

# 補足説明資料

(令和2年10月16日ご説明からの追記箇所を赤文字で示す。)

令和2年11月13日  
四国電力株式会社

枠囲みの内容は商業機密のため公開できません。

# (補足1) 乾式キャスクの安全性確保の考え方等

## 乾式キャスクの安全性確保の考え方

○乾式貯蔵施設は、使用済燃料を再処理工場へ搬出するまでの間、一時的に貯蔵するための施設であり、乾式キャスクについては、以下のとおり設計段階および運用段階において安全性を確保する。

### ・設計段階

使用済燃料を収納する乾式キャスクは、設計貯蔵期間(60年)を通じて、4つの安全機能(臨界防止機能、遮蔽機能、除熱機能、閉じ込め機能)を維持できる設計とするとともに、使用済燃料および乾式キャスク構成部材の長期健全性を維持する設計とする。

### ・運用段階

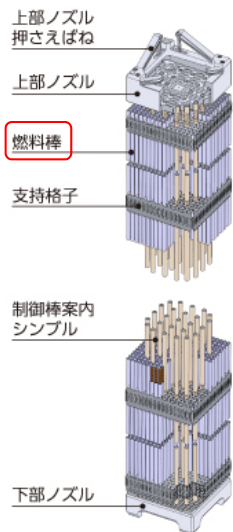
乾式キャスクの蓋間圧力や表面温度を監視することにより乾式キャスクの安全機能が維持されていることを確認するとともに、蓋間圧力が低下した場合は乾式キャスクを使用済燃料ピットへ移送して金属ガスケットを交換する等、必要な措置を講じることとする。また、PWR燃料を対象とした国内外の乾式キャスク先行貯蔵試験等に関する知見や情報を継続的に幅広く収集するとともに、必要に応じて乾式キャスクの運用管理に反映していく。

## 燃料棒の構造

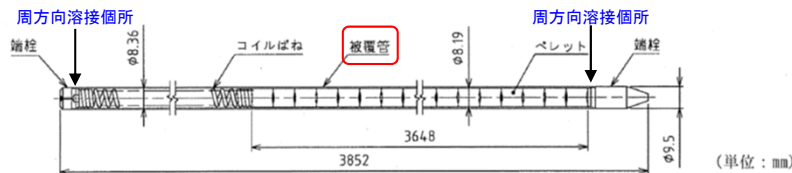
○燃料集合体は、燃料棒を17列×17列(17×17型燃料)または14×14列(14×14型燃料)を束ねた構造である。

○燃料棒は、ペレットを燃料被覆管で閉じ込めた構造であるため、使用済燃料の健全性を確認する際は、燃料被覆管に着目して、温度等の基準値を満足することを確認する。

○上下部端栓は、燃料被覆管に周方向溶接している。



(全体図)



(燃料棒の拡大図)

【使用済燃料の構造図(17×17型燃料の例)】 出典:全体図は三菱原子燃料HPより引用

## 使用済燃料に由来する放射線の種類と特性

### ○放射線の種類

- ・核分裂生成物の崩壊により荷電粒子(β線)および電磁放射線(γ線)が発生する。
- ・アクチノイド核種の崩壊により荷電粒子(α線、β線)およびγ線が発生する。
- ・自発核分裂等により中性子が発生する。

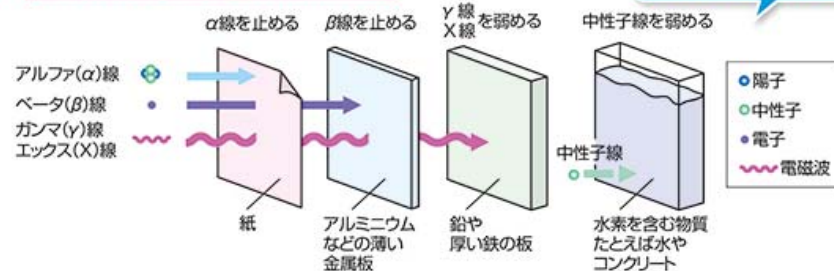
### ○放射線の特性

- ・アルファ線は紙で、ベータ線はアルミニウムなどの薄い金属板で止めることができる。
- ・ガンマ線は厚い鉄などの板で、中性子は水などで弱めること(遮へい)ができる。

### 【乾式キャスクの主な遮へい機能】

- ・ガンマ線は、炭素鋼製である乾式キャスクの胴、外筒、一次蓋および二次蓋で遮へいする。
- ・中性子は、外筒の内面のレジンおよび一次蓋に充填するレジンで遮へいする。

## 放射線の種類と透過力



出典:環境省「放射線による健康影響等に関する統一的な基礎資料(平成29年度版)」より作成

# (補足2) 収納条件および解析条件の設定の考え方

## 収納条件および解析条件の設定の考え方

- ・線量当量率および温度(使用済燃料の崩壊熱量)は貯蔵開始時が最も高く、その後、時間の経過とともに低下していく。
- ・これを踏まえ、最も厳しい貯蔵開始時において実施するとともに、各解析は着目点に応じてパラメータを保守的に設定している。
- ・なお、各解析の解析条件の設定の考え方については、既設の使用済燃料ピットや従来の輸送キャスクの設計・評価の手法と同様である。

- 凡例:   解析結果(実効増倍率、線量当量率、乾式キャスク構成部材および使用済燃料の温度)を高くするため、解析条件を高めに設定している項目
- 解析結果(実効増倍率、線量当量率、乾式キャスク構成部材および使用済燃料の温度)を高くするため、解析条件を低めに設定している項目

			臨界解析	遮蔽解析	除熱解析
解析条件設定の考え方(概要)			貯蔵中は乾式キャスク内部はヘリウムを充填しているが、燃料収納作業時は冠水状態であることを踏まえ、臨界解析においては冠水状態とし、解析結果(実効増倍率)が大きくなるように、解析の初期条件(初期ウラン濃縮度、燃焼度)を保守的に設定している。	解析結果(線量当量率)が高くなるように、解析の初期条件(初期ウラン濃縮度、燃焼度、冷却期間、配置等)を保守的に設定している。	解析結果(乾式キャスク構成部材および使用済燃料の温度)が高くなるように、解析の初期条件(初期ウラン濃縮度、燃焼度、冷却期間、配置等)を保守的に設定している。
解析条件の設定の考え方(詳細)	燃料集合体1体	初期ウラン濃縮度	収納制限の上限値(理由) ウラン濃縮度が高い(核分裂性物質であるウラン235量が多い)方が核分裂の確率が高くなり、実効増倍率が大きめとなるため。	製造公差を考慮して低めの値(理由) ウラン濃縮度が低い(ウラン235量が少ない)方が、ウラン238量が多く、燃焼後にアクチノイド核種(Pu238、Am241、Cm244など)量が多くなり、線源強度が高くなり、線量当量率が高めとなるため。	製造公差を考慮して低めの値(理由) ウラン濃縮度が低い(ウラン235量が少ない)方が、ウラン238量が多く、燃焼後にアクチノイド核種(Pu238、Am241、Cm244など)量が多くなり、発熱量が高くなり、乾式キャスク部材温度や使用済燃料の温度が高めとなるため。
		ウラン重量	— (計算に使用しないため。)	収納制限の上限値(理由) ウラン重量が大きい方が、線源強度が高くなり、線量当量率が高めとなるため。	収納制限の上限値(理由) ウラン重量が大きい方が、発熱量が高くなり、乾式キャスク部材温度や使用済燃料の温度が高めとなるため。
		燃焼度	収納制限の下限値(燃焼度0:新燃料)(理由) 燃焼度が低い(ウラン235量が多い)方が核分裂の確率が高くなり、実効増倍率が大きめとなるため。	収納制限の上限値(平均燃焼度の上限は無視し、燃料集合体の燃焼度を中央部と外周部それぞれの最高燃焼度に設定)(理由) 燃焼度が高い方が、線源強度が高くなり、線量当量率が高めとなるため。	キャスク1基あたりの平均燃焼度の上限を満足しつつ、中央部(タイプ1では中心)の燃焼度を制限の上限値に設定(理由) 発熱量はキャスク全体に広がっていくが、伝熱経路が長い方が、除熱し難くなり、乾式キャスク部材温度や使用済燃料の温度が高めとなるため、中央部の燃焼度を高く設定する。
		SFP※での冷却期間	— (計算に使用しないため。)	収納制限の下限値(理由) 冷却期間が短い方が、線源強度が高くなり、線量当量率が高めとなるため。	収納制限の下限値(理由) 冷却期間が短い方が、発熱量が高くなり、乾式キャスク部材温度や使用済燃料の温度が高めとなるため。
	キャスク1基あたり	平均燃焼度	収納制限の下限値(燃焼度0:新燃料)(理由) 燃焼度が低い(ウラン235量が多い)方が核分裂の確率が高くなり、実効増倍率が大きめとなるため。	— (燃焼度の記載のとおり)	収納制限の上限値(理由) 燃焼度が高い方が、発熱量が高くなり、乾式キャスク部材温度や使用済燃料の温度が高めとなるため。

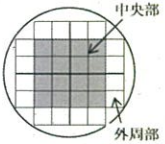
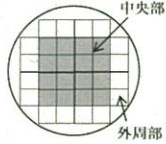
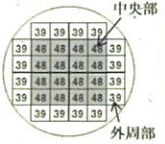
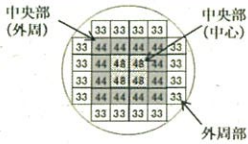
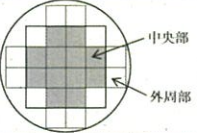
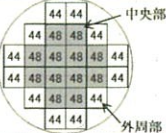

※: 使用済燃料ピット



# (補足2) 収納条件および解析条件の設定の考え方

## 収納条件および解析条件の設定の考え方 (詳細)

- ・乾式キャスクの収納条件は、貯蔵対象燃料のスペックを考慮し、効率的に燃料を収納できるよう、設定している。
- ・乾式キャスクへの使用済燃料の装荷にあたっては、運用段階においては、収納制限をすべて満足することを確認したうえで装荷する。
- ・解析条件は、収納条件を踏まえて、以下のとおり保守的に設定する。

収納物仕様	<タイプ1> 1, 2号炉ウラン燃料 (14×14型燃料) 用	キャスク収納制限 配置制限		燃料スペック		解析条件					
		中央部	外周部	中央部	外周部	臨界		遮蔽		除熱	
						中央部	外周部	中央部	外周部	中央部 中心	外周部
燃料 集合体 1体の 仕様	燃料タイプ	14×14型 (A/B型)		14×14型 (A/B型)		14×14型 (A型)		14×14型 (B型)		14×14型 (A型)	
	初期ウラン濃縮度 (wt%)	≤ 4.2	≤ 3.5	4.1	3.4						
	ウラン重量 (kg)										
	最高燃焼度 (Gwd/t) (燃料集合体平均)	≤ 48	≤ 39	≤ 48	≤ 39	0	48	39	48	44※1	33
	SFPでの冷却期間 (年)	≥ 15	≥ 25	—		—	15	25	15		25
キャスク 1基あたり	平均燃焼度 (Gwd/t)	≤ 45	≤ 33	—		0		—		45	33
配置※4											
収納物仕様	<タイプ2> 3号炉ウラン燃料 (17×17型燃料) 用	キャスク収納制限 配置制限		燃料スペック		解析条件					
		中央部	外周部	中央部	外周部	臨界	遮蔽		除熱		
							中央部	外周部	中央部	外周部	
燃料 集合体 1体の 仕様	燃料タイプ	17×17型 (A/B型)		17×17型 (A/B型)		17×17型 (A型)		17×17型 (A型)		17×17型 (A型)	
	初期ウラン濃縮度 (wt%)	≤ 4.2		4.1							
	ウラン重量 (kg)										
	最高燃焼度 (Gwd/t) (燃料集合体平均)	≤ 48	≤ 44	≤ 48		0	48	44	48	40 ※3	
	SFPでの冷却期間 (年)	A型: ≥ 15※2 B型: ≥ 17	A型: ≥ 15 B型: ≥ 17	—		—	15		15		
バーナブル ポイズン	最高燃焼度 (Gwd/t)	≤ 90	—	—		—	90	—	—		
	SFPでの冷却期間 (年)	≥ 15	—	—		—	15	—	—		
キャスク 1基あたり	平均燃焼度 (Gwd/t)	≤ 44		—		0		—		44	
配置※4											

※1: 中央部16体のうち中心4体を除く12体は、中央部16体の燃焼度が平均45Gwd/tになるよう44Gwd/tとしている。

※2: 回収ウラン燃料については、15年冷却した通常ウラン燃料と放射能及び発熱量が同程度以下となるよう20年以上冷却した後、収納する。

※3: 外周部12体は、乾式キャスク全体の燃焼度が平均44Gwd/tになるよう40Gwd/tとしている。

※4: 数値は燃焼度 (Gwd/t) を示す。

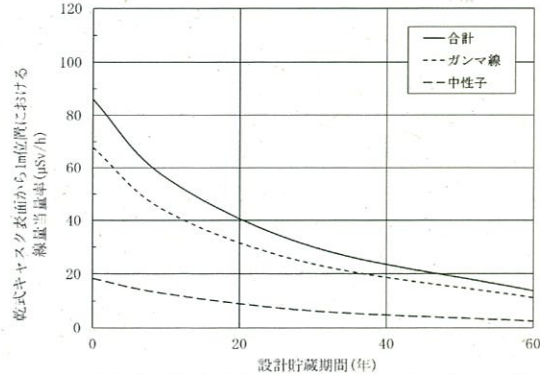


# (補足3)線量当量率および崩壊熱量、部材温度の推移

## 設計貯蔵期間における線量当量率および崩壊熱量の推移

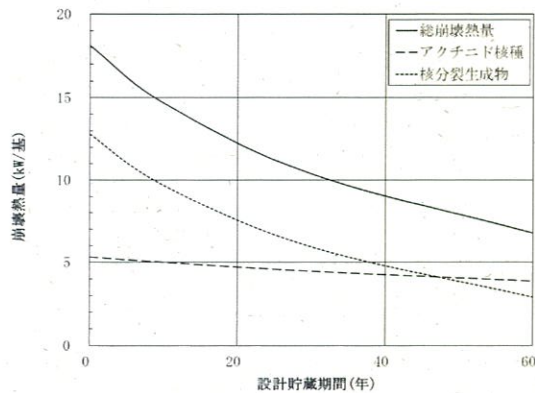
・3号機燃料用乾式キャスクの例は下図のとおりであり、線量当量率および崩壊熱量は貯蔵開始時が最も高く、その後、時間の経過とともに低下していく。

<3号機ウラン燃料用乾式キャスクの例(乾式キャスク1基あたり)>



線量当量率(乾式キャスク表面から1m位置)の推移

(貯蔵期間0年時点の表面から1m位置における最大線量当量率に対して、貯蔵期間の影響を考慮して算出)



崩壊熱量の推移

(貯蔵期間0年時点の崩壊熱量に対して主要な核種は  
アクチノイド核種: Pu238, Am241, Cm244等  
核分裂生成物: Sr90/Y90, Cs137/Ba137m等)

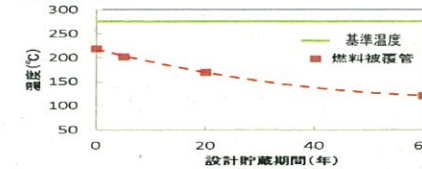
【線量当量率推移および崩壊熱の推移(ORIGEN計算結果)】

## 設計貯蔵期間における部材温度の推移(貯蔵中)

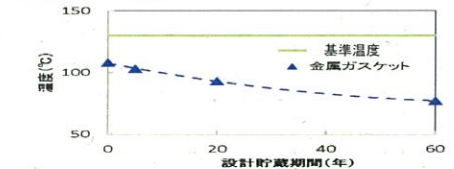
・3号機燃料用乾式キャスクの例は下図のように、各部材の温度が最も高くなる貯蔵開始時においても制限温度を下回るよう設計しており、その後、時間の経過とともに温度は低下していく。

<3号機ウラン燃料用乾式キャスクの例>

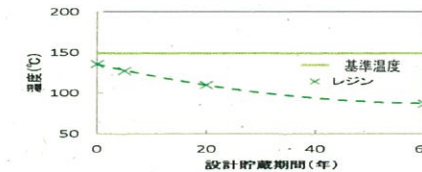
燃料被覆管



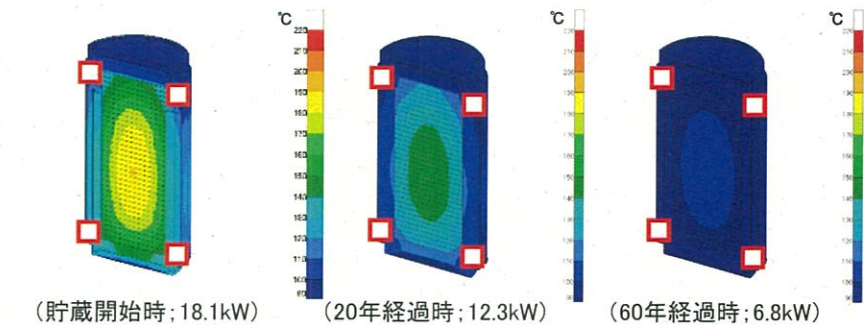
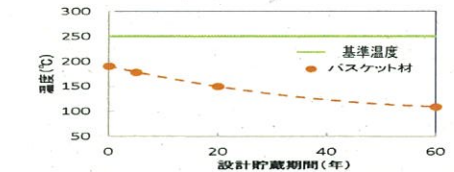
金属ガスケット



中性子遮蔽材(レジン)



バスケット材(アルミニウム合金)



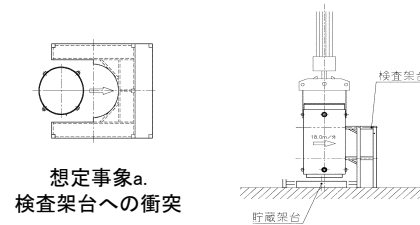
【設計貯蔵期間における各部材の温度推移(ABAQUS解析結果)】

# (補足4) 想定事象における乾式キャスクおよび使用済燃料の健全性

## 想定事象における乾式キャスクおよび使用済燃料の健全性

・想定事象「a. 検査架台への衝突」\*における1,2号炉ウラン燃料用乾式キャスクの主な構成部材および使用済燃料の健全性について、下表のとおり確認している。(その他想定事象(資料1別添1P43参照)についても同様に確認している。)

※ 乾式貯蔵建屋天井クレーンの誤操作により、乾式キャスクの側部がクレーン走行の最大速度(18m/分)で検査架台に衝突することを想定。(イメージを右図に示す。)  
 なお、検査架台近傍では低速(0.9m/分)かつ、インチング操作で乾式キャスクを取扱うため、想定としては十分保守的である。



想定事象a.  
検査架台への衝突

乾式キャスク	評価方法	乾式キャスク本体(胴、外筒、一次蓋、一次蓋ボルト等)を三次元でモデル化し、ABAQUSコードを用いて、想定事象における各部材に発生する応力を評価し、弾性範囲内であることを確認する。 また、バスケットについては、材料力学の公式等を用いて、想定事象において発生する応力を評価し、弾性範囲内であることを確認する。																					
	評価結果	想定事象における発生応力が弾性範囲内であり、乾式キャスクの各構成部材の健全性は維持できる。 <table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <thead> <tr> <th></th> <th>評価部位</th> <th>想定事象における発生応力(MPa)</th> <th>基準値(MPa)【弾性範囲内】</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="5">想定事象a.</td> <td>胴</td> <td>8</td> <td>186以下</td> </tr> <tr> <td>外筒</td> <td>42</td> <td>156以下</td> </tr> <tr> <td>一次蓋シール部(蓋側)</td> <td>103</td> <td>185以下</td> </tr> <tr> <td>一次蓋ボルト</td> <td>249</td> <td>562以下</td> </tr> <tr> <td>バスケット</td> <td>2</td> <td>56以下</td> </tr> </tbody> </table>				評価部位	想定事象における発生応力(MPa)	基準値(MPa)【弾性範囲内】	想定事象a.	胴	8	186以下	外筒	42	156以下	一次蓋シール部(蓋側)	103	185以下	一次蓋ボルト	249	562以下	バスケット	2
	評価部位	想定事象における発生応力(MPa)	基準値(MPa)【弾性範囲内】																				
想定事象a.	胴	8	186以下																				
	外筒	42	156以下																				
	一次蓋シール部(蓋側)	103	185以下																				
	一次蓋ボルト	249	562以下																				
	バスケット	2	56以下																				
使用済燃料 (燃料被覆管)	評価方法	想定事象における燃料被覆管に発生する応力が弾性範囲内であることを以下方法で確認する。 ・想定事象における衝撃加速度は、エネルギー保存則(衝突物の運動エネルギー又は位置エネルギーが、被衝突物の変形エネルギーとつり合う)および運動方程式によって算出し、算出した衝撃加速度が、輸送許認可において燃料被覆管に発生する応力が弾性範囲内であることが確認できている衝撃加速度を下回ることを確認する。・・・下表①② ・輸送に係る許認可(設計承認申請)では、輸送時(0.3m落下)において、燃料被覆管に発生する衝撃加速度はCRUSHコードを用いて算出し、発生する応力を工学式を用いて算出している。その結果、衝撃加速度が21.4G、発生応力が200MPaとなり弾性範囲内であることを確認している。・・・下表②																					
	評価結果	想定事象における衝撃加速度は3.3Gとなり、輸送に係る許認可(設計承認申請)の事故想定(0.3m落下)における衝撃加速度(21.4G)を下回ることから、想定事象における燃料被覆管に発生する応力は弾性範囲内であり、燃料健全性は維持できる。 <table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <thead> <tr> <th rowspan="2"></th> <th rowspan="2">貯蔵時の想定事象における 衝撃加速度 ① (設置変更許可申請で説明)</th> <th colspan="3">輸送時における衝撃加速度に対する評価結果 ② (設計承認申請で説明)</th> </tr> <tr> <th>0.3m落下における衝撃加速度</th> <th>0.3m落下における発生応力</th> <th>基準値【弾性範囲内】</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>想定事象a.</td> <td>3.3G</td> <td>21.4G</td> <td>200MPa</td> <td>595MPa以下</td> </tr> </tbody> </table>				貯蔵時の想定事象における 衝撃加速度 ① (設置変更許可申請で説明)	輸送時における衝撃加速度に対する評価結果 ② (設計承認申請で説明)			0.3m落下における衝撃加速度	0.3m落下における発生応力	基準値【弾性範囲内】	想定事象a.	3.3G	21.4G	200MPa	595MPa以下						
	貯蔵時の想定事象における 衝撃加速度 ① (設置変更許可申請で説明)	輸送時における衝撃加速度に対する評価結果 ② (設計承認申請で説明)																					
		0.3m落下における衝撃加速度	0.3m落下における発生応力	基準値【弾性範囲内】																			
想定事象a.	3.3G	21.4G	200MPa	595MPa以下																			

## (補足5) 準備作業(真空乾燥およびHe充填)の概要

### 真空乾燥およびHe充填手順 (貯蔵準備作業のイメージ)

#### ①排水の準備

- ・ドレンバルブ側には排水ポンプ、  
ベントバルブ側には真空乾燥装  
置及びHe供給系統を接続する。

#### ②乾式キャスク内部水の排水

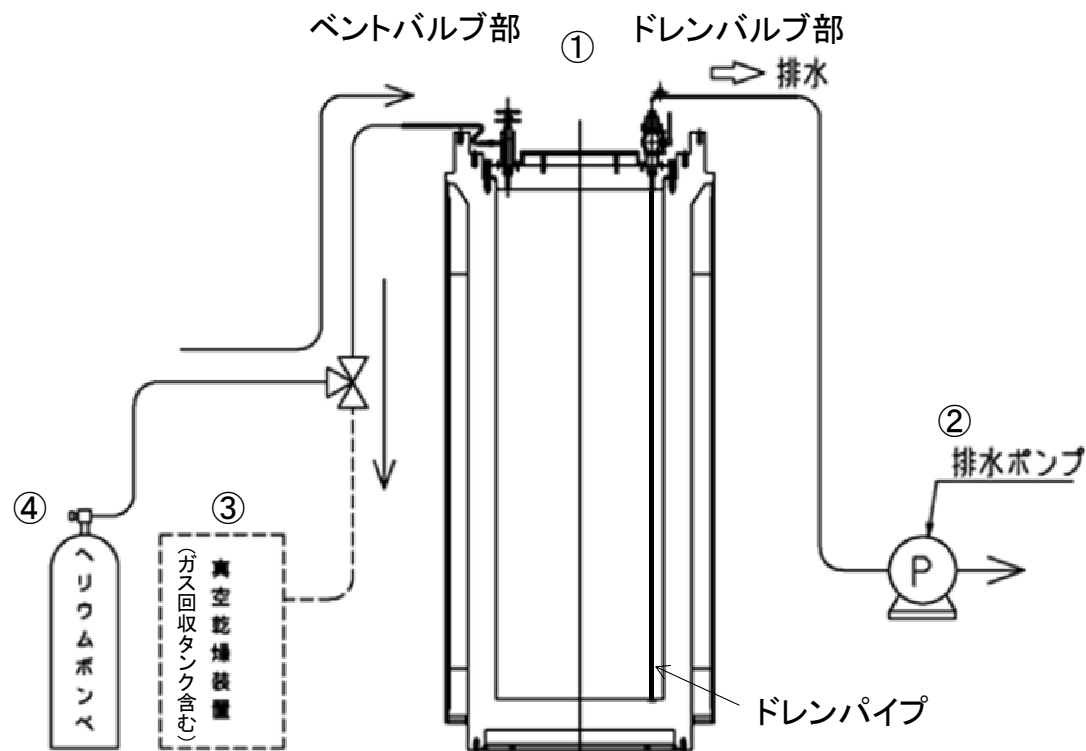
- ・排水ポンプを起動し、キャスク内部水  
を排水する。

#### ③乾式キャスク内部の真空乾燥

- ・真空乾燥装置を使用し、キャスク  
内部の真空乾燥を行う。(キャスク  
内の気体を真空乾燥装置内のガ  
ス回収タンクに回収)

#### ④乾式キャスク内部のHeガス充填

- ・真空乾燥系統から、Heガス充填  
系統へ切り替える。
- ・キャスク内部のHe充填を行う。





## (補足6)使用済燃料の長期健全性に係る検討経緯(1/2)

### 米国における経緯

- 米国では1980年代より乾式キャスクによる貯蔵が開始され、米国の審査指針（NUREG-1536）において、乾式キャスクを設計する際の主要設計項目が示されている。
  - ・熱特性（燃料被覆管、その他部材）
  - ・構造健全性
  - ・密封機能（漏えい率、監視システム）
  - ・材料性能（燃料被覆管の周方向応力）
  - ・遮蔽（線量当量率）
  - ・臨界（実効増倍率）
- 1985年から米国アイダホ国立研究所において乾式キャスクにPWR燃料を収納した実機検証試験が実施されている。キャスク本体については、外部および内部の検査を実施し、腐食生成物やひび割れ等がないことを確認している。使用済燃料については、燃料被覆管の破損は発生しておらず、また、外観観察、核分裂生成ガス（FP）放出率、酸化膜厚さ、水素量・水素化物配向、クリープ特性に関する試験を実施し、照射後取出し燃料と比較して顕著な差異は見られず、貯蔵による燃料健全性への影響は小さい結果となっている。

### 日本における経緯

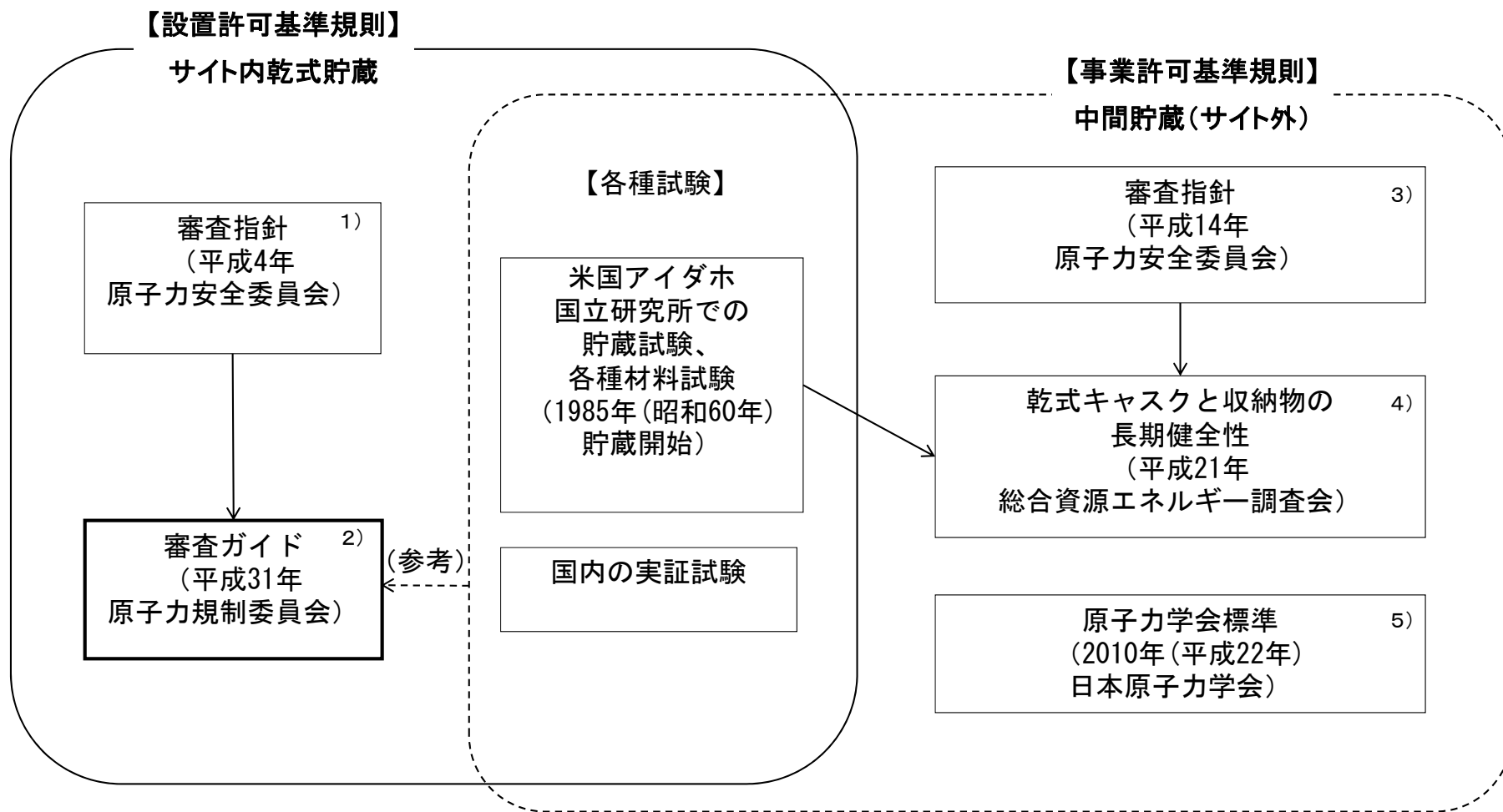
- 乾式キャスクの安全機能に係る設計方法や、安全審査にあたって確認すべき項目については、これまでの各種材料試験や先行貯蔵試験の結果を踏まえ、国の審査ガイドや各種文献において、明確に整理されている。具体的には、以下のとおり。
  - －平成4年の原子力安全委員会「原子力発電所内の使用済燃料の乾式キャスク貯蔵について」において、原子炉施設に係る安全設計の考え方、国内確証試験及び海外実証試験の成果等の知見を参考として、乾式キャスク貯蔵施設の安全確保のための基本設計ないし基本的設計方針に係る項目について検討し、乾式貯蔵施設は適切な設計方法、設計基準により十分安全に設計され得ると判断し、審査の指針を了承している。
    - ・乾式キャスクの4つの安全機能（閉じ込め機能、臨界防止機能、遮蔽機能、除熱機能）
    - ・乾式キャスクおよび使用済燃料の健全性（放射線照射影響、腐食、クリープ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すること、等）
  - －総合資源エネルギー調査会や日本原子力学会において、乾式キャスクおよび使用済燃料の健全性を維持するための制限値が示されている。
    - ・平成21年の総合資源エネルギー調査会「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」において、米国アイダホ国立研究所等において蓄積された金属キャスクや収納物の健全性に関する知見の評価がなされた。PWR燃料を用いたクリープ試験、照射硬化回復試験、水素化物再配向試験、応力腐食割れ試験の結果を踏まえ、燃料被覆管の温度や周方向応力の制限値が示されている。また、燃料被覆管の温度が貯蔵期間を通じて文献に定められた条件以下に維持されていれば、熱的要因による劣化については問題ないものと判断できる、ことが示されている。
    - ・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」において、国内外におけるPWR燃料を用いたクリープ試験、照射硬化回復試験、水素化物再配向試験、応力腐食割れ試験の結果を踏まえ、燃料被覆管の温度や周方向応力の制限値が示されている。
  - －平成31年の原子力規制委員会において、規則改正案「実用発電用原子炉及び附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」および審査ガイド案「原子力発電所敷地内での輸送・貯蔵兼用乾式キャスクによる使用済燃料の貯蔵に関する審査ガイド」について了承され、規則等は平成31年4月に施行されている。
    - ・4つの安全機能を維持すること。
    - ・乾式キャスク内部の不活性環境を維持し、温度を制限される範囲に収めることにより、乾式キャスクに収納される使用済燃料の経年変化を低減又は防止する設計であること。

### 当社の対応

- 当社は、乾式キャスクおよび使用済燃料の長期健全性については、文献等の知見を踏まえ、貯蔵時の照射影響、熱的影響および化学的影響の観点から問題ないことを確認するとともに、乾式キャスクの安全機能を維持できることを解析等により確認している。
- 引き続き国内外での乾式貯蔵施設に関する調査および文献等により、乾式キャスクおよび使用済燃料の長期健全性に関して既に貯蔵を開始している海外の知見等を幅広く収集し、信頼性の向上を図る。



## (補足6)使用済燃料の長期健全性に係る検討経緯(2/2)



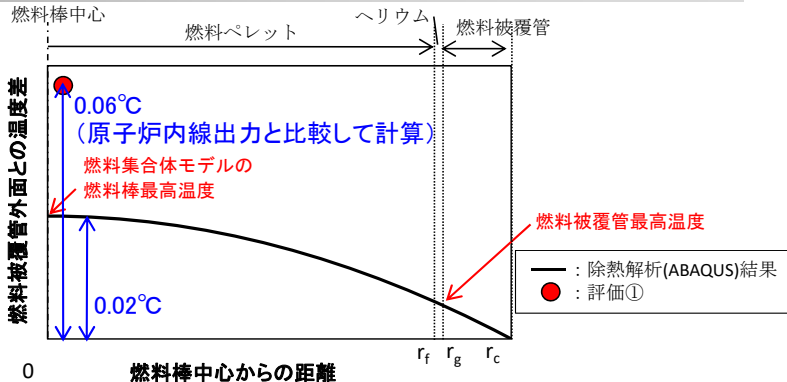
- 1) 原子力発電所内の使用済燃料の乾式キャスク貯蔵について、原子力安全委員会了承、平成4年8月27日
- 2) 原子力発電所敷地内での輸送・貯蔵兼用乾式キャスクによる使用済燃料の貯蔵に関する審査ガイドの制定について、原子力規制委員会、平成31年3月13日
- 3) 「金属製乾式キャスクを用いる使用済燃料中間貯蔵施設のための安全審査指針」及び「使用済燃料中間貯蔵施設における金属製乾式キャスクとその収納物の長期健全性について」について、原子力安全委員会決定、平成14年10月3日
- 4) 金属製乾式キャスクを用いる使用済燃料中間貯蔵施設における金属製乾式キャスクとその収納物の長期健全性について、総合資源エネルギー調査会 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、平成21年6月25日
- 5) 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、日本原子力学会、2010年7月

# (補足7) 除熱解析結果の詳細および分析結果(1/2)

## 除熱解析結果の詳細および分析結果

- 3号機燃料用乾式キャスクにおける使用済燃料の発熱量は約15.8kWであり、使用済燃料1体あたりの発熱量は約660W、燃料棒1本あたり約2.5W、燃料棒1mあたりではわずか0.7Wで、原子炉内（定格出力で運転中）の約1/25000程度である。そのため、燃料棒内（燃料被覆管表面からペレット中心まで）の温度差も、原子炉内での約1400°Cに対し、0.06°C程度（無視できる程度）と推定される。※・・・評価①
- これを踏まえて、除熱解析の燃料集合体モデルでは、燃料棒のモデルは径方向の要素分割は行わず、ペレット、ギャップ及び燃料被覆管の均質体（熱伝導率は体積平均値）としている。また、伝熱部材であるグリッドを無視することにより、熱が燃料棒内に籠りやすくなるようにしている。さらに、解析結果を10°C単位で切り上げている。

※ キャスク1基あたりの使用済燃料の発熱量約15.8kW(44GWd/t、15年冷却)を基に計算。(15.8kW/基)÷(24体/基)≈約660W/体、(660W/体)÷(264本/体)≈約2.5W/本、(2.5W/本)÷(3.648m/本)≈約0.7W/m、0.7W/m÷原子炉内線出力(平均17.1kW/m)=1/25000、(ペレット中心1770°C-燃料被覆管表面温度349°C)×(1/25000)≈約0.06°C



3号機用	実形状	解析モデル	解析結果(ABAQUS)
燃料集合体断面			
拡大図			



# (補足7) 除熱解析結果の詳細および分析結果(2/2)

## 燃料棒内(燃料被覆管表面からペレット中心まで)の温度差の妥当性

- 原子炉内線出力と比較した場合の燃料棒内の温度差(0.06℃)、ABAQUSを用いた場合の燃料棒内の温度差(0.02℃)の妥当性を確認するため、理論式を用いて別途計算した結果を以下に示す。
- 理論式を用いた場合の燃料棒内の温度差は約0.06℃であり、原子炉内線出力と比較した場合の燃料棒内の温度差や、ABAQUSを用いた場合の燃料棒内の温度差と同程度である。・・・評価②
- 従って、ABAQUSの計算結果は妥当であり、燃料集合体モデルでペレット、ギャップ及び燃料被覆管を均質体とするとともに、径方向の要素分割は行っていないモデルとしていることに支障はないことを確認した。

<理論式による計算方法(3号機用燃料: 17×17型の例)>

$$\Delta T = q \times r_f^2 \times \left\{ \underbrace{\ln(r_c/r_g)}_{\text{燃料被覆管温度上昇}} / (2 \times k_c) + \underbrace{1/(2 \times h_{\text{gap}} \times r_f)}_{\text{ギャップ温度上昇}} + \underbrace{1/(4 \times k_f)}_{\text{ペレット温度上昇}} \right\} \quad [1]$$

ここで、

$\Delta T$ : 燃料被覆管表面からペレット中心までの温度差(K)

$q$ : ペレット単位体積面積あたりの発熱量(13192 W/m<sup>3</sup>)

$r_f$ : ペレット半径(4.095 mm)

$r_c$ : 燃料被覆管外半径(4.75mm)

$r_g$ : 燃料被覆管内半径(4.18mm)

$k_c$ : 燃料被覆管熱伝導率(12 W/m·K) [2]

$h_{\text{gap}}$ : ペレット・燃料被覆管ギャップ熱伝達率(918 W/m<sup>2</sup>·K)

$k_f$ : ペレット熱伝導率(2 W/m·K) [2]

[1] 伝熱工学(上) J.R.ホールマン、ブレイン図書出版

[2] 軽水炉燃料のふるまい、原子力安全研究協会、平成25年3月

<理論式による計算結果>

	計算結果(℃)
	$\Delta T$ (燃料被覆管表面からペレット中心までの温度差)
3号機燃料用乾式キャスク	約0.06℃

