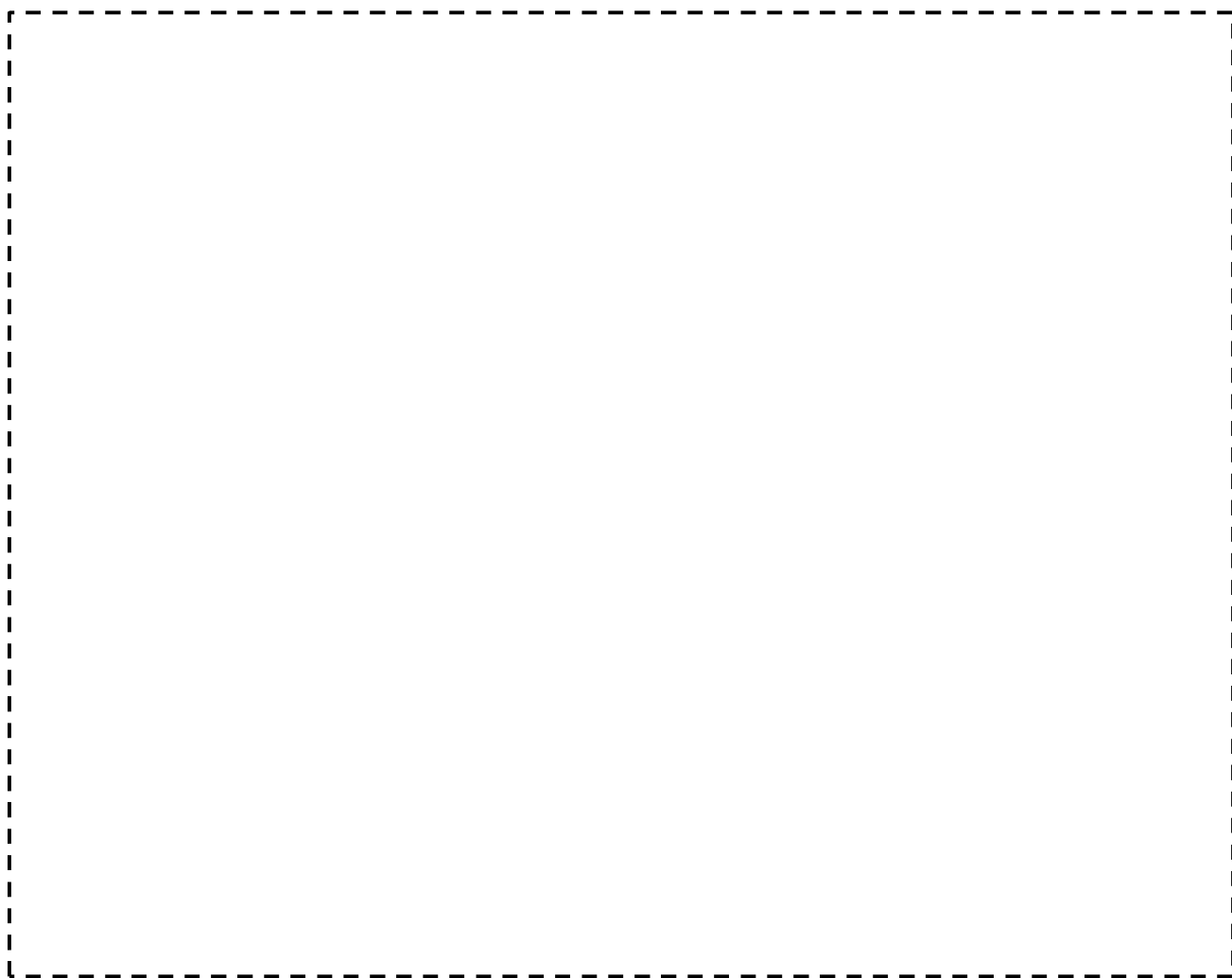


補足：実線は、燃料集合体平均燃焼度に対する燃焼度の相対値を、軸方向燃焼度分布測定データを用いて算出している。

第 2-11 図 軸方向燃焼度分布の設定 (MSF-21P 型収納燃料)

□□□ : 商業機密に係る事項のため公開できません



補足：実線は、燃料集合体平均燃焼度に対する燃焼度の相対値を、軸方向燃焼度分布測定データを用いて算出している。

第 2-12 図 軸方向燃焼度分布の設定 (MSF-24P 型収納燃料)

⎓⎓⎓ : 商業機密に係る事項のため公開できません

最も厳しい評価となる燃料仕様を収納した場合において、第 2-3 表に示すとおり評価基準を満たしている。

第 2-3 表 評価結果

項 目	評 価 結 果		評 価 基 準	備 考
	MSF-21P 型	MSF-24P 型		
表面線量当量率	1.73 mSv/h	1.83 mSv/h	2 mSv/h 以下	各部位の評価結果は、 第 2-4 表及び 第 2-5 表に示す。 出力位置は、 第 2-13 図及び 第 2-14 図に示す。
表面から 1 m の 位置における 線量当量率	78 μ Sv/h	86 μ Sv/h	100 μ Sv/h 以下	

第2-4表 線量当量率評価結果 (MSF-21P型)

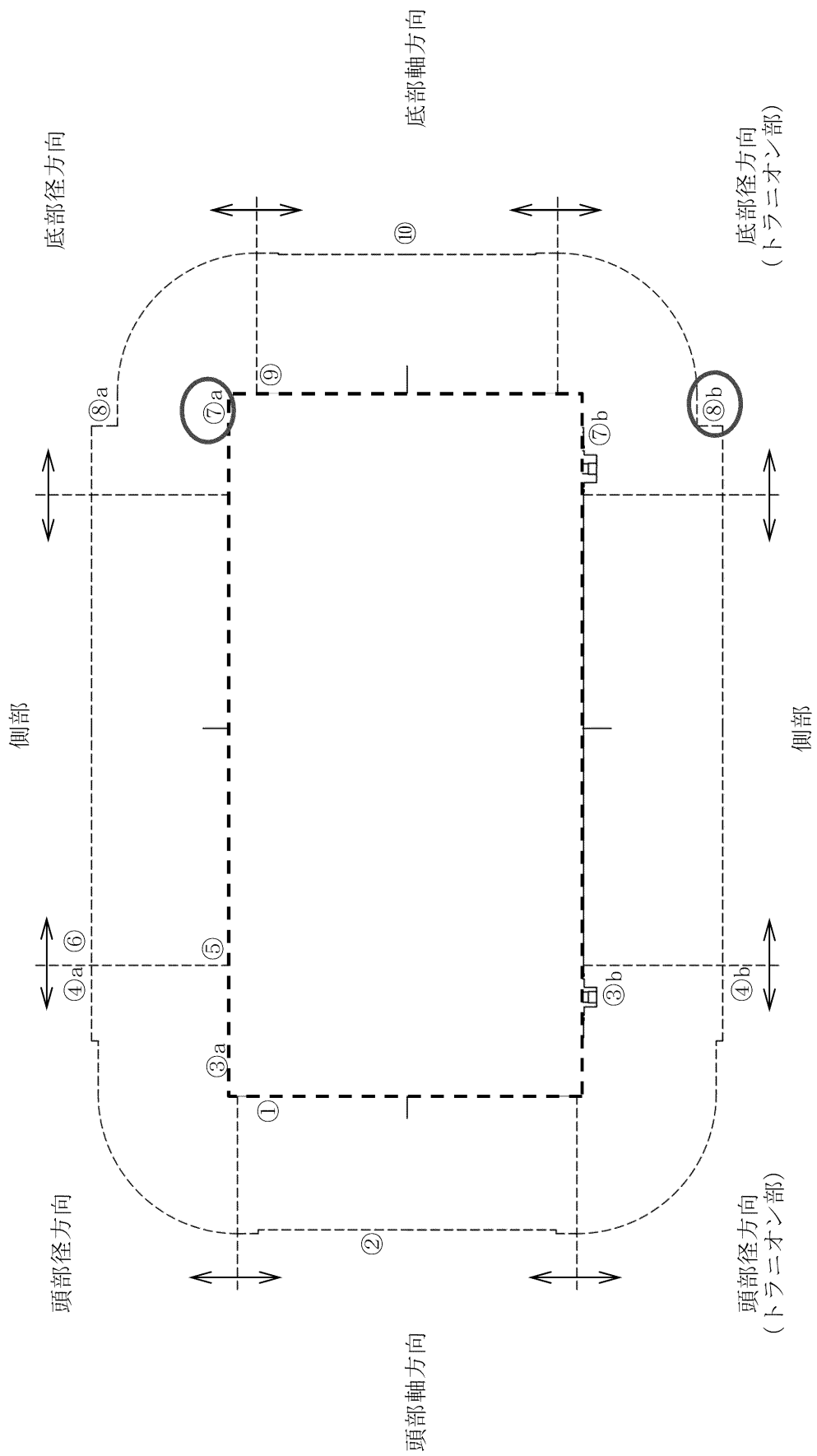
(単位: μ Sv/h)

評価点	頭部			側部	底部		
	軸方向	径方向	径方向 (トランニオン部)		径方向	径方向 (トランニオン部)	軸方向
	①	③a	③b		⑦a	⑦b	⑨
表面	燃料有効部	<0.1	10.0	34.3	2.5	3.0	<0.1
	構造材放射化	0.4	41.7	107.0	7.1	11.9	0.5
	二次ガンマ線	0.7	9.7	10.9	7.4	5.3	1.0
中性子	283.0	554.0	580.9	18.1	1711.0	1067.8	252.9
合計	284.2	558.5	642.3	170.3	<u>1728.0</u>	1088.0	254.5
評価点	②	④a	④b	⑥	⑧a	⑧b	⑩
表面から1m	燃料有効部	0.2	15.0	17.5	6.0	4.8	3.8
	構造材放射化	4.9	25.6	25.3	6.6	4.7	40.5
	二次ガンマ線	0.4	5.7	6.2	3.2	3.0	3.7
中性子	52.5	20.1	30.6	19.4	54.1	64.8	26.4
合計	58.0	66.9	68.9	68.4	69.9	<u>77.3</u>	74.4

第2-5表 線量当量率評価結果 (MSF-24P型)

(単位: μ Sv/h)

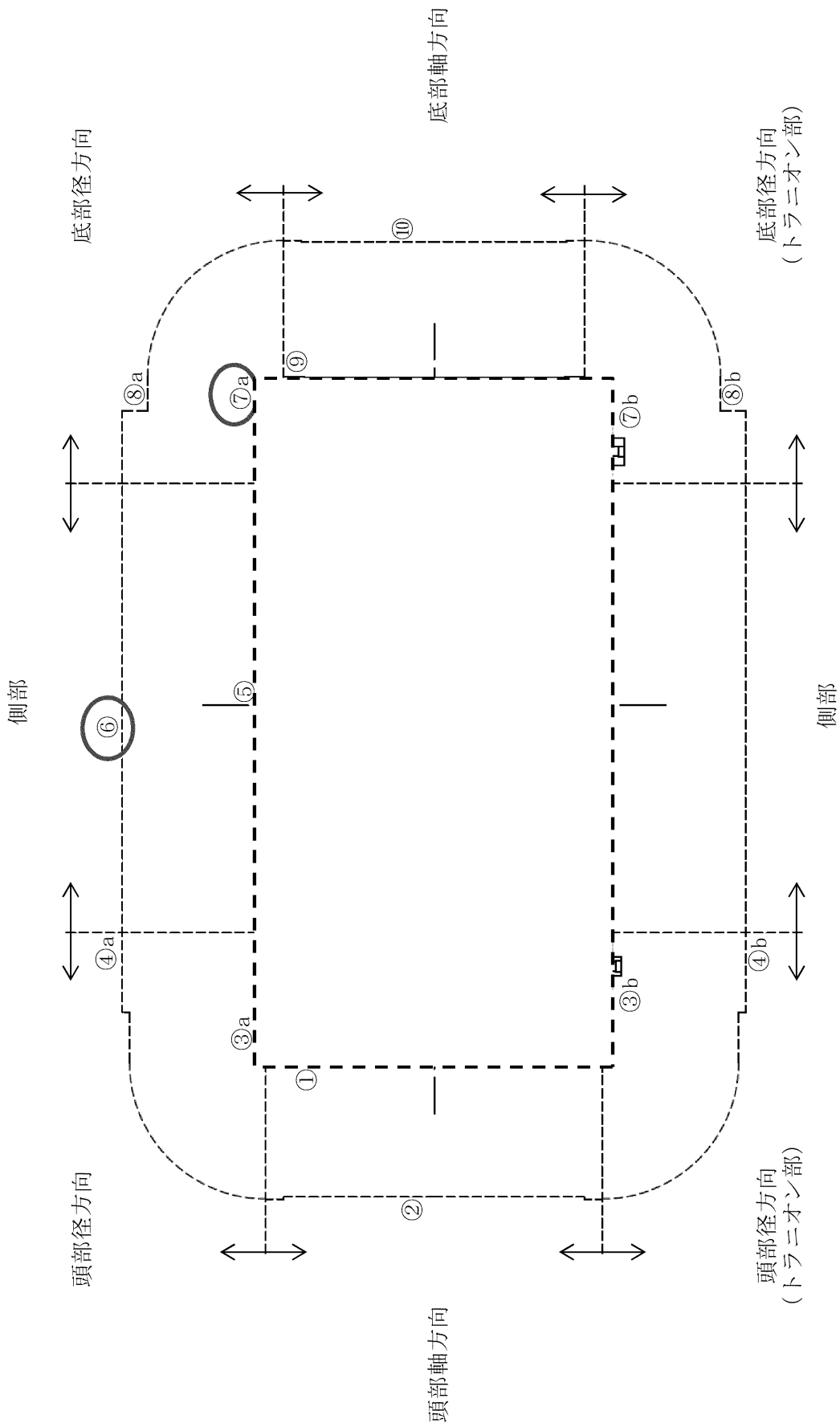
評価点	頭部			側部	底部		
	軸方向	径方向	径方向 (トランニオン部)		径方向	径方向 (トランニオン部)	軸方向
	①	③a	③b		⑦a	⑦b	⑨
表面	燃料有効部	<0.1	8.0	100.7	4.0	5.4	<0.1
	構造材放射化	0.4	103.0	25.9	6.6	13.4	0.3
	二次ガンマ線	0.8	5.7	25.7	7.4	4.8	0.9
中性子	333.7	804.2	741.4	45.1	1807.3	1108.3	222.6
合計	335.0	807.7	858.1	197.4	<u>1825.3</u>	1131.9	223.9
評価点	②	④a	④b	⑥	⑧a	⑧b	⑩
表面から1m	燃料有効部	0.3	22.6	44.8	9.0	7.9	4.9
	構造材放射化	3.5	20.1	20.9	7.4	6.1	28.8
	二次ガンマ線	0.4	5.4	10.4	3.0	2.8	3.6
中性子	64.8	23.2	32.7	18.3	56.6	66.3	23.1
合計	69.0	71.2	81.6	<u>86.0</u>	76.0	83.1	60.4



(注) ①～⑩の評価点位置は各方向での最大線量当量率となる位置を示している。

第2-13図 線量当量率評価点及び最大線量当量率位置 (MSF-2IP型)

⌈ ⌋ : 商業機密に係る事項のため公開できません



(注) ①～⑩の評価点位置は各方向での最大線量当量率となる位置を示している。

第2-14 図 線量当量率評価点及び最大線量当量率位置 (MSF-24P 型)

【 〓 】 : 商業機密に係る事項のため公開できません

[確認内容]

3) 敷地境界における実効線量評価

① 直接線及びスカイシャイン線の評価

兼用キャスクが敷地境界に近い場所に設置される場合等に、使用済燃料から放出される中性子の敷地境界線量への寄与が大きくなる可能性があることを適切に考慮した上で、通常貯蔵時の直接線及びスカイシャイン線（ガンマ線及び中性子）による実効線量について評価すること。

② ソースターム

兼用キャスクの遮蔽機能データ又は兼用キャスク表面から 1m 離れた位置における線量当量率が $100 \mu\text{Sv/h}$ となるよう放射線源強度を規格化したものを用いること。ここで、放射線源強度を規格化して用いる場合は、中性子 100%又はガンマ線 100%のいずれか保守的な線量評価とすること。また、中性子及びガンマ線の表面エネルギースペクトルは、保守的な線量評価となるものを使用すること。

③ 遮蔽解析コード等

検証され適用性が確認された遮蔽解析コード等を使用すること。なお、モンテカルロコードを用いる場合は、相互遮蔽効果、ストリーミング及びコンクリート深層透過の観点から検証され適用性が確認されたものであること。

④ 通常貯蔵時の線量

通常貯蔵時の直接線及びスカイシャイン線について、原子力発電所敷地内の他の施設からのガンマ線と兼用キャスクからの中性子及びガンマ線とを合算し、ALARA の考え方の下、敷地境界において実効線量で $50 \mu\text{Sv/y}$ 以下となることを目標に、線量限度 (1mSv/y) を十分下回る水準とすること。

なお、兼用キャスク以外の施設の線量は、既評価の空気カーマ

(Gy/y) を実効線量 (Sv/y) へ換算し、又は新たに実効線量 (Sv/y) を評価するものとする。換算に当たっては、係数を 1 とすること。

敷地境界における実効線量評価については、設置許可基準第 29 条まとめ資料において説明する。

[確認内容]

4) 応急復旧

貯蔵建屋等を設置する場合は、貯蔵建屋等の損傷によりその遮蔽機能が著しく低下した場合においても、必要に応じて土嚢による遮蔽の追加等の適切な手段による応急復旧を行うことにより、工場等周辺の実効線量が敷地全体で線量限度 (1mSv/y) を超えないこと。この場合において、応急復旧による遮蔽機能の回復を期待する場合には、その実施に係る体制を適切に整備すること。

設計上考慮すべき自然現象において、貯蔵建屋等の損壊が生じない設計であることについて、地盤審査及び 4 条、5 条、6 条まとめ資料で説明することとし、遮蔽機能が著しく低下しない設計とする。

3. 使用する解析コード

a. 解析コード

乾式キャスクの遮蔽設計に用いられる解析コードについて、その機能、計算方法、使用実績及び検証結果について説明する。

(a) ORIGEN2 コード

i 概要

ORIGEN2 コード¹⁾は、米国のオークリッジ国立研究所(ORNL)で開発された燃焼計算コードである。ORIGEN2 コードは公開コードであり、輸送容器の崩壊熱計算等に広く用いられている。

ii 機能

ORIGEN2 コードは、燃焼計算に際して以下の機能を有している。

- a) 燃料の炉内での燃焼計算、炉取出後の減衰計算により、冷却期間に対応した崩壊熱、放射線の強度、各核種の放射エネルギー等が求められる。
- b) 原子炉の炉型と燃料の組合せに対し、中性子エネルギースペクトルの違いにより重みをつけた断面積ライブラリデータが内蔵されており、任意に選択できる。
- c) 計算結果は、放射化生成物、アクチニド、核分裂生成物に分類して出力される。
- d) 燃焼計算に必要な放射性核種のデータ(崩壊熱、ガンマ線のエネルギー分布、自発核分裂と(α , n)反応により発生する中性子源強度等)は、ライブラリデータとしてコードに内蔵されている。

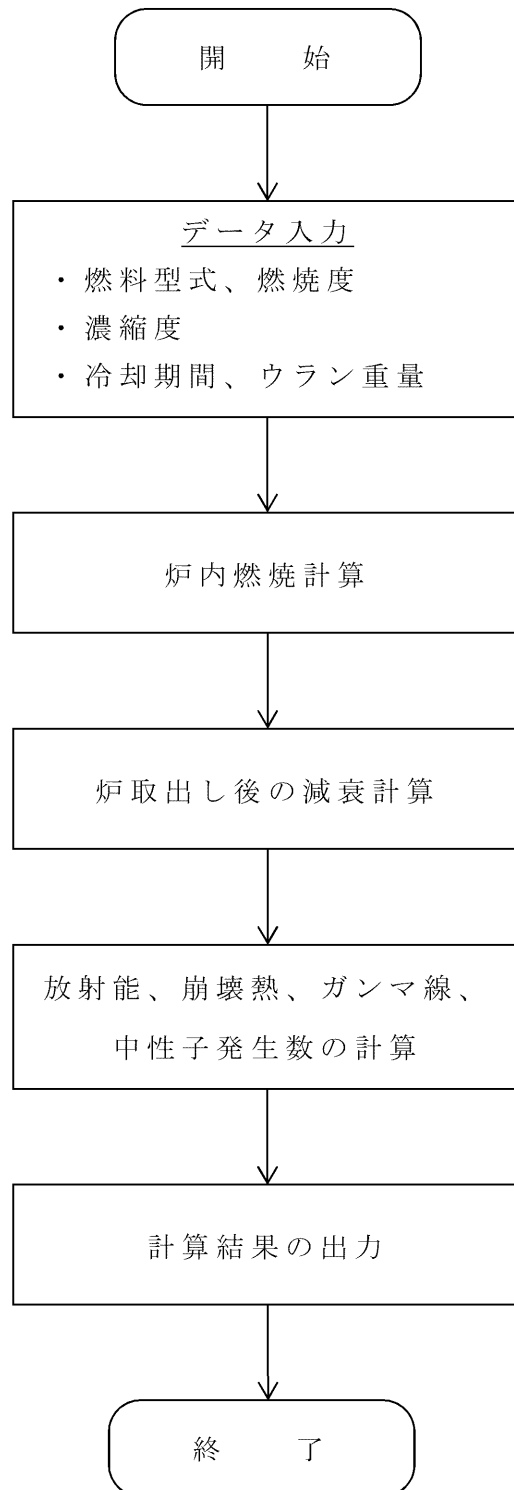
iii 計算フロー

ORIGEN2 コードの計算フローを第 2-15 図に示す。

iv 使用実績及び検証

ORIGEN2 コードは、輸送キャスク、原子燃料施設の崩壊熱計算に広く使用されている。また、ORNL では ORIGEN2 コードの崩壊熱計算結果を ANS 標準崩壊熱の値と比較し、ORIGEN2 コードの妥当性を検証している²⁾。

ORIGEN2 コードの検証例を第 2-16 図に示す。



第2-15 図 ORIGEN2 コードの計算フロー図

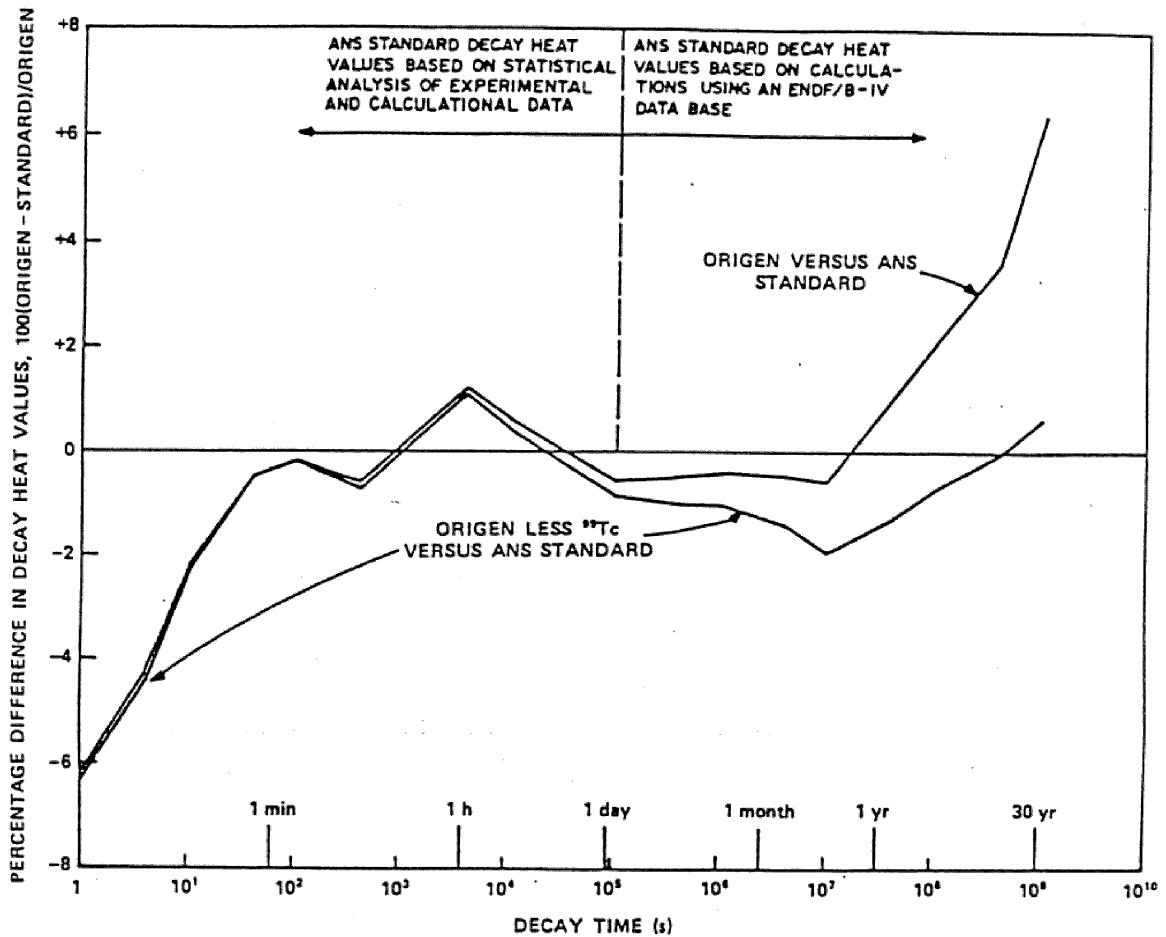


Fig. 3. Differences between ORIGEN2 and ANS Standard 5.1 decay heat values for 10^{13} -s irradiation of ^{235}U .

(注)ORIGEN2 コードの崩壊熱は、ANS 標準崩壊熱と比較して、15 年以上（乾式キャスクに収納される燃料の冷却期間）の年数に対して高めの値となっている。この理由は、ANS 標準崩壊熱は ^{99}Tc を考慮していないためである。ORIGEN2 コードの解析結果より ^{99}Tc を除いた崩壊熱を比較するとよい一致を示している。

第2-16 図 ORIGEN2 コードの検証例²⁾

(b) DOT3.5 コード

i 概要

DOT3.5 コード³⁾ (以下、「DOT コード」という。)は、米国のオークリッジ国立研究所(ORNL)で開発された二次元輸送コードである。

ii 機能

DOT コードは、遮蔽解析に関して以下の機能を有する。

a) ガンマ線や中性子に対するボルツマン輸送方程式を Sn 法により解く解析コードであり、放射線の挙動を追跡するのに重要な非等方性が表現できる。

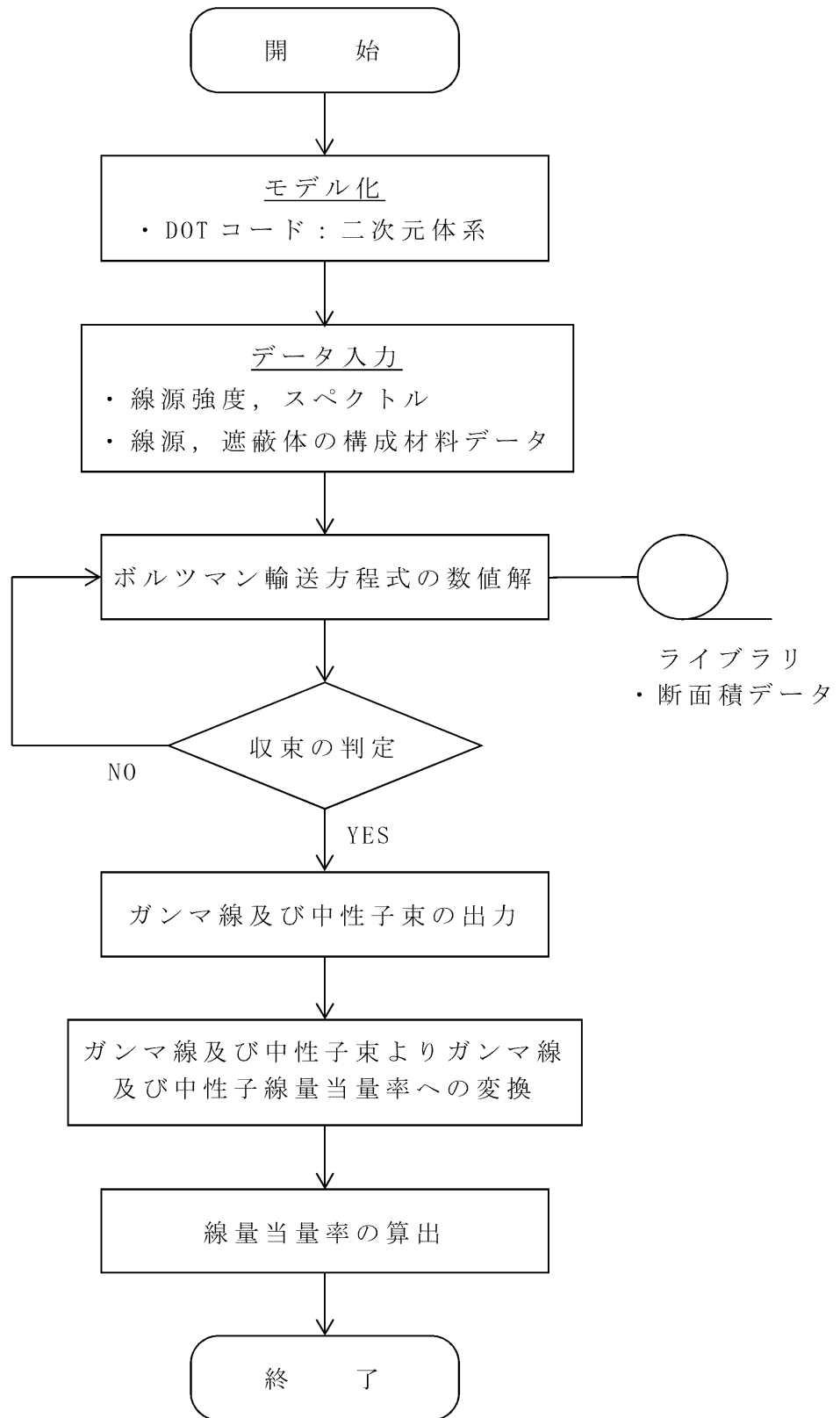
b) DOT コードは、二次元の体系を扱うことができる。

iii 解析フロー

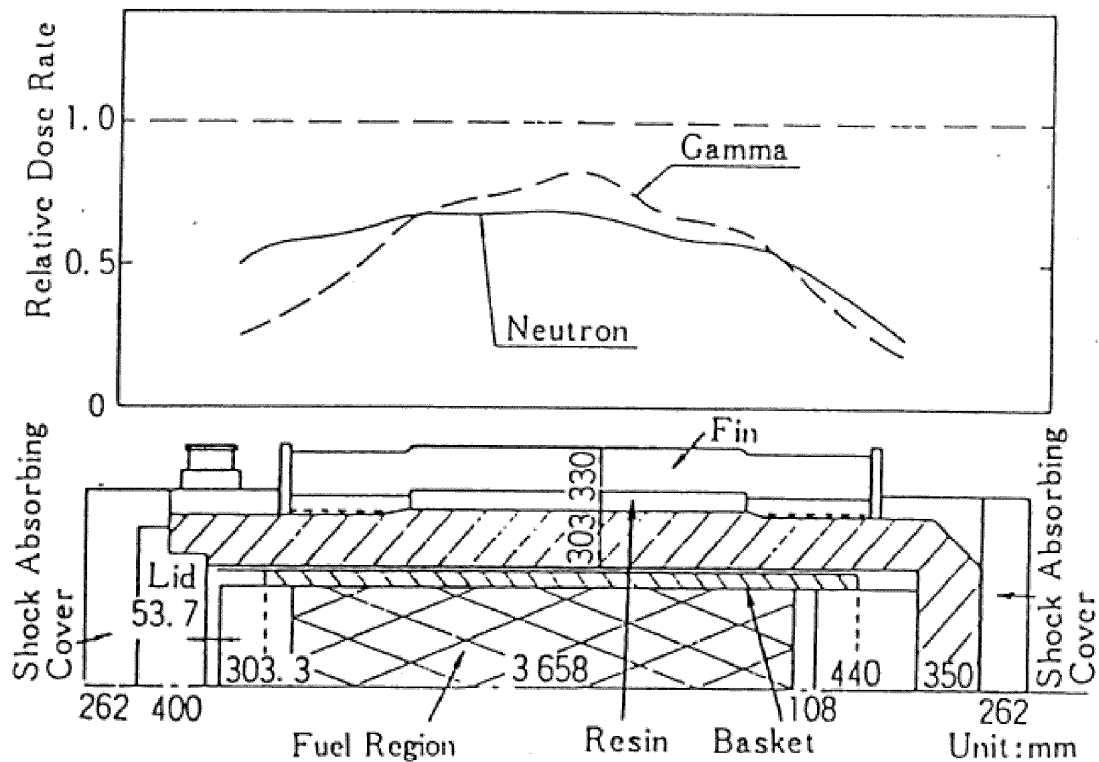
DOT コードの解析フローを第 2-17 図に示す。

iv 使用実績及び検証

DOT コードは、原子力施設の遮蔽計算に広く用いられており、輸送キャスクの遮蔽解析の豊富な実績がある。使用済燃料輸送容器の解析事例と測定値を第 2-18 図に示す。測定値はすべて解析値よりも低い値を示しており、解析コードが信頼できることを示している⁴⁾。



第 2-17 図 DOT コードの解析フロー図



(注) 中性子及び二次ガンマ線を DOT 及び ANISN (一次元輸送コードで計算法上の差はない)、燃料有効部のガンマ線を QAD (点減衰核積分法によるもので、原子力施設の遮蔽計算に広く用いられており、建屋の遮蔽解析の豊富な実績がある。) の各コードで解析した結果である。

第2-18図 DOTコードの検証例⁴⁾

v 断面積ライブラリ MATXSLIB-J33

MATXSLIB-J33 は、DOT3.5 等の輸送計算コード用に、JENDL-3.3 に基づく断面積ライブラリとして、日本原子力研究所にて整備されたものである。MATXSLIB-J33 を用いた断面積

ライブラリは、多群ライブラリ処理コード TRANSX-2.15 を用いて、輸送計算コード用に中性子 175 群、ガンマ線 42 群のエネルギー群構造に変換し作成している。

JENDL-3.3 の信頼性は遮蔽性能に関するベンチマーク解析で確認されている⁵⁾。

4. 参考文献

- 1) M. Ishikawa、 T. Jin、 J. Katakura、 M. Kataoka、 H. Matsumoto、 Y. Ohkawachi、 S. Ohki、 A. Onoue、 A. Sasahara、 K. Suyama、 H. Yanagisawa、 “ZZ-ORIGEN2.2-UPJ、 A Complete Package of ORIGEN2 Libraries Based on JENDL-3.2 and JENDL-3.3”、 Computer Programs NEA-1642、 OECD/NEA Databank、 (2006).
- 2) A. G. Croff、 “ORIGEN2 : A Versatile Computer Code for Calculating the Nuclide Compositions and Characteristics of Nuclear Materials”、 Nuclear Technology、 Vol.62、 (1983).
- 3) Oak Ridge National Laboratory、 “DOT3.5-Two Dimensional Discrete Ordinates Radiation Transport Code”、 CCC-276、 (1977).
- 4) 松田文夫他、 「TN-12 型輸送容器の放射性遮蔽特性 (I)線量率」、(一社)日本原子力学会「昭和 56 年秋の分科会」、 C17、 (1981).
- 5) 大西世紀 ほか、 「 ^{252}Cf 核分裂中性子源を用いた遮へい透過実験及び二次元離散座標計算コードによる輸送容器評価用断面積セット SFCX-J33 の適用性に関する研究」、海上技術安全研究所報告 第 7 卷 第 3 号 研究報告、 (2007).

使用済燃料乾式貯蔵容器の
4つの安全機能について
(除熱機能)

<目 次>

1. 要求事項
2. 適合性について
3. 使用する解析コード
4. 参考文献

1. 要求事項

乾式キャスクの除熱機能に関する要求事項は、以下のとおりである。

(1) 設置許可基準規則要求事項

①設置許可基準規則第16条第4項二号

- ・使用済燃料の崩壊熱を適切に除去することができるものとする。

②設置許可基準規則解釈別記4第16条3項

第16条第4項第2号に規定する「崩壊熱を適切に除去することができる」とは、第5項に規定するもののほか、貯蔵事業許可基準規則解釈第6条並びに第17条第1項第2号（貯蔵建屋を設置する場合に限る。）及び第3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6条

第6条に規定する「崩壊熱を適切に除去できるもの」とは、以下の設計をいう。

- 一 使用済燃料の温度を、被覆管のクリープ破損及び被覆管の機械的特性の低下を防止する観点から制限される値以下に維持できる設計であること。
- 二 金属キャスクの温度を、基本的安全機能を維持する観点から制限される値以下に維持できる設計であること。
- 三 貯蔵建屋（使用済燃料貯蔵施設において金属キャスク等を収納する建物をいう。以下同じ。）は、金属キャスクの除熱機能を阻害しない設計であること。また、貯蔵建屋の給排気口は積雪等により閉塞しない設計であること。
- 四 使用済燃料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必要な措

置が講じられること。

③設置許可基準規則解釈別記4第16条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 2.3 除熱機能」には、以下のように記載されている。

【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、使用済燃料の崩壊熱を適切に除去することができること。

』

【確認内容】

『

以下を踏まえ除熱設計が妥当であること。

1) 使用済燃料の崩壊熱評価

使用済燃料の崩壊熱は、検証され適用性が確認された燃焼計算コードを使用して求めること。また、燃料型式、燃

料体の実形状、燃焼度、濃縮度、冷却年数等を条件として計算した核種の生成及び崩壊から発熱量として求めること。

2) 兼用キャスク各部の温度評価

a. 兼用キャスクの各部の温度は、検証され適用性が確認された伝熱解析コードを使用して求めること。また、使用済燃料の崩壊熱、外部からの入熱及び兼用キャスク周囲の温度を条件とし、及び兼用キャスクの実形状を適切にモデル化すること。

b. 安全機能及び兼用キャスクの構造強度を維持する観点から、a. で求めた温度は、設計上想定される状態において、兼用キャスクの構成部材が健全性を保つ範囲に収まること。ここで、「健全性を保つ範囲」とは、兼用キャスクの各部の安全機能を維持する構造健全性及び性能を維持できる温度の範囲をいう。

3) 燃料被覆管の温度評価

a. 燃料被覆管の温度は、検証され適用性が確認された伝熱解析コードを使用して求めること。また、1) で求めた使用済燃料の崩壊熱と 2) で求めた兼用キャスクの各部の温度を条件とし、使用済燃料集合体、バスケット等の実形状を適切にモデル化すること。

b. 燃料被覆管のクリープ破損及び機械的特性の低下を防止する観点から、a. で求めた温度は、設計上想定される状態において、制限される範囲に収まること。ここで、「制限される範囲」とは、燃料被覆管の構造健全性を維持できる温度の範囲をいう。

4) 貯蔵建屋の除熱評価

① 貯蔵建屋を設置する場合は、兼用キャスクの除熱機能を阻害しないこと。

また、貯蔵建屋の給排気口は積雪等により閉塞しないこと。

- ② 貯蔵建屋を設置する場合であって、放水による冷却等
応急復旧による除熱機能の回復を期待するときには、そ
の実施に係る体制を適切に整備すること。

』

2. 適合性について

審査ガイドでは、設置（変更）許可に係る審査において、兼用キャスクの有する4つの安全機能（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、乾式キャスクの除熱機能については、以下のとおり審査ガイドの確認内容に適合している。

[確認内容]

1) 使用済燃料の崩壊熱評価

使用済燃料の崩壊熱は、検証され適用性が確認された燃焼計算コードを使用して求めること。また、燃料型式、燃料体の実形状、燃焼度、濃縮度、冷却年数等を条件として計算した核種の生成及び崩壊から発熱量として求めること。

2) 兼用キャスク各部の温度評価

- a. 兼用キャスクの各部の温度は、検証され適用性が確認された伝熱解析コードを使用して求めること。また、使用済燃料の崩壊熱、外部からの入熱及び兼用キャスク周囲の温度を条件とし、及び兼用キャスクの実形状を適切にモデル化すること。
- b. 安全機能及び兼用キャスクの構造強度を維持する観点から、a. で求めた温度は、設計上想定される状態において、兼用キャスクの構成部材が健全性を保つ範囲に収まること。ここで、「健全性を保つ範囲」とは、兼用キャスクの各部の安全機能を維持する構造健全性及び性能を維持できる温度の範囲をいう。

3) 燃料被覆管の温度評価

- a. 燃料被覆管の温度は、検証され適用性が確認された伝熱解析コードを使用して求めること。また、1) で求めた使用済燃料の崩壊熱と 2) で求めた兼用キャスクの各部の温度を条件とし、使用済燃料集合体、バスケット等の実形状を適切にモデル化すること。
- b. 燃料被覆管のクリープ破損及び機械的特性の低下を防止する観

点から、a. で求めた温度は、設計上想定される状態において、制限される範囲に収まること。ここで、「制限される範囲」とは、燃料被覆管の構造健全性を維持できる温度の範囲をいう。

4) 貯蔵建屋の除熱評価

- ① 貯蔵建屋を設置する場合は、兼用キャスクの除熱機能を阻害しないこと。

貯蔵時の使用済燃料及び乾式キャスクの基本的安全機能を有する構成部材の健全性を維持するために、乾式キャスクは使用済燃料の崩壊熱を除去する設計とする。

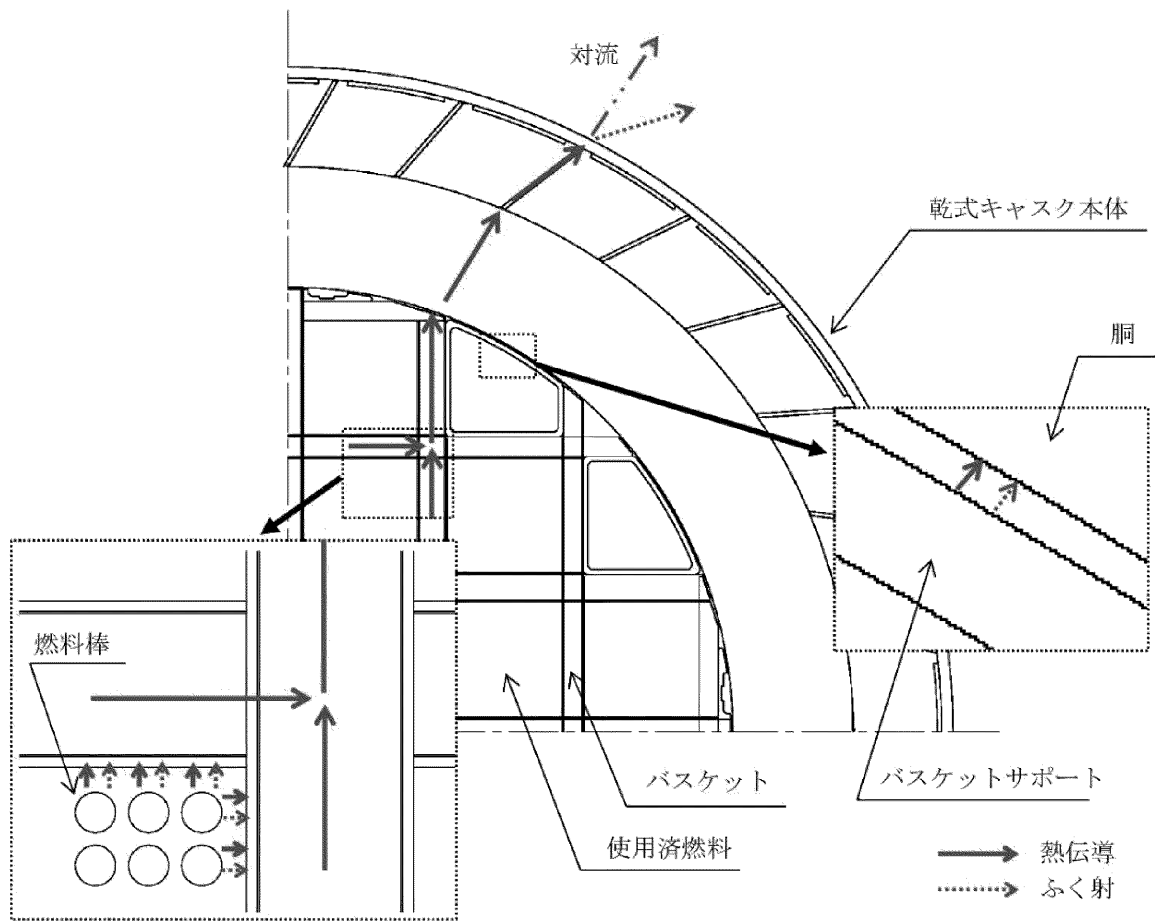
乾式キャスクは、使用済燃料から発生する崩壊熱を熱伝導及びふく射により乾式キャスクの外表面に伝え、対流及びふく射により周囲の空気等に伝達する。乾式キャスク本体側部の中性子遮蔽材には熱伝導率の低いレジンを用いるため、伝熱フィンを設けることにより必要な伝熱性能を確保する。

乾式貯蔵施設における使用済燃料の崩壊熱の主要な伝熱形態は次のとおりである。

(第 2-1 図参照)

- a) 崩壊熱は、使用済燃料の被覆管表面からヘリウムガスを介した熱伝導及びふく射によりバスケットへ伝えられる。
- b) バスケットに伝えられた熱は、バスケット内の熱伝導によりバスケット外周部へ伝えられる。
- c) バスケット外周部に伝えられた熱は、バスケット外表面からヘリウムガスを介した熱伝導及びふく射により乾式キャスク本体内面へ伝えられる。
- d) 乾式キャスク本体内面に伝えられた熱は、熱伝導により乾式キャスク本体外面へ伝えられる。
- e) 乾式キャスク本体外面へ伝えられた熱は、乾式キャスク本体外面の対流により乾式キャスク周囲の空気へ伝えられる。また、乾式キャスク本体外面のふく射により建屋に伝えられる。

使用済燃料乾式貯蔵建屋（以下、「乾式貯蔵建屋」という）は、乾式キャスクを配置するとともに、給気口と排気口を有する構造とし、自然対流冷却により、乾式キャスクの除熱機能を阻害しない設計とする。



第 2-1 図 乾式キャスクの伝熱形態 (MSF-24P 型の例)

乾式キャスク及び乾式貯蔵建屋の除熱解析フローを第 2-2 図に示す。

解析条件は第 2-1 表及び第 2-2 表のとおり。

a. 使用済燃料の崩壊熱評価方法

使用済燃料の型式、燃焼度、濃縮度、冷却期間等を条件に燃焼計算コード ORIGEN2 を使用して核種の生成、崩壊及びそれに基づく崩壊熱を計算する。

b. 乾式キャスク構成部材及び燃料被覆管の温度評価方法

乾式キャスク構成部材の各部温度は、使用済燃料の崩壊熱、周囲の乾式キャスクからのふく射熱及び乾式キャスク周囲温度等を条件として、乾式キャスクの実形状を三次元でモデル化し、伝熱解析コード ABAQUS を使用して求める。(第 2-3 図～第 2-5 図及び第 2-8 図～第 2-10 図参照)

使用済燃料被覆管の温度は、使用済燃料の崩壊熱とバスケットの温度を条件として、燃料集合体の径方向断面の二次元モデルを用い、伝熱解析コード ABAQUS を使用して求める。(第 2-6 図及び第 2-7 図参照)

なお、本評価においては、以下の点について保守性を有している。

・ 収納制限に対する解析条件の保守性

- － ウラン濃縮度 $4.1 \pm []$ wt% を保守的に $[]$ wt% とする。
- － 使用済燃料の最高温度を保守的に高めに算出するために、MSF-21P 型では、第 2-11 図のとおり中央 9 体に燃焼度が 48Gwd/t の使用済燃料を配置し、外周部 12 体は、乾式キャスク全体の崩壊熱が平均燃焼度 44Gwd/t に相当するよう中央部の崩壊熱量を差し引いて外周部の 12 体で平均化した崩壊熱量を設定する。MSF-24P 型では、第 2-12 図のとおり中央 12 体に燃焼度が 48Gwd/t の使用済燃料を配置し、外周部

[]: 商業機密に係る事項のため公開できません

12 体は、乾式キャスク全体の崩壊熱が平均燃焼度 44Gwd/t に相当するよう中央部の崩壊熱量を差し引いて外周部の 12 体で平均化した崩壊熱量を設定する。

－使用済燃料は、使用済燃料ごとに軸方向の燃焼度分布に基づく発熱量分布を有するが、発熱量計算にあたっては、軸方向燃焼度分布を第 2-13 図のとおりとし、実際の燃焼度分布より保守的に計算しており、その結果、発熱量は、収納制限における最大崩壊熱量（MSF-21P 型：13.9kW、MSF-24P 型：15.8kW）を 14% 程度上回る崩壊熱量となる。

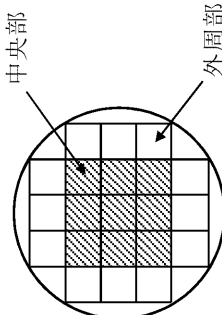
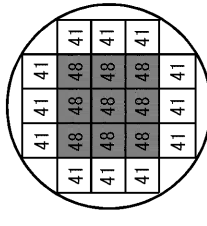
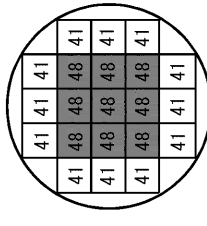
・モデル化の保守性

－乾式キャスク本体内のバスケット及びバスケット内の使用済燃料は、温度を高め評価するよう、空間の中央に配置する。

－燃料集合体モデルは、軸方向への熱移動を考慮しない二次元モデルとする。

－MSF-21P 型及び MSF-24P 型は、使用済燃料とともにバーナブルポイズン集合体を収納する場合もあるが、無視する方が熱伝導性が低下し保守側の評価となるため、モデル化しない。

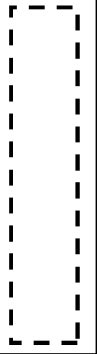
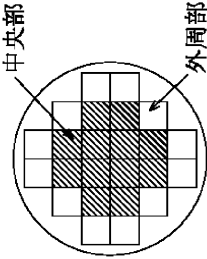
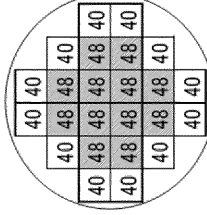
第2-1表 乾式キャスク (MSF-21P型) 解析条件の概要

収納物仕様	燃料 集合体 1体の 仕様	キャスク収納制限 配置制限				燃料スペック		解析条件	
		17×17型燃料収納時		14×14型燃料収納時		17×17型 (A/B型)	14×14型 (A/B型)	中央部	外周部
		中央部	外周部	中央部	外周部			17×17型 (A型)	
	燃料タイプ	17×17型 (A/B型)		14×14型 (A/B型)		17×17型 (A/B型)	14×14型 (A/B型)	17×17型 (A型)	
	初期ウラン濃縮度 (wt%)	≤4.2		≤4.9		4.1	4.8	[]	
	ウラン重量 (kg)	≤44		≤55		≤48	≤55	48	41
	最高燃焼度 (GWd/t) (燃料集合体平均)	A型: ≥15 B型: ≥20		≥15		—	—	15	
	SFPでの冷却期間 (年)	—		≤90		—	—	—	
	最高燃焼度 (GWd/t)	A型: ≥15 B型: ≥20		≥15		—	—	—	
	SFPでの冷却期間 (年)	≤44		≤43		—	—	44	
	平均燃焼度 (GWd/t)	—		—		—	—	—	
	配置※					—			

※：数値は燃焼度 (GWd/t) を示す。

[]：商業機密に係る事項のため公開できません

第 2-2 表 乾式キャスタ (MSF-24P 型) 解析条件の概要

収納物仕様	キャスタ収納制限 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
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)	
	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	40
	SFP での冷却期間 (年)	A 型 : ≥15 B 型 : ≥17		—	15
バーナブル ホイスン キャスタ 1 基あたり	最高燃焼度 (GWd/t)	≤90	—	—	—
	SFP での冷却期間 (年)	≥15	—	—	—
	平均燃焼度 (GWd/t)	≤44	—	—	44
配置*			—		

※：数値は燃焼度 (GWd/t) を示す。

【 】：商業機密に係る事項のため公開できません

乾式貯蔵建屋の流路を一次元でモデル化し、第 2-3 表のとおり、給気温度、乾式キャスクの発熱量等を評価条件として、乾式貯蔵建屋内の空気と外気との密度差により生じる駆動力 H_{th} と、乾式貯蔵建屋内を空気が流れることによって生じる圧力損失 ΔP がバランスする点を算出し、乾式キャスクの周囲温度を評価する。なお、乾式キャスクの周囲温度は、乾式貯蔵建屋内で最も温度が高くなる排気温度で評価する。(第 2-14 図及び第 2-15 図参照)

第 2-3 表 除熱評価の代表的な評価条件

項目	条件	備考
乾式キャスクの発熱量(q)	18kW/基	
給気温度 (T_{in})	33°C	冷暖房設計用乾球温度・露点温度における TAC2.5%温度*の最高温度(空気調和・衛生工学便覧[第 14 版])
目標排気温度 (T_{out})	50°C以下	乾式キャスクの除熱機能に関する評価条件

*TAC2.5%温度とは、夏季(6~9月)のうち高温側 2.5%(約 73 時間)は、その温度を超過することを許容する温度である。

a) 駆動力 H_{th} (熱ドラフト力) の計算

駆動力 H_{th} (熱ドラフト力) は、以下の式で表される。

$$H_{th} = (\rho_{in} - \rho_{out}) \times g \times h$$

ここで、

H_{th} : 熱ドラフト (Pa)

ρ_{in} : 外気の密度 (1.112) (kg/m³)

ρ_{out} : 排気の密度 (kg/m³)

g : 重力加速度 (9.81) (m/s²)

h : ドラフト高さ (19.7) (m)

b) 圧力損失 ΔP の計算

圧力損失 ΔP は、以下の式で表される。

$$\Delta P = \sum_i \frac{\zeta_i \cdot W_i^2}{2\rho_i \cdot A_i^2}$$

$$W_i = \frac{q \cdot n}{C_p \cdot (T_{out} - T_{in})}$$

ここで、

ΔP : 圧力損失 (Pa)

ζ_i : 圧力損失係数 (-)

W_i : 通過風量 (質量流量) (kg/s)

ρ_i : 通風路の空気密度 (kg/m³)

A_i : 通風路の断面積 (m²)

q : キャスク発熱量(18) (kW/基)

n : 評価領域のキャスク基数 (基)

C_p : 空気の比熱(1.007) (kJ/kg・°C)

T_{out} : 排気温度 (°C)

T_{in} : 給気温度(33) (°C)

貯蔵建屋の一次元除熱評価で得られた結果を第2-4表に示す。貯蔵建屋の排気温度 T_{out} は45°Cとなり、目標排気温度 (50°C) 以下となる。

第 2-4 表 貯蔵建屋除熱評価の結果

排気温度 T_{out} (°C)	熱ドラフト H_{th} (Pa)	圧力損失 ΔP (Pa)
約 45	約 7.9	約 7.9

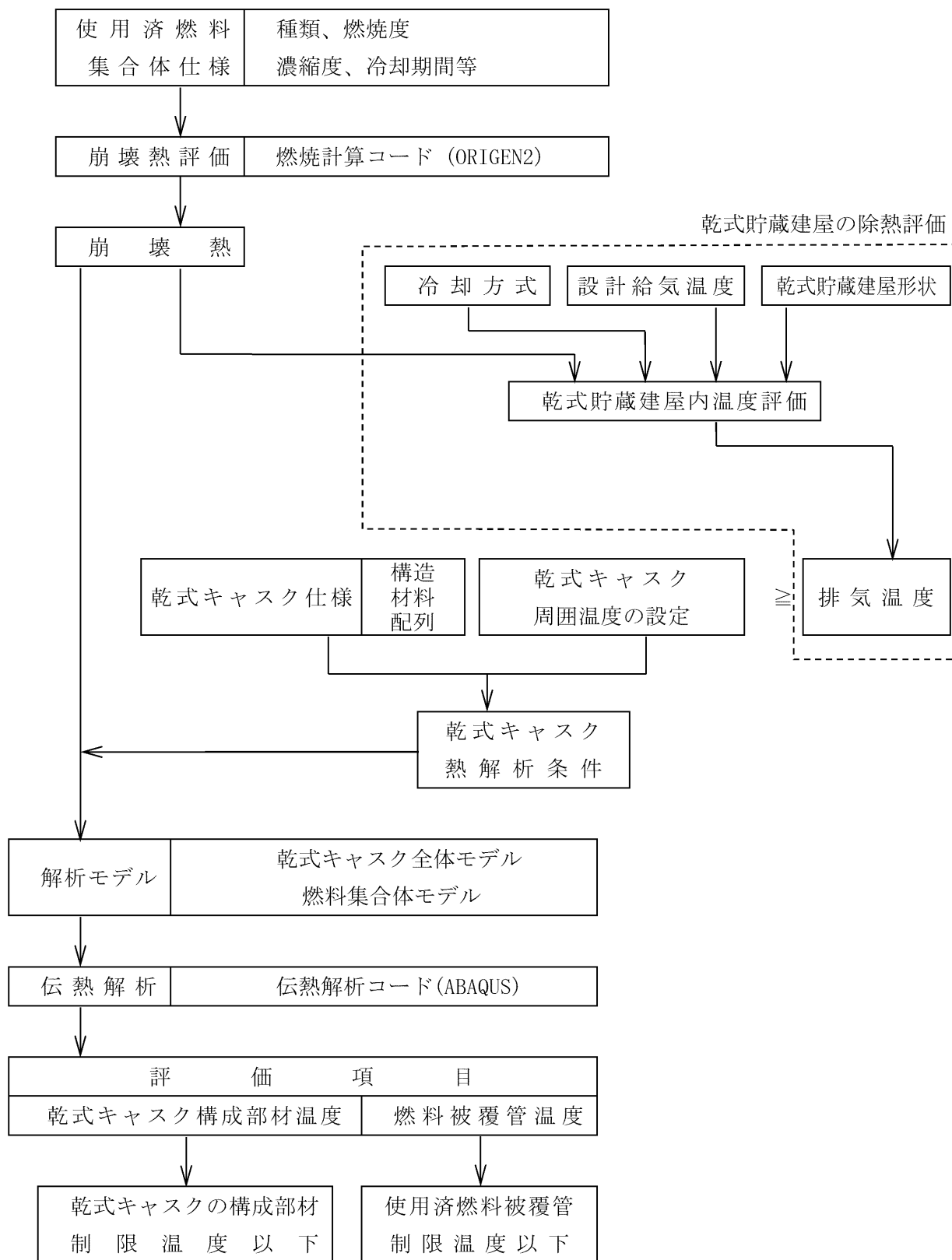
なお、本評価においては、以下の点について保守性を有している。

・設定条件の保守性

— 乾式キャスクの発熱量は、MSF-21P 型及び MSF-24P 型の発熱量を包絡する発熱量を使用している。

— 乾式キャスクの発熱量は、すべて空気によって除熱されると考え、建屋コンクリート等を通して大気や地中に逃げる熱は考慮しない。また、通風路各部の圧力損失を計算する際に、圧力損失係数が高くなる様に設定する。

なお、太陽ふく射熱により貯蔵建屋の外壁面温度に変動が生じるが、貯蔵建屋の壁は 1m 以上のコンクリートであり、太陽ふく射熱により貯蔵建屋の壁内面 (貯蔵建屋内表面) の温度が上昇することはないため、貯蔵建屋内表面を断熱条件として、排気温度を評価することが保守的な評価となる。

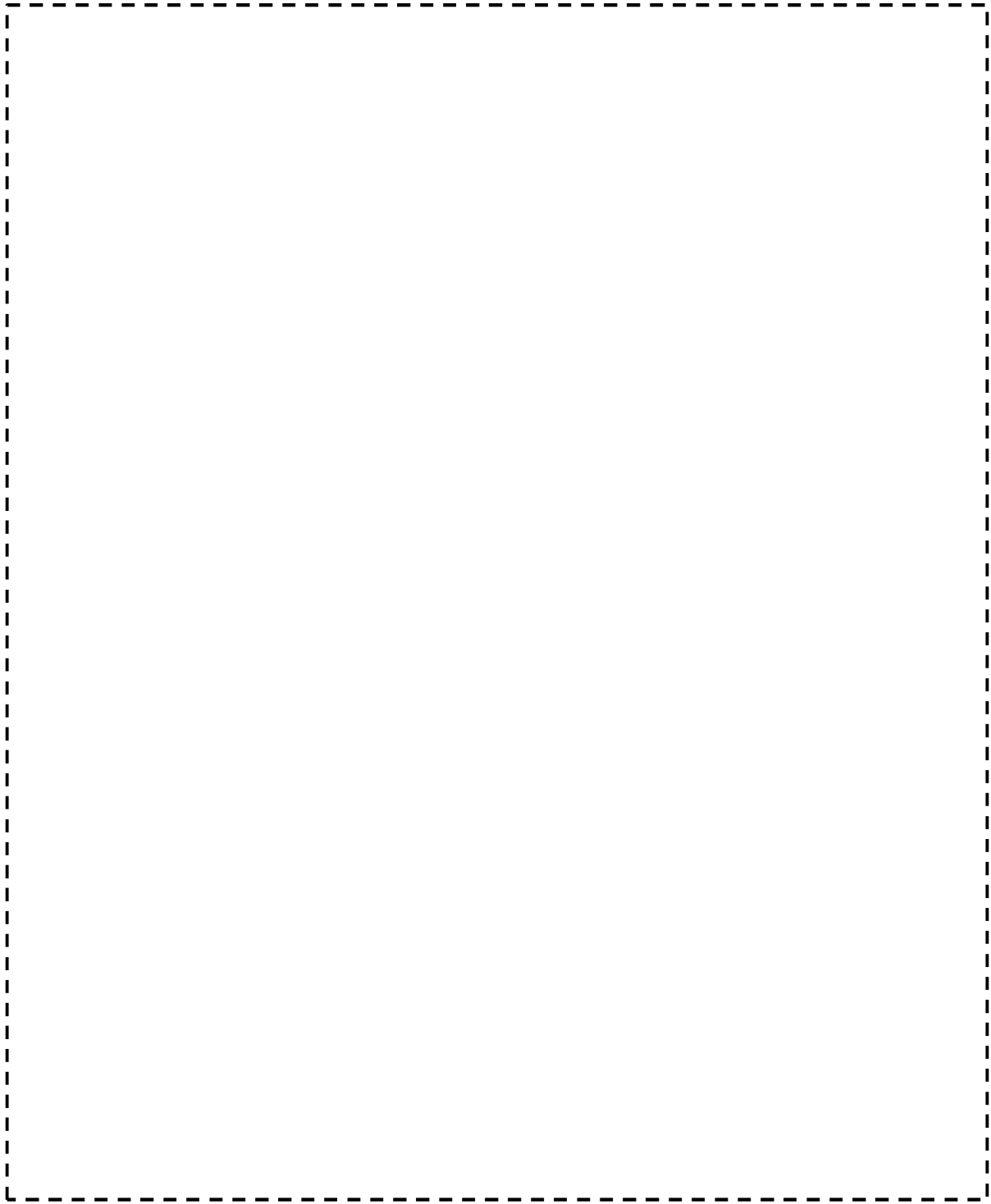


第2-2 図 乾式キャスクの除熱解析フロー



第 2-3 図 MSF-21P 型全体モデル形状図（縦断面図）

【 〇〇 】：商業機密に係る事項のため公開できません



第 2-4 図 MSF-21P 型全体モデル形状図（横断面図）

【 〇 】：商業機密に係る事項のため公開できません

16 条-別添 4（除熱）-17




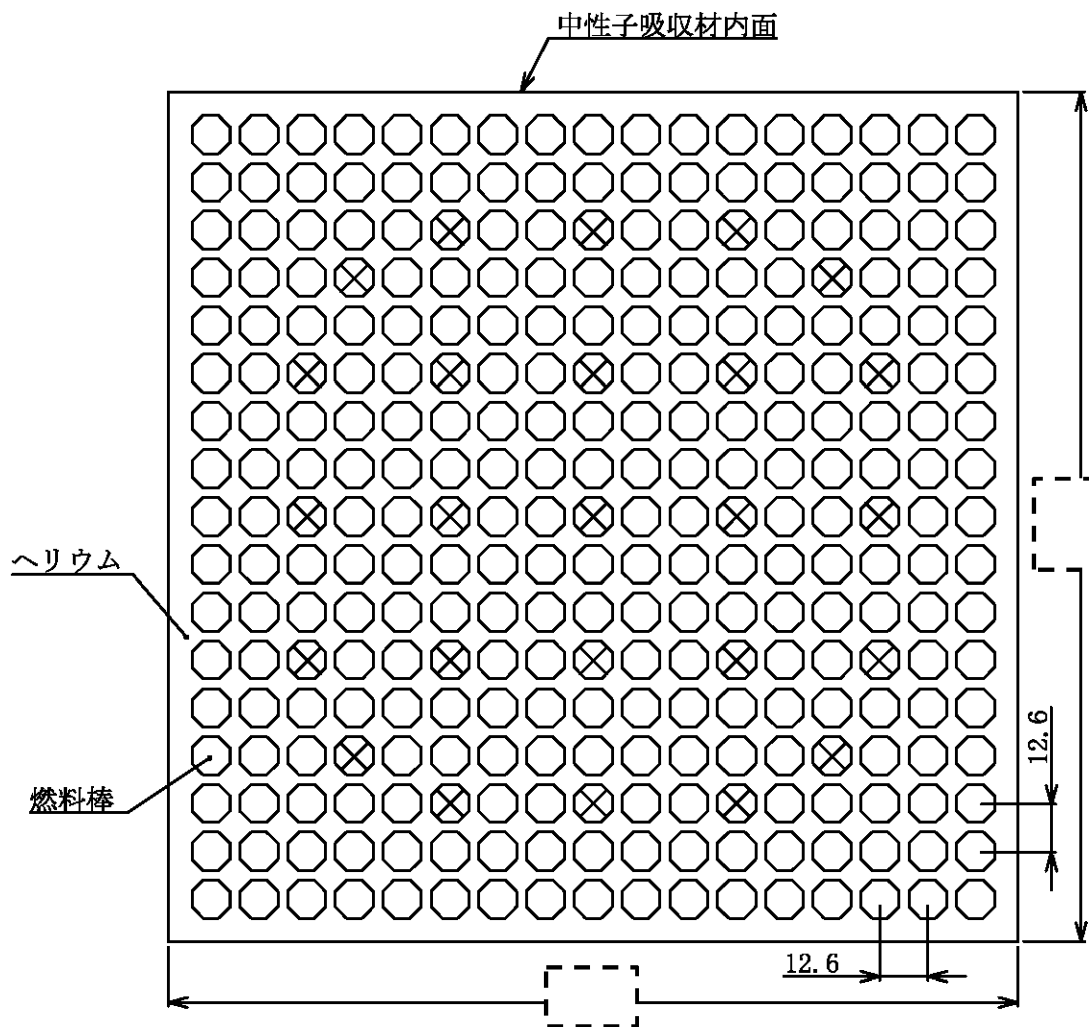
(モデル全体)

(バスケット)

(燃料集合体領域)

第 2-5 図 MSF-21P 型全体モデル要素分割図

 : 商業機密に係る事項のため公開できません



(単位 : mm)

(注) ⊗ は制御棒案内シムプル等であり、発熱はない。

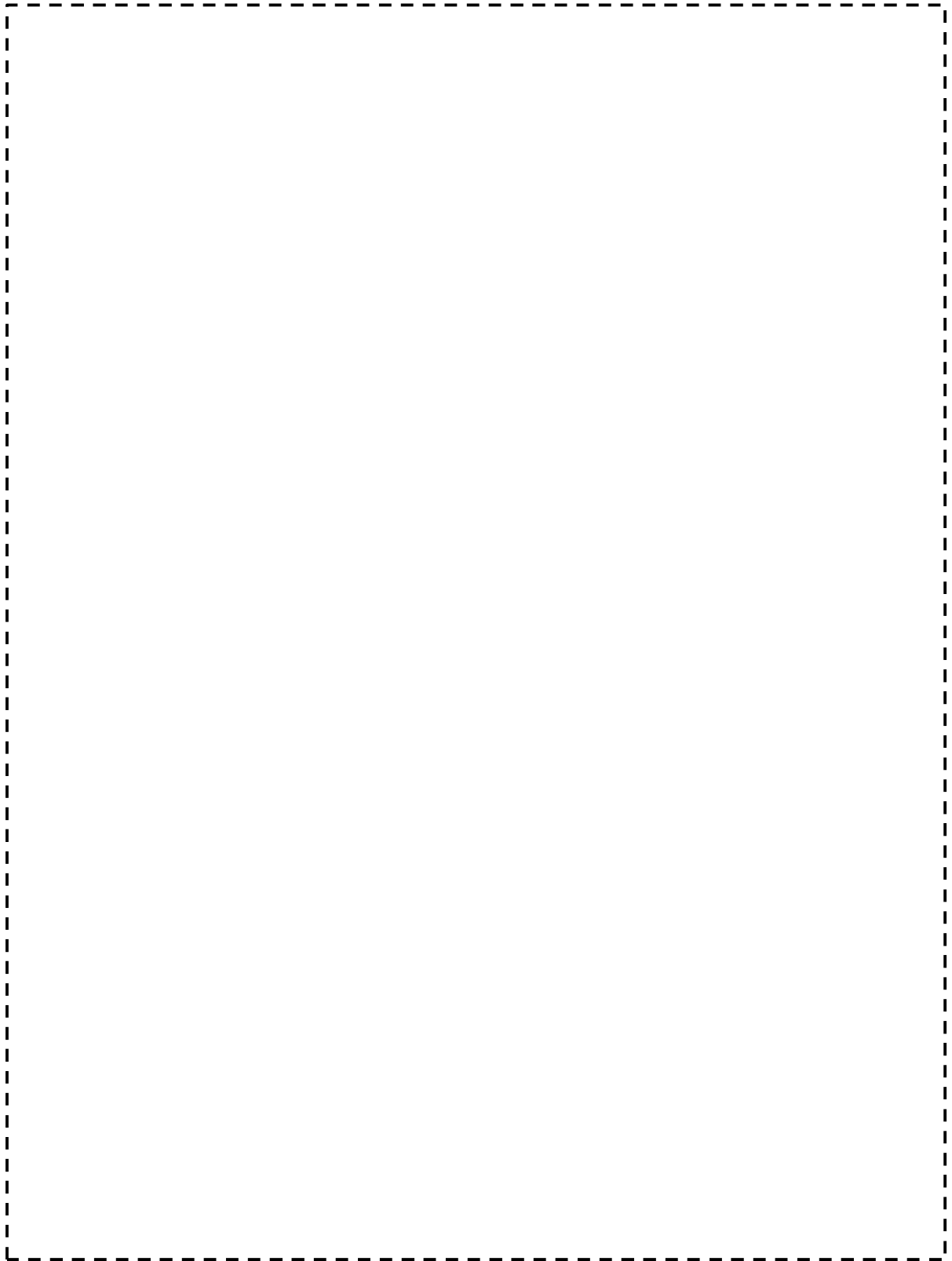
第 2-6 図 MSF-21P 型及び MSF-24P 型燃料集合体モデル形状図

☐ : 商業機密に係る事項のため公開できません



第 2-7 図 MSF-21P 型及び MSF-24P 型燃料集合体モデル要素分割図

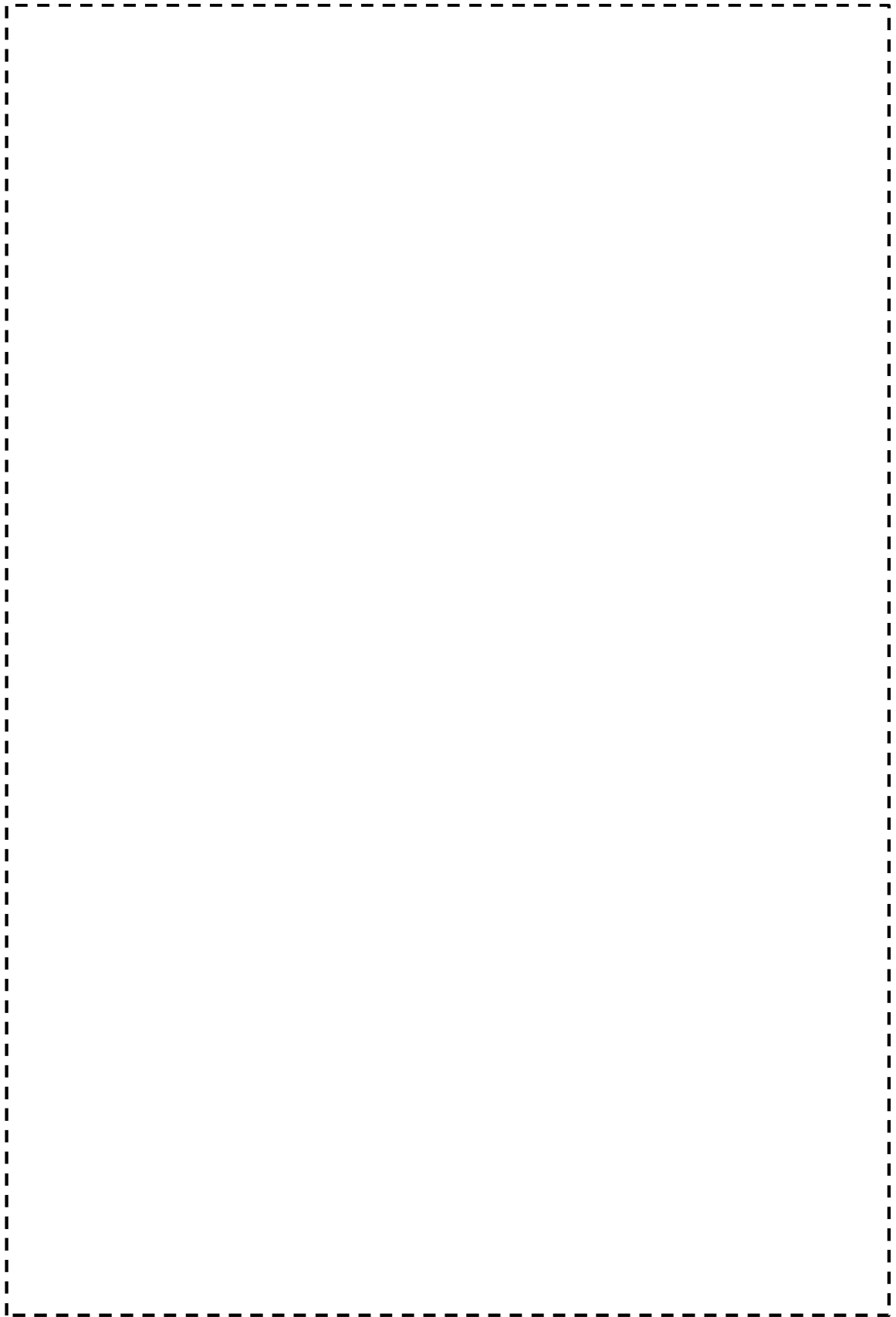
〔 〕 : 商業機密に係る事項のため公開できません
16 条-別添 4 (除熱) -20



第 2-8 図 MSF-24P 型全体モデル形状図（縦断面図）

〔 〕：商業機密に係る事項のため公開できません

16 条-別添 4（除熱）-21



第 2-9 図 MSF-24P 型全体モデル形状図（横断面図）

【 〇 】：商業機密に係る事項のため公開できません
16 条-別添 4（除熱）-22



(モデル全体)

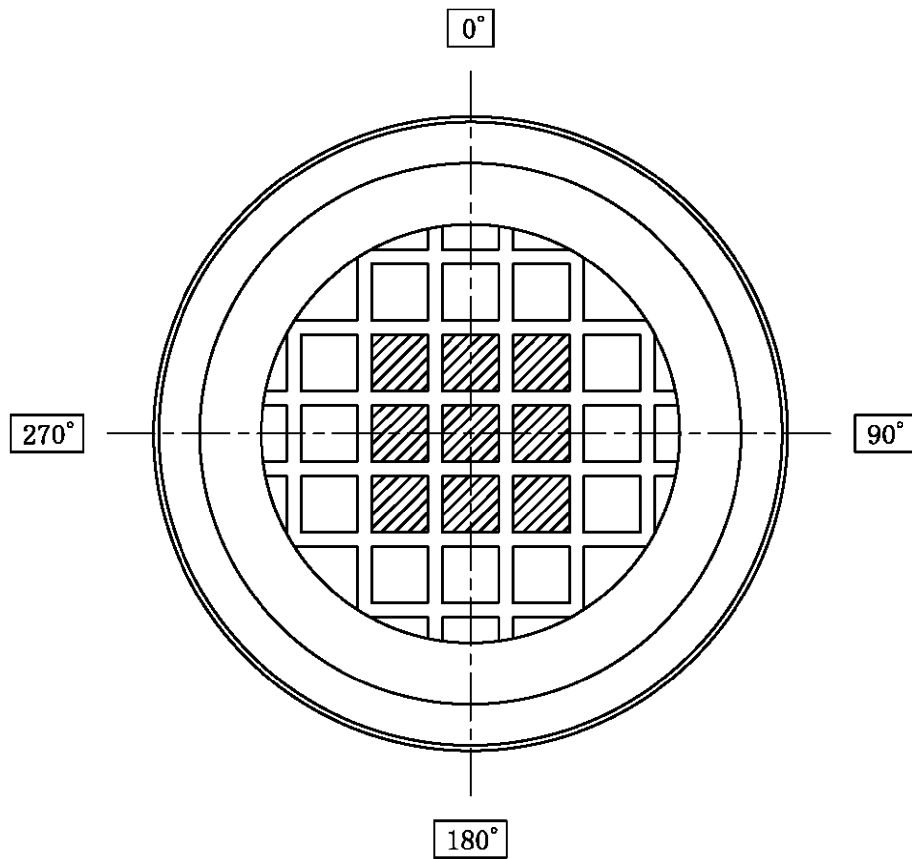
(バスケット)

(燃料集合体領域)

第 2-10 図 MSF-24P 型全体モデル要素分割図

【 〇 】 : 商業機密に係る事項のため公開できません

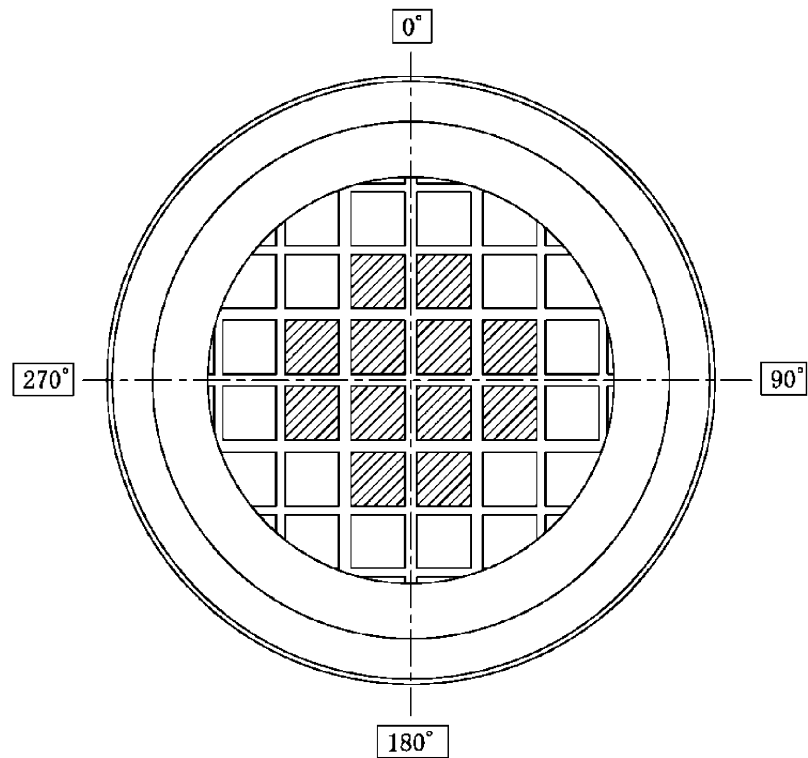
16 条-別添 4 (除熱) -23





▨ : 最高燃焼度の崩壊熱量(中央部 9 体)

□ : 平均燃焼度の崩壊熱量 (21 体分) から中央部の最高燃焼度の崩壊熱量 (9 体分) を差し引き、外周部の収納体数 (12 体) で平均化した崩壊熱量
(外周部 12 体)

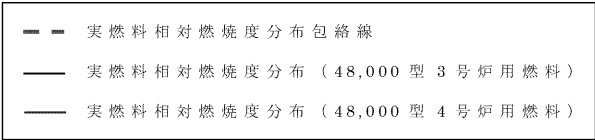
第 2-11 図 MSF-21P 型の除熱解析における
使用済燃料集合体の収納条件



 : 最高燃焼度の崩壊熱量(中央部 12 体)

 : 平均燃焼度の崩壊熱量 (24 体分) から中央部の最高燃焼度の崩壊熱量 (12 体分) を差し引き、外周部の収納体数 (12 体) で平均化した崩壊熱量
 (外周部 12 体)

第 2-12 図 MSF-24P 型の除熱解析における
 使用済燃料集合体の収納条件

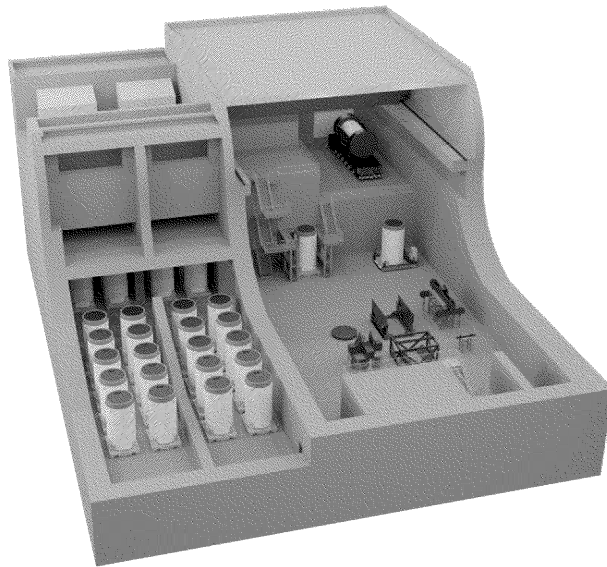


補足：実線は、燃料集合体平均燃焼度に対する燃焼度の相対値を、軸方向燃焼度分布測定データを用いて算出している。

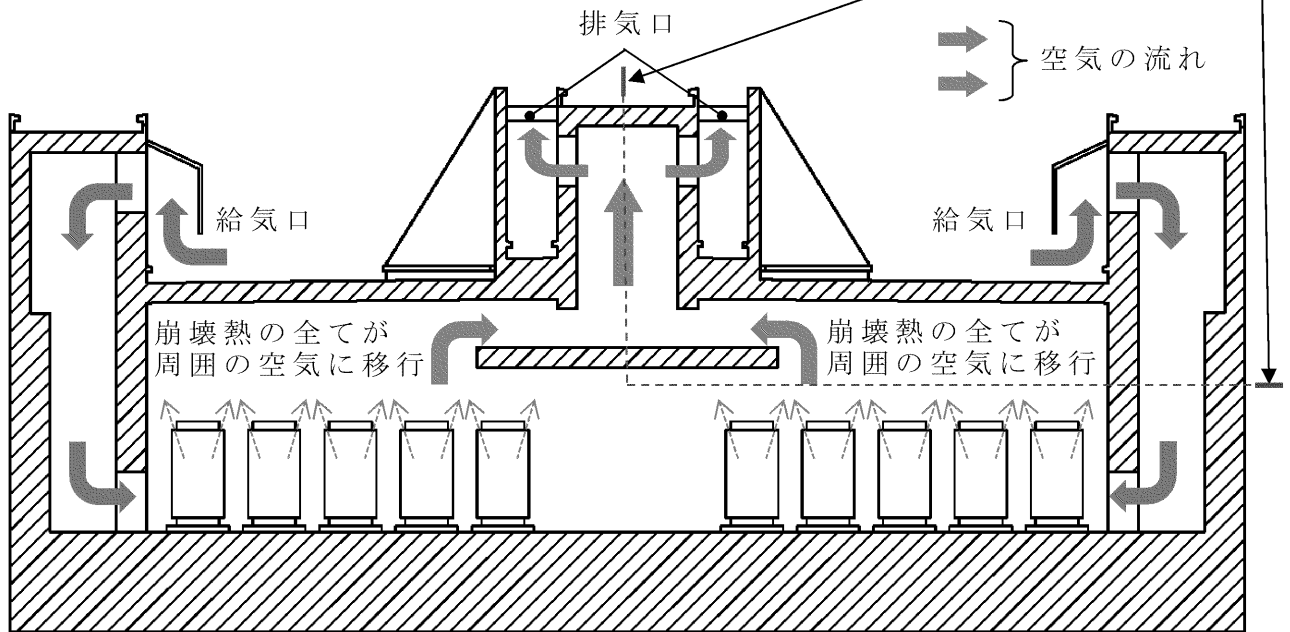
第 2-13 図 3, 4 号炉燃料 軸方向燃焼度分布の設定

〔 〕：商業機密に係る事項のため公開できません

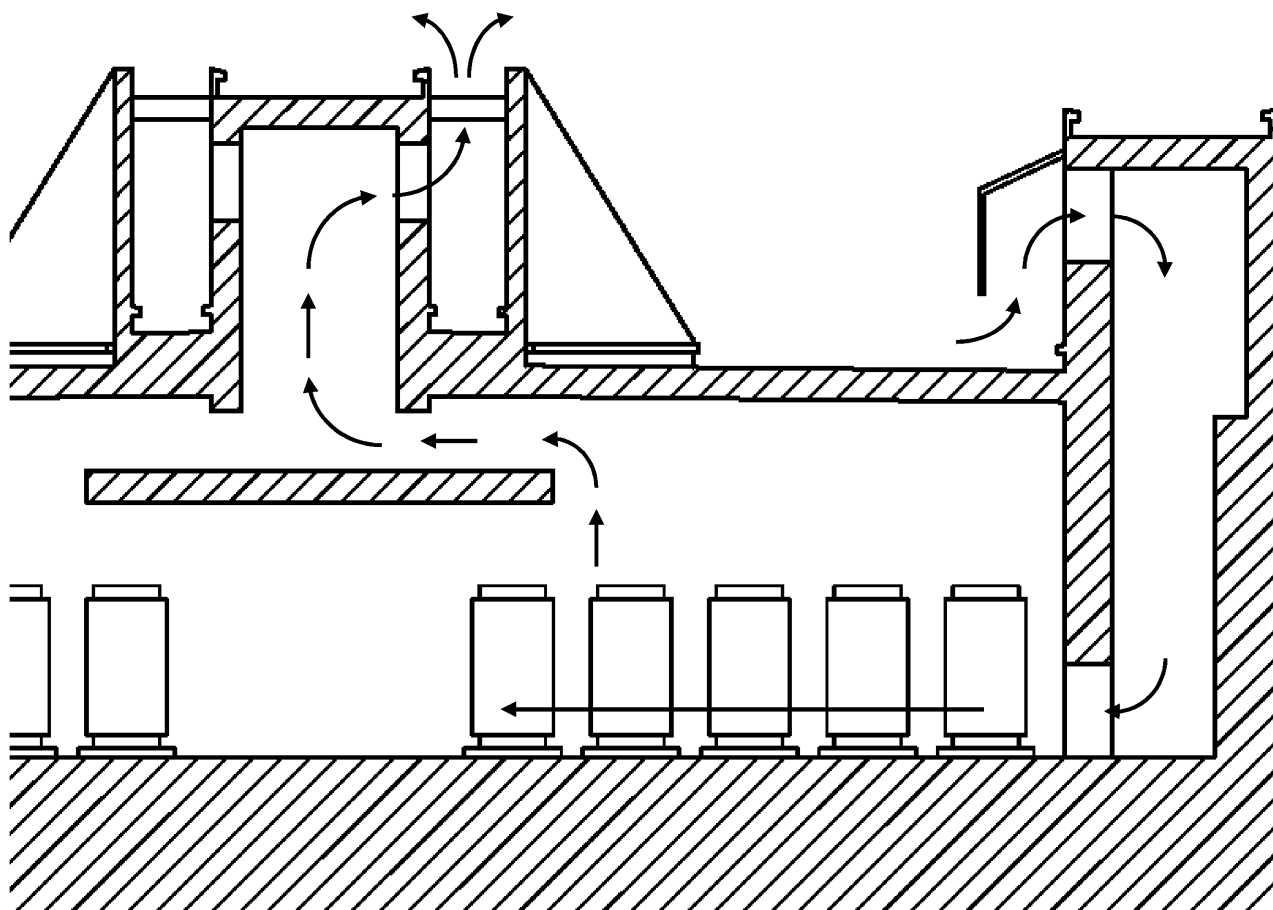
乾式貯蔵建屋のイメージ



矢視断面



第 2-14 図 乾式貯蔵建屋内の空気の流れイメージ図（評価断面図）



第 2-15 図 乾式貯蔵建屋の除熱評価で想定する流路（モデル範囲）

乾式キャスクの除熱機能の評価基準は、以下のとおりとする。

a. 使用済燃料被覆管

使用済燃料被覆管の温度は、燃料被覆管のクリープ破損及び機械的特性の低下を防止する観点から、制限される値以下に維持できること。

b. 乾式キャスク構成部材

基本的な安全機能及び構造強度の維持が必要な部材は、健全性を保つ温度範囲に収まること。

c. 乾式貯蔵建屋

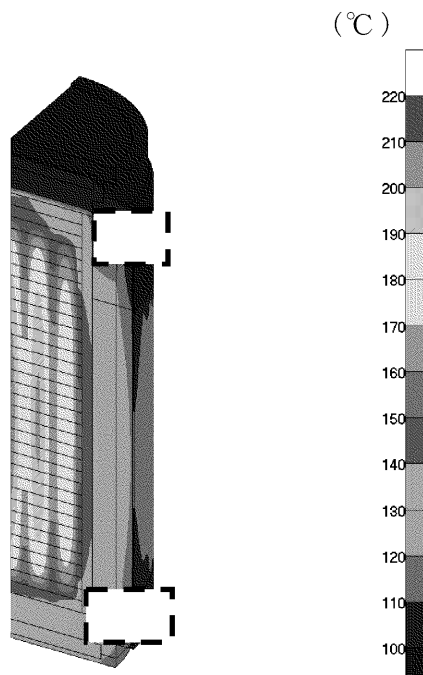
乾式貯蔵建屋の除熱評価で算出した結果（排気温度）が、乾式キャスクの除熱評価で設定している周囲温度以下であること。

第 2-11 図及び第 2-12 図に示すように、最も厳しい評価となる燃料仕様を収納した場合において、第 2-5 表に示すとおり乾式キャスク各部及び使用済燃料被覆管温度は評価基準を満足している。また、乾式貯蔵建屋の除熱評価で算出した結果（排気温度）が、乾式キャスクの除熱評価で設定している周囲温度（50℃）以下であり、乾式貯蔵建屋は乾式キャスクの除熱機能を阻害しない。なお、乾式貯蔵建屋の除熱評価にあたっては、MSF-21P 型及び MSF-24P 型の 2 型式の乾式キャスクの収納制限における最大発熱量（MSF-21P 型：13.9kW、MSF-24P 型：15.8kW）を包絡する 18kW の条件で評価していることから、乾式貯蔵建屋内での乾式キャスクの配置制限は不要である。

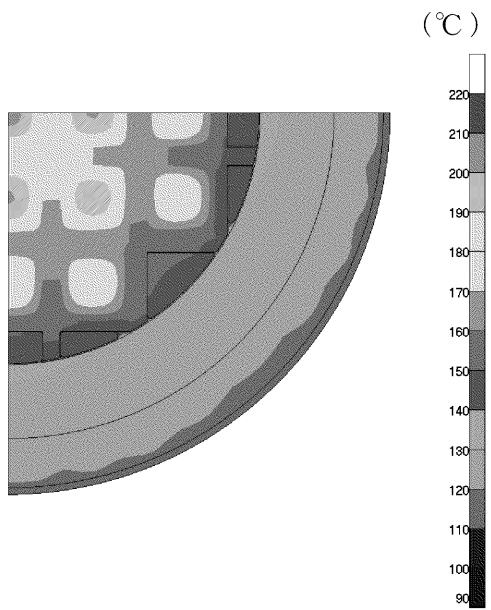
第 2-5 表 評価結果

項 目	評 価 結 果		評価基準	備 考	
	MSF-21P 型 ^(注)	MSF-24P 型			
乾式キャスク各部	胴、外筒、一次蓋及び二次蓋	約 140 °C	約 150 °C	350 °C 以下 ¹⁾	構造強度が確保される制限温度 (第 2-16 図及び第 2-18 図)
	中性子遮蔽材 (レジン)	約 140 °C	約 140 °C	149 °C 以下 ²⁾	中性子遮蔽材の性能が維持される制限温度 (第 2-16 図及び第 2-18 図)
	金属ガスケット	約 110 °C	約 110 °C	130 °C 以下 ³⁾	閉じ込め機能が維持される制限温度 (第 2-16 図及び第 2-18 図)
	バスケット	約 180 °C	約 200 °C	250 °C 以下 ⁴⁾	構造強度が確保される制限温度 (第 2-16 図及び第 2-18 図)
使用済燃料被覆管	約 210 °C	約 220 °C	275 °C 以下 ⁵⁾	燃料被覆管健全性が維持される制限温度 (第 2-17 図及び第 2-19 図)	
乾式貯蔵建屋	乾式キャスクの周囲温度	約 45 °C		50°C 以下	乾式キャスクの除熱評価で設定している温度

(注) MSF-21P 型には 14×14 燃料 55GWd/t 型も収納可能であるが、使用済燃料被覆管の最高温度は約 200°C であり、評価基準 (250°C 以下)⁶⁾を満足することを確認している。一方、他の項目の最高温度は全て 17×17 燃料 48GWd/t が 14×14 燃料 55GWd/t 型を上回り、且つ、評価基準が同じであることから、17×17 燃料 48GWd/t の結果で代表している。



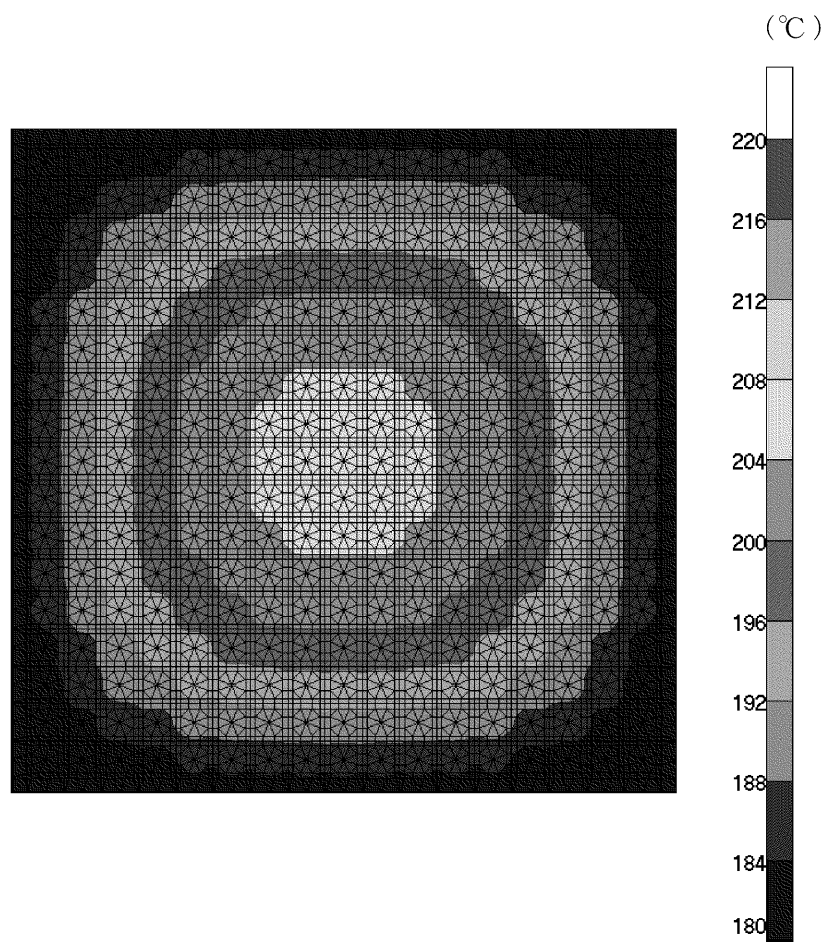
(全体)



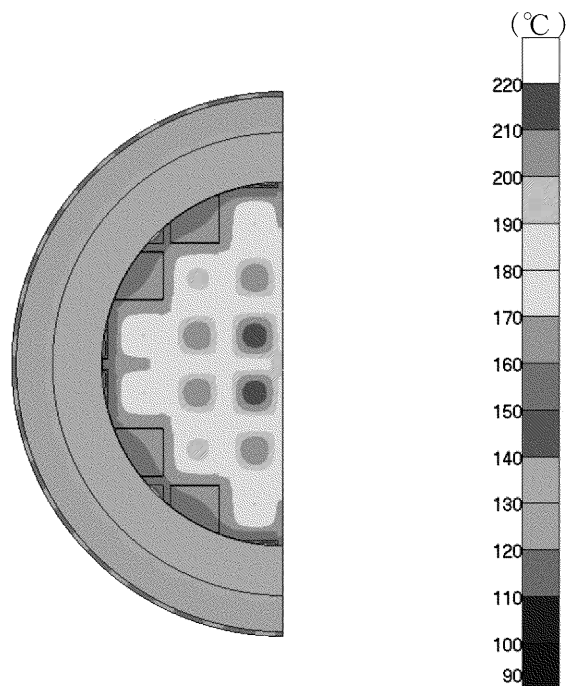
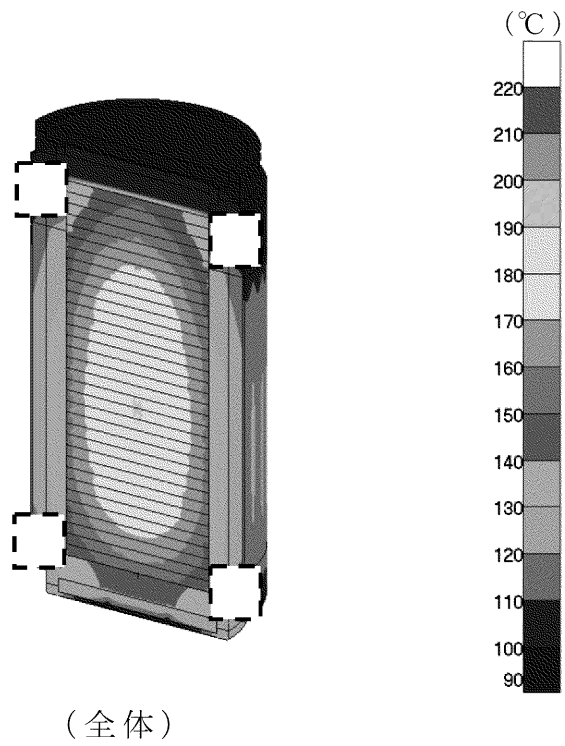
(燃料集合体最高温度位置断面)

第 2-16 図 MSF-21P 型除熱解析結果 (全体モデル)

〔 〕 : 商業機密に係る事項のため公開できません

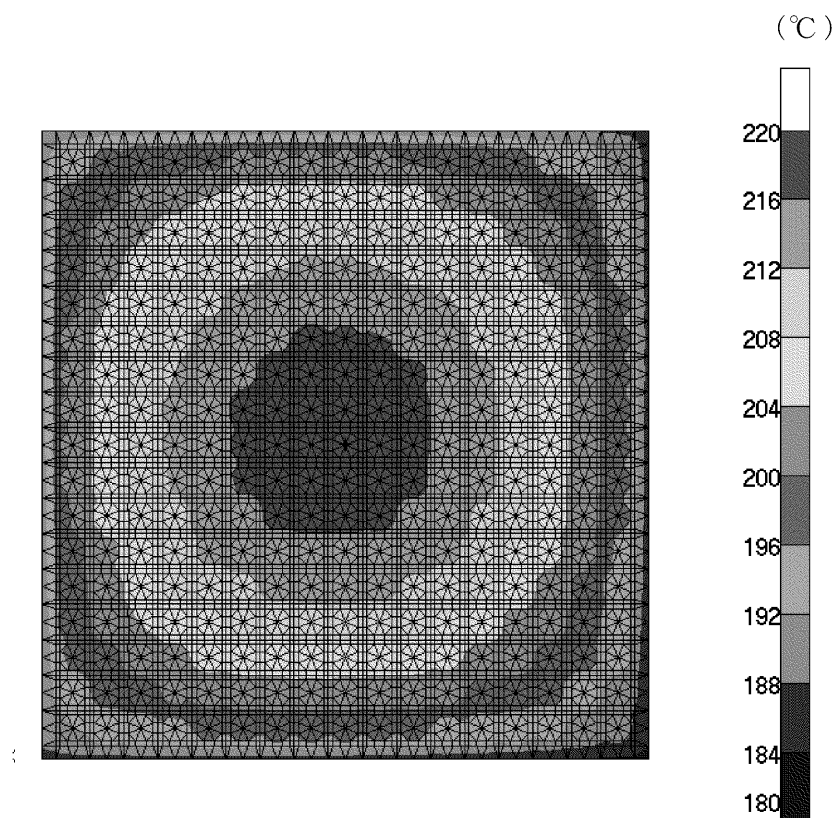


第 2-17 図 MSF-21P 型除熱解析結果(燃料集合体モデル)



第 2-18 図 MSF-24P 型除熱解析結果(全体モデル)

〔 〕 : 商業機密に係る事項のため公開できません



第 2-19 図 MSF-24P 型除熱解析結果(燃料集合体モデル)

〔確認内容〕

4) 貯蔵建屋の除熱評価

- ① また、貯蔵建屋の給排気口は積雪等により閉塞しないこと。
- ② 貯蔵建屋を設置する場合であって、放水による冷却等応急復旧による除熱機能の回復を期待するときには、その実施に係る体制を適切に整備すること。

貯蔵建屋の給排気口は積雪等により閉塞しない設計とする。(詳細は、6条で説明する。)

また、設計上考慮すべき自然現象に対しては、貯蔵建屋等の損壊が生じず、除熱機能は損なわれない設計とし、放水による冷却等応急復旧による除熱機能の回復を期待しない設計とする。(詳細は4、5、6条で説明する。なお、地盤及び周辺斜面の安定性に関しては地盤審査において確認されている。)

特に、以下の貯蔵建屋等の損壊モードについても、想定されない設計とする。

＜兼用キャスクの埋没状態＞

貯蔵建屋等（貯蔵建屋（兼用キャスク、兼用キャスク取扱設備等を収納する建物）及び遮蔽壁）は、地震（4条）、津波（5条）、外部からの衝撃（6条）による損傷の防止が図られ、損壊しないため、兼用キャスクは埋没しない。また、地盤（3条）及び周辺斜面（4条）も基準地震動に対して、安定であるため、兼用キャスクは埋没しない。

＜貯蔵建屋給排気口の損傷状態＞

貯蔵建屋給排気口は、貯蔵建屋の一部からなり、地震（4条）、津波（5条）、外部から衝撃（6条）による損傷の防止が図られるため、損壊しない。

3. 使用する解析コード

a. 解析コード

乾式キャスクの除熱安全設計に用いられる解析コードについて、その機能、計算方法、使用実績及び検証結果について説明する。

(a) ORIGEN2 コード

別添 3 の「玄海原子力発電所*号炉燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設（使用済用済燃料乾式貯蔵容器の遮蔽機能について）」6.(a)で説明した内容と同じ。

(b) ABAQUS コード

i 概要

ABAQUS コード⁷⁾は、米国 Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc.（現在は Dassault Systèmes 社）で開発された有限要素法に基づく伝熱解析等の汎用解析コードであり、輸送キャスクの伝熱解析などに広く利用されている。

ii 機能

ABAQUS コードは、伝熱解析に際して以下の機能を有している。

- a) 定常、非定常のいずれの解も得ることができる。
- b) 一次元から三次元の任意形状の構造に対して解くことが可能である。
- c) 初期条件（温度）は要素ごとに変化させることができ、計算ステップの自動決定も可能である。
- d) 境界条件として、時間に依存する熱流束、温度、熱伝導、対流及びふく射が考慮できる。熱伝導率の温度依存が可能で、また、伝熱解析と応力解析（構造強度解析）を同時に行うことが可能なため、ギャップ間の変化による伝熱条件を変化させることができる。
- e) 構成物質の相変態が考慮できる。

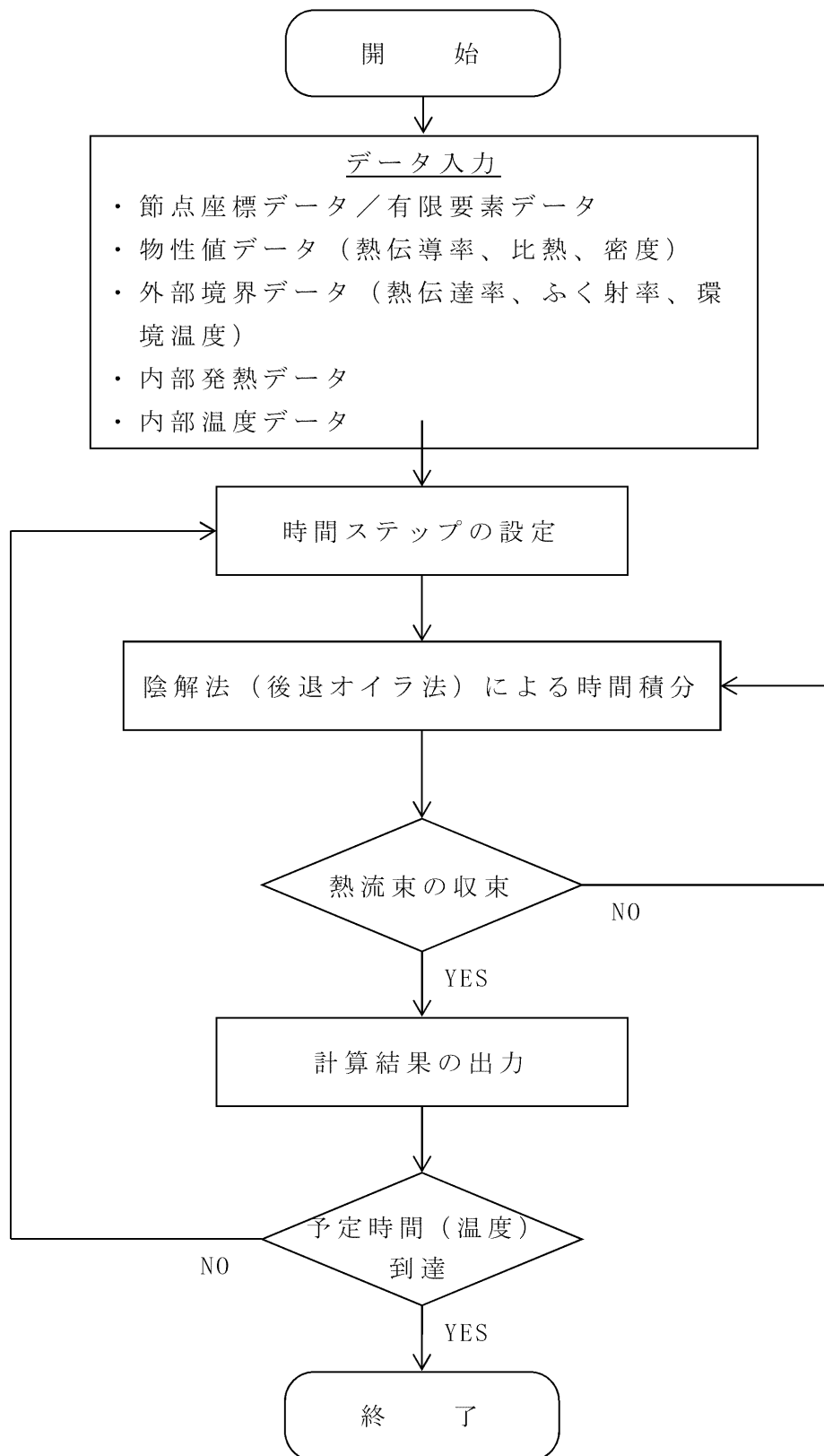
iii 解析フロー

代表的な解析フローを第 2-20 図に示す。

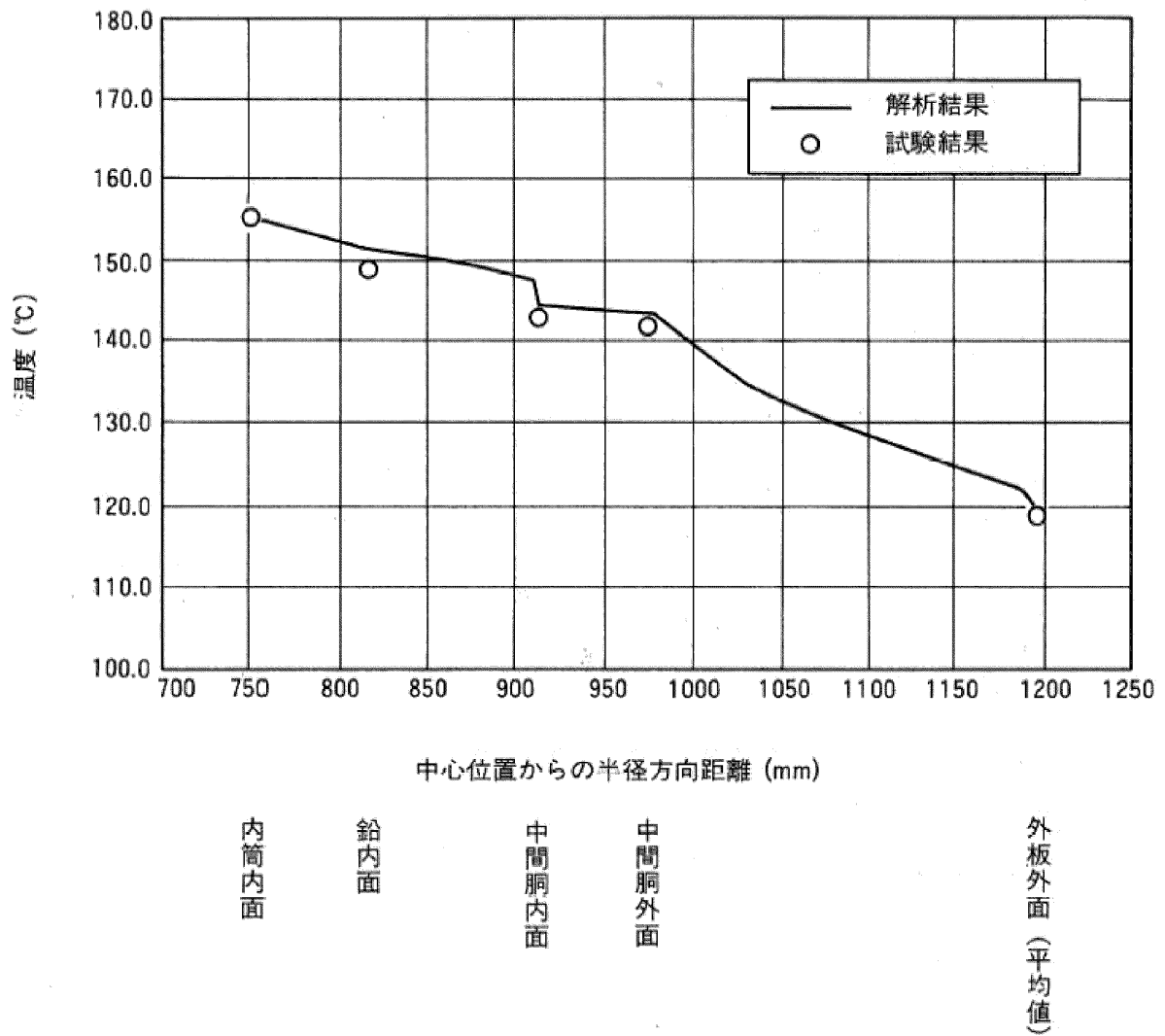
iv 使用実績及び検証

ABAQUS コードは、多くの伝熱解析に使用された実績がある。また、乾式キャスクの定常伝熱試験に対して ABAQUS による解析結果と試験結果を比較・検討し、ABAQUS コードの妥当性が検証されている⁸⁾。

ABAQUS コードの検証例を第 2-21 図に示す。



第 2-20 図 ABAQUS コードの解析フロー図



第 2-21 図 ABAQUS コードの検証例⁸⁾

4. 参考文献

- 1) (一社)日本機械学会, 「発電用原子力設備規格 材料規格 (2012年版) (JSME S NJ1-2012)」, (2012).
- 2) BISCO PRODUCTS, Inc., “NS-4-FR Fire Resistant Neutron and/or Gamma Shielding Material”, (1986).
- 3) (一財)電力中央研究所, 「平成 21 年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等 報告書」, (2010).
- 4) 三菱重工業(株), 「型式設計特定容器等の型式指定申請書本文及び添付書類の一部補正について」, (2017).
- 5) 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, 「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」, (2009).
- 6) (独)原子力安全基盤機構, 「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燃料健全性等調査に関する試験成果報告書)」, (2009).
- 7) Dassault Systèmes, “ABAQUS Analysis User’s Manual (6.12)”, (2012).
- 8) 山川秀次, 五味義雄, 尾崎幸男, 小崎明朗, 「使用済燃料キャスク貯蔵技術の確立ーキャスクの伝熱特性評価ー」, (一財)電力中央研究所, (1993).

使用済燃料乾式貯蔵容器の
設計及び評価で引用している文献の
記載内容について

使用済燃料乾式貯蔵容器の設計及び評価で引用している文献の記載内容について

《閉じ込め》

番号	安全審査資料		参考文献		参考文献としての妥当性 (以下の観点から、適用することが妥当であると考 えている。)
	記載箇所	記載内容	文献名 (国際規格/研究機関論文等)	文献概要	
1	別添 1 2. 適合性について	<16 条 - 別添 1(閉じ込め) - 8 ページ> 乾式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(約 0.01 %以下)を考慮し、保守的な値として 0.1 % ¹⁾ を想定する。	(一社) 日本原子力学会, 「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」, (2014).	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%)と国内の軽水炉における漏えい燃料発生率(約 0.01%)を考慮し、漏えい率を 0.1%と想定する。	本文献に示される米国の漏えい燃料発生率は、乾式キャスクと同じ乾式貯蔵での実績、及び乾式貯蔵に比べ厳しい条件下にある軽水炉(国内)における漏えい燃料発生率を考慮した上で保守的に設定しており、参考文献として妥当である。
2	別添 1 2. 適合性について a. 基準漏えい率の計算	<16 条 - 別添 1(閉じ込め) - 9 ページ> また、ここで漏えい率 Q は、以下のクヌッセンの式 ²⁾ で求められる。	International Organaization for Standardization, “Safe Transport of Radioactive Materials - Leakage Testing on Packages”, ISO 12807 (1996)	本文献は放射性物質輸送容器の密封機能評価方法(気体の漏えい率から放射性物質の放出率を評価)を示す ISO 規格である。気体の漏えい率は、リーク孔として円管を仮定し、流路モデルとして粘性流(漏えい率 Q の式の第 1 項)と分子流(漏えい率 Q の式の第 2 項)が適用される。	乾式キャスクの蓋間空間にはヘリウムが充填される。本文献に示されるクヌッセンの式は、乾式キャスクの蓋シール部の気体の漏えい状態として想定される流れの状態(粘性流、分子流)が考慮されている。また、クヌッセンの式を用いた漏えい評価は乾式キャスクの閉じ込め機能評価に多くの実績を有しており、妥当である。
3	別添 1 2. 適合性について 第 2-1 表 閉じ込め評価条件及び評価結果	<16 条 - 別添 1(閉じ込め) - 14 ページ> 金属ガスケットの漏えい率 ^{3), 4)} $1 \times 10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 以下	“METAL SEALS TECHNICAL CATALOG”, Technetics Group., (2017).	金属ガスケットのシール性能(カタログ値)は、ヘリウムガスを用いた場合、 $1 \times 10^{-12} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 程度を達成可能である。	本文献は、MSF-21P 型及び MSF-24P 型に用いる金属ガスケットのメーカーカタログであり、参考文献として妥当である。 なお、参考文献 4 の電中研報告を考慮し、メーカーカタログ値($1 \times 10^{-12} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$)から保守的に金属ガスケットの性能を $1 \times 10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ と設定している。
4	別添 1 2. 適合性について 第 2-1 表 閉じ込め評価条件及び評価結果	<16 条 - 別添 1(閉じ込め) - 14, 15, 16 ページ> ・金属ガスケットの漏えい率 ^{3), 4)} $1 \times 10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 以下 ・平成 21 年度の(一財)電力中央研究所研究において、金属ガスケットの長期密封機能について試験を実施し、試験と解析で得られた乾式キャスクの温度と時間をラーソン・ミラー・パラメータ(以下「LMP」という。)により長期密封性能について検討を行っている ⁴⁾ 。第 2-6 図は当該試験結果の二次蓋ガスケット温度から得られた LMP を示しており、LMP が 7942 以下であれば密封性は健全であることが示されている。また、第 2-7 図には、LMP=7942 となる場合の、蓋初期温度と評価年数の関係が示されており、評価年数(貯蔵期間)を 60 年とすると、その期間健全性を担保するためには、初期温度を 134℃以下にすればよいことが示されている ⁴⁾ 。	(一財)電力中央研究所, 平成 21 年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等 報告書, (2010)	・金属ガスケット(外被材:アルミニウム、内被材及びコイルスプリング:ニッケル基合金)の性能について、ガスケット部の温度を約 130℃から 140℃の範囲で一定とし、定期的に密封性能を測定した結果、試験開始から 19 年以上が経過(ラーソン・ミラー・パラメータ(LMP)=7942)しても密封部の漏えい率の変化はなく、良好な密封性能を保持していることが確認された。 ・本試験結果では LMP=7942 まで健全性が示されており、貯蔵期間を 60 年とした場合に LMP=7942 となる金属ガスケットの初期温度は 134℃となり、この温度以下にすれば密封性能が維持される。	本文献での試験は、乾式キャスクで使用する金属ガスケットと同じ材料で行われている。また、金属ガスケット断面外径(φ6.1mm)は、乾式キャスクの一次蓋及び二次蓋のガスケット断面外径(φ10mm)よりも小さい。さらに、試験におけるガスケット部の温度(約 130℃~140℃)は、乾式キャスクの貯蔵時の熱解析結果で得られた金属ガスケット部温度(約 110℃)より高い。したがって、一次蓋及び二次蓋用金属ガスケットにおいて、乾式キャスク貯蔵時の環境に比べて、一次蓋及び二次蓋用金属ガスケットに対してより厳しい条件下で得られた結果である。以上より、参考文献として妥当である。 なお、電中研試験結果を踏まえ、金属ガスケットの性能としては、参考文献 3 のカタログ値より保守的な $1 \times 10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ と設定している。

使用済燃料乾式貯蔵容器の設計及び評価で引用している文献の記載内容について

《臨界防止》

番号	安全審査資料		参考文献		参考文献としての妥当性 (以下の観点から、適用することが妥当であると考 えている。)
	記載箇所	記載内容	文献名 (国際規格/研究機関論文等)	文献概要	
1	別添 2 2. 適合性について 第 2-4 表 評価結果	<16 条 - 別添 2(臨界防止) - 34 ページ> 評価基準 0.95 以下 ¹⁾	「臨界安全ハンドブック第 2 版」, 日 本原子力研究所 JAERI 1340, (1999)	十分に検証されたコードシステムを用いる場合には、そのコードシステムによって 算出された中性子増倍率 keff が次式を満足することにより未臨界であると判定で きると記載されている。 keff ≤ 0.95	臨界防止設計における未臨界判定基準の考え方及 びその判定基準が記載されており、参考文献として 妥当である。
2	別添 2 3. 使用する解析コード a. 解析コード (a)SCALE コードシステム	<16 条 - 別添 2(臨界防止) - 35 ページ> i 概要 臨界解析には、米国のオークリッジ国立研究 所 (ORNL) で開発された公開の SCALE コード システム ²⁾ を用い、実効増倍率の計算には同 コードシステムに含まれる KENO-VI コードを 用いる。	SCALE Code System, ORNL/TM-2005/39 Version 6.2.1, (2016).	－ (使用マニュアルのため、省略)	－ (使用マニュアルのため、省略)
3	別添 2 3. 使用する解析コード a. 解析コード (a)SCALE コードシステム	<16 条 - 別添 2(臨界防止) - 35 ページ> iv 使用実績及び検証 臨界解析で使用した SCALE コードシステムに 対しては、乾式キャスクを模擬した多数の臨 界実験のベンチマーク試験解析が実施され、 その妥当性が示されている。 文献 3) に示す実験について、収納物である 使用済燃料の仕様並びに下記①～⑥の条件を 考慮し、ベンチマーク試験解析を実施する臨 界実験を選定した。第 2-5 表に示すとおりベ ンチマーク試験解析は実験を良く再現してお り、妥当な結果が得られている。 ①燃料棒を配列した集合体が水中に単独で存 在する場合 ②複数の集合体が近接して配列する場合 ③この集合体の配列の間に鋼板、中性子吸収 材 (ほう素) を含む板が存在する場合 ④集合体に近接して反射体 (鋼板、鉛) を配 置した場合 ⑤水中に中性子吸収材 (ほう素) が溶解して いる場合 ⑥乾式貯蔵の条件を模擬し、減速材を用いな い場合	International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments, NEA/NSC/DOC(95)03, (2006)	OECD/NEA にて評価・収集された臨界実験に関わる国際ベンチマークデータベース (International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments, NEA/NSC/DOC(95)03 (2006)) は、下記①～⑥の条件を満たす臨界実 験が記載されている。 ①燃料棒を配列した集合体が水中に単独で存在する場合 ②複数の集合体が近接して配列する場合 ③この集合体の配列の間に鋼板、中性子吸収材 (ほう素) を含む板が存在する場合 ④集合体に近接して反射体 (鋼板、鉛) を配置した場合 ⑤水中に中性子吸収材 (ほう素) が溶解している場合 ⑥乾式貯蔵の条件を模擬し、減速材を用いない場合	本解析に使用する SCALE コードシステム (KENO-VI を含む) が妥当な結果を与えることを確認するた めのベンチマーク試験解析に適した臨界実験が記載 されており、参考文献として妥当である。

使用済燃料乾式貯蔵容器の設計及び評価で引用している文献の記載内容について

《遮蔽》

番号	安全審査資料		参考文献		参考文献としての妥当性 (以下の観点から、適用することが妥当であると考えている。)
	記載箇所	記載内容	文献名 (国際規格/研究機関論文等)	文献概要	
1	別添3 3.使用する解析コード a.解析コード (a)ORIGEN2コード	<16条-別添3(遮蔽)-29ページ> i 概要 ORIGEN2 コードは、米国のオークリッジ国立研究所 (ORNL) で開発された燃焼計算コードである。ORIGEN2 コードは公開コードであり、輸送容器の崩壊熱計算等に広く用いられている。	• “ZZ-ORIGN2.2-UPJ, A Complete Package of ORIGEN2 Libraries Based on JENDL-3.2 and JENDL-3.3”, Computer Programs NEA-1642, OECD/NEA Databank. (2006).	－ (使用マニュアルのため、省略)	－ (使用マニュアルのため、省略)
2	別添3 3.使用する解析コード a.解析コード (a)ORIGEN2コード	<16条-別添3(遮蔽)-30,32ページ> iv 使用実績及び検証 ORIGEN2 コードは、輸送キャスク、原子燃料施設の崩壊熱計算に広く使用されている。また、ORNL では ORIGEN2 コードの崩壊熱計算結果を ANS 標準崩壊熱の値と比較し、ORIGEN2 コードの妥当性を検証している。	• “ORIGEN2:A Versatile Computer Code for Calculating the Nuclide Compositions and Characteristics of Nuclear Materials”, Nuclear Technology, Vol.62, (1983).	PWR 燃料を対象に ORIGEN2 コードにより計算した崩壊熱と、ANS 標準値を比較した結果は、よく一致している。	本解析に使用する ORIGEN2 コードが適切に検証されていることを示す文献であり、参考文献として妥当である。
3	別添3 3.使用する解析コード a.解析コード (b)DOT3.5コード	<16条-別添3(遮蔽)-33ページ> i. 概要 DOT3.5 コードは、米国のオークリッジ国立研究所 (ORNL) で開発された二次元輸送コードである。	• Oak Ridge National Laboratory, “DOT3.5-Two Dimensional Discrete Ordinates Radiation Transport Code”, CCC-276, (1977).	－ (使用マニュアルのため、省略)	－ (使用マニュアルのため、省略)
4	別添3 3.使用する解析コード a.解析コード (b)DOT3.5コード	<16条-別添3(遮蔽)-33,35ページ> iv. 使用実績及び検証 DOT コードは、原子力施設の遮蔽計算に広く用いられており、輸送キャスクの遮蔽解析の豊富な実績がある。使用済燃料輸送容器の解析事例と測定値の比較より、測定値はすべて解析値よりも低い値を示しており、解析コードが信頼できることを示している。	• 「TN-12 型輸送容器の放射性遮蔽特性 (I)線量率」, (一社)日本原子力学会「昭和 56 年秋の分科会」, C17, (1981).	TN-12 型輸送容器 (PWR 燃料を 12 体収納) について、DOT3.5 コードを使用した計算結果と計算値は比較的単純形状部である胴中央 (モデル化の影響が少ない) では良く一致している。複雑形状部 (端部) は計算値が数十%高い値となっている。全体的に計算値と測定値は良く一致している。	本解析に使用する DOT コードが適切に検証されていることを示す文献であり、参考文献として妥当である。
5	別添3 3.使用する解析コード a.解析コード (b)DOT3.5コード	<16条-別添3(遮蔽)-35,36ページ> v. 断面積ライブラリ MATXSLIB-J33 MATXSLIB-J33 は、DOT3.5 等の輸送計算コード用に、JENDL-3.3 に基づく断面積ライブラリとして、日本原子力研究所にて整備されたものである。MATXSLIB-J33 を用いた断面積ライブラリは、多群ライブラリ処理コード TRANSX-2.15 を用いて、輸送計算コード用に中性子 175 群、ガンマ線 42 群のエネルギー群構造に変換して作成している。 JENDL-3.3 の信頼性は遮蔽性能に関するベンチマーク解析で確認されている。	• 「 ²⁵² Cf 核分裂中性子源を用いた遮へい透過実験及び二次元離散座標計算コードによる輸送容器評価用断面積セット SFCX-J33 の適用性に関する研究」, 海上技術安全研究所報告 第 7 巻 第 3 号 研究報告, (2007).	輸送容器体系内部に ²⁵² Cf 線源設置したモデルについて、JENDL-3.3 に基づく断面積ライブラリ SFCX-J33 を使用した DOT3.5 コードによる解析結果と、ガンマ線及び中性子線量当量率を測定した結果はよく一致している。	本文献は、JENDL-3.3 の核データを基に作成した断面積ライブラリ SFCX-J33 を用いた DOT3.5 コードによる解析のベンチマークを示した文献である。乾式キャスク評価に用いる断面積ライブラリ MATXSLIB-J33 は、JENDL-3.3 の核データを基に作成されており、JENDL-3.3 の核データを基に作成された断面積ライブラリを使用した解析の妥当性が示されており、参考文献として妥当である。

使用済燃料乾式貯蔵容器の設計及び評価で引用している文献の記載内容について

《除熱》

番号	安全審査資料		参考文献		参考文献としての妥当性 (以下の観点から、適用することが妥当であると考 えている。)												
	記載箇所	記載内容	文献名 (国際規格/研究機関論文等)	文献概要													
1	別添 4 2. 適合性について 第 2-5 表 評価結果	<16 条 - 別添 4(除熱) - 30 ページ> 第 2-5 表 評価結果 <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <th>項目</th> <th>評価基準</th> </tr> <tr> <td>胴、外筒、 一次蓋及び二次蓋</td> <td>350 ℃以下¹⁾</td> </tr> <tr> <td>中性子遮蔽材 (レジン)</td> <td>149 ℃以下²⁾</td> </tr> <tr> <td>金属ガスケット</td> <td>130 ℃以下³⁾</td> </tr> <tr> <td>バスケット</td> <td>250 ℃以下⁴⁾</td> </tr> <tr> <td>使用済燃料被覆管</td> <td>275 ℃以下⁵⁾</td> </tr> </table>	項目	評価基準	胴、外筒、 一次蓋及び二次蓋	350 ℃以下 ¹⁾	中性子遮蔽材 (レジン)	149 ℃以下 ²⁾	金属ガスケット	130 ℃以下 ³⁾	バスケット	250 ℃以下 ⁴⁾	使用済燃料被覆管	275 ℃以下 ⁵⁾	・(一社)日本機械学会,「発電用原子力 設備規格 材料規格(2012 年版) (JSME S NJ1-2012)」, (2012).	炭素鋼は-30℃~375℃の温度範囲において、ステンレス鋼は、-30℃~425℃の温度 範囲において、ニッケルクロムモリブデン鋼は、-30℃~350℃の温度範囲において、 設計用強度と物性値が規定されている。 ・SGV480 (外筒、蓋部中性子遮蔽材カバー) ・SUS304 (下部端板, 底部遮蔽材カバー) ・SUS630 (トラニオン) ・GLF1 (胴, 一次蓋、二次蓋) ・SNB23-3 (蓋ボルト)	○本文献は、乾式キャスク各部材の設計用強度及び物性 値の規格値。文献概要欄に示す各材料の温度範囲は乾 式キャスクの設計貯蔵期間中の温度範囲を包絡して おり、参考文献として妥当である。
項目	評価基準																
胴、外筒、 一次蓋及び二次蓋	350 ℃以下 ¹⁾																
中性子遮蔽材 (レジン)	149 ℃以下 ²⁾																
金属ガスケット	130 ℃以下 ³⁾																
バスケット	250 ℃以下 ⁴⁾																
使用済燃料被覆管	275 ℃以下 ⁵⁾																
2			・BISCO PRODUCTS, Inc., “NS-4-FR Fire Resistant Neutron and/or Gamma Shielding Material”, (1986).	エポキシ系レジンの使用可能温度が示された文献である。	○本文献は、乾式キャスクで使用される中性子遮蔽材と同 等の組成であるエポキシ系レジンの使用可能温度で あり、参考文献として妥当である。												
3			・(一財)電力中央研究所,「平成 21 年 度 リサイクル燃料資源貯蔵技術調 査等 報告書」, (2010). 平成 21 年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術調査報 告書	金属ガスケット (外被材: アルミニウム、コイルスプリング: ニッケル合金) の 性能について、ガスケット部の温度を約 130℃~140℃で保持し、定期的に密封性能 を測定した結果、試験開始から 19 年以上が経過しても密封部の漏えい率の変化はな く、良好な密封性能を保持していることが確認された。	○本文献での試験は、乾式キャスクで使用する金属ガス ケットと同じ材料で行われている。また、金属ガス ケット断面の外径(φ6.1mm)は、乾式キャスクの一次蓋 及び二次蓋のガスケット断面外径(φ10mm)よりも小 さい。さらに、試験におけるガスケット部の温度(約 130℃~140℃)は、乾式キャスクの設計貯蔵期間中の 熱解析結果で得られた金属ガスケット部温度(約 110℃)より高い。したがって、一次蓋及び二次蓋用金 属ガスケットにおいて、乾式キャスクの設計貯蔵期間 中の環境より厳しい条件下で得られた結果であり、参 考文献として妥当である。												
4			・三菱重工業(株),「型式設計特定容器 等の型式指定申請書 本文及び添付 書類の一部補正について」, (2017).	三菱重工業製の乾式キャスク (MSF-21P 型) のバスケットに用いるアルミニウム合金 (MB-A3004-H112) の設計用強度及び物性値、並びに強度設計における設計基準の設 定根拠がまとめられている。アルミニウム合金は設計貯蔵期間中の強度低下を考慮 する必要があるが、設計貯蔵期間中の熱ばく露条件を模擬した条件での材料試験に より得られた材料特性を保守的に包絡し、設計貯蔵期間中の熱ばく露を適切に考慮 した設計用強度を規定している。	○本文献には、乾式キャスクのバスケットに用いるアル ミニウム合金と同じ材料であり、同じ設計貯蔵期間が 考慮された設計用強度及び物性値が示されている。アル ミニウム合金の温度範囲は乾式キャスクの設計貯蔵 期間中の温度範囲を包絡しており、参考文献として妥 当である。												
5			・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, 「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」, (2009).	・照射劣化 貯蔵期間中の中性子照射量は $10^{15} \sim 10^{16} \text{cm}^{-2}$ 程度と評価されており、炉内照射に伴 う中性子照射量 $10^{21} \sim 10^{22} \text{cm}^{-2}$ に比べて無視できるものであり、貯蔵中の中性子照 射は機械特性に影響しないと評価する。 ・クリープ 国内で照射された照射済ジルカロイ 4 被覆管を用いたクリープ試験が実施さ れ、1%以上の変形能力を有することが確認されている。設計貯蔵期間中には温度 を制限することによりクリープひずみが 1%以下に制限でき、クリープ破損を防止 することができる。 ・照射硬化 被覆管は炉内照射により強度が増し、延性が低下するが、高温条件に長時間保 持されると照射効果が徐々に回復する。約 300℃では照射硬化の回復の可能性は 小さいことが確認されている。 ・水素化物再配向 貯蔵中は燃料棒の内圧が外圧より高いため、被覆管には周方向応力が発生して いる。照射被覆管を用いた水素化物再配向試験及び機械特性試験を行い、被覆管 温度を 275℃以下、周方向応力を 100MPa 以下に制限することにより、機械特性の 劣化を防止することができる。 ・応力腐食割れ 腐食性雰囲気を整った条件におけるジルカロイ 4 の SCC 発生のしきい応力は 200MPa 程度であり、設計貯蔵期間中の応力はこれに比べて低いことから、SCC は 発生しない。	○本文献には、乾式キャスクに収納する PWR39GWd/t およ び 48GWd/t 燃料を対象とし、実燃料と同じ材料を用い た試験結果に基づく評価結果である。また、本文献結 果に示す中性子照射量及び燃焼度等の試験条件は、乾 式キャスクの設計貯蔵期間中の環境を包絡する条件 で得られた結果であるため、参考文献として妥当であ る。												
6	別添 4 2. 適合性について 第 2-5 表 評価結果	<16 条 - 別添 4(除熱) - 30 ページ> (注) MSF-21P 型には 14×14 燃料 55GWd/t 型も収納可能 であるが、使用済燃料被覆管の最高温度は約 200℃ であり、評価基準 (250℃以下) ⁶⁾ を満足すること を確認している。一方、他の項目の最高温度は全て 17×17 燃料 48GWd/t が 14×14 燃料 55GWd/t 型を上 回り、且つ、評価基準が同じであることから、17 ×17 燃料 48GWd/t の結果で代表している。	(独)原子力安全基盤機構,「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 のうち貯蔵燃料健全性等調査に関する 試験成果報告書)」, (2009).	・水素化物再配向 貯蔵中は燃料棒の内圧が外圧より高いため、被覆管には周方向応力が発生して いる。照射被覆管を用いた水素化物再配向試験及び機械特性試験を行い、MDA 及 び ZIRLO 被覆管温度を 250℃以下、周方向応力を 90MPa 以下に制限することによ り、機械特性の劣化を防止することができる。	○本文献は、乾式キャスクに収納する PWR55GWd/t を対象 とし、実燃料と同じ材料を用いた試験結果に基づく評 価結果であるため、参考文献として妥当である。												

使用済燃料乾式貯蔵容器の設計及び評価で引用している文献の記載内容について

番号	安全審査資料		参考文献		参考文献としての妥当性 (以下の観点から、適用することが妥当であると考 えている。)
	記載箇所	記載内容	文献名 (国際規格/研究機関論文等)	文献概要	
7	別添4 3.使用する解析コード (b)ABAQUSコード	<16条-別添4(除熱)-36ページ> i 概要 ABAQUSコード ⁷⁾ は、米国 Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc. (現在はDassault Systèmes社)で開発された有限要素法に基づく伝熱解析等の汎用解析コードであり、輸送キャスクの伝熱解析などに広く利用されている。	・Dassault Systems, “ABAQUS Analysis User’s Manual(6.12)” (2012)	－(使用マニュアルのため、省略)	－(使用マニュアルのため、省略)
8	別添4 3.使用する解析コード (b)ABAQUSコード	<16条-別添4(除熱)-37,39ページ> iv 使用実績及び検証 ABAQUSコードは、多くの伝熱解析に使用された実績がある。また、乾式キャスクの定常伝熱試験に対して ABAQUSによる解析結果と試験結果を比較・検討し、ABAQUSコードの妥当性が検証されている ⁸⁾ 。	・「使用済燃料キャスク貯蔵技術の確立－キャスクの伝熱特性評価－」(一財)電力中央研究所(1993).	使用済燃料の模擬物を収納した実寸大キャスクの伝熱試験(貯蔵時)に対して、ABAQUSコードを用いた計算結果(キャスク各部温度及び燃料被覆管温度)が測定結果とよく一致した。	本解析に使用する ABAQUS コードが適切に検証されていることを示す文献であり、参考文献として妥当である。

使用済燃料乾式貯蔵容器の設計及び評価で引用している文献の記載内容について

《想定事象》

番号	記載箇所	安全審査資料				参考文献		参考文献としての妥当性 (以下の観点から、適用することが妥当であると考えている。)																																
		記載内容				文献名 (国際規格/研究機関論文等)	文献概要																																	
1	7. 使用済燃料乾式貯蔵容器を通常に取り扱う場合の設計上想定される事象について 7.3 通常取扱い時に想定すべき事象の評価	<p><16条-別紙-101 ページ></p> <p>第7-17表 使用済燃料集合体の応力評価結果</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>項目</th> <th>想定事象における衝撃加速度</th> <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>解析基準</th> <th>解析基準値 (MPa)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>a. 検査架台への衝突</td> <td>3.3g^(註1)</td> <td>21.4g (水平落下)</td> <td>141 MPa</td> <td rowspan="6">Sy</td> <td rowspan="6">589 MPa¹⁾ (シ'ルコニウム、215℃)</td> </tr> <tr> <td>b. 貯蔵架台への衝突</td> <td>3.1g^(註1)</td> <td>27.5g (頭部垂直落下)</td> <td>105 MPa</td> </tr> <tr> <td>d. 横倒し時の衝突</td> <td>1.1g^(註1)</td> <td>21.4g (水平落下)</td> <td>141 MPa</td> </tr> <tr> <td>e. 二次蓋の衝突</td> <td>1g^(註2)</td> <td>27.5g (頭部垂直落下)</td> <td>105 MPa</td> </tr> <tr> <td>f. 緩衝体(上部)の衝突</td> <td>1g^(註2)</td> <td>21.4g (水平落下)</td> <td>141 MPa</td> </tr> <tr> <td>f. 緩衝体(下部)の衝突</td> <td>1g^(註2)</td> <td>21.4g (水平落下)</td> <td>141 MPa</td> </tr> </tbody> </table>				項目	想定事象における衝撃加速度	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	解析基準	解析基準値 (MPa)	a. 検査架台への衝突	3.3g ^(註1)	21.4g (水平落下)	141 MPa	Sy	589 MPa ¹⁾ (シ'ルコニウム、215℃)	b. 貯蔵架台への衝突	3.1g ^(註1)	27.5g (頭部垂直落下)	105 MPa	d. 横倒し時の衝突	1.1g ^(註1)	21.4g (水平落下)	141 MPa	e. 二次蓋の衝突	1g ^(註2)	27.5g (頭部垂直落下)	105 MPa	f. 緩衝体(上部)の衝突	1g ^(註2)	21.4g (水平落下)	141 MPa	f. 緩衝体(下部)の衝突	1g ^(註2)	21.4g (水平落下)	141 MPa	<p>“ Proving Test on the Reliability of PWR 15×15 Fuel Assemblies Through Three Reactor Cycles in Japan”、Proceeding of the International Topical Meeting on LWR Fuel Performance April 17-20、(1998).</p>	<p>国内高燃焼度 PWR 燃料被覆管のパンクチャー試験やペレットのガス放出率、酸化膜厚等の各種照射後試験結果を記載している。 その中で、照射後の燃料被覆管の機械特性について、中性子照射量と温度をパラメータとして、引張強度、0.2%耐力及び伸びのグラフが示されている。</p>	<p>○国内の照射後のPWR燃料の被覆管に対して取得された0.2%耐力を含む機械特性データであり、左記の値を用いることは妥当である。</p>
項目	想定事象における衝撃加速度	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	解析基準	解析基準値 (MPa)																																			
a. 検査架台への衝突	3.3g ^(註1)	21.4g (水平落下)	141 MPa	Sy	589 MPa ¹⁾ (シ'ルコニウム、215℃)																																			
b. 貯蔵架台への衝突	3.1g ^(註1)	27.5g (頭部垂直落下)	105 MPa																																					
d. 横倒し時の衝突	1.1g ^(註1)	21.4g (水平落下)	141 MPa																																					
e. 二次蓋の衝突	1g ^(註2)	27.5g (頭部垂直落下)	105 MPa																																					
f. 緩衝体(上部)の衝突	1g ^(註2)	21.4g (水平落下)	141 MPa																																					
f. 緩衝体(下部)の衝突	1g ^(註2)	21.4g (水平落下)	141 MPa																																					
2	7. 使用済燃料乾式貯蔵容器を通常に取り扱う場合の設計上想定される事象について 7.3 通常取扱い時に想定すべき事象の評価	<p><16条-別紙-102、106 ページ></p> <p>(1) 検査架台への衝突 検査架台への衝突時には、第7-23図に示す2枚の足場板の梁が圧縮変形するとして検査架台衝突部のばね剛性K₁は次式²⁾より算出する。</p> <p>(3) 横倒し時の衝突 横倒し時の衝突時には、第7-25図に示すたて起こし架台の胴受け部が圧縮変形するとして輸送架台衝突部のばね剛性K₃は次式²⁾より算出する。</p>				<p>(株)培風館、材料力学の基礎、(1991)</p>	<p>断面が一様な棒の両端に力Wが作用した際の変形量λは、以下の関係である。</p> $\lambda = \frac{\ell}{EA} W$ <p>ここで、λ：変形量、ℓ：棒の長さ、E：縦弾性係数、A：断面積</p>	<p>○左記の式は、一様断面の構造物に力が作用した場合の式である。ここで、ばね剛性K₁、K₃の算出においては、検査架台又はたて起こし架台の一部を一様断面な構造物とみなして計算を行っており、左記の式を用いることは妥当である。 ここで、左記の式を変形すると、$W = \frac{EA}{\ell} \lambda$と表される。 また、W=Kλであることから、$K = \frac{EA}{\ell}$で求められる。</p>																																

使用済燃料乾式貯蔵容器の設計及び評価で引用している文献の記載内容について

《監視》

番号	安全審査資料		参考文献		参考文献としての妥当性 (以下の観点から、適用することが妥当であると考 えている。)
	記載箇所	記載内容	文献名 (国際規格/研究機関論文等)	文献概要	
1	8. 使用済燃料乾式貯蔵容器蓋 間圧力等の監視について 8.2 適合性について	<16 条-別紙-124 ページ> b. 海外事例及び文献を踏まえた考察 ・サリー発電所における密封異常 (アメリカ) ¹⁾	資源エネルギー庁、「使用済 燃料乾式貯蔵施設(中間貯蔵 施設)に係る技術検討報告 書」、(2000).	サリー発電所(アメリカ)で貯蔵中のTN-32 キャスクにおいて、2000 年5月31日に、加圧している2重の金属ガスケット間の圧力が低下 したため、He リークテストを実施した結果、2次側の金属ガスケット がリークしていた。1次側の金属ガスケットにはリークはなかった。 原因は、防護カバーを貫通している電気ケーブル周囲の金属シール部 分から雨水が防護カバー内に入り、蓋部の金属ガスケット外側が腐食 したためである。	○TN-32 に用いられている金属ガスケットと乾式 キャスクで使用する金属ガスケットは同じ材料 である。また、金属ガスケットの温度や周囲気体 (大気)は同等と考えられることから、本文献を 参考とすることは妥当である。
2	8. 使用済燃料乾式貯蔵容器蓋 間圧力等の監視について 8.2 適合性について	<16 条-別紙-125 ページ> b. 海外事例及び文献を踏まえた考察 ・航空機エンジンの衝突における評価 (電力中央研究所) ²⁾	(一財)電力中央研究所、「航 空機エンジンの水平衝突荷 重に対する金属キャスクの 密封性能評価」、(2010)	使用済燃料貯蔵施設に民間航空機エンジンが貫入した場合を想定し、 水平方向から衝撃荷重を受ける金属キャスクの密封性能の検証を目的 に水平衝突試験を実施した。2/5 縮尺キャスクに、高速飛来物を 57.3m/s で水平衝突させ、キャスク内部からのHe 漏洩率を測定した。 漏洩率は衝突直後に $4.0 \times 10^{-6} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ まで上昇したが、試験後 20 時 間経過時点で約 $1 \times 10^{-6} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ に収束した。本結果を用いて実物大キ ャスクの漏洩率を評価すると $3.5 \times 10^{-5} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ となり、衝突後、直ち に密封性能に影響を与えることはないものと推察される。	○本文献での試験は、乾式キャスクで使用する金属 ガスケットと同じ材料で行われている。また、金 属ガスケット断面外径(φ4mm)だが、漏洩率は 実機大(φ10mm)の値に換算されている。さらに、 試験に用いられた金属キャスク蓋及び胴フラン ジの形状は乾式キャスクと同様の構造及び材料 であることから、本文献の試験結果を参考とする ことは妥当である。
3	8. 使用済燃料乾式貯蔵容器蓋 間圧力等の監視について 8.2 適合性について	<16 条-別紙-125、126 ページ> b. 海外事例及び文献を踏まえた考察 ・乾式キャスク落下時の漏えい評価 (電力中央研究所) ³⁾	(一財)電力中央研究所、「金 属キャスク落下時瞬時漏え い評価」、(2006)	貯蔵施設内での事故を想定して、コンクリート床板上への高さ1mか らの水平落下試験及び後部トラニオンを回転中心とした水平状態高 さ1mからの回転衝突試験を実施した。落下試験時の最大漏洩率(試 験前：一次蓋・二次蓋との約 $10^{-12} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$)は、水平落下試験の一次 蓋で $2.4 \times 10^{-10} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 、二次蓋で $2.9 \times 10^{-9} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 、回転衝突試験の 一次蓋で $3.9 \times 10^{-9} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 、二次蓋で $8.4 \times 10^{-9} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ であり、い ずれも貯蔵時の基準漏洩率 $10^{-6} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ を上回るものではなかった。ま た、漏洩率は、24 時間以内に初期値に回復することを確認した。	○本文献での試験は、乾式キャスクで使用する金属 ガスケットと同じ材料、断面外径(φ10mm)で行 われている。さらに、試験に用いられた金属キ ャスクの重量、構造及び材質は乾式キャスクと同等 であることから、本文献の試験結果を参考とする ことは妥当である。

使用済燃料乾式貯蔵容器の設計及び評価で引用している文献の記載内容について

《長期健全性》

番号	安全審査資料		参考文献		参考文献としての妥当性 (以下の観点から、適用することが妥当であると考 えている。)
	記載箇所	記載内容	文献名 (国際規格/研究機関論文等)	文献概要	
1	6. 使用済燃料乾式貯蔵容 器の長期健全性につ いて 6.2 適合性について	<16 条-別紙-26～29 ページ> (1) 胴、一次蓋、二次蓋及び蓋ボルト 【照射影響】 胴、一次蓋、二次蓋及び蓋ボルトに使用する炭素鋼及びニッケルクロムモリブデン鋼につ いては、中性子照射量が 10^{16} n/cm ² までは、顕著な機械的特性変化は見られない ¹⁾ ことが 示されており、最も中性子照射量が高くなる箇所においても、設計貯蔵期間中の中性子照 射量は 6.5×10^{14} n/cm ² であることから照射脆化の影響はない。 (4) 外筒及び蓋部中性子遮蔽材カバー 【照射影響】 外筒及び蓋部中性子遮蔽材カバーに使用する炭素鋼は、中性子照射量が 10^{16} n/cm ² までは、 顕著な機械的特性変化は見られない ¹⁾ ことが示されており、最も中性子照射量が高くなる 箇所においても、設計貯蔵期間中の中性子照射量は、外筒では 3.5×10^{12} n/cm ² 、蓋部中性 子遮蔽材カバーでは 6.5×10^{14} n/cm ² であることから照射脆化の影響はない。	“An Evaluation of Low Temperature Radiation Embrittlement Mechanisms in Ferritic Alloys”, Journal of Nuclear Materials, Vol. 210, (1994).	様々な組成の鋼及び合金鋼の照射材を用いたシャルピー 衝撃試験の結果、中性子照射量が 10^{16} n/cm ² 以下までは、 未照射材の機械的特性（遷移温度）との有意な差はみら れない。	○炭素鋼及びニッケルクロムモリブデン鋼と同等の 組成の鋼への中性子照射による機械的特性への影 響を示した文献である。本文献結果には、乾式キ ャスクの設計貯蔵期間中の中性子照射量（ 10^{15} n/cm ² ）を上回る中性子照射量（ 10^{16} n/cm ² ）と遷移 温度変化の関係が示されており、機械的特性へ影 響が無い中性子照射量の範囲を示すための参考文 献として妥当である。
2	6. 使用済燃料乾式貯蔵容 器の長期健全性につ いて 6.2 適合性について	<16 条-別紙-26～30 ページ> (1) 胴、一次蓋、二次蓋及び蓋ボルト 【熱的影響】 胴、一次蓋、二次蓋及び蓋ボルトに使用する炭素鋼及びニッケルクロムモリブデン鋼は、 設計用強度・物性値が規定 ²⁾ されており、その温度範囲で使用するため、低温脆性を含め、 熱による経年変化を考慮する必要はない。 (3) トラニオン 【熱的影響】 トラニオンに使用するステンレス鋼は、貯蔵状態における温度において、設計用強度・物 性値が規定 ²⁾ されており、その温度範囲で使用するため、低温脆性を含め、熱による経年 変化を考慮する必要はない。 (4) 外筒及び蓋部中性子遮蔽材カバー 【熱的影響】 外筒及び蓋部中性子遮蔽材カバーに使用する炭素鋼は、設計用強度・物性値が規定 ²⁾ さ れており、その温度範囲で使用するため、低温脆性を含め、熱による経年変化を考慮する 必要はない。 (5) 下部端板及び底部中性子遮蔽材カバー 【熱的影響】 下部端板及び底部中性子遮蔽材カバーに使用するステンレス鋼は、設計用強度・物性値が 規定 ²⁾ されており、その温度範囲で使用するため、低温脆性を含め、熱による経年変化を 考慮する必要はない。	(一社)日本機械学会, 「発電 用原子力設備規格 材料規 格 (2012 年版) (JSME S NJ1-2012)」, (2012).	炭素鋼は-30℃～375℃の温度範囲において、ステンレス 鋼は、-30℃～425℃の温度範囲において、ニッケルクロ ムモリブデン鋼は、-30℃～350℃の温度範囲において、 設計用強度と物性値が規定されている。 ・SGV480（外筒、蓋部中性子遮蔽材カバー） ・SUS304（下部端板、底部遮蔽材カバー） ・SUS630（トラニオン） ・GLF1（胴、一次蓋、二次蓋） ・SNB23-3（蓋ボルト）	○本文献は、乾式キャスク各部材の設計用強度及び 物性値の規格値。文献概要欄に示す各材料の温度 範囲は乾式キャスクの設計貯蔵期間中の温度範囲 を包絡しており、参考文献として妥当である。

使用済燃料乾式貯蔵容器の設計及び評価で引用している文献の記載内容について

番号	安全審査資料		参考文献		参考文献としての妥当性 (以下の観点から、適用することが妥当であると考 えている。)
	記載箇所	記載内容	文献名 (国際規格/研究機関論文等)	文献概要	
3	6. 使用済燃料乾式貯蔵容 器の長期健全性につ いて 6.2 適合性について	<16 条-別紙-26 ページ> (1) 胴、一次蓋、二次蓋及び蓋ボルト 【化学的影響】 乾式キャスク内部の使用済燃料を閉じ込める空間は、使用済燃料収納時にその空間を真空乾 燥するとともに、不活性ガスであるヘリウムを封入し、貯蔵する設計としている。したがっ て、不活性雰囲気維持されるため、残留水分 (10 wt%) を考慮しても腐食の影響はない ³⁾ 。	日本アルミニウム協会、「ア ルミニウムハンドブック 第 7 版」, (2007)。	炭素鋼の試験片を淡水に完全に浸漬した条件において 16 年間の浸漬試験の結果、腐食速度は 18 μm/年である。	○本文献結果は、炭素鋼の試験片を淡水の湖に完全 に浸漬した条件のもと得られた結果である。乾式 キャスクの設計貯蔵期間中の環境は、残留水分が 限られていることに加え、酸素が連続的に供給さ れないことから、より厳しい条件下で得られた結 果であるため、参考文献として妥当である。
		<16 条-別紙-30 ページ> (7) 金属ガスケット 【化学的影響】 また、10 年間海浜条件で大気ばく露させた際の平均浸食深さ及び最大孔食深さ ³⁾ を用い、設 計貯蔵期間中の浸食深さと孔食深さを評価した結果、それぞれ約 0.025mm 及び約 0.33mm であ り、外被材の製造公差 ⁸⁾ を含めても、板厚 0.5mm より小さいため、閉じ込め機能に影響はない。		アルミニウム (A1100) の性能について、10 年間海浜条 件で大気ばく露させた試験における平均浸食深さ及び最 大孔食深さの計測結果が記載されている。 ・平均浸食深さ：0.0041mm/10 年 ・最大孔食深さ：0.18mm/10 年	
4	6. 使用済燃料乾式貯蔵容 器の長期健全性につ いて 6.2 適合性について	<16 条-別紙-26 ページ> (1) 胴、一次蓋、二次蓋及び蓋ボルト 【化学的影響】 また、胴、一次蓋、二次蓋及び蓋ボルトに使用する炭素鋼及びニッケルクロムモリブデン 鋼は、設計貯蔵期間中の温度条件において、仮に燃料破損率 1 % 相当の燃料棒内ガスの存 在を考慮しても、腐食の影響はない ⁴⁾ 。	(独) 原子力安全基盤機構、 「平成 15 年度 金属キャス ク貯蔵技術確証試験 報告 書 最終報告」, (2004)。	・鉄系材料 (A350LF5) の腐食速度は、6 ヶ月間の腐食試 験 (ヨウ素ガス濃度 3g/m ³ ; 1% の燃料破損率相当) で は最大 2.3 μm/年であり、この腐食速度が 60 年間維持 されたとしても 138 μm 程度であり、問題となる腐食量 ではない。容器底部の高濃度条件下 (20.5g/m ³) でも 8 μm 程度であり、60 年間の腐食量は 500 μm 程度であ り、問題となる腐食量ではない。 ・ステンレス鋼 (SUSF304) は、腐食速度は 6 ヶ月ばく露 試験では最大 0.13 μm/年であり、この腐食速度が 60 年間維持されたとしても 7.8 μm 程度であり、問題とな る腐食量ではない。 ・アルミ系材料は、キャスク内に残留する酸素が全てバ スケットの腐食に使用されたとしても、平均被膜厚さ は 1 μm 以下である。	○各材料において、6 ヶ月間の腐食試験により腐食量 を評価し、60 年間 (キャスク安全性評価期間) で の腐食量を算出し、設計寸法に対して影響がない ことを示しており、参考文献として妥当である。 ○本文献結果は、設計上の燃料破損率 0.1% に対して 1% 破損の条件、キャスク内部の最高温度 (燃料集 合体最高温度。MSF-24P 型: 約 220℃、MSF-21P 型: 約 210℃) に対して試験温度が 270℃ の条件のもと 得られた結果であり、乾式キャスクの設計貯蔵期 間中の環境に比べて厳しい条件下で得られた結果 であるため、参考文献として妥当である。 ○参考文献におけるキャスクと、今回の MSF-24P 及 び 21P 型で、空間容積が同等であるため、適用す ることは妥当である。
5	6. 使用済燃料乾式貯蔵容 器の長期健全性につ いて 6.2 適合性について	<16 条-別紙-27、28 ページ> (2) バスケット 【照射影響】 バスケットプレート及びバスケットサポートに使用するアルミニウム合金は、中性子照射 量が 10 ¹⁶ n/cm ² まで顕著な機械的特性変化は見られない ^{1)、5)} ことが示されており、最も	三菱重工業(株)、「型式設計 特定容器等の型式指定申請 書 本文及び添付書類の一 部補正について」, (2017)。	・アルミニウム合金は、中性子照射量が 10 ¹⁶ n/cm ² までは 未照射材との機械的特性変化の有意な差は見られな い。 ・アルミニウム合金は、-40℃～250℃の温度範囲におい て、設計用強度と物性値が規定されている。	○バスケットプレート及びバスケットサポートに使用 するアルミニウム合金への中性子照射による機 械的特性への影響を示した文献であり、本文献に は、乾式キャスクの設計貯蔵期間中の中性子照射 量 (10 ¹⁶ n/cm ²) を上回る中性子照射量と機械的特性

使用済燃料乾式貯蔵容器の設計及び評価で引用している文献の記載内容について

番号	安全審査資料		参考文献		参考文献としての妥当性 (以下の観点から、適用することが妥当であると考 えている。)
	記載箇所	記載内容	文献名 (国際規格/研究機関論文等)	文献概要	
		<p>中性子照射量が高くなる箇所においても、設計貯蔵期間中の中性子照射量は 1.6×10^{15} n/cm² であることから照射脆化の影響はない。</p> <p>【熱的影響】 バスケットプレート及びバスケットサポートに使用するアルミニウム合金は、貯蔵状態における温度において、設計用強度・物性値が規定²⁾、⁵⁾されており、その温度範囲で使用するため、低温脆性を含め、熱による経年変化を考慮する必要はない。 なお、バスケットプレート及びバスケットサポートに使用するアルミニウム合金の設計用強度は、設計貯蔵期間中の熱ばく露条件 (250℃) を模擬した条件での材料試験により得られた材料特性を保守的に包絡するように設定しており、クリープによる設計貯蔵期間中の熱ばく露による強度低下を適切に考慮している⁵⁾、⁷⁾。また、貯蔵時にバスケットプレートに発生する応力は 1MPa 未満と小さく、設計貯蔵期間中のバスケットプレートのクリープ変形量は無視し得る⁵⁾。</p>			<p>の関係が示されており、機械的特性への影響がない中性子照射量の範囲を示すための参考文献として妥当である。</p> <p>○本文献は、バスケットプレート及びバスケットサポートに使用するアルミニウム合金の設計用強度及び物性の規定値。設計用強度は、設計貯蔵期間中の熱ばく露条件 (250℃) を模擬した条件での材料試験により得られた材料特性を保守的に包絡するように設定しており、設計貯蔵期間中の熱ばく露による強度低下を適切に考慮している。また、温度範囲 (-40℃～250℃) は乾式キャスク設計貯蔵期間中の温度範囲を包絡しており、参考文献として妥当である。</p>
6	<p>6. 使用済燃料乾式貯蔵容器の長期健全性について</p> <p>6.2 適合性について</p>	<p><16 条-別紙-27 ページ> (2) バスケット</p> <p>【照射影響】 また、中性子吸収材に使用するほう素添加アルミニウム合金については、中性子吸収材中のほう素の設計貯蔵期間中の減損割合は 10^{-5} 程度*であり無視し得るほど小さいため、臨界防止機能への影響はない。 ※：以下のとおり算出。 B-10 減損割合 = $\sigma \times \phi \times t$ (n) ここで、 σ : B-10 の熱中性子吸収断面積 (3840barn = 3.840×10^{-21} (cm²))⁶⁾ B-10 の反応断面積(熱中性子領域 (0.025eV))。 ϕ : 全中性子束 8.117×10^5 [MSF-21P 型] (n/cm²/s) 7.977×10^5 [MSF-24P 型] (n/cm²/s) 遮蔽解析結果(燃料集合体領域の最大値)。保守的に貯蔵初期の値を 60 年一定とする。 t : 照射期間 (60 年間 = 1.9×10^9 (s))</p>	<p>“Curves and Tables of Neutron Cross Sections in JENDL-3.3”, JAERI-Data/Code 2002-020, (2002).</p>	<p>B-10 (ホウ素 10) の熱中性子領域 (0.025eV) における全断面積が示された文献。</p>	<p>○本文献は中性子吸収材に含まれる B-10 の全断面積であり、吸収に加え散乱を含むものであり、保守的な断面積を選定しており、参考文献として妥当である。</p>
7	<p>6. 使用済燃料乾式貯蔵容器の長期健全性について</p> <p>6.2 適合性について</p>	<p><16 条-別紙-28 ページ> (2) バスケット</p> <p>【熱的影響】 なお、バスケットプレート及びバスケットサポートに使用するアルミニウム合金の設計用強度は、設計貯蔵期間中の熱ばく露条件 (250℃) を模擬した条件での材料試験により得られた材料特性を保守的に包絡するように設定しており、クリープによる設計貯蔵期間中の熱ばく露による強度低下を適切に考慮している⁵⁾、⁷⁾。</p>	<p>「A3004-H112 合金の機械的性質に及ぼす長時間加熱および焼きなましの影響」, 軽金属, 第 68 巻 第 12 号, (2018).</p>	<p>アルミニウム合金の強度は高温保持によって低下するため、設計強度は、この低下の影響を適切に反映する必要がある。キャスクのバスケット用構造材料である A3004-H112 材合金の引張特性に及ぼす熱処理条件の影響、各強化因子の引張特性への寄与を確認し、設計強度の設定に必要な長時間加熱と焼きなまし条件を見出した。</p>	<p>○本文献は、バスケットプレート及びバスケットサポートに使用するアルミニウム合金の設計用強度及び物性の規定するための適切な試験条件を示している。本文献で対象とした材料は乾式キャスクと同じ材料であり、また、温度条件は乾式キャスクの温度を包絡しており、参考文献として妥当である。</p>
8	<p>6. 使用済燃料乾式貯蔵容器の長期健全性について</p> <p>6.2 適合性について</p>	<p><16 条-別紙-28 ページ> (2) バスケット</p> <p>【化学的影響】 バスケットが置かれた空間は、使用済燃料収納時にその空間を真空乾燥するとともに、不活性ガスであるヘリウムを封入する設計としている。したがって、不活性雰囲気が維持されるため、残留水分 (10 wt%) を考慮しても腐食の影響はない。⁴⁾、⁸⁾</p> <p><16 条-別紙-33 ページ> (9) 使用済燃料被覆管</p> <p>【化学的影響】 残留水分が 10 wt% 以下の不活性雰囲気にある燃料被覆管の酸化量及び水素吸収量は無視し得るほど小さい⁸⁾ ため、健全性に影響はない。</p>	<p>(一社)日本原子力学会標準委員会, 「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).</p>	<p>・残留水分が 10% (質量) 以下の不活性ガス雰囲気にあるアルミニウム合金、ホウ素添加アルミニウム合金は、腐食を考慮する必要はない。</p> <p>・金属キャスク内部の残留水分を 10% (質量) 以下に制限すれば、燃料被覆管の酸素量や水素吸収量はわずかとなり、被覆管の健全性に影響を与えることはない。</p>	<p>○本文献結果は、乾式キャスクと同じ真空乾燥後の状態を基にした結果であるため、参考文献として妥当である。</p> <p>○本文献結果は、乾式キャスクの設計貯蔵期間中の環境に比べて金属キャスク内部体積及び燃料有効部の被覆管表面積が同等の条件で得られた結果であるため、参考文献として妥当である。</p>

使用済燃料乾式貯蔵容器の設計及び評価で引用している文献の記載内容について

番号	安全審査資料		参考文献		参考文献としての妥当性 (以下の観点から、適用することが妥当であると考 えている。)
	記載箇所	記載内容	文献名 (国際規格/研究機関論文等)	文献概要	
9	6. 使用済燃料乾式貯蔵容 器の長期健全性につ いて 6.2 適合性について	<16 条-別紙-28、29 ページ> (3) トラニオン 【照射影響】 トラニオンに使用するステンレス鋼は、中性子照射量が 10^{17} n/cm ² までは、顕著な機械 的特性変化は見られない ⁹⁾ ことが示されており、最も中性子照射量が高くなる箇所におい ても、設計貯蔵期間中の中性子照射量は 6.5×10^{14} n/cm ² であることから照射脆化の影響 はない。 (5) 下部端板及び底部中性子遮蔽材カバー 【照射影響】 下部端板及び底部中性子遮蔽材カバーに使用するステンレス鋼は、中性子照射量が 10^{17} n/cm ² までは、顕著な機械的特性変化は見られない ⁹⁾ ことが示されており、最も中性子照 射量が高くなる箇所においても、設計貯蔵期間中の中性子照射量は 8.2×10^{13} n/cm ² であ ることから照射脆化の影響はない。	「304 ステンレス鋼の SCC 特 性に及ぼす中性子照射効果 (その 2) -熱鋭敏化材の SCC 感受性に及ぼす照射影 響-」, (一財)電力中央研 究所, (1997)。	ステンレス鋼の照射材を用いた引張試験の結果、中性子 照射量が 10^{17} n/cm ² 以下では未照射材に対する機械的特性 (0.2%耐力及び一様伸び) の有意な差はみられない。	○ステンレス鋼への中性子照射による機械的特性へ の影響を示した文献である。本文献結果には、乾 式キャスクの設計貯蔵期間中の中性子照射量 (10^{15} n/cm ²) を上回る中性子照射量 (10^{18} n/cm ²) と 0.2% 耐力及び一様伸びの関係が示されており、機械的 特性への影響がない中性子照射量の範囲を示すた めの参考文献として妥当である。
10	6. 使用済燃料乾式貯蔵容 器の長期健全性につ いて 6.2 適合性について	<16 条-別紙-28、29、30 ページ> (3) トラニオン 【化学的影響】 トラニオンの内面は中性子遮蔽材 (レジン) に接しており、中性子遮蔽材の熱劣化により 水が生じるが、中性子遮蔽材充填空間は閉鎖環境にあり、酸素が連続的に供給されないた め腐食の影響はない。 ¹⁰⁾ (4) 外筒及び蓋部中性子遮蔽材カバー 【化学的影響】 外筒の内面及び蓋部中性子遮蔽材カバーの内面は中性子遮蔽材 (レジン) に接しており、 中性子遮蔽材の熱劣化により水が生じるが、中性子遮蔽材充填空間は閉鎖環境にあり、酸 素が連続的に供給されないため腐食の影響はない。 ¹⁰⁾ (5) 下部端板及び底部中性子遮蔽材カバー 【化学的影響】 下部端板の内面及び底部中性子遮蔽材カバーの内面は中性子遮蔽材 (レジン) に接してお り、中性子遮蔽材の熱劣化により水が生じるが、中性子遮蔽材充填空間は閉鎖環境にあり、 酸素が連続的に供給されないため腐食の影響はない。 ¹⁰⁾	(公社)腐食防食協会編、「腐 食・防食ハンドブック CD-ROM 版 第 2 版」, 丸善 (株), (2005)。	淡水中における炭素鋼の腐食における酸化剤は水中に溶 存した酸素である。水中の炭素鋼の腐食速度は溶存酸素 濃度に比例して増大する。ステンレス鋼については、全 面腐食のほか、局部腐食 (孔食他) がある。局部腐食が 通常問題となるのは特に塩化物を含む環境である。淡水 中ではステンレス鋼は不動態膜を形成するため炭素鋼に 比べ全面腐食の程度は小さい。	○炭素鋼及びステンレスの淡水環境での腐食影響を 示した文献である。中性子遮蔽材の熱劣化で生じ る水分と同じ淡水環境での腐食影響を示すもので あり、参考文献として妥当である。

使用済燃料乾式貯蔵容器の設計及び評価で引用している文献の記載内容について

《長期健全性》

番号	安全審査資料		参考文献		参考文献としての妥当性 (以下の観点から、適用することが妥当であると 考えている。)
	記載箇所	記載内容	文献名 (国際規格/研究機関論文等)	文献概要	
1 1	6. 使用済燃料乾式貯蔵容器の 長期健全性について 6.2 適合性について	<16条-別紙-30、31ページ> (6) 中性子遮蔽材 【照射影響、熱的影響、化学的影響】 中性子遮蔽材（レジン）は、中性子照射量が 10^{15} n/cm ² までは、顕著な質量減損は見られないことが示されており ^{11)、12)} 、最も中性子照射量が高くなる箇所においても、設計貯蔵期間中の中性子照射量は 1.6×10^{14} n/cm ² であることから照射脆化の影響はない。 【熱的影響、化学的影響】 中性子遮蔽材は、設計貯蔵期間中の熱的（化学的）影響により質量減損（2%程度）が発生 ¹¹⁾ するため、遮蔽評価上、保守的に2.5%の質量減損を考慮する。	(財)原子力発電技術機構, 「平成14年度 リサイクル 燃料資源貯蔵技術調査等（金 属キャスク貯蔵技術確証試 験）報告書」, (2003).	閉鎖系環境でのエポキシ系レジンの加熱試験及び照射試験により、エポキシ系レジンの質量減損には照射の影響は認められなかった。また、質量減損は温度及び加熱時間を基に劣化パラメータを用いた整理による以下の式で評価ができる。 $\Delta w = 5.69 \times 10^{-4} \times E_p - 19.2$ Δw : 中性子遮蔽材の質量減損率 (%) E_p : 劣化パラメータ $= T \times (77.6 + \ln(t))$ T : 中性子遮蔽材温度 (K) t : 中性子遮蔽材加熱時間 (h)	○本文献での試験は、乾式キャスクの中性子遮蔽材と同じエポキシ系レジンをを用い、乾式キャスクと同じ閉鎖系条件で行われている。また、本文献結果に示される質量減損の式に含まれる劣化パラメータの範囲（約38000）は、乾式キャスクの設計貯蔵期間における劣化パラメータ（24P： 37140 、21P： 37049 ）を包絡しており、参考文献として妥当である。 ○評価式による計算結果は以下の通りとなる。 24P： $5.69 \times 10^{-4} \times \{(136+273.15) \times (77.6 + \ln(24 \times 365.25 \times 60))\} - 19.2 \approx 2.0 \%$ 21P： $5.69 \times 10^{-4} \times \{(135+273.15) \times (77.6 + \ln(24 \times 365.25 \times 60))\} - 19.2 \approx 1.9 \%$ これを踏まえ、レジンに保守的に2.5%減損することとして遮蔽評価を実施している。
1 2	6. 使用済燃料乾式貯蔵容器の 長期健全性について 6.2 適合性について		“Verification Tests of Neutron Shielding Materials and Shielding Assessment”, Proceedings of the 15th International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials, (2007).	閉鎖系環境でのエポキシ系レジンの照射材（中性子照射量 10^{15} n/cm ² ）及び未照射材の加熱試験の結果、照射材と未照射材で質量減損率に有意な差は認められなかった。以上のことから、照射による劣化は有意ではなく、熱的劣化が支配的である。	○本文献での試験は、乾式キャスクの中性子遮蔽材と同じエポキシ系レジンをを用い、乾式キャスクと同じ閉鎖系条件で行われている。中性子照射量は、乾式キャスクの貯蔵中と同等であり、参考文献として妥当である。
1 3	6. 使用済燃料乾式貯蔵容器の 長期健全性について 6.2 適合性について	<16条-別紙-30ページ> (7) 金属ガスケット 【照射影響】 金属ガスケットに使用するアルミニウム及びニッケル基合金は、中性子照射量がそれぞれ 10^{19} n/cm ² 又は 10^{21} n/cm ² までは、顕著な機械的特性変化は見られない ^{13)、14)} ことが示されており、最も中性子照射量が高くなる箇所においても、設計貯蔵期間中の中性子照射量は 2.0×10^{14} n/cm ² であることから照射脆化の影響はない。	“Reactor Irradiation Effects on Al 1100”, Proc. Jpn. Congr. Mater. Res., Vol. 24, (1981).	金属ガスケットに使用するアルミニウムの照射材を用いた引張試験の結果、中性子照射量が 10^{19} n/cm ² 以下では未照射材に対する機械的特性（引張強さ及び伸び）の有意な差はみられない。	○金属ガスケットに使用されているアルミニウムに対する、中性子照射による機械的特性への影響を示した文献である。本文献には、乾式キャスクの設計貯蔵期間中の中性子照射量（ 10^{15} n/cm ² ）を上回る中性子照射量（ 10^{19} n/cm ² ）と機械的特性の関係が示されており、機械的特性への影響が無い中性子照射量の範囲を示すための参考文献として妥当である。
1 4	6. 使用済燃料乾式貯蔵容器の 長期健全性について 6.2 適合性について		“Cladding and Structural Materials Semi-Annual Progress Report”, HEDL-TME 75-77, (1975).	金属ガスケットに使用するニッケル基合金の照射材を用いた引張試験の結果、中性子照射量が 10^{21} n/cm ² 以下では未照射材に対する機械的特性（引張強さ及び降伏応力）の有意な差はみられない。	○金属ガスケットに使用されているニッケル基合金に対する、中性子照射による機械的特性への影響を示した文献である。本文献には、乾式キャスクの設計貯蔵期間中の中性子線量（ 10^{15} n/cm ² ）を上回る中性子照射量（ 10^{21} n/cm ² ）と機械的特性の関係が示されており機械的特性への影響が無い中性子照射量の範囲を示すための参考文献として妥当である。

使用済燃料乾式貯蔵容器の設計及び評価で引用している文献の記載内容について

番号	安全審査資料		参考文献		参考文献としての妥当性 (以下の観点から、適用することが妥当であると 考えている。)
	記載箇所	記載内容	文献名 (国際規格/研究機関論文等)	文献概要	
1 5	6. 使用済燃料乾式貯蔵容器の 長期健全性について 6.2 適合性について	<16 条-別紙-30 ページ> (7) 金属ガスケット 【熱的影響】 また、高温時の健全性についてラーソン・ミラー・パラメータ (LMP) で評価すると、150 °Cでは100 年以上閉じ込め機能を維持できる ¹⁵⁾ 。	「使用済燃料貯蔵キャスクの長期密封性能評価手法の開発」, 日本原子力学会誌, Vol. 38, No. 6, (1996).	・金属ガスケット (外被材: アルミニウム、内被材及びコイルスプリング: ニッケル基合金) の応力緩和による漏えい率の影響について、金属ガスケットの漏えい率と LMP の関係が示されており、金属ガスケットの LMP が約 11.0×10^3 を超えなければ貯蔵初期の漏えい率が維持される。 ・ LMP は以下の式のとおり示され、 $LMP=11.0 \times 10^3$ 、温度 150°C (273.15+150K) とすると、時間 t は約 190 年となる。 $LMP=T (20 \times \log(t))$ T: 温度 (K) t: 時間 (h)	○本文献での試験は、乾式キャスクで使用する金属ガスケットと同じ材料で行われている。また、試験に用いた金属ガスケット断面の外径 (φ5.5mm) は、乾式キャスクの一次蓋のカバープレート用金属ガスケットの断面外径 (φ5.6mm) と同等である一方、一次蓋及び二次蓋のガスケット断面外径 (φ10mm) よりも小さい。したがって、乾式キャスクの設計貯蔵期間中の環境に比べて、バルブカバー用金属ガスケットに対しては同等の条件下で得られた結果であり、一次蓋及び二次蓋用金属ガスケットに対してはより厳しい条件下で得られた結果である。さらに、乾式キャスクの設計貯蔵期間を上回る金属ガスケットの LMP と漏えい量の関係が示されており、参考文献として妥当である。
1 6	6. 使用済燃料乾式貯蔵容器の 長期健全性について 6.2 適合性について	<16 条-別紙-30 ページ> (7) 金属ガスケット 【熱的影響】 さらに、設計貯蔵期間中の温度条件において長期密封性能試験 (19 年以上) が実施され、閉じ込め機能が維持されることが確認されている ¹⁶⁾ 。	(一財)電力中央研究所, 「平成 21 年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等 報告書」, (2010).	金属ガスケット (外被材: アルミニウム、コイルスプリング: ニッケル基合金) の性能について、ガスケット部の温度を約 160°Cで一定とし、定期的に密封性能を測定した結果、試験開始から 19 年以上が経過しても密封部の漏えい率の変化はなく、良好な密封性能を保持していることが確認された。	○本文献での試験は、乾式キャスクで使用する金属ガスケットと同じ材料で行われている。また、金属ガスケット断面の外径 (φ6.1mm) は、乾式キャスクの一次蓋及び二次蓋のガスケット断面外径 (φ10mm) よりも小さい。さらに、試験におけるガスケット部の温度 (約 130°C~140°C) は、乾式キャスクの設計貯蔵期間中の熱解析結果で得られた金属ガスケット部温度 (約 110°C) より高い。したがって、一次蓋及び二次蓋用金属ガスケットにおいて、乾式キャスクの設計貯蔵期間中の環境より厳しい条件下で得られた結果であり、参考文献として妥当である。
1 7	6. 使用済燃料乾式貯蔵容器の 長期健全性について 6.2 適合性について	<16 条-別紙-31 ページ> (7) 金属ガスケット 【化学的影響】 大気と接触する二次蓋金属ガスケットの外側については、約 3 年間の塩水噴霧試験を実施し、実機の使用環境より厳しい塩水噴霧環境においても漏えい率に変化のないことが確認されている ¹⁷⁾ 。	小崎明朗, 「使用済燃料貯蔵中の耐久性に関する海外動向他」, (株) 日本原子力情報センター主催セミナー「使用済燃料貯蔵技術の現状と課題」, (1998).	金属ガスケット (外被材: アルミニウム、コイルスプリング: ニッケル基合金) の性能について、実機より厳しい環境である塩水噴霧環境において 3 年間漏えい率に変化がないことを確認している。	○本文献での試験は、乾式キャスクで使用する金属ガスケットと同じ材料相当で行われている。また、乾式キャスクの設計貯蔵期間中の環境より厳しい塩水噴霧環境下で得られた結果であり、参考文献として妥当である。
1 8	6. 使用済燃料乾式貯蔵容器の 長期健全性について 6.2 適合性について	<16 条-別紙-31 ページ> (8) 伝熱フィン 【照射影響】 伝熱フィンに使用する銅は、中性子照射量が 10^{16} n/cm ² までは、顕著な機械的特性変化は見られない ¹⁸⁾ ことが示されており、最も中性子照射量が高くなる箇所においても、設計貯蔵期間中の中性子照射量は 1.6×10^{14} n/cm ² であることから照射脆化の影響はない。	“Low-Load Microhardness Changes in 14-MeV Neutron Irradiated Copper Alloys”, ASTM STP888, (1986).	銅の照射材を用いた硬さ試験の結果、中性子照射量が 10^{16} n/m ² 以下では未照射材に対する機械的特性 (ピッカース硬さ) の有意な差はみられない。	○本文献は、伝熱フィンに使用している銅への中性子照射による機械的特性への影響を示した文献である。本文献は、乾式キャスクの設計貯蔵期間中の中性子線量 (10^{15} n/cm ²) を上回る中性子線量 (10^{16} n/cm ²) とピッカース硬さの関係が示されており、機械的特性への影響が無い中性子照射量の範囲を示すための参考文献として妥当である。

使用済燃料乾式貯蔵容器の設計及び評価で引用している文献の記載内容について

番号	安全審査資料		参考文献		参考文献としての妥当性 (以下の観点から、適用することが妥当であると 考えている。)
	記載箇所	記載内容	文献名 (国際規格/研究機関論文等)	文献概要	
1 9	6. 使用済燃料乾式貯蔵容器の 長期健全性について 6.2 適合性について	<16 条-別紙-31 ページ> (8) 伝熱フィン 【熱的影響】 銅は、設計貯蔵期間中の温度条件において、設計用強度・物性値が規定 ¹⁹⁾ されており、その温度範囲で使用するため、低温脆性を含め、熱による経年変化を考慮する必要はない。	(一財)日本規格協会、「圧力 容器の設計 (JIS B 8267 : 2015)」, (2015).	-40℃~200℃の温度範囲において、設計用強度と物性値が規定されてい る。	○本文献は、銅の設計用強度及び物性値の規格 値。この温度範囲 (-40℃~200℃) は乾式キ ャスクの設計貯蔵期間中の温度範囲を包絡し ており、参考文献として妥当である。
2 0	6. 使用済燃料乾式貯蔵容器の 長期健全性について 6.2 適合性について	<16 条-別紙-31 ページ> (8) 伝熱フィン 【化学的影響】 銅の電極電位は炭素鋼に比べて高く、イオン化傾向の低い金属である ²⁰⁾ ことから、銅は腐食することはなく、炭素鋼が選択的に腐食される。	(公社)腐食防食協会編、「材 料環境学入門」, 丸善 (株), (1993).	銅の電極電位は炭素鋼 (鉄) に比べて高く、イオン化傾向の低い金属で ある。	○本文献は、金属の熱力学的貴卑を示す基礎デー タであり、参考文献として妥当である。
2 1	6. 使用済燃料乾式貯蔵容器の 長期健全性について 6.2 適合性について	<16 条-別紙-32 ページ> (8) 伝熱フィン 【化学的影響】 伝熱フィンと胴及び外筒の接合部において異種金属接触による腐食促 進の可能性があるが、密閉静止した淡水環境における銅が接続した鋼の腐 食試験において鋼単独の場合の腐食速度と同程度になることが確認され ている ²¹⁾ 。	能登谷武紀, 密閉系淡水にお ける鋼-銅系のガルバニック 腐食, 伸銅技術研究会誌 33 巻, (1994).	密閉した水道水において銅を接続した鋼の腐食試験の結果、鋼の腐食速 度は 1 週間以内に約 2 桁減少した。銅を接続した鋼の腐食速度は、比液 量、表面積比、溶液の電気伝導率などに依存するが、腐食反応に伴う溶 存酸素の消費により、鋼の腐食速度は短時間に大幅に減少する。	○本文献には、乾式キャスクの伝熱フィン及び胴 又は外筒と同じ材料である銅及び炭素鋼を用 いた腐食試験の結果が示されている。本試験 は、貯蔵期間中の伝熱フィンと同じ淡水条件 (中性子遮蔽材により生じる水分に相当)・密閉 環境であるため、参考文献として妥当である。
2 2	6. 使用済燃料乾式貯蔵容器の 長期健全性について 6.2 適合性について	<16 条-別紙-32、33 ページ> (9) 使用済燃料被覆管 【照射影響】 燃料被覆管に使用するジルコニウム合金は、設計貯蔵期間中の中性子照 射量が 1.6×10^{15} n/cm ² であり、炉内の中性子照射量 ($10^{21} \sim 10^{22}$ n/cm ²) に対して十分低いことから、照射の影響は無視し得る ²²⁾ 。 【熱的影響】 熱による経年変化としては、クリープひずみの進行による燃料被覆管の 破損、照射硬化の回復による燃料被覆管強度の低下、燃料被覆管中の水素 化物再配向による燃料被覆管の脆化、及び応力腐食割れについて評価する 必要がある ²³⁾ 。 クリープひずみの進行については、予測式に基づく累積クリープひずみ が 1 % 以下となるよう制限することで防止できる ²²⁾ ことが示されてお り、燃料被覆管中の水素化物再配向に係る制限以内では、クリープひずみ が 1% を超えることはない。 照射硬化の回復については、国内軽水炉で照射された PWR 照射済被覆管 を用いた照射硬化回復試験の結果では、硬化の回復のしきい値は 55 GwD/t 燃料では 270℃ 近傍 ²²⁾ であり、また、48GwD/t 燃料では 300 ℃ 近傍 ²²⁾ で あり、しきい値以下であれば照射硬化の回復の可能性は小さいため、使用 済燃料被覆管の温度を制限することにより防止する。 燃料被覆管中の水素化物再配向については、国内の軽水炉で照射された PWR 燃料の燃料被覆管を用いた水素化物再配向試験及び機械的特性試験の 結果、被覆管の周方向機械的特性が低下しない燃料被覆管の温度が 55 GwD/t 燃料では 250 ℃ 以下、周方向応力が 90 MPa 以下 ²³⁾ と求められてお り、また、48 GwD/t 燃料では 275 ℃ 以下、周方向応力が 100MPa 以下 ²²⁾ と 求められており、燃料被覆管温度と周方向応力を制限することによって、 機械的特性の劣化を防止する。 応力腐食割れについては、燃料棒ペレットの温度上昇による腐食性核分 裂生成ガスの放出はなく、また、原子炉運転中に燃料棒ペレットから放出 されたよう素はヨウ化セシウムとして安定に存在することから応力腐食 割れが発生する化学的雰囲気となっていない ²²⁾ 。なお、腐食性雰囲気での の応力腐食割れ試験でジルコニウム合金の応力腐食割れのしきい応力は 55GwD/t 燃料では 150MPa であり、また、48GwD/t 燃料では 200 MPa であり、 設計貯蔵期間中の応力はこれに比べて十分低い ²²⁾ 。	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、「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」, (2009).	・照射劣化 貯蔵期間中の中性子照射量は $10^{15} \sim 10^{16}$ cm ² 程度と評価されており、炉 内照射に伴う中性子照射量 $10^{21} \sim 10^{22}$ cm ² に比べて無視できるもので あり、貯蔵中の中性子照射は機械特性に影響しないと評価する。 ・クリープ 国内で照射された照射済ジルコイ 4 被覆管を用いたクリープ試験 が実施され、1% 以上の変形能力を有することが確認されている。設計 貯蔵期間中には温度を制限することによりクリープひずみが 1% 以下 に制限でき、クリープ破損を防止することができる。 ・照射硬化 ジルコイ 4 被覆管は炉内照射により強度が増し、延性が低下する が、高温条件に長時間保持されると照射効果が徐々に回復する。約 300℃ では照射硬化の回復の可能性は小さいことが確認されている。 ・水素化物再配向 貯蔵中は燃料棒の内圧が外圧より高いため、被覆管には周方向応力 が発生している。照射被覆管を用いた水素化物再配向試験及び機械特 性試験を行い、ジルコイ 4 被覆管温度を 275℃ 以下、周方向応力を 100MPa 以下に制限することにより、機械特性の劣化を防止するこ とができる。 ・応力腐食割れ 腐食性雰囲気が整った条件におけるジルコイ 4 の SCC 発生のしき い応力は 200MPa 程度であり、設計貯蔵期間中の応力はこれに比べて 低いことから、SCC は発生しない。	○本文献は、乾式キャスクに収納する PWR39GwD/t 及び 48GwD/t を対象とし、実燃料と同じ材料を 用いた試験結果に基づく評価結果である。ま た、本文献結果に示す中性子照射量及び燃焼度 等の試験条件は、乾式キャスクの設計貯蔵期 間中の環境を包絡する条件下で得られた結果で あるため、参考文献として妥当である。

使用済燃料乾式貯蔵容器の設計及び評価で引用している文献の記載内容について

番号	安全審査資料		参考文献		参考文献としての妥当性 (以下の観点から、適用することが妥当であると 考えている。)
	記載箇所	記載内容	文献名 (国際規格/研究機関論文等)	文献概要	
23	6. 使用済燃料乾式貯蔵容器の 長期健全性について 6.2 適合性について	<16 条-別紙-32、33 ページ> (9) 使用済燃料被覆管 【熱的影響】 燃料被覆管中の水素化物再配向については、国内の軽水炉で照射された PWR 燃料の燃料被覆管を用いた水素化物再配向試験及び機械的特性試験の結果、被覆管の周方向機械的特性が低下しない燃料被覆管の温度が 55 GWd/t 燃料では 250 °C以下、周方向応力が 90 MPa 以下 ²³⁾ と求められており、また、48 GWd/t 燃料では 275 °C以下、周方向応力が 100MPa 以下 ²²⁾ と求められており、燃料被覆管温度と周方向応力を制限することによって、機械的特性の劣化を防止する。	(独)原子力安全基盤機構, 「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 試験のうち貯蔵燃料健全性 等調査に関する試験成果報 告書)」, (2009).	・水素化物再配向 貯蔵中は燃料棒の内圧が外圧より高いため、被覆管には周方向応力が発生している。照射被覆管を用いた水素化物再配向試験及び機械特性試験を行い、MDA 及び ZIRLO 被覆管温度を 250°C以下、周方向応力を 90MPa 以下に制限することにより、機械特性の劣化を防止することができる。	○本文献は、乾式キャスクに収納する PWR55GWd/t を対象とし、実燃料と同じ材料を用いた試験結果に基づく評価結果である。また、本文献結果に示す中性子照射量及び燃焼度等の試験条件は、乾式キャスクの設計貯蔵期間中の環境を包絡する条件下で得られた結果であるため、参考文献として妥当である。

玄海原子力発電所 3 号炉及び 4 号炉

使用済燃料乾式貯蔵施設の設置変更
許可に係る詳細な確認範囲について

使用済燃料乾式貯蔵施設の設置変更許可に係る詳細な確認範囲を明確にするため、既設建屋（燃料取扱棟）において、使用済燃料乾式貯蔵容器（以下、「乾式キャスク」という。）へ使用済燃料集合体を装荷する作業から、乾式キャスクを使用済燃料乾式貯蔵建屋（以下、「乾式貯蔵建屋」という。）内に貯蔵し、貯蔵後に構外輸送するまでの全体プロセスを整理した結果を表1に示す。このうち、既設建屋における使用済燃料ピットクレーン（以下、「SFPクレーン」という。）および燃料取扱棟クレーン（以下、「FH/Bクレーン」という。）での新燃料（輸送容器含む）、使用済燃料、使用済燃料輸送容器および乾式キャスクの取扱いについて、下表に示す。

表 SFPクレーンおよびFH/Bクレーンの取扱い設備

	SFPクレーン	FH/Bクレーン
新燃料（輸送容器含む）	×	○
使用済燃料	○	×
使用済燃料輸送容器	×	○
乾式キャスク	×	○

○：取扱う、×：取扱わない

1. SFPクレーンでの取扱いについて

SFPクレーンでの使用済燃料の取扱いについては、燃料取扱設備として許可を受けている。ここで、SFPクレーンについては、今回取扱う使用済燃料が、既許可と同一であることから、既許可に包絡される。詳細は添付資料参照。

2. FH/Bクレーンでの取扱いについて

FH/Bクレーンについては、新燃料（輸送容器含む）を取扱うことから燃料取扱設備として許可を受けているとともに、使用済燃料輸送容器を取扱う設備としても許可を受けている。ここで、FH/Bクレーンにより今回新たな乾式キャスクを取扱うこととなるが、表2に示すと

り、FH/B クレーンの容量（吊荷重）以下であることから、当該クレーンの既設設備の改造は伴わず使用することができ、既許可に包絡される。

3. 運搬モードについて

乾式キャスクの運搬モードについては、既に許可を受けている発電所内の構内輸送に用いる使用済燃料輸送容器と同様であり、乾式キャスクについては「核燃料物質等の工場又は事業所の外における運搬に関する規則」で要求される事項を満足することを核燃料輸送物設計承認申請において説明している。なお、核燃料輸送物設計承認申請では、乾式キャスクへの燃料装荷作業中において、乾式キャスクが冠水する際の未臨界性についても説明している。

以上のとおり、運搬モード（既設建屋における乾式キャスクの取扱いを含む）については、既許可または別途審査に包絡されることから、乾式貯蔵施設の設置変更許可に係る審査においては、乾式キャスクの通常貯蔵様態（乾式貯蔵建屋内での取扱モードおよび貯蔵モード）を審査頂きたいと考えている。

以 上

表 1. 乾式キャスクのモード、運用管理及び確認範囲に関する整理表 (2 / 2) (参考)

場所	乾式貯蔵建屋	
	構内	貯蔵区域
項目	構外輸送 (岸壁↓輸送先)	構内輸送 (乾式貯蔵↓岸壁)
様態	乾式キャスク乗送 (緩衝体取付・車両積付)	取扱区域内搬送 (天井クレーン搬送)
	発送仕立て② (監視設備取外し・三次蓋取付)	取扱区域内搬送 (搬送台車搬送)
モード	輸送様態 (緩衝体、三次蓋取付)	貯蔵区域内搬送 (搬送台車搬送)
	運搬モード (外運搬)	貯蔵指定位置解除 (アンカ解除)
設計	運搬モード (外運搬)	乾式貯蔵に係る詳細な確認範囲
	貯蔵中の兼用キャスクへの波及的影響なし	貯蔵中の兼用キャスクへの波及的影響 確認範囲

↓
構外搬出ルート

表 2. 既設設備、使用済燃料輸送容器および乾式キャスクの仕様

既設設備		使用済燃料輸送容器重量 (NFT-14P 型)	乾式キャスク重量		備考
名称	仕様		MSF-21P 型	MSF-24P 型	
FH/B クレーン	容量 (吊荷重) 150 (t)	約 114 (t)	約 120 (t)	約 123 (t)	乾式キャスク重量は、FH/B クレーンの容量 (吊荷重) の範囲内

16 条—参考 2—5

乾式キャスクへの燃料装荷時想定事象と設計基準事故（燃料集合体の落下）との比較について

乾式キャスクへ使用済燃料集合体を装荷する作業時に想定される事象が、既許可の設計基準事故（燃料集合体の落下）に包絡されていることを示す。

乾式キャスクは、既設建屋において、使用済燃料ピット（以下、「SFP」という。）およびキャスクピットで使用済燃料集合体の装荷作業を行う。なお、当該作業には既設設備を用い、新たに追加、仕様変更等を伴う設備はない。

ここで、キャスクピットに据付けられた乾式キャスクに使用済燃料集合体を装荷する作業において想定される事象と、既許可において想定している事象を比較整理した結果を表 1 に示す。また、これらの事象について、SFP における燃料取扱時の高さ関係を図 1 に示す。

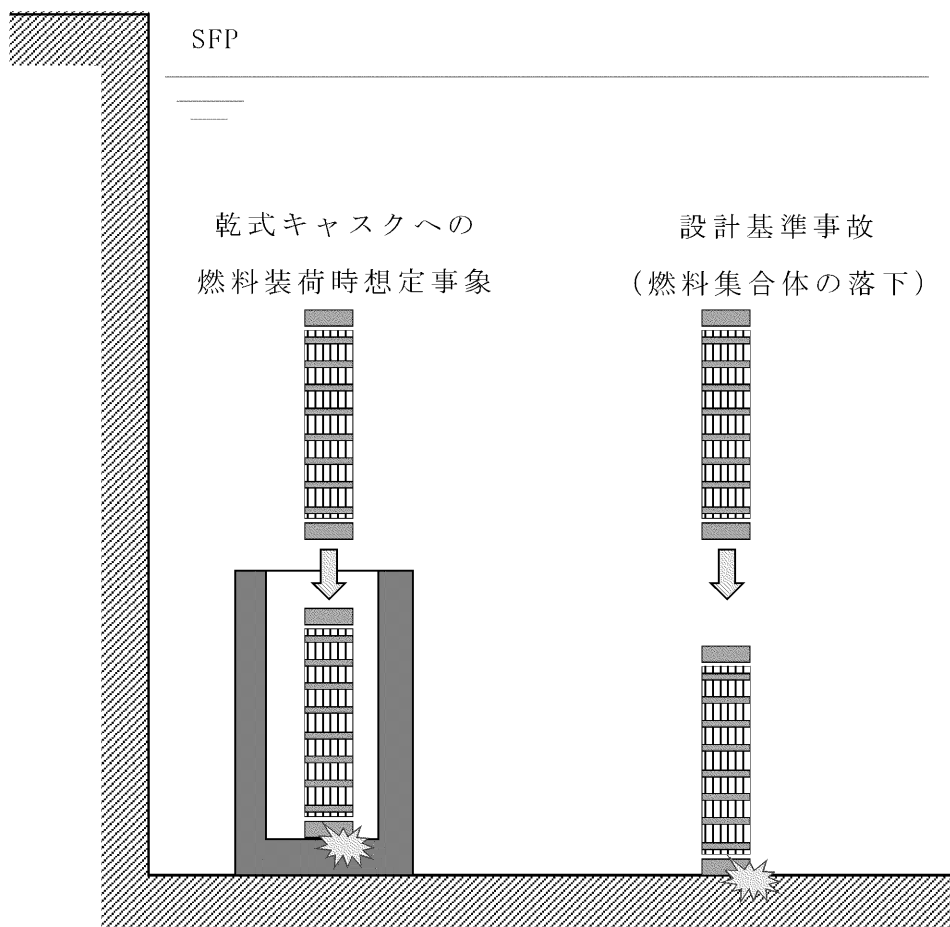
表 1 に示すとおり、燃料仕様、燃焼度、冷却時間（年数）および落下想定高さが、既許可の設計基準事故（燃料集合体の落下）に包絡されており、乾式キャスクを運用する上で既許可への影響はなく、新たに審査される項目はないことを確認した。

表 1 乾式キヤスクへの燃料装荷時想定事象と設計基準事故

(燃料集合体の落下) との比較

	乾式キヤスクへの燃料装荷時想定事象	設計基準事故 (燃料集合体の落下)		比較
		3号炉 SFP	4号炉 SFP	
評価条件	型	17×17型 48GWd/t	17×17型 48GWd/t	燃料に係る評価条件は、設計基準事故(燃料集合体の落下)に包絡される。
	燃料仕様	48GWd/t	48GWd/t	
	冷却時間	131,496時間 (15年)	100時間	
	評価場所	SFP*	SFP*	—
	落下場所	乾式キヤスク 底部	SFP床*	SFP床*

※ 玄海3/4号炉 SFP における比較



(注) 比較のため SFP とキャスクピットの区画等は省略

図 1 SFP における燃料取扱時の高さ関係

貯蔵中の乾式キャスクの転倒防止
(エアパレット搬送時含む) について

1. 概要

使用済燃料乾式貯蔵施設（以下、「乾式貯蔵施設」という。）において、使用済燃料乾式貯蔵容器（以下、「乾式キャスク」という。）を乾式貯蔵容器搬送台車（以下、「搬送台車」という。）で搬送中に転倒しないこと及び貯蔵中の乾式キャスクに衝突しないことを示す。

2. 乾式キャスクの貯蔵架台での固定条件

乾式キャスクは、図1及び図2に示すように、貯蔵架台に設置し、4つの下部トラニオンを固定する方式とする。このため、搬送中であっても、乾式キャスクが貯蔵架台から浮き上がることはない。

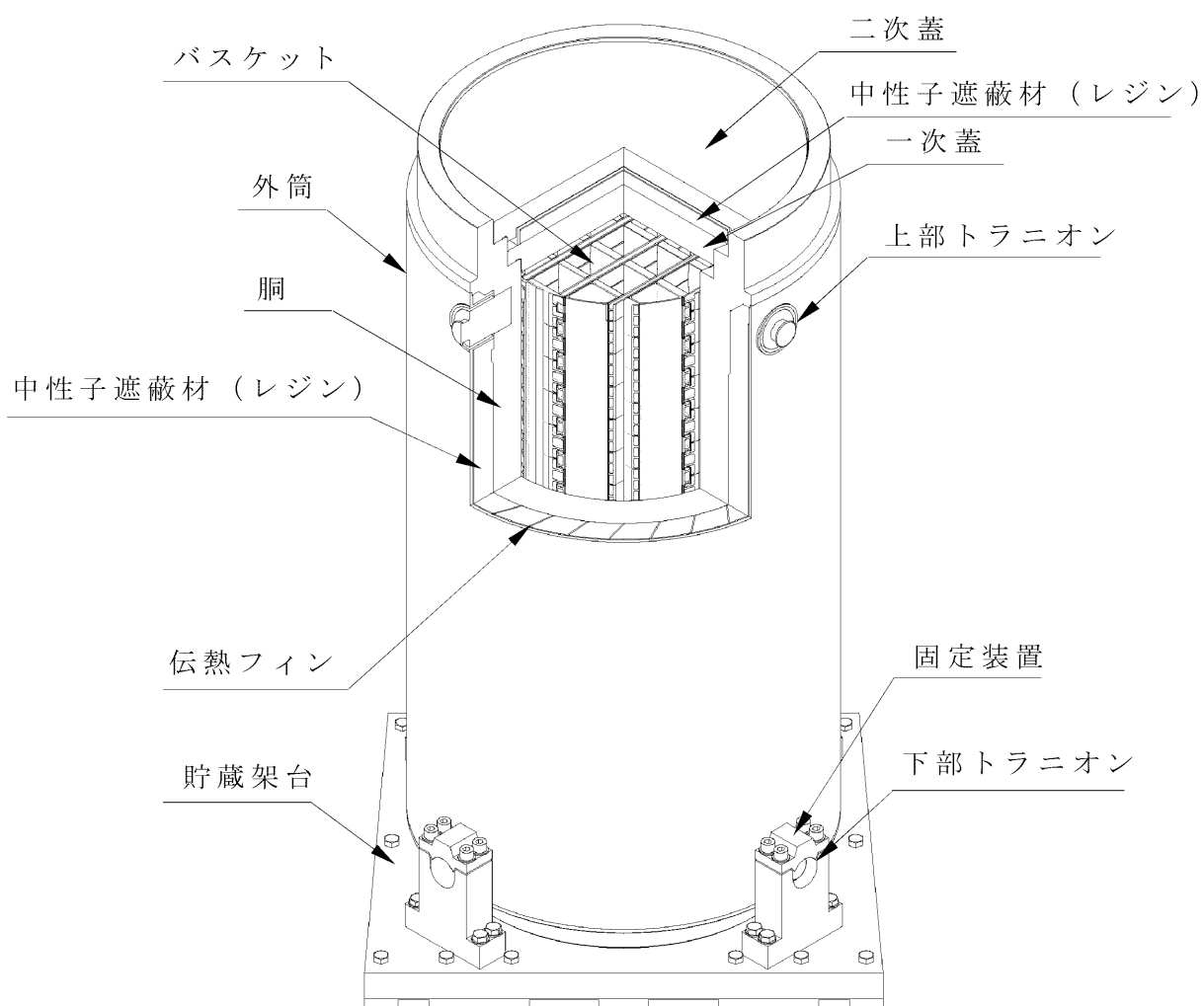


図1 貯蔵架台設置時の乾式キャスク

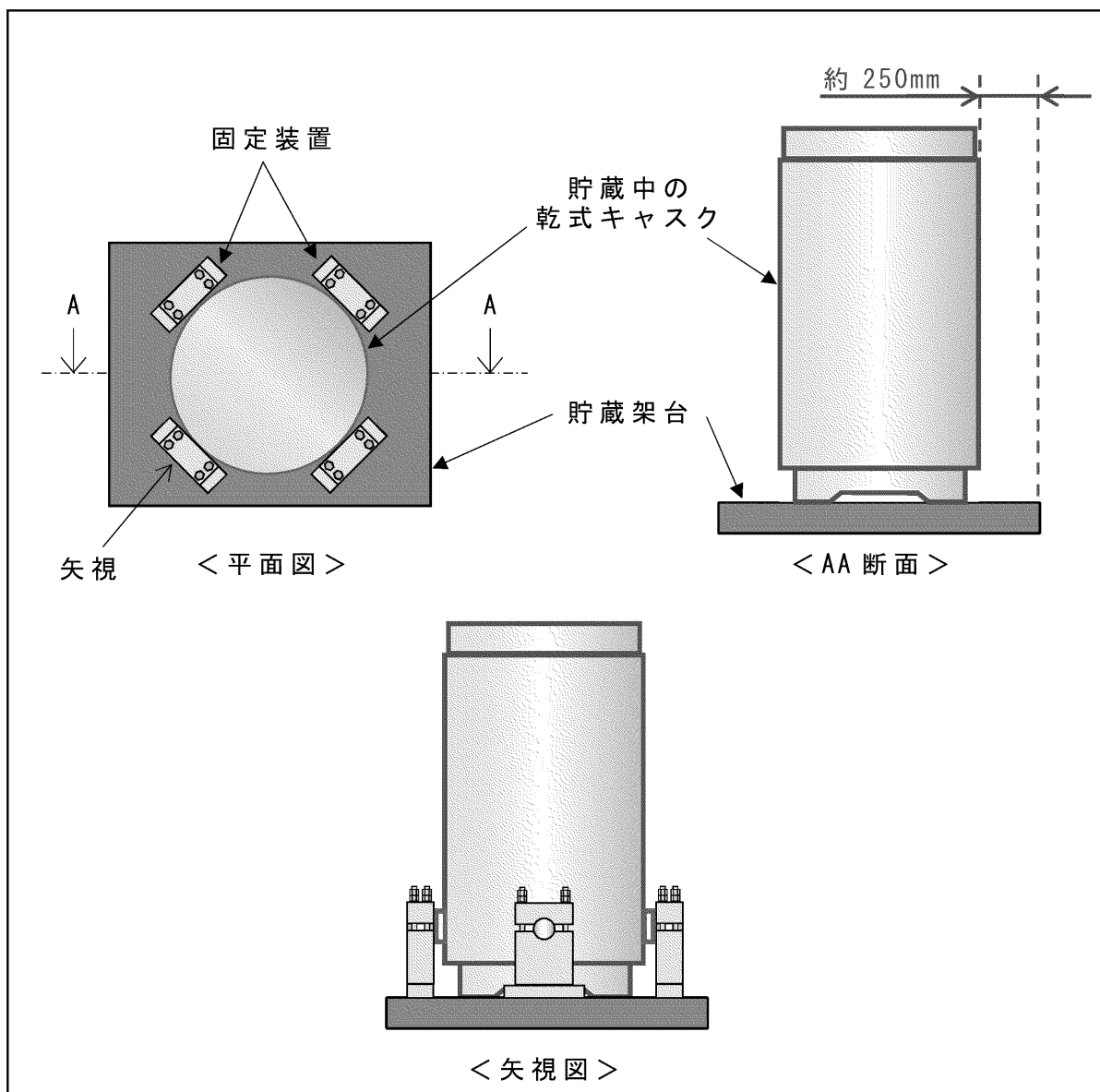


図 2 貯蔵架台により支持された乾式キャスクの状態


3. 乾式キャスクの転倒に対するクライテリア


乾式キャスクを貯蔵架台に設置せずに、乾式キャスク単体で床面に貯蔵した場合の乾式キャスクの転倒に対するクライテリアを以下に示す。なお、貯蔵状態から転倒に至るまでの各状態を図 3 及び以下の①～④に示す。


貯蔵状態

- ① 乾式キャスクの重心位置が回転中心を超えない場合、自重が自身の姿勢を復元する方向に作用するため、乾式キャスクは転倒せず、貯蔵状態に戻る状態
- ② 貯蔵中の乾式キャスクの重心が、回転中心の直上に位置する状態（クライテリア）
- ③ 乾式キャスクの重心位置が回転中心を超える場合、自重が自身を転倒させる方向に作用し、乾式キャスクが転倒する状態

ここで、乾式キャスクが転倒する場合、乾式キャスク転倒のクライテリアは、幾何学的に図3に示すとおりとなる。

・MSF-24P型 : 

ここで、実際の乾式キャスクの転倒に対するクライテリアは、2.に示すように乾式キャスクが貯蔵架台及び搬送台車に固定されており、乾式キャスク単体より重心が低く、回転中心と重心との水平距離が長くなるため、乾式キャスク単体の転倒に対するクライテリアより大きくなるが、保守的に乾式キャスク（MSF-24P型）単体の転倒のクライテリア（)を用い、評価する。

 : 商業機密に係る事項のため公開できません

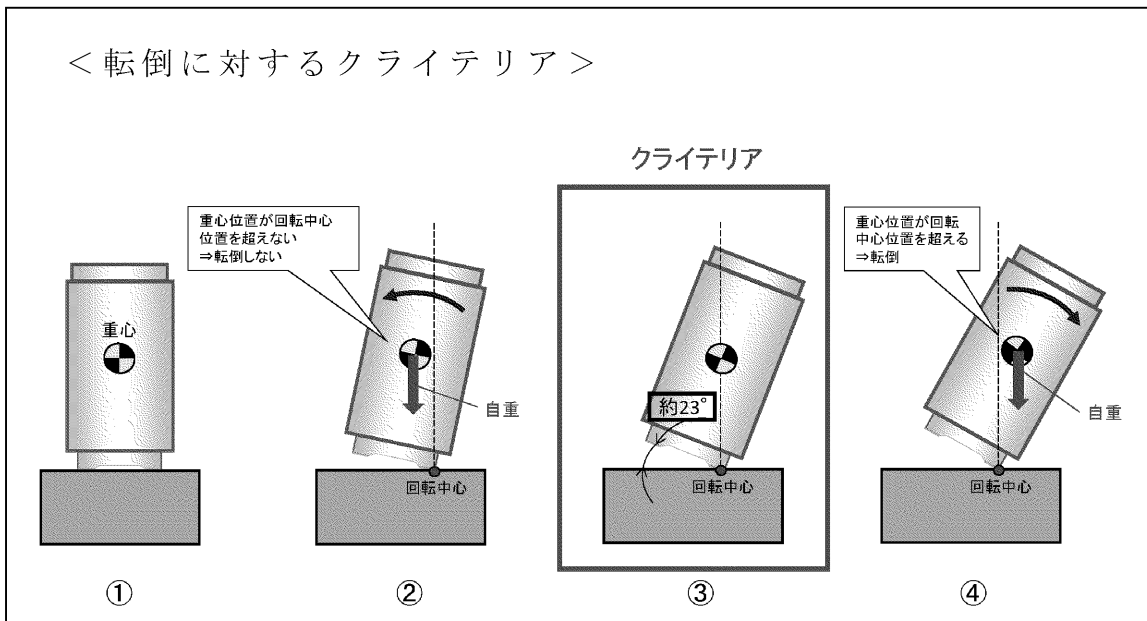


図3 乾式キャスクが貯蔵状態から転倒に至るまでの各状態

4. 乾式キャスクの転倒及び乾式キャスク同士の衝突の防止

乾式キャスク搬送中に搬送台車が仮に逸走し、搬送中の乾式キャスクの貯蔵架台と貯蔵中の乾式キャスクの貯蔵架台同士が衝突した場合を想定し、搬送中の乾式キャスクが転倒しないこと及び貯蔵中の乾式キャスクへ衝突しないことを評価する。

ここで、衝突速度を 0.0334 (m/s) ※1 とし、搬送台車及び乾式キャスク（貯蔵架台含む）が一体で傾く場合を想定する。ただし、搬送台車及び乾式キャスク（貯蔵架台含む）が一体となった場合の重心位置及び重量においては、保守的に搬送台車を考慮しない。

※1：搬送台車の最大走行速度（2m／分）

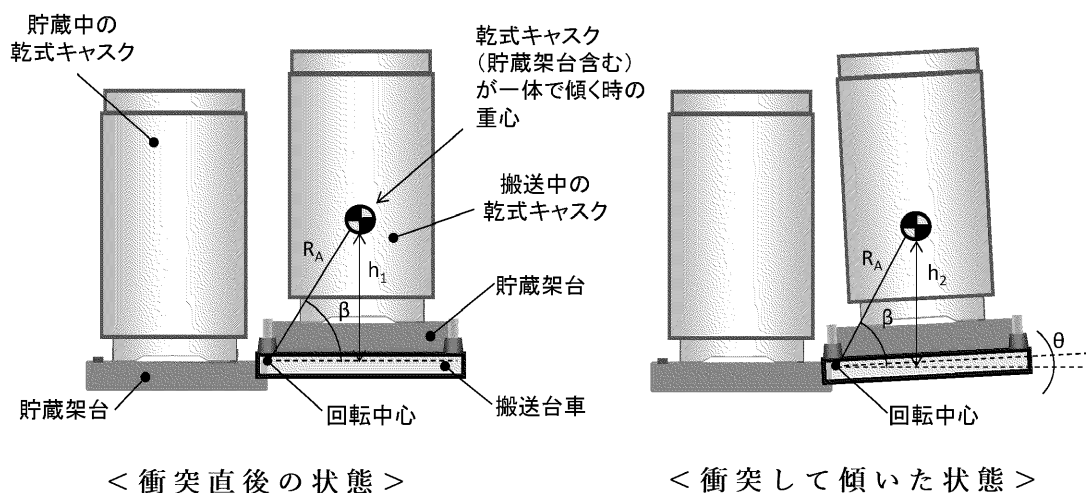
このとき、衝突速度での運動エネルギーが、全て転倒エネルギー（乾式キャスク（貯蔵架台含む）の位置エネルギー）に使われたと仮定し、次式から傾き角を求めると、約 [] となり、乾式キャスク単体の転倒のクライテリア（約 []）より十分小さいため、搬送中の乾式キャスクは転倒しない。

[]：商業機密に係る事項のため公開できません

$$\frac{1}{2}m(v)^2 = mgh_2 - mgh_1 \quad , \quad \theta = \sin^{-1}\left(\frac{h_2}{R_A}\right) - \beta \cong 0.01$$

ここで、計算式中の記号は以下のとおりである。

- m : 乾式キャスク（貯蔵架台含む）の重量 (kg)
- v : 衝突速度 (m/s)
- g : 重力加速度 (m/s²)
- h₁ : 衝突直後の状態における、回転中心を基準高さとした乾式キャスク（貯蔵架台含む）の重心高さ (m)
- h₂ : 衝突して傾いた状態における、回転中心を基準高さとした乾式キャスク（貯蔵架台含む）の重心高さ (m)
- θ : 乾式キャスク（貯蔵架台含む）の傾き角 (°)
- R_A : 回転中心から乾式キャスク（貯蔵架台含む）の重心までの距離 (m)
- β : 回転中心を通る水平面及び直線 R_A で構成される角度 (°)



また、図 4 の平面図及び断面図に示すように、搬送中に搬送台車及び乾式キャスク（貯蔵架台含む）が傾いても、搬送中の乾式キャスクの端部と貯蔵架台端部までの水平距離は約 250mm^{※2} となり、乾式キャスクの端部が貯蔵架台の端部より外側に出ることはなく、貯蔵中の乾

式キャスクとの水平距離が約 500mm 確保されることから、貯蔵中の乾式キャスクは搬送中の乾式キャスクと衝突しない。

※ 2 : 貯蔵架台が乾式キャスクと一体となって傾くため、厳密には貯蔵架台端部の位置も変化するが、傾き角が非常に軽微のため、ここでは貯蔵架台の位置が変化していないと仮定する。

以上より、乾式キャスク搬送中に搬送台車が逸走し、貯蔵中の乾式キャスクの貯蔵架台と衝突しても、搬送中の乾式キャスクは転倒せず、貯蔵中の乾式キャスクにも衝突しない。

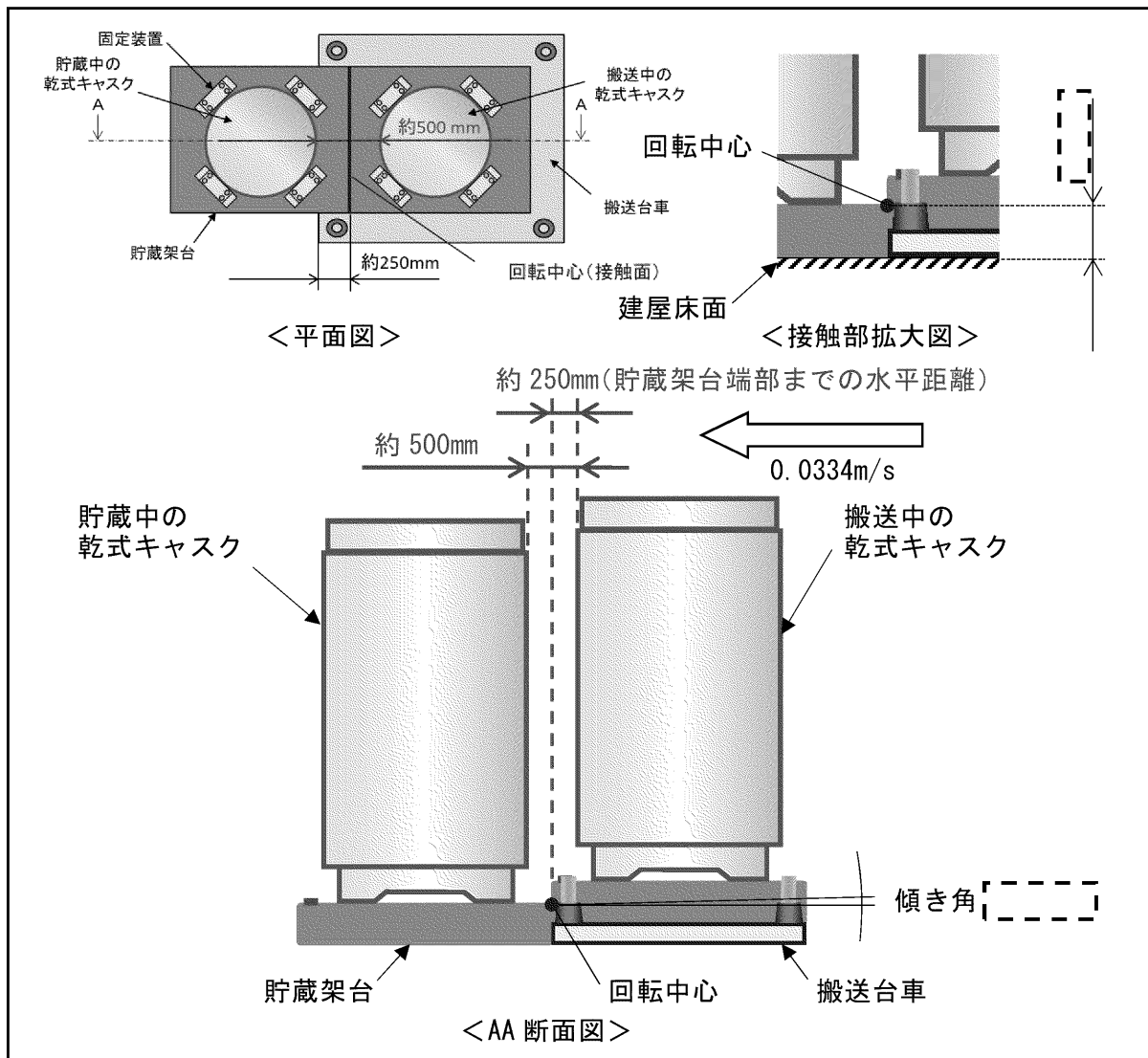


図 4 搬送台車及び乾式キャスクが一体で傾く場合の状態

〔 〕 : 商業機密に係る事項のため公開できません
16 条-参考 3-6

解析条件等の比較
(核燃料輸送物設計承認申請／設置変更
許可申請)

16 条における乾式キャスクの安全評価（遮蔽、臨界、除熱、閉じ込め）と核燃料輸送物設計承認申請における安全評価での解析条件の違いについて、MSF-24P 型の例を表 1～5 および図 1～4 に示す。

表 1 線源強度計算及び崩壊熱量計算における解析条件の相違

	輸送時		貯蔵時	輸送時との相違
	一般の試験条件	特別の試験条件		
解析コード	ORIGEN2.2UPJ	同左	同左	同じ
燃焼度	48,000 MWd/t (中央部) 44,000 MWd/t (外周部)	同左	同左	同じ
平均比出力	38.4 MW/t	同左	同左	同じ
照射日数	1,250 日 (中央部) 1,146 日 (外周部) 2,344 日 (BP)	同左	同左	同じ
初期濃縮度	――	同左	同左	同じ
冷却日数	5,479 日	同左	同左	同じ
ウラン重量	――	同左	同左	同じ
PF	考慮	同左	同左	同じ

※：MSF-24P 型の例で記載

「――」：商業機密に係る事項のため公開できません

表 2 遮蔽評価における解析条件の相違

	輸送時		貯蔵時	輸送時との相違
	通常輸送時及び一般の試験条件	特別の試験条件		
解析コード	DOT3.5	同左	同左	同じ
解析モデル	横置き想定 ・緩衝体：考慮（ただし、一般の試験条件下では、0.3m落下時の変形を考慮） ・三次蓋：考慮 ・その他部位：考慮	横置き想定 ・緩衝体：無視 ・三次蓋：考慮 ・その他部位：考慮 ・外筒、側部レジンの1m貫通試験による貫通孔をモデル化	縦置き想定 ・緩衝体：なし ・三次蓋：なし ・その他部位：考慮	貯蔵時は、三次蓋と緩衝体がない。
寸法公差	解析モデルの各種寸法は公称寸法でモデル化するが、各構成部材の寸法公差については最小厚さを密度係数（＝最小寸法／公称寸法）で考慮	同左	同左	同じ
密度	レジン以外：最低保証密度を使用 して原子個数密度を設定 レジン：2.5%の減損を考慮 （60年間の経年変化を考慮）	レジン以外：最低保証密度を使用して原子個数密度を設定 レジン：50%の減損を考慮 （火災後の損耗を考慮）	同左（通常輸送時及び一般の試験条件）	同じ（通常輸送時及び一般の試験条件）
判定基準	<u>通常輸送時</u> 表面： ≤ 2000 (μ Sv/h) 表面から1 m： ≤ 100 (μ Sv/h) <u>一般の試験条件</u> 表面： ≤ 2000 (μ Sv/h)	表面から1 m： ≤ 10 (mSv/h)	同左（通常輸送時）	同じ（通常輸送時）

表3 臨界評価における解析条件の相違

	輸送時		貯蔵時	輸送時との相違
	取扱い時	一般/特別の試験条件		
解析コード	SCALE6.2.1	同左	同左	同じ
収納燃料	17×17型 (48GWd/t)	同左	同左	同じ
燃料材質	二酸化ウラン	同左	同左	同じ
被覆管材質	ジルコニウム	同左	同左	同じ
燃料密度	95% 理論密度	同左	同左	同じ
ペレット直径	0.819 cm	同左	同左	同じ
燃料有効長	364.8 cm	同左	同左	同じ
被覆管肉厚	0.057 cm	同左	同左	同じ
燃料棒数	264 本	同左	同左	同じ
初期濃縮度	1.2 wt%	同左	同左	同じ
燃料棒ピッチ	通常 (1.26 cm)	通常、1 スパン拡大/縮小を考慮	同左 (取扱い時)	同じ
燃料集合体の幅	通常 (21.42 cm)	通常、1 スパン拡大/縮小を考慮	同左 (取扱い時)	同じ
キヤスクの配列	無限配列	同左	同左	同じ
解析モデル	BP 無視 中性子遮蔽材無視 緩衝体及び三次蓋なし その他部位：考慮	BP 無視 中性子遮蔽材無視 緩衝体及び三次蓋無視 (なしと 同じ) その他部位：考慮	同左 (取扱い時)	同じ
寸法公差	バスケットは実効増倍率が大きくなるほうの公差を考慮	同左	同左	同じ
キヤビティ内条件	冠水状態：100%純水	乾燥状態：真空中に5リットルの水蒸気考慮 (浸漬時の水流入)	冠水状態：同左 (取扱い時) 乾燥状態：真空	貯蔵時は浸漬未考慮のため、乾燥状態を真空として評価
キヤビティ外条件	真空	同左	同左	同じ
判定基準	実効増倍率 (+3σ 考慮) <0.95	同左	同左	同じ

※：MSF-24P 型の例で記載

【 】：商業機密に係る事項のため公開できません

表 4 除熱評価における解析条件の相違 (1/2)

	輸送時		貯蔵時	輸送時との相違
	一般の試験条件 (通常時 (注1) / 一般 (注2))	特別の試験条件		
解析コード	ABAQUS	同左	同左	同じ
解析モデル	全体モデル ・緩衝体：考慮 ・三次蓋：考慮 ・その他部位：考慮	全体モデル ・緩衝体：考慮 (ただし、9m 落下時の変形考慮) ・三次蓋：考慮 ・その他部位：考慮	全体モデル ・緩衝体：なし ・三次蓋：なし ・その他部位：考慮	貯蔵時は、三次蓋、三次蓋ボルト及び緩衝体がない。
寸法公差	燃料集合体モデル ・燃料被覆管：考慮 ・燃料棒同士の隙間：He ガス	燃料集合体モデル ・燃料被覆管：考慮 ・燃料棒同士の隙間：He+FP ガス	同左 (一般)	
収納燃料の設計崩壊熱量	ノミナル寸法でモデル化 18.1 kW (17×17 型) 表 1 の保守的な条件にて計算した結果から設定	同左	同左	同じ
周囲温度	38℃ (大気温度)	火災中 (30 分間)：800℃ 火災前後：38℃ (大気温度)	50℃ (建屋内周囲温度)	貯蔵時は、建屋内の条件で解析。
自然対流	横置き状態	同左	縦置き状態	貯蔵時は、縦置き状態の条件で解析。

※：MSF-24P 型の例で記載

(注 1) 人の近づきうる表面の最高温度評価条件 (注 2) 最高温度評価条件

表 4 除熱評価における解析条件の相違 (2/2)

	輸送時		貯蔵時	輸送時との相違
	一般の試験条件 (通常時 (注1) / 一般 (注2))	特別の試験条件		
解析コード	ABAQUS	同左	同左	同じ
ふく射	大気への熱放射 基準温度：38℃	火災中：火炎とのふく射 火災前後：大気への熱放射 基準温度：800℃ (火災中 30 分間) ：38℃ (火災前後)	建屋の天井と床面へのふく射 基準温度：65℃	貯蔵時は、建屋 内の条件で解 析。
太陽熱	通常時：考慮しない 一般：考慮	考慮	同左 (通常時)	同じ
判定基準	バスケット：250℃ 燃料集合体：275℃ レジン：149℃ 金属ガスケット：130℃ 近接表面：85℃ (通常時) 要求なし (一般)	バスケット：同左 燃料集合体：－ レジン：180℃ 金属ガスケット：190℃ 近接表面：要求なし	同左 (一般)	同じ

※：MSF-24P 型の例で記載

(注1) 人の近づきうる表面の最高温度評価条件 (注2) 最高温度評価条件

表5 閉じ込め評価における解析条件の相違 (1/2)

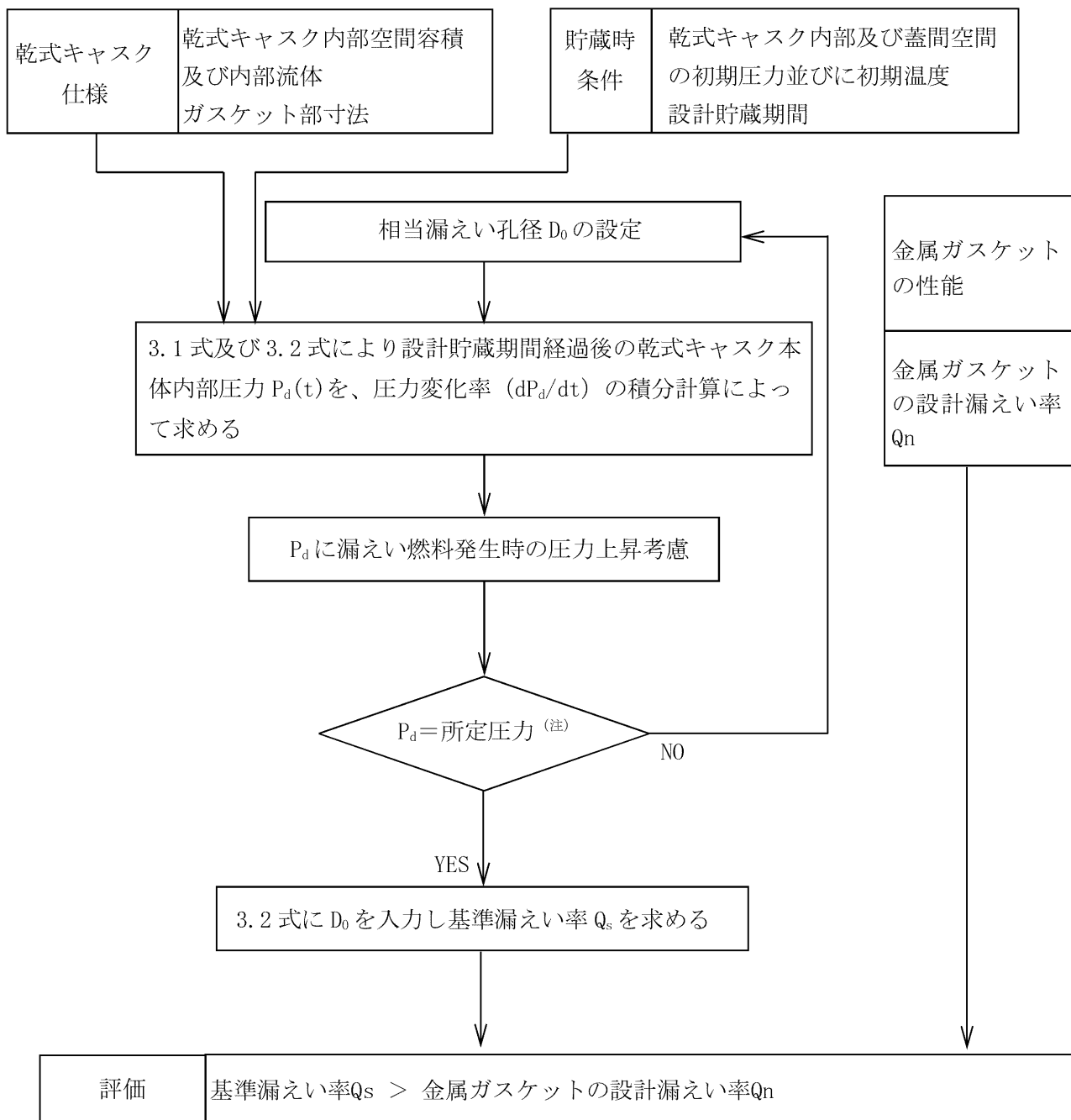
評価方法	輸送時		貯蔵時	輸送時との相違
	一般の試験条件	特別の試験条件		
評価方法	キャビティ内の核分裂性ガス (^3H , ^{85}KR) が大気に漏えいする計算を行い、放射性物質の漏えい率が判定基準以下であることを確認。(一次蓋-二次蓋間は正圧、キャビティ内は負圧であり、キャビティ内ガスが大気に漏えいすることはないが、仮に、一次蓋及び二次蓋を無視し、キャビティ内圧 (三次蓋-胴内圧) が正圧になると想定し評価を実施)	同左 (特別の試験条件におけるキャビティ内圧 (三次蓋-胴内圧) は正圧となる可能性があるため、特別の試験条件下における漏えい率の評価を実施)	一次蓋-二次蓋間に充填されたHeガスがキャビティ内に漏えいする計算を行い、キャビティ内圧が設計評価期間中に負圧 (0.097 MPa 未満) を維持できざる基準漏えい率を計算。また、使用する金属ガスケットの性能が上記漏えい率以下であることを確認。	貯蔵時の閉じ込め境界は一次蓋の金属ガスケット、輸送時の閉じ込め境界は三次蓋のゴムOリングとしている。
評価フロー	図3及び図4参照		図1及び図2参照	
評価式	クヌッセンの式 ボイル・シャルルの式	同左	同左	同じ
閉じ込め境界	三次蓋 (ゴムOリング)	同左	一次蓋 (金属ガスケット)	評価方法の欄参照。

※：MSF-24P 型の例で記載

表 5 閉じ込め評価における解析条件の相違 (2/2)

	輸送時		貯蔵時	輸送時との相違
	一般の試験条件	特別の試験条件		
燃料破損率	0.1 %	100 %	同左 (一般の試験条件)	同じ
圧力 条件	0.105 MPa (キャビティ内圧)	0.330 MPa (キャビティ内圧)	0.41 MPa (一次蓋-二次蓋間圧力)	評価方法の欄参照。
	0.097 MPa (大気圧)	同左	0.08 MPa (キャビティ内圧)	評価方法の欄参照。
漏えい気体	He ガス 分子量：4.002602 g/mol	同左	同左	同じ
気体定数	8.3144598 J/(mol・K)	同左	同左	同じ
漏えい気体 の温度	110°C (三次蓋0リング部温度)	195°C (三次蓋0リング部温度)	-25°C (外気の最低温度)	貯蔵時の周囲温度を考慮。
判定基準	放射性物質の漏えい率 <A2 値×10 ⁻⁶ /h	放射性物質の漏えい率 <A2 値/week	金属ガスケットの設計漏えい率 <基準漏えい率	貯蔵時は基準漏えい率と金属ガスケットの性能 (設計漏えい率) を比較。(評価方法の欄参照)

※：MSF-24P 型の例で記載



(注) 所定圧力は、大気圧の変動を考慮し、 9.7×10^4 Pa とする。

図1 基準漏えい率の計算フロー図（貯蔵時の閉じ込め計算）

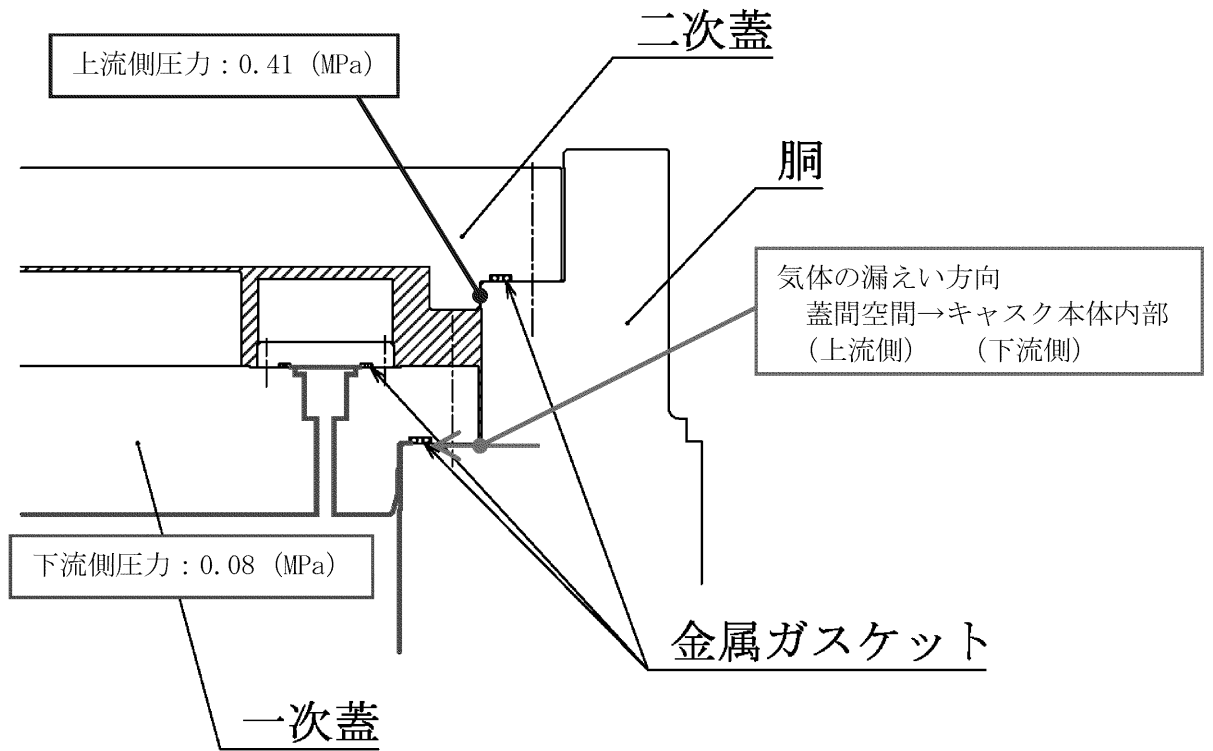


図2 閉じ込め評価に係る構造図 (貯蔵時の閉じ込め計算)

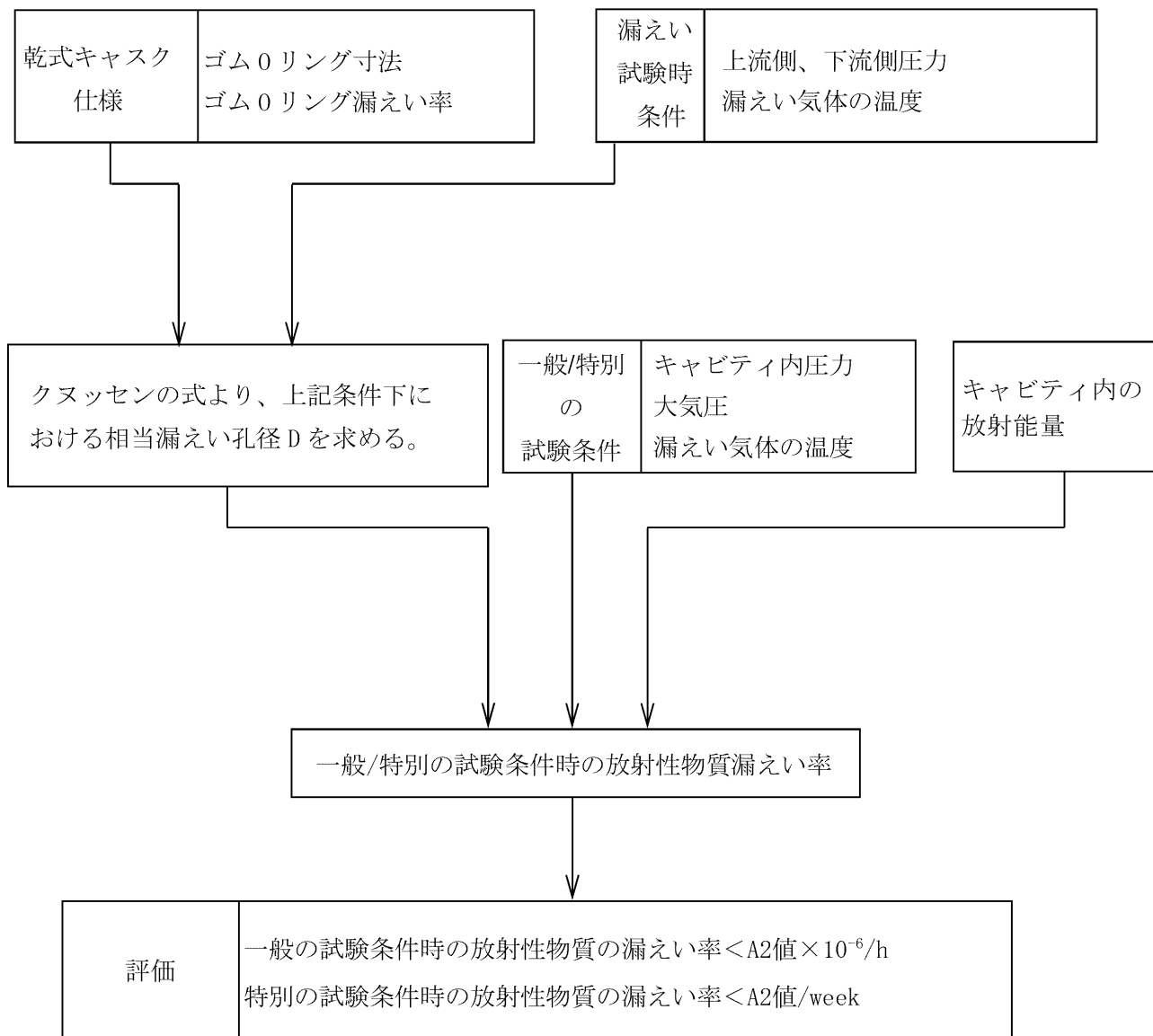


図3 放射性物質の漏えい率の計算フロー図（輸送時の閉じ込め計算）

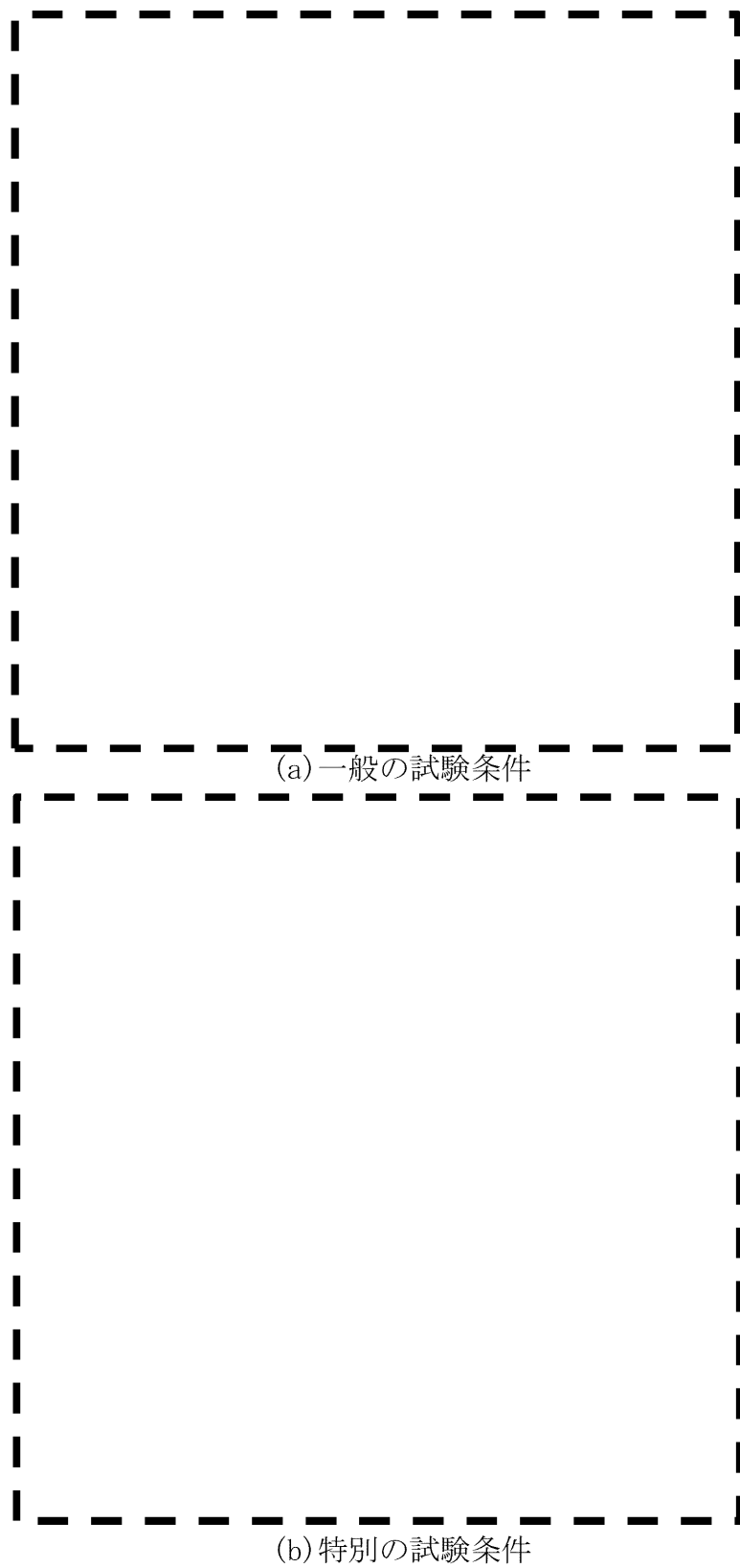


図 4 閉じ込め評価に係る構造図（輸送時の閉じ込め計算）

【 〇 】：商業機密に係る事項のため公開できません

16 条－参考 4－12

玄海原子力発電所 3 号炉及び 4 号炉

設置許可基準規則 第 16 条

第 1 項の取扱いについて

1. 既許可における燃料取扱設備について

「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」（以下、「設置許可基準規則」という）第 16 条第 1 項に定める燃料取扱設備については、「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則」（以下、「技術基準規則」という）第 26 条の解釈において、「燃料体又は使用済燃料を取り扱う設備」とは、新燃料、再使用燃料又は使用済燃料の装荷、取出又は保管等を行うために使用する設備をいう。」と定義されている。これは、「発電用原子力設備に関する技術基準を定める省令」（以下、「省令」という）でも同じ定義がなされており、従来から変更されていない。

（添付資料参照）

これを踏まえ、当社既設設備については表 1 のとおり整理している。

また、図 1 に、当社既設設備の配置概要図と取扱様態との関係性を示す。

表 1 . 燃料取扱設備の例

設備名称	燃料取扱設備として 取扱うもの	取扱様態	左記以外で取扱う もの
燃料取扱棟 クレーン	新燃料	装荷	新燃料輸送容器 使用済燃料運搬用 容器 使用済燃料乾式貯 蔵容器
新燃料 エレベータ	新燃料	装荷	—
使用済燃料ピ ットクレーン	新燃料、使用済燃料	装荷・取出	—
燃料移送装置	新燃料、使用済燃料	装荷・取出	—
燃料仮置 ラック	新燃料、使用済燃料	装荷・取 出・保管	—
燃料取替 クレーン	新燃料、使用済燃料	装荷・取出	—
使用済燃料運 搬用容器	使用済燃料	保管	—

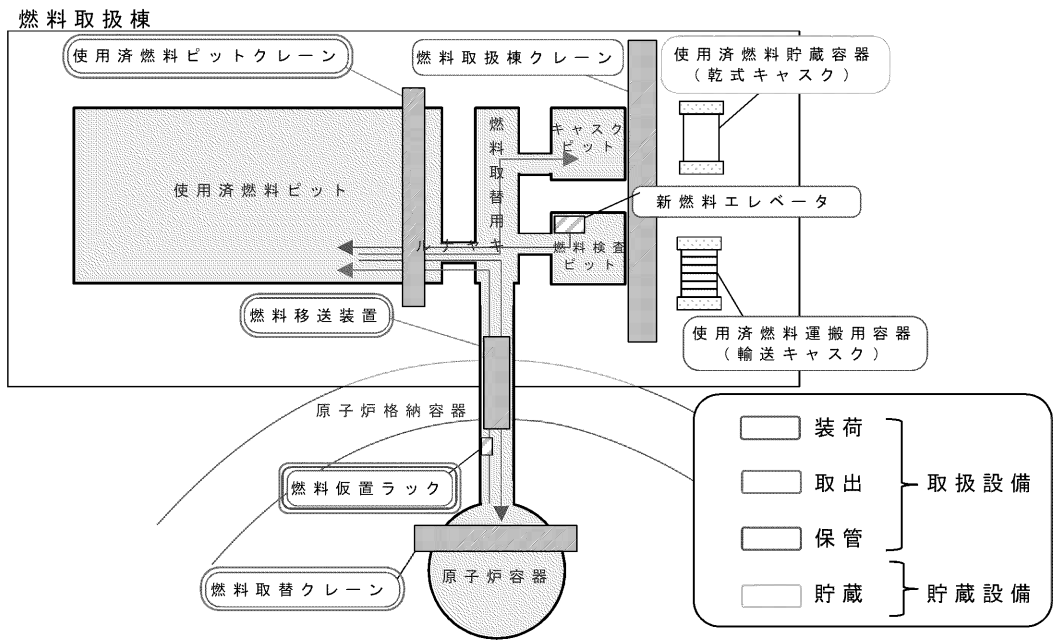


図1 当社既設設備の配置概要図と取扱様態との関係性

既許可の範囲としては、燃料取扱様態として

- ・原子炉容器への燃料の「装荷」に使用する燃料取扱棟クレーン、新燃料エレベータ、使用済燃料ピットクレーン、燃料移送装置および燃料取替クレーン
- ・原子炉容器からの燃料の「取出」に使用する使用済燃料ピットクレーン、燃料移送装置および燃料取替クレーン

について、燃料取扱設備として認可頂いている。

また、使用済燃料運搬用容器(NFT-14P型)は、使用済燃料を貯蔵するものではなく、貯蔵設備である使用済燃料ピット間の構内運搬用に専ら使用することから、貯蔵設備間の一時的な「保管」と整理し、燃料取扱設備として認可頂いている。

2. 既許可における設置許可基準規則第16条第1項でのキャスク等の取扱設備の取扱い

新規制基準施行前及び新規制基準施行後において、燃料取扱設備に対する要求事項は特段変更されておらず(添付資料参照)、既許可における当社の設計方針は以下のとおり、燃料体等(通常運転時に使用する燃料体又は使用済燃料)の取り扱いについて記載しており、キャスク等を取り扱う設備については記載していない。よって、従来からキャスク等の取扱設備については、設置許可基準規則第16条第1項(燃料取扱設備)としての基準適合性は求められていない。

【当社設計方針(玄海3号炉の例)】

<新規制基準施行前(発電用軽水型原子炉施設に関する安全設計審査指針49.50.)>

- ・燃料の貯蔵設備及び取扱設備は、新燃料の搬入から使用済燃料の搬出までの取扱いを安全かつ確実に行うことができるように、次の方針により設計する。

燃料取扱設備は、移送操作中の燃料集合体の落下を防止するために、適切な保持装置を有するように設計する。

- ・燃料取扱設備は、燃料集合体を一体ずつ取り扱うこととし、臨界を防止する設計とする。

< 新規制基準施行後（設置許可基準規則第16条第1項） >

1 について

燃料取扱棟内の燃料体等の取扱施設（一部3号及び4号炉共用、既設）は、下記事項を考慮した設計とする。

- 一 燃料取扱設備は、新燃料の搬入から使用済燃料の搬出までの取り扱いにおいて、燃料取替クレーン、燃料移送装置、使用済燃料ピットクレーン等を連携し、当該燃料を搬入、搬出又は保管できる設計とする。
- 二 燃料取扱設備は、燃料体等を一体ずつ取り扱う構造とし、臨界を防止する設計とする。
- 三 燃料体等（新燃料を除く。）の移送は、全て水中で行い、崩壊熱により溶融しない設計とする。
- 四 使用済燃料及びウラン・プルトニウム混合酸化物新燃料の取扱設備は、取扱い時において、十分な水遮へい深さが確保される設計とするなど、放射線業務従事者の線量を合理的に達成できる限り低くする設計とする。
- 五 燃料取扱設備は、移送操作中の燃料体等の落下を防止するため十分な考慮を払った設計とする。

また、クレーン類は、「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」において周辺施設に分類され、一般産業施設や公衆施設と同等の安全性が要求されていることから、一般産業施設や公衆施設以上の安全性を有する燃料取扱設備に位置付けることは適切ではないと考えられる。

3. 他プラントとの比較（キャスク取扱関係）

他プラント及び当社における各種キャスクを取扱う設備について、燃料取扱設備への該非を整理した結果を以下に示す。

貯蔵専用キャスクを採用しているプラントでは、天井クレーンを燃料取扱設備に位置付けている一方、搬送台車は燃料取扱設備に位置付けていない。

輸送・貯蔵兼用キャスク又は輸送専用キャスクを採用しているプラントでは、天井クレーン及び搬送台車は燃料取扱設備に位置付けていない。

以上のとおり、各種キャスクを取り扱う設備については、「新燃料、再使用燃料又は使用済燃料の装荷、取出又は保管等を行うために使用する設備」との燃料取扱設備の定義に該当しないことから、燃料取扱設備には基本的には位置付けていないが、貯蔵専用キャスクを取扱う天井クレーンについては、燃料取扱設備に位置付け、貯蔵専用容器として構造健全性を確認している。

なお、外運搬規則に基づき安全機能維持に係る構造健全性（頑健性）を確認している輸送・貯蔵兼用キャスク及び輸送専用キャスクを取扱う天井クレーンは、輸送・貯蔵兼用キャスク及び輸送専用キャスクの衝撃への耐性が高いことから、燃料取扱設備に位置付けないことは妥当と考える。

プラント	既設 建屋	乾式貯蔵施設				キャスク保管庫 ※2	
		(貯蔵専用)		(輸送・貯蔵 兼用)		(輸送専用)	
	天井ク レーン※1	天井ク レーン	搬送台 車	天井ク レーン	搬送 台車	天井ク レーン	搬送台 車
A	○	○					
B	○	○	×				
C	○					×	
D	○					×	×
E	○			×	×	×	×
F	○			×	×		
九州電力 (株) 玄海	○			×	×	×	×
		車両運搬規則 に基づく 耐性を有す る。 (上下 3G、前後 2G、左右 1G)			外運搬規則に基づく 9 m 落下 試験での耐性を有する。		

※1 新燃料及び各種キャスクを取扱う設備

※2 輸送専用キャスクを仕立後、構外へ搬出するまでの間、一時的に保管する等の施設

<凡例>

- ; 燃料取扱設備と位置付けしている設備
- ×
- ; 該当設備なし
- ; 申請中

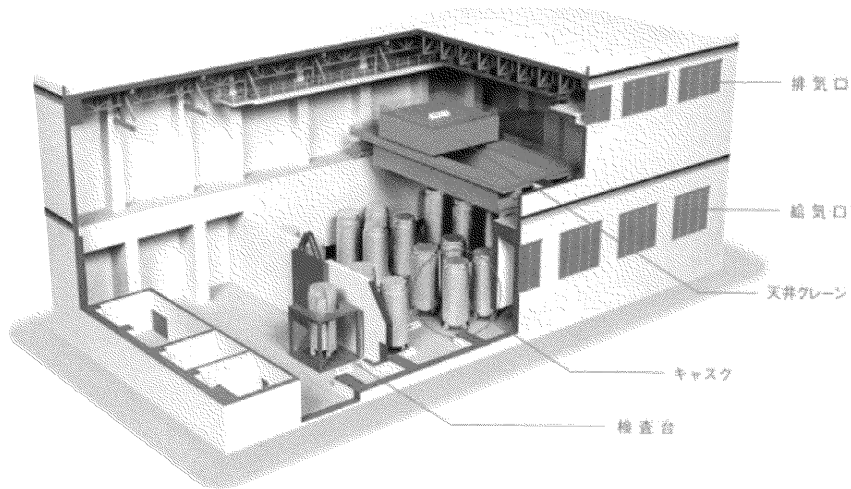
新規制基準施行前後における燃料取扱設備に対する要求事項の比較

添付資料

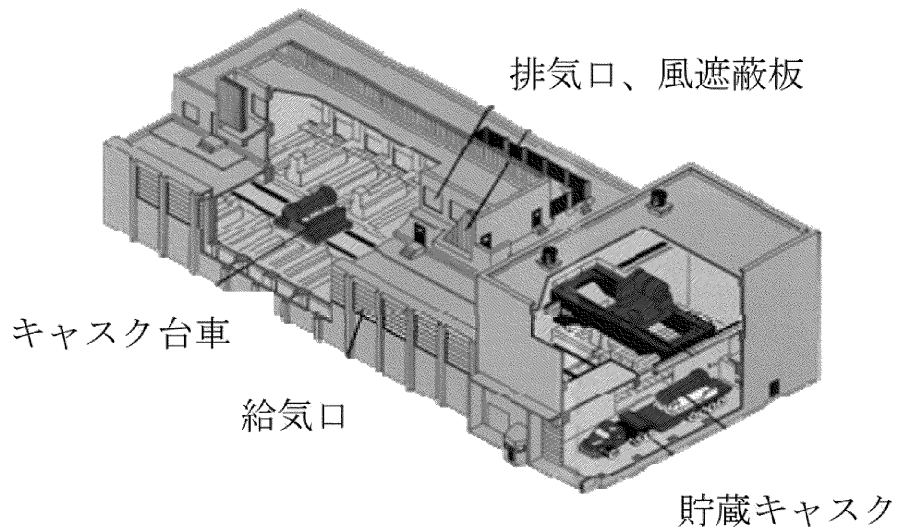
安全審査指針	新規制基準施行前		新規制基準施行後				差異
	発電用原子力設備に関する技術基準を定める省令		設置許可基準規則 16条 第1項		実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則 第26条 第1項		
49 燃料の貯蔵設備及び取扱設備	省令	解釈	規則	解釈	規則	解釈	
一 新燃料及び使用済燃料の貯蔵設備及び取扱設備は、次の各号に掲げる事項を満足する設計であること。	(燃料取扱設備) 第26条 燃料を取り扱う設備は、次の各号により施設しなければならない。	第26条に規定する「燃料を取り扱う設備」とは、新燃料、再使用燃料又は使用済燃料の装荷、取出又は保管等を行うために使用する設備をいう	第十六条 発電用原子炉施設には、次に掲げるところにより、通常運転時に使用する燃料体又は使用済燃料（以下この条において「燃料体等」という。）の取扱施設（安全施設に係るものに限る。）を設けなければならない。		第二十六条 通常運転時に使用する燃料体又は使用済燃料（以下この条において「燃料体等」という。）を取り扱う設備は、次に定めるところにより施設しなければならない。	第26条（燃料取扱設備及び燃料貯蔵設備） 1 第1項に規定する「燃料体又は使用済燃料を取り扱う設備」とは、新燃料、再使用燃料又は使用済燃料の装荷、取出又は保管等を行うために使用する設備をいう。	
(一) 安全機能を有する構造物、系統及び機器は、適切な定期的試験及び検査ができること。 (二) 貯蔵設備は、適切な格納系及び空気浄化系を有すること。 (三) 貯蔵設備は、適切な貯蔵能力を有すること。 (四) 取扱設備は、移送操作中の燃料集合体の落下を防止できること。							
	一 通常運転時において使用する燃料を取り扱う能力を有するものであること。	2 第1号に規定する「通常運転時において使用する燃料を取り扱う能力」とは、新燃料の搬入から使用済燃料の搬出までの取扱いは、関連する機器間を連携し、当該燃料を搬入、搬出又は保管できる能力があること。	一 燃料体等を取り扱う能力を有するものとする。	1 第1項第1号に規定する「燃料体等を取り扱う能力」とは、新燃料の搬入から使用済燃料の搬出までの取り扱いにおいて、関連する機器間を連携し、当該燃料を搬入、搬出又は保管できる能力があること。	一 燃料体等を取り扱う能力を有するものであること。	2 第1項第1号に規定する「燃料体等を取り扱う能力」とは、新燃料の搬入から使用済燃料の搬出までの取扱いは、関連する機器間を連携し、当該燃料を搬入、搬出又は保管できる能力があること。	なし
	二 崩壊熱により燃料が溶融しないものであること。	4 第3号に規定する「燃料が溶融しない」とは、設計計算により、燃料が溶融しないことを確認された冷却能力を有すること。	二 崩壊熱により燃料体等が溶融しないものとする。		二 崩壊熱により燃料体等が溶融しないものであること。	4 第1項第3号に規定する「燃料体等が溶融しないものであること」とは、設計計算により、燃料が溶融しないことを確認された冷却能力を有すること。	なし
	四 取扱いに燃料が破損するおそれがないこと。	第4号に規定する「燃料が破損するおそれがないこと」とは、以下によること。 ・燃料交換機にあっては、摺み機構のワイヤーを二重化すること。ただし、昭和52年以前に施設し、又は施設に着手した原子炉施設においては、構成する機械器具の機能、構造及び動作原理を考慮し、同等の機能維持が確認されること。 ・燃料交換機にあっては、燃料取扱中に過剰となった場合は上昇阻止される措置がなされていること。この場合において、取扱時の荷重監視等による運転管理による対応も含まれる。 ・原子炉建屋天井クレーンにあっては、吊り上げられた使用済燃料運搬用容器が燃料プールに貯蔵された燃料上を走行できない措置を行うこと。ただし、措置には、運用管理での対応も含むものとする。この運用管理にあっては、運搬用容器が燃料上に行かないことを確実にするものであること。また、フックのワイヤー外れ止めを設けること。	五 燃料体等の取扱における燃料体等の落下を防止できるものとする。		四 取扱中に燃料体等が破損しないこと。	5 第1項第4号に規定する「燃料体等が破損しないこと」とは、以下によること。 ・燃料交換機にあっては、摺み機構のワイヤーを二重化すること。 ・燃料交換機にあっては、燃料取扱中に過剰となった場合は上昇阻止される措置がなされていること。この場合において、取扱時の荷重監視等による運転管理による対応も含まれる。 ・原子炉建屋天井クレーンにあっては、吊り上げられた使用済燃料運搬用容器等重量物が燃料プールに貯蔵された燃料上を走行できない措置を行うこと。ただし、措置には、運用管理での対応も含むものとする。この運用管理にあっては、運搬用容器が燃料上に行かないことを確実にするものであること。また、フックのワイヤー外れ止めを設けること。なお、ここでの「使用済燃料運搬用容器等」の等には、燃料交換機又は原子炉建屋天井クレーンを用いて取扱うものであって、その落下によって燃料を破損させるおそれがあるものを含む。 ・燃料交換機、原子炉建屋天井クレーン等にあっては、適切な落下防止対策等を施すことにより、その落下により燃料を破損するおそれがないとしてもよい。	なし
	五 燃料を封入する容器は取扱中における衝撃、熱等に耐え、かつ、容易に破損しないものであること。	6 第5号に規定する「容易に破損しないものであること」とは、「実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則（通商産業省令第77号 昭和53年12月28日）第13条第1項第3号に規定されている「容易かつ安全に取扱うことができ、かつ、運搬中に予想される温度及び内圧の変化、振動等により、き裂、破損等が生じるおそれがないものであること」。 なお、「核燃料物質等の工場又は事業所の外における運搬に関する規則第3条等の規定に基づく核燃料物質等の工場又は事業所の外における運搬に関する技術上の基準に係る細目等（平成2年11月28日 科学技術庁告示第5号）」を満たすものを、「燃料を封入する容器」として用いてもよい。 第5号に規定する「容器」は、「実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則（通商産業省令第77号 昭和53年12月28日）」を準用し、理論的又は適切な試験・実験により所定の機能が満足されていること。			五 燃料体等を封入する容器は、取扱中における衝撃、熱その他の容器に加わる負荷に耐え、かつ、容易に破損しないものであること。	6 第1項第5号に規定する「容易に破損しないものであること」とは、「実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則（昭和53年通商産業省令第77号）第8条第1項第3号に規定されている「容易かつ安全に取扱うことができ、かつ、運搬中に予想される温度及び内圧の変化、振動等により、き裂、破損等が生じるおそれがないものであること」。 なお、「核燃料物質等の工場又は事業所の外における運搬に関する規則第3条等の規定に基づく核燃料物質等の工場又は事業所の外における運搬に関する技術上の基準に係る細目等」（以下「科技庁告示第5号」という。）を満たすものを、「燃料体等を封入する容器」として用いてもよい。 7 第1項第5号に規定する「容器」は、「実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則」を準用し、理論的若しくは適切な試験又は実験により所定の機能が満足されていること。	なし
	七 燃料取扱中に燃料を取り扱うための動力源がなくなった場合に、燃料を保持しているものであること。	8 第7号に規定する「燃料取扱中に燃料を取り扱うための動力源が無くなった場合でも燃料を保持する機構」とは、動力源である電源又は空気が喪失した場合でも燃料を保持できる性能を有すること。			七 燃料体等の取扱中に燃料体等を取り扱うための動力源がなくなった場合に、燃料体等を保持する構造を有する機器を設けることにより燃料体等の落下を防止できること。	8 第1項第7号に規定する「燃料体等の取扱中に燃料体等を取り扱うための動力源がなくなった場合に、燃料体等を保持する構造」とは、動力源である電源又は空気が喪失した場合でも燃料を保持できる性能を有すること。	なし
二 使用済燃料の貯蔵設備及び取扱設備は、前項の各号に掲げる事項のほか、次の各号に掲げる事項を満足する設計であること。							
(一) 放射線防護のための適切な遮へいを有すること。	六 前号の容器は、内部に燃料を入れた場合に、その表面の生体実効線量率が200ミリレム毎時以下で、かつ、その表面から1メートルの距離において生体実効線量率10ミリレム毎時以下であること。ただし、管理区域内においてのみ使用されるものについては、この限りでない。		四 使用済燃料からの放射線に対して適切な遮蔽能力を有するものとする。		六 前号の容器は、内部に燃料体等を入れた場合に、放射線障害を防止するため、その表面の線量当量率及びその表面から1メートルの距離における線量当量率がそれぞれ原子力規制委員会の定める線量当量率を超えないように遮蔽できるものであること。ただし、管理区域内においてのみ使用されるものについては、この限りでない。		なし
(二) 貯蔵設備は、崩壊熱を十分に除去し、最終的な熱の逃がし場へ輸送できる系統及びその浄化系を有すること。 (三) 貯蔵設備の冷却水保有量が著しく減少することを防止し、適切な漏えい検知を行うことができること。 (四) 貯蔵設備は、燃料集合体の取扱中に想定される落下時においても、その安全機能が損なわれるおそれがないこと。							
50 核燃料の臨界防止 燃料の貯蔵設備及び取扱設備は、幾何学的な安全配置又はその他の適切な手段により、想定されるいかなる場合でも、臨界を防止できる設計であること。	第26条 二 燃料が臨界に達するおそれがない構造であること。	3 第2号に規定する「燃料が臨界に達するおそれがない構造であること」とは、臨界計算により燃料が臨界に達しないことを確認された構造であること。	16条 第1項 二 燃料体等が臨界に達するおそれがないものとする。		第26条 第1項 二 燃料体等が臨界に達するおそれがない構造であること。	3 第1項第2号に規定する「燃料体等が臨界に達するおそれがない構造であること」とは、臨界計算により燃料が臨界に達しないことを確認された構造であること。	なし

(参考)

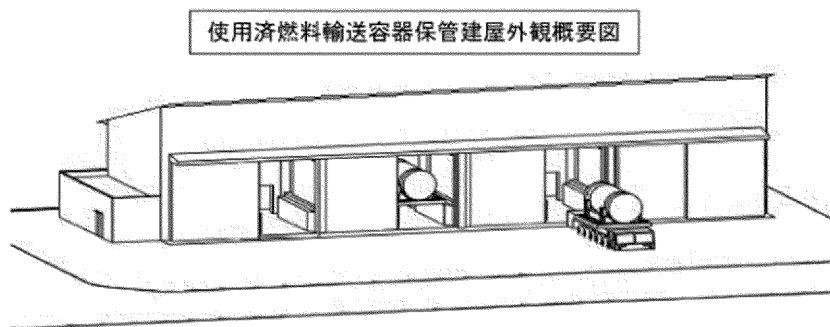
○日本原電(株)東海第二



○東京電力HD(株)福島第一 (旧キャスク保管庫)



○関西電力(株) (キャスク保管庫)



使用済燃料乾式貯蔵容器蓋間圧力の監視頻度の 妥当性について

(乾式キャスクの落下試験等の文献を考慮した監視頻度の妥当性)

1. 監視頻度の評価条件

以下のとおり、監視頻度の妥当性を確認した。

- ① 金属ガスケットの漏えい率は、設計漏えい率程度で推移すると想定しているが、保守的に、基準漏えい率の 1000 倍の漏えい率*¹ ($2.49 \times 10^{-6} \times 1000 = 2.49 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$) を設定する。

*1：文献（航空機衝突試験、キャスク転倒試験、9 m 落下試験）を基に設定。（表 1 参照）

- ② 乾式キャスクの蓋間空間のヘリウムガスが、一次蓋側（キャスク内部）および二次蓋側（キャスク外部）の二方向から漏えいする。
- ③ 想定される全ての発熱量条件での圧力変動幅を包絡するよう、蓋間圧力は崩壊熱量を考慮する場合*²と崩壊熱量を考慮しない場合（崩壊熱量 0 kW の場合）を想定する。
- ④ 貯蔵開始後は、周囲環境温度が $-6 \text{ }^{\circ}\text{C} \sim 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ の範囲で変動すると想定する。
- ⑤ 圧力計の計器誤差を $\pm 1.6\%$ とする。

*2：MSF-24P 型キャスクの収納制限最大の発熱量となる場合

2. 監視頻度の評価結果

図 1 及び図 2 に示すように、仮に、貯蔵開始直後に、基準漏えい率の 1000 倍の漏えいが 2 方向で生じた場合、蓋間圧力は急激に低下し、最早で約 9 日経過後に大気圧に到達する可能性がある。また、蓋間圧力が大気圧に到達した後は、蓋間空間内のガスは乾式キャスク内部へ大気圧一定条件下で 1 方向に漏えいする。（乾式キャスク外（大気圧）→蓋間空間（大気圧）→乾式キャスク内部、の方向で 1 方向に漏えいする。）

一方、乾式キャスク内部は蓋間空間と比べて容積が大きいため、乾式キャスク内部は大気圧に到達するまでに比較的時間を要する。具体的には、乾式キャスク内部は、基準漏えい率の 1000 倍の漏えいが生じた場合、約 4 年間が経過しても、乾式キャスク内部は大気圧（大気圧の気象変動を考慮した下限値である 0.097MPa）に到達することはなく、大気圧に到達しない。

従って、蓋間空間が大気圧で一定となっている一方で、乾式キャスク内部は、約 4 年間は乾式キャスク内部が負圧に維持されているため、約 4 年間は FP ガスが外部へ放出されることはない。

以上のことから、監視頻度の設定にあたって、設計貯蔵期間中の乾式キャスクの発熱量の低下、周囲環境の温度変化、蓋間圧力の変化に加え、基準漏えい率の 1000 倍の漏えい率を考慮しても、3 カ月に 1 回の頻度で監視することにより、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ため、監視頻度を 3 カ月に 1 回と設定することは適切である。

表1 各種試験前後の漏えい率

試験	部位	漏えい率 (測定値) : Pa・m ³ /s		増加率	
		試験前	試験後		
キャスク転倒試験 (トラニオンを回転中心とする回転高さ1mでの蓋部衝突試験)	一次蓋	3.7×10^{-12}	3.9×10^{-9}	1000	
	二次蓋	1.2×10^{-12}	8.4×10^{-9}	1000	
航空機衝突試験 (縦置き状態のキャスク蓋部周辺への航空機エンジンの衝突試験)	一次蓋	8.2×10^{-11}	4.0×10^{-6}	100000	
9m落下試験 (MSF型キャスクのプロトタイプを用いた輸送荷姿(緩衝体付き)での落下試験※)	0.3m 傾斜落下	一次蓋	2.5×10^{-11}	1.0×10^{-11}	1
		二次蓋	1.5×10^{-11}	$< 1 \times 10^{-11}$	1
	9m 傾斜落下	一次蓋	1.0×10^{-11}	$< 1 \times 10^{-11}$	1
		二次蓋	$< 1 \times 10^{-11}$	3.0×10^{-7}	10000
	9.3m 傾斜落下	一次蓋	$< 1 \times 10^{-11}$	$< 1 \times 10^{-11}$	1
		二次蓋	7.4×10^{-9}	1.6×10^{-6}	1000

以上の知見を踏まえ、監視頻度の設定における金属ガスケットの漏えい率として、基準漏えい率の1000倍の漏えい率を設定。

※ 金属ガスケットを用いた二重の蓋構造であり、三次蓋(ゴムOリング)を設けない構造

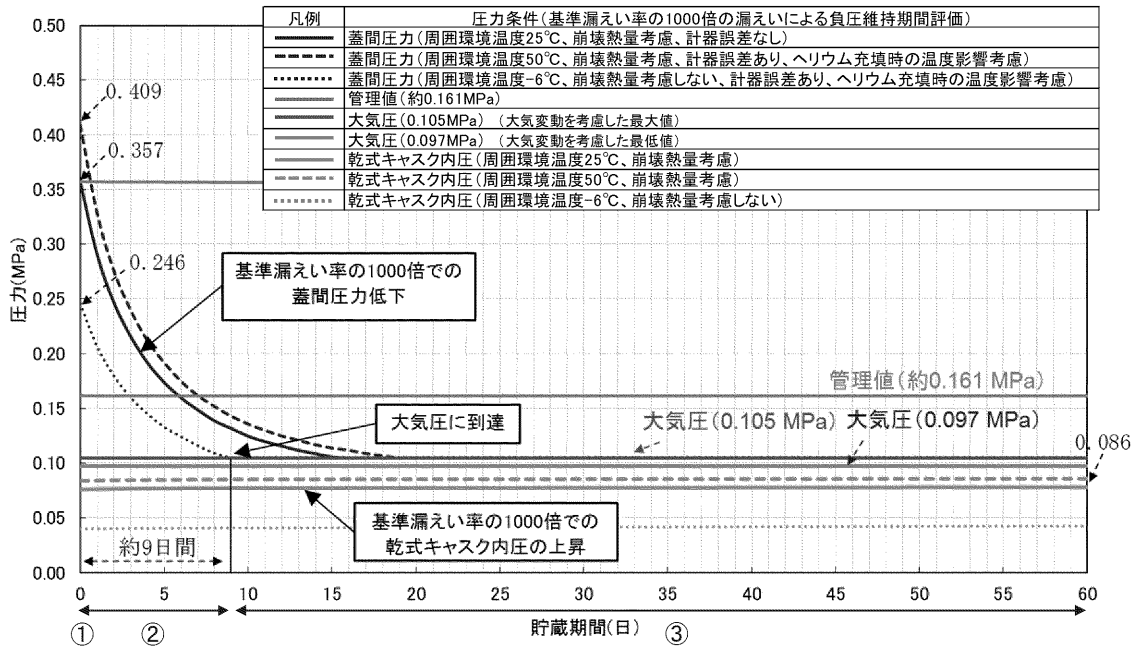


図1 貯蔵期間中における蓋間圧力等の経時変化(1/2)

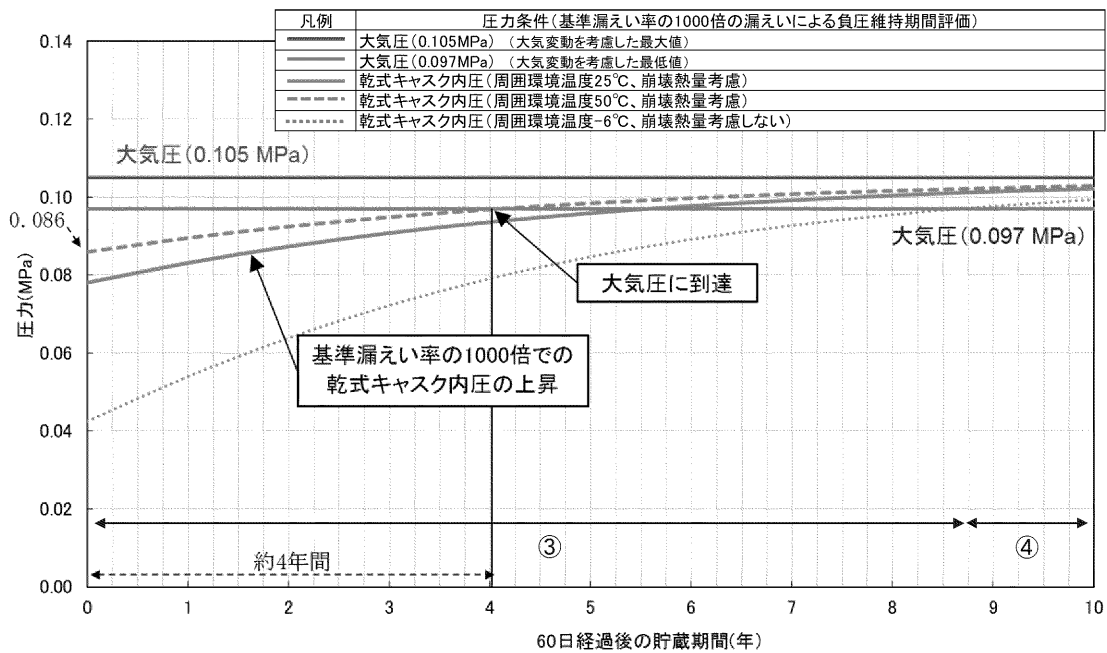


図1 貯蔵期間中における蓋間圧力等の経時変化(拡大図)(2/2)

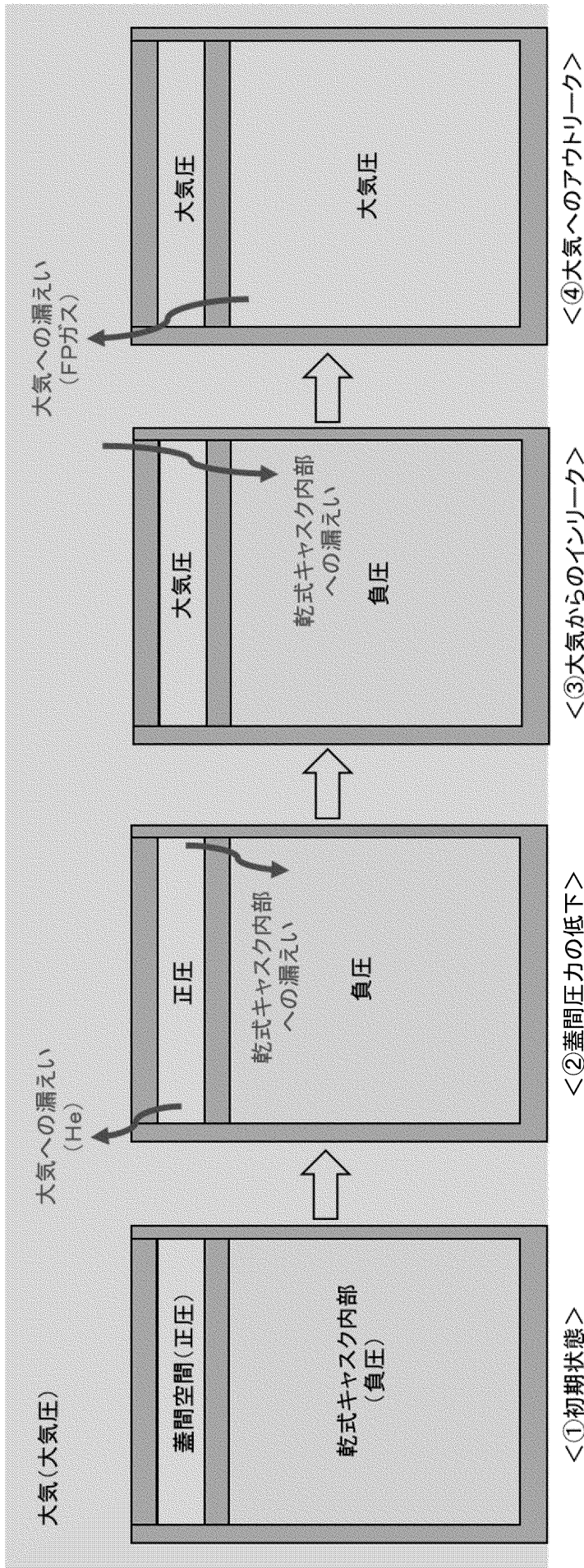


図2 漏えいのイメージ

輸送時（特別の試験条件）の 遮蔽評価の概要

1. はじめに

輸送時（特別の試験条件）において、除熱解析で算出した中性子遮蔽材の温度が基準値（180℃）を上回ることから、遮蔽評価は“保守的に中性子遮蔽材の質量減損率が50%の条件”で評価し、問題がないことを確認している。本書は、輸送時（特別の試験条件）の遮蔽評価の概要をまとめたものである。

2. 輸送時（特別の試験条件）の遮蔽評価

輸送時（特別の試験条件）の遮蔽評価において、中性子遮蔽材は通常輸送時からの質量減損率を50%と設定している。評価結果は876.6 μ Sv/h（MSF-24P型）、810.7 μ Sv/h（MSF-21P型）となり、基準である表面から1m離れた位置の最大線量率が10mSv/h以下を満足している。なお、質量減損率50%の考え方を3章に示す。

3. 遮蔽評価における中性子遮蔽材質量減損率の考え方

輸送時（特別の試験条件）の遮蔽評価では、中性子遮蔽材耐火試験（800℃30分で中性子遮蔽材を加熱した試験）で確認した質量減損率を十分上回る値として、質量減損率50%を設定している。

中性子遮蔽材耐火試験の試験供試体を図1に示す。試験は、中央に貫通孔がある供試体と無い供試体の2種類で実施している。試験方法としては、試験供試体を800℃の炉で30分間加熱した後、炉から取り出して自然冷却している。

耐火試験前後の質量及び質量減損率を表1に示す。貫通孔あり及び無しで質量減損率は共に約2割である。したがって、質量減損率50%は十分保守側の設定である。

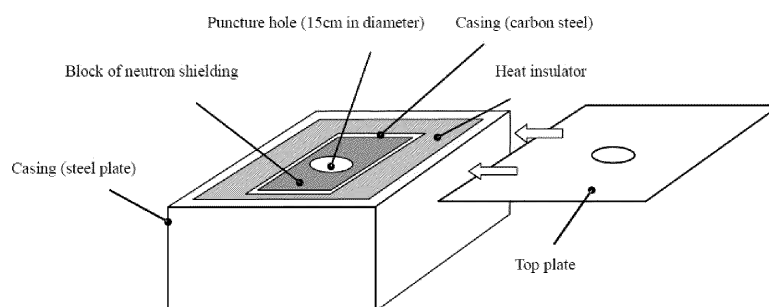


図1 試験供試体（貫通孔ありの例）

表1 耐火試験前後の中性子遮蔽材の質量及び質量減損率

試験供試体の種類	中性子遮蔽材の重量 [kg]		質量減損率 [%] 【(①-②) / ① × 100】
	①耐火試験前	②耐火試験後	
貫通孔無し	21.0	17.8	約 16 ^(注)
貫通孔あり	16.4	13.1	約 21 ^(注)

(注) 計算値を切り上げた値

以上

使用済燃料乾式貯蔵における
燃料被覆管の健全性について

1. 燃料被覆管のクリープ

原子炉照射中に発生した核分裂生成ガス（FP ガス）の一部が燃料ペレットから放出されるため、原子炉取出し時の燃料棒内圧は製造時よりも大きくなっており、貯蔵中にこの内圧によって燃料被覆管には周方向引張応力（フープ応力）が作用する。この時、被覆管応力が材料の降伏強度以下でも徐々に塑性変形（クリープ）が生じ、この変形量（累積クリープひずみ）が限界を超えると破断する（図 1）。

このため、貯蔵時に燃料被覆管がクリープ破断しないようにする必要がある。国内で照射された PWR48GWd/t 燃料の照射済燃料被覆管（Zry-4）を用いたクリープ試験が実施され、燃料被覆管は 1%以上のクリープ変形能力を有することが確認されている。（図 2）

一方、燃料被覆管のクリープ速度は温度とフープ応力に依存するが、フープ応力も温度に依存することから、貯蔵時においては、クリープひずみが 1%以下となるように、温度を制限することによってクリープ破損を防止することができる。クリープひずみを求める計算式は、照射被覆管と未照射被覆管を用いたクリープ試験にもとづいて、幾つかの式が提案されている。一般に未照射被覆管の方がクリープ速度は大きいため、未照射被覆管のクリープひずみ計算式を用いる方が保守側である。
[1]

図 3 に代表的な貯蔵中の燃料被覆管の温度履歴を仮定して求めた貯蔵初期温度と累積クリープひずみの計算例を示す。最も保守的な計算式を用いた場合の累積クリープひずみが 1%を超えない初期燃料被覆管温度は、約 320°Cとなる

なお、PWR 55GWd/t 燃料の照射被覆管（MDA、ZIRLO）を用いたクリープ試験から得られたクリープ速度は、PWR 48GWd/t 燃料の照射被覆管（Zry-4）のクリープ速度と比較して同等以下であると報告されている。（図 4）

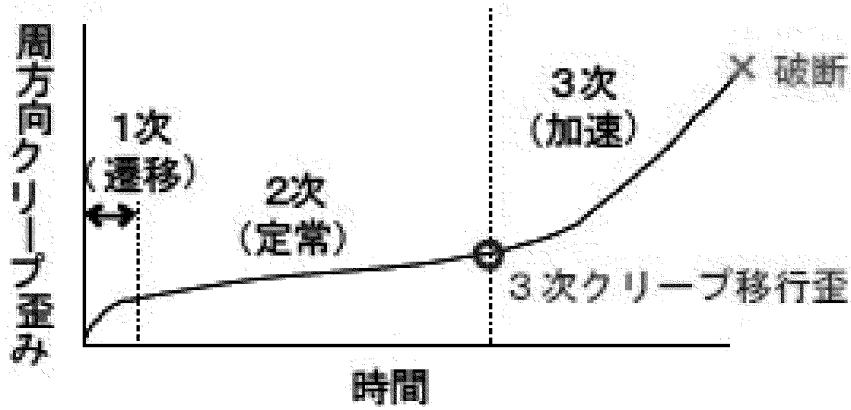


図1 燃料被覆管の周方向クリープひずみの時間変化[2]

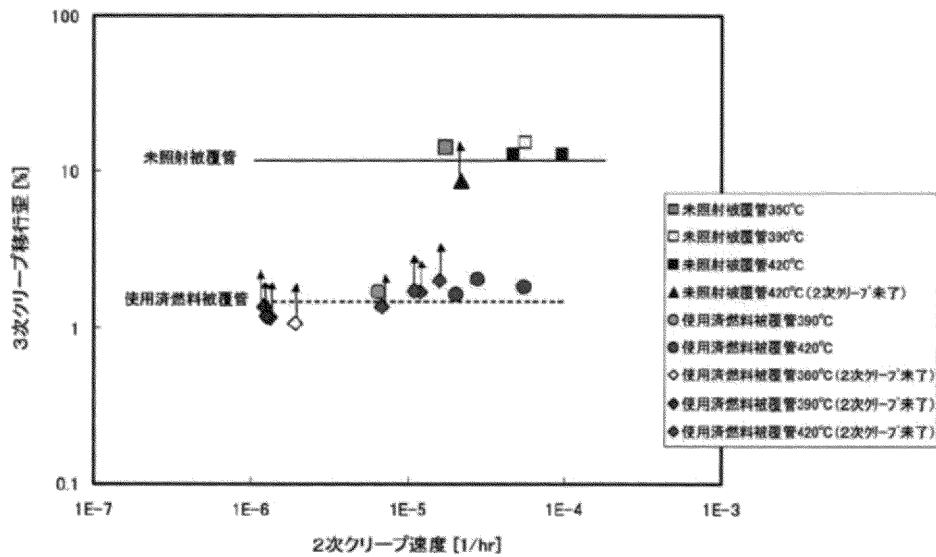


図2 PWR 照射被覆管 (Zry-4) の3次クリープ移行ひずみ[3]

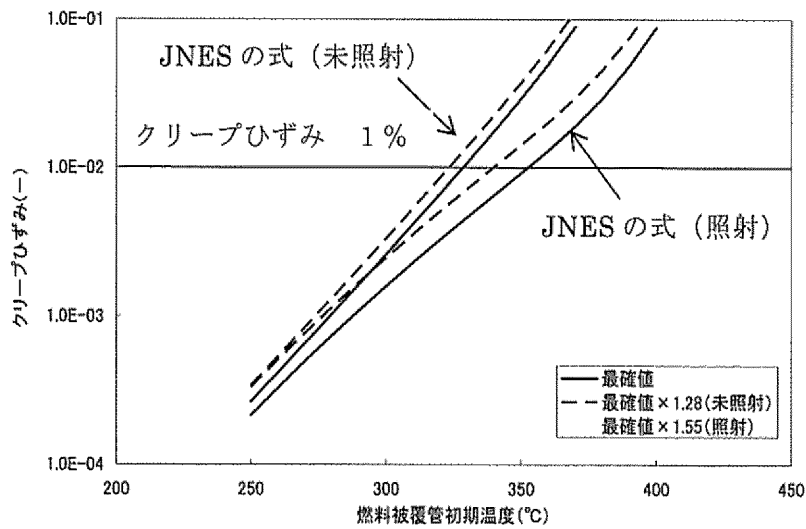


図3 PWR 燃料被覆管の初期温度と60年間貯蔵中の累積クリープひずみ計算例[4]

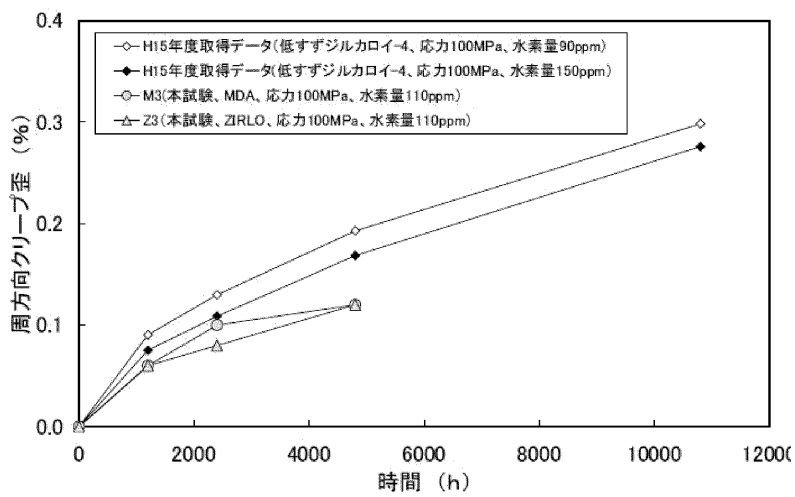
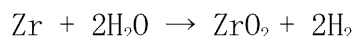


図4 PWR 55Gwd/t 照射被覆管(MDA, ZIRLO)と PWR 48Gwd/t 照射被覆管(Zry-4)のクリープ速度比較[1]

2. 水素化物再配向

(1) 水素化物再配向の発生機構

ジルカロイ被覆管は炉内滞在中、下式に示すように、ジルコニウム (Zr) と冷却水との反応により酸化物を形成するとともに水素を発生し、その水素の一部は燃料被覆管中に吸収される。



吸収された水素は固溶限内であればジルカロイ結晶格子中に侵入型原子として存在するが、固溶限を超えると Zr 水素化物 (ZrH_x) として析出する。図 5 に Zry-4 中の水素固溶限と温度の関係を示すように、ジルコニウム合金中の水素は温度が約 100°C まではほとんど固溶せず、これより高くなると温度とともに固溶限は急激に増加する。また、昇温時 (溶解時) と降温時 (析出時) では固溶限が異なる。図の矢印は、300°C まで昇温後、冷却する場合の溶解・析出履歴をあらわす。

使用済燃料をキャスクに装荷した状態でプールから引き上げて、真空乾燥を行う際に高温 (~300°C) になると、かなりの水素化物が再固溶する。その後、貯蔵中に燃料被覆管温度が低下すると図 5 に示すように固溶限が下がるため水素が徐々に析出し、その際、燃料被覆管の周方向応力 (フープ応力) がある値以上ならば板状の水素化物が応力方向と直交する半径方向に析出し、燃料被覆管の機械的特性 (強度、延性) の低下をもたらす。この現象を水素化物再配向と呼び、燃料健全性に影響を及ぼすことから、これを避けるために燃料被覆管温度とフープ応力を管理する必要がある。図 6-1 と図 6-2 に水素化物再配向の模式図を示す。[4]~[6]

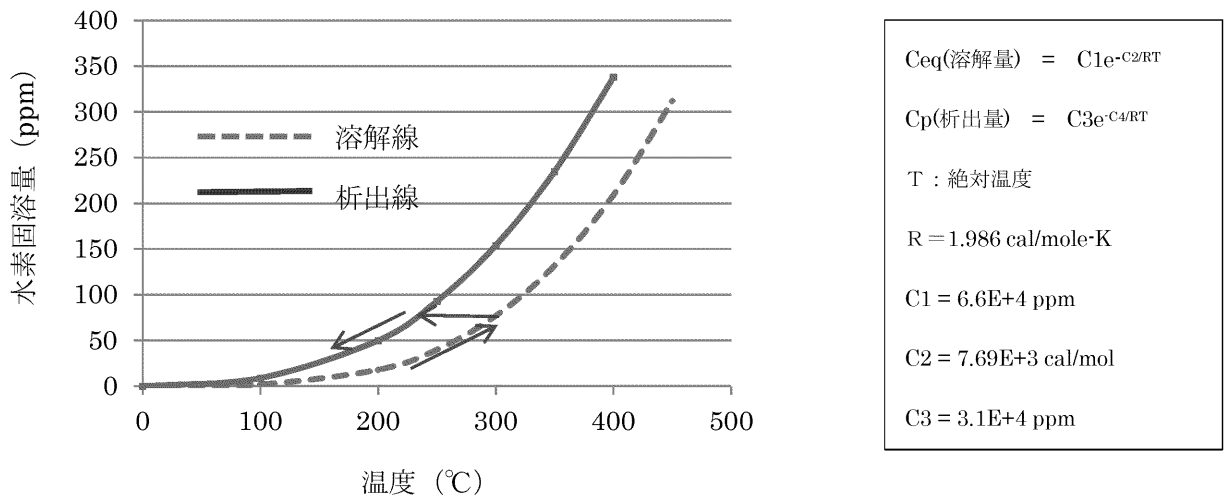


図 5 Zry-4 中の水素固溶限の温度依存性[7]

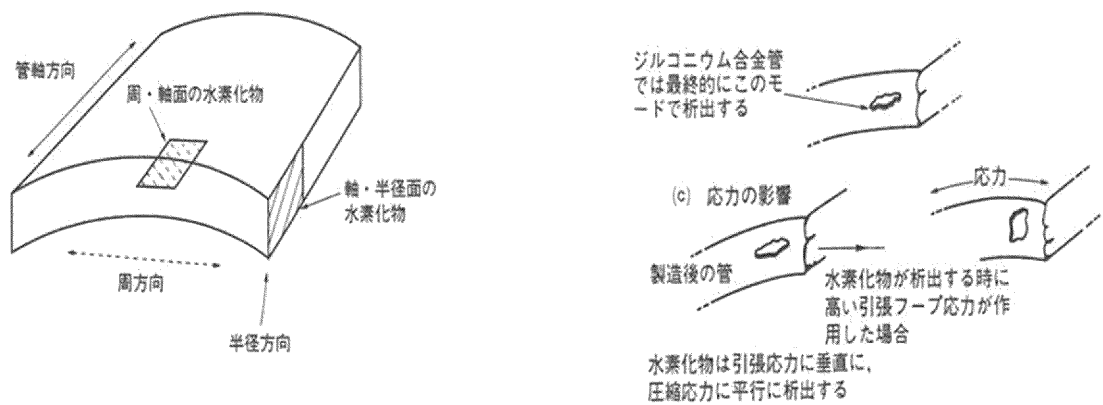
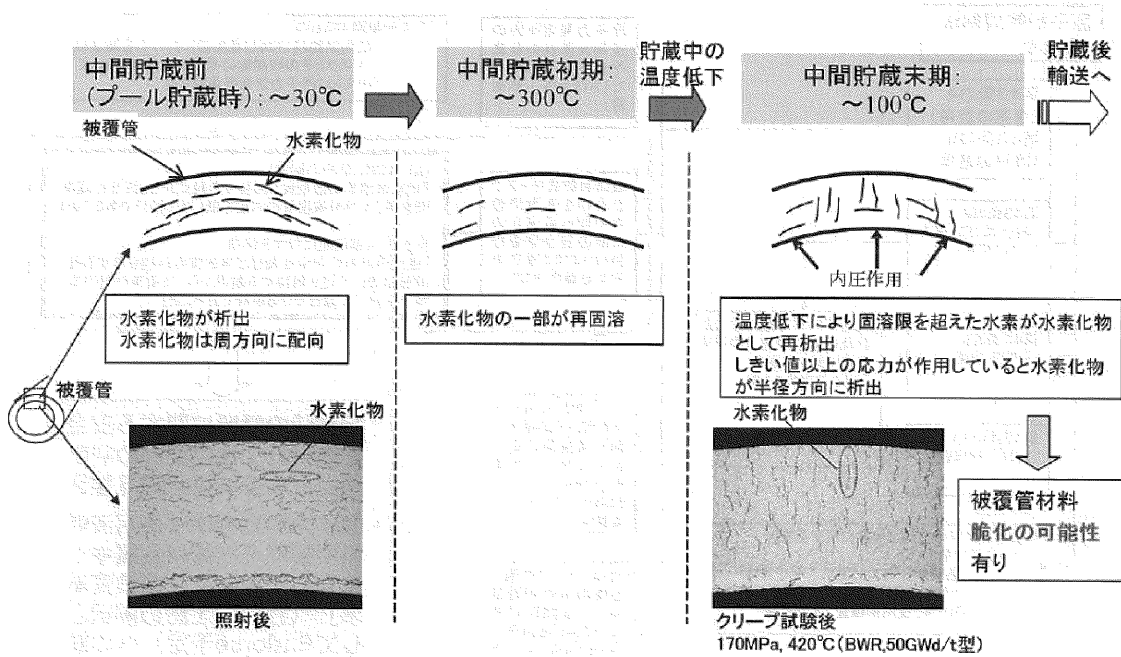


図 6-1 燃料被覆管の水素化物再配向

燃料被覆管の水素化物再配向現象



第20-1回中間貯蔵燃料検討会

6

図 6-2 乾式貯蔵過程における水素化物再配向の発生プロセス [6]

(2) 水素化物再配向が影響しない温度・応力条件

これまでに表 1 のように PWR 燃料被覆管では Zry-4、MDA、ZIRLO の 3 種の照射被覆管について水素化物再配向によって機械的特性に影響しない温度とフープ応力の範囲が調べられている。

表 1 照射被覆管の機械的特性に影響しない条件 [9]

照射被覆管の種類	温度	フープ応力
Zry-4	275°C 以下	100MPa 以下
MDA	250°C 以下	90MPa 以下
ZIRLO	250°C 以下	90MPa 以下

これらの条件は、原子力安全基盤機構（以下「JNES」という。）が実施した照射被覆管を用いた水素化物再配向特性試験ならびに再配向処理した燃料被覆管のリング圧縮試験から得られたものである。以上の水素化物再配向が影響しない条件は、リング圧縮試験で得られた燃料被覆管の破損扁平率と強度（最大荷重）が、照射まま材の値から有意に低下しない範囲を指している。（表 2-1～2-3 参照）

表 2-1 48GWd/t 燃料被覆管 (Zry-4) の水素化物再配向特性[9]

(1) 再配向特性

温度 (°C)	冷却速度 (°C/h)	周方向応力条件 (MPa)			
		85	100	115	130
340	30		○		■
300	30	○	○	■	■
	3			■	
	0.6			■	
275	30		○	■	△
	3			■	
250	30		○		△

○: 照射まま材と同等
 △: 明瞭に判断できず
 ■: 再配向あり
 □: 許容される条件

(2) 周方向機械特性

温度 (°C)	冷却速度 (°C/h)	周方向応力条件 (MPa)			
		85	100	115	130
340	30		■		■
300	30	■	■	■	■
	3			■	
	0.6			■	
275	30		○	△	△
	3			■	
250	30		○		△

○: 照射まま材と同等
 △: 延性低下あり
 ■: 延性および強度低下あり
 □: 許容される条件

表 2-2 55GWd/t 燃料被覆管 (MDA) の水素化物再配向特性[9]

(1) 再配向特性

温度 (°C)	冷却速度 (°C/h)	周方向応力条件 (MPa)							
		55	70	85	90	95	100	115	130
300	30						△	■	■
275	30			○		△	△		
	3			○			△		
265	30								
	3								
260	30					△			
	3								
250	30				△		△		
	3								

○: 照射まま材と同等
 △: 明瞭に判断できず
 ■: 再配向あり
 ■: 許容される条件

(2) 周方向機械特性

温度 (°C)	冷却速度 (°C/h)	周方向応力条件 (MPa)							
		55	70	85	90	95	100	115	130
300	30						○	■	■
275	30			△		△	△		
	3			○			○		
265	30								
	3								
260	30					△			
	3								
250	30				○		■		
	3								

○: 照射まま材と同等
 △: 延性低下あり
 ■: 延性および強度低下あり
 ■: 許容される条件

表 2-3 55GWd/t 燃料被覆管 (ZIRLO) の水素化物再配向特性[9]

(1) 再配向特性

温度 (°C)	冷却速度 (°C/h)	周方向応力条件 (MPa)							
		55	70	85	90	95	100	115	130
300	30		○				■	■	■
275	30		○				■		
	3	○	○						
265	30					△			
	3								
260	30					△			
	3								
250	30				△				
	3								

○: 照射まま材と同等
 △: 明瞭に判断できず
 ■: 再配向あり
 ■: 許容される条件

(2) 周方向機械特性

温度 (°C)	冷却速度 (°C/h)	周方向応力条件 (MPa)							
		55	70	85	90	95	100	115	130
300	30		○				■	■	■
275	30		△				△		
	3	○	△						
265	30					△			
	3								
260	30					△			
	3								
250	30				○				
	3								

○: 照射まま材と同等
 △: 延性低下あり
 ■: 延性および強度低下あり
 ■: 許容される条件

なお、NDA については、前記の照射被覆管材を用いた水素化物再配向特性試験及びリング圧縮試験を行っていないが、未照射被覆管の水素化物再配向特性試験を実施し、未照射被覆管 (Zry-4) よりも水素化物再配向が起こりにくい傾向を確認している。

(3) 水素化物再配向特性試験の方法

脱ミートした短尺の照射被覆管の内部を加圧（一方の端部を端栓で閉止し、もう一方の端面に配管を接続してガスで加圧）してフープ応力を付与し、ある温度で一定時間保持した後、フープ応力一定の状態で降温する。常温まで降温した後、燃料被覆管の断面金相から水素化物配向係数を求める。また、燃料被覆管の機械的特性への影響を調べるために、試料から試験片を採取して機械試験（リング圧縮試験等）を行う。

図 8 に試験装置と温度・フープ応力履歴の例を示す。[9]

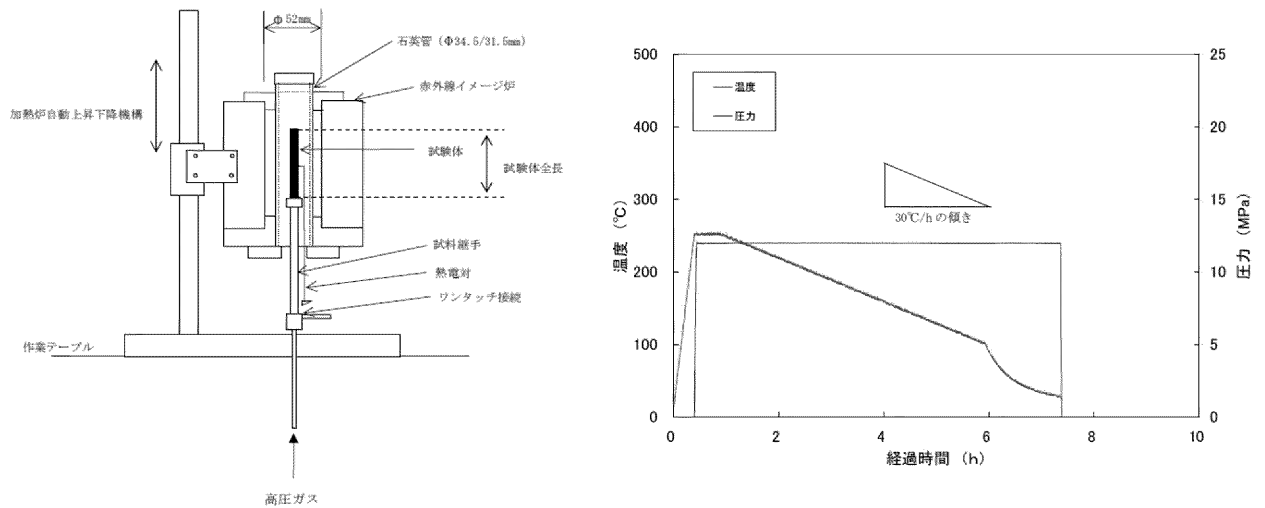


図 8 水素化物再配向試験装置と試験の温度・応力履歴例[9]

(4) 水素化物再配向係数の定義と求め方

燃料被覆管の水素化物配向の有無を調べるには、燃料被覆管の断面金相から水素化物配向係数を求め、配向していない燃料被覆管（照射まま材、未照射被覆管）と比較する方法が用いられる。

水素化物再配向係数は、燃料被覆管中に析出する水素化物の方向性をあらわす指標で、その値が大きいほど半径方向を向く水素化物の割合が多いことになる。水素化物再配向係数には、以下に示す幾つか異なる定義がある。[6]

$$F_n = \frac{\text{被覆管の径方向に対して } \pm 40^\circ \text{ 以内の角度を持つ板状水素化物の数}}{\text{観察した板状水素化物の数}}$$

$$F_e = \frac{\text{試料中の固溶水素量のうち被覆管の径方向に対し} \pm 40^\circ \text{ 以内に配向した水素量}}{\text{試料中の固溶水素量}}$$

水素化物再配向は、温度の上昇によって析出した水素化物が再固溶し、次に降温過程で応力の作用で径方向に再析出する現象を指すので、再配向特性をあらわす指標としては F_e が最も直接的である。

F_e は、材料の水素固溶限（温度の関数）から、次式によって計算できる。

$$F_e = \frac{\text{試料水素量} \times F_n - (\text{試料水素量} - \text{固溶水素量}) \times F_0}{\text{試料中の固溶水素量}}$$

F_0 : 再配向処理前の試料の F_n

水素化物配向係数は、燃料被覆管の断面金相写真から析出している水素化物の長さや個数を画像解析によって求めて、前述の定義にしたがって計算する。

JNES が実施した水素化物再配向特性試験で得られた照射被覆管（48GWd/t 燃料、Zry-4）のフープ応力と Fe の関係を図 9 に示す。温度 250°C～340°C の範囲でフープ応力が約 100MPa を超えたところで Fe が増加する傾向が見られる。

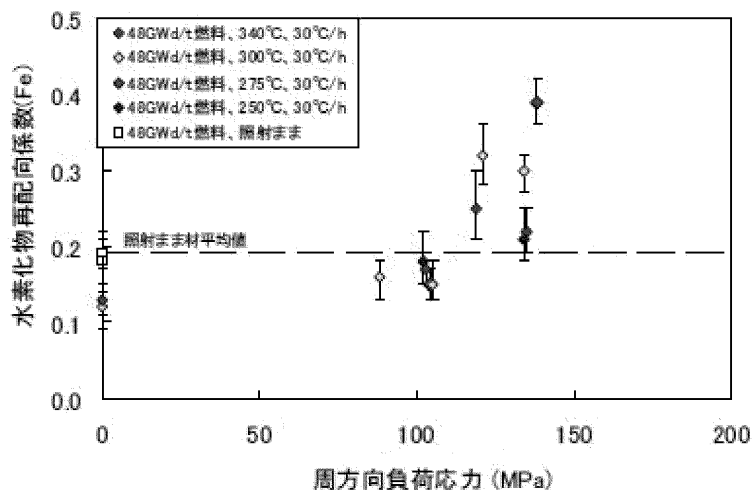


図 9 フープ応力と水素化物再配向係数 (Fe) の関係 [9]

(5) リング圧縮試験の方法

リング圧縮試験は、リング状に切り出した燃料被覆管に試験機によって圧縮変位を与えて、荷重-変位を取得するもので、最大荷重に到達した変位から破損扁平率を求めるものである。(図 10) JNES の他にも米国 NRC でもこの方法で水素化物再配向の影響を調べており、世界的に標準的な手法と言える。

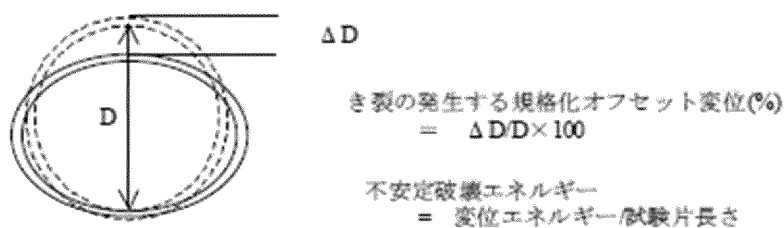
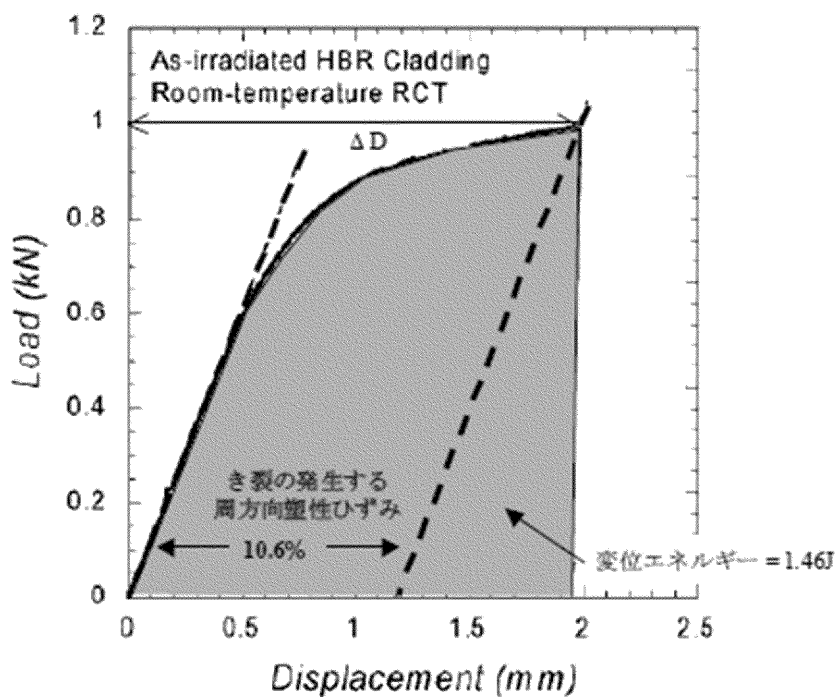


図 10 リング圧縮試験[8]

JNES が実施した Zry-4、MDA 及び ZIRLO に対する照射被覆管のリング圧縮試験結果を図 11-1、図 11-2、図 12-1、図 12-2、図 13-1 及び図 13-2 に示す。Zry-4 については、燃料被覆管フープ応力が 100MPa で最高到達温度が 275°C を超えると、MDA、ZIRLO については、燃料被覆管フープ応力が 90MPa で最高到達温度が 250°C を超えると強度又は破壊扁平率が低下する結果が得られており、これに基づいて表 2-1、表 2-2、表 2-3 に挙げた燃料被覆管の水素化物再配向しきい条件が設定される。

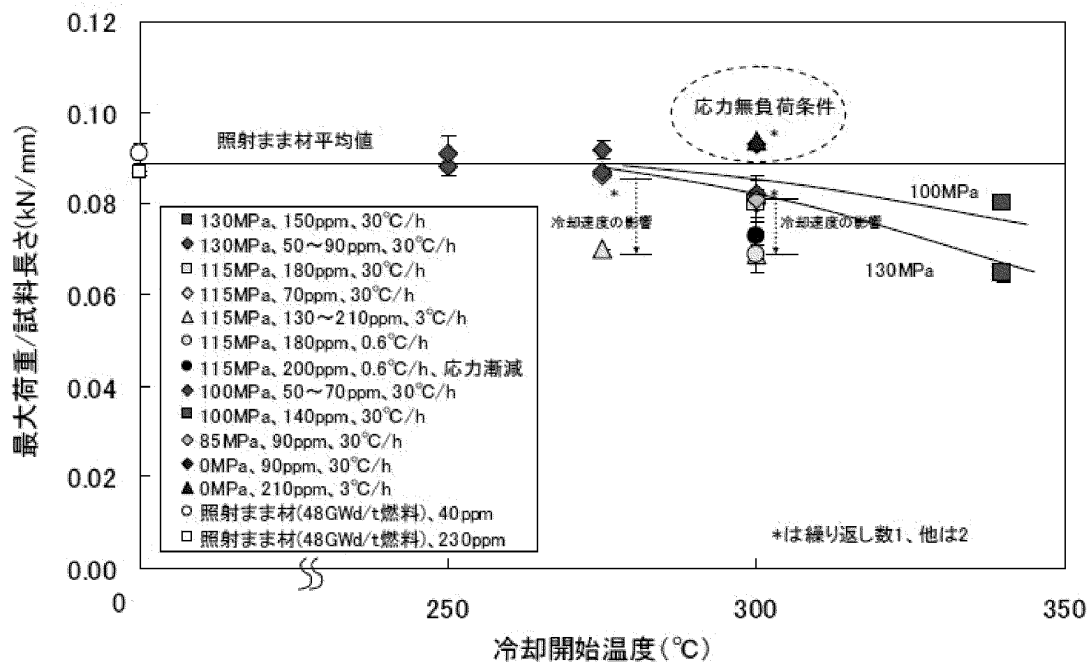


図 11-1 照射被覆管 (Zry-4) のリング圧縮試験における温度、フープ応力と最大荷重[9]

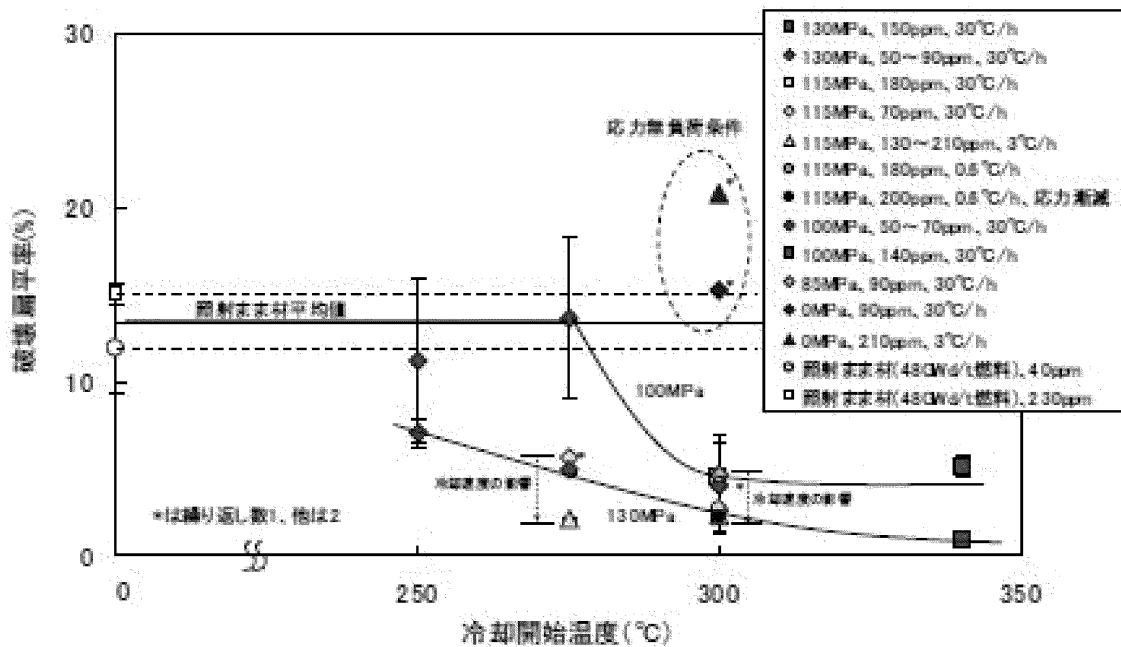


図 11-2 照射被覆管 (Zry-4) のリング圧縮試験における温度、フープ応力と破損扁平率[9]

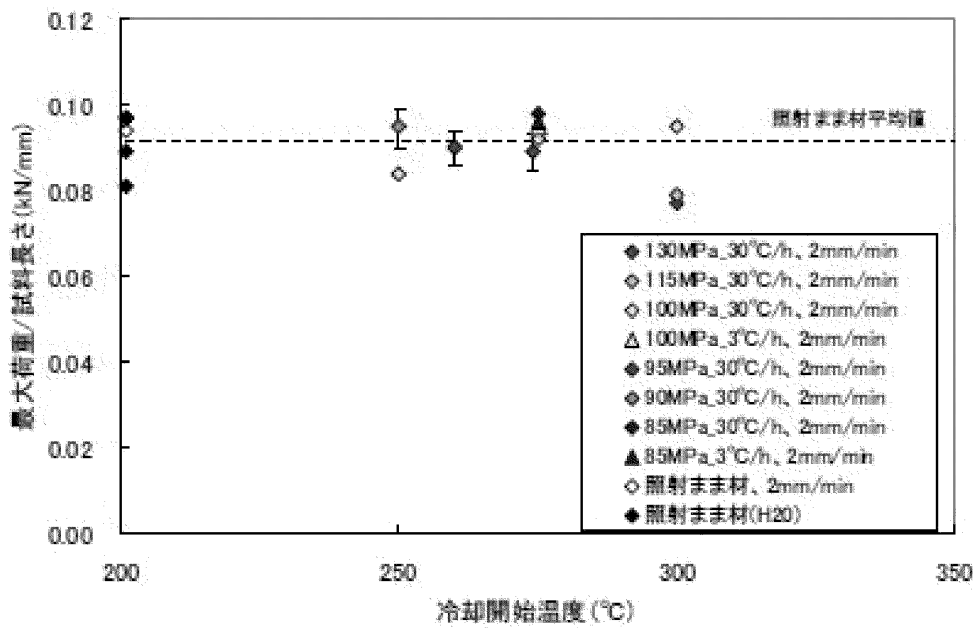


図 12-1 照射被覆管 (MDA) のリング圧縮試験における温度、フープ応力と最大荷重
[9]

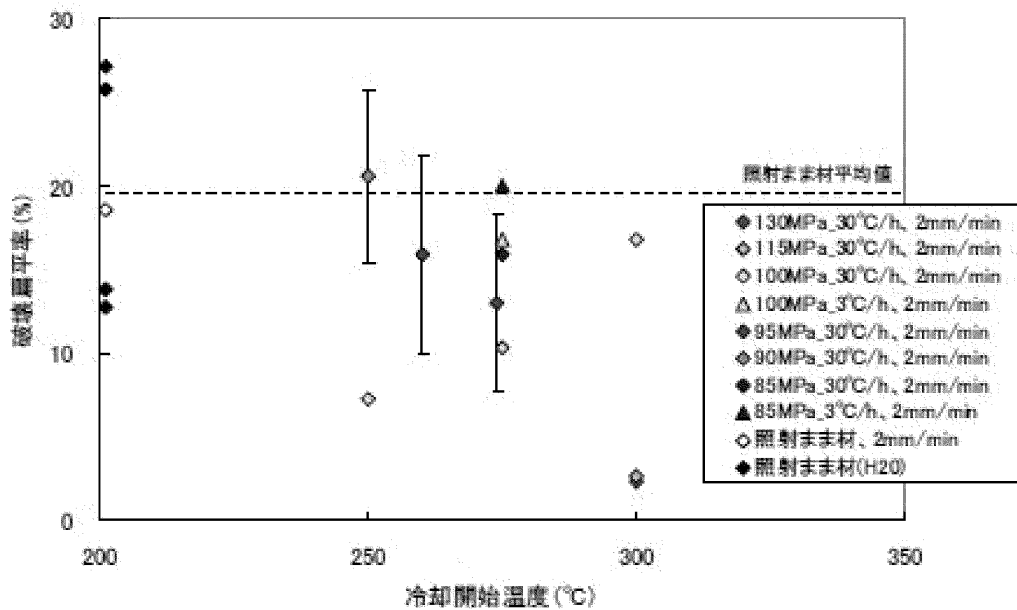


図 12-2 照射被覆管 (MDA) のリング圧縮試験における温度、フープ応力と破損扁平率[9]

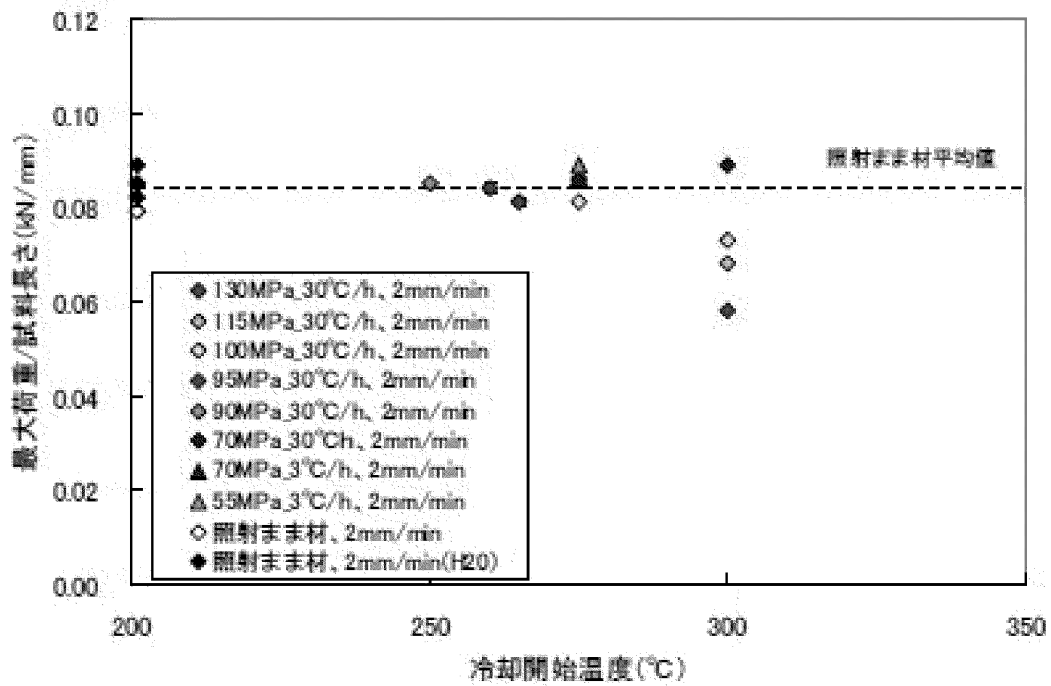


図 13-1 照射被覆管（ZIRLO）のリング圧縮試験における温度、フープ応力と最大荷重[9]

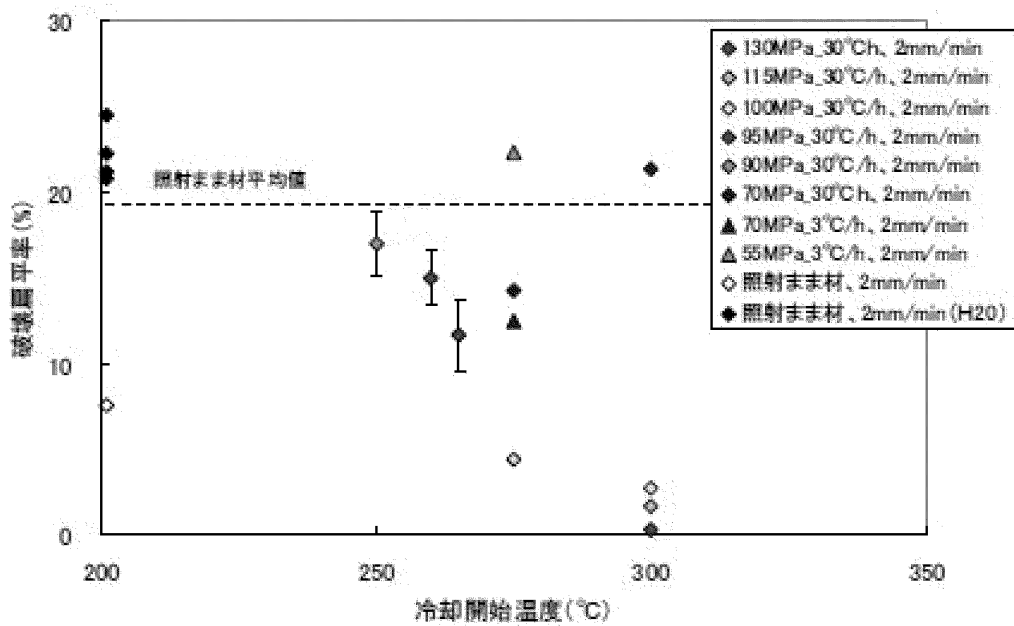


図 13-2 照射被覆管（ZIRLO）のリング圧縮試験における温度、フープ応力と破損扁平率[9]

3. 照射硬化回復

燃料被覆管は炉内で照射されると強度が増加し、延性が低下するが、照射後に高温に長時間保持されると照射硬化が徐々に回復する。国内軽水炉で照射された PWR 48GWd/tZry-4 照射被覆管を用いた照射硬化回復試験の結果(図 14)では、約 300°Cでは照射硬化の回復の可能性は小さいことが確認されている。[1]

すなわち、貯蔵中の温度が 300°Cを超えなければ、照射硬化回復による燃料被覆管の機械的強度の低下を考慮する必要はなく、照射被覆管の強度を用いて使用済燃料の健全性評価を行うことができる。

なお、55GWd/t 燃料被覆管 (MDA、NDA、ZIRLO) については、照射硬化回復試験を行っていないが、キャスク貯蔵時の燃料被覆管最高温度は約 230°Cで 300°Cより十分小さいので照射硬化回復を考慮しない。

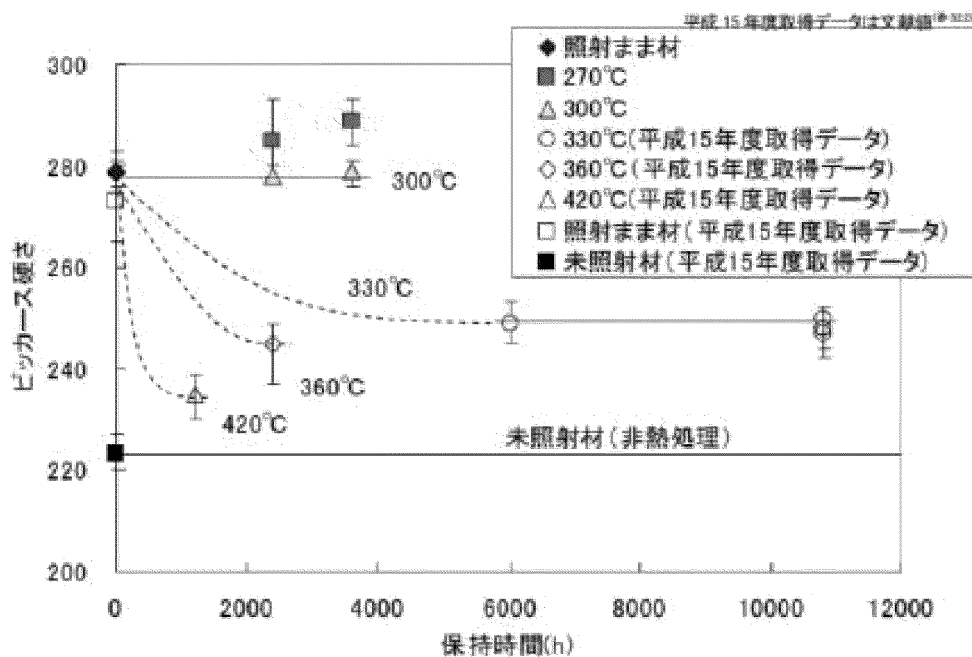


図 14 照射被覆管 (Zry-4) の照射硬化回復試験結果[1]

4. 応力腐食割れ

燃料被覆管の応力腐食割れ（SCC）は、応力と燃料棒内の化学雰囲気との組み合わせにより生じるといわれている。貯蔵中の使用済燃料においては、ペレットの温度上昇による腐食性核分裂生成ガス（ヨウ素など）の放出はなく、ペレット内ではヨウ素はCsIとして安定に存在することから、SCCが発生する化学的雰囲気になっていないとされている。[10]，[11]

応力については、腐食性雰囲気が整った条件でのSCC試験（図15）で、ジルカロイ-2とZry-4（PWR被覆管で使用される材質）のSCC発生のしきい応力がそれぞれ、150MPa、200MPa程度であることが報告されており[11]、貯蔵時の応力は約94MPaでこの値に比べて低い。

以上から、SCCは発生しないと評価される。

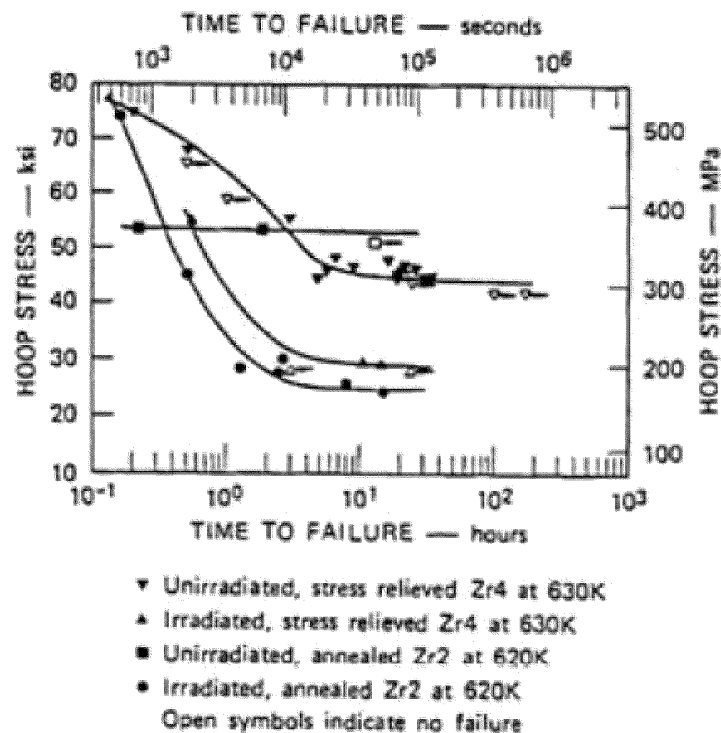


図 15 腐食性雰囲気が整った条件での SCC 試験における周方向応力と破断時間[11]

参考文献

1. 06 基炉報-0006 平成 18 年度リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等（貯蔵燃料長期健全性等確証試験に関する試験最終成果報告書）
2. “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，平成 21 年 6 月 25 日
3. 04-基炉報-0001 平成 15 年度リサイクル燃料資源貯蔵施設安全解析コード改良試験（燃料の長期安全性に関する試験最終成果報告書）
4. 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
5. PWR 燃料の高燃焼度化（ステップ 2）及び燃料の高燃焼度化に係る安全研究の現状と課題について（平成 14 年 3 月 19 日）（原子力安全・保安院）
6. 貯蔵燃料健全性等調査 平成 20 年度第 1 回中間貯蔵検討会資料（平成 21 年 2 月 27 日）（原子力安全基盤機構）
7. EPRI, “Dry Storage of High-Burnup Spent Fuel Responses to Nuclear Regulatory Commission Requests for Additional Information and Clarification,” 1009276 (2003).
8. 平成 19 年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等（貯蔵燃料健全性等調査に関する試験成果報告書），07 基炉報-0004, 平成 20 年 3 月 独立行政法人 原子力安全基盤機構
9. 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燃料長期健全性等調査に関する試験成果報告書），08 基炉報-0006, 平成 21 年 3 月 独立行政法人 原子力安全基盤機構.
10. 使用済燃料貯蔵施設（中間貯蔵施設）に係る技術検討報告書平成 12 年 12 月資源エネルギー庁
11. 平成 12 年度リサイクル燃料資源貯蔵施設安全解析コード改良試験等に関する報告書＝燃料の長期安全性に関する試験＝平成 13 年 3 月(財)原子力発電技術機構

先行電力との乾式貯蔵施設に関する差異

先行電力との申請に関する設計方針において、差異の概要を示す。

なお、サイト固有条件や個別設計（設計方針は同じ）に基づく差異は除く。

	先行電力	九電	差異
3条	乾式貯蔵建屋は基準地震動に対して十分な支持力を有する地盤に設置する。	同左	なし
4条	乾式キャスクは基準地震動に対して耐震性を有する設計とする。 波及的影響： ・貯蔵建屋 基準地震動に対して損壊しないことで波及的影響を及ぼさない設計とする。 ・天井クレーン 基準地震動の発生確率や作業時間を考慮した確率論的考察により重畳考慮不要とする。	同左 波及的影響： ・貯蔵建屋 同左 ・天井クレーン トロリの落下を考慮してもキャスクの安全機能が維持できる設計とする。	なし 差異あり
5条	基準津波の到来しない設置位置	同左	なし
6条	乾式貯蔵施設（乾式貯蔵建屋、乾式キャスク）として1項、3項を適用し設計。	乾式貯蔵建屋は、PS-3として1項、3項を適用し外部事象に対して設計。 乾式キャスクは4項、6項を適用し竜巻、外部火災に対して設計。	なし 差異あり
7条	再稼働時方針と同じ。	同左	なし
8条	放射性物質の貯蔵等の機器等である乾式貯蔵容器を貯蔵する乾式貯蔵建屋を火災区域として設定する。 火災区域を細分化して、乾式貯蔵容器を貯蔵する貯蔵エリア、取扱エリア及びユーティリティエリアの建屋全域を火災区画として設定している。	同左 火災区域を細分化して、乾式貯蔵容器を貯蔵する貯蔵エリア及び乾式貯蔵容器を取り扱う取扱エリアを火災区画として設定する。 なお、火災区画を設定しないユーティリティエリア（コンプレッサ室含む）については、貯蔵エリア及び取扱エリアと同様に、消防法に基づき火災感知器及び消火設備を設置するため、設計の相違はない。	なし 差異あり
9条	200m 浸漬評価により影響を受けない。	同左	なし
11条	安全避難通路を設ける。	同左	なし

	先行電力	九電	差異
12条	キャスク：PS-2 建屋：PS-3	同左	なし
16条	<p>【兼用キャスク／収納SF】 1/2号用 (14×14 48G)</p> <p>MSF-32P (単一燃料)</p> <p>3号用 (17×17 48G) MSF-24P</p> <p>【4つの安全機能】 貯蔵状態での安全機能維持 想定事象による安全機能維持</p> <p>【長期健全性】 設計貯蔵期間 (60年) において安全 機能維持できる設計 55G 燃料無</p> <p>【監視装置】 蓋間圧力計、表面温度計、雰囲気温 度計を設けて監視できる設計。 監視頻度は3ヶ月/回</p>	<p>【兼用キャスク／収納SF】 1/2/3/4号用 (14×14 48G) (14×14 55G) (17×17 48G)</p> <p>MSF-21P (複数種燃料、燃料型の 混載無)</p> <p>3/4号用 (17×17 48G) MSF-24P</p> <p>同左</p> <p>同左</p> <p>個別：55G 燃料健全性</p> <p>同左</p>	<p>差異あり</p> <p>なし</p> <p>なし</p> <p>なし</p> <p>差異あり</p> <p>なし</p>
29条	<p>建屋を設ける事で年間 50μSv/y を 満足する設計とする。</p> <ul style="list-style-type: none"> 管理区域境界線量評価を行う。 敷地境界線量評価を行う。 (補足) 開口部のストリーミング影響評価 を行う。 	<ul style="list-style-type: none"> 記載なし 30条に評価結果を記載する。 敷地等境界線量評価を行う。 (補足) 同左 	<p>差異あり</p> <p>なし</p> <p>なし</p>
30条	<p>建屋壁を境界として管理区域境界を 設ける。 建屋外及びユーティリティエリアは 非管理区域。 飛び地管理。 線量当量率の表示を行う。</p>	同左	なし