

Doc. No. MA035A-RC-F01 Rev.1

2020年11月25日

日立造船株式会社

補足説明資料 1-2

Hitz-B52 型の経年変化に関する説明資料

目 次

1) 設計方針-----	1
2) Hitz-B52 型の構成部材-----	2
3) 経年変化に関する評価条件-----	2
4) 経年変化に関する評価結果-----	2
5) 参考文献-----	3

別紙 1 中性子遮蔽材の熱分解により生じる水分による胴及び外筒の腐食量評価



1. 設計方針

Hitz-B52 型は、基本的安全機能を維持するうえで重要な構成部材について、設計貯蔵期間中の温度、放射線等の環境、並びにその環境下での腐食等の経年変化に対して十分に信頼性のある材料を選定し、それらの構成部材に必要とされる強度、性能を維持し、必要な安全機能を損なうことのないように設計する。また、Hitz-B52 型は、金属キャスク本体内面、バスケット及び使用済燃料集合体の腐食等を防止するために、不活性ガスを封入する設計とする。さらに、金属キャスク表面の必要な箇所には、塗装等による防錆措置を施す。

2. Hitz-B52 型の構成部材

Hitz-B52 型の主要な構成部材の材質を表 1 に示す。Hitz-B52 型は、基本的安全機能を維持するうえで重要な構成部材について、設計貯蔵期間中の温度、放射線の環境及びその環境下での腐食等の経年変化に対して十分な信頼性のある材料を選定している。

3. 経年変化に対する評価条件

Hitz-B52 型の基本的安全機能を維持するうえで重要な構成部材の経年変化に対する評価条件を以下に示す。

- ・ 金属キャスク内面、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、不活性ガスであるヘリウムを適切に封入し、使用済燃料を貯蔵する。
- ・ 設計貯蔵期間は 60 年間とする。
- ・ Hitz-B52 型の構成部材の温度は、除熱解析結果より表 2 に示す条件とする。
- ・ Hitz-B52 型の構成部材の中性子照射量は、遮蔽解析結果より表 3 に示す条件とする。

4. 経年変化に対する評価結果

Hitz-B52 型の基本的安全機能を維持するうえで重要な構成部材について、設計貯蔵期間における環境条件（熱、放射線、腐食）の影響を考慮して、文献に基づき、経年変化の影響を評価した。Hitz-B52 型の主要な構成部材毎に評価した具体的内容を表 4 に示す。

評価結果より、設計貯蔵期間中の温度、放射線等の環境及びその環境下での腐食等の経年変化に対して、主要な構成部材の健全性を維持できることを確認した。

5. 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 最終報告」(平成 16 年 6 月)、P.217-222
- (2) (一財) 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」、(平成 15 年 3 月)、P.537
- (3) (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 (2007 年版) (JSME S FA1-2007)」、(2007 年 12 月)
- (4) (一社) 日本機械学会、「発電用原子力設備規格 設計・建設規格<第 I 編 軽水炉規格> (JSME S NC1-2007)」、(2007 年 9 月)
- (5) ステンレス協会、「ステンレス鋼便覧 (第 3 版)」、日刊工業新聞社 (1995)、P.216、P.1428
- (6) (一社) 日本機械学会、「金属便覧 (改訂 6 版)」、丸善 (株) (平成 12 年)、P.475
- (7) K. Farrell, et al., “An evaluation of low temperature radiation embrittlement mechanisms in ferritic alloys”, *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 210, (1994)
- (8) (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 7 版)」(2007)、P.32、P.76
- (9) R. R. Gaugh, “Stress corrosion cracking of precipitation-hardening stainless steels”, *Materials Performance*, Vol. 26, No.2 (1987)、P.31-P.34
- (10) 土肥謙次ら、「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 (平成 9 年 6 月)、P.10
- (11) 腐食防食協会、「腐食・防食ハンドブック」、丸善 (2000)、P.18
- (12) (一財) 日本規格協会、「圧力容器の設計 (JIS B 8267 : 2015)」、(一財) 日本規格協会 (2015)
- (13) S. J. Zinkle, G. L. Kulcinski, “Low-Load Microhardness Changes in 14-MeV Neutron Irradiated Copper Alloys”, *The use of small scale specimens for testing irradiated material*, ASTM STP888 (1986)、P.154
- (14) H. Yoshida, et al., “Reactor irradiation effects on Al 1100”, *Proc. Jpn. Congr. Mater. Res* Vol. 24, P.1-6 (1981)
- (15) 吉村壽次、「化学辞典 (第 2 版)」、森北出版 (2009)、P.815
- (16) “NS-4-FR Fire Resistant Neutron and/or Gamma Shielding Material” BISCO PRODUCTS, INC, 6/23/86 (1986)
- (17) 小崎明朝、「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)、P.114
- (18) 東京電力 (株)、「福島第一原子力発電所 既設乾式貯蔵キャスクの点検報告」(平成

1

1

1

25年5月31日)

- (19) 加藤治、伊藤千浩、「使用済燃料貯蔵容器用ガスケットの長期密封特性」、(一財)電力中央研究所 (U92009) (平成4年7月)、P.531-P.533
- (20) (一財)電力中央研究所、「使用済燃料貯蔵の基礎」、P67-P73、(株)ERC出版、(2014年4月20日)
- (21) (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」(平成22年3月)、P.13-P.19
- (22) W.J. Mills, “Deformation and Fracture Characteristics for Irradiate Inconel X-750”, Nuclear Technology, American Nuclear Society, Vol.73, 102 (1986) 、P.105
- (23) S. Shirai, et al., “Evaluation Test on the Thermal Stability of Resin as Neutron Shielding Material for Spent Fuel Transport Cask”, Proc. the 12th Int. Conf. on PATRAM (1998) 、P.1645-P.1652

1

1

表 1 Hitz-B52 型の主要な構成部材の材質

構成部材	材 質
金属キャスク本体	
胴	炭素鋼*1
底板	炭素鋼*1
外筒	炭素鋼*2
底部中性子遮蔽材カバー	炭素鋼*2
トランニオン	析出硬化型ステンレス鋼
伝熱フィン	銅
中性子遮蔽材（底部、側部）	樹脂（レジン）
バスケット	
コンパートメント、 <u>スペーサー</u>	炭素鋼*3
サポートプレート、 <u>上部プレート、下部プレート、フランジプレート、クランプ、ストッパー、ボルト</u>	ステンレス鋼
中性子吸収材	ほう素添加アルミニウム合金
伝熱部材	アルミニウム合金
蓋部	
一次蓋	ステンレス鋼
二次蓋	炭素鋼*4
一次蓋ボルト	合金鋼*5
二次蓋ボルト	合金鋼*5
中性子遮蔽材（蓋部）	樹脂（レジン）
蓋部中性子遮蔽材カバー	ステンレス鋼
金属ガスケット	ニッケル基合金/アルミニウム合金

1

注記*1：胴の表面のうち、一次蓋、二次蓋の [] を、胴及び底板の内面には [] を、胴及び底板の外面のうち大気に触れる部分については塗装を施す。

*2：外筒及び底部中性子遮蔽材カバーの外表面には、塗装を施す。

*3：コンパートメント表面には、 [] を施す。

*4：二次蓋の、胴の [] を、胴の内面側には [] を、大気に触れる部分は塗装を施す。

*5：一次蓋ボルト及び二次蓋ボルトの表面には、メッキを施す。

表 2 Hitz-B52 型の主要な構成部材の温度条件

構成部材	最高温度*1 (°C)
胴	123
底板	145
外筒	112
一次蓋	119
二次蓋	87
蓋部中性子遮蔽材カバー	92
底部中性子遮蔽材カバー	121
一次蓋ボルト	97
二次蓋ボルト	88
中性子遮蔽材（蓋部、底部、側部）*2	129
金属ガスケット	95
コンパートメント*3	236
中性子吸収材	236
サポートプレート*4	164
伝熱部材	146
伝熱フィン	117
トラニオン	121

注記*1：除熱解析から得られた結果を示す。

*2：蓋部、底部及び側部の中性子遮蔽材のうちの最も高い温度を示す。

*3：スペーサーを含む。

*4：上部プレート、下部プレート、フランジプレート、クランプ、ストッパー及びボルトを含む。

1

表 3 Hitz-B52 型の主要な構成部材の中性子照射量

構成部材	中性子照射量*1 (n/cm ²)
胴及び底板	1.6×10 ¹⁵
外筒*2	1.6×10 ¹⁵
トラニオン*2	1.6×10 ¹⁵
蓋部*3	1.6×10 ¹⁴
中性子遮蔽材（蓋部、底部、側部）*4	1.9×10 ¹⁴
バスケット*5	3.6×10 ¹⁵
伝熱フィン	1.9×10 ¹⁴

注記*1：遮蔽解析結果から得られた中性子束が 60 年間一定であると仮定して算出した値。

*2：外筒及び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。

*3：一次蓋、二次蓋、蓋部中性子遮蔽材カバー、一次蓋ボルト、二次蓋ボルト及び金属ガスケットを含む。

*4：蓋部、底部及び側部の中性子遮蔽材のうち、中性子照射量の最も高くなる場所を選定した。

*5：コンパートメント、スペーサー、サポートプレート、上部プレート、下部プレート、フランジプレート、クランプ、ストッパー、ボルト、中性子吸収材及び伝熱部材を含む。

表 4 Hitz-B52 型の主要な構成部材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 (内面、中性子遮蔽材接触部)、底板 (内面、中性子遮蔽材接触部)、外筒 (内面)、二次蓋 (内面)、一次蓋ボルト 【材質】 炭素鋼 合金鋼	腐食	●構造強度： 腐食による構造強度の低下	<ul style="list-style-type: none"> 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⁾である。 胴 (中性子遮蔽材接触部) 及び外筒 (内面) が全面腐食すると仮定して算出したところ、0.5mm 程度。(別紙 1) 	使用環境： ・ヘリウム雰囲気 ・中性子遮蔽材と接触	<ul style="list-style-type: none"> 胴 (内面)、二次蓋 (内面) 及び一次蓋ボルトは、不活性雰囲気が維持される限り、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 (中性子遮蔽材接触部) 及び外筒 (内面) は、中性子遮蔽材の熱劣化により生じる水による全面腐食を考慮しても、構造強度への影響はない。
	熱	●構造強度： 熱によるき裂・破損	<ul style="list-style-type: none"> 金属キャスク構造規格⁽³⁾ (設計・建設規格 (2007 年追補版)⁽⁴⁾適用) では、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 300℃⁽⁵⁾⁽⁶⁾。 	使用環境温度： 150℃以下	<ul style="list-style-type: none"> 使用環境温度は、300℃よりも十分低く、クリープを考慮する必要はないため、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	<ul style="list-style-type: none"> 中性子照射量が 10¹⁶n/cm² までは、顕著な特性変化は認められない (図 1)。 	中性子照射量： 1.6×10 ¹⁵ n/cm ² 以下 (60 年間一定)	<ul style="list-style-type: none"> 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。
胴 (外面)、底板 (外面)、外筒 (外面)、二次蓋 (外面)、二次蓋ボルト、底部中性子遮蔽材カバー 【材質】 炭素鋼 合金鋼	腐食	●構造強度： 腐食による構造強度の低下	<ul style="list-style-type: none"> 各種金属材料の 16 年間の海浜大気暴露試験結果から、最も定常腐食速度の大きい炭素鋼のデータ (21µm/年) で 60 年間の腐食量を推定しても 1.26mm 程度⁽⁸⁾である (図 4)。 	使用環境： ・外気 (海塩粒子雰囲気) ・結露水	<ul style="list-style-type: none"> 外筒 (外面)、二次蓋 (外面) 及び二次蓋ボルトは防錆処理により腐食しない。なお、防錆処理の補修が困難であるキャスク本体底部について、防食効果を考慮せず評価しても、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	<ul style="list-style-type: none"> 金属キャスク構造規格⁽³⁾ (設計・建設規格 (2007 年追補版)⁽⁴⁾適用) では、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℃⁽⁵⁾⁽⁶⁾。 	使用環境温度： 125℃以下	<ul style="list-style-type: none"> 使用環境温度は、300℃よりも十分低く、クリープを考慮する必要はないため、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	<ul style="list-style-type: none"> 中性子照射量が 10¹⁶n/cm² までは、顕著な特性変化は認められない (図 1)。 	中性子照射量： 1.6×10 ¹⁵ n/cm ² 以下 (60 年間一定)	<ul style="list-style-type: none"> 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。
一次蓋、蓋部中性子遮蔽材カバー【材質】 ステンレス鋼	腐食	●構造強度： 腐食による構造強度の低下	<ul style="list-style-type: none"> 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 (ステンレス鋼) の最大腐食速度により、60 年間の腐食量を推定しても 10µm 程度⁽¹⁾である。 	使用環境： ・ヘリウム雰囲気	<ul style="list-style-type: none"> 一次蓋蓋部中性子遮蔽材カバーは、不活性雰囲気が維持される限り、腐食しない。
	熱	●構造強度： 熱によるき裂・破損	<ul style="list-style-type: none"> 金属キャスク構造規格⁽³⁾ (設計・建設規格 (2007 年追補版)⁽⁴⁾適用) では、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℃⁽⁵⁾。 	使用環境温度： 125℃以下	<ul style="list-style-type: none"> 使用環境温度は、280℃よりも十分低く、クリープを考慮する必要はないため、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	<ul style="list-style-type: none"> 中性子照射量が 10¹⁷n/cm² までは、顕著な特性変化は認められない (図 2)。 	中性子照射量： 1.6×10 ¹⁴ n/cm ² 以下 (60 年間一定)	<ul style="list-style-type: none"> 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。

△1

△1

△1

△1

表4 Hitz-B52型の主要な構成部材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
トランニオン 【材質】 析出硬化型 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、応力腐食割れに対する高い耐食性が確認された(9)。	使用環境： ・外気(海塩粒子雰囲気) ・結露水	・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に対する高い耐食性を有し、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(3)(設計・建設規格(2007年追補版)(4)適用)では、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℃(5)。	使用環境温度： 125℃以下	・使用環境温度は、280℃よりも十分低く、クリープを考慮する必要はないため、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、顕著な特性変化は認められない(図2)。	中性子照射量： $1.6 \times 10^{15}\text{n/cm}^2$ 以下 (60年間一定)	・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、銅に比べて鉄はイオン化傾向の高い金属であるため、銅は腐食しない。(11)	使用環境： ・胴と外筒間の閉鎖環境 ・中性子遮蔽材と接触	・胴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ため、除熱機能への影響はない。
	熱	●除熱機能： 熱によるき裂・破損	・日本工業規格(JIS)では200℃までの設計用強度・物性値が規定されている。(12)	使用環境温度： 120℃以下	・使用環境温度は、200℃よりも低く、熱によりき裂・破損することはないため、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 までは、顕著な特性変化は認められない。(13)	中性子照射量： $1.9 \times 10^{14}\text{n/cm}^2$ 以下 (60年間一定)	・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、使用環境において、き裂・破損することはないため、除熱機能への影響はない。
コンパートメント、 スペーサー 【材質】 炭素鋼	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)である。	使用環境： ・ヘリウム雰囲気	・コンパートメント及びスペーサーは、不活性雰囲気が維持される限り、腐食しない。 ・コンパートメント及びスペーサーは、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(3)(設計・建設規格(2007年追補版)(4)適用)では、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℃(5)(6)。	使用環境温度： 240℃以下	・使用環境温度は、300℃よりも十分低く、クリープを考慮する必要はないため、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、顕著な特性変化は認められない(図1)。	中性子照射量： $3.6 \times 10^{15}\text{n/cm}^2$ 以下 (60年間一定)	・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。
サポートプレート、 上部プレート、下部 プレート、フランジ プレート、クランプ、 ストッパー、ボルト 【材質】 ステンレス鋼	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(ステンレス鋼)の最大腐食速度により、60年間の腐食量を推定しても $10\mu\text{m}$ 程度(1)である。	使用環境： ・ヘリウム雰囲気	・サポートプレート、 <u>上部プレート</u> 、 <u>下部プレート</u> 、 <u>クランプ</u> 、 <u>ストッパー</u> 及び <u>ボルト</u> は、不活性雰囲気が維持される限り、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(3)(設計・建設規格(2007年追補版)(4)適用)では、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℃(5)。	使用環境温度： 165℃以下	・使用環境温度は、280℃よりも十分低く、クリープを考慮する必要はないため、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、顕著な特性変化は認められない(図2)。	中性子照射量： $3.6 \times 10^{15}\text{n/cm}^2$ 以下 (60年間一定)	・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。

△1

△1

△1

△1

表 4 Hitz-B52 型の主要な構成部材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
伝熱部材 【材質】 アルミニウム合金	腐食	●除熱機能： 腐食によるき裂・破損	・金属キャスク内部に残留する酸素量が全て伝熱部材（アルミニウム合金）の腐食に費やされたとしても、腐食量は 1μm 以下。(1)	使用環境： ・ヘリウム雰囲気	・伝熱部材は、不活性雰囲気維持される限り、腐食しない。
	熱	●除熱機能： 熱によるき裂・破損	・構造強度部材として使用する場合は、使用温度に応じてクリープによる強度の低下を考慮する必要がある。	使用環境温度： 150℃以下	・構造強度部材ではないため、クリープを考慮する必要はないため、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^{19}n/cm^2 程度までは引張強度への影響はない(14)。	中性子照射量： $3.6 \times 10^{15}\text{n/cm}^2$ 以下 (60年間一定)	・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。
中性子吸収材 【材質】 ほう素添加 アルミニウム合金	腐食	●未臨界機能： 腐食による未臨界機能の低下	・中性子吸収材に存在する炭化ほう素は科学的に安定であり、酸・アルカリによる腐食はない(15)。 ・1%燃料破損相当の燃料棒内ガス中のよう素ガスを含む実機模擬環境における、アルミニウム合金の平均酸化膜厚さは 1μm 以下。(1)	使用環境： ・ヘリウム雰囲気	・不活性ガス雰囲気が維持される限り、腐食の影響はないため、臨界防止機能への影響はない。仮に 1%燃料破損相当の燃料棒内ガス中のヨウ素ガスの存在を考慮しても、臨界防止機能への影響はない。
	熱	●未臨界機能： 熱による未臨界機能の低下	・中性子吸収材に存在する炭化ほう素の融点は 2000℃以上であり、熱に対して安定性を有している。(15)	使用環境温度： 240℃以下	・炭化ほう素は使用環境温度に対して熱的に安定であり、臨界防止機能への影響はない。
	照射	●未臨界機能： 照射による未臨界機能の低下	・ ^{10}B の 60 年の設計貯蔵期間中の減損割合は、保守的に全中性子束を用いて評価しても 1.4×10^{-5} 以下。 ・中性子照射量が 10^{19}n/cm^2 程度までは引張強度への影響はない(14)。	中性子照射量： $3.6 \times 10^{15}\text{n/cm}^2$ 以下 (60年間一定)	・ ^{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るため、未臨界機能への影響はない。
中性子遮蔽材 【材質】 樹脂（エポキシ系 レジン）	熱・腐食	●遮蔽機能： 重量減損の有無	・(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証試験）報告書」(2)に記載されているデータに基づいて、熱による中性子遮蔽材の重量減損率は最大 1.5%と評価（図 3）。	使用環境温度： 130℃以下 使用環境： ・閉鎖環境	・設計貯蔵期間中の温度の低下を考慮すると、設計貯蔵期間経過時までの樹脂の質量減損量は最大 1.5%となるが、これを考慮して評価を行っている。
	照射	●遮蔽機能： 重量減損の有無	・中性子遮蔽材である樹脂は 10^4Gy 程度のガンマ線照射量、又は 10^{15}n/cm^2 程度の中性子照射量が、質量減損に影響を与えることはない(2)(16)。	放射線照射量： $1.3 \times 10^3\text{Gy}$ 以下 $1.9 \times 10^{14}\text{n/cm}^2$ 以下 (60年間一定)	・照射中加熱試験は設計条件を超える照射量で行っており、照射による質量減損を考慮する必要はない。

△1

△1

△1

表 4 Hitz-B52 型の主要な構成部材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
金属ガスケット 【材質】 ニッケル基合金 アルミニウム合金	腐食	●閉じ込め機能： 腐食による閉じ込め機能の低下	<ul style="list-style-type: none"> 金属ガスケットの外皮のアルミニウム合金は外気に触れることになるが、各種金属材料の 16 年間の海浜大気曝露試験結果から、アルミニウム合金のデータ(0.25μm)で 60 年の腐食量を推定しても 0.15 μm 程度⁽⁸⁾である (図 4)。 蓋部縮小モデルにおける 3 年間の塩水噴霧試験では、漏えい率に変化はない (図 5)。(17) 長期保管後の海水流入時においても漏えい率は判定基準値以下であり、ただちに漏えい率に影響はない。(18) 	使用環境： 一次、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	<ul style="list-style-type: none"> 一次蓋及び二次蓋内側の金属ガスケットは、不活性雰囲気維持される限り、腐食しない。二次蓋外側の金属ガスケットは、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。また、海水流入のような厳しい腐食環境におかれても、ただちに閉じ込め機能に影響はなく、金属キャスクを点検可能な構造としているため、必要に応じて対応可能である。
	熱	●閉じ込め機能： 熱による閉じ込め機能の低下	<ul style="list-style-type: none"> 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ソン・ミラー・パラメータ (LMP) は、定数 C が 20 の場合は約 11.0×10^3⁽¹⁹⁾、14 の場合は 8.0×10^3⁽²⁰⁾。 長期密封性能試験⁽²¹⁾において 130°C~140°C (19 年以上) で閉じ込め性能維持。 	使用温度： 100°C以下	<ul style="list-style-type: none"> 使用環境温度から設計貯蔵期間 (60 年間) に相当する LMP を算出すると LMP の定数 C=20 の場合は約 9.6×10^3、C=14 の場合は約 7.4×10^3 となり、設計貯蔵期間を通じて初期の漏えい率が維持されると判断される。
	照射	●閉じ込め機能： 照射による機械的 特性の変化	<ul style="list-style-type: none"> ニッケル基合金は中性子照射量が 10^{21}n/cm^2 までは機械的性質は変化しない⁽²²⁾。 アルミニウムは中性子照射量が 10^{19}n/cm^2 程度以下では機械的性質に顕著な変化はない⁽¹⁴⁾。 	中性子照射量： $1.6 \times 10^{14} \text{n/cm}^2$ 以下 (60 年間一定)	<ul style="list-style-type: none"> 中性子照射量は、各材料の機械的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。
二次蓋 (ポートカバー部) 【材質】 ステンレス鋼	腐食	●形状保持： 腐食による形状保持機能の低下	<ul style="list-style-type: none"> 各種金属材料の 16 年間の海浜大気曝露試験結果から、ステンレス鋼のデータ (0.25μm/年) で 60 年間の腐食量を推定しても 15μm 程度⁽⁸⁾である (図 4)。 	使用環境： ・外気 (海塩粒子雰囲気)、 ・結露水	<ul style="list-style-type: none"> 二次蓋 (ポートカバー部) はステンレス鋼であり、仮に防食効果を考慮せず評価しても、腐食による形状保持機能への影響はない。
	熱	●形状保持： 熱によるき裂・破損	<ul style="list-style-type: none"> 金属キャスク構造規格⁽³⁾ (設計・建設規格 (2007 年追補版)⁽⁴⁾ 適用) では、425°C 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°C⁽⁵⁾。 	使用環境温度： 90°C以下	<ul style="list-style-type: none"> 使用環境温度は、280°C よりも十分低く、クリープを考慮する必要はないため、形状保持機能への影響はない。
	照射	●形状保持： 照射による機械的 特性の変化	<ul style="list-style-type: none"> 中性子照射量が 10^{17}n/cm^2 までは、顕著な特性変化は認められない (図 2)。 	中性子照射量： $1.6 \times 10^{14} \text{n/cm}^2$ 以下 (60 年間一定)	<ul style="list-style-type: none"> 中性子照射量は、機械的的特性に変化が認められる値以下であり、形状保持機能への影響はない。

1

1

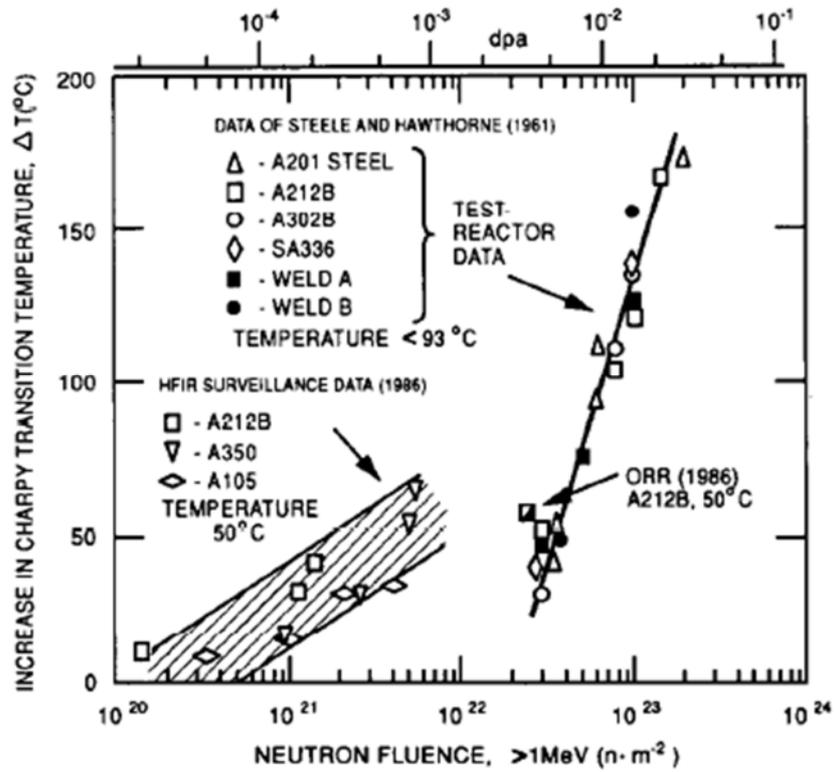


図1 炭素鋼・低合金鋼のシャルピー遷移温度増加と照射量 (n/m^2) の関係⁽⁷⁾
 (図中の中性子照射量の単位 $1 n/m^2$ は、 $1 \times 10^{-4} n/cm^2$)

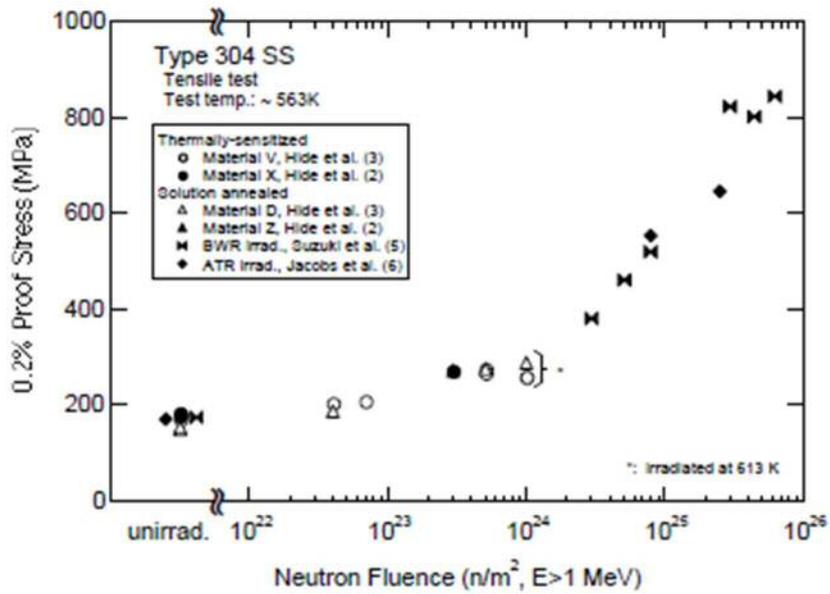


図 3-1. 引張試験時の 0.2%耐力の中性子照射量依存性
Fig. 3-1. Neutron fluence dependence of 0.2% proof stress obtained from tensile tests.

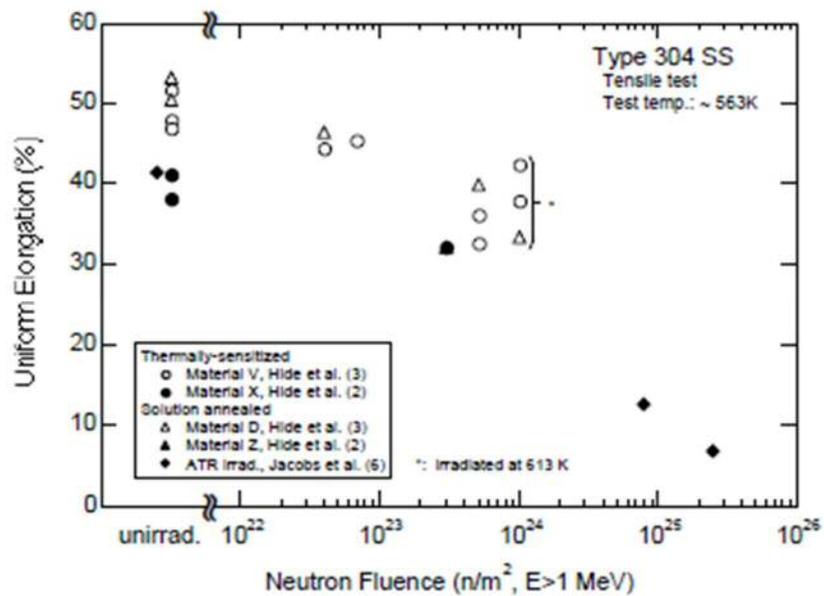
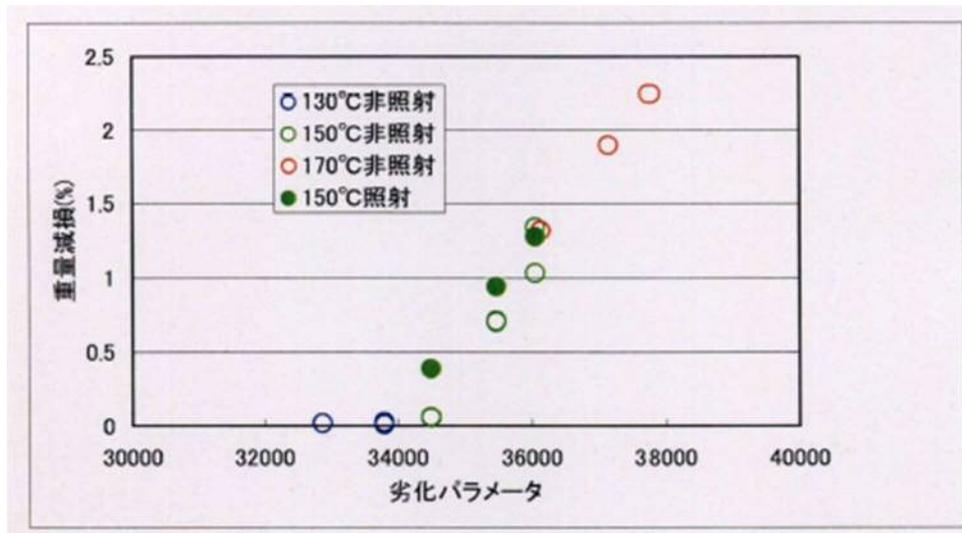


図 3-2. 引張試験時の一様ひずみの中性子照射量依存性
Fig. 3-2. Neutron fluence dependence of uniform elongation obtained from tensile tests.

図 2 ステンレス鋼の中性子照射の影響評価結果⁽¹⁰⁾
(図中の中性子照射量の単位 $1 n/m^2$ は、 $1 \times 10^{-4} n/cm^2$)



$$\Delta w = 5.69 \times 10^{-4} \cdot (T + 273.15)(77.6 + \ln t) - 19.2$$

T : 評価温度 (°C)

t : 評価時間 (h)

劣化パラメータ : $(T + 273.15)(77.6 + \ln t)$

図3 中性子遮蔽材の質量減損データ⁽²⁾
(閉鎖系における質量減損)

表 6.6.13. 各種金属材料の耐食性の比較 (その1) 大気ばく露試験16年の結果

供試材料		海浜大気 ^①					内陸大気 ^②				
種類	合金	腐食量 (g/m ²)	平均侵食 深さ (μm)	定常 腐食 速度 (μm/yr)	孔食深さ		腐食量 (g/m ²)	平均侵食 深さ (μm)	定常 腐食 速度 (μm/yr)	孔食深さ	
					平均 ^③ (mm)	最大 (mm)				平均 ^③ (mm)	最大 (mm)
アルミニウム	1100	8	3	<0.25	<0.13	<0.13	5	2	<0.25	<0.13	<0.13
	6061-T6	8	3	<0.25	<0.13	<0.13	6	2	<0.25	<0.13	<0.13
	Alclad 2024-T6	9	3	<0.25	<0.13	<0.13	5	2	<0.25	<0.13	<0.13
非鉄金属 (純金属)	鉛(99.9%)	228	20	1.3	<0.13	<0.13	161	14	1.0	<0.13	<0.13
	ニッケル(99%)	26	3	<0.25	<0.13	<0.13	21	3	<0.25	<0.13	<0.13
	銅(99.9%)	173	19	0.8	<0.13	<0.13	60	7	0.25	<0.13	<0.13
	亜鉛(99.5%)	294	41	1.8	<0.13	<0.13	98	14	0.8	<0.13	<0.13
非鉄金属 (合金)	モネル(70Ni-30Cu)	49	6	0.25	<0.13	<0.13	30	4	<0.25	<0.13	<0.13
	銅ニッケル(70Cu-30Ni)	93	10	0.5	<0.13	<0.13	62	7	0.5	<0.13	<0.13
	アルミ青銅(95Cu-5Al)	84	10	0.5	<0.13	<0.13	52	6	0.25	<0.13	<0.13
	70/30黄銅(70Cu-30Zn)	72	8	0.5	<0.13	<0.13	54	6	0.25	<0.13	<0.13
鉄 鋼	炭素鋼(0.25C)	3149	402	21	1.30	3.12	2277	290	14	0.56	0.84
	含銅鋼(0.22C-0.3Cu)	2710	345	19	0.76	1.68	1863	237	15	(4)	(4)
	低合金鋼(Corten)	1596	204	10	0.46	0.89	851	108	4.6	0.46	0.69
ステンレス鋼	302(18Cr-8Ni)	3	0.5	<0.25	<0.13	<0.13	0	0	0	<0.13	<0.13
	316(18Cr-13Ni-2.3Mo)	0	0	0	<0.13	<0.13	0	0	0	<0.13	<0.13

注. (1) ばく露場所: Limon Bay (パナマ運河地帯) (2) ばく露場所: Miraflores Locks (パナマ運河地帯) 海岸から8km
 (3) 最も深い20個の平均 (4) データなし

図 4 各種金属材料の耐食性の比較 大気ばく露試験 16 年の結果⁽⁸⁾

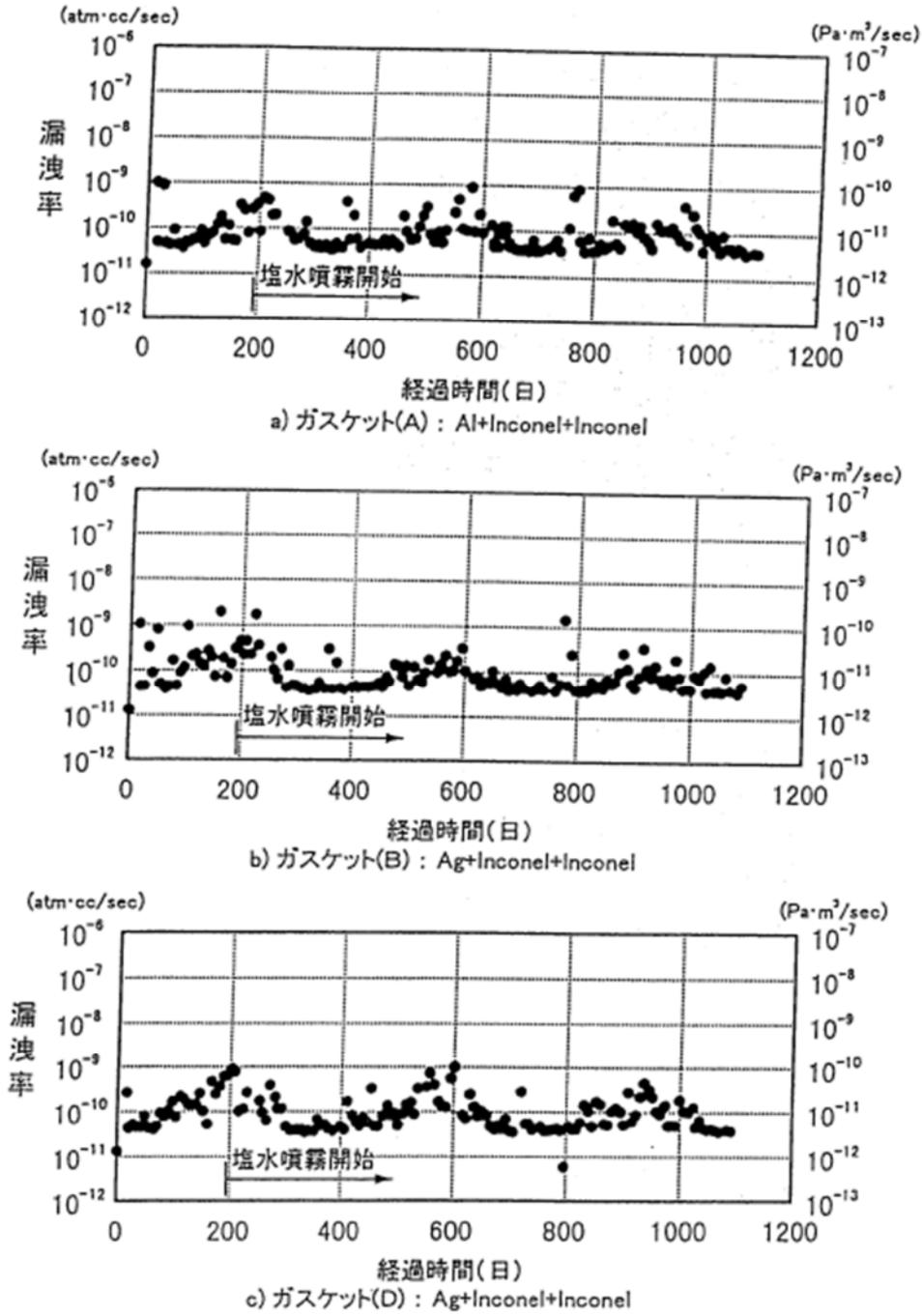


図2. 6. 3-5(1/2) 密封部小モデル試験結果 (金属ガスケット : Heリーク試験)

図5 密封部小モデルの塩水噴霧試験結果⁽¹⁷⁾

別紙 1 中性子遮蔽材の熱分解により生じる水分による胴及び外筒の腐食量評価

Hitz-B52 型で用いる中性子遮蔽材の樹脂 (エポキシ系レジン) は、熱分解により主に水、二酸化炭素が生じる⁽²³⁾。胴の中性子遮蔽材接触部及び外筒内面は、これら生成物により腐食される可能性がある。そこで、中性子遮蔽材の熱分解による生成物を全て水とし、水による胴の中性子遮蔽材接触部及び外筒内面の腐食量を評価する。

1) 生成される水分量

設計貯蔵期間 (60 年) の Hitz-B52 型の中性子遮蔽材の質量減損は、使用環境温度を考慮し評価した wt% を用いる。その全てが水とした場合、側部中性子遮蔽材の長手方向の単位長さあたりの質量から、単位長さあたりに生じる水質量は g/cm と求められる。ここで、水の分子量は 18.01535 g/mol であることから、単位長さあたりに生じる水のモル数 $N_{\text{H}_2\text{O}}$ は mol/cm となる。

2) 腐食量の評価

胴及び外筒は炭素鋼で構成される。なお、炭素鋼は鉄 100% とする。鉄の酸化反応を、 $2\text{Fe} + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{H}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ と仮定すると、単位長さあたりの酸化される鉄の質量 m_{Fe} (g/cm) は以下の式により求められる。

$$m_{\text{Fe}} = \frac{2}{3} N_{\text{H}_2\text{O}} \times M_{\text{Fe}}$$

ここで、

$N_{\text{H}_2\text{O}}$: 単位長さあたりに生じる水のモル数

M_{Fe} : 鉄の原子量 (= 55.845 g/mol)

したがって、

$$\begin{aligned} m_{\text{Fe}} &= \frac{2}{3} \times \text{} \times 55.845 \\ &= \text{} \text{ g/cm} \end{aligned}$$

胴及び外筒の腐食厚さ t (cm) は全面腐食を仮定すると以下の式より求められる。

$$t = \frac{(m_{\text{Fe}} / \rho_{\text{Fe}})}{S}$$

ここで、

ρ_{Fe} : 鉄の密度 (= 7.85 g/cm³)

S : 単位長さあたりの胴中性子遮蔽材接触部及び外筒内面の表面積
(= cm²/cm)

したがって、

$$t = (\text{} / 7.85) / \text{}$$

$$= 0.041 \text{ cm} \rightarrow 0.5 \text{ mm}$$

よって、胴（中性子遮蔽材接触部）及び外筒（内面）の腐食厚さは 0.5mm 程度となる。

Doc. No. MA035A-RC-F02-1 Rev.3

2020年11月25日

日立造船株式会社

使用済燃料貯蔵施設に係る特定容器等の設計の型式証明申請（Hitz-B52型）

質問管理表に対する回答（経年変化関連）

番号	項目	質問日	コメント内容
88	経年変化	2019/2/6	<p>【補足説明資料 1-2 Hitz-B52 型の経年変化に関する説明資料】(Doc.No.MA035A-RC-F01-1 Rev.0) (平成 31 年 2 月 6 日説明資料)</p> <p>・P.2 3. 経年変化に対する評価条件において、金属キャスクの内部空間を真空乾燥状態にした場合、残存する水分量及び酸素量について考慮した金属キャスク内部の部材及び材料について経年変化に対する評価をすること。</p>

(回答) -2019/3/20 済み

真空乾燥時の残留水分によるキャスク内面の酸化減肉量と、その算出過程を以下に示す。

1. 真空乾燥時の残留水分

キャスク内部の腐食要因としては、真空乾燥後に残留する水分と酸素が考えられる。真空乾燥により 700Pa まで減圧したのちにヘリウムガスを 1 気圧まで充填した場合を仮定し、空気の酸素量割合を 23.1wt%、窒素量割合を 76.9wt%とすると、ヘリウムガス充填後にキャビティ内に残留する酸素は 1wt%、窒素は 3.33wt%となる⁽¹⁾。また、ヘリウムガス充填後の残留水分量は 10wt%以下になるように管理される。

キャスク内ガスの物質質量 n は気体の状態方程式より次のとおり表わされる。

$$n = \frac{P \times V}{R \times T}$$

ここで、

P : キャスク内初期圧力 (MPa) = 0.07 MPa

V : キャスク内空間体積 (m^3) = m^3

R : 気体定数 ($J/(mol \cdot K)$) = 8.3144598 $J/mol \cdot K$

T : 温度 (K) = 293.15 K (初期のヘリウム充填時の温度を 20°C と設定)

よって、キャスク内ガスの物質質量は 111.4 mol となる。

キャスク内ガス組成はヘリウム、水、窒素及び酸素を考慮することから、全体のガス重量 m は次の式より求められる。

$$m = \frac{n \times 100}{\left(\frac{R_{He}}{M_{He}} + \frac{R_W}{M_W} + \frac{R_O}{M_O} + \frac{R_N}{M_N} \right)}$$

ここで、

R_{He} : ヘリウムの割合 (wt%) = 85.67 wt%

R_W : 水の割合 (wt%) = 10 wt%

R_O : 酸素の割合 (wt%) = 1 wt%

- R_N : 窒素の割合 (wt%) = 3.33 wt%
 M_{He} : ヘリウム分子のモル質量 (g/mol) = 4.00260 g/mol
 M_W : 水分子のモル質量 (g/mol) = 18.0153 g/mol
 M_O : 酸素分子のモル質量 (g/mol) = 31.9988 g/mol
 M_N : 窒素分子のモル質量 (g/mol) = 28.0134 g/mol

よってキャスク内ガスの重量は 504.0 g となり、水の重量 m_W は 50.4 g、酸素の重量 m_O は 5.04 g となる。また、残留する水の物質質量 n_W 及び酸素の物質質量 n_O は、それぞれ次式により求めることができる。

$$n_W = \frac{m_W}{M_W}$$

$$n_O = \frac{m_O}{M_O}$$

上式より、キャスク内に残留する水の物質質量は 2.798 mol、酸素の物質質量は 0.158 mol となる。

2. キャスク内面の酸化減肉量

キャスク内面の温度を 20°C と仮定すると、飽和水蒸気圧は 2.38kPa であり、キャスク内空間体積における飽和水蒸気量は 67.1 g となり、ヘリウムガス充填後におけるキャスク内の残留水分の重量より大きい。したがって、残留水分はキャスク内空間においてガスとして存在していると考えられ、キャスク内空間における残留水分及び酸素による酸化減肉量の算出にあたっては、キャスク内面にわたる全面腐食として評価する。なお評価に当たっては、キャスクの胴及び底部内面は を行うが、それを無視することとする。

2.1 キャスク内面の表面積

キャスク内面の表面積 S_c は、胴内面積と底板の内側面積の合計であり、次式により求めることができる。

$$S_c = \frac{D_c^2}{4} \times \pi + \pi \times D_c \times L_c$$

ここで、

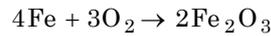
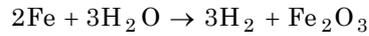
D_c : キャスク内径 (m) = 1.550 m

L_c : キャスク空間長さ (m) = m

以上より、キャスク内面の表面積は m² となる。

2.2 キャスク内酸化減肉量

キャスク内面である胴及び底板は炭素鋼を構造材とすることから、キャスク内の酸化（腐食）反応は炭素鋼の酸化反応と考えられる。鉄の酸化反応は次式で表わされる。



炭素鋼の組成を鉄 100%とすると、酸化される炭素鋼の重量 m_{Fe} は次式より求めることができる。

$$m_{\text{Fe}} = \left(\frac{2}{3} \times n_{\text{W}} + \frac{4}{3} \times n_{\text{O}} \right) \times M_{\text{Fe}}$$

ここで、

$$M_{\text{Fe}} : \text{鉄のモル質量 (g/mol)} = 55.8451 \text{ g/mol}$$

以上より、酸化される炭素鋼の重量は 115.9 g となる。
この時の酸化される炭素鋼の厚さ t_{Fe} は次式にて求めることができる。

$$t_{\text{Fe}} = \frac{m_{\text{Fe}}}{S_c \times \rho_{\text{Fe}}} \times 10^{-6}$$

ここで、

$$\rho_{\text{Fe}} : \text{炭素鋼の密度 (g/cm}^3\text{)} = 7.85 \text{ g/cm}^3$$

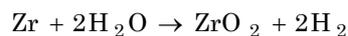
以上より、キャスク内の酸素が全て炭素鋼の酸化に消費されると仮定しても、酸化される炭素鋼の厚さは約 0.7 μm となり、真空乾燥での残存水分量及び酸素量に対する腐食の影響は小さい。

3. 燃料被覆管の酸化減肉量及び水素吸収量

参考として、キャスク内空間における残留水分及び酸素による酸化減肉量の評価に加えて燃料被覆管の残留水分による酸化減肉量及び水素吸収量の評価を行う。

3.1 水素脆化のメカニズム

ジルカロイ-2 が高温水や高温蒸気中で使われた場合の酸化反応は次式で表わされる。



この反応により表面に酸化膜を生じ、上記反応で発生した水素の一部はジルカロイ-2 中に吸収される。

さらに残留空気中の水素量を安全側に $1 \times 10^{-4}\%$ (質量) と仮定⁽¹⁾した場合の水素量も考慮する。

$$m_H(\text{残}) = m \times 1.0 \times 10^{-6} = 0.0005 \text{ g}$$

となる。

3.2 酸化への影響

上記 3.1 で示した酸化反応に対し、1 項で述べた水分中の酸素が全て使われたとすると、酸化物となるジルコニウム (Zr) の量は次のとおりとなる。

$$m_{Zr1} = m_W \times \frac{M_{Zr}}{2M_W}$$

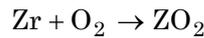
ここで、

M_{Zr} : ジルコニウムのモル質量 (g/mol) = 91.2236 g/mol

m_W : 生成した水の質量 (g) = 50.4 g

よって反応する Zr 量は 127.6g となる。

また、ガス成分としての酸素 (O) と Zr が反応する場合、酸化物となる Zr の量は次のとおりとなる。



であるため、

$$m_{Zr2} = m_{WO} \times \frac{M_{Zr}}{M_O}$$

と表わされる。よって酸素が 5.04g の場合、反応する Zr 量は 14.4g となる。

したがって残留水分及びガス中の酸素と反応する Zr の総量は、142.0g となる。

一方、金属キャスク中の燃料棒被覆管の表面積は、次式によって表わされる。

$$A_f = \pi \times d_o \times L \times a \times N$$

ここで、

d_o : 燃料被覆管外径 (cm) = cm

L : 燃料有効長 (cm) = cm

a : 燃料集合体あたりの燃料棒数 = 60 本

(上記はいずれも Doc.No.MA035A-RC-E-01 Rev.0 別紙 1-1 表より)

N : キャスク一体当たりの収納体数 = 52 体

以上より、燃料被覆管の表面積は $4.470 \times 10^6 \text{ cm}^2$ となる。

したがって、酸化による燃料被覆管 (Zr 密度 : 6.5 g/cm^3) の減肉厚は、

$$\frac{142.0 \text{ g}}{4.470 \times 10^6 \text{ cm}^2} \times \frac{1}{6.5 \text{ g/cm}^3} = 4.89 \times 10^{-6} \text{ cm} = 0.0489 \mu\text{m}$$

となり、無視し得る量である。

3.3 水素脆化への影響

上記 3.1 で示した酸化反応に対し、1 項で述べた水分中の酸素が全て使われたとすると、発生する水素 (H) の量は次の通りとなる。

$$m_H = m_W \times \frac{2M_H}{2M_W} + m_H(\text{残})$$

ここで、

$$M_H : \text{水素分子のモル質量 (g/mol)} = 2.01588 \text{ g/mol}$$

よって、発生する水素量は 5.640g となる。

一方、金属キャスク中の燃料棒被覆管の体積は、次式によって表わされる。

$$S_f = \frac{d_o^2 - (d_o - 2t)^2}{4} \times \pi \times L \times a \times N$$

ここで、

$$t : \text{燃料被覆管肉厚 (cm)} = \boxed{} \text{ cm}$$

(上記は Doc.No.MA035A-RC-E-01 Rev.0 別紙 1-1 表より)

以上より、燃料被覆管の体積は $3.576 \times 10^5 \text{ cm}^3$ となる。

安全側に発生した水素とガスの成分としての水素が全て燃料被覆管に吸収されたとした場合、燃料被覆管中の水素濃度は、

$$\frac{5.640\text{g}}{3.576 \times 10^5 \text{ cm}^3 \times 6.5\text{g/cm}^3} = 2.427 \times 10^{-6} \rightarrow 2.43\text{ppm}$$

となり、無視し得る量である。

4. バスケットの評価

バスケットのコンパートメント及びスペーサー (炭素鋼) の腐食の評価においては、防錆処理を施しているため腐食しない。

5. 参考文献

(1) (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) 附属書 I」(2010 年 7 月)

番号	項目	質問日	コメント内容
89	経年変化	2019/2/6	<p>【補足説明資料 1-2 Hitz-B52 型の経年変化に関する説明資料】(Doc.No.MA035A-RC-F01-1 Rev.0) (平成 31 年 2 月 6 日説明資料)</p> <p>・P.3 5. 参考文献について、評価結果に用いた参考文献の該当箇所を説明資料に追記すること。また、必要に応じて、該当箇所を添付すること。</p>

(回答) -2019/3/20 済み

参考文献として、下記のとおり追記を行う。(アンダーライン部に追記内容を記載する。)

- (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 最終報告」(平成 16 年 6 月)、P.217-222
- (2) (一財) 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」、(平成 15 年 3 月)、P.537
- (3) (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(2007 年版)(JSME S FA1-2007)」、(2007 年 12 月)
- (4) (一社) 日本機械学会、「発電用原子力設備規格 設計・建設規格<第 I 編 軽水炉規格>(JSME S NC1-2007)」、(2007 年 9 月)
- (5) ステンレス協会、「ステンレス鋼便覧(第 3 版)」、日刊工業新聞社(1995)、P.216、P.1428
- (6) (一社) 日本機械学会、「金属便覧(改訂 6 版)」、丸善(株)(平成 12 年)、P.475
- (7) K. Farrell, et al., "An evaluation of low temperature radiation embrittlement mechanisms in ferritic alloys", Journal of Nuclear Materials, Vol. 210, (1994)
- (8) (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 7 版)」、(2007)、P.32、P.76
- (9) R. R. Gaugh, "Stress corrosion clacking of precipitation-hardening stainless steels", Materials Performance, Vol. 26, No.2 (1987)、P.31-P.34
- (10) 土肥謙次ら、「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(平成 9 年 6 月)、P.10
- (11) 腐食防食協会、「腐食・防食ハンドブック」、丸善(2000)、P.18
- (12) (一財) 日本規格協会、「圧力容器の設計(JIS B 8267:2015)」、(一財) 日本規格協会(2015)
- (13) S. J. Zinkle, G. L. Kulcinski, "Low-Load Microhardness Changes in 14-MeV Neutron Irradiated Copper Alloys", The use of small scale specimens for testing

- irradiated material, ASTM STP888 (1986)、P.154
- (14) H. Yoshida, et al., “Reactor irradiation effects on Al 1100”, Proc. Jpn. Congr. Mater. Res Vol. 24, P.1-6 (1981)
- (15) 吉村壽次、「化学辞典（第2版）」、森北出版（2009）、P.815
- (16) “NS-4-FR Fire Resistant Neutron and/or Gamma Shielding Material” BISCO PRODUCTS, INC, 6/23/86 (1986)
- (17) 小崎明朝、「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）、P.114
- (18) 東京電力（株）、「福島第一原子力発電所 既設乾式貯蔵キャスクの点検報告」（平成25年5月31日）
- (19) 加藤治、伊藤千浩、「使用済燃料貯蔵容器用ガスケットの長期密封特性」、(一財)電力中央研究所（U92009）（平成4年7月）、P.531-P.533
- (20) (一財)電力中央研究所、「使用済燃料貯蔵の基礎」、(株)ERC出版、(2014年4月20日)、P.67-P.73
- (21) (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」（平成22年3月）、P.13-P.19
- (22) W.J. Mills, “Deformation and Fracture Characteristics for Irradiate Inconel X-750”, Nuclear Technology, American Nuclear Society, Vol.73, 102 (1986)、P.105
- (23) S. Shirai, et al., “Evaluation Test on the Thermal Stability of Resin as Neutron Shielding Material for Spent Fuel Transport Cask”, Proc. the 12th Int. Conf. on PATRAM (1998)、P.1645-P.1652

なお(8)及び(17)については本文に参考図を追加することとする。

番号	項目	質問日	コメント内容
90	経年変化	2019/2/6	<p>【補足説明資料 1-2 Hitz-B52 型の経年変化に関する説明資料】(Doc.No.MA035A-RC-F01-1 Rev.0) (平成 31 年 2 月 6 日説明資料)</p> <p>・P.5 「表 1 Hitz-B52 型の主要な構成部材」において、バスケットの構成部材は全て網羅し、経年変化に対する評価も含めて説明すること。また、二次蓋の圧力センサーポート部の部材についても説明すること。</p>

(回答) -2019/3/20 済み

1. バスケットの構成部材

バスケットの構成部材について、ステンレス鋼の部材である上部プレート、下部プレート、フランジプレート、クランプ、ストッパー及びボルトを追加する。これらの部材はいずれも材質がステンレス鋼であるため、サポートプレートと同様の評価とする。

また、炭素鋼部材としてコンパートメント欄にスペーサーを追加し、評価はコンパートメントと同様とする。

2. 二次蓋センサーポート部の評価について

二次蓋の圧力センサーポート部は、ステンレス鋼の肉盛溶接もしくはステンレス鋼の部材によって構成されることから、ステンレス鋼として評価する。

表 4 に「二次蓋 (センサーポート部)」の評価を追加する。

3. 本文への記載

上記 1、2 をふまえて、1718 頁から 1920 頁、2122 頁及び 2324 頁に示すとおり本文を訂正する。(アンダーライン部に説明資料の追加箇所を示す。)

3

番号	項目	質問日	コメント内容
91	経年変化	2019/2/6	<p>【補足説明資料 1-2 Hitz-B52 型の経年変化に関する説明資料】(Doc.No.MA035A-RC-F01-1 Rev.0) (平成 31 年 2 月 6 日説明資料)</p> <p>・ P. 8 「表 4 Hitz-B52 型の主要な構成部材の経年変化に対する評価」についての胴、底板、外筒、二次蓋、一次蓋ボルトの経年変化に係るデータ欄において、「実機模擬環境」についての環境条件が記載されていないので用いた参考文献の概要も含めて具体的に説明すること。</p>

(回答)

1. 実機環境について

「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」としては 1%の燃料破損率相当の 3 g/m^3 のヨウ素ガス濃度となる。そして温度差によるヘリウムガス等の対流による攪拌作用が生じることにより高いヨウ素ガス濃度が維持される可能性は低いことから、底部の沈積を考慮する場合でも、最大約 20 g/m^3 程度を想定すればよいと考えられ、試験では上記環境を模擬した結果が示されている。

2. 腐食量評価

腐食速度（減肉速度）について、図 91-1 に試験結果を示す。

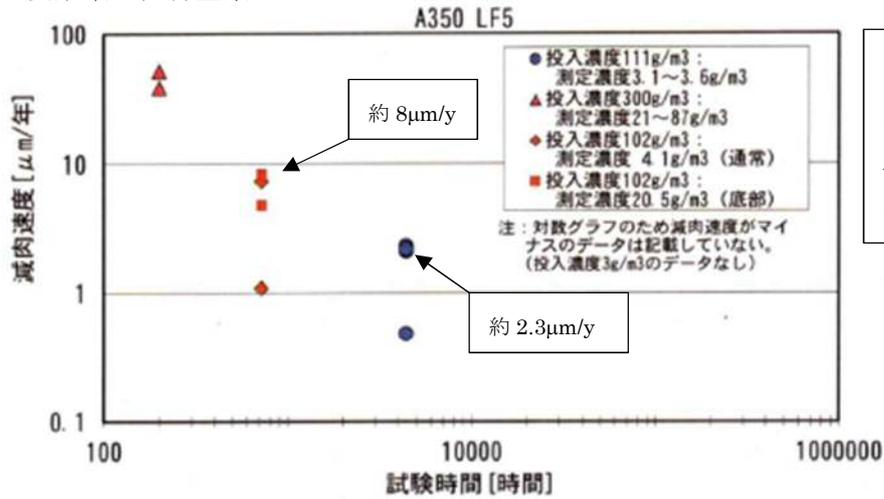
炭素鋼については、腐食速度は 6 ヶ月ばく露試験の試験結果が $2.3 \mu\text{m/y}$ であるが、容器底部の高濃度(20.5 g/m^3)の試験結果では腐食速度が約 $8 \mu\text{m/y}$ であることから、60 年間の腐食量を保守的に推定すると約 $500 \mu\text{m}$ 程度となる。

なお、炭素鋼の評価には、炭素鋼に Ni が 1.0%~2.0% 添加された A350LF5 の試験結果を用いているが、Ni はステンレス鋼などで Cr の酸化膜の密着性を上げる効果によって耐食性を上げる効果はあるが、A350LF5 の Ni は低温じん性を高める目的で添加されたものであり⁽²⁾、Ni 単独では耐食性に対する影響は小さいことから、このデータを引用できるものと判断した。

ステンレス鋼については、腐食速度は 6 ヶ月ばく露試験の試験結果（約 $0.13 \mu\text{m/y}$ ）から 60 年間の腐食量を保守的に推定すると約 $7.8 \mu\text{m}$ 程度となる。

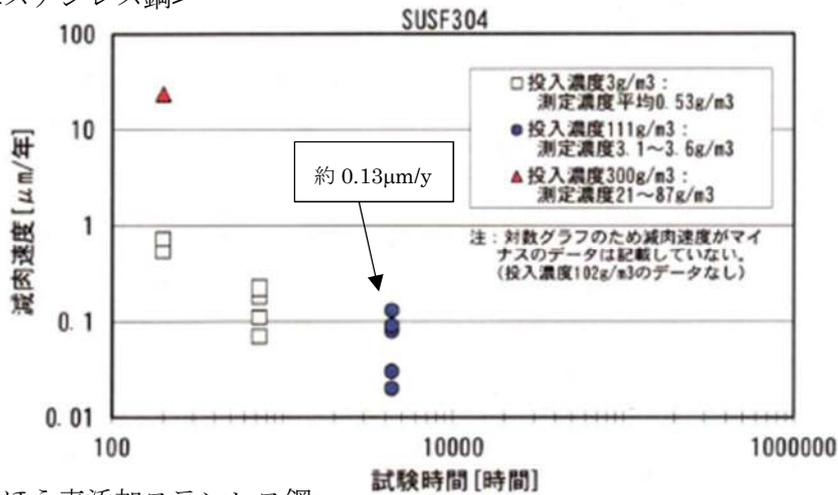
3

<炭素鋼・低合金鋼>

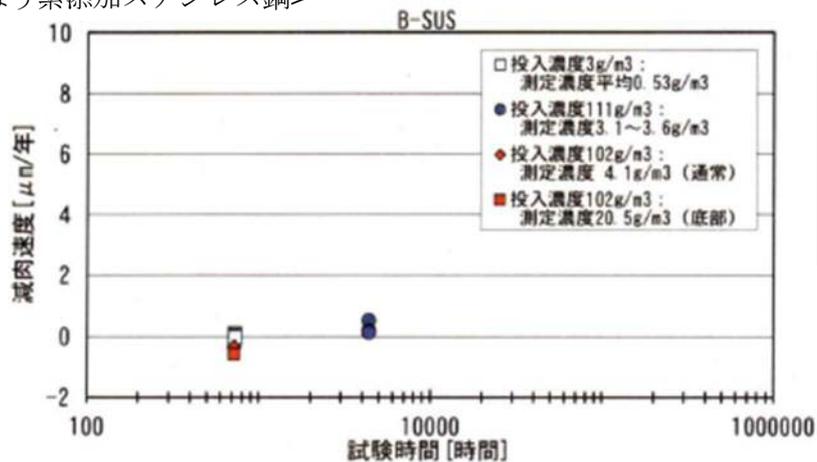


鉄系材料である炭素鋼の評価はA350 LF5の試験結果を引用

<ステンレス鋼>



<ほう素添加ステンレス鋼>



Hitz-B52 型ではほう素添加ステンレス鋼は使用せず

図 3.3.1-9 (1/2) 減肉速度と試験時間 (鉄系材料)

図 91-1 鉄系材料の減肉速度と試験時間

3. 参考文献の内容

評価で引用した「平成 15 年度 金属キャスク貯蔵技術確証試験 最終報告」⁽¹⁾、217 頁の試験結果のまとめによると、実機環境について次のように述べられている。

「また、底部のヨウ素濃度は、各試験で 19.8~24.0 g/m³ の範囲にあり、100%燃料破損相当のヨウ素を封入した予備試験 II-2 でも初期は高い値を示したが、試験終了時には 21.7 g/m³ と同程度の値を示したことから、ヨウ素ガスの濃度は沈積によっても約 20 g/m³ 程度で飽和し、濃度確認試験では表面積の違いにより余剰のヨウ素があり、それが底部から沈積して約 20 g/m³ 程度の領域が高くなり、容器中央付近でも高いヨウ素ガス濃度を示したものと推定される。また、これらの濃度の測定は、昇温開始から約 65~140 時間程度の初期に行っているが、その時点で既に濃度は安定している可能性がある。

ヨウ素ガスについては、試験容器内が温度 270℃均一の条件下では大部分が容器底部に沈積したが、実機では金属キャスク内部の温度は均一ではなく、内部では温度差によるヘリウムガス等の対流による攪拌作用が生じると推定され、時間経過とともに全体の温度が下がっていくため、燃料近傍の高温部でヨウ素が気化したとしても、内部の対流等によりヨウ素ガスが温度の低い部分に運ばれ、徐々に低温部で固化していくと推定されることから、高いヨウ素ガス濃度が維持される可能性は低いと考えられる。低温部で固化したヨウ素が付着した部材への影響については、付着した固体ヨウ素と部材の間では、固相/固相界面でのヨウ素と金属元素との反応が考えられるが、反応性生物が移動できないため固相界面に残存し、それ以降の反応は、ヨウ素または金属原子の腐食性生物層中の移動速度に律速されると考えられ、固着状態での腐食進行は極端に遅くなると推定される。したがって、ヨウ素ガスによってどの程度の腐食量が生じるか算定することで材料の健全性を確認することは妥当と考えられ、前述の通り、ヨウ素ガス濃度としては最大でも約 20 g/m³ 程度を想定すればよいと考えられる。」

さらに 219 頁の c. 腐食評価方法の検討でも次のように述べられている。

「6 ヶ月ばく露試験は 0.1%の想定燃料破損率に対して安全側に 1%の燃料破損率相当の 3 g/m³ のヨウ素ガス濃度で腐食試験を行っている。したがって、腐食評価として 6 ヶ月までの腐食量から算出した腐食速度が 60 年間続くとして評価することは、実際は一般的に腐食が初期に進行したあと安定化し、腐食速度は下がることを考えれば、十分な保守性があると考えられ、実際に鉄系材料では時間とともに腐食速度が下がる結果が得られている。」

4. 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 最終報告」(平成 16 年 6 月)、P.217-222

(2) 日本工業新聞社、「設計者に必要な材料の基礎知識」(2003年)、日本工業新聞社、
P.47-48

3

番号	項目	質問日	コメント内容
92	経年変化	2019/2/6	<p>【補足説明資料 1-2 Hitz-B52 型の経年変化に関する説明資料】(Doc.No.MA035A-RC-F01-1 Rev.0) (平成 31 年 2 月 6 日説明資料)</p> <p>・P.8 設計条件欄の「中性子照射量：10^{16}n/cm^2 未満」の表記は「表 3」の値に変更すること。</p>

(回答) -2019/3/20 済み

1. 中性子照射量の記載について

中性子照射量の表記を「表 3」の値に変更する。

2. 本文への記載

上記 1 をふまえて、2021 頁から 2324 頁に示すとおり本文を訂正する。(アンダーライン部に説明資料の追加箇所を示す。)



番号	項目	質問日	コメント内容
95	経年変化	2019/2/6	<p>【補足説明資料 1-2 Hitz-B52 型の経年変化に関する説明資料】(Doc.No.MA035A-RC-F01-1 Rev.0) (平成 31 年 2 月 6 日説明資料)</p> <p>・P. 10 部材及び材質欄において、「中性子遮蔽材【材質】樹脂」について、具体的材質名を記載すること。</p>

(回答) -2019/3/20 済み

1. 中性子遮蔽材の材質

中性子遮蔽材で使用する具体的材質名である「エポキシ系レジン」を表 4 に追記する。

2. 本文への記載

上記をふまえて、**2223** 頁に示すとおり本文を訂正する。(アンダーライン部に説明資料の追加箇所を示す。)



番号	項目	質問日	コメント内容
96	経年変化	2019/2/6	<p>【補足説明資料 1-2 Hitz-B52 型の経年変化に関する説明資料】(Doc.No.MA035A-RC-F01-1 Rev.0) (平成 31 年 2 月 6 日説明資料)</p> <p>・P. 10 金属ガスケットの経年変化に関わるデータ欄について、「3年間の塩水噴霧試験」を用いて「設計貯蔵期間 60 年の経年変化」を評価することの妥当性はどのように説明できるのか。用いた参考文献の概要も含めて丁寧に説明すること。</p>

(回答) -2019/9/2 済み

1. 金属ガスケットの評価

二次蓋の金属ガスケットの外皮のアルミニウム合金は外気に触れることになるが、各種金属材料の 16 年間の海浜大気曝露試験結果から、アルミニウム合金のデータ(0.25 $\mu\text{m}/\text{y}$)で 60 年の腐食量を推定しても 15 μm 程度である⁽¹⁾。

一方、金属ガスケットは眼鏡型であり、内側にはヘリウムガスが充填されることから、不活性ガス雰囲気には金属ガスケット内側での腐食はなく、したがって設計貯蔵期間 60 年において、閉じ込め機能に影響を及ぼさない。

さらに 3 年間の塩水噴霧試験においても、漏えい率に変化はなく、長期保管後の海水流入時においても漏えい率は判定基準値以下であることが確認されている⁽²⁾ことから、実環境よりも厳しい条件においても、ただちに閉じ込め機能に影響はないとした。

仮に腐食が発生した場合でも、一次蓋、二次蓋間の圧力監視で状態を確認、外観検査を行い、必要に応じて補修、取替えを行うことで対応は可能である。

上記をふまえて、各部材の材質に対する経年変化に係わるデータに「金属ガスケットの外皮のアルミニウム合金は外気に触れることになるが、各種金属材料の 16 年間の海浜大気曝露試験結果から、アルミニウム合金のデータ(0.25 $\mu\text{m}/\text{y}$)で 60 年の腐食量を推定しても 15 μm 程度である。」という表記を追加する。

2. 参考文献

- (1) (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 7 版)」(2007)、P.76
- (2) 東京電力(株)、「福島第一原子力発電所 既設乾式貯蔵キャスクの点検報告」(平成 25 年 5 月 31 日)、P.1

番号	項目	質問日	コメント内容
97	経年変化	2019/2/6	<p>【補足説明資料 1-2 Hitz-B52 型の経年変化に関する説明資料】(Doc.No.MA035A-RC-F01-1 Rev.0) (平成 31 年 2 月 6 日説明資料)</p> <p>・P. 10 中性子遮蔽材の評価「設計貯蔵期間中の温度の低下を考慮すると、～」とあるが、設計貯蔵期間中の温度の低下を考慮する必要があるのか。考慮する必要がある場合、その温度変化はどのように評価し、また、質量減損をどのように評価したのか。さらに、閉鎖系とした理由等を JNES の「金属キャスク貯蔵技術確証試験報告書」を参考として整理して説明すること。</p>

(回答) -2019/9/2 済み

1. 貯蔵期間中の温度の低下の考慮について

レジン系の中性子遮蔽材の遮蔽性能は、レジンに含まれる水素含有量で決まるが、NUPEC 報告書（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」⁽¹⁾）にエポキシ系レジンには質量減損率と水素減損率は良い相関関係を有していることが示されており、したがって質量減損率を基に評価することとしている。中性子遮蔽材の質量減損率は貯蔵期間だけでなく温度にも依存するため、貯蔵期間中の使用済燃料の発熱量の低下に対し、NUPEC 報告書（平成 13 年度「リサイクル燃料資源貯蔵技術確証試験（金属キャスク貯蔵技術確証試験）報告書」⁽²⁾）の方法に準じ合理的に、しかしながら非安全側にならないように評価を行うよう、レジンの温度低下を考慮することとした。

2. 温度変化及び質量減損の評価

貯蔵期間中の質量減損の評価については、遮蔽関連の質問回答 No.67 に示している。

3. 閉鎖系とした理由等の整理、説明

閉鎖系とした理由等については、NUPEC 及び JNES 報告書⁽¹⁾⁽³⁾を参考として整理し、遮蔽関連の質問回答 No.68 に示している。

4. 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」（平成 15 年 3 月）
- (2) (財)原子力発電技術機構、「平成 13 年度「リサイクル燃料資源貯蔵技術確証試験（金属キャスク貯蔵技術確証試験）報告書」（平成 14 年 3 月）
- (3) (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」（平成 16 年 6 月）

<本文訂正箇所のまとめ>

<本文 5 頁>

表 1 Hitz-B52 型の主要な構成部材の材質

構成部材	材 質
金属キャスク本体	
胴	炭素鋼*1
底板	炭素鋼*1
外筒	炭素鋼*2
底部中性子遮蔽材カバー	炭素鋼*2
トランニオン	析出硬化型ステンレス鋼
伝熱フィン	銅
中性子遮蔽材（底部、側部）	樹脂（レジン）
バスケット	
コンパートメント、 <u>スパーサー</u>	炭素鋼*3
サポートプレート、 <u>上部プレート、下部プレート、フランジプレート、クランプ、ストッパー、ボルト</u>	ステンレス鋼
中性子吸収材	ほう素添加アルミニウム合金
伝熱部材	アルミニウム合金
蓋部	
一次蓋	ステンレス鋼
二次蓋	炭素鋼*4
一次蓋ボルト	合金鋼*5
二次蓋ボルト	合金鋼*5
中性子遮蔽材（蓋部）	樹脂（レジン）
蓋部中性子遮蔽材カバー	ステンレス鋼
金属ガスカート	ニッケル基合金/アルミニウム合金

表 2 Hitz-B52 型の主要な構成部材の温度条件

構成部材	最高温度*1 (°C)
胴	123
底板	145
外筒	112
一次蓋	119
二次蓋	87
蓋部中性子遮蔽材カバー	92
底部中性子遮蔽材カバー	121
一次蓋ボルト	97
二次蓋ボルト	88
中性子遮蔽材（蓋部、底部、側部）*2	129
金属ガスケット	95
コンパートメント*3	236
中性子吸収材	236
サポートプレート*4	164
伝熱部材	146
伝熱フィン	117
トラニオン	121

注記*1：除熱解析から得られた結果を示す。

*2：蓋部、底部及び側部の中性子遮蔽材のうちの最も高い温度を示す。

*3：スペーサーを含む。

*4：上部プレート、下部プレート、フランジプレート、クランプ、ストッパー及びボルトを含む。

<本文 7 頁>

表 3 Hitz-B52 型の主要な構成部材の中性子照射量

構成部材	中性子照射量*1 (n/cm ²)
胴及び底板	1.6×10 ¹⁵
外筒*2	1.6×10 ¹⁵
トラニオン*2	1.6×10 ¹⁵
蓋部*3	1.6×10 ¹⁴
中性子遮蔽材（蓋部、底部、側部）*4	1.9×10 ¹⁴
バスケット*5	3.6×10 ¹⁵
伝熱フィン	1.9×10 ¹⁴

注記*1：遮蔽解析結果から得られた中性子束が 60 年間一定であると仮定して算出した値。

*2：外筒及び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。

*3：一次蓋、二次蓋、蓋部中性子遮蔽材カバー、一次蓋ボルト、二次蓋ボルト及び金属ガスケットを含む。

*4：蓋部、底部及び側部の中性子遮蔽材のうち、中性子照射量の最も高くなる場所を選定した。

*5：コンパートメント、スペーサー、サポートプレート、上部プレート、下部プレート、フランジプレート、クランプ、ストッパー、ボルト、中性子吸収材及び伝熱部材を含む。

表 4 Hitz-B52 型の主要な構成部材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（内面、中性子遮蔽材接触部）、底板（内面、中性子遮蔽材接触部）、外筒（内面）、二次蓋（内面）、一次蓋ボルト 【材質】 炭素鋼 合金鋼	腐食	●構造強度： 腐食による構造強度の低下	<ul style="list-style-type: none"> 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⁾である。 胴（中性子遮蔽材接触部）及び外筒（内面）が全面腐食すると仮定して算出したところ、0.5mm 程度。（別紙 1） 	使用環境： ・ヘリウム雰囲気 ・中性子遮蔽材と接触	<ul style="list-style-type: none"> 胴（内面）、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（中性子遮蔽材接触部）及び外筒（内面）は、中性子遮蔽材の熱劣化により生じる水による全面腐食を考慮しても、構造強度への影響はない。
	熱	●構造強度： 熱によるき裂・破損	<ul style="list-style-type: none"> 金属キャスク構造規格⁽³⁾（設計・建設規格（2007 年追補版）⁽⁴⁾適用）では、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 300℃⁽⁵⁾⁽⁶⁾。 	使用環境温度： 150℃以下	<ul style="list-style-type: none"> 使用環境温度は、300℃よりも十分低く、クリープを考慮する必要はないため、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	<ul style="list-style-type: none"> 中性子照射量が 10¹⁶n/cm² までは、顕著な特性変化は認められない（図 1）。 	中性子照射量： 1.6×10 ¹⁵ n/cm ² 以下 （60 年間一定）	<ul style="list-style-type: none"> 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。
胴（外面）、底板（外面）、外筒（外面）、二次蓋（外面）、二次蓋ボルト、底部中性子遮蔽材カバー 【材質】 炭素鋼 合金鋼	腐食	●構造強度： 腐食による構造強度の低下	<ul style="list-style-type: none"> 各種金属材料の 16 年間の海浜大気暴露試験結果から、最も定常腐食速度の大きい炭素鋼のデータ（21µm/年）で 60 年間の腐食量を推定しても 1.26mm 程度⁽⁸⁾である（図 4）。 	使用環境： ・外気（海塩粒子雰囲気） ・結露水	<ul style="list-style-type: none"> 外筒（外面）、二次蓋（外面）及び二次蓋ボルトは防錆処理により腐食しない。なお、防錆処理の補修が困難であるキャスク本体底部について、防食効果を考慮せず評価しても、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	<ul style="list-style-type: none"> 金属キャスク構造規格⁽³⁾（設計・建設規格（2007 年追補版）⁽⁴⁾適用）では、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℃⁽⁵⁾⁽⁶⁾。 	使用環境温度： 125℃以下	<ul style="list-style-type: none"> 使用環境温度は、300℃よりも十分低く、クリープを考慮する必要はないため、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	<ul style="list-style-type: none"> 中性子照射量が 10¹⁶n/cm² までは、顕著な特性変化は認められない（図 1）。 	中性子照射量： 1.6×10 ¹⁵ n/cm ² 以下 （60 年間一定）	<ul style="list-style-type: none"> 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。
一次蓋、蓋部中性子遮蔽材カバー【材質】 ステンレス鋼	腐食	●構造強度： 腐食による構造強度の低下	<ul style="list-style-type: none"> 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（ステンレス鋼）の最大腐食速度により、60 年間の腐食量を推定しても 10µm 程度⁽¹⁾である。 	使用環境： ・ヘリウム雰囲気	<ul style="list-style-type: none"> 一次蓋蓋部中性子遮蔽材カバーは、不活性雰囲気が維持される限り、腐食しない。
	熱	●構造強度： 熱によるき裂・破損	<ul style="list-style-type: none"> 金属キャスク構造規格⁽³⁾（設計・建設規格（2007 年追補版）⁽⁴⁾適用）では、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℃⁽⁵⁾。 	使用環境温度： 125℃以下	<ul style="list-style-type: none"> 使用環境温度は、280℃よりも十分低く、クリープを考慮する必要はないため、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	<ul style="list-style-type: none"> 中性子照射量が 10¹⁷n/cm² までは、顕著な特性変化は認められない（図 2）。 	中性子照射量： 1.6×10 ¹⁴ n/cm ² 以下 （60 年間一定）	<ul style="list-style-type: none"> 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。

表 4 Hitz-B52 型の主要な構成部材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
トランニオン 【材質】 析出硬化型 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、応力腐食割れに対する高い耐食性が確認された(9)。	使用環境： ・外気（海塩粒子雰囲気） ・結露水	・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に対する高い耐食性を有し、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(3)（設計・建設規格（2007年追補版）(4)適用）では、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℃(5)。	使用環境温度： 125℃以下	・使用環境温度は、280℃よりも十分低く、クリープを考慮する必要はないため、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、顕著な特性変化は認められない（図2）。	中性子照射量： $1.6 \times 10^{15}\text{n/cm}^2$ 以下 （60年間一定）	・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、銅に比べて鉄はイオン化傾向の高い金属であるため、銅は腐食しない。(11)	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ため、除熱機能への影響はない。
	熱	●除熱機能： 熱によるき裂・破損	・日本工業規格（JIS）では200℃までの設計用強度・物性値が規定されている。(12)	使用環境温度： 120℃以下	・使用環境温度は、200℃よりも低く、熱によりき裂・破損することはないため、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 までは、顕著な特性変化は認められない。(13)	中性子照射量： $1.9 \times 10^{14}\text{n/cm}^2$ 以下 （60年間一定）	・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、使用環境において、き裂・破損することはないため、除熱機能への影響はない。
コンパートメント、 スペーサー 【材質】 炭素鋼	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)である。	使用環境： ・ヘリウム雰囲気	・コンパートメント及びスペーサーは、不活性雰囲気が維持される限り、腐食しない。 ・コンパートメント及びスペーサーは、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(3)（設計・建設規格（2007年追補版）(4)適用）では、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℃(5)(6)。	使用環境温度： 240℃以下	・使用環境温度は、300℃よりも十分低く、クリープを考慮する必要はないため、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、顕著な特性変化は認められない（図1）。	中性子照射量： $3.6 \times 10^{15}\text{n/cm}^2$ 以下 （60年間一定）	・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。
サポートプレート、 上部プレート、下部 プレート、フランジ プレート、クランプ、 ストッパー、ボルト 【材質】 ステンレス鋼	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（ステンレス鋼）の最大腐食速度により、60年間の腐食量を推定しても10μm程度(1)である。	使用環境： ・ヘリウム雰囲気	・サポートプレート、 <u>上部プレート</u> 、 <u>下部プレート</u> 、 <u>クランプ</u> 、 <u>ストッパー</u> 及び <u>ボルト</u> は、不活性雰囲気が維持される限り、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(3)（設計・建設規格（2007年追補版）(4)適用）では、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℃(5)。	使用環境温度： 165℃以下	・使用環境温度は、280℃よりも十分低く、クリープを考慮する必要はないため、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、顕著な特性変化は認められない（図2）。	中性子照射量： $3.6 \times 10^{15}\text{n/cm}^2$ 以下 （60年間一定）	・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。

表 4 Hitz-B52 型の主要な構成部材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
伝熱部材 【材質】 アルミニウム合金	腐食	●除熱機能： 腐食によるき裂・破損	・金属キャスク内部に残留する酸素量が全て伝熱部材（アルミニウム合金）の腐食に費やされたとしても、腐食量は 1μm 以下。(1)	使用環境： ・ヘリウム雰囲気	・伝熱部材は、不活性雰囲気維持される限り、腐食しない。
	熱	●除熱機能： 熱によるき裂・破損	・構造強度部材として使用する場合は、使用温度に応じてクリープによる強度の低下を考慮する必要がある。	使用環境温度： 150℃以下	・構造強度部材ではないため、クリープを考慮する必要はないため、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 ¹⁹ n/cm ² 程度までは引張強度への影響はない(14)。	中性子照射量： <u>3.6×10¹⁵n/cm² 以下</u> (60 年間一定)	・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。
中性子吸収材 【材質】 ほう素添加 アルミニウム合金	腐食	●未臨界機能： 腐食による未臨界機能の低下	・中性子吸収材に存在する炭化ほう素は科学的に安定であり、酸・アルカリによる腐食はない(15)。 ・1%燃料破損相当の燃料棒内ガス中のよう素ガスを含む実機模擬環境における、アルミニウム合金の平均酸化膜厚さは 1μm 以下。(1)	使用環境： ・ヘリウム雰囲気	・不活性ガス雰囲気が維持される限り、腐食の影響はないため、臨界防止機能への影響はない。仮に 1%燃料破損相当の燃料棒内ガス中のヨウ素ガスの存在を考慮しても、臨界防止機能への影響はない。
	熱	●未臨界機能： 熱による未臨界機能の低下	・中性子吸収材に存在する炭化ほう素の融点は 2000℃以上であり、熱に対して安定性を有している。(15)	使用環境温度： 240℃以下	・炭化ほう素は使用環境温度に対して熱的に安定であり、臨界防止機能への影響はない。
	照射	●未臨界機能： 照射による未臨界機能の低下	・ ¹⁰ B の 60 年の設計貯蔵期間中の減損割合は、保守的に全中性子束を用いて評価しても 1.4×10 ⁻⁵ 以下。 ・中性子照射量が 10 ¹⁹ n/cm ² 程度までは引張強度への影響はない(14)。	中性子照射量： <u>3.6×10¹⁵n/cm² 以下</u> (60 年間一定)	・ 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るため、未臨界機能への影響はない。
中性子遮蔽材 【材質】 樹脂（エポキシ系 レジン）	熱・腐食	●遮蔽機能： 重量減損の有無	・(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」(2)に記載されているデータに基づいて、熱による中性子遮蔽材の重量減損率は最大 1.5%と評価（図 3）。	使用環境温度： 130℃以下 使用環境： ・閉鎖環境	・設計貯蔵期間中の温度の低下を考慮すると、設計貯蔵期間経過時までの樹脂の質量減損量は最大 1.5%となるが、これを考慮して評価を行っている。
	照射	●遮蔽機能： 重量減損の有無	・中性子遮蔽材である樹脂は 10 ⁴ Gy 程度のガンマ線照射量、又は 10 ¹⁵ n/cm ² 程度の中性子照射量が、質量減損に影響を与えることはない(2)(16)。	放射線照射量： <u>1.3×10³Gy 以下</u> <u>1.9×10¹⁴n/cm² 以下</u> (60 年間一定)	・照射中加熱試験は設計条件を超える照射量で行っており、照射による質量減損を考慮する必要はない。

表 4 Hitz-B52 型の主要な構成部材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
金属ガスケット 【材質】 ニッケル基合金 アルミニウム合金	腐食	●閉じ込め機能： 腐食による閉じ込め機能の低下	<ul style="list-style-type: none"> 金属ガスケットの外皮のアルミニウム合金は外気に触れることになるが、各種金属材料の 16 年間の海浜大気曝露試験結果から、アルミニウム合金のデータ(0.25μm)で 60 年の腐食量を推定しても 15 μm 程度⁽⁸⁾である (図 4)。 蓋部縮小モデルにおける 3 年間の塩水噴霧試験では、漏えい率に変化はない (図 5)。⁽¹⁷⁾ 長期保管後の海水流入時においても漏えい率は判定基準値以下であり、ただちに漏えい率に影響はない。⁽¹⁸⁾ 	使用環境： 一次、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	<ul style="list-style-type: none"> 一次蓋及び二次蓋内側の金属ガスケットは、不活性雰囲気維持される限り、腐食しない。二次蓋外側の金属ガスケットは、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。また、海水流入のような厳しい腐食環境におかれても、ただちに閉じ込め機能に影響はなく、金属キャスクを点検可能な構造としているため、必要に応じて対応可能である。
	熱	●閉じ込め機能： 熱による閉じ込め機能の低下	<ul style="list-style-type: none"> 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ソン・ミラー・パラメータ (LMP) は、定数 C が 20 の場合は約 11.0×10^3⁽¹⁹⁾、14 の場合は 8.0×10^3⁽²⁰⁾。 長期密封性能試験⁽²¹⁾において 130°C~140°C (19 年以上) で閉じ込め性能維持。 	使用温度： 100°C以下	<ul style="list-style-type: none"> 使用環境温度から設計貯蔵期間 (60 年間) に相当する LMP を算出すると LMP の定数 C=20 の場合は約 9.6×10^3、C=14 の場合は約 7.4×10^3 となり、設計貯蔵期間を通じて初期の漏えい率が維持されると判断される。
	照射	●閉じ込め機能： 照射による機械的特性の変化	<ul style="list-style-type: none"> ニッケル基合金は中性子照射量が 10^{21}n/cm^2 までは機械的性質は変化しない⁽²²⁾。 アルミニウムは中性子照射量が 10^{19}n/cm^2 程度以下では機械的性質に顕著な変化はない⁽¹⁴⁾。 	中性子照射量： $1.6 \times 10^{14} \text{n/cm}^2$ 以下 (60 年間一定)	<ul style="list-style-type: none"> 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。
二次蓋 (ポートカバー部) 【材質】 ステンレス鋼	腐食	●形状保持： 腐食による形状保持機能の低下	<ul style="list-style-type: none"> 各種金属材料の 16 年間の海浜大気曝露試験結果から、ステンレス鋼のデータ (0.25μm/年) で 60 年間の腐食量を推定しても 15μm 程度⁽⁸⁾である (図 4)。 	使用環境： ・外気 (海塩粒子雰囲気)、 ・結露水	<ul style="list-style-type: none"> 二次蓋 (ポートカバー部) はステンレス鋼であり、仮に防食効果を考慮せず評価しても、腐食による形状保持機能への影響はない。
	熱	●形状保持： 熱によるき裂・破損	<ul style="list-style-type: none"> 金属キャスク構造規格⁽³⁾ (設計・建設規格 (2007 年追補版)⁽⁴⁾ 適用) では、425°C 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°C⁽⁵⁾。 	使用環境温度： 90°C以下	<ul style="list-style-type: none"> 使用環境温度は、280°C よりも十分低く、クリープを考慮する必要はないため、形状保持機能への影響はない。
	照射	●形状保持： 照射による機械的特性の変化	<ul style="list-style-type: none"> 中性子照射量が 10^{17}n/cm^2 までは、顕著な特性変化は認められない (図 2)。 	中性子照射量： $1.6 \times 10^{14} \text{n/cm}^2$ 以下 (60 年間一定)	<ul style="list-style-type: none"> 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、形状保持機能への影響はない。