

# 熱化学水素製造法 IS プロセスに用いる SiC の 構造設計手法案

Study on Structural Design Technique of Silicon Carbide  
Applied for Thermochemical Hydrogen Production IS Process

竹上 弘彰 石倉 修一 寺田 敦彦 稲垣 嘉之  
Hiroaki TAKEGAMI, Syuichi ISHIKURA, Atsuhiko TERADA and Yoshiyuki INAGAKI

原子力水素・熱利用研究センター  
水素利用研究開発ユニット

Hydrogen Application Research & Development Division  
Nuclear Hydrogen and Heat Application Research Center

March 2011

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。  
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。  
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)  
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課  
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4  
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail: ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency  
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to  
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,  
Japan Atomic Energy Agency  
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan  
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail: ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2011

## 熱化学水素製造法 IS プロセスに用いる SiC の構造設計手法案

日本原子力研究開発機構 原子力水素・熱利用研究センター  
水素利用研究開発ユニット

竹上 弘彰、石倉 修一\*、寺田 敦彦、稲垣 嘉之

(2011 年 1 月 17 日受理)

IS プロセスは硫酸の高温熱反応とヨウ素の化学反応サイクルを利用した水素製造プロセスであり、製造設備は高温かつ腐食性の環境に耐える設計が要求される。特に、IS プロセスの主要機器のひとつである硫酸分解器は、90wt%の濃硫酸を高温ヘリウムにより加熱して蒸発させ硫酸蒸気を生成させるとともに、一部を  $\text{SO}_3$  に分解して次の工程である  $\text{SO}_3$  分解器に供給する重要機器である。濃硫酸を蒸発させる熱交換器部は 4MPa の高圧ヘリウムを内蔵するために耐圧構造とする必要があり、かつ 700°C 以上の高温と腐食環境に耐えうる材料として現状では炭化ケイ素セラミックス (SiC) が最も優れた材料である。熱交換器となるセラミックブロックは、外側に位置する耐圧金属容器に格納される構造となっており、仮に内部でセラミックブロックが破損しても、硫酸等の流体が外部には漏れない構造となっている。しかしながら、セラミックスを構造部材として使用する場合に手引きとなる統一された構造設計手法が規格・基準として整備されていない。本報告書は、既存の構造設計基準類を参考に、IS プロセスに用いる SiC の材料強度特性を考慮した構造設計手法案をまとめたものである。

---

大洗研究開発センター：〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002

\*：三菱 FBR システムズ株式会社 (2008 年 3 月まで IS プロセス技術開発グループ (現：IS プロセス信頼性確認試験グループ) に出向)

**Study on Structural Design Technique of Silicon Carbide  
Applied for Thermochemical Hydrogen Production IS Process**

Hiroaki TAKEGAMI, Syuichi ISHIKURA\*, Atsuhiko TERADA and Yoshiyuki INAGAKI

Hydrogen Application Research & Development Division  
Nuclear Hydrogen and Heat Application Research Center  
Japan Atomic Energy Agency  
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received January 17, 2011)

The IS process is the hydrogen production method which used the thermochemical reaction cycle of sulfuric acid and iodyne. Therefore, the design to endure the high temperature and moreover corrode-able environment is required to the equipment. Specifically, the sulfuric acid decomposer which is one of the main equipment of the IS process is the equipment to heat with hot helium and for the sulfuric acid of 90 wt% to evaporate. Moreover, it is the important equipment to supply the SO<sub>3</sub> decomposer which is the following process, resolving the part of sulfuric acid vapor into SO<sub>3</sub> with. The heat exchanger that sulfuric acid evaporates must be made pressure-resistant structure because it has the high-pressure helium of 4 MPa and the material that the high temperature and the corrosion environment of equal to or more than 700 °C can be endured must be used. As the material, it is selected from the corrosion experiment and so on when SiC which is carbonization silicone ceramics is the most excellent material. However, even if it damages the ceramic block which is a heat exchanger because it becomes the structure which is stored in pressure-resistant metallic container, fluid such as sulfuric acid becomes the structure which doesn't leak out outside. However, the structure design technique to have been unified when using ceramics as the structure part isn't serviced as the standard.

This report is the one which was studied about the structural design technique to have taken the material strength characteristic of the ceramics into consideration, refer to existing structural design standard.

Keywords : Sulfuric Acid Decomposer, Thermochemical Reaction, IS Process, Hydrogen Production, SiC, Ceramics, Structural Design Standard

---

\*: MFBR (Enrolled in the IS process research and development group (formerly IS process technology group) until March, 2008)

目 次

1. はじめに	1
2. セラミックス材料の機械的性質	2
3. 設計方針	3
3. 1 荷重条件の抽出	3
3. 2 解析による設計	4
3. 3 応力評価	5
4. 確率論的評価	14
5. 安全裕度の考え方	15
6. 材料強度データ	16
7. 硫酸分解器の解析評価例	17
8. 高圧ガス保安法への対応	19
9. まとめ	21
謝辞	22
参考文献	23

Contents

1. Introduction	1
2. Mechanical Property of Ceramics	2
3. Structural Design Concepts	3
3.1 Establishment of Load Conditions	3
3.2 Design by Analysis	4
3.3 Stress Evaluation	5
4. Probabilistic Evaluation	14
5. Concepts of Safety Margin	15
6. Material Strength Data	16
7. Stress Analysis Evaluation of Sulfuric Acid Decomposer	17
8. Way of Thinking of Compatible to The High Pressure Gas Safety Act	19
9. Conclusion	21
Acknowledgment	22
Reference	23

## 1. はじめに

IS プロセスは硫酸の高温熱反応とヨウ素の反応を利用した水素製造プロセスであり、製造設備は高温かつ腐食性の環境に耐える設計が要求される。特に、IS プロセスの主要機器のひとつである硫酸分解器は、90wt%の濃硫酸を高温ヘリウムにより加熱して蒸発させ硫酸蒸気を生成させるとともに、一部を  $\text{SO}_3$  に分解して次の工程である  $\text{SO}_3$  分解器に供給する重要機器である<sup>1)</sup>。この中で、濃硫酸を蒸発させる熱交換器部は、4MPaの高圧ヘリウムを内蔵するために耐圧構造とする必要があり、かつ700℃以上の高温と腐食環境に耐える必要がある。これらを満たす材料としては、現状では炭化ケイ素セラミックス (SiC) が最も優れた材料である<sup>2)</sup>。

そこで、SiCを熱交換部として用いた硫酸分解器として、Fig.1.1に示すような型式が考えられる。この中のブロック型硫酸分解器では、熱交換器となるセラミックスブロックは外側に耐圧金属容器に格納される構造となっており、仮にセラミックスブロックが破損しても、硫酸等の流体が外部には漏れない構造となっている。しかしながら、セラミックスブロックは複数の流路を内包しているため、それぞれの流路壁が耐圧境界と同等であり、一部の配管等を使用されるガラスライニング配管等を含めて、脆性材料の健全性を如何に確保するかがISプロセスの実用化に向けての大きな課題の一つである。

セラミックスの構造設計に関する基準化はこれまで試みられたものの、JISのような基準化には至らず<sup>3),4)</sup>、機械工学便覧に構造評価手法が簡単に紹介されている程度である<sup>5)</sup>。これは、セラミックスが脆性材料であるために信頼性のある設計手法の確立が困難であるだけでなく、材料特性が組成や製造方法に大きく依存するために一律に規定し難いこと、材料メーカーのノウハウが絡んでいることが大きな要因のひとつと考えられる。近年ファイナセラミックスのような高強度で均質性に優れたセラミックスが開発されるに至り、タービンブレードのような厳しい環境に耐える構造材として使用されているが、その設計はメーカー各自が各ケースに見合っているのが現状である。

ここでは、硫酸分解器のセラミックス熱交換器を対象に、既存の構造設計基準類を参考にセラミックスの構造設計手法の考え方を提示する。

## 2. セラミックス材料の機械的性質

SiCを含むセラミックス材料について、機械的性質を述べる。SiCの機械的性質を簡単に言えば、金属よりも硬く強度も高いが脆いということである。このため、金属材料の強度特性である降伏後の破壊に至るまでの伸び（変形）が無く、ある限界荷重に達すると突然破壊してしまう。これは、金属における降伏のような破壊の前兆現象が無いため、破壊防止がより困難となることを意味する。加えて、セラミックスの強度特性の大きな問題点は強度の均一性に劣ることである。組成の違いや製造方法はもちろんのこと、同一製造方法においても破壊強度にばらつきが生じる。ばらつきの度合である標準偏差を金属と比較すると、金属が数%以内であるのに対し、セラミックスの場合は10数%程度であるのが一般的である。

セラミックスでは、材料中に存在するマイクロクラックに作用する応力が限界値に達すると破壊が生じる。マイクロクラックは材料全体に存在しており、存在するクラックの大きさの存在確率と応力分布で破壊が決まる。これが、同一製造法でも破壊強度にばらつきを生じる原因であり、この損傷形態は統計学的にワイブル分布で近似できる。すなわち、大きさ（強さ）に関する確率分布に従うクラックが物体内均一に存在する物体の破壊メカニズムであり、実際に存在する最も大きな（最弱な）クラックが破壊を支配する。これは、“最弱リング説”と言われるように、Fig.2.1に示すような多数のリングを連結した鎖を引張ると、最も弱いリングの破壊により鎖の破壊が起こることと同じである。統計学的には極値統計学のうちの最小値分布の問題に帰着する。最小値分布の概念をFig.2.2に示す。これは、分布関数を持つ母集団から $n$ 個を一組とするサンプルを何組か抽出した場合に、各サンプルの最小値も分布となり、これがワイブル確率分布と同様の式で表される。Fig.2.2に示すように、 $n$ が大きくなるほど小さな値の出る確率が増加するため、最小値が小さくなる。セラミックスの評価では、リング数あるいは抽出サンプル数 $n$ が大きさに相当する。

破壊の評価手法としては大規模降伏を考えない線形破壊力学が適用され、クラック先端に応力集中が起こり（応力拡大係数：KI、KII、KIII）、それが限界応力（破壊靱性値：KIC、KIIC、KIIC）に達すると破壊が開始する。破壊が進展（亀裂の伝搬）するには他の条件が必要であり、エネルギー平衡の考えに基づいてGriffithが導き提唱したクライテリアを基本として、現在は最大エネルギー開放率説として知られている。すなわち、亀裂が進展することにより弾性エネルギーが解放されるが、それが亀裂面の増分に要する表面エネルギーより大きい場合に進展が起こるという条件である。本報告書のセラミックスの力学的特性に関する部分は成書<sup>6)-8)</sup>を参考にした。

### 3. 設計方針

本章ではセラミックスの構造設計を行うにあたり、基本となる設計手法の考え方を提示する。セラミックスの破壊現象は、第2章の材料特性で述べたように、材料中に存在するマイクロクラックの存在確率に支配されるため、確率論的性質が強い。したがって、構造設計手法としてはワイブル分布をベースにした確率論的手法を適用するのが合理的であり、これまで実施されたケースは殆どが確率論手法によっている。しかしながら、主に金属構造物を対象とした従来の構造基準類は決定論的手法が踏襲されており、限界値以下に抑える論理性は（限界値の信頼性は別として）単純かつ明確である。さらに、IS プロセス機器に高圧ガス保安法等の既存の基準が適用された場合、確率論的手法よりも決定論的手法の方が審査を受けやすいと判断される。したがって、設計手法の基本方針としては決定論的手法を基本として、確率論的手法をバックアップと位置づけるものとする。

#### 3. 1 荷重条件の抽出

構造設計を行うにあたり、評価対象とする構造要素に運転中に作用すると想定される荷重を抽出し、それらが原因となる破壊のメカニズム毎に分類し、それぞれに適切な評価手法を適用する。

代表的な荷重の種類としては以下が挙げられる。

##### ① 自重、圧力等の機械荷重

破断や座屈等の破壊の原因となる荷重である。即時破壊を招くため、その応力（1次応力）は材料の強度データから求まる設計最小値から適切に設定された許容応力以内に制限される。

##### ② 熱応力の原因となる熱荷重

構造物内部に温度分布が生じた場合に、熱膨張差に応じて発生する熱応力である。機械荷重と異なり変形の連続性を保つために生じた応力（2次応力）であり、降伏しても瞬時破壊に至るものではなく、繰り返して作用することにより塑性歪みが蓄積して限界歪みに達した時、破壊に至る。したがって、金属のような延性材料に対しては塑性変形を考慮して適切な許容応力値を設定している。

これと同様の性質を持つ荷重として、熱的荷重、機械的荷重に関わらず複数の力学的境界に生じた、熱膨張差や地震時変位等による外部からの相対変位により生じる応力もこのカテゴリーに入る。相対変位に対して構造健全性上問題となるのは機器ノズルが一般的であるが、IS プロセスの場合のようにガラスライニング配管を用いている場合には配管の熱膨張応力と同等の損傷要因となる。

以上は、時間的な変化の小さい定常な応力であるが、熱的荷重が動的に作用する場合や繰り返し作用する場合には熱衝撃問題として非定常応力を評価する必要がある。このような熱的変動が予想されるのはトラブル時の緊急停止や、沸騰域の熱伝達の変動等である。さらに、温度変化が材料中の音速（鉄系金属の場合約 5000m/s）より速い場合には材料内に熱弾性波が生じるために波動現象の評価が必要になる。

③ 地震による動的荷重

地震時に対してはいわゆる耐震設計となるが、耐震設計には大きく分けて簡便法である静的震度法とより詳細な動的震度法の2通りがある。

一般的に、構造物の固有振動数を20Hz以上の剛構造にすることが望ましい。この場合、静的震度の評価で十分であるが、20Hz以下の場合には建物との共振による地震荷重の増幅があるので動的評価が望ましい。動的評価は構造物の固有振動数を求め、別途設定した構造物の設置床における地震応答スペクトルから応答加速度を求めて設計地震力として評価する手法である。さらに詳細には、時刻歴応答解析手法もある。

また、液体を内蔵した容器等においては、地震時の揺れ、特に周期が1秒以上の長周期成分に対して液面が揺動（スロッシング）し容器壁や屋根構造に衝撃荷重を与えることになる。さらに、衝撃荷重としては構造健全性上無視できる範囲であっても構造壁温度と液体温度に温度差がある場合には熱衝撃問題が生じるため、評価が必要である。

④ その他

以上の一般的な荷重の他に、衝撃力や電磁力、キャビテーションによるエロージョン、流れ場におけるカルマン渦に代表される流力振動等の、それぞれの機器に特有の荷重を的確に摘出し、それらに対して適切に解析評価する必要がある。

以上を考慮した、IS プロセスプラントを対象に想定される発生荷重要因と発生部位の分類を Table3.1 に示す。

3. 2 解析による設計

既存の設計基準の中には、高圧ガス保安法で規定されている構造設計基準のように、内包するガス圧に対する必要板厚のみを算定する公式計算による手法を踏襲している基準も依然存在するが、多様な構造要素に作用する多様な荷重形態に対する強度評価を行うには有限要素法を用いた詳細解析と破壊モードに即した材料特性を反映した評価手法が必要不可欠である。米国が先駆けて火力及び原子力設備を対象とした設計基準（ASME SecVIII および SecIII）を実用化し、それを参考に日本国内でも基準化され（通産告示 501 号（現在は性能規定化された省令 62 号に取り込まれ廃止））<sup>9)</sup>、最近では JIS 圧力容器構造規格<sup>10)</sup>にもその考えが反映されている。

① 温度分布解析

熱応力の原因となる構造物内の温度分布を求める解析であり、一般的には有限要素法による汎用解析コードを用いて行う。構造物の温度変化の原因が流体の温度分布や温度変化に起因する場合、別途流体系の温度分布解析を実施し、構造物の境界条件として流体温度分布と熱伝達係数を設定する必要がある。

流体系の温度分布解析には汎用の CFD コードが多数あり、JAEA で使用可能なコードとして「STAR-CD」、「FRUENT」等がある。

構造物の温度分布解析には汎用構造解析コードが多数あり、JAEA で使用可能なコー

ドとして「ABAQUS」、「ANSYS」、「FINAS」等がある。

## ② 応力解析

機械荷重や熱荷重に対して構造物内部に発生する応力を求める解析であり、一般的には陰解法を用いた有限要素法による汎用構造解析コードを用いて行う。通常、汎用構造解析コードは温度分布解析と同じコードを用い、JAEA で使用可能なコードとして「ABAQUS」、「ANSYS」、「FINAS」等がある。

機械荷重に対する応力解析は、境界条件に直接荷重を与えて応力解析を行うが、熱応力解析の場合には①の温度分布解析の結果を用いて応力解析を実施する手順となる。

機械的・熱的衝撃荷重による波動現象を解析するには陽解法を用いた有限要素法による汎用構造解析コードを用いて行う。JAEA で使用可能な陽解法コードとして「LS-DYNA」、「ABAQUS(Explicit)」、「ANSYS(Multi-Physics)」等がある。

## ③ 耐震解析

静的地震力に対する解析や動的な地震力に対する解析、振動解析に対しても②に挙げた汎用解析コードを用いて行う。振動計算は、応力分布計算と異なり局所的な構造不連続による影響が小さいために多質点系にモデル化しやすく、PC でも解析可能な場合が多い。

機器の固定用基礎ボルトに作用する地震力の算定は、機器の重量と重心位置、設計地震力(加速度)から手計算程度で可能である。

スロッシングに対しても、②で挙げた構造解析コードの流体連成解析機能を用いて評価が可能である。

## ④ 座屈（圧壊）解析

座屈解析は、外圧や圧縮荷重が作用する円筒等の簡単な形状形態については公式化されており、概算可能である。リブ構造や穴あき等の複雑な形状に対しては、②に挙げた解析コードを用いて非線形（大変形）解析（必要により弾塑性解析も）を行う必要がある。

## ⑤ その他

上記以外の特殊な荷重や現象に対する解析評価は②の汎用解析コードで近似的に対応するか、それが困難な場合は専用の解析コードを作成し評価する必要がある。

### 3. 3 応力評価

#### 3. 3. 1 破損形態と応力分類

一般的な構造系の健全性を維持するために、防止すべき破損形態を以下に示す。

- 1) 延性破壊
- 2) 過大な塑性変形

- 3) 疲労破壊
- 4) 弾塑性座屈
- 5) クリープ破損
- 6) 過大なクリープ変形
- 7) クリープ疲労
- 8) クリープ座屈
- 9) 脆性破壊
- 10) 延性不安定破壊
- 11) 応力腐食割れ
- 12) 腐食疲労

上記に示した破壊形態の内、セラミックスに特有である 3)の疲労破壊と 9)の脆性破壊が支配的破損モードとなる。

JIS 圧力容器構造規格 (B 8281 圧力容器の応力解析及び疲労解析) では、構造物内部に発生する応力を 1 次応力( $P_m$ 、 $P_L$ 、 $P_b$ )、2 次応力(Q)、ピーク応力(F)の 3 種類に分類して、想定破損形態ごとに合理的な許容応力を与えている。JIS 圧力容器構造規格の応力分類と応力制限を Table3.2 に、応力評価の流れを Fig.3.1 に示す。安全裕度は、分類された応力のカテゴリごとに安全係数 (破損限界/許容限界) を設定することにより、破損発生確率と結果の重大さの積としてとらえられるリスクから評価される。以下に各応力分類について示す。

- 1) 1 次応力：外力及びそれに伴う外モーメントに対して、力学的平衡の法則を満足するために必要な荷重制御型の応力であって、構造系の変形によって緩和されることがなく、これが過大になると直接延性破断に至る可能性があるものをいう。さらに、1 次応力は、その板厚分布形状によって、構造部材の膜成分である 1 次一般膜応力： $P_m$ 、曲げ成分である 1 次曲げ応力： $P_b$ 、構造不連続部等の局所的な膜応力成分である局部膜応力： $P_L$  に分類される。1 次応力に対する許容応力は、構造部材の全断面(容器ならその板厚)が降伏した状態をもって破損するとの考え方を基にしており、1 次一般膜応力( $P_m$ )は降伏応力に安全率(約 2/3)を考慮した設計許容応力  $S_m$  以下とし、1 次曲げ応力( $P_b$ )と局部膜応力( $P_L$ )は、断面形状効果を考慮して設計許容応力の 1.5 倍の  $1.5S_m$  以下に制限している。
- 2) 2 次応力：隣接部分の拘束または自己拘束によって生じる変形制御型の応力であって、これに伴う変形またはひずみが自己制御性を有するために、直接延性破断やクリープ破断に結びつくことはないが、これが繰り返されることによって、進行性変形が生じる可能性のあるものをいう。すなわち、2 次応力には、熱応力のような熱膨張変形が拘束されることによって生じる内部応力や、円筒容器の鏡板の内圧による変形と連続性を保つために生じる円筒部の変形で生じる応力等が該当する。したがって、2 次応力に対する許容応力は、それが降伏応力を超えても直接破断に至らないことを基に、構造部材の一部分に塑性変形が生じても、その応力の繰り返しに

より部材断面の塑性変形が累積しない限界（シェイクダウン）以下にする考え方により、1次応力（ $P_L+P_b$ ）と2次応力(Q)の合計応力が $3S_m$ 以下と制限している。

- 3) ピーク応力：応力集中または局部熱応力により、1次応力または2次応力に付加される応力成分であって、局部に限定されるため構造系の変形に結びつくものではないが、これが繰り返されることによって、疲労によるき裂の発生に結びつく可能性があるものをいう。

疲労破壊に対する許容応力は、その応力変動幅が破壊を支配することから、1次応力、2次応力とピーク応力を合計した応力変動の最大応力振幅(Sa)とその繰り返し数(N)を基に、設計疲労曲線（JIS 構造規格基準では、応力で2、繰り返し数で20の安全率を考慮している）から求まる許容応力振幅(Sa)とその破損繰り返し数(Nf)との関係から疲労強度に対する損傷率(f)を評価する。実際には、線形累積損傷則に基づき、種々の応力サイクルに対して、応力振幅  $Sa_1, Sa_2, \dots, Sa_i, \dots$  とその回数  $N_1, N_2, \dots, N_i, \dots$  を算出し、それぞれのサイクルに対する疲労損傷率(f<sub>i</sub>)の合計( $\sum f_i$ )が1以下になるように制限する。

以上は延性材料に対する応力分類と評価手法であり、1次応力の曲げ応力に対する許容応力を1.5倍にする考えは、全断面が降伏するまでの応力が、降伏し始める曲げ応力（表面での最大応力）の1.5倍に相当するところから来ており、セラミックスのような塑性変形しない脆性材料に対しては適用できない。同様に、熱応力や強制変位のような変位制御型加重による2次応力に対する許容応力を1次曲げ応力に対する許容応力の2倍にする考え方、最初の負荷で降伏しても次の負荷サイクルから弾性域に落ち着くと言うメカニズム（弾性追従）も塑性変形を考慮に入れた考え方であり、脆性材料に対しては2次応力に対する許容応力の考え方を適用できない。疲労強度評価に関しても安全率の取り方を見直す必要があり、荷重サイクルの重ね合わせの手法に関しても、セラミックに特有の特性があるかどうかを検証する必要がある。

セラミックスの主要な破損モードとその特性を以下に示す。

#### ① 即時破壊

引張り荷重、せん断荷重により潜在クラックが伝播することによる破壊（体積、表面、コーナー部の多重モード破壊）。高温ガス炉の炉心支持構造物に用いている黒鉛ブロックはセラミックスと同様な脆性材料であり、当該設備の構造設計基準として熱応力は2次応力に分類せず1次応力の範疇としている<sup>11), 12)</sup>。この考えは妥当であると判断されるため、本構造設計方針案においても採用熱応力の発生は、即時破壊を引き起こすものとする。

#### ② 時間依存型破壊

ガラス質の  $SiO_2$  の原子結合が＜応力+水分＞の環境で応力腐食割れを起こすことに起因する。硫酸中には水分が存在し、応力腐食割れの可能性があるが、硫酸分解器では温度上昇に伴い状態が変化するため可能性が変化する。硫酸分解器に入った硫酸は、ヘリウムガスとの熱交換により加熱され（加熱域）、やがて沸騰が始まり硫酸が蒸発する（沸騰域）。

硫酸蒸発が完了しドライアウトした（ドライアウト部）以降は、硫酸蒸気および分解した  $\text{SO}_3$  の温度が上昇する（過熱域）。それぞれの領域では、以下の可能性が考えられる。

加熱域：濃硫酸中の水分による応力腐食割れの可能性。

沸騰域：内面に濃い硫酸液膜が薄く着くので応力腐食割れを起こしにくい。

過熱域：硫酸蒸気中の水分による応力腐食割れの可能性。

ドライアウト部：熱応力が高く、硫酸蒸気中の水分による応力腐食割れの可能性大。

なお、不活性ガスであるヘリウムガスと接する面では、応力腐食割れは起きない。

### ③ 繰返し数依存型破壊

亀裂面に生じる架橋(bridging：亀裂先端の応力低下に寄与する)が繰返し応力により架橋が摩滅し破損するため、時間依存型よりも寿命が低下する。

### ④ 座屈（圧壊）

金属等の延性材料の場合は圧縮荷重に対する不安定現象として弾性座屈や弾塑性座屈が評価対象となる。セラミックスの場合はコンクリートの圧壊のような圧縮荷重による斜め方向面に作用するせん断応力が、マイクロクラックのモード II 破壊を生じ、それが伝搬して構造物の崩壊に至る破損モードがある。

## 3. 3. 2 許容応力の設定

決定論的評価においては、発生応力が許容応力以下であることが必須条件となり、許容応力は当該材料の強度データを統計処理して適当な安全率を考慮して設定される。延性材料に対する許容応力は材料に固有な物性値であり、単一の値として設定可能である。すなわち、材料強度試験に用いた試験片から得られた強度データを、任意の大きさ、形状を有する実機の材料強度データとして適用できる。

原子力機器の構造設計基準および JIS 圧力容器構造規格における許容応力の基本となる設計応力強さの設定基準（安全率の取り方）を以下に示す。

#### ① オーステナイト系材料の設計応力強さ $S_m$ は以下の最低値とする。

- ・ 室温での規格引張り強さの 1/3 の値。
- ・ 各温度での設計引張り強さの 1/3 の値。
- ・ 室温での規格降伏点の 2/3 の値。
- ・ 各温度での設計降伏点の 0.9 倍の値。

#### ② 設計疲労曲線

小型試験片に対して行った完全両振歪制御型疲労試験で得られた歪振幅と繰返し回数との関係を示すデータを基に最適曲線を求め、最適曲線に対して歪で 1/2、繰返し回数で 1/20 にした曲線を設計疲労曲線とする。

ここで、許容応力を決めるための基準値となる設計引張り強さや設計降伏点は、材料強度

試験で得られたデータを基に統計処理し、データのばらつきを十分カバーできる値として設定される。設定方法は基準により統一されていないが、最も多く用いられているのは、実験データに正規分布を当てはめて、非破損確率が 99%になる強度を最小強度とする設定手法である。

一方、HTTR においては、黒鉛を用いる高温ガス炉の炉心支持構造物設計基準における設計引張強さの設定に正規分布を仮定した決定論的評価手法を採用し、黒鉛の特性を考慮したうえで 95%信頼下限を用いて設計引張強さを定義し、許容応力評価としている。ただし、このように従来の金属構造物の設計手法にセラミックス材料、すなわち脆性材料の強度特性を当てはめて許容応力を設定する方法はセラミックス構造物の設計手法として確立されるには至っていない。

これは、脆性材料では、強度データが材料固有の値ではなく同一材料の場合においても対象の形状・大きさ、応力分布に依存するためである。また、一般的な脆性材料では、強度特性は金属で用いられる正規分布とはならず極値分布（最小値分布）を示すことも一因である。セラミックスの強度に関してはワイブル分布の適用性が良いとされている<sup>13),14)</sup>。

したがって、脆性材料の許容応力を延性材料と同様に材料固有の値として決定することは非常に困難であり、構造物の形状・大きさと応力分布を反映できる決定方法が必要である。脆性材料の構造物形状・大きさと応力分布をあらわすのが、有効体積の考え方であり、有効体積と構造物に発生する最大応力を用いて健全性評価が可能となる<sup>14)</sup>。さらに、材料強度試験片と評価構造物のそれぞれの有効体積の比を用いて、強度試験で得られた材料強度から実機構造物の強度に換算でき可能である。その方法の概要を以下に述べる。

#### i. 破壊確率

ある応力分布にある体積  $V$  のセラミックス構造物の破壊確率  $P_f$  は、次式で表される。

$$P_f = 1 - \exp \left[ - \int_V \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m dV \right]$$

ここで、 $\sigma$  は微小体積の応力であり、 $\sigma_0$  は尺度母数である。また、 $m$  はワイブル係数といい、強度ばらつきの指標であり、値が大きいほど強度のばらつきが小さい。

#### ii. 有効体積 $V_e$

上記の破壊確率を、構造物に発生する最大応力  $\sigma_{\max}$  を用いて書き直すと、次式が得られる。

$$P_f = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_0} \right)^m V_e \right], \quad V_e = \int_V \left( \frac{\sigma}{\sigma_{\max}} \right)^m dV$$

ここで、 $V_e$  は有効体積であり、構造物の形状・大きさと応力分布を表す指標である。計算には、評価対象の応力分布が必要であるが、汎用有限要素プログラムにより出力される解析結果を用いることができる。評価対象の応力解析結果から有効体積を算出すれば、最大応力  $\sigma_{\max}$  での破壊確率が評価できる。なお、圧縮応力は破壊に寄与しないとして、全て  $\sigma$

=0 として計算する。

一例として、3 点曲げ試験の有効体積は、 $V_{et}=V/\{2(m+1)^2\}=1.8 \text{ (mm}^3\text{)}$  ( $m=9$ ) となる。

### iii. 有効体積による応力換算

有効体積が異なる構造物において、それぞれの最大応力の間には、次の関係がある。

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{\frac{1}{m}}$$

これを利用して、破壊試験から得られた破壊応力を実機構造物の破壊応力に換算できる。

$$\beta = \frac{\bar{\sigma}_p}{\bar{\sigma}_t} = \left( \frac{Ve_t}{Ve_p} \right)^{1/m}$$

この手法を用いて、曲げ強度と第 7 章で紹介する硫酸分解器の SiC 製熱交換器の強度比  $\beta$  を求めると、以下の値となる。なお、曲げ試験結果等を参考にワイブル係数を 9 として計算した。

1. ブロック型の有効体積： $Ve=3.4 \times 10^3 \text{ (mm}^3\text{)}$ 、 $\beta=0.44$
2. 配管型(32 本)の有効体積： $Ve=2.7 \times 10^2 \text{ (mm}^3\text{)}$ 、 $\beta=0.57$
3. バイヨネット型(内管)の有効体積： $Ve=3.3 \times 10^2 \text{ (mm}^3\text{)}$ 、 $\beta=0.56$

曲げ試験で得られた強度の約 40%~60%が実機の強度に相当することになり、これを基に許容応力を設定することができる。

以上より、有効体積理論により、理論上は構造物の形状・大きさと応力分布を考慮した許容応力の設定が可能である。しかしながら、実際には、有効体積が大きくなるほど、換算値と実際の強度分布の誤差が大きくなるため、換算値を許容応力として設計に用いるには注意が必要である。

### 3. 3. 3 強度推定法の検討

3. 3. 2 で用いた有効体積による補正は、許容応力決定のための有効な方法であるが、曲げ試験片との有効体積の差が大きい場合は精度が大きく低下する。このため、セラミックス製品の設計では、強度信頼性評価は実機相当の試作体の破壊試験により行われ、換算による許容応力設定は参考値程度として扱われている。このことは、設計を非効率的にするばかりではなく、破壊試験費用および時間の負担が大きいため、セラミックス構造体の設計手法確立が強く求められる。

そこで、有効体積の考え方を応用し、SiC 構造体設計のための強度評価手法を検討した。

有効体積理論が大型構造体の設計において誤差を生じる原因は、式中のワイブル係数  $m$  にある。理論的には  $m$  の値は同一材料では一定値であるが、実際には、同一材料においても、構造体の形状に応じて  $m$  が変化してしまうためである<sup>15), 16)</sup>。また、基本的には相対的評価であるものの、実際には曲げ試験が基準となっている。その曲げ試験結果も強度ばらつきを有しており、許容応力を決定するための基準がそもそも曖昧であるという問題もある。そこで、単純な補正ではなく、次のような考え方の新しい強度評価手法を検討した。

基本的な考え方は、相対評価の基準となる強度を、形状等の影響を受けない、材料 (SiC)

の基準強度として決定し、ここから構造体の形状、応力分布を考慮して、強度を推定するというものである。

まず、セラミックスの破壊のメカニズムを考慮すると、形状等に依存しない材料強度とは無欠陥材の強度に相当する。ただし、強度試験による無欠陥材料強度の取得が事実上不可能であるため、微小体積の強度を近似的に無欠陥材の強度と考え、基準強度とした。さらに、基準強度算出には、一般的な強度試験である曲げ試験を利用できるよう、曲げ試験片と有効体積の近い有効体積が  $1\text{mm}^3$  の強度を基準強度とした。以上から、曲げ強度および有効体積理論による次式から、材料の基準強度が以下のように求まる。

$$\sigma_0 = \sigma_b (V_{eb})^{\frac{1}{m}}$$

ここで、 $\sigma_0$  は基準強度、 $\sigma_b$  は曲げ強度、 $V_{eb}$  は曲げ試験片の有効体積である。

次に、基準強度からの構造体強度推定について述べる。実際の構造体の強度は、この基準強度に対し構造体の形状および応力分布に応じて低下することになる。この構造体の形状、応力分布をあらわすパラメータが、有効体積となる。ただし、有効体積を用いるには、ワイブル係数の形状依存性を十分に考慮しなければならない。

セラミックスの強度評価におけるワイブル係数は、強度ばらつきをあらわす指標である。ワイブル係数によって示されるばらつきは、同一有効体積における強度ばらつきおよび異なる有効体積間での強度ばらつきである。曲げ試験によって得られるワイブル係数は前者であり、後者についてはワイブル係数が一定として処理されている。しかしながら、前述のとおり有効体積が著しく異なる場合はワイブル係数の値が保証されないため、両者を同時に精度良く整理することはできない。

一方、セラミックス構造体の設計段階においては、設計の基準となる強度が重要である。つまり、製品ごとの強度ばらつきよりも下限強度、すなわち、設計の基準となる強度が推定できれば良い。そこで、異なる有効体積間での強度ばらつきに着目し、有効体積をパラメータとした強度推定を検討した。

有効体積の変化は、応力分布変化および体積変化によるものである。異なる有効体積間の強度変化は、体積変化に伴う材料中の欠陥分布の違いによると考えられる。この欠陥分布の違いによる強度変化も最弱リンク説によって説明でき、有効体積理論の適用が可能であると考えられる。以上より、有効体積をパラメータとした強度推定式として、材料基準強度および補正ワイブル係数  $M$  を用いて次式が得られる。

$$\sigma_j = \sigma_0 \left( \frac{1}{V_e} \right)^{\frac{1}{M}}$$

$M$  は異なる有効体積間での強度ばらつきを設定するパラメータであり、ある有効体積における下限強度を推定できるように決定する。常圧焼結 SiC の場合、小型モデルの破壊試験結果から  $M=7$  とした (Fig.3.2) <sup>17), 18)</sup>。

設計においては、有限要素法による解析等により求めた応力分布を用いて有効体積を算出し、強度推定式から設計強度の基準値を得ることになる。

### 3. 3. 4 破壊基準

応力評価の合否判定には、破壊という観点から、材料強度データと評価対象構造物の応力状態とを関連付けなければならない。材料強度データは、単純引張り試験や曲げ試験から得られるデータであり、それは単軸応力場での降伏強さ、あるいは破壊強さである。しかしながら、構造物における応力場は一般的に多軸応力場であり、破壊現象を精度良く説明できる多軸応力場から単軸応力場に変換する手法、すなわち、テンソル量から座標系に依存しない不変量であるスカラー量に変換する方法が必要である。多軸応力場を、損傷的に関連づけられた等価な単軸応力に変換したものを一般的に相当応力と呼び、任意の座標系に対して不変量となっている。

延性材料を対象にした原子力機器の構造設計基準および JIS 圧力容器構造規格における破壊基準は、最大せん断応力説を採用している。これは、最大主応力差が単軸降伏応力に達すると降伏を開始するとする説で、Tresca の降伏条件とも言われる。

脆性材料に対する破壊基準としては、その破壊メカニズムがマイクロクラックの存在によることから、クラック近傍の応力状態を解析し破壊現象と関連づける線形破壊力学の適用が用いられる。クラックの進展モードとして応力状態に対応して引張り型（モード I）とせん断型（モード II、III）の 3 種類の破壊モードが提案されており、それぞれのモードに対する限界値（破壊靱性値）が対応している。この場合においても、限界値は単軸応力状態の材料試験から求められるから、延性材料の場合と同様に構造物の多軸応力場から等価な単軸応力に変換することが必要となる。

セラミックスの場合、3 種類の破壊モードのうち、最も弱いのがモード I の引張り型であり、その場合の多軸応力場の破壊基準としては、クラックを開こうと働く最大主応力が最も簡単な評価基準となる。最も簡単な最大主応力から複雑な破壊基準まで多くの破壊基準が提案されており、代表的な破壊基準（これらはクラックが一様に分布する構造体に作用する多軸応力場から如何に精度良く全体での破壊確率を評価するための基準であり、個々のクラックの進展を評価する基準は有効応力という概念として別のクライテリアとなる）の概念を以下に挙げる。

#### ① 最大主応力に基づく破壊基準

多軸応力場の最大主応力が限界強度に達したとき破壊が起きる。

$$\hat{\sigma} = \text{Max}[\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3] > \sigma_c$$

最も簡単であるが非安全側の評価である。設計のサーベイを行うには便利な評価手法である。

#### ② PIA（principle of Independent Action）手法に基づく破壊基準

すべての主応力が独立に寄与するものとして、ワイブル係数  $m$ （強度のばらつきを表す）の重みを付けた  $m$  乗和を破壊基準とする。

$$\hat{\sigma} = (\sigma_1^m + \sigma_2^m + \sigma_3^m)^{1/m} > \sigma_c$$

この手法は、クラックの存在が主応力方向にのみ存在する場合を仮定したのとなっており、次のワイブル垂直引張り応力平均手法と比べて非安全側の評価となる。

③ ワイブル垂直引張り応力平均手法に基づく破壊基準

主応力空間において、単位長さの半径を持つ球面を考え、球面の垂直応力成分  $\sigma_n$  が引張りとなる領域で面積積分し、同じ領域の面積で規格化した値を基準値とする。

この手法は、クラックの存在があらゆる方向に均一に分布しているものと仮定して、それぞれの方向の引張り応力の寄与率を積分したのとなっている。

④ Batdorf と Corsen の手法に基づく破壊基準

この手法は、③のワイブル垂直引張り応力平均手法と類似しており、主応力空間での球面における引張り応力を求め、クラックの一様分布（方向性も含めた存在確率）の仮定までは同じであるが、ワイブル手法が単に正值の垂直応力（引張り成分の領域のみ）を面積積分しているのに対し、本手法の特徴は球面における有効応力（垂直応力とせん断応力を破壊モードIに適応するように合成したもの）がクラックの破損モードIの限界応力を超えた領域について積分している点にある。従って、評価にはクラックの進展を支配する有効応力が必要となるが、以下の4種類が主要なクライテリアである。

- (i) 最大引張り応力クライテリア
- (ii) 全ひずみエネルギー開放率クライテリア
- (iii) Shetty の混合モードクライテリア
- (iv) 淡路の新最大エネルギー開放率説

これらの4種のクライテリアの中では、(iii)の Shetty の混合モードクライテリアと(iv)の淡路の新最大エネルギー開放率説が最も精度が良い破壊クライテリアと言われている。

これらの破壊クライテリアのうちどの手法を用いるかは、対象とする機器の重要度や設計の進捗の度合い（概念設計、詳細設計、製作設計の段階）に応じて要求される精度に見合った手法で行うのが合理的であり、その段階に応じて適切な手法を選択することになる。例えば、概念設計段階では計算が容易な(i)の「最大引張り応力クライテリア」に十分な余裕を考慮して評価し、詳細設計以降ではより精度の高い(ii)以降のクライテリアを用いる、等である。

#### 4. 確率論的評価

セラミックスの設計法は、その強度特性がマイクロクラックの存在確率に起因していることから、もともとワイブル統計学を基にした確率論的評価が主流である。セラミックスの設計基準として公式に制定されたケースはまだ無いが、ここまでに参考としたセラミックスの強度評価手法もすべてワイブル統計学がベースとなっている<sup>3),5)~7)</sup>。

確率論的評価を用いたセラミックスの信頼性評価コードもいくつか開発されている。これらの評価コードでは、汎用有限要素法プログラムによる構造解析結果を基に、各種評価を行う。米国の NASA が開発したセラミックスの確率論評価コード CARES/LIFE (Lifetime Reliability Prediction of Ceramic Structures Under Transient Thermomechanical Loads (NASA/TP—2005-212505))は、ワイブル強度データの統計処理法も含め即時破壊から時間依存疲労破壊まで詳細な評価法が取り入れられており、現在公開されているセラミックスの強度評価手法に関しては最も優れたものと考えられる。また、非公開ではあるが、東京電力(株)と石川島播磨重工業(株)によるセラミックス製ガスタービンの信頼性評価システム「G-FICES」が開発されている<sup>19)</sup>。G-FICES は、即時破壊、疲労破壊の評価に加え、保証試験の効果を評価できるのが特徴である。また、経時劣化を考慮した即時破壊評価等も行える<sup>20)</sup>。

また、セラミックスのワイブル強度データの統計処理法に関しては、米国の ASTM (米国材料試験協会; American Society for Testing and Materials) から Standard (C-1239) : “Standard Practice for Reporting Uniaxial Strength Data and Estimating Weibull Distribution Parameters for Advanced Ceramics”が出ており、実際に統計処理する上でのガイドになる。

以上のように、セラミックス構造物に対する確率論的評価手法はほぼ確立されており、構造物の応力分布を考慮した確率論的評価を行うことも可能である。しかしながら、設計手法としての確率論的評価の導入には、許容破壊確率の目標値の合理的な決定が課題である。

## 5. 安全裕度の考え方

現行の種々の構造設計基準における安全裕度（安全率）は経験的に設定されてきたものである。高圧ガス保安規則のように公式による設計で行う旧式の基準では安全率 4 を設定しているが、米国の ASME で規格化された火力・ボイラー規則では、20 世紀後半の電子計算機の進歩に伴って急進な進歩を遂げた解析をベースにした設計手法と、塑性変形のような材料強度特性を合理的に取り入れたために安全率を 3 まで低減することを可能にした。

安全率を定量的に評価するには、確率論的評価が唯一の方法であり、これにより統一的に安全率が設定可能となる。ただし、安全率には産業革命以来長い歴史の経験に培われたヒューマンエラーも含まれているが、これを確率論で定量的に評価することは困難であり、ヒューマンエラーは対象外としたうえで、確率論的評価を行うことが有効であると考えられる。この場合も、材料強度の分布が正規分布なりワイブル分布に厳密に従うのであれば、その統計解析の正確性も保証されるが、実際には分布に対する適合性が完全でないため指標程度の位置づけとなる。それでも、現在のところ確率論的評価以上の方法は無いのが現実である。

現行設計基準類の設計に対する基本的考え方と設定安全率、その安全率に対する破損確率の比較を Table5.1 に示す。いずれの基準類においても、許容応力算出の考え方に大きな違いはなく、得られた破損確率も十分に低くなっている。ただし、ワイブル分布との適合性が良いセラミックスにおいては、破損確率と安全率の関係もワイブル係数によりにより変化するため、安全率の設定には材料強度のばらつきを十分考慮する必要がある。参考として、SiC 強度のワイブル分布仮定のもと、平均強度と 99%非破損確率強度をそれぞれ設計最小強度として、その値に安全率を考慮した場合の破損確率との関係を Fig.5.1 に示す。許容応力算出および許容応力からの破損確率計算にワイブル係数が含まれるため、破損確率はワイブル係数に依存し、同じ安全率でもワイブル係数が大きいほど破損確率は小さくなる。

## 6. 材料強度データ

セラミックスの材料強度データは金属材料のように規格化されていないために、それぞれのケースで想定される使用環境や負荷荷重の種類に応じて必要となるデータを整備する必要がある。

例として、IS プロセスの硫酸分解器について、構造設計上必要と考えられる材料データを以下に挙げる。

- ・ 腐食データ：濃硫酸、ヨウ素環境での耐食性
- ・ 曲げ強度：腐食との相乗効果に関しても必要
- ・ 静疲労データ：応力腐食割れの効果
- ・ 繰返し疲労データ
- ・ 破壊靱性データ
- ・ 衝撃試験データ
- ・ クリープ強度データ
- ・ その他：上記以外の IS プロセスで特有な環境や負荷に対するデータ

これらの材料データを整備するにはセラミックスメーカーの協力が不可欠であり、セラミックス協会やファインセラミックスセンター（JFCC）等の公益組織が参画できる体制づくりを進める計画である。また、試験の実施は、JFCC、試験受託企業等のセラミックス材料の強度評価に実績がある機関によることが望ましい。

また、セラミックス材料の強度特性は原料、製造工程の影響を大きく受けることから、ロット毎のばらつき、あるいは製造メーカー毎のばらつきが存在する。従って、取得した材料データを基に材料基準を作成し、材料強度の保証として製造時に使用材料の適合判定試験を行うことを検討する。

以上の必要なデータのうち、SiC の基本的な物性値に関しては、既存のデータを基に使用材料の物性確認を行う。体積依存性のある強度データに関しては、構造体の破壊試験によりデータ整備を進めている。IS プロセス特有の高温腐食環境における腐食データ等は、これまでに高温腐食試験を実施し、問題ないことを確認している。ただし、過去に使用実績のない機器であり、今後、必要に応じて実環境を模擬した試験によるデータ収集を検討する。

## 7. 硫酸分解器の解析評価例

IS プロセスの主要機器のひとつである硫酸分解器の SiC 製熱交換器について、Fig.1.1 に示したブロック型、配管型およびバイヨネット型の 3 タイプの、構造強度評価を行った。構造評価の手順は以下のとおりである。

- ① 硫酸系とヘリウム系の沸騰伝熱解析を行い、硫酸とヘリウムの流体温度分布を求める (Fig.7.1～Fig.7.5)。濃硫酸の沸騰解析には沸点の濃度依存と希釈エンタルピー変化、さらに、硫酸蒸気の SO<sub>3</sub> 分解反応を考慮する<sup>21)</sup>。沸騰熱伝達係数は別途実施した沸騰実験結果<sup>22)</sup>を反映し、沸騰開始位置と沸騰終了位置（ドライアウト位置）においてステップ状に与え、安全側の評価としている。バイヨネット型熱交換器に関しては、SO<sub>3</sub> 分解機能も一体であるため、分解ガスの温度変化を加えて考慮した。
- ② 汎用構造解析コード ABAQUS で解析モデルを作成し、流体温度分布を境界条件として温度分布解析を行い、SiC 構造体の温度分布を求める。
- ③ 温度分布を基に熱応力解析と圧力による応力解析を行い、応力分布を求める。
- ④ 応力分布から最大主応力を算出して、SiC 材の強度データと比較する（決定論的評価）。
- ⑤ 応力分布から有効応力を算出して、構造全体の破損確率を計算する（確率論的評価）。

評価結果を以下に示す。

ブロック型熱交換器の結果を Table7.1 および Fig.7.6 に示す。ブロック型熱交換器は、ドライアウト部の沸騰熱伝達係数がステップ状に変化する部分で、100MPa 以上の高い応力を示した。これは、今回検討した 3 つの型式の中で、最も高い応力である。この応力を低減させる手段としては、Fig.7.7 に示すように熱流束を下げるのが効果的であり、60MPa 程度に下げることが可能である。例えば、伝熱孔を太くしてヘリウムの熱伝達係数を下げて孔数も増やす、小型ユニット化して並列配置にする等の設計が考えられる。しかしながら、結果として分解器が大型化することになり、実際の設計では製造コストと製作性とリスクのバランスの考慮が必要となる。

次に、配管型熱交換器の結果を Table7.2、Fig.7.8 および Fig.7.9 に示す。配管型では、伝熱管と分配管や管盤と接合部に発生する最大応力が 50MPa 程度となるが、伝熱部の熱応力は 10MPa と低い。さらに、分配管のヘリウム側（外側）を断熱構造とすることで接合部の応力が 20MPa 程度まで低下する。配管型にはこのような構造対応がとれる利点があるが、接合部の信頼性が低下する欠点もある。

バイヨネット型熱交換器は、外管と内管は構造体として独立しており、個別の解析とした。解析結果を Table7.3、Fig.7.10 および Fig.7.11 に示す。バイヨネット型熱交換器は、発生応力が 3 つの型式の中で最も低い。内外管が構造的に独立し、かつ管の片側だけの拘束で、配管型のような接合部も存在しないといった構造的利点があり、これにより他の型式に比べ設計自由度が高いためである。使用条件的にも、外管は外圧（ヘリウム：4MPa）が内圧（硫酸：0.5MPa）より大きい場合全領域で圧縮応力となり、内管は管内外の差圧が 0 で内圧による引張応力の発生がないことが応力を小さくしている。

上記の解析結果に対し、SiC 強度に対する成立性を評価した。平均曲げ強度が 500MPa、

ワイブル係数  $m=9$  の SiC セラミックスにおいて、99%非破損確率値を最小設計強度とし、安全率 2 とすると許容応力が約 90MPa となり、安全率 3 とすると約 60MPa になる。従って、 $m=9$  程度の SiC セラミックスの場合、安全率が 2 であれば前述のブロック型熱交換器でも応力を低減することにより構造成立の可能性が高いが、安全率が 3 であれば構造成立は難しい。

安全率と破損確率の関係から比較すると、Fig.5.1 から安全率が 2 であれば破損確率が約  $10^{-4}$  程度、安全率が 3 であれば破損確率が約  $10^{-6}$  程度となる。破損確率のみを単純に比較すると、安全率 3 の設備が 100 機有ると安全率 2 の設備が 1 機有るとでは同じ破損確率である。従って、総合的なリスク評価としては、製作数が限定される開発設備に関しては安全率 2 程度でも JIS 規格等の一般設備並みの安全性を有すると言える。

また、3.3.3 で検討した強度推定法による求めた強度と解析結果を比較すると、それぞれの構造体における発生応力は推定強度以下であり、一応の構造成立性は確保されたといえる。ただし、強度推定結果に対する安全裕度の考え方によっては、より詳細な検証が必要である。

## 8. 高圧ガス保安法への対応

硫酸分解器のセラミックスブロックを耐圧境界とする場合、高圧ガス保安法の特定設備の設計基準（以下、高圧ガス基準と記述）が適用される。その場合には、①高圧ガス基準は公式による耐圧設計のみであり熱応力に対する設計手法はないこと、さらに、②使用可能な材料にセラミックスが無いことから、設計と材料の両方について特認を取得する必要が生じる。高圧ガス保安法の適用基準および適用された場合の課題を Fig.8.1 に示す。

高圧ガス基準も、近年は解析評価をベースとした考えを導入する傾向にあり、例えば、ASME Sec.VIII の設計法が取り入れられている。この場合、解析ベースの設計が可能で、許容応力も塑性変形を考慮に入れた設定となっている。しかしながら、特に発生応力の大きいブロック型の場合、ASME Sec.VIII 並みの評価を適用しても、熱応力は厳しい条件にある。高圧ガス基準が適用された場合を含めたセラミック構造体の設計フローを Fig.8.2 に示す。

また、高圧ガス基準には、公式では計算できない形状の設計に対しては使用圧力の 4 倍の耐圧試験に合格すれば設計の代替とできる規定（通称 4 倍耐圧試験と言う）がある。この考え方を拡大的に利用すると、モデルでは再現が難しい熱応力に対しても最大熱応力を発生し得る耐圧試験に置き換えることも可能であると考えられる。これを想定して、通常運転で発生する最大熱応力の 4 倍の応力を水その他の安全な液体を使用して発生させる耐圧試験で健全性を検証する手法についても検討した。セラミックブロックと配管型熱交換器のモデル試験体に単位圧力をかけた場合の最大発生応力を Fig.8.3～Fig.8.5 に示し、それを基に、硫酸分解器における最大熱応力を発生させるために必要な負荷圧力の推定値を Table8.1 に示す。

Table8.1 から、ブロックタイプでは最大熱応力を推定許容限界値の 39MPa (Fig.8.2 下段記載の中間強度の許容応力) に設定すると、1MPa の内圧に対する発生応力が 2.1MPa となり熱応力相当分を発生させるためには 19MPa が必要となる。さらに、4 倍耐圧とするためには 74MPa 程度の耐圧試験が必要となり実験装置もそれなりの規模となる。一方、配管タイプの場合は 0.6MPa の内圧に対して 4～16MPa 程度の応力が発生するため、熱応力相当分を発生させるためには約 2MPa の耐圧試験となり、4 倍耐圧でも 8MPa 程度の耐圧試験で模擬できる。

また、高圧ガス保安法の特定設備検査規則（特定則）では、完成検査以外に、工程ごとに設計検査、材料検査等がある。この場合、設計段階では設計の妥当性を保証し、製造開始後は性能を保証するための論理構築が必要となる。また、検査に用いる手法等も高圧ガス保安法は金属容器の評価を前提としており、金属とセラミックスの特性の違いをどう処理するかが課題となる。

実際に必要なデータ等は、特認取得過程において高圧ガス保安協会および評価委員会との協議により確定するが、高圧ガス保安法の目的である高圧機器の安全確保に沿うように事前検討は可能である。そこで、セラミックスと金属の違いから想定される、セラミックス適用の課題とその対処方針について以下にまとめる。

### (1) 材料

材料の課題は、使用材料の同一性の保証である。セラミックス材は、材料規格が無く、

メーカー、原料ロット、製造方法等によって材料物性がわずかに異なり、強度に関しては形状依存性もあるため、同種材料であっても、製品ごとの材料の同一性が保証されない。

これに対しては、材料物性の基準値を設計条件に合わせて決定し、材料物性の保証試験により基準値を満たしたものを使用材料とすることにより、材料の同一性を保証する。

SiC セラミックスの製造工程に対する材料同一性保証方法を Fig.8.6 に示す。物性基準値は、設計における解析等に利用するため、設計開始前に材料試験等により物性値を取得し物性基準値を決定する必要がある。ただし、同一材料に要求される基準値はある程度等しいと考えられ、物性基準値に関しては材料ごとにデータベース化した値を用い、材料物性保証のみ材料試験を行うとすることも可能である。

物性基準値の設定は、設計に必要な物性および関連物性に対して行う。例えば、硫酸分解器用 SiC 製熱交換器であれば、第 6 章に示したように曲げ強度およびワイブル係数、ヤング率、熱伝導率、線膨張係数に加え、嵩密度、組成等が必要である。また、高温で使用するため、強度、熱伝導率等に関しては、高温物性も要求される。また、製造方法も材料物性に大きく影響するため、必要であれば製造法を指定する。

一方、材料特性の保証試験は、基本的な物性が確定する焼成後の材料について行う。物性基準に準じた項目について試験を行い、物性基準値をもとに合否判定を行う。高圧ガス保安法への対応においては、この試験結果を材料試験成績書として提示する。

セラミックスでは材料強度の形状依存性も問題となる。このため、上記で決定した使用材料の強度を設計にそのまま用いることができない。これについては、3.3.3 で検討した強度推定法による評価を検討する。金属とは異なり、設計の結果による応力分布等が材料強度にも大きく影響するため、材料と設計をより密接に関連させた評価が必要である。

最終的な製品の強度保証については、(3) 検査で述べる。

## (2) 設計

セラミックス材を用いた構造体の設計手法が規格化されていないため、第 3 章、第 4 章で示した考え方を基に設計を行い、その設計の妥当性を示す必要がある。特に、強度の形状依存性は金属と大きく異なる点であり、設計における強度評価の妥当性を示すことが必要である。これには、3.3.3 強度推定法の検討およびそこで実施した小型モデルの破壊試験等のデータを利用可能である。

## (3) 検査

セラミックスの検査における課題は、非破壊検査である。現在の超音波等の非破壊検査の検出限界は、セラミックス材料の即時破壊につながる欠陥サイズの検知には不十分であり、非破壊検査による材料強度の保証が困難である。

対応として、耐圧試験による保証試験を検査手法とする。保証試験は、検査対象に使用圧力あるいは発生応力以上の負荷をかけ、対象が破壊しないことを確認する試験である。セラミックスの強度は欠陥サイズおよび負荷応力に依存するため、保証試験で破壊しなければ、有害な欠陥が存在せず、材料強度が設計強度以上であることが保証される。

## 9. まとめ

本報告では、IS プロセスの高温かつ高い腐食環境で使用できる唯一の構造材料であるセラミックス（SiC セラミック）の構造設計手法の考え方について、既存の設計基準等（原子力構造設計基準、JIS 圧力容器設計規格、高圧ガス保安法、等）を参考に、セラミックスの力学的特性を考慮して考察した。高圧ガス保安法特認取得のための方針案としてまとめたものが以下となる。

### <セラミックスの構造設計基準案の構成>

1. 許容応力の決め方
  - ・材料試験：体積強度、面積強度、線強度
  - ・統計処理：ワイブルパラメータの推定、分布の適合度検定、99%非破損確率、（95%信頼区間）
  - ・安全率の設定：JIS 圧力容器基準、高圧ガス基準、etc
2. 多軸応力場の応力評価と破壊基準
  - ・最大主応力
  - ・PIA（Principle of Independent Action）手法（主応力の m 乗和）
  - ・ワイブル垂直引張り応力平均手法（主応力空間での単位球面の法線引張り応力の積分）
  - ・Batdorf と Cross の手法：有効応力の評価（<法線+せん断>合成応力の積分）
    - ①最大引張り応力クライテリア、②全ひずみエネルギー開放率クライテリア、③Shetty の混合モード、④淡路の新最大エネルギー開放率説
3. 破壊モード（金属に対するような応力分類に対応した許容応力体系の適用は不可）
  - ・瞬時破壊
  - ・静的/動的疲労強度（応力腐食割れ）
  - ・繰返し疲労強度
4. 材料強度試験（腐食、曲げ、静疲労、繰返し疲労、応力腐食割れ、衝撃試験、破壊靱性、クリープ、etc）

### <健全性評価手法の構成>

1. 解析による評価
  - ① 確定論的評価（メイン）
    - ・材料データ、統計処理、許容応力、安全率の設定、応力解析、最大相当応力評価、健全性判定
  - ② 確率論的評価（バックアップの位置づけ）
    - ・材料データ：統計処理、ワイブルパラメータの推定、応力解析、相当応力で体積積分、破損確率、健全性判定（許容破損確率をどの程度に設定すべきか  $<10^{-4}$ ）
2. モデルの耐圧試験による健全性検証（解析評価の不確かさの補助）
 

実機の応力分布（温度分布）を模擬するのは困難であるが、セラミックスの破壊が最大引張り応力に大きく依存すると言う特質を利用して、最大引張り応力を発生さ

せる代替案を採用する。

- ・代替案として、圧力により実機相当最大応力を発生させて健全性を確認。
- ・実機最大応力の4倍の耐圧試験で高压ガス基準の4倍耐圧の代替を検討。
- ・製品の保証試験を導入して低強度部材を排除。保証試験は、製品の強度が決定した段階、すなわち、全ての加工が終了した段階で行う必要があるため、保証試験により破壊してしまうことを想定して、最終製品の製作本数を決定しなければならない。

さらに、その考え方に沿って、IS プロセス主要機器のうちでは最も厳しい設計条件と考えられる硫酸分解器のセラミック熱交換器を対象に、セラミックブロック、配管型熱交換器およびバイヨネット型熱交換器の3つのタイプを例にとり構造強度評価を行った結果、以下のことが分かった。

- ① セラミックブロックは熱応力が厳しい条件にあり、製作性を考慮の上現在使用可能なSiCセラミックの強度（平均曲げ強度が500MPa程度）であると、構造成立のためには現設計よりも熱流束を抑えた構造とする必要があり、製作コストとのバランスを要する。
- ② 配管型熱交換器は、熱応力は低く抑えられるが接合部の強度の信頼性を確保するのが課題となる。
- ③ バイヨネット型熱交換器は、内管、外管ともに熱応力は低く抑えられた。特に外管は、外圧による圧縮応力が主となるため、SiCの破壊強度に対し最も裕度がある。

## 謝 辞

名古屋工業大学の淡路英夫教授にはセラミックの材料強度に関して、ならびに埼玉大学の鈴木章彦教授にはセラミックの構造強度評価に関して有益な助言を頂いた。ここに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 寺田敦彦、大田裕之、野口弘喜、小貫薫、日野竜太郎：“熱化学水素製造法 IS プロセスのための硫酸分解器の開発”、日本原子力学会和文誌、Vol.5、No.1、pp.68-75 (2006).
- 2) S. Kubo, M. Futakawa, I. Ioka, K. Onuki, S. Shimizu, K. Ohsaka, A. Yamaguchi, R. Tsukada, T. Goto: Corrosion test on structural materials for Iodine-Sulfur thermochemical water-splitting cycle, Proc. 2nd Topical Conf. Fuel Cell Technology, 2003 AIChE Spring National Meeting, March 30 - April 3, 2003, New Orleans, USA.
- 3) 鈴木章彦：“ファインセラミックス部品の設計基準案”、配管技術、1、pp. 78-89 (1989).
- 4) 鈴木章彦：“セラミックスの強度評価”、圧力技術、29、4、pp. 218-229 (1991).
- 5) 鈴木章彦：“7.5 セラミックスの構造強度設計”、機械工学便覧、デザイン編 β2 編 材料学・工業材料、pp. 204-208 (2006).
- 6) 西田俊彦、安田榮一 編：“セラミックス基礎工学講座シリーズ1 セラミックスの機械的性質”、日本セラミックス協会 (1986).
- 7) 日本セラミックス協会編：“セラミックスの力学的特性評価”、日刊工業新聞社 (1998).
- 8) 淡路英夫：“セラミックス材料強度学”、コロナ社 (2001).
- 9) 通産省資源エネルギー庁公益事業部原子力発電安全管理課編：解説原子力設備の技術基準、電力新報社、(1986).
- 10) 日本規格協会編：J I Sハンドブック (17) 圧力容器・ボイラ 用語／構造／付属品・部品・その他／試験・検査、日本規格協会、(2005).
- 11) 伊与久達夫、他：“高温工学試験研究炉 炉心支持黒鉛構造設計方針の解説”、日本原子力研究所、JAERI-M 91-070 (1991).
- 12) T. Shibata, M. Eto, E. Kunimoto, S. Shiozawa, K. Sawa, T. Oku, T. Maruyama: “Draft of Standard for Graphite Core Components in High Temperature Gas-cooled Reactor”, JAEA-Research 2009-042 (2010).
- 13) 市川昌弘：“多軸応力下でのセラミックスの信頼性解析に関する研究”、日本機械学会論文集 (A 編)、Vol.51、No.470、pp.2368-2376 (1985).
- 14) 鈴木章彦、林誠二郎、馬場秀成：“ワイブル統計に基づいたセラミックス部品強度評価理論の信頼性”、日本機械学会論文集 (A 編)、Vol.61、No.589、pp.1902-1908 (1995).
- 15) 谷口佳文、北住順一、山田敏郎：“計算機実験によるセラミックスの強度分布と寸法効果”、材料、Vol.38、No.435、pp.1428-1433 (1989).
- 16) 山田直仁、服部満、榊田昌明、松井實：“多重モードワイブル分布を用いた窒化ケイ素の強度解析”、J.Ceram. Soc. Japan、Vol.100、No.10、pp.1251-1255 (1992).
- 17) H. Takegami, A. Terada, K. Onuki, R. Hino: “Fracture strength estimation of SiC block for IS process”, Proc. of 18th Int. Conf. on Nuclear Engineering (ICONE18) (2010) Xian, China.
- 18) H. Takegami, A. Terada, R. Hino, S. Shiozawa: “Fracture stress estimation method of SiC components in IS process”, Proc. of the second international topical meeting on the safety and technology of nuclear hydrogen production, control, and management (ST-NH2) (2010) San Diego, California, USA.
- 19) 浜中順一、橋本芳廣、伊東正道、渡辺教雄：“セラミックス製ガスタービンの信頼性評

- 価システムの開発”、日本機械学会論文集（A編）、Vol.52、No.481、pp.2187-2193 (1986).
- 20) 浜中順一、寺前哲夫、浜田晴一、中塚正人、江積弘泰、原之義：“セラミックス製ガスタービンの信頼性評価システムの開発(第2報、経時劣化評価機能および各種評価機能の追加)”、日本機械学会論文集（A編）、Vol.55、No.516、pp.1935-1941 (1989).
- 21) 石倉修一、寺田敦彦、野口弘喜、笠原清司、小貫薫、日野竜太郎：“SiCブロック製硫酸分解器の熱構造シミュレーション”、日本原子力学会和文論文誌 Vol.7, No.2、pp.134-141 (2008).
- 22) 野口弘喜、大田裕之、久保真治、小貫薫、日野竜太郎：“硫酸の流動沸騰実験結果”、日本原子力学会和文論文誌 Vol.6, No.1、pp. 1-4 (2007).

Table 3.1 想定される発生加重と発生部位

応力形態		発生要因	発生部位	必要データ
1 次 応 力	自重	自明	支持部、構造不連続部	曲げ、引張、静的疲労
	内圧	自明	全体	曲げ、引張、静的疲労
	機械荷重、振動	地震荷重、回転機、etc.	機器、配管、etc.	靱性値 ( $K_{IC}$ )、動的疲労、衝撃
	座屈 (圧縮破壊)	自重	支持部、etc.	せん断強度 ( $K_{IC}$ )
	その他	流力振動 (カルマン渦、etc.)、etc.	容器内流動、運動量変化部	
2 次 応 力	定常熱応力	定常温度分布 沸騰開始部の熱伝達係数の変化 ドライアウト部の熱伝達係数の変化 etc.	硫酸分解器 $SO_3$ 分解器 etc.	曲げ、引張り強度
	非定常熱応力 (熱衝撃)	沸騰開始部の変動 ドライアウト部の変動 etc.	硫酸分解器のドライアウト部	熱衝撃 動的疲労
	機器間相対変位	熱膨張差 地震時相対変位	機器ノズル部、配管、etc.	曲げ、引張、静的疲労
	座屈 (圧縮破壊)	不明	不明	不明
	その他	不明	不明	不明

Table 3.2 JIS 圧力容器構造規格の応力分類と応力制限

破損形態	荷重分類	応力分類	応力制限	SUS316Lの許容値 (150°C) MPa
延性破壊	荷重制限型荷重 (機械荷重)	膜応力: $P_m$	$P_m \leq S_m$	115
		曲げ応力: $P_b$	$P_L + P_b \leq 1.5S_m$	172
		不連続部の膜応力: $P_L$		
	変位制限型荷重	不連続部の曲げ応力: $Q$	$Re[P_L + P_b + Q + D] \leq 3S_m$	345
熱応力: $Q$				
	動的熱衝撃	熱膨張に起因する圧力波による 応力: $D$		
疲労破壊	繰り返し荷重	全ての合計応力の応力変動幅: $S_{alt} = Re[P_m + P_b + P_L + Q + D + F]$	$S_{alt} \leq 2S_f$	$N_f = 10^9$ において 165 (A曲線) 115 (B曲線)

Table 5.1 現行設計基準類の基本的考え方と安全率に対する破損確率の比較

	JIS圧力容器 (発電用原子力施設MITI-501)	高温ガス炉 (黒鉛ブロック)	高圧ガス基準 (性能規定)	高圧ガス基準 耐震設計基準
設計手法	解析ベース	解析ベース	容器耐圧のみ 規定無し 例示基準集に規定有り	規定無し (解析ベース)
対象機器の要求機能	容器(圧力境界)	支持構造物	容器(圧力境界)	容器(圧力境界)
許容応力	降伏応力&引張り強さ 非破壊確率:1% or? 信頼度:95%下限値	引張り強さベース 非破壊確率:1% and 信頼度:95%下限値	引張り強さベース	降伏応力 & 引張り強さベース
安全率	対降伏応力:1.1(0.9Sy) 対引張り強さ:3.0	膜応力:4.0 ポイント応力:3.0	対降伏応力:2.5~2.8 対引張り強さ:4.0 (4倍耐圧試験?)	対降伏応力:1.1(0.9Sy) 対引張り強さ:1.7(0.6Su)
1次応力評価の破損確率 (目安値)	正規分布で変動係数 $\sigma/\mu=13\%$ とした場合 安全率3で $F=5 \times 10^{-7}$	正規分布で変動係数 $\sigma/\mu=13\%$ とした場合 安全率3で $F=5 \times 10^{-7}$ 安全率4で $F=2 \times 10^{-8}$	正規分布で変動係数 $\sigma/\mu=13\%$ とした場合 安全率4で $F=2 \times 10^{-8}$	正規分布で変動係数 $\sigma/\mu=13\%$ とした場合 安全率1.7で $F=7 \times 10^{-9}$
応力算定の信頼性	高い	高い	低い	高い
材料の特殊性に対する特別な措置		熱応力を1次応力評価の 範囲とする	ワイプル係数 $m=10$ とした場合、 安全率 3.81, 4.1, 5.6 破損確率 $10^{-6}$ , $5 \times 10^{-7}$ , $2 \times 10^{-8}$	

Table 7.1 ブロック型熱交換器の応力解析結果および安全裕度

材質	平均曲げ強さ (実験値) [MPa]	平均引張り強さ (予測値) [MPa]	発生応力 (熱応力+圧力[硫酸: 2MPa、He: 4 MPa]) [MPa]	安全係数
高強度反応焼結SiC (推奨)	850	471	124	3.6
常圧焼結SiC	450	249		1.9

Table 7.2 配管型熱交換器の応力解析結果（硫酸側圧力は 0.6MPa）

	伝熱管: $\phi 30\text{mm} / t5\text{mm}$ 分配管: $\phi 120\text{mm} / t10\text{mm}$ + R10mm	伝熱管: $\phi 30\text{mm} / t5\text{mm}$ 分配管: $\phi 120\text{mm} / t10\text{mm}$ + R10mm (分配管のHe断熱)
上端部	45.7 MPa	14.5 MPa
ドライアウト部	7.5 MPa	7.4 MPa
下端部	46.6 MPa	16.2 MPa

Table 7.3 バイヨネット型熱交換器の応力解析結果

	外圧 [MPa]	内圧 [MPa]	発生応力 [MPa]
外管	4	0.5	-0.8(圧縮)
内管	0.5	0.5	2

Table 8.1 硫酸分解器における通常熱応力を耐圧試験で発生させるための必要圧力の推定

構造形式		最大応力 (熱応力+圧力) [MPa]	1MPaによる 最大応力 [MPa]	最大応力発生に 必要な圧力 [MPa]	4倍耐圧試験に 必要な圧力 [MPa]
ブロック型		39	2.1	19	74
配管型	上結合部	14.5	15.8	0.92	4
	ドライアウト部	7.4	3.9	1.9	8
	下結合部	16.2	15.5	1.1	4.4

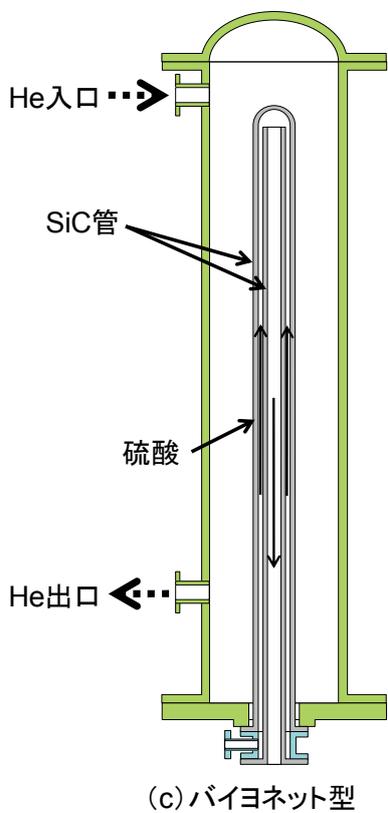
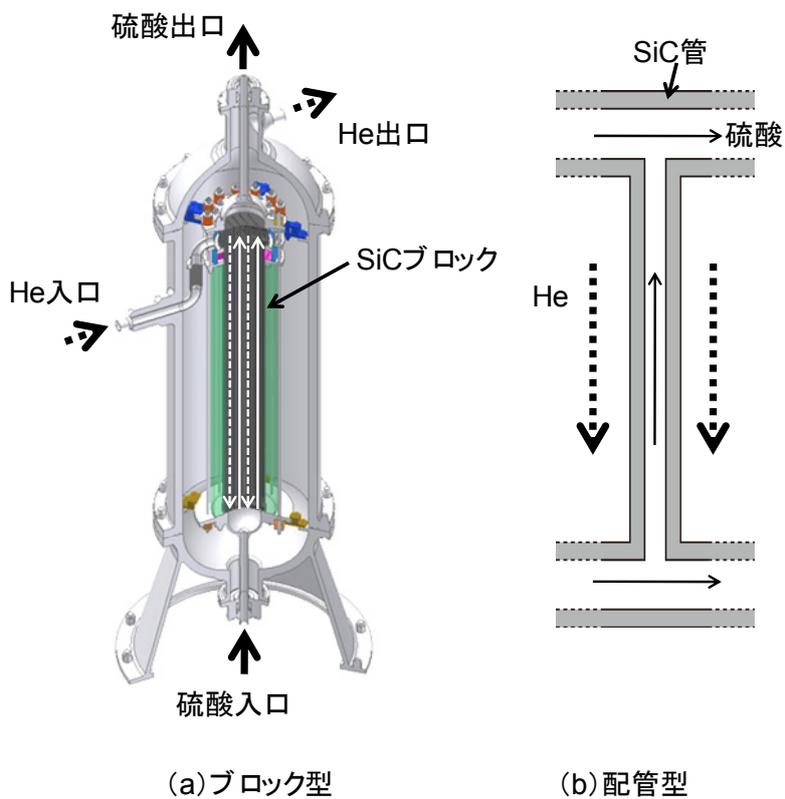
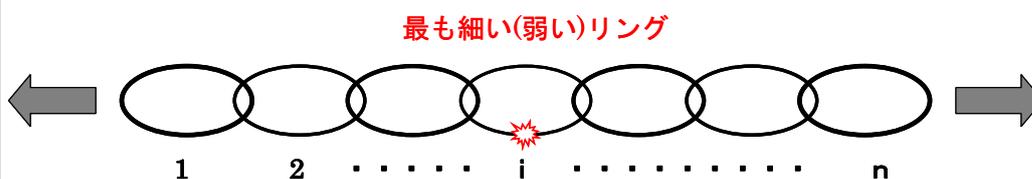


Fig.1.1 硫酸分解器の概略

## ワイブル破損確率のメカニズム (最弱リングモデル)



各リングに生じる応力を  $s$  とし、リングの強さが確率変数  $S$  で与えられとすれば、応力  $s$  が  $S > s$  の時にはリングは壊れない。そこで、強度  $S$  の分布関数を  $F_0(S)$  とすれば、リングの破損する確率は、

$$F_0(S) = P[S \leq s] = 1 - P[S > s]$$

したがって、リングが破損しない確率は、

$$1 - F_0(S)$$

つぎに、 $n$  個のリングからなるチェーンが壊れない確率は、次式となる。

$$1 - F(S) = \{1 - F_0(S)\}^n \quad \text{同様に破損する確率は、} \quad F(S) = 1 - \{1 - F_0(S)\}^n$$

Fig.2.1(1) 最弱リングモデルとワイブル分布の関係(1)

## 最小値の漸近分布(ワイブル分布との等価性)

分布関数  $F_0(S)$  をもつ母集団から  $n$  個を一組とするサンプルを何組か抽出した時に、各サンプルの最小値も何らかの分布をもつ。最小値の分布関数を  $F(s)$ :  $\text{Prb.}[\min s_i < s]$  とすると  $1 - F(s)$  は  $\text{Prb.}[\min s_i > s]$  である。したがって、最小値が  $s$  より大きい確率とは、原分布関数  $F_0(S)$  において、 $n$  個の値がすべて  $s$  より大きくなる確率であるから、

$$\begin{aligned} 1 - F(S) &= P[\min s_i > s, (i = 1, n)] \\ &= \{1 - F_0(s)\}^n \end{aligned}$$

したがって、 $n$  個のリングからなるチェーンが壊れる確率は、次式となる。

$$F(s) = 1 - \{1 - F_0(s)\}^n$$

これは、ワイブルの確率分布と同式である。

因みに極値分布はGumbelにより研究され、次の3種類に分類されている。

- ①レイリー分布、②ガンベル分布(2重指数分布)、③ワイブル分布

Fig.2.1(2) 最弱リングモデルとワイブル分布の関係(2)

## 最小値の漸近分布(サンプル数依存と体積効果)

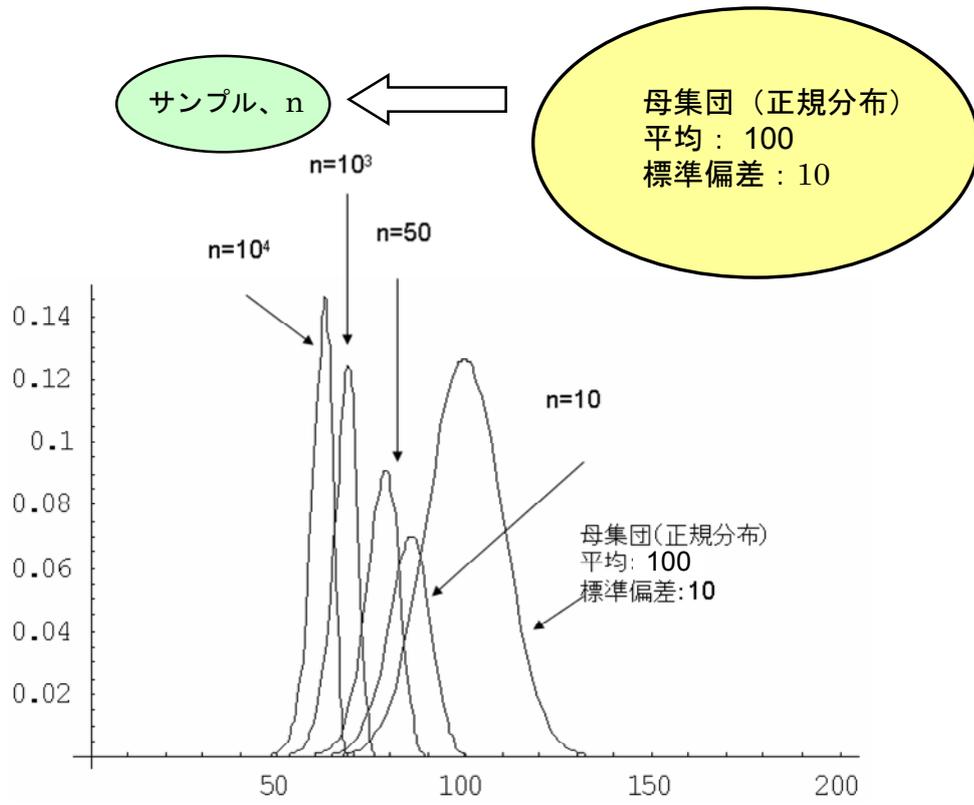
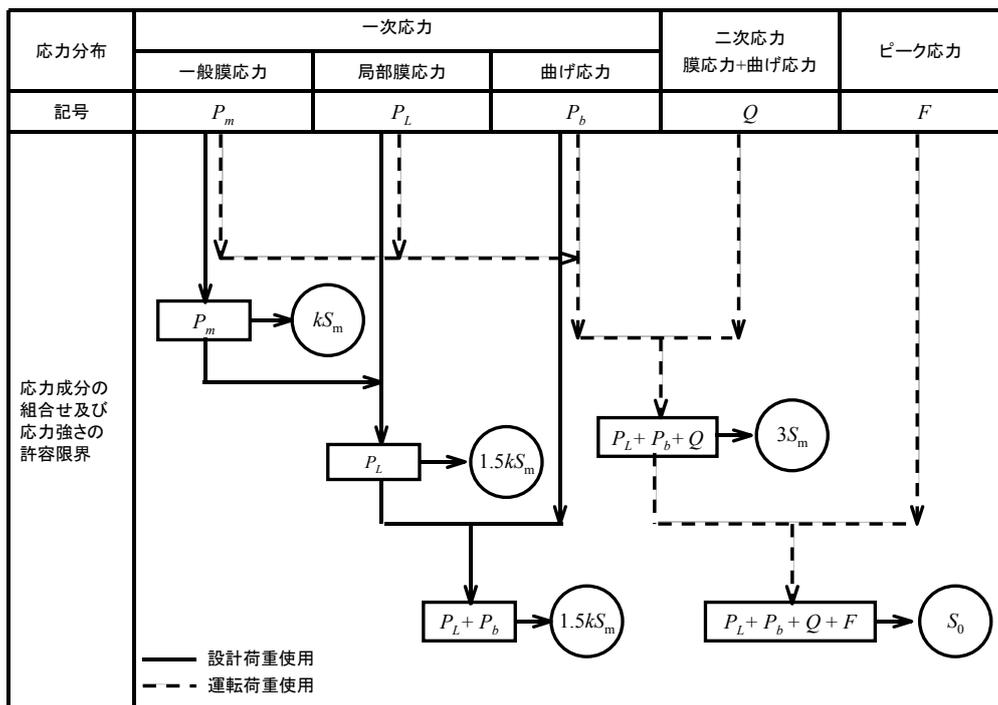


Fig.2.2 正規母集団からのサンプル数  $n$  に対する最小値分布



$k$  : 割増係数

条件	荷重の組合せ		$k$ の値	応力値算定条件
設計荷重	A	設計圧力、容器の自重、内容物の重量、附属する装置の重量及び外部附属品の重量	1.0	設計温度における腐れ後の肉圧、寸法
	B	A + 風荷重	> 1.0	同上
	C	A + 地震荷重	> 1.0	同上
試験荷重	A	試験圧力、容器の自重、内容物の重量、附属する装置の重量及び外部附属品の重量	水圧試験 1.25 気圧試験 1.15	試験荷重を受けるときの肉圧、寸法、試験温度

Fig.3.1 JIS 圧力容器構造規格の応力分類と応力評価の流れ

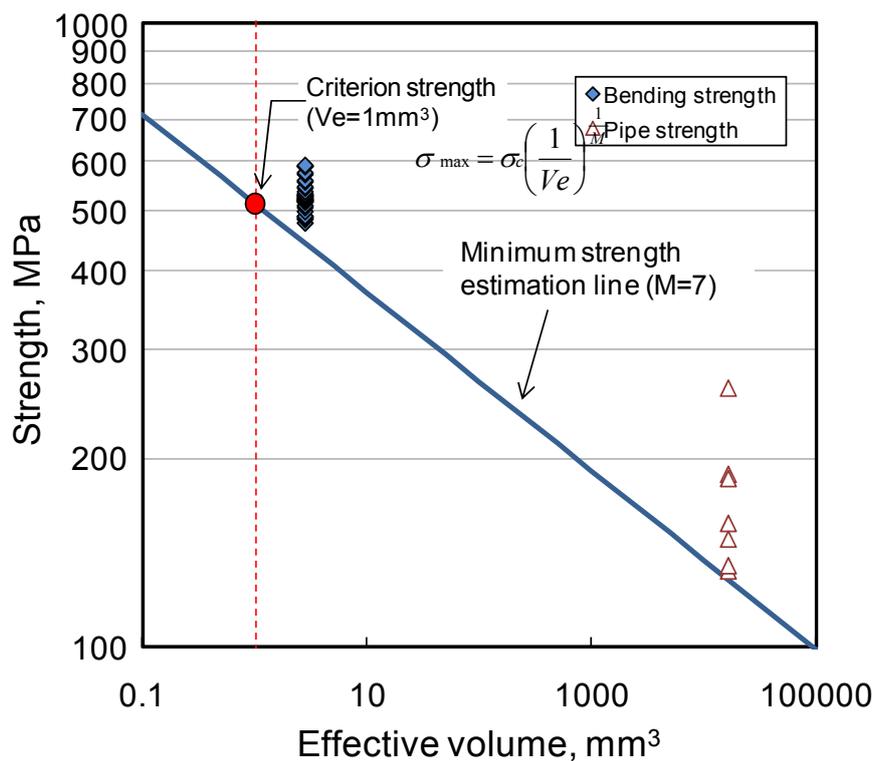


Fig.3.2 常圧焼結 SiC に対する強度推定線

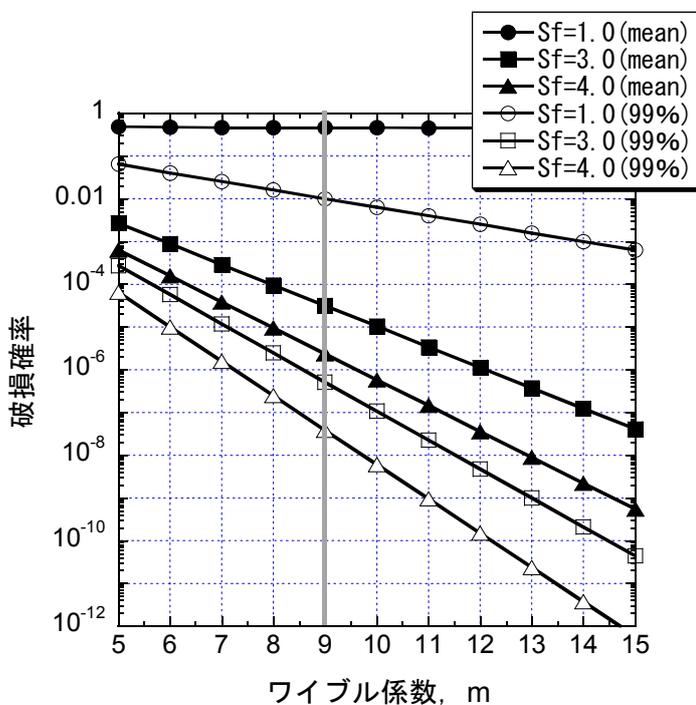


Fig.5.1 ワイブル分布の安全率 Sf と破損確率との関係 (平均強度と 99%非破損確率強度を設計最小強度として安全率を考慮)

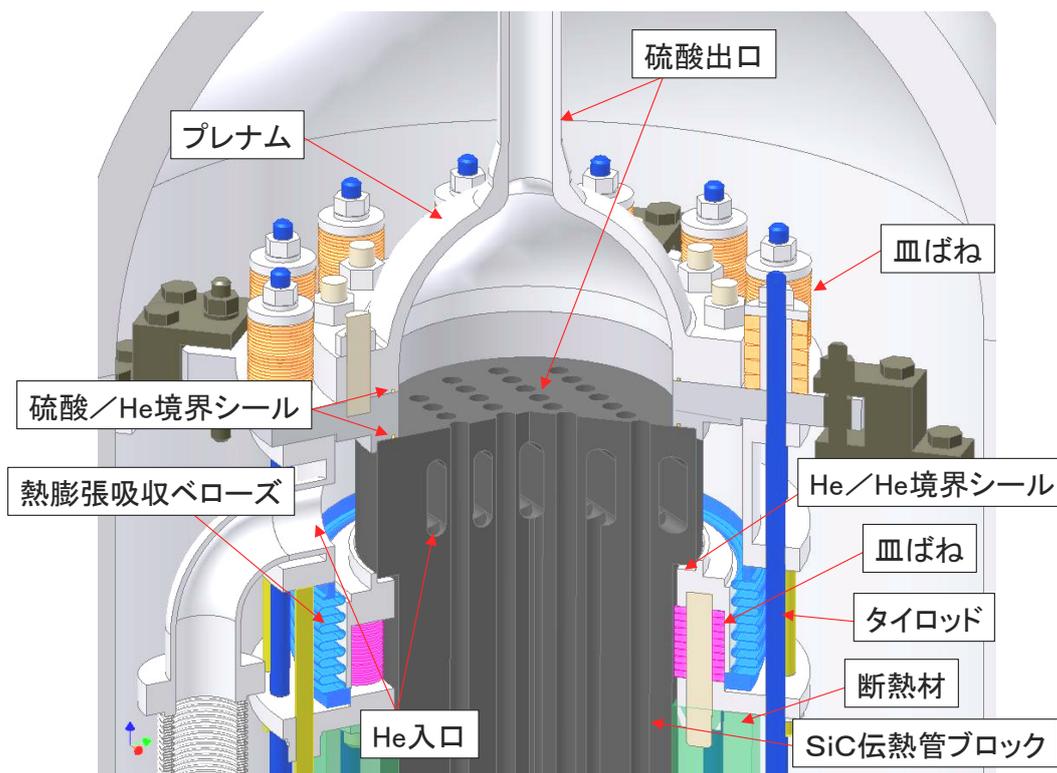


Fig.7.1 硫酸分解器の上部構造概念

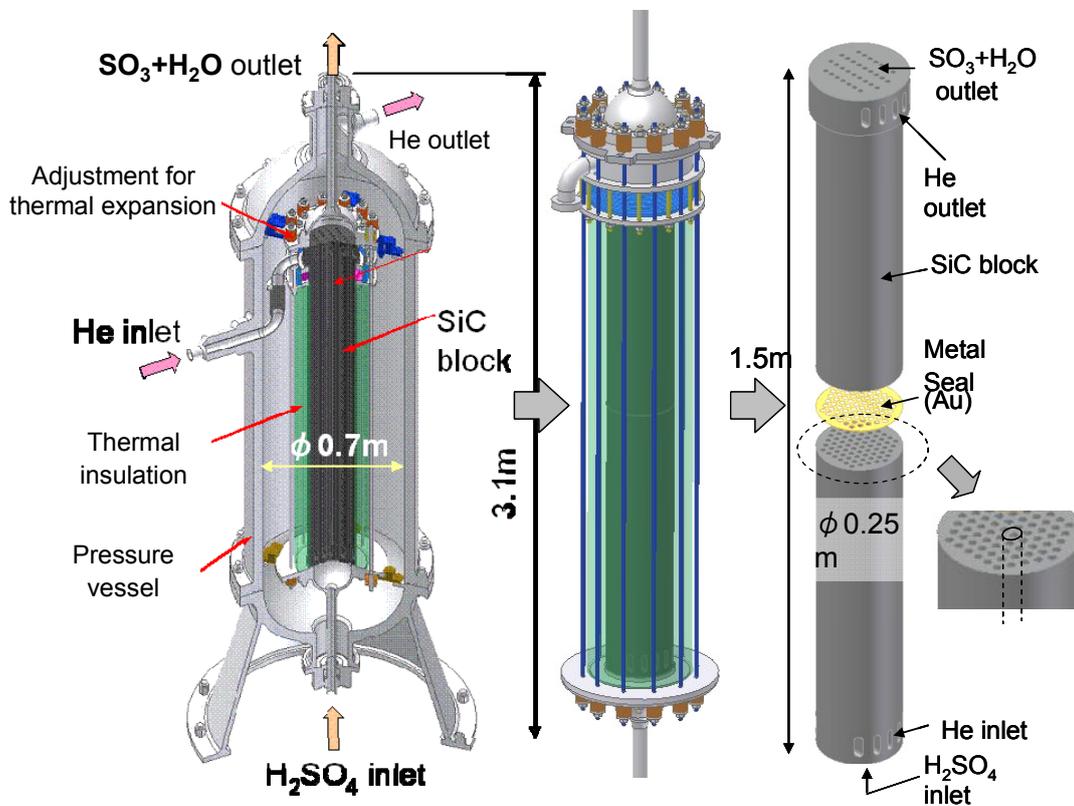


Fig.7.2 硫酸分解器の全体概念とセラミックブロック構造

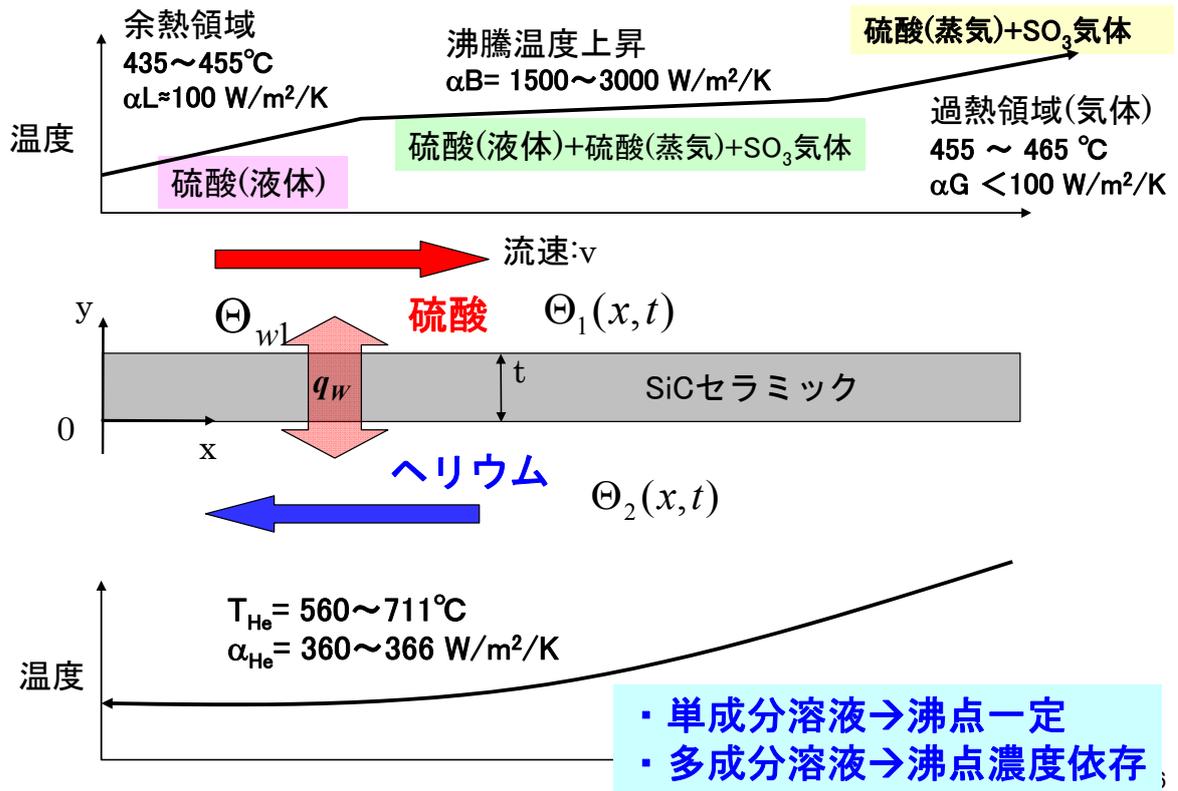


Fig.7.3 セラミックブロック型硫酸分解器の伝熱解析モデル概念

硫酸温度が求める解だから、濃度xに対する温度Tの関数  $T = f(x)$  の逆関数として、 $x = f^{-1}(T)$  を求める。

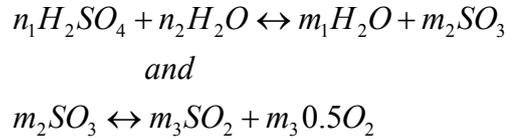
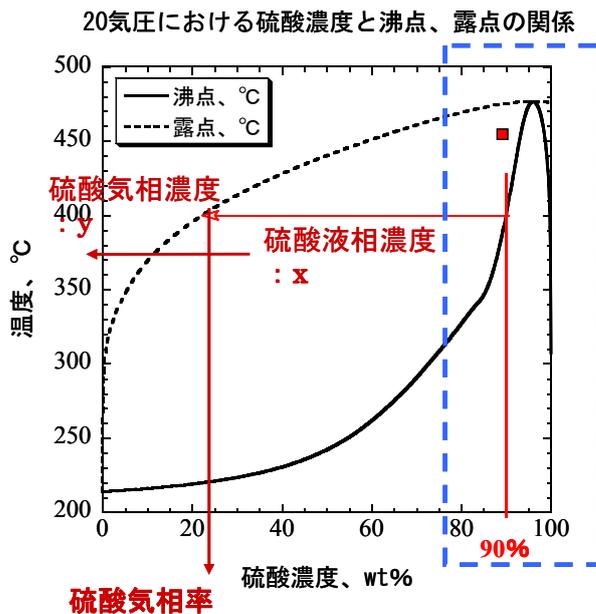


Fig.7.4 硫酸の濃度と沸点・露点の平衡線図 (2MPa)

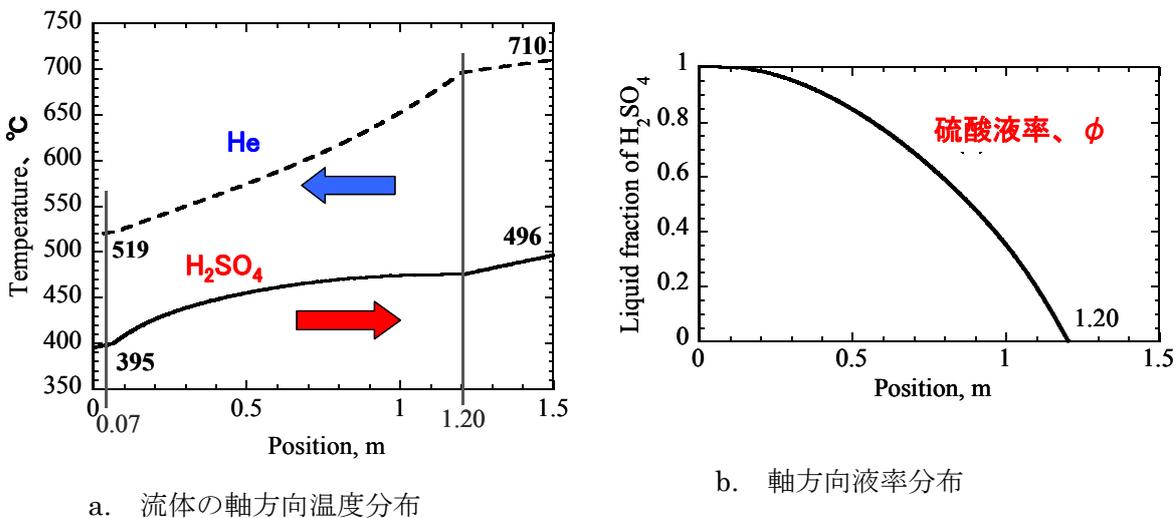


Fig.7.5 セラミックブロック型硫酸分解器の伝熱解析結果

解析コード： ABAQUS

解析モデル： SiC熱交換ブロック1/4モデル

4面体1次要素、要素数:170万、節点数:37万、要素長:約2mm

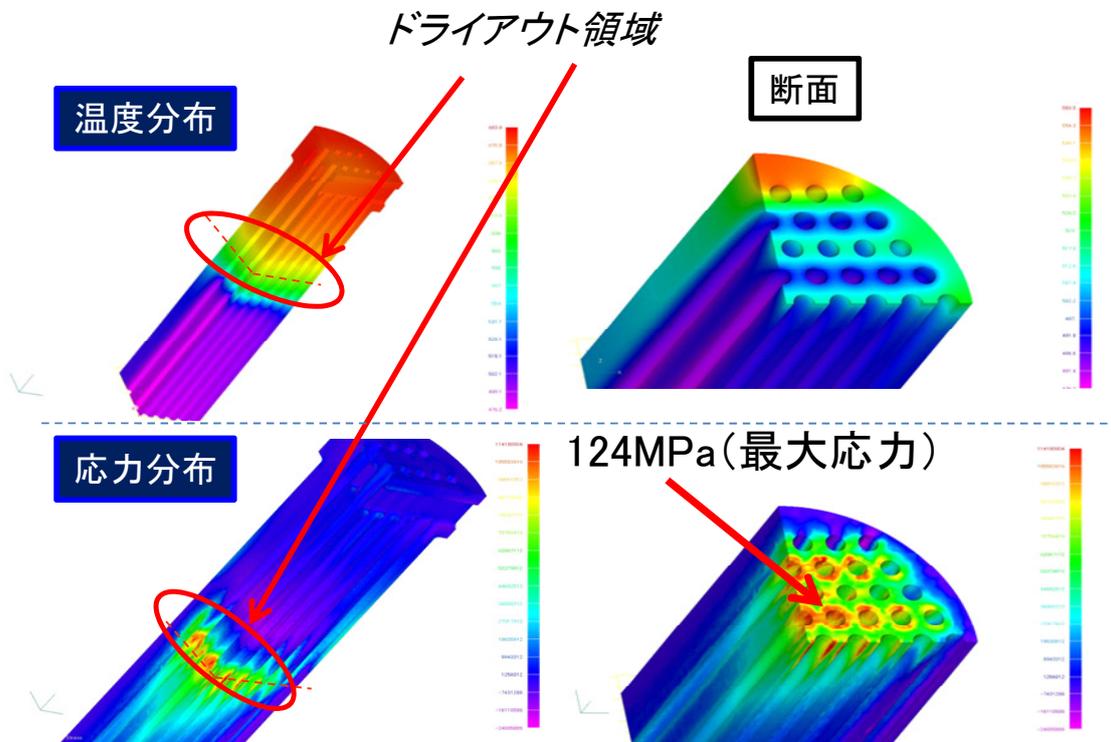


Fig.7.6 ブロック型硫酸分解器熱交換部の熱応力解析結果

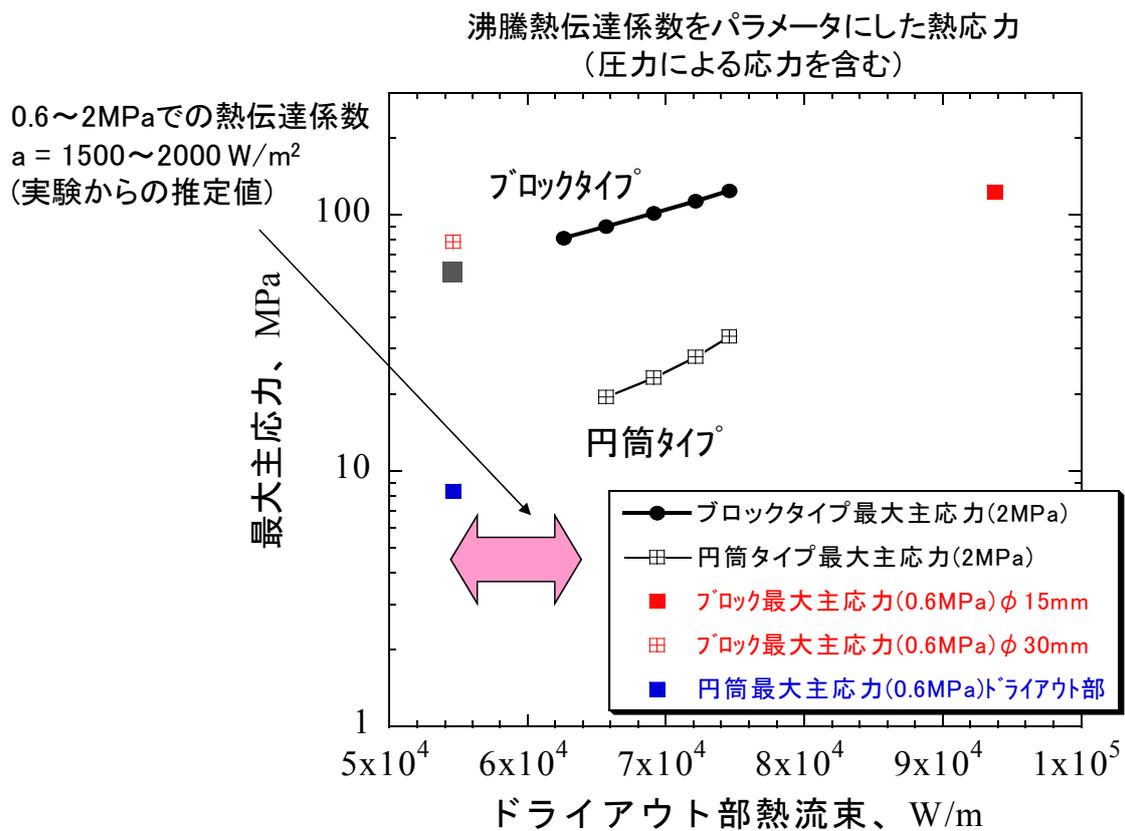


Fig.7.7 ブロック型・配管型硫酸分解器の熱応力の熱流束依存性

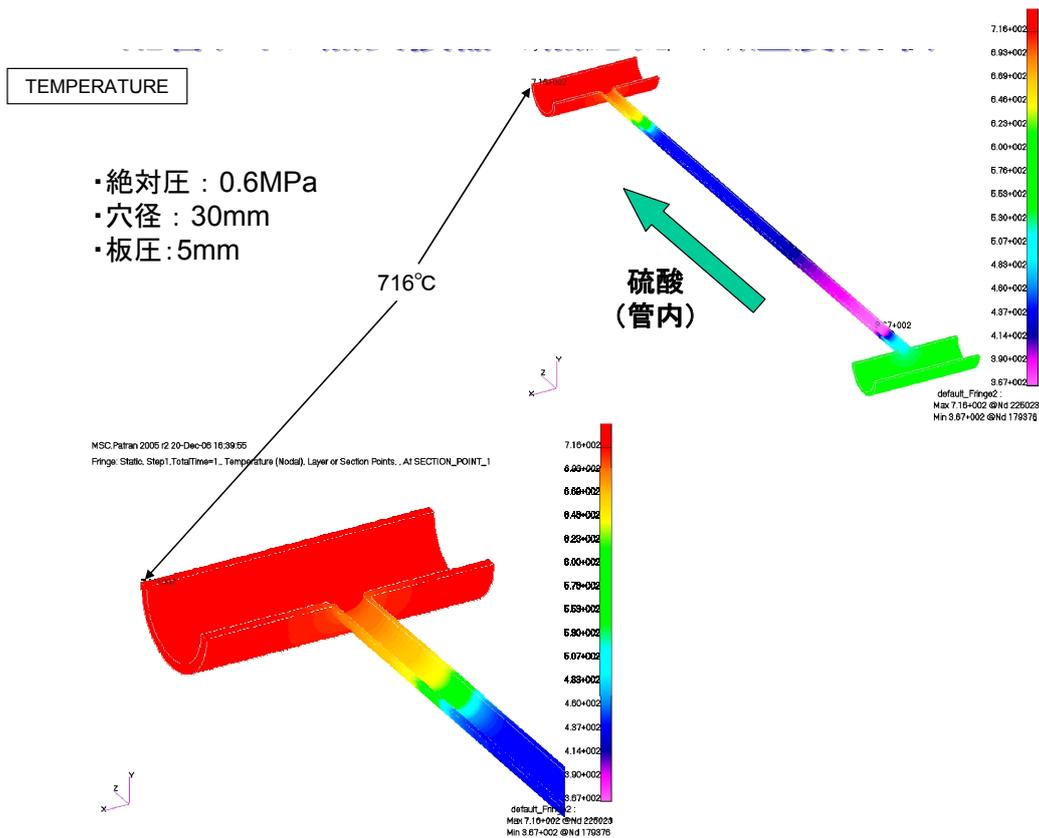


Fig.7.8 配管型硫酸分解器の温度分布解析結果

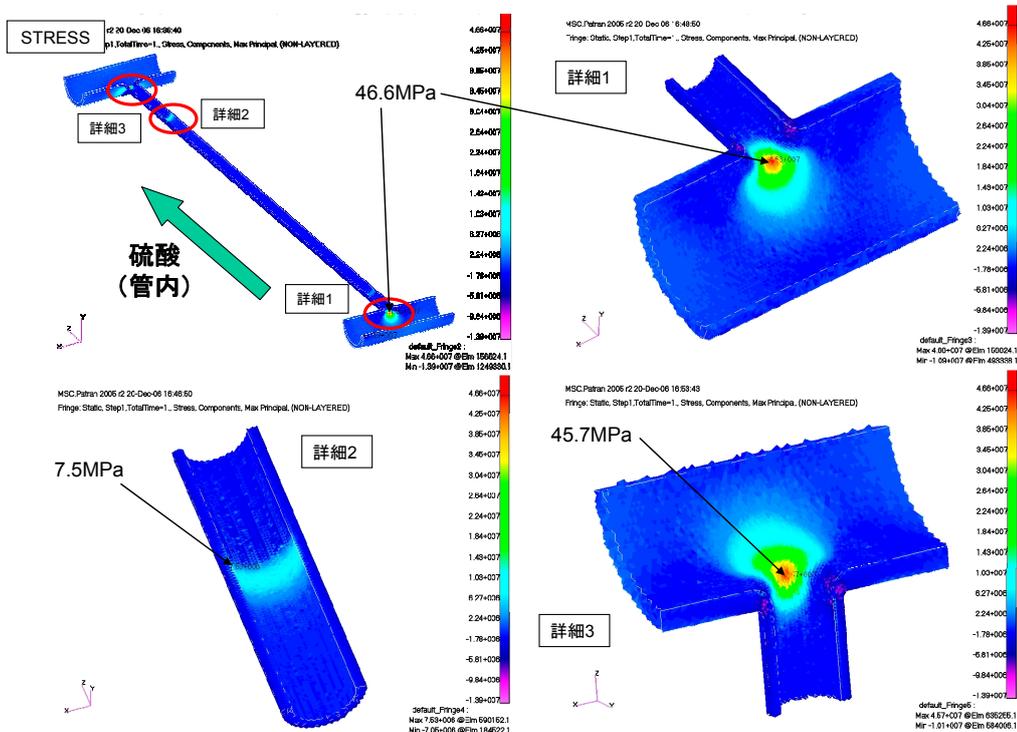


Fig.7.9 配管型硫酸分解器熱交換部の熱応力分布解析結果

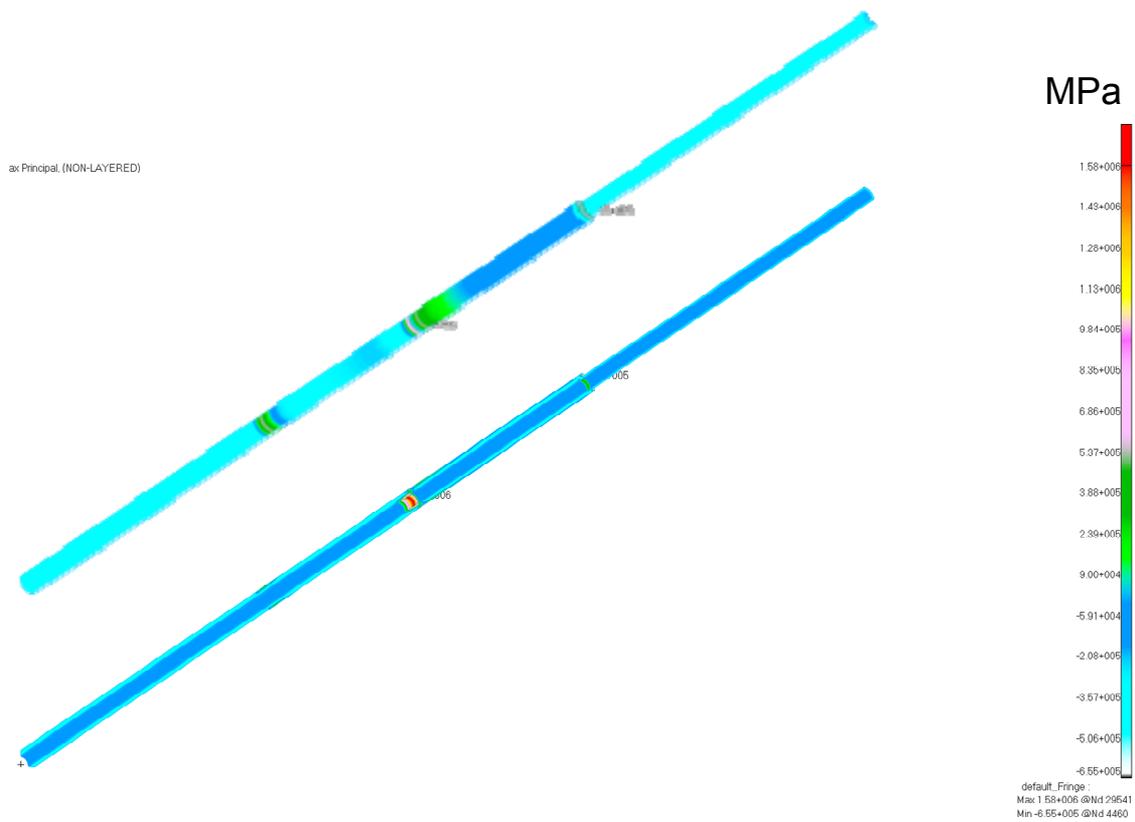


Fig.7.10 バイヨネット型硫酸分解器熱交換部の応力分布解析結果（内管）

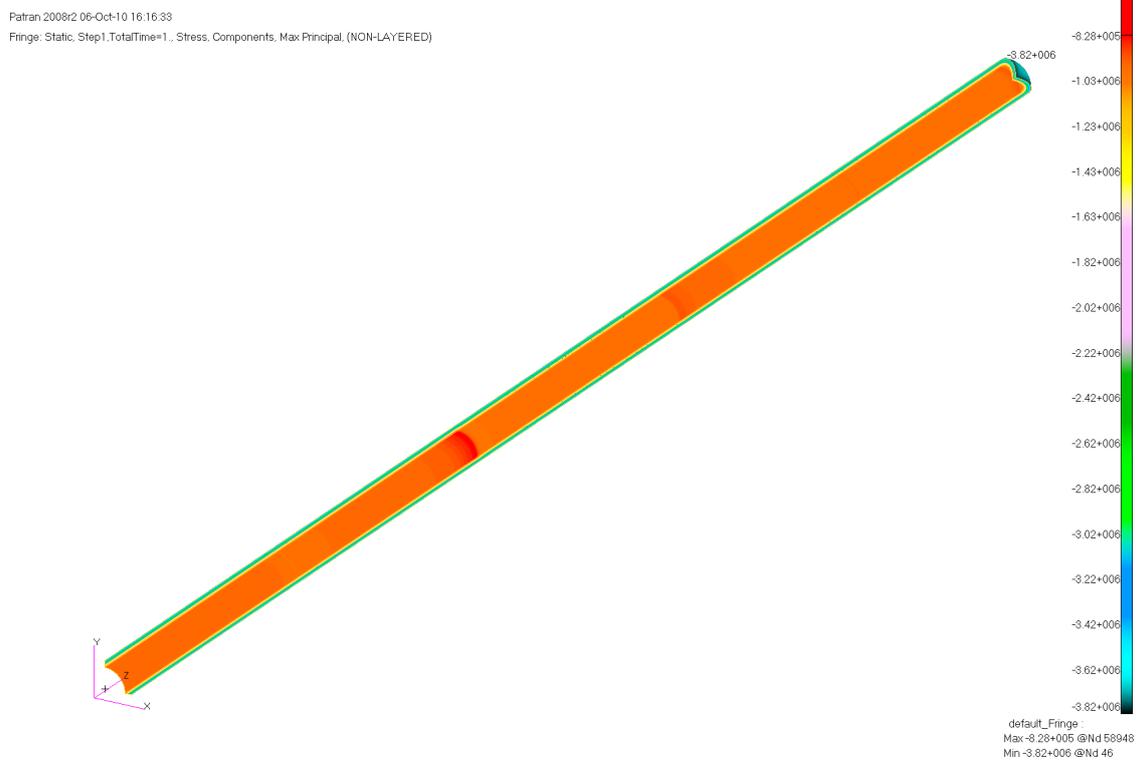


Fig.7.11 バイヨネット型硫酸分解器熱交換部の応力分布解析結果（外管）

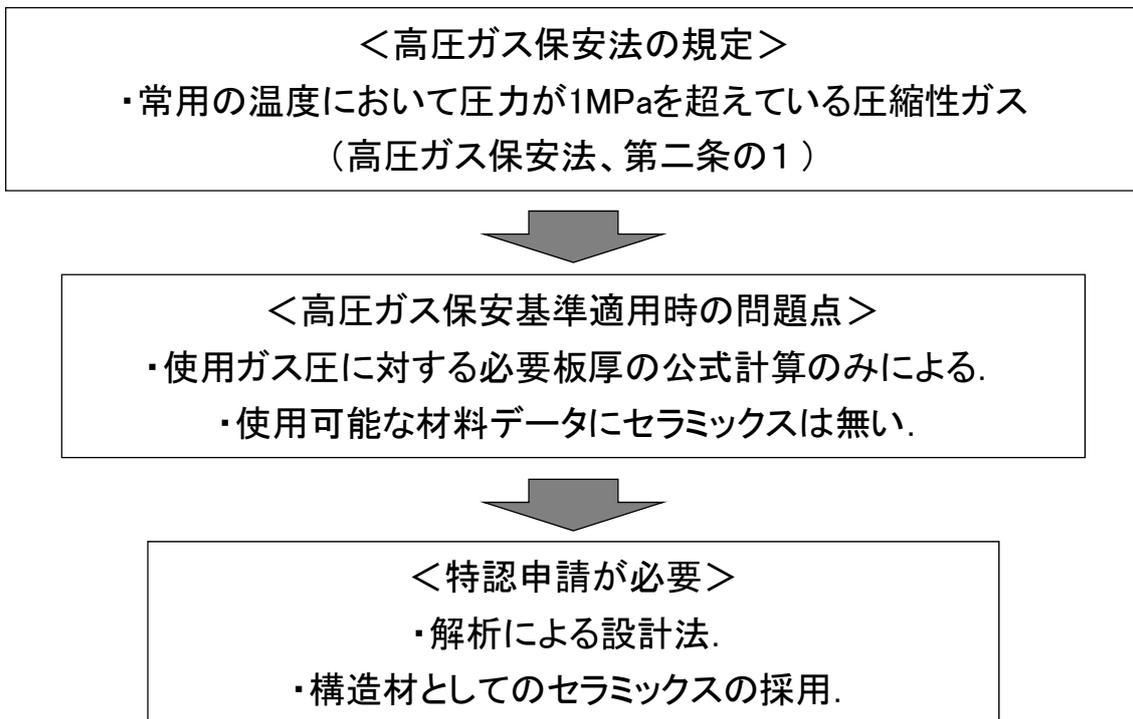


Fig.8.1 高圧ガス保安法の適用と課題

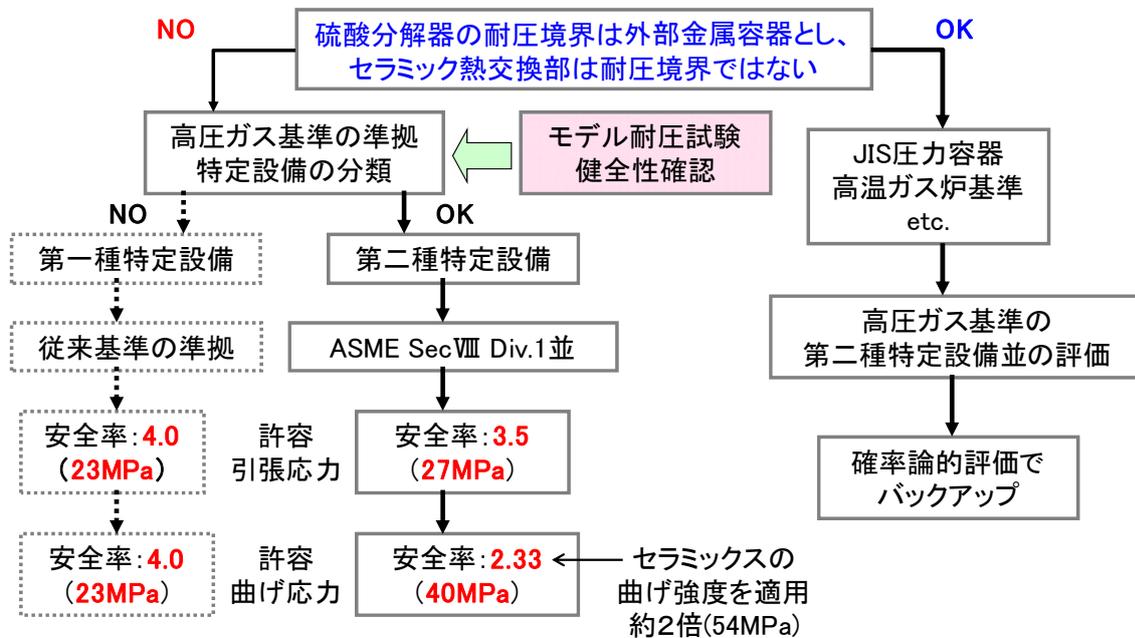


Fig.8.2 高圧ガス保安法の設計基準適用フロー

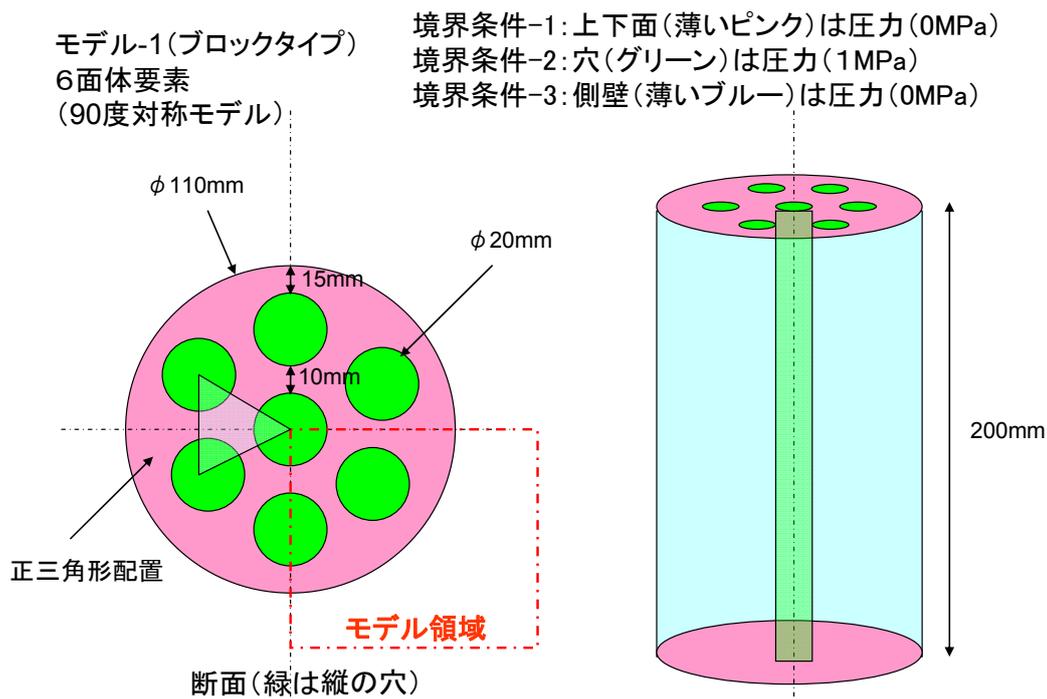


Fig.8.3 ブロック型の耐圧試験用モデル試験体

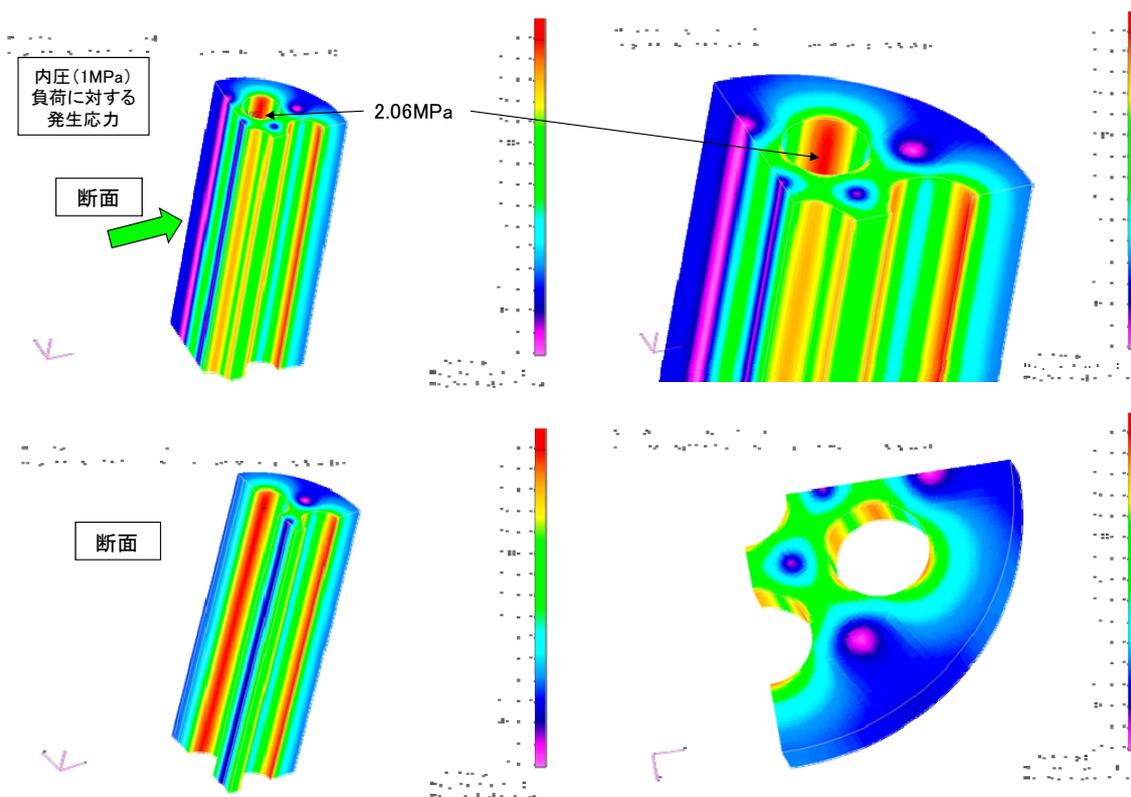


Fig.8.4 ブロック型のモデル試験体に 1MPa 負荷した場合の応力分布

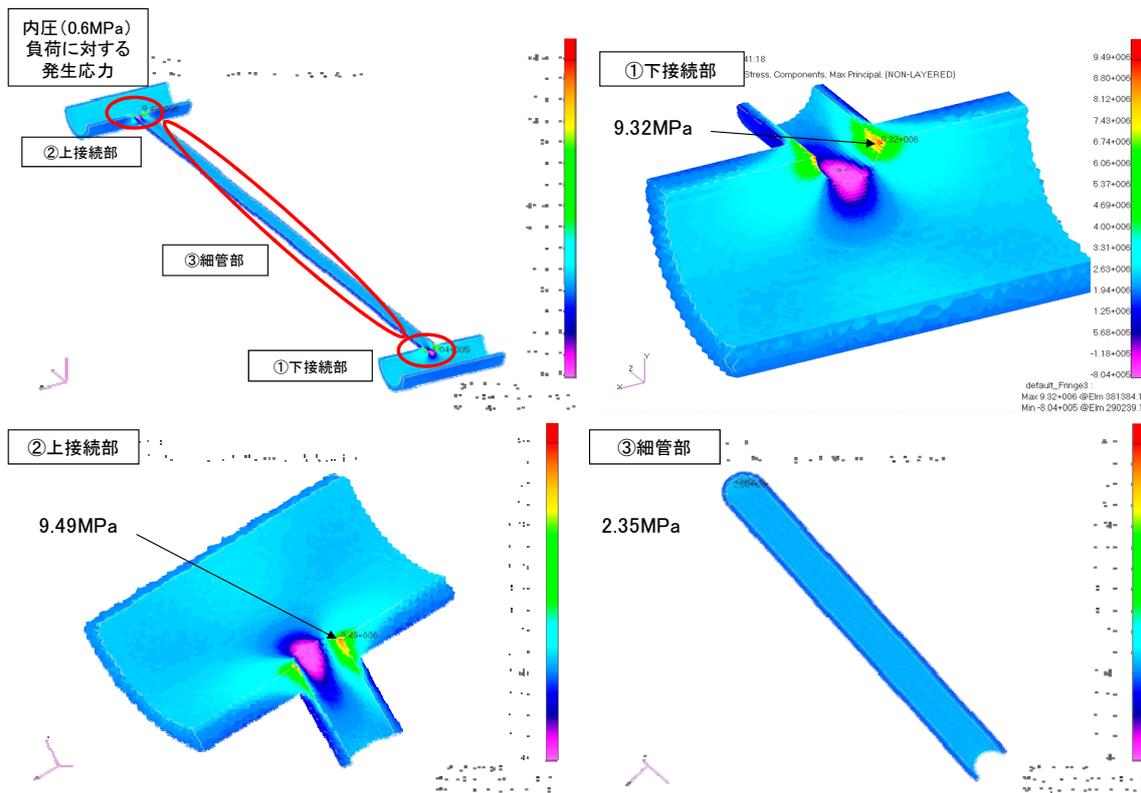


Fig.8.5 配管型のモデル試験体に 0.6MPa 負荷した場合の応力分布

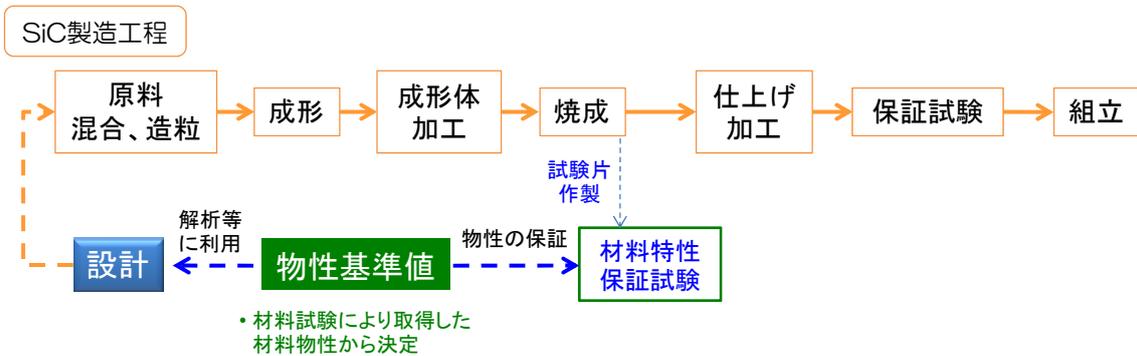


Fig.8.6 SiC の製造工程と材料同一性保証方法

This is a blank page.

# 国際単位系 (SI)

表1. SI基本単位

基本量	SI基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質の量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m <sup>2</sup>
体積	立方メートル	m <sup>3</sup>
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s <sup>2</sup>
波数	毎メートル	m <sup>-1</sup>
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m <sup>2</sup>
比体積	立方メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 <sup>(a)</sup> , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>
屈折率 <sup>(b)</sup>	(数字の) 1	1
比透磁率 <sup>(b)</sup>	(数字の) 1	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。  
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン <sup>(b)</sup>	rad	1 <sup>(b)</sup>	m/m
立体角	ステラジアン <sup>(b)</sup>	sr <sup>(c)</sup>	1 <sup>(b)</sup>	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
周波数	ヘルツ <sup>(d)</sup>	Hz		s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N		m kg s <sup>-2</sup>
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
電荷, 電流量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
静電容量	ファラド	F	C/V	m <sup>-2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-2</sup>
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V	m <sup>-2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>3</sup> A <sup>2</sup>
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(e)</sup>	°C		K
光照度	ルーメン	lm	cd sr <sup>(c)</sup>	cd
放射線量	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> cd
放射線種の放射能 <sup>(f)</sup>	ベクレル <sup>(d)</sup>	Bq		s <sup>-1</sup>
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト <sup>(g)</sup>	Sv	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
酸素活性	カタール	kat		s <sup>-1</sup> mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。  
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。  
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。  
 (d) ヘルツは周期現象についての、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。  
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。  
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。  
 (g) 単位シーベルト (PV,2002,70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI組立単位		
	名称	記号	SI基本単位による表し方
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-1</sup>
表面張力	ニュートンメートル	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s <sup>-2</sup>
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> =s <sup>-1</sup>
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s <sup>2</sup>	m m <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup> =s <sup>-2</sup>
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-3</sup>
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> kg s <sup>-2</sup>
電荷密度	ジュール毎平方メートル	J/m <sup>2</sup>	m kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
表面電荷	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> s A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> mol <sup>-1</sup>
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup>
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg <sup>-1</sup> s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> =m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
酵素活性濃度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m <sup>2</sup> sr)	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> =kg s <sup>-3</sup>
	カタール毎立方メートル	kat/m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> mol

表5. SI接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 <sup>24</sup>	ヨタ	Y	10 <sup>-1</sup>	デシ	d
10 <sup>21</sup>	ゼタ	Z	10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>18</sup>	エクサ	E	10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>15</sup>	ペタ	P	10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>12</sup>	テラ	T	10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>9</sup>	ギガ	G	10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>6</sup>	メガ	M	10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>3</sup>	キロ	k	10 <sup>-18</sup>	アト	a
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h	10 <sup>-21</sup>	ゼプト	z
10 <sup>1</sup>	デカ	da	10 <sup>-24</sup>	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1ha=1hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>
リットル	L, l	1L=1l=1dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
トン	t	1t=10 <sup>3</sup> kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI単位で表される数値
電子ボルト	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 <sup>-19</sup> J
ダルトン	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> kg
統一原子質量単位	u	1u=1 Da
天文単位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 <sup>11</sup> m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 <sup>5</sup> Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 <sup>-10</sup> m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm <sup>2</sup> =(10 <sup>-12</sup> cm) <sup>2</sup> =10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベベル	B	
デジベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 <sup>-7</sup> J
ダイン	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =0.1Pa s
ストークス	St	1 St=1cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> =10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
スチルブ	sb	1 sb=1cd cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> cd m <sup>-2</sup>
ファ	ph	1 ph=1cd sr cm <sup>-2</sup> 10 <sup>4</sup> lx
ガル	Gal	1 Gal=1cm s <sup>-2</sup> =10 <sup>-2</sup> ms <sup>-2</sup>
マクスウェル	Mx	1 Mx=1G cm <sup>2</sup> =10 <sup>-8</sup> Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> T
エルステッド <sup>(c)</sup>	Oe	1 Oe ≐ (10 <sup>3</sup> /4π)A m <sup>-1</sup>

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「≐」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq
レントゲン	R	1 R = 2.58×10 <sup>-4</sup> C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 <sup>-9</sup> T
フェルミ	f	1フェルミ=1 fm=10 <sup>-15</sup> m
メートル系カラット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10 <sup>-4</sup> kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリ	cal	1cal=4.1858J (「15°C」カロリ), 4.1868J (「IT」カロリ), 4.184J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1μm=10 <sup>-6</sup> m

