

耐震設計の許容応力体系について

平成18年1月17日

日本電気協会 原子力規格委員会
耐震設計分科会 機器・配管系検討会

耐震設計と構造設計の関係

設計と 適用規格	耐震設計 - JEA指針:地震力の特徴*に留意				
	構造設計 - JSME規格				
作用荷重	圧力	機械的 外力	熱膨張差 温度分布	自重	地震力

JEA指針 : 原子力発電所耐震設計技術指針JEAG4601

JSME規格 : 発電用原子力設備規格 設計・建設規格

耐震設計の許容応力は、基本的に構造設計の許容応力と同じである

* 地震力は発電所のすべての施設に同時かつ共通に作用する
地震力は短時間に繰返し作用する

機器等の重要度の考え方

- **構造設計**

個々の機器・配管が破損した場合の安全への影響度に応じてクラス分類(主に品質レベルで配慮)

(クラス1、クラス2、クラス3、クラス4、クラスMC)

- **耐震設計**

共通かつ同時に作用する地震力により当該施設が破損した場合の安全への影響度に応じて重要度分類(主に耐震強度で配慮)

(Asクラス、Aクラス、Bクラス、Cクラス)

一次応力と二次応力

- **一次応力**

作用する力との釣り合いにより生じる応力

作用する力が増えると、応力・ひずみも増える

例：内圧により容器壁に生じる一様な応力

曲げモーメントを受ける配管に生じる応力

地震慣性力により生じる応力は一次応力に分類されている

- **二次応力**

隣接部分の拘束により生じる応力

変形・ひずみが生じると、応力が低減する

例：熱応力

円筒胴と球形鏡の接続部に生じる応力増加分

許容応力の考え方

(1) 破損形態ごとに許容基準を規定する

延性破壊防止：一次一般膜応力を制限

塑性崩壊防止：一次(膜+曲げ)応力を制限

座屈防止：外圧、圧縮応力等を制限

疲労破損防止：応力・ひずみの変動範囲と繰返数を制限

進行性変形：一次、二次応力の組合せ条件を制限

脆性破壊、応力腐食割れ、腐食・磨耗は、応力、材料、さらに使用環境をも考慮した制限により破損を防止する

許容基準は、実際の限界より安全側に設定されている

許容応力の考え方

(2) 運転状態ごとに許容応力を設定する

運転状態 : 原子炉施設の通常運転時の運転状態

運転状態 : 運転状態 から逸脱した運転状態であって、運転状態、運転状態、試験状態以外の運転状態

運転状態 : 原子炉施設の故障、異常な作動等により原子炉の運転停止が緊急に必要とされる運転状態

JEAG4601はS₁地震を運転状態 相当としている

運転状態 : 原子炉施設の安全性評価の観点から異常な状態を想定した運転状態

JEAG4601はS₂地震を運転状態 相当としている

膜応力、曲げ応力、ピーク応力

膜 応 力

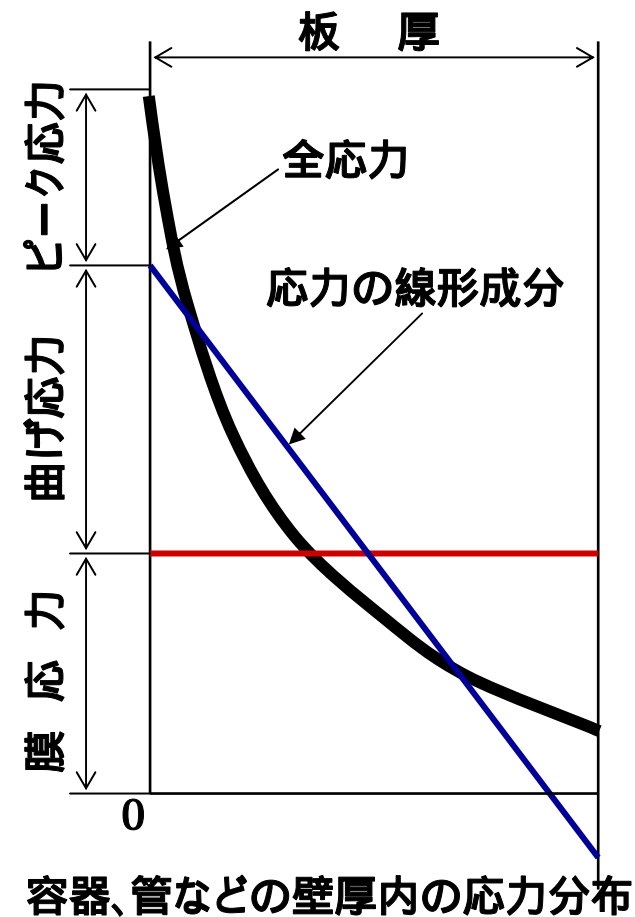
応力の板厚平均成分

曲げ応力

線形成分のうち
平均値からの変化成分

ピーク応力

膜 + 曲げ応力に
付加される成分



一次一般膜応力の制限

・ 内圧による破裂や外力による延性破断を防止するため、
広範囲に作用する一次応力の壁厚平均成分を制限する

・ クラス1容器(フェライト鋼系材料)の許容応力

設計条件----- $S_m^{(1)}$

運転状態、 S_1 地震---- $\text{MIN}[S_y, (2/3)S_u]^{(2)}$

運転状態、 S_2 地震---- $(2/3)S_u^{(2)}$

注 (1) 設計応力強さ

(2) オーステナイト系ステンレス鋼及び高ニッケル合金の場合の許容応力は、

運転状態、 S_1 地震で $1.2S_m$

運転状態、 S_2 地震で $\text{MIN}[(2/3)S_u, 2.4S_m]$

設計応力強さ (Sm)

$$S_m = \text{MIN} [A, B, C, D]$$

$$A = \frac{1}{3} (\text{常温における引張強さ規格値})$$

$$B = \frac{1.1}{3} \left(\frac{\text{温度 } T \text{ における引張強さ}}{\text{常温における引張強さ}} \right) (\text{常温における引張強さ規格値})$$

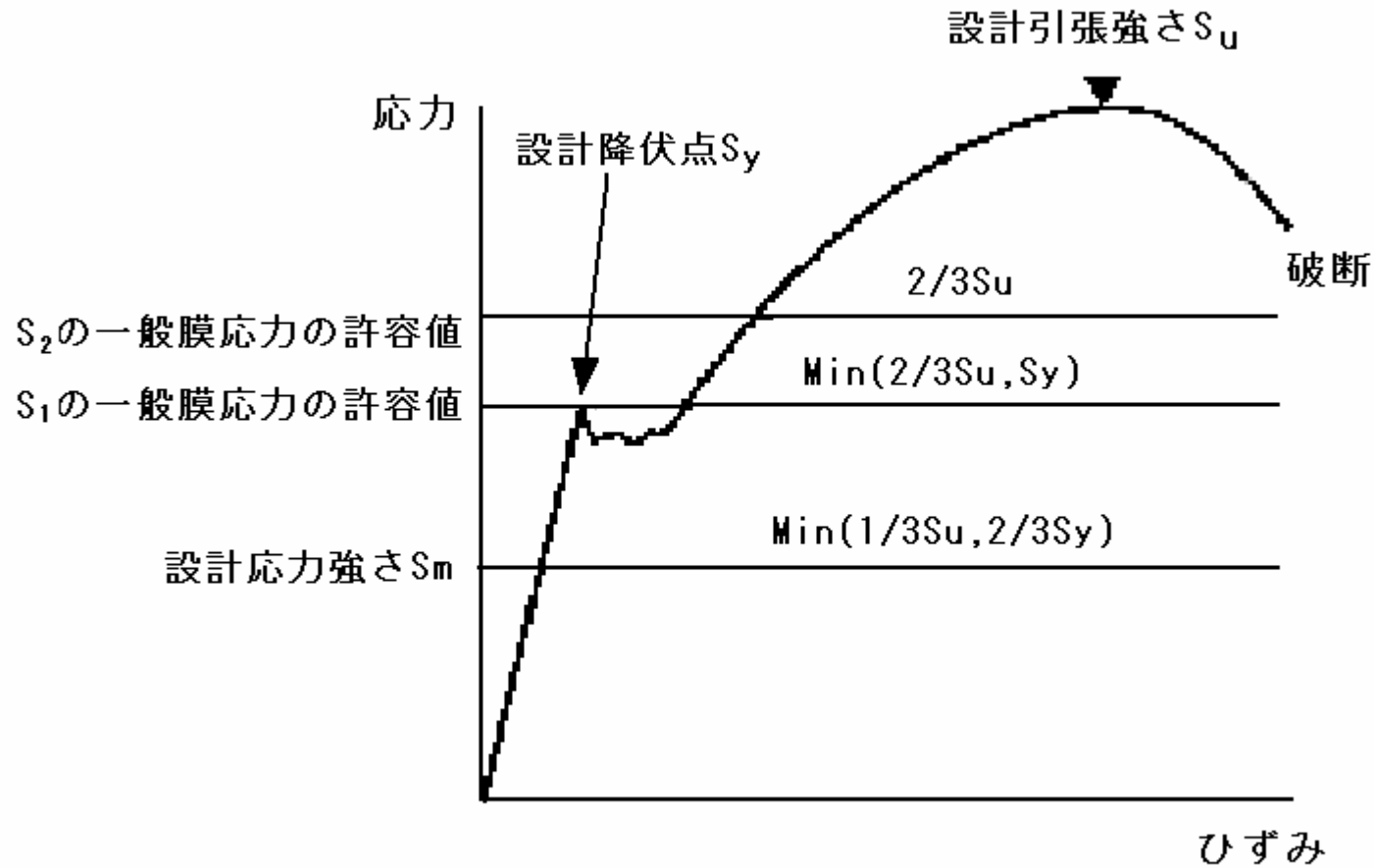
$$C = \frac{2}{3} (\text{常温における降伏点規格値})$$

$$D = \frac{2}{3} \left(\frac{\text{温度 } T \text{ における降伏点}}{\text{常温における降伏点}} \right) (\text{常温における降伏点規格値})$$

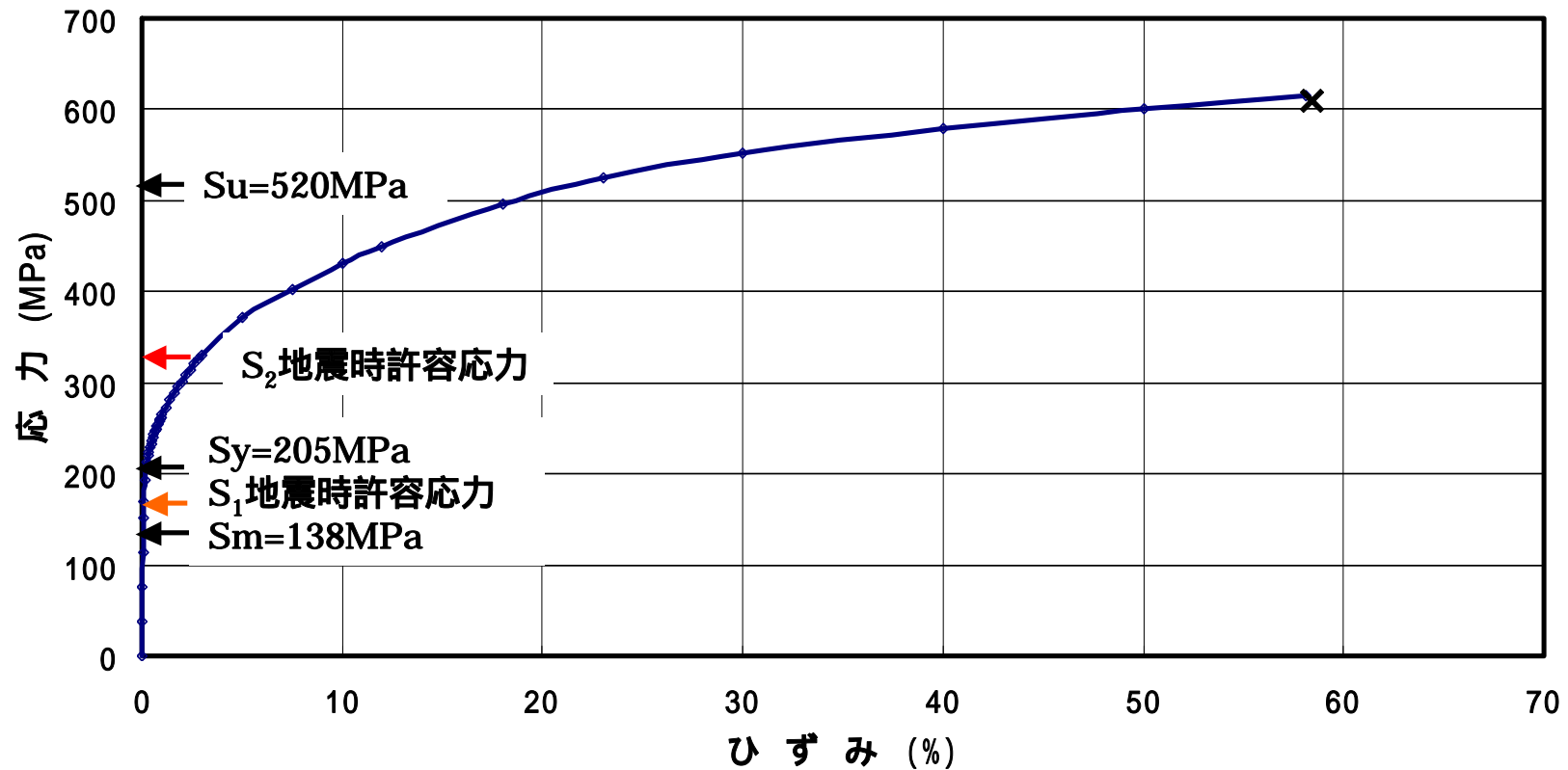
ただし、オーステナイト鋼及び高ニッケル合金においては、

$$D = 0.9 \left(\frac{\text{温度 } T \text{ における降伏点}}{\text{常温における降伏点}} \right) (\text{常温における降伏点規格値})$$

保安院・JNESパンフレット
「原子力発電所の耐震安全性」より抜粋

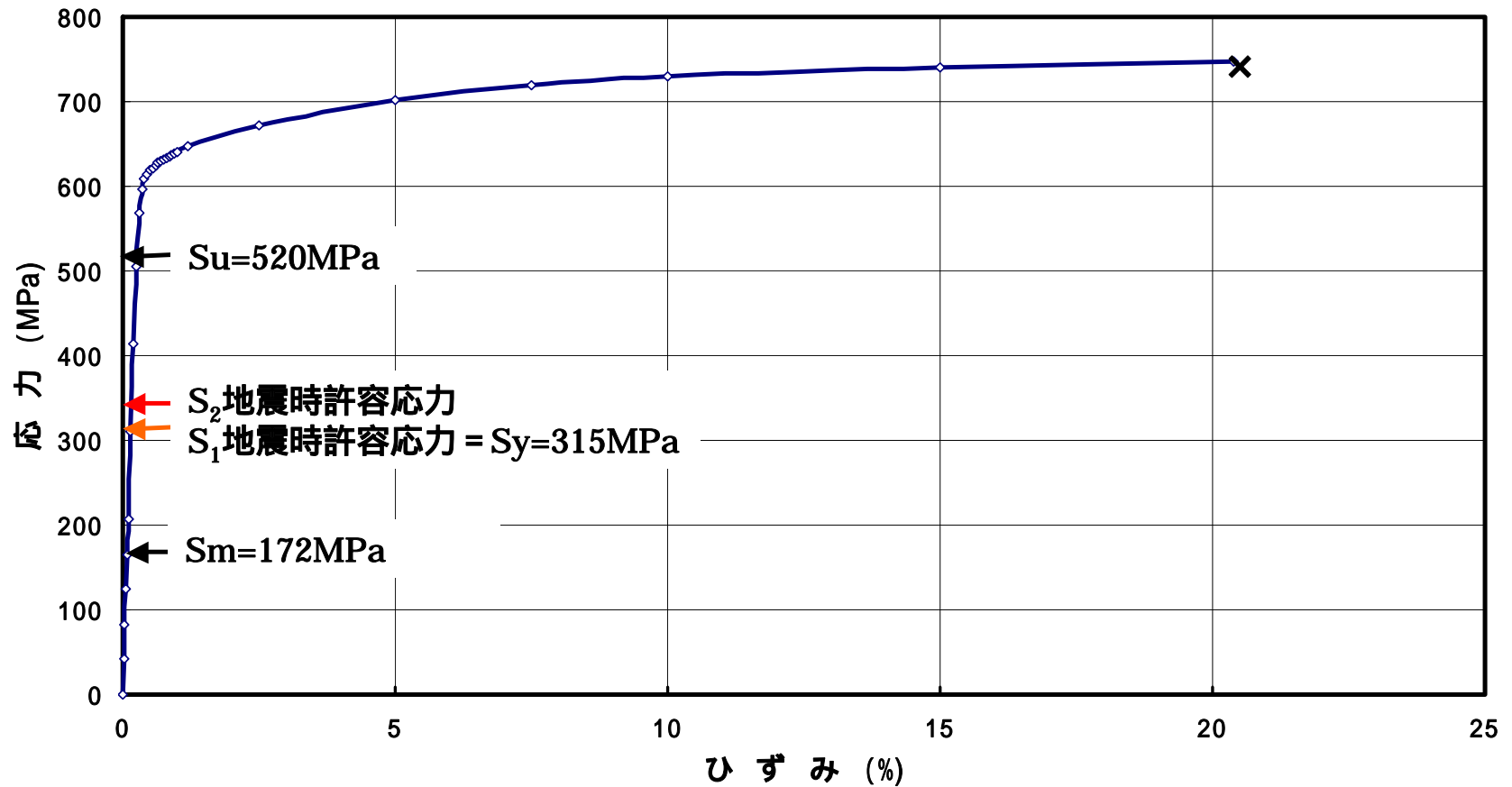


原子炉圧力容器の許容値 (例)



SUS304鋼板の引張曲線(20) (JAEA大洗提供データ)

原子力プラントには延性と靱性に優れた材料が適用される
 S_1 地震時許容応力は弾性領域、 S_2 地震時許容応力も破損限界のはるか手前



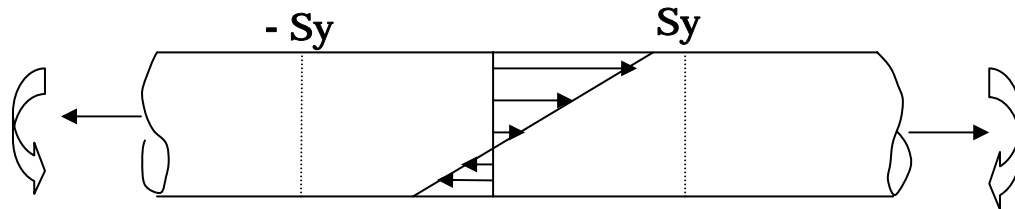
2¹/₄Cr-1Mo鋼板の引張曲線 (JAEA大洗提供データ)

原子プラントには延性と靱性に優れた材料が適用される
 S₁地震時許容応力は弾性領域、S₂地震時許容応力もほぼ弾性領域

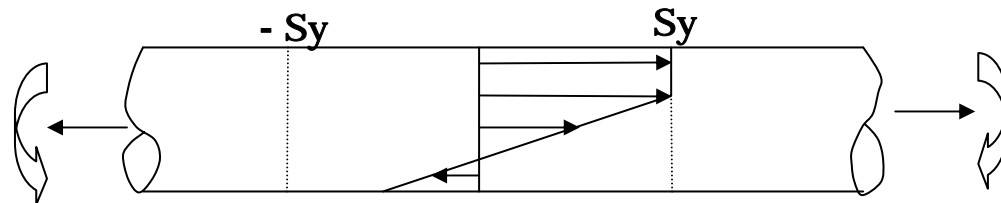
一次(膜+曲げ)応力の制限

軸力と曲げモーメントが作用する場合の応力分布(弾完全塑性体を仮定)

弾性領域

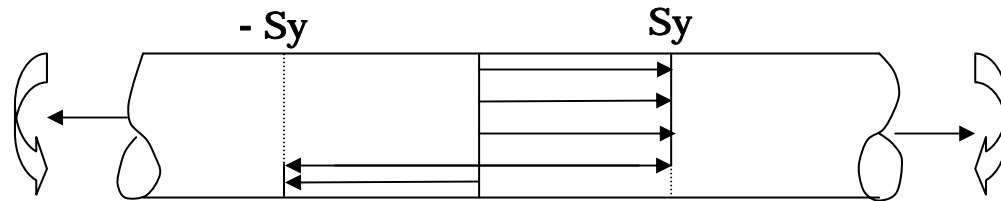


弾塑性領域



塑性崩壊

これ以上の曲げモーメントに
耐えられない



実際に使用している材料は加工硬化を生じるので
もっと大きな曲げモーメントに耐えられる

一次 + 二次応力変動範囲の制限

一次 + 二次応力の変動範囲 $3S_m(\ 2S_y)$

この制限は疲労評価を簡易に行うために定めているもので、応力変動範囲が $3S_m$ を超えても直ちに破壊には結びつかない。超えた場合は、塑性ひずみを考慮して疲労解析を行う。

シェイクダウンの説明

弾完全塑性体(加工硬化なし)を仮定する。

O P: 弾性挙動

Pを超えてひずみを生じさせると、

弾性計算上は O A B C

実際は O A₁ B₁ C₁

A₁で荷重を反転させると、A₁ A₂

再び荷重を反転させると、A₂ A₁

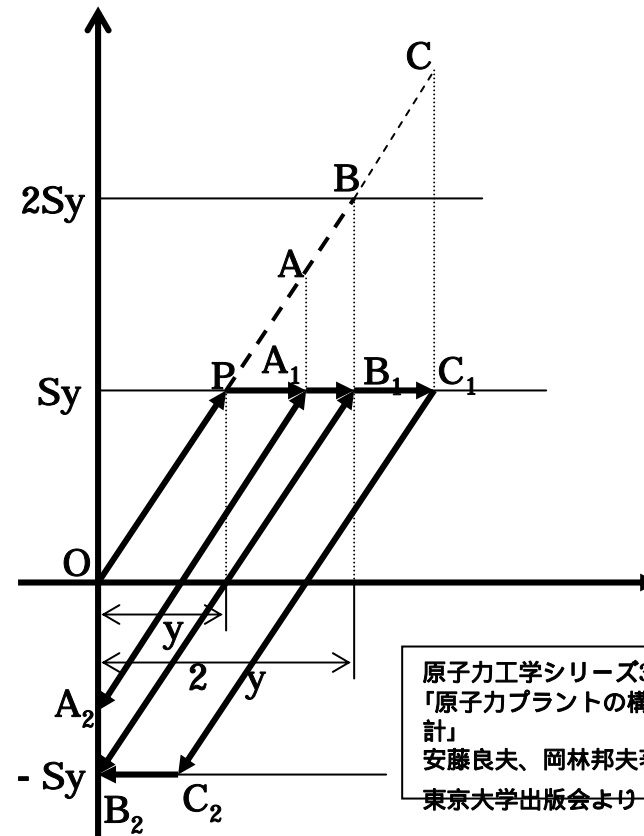
2回目以降は、A₁ A₂(弾性挙動)の繰返し

最初の荷重がB₁までなら、2回目以降は弾性挙動の繰返し(シェイクダウン現象)となる。

最初の荷重がB₁を超えてC₁まで行く場合、

1回目は O P C₁ C₂ B₂

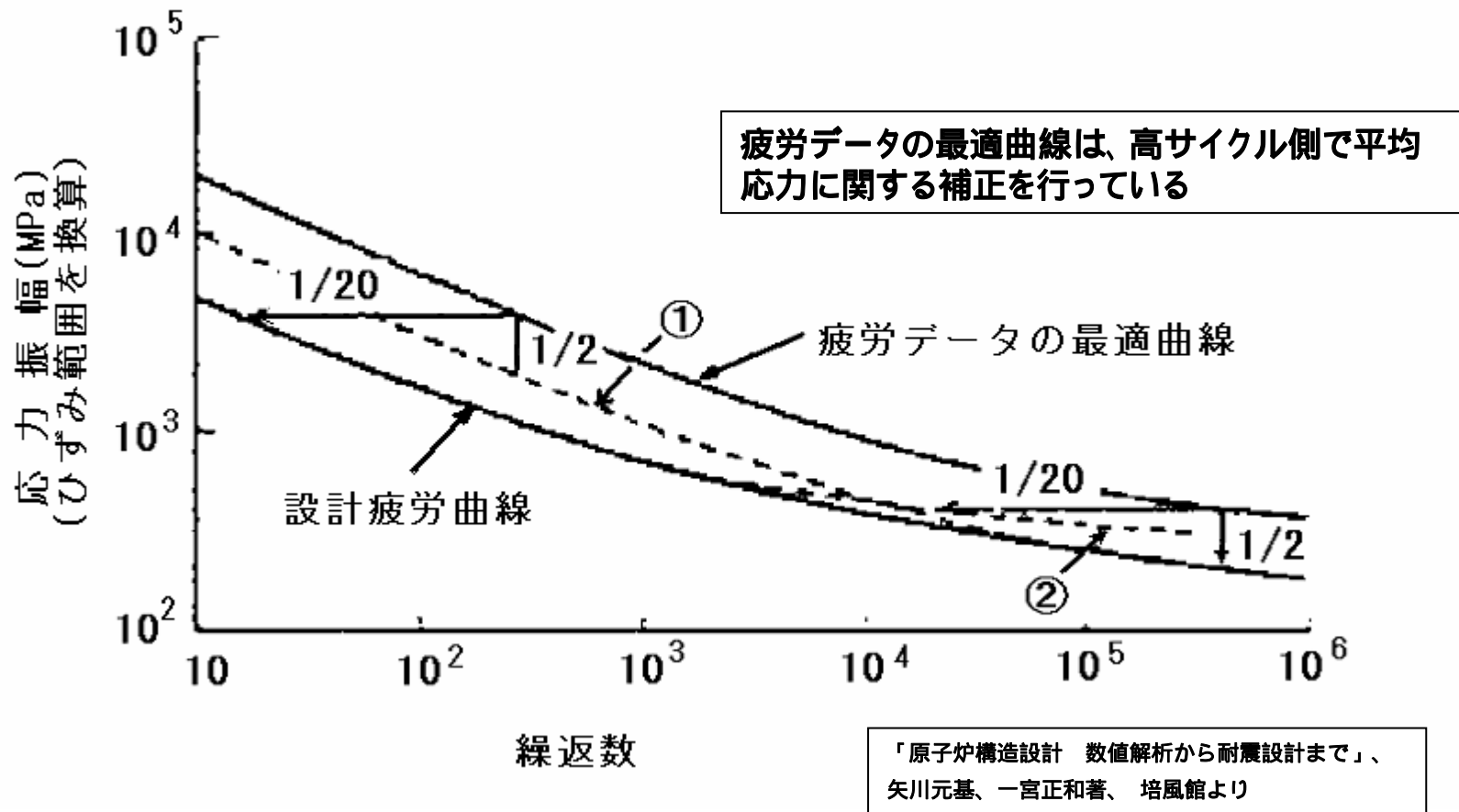
2回目以降は B₂ B₁ C₁ C₂ B₂となり、塑性サイクルを描く。疲労解析が必要になる。



現実の材料は加工硬化があるため、荷重繰返しにより降伏応力が上昇する。

(一次 + 二次 + ピーク)応力振幅制限

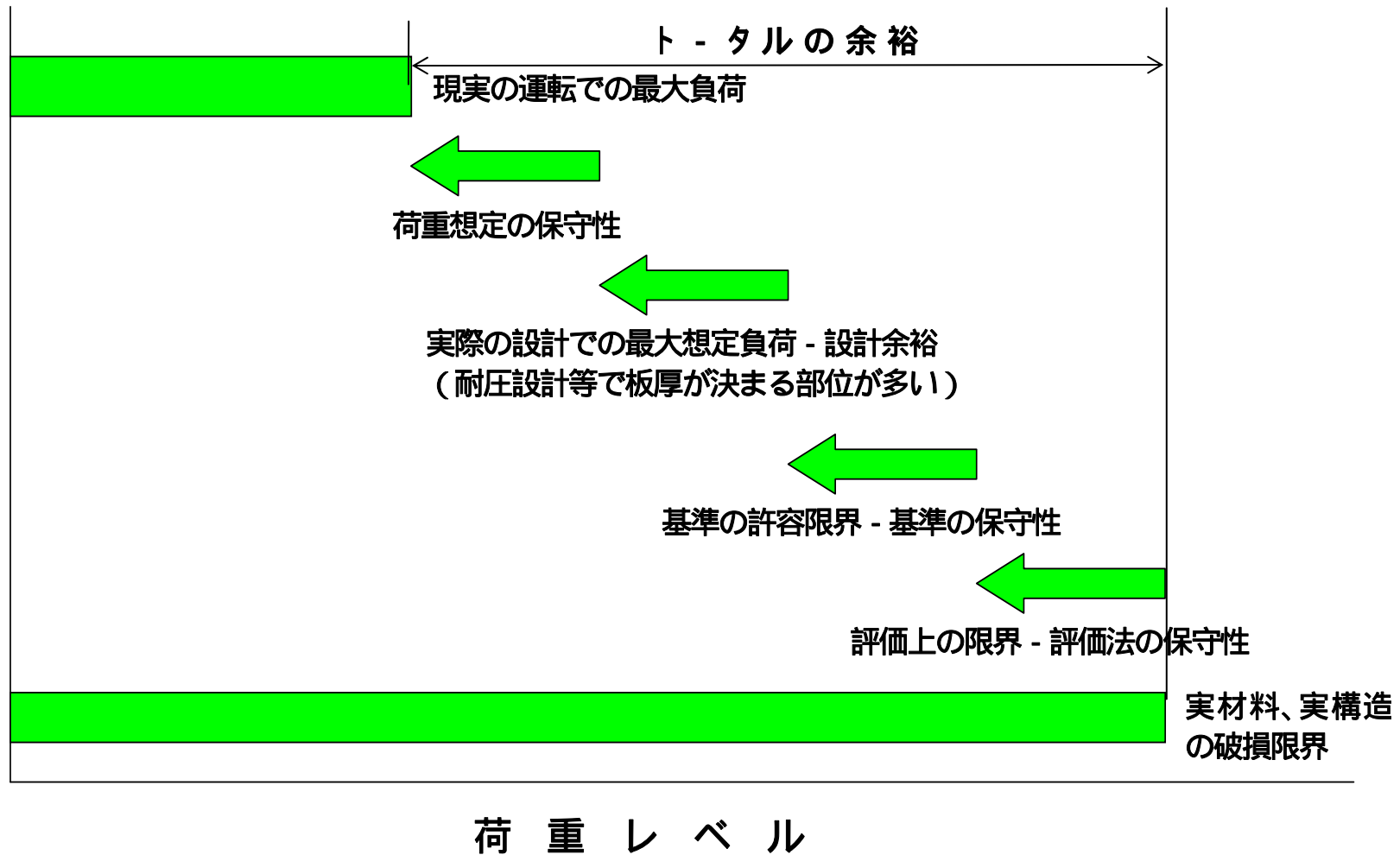
累積疲労損傷係数 1.0 を確認する



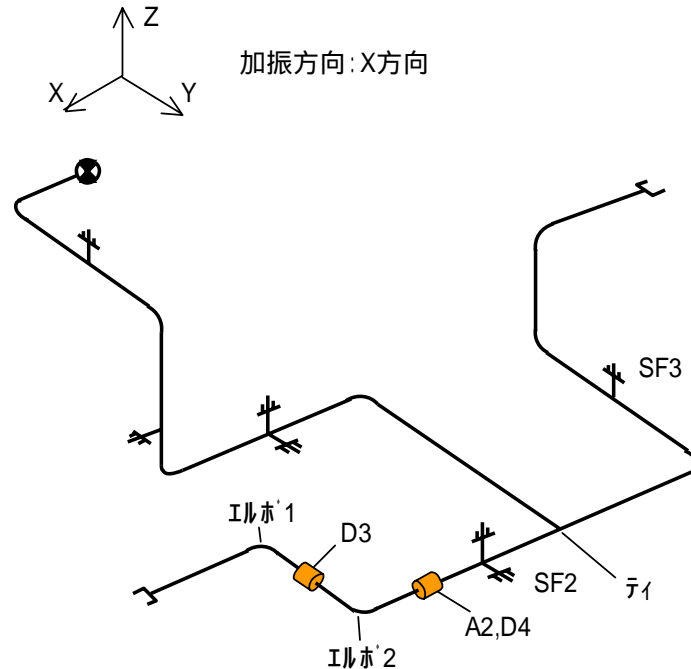
設計疲労曲線の作成(概念図)

構造・耐震設計における裕度概念図

(どこでどの程度の余裕を取るかは設計に依存する)



NUPECによる配管系終局強度試験



終局強度試験体

試験体：実機配管系を模擬した3次元配管系モデル

付加質量(弁)、レストレイント、ティー、エルボ付き

荷 重：内圧10.7MPa (フープ応力でSm相当)

付加質量部水平変位=±120mm (許容限界の8.5倍、
兵庫県南部地震の約15倍)を生じる地震波を入力

結 果：5回目の加振中にエルボ横腹に疲労き裂が貫通

内部の水が漏洩 (配管要素の疲労寿命曲線に対する累
積疲労損傷係数で1.8超)

疲労以外の形態の破損は起きなかった

疲労破損に対する裕度(共振状態)

$$\frac{1 \text{ 回の地震で疲労破損する入力地震動}}{S_2 \text{ 地震に対するJEAG4601の許容入力地震動}} > 10$$

(1回の地震での等価繰返し回数=60と仮定)

(設計疲労曲線に対する累積疲労損傷=1で破損を仮定)

出典：平成15年度 原子力発電施設耐震信頼性実証に関する報告書 その1 配管系終局強度, 平成15年9月, 財団法人 原子力発電技術機構
平成15年度 原子力発電施設耐震信頼性実証に関する報告書 配管系終局強度, 平成16年6月, 独立行政法人 原子力安全基盤機構

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

J E A G 4 6 0 1 ・ 補 1 9 8 4

社団法人 日本電気協会

電気技術基準調査委員会

付 録 2

地震荷重と他の荷重との組合せ及び対応する許容応力状態

本参考資料での検討と JEAG4601・補 - 1984「原子力発電所耐震設計技術指針 - 許容応力編」での検討を踏まえた結果、地震荷重と他の荷重との組合せ及び対応する許容応力状態は次のとおりである。

耐震クラス	(1) 種 別 荷重の組合せ	第1種	第2種	第3種	第4種	第5種	炉心支持構造物	そ の 他		
		機 器 支持構造物	容 器 支持構造物	機 器 支持構造物	容 器 管	管		ポンプ・弁	炉内構造物	支持構造物
As	$D + P + M + S_1$	A_S	A_S				A_S			
	$D + P_D + M_D + S_1$			A_S	A_S			A_S	A_S	A_S
	$D + P_L + M_L + S_1$	(2) A_S	(3) A_S				A_S			
	$D + P + M + S_2$	A_S	A_S				A_S			
	$D + P_D + M_D + S_2$			A_S	A_S			A_S	A_S	A_S
A	$D + P_D + M_D + S_1$			A_S	A_S	A_S		A_S	A_S	A_S
B	$D + P_d + M_d + S_B$			B_{A_S}	B_{A_S}	B_{A_S}		B_{A_S}		B_{A_S}
C	$D + P_d + M_d + S_c$				C_{A_S}	C_{A_S}		C_{A_S}		C_{A_S}

注：(1) 各設備の種別は、原則として告示に基づくものとする。

告示で規定されない容器・管にあっては以下による。

1) 耐震 A 又は As クラスに分類される非常用予備発電装置に付属する容器・管については第 3 種の規定を準用する。

2) 第 5 種管に分類されないダクトについても、第 5 種管の規定を準用する。

3) 上記 1), 2) 以外で告示で規定されない容器・管にあっては第 4 種の規定を準用する。

(2) なお、E C C S 及びそれに関連し、事故時に運転を必要とするものについては A_S とする。

(3) 1) 第 2 種容器、許容応力状態 A_S の荷重の組合せ ($D + P_L + M_L + S_1$) の P_L は、LOCA 後 10^{-1} 年後の原子炉格納容器内圧を用いる。

2) 原子炉格納容器は、LOCA 後の最終障壁となることから、構造体全体としての安全裕度を
確認する意味で LOCA 後の最大内圧と S_1 地震動 (又は静的地震力) との組合せを考慮する。
この場合の評価は、許容応力状態 A_S の許容限界を用いて行う。

〔記号の説明〕

D : 死荷重

P : 地震と組合わすべきプラントの運転状態（冷却材喪失事故後の状態は除く）における圧力荷重

M : 地震及び死荷重以外で地震と組合わすべきプラントの運転状態で（冷却材喪失事故後の状態は除く）設備に作用している機械的荷重

〔各運転状態における P 及び M については、安全側に設定された値（たとえば最高使用圧力、設計機械荷重）を用いてもよい。〕

P_L : 冷却材喪失事故直後を除き、その後に生じている圧力荷重

M_L : 冷却材喪失事故直後を除き、その後に生じている死荷重及び地震荷重以外の機械的荷重

P_D : 地震と組合わすべきプラントの運転状態 I 及び（運転状態がある場合にはこれを含む）、又は当該設備に設計上定められた最高使用圧力による荷重

M_D : 地震と組合わすべきプラントの運転状態 I 及び（運転状態がある場合にはこれを含む）、又は当該設備に設計上定められた機械的荷重

P_d : 当該設備に設計上定められた最高使用圧力による荷重

M_d : 当該設備に設計上定められた機械的荷重

S_1 : 基準地震動 S_1 により定まる地震力又は静的地震力

S_2 : 基準地震動 S_2 により定まる地震力

S_B : 耐震 B クラスの設備に適用される地震動より求まる地震力又は、静的地震力

〔耐震 B クラスの設備に適用される地震動により求まる荷重とは基準地震動 S_1 に基づく地震力を 1/2 倍した値を用いることができる。〕

S_C : 耐震 C クラスの設備に適用される静的地震力

${}_A S$: 通産省告示 501 号の運転状態 相当の許容応力を基準として、それに地震により生じる応力に対する特別な制限を加えた許容応力状態

${}_A S$: 通産省告示 501 号の運転状態 相当の許容応力を基準として、それに地震により生じる応力に対する特別な制限を加えた許容応力状態

$B_A S$: 耐震 B クラス設備の地震時の許容応力状態

$C_A S$: 耐震 C クラス設備の地震時の許容応力状態

〔 ${}_A S$, ${}_A S$, $B_A S$, $C_A S$ は JEAG4601・補 - 1984「原子力発電所の耐震設計技術指針 - 許容応力編」による。〕

第2章 耐震 As クラス及び A クラス施設の許容応力

本章の各施設の地震時における許容応力状態 A_S 及び A は、許容応力を体系的に理解するために許容応力状態 $A \sim A$ と共に表にまとめている。

許容応力状態 $A \sim A$ は告示で規定されるものであり、それにしたがうものとする。

なお、表の注のうち表の中に対応する注番号がないものは、表全体の注記である。

2.1 容器の許容応力

2.1.1 第1種容器の許容応力

第1種容器の許容応力を次に示す。

許容 応力状態	応力分類	1次一般膜応力	1次膜応力 + 1次曲げ応力	1次+2次 応力	1次+2次+ ピーク応力	特別な応力限界	
						純せん断応力	支圧応力
設計条件		S_m	$1.5S_m$	-	-	-	-
A		-	-	$3S_m$ (1)	(2) 運転状態 I 及び における荷重の組 合せについて疲れ 解析を行い疲れ累 積係数が 1.0 以下 であること。	$0.6S_m$ (7)	(8)(9) S_y ($1.5S_y$)
A		-	-			$0.6S_m$ (7)	(8)(9) S_y ($1.5S_y$)
A		S_y と $2/3S_u$ の小さい 方。ただしオーステナ イト系ステンレス鋼及 び高ニッケル合金につ いては $1.2S_m$ とする。	左欄の 1.5 倍の値	-	-	$0.6S_m$ (7)	(8)(9) S_y ($1.5S_y$)
A		$2/3S_u$ 。ただしオース テナイト系ステンレス 鋼及び高ニッケル合金 については $2/3S_u$ と $2.4S_m$ の小さい方。	左欄の 1.5 倍の値	-	-	-	-
A_S		S_y と $2/3S_u$ の小さい 方。ただしオーステナ イト系ステンレス鋼及 び高ニッケル合金につ いては $1.2S_m$ とする。	左欄の (3) 1.5 倍の値	$3S_m$ (4) (S_1 又は S_2 地震動のみ による応力 振幅につ いて評価 する。)	(5)(6) S_1 又は S_2 地震動 のみによる疲れ 解析を行い疲れ 累積係数を求め、 運転状態 I、に おける疲れ累積 係数との和が 1.0 以下であること。	$0.6S_m$	(9) S_y ($1.5S_y$)
A_S		$2/3S_u$ 。ただしオース テナイト系ステンレス 鋼及び高ニッケル合金 については $2/3S_u$ と 2.4 S_m の小さい方。	左欄の 1.5 倍の値			$0.4S_u$	(9) S_u ($1.5S_u$)

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

2.1.3 第3, 4種容器の許容応力

第3, 4種容器の許容応力を次に示す。

応力分類 許容 応力状態	1次一般膜応力	1次膜応力+ 1次曲げ応力	1次+2次応力	1次+2次+ ピーク応力
設計条件	S	-	-	-
A	-	-	-	-
A	-	-	-	-
A	-	-	-	-
A	-	-	-	-
A _S	S _y と0.6S _u の小さい方。ただし、オーステナイト系ステンレス鋼及び高ニッケル合金については1.2Sとしてもよい。	左欄の1.5倍の値	(注) S ₁ 又はS ₂ 地震動のみによる疲れ解析を行い 疲れ累積係数が1.0以下であること。ただし、 地震のみによる1次+2次応力の変動値が2S _y 以下であれば疲れ解析は不要である。	
A _S	0.6S _u	左欄の1.5倍の値		

注：2S_yを超えるときは弾塑性解析を行うこと。この場合告示第14条（同条第三号を除く。またS_mは2/3S_yに読替える。）の弾塑性解析を用いることができる。

2.2 管の許容応力

2.2.1 第1種管の許容応力

第1種管の許容応力を次に示す。

応力分類 許容 応力状態	1次一般膜応力	1次膜応力+ 1次曲げ応力	1次+2次応力	1次+2次+ ピーク応力
設計条件	S_m	$1.5S_m$	-	-
A	-	-	$3S_m$ (1)	運転状態 及び における荷重の組合せについて疲れ解析を行い疲れ累積係数が1.0以下であること。
A	-	-		
A	(2) ($1.5S_m$)	$2.25S_m$	-	-
A	(2) ($2S_m$)	$3S_m$	-	-
A_S	(4) $1.5S_m$	(5) $2.25S_m$ ただし、ねじりによる応力が $0.55S_m$ を超える場合は、曲げとねじりによる応力について $1.8S_m$ とする。	$3S_m$ (3)(5) 〔 S_1 又は S_2 地震動のみによる応力振幅について評価する。〕	(5) S_1 又は S_2 地震動のみによる疲れ解析を行い疲れ累積係数を求め、運転状態 における疲れ累積係数との和が1.0以下であること。
A_S	(4) $2S_m$	(5) $3S_m$ ただし、ねじりによる応力が $0.73S_m$ を超える場合は、曲げとねじりによる応力について $2.4S_m$ とする。		

注：(1) $3S_m$ を超えるときは、告示第47条の弾塑性解析を用いることができる。

(2) 告示第49条第4項第一号及び第二号には、次に示すように規定されており、1次一般膜応力に逆算すると、()内の値となる。

A に対し管の内面に受ける圧力は最高使用圧力の1.5倍を超えてはならない。

A に対し管の内面に受ける圧力は最高使用圧力の2倍を超えてはならない。

(3) $3S_m$ を超えるときは弾塑性解析を行うこと。この場合告示第14条（同条第三号を除く）又は、告示第47条（同条第三号及び第六号を除く）を用いることができる。

(4) 軸力による全断面平均応力については、許容応力状態 A_S の1次一般膜応力の許容値の0.8倍の値とする。

(5) サポート用ラグ等が配管に直接溶接されている場合、配管に発生する局部的応力についても応力評価を行うこと。

- (a) 許容応力状態 A_S では、材料の延性に期待した崩壊限界 $1.2S_y$ と、地震時の 1 次応力に対する許容値 $2.25S_m$ との交点は、 $0.55S_m$ となる。したがって、曲げモーメントとねじりモーメントによる応力は、それが $0.55S_m$ を超える場合、 $1.8S_m$ ($1.2S_y$ を S_m 表示) を限界とする。
- (b) 許容応力状態 A_S では、材料の延性に期待した崩壊限界 $1.6S_y$ と、地震時の 1 次応力に対する許容値 $3S_m$ との交点は、 $0.73S_m$ となる。したがって、曲げモーメントとねじりモーメントによる応力は、それが $0.73S_m$ を超える場合、 $2.4S_m$ ($1.6S_y$ を S_m 表示) を限界とする。

2.2.2 第 3 種管の許容応力

第 3 種管の許容応力を次に示す。

応力分類 許容 応力状態	1 次一般膜応力	1 次膜応力 + 1 次曲げ応力	1 次 + 2 次応力	1 次 + 2 次 + ピーク応力
設計条件	(1) S	(2) S (1.2S)	-	-
A	-	-	(3) S _a	-
A	-	-		-
A	-	-	-	-
A	-	-	-	-
A_S	(4) S _y と $0.6S_u$ の小さい方。ただしオーステナイト系ステンレス鋼及び高ニッケル合金については $1.2S$ としてもよい。	S _y ただしオーステナイト系ステンレス鋼及び高ニッケル合金については $1.2S$ としてもよい。	(5) S ₁ 又は S ₂ 地震動のみによる疲れ解析を行い疲れ累積係数が 1.0 以下であること。ただし地震動のみによる 1 次 + 2 次応力の変動値が $2S_y$ 以下であれば、疲れ解析は不要である。	
A_S	(4) $0.6S_u$	左欄の 1.5 倍の値		

注：(1) 告示第 55 条により、検定水圧により確認してもよい。

(2) () 内は、逃し弁及び安全弁の吹出し反力その他の短期的荷重を入れた場合を示す。

(告示第 56 条第一号口参照)

(3) S_a は告示第 56 条第二号八による。ただし逃し弁及び安全弁の吹出し反力その他の短期的荷重を入れた場合は告示第 56 条第二号二による。

(4) 軸力による全断面平均応力については、許容応力状態 A_S の 1 次一般膜応力の許容値の 0.8 倍の値とする。

(5) $2S_y$ を超えるときは、弾塑性解析を行うこと。この場合告示第 47 条 (同条第 3 号及び第 6 号を除く。また S_m は $2/3S_y$ に読替える。) の弾塑性解析を用いることができる。

第3章 耐震Bクラス施設の許容応力

本章の各施設の地震時許容応力状態 $B_A S$ は、許容応力を体系的に理解するために許容応力状態 $A \sim A$ と共に表にまとめている。

この許容応力状態 $A \sim A$ は告示で規定されるものであり、それに従うものとする。

なお、表の注のうち表の中に対応する注番号がないものは、表全体の注記である。

3.1 容器の許容応力

3.1.1 第3,4種容器の許容応力

第3,4種容器の許容応力を次に示す。

許容応力状態 \ 応力分類	1次一般膜応力	1次応力
設計条件	$S^{(注)}$	-
A	-	-
A	-	-
$B_A S$	S_y と $0.6S_u$ の小さい方。 ただし、オーステナイト系ステンレス鋼及び高ニッケル合金については $1.2S$ としてもよい。	S_y ただし、オーステナイト系ステンレス鋼及び高ニッケル合金については $1.2S$ としてもよい。

注：告示第31条により検定水圧により確認してもよい。

3.2 管の許容応力

3.2.1 第3種管の許容応力

第3種管の許容応力を次に示す。

許容応力状態 \ 応力分類	1次一般膜応力	1次応力 (曲げ応力を含む)	1次+2次応力
設計条件	$S^{(1)}$	S $(1.2S)^{(2)}$	-
1_A	-	-	S_a (3)
A	-	-	
$B_A S$	⁽⁴⁾ S_y と $0.6S_u$ の小さい方。 ただしオーステナイト系ステンレス鋼及び高ニッケル合金については $1.2S$ としてもよい。	S_y ただしオーステナイト系ステンレス鋼及び高ニッケル合金については $1.2S$ としてもよい。	(5)

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

モーメント荷重を受ける配管系の一次応力制限について

(99～102 ページ)

(9) 許容応力状態 A_S 及び A_S の 1 次応力の許容限界について次の a, b に述べるような意見があったが, b の意見を採用することとした。

a. 地震力は, 配管系に主として曲げモーメント, ねじりモーメントを発生させるので, 1 次応力のうち問題となるのは, 1 次局部 + 1 次曲げ応力である。これらの 1 次応力の算定, 及び内圧, 自重その他の 1 次応力を発生させる荷重と地震力との組合せ方は, 告示第 46 条第一号の式をそのまま適用できる。すなわち

$$S = \frac{B_1 P D_o}{200t} + \frac{B_2 M_{iP}}{Z_i}$$

S : 1 次応力

P : 最高使用圧力

D_o : 管の外径

t : 管の厚さ

M_{iP} : 管の機械的荷重により生じるモーメント

Z_i : 管の断面係数

B_1, B_2 : 応力係数

地震力(片振幅)は, モーメント M_{iP} (曲げモーメント M , ねじりモーメント T を合

成して $M_{iP} = \sqrt{M^2 + T^2}$ として求められる) 中に, 自重その他の機械的荷重によるモーメントとして組合せて考慮される。

(a) 許容応力状態 A_S の許容応力 $2.25S_m$ に対し, 圧力が小, すなわち圧力による円周方向応力 $\sigma_{\theta} = 0$, 軸方向応力 $\sigma_{\parallel} = 0$ で, 管厚が圧力によって支配されない管では, ねじりモーメントが大になると崩壊曲線($C_L' = 1.2S_y$: 許容応力状態 A_S に対し, 材料の延性に期待し, 降伏点の 2 割増しとした。)を超える領域が出てくる。(図 2-4 の斜線部分)

したがって, この領域をさらに制限するために内圧による軸応力が $0.4S_m$ 未満の管においては, 上式 M_{iP} 中のねじりモーメント T による応力を $1.4S_m$ 以下とする制限を設けた。この場合でも, 崩壊限界(C_L')を超える領域(図 2-4 の斜線の部分)が残るが, この領域で設計される配管は極くまれであること, かつこの領域においてもなお材料の延性に期待できると判断した。

(b) 許容応力状態 A_S についても同じねじり応力の制限を設けた。

b. 各許容応力状態ごとに材料の延性に期待した崩壊限界(A_S に対しては, 降伏点の 1.2 倍, A_S に対しては, 降伏点の 1.6 倍とした。)を定め, これと 1 次応力に対する許容限界の双方を満足する範囲を制限領域とした。(図 2-5 参照)

すなわち上述の制限領域は次のようになる。

(a) 許容応力状態 A_S では, 材料の延性に期待した崩壊限界 $1.2S_y$ と, 地震時の 1 次応力に対する許容値 $2.25S_m$ との交点は, $0.55S_m$ となる。したがって, 曲げモーメントとねじりモーメントによる応力は, それが $0.55S_m$ を超える場合, $1.8S_m$ ($1.2S_y$ を S_m 表示)を限界とす

る。

(b) 許容応力状態 A_S では、材料の延性に期待した崩壊限界 $1.6S_y$ と、地震時の1次応力に対する許容値 $3S_m$ との交点は、 $0.73S_m$ となる。したがって、曲げモーメントとねじりモーメントによる応力は、それが $0.73S_m$ を超える場合、 $2.4S_m$ ($1.6S_y$ を S_m 表示) を限界とする。

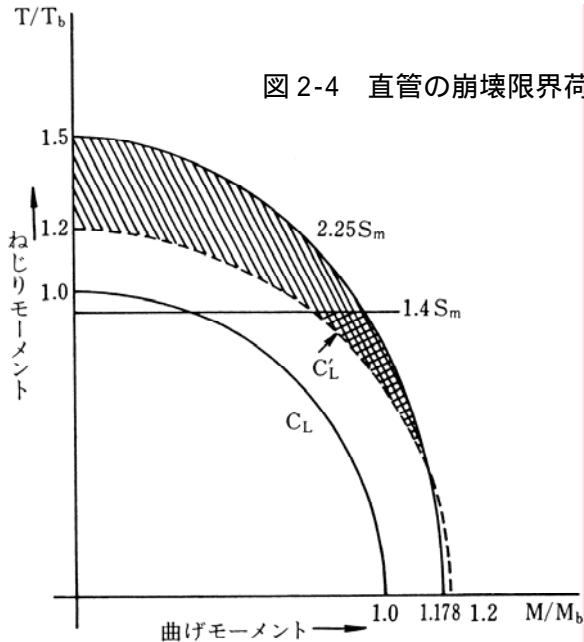


図 2-4 直管の崩壊限界荷重と地震時の許容限界との関係

内圧 $P=0$ の場合 $C'_L=1.2C_L$

$M_b=4tr^2 S_y$ = 単純曲げの場合の限界曲げモーメント
 $T_b=\pi tr^2 S_y$ = 単純ねじりの場合の限界ねじりモーメント

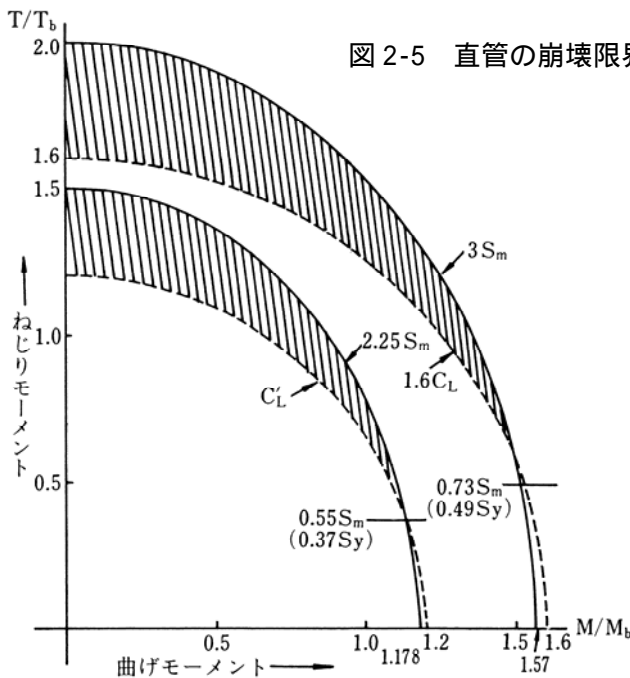


図 2-5 直管の崩壊限界荷重と地震時の許容限界との関係

内圧 $P=0$ の場合 $C'_L=1.2C_L$

$M_b=4tr^2 S_y$ = 単純曲げの場合の限界曲げモーメント
 $T_b=\pi tr^2 S_y$ = 単純ねじりの場合の限界ねじりモーメント