

お詫びと訂正

2020年7月31日に発行いたしました本誌「Vol.70, No.1 特集：エネルギー・環境」におきまして、記載に誤りがございましたので以下のように訂正いたします。

ご愛読いただいている皆さま，ならびに関係各位にご迷惑をお掛けしましたことをお詫び申し上げます。

105ページ 右段24行目：

誤： り⁵⁾，爆破ごとに累積残留塑性ひずみが増加するいわゆ

正： り⁴⁾，爆破ごとに累積残留塑性ひずみが増加するいわゆ

107ページ 右段7行目：

誤： 4) API 579-1/ASME FFS-1 2007 Fitness-For Service.

5) Joseph K. Asahina et al. "ASME" Proceedings of PVP2011-57843, p.135-139.

正： 4) Joseph K. Asahina et al. "ASME" Proceedings of PVP2011-57843, p.135-139.

(解説)

化学兵器処理用爆破チャンバの設計

林 浩一*

Design of Detonation Chamber for Destructing Chemical Warfare Materials

Koichi HAYASHI

要旨

爆破チャンバは内部で化学兵器を数十kgの爆薬で爆破処理する設備である。耐破片性、操作性、密閉性などの性能を満足するための構造の制限がある。基本の頑健性に対する構造設計には、爆破衝撃波が瞬間の動的荷重であるため、静的圧力を対象とした通常の圧力容器の設計規格は適用できない。近年ASME（米国機械学会）より特別規格「衝撃荷重を受ける圧力容器」が発行され、これを設計指針としている。すなわち、動的圧力解析と動的応力・ひずみ解析を実施し、疲労損傷や局部ひずみ制限など各破壊形態について評価する手法により詳細構造設計が可能となった。ここでは、その設計手法の実践例も含めて紹介する。

Abstract

A detonation chamber is a device for destroying chemical warfare materials by detonation, using tens of kilograms of explosives in the process. Special structural features are required to satisfy fragment resistance, operability and leak tightness. The normal design code for static pressure vessels cannot be applied to the basic structural design of the robust detonation chamber because the detonation shock wave causes instantaneous dynamic pressure. Hence, the Code Case "Impulsively loaded pressure vessels," published recently by the American Society of Mechanical Engineers (ASME), was used as the design guideline. It requires dynamic pressure analysis and dynamic stress and strain analysis, which are used for the evaluation of each mode of failure such as fatigue damage and local strain limit, to allow detailed design. This paper introduces the design features with examples.

キーワード

爆破チャンバ、動的荷重、化学兵器、衝撃波、ASME規格、多層胴、破壊評価、LBBM、完全塑性ヒンジ、局部塑性ひずみ、疲労破壊

まえがき = 爆破チャンバは内部で化学兵器を数十kgの爆薬で爆破処理する設備である。耐破片性・操作性・密閉性などの用途上特有の性能を満足するために構造の制限がある。いっぽうで頑健性に対する構造設計には静的圧力を対象とした通常の設計規格はそのまま適用できない。これは爆破時に発生する爆破衝撃波が動的荷重であるためである。

近年、動的荷重に対する特別規格ASME Section VIII Division3¹⁾ (以下、ASMEという) およびCode Case2564²⁾ (以下、Code Caseという) が発行され、現在はそれらを設計指針としている。当社もこのASME特別規格の

Task Groupに参画し、情報提供などの協力を行っている。この特別規格は、動的圧力解析や動的応力・ひずみ解析を実施し、疲労損傷や局部ひずみ制限など各破壊形態について評価する手法である。設計手順や評価基準が複雑で厳しいが、この適用により一層安全な爆破チャンバの設計や安全評価が可能となった。

本稿では爆破チャンバの構造上の特徴とその設計手法、および設計・評価例について紹介する。

1. 爆破チャンバの構造

爆破チャンバは基本的には鋼製の圧力容器であり、図1

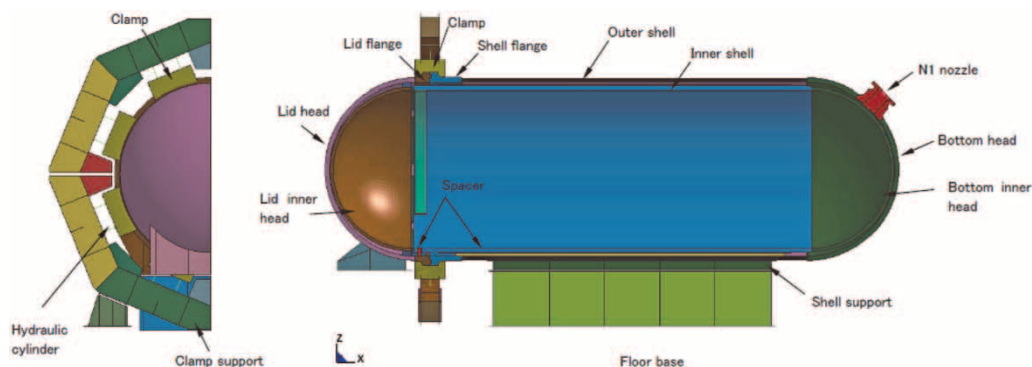


図1 爆破チャンバの構造モデル
Fig.1 Structural model of detonation chamber

* エンジニアリング事業部門 CWDセンタープロジェクト部

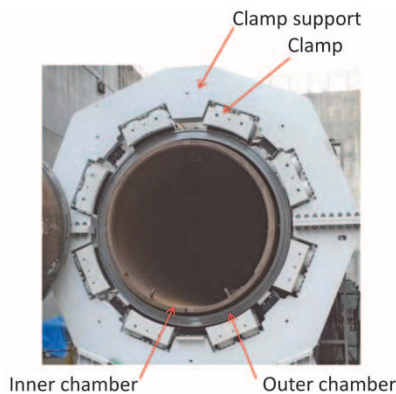


図2 爆破チャンバ内部
Fig.2 Inside view of detonation chamber

にその基本構造モデル図を示す。化学弾を爆破処理するため、耐破片性、操作性、密閉性、および爆破衝撃に耐える頑健性の機能を持つ構造上の特徴を有する。以下にその特徴を概説する。

1.1 耐破片性

爆破処理する化学兵器が弾の場合、爆破時に弾殻の破片が高速で爆破チャンバ内面に衝突して損傷を与える。爆破衝撃波に耐えるべき耐圧部分が損傷によって減肉すると頑健性が低下する。図2に示すように、胴体・鏡部とも外筒・内筒の2重構造とし、圧力容器の密封性は外筒が、耐破片性は内筒がそれぞれ受け持っている。内筒が密閉容器とならないように内筒胴と内筒蓋鏡との間には隙間を設け、衝撃波圧力が内筒部分から外筒内面に漏洩（ろうえい）する構造としている。

内筒は耐破片性の高い800 MPa級の引張強度を有する高張力鋼（JIS SHY685）を使用している。また、損傷を受けた場合は外筒から内筒だけを引き抜いて交換できるような構造としている。

1.2 操作性

化学兵器を爆破チャンバ内部へ搬入・設置し、爆破後に破片を回収する必要がある。このため容器は水平型とし、蓋は油圧駆動でスライドさせて完全開放できるようにしている。図2は開放した状態を示している。爆破処理にあたっては、運転員は爆破チャンバの軸中心に化学兵器を設置する。このため、操作性の観点から直径は3m以下に抑えている。

水平型容器は爆破時に、架台のサポート部に水平方向の大きな動的荷重を受ける。このため初期には大きなひずみやき裂の発生もあった。そこでこうした問題を解消すべく、サポート部を対象に、リブの大きさやそれらの組み合わせ、溶接施工法を解析と実運転データとによって詳細に検討し、改善してきた。図3に架台サポート部の構造改善例を示す。

衝撃波による圧力は伝搬距離の3乗に反比例する。このため円筒容器の場合、同じ容量であれば内径を大きく全長を短くすれば円筒胴体部の応力を低減できる。しかしながら上述の操作性の問題から、水平円筒の直径の大きさは制限される。したがって爆薬処理能力を増加する場合は、円筒の軸方向長さを伸ばすことで対応している。

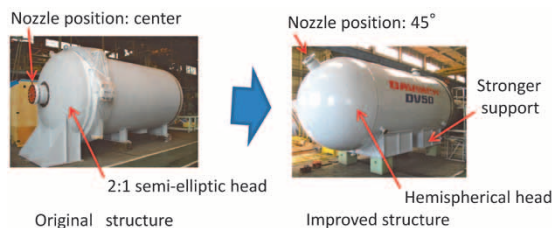


図3 構造の改善例
Fig.3 Example of structural improvement

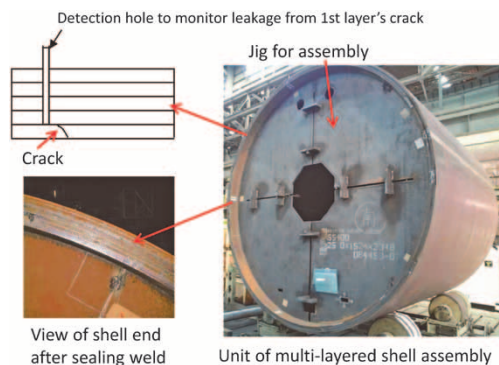


図4 多層構造の外筒胴体
Fig.4 Multi-layered outer shell

1.3 密閉性

化学兵器の処理環境中の許容濃度は低く、爆破時のガス漏洩が抑えられるように稼働蓋も高い密閉性が要求される。蓋は当初、半割リングをボルトで止めた構造であったが、爆薬量増加に伴ってより密閉性の高い油圧クランプ方式に変更した（図2参照）。8個のクランプで蓋側および胴体側フランジを油圧で締め付け、両フランジ間で密封性を保つ。これらの変形挙動も動的解析により確認し、例えばインロー部のはめあい構造を両フランジ部に持たせるなど各種の機構的な改善を実施している。

1.4 爆破衝撃波に対する構造の頑健性

構造の頑健性の評価上最も問題となるのは爆発衝撃波によるぜい性破壊である。これを防止するため胴体部分は、図4に示すように薄板を重ね合わせて厚肉の胴体構造を形成する多層構造としている。この多層構造は、衝撃波を受ける最内層（1層目）にき裂が入った場合でも、その不連続性から2層目より外の層にき裂が伝搬しない。このため、一挙に全厚を貫通したぜい性破壊に至ることはない。また1層目に図4左上図に示すようなき裂が生じた場合、検知孔からのガス漏れを検出することによって1層目のき裂の存在が確認できる構造となっている。いっぽう、鏡やノズル、フランジなどは単肉構造であるが、引張強度よりも耐ぜい性破壊性を重視してSA203Gr.EあるいはSA350LF3などのじん性の高い3.5%Ni鋼を使用している。

内筒胴体はスペーサの上に外筒胴体と軸芯を合わせて設置される。上述のとおり内筒を容易に交換可能とするため外筒に固定はされていない。このため内筒は爆破の衝撃エネルギーによって軸・上下方向に動き外筒に衝突する。この内筒と外筒との衝突時の衝撃荷重についても検討する必要がある。とくに局部的な衝突箇所では外筒に発生する応力が高くなる。これを緩和するために、図

3に示すように鏡の形状を2:1半楕円から半球形に変更するとともに、ノズル位置を鏡中央(当初のノズル位置)から45°上方向へ変更するなどの対策を実施している。

2. 構造設計

衝撃荷重を受ける圧力容器の板厚を設計する場合、最も簡便な方法としては静的圧力容器の計算式を流用し、衝撃荷重を考慮して安全率を大きく(許容応力を小さく)設定して計算する方法が考えられる。しかし安全率の設定には数多くの実績値が必要であり、適切な設定が困難である。また上述の爆破チャンバ固有の構造自体が頑健性においてもクリティカルな箇所であり上記計算式に当てはまらない。そこでASMEの特別規格を設計指針として、当社独自で爆破チャンバの設計と安全性評価手法を確立してきた。

本章ではこの設計および安全性評価手法について概説するとともに、設計爆薬量TNT60 kg相当を超える現在までの最大クラスの爆破チャンバを対象とした設計・評価例を紹介する。

2.1 Design Input

爆破チャンバの設計においては通常的设计規格での「設計圧力」という概念はなく、各爆破チャンバの詳細構造、使用材質および爆薬量(TNT換算量)がDesign Inputとなる。また、爆薬の爆破位置や爆破時間差などの爆破方法もDesign Inputとなる。同じ爆薬量でも、一箇所で爆破する場合と3分割で爆破する場合とでは衝撃波の分散状況が異なる。また、使用材料の機械的性質は動的荷重下ではひずみ速度に応じて変わるため、高速引張試験結果を基に得られた応力-ひずみ曲線を使用している。

2.2 爆発解析

衝撃解析ソフトAUTODYN^{®注1)}を用いて解析した爆発時の圧力分布の経時変化を図5に示す。外筒内径

3.0 m、爆薬量64.2 kgTNT換算で3点同時爆破の例(以下、本稿の計算例はすべてこの条件を用いた)であり、時刻の経過とともに圧力波は反射拡散を繰り返していることが分かる。爆薬の起爆箇所や起爆時間などの爆破条件によって圧力分布の変動状況は変わる。また、静的圧力容器は圧力分布が容器内で均一であるのに対し、爆破衝撃波を受けるチャンバの場合は各部位・時刻によって受ける圧力が異なる。したがって部位ごとに圧力時刻歴を求める必要がある。図6に外筒鏡内面の圧力時刻歴の一例を示す。圧力は単調に減衰するのではなく、いくつかのピークを示している。これは、衝撃波が反射拡散を繰り返して当該部位に衝撃力を及ぼしていることを示している。

2.3 動的構造解析

各箇所の圧力の時刻歴を基に衝撃・構造解析ソフトLS-DYNA^{®注2)}によって動的応力やひずみ分布を計算する。圧力と同様に、外筒に生じる応力やひずみ分布も繰

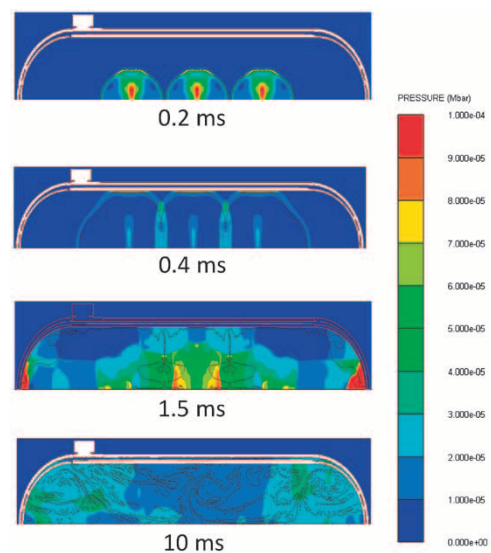


図5 圧力分布の経時変化
Fig.5 Change with time of pressure distribution

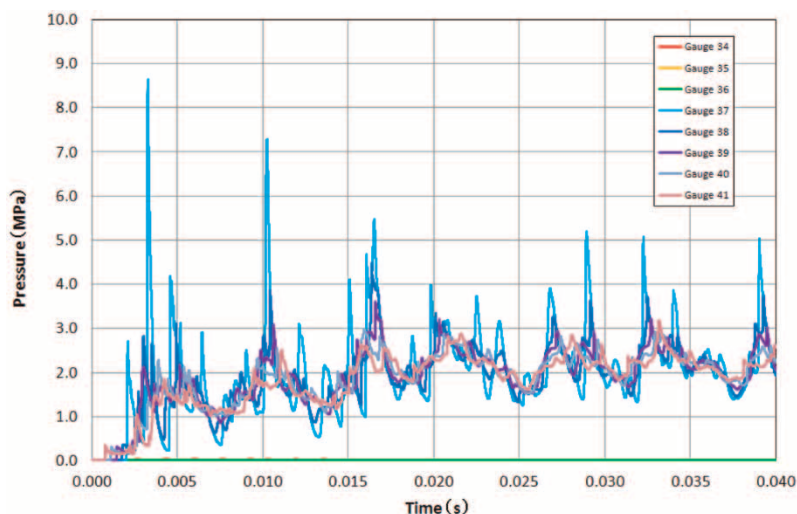


図6 圧力時刻歴(蓋外筒内面)
Fig.6 Time history of pressure of inside surface of outer lid head

脚注1) 爆破をはじめとする広範な衝撃問題解析のために設計された陽解法による解析ソフトウェア。ANSYS[®]社が提供。

脚注2) Lawrence Software Technology Corporationが提供する陽解法による高速非線形動解析ソフトウェア。

り返しピークを示す状態が発生する。これには内筒の衝突による衝撃荷重も考慮されている。解析結果例は以下の評価項目ごとに個別に紹介する。

2.4 ASMEとCode Caseに基づく評価

本節では4種類の破壊モードについてその評価方法の基本概念と評価例を述べる。

2.4.1 Leak before burst mode of failure (LBBM)

LBBMはき裂が高速で一挙に進展して壊滅的破壊が生じないことを示し、ASME KD-141で規定される。多層胴の部分は構造上LBBMとASME KD-810で認められており、単肉の部位は下記(I)と(II)の2項目の両方を満たせばLBBMと判断される。

(I) 材料全厚(t)の80%の厚さまでき裂が進展したとしてき裂先端の応力拡大係数 K_I が材料の破壊じん性値 K_{Ic} より小さいこと。

(II) Remaining ligament(き裂先端から自由表面までの距離)が $(K_{Ic}/\sigma_{ys})^2$ より小さいこと。

以下に詳細な評価方法について説明する。き裂形状はASME KD-410に示す半楕円(だえん)とし、深さ(a)と長さ($2c$)との比を1:3とする。き裂先端の K_I 値は下式³⁾で表される。

$$K_I = [\sigma_0 G_0 + \sigma_1 G_1 (a/t) + \sigma_2 G_2 (a/t)^2 + \sigma_3 G_3 (a/t)^3 + \sigma_4 G_4 (a/t)^4] \sqrt{\pi(a/Q)} \dots\dots\dots (1)$$

$$Q = 1 + 1.464(a/c)^{1.65} \dots\dots\dots (2)$$

$$\sigma(x) = \sigma_0 + \sigma_1(x/t) \dots\dots\dots (3)$$

$\sigma(x)$ は瞬間的に最大となる応力を基に式(3)より求める。

ここで、

$\sigma_0 \sim \sigma_4$: き裂に直交する応力 $\sigma(x)$ を4次多項式で表した場合の係数

t : 板厚

x : 端部からの距離(0~ t)

Q : き裂形状係数

$G_0 \sim G_4$: 影響係数

σ_{ys} : 静的降伏強さ

K_{Ic} は下式で算出される。

$$(K_{Ic}/\sigma_{ys})^2 = 5(CVN/\sigma_{ys} - 0.05) \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 CVN : 材料のじん性値に関連するシャルピー衝撃試験での吸収エネルギー値である。

つぎに、今回の対象チャンバの評価例について示す。

(I) については $K_I = 107 \text{ MPa m}^{1/2}$, $K_{Ic} = 225 \text{ MPa m}^{1/2}$ となり、 $K_I < K_{Ic}$ を満足する。また(II)についてもRemaining ligamentは肉厚75 mmの20%で15 mm, $(K_{Ic}/\sigma_{ys})^2 = 670 \text{ mm}$ となり、Remaining ligament $< (K_{Ic}/\sigma_{ys})^2$ を満足する。すなわち(I), (II)両方の条件を満足するため、LBBMと判断できる。

2.4.2 Global plastic instability

Code Caseでは、衝撃荷重で塑性不安定状態が形成されないことを動的弾塑性解析で示すことを要求している。例えば、開口部回りに完全塑性ヒンジの形成がない

ことである。爆破チャンバでは、胴側鏡の排ガス用ノズル部と、蓋側・胴側フランジとが評価対象となる。衝撃荷重の設計マージンとして1.732が規定され、具体的には設計爆薬量に相当する衝撃荷重(圧力)の175%とした荷重を用いて解析評価する。

図7に胴側フランジの蓋側から見た残留相当塑性ひずみ分布例を示す。フランジ部材に残留相当塑性ひずみが観察されるが、全断面に弾性域が存在していることが確認できる。すなわち、胴側フランジには完全塑性ヒンジがなく、塑性不安定状態はないと判断できる。

2.4.3 局部塑性ひずみの制限(Local strain limit)

Code Caseでは局部塑性ひずみ制限については以下の3条件を規定している。

- (1) 最大相当塑性ひずみの許容値は容器の板厚平均で0.2%
- (2) 最大塑性ひずみ成分の許容値は容器板厚内で線形化したもので2% (1% at welds)
- (3) 容器内任意の点における最大ピーク相当塑性ひずみの許容値は5% (2.5% at welds)

これは1回の爆破による基準であるが、複数回の爆破の累積残留塑性ひずみについても同基準で評価が必要である。ただし、爆破の動的荷重変形の場合でも高ひずみ発生部ではシェイクダウンが実験的に確認されており⁵⁾、爆破ごとに累積残留塑性ひずみが増加するいわゆる漸増崩壊(ratcheting)現象は生じず、最大の爆破量の1回の残留塑性ひずみ量で評価すればよいことが確認されている。

本例の蓋鏡部における上述の条件(3)の最大ピーク塑性ひずみ成分および最大ピーク相当塑性ひずみの解析結果例を表1に示す。結果例は条件(3)の判定基準である50,000(25,000 at welds) μ 以下である。計算値は割

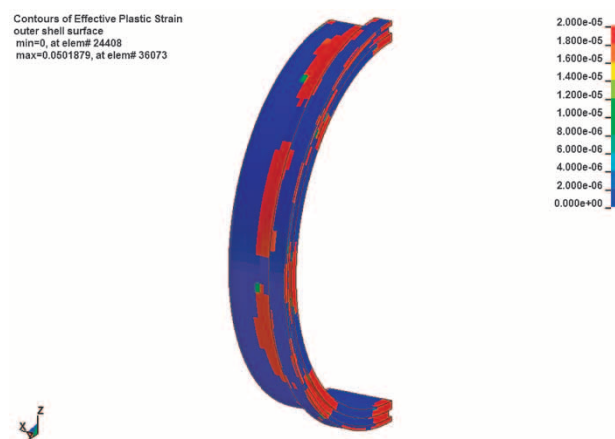


図7 胴体フランジの残留相当塑性ひずみ分布(175%荷重)
Fig.7 Contours of effective equivalent plastic strain in shell flange (175%load)

表1 蓋鏡部の最大ピーク相当塑性ひずみ
Table 1 Maximum peak equivalent plastic strain of lid head

Plastic strain component						Equivalent plastic strain $\epsilon_{eq,p}$	Acceptable range
$\epsilon_{xx,p}$	$\epsilon_{yy,p}$	$\epsilon_{zz,p}$	$\epsilon_{xy,p}$	$\epsilon_{yz,p}$	$\epsilon_{zx,p}$		
-589	75	210	23	1	521	792	<50,000 <25,000 weld unit: μ

愛するが (1) および (2) の条件も満足しており基準内と判断される。

2.4.4 疲労破壊評価

LBBMが立証された場合、疲労破壊評価においてはき裂が発生するまでの回数をASME KD-3により求めることが認められている。LBBMが立証されない場合は、発生したき裂の進展を評価するASME KD-4に基づいて破壊力学的評価を行う必要がある。

爆破チャンバの最新モデルでは、前述のとおり破壊じん性の高い材料を使用し、LBBMが立証されていることからASME KD-3での評価を実施している。以下にその概要を紹介する。

(1) ひずみ振幅

ひずみ振幅の時刻歴からASME KD-353のレインプロー法で次式により各ひずみピーク群について時刻ごとに相当ひずみ振幅を求める。

$${}^{mn}\Delta\varepsilon_{ij} = {}^m\varepsilon_{ij} - {}^n\varepsilon_{ij} \dots\dots\dots (5)$$

$${}^{mn}\Delta\varepsilon_{range} = \frac{\sqrt{2} \sqrt{({}^m\Delta\varepsilon_{11} - {}^m\Delta\varepsilon_{22})^2 + ({}^m\Delta\varepsilon_{22} - {}^m\Delta\varepsilon_{33})^2 + ({}^m\Delta\varepsilon_{33} - {}^m\Delta\varepsilon_{11})^2 + 6({}^m\Delta\varepsilon_{12}^2 + {}^m\Delta\varepsilon_{23}^2 + {}^m\Delta\varepsilon_{31}^2)}}{3} \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 ${}^m\varepsilon_{ij}$; 時刻mにおけるひずみ成分

${}^{mn}\Delta\varepsilon_{range}$; 相当ひずみ振幅

(2) 疲労限度減少係数

ノズル付け根部などの局所的な形状不連続部の疲労強度は減少するため、疲労強度減少係数をひずみ振幅に乗じて評価する。疲労強度減少係数は基本的に形状から算定される応力集中係数と関連した係数としている。

(3) 疲労曲線

塑性ひずみによる低サイクル疲労であることから、応力-寿命曲線ではなくひずみ-寿命曲線で評価する。ASME設計疲労曲線より推定されるBest Fit Curveの寿命に3倍のマージンを持った図8に示す曲線で評価する。各時刻のひずみ振幅に疲労強度減少係数を乗じた値と、疲労曲線上で対応する寿命Niとを求め、一つのひずみピーク群の疲労損傷度 $1/Ni$ を算出する。つぎに1回の爆破で生じるすべてのひずみピーク群に対しての総計 $\Sigma 1/Ni$ を求める。これが1回の爆破による疲労損傷度の総計である。

(4) 複数回爆破時の疲労損傷度

例えば計画された爆破回数がnであり、爆薬量など爆

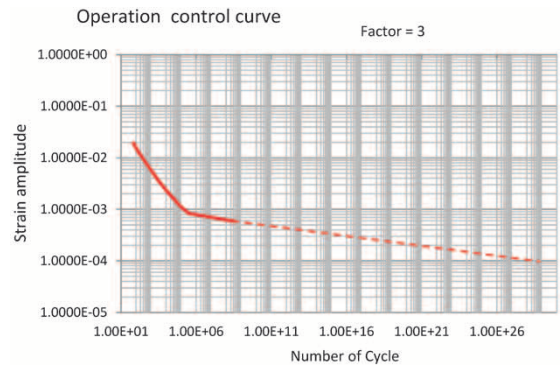


図8 疲労曲線
Fig.8 Fatigue curve

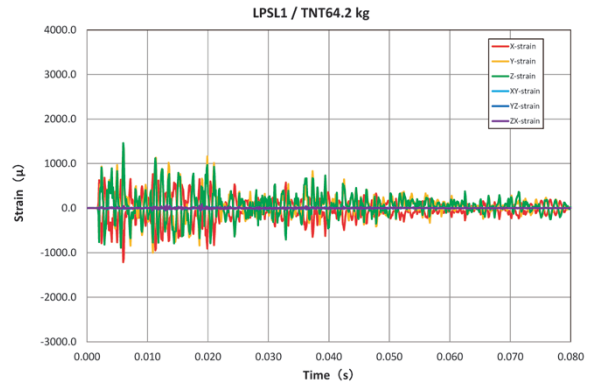


図9 蓋鏡部の動ひずみ時刻歴
Fig.9 Time history of dynamic strain of top of lid head

破条件がすべての爆破で同じであれば累積疲労損傷度は $n \times \Sigma 1/Ni$ となる。累積疲労損傷度が1となれば寿命と判断されるため、逆に設計計算上の許容爆破回数は $n = 1 / (\Sigma 1/Ni)$ となる。

図9に本例(蓋鏡部)の動ひずみ時刻歴を示す。上記手順により求めた1回の爆破あたりの疲労損傷度は $7.8E-05$ となり許容爆破回数は12,800回となる。本例の場合、設計上の許容爆破回数は約1,700回であり、設計基準を満足する。

本例の場合4項目の破壊形態のいずれも基準を満足しており安全性が設計上担保されている。

3. 設計検証と運転管理

ASME KD-12では試験による設計検証が規定されており、爆破チャンバも爆破試験でひずみを実測することにより設計検証を行っている。破壊試験という手法も

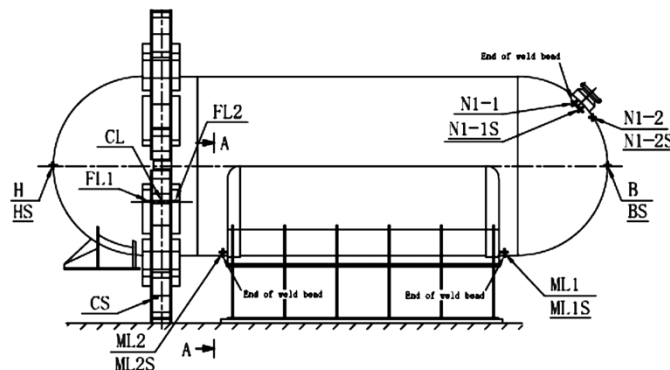


図10 ひずみゲージ貼付位置
Fig.10 Location of strain gage

あるが爆破チャンバでは設計爆薬量にて発生するひずみを測定する。測定箇所は図10に示すクリティカルポイントを選定している。静ひずみゲージで累積残留塑性ひずみ(2.4.3項)、動ひずみゲージで爆破ごとの疲労損傷(2.4.4項)を確認する。疲労損傷の累積計算は独自開発の計算プログラムにより試験中での計算が可能である。

また、実機運転中にもひずみを実測し、爆破ごとに累積残留塑性ひずみ、および累積疲労損傷を算定し、補修あるいは交換時期を予測する保守に活用している。

むすび=爆破チャンバを実際の化学兵器処理案件に導入して十数年以上が経過する。その間、衝撃荷重を受ける圧力容器に関わるASMEの特別設計規格を基に構造設計手法を確立してきた。今後もさらなる設計のブラッシュアップを図り保守、改善および開発に反映して一層の安全性の向上を目指したい。

最後に、設計にあたって協力・指導を頂いた元ASMEのPresident 故Dr. Robert E Nickellに謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) ASME Code Section VIII Division 3, Alternative Rules for Construction of High Pressure Vessels.
- 2) Code Case 2564-4 Impulsively Loaded Pressure Vessels, Section VIII Division 3.
- 3) WRC Bulletin 471 May. 2002.
- 4) API 579-1/ASME FFS-1 2007 Fitness-For Service.
- 5) Joseph K. Asahina et al. "ASME" Proceedings of PVP2011-57843, p.135-139.



林 浩一

エンジニアリング事業部門
CWDセンタープロジェクト部