

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

女川原子力発電所第2号機 工事計画審査資料	
資料番号	02-工-B-04-0065_改3
提出年月日	2021年10月12日

VI-3-3-3-2-1-3-1 管の基本板厚計算書（主蒸気系）

02 ③ VI-3-3-3-2-1-3-1 R0

2021年10月

東北電力株式会社

1. 管の基本板厚計算書

まえがき

本計算書は、添付書類「VI-3-1-5 重大事故等クラス2機器及び重大事故等クラス2支持構造物の強度計算の基本方針」及び「VI-3-2-9 重大事故等クラス2管の強度計算方法」に基づいて計算を行う。

評価条件整理結果を以下に示す。なお、評価条件の整理に当たって使用する記号及び略語については、添付書類「VI-3-2-1 強度計算方法の概要」に定義したものを使用する。

・ 評価条件整理表

管No.	既設 or 新設	施設時の 技術基準に 対象とする 施設の規定 があるか	クラスアップするか				条件アップするか				既工認に おける 評価結果 の有無	施設時の 適用規格	評価区分	同等性 評価 区分	評価 クラス	
			クラス アップ の有無	施設時 機器 クラス	DB クラス	SA クラス	条件 アップ の有無	DB条件		SA条件						
								圧力 (MPa)	温度 (℃)	圧力 (MPa)						温度 (℃)
1	既設	有	無	DB-1	DB-1	SA-2	有	8.62	302	10.34	315	—	S55告示	設計・建設規格 又は告示	—	SA-2
2	既設	有	無	DB-1	DB-1	SA-2	有	8.62	302	10.34	315	—	S55告示	設計・建設規格 又は告示	—	SA-2
3	既設	有	無	DB-1	DB-1	SA-2	有	8.62	302	10.34	315	—	S55告示	設計・建設規格 又は告示	—	SA-2
4	既設	有	有	DB-3	DB-3	SA-2	有	3.80	249	4.71	262	—	S55告示	設計・建設規格 又は告示	—	SA-2
5	既設	有	有	DB-3	DB-3	SA-2	有	3.80	249	4.71	262	—	S55告示	設計・建設規格 又は告示	—	SA-2
6	既設	有	有	DB-3	DB-3	SA-2	無	1.77	171	1.77	171	—	S55告示	設計・建設規格又 は告示	—	SA-2
7	既設	有	有	DB-3	DB-3	SA-2	無	1.77	171	1.77	171	—	S55告示	設計・建設規格又 は告示	—	SA-2
C1	既設	有	有	DB-3	DB-3	SA-2	有	3.80	249	4.71	262	—	S55告示	設計・建設規格 又は告示	—	SA-2
SP1	既設	有	有	DB-3	DB-3	SA-2	有	3.80	249	4.71	262	—	S55告示	設計・建設規格 又は告示	—	SA-2
E1	新設	—	—	—	—	SA-2	—	—	—	1.77	171	—	—	設計・建設規格	—	SA-2

・ 評価条件整理表

管No.	既設 or 新設	施設時の 技術基準に 対象とする 施設の規定 があるか	クラスアップするか				条件アップするか				既工認に おける 評価結果 の有無	施設時の 適用規格	評価区分	同等性 評価 区分	評価 クラス	
			クラス アップ の有無	施設時 機器 クラス	DB クラス	SA クラス	条件 アップ の有無	DB条件		SA条件						
								圧力 (MPa)	温度 (℃)	圧力 (MPa)						温度 (℃)
E2	既設	有	有	DB-3	DB-3	SA-2	無	1.77	171	1.77	171	—	S55告示	設計・建設規格又は告示	—	SA-2
E3	既設	有	有	DB-3	DB-3	SA-2	無	1.77	171	1.77	171	—	S55告示	設計・建設規格又は告示	—	SA-2
E4	既設	有	有	DB-3	DB-3	SA-2	無	1.77	171	1.77	171	—	S55告示	設計・建設規格又は告示	—	SA-2
E5	既設	有	有	DB-3	DB-3	SA-2	無	1.77	171	1.77	171	—	S55告示	設計・建設規格又は告示	—	SA-2
E6	既設	有	有	DB-3	DB-3	SA-2	無	1.77	171	1.77	171	—	S55告示	設計・建設規格又は告示	—	SA-2
E7	既設	有	有	DB-3	DB-3	SA-2	無	1.77	171	1.77	171	—	S55告示	設計・建設規格又は告示	—	SA-2
E8	既設	有	有	DB-3	DB-3	SA-2	無	1.77	171	1.77	171	—	S55告示	設計・建設規格又は告示	—	SA-2
E9	既設	有	有	DB-3	DB-3	SA-2	無	1.77	171	1.77	171	—	S55告示	設計・建設規格又は告示	—	SA-2
E10	既設	有	有	DB-3	DB-3	SA-2	無	1.77	171	1.77	171	—	S55告示	設計・建設規格又は告示	—	SA-2
E11	既設	有	有	DB-3	DB-3	SA-2	無	1.77	171	1.77	171	—	S55告示	設計・建設規格又は告示	—	SA-2

・ 評価条件整理表

管No.	既設 or 新設	施設時の 技術基準に 対象とする 施設の規定 があるか	クラスアップするか				条件アップするか				既工認に おける 評価結果 の有無	施設時の 適用規格	評価区分	同等性 評価 区分	評価 クラス	
			クラス アップ の有無	施設時 機器 クラス	DB クラス	SA クラス	条件 アップ の有無	DB条件		SA条件						
								圧力 (MPa)	温度 (℃)	圧力 (MPa)						温度 (℃)
E12	既設	有	有	DB-3	DB-3	SA-2	無	1.77	171	1.77	171	—	S55告示	設計・建設規格又は告示	—	SA-2
E13	新設	—	—	—	—	SA-2	—	—	—	1.77	171	—	—	設計・建設規格	—	SA-2
E14	新設	—	—	—	—	SA-2	—	—	—	1.77	171	—	—	設計・建設規格	—	SA-2
E15	既設	有	有	DB-3	DB-3	SA-2	無	1.77	171	1.77	171	—	S55告示	設計・建設規格又は告示	—	SA-2
E16	新設	—	—	—	—	SA-2	—	—	—	1.77	171	—	—	設計・建設規格	—	SA-2
E17	既設	有	有	DB-3	DB-3	SA-2	無	1.77	171	1.77	171	—	S55告示	設計・建設規格又は告示	—	SA-2
その他 T1	既設	有	無	DB-1	DB-1	SA-2	有*	8.62	302	10.34	315	有*	S55告示	既工認	—	SA-2
その他 T2	既設	有	無	DB-1	DB-1	SA-2	有*	8.62	302	10.34	315	有*	S55告示	既工認	—	SA-2
その他 T3	既設	有	無	DB-1	DB-1	SA-2	有*	8.62	302	10.34	315	有*	S55告示	既工認	—	SA-2

* : 既工認において評価を実施しており、かつ評価で使用する圧力及び温度は設計基準対象施設としての使用時における最高使用圧力及び最高使用温度であり評価条件に変更はないことから、評価結果については平成4年1月13日付け 第5回 3資庁第10518号にて認可された工事計画書の添付書類「IV-3-2-1-1-1 管の基本板厚計算書」による。

・適用規格の選定

管No.	評価項目	評価区分	判定基準	適用規格
1	管の板厚計算	設計・建設規格 又は告示	同等	設計・建設規格
2	管の板厚計算	設計・建設規格 又は告示	許容値	告示第501号
3	管の板厚計算	設計・建設規格 又は告示	許容値	告示第501号
4	管の板厚計算	設計・建設規格 又は告示	同等	設計・建設規格
5	管の板厚計算	設計・建設規格 又は告示	許容値	告示第501号
6	管の板厚計算	設計・建設規格 又は告示	同等	設計・建設規格
7	管の板厚計算	設計・建設規格 又は告示	同等	設計・建設規格
C1	鏡板の強度計算	設計・建設規格 又は告示	許容値	告示第501号
SP1	管の穴と補強計算	設計・建設規格 又は告示	許容値	告示第501号

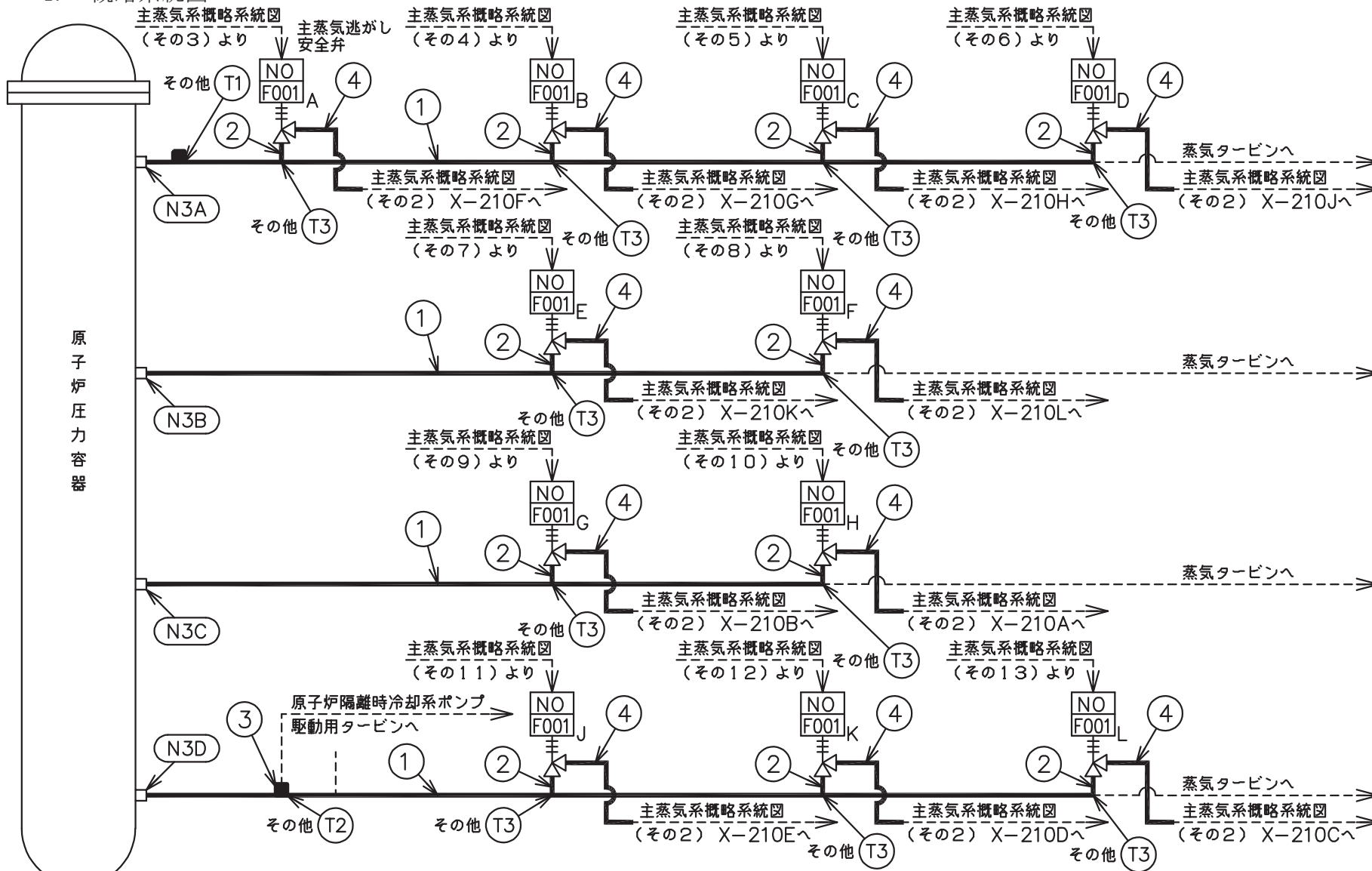
・適用規格の選定

管No.	評価項目	評価区分	判定基準	適用規格
E1	伸縮継手の強度計算	設計・建設規格	—	設計・建設規格
E2	伸縮継手の強度計算	設計・建設規格 又は告示	同等	設計・建設規格
E3	伸縮継手の強度計算	設計・建設規格 又は告示	同等	設計・建設規格
E4	伸縮継手の強度計算	設計・建設規格 又は告示	同等	設計・建設規格
E5	伸縮継手の強度計算	設計・建設規格 又は告示	同等	設計・建設規格
E6	伸縮継手の強度計算	設計・建設規格 又は告示	同等	設計・建設規格
E7	伸縮継手の強度計算	設計・建設規格 又は告示	同等	設計・建設規格
E8	伸縮継手の強度計算	設計・建設規格 又は告示	同等	設計・建設規格
E9	伸縮継手の強度計算	設計・建設規格 又は告示	同等	設計・建設規格
E10	伸縮継手の強度計算	設計・建設規格 又は告示	同等	設計・建設規格
E11	伸縮継手の強度計算	設計・建設規格 又は告示	同等	設計・建設規格
E12	伸縮継手の強度計算	設計・建設規格 又は告示	同等	設計・建設規格
E13	伸縮継手の強度計算	設計・建設規格	—	設計・建設規格
E14	伸縮継手の強度計算	設計・建設規格	—	設計・建設規格
E15	伸縮継手の強度計算	設計・建設規格 又は告示	同等	設計・建設規格
E16	伸縮継手の強度計算	設計・建設規格	—	設計・建設規格
E17	伸縮継手の強度計算	設計・建設規格 又は告示	同等	設計・建設規格

目次

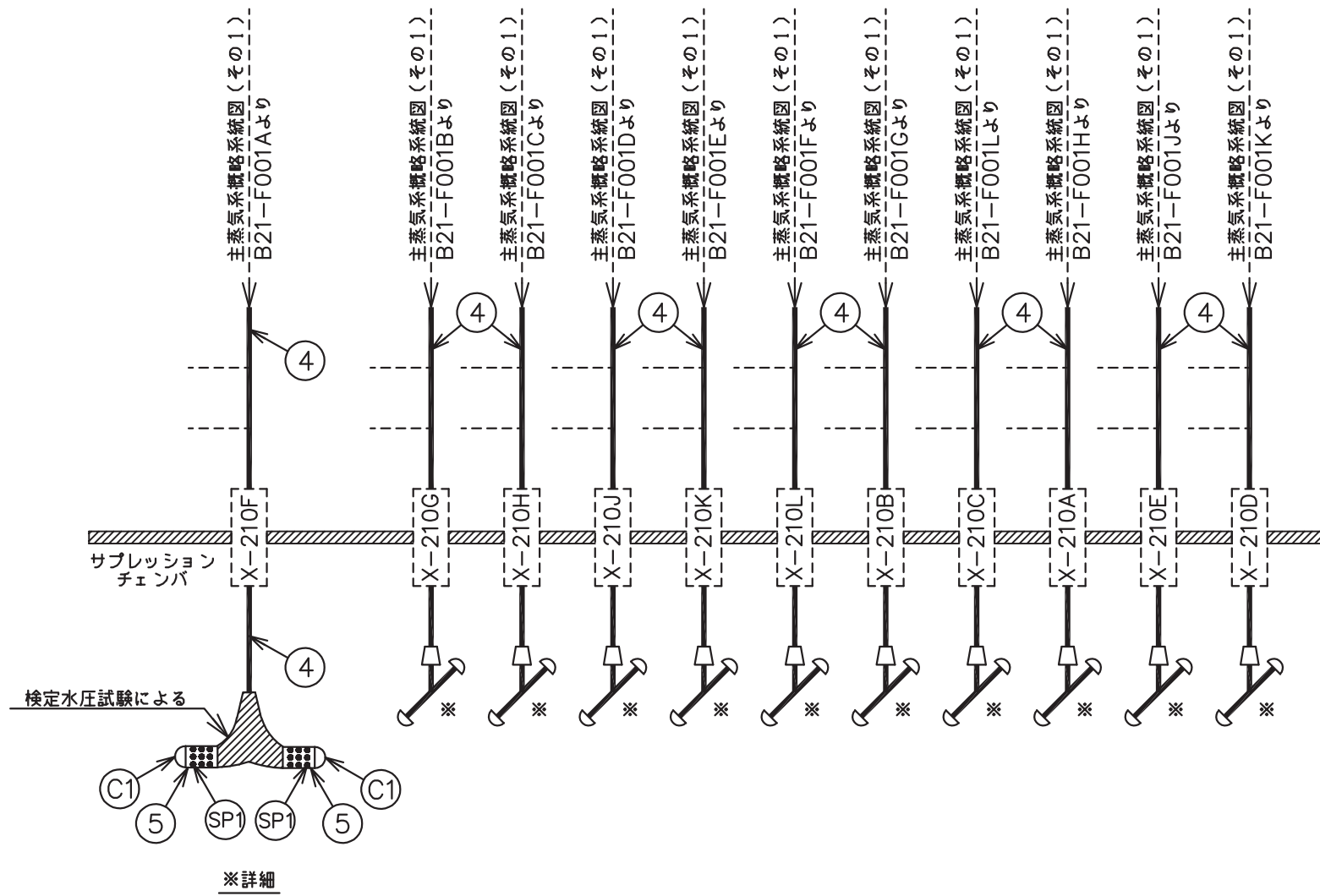
1. 概略系統図	1
2. 管の強度計算書	14
3. 鏡板の強度計算書	18
4. 管の穴と補強計算書	19
5. 伸縮継手の強度計算書	22

1. 概略系統図

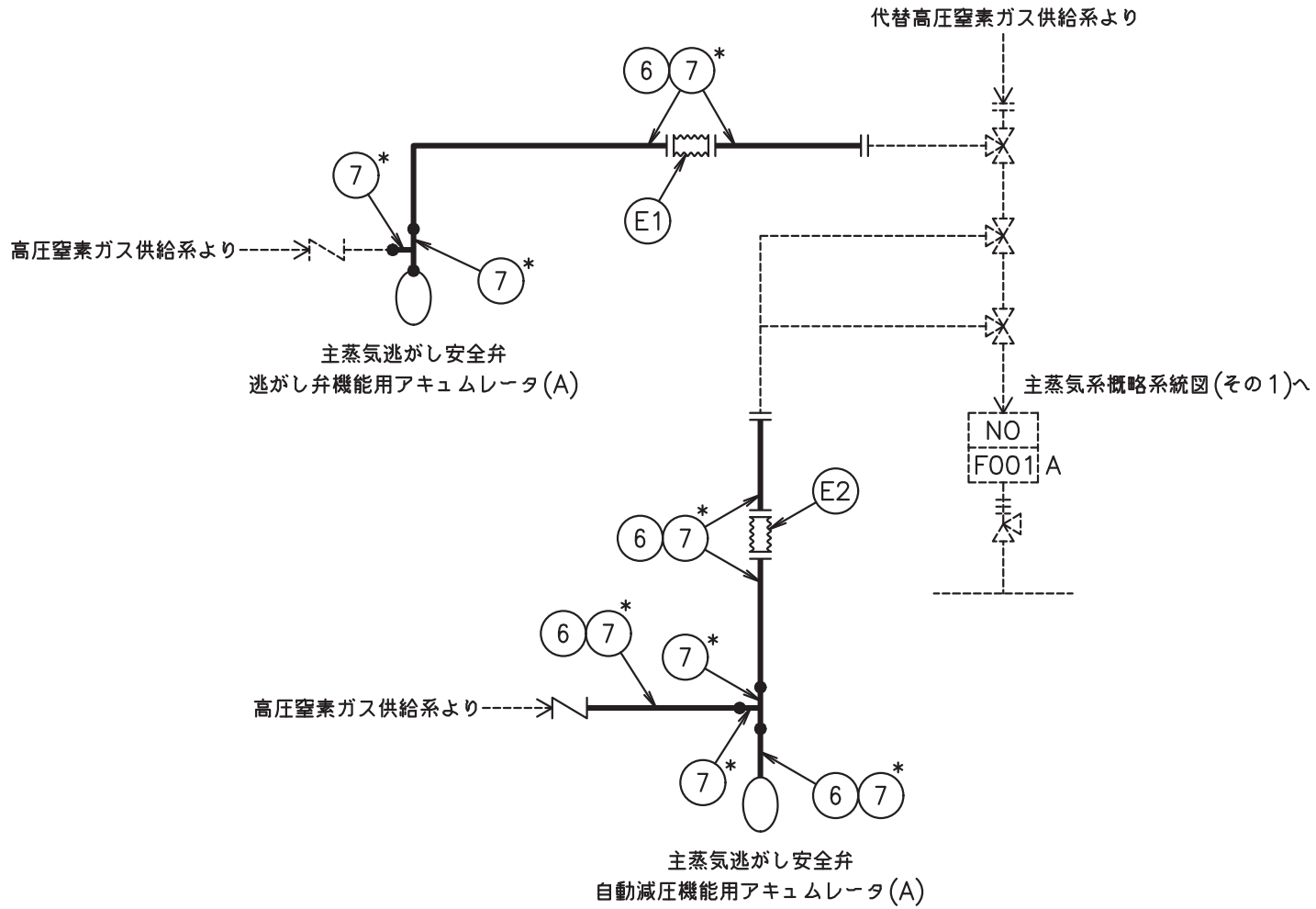


その他 (T1) (T2) (T3) 本範囲の強度計算は、平成4年1月13日付け 第5回 3資庁第10518号にて認可された工事計画書の添付書類「IV-3-2-1-1-1 管の基本板厚計算書」による。

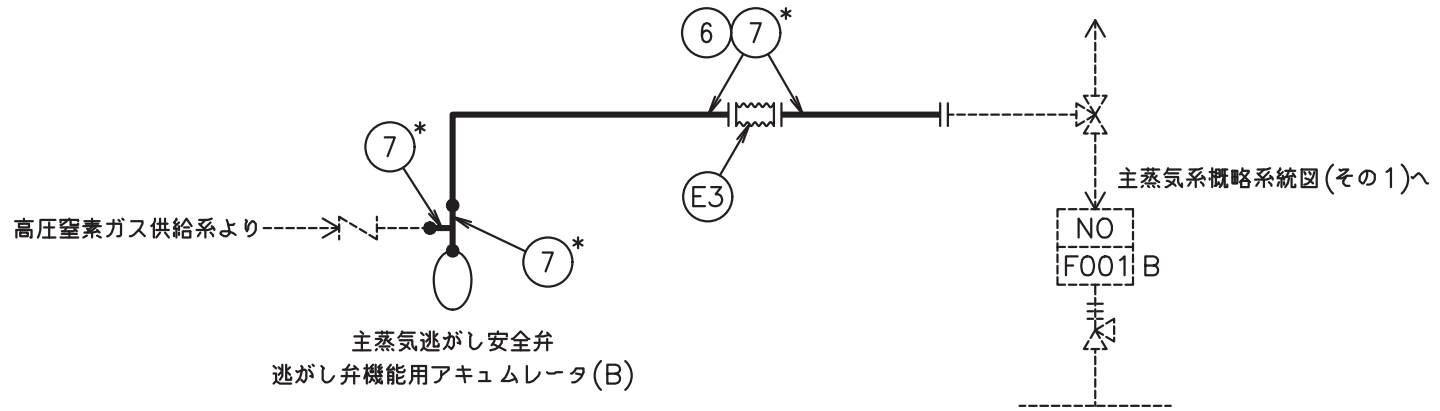
主蒸気系概略系統図 (その1)



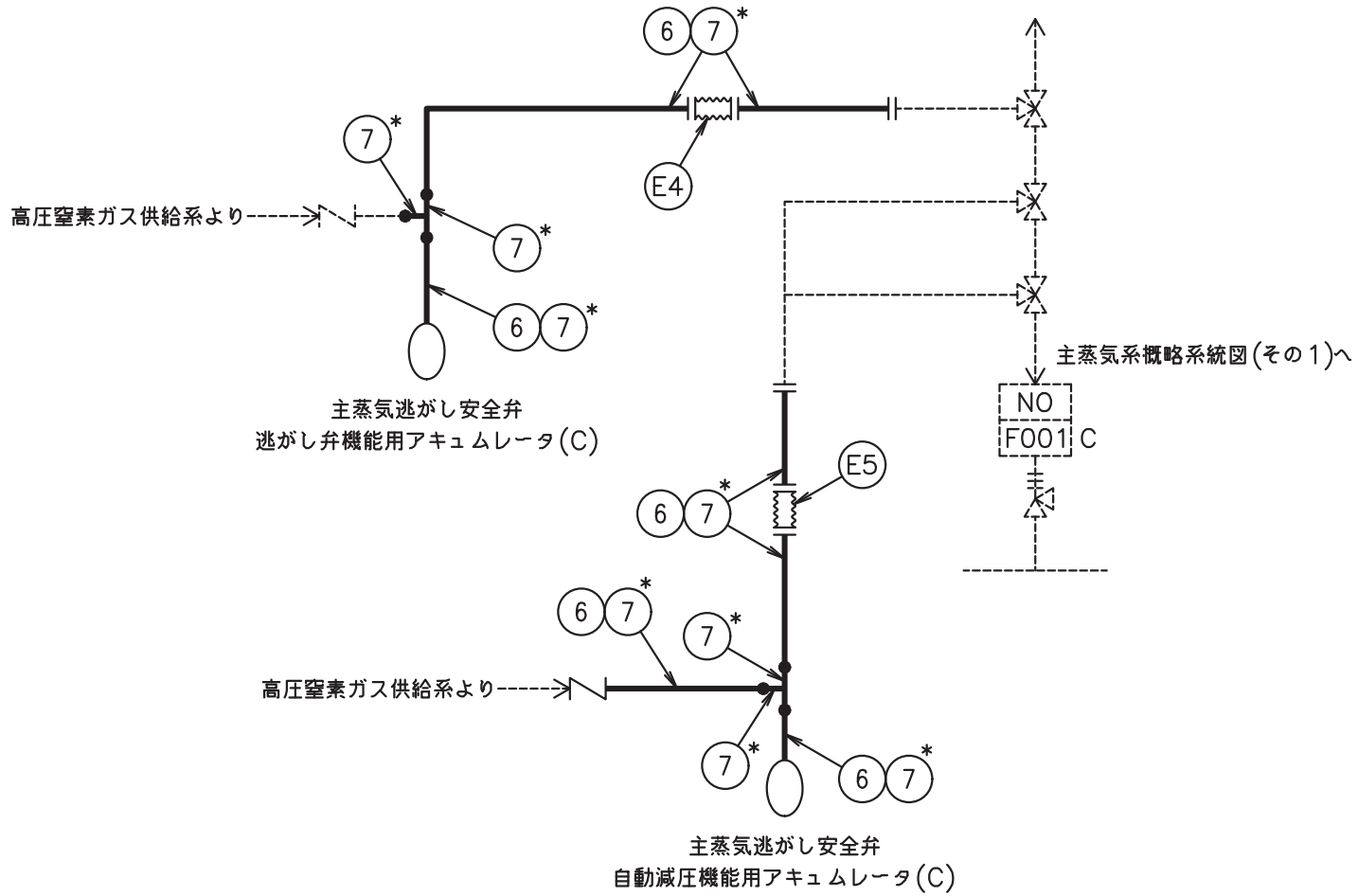
主蒸気系概略系統図 (その2)

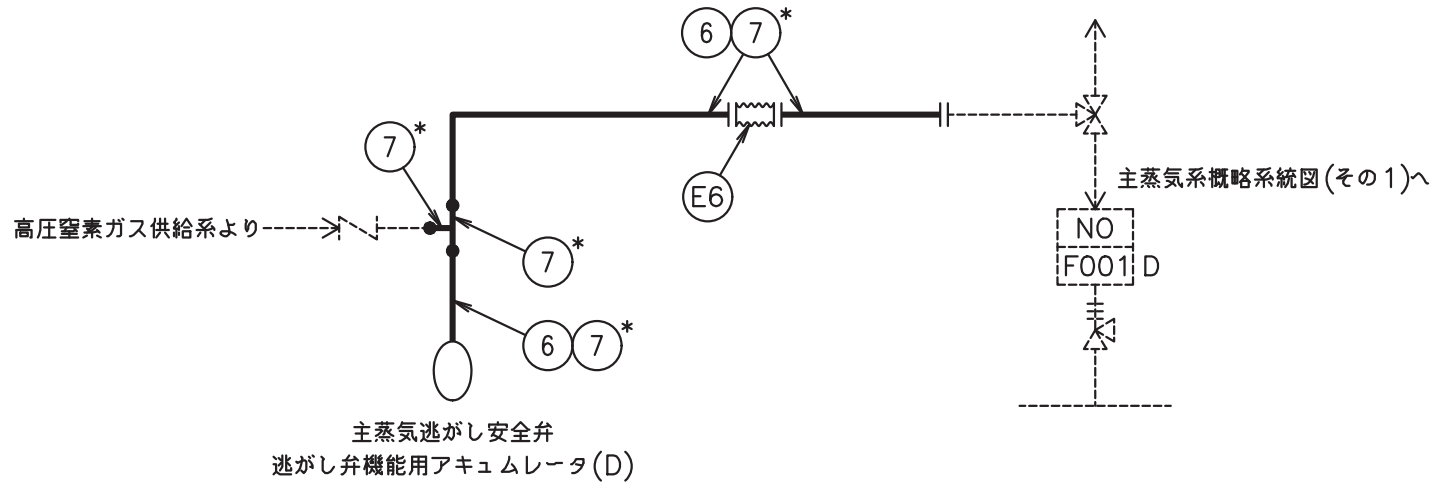


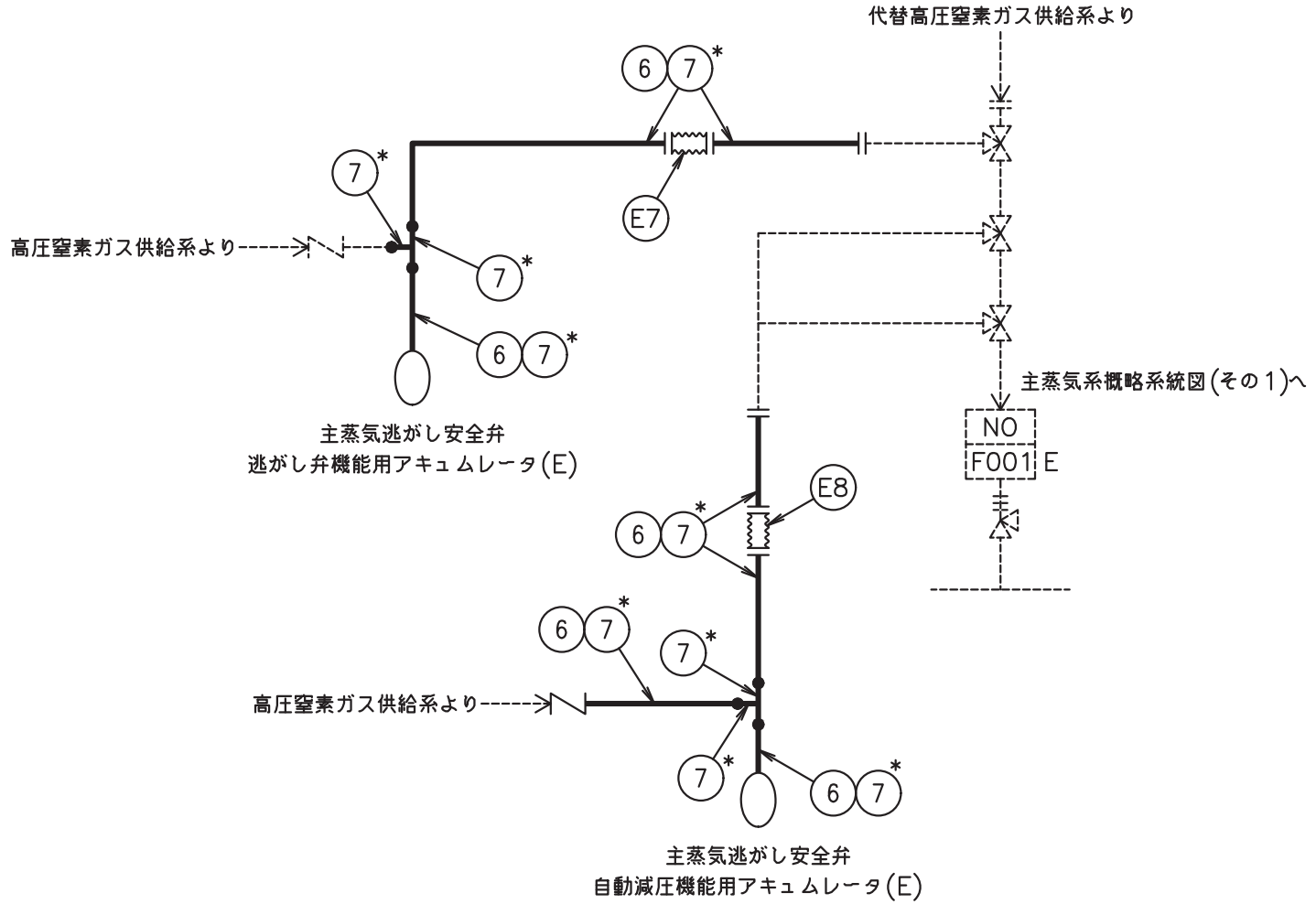
注記* : 管継手
主蒸気系概略系統図 (その3)



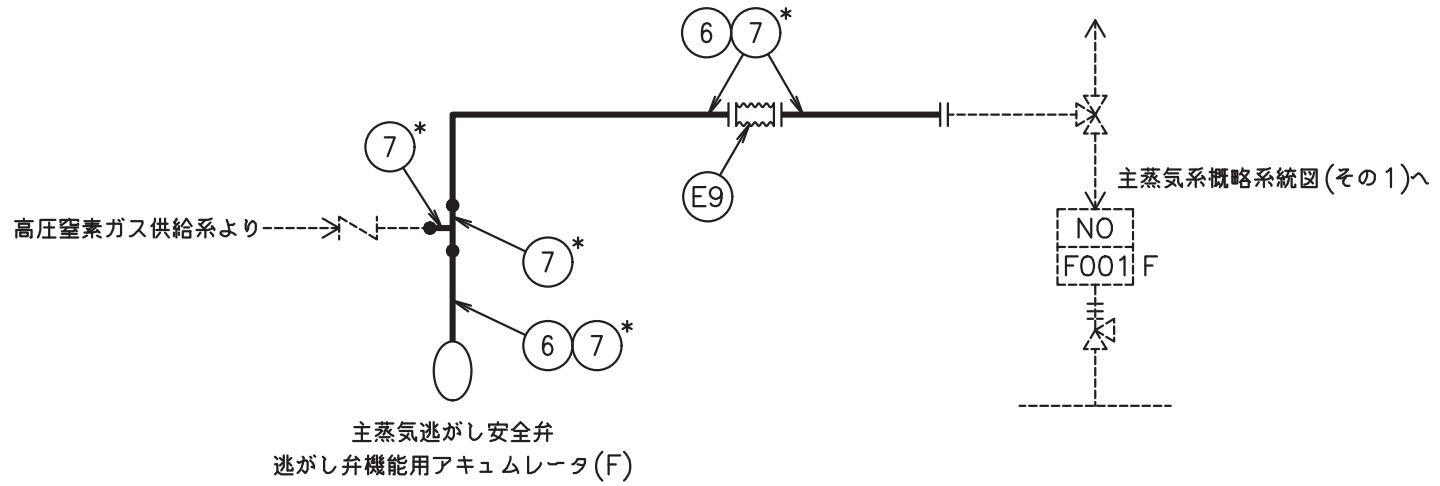
注記* : 管継手
主蒸気系概略系統図(その4)





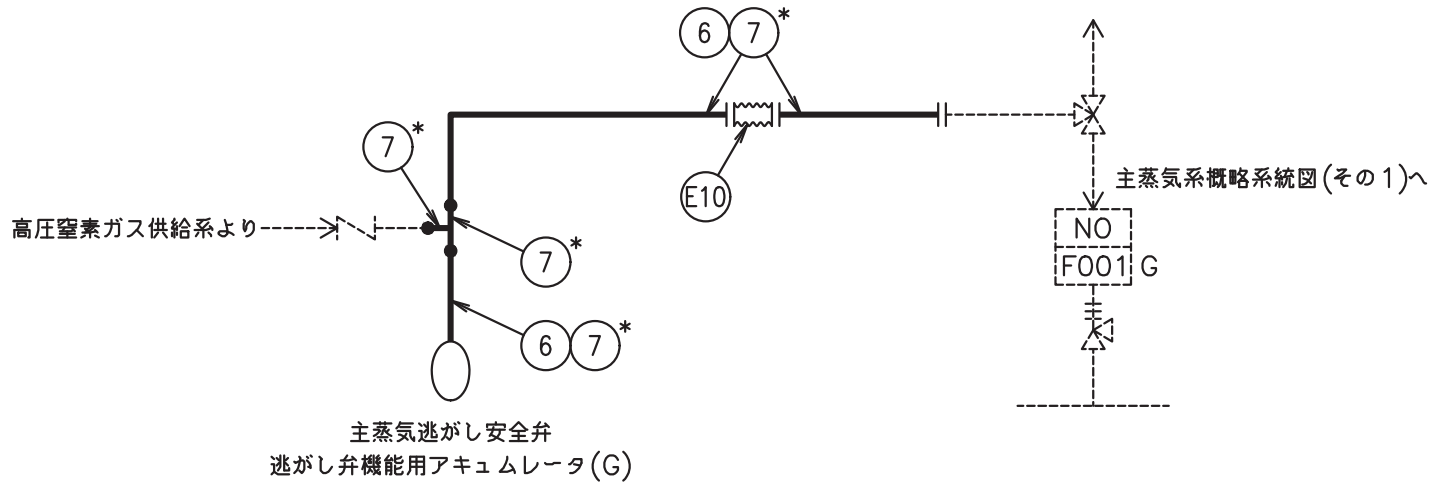


注記* : 管継手
主蒸気系概略系統図 (その7)

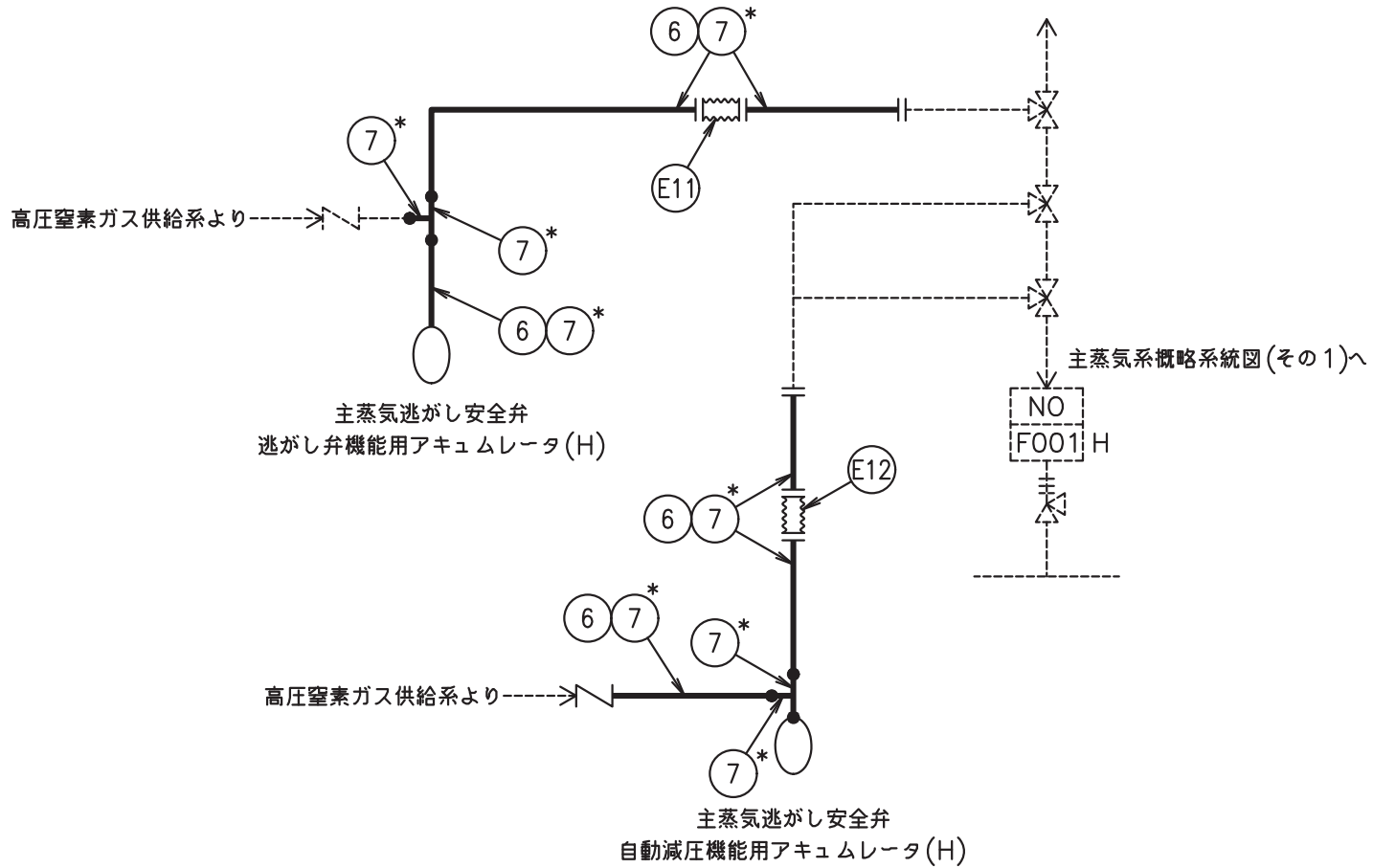


∞

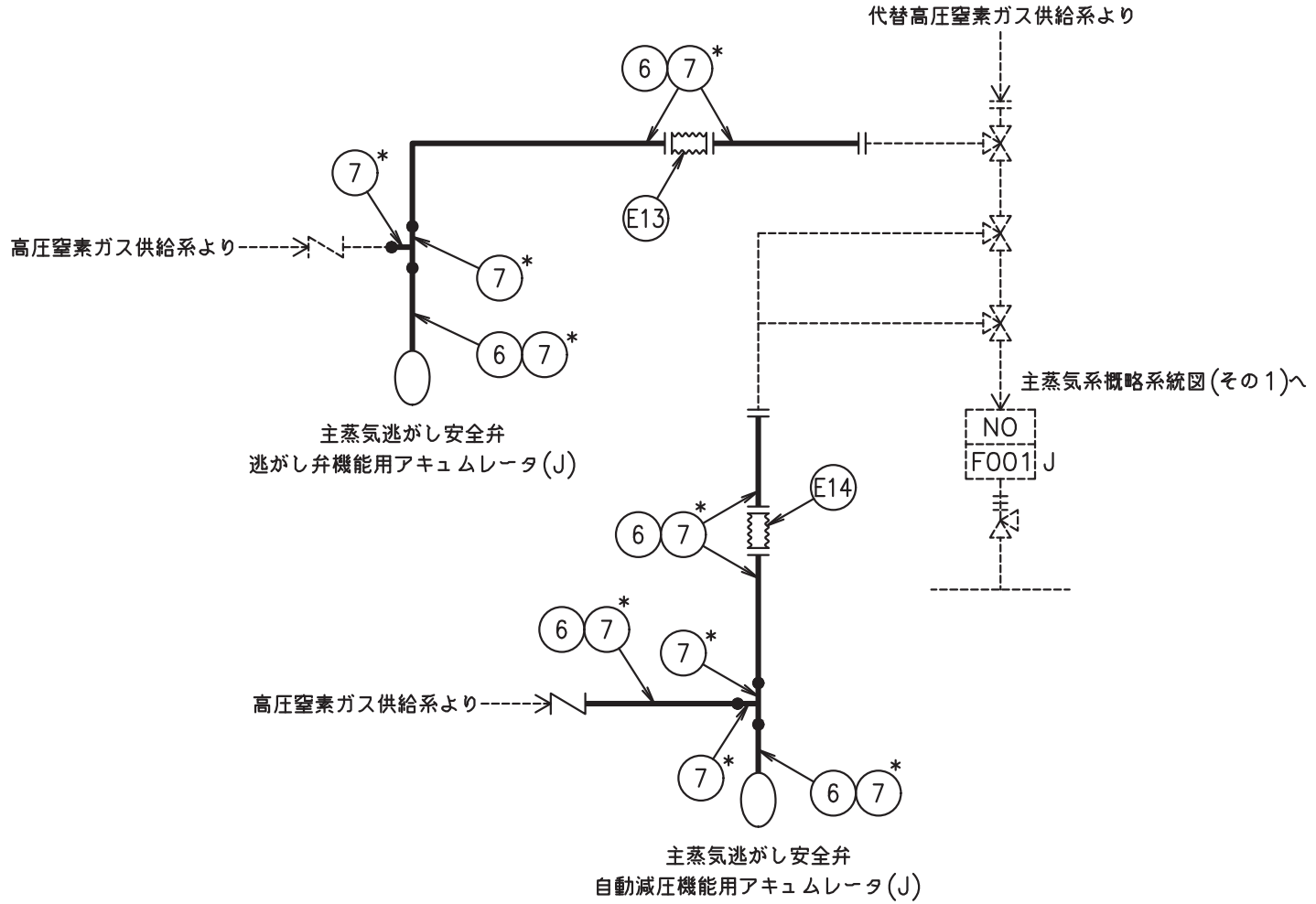
注記* : 管継手
主蒸気系概略系統図 (その8)



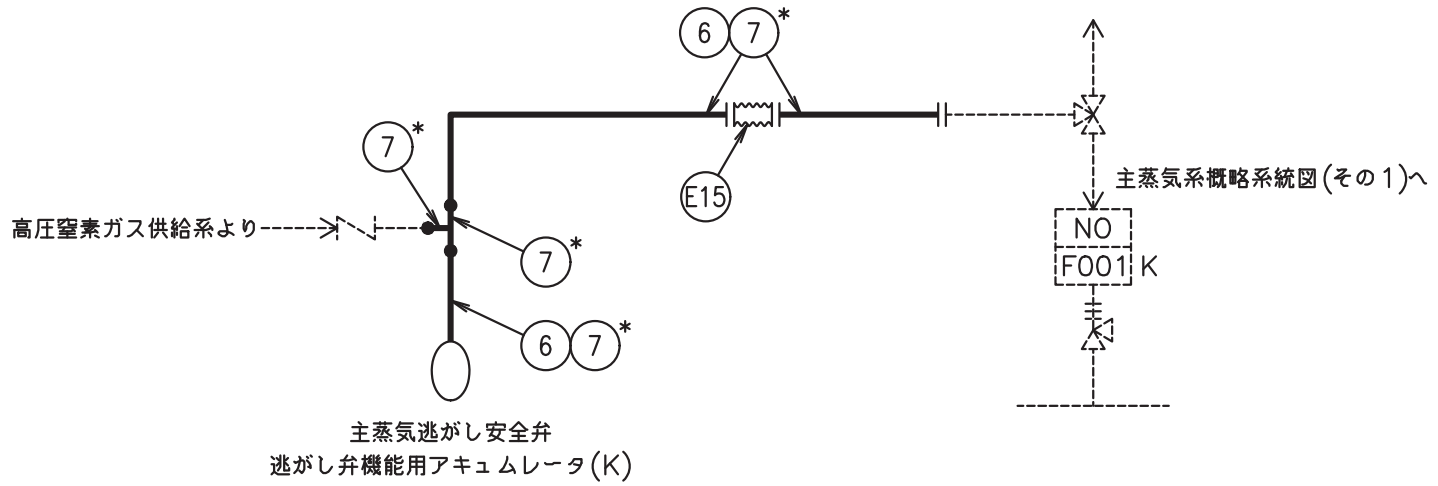
注記* : 管継手
主蒸気系概略系統図 (その9)

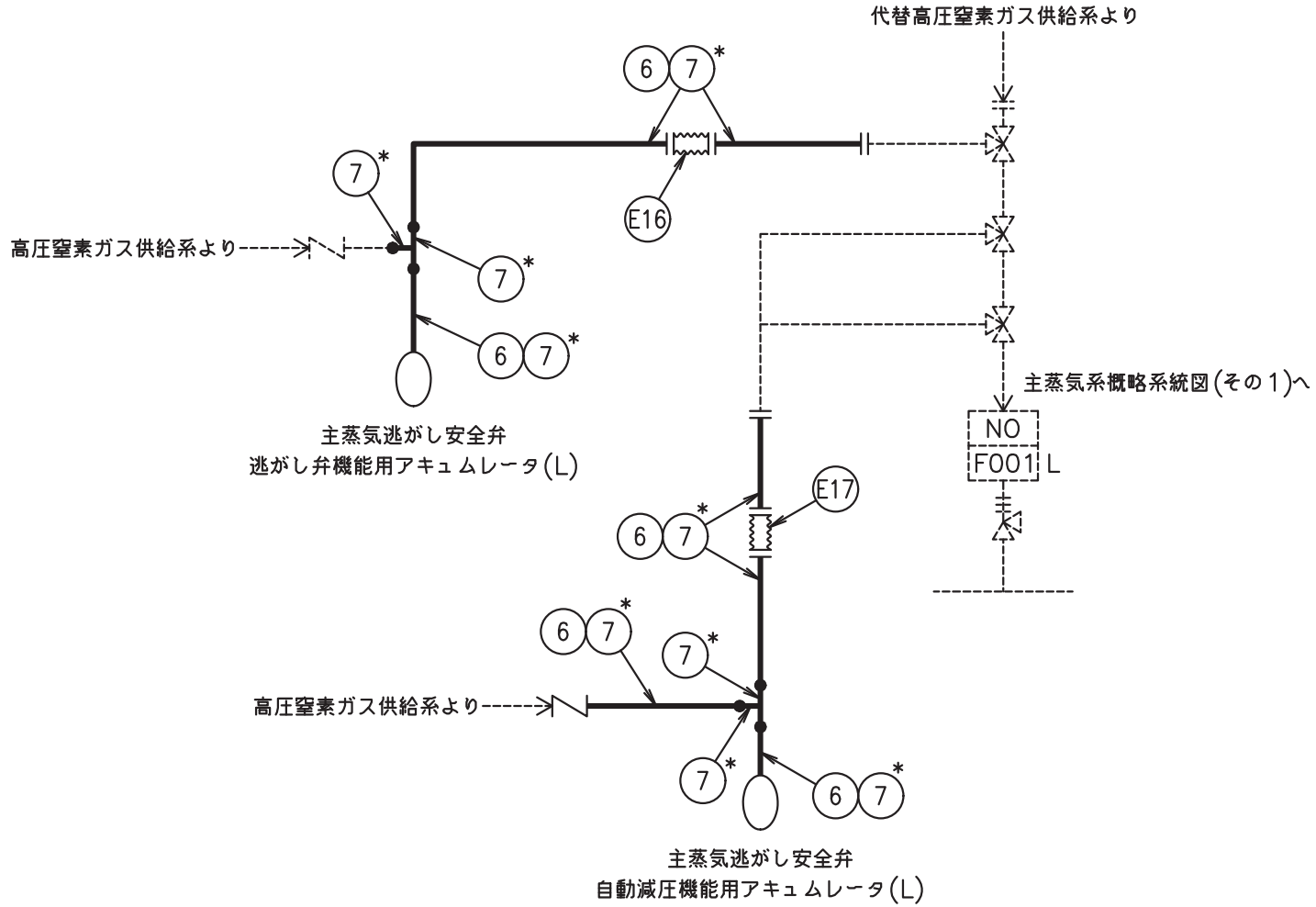


注記* : 管継手
主蒸気系概略系統図(その10)



注記* : 管継手
主蒸気系概略系統図(その11)





注記* : 管継手
主蒸気系概略系統図(その13)

2. 管の強度計算書（重大事故等クラス 2 管）

設計・建設規格 PPB-3411 及び PPB-3561 準用

NO.	最高使用圧力 P (MPa)	最高使用 温 度 (°C)	外 径 D _o (mm)	公称厚さ (mm)	材 料	製 法	ク ラ ス	S _m (MPa)	Q	t _s (mm)	t [*] (mm)	算 式	t _r (mm)	事故時圧力 P _E (MPa)	許容圧力 P _{aE} (MPa)
1	8.62	302	609.60	31.00	STS49 (STS480)	S	1	138	12.5%	27.12	18.58	A	18.58	10.34	17.24

*：最高使用圧力 P により計算した必要厚さ。

評価：t_s ≥ t_r, P_E ≤ P_{aE}, よって十分である。

管の強度計算書（重大事故等クラス 2 管）

告示第 5 0 1 号第 49 条第 1 項及び第 4 項第 2 号 準用

NO.	最高使用圧力 P (MPa)	最高使用 温 度 (°C)	外 径 D _o (mm)	公称厚さ (mm)	材 料	製 法	ク ラ ス	S _m (MPa)	Q	t _s (mm)	t [*] (mm)	算 式	t _r (mm)	事故時圧力 P _E (MPa)	許容圧力 P _{aE} (MPa)
2	8.62	302	228.60	33.00	SFVC2B	S	1	122	12.5%	28.87	7.86	A	7.86	10.34	17.24
3	8.62	302	114.30	11.10	SFVC2B	S	1	122	12.5%	9.71	3.93	A	3.93	10.34	17.24

*：最高使用圧力 P により計算した必要厚さ。

評価：t_s ≥ t_r，P_E ≤ P_{aE}，よって十分である。

管の強度計算書（重大事故等クラス 2 管）

設計・建設規格 PPC-3411 準用

NO.	最高使用圧力 P (MPa)	最高使用 温 度 (°C)	外 径 D _o (mm)	公称厚さ (mm)	材 料	製 法	ク ラ ス	S (MPa)	η	Q	t _s (mm)	t (mm)	算 式	t _r (mm)
4	4.71	262	267.40	15.10	STS42 STS410	S	2	103	1.00	12.5%	13.21	6.01	A	6.01
6	1.77	171	60.50	3.90	SUS304TP	S	2	113	1.00	0.50mm	3.40	0.47	A	0.47
7	1.77	171	60.50	6.10	SUS304	S	2	113	1.00			0.47	A	0.47

評価：t_s ≥ t_r, よって十分である。

管の強度計算書（重大事故等クラス 2 管）

告示第 5 0 1 号第 58 条第 1 項 準用

NO.	最高使用圧力 P (MPa)	最高使用 温 度 (°C)	外 径 D _o (mm)	公称厚さ (mm)	材 料	製 法	ク ラ ス	S (MPa)	η	Q	t _s (mm)	t (mm)	算 式	t _r (mm)
5	4.71	262	323.90	17.50	SCS16A	S	2	89	1.00			8.40	A	8.40

評価： $t_s \geq t_r$ ， よって十分である。

3. 鏡板の強度計算書（重大事故等クラス 2 管）

告示第 5 0 1 号第 58 条第 2 項 準用

NO.	最高使用圧力 P (MPa)	最高使用 温 度 (°C)	形 式	外 径 D _o (mm)	公称厚さ (mm)	材 料	S (MPa)	R (mm)	r (mm)	D (mm)	2・h (mm)	K	η	Q	t _c (mm)	算 式	t (mm)
C1	4.71	262	半だ円形	323.90	17.50	SCS16A	89	—	—			1.00	1.00			C	7.72
			フランジ部	323.90	17.50	SCS16A	89	—	—	—	—	—	1.00			D	8.40

評価：t_c ≥ t，よって十分である。

4. 管の穴と補強計算書（重大事故等クラス2管）

NO. SP1

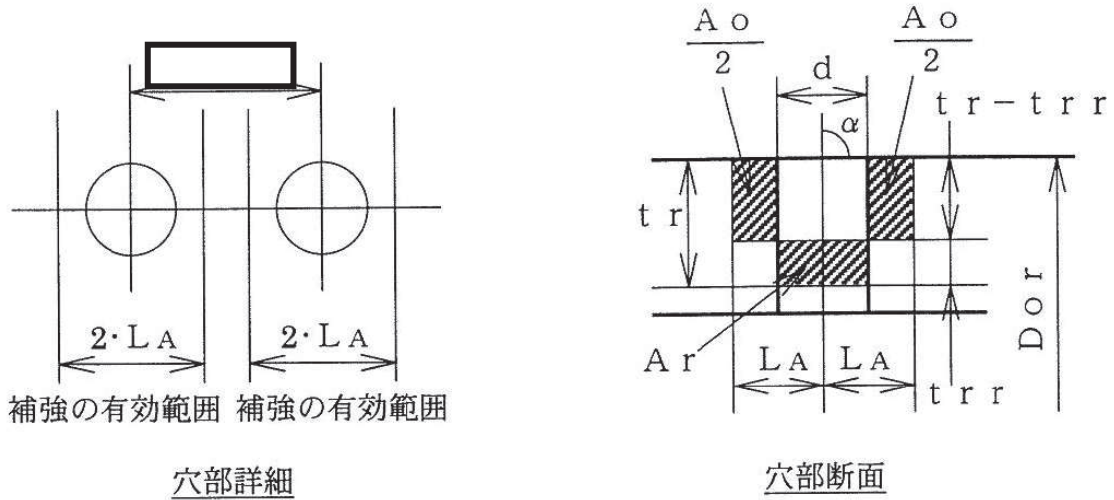


図 4-1 穴部詳細及び穴部断面

(1) 告示第501号第60条第2項第1号により，穴の補強計算を行う。

a. 主管の計算上必要な厚さ： t_{rr}

$$\begin{aligned}
 t_{rr} &= \frac{P \cdot D_{or}}{2 \cdot S_r \cdot \eta + 0.8 \cdot P} \\
 &= \frac{4.71 \times 323.90}{2 \times 89 \times 1.00 + 0.8 \times 4.71} \\
 &= 8.40 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

ここで

P	: 最高使用圧力（内圧）	4.71	(MPa)
	最高使用温度	262	(°C)
D_{or}	: 主管の外径	323.90	(mm)
S_r	: 主管の材料の許容引張応力	89	(MPa)
	主管材料	SCS16A	
η	: 長手継手の効率	1.00	

b. 穴の補強に必要な面積： A_r

$$\begin{aligned}
 A_r &= 1.07 \cdot d \cdot t_{rr} \cdot (2 - \sin \alpha) \\
 &= 1.07 \times \boxed{} \times 8.392945953 \times (2 - \sin \boxed{}) \\
 &= 90.70 \text{ (mm}^2\text{)}
 \end{aligned}$$

ここで

d : 断面に現われる穴の径 $\boxed{}$ (mm)

α : 分岐間の中心線と主管の中心線との交角 $\boxed{}$ (°)

c. 穴の補強に有効な面積の総和： A_0

$$\begin{aligned}
 A_0 &= (\eta \cdot t_{ro} - F \cdot t_{rr}) \cdot (2 \cdot L_A - d) \\
 &= (1.00 \times \boxed{} - 1.00 \times 8.392945953) \times (2 \times \boxed{} - \boxed{}) \\
 &= 287.5 \text{ (mm}^2\text{)}
 \end{aligned}$$

ここで

t_{ro} : 主管の公称厚さ 17.50 (mm)

Q_r : 主管の厚さの負の許容差 $\boxed{}$ (mm)

t_r : 主管の最小厚さ $\boxed{}$ (mm)

$$t_r = t_{ro} - Q_r$$

F : 告示第501号第60条第2項第1号ロ(イ)の図により求めた値
1.00

L_A : 補強に有効な範囲 (次の2つの式より計算したいずれか大きい方の値)

$$L_A = d = \boxed{} \text{ mm}$$

$$L_A = d / 2 + t_r + t_b = \boxed{} \text{ mm}$$

よって $L_A = \boxed{}$ (mm)

d. 評価

$A_0 > A_r$, よって穴の補強は十分である。

(2) 告示第501号第60条第2項第4号により、大穴の補強の要否の判定を行う。

a. 大穴の補強を要しない限界径： d_{frD}

$$\begin{aligned}d_{frD} &= \frac{D_{or} - 2 \cdot t_r}{2} \\ &= \frac{323.90 - 2 \times 16.90}{2} \\ &= 145.05 \text{ (mm)}\end{aligned}$$

b. 評価

$d \leq d_{frD}$ ，よって大穴の補強計算は必要ない。
以上より十分である。

5. 伸縮継手の強度計算書（重大事故等クラス 2 管）

設計・建設規格 PPC-3416 準用

NO.	最高使用圧力 P (MPa)	最高使用温 度 (°C)	材 料	縦弾性係数 E (MPa)	t (mm)	全伸縮量 δ (mm)	b (mm)	h (mm)	n	c	算 式	継手部応力 σ (MPa)	N ×10 ³	N _r ×10 ³	U						
E1	1.77	171	SUS304	184300	1.00																
E2	1.77	171	SUS304	184300	0.40											1	A	1350	1.55	0.50	0.3207
E3	1.77	171	SUS304	184300	0.40											1	A	1053	3.72	0.50	0.1344
E4	1.77	171	SUS304	184300	0.40											1	A	1398	1.37	0.50	0.3624
E5	1.77	171	SUS304	184300	0.40											1	A	1398	1.37	0.50	0.3624
E6	1.77	171	SUS304	184300	0.40											1	A	1046	3.80	0.50	0.1313
E7	1.77	171	SUS304	184300	0.40											1	A	1220	2.22	0.50	0.2250
E8	1.77	171	SUS304	184300	0.40											1	A	1220	2.22	0.50	0.2250
E9	1.77	171	SUS304	184300	0.40											1	A	970	4.95	0.50	0.1009

評価：U ≤ 1, よって十分である。

注 1：E1の外径は、 mm。

注 2：E2～E9の外径は、 mm。

伸縮継手の強度計算書（重大事故等クラス 2 管）

設計・建設規格 PPC-3416 準用

NO.	最高使用圧力 P (MPa)	最高使用温 度 (°C)	材 料	縦弾性係数 E (MPa)	t (mm)	全伸縮量 δ (mm)	b (mm)	h (mm)	n	c	算 式	継手部応力 σ (MPa)	N $\times 10^3$	N_r $\times 10^3$	U
E10	1.77	171	SUS304	184300	0.40										
E11	1.77	171	SUS304	184300	0.40										
E12	1.77	171	SUS304	184300	0.40										
E13	1.77	171	SUS304	184300	1.00										
E14	1.77	171	SUS304	184300	1.00										
E15	1.77	171	SUS304	184300	0.40										
E16	1.77	171	SUS304	184300	1.00										
E17	1.77	171	SUS304	184300	0.40										

評価：U ≤ 1, よって十分である。

注 1：E10, E11, E12, E15, E17の外径は, mm。

注 2：E13, E14, E16の外径は, mm。

2. 主蒸気逃がし安全弁排気管Tークエンチャラムズヘッドの強度計算書

目次

1. 概要.....	1
2. 測定方法及び測定条件.....	1
3. 測定箇所.....	1
4. 測定器.....	3
5. 試験結果のまとめ.....	3
(1) 主ひずみの算出.....	3
(2) 主応力の算出.....	3
(3) 検定圧力の算出.....	4
6. 測定圧力.....	5
(1) 検定水圧試験（浜岡第3号機の試験結果）.....	5
(2) 検定水圧試験（試験結果に基づく線形外挿結果）.....	5
7. 判定基準.....	5
(1) 判定基準（設計基準対象施設）.....	5
(2) 判定基準（重大事故等対処設備）.....	5
8. 設計仕様の比較.....	6
9. Tークエンチャラムズヘッド検定水圧試験結果.....	6
(1) 測定結果（設計基準対象施設）.....	6
(2) 計算結果（重大事故等対処設備）.....	6
(3) 検定圧力の算出.....	7
(4) 結果.....	7
10. まとめ.....	9
(添付第1図)	
Tークエンチャラムズヘッド測定箇所図.....	10
(添付第2図)	
Tークエンチャラムズヘッド形状・寸法図.....	11

参考 主蒸気逃がし安全弁排気管Tークエンチャラムズヘッドの強度計算について

1. 概要

主蒸気逃がし安全弁排気管Tークエンチャラムズヘッドは、発電用原子力設備に関する構造等の技術基準（昭和55年通産省告示第501号）に定める第4種管の構造の規格第64条の規定に基づき、準用する第55条ただし書きの規定により検定水圧試験を実施している。

なお、本検定水圧試験は、女川第2号機と同一設計である浜岡第3号機において既に実施されており、本計算書ではその試験方法、判定基準、試験結果及び重大事故等対処設備としての強度評価について示すものである。

女川第2号機は、既に実施された試験の結果をもって検定水圧試験にかえるものとする。

また、既工認（平成4年1月13日付け 第5回 3資庁第10518号にて認可された工事計画書の添付書類「IV-4-3 主蒸気逃がし安全弁排気管Tークエンチャラムズヘッドの強度計算書」）の結果を用いることから、既工認の結果は当時の記載単位を併記する。

2. 測定方法及び測定条件

- (1) あらかじめ最も弱いと推定した箇所に選定した数個の点に抵抗線ひずみ計を張りつける。
- (2) 測定方法は三軸直角型抵抗線ひずみ計を用い、アクティブダミー法で測定を行う。
- (3) 測定条件は下記とする。
 - イ. 加圧水（水圧）：3.80 MPa（最高使用圧力 3.80 MPa（38.7 kg/cm²））
 - ロ. 温度 ：常温
- (4) 測定するひずみの値はデジタルプリンタにて記録する。

3. 測定箇所

添付第1図に測定箇所を、表3-1に測定箇所の選定理由を示す。

表 3-1 測定箇所を選定理由

測定箇所	選 定 理 由	備 考
A	ボトム部で最も弱いと推定される点	外 面
B	ボトム部に近い点で補強ガセットのつけ根部	外 面
C	ボトム部に近い点で補強ガセットのつけ根部 のレジューサ側の点	外 面
D	ラムズヘッド部のほぼ中央の点	外 面
E	エルボの側面部のほぼ中央の点	外 面
F	エルボの小半径部のほぼ中央の点	外 面
G	レジューサのほぼ中央の点	外 面
a	ボトム部で最も弱いと推定される点	内 面
b	ボトム部に近い点で補強ガセットのつけ根部	内 面
c	ボトム部に近い点で補強ガセットのつけ根部 のレジューサ側の点	内 面
d	ラムズヘッド部のほぼ中央の点	内 面
g	レジューサのほぼ中央の点	内 面

4. 測定器

デジタルストレインインディケータ
 スイッチボックス
 ストレインゲージ

5. 試験結果のまとめ

(1) 主ひずみの算出

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{2}(\varepsilon_a + \varepsilon_c) + \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2}$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{2}(\varepsilon_a + \varepsilon_c) - \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2}$$

ここに $\varepsilon_1, \varepsilon_2$: 主ひずみ
 $\varepsilon_a, \varepsilon_b, \varepsilon_c$: 測定した a, b, c 方向のひずみの読み
 但し a, c 方向が直交するものとする。

(2) 主応力の算出

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_1 + \nu\varepsilon_2) \quad (\text{MPa (kg/mm}^2))$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_2 + \nu\varepsilon_1) \quad (\text{MPa (kg/mm}^2))$$

ここに σ_1 : 主ひずみ ε_1 方向の主応力
 σ_2 : 主ひずみ ε_2 方向の主応力
 ν : ポアソン比=0.3
 E : 縦弾性係数=1.95×10⁵ (MPa)
 (縦弾性係数=1.99×10⁴ (kg/mm²))
 (使用材料 : SCS16A)

(3) 検定圧力の算出

告示501号第55条第1項第2号により検定圧力を計算するものとする。

a. 設計基準対象施設

$$P = \frac{P_0 \cdot S}{\sigma_0}$$

P : 検定圧力 (MPa (kg/cm²))

P_0 : 予定する最高使用圧力に相当する圧力 (MPa (kg/cm²))

σ_0 : 上の方法でひずみを応力に換算して求めた値のうち絶対値が最大の応力 (MPa (kg/mm²))

S : 使用温度における材料の許容引張応力 (MPa (kg/mm²))

$$P_0 = 3.80 \text{ MPa (38.7 kg/cm}^2\text{)}$$

$$S = 89.2 \text{ MPa (9.1 kg/mm}^2\text{)} \text{ (告示501号別表第6備考3の(ロ)による。)}$$

b. 重大事故等対処設備

$$P = \frac{P_E \cdot S_E}{\sigma_E}$$

P : 検定圧力 (MPa)

P_E : 重大事故等時の使用圧力に相当する圧力 (MPa)

σ_E : 上の方法でひずみを応力に換算して求めた値のうち絶対値が最大の応力 (MPa)

S_E : 使用温度における材料の許容引張応力 (MPa)

$$P_E = 4.71 \text{ MPa}$$

$$S_E = 89.2 \text{ MPa (告示501号別表第6備考3の(ロ)による。)}$$

6. 測定圧力

(1) 検定水圧試験（浜岡第3号機の試験結果）

測定圧力は表6-1に示す0.00 MPa（0.0kg/cm²）から3.80 MPa（38.7kg/cm²）まで。

(2) 検定水圧試験（試験結果に基づく線形外挿結果）

算出圧力は表6-1に示す3.92 MPaから4.71 MPaまで。

表 6-1 測定圧力及び算出圧力

圧力 (MPa)	0.0	0.49	0.98	1.47	1.96	2.45	2.94	3.43	3.80
圧力 (kg/cm ²)	0.0	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0	35.0	38.7
備考									

（表 6-1 続き）

圧力 (MPa)	3.92	4.41	4.71
圧力 (kg/cm ²)	40.0	45.0	48.0
備考			SA 時 条件

7. 判定基準

(1) 判定基準（設計基準対象施設）

最高使用圧力（3.80 MPa（38.7 kg/cm²））が検定圧力以下であること。

(2) 判定基準（重大事故等対処設備）

重大事故等時の使用時の圧力（4.71 MPa）が検定圧力以下であること。

8. 設計仕様の比較

女川第2号機及び浜岡第3号機のTークエンチャラムズヘッドの仕様を表8-1に示す。また、女川第2号機の重大事故等時の使用時の圧力及び温度を表8-2に示す。

表 8-1 設計仕様の比較

設計仕様 プラント名称	最高使用 圧力 (MPa)	最高使用 温度 (°C)	外径 (mm)	厚さ (mm)	材 料	製 法
女川第2号機	3.80 (38.7 kg/cm ²)	249	267.4 323.9 323.9	15.1 17.5 17.5	SCS16A	継目無 (一 体) 鑄 造
浜岡第3号機	同 上	同 上	同 上	同 上	同 上	同 上

表 8-2 重大事故等時の使用時の圧力及び温度

重大事故等時の使用時の圧力 (MPa)	重大事故等時の使用時の温度 (°C)
4.71	262

添付第2図にTークエンチャラムズヘッドの形状・寸法を示す。

9. Tークエンチャラムズヘッド検定水圧試験結果

(1) 測 定 結 果 (設計基準対象施設)

ひずみの測定結果及び主ひずみ、主応力の計算結果を表9-1に、測定箇所を添付第1図に示す。

(2) 計 算 結 果 (重大事故等対処設備)

ひずみの線形外挿結果及び主ひずみ、主応力の計算結果を表9-2に、測定箇所は(1)の最大値の測定箇所とする。

(3) 検定圧力の算出

a. 設計基準対象施設

$$P = \frac{P_0 \cdot S}{\sigma_0} = \frac{3.80 \times 89.2}{52.4} = 6.47 \text{ MPa}$$

$$\left(= \frac{38.7 \times 9.1}{5.34} = 65.95 \text{ kg/cm}^2 \right)$$

σ_0 : 最高使用圧力 ($P_0 = 38.7 \text{ kg/cm}^2$) 時の表 9-1 に示す最大値 5.34 kg/mm^2 (b 点) である。

b. 重大事故等対処設備

$$P = \frac{P_E \cdot S_E}{\sigma_E} = \frac{4.71 \times 89.2}{64.8} = 6.49 \text{ MPa}$$

σ_E : 重大事故等時の圧力 ($P_E = 4.71 \text{ MPa}$) 時の表 9-2 に示す最大値 64.8 MPa (b 点) である。

(4) 結果

a. 設計基準対象施設

P (6.47 MPa (65.95 kg/cm^2)) $> P_0$ (3.80 MPa (38.7 kg/cm^2)) となり検定圧力以下である。

b. 重大事故等対処設備

P (6.49 MPa) $> P_E$ (4.71 MPa) となり検定圧力*以下である。

* : 検定圧力に基づく重大事故等時の使用時のひずみを線形外挿して算出した圧力。

表 9-1 検定水圧試験の測定結果（設計基準対象施設）

計測箇所	ひずみの測定結果×10 ⁻⁶			主ひずみ×10 ⁻⁶		主応力 [kg/mm ²]	
	ϵ_a	ϵ_b	ϵ_c	ϵ_1	ϵ_2	σ_1	σ_2
A	54	93	0	98.31	-44.31	1.86	-0.32
B	0	40	96	96.66	-0.66	2.11	0.62
C	-1	56	110	110.02	-1.02	2.40	0.70
D	105	100	64	110.20	58.80	2.80	2.01
E	31	88	85	98.36	17.64	2.27	1.03
F	68	22	-33	68.20	-33.20	1.27	-0.28
G	90	57	21	90.03	20.97	2.11	1.05
a	-64	108	256	256.45	-64.45	5.19	0.27
b	-84	110	269	269.87	-84.87	5.34	-0.09
c	-39	87	160	163.47	-42.47	3.30	0.14
d	-10	22	20	27.67	-17.67	0.49	-0.20
g	66	50	29	66.17	28.83	1.64	1.06

表 9-2 検定水圧試験に基づく計算結果（重大事故等対処設備）

評価箇所	ひずみの測定結果×10 ⁻⁶			主ひずみ×10 ⁻⁶		主応力 [MPa]	
	ϵ_a	ϵ_b	ϵ_c	ϵ_1	ϵ_2	σ_1	σ_2
b*	-103	135	332	332.96	-103.96	64.8	-0.9

*：表 9-1 の 3.80 MPa (38.7 kg/cm²) 加圧時の測定結果に示す最大値の測定箇所 (b)。

10. まとめ

前項の結果より，女川第2号機の設計基準対象施設として最高使用圧力（3.80 MPa（38.7 kg/cm²））に基づき検定圧力の算出を行う。

また，重大事故等対処設備として重大事故等時の使用時の圧力（4.71 MPa）に基づき検定圧力の算出を行う。

(1) 設計基準対象施設

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{P_0 \cdot S}{\sigma_0} \\
 &= \frac{3.80 \times 89.2}{52.4} = 6.47 \text{ MPa} \\
 &\left(= \frac{38.7 \times 9.1}{5.34} = 65.95 \text{ kg/cm}^2 \right)
 \end{aligned}$$

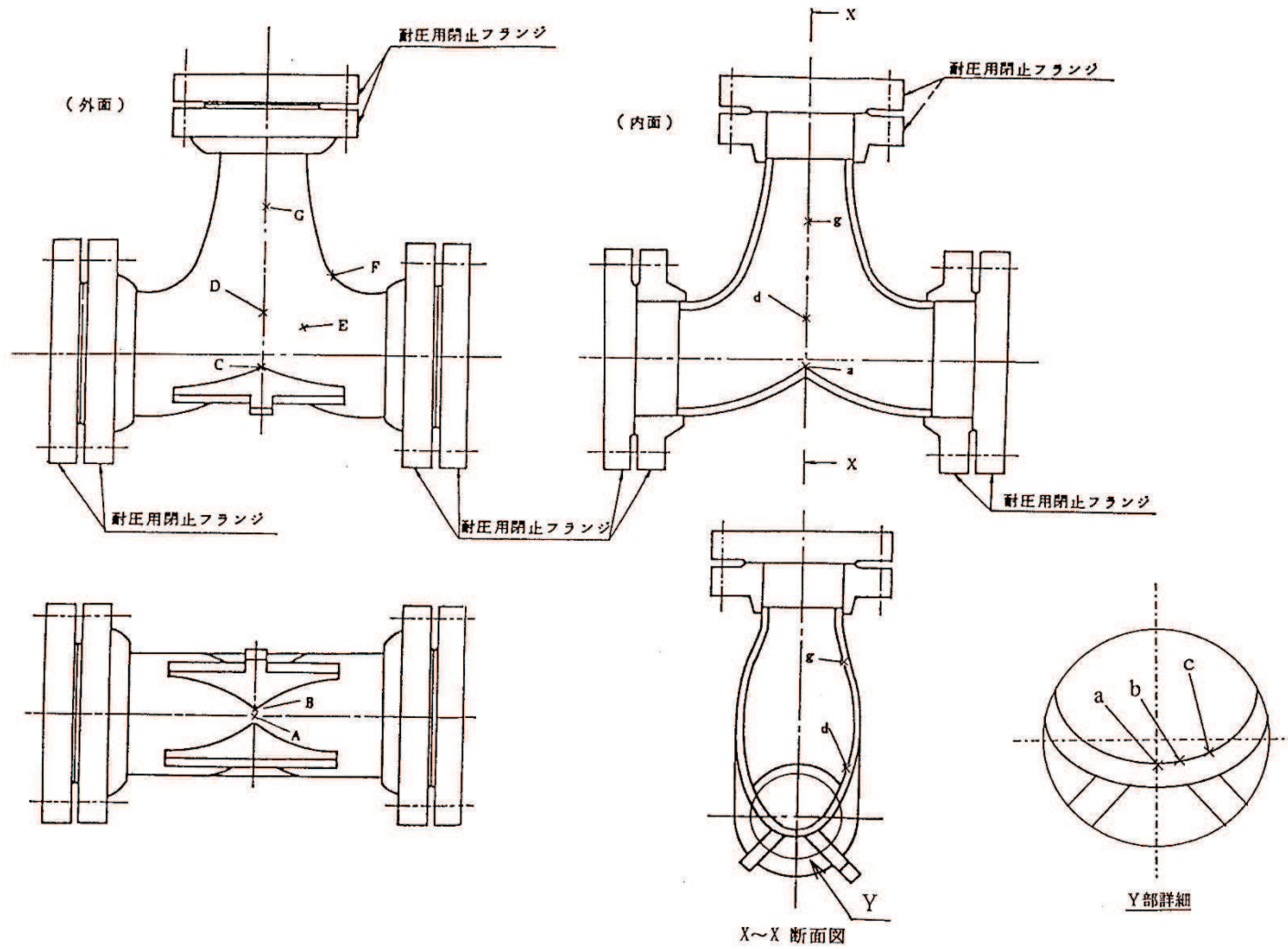
(2) 重大事故等対処設備

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{P_E \cdot S_E}{\sigma_E} \\
 &= \frac{4.71 \times 89.2}{64.8} \\
 &= 6.49 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

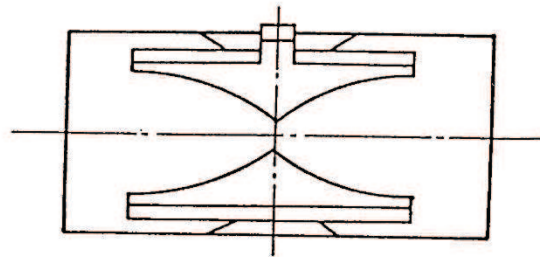
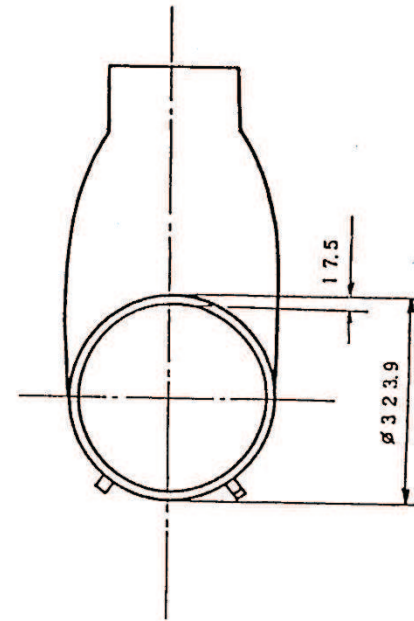
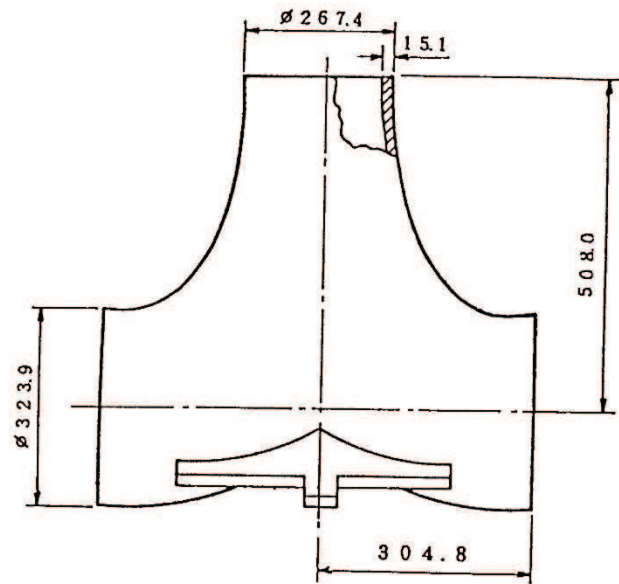
この結果より女川第2号機の最高使用圧力（3.80MPa（38.7kg/cm²））は検定圧力（6.47MPa（65.95kg/cm²））以下となる。

また，重大事故等時の使用時の圧力（4.71MPa）は検定圧力（6.49MPa）以下となる。

添付第 1 図 T-クエンチャラムズヘッド測定箇所図



添付第 2 図 T-クエンチャラムズヘッド形状・寸法図



(単位 : mm)

参考

主蒸気逃がし安全弁排気管Tークエンチャラムズヘッドの
強度計算について

1. はじめに

「VI-3-3-3-2-1-3-1 管の基本板厚計算書（主蒸気系）」のうち、「2. 主蒸気逃がし安全弁排気管Tークエンチャラムズヘッドの強度計算書」において重大事故等時の使用時の圧力に関する評価については、既工認にて実施した検定水圧試験※の結果を線形外挿することにより実施している。

Tークエンチャラムズヘッドは、重大事故等時の使用時の圧力が、設計基準対象施設の最高使用圧力を超えることから、重大事故等時の使用条件での技術基準への適合性を確認するため、施設時同様に検定水圧試験の実施が必要となる。しかしながら、当該Tークエンチャラムズヘッドは溶接にて敷設されており、実機を用いての検定水圧試験の実施は困難である。このため、今回は施設時の検定水圧試験結果で得られたひずみ及びひずみから算出した最大応力を線形外挿した値を用いて検定圧力を算出し、重大事故等時の使用時の圧力が検定圧力以下であることを確認した。

また、線形外挿した値を用いた評価が妥当であることを確認するため、別途、有限要素法による応力解析を実施したことから、本資料ではその結果について説明するものである。

※Tークエンチャラムズヘッドは、形状が特殊であり告示第501号に定める第4種管の構造の規格式による強度計算が困難なことから、同技術基準の検定水圧試験を適用している。

2. 重大事故等時の使用時の圧力による線形外挿による評価

既工認において、Tークエンチャラムズヘッドは、告示第501号に定める第4種管の構造の規格第64条の規定に基づき、準用する第55条ただし書きの規定により検定水圧試験を実施している。検定水圧試験では、設計基準対象施設の最高使用圧力3.80 (MPa) (38.7 (kg/cm²)) が、検定圧力6.47 (MPa) (65.95 (kg/cm²)) 以下であることを確認している。

(告示第501号より)

(第4種管の構造の規格)

第54条 第55条、第58条第1項及び第2項並びに第60条の規定は、第4種管の構造の規格に準用する。この場合において、第55条中「次条から第62条までの規定」とあるのは「第58条第1項及び第2項、第60条並びに第64条第2項から第7項までの規定」と、第55条第1号、第58条第1項第1号並びに第60条第1項第2号及び第2項第6号から第9号まで中「別表第6」とあるのは「別表第6又は別表第7」と、第58条第1項第1号及び第2項第2号並びに第60条第1項第2号及び第2項第1号中「第32条第4項」とあるのは「第43条第2項」と、第60条第1項第2号及び第2項第1号中「第58条第3項」とあるのは「第64条第2項」と読み替えるものとする。

(第3種管の構造の規格)

第55条 第3種管の構造の規格は、次条から第62条までの規定によらなければならない。ただし、形状、穴の位置等によりこれにより難い耐圧部分であつて、その最高使用圧力が次の各号に掲げる検定水圧試験方法のうちいずれかにより試験を行つて求めた検定圧力以下であるものについては、この限りでない。

二 あらかじめ最も弱いと推定した箇所に選定した数個の点に抵抗線ひずみ計をはり付け、当該耐圧部分の予定する最高使用圧力に相当する水圧力を加えて生ずるひずみを応力に換算して求めた値のうち絶対値による最大の値に基づいて、次の計算式により検定圧力を計算すること。

$$P = \frac{P_0 S}{\sigma_0}$$

P_0 は、予定する最高使用圧力に相当する水圧力（キログラム毎平方センチメートルを単位とする。）

σ_0 は、最も弱いと推定される箇所に生じた応力の値（キログラム毎平方ミリメートルを単位とする。）

P 及び S は、それぞれ前号に定めるところによる。

前項に記載したとおり、重大事故等時の使用時の圧力で検定水圧試験を実施することは困難であることから、既工認において設計基準対象施設として実施した検定水圧試験で測定されたひずみ値を、重大事故等時の使用時の圧力である 4.71 (MPa) の水圧まで線形外挿して得られたひずみ値から算出した最大応力 (64.8 (MPa)) より検定圧力を算出し、重大事故等時の使用時の圧力である 4.71 (MPa) が検定圧力 6.49 (MPa) 以下であることを確認した。

Tークエンチャラムズヘッドの材質はステンレス鋼鑄鋼品の SCS16A で、重大事故等時の使用時の温度は 262℃より、告示第 5 0 1 号の別表第 9 の材料の各温度における設計降伏点 S_y は 138 (MPa)、同別表第 6 の材料の許容引張応力 S で 105 (MPa) であることから、線形外挿により算出した最大応力 (64.8 (MPa)) は十分弾性域の範囲であり、線形外挿による評価が妥当なことが確認できる。

表－1 材料 SCS16A の設計降伏点 (S_y) 及び許容引張応力 (S)

重大事故等時の 使用時の温度 (℃)	設計降伏点 S_y (MPa)		許容引張応力 S (MPa)	
	1.0 倍	0.85 倍*	1.0 倍	0.85 倍*
262	138	117	105	89

* : 告示第 5 0 1 号 別表第 6 の備考 3 の口及び別表第 9 の備考 2 の口により、第 11 条の規定に準じて浸透探傷試験を行い、これに合格していることから 0.85 倍した値とする。

ステンレス鋼鑄鋼品の応力-ひずみ曲線の参考データを図-1に示す。

ここで示す図-1は図中に記載の参考文献を参照したもので、材料はASTM材のCF8M(JIS規格SCS14A相当)のデータを参照する。

なお、CF8M(JIS規格SCS14A相当)は、T-クエンチャラムズヘッドの材料であるSCS16A(CF3M相当)とJIS規格の機械的性質が同じで化学成分が類似しているため参照できる。本評価の応力範囲であれば材料の特徴及び弾性域の中間値以下の範囲を参照するため、SCS16A材においても弾性域と判断できる。

参考にSCS14AとSCS16AのJIS規格に記載される機械的性質及び化学成分を表-2及び表-3に示す。

表-2 ステンレス鑄鋼品の当該材料と参照材料の比較（機械的性質）

材料 (JIS規格)	引張強さ (N/mm ²)	耐力 (N/mm ²)	伸び (%)	硬さ (HB)	比較結果
SCS14A(参照材料)	480以上	205以上	33以上	183以下	規格値は同様。
SCS16A(当該材料)	480以上	205以上	33以上	183以下	

表-3 ステンレス鑄鋼品の当該材料と参照材料の比較（化学成分）

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
SCS14A	0.08 以下	1.50 以下	1.50 以下	0.040 以下	0.040 以下	9.00 ～ 12.00	18.00 ～ 21.00	2.00 ～ 3.00	—
SCS16A	0.03 以下	1.50 以下	1.50 以下	0.040 以下	0.040 以下	9.00 ～ 13.00	17.00 ～ 21.00	2.00 ～ 3.00	—
比較 結果	※ 固溶化熱処理はどちらも同じ条件（1030～1150急冷）。 Cの成分規定の差異は、主に耐食性に影響する差異となる。また、Ni及びCrの成分規定の範囲の差異は、主に耐食性及び耐熱性に影響する差異となる。いずれの材料も告示第501号の別表第9のSy値及び別表第6のS値は同じ規定値であることから強度的には同等な特徴を示す材料であると判断できる。								

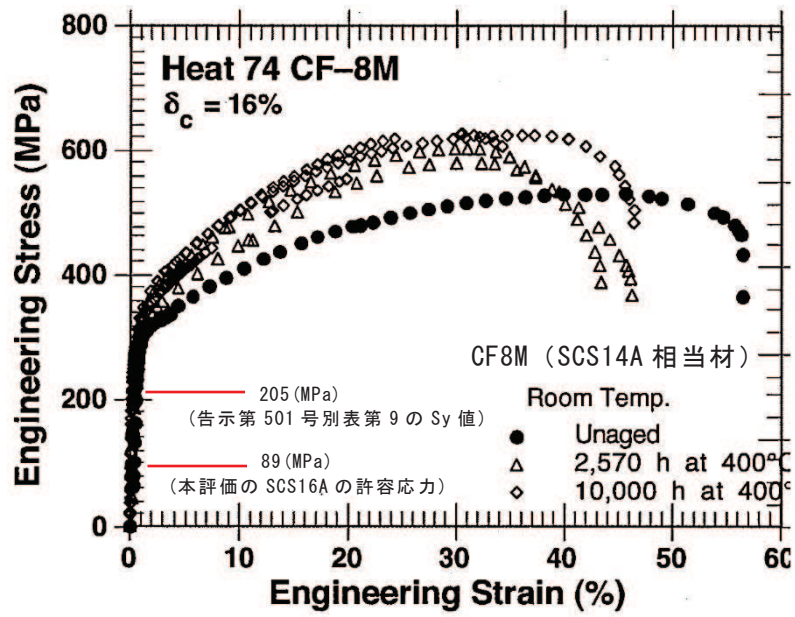


図-1 ステンレス鋼鋳鋼品の応力-ひずみ線図*1

(Figure9.effect of thermal aging on engineering stress vs strain curves for heat 69*1)

*1: 参考文献「Tensile-Property Characterization of Thermally Aged Cast Stainless Steels」NUREG/CR-6142 ANL-93/35 (U.S. Nuclear Regulatory Commission Office of Nuclear Regulatory Research Washington, DC 20555-0001)

3. 有限要素法による線形外挿の妥当性確認

有限要素法による線形外挿の妥当性確認を行うにあたり、形状が特殊なTークエンチャラムズヘッドに関するモデルの適切性確認として、既工認の強度計算である最高使用圧力を基準とした検定水圧試験の結果から算出した最大応力と、有限要素法による最高使用圧力での最大応力を比較し、解析モデルの適切性を確認する。

次に、有限要素法による最高使用圧力での最大応力と、重大事故等時の使用時の圧力による最大応力を算出した結果を比較し、内圧の変化による最大応力の傾向を確認する。

これらの結果と線形外挿により算出した最大応力の結果が同等かつ許容応力以下であることを確認する。

解析条件を表-4に、Tークエンチャラムズヘッドの構造を図-2に、解析モデルを図-3に、解析結果の応力分布図を図-4に、解析結果のグラフ表示（解析値と検定水圧試験値の比較）を図-5に示す。

(1) 計算条件

表-4 Tークエンチャラムズヘッド計算条件

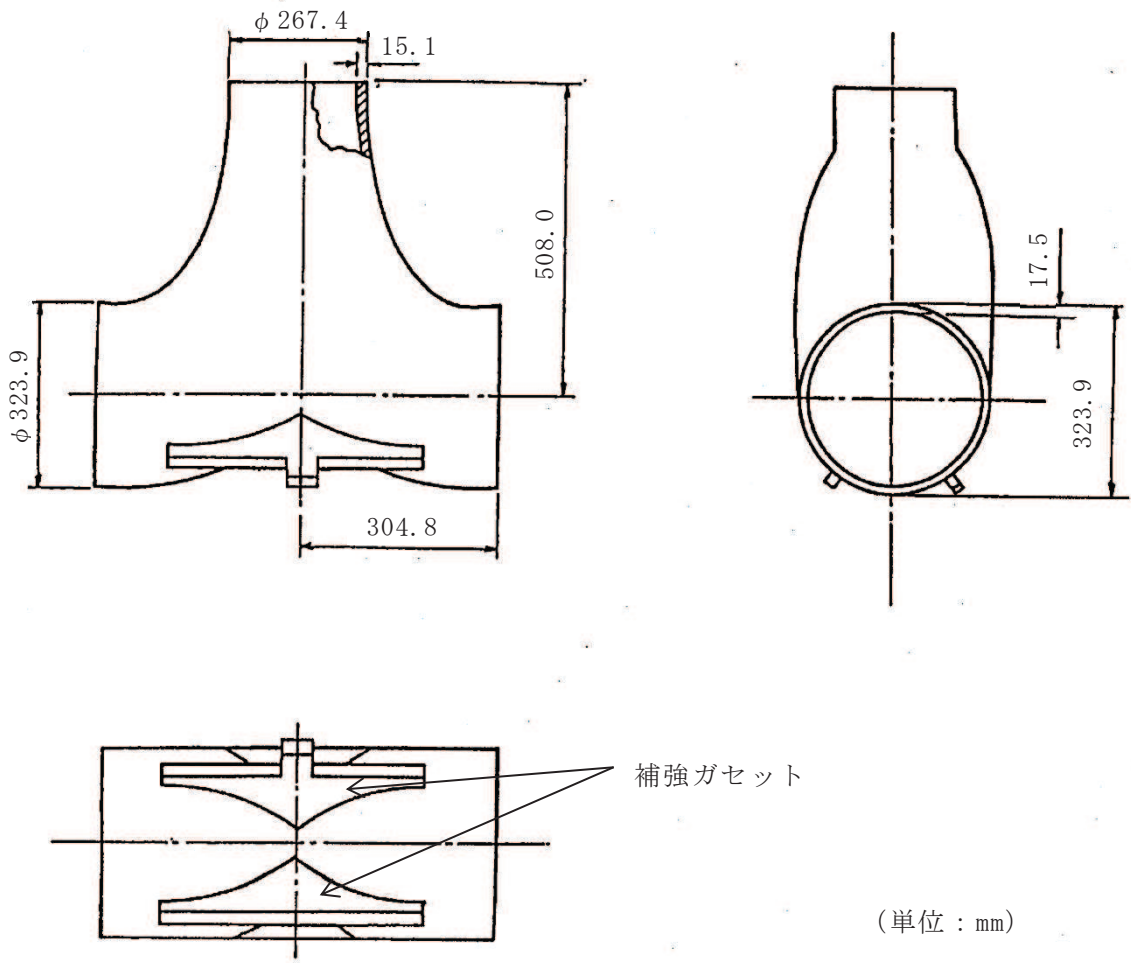
計算条件	
最高使用圧力 (MPa)	3.80
最高使用温度 (°C)	249
重大事故等時の使用時の圧力 (MPa)	4.71
重大事故等時の使用時の温度 (°C)	262
検定水圧試験の負荷圧力 (MPa) (11°C) (検定水圧試験時の測定圧力 39(kg/cm ²))	3.82
口径 (ティー入口内径) (mm)	φ 237.2
口径 (ティー出口内径) (mm)	φ 288.9
材質	SCS16A
許容引張応力 S (MPa) (260°C)	105
縦弾性係数 E (MPa) (260°C)	177520
ポアソン比	0.3

*解析コード：ABAQUS 2017

*解析要素：線形8節点6面体ソリッド要素

*解析モデル：1/2モデル（入口部中心から各出口部は対称構造）

*解析内容：圧力解析

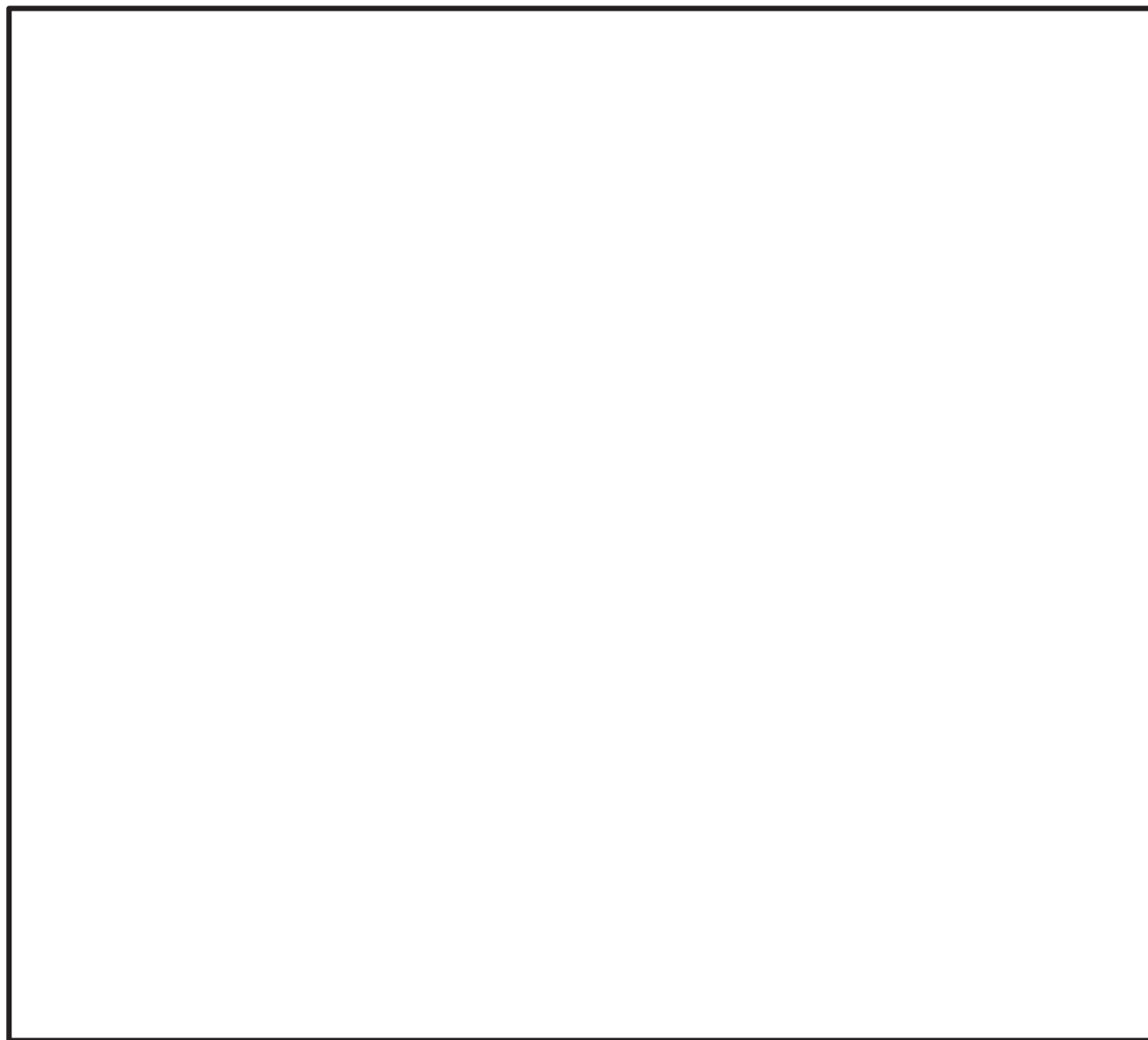


(単位 : mm)

図-2 T-クエンチャラムズヘッド構造

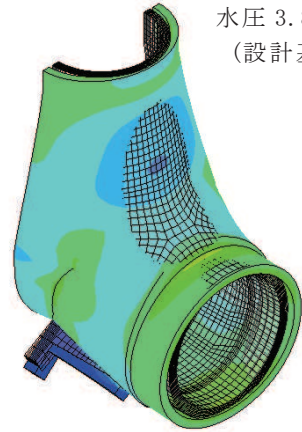
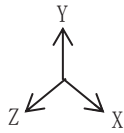
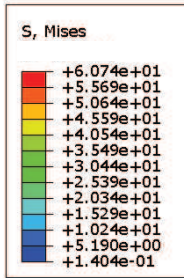
(2) 応力計算

解析評価部位は、検定水圧試験時の測定点（a, b, c, d, g 点）とし、検定水圧試験時の発生応力と、重大事故等時の使用時の圧力を内面に付加した状態の発生応力を解析により求める。

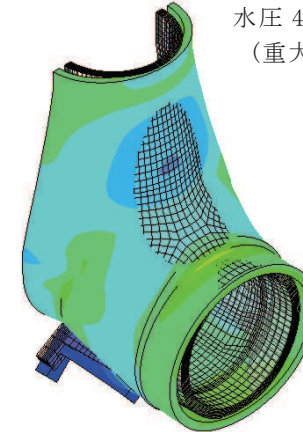
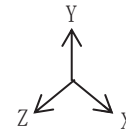
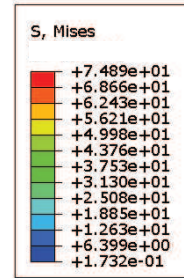


図－3 Tークエンチャラムズヘッド解析モデル図（1/2モデル）

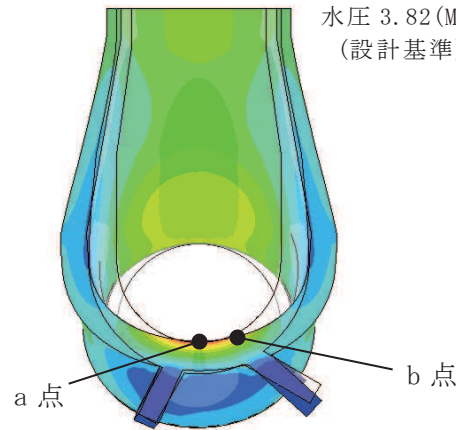
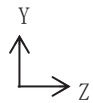
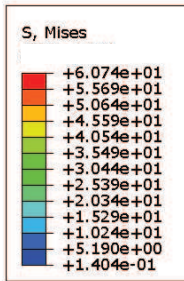
枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。



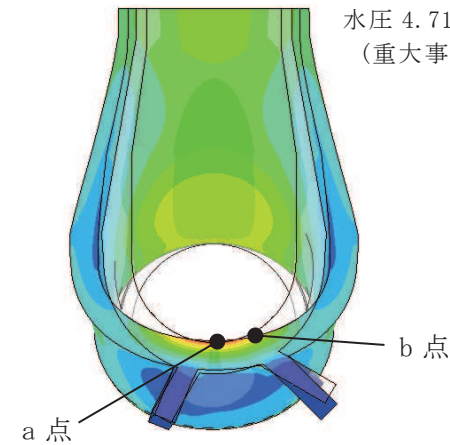
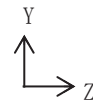
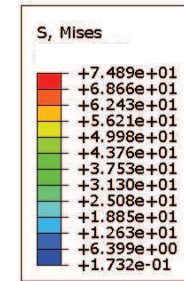
水圧 3.82 (MPa)
(設計基準)



水圧 4.71 (MPa)
(重大事故等時)



水圧 3.82 (MPa)
(設計基準)



水圧 4.71 (MPa)
(重大事故等時)

S : 内面に水圧を負荷した状態のミーゼス応力を示す。発生応力の状態は色別した応力分布図を参照。

図-4 T-クエンチャラムズヘッド 解析結果 (応力分布)

(3) 計算結果

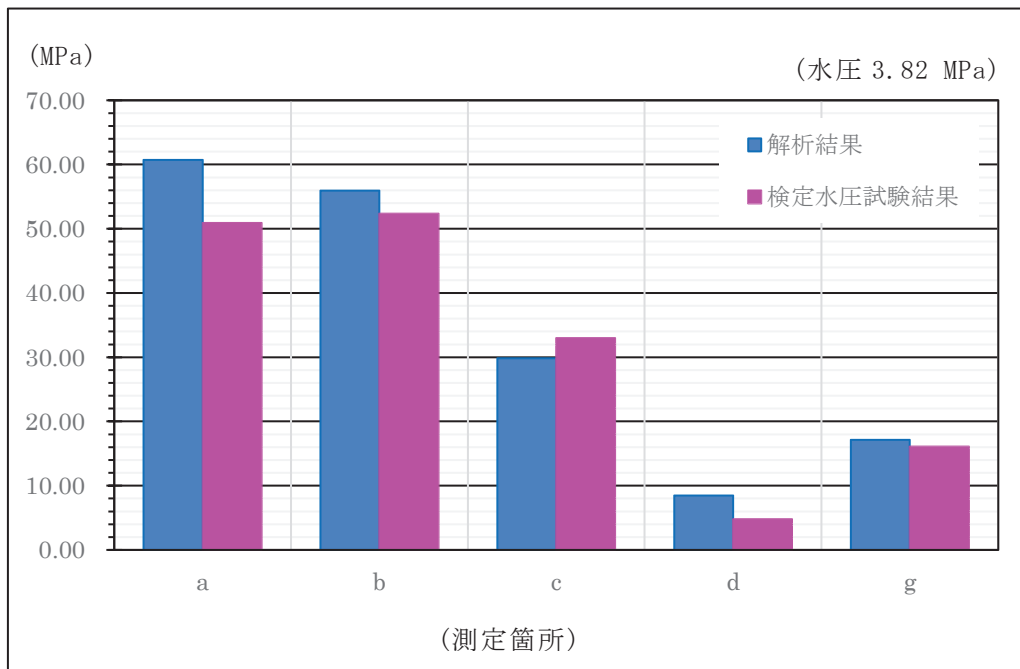
解析評価部位に対して、検定水圧試験時（3.82(MPa)）を解析した発生応力と実際の測定応力の比較を図－5に示す。

この比較結果より、各測定点の応力分布状態は概ね一致しており、特殊な構造をモデル化したものであるが、検定水圧試験結果に対して全体的に概ね一致していると評価でき、解析モデルは妥当なものと判断する。

また、解析により算出した検定水圧試験圧力の発生応力と重大事故等時の使用時の圧力の発生応力を図－6に示す。各測定点の応力の分布傾向は同様であるが、最大応力点の増加幅が大きくなることを確認できる。

重大事故等時の使用時の圧力での発生応力の結果を図－7に示す。解析値と検定水圧試験値を線形外挿した値について比較を行い、値が概ね一致することを確認した。また、解析の最大応力点(a点)及び検定水圧試験結果の最大応力点(b点)が許容応力以下であることを確認した。

発生応力と許容応力を表－5に示す。



図－5 Tークエンチャラムズヘッド応力値（解析値と検定水圧試験値の比較）

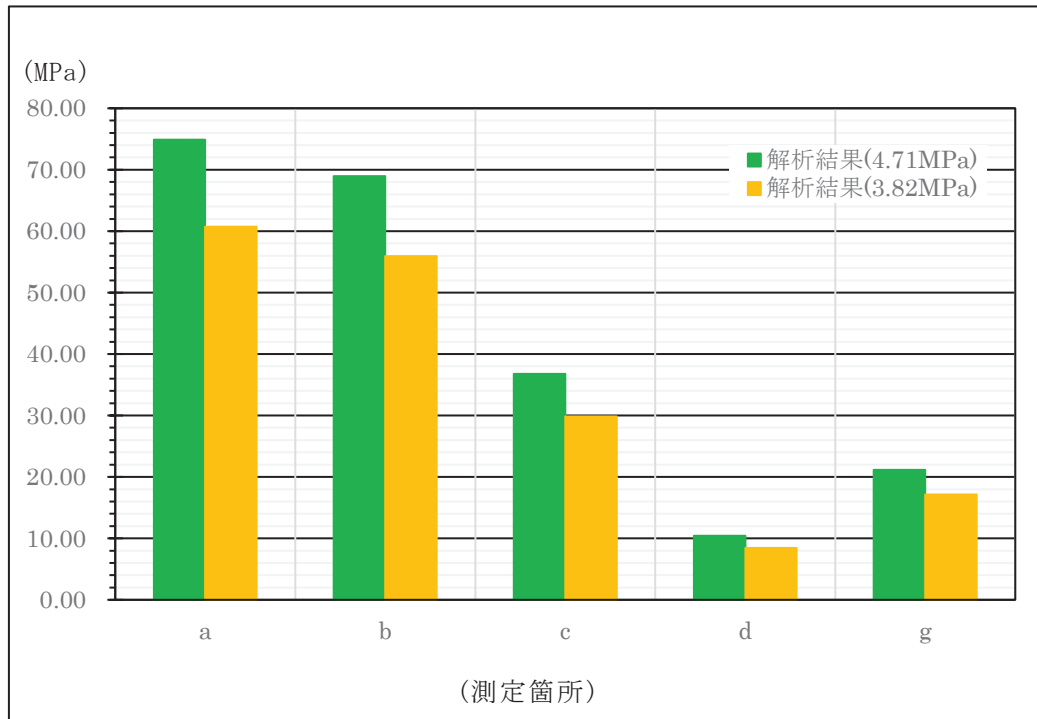


図-6 T-クエンチャラムズヘッド応力値

(最高使用圧力(3.82MPa)と重大事故等時の使用時の圧力(4.71MPa)の比較)

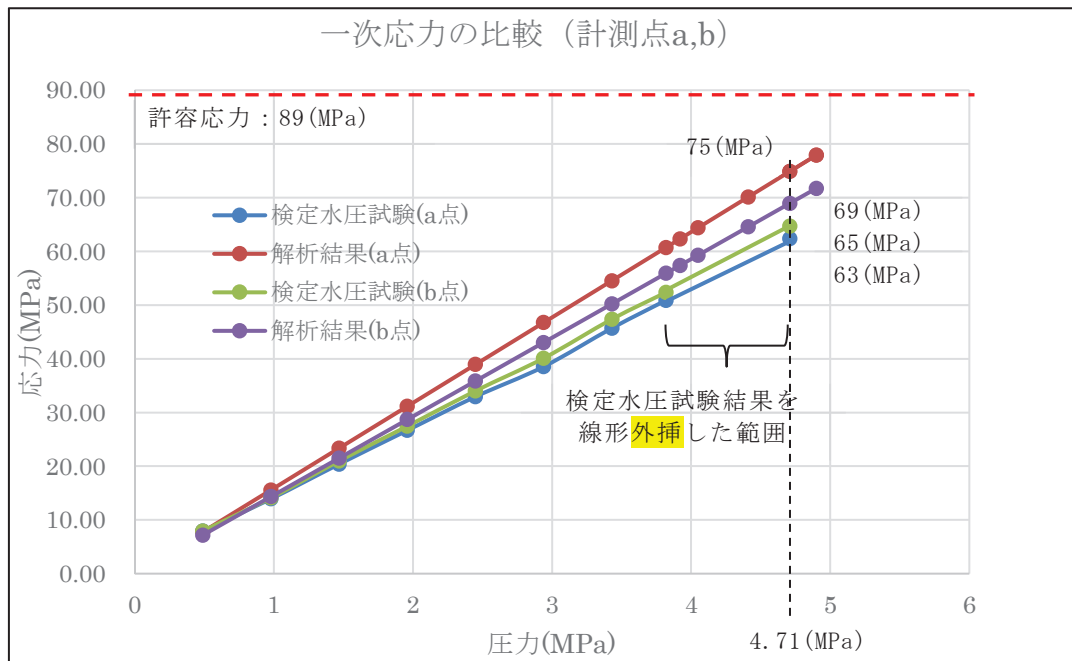


図-7 T-クエンチャラムズヘッドの一次応力
(解析値と検定水圧試験値の比較)

表-5 T-クエンチャラムズヘッドの一次応力 (内圧: 4.71(MPa))

評価部位	一次応力		
	線形外挿による発生応力 (MPa)	FEMによる発生応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
解析による最大応力点 (a点)	62.4	75	89
検定水圧試験の最大応力点 (b点)	64.8*	69	89

* : 「VI-3-3-3-2-1-3-1 管の基本板厚計算書 (主蒸気系)」のうち, 「2. 主蒸気逃がし安全弁排気管T-クエンチャラムズヘッドの強度計算書」に記載の σ_E (重大事故等時の使用時の圧力時の最大応力) を記載。

4. まとめ

T-クエンチャラムズヘッドの強度評価については, 重大事故等時の使用時の圧力については既工認にて実施した検定水圧試験の結果を線形外挿することで評価を行った。線形外挿は弾性域の範囲において実施しているが, 適用の妥当性を確認するために有限要素法を用いた妥当性確認を行うこととした。モデル化の妥当性を確認するため, 過去の検定水圧試験について解析した発生応力と実際の測定応力を比較し, 概ね一致する結果を得たことからモデルは妥当であることを判断した。続いて, 重大事故等時の使用時の圧力についても, 解析値と検定水圧試験値を線形外挿した値について比較を行い, 値が概ね一致することおよび許容応力以下であることを確認した。

以上より, 施設時に実施した最高使用圧力による検定水圧試験の結果を用いた線形外挿による評価は適用できると考える。