

〈5/12 監視チームにおける議論のまとめ〉

2. 地震対策について

② 高放射性廃液貯槽の据付ボルトのせん断強度試験について

○せん断強度評価において塑性を許容する場合の理由

○安全の裕度向上のための現実的な対策の検討

高放射性廃液貯蔵場(HAW) 高放射性廃液貯槽の

据付ボルトのせん断強度と安全裕度の向上に関する検討について

【概要】

高放射性廃液貯蔵場(HAW)の高放射性廃液貯槽の据付ボルトに関して、廃止措置計画用設計地震動時に据付ボルトに加わる最大荷重は、荷重試験の結果から算定される許容荷重を満足する結果が得られている。

しかしながら荷重試験の結果に基づく許容荷重は実力値に近く、その裕度は大きくない。機構としてリスクの大きい高放射性廃液を取り扱うという観点を重要視し、更なる耐震裕度を確保するために、貯槽の液量を制限して地震時に発生する荷重を低減する方法について検討した。

検討の結果、各高放射性廃液貯槽の液量について、材料規格の材料強度に基づき算定される保守的な許容荷重を参照した場合、100 m³ 以下において地震時のボルトのせん断荷重は上記参照値を満足するという結果が得られた。

以上より、高放射性廃液を取り扱うという観点を重要視し、貯蔵液量管理(保守的に 90m³ 程度に設定)による耐震裕度向上に向けた運用を当面の間行うことについて検討を進める。

令和2年5月25日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

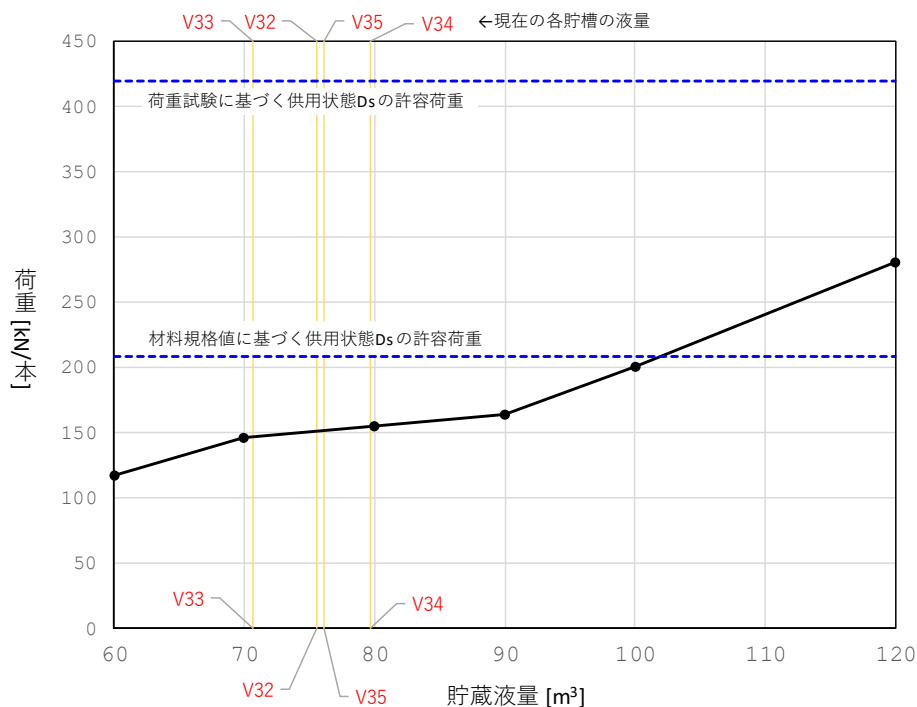
高放射性廃液貯蔵場（HAW 施設） 高放射性廃液貯槽（272V31～V36）の 据付ボルトのせん断強度と安全裕度の向上に関する検討

高放射性廃液貯槽の据付ボルトについて、廃止措置計画用設計地震動が作用した際のせん断荷重の評価結果（最大 281 kN/本（ボルト有効断面積に対するせん断応力は 191MPa）、80℃条件）は、実機を模擬して実施した荷重試験の結果から算定された許容荷重（供用状態 Ds : 420 kN/本、80℃条件）を満足する結果が得られている（付表）。しかしながら荷重試験に基づく許容荷重は実機の実力値に近くその裕度は大きくない。そこで、リスクの大きい高放射性廃液を取り扱うという観点からさらなる耐震裕度を確保する方策として、貯槽の液量を制限した場合に地震時に据付ボルトに作用する荷重がどの程度低減可能かについての評価を行った（付図）。この評価結果より 100 m³ 以下において地震時の据付ボルトのせん断荷重は材料規格の材料強度に基づき算定される保守的な許容荷重（支持構造物においては供用状態 Ds の許容応力は実降伏点以下）を満足する。なお、現状の貯蔵液量は 340 m³/5 貯槽（その他予備 1 基）、最大 79.7 m³ であり、上記の 100 m³ を下回る状態である。

以上より、高放射性廃液を取り扱うという観点を重要視し、貯蔵液量管理（保守的に 90m³ 程度に設定）による耐震裕度向上に向けた運用を当面の間行うことについて検討を進める。

付表 廃止措置計画用設計地震動に対する高放射性廃液貯槽据付ボルトの発生荷重と各許容荷重

設計地震動において据付ボルトに加わる最大せん断荷重 (満水 120 m ³ 時)	荷重試験に基づく許容せん断荷重 (供用状態 Ds)	材料規格値に基づく許容せん断荷重 (供用状態 Ds)
281 kN/本	420 kN/本	208 kN/本



付図 高放射性廃液貯槽の貯蔵液量と地震時のせん断ボルトに発生するせん断応力の関係

【参考】 検討の詳細について

1. ボルトの許容応力

1.1 規準

日本機械学会「発電用原子力設備規格 材料規格（2012年版）」（以下、材料規格）^[1]に基づいて支持構造物のボルトの許容応力を定める方法については、「発電用原子力設備規格 設計・建設規格（2012年版） JSME S NC1-2012」（以下、設計・建設規格）^[2]の SSB-3130 に規定されている。以下に当該規定部分を抜粋する。

SSB-3000 クラス 1 支持構造物の設計

SSB-3110 許容応力

ボルト材以外の材料の応力は SSB-3120、ボルト材の応力は SSB-3130 のそれぞれの規定に定める許容応力に適合するものでなければならない。

SSB-3120 ボルト材以外の許容応力

ボルト材以外の許容応力は、SSB-3121 及び SSB-3122 の規定によるものである。

SSB-3121 一次応力に対する許容応力

一次応力については、以下の許容応力の規定によらなければならない。

SSB-3121.1 供用状態 A および B での許容応力

供用状態 A および供用状態 B において生じる一次応力は、(1)から(5)の値を超えず、かつ(6)を満足すること。

(1) 引張応力

一次引張応力については、次の計算式により計算した値

$$f_t = \frac{F}{1.5} \quad (\text{SSB-1.1})$$

f_t : 許容引張応力 (MPa)

F : 次の a. または b. に定める値

a. 溶接部であって溶接規格 N-1100 の規定に準じてそれぞれ放射線透過試験、超音波探傷試験、磁粉探傷試験または浸透探傷試験を行った場合に合格する部分、または溶接部以外の部分については次の値

(a) 使用温度が 40°C を超えるオーステナイト系ステンレス鋼および高ニッケル合金については、次のうちいずれか小さい方の値

$$\cdot 1.35S_y$$

$$\cdot 0.7S_u$$

$$\cdot S_y(RT)$$

S_y : 材料規格 Part3 第 1 章 表 6 に規定する材料の設計降伏点 (MPa)

S_u : 材料規格 Part3 第 1 章 表 7 に規定する材料の設計引張強さ (MPa)

$S_y(RT)$: 材料規格 Part3 第 1 章 表 6 に規定する材料の 40°C における設計降伏点 (MPa)

(b) 上記の(a)以外のものについては、次のうち小さい方の値

$$\cdot S_y$$

$$\cdot 0.7S_u$$

S_y, S_u : (a)に定めるところによる。

～ (省略) ～

(2) せん断応力

一次せん断応力については、次の計算式により計算した値

$$f_s = \frac{F}{1.5\sqrt{3}} \quad (\text{SSB-1.2})$$

f_s : 許容せん断応力 (MPa)

F : (1)に定めるところによる。

～ (省略) ～

SSB-3130 ボルト材の許容応力

供用状態 A および供用状態 B においてボルトネジ部の有効断面積に基づき算定される応力は、次の値を超えないこと。なお、ネジ部の有効断面積の代わりに軸部断面積の75%を用いても良い。また、せん断面が必ず軸断面となることが明らかな場合は、せん断応力算定に用いる断面積として軸部断面積を用いても良い。

(1) 引張応力

引張応力については、次の計算式により計算した値

$$f_t = \frac{F}{1.5} \quad (\text{SSB-1.25})$$

f_t : 許容引張応力 (MPa)

F : SSB-3121.1(1)に定めるところによる。

(2) せん断応力

せん断応力については、次の計算式により計算した値

$$f_s = \frac{F}{1.5\sqrt{3}} \quad (\text{SSB-1.26})$$

f_s : 許容せん断応力 (MPa)

F : SSB-3121.1(1)に定めるところによる。

(3) せん断応力と引張応力の組合せ応力

せん断応力と引張応力を同時に受けるボルトの許容引張応力は、次のいずれか小さい方の値。

a. $f_{ts} = 1.4f_{to} - 1.6\tau$

b. $f_{ts} = f_{to}$

f_{ts} : せん断力を同時に受けるボルトの許容引張応力 (MPa)

f_{to} : SSB-3131(1)に規定するボルトの許容引張応力 (MPa)

τ : ボルトに作用するせん断応力 (MPa)

SSB-3132 供用状態 C での許容応力

供用状態 C においてボルトネジ部の有効断面積に基づき算定される応力は、SSB-3131(1)および(2)に定める許容応力 f_s, f_t の1.5倍の値を超えないこと。また、SSB-3131(3)に定める f_{ts} の式において、 f_{to}

を 1.5 倍として求めた値を超えないこと。なお、ネジ部の有効断面積の代わりに軸部断面積の 75%を用いてもよい。また、せん断面が必ず軸断面となることが明らかな場合は、せん断応力算定に用いる断面積として軸部断面積を用いても良い。

SSB-3133 供用状態 D での許容応力

供用状態 D においてボルトネジ部の有効断面積に基づき算定される応力は、SSB-3131(1)および(2)に定める許容応力 f_s 、 f_t の 1.5 倍の値を超えないこと。また、SSB-3131(3)に定める f_{ts} の式において、 f_{to} を 1.5 倍として求めた値を超えないこと。この場合において、SSB-3121.1(1)a本文中 S_y および $S_y(RT)$ は、 $1.2S_y$ および $1.2S_y(RT)$ と読み替えるものとする。

なお、ネジ部の有効断面積の代わりに軸部断面積の 75%を用いてもよい。また、せん断面が必ず軸断面となることが明らかな場合は、せん断応力算定に用いる断面積として軸部断面積を用いても良い。

まとめると表 1.1 の通りとなる。

表 1.1 支持構造物のボルト（オーステナイト系ステンレス鋼）の許容応力

供用状態	許容引張応力	許容せん断応力
A および B	$f_t = \frac{F}{1.5}$ $F = \min \{1.35S_y, 0.7S_u, S_y(RT)\}$	$f_s = \frac{F}{1.5\sqrt{3}}$ $F = \min \{1.35S_y, 0.7S_u, S_y(RT)\}$
C (Cs [※])	$f_t^* = 1.5f_t = F$ $F = \min \{1.35S_y, 0.7S_u, S_y(RT)\}$	$f_s^* = 1.5f_s = \frac{F}{\sqrt{3}}$ $F = \min \{1.35S_y, 0.7S_u, S_y(RT)\}$
D (Ds [※])	$f_t^* = 1.5f_t = F$ $F = \min \{1.35S_y, 0.7S_u, 1.2S_y(RT)\}$	$f_s^* = 1.5f_s = \frac{F}{\sqrt{3}}$ $F = \min \{1.35S_y, 0.7S_u, 1.2S_y(RT)\}$

※ 弾性設計用地震動 (Sd) および基準地震動 (Ss) の組合せを考慮する供用状態はそれぞれ Cs、Ds (運転状態ではそれぞれⅢ_AS、Ⅳ_AS) と表されるが、許容応力については同等であると定められている^{[6][9]}ので本資料においては設計・建設規格の内容を引用している場合には C、D を、設計・建設規格に基づいて算定された許容応力・許容荷重を廃止措置計画用設計地震動時の評価に用いる場合には Cs、Ds と表記する。

1.2 短期と長期の許容応力の考え方（一次応力）

「設計・建設規格」において支持構造物の許容応力については、日本建築学会「鋼構造設計基準 —許容応力度設計法— 2005 年版」（以下、鋼構造設計規準）^[3]の考え方を基本としている。すなわち、供用状態 A（運転状態Ⅰ）および B（運転状態Ⅱ）は通常時の状態であるから「鋼構造設計規準」の長期許容応力、供用状態 C（運転状態Ⅲ）および D（運転状態Ⅳ）は発生が稀である異常時の状態であるから「鋼構造設計規準」の短期許容応力とみなし、短期許容応力は長期許容応力の 1.5 倍としている^[1]。1.1 に記載した通り、供用状態 A および B の許容応力は F 値の 1/1.5 (= 2/3) であることから、その 1.5 倍である供用状態 C および D の F 値は実質的に降伏点に等しい。

1.3 オーステナイト系ステンレス鋼の強度特性に基づく許容応力の考え方

「鋼構造設計規準」は炭素鋼材料を中心とした規準であることから、「設計・建設規格」で対象とするオーステナイト系ステンレス鋼および高ニッケル合金に対しては、材料の強度特性に基づき割り増しが行われる。設計降伏点 S_y は炭素鋼やフェライト系ステンレス鋼における引張試験における降伏点に基づき定められるものであるが、オーステナイト系ステンレス鋼は引張試験において明確な降伏点を示さない材料であるので、0.2%永久ひずみ耐力点をもって設計降伏点と見なしている。しかしながら、オーステナイト系ステンレス鋼はひずみ硬化性を持ち、設計降伏点を超えても強度が期待できることから許容応力を定める際にはこの特性を考慮して割り増しを行う。

SSB-3121.1(1)において、F 値を定める項目の一つである使用温度が 40°C を超える場合の S_y 値 (SSB-3121.1(1)の a.(a)) に対して 1.35 倍の割り増しを行うのはこのためであり、割増率 1.35 は、ASME SecIII での設計応力強さ S_m の以下の考え方

炭素鋼に対して： $2/3 S_y$

オーステナイト系ステンレス鋼に対して： $0.9 S_y$

から、炭素鋼に対するオーステナイト系ステンレス鋼の設計応力強さの比を求めた

$$(\text{オーステナイト系ステンレス鋼の } S_m) / (\text{炭素鋼の } S_m) = 0.9 / (2/3) = 1.35$$

に基づいている^{[1][4]}。

さらに、供用状態 D では F 値を定める際の一項目として考慮する室温の S_y 値に対しても 1.2 倍の割り増しを行うが (SSB-3133)、これは、供用状態 D では事故時の衝撃荷重が主でひずみ速度が大であること及び通常材料の実降伏点は設計値に対して余裕があることを考慮したものである (ASME SecIII Appendix F) ^{[1][4]}。なお、使用温度が 40°C を超える材料には本割増しを適用しない。

最後に、F 値を定める際の一項目の S_u 値ベースの考え方 (SSB-3121.1(1)の a.(a)) である $0.7S_u$ については炭素鋼・オーステナイト系ステンレス鋼とも違いはない。この条件は、ひずみ硬化性の低い材料 (S_y 値と S_u 値が近接している材料) に対して引張強さに 30%の余裕を確保するという考え方 (「鋼構造設計規準」と同じ) に基づくもので、クラス 1 容器の供用状態 C および D と同じである^[4]。オーステナイト系ステンレス鋼では S_y 値と S_u 値は十分離れているので、F 値を算定する際に選択される許容応力は S_y 値ベースのものとなる。

以上より「設計・建設規格」の支持構造物のボルト (オーステナイト系ステンレス鋼) の許容応力は供用状態 A~D のいずれに対しても弾性範囲を意味する S_y ベースのものとなるので、これらに適合することは対象とするボルトに作用する応力が実降伏点以下 (弾性範囲) にとどまることを意味する。

1.4 高放射性廃液貯槽の据付ボルトの許容応力

高放射性廃液の据付ボルト (SUS316 材、M48 ボルト、有効断面積 1470 mm^2) の許容応力を「設計・建設規格」に基づき計算する。材料の設計降伏点 S_y 、設計引張強さ S_u は「材料規格」に基づき、使用温度を 60°C 、 80°C の場合について計算した (表 1.2)。

表 1.2 SUS316 材の材料特性

材料の規格		常温最小引張強さ (MPa)	常温最小降伏点 (MPa)	温度 (°C)				
				-30~40	65	75	100	
JIS G 4303(2005) ステンレス鋼棒	SUS316	設計降伏点Sy値 ^{※1} (MPa)	520	205	205	189	—	176
		設計引張強さSu値 ^{※2} (MPa)	520	205	520	—	489	476

※1 材料規格 JSME S NJ1-2012 Part3 第1章 表6

※2 材料規格 JSME S NJ1-2012 Part3 第1章 表7

材料の規格		温度 (°C)		
		60	80	
JIS G 4303(2005) ステンレス鋼棒	SUS316	設計降伏点Sy値 ^{※3} (MPa)	192	183
		設計引張強さSu値 ^{※4} (MPa)	502	486

※3 材料規格 JSME S NJ1-2012 Part3 第1章 表6 の近傍温度における値を元に線形補間によって求めた値。

※4 材料規格 JSME S NJ1-2012 Part3 第1章 表7 の近傍温度における値を元に線形補間によって求めた値。

「設計・建設規格」の SSB-3130 に基づき算定した供用状態 Ds の据付ボルトの許容応力を表 1.3 に示す。また、表には M48 ボルトの有効断面積に基づく 1 本当たりの許容せん断荷重についても示す。

表 1.3 材料規格に基づく据付ボルトの許容応力と許容せん断荷重

① 設計降伏点Sy値ベース			供用状態 Ds (運転状態 IV _s)			M48ボルトの有効断面積 (mm ²) [※]	M48ボルトの許容せん断荷重 (kN/本)
温度 (°C)	Sy	1.35 Sy	F値 (MPa)	許容引張応力 ft* (MPa)	許容せん断応力 fs* (MPa)		
80	183	247	min {①, ②, ③}	1.5×F/1.5	1.5×F/(1.5√3)	1470	208
80	486	340					
② 設計引張強さSu値ベース			246	246	142	1470	208
温度 (°C)	Su	0.7 Su					
80	486	340	246	246	142	1470	208
40	205	246					
③ 室温の設計降伏点Sy値ベース			246	246	142	1470	208
温度 (°C)	Sy	1.2 Sy (RT)					
40	205	246	246	246	142	1470	208
40	205	246					

※ JIS B 0205(メートル並目ねじ)に基づく。

2. ボルトの許容荷重

2.1 規準

「設計・建設規格」では SSB-3200 の規定により、荷重試験（形式試験）を行うことにより SSB-3100 の規定に変えることができる。以下に当該規定部分を抜粋する。

SSB-3210 許容荷重

材料の許容荷重に関する次の SSB-3220 から SSB-3240 を満足する場合は、SSB-3100 の材料の許容応力の規定に代えることができる。SSB-3210 から SSB-3240 において、計算に用いる材料の設計降伏点は、当該支持構造物に使用する材料のうち最高使用温度における材料規格 Part3 第 1 章 表 6 に定める値と試験温度における材料規格 Part3 第 1 章 表 6 に定める値との比が最小となる材料の値としなければならない。

荷重試験における供試体の個数は、同一の材質および形状を有する支持構造物ごとに 3 個とし、供試体によって得られた値のうち最小の値を用いて許容荷重を計算する。ただし、計算で求めた許容荷重の 0.9 倍の値を許容荷重とする場合は、同一の材質および形状を有する支持構造物ごとに 1 個の供試体により得られた値を用いることができる。

SSB-3220 供用状態 A および B での許容荷重

供用状態 A および B における荷重については、次の計算式により計算した値を超えないこと。この場合において、当該支持構造物と同一の材質および形状を有する支持構造物がある場合は、その支持構造物で求めた値を使用することができる。

$$A_L = \frac{1}{3} T_L \frac{S_{yd}}{S_{yt}} \quad (\text{SSB-2.1})$$

A_L : 許容荷重 (N)

T_L : SSB-3210 に定める荷重試験により支持構造物が破損するおそれのある荷重 (N)

S_{yd} : 最高使用温度における材料規格 Part 3 第 1 章 表 6 に定める値 (MPa)

S_{yt} : 試験温度における材料規格 Part 3 第 1 章 表 6 に定める値 (MPa)

SSB-3230 供用状態 C での許容荷重

供用状態 C における荷重については、次の計算式により計算した値を超えないこと。この場合において、当該支持構造物と同一の材質および形状を有する支持構造物がある場合は、その支持構造物で求めた値で使用することができる。

$$A_L = \frac{1}{2} T_L \frac{S_{yd}}{S_{yt}} \quad (\text{SSB-2.2})$$

A_L : 許容荷重 (N)

T_L, S_{yd}, S_{yt} : それぞれ SSB-3220 に定めるところによる。

SSB-3240 供用状態 D での許容荷重

供用状態 D における荷重については、次の計算式により計算した値を超えないこと。この場合において、当該支持構造物と同一の材質および形状を有する支持構造物がある場合は、その支持構造物で求めた値を使用することができる。

$$A_L = 0.6 T_L \frac{S_{yd}}{S_{yt}} \quad (\text{SSB-2.3})$$

A_L : 許容荷重 (N)

T_L, S_{yd}, S_{yt} : それぞれ SSB-3220 に定めるところによる。

2.2 高放射性廃液貯槽の据付ボルトの許容荷重

高放射性廃液の据付ボルト（SUS316 材、M48 ボルト）の許容荷重を「設計・建設規格」に基づき計算する。荷重試験については既報告の通りである。算定結果を表 2.1 に示す。

表 2.1 荷重試験結果に基づく据付ボルトの許容荷重

せん断荷重試験 T_L 値 (kN/本)	ボルトの 最高使用温度 T_s (°C)	材料規格 Part3 第1章 表6に 基づく温度補正項			供用状態Ds（運転状態IV _A S） での許容荷重 A_L (kN/本) = $0.6 \times T_L \times (Syd/Syt)$
		Syd値(Ts)	Syt値(RT)	Syd/Syt	
785	60	192	205	0.936	440
	80	183	205	0.892	420

2.3 荷重試験に基づく許容荷重の保守性について

SSB-3210 解説においては、SSB-3110 の許容応力と比較してその保守性を評価している。すなわち許容荷重の式において $T_L = S_u$ として、 A_L/f_s を比較している。しかしながら、解説の評価は S_u ベースのもののみであるため、 S_y ベースの許容荷重についても比較を行った。このとき、 S_u と S_y の関係性について、 $S_u = n \times S_y$ において、許容荷重が許容応力より保守側となる材料特性 $n = S_u/S_y$ を求めた（表 2.2）。

これより S_u ベースでは許容荷重の方が常に保守側となるが、 S_y ベース及び $S_y(RT)$ ベースでは対象とする材料の設計引張強さ S_u と設計降伏点 S_y の比に依存する。

高放射性廃液貯槽の据付ボルトは SUS316 であることから、表 1.2 に従い $n = S_u/S_y$ を求めると、

- ・ S_y ベース (80°C)

$$n = \frac{S_u}{S_y} = \frac{486}{183} = 2.656$$

- ・ $S_y(RT)$ ベース

$$n = \frac{S_u}{S_y} = \frac{520}{205} = 2.537$$

となることから、許容応力（SSB-3110）の方が保守側となる。

表 2.2 許容応力 (SSB-3110) に対する許容荷重 (SSB-3210) の保守性の条件

【供用状態 : A および B】

F値のベース	$1.35S_y$	$0.7S_u$	$S_y(RT)$
許容応力 f_s	$f_s = \frac{F}{1.5} = \frac{1.35}{1.5}S_y$	$f_s = \frac{F}{1.5} = \frac{0.7}{1.5}S_u$	$f_s = \frac{F}{1.5} = \frac{1}{1.5}S_y(RT)$
許容荷重 A_L	$A_L = \frac{1}{3}T_L = \frac{1}{3}S_u = \frac{1}{3}nS_y$		
A_L/f_s	$\frac{1}{3} \cdot \frac{1.5}{1.35} \cdot n = 0.370n$	$\frac{1}{3} \cdot \frac{1.5}{0.7} = 0.714$	$\frac{1}{3} \cdot \frac{1.5}{1} \cdot n = 0.5n$
保守性の条件	$n < 2.7$	常に保守側 ($A_L/f_s < 1$)	$n < 2.0$

【供用状態 : C】

F値のベース	$1.35S_y$	$0.7S_u$	$S_y(RT)$
許容応力 f_s	$f_s = F = 1.35S_y$	$f_s = F = 0.7S_u$	$f_s = F = S_y(RT)$
許容荷重 A_L	$A_L = \frac{1}{2}T_L = \frac{1}{2}S_u = \frac{1}{2}nS_y$		
A_L/f_s	$\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{1.35}n = 0.370n$	$\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{0.7} = 0.714$	$\frac{1}{2}n = 0.5n$
保守性の条件	$n < 2.7$	常に保守側 ($A_L/f_s < 1$)	$n < 2.0$

【供用状態 : D】

F値のベース	$1.35S_y$	$0.7S_u$	$1.2S_y(RT)$
許容応力 f_s	$f_s = F = 1.35S_y$	$f_s = F = 0.7S_u$	$f_s = F = 1.2S_y(RT)$
許容荷重 A_L	$A_L = 0.6T_L = 0.6S_u = 0.6nS_y$		
A_L/f_s	$0.6 \cdot \frac{1}{1.35}n = 0.444n$	$\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{0.7} = 0.714$	$0.6 \cdot \frac{1}{1.2}n = 0.5n$
保守性の条件	$n < 2.25$	常に保守側 ($A_L/f_s < 1$)	$n < 2.0$

3. 廃止措置計画用設計地震動に対する安全性の検討

3.1 廃止措置計画用設計地震動により据付ボルトに発生するせん断応力との比較

廃止措置計画用設計地震動が高放射性廃液貯槽に作用した際に、据付ボルトに生じるせん断応力については「別紙 6-1-2-3-3-1 高放射性廃液貯槽(272V31~V36)の耐震性についての計算書」に示すとおり、191 MPa（解析結果として得られたボルトの最大反力 281 kN/本を M48 ボルトの有効断面積 1470 mm² で除して求めた値）であった。

表 3.1 より 80 °Cにおける許容荷重と比較すると、供用状態 Ds の許容荷重に対しては約 1.5 割程度の裕度がある。

表 3.1 据付ボルトの発生応力と許容荷重の比較

最高使用温度	廃止措置計画用 設計地震動における 発生せん断応力 (液量満杯を想定)	許容せん断荷重 (荷重試験に基づく)
		供用状態 Ds (運転状態 IVAS)
80 °C	281 kN/本	420 kN/本

以上より、基準地震動相当の強さと稀な発生確率である廃止措置計画用設計地震動が作用した場合においても据付ボルトは荷重試験結果から算定した供用状態 Ds の許容荷重を満足する。しかしながら、これらの荷重試験に基づき求めた許容荷重は実機の実力値に近いもので、その裕度は大きくない。

3.2 廃止措置段階における現実的な運用の状態に基づく安全裕度の向上

廃止措置段階においては、新たな使用済燃料の再処理によって高放射性廃液が増えることはないことから、将来において現時点で保管している高放射性廃液の量を大きく超過することはない（工程洗浄や分離精製工場（MP）に残存する少量の高放射性廃液の集約化等による変動は考慮する必要がある）。

そこで、高放射性廃液の液量と、廃止措置計画設計用設計地震動に対する据付ボルトのせん断応力の関係について評価を行った。評価モデル及び解析手法は「別紙 6-1-2-3-3-1 高放射性廃液貯槽(272V31~V36)の耐震性についての計算書」に示したものと同一であり、液量に応じて荷重条件（液位位置までの高さの胴板に液重量分の荷重を付加）を変更した。表 3.2 に評価を示す。また現在の各貯槽の液量を表 3.3 に示し、それらを貯蔵液量と地震時の据付ボルトに発生する荷重との関係として図示したものを図 3.1 に示す。

表 3.2 高放射性廃液貯槽の貯蔵液量と地震時のせん断ボルトに発生するせん断荷重の関係

貯蔵液量 (m ³)	80	90	100	120
せん断荷重 (kN/本)	155	165	201	281
せん断応力 (MPa) ※	106	112	137	191

※ せん断荷重を M48 ボルトの有効断面積 1470 mm² で除して求めたもの。

表 3.3 現在（2017年11月30日時点）での各高放射性廃液貯槽の貯蔵液量

貯槽	272V31	272V32	272V33	272V34	272V35	272V36 予備貯槽	合計 (5貯槽貯液率)
貯蔵液量 (m ³)	38.4	75.6	70.7	79.7	76.1	0	340.5 (56.8%)

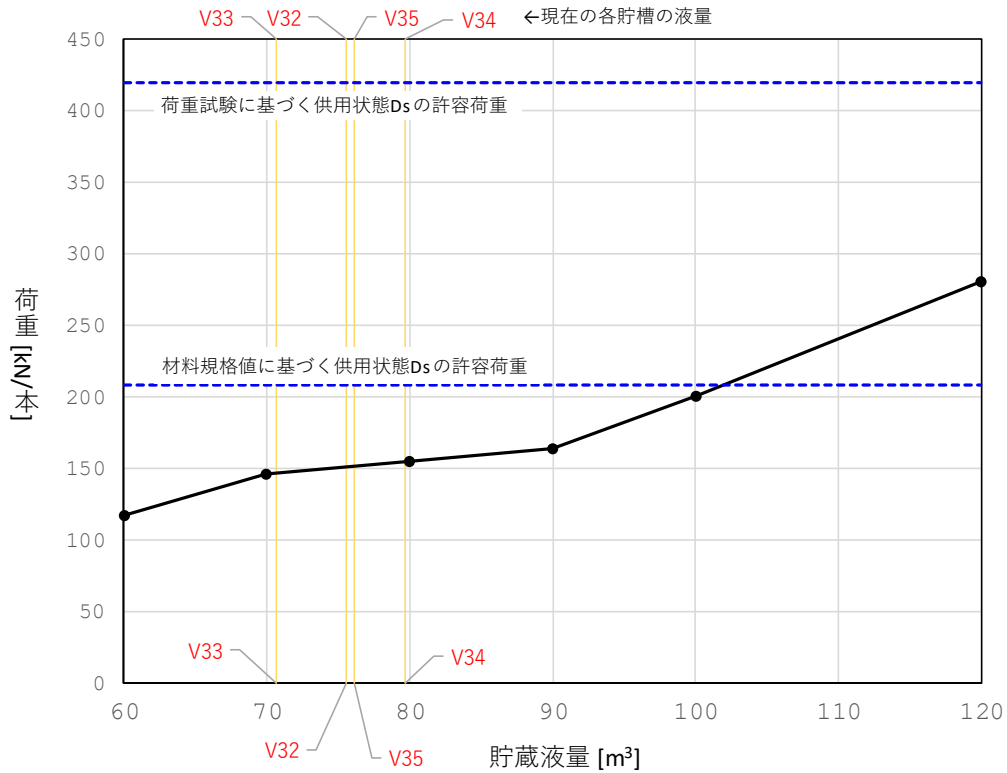
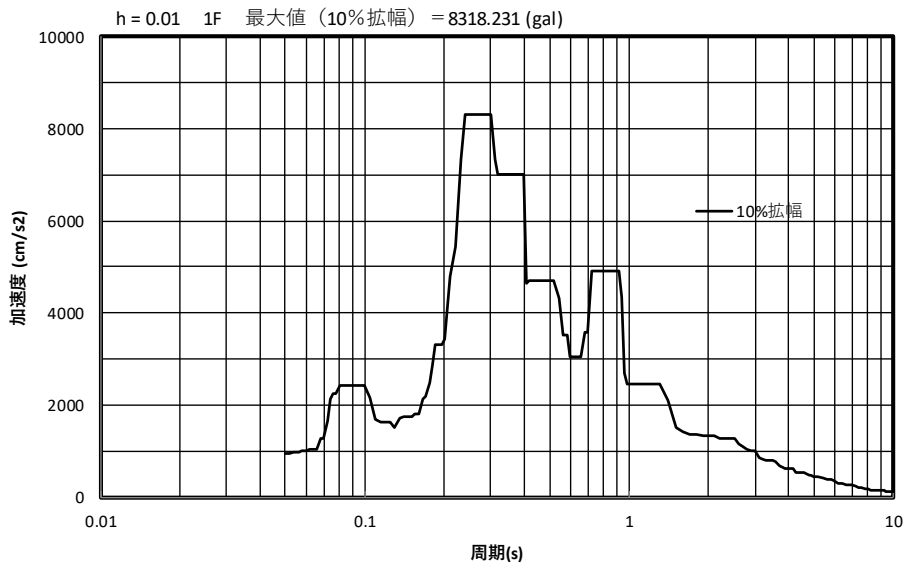


図 3.1 高放射性廃液貯槽の貯蔵液量と地震時のせん断ボルトに発生するせん断応力の関係

貯蔵液量の低下とともに総質量及び重心位置が低下し、それにより高放射性廃液貯槽の固有周期は低下する（剛側にシフトする）。地震動に対する応答は床応答スペクトルの形状に依存するため、固有周期が変化することにより液量の低下とせん断荷重の低下は単純な線形関係にはならず、固有周期が変化する領域の床応答スペクトルの形状に影響を受けて図 3.1 のようなやや複雑な挙動を示すものと考えられる。高放射性廃液貯槽が満水時の固有周期は 0.071 sec であり、評価に用いた床応答スペクトル（図 3.2、Ss-D、Ss-1、Ss-2 の 3 波包絡、周期軸方向に ±10 % 拡幅したもの）においては 0.071 sec 以下の範囲では応答加速度は低下し続ける方向となっているので、貯蔵液量の低下とともに据付ボルトに作用するせん断荷重も単調に低下していくものの、低下の程度は応答スペクトルの形状に依存する。

【床応答スペクトル全体】



【0.01~0.1 s の範囲の拡大】

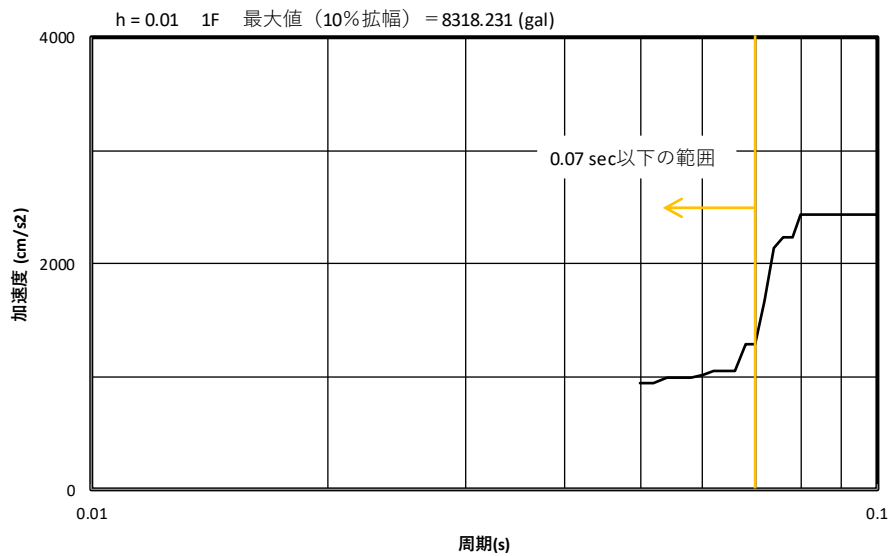


図 3.2 解析用の床応答スペクトル（水平方向，1階，減衰定数 1.0 %）

前述したように液量が満水状態（120 m³）においても、廃止措置計画用設計用地震動によって貯槽の据付ボルトに加わるせん断荷重は、荷重試験結果から算定される許容荷重を満足できる。一方で、2.2 で述べたように SUS316 に対する許容荷重は SSB-3110 に基づく許容応力に対して必ずしも保守的とは言えない。また、荷重試験に基づく許容荷重は実機の実力値に近いものであるから、その裕度は大きくない。そこで、リスクの大きい高放射性廃液を取り扱うという観点からさらに耐震裕度を確保するために、材料規格値から算定される保守的な許容応力に基づく荷重を参照し、貯槽の液量を制限して地震時に発生する荷重を低減する方策が考えられる。そのような考え方に基づけば、材料規格値から算定される供用状態 Ds

の許容荷重を満足するのは、図 3.1 より貯蔵液量 100 m³ 以下であると読み取れる。オーステナイト系ステンレス鋼である SUS316 に対して材料規格値から算定した供用状態 Ds の許容荷重は 2.3 で述べたように実降伏点以下（弾性範囲）に留まることから、廃止措置計画用設計地震動に対して保守性を持った運用状態となる。

一方、液量管理の点では、表 3.3 に示した現状の貯蔵量は 100 m³ 以下であるものの、今後実施する工程洗浄や分離精製工場（MP）に残存する少量の高放射性廃液の集約化に対する影響確認が必要である。

以上より、高放射性廃液を取り扱うという観点を重要視し、貯蔵液量管理（保守的に 90m³ 程度に設定）による耐震裕度向上に向けた運用を当面の間行うことについて検討を進める。

参考文献

1. "日本機械学会規格 発電用原子力設備規格 材料規格（2012 年版）", JSME S NJ1-2012, 日本機械学会 (2012)
2. "日本機械学会規格 発電用原子力設備規格 設計・建設規格（2012 年版）〈第 I 編 軽水炉規格〉", JSME S NC1-2012, 日本機械学会 (2012)
3. "鋼構造設計基準 一許容応力度設計法一 2005 年版", 日本建築学会 (2005)
4. "解説 原子力設備の技術基準 1994", 通商産業省資源エネルギー庁 公益事業部 原子力発電安全管理課, 電力新報社 (1995)
5. "電気技術指針 原子力編 原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編", JEAG4601・補-1984, 日本電気協会 電気技術基準調査委員会 (1984)
6. "電気技術規程 原子力編 原子力発電所耐震設計技術規程", JEAC4601 -2008, 日本電気協会 原子力規格委員会 (2008)

別添 支持構造物の許容応力について

以下に示すように「設計・建設規格」の支持構造物の許容応力の考え方に基づけば、Sd 地震動を考慮する場合の供用状態 Cs だけでなく Ss 地震動を考慮する場合の供用状態 Ds においても発生応力を降伏点以下とする考え方に基づくことになる。なお引用文中の「材料規格 Part 3 第 1 章表 6」は材料の設計降伏点 S_y の数値表である。

(解説 SSB-3121.3) 供用状態 D での許容応力

SSB-3121.3 は、供用状態 D における一次応力に対する許容応力について定めたものである。

SSB-3121.3 の規定は、クラス 1 容器およびクラス 1 配管の規定では設計条件の許容値の 2 倍の値としているが、AIJ の「鋼構造設計規準」の短期応力の許容値が長期応力の許容値の 1.5 倍なので、供用状態 A および供用状態 B の許容値の 1.5 倍の値としたものである。

SSB-3121.3 の供用状態 D における一次応力の許容値を材料規格 Part 3 第 1 章表 6 に定める値の 1.2 倍に読み替える理由は次のとおりである。

供用状態 C における引張応力の許容値は、 F は S_y または $0.7S_u$ のいずれか小さい方の値としている。これは鋼構造設計規準の短期の許容応力に対応するもので、支持構造物のように単軸応力が支配的な構造において、その最大値を降伏点以下に制限することを基本とし、ひずみ硬化性の少ない材料に対しては引張強さに対して 30% の余裕を確保しようとするものである。

一方、供用状態 D の荷重は、プラント寿命中起こり得ないような非常に頻度の低い荷重であることから、供用状態 D における一次応力の許容値としてクラス 1 容器と同様に $0.7S_u$ のみを制限条件としてもよいが、単軸応力に着目した設計であることもあって基本的に降伏点以下とすることとする。

ただし、供用状態 D の荷重は、事故時の衝撃荷重が主でひずみ速度が大であることおよび通常材料の実降伏点は設計値に対し余裕があることを考慮して、 $1.2 S_y$ を制限条件とした。

なお、オーステナイト系ステンレス鋼および高ニッケル合金であって使用温度が 40°C を超える材料の規定値のうち、 $1.35 S_y$ (使用温度) に対しては本割増しを適用しない。

参考の表 1.1 に示した通り、許容応力を規程する式において供用状態 C と供用状態 D の違いは、室温に対する S_y の項のみで、供用状態 C の S_y が供用状態 D で割り増して $1.2S_y$ となっているのは上記の通りである。これは明確な降伏点を示さないオーステナイト鋼の S_y 値が 0.2% 永久ひずみ耐力をもとに保守的に設定されていることに基づくもので、供用状態 D に対しては引用文中に記載された理由から、この保守性を表に出して扱うものとなっている(クラス 1 容器では $1.2S_y$ の割り増しは供用状態 C における許容応力の設定で適用されている)。