

〈4/27 監視チームにおける議論のまとめ〉
3. 安全対策(地震対策)について
② 地震対策の個別事項について
(イ)高放射性廃液貯槽の据付ボルトの強度試験の妥当性

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試験について

【概要】

高放射性廃液貯蔵場(HAW 施設)の高放射性廃液貯槽を直接支持しているアンカーボルトについて、地震時に作用する水平方向せん断力に対する強度を明らかにするために、実機の支持構造を模擬して荷重試験を実施した。

試験結果を用いて許容荷重の評価を行った。

令和2年5月12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試験について

1. 試験の概略

高放射性廃液を貯蔵する高放射性廃液貯蔵場（HAW 施設）の高放射性廃液貯槽（272V31～272V36、最大貯液量 120 m³）は貯槽の 4 方向側面に取り付けられたラグに建家鉄筋コンクリート躯体に鉛直方向に埋め込まれたアンカーボルトで固定し、支持する構造となっている。

地震力が作用する場合において、これらのボルトは主として高放射性廃液貯槽の水平方向の慣性力を受け止めて高放射性廃液貯槽を支持する役割を担う。その際、ボルトにはせん断応力が生じることとなる。したがって、地震時に高放射性廃液貯槽の支持構造の健全性を保つには、地震力によって生じるせん断応力に対してボルトの許容応力が十分余裕を持つことが必要である。

以上のことから、当該ボルトのせん断強度を現物に即して把握することは高放射性廃液貯槽の耐震性を判断する上で重要であるため、実物を模擬した荷重試験を実施しデータを取得した。

荷重試験は"日本機械学会規格 発電用原子力設備規格 設計・建設規格（2008 年版）〈第 I 編 軽水炉規格〉"（設計規格）^[1]の"SSB-3000 クラス 1 支持構造物の設計"における"SSB-3210 許容荷重"に定める内容に準拠したものとした（表 1）。

表 1 荷重試験の条件と実機の荷重状態の同一性

SSB-3210 要求項目		実機の支持構造	荷重試験条件
同一の材質	同一規格材	JIS G 4303 ステンレス鋼棒材の SUS316	JIS G 4303 ステンレス鋼棒材の SUS316
	同一製造法	1050℃での固溶化処理	1080℃での固溶化処理
同一の品質管理基準		JIS に定める化学成分、機械的特性を材料検査証明書で確認。	JIS に定める化学成分、機械的特性を材料検査証明書で確認。
同一の形状		—	実機設計図に基づき製作し、実機の使用前検査と同じ検査項目を確認。当該支持構造物が地震時に受ける荷重状態（せん断）に合致するような形状で試験を実施。
供試体の個数（3 個）		—	3 個
許容荷重の計算に用いる値（得られた値のうち最小の値）		—	得られた値のうち最小の値

荷重試験の結果と、その結果を用いて"SSB-3240 供用状態 D での許容荷重"に規定されている方法を用いて算出した許容荷重を表 2 に示す。"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)"(材料規格)に記載されている JIS G 4303 ステンレス鋼棒 SUS-316 の設計降伏点・設計引張強さから設計規格 11 の"SSB-3133 供用状態 D での許容応力"に規定されている方法を用いて算出した許容せん断応力は 142 MPa (80°C) であることから、実機の支持構造を模擬した荷重試験から得られた許容応力には十分な裕度があることが確認できた。

表 2 荷重試験から得た値に基づき計算した許容荷重および許容応力

観測値 最小値 T_L	785 kN/本
試験温度	室温
最高使用温度	80 °C
S_{yt} (JIS G 4303 SUS-316)	205 MPa (室温) ※ 材料規格 Part 3 第 1 章 表 6 の常温最小降伏点。
S_{yd} (JIS G 4303 SUS-316)	183.4 MPa (80°C) ※ 材料規格 Part 3 第 1 章 表 6 の 100°C の値 (176 MPa) と 65°C の値 (189 MPa) を線形補間して求めた 80°C の値。
許容荷重 $A_L = \frac{0.6T_L S_{yd}}{S_{yt}}$	421.4 kN/本 (80°C)
供試体断面積 C	1809 mm ² ※ M48 ボルト呼び径 (48mm) より $3.14 \times 24^2 \cong 1809$
許容応力 $f_s = \frac{A_L}{C}$	232.9 MPa (80°C)

2. 高放射性廃液貯槽の支持構造

HAW 施設には 6 基の高放射性廃液貯槽（272V31～V36）が設置されており、そのうちの 5 基に高放射性廃液が貯液されている（残り 1 基の 272V36 は予備）。個々の貯槽は独立したセルに設置されている。

貯槽側面 4 方向 1 カ所ずつにラグが設けられており、建家躯体壁面張り出し部に鉛直方向に埋め込まれたアンカーボルト（径 48mm）をラグの底板のボルト穴に差し込んで、それを二重ナットを用いて固定することで貯槽を支持している（図 1）。1 つのラグは 4 本のアンカーボルトで固定され、したがって貯槽全体で 16 本のアンカーボルトを用いて固定されている。

地震力が作用した場合、これらのボルトには主として水平方向の加振力が働くことでせん断応力が生じる。まず、建家が地震力によって水平動を生じ、建家からの水平力はアンカーボルトを通して貯槽を水平方向に押す作用として働く。続いて、水平方向に加速された貯槽に対して建家が異なる方向に加速されると、貯槽の慣性力がアンカーボルトを通して建家躯体へ伝わる。したがってラグと建家躯体の境界にあるアンカーボルト断面にはこのような向きの異なる水平力を受けることによってせん断力が発生する。

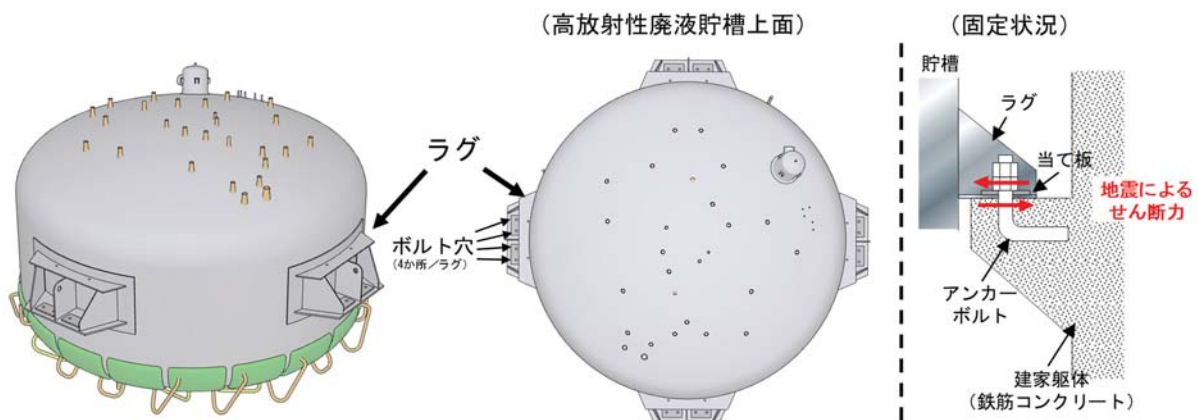


図 1 高放射性廃液貯槽の直接支持構造

図 2 にラグとアンカーボルトの固定状態についての詳細を示す。高放射性廃液貯槽のラグのアンカーボルトを通す穴は単純な円孔形状ではなく、貯槽側面に垂直方向のスリットが設けられており、当て板を挟んで二重ナットによりボルトとラグ（ラグの底板）を締め付けている。スリット板はラグの底板にはめ込まれて溶接により一体化されている。当て板は座金と同じようなものでラグの底板とナットの間で締め付けられているものの、固定はされておらず、地震時にははめ込まれているアンカーボルトに追従して動く。図 3 にはアンカーボルトの設計図を示す。

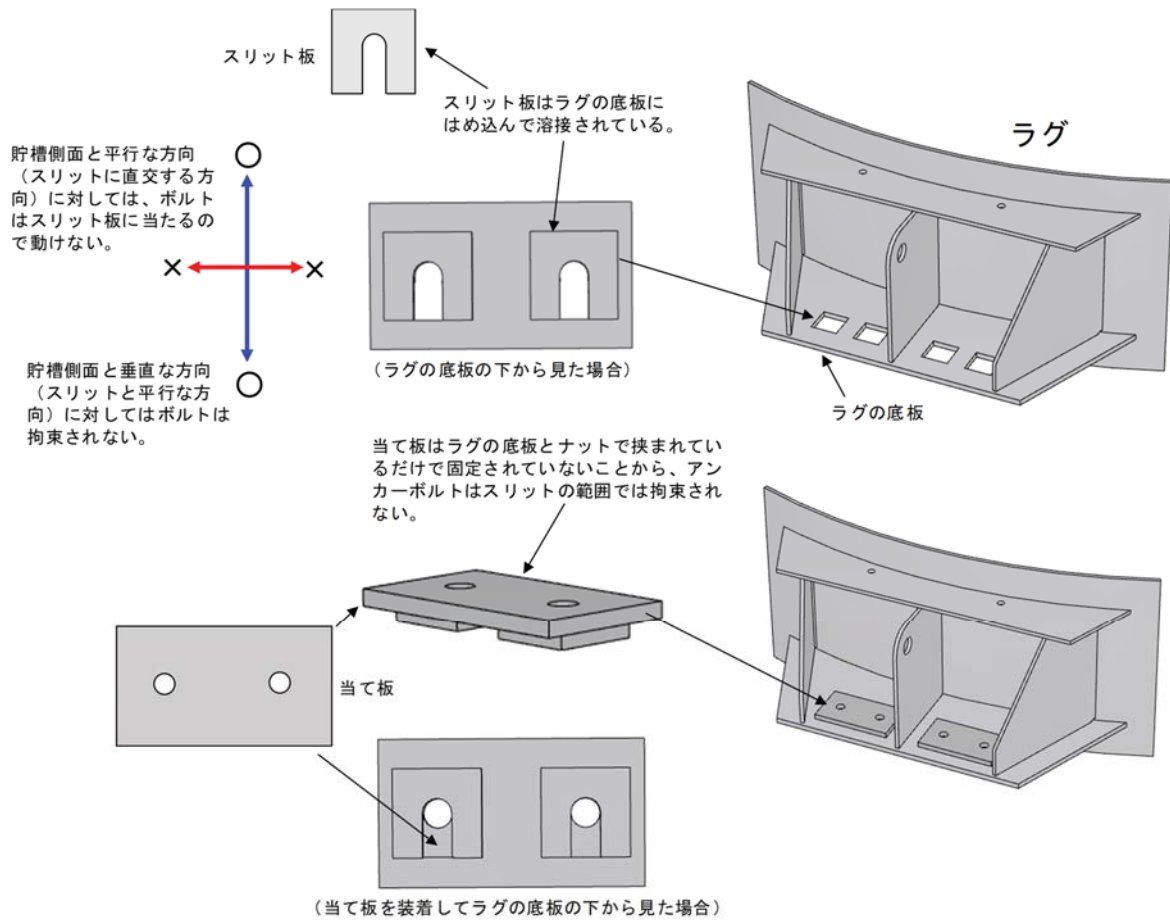


図 2 高放射性廃液貯槽ラグの固定状態

3. せん断強度試験

3.1. 試験の対象

実機で使用された材料および支持構造に基づき、高放射性廃液貯槽を支持しているアンカーボルトが実際の設置状態で耐えうる最大のせん断力（アンカーボルトが破断する恐れのある荷重）を取得する。また、取得した荷重データから許容荷重及び許容応力を評価する。

3.2. 準拠する規格

前項の目的に適した試験を実施するために、設計規格^[1]における"SSB-3210 許容荷重"に定める内容に準拠した荷重試験を実施する。その要件は以下の通りである。

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変わることができる。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。

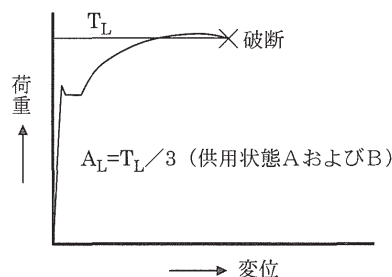
荷重試験における供試体の個数は、同一の材質および形状を有する支持構造物ごとに 3 個とし、供試体によって得られた値のうち最小の値を用いて許容荷重を計算する。ただし、計算で求めた許容荷重の 0.9 倍の値を許容荷重とする場合は、同一の材質及び形状を有する支持構造物ごとに 1 個の供試体により得られた値を用いることができる。

解説 SSB-3210 許容荷重

SSB-3200 は、荷重試験によって支持構造物の許容荷重をあらかじめ求めておき、実際の荷重がその許容荷重以内であることを確認することにより支持構造物の強度上の評価を行う場合について定めたものである。荷重試験の具体例を次に示す。

(1) 荷重試験の具体例

支持構造物の荷重試験は、それが使用される荷重状態（引張またはせん断等）に合致させた方法で行わなければならない。例えば、配管のハンガロッドに対して荷重試験によって許容荷重を求める場合は、引張試験を行えばよい。この時に得られる T_L は解説図 SSB-3210-1 のようになる。



解説図 SSB-3210-1 荷重－変位曲線

したがって、供用状態 A および B における許容荷重 A_L は、最高使用温度が室温の場合において $A_L = \frac{T_L}{3}$ となる。

SSB-3210 で規定した許容荷重と SSB-3110 の許容応力との関係は、次に掲げるとおりである。

供用状態 A および B における許容荷重は、

$$A_L = \frac{1}{3} \times T_L \times \frac{S_{yd}}{S_{yt}} \quad (\text{解説 SSB-32})$$

T_L は、試験時に最も弱い部分が S_u に達した時の値と考えられるため、引張応力で考えれば、

$$\sigma_L = \frac{1}{3} \times S_u \times \frac{S_{yd}}{S_{yt}} \quad (\text{解説 SSB-33})$$

となる。

SSB-3121 の許容応力では、引張に対して、

$$f_t = \text{MIN} \left[\frac{0.7}{1.5} S_u, \frac{1}{1.5} S_y \right] \quad (\text{解説 SSB-34})$$

としており、 $\frac{S_{yd}}{S_{yt}}$ は許容荷重の温度補正を表すため、最高使用温度における S_u ベースで考えると、

$$\frac{A_L}{f_t} = \frac{\frac{1}{3} S_u}{\frac{0.7}{1.5} S_u} = \frac{2.14}{3} = 0.713 \quad (\text{解説 SSB-35})$$

S_y ベースで考えると、通常材料では、 $S_y \geq \frac{1}{2} S_u$ であるため $S_y = \frac{1}{2} S_u$ と仮定して計算すると、

$$\frac{A_L}{f_t} = \frac{\frac{2}{3} S_y}{\frac{1}{1.5} S_y} = 1 \quad (\text{解説 SSB-36})$$

となり、許容応力に対して等価または安全側となる。

またステンレス鋼材 (SUS304 または SUS316) のように S_y が $\frac{1}{2} S_u$ を下回る材料においては、 $f_t = \frac{1.35}{1.5} S_y$ としているため、上記の考え方を採っても $S_y \geq \frac{1}{2.7} S_u$ の範囲の材料までカバーされることとなる。

なお、供用状態 A および B に対する割増し係数は、許容応力における S_y ベースの係数と等価である。

- (2) 本規定の「同一の材質および形状を有する支持構造物」とは、同一寸法で同一規格材を使用し、同一の製造法で製造され、同一の品質管理規準に合格したものであること。供試体の個数が 1 個の場合、 T_L の 90% を用いることにしたのは、ASME B&PV Code Section III NF-3281 (2001) による。3 個の場合、最低の T_L を用いるのは平均値より安全側であるためである。

3.3. 使用材料と規格への適合性

高放射性廃液貯槽に実際に使用されているアンカーボルトは JIS G 4303 で規格化された SUS-316 材で製作された M48 ボルト (並目ねじ) である。JIS の規格値と実際に使用されているアンカーボルト、今回の荷重試験で用いた供試体の材料特性を表 3 に示す (なお、これらのエビデンスとなる材料試験成績書を添付-1 及び 2 に示す)。成分においては Si と S で、機械的特性では 0.2 %耐力の数値でやや差違が目立つが、いずれも JIS 規格の定める範囲内のバラツキである。

これより、本試験で用いる供試体は SSB-3210 の要求するところの〈同一の材質〉、すなわち「同一規格材 (=JIS G 4303 に基づく SUS-316 ステンレス鋼棒材) を使用し、同一の製造法 (=同一熱処理温度で固溶化処理を実施) で製造され、同一の品質管理規準 (=当該 JIS に定められた項目について材料検査証明による確認) に合格したもの」に適合し

ていると考える。

表 3 高放射性廃液貯槽アンカーボルトと供試体の材料特性

対象 (SUS316)	寸法 (mm)	化学成分							
		C (%×100)	Si (%×100)	Mn (%×100)	P (%×1000)	S (%×100)	Ni (%×100)	Cr (%×100)	Mo (%×100)
規格範囲 ^{※1}	—	max 8	max 100	max 200	max 45	max 30	1000 ~ 1400	1600 ~1800	200 ~300
実物	48	6	75	122	34	4	1036	1633	207
供試体	48	5	29	129	33	27	1006	1708	202

対象 (SUS316)	機械的特性							熱処理温度 (°C)
	試験温度 (°C)	試験片	0.2%耐力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)	絞り (%)	硬さ試験 (HBW)	
規格範囲 ^{※1}	—	—	min 205	min 520	min 40	min 60	max 187	1010~1150 急冷
実物	20	10号試験片 ^{※2}	255 (26 kgf/mm ²)	608 (62 kgf/mm ²)	62	77	147	1050
供試体	RT	10号試験片 ^{※2}	282	595	60	74	156	1080

※1 JIS G 4303 SUS316

※2 JIS Z 2201 に定める径 12.5×焦点距離 50mm の試験片サイズ。

3.4 試験方法と規格への適合性

荷重試験の方法は実物の支持構造を模擬できるように検討を行った。実機の支持構造は「2. 高放射性廃液貯槽の支持構造」で述べたとおり、ラグの底板に設けられたスリット状のボルト孔にアンカーボルトを差し込み、二重ナットで締結したものである。アンカーボルトはラグの底板とアンカーボルトが埋め込まれた建家躯体によって拘束されるため地震動による水平力によってせん断力を負担する。

このような実機の固定状態における地震時せん断力を模擬するために、試験治具としては、

- ・スリットと直行する方向への荷重の作用を模擬するラグ模擬体 A (スリット直行)
- ・スリットと平行な方向への荷重の作用を模擬するラグ模擬体 B (スリット並行)

の 2 通りを製作した。試験治具の概念を図 4 に示す。先に示した SUS316 の棒材を実機的设计図及び施工記録に基づきメートル並目ねじの規格 (JIS B 0205) で加工した供試体 (M48 ボルト相当、図 5) の一端を試験治具の固定架台にはめ込んで二重ナットで結合した。ラグ模擬体は実機ラグと同じ SUS-304 で製作したものであり (図 6)、供試体の反対側に図 7 に示すように実機の据付時寸法に合致するようにラグ模擬体とアンカーボルトのねじ切り位置を調整した後、二重ナットで結合した。その際のナットの締め付けトルクは実機据付工事の時と同じ (1419 N・m) とした。試験治具の組み立て手順を図 8 に示す。

荷重試験はラグ模擬体を油圧式一軸試験装置 (引張・圧縮能力 2000 kN、図 9) のクロスヘッドに固定し、固定架台を設置した油圧式一軸試験装置のテーブルを上方へ一定の荷重速度で移動させていくことで、ラグ模擬体と固定架台に押さえられたボルト供試体に発生するせん断力を漸増させていき、その時の荷重と変位を測定する。荷重の増加はボルト

が破断するまで継続した。これらの試験は(財)茨城県建設技術管理センター (ISO17025 認証試験所) にて実施した。

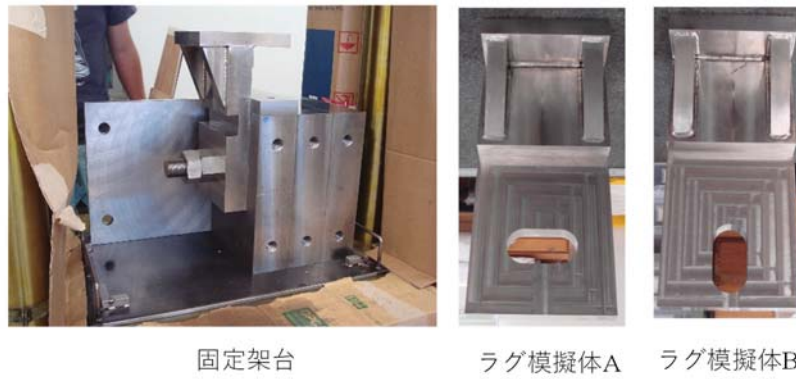
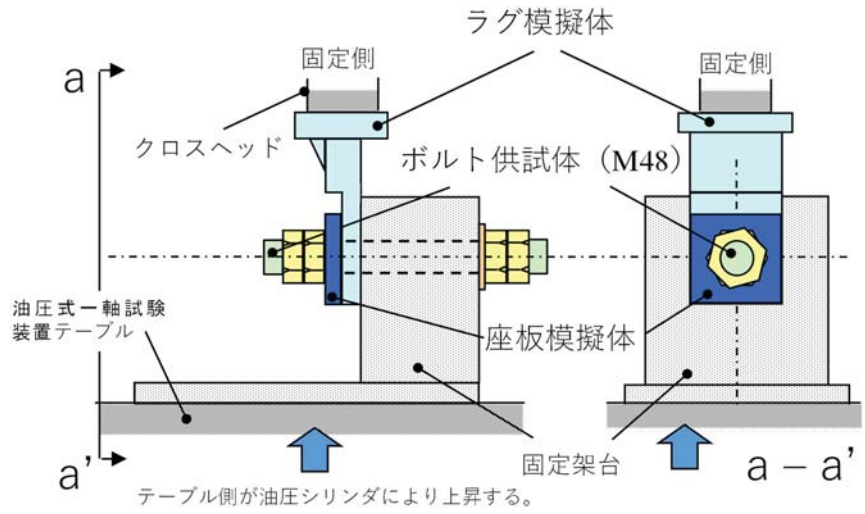
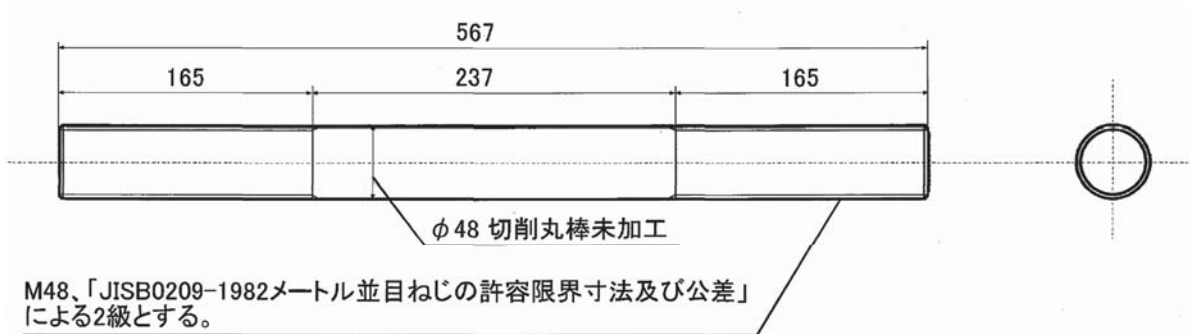
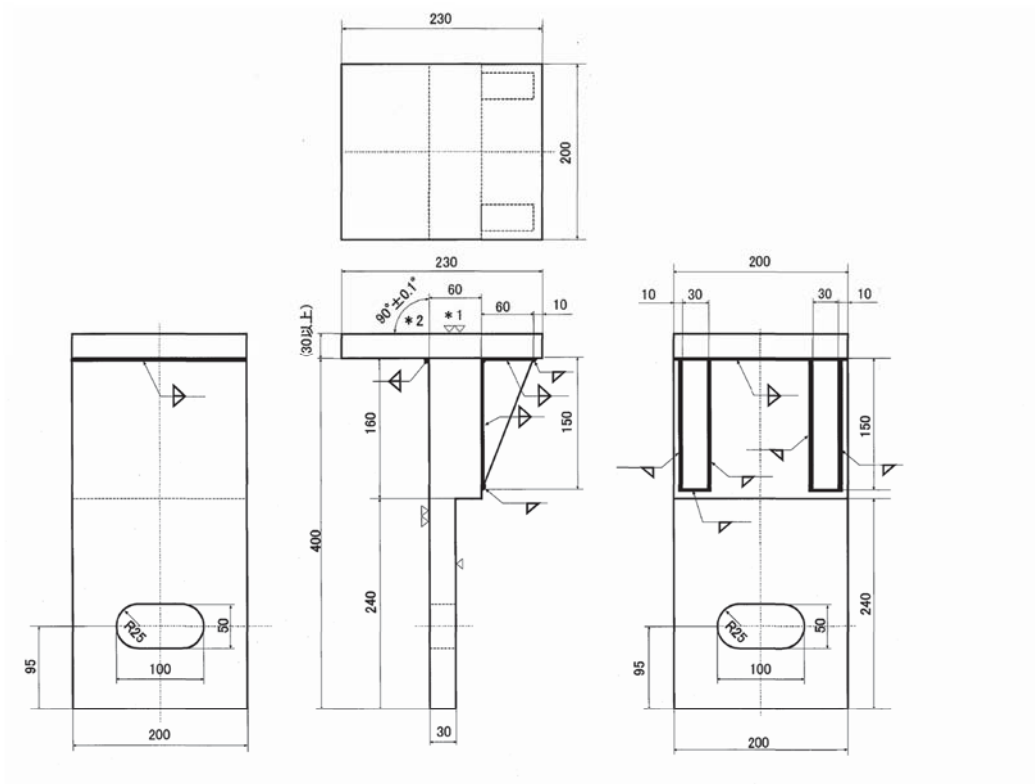


図4 せん断荷重試験の試験治具



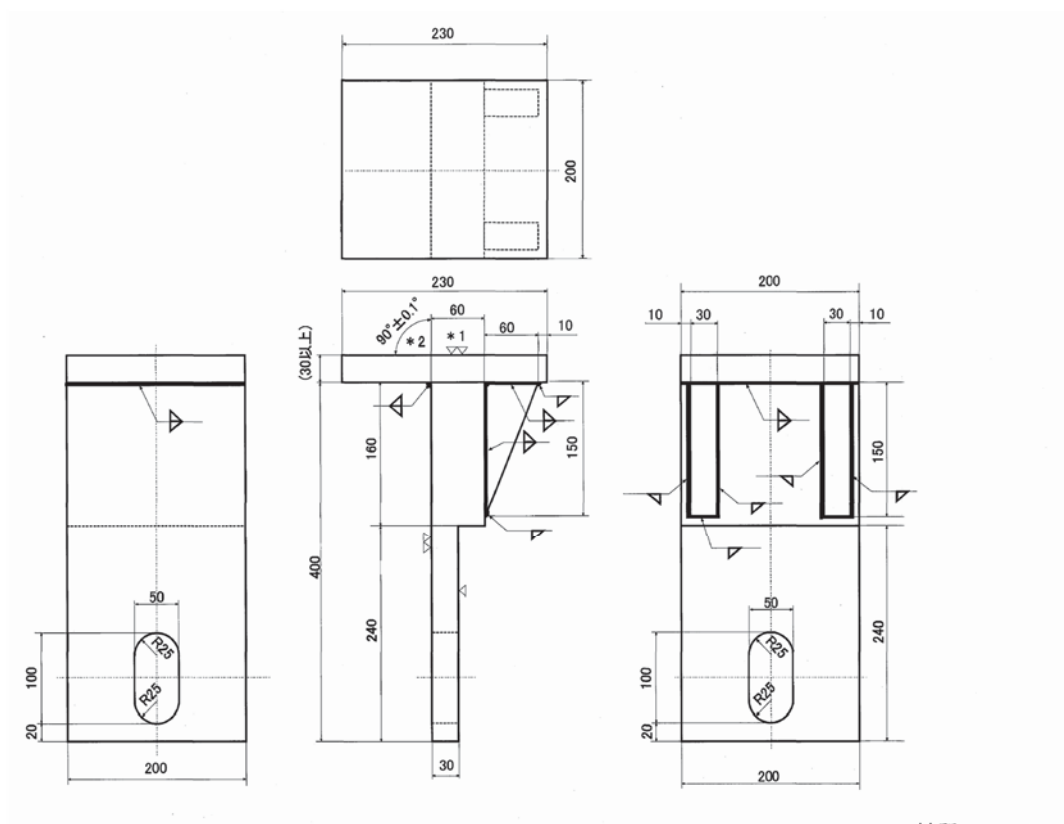
材質:SUS316

図5 ボルト供試体



ラグ模擬体A (スリット直交)

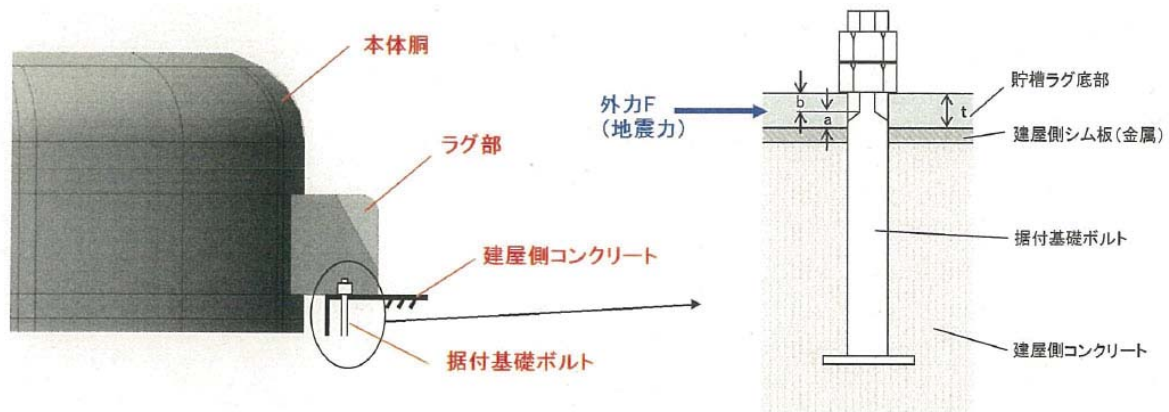
材質:SUS304L



ラグ模擬体B (スリット平行)

材質:SUS304L

図6 ラグ模擬体



	HAW
据付基礎ボルト	M48 (SUS316)
ナット	(SUS304)
t[mm]	60
a[mm]	15
b[mm]	45

(1) 据付基礎ボルト設置状況

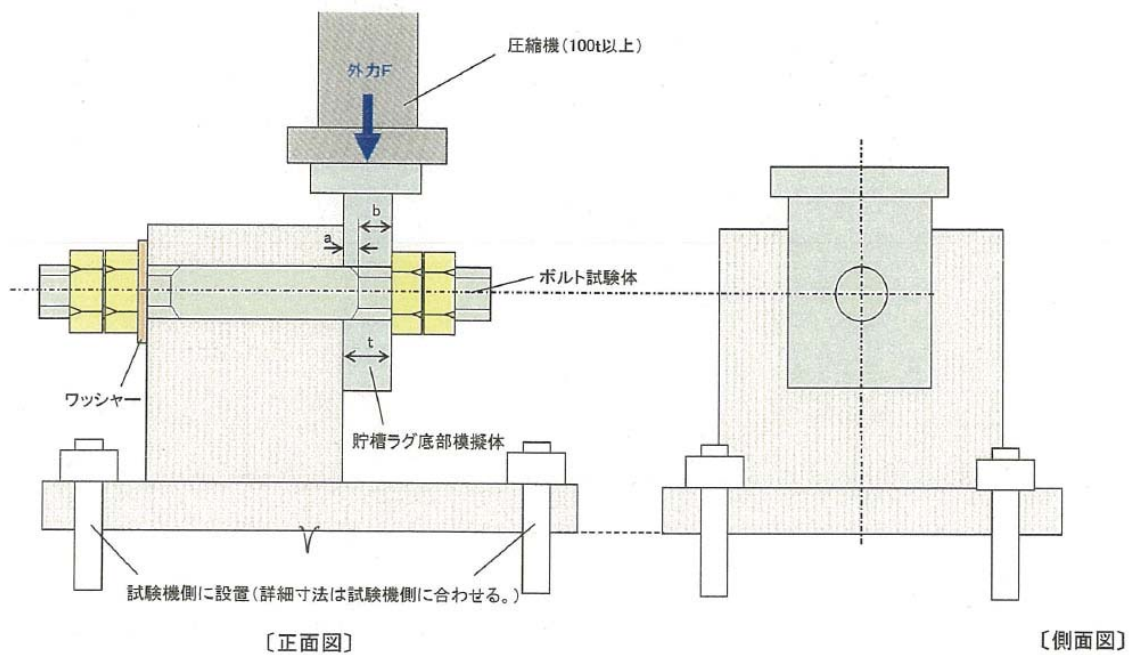


図7 実機の固定構造（アンカーボルトとラグの底板の位置関係）に基づく荷重試験治具の配置
 （アンカーボルトねじ切り位置とラグの当たり具合を示すものであるため、ラグの上部に乗せる座金は表記上省略している）

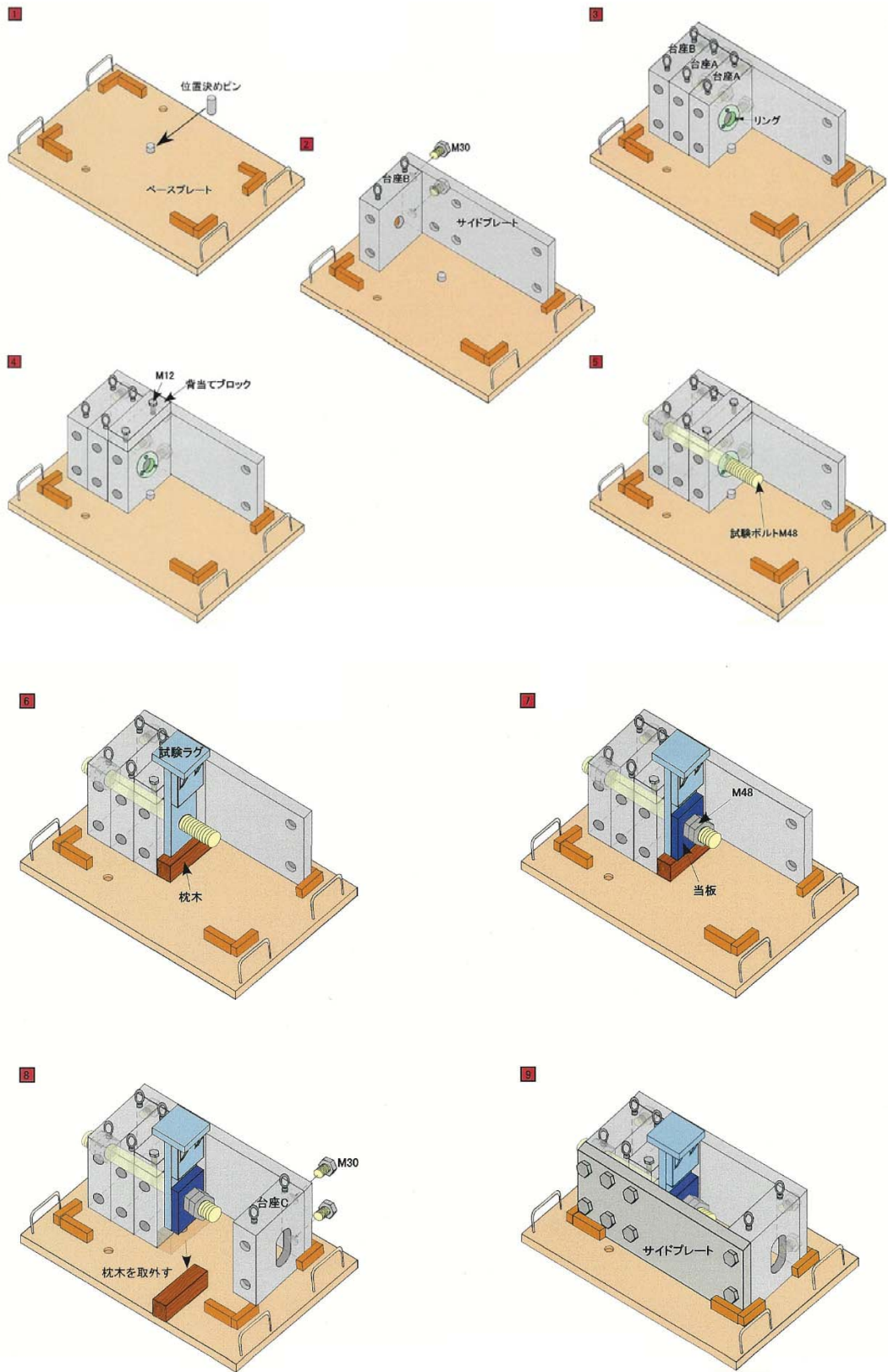


図8 試験治具の組み立て

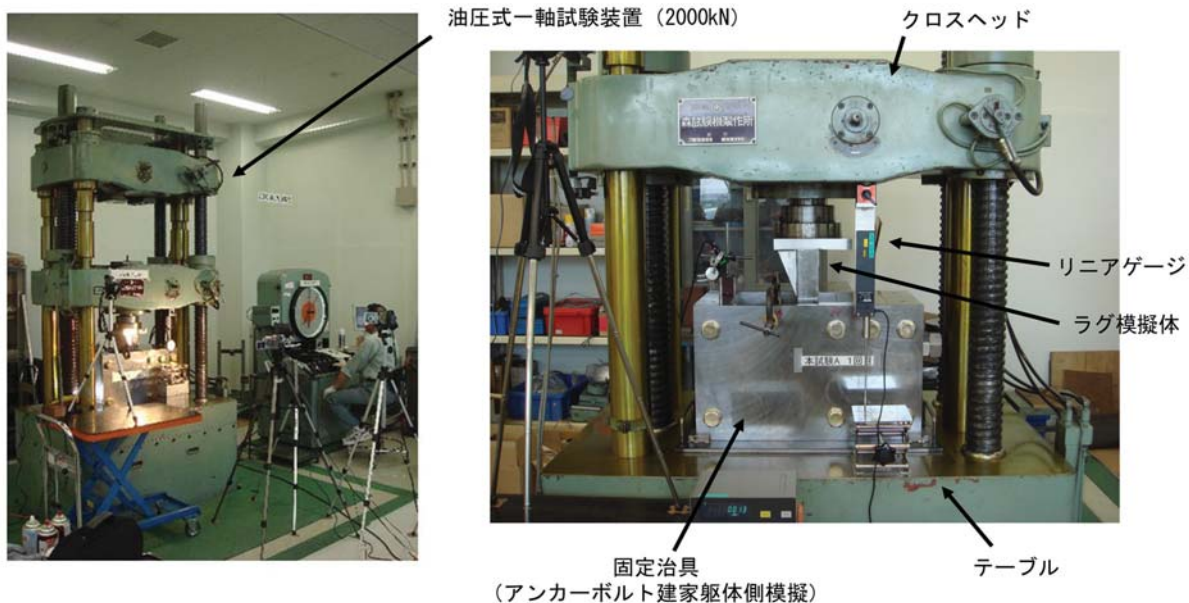


図9 荷重試験装置外観

変位の測定はラグ模擬体を固定している油圧式一軸試験装置のクロスヘッドと上昇テーブルの間に取り付けたリニアゲージにより測定した。また、荷重は試験機に内蔵された荷重計により測定した。試験回数はSSB-3210の規定に基づきラグ模擬体A、ラグ模擬体Bそれぞれ3回実施した。

以上より、本試験内容はSSB-3210の要求するところの<同一の材質および形状を有する支持構造物ごとに3個>に適合したものとなっている。

また、実機における使用前検査項目・自主検査項目である材料確認検査、ボルト締付力確認、ボルト据付位置確認を行うことにより、同一の品質管理基準を満足するものとした。

3.5 その他の試験条件

(1) 温度

試験温度は室温とした。実機は高放射性廃液貯槽からの熱が伝導するため、その強度評価時に考慮する温度は設計で定める最高使用温度とするが、許容荷重の計算においてはSSB-3200の規定に基づく許容荷重の計算式においては室温に対して使用温度を考慮した補正を行うため、本試験における温度は室温で実施した。

(2) 荷重速度

JIS規格には引張り試験における荷重速度は規定されているものの、せん断試験についての記載がないことから以下の考察によりSUS-316材のひずみ増加率が60%/minになる荷重速度として17.6kN/secとした。

(i) ひずみ増加率

ステンレス鋼材料の引張り試験の引張速度はJIS G 4303に規定があり、それによれば試験片平行部のひずみ増加率が40~80%/min(試験温度23±5℃)になるような引張速度を用いることとされている。本せん断荷重試験においても当該規定に従うこととし、その中央値である60%/minとなるように荷重速度を設定した。

(ii) ひずみ増加率に基づく荷重速度

本せん断荷重試験の対象材料である SUS-316 の引張り強さは"SUS316 の高温強度試験（構造材料試験 77-3）"（PNC TJ 202 78-28、日立製作所実施）の室温における引張り試験結果でより 58.3 kg/mm²（571 MPa）であることから、上記で設定したひずみ増加率 60 %/min に基づき、供試体の断面積（φ 48 mm）より求まる

$$(571 \text{ MPa} \times \pi \times (0.024 \text{ m})^2) \div 58.8 \% \times 60 \%/\text{min} = 17.6 \text{ kN/sec}$$

を油圧式一軸試験装置で操作する荷重速度とした。

4. 試験結果

4.1 ラグ模擬体 A（スリット直交）

ラグ模擬体 A を用いた 3 回の荷重試験の結果得られた変位－荷重関係を図 10 に示す。試験時の最大荷重は 785.5～798 kN であった。最大荷重点までの曲線は 3 回とも概ね一致しており、最大荷重点以降から破断点まではばらつくものの破断点の荷重に大きな違いは見受けられなかった。

1回目		2回目		3回目	
変位量 [mm]	荷重 [kN]	変位量 [mm]	荷重 [kN]	変位量 [mm]	荷重 [kN]
0	0	0	0	0	0
1	23.5	1	18.5	1	14.5
2	147	2	125.5	2	112.5
3	274	3	254.5	3	241.5
4	362	4	343.5	4	335
5	417	5	400.5	5	395
6	458.5	6	441	6	438.5
7	495	7	479	7	477
8	528	8	513	8	511.5
9	560	9	546.5	9	545.5
10	589	10	577	10	575.5
11	618	11	606	11	605.5
12	645	12	633	12	633
13	668	13	660	13	659.5
14	692.5	14	683.5	14	683.5
15	715	15	706.5	15	706.5
16	735.5	16	728.5	16	729
17	753.5	17	747	17	749.5
18	770	18	763.5	18	766.5
19	781.5	19	775.5	19	783
20	789.5	20	783	20	792.5
21	791	20.6	785.5	21	797.5
22	783.5	21	785	21.3	798
23	756	22	777	22	796.5
24	710	23	754	23	781.5
24.7	658.5	24	710.5	24	751.5
		24.6	666	25	703.5
				25.8	663.5

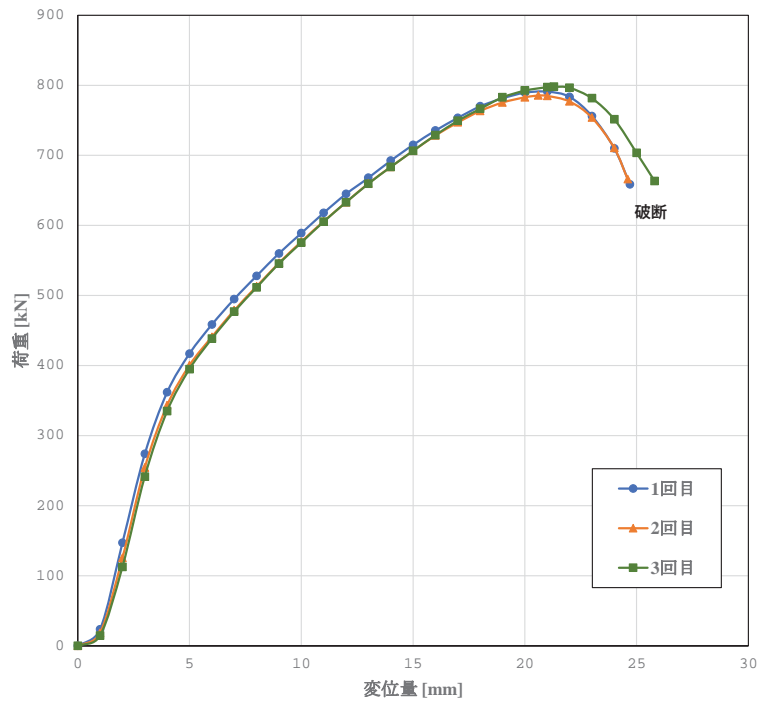


図 10 ラグ模擬体 A（スリット直交）の荷重試験結果：変位－荷重曲線

4.2 ラグ模擬体 B（スリット並行）

ラグ模擬体 B を用いた 3 回の荷重試験の結果得られた荷重－変位関係を図 11 に示す。試験時の最大荷重は 804～815 kN であった。最大荷重点までの曲線は 3 回とも概ね一致している。最大荷重点以降から破断点までは荷重が大きく低減したものの、破断点の荷重に大きな違いは見受けられなかった。

1回目		2回目		3回目	
変位量 [mm]	荷重 [kN]	変位量 [mm]	荷重 [kN]	変位量 [mm]	荷重 [kN]
0	0	0	0	0	0
1	23	1	19	1	20.5
2	119.5	2	131.5	2	147.5
3	352	3	355	3	353.5
4	442.5	4	445.5	4	437
5	495	5	497.5	5	489.5
6	538.5	6	541	6	533
7	577.5	7	580.5	7	573.5
8	612.5	8	616	8	606.5
9	644.5	9	647	9	639
10	673	10	676.5	10	667.5
11	698.5	11	702.5	11	694
12	724	12	727.5	12	718
13	746	13	750.5	13	740.5
14	766	14	771	14	760
15	782.5	15	788	15	778
16	794.5	16	800.5	16	793
17	803	17	809	17	805
17	803	17.9	812	18	813
17.6	805	18	812	18.7	815
18	804	19	805	19	815
19	792	20	777.5	20	802
20	760	21	659.5	21	764.5
21	580	22	583	22	568
22	530	23	432.5	23	508.5
23	412	24	358	24	416
23.7	348.5			24.1	406.5

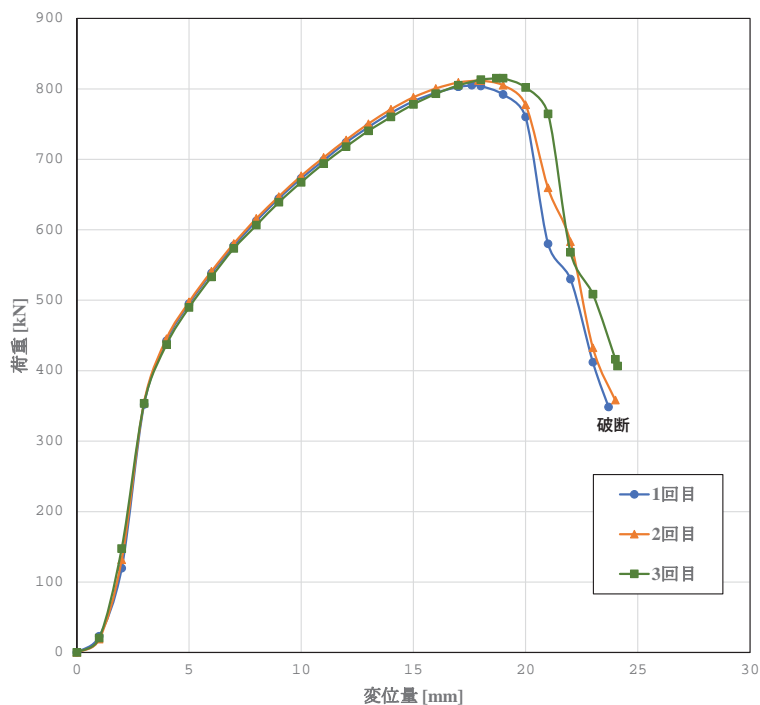


図 11 ラグ模擬体 B (スリット平行) の荷重試験結果：変位－荷重曲線

4.3 荷重方向の違いに関する考察

ラグ模擬体 A とラグ模擬体 B の試験結果から、それぞれ最も低い最高荷重値となった試験の変位－荷重曲線を図 12 に示す。またそれぞれの試験後の供試体の状況を図 13、図 14 に示す。

変位－荷重曲線の比較では、最大荷重値は大きくは異なるものの、最大荷重値までの曲線及び最大荷重値から破断に至る変位関係には相違が見られた。この理由として、スリットに対するボルトの拘束関係が関係していると考えられる。

ラグとボルトの接触面については、ラグ模擬体 A ではスリットの直線部分とボルトの円周部分の 1 点が接触しているのに対し、ラグ模擬体 B ではスリットの円周部分とボルトの円周部分が面で接触しているという違いがある (図 15)。図 13 と図 14 から供試体 (ボルト) のマクロ的視点での変形は両方で大きく異なる挙動を示していない。一方、ラグ模擬体のボルトとの接触面の変形では、ラグ模擬体 A ではボルト接触の圧痕だけでなく一部で塑性変形を示している。ラグ模擬体 B ではボルトのねじ山の圧痕程度の変形を示している程度である。またラグ模擬体 A の変形ではボルトの軸方向で塑性変形の程度が異なるから均一な荷重伝達ではなく、固定治具側 (実機での建家躯体側) の方が大きな力を受けていることを示している。これはねじ山のない位置のボルト側面部分がラグの底板との接触を集中的に受けることになるからである。これらより、ラグ模擬体 A では加えられた荷重の幾分かはラグ側の降伏で負担していることがわかる。また、ねじ山の変形 (つぶれ) も集中荷重を受けるラグ模擬体 A の方が大きくなっており、荷重のエネルギーの一部を吸収している。これらが同じ荷重でもラグ模擬体 B よりラグ模擬体 A の方が変位量

が大きいこととされる。最高荷重点通過後の破断までの変位－荷重曲線の違いも同じようにラグとの接触関係の違いから説明できると考えられる。すなわち、前述したようにラグ模擬体 A では固定治具側の方に大きな変形が認められる。供試体（ボルト）が破損し始めてからも荷重の増加に応じてラグの固定治具側接触面の変形が拡大することにより多くの荷重をラグ側で負担することになって、破断までの荷重の落ち込みが小さくなったものと考えられる。一方、ラグ模擬体 B はせん断力のほとんどを供試体（ボルト）側で負担することで、破損の開始から破断までの荷重の落ち込みが大きくなったものと考えられる。

一般的にボルトでの固定は単純な円孔にボルトを通して締結することから、ラグ模擬体 Bの方が一般的なボルト締結による支持構造への適用性が高いと考えられる。すなわちラグ模擬体 Aの方は今回模擬した高放射性廃液貯槽のアンカーボルト支持構造特有の特徴を示したものとする。

なお、ここで示さなかった他の試験においても同様の破壊後の様相が認められた。

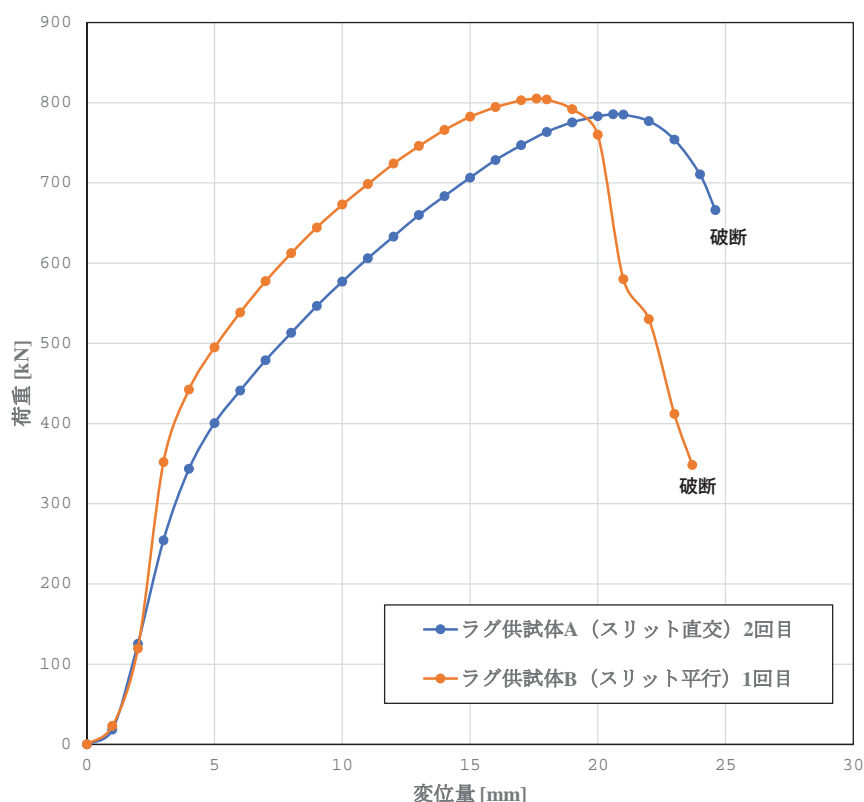
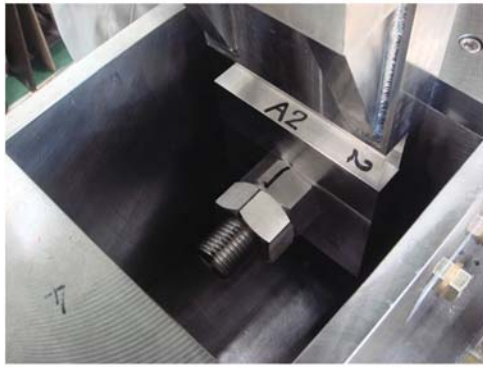
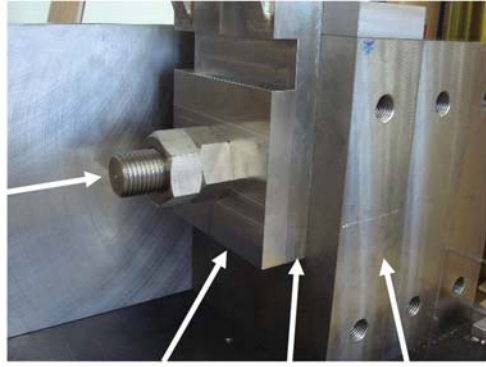


図 12 ラグ供試体 A（スリット直交）とラグ供試体 B（スリット平行）の変位－荷重曲線の比較

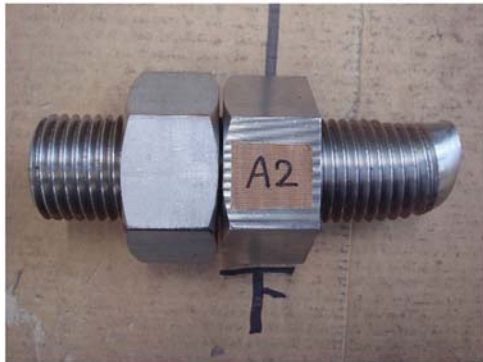


供試体
(ボルト)



↑
固体架台が
上方へ移動

座板 模擬ラグ 固体架台



↓
せん断方向



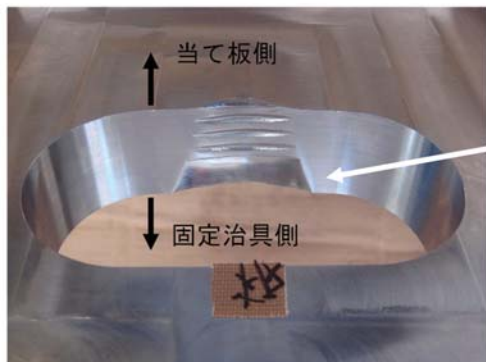
↑
せん断方向



↓
せん断方向

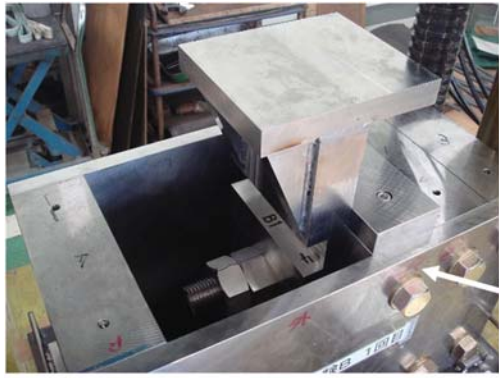


↑
せん断方向

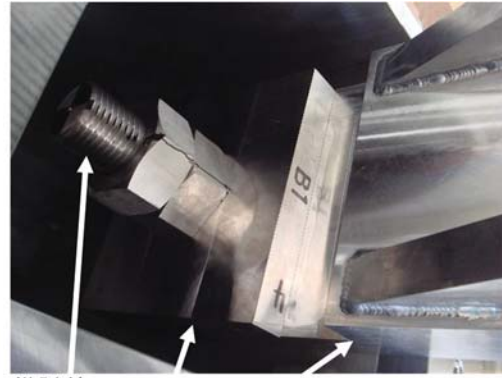


↑
固定治具側の
変形が大きい

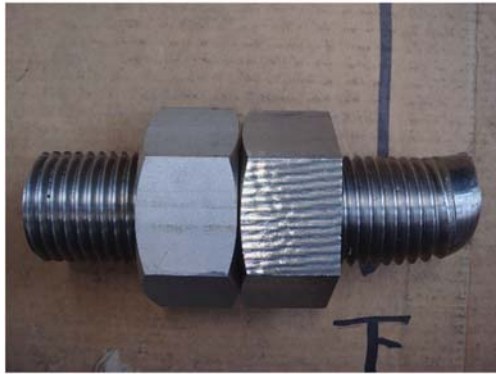
図 13 模擬ラグ A (スリット直交) 2 回目試験の試験後の供試体等の状況



↑
 固体架台が
 上方へ移動
 ↓
 固体
 架台



↑
 供試体
 (ボルト)
 ↓
 座板 模擬ラグ



↑
 せん断方向
 ↓



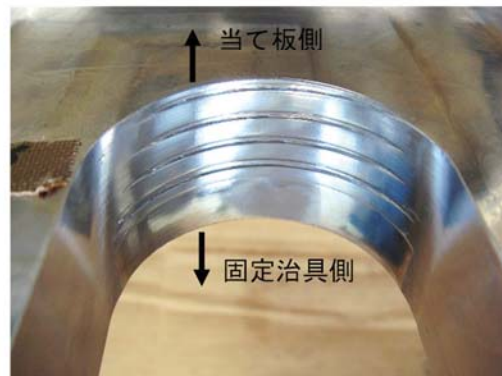
↑
 せん断方向
 ↓



↑
 せん断方向
 ↓



↑
 せん断方向
 ↓



↑
 当て板側
 ↓
 固定治具側

図 14 模擬ラグ B (スリット平行) 1 回目試験の試験後の供試体等の状況

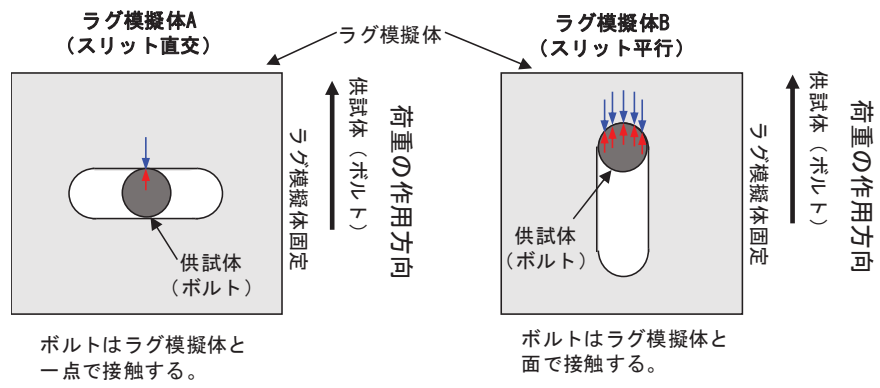


図 15 ラグ模擬体と供試体（ボルト）の接触の違い

5. 試験結果に基づく許容応力の評価

二つのラグ模擬体でそれぞれ 3 回の荷重試験を行った結果、それぞれの試験で最大の荷重は表 4 に示す通りであった。

表 4 荷重試験における最大荷重値

試験	ラグ模擬体 A (スリット直交)	ラグ模擬体 B (スリット平行)
1 回目	791.0 kN	804.0 kN
2 回目	785.5 kN	812.0 kN
3 回目	798.0 kN	815.0 kN
観測値最小値	785.5 kN	804.0 kN

これより JSME S NC1-2008 の SSB-3240 に基づき許容荷重を計算する。その際に用いる荷重試験から得られた値としては、SSB-3210 に定められているように同一条件について 3 個の供試体から得られた値のうちの最小の値 (kN 単位とし、小数点以下切り捨て) を用いる。

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。

$$A_L = \frac{0.6T_L S_{yd}}{S_{yt}}$$

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)

上記に基づき計算した許容荷重およびアンカーボルト (φ 48 mm) の断面積を考慮した場合の許容応力は表 5 の通りとなる。このように算出した許容荷重は図 16 に示すように試験データの最大荷重 (3 回試験中の最小値) に対しても十分な裕度を持っている。

参考として図 16 には材料規格 ㉒に記載されている JIS G 4303 ステンレス鋼棒 SUS-316 の設計降伏点・設計引張強さから設計規格 ㉑の"SSB-3133 供用状態 D での許容応力"に規定されている方法を用いて算出した許容せん断応力 (142 MPa) にボルト断面積をかけて許容荷重を求めた結果 (257 kN) を併記している。荷重試験から得られた値をもとに算出した許容荷重を実力値とみなすと、実力値は規格値に対して約 1.6 倍の余裕があるとみなせる。

表 5 荷重試験から得た値に基づき計算した許容荷重および許容応力

試験条件	ラグ模擬体 A (スリット直交)	ラグ模擬体 B (スリット平行)
観測値 最小値 T_L	785 kN/本	804 kN/本
試験温度	室温	
最高使用温度	80 °C	
S_{yt} (JIS G 4303 SUS-316)	205 MPa (室温) ※ 材料規格 Part 3 第 1 章 表 6 の常温最小降伏点。	
S_{yd} (JIS G 4303 SUS-316)	183.4 MPa (80°C) ※ 材料規格 Part 3 第 1 章 表 6 の 100°C の値 (176 MPa) と 65°C の値 (189 MPa) を線形補間して求めた 80°C の値。	
許容荷重 A_L	421.4 kN/本 (80°C)	431.6 kN/本 (80°C)
供試体断面積	1809 mm ² ※ M48 ボルト呼び径 (48mm) より $3.14 \times 24^2 \cong 1809$	
許容応力 f_s	232.9 MPa (80°C)	238.5 MPa (80°C)
	上記より低い側の値の小数点以下を切り捨てた 232 MPa を高放射性廃液貯槽の据付けボルトのせん断に対する許容応力とする。	

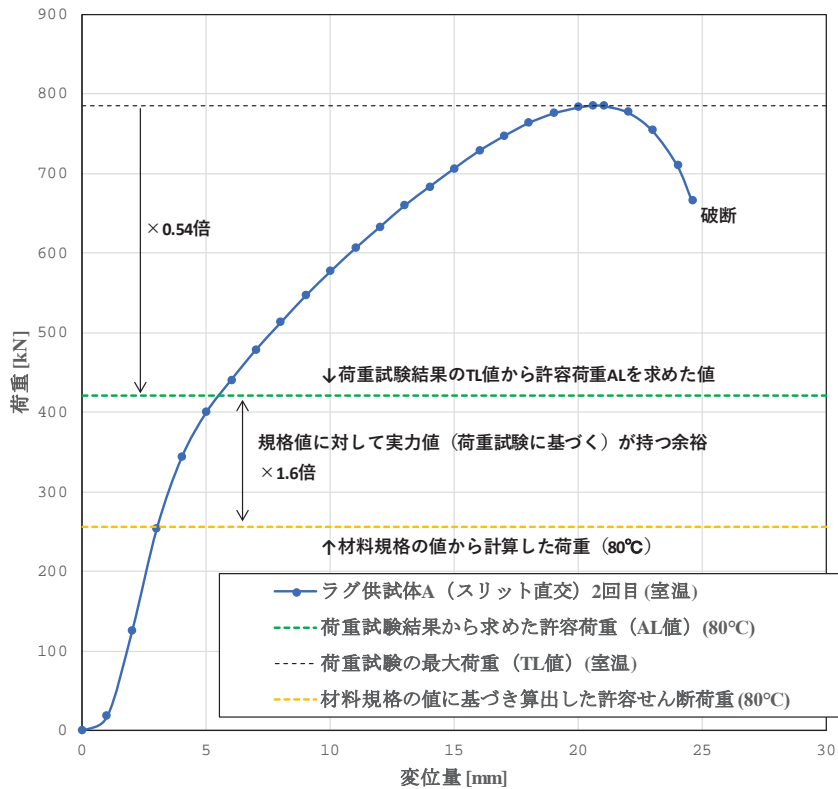


図 16 試験データと許容荷重 A_L の比較

7. まとめ

高放射性廃液貯蔵場（HAW 施設）において高放射性廃液を貯蔵する大型の貯槽である高放射性廃液貯槽（272V31～V36）を直接支持しているアンカーボルトについて、地震時に作用する水平方向せん断力に対する強度を明らかにするために、実機の支持構造を模擬して荷重試験を実施した。荷重試験の方法は"日本機械学会規格 発電用原子力設備規格 設計・建設規格（2008年版）〈第I編 軽水炉規格〉"（JSME S NC1-2008）¹⁾の"SSB-3000 クラス1支持構造物の設計"における"SSB-3210 許容荷重"に基づくものとした。また、支持構造に基づき二種類のラグ模擬体を使用した。

試験の結果、ラグに対するせん断力の作用方向により変位－荷重曲線の挙動に違いが見られたものの、計測された最大許容値に大きな差違は見られなかった。測定された最大許容値のうちの最小値（785 kN/本）を用いてSSB-3240に基づく許容荷重の評価を行い、その値として421 kN/本を得た。また、ボルトの断面積に基づき計算された許容応力は232 MPaであった。

参考文献

1. "日本機械学会規格 発電用原子力設備規格 設計・建設規格（2008年版）〈第I編 軽水炉規格〉", JSME S NC1-2008, 日本機械学会（2008）
2. "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）
3. 上坂 充, 鬼沢邦雄, 笠原直人, 鈴木一彦, "原子力教科書 原子炉構造工学", 株式会社オーム社, ISBN978-4-274-20690-0 (2009)
3. "日本工業規格 JIS G 4303 ステンレス鋼棒", 日本工業規格
4. "日本工業規格 JIS Z 2201 金属材料引張試験片", 日本工業規格
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", JEAG4601-1991 追補版, 日本電気協会 電気技術基準調査委員会（1991）
6. "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）
7. 日立製作所, "SUS316 の高温強度試験（構造材料試験 77-3）", 動力炉・核燃料開発事業団委託報告書, PNC TJ 202 78-28 (1978)
8. 坂口 忍, 立花 郁也, 他, "地震時にせん断荷重を受ける機器据付けボルトの耐震裕度に関する一考察", JAEA-Technology 2011-006, 日本原子力研究開発機構（2011）
9. 白井 更知, 三浦 靖, 他, "第2回 再処理施設の定期的な評価報告書", JAEA-Technology 2016-007 (Part I), 日本原子力研究開発機構（2016）

添付資料

- (1) 材料試験成績書（実機アンカーボルト材）
- (2) 材料検査証明書（本試験において用いた供試体）
- (3) ボルトせん断試験結果通知書

三菱重工神戸造船所

Purchaser: Mitsubishi Heavy Industries Ltd.
(需要者) Kobe Shipyard & Engine works.

P. O. No. 7572201-0100-ZH-387003
(発注注文番号)

Material Spec.: JIS G4303 SUS316-B1
(鋼種規格)

MATERIAL TEST REPORT

(材料試験成績書)



58.6.24

Oct, T
八角子イ

TAKENAKA SEISAKUSHO CO., LTD.

(株式会社 竹中製作所)

Head Office: 1-18, 9-Chrome Tanimachi, Minami-Ku,
Osaka 542, Japan

本社 大阪府南区南9丁目番18号 (住友生命館内)

Date: June 14th 1983
(発行年月日)

Report No. 123B
(成績書番号)

Steel Works (製鋼所)	Dimension (寸法)	Chemical Composition (化学成分)											I. D No.
		Elements (成分)		(% x 100 Except P, S)									
Specification (規格)	Results (成績)	C %	Si %	Mn %	P % (% x 1000)	S % (% x 1000)	Cu %	Ni %	Cr %	Mo %			
max 8	6	max 100	max 200	max 45	max 30	---	1000	1600	200				
Results (成績)	6	75	122	34	4	---	1036	1633	207			14	

Items (項目)	Test Temp. (試験温度)	Test Piece (試験片寸法)	Yield Strength 0.2% offset (耐力)	Tensile Strength (引張強さ)	Elongation (伸び)	Reduction of Area (絞り)	Impact Test (衝撃試験)		Hardness Test (硬さ試験)	Heat Treatment (熱処理)		
							min	Avg		Solution (焼入)	Quenching (焼入)	Tempering (焼戻)
Specification (規格)	°C	mm	kgf/mm ²	kgf/mm ²	%	%	min	min	Hn	°C		
Results (成績)	20	12.5x50.0	21	53	40	60	62	77	max 187	1010	---	---
			26	62	62	77			147	1050	---	---

It is hereby certified that the above results are true and correct in every details.
(上記の通り検査の結果、指定の規格に合格していることを証明致します。)

Certified by



Works (製鋼所)

NS: Nippon Steel Corporation (新日本製鐵株式会社)

AS: Aohi Steel Works, Ltd. (あおひ製鋼株式会社)

KSO: Kawasaki Steel Corporation (川崎製鐵株式会社)

SS: Sanyo Special Co., Ltd. (山陽特殊製鐵株式会社)

AZ: Azuma Steel Co., Ltd. (あづま製鐵株式会社)

L: Kobe Steel, Ltd. (神戸製鋼所)

SM: Sumitomo Metal Industries Ltd. (住友金属工業株式会社)

DS: Daiko Steel Co., Ltd. (大工製鐵株式会社)

KSO: Kawasaki Steel Corporation (川崎製鐵株式会社)

SS: Sanyo Special Co., Ltd. (山陽特殊製鐵株式会社)

AZ: Azuma Steel Co., Ltd. (あづま製鐵株式会社)

契約番号 OUR REF. NO.
CB71B012 15

INSPECTION

CERTIFICATE

検査証明書

Contractor 契約先		三井物産株式会社				ステンタ TM 11A		鋼中		Purchaser 需要家		株式会社UEX				鋼中	
Chemical Composition 化学成分																	
Elements 成分	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	%	%	%	%	%	%	%	
Specification 規格	MAX 100	MAX 100	MAX 200	MAX 45	MAX 30		1000	1600	200								
Results 成績	8	100	200	45	30		-1400	-1800	-300								
Results 成績	5	29	129	33	27		1006	1708	202								
Mechanical Properties 機械的性質																	
Items 項目	Tension Test 引張試験				Impact Test 衝撃試験		Bending Test 曲げ試験		Heat Treatment 熱処理		Remarks 記事						
	Type of Specimen 試験片	Yield Strength 引張強さ	Yield Point 降伏点	Elongation 伸び	Reduction of Area 絞り	Hardness 硬さ	Type of Specimen 試験片	曲げ試験	熱	処理							
Specification 規格	JIS10	MIN 520	MIN 40	MIN 40	MIN 60	HBW MAX 187			BODY								
Results 成績		282	595	60	74	156			1080°C	WQ	寸法検査 GOOD						
Items 項目	Grain Size 結晶粒度		Decarburization 脱炭		Streak Flaw 地きず		Body Hardness 製品かたさ		Non Metallic Inclusion 非金属夹杂物								
Results 成績							HBW 156										
Hardenability (End Quenching Method) 焼入性(一端焼入法)																	
Results 成績																	
Date 発行日	Certificate No. 証明番号		Type of Steel 鋼種		Size & Shape 寸法・形状		Condition 納入状態		Heat No. 溶解番号								
07-2-1 (DS2210)	1M1114 (1BK491)		JISG4303-05-SUS316		48D		ST, PM		D459D								

Quality Assurance Section, Hoshizaki Plant

Daido Steel Co. Ltd.
 大同特殊鋼株式会社
 星崎工場品質保証部
 〒457-8545 名古屋市長区大洞町
 TEL. ダイヤルイン (052) 611-XXXX

It is hereby certified that the above results are true and correct in every detail
 上記の成績は要求事項を満足していることを証明します。
 Chief of Quality Assurance Section

受付番号 09212

ボルトせん断試験結果通知書

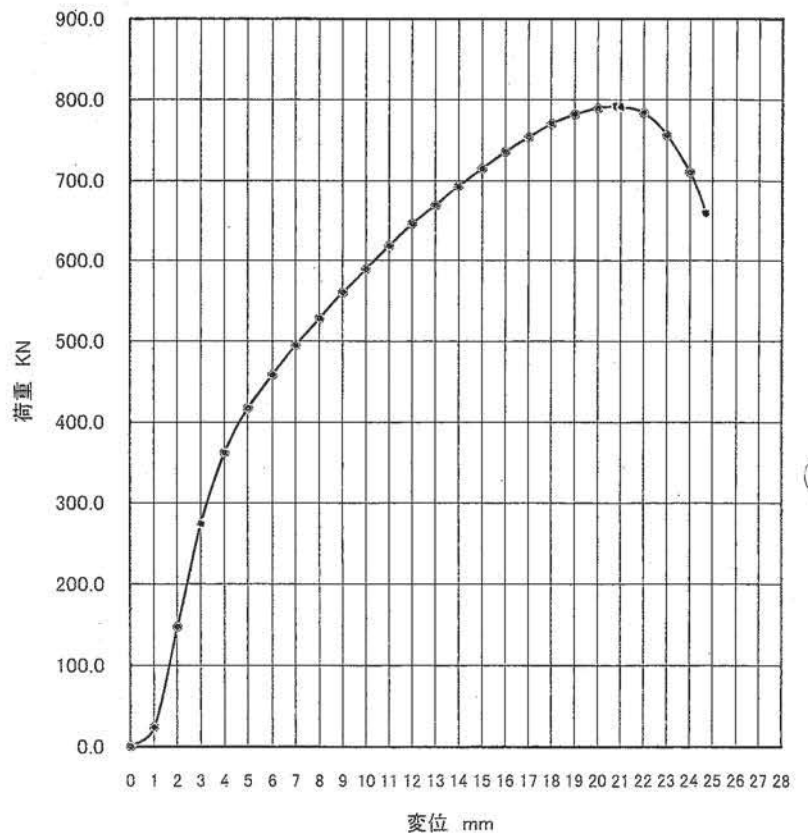
(1/6)

受付年月日	平成 20 年 08 月 06 日	試験年月日	平成 20 年 08 月 07 日
工事名	***		
工事場所	***		
試料名	本試験A 1本目 (SUS316 M48)		
産地又は製造者	***		
特記事項	試験方法は「日本機械学会 (JSME) 発電用原子力設備規格 設計・建設規格 2005年版 SSB-3200」による		

供試体番号 1

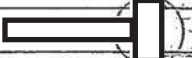
変位量 (mm)	荷重 (kN)	備考
0	0.0	
1	23.5	
2	147.0	
3	274.0	
4	362.0	
5	417.0	
6	458.5	
7	495.0	
8	528.0	
9	560.0	
10	589.0	
11	618.0	
12	645.0	
13	668.0	
14	692.5	
15	715.0	
16	735.5	
17	753.5	
18	770.0	
19	781.5	
20	789.5	
20.8	791.5	最大荷重
21	791.0	
22	783.5	
23	756.0	
24	710.0	
24.7	658.5	破断

荷重～変位量曲線



備 考

荷重速度 = 1056kN/min ≒ 17.6kN/sec とした
 試験室温度 23.3℃

試験者 

ボルトせん断試験結果通知書

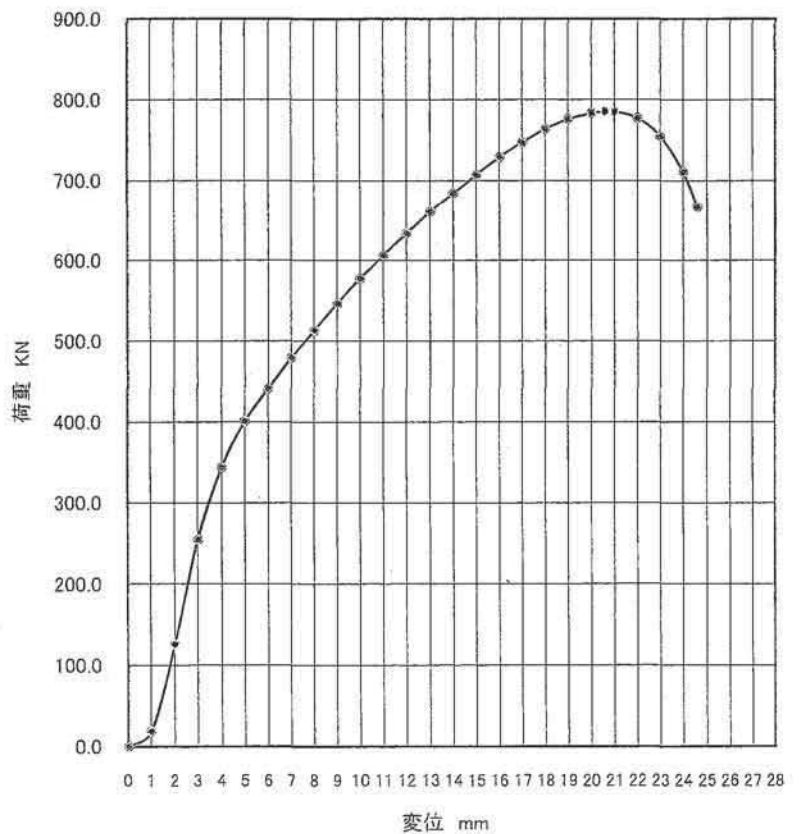
(2/6)

受付年月日	平成 20 年 08 月 06 日	試験年月日	平成 20 年 08 月 07 日
工事名	***		
工事場所	***		
試料名	本試験A 2本目 (SUS316 M48)		
産地又は製造者	***		
特記事項	試験方法は「日本機械学会 (JSME) 発電用原子力設備規格 設計・建設規格 2005年版 SSB-3200」による		

供試体番号 2

変位量 (mm)	荷重 (kN)	備考
0	0.0	
1	18.5	
2	125.5	
3	254.5	
4	343.5	
5	400.5	
6	441.0	
7	479.0	
8	513.0	
9	546.5	
10	577.0	
11	606.0	
12	633.0	
13	660.0	
14	683.5	
15	706.5	
16	728.5	
17	747.0	
18	763.5	
19	775.5	
20	783.0	
20.6	785.5	最大荷重
21	785.0	
22	777.0	
23	754.0	
24	710.5	
24.6	666.0	破断

荷重～変位量曲線



備考

荷重速度 = 1056kN/min ≒ 17.6kN/sec とした
 試験室温度 23.3℃

試験者	[]
-----	-----

ボルトせん断試験結果通知書

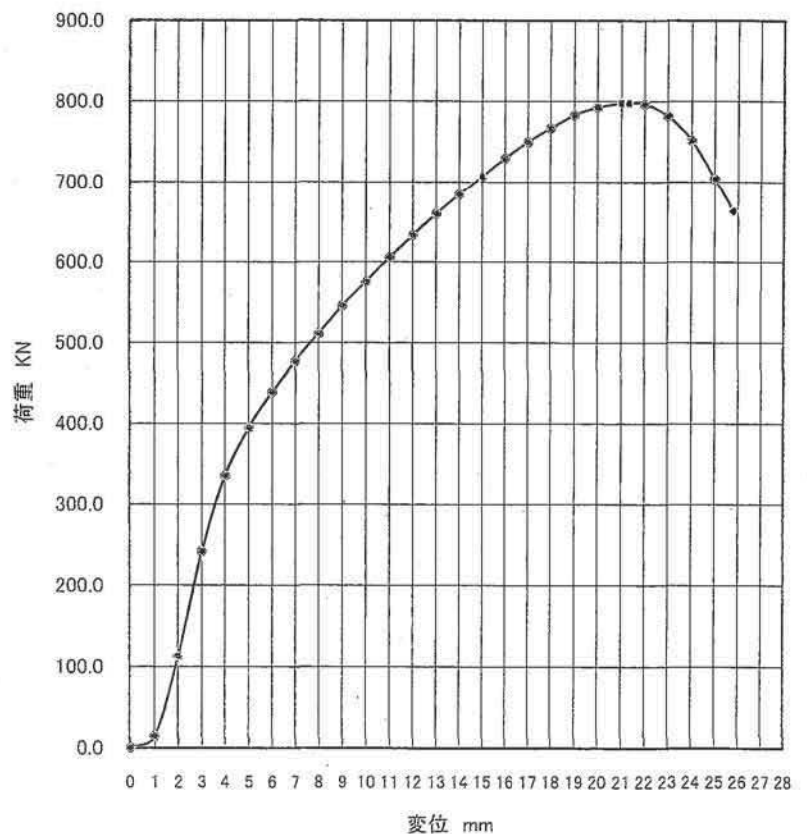
(3/6)

受付年月日	平成 20 年 08 月 06 日	試験年月日	平成 20 年 08 月 08 日
工事名	***		
工事場所	***		
試料名	本試験 A 3本目 (SUS316 M48)		
産地又は製造者	***		
特記事項	試験方法は「日本機械学会 (JSME) 発電用原子力設備規格 設計・建設規格 2005年版 SSB-3200」による		

供試体番号 3

変位量 (mm)	荷重 (kN)	備考
0	0.0	
1	14.5	
2	112.5	
3	241.5	
4	335.0	
5	395.0	
6	438.5	
7	477.0	
8	511.5	
9	545.5	
10	575.5	
11	605.5	
12	633.0	
13	659.5	
14	683.5	
15	706.5	
16	729.0	
17	749.5	
18	766.5	
19	783.0	
20	792.5	
21	797.5	
21.3	798.0	最大荷重
22	796.5	
23	781.5	
24	751.5	
25	703.5	
25.8	663.5	破断

荷重～変位量曲線



備考

荷重速度 = 1056kN/min ≒ 17.6kN/sec とした
 試験室温度 24.1℃

試験者

ボルトせん断試験結果通知書

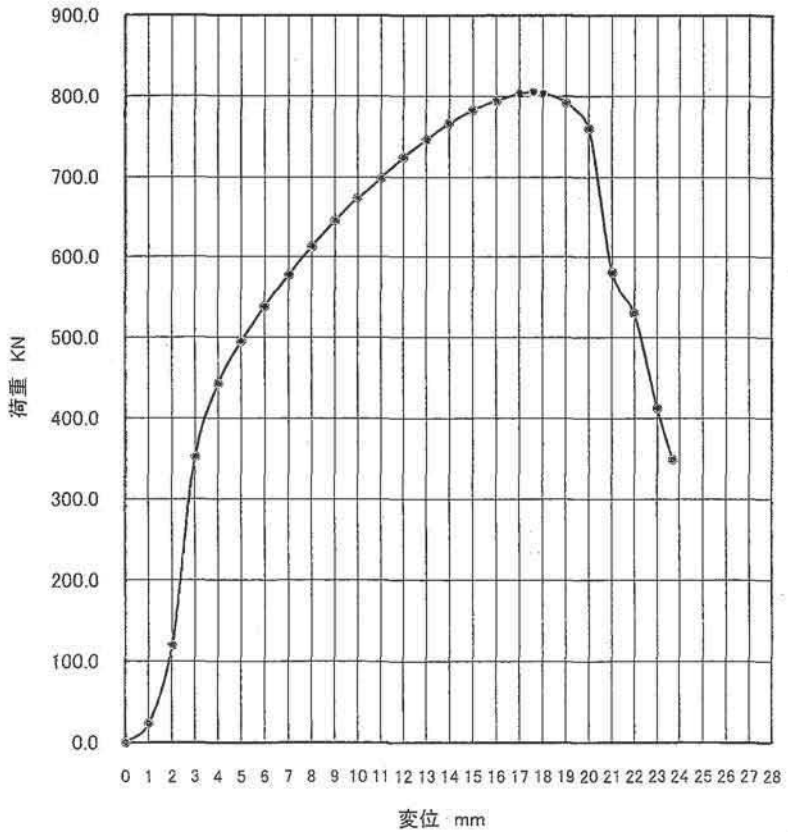
(4/6)

受付年月日	平成 20 年 08 月 06 日	試験年月日	平成 20 年 08 月 07 日
工事名	***		
工事場所	***		
試料名	本試験B 1本目 (SUS316 M48)		
産地又は製造者	***		
特記事項	試験方法は「日本機械学会 (JSME) 発電用原子力設備規格 設計・建設規格 2005年版 SSB-3200」による		

供試体番号 1

変位量 (mm)	荷重 (kN)	備考
0	0.0	
1	23.0	
2	119.5	
3	352.0	
4	442.5	
5	495.0	
6	538.5	
7	577.5	
8	612.5	
9	644.5	
10	673.0	
11	698.5	
12	724.0	
13	746.0	
14	766.0	
15	782.5	
16	794.5	
17	803.0	
17.6	805.0	最大荷重
18	804.0	
19	792.0	
20	760.0	
21	580.0	
22	530.0	
23	412.0	
23.7	348.5	破断

荷重～変位量曲線



備考

荷重速度 = 1056kN/min ≒ 17.6kN/sec とした
 試験室温度 23.1℃

試験者

ボルトせん断試験結果通知書

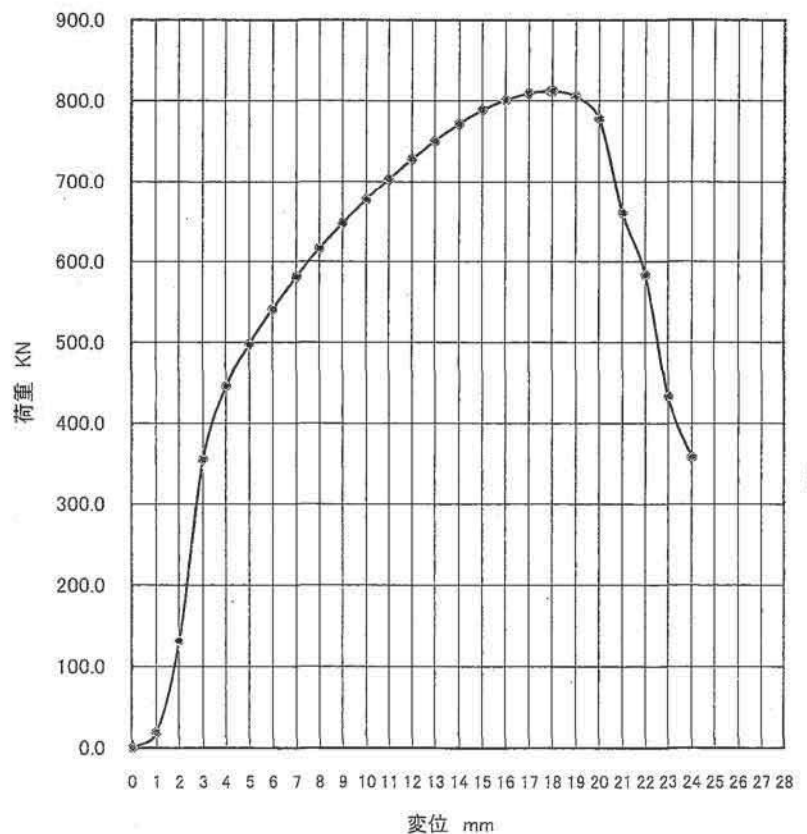
(5/6)

受付年月日	平成 20 年 08 月 06 日	試験年月日	平成 20 年 08 月 07 日
工事名	***		
工事場所	***		
試料名	本試験B 2本目 (SUS316 M48)		
産地又は製造者	***		
特記事項	試験方法は「日本機械学会 (JSME) 発電用原子力設備規格 設計・建設規格 2005年版 SSB-3200」による		

供試体番号 2

変位量 (mm)	荷重 (kN)	備考
0	0.0	
1	19.0	
2	131.5	
3	355.0	
4	445.5	
5	497.5	
6	541.0	
7	580.5	
8	616.0	
9	647.0	
10	676.5	
11	702.5	
12	727.5	
13	750.5	
14	771.0	
15	788.0	
16	800.5	
17	809.0	
17.9	812.0	最大荷重
18	812.0	
19	805.0	
20	777.5	
21	659.5	
22	583.0	
23	432.5	
24	358.0	破断

荷重～変位量曲線



備考

荷重速度 = 1056kN/min ≒ 17.6kN/sec とした
 試験室温度 23.0℃

試験者	
-----	--

ボルトせん断試験結果通知書

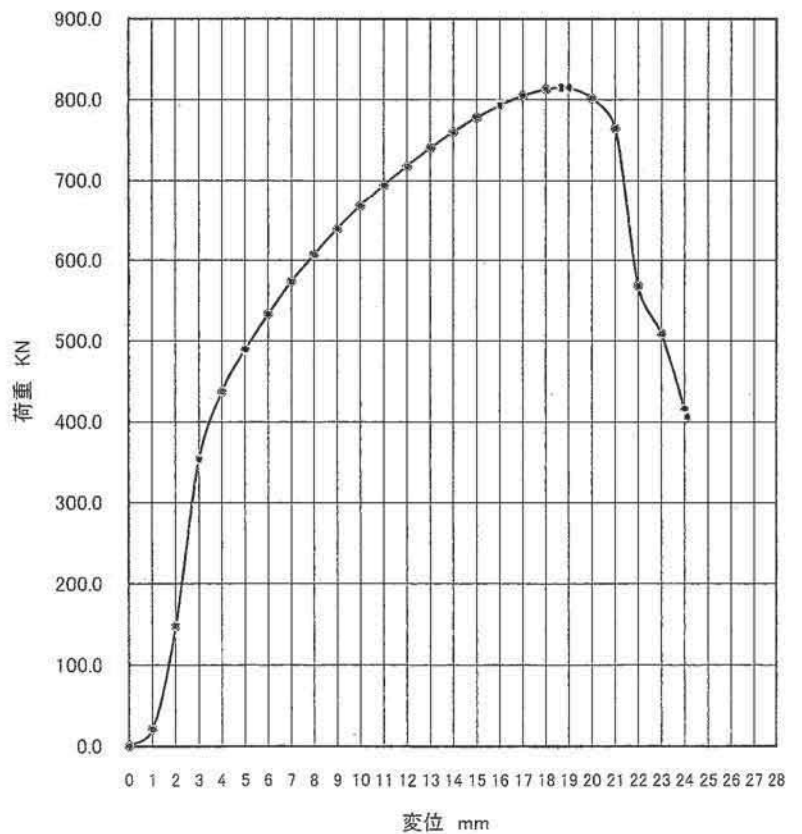
(6/6)

受付年月日	平成 20 年 08 月 06 日	試験年月日	平成 20 年 08 月 08 日
工事名	***		
工事場所	***		
試料名	本試験B 3本目 (SUS316 M48)		
産地又は製造者	***		
特記事項	試験方法は「日本機械学会 (JSME) 発電用原子力設備規格 設計・建設規格 2005年版 SSB-3200」による		

供試体番号 3

変位量 (mm)	荷重 (kN)	備考
0	0.0	
1	20.5	
2	147.5	
3	353.5	
4	437.0	
5	489.5	
6	533.0	
7	573.5	
8	606.5	
9	639.0	
10	667.5	
11	694.0	
12	718.0	
13	740.5	
14	760.0	
15	778.0	
16	793.0	
17	805.0	
18	813.0	
18.7	815.0	最大荷重
19	815.0	
20	802.0	
21	764.5	
22	568.0	
23	508.5	
24	416.0	
24.1	406.5	破断

荷重～変位量曲線



備考

荷重速度 = 1056kN/min ≒ 17.6kN/sec とした
 試験室温度 22.9℃

試験者

