

熱化学水素製造法ISプロセスのための 硫酸分解器の試作試験

Test Fabrication of Sulfuric Acid Decomposer Applied
for Thermochemical Hydrogen Production IS Process

野口 弘喜 大田 裕之* 寺田 敦彦 久保 真治
小貫 薫 日野 竜太郎

Hiroki NOGUCHI, Hiroyuki OTA*, Atsuhiko TERADA, Shinji KUBO
Kaoru ONUKI and Ryutaro HINO

原子力基礎工学研究部門
ISプロセス技術開発グループ

IS Process Technology Group
Nuclear Science and Engineering Directorate

July 2007

本レポートは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/index.shtml>)
より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター*では実費による複写頒布を行っ
ております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
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
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

*〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4 日本原子力研究開発機構内

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

熱化学水素製造法 IS プロセスのための硫酸分解器の試作試験

日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究部門

核熱応用工学ユニット

野口 弘喜・大田 裕之*・寺田 敦彦・久保 真治・小貫 薫・日野 竜太郎

(2007年4月11日受理)

水を原料として、二酸化炭素を排出することなく水素を製造する IS プロセスでは、高温高压下で腐食性の強い酸を取り扱うため、耐熱性、耐食性に優れた材料を用い、商用化を見据えた大型の反応装置の開発が必須の課題であった。中でも、ヘリウムガスの熱を用いて、300℃～500℃の高温下で、濃硫酸を蒸発・分解する硫酸分解器は、一般硫酸工業での使用条件(100℃程度)を大幅に超えた過酷な条件で使用される熱交換型化学反応器である。この環境に適用できる材料として、これまでの腐食試験等から、SiC セラミックスだけが使用可能であることがわかっていたが、商用で必要となる大きな SiC セラミックス体は製作できないため、熱交換型化学反応器の大型化技術に関しては未解決であった。そこで、複雑な管群式熱交換構造ではなく、SiC の高い熱伝導率を活かして、円筒型 SiC ブロックに複数の熱交換流路穴を設け、これを1ユニットとして、直列・並列に接続することで大型化を図る新しい熱交換器の概念を構築した。本書は当該概念の成立性を確認する目的で行なった硫酸分解器構造の SiC セラミック伝熱ブロックの設計と硫酸分解器主要構造部の試作の詳細について報告するものである。

本報告書は、電源開発促進対策特別会計法に基づく文部科学省からの受託事業として、原子力機構が実施した平成 16・17 年度「核熱利用システム技術開発」の成果の一部である。

原子力科学研究所(駐在)：〒311-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

*：東芝(2006年10月まで IS プロセス技術開発グループに在籍)

Test Fabrication of Sulfuric Acid Decomposer Applied for Thermochemical Hydrogen Production
IS Process

Hiroki NOGUCHI, Hiroyuki OTA*, Atsuhiko TERADA, Shinji KUBO,
Kaoru ONUKI and Ryutaro HINO

Nuclear Applied Heat Technology Division
Nuclear Science and Engineering Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received April 11, 2007)

Thermo-chemical Iodine-Sulfur (IS) process produces large amount of hydrogen effectively without carbon dioxide emission. Since the IS process uses strong acids such as sulfuric acid and hydriodic acid, it is necessary to develop large-scale chemical reactors featuring materials that exhibit excellent heat and corrosion resistance. A sulfuric acid decomposer is one of the key components of the IS process plant, in which sulfuric acid is evaporated and decomposed into water and sulfur trioxide under temperature range from 300 °C to 500°C using the heat supplied by high temperature helium gas. The decomposer is exposed to severe corrosion condition of sulfuric acid boiling flow, where only the SiC ceramics shows good corrosion resistance. However, at the current status, it is very difficult to manufacture the large-scale SiC ceramics structure required in the commercial plant. Therefore, we devised a new concept of the decomposer, which featured a counter flow type heat exchanger consisting of cylindrical blocks made of SiC ceramics. Scale up can be realized by connecting the blocks in parallel and/or in series. This paper describes results of the design work and the test-fabrication study of the sulfuric acid decomposer, which was carried out in order to confirm its feasibility.

Keywords: Sulfuric Acid Decomposer, Thermochemical IS Process, Hydrogen Production, HTTR, SiC Ceramics

A part of the study was performed by JAEA in the “Development of Nuclear Heat Utilization Technology” under the auspices of the Ministry of Education, Culture, Sports and Technology in the fiscal year 2004 and 2005.

*: TOSHIBA (Enrolled in the IS process technological group until October, 2006)

目 次

1. はじめに.....	1
2. 設計	3
2.1 機器の目的.....	3
2.2 機器概要	3
2.3 機器運転条件.....	3
3. セラミックス伝熱ブロックの温度・応力解析.....	6
3.1 目的	6
3.2 検討条件	6
3.3 解析結果	7
3.3.1 温度分布解析結果.....	7
3.3.2 応力解析結果.....	7
3.4 評価	7
3.5 まとめ.....	8
4. SiC 伝熱ブロックの製作.....	9
4.1 目的	9
4.2 高強度反応焼結 SiC ブロック	9
4.3 常圧焼結 SiC ブロック	9
5. 高温耐腐食シールの開発	11
6. 硫酸分解器の試作.....	12
6.1 試験体の設計	12
6.2 試験体の製作.....	13
6.3 構造健全性確認試験.....	13
7. まとめ.....	15
謝 辞.....	16
参考文献	17

Contents

1. Introduction.....	1
2. Decomposer Design.....	3
2.1 Objective.....	3
2.2 Design Concept.....	3
2.3 Specification.....	3
3. Thermal and Stress Analysis for SiC Ceramic Block	6
3.1 Objective of analysis	6
3.2 Analytical Condition	6
3.3 Analytical Results	7
3.3.1 Analysis of Temperature Distribution	7
3.3.2 Analysis of Stress Distribution	7
3.4 Evaluation	7
3.5 Conclusion	8
4. Fabrication of SiC Ceramic Block	9
4.1 Objective of Fabrication	9
4.2 High Strengthened Reaction Sintering SiC Block	9
4.3 Atmospheric Sintering SiC Block.....	9
5. Development of High Temperature Corrosion Resistant Seal.....	11
6. Test Fabrication of Sulfuric Acid Decomposer.....	12
6.1 Design of Test Article	12
6.2 Fabrication of Test Article	13
6.3 Structural Confirmation Test.....	13
7. Conclusion	15
Acknowledgement	16
Reference	17

1. はじめに

水を原料として二酸化炭素を排出することなく水素を製造する IS プロセス[1]では、高温高压下で腐食性の強い酸を取り扱うため、耐熱性、耐食性に優れた材料を用い、商用化を見据えた大型の反応装置の開発が必須の課題であった。中でも、ヘリウムガスの熱を用いて、300℃～500℃の高温下で、濃硫酸を蒸発・分解する硫酸分解器は、一般硫酸工業での使用条件(100℃程度)を大幅に超えた過酷な条件で使用される熱交換型化学反応器である[2]。

この環境に適用可能な材料として、腐食試験等から、SiC セラミックスのみが使用可能であることがわかっていたが[3]、商用規模で想定された大型で複雑な構造の SiC セラミックス体の製作は極めて困難なため、熱交換型化学反応器の大型化技術に関しては未解決の状態であった。IS プロセスに関しては、これまでの工学基礎試験の段階から 30m³/h 規模のパイロット試験へと移行することとなり、パイロット試験装置の設計検討を開始した[4]。

このとき、硫酸分解器を工学的に成立させるため、SiC セラミックスの製作工程に注目して、大型化のための要件を検討した。その結果、円柱状のような単純な構造体であれば、大型化が可能という目処を得た。そこで、複雑な管群式熱交換構造ではなく、SiC の高い熱伝導率を活かして、円筒型 SiC ブロックに複数の熱交換流路穴を設け、これを1ユニットとして、直列・並列に接続することで大型化を図ることとした。直列に接続するユニット間のシールには、耐食性と高温シールの観点から、950℃の高温で水蒸気電解を行う際に水素等の高温シールに実績があり[5]、硫酸に対して腐食性のない金をシール材として用いることとした。使用後の金は、再成形することによりシール材として再使用できる。

セラミックスの接合に当たっては、組み立て性を考慮してユニット全体をまとめて接続・固定する簡易な金属タイロッド締結機構とすることとした。このとき、シール材はその押しつけ力が変わるとシール性能も変化するので、シール材の押しつけ力を高温条件下でも常に一定に保持することが肝要である。そこで、機械加工等を極力排除して装置の簡素化を図り、高信頼性を確保するため、多数の皿バネを積み重ねることにより金属タイロッドと SiC の熱膨張を効率的に吸収できる機構を考案した [6, 7, 8]。

これらの概念の技術的成立性を検証するため、まず、シール性試験装置を用いて、500℃、4MPa のヘリウムガスによるシール試験を行い、軽水炉のゴムシール級のシール性能(1x10⁻⁴ Pa・m³/s)と比較して同等以下であることを確認した[7, 8]。次に、SiC と結着材を混合した粉末を CIP (冷間静水圧プレス: Cold Isostatic Press) 法により成型し、穴加工後常圧焼結する方法により、現時点で最大の外径 25cm、長さ 75cm の SiC ブロックの製作に成功した[8]。この SiC ブロック 2 体を接続した、IS プロセスパイロット試験規模の熱交換型硫酸分解器を試作し、強い地震に相当する水平荷重(0.6G)を負荷してもシール性能に影響がないことを確認し、構造強度解析結果を検証した[9]。

以上のように、セラミックスを用いた高温耐食性、高信頼性に優れた熱交換型硫酸分解器の大型化技術を開発したことにより、30m³/h 規模のパイロット試験に向けて、IS プロセスの最大の課題

を解決した。

本書は上述の研究開発のうち、当該分解器構造の SiC セラミックス伝熱ブロックの設計と硫酸分解器主要構造部の試作の詳細について報告するものである。

2. 設計

2.1 機器の目的

IS プロセスでは高温高圧下で硫酸やヨウ化水素のような極めて腐食性の強い酸を取り扱うことから、高温強度性能を有し、かつ、酸に対する耐食性に極めて優れた材料による大型の反応装置の開発が技術の要であった。原子力機構では、これまでの材料腐食試験や物性調査から、鋼材が溶けるような上記環境下に適用できる材料はセラミックスしかなく、中でも SiC 系セラミックスの適性が優れていることを確認してきたが[3]、セラミックスでは硫酸分解器の熱交換部のような大型で複雑な構造化が極めて困難であった。本開発研究はこの問題点を解決し、商用化に必要な熱交換型化学反応器の大型化技術を確立することを目的とする。

2.2 機器概要

硫酸分解器は、ヘリウム熱により 90wt% の硫酸を沸騰蒸発させ、更に、硫酸を SO_3 ガスと水蒸気に分解する機能(分解率約 50%)を有する IS プロセスの主要機器である。水素製造能力 $30\text{m}^3/\text{h}$ の IS プロセスパイロット試験で想定している硫酸分解器の諸元を表 2.2-1、構造概念を図 2.2-1 に示す。本器は、熱交換部に SiC セラミックス製の伝熱ブロックを用いることを特徴とし、伝熱ブロックに加工された孔に硫酸とヘリウムを対向させながら流動・熱交換させる。孔径は 14.8mm で、硫酸用に 32 本、ヘリウムガス用に 38 本の計 70 本の孔を設けている。伝熱ブロックの全長は 1.5m である。ここで、伝熱ブロックは、長尺ほど焼成時の割れ等により歩留まりが悪くなるため、全長 0.75m のブロックを上下に 2 体接続する構成としている。2 体の伝熱ブロックの接続に当たっては、高温硫酸に対して腐食しない金製ガスケットを用いることとした。上下プレナムとの接続に当たっても同様に金製ガスケットを用いることとした。ガスケットによるシールでは、高温時においてもシール材の押し付け力が変化しないようにする必要がある。そこで、伝熱ブロックをタイロッドで軸方向に締付け、このとき、皿バネを多数積み重ねて構造部材間の高温運転時の熱膨張差を吸収する機構を設けてシール材の押し付け力の変化を抑制するようにした。併せて、高温ヘリウムガスが流入する入口部や硫酸の流出入部にはベローズ式のプレナムを設置し、伝熱ブロックとケーシングの熱膨張公差を吸収できる構造とした。なお構造の詳細は 6 章において記す。

2.3 機器運転条件

パイロット試験装置の熱物質収支評価から定めた硫酸分解器の定格運転条件を表 2.3-1 に示す。なお、本条件では硫酸の運転圧力を 2MPaG にして、硫酸の沸点を高めた温度的に厳しい条件とした。この条件で、流入する硫酸を全量蒸発させることができ、また、硫酸が蒸発する際の硫酸分解反応 ($\text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{SO}_3$) の吸熱量も十分に補える条件である。

本ブロック構造で硫酸の蒸発が行えることを以下のようにして評価を行った。

(a) 硫酸側の沸騰熱伝達

下記のような硫酸流路をセラミックス伝熱ブロック内に設けてある。

有効伝熱長さ: 1.5m

硫酸チャンネル数: 32 本

硫酸チャンネル径: 14.8mm

1 本あたりの硫酸の質量流量: 0.0021kg/s

上記流路における平均熱流束は、80kW/m² と低いため、低熱流束領域に使用可能な次の西川藤田の式[10]を用いた。

$$Y = 6.24(f_s f_p X)^{2/3}$$

$$Y = \frac{hR}{\lambda_l}$$

$$X = \left[\left(\frac{1}{M^2 P} \right) \left(\frac{c_{pl} \rho_l^2 g}{\lambda_l \sigma \rho_v \Delta h_v} \right) \right]^{1/2} qR^{3/2}$$

$$f_p = \left(\frac{p}{p_a} \right)^{0.7} \frac{[1 + 3(p/p_c)^3]}{[1 + 3(p_a/p_c)^3]}$$

記号

f_s : 圧力の影響を補正する圧力係数

f_p : 気泡係数 (≈1)

h : 熱伝達率 [W/m²K]

R : 伝熱面代表径 [m]

λ_l : 液熱伝導率 [W/mK]

M : 次元定数 (=900[m⁻¹])

P : 次元定数 (=1.976[W])

c_{pl} : 液比熱 [J/kgK]

ρ_l : 液密度 [kg/m³]

g : 重力加速度 [m/s²]

σ : 表面張力 [N/m]

ρ_v : ガス密度 [kg/m³]

Δh_v : 潜熱 [kJ/kg]

q : 熱流束 [W/m²]

p : 圧力 [Pa]

p_a : 大気圧力 [Pa]

p_c : 臨界圧力 [Pa]

(b) ヘリウム側の熱伝達

下記のようなヘリウム流路をセラミックス伝熱ブロック内に設けてある。

有効伝熱長さ: 1.5m

ヘリウムチャンネル数: 38 本

ヘリウムチャンネル径: 14.8mm

1 本あたりのヘリウムの質量流量: 0.0024kg/s

上記流路における上記条件におけるレイノルズ数は $Re \approx 6000$ 、 $Pr \approx 0.7$ より、乱流熱伝達モデルである Kays の式を適用した。Kays の式[11]を以下に示す。

$$Nu = 0.022 Re^{0.8} Pr^{0.5}$$

記号

Nu : ヌセルト数

Re : レイノルズ数

Pr : プラントル数

上記の式を用いて硫酸、ヘリウムの流路一本について、1次元熱伝達モデルの計算を行った。計算した結果を表 2.3-1 及び図 2.3-1 に示す。この結果から図 2.2-1 の構造で硫酸の蒸発が可能な見通しが得られた。

3. セラミックス伝熱ブロックの温度・応力解析

3.1 目的

パイロット試験硫酸分解器に適用を計画しているセラミックス伝熱ブロックについて、運転時の想定される熱負荷、圧力負荷に対する健全性を評価した。なお、セラミックス伝熱ブロックの材質は、高強度反応焼結 SiC で計画しているが、高強度反応焼結 SiC が開発中の材料であることを踏まえ、常圧焼結 SiC をバックアップ材として位置付けている。本資料では、この常圧焼結 SiC についても適用性を検討した。

3.2 検討条件

(1) セラミックス伝熱ブロックのモデル化範囲

セラミックス伝熱ブロックのモデル化範囲は、ブロック全体の上側半分とし、流路穴の対称性をから 90°分(1 / 4 セクター)をモデル化範囲とした。ここで、ブロック全体の上側半分とした理由は、熱負荷として考慮するヘリウム/硫酸間温度差がブロック下側(低温側)に比較して上側(高温側)の方が大きくなることに配慮したものである。

(2) 負荷条件

(a) 熱負荷

熱負荷として、定格運転時の温度条件を想定した。別途、過渡状態も含めた評価が必要と考えられるが、過渡状態の把握にはプラントシステムの検討が必要であり、今後の検討を待つ必要がある。なお、定格運転時は、硫酸分解器にとって最も交換熱量が大きい運転状態と考えられ、ヘリウムと硫酸の間で最も大きな温度差が生じる状態に相当する。定格運転時の温度条件を図 2.3-1 に示す。同図に示す条件はサイジング状態のものであり、このときのヘリウム側、硫酸側それぞれの温度分布、熱伝達率を境界条件として考慮した。

(b) 圧力

硫酸蒸発器には、定格時ヘリウム側 4MPa、硫酸側 2MPa の圧力が作用する。ここでは、圧力負荷として、何らかの理由により硫酸側の圧力が低下した場合を想定し、ヘリウム側のみに 4MPa を作用させた場合の評価を実施した。

(3) 解析モデル

解析モデルのメッシュ分割を図 3.2-1 に示す。解析に用いたコード及び要素は、以下の通りである。

解析コード: ABAQUS Ver. 6.4

熱伝導解析要素: DC3D8 (3次元ソリッドモデル、8節点、線形、れんが型)

熱応力解析要素: C3D8 (3次元ソリッドモデル、8節点、線形、れんが型)

(4) 物性値

SiC の物性値として、表 3.2-1 に示す値を用いた。解析で重要なパラメータである熱伝導率を炭素鋼 S35 (40[W/mK]) と比較すると、高強度反応焼結 SiC は 130[W/mK]、常圧焼結 SiC は 170[W/mK] であり、炭素鋼の 3~4 倍の熱伝導率を有する。

3.3 解析結果

3.3.1 温度分布解析結果

図 3.3-1 にセラミックス伝熱ブロックの温度分布を示す。ブロックの温度は、上端近傍で急激に上昇している。これは、図 2.3-1 に示すように硫酸及びヘリウムの温度は連続的に変化しているが、ブロック上端より約 140mm の位置に硫酸のドライアウト点があり、その上下で熱伝達率をステップ状に変化させていることに起因している。すなわち、ドライアウト点より下方では硫酸側の熱伝達率が大きく、セラミックス伝熱ブロックの温度は硫酸温度に追従するのに対し、ドライアウト点より上方ではヘリウム側の熱伝達率が大きくなるため、セラミックス伝熱ブロックの温度はヘリウム温度に追従する。また、セラミックス伝熱ブロックの上端付近ではヘリウムと硫酸の温度差が約 250°C あり、これらが重畳して大きな温度差が生じる。このような温度分布は、硫酸の沸騰挙動及び物性値について不明な点があるためであり、要素試験結果を踏まえることにより緩和されるものと想定される。

3.3.2 応力解析結果

図 3.3-2 に、図 3.3-1 の温度分布に伴う熱応力解析結果を示す。図 3.3-2 では、材質がセラミックスであることを考慮し、最大主応力で出力している(セラミックス等の脆性材料は最大主応力説に良く一致すると言われる)。最大主応力は 114MPa であり、硫酸流路の内面で、かつ、ドライアウト点より若干下方の位置に発生している。また、硫酸流路の内面に発生する応力は、ブロックの中心に近いほど大きくなる傾向を示す。これは、隣接している他の流路の影響、ブロック全体構造の影響によるものと考えられる。

3.4 評価

硫酸分解器のセラミックス伝熱ブロックに適用を計画している、高強度反応焼結 SiC の平均曲げ強さは 850MPa、バックアップ材として考えている常圧焼結 SiC (東芝セラミックス製、製品名 CERASIC) の平均曲げ強さは 450MPa(表 3.4-1 参照) であるが、上記の発生応力に対する評価を行う場合には、曲げ強さでなく引張強さと比較する必要がある。

曲げ強さから引張強さへの変換は、セラミックスの強度評価に際してよく用いられる、ワイブル分布関数を用いた下式を用いる[12]。

$$\frac{\mu_T}{\mu_3} = \left\{ \frac{1}{2(m+1)^2} \right\}^{1/m}$$

ここで、

μ_T : 引張強さ

μ_3 : 3点曲げ強さ

m : ワイブル係数

ワイブル係数は、ばらつきに係る係数であり、 m の値が小さいほどばらつきが大きい。今回の評価では、 $m = 9$ を使用した。この値は、バックアップ材として計画している常圧焼結 SiC (CERASIC) の製品に対して、東芝セラミックスより提示されている値であり、高強度反応焼結 SiC についても、想定している値である。

$m = 9$ とすると、上式による引張強さと 3 点曲げ強さの比は 0.555 となり、平均引張強さとして、以下の値が想定される。これらの数値は発生応力を上回っている。

常圧焼結 SiC : 249MPa

高強度反応焼結 SiC : 471MPa

これらの引張強さと発生応力の比を安全率とすると、

常圧焼結 SiC : 2.19

高強度反応焼結 SiC : 4.14

となり、常圧焼結 SiC でも 2 倍の安全率を有している。この値の妥当性については、現在策定を開始しているセラミックスの設計基準を待つ必要があるが、従来の実績からは、高強度反応焼結 SiC については十分な裕度を有している。常圧焼結 SiC は、裕度が少ない傾向にあるが、これまで CERASIC については今回の発生応力と同程度の応力レベルで使用されている例もあり、バックアップ材として計画することは可能と考える。

3.5 まとめ

硫酸分解器に適用を計画しているセラミックス伝熱ブロックの、熱負荷及び圧力負荷に対する発生応力の評価を実施した。別途、プロセス及び運用法の検討進捗を踏まえた過渡状態の評価、要素試験結果を踏まえた温度分布の再評価等を行う必要があるが、最もヘリウム/硫酸間で温度差が大きくなる定格運転時の発生応力に対して、高強度反応焼結 SiC は十分な裕度を有し、バックアップ材として検討している常圧焼結 SiC についても、発生応力を上回る強度を有し、適用性があることが明らかとなった。

4. SiC 伝熱ブロックの製作

4.1 目的

本項は、硫酸分解器の製作の内、セラミックス伝熱ブロックの製作経過をまとめたものである。当初、セラミックス伝熱ブロックは、高強度反応焼結 SiC にて製作する計画であったが、製作した製品にはいずれもクラックが発生し良品が得られなかった。このため、常圧焼結 SiC 材を用いて組立性試験用のセラミックス伝熱ブロックの製作をおこなった。以下に、高強度反応焼結 SiC ブロック及び常圧焼結 SiC ブロックの製作経過を記載する。

4.2 高強度反応焼結 SiC ブロック

(1) 製作要領

高強度反応焼結 SiC セラミックス伝熱ブロックの製作手順を図 4.2-1 に示す。原料の SiC 粉末と C 粉末を混合・造粒し、CIP 法により $\phi 300 \times 800L$ のブロックを成形した。この成形体にヘリウムおよび硫酸流路等の加工をおこない、仮焼後に Si を含浸させ、反応焼結を実施した。反応焼結後は、仕上げ加工と検査を実施した。

(2) 製作結果

高強度反応焼結 SiC にて製作したセラミックス伝熱ブロックは、反応焼結後に表面に付着しているシリコンを除去した際に、いずれもクラックが観察され良品が得られなかった。

4.3 常圧焼結 SiC ブロック

(1) 製作要領

常圧焼結 SiC セラミックス伝熱ブロックの構造は、高強度反応焼結 SiC と同じである。セラミックス伝熱ブロックの製作は図 4.2-1 に示す高強度反応焼結 SiC の製作手順とほとんど同じ手順である。高強度反応焼結 SiC では Si を添加して反応焼結を行うが、常圧焼結ではこの工程が無い。

製作手順は原料を混合・造粒し、CIP 法により成形体を製作した。SiC は非常に硬いため、焼結後の加工が困難であり、素地加工をすることが一般的である。そのためには、予め焼結収縮を測定する必要がある。そのため先行試験として、成形体から焼結収縮を測定するテストピースを切り出し焼結し、焼結収縮率を測定した。

製作工程は、①原料の混合・造粒、②CIP 法による $\phi 300 \times 800L$ の成形体の製作、③成形体の硬化後、伝熱孔を開ける等の素地加工の実施、④高温炉での焼結、⑤焼結後のバリ等の除去など焼結体の最終加工の実施、及び⑥洗浄・検査から構成される。

(2) 製作結果

常圧焼結 SiC にて製作したセラミック伝熱ブロックは、上記の一連の製作過程で、割れ等は生じず、伝熱ブロックの製作性を確認することができた。また、上下 2 体の伝熱ブロックを製作したが、フランジタイプのブロックにおいてハンドリングミスからフランジ角よりカケ等が発生したが、研磨等の補修により対応した。また、重量、寸法、外観、PT 検査を製造過程及び完成時に行い、その品質に問題のないことを確認した。

5. 高温耐腐食シールの開発

SiC セラミックス伝熱ブロックと金属構造部材の複合体である硫酸分解器には硫酸とヘリウムのバウンダリとなる部材間接合部位が存在する。このため、シール構造の適用が必要となるが、高温高圧の硫酸環境に耐えうる耐熱耐腐食シールは現存しなかった。本シール開発では、以下の各シール部位に適用するガスケットとして図 5-1 に示すガスケットを摘出し、事前評価試験にてキャップ式とワイヤ式に候補を絞った。ガスケット材料には高温の硫酸に対しても良好な耐腐食性を示す純金を適用した。

- 硫酸接触部フランジ間シール(金属-金属間シール)
- SiC ブロックとフランジ間シール(セラミックス-金属間シール)
- SiC ブロック間シール(セラミックス-セラミックス間シール)

試験装置を図 5-2 に示す。当該装置は硫酸分解器の上記シール部を模擬しており、これを真空加熱炉に設置し 70～500℃のヒートサイクル3回負荷した。シール性能はヒートサイクル中にヘリウムにより最大 4MPa まで加圧し、真空フード法によりヘリウムリーク量を評価した。表 5-1 にワイヤガスケットとキャップガスケット試験部からのヘリウムリーク量とその測定条件を示す。表(a)は第 3 サイクル目の 500℃での測定値、表(b)は試験終了後室温での測定値である。表値の比較から、500℃でのシールの締付け力は室温時と比較して約半分に低下するが、逆にヘリウムリーク率は低下し、性能が向上しているものも見られた。これは高温におけるガスケット材(金)の軟化による接着効果の向上に起因するものと思われる。また、500℃でのヘリウムリーク量は $7.5 \times 10^{-8} \sim 3.6 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ と軽水炉のゴムシール級のシール性能($1 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$)と比較して同等以下であり、これから実際の使用条件(2MPa)での年間漏洩量に概算するとおおよそ 10NmL ～ $10^2 \text{ NL}/(\text{シール} \cdot \text{年})$ 程度と少ないことが予想される。本試験より、当該金シール構造の良好なシール性能が確認され、硫酸分解器への適用性に見通しを得た。

6. 硫酸分解器の試作

6.1 試験体の設計

本試験体は熱交換部の構造健全性や組立性の検証を目的としている。従って、硫酸を用いての流動試験は行わない仕様となっていることから、SiC 伝熱ブロックを除く金属部品は実機での材料仕様とは異なりステンレスで代用することとした。図 6.1-1 に試作する硫酸分解器の主要構造の概念図を示す。

設計当初において提起された構造上の課題部位は下記の通りであった。

- 硫酸シール構造
- SiC 伝熱ブロック締結構造
- 振れ止め構造

① 硫酸シール構造

高温硫酸シール材料として適用可能と思われる材料は現段階では金で、その形状は以下のものが想定された。

- 金板、金線
- 金メッキ、金蒸着
- メタル O リング + 金板被着

今回の設計では、5 章で説明したガスケット構造を適用した。SiC 伝熱ブロック間締結構造はキャップ式ガスケットを、それ以外は、 $\phi 2 \text{ mm}$ O リングを採用した。なお、より安価な金メッキガスケットなども考えられるが、今後、メッキの信頼性や金板被着の製作性が明らかになった時点で、適応性を再度検討する。

② SiC 伝熱ブロック締結構造

SiC 伝熱ブロック締結はタイロッドによりシールを挟んだ伝熱ブロック同士を押し付けて締結するもので、フランジ継手の大型化した概念である。この機構により、将来に向けた熱交換部の大型化が容易となり、セラミックス伝熱ブロック製作において高い歩留まりが期待できる。本構造設計における重要な点は、タイロッドによる必要ガスケット締付荷重を維持しつつ、タイロッドと伝熱ブロック間の熱膨張差を吸収することにある。特に、各部品温度の推定が難しく、温度分布によってその値は大きく変化する。このため、タイロッドには SiC の線膨張係数に近い材料(熱膨張量が少ない材料)のモリブデンを適用した。一方、熱膨張差吸収機構には、皿ばねの撓みを利用した機械機構を選定した。なお、本試験体のこれらの材料は SUS304 で代用してある。

③ 振れ止め構造

振れ止め構造に要求される機能は、圧力容器と伝熱ブロックとの軸方向熱膨張差の吸収、加えて、圧力容器と伝熱ブロックとの径方向の熱膨張差を吸収すると共に径方向の振れ止めを行うものである。本試験体ではピン支持振れ止め機構を上下部に採用した。なお、伝熱ブロック締結部の振れ止めは、各ブロックとも一端は支持されていること、各ブロックの自重は約 100 kg と締め付け荷重約 30,000 kg に比して小さいこと、径方向熱膨張差吸収ばねが必要でばねとのバランスを考慮すると小さな変位には追従できないことから、本装置では不要と判断した。しかしながら、更なる大型化を考慮すれば必要な状況も有り得る。なお、高温ヘリウムガス雰囲気の実機では振れ止め部にカジリ防止対策としてのデブリックコートなどの表面処理が必要である。

6.2 試験体の製作

図 6.2-1 に示す手順で硫酸分解器組立性試験体の試作を行った。完成した試験体を図 6.2-2 に示す。当該試験体に対し、外観・寸法検査を行い、有害な傷なく、設計通りの寸法公差で製作できたことを確認した。また、組立手順の妥当性が確認できたとともに、タイロッド締め付け試験によりタイロッドの締め付け量と各シールのつぶれ量を確認し、適正な締め付けを設定することができた。更に、硫酸分解器の製作要領の妥当性を検証することができたとともに、その他重要な設計パラメータを取得することができ、SiC ブロック型硫酸分解器の製작성・構造成立性に見通しを得た。

6.3 構造健全性確認試験

上記で試作した組立性試験体の構造及びシール部の機能健全性を評価することを目的として耐水圧試験及びヘリウムリーク試験を行なった。その結果、硫酸分解器の構造健全性及び良好なシール性能を確認した。

① 耐水圧試験

組立性試験体に定格運転時の内外差圧に相当する 2MPa の水圧を室温で硫酸側に加圧し 30 分間保持した結果、水の漏洩及び異常な変形は確認されず強度上問題の無いことを確認した。

② ヘリウムリーク試験

JIS Z2332 の加圧放置法に従い、図 6.3-1 に示す系統構成でガスケットのヘリウムリーク量を評価した。組立性試験体の 5 カ所の部材間接合部位には 4 本のリング式ガスケットと 70 個のキャップ式ガスケットが使用されている。組立性試験体の硫酸側に約 0.2MPa のヘリウムを充填し、室温で圧力降下をデジタルマノメータで測定してヘリウムリーク率を評価した。測定は 1800 秒とし、600 秒毎の圧力を測定した。その結果、組立性試験体全てのガスケット部からの合計リ

ーク率は最大 $(2.2\sim 2.5)\times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ であった。これを標準状態で1年間のヘリウムリーク量に換算すると $0.79\text{Nm}^3/\text{y}$ に相当する。ただし、これは当該試験圧力条件 0.2MPa での値であり、パイロット試験条件ではその10倍の 2MPa の差圧が発生する。同プラント条件でのヘリウムリーク量を以下のように見積った。

シール部にある微小な孔からのリークを考えると、その孔からのリーク量 q と圧力降下 Δp には一般的に $\Delta p \propto q$ の関係がある。従って、シール試験と試験体のリーク量と試験圧力をそれぞれ q_1 と p_1 、 q_2 と p_2 とすると、シール試験と試験体のリーク量の比は以下となる。

$$q_1/q_2 = (p_1/p_2) = (4/0.2) = 20$$

即ち、 $0.79 \times (20) = 15.8\text{Nm}^3/\text{y}$ となり、一般に市販されている 7m^3 ガスボンベに換算して標準状態で年間2.3本程度の漏れに該当することから、ヘリウムコスト的には問題のないレベルと考える。ただし、実際には硫酸分解器内圧増加によるシール面圧低下によってシール性能が低下、及び逆に高温でのシール材の軟化によるシール性能向上の両者の複合現象となるため、上記はあくまでも粗い評価による推定値である。

7. まとめ

- ① SiC セラミックスを用いたブロック型硫酸分解器の概念を構築した。セラミックス材を用いた熱交換型化学反応器を大型化する本概念は、SiC セラミックスの製作限界に依存することなく、大型化に対応可能である。
- ② 上記概念に対して熱・構造解析を行ない、定格時において十分な機械強度を有していることを確認した。
- ③ 水素製造 30Nm³/h 級のパイロット試験に適用する硫酸分解器の 1/1 スケール SiC セラミックス伝熱ブロックの試作に成功した。
- ④ 500°C、4MPa のヘリウム環境に適用する金製ガスケットを設計・試作し、高温シール試験にて、その性能が軽水炉のゴムシール級(1x10⁻⁴ Pa・m³/s)であり、実機への適用性に見通しを得た。
- ⑤ 水素製造 30Nm³/h 級のパイロット試験に適用する硫酸分解器の主要構造を試作に成功した。本試作において、硫酸分解器の製作要領の妥当性を検証することができたとともに、その他重要な設計パラメータを取得することができ、SiC ブロック型硫酸分解器の製作性・構造成立性に見通しを得た。

謝 辞

本研究を行うにあたり、(株)東芝小林正彦氏、丸山茂樹氏、稲富誉也氏に多大な御協力を頂いた。記して謝意を表します。

本報告書は、電源開発促進対策特別会計法に基づく文部科学省からの受託事業として、原子力機構が実施した平成 16-17 年度「核熱利用システム技術開発」の成果の一部である。

参考文献

- [1] K. Onuki, H. Nakajima, I. Ioka, M. Futakawa, S. Shimizu: IS Process for thermo-chemical hydrogen production, JAERI-Review 94-006 (1994).
- [2] A. Terada, S. Kubo, H. Okuda, S. Kassahara, N. Tanaka: Development of Hydrogen Production Technology by Thermo-Chemical Water Splitting IS Process, Proc. of GLOBAL 2005, Tsukuba, Japan, Oct 9-13, GLOBAL2005-427.
- [3] 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.
- [4] S. Kubo, S. Kasahara, Y. Inaba, S. Ishiyama, K. Onuki, R. Hino, "A pilot test plan of thermochemical water-splitting Iodine-Sulfur process", Nucl. Eng. Desi., Vol. 233, pp. 355-362 (2004).
- [5] R. Hino, K. Haga, H. Aita, K. Sekita: R&D on Hydrogen Production by High Temperature Electrolysis of Steam, Nucl. Eng. Desi., Vol. 233, pp. 363-375 (2004).
- [6] 稲富誉也、酒井康弘、丸山茂樹、須山章子、日野竜太郎、寺田敦彦、小貫薫、久保真治、笠原清司: セラミックス熱交換器, 特願 2005-141767
- [7] H. Ota, A. Terada, S. Kubo, S. Kasahara, M. Hodotsuka, R. Hino, T. Inatomi, K. Ogura, M. Kobayashi, S. Maruyama: Conceptual Design of Sulfuric-Acid Decomposer for Thermo-Chemical Iodine-Sulfur Process Pilot Plant, Proc. 13th Int. Conf. Nucl. Eng., 2005, Beijing, China, ICONE13-50494.
- [8] 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)
- [9] H. Noguchi, H. Ota, A. Terada, S. Kubo, K. Onuki, R. Hino: Development of Sulfuric Acid Decomposer for Thermo-Chemical IS Process, Proc. of ICAPP2006, June 4-8, 2006, Reno, USA, ICAPP2006-6166.
- [10] K. Nishikawa and Y. Fujita: Correlation of nucleate boiling heat transfer based on bubble population density, Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol.20, 3, March 1977, Pages 233-245
- [11] W.M. Kays and M.E. Crawford, Convective Heat and Mass Transfer (2nd ed.), McGraw-Hill, 1980, p. 243.
- [12] セラミックス編集委員会講座小委員会編、「セラミックスの機械的性質」、(社)窯業協会

表 2.2 -1 硫酸分解器設計諸元

項目	細目	数値
硫酸	圧力	2MPaG
	流量	4.0kg/min
	出入口温度	460/435°C
	硫酸濃度	90wt%
	沸騰温度	455°C
ヘリウム	圧力	4MPaG
	流量	5.5kg/min
	出入口温度	710/535°C
熱交換量		83kW
最大熱流束		80kW/m ²
伝熱管本数	硫酸/ヘリウム	32 本/38 本
伝熱管寸法	内径/長さ	14.8mm/L1.5m

表 2.3-1 1次元熱伝達モデルによる伝熱ブロック計算条件及び計算結果

	項目	単位	計算条件
計算条件	交換熱量	kW	82.7
	ヘリウム入口／出口温度	°C	710／535
	硫酸入口／出口温度	°C	435／460
	ヘリウム圧力	MPaG	4.0
	硫酸圧力	MPaG	2.0
	ヘリウム流量	kg/s	0.091
	硫酸流量	kg/s	0.066
計算結果	ヘリウム流路径／個数	mm／－	φ14.8／38
	硫酸流路径／個数	mm／－	φ14.8／32
	ブロック長さ	m	1.5

表 3.2-1 解析に使用した SiC の物性値

温度	熱伝導率	縦弾性率	ポアソン比	線膨張率	密度
(°C)	(W/mK)	(MPa)	(-)	(1/K)	(kg/m ³)
0	120.0	3.98E+05	0.27	3.47E-06	3100
800	81.2	3.98E+05	0.27	3.90E-06	3100
1300	58.2	3.98E+05	0.27	4.40E-06	3100

表 3.4-1 SiC の物性

		高強度反応焼結 SiC RS-SiC	常圧焼結 SiC CERASIC
密度	g/cm^3	3.0	3.1
曲げ強さ	MPa	850	450 (RT)
			450 (1450°C)
ヤング率	GPa	370	420
破壊靱性	$\text{MPa/m}^{1/2}$	3.0	3.5
硬度	HV	1900	2300
熱伝導率	W/mK	130	170
熱膨張係数	$10^{-6}/\text{K}$	3.9 (RT-1073K)	4.5
		4.3 (RT-1473K)	

表 5-1 高温シール試験結果

(a) 3 ヒートサイクル終了後 500°C

試験部位	シール形状	ヘリウム リーク率 (Pa・m ³ /s)	ヘリウム 圧力 (MPa)	締付け荷重
フランジ間シール (金属-金属)	ワイヤ ガスケット	3.6x10 ⁻⁴	3.6	1.0x10 ⁵ N/m
SiC ブロッカーフランジ間シール (セラミックス-金属)	ワイヤ ガスケット	2.2x10 ⁻⁶	2.6	1.2x10 ⁵ N/m
SiC ブロック間シール (セラミックス-セラミックス)	キャップ ガスケット	7.5x10 ⁻⁸	4.0	24 MPa

(b) 3 ヒートサイクル終了後 20°C

試験部位	シール形状	ヘリウム リーク率 (Pa・m ³ /s)	ヘリウム 圧力 (MPa)	締付け荷重
フランジ間シール (金属-金属)	ワイヤ ガスケット	6.4x10 ⁻⁸	4.0	2.8x10 ⁵ N/m
SiC ブロッカーフランジ間シール (セラミックス-金属)	ワイヤ ガスケット	2.7x10 ⁻⁴	3.4	3.0x10 ⁵ N/m
SiC ブロック間シール (セラミックス-セラミックス)	キャップ ガスケット	2.8x10 ⁻⁷	4.0	58 MPa

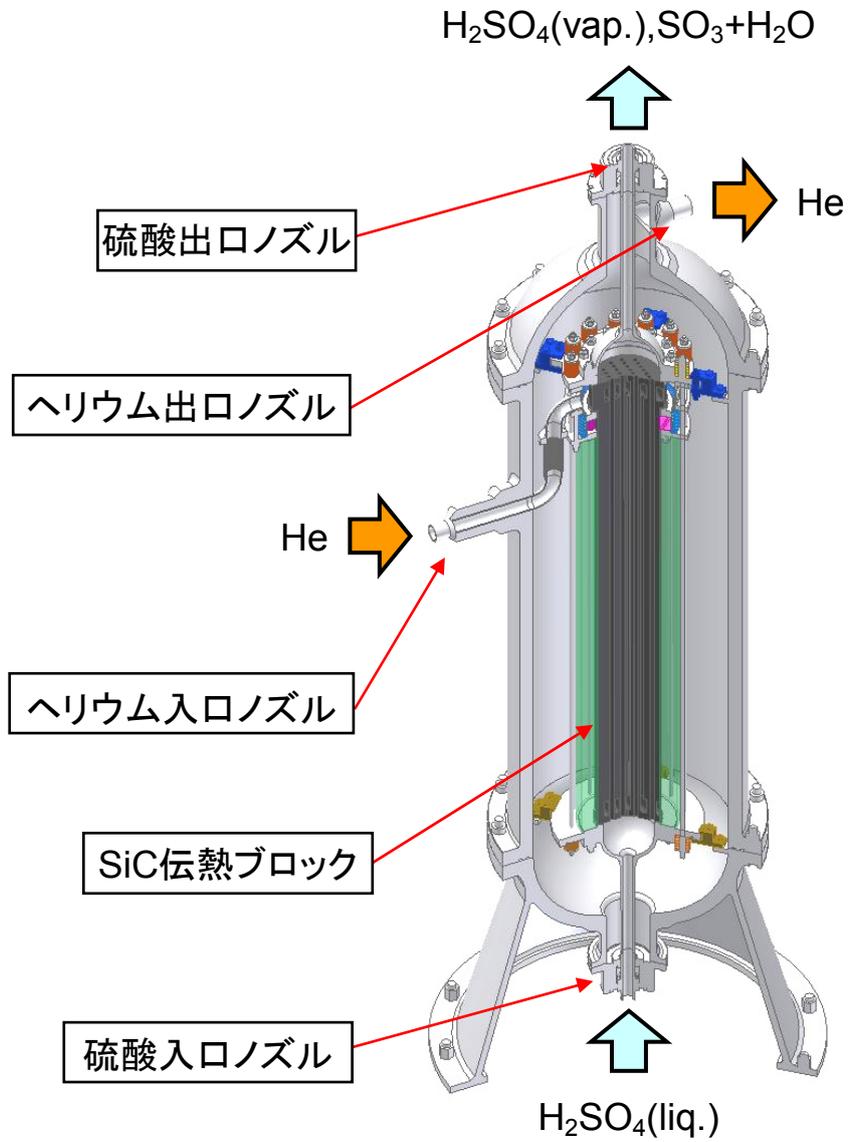


図 2.2-1 硫酸分解器の構造概念

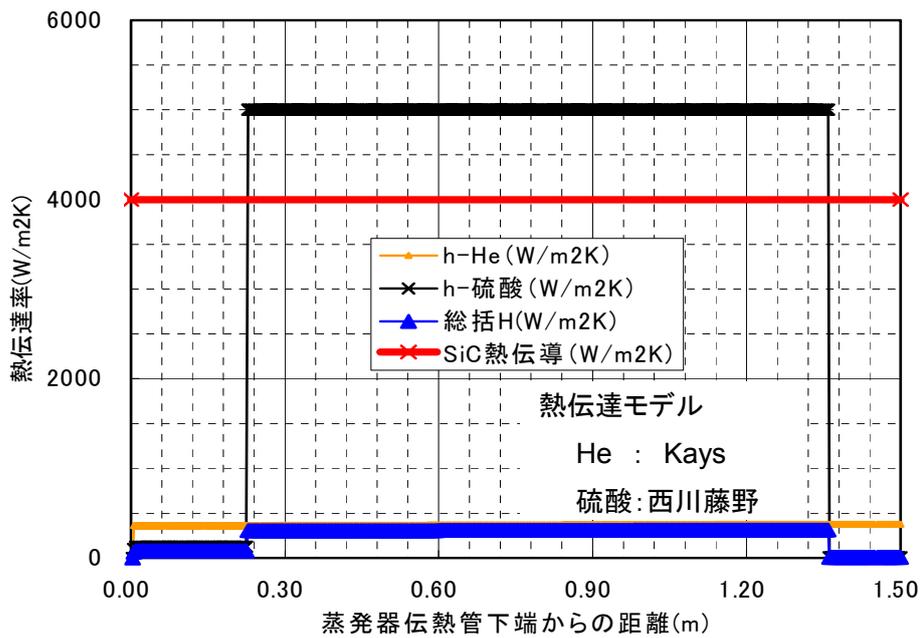
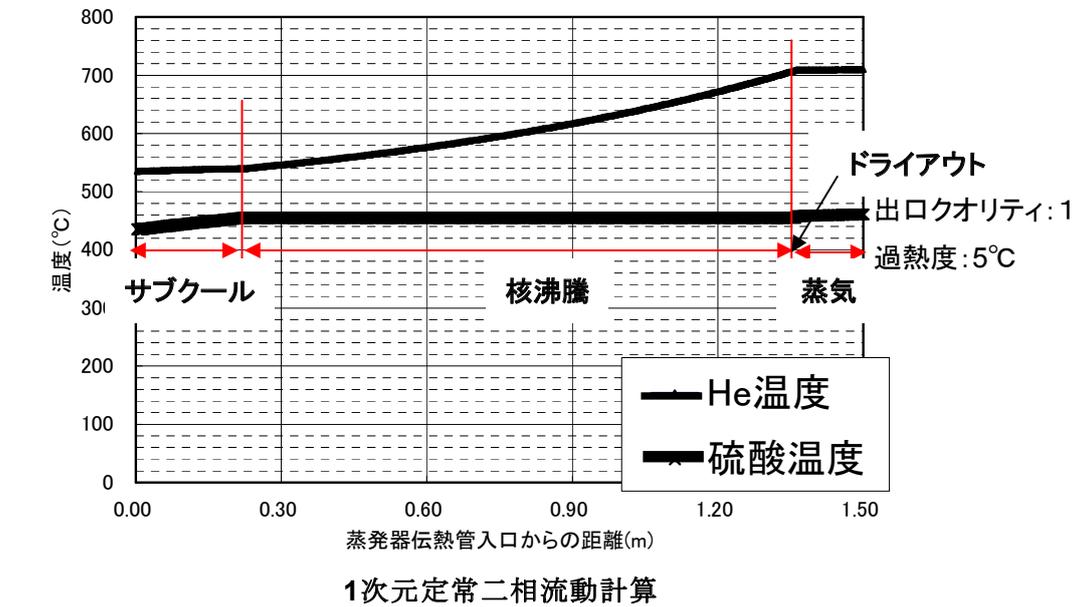


図 2.3-1 定格運転時の硫酸と He の流体温度計算条件と結果

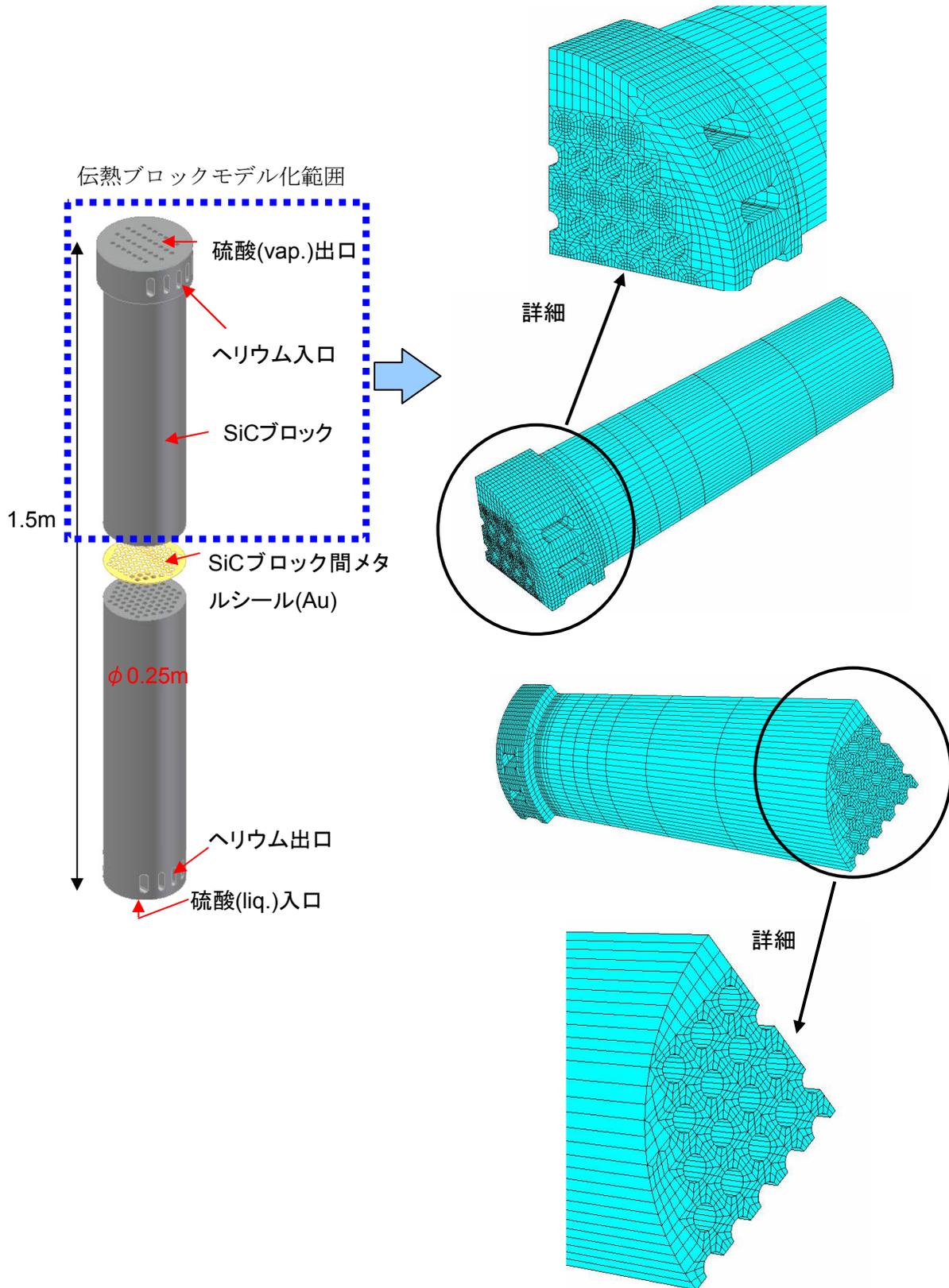


図 3.2-1 セラミックブロック構造図(メッシュ分割図 ¼セクター)

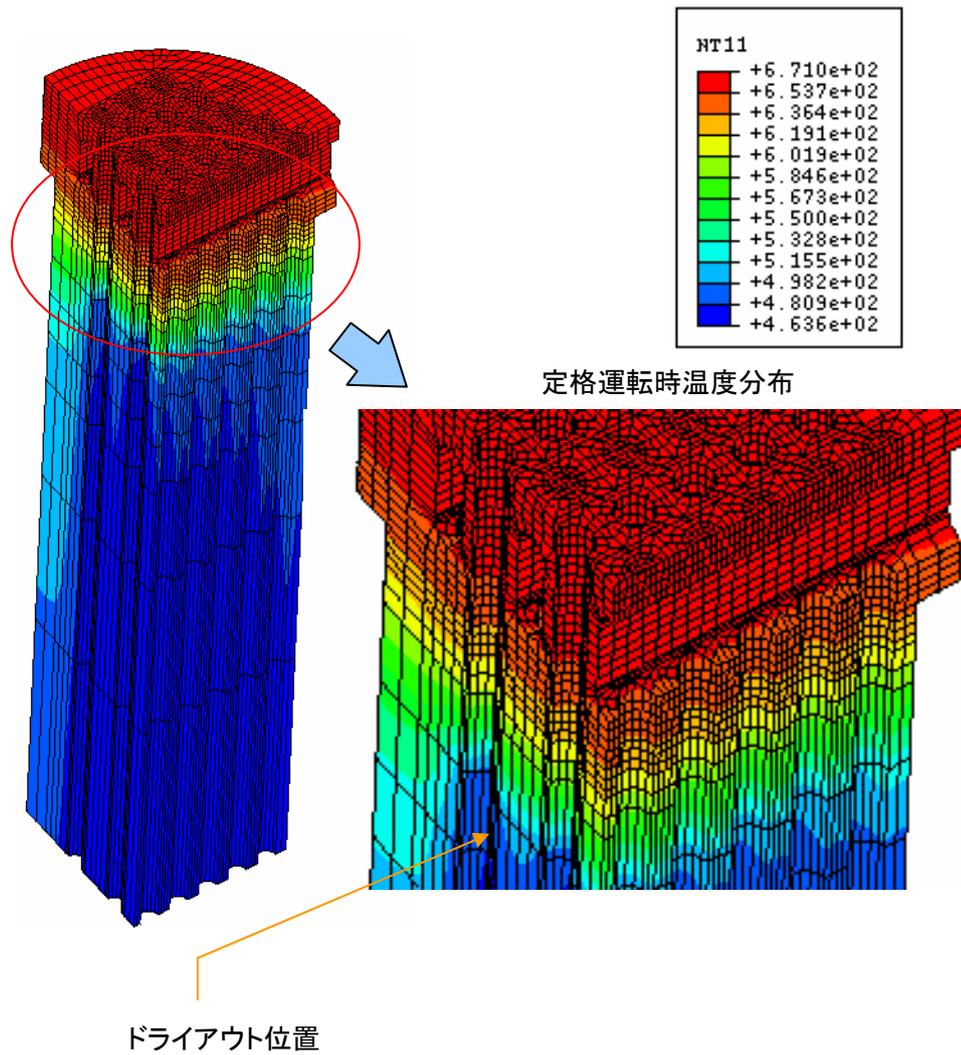


図 3.3-1 セラミックブロックの温度解析結果

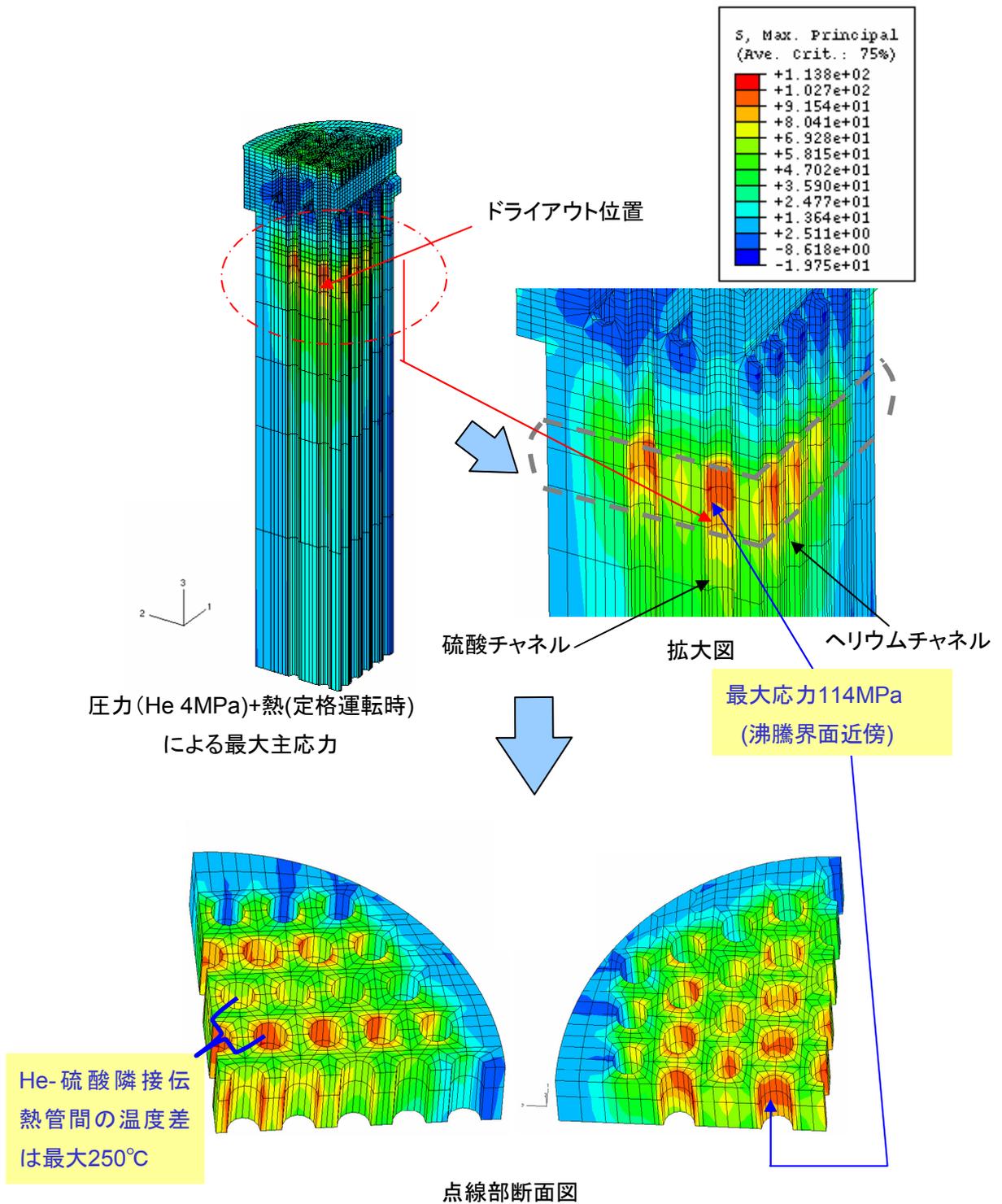


図 3.3-2 セラミックブロックの応力解析結果

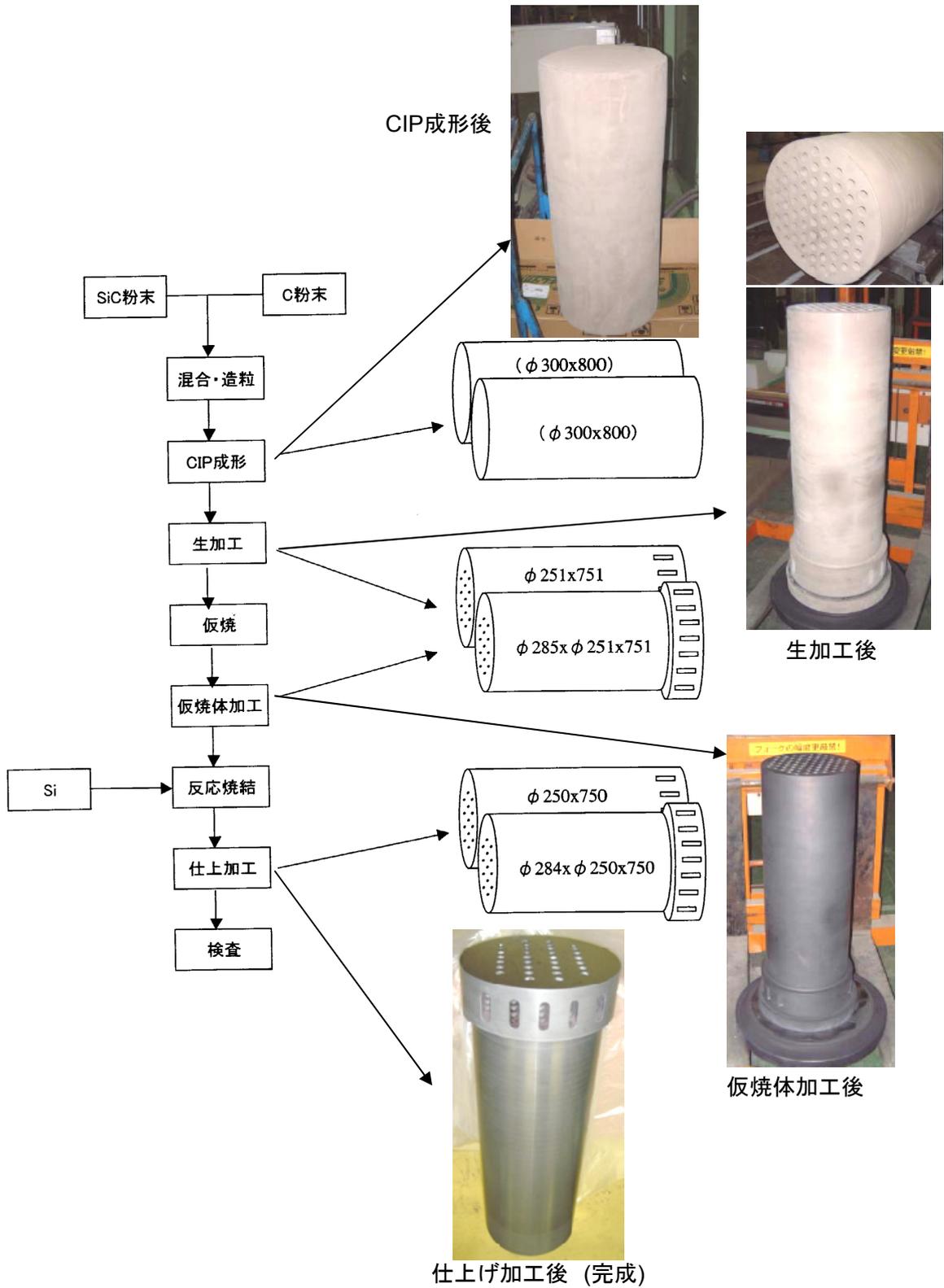


図 4.2-1 高強度反応焼結 SiC ブロックの製作手順



金製キャップガスケット
(O.D19mm, 1mmt)



金製キャップガスケット
取付状態



金製プレートガスケット
(O.D118mm, 0.5mmt)



金製プレートガスケット
取付状態



金製ワイヤガスケット
(O.D98mm, 1mmφ)



金製ワイヤガスケット
取付状態

図 5-1 高温体腐食シールの選定候補

シール性試験

シール性試験状況

真空過熱炉

試験条件：
 室温及び70°C～500°Cのヒートサイクル3回
 外圧：真空 内圧：最大4MPa

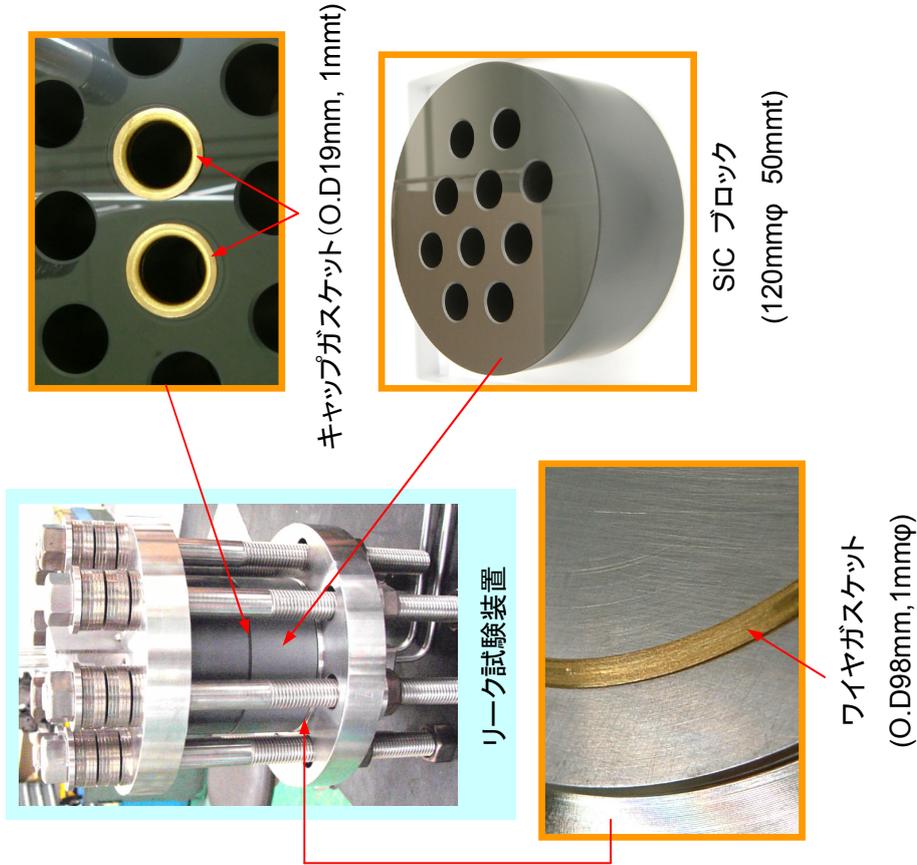


図 5-2 高温シール性試験装置

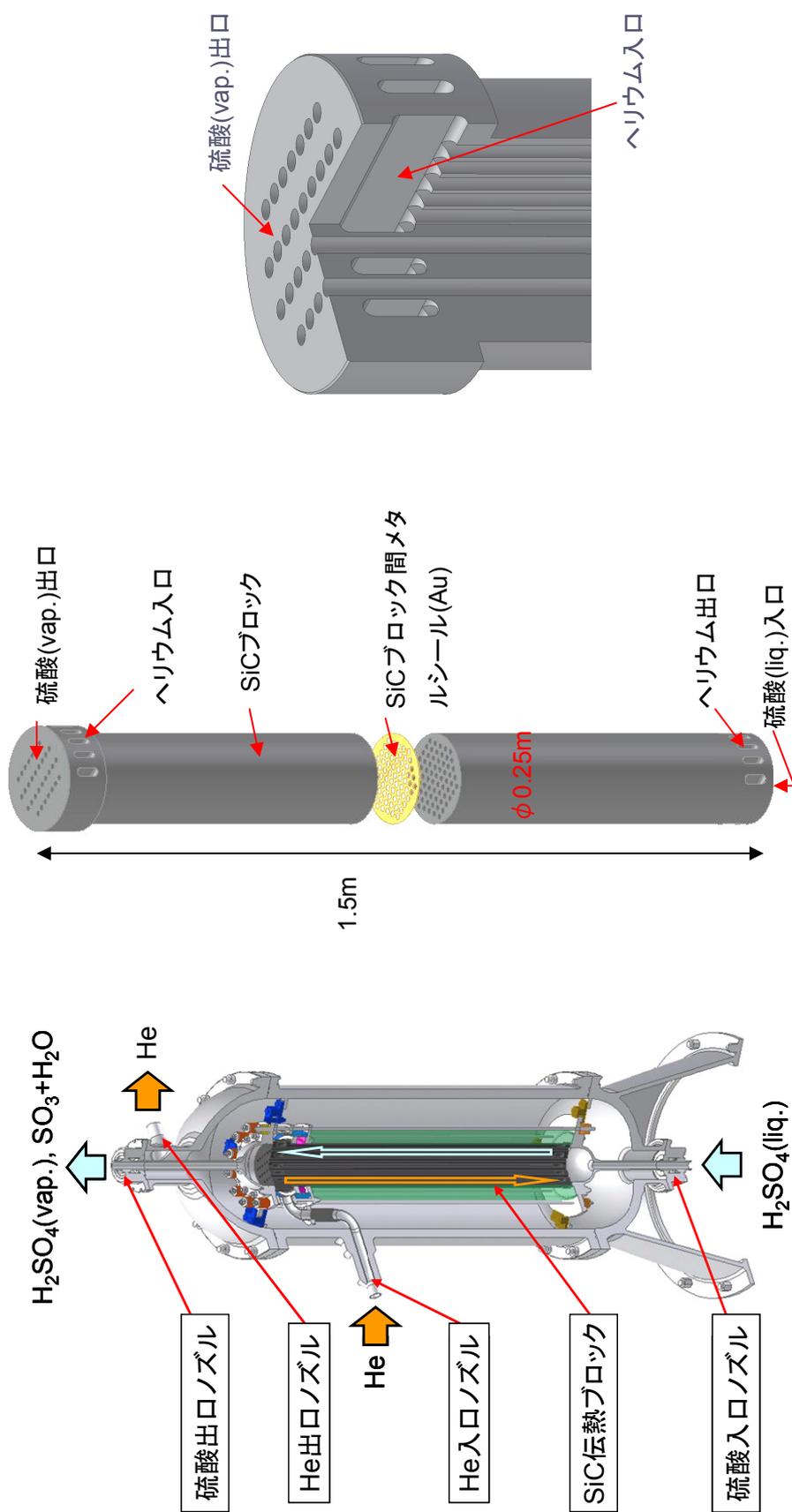
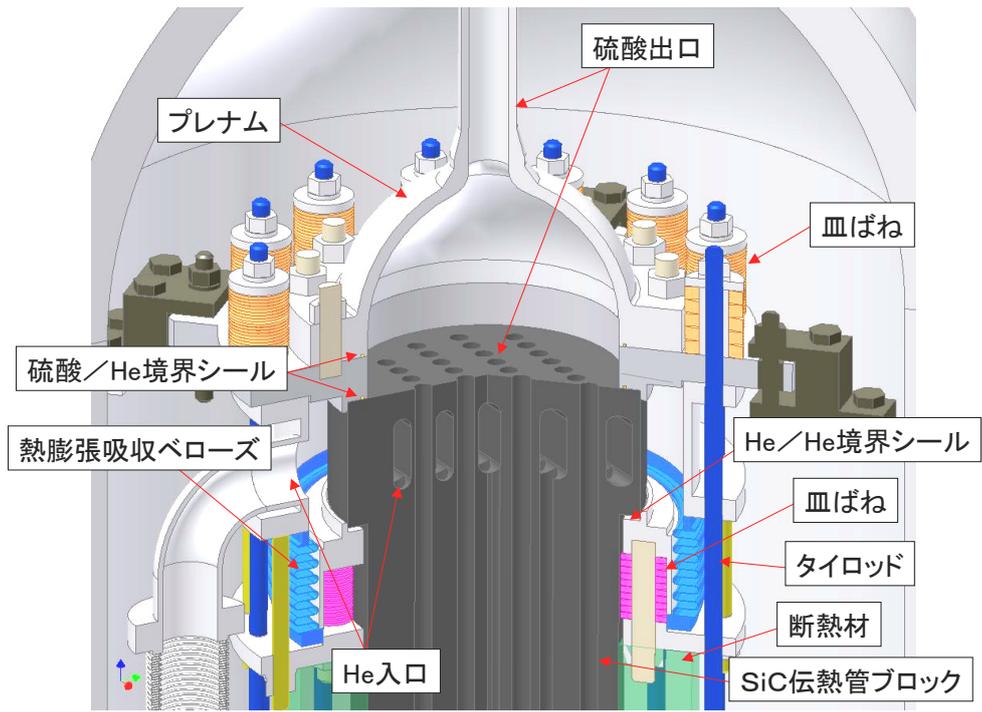
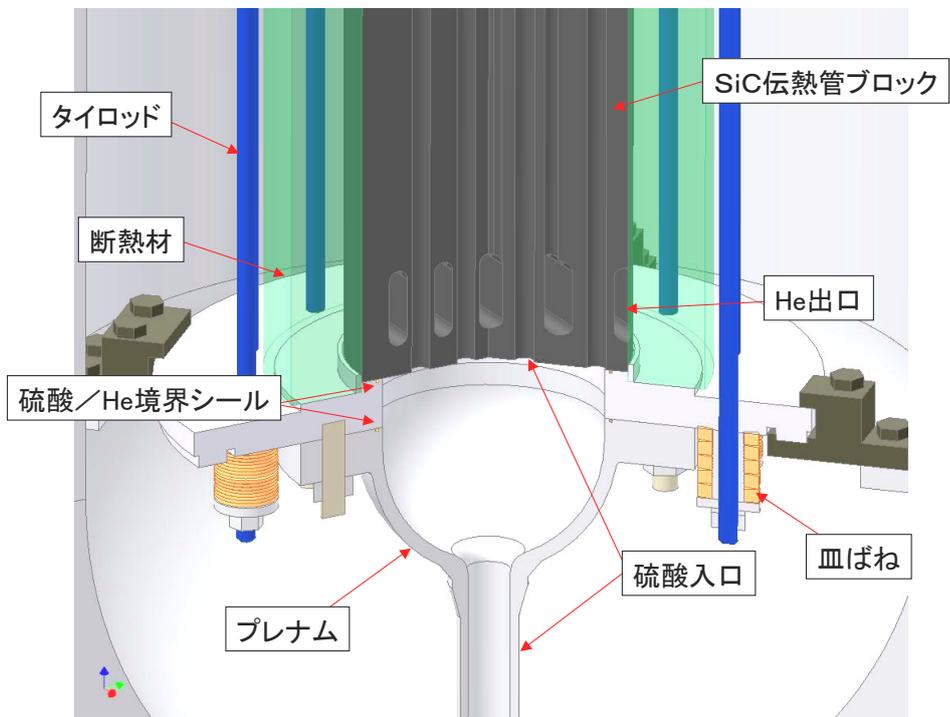


図 6.1-1 硫酸分解器の主要構造概念図(1/2)



(a) 上部プレナム部



(b) 下部プレナム部

図 6.1-1 硫酸分解器の主要構造概念図(2/2)

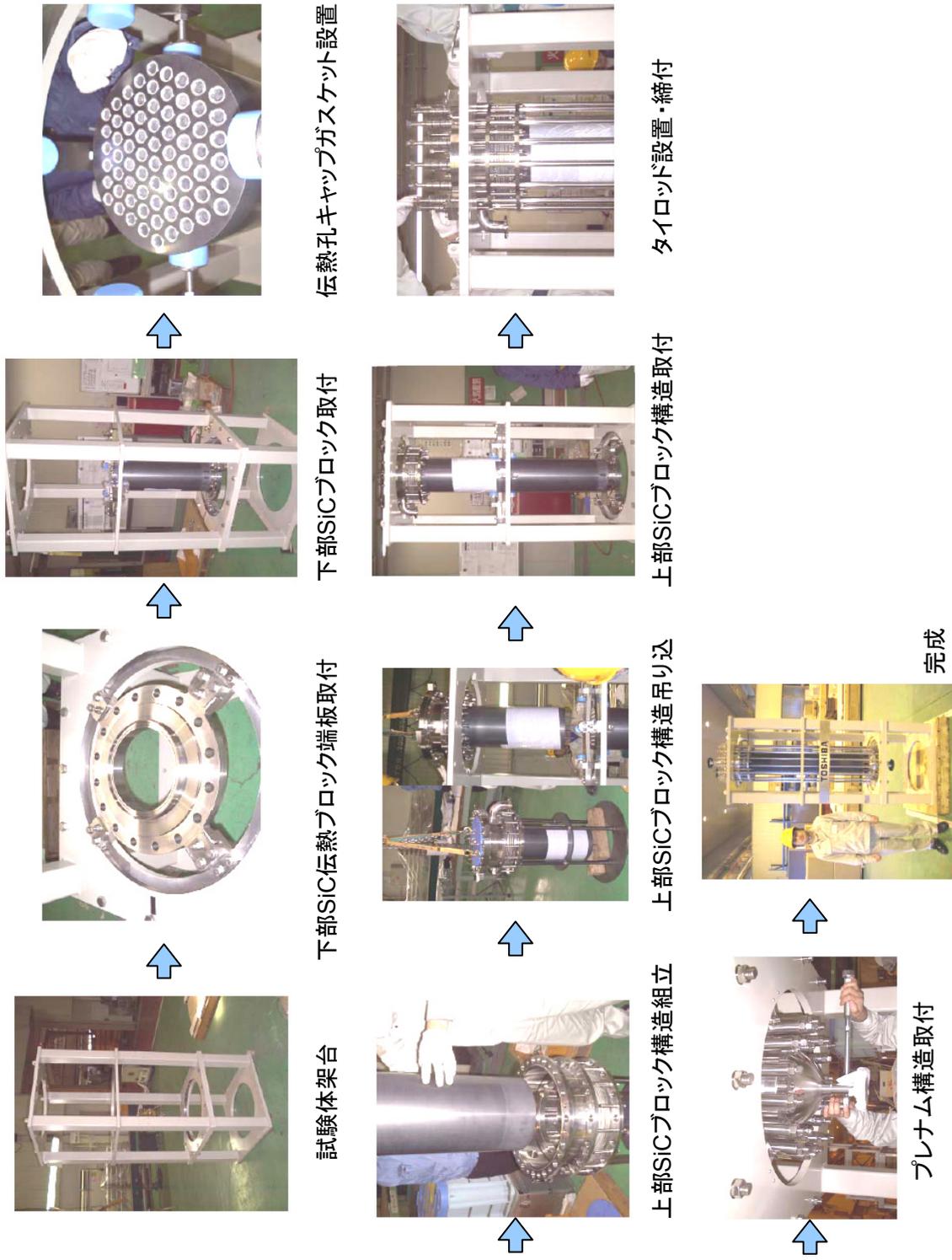


図 6.2-1 硫酸分解器試作試験体組立手順記録写真

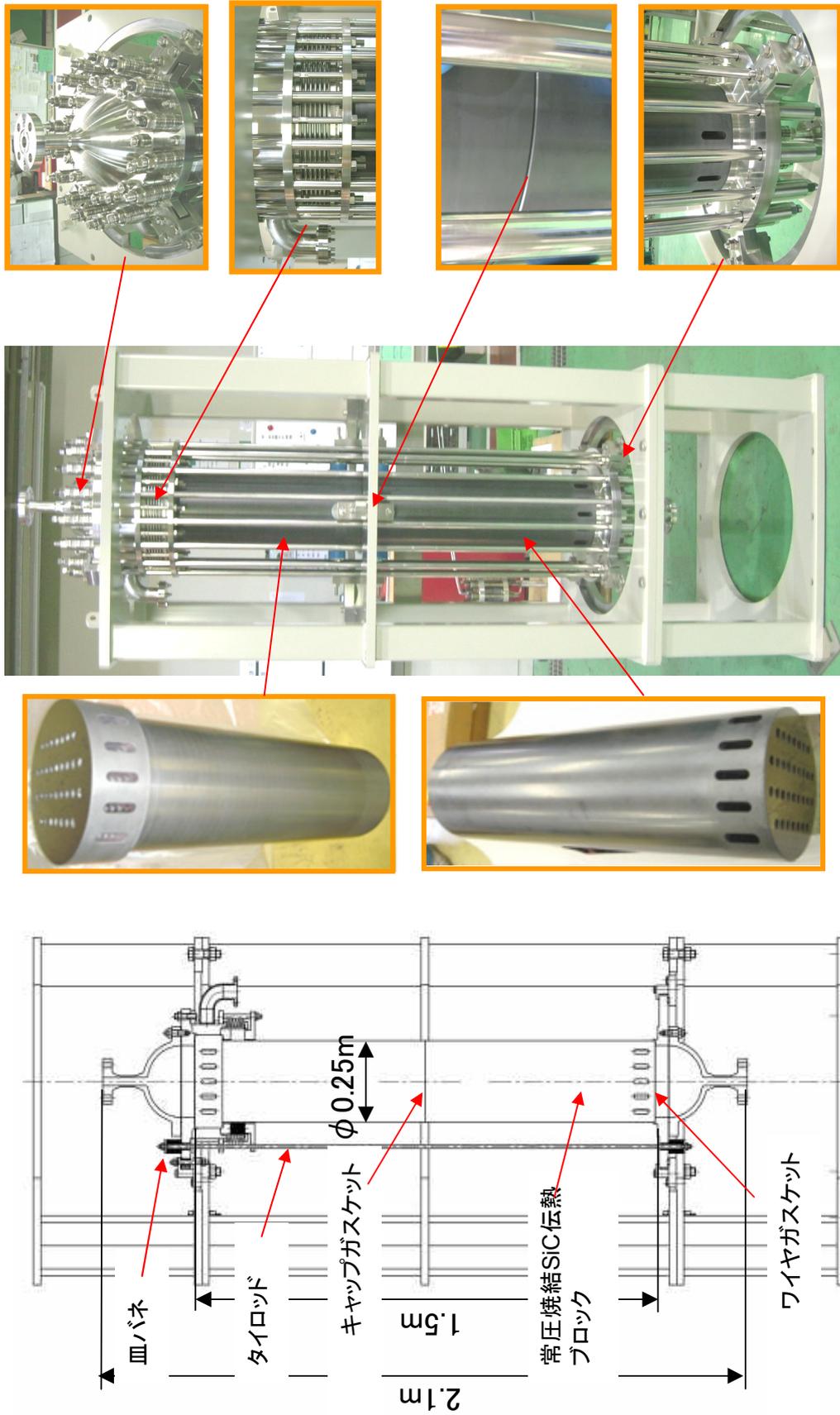


図 6.2-2 硫酸分解器試作試験体写真

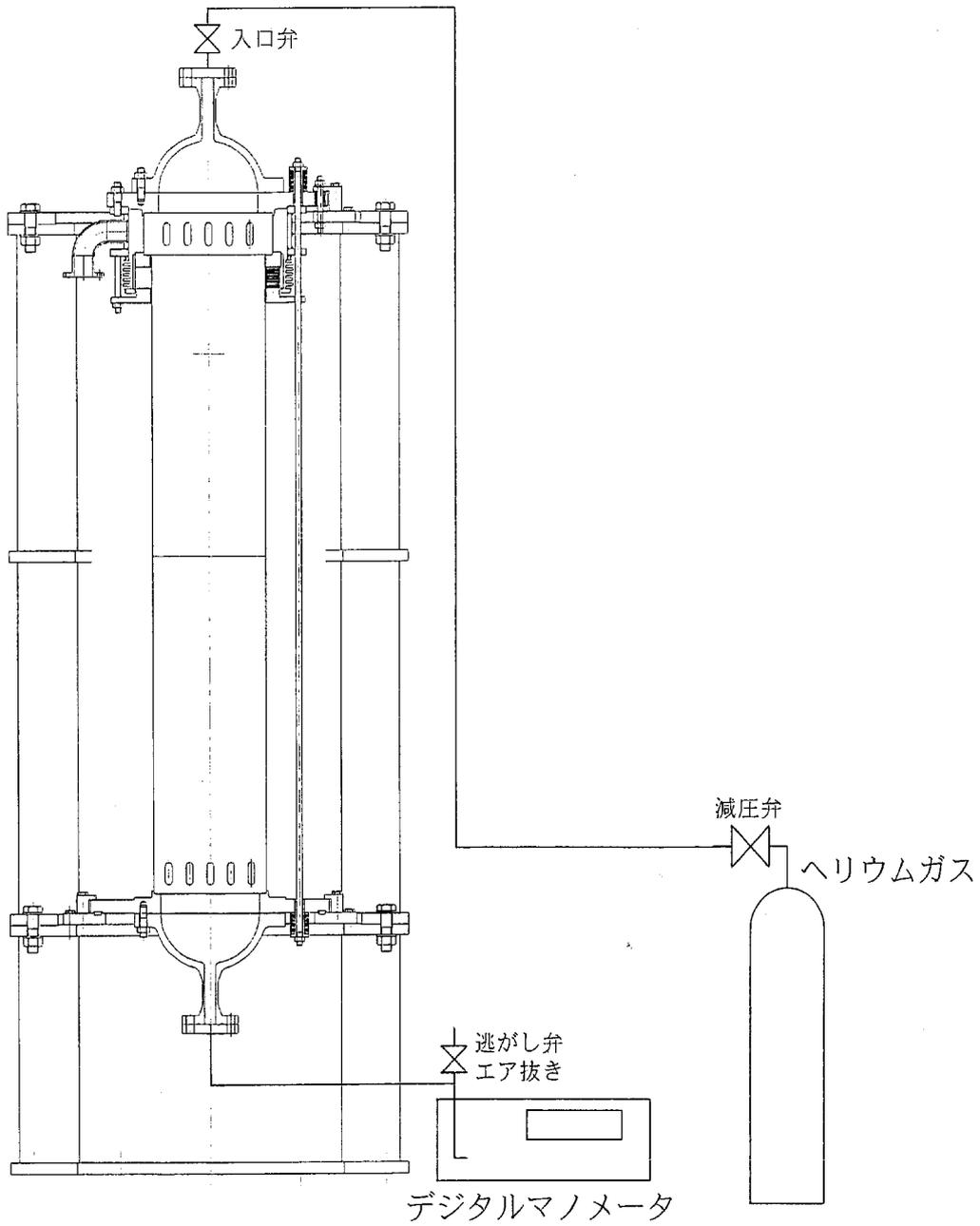


図 6.3-1 硫酸分解器組立性試験体の He リーク試験構成

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 ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度 (質量密度)	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
質量体積 (比体積)	立法メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
(物質の)濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率	(数の) 1	1

表5. SI 接頭語

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

表3. 固有の名称とその独自の記号で表される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 ^(a)	rad		m ² ・m ⁻¹ =1 ^(b)
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)		m ² ・m ⁻² =1 ^(b)
周波数	ヘルツ	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ ・kg ⁻¹ ・s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N・m	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻²
工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s ² ・A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ ・A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ ・A ⁻²
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ³ ・A ²
磁束	ウェーバ	Wb	V・s	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg ⁻¹ ・s ⁻² ・A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・A ⁻²
セルシウス温度 ^(d)	セルシウス度	°C		K
光照射度	ルーメン	lm	cd・sr ^(c)	m ² ・m ⁻² ・cd=cd
放射能	ベクレル	Bq	lm/m ²	m ² ・m ⁻¹ ・cd=m ⁻² ・cd
吸収線量, 質量エネルギー当量, カーマ線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量, 組織線量当量	グレイ	Gy	J/kg	s ⁻¹
	シーベルト	Sv	J/kg	m ² ・s ⁻²

- (a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なった性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときにいくつかの用例は表4に示されている。
- (b) 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“1”は明示されない。
- (c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。
- (d) この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含む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
力のモーメント	パスカル秒	Pa・s	m ⁻¹ ・kg ⁻¹ ・s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N・m	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg ⁻¹ ・s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m ² ・m ⁻¹ ・s ⁻¹ =s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²	m ² ・m ⁻¹ ・s ⁻² =s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg ⁻¹ ・s ⁻³
質量熱容量 (比熱容量), 質量エントロピー	ジュール毎キログラム	J/K	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・K ⁻¹
質量エネルギー (比エネルギー)	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² ・s ⁻² ・K ⁻¹
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m・K)	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ ・K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ ・kg ⁻¹ ・s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ ・A ⁻¹
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ ・s ² ・A
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² ・s ² ・A
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m ⁻³ ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・mol ⁻¹
モルエントロピー	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol・K)	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・K ⁻¹ ・mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ ・s ² ・A
吸収線量	グレイ毎秒	Gy/s	m ² ・s ⁻³
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ ・m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ =m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² ・sr)	m ² ・m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ =kg ⁻¹ ・s ⁻³

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
リットル	l, L	1 l=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg
ネーパ	Np	1 Np=1
ベル	B	1 B=(1/2) ln10 (Np)

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位で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 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.60217733(49)×10 ⁻¹⁹ J
統一原子質量単位	u	1 u=1.6605402(10)×10 ⁻²⁷ kg
天文単位	ua	1 ua=1.49597870691(30)×10 ¹¹ m

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里		1 海里=1852m
ノット		1 ノット=1 海里毎時=(1852/3600)m/s
アール	a	1 a=1 dam ² =10 ² m ²
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 ⁵ Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=10 ⁻¹⁰ m
バール	b	1 b=100fm ² =10 ⁻²⁸ m ²

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn・s/cm ² =0.1Pa・s
ストークス	St	1 St=1cm ² /s=10 ⁻⁴ m ² /s
ガウス	G	1 G=10 ⁴ T
エルステッド	Oe	1 Oe=(1000/4π)A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx=10 ⁻⁸ Wb
スチル	sb	1 sb=1cd/cm ² =10 ⁴ cd/m ²
ホト	ph	1 ph=10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm/s ² =10 ⁻² m/s ²

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1cSv=10 ⁻² Sv
X線単位		1 X unit=1.002×10 ⁻⁴ nm
ジャンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
ジャンスキー	Jy	1 Jy=10 ⁻²⁶ W・m ⁻² ・Hz ⁻¹
フェルミ		1 fermi=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 metric carat=200 mg=2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101325/760) Pa
標準気圧	atm	1 atm=101325 Pa
カロリー	cal	
マイクロン	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m

