

補足説明資料 16-5

第十六条

燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設

閉じ込め機能に関する説明資料

目次

1	要求事項.....	3
2	要求事項への適合性.....	6
3	参考文献一覧.....	20
別紙 1	燃料破損がもたらす特定兼用キャスク内部へのガス放出量.....	21
別紙 2	基準漏えい率及びリークテスト判定基準の評価.....	23
別紙 3	設計貯蔵期間にわたる金属ガスケットの設計漏えい率.....	32
別紙 4	貯蔵中の蓋間圧力の経時変化及び蓋間空間の再充填による特定兼用キャスク本体内部圧力の負圧維持について.....	38

1 要求事項

特定機器の設計の型式証明申請において、特定兼用キャスクの閉じ込め機能に関する要求事項は、以下の通りである。

(1) 設置許可基準規則要求事項

a. 設置許可基準規則 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。

b. 設置許可基準規則解釈 別記4 第16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。

・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。

- 一 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。
- 二 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。
- 三 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。

四（略）

五（略）

・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。

- 一 蓋部が有する閉じ込め機能を監視できること。

二（略）

三（略）

c. 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。

- ・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。

(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確認事項

「2. 安全機能の確保 2.4 閉じ込め機能」及び「4. 自然現象等に対する兼用キャスクの設計 4.4 監視機能」には、以下の様に記載されている。

【審査における確認事項】

『

- (1) 設計上想定される状態において、兼用キャスクが内包する放射性物質を適切に閉じ込めることができること。
- (2) 密封境界部は、設計上想定される衝撃力に対して、おおむね弾性範囲内にとどまること。
- (3) 閉じ込め機能の異常に対して、その修復性が考慮されていること。

』

【確認内容】

『

- (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。
- (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。
- (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。
- (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空間の容積、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。
- (5) 兼用キャスクの衝突評価
 - 1) 兼用キャスクを床等に固定せず設置するとき
 - ① 転倒モードの設定
兼用キャスクを縦置き又は横置きにした貯蔵状態で第6項地震力(設置許可基準規則第4条第6項に規定する地震力をいう。以下同じ。)を入力し、兼用キャスクの転倒、兼用キャスク同士の衝突及び兼用キャスクと周辺施設との衝突のうち、設計上想定するものを設定すること。
 - ② 兼用キャスクの衝突評価
 - ①で抽出した転倒等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。この際「4.3.1 地震に対する設計方針」を参考にしていること。
 - 2) 貯蔵建屋等を設置するとき
 - 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。
 - ② 兼用キャスクの衝突評価
 - 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。
 - 3) 使用済燃料の再取出性の評価
 - 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。
 - 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。
- (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。

』

【審査における確認事項】

『

蓋間圧力及び兼用キャスク表面温度について、適切な頻度での監視をすること。

』

【確認内容】

『

- (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 ガス等の放出に至る前に、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。
- (8) 兼用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。

』

2 要求事項への適合性

(1) 設置許可基準規則への適合性

CASTOR[®]-geo26JP型の閉じ込め機能については、以下のとおり設置許可基準規則に適合している。

a. 設置許可基準規則 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。

b. 設置許可基準規則解釈 別記4 第16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。

・ 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。

- 一 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。
- 二 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。
- 三 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。

・ 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。

- 一 蓋部が有する閉じ込め機能を監視できること。

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、**ヘリウムガスを封入**することにより、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を保つとともに、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、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。さらに、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。(詳細は2.(2)審査ガイドへの適合性【確認内容】(1)の説明を参照)

2.(2)審査ガイドへの適合性【確認内容】(2)から(4)への説明に示すとおり、CASTOR[®] geo26JP型の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(貯蔵開始**搬出**前の漏えい検査の判定基準として可能な漏えい率)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。

なお、貯蔵事業許可基準規則解釈第5条第1項第三号に示される閉じ込め機能の異常に対する閉じ込め機能の修復性に関する考慮がなされていることについては、型式証明申請の範囲外（設置（変更）許可申請において別途確認）であるが、2.(2)審査ガイドへの適合性【確認内容】(6)の説明に示すとおり、蓋間圧力に異常が生じた場合でも、あらかじめ特定兼用キャスク内部を負圧に維持するとともに蓋間圧力を正圧としているため、内部の気体が外部に漏えいすることはない。

c. 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。
- ・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。

CASTOR[®] geo26JP型の設計貯蔵期間は60年とする。

CASTOR[®] geo26JP型を構成する部材は、補足説明資料「特定兼用キャスクの構造と材料(1024-TR-00005)」に示す通り、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。

(2) 審査ガイドへの適合性

審査ガイドでは、兼用キャスクの有する安全機能(臨界防止機能、遮蔽機能、除熱機能及び閉じ込め機能)に係る設計の基本方針の妥当性を確認することが定められており、CASTOR® geo26JP型の閉じ込め機能については、以下の通り審査ガイドの確認内容に適合している。

【確認内容】

- (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。

CASTOR®-geo26JP 型の閉じ込め構造を図 1 に、シール部詳細を図 2 に、金属ガスケット構造を図 3 に示す。

CASTOR®-geo26JP 型は、特定兼用キャスク本体及び一次蓋により使用済燃料を封入する空間を、設計貯蔵期間(60 年)を通じて負圧に維持する。CASTOR®-geo26JP 型は、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**基準漏えい率**は、設計貯蔵期間中に特定兼用キャスク本体蓋部の負圧が維持できる漏えい率(以下「基準漏えい率」という。)を下回るように設定される。さらに、貯蔵開始**搬出**前の気密漏えい検査の判定基準として確認可能な漏えい率(以下「リークテスト判定基準」という。)を満足するものを使用する。

一次蓋の金属ガスケットのリークテスト**気密漏えい検査**には、別途、専用のテストプレートを用意し、一次蓋の上方でキャスク**特定兼用キャスク**頭部の上端部に仮設置し、テストプレートと一次蓋の間の空間を真空にして、キャスクキャビティ**特定兼用キャスク内部**内のヘリウムリークの有無を検知する。二次蓋の金属ガスケットのリークテスト**気密漏えい検査**も同様に行う。

金属ガスケットは、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**困んだもの**を用いる(図 3 参照)。このガスケットは、別紙 3 及び**参考**文献[1]に示すとおり、耐熱性、耐食性、耐久性に優れたものである(補足説明資料「長期健全性に関する説明資料」(1024-TR-00011))。なお、本ガスケットは、ドイツ及びチェコ等で許認可されている輸送・貯蔵兼用キャスクに使用されており(CASTOR® V/19 (D/4372/B(U)F-96, Rev. 3, 2015 年)及び CASTOR® 1000/19 (CZ/070/B(U)F-96, Rev. 0, 2010 年))、現在も継続して使用されている。

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(図 4 参照)。この蓋間圧力監視装置の詳細は図 4 の(b)に示す通りで、蓋間圧力は圧力を電気信号に変換・測定される。本装置は、すでにドイツやチェコ等の輸送・貯蔵兼用の CASTOR® 型キャスクで使用されている。

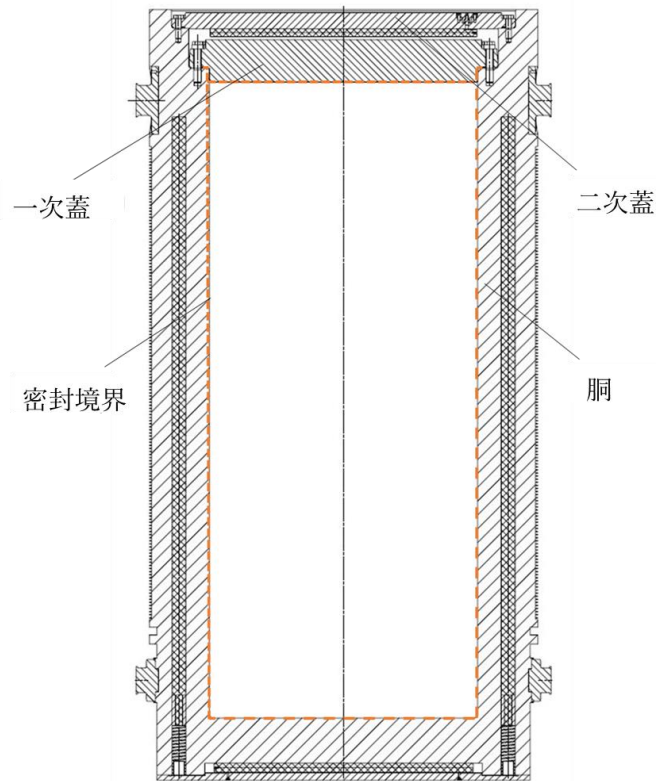


図1 CASTOR® geo26JP 型の閉じ込め構造(密封境界部)

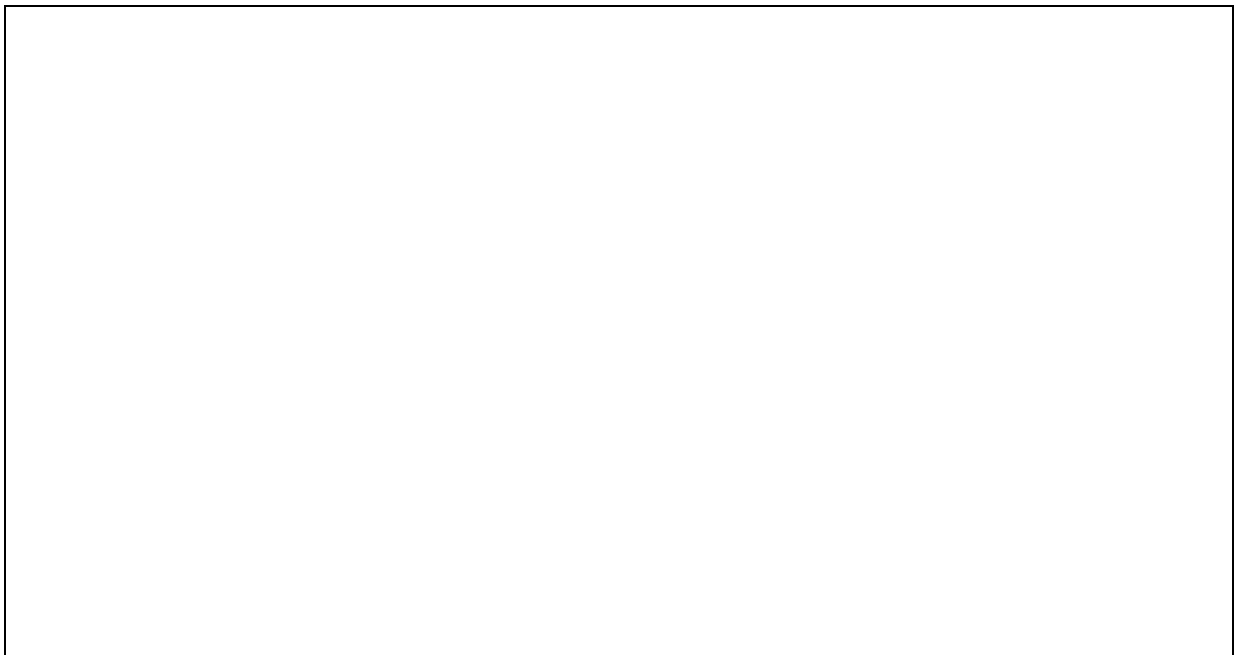


図2 CASTOR® geo26JP 型のシール部詳細

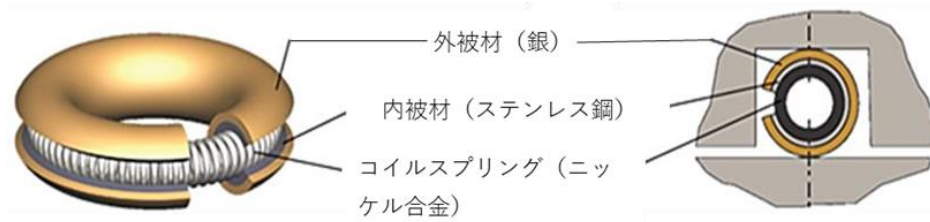


図 3 金属ガスケット構造

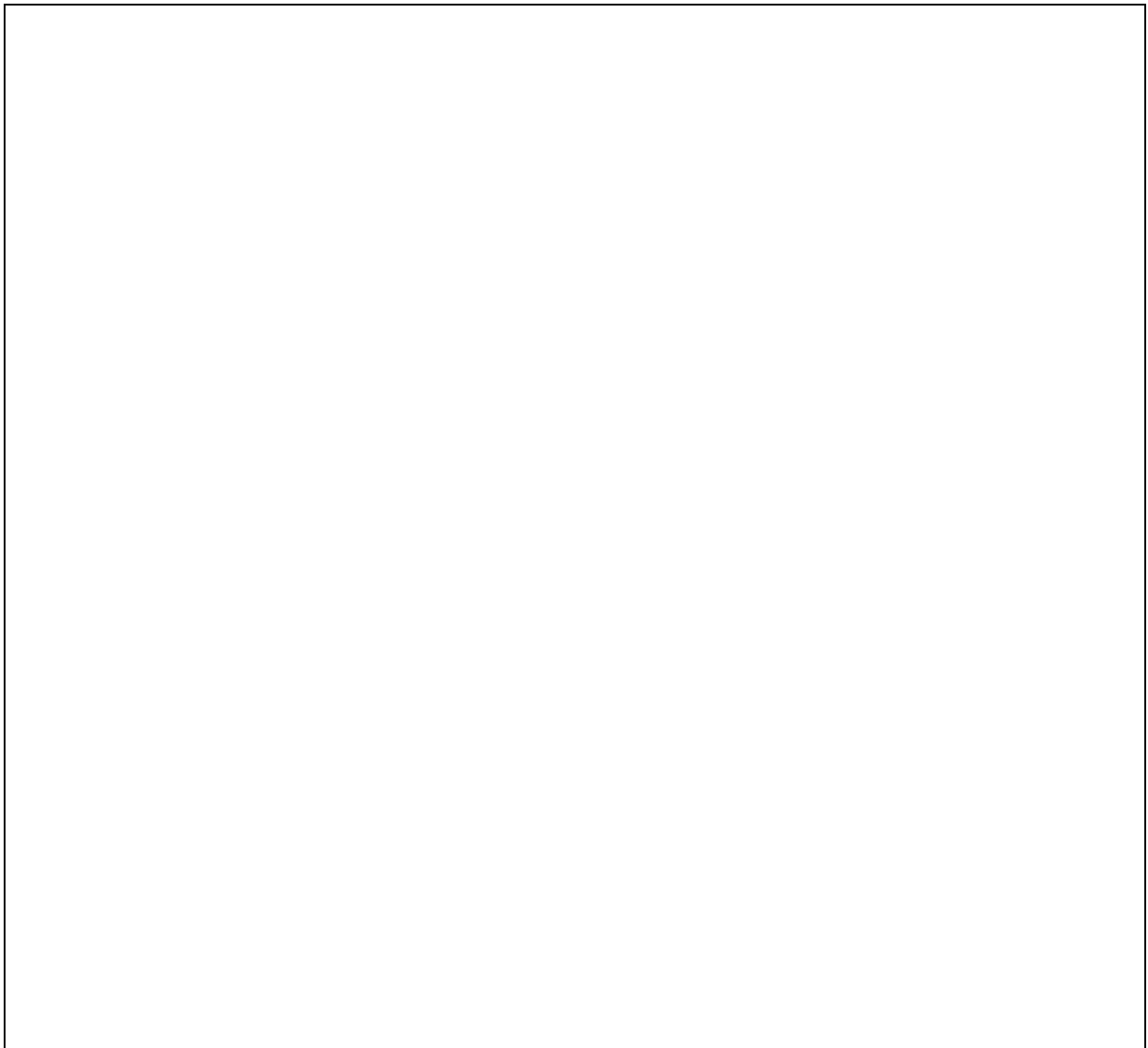


図 4 圧力監視装置を設置した二次蓋の構造

【確認内容】

- (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。
- (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リングの性能は、当該漏えい率以下であること。
- (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。

a. 閉じ込め評価方法

閉じ込め評価フローを図5に示す。

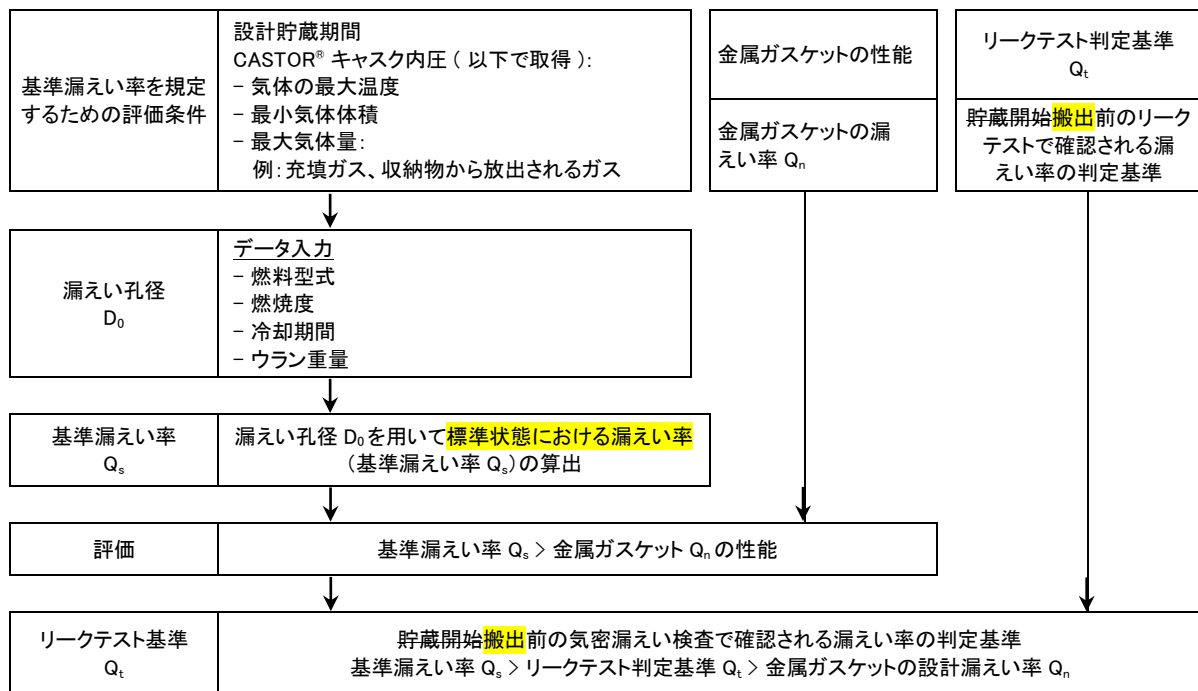


図5 閉じ込め評価フロー

基準漏えい率 Q_s は、標準条件下での漏えい率であり、すなわち、上流圧力 $p_u = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$ 、下流圧力 $p_d = 1.013 \times 10^3 \text{ Pa}$ 、温度 $T = 298 \text{ K}$ 、ヘリウムガスの条件で、特定の漏えい孔直径で漏えいし、別紙2、セクション A2.1 のクヌッセンの式を解くことによって得られる。基準漏えい率 Q_s は、キャスク本体内部から蓋間空間および環境への十分な負圧差を確保するために定義される。リークテスト判定基準 Q_t は、 Q_s よりも小さい値として定義される必要がある。ガスケットの設計漏えい率 Q_n (別紙3参照)に期待される性能は、リークテスト判定基準に適合し、 Q_t よりも小さい必要がある(図5参照)。以下では、キャスク本体内部から蓋間空間および環境への負圧差を確認するために、いくつかの計算ケース(表1参照)を検討・分析する。

閉じ込め評価では、基準漏えい率(Q_s)を求め、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(Q_t)よりも小さい金属ガスケット(金属ガスケットの設計漏えい率(Q_n))を使用することを説明する。

基準漏えい率は、蓋間圧力と特定兼用キャスク本体内部圧力差のもとで、シール部を通して特定兼用キャスク本体内部へ流入する気体の漏えい率を積分することによって、設計貯蔵期間経過後に特定兼用キャスク本体内部圧力が大気圧となるまで圧力変化を求めた際の漏えい率として計算される。

基準漏えい率及びリークテスト判定基準の具体的な評価方法を別紙 1 及び別紙 2 に示す。

基準漏えい率の計算では、蓋間圧力は保守的に初期圧力(7.09×10^5 Pa)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にのみ漏えいするものとする。また、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、 9.7×10^4 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[2]。

表 1——圧力評価の計算ケースにおける漏えい率

密封境界の漏えい率	圧力障壁の漏えい率
Q_s	Q_s
Q_s	0
Q_t	0
Q_n	0

ケース 1. 圧力障壁と密封境界は、同じ基準漏えい率を有する。これは、60 年間の貯蔵後にキャスク本体内部から蓋間空間および環境への適切な負圧差を確認するために行う。これは、使用済燃料集合体を封入するキャスク内の容積が、設計貯蔵期間を通じて周囲圧力と比較して低い圧力に維持され得ることを意味する。対応する漏えい率は、基準漏えい率 Q_s として定義される。このケースについては、以下のセクションで分析する。

ケース 2. ここでは、圧力障壁は、蓋間から環境へのガスの流出を回避するために完全に気密であると仮定する。すなわち、蓋間空間のガスは特定兼用キャスク本体内部側にのみ漏洩するものとして計算を行う。

2-a. キャビティへのガス流を最大化するこの変動が、60 年間の貯蔵後にキャビティ内の負圧に重大な影響を及ぼすかどうか、すなわち、密封境界の Q_s の定量化に影響するかどうかを評価する。

2-b. 密封境界がリークテスト判定基準 Q_t を満たす場合に、どのような圧力の変化が予想されるかをさらに評価する。

2-c. 最後に、密封境界が設計漏えい率 Q_n を満たす場合に、どのような圧力の変化が予想されるかを評価する。

これらの計算ケースについては、別紙 2 に示す。

b. 閉じ込め評価結果

特定兼用キャスクの閉じ込め評価の結果を表 1 に示す。表 1 に示すとおり、使用する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したリークテスト判定基準より小さいことを確認した。また、使用する金属ガスケットによる本体内部圧力の経時変化を図 6 に示す(金属ガスケットの設計漏えい率による特定兼用キャスク本体内部の圧力変化の具体的な評価方法は別紙 2 参照)。

表 1 閉じ込め評価結果

基準漏えい率 Q_s	リークテスト判定基準 Q_t	金属ガスケットの設計漏えい率 Q_n
3.5×10^{-6} $\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$	1.0×10^{-8} $\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$	1.7×10^{-9} $\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$
1.59×10^{-6}	7.80×10^{-7}	1.67×10^{-9}

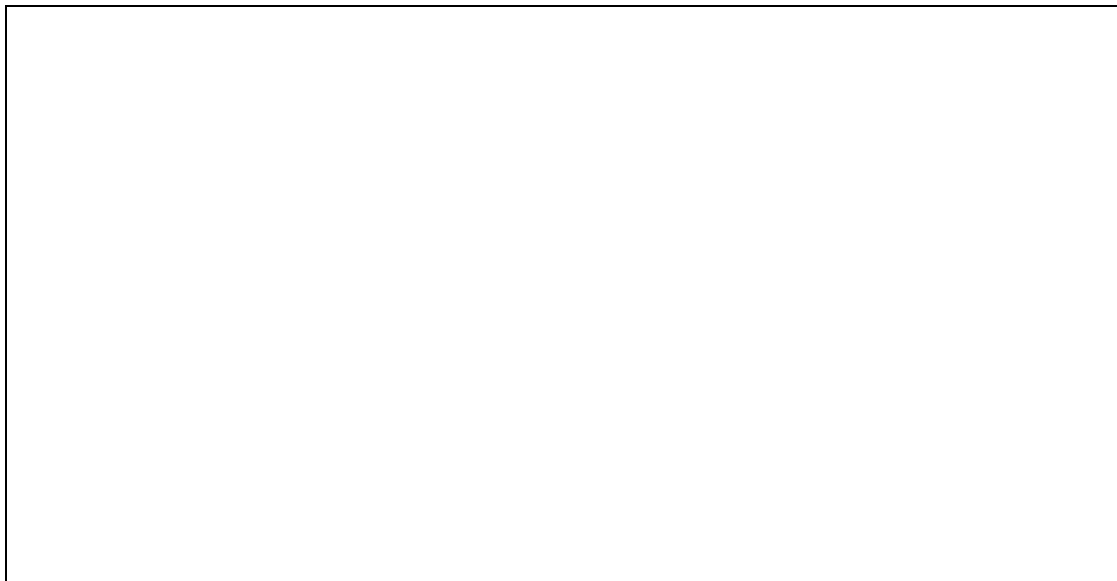


図 6 特定兼用キャスク本体内部圧力の経時変化

図 6 に示す通り、使用する金属ガスケットの設計漏えい率による設計貯蔵期間経過後の特定兼用キャスク本体内部圧力は負圧に維持されることを確認した。

ただし、金属ガスケットの設計漏えい率を有する金属ガスケットにおいても、その漏えい率は金属ガスケット締付時の胴フランジ及び蓋の金属ガスケットシート面の状態(傷、埃の有無)に影響を受けやすく、 $1.7 \times 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ (注)を上回る漏えい率となる可能性がある。上記のような金属ガスケットの漏えい率の不確実性を考慮し、搬出前の漏えい検査では、一次蓋及び蓋貫通孔の密閉カバーシール部の漏えい率の合計がリークテスト判定基準を満足することを確認する。

図 6の残りの部分とは異なるスケールで示している。 $3.5 \times 10^{-6} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ の基準漏えい率に対して、60年後の差圧が $2 \times 10^4 \text{ Pa}$ (60年後の $p_{c0} = 7.3 \times 10^4 \text{ Pa}$ 、最小周囲圧力 $9.7 \times 10^4 \text{ Pa}$)以上となるので、周囲圧力と比較してキャスク本体内部圧力の負圧が依然として維持される。したがって、この値を基準漏えい率 Q_s として定義することが適切である(表 1表 2参照)。次いで、キャスクの内部圧力は、60年の全設計貯蔵期間の間、周囲圧力と比較して、より低いレベルにあり、キャスクからの放射能放出を定量化する計算を行う必要がない。蓋間圧力は、 $1.03 \times 10^5 \text{ Pa}$ の最大周囲圧力を下回って降下しないため、キャスク外部からの空気の侵入はない。

リークテスト判定基準 Q_t は、漏えい検出器の性能に応じて決定する。一般的に使用されている技術的气密性の値として、CASTOR[®] geo26JP型キャスクでは $Q_t = 1.0 \times 10^{-8} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ が使用されている。

(注)金属ガスケットの設計漏えい率 Q_n は、出荷時の漏れ試験の結果として考慮される。電力中央研究所が実施した長期密封性試験における約19年間の漏えい率測定結果から、 $1.7 \times 10^{-9} \sim 10^{-9} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ の値が設定される。これは、金属ガスケットの密封性試験における平均漏えい率($6.50 \times 10^{-10} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$)に標準偏差($3.40 \times 10^{-10} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$)の3倍を加えた値を切り上げたものである(別紙 3)。

計算ケース2a、2b、2cについては別紙添 2で考察する。これらの結果、表 2に示すように、金属ガスケットのリークテスト判定基準 Q_t は、基準漏えい率漏えい率 Q_s よりは低い、設計漏えい率 Q_n よりは高く、設計基準を満たしている(図5参照)。

c. 設計貯蔵期間中の漏えい率の維持に関する評価

金属ガスケットの閉じ込め性能は、特定兼用キャスクのシール部が比較的高温下にあるため、長期貯蔵中のクリープによる応力緩和を考慮したうえで評価する必要がある。「応力緩和による漏えい率への影響については、(一財)電力中央研究所で実施された長期密封性能試験結果において、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。)の関係として図 7に示すとおり整理されている[3]。

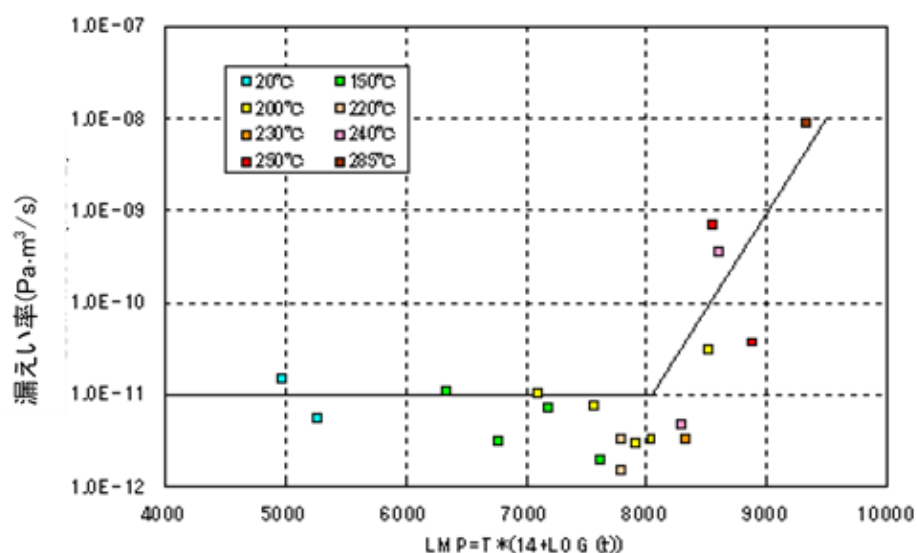


図 7 金属ガスケットの LMP と漏えい率の関係

図 7 より、金属ガスケットの LMP が 8050 を超えないように設計すれば、長期貯蔵中のクリープによる応力緩和を考慮しても設計貯蔵期間(60 年間)を通じて初期の漏えい率が維持されることが示されている[4]。

CASTOR® geo26JP 型の除熱評価の結果(補足説明資料「除熱機能に関する説明資料」(1024-TR-00008)参照)から、金属ガスケット温度は、17 x 17 燃料収納時及び 15 x 15 燃料収納時ともに 100°C 以下である。この温度(100°C)から設計貯蔵期間に相当する LMP を算出すると、約 7500 となり、長期密封性能試験の金属ガスケットの漏えい率と LMP の関係から金属ガスケットは設計貯蔵期間を通じて初期の漏えい率を維持できると判断される。

また、図 8 に示す(一財)電力中央研究所で実施された実規模の金属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 19 年以上(平成 2 年 10 月から平成 22 年 1 月)が経過した二次蓋閉じ込め部の漏えい率に変化はなく、その金属ガスケットは試験開始時と同等の閉じ込め性能を保持できることが確認されている。なお、この試験での金属ガスケットの温度は 125°C 一定であり、CASTOR® geo26JP 型の設計貯蔵期間中の温度よりも高いので、CASTOR® geo26JP 型の漏えい率は更なる期間、維持されると、考えられる。

更に、米国サリー発電所では 1985 年以降、銀被覆の金属ガスケットを使用した CASTOR® 型キャスクの貯蔵を継続しており、その密封性は 14 年後に確認され [5]、貯蔵は現在も継続されている。

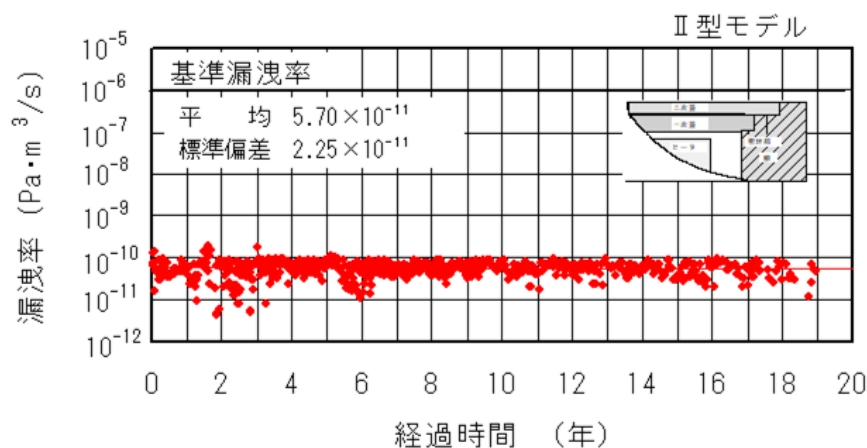


図 8 銀被覆の金属ガスケット(二次蓋)の長期密封性能試験結果

【確認内容】

(5) 兼用キャスクの衝突評価

1) 兼用キャスクを床等に固定せず設置するとき

① 転倒モードの設定

兼用キャスクを縦置き又は横置きにした貯蔵状態で第6項地震力(設置許可基準規則第4条第6項に規定する地震力をいう。以下同じ。)を入力し、兼用キャスクの転倒、兼用キャスク同士の衝突及び兼用キャスクと周辺施設との衝突のうち、設計上想定するものを設定すること。

② 兼用キャスクの衝突評価

①で抽出した転倒等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。この際「4.3.1 地震に対する設計方針」を参考にしていること。

2) 貯蔵建屋等を設置するとき

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。

② 兼用キャスクの衝突評価

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。

3) 使用済燃料の再取出性の評価

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。

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。

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。

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。

【確認内容】

- (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。

CASTOR[®] geo26JP型の閉じ込め機能の異常に対する具体的な対応方法は、型式証明申請の範囲外であるが、以下に示す通り、蓋間の圧力に異常が生じた場合でも、あらかじめ特定兼用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ため、内部の気体が外部に漏えいすることはない。

CASTOR[®] geo26JP型は、蓋間圧力を測定することにより、閉じ込め機能を監視する設計とする。

蓋間圧力の大幅な低下が確認された場合は、まず監視機器の異常がないか確認し、監視機器の異常であることが確認された場合は監視機器を交換した後、貯蔵の再開が可能である。監視機器に異常がない場合は、一次蓋金属ガスケット又は二次蓋金属ガスケットからの漏えいが想定される。CASTOR[®] geo26JP型の二次蓋の気密性**金属ガスケットからの漏えい**は、図4に示す圧力監視装置から確認可能な設計となっている。二次蓋金属ガスケットから漏えいする場合、**蓋間空間のヘリウムガスが大気中に放出され、蓋間圧力が大気圧に低下するのみであり、特定兼用キャスク本体内部は設計貯蔵期間中を通して大気圧より低いレベルが維持されることから放射性物質がCASTOR[®] geo26JP型の外部へ漏えいするおそれはない。**また、一次蓋の金属ガスケットから漏えいする場合には、キャスク本体と二次蓋の金属ガスケットにより、**蓋間空間のガスがキャスク本体内に流入するのみであるので(圧力障壁)**、放射性物質がCASTOR[®] geo26JP型の外部へ漏えいするおそれはない。

【確認内容】

- (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ガス等の放出に至る前に、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。
- (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。

確認内容(7)については、蓋間圧力の監視頻度に関する確認事項であり、型式証明の申請範囲外(設置(変更)許可時の別途確認事項)とする。参考として、監視の頻度については、図4に示した圧力監視装置により、圧力を連続監視することが可能である。ヘリウムの再充填については、通常、必要ではないが、二次蓋上部のクイックコネクタから可能である。仮に再充填する場合、特定兼用キャスク内部の負圧状態を確認して行う(別紙4参照)。

また、確認内容(8)については、除熱機能の監視に係る確認事項である。除熱設計は閉じ込め機能が維持することを担保する設計としている。

参考として、監視の頻度については、圧力を連続監視する。ヘリウムの再充填については、通常、必要ではないが、二次蓋上部のクイックコネクタから可能である。仮に再充填する場合、キャスクキャビティの負圧状態を確認する。

3 参考文献一覧

- [1] M. Wataru, et al, Ageing of HELICOFLEX[®] metallic gasket for spent fuel cask: results of sealing performances of a 100,000h campaign (Paper No. 5026), PATRAM 2016 September 18-23, 2016, Kobe, Japan
- [2] AESJ-SC-F002:2021 日本原子力学会標準
使用済燃料中間貯蔵施設の金属キャスクの安全設計及び検査基準: 2021 年
- [3] (一財)電力中央研究所、使用済核燃料貯蔵の基礎、ERC 出版、2014 年
- [4] 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試験手法の開発、日本原子力学会誌 Vol.38, No.6 (1996), p.95-101
- [5] NUREG/CR 6745
Dry cask storage characterization Project – Phase 1: CASTOR[®] V/21 Cask Opening and Examination
Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, 2001

別紙 1 収納物の特性燃料破損がもたらす特定兼用キャスク内部へのガス放出量

閉じ込め評価では0.1%の燃料破損に伴う内部ガスの放出を考慮することから、以下のとおり、FPガスの生成量及び初期充填ガス量を計算した。

(1) FPガスの生成量

燃料集合体の幾何学的形状に加えて、特定兼用キャスクの閉じ込め性能に関連する主要な収納物特性は、最終燃焼度および重金属質量である。

CASTOR[®]-geo26JP型では、2種類の使用済燃料タイプとして、15x15型及び17x17型が検討されており、燃焼度は 48,000 MWd/tHM まで、重金属質量は kg までを設計仕様としている。

使用済燃料の燃焼計算は、ORIGEN-2.2を用いて双方の燃料タイプに対して、燃焼度及び重金属質量を上記の値で行った(補足説明資料「遮蔽機能に関する説明資料」(1024-TR-00007))。燃料タイプ、燃焼度、重金属質量の組み合わせの中で、核分裂性ガスの生成エネルギーあたりの量の最大値を表A1-1に示す。

生成エネルギーあたりの核分裂性ガスの合計値である mol/1,000-MWd に対して、設計仕様として上記の燃焼度及び重金属質量を乗じると、核分裂ガス

FPガスの総発生量は燃料集合体あたり約 mol^{注1} となる。

26体の使用済燃料集合体を装荷した場合には、約 mol の(基本的には非放射性の)FPガスが原子力発電所の原子炉で使用される際の最大FPガス生成量の設計仕様とする。

表 A1-1 生成エネルギーあたりの FP ガス量

--

†— 使用済燃料集合体1体当たり及び26体からの発電エネルギーあたりの核分裂ガス量は、
 mol/GWd × 48 GWd/キャスク × kg × 26 体で計算される。個々の値は別々に切り上げられるため、丸めた値 mol × 26 の計算とは若干の差がある。キャスク内圧の計算(第2章参照)では、キャスク1体分の丸めた値のみが考慮される。

(2) 初期充填ガス量

各燃料棒の充填ガス量を以下のように算出した。

各燃料棒内の空間容積は m³、ヘリウム充填圧力は Pa を想定している。

これらの値は、17×17型（燃料集合体あたり燃料棒264本）の場合である。

気体定数 ($R = 8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) と標準状態温度 298 K を用いると、燃料集合体あたりの充填ガス量は約 mol^{注2} となる。

よって、26 体の燃料集合体を収納する場合、燃料棒への充填ガスの総量は mol となる。

15X15型に対しては、同様の計算の結果、燃料棒への充填ガスの総量は mol 以下となり、17X17型のほうが圧力上昇において支配的である。

(3) 燃料破損に伴う特定兼用キャスクの内圧上昇をもたらすガス量

燃料破損に伴う特定兼用キャスクの内圧上昇は、上述の燃料棒内FPガスの生成量及び初期充填ガス量を考慮して、別紙2のA2.3項で計算される。

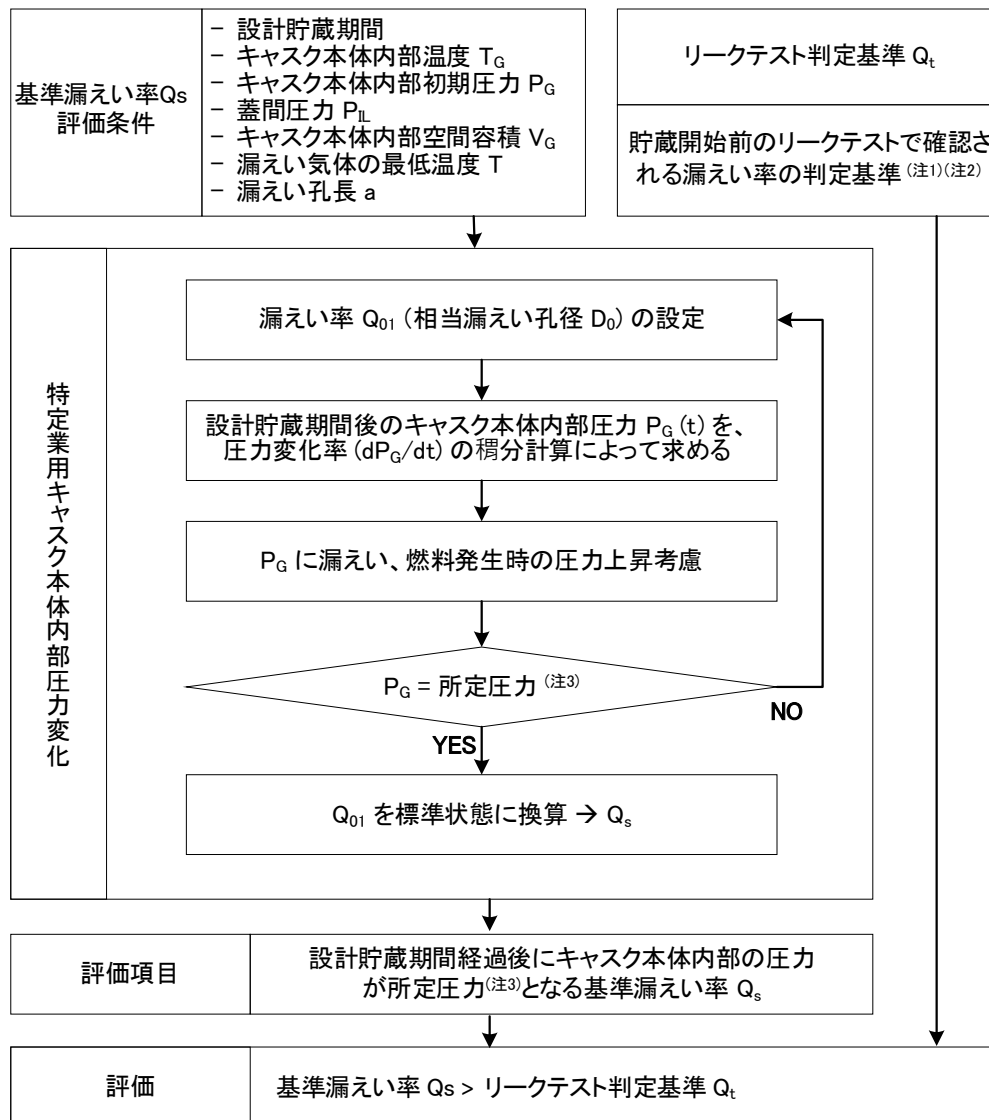
注2—使用済燃料集合体1体当たり及びキャスク装荷分(26体)の燃料棒充填ガス量の値は、 $264 \times 26 \text{ 体} \times \text{ m}^3 \times \text{ Pa} / 8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} / 298 \text{ K}$ で計算され、個別に切り上げられる。キャスク内圧の計算(本文参照)では、キャスク1体分の丸めた値のみが考慮される。

別紙 2 内圧の経時変化及び基準漏えい率の評価方法と結果

基準漏えい率及びリークテスト判定基準の評価

ここでは、キャスク内部圧力の時間的推移の計算モデルについて説明する。

CASTOR[®] geo26JP型の基準漏えい率 Q_s 及びリークテスト判定基準 Q_t の計算フローを図A2- 1に示す。また、漏えい率計算の概要を図A2- 2に示す。



^(注1) リークテスト判定基準 Q_t の計算においては、特定兼用キャスク本体内部圧力が燃料破損によるガス放出を想定した圧力上昇、及び設計貯蔵期間経過後の蓋間空間ガス全量の流入を想定した圧力上昇を考慮して、設計貯蔵期間経過後に大気圧となる漏えい孔径を求め、リークテスト判定基準 Q_t を算出する。

^(注2) 搬出前の気密漏えい検査において、一次蓋、一次蓋密閉カバーの2か所の漏えい率の合計値がリークテスト判定基準以下であることを確認する。

^(注3) 所定圧力は、大気圧の変動を考慮する。

図 A2- 1 基準漏えい率 Q_s 及びリークテスト判定基準 Q_t の計算フロー



図 A2-2 漏えい率計算の概要

特定兼用キャスク体積の基準漏えい率は、設計貯蔵期間中、金属キャスク内を負圧に維持できる漏えい率とし、金属ガスケットの漏えい率が基準漏えい率を下回っていることを確認する。基準漏えい率を求めるために用いるクヌッセン流れの式を以下に示す(A2.1参照)。ここで求めた漏えい率を用いて、特定兼用キャスク本体内部ガスと蓋間体積容積の物質収支式平衡方程式より、特定兼用キャスク内部圧力の時間変化を計算する(A2.2, A2.3参照)。

A2.1 クヌッセン流れのモデル及び金属ガスケットの漏えい孔長

密封境界部からの漏えい率は、クヌッセンの式より円形断面の細管を通る連続流と分子流の複合流体として評価する。

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

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

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

ここで

L_c	:	層流粘性(連続流)体積漏えい率 (m^3/s)
L_m	:	分子流体積漏えい速度 (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) ($a = \sqrt{D^2 - H^2}$ [6](図A2-3参照))
D	:	漏えい孔径 (m)
T	:	密封境界部の温度(それぞれの蓋ガスケットの温度) (K)
R	:	気体定数 ($8.314 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)

流体である層連続流粘性流 L_c と分子流 L_m 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。

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

図A2-3に、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 $a = \sqrt{D^2 - H^2} = \square$ mm を計算する ([6] 参照)。

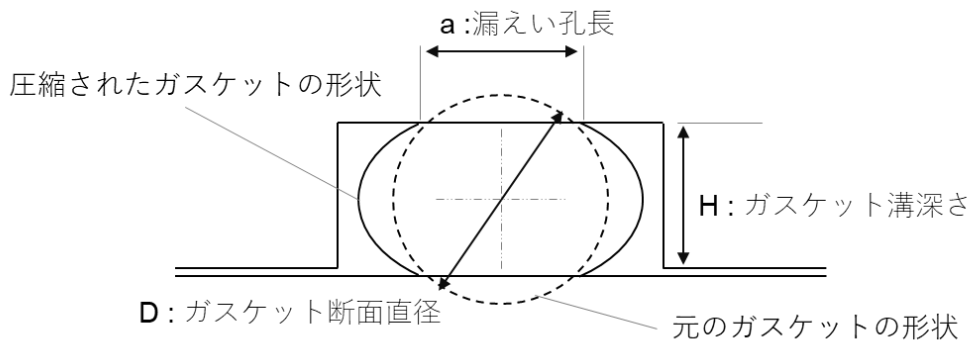


図 A2-3 漏えい孔長計算モデル

A2.2 圧力の経時変化

特定兼用キャスク本体内部**部**圧力及び蓋間圧力の時間変化を算出するために、前述のクヌツセンの式を用いて密封境界部を通過・流入するガス量を求める。保守的に、設計貯蔵期間を通じて各部の温度は初期温度が継続されるものと仮定し、漏えい率の計算ではヘリウムを想定した。また、天候による圧力変動を考慮し、周囲圧力**大気圧**は $9.7 \times 10^4 \text{ Pa}$ とした。初期**特定兼用**キャスク本体圧力は表A2-1に示す値を用いる。**保守的に蓋間圧力は一定とし、最大値である初期値と仮定した。**

理想気体の状態方程式に基づき、**特定兼用**キャスク本体内部及び蓋間**空間**のガスの質量に関する物質収支式**平衡方程式**を整理し、この式に基づき圧力(p_G 及び p_{He})の時間的な変化を求める。

蓋間圧力は周囲圧力及び**特定兼用**キャスク本体内部**部**圧力よりも、著しく高いことから、密封境界(一次蓋、PL)を介した蓋間空間(IL)からキャビティ**特定兼用**キャスク本体内部**空間**(G、キャビティ**特定兼用**キャスク本体内部**空間**ガスを表す)への漏えいを考慮する。圧力障壁(二次蓋、SL)を介した蓋間空間から環境(E)への漏えいは、保守的に無視される(計算ケース2a、2b、2c)。物質の量の時間的な変化は以下のとおりである。

$$\dot{n}_G = + \frac{p_{IL} \cdot L_{PL}(p_{IL})}{R_{univ} \cdot T_{IL}} \quad \text{及び}$$

$$\dot{n}_{HE} = - \frac{p_{IL} \cdot L_{PE}(p_{IL})}{R_{univ} \cdot T_{HE}}$$

$$\text{ここで } L_{PL}(p_{IL}) = L(a_{PL}, \mu_{He}(T_{PL}), D_{PL}, p_u = p_{IL}, p_d = p_G, T = T_{PL}, M = M_{He}).$$

$$L_{SL}(p_{IL}) = L(a_{SL}, \mu_{He}(T_{SL}), D_{SL}, p_u = p_{IL}, p_d = p_E, T = T_{SL}, M = M_{He}).$$

この微分方程式を、有限差分法により解いた。

最初に、圧力、温度(一定に設定)、ガス質量、及び密封**シール部**を通過する漏えい率である。圧力については、次の方程式が成立する。

$$p_G = \frac{n_G \cdot R_{univ} \cdot T_G}{V_G} \quad \text{及び}$$

$$p_{IL} = \frac{n_{IL} \cdot R_{univ} \cdot T_{IL}}{V_{IL}}$$

この圧力を用いて、密封境界部における漏えい率を求めた。

A2.3 計算

に示す定数又は初期値³⁾は、A2.1およびA2.2に記載される計算の境界条件を示す。計算ケースは、表A-2-2に示す(表1も参照)。

漏えい孔長 $a = 4.5 \text{ mm}$ は、A2.1に示す式で求められる。基準漏えい率は、密封される気体媒体、ガスケット温度、漏えいの上流側圧力および下流側圧力に依存し、漏えい孔径はクヌッセンの式を用いて算出される。図A2-1に示す計算フローにおいて、 $D_0 = 6.06 \cdot 4.84 \times 10^{-6} \text{ m}$ に設定することで、 Q_s の計算は、計算条件と整合が取れると、クヌッセンの式により、計算ケース1のパラメータに対して一貫した結果が得られる。

特定兼用キャスク内部の気体温度 T_g は、除熱解析で使用される解析モデルの**特定兼用キャスク本体内部空間内充填ガスの平均温度**を表す(補足説明資料「除熱機能に関する説明資料」(1024-TR-00008))。内部ガス温度 T_g は、解析プログラムANSYSを用いて評価される。 T_g の保守的に高い値を使って、最大化された**特定兼用キャスク内部**圧力 p_g を計算する(以下の式を参照)。最大化された**特定兼用キャスク内部**圧力は、圧力が漏えいの駆動力であるため、保守的な結果をもたらす。初期の**特定兼用キャスク内部**圧力が高いと、**特定兼用**キャスク内への負の圧力勾配により、漏えいは、保守的に、より短時間になる。同様に、蓋間空間のガス気体温度 T_{H1} は、キャスクキャビティキャスク内部の負圧に対して、保守的に最小化される。

内部ガス温度 T_g に低い温度を選ぶことは、明らかにキャビティ内圧力を低下させるが、外気に対して正圧である蓋間圧力に関しては余裕率を下げることになる。保守的に $T_g = 250.6 \text{ K}$ の低い温度を仮定すると、60年後の蓋間圧力は $1.04 \times 10^5 \text{ Pa}$ となるが、これは依然として最大周囲気圧よりも高い。

金属ガスケットの漏えい孔内の漏えいガス温度が最小化されると、まずガスの動的粘度が最小化され、その結果、クヌッセン流の漏えい速度 L_c が最大化する、その結果、潜在的な漏えいが最大化し、**特定兼用キャスク**内への負の圧力勾配による漏えい時間を最小化する(A2.1を参照)。この理由により、高い蓋間温度は選択しない。

³⁾初期値は貯蔵期間中に大きな変化が起きた場合の条件を含むがある。

表 A2-1 基準漏えい率及びリークテスト判定基準の計算条件

記号	単位	説明	定数	初期値 ^(注8)	記号又は数値(範囲)
Q_{PL}	$Pa \cdot m^3/s$	一次蓋設計漏洩率	*		$0 \sim \dots Q_s$
Q_{SL}	$Pa \cdot m^3/s$	二次蓋設計漏洩率	*		$0 \sim \dots Q_s$
T	K	ガスケット温度及び漏洩漏えいガス温度 ^(注1)	x		250.6 \sim 375
T_{IL}	K	蓋間温度 ^(注1)	*		250.6 \sim 365
T_G	K	内部ガス温度(概数) ^{(注1), (注2)}	x		250.6 \sim 450.0
$p_u = p_{IL}$	Pa	蓋間圧力 ^(注3)		x	計算される 7.09×10^5
$p_d = p_G$	Pa	キャスクキャビティ特定兼用キャスク内部ガス圧力 ^{(注3), (注4)}		x	計算される 6.43×10^4
p_{atm}	Pa	外気圧	x		9.70×10^4 7,000 \sim 103,000
V_{IL}	m^3	蓋間空間内自由容積	x		<input type="text"/>
V_G	m^3	特定兼用キャスク内自由ガス容積 ^{(注5), (注4)}	x		<input type="text"/>
n_{IL}	mol	蓋間空間内のガス量 ^(注6)		x	計算される <input type="text"/>
n_G	mol	特定兼用キャスク内ガス量		x	<input type="text"/>
M_{He}	kg/mol	モル質量 ^(注7)	x		4.0×10^{-3}
$\mu(T)$	$Pa \cdot s$	動粘性係数(最小) ^(注7)	x		$1.77 \times 10^{-5} \sim 2.31 \times 10^{-5}$
A_d	m	漏えい孔長	x		4.5×10^{-3}
D_d	m	漏えい孔径	*		$0 \sim \dots 6.06 \times 10^{-6}$

(注1) 貯蔵建屋内の特定兼用キャスク周辺温度として $-22.4^\circ C$ を最低温度として考慮

(注2) ガス気体媒体の最大容積平均温度 () を考慮

(注3) 燃料棒の破損による圧力上昇を含む

(注4) キャスクキャビティ特定兼用キャスク内部の全容積を示すが、使用済燃料集合体及びバスケットの容積を除く

(注5) ヘリウムガスを考慮

(注6) 最低設計温度、最大蓋間圧力及び蓋間空間容積から導出

(注7) 気体媒体としてヘリウムを考慮

(注8) 初期値は貯蔵期間中に大きな変化が起きた場合の条件を含む。

表 A2-2 基準漏えい率算出のための評価条件

記号	単位	ケース 1	ケース2a	ケース2b	ケース2c
Q_{PL}	$\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$	Q_s	Q_s	Q_t	Q_n
Q_{SL}	$\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$	Q_s	0	0	0
T	K	250.6	250.6	250.6	250.6
T_{IL}	K	250.6	250.6	250.6	250.6
T_G	K	450.0	450.0	450.0	450.0
$p_u = p_{IL}$	Pa	5.81E+05	5.81E+05	5.81E+05	5.81E+05
$p_u = p_G$	Pa	6.43E+04	6.43E+04	6.43E+04	6.43E+04
p_{atm}	Pa	9.70E+04	9.70E+04	9.70E+04	9.70E+04
V_{IL}	m^3	0.1	0.1	0.1	0.1
V_G	m^3	4.9	4.9	4.9	4.9
n_{IL}	mol	27.9	27.9	27.9	27.9
n_G	mol	84.2	84.2	84.2	84.2
M_{He}	kg/mol	4.0E-03	4.0E-03	4.0E-03	4.0E-03
$\mu(T)$	$\text{Pa} \cdot \text{s}$	1.77E-05	1.77E-05	1.77E-05	1.77E-05
a	m	4.5E-03	4.5E-03	4.5E-03	4.5E-03
D_0	m	6.06E-06	6.06E-06	1.05E-06	5.95E-07

$Q_s = 3.5 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ の基準漏えい率は、外気圧に対してキャスクキャビティ内の負圧が60年の貯蔵期間中に維持される漏えい率(60年後にキャスクキャビティ内圧 $p_G = 7.3 \times 10^4 \text{ Pa}$)として本文に記載されている。蓋間圧力は、 $1.03 \times 10^5 \text{ Pa}$ の最大周囲圧下で低下しない。したがって、環境からの空気の侵入はない。

特定兼用キャスク本体内部の圧力 p_u は、以下に示す理想気体の状態方程式により求められる。

$$p_u = p_{init} \cdot T_G / T_{init} + n \cdot R_{univ} \cdot T_G / V_G$$

ここで、

p_{init} : **特定兼用**キャスクの初期充填ガス圧力 (Pa)

T_{init} : 初期充填ガスの温度 (K)

n : 充填ガス以外のガス量

R_{univ} : 気体定数 (8.314 J/mol/K)

特定兼用キャスクのヘリウムによる最大初期充填圧力 p_{init} は Pa である。最大となる**特定兼用**キャスク本体内部の内圧 p_u を求めるために、n と T_G の値は最大に、 V_G の値は最小とする。このうち、 T_G と V_G は表A2-1に示す通りである。

ガスの最大量nは、燃料棒から放出されるガス、すなわち、燃料棒中のFPガスおよび充填ガスの最大量を含む。使用済燃料の乾式貯蔵中に破損した燃料棒の割合を 0.1 % [6]として、FPガス放出の割合を 10 % として考慮する[7]。乾燥工程の終了後の残留水蒸気の潜在的な量は無視される。

使用済燃料の燃焼度計算に基づく \square mol のFPガスの総量 \square と、燃料棒の充填ガスの総量 \square mol とが考慮される(別紙1参照)。特定兼用キャスク内充填ガス以外の流動化ガスの量は、 $n = \square$ mol と考えられ、これには燃料棒のヘリウム充填ガス \square mol (\square mol x 0.1 % の値を切り上げ)と、FPガス \square mol (\square mol x 10% x 0.1% の値を切り上げ)とを含む。

設定された基準漏えい率 $Q_{s,x}$ は、 $Q_t \cdot 7.80 \times 10^{-7}$ 使用する金属ガスケットの設計漏えい率 Q_n と、貯蔵開始前のリークテスト判定基準 Q_t よりも高い必要がある。

その結果、特定兼用キャスク本体内部が大気圧より負圧に保たれる基準漏えい率は、 $Q_s = 1.59 \times 10^6 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ となり、60年後の特定兼用キャスク本体内部圧力は、 $p_G = 9.7 \times 10^4 \text{ Pa}$ となる。この場合に対応する漏えい孔の直径は $D_0 = 4.84 \times 10^{-6} \text{ m}$ で、圧力変化は図A2-4に示すとおりである。

同様に、貯蔵期間の終了時に蓋間空間ガスが特定兼用キャスク本体内部ガスの一部となる(特定兼用キャスク本体内部圧力に \square Pa 寄与する)と仮定し、特定兼用キャスク本体内部圧力が大気圧(60年後に $p_G = 9.7 \times 10^4 \text{ Pa}$)に比べて負圧が維持される場合の漏えい率は、 $Q_t = 7.80 \times 10^7 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ である。この場合に対応する漏えい孔の直径は $D_0 = 3.94 \times 10^{-6} \text{ m}$ であり、圧力変化は図A2-4に示すとおりである。

設計漏えい率 $Q_n = 1.67 \times 10^9 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ による漏えいの場合、特定兼用キャスク本体内部圧力 $p_G = 6.43 \times 10^4 \text{ Pa}$ は、60年間大きく変化しない。この場合に対応する漏えい孔の直径は $D_0 = 5.92 \times 10^{-7} \text{ m}$ であり、圧力変化は図A2-4に示すとおりである。

キャスクキャビティしたがって、計算ケース 2a、2b および 2c(表1および表A2-2)の計算を実施し、図A2-2、図A2-3および図A2-4に結果を表示する。

計算ケース2aは、完全に漏れのない圧力障壁はキャスクキャビティの負圧の損失を遅らせ、安全裕度を増加させることを実証している。したがって、計算ケース1は、 Q_s の値を保守的に定義していることを示している。

非常に類似した結果をもたらす計算ケース 2b 及び 2c において、初期蓋間圧力は、60年後に \square Pa より小さくはならず、蓋間圧力に対して 1% 未満だけ減少する。これらの結果は、期待される密封性能について得られたものであり、本方法論の全体的な保守性を実証している。

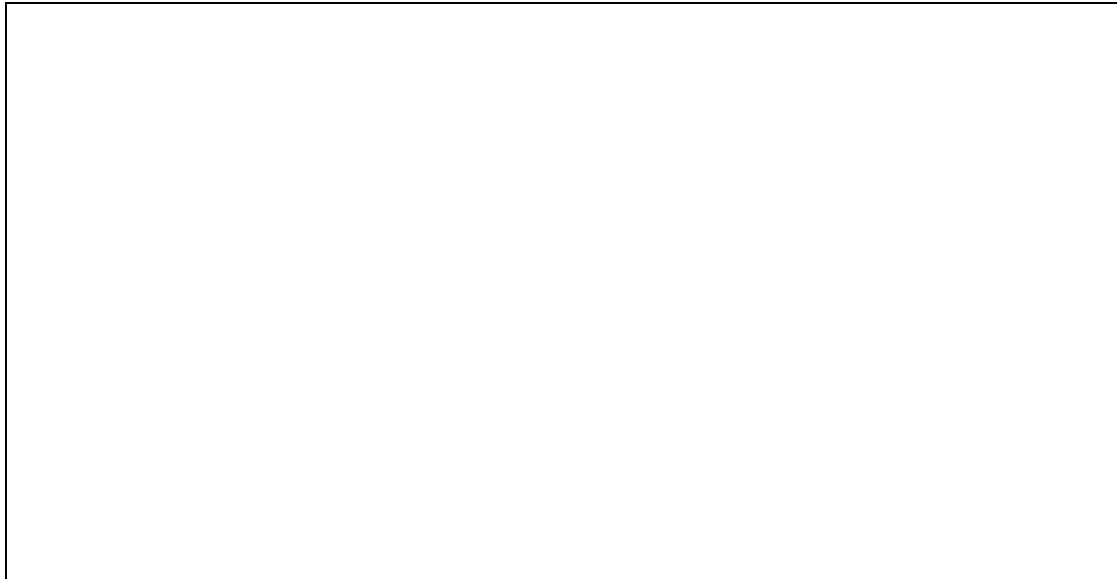


図 A2-4 貯蔵期間中の兼用キャスク本体内部圧力の経時変化
(基準漏えい率 Q_s 、リークテスト判定基準 Q_t 、設計漏えい率 Q_n の関係)

参考文献

- [6] AESJ-SC-F002:2021 日本原子力学会標準
使用済燃料中間貯蔵施設の金属キャスクの安全設計及び検査基準: 2021 年
- [7] AESJ-SC-F006:2013 日本原子力学会標準
使用済燃料・混合酸化物新燃料・高レベル放射性廃物輸送容器の安全設計及び検査基準:
2013 年

別紙 3 設計貯蔵期間にわたる金属ガスケットの設計漏えい率

(一財)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[3]及び設計漏えい率の設定を示す。

1. 漏えい率とラーソンミラーパラメーター(LMP)との関係

CASTOR[®]-geo26JP型の閉じ込め構造には一次蓋及び二次蓋の二重蓋構造が採用され、これらの密封境界は金属ガスケットにより形成される。ガスケットは、ボルト締付力によって圧縮変形してフランジ接触面と密着し、その弾性力で密封を達成するものであるが、高温下で長時間の使用を考慮した場合、ガスケット自身のクリープによって時間経過とともに弾性力が減少していき、密封性能に影響を及ぼすことが考えられる。このため、図A3-1に示すように、**特定兼用**キャスクへの適用が考えられる材質の異なる4種類の金属ガスケット(内径: $\phi 176$ mm、線径: $\phi 5.5$ mm)を用い、室温から 300°C までの温度範囲で最長 10,000 時間のクリープ現象を促進する加速試験を実施し、金属ガスケットの密封性能の温度・時間依存性を検討した。

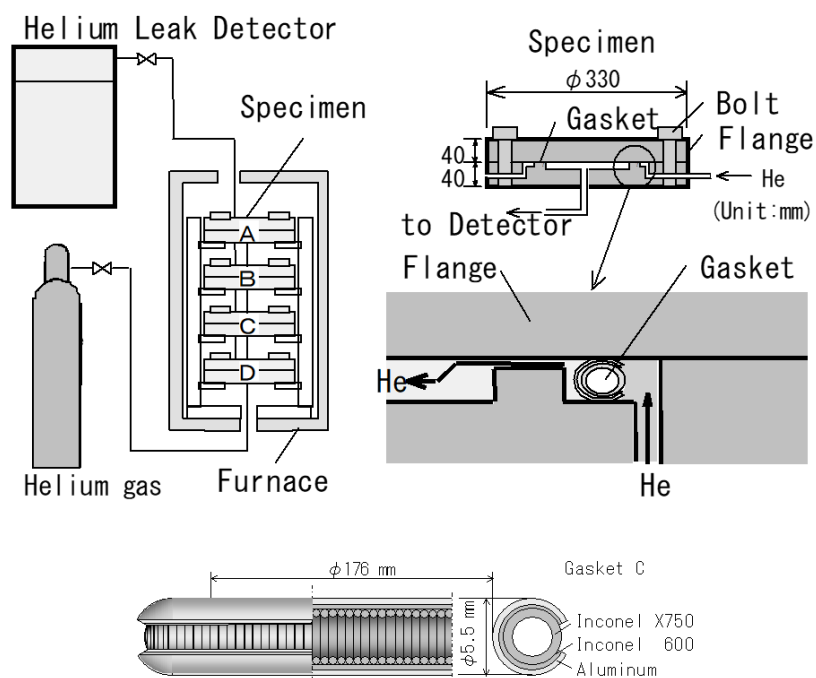


図 A3-1 縮尺模型による金属ガスケットの長期密封加速試験装置と試験体

クリープ等の熱活性化に伴う現象は、一般に次に示すアレニウスの式で表される。

$$\text{クリープ速度} \propto \exp(-Q/T) \quad (1)$$

ここで、Q: 活性化エネルギー、T: 絶対温度

また、クリープ現象に対してアレニウスの式を応用し、実験による確認を行ったのがラーソンとミラーであり、 $LMP = T(C + 10 \log t)$ 、(C: 定数、t: 時間)で表されるラーソン・ミラー・パラメータ(LMP)は、金

属材料のクリープ強度等の評価に際して温度・時間パラメータとして用いられている。

そこで、ここでは、ガスケットのクリープ特性を表すものとして圧縮変形に占める塑性変形の割合を塑性変形率として図A3-2のように定義し、漏えい率及びLMPとの関係を求めた。

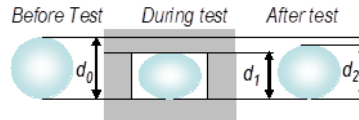


図 A3-2 金属ガスケットの変形

$$D_p = \frac{d_0 - d_2}{d_0 - d_1} \times 100(\%) \quad (2)$$

ここで、 D_p : 塑性変形率、 d_0 : 試験前のガスケット線径、 d_1 : 試験中のガスケット線径、 d_2 : 試験後のガスケット線径

その結果は図A3-3及び図A3-4に示すとおりであり、塑性変形率はLMPと比例関係にあること、また、漏えい率はLMPが小さい範囲では、ほぼ一定の値となるが、それ以上では次第に増大することが分かり、ガスケットの密封性能の温度・時間依存性が明らかとなった。

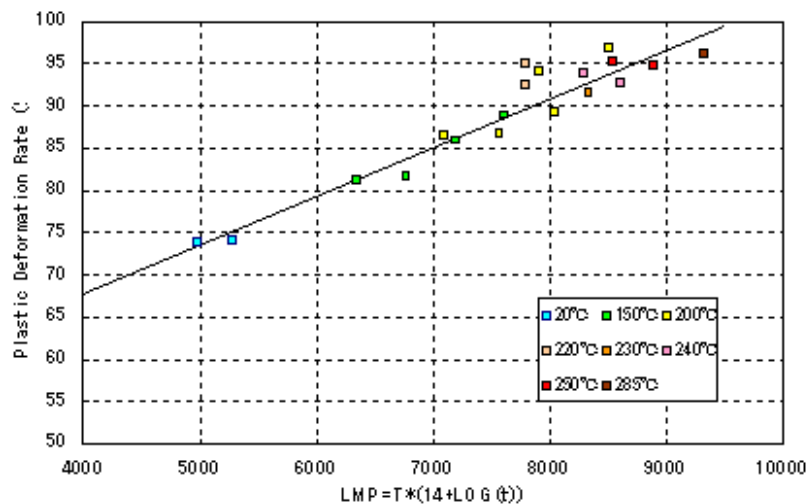


図 A3-3 金属ガスケットの LMP と塑性変形率

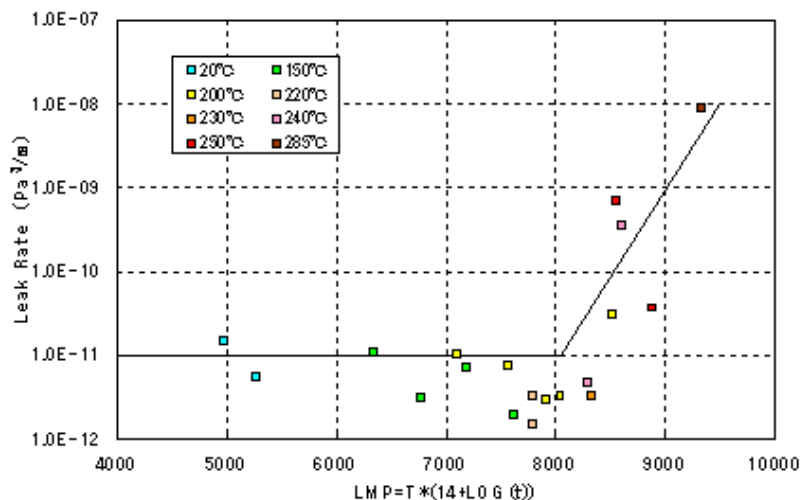


図 A3-4 金属ガスケットの LMP と漏えい率の関係

したがって、これらから、所定の密封性能が保持できる限界のLMPを決定し、許容温度又は許容時数を求めることによって長期密封性能の評価が可能である。

例えば、被覆材がアルミニウム、内被材及びコイルスプリングがインコネルからなる金属ガスケットの場合、漏えい率が増加を開始するLMPは8,050であり、使用温度に応じた寿命が予測可能になる。ここで、Cの値については、別途行った金属ガスケットの応力緩和試験の結果からC=14とした。一般に、被覆材が銀のガスケットはアルミニウムのガスケットに比べて優れた長期密封性能を示す(図A3-5)。従って、銀被覆のガスケットの漏えい率が増加を開始するLMPは保守的に8,050と仮定できる。

2. 実物大のキャスク蓋部モデルによる長期密封性能試験

実物大の金属キャスク蓋部モデル2体を用いた密封性能試験を19年間以上、実施し、金属ガスケットの長期密封性能に関する実証データを取得した(図A3-5)。

- 1) 金属キャスク蓋部モデル2体の二次蓋金属ガスケットの漏えい率は、約19年間、ほぼ一定の値となっており、長期密封性能が維持されることが示された(図A3-6)。これまで得られたデータを基に、LMPを計算すると、I型モデル(アルミニウム被覆ガスケット)では、LMP=7942、II型モデル(銀被覆ガスケット)では、LMP=7781である。ただし、LMPの定数Cは14とした。
- 2) LMPを用いた評価から、金属ガスケットの密封寿命とガスケット初期温度の関係を明らかにした(図A3-7)。本結果から、ガスケット初期温度(設計条件)が決まると、密封寿命が容易に推定可能となる。

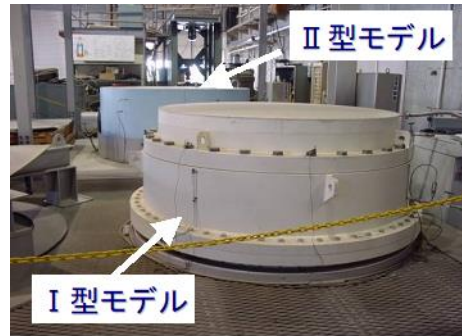


図 A3-5 実物大の金属キャスク蓋部モデル

I型モデルは他社の**特定兼用**キャスクの蓋部モデルで、アルミの外被材の金属ガスケットを使用している。

II型モデルはCASTOR型キャスクの蓋部モデルで、銀の外被材の金属ガスケットを使用している。

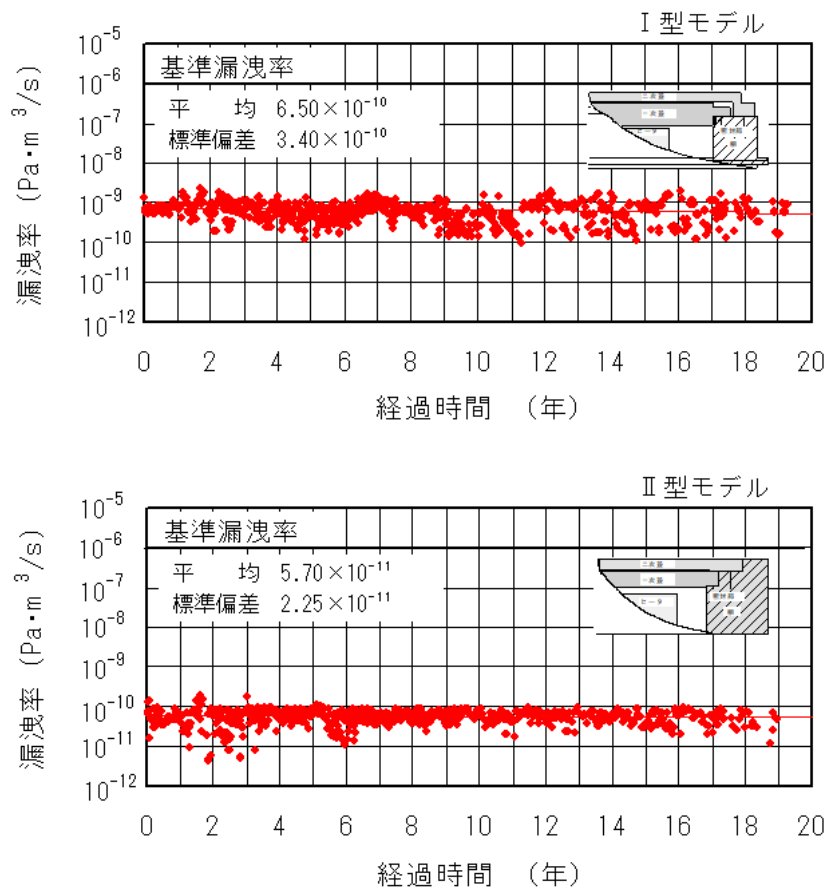


図 A3-6 実物大の金属キャスク蓋部モデルからの漏えい率測定結果

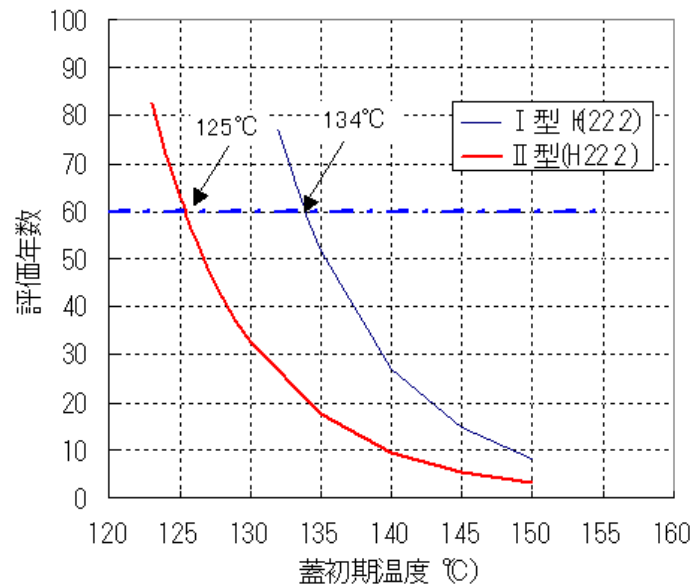


図 A3-7 実物大の金属キャスク蓋部モデルからの漏えい率測定結果

また、上記に加え、図A3-2に示す（一財）電力中央研究所で実施された実物大のキャスク蓋部モデルによる長期密封性能試験結果からも金属ガスケットの漏えい率が維持できることを補足的に説明している。

これらの試験で使用した金属ガスケットと CASTOR[®]geo26JP型の金属ガスケットの仕様比較及び仕様相違点に対する評価を表A3-1に示す。表A3-1に示すとおり、仕様の一部について、相違点はあるが、CASTOR[®]geo26JP型の閉じ込め評価において、（一財）電力中央研究所の密封性能試験結果を適用することは妥当である。

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 ($6.50 \times 10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$) に標準偏差 ($3.40 \times 10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$) の3倍を加算した値を切り上げた設定値 ($1.7 \times 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$) とする。

表 A3-1 (一財)電力中央研究所の密封性能試験体及び実機の金属ガスケットの仕様比較

項目	密封性能試験の試験体		CASTOR® geo26JP型	試験体と実機の比較・評価	
	要素試験	実規模試験			
材質	外被材:銀 内被材:インコネル コイルスプリング:インコネル		外被材:銀 内被材:ステンレス鋼、 コイルスプリング:ニッケル基合金	<ul style="list-style-type: none"> 外被材とコイルスプリングの材質は同じ。内被材の材質が若干、異なるが、両者ともニッケルとクロームの合金で耐食性に優れる。 両者のクリープ温度は約270~290°Cで、同等。 	
断面積 (H)	一次蓋 二次蓋	φ 5.5 mm	φ 10 mm (注1)	一次、二次蓋 φ <input type="text"/> mm	<ul style="list-style-type: none"> 金属ガスケットの断面径は両者とも同等。
	ドレン・ベント・バルブカバー		-		
内径 (D _i)	一次蓋 二次蓋	φ 176 mm	φ 1741 mm (注1)	一次蓋 φ <input type="text"/> mm	<ul style="list-style-type: none"> 一般に、漏えい率は周長に比例する。 実規模試験体及び実機の周長の差は4%程度であり、密封性能は同等である。 小内径のガスケットにおいては、要素試験体の漏えい率結果が、実機の漏えい率を確証している。
	ドレン・ベント・バルブカバー		-		

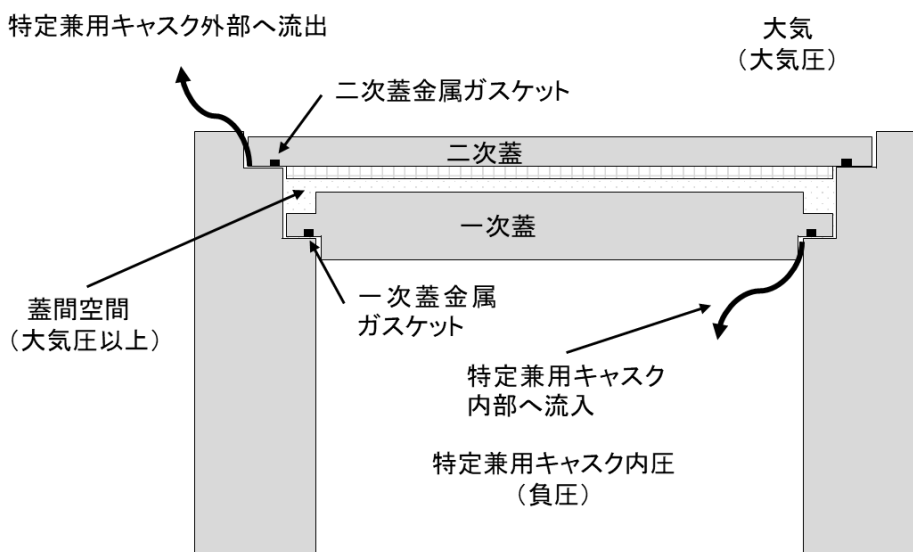
(注1) 実規模試験の断面径(H)及び内径(D_i)は、漏えい率測定を実施した二次蓋の値を示す。

別紙4 貯蔵中の蓋間圧力の経時変化及び蓋間空間の再充填による特定兼用キャスク本体内部圧力の負圧維持について

1. 蓋間空間の経時変化を算出するための条件

貯蔵中の特定兼用キャスク蓋間空間から漏えいのイメージを図A4-1に示す。貯蔵中は、一次蓋と二次蓋に設置される金属ガスケット部を通じて、蓋間空間ガスが蓋間空間から特定兼用キャスク内部及び外部へ漏えいすることで蓋間圧力が低下する。

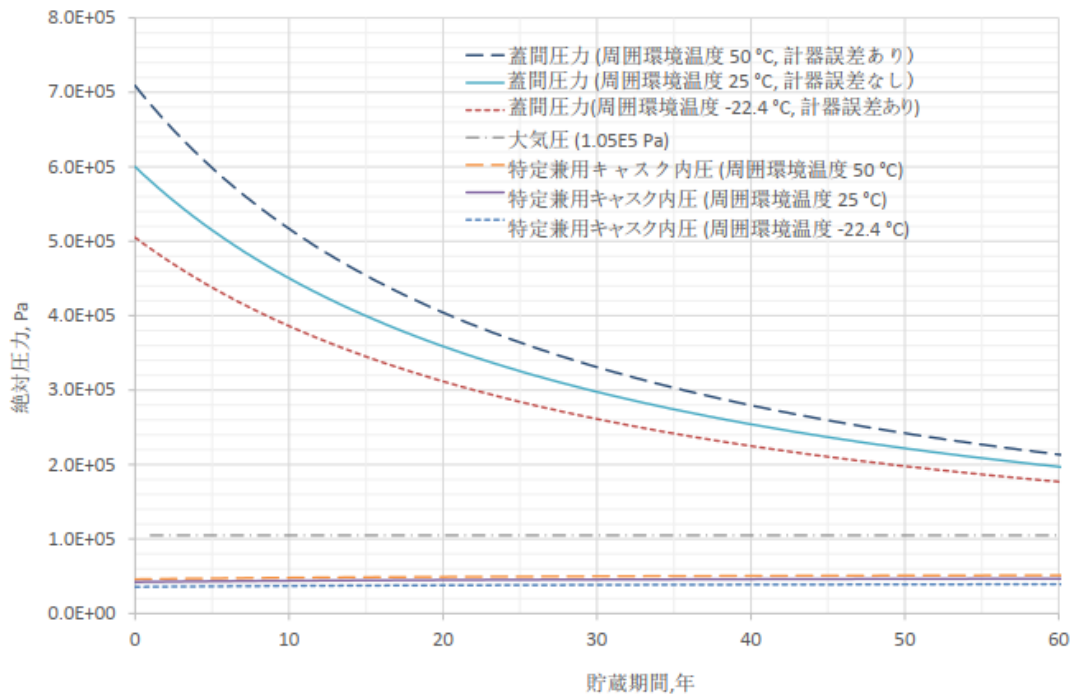
周囲温度 25 °Cで、計器誤差がない場合の蓋間圧力は Pa である。周囲温度 50 °Cで、計器誤差がある場合の最大初期蓋間圧力は 7.09×10^5 Pa である。周囲温度 -22.4 °Cで、計器誤差がある場合の初期蓋間圧力の最小値は Pa である。 Q_s と Q_t の算定と同様に、密封境界部と圧力障壁について別紙 2 で算定された Q_s を仮定して、これらの 3 つの温度における蓋間空間の圧力変化を計算する。



図A4-1 特定兼用キャスク蓋間空間からの漏えい(イメージ)

2. 貯蔵中に想定される蓋間圧力の経時変化

1. に示す評価条件に基づき算出した蓋間圧力の経時変化を図A4-2に示す。図A4-2に示すとおり、圧力計の計器誤差に加え、周囲環境の温度変化(-22.4°C~50°C)による圧力変動により、蓋間圧力は圧力変動幅を有する。蓋間圧力は、金属ガスケットの基準漏えい率により漏えいする場合、蓋間圧力は、設計貯蔵期間中に圧力低下するものの、正圧(大気圧以上)が維持される。なお、金属ガスケットの設計漏えい率により漏えいする場合、蓋間圧力は設計貯蔵期間中にほとんど圧力低下しない。



図A4-2 貯蔵期間中の特定兼用キャスク蓋間空間圧力の経時変化

3. 蓋間圧力の管理値及び監視頻度の設定例

60年間の貯蔵期間中、蓋間圧力が大気圧(予想最大値 1.05×10^5 Pa)に達することはない。従って、ヘリウムの再充填は必要ないと予想される。最低周囲温度における蓋間圧力の変化の終点は、 Paである(図A4-2の赤い破線曲線の終点)。これより低い圧力は異常の兆候であるため、対策を講じる必要がある。従って、 Paの蓋間圧力は、蓋間空間へのヘリウムの再充填が考慮される管理値である。この値に達したら、圧力監視システムの点検・交換、及び特定兼用キャスクの適切な施設への移送等の対応を、十分な時間的余裕をもって、行う。

上記の方法で管理値を定めることで、1年に1回等の圧力監視により(図4の監視構造の例を参照)、特定兼用キャスクが内包する放射性物質が特定兼用キャスク外部に放出される前に密封シール部の異常を検知することができる。

ガス充填の可否は次のように評価される。

初期内部圧力(6.43×10^4 Pa)が大気圧(下限値の場合は 9.7×10^4 Pa)に上昇するまで、特定兼用キャスク内部に蓋間空間ガスであるヘリウムが流入すると仮定した場合、蓋間圧力の低下量 Δp_1 は以下のように計算できる。

$$\Delta p_0 \times V_0 / T_0 = \Delta p_1 \times V_1 / T_1. \text{ よって}$$

$$\Delta p_1 = \Delta p_0 \times V_0 / T_0 \times T_1 / V_1$$

ここで

V_0 : 特定兼用キャスク空洞容積 (m^3)

V_1 : 蓋間空間容積 (m^3)

T_0 : 特定兼用キャスク内部温度 (K) (450K)

T_1 : 蓋間空間温度 (K) (365K)

Δp_0 : 特定兼用キャスク内部の許容圧力上昇量 (Pa)。

これにより

Δp_1 : 蓋間圧力の累積圧力降下量 (Pa)

管理値から最大初期圧力までガス充填を繰り返すと、以下のように 2 回 (ガス充填回数 $N=2$) のガス充填が可能である。

Δp : ガス充填圧力 (Pa)

$\Delta p_1 / \Delta p = 2.443$

$N = 2 < 2.443$

異常時以外は再充填不要なので、この許容充填回数で十分であり、特定兼用キャスク内部は負圧を維持可能である。