

限定なし



宇宙用高圧ガス機器技術基準

2021年8月25日 F改定

国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構

免責条項

ここに含まれる情報は、一般的な情報提供のみを目的としています。JAXA は、かかる情報の正確性、有用性又は適時性を含め、明示又は黙示に何ら保証するものではありません。また、JAXA は、かかる情報の利用に関連する損害について、何ら責任を負いません。

Disclaimer

The information contained herein is for general informational purposes only. JAXA makes no warranty, express or implied, including as to the accuracy, usefulness or timeliness of any information herein. JAXA will not be liable for any losses relating to the use of the information.

発行

〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1

宇宙航空研究開発機構 安全・信頼性推進部

JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency)

目 次

1.	総則	1
1.1	目的	1
1.2	適用範囲	1
1.3	単位	1
1.4	関連文書	2
1.4.1	適用文書	2
1.4.2	参考文書	3
1.5	用語の定義	6
2.	宇宙用高圧ガス機器の開発手順	12
2.1	開発フロー	12
2.1.1	設計	12
2.1.2	認定試験	12
2.1.3	実機製造	12
2.2	免除規定	13
2.2.1	安全係数4以上の場合	13
2.2.2	既に認定試験が終了しているもの	13
2.2.3	購入品等	14
2.2.4	他の技術基準で適合が認証された宇宙用高圧ガス機器	15
2.3	特例処理	15
3.	設計	17
3.1	設計条件の設定	17
3.1.1	機能性能要求	17
3.1.2	荷重、および温度条件	17
3.1.3	安全係数の定義	21
3.1.4	インタフェース条件	23
3.1.5	寿命要求	23
3.2	構造様式の設定	24
3.2.1	金属圧力容器の構造様式	24
3.2.2	ロケット推進薬タンクの構造様式	24
3.2.3	複合圧力容器の構造様式	25
3.3	材料の選定	30
3.3.1	機械的特性	30
3.3.2	破壊特性	30
3.3.3	適合性	30
3.3.4	製造性	31
3.4	板厚の算定	32
3.4.1	金属圧力容器の板厚の算定	32
3.4.2	ロケット推進薬タンクの板厚の算定	34
3.4.3	複合圧力容器の板厚の算定	40
3.5	詳細解析	49
3.5.1	応力解析	51

3.5.2	LBB成立の判定(解析、および試験)	62
3.5.3	疲労損傷解析、および試験	73
3.5.4	き裂進展解析、および試験	76
3.5.5	剛性解析、および試験	81
3.5.6	ベローズ関連解析	81
3.6	複合圧力容器の損傷管理要求	82
3.6.1	損傷予防管理	83
3.6.2	損傷許容設計	83
3.6.3	損傷管理に対する配慮	84
4.	製造	85
4.1	加工、成形	85
4.2	溶接	85
4.2.1	一般要求	85
4.2.2	溶接施工管理	86
4.3	熱処理	86
4.4	非金属ライナの成形	86
4.5	フィラメントワインディング	87
4.6	塑性変形処理	87
4.7	検査、試験	88
4.7.1	材料受入検査	88
4.7.2	部品検査(金属材料)	89
4.7.3	溶接部検査	90
4.7.4	受入検査	91
4.7.5	受入試験	92
5.	開発試験、および認定試験	103
5.1	開発試験	103
5.1.1	材料基礎試験	103
5.1.2	溶接施工方法の決定、および確認	104
5.1.3	試作試験	104
5.2	認定試験	105
6.	再使用	109
6.1	再使用検査	109
6.1.1	外観検査	109
6.1.2	非破壊検査	109
6.1.3	寸法検査	109
6.2	再使用試験	110
6.3	補修	110
7.	加圧作業時の安全確保	112
8.	取扱い	113
9.	改定時の措置	114
	付録	115

1. 総則

1.1 目的

本技術基準は、宇宙航空研究開発機構(以下「機構」という。)が開発、または打上げるロケット、およびペイロードに搭載する高圧ガス機器の技術基準を示すものである。

1.2 適用範囲

本技術基準は、無人のロケット、およびペイロードに搭載する高圧ガス機器(購入品等を含む。)に適用する。温度条件としては使用材料のクリープが問題となるような高温は含めない。

本技術基準の適用範囲を表1.2-1に示す。また、適用範囲のうち高圧ガス保安法の規定に基づく経済産業大臣の技術基準特別認可申請、または特別充填許可申請を行う機器(以下「申請機器」という。)を図1-1に例示する。

表1.2-1 本技術基準の適用範囲

番号	分類	使い切り型	再使用型	備考
1	ロケット、およびペイロードに搭載される金属圧力容器	適用する	適用する	気蓄器、推進薬タンク、ヒートパイプ、Ni-H ₂ バッテリー用圧力容器等
2	ロケット、およびペイロードに搭載される複合圧力容器	適用する	適用する	気蓄器、推進薬タンク等
3	ロケット推進薬タンク(金属)	適用する	適用する (個別対応)	
4	ロケット推進薬タンク(複合材)	適用しない	適用しない	
5	圧力配管、フィッティング、ベローズ、その他のコンポーネント	適用する	適用する	

1.3 単位

本基準では特に断わって使用する場合以外は、計算式での記号について単位を規定していない。計算に必要な場合には、SI基本単位(長さ：m、質量：kg、時間：s、その他)、および組立単位(力：N、圧力・応力：Pa、その他)を使用するものとする。これ以外の単位を使用する場合には、一般に換算のための係数が付くので十分注意をすること。

1.4 関連文書

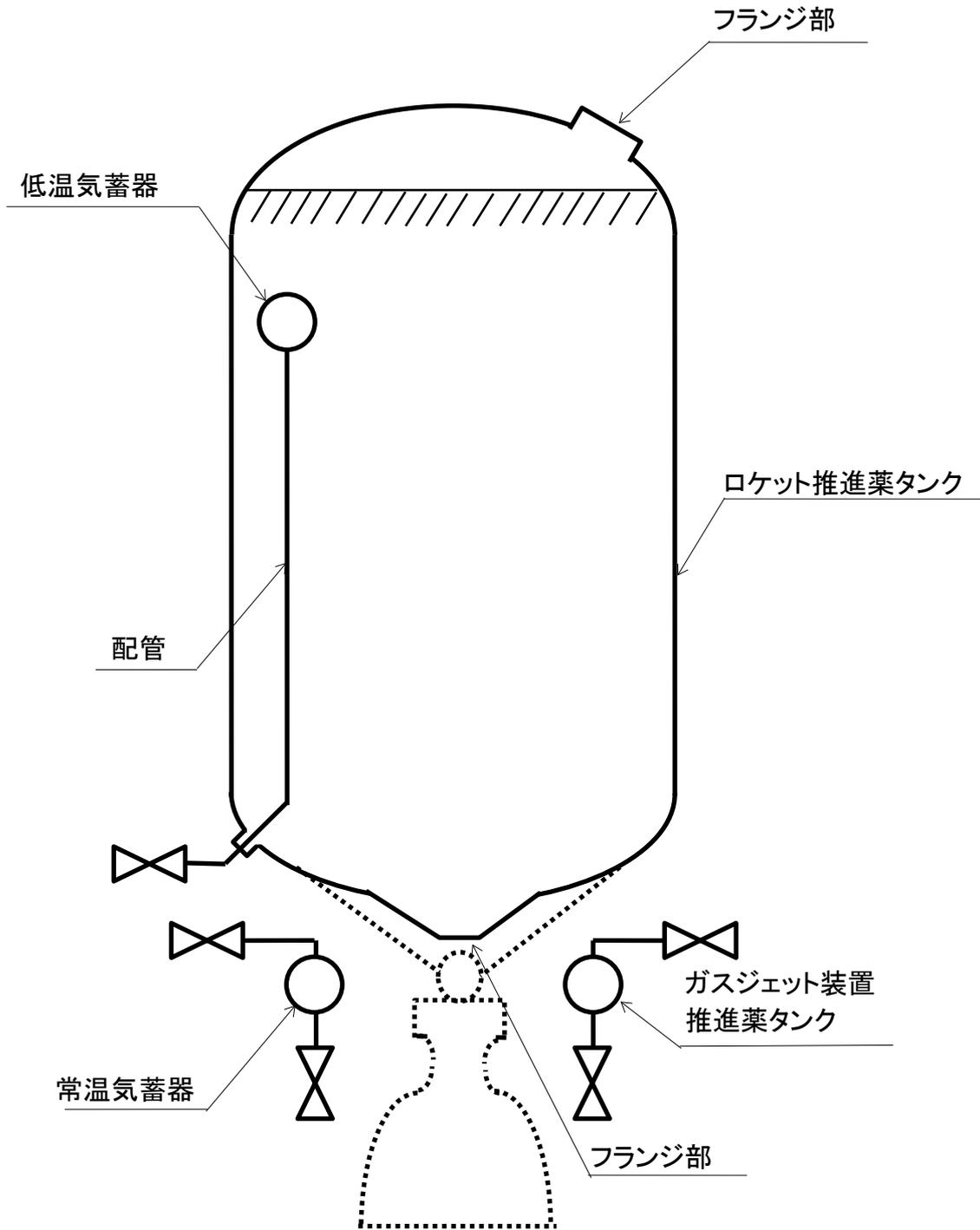
以下の文書は、特に版を指定するもののほかは、最新版を用いること。これらの文書と本技術基準との間に矛盾がある場合には、本技術基準が優先する。

1.4.1 適用文書

- (1) MMPDS : Metallic Materials Properties Development and Standardization
- (2) AFML-TR-68-115 : Aerospace Structural Metals Handbook
- (3) AMS2645 : Fluorescent Penetrant Inspection
- (4) ASTM-E1742 : American Society for Testing and Materials Standard Practice for Radiographic Examination
- (5) MIL-STD-889 : DISSIMILAR METALS
- (6) AWS D17.1 : FUSION WELDING FOR AEROSPACE APPLICATIONS
- (7) ASTM-E1417 : American Society for Testing and Materials Standard Practice for Liquid Penetrant Examination
- (8) SAE-AMS-STD-2154: Society of Automotive Engineers-Aerospace Material Specifications Inspection, Ultrasonic, Wrought, Metals, Process for
- (9) JMR-001 : システム安全標準
- (10) JMR-002 : ロケットペイロード安全標準
- (11) SE-019-094-2H : MATERIAL SELECTION LIST AND USE INSTRUCTION SRB/SRM (NASA文書)
- (12) FEDERAL SPECIFICATIONで規定する金属材料(FS規格)
- (13) JIS B 8266 附属書8 : (規定) 圧力容器の応力解析及び疲労解析
- (14) NASA-CR 124075 : ISOGRID DESIGN HANDBOOK
- (15) NASA-CR 912 : SHELL ANALYSIS MANUAL
- (16) ASTM D 2290 : STANDARD TEST METHOD FOR APPARENT TENSILE STRENGTH OF RING OR TUBULAR PLASTICS AND REINFORCED BY SPILT DISK METHOD
- (17) ASTM D 3039 : Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber-Resin Composites
- (18) JIS-K-6251 : 加硫ゴム及び熱可塑性ゴム-引張特性の求め方
- (19) JIS B 8265 附属書N: (規定)「圧力容器の伸縮継手」
- (20) ISO14623 : Space Systems-Pressure Vessels and pressurized Structures-Design and Operation
- (21) NDIS 3414 : 目視試験方法通則 (日本非破壊検査協会規格)
- (22) NAS 1514 : RADIOGRAPHIC STANDARD FOR CLASSIFICATION OF FUSION WELD DISCONTINUITIES
- (23) ASTM-E164 : Standard Practice for Contact Ultrasonic Testing of weldments
- (24) CSA-115016 : 宇宙用高圧ガス機器技術基準適合審査特例処理方法について
- (25) ASTM-D2344 : Standard Test Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates
- (26) JIS K 7078 : 炭素繊維強化プラスチックの層間せん断試験方法
- (27) JIS K 7057 : 繊維強化プラスチック-ショートビーム法による見掛けの層間せん断強さの求め方
- (28) KHKS 0220 (2020) : 超高圧ガス設備に関する基準

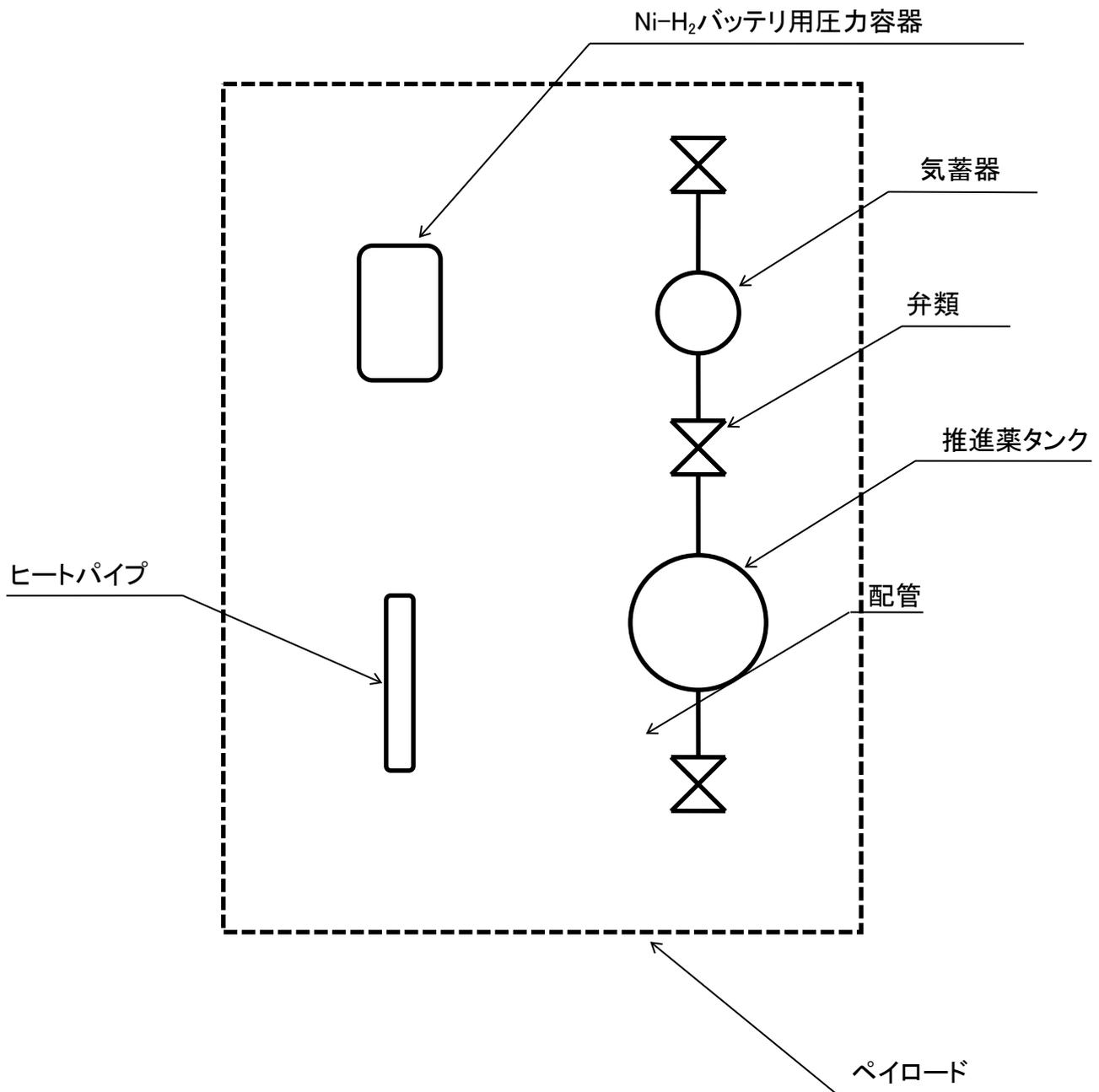
1.4.2 参考文書

- (1) CSA-113004 : 金属製圧力容器設計の基礎技術
- (2) MIL-STD-1522A : Standard General Requirements for Safe Design and Operation of Pressurized Missile and Space Systems
- (3) CR68815 : NASDA宇宙関連用語集
- (4) JIS B 0190 : 圧力容器の構造に関する共通用語
- (5) NASA SP-8040 : Fracture Control of Metallic Pressure Vessels
- (6) JIS B 8285 : 圧力容器の溶接施工方法の確認試験
- (7) 機械設計便覧 (機械設計便覧編集委員会編(丸善))
- (8) 溶接・接合用語辞典 (溶接学会編 (産報出版))
- (9) JMR-006 : コンフィギュレーション管理標準
- (10) JMR-004 : 信頼性プログラム標準
- (11) JMR-005 : 品質保証プログラム標準
- (12) 航空宇宙工学便覧 (日本航空宇宙学会編 (丸善))
- (13) NASA REFERENCE PUBLICATION : OUTGASSING DATA FOR SPACECRAFT MATERIALS
- (14) MRN89-441 : 宇宙用アウトガスデータ集
- (15) AIAA-83-1274 : HIGH PERFORMANCE PRESTRESSED COMPOSITE TANK FOR SPACE USE
- (16) NASA-CR-72753 : DEVELOPMENT OF A FILAMENT-OVERWRAPPED CRYOFORMED METAL PRESSURE VESSEL
- (17) NASA-CR-72124 : COMPUTER PROGRAM FOR THE ANALYSIS OF FILAMENT-REINFORCED METAL-SHELL PRESSURE VESSEL
- (18) 東京大学宇宙航空研究所報告 第15巻 第4号 : CFRPロケットモータの開発研究
- (19) JERG-0-003 : 宇宙用高圧ガス機器技術基準解説書
- (20) 強化プラスチックハンドブック 改訂版 : 強化プラスチック協会編 日刊工業新聞社
- (21) JEAG 4224-2009 : 原子力発電所の設備診断に関する技術指針—放射線肉厚診断技術
- (22) CSA-114011 : 宇宙用高圧ガス機器の適合性評価について
- (23) JIS B 8265 : 圧力容器の構造—一般事項
- (24) JIS B 8267 : 圧力容器の設計
- (25) JIS B 8265 附属書T (規定) 「許容圧力確認試験」
- (26) JIS B 8210 : 安全弁
- (27) CSA-2018006A : 宇宙用高圧ガス機器の適合審査に係る業務処理手続き
- (28) JIS B 8277 : 圧力容器の伸縮継手



- 注記 1) 実線部 (——) は適用範囲を示す。
 2) 点線部 (---) は適用範囲外を示す。

図1-1(1/2) ロケットに搭載される申請機器 (例)



- 注記 1) 実線部 (——) は適用範囲を示す。
 2) 図中ヒートパイプ、Ni-H₂バッテリー用圧力容器については、機器の仕様によっては申請を要しない場合がある。

図1-1(2/2) ペイロードに搭載される申請機器(例)

1.5 用語の定義

本技術基準の中で使用する用語の定義は以下のとおりである。

アウトガス	物質が高真空、および高温に曝されたとき、物質の表面、および内面から水(水蒸気)、炭酸ガス、酸素、水素、窒素などの気体が放出する現象、またはその気体。
圧力容器	内部に常用の温度(設計温度)において圧力1.0[MPa]以上の圧縮ガス、あるいは常用の温度(設計温度)において圧力0.2[MPa]以上の液化ガスを貯蔵する容器。
インプレン巻き	球形のライナに対してフィラメントワインディングを行う際の繊維の巻き方の一種。球の中心を通る面内で繊維を巻き付け、わずかずつずらしていき、ライナ全体を複合材で覆うように巻く。
一次一般膜応力	圧力、またはほかの機械的荷重によって生じる膜応力であって、総体的、および局所的な構造上の不連続性がない部のもの。
一次局部膜応力	圧力、またはほかの機械的荷重によって生じる膜応力のうち、構造上の不連続性などの影響で局部的に大きくなるもの。二次応力的な性格をもつが構造物のほかの部分に大きなゆがみを生じるような膜応力。
一次曲げ応力	圧力、またはほかの機械的荷重によって生じる曲げ応力であって、総体的、および局所的な構造上の不連続性のない部分のもの。
受入試験	フライトハードウェアとしての納入品目の受入れ可能性を立証するために実施される公式の試験。受入試験は、認定済の設計によって製造されたハードウェアの材料、および製造上の欠陥のないことを確認するために行う。
裏波	片側溶接において、電極と反対側(裏側)にできた整った波形を示すビード。
円筒形複合圧力容器	ライナとフィラメントワインディングによる複合材からなる圧力容器で円筒部分のあるもの。
応力強さ	組み合わせ応力の等価強さで与えられた点における最大せん断応力の2倍、すなわち主応力の代表的な最大値と最小値との差。3主応力を $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ とすると、応力強さ $S = \sigma_1 - \sigma_3$ となる。
応力腐食割れ	合金が一定持続荷重下で侵食性環境の影響を受け、著

しくぜい化して破壊する現象。

加圧サイクル試験	高压ガス機器に対して、実際に作用する圧力パターンを模擬した圧力を負荷し、所定の寿命を有していることを確認する試験。
開先	母材中、または2つの母材の間に作られた、みぞ、または間隙で、溶接するための空間として設けられたもの。
危険漏洩	有毒ガス(N ₂ H ₄ 、MMH、NTO等)が放出される漏洩。または、高压ガス機器の外側の区画が漏洩による昇圧で破損する等の災害を起こす漏洩。
気蓄器	高压ガスを貯えるための容器。
基本許容応力	材料の特性、および温度によって定められる許容応力の基本となる引張応力の値。
気密試験	最大予想使用圧力以上で行う気体による漏れ試験。
局部膜応力	任意の断面における応力の平均値。構造不連続は考慮するが応力集中は除く。機械的荷重によって生じるものだけをとる。
許容応力	設計上許容される応力の限界で、応力の種類や種別で異なり通常、基本許容応力の倍数で示される。
金属ライナ	複合圧力容器の内層を構成する金属容器。
高压ガス機器	高压ガス保安法第2条で定義される高压ガスを使用する機器。
構造部材	高压ガス機器で、圧力を保持するために必要となる部材。
降伏比	材料の降伏応力を引張強度で割った値。
座屈応力	構造物の部材が外力により座屈状態に達する直前に部材に生じている応力。
座屈荷重	構造物の部材が外力により座屈状態に達する直前に部材に生じている荷重。
座屈強さ	座屈、または座屈荷重を座屈に対する安全係数で割った値。
最大予想使用圧力	運用環境中で、高压ガス機器に負荷されると予想され

	る最大圧力。
シェークダウン	一次応力プラス二次応力に対応する荷重サイクルによって、材料の降伏応力を越える場合、弾塑性挙動を示し変形の進行が生じることがある。シェークダウンは、初期の弾塑性挙動後、弾性挙動を示し変形の生じない場合をいう。
終極	構造体が崩壊したり、破壊したり、あるいはもはや荷重を支えきれなくなった状態をいう。
終極荷重	制限荷重に、引張強度、設計破壊圧力、または終極荷重に対する安全係数を乗じたもの。通常、終極荷重で破壊しないことが要求される。
推進薬タンク	ロケット、およびペイロードの液体推進薬を貯えるための容器。
ストレスラプチャ	持続荷重下で時間経過によりき裂が進展し破断する現象。
ストレスラプチャ強度	持続荷重下でストレスラプチャにより破断するときの引張強度。
スロッシング	液体ロケットの推進薬タンク内で起きる液体推進薬の動揺。
制限圧力	運用環境中でロケット推進薬タンクに負荷されると予想される最大圧力。これは、最大予想使用圧力に等しい。
制限荷重	運用環境中で負荷される複合荷重、または荷重のうちの最大値。
設計温度	高圧ガス機器の使用する温度範囲で、設計条件として規定するもの。
設計破壊圧力	金属高圧ガス機器の場合は、最大予想使用圧力に引張強度に対する安全係数を乗じた圧力。複合圧力容器の場合は、最大予想使用圧力に設計破壊圧力に対する安全係数を乗じた圧力。
繊維	複合材の主たる強化材。ガラス繊維、アラミド繊維、炭素繊維等をいう。
塑性変形処理	運用に対して金属ライナの弾性変形領域を拡大するため、複合材成形後に行う加圧処理。

損傷管理	機械的損傷によって複合圧力容器の破壊強度が機能要求を下回るのを防止するために実施する管理。損傷予防管理と損傷許容設計の2つの手法に分けられる。
損傷予防管理	損傷が発生しないように実施する管理。損傷予防管理計画の作成、損傷予防管理計画の遵守、損傷予防管理記録の作成からなる。
損傷許容設計	傷、ワレ、剥離、衝撃損傷や他の機械的損傷に対して修理せずに定められた時間に破壊に至らない設計。
耐圧試験	高圧ガス機器の内圧(外圧)を受ける部分に、圧力をかけて所定の圧力で安全に耐え得るか、否かを確認する試験。
特例処理	技術基準の規定に合致しない状態について、規定事項を満足しない理由と代替方策、および安全性等を保証する根拠についてその検討内容を示すことで、技術基準の意図を満足することを確認し、技術基準の規定に適合とすること。
二次応力	構造物の隣接部分の拘束、または自己拘束によって生じ、自己制限的性質をもつ垂直応力、またはせん断応力。
認定試験	ロケット、およびペイロード等のシステムあるいはサブシステムが打上げ、および宇宙空間での運用に供し得るような機能、性能、耐環境性、耐久性を有していることを認定する試験。
破壊圧試験	高圧ガス機器に対して、設計破壊圧力を負荷し、高圧ガス機器が破壊しないことを確認する試験。
破壊圧力	高圧ガス機器が実際に破壊したときの圧力。
破壊試験	高圧ガス機器に対して、破壊するまで圧力を負荷する試験。
破壊前漏洩(LBB)	高圧ガス機器の初期欠陥が成長して、板厚を貫通し、瞬時破壊以前に漏洩させる破壊力学の設計概念。
バックング	開先の底部に裏から当てる金属板、テープ、または(裏当て)フラックスをいう。
非危険漏洩	危険漏洩でない漏洩。
非金属ライナ	複合圧力容器の内層を構成する非金属シール部分。

ピーク応力	段差、切欠等の局所的な構造不連続に伴う応力集中、または局部応力により、一次応力、および二次応力に付加される応力の増加分。
フィラメントワインディング	ライナの外部にマトリクス樹脂を含浸させたワインディング繊維を巻きつけていく作業。
複合圧力容器	ライナ(内層)と複合材(外層)からなる圧力容器。
複合材	複合圧力容器の外層を構成する繊維強化プラスチック。
フープ巻き	フィラメントワインディングにて円筒部分を巻き付ける方法の一種。周巻きのこと。
フラックス	溶接、またはろう接の際に、母材、および溶加材の酸化物などの有害物を除去し、母材表面を保護し、または溶接金属の精錬を行う目的で用いる材料。
プルーファクタ	保証試験圧力を決めるための設計係数。その値によって保証寿命が決定される。
ペイロード	打上げ機により打ち上げる積み荷。ロケットでは搭載する人工衛星、宇宙探査機などがそのペイロードとなる。
ヘリカル巻き	フィラメントワインディングにて、らせん状に巻き付ける方法。
POGO	液体ロケットの機体と推進薬供給系の振動が連成して起きる自励振動。
保証試験(欠陥検出圧力試験)	製造された圧力容器に、作動状態において破壊の原因となるような大きさの初期欠陥が存在しないことを保証するための加圧試験。
ポロシティ	ガスを巻き込むことによって溶接部に生じた球状の空洞。ブローホール。
保証試験圧力	保証試験(欠陥検出圧力試験)を行う圧力。最大予想使用圧力にプルーファクタを乗じて求めた圧力、または初期欠陥寸法より計算された圧力。
マトリクス樹脂	複合材成形時に繊維を固定するための樹脂。あらかじめ繊維に含浸されているものと、成形時に繊維に含浸させるものがある。

曲げ応力	断面の図心からの距離に比例する一次応力の成分。構造不連続、および応力集中を除く。機械的荷重によって生じるものだけをとる。
ミルシート	材料製造業者が試験の成績・製造年月日・注文寸法・数量・材料から溶解まで追跡できるような識別番号などを記載した明細書。材料試験成績書。
Mises相当応力	<p>3軸応力状態にある物体が降伏状態にあるか否かを評価する量であって、ミーゼス型の降伏条件式で材料の1軸引張降伏応力と等置される式で表す。</p> $\sigma_e = \left[\frac{1}{2} \left\{ (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right\} \right]^{\frac{1}{2}}$ <p>ここで、σ_1, σ_2, σ_3 は、主応力。</p>
目違い	母材間の基準面どうしのくい違い。若干の板厚差のある母材を溶接する場合には、表面か裏面のいずれかを基準面として、基準面は平滑になるように溶接するのが一般的であるが、その基準面のずれをいう。
溶接性	材質が溶接に適しているかどうか、溶接の難易を表すための性質。溶接性を大別すると、溶接施工上の溶接性(接合性)と、溶接構造物の使用性能に関する溶接性に分けられる。
溶接変形	溶接によって部材、または構造物に生ずる変形で、通俗的には溶接ひずみと呼ばれる。特に横曲がり変形はもっとも顕著なもので、角変形とも呼ばれる。
溶接ビード	溶接パスによって作られた溶接金属、または溶着金属。単にビードともいう。
ロケット推進薬タンク	ロケット機体の一部として、構造荷重を受けもつ推進薬タンク。

2. 宇宙用高圧ガス機器の開発手順

2.1 開発フロー

ロケット、およびペイロードに搭載される高圧ガス機器は、基本的に図2-1のフローに従い開発すること。個別のシステム要求によって多少の変更は認められるが、実機を製作する前に、実機と同じコンフィギュレーションの試作品を製作、試験し、設計の妥当性を確認することは必須である。このことが一般の地上用高圧ガス機器と異なる点であり、宇宙用高圧ガス機器が地上用の高圧ガス機器よりも低い安全係数を採用するために必要である。ただし、再使用型高圧ガス機器の場合には、再使用のための工程が加わる。再使用型高圧ガス機器の場合には、6項「再使用」の要求に従うこと。また、設計・製造に際しては、別途定めるコンフィギュレーション管理プログラム、信頼性プログラム、品質保証プログラム、およびシステム安全性プログラムにより適切な管理を実施すること。

2.1.1 設計

(1) 設計条件の設定

3.1項で述べる設計条件を明確にすること。特に高圧ガス機器がさらされる環境条件(圧力、荷重等を含む。)を製造から予定のフライト回数の完了までもれなく考慮すること。これらに基づき、設計の評定となる設計条件を設定すること。

(2) 構造様式の設定

設計条件に基づいて、3.2項に述べる構造様式を設定すること。

(3) 材料の選定

3.2項で選定した構造様式に基づいて、3.3項に述べる材料についてトレードオフを実施し、適切な材料を選定すること。これらの選定に当たっては、必要に応じ、材料試験、加工試験を行うこと。

(4) 板厚の算定

3.4項に述べる「板厚の算定」を行うこと。

(5) 詳細解析

3.5項に述べる解析を実施し、強度、座屈(必要な場合)、寿命に適切な余裕があり、3.1項の設計条件を満足していることを確認すること。設計条件を満足できない場合には、構造様式、材料、板厚等の見直しを実施し、再度解析を行うこと。

2.1.2 認定試験

2.1.1項の設計が完了後、実機と同じコンフィギュレーションの供試体を製作し、振動試験、加圧サイクル試験、破壊試験等の認定試験を実施することにより、設計の妥当性を確認すること。また、妥当な製造工程、および検査工程を設定すること。認定試験、またはその他の方法によって、それらの妥当性と品質を立証すること。必要に応じ、認定試験に先立ち、開発試験として材料基礎試験、溶接施工方法の決定、および確認、試作試験を実施し、認定試験用の供試体の製造に必要な設計データや製造方法、試験方法を確認すること。

2.1.3 実機製造

認定試験が終了し、設計、および製造工程の妥当性が確認された後、フライトハードウェアを製作する。製作されたフライトハードウェアに対し納入品目の受入れ可能性を立証するために受入試験を実施すること。受入試験は、認定済の設計によって製造されたフライトハードウェアに材料、および製造上の欠陥のないことを確認するために行う。

2.2 免除規定

以下のいずれかに該当する場合は、設計、および製造に係る本技術基準との適合審査時に本技術基準の一部について、その適用を免除する。

2.2.1 安全係数4以上の場合

(1) 該当条件

金属高圧ガス機器では最大予想使用圧力を負荷したとき、引張強度に対する安全係数が4以上を有する場合、また複合圧力容器は設計破壊圧力に対する安全係数が4以上の場合が該当する。

(2) 設計に係る適合審査時

胴板、鏡板、および配管等の板厚算定結果の資料を提出することで、3項「設計」で要求される以下の審査項目を免除できる。

- 3.5.1 応力解析
- 3.5.2 LBB成立の判定(解析、および試験)
- 3.5.3 疲労損傷解析、および試験
- 3.5.4 き裂進展解析、および試験

また、配管類には、4項「製造」で要求される以下の審査項目は適用しない。

- 4.7.2(3) 非破壊検査

(3) 製造に係る適合審査時

以下の資料を提出することで、4項「製造」で要求されるほかの審査項目を免除できる。

- a. 使用した金属材料のミルシート、複合材・非金属材料の検査成績書等
- b. 最大予想使用圧力の1.5倍以上の耐圧試験結果
- c. 最大予想使用圧力以上の気密試験結果
- d. 溶接部の非破壊検査結果

(4) 認定試験

5.2の認定試験を免除できる。ただし、耐環境性、および劣化モード等の評価が必要な場合には、必要な認定試験を実施する。

2.2.2 既に認定試験が終了しているもの

(1) 該当条件

機構旧組織(NASDA、ISAS、NAL)、NASA、およびESA等の各機関で個別プロジェクトの人工衛星、またはロケット等に用いるために開発されたもの、他の宇宙機向けに開発され、本技術基準により設計適合審査を受け適合証が発行されたもの、または米国、欧州等の射場における安全審査に合格しているもので、既に認定試験が完了している機器(以下「既認定品」という。)が該当する。

既認定品は、以下の3とおりが考えられる。

- a. 同一設計で、新たに製作する。
- b. 既に製作されている機器を流用する。
- c. 強度に影響のない軽微な設計変更を施して製作する。

(2) 設計に係る適合審査時

以下の項目を確認した資料を提出することで、3項「設計」で要求されるほかの審査項目を免除できる。

- a. 機器の使用条件(圧力、温度、振動等)が、機器開発時に認定された使用条件を越えていないこと。
- b. 機器認定時の設計計算書の内容と本技術基準の規定内容とを照合し、本技術基準の要求を満足していること。
- c. 本技術基準の要求項目に対して、機器認定時の設計解析項目が抜けている場合は、本技術基準に従い解析すること。

(3) 製造に係る適合審査時

既に製作されている機器を流用する場合は、検査成績書(ミルシート、耐圧試験、気密試験、非破壊検査、寸法(板厚)検査等)を提出することで、4項「製造」で要求されるほかの審査項目を免除できる。

2.2.3 購入品等**(1) 該当条件**

製品カタログ、または製品仕様書等があり、型番等を指定して購入するもので、以下のa.~d.の条件が製品カタログ、技術資料、または製品仕様書等で説明できること。

- a. 機器の使用条件が使用可能範囲内であること。
- b. 認定試験相当が実施されていること。
- c. 製品の安全係数が、降伏応力に対して1.5以上、引張強度に対して2.5以上であること。
- d. 地上、または宇宙での使用実績があること。

(2) 設計に係る適合審査時

(1)該当条件を示す資料を提出することで、以下の項目を除いて、3項「設計」で要求されるほかの審査項目を免除できる。ただし、配管の場合には、2.2.1(2)項の資料を提出すること。

- 3.1.3.1 圧力に対する安全係数
- 3.1.5(3) 作動サイクル、変位サイクルの寿命要求

また、4項「製造」で要求される以下の審査項目は適用しない。

- 4.1 加工、成形
- 4.2 溶接
- 4.3 熱処理
- 4.7.1 材料受入検査
- 4.7.2 部品検査(金属材料)
- 4.7.3 溶接部検査

(3) 製造に係る適合審査時

検査成績書(耐圧試験、気密試験、および作動試験等)、または受入検査規定による検査合格証を提出することで、4項「製造」で要求されるほかの審査項目を免除できる。ただし、配管の場合には、2.2.1(3)項の資料を提出すること。

2.2.4 他の技術基準で適合が認証された宇宙用高圧ガス機器

次の(1)～(3)の基準を適用して設計され、適合が認証された高圧ガス機器のフライト品については、以下のa～cの書類、およびd, eの項目の説明資料を提出することで本技術基準に適合しているとみなす。

- a. 機器の設計が(1)～(3)の基準の要求事項に適合していることを示す認証機関^{注1)}が発行する適合証明書（以下「設計適合証明書」という）
ただし、設計適合証明書は同型品に対する米国・欧州等の射場における安全審査のエビデンスで代替することができる。
- b. フライト品が(1)～(3)の基準の要求事項に適合して製造されたことを示す高圧ガス機器製造者が発行する適合証明書（以下、「製造適合証明書」という）
- c. 本技術基準との適合審査を機構に対して依頼する者が製造適合証明書の内容に同意することを示す書類（以下、「同意書」という）
- d. 使用条件（最大予想使用圧力、寿命等）、設計条件（安全係数等）、開発試験、認定試験
- e. フライト品の材料証明^{注2、3)}、寸法検査^{注2、4)}、非破壊検査^{注3)}、耐圧・気密試験、加圧サイクル残寿命^{注5)}

- (1) ISO 14623 “Space systems - Pressure vessels and pressurized structures - Design and operation”
- (2) 容器保安規則関係の例示基準
- (3) その他同等の内容を持つと認められる基準（MIL-STD-1522A 等）

注1) 認証機関とは、NASA、ESA等の政府機関、KHK等の公的な第三者機関、および公的な第三者機関から認定された民間の認証機関をいう。

注2) 提出できない場合には、その理由を示すこと。

注3) 2.2.3(1)項「該当条件」を満足する弁類等の購入品は除く。

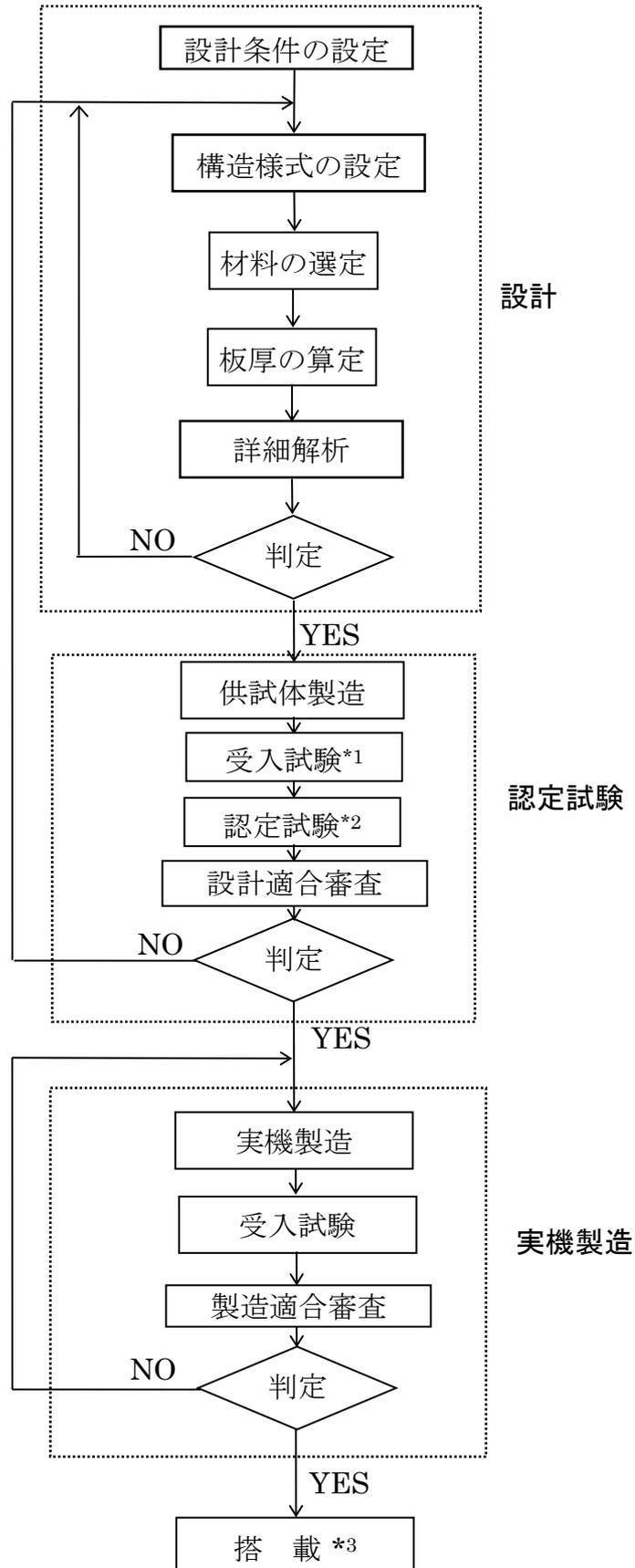
注4) 2.2.1(1)項「該当条件」を満足する配管類、および2.2.3(1)項「該当条件」を満足する購入品等は除く。

注5) 圧力容器に限る。

2.3 特例処理

本技術基準の規定を満足しない場合は、特例処理を行い、設計または製造に係る本技術基準との適合審査時に特例報告書を提出すること。報告書には、本技術基準の規定を満足しない理由と代替方策、および安全性等を保証する根拠について、その検討内容を示すこと。報告書の内容が妥当であると確認できた場合に限り、本技術基準の当該部分の適合審査を免除する。

なお、報告方法は、技術資料CSA-115016「宇宙用高圧ガス機器技術基準適合審査特例処理方法について」によること。



*1:認定試験の一環として実機製造後に行う受入試験と同じ内容の試験を実施すること。

*2:認定試験に先立ち、開発試験(材料基礎試験、溶接施工方法の決定、および確認、試作試験)を実施してもよい。

*3:打上げまでに不具合が発生し、機器を交換した場合、再審査を行う。

図2-1 宇宙用高圧ガス機器の開発フロー

3. 設計

3.1 設計条件の設定

3.1.1 機能性能要求

高压ガス機器は、製造から予定のフライト回数の完了までの、圧力、荷重、温度等の環境条件に耐え、さらにシステムからの機能性能要求を満足すること。

3.1.2 荷重、および温度条件

高压ガス機器の荷重条件は、以下に示すような荷重履歴を考慮すること。

製造試験時	耐圧試験圧力
	保証試験圧力(欠陥検出圧力試験)(実施の場合)
	気密試験圧力
地上取扱時	輸送時荷重
	組立時荷重
	気密試験圧力
	地上風荷重
	推進薬充填試験荷重
	燃焼試験時荷重
	極低温点検時荷重
フライト時	フライト時荷重

3.1.2.1 最大予想使用圧力(制限圧力)

高压ガス機器に対して、最大予想使用圧力(ロケット推進薬タンクについては制限圧力という。)を設定すること。

最大予想使用圧力の設定に当たっては、製造から予定のフライト回数の完了までにさらされるすべての圧力条件を考慮すること。

圧力分布の時間的履歴の包絡値を求め、最大圧力を最大予想使用圧力(制限圧力)とすること。そのため、製造試験(耐圧試験、保証試験を除く)、地上取扱時、フライト時の圧力を考慮すること。

(1) ロケット推進薬タンクに対する制限圧力

推進薬充填、およびフライト時には、アレッジ部加圧圧力に加え加速度により生じる推進薬の水頭圧を考慮すること。フライト時加速度は、機軸方向の静的な加速度と低周波振動による動的な加速度を考慮して設定すること。低周波振動には、ロケット推進薬のスロッシング、POGO、ロケットエンジン着火時の過渡応答、突風による過渡応答等を考慮すること。

- 最大予想使用圧力(制限圧力)=アレッジ部最大加圧圧力+水頭圧
ロケット推進薬タンクでは、各機軸方向位置に対する最大圧力を制限圧力とする。
アレッジ部最大加圧圧力は、以下を考慮して設定すること。
 - ① 公称使用圧力
 - ② 圧力制御幅
 - ③ 圧力のオーバーシュート
 - ④ 圧力計測誤差
 - ⑤ ベントバルブ作動時圧力
 - ⑥ ベントバルブ作動時の配管の圧力損失
 - ⑦ 周囲大気圧
 - ⑧ その他

- 水頭圧＝推進薬密度×フライト時機軸方向加速度×液面高さ

(2) **ロケット推進薬タンク以外の高圧ガス機器に対する最大予想使用圧力**

フライト時の加圧圧力に加えて加速度により生じる圧力増加を考慮すること。
ただし、加圧圧力に比較し、圧力増加が小さいときは無視することができる。

(3) **低温用推進薬タンク等の常温補正圧力**

低温用推進薬タンク等を常温で加圧する場合は、下式のように制限圧力を設計温度での材料の降伏応力と常温での降伏応力との比で補正した圧力以下で加圧すること。

$$\text{常温時加圧圧力} \leq (\text{制限圧力})_{\text{設計温度}} \times \frac{(\text{降伏応力})_{\text{常温}}}{(\text{降伏応力})_{\text{設計温度}}}$$

低温用推進薬タンク等の常温での設計破壊圧力は、下式のように設計温度での材料の引張強度と常温での引張強度との比で補正すること。

$$\text{常温時の設計破壊圧力} = (\text{設計破壊圧力})_{\text{設計温度}} \times \frac{(\text{引張強度})_{\text{常温}}}{(\text{引張強度})_{\text{設計温度}}}$$

3.1.2.2 フライト時の荷重

高圧ガス機器は、フライト時に圧力荷重に加えてフライト荷重(外荷重)を受ける。フライト荷重は、フライト中のある時刻における以下の荷重等を考慮すること。

フライト荷重は、上位システムから与えられるものとし、荷重、およびその解析手法の妥当性判定基準は、本技術基準では取り扱わない。

(1) **ロケット推進薬タンク**

機軸方向圧縮荷重の例

- ① ロケットエンジン推力
- ② ロケット構体の機軸方向慣性力
- ③ ペイロードの慣性力
- ④ 空気抵抗(抗力)
- ⑤ 低周波振動応答による荷重

機軸と直角方向のせん断力の例

- ① 迎え角をとるフライト時の空気力
- ② 突風による空気力
- ③ エンジン推力の機軸と直角方向成分(操舵時)
- ④ ロケット構体の機軸と直角方向の慣性力
- ⑤ 低周波振動応答による荷重

曲げモーメントの例

機軸と直角方向のせん断力分布により発生するモーメント

風向、風速、その他分散のあるパラメータは、分散を考慮して厳しい側にとること。
参考例として、H-IIロケットのフライト時の荷重を図3.1.2-1に示す。

(2) **ロケット推進薬タンク以外の高圧ガス機器**

ロケット推進薬タンク以外の高圧ガス機器は、以下のフライト時の加速度、環境を考慮すること。

a. **準静的加速度**

ロケット打上げ時に、高圧ガス機器の重心に作用するロケット機軸方向、機軸直角

方向の静的加速度と振動荷重の和で規定すること。

b. 正弦波振動加速度

ロケット打上げ時、第1段、第2段等の燃焼の終了時等に、ロケット本体から伝えられる過渡応答や自励振動を正弦波振動条件に置き換えて規定すること。

c. 音響環境、ランダム振動環境

ロケット打上げ時の音響、遷音速時の空力変動によるランダム振動応答で、ロケット／衛星への取付面でのランダム振動条件、または搭載機器に直接加わる音の強さである音響振動条件のいずれかで規定すること。搭載機器が小型、または質量対体積比が大きい場合には、境界条件の違いにより等価とみなせないことがあるため注意すること。

d. 衝撃環境

火工品を用いた保持解放機構等の作動時に、火工品の点火、拘束の衝撃弛緩、可動部の衝突等による衝撃が生じる。衝撃値は応答スペクトルによるフーリエスペクトル、または衝撃応答スペクトルで規定すること。

3.1.2.3 地上取扱時の荷重

ロケット推進薬タンクについては、地上取扱時の圧力荷重に加えて地上取扱荷重を受ける。地上取扱荷重は以下の荷重を考慮すること。

機軸方向圧縮荷重の例

- ① ロケット構体の機軸方向荷重
- ② ペイロードの質量

機軸と直角方向のせん断力の例

- ① 地上風による空気力
- ② 輸送時に発生する静荷重
- ③ 輸送時の低周波振動荷重

曲げモーメントの例

機軸と直角方向のせん断力分布により発生するモーメント

ロケット推進薬タンク以外の高圧ガス機器については、地上取扱荷重はフライト荷重に比較して小さくなるようにすること。

地上取扱時の荷重設定において、作業者の安全性、および荷重の不確定性を考慮し、計算値に荷重に対する特別係数を乗じること。特別係数は1.06以上とする。

地上取扱時の荷重は、上位システムから与えられるものとし、荷重、およびその解析手法の妥当性判定基準は、本技術基準では取り扱わない。

3.1.2.4 温度条件

高圧ガス機器は、予定のフライト回数が完了するまでにさらされるすべての温度条件を考慮して設計温度を設定すること。そのためには、製造試験時、地上取扱時、およびフライト時の温度を考慮すること。使用材料のクリープが問題となるような高温の温度条件は本基準では含めない。

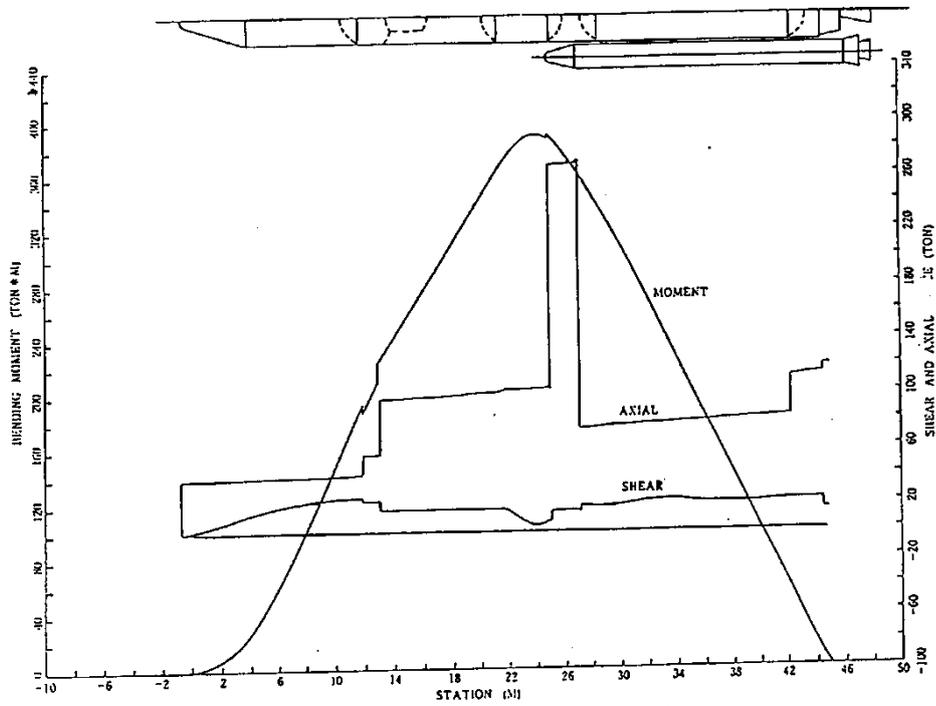


図3.1.2-1 H-II ロケットの飛行時制限荷重(参考例)

3.1.3 安全係数の定義

高压ガス機器の安全係数を以下に示す。

3.1.3.1 圧力に対する安全係数

金属高压ガス機器については、材料強度に対する安全係数として表3.1.3-1に規定する。複合圧力容器については、設計破壊圧力に対する安全係数として表3.1.3-2に規定する。

表3.1.3-1 金属高压ガス機器の材料強度に対する安全係数

番号	構造区分	安全係数		条件 (注記1)
		降伏応力(σ_y)*	引張強度(σ_u)	
1	圧力容器	1.5以上	2.0以上	人員接近可
2	圧力容器	$\frac{1+(\text{引張強度に対する安全係数})}{2}$ 以上	1.5以上 2.0未満	人員接近不可 (注記2)
3	圧力配管、フィッティング (直径38.1mm以上)	1.5以上	2.5以上	人員接近可 (注記3)
4	圧力配管、フィッティング (直径38.1mm未満)	1.5以上	4.0以上	人員接近可 (注記3)
5	ベローズ	1.0以上	1.5以上	人員接近不可 (注記2)
6	ベローズ	1.5以上	2.5以上	人員接近可
7	その他のコンポーネント	1.5以上	2.5以上	人員接近可 (注記3)
8	ロケット推進薬タンク	1.0以上	1.25以上	人員接近不可

*：または0.2%耐力(以下、「降伏応力」という。)

表3.1.3-2 複合圧力容器の設計破壊圧力に対する安全係数

番号	安全係数	条件 (注記1、4)
1	2.0以上	人員接近可
2	1.5以上 2.0未満	人員接近不可 (注記2)

注記1：最大予想使用圧力を負荷した時の、静定時の人員接近可否について示す。

ただし、設計破壊圧力の4分の1以下の圧力を負荷するときには、常時人員接近可とする。

注記2：LBB成立の場合は、人員接近可とする。ただし、LBB不成立の場合は、圧力容器に設計破壊圧力の2分の1以下の圧力を負荷するときには、圧力が静定した後に人員接近可とする。

注記3：圧力配管、フィッティング、およびその他のコンポーネントが上記の安全係数を満足できない場合には圧力容器として扱う。

注記4：500L以下であり、認定試験時にライナの母材（非金属ライナを除く）および溶接部の引張試験を実施している場合は、下記の圧力を負荷するときには常時人員接近可とする。

炭素繊維複合圧力容器：設計破壊圧力の2.25分の1以下

アラミド繊維複合圧力容器：設計破壊圧力の3分の1以下

ガラス繊維複合圧力容器：設計破壊圧力の3.5分の1以下

3.1.3.2 フライト時の安全係数

金属高圧ガス機器については、材料強度に対する安全係数として表3.1.3-3に規定する。

複合圧力容器については、降伏応力(金属ライナ)、および終極荷重に対する安全係数として表3.1.3-4に規定する。

この場合の複合荷重は、圧力荷重とフライトに起因する荷重(3.1.2.2フライト時の荷重)とが複合したものの。

表3.1.3-3 金属高圧ガス機器のフライト時の材料強度に対する安全係数

構造区分	安全係数	
	降伏応力(σ_y)	引張強度(σ_u)
金属高圧ガス機器	1.00以上	1.25以上

表3.1.3-4 複合圧力容器のフライト時の降伏応力(金属ライナ)、および終極荷重に対する安全係数

構造区分	安全係数	
	降伏応力(金属ライナ) (注記1)	終極荷重
複合圧力機器	1.00以上	1.25以上

注記1 実使用時に金属ライナが降伏しない設計の場合の安全係数。

3.1.3.3 座屈に対する安全係数

高圧ガス機器で座屈を考慮する必要がある場合は、座屈に対する安全係数として、表3.1.3-1～4の、引張強度、設計破壊圧力、または終極荷重に対する安全係数を用いること。

3.1.3.4 地上取扱時の安全係数(ロケット推進薬タンクのみ)

表3.1.3-1のロケット推進薬タンクの安全係数とする。

この場合の複合荷重は、圧力荷重と地上取扱に起因する荷重(3.1.2.3地上取扱時の荷重)とが複合したものの。

3.1.4 インタフェース条件

(1) システム側とのインタフェース

高圧ガス機器は、隣接する構造体、支持トラス、またはブラケットを介してロケット、または人工衛星システムに組み付けられること。インタフェース形状は、システム側から要求される環境条件(荷重、振動、衝撃、入熱等)に適したものを選定すること。

低温推進薬タンクの場合、空力加熱等による推進薬の温度上昇を許容値内とするために適切な断熱を行うこと。

(2) 艀装品とのインタフェース

高圧ガス機器は、推進薬供給配管、加圧配管、各種バルブ、バップル、温度センサ、圧力センサ等の推進系艀装品、ワイヤハーネス等の電気系艀装品、および火工品等を組み付けられること。インタフェース形状は、フランジ、ボス、またはブラケット等、艀装品に適したものを選定すること。

(3) 地上支援装置とのインタフェース

高圧ガス機器は、原則として液体、およびガスの充填、排出用の配管を有すること。インタフェース形状は、地上支援装置の配管を有すること。インタフェース形状は、地上支援装置の配管との着脱性、対漏洩性等を考慮し、適切なものを選定すること。

低温推進薬タンクの場合は、推進薬の蒸発損失を許容値内とするために適切な断熱を行うこと。

3.1.5 寿命要求

高圧ガス機器は、製造から予定のフライト回数の完了までを考慮し、適切に以下の要求寿命を設定すること。

(1) フライト回数

フライト回数を規定すること。

(2) 加圧サイクルの要求寿命

最初の耐圧試験以降運用終了までに圧力負荷回数（寿命要求）を設定すること。なお、再試験や打上げ延期等に備えた予備の負荷回数を考慮すること。

ただし、2.2.1項が適用される配管類には、圧力負荷回数の設定は要求しない。

(3) 作動サイクル、変位サイクルの寿命要求

電磁弁、注排弁等の作動機構を持つものは運用終了までの作動サイクル数、ベローズについては変位サイクル数（寿命要求）を設定すること。なお、再試験や打上げ延期等に備えた予備の作動回数を考慮すること。

3.2 構造様式の設定

3.2.1 金属圧力容器の構造様式

金属圧力容器は、推進薬、または加圧ガス等の流体を貯蔵し、圧力荷重を受けるシェル部分、ロケット、衛星等への結合のための取付部、および加圧ガス、推進薬の充填排出の配管部分で構成される。

シェル形状は、球、だ円体、円筒、円すい形等、およびこれらの組み合わせで種々の形態を取りうるが、容量、質量、艤装性等を考慮し選定すること。

取付部形状は、ロケット、衛星への取付コンフィギュレーションに従い選定すること。図3.2-1に構造様式の例を示す。

3.2.2 ロケット推進薬タンクの構造様式

ロケット推進薬タンクの構造は、一般には円筒部(シリンダ部)と鏡板部(ドーム部)から構成される。その他は隣接構造との結合用のフランジ、タンク内部アクセス用の蓋、推進薬、加圧ガス等の流体の充填、排出孔、各種艤装品類の取付部を有する。

円筒部は、各種荷重に対する強度(内部荷重、フライト時や地上取扱い時に機体に作用する外荷重)、製造性、取扱い性等を考慮して構造様式を選定すること。

鏡板部についても、作用する荷重(内圧荷重、エンジン推力、慣性力等の外荷重の円筒部への伝達)、製造性、質量等を考慮して構造様式を選定すること。

鏡板部の形状としては、球形シェル、だ円体シェル等各種形状がある。その他、タンクを1つの鏡板で仕切った共通隔壁型のタンクがある。

以上のロケット推進薬タンクの構造様式については、機体全長、機体質量に影響する事項であるため、機体全体のシステム設計の際に検討を行い、基本的な仕様を設定すること。図3.2-2に構造様式の例を示す。

3.2.3 複合圧力容器の構造様式

複合圧力容器は、内側にライナ、外側をフィラメントワインディング層の2層構造をもつ圧力容器である。ライナには金属ライナと非金属ライナ(プラスチック、ゴム等)がある。金属ライナ、および非金属ライナの機能は気密性を保持することである。本技術基準で規定する金属ライナについては圧力荷重を分担し、非金属ライナについては圧力荷重を分担しないものとする。

金属ライナに圧縮応力を導入するために複合材の成形完了後に内圧負荷によって金属ライナに塑性変形処理を施してもよい。塑性変形処理圧力は耐圧試験圧力の100～110%程度を目安とする。

(1) 球形複合圧力容器

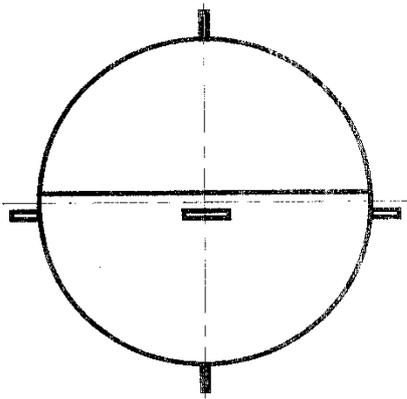
球形の複合圧力容器は、球形のライナ、インプレックス巻きのフィラメントワインディング層で構成される。ポート部形状、容器直径等の幾何学的形状や、ライナの材質、外部荷重の支持方法などを考慮し、巻き付け総数、巻き付け仰角、巻き付けピッチ等を選定すること。図3.2-3に構造様式の例を示す。

(2) 円筒形複合圧力容器

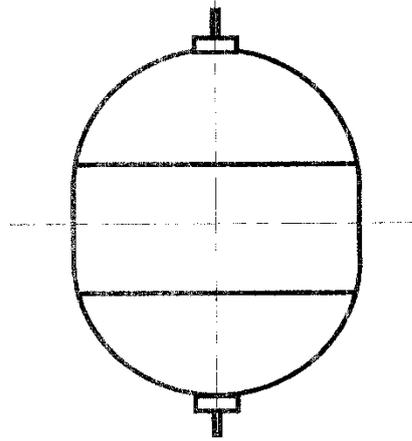
円筒形の複合圧力容器は、ライナ、胴部-鏡部一体補強フィラメントワインディング層、胴部補強フープ層で構成した構造（フルラップ構造）、または金属圧力容器に対してフープ層により胴部だけを補強した構造（フープラップ構造）とすること。

フィラメントワインディングには、インプレックス巻き、ヘリカル巻き、フープ巻きがある。それぞれの巻き方の概要を図3.2-4に示す。また、フープラップ構造の概要を図3.2-5に示す。口金形状、容器直径、容器長さ、フープ層端部の位置などの幾何学的形状や、ライナ、または金属圧力容器の材質、外部荷重の支持方法などを考慮して、巻き付け方法をはじめとする容器の構造様式を決定すること。

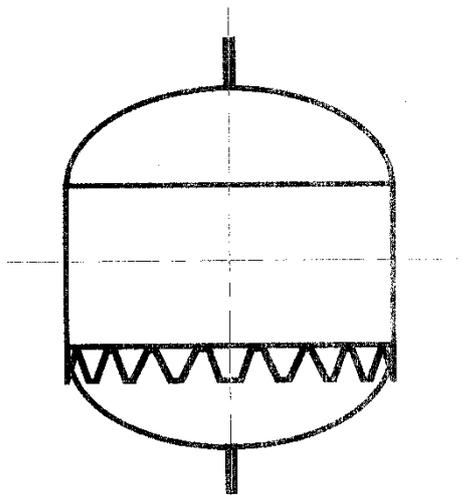
複合圧力容器の設計においては、構造様式を決定した後に破壊モードと破壊位置を特定することが望ましい。また、円筒部分が長い複合圧力容器は、応力状態が把握しやすい胴部を設計評定部とすることが望ましい。



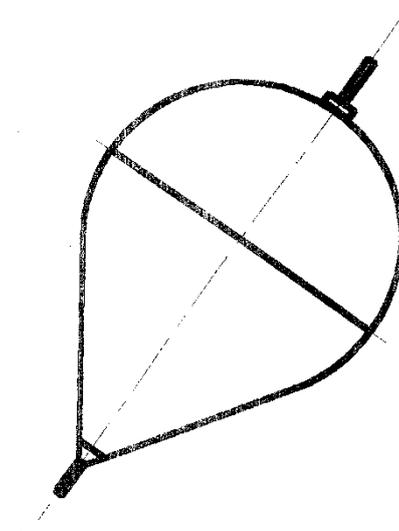
球形容器



円筒形容器 (球形ドーム)

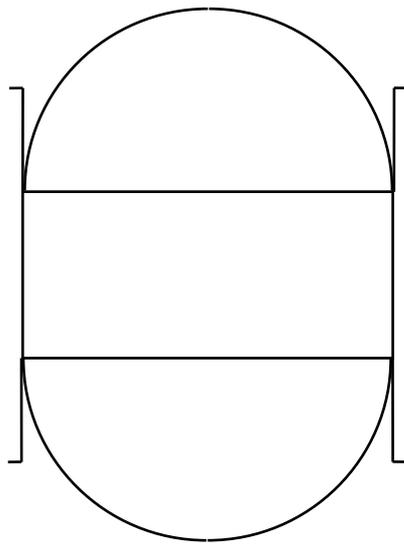


円筒形容器 (だ円ドーム)

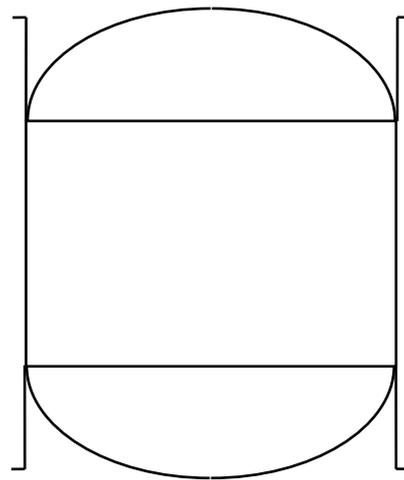


涙滴形容器

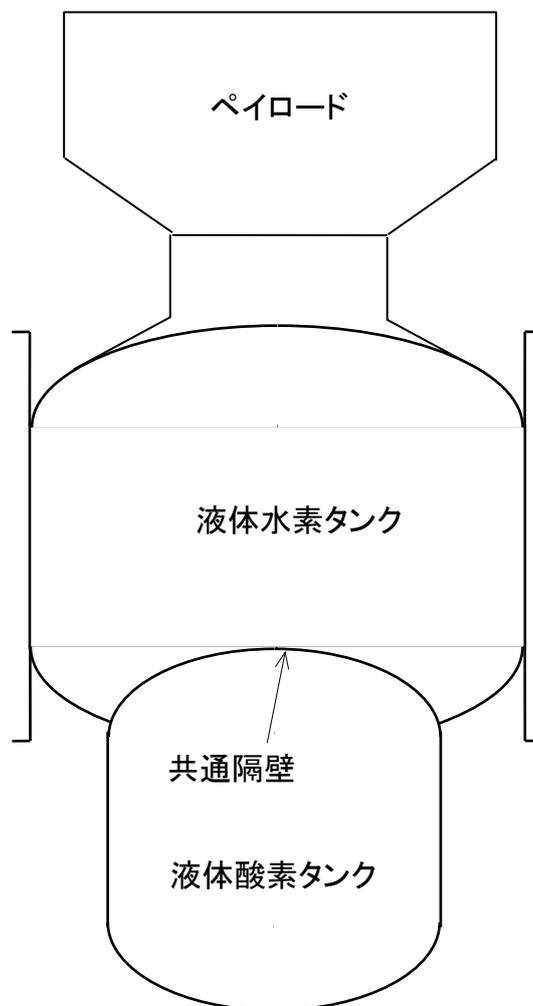
図3.2-1 金属圧力容器の構造様式の例



円筒形タンク(球形ドーム)



円筒形タンク(だ円ドーム)



共通隔壁を有するタンク
(H-II ロケット2段タンク)

図3.2-2 ロケット推進薬タンクの構造様式の例

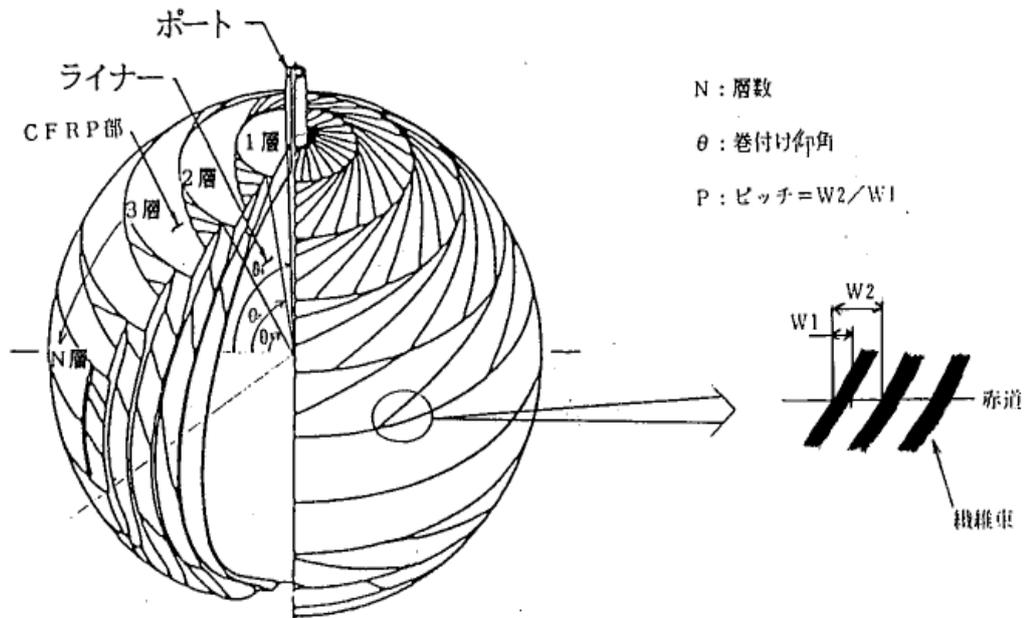
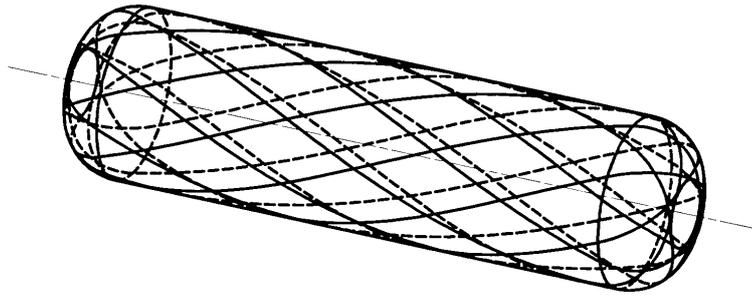
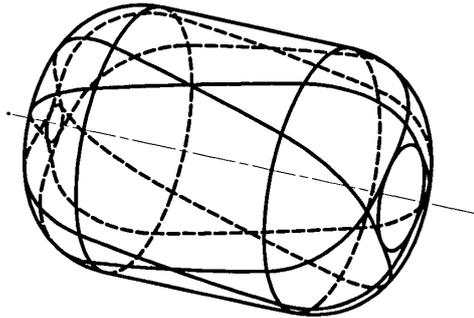


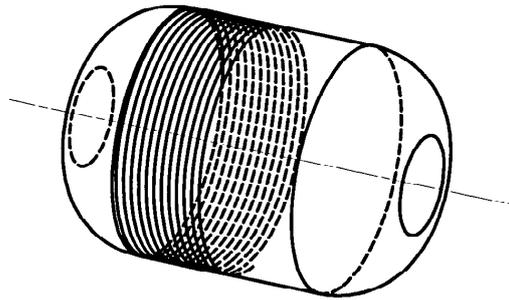
図3.2-3 球形複合圧力容器の構造様式の例



ヘリカル巻き



インプレメン巻き



フープ巻き

図3.2-4 フィラメントワインディング巻き方概要

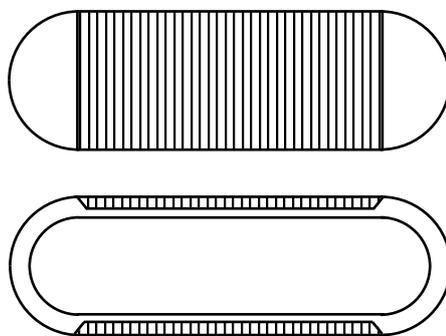


図3.2-5 フープラップ構造の例

3.3 材料の選定

高圧ガス機器を構成する材料は、3.2項「構造様式」並びに3.3.1項～3.3.4項の特性を考慮して選定すること。ただし、安全係数が3.5未満の高圧ガス機器に、下記の(1)、(2)、および(3)の規格以外の材料を使用する場合には、5.1.1項に示す材料基礎試験を実施すること。

- (1) AMS規格
- (2) MIL規格
- (3) FS規格

3.3.1 機械的特性

(1) 金属材料

使用する金属材料は、所定の材料強度を有し、その特性値に十分な信頼性を有すること。設計に使用する値は、MMPDSのA値相当とすること。機械的性質に影響を与える要素には、温度、負荷時間、負荷繰返し数等があり、さらに母材、および溶接部等の加工条件もあるため、これらを考慮して材料を選定すること。

ロケット推進薬タンクに使用する金属材料の降伏比は、終極状態が塑性崩壊となるように以下を満足すること。これを満足しない場合は、安全である根拠を示すこと。

$$\text{降伏比} = \frac{\text{降伏応力}}{\text{引張強度}} \leq 0.85$$

(2) 複合材

複合材は、フィラメントワインディング条件、硬化条件その他必要な条件、およびストレスラプチャ特性を考慮して材料を選定すること。

(3) 非金属ライナ

複合圧力容器のライナに使用する非金属材料は、使用温度条件のもとで複合材に比べ破断ひずみが大いこと。また、その特性値は十分な信頼性を有すること。

さらに形状、接合等の加工条件を考慮して材料を選定すること。

3.3.2 破壊特性

使用する材料は、作動環境条件のもとで繰返し荷重、および持続荷重による、割れの進展に対する適切な破壊特性を有するものであること。

非金属ライナに使用する材料は、繰返し荷重、および持続荷重による割れの進展に対する破壊靱性について考慮しなくてもよい。

3.3.3 適合性

使用する材料は、充填する液体等遭遇するあらゆる環境に対して腐食、応力腐食割れ等を生ずることなく良好な適合性を有すること。

(1) 充填流体との適合性

充填流体に接する材料は、高圧ガス機器内に充填する流体と適合し、高圧ガス機器材料の劣化、または充填流体の変質、分解等が促進されないこと。

なお、材料の選定に当たっては、NASA文書(SE-019-094-2H)によること。

複合圧力容器の複合材については、ライナにより充填流体に接触しない場合は、充填流体との適合性を考慮しなくてもよい。

(2) 外的環境に対する適合性

外的環境に露出されたとき、材料単独で、または適切な保護仕上げにより、その影響に耐えること。

特に複合圧力容器に使用する非金属材料は、金属材料と異なる以下の耐環境性を適正に考慮すること。

- a. アウトガス：アウトガスの発生が要求範囲内であること。
- b. 耐放射線性：軌道上で複合圧力容器がさらされる放射線環境において要求される耐放射線性を有すること。
- c. 耐透過性：作動環境条件のもとで気体、および充填流体に対し、要求される耐透過性を有すること。

(3) 使用流体との適合性

材料処理、加工、検査、試験、輸送、および保管中における工場用流体、試験用流体に対し、材料の汚染、劣化が生じてはならず、反応により有害物質を生成しないこと。

(4) 異種金属との適合性

金属を異なる種類の金属と接触させて使用する場合には、MIL-STD-889の要求に従い、異種金属間腐食の原因となることの少ない金属の組み合わせを選択すること。

(5) 複合材とライナとの適合性

複合圧力容器については複合材とライナは、ライナの腐食等の劣化を生じない組み合わせを選択するか、または適切な処置を施すこと。特に導電性の繊維を用いる場合は腐食を考慮すること。

3.3.4 製造性

使用する材料の選定に関して、製造性は重要な要素であり、その製造方法の検討では、所定の形状、性能、および品質を持った製品を作るために、必要な材料と製造方法を決定しなければならない。具体的には製造性等に対して以下の要求を満足すること。

(1) 品質、および入手性

使用する材料は、適切な品質と入手性を有すること。

(2) 成形、機械加工性

使用する材料は、要求される形状、寸法と適切な材料強度が確保できるように、成形、機械加工ができること。

複合圧力容器の非金属ライナの使用材料は、要求される形状、寸法と適切な破断伸びが確保できるように成形が可能なこと。

(3) 溶接性

製造工程に溶接工程のある場合、使用する材料は良好な溶接性を有すること。

(4) 複合材の成形性

複合圧力容器に使用する複合材は、要求される形状、寸法と適切な材料強度が確保できるように、フィラメントワインディング、加熱硬化が可能なこと。

3.4 板厚の算定

3.4.1 金属圧力容器の板厚の算定

板厚の算定は、以下に示す計算式により行う。他の式を使用する場合はその根拠、出典を明確にすること。

3.4.1.1 円筒胴の胴板

胴板の最小板厚が胴の内径の0.25以下となる場合

$$t = \frac{PD}{2S_m - 1.2P} \quad (3.4.1)$$

ここで、

- t : 最小板厚
- P : 最大予想使用圧力
- D : 胴の内径
- S_m : 設計応力強さ

$$S_m = \left(\frac{\text{材料の降伏応力}(\sigma_y)^*}{\text{降伏応力に対する安全係数}^{**}} \text{と} \frac{\text{材料の引張強度}(\sigma_u)^*}{\text{引張強度に対する安全係数}^{**}} \right) \text{のうち小さい方}$$

- * : 設計温度における値を使用する。ただし、低温で使用する材料で、低温での降伏応力、または引張強度が常温での降伏応力、または引張強度より大きい場合は、常温の降伏応力、または引張強度を使用してよい。溶接部については、4.2.1(2)項の増厚を考慮すること。

- ** : 表3.1.3-1に示す値で実際に用いる値とすること。

なお、配管に関しては、以下。

$$t = \frac{PD_o}{2S_m + 0.8P} \quad (3.4.1a)$$

ここで、

- D_o : 配管の外径

3.4.1.2 球形胴の胴板

胴板の最小板厚が胴の内径の0.178以下となる場合

$$t = \frac{PD}{4S_m - 0.4P} \quad (3.4.2)$$

3.4.1.3 円すい胴の胴板

$$t = \frac{PD}{2\cos\theta(S_m - 0.6P)} \quad (3.4.3)$$

ここで、

- D : 胴板の最小板厚を計算する各部分の内径で円すいの軸に対し直角に測ったもの
- θ : 円すいの頂角の2分の1の値。[°]

3.4.1.4 さら形鏡板、または全半球形鏡板

$$t = \frac{PRW}{2S_m - 0.2P} \quad (3.4.4)$$

ここで、

- R : さら形鏡板の中央部、または全半球鏡板の内半径
 W : さら形の形状に関する係数で、以下の算式により得られる数値
 (全半球形鏡板にあつては、1)

$$W = \frac{1}{4} \left(3 + \sqrt{\frac{R}{r_1}} \right)$$

ここで、

- r_1 : さら形鏡板のすみの丸みの内半径

3.4.1.5 半だ円体形鏡板

$$t = \frac{PDK}{2S_m - 0.2P} \quad (3.4.5)$$

ここで、

- D : 鏡板の内側のだ円体の長径
 K : 鏡板の形状によって定まる係数で、以下の算式によって得られる値

$$K = \frac{1}{6} \left(2 + \left(\frac{D}{2h} \right)^2 \right)$$

ここで、

- h : 鏡板の内側のだ円体の短径の2分の1の長さ

3.4.1.6 円すい体形鏡板

(1) 円すいの頂角が140度以下の鏡板の円すいの部分

$$t = \frac{PD}{2\cos\theta(S_m - 0.6P)} \quad (3.4.6a)$$

ここで、

- D : 鏡板の最小板厚を計算する各部分の内径で円すいの軸に対し直角に測ったもの
 θ : 円すいの頂角の2分の1の値。[°]

(2) 円すいの頂角が140度を超える鏡板の円すいの部分

上記(1)の算式により得られる値、または以下の算式により得られる値のいずれか小さい値に等しい最小板厚

$$t = 0.5(D_0 - r_2) \frac{\theta}{90} \sqrt{\frac{P}{S_m}} \quad (3.4.6b)$$

ここで、

- D_0 : 円すいの大径端における外径
 r_2 : 円すいの大径端に接続する丸みの内半径

3.4.2 ロケット推進薬タンクの板厚の算定

フライト時の荷重条件により板厚の算定を行う。算定された板厚は3.5項の「詳細解析」でフライト時と地上取扱時の双方について検証すること。

板厚の算定は以下に示す計算式により行うこと。他の式を使用した場合は、その根拠、出典を明確にしておくこと。

3.4.2.1 円筒部

軸方向の荷重の変化に応じて板厚は変化してよいが、任意の機軸方向位置で以下に示す円周方向応力から算定される板厚、および機軸方向から算定される板厚を下回らないこと。

なお、ワッフル、アイソグリッド等のリブ／フランジで補強された平板の場合は、リブ／フランジの効果を考慮した等価板厚(注1) を使用してよい。

注1：参考例としてアイソグリッド平板の等価板厚を図3.4.2-1に示す。

(1) 円周方向応力からの板厚の算定

3.4.1項(3.4.1)式によること。

ただし、

t : 板厚。アイソグリッド等の補強平板の場合は等価強度板厚を使用してよい。(図3.4.2-1参照)

(2) 機軸方向応力からの板厚の算定

推進薬タンク円筒部の機軸方向応力は、フライト時の曲げモーメントにより引張側と圧縮側が存在するため、各々の状態に対する以下の場合について、板厚の算定を行うこと。さらにフライト時の曲げモーメントの圧縮側応力については、強度、座屈強度の双方についての板厚算定を行うこと。

- ・ 曲げモーメントの引張側応力 — 強度に対する板厚算定 : a.項による。
- ・ 曲げモーメントの圧縮側応力 — 強度に対する板厚算定 : b.項による。
- └ 座屈応力に対する板厚算定 : c.項による。

ただし、曲げモーメントの引張側応力に対する板厚の算定で等価軸引張力($F_{eq,a}$)が圧縮となる場合、曲げモーメントの圧縮側応力に対する板厚の算定で等価軸圧縮力($F_{eq,b}$)が引張となる場合の板厚の算定は不要とする。

a. フライト時の曲げモーメントの引張側応力に対する板厚の算定

$$t = \frac{(F_{eq})_a}{\pi D S_m} \quad (3.4.7)$$

$$(F_{eq})_a = -F + \frac{4M}{D} + \frac{\pi D^2 P}{4}$$

ここで、

$(F_{eq})_a$: 圧力荷重を考慮した等価軸引張力の時間履歴の最大値

t : 板厚。アイソグリッド等の補強平板の場合は、等価強度板厚を使用してよい。(図3.4.2-1参照)

D : 内径

F : 軸方向圧縮力

M : 曲げモーメント

P : 圧力

S_m : 設計応力強さ

$$S_m = \left(\frac{\text{材料の降伏応力}(\sigma_y)^*}{\text{降伏応力に対する安全係数}^{**}} \text{と} \frac{\text{材料の引張強度}(\sigma_u)^*}{\text{引張強度に対する安全係数}^{**}} \right) \text{のうち小さい方}$$

* : 設計温度における値を使用する。ただし、低温で使用する材料で、低温での降伏応力、または引張強度が常温での降伏応力、または引張強度より大きい場合は、常温の降伏応力、または引張強度を使用してよい。溶接部については、4.2.1(2)項の増厚を考慮すること。

** : 表3.1.3-1に示す値で実際に用いる値とすること。

b. フライト時の曲げモーメントの圧縮側応力に対する板厚の算定

$$t = \frac{(F_{eq})_b}{\pi D S_m} \quad (3.4.8)$$

$$(F_{eq})_b = F + \frac{4M}{D} - \frac{\pi D^2 P}{4}$$

ここで、

$(F_{eq})_b$: 圧力荷重を考慮した等価軸圧縮力の時間履歴の最大値

t : 板厚。アイソグリッド等の補強平板の場合は、等価強度板厚を使用してよい。(図3.4.2-1参照)

D : 内径

F : 軸方向圧縮力

M : 曲げモーメント

P : 圧力

S_m : 設計応力強さ

c. フライト時の座屈に対する板厚の算定

$$t_b = \frac{(F_{eq})_b}{\pi DS_b} \quad (3.4.9)$$

$$S_b = \frac{\sigma_{cr}}{\text{安全係数}^*}$$

$$\sigma_{cr} = \frac{\gamma}{\{3(1-\nu^2)\}^{1/2}} E \frac{2t}{D}$$

ここで、

t_b : フライト時の座屈に対する板厚の算定値

$(F_{eq})_b$: 圧力荷重を考慮した等価軸圧縮力の時間履歴の最大値
(b.項で使用した式と同じ。)

P : 圧力

S_b : 座屈強さ

t : 板厚。アイソグリッド等の補強平板の場合は、等価強度板厚を使用
してよい。等価剛性板厚を使用する場合は、等価縦弾性係数と同時
に使用すること。(図3.4.2-1参照)

σ_{cr} : 座屈応力

D : 内径

ν : ポアソン比

E : 縦弾性係数。アイソグリッド等の補強平板の場合は、等価縦弾性係
数を使用してよい。等価縦弾性係数を使用する場合は、等価剛性板
厚と同時に使用すること。

γ : 製作時の初期不整、残留応力によって座屈応力が理論値よりも減少
することに対する修正係数($\gamma < 1$)。試験結果、解析結果、文献等に
基づき設定し、出典を明確にすること。

* : 3.1.3.3項に示す座屈に対する安全係数

3.4.2.2 鏡板(ドーム部)

フライト時の内圧荷重に対する板厚算定を行う。鏡板は算定される板厚を下回らないこと。鏡板でペイロード荷重を受ける場合、共通隔壁構造で逆圧を受ける場合等は、3.5項「詳細解析」で強度(座屈を含む)を確認すること。

(1) さらに形鏡板、全半球形鏡板

さらに形鏡板の場合は単一半径の中央部についてのみ適用し、すみの丸みの部分は、3.5項「詳細解析」で強度を確認すること。

$$t = \frac{PR}{2S_m - 0.2P} \quad (3.4.10)$$

P : 制限圧力

t : 最小板厚

R : さらに形鏡板の中央部、または全半球鏡板の内半径

S_m : 設計応力強さ

$$S_m = \left(\frac{\text{材料の降伏応力}(\sigma_y)^*}{\text{降伏応力に対する安全係数}^{**}} \text{と} \frac{\text{材料の引張強度}(\sigma_u)^*}{\text{引張強度に対する安全係数}^{**}} \right) \text{のうち小さい方}$$

* : 設計温度における値を使用する。ただし、低温で使用する材料で、低温での降伏応力、または引張強度が常温での降伏応力、または引張強度より大きい場合は、常温の降伏応力、または引張強度を使用してよい。溶接部については、4.2.1(2)項の増厚を考慮すること。

** : 表3.1.3-1に示す値で実際に用いる値とすること。

(2) だ円体鏡板

$$t = \left[\frac{N_\phi}{S_m} \text{と} \frac{N_\theta}{S_m} \text{のうち大きい方} \right] \quad (3.4.11)$$

$$\frac{N_\phi}{aP} = \frac{a}{2b} \left[1 - \left(\frac{R}{a} \right)^2 \left\{ 1 - \left(\frac{b}{a} \right)^2 \right\} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\frac{N_\theta}{aP} = \frac{N_\phi}{aP} \left[2 - \frac{1}{1 - \left(\frac{R}{a} \right)^2 \left\{ 1 - \left(\frac{b}{a} \right)^2 \right\}} \right]$$

図3.4.2-2は上記式の関係、および形状の定義を図示したものである。

ここで、

t : 板厚

N_ϕ : 経線方向の単位長さ当たりの荷重

N_θ : 円周方向の単位長さ当たりの荷重

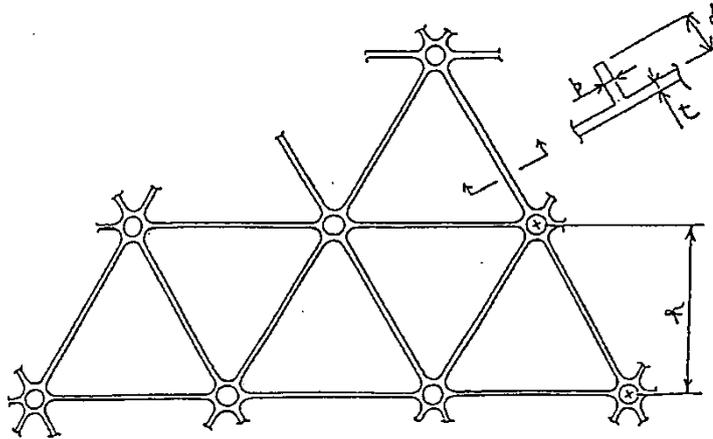
a : だ円体の長半径

b : だ円体の短半径

R : 中心軸からの距離

P : 制限圧力

S_m : 設計応力強さ((1)項を適用する。)



無次元パラメター

$$\alpha = \frac{bd}{th}$$

$$\delta = \frac{d}{t}$$

$$\beta = [3\alpha(1+\delta)^2 + (1+\alpha)(1+\alpha\delta^2)]^{1/2}$$

等価強度板厚

$$t_{\text{eff}} = t(1+\alpha)$$

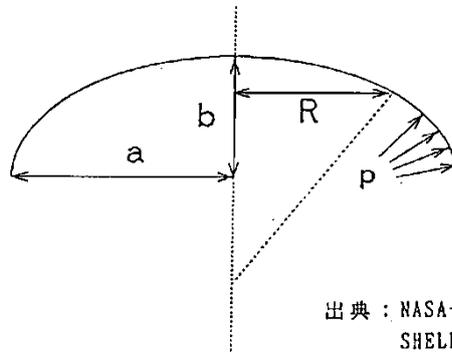
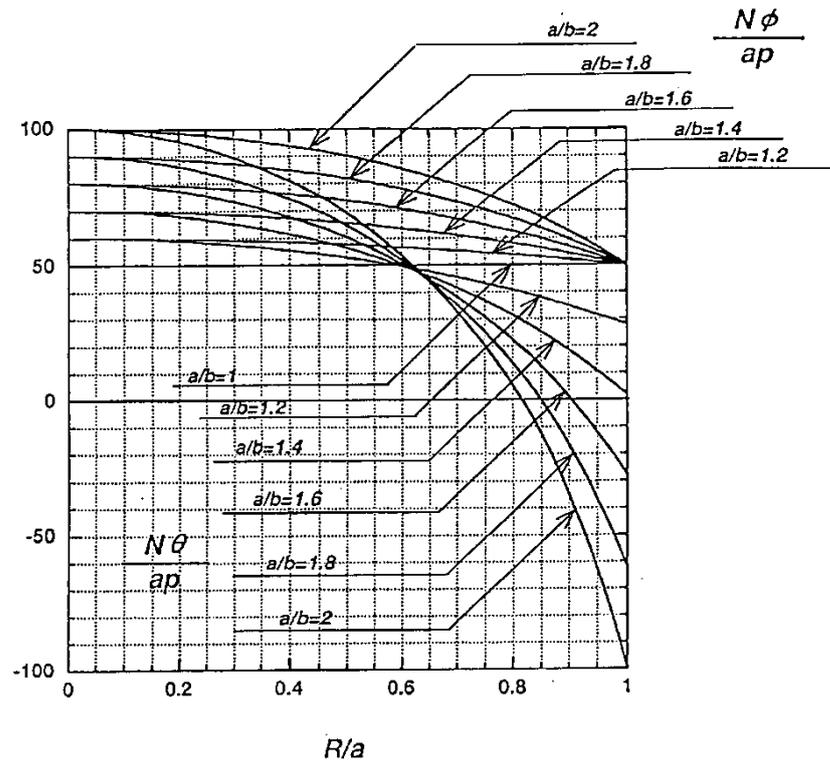
等価剛性板厚 / 等価縦弾性係数

$$t^* = t \frac{\beta}{1+\alpha}$$

$$E^* = E_0 \frac{(1+\alpha)^2}{\beta}$$

出典 : NASA-CR-124075
ISOGRID DESIGN HANDBOOK

図3.4.2-1 アイソグリッド平板の等価板厚(参考例)



出典：NASA-CR 912
SHELL ANALYSIS MANUAL

図3.4.2-2 だ円体鏡板の内圧による荷重分布

3.4.3 複合圧力容器の板厚の算定

複合圧力容器の板厚の算定フローを図3.4.3-1に示す。板厚の算定に用いた式を明確にすること。金属ライナを有する複合圧力容器についての板厚の算定の例を以下に示す。

3.4.3.1 板厚の算定

3.4.3.1.1 球形複合圧力容器

球形の複合圧力容器の複合材部は、疑似等方性材料であると仮定した場合の板厚算定式を以下に例示する。(ポアソン比の効果を見捨てる。)

$$t_c = \frac{(1-k_m) \cdot P_B \cdot R}{E_c \cdot \varepsilon_B} \quad (3.4.12)$$

ここで

- t_c : 疑似等方性を仮定した場合の複合材板厚
- k_m : 金属ライナの圧力分担比
- P_B : 設計破壊圧力
- R : 容器半径
- E_c : 複合材繊維方向弾性係数
- ε_B : 設計破壊圧力での繊維方向ひずみ(破断ひずみ)

つぎに、金属ライナの板厚を以下の式で計算する。

$$t_m = \frac{k_m \cdot P_B \cdot R}{2 \cdot S_{my}} \quad (3.4.13)$$

ここで

- t_m : 金属ライナ板厚
- S_{my} : 金属ライナの降伏応力

3.4.3.1.2 円筒形複合圧力容器(フープラップ構造の容器を除く)

(1) 胴部板厚算定からアプローチする場合

胴部板厚を第一に算定し、その後に鏡部板厚を算定する場合について本項で例示する。

a. 胴部板厚の算定

まず、容器形状から巻き方を検討し、ヘリカル巻き層(またはインプレックス巻き層)の角度 θ を設定すること。以下の式により、ヘリカル巻き層(またはインプレックス巻き層)、金属ライナの板厚を算定すること。

$$k = \frac{\varepsilon_{LP\theta}}{\varepsilon_{my}} = \frac{E_m \varepsilon_{LP\theta}}{(1 - \nu_m) S_{my}} \quad (3.4.14)$$

$$t_\theta = \frac{(P_B - P_P) D}{4 E_L \cos^2 \theta (\varepsilon_{LB\theta} - k \varepsilon_{my})} \quad (3.4.15)$$

$$t_m = \frac{(P_B \varepsilon_{LP\theta} - P_P \varepsilon_{LB\theta}) D}{4 (\varepsilon_{LP\theta} - \varepsilon_{LB\theta}) S_{my}} \quad (3.4.16)$$

ここで、

- k : 塑性変形処理時の金属ライナひずみ(塑性変形処理時の繊維ひずみ)と金属ライナ降伏時のひずみの比
(金属ライナ、および繊維の材料特性に依存する。例：k=2~3)
- P_B : 設計破壊圧力
- P_P : 塑性変形処理圧力
- D : 容器直径
- S_{my} : 金属ライナ降伏応力
- t_m : 金属ライナ板厚
- t_θ : ヘリカル巻き層(またはインプレックス巻き層)板厚
- E_L : 複合材の繊維方向弾性係数
- E_m : 金属ライナ縦弾性係数
- ν_m : 金属ライナのポアソン比
- $\varepsilon_{LB\theta}$: 設計破壊圧力でのヘリカル巻き層(またはインプレックス巻き層)の複合材の繊維方向ひずみ
- $\varepsilon_{LP\theta}$: 塑性変形処理圧力でのヘリカル巻き層(またはインプレックス巻き層)の複合材の繊維方向ひずみ
- ε_{my} : 金属ライナ降伏ひずみ
- θ : ヘリカル巻き層(またはインプレックス巻き層)の角度

次にフープ巻き層の板厚を以下の式で算定すること。

$$t_h = \frac{\frac{P_B D}{2} - S_{my} t_m - E_L \varepsilon_{LB\theta} t_\theta \sin^2 \theta}{E_L \varepsilon_{LBh}} \quad (3.4.17)$$

$$\varepsilon_{LP\theta} = \frac{\frac{P_P D}{2} - S_{my} t_m - E_L \varepsilon_{LP\theta} t_\theta \sin^2 \theta}{E_L t_h} \quad (3.4.18)$$

ここで、

- ε_{LBh} : 設計破壊圧力でのフープ巻き層の複合材の繊維方向ひずみ
- ε_{LPh} : 塑性変形処理圧力でのフープ巻き層の複合材の繊維方向ひずみ
- t_h : フープ巻き層の板厚

b. 鏡部板厚の算定

a.で算定した胴部板厚をもとにして複合材の板厚分布と繊維交差角度分布を求める。なお、金属ライナの厚さは鏡部で一定と仮定する。鏡部の形状は(3.4.19)式を用いて求めることができる。(出典：NASA-CR-72124)

$$\ddot{\rho} = \frac{2(\dot{\rho}^2+1)^{\frac{1}{2}}}{\rho} \left[-\frac{k_m}{2\rho} (\tan^2 \theta - 1) + (\dot{\rho}^2+1)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{1}{2} \tan^2 \theta - 1 \right) \right] \quad (3.4.19)$$

ここで、

$$\tan^2 \theta = \frac{(\rho_0)^2}{\rho^2 - (\rho_0)^2} \quad (\text{等張力曲面の場合}) \quad (3.4.20a)$$

$$\tan^2 \theta = \frac{\{\rho \tan \gamma - (\zeta \tan \gamma + \rho_e) \dot{\rho}\}^2}{(1 + \dot{\rho}^2) \{\rho^2 - (\zeta \tan \gamma + \rho_e)^2\}} \quad (\text{インプレン巻きの場合}) \quad (3.4.20b)$$

r , z は図3.4.3-2に示す座標である。 ρ , ζ は r , z の無次元化座標である。また、 R は胴部半径を示す。

k_m : ライナの圧力分担比(設計破壊圧力負荷時)

$$\rho = \frac{r}{R} \quad \dot{\rho} = \frac{d\rho}{d\zeta}$$

$$\zeta = \frac{z}{R} \quad \ddot{\rho} = \frac{d^2\rho}{d\zeta^2}$$

γ : インプレン角度

ρ_e : インプレンパラメータ

ρ_0 : 開口比

γ , ρ_e , ρ_0 は図3.4.3-3に示す。

(3.4.19)式は2階の常微分方程式であるため、ルンゲ-クッタ法等の数値計算により、鏡部の形状を決定する。境界条件は鏡/胴接合部において

$$\rho(\zeta=0)=1, \dot{\rho}(\zeta=0)=0$$

とする。

鏡部の形状が求められたら、次式を用いて鏡部の複合材の板厚分布を求める。

$$t_{\theta d} = \frac{\cos \theta_0}{\rho \cos \theta} t_0 \quad (3.4.21)$$

ここで、

$t_{\theta d}$: 鏡部の複合材厚さ

θ_0 : 鏡/胴接合部での巻き角度

(2) 鏡部板厚算定からアプローチする場合

鏡部板厚を第一に算定し、その後に胴部板厚を算定する場合について本項で例示する。

a. 鏡部板厚の算定

容器形状から巻き方を検討し、ヘリカル巻き層(またはインプレックス巻き層)の角度 θ を設定すること。以下の式によりヘリカル巻き層(またはインプレックス巻き層)、金属ライナの厚さを算定すること。

$$t_{\theta} = (1 - k_m) \frac{P_B D}{4 E_L \varepsilon_{LB\theta} \cos^2 \theta} \quad (3.4.22)$$

$$t_m = \frac{k_m P_B D}{4 S_{my}} \quad (3.4.23)$$

ここで、

k_m : 設計破壊圧力負荷時の鏡部ライナの圧力分担比

次に(3.4.19)、(3.4.20)式を用いて鏡部形状、繊維交差角度分布を、また(3.4.21)式を用いて鏡部板厚分布を求める。

b. 胴部板厚の算定

以下の式により胴部フープ巻き層の厚さを算定すること。

$$t_h = \frac{1}{E_L \varepsilon_{LBh}} \left(\frac{P_B D}{2} - S_{my} t_m - E_L \varepsilon_{LB\theta} t_{\theta} \sin^2 \theta \right) \quad (3.4.24)$$

a.項、b.項で算定した板厚から塑性変形処理圧力下でのヘリカル巻き層、フープ巻き層のひずみを算出すること。

$$\varepsilon_{LP\theta} = \frac{1}{E_L t_{\theta} \cos^2 \theta} \left(\frac{P_P D}{4} - S_{my} t_m \right) \quad (3.4.25)$$

$$\varepsilon_{LP_h} = \frac{1}{E_L t_h} \left(\frac{P_P D}{2} - S_{my} t_m - E_L \varepsilon_{LP\theta} t_{\theta} \sin^2 \theta \right) \quad (3.4.26)$$

3.4.3.2 金属ライナの圧縮強度確認

金属ライナを用いた場合は、塑性変形処理後の無加圧時のライナ圧縮応力を算出し、ライナが降伏しないことを確認すること。

$$S_{m0} < S'_{my}$$

ここで、

S_{m0} : 塑性変形処理後の無加圧時のライナの応力

S'_{my} : 材料の降伏応力

ただし、金属ライナの降伏を許容する設計手法を採用する場合は、3.5.1項応力解析で評価すること。

3.4.3.3 金属ライナの座屈強度確認

金属ライナを用いた場合は、塑性変形処理後の無加圧時のライナ圧縮応力を算出し、ライナが座屈しないことを確認すること。

$$S_{m0} < S_{cr}$$

円筒形複合圧力容器の胴部周方向応力に対して
(出典：NASA-CR-72753)

$$\frac{S_{cr}}{E_m} = 106,000 \left(\frac{t_m}{D} \right)^3 \quad (3.4.27)$$

球形複合圧力容器、および円筒形複合圧力容器の鏡部に対して
(出典：NASA-CR-72753)

$$\frac{S_{cr}}{E_m} = 21,200 (1 - \nu_m)^2 \left(\frac{t_m}{D} \right)^2 \quad (3.4.28)$$

ここで、

- S_{m0} : 塑性変形処理後の無加圧時の金属ライナの応力
- S_{cr} : 座屈応力
- E_m : 金属ライナ材料の縦弾性係数 (金属ライナが降伏域の場合はセカントモジュラス)
- t_m : 金属ライナ板厚
- D : 金属ライナ直径
- ν_m : 金属ライナ材料のポアソン比

3.4.3.4 圧力-ひずみ線図の作成

設定した容器の板厚と形状に基づき、金属ライナと複合材について内圧に対するそれぞれの圧力分担比を決定し、図3.4.3-4に例示する圧力-ひずみ線図を求めること。

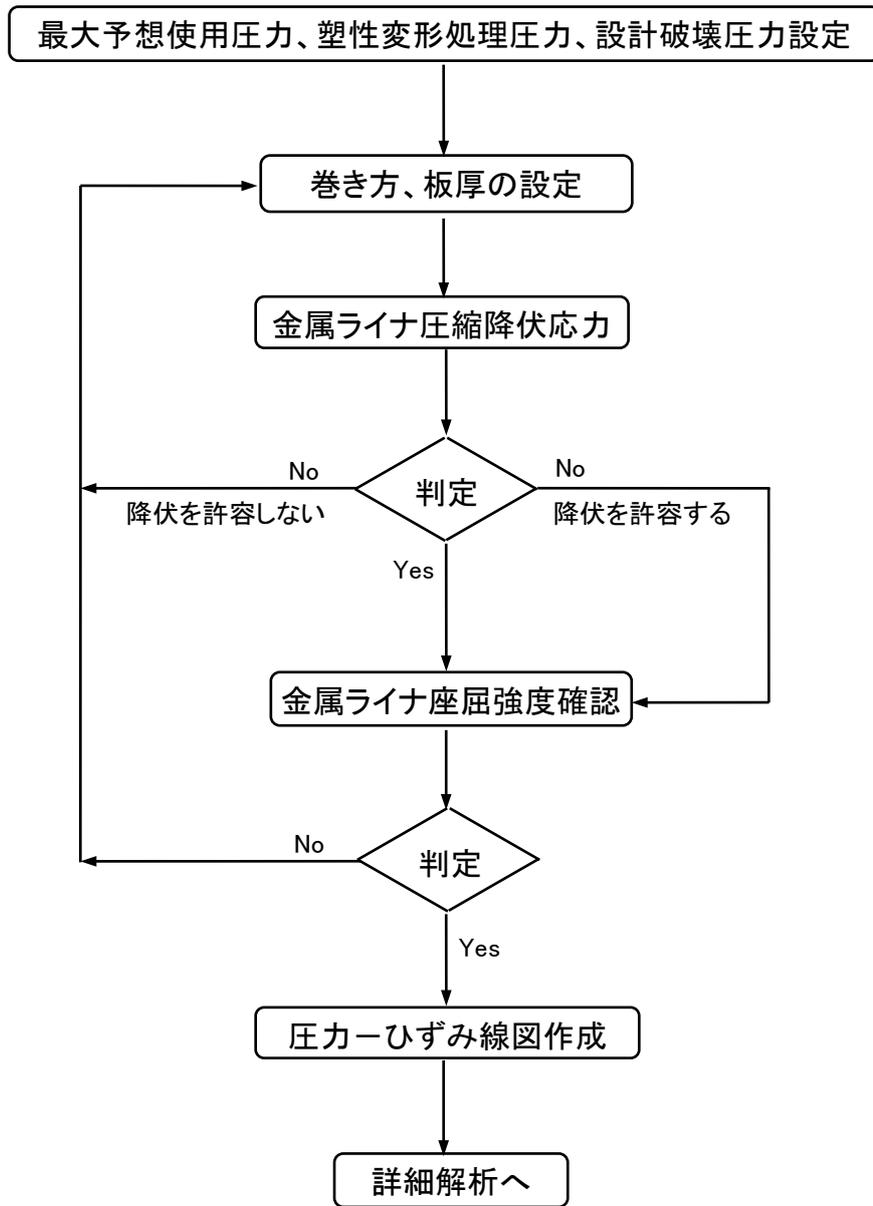


図3.4.3-1 板厚の算定フロー

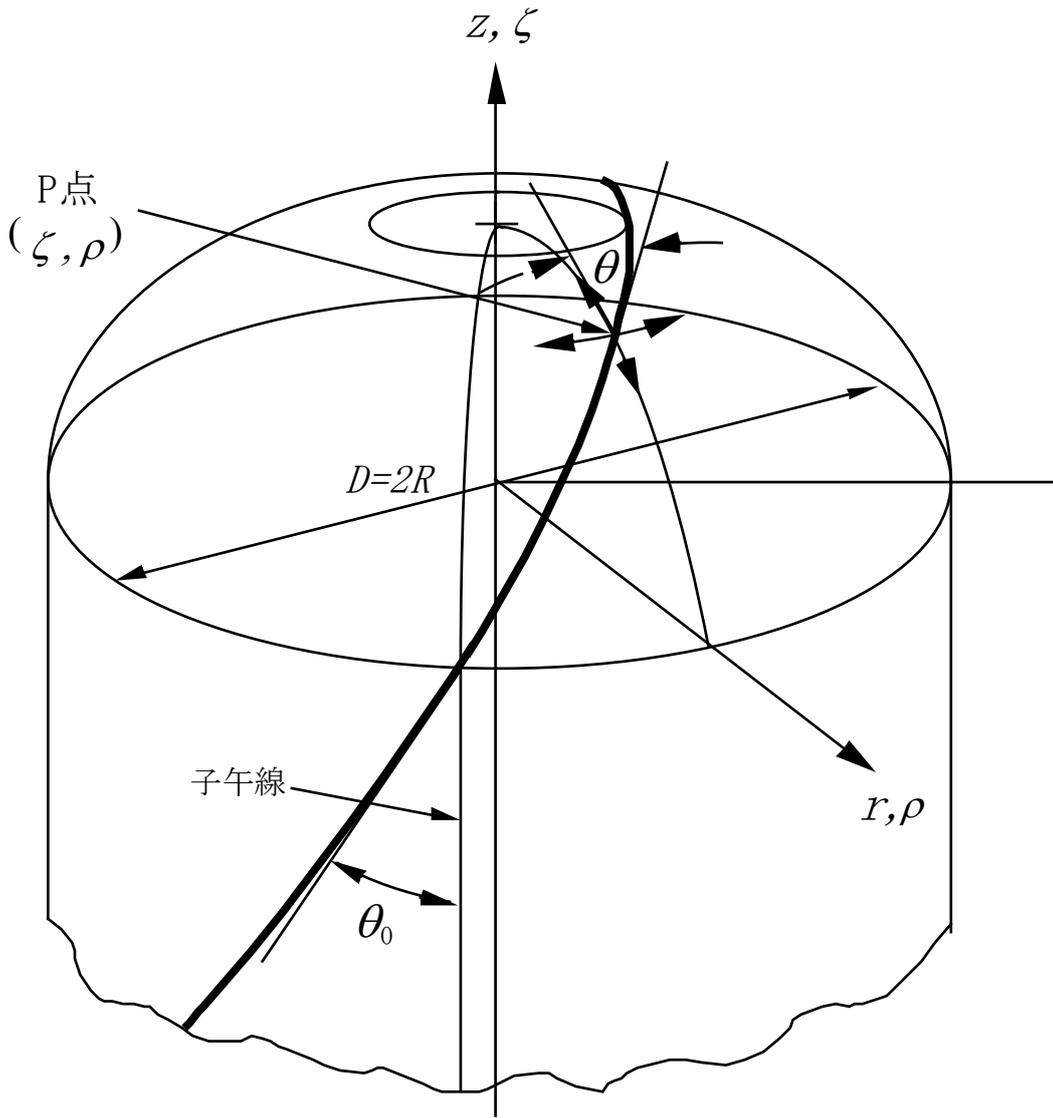


图3.4.3-2 記号·座標(1)

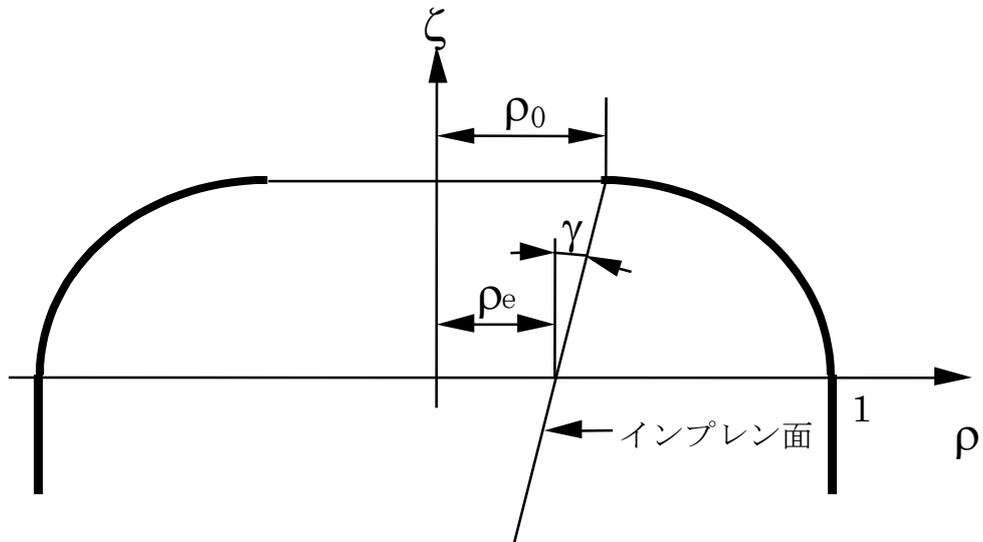


図3.4.3-3 記号・座標(2)

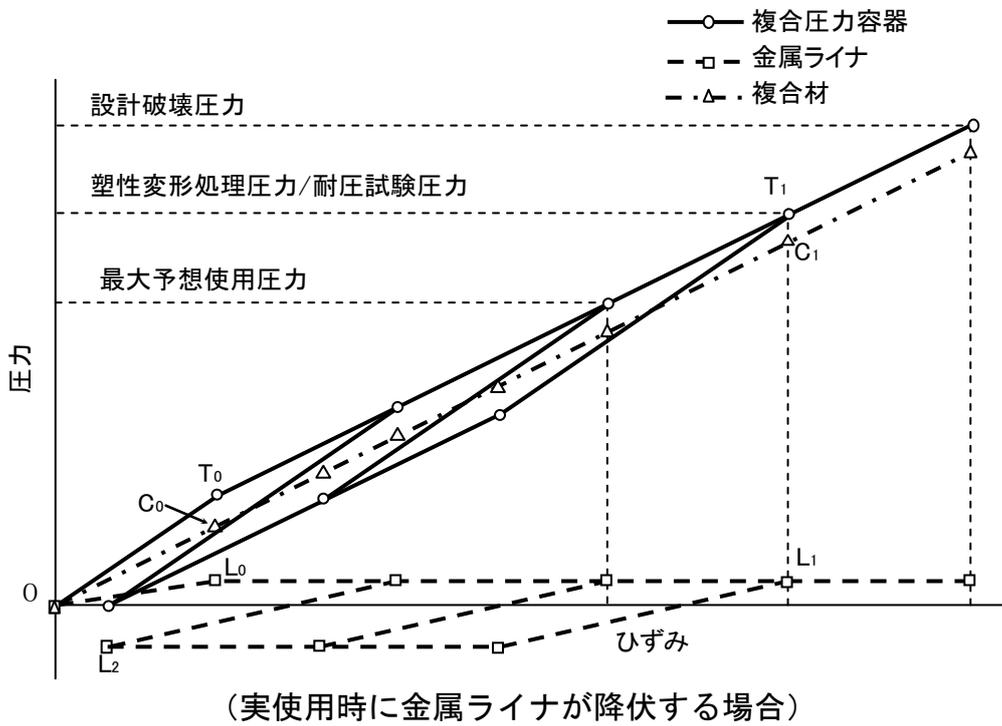
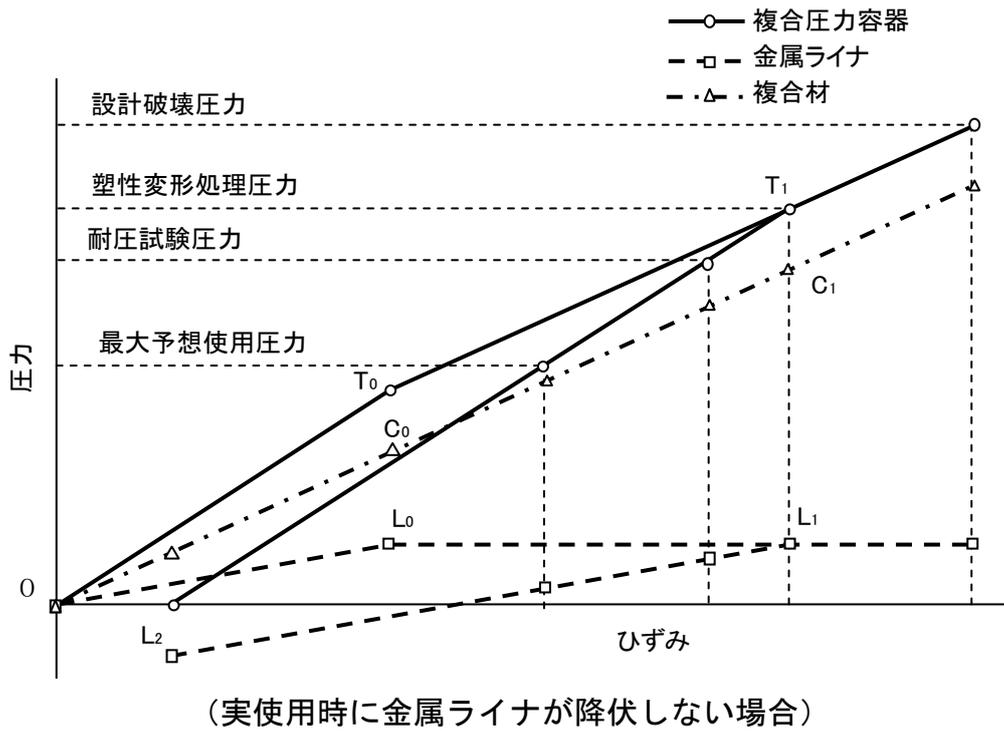


図3.4.3-4 圧力-ひずみ線図(代表例)

3.5 詳細解析

高圧ガス機器の設計の立証方法は図3.5-1に示すように、応力解析、破壊前漏洩(LBB)成立の判定、疲労損傷解析、またはき裂進展解析、受入試験、および認定試験によること。LBB成立の判定の結果によって以下の2つの立証方法のいずれかによること。

- (1) LBBが成立し、かつ非危険漏洩であるもの。
- (2) LBBが成立しないもの、またはLBBが成立していても危険漏洩であるもの。

設計の立証方法は、以下の手順に従って行うことを基本とする。

- ① 応力解析は、3.5.1項に示す方法により機器の安全性を確認するために行う。ロケット推進薬タンク以外の圧力容器については、3.5.1.1項 圧力に対する解析、および3.5.1.2項 フライト時の解析を実施すること。ロケット推進薬タンクについては、3.5.1.2項 フライト時の解析、および3.5.1.3項 地上取扱時の解析を実施すること。
- ② LBB成立の判定は、3.5.2項によること。
- ③ LBB成立かつ非危険漏洩の場合の疲労損傷解析は、疲労により破壊に至らないことを検証するもので3.5.3項によること。
なお、複合圧力容器の複合材、および最大予想使用圧力の加圧、減圧で降伏する金属ライナについては、LBB成立のいかんにかかわらず実施する。
- ④ LBB不成立、またはLBB成立かつ危険漏洩の場合のき裂進展解析は、3.5.4項によること。
- ⑤ 受入試験は、4.7.5項により耐圧試験、気密試験を実施すること。
LBB不成立、またはLBB成立かつ危険漏洩の場合(または、LBB成立かつ非危険漏洩でも、④のき裂進展解析を実施する場合は)、耐圧試験の圧力負荷に引き続き保証試験を実施してもよい。
- ⑥ 認定試験は、5.2項によること。

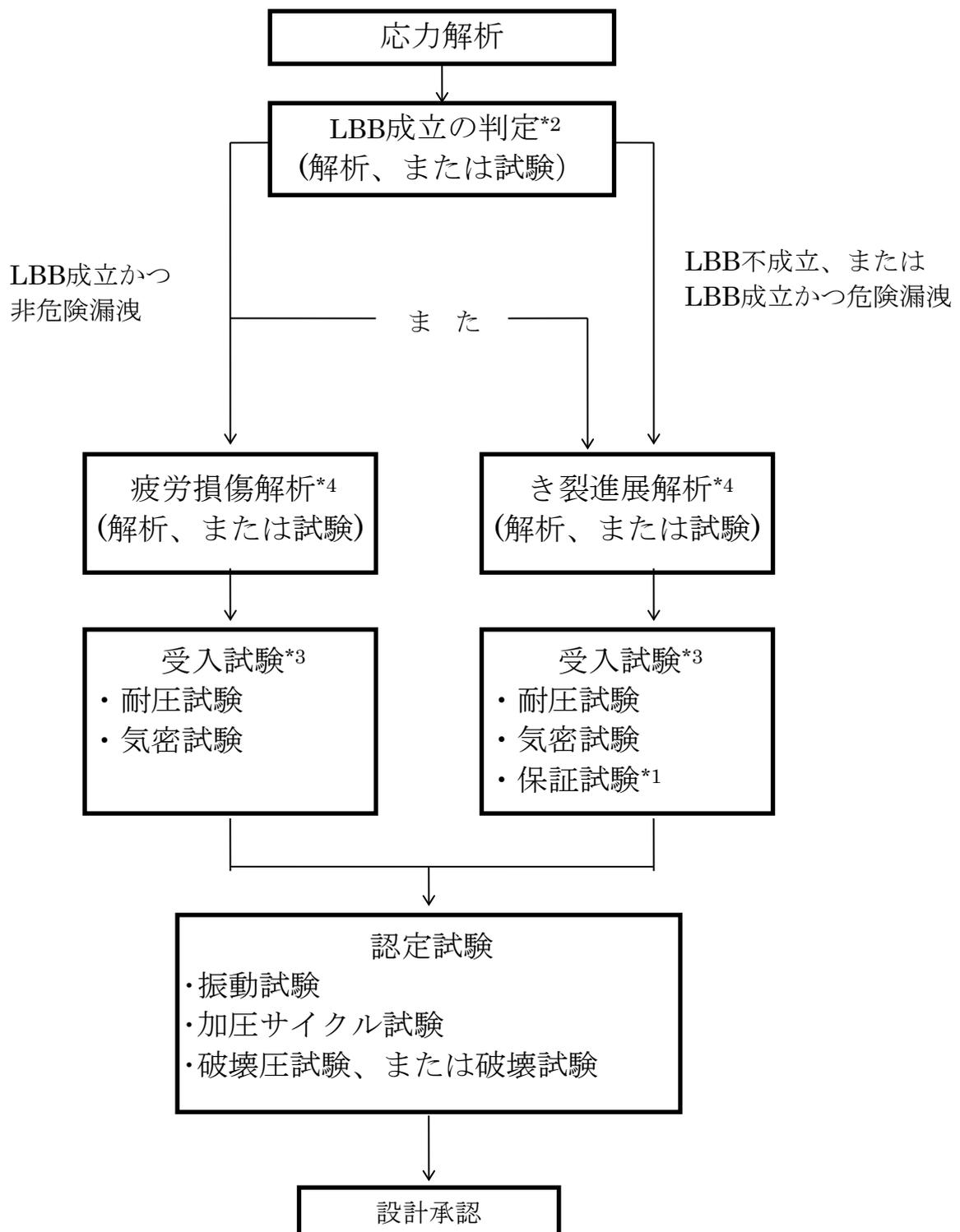


図3.5-1 設計の立証方法

*1:非破壊検査で初期欠陥寸法を設定しない場合、実施する。

*2:LBB成立を判定しない場合、LBBは不成立とみなす。

*3:受入試験の試験項目は認定試験の一環として実施してもよい。

*4:複合圧力容器の複合材と降伏する金属リブはLBB成立如何にかかわらず疲労損傷解析を行うこと。

3.5.1 応力解析

3.4項で算定した板厚に対して強度上(座屈を含む。)問題ないことを以下の解析により示すこと。なお、本項に示す解析は、必要最小限のものであり、ほかに考慮すべき解析が必要な場合は、その解析も行うこと。

応力解析に使用する材料特性、およびその他の機械的、物理的性質は、以下に示すとおりとする。

金属材料は、以下の文書、または使用する材料規格(MIL、AMS、FS規格)の規定から適切な値を選択すること。

(1) MMPDS : Metallic Materials and Elements for Aerospace Vehicle Structure

(2) AFML-TR-68-115 : Aerospace Structural Metals Handbook

上記公的データに記載のない材料を使用する場合は、5.1.1項の「材料基礎試験」を実施し、その評価データを用いること。なお、判定基準に使用する材料強度は、MMPDSのA値相当とすること。また、本技術基準では、3.1.2.4項「温度条件」の規定のとおり高温域での使用がないため材料のクリープは考慮しない。

複合圧力容器の金属ライナについては、塑性変形処理の解析に使用する金属ライナ材料の降伏応力は、市販同種材料のミルシートの平均値を用いて解析してもよい。

複合材の応力解析に使用する材料特性、およびその他の機械的、物理的性質は、5.1.1項の材料基礎試験を実施し、その評価データを用いること。

データは複合材としての繊維体積含有率(V_f)を考慮し、適切な換算を行うこと。

繊維方向引張強度は、試験データの95%信頼性水準、1%破壊確率の最小値を用いること。繊維方向の弾性係数については、硬化型材料で非線形性が顕著でない場合は、繊維メーカーの値を使用し、 V_f 換算して用いてもよい。

非金属ライナの材料特性については、必要に応じて5.1.1項の材料基礎試験を実施し、その評価データを用いること。

3.5.1.1 圧力に対する解析

(1) 解析目的

3.4項で算定した板厚が、以下に示す製造、および打上げ準備作業等の加圧作業において強度上(座屈を含む。)問題ないことを確認すること。

- a. 製作工程
- b. 認定試験
- c. 受入試験
- d. 打上げ準備作業における気密試験
- e. ロケット、およびペイロードのシステム試験
- f. 打上げ前の加圧

本解析は、金属圧力容器、複合圧力容器、および表3.1.3-1の安全係数を満足できない圧力配管、フィッティング、およびその他のコンポーネントについて適用する。

ロケット推進薬タンクについては、3.5.1.3項「地上取扱時の解析」が本解析を包含するため実施しなくてもよい。

(2) 解析方法、解析条件

- a. 3.4項で算定した板厚、および形状に対して、FEM解析により応力解析を実施すること。解析条件の設定に関しては、適切に実施し(モデル化を含む。)、それを明確にすること。
- b. 座屈解析が必要な場合には、3.4項で算定した板厚、および形状に対して、座屈解析を応力解析とは別個に実施すること。解析条件の設定に際しては、適切に実施し(モデル化を含む。)それを明確にすること。
- c. FEMは弾性解析を基本とする。ただし、複合圧力容器については、必要に応じて幾何学的非線形性(形状非線形性)を考慮すること。また、塑性変形処理の場合、および最大予想使用圧力の加圧減圧で金属ライナが降伏する場合は、弾塑性解析によること。この場合、モデル化に当たっては、安全側の仮定にたつて、適正にモデル化すること。例えば、板厚は一般部、および溶接部について、それぞれ図面最小板厚を用いること。また、溶接変形(特に角変形)、および目違い等必要な変形を考慮すること。段差、切欠等の構造不連続については、局所的なピーク応力の最大値を求めること。ピーク応力は、応力集中係数の信頼できる解析結果、または実験結果がある場合はその数値を用いてよい。ただし、応力集中係数が不明確な場合は4とすること。
- d. 座屈解析の場合、板厚は図面最小板厚を用いること。また、製造時の初期不整、残留応力により座屈荷重が減少することに対する修正係数を考慮すること。
- e. 境界条件については、モデル化と同様に安全側の仮定にたつて、適切にバネ定数等を設定すること。
- f. 金属圧力容器についての荷重条件は、最大予想使用圧力を考慮すること。
- g. 推進薬充填等で真空引きをする場合で、圧力容器内部が外部圧に対して負圧となる場合には、座屈解析を行うこと。

- h. 複合圧力容器についての荷重条件は、製造から運用までのすべてのフェーズを考慮し、以下の各状態での容器について、順を追って解析を実施すること。
- ① 塑性変形処理時(塑性変形処理を実施する場合のみ)
 - ② 塑性変形処理後の無加圧時(塑性変形処理を実施する場合のみ)
 - ③ 耐圧試験時
 - ④ 最大予想使用圧力負荷時
 - ⑤ 設計破壊圧力負荷時
- i. 複合圧力容器の鏡部と胴部の接合部近傍、鏡部の開口部近傍、ライナの板厚が変化する部分、圧力容器の支持部などの構造不連続部分の解析に際しては、メッシュ分割などに留意すること。
- j. 複合圧力容器では、応力、またはひずみの高い部分に着目し、圧力-ひずみ線図を作成し、以下の場合を解析すること。解析はライナが降伏しない、または降伏するケースをMises相当応力で評価すること。
- ① 塑性変形処理後の無加圧時
 - ② 耐圧試験圧力負荷時
 - ③ 耐圧試験負荷後の無加圧時
 - ④ 最大予想使用圧力負荷時
 - ⑤ 最大予想使用圧力負荷後の無加圧時
- k. 複合圧力容器については、フィラメントワインディングによって発生する繊維のよれや交差の影響を複合材の強度低下として考慮すること。フィラメントワインディング複合圧力容器に固有な樹脂割れをFEM解析においてモデル化するために、繊維直交方向応力、またはひずみはその材料の強度を越えたときみなされる要素については、その要素の繊維直交方向の弾性係数(E_T 、 ν_{LT})を解析上支障のない範囲で低下させて解析を行うこと。ただし、簡易的にすべての部位で繊維直交方向弾性係数を低下させて解析した解で代用してもよい。
- l. 塑性変形処理を実施する複合圧力容器で金属ライナが外圧を受ける場合も、座屈解析を実施すること。この場合は弾塑性解析を実施すること。

(3) 判定基準

判定基準は、3.5.1.4項によること。

3.5.1.2 フライト時の解析

(1) 解析目的

3.4項で算定した板厚が、打上げから宇宙空間の軌道までのフライト中(再使用型の場合、帰還時も含む。)に遭遇する圧力荷重、およびフライト荷重に対して強度上(座屈を含む。)問題ないことを確認すること。

本解析は、金属圧力容器、ロケット推進薬タンク、および複合圧力容器に適用すること。さらに、表3.1.3-1の安全係数を満足できない圧力配管、フィッティング、およびその他のコンポーネントについても適用する。

(2) 解析方法、解析条件

- a. 3.4項で算定した板厚、および形状に対して、FEMにより応力解析を実施すること。解析条件の設定に関しては、適切に実施し(モデル化を含む。)、それを明確にすること。
- b. 座屈解析が必要な場合には、3.4項で算定した板厚、および形状に対して、座屈解析を応力解析とは別個に実施すること。解析条件の設定に際しては適切に実施し(モデル化を含む。)、それを明確にすること。
- c. FEMは弾性解析を基本とする。ただし、複合圧力容器で最大予想使用圧力の加圧で金属ライナが降伏する場合は、弾塑性解析によること。この場合、モデル化に当たっては、安全側の仮定にたつて、適正にモデル化すること。例えば、板厚は、一般部、および溶接部についてそれぞれ図面最小板厚を用いること。また、溶接変形(特に角変形)、および目違い等必要な変形を考慮すること。段差、切欠等の構造不連続については、局所的なピーク応力の最大値を求めること。ピーク応力は、応力集中係数の信頼できる解析結果、または実験結果がある場合はその数値を用いてよい。ただし、応力集中係数が不明確な場合は4とすること。
- d. 座屈解析の場合、板厚は図面最小板厚を使用すること。また、製造時の初期不整、残留応力によって理論値よりも座屈荷重が減少することを考慮すること。ただし、ロケット推進薬タンクの座屈解析の場合は、板厚は設計上の板厚公称値とする。
- e. 境界条件については、モデル化と同様に安全側の仮定にたつて、適切にバネ定数等を設定すること。
- f. 各部材に対して、時間履歴の中で各部位毎に応力が最大となる条件で解析を行うこと。
- g. ロケット推進薬タンクについては、図3.5.1-1に示す円筒部と鏡板との接合部、およびフランジ部等で構造的に不連続となる部位の応力解析、およびフライト時荷重、圧力荷重、および温度分布による熱応力が同時に負荷される部位等の応力解析は、FEM等の数値解析により応力を算出すること。
- h. 以下に示す場合は座屈解析を行うこと。
 - ① 円筒部にフライト時荷重による軸圧縮力、曲げモーメントが負荷される場合。
 - ② 鏡板(ドーム部)にペイロード荷重が負荷される場合。(図3.2-2参照)
 - ③ 共通隔壁構造に逆圧が負荷される場合等。(図3.2-2参照)

(3) 判定基準

判定基準は、3.5.1.4項によること。

3.5.1.3 地上取扱時の解析

(1) 解析目的

3.4.2項で算定したロケット推進薬タンクの板厚が、地上取扱時の圧力荷重、および地上取扱時荷重に対して強度上(座屈を含む。)問題ないことを確認すること。

(2) 解析方法、解析条件

- a. 図3.5.1-1に示す円筒部と鏡板との接合部、およびフランジ部等で構造的に不連続となる部位の応力解析、および地上取扱時荷重、圧力荷重、および温度分布による熱応力が同時に負荷される部位等の応力解析は、FEM等の数値解析により応力を算出すること。
- b. 座屈解析が必要な場合には、3.4項で算定した板厚、および形状に対して、座屈解析を応力解析とは別個に実施すること。解析条件の設定に際しては、適切に実施し(モデル化を含む。)、それを明確にすること。
- c. FEMは弾性解析を基本とする。この場合、モデル化に当たっては、安全側の仮定にたつて、適正にモデル化すること。例えば、板厚は一般部、および溶接部について、それぞれ図面最小板厚を用いること。また、溶接変形(特に角変形)、および目違い等必要な変形を考慮すること。段差、切欠等の構造不連続については、局所的なピーク応力の最大値を求めること。ピーク応力は、応力集中係数の信頼できる解析結果、または実験結果がある場合はその数値を用いてよい。ただし、応力集中係数が不明確な場合は4とすること。
- d. 座屈解析の場合、応力を算出する板厚は設計上の板厚公称値を使用すること。また、製造時の初期不整、残留応力によって理論値よりも座屈応力が減少することを考慮すること。
- e. 境界条件については、モデル化と同様に安全側の仮定にたつて、適切にバネ定数等を設定すること。
- f. 地上取扱荷重には、特別係数(3.1.2.3項)を考慮すること。
- g. 各部材に対して、時間履歴の中で各部位毎に応力が最大となる条件で解析を行うこと。
- h. 以下に示す場合は座屈解析を行うこと。
 - ① 円筒部に地上取扱荷重による軸圧縮力、曲げモーメントが負荷される場合。
 - ② 鏡板(ドーム部)にペイロード荷重が負荷される場合。(図3.2-2参照)
 - ③ 共通隔壁構造に逆圧が負荷される場合等。(図3.2-2参照)

(3) 判定基準

判定基準は、3.5.1.4項によること。

3.5.1.4 判定基準

3.5.1.1項 圧力に対する解析、3.5.1.2項 フライト時の解析、および3.5.1.3項 地上取扱時の解析のそれぞれに対する判定基準を以下に示す。

3.5.1.4.1 金属圧力容器、ロケット推進薬タンクの応力解析の判定基準

(1) 金属圧力容器、ロケット推進薬タンクの強度解析の判定基準

a. 一次一般膜応力、一次一般膜応力プラス曲げ応力、一次局部膜応力プラス曲げ応力

圧力、および振動等の外荷重に対して、いずれの断面、または部位の応力は、図3.5.1-2に示す範囲内でなければならない。

図3.5.1-2は、以下の関係式を示したものである。

$$\frac{P_m + P_b}{S_m} \leq \frac{5}{3} - \frac{3}{2} \left(\frac{1}{3} - \frac{P_m}{S_m} \right)^2 \quad (3.5.1)$$

$$\frac{P_m}{S_m} \leq 1 \quad (3.5.2)$$

上式で $P_m + P_b$ は一次一般膜応力プラス曲げ応力の場合で、一次局部膜応力プラス曲げ応力の場合は $P_L + P_b$ とする

ここで、

P_m : 圧力に対する解析、フライト時の解析、地上取扱時の解析によりそれぞれ発生する一次一般膜応力の応力強さ

$$P_m = \text{Max}\{|\sigma_1 - \sigma_2|, |\sigma_2 - \sigma_3|, |\sigma_3 - \sigma_1|\}$$

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$: 主応力

P_b : 圧力に対する解析、フライト時の解析、地上取扱時の解析によりそれぞれ発生する曲げ応力の応力強さ

P_L : 圧力に対する解析、フライト時の解析、地上取扱時の解析によりそれぞれ発生する一次局部膜応力の応力強さ

S_m : 設計応力強さ

$$S_m = \left(\frac{\text{材料の降伏応力}(\sigma_y)^*}{\text{降伏応力に対する安全係数}^{**}} \text{と} \frac{\text{材料の引張強度}(\sigma_u)^*}{\text{引張強度に対する安全係数}^{**}} \right) \text{のうち小さい方}$$

* : 設計温度における値を使用する。ただし、低温で使用する材料で、低温での降伏応力、または引張強度が常温での降伏応力、または引張強度より大きい場合は、常温の降伏応力、または引張強度を使用してよい。

** : 圧力に対する解析の場合は表3.1.3-1に示す値、フライト時の解析の場合は、表3.1.3-3に示す値、地上取扱時の解析の場合は、3.1.2.3項の特別係数を考慮して、表3.1.3-1の値を用いること。

b. シェークダウン(一次応力プラス二次応力)

圧力、および振動等の外荷重に対して、いずれの断面、または部位に対して以下を満足しなければならない。

$$P_L + P_b + Q \leq 2\sigma_y \quad (3.5.3a)$$

または、

$$P_m + P_b + Q \leq 2\sigma_y \quad (3.5.3b)$$

ここで、

- Q : 二次応力。ただし、局部応力集中は除く。
 σ_y : 材料の降伏応力

- (2) 金属圧力容器、ロケット推進薬タンクの座屈解析の判定基準
 座屈解析の結果、以下の座屈判定をすること。

$$\frac{F}{F_b} \leq 1 \quad (3.5.4)$$

$$F_b = \frac{F_{cr}}{\text{安全係数}^*}$$

*3.1.3.3項に示す安全係数で実際に用いる値とすること。

ここで、

- F_b : 荷重表示の座屈強さ
 F : 上記に示す対象構造部分に負荷される圧縮荷重
 F_{cr} : 対象構造部分の座屈荷重

3.5.1.4.2 複合圧力容器の応力解析の判定基準

(1) 複合圧力容器の強度解析の判定基準

a. 圧力に対する解析の判定基準

以下に規定する設計破壊圧力、耐圧試験圧力において複合材、金属ライナ、非金属ライナについて判定基準を示す。

(設計破壊圧力)=(最大予想使用圧力)×(表3.1.3-2の設計破壊圧力に対する安全係数)

(耐圧試験圧力)=(最大予想使用圧力)×(表4.4-1の複合圧力容器の耐圧試験圧力に係る係数)

① 複合材

- 設計破壊圧力負荷時 : $S_{cb} < S_{cu}$

ここで、

S_{cb} : 設計破壊圧力による複合材の繊維方向の最大応力

S_{cu} : 複合材の繊維方向引張強度

$$S_{cu} = S_{ca} \times R_{fw}$$

S_{ca} : 複合材の引張強度最低値

R_{fw} : 繊維の重なり等による複合材の強度低下率

ただし、ガラス繊維その他を用いた再使用型高圧ガス機器で、3.5.3.1項の疲労損傷解析(ストレスラプチャ解析)を行った場合は、以下の式によるものとする。

- 設計破壊圧力負荷時 : $S_{cb} < S_{cu} \times 0.625$

② 金属ライナ

(金属ライナが降伏しない場合)

- 耐圧試験圧力負荷時 : $S_{mp} < S_{my}$
- 設計破壊圧力負荷時 : $\epsilon_{mb} < \epsilon_{mu}$

ここで、

S_{mp} : 耐圧試験圧力による金属ライナのMises相当応力

S_{my} : 金属ライナの降伏応力

ϵ_{mb} : 破壊圧力による金属ライナの最大ひずみ

ϵ_{mu} : 金属ライナ材の破断ひずみ

(金属ライナが降伏する場合)

- 設計破壊圧力負荷時 : $\epsilon_{mb} < \epsilon_{mu}$

さらに、圧カーヒズミ線図の最大予想使用圧力での金属ライナのひずみが加圧サイクルの要求寿命の4倍の回数で疲労破壊しないことを疲労損傷解析により確認すること。

③ 非金属ライナ

- 設計破壊圧力負荷時 : $\epsilon_{rb} < \epsilon_{ru}$

ここで

ϵ_{rb} : 設計破壊圧力による非金属ライナの最大ひずみ

ϵ_{ru} : 非金属ライナ材の破断ひずみ

b. フライト時の解析の判定基準

① 複合材

- $(S_{cm} + S_{cd}) \times (\text{表3.1.3-4の終極荷重に対する安全係数}) < S_{cu}$

ここで

$S_{cm} + S_{cd}$: 最大予想使用圧力、および動荷重の組み合わせによる複合材の繊維方向最大応力

S_{cu} : 複合材の繊維方向引張強度

ガラス繊維その他を用いた使い切り型高圧ガス機器で、3.5.3.1項の疲労損傷解析(ストレスラプチャ解析)を行った場合は、以下の式によるものとする。

- $(S_{cm} + S_{cd}) \times (\text{表3.1.3-4の終極荷重に対する安全係数}) < S_{cu} \times 0.625$

② 金属ライナ

- $(S_{mm} + S_{md}) \times (\text{表3.1.3-4の降伏応力(金属ライナ)に対する安全係数}) < S_{my}$

- $(\epsilon_{mm} + \epsilon_{md}) \times (\text{表3.1.3-4の終極荷重に対する安全係数}) < \epsilon_{mu}$

ここで

$S_{mm} + S_{md}$: 最大予想使用圧力、および動荷重の組み合わせによる金属ライナのMises相当応力

S_{my} : 金属ライナの降伏応力

ϵ_{mm} : 最大予想使用圧力による金属ライナの最大ひずみ

ϵ_{md} : 動荷重による金属ライナの最大ひずみ

ϵ_{mu} : 金属ライナ材の破断ひずみ

ただし、金属ライナの降伏を許容する設計手法を採用する場合は、以下のひずみ条件を満足することを確認するのみでよい。

- $(\epsilon_{mm} + \epsilon_{md}) \times (\text{表3.1.3-4の終極荷重に対する安全係数}) < \epsilon_{mu}$

③ 非金属ライナ

- $(\epsilon_{cm} + \epsilon_{cd}) \times (\text{表3.1.3-4の終極荷重に対する安全係数}) < \epsilon_{cu}$

ここで、

$\epsilon_{cm} + \epsilon_{cd}$: 最大予想使用圧力、および動荷重の組み合わせによる非金属ライナの最大ひずみ

ϵ_{cu} : 非金属ライナ材の破断ひずみ

(2) 複合圧力容器の座屈解析の判定基準

判定基準は、3.4.3.3項によること。

(3) 複合圧力容器の圧縮降伏応力の判定基準

判定基準は、3.4.3.2項によること。ただし、金属ライナの降伏を許容する設計手法を採用する場合は、本項は免除される。

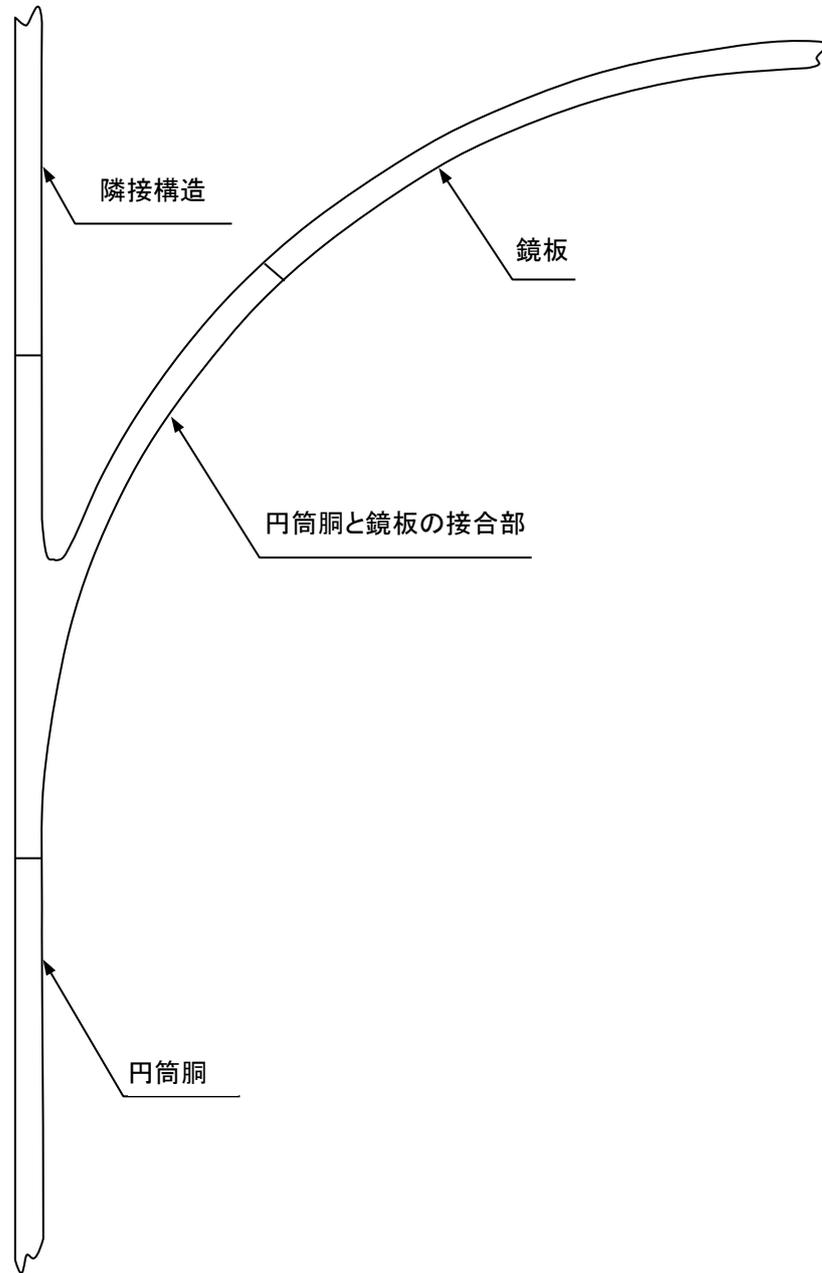


図3.5.1-1 円筒胴と鏡板の接合部(代表例)

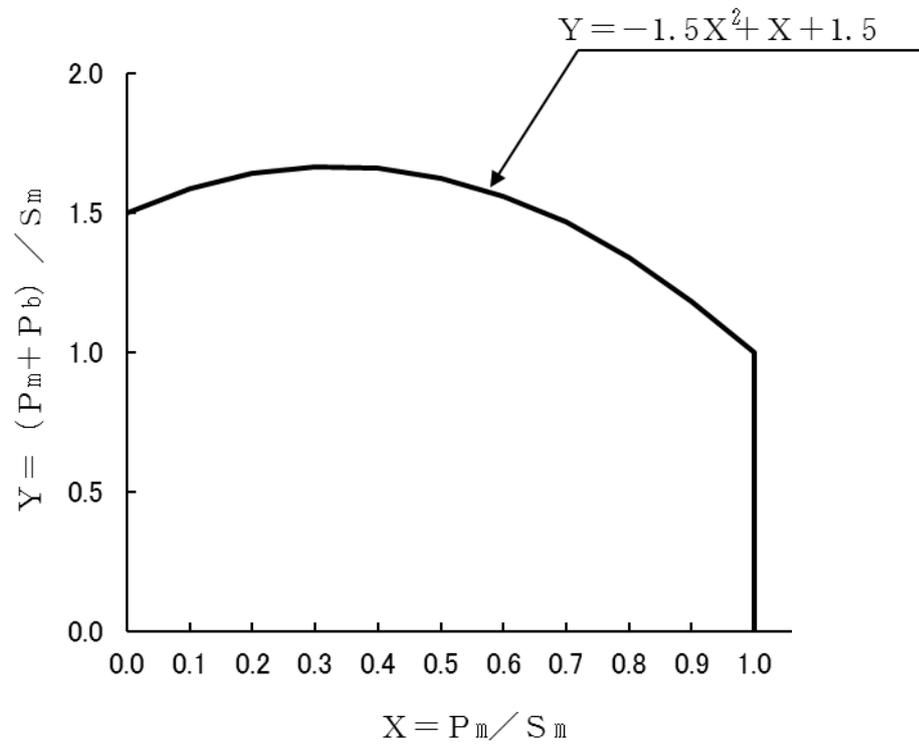


図3.5.1-2 一次一般膜応力、一次一般膜応力プラス曲げ応力、一次局部膜応力
 プラス曲げ応力の許容範囲

3.5.2 LBB成立の判定(解析、および試験)

最大予想使用圧力の繰返し負荷によって、LBBが成立するか否かの判定は、以下に示す破壊靱性と塑性崩壊圧力を考慮した判定式、または試験によって判定すること。解析は、高压ガス機器の応力が高い部位について実施すること。ただし、円筒形圧力容器のLBB解析は、直胴部を対象とする。

本解析は、圧力容器、およびロケット推進薬タンクに適用すること。さらに、表3.1.3-1の安全係数を満足できない圧力配管、フィッティング、およびその他のコンポーネントについても適用する。

3.5.2.1 解析によるLBB成立の判定

3.5.2.1.1 金属圧力容器、ロケット推進薬タンクの場合

き裂進展解析により貫通直前の表面き裂形状、または貫通直後の貫通き裂寸法を予測し、そのいずれかに対して以下の手順で破壊条件を評価すること。き裂進展解析の代わりに、表面き裂形状、または貫通き裂寸法を広範囲に変えて評価を実施してもよい。

- ① (1)破壊条件 K_r を解析する。
- ② 材料が顕著な破壊抵抗曲線(R曲線)特性を示す場合には、(1)破壊条件 K_r の代わりに(2)破壊条件 K_R を解析すること。
- ③ (3)塑性崩壊条件 L_r を解析する。
- ④ 以下のいずれかでLBB成立を判定する。

判定1： $K_r < 1$ かつ $L_r < 1$ の場合LBB成立、それ以外はLBB不成立

判定2：破壊条件 K_r 、塑性崩壊条件 L_r の相互影響を考慮するために(4)破壊評価線図で判定する。

以下にLBB成立判定式の詳細を示す。

(1) 破壊条件(K_r)

LBB成立： $K_r < 1$

LBB不成立： $K_r \geq 1$

$$K_r = \frac{K}{K_c}$$

K ：応力拡大係数

K_c ：材料の設計温度における破壊靱性

K_c の値を設定する場合、適正な試験条件で実施された信頼性の高いデータに基づくこと。データの信頼性が保証できれば、データの平均値を用いてよい。

K の算定は、以下に示す計算式により行う。他の式を使用する場合は、その根拠、出典を明確にすること。

a. 表面き裂

$$K = \sqrt{\pi a} (\sigma_m f_m + \sigma_b f_b) \quad (3.5.7)$$

$$\sigma = \sigma_m + \sigma_b \left(1 - \frac{2z}{t} \right) \quad (3.5.8)$$

$$f_m^A = \frac{1}{\sqrt{Q}} \left[1.13 - 0.18 \frac{a}{2c} + \left(-0.54 + \frac{0.89}{0.2 + \frac{a}{c}} \right) \left(\frac{a}{t} \right)^2 + \left(0.5 - \frac{1}{0.65 + \frac{a}{c}} + 14 \left(1 - \frac{a}{c} \right)^{24} \right) \left(\frac{a}{t} \right)^4 \right] \quad (3.5.9)$$

$$Q = \phi^2 - 0.212 \left[\frac{\sigma}{\sigma_y} \right]^2 \quad (3.5.10)$$

$$\phi^2 = 1 + 4.595 \left[\frac{a}{2c} \right]^{1.65} \quad (3.5.11)$$

$$f_m^B = \left[\left(1.1 + 0.35 \left(\frac{a}{t} \right)^2 \right) \left(\frac{a}{c} \right)^{0.5} \right] f_m^A \quad (3.5.12)$$

$$f_b^A = \left[1 + \left(-1.22 - 0.24 \frac{a}{2c} \right) \frac{a}{2c} + \left\{ 0.55 - 1.05 \left(\frac{a}{c} \right)^{0.75} + 0.47 \left(\frac{a}{c} \right)^{1.5} \right\} \left(\frac{a}{t} \right)^2 \right] f_m^A \quad (3.5.13)$$

$$f_b^B = \left[1 - 0.34 \frac{a}{t} - 0.22 \left(\frac{a}{t} \right) \left(\frac{a}{2c} \right) \right] f_m^B \quad (3.5.14)$$

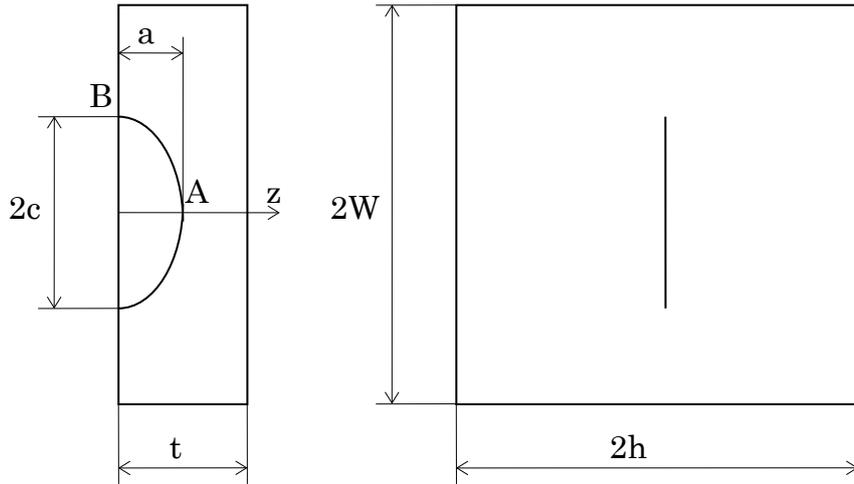
- ①円筒形容器（軸方向き裂）の内圧の場合 : $\sigma_m = \frac{PR}{t}$ 、 $\sigma_b = 0$
 ②球形容器の内圧の場合 : $\sigma_m = \frac{PR}{2t}$ 、 $\sigma_b = 0$

ここで、

- σ : 板厚方向の線形応力分布
- σ_m : 引張応力
- σ_b : 曲げ応力
- σ_y : 材料の設計温度における降伏応力
- f_m : 引張応力の補正係数
- f_b : 曲げ応力の補正係数
- f_m^A : A点(最深点)の f_m
- f_b^A : A点(最深点)の f_b
- f_m^B : B点(表面点)の f_m
- f_b^B : B点(表面点)の f_b
- Q : 塑性域補正した欠陥の形状パラメータ
- ϕ : 欠陥の形状パラメータ
- $2W$: 板幅
- a : き裂深さ
- c : き裂半長
- t : 板厚
- z : 内面（き裂側）からの板厚方向の距離
- $2h$: 板長
- P : 内圧
- R : 内半径

なお、これらの式は以下の範囲で適用可能である。

$$\frac{a}{t} \leq 0.8, \quad \frac{a}{2c} \leq 0.5, \quad \frac{2c}{W} \leq 0.3, \quad \frac{2c}{h} \leq 0.3$$



b. 貫通き裂

$$K = \sigma_m \sqrt{\pi a} F \tag{3.5.15}$$

$$F = 1 + 7.2449 \times 10^{-2} \lambda + 0.64856 \lambda^2 - 0.2327 \lambda^3 + 3.8154 \times 10^{-2} \lambda^4 - 2.3487 \times 10^{-3} \lambda^5 \tag{3.5.16}$$

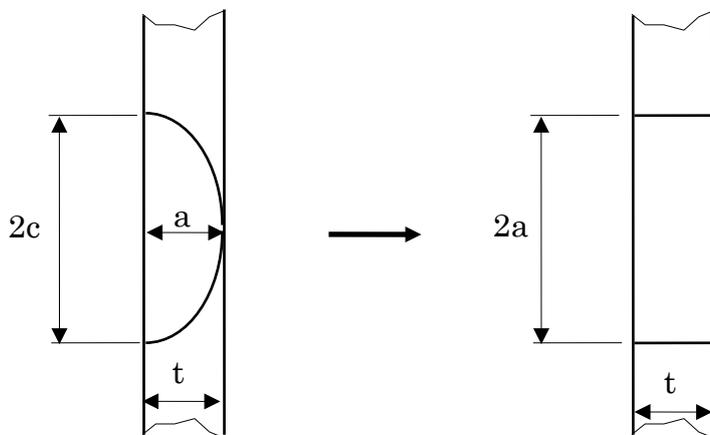
$$\lambda = \frac{a}{\sqrt{Rt}} \tag{3.5.17}$$

ここで、 a はき裂半長である。貫通した表面き裂（き裂深さ $a=t$ 、き裂全長 $2c$ ）を貫通き裂（き裂全長 $2a=2c$ ）に置き換え、これを貫通き裂の形状とする。

- ① 円筒形容器（軸方向き裂）の内圧 $\sigma_m = \frac{PR}{t}$
- ② 球形容器の内圧 $\sigma_m = \frac{PR}{2t}$

なお、これらの式は以下の範囲で適用可能である。

$$0 \leq \lambda \leq 5$$



(2) 破壊条件 (K_R)

材料が顕著な破壊抵抗曲線(R曲線)特性を示す場合には、以下のとおりとする。

$$\text{LBB成立} \quad : K=K_R \text{において} \frac{\partial K}{\partial a} < \frac{dK_R}{da}$$

$$\text{LBB不成立} \quad : K=K_R \text{において} \frac{\partial K}{\partial a} \geq \frac{dK_R}{da}$$

K_R : 材料の設計温度における破壊抵抗

(3) 塑性崩壊条件

$$\text{LBB成立} \quad : L_r (\text{局部}) < 1, L_r (\text{全体}) < 1$$

または

$$L_r (\text{局部}) \geq 1, L_r (\text{全体}) < 1$$

$$\text{LBB不成立} \quad : L_r (\text{全体}) \geq 1$$

$$L_r = \frac{P}{P_c}$$

P : 内圧

P_c : 設計温度における塑性崩壊圧力

P_c の算定は、以下に示す計算式により行う。他の式を使用する場合は、その根拠、出典を明確にすること。

a. 表面き裂

(局部崩壊)

$$P_c = P_0 \frac{\eta}{1 - \frac{1-\eta}{m}} \quad (3.5.18)$$

$$\eta = 1 - \frac{a}{t} \quad (3.5.19)$$

$$m = \left[1 + \frac{1.61(1-\eta)c^2}{Rt} \right]^{0.5} \quad (3.5.20)$$

(全体崩壊)

$$P_c = P_0 \left(\eta + \frac{1-\eta}{m'} \right) \quad (3.5.21)$$

$$m' = \left[1 + \frac{1.61c^2}{Rt} \right]^{0.5} \quad (3.5.22)$$

$$\text{①円筒形容器 (軸方向亀裂) の内圧} \quad : P_0 = \frac{\sigma_y t}{R}$$

$$\text{②球形容器の内圧} \quad : P_0 = \frac{2\sigma_y t}{R}$$

ここで、

P_0 : き裂なしの塑性崩壊圧力

σ_y : 材料の設計温度における降伏応力

b. 貫通き裂

(全体崩壊)

① 円筒形容器(軸方向き裂)の内圧

$$P_c = \frac{P_0}{m} \quad (3.5.23)$$

$$P_0 = \frac{\sigma_y t}{R} \quad (3.5.24)$$

$$m = \left(1 + 1.2987\lambda^2 - 0.026905\lambda^4 + 5.3549 \times 10^{-4}\lambda^6\right)^{0.5} \quad (3.5.25)$$

$$\lambda = \frac{a}{\sqrt{Rt}} \quad (3.5.26)$$

ここで、 a はき裂半長である。貫通した表面き裂（き裂深さ $a=t$ 、き裂全長 $2c$ ）を貫通き裂（き裂全長 $2a=2c$ ）に置き換え、これを貫通き裂の形状とする。

なお、上式は以下の範囲で適用可能である。

$$0 \leq \lambda \leq 5$$

② 球形容器の内圧

$$P_c = P_0 \frac{1}{\left(1 + \frac{8\rho^2}{\cos^2 \phi}\right)^{0.5}} \quad (3.5.27)$$

$$P_0 = \frac{2\sigma_y t}{R} \quad (3.5.28)$$

$$\rho = \frac{a}{\sqrt{Rt}} \quad (3.5.29)$$

$$\phi = \frac{a}{R} \quad (3.5.30)$$

ここで、 a はき裂半長である。貫通した表面き裂（き裂深さ $a=t$ 、き裂全長 $2c$ ）を貫通き裂（き裂全長 $2a=2c$ ）に置き換え、これを貫通き裂の形状とする。

なお、上式は以下の範囲で適用可能である。

$$\frac{t}{R} \leq 0.1 \quad (3.5.31)$$

(4) 破壊評価線図

LBB成立 : 破壊評価線図の内側にある。

LBB不成立 : 破壊評価線図の外側にある。

破壊評価線図は以下の式で表される。

$$K_r = (1 - 0.14(L_r)^2) \{0.3 + 0.7 \exp(-0.65(L_r)^6)\} \quad (3.5.32)$$

$$L_r = L_r^{\max} \quad (3.5.33)$$

$$L_r^{\max} = \frac{\sigma_{\text{eff},y}}{\sigma_y} \quad (3.5.34)$$

$$\sigma_{\text{eff},y} = \frac{\sigma_y + \sigma_u}{2} \quad (3.5.35)$$

ここで、

σ_u : 材料の設計温度における引張強度

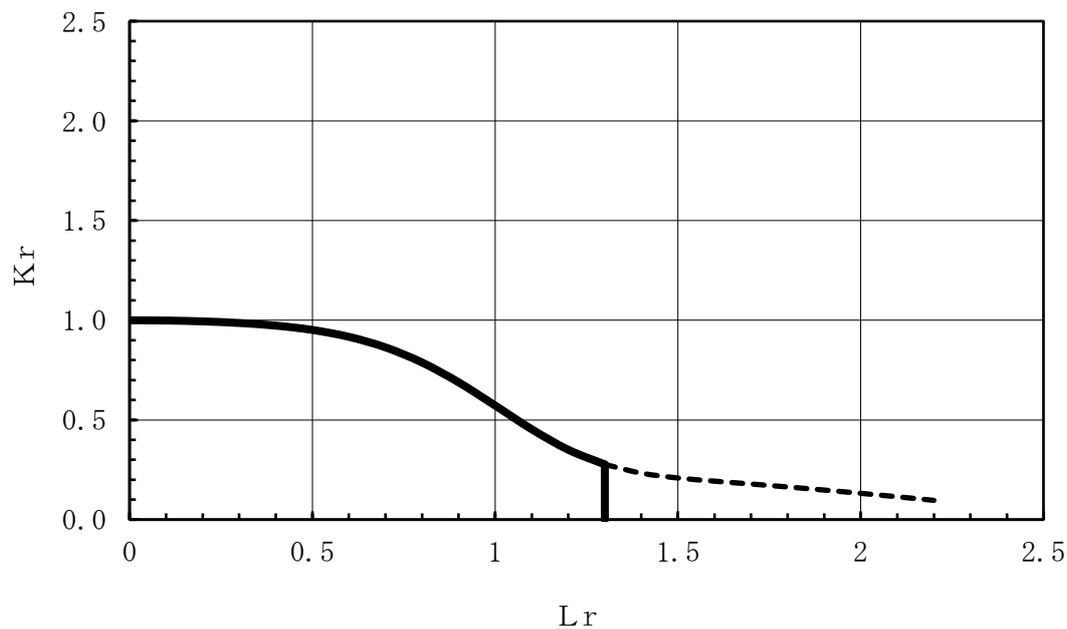


図3.5.2-1 破壊評価線図

3.5.2.1.2 複合圧力容器の場合

(1) 金属ライナを有する複合圧力容器

金属ライナについて3.5.2.1.1項「金属圧力容器、ロケット推進薬タンクの場合」と同一方法により、破壊条件 K_r 、塑性崩壊条件 L_r を評価すること。

複合圧力容器のLBB成立の判定は、以下の①、または②により行うこと。

- ① $K_r < 1$ 、 L_r 任意 : LBB成立
- $K_r \geq 1$ 、 L_r 任意 : LBB不成立
- ② 破壊評価線図の内側にある : LBB成立
- 破壊評価線図の外側にある : LBB不成立

(2) 非金属ライナを有する複合圧力容器

非金属ライナは圧力分担をしないため、複合材が全圧力を分担する。

複合材部は、疲労損傷解析により疲労破壊しないことを確認すること。

複合圧力容器の判定は、非金属ライナの破壊が圧力容器の破壊を誘起しないので、LBBは成立するものとみなす。

3.5.2.2 試験によるLBB成立の判定

3.5.2.2.1 金属圧力容器(ロケット推進薬タンクを含む)の場合

試験によるLBB成立の判定は、以下の二つの評価方法がある。基本的には実機モデルによる方法を選択することが望ましいが、個別の開発において、実機と同一板厚の試験片、または部分モデルによる方法で、実機と同一の応力、またはひずみ状態を実現できる場合は、以下に示す試験片等を用いた評価方法で検証してもよい。

(1) 実機モデルによる判定試験

a. 供試体

実機と同じ構造の容器を実機と同一の方法により製造すること。

予き裂形状は以下の①、または②により設定のこと。き裂幅は0.3[mm]以下のこと。

① き裂進展解析による場合

予き裂は、非破壊検査での検出限界以上とし、貫通直前の表面き裂形状、または貫通直後の貫通き裂寸法を予測し、予き裂の形状 ($a/2c$) を設定すること。

② き裂進展解析によらない場合

貫通き裂寸法が広範囲になるように、予き裂の形状を広範囲 ($a/2c=0.1\sim0.5$) に設定すること。

b. 試験方法

上記a.項①、または②で設定した予き裂を入れ、最大予想使用圧力の繰返し負荷によりLBB成立を確認すること。

c. 判定基準

予き裂が板厚を貫通した時点において欠陥が安定であること。

(2) 試験片による判定試験

a. 試験片

加工、溶接、熱処理条件等は実機を模擬し、板厚は想定部位の図面指示板厚とした試験片を用いること。試験片の形状例を図3.5.2-2に示す。

予き裂形状は実機モデルによる判定試験のa.項①、または②により設定のこと。き裂幅は0.3[mm]以下のこと。

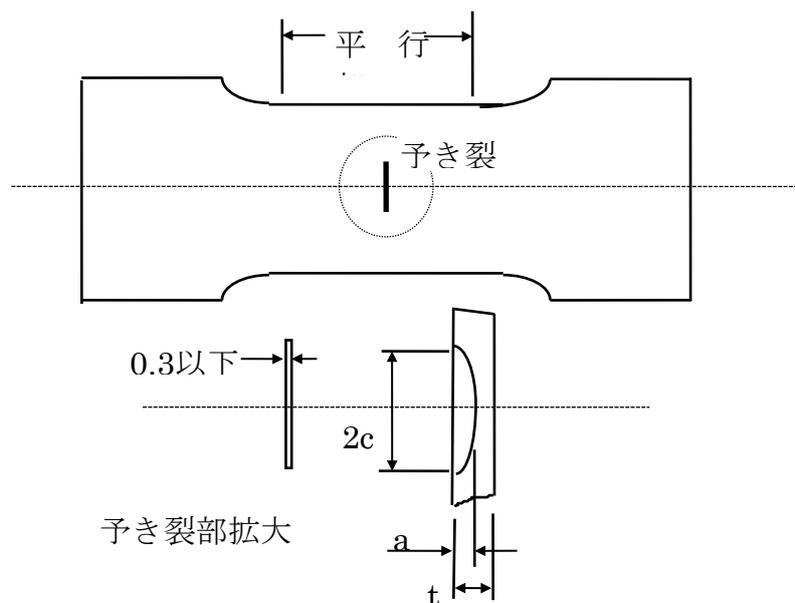


図3.5.2-2 試験片形状例

b. 試験方法

実機モデルによる判定試験のa.項①、または②で設定した予き裂を入れた試験片に、供試体の最大予想使用圧力負荷時と同等の応力、またはひずみを繰返し負荷することにより、LBB成立を確認すること。

c. 判定基準

実機モデルによる判定試験のc.項による。

3.5.2.2.2 複合圧力容器の場合

試験によるLBB成立の判定は、以下の三つの評価方法がある。基本的には実機モデルによる方法を選択することが望ましいが、個別の開発において、部分モデル、または試験片による方法での立証が可能な場合は、以下に示す部分モデル、または試験片を用いた評価方法で検証してもよい。

(1) 金属ライナを有する複合圧力容器

a. 実機モデルによる判定試験

① 供試体

実機と同じ構造の容器を実機と同一の方法により製造すること。

予き裂形状は金属圧力容器の場合の実機モデルによる判定試験のa.項①、または②により設定のこと。き裂幅は0.3[mm]以下のこと。

② 試験方法

金属圧力容器の場合の実機モデルによる判定試験のa.項①、または②で設定した予き裂を入れ、最大予想使用圧力の繰返し負荷によりLBB成立を確認すること。

③ 判定基準

金属圧力容器の場合の実機モデルによる判定試験のc.項による。

b. 部分モデルによる判定試験

① 供試体

実機と同じ構造を部分的に模擬した部分モデルによること。

部分モデルのライナは、加工、溶接、熱処理条件等は実機の複合圧力容器のライナを模擬し、板厚は想定部位の図面指示板厚としたものを用いること。また、実使用時に発生するMises相当応力が降伏応力を超える場合には、引張側／圧縮側それぞれの塑性域を含めて実使用時のひずみサイクルが負荷できること。部分モデル形状例を図3.5.2-3に示す。

予き裂形状は金属圧力容器の場合の実機モデルによる判定試験のa.項①、または②により設定のこと。き裂幅は0.3[mm]以下のこと。

注)円筒両端を治具で固定して、フープ方向のみ
内圧による荷重が負荷される構造となっている
t:ライナ板厚は実機を模擬

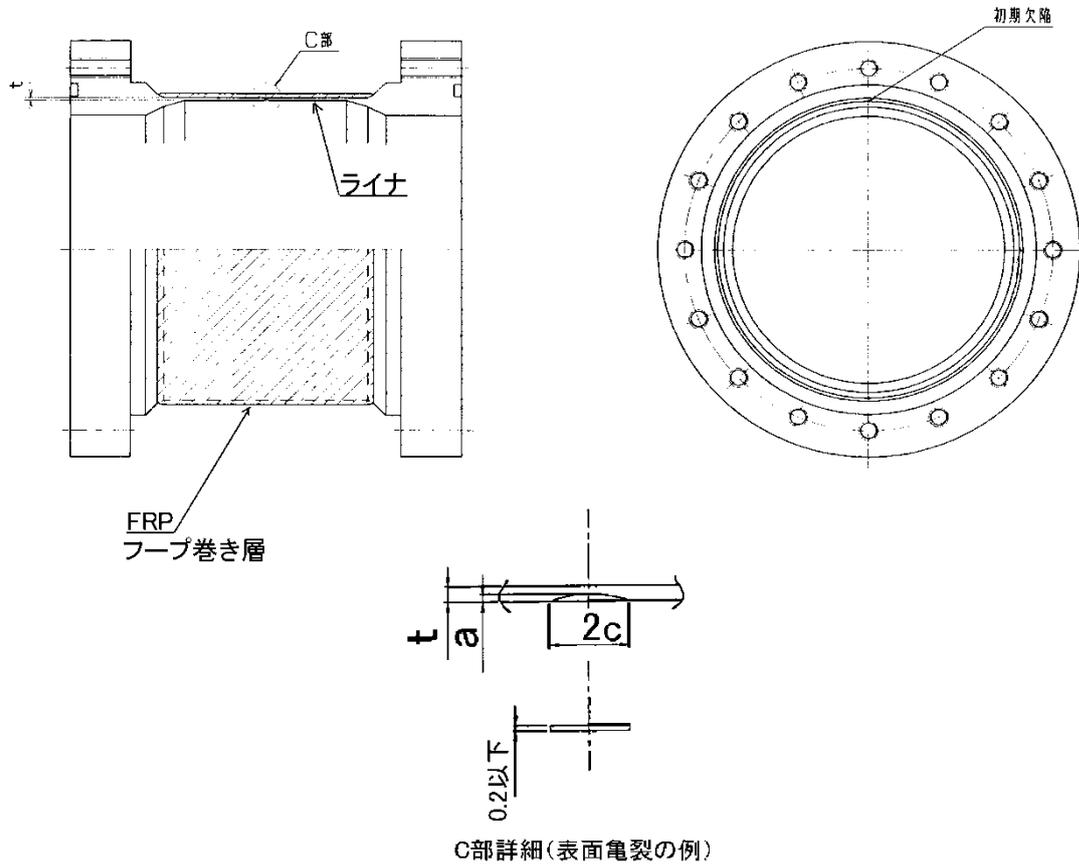


図3.5.2-3 部分モデル供試体の例

② 試験方法

設定した予き裂を入れた部分モデルに、圧力の繰返し負荷によりLBB成立を確認すること。圧力は引張側／圧縮側それぞれの塑性域を含めて実使用時のひずみサイクルが実機と同等となるように設定すること。また、部分モデルの発生ひずみが1軸となる場合には、実機の2軸のひずみを換算して試験を行うこと。

$$\text{換算式： } \varepsilon' = \left((\varepsilon_1)^2 + (\varepsilon_2)^2 \right)^{0.5}$$

ε' : 部分モデルに負荷するひずみ

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$: 実機での発生ひずみ

③ 判定基準

金属圧力容器の場合の実機モデルによる判定試験のc.項による。

c. 試験片による判定試験

金属圧力容器の場合の(2)項の試験片による判定試験を適用する。

ただし、実使用時に発生するMises相当応力が降伏応力を超える場合には、応力制御ではなく、ひずみ制御により試験を実施すること。また、引張側／圧縮側それぞれの塑性域を含めて実使用時のひずみサイクルが実機と同等となるように繰返しひずみを設定すること。

(2) 非金属ライナを有する複合圧力容器

非金属ライナを有する複合圧力容器については、基本的にLBB成立とみなせるため、試験については規定しない。

3.5.3 疲労損傷解析、および試験

高圧ガス機器が十分な疲労強度を持つことを、解析、または試験により確認すること。

3.5.3.1 疲労損傷解析

(1) 解析目的

繰返し荷重を受ける高圧ガス機器の応力が高い部位について、疲労損傷解析を実施し、3.1.5項(2)加圧サイクルの要求寿命を満足できることを確認する。

本解析は圧力容器（表3.1.3-1の番号1,2）、およびベローズ（表3.1.3-1の番号5,6）に適用する。さらに、表3.1.3-1の番号3,4,7の安全係数を満足できない圧力配管、フィッティング、およびその他のコンポーネントについても適用する。

(2) 解析方法、解析条件

- a. 機器のデューティサイクル（荷重履歴）を基にピーク応力の繰返し応力振幅と負荷繰返し数を算出し、材料の設計疲労曲線と比較し、要求寿命を満足できることを（5）判定基準に従いマイナー則（式(3.5.39)）によって確認すること。
- b. 繰返し応力が弾性範囲を越えた場合には、繰返しひずみ（ひずみ振幅）を評価し、そのひずみに材料の設計温度における縦弾性係数を乗じて設計温度における仮想弾性応力振幅の値を求めること。
- b2. 平均応力がある場合には、次のSWT式により等価応力振幅に換算すること。

$$\sigma_{aeq} = \sqrt{\sigma_a(\sigma_a + \sigma_m)} \quad (3.5.35-2)$$

ここで、

- σ_{aeq} : 平均応力がある場合の等価応力振幅
- σ_a : 応力振幅
- σ_m : 平均応力（ただし、圧縮の場合は $\sigma_m = 0$ とする。）

なお、式(3.5.35-2)の適用条件はKHKS 0220 (2020)を参照すること。

- c. 設計疲労曲線に示される縦弾性係数と設計温度における材料の縦弾性係数が異なる場合は、繰返し応力振幅、または仮想弾性応力振幅を縦弾性係数の比で補正し、設計疲労曲線に適用すること。
- d. 圧力サイクルと流体励起振動、機械的振動による振動応力が重畳される場合は、圧力サイクルによる疲労と振動による疲労は独立して加わるものとし、累積疲労としてマイナー則（式(3.5.39)）により加算して評価する。
- e. 応力振幅には、コーナー、ノッチ、ホール、ジョイント等の形状に起因する応力集中、表面粗さ等の仕上げ状態、使用時の温度、雰囲気等の環境条件による影響を考慮に入れること。

(3) 金属材料の最適疲労曲線と設計疲労曲線

a. KHKSによる場合

KHKS 0220 (2020)の最適疲労曲線、または設計疲労曲線に該当する材料の場合は、これによることができる。この場合には、最適疲労曲線の信頼性に基づいた疲労強度、および疲労寿命の安全係数が与えられており、適宜選択することができる。

b. 公的機関が発行する疲労試験データ集による場合

公的機関が発行する信頼性のある疲労試験データ集（MMPDS、物質・材料研究機構が発行する「疲労データシート」と「宇宙関連材料強度データシート」、等）に該当する材料の場合には、これによることができる。

c. 疲労曲線を予測する場合

低サイクル疲労（約 10^5 回以下）、および高サイクル疲労（約 10^5 回以上）に対して疲労曲線を予測する場合には、以下の修正したMansonの式によること。

$$\Delta\varepsilon_t = 0.0266(\varepsilon_f)^{0.155} \left(\frac{\sigma_u}{E} \right)^{-0.53} (N_f)^{-0.56} + 1.17 \left(\frac{\sigma_u}{E} \right)^{0.832} (N_f)^{-0.09} \quad (3.5.36)$$

$$\Delta\sigma = E\Delta\varepsilon_t \quad (3.5.37)$$

ここで、

- $\Delta\varepsilon_t$: 全ひずみ範囲 ($2\varepsilon_a$)
- $\Delta\sigma$: 仮想弾性応力範囲 ($2\sigma_a$)
- N_f : 疲労LBB寿命
- E : 設計温度における縦弾性係数
- σ_u : 設計温度における引張強度
- ε_f : 設計温度における破断ひずみ（真破断ひずみ）

ただし、 E 、 σ_u 、 ε_f は5.1(1)項の材料基礎試験によって求めること。

また、設計疲労曲線は、この式に疲労強度で2、疲労寿命で20の安全係数を考慮し、得られた二つの曲線のいずれか低い方を包絡した曲線とすること。

この式はひずみ制御両振り疲労試験（平均応力0）の結果であるが、必要に応じて平均応力の補正を行う。

d. 疲労曲線を作成する場合

疲労曲線を作成する場合には、c.に示した修正したMansonの式によること。ただし、全ひずみ範囲の異なる5本以上の試験片を用いてひずみ制御両振り疲労試験を実施し、修正したMansonの式と実験結果の適合を確認すること。

適合しない場合には、多数の試験片を用いてひずみ制御両振り疲労試験を実施し、最適疲労曲線を求めること。また、設計疲労曲線はこの式に疲労強度で2、疲労寿命で20の安全係数を考慮し、得られた二つの曲線のいずれか低い方を包絡した曲線とすること。

(4) 複合材

a. 炭素繊維

炭素繊維については、疲労損傷解析（ストレスラプチャ解析）は不要とする。

b. ガラス繊維その他

ガラス繊維その他については、実運用期間によらず疲労損傷解析（ストレスラプチャ解析）を行い、以下となるように材料を選定する。

$$\frac{\text{実運用期間末期の繊維のストレスラプチャ強度}}{\text{複合材の繊維方向引張強度}(S_{cu})} > 0.625$$

なお、ガラス繊維その他で炭素繊維と同等のストレスラプチャ特性を有することが実証される場合は、炭素繊維と同等に扱うことが出来る。

(5) 判定基準

以下のマイナー則の式を満足すること。

$$\sum \frac{n_i}{N_i} \leq 1.0 \quad (3.5.39)$$

ここで、

N_i : 設計疲労曲線上で各々の繰返し応力振幅 σ_{ai} に対応する許容負荷繰返し数

繰返し応力振幅を定めるためのピーク応力の応力強さは、以下とすること。

$$P_m + P_b + Q + F$$

または、

$$P_L + P_b + Q + F$$

ここで、

F : 段差、切欠等の構造不連続に伴う応力集中によって一次応力 (P_m 、 P_L 、 P_b)、および二次応力 (Q) に加算される応力の増加分 (ピーク応力)、溶接部の角変形や目違いによる応力の増加分も含める。

n_i : 各々の繰返し応力振幅の負荷繰返し数

3.5.3.2 疲労損傷試験

繰返し荷重が負荷される部位、およびその部位の応力に影響を与える隣接部分について、実機の供試体と幾何学的相似性を保った試験体(圧力容器)を製作し、3.1.5項(2)加圧サイクルの要求寿命の4倍の回数の試験を実施し、要求寿命中に疲労破壊しないことを保証すること。負荷荷重レベルは、実機の供試体と本試験片の幾何学的相似性を考慮して補正すること。

試験方法については、JIS B 8266 附属書8「6. 実験的応力解析」、ASME Section VIII Division 2 Appendix-6等を参照してもよい。

3.5.4 き裂進展解析、および試験

繰返し荷重を受ける高圧ガス機器の応力が高い部位について、3.1.5項「寿命要求」に対して4倍以上の寿命を有することを、以下に示す解析、または試験により確認すること。

3.5.4.1 き裂進展解析

3.5.4.1.1 解析目的

製造時における微小な欠陥が、3.1.5項(2)「加圧サイクルの要求寿命」で破壊に至るまで成長しないことを解析的に確認する。本解析は圧力容器に適用すること。さらに、表3.1.3-1の安全係数を満足できない圧力配管、フィッティング、およびその他のコンポーネントについても適用する。

なお、本解析は複合圧力容器の場合は、金属ライナのみに適用する。

3.5.4.1.2 解析方法、解析条件

解析に当たっては、解析理論とその適用範囲を明確にすること。

また、解析に使用する初期欠陥寸法は、以下の①、または②より設定する。

- ① 非破壊検査を実施する箇所
非破壊検査で検出できる寸法。
ただし、 $2c=0.25$ [mm]を最小限度とする。
- ② 非破壊検査が実施できない箇所
保証試験（欠陥検出圧力試験）で保証する寸法。
ただし、 $2c=0.25$ [mm]を最小限度とする。

ここで、保証試験圧力は最大予想使用圧力にプルーフファクタを乗じて得られた圧力とする。初期欠陥寸法とプルーフファクタは以下の関係式による。

$$a_i = \frac{a_{cr}}{(P.F)^2} \quad (3.5.40)$$

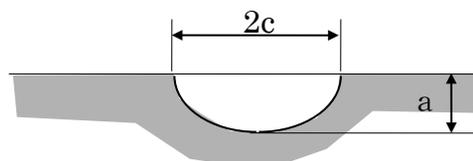
ここで、

P.F : プルーフファクタ

a_{cr} : 最大予想使用圧力を負荷したときに、高圧ガス機器が破壊、または貫通する限界欠陥寸法（深さ）。

a_i : 保証試験（欠陥検出圧力試験）で保証する初期欠陥寸法（深さ）。

a_{cr} と a_i の計算に際して、き裂形状は下図のように定める。



ここで、 a/c は、製造方法、および荷重条件等から決まる。

$$(0.2 \leq a/c \leq 1)$$

上記を初期欠陥とし、き裂進展解析を行う。

(1) き裂進展速度の式

き裂進展速度は、以下のParis則、またはForman則によることができる。この他の式を使用する場合には、その出典を明確にすること。

なお、材料定数(C_1 , C_2 , m_1 , m_2)は、常温における数値を使用してもよい。また、破壊靱性(K_c)は設計温度における数値を使用すること。

$$\frac{da}{dN} = C_1 (\Delta K)^{m_1} \quad (\text{Paris則}) \quad (3.5.41a)$$

$$\frac{da}{dN} = \frac{C_2 (\Delta K)^{m_2}}{(1 - R_1)K_c - \Delta K} \quad (\text{Forman則}) \quad (3.5.41b)$$

ここで、

- a : 欠陥深さ
- N : 負荷繰返し数
- ΔK : 応力拡大係数Kの変動範囲
 $\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$ ただし、 K_{\min} が負の時は $\Delta K = K_{\max}$ とする。
- C_1, C_2 : 常温における材料定数
- m_1, m_2 : 常温における材料定数
- R_1 : 応力比 ($R_1 = K_{\min} / K_{\max}$)
- K_c : 設計温度における破壊靱性

上記の式で、 C 、 m 、 K_c の値を設定する場合、適正な試験条件で実施された信頼性の高いデータに基づくこと。データの信頼性が保証できればデータの平均値を用いてよい。

(2) 応力拡大係数

a_{cr} 、 a_i 、およびき裂進展速度の計算に際して、応力拡大係数は以下に示す式によることができる。以下に示す式は、a.引張り、および曲げを受ける平板の応力拡大係数の式、b.円筒容器の応力拡大係数の式であるが、球形容器の応力拡大係数についてもこれらの式を用いてよい。

a. 平板内の半だ円表面き裂の応力拡大係数

平板内の半だ円表面き裂の応力拡大係数 K_I は、(3.5.7)～(3.5.14)式を使用して求める。

なお、この式には塑性補正係数が考慮されており、小規模降伏条件を満足しない場合にも適用できる。

b. 円筒内の軸方向半だ円表面き裂の応力拡大係数

円筒内の軸方向半だ円表面き裂の応力拡大係数 K_I は、以下の式で求める。

・ 内圧

最深点

$$K_I = \sigma_h \sqrt{\pi t f} \quad (3.5.42)$$

$$\sigma_h = P \frac{(R_o)^2 + (R_i)^2}{(R_o)^2 - (R_i)^2} \quad (3.5.43)$$

$$f = 0.25 + \frac{0.4759\alpha + 0.1262\alpha^2}{\left[0.102 \left[\frac{R_i}{t}\right] - 0.02\right]^{0.1}} \quad (3.5.44)$$

$$\alpha = \frac{\frac{a}{t}}{\left(\frac{a}{c}\right)^{0.58}} \quad (3.5.45)$$

表面点

$$K_I = \sigma_h \sqrt{\pi t f_s} \quad (3.5.46)$$

$$f_s = f \left[1.06 + 0.28 \left(\frac{a}{t}\right)^2 \right] \left(\frac{a}{c}\right)^{0.41} \quad (3.5.47)$$

・ 任意分布応力

最深点

$$K_I = \sqrt{\pi t} \left[\sum_{i=0}^3 \sigma_i g_i \right] \quad (3.5.48)$$

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma_1 \left[\frac{z}{t}\right] + \sigma_2 \left[\frac{z}{t}\right]^2 + \sigma_3 \left[\frac{z}{t}\right]^3 \quad (3.5.49)$$

$$g_i = A_0 + \frac{A_1 \alpha_i + A_2 (\alpha_i)^2 + A_3 (\alpha_i)^3 + A_4 (\alpha_i)^4 + A_5 (\alpha_i)^5}{\left[0.102 \left(\frac{R_i}{t}\right) - 0.02\right]^{0.05}} \quad (3.5.50)$$

$$\alpha_i = \frac{\frac{a}{t}}{\left(\frac{a}{c}\right)^\beta} \quad (3.5.51)$$

i	A ₀	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	β
0	0.00	1.7767	-2.5975	2.7520	-1.3237	0.2363	0.58
0*	0.20	0.5000	0.0962	0.000	0.000	0.000	0.58
1	0.00	0.1045	0.4189	0.000	0.000	0.000	0.22
2	0.00	0.02038	-0.00397	0.42126	0.000	0.000	0.10
3	0.00	0.07283	-0.36006	0.66883	0.000	0.000	0.05

* : 適用範囲 $a/c < 0.2, \alpha > 2$

表面点

$$K_I = \sqrt{\pi t} \left[\sum_{i=0}^3 \sigma_i g_{si} \right] \quad (3.5.52)$$

$$g_{si} = g_i \left[A_6 + A_7 \left[\frac{a}{t} \right]^2 \right] \left[\frac{a}{c} \right]^\gamma \quad (3.5.53)$$

i	A ₆	A ₇	γ
0	1.06	0.28	0.41
1	0.25	0.20	0.26
2	0.07	0.16	0.06
3	0.085	0.02	0.00

ここで、

- A_{0~7} : 補正係数の定数
- f : 最深点の補正係数 (圧力)
- f_s : 表面点の補正係数 (圧力)
- g_i : 最深点の補正係数 (任意分布応力) (i = 0 ~ 3)
- g_{si} : 表面点の補正係数 (任意分布応力) (i = 0 ~ 3)
- K_I : 応力拡大係数
- P : 圧力
- R_i : 円筒内半径
- R₀ : 円筒外半径
- t : 円筒肉厚
- z : 内面 (き裂側) からの肉厚方向の距離
- σ : 板厚方向の非線形応力分布 (多項式近似)
- σ_h : フープ応力 (周方向応力) の最大値
- σ_i : 多項式近似の応力分布 (i = 0 ~ 3)
- α : き裂寸法比のパラメータ (内圧)
- α_i : き裂寸法比のパラメータ (任意分布応力) (i = 0 ~ 3)
- β : き裂寸法比のパラメータ (任意分布応力) の定数
- γ : 表面点の補正係数 (任意分布応力) の定数

なお、これらの式は以下の範囲で適用可能である。

・内圧

$$0.05 \leq a/t \leq 0.85$$

$$0.1 \leq a/c \leq 1$$

$$0.2 \leq \alpha$$

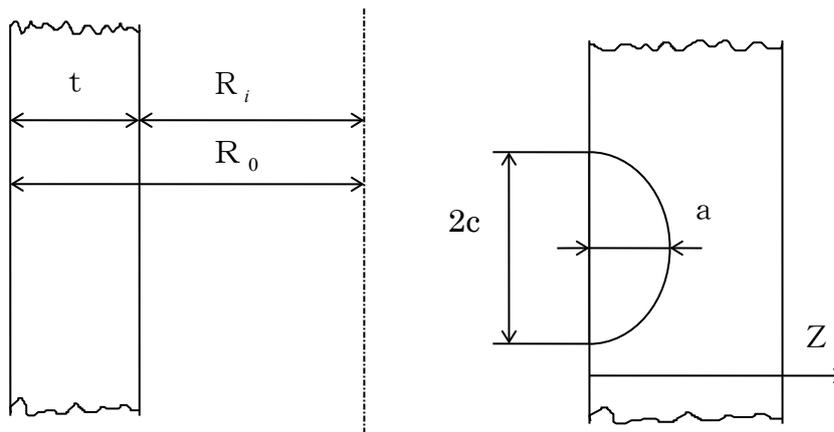
$$1 \leq R_i/t \leq 10$$

・任意分布応力

$$0.05 \leq a/t \leq 0.85$$

$$0.1 \leq a/c \leq 1$$

$$1 \leq R_i/t \leq 10$$



これらの式を適用する場合には、次式の小規模降伏条件が満足されなければならない。

$$a, t - a \geq 2.5 \left(\frac{K_I}{\sigma_y} \right)^2 \tag{3.5.54}$$

上記の式を満足しない場合には、応力拡大係数に塑性域補正を考慮すること。塑性域補正は次式を解くか、繰返し計算で行う。

$$K_I^* = f \left[\sigma, a + \frac{1}{2\pi} \left[\frac{K_I^*}{\lambda \sigma_y} \right]^2 \right] \tag{3.5.55}$$

ここで、

K_I^* : 塑性領域補正をした応力拡大係数

$f[]$: 応力拡大係数の式 (関数式)

σ : 応力

a : き裂寸法 (き裂深さ a 、またはき裂長さ c)

σ_y : 降伏応力

λ : 塑性拘束係数 (最深点 $\lambda = 1.68$ 、表面点 $\lambda = 1$)

3.5.4.1.3 判定基準

以下の式を満足すること。

$$S.F_1 \times N < N_D \quad (3.5.56)$$

ここで、

$S.F_1$: 安全係数 ($S.F_1=4$)

N : 負荷繰返し数

N_D : 貫通、または不安定破壊に至るまでの負荷繰返し数

3.5.4.2 き裂進展試験

(1) 試験目的

本試験は、製造時の欠陥を模擬した試験片に、3.1.5項(2)「加圧サイクルの要求寿命」相当の繰返し応力を負荷し、要求寿命を満足することを確認する試験である。

(2) 試験方法、試験条件

- a. 初期欠陥は、非破壊検査での検出限界以上とする。ただし、 $2c=0.25[\text{mm}]$ を最小限界とする。欠陥の先端には、疲労き裂を有すること。
- b. 試験片は、表面切り欠き試験片とし、板厚は想定部位の図面指示板厚とすること。加工、溶接、熱処理条件等は、実機を模擬すること。
- c. 表面切欠の形状は、 $0.2 \leq a/c \leq 1$ とすること。
- d. 3.1.5項の「寿命要求」で設定した加圧サイクルで発生する応力を負荷すること。
- e. 試験は、3.1.2.4項の「温度条件」で設定した設計温度で実施すること。
- f. 試験片の数は、3本以上とし既存データの有無、試験方法等を考慮して決定すること。

(3) 判定基準

3.1.5(2)項に示す「加圧サイクルの要求寿命」に対して4倍以上の寿命を有すること。

3.5.5 剛性解析、および試験

高圧ガス機器以外の構造系との間の有害な相互作用を抑えるため、高圧ガス機器の剛性、質量、固有振動数、スロッシング特性その他を解析、または試験によって求め、上位システムへ提供すること。または上位システムの要求している範囲を満足していることを確認すること。

3.5.6 ベローズ関連解析

表3.1.3-1の番号6のベローズは以下の解析を行うこと。表3.1.3-1の番号5のベローズは金属圧力容器として扱い、ベローズ関連解析に加えて、金属圧力容器としての解析も行うこと。

3.5.6.1 応力解析、および判定基準

JIS B 8265 附属書N、JIS B 8277、または有限要素法、あるいはこれと同等のものにより最大予想使用圧力、最大変位の状態での各部応力を解析し、許容範囲にあることを示すこと。

座屈、および振りについてはEJMA 8th Edition for Unreinforced Bellows、または同等の解析式による。

補強付ベローズ（Braid式等）については実績ある解析式、判定基準による。加工硬化を考慮した材料強度を使用する場合は、値の根拠を示すこと。

3.5.6.2 寿命解析、および判定基準

解析式、および判定基準は、JIS B 8265 附属書N、JIS B 8277、または本技術基準 3.5.3.1項「疲労損傷解析」、あるいはこれらと同等のものによる。

解析では圧力サイクルと変位サイクルを考慮すること。また、これらと流体励起振動、機械的振動による振動応力が重畳される場合は、3.5.3.1.(3)d.を適用する。

疲労曲線では、加工硬化を考慮しないこと。ただし、信頼性のある加工硬化材料の疲労強度データがある場合は、その使用を認める。

3.5.6.3 流体励起振動

ベローズ内の流れにより流体励起振動が起こる可能性を、解析、または試験で評価すること。流体励起振動が起こる場合は、抑制できることを解析的に示すこと。

3.5.6.4 ベローズ拘束

(1) 要求事項

必要な可動方向、可動範囲以外にベローズが有害な変形をしないように拘束されていること。

(2) 解析方法

幾何学的、機構学的、力学的に解析すること。

(3) 判定基準

ベローズは機械的に拘束され、ベローズ推力の補償、許容値以上の変形防止、過大反力（モーメントを含む）防止、関節軸受けの過大摩擦力防止、伸縮時の体積変化に伴う圧力変動補償、整流ライナのコンタミネーションと崩壊防止、気体・液体の氷結による固着などの不具合防止策がとられていること。

3.6 複合圧力容器の損傷管理要求

複合圧力容器については、損傷の種類に対して損傷予防管理、もしくは損傷許容設計のいずれか、または両方を実施すること。本項で規定する損傷の種類は機械的損傷のうち、衝撃損傷、表面切断と擦過である。

損傷予防管理とは、起こりうる損傷の防止対策を施すとともに検査によって損傷が生じていないことを実証することで、製品の健全性を保証する。

損傷許容設計とは、想定した損傷に対して製品の機能要求を損なわない設計をすることで製品の健全性を保証することをいう。

容器の設計時に、損傷の種類、想定、損傷管理手法の決定を実施すること。

なお、損傷管理要求は、破壊に対する安全係数が4.0未満、または全肉厚が6.35mm未満の複合圧力容器を対象とする。

3.6.1 損傷予防管理

容器の損傷予防管理は損傷予防管理計画の作成、損傷予防管理計画の遵守、損傷予防管理記録の作成からなる。

3.6.1.1 損傷予防管理計画の作成

損傷予防管理の実行組織を作り、以下を含めた計画を作成すること。

- ① 4.7.4項の受入検査後、または6.1項再使用検査後から発射整備作業完了までのすべての工程について衝撃損傷、表面切断、擦過の危険性のある作業を抽出すること。
- ② 損傷が発生する危険性のある作業については、損傷予防策を明確にすること。
- ③ 有効な容器保護方法について規定すること。
- ④ 損傷の有無の確認時期とその確認方法。

損傷の有無の確認時期とその確認方法は図3.6.1-1に示すフローに基づいて決定すること。なお、損傷の確認は目視試験、超音波探傷試験、アコースティック・エミッション（以下「AE」）計測により行うこと。

a. 目視試験

目視試験は必ず行うこと。目視試験の対象を表4.7.4-1に示す。

b. 超音波探傷試験

目視試験で損傷を検出した場合は超音波探傷試験により有意な信号の確認を行うこと。なお、この場合には、欠陥検出能力や探傷手順が適切である事を示すこと。

c. AE計測

AE計測を加圧試験と共に極力実施しデータを取得すること。なお、この場合には、データの取得方法が適切である事を示すこと。

3.6.1.2 損傷予防管理計画の遵守、および損傷予防管理の記録

3.6.1.1の損傷予防管理計画を遵守して損傷予防管理を実施し、記録すること。

不具合対応などの計画外作業は、その作業内容と損傷予防管理計画について検討の上、実施すること。

3.6.1.3 損傷の検出と判定

損傷を検出した場合は、その検査結果を記録すること。検査結果は損傷の様態や損傷付加時の状況について詳細に記録すること。

損傷の程度により、解析、または試験の結果に基づき使用可否を判定すること。

3.6.2 損傷許容設計

対象とする損傷の種類に対応して、損傷許容設計を実施する場合は、損傷許容設計であることを明示し、実証すること。

損傷許容設計の実証は、解析、または試験による。試験による実証は、フライト品と同一の仕様で設計し、製造した容器に対して、想定される最も厳しい位置に許容する上限の損傷を与えた上で、圧力による破壊試験を実施し、要求性能を満足することを確認することで行う。

3.6.3 損傷管理に対する配慮

損傷予防管理、および損傷許容設計のいずれの場合も、a～dの事項を設計時に考慮すること。

- a. 防護層の設置。
- b. 上位システムが許容する範囲での、設計標定部の強度余裕の十分な確保。
- c. 設計標定部が損傷を受ける部位にならないような設計上の配慮。
(例:CFRPフープ層が設計標定の場合の、最外層がフープ層にならないような設計)
- d. 容器の外部に断熱部材などを設置する場合に、万一の場合の保護部材になることを考慮した、大きさ、厚さ、範囲などの設計。

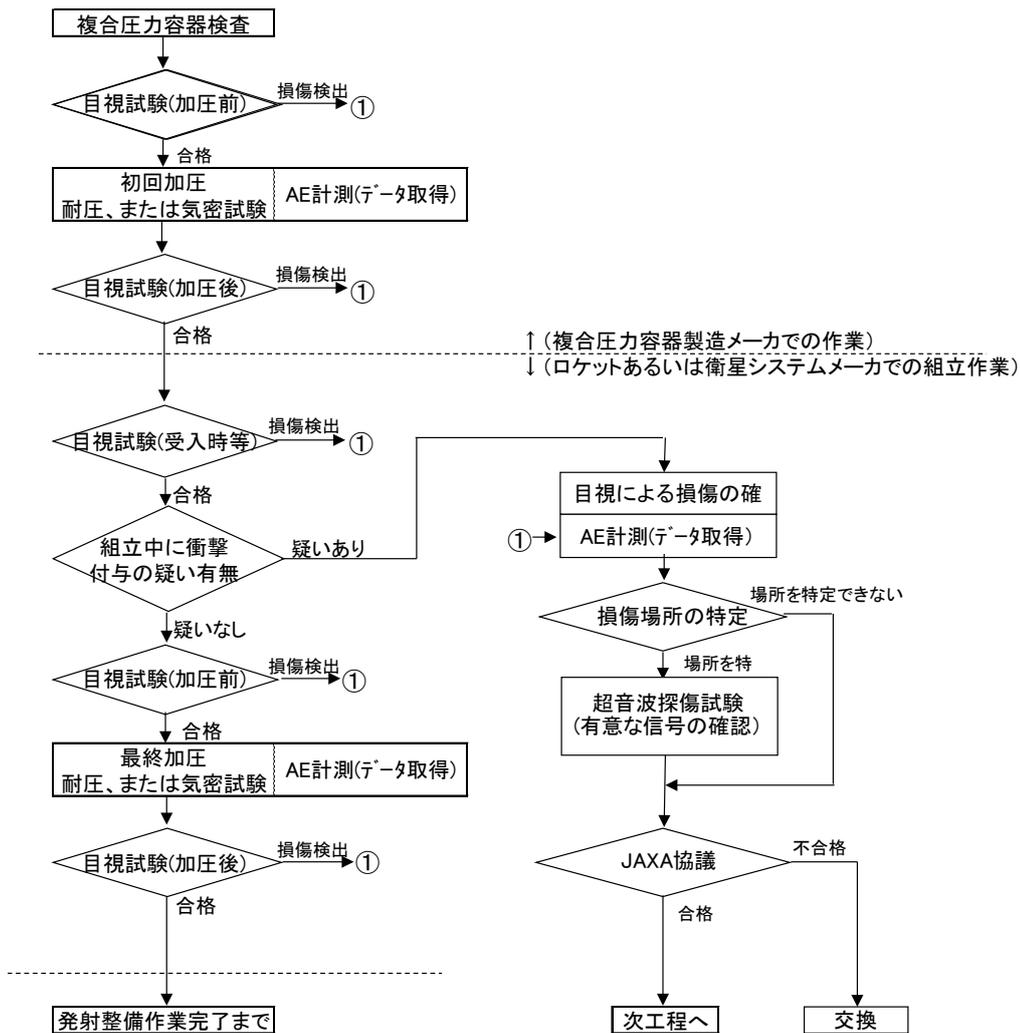


図3.6.1-1 複合圧力容器の検査、および試験フロー

4. 製造

高圧ガス機器の製造工程は、信頼性、作業性、コスト等のトレードオフによって、適切と考えられるものであること。機械加工、板金加工、溶接、熱処理、超音波洗浄等は材料の機械的、および物理的特性を許容限度以下に低下させるものでないこと。製造工程は、高圧ガス機器の製造が完了した時点で設計、および解析に使用した材料特性を保証できること。

以下に示す製造方法の健全性については、認定試験において確認すること。（開発試験を実施する場合にはそこで確認してもよい。）なお、材料、製法、製造設備などが変更された場合、実機の品質確保に関し、製造上問題ないことを確認すること。

代表的な製造フローを図4-1(金属高圧ガス機器の場合)、図4-2(複合圧力容器の場合)、および図4-3(配管組立・推進系組立の場合)に例示する。

4.1 加工、成形

高圧ガス機器の加工方法、および成形方法は、その材料の機械的性質に影響を及ぼす。これらについては、認定試験で確立した基準・規定により管理すること。

4.2 溶接

溶接に当たっては、適切な溶接方法、継手形状、および溶加材を選定し、設計で設定した機械的特性を有すること。

4.2.1 一般要求

(1) 溶接継手の位置、形状、寸法

溶接継手は溶接部の強度低下、熱影響範囲、応力集中、溶接方法等を考慮して位置、形状、寸法を適切に設定すること。

(2) 溶接継手部の増厚

溶接継手部が、母材部より強度低下を生じる場合には、溶接部に強度低下を考慮すること。このため必要な場合、溶接継手部板厚は図4.2-1に示す増厚を行うこと。

(3) 溶接作業等

溶接作業者は、AWS D17.1に規定する有資格者、またはこれと同等の者が実施すること。

(4) 溶接機の検定

溶接機の性能と作動安定性を判定するため、溶接機の異なる形式ごとに、規定設備検定を実施し、溶接性能を維持すること。

(5) 開先形状

溶接継手の開先形状は、原則として実績のあるものから選定すること。代表的な開先形状を図4.2-2に示す。

(6) 補修溶接

補修溶接を行う場合、同一溶接部の補修溶接回数は原則として2回以内とすること。

4.2.2 溶接施工管理

溶接施工管理は、溶接施工要領書を作成して行うこと。特に強度に影響を与える下記の項目に注意すること。

(1) 溶接条件

溶接条件は、5.1.2項の「溶接施工方法の決定、および確認」で設定した条件であること。実際に溶接した条件を記録に残すこと。溶接施工時の雰囲気、および設備の管理を実施し、上記の条件の再現性を保つこと。

(2) 開先部

溶接前に開先部の清掃状態を確認し、溶接強度に影響を与える油脂、さび等がないことを確認すること。

(3) 溶接変形、目違い防止

溶接継手は、溶接変形(特に角変形)、目違いの最小化を図るために適切に溶接治工具へセットアップされること。

(4) 溶接ビード、裏波

溶接ビード、裏波は、応力集中を避けるため、なめらかな形状となる溶接条件を設定すること。裏波が確認できない場合は、開発試験、または認定試験において確認すること。

(5) 目外れ防止

対象となる溶接線に適切に溶接されるようにすること。

(6) 溶接欠陥

溶接部の表面欠陥、および内部欠陥が規定値内となる溶接条件を設定すること。

4.3 熱処理

高圧ガス機器を製造する過程において、焼なまし、溶接後熱処理、溶体化、時効等の適切な熱処理を行うこと。ただし、厚さが薄い容器の溶接部のように、構造上熱処理による変形を生じることが予想され、熱処理を行うことが適切でないと判断される場合はこの限りでない。

4.4 非金属ライナの成形

非金属ライナの成形に当たっては、以下の項目について適切な管理を行うこと。

- a. 原材料の有効寿命管理
- b. 接着剤を用いる場合はその有効寿命管理
- c. 接着剤を用いる場合はその配合成分比
- d. 熱硬化を行う場合は加熱炉の温度・圧力プロファイル

4.5 フィラメントワインディング

複合材のフィラメントワインディングに当たっては、5.1.3項「試作試験」において設定した基準により、以下の項目の適切な管理を行うこと。

(1) ワインディング工程

- a. 繊維、およびマトリクス樹脂の有効寿命管理
- b. 各層における繊維の配向角
- c. 巻き付け回数、または使用繊維質量
- d. ワインディング時の繊維張力
- e. マトリクス樹脂の配合成分比(2種以上を混合して用いる場合)
- f. ワインディング作業中のマトリクス樹脂温度
- g. 繊維体積含有率 (V_f)
- h. 巻き付け速度

(2) 硬化工程

- a. 熱硬化を行う場合は加熱炉の温度・圧力プロファイル
- b. 時間硬化を行う場合はその時間

4.6 塑性変形処理

複合材成形完了後に内圧負荷による金属ライナの塑性変形処理を行う場合には、その圧力の設定について以下の要求を満足すること。

- a. 複合圧力容器として設定した耐圧試験圧力の100～110%の圧力を目安として実施すること。(図3.4.3-4で例を示すと、実線O-T₀-T₁に従い加圧する。)
- b. 塑性変形処理に使用する流体は、原則として非圧縮性流体を使用すること。
- c. 外観、容積、寸法、およびその他の検査結果の評価により、金属ライナ部の座屈について確認すること。
- d. 実施に当たっては、非圧縮性流体で行う耐圧試験に適用される安全規定に従うこと。

4.7 検査、試験

高圧ガス機器の検査・試験工程は、検査、試験の目的、および対象に適合した信頼性の高いものであること。また、それらが機器の品質を低下させないように考慮すること。

高圧ガス機器を製造する過程において、以下に示す検査、試験を実施し、記録に残すこと。

4.7.1 材料受入検査

4.7.1.1 金属材料受入検査

ミルシート等により受け入れた材料の特性が要求仕様を満足することを確認すること。

4.7.1.2 複合材受入検査

検査成績書等により材料の特性が以下の項目について要求仕様を満足していることを確認すること。

(1) 繊維

- a. 繊維銘柄
- b. 繊維としての引張強度
- c. 繊維としての弾性係数
- d. 破断ひずみ
- e. 使用有効期限
- f. その他設計、製造上必要となる項目

(2) マトリクス樹脂(樹脂単体で受け入れる場合)

- a. 樹脂銘柄
- b. 組成成分
- c. 粘度
- d. 使用有効期限
- e. その他設計、製造上必要となる項目

(3) マトリクス樹脂(プリプレグとして受け入れる場合)

- a. 樹脂銘柄
- b. ガラス転移温度
- c. 樹脂含有率
- d. ゲルタイム
- e. 樹脂流出量
- f. 使用有効期限
- g. その他設計、製造上必要となる項目

4.7.1.3 非金属ライナ受入検査

検査成績書等により、材料の特性が以下の項目について要求仕様を満足していることを確認すること。

- (1) 生ゴム状態
 - a. 外観
 - b. 寸法

- (2) 加硫中、または加硫後
 - a. 密度
 - b. 加硫中の粘度
 - c. 加硫後の硬度
 - d. 加硫後の破断ひずみ
 - e. その他設計、製造上必要となる項目

- (3) 接着剤(使用する場合)
 - a. 接着剤銘柄
 - b. その他設計、製造上必要となる項目

4.7.2 部品検査(金属材料)

- (1) 寸法検査
図面要求を満足していることを確認すること。

- (2) 外観検査
有害な加工傷、打痕、および腐食等がないこと。

- (3) 非破壊検査
浸透探傷試験、渦電流探傷試験、または超音波探傷試験を実施し、有害な欠陥がないことを確認すること。この場合に設定する欠陥検出能力は、3.5.4.1.2項①の非破壊検査で検出できる寸法を意味する。
 - a. 浸透探傷試験
浸透探傷試験を適用する場合には、AMS2645、もしくはASTM-E1417、またはこれらと同等の規格に規定する浸透探傷試験を実施すること。
 - b. 渦電流探傷試験
渦電流探傷試験を適用する場合には、欠陥検出能力や探傷手順が適切であることを示すこと。
 - c. 超音波探傷試験
超音波探傷試験を適用する場合には、欠陥検出能力や探傷手順が適切であることを示すこと。

形状の理由で、これらの非破壊検査が適用できない場合には、欠陥検出能力を有する適切な代替方法を選定して実施すること。

4.7.3 溶接部検査

4.7.3.1 溶接条件

溶接施工が4.2項で設定された条件で行われていることを確認すること。

4.7.3.2 外観検査等

溶接位置が図面要求どおりであることを確認すること。また、余盛り形状等が適切であることを確認すること。

4.7.3.3 溶接変形、目違い

溶接変形、目違いが図面要求内であることを確認すること。

4.7.3.4 溶接ビード、裏波

溶接ビード、裏波の形状が図面要求内であることを確認すること。

溶接裏波については、原則目視試験による確認をすること。

4.7.3.5 溶接欠陥

(1) 表面

部品形状や作業性を考慮し、浸透探傷試験、渦電流探傷試験、または超音波探傷試験を実施すること。この場合に設定する欠陥検出能力は、3.5.4.1.2項①の非破壊検査で検出できる寸法を意味する。これによって保証試験を実施しなくてもよい。

a. 浸透探傷試験

AMS2645、もしくはASTM-E1417、またはこれらと同等の規格に規定する浸透探傷試験を実施し、有害な欠陥がないことを確認すること。

b. 渦電流探傷試験

渦電流探傷試験を実施し、有害な欠陥がないことを確認すること。なお、渦電流探傷試験を適用する場合には、欠陥検出能力や探傷手順が適切であることを示すこと。

c. 超音波探傷試験

超音波探傷試験を実施し、有害な欠陥がないことを確認すること。なお、超音波探傷試験を適用する場合には、欠陥検出能力や探傷手順が適切であることを示すこと。

(2) 内部

形状等を考慮し、放射線透過試験、または超音波探傷試験を実施すること。

a. 放射線透過試験

ASTM-E1742、またはこれと同等の規格に規定する放射線透過試験を実施し、有害な未溶着部、き裂、ポロシティ、および融合不良がないことを確認すること。放射線透過試験では、イメージング・プレート（IP）を使用してよい。

単一のポロシティの大きさの判定基準は、次のいずれか小さい方を最大限度として、十分な設計検討により定めること。

- ・AWS D17.1 CLASS A、またはNAS 1514 CLASS IIIで定める、 $1/3 \times t$ （板厚）と1.5mmのいずれか小さい値。
- ・3.5.4.1.2項の初期欠陥寸法。

複数のポロシティに対しては、次のいずれかを満足すること。

- ・AWS D17.1 CLASS Aの定めに準拠した、溶接部の長さ76mmあたりの最大寸法の合計が $1.33 \times t$ （mm）と6mmのいずれか小さい値以下。
- ・NAS 1514 CLASS IIIの定めに準拠した、溶接部の長さ25mmあたりの面積の合計が $1.25 \times t$ （mm²）以下。

ただし、 t は実際の溶接部の厚さとしても良い。

b. 超音波探傷試験

ASTM-E164、またはこれと同等の規格に規定する超音波探傷試験を実施し、有害な未溶着部、き裂、ポロシティ、および融合不良がないことを確認すること。

単一のポロシティの大きさの判定基準は、次のいずれか小さい方を最大限度として、十分な設計検討により定めること。

- ・ AWS D17.1 CLASS A、またはNAS 1514 CLASS IIIで定める、 $1/3 \times t$ (板厚) と1.5mmのいずれか小さい値。
- ・ 3.5.4.1.2項の初期欠陥寸法。

複数のポロシティに対しては、AWS D17.1 CLASS Aの定めに準拠した、溶接部の長さ76mmあたりの最大寸法の合計が $1.33 \times t$ (mm)と6mmのいずれか小さい値以下、を満足すること。

ただし、 t は実際の溶接部の厚さとしても良い。

なお、ポロシティを超音波探傷試験で検出、および寸法測定する場合には、探傷手順、検出能力、および寸法測定能力が適切であることを示すこと。

4.7.4 受入検査

(1) 寸法検査

図面要求を満足している事を確認すること。

(2) 外観検査

合否判定基準を明確にすること。金属圧力容器については、表4.7.4-1の1から6、複合圧力容器については、同表1から12に示す目視試験対象について検査を行い、基準を満足すること。また、目視によるマクロな検査と、光学的補助具を使用したマイクロな検査を区分けすること。

表4.7.4-1 目視試験対象

金属圧力容器、複合圧力容器共通項目	
1	加工傷
2	打痕／圧痕
3	擦過傷
4	色調異常
5	腐食
6	付着物
複合圧力容器への追加項目	
7	剥離
8	繊維破断
9	繊維の配列不良／しわ
10	樹脂割れ
11	樹脂欠乏／過剰
12	異物、気泡巻き込み

(注) 検査者の視力、検査対象品照度はNDIS 3414「目視試験方法通則」(日本非破壊検査協会規格)によること。

(3) 容量検査

必要に応じて容量検査を実施し、要求を満足していることを確認すること。

(4) 質量検査

必要に応じて質量検査を実施し、要求を満足していることを確認すること。

(5) 清浄度検査

上位システムの要求仕様に基づき清浄度検査を行い、規定値を満足すること。

4.7.5 受入試験

4.7.5.1 金属高压ガス機器の受入試験

製造が完了した金属高压ガス機器に対して以下の試験を実施すること。

(1) 耐圧試験

- a. 耐圧試験圧力は、最大予想使用圧力(制限圧力)に表4.4-1の係数を乗じた圧力とし、耐圧試験時の応力強さの範囲は、原則として図4.4-1に示す範囲内とする。
- b. 常温で耐圧試験を行う場合は、原則として設計温度の材料の降伏応力と常温での降伏応力との比で耐圧試験圧力を補正すること。

$$(\text{耐圧試験圧力})_{\text{常温}} = (\text{耐圧試験圧力})_{\text{設計温度}} \times \frac{(\text{降伏応力})_{\text{常温}}}{(\text{降伏応力})_{\text{設計温度}}}$$

- c. 図4.4-1の包絡線は、以下の応力関係式を示したものである。

$$\frac{P_m + P_b}{\sigma_y} = \frac{5}{3} - \frac{3}{2} \left(\frac{1}{3} - \frac{P_m}{S_m} \right)^2 \quad (4.7.1)$$

$$\frac{P_m}{\sigma_y} = 1 \quad (4.7.2)$$

上式で、 $P_m + P_b$ は一次一般膜応力プラス曲げ応力の場合で、一次局部膜応力プラス曲げ応力の場合は $P_L + P_b$ とする。

ここで、

- P_m : 一次一般膜応力の応力強さ
 P_L : 一次局部膜応力の応力強さ
 P_b : 曲げ応力の応力強さ
 σ_y : 材料の降伏応力

ロケット推進薬タンクの耐圧試験時の応力強さは、式4.7.1と式4.7.2に加えて、いずれの断面、または部位に対して以下のシェークダウン要求を満足すること。

$$P_L + P_b + Q \leq 2\sigma_y$$

あるいは

$$P_m + P_b + Q \leq 2\sigma_y$$

ここで、

- Q : 二次応力。ただし、局部応力集中は除く。

σ_y : 材料の降伏応力。

- d. 耐圧試験に使用する流体は原則として非圧縮性流体を使用すること。ただし、高圧ガス機器の性質から非圧縮性流体を使用することが適切でないとは判断される場合は、この限りでない。
- e. 試験後、外観目視試験を行い、有害な変形、き裂等の異常が認められないこと。
- f. ロケット推進薬タンクを除く高圧ガス機器単体で試験を行う場合には、原則として耐圧試験後に溶接部に対して4.7.3.5項(1)のa. 浸透探傷試験、b. 渦電流探傷試験、c. 超音波探傷試験のいずれかを行い、有害な欠陥がないこと。
- g. 所定の圧力が負荷されたことを確認すること。
- h. 耐圧試験後に、原則として円筒部の直径を試験前と試験後に計測し、残留変形が0.2%以下であることを確認すること。
- i. (削除)
- j. シールを有する接合部は、開口部に閉止板、または同等のものを施し、耐圧試験を実施してもよい。

なお、a.、b.、f.、h.項の原則に対する例外は、免除規定2.2.1項が適用される配管や2.2.3項が適用される購入品等である。

(2) 気密試験

- a. 気密試験の前には耐圧試験が完了していること。
- b. 原則として最大予想使用圧力以上の圧力で、ガスで加圧すること。
ただし、ロケット推進薬タンクの場合は、下式の圧力で気密試験を行うこと。

$$(\text{気密試験圧力})_{\text{常温}} \leq 1 / 4 \times (\text{設計破壊圧力})_{\text{設計温度}} \times \frac{(\text{引張強度})_{\text{常温}}}{(\text{引張強度})_{\text{設計温度}}}$$
- c. 気密試験に使用するガスは圧力容器の性能を劣化させるものでないこと。
- d. 加圧時間は、気密試験方法によって定めること。
- e. 外部への漏洩量が規定値以下であること。

(3) 保証試験(欠陥検出圧力試験)

3.5.4.1.2項の非破壊検査が実施できない箇所に対する保証試験は、以下のように実施すること。

- a. 保証試験圧力は、最大予想使用圧力に3.5.4.1.2項で求めたプルーフファクタを乗じた圧力とする。保証試験(欠陥検出圧力試験)時の応力強さの範囲は、4.7.5.1項(1)の「耐圧試験」で示した範囲内とする。
- b. 保証試験(欠陥検出圧力試験)は、耐圧試験と連続して行ってもよい。

- c. 保証試験（欠陥検出圧力試験）は、原則として非圧縮性流体で実施すること。保証試験圧力の保持時間は5秒以内を目標とし、さらに保証試験圧力到達時点から耐圧試験圧力までの降圧に要する時間は15秒以内を目標にすること。（図4.4-2参照）
- d. 試験後外観目視試験を行い、有害な変形、き裂等の異常が認められないこと。
- e. 保証試験（欠陥検出圧力試験）後に、溶接部に対して4.7.3.5項(1)のa. 浸透探傷試験、b. 渦電流探傷試験、c. 超音波探傷試験のいずれかを行い、有害な欠陥がないこと。
- f. 耐圧試験圧力と保証試験圧力が同じで、これらの試験を同時に実施する場合は、所定の圧力が負荷されたことを確認すること。
- g. その他、NASA SP-8040を参照して試験を行うこと。

4.7.5.2 複合圧力容器の受入試験

4.7.5.2.1 金属ライナ受入試験

フルラップ容器の金属ライナ、およびフープラップ容器の直胴部については、フィラメントワインディング前に、外面、および内面に有害な欠陥がないことを確認すること。

または、ライナ単体で4.7.5.1項の(1)耐圧試験、(2)気密試験、(3)保証試験（必要な場合）を実施すること。ただし、耐圧試験圧力、気密試験圧力は金属ライナ単体に設定した圧力とすること。

4.7.5.2.2 複合圧力容器受入試験

(1) 耐圧試験

4.7.5.1(1)項に従い耐圧試験を実施すること。ただし、b.、c.、f.項は適用しない。耐圧試験は、4.6項「塑性変形処理」における加圧と同時に実施してもよい。

(2) 気密試験

4.7.5.1(2)項に従い気密試験を実施すること。

表4.4-1 耐圧試験圧力を得るために最大予想使用圧力に乗じる係数

番号 (注記1)	構造区分	係数
1	金属圧力容器、および複合圧力容器	1.50以上
2	金属圧力容器	$\frac{1+(\text{引張強度に対する安全係数})}{2}$ 以上
	複合圧力容器	$\frac{1+(\text{設計破壊圧力に対する安全係数})}{2}$ 以上
3	圧力配管、フィッティング (直径38.1mm以上)	1.50以上
4	圧力配管、フィッティング (直径38.1mm未満)	1.50以上
5	ベローズ	1.00以上
6	ベローズ	1.50以上
7	その他のコンポーネント	1.50以上
8	ロケット推進薬タンク	1.00以上

注記1. 本表により係数を選択する際には、本表の番号と表3.1.3-1、表3.1.3-2の番号を対応させ人員接近可否に応じて選択すること。

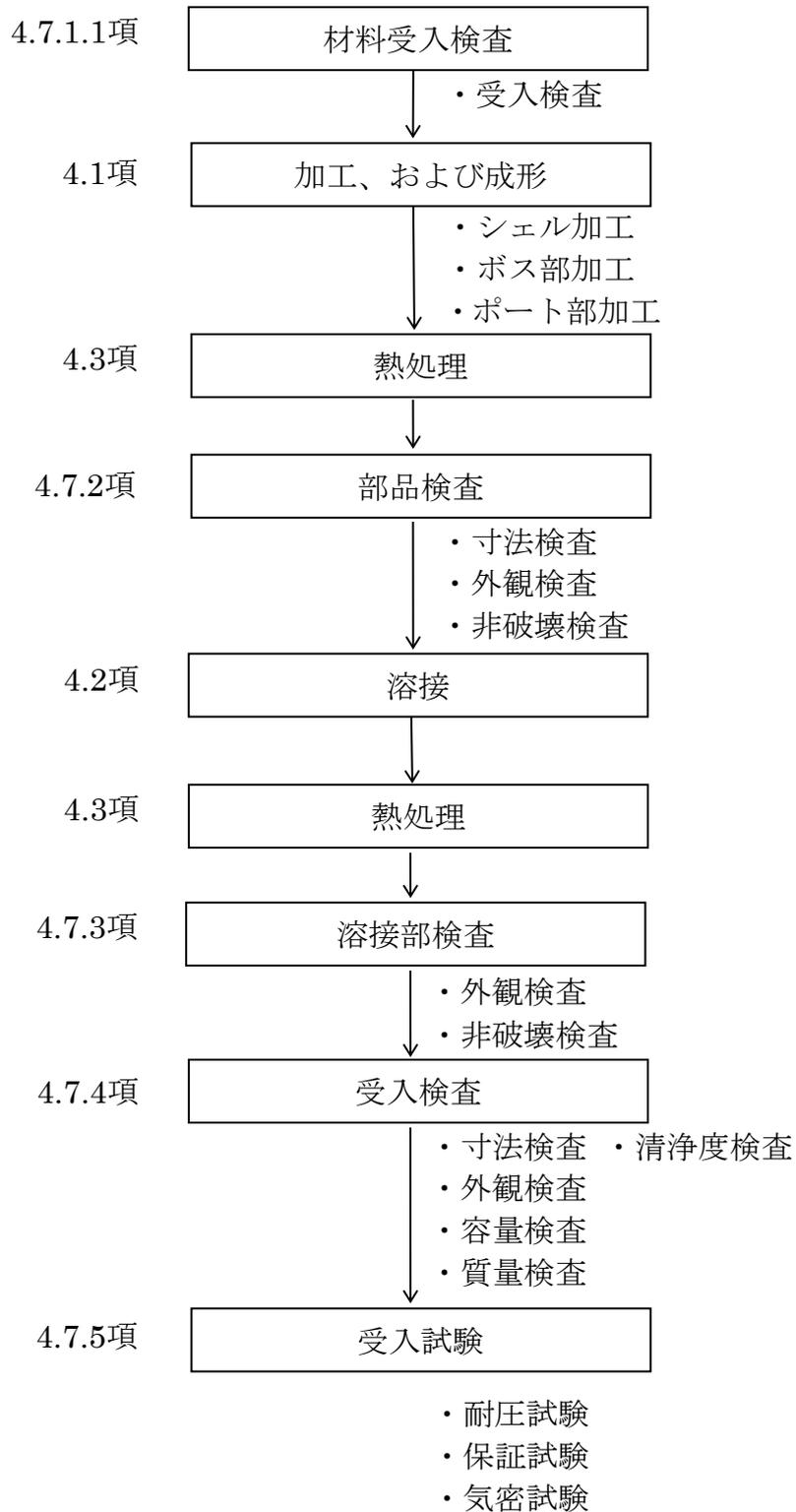


図4-1 金属高圧ガス機器の製造フロー(代表例)

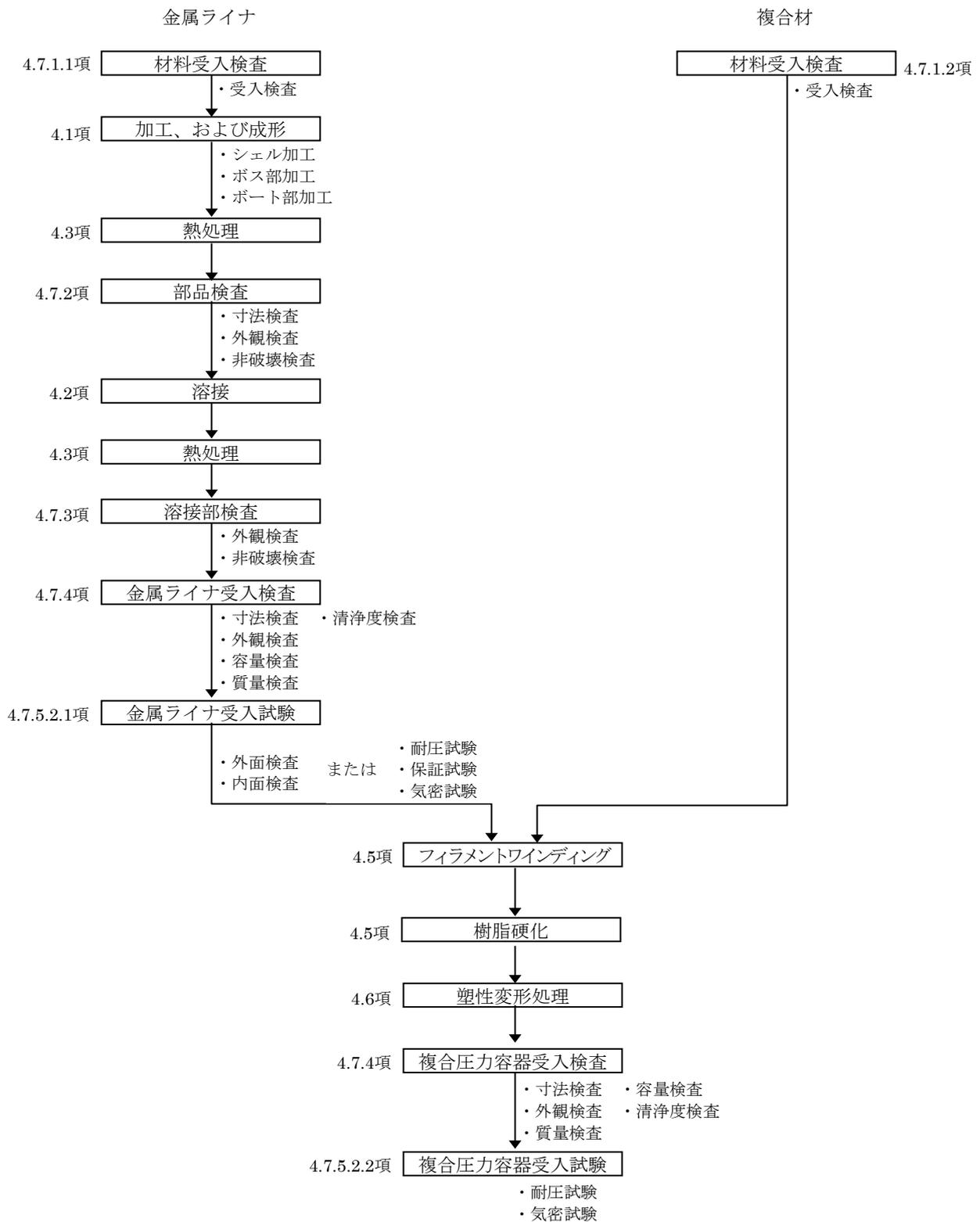


図4-2(1/2) 複合压力容器の製造フロー(金属ライナの場合の代表例)

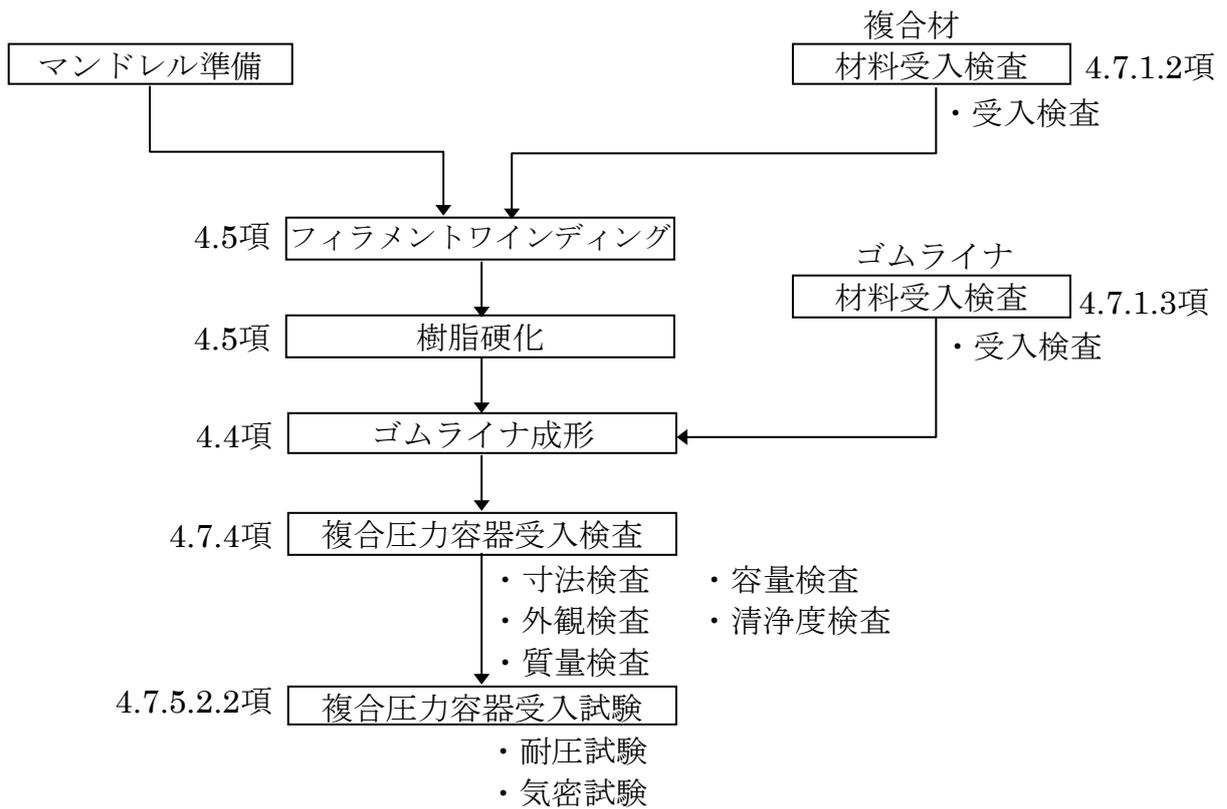


図4-2(2/2) 複合圧力容器の製造フロー(ゴムライナの場合の代表例)

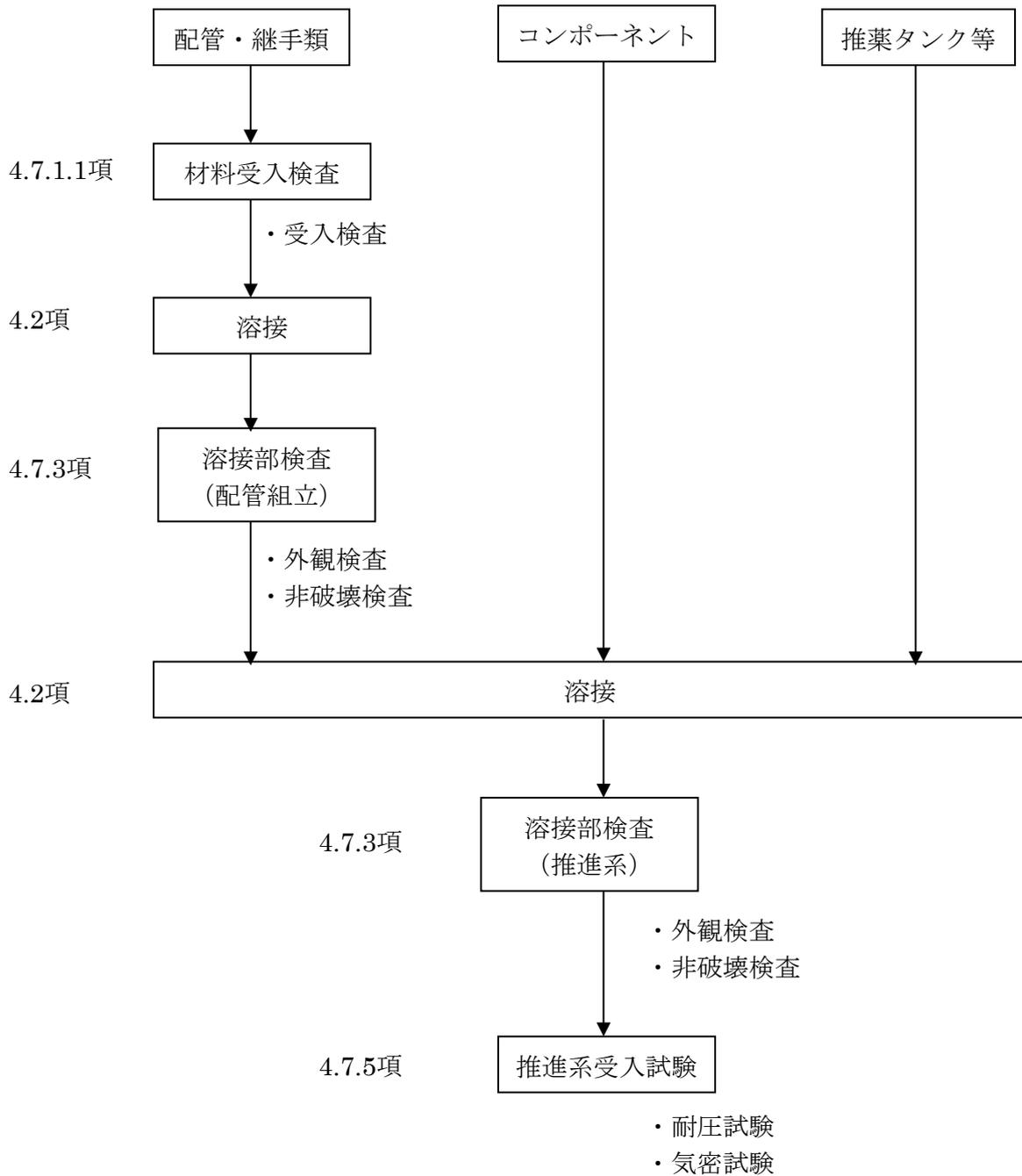


図4-3 配管組立・推進系の製造フロー(代表例)

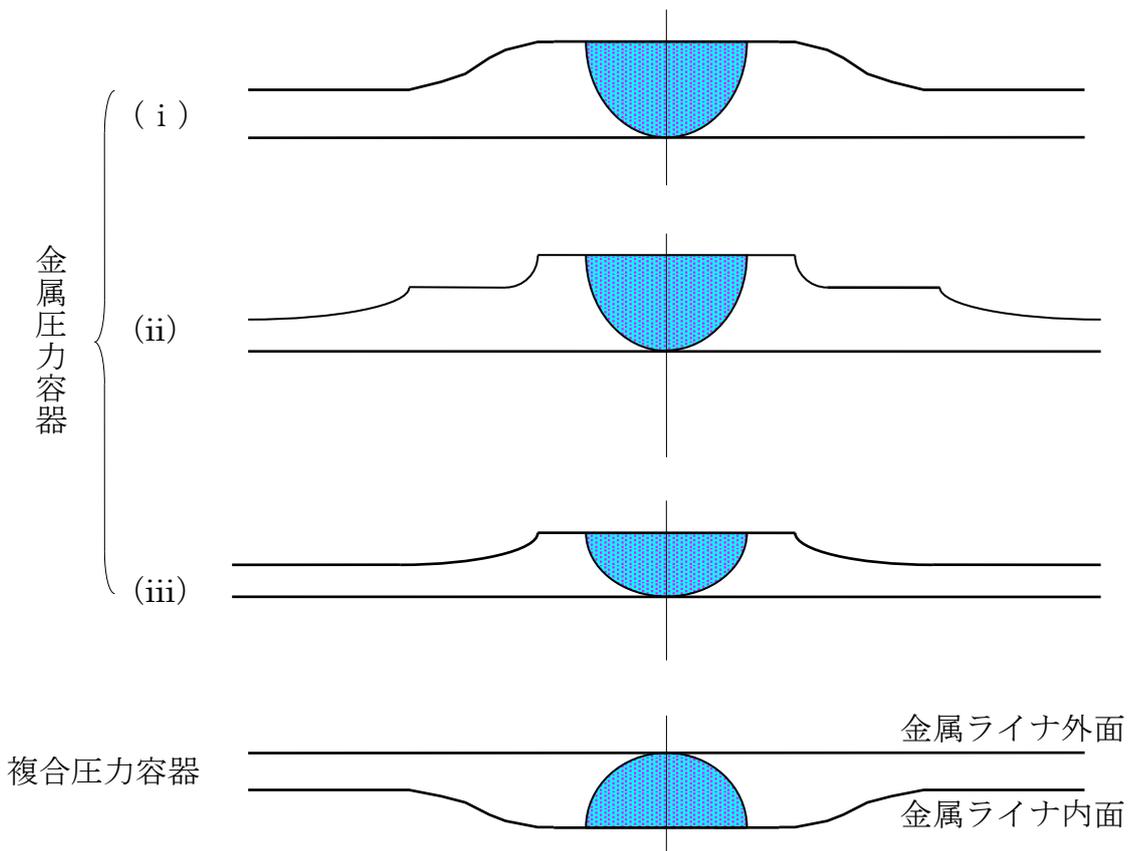


図4.2-1 代表的な溶接継手の増厚の形状(参考)

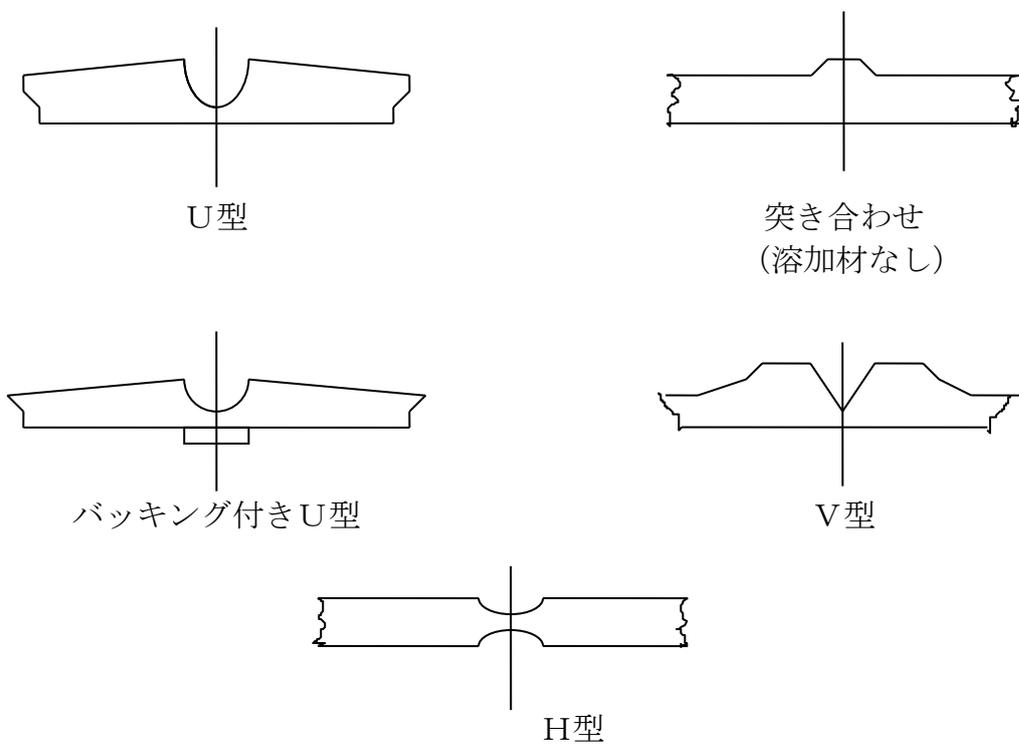


図4.2-2 代表的な溶接部の開先形状(参考)

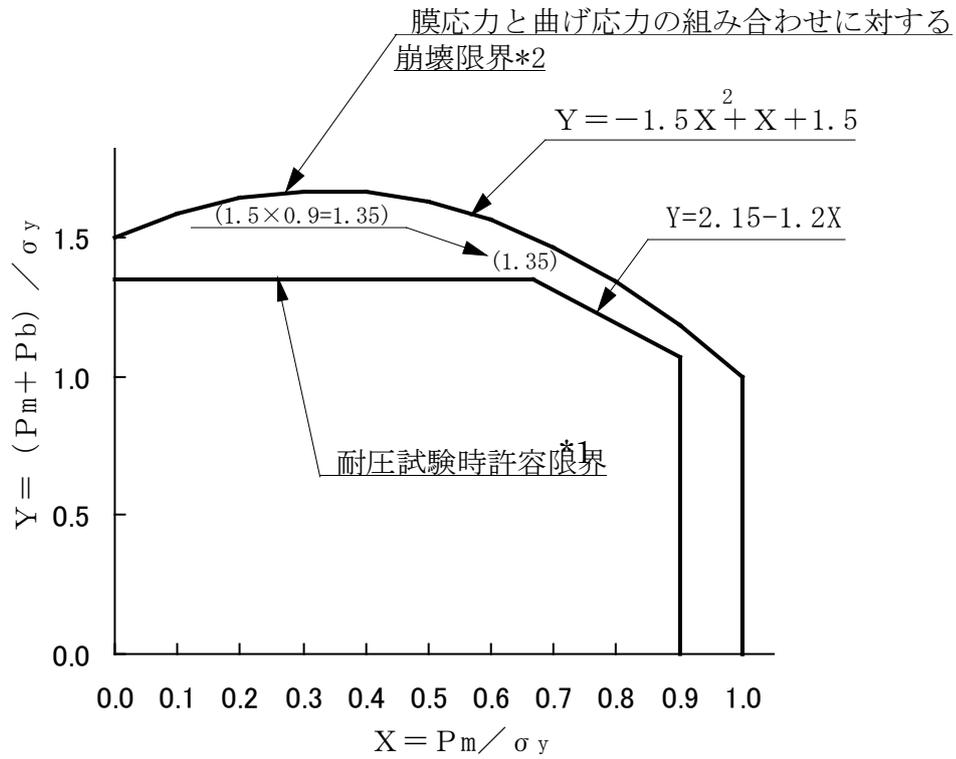


図4.4-1 耐圧試験時の応力強さの許容限界

*1：金属圧力容器の耐圧試験時の許容限界

*2：ロケット推進薬タンクについての耐圧試験時の許容限界

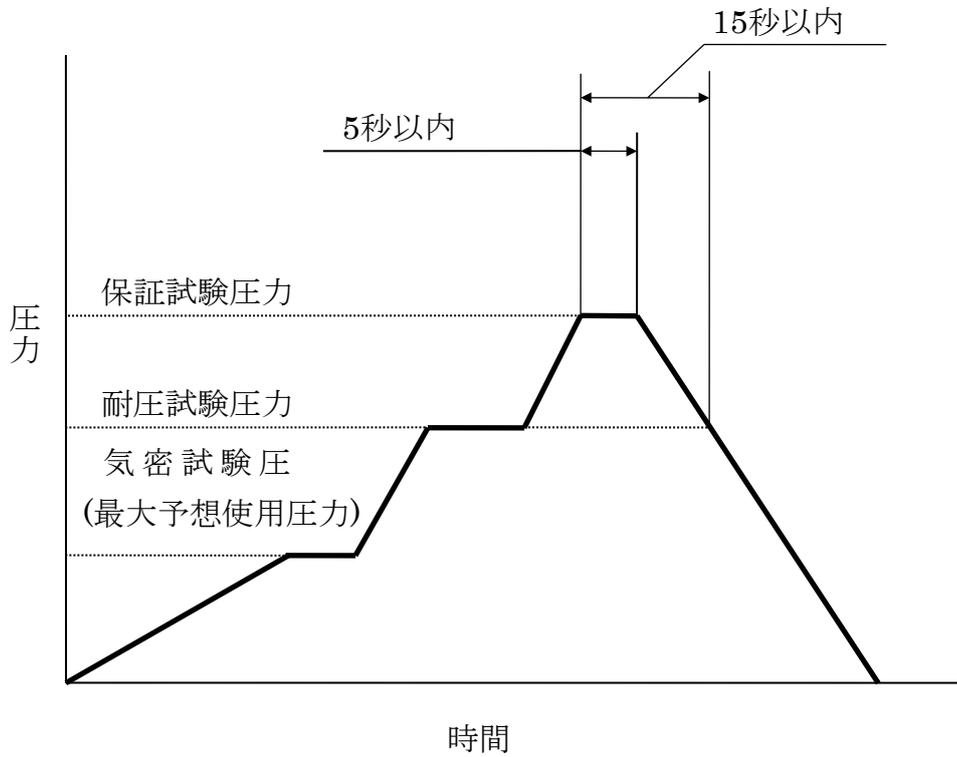


図4.4-2 保証試験における時間の制限

5. 開発試験、および認定試験

5.1 開発試験

5.1.1 材料基礎試験

(1) 金属材料

- a. AMS、MIL、およびFS規格以外の材料を使用して安全係数が3.5未満の高圧ガス機器を製作する場合、または新たに開発した加工方法によって高圧ガス機器を製作する場合には、必要に応じ試験を実施して以下に示す材料データを取得すること。
 - ・化学成分
 - ・マクロ、ミクロ組織
 - ・引張強度、降伏応力、伸び(溶接部を含む。)
 - ・破壊靱性
 - ・疲労特性
- b. 試験片の形状は、JIS、またはASTMに準じること。ただし、試験片の形状がJIS、またはASTMに適合できない場合は、その形状を明確にすること。
- c. 取得したデータの評価は、MMPDSに準じて行うこと。

(2) 非金属材料、複合材

- a. 非金属ライナを製作する場合には、必要に応じ、引張試験を実施して破断ひずみ(ϵ)を含む材料データを取得すること。加硫ゴムの引張試験の場合は、JIS-K6251「加硫ゴム及び熱可塑性ゴム—引張特性の求め方」に基づくこと。その他の規格に基づく場合はその方法を明確にすること。
- b. 複合材の繊維方向引張強度データは必ず取得すること。試験の方法、および試験片の形状は、ASTM D2290、ASTM D3039に準じること。ただし、試験片の形状がASTMに適合できない場合は、その形状と取得データの妥当性を明確にすること。また、試験片は製品と同等の製造プロセスにより製作されたものであること。
- c. 必要に応じ試験を実施して以下に示す材料データを取得すること。
 - ・弾性係数(繊維方向の弾性係数については、3.5.1項に従うこと。)
 - ・ストレスラプチャ特性
 - ・アウトガス特性
 - ・耐放射線性
- d. 既に必要数のデータを取得している材料については、材料基礎試験は不要とする。

5.1.2 溶接施工方法の決定、および確認

4.2項で要求される溶接品質を確保するために溶接施工方法を決定し、溶接施工方法の確認を実施すること。溶接施工方法の決定には、以下の要素を明確にして再現性を確保すること。

- a. 溶接方法
- b. 溶接材料(溶接棒の化学成分、銘柄、棒径等)
- c. 溶接条件(電極、溶接電流、アーク電圧、溶接速度、溶接姿勢、運棒法、溶接入熱量、シールドガス等)
- d. 裏当て
- e. 予熱
- f. 溶接後熱処理

溶接施工方法の確認項目は、4.2.2項によること。

5.1.3 試作試験

原則として、開発段階において試作試験を実施すること。

設計を評価し、解析結果の妥当性を立証するための供試体を試作し、必要に応じて以下の試験を実施すること。

- a. 耐圧試験
- b. 気密試験
- c. 加圧サイクル試験
- d. フライト時荷重試験(ロケット推進薬タンクの場合のみ)
- e. 破壊圧試験(*1)、または破壊試験(*1)
- f. 負圧試験(*2)

(*1) : 加圧時ひずみ計測を行うこと。(バルブ等のコンポーネントは除く。)

(*2) : 製造から予定のフライト回数の完了までに内圧が外圧に対して負圧になることが予測される場合のみ実施する。

試作試験の判定基準は、以下のとおりとする。

- a. 耐圧試験
4.7.5.1項(1)によること。
- b. 気密試験
4.7.5.1項(2)によること。
- c. 加圧サイクル試験
5.2項(1)によること。
- d. フライト時荷重試験
座屈、破壊しないこと。
- e. 破壊圧試験(*1)、または破壊試験(*1)
5.2項(2)によること。
- f. 負圧試験(*2)
供試体を負圧にしたときに、座屈しないこと。

5.2 認定試験

設計、製造工程、および検査工程の妥当性を確認するため、高圧ガス機器の開発の最終段階において実環境を考慮した認定試験を実施すること。ただし、認定試験が終了しているものを流用、または小規模改造して使用する場合には、これを省略できる。

認定試験においては、実機と同一製造工程、および検査工程で製作された供試体を使用し、4.7項の検査、試験に合格した後、以下の試験を実施すること。

ただし、4.7.5.1(1)項の耐圧試験における試験圧力は、原則として供試体の実測板厚最小値と設計最小板厚の差異を補正し、供試体が設計最小板厚で製造された場合を模擬すること。

(1) 加圧サイクル試験

a. 容器の構成により最低限、次の回数の圧力サイクル試験を行うこと。

【金属圧力容器の場合】

①、または②のいずれかの圧力サイクル試験。

① 最大予想使用圧力の1.5倍の圧力を最大予想使用圧力の要求寿命の2倍の回数

② 最大予想使用圧力を最大予想使用圧力の要求寿命の4倍の回数

注：ただし、フライトモデルの運用で耐圧試験が複数回実施される場合は、①、または②の圧力サイクルに耐圧試験の要求回数の加圧を追加すること。

【複合圧力容器の場合】

①、または②のいずれかの圧力サイクル試験。

① 耐圧試験圧力を計画された耐圧試験回数(フライトモデルの運用で耐圧試験が複数回実施される場合は耐圧試験の要求回数の加圧を追加すること。)の4倍の回数、および最大予想使用圧力を最大予想使用圧力の要求回数の4倍の回数。

② 計画された圧力サイクルをその加減圧順序で要求回数の4倍の回数(塑性変形処理により与えられる金属ライナの予圧縮応力の値を超える引張り応力を生ずるピーク運用圧力がある場合にのみ適用する)。

注：計画された圧力サイクルとは、耐圧試験、気密試験、最大予想使用圧力の要求回数などの一連の圧力サイクルのことをいう。

b. 試験後、外観目視試験を行い、有害な変形、き裂等の異常が認められないこと。

c. 表3.1.3-1番号5のベローズについては、圧力容器と同等の方法にて加圧サイクル試験を行うこと。加圧サイクル試験では圧力サイクルと変位サイクルを考慮すること。

d. ロケット推進薬タンクで試験が困難な場合は、加圧サイクル試験を免除できる。

(2) 破壊圧試験

a. 破壊圧試験では、原則として設計破壊圧力を材料強度の温度補正、および供試体の実測板厚最小値と設計最小板厚の差異を補正した圧力において試験を実施し、補正した圧力以下で破壊しないことを確認すること。
複合圧力容器の場合は加圧保持時間を30s以上とすること。

b. 上記a.項の確認に続き、破壊試験を実施することを推奨する。その場合は、設計破壊圧力を越える加圧を行い供試体を破壊させ、強度余裕を確認すること。

- c. 金属圧力容器の破壊試験に際しては、以下に示す流動応力式で求めた破壊圧力の予測値と照合すること。

流動応力式（薄肉の場合）は以下に示すとおり。

① 円筒胴部

$$P_B = \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{\sigma_y + \sigma_u}{2} \right) \frac{t}{R_i}$$

② 球殻部

$$P_B = 2 \left(\frac{\sigma_y + \sigma_u}{2} \right) \frac{t}{R_i}$$

ここで、

P_B : 破壊圧力

σ_y : 材料の降伏応力

σ_u : 材料の引張強度

R_i : 内半径

t : 板厚

注記： 上記の計算には、破壊試験を行った金属圧力容器の実際の値を使用のこと。

(3) 振動試験

- a. 振動試験はランダム振動試験、正弦波振動試験、音響試験よりなる。
- b. 3.1.2.2項の環境条件の振動要求が、上記(1),(2)の認定試験で包含されることが証明できない場合は、振動試験を実施すること。
- c. 振動試験の要求条件として、振動試験のレベル、および負荷時間等の実施方法を規定すること。
- d. ロケット推進薬タンクについては振動試験を実施しなくてもよい。

(4) 地上取扱時荷重試験

ロケット推進薬タンクについては、必要に応じて(*1)地上取扱時に想定される荷重を負荷して、3.5.1.3項による設計解析の妥当性（3.1.2.3項に示す特別係数、および3.1.3.4項に示す安全係数が確保されていること）を確認すること。

(*1) タンクの板厚を算定する上で地上取扱時の荷重が最も厳しい場合。

(5) 作動サイクル試験、変位サイクル試験

電磁弁、注排弁等の作動環境を持つもの、およびベローズについては、3.1.5(3)で定めたサイクル数に上位システムで規定する安全係数を乗じたサイクル数の作動サイクル試験（ベローズについては変位サイクル試験）を実施し、要求寿命が確保されていることを確認すること。なお、表3.1.3-1番号5ベローズに係る変位サイクル試験は、5.2(1)c項により加圧サイクル試験に組込んで実施すること。

(6) 層間せん断試験

炭素繊維強化エポキシ樹脂複合材を除き、複合圧力容器の樹脂含浸繊維層は、同等な試験材を用いて、以下により層間せん断試験を行い、これに合格すること。

- a. 試験は、ASTM-D2344、JIS K 7078、またはJIS K 7057に準拠して、5個の試験片を用いて実施すること。
- b. 試験の結果、試験片が水平な層間せん断破壊以外で破壊した場合は、当該試験片による試験結果は無効とし、当該試験片に替わる試験片を採取し、再試験を行うこと。
- c. 試験は設計温度で行うこと。
- d. 個々の試験片のせん断応力の値が、 35N/mm^2 以上の場合に合格とする。

6. 再使用

再使用型高圧ガス機器を再使用する場合には、ミッション中、地上運用、および保管時に受ける劣化要因・事項を明確にし、その劣化要因・事項に対して解析、または試験で安全を保証すること。主な劣化要因は、機械的なものとして圧力、振動、加速度、衝撃等、環境的な要因として宇宙線、熱等があり、また化学的な要因として、推進薬、加圧ガス等による腐食等がある。

再使用の作業フローを図6-1に示す。

6.1 再使用検査

6.1.1 外観検査

有害な傷、変形、打痕、および腐食等の異常がないこと。

6.1.2 非破壊検査

必要に応じ、高圧ガス機器に有害な欠陥のないことを確認するために、以下の非破壊検査を実施すること。外観検査で欠陥が発見された場合、および補修を実施した場合には、以下の試験のうち、適切な試験方法を選定し実施すること。

(1) 浸透探傷試験

母材部、および溶接部の表面に対してAMS2645、もしくはASTM-E1417、またはこれらと同等の規格に規定する浸透探傷試験を実施すること。判定基準は4.7.2項、および4.7.3項によること。浸透探傷試験の代わりに、4.7.2項(3)、および4.7.3.5項(1)による渦電流探傷試験、または超音波探傷試験を実施しても良い。

(2) 放射線透過試験

溶接部内部に対してASTM-E1742、またはこれと同等の規格に規定する放射線透過試験を実施すること。判定基準は4.7.3項によること。

(3) 超音波探傷試験

溶接部内部に対してASTM-E164、またはこれと同等の規格に規定する超音波探傷試験を実施すること。判定基準は4.7.3項によること。

6.1.3 寸法検査

ミッション中に高圧ガス機器の強度上問題となる寸法の変化が想定されるもの、あるいは6.3項に規定する補修の実施によって寸法の変化があるものについては、寸法計測を実施し、図面要求を満足していることを確認すること。

6.2 再使用試験

(1) 耐圧試験

再使用試験において構造健全性の確認が必要な以下の場合、耐圧試験を実施すること。なお、耐圧試験は高圧ガス機器の寿命劣化させる原因となり得るため実施の要不要を十分検討すること。

- a. 補修した場合
- b. 長期間、8項(3)～(5)の要求以下の保管状態にあった疑いのある機器を再使用する場合
- c. その他必要と認められた場合

耐圧試験を実施する場合は、4.7.5.1項(1)、および4.7.5.2.2項(1)「耐圧試験」に準じること。

(2) 気密試験

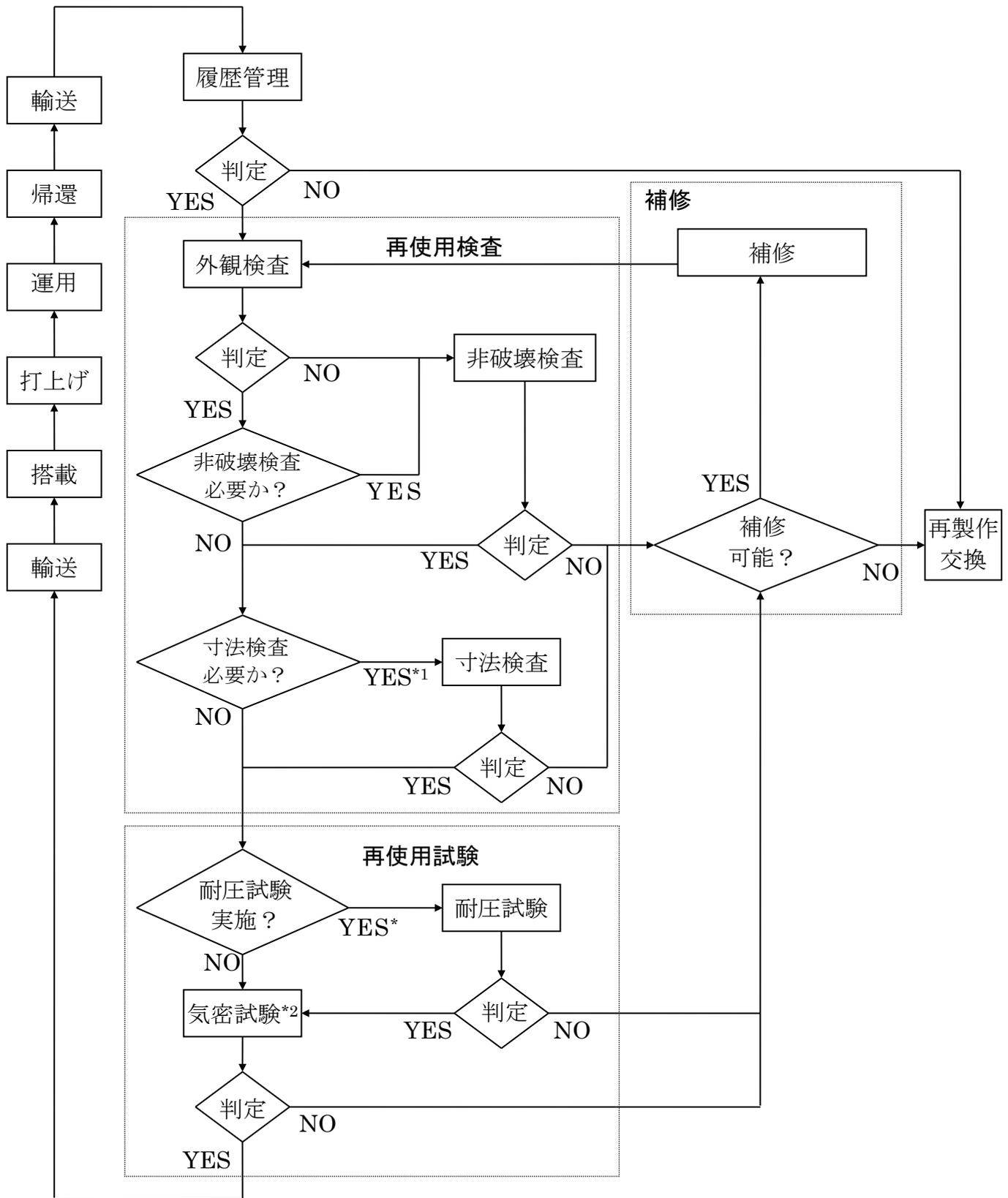
4.7.5.1項(2)、および4.7.5.2.2項(2)「気密試験」と同じ内容の試験を実施すること。

6.3 補修

再使用検査により許容される水準を越える構造的損傷、欠陥が発見された場合、または再使用試験の判定で不合格となった場合には、高圧ガス機器は適切に補修を実施すること。補修が不可能な場合には再製作、交換とすること。

補修の方法は、使用した材料の特性を維持し、寸法公差の範囲内で実施すること。これを逸脱して補修を実施する場合には、追加の解析、または試験で問題ないことを確認すること。補修は強度を劣化させる原因ともなるため、損傷、欠陥に対する補修の要不要は、3.5.4.1項「き裂進展解析」の結果を考慮し、判定すること。補修を実施した場合には、再使用試験において耐圧試験を実施する必要がある、予定のフライト回数に対し、想定した加圧回数にも影響するため実施に当たっては十分な配慮を行うこと。

ただし、強度に影響しない補修、例えば気密試験での漏洩に対しシール材を交換する等の補修については、補修後の再使用試験での耐圧試験は不要である。



*1：補修を実施したものについては、非破壊検査、寸法検査、耐圧試験は原則として実施すること。
 *2：Ni-H₂バッテリー、ヒートパイプについては、密封されており、最大予想使用圧力に加圧できないので、それぞれ作動状態における圧力での気密確認でよい。

図6-1 再使用型高圧ガス機器の再使用フロー

7. 加圧作業時の安全確保

気密試験、耐圧試験、射場での高圧ガスの充填等で高圧ガス機器に対して圧力を加える場合、要員の安全確保のため以下の規定を満足すること。

- (1) 安全弁、または同等の機能(以下「安全弁等」という。)を供試体側に適切に使用し、宇宙用高圧ガス機器に必要以上の圧力がかからないようにすること。
 なお、安全弁等を供試体側に設置できない場合は、試験設備側に設置しても良い。安全弁等の設定圧力は、吹始め圧力に対応する圧力として、下記のとおりとすること。
 - ・ 気密試験：気密試験圧力＋正側試験圧力公差
 - ・ 充填：最大予想使用圧力
 なお、吹出し圧力を設定圧力とする場合には、吹始め圧力の1.1倍未満とすること。許容差はJIS B 8210によること。
- (2) 加減圧操作は遠隔操作あるいは防護された場所からの手動操作で行えること。
- (3) 加圧流体を緊急に排出できるような設備とすること。
- (4) 表3.1.3-1、表3.1.3-2に示す条件によって人員接近可・不可を判断し、加圧作業を実施すること。
- (5) 500L以下の複合圧力容器であり、認定試験時にライナの母材（非金属ライナを除く）および溶接部の引張試験を実施している場合は下記の圧力を、それ以外の高圧ガス機器では設計破壊圧力の4分の1超の圧力を負荷するときには、安全に作業ができる適切な距離外で、または適切な防護壁を使用して、加圧、および減圧作業を行うこと。

炭素繊維複合圧力容器	：	設計破壊圧力の2.25分の1超
アラミド繊維複合圧力容器	：	設計破壊圧力の3分の1超
ガラス繊維複合圧力容器	：	設計破壊圧力の3.5分の1超
- (6) (5)項の圧力を負荷して人員接近する場合は、加圧終了後圧力変化等を観察し、接近前にそれらが静定したことを確認すること。
- (7) 圧力容器に最大予想使用圧力を越える圧力を負荷する場合は、ピット内、または同等の構造物内で実施すること。
- (8) 安全管理担当者が立会うこと。

注：ただし、Ni-H₂バッテリー、ヒートパイプ等で、通常の作業においても圧力の加圧、減圧がされるものについても十分な安全確保がなされる必要があるが、(1)～(3)、(7)、(8)は実施が困難な場合その一部を省略してもよい。

8. 取扱い

- (1) 高圧ガス機器は、運用に支障がないことを確認するため、3.1.5項で規定するフライト回数、加圧サイクルの要求寿命、作動サイクル、変位サイクルの寿命並びに受入時、および運用時の検査結果、補修記録等に関する履歴管理を行うこと。
- (2) 高圧ガス機器の製造、および検査に使用する流体、ガス、検査液等の副資材は、高圧ガス機器の材料を腐食、脆化させたり、あるいは高圧ガス機器の破壊や漏洩、および汚染を生じさせるおそれのあるものを使用してはならない。
- (3) 高圧ガス機器は、粉じん等による内部汚染の防止、クリープや自重による変形、腐食の防止等の目的で、低圧の清浄な乾燥した不活性ガスを封入、またはデシカントを通した乾燥空気を維持することにより、取扱い保管すること。
- (4) 外部環境による保管中の劣化を防止するため、温度、湿度等の管理された部屋に保管すること。不必要な外力から高圧ガス機器を保護するために原則としてコンテナに収納保管すること。
- (5) 地上取扱い、および輸送時は、高圧ガス機器に過大な荷重が作用しないように、取扱い方法の制限、治具による補強、コンテナによる保護等の対策を講ずること。
- (6) 3.6.1.2項に基づき、損傷予防管理計画に基づき取扱いを行うこと。

9. 改定時の措置

本技術基準が改定された際には、改定版は発行後直ちに有効となるが、本技術基準による適合審査は以下のように実施する。

- (1) 改定前の版（以下、旧版とする）での適合審査は、原則として改定版発行後、6か月以内に限る。
- (2) 旧版による設計適合審査で適合証の発行を受けた機器に対して、改定版による製造適合審査を申請する場合には、改定項目が設計適合審査として全て合致することを立証し、合致しない項目は特例処理を完了すること。その場合、以降の同一設計の機器については、旧版による設計適合審査の適合証は有効である。
- (3) 旧版による設計適合審査で適合証の発行を受けた機器で、改定項目の中に設計適合審査としては合致しない項目があり、特例処理が完了できなかった場合に、製造実績が改定版に全て合致していれば、製造適合審査の適合証を発行する。

付録

本技術基準で使用している記号の意味は、以下のとおりである。ただし、代表的なものを例示してあり、これ以外の意味で用いる場合には、該当項目においてそれぞれ定義してある。

a	: き裂寸法(欠陥深さ a、あるいはき裂長さ c)
a _{cr}	: 最大予想使用圧力を負荷したときに、高压ガス機器が破壊、または貫通する限界欠陥寸法(深さ)
a _i	: 保証試験(欠陥検出圧力試験)で保証する初期欠陥寸法(深さ)
D	: 鏡板の内側のだ円体の長径、胴の内径、胴板、鏡板の最小厚さを計算する各部分の内径で円すいの軸に対し直角に測ったもの
D ₀	: 円すいの大径端における外径
d _o	: 外径
d _i	: 内径
E	: 縦弾性係数
F	: 段差、切欠等の構造不連続に伴う応力集中によって一次応力、または二次応力に加わる応力の増加分(ピーク応力)。溶接部の角変形、目違いによる応力の増加分も含める。
h	: 鏡板の内側のだ円体の短径の2分の1の長さ
K	: 応力拡大係数
K _c	: 破壊靱性
K _R	: 破壊抵抗
ΔK	: 応力拡大係数Kの変動範囲
L _r	: 内圧Pを塑性崩壊圧力P _c で割った係数
N	: 負荷繰返し数
N _D	: 貫通、または不安定破壊に至るまでの負荷繰返し数
N _f	: 疲労寿命
N _i	: 負荷繰返し数
n _i	: 応力範囲の繰返し数
P	: 最大予想使用圧力
P ₀	: き裂なしの塑性崩壊圧力
P _B	: 破壊圧力
P _b	: 曲げ応力の応力強さ
P _c	: 設計温度における塑性崩壊圧力
P _L	: 一次局部膜応力の応力強さ
P _m	: 最大予想使用圧力により発生する一次一般膜応力の応力強さ
P.F	: プルーフファクタ
Q	: 二次応力
R	: さら形鏡板の中央部、または全半球鏡板の内半径
R ₁	: 応力比
R _i	: 円筒内半径
R _o	: 円筒外半径
r ₁	: さら形鏡板のすみの丸みの内半径
r ₂	: 円すいの大径端に接続する丸みの内半径

S_m	: 設計応力強さ
$S.F_1$: 安全係数($S.F_1 = 4$)
t	: 最小板厚、板厚、
t_c	: 疑似等方性を仮定した場合の複合材板厚
t_m	: 金属ライナ板厚
t_θ	: ヘリカル巻き層(またはインプレックス巻き層)板厚
t_h	: フープ巻き層の板厚
u	: 内面(き裂側)からの板幅方向の距離
W	: さら形の形状に関する係数
z	: 内面(き裂側)からの板厚方向の距離
ε_f	: 破断延性(真破断ひずみ)
$\Delta \varepsilon_t$: 全ひずみ範囲
θ	: 円すいの頂角の2分の1の値
λ	: 塑性拘束係数(最深点 $\lambda = 1.68$ 、表面点 $\lambda = 1$)
ν	: ポアソン比
σ	: 応力
σ_b	: 公称(最大)曲げ応力
σ_h	: フープ応力(周方向応力)の最大値
σ_i	: 多項式近似の応力分布 ($i=0\sim 3$)
σ_m	: 平均応力
σ_u	: 材料の引張強度
σ_y	: 材料の降伏応力、または0.2%耐力
$\Delta \sigma$: 仮想弾性応力範囲