

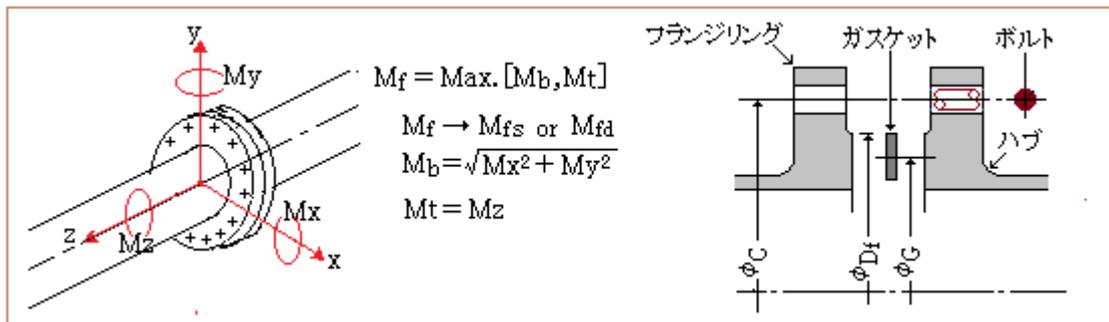
【整番】 SE-15-TM-005	【標題】 配管用フランジ継手のモーメント制限について(メモ)
分類：構造(FLG 継手)／種別：技術メモ	作成年月：H28.04／改訂：Ver.0.0(H28.5) 作成者：N. Miyamoto

全 17 枚

## 1. はじめに

フランジ継手は圧力設計によることが大半で、設計圧力ー設計温度ベースの圧力-温度レーティングにより規格化されている実状がある。然るに配管フランジになると圧力荷重以外に自重/地震/熱膨張/弁作動反力などによって曲げモーメントや軸方向フォースが作用して、圧力荷重による影響を上回ることが考えられる。そのためフランジ継手の 2 つの要件、即ち**強度**と**シール性**に対し**モーメント・フォースの影響をどう評価しどうコントロールするか**は、配管設計の課題のひとつと思われる。ただフランジ継手の圧力-温度レーティング的な認識は根深く、余程の無理がない限りフランジ構造が持っている裕度の中でモーメント・フォースによる影響を緩和/解消できると考えている向きが多く、エネルギー関連のシリアスな環境を除いてほぼ無視されているのが実情と思われる。実績から言えば、それはそれなりの見識ではあるが、フランジ構造でどんな問題がありいかなる対応が有効であるかを知っておくことは無意味ではないと思う(必要ならその方法を利用できる)。

一般プラントの設計コード(ASME B31 系)は、フランジ継手に及ぼすモーメント・フォースの影響を制限することはないが、Nuclear 関連の ASME Sect. III や高圧ガス耐震設備基準などでは配管のモーメント制限が明記されている。ここでは ASME Sect. III の NC3658 の規定をベースにして配管用フランジ継手のモーメント・フォース問題を考えてみたい。



## 2. NC3658 規定のあらまし

(1) NC-3658 の規定は一見簡明であるが、内容はかなり複雑である。特に Nuclear 特有の荷重および荷重状態の定義があり大変わかり難くなっている(規定内容をチャート 1 に示しているので参照のこと)。しかし煩雑な荷重状態定義を割愛すれば、N-3658 の要求事項は次の 2 つに要約できる。

- ① 全てのフランジについて、配管モーメントを含む設計圧力で**フランジ強度**を確認する。
- ② 指定のフランジについて配管モーメントを制限して**シール性とボルト強度**を確保する。

(2) まず①の**フランジ強度要求**について。この要求は Nuclear クラス 2 配管(ASME B31.1/B31.3 配管に相当)のフランジ継手全てに適用される。手順的には、

- ・まずフランジ部のモーメントを考慮して**フランジ設計圧力**を求め、
- ・次いでこのフランジ設計圧力を用いて**フランジ強度**を評価する。

この場合、フランジ設計圧力は次の式から算定する(なお単位系は規定に合わせ inch- $lb_b$  で表記)。

$$P' = P + P_{eq} \quad \text{但し} \quad P_{eq} = 16M_{fs}/(\pi G^3) \quad \text{または} \quad 8M_{fd}/(\pi G^3) \quad \text{-----}(a)$$

ここで  $P'$  = フランジ設計圧力(psi)、 $P$  = 配管の設計圧力(psi)、 $G$  = ガスケット反力円の直径(in)  
 $P_{eq}$  = フランジ部のモーメント( $M_{fs}$ ,  $M_{fd}$ )からカウントされる相当圧力(psi)  
 $M_{fs}$  = 各種荷重(動荷重は除く)から生じる曲げモーメントないし振りモーメント(in·lb)  
 $M_{fd}$  = 各種荷重(動荷重を含む)から生じる曲げモーメントないし振りモーメント(in·lb)

モーメント  $M_{fs}, M_{fd}$  のソースとなる各種荷重は次のように定義される。

#### 配管重量、配管熱膨張、アンカ変位、安全弁吹出し反力およびその他機械荷重

多くの場合、配管熱膨張によるモーメントは大きくそのため大きな  $P_{eq}$  がカウントされる。また  $M_{fs}$  と  $M_{fd}$  は動荷重の有無で区別されるが、ここでは動荷重についての定義が見当たらない。おそらく地震/水撃/安全弁作動などに際して過渡的に生じる荷重(いわゆるピーク荷重)を指すものとみていい。なお、(a)式では  $M_{fs}, M_{fd}$  が夫々2通り、 $P_{eq}$  が2通りなので、4通りの  $P'$  が得られるが、煩雑なので  $M_{fs}$  or  $M_{fd} = \text{Max.}[ \text{曲げ, 振り} ]$  及び  $P_{eq} = \text{Max.}[ 16M_{fs}/(\pi G^3), 8M_{fd}/(\pi G^3) ]$  とすればチェック対象の  $P'$  は1つで済む。

以上のフランジ設計圧力  $P'$  を用いたフランジ強度の評価法には、次の2つがある。

- ・当該フランジの設計温度における定格圧力  $P_r$  と  $P'$  を比較し  $P' < P_r$  のとき OK とする
- ・規格で与えられる方法でフランジ応力を求め許容応力を下回るとき OK とする。

前者はいわゆる圧力・温度レーティング基準によっている。

(3) 次に①の[シール性+ボルト強度] 要求について。この要求は次の2様のフランジ継手に適用される。

- ・100psi/95°C以下で使用される規格継手 (→ ASME B16.5a, MSS SP-44 など)
- ・許容応力 20000psi(138MPa)以上の高強度ボルトを用いた規格継手 (→ ASME B16.5a)

前者は通常のボルト材使用であるから、ボルト材の強度(→締付力)がしきい値になって、 $M_{fs}, M_{fd}$  の値を抑制する形になっている。制限式を下表に示す。この表で通常状態あるいは過渡状態と表記されている部分は定常運転状態(→設計状態)とみていい。

適用	制限式
穏便な圧力/温度で使用される 標準規格フランジ継手	通常状態： $M_{fs} \leq A_b C S / 4$ -----(b)
	過渡状態： $M_{fd} \leq A_b C S / 2$ -----(c)
高強度のボルト材を使用する ASME B16.5a フランジ継手	通常状態： $M_{fs} \leq 3125(S_y / 36000) C A_b$ -----(d)
	過渡状態： $M_{fd} \leq 6250(S_y / 36000) C A_b$ -----(e)
	緊急状態/事故状態： $M_{fd} \leq \{11250 A_b - (\pi / 16) D_f^2 P_{fd}\} C (S_y / 36000)$ -----(f)
ここで $M_{fs}$ = 各種荷重(動荷重は除く)から生じる曲げモーメントないし振りモーメント(in·lb) $M_{fd}$ = 各種荷重(動荷重を含む)から生じる曲げモーメントないし振りモーメント(in·lb) $A_b$ = 全ボルト断面積(最小断面ベース)(in <sup>2</sup> )、 $C$ = ボルトサークル径(in), $S$ = ボルト材の許容応力(psi)、 $S_y$ = 設計温度におけるフランジ材の降伏応力(psi) $D_f$ = フランジ RF 面の外径(in.)、 $P_{fd}$ = $M_{fd}$ 発生時の圧力(psi)	

内容的にみて制限式の右辺(許容値)が、[ 通常状態 → 過渡状態 → 緊急状態/事故状態 ]の順で高くなるのは、発生時間の多寡や発生頻度からみて納得できる。とにかく通常状態の  $M_{fs}$  が最も最も制限を受ける。発生時間の短い過渡状態の  $M_{fd}$  は  $M_{fs}$  の 2 倍まで許容される。また当然ながら高強度ボルト材を使用した継手の方が高い許容値になっている。

### チャート 1. 配管モーメントの評価(制限) (ASME Sect. III NC-3658 ベース)

計算パラメータ [  $P_o, P_d, P_{fd}, P_r, T_o, C, A_b, D_f, S, S_y$  ] および計算条件の確認

評価対象配管フランジ → 指定規格フランジ (Table NC-3132-1)

?

n → off

y ↓

< 配管構造解析の結果 >

自重、熱膨張、アンカ変位、定常吹出し反力及びその他機械荷重により  
当該フランジ継手位置において同時に発生するモーメント (下記)

- ① 動荷重を含まない静荷重のみの場合：各荷重状態における  $M_{xi}, M_{yi}, M_{zi}$
- ② 動荷重も含んだ全ての荷重の場合：各荷重状態における  $M_{xj}, M_{yj}, M_{zj}$

$$M_{bs} = \{(\sum M_{xi})^2 + (\sum M_{yi})^2\}^{1/2}, \quad M_{ts} = \sum M_{zi}$$

各荷重状態の静荷重によるモーメント：  $M_{fs} = \text{Max.}[M_{bs}, M_{ts}]$

$$M_{bs} = \{(\sum M_{xj})^2 + (\sum M_{yj})^2\}^{1/2}, \quad M_{ts} = \sum M_{zj}$$

各荷重状態の [ 静荷重 + 動荷重 ] によるモーメント：  $M_{fd} = \text{Max.}[M_{bd}, M_{td}]$

設計状態における強度維持チェック

$$P_{es} = 16M_{fs}/(\pi G^3), \quad P_{ed} = 8M_{fd}/(\pi G^3)$$

$$P_e = \text{Max.}[P_{es}, P_{ed}] \rightarrow P' = P_d + P_e$$

指定の規格フランジでかつ  $P' \leq P_r$  か?

y ↓

n ↓

Appendix XI によるフランジ強度計算 ( $P'$  ベース)

算定応力  $\leq$  規定許容応力

n → 設計変更

y ↓

シール性保持及びボルト強度チェック

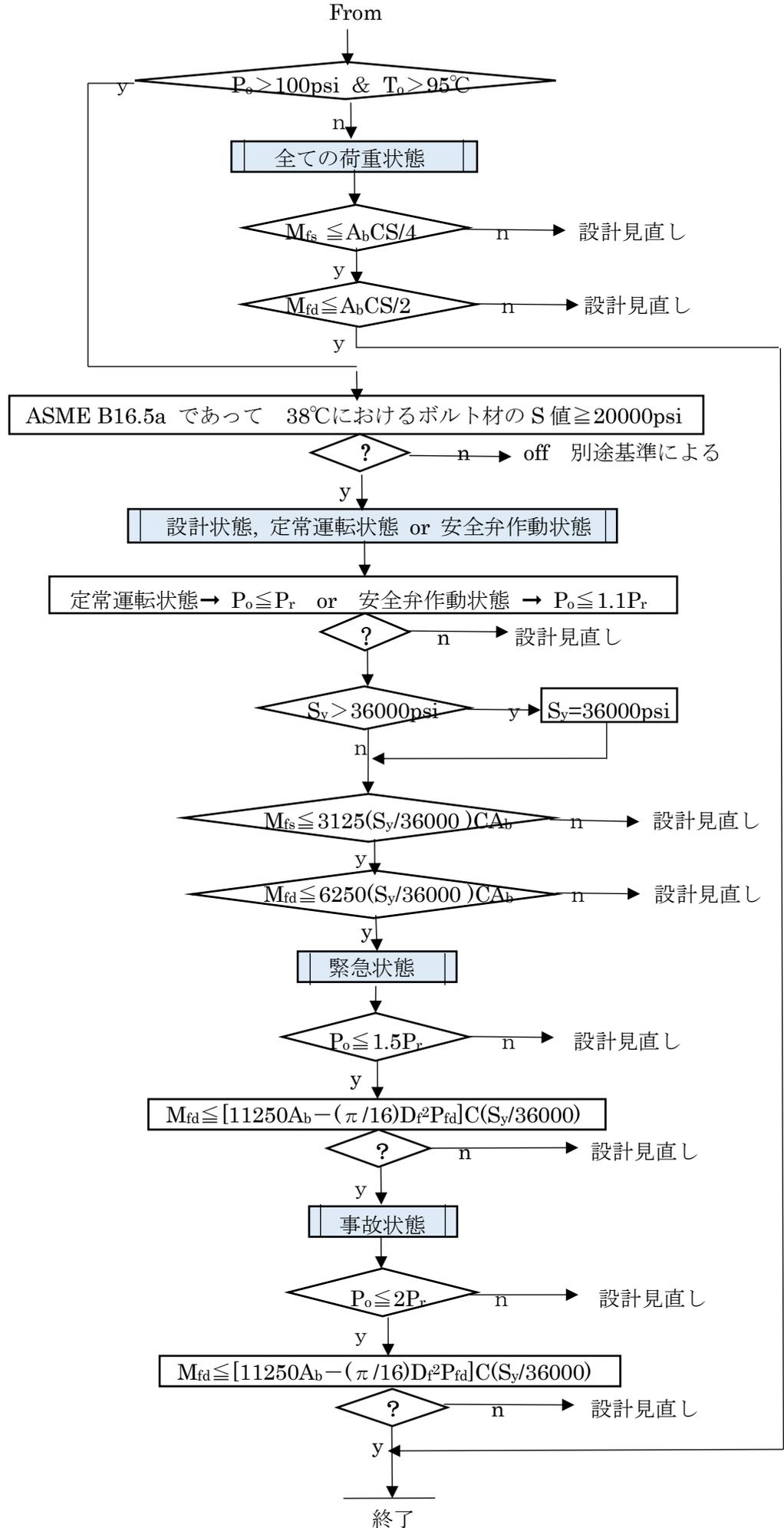
ASME B16.5a, MSS SP-44, ASME B16.47a など指定の規格フランジ

?

n → off

y ↓

Next



＜チャート1の記号説明＞

$P_o$ =設計/運転圧力(psi)、 $P_{fd}=M_{fd}$ 発生時の圧力(psi)、 $P_r$ =フランジ定格圧力(psi)、 $T_o$ =設計/運転温度(°C)  
 $C$ =フランジのボルトサークル径(in)、 $G$ =ガスケット反力円の直径(in)、 $D_f$ =フランジ座面径(in)、  
 $A_b$ =ボルト谷底のトータル断面積(in<sup>2</sup>)、 $S$ =ボルトの許容応力(psi)、 $S_y$ =フランジ材の降伏応力(psi)、  
 $M_x, M_y, M_z$ =各モーメントの x,y,z 方向の成分(in·lb)、 $M_b$ =全曲げモーメント(in·lb)、  
 $M_t$ =全振りモーメント(in·lb)  
 $M_{fs}$ =各荷重状態で各種の静的荷重によってフランジ継手に同時作用するモーメント(in·lb)  
 $M_{fd}$ =各荷重状態で各種の動荷重を含む荷重によってフランジ継手に同時作用するモーメント(in·lb)

### 3. NC-3658 規定の背景

(1) NC-3658 の規定内容について、直にその背景を示した文献資料は見当たらないが、関連文献(5)などからある程度推測できる。ここではまず“何故モーメント・フォースなのか?”から始める。

基本的にフランジ強度は機器用途をベースに圧力荷重のみを対象に設計されている。周知のように規格フランジではさらにこれを圧力-温度レーティングの形で合理化している。図1(a)は、内圧下のフランジリング断面における力の釣合い関係を示している。即ち

$$W_o = H_G + H_T + H_D, \quad M_r = H_G h_G + H_T h_T + H_D h_D \quad \text{-----(g)}$$

ここで  $W_o$ =ボルト軸力、 $H_G$ =ガスケット反力、 $H_T, H_D$ =各内圧フォース(集中力で表現)、  
 $M_r$ =リング振りモーメント、 $h_G, h_T, h_D$ =各アーム長さ

$W_o$ と( $H_G, H_T, H_D$ )は偶力関係なのでリングは偶モーメント  $M_r$  で右廻りに振られ、リングは右に傾き図1(b)左に示すように内側におじきする形で変形する。この変形は、配管が軸方向に引張りを受けるとき更に増幅する。内圧推力  $H_D$  に配管軸力  $F$  がもろに加算されるからである。

一方、配管が梁曲げ状のモーメント  $M_b$  で曲げられるときは図1(b)右に示すように、わずかに湾曲して上半分は閉じ、下半分は開き勝手になる。そのため上側のボルトは緩みガスケットは締るが、下側のボルトは締まってガスケットは緩む。そのため配管モーメントを伝達する有効断面は、図1(c)に示すように上半分と下半分で違ってくる。

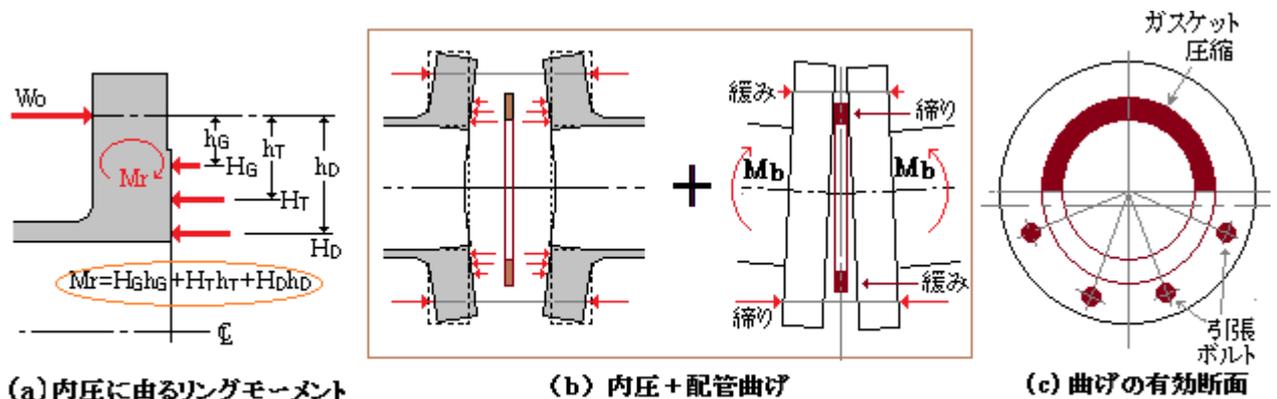
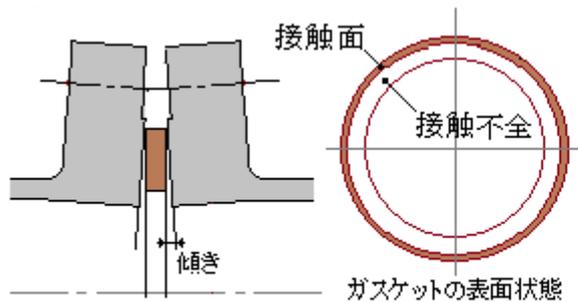


図1 フランジの変形

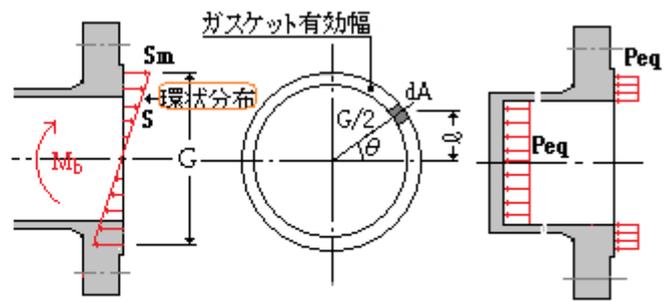
これらのフランジの挙動をフランジリングの強度面からみると、ボルト軸力の多寡が大きく係ってくる。内圧が増加するとボルト引張軸力  $W_o$  は増加してリングや管接続部(ハブ)の応力は高くなる。これに配管曲げが加算されると、開き側(下側)のボルト引張軸力が増加して更に応力は高くなる。

フランジの挙動は、シール性にも同じような影響を及ぼす。内圧下ではフランジは全周にわたって内側におじきをするので、**図2**に示すようにガスケットの内周側が広範囲に接触不全になりシール性は外周側の比較的狭い接触面で保持されるようになる。配管が軸方向に引張を受けると、ますます接触面が縮まる。更に配管の曲げが加わると、くさび状のギャップは微妙に狭まるものの、局部的に接触面圧が低下して不安定になり漏洩し易い状態になる。

以上のごとく、配管のモーメント・フォースは、強度面でもシール性でも悪影響をもたらすので何らかの形でこれに制限を加える必要がある。



**図2 内圧下のガスケット状態**



**図3 配管曲げモーメント-ガスケット保持モデル**

- (2) まずフランジ強度に関しどのような考えがとられているか？ 配管に曲げがかかるとガスケットの上半分は圧縮を受ける。図1(c)に示したように下半分はボルトが分担するが、これを単なる振替とみれば、**図3中央**に示すようにある有効幅を持ったガスケットリング(→円環)上に面圧  $S$  が分布していると見てもいい。この場合、ガスケット面上分布のモーメント  $M$  は、

$$M = \int \ell S dA \quad \text{ここで } S = \text{分布面圧、} dA = \text{単位有効面積、} \ell = \text{アーム長さ}$$

$\ell = (1/2)G \sin \theta$ 、 $S = S_m \sin \theta$ 、 $dA = (1/2)G b d \theta$  であるから、

$$\begin{aligned} M &= \int (1/2)G \sin \theta \times S_m \sin \theta \times (1/2)G b d \theta = (1/4)G^2 b S_m \int \sin^2 \theta d \theta \\ &= (1/4)G^2 b S_m \left[ (1/2)\theta - (1/4)\sin^2 \theta \right]_0^{2\pi} = (\pi/4)G^2 b S_m \end{aligned}$$

ここで、 $S_m = \text{Max.面圧}$ 、 $b = \text{ガスケット有効幅}$ 、 $G = \text{ガスケット反力円直径}$ である。仮に内圧  $P_{eq}$  が作用する場合のガスケット接触面の面圧が  $\text{Max.面圧 } S_m$  に等しいとすれば、

$$S_m = (\pi G^2/4)P_{eq} / (\pi G b) = (1/4)(G/b)P_{eq}$$

であるから、これを上記の  $M$  式に代入して整理すると、(a)式すなわち相当圧力式さらにはフランジ設計圧力式が得られる(なお  $M = M_b$ )。

$$P_{eq} = 16M_b / (\pi G^3) \rightarrow P_{eq} = 16M_{fs} / (\pi G^3) \rightarrow P' = P + P_{eq} \quad \text{----- (h)}$$

ここで  $P_{eq} = \text{相当圧力}$ 、 $P = \text{配管設計圧力}$ 、 $P' = \text{フランジ設計圧力}$

$M_b$  については静荷重  $M_{fs}$  を採っているが、これに動荷重を含めるときは  $M_{fd}$  をとり、 $P_{eq}$  式をその半分の  $P_{eq} = 8M / (\pi G^3)$  に切り下げる。これは実質的に短期応力の割増しになる。

- (3) 次にシール性に関しどのような考えがとられているか？ 図1(b)をみればわかるように内圧負荷状態では[内圧力+ガスケット反力+引張側配管軸力]によって引張側(+)のボルト応力が生じているが、これに配管曲げが加わると、下半分ではフランジリングの口開きによって(+)のボルト応力が加算され、ガスケットの圧縮が緩んで漏れ易くなる。一方、上半分では逆に口が閉じてガスケットが圧縮される。ここでは下半分の動きに注目してみる。

図 4(a)～(c)にかなりデフォルメした形で下半分の動きを表現してみた。いずれも内圧有りなので図 1(b)のようにおじき状になるが、煩雑なので図の上ではおじき変形は割愛している。

図(a)は全く仮想的なモデル。まだガスケットの締込みは行われておらず、内圧はレーズドフェース外径  $D_f$  まで浸透して漏れ寸前にある。図(e)に示すようにフランジ全座面にわたり内圧が作用しているからボルトの初期締付けに必要なボルト軸力は  $[\pi D_f^2 P/4]$  ということになる。ボルト応力で表すと、

$$\sigma_{bp} = (\pi D_f^2 P/4)/A_b \quad (\text{但し } A_b = \text{ボルト全断面積}) \quad \text{----- (i)}$$

(b)は、(a)の状態です。ナットを締めこんでガスケットを圧縮したもの。圧縮とともに内圧浸透の先端が内側に移動するのでボルトの軸力は変化する。しかしガスケット反力が生じる一方で内圧浸透域が縮退して内圧力が減じるのでそれほど大きくならない。モデルとしてはボルト軸力及びボルト応力に変化なしと考える。

(c)は、(b)の状態です。配管曲げが加算されたもの。フランジリングの曲げ変形でボルトが押し広げられ面間は  $L_m$  から  $L_b$  へと初期面間  $L_0$  近くまで回復する。ガスケットは圧縮状態から解放され(a)の状態に戻る傾向がある。そのため内圧浸透域が  $D_f$  近くまで広がり(a)の漏洩寸前に近づく。

恐らくフランジ継手に起きる(a)(b)(c)の状態を解析的にフォローするのは大変である。ボルト面間部分に着目すれば、(b)(c)とも引張状態で、ガスケット厚さが(b)の状態から(a)近くまで回復するには(b)(c)の軸ひずみ量(→ボルト応力)は等しくならねばならない。この場合、(b)におけるボルト応力  $\sigma_{bp}$  は、内圧負荷(→機械荷重)によって生じる1次応力であり当然ながらボルト許容応力  $S_b$  を越えることはない。したがって、(c)におけるボルト応力  $\sigma_{mp}$  はボルト許容応力を越えることはない。即ち

$$\sigma_{bp} \leq S_b \rightarrow \boxed{\sigma_{mp} \leq S_b} \quad \text{----- (i)}$$

しかしこの状態で配管曲げによるボルト応力  $\sigma_{mp}$  が  $S_b$  を凌駕するならば、ガスケット圧縮は過剰に解放されて内圧浸透域は  $D_f$  をオーバーして漏洩が起きる。シーリング保持の上で (i)式は重要である。

なお図 1(c)に示したように下半分はボルト断面でモーメントバランスが保たれているが、上半分もボルトで保持されていると見なせば、図 4(d)に示すような状態になる。図 4 中央に示すように更に環状配置のボルト列を面積的に等価円環で置き換えると、ボルト応力  $\sigma_{mp}$  は次式で表せる。

$$\sigma_{mp} = M_b/Z = M_b/[(\pi/4)C^2 \{A_b/(\pi C)\}] = M_b/(CA_b/4) \quad \text{----- (j)}$$

ここで  $M_b$  = 配管曲げモーメント (=M)、 $Z$  = 等価円環の断面係数、 $C$  = ボルトピッチ径  
この場合、 $\{A_b/(\pi C)\}$  は等価円環の厚さである。 $M_b$  を  $M_{fs}$  に置き換えて(j)式を(i)式に代入すると、

$$M_{fs} \leq A_b CS/4 \quad \text{----- (b)}$$

が得られる(前2節と同じ式で  $S_b$  を  $S$  に置き換えて表記)。なお(b)式の有効性についてはリーク試験などで確認されている。

(b)式は動荷重を含まない静荷重を対象にしている。動荷重を含めた全荷重については次式のように2倍の制限が採られる。この制限は漏洩防止というより短期強度割増しの観点に由ると思われる。

$$M_{fd} \leq A_b CS/2 \quad \text{----- (c)}$$

(b)(c)式は、穏便な圧力/温度で使用される標準規格フランジ継手に適用される。しかしこのクラスのフランジ継手に関して配管モーメント対策としてSNBやSNCMのような高強度のボルト材を使用すると問題が起きる。大きな配管モーメントが許容されるためにフランジリングやハブ部分の変形が大きくなって強度が低下したり漏洩しやすくなるからである。そこでNC-3658では最もよく使用されているASME B16.5aについて、許容応力が20000psi(138MPa)を越える高強度ボルトを使用する場合に限り、(b)(c)式とは多少違った(d)(e)式を与えている。

$$M_{fs} \leq 3125(S_y/36000)CA_b \text{ -----(d)}, \quad M_{fd} \leq 6250(S_y/36000)CA_b \text{ -----(e)}$$

これは種々の解析/実験によるもので、最適の $S_b$ 値として(b)式につき25000psi(172MPa)を、(c)式につき50000psiを選んでいる。なお式中の $(S_y/36000)$ は、解析/実験に使用したフランジ材(A105)の降伏強度が36000psiであったことを補正するものである。

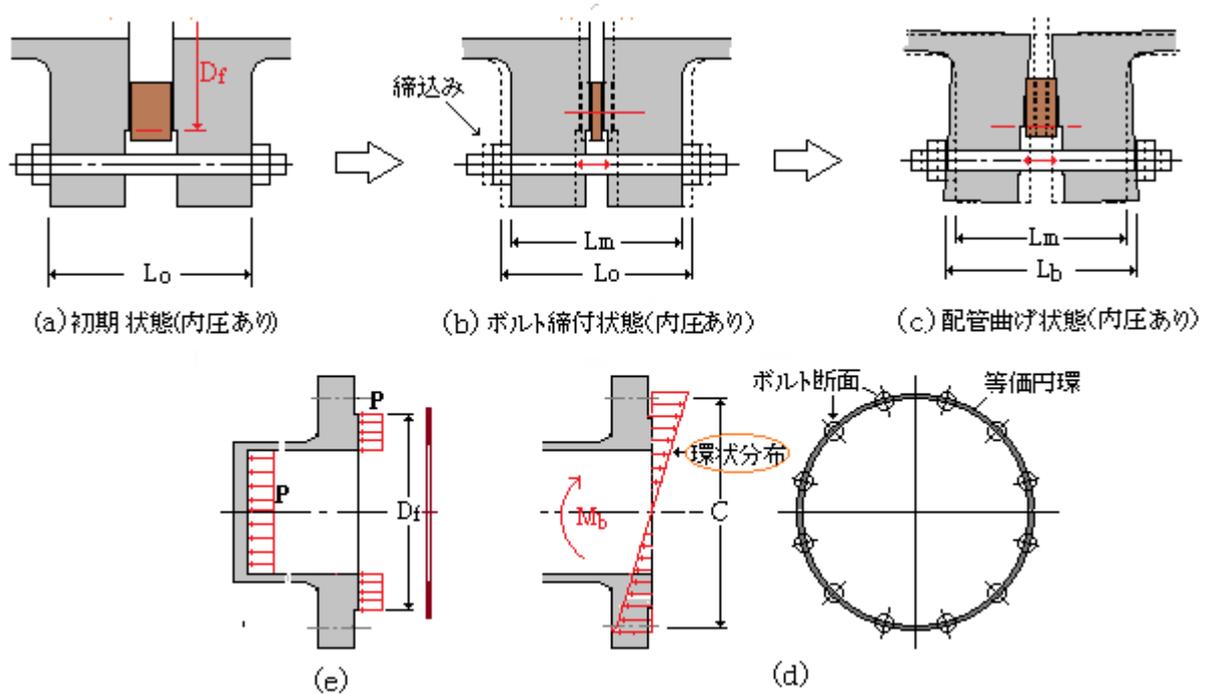


図4 配管曲げモーメント-ボルト保持モデル

(4) 次にボルト強度に関しどのような考えがとられているか？ 以上NC-3658の(b)~(e)式に関してシール性の観点から考察してきたが、ボルト強度の観点からも、reasonableな内容になっているようである。以下これを記す。

前述の(i)式は $\sigma_{bp}$ と $\sigma_{mp}$ がいずれも $S_b$ 以下であることを示している、また動荷重を含めた全荷重では静荷重の2倍のモーメントが許容されていることから、以下の式が得られる。

$$\textcircled{1} \text{ 内圧単独-静荷重: } \sigma_b = \sigma_{bp} \leq S_b \text{ -----(k)}$$

$$\textcircled{2} \text{ 内圧+配管曲げ-静荷重: } \sigma_b = \sigma_{bp} + \sigma_{mp} \leq 2S_b \text{ -----(l)}$$

$$\textcircled{3} \text{ 内圧+配管曲げ-全荷重: } \sigma_b = \sigma_{bp} + \sigma_{mp} \leq 3S_b \text{ -----(m)}$$

①の場合、内圧以外の機械荷重(例えば自重モーメント・フォース)は一般に軽少なので、(k)式はボルトの1次応力制限として妥当である。また

②の場合、配管曲げには熱膨張によるモーメント(→変位荷重)もふくまれるので(k)式は(1次+2次)応力制限のフォームになるが、そのときの平均引張応力をボルト許容応力の2倍で制限する点で、ASME Sect.IIIのボルト応力制限と符合している(妥当である)。

③の場合は、ASME Sect.Ⅲのボルト応力制限と符合することはないが、通念的な“短期 1.5 倍の割増し”にマッチしており妥当である。因みに  $S_b = S_y/3$  であるから、右辺の制限値  $3S_b$  は  $S_y$  になりボルトの(1次+2次)応力は降伏応力  $S_y$  内の弾性域で挙動するので疲労の懸念は少ない。

結果的にシール性保持に関する(b)(c)式はボルト強度制限式としても有効で、ひとつの式で2つの役割を果たすことになる。これは(d)(e)式についても然り。

[ NC-3658 のベースとなった ORNL レポート<sup>⑥</sup>はボルト強度の検討から入ってテストでシール性を確認している。ただ当初から前項で述べたようなシール性保持の視点があったようなのでシール性保持を先に述べた。前(3)項は多少書き過ぎているかも知れないが、大きな逸脱はないと思う。]

(5) 以上の説明では緊急状態/事故状態の(f)式を除外していたので、ここで補足しておく。

プラントにおいては緊急/事故は極めてレアケースなのでボルト応力としてはかなり高いレベルまで許容できる。NC-3658 は、ボルト応力を降伏応力と引張強さの間(いわゆるフロー応力)辺りの 45000psi (314MPa)に設定しているようである。すなわち、

$$\sigma_{bp} + \sigma_{mp} \leq 45000 \rightarrow (\pi/4)D_r^2 P/A_b + 4M_b/(A_b C) \leq 45000$$

さらに変形して  $(S_y/36000)$  で調整すると、前 2.(3)の(f)式が得られる。但し  $M_{fd} = M_b$

$$M_{fd} \leq \{11250A_b - (\pi/16)D_r^2 P_{fd}\} C (S_y/36000) \quad \text{-----}(f)$$

(6) 更に補足として“動荷重の扱い”と“配管の振りモーメントの扱い”に触れておく。

**動荷重の扱いについて。** 一般には短期荷重(1時荷重)と受け取れかねないが、安全弁の吹出しの例で言えば、吹出し直後の衝撃応答は動荷重、その後の安定した定常吹出しは静荷重になる。端的には過渡状態で派生するピーク荷重(水撃圧/地震応答量/爆風圧など)と見ていい。動的効果によって定常値の Max.2 倍になる。

**配管の振りモーメント(管軸廻りの回転モーメント)の扱いについて。** 配管曲げモーメントとシール性の関係は既に述べた通りであるが、配管の振りモーメントもシール性と関係する。フランジ・ガスケットの界面には初期締付けによって振りに対する摩擦抵抗(トルク容量)が与えられるが、運転時に発生する配管の振りモーメント(トルク)がこれを上回るとガスケットが滑って界面から漏洩が起きる可能性があるためトルク制限が必要である。界面のトルク容量は、

$$M_{pt} = \int (G/2) dF \quad [0 \sim 2\pi]$$

$dF$  はガスケットの単位円周当たりの摩擦抵抗で、次式で与えられる。

$$dF = \mu \{S_b A_b / (\pi G)\} (G/2) d\phi \quad \text{ここで } \mu = \text{摩擦係数}$$

$dF$  を上式に代入すると  $M_{pt} = \int (G/2)^2 \mu \{S_b A_b / (\pi G)\} d\phi = \mu G S_b A_b / 2$  が得られるが、通常  $\mu \doteq 0.4$ 、 $G \doteq 1.25C$  程度なので、 $M_{pt} = A_b C S_b / 4$  となる。ここで  $M_t \leq M_{pt}$  なので

$$M_t \leq A_b C S_b / 4 \quad (\text{ここで } M_t = \text{振りモーメント}) \quad \text{-----}(n)$$

この式は曲げモーメントに関する(c)式と全く同じフォームになる。そこで規格式では、配管の曲げモーメントと振りモーメントは並列的に扱われ、同じ制限式が用いられる。

#### 4. NC-3658 とその他規格の比較

冒頭に述べたように、ASME B31 系のコードでは表面的に、配管モーメントの影響を云々することはない。しかし強度規定の厳しいコードではこれに対し何らかの評価/制限を設けている。

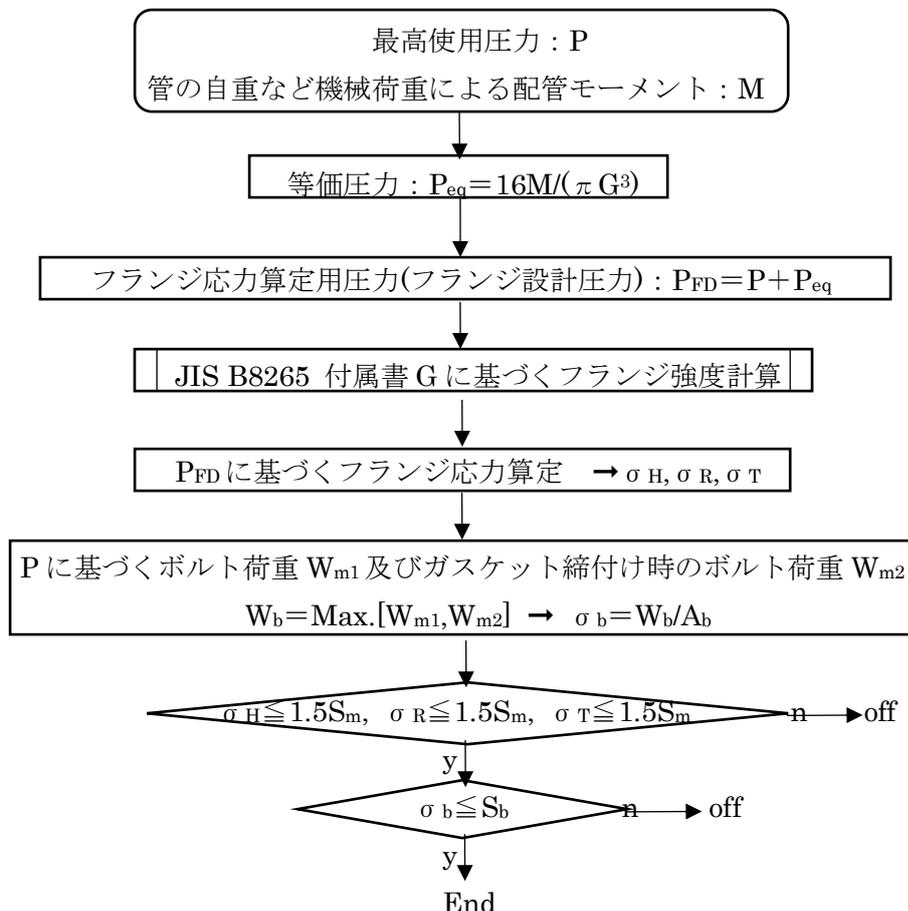
ここでは、国内原発のクラス 1 配管に適用される JSME S NC1-PPB3414 と重要度の高い一般プラントに適用される高圧ガス設備耐震設計指針(配管編)の規定のあらましを紹介する。

先ず JSME S NC1(-PPB3414)について。チャート 2 にあらましを示す。NC-3658 に似ているが、以下の点で違いがある。

- ① フランジ設計圧力による強度チェックのみ規定されモーメントの直接制限は見当たらない。
- ② 配管モーメントの荷重源泉が機械荷重(管自重+その他機械荷重)だけになっている。
- ③ フランジの許容応力が高くなって通常の $\sim S_y/1.5$ から $1.5S_m$ ( $\rightarrow \sim S_y$ )になっている。
- ④ 曲げモーメントのみが対象で振りモーメントは見当たらない。

①②については次節 5. で議論する。③については、等価圧力が安全側の近似であることを勘案したものと思われるが取り過ぎの印象をぬぐえない。④の振り無視には疑問が残る。3次元の配管引き回しでは振りモーメントが最も大きくなることもある。

チャート 2. クラス 1 配管の評価/制限 [JSME S NC1(-PPB3414)]

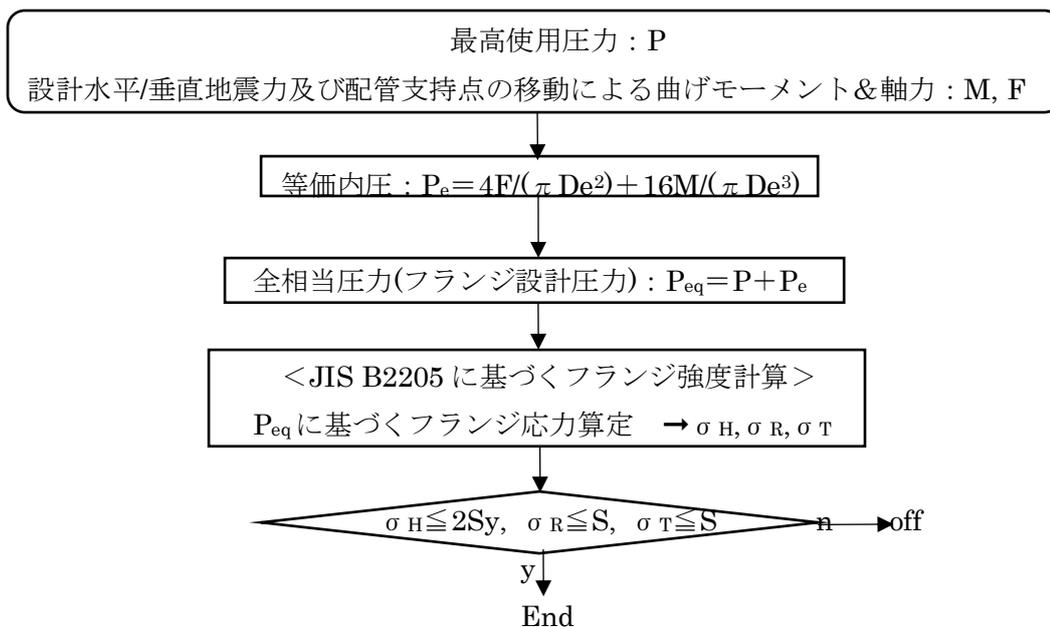


次に高圧ガス設備等耐震設計指針(配管編)について。チャート 3 にあらましを示す。この規定は NC-3658 や JSME S NC1 のようにプラントの運転状態(運転サイクル)を対象にしたものではなく地震サイクル単独を対象にしており、地震荷重による(1次+2次応力)範囲を評価し制限するもので、以下の点で NC-3658 あるいは JSME S NC1 と違っている。

- ① JSME S NC1 と同じようにモーメントの直接制限は見当たらない
- ② 配管モーメントの荷重源泉が機械荷重(地震力)+変位荷重(支持点移動)になっている。
- ③ (1次+2次応力)範囲制限  $2S_y$  はハブ応力  $\sigma_H$  のみで、 $S_R, S_T$  は JSME S NC1 と同じ。
- ④ JSME S NC1 と同様に曲げモーメントのみが対象で振りモーメントは見当たらない。

①②については次節 5. で議論する。③については、 $S_R, S_T$  はフランジリング内表面の半径方向及び周方向の応力で、シール性維持に関連するために  $2S_y$  即ち降伏応力の 2 倍という大きな応力は認めていないようである(塑性変形そのものを認めていないようである)。なお、等価応力式には配管軸力  $F$  の圧力換算項  $4F/(\pi De^2)$  があるが一般には小さい(PC-3658 の(a)では割愛されている)。

チャート 3. 一般プラント配管の評価/制限 [高圧ガス設備等耐震設計指針(配管編)]



## 5. NC-3658 規定に関する議論

NC-3658 規定に関しては ORNL のベース資料があつて比較的判りやすいが、実際の運用を考えると幾つかの疑問を湧いてくる。例えば、

- ① 一般のプラント配管にはないモーメントの影響評価が何故必要なのか?
- ② フランジ設計圧力による強度チェックに加えて更にモーメントの影響制限が必要か?
- ③ 配管モーメントの荷重ソース定義と応力評価の関係はマッチしているのか?
- ④ NC-3658 のモーメント直接制限は例えば JIS フランジに適用できるか?

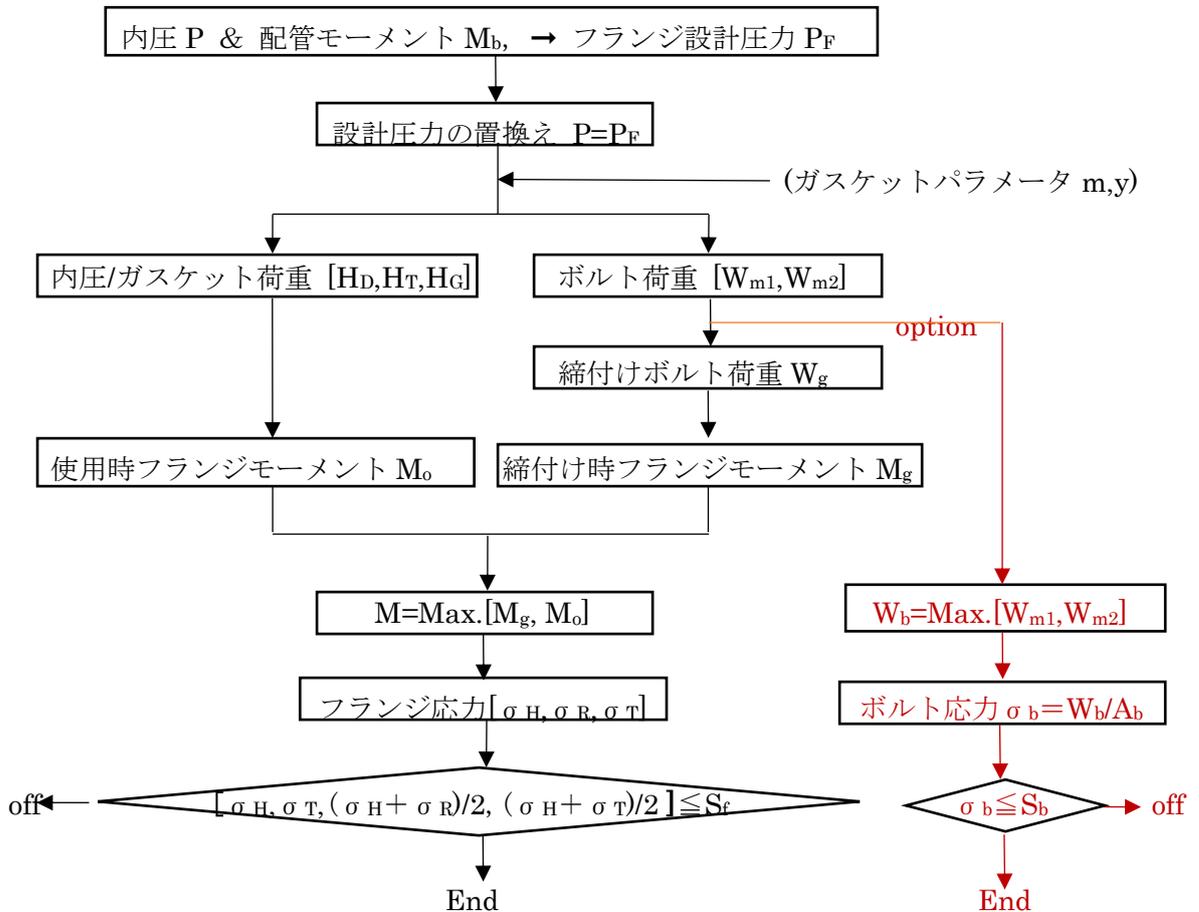
ここでは、自問自答する形でこれらの疑問について考えてみたい。

まず① について。冒頭にも述べたように一般プラント規格 (B31 系) では、配管モーメントの影響の評価は要求されていない。おそらく実績から云ってその影響は規格フランジの裕度の中で吸収できるという暗黙の認識が働いているような気がする。しかし規格フランジの中には圧力-温度レーティングに余裕がなくモーメントの影響を吸収できないものもあると云われる。そのためもあつてか、どうしても配管モーメントが大きくなりがちな機器ノズル接続フランジでは、#150→#300 といった具合にレーティングを上げるケースもみられる。機器接続部だけでなく配管モーメントの影響は弁接続部にも存在する。恐らくほとんどの配管フランジ継手は、運転寿命中、強度/シール性に支障をきたすこと

はないのだろうが、まれにモーメントの影響と思われる事象があって設計的にそれを追求した結果が NC-3658 の規定のようだ。B31 系はレアケースを確率の問題にして設計的な追求を放棄したのではないか？特にシール性の問題はガスケット特性/締め付け施工/加工精度/据え付け精度などのファクタが注目されて、配管モーメントのようなマクロなファクタは見過ごされやすいと思う。

次に②について。NC-3658 は[フランジ設計圧力  $P_F$  による強度チェック]と[モーメントの直接制限]の 2 本立てになっている。この場合、フランジ設計圧力による強度チェックでモーメントの影響を十分評価できるのでは？という疑問が湧いてくる。というのは、JSME S NC1 でも高圧ガス耐震設備等設計指針でも後者の[モーメントの直接制限]は見当たらない(筆者の知る限りモーメントの直接制限は NC-3658 だけである)。設計指針の方は短期の地震サイクルが対象なのでシール性を軽視しているのかも知れないが、気になる問題なので少し考えてみたい。

フランジ設計圧力による強度チェック]は規格によるフランジ強度計算 (例えば Sect.III Appendix XI や JIS B8265 付属書 G) で行う。その流れを下記にしめす。



チャートの黒字部分はフランジ躯体の応力を算定し評価する流れであって、フランジ設計圧力  $P_F$  で置き換えられた設計圧力  $P$  に支配される。この流れの末尾にくる応力制限にはもともとフランジ躯体の過度な変形(→漏洩)を抑える意図が織り込まれている。応力制限が満足されないときはレーティングを上げてフランジリングの肉厚を厚くするか、配管モーメントを切り下げることとなる。

チャートの着色部分は規格計算には含まれないのでオプションの流れになるが、通常はボルト荷重  $W_{m1}, W_{m2}$  の妥当性をみるために必然的にチェックされる。通常  $W_{m1} > W_{m2}$  で、 $W_{m1}$  は  $P(=P_F)$  に支配

されるので、ボルト応力の制限が満足されない時は、高強度のボルト材に変更するか、レーティングを上げてボルト断面積をアップするか、あるいは配管モーメントを切り下げることになる。

NC-3658 のモーメントの直接制限は  $[\sigma_{mp} \leq S_b \rightarrow \{4M_b / (CA_b)\} \leq S_b]$  を満足することであるから上記のボルト応力対策はいずれもが適切で、シール性およびボルト強度の保持に有効であるということになる。しかし[フランジ設計圧力を用いた強度チェック]のみで、モーメントの影響を評価して設計的に処理できることにはならない。次のように設計的なアクションが異なっており得られる結果が違ってくるような気がする(もちろん結果の違いを立証するにはシミュレーションが必要だが…)。

[フランジ設計圧力による強度チェック] →フランジ強度を規準とした設計対応

[配管モーメントの直接制限] →ボルト強度を規準とした設計対応

ただ、フランジ設計圧力を用いた設計でもそこそこモーメントの影響を評価し設計対応できることは否定できない。JSME S NC1 などがこの見解に拠ってモーメントの直接制限を削除している可能性は強い。

次に③について。NC-3658 の  $M_{fs}, M_{fd}$  の  $M_{fs}$  および  $M_{fd}$  の荷重ソースは、

配管重量、配管熱膨張、アンカ変位、安全弁吹出し反力およびその他機械荷重  
になっている。これらの属性は次のように双分できる。

配管重量、安全弁吹出し反力およびその他機械荷重 →機械荷重(1次応力源)

配管熱膨張、アンカ変位 →変位荷重(2次応力源)

従って、NC-3658 のフランジ強度評価は(1次+2次)応力評価になる。然るに Appendix XI では内圧(機械荷重)に対する実質上の1次応力評価になると思われるので全くマッチしない。

なお上記のその他機械荷重という表現は、“以上の機械荷重とそれ以外の機械荷重”という風にも読めるので、安全側に配管熱膨張もアンカ変位も機械荷重にしているのかも知れない。シール性の観点からフランジリングの塑性変形を嫌うならあり得る話である。しかし配管熱膨張やアンカ変位による変位荷重は機械荷重よりはるかに大きな配管モーメントを生じるので、必然的にレーティングをあげてリング厚さやボルト断面積をアップせざるを得ない(コストアップになる)。

JSME S NC1 の方は、この点有利である。M ( $M_{fs}$  に相当)の荷重ソースは軽少な機械荷重であるからレーティングアップは殆ど必要ではない(許容応力も大きい)。

一方、高圧ガス設備等耐震設計指針は、(機械荷重+変位荷重)に対してははっきり(1次+2次)応力評価の態をとっている。即ちシール性を配慮してか、 $\sigma_R, \sigma_T$  に対する許容応力は降伏応力程度にとどまるものの、配管接合部のハブ応力  $\sigma_H$  には  $2S_y$  の許容応力が認められている。

筆者は、フランジ強度評価については、JSME S NC1+高圧ガス設備等耐震設計指針の方が現実的で理にあっていていると思う。

[NC-3658 の荷重定義には旧 Version 以降、混乱があるような気がする。あるいは荷重と応力評価の関係をコードユーザーの選択に委ねているのかも知れない。]

最後に④について。②で[モーメントの直接制限]が採用されない理由を議論したが対象フランジ規格が異なっていることも理由のひとつではないかと思う。JSME S NC1 でも耐震設計指針でも主に JIS フランジ適用になるので、NC-3658 の ASME B16.5a フランジとリング剛性の点で違いがでてくる。

剛性に違いがあると、リングの傾きが違ってシール特性に相違があるので NC3658 のモーメント直接制限の流用は abort されたのかも知れない。ただこの剛性差の影響についてはシミュレーションが必要である。筆者の直感では JIS B2238 vs ASME B16.5 に有意差があるようには思えない。多分、NC-3658 のモーメント直接制限は JIS フランジにも適用できるような気がする。

## 6. 配管モーメントの影響評価及び制限に関する提案

(1) 前 5.(1)でも述べたように一般プラント配管のフランジ継手で配管モーメントの影響が問題にされることは少ない。しかし何らかの不具合や悪条件があつて大きな配管モーメントが重なると疲労や漏洩と云つた問題がでてくる。従つて例えば可燃性/毒性の流体を扱う場合には、予めクリティカルな部位にあるフランジ継手について配管モーメントの影響を評価し対策を講じるのがベターで、その場合、NC-3658 規定は最もマッチする。その内容はモーメントの影響評価の原典であつて、かなり本質的なアプローチになっているからである。しかし残念ながら、Nuclear 設備に適用されるために運用が複雑になっている上に、前 5.の考察からわかるように決して完全な規定ではなく幾つの不明がある。ここでは NC-3658 の持つ良否を勘案しながら、一般プラント配管に適した“配管モーメントの影響評価(制限)手順”を提案してみたい。

(2) まず、提案の骨子について説明する。

前節では、[フランジ設計圧力による強度チェック]と[モーメントの直接制限]がダブっていないか考えてみたが、設計的なアクションとして見れば差異があり、前者だけで影響評価を行うのは無理筋と思われる。ここでは多少の重複はあつても両者を並置することにする。

また、NC-3658 のモーメントの荷重ソースとフランジの応力評価の間には前述のように曖昧なミスマッチがあるので、JSME S NC1 と高圧ガス設備等耐震設計指針の併せた形、即ち

[機械荷重に対し 1 次応力評価] & [(機械+変位)荷重に対し(1 次+2 次)応力評価]  
を採ることにする。ただ 後者の(1 次+2 次)応力評価については、[モーメントの直接制限]によって変位荷重分も含んだモーメントが制限されるので、評価自身が割愛できるかも知れない。代表サイズを挙げて幾つかのシミュレーションを行なえば、評価の要否について一定の答えが得られると思う。

なお JSME S NC1 のフランジ 1 次応力に対する許容応力には疑問が残るので、NC-3658 のように強度計算規格で規定された許容応力  $S_r$  を採る。

また、NC-3658 は米国コードによる規格フランジを対象にしているので、国内の規格フランジ特に JIS フランジについては、前節で述べたように剛性差があつて[モーメントの直接制限]のストレートな転用には疑問がある。ただ、JIS フランジが ASME フランジに較べ著しく華奢であるとは思えない。また NC-3658 規定がそれほど厳密なものではなく About であることを考えれば、特に気にかける必要はないと思われる。従つて NC-3658 の[モーメントの直接制限]式は基本的にそのまま流用する。参考としてフランジリングの剛性差の簡易チェック方法を後述(4)項に示しておく。

以上は前節 5.の議論によるものである。さらに評価対象を一般国内プラントの配管フランジ継手に的を NC-3658 のような複雑な荷重状態定義はやめて、長期荷重(状態)と短期荷重(状態)だけにする。

短期荷重には安全/逃がし弁の吹出し反力、水撃、地震などを想定する(高圧ガス保安法対象ケースは除く)。振動荷重や脈動圧あるいは風雪荷重のようにある程度持続するものは長期荷重として扱う。

なお評価式としては NC-3658 式を次のように運用する。

- ・長期荷重の場合)  $P_{eq}=16M_{fs}/(\pi G^3)$ による(a)式、及びモーメント制限式としての(b)(d)式
  - ・短期荷重の場合)  $P_{eq}=8M_{fs}/(\pi G^3)$ による(a)式、及びモーメント制限式としての(c)(e)式
- 過渡状態でのピーク荷重(NC-3658 で言う動荷重)は考えない。緊急状態や事故状態は割愛する。

(3) **チャート 4**「配管モーメントの評価/制限手順(案)」を次頁に示す。このチャートではモーメント制限式とボルト応力制限式の右辺に補正係数  $k_0, k_1, k_2$  を乗じている。 $k_0$  は本来のモーメント制限が安全側に寄りすぎる傾向を解消しようとしたものである。 $k_1, k_2$  は NC-3658 のボルトの基本許容応力が一般プラントの約半分になっているのを補正するもの。ボルトの基本許容応力については、クラス 1 とクラス 2 の違いがあって、本ケースでは、

NC-3658 の場合：内圧荷重に対し降伏応力の 1/3

B31 系の場合：内圧荷重に対し降伏応力の 1/1.5

になる。NC-3658 は 3.(4)項の(k)(l)式に示すように、

内圧単独・静荷重に対して ボルト応力  $\leq S_y/3$

内圧+配管曲げ-静荷重： トータルボルト応力  $\leq [2S_y/3=S_y/1.5]$

になるので、ここでは 1 次応力に対し安全側に内圧単独の場合の  $S_b(\rightarrow S_y/3)$  を、(1 次+2 次)応力に対し内圧+配管曲げの  $2S_b(\rightarrow S_y/1.5)$  をベースに割り当てた。前者に B31 系の  $2S_b$ 、後者に  $3S_b(\rightarrow S_y)$  を割り当てることも考えられるが、(長期+短期)荷重状態では完全に降伏してしまう可能性が強いので、ここでは  $S_y \sim 2S_y, 2S_y \sim 3S_y$  の間を狙って補正係数(1~1.5, 1~1.25)を設定している。

(4) ここでフランジリングの剛性差について触れておく。

チモシェンコの材料力学中巻 28 「中心線に沿って一様に分布する偶力による円輪の振り」では  
リングの回転変位： $\theta = M_0/(2\beta D)$

$$M_0 = R(b-a)/[1 + \beta t_0/2 + \{(1-\nu^2)/(2\beta a)\}(t_0/g_0)^3 \ln(b/a)]$$

$$\beta = [3(1-\nu^2)/(a+0.5g_0)^2 g_0^2]^{1/4}, D = E g_0^3 / [12(1-\nu^2)]$$

$R(b-a)$  は下図の通りリングモーメントであって、ここで  $M/(2\pi C)$  とすれば回転バネ定数  $k_\theta$  は

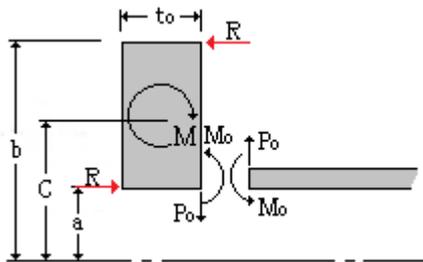
$$k_\theta = \theta/M = \{1/(2\pi C)\} \{1/(2\beta D)\} [1 + \beta t_0/2 + \{(1-\nu^2)/(2\beta a)\}(t_0/g_0)^3 \ln(b/a)]^{-1}$$

但し  $\theta$  = リング回転角(rad.)、 $M$  = フランジに作用する全モーメント(kgf·mm)、

$a$  = リング内半径(mm)、 $b$  = リング外半径(mm)、 $C$  = リング平均半径(mm)  $(=(a+b)/2)$

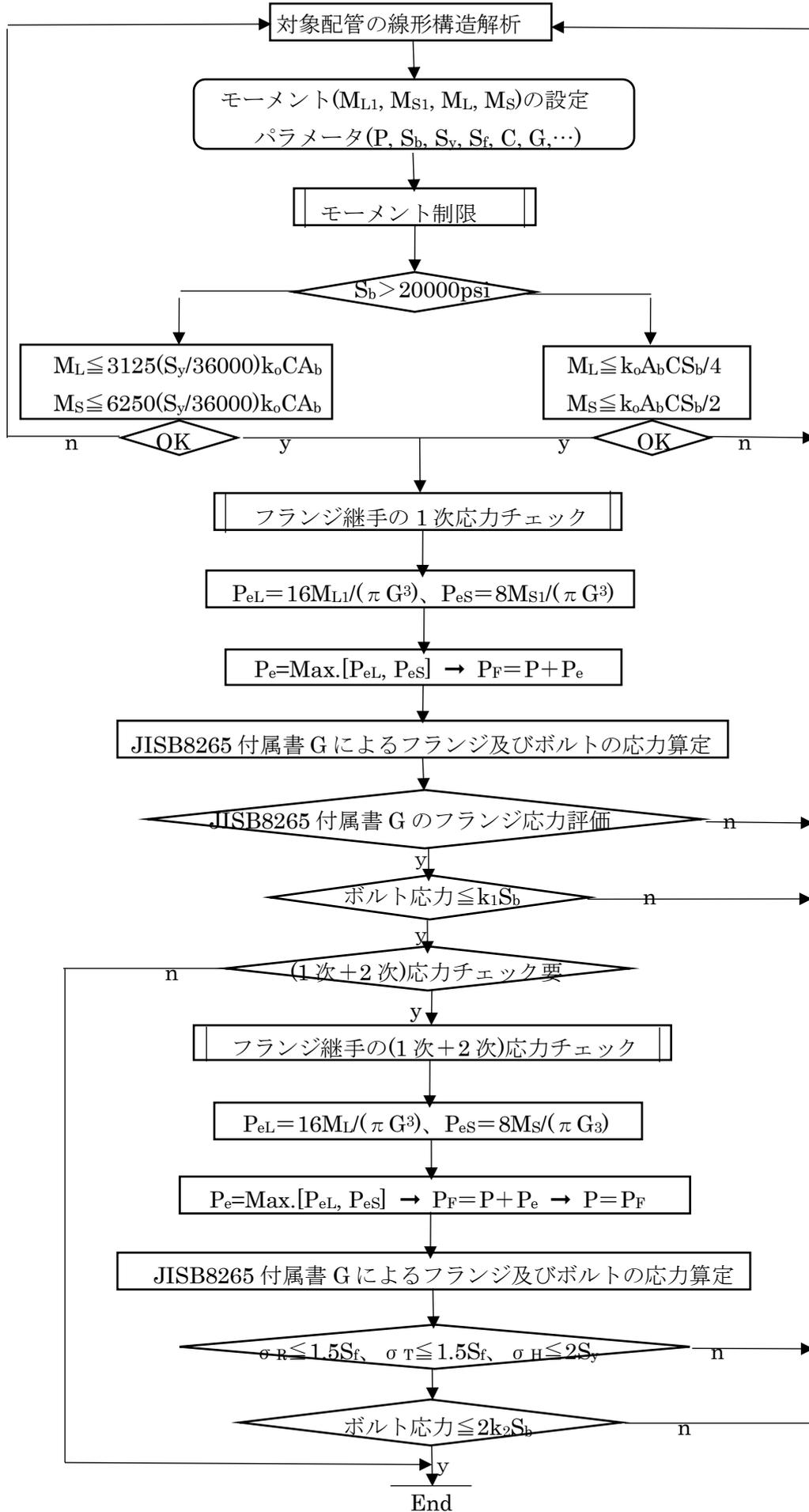
$t_0$  = リング厚さ(mm)、 $g_0$  = 胴厚さ(mm)、 $E$  = 縦弾性係数(kgf/mm<sup>2</sup>)、 $\nu$  = ポアソン比、

$\beta$  = シェル定数(mm<sup>-1</sup>)、 $D$  = 板剛性(kgf·mm)、



2つのフランジの剛性差は、当該フランジとこれに該当する圧力-温度レーティングを持った同サイズの ASME B16.5a フランジの寸法から、夫々の  $k_\theta$  を計算して比較すればよい。また得られた  $k_\theta$  の比を用いてモーメントの制限量を加減してもよい。

チャート 1. 配管モーメントの評価(制限) [ 案 ]



＜チャート4の記号説明＞

$P$ =設計圧力(psi)、 $P_F$ =フランジ設計圧力(psi)、 $P_e$ =モーメント等価圧力(psi)  
 $P_{eL}$ =長期等価圧力(psi)、 $P_{eS}$ =短期等価圧力(psi)、  
 $M_{L1}$ =長期機械荷重による曲げモーメントと振りモーメントの大きい方(in- $\ell_b$ )、  
 $M_{L2}$ =(長期+短期)機械荷重による曲げモーメントと振りモーメントの大きい方(in- $\ell_b$ )、  
 $M_L$ =長期の(機械荷+変位)荷重による曲げモーメントと振りモーメントの大きい方(in- $\ell_b$ )、  
 $M_S$ =(長期+短期)の(機械+変位)荷重による曲げモーメントと振りモーメントの大きい方(in- $\ell_b$ )、  
 $S_b$ =ボルト許容応力(= $S_{by}/3$ )(psi)、 $S_{by}$ =ボルト材の設計温度における降伏応力(psi)  
 $\sigma_R, \sigma_T, \sigma_H$ =フランジの半径方向,周方向及びハブの軸方向の応力(psi)、  
 $S_f$ =フランジ材の設計温度での許容応力(psi)、 $S_y$ =フランジ材の設計温度での降伏応力(psi)、  
 $A_b$ =ボルトの全有効断面積(in<sup>2</sup>)、 $C$ =ボルトピッチサークルの直径(in)、  
 $G$ =ガスケット反力円の直径(in)  
 $k_0$ =補正係数(1~1.2)、 $k_1$ =補正係数(1~1.5)、 $k_2$ =補正係数(1~1.25)

ここでは、NC-3658を転用したので、in- $\ell_b$ 系をとった(申し訳なし)。

$$1 \text{ psi} = 0.07 \text{ kg/cm}^2 = 0.00685 \text{ MPa} = 0.00685 \text{ N/mm}^2$$

$$1 \text{ in-}\ell_b = 113 \text{ N}\cdot\text{m} = 0.113 \text{ N}\cdot\text{m}$$

$$1 \ell_b = 0.454 \text{ kg} = 4.45 \text{ N}, \quad 1 \text{ in.} = 1 \text{ inch} = 25.4 \text{ mm}$$

次の Ver-up に備えて

B31系コードではフランジネックに応力係数が与えられている(例えばB31.3付属書D付表)。故に配管フランジ部の強度評価はされているという見方もある。これについて見解をMarkleの試験も含めて議論しておくべく。

計算例を示しておくべき

引用文献)

- (1) ASME Sect. III NC Component NC-3658 Analysis of Flanged Joint
- (2) JSME S NC1 原発用設計建設規格 第5章 PPB-3414 フランジ
- (3) 高圧ガス設備等耐震設計指針レベル1耐震性能評価(配管系)編 2.5 フランジ継手の耐震性能評価
- (4) 解説・原子力設備の技術基準 (通産省原発安全管理課) 電力新報社
- (5) ORNL/Sub/2913-3 Evaluation of the Bolting and Flanges of ANSI B16.5 Flanged Joint (by Rodbaugh et al.)