

発電用原子炉施設に係る特定機器の設計の 型式証明申請 設置許可基準規則への適合性について (第十六条関連)

GNS Gesellschaft für Nuklear-Service mbH

2023年5月8日

1. 指摘事項(コメント)リスト
2. 設置許可基準規則への適合性の概要
3. 設置許可基準規則への適合性(第十六条)

2. 設置許可基準規則への適合性の概要

設置許可基準規則適合性説明対象

設置許可基準規則	安全機能					構造健全性	設計条件	貯蔵施設に関する要件
	臨界防止	遮蔽	除熱	閉じ込め	長期健全性			
第四条:地震による損傷の防止	-	-	-	-	-	○	-	○
第五条:津波による損傷の防止	-	-	-	-	-	○	-	○
第六条:外部からの衝撃による損傷の防止	-	-	-	-	-	○	-	○
第十六条:燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設	○	○	○	○	○	-	-	○

「第十六条:燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設」の閉じ込め及び遮蔽機能について、本資料で説明する。(青枠部分)

3. 設置許可基準規則への適合性(第十六条)(閉じ込め機能)

設置許可基準規則第十六条の内、閉じ込め機能に係る要求事項に対するCASTOR[®] geo26JP型の設計方針を下表に示す。

規則等	要求事項	設計方針	先行例との比較
設置許可基準規則(注1) 第十六条第4項 第三号	使用済燃料が内包する放射性物質を適切に閉じ込めることができ、かつ、その機能を適切に監視することができるものとする。	CASTOR [®] geo26JP型は、使用済燃料を限定された区域に閉じ込めるため、特定兼用キャスクの蓋及び蓋貫通孔のシール部に金属ガスケットを用いることにより、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する。また、CASTOR [®] geo26JP型は、一次蓋及び二次蓋による二重の閉じ込め構造とし、蓋間を正圧に維持することにより圧力障壁を形成し、使用済燃料集合体を内封する空間を特定兼用キャスク外部から隔離する設計とする。さらに、CASTOR [®] geo26JP型は、蓋間の圧力を測定することにより、閉じ込め機能を監視できる設計とする。なお、CASTOR [®] geo26JP型の万一の閉じ込め機能の異常に対する修復性の考慮がなされていることについては、設置(変更)許可時に別途確認されるものとする。	先行例と同様
設置許可基準規則解釈(注2) 別記4第十六条 第4項	第16条第4項第3号に規定する「放射性物質を適切に閉じ込めることができ、かつ、その機能を適切に監視することができる」とは、次項に規定するもののほか、貯蔵事業許可基準規則解釈(注3)第5条第1項第1号及び第2号並びに第17条第1項第1号に規定する金属キャスクの設計に関する基準を満たすことをいう。		

(注1)「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」

(注2)「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈」

(注3)「使用済燃料貯蔵施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈」

3. 設置許可基準規則への適合性(第十六条)(閉じ込め機能)

設置許可基準規則第十六条の内、閉じ込め機能に係る要求事項に対するCASTOR® geo26JP型の設計方針を下表に示す。

規則等	要求事項	設計方針	先行例との比較
貯蔵事業許可基準規則解釈 第5条第1項	第5条に規定する「限定された区域に適切に閉じ込めることができるもの」とは、以下の設計をいう。		
第一号	金属キャスクは、設計貯蔵期間を通じて、使用済燃料等を内封する空間を負圧に維持できる設計であること。	CASTOR® geo26JP型は、使用済燃料集合体を限定された区域に閉じ込めるため、特定兼用キャスクの蓋及び蓋貫通孔のシール部に金属ガスケットを用いることにより、設計貯蔵期間(60年)を通じて、使用済燃料集合体を内封する空間を不活性雰囲気保つとともに、負圧に維持する設計とする。	先行例と同様。 なお、用いる金属ガスケットの形状および外被材が異なる。
第二号	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、使用済燃料等を内封する空間を容器外部から隔離できる設計であること。	CASTOR® geo26JP型は、一次蓋及び二次蓋による二重の閉じ込め構造とし、一次蓋と二次蓋の間の空間(以下「蓋間空間」)を正圧に維持することにより圧力障壁を形成し、使用済燃料集合体を内封する空間を特定兼用キャスクの外部から隔離する設計とする。	先行例と同様
第三号	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金属製の乾式キャスクの蓋等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、蓋を追加装着できる構造を有する設計とすること等、閉じ込め機能の修復性に関して考慮がなされていること。	申請範囲外とする。	

3. 設置許可基準規則への適合性(第十六条)(閉じ込め機能)

設置許可基準規則第十六条の内、閉じ込め機能に係る要求事項に対するCASTOR® geo26JP型の設計方針を下表に示す。

規則等	要求事項	設計方針	先行例との比較
貯蔵事業許可基準規則解釈 第17条 第1項	第1項に規定する「適切に監視することができる」とは、以下の設計をいう。		
第一号	蓋部が有する閉じ込め機能を監視できること。	CASTOR® geo26JP型は、蓋間空間の圧力を測定することで、閉じ込め機能を監視できる設計とする。	先行例と同様
設置許可基準規則解釈 別記4 第16条第5項	第16条第2項第1号ハ及び同条第4項各号を満たすため、兼用キャスクは、当該兼用キャスクを構成する部材及び使用済燃料の経年変化を考慮した上で、使用済燃料の健全性を確保する設計とすること。ここで、「兼用キャスクを構成する部材及び使用済燃料の経年変化を考慮した上で、使用済燃料の健全性を確保する設計」とは、以下を満たす設計をいう。 <ul style="list-style-type: none"> ・設計貯蔵期間を明確にしていること。 ・設計貯蔵期間中の温度、放射線等の環境条件下での経年変化を考慮した材料及び構造であること。 	設計貯蔵期間は60年とする。 CASTOR® geo26JP型を構成する部材は、設計貯蔵期間中の温度、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を有する材料を選定し、その必要とされる強度及び性能を維持することで使用済燃料の健全性を確保する設計とする。	先行例と同様 なお、用いる金属ガasketの形状および外被材が異なる。

3. 設置許可基準規則への適合性(第十六条)(閉じ込め機能)

CASTOR® geo26JP型の閉じ込め機能に係る設計方針について具体的には以下の通り。

[設計方針]

- 使用済燃料集合体を限定された区域に閉じ込めるため、特定兼用キャスクの蓋及び蓋貫通孔のシール部に金属ガスケットを用いることにより、設計貯蔵期間(60年)を通じて、使用済燃料集合体を内封する空間を不活性雰囲気と保つとともに、負圧に維持する設計とする。
- 一次蓋及び二次蓋による二重の閉じ込め構造とし、蓋間空間を正圧に維持することにより圧力障壁を形成し、使用済燃料集合体を内封する空間を特定兼用キャスクの外部から隔離する設計とする。
- 蓋間空間の圧力を測定することで、閉じ込め機能を監視できる設計とする。

[安全評価方針]

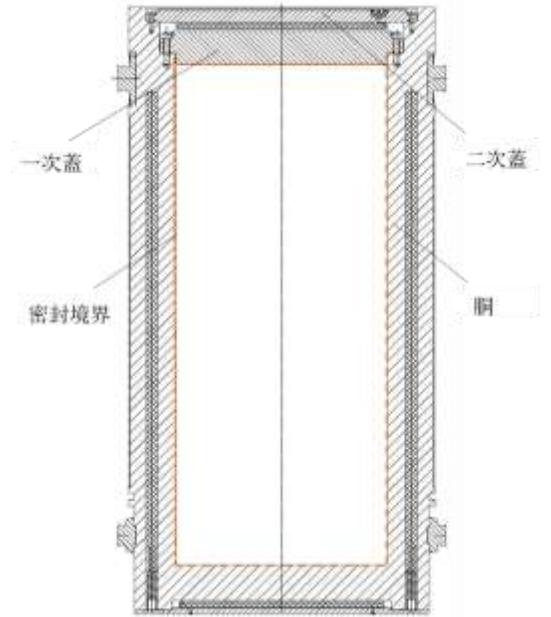
- 特定兼用キャスクの内部の負圧を設計貯蔵期間中維持できる漏えい率を基準漏えい率として設定する。
- 閉じ込め境界部の漏えい率の判定基準として、基準漏えい率よりも小さいリークテスト判定基準を設定する。
- 使用する金属ガスケットの性能が、リークテスト判定基準の漏えい率以下であることを確認する。

[設計の妥当性(成立性見通し)]

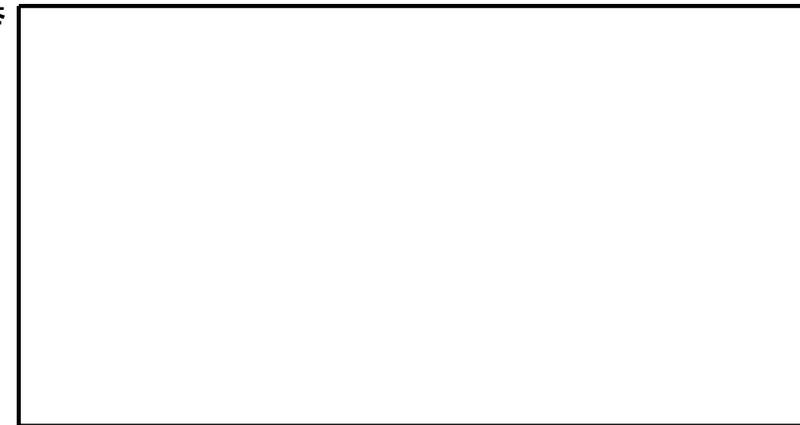
- 金属ガスケットの性能が、基準漏えい率よりも小さく設定されたリークテスト判定基準に対し、小さい漏えい率であり、設計貯蔵期間を通じて確認した。

[原子炉設置(変更)許可申請時の確認事項]

- 万一の閉じ込め機能の異常に対する修復性の考慮がなされていること。



閉じ込め構造図

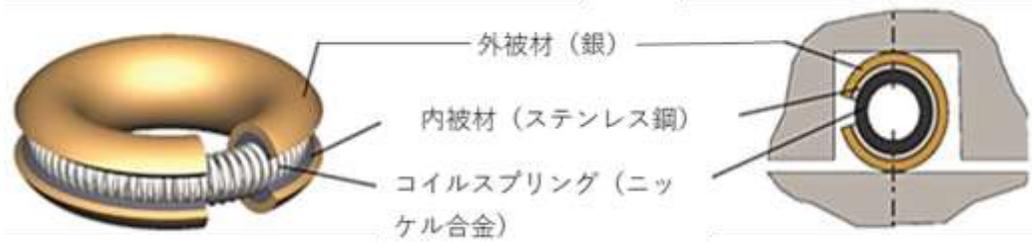


蓋及び蓋貫通孔のシール部詳細図

3. 設置許可基準規則への適合性(第十六条)(閉じ込め機能)

金属ガスケット

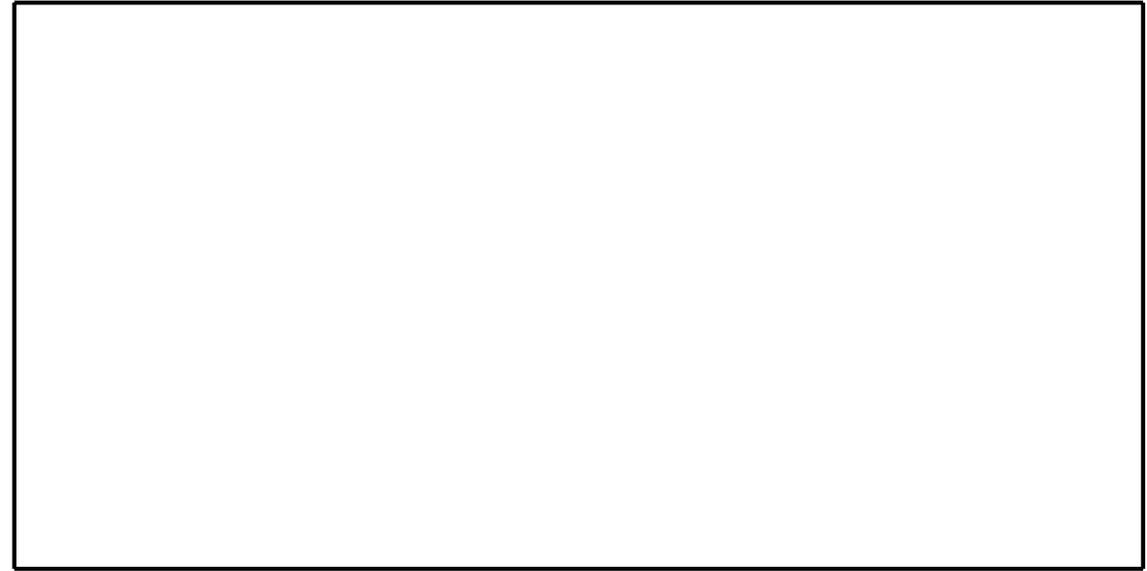
金属ガスケットは、耐熱性、耐食性、耐久性に優れたニッケル合金製のコイルスプリングをステンレス鋼製の内被材と銀製の外被材で覆った罫んだものを用いる。



金属ガスケット構造

閉じ込め機能の監視

CASTOR® geo26JP型は、二次蓋に貫通部を設け、圧力センサ(圧力計)を設置する構造とし、蓋間圧力を測定することにより、閉じ込め機能を監視できる設計とする



圧力監視装置を設置した二次蓋の構造

3. 設置許可基準規則への適合性(第十六条)(閉じ込め機能)

審査ガイド(注1)の確認内容に対するCASTOR® geo26JP型の閉じ込め機能に係る設計方針を下表に示す。

確認内容	閉じ込め機能に関する設計方針	先行例との比較
<p>(1) 長期間にわたって閉じ込め機能を維持する観点から、耐熱性、耐食性等を有し耐久性の高い金属ガスケット等のシールを採用するとともに、蓋部を一次蓋と二次蓋の二重とし、一次蓋と二次蓋との間の圧力(以下「蓋間圧力」という。)を監視することにより、蓋部が有する閉じ込め機能を監視できること。</p>	<p>CASTOR® geo26JP型は、蓋部を一次蓋と二次蓋の二重とし、蓋間空間を正圧とし、圧力障壁を形成することにより、使用済燃料を封入する空間を特定兼用キャスク外部から隔離する設計とする。一次蓋及び二次蓋の蓋貫通孔のシール部には、耐熱性、耐食性、耐久性に優れたニッケル合金製のコイルスプリングをステンレス鋼製の内被材と銀製の外被材で覆った囲んだ金属ガスケットを用いる。また、CASTOR® geo26JP型は、二次蓋に貫通部を設け、圧力センサ(圧力計)を設置する構造とし、蓋間圧力を測定することにより、閉じ込め機能を監視できる設計とする。</p>	<p>用いる金属ガスケットの形状および外被材が異なる。</p>
<p>(2) 兼用キャスクの内部の放射性物質が外部へ漏えいしないよう、設計貯蔵期間中、兼用キャスク内部の負圧を維持できること。</p>	<p>金属ガスケットの設計漏えい率は、設計貯蔵期間中に特定兼用キャスク本体内部の負圧が維持できる漏えい率(基準漏えい率)を下回るように設定されるリークテスト判定基準を満足することから、使用済燃料を封入する空間は、設計貯蔵期間を通じて負圧に維持される。</p>	<p>リークテスト判定基準については、気密漏えい検査に用いる装置の性能等から申請者で決めた数値を用いる。</p>
<p>(3) 密封境界部の漏えい率は、(2)を満たすものであること。また、使用する金属ガスケット等のシールの性能は、当該漏えい率以下であること。</p>		
<p>(4) 閉じ込め機能評価では、密封境界部の漏えい率が、設計貯蔵期間、内部初期圧力及び自由空間容積(兼用キャスク内部容積から収納物及びバスケットを減じた容積をいう。)、初期の蓋間圧力及び蓋間の容積、温度等を条件として、適切な評価式を用いて求められていること。</p>	<p>閉じ込め機能評価においては、設計貯蔵期間、充填ガスの種類、内部初期圧力、蓋間圧力、大気圧、キャスク内部空間体積、蓋間空間体積、内部気体温度、漏えい気体温度等を条件として、適切な評価式を用いる。</p>	<p>同上</p>

(注1)「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」

3. 設置許可基準規則への適合性(第十六条)(閉じ込め機能)

審査ガイド(注1)の確認内容に対するCASTOR® geo26JP型の閉じ込め機能に係る設計方針を下表に示す。

確認内容	閉じ込め機能に関する設計方針	先行例との比較
<p>(5) 兼用キャスクの衝突評価</p> <p>1) 兼用キャスクを床等に固定せず設置するとき (略)</p> <p>2) 貯蔵建屋等を設置するとき</p> <p>① 貯蔵建屋等の損壊モードの設定 損壊モードに応じた衝突物又は落下物を抽出し、そのうち兼用キャスクの閉じ込め機能に及ぼす影響が最大であるものを設定すること。</p> <p>② 兼用キャスクの衝突評価</p> <p>①で抽出した衝突物又は落下物による兼用キャスクへの衝突荷重に対して、密封境界部がおおむね弾性範囲内であること。</p> <p>3) 使用済燃料の再取出性の評価</p> <p>a. 兼用キャスクに収納される使用済燃料を取り出すために、一次蓋及び二次蓋が開放できること。</p> <p>b. 使用済燃料の燃料ペレットが燃料被覆管から脱落せず、かつ、使用済燃料集合体の過度な変形を生じないこと。</p>	<p>CASTOR® geo26JP型は貯蔵施設の基礎に固定するため、転倒モードの設定及び兼用キャスクの衝突評価は実施しない。また、貯蔵建屋等を設置するときの損壊モードの設定および兼用キャスクの衝突評価については、申請範囲外とし、別途設置(変更)許可申請にて審査を受ける事項とする。</p> <p>使用済燃料の再取出性に関しては、CASTOR® geo26JP型は一次蓋及び二次蓋を開放して使用済燃料集合体を取り出すことができる設計とする。</p>	<p>先行例では申請範囲外。</p>
<p>(6) 閉じ込め機能の異常に対し、適切な期間内で使用済燃料の取出しや詰替え及び使用済燃料貯蔵槽への移送を行うこと、これらの実施に係る体制を適切に整備すること等、閉じ込め機能の修復性に関して考慮がなされていること。</p>	<p>申請範囲外とする。</p>	

3. 設置許可基準規則への適合性(第十六条)(閉じ込め機能)

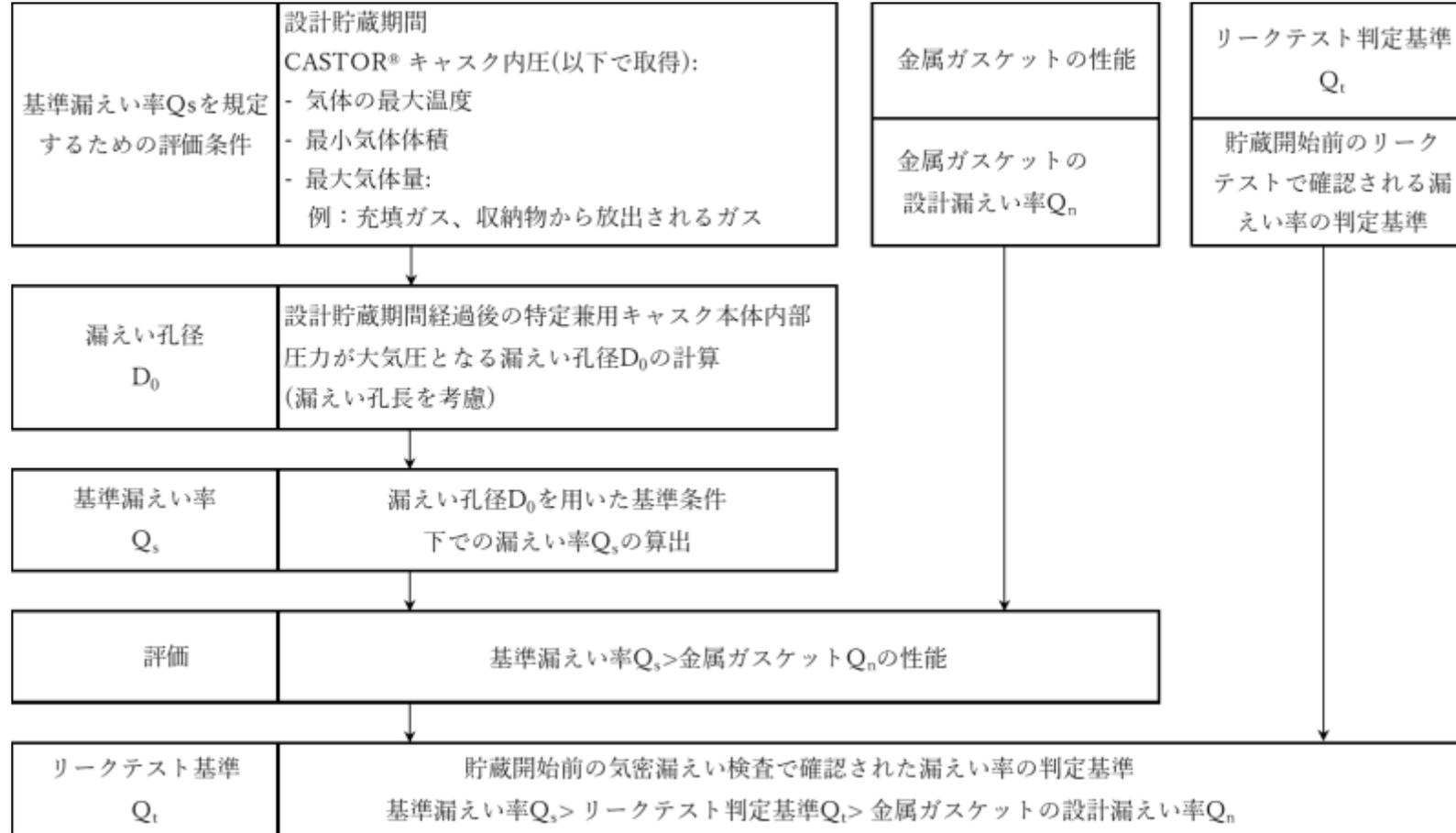
審査ガイド(注1)の確認内容に対するCASTOR® geo26JP型の閉じ込め機能に係る設計方針を下表に示す。

確認内容	閉じ込め機能に関する設計方針	先行例との比較
(7) 蓋間圧力を適切な頻度で監視すること。ここで、適切な頻度とは、閉じ込め機能が低下しても、FPガス当の放出に至る前に、密封シール部の異常を検知できる頻度をいう。頻度の設定に当たっては、設計貯蔵期間中の兼用キャスクの発熱量の低下、周囲環境の温度変化及び蓋間圧力の変化を考慮する。	申請範囲外とする。	
(8) キャスク表面温度を適切な頻度で監視すること。ここで、適切な頻度とは、除熱機能が低下しても、兼用キャスクや燃料被覆管が健全であるうちに異常を検知できる頻度をいう。	除熱機能の監視に係る確認事項である。	先行例と同様

3. 設置許可基準規則への適合性(第十六条)(閉じ込め機能)

CASTOR® geo26JP型の閉じ込め機能に係る安全評価方針について具体的には以下の通り。

基準漏えい率 > リークテスト判定基準 > 金属ガスケットの設計漏えい率 であることをフローに基づき評価する。



閉じ込め機能評価フロー

3. 設置許可基準規則への適合性(第十六条)(閉じ込め機能)

閉じ込め機能評価条件

- 蓋間圧力は保守的に初期圧力で一定とし、蓋間空間のガスは特定兼用キャスク本体内部側のみ漏洩するものとする。
- 大気圧は気象変化による圧力変動を保守的に考慮した値として、 $9.7 \times 10^4 \text{Pa}$ とする。
- 特定兼用キャスク本体内部空間の圧力の算定にあたっては、使用済燃料の破損によるガス放出による圧力上昇を考慮する。
- 使用済燃料の破損率は、米国の使用済燃料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(約0.01%以下)を考慮し、保守的な値として、0.1%とする。

漏えい孔中の流体の流れの形態としては、自由分子流と連続流とを考慮して、漏えい率は次式で求める。

$$L(p_a) = L_c(p_a) + L_m(p_a)$$

$$L_m = \frac{1}{6} \cdot \sqrt{\frac{2\pi \cdot R \cdot T}{M}} \cdot \frac{D^3}{a \cdot p_a} \cdot (p_u - p_d)$$

$$L(p_u) = L(p_a) \cdot p_a / p_u$$

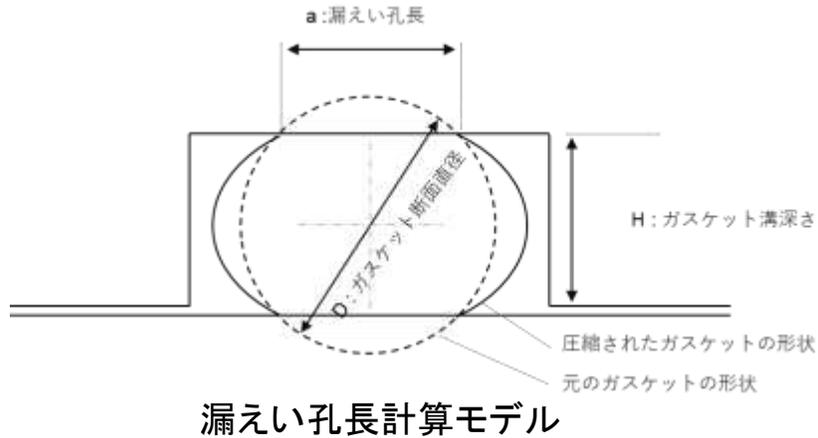
$$L_c = \frac{\pi}{128} \cdot \frac{D^4}{\mu \cdot a} \cdot (p_u - p_d)$$

流体である層流粘性流 $L_c(p_a)$ と分子流 $L_m(p_a)$ は、平均圧力 p_a で流れるものとする。
ただし、流体の体積漏えい速度は上流側圧力で決定されるとし、ガス漏えい量を求める。

L_c	:	層流粘性(連続流)体積漏えい率 (m^3/s)
L_m	:	分子体積漏えい速度 (m^3/s)
μ	:	気体の動粘度 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)
M	:	気体分子のモル質量 (kg/mol)
p_u	:	上流圧力 (Pa)
p_d	:	下流圧力 (Pa)
p_a	:	平均圧力 ($p_a = (p_u + p_d)/2$) (Pa)
a	:	漏えい孔長 (m)
D	:	漏えい孔径 (m)
T	:	密封境界の温度(それぞれの蓋ガスケットの温度) (K)
R	:	気体定数($8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)

3. 設置許可基準規則への適合性(第十六条)(閉じ込め機能)

閉じ込め機能評価条件(続き)



溝で圧縮されたガスケットの外形を示す。ガスケット溝の高さ ($H = \square$ mm) と金属ガスケットの直径 ($D = \square$ mm) を用いて、漏えい孔長を計算する。

$$a = \sqrt{D^2 - H^2} = 4.5 \text{ mm}$$

標準条件およびこの漏えい孔長を用いて、クヌッセンの方程式を解くと、漏えい孔径は $D_0 = 1.20 \times 10^{-5}$ m となる。

閉じ込め評価条件

記号	単位	説明	定数	初期	密封境界(一次蓋)
Q_S	$\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$	基準漏えい率	x		4.1×10^{-5}
T	K	ガスケット及び漏えいガス温度(最低)	x		250.6
$T_{IL} = T_E$	K	蓋間ガス/環境温度(最低)	x		250.6
T_G	K	内部気体温度(丸めた値)	x		450
$p_u = p_E$	Pa	上流圧力(蓋間圧力)	x		7.09×10^5
$p_d = p_G$	Pa	下流圧力(内部気体圧力)		x	6.4×10^4
V_g	m^3	蓋間空間内自由ガス量	x		
V_G	m^3	キャスク内自由ガス量	x		
n_g	mol	蓋間空間内ガス物質量		x	
n_G	mol	キャスク内ガス物質量		x	
M_{He}	kg/mol	モル質量	x		4.0×10^{-3}
$\mu(T)$	$\text{Pa} \cdot \text{s}$	動粘度(最小)	x		1.7×10^{-5}
a	m	漏えい孔長	x		4.5×10^{-3}
D_0	m	漏えい孔径	x		1.20×10^{-5}

基準漏えい率 Q_S は、雰囲気圧力を一定とし、ガスがキャスク内部にのみ漏えいすると仮定して計算される。CASTOR® geo26JP型キャスクの設計仕様(温度、圧力、内部ガス、キャスク内部空間の容積、金属ガスケット形状)に基づき、漏えい孔径をパラメータとして設計貯蔵期間後のキャスク内圧を繰り返し計算し、設計貯蔵期間後のキャスク内圧が大気圧よりも低い負圧となる漏えい率を標準状態に換算して基準漏えい率を求める。

3. 設置許可基準規則への適合性(第十六条)(閉じ込め機能)

閉じ込め機能評価結果

算出及び設定した基準漏えい率、リークテスト判定基準及び金属ガスケットの設計漏えい率は下表のとおり。

項目	基準漏えい率 Q_s	リークテスト判定基準 Q_t	設計漏えい率 Q_n
金属ガスケットの漏えい率	4.1×10^{-5} Pa · m ³ /s 注1	1.0×10^{-8} Pa · m ³ /s	1.7×10^{-9} Pa · m ³ /s

注1 設計貯蔵期間中にキャスク内の負圧を維持するための漏えい率(標準状態)を示す。

リークテスト判定基準は、気密漏えい検査に用いる装置の性能より、 1.0×10^{-8} Pa · m³/sと設定した。

金属ガスケットの設計漏えい率は、(一財)電力中央研究所で実施された長期密封性能試験の約19年間の金属ガスケットの漏えい率計測結果における金属ガスケットからの漏えい率平均(6.50×10^{-10} Pa m³/s)に標準偏差(3.40×10^{-10} Pa m³/s)の3倍を加算した値を切り上げた設定値(1.7×10^{-9} Pa m³/s)とした。

以上より、CASTOR® geo26JP型の金属ガスケットの設計漏えい率は、基準漏えい率を下回るように設定されるリークテスト判定基準を満足することから、使用済燃料を封入する空間は、設計貯蔵期間を通じて負圧に維持されることを確認した。

ご清聴ありがとうございました！

