

補足説明資料 16-6

16条

燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設

材料・構造健全性（長期健全性）に関する説明資料

枠囲みの範囲は、商業機密のため、非公開とします。

目 次

1. 要求事項	1
2. 要求事項への適合性	3
3. 参考文献	12

別紙 1 中性子遮蔽材の質量減損率について

別紙 2 緩衝材（木材）の熱による強度低下について

別紙 3 における除熱解析条件

1. 要求事項

特定機器の設計の型式証明申請において、兼用キャスクの材料・構造健全性（長期健全性）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

a. 設置許可基準規則第 16 条第 2 項一号ハ

- ・燃料体等が臨界に達するおそれがないものとする。

b. 設置許可基準規則第 16 条第 4 項一号

- ・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。

c. 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。

d. 設置許可基準規則第 16 条第 4 項三号

- ・使用済燃料が内包する放射性物質を適切に閉じ込めることができ、かつ、その機能を適切に監視することができるものとする。

e. 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

「4. 自然現象等に対する兼用キャスクの設計 4.5 材料・構造健全性」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】

『

設計貯蔵期間中の温度、放射線等の環境及び当該環境下での兼用キャスクの経年変化
に対して十分な信頼性を有する材料及び構造であること。また、貯蔵建屋を設置しな
い場合は、雨水等により兼用キャスクの安全機能が喪失しないよう対策が講じられて
いること。輸送荷姿等の緩衝体を装着した状態で貯蔵を行う場合は、緩衝体の経年変
化についても考慮していること。

』

【確認内容】

『

- (1) 安全機能を維持する上で重要な兼用キャスクの構成部材は、兼用キャスクの最低
使用温度における低温脆性を考慮したものであること。また、設計貯蔵期間中の温
度、放射線等の環境及び当該環境下での腐食、クリープ、応力腐食割れ等の経年変
化の影響を、設計入力値（例えば、寸法、形状、強度及び材料物性値）又は設計基
準値の算定に際し考慮していること。さらに、必要に応じて防食措置等が講じられ
ていること。
- (2) 兼用キャスク内部の不活性環境を維持し、温度を制限される範囲に収めること
により、兼用キャスクに収納される使用済燃料の経年変化を低減又は防止する設計で
あること。

』

2. 要求事項への適合性

審査ガイドでは、兼用キャスクの有する安全機能（臨界防止機能、遮蔽機能、除熱機能及び閉じ込め機能）に係る設計の基本方針の妥当性を確認することが定められており、兼用キャスクの材料・構造健全性については、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) 安全機能を維持する上で重要な兼用キャスクの構成部材は、兼用キャスクの最低使用温度における低温脆性を考慮したものであること。また、設計貯蔵期間中の温度、放射線等の環境及び当該環境下での腐食、クリープ、応力腐食割れ等の経年変化の影響を、設計入力値（例えば、寸法、形状、強度及び材料物性値）又は設計基準値の算定に際し考慮していること。さらに、必要に応じて防食措置等が講じられていること。
- (2) 兼用キャスク内部の不活性環境を維持し、温度を制限される範囲に収めることにより、兼用キャスクに収納される使用済燃料の経年変化を低減又は防止する設計であること。

MSF-24P 型は、主要な構成部材について、設計貯蔵期間（60 年）中の温度、放射線等の環境及びその環境下での腐食等の経年変化に対して信頼性を有する材料（第 1 表）及び構造とし、MSF-24P 型の最低使用温度における低温靱性を考慮した上で、使用済燃料の健全性を維持する設計とする。

また、MSF-24P 型は、キャスク本体内面、バスケット及び使用済燃料の腐食等を防止するために、使用済燃料収納時にその内部空間を真空乾燥し、使用済燃料を不活性ガスであるヘリウムとともに封入して貯蔵する設計とする。さらに、キャスク本体及び蓋部表面の必要な箇所には、塗装等による防錆処理を講ずる。

設計貯蔵期間中の温度、放射線等の環境及び当該環境下での腐食、クリープ、応力腐食割れ等の経年変化要因に対する影響について、第 2 表から第 4 表に示す MSF-24P 型の構成部材の温度及び放射線照射量を条件として、文献及び試験データに基づき評価した。MSF-24P 型の主要な構成部材及び使用済燃料（燃料被覆管）の評価結果を第 4 表に示す。評価結果より、経年変化要因に対して、主要な構成部材の経年変化を考慮した上で、使用済燃料の健全性が維持されることを確認した。

第1表 MSF-24P型の主要な構成部材の材質

構成部材	材質
キャスク本体	
胴	炭素鋼 (GLF1) (注1)
外筒	炭素鋼 (SGV480) (注2)
底部中性子遮蔽材カバー	ステンレス鋼 (SUS304) (注3)
下部端板	ステンレス鋼 (SUS304) (注3)
トラニオン	析出硬化系ステンレス鋼 (SUS630) (注3)
伝熱フィン	銅 (C1020)
中性子遮蔽材 (底部、側部)	レジン (エポキシ系樹脂)
バスケット	
バスケットプレート	アルミニウム合金 (MB-A3004-H112)
中性子吸収材	ほう素添加アルミニウム合金
蓋部	
一次蓋	炭素鋼 (GLF1) (注4)
蓋部中性子遮蔽材カバー	炭素鋼 (SGV480) (注4)
二次蓋	炭素鋼 (GLF1) (注4)
貯蔵用三次蓋	ステンレス鋼 (SUS304)
一次蓋ボルト	ニッケルクロムモリブデン鋼 (SNB23-3) (注5)
二次蓋ボルト	ニッケルクロムモリブデン鋼 (SNB23-3) (注5)
貯蔵用三次蓋ボルト	ニッケルクロムモリブデン鋼 (SNB23-3) (注5)
中性子遮蔽材 (蓋部)	レジン (エポキシ系樹脂)
金属ガスケット	ニッケル基合金/アルミニウム
貯蔵用緩衝体	
緩衝材	木材 (オーク材・米スキ材・バルサ材)
カバープレート・リブ	ステンレス鋼
貯蔵用緩衝体ボルト	ニッケルクロムモリブデン鋼 (SNB23-3) (注5)

(注1) 胴の表面のうち、一次蓋、二次蓋及び貯蔵用三次蓋との接触面は [] を、胴内面には [] を、また、胴外面のうち、大気に触れる部分については、塗装を施す。

(注2) 外筒の外表面には、塗装を施す。

(注3) 底部中性子遮蔽材カバー、下部端板及びトラニオンの外表面には、使用環境を考慮し、必要に応じ防錆措置を施す。

(注4) 一次蓋及び二次蓋のうち、胴との接触面は [] を、また、その他の表面には、メッキを施す。また、蓋部中性子遮蔽材カバーの外表面にはメッキを施す。

(注5) 一次蓋ボルト、二次蓋ボルト、貯蔵用三次蓋ボルト及び貯蔵用緩衝体ボルトの表面には、メッキを施す。

[] 内は商業機密のため、非公開とします。

第2表 MSF-24P型の主要な構成部材及び使用済燃料の温度条件（最高温度）

部材		最高温度 ^(注1) (°C)
MSF- 24P型	胴	140
	外筒	120
	底部中性子遮蔽材カバー	125
	下部端板	120
	トラニオン	125
	伝熱フィン	120
	中性子遮蔽材（蓋部、底部、側部）	135
	バスケットプレート	185
	中性子吸収材	185
	一次蓋	115
	蓋部中性子遮蔽材カバー	115
	二次蓋	110
	貯蔵用三次蓋	110
	一次蓋ボルト	115
	二次蓋ボルト	110
	貯蔵用三次蓋ボルト	110
	金属ガスケット	115
	緩衝材	120
	カバープレート・リブ	120
貯蔵用緩衝体ボルト	120	
使用済燃料（燃料被覆管）		215

(注1) 仕様上の最大崩壊熱量 15.8kW を上回る設計崩壊熱量 18.1kW を適用した除熱解析により得られた温度（設計温度）である。本温度は、屋外貯蔵時及び貯蔵建屋内貯蔵時を包絡する温度設定としている（補足説明資料 16-4 「除熱機能に関する説明資料(L5-95JY213)」参照）。

第3表 MSF-24P型の緩衝材温度条件

部材		
MSF- 24P型	緩衝材	

内は商業機密のため、非公開とします。

第4表 MSF-24P型の主要な構成部材及び使用済燃料の放射線照射量

部材		中性子照射量 (n/cm ²) (注1)
MSF- 24P型	胴	6.9×10^{14}
	外筒	3.7×10^{12}
	底部中性子遮蔽材カバー及び下部端板	8.4×10^{13}
	トラニオン	6.9×10^{14} (注2)
	伝熱フィン	1.6×10^{14}
	中性子遮蔽材 (蓋部、底部、側部)	1.6×10^{14}
	バスケットプレート及び中性子吸収材	1.5×10^{15}
	蓋部 (注3)	2.5×10^{14}
貯蔵用緩衝体 (注4)	9.8×10^{12}	
使用済燃料 (燃料被覆管)		1.5×10^{15}

(注1) 遮蔽解析結果 (補足説明資料 16—3 「遮蔽機能に関する説明資料 (L5-95JY212)」参照) から得られた貯蔵初期の中性子束が減衰せず設計貯蔵期間 (60年間) 中一定であると仮定して算出した設計貯蔵期間中の累積値。

(注2) トラニオンの中性子照射量は保守的に胴の値と同じとした。

(注3) 一次蓋、蓋部中性子遮蔽材カバー、二次蓋、貯蔵用三次蓋、一次蓋ボルト、二次蓋ボルト、貯蔵用三次蓋ボルト及び金属ガスケットを含む。

(注4) 緩衝材、カバープレート・リブ及び緩衝体ボルトを含む。

内は商業機密のため、非公開とします。

第4表 MSF-24P型の主要な構成部材及び使用済燃料の経年変化に対する評価について(1/4)

部材及び材質	要因	主な評価の観点	各部材の材質に対する経年変化に係わるデータ	設計条件	評価
胴、外筒(内面)、一次蓋、蓋部中性子遮蔽材カバー、二次蓋(内面)、一次蓋ボルト 【材質】 炭素鋼 ニッケルクロム モリブデン鋼	腐食	●構造強度： 腐食による構造強度の低下	・1%燃料破損相当の燃料棒内ガス中のヨウ素ガスを含む実機模擬環境における、鉄系材料の最大腐食速度により、60年間の腐食量を推定しても0.5mm程度 ⁽¹⁾ 。	使用環境： ・ヘリウム雰囲気 ・中性子遮蔽材と接触	・胴(内面)、一次蓋、蓋部中性子遮蔽材カバー(外面)、二次蓋(内面)及び一次蓋ボルトは、不活性雰囲気維持される限り、腐食しない。仮に1%燃料破損相当の燃料棒内ガスの存在を考慮しても、胴(内面)の腐食による構造強度への影響はない。 ・胴(外面)、外筒(内面)及び蓋部中性子遮蔽材カバー(内面)は、中性子遮蔽材と接しており、中性子遮蔽材の熱劣化により水が生じるが、酸化鉄の生成により酸素の拡散障壁が形成されること、及び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による構造強度への影響はない。
	熱	●構造強度： 熱によるき裂・破損	・金属キャスク構造規格 ⁽²⁾ (設計・建設規格(2007年追補版) ⁽³⁾ 適用)では、-30℃から350℃までの設計用強度・物性値が規定されている。 ・クリープによる変形を考慮すべき温度(融点[絶対温度]の1/3に相当)は約300℃ ⁽⁴⁾⁽⁵⁾ 。 ・-20℃において低温脆性破壊のおそれはない ⁽⁶⁾ 。	使用環境温度： -20℃～140℃	設計用強度・物性値が規定されており、熱により亀裂・破損することはない温度範囲で使用するため、構造強度への影響はない。
	照射	●構造強度： 照射による機械的特性の変化	・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認められない ⁽⁷⁾ 。	中性子照射量： 10^{15}n/cm^2 以下	中性子照射量は、機械的特性に変化が認められる値以下であり、構造強度への影響はない。
外筒(外面)、二次蓋(外面)、二次蓋ボルト、貯蔵用三次蓋ボルト、貯蔵用緩衝体ボルト 【材質】 炭素鋼 ニッケルクロム モリブデン鋼	腐食	●構造強度： 腐食による構造強度の低下	・防錆効果を考慮せず炭素鋼の全面腐食を仮定して算出したところ、6mm程度(60年間×腐食進展速度0.1mm/年 ⁽⁸⁾)。	使用環境： 外気(海塩粒子雰囲気)、結露水	外筒(外面)、二次蓋(外面)、二次蓋ボルト、貯蔵用三次蓋ボルト及び貯蔵用緩衝体ボルトは防錆処理により腐食しない。
	熱	●構造強度： 熱によるき裂・破損	・金属キャスク構造規格 ⁽²⁾ (設計・建設規格(2007年追補版) ⁽³⁾ 適用)では、-30℃から350℃までの設計用強度・物性値が規定されている。 ・クリープによる変形を考慮すべき温度(融点[絶対温度]の1/3に相当)は約300℃ ⁽⁴⁾⁽⁵⁾ 。 ・-20℃において低温脆性破壊のおそれはない ⁽⁶⁾ 。	使用環境温度： -20℃～120℃	設計用強度・物性値が規定されており、熱により亀裂・破損することはない温度範囲で使用するため、構造強度への影響はない。
	照射	●構造強度： 照射による機械的特性の変化	・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認められない ⁽⁷⁾ 。	中性子照射量： 10^{15}n/cm^2 以下	中性子照射量は、機械的特性に変化が認められる値以下であり、構造強度への影響はない。
貯蔵用三次蓋、底部中性子遮蔽材カバー、下部端板、トランニオン、カバープレート・リブ 【材質】 ステンレス鋼 析出硬化系ステンレス鋼	腐食	●構造強度： 腐食による構造強度の低下	・0.2%耐力相当の応力を負荷した条件における海浜環境での長期曝露試験において、応力腐食割れは認められない ⁽⁹⁾ 。	使用環境： ・外気(海塩粒子雰囲気)、結露水 ・中性子遮蔽材と接触	・実機より厳しい使用環境(応力及び雰囲気)においても応力腐食割れは発生せず、腐食による構造強度への影響はない。 ・底部中性子遮蔽材カバー、下部端板及びトランニオンの内面は中性子遮蔽材と接しており、中性子遮蔽材の熱劣化により水が生じるが、ステンレス鋼は耐食性に優れていることに加え、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による構造強度への影響はない。
	熱	●構造強度： 熱によるき裂・破損	・金属キャスク構造規格 ⁽²⁾ (設計・建設規格(2007年追補版) ⁽³⁾ 適用)では、-30℃から350℃又は425℃までの設計用強度・物性値が規定されている。 ・クリープによる変形を考慮すべき温度(融点[絶対温度]の1/3に相当)は約280℃ ⁽⁴⁾ 。 ・-20℃において低温脆性破壊のおそれはない ⁽⁶⁾ 。	使用環境温度： -20℃～125℃	設計用強度・物性値が規定されており、熱により亀裂・破損することはない温度範囲で使用するため、構造強度への影響はない。
	照射	●構造強度： 照射による機械的特性の変化	・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認められない ⁽¹⁰⁾ 。	中性子照射量： 10^{15}n/cm^2 以下	中性子照射量は、機械的特性に変化が認められる値以下であり、構造強度への影響はない。
伝熱フィン 【材質】 銅	腐食	●除熱機能： 腐食によるき裂・破損	・胴(炭素鋼)-外筒(炭素鋼)の閉鎖環境であり、銅の電極電位は鉄に比べて高く、イオン化傾向の低い金属である ⁽¹¹⁾ ため、銅は腐食しない。 ・密閉静止した淡水環境における銅が接続された鋼の腐食試験において、腐食速度は鋼単体の場合と同程度 ⁽¹²⁾ 。	使用環境： ・胴と外筒間の閉鎖環境 ・中性子遮蔽材と接触	銅に比べて鉄はイオン化傾向の高い金属であり、炭素鋼が選択的に腐食されることから、伝熱フィンがき裂・破損することはない。また、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、伝熱フィンと胴及び外筒との接合部において異種金属接触による腐食促進の影響は小さく、除熱機能への影響はない。
	熱	●除熱機能： 熱によるき裂・破損	・日本産業規格(JIS)では-30℃から200℃までの設計用強度・物性値が規定されている ⁽¹³⁾ 。 ・-20℃において低温脆性破壊のおそれはない ⁽⁶⁾ 。	使用環境温度： -20℃～120℃	設計用強度・物性値が規定されており、熱により亀裂・破損することはない温度範囲で使用するため、除熱機能への影響はない。
	照射	●除熱機能： 照射によるき裂・破損	・中性子照射量が 10^{16}n/cm^2 程度までは、顕著な機械的特性変化は認められない ⁽¹⁴⁾ 。	中性子照射量： 10^{15}n/cm^2 以下	中性子照射量は、機械的特性に変化が認められる値以下であり、除熱機能への影響はない。

第4表 MSF-24P型の主要な構成部材及び使用済燃料の経年変化に対する評価について(2/4)

部材及び材質	要因	主な評価の観点	各部材の材質に対する経年変化に係わるデータ	設計条件	評価
バスケットプレート 【材質】 アルミニウム合金	腐食	●構造強度： 腐食による構造強度の低下	・使用済燃料収納時における使用済燃料プール水(ほう酸水)による腐食量は0.127mm/年以下 ⁽¹⁵⁾ 。 ・金属キャスク内部に残留する酸素量が全てバスケットの腐食に費やされたとして評価しても、腐食量は1μm以下 ⁽¹⁾ 。	使用環境： ヘリウム雰囲気	不活性雰囲気維持される限り、腐食しない。なお、使用済燃料収納時に使用済燃料プール水中に置かれる期間は最大でも数日程度であり腐食による構造強度への影響はない。
	熱	●構造強度： 熱によるき裂・破損	・バスケットプレートに用いるアルミニウム合金は-40℃から250℃までの温度において、設計貯蔵期間中の熱による材料特性変化を考慮した材料特性試験データに基づき設計用強度・物性値を設定 ⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾ 。 ・バスケットプレートに用いるアルミニウム合金は、クリープひずみが0.1%から1.0%程度の範囲において、クリープひずみが材料の機械的特性に影響を与えることはない ⁽¹⁾ 。 ・設計貯蔵期間経過後のクリープひずみが0.1%となるためには10MPa以上の応力が必要 ⁽¹⁶⁾ であるが、貯蔵中にバスケットプレートに発生する応力は1MPa以下。 ・初期材及び設計貯蔵期間中の熱による材料変化を考慮した材料においても、-40℃において低温脆性破壊のおそれはない ⁽¹⁶⁾ 。	使用環境温度： -20℃～185℃以下	設計用強度・物性値が規定されており、熱により亀裂・破損することはない温度範囲で使用するため、構造強度への影響はない。
	照射	●構造強度： 照射による機械的特性の変化	・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認められない。 ⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾	中性子照射量： 10^{16}n/cm^2 以下	中性子照射量は、機械的特性に変化が認められる値以下であり、構造強度への影響はない。
中性子吸収材 【材質】 ほう素添加 アルミニウム合金	腐食	●臨界防止機能： 腐食による臨界防止機能の低下	・中性子吸収材内に存在する炭化ほう素は耐化学薬品性も大きいことから酸・アルカリに侵されることはない ⁽²⁰⁾ 。 ・使用済燃料収納時における使用済燃料プール水(ほう酸水)による腐食量は0.127mm/年以下 ⁽¹⁵⁾ 。 ・金属キャスク内部に残留する酸素量が全てバスケットの腐食に費やされたとして評価しても、腐食量は1μm以下 ⁽¹⁾ 。	使用環境： ヘリウム雰囲気	不活性雰囲気維持される限り、腐食しない。なお、使用済燃料プール水中に置かれる期間は最大でも数日程度であり、腐食による臨界防止機能への影響はない。
	熱	●臨界防止機能： 熱による臨界防止機能の低下	・中性子吸収材内に存在する炭化ほう素の融点は約2350℃であり、熱に対して安定性を有している ⁽²⁰⁾ 。 ・アルミニウム及びアルミニウム合金の融点は約600℃である ⁽¹⁵⁾ 。	使用環境温度： -20～185℃以下	使用環境温度は、600℃よりも十分低く、臨界防止機能への影響はない。
	照射	●臨界防止機能： 中性子照射による臨界防止機能の低下	・ ^{10}B の設計貯蔵期間(60年間)中の減損割合は、保守的に全中性子束を用いて評価しても 10^{-5} 程度。 ・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認められない ⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾ 。	中性子照射量： 10^{16}n/cm^2 以下	^{10}B の減損割合は無視でき、また、中性子照射量は、機械的特性に変化が認められる値以下であり、臨界防止機能への影響はない。
中性子遮蔽材 【材質】 エポキシ樹脂	熱・腐食	●遮蔽機能： 重量減少の有無	・(独)原子力安全基盤機構「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認試験)報告書」 ⁽²¹⁾ に記載されているデータ及び熱解析結果に基づき、熱による設計貯蔵期間経過後の中性子遮蔽材の質量減損率は、1.9%と評価(別紙1参照)。	使用環境温度： -20～135℃以下 使用環境： 閉鎖環境	遮蔽設計では、設計貯蔵期間及び使用環境温度を考慮した質量減損率(1.9%)を評価したうえで、これに余裕を加えて2.5%の質量減損があるとして、中性子遮蔽材の原子個数密度を保守的に設定し、遮蔽機能への影響を考慮している。
	照射	●遮蔽機能： 重量減少の有無	・中性子照射後(10^{15}n/cm^2)の耐熱試験結果によれば、照射による質量減損は認められない ⁽¹⁾⁽²²⁾ 。	中性子照射量： 10^{15}n/cm^2 以下	中性子照射量は、質量減損が認められない条件以下であり、遮蔽機能への影響はない。

第4表 MSF-24P型の主要な構成部材及び使用済燃料の経年変化に対する評価について (3/4)

部材及び材質	要因	主な評価の観点	各部材の材質に対する経年変化に係わるデータ	設計条件	評価
金属ガスケット 【材質】 ニッケル基合金 アルミニウム	腐食	●閉じ込め機能： 腐食による閉じ込め機能の低下	・蓋部縮小モデルにおける約3年間の塩水噴霧試験では、漏えい率に変化はない ⁽²³⁾ 。	使用環境： 一次蓋、二次蓋内側： ヘリウム雰囲気 二次蓋外側： 外気（海塩粒子雰囲気）、結露水	一次蓋及び二次蓋の金属ガスケット内側は、不活性雰囲気は維持される限り、腐食しない。二次蓋の金属ガスケット外側は、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はなく、閉じ込め機能への影響はない。
	熱	●閉じ込め機能： 熱による閉じ込め機能の低下	・初期の閉じ込め機能 ($1 \times 10^{-10} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$) を保持できる限界ラウン・ミラー・パラメータ (LMP) は約 11.0×10^3 (150°Cで100年以上閉じ込め機能を維持可能に相当) ⁽²⁴⁾ 。 ・長期密封性能試験において130~140°C (19年以上) で閉じ込め性能維持した ⁽²⁵⁾ 。設計貯蔵期間を60年とした場合に長期密封性能試験と同じLMPとなる金属ガスケットの初期温度は134°Cであり、この温度以下とすれば閉じ込め機能は維持される ⁽²⁵⁾ 。	使用環境温度： -20°C~115°C以下	使用環境温度は、130°Cよりも低く、閉じ込め機能への影響はない。
	照射	●閉じ込め機能： 照射による機械的特性の変化	・ニッケル基合金は中性子照射量が 10^{21}n/cm^2 程度までは顕著な機械的特性変化は認められない ⁽²⁶⁾ 。 ・アルミニウムは中性子照射量が 10^{19}n/cm^2 程度以下では、顕著な機械的特性変化は認められない ⁽²⁷⁾ 。	中性子照射量： 10^{15}n/cm^2 以下	中性子照射量は、各材料の機械的特性に変化が認められる値以下であり、閉じ込め機能への影響はない。
緩衝材 【材質】 木材 (オーク材、米スギ材、バルサ材)	腐食	●緩衝性能： 腐食による緩衝性能の低下			
	熱	●緩衝性能： 熱による緩衝性能の低下			
	照射	●緩衝性能： 照射による緩衝性能の低下			

第4表 MSF-24P型の主要な構成部材及び使用済燃料の経年変化に対する評価について(4/4)

部材及び材質	要因	主な評価の観点	各部材の材質に対する経年変化に係わるデータ	設計条件	評価
燃料被覆管 【材質】 ジルカロイ	腐食	●腐食による亀裂・破損	・残留水分が10wt%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 ⁽¹⁸⁾ 。	使用環境： ヘリウム雰囲気	燃料被覆管は、不活性雰囲気が維持される限り、腐食による影響はなく、亀裂・破損しない。
	熱	●熱による亀裂・破損	<ul style="list-style-type: none"> ・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⁽³³⁾。 ・クリープひずみの進行による燃料被覆管の破損については、予測式に基づく累積クリープひずみが1%以下となるよう温度を制限することで防止できる⁽³³⁾。以下に示す燃料被覆管の水素化物再配向に係る制限範囲では、累積クリープひずみが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、300℃近傍である⁽³³⁾。しきい値以下であれば照射硬化の回復の可能性は小さく、使用済燃料被覆管の温度を制限することにより照射硬化の回復を防止できる。 ・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、燃料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275℃以下、周方向応力が100MPa以下と求められており、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できる⁽³³⁾。 ・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⁽³³⁾。 	使用環境温度： -20℃～215℃以下	熱による経年変化要因のうち、燃料被覆管中の水素化物再配向を防止することにより、他の発生も同時に防ぐことができる。設計貯蔵期間中の燃料被覆管の温度及び周方向応力は、275℃及び100MPaを超えないことから、熱による影響はなく、亀裂・破損しない。
	照射	●照射による亀裂・破損	・ジルコニウム合金は中性子照射量が炉内の中性子照射量($10^{21} \sim 10^{22}$ n/cm ²)に対して十分低い場合、照射の影響は無視し得る ⁽³³⁾ 。	中性子照射量： 10 ¹⁶ n/cm ² 以下	中性子照射量は、機械的特性に変化が認められる値以下であり、亀裂・破損しない。

3. 参考文献

- (1) (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).
- (2) (一社)日本機械学会,「使用済燃料貯蔵施設規格 金属キャスク構造規格 (JSME S FA1-2007)」, (2007).
- (3) (一社)日本機械学会,「発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (2005 年版) <第 I 編 軽水炉規格> (JSME S NC1-2005 (2007 年追補版含む))」, (2007).
- (4) ステンレス協会,「ステンレス鋼便覧 (第 3 版)」, (1995).
- (5) (一社)日本金属学会,「金属便覧 (改訂 6 版)」, (2000).
- (6) (一社)日本原子力学会,「使用済燃料・混合酸化物新燃料・高レベル放射性廃棄物輸送容器の安全設計及び検査基準 : 2013 (AESJ-SC-F006 : 2013)」, (2013).
- (7) K. Farrell, S. T. Mahmood, R. E. Stoller, L. K. Mansur, “An Evaluation of Low Temperature Radiation Embrittlement Mechanisms in Ferritic Alloys” , Journal of Nuclear Materials, Vol. 210, (1994).
- (8) (一社)腐食防食協会編,「腐食・防食ハンドブック (第 2 版)」, (2005).
- (9) R. R. Gaugh, “Stress Corrosion Cracking of Precipitation-Hardening Stainless Steels” , Materials Performance, Vol. 26, No. 2, (1987).
- (10) 土肥謙次, 秀耕一郎, 黛正己, 恩地健雄, 大岡紀一,「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).
- (11) 北村義治, 鈴木紹夫,「防蝕技術 (第 2 版)」, (2002).
- (12) 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).
- (13) (一財)日本規格協会,「圧力容器の設計 (JIS B 8267 : 2015)」, (2015).
- (14) S. J. Zinkle, G. L. Kulcinski, “Low-Load Microhardness Changes in 14-MeV Neutron Irradiated Copper Alloys” , ASTM STP888, (1986).
- (15) (一社)日本アルミニウム協会,「アルミニウムハンドブック (第 8 版)」, (2017).
- (16) 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).
- (17) 前口貴治, 川原慶幸, 山本隆一, 崎間公久, 玉置廣紀,「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).
- (18) (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 (AESJ-SC-F002 : 2010)」, (2010).
- (19) T. Maeguchi, Y. Kamiwaki, D. Ishiko, T. Yamamoto, “Development and Reliability

- Verification of Aluminum Alloys for Basket of Transport and Storage Cask for Spent Nuclear Fuel”, Proceedings of the 15th International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials, (2007).
- (20) 吉村壽次, 「化学辞典 (第2版)」, (2009).
- (21) (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).
- (22) T. Ichihashi, D. Ishiko, A. Ogawa, M. Morishima, “Verification Tests of Neutron Shielding Materials and Shielding Assessment”, Proceedings of the 15th International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials, (2007).
- (23) 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).
- (24) 加藤治, 伊藤千浩, (一財)電力中央研究所, 「使用済燃料貯蔵容器用ガasketの長期密封特性」, (1992).
- (25) (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).
- (26) T. T. Claudson, “Cladding and Structural Materials Semi-Annual Progress Report”, HEDL-TME 75-77, (1975).
- (27) H. Yoshida, et al., “Reactor Irradiation Effects on Al 1100”, Proc. Jpn. Congr. Mater. Res., Vol. 24, (1981).
- (28) 桃原郁夫, 「木材腐朽のメカニズムとその防止」, 木材保存 Vol. 42-3, (2016).
- (29) (公社)土木学会 鋼構造工学委員会 木橋技術小委員会, 木材技術の手引き.2005, (2005).
- (30) 北原覚一, 「木材物理」, 森北出版, (1974).
- (31) M.A. Millett, C.C. Gerhards, “Accelerated Aging: Residual Weight and Flexural Properties of Wood Heated in Air at 115°C to 175°C”, Wood Science Vol. 4(4), (1972).
- (32) T. Aoki, M. Norimoto, T. Yamada, “Some Physical Properties of Wood and Cellulose Irradiated with Gamma Rays”, Wood Research No. 62, (1977).
- (33) 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).

別紙 1 中性子遮蔽材の質量減損率について

設計貯蔵期間経過後の中性子遮蔽材の質量減損率の評価を行い、経年劣化を考慮した原子個数密度を遮蔽解析に用いている。

質量減損率は、劣化パラメータにより次式で表される⁽¹⁾。

$$\Delta w = 5.69 \times 10^{-4} \times E_p - 19.2$$

ここで、

Δw : 中性子遮蔽材の質量減損率 (%)

E_p : 劣化パラメータ

$$E_p = T \times (77.6 + \ln(t))$$

T : 中性子遮蔽材温度 (K)

t : 中性子遮蔽材加熱時間 (h)

貯蔵中は、使用済燃料の崩壊熱量の低下に伴い、中性子遮蔽材の温度も低下するが、設計評価期間経過後の中性子遮蔽材の質量減損率算定においては、保守的に貯蔵開始直後の中性子遮蔽材の最高温度が設計評価期間にわたり一定として質量減損率を算定する。設計貯蔵期間初期の中性子遮蔽材の設計温度は 135°C である。

上記を基にすれば、質量減損率は 1.9 % と算定される。遮蔽解析ではこれを切り上げて 2.5 % の質量減損があるとして評価する。

なお、中性子遮蔽材から放出される成分は水が支配的であり、水よりも水素含有率が高いガス成分はわずかである。したがって、遮蔽解析においては、中性子の遮蔽性能を安全側に設定するため、中性子遮蔽材の質量減損の成分を全て水とし、この質量減損分を遮蔽体として無視している。

(参考文献)

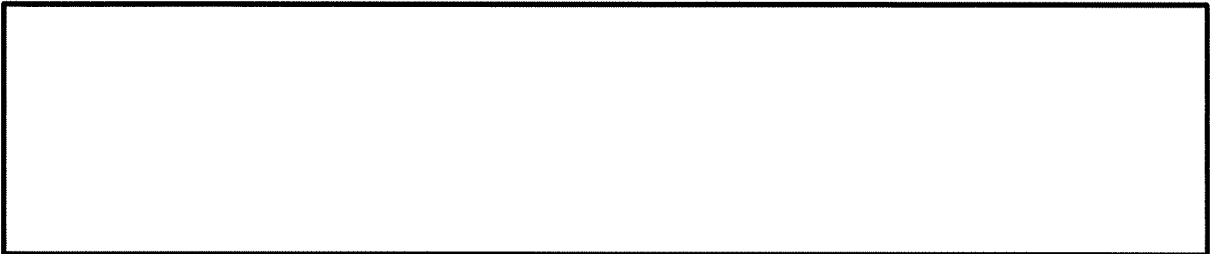
- (1) (財) 原子力発電技術機構, 「平成 14 年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等 (金属キャスク貯蔵技術確証試験) 報告書」, (2003).

別紙 2 緩衝材（木材）の熱による強度低下について

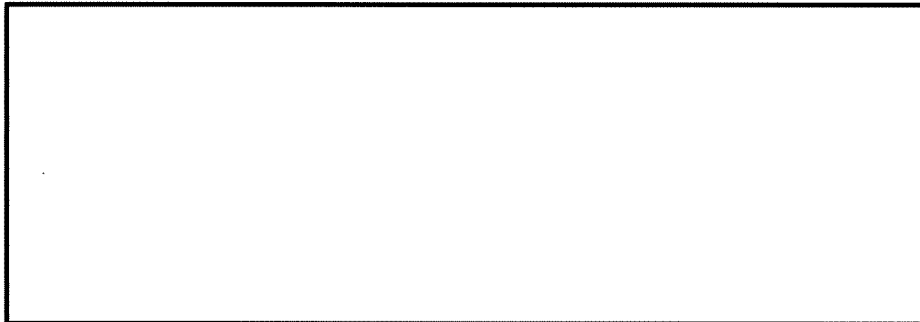
1. 熱による強度低下の概要

緩衝材に用いる木材の強度は、高温では減少し、低温では増加する。短期的に木材が高温となる場合には木材強度は可逆的であるが、木材を高温で長期間保持すると、不可逆的に強度が低下する現象が生じる。したがって、緩衝材の温度及び貯蔵期間を基に緩衝材の強度低下量を評価する。

2. MSF-24P 型の緩衝材温度

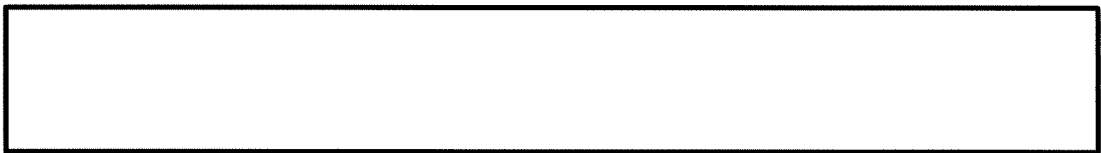


別紙 2 - 1 表 緩衝材の温度

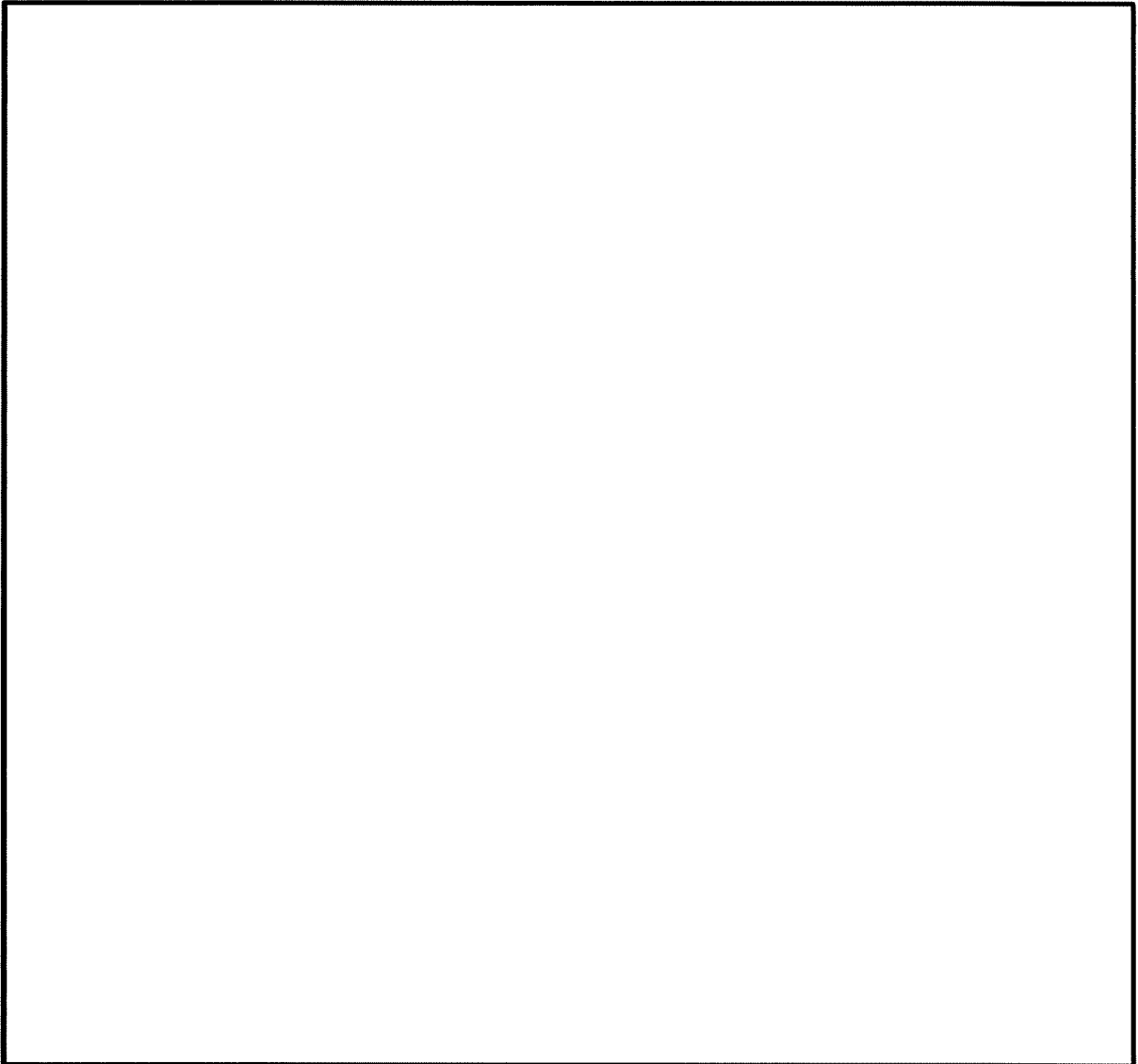


(注 1) 最大崩壊熱量の () 値は、MSF-24P 型の除熱評価上の入力条件としている設計崩壊熱量（最大崩壊熱量に対し約 14% 保守的な設定）を示す。

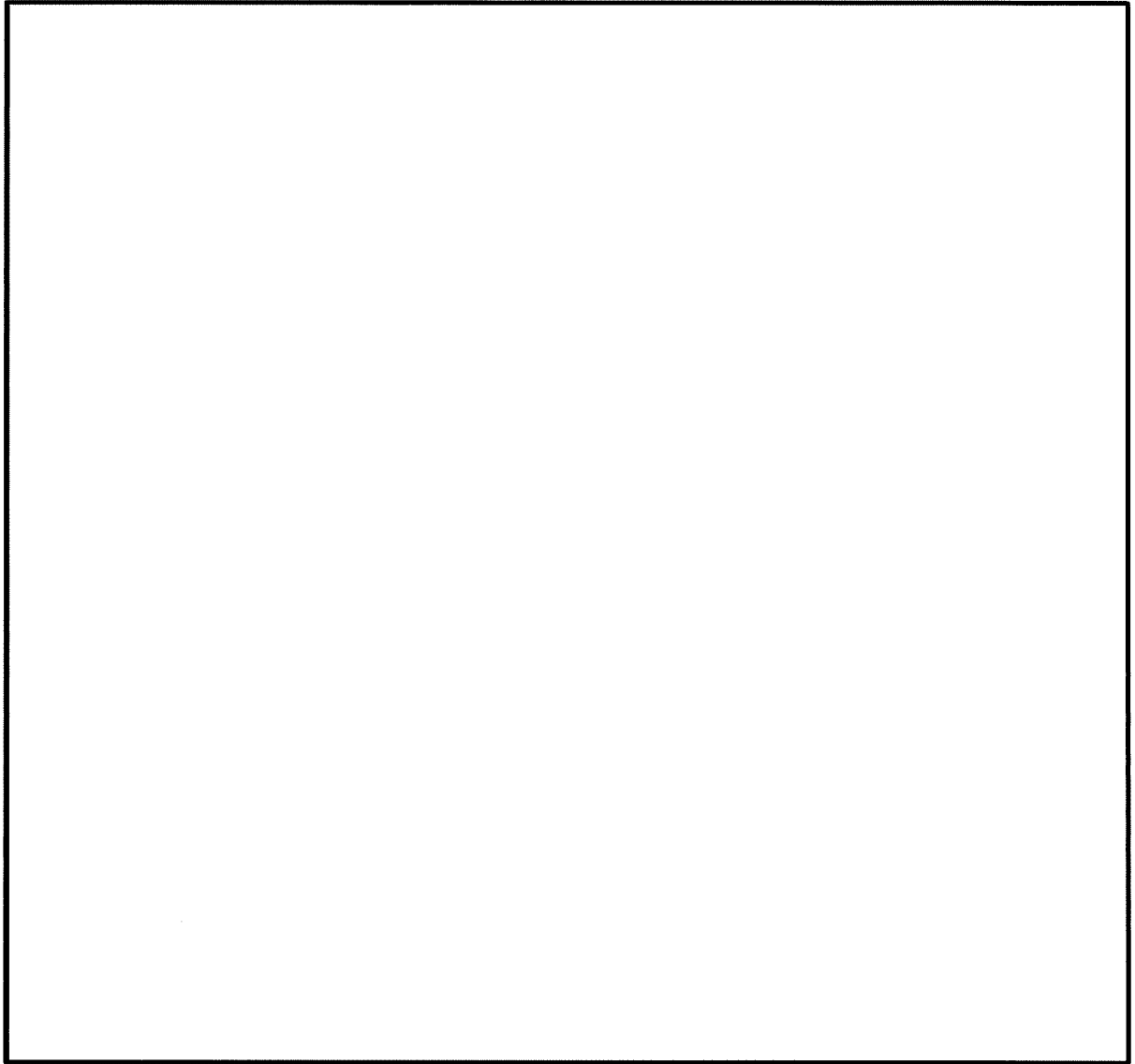
(注 2)



3. 熱による強度低下の算定



<熱曝露期間算定の保守性について>

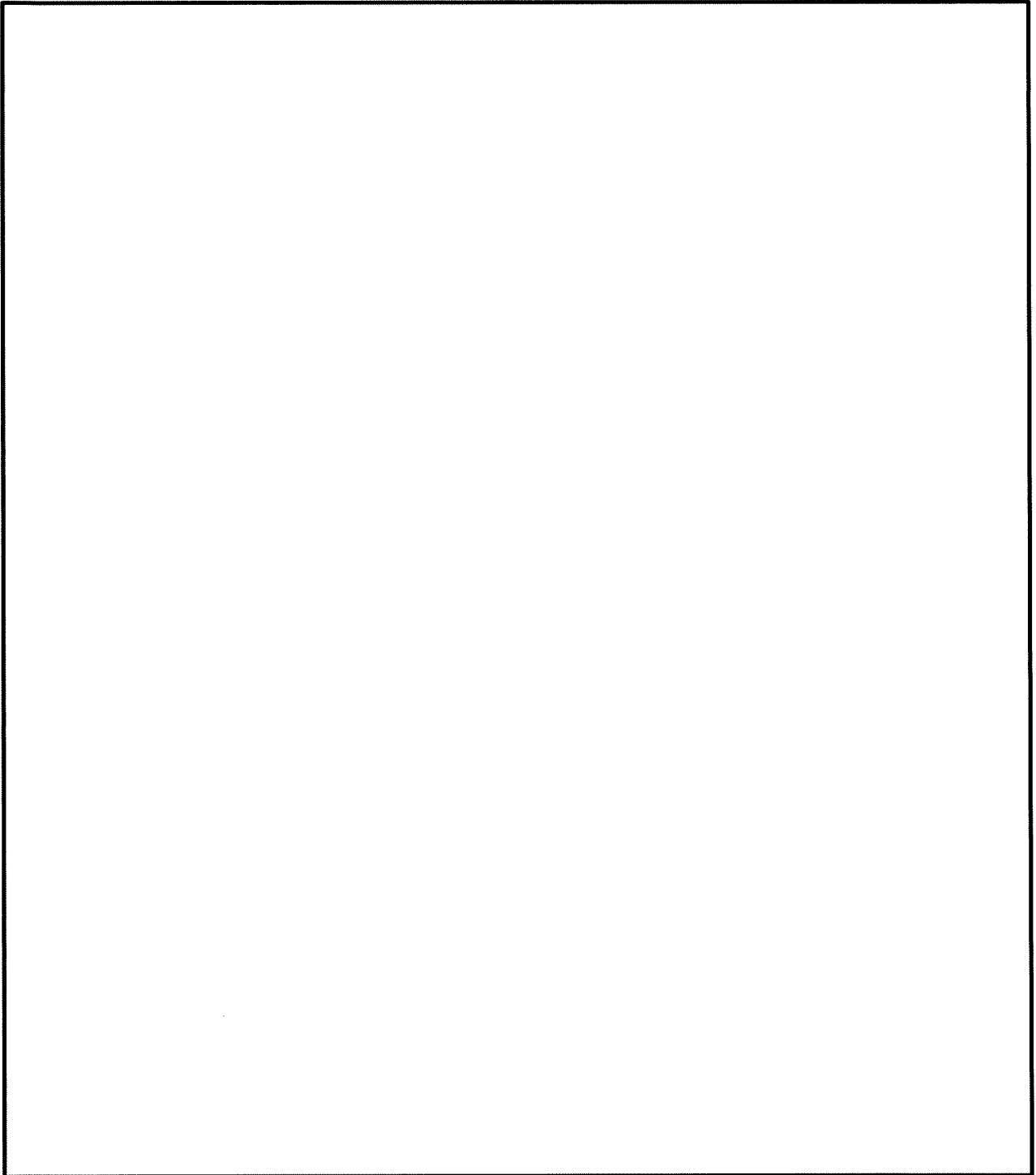


無断複製・転載禁止 三菱重工業株式会社

内は商業機密のため、非公開とします。

別紙 2-3

<引用文献の適切性について>



無断複製・転載禁止 三菱重工業株式会社

内は商業機密のため、非公開とします。

別紙 2-4

4. 型式証明申請における について

[Empty box for content]

5. 構造強度評価における強度低下の考慮について

6. 後段申請（設置（変更）許可申請）への引継ぎ事項について

別紙 2 - 5 表(1/2) 使用済燃料集合体の仕様 (収納条件)

項 目		仕 様			
使用済燃料集合体の種類		17×17 燃料			
		48,000MWd/t 型		39,000MWd/t 型	
		A型	B型	A型	B型
形 状	集 合 体 幅	約 214 mm			
	全 長	約 4100 mm			
質 量		約 680 kg			
燃料集合体 1 体の仕様	初 期 濃 縮 度 (集合体平均)	4.2 wt%以下		3.7 wt%以下	
	最高燃焼度 ^(注1)	48,000 MWd/t		39,000 MWd/t	
	冷 却 期 間	15 年以上	17 年以上	15 年以上	17 年以上
兼用キャスク 1 基当たりの仕様	収 納 体 数	24 体			
	平均燃焼度 ^(注2)	44,000 MWd/t 以下			
	崩 壊 熱 量	15.8 kW 以下 ^(注3)			

(注 1) 最高燃焼度とは、収納する燃料集合体 1 体の燃焼度の最大値を示す。

(注 2) 平均燃焼度とは、収納する全燃料集合体に対する燃焼度の平均値を示す。

(注 3) 17×17 燃料のうち、最も崩壊熱量の大きい 48,000MWd/t (A型) が MSF-24P 型 1 基あたりの平均燃焼度 44,000MWd/t まで燃焼後、15 年冷却して 24 体収納した場合の崩壊熱量を基に設定した値。

別紙 2 - 5 表 (2/2) 使用済燃料集合体の仕様 (収納条件)

項 目		仕 様			
使用済燃料集合体の種類		15×15 燃料			
		48,000MWd/t 型		39,000MWd/t 型	
		A 型	B 型	A 型	B 型
形 状	集 合 体 幅	約 214 mm			
	全 長	約 4100 mm			
質 量		約 670 kg			
燃料集合体 1 体の仕様	初 期 濃 縮 度 (集合体平均)	4.1 wt%以下		3.5 wt%以下	
	最高燃焼度 ^(注1)	48,000 MWd/t		39,000 MWd/t	
	冷 却 期 間	15 年以上	17 年以上	15 年以上	17 年以上
兼用キャスク 1 基当たりの仕様	収 納 体 数	24 体			
	平均燃焼度 ^(注2)	44,000 MWd/t 以下			
	崩 壊 熱 量	15.8 kW 以下 ^(注3)			

(注 1) 最高燃焼度とは、収納する燃料集合体 1 体の燃焼度の最大値を示す。

(注 2) 平均燃焼度とは、収納する全燃料集合体に対する燃焼度の平均値を示す。

(注 3) 15×15 燃料のうち、最も崩壊熱量の大きい 48,000MWd/t (A 型) が MSF-24P 型 1 基あたりの平均燃焼度 44,000MWd/t まで燃焼後、15 年冷却して 24 体収納した場合の崩壊熱量を基に設定した値。

7. 参考文献

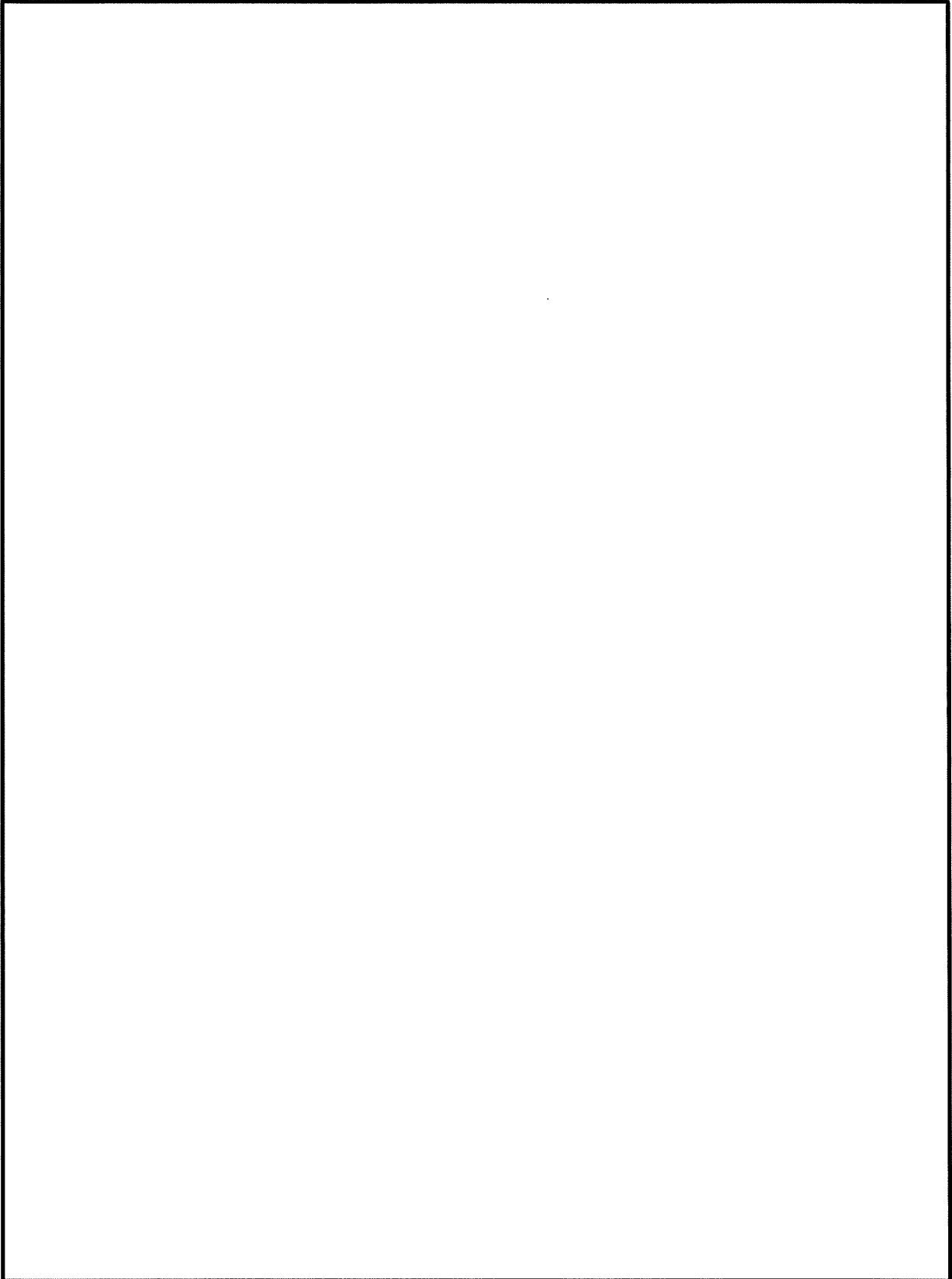
- (1) M.A. Millett, C.C. Gerhards, "Accelerated Aging: Residual Weight and Flexural Properties of Wood Heated in Air at 115°C to 175°C", Wood Science Vol.4(4), (1972).

別紙 3 における除熱解析条件

1. 概要

MSF-24P 型に収納する における除熱解析は、設置許可基準規則第 16 条第 4 項二号（除熱機能）の適合性説明（補足説明資料 16-4 「除熱機能に関する説明資料(L5-95JY213)」参照）において実施した除熱解析モデルを用いて、崩壊熱量の条件を変更して実施した。なお、17×17 燃料収納時と 15×15 燃料収納時で温度差は殆どないため、

2. 崩壊熱条件



(注) 使用済燃料集合体 24 体分の崩壊熱量を示す。

別紙 3 - 1 図 の使用済燃料集合体 (燃料有効部) の
軸方向崩壊熱量分布

無断複製・転載禁止 三菱重工業株式会社

内は商業機密のため、非公開とします。