

## 熱化学水素製造法ISプロセス用SO<sub>3</sub>分解器の開発

— SiCプレート型SO<sub>3</sub>分解器の基本設計及びSO<sub>3</sub>分解触媒の試験結果 —

Development of SO<sub>3</sub> Decomposer for Thermochemical Hydrogen Production  
by IS Process

- Basic Design of SiC Plate-type SO<sub>3</sub> Decomposer and Catalyst Test Results -

金川 昭宏\* 今井 良行 寺田 敦彦 小貫 薫  
日野 竜太郎

Akihiro KANAGAWA\*, Yoshiyuki IMAI, Atsuhiko TERADA, 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

September 2007

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

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 プロセス用 SO<sub>3</sub> 分解器の開発  
—SiC プレート型 SO<sub>3</sub> 分解器の基本設計及び  
SO<sub>3</sub> 分解触媒の試験結果—

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  
金川 昭宏\*<sup>1</sup>、今井 良行、寺田 敦彦、小貫 薫、日野 竜太郎

(2007 年 4 月 16 日受理)

熱化学法 IS プロセスは、地球温暖化ガスである二酸化炭素を排出することなく大量の水素を効率的に製造することが可能であり、高温ガス炉からの核熱を熱源として使用する。IS プロセスは強酸である硫酸やヨウ化水素酸を高温高圧下で使用する。このため、耐熱性に加えて耐腐食性の材料で大型化学反応器の開発が必須である。三酸化硫黄 (SO<sub>3</sub>) 分解器は IS プロセスの重要な機器の一つであり、高温の He ガスを用いて最高 850℃の温度条件で、硫酸蒸気を SO<sub>3</sub> に分解した後、触媒で酸素と二酸化硫黄 (SO<sub>2</sub>) に分解する。SO<sub>3</sub> 分解器は極めて腐食性の強い SO<sub>3</sub> と SO<sub>2</sub> ガスに晒されるが、この条件では SiC セラミックスが極めて良い耐食性を示す。しかしながら、商用プラントで要求される大型の SiC 構造物を製作するのは、現状技術では極めて困難である。

この SO<sub>3</sub> 分解器について、SiC セラミックス製のプレート型熱交換器構造を提案した。大型化は、熱交換ユニットを直列に接続することで容易に達成することができる。この概念の製作性を検証するために、モックアップモデル（構造要素試作体）を試作した。試作を通して、大型化における組立て時の課題を明らかにした。並行して、SO<sub>3</sub> 分解器に用いる触媒充填層の仕様を明確にするために、触媒反応試験を行った。本報告では、提案した SO<sub>3</sub> 分解器構造とその熱・機械特性の解析評価結果、モックアップモデルの試作、触媒試験結果等について述べる。

---

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（旧原子力研究所）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。

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

\*1 三菱重工業(株)

Development of SO<sub>3</sub> Decomposer for Thermochemical Hydrogen Production  
by IS Process

— Basic Design of SiC Plate-type SO<sub>3</sub> Decomposer and Catalyst Test Results —

Akihiro KANAGAWA\*<sup>1</sup>, Yoshiyuki IMAI, Atsuhiko TERADA,  
Kaoru ONUKI and Ryutaro HINO

Nuclear Applied Heat Technology Division  
Nuclear Science and Engineering Directorate  
Japan Atomic Energy Agency  
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received April 16, 2007)

Thermo-chemical Iodine-Sulfur (IS) process has a potential to produce large amount of hydrogen without carbon dioxide emission using thermal energy of a high temperature gas-cooled reactor (HTGR). Sulfur-trioxide (SO<sub>3</sub>) decomposer is one of the key components of the IS process, in which SO<sub>3</sub> gas is catalytically decomposed into oxygen (O<sub>2</sub>) and sulfur dioxide (SO<sub>2</sub>) under high temperature condition up to 850°C using the sensible heat of helium gas. The decomposer is exposed to the severe corrosive condition, where SiC ceramics shows good corrosion resistance. However, it is very difficult to manufacture large-size SiC ceramics structure required in the commercial plant.

We have proposed a new concept of the decomposer, which featured a plate-type heat exchanger made of SiC ceramics. The concept ensures the scale-up by connecting the heat exchanger units in series. To examine the fabricability of the proposed concept, a mock-up model was test-fabricated. Through the test-fabrication, issues on the fabricability of large-sized heat-exchanger-type SO<sub>3</sub> decomposer using SiC ceramics were clarified. Also, preliminary catalyst tests were carried out to clarify catalyst bed specification of the SO<sub>3</sub> decomposer. This report describes the proposed structure, results of thermal-hydraulic and mechanical strength analysis, the mock-up model test-fabrication, and the catalyst tests.

Keywords: Hydrogen, Thermochemical, IS-process, HTGR, Sulfur Trioxide Decomposer,  
SiC, Mock-up Model, Analytical Result, Catalyst Test

---

This work was carried out under the contract of research between JAEA(JAERI) and the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology in Japan.

\* 1 Mitsubishi Heavy Industries Ltd.

目 次

1. はじめに	1
2. SiC セラミクスプレート型 SO <sub>3</sub> 分解器の基本設計	2
2. 1 設計条件	2
2. 2 SO <sub>3</sub> 分解器の形式	2
2. 3 伝熱評価式	2
2. 4 計算結果と基本構造	3
3. セラミクスプレート型 SO <sub>3</sub> 分解器の構造成立性検討	5
3. 1 基本構造における予備解析	5
3. 2 改善条件における熱流動解析	5
3. 3 改善条件における熱応力解析	5
4. 構造要素試作体の製作・評価	13
4. 1 試作体の製作	13
4. 2 試作体の評価	13
5. ISI 検査基準・手法の調査	17
5. 1 調査の目的	17
5. 2 検査基準、手法の調査	17
6. SO <sub>3</sub> 分解触媒性能評価試験	23
6. 1 試験装置の構成	23
6. 2 試験装置仕様	23
6. 3 主要機器の構造・外観	24
6. 4 第1回実液試験	24
6. 5 第2回実液試験	25
7. SO <sub>3</sub> 分解ガス凝縮液の分析	42
7. 1 分析の目的	42
7. 2 実施内容	42
7. 3 分析結果	43
7. 4 考察	44
7. 5 分析結果のまとめ	45
8. まとめ	53
謝辞	53
参考文献	53

## Contents

1. Introduction	1
2. Basic design of the SiC ceramics plate type SO <sub>3</sub> decomposer	2
2.1 Design conditions	2
2.2 Specifications of the SO <sub>3</sub> decomposer	2
2.3 Equation of heat transfer	2
2.4 Result of calculation and basic design	3
3. Structural analysis of the SiC ceramics plate type SO <sub>3</sub> decomposer	5
3.1 Preliminary analysis for original design	5
3.2 Thermal-hydraulic analysis for modified design	5
3.3 Thermal stress analysis for modified design	5
4. Experimental manufacture	13
4.1 Making a prototype SO <sub>3</sub> decomposer	13
4.2 Estimation of prototype SO <sub>3</sub> decomposer	13
5. Survey of inspection standard and method for ISI	17
5.1 Objectives	17
5.2 Result of the survey	17
6. Preliminary test of SO <sub>3</sub> decomposition catalysts	23
6.1 Flow diagram of the test facility	23
6.2 Specifications of the test facility	23
6.3 Structural drawings of the main components	24
6.4 SO <sub>3</sub> decomposition test (1 <sup>st</sup> )	24
6.5 SO <sub>3</sub> decomposition test (2 <sup>nd</sup> )	25
7. Chemical analysis of the condensate of SO <sub>3</sub> decomposition gas	42
7.1 Objectives	42
7.2 Analytical item	42
7.3 Results of the analysis	43
7.4 Discussion	44
7.5 Summary	45
8. Concluding remarks	53
Acknowledgements	53
References	53

## 1. はじめに

日本原子力研究開発機構（原子力機構）では、高温ガス炉から得られる 1000℃以下の核熱を用いて水を分解して水素を製造する熱化学水素製造法、具体的には、硫黄とヨウ素を循環物質とする I S (Iodine-Sulfur) プロセスの開発研究を進めている。これまでに、I S プロセスの基本反応及び分離操作を組み合わせた実験室規模の水素製造実験が行われ、反応に関与する硫酸やヨウ素などの循環物質をほとんど損なうことなく連続的に水を分解できることが実証されている。(1)

SO<sub>3</sub> 分解器は、硫酸分解器で得られる高温の硫酸分解ガス (SO<sub>3</sub> 等) をさらに加熱して触媒環境下で SO<sub>3</sub> を SO<sub>2</sub> と O<sub>2</sub> に分解するための装置であり、高温ガス炉 (HTGR) からの He と直接熱交換を行う IS プロセスでも特に主要な機器の 1 つである。

SO<sub>3</sub> の分解反応は約 850℃での吸熱反応であるので、高温ガス炉から得られる高温・高圧の He を熱源として利用する。また、反応を促進するための触媒を流路内に保持することも必要となる。このような、高温・高圧かつ腐食環境下において使用できる材料は特殊耐熱合金若しくはセラミクスに限られる。このため、SO<sub>3</sub> 分解器には、高温・高圧かつ腐食環境に耐える材料を使用し、必要な熱交換性能、耐圧・気密性能を維持できることが求められる。

この SO<sub>3</sub> 分解器について候補材料の検討を行った結果、850℃を越す高温環境下でも耐食性に優れ、クリープ変形がなく、熱伝導率が金属並みに高い SiC セラミクスを選定した。さらに、SO<sub>3</sub> 分解器の構造については、He との伝熱効率が高く小型化が見込めるプレート型熱交換方式の SO<sub>3</sub> 分解器がパイロットプラントに適用可能と判断し、SiC セラミクス製 SO<sub>3</sub> 分解器構造体の製作性等について評価を行うこととした。具体的には、SO<sub>3</sub> 分解器の基本設計、および、その熱・機械特性の解析を行い、モックアップモデル（構造要素試験体）を試作した。また、この過程を通して大型化における組立て時の課題や構造の成立性、製作精度等々を評価した。加えて、供用中試験検査 (ISI) の前提条件としてセラミクス構造体の強度特性を整理し、検査に適用可能な非破壊検査技術の評価した。

並行して、SO<sub>3</sub> 分解反応に用いる触媒の性能を把握し触媒充填層の設計仕様を明らかにするために触媒反応試験を行うこととした。このため、IS プロセスの硫酸分解ループを模擬した要素試験装置を製作し、触媒性能評価試験を実施した。この装置は、SO<sub>3</sub> の分解反応温度、プロセスガスの空間速度などをパラメータとして、SO<sub>3</sub> の分解率、触媒の寿命、副反応の有無などを評価することが可能なものである。

本報は、パイロット試験装置に必要な設計データを取得することを目的として、SO<sub>3</sub> 分解器構造とその熱・機械特性の解析評価結果、構造要素試験体の評価、ISI への適用を前提とした非破壊検査方法の検証を行った結果、並びに、SO<sub>3</sub> 分解触媒特性の評価結果について取りまとめたものである。

## 2. SiC セラミクスプレート型 SO<sub>3</sub> 分解器の基本設計

### 2. 1 設計条件

SO<sub>3</sub> 分解器組立性試験の供試体の仕様を決定するため、パイロット試験装置に適用する SO<sub>3</sub> 分解器の形式、基本構造、伝熱計算および材料選定といった基本設計を行った。SO<sub>3</sub> 分解器の基本設計には、表 2.1 及び表 2.2 に示す設計条件を採用した。SO<sub>3</sub> 分解器の触媒量は、小貫らの試験データ<sup>(2)</sup>を参考に標準 SV 値（標準状態の処理ガス量/触媒容積）10000h<sup>-1</sup>以下で設計する。

### 2. 2 SO<sub>3</sub> 分解器の形式

SO<sub>3</sub> 分解器構造はプレート積層型を採用し、流体方向は He とプロセスの温度条件から対向流形式とする。図 2.1 にセラミクスプレート型 SO<sub>3</sub> 分解器の構造概念を示す。

He 側流路は耐差圧の強度向上と伝熱促進を図るために、円柱形のサポートフィンを配した構造とし、プロセス側は耐差圧の保持と触媒を担持した球形の担体を充填することを考慮し、極力大径とした φ12mm の円筒形状の流路を採用している。全体構造としては製作性、耐震性、ハンドリング性を考慮して、均等な形状となるよう基本構造は以下を目安とし、必要な伝熱面積、触媒量を確保するためのスタック段数を決定した。

- ・プレート幅           214mm
- ・プレート高さ       120mm
- ・プロセスプレート数 6
- ・He プレート数 7

### 2. 3 伝熱評価式

伝熱式は下記評価式を採用する。

$$Q = U \times A \times LMTD$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{t}{\lambda_m} + \frac{1}{\alpha_2}}$$

$$LMTD = \frac{(T_{1i} - T_{2o}) - (T_{1o} - T_{2i})}{\ln \left\{ \frac{(T_{1i} - T_{2o})}{(T_{1o} - T_{2i})} \right\}}$$

$$\alpha_1 = \frac{\lambda Nu}{d}$$

$$Nu_1 = 3.66 + \frac{0.0668 \left( Re \ Pr \ \frac{d}{l} \right)}{1 + 0.04 \left( Re \ Pr \ \frac{d}{l} \right)^{2/3}}$$

$$Re_1 = \frac{vDe}{\nu}$$



ここで

$Q$ : 交換熱量 [W]

$A$ : 伝熱面積 [m<sup>2</sup>]

$U$ : 熱通過率 [W/m<sup>2</sup>°C]

$K$ : 汚れ係数 [-]

$\alpha$ : 熱伝達率 [W/m<sup>2</sup>°C]

$t$ : プレート厚さ [m] = 0.006

$\lambda_m$ : プレート熱伝導率 [W/mK] = 40

$d$ : 代表長さ [m]

$T$ : 温度 [°C]

$\lambda$ : 熱伝導率 [W/mK]

$Nu$ : ヌセルト数

$Re$ : レイノルズ数

$Pr$ : プラントル数

$v$ : 流速 [m/s]

$\nu$ : 動粘度 [m<sup>2</sup>/s]

添字 1: ヘリウム側、2: 硫酸側、 $i$ : 入口、 $o$ : 出口

プロセス側のヌセルト数は充填層における伝熱式を用い、充填層の条件を以下と仮定して評価した<sup>(3)</sup>。また、He側のヌセルト数は円管内層流熱伝達の近似式を用いて評価した<sup>(4)</sup>。

- 充填層の粒子径:  $\phi$  1 mm
- 充填層の空隙率: 0.4
- SiC 粒子放射率: 0.78 (850°Cにおける SiC 放射率<sup>(5)</sup>)

## 2. 4 計算結果と基本構造

伝熱評価の結果、パイロットプラント規模の SO<sub>3</sub> 分解器に必要な伝熱面積は 3.6m<sup>2</sup> でスタック数は 12 段分が必要となる。ただし、SO<sub>3</sub> 分解器は 3 ユニットで構成するため、1 ユニットあたりの構造は 4 段スタック構造を採用とする。

本ユニットでの触媒充填される内容積は 17.64 リットルと想定される。標準 SV 値は  $1.71(\text{mol/s}) \times 22.4(\text{NL/mol}) \times 3600 / (17.64) = 7817\text{h}^{-1}$  と標準 SV 値  $10000\text{h}^{-1}$  以下の条件を満足しており、本構造を採用するものとする。

表 2.1 SO<sub>3</sub>分解器基本条件

	水素製造 30Nm <sup>3</sup> /h 条件
プロセス圧力	2.0 (MPaG)
プロセス流量(プロセス分解原料)	1.217 (mol/s)
プロセス濃度(プロセス分解原料)	90 (wt%)
プロセス側温度(入口/出口)	527/850 (°C)
He 圧力(入口)	4.0 (MPaG)
He 流量	100 (g/s)
He 温度(入口)	880 (°C)

表 2.2 プロセス側流量

モル流量 (mol/s)	入口(527°C)		出口(850°C)	
	H <sub>2</sub> O	0.931	1.210	
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0.286	0.005		
SO <sub>3</sub>	0.441	0.307		
SO <sub>2</sub>	0.032	0.446		
O <sub>2</sub>	0.016	0.223		
合計	1.71	2.19		

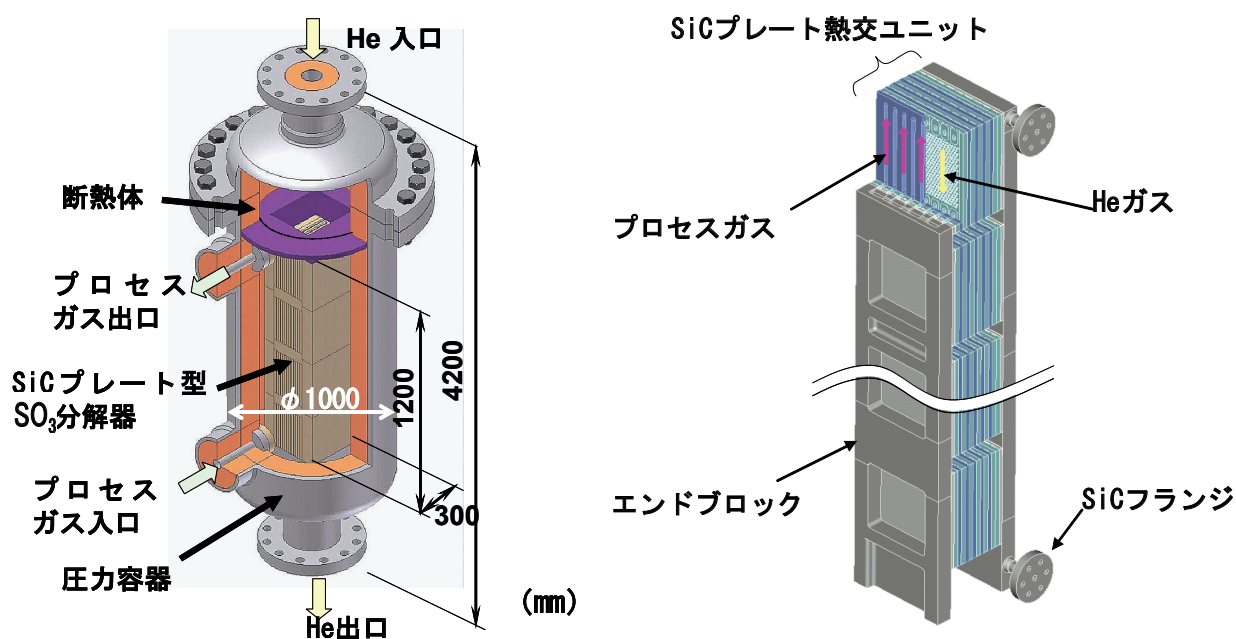


図 2.1 セラミクスプレート型 SO<sub>3</sub>分解器の概念

### 3. セラミクスプレート型 SO<sub>3</sub> 分解器の構造成立性検討

#### 3. 1 基本構造における予備解析

上述の SO<sub>3</sub> 分解器基本構造における予備解析を行った結果、発生応力が材料の許容応力を超過する箇所があることが確認された。許容応力を超過する応力発生する位置は、硫酸側入口部（下段）のみに限定して発生しており、2 段目以降のスタックでの最大発生応力は許容応力に対して十分な余裕がある。

1 段目に高い応力が発生する要因として、流体温度差が大きくなることと、それに伝熱性能が良好で、スタック出入口温度差が大きくなることが考えられる。

そこで SO<sub>3</sub> 分解器を分割し、温度差が大きく発生応力が問題となる硫酸側入口部（下段）のみで He をバイパスし、硫酸側出口部（上段）は計画値のままとした。プロセス条件の計画と変更後の比較を図 3.1 に示す。

硫酸側入口部での He 流量は、計画条件での解析結果を参考とし、発生応力が許容応力以下に収まるよう硫酸側入口部の流体温度差が 50°C 程度となる 19.6g/s に設定した。

熱交換性能の面では、He 流量を減少させたことにより、流体温度差の低下に加えて、流速低下に伴う熱伝達率低下の影響があるため、伝熱性能の変化を伝熱解析結果から求め、必要伝熱量が得られるよう、流量低下部分 SO<sub>3</sub> 分解器を 2 段追加して合計 6 段の構成とし、かつ、He のバイパス構造がとれるように、2 段と 4 段の分割構成とした。

#### 3. 2 改善条件における熱流動解析

許容応力を超過する 1 段目のみを対象として熱流動解析を実施した。解析モデルを図 3.2 に示す。解析コードは STAR-CD Ver.3.15 を使用した。解析結果として SO<sub>3</sub> 分解器流路での流速分布、SO<sub>3</sub> 分解器温度のコンター図を図 3.3 に示す。

硫酸側の流速分布は、プレート積層方向での流速分布が抑制されており、それに伴い、流体の温度差も縮小している効果が認められる。また He 流速分布は計画条件においてもほぼ均等であったが、構造変更により、面内での流速分布がさらに均一化されている効果が認められる。

全体的な温度分布としては、プロセス条件の変更により全体的に温度差が抑制されており、温度の均一化が認められる。

本解析結果である SO<sub>3</sub> 分解器の温度分布は次項に示す構造解析の温度条件として使用し、SO<sub>3</sub> 分解器設計に反映する。

#### 3. 3 改善条件における熱応力解析

構造解析も熱流動解析と同様に、許容応力を超過する 1 段目のみを対象として実施した。複雑形状である He 流路のサポートフィン部を評価するために、別途、詳細単プレートモデルの構造解析により等価剛性と応力集中係数を求めた。得られた等価剛性を He 流路部に条件として与えてスタック一体の構造解析を実施し、応力集中係数については解析結果の評価で用いている。解析モデルを図 3.4 に示す。解析コードは、ABAQUS Ver.6.3 を使用した。

構造物に負荷される荷重には、熱流動解析によって得られた SO<sub>3</sub> 分解器温度分布による熱荷

重と静差圧荷重の2種類を考慮する。差圧については運転圧力である硫酸側圧力 2.0MPa、He 側圧力 4.0MPa の静差圧荷重を与えた。

SO<sub>3</sub>分解器全体の応力コンター図を図 3.5 に示す。SO<sub>3</sub>分解器の外表面では問題となる応力の発生は認められない。しかし、硫酸側と He 流路が近距離となり温度差が大きくなりやすい内部流路では応力のピークが認められ、特に低温流体が供給される硫酸側入口部で応力が高い傾向にある。発生応力の判定基準は SiC 材許容応力から母材部で 8.2kg/mm<sup>2</sup> (81MPa) を採用した。

熱応力と静差圧の複合で発生する応力については全て許容応力以下となり、通常運転条件においては、十分な強度を持つものと評価できる。以上の解析結果から、SiC プレート型熱交換器の構造成立性に目処が得られたものと評価できる。

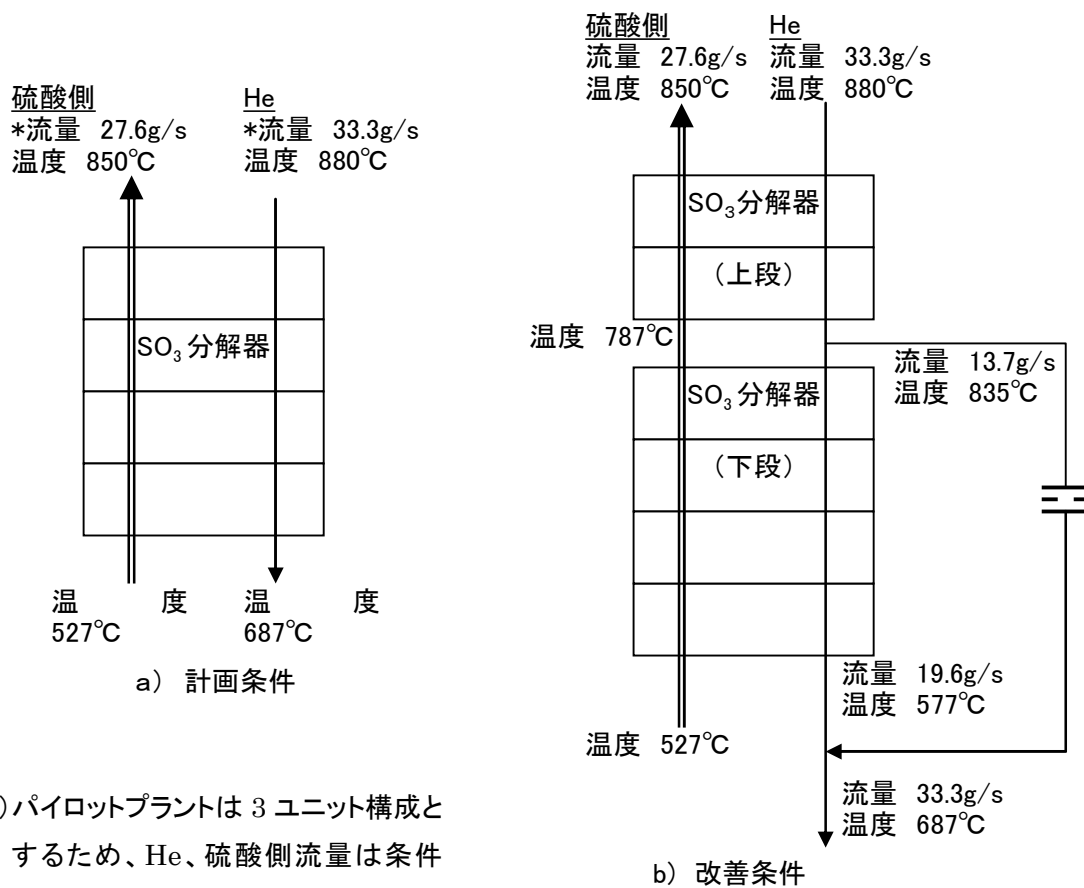
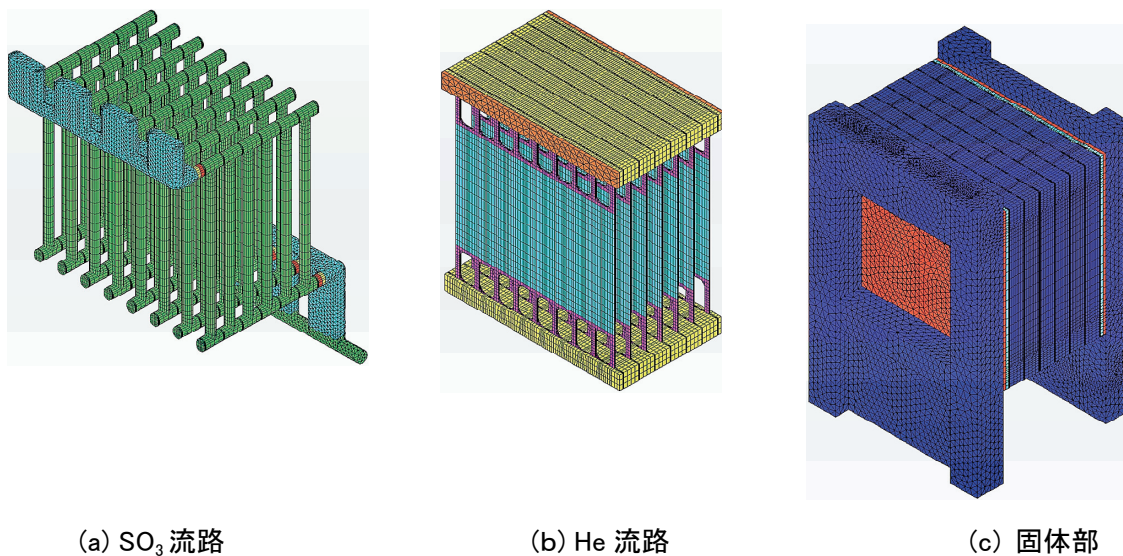


図 3.1 プロセスの計画条件と改善条件の比較

This is a blank page.

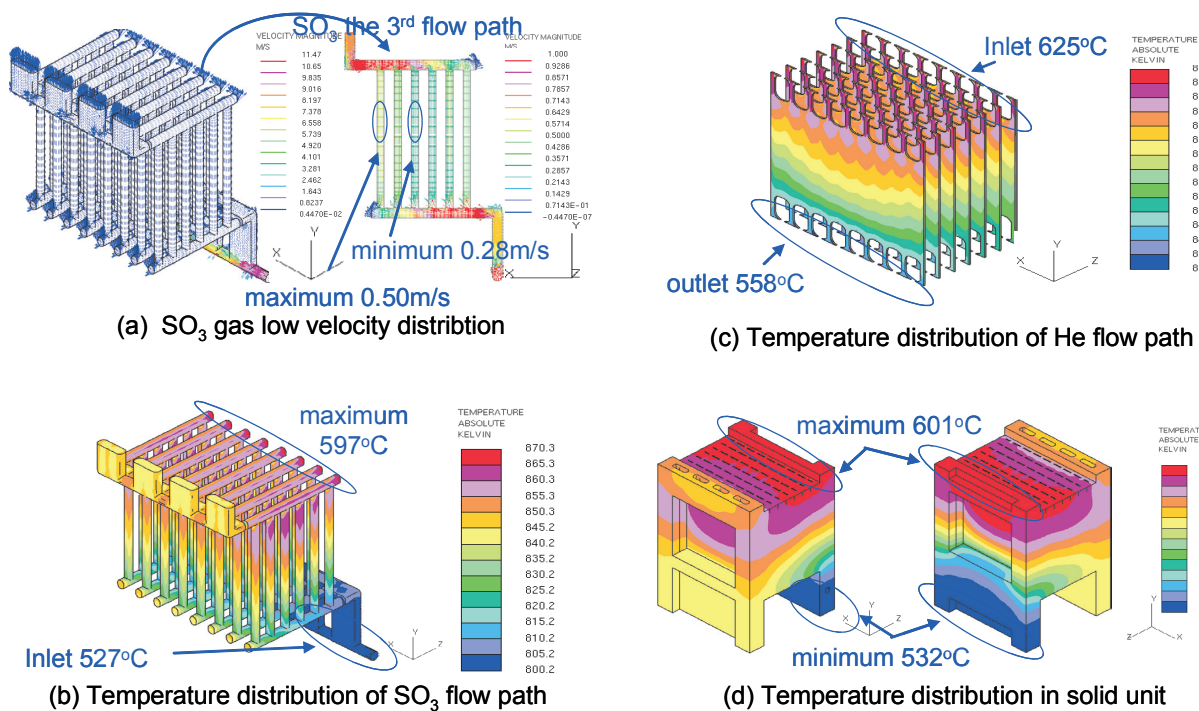


(a) SO<sub>3</sub> 流路

(b) He 流路

(c) 固体部

図 3.2 SO<sub>3</sub>分解器の熱流動解析モデル



(a) SO<sub>3</sub> gas low velocity distribution

(c) Temperature distribution of He flow path

(b) Temperature distribution of SO<sub>3</sub> flow path

(d) Temperature distribution in solid unit

図 3.3 SO<sub>3</sub>分解器（1 段階）流路での流速分布、SO<sub>3</sub>分解器温度分布解析結果

This is a blank page.



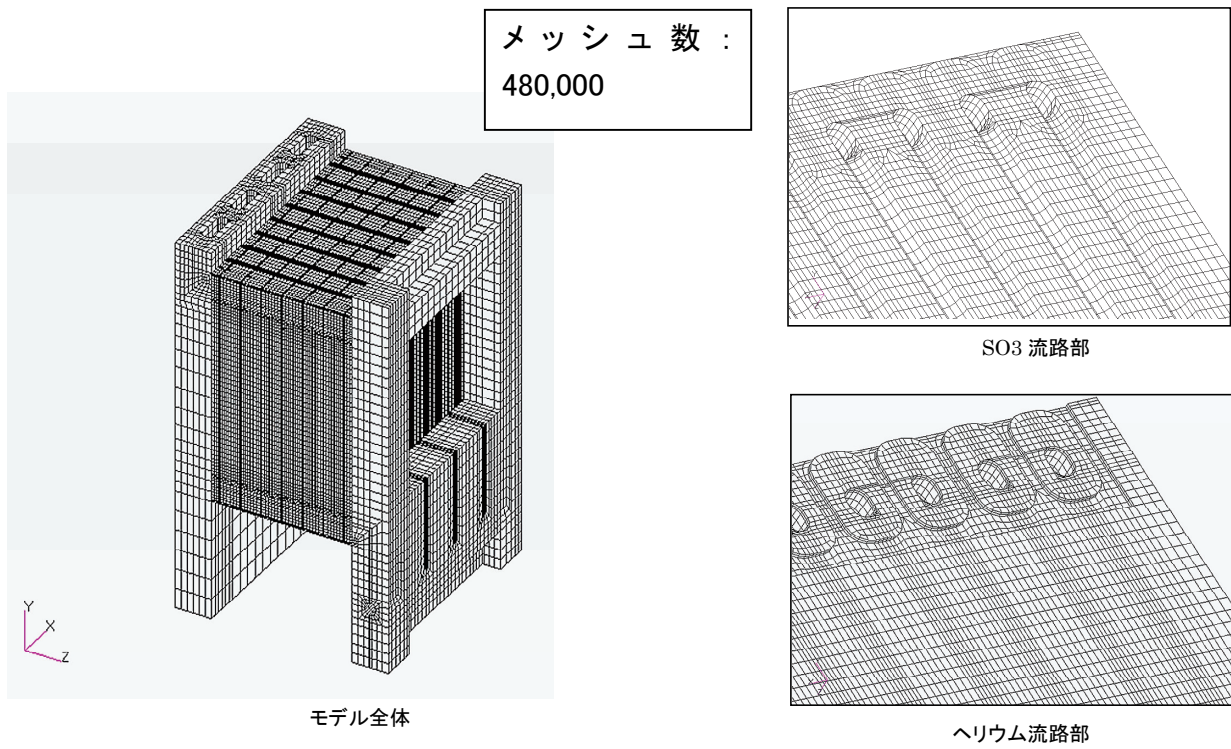


図 3.4 SO<sub>3</sub>分解器熱応力分布の解析モデル

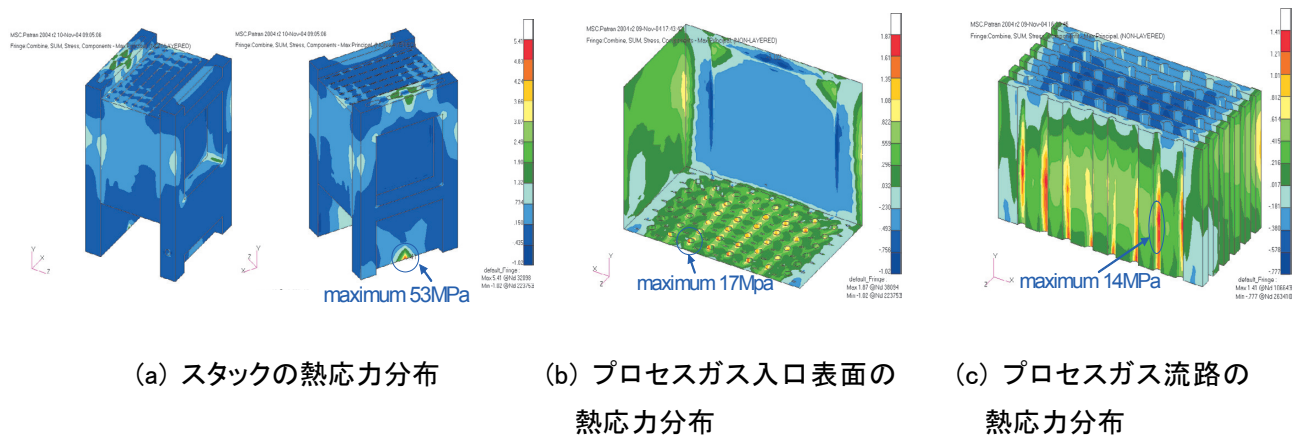


図 3.5 SO<sub>3</sub>分解器全体（1 段目）の応力分布解析結果

This is a blank page.

## 4. 構造要素試作体の製作・評価

### 4. 1 試作体の製作

上述の解析結果を基に、構造要素試作体の構造を検討した。試作体は、構造の成立性、製作精度等を評価するために製作するものであり、以下の要件を満たす必要がある。試作した SiC プレート型 SO<sub>3</sub> 分解器の構造図及び外観をそれぞれ図 4.1 及び図 4.2 に示す。

- ・ 複数の He 及びプロセスの流路を有すること。
- ・ 複数のユニットをエンドプレートで接続していること。
- ・ プロセスガス用のノズルを有していること。

### 4. 2 試作体の評価

試作した SO<sub>3</sub> 分解器の構造成立性確認のため、油圧シリンダーで負荷をかけ、試作体の変位をレーザー変位計等で計測する荷重負荷試験を行った。

今回試作した SiC プレート型 SO<sub>3</sub> 分解器は、セラミクスメーカーの大型製品の製造実績に比べて重量で約 20 倍、断面積で 30 倍もの大きさがある。大型のセラミクス構造体は微細欠陥を内包する確率が高くなること、焼結時の昇降温で膨張・収縮する量が増加することなどから、製作時に欠陥が生じる可能性が高いことが想定されており、今回の試作体についてもプレートを重ねたユニット同士を接続する部分で欠陥が生じ易いことが判明した。ただし、1 ユニットでの製作性には見通しが得られていることから、ユニット間を金シール等で圧着接合する構造を採用することにより、歩留まり低下させることなく大容量化することが可能と考えられる。

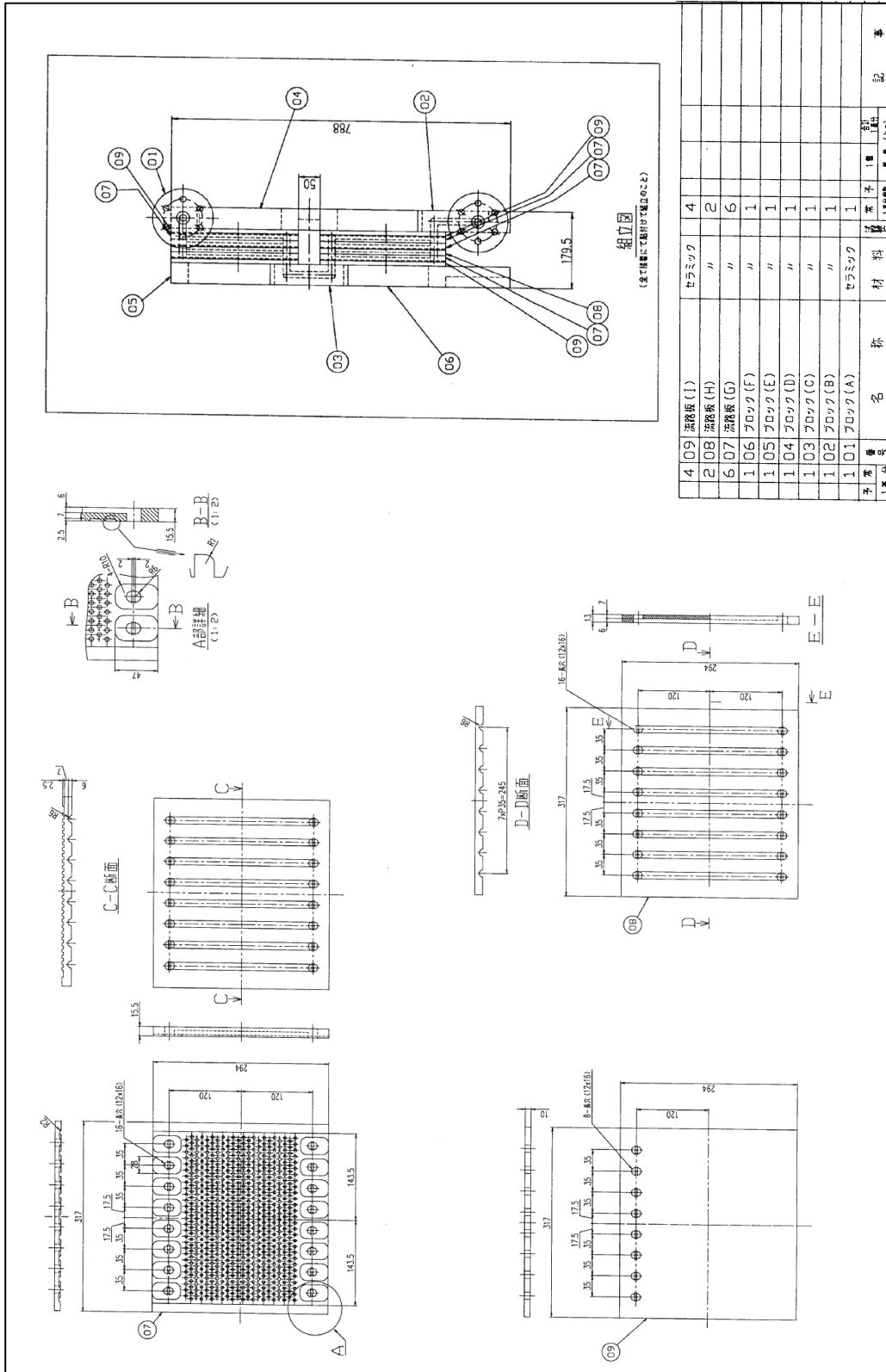


図 4.1 SiCプレート型 SO<sub>3</sub>分解器 構造要素試作体の構造図 (1/2)

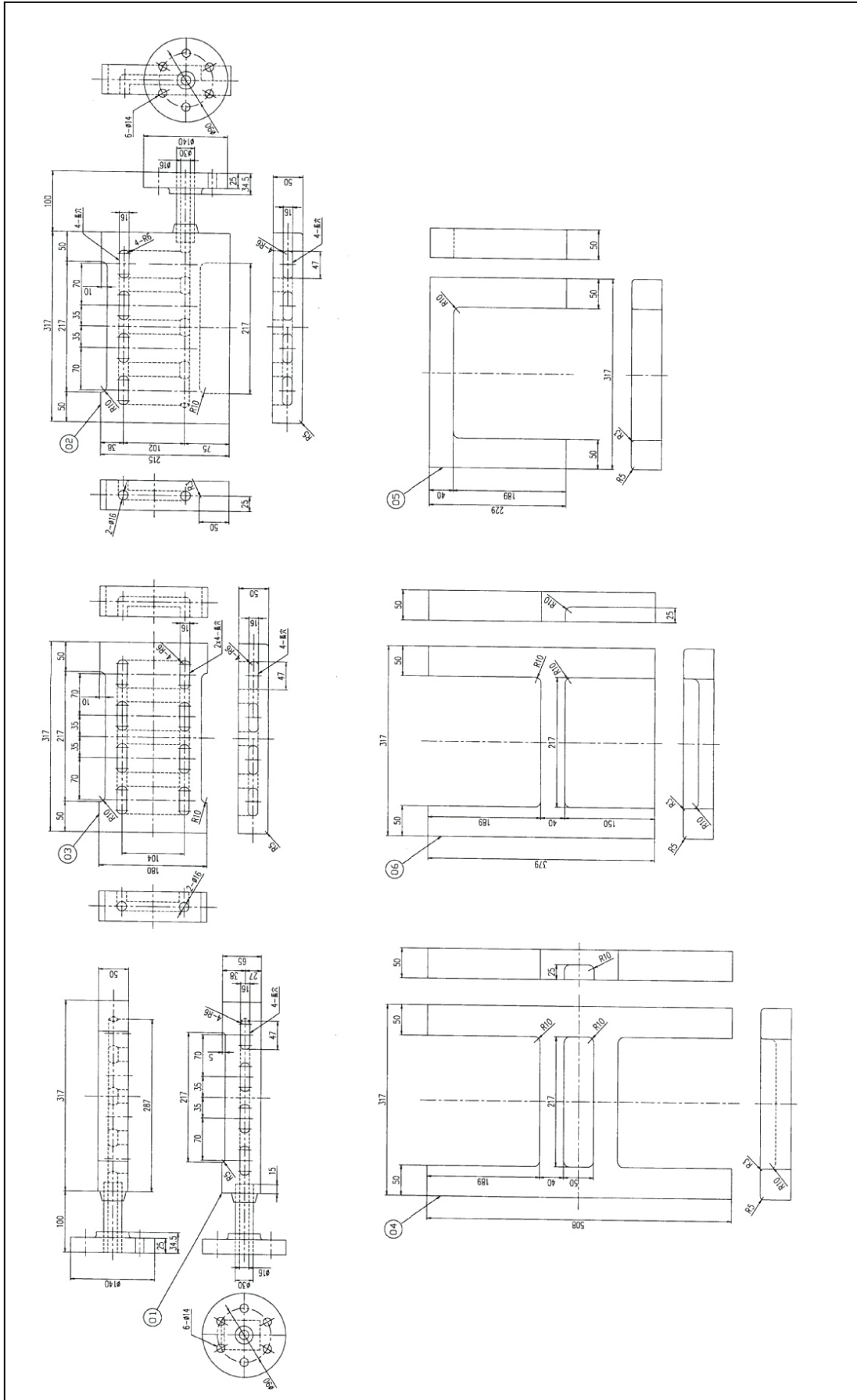
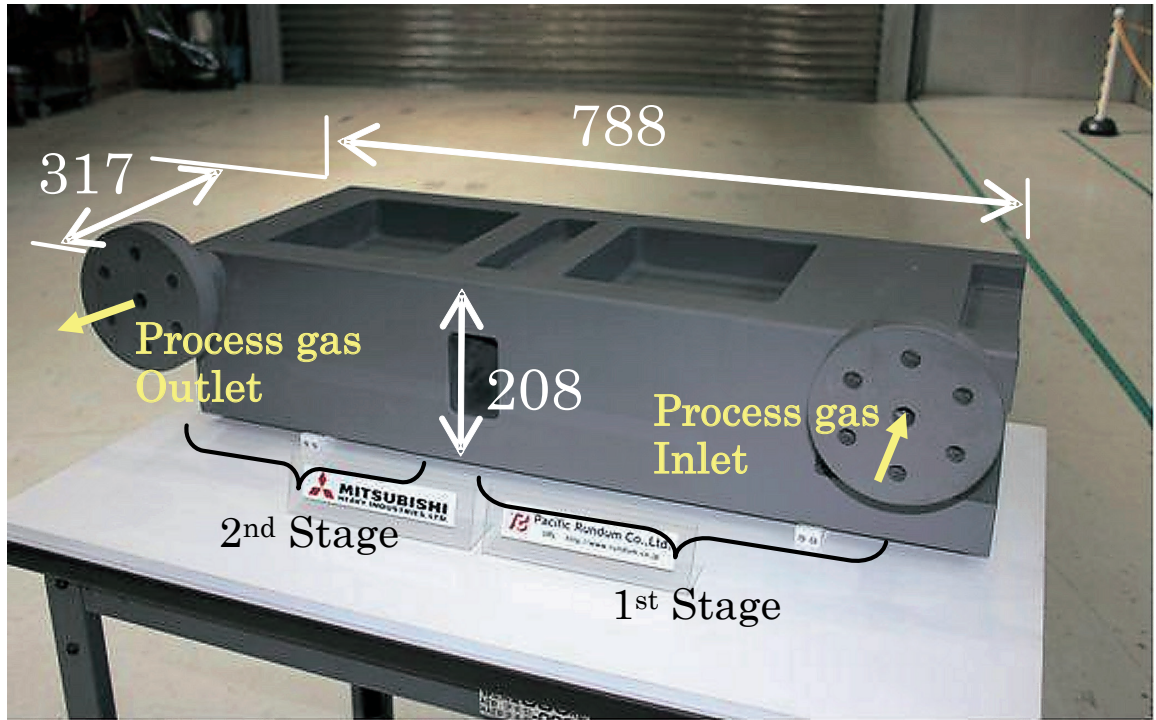
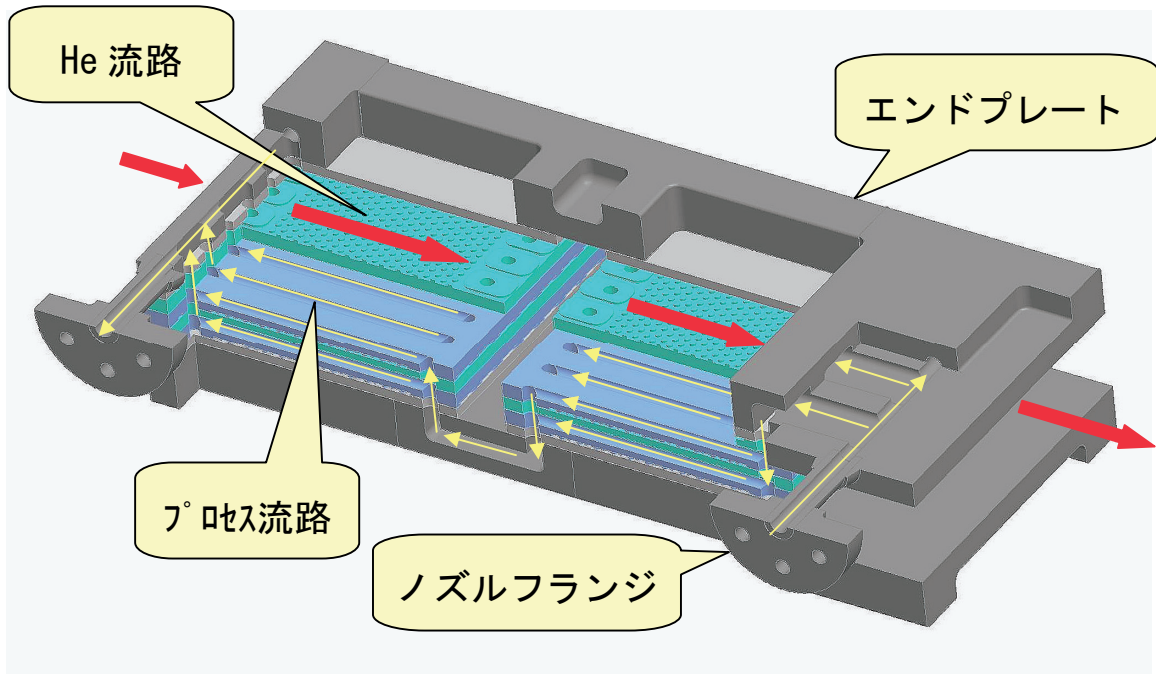


図 4.1 SiC プレート型 SO<sub>3</sub> 分解器 構造要素試作体の構造図 (2 / 2)



(a) 試作体外観



(b) 試作体の構造概念

図 4.2 SiC プレート型 SO<sub>3</sub> 分解器 構造要素試作体の外観及び構造概念

## 5. ISI 検査基準・手法の調査

### 5. 1 調査の目的

SiC 構造体の供用中試験検査 (ISI) に適用可能な非破壊検査技術の開発を目的として非破壊検査手順、評価方法への要求を集約し、検査法案および判定基準などをまとめる。並行して、適用可能性ある検査方法の選定し、選定した検査方法の欠陥検出限界・測定対象物の形状に関する制限などを検討すると共に、実機評価の観点から必要な改善項目を抽出する。

### 5. 2 検査基準、手法の調査

#### (1) 検査への要件整理

構造体の非破壊検査は母材部に関しては Si 含浸不足部、接合部に関してはそれに加えて接合不良部の評価が必要になると考えられる。構造体中に存在する欠陥がき裂として働くと仮定すると、作用応力によって耐えることの出来る限界欠陥寸法が、材料の破壊靱性値より定義可能となる。

#### a. 材料試験による欠陥評価

SO<sub>3</sub> 分解器に用いる製作方法を用い、母材、接合部を JIS R1601 に準じた試験片形状にて、3 点曲げ法による曲げ強度及び破壊靱性試験を実施した。なお、破壊靱性 (KIC) においては、中央部にシェブロンノッチを用いた試験にて評価した。

今回の試験ではサンプル数が十分でなく、下限しきい値を持つ 3 母数ワイブル分布を示さないグループが散見されたことから、以下の式で示すしきい値を持たない 2 母数ワイブル分布で近似した。

$$F(x) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{x}{a} \right)^m \right]$$

ここで、F(x) : 破壊確率

a : 尺度母数

m : ワイブル係数

x : 破壊強度

上限強度を 10<sup>-5</sup> 破壊確率値とし、破壊靱性値のしきい値を用いて固有欠陥寸法を評価した結果を表 5.1 に示す。

非破壊検査への要求としては表 5.1 の最小値を判定する必要があると考えられるため、固有欠陥寸法として 0.06mm を検出する必要がある。ただし、今回の結果は 1 点だけが突出して小さいことや、3 母数ワイブル分布を取らないグループが見られたことから、今後さらにデータを蓄積し評価精度を向上させることが望ましい。

## b. 構造体破壊挙動評価

先に報告した熱応力解析結果において、発生する応力が最大となる部分は He 流路出口付近の接合部であることから、接合部の強度を評価するための試験体を製作し破壊挙動評価試験を行った。試験体の構造を図 5.1 に示す。試験体はフランジの中央部に円板を接合したものである。この試験体に圧力（水圧）を負荷し、接合部の破壊挙動及び破損した試験体の外観から破壊挙動を評価した。また、破壊に至るまでに発生する歪を歪ゲージで測定した。

試験温度は室温で、水圧ポンプで圧力をモデルが破壊するまで付与した。その際、ひずみゲージ式圧力計で圧力を測定し、破壊圧力を求めた。SiC 接合部の耐圧試験片を用いた破壊圧力は、6.5MPa であった。

試験後の破面観察結果を図 5.2 に示す。セラミックスの破面は起点部ほど平坦である特徴があることから、本試験片の起点部は 3 または 7 であると判断できる。破断は接合面方向に発生していることがわかる。断面観察からは欠陥などは観察されなかったが、上限強度をもとに試験体形状の接合部破断時の内圧を FEM 解析で評価した結果、2MPa と推定された。この値は試験結果の 6.5MPa に比べて小さい値となっていることから、 $10^{-5}$  破壊確率を許容応力とする評価手法は、安全側評価で妥当なものと考えられる。

## (2) 検査手法のサーベイ

セラミックスに対する非破壊検査手法の比較例を表 5.2 に示す<sup>(6)</sup>。欠陥検出能力は調査対象品の寸法や構造にも支配されるために、絶対値の引用は難しいと考えられるが、定性的な比較として引用する<sup>(7)・(8)</sup>。セラミックス接合構造体の非破壊欠陥検査に関しては、現状適用可能な手法の中では X 線 CT が有効と考えられる。しかし、採用候補材の種類・密度（線吸収係数）、構造体の寸法（板厚）、構造体の構造、X 線 CT 装置の能力などで検出限界が影響されるため<sup>(9)</sup>、実際に採用を検討している材料で、実際に採用を検討している接合方法で製作した模擬試験片を用いて、検出精度評価を検討する必要がある。上記で検討した、X 線 CT のうち、マイクロフォーカス X 線 CT 及びミリフォーカス X 線 CT を検討対象とした<sup>(10)</sup>。

マイクロフォーカス X 線 CT は、微小欠陥の検出に適する装置であり、一般的に半導体産業において、集積回路の検査などに多く用いられる装置である。検証の結果、検出可能な欠陥寸法は 0.2mm 以上であり、所要検出精度である 0.06mm には対応できないことが明らかとなった。また、サンプルを 2 個同時に検査した結果、X 線が試料を透過せず、CT 画像を得ることができなかった。これは、X 線受光器の能力から、X 線出力を上げることができず、必要な X 線量を受光できなかったことにある。よって、当該装置にて、0.2mm の欠陥が検出できる試料寸法は、概略 60×60mm の外寸法の試



料までと考えられる。

ミリフォーカス X 線 CT は、検査対象が大きい場合に用いられるが、検出可能な欠陥寸法は数ミリオーダーであり、マイクロフォーカス X 線 CT に劣る傾向にある。検証の結果、接合部に欠陥を示す濃度差が表示されているものの、アーチファクトが生じており、正確な欠陥検出ができていないことが判明した。よって、当該装置にて、0.06mm の欠陥を検出することは現状困難と判断される。なお、アーチファクトは、サンプルと雰囲気（空気）との密度差が大きい、試料形状が複雑で演算できない、X 線エネルギーが不足などの理由により起こるノイズのことである。

以上の検証結果より、X 線 CT を適用する場合の課題として下記を抽出した。これらはいずれもハードルの高い技術課題であり、関連する産業界の技術動向も視野に入れ、今後の取り組みを検討する必要がある。

- X 線の高エネルギー化
- X 線受光器の高エネルギー対応
- 計測アルゴリズムの最適化
- 試料の大型化対応

表 5.1 上限強度、破壊靱性値と固有欠陥寸法

材料	温度(°C)	上限強度 (MPa)	破壊靱性値 (MPam <sup>0.5</sup> )	固有欠陥寸法 (mm)
母材	400	88.0	(3.68)	0.56
	550	81.5	3.68	0.65
	850	94.1	4.00	0.58
継手材	400	34.3	2.39	1.55
	550	66.9	0.88	0.06
	850	41.1	2.55	1.23

表 5.2 セラミックスの非破壊検査法の比較 (6)

媒体	検査手段		試験法	原理	特徴	検出欠陥		展望
	入射波	計測形態				欠陥部位	欠陥検出能力	
光	紫外線	可視光	蛍光浸透探傷法	製品を浸透液中に浸漬し、表面の浸透液を除去した後、紫外線を照射して観察する。	特殊な装置が不用で、表面傷を比較的簡単に検査できる。	表面		改良の余地はあるが、大幅な性能向上は期待できない。
			超音波探傷法 (表面波法)	製品表面に表面波を伝播させ、表面の欠陥からエコーを検出し、表面表示する。	装置が簡単で、分解能が比較的良好な平面表示図又はエコー高さから欠陥大きさが測定できる。表面欠陥の検出に適している。			自動化が容易であり、オンライン計測に適用している。
			超音波探傷法 (C スコープ)	製品内部に超音波を伝播させ、内部の欠陥からエコーを検出し、表面表示する。	スベクトルアナライザを使用し、健全材と欠陥材とは周波数のピーク、帯域幅などが異なることを利用する。	欠陥材か健全材かの区別、マイクロクラックの有無、結晶粒径や気孔率の評価ができる。	(表面直下) 内部 界面	ボア 100 μm 程度 異物 ~50 μm φ
超音波	超音波	減衰 反射 散乱 音速	超音波探傷法 (音速測定、減衰測定)	気孔率の違いによって音速が変化し、減衰作数異なることを利用する。	気孔率の管理に利用できる。マイクロクラックの有無を判断できる。			精度の高い計測器が必要。
			機械走査	高周波数取束探触子で製品の表面を走査し、欠陥エコー又は透過波を信号処理により拡大映像化する。	表面近傍の欠陥を最も高分解能で検出できる。	表面直下	数 μm 程度 十 μm	高精度測定法、画像処理法の発展により、その利用の拡大が期待できる。
			レーザー走査	製品に超音波を伝播し、表面で微細な振動をレーザーで検出する。	介入物、気孔、面状欠陥の検出が可能。オンライン化が可能。	表面直下	ボイド 100 μm φ	データの蓄積が必要であるが、将来の期待は大きい。
放射線	X線	ラジオグラフィーム断層像	放射線透過法 (PAS)	断続光を製品表面に照射したときに生じる熱振動を検知する。	表面近傍の欠陥検出に適する。	表面直下	スリット 50 μm 幅	3次元映像化などにより、将来期待できる。
			放射線透過法 (AE)	割れ発生及び割れ進展のときに発生する音を検出し、欠陥の発生位置及び大きさを検知する。	微量割れの検出、割れ位置評定が可能。複数製品の適用が可能である。	表面直下 内部		保証試験時の製品のスクリーニング及びモニタリングに利用可。
			放射線透過法 (X線 CT)	微小焦点の X 線の透過写真から欠陥像を得る。	X 線の透過率の異なる介入物の検出に適する。割れのような面状欠陥の検出には劣る。	(表面直下) 内部 界面	ボア 300 μm φ スリット 20 μm 幅 密度差 1%	デジタルラジオグラフィームにして画像処理を行えば、検出能力の向上及び複雑形状品への適用が期待できる。
放射線	γ線 中性子線 重粒子線	ラジオグラフィーム断層像 トモグラフィーム	放射線透過法	製品の全方向から X 線の透過データを収集し、その断面内部の X 線係数に対応した断面画像を再構築する。	複雑形状品にも適用可能。現在のところ分解能が低い。			3次元立体画像表示が可能。今後、微小焦点 X 線 CT 装置などの開発が必要。
			放射線透過法	中性子の透過写真から欠陥像を得る。イメージコンパクターが必要。	X線吸収の大きいセラミックスには有効	内部 (界面)		熱中性子 CT が開発されつつある。
			放射線透過法	電子線の透過電子の線量分布又はエネルギー分布から欠陥を検知する。	表面及び内部欠陥、介入物、空孔、傾いた割れも検出可能である。		γ線 CT では X 線 CT と同等	信号処理により高感度化が可能。
磁場		断層像	NMR-CT	核磁気共鳴を利用する。	グリーン形成対の欠陥検出に適する。		発展の可能性あり。	

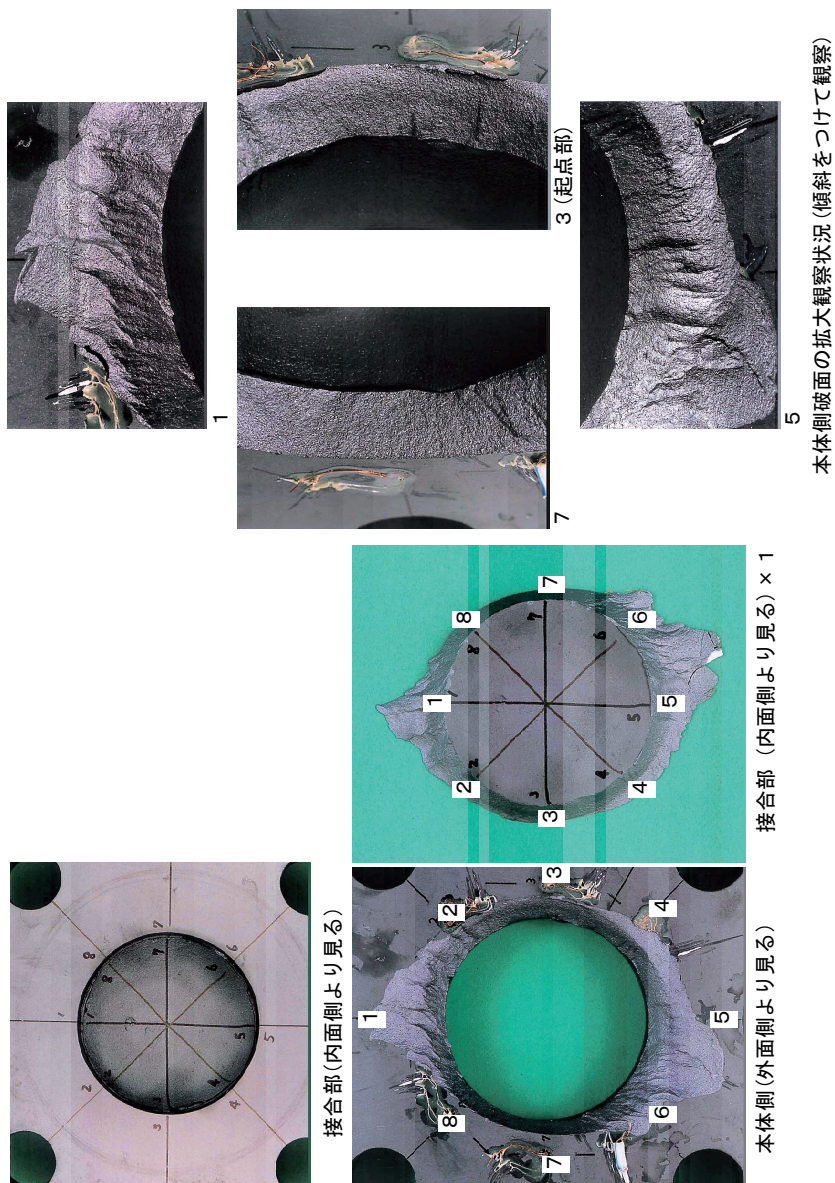


図 5.1 構造体破壊挙動評価試験体の構造

図 5.2 ISI 継ぎ手部強度確認加圧試験後の破面拡大観察結果 (破壊圧力：6.5MPa)

## 6. SO<sub>3</sub>分解触媒性能評価試験

### 6. 1 試験装置の構成

本試験装置は、IS プロセスの硫酸分解ループを模擬した試験ループであり、SO<sub>3</sub>の分解反応温度、プロセスガスの空間速度などをパラメータとして、SO<sub>3</sub>の分解率、触媒の寿命、副反応の有無などを評価する。電気ヒータにより硫酸を蒸発し硫酸分解ガスを発生させ SO<sub>3</sub>分解器を模擬した触媒層に導入するためのオープンループで構成され、Ar ガスをキャリアとして用いている。

試験装置のプロセスフロー図を図 6.1 に示す。また、装置の外観を図 6.2 に示す。

### 6. 2 試験装置仕様

装置の仕様を以下に示す。

- (1) 最高試験温度（触媒部温度）：850℃
- (2) 最高試験圧力（系統圧力）：0.75MPa
- (3) 最高硫酸供給速度：72g/min（40cc/min）
- (4) 最高 Ar ガス供給速度：6.3NL/min（試験時）、25NL/min（ブロー時等）

この外、SO<sub>3</sub>分解器アニュラス部に常時 0.1～0.15NL/min

- (5) SO<sub>3</sub>分解器中の最高触媒空間速度：10000 h<sup>-1</sup>以上（触媒量に依存）

#### (6) 計測器

##### a. SO<sub>2</sub>濃度計：

型式：日本サーモエレクトロン(株)製 MODEL 7100

方式：非分散式赤外線法（NDIR 法）

その他：サンプルガスを希釈プローブにより 50 倍に希釈

##### b. ガス流量計：

型式：(株)シナガワ製 W-NH 型高圧用湿式ガスメータ

検出器：(株)シナガワ製 Model SUB インテリジェントカウンタ

##### c. 酸素濃度計：

型式：東レ(株)製 LC-700L

方式：固体電池式（ジルコニア固体電解質セル使用）

#### (7) 使用触媒

##### a. SiO<sub>2</sub>担持 Pt 触媒 A：

粒径：1～2 mm φ

Pt 担持量：0.90 wt%

水分量：1.18 wt%

触媒分散度：12 m<sup>2</sup>/g·Pt

比表面積：299 m<sup>2</sup>/g

##### b. SiO<sub>2</sub>担持 Pt 触媒 B：

粒径：1～2 mm φ

Pt 担持量 : 0.92 wt%  
水分量 : 3.83 wt%  
触媒分散度 :  $2 \text{ m}^2/\text{g}\cdot\text{Pt}$   
比表面積 :  $298 \text{ m}^2/\text{g}$

c. SiC 担持 Pt 触媒

粒径 :  $1 \sim 2 \text{ mm } \phi$   
Pt 担持量 : 0.89 wt%  
水分量 : 0.1 wt%未満  
触媒分散度 :  $0 \text{ m}^2/\text{g}\cdot\text{Pt}$   
比表面積 :  $0.4 \text{ m}^2/\text{g}$

d.  $\text{TiO}_2$  担持 Pt 触媒

粒径 :  $1.5 \text{ mm } \phi$   
Pt 担持量 : 約 1 wt%

e.  $\text{ZrO}_2$  担持 Pt 触媒

粒径 :  $3 \text{ mm } \phi \times 3 \sim 5 \text{ mm}$   
Pt 担持量 : 約 1 wt%

6. 3 主要機器の構造・外観

以下の装置についてそれぞれの図に構造又は外観を示す

- イ. 硫酸フィードタンク : 図 6.3
- ロ. 硫酸ポンプ : 図 6.4
- ハ. 硫酸加熱器蒸発部 : 図 6.5
- ニ.  $\text{SO}_3$  分解器 : 図 6.6
- ホ. 凝縮器 : 図 6.7
- ヘ.  $\text{SO}_2$  トラップ : 図 6.8
- ト. 気水分離器 : 図 6.9
- チ. NaOH タンク : 図 6.10
- リ. ドレンタンク : 図 6.11
- ヌ.  $\text{SO}_2$  濃度計 : 図 6.12
- ル. ガス流量計 : 図 6.13
- ヲ. 酸素濃度計 : 図 6.14

6. 4 第 1 回実液試験

(1) 試験条件

- a. 圧力 : 0.32MPa
- b. 触媒温度 :  $753^\circ\text{C}$
- c. 硫酸流量/濃度 :  $3.6 \text{ cc}/\text{min}$  / 98wt%
- d. Ar 流量 :  $1.16 \text{ NL}/\text{min}$  (アニュラス部流量( $0.15 \text{ NL}/\text{min}$ )を除く)

- e. 触媒空間速度 (SV 値) : 約  $1000\text{h}^{-1}$

## (2) 試験結果

### a. 試験の経緯

装置の昇温は昼間のみ実施し昇温速度は  $50^\circ\text{C}/\text{h}$  とした。夜間は温度保持状態とした。昇温開始から 5 日後に試験温度に到達し、その後硫酸分解試験を約 2 週間行った。分解試験終了後は装置の降温を開始し、開始後 4 日目に完了し試験を終了した。昇温の途中落雷による停電が発生しヒータ等が停止したが、適切な処置を講じることによりその日のうちに復旧することができた。

### b. $\text{SO}_3$ 分解率の評価

今回の試験では  $\text{SO}_2$  濃度と酸素流量により  $\text{SO}_3$  ガスの分解率を評価した。その結果を図 6.15 に示す。なお、今回の試験条件は SV 値が  $1000\text{h}^{-1}$  と小さい値であることから  $\text{SO}_3$  ガスの分解率はほぼ平衡状態に達しているものと推定される。

第 1 回実液試験では、 $\text{SO}_2$  濃度計の指示値が定常値に達するまで約 5 時間要する上、その指示から換算した  $\text{SO}_3$  ガスの分解率は 3 2 % と平衡分解率の 60% にも満たない結果となった。一方、酸素流量で評価した  $\text{SO}_3$  ガスの分解率は 5 5 % とほぼ平衡分解率と同等の値を示しており、こちらの結果はほぼ妥当なものと評価できる。

$\text{SO}_2$  濃度計の指示値が低くなる傾向と飽和に達するのに 5 時間もの時間を要するのは、 $\text{SO}_3$  分解器の下流にある凝縮器で発生する凝縮水の影響が大きいものと推測される。即ち、凝縮水に  $\text{SO}_2$  ガスが溶解し共に、凝縮器へは常に硫酸分解ガスとして水分が供給されるため気相側の  $\text{SO}_2$  濃度が低くなると共に、凝縮器内に貯留した凝縮水に吸収される  $\text{SO}_2$  ガスの量が飽和に達するまでに時間を要することが上述事象の主要因と考えられる。

## 6. 5 第 2 回実液試験

### (1) 試験条件

- a. 圧力 :  $0.21\text{MPa}$   
 b. 触媒温度 :  $753^\circ\text{C}$   
 c. 硫酸流量 / 濃度 :  $3.6\text{cc}/\text{min}$  / 98wt%  
 d. Ar 流量 :  $1.18\text{NL}/\text{min}$  (アニュラス部流量( $0.15\text{NL}/\text{min}$ )を除く)  
 e. 触媒空間速度 (SV 値) : 約  $1000\text{h}^{-1}$

### (2) 試験結果

#### a. 試験の経緯

装置の昇温は第 1 回試験と同様に昼間のみ実施し昇温速度は  $50^\circ\text{C}/\text{h}$  とした。夜間は温度保持状態とした。昇温開始から 5 日後に試験温度に到達し、その後硫酸分解試験を 10 日間行った。装置の降温は 4 日間で完了した。

**b. SO<sub>3</sub>分解率の評価**

第2回実液試験においてもSO<sub>2</sub>濃度計の挙動は第1回試験と同様であった。また、今回から酸素濃度計による評価も試みたが、SO<sub>2</sub>濃度と同様に指示値が飽和するのに長時間要したため、主な評価は酸素流量で評価することとした。この評価結果を図6.16に示す。この結果、今回の条件における平衡分解率は58%であるのに対して酸素濃度から換算された分解率は49%とやや低い値を示した。これは、第1回試験に比べて圧力が低いため体積流量が相対的に大きくなった結果とも考えられるが、SV値は1000h<sup>-1</sup>と低い値であることから今後さらにデータの蓄積を図り検討を進めることが望ましい。



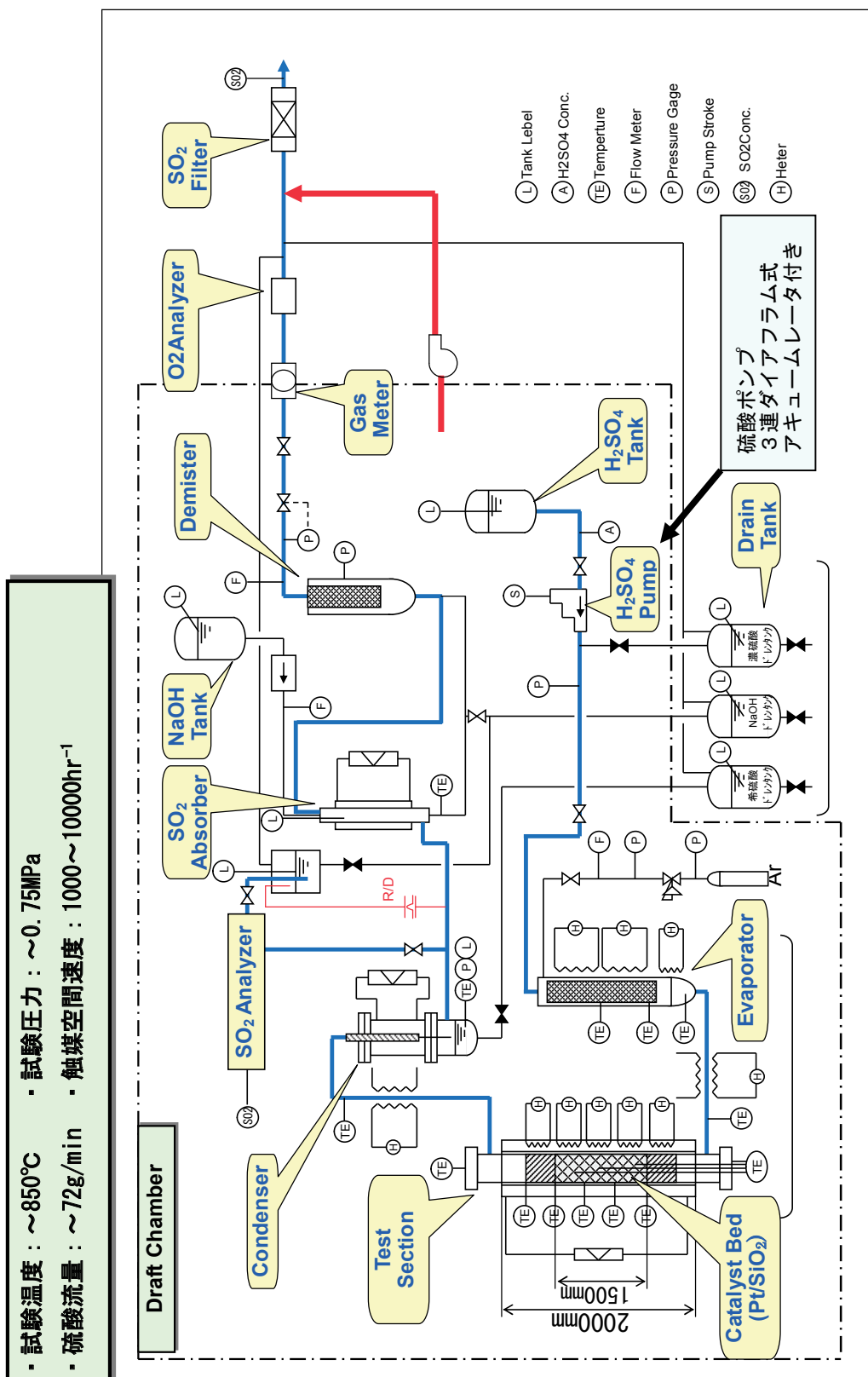
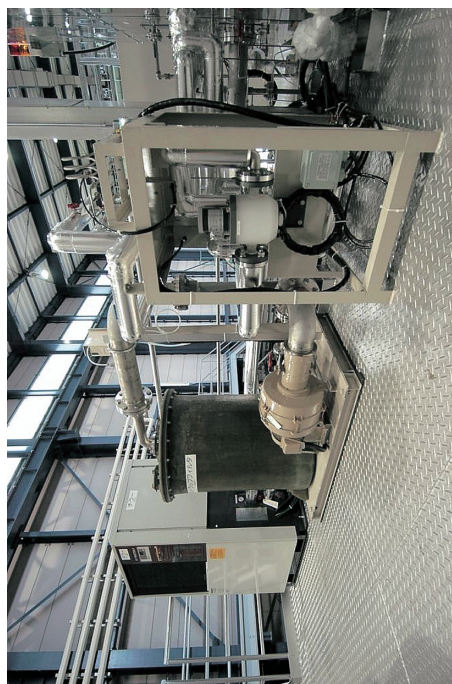


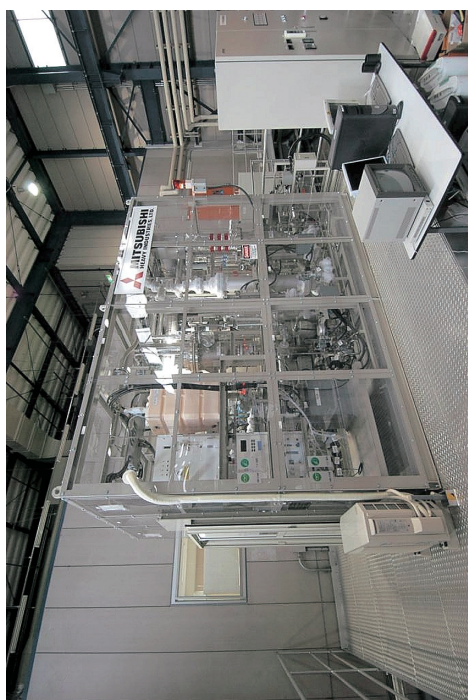
図 6.1 SO<sub>3</sub> 分解触媒試験装置のプロセスフロー図



(c) ドレンタンク (1F)



(d) チラナー、フィルタ及びブロー



(a) 装置全景 (2F ドラフトチャンバ)



(b) ドラフトチャンバ内部

図 6.2 SO<sub>3</sub>分解触媒試験装置の外観

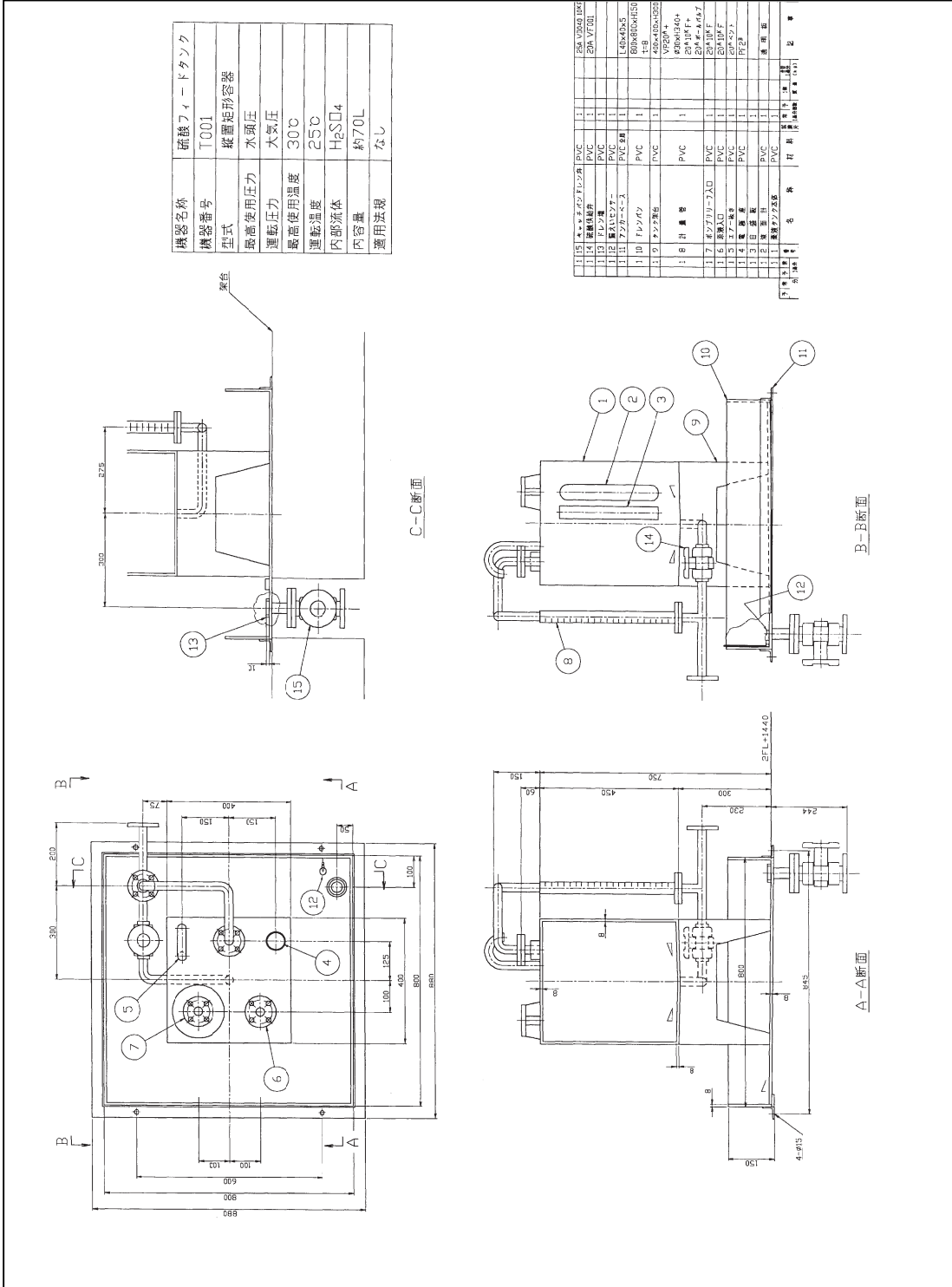
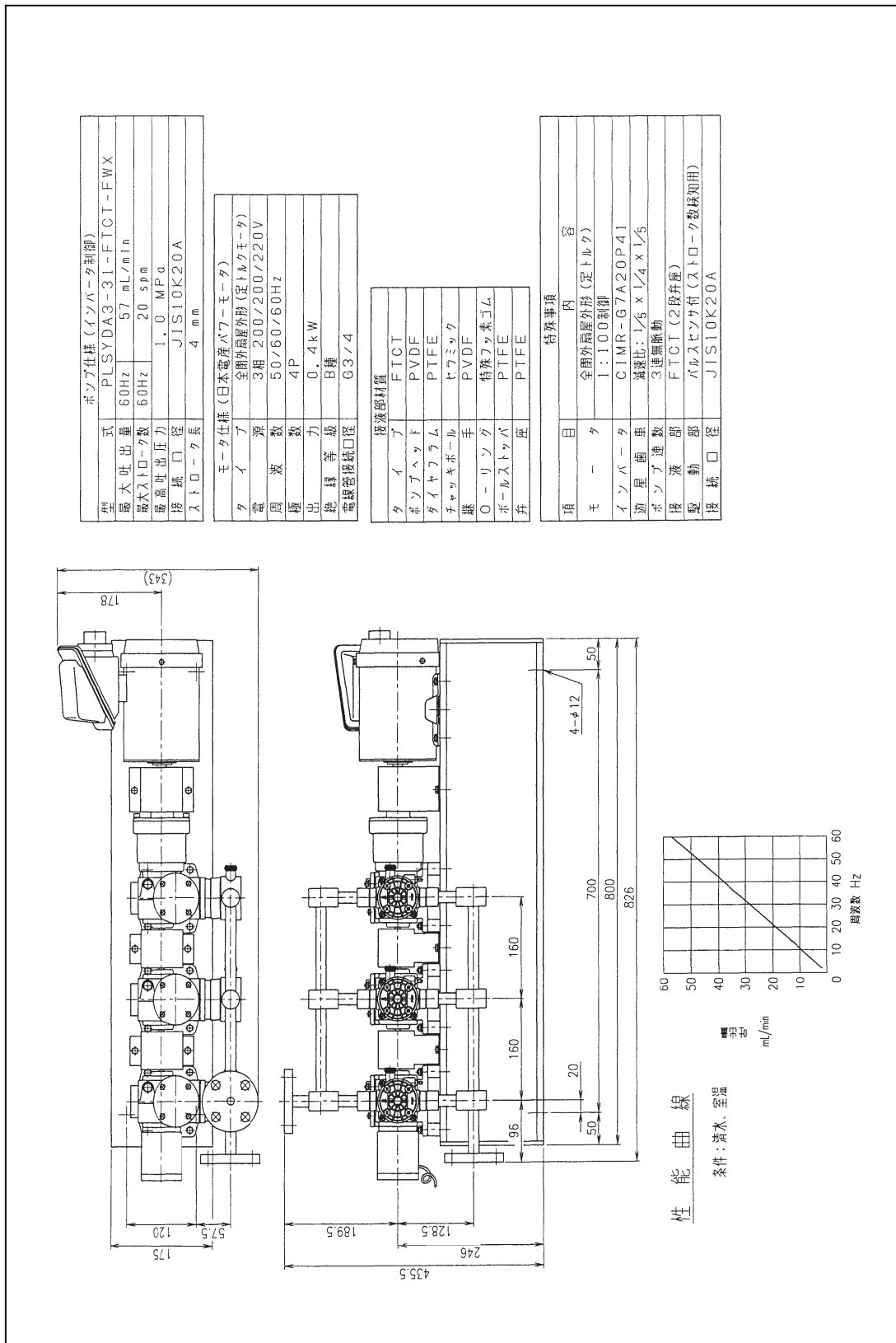


図 6.3 硫酸フィードタンク構造



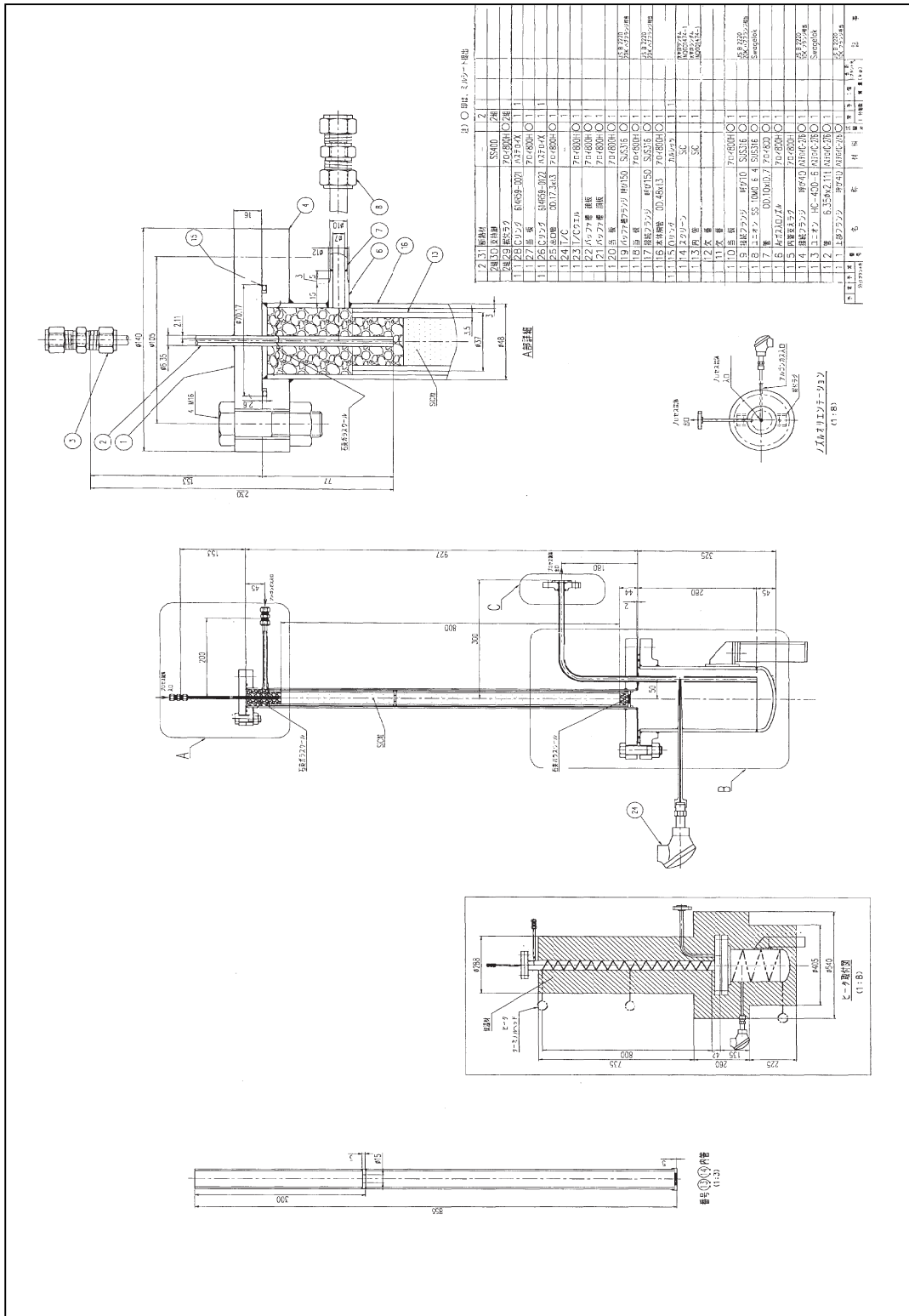


図 6.5 硫酸加熱器蒸発部構造

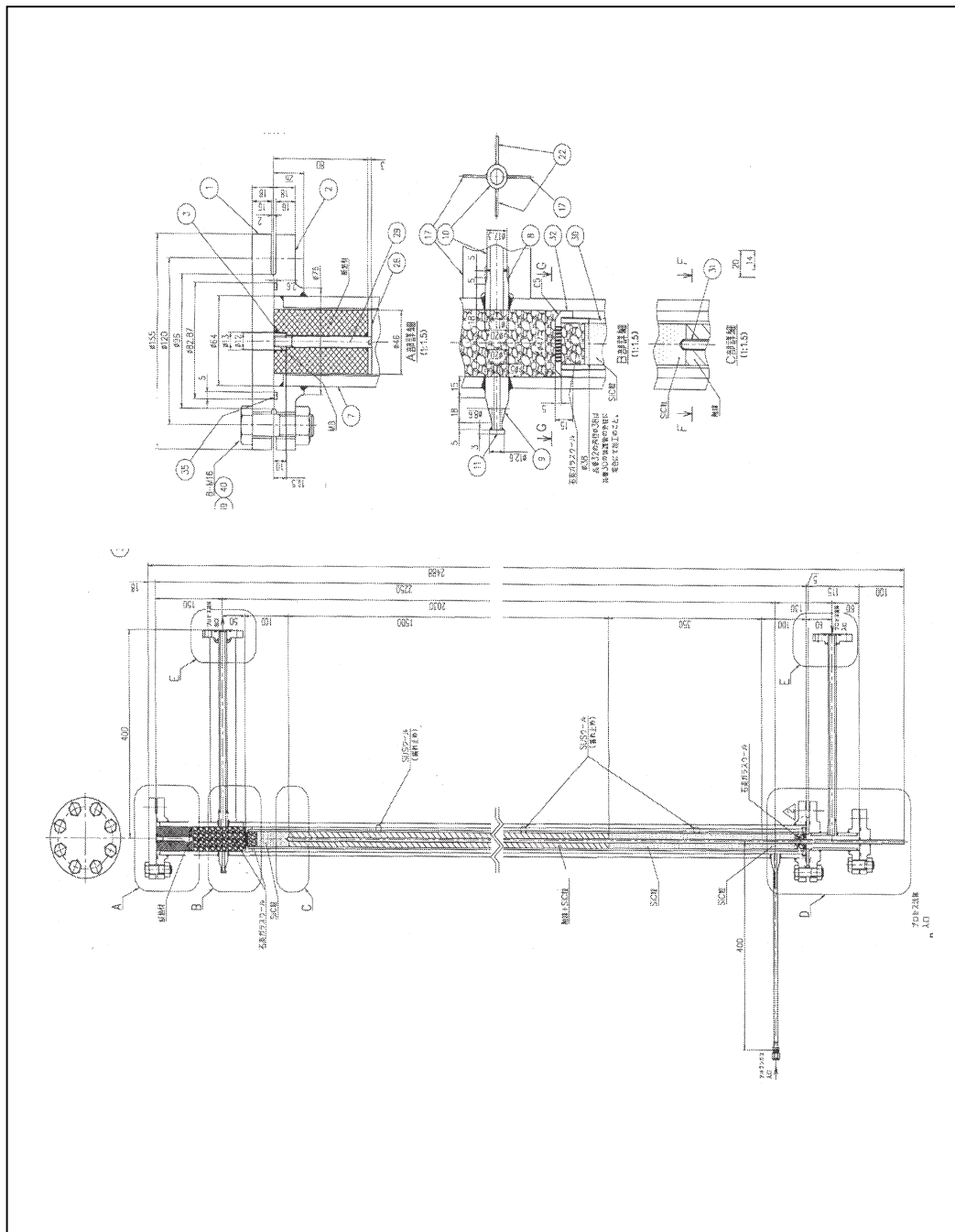
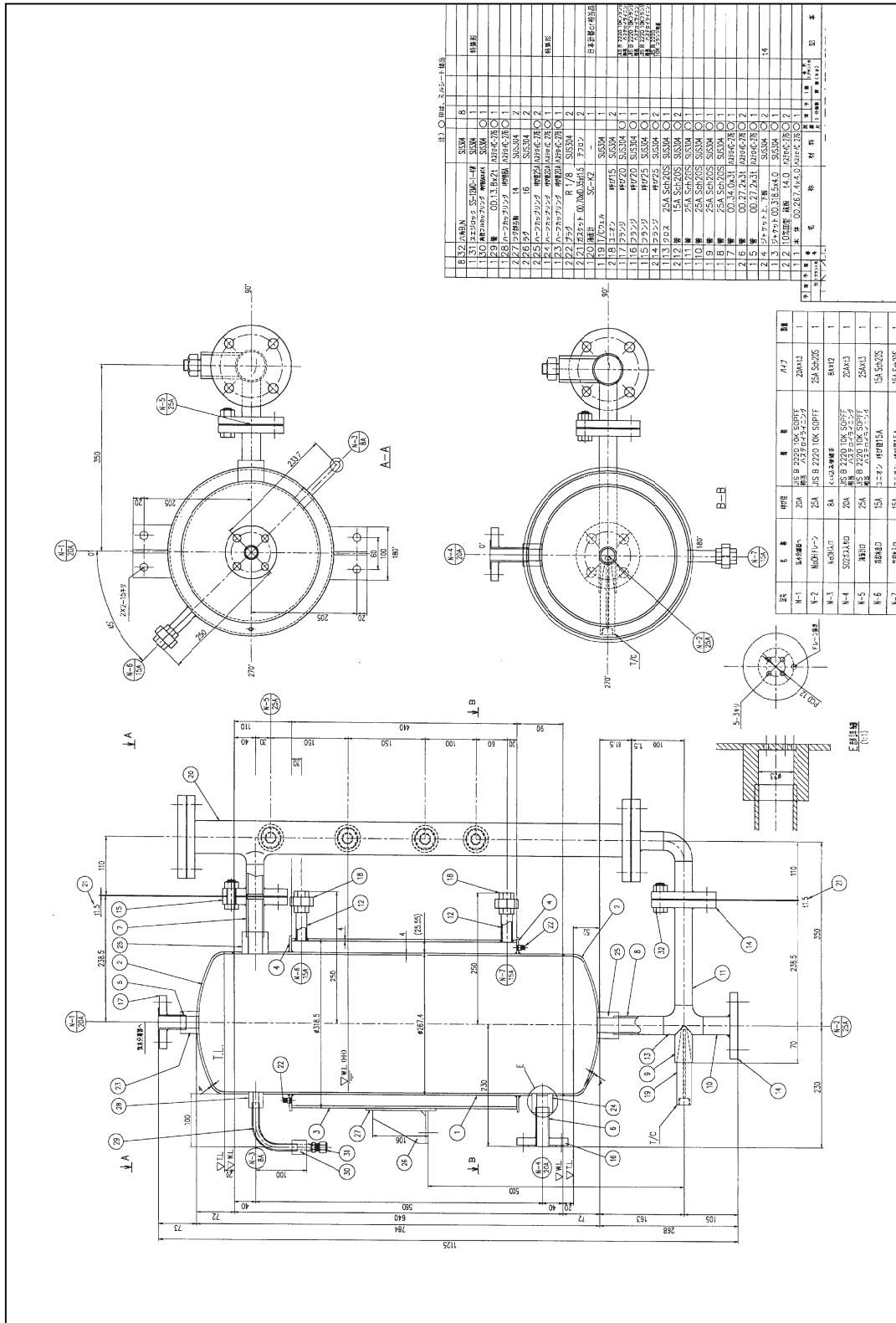


図 6.6 SO<sub>3</sub>分解器構造







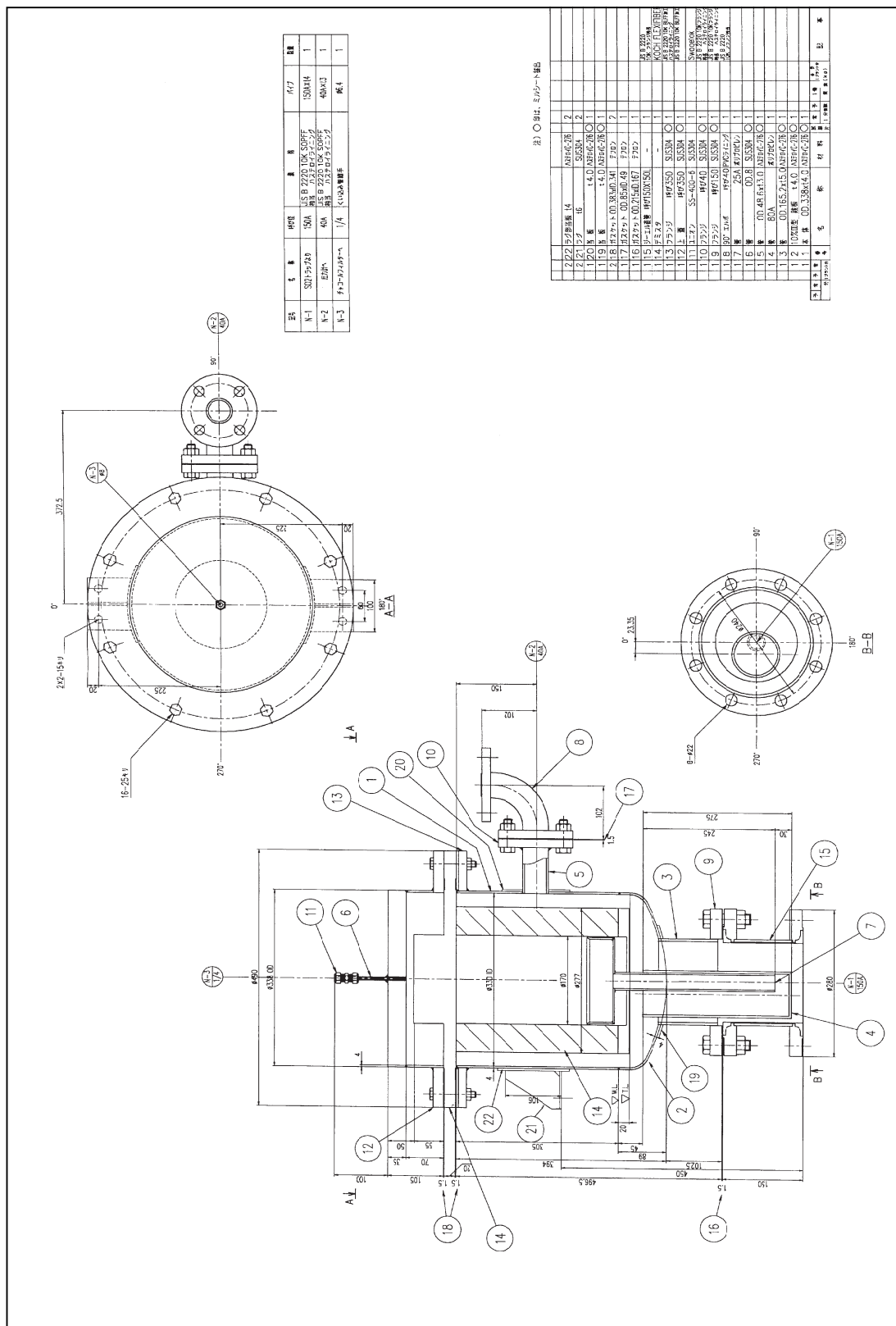


図 6.9 気水分離器構造

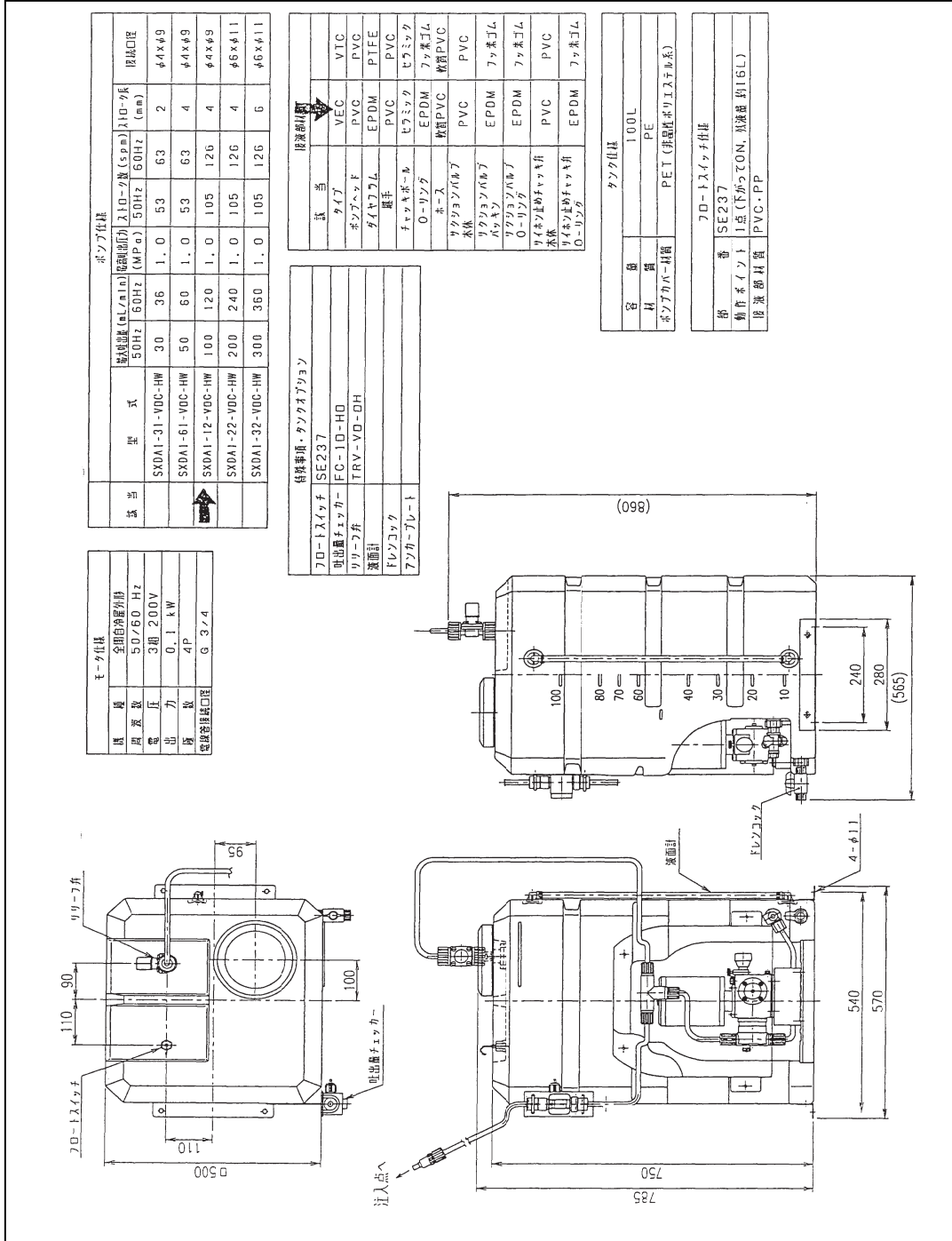


図 6.10 NaOH タンク構造

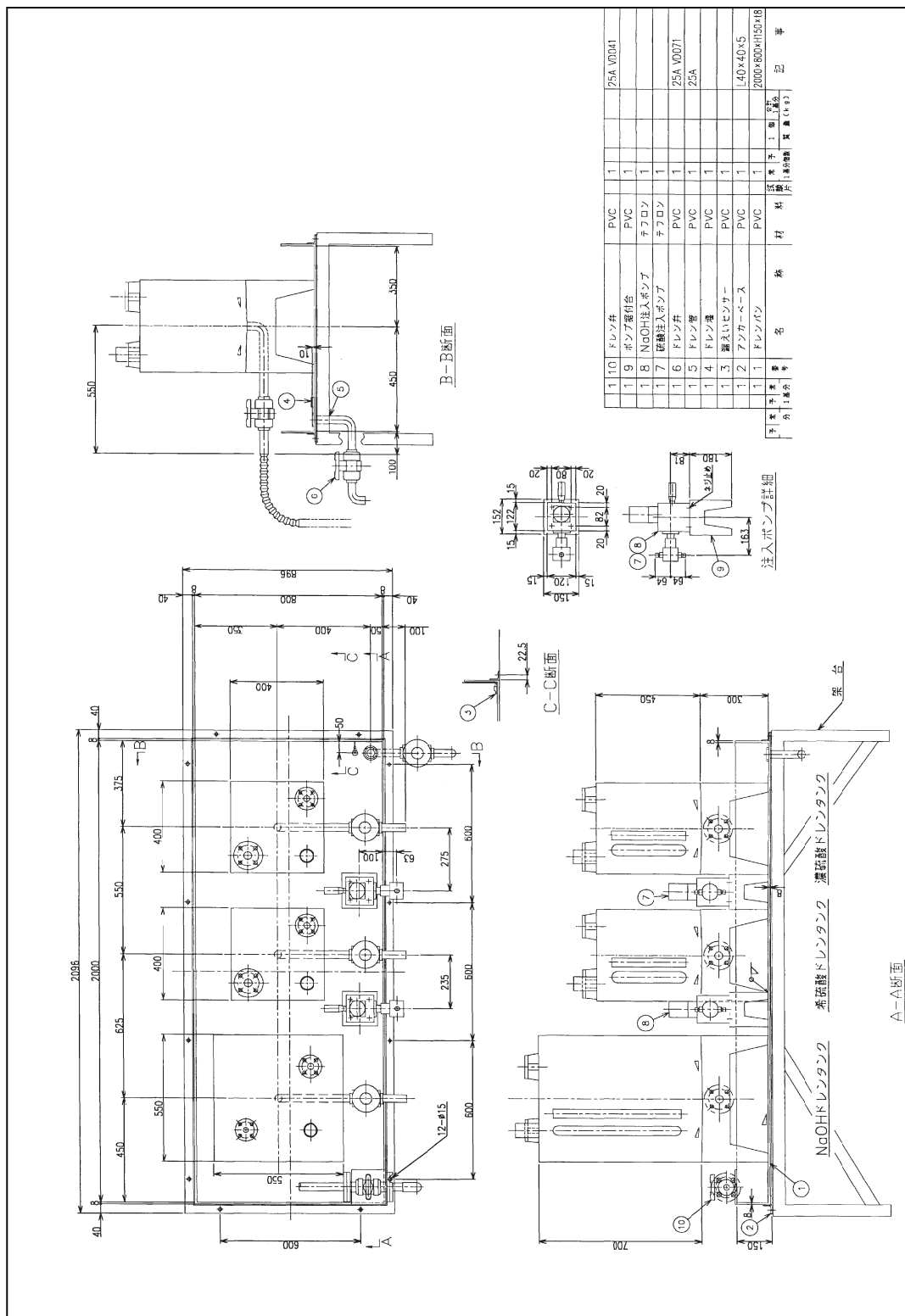
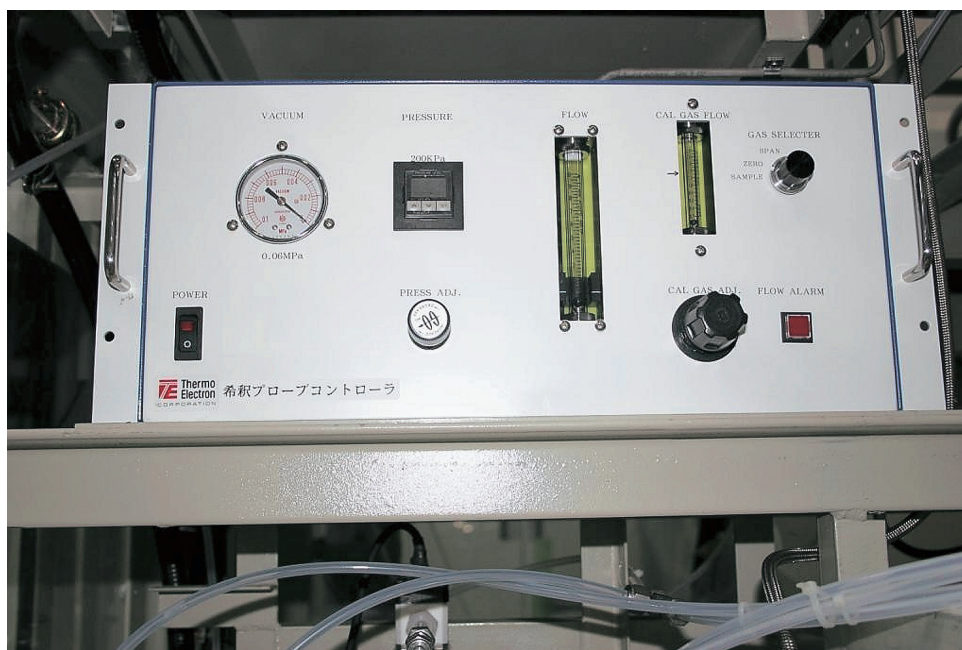


図 6.11 ドレンタンク構造



(a) 計測器本体



(b) 希釈プローブコントローラ

図 6.12 SO<sub>2</sub>濃度計外観

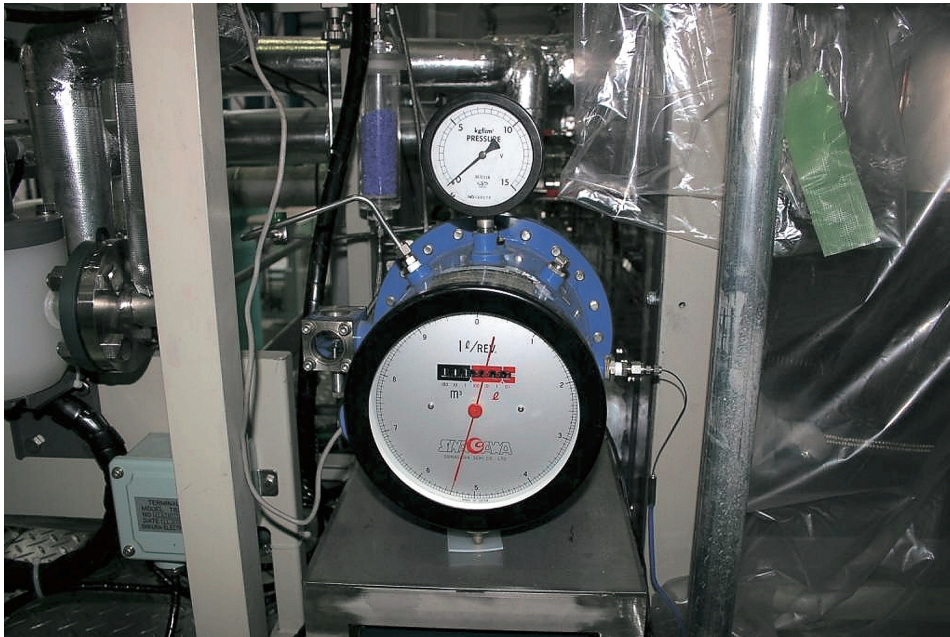


図 6.13 ガス流量計外観



図 6.14 酸素濃度計外観

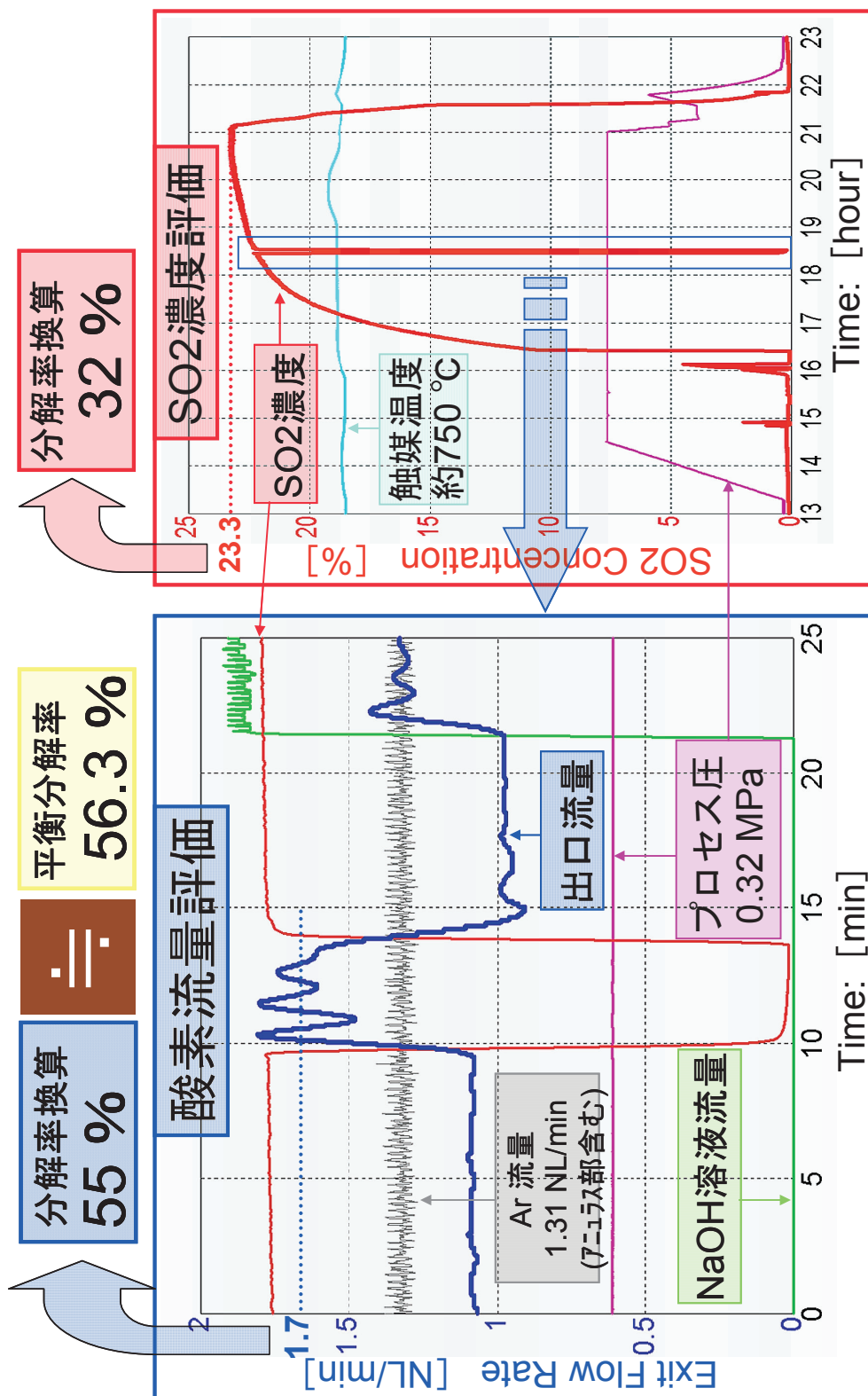


図 6.15 第 1 回実液試験における SO<sub>3</sub> 分解率の評価

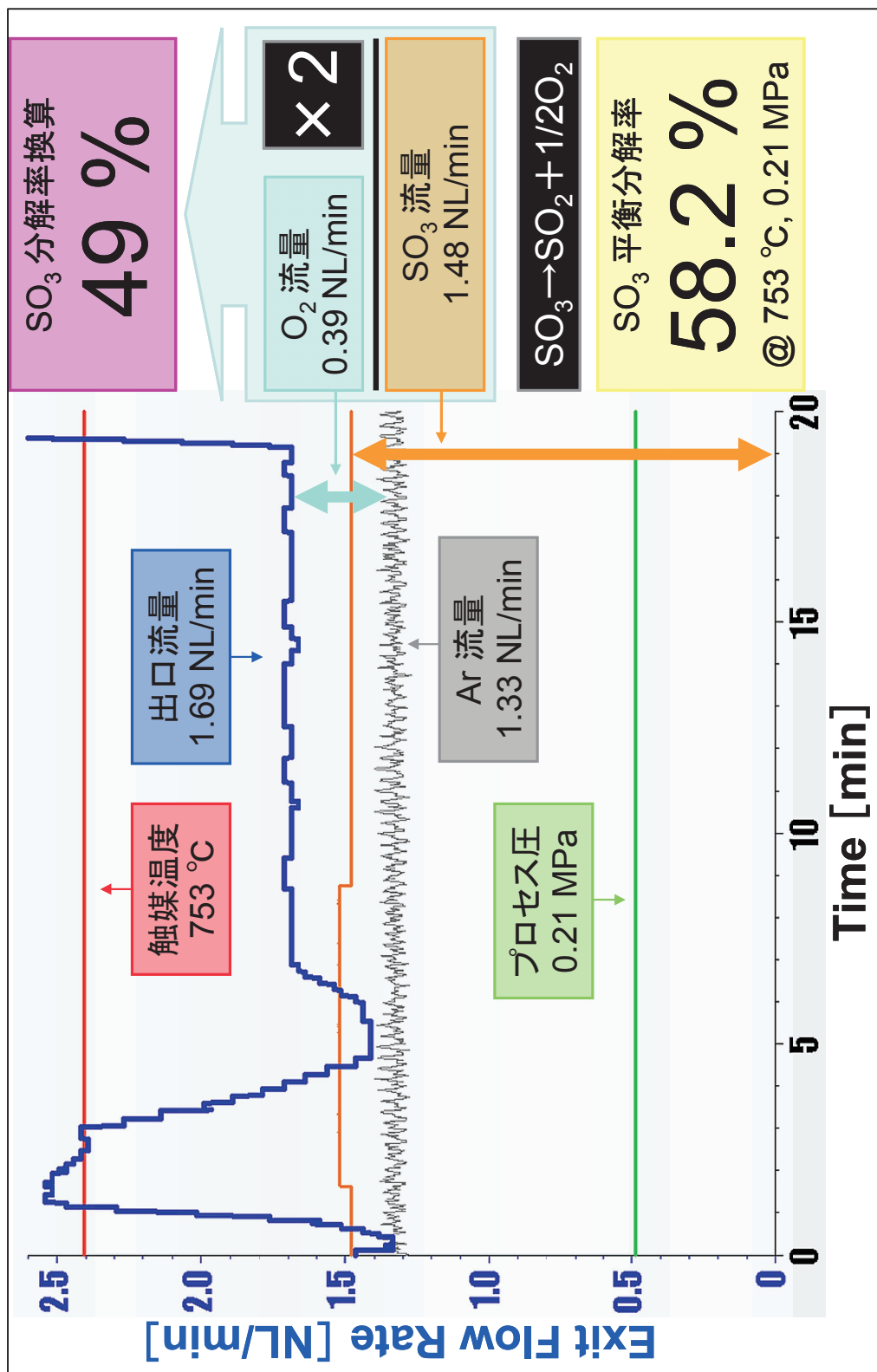


図 6.16 第 2 回実液試験における SO<sub>3</sub> 分解率の評価

## 7. SO<sub>3</sub>分解ガス凝縮液の分析

### 7. 1 分析の目的

本試験は、SO<sub>3</sub>触媒試験装置から採取したSO<sub>3</sub>分解ガスの凝縮液の分析を行い、凝縮配管と凝縮硫酸液との反応について評価することにより、運転条件の厳しい硫酸分解工程のSO<sub>3</sub>分解器における供用中試験検査 (ISI) 手法について検討することを目的とする。凝縮液の分析項目を以下に示す。

- (1) 凝縮液の硫酸濃度、SO<sub>2</sub>濃度
- (2) 凝縮液内の不純物定性分析
- (3) 主な不純物の濃度分析
- (4) 沈殿、凝縮物の分析

### 7. 2 実施内容

SO<sub>3</sub>分解触媒試験装置ではSO<sub>3</sub>分解試験において、約850℃で分解したSO<sub>2</sub>、SO<sub>3</sub>、H<sub>2</sub>O、O<sub>2</sub>及びArを、約600℃のアロイ800H製配管を介して凝縮部に移送し、約20℃の冷却水で冷却したハステロイC276/B2製の配管部で凝縮させ未反応の硫酸を回収している。この凝縮液は硫酸濃度50%から80%程度と推定されSO<sub>2</sub>ガスも溶解しているため極めて腐食性の高い性質を有している。したがって、この凝縮液に配管成分が溶け出している可能性があるため、回収した凝縮液の分析を行い使用材料の凝縮液に対する耐食性の評価データとする。また、凝縮器下流の分解ガスをSO<sub>2</sub>濃度計測装置に導入する配管において凝縮液が採取されており、この液体についても分析を行う。分析内容の詳細を以下に示す。

#### (1) 凝縮液の硫酸濃度、SO<sub>2</sub>濃度

採取した凝縮液（凝縮配管：2件、分解ガス配管：1件）に対して、イオンクロマトグラフ測定装置を用いて、同凝縮液中の硫酸濃度及びSO<sub>2</sub>濃度（凝縮液中の亜硫酸濃度として測定）を測定する。

#### (2) 凝縮液内の不純物定性分析

採取した凝縮液に対して、ICP-AES（凝縮配管：2件）及びICP-MS（分解ガス配管：1件）を用いて、凝縮液中の不純物定性分析を行う。尚、不純物元素の同定は、配管の主構成元素の検出量相当の検出信号を示すものを対象に行う。

#### (3) 主な不純物の濃度分析

採取した凝縮液に対して、凝縮配管／分解ガス配管の主要構成元素及び(2)項で検出・同定された元素を対象に、定量測定を行う。

#### (4) 沈殿／凝集物の分析

採取した凝縮液（原液）をろ過した残渣（2件）に対して、EPMA（電子線微小分析）を行い、沈殿／凝集物のマッピング測定を行う。測定条件を以下に記す。

- ・測定方法：面測定（マッピング）
- ・測定元素：Ni, Cr, Fe, Mo, Pt, Si, W および EDS（エネルギー分散型X線分光計測）



で検出された元素

- ・測定箇所：2点（各1件毎に1点）
- ・測定倍率：沈殿／凝集物の状況に応じて決定

### 7. 3 分析結果

SO<sub>3</sub>分解試験における凝縮配管における凝縮液（2件：第1回実液試験の凝縮配管溶液（以下、1回目凝縮配管溶液）、第2回実液試験の凝縮配管溶液（以下、2回目凝縮配管溶液）、および凝縮器下流の分解ガス配管における凝縮液（1件：以下、分解ガス配管溶液）に対して、下記の性状についての測定を実施した。

測定に供した凝縮溶液（原液）及び凝縮溶液をガラスフィルタを用いて濾過した際の残渣の写真を図7.1に示す。

#### (1) 凝縮液の硫酸濃度、SO<sub>2</sub>濃度

凝縮液をイオンクロマトグラフ測定装置を用いて測定した。測定に使用した測定機器を以下に記す。また、測定結果を表7.1に示す。尚、表中の濃度は原液の濃度である。

- ・使用機種：DX-100（DIONEX社）

表7.1に示すように、凝縮配管溶液（1回目、2回目）では硫酸イオンが同程度検出された（340～370ppm）。また、2回目凝縮配管溶液では多量の亜硫酸が検出された（270000ppm）。分解ガス配管溶液では、硫酸、亜硫酸ともに検出されなかった。

#### (2) 凝縮液内の不純物定性分析

凝縮液に対して、ICP-MSを用いて定性測定を実施した。測定に使用した測定機器及び測定条件を以下に記す。また、定性測定において検出された元素を以下に記す。

- ・使用機種：ELAN600（パーキンエルマージャパン社）
- ・走査範囲：24～200（質量数）
- ・測定結果：①1回目凝縮配管溶液：Fe,Ni,Cr,Ti,Mn,Mo,Cu,Si,W,Al,Zn,Sn,Zr  
②2回目凝縮配管溶液：Fe,Ni,Cr,Ti,Mn,Mo,Cu,Si,W,Al,Zn,Sn,Zr  
③分解ガス配管溶液：Fe,Ni,Cr,Ti,Mn,Mo,Cu,Si,W,Al,Zn,Sn,Zr

上述の様に、3試料ともに同様の元素が検出された。

#### (3) 主な不純物の濃度分析

凝縮液に対して、凝縮配管／分解ガス配管の主要構成元素及び(2)項で検出・同定された元素を対象に、定量測定を実施した。測定に使用した測定機器を以下に記す。また、測定結果を表7.2に示す。

- ・使用機種：ELAN600（パーキンエルマージャパン社）

表7.2に示すように、凝縮配管溶液、分解ガス配管溶液ともにNi及びMoが多く検出された。

## (4) 沈殿／凝集物の分析

凝縮液（凝縮配管溶液）をろ過した残渣（2件）に対して、EPMA（電子線微小分析）を行い、沈殿／凝集物のマッピング測定を実施した。測定機器及び測定条件を以下に記す。また、測定結果を図 7.2、7.3 に示す。

- ・使用機種：EPMA-C1（島津製作所） + PV-9800（EDAX 社）
- ・測定方法：面測定（マッピング）

測定結果の概要を以下に記す。

- a. 1回目凝縮配管溶液の残渣においては、ガラスフィルタの繊維上に数 $\mu\text{m}$ 大の粒子と不定形な堆積物が観察された。粒子上の部分ではSiがバックグラウンド（ガラス繊維からの信号）よりも強く観察された（同じ場所ではOも僅かに強く観察される）。また、不定形な堆積物においてはSが強く観察された。
- b. 2回目凝縮配管溶液の残渣においては、ガラスフィルタの繊維上に数 $\mu\text{m}$ ～10 $\mu\text{m}$ 大の平板状物質が3個とその近傍に不定形な堆積物が観察された。平板状物質の内、2個ではCr及びMoが強く観察され、Niも弱くであるが観察された。また残り1個ではNiが強く観察され、Feも弱くであるが観察された。これら平板状物質の近傍ではSとSiがそれぞれ単独に強く観察された。

## 7. 4 考察

(1) 上述の測定結果から、凝縮配管と凝縮硫酸液との反応について検討を行った。凝縮液の不純物成分と凝縮液が存在した近傍の配管材料との組成を表 7.3 に、また、その概要を以下に示す。

- a. 凝縮配管溶液については、配管構成元素として、1回目及び2回目共にNi及びMoが多く、以下Fe、Cr、Ti及びWが有意に検出された。
- b. 分解ガス配管溶液については、配管構成元素として、1回目及び2回目共にNi及びMoが多く、以下Fe、Cr、Ti及びWが有意に検出された。
- c. アロイ 800H は、Fe、Ni 及び Cr を主構成元素として、微量元素としてTiを含有する。
- d. ハステロイ C276 は、Ni、Cr 及び Mo を主構成元素として、その他にFe及びWを数wt%程度含有する。
- e. ハステロイ B2 は、Ni 及び Mo を主要元素とし、その他にFeを数wt%程度含有する。また、凝縮液を濾過した残渣では以下の元素分布が観察された。
- f. 1回目凝縮配管溶液の残渣においては、Si 及び S の偏在が、それぞれ単独に観察された。
- g. 2回目凝縮配管溶液の残渣においては、(Cr、Mo、Ni) および (Ni、Fe) の偏在が観察された。また、S 及び Si それぞれ単独の偏在も観察された。

(2) 以上のことから、凝縮液中の不純物元素の発生起源（＝腐食）としては以下のように考えられる。

- a. 凝縮配管溶液については、Ni 及び Mo が多く検出されることから、その不純物の主要起源（＝凝縮液と主に反応した配管材料）は Hastelloy であると考えられる。このことは 2 回目の EPMA 測定において、観察された（Cr、Mo、Ni）の偏在からも考えられる。特に、W が検出されていることから Hastelloy C276 が起源に含まれると考えられる。

アロイ 800H 及び Hastelloy B2 についても検出元素を構成元素とすることから起源であると考えられる。ここで、1 回目に比べ 2 回目は Fe および Ti が多く検出されることから、2 回目ではアロイ 800H の不純物元素の発生に対する寄与が大きくなっていると考えられる。このことは 2 回目の EPMA 測定において（Ni、Fe）の偏在が観察されたことから可能性は高いと考えられる。

- b. 分解ガス配管溶液についても、Ni 及び Mo が多く検出されることから、その不純物の主要起源は Hastelloy であると考えられる。特に、W が検出されていることから Hastelloy C276 が起源に含まれると考えられる。アロイ 800H 及び Hastelloy B2 についても検出元素を構成元素とすることから起源であると考えられる。

#### 7. 5 分析結果のまとめ

本分析の結果、以下の知見を得た。

- (1) 凝縮配管溶液（1 回目・2 回目）、分解ガス配管溶液については、三者ともに、配管構成元素として、Ni 及び Mo が多く、以下 Fe、Cr、Ti 及び W が有意に検出された。
- (2) 1 回目凝縮配管溶液の残渣においては、Si 及び S の偏在が、それぞれ単独に観察された。
- (3) 2 回目凝縮配管溶液の残渣においては、a.（Cr、Mo、Ni）および b.（Ni、Fe）の偏在が観察された。また、S 及び Si それぞれ単独の偏在も観察された。
- (4) 凝縮配管溶液については、Hastelloy（得に C276）と凝縮液とが主に反応したものと考えられる。ただし、1 回目に比べ 2 回目ではアロイ 800H と凝縮液との反応も増加していると考えられる。
- (5) 分解ガス配管溶液については、Hastelloy（得に C276）と凝縮液とが主に反応したものと考えられる。

表 7.1 凝縮液の硫酸濃度、SO<sub>2</sub>濃度測定結果

触媒試料	凝縮配管溶液		分解ガス 配管溶液
	1回目	2回目	
硫酸濃度 (ppm)	3.4 × 10 <sup>2</sup>	3.7 × 10 <sup>2</sup>	ND
亜硫酸濃度 (ppm)	ND	2.7 × 10 <sup>5</sup>	ND

注)ND:計測限界以下

表 7.2 不純物の濃度測定結果

試料	測定元素濃度(ppb)													
	Fe	Ni	Cr	Mn	Mo	Cu	Si	W	Ti	Al	Zn	Sn	Zr	
1回目凝縮配管溶液	3.40E+4	3.25E+5	4.57E+4	2.39E+3	2.74E+5	1.59E+3	2.03E+3	1.45E+4	4.67E+4	1.14E+3	4.30E+3	1.63E+2	4.28E+2	
2回目凝縮配管溶液	2.20E+4	9.81E+4	1.32E+4	5.57E+2	5.97E+4	1.02E+2	1.35E+3	4.84E+3	6.14E+4	6.40E+2	1.29E+4	1.02E+3	1.50E+2	
分解ガス配管溶液	6.82E+2	1.92E+3	5.20E+2	1.81E+1	3.56E+3	5.72E+1	5.44E+1	9.24E+1	5.65E+2	6.36E+2	6.15E+2	3.11E+1	1.57E+1	

表 7.3 凝縮液中の不純物成分と配管材料の元素組成

試料	測定元素濃度(wt%)													
	Fe	Ni	Cr	Mn	Mo	Cu	Si	W	Ti	Al	Zn	Sn	Zr	
1回目凝縮配管溶液	4.5	43	6.1	0.3	36	0.2	0.3	1.9	6.2	0.2	0.6	0.02	0.1	
2回目凝縮配管溶液	8.0	36	4.8	0.2	22	0.04	0.5	1.8	22	0.2	4.7	0.4	0.1	
分解ガス配管溶液	7.8	22	5.9	0.2	41	0.7	0.6	1.1	6.4	7.3	7.0	0.4	0.2	
アロイ800H	45	33	21	0	0	0	0	0	1		0	0	0	
ハステロイC276	5	59	16	0	16	0	0	4	0	0	0	0	0	
ハステロイB2	2	70	0	0	28	0	0	0	0	0	0	0	0	

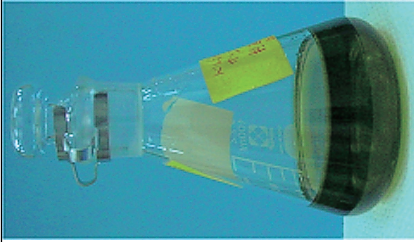
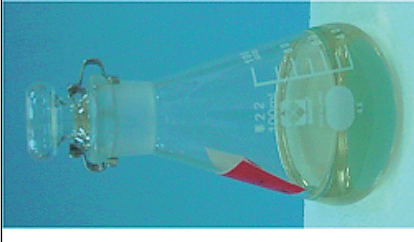

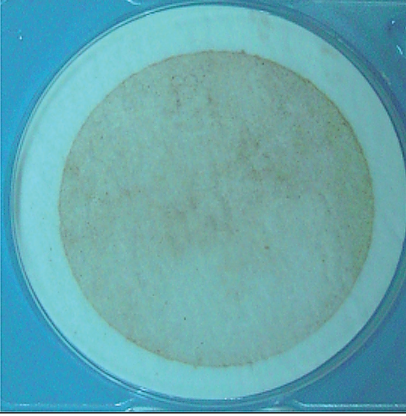
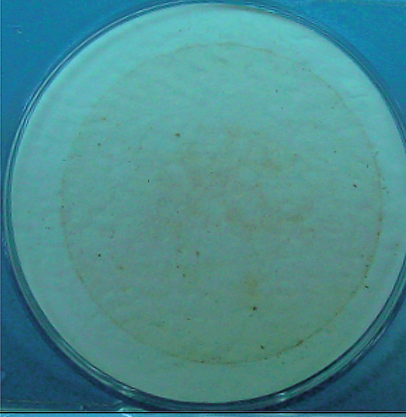
凝縮液試料	凝縮配管溶液		分解ガス配管溶液
	1回目	2回目	
原液			
ガラスフィルタ 濾過残渣			極少量であることから濾過は実施していない。

図 7.1 凝縮液試料の外観写真

This is a blank page.

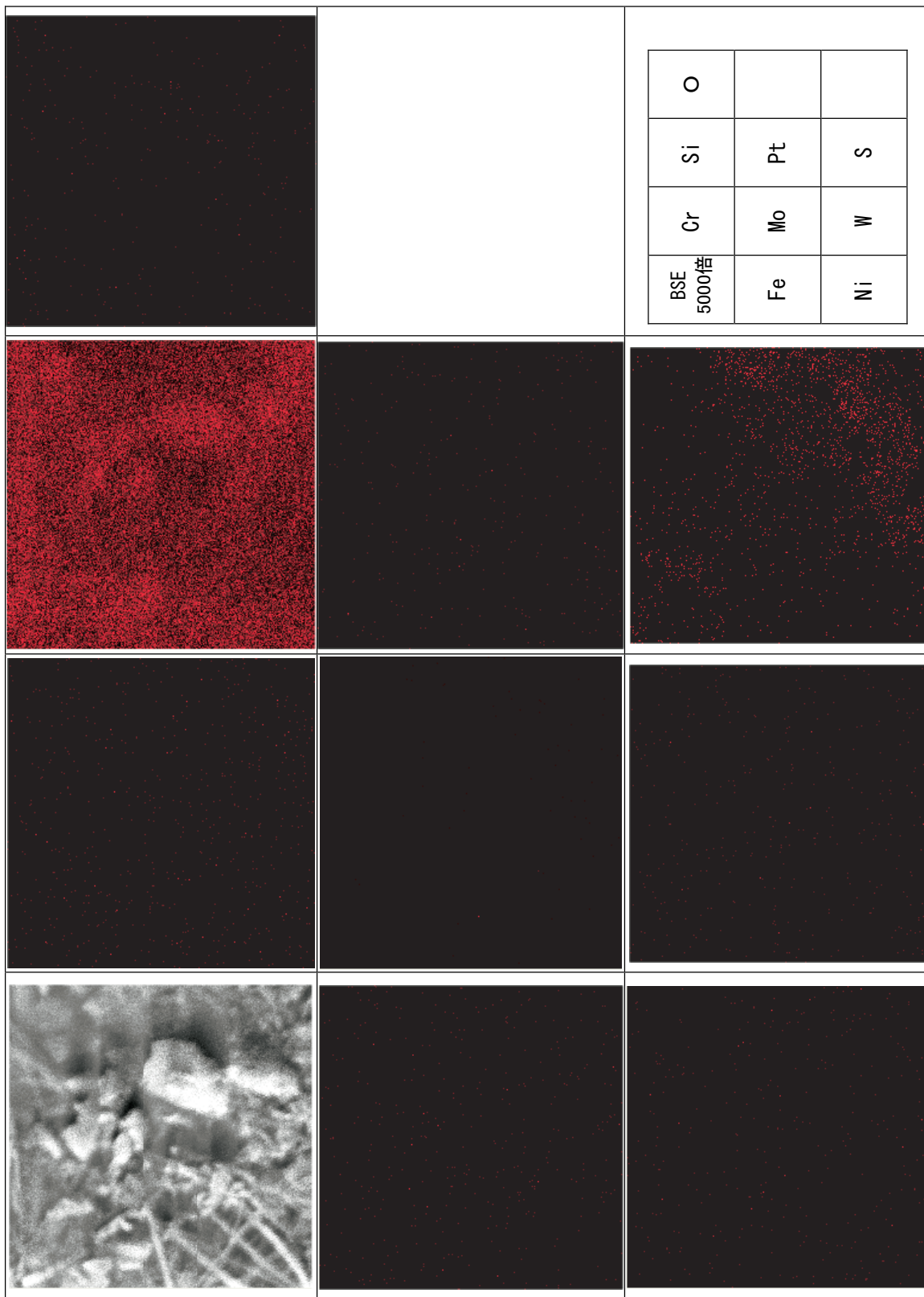


図 7.2 沈殿／凝集物の EPMA 測定結果（1 回目凝縮配管溶液）

This is a blank page.



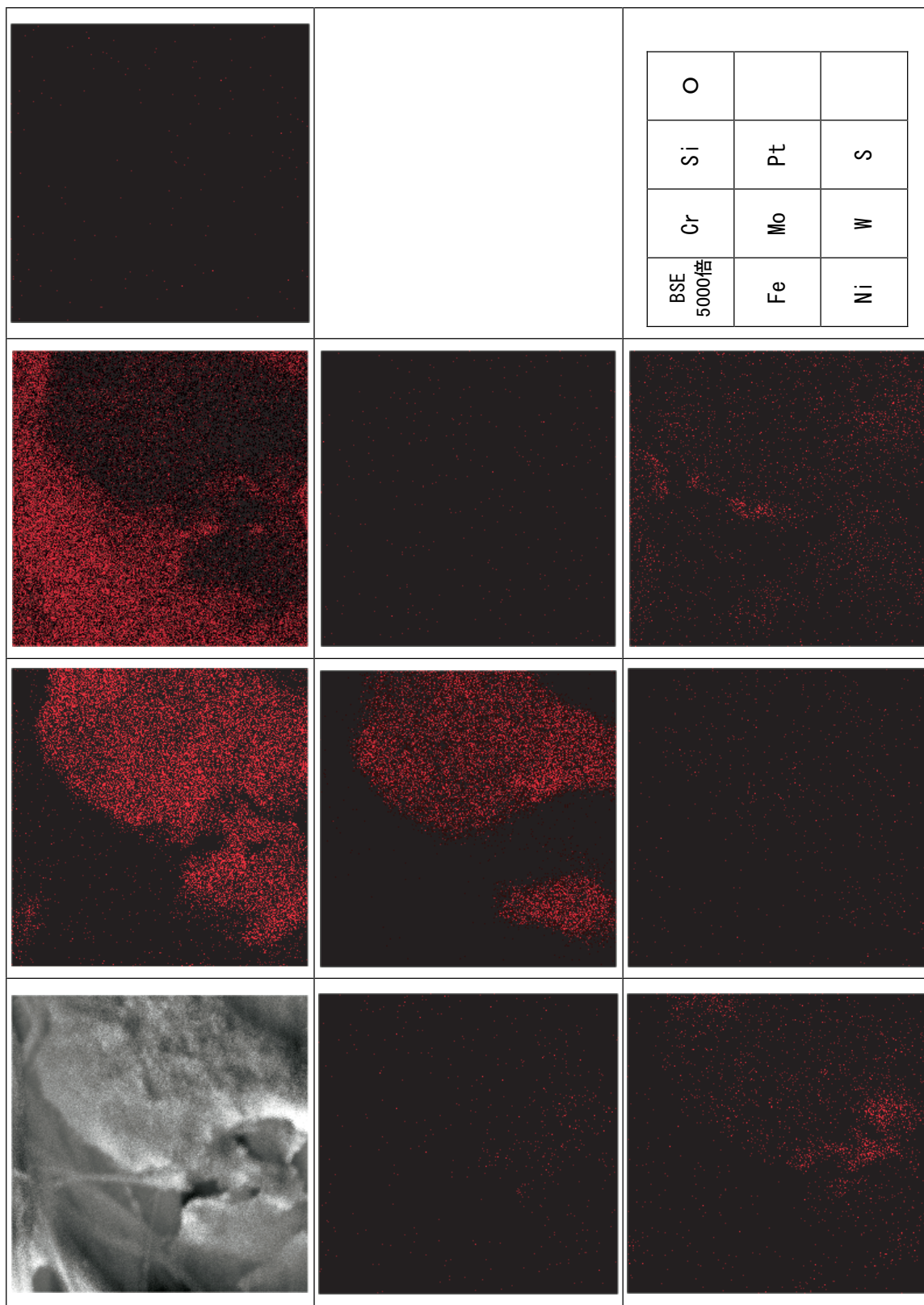


図 7.3 沈殿／凝集物の EPMA 測定結果（2 回目凝縮配管溶液）

This is a blank page.

## 8. まとめ

IS プロセスは高温ガス炉と組合せることにより、原子炉から得られる核熱を用いて水素を効率的に製造する方法として極めて有望な化学プロセスである。原子力機構では高温ガス炉に接続する IS プロセス機器の中で最も高温条件で使用される  $\text{SO}_3$  分解器の使用材料、構造について検討した結果、SiC セラミクス製プレート熱交換方式の  $\text{SO}_3$  分解器を適用候補とした。

そこで、本方式の  $\text{SO}_3$  分解器の試設計を行い温度解析、構造解析を行うと共に、小型モデルを試作して本方式の構造の成立性、製作精度を評価した。この結果、プレート間を流れるプロセス流体と He の圧力差や  $\text{SO}_3$  分解器の温度分布により発生する応力に対して十分な強度を有することを確認できた。また、試作品の製作過程をとおして、歩留まりを低下させる可能性のある製作上の課題が見出されたため、その対策についても検討した。

SiC 構造体に適用可能な非破壊検査技術の開発を目的として非破壊検査手順、評価方法への要求を集約し、検査法案および判定基準などを評価し、適用可能性ある検査法方法の選定した。選定した検査方法の欠陥検出限界・測定対象物の形状に関する制限などを検討すると共に、実機評価の観点から必要な改善項目を抽出した。

$\text{SO}_3$  分解器の性能評価として、高压条件下で  $\text{SO}_3$  の分解率、触媒の寿命、副反応の有無などを評価可能な触媒性能評価試験装置を製作した。この装置を用いて IS プロセスの硫酸分解ループを模擬した  $\text{SO}_3$  の分解試験を行った。また、試験中に未分解硫酸として凝縮回収した溶液に溶け込んだ物質の組成を分析し、不純物の発生起源について考察した。

以上の評価は今後データの蓄積や技術開発を要するものであるが、SiC セラミクス製プレート熱交換方式の  $\text{SO}_3$  分解器の成立性に目処を得ることができた。

## 謝 辞

本報をまとめるにあたり貴重なご助言を頂いた(独)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 ガス炉 IS プロセス接続技術開発グループリーダー 稲垣嘉之氏に感謝いたします。また、 $\text{SO}_3$  分解器の試設計、試作品の製作、及び、 $\text{SO}_3$  触媒性能評価試験にわたり大変なご尽力を頂いた三菱重工業(株)神戸造船所原子力水素 Pj 室の各位、並びに、 $\text{SO}_3$  触媒性能評価試験装置の設計において有用なご助言を頂いた(独)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 IS プロセス技術開発グループの高橋才雄氏に感謝いたします。 $\text{SO}_3$  分解試験では原子力エンジニアリング(株)の米川日出男氏、照沼孝志氏に大変お世話になりました。ここに深く感謝いたします。

## 参考文献

- (1) S.Kubo et.al., "A demonstration study on a closed-cycle hydrogen production by

- thermochemical water-splitting Iodine-Sulfur process”, Nucl.Eng.Des., 233, 347-354(2004)
- (2) 佐藤章一、池添康正、諏訪武、清水三郎、中島隼人、小貫薫：“閉サイクル水素製造法の研究・V-1980年度-”、JAERI-M 9724、pp.53-67 (1981)
  - (3) 伝熱工学資料 改定第4版、日本機械学会、p.91
  - (4) 伝熱工学資料 改定第4版、日本機械学会、p.55
  - (5) 伝熱工学資料 改定第4版、日本機械学会、p.184
  - (6) セラミックス接合工学、日刊工業新聞社、p.277(1990)
  - (7) Randvic M. et.al., Ceram Eng Proc, Vol.24, No.3, pp.329-334(2003)
  - (8) 恩田ほか、超音波 TECHNO、Vol.12, No.2, pp.32-36(2000)
  - (9) Stainbrook,J.P. et.al., Ceram Eng Proc, Vol.23, No.3, pp.541-548(2002)
  - (10) 新非破壊検査便覧、日刊工業新聞社、pp.1053-1080(1992)

# 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>
質量体積 (比体積)	立法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
(物質の) 濃度	モル毎立方メートル	mol/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	(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 <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 <sup>(a)</sup>	rad		m <sup>2</sup> ・m <sup>-1</sup> =1 <sup>(b)</sup>
立体角	ステラジアン <sup>(a)</sup>	sr <sup>(c)</sup>		m <sup>2</sup> ・m <sup>-2</sup> =1
周波数	ヘルツ	Hz		s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N		m <sup>2</sup> ・kg <sup>2</sup> ・s <sup>-2</sup>
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>	m <sup>-1</sup> ・kg <sup>2</sup> ・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 <sup>2</sup> ・s <sup>-2</sup>
工率, 放射束	ワット	W	J/s	m <sup>2</sup> ・kg <sup>2</sup> ・s <sup>-3</sup>
電荷, 電気量	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 <sup>2</sup> ・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 <sup>2</sup> ・s <sup>-3</sup> ・A <sup>-2</sup>
コンダクタンス	ジーメン	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	V・s	m <sup>2</sup> ・kg <sup>2</sup> ・s <sup>-2</sup> ・A <sup>-1</sup>
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>	kg <sup>2</sup> ・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 <sup>2</sup> ・s <sup>-2</sup> ・A <sup>-2</sup>
セルシウス温度 <sup>(d)</sup>	セルシウス度	°C		K
光照射度	ルーメン	lm	cd・sr <sup>(c)</sup>	m <sup>2</sup> ・m <sup>-2</sup> ・cd=cd
(放射核種の) 放射能	ベクレル	Bq	lm/m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup> ・m <sup>-1</sup> ・cd=m <sup>2</sup> ・cd
吸収線量, 質量エネルギー当量	グレイ	Gy	J/kg	s <sup>-1</sup>
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	シーベルト	Sv	J/kg	m <sup>2</sup> ・s <sup>-2</sup>

- (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
粘着力のモーメント	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 <sup>2</sup> ・s <sup>-2</sup>
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg <sup>2</sup> ・s <sup>-2</sup>
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m <sup>2</sup> ・m <sup>-1</sup> ・s <sup>-1</sup> =s <sup>-1</sup>
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎平方秒	rad/s <sup>2</sup>	m <sup>2</sup> ・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 <sup>2</sup> ・s <sup>-3</sup>
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 <sup>2</sup> ・kg <sup>2</sup> ・s <sup>-2</sup> ・K <sup>-1</sup>
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 <sup>2</sup> ・s <sup>-2</sup> ・K <sup>-1</sup>
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m・K)	m <sup>2</sup> ・kg <sup>2</sup> ・s <sup>-3</sup> ・K <sup>-1</sup>
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m <sup>-1</sup> ・kg <sup>2</sup> ・s <sup>-2</sup>
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m <sup>2</sup> ・kg <sup>2</sup> ・s <sup>-3</sup> ・A <sup>-1</sup>
体積電荷	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	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>
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m <sup>2</sup> ・kg <sup>2</sup> ・s <sup>-2</sup> ・A <sup>-2</sup>
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m <sup>2</sup> ・kg <sup>2</sup> ・s <sup>-2</sup> ・mol <sup>-1</sup>
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol・K)	m <sup>2</sup> ・kg <sup>2</sup> ・s <sup>-2</sup> ・K <sup>-1</sup> ・mol <sup>-1</sup>
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg <sup>-1</sup> ・s・A
吸収線量	グレイ毎秒	Gy/s	m <sup>2</sup> ・s <sup>-3</sup>
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m <sup>4</sup> ・m <sup>-2</sup> ・kg <sup>2</sup> ・s <sup>-3</sup> =m <sup>2</sup> ・kg <sup>2</sup> ・s <sup>-3</sup>
放射輝度	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 <sup>2</sup> ・s <sup>-3</sup> =kg <sup>2</sup> ・s <sup>-3</sup>

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 <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
トン	t	1 t=10 <sup>3</sup> 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 <sup>-19</sup> J
統一原子質量単位	u	1 u=1.6605402(10)×10 <sup>-27</sup> kg
天文単位	ua	1 ua=1.49597870691(30)×10 <sup>11</sup> 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 <sup>2</sup> =10 <sup>2</sup> m <sup>2</sup>
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>
バル	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 <sup>5</sup> Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=10 <sup>-10</sup> m
バール	b	1 b=100fm <sup>2</sup> =10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>

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 <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=10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> /s
ガウス	G	1 G=10 <sup>4</sup> T
エルステッド	Oe	1 Oe=(1000/4π)A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx=10 <sup>-8</sup> Wb
スチル	sb	1 sb=1cd/cm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> cd/m <sup>2</sup>
ホト	ph	1 ph=10 <sup>4</sup> lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm/s <sup>2</sup> =10 <sup>-2</sup> m/s <sup>2</sup>

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 <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=1cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
X線単位		1 X unit=1.002×10 <sup>-4</sup> nm
ジャンマ	γ	1 γ=1 nT=10 <sup>-9</sup> T
ジャンスキー	Jy	1 Jy=10 <sup>-26</sup> W・m <sup>-2</sup> ・Hz <sup>-1</sup>
フェルミ	f	1 fermi=1 fm=10 <sup>-15</sup> m
メートル系カラット		1 metric carat = 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
カロリー	cal	
マイクロン	μ	1 μ=1um=10 <sup>-6</sup> m

