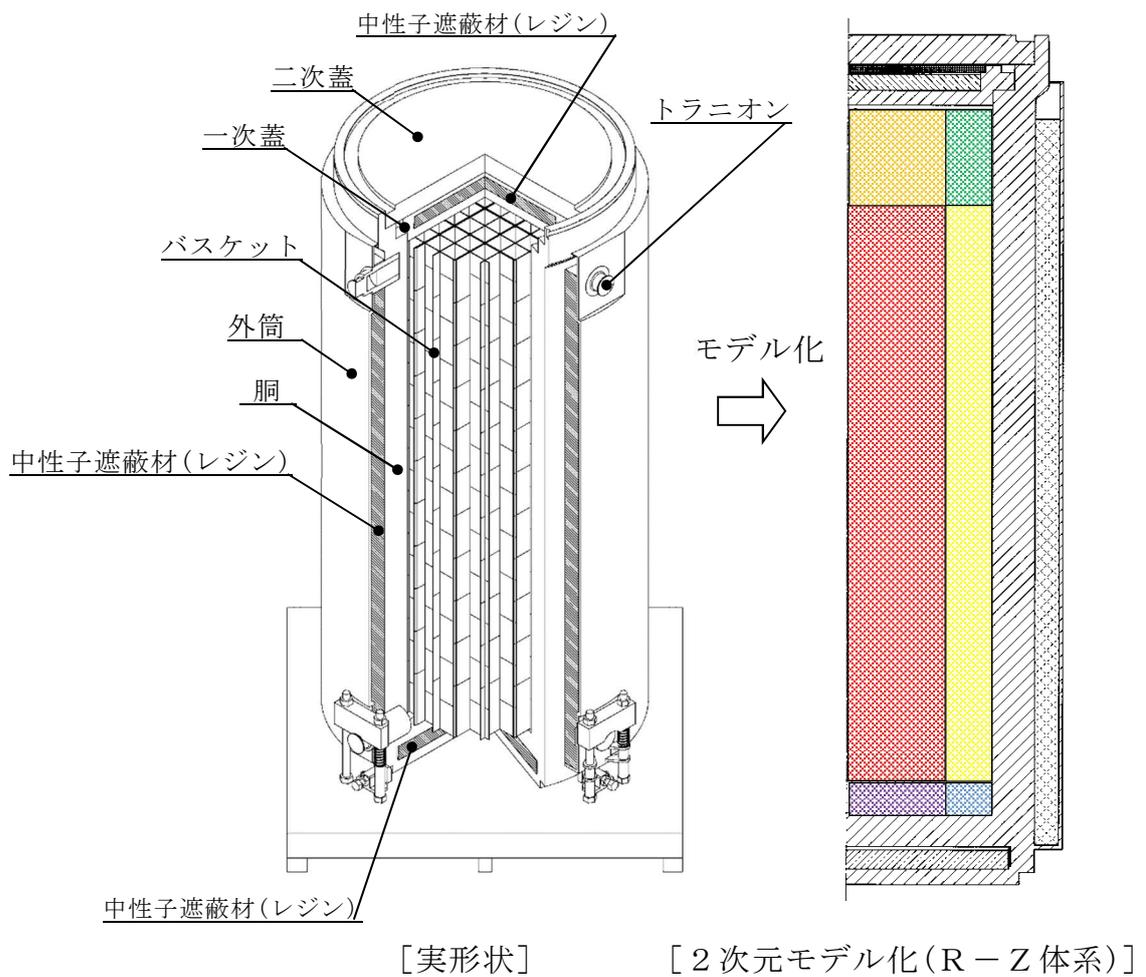
項目	内容
寸法公差	<ul style="list-style-type: none"> 解析モデルの各種寸法は公称値でモデル化するが、各遮蔽体の最小厚さを密度係数(最小寸法/公称寸法)としてばらつきの下限値を考慮する。
材料密度	<ul style="list-style-type: none"> ばらつきを考慮して、最小密度を使用して原子個数密度を評価する。

第7. 2-4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2A)
燃料有効部のガンマ線及び中性子	燃 焼 計 算 コ ー ド ORIGEN 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 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] ORIGEN2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]



第7. 2-1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7. 2-2 図 金属キャスクのモデル化の概要