

# 補足説明資料

令和2年10月16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

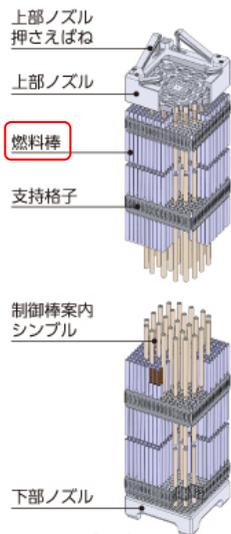
乾式キャスクの蓋間圧力や表面温度を監視することにより乾式キャスクの安全機能が維持されていることを確認するとともに、蓋間圧力が低下した場合は乾式キャスクを使用済燃料ピットへ移送して金属ガスケットを交換する等、必要な措置を講じることとする。また、PWR燃料を対象とした国内外の乾式キャスク先行貯蔵試験等に関する知見や情報を継続的に幅広く収集するとともに、必要に応じて乾式キャスクの運用管理に反映していく。

## 燃料棒の構造

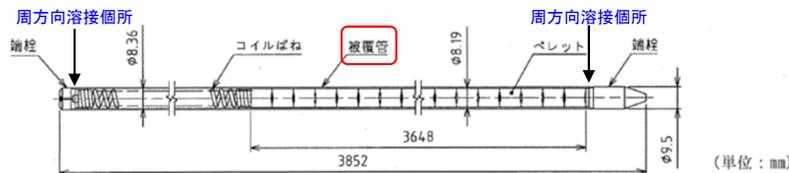
○燃料集合体は、燃料棒を17列×17列(17×17型燃料)または14×14列(14×14型燃料)を束ねた構造である。

○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、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。

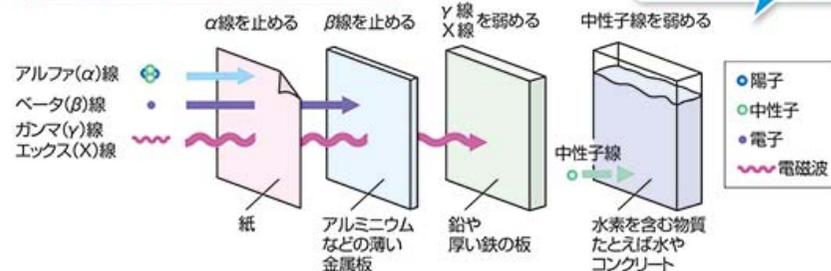
### ○放射線の特性

- ・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した基礎資料(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:  解析条件を高めを設定している項目(解析条件を高めを設定することにより、解析結果が高くなる項目)

解析条件を低めを設定している項目(解析条件を低めを設定することにより、解析結果が高くなる項目)

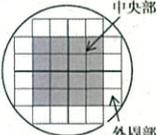
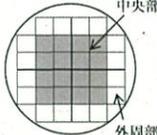
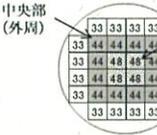
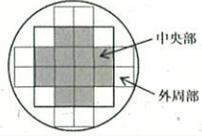
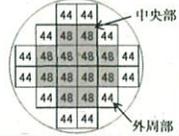
		臨界解析	遮蔽解析	除熱解析	
解析条件設定の考え方(概要)		貯蔵中は乾式キャスク内部はヘリウムを充填しているが、燃料収納作業時は冠水状態であることを踏まえ、臨界解析においては冠水状態とし、解析結果(実効増倍率)が大きくなるように、解析の初期条件(初期ウラン濃縮度、燃焼度)を保守的に設定している。	解析結果(線量当量率)が大きくなるように、解析の初期条件(初期ウラン濃縮度、燃焼度、冷却期間、配置等)を保守的に設定している。	解析結果(乾式キャスク構成部材および使用済燃料の温度)が大きくなるように、解析の初期条件(初期ウラン濃縮度、燃焼度、冷却期間、配置等)を保守的に設定している。	
解析条件の設定の考え方(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、遮蔽解析結果が高めとなるため。	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、除熱解析結果が高めとなるため。
		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、遮蔽解析結果が高めとなるため。	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、除熱解析結果が高めとなるため。
		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、遮蔽解析結果が高めとなるため。	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、遮蔽解析結果が高めとなるため。	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、除熱解析結果が高めとなるため。
	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、除熱解析結果が高めとなるため。

※: 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		外周部	
						中央部	外周部	中央部	外周部	中心	外周		
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			臨界		遮蔽		除熱			
						中央部	外周部	中央部	外周部	中央部	外周部		
		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エネルギー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。

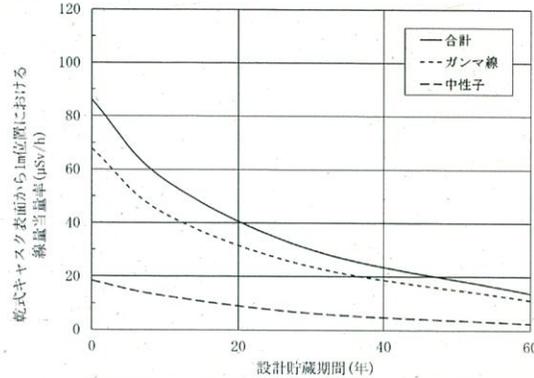
※4: 数値は燃焼度 (GWd/t) を示す。

# (補足3)線量当量率および崩壊熱量、部材温度の推移

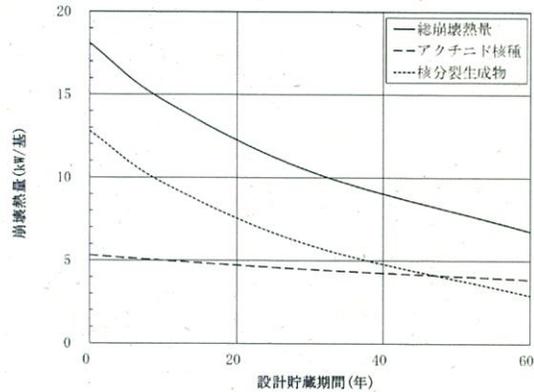
## 設計貯蔵期間における線量当量率および崩壊熱量の推移

・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の位置)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)

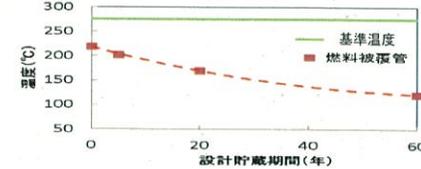
【線量当量率推移および崩壊熱の推移(ORIGEN計算結果)】

## 設計貯蔵期間における部材温度の推移(貯蔵中)

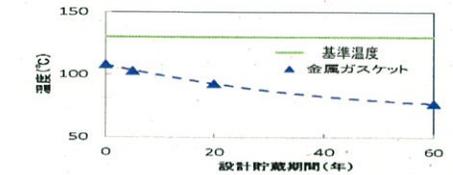
・3号機燃料用乾式キャスクの例は下図のように、各部材の温度が最も高くなる貯蔵開始時においても制限温度を下回るよう設計しており、その後、時間の経過とともに温度は低下していく。

<3号機ウラン燃料用乾式キャスクの例>

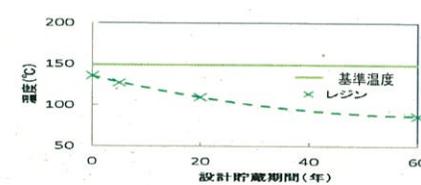
### 燃料被覆管



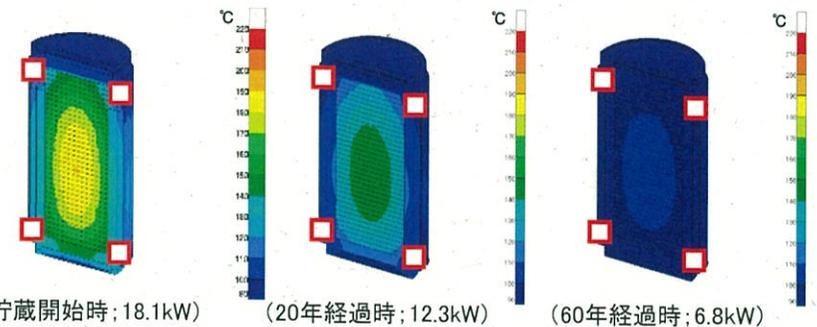
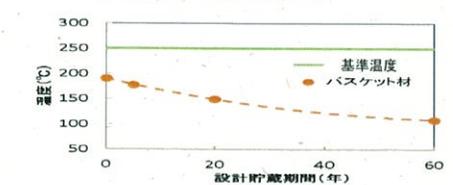
### 金属ガasket



### 中性子遮蔽材(レジン)



### バスケット材(アルミニウム合金)



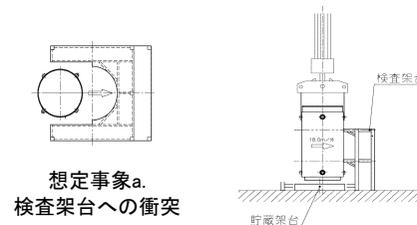
【設計貯蔵期間における各部材の温度推移(ABAQUS解析結果)】

# (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。

