

HTTR-IS水素製造システムに供するブンゼン反応器 および硫酸分解器の構造概念

Structural Concept Design of the Bunsen Reactor and Sulphuric Acid Decomposer
of the HTTR-IS Hydrogen Production System

原 輝夫 坂場 成昭 佐藤 博之 大橋 弘史
橘 幸男 國富 一彦

Teruo HARA, Nariaki SAKABA, Hiroyuki SATO, Hirohumi OHASHI
Yukio TACHIBANA and Kazuhiko KUNITOMI

原子力基礎工学研究部門
コジェネレーション高温ガス炉設計評価グループ
HTGR Cogeneration Design and Assessment Group
Nuclear Science and Engineering Directorate

March 2008

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

HTTR-IS 水素製造システムに供するブンゼン反応器および硫酸分解器の構造概念

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

原 輝夫^{*1}、坂場 成昭、佐藤 博之、大橋 弘史、橘 幸男、國富 一彦

(2008 年 1 月 18 日 受理)

原子炉の核熱を利用した水素製造の実用化には、他の水素製造法に対して経済的に競合できる必要があり、そのためには水素製造プラントの建設コストを削減することが重要である。高温ガス炉 HTTR に接続する熱化学法 IS プロセス水素製造システムにおいては、機器数の低減や小型化および汎用材料の使用により機器製作コスト削減を可能とするミキサセトラ型ブンゼン反応器および一体型硫酸分解器の概念を提案してきた。本報では、これら機器の詳細な構造検討をおこない、新しい概念を提案することにより、さらなる性能向上および小型化を可能とした。ブンゼン反応器においては、マイクロバブル生成装置を内蔵したスタティックミキサによる水と二酸化硫黄および亜硫酸とヨウ素の混合促進を提案し、加えてセトラ部の隔壁による硫酸とヨウ化水素酸の分離促進を提案した。また、硫酸分解器においては、流路構成の最適化による機器小型化を可能とさせ、機器物量の低減が図れることを示した。

Structural Concept Design of the Bunsen Reactor and Sulphuric Acid Decomposer of the HTTR-IS Hydrogen Production System

Teruo HARA^{※1}, Nariaki SAKABA, Hiroyuki SATO, Hirohumi OHASHI,
Yukio TACHIBANA and Kazuhiko KUNITOMI

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

(Received January 18 , 2008)

Since nuclear hydrogen production system should be economically competitive compared with other hydrogen production methods, it is important to reduce the construction cost of the IS process hydrogen production plant. Japan Atomic Energy Agency (JAEA) has started the conceptual design study of components in the IS process hydrogen production system to be connected with the HTTR (HTTR-IS system). This paper describes the additional proposal for the mixer-Settler type Bunsen reactor and combined sulphuric acid decomposer of the HTTR-IS system which enhances their performance and enables reduction of fabrication cost. The enhancements of the mixing and separating performance in the Bunsen reactor using static mixers with microbubble and dams, and minimizing the size of the combined sulphuric acid decomposer by optimizing its flow path remarkably contribute to the size reduction of components.

Keywords: Nuclear Hydrogen, Hydrogen Production, IS Process, HTTR, HTTR-IS System, Bunsen Reactor, Sulphuric Acid Decomposer

^{※1} Collaborating Engineer (Mitsubishi Heavy Industries Ltd.)

目次

| | |
|-----------------------------------|----|
| 1. はじめに..... | 1 |
| 2. ブンゼン反応器の高度化検討..... | 2 |
| 2.1 概要..... | 2 |
| 2.2 混合・反応効果の検討..... | 2 |
| 2.2.1 バブルによる気液混合・反応の促進..... | 2 |
| 2.2.2 ミキサ形状および攪拌機による混合・反応の促進..... | 3 |
| 2.3 分離促進構造の検討..... | 4 |
| 2.4 全体構造概念..... | 5 |
| 2.5 形状構造の健全性確認（構造最適化）..... | 6 |
| 2.5.1 耐圧強度..... | 6 |
| 2.5.2 耐震性..... | 6 |
| 2.6 ブンゼン反応器のまとめ..... | 7 |
| 3. 硫酸分解器の高度化検討..... | 8 |
| 3.1 概要..... | 8 |
| 3.2 伝熱性能面からの構造最適化検討..... | 8 |
| 3.2.1 伝熱部構造および機器内ヒートマスバランス..... | 8 |
| 3.2.2 硫酸分解器内伝熱性能計算..... | 9 |
| 3.3 構造簡素化検討..... | 11 |
| 3.4 硫酸分解器のまとめ..... | 12 |
| 4. おわりに..... | 13 |
| 謝辞..... | 13 |
| 参考文献..... | 14 |

Contents

| | |
|--|----|
| 1. Introduction..... | 1 |
| 2. Study of Bunsen reactor..... | 2 |
| 2.1 Outline..... | 2 |
| 2.2 Mixing..... | 2 |
| 2.2.1 Effect of bubbles..... | 2 |
| 2.2.2 Effect of the structure and stirrer..... | 3 |
| 2.3 Separating | 4 |
| 2.4 Conceptual Design | 5 |
| 2.5 Structure confirmation (structure optimization)..... | 6 |
| 2.5.1 For Pressure | 6 |
| 2.5.2 For Earthquakes..... | 6 |
| 2.6 Summary | 7 |
| 3. Study of sulphuric acid decomposer | 8 |
| 3.1 Outline..... | 8 |
| 3.2 Structure optimization for heat transfer..... | 8 |
| 3.2.1 Structure and Heat-mass-balance..... | 8 |
| 3.2.2 Heat transfer calculation..... | 9 |
| 3.3 Structure simplification..... | 11 |
| 3.4 Summary | 12 |
| 4. Concluding remarks | 13 |
| Acknowledgements | 13 |
| References | 14 |

1. はじめに

地球温暖化が世界規模の環境問題として近年大きく取り上げられ、その主要な要因のひとつである二酸化炭素の排出削減に政府、民間をはじめ幅広い産業で取り組まれている。また、現在主要なエネルギー源である原油の価格高騰により、電気などの二次エネルギーやこれらエネルギーを使用した生産物の価格上昇が問題となっている。原子力はこのような環境問題やエネルギー資源問題の解決策として期待され、最近これまでになく各国で原子炉建設の機運が高まり、日本においても軽水炉の高度化、高速炉開発、リサイクル技術開発等に注力されている。

一方、原子力以外の将来的なエネルギーとしては水素が有望視され、自動車や家庭用燃料電池の燃料として用いることを前提に関連技術の研究開発が進んでいる。水素は自然界ではほとんど単独では存在せず、水や有機物の状態で存在しており、現在では天然ガスやコークスガスから取り出されているが、これら化石燃料を原料とする限り前述の環境問題やエネルギー資源問題の根本的な解決とは成り得ない。

日本原子力研究開発機構（原子力機構）では、原子力による水素製造の開発に取り組み、高温ガス炉の核熱を利用して二酸化炭素を排出することなく水を分解する水素製造法、ヨウ素-硫黄系熱化学プロセス（IS プロセス）¹⁾の技術開発を進めている。熱源となる高温ガス炉の開発では高温工学試験研究炉（HTTR）を建設し、2004年に世界で初めて950℃の高温のヘリウムガスを炉外に取り出すことに成功した²⁾。一方、IS プロセスの開発ではベンチスケールによるIS プロセス水素製造実験で連続的に水素を製造することを実証し、現在、水素の製造能力が30Nm³/h規模のパイロットプラント試験装置を計画している³⁾。また、それと並行して原子力機構が所有する高温ガス炉HTTRに接続する1,000Nm³/h規模のIS プロセスプラント（HTTR-IS システム）も検討を進め、熱効率約44%、水素製造量約1,100Nm³/h規模のHTTR-IS システムの基本的成立性を確認した⁴⁾。

IS プロセスの実用化に向けた開発ステップにおいては他の水素製造システムと経済的に競合できるシステムであることが重要であり、HTTR-IS システムの検討を進める中で一部システムの合理化に着手した⁵⁾。具体的には、システムを構成する機器数の低減やコンパクト化、コスト的に有利な汎用材料の多用、据付工事物量の低減が有効と判断してシステムを構成する機器の一体化検討を提案した。本報ではHTTR-IS システム中の代表的な機器であるブレンデン反応器と硫酸分解器について、前報⁵⁾の一体化した機器概念をベースにさらなる高度化検討を行った結果を報告する。

2. ブンゼン反応器の高度化検討

2.1 概要

ブンゼン反応器は以下の化学反応により、二酸化硫黄、ヨウ素、水からヨウ化水素と硫酸を生成する機能を有する反応器である。



先の検討において、HTTR-IS システムにおける系統の合理化を目的としてブンゼン反応器、二相分離器およびその間を結ぶ液移送ポンプの一体化検討を実施し、表-1 の設計条件をもとにミキサセトラ⁶⁾型のブンゼン反応器の構造概念図-1 を提案した⁵⁾。

HTTR-IS システムの目的のひとつは IS プロセスを実際に高温ガス炉 HTTR に接続して核熱を利用した水素製造を実証し、その経済的優位性を示すことである。したがって、プロセスを構成するブンゼン反応器において、ヨウ化水素と硫酸の生成・分離機能を満足させるのは当然のこと、設備建設コストを抑えるために合理性を追求し、性能向上を図らなければならない。そこで、本検討ではブンゼン反応の原料となる二酸化硫黄（気体）と水、ヨウ素（液体）の混合・反応および生成したヨウ化水素と硫酸（液体）の重力分離の促進化方法を検討し、結果を構造概念に反映させることにより、一体型ブンゼン反応器の高度化を図る。

2.2 混合・反応効果の検討

一体型ブンゼン反応器では二酸化硫黄、水、ヨウ素の混合・反応を2段階で行う。ブンゼン反応器の前段である硫酸設備で硫酸を加熱分解することにより得られた二酸化硫黄および酸素はガス状で反応器に流入させる。このうち、二酸化硫黄-水-ヨウ素の混合溶液系では二酸化硫黄の吸収率は酸素に比べて非常に大きく、混合溶液によりよく分離されることが報告されている⁷⁾。また、同報告の中で二酸化硫黄の混合溶液への吸収はヨウ素濃度にはほぼ無関係に見かけ上零次反応として極めて速やかに行われるものとされている。このことから、まず1段階目で二酸化硫黄と水を混合・反応させて亜硫酸を速やかに生成させ、2段階目で亜硫酸とヨウ素と水の3液を機械的に混合、反応させることにより硫酸とヨウ化水素を得る構造を提案する。

2.2.1 バブルによる気液混合・反応の促進

ここでは1段階目におけるガス状の二酸化硫黄を水と混合・反応させ、亜硫酸を生成させる反応を考える。前述のとおり、二酸化硫黄と水は速やかな反応が期待されるが、より速く確実に溶解、反応させるため構造を工夫する。

一般的に、気体を液体中に速く溶解させるためには、より多くの気体を、より広い面積で液体と接触させることが重要である。今回対象とする器内のブンゼン反応は、試験管での三成分混合試験において二酸化硫黄 4mol%、ヨウ素 22mol%、残りを水とした場合に効率よく反応生成物（ヨウ化水素、硫酸）が分離することが報告されている⁸⁾。このことから、1

段階目の気液混合反応促進のために気体である二酸化硫黄のみを多く流入させることは分離までの機能を有する一体型ブンゼン反応器としては好ましくない。したがって、この反応を促進するためには気液接触面積を増加することが望ましい。

気液接触面積を増やすためには、気体を気泡状にして気体流量に対する比表面積を大きくする必要がある。図-2 に二酸化硫黄の気体を気泡状でブンゼン反応器に流入させた場合の気泡の直径と気液接触面積の関係を示す。気泡の直径と気液接触面積は反比例の関係にあり、気泡径が 1mm の時には 175m^2 となる。さらに気泡径を小さくして数 $10\mu\text{m}$ オーダーとしてマイクロバブルにすると、気液接触面積は格段に大きくなる。マイクロバブルについては近年多様な研究が行われ、優れた溶解性が報告されている⁹⁾。また、その発生方法も種々提案されている。マイクロバブル発生方法を表-2 に示す¹⁰⁾。気泡径を 1mm 以下にしようとした場合、図-1 で示したミキサ部の多孔板の孔径は $100\mu\text{m}$ 以下としなければならず、生成流体が亜硫酸で系統内の不純物の詰まり等を考えると実用上困難である。そこで、表-2 のうち、構造がシンプルで動的機器を必要としない方法であり、セラミック等の耐酸性材料で製作可能なスタティックミキサ方式の採用を考える。その中でも、水と二酸化硫黄の反応が比較的速やかであることおよびメンテナンス性を考慮して反応容器外の流入部に設置するインライン方式のスタティックミキサの採用を考える。図-1 の 1 段階目ミキサを本方式に置き換えた概念を図-3 に示す。スタティックミキサは構造を複雑にした流路と流体の流通駆動力の組合せで混合するものであり、流路の構成には様々なものがあるが、今回はマイクロバブルを利用した気体と液体の混合という観点から管内に旋回流を起こす案内板を設けて遠心力によって気体柱を発生させ、別途管内壁に設けた突起によりこれを破碎してマイクロバブルを生成するタイプのものを使用することとした。また、化学反応に伴う発熱はラインに水冷ジャケットを設けることにより除熱することが可能である。

2.2.2 ミキサ形状および攪拌機による混合・反応の促進

1 段階目ミキサで生成した亜硫酸および残部の水は、2 段階目ミキサに流入させ、ヨウ素を加えて 3 液の混合、反応により、ヨウ化水素と硫酸を生成させる。化学工業の分野で広く用いられる混合・反応装置は、バッチ式の場合は反応容器+攪拌装置の組合せ、連続式の場合はインライン式のローターミキサである。

HTTR-IS のブンゼン反応器としては、反応器の下流側プロセスの煩雑化を回避するために連続式が好ましい。しかしながら、腐食性があり析出可能性のあるプロセス流体との接液部に軸封部を有するローターミキサを設置することは軸封からの漏えい、軸固着等、設備運用上のリスクが大きい。また、メンテナンス性および経済性の観点から構造の簡素化も望まれる。したがって、インラインにおいてはプレミキサとしてスタティックミキサを採用し、これに反応器本体において攪拌槽式のみキサを組み合わせることにより、連続でも効率よい均一な混合・反応が期待できる。本構造の概念を図-4 に示す。スタティックミキサは 1 段階目と異なり、長方形の板を左方向又は右方向に 180 度ねじった 2 種類のエレメントを管内部に交

互に並べることにより、流体の分割、転換、反転作用を生じさせて混合を促進するタイプを選定した。化学反応に伴う発熱は1段目と同様にライン上に設けた冷却ジャケットで除熱するものとし、攪拌槽においても除熱が必要な場合は冷却コイルを槽内に投入することにより除熱する。

反応器本体に設置する攪拌槽の概念を図-5に示す。槽の形状はブンゼン反応器本体のミキサ部矩形容器の中に、図に示す下部円錐鏡を有する円筒槽を設け、ここで攪拌機を用いた機械的な混合を行い、反応を促進する。プレミキサで混合された流体は槽下部に設けたノズルから槽内に導入し、円錐状の下鏡に向けたノズルから円錐頂部に当たるように混合流体を噴出させ、この噴流により槽下部で攪拌流を起こす。さらに、槽中央部および上部において多段のパドル翼を有する攪拌機で機械的に混合する。この時、多段パドル翼では上段翼と下段翼の角度を45度にした場合に混合時間が最小となり、それぞれの攪拌領域が干渉して分離しないためには翼の先端鉛直方向に補助翼を設けることが効果的との報告がある¹¹⁾。そこで本攪拌槽もこれに倣い図に示す構造とした。2枚のパドル翼形状は、実際に要素試験を実施し、その効果を確認して決定するのが好ましいが、翼径70cm、幅50cm、回転数100rpmとした場合、永田式¹²⁾を用いてその攪拌動力を推算すると7kW程度である。本構造の特長は簡素的な構造でマイクロバブルにより効果的に均一な混合がおこなえること、槽底部を円錐状として常に噴流を当てて巻き上げることにより、析出ヨウ素が容器に固着するのを防止することである。

2.3 分離促進構造の検討

ミキサ部で生成したヨウ化水素、硫酸はセトラ部に導入し、そこでそれら2相の比重差により分離する。セトラ部の機能はこの比重分離によりヨウ化水素と硫酸を分けて排出することであり、静置による比重分離の場合には、滞留させる時間と流路の形状により分離性能が決まる。一般的にセトラ部で滞留させる時間は長い方が分離上有利である。しかし、一定の流入量がある以上は、長時間の滞留時間は容器容量の増大につながり合理的とは言えない。本検討では表-1に示した流量240t/h、滞留時間5min(静置)をもと一体化検討⁵⁾の際にサイジングした20m³の容積を有する1,400W×5,400L×2,700Hの容器をベースに考える。

分離を促進するための流路の構成については、一定の流入量がある一定容積下での分離を考えた場合、分離が終わった相を速く排出し、未分離相をなるべく長時間容器内に滞留させることが重要である。これを構造的に具現化し、高速炉燃料再処理におけるパルスカラムの検討の中で有機相と水相の分離試験が行われている¹³⁾。具現化された構造および分離試験状況を図-6に示す。この報告では、構造的にセトラを仮静置部と相分離部に分けて、前者で分離の済んだ有機相、水相を速やかに後者に流出させ、隔壁で未分離相を滞留させることにより2相の分離が促進され、後者では揺らぎのない安定した界面が得られている。また、エマルジョン相*を形成することなく安定した界面が得られたこの結果はセトラ内に4分以上滞留できる流量条件としている。

*: 溶質溶媒がともに液体である分散系溶液の相。乳濁。

一体型ブンゼン反応器のセトラ部に前述の分離構造を採用した概念を図-7に示す。セトラ部を仮静置部と相分離部の2つに区分し、仮静置部には3枚の隔壁を設けて未分離相は滞留させ、分離したヨウ化水素は隔壁の下から、硫酸は上から次の段に速やかに流出させる。これを3段階繰り返して粗分離した流体は相分離部に移動させ、時間をかけて完全に分離させる。その後、硫酸はセトラ部右端上段のノズルから、ヨウ化水素は下段のノズルから排出する。この時、ヨウ化水素側出口部には流量調節弁を設け、界面がほぼ中段一定となるように調整する。界面付近に蓄積された未反応成分および未分離成分は、適宜中段のノズルから外部に取り出し、混合前の上流側に戻すものとする。

2.4 全体構造概念

ブンゼン反応器の主たる機能である混合・反応と分離に分けて、それぞれの機能を高度化し得る技術を提案した。これにより、現在の化学分野における混合・反応、攪拌および分離に関する優れた技術を融合した一体型ブンゼン反応器の概念を構築した。提案した概念を図-8に示す。

ベースとなる構造は矩形容器であるミキサセトラとし、入口部に水と二酸化硫黄の混合機能およびその混合流体と硫黄の粗混合機能を持つ型式の異なる2つのスタティックミキサを組み込んだ。このうち、気液混合となる水と二酸化硫黄の混合にはマイクロバブルにより混合促進を図るスタティックミキサを採用した。使用流体が腐食性流体であり、析出可能性があることから実際の運用を考えて、これらのミキサは2系列設け、片系使用時にもう一方の片系が洗浄、交換等のメンテナンスができるようにした。また、この入口部には反応熱除去のために冷却ジャケットを設けることとし、ヨウ素入口ラインには未反応および未分離溶液の戻りラインを接続できることとする。本体部は矩形容器を平板で仕切り、ミキサ部とセトラ部を独立して形成し、それぞれ表-1に示した流体条件（流量、滞留時間）を満足するように容器容量を設定した。総じて製作性、メンテナンス性の向上を目指して簡素な構造とした。なお、発熱反応による反応熱の除去については、今後詳細設計で検討するが、ラインに設けた冷却ジャケットにより反応熱を全て除熱する見込みがたたない場合には、必要に応じて容器外部に冷却フィン又は冷却ジャケットを設置する。

2.5 形状構造の健全性確認（構造最適化）

本項では先に示した構造概念について耐圧強度および耐震性の面から構造最適化検討を実施する。

2.5.1 耐圧強度

構造概念において設定した容器サイズを基に、ブンゼン反応器にかかる液頭圧に対する部材強度を満足しつつ合理化の観点から最適な容器部材の板厚を求める。容器サイズは図-8に示すようにセトラ部が1,400W×5,400L×2,700H、ミキサ部が1,400W×1,400L×2,000Hとし、内包する混合溶液の比重を4と仮定してそれぞれの液頭圧を0.11MPa、0.08MPaとした。また、容器胴部には700mmピッチで補強リブを設けるものとし、4辺固定の平板に液頭圧の均一荷重がかかるものとして、板厚を8~18mmまで変化させた場合のそれぞれの曲げ応力を求めた。計算結果を図-9に示す。図中の破線は胴部の候補材料である炭素鋼材SS400の許容値100N/mm²を示したものである。この許容値を満足するには、ミキサ部の板厚12mmで84N/mm²、ミキサ部の板厚14mmで85N/mm²である。したがって、素材調達の合理性から共通部材での製作を考えると、反応器胴部の最適な板厚は14mmとなる。

2.5.2 耐震性

液頭圧に対する強度を満足したブンゼン反応器形状を基に耐震性の面から構造最適化検討を行う。原子力関連機器耐震性の検討は、一般的には機器運転時重量と水平震度から地震荷重を求め、機器の圧力バウンダリとなる部位および支持部位の健全性を評価する。ただし、今回は内包する流体が自由液面を持つ大型の矩形容器という点に着目し、地震時においてその液面揺動が容器に与える影響を荷重として算出して評価することとした。荷重は矩形容器寸法を変化させてそれぞれの値を求めて比較し、設定した形状寸法の耐震性の面からの最適性を確認した。地震時の液面揺動による容器への荷重は比較的簡便な評価手法として一般に使用されているハウスナー理論を用いた¹⁴⁾。この理論は液面揺動の影響を衝撃圧と振動圧に分けて考えるもので、今回は後者の容器内の液体の動揺振動によって生じる荷重を求めた。計算条件は水平震度0.24一定とし、溶液比重を4、容器鋼材の比重を7.85g/cm³と仮定して質量を求め、矩形容器長辺の長さを変化させて容器にかかるそれぞれの振動力を求めた。計算結果を図-10に示す。容器長辺が3,400mmの時の振動力は6,444kgfで、長辺が長くなるとともにその値は増加し、8,400mmで12,392kgfであった。現設計点を同図に示しているが、長辺5,400mmで9,527kgfである。一方、容器運転重量と水平震度から求まる地震荷重は約20,000kgfであり、衝撃荷重分を考えると液体の振動力はその1/2程度に抑えることが望ましい。したがって、ブンゼン反応器の性能面からは分離性能を向上させるために容器長辺を伸ばすことが有利であるが、地震時の液面揺動を考慮して現設計形状が最適であると判断した。

2.6 ブンゼン反応器のまとめ

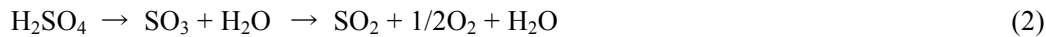
ブンゼン反応器性能の高度化を狙った概念設計と構築した構造概念に対する健全性評価を実施した。概念設計は一体化したミキサセトラ型ブンゼン反応器をベースに混合および分離性能を向上させるため、マイクロバブルによる気液混合、スタティックミキサと攪拌槽を組み合わせた混合、粗分離と静置を組み合わせた分離構造等を機器概念に取り込んだものである。

本形状にて、未反応溶液および不完全分離溶液の流出を低減させることが期待できるが、今後、試験や流体シミュレーションを通じてその性能を定量的に実証し、さらなる最適化を設計段階に応じて実施する。また、実用化に向けては、上記に加え、廉価ライニング材の耐久性、施工性の検討や反応器構造の設計も重要である。

3. 硫酸分解器の高度化検討

3.1 概要

硫酸分解器は約 90%の高濃度硫酸を加熱によりブンゼン反応の原料となる二酸化硫黄まで分解する化学反応器である。硫酸を二酸化硫黄まで分解するためには、以下化学反応に従い 500℃程度で加熱分解して三酸化硫黄ガスを生成させ、さらにこれを 900℃程度で加熱分解する必要がある。



HTTR-IS システムでは上記の加熱分解に HTTR の核熱を利用する。核熱の媒体となるヘリウムと硫酸との熱交換器として、先の検討で構造部材やシール部位の低減を目的に予熱器、硫酸分解器、SO₃分解器を統合した図-11 に示す一体型の硫酸分解器を提案し構造の合理化が図られたが、一方で機器サイズに難点があった⁵⁾。したがって、硫酸分解器においても、構造をコンパクト化、簡素化させ機器製作コストを下げるのが実用化に向けた課題である。特に硫酸分解器は高温硫酸という環境下で耐えうる高コスト材料を使用するため、コンパクト化は極めて重要である。そこで、本検討では提案した一体型硫酸分解器をベースに構造寸法をパラメータとして伝熱性能面から見た構造の最適化を図る。さらに、その伝熱性能を確保しつつ構造の簡素化を達成させ、合理的な構造概念を提案する。

3.2 伝熱性能面からの構造最適化検討

3.2.1 伝熱部構造および機器内ヒートマスバランス

硫酸分解器では高温ヘリウムでの加熱により液体硫酸を二酸化硫黄まで分解し、生成した二酸化硫黄の余剰熱により分解前の液体硫酸を予熱する。図-12 に伝熱部概略を示す。ヘリウムは中央の二重管内管下部より熱交換器に流入し、二重管外管を流れる三酸化硫黄と熱交換しながら上昇、上部で折り返し、単管を通過して管外の硫酸と熱交換した後、中段から熱交換器外へ流出する。一方、液体硫酸は熱交換器下部の管外へ流入し、単管内を流れる二酸化硫黄ガスにより加熱されながら上昇する。その後、上部の単管を流れるヘリウムによって三酸化硫黄に加熱分解され、折り返し二重管の外管を流れ下部まで流れる間に二重管内管のヘリウムにより二酸化硫黄まで分解される。二酸化硫黄は下部で再度折り返し、単管内を回りながら管外の液体硫酸と熱交換して、中段より熱交換器外へ出る。本熱交換器は、約 900℃の高温ヘリウムと硫酸又は三酸化硫黄の主たる熱交換部に上下熱交換部を貫通した二重管を用いることにより高温域の伝熱面積を大きくしていることが特長であり、高温腐食環境下でも耐食性が期待でき、製作性の観点からも優れたセラミックコーティングの耐熱合金¹⁵⁾の使用を想定した。また、900℃を多少下回った温度域でも硫酸の二酸化硫黄への分解反応が可能ないように二重管外管部の三酸化硫黄流路に白金触媒を充填する¹⁶⁾。

本熱交換器の内部の熱の授受を大別すると、硫酸系流体とヘリウム間の熱交換および生成二酸化硫黄と液体硫酸間の熱交換である。前者は二重管と上部の単管部で行われ、後者は下

部単管部で行われる。ここで、それぞれの部位における交換熱量を表-3 に示す本熱交換器へ要求される設計条件（出入口流体条件）をもとに溶解平衡を考慮した上でヒートマスバランス計算を行って求めた。結果は図-12 中に示すが、前者は 4,169kW で後者は 1,564kW であった。

3.2.2 硫酸分解器内伝熱性能計算

前述の交換熱量をもとに硫酸分解器各部位における伝熱計算を行う。交換熱量が大きく、機器構造寸法を決める上で支配的となる高温ヘリウム—三酸化硫黄間の熱交換部位については、伝熱部構造寸法をパラメータとしてサーベイし、伝熱管部材が合理的な物量で、硫酸分解器の必要交換熱量を満足する寸法を求める。

(1) 計算条件

(i) 液体硫酸—二酸化硫黄熱交換部

本部位は機器下部の単管における熱交換であり、管内側を二酸化硫黄が流れ、管外側を液体硫酸が流れる。流体および形状に係る計算条件を表-4 に示す。液体硫酸系側の熱伝達係数の算出には、既往研究の成果¹⁷⁾から沸騰領域には西川・藤田の相関式¹⁸⁾に Stephan-Korner の 2 成分系の補正を加えた式¹⁸⁾を、円管内の二酸化硫黄側には Dittus-Boelter の式¹⁸⁾を用いた。

(ii) 高温ヘリウム—三酸化硫黄熱交換部

機器中央部に配する二重管および上部単管での熱交換である。二重管での熱交換が支配的となるため、本計算では単管部での熱交換量も二重管で行われるものと仮定した。流体は二重管内管内側を高温ヘリウムが流れ、内管と外管の間隙を三酸化硫黄が流れる。流体および形状に係る計算条件を表-5 に示す。高温ヘリウム側の熱伝達係数の算出には、Dittus-Boelter の式を二重管内外管の間隙の三酸化硫黄側には環状流路内の乱流の評価式である Dalle-Donne の式¹⁸⁾を用いた。

(2) 伝熱計算結果

各熱交換部位の伝熱計算の結果、求めた必要伝熱面積を表-6 に示す。必要伝熱面積は下部単管では 195m²で、二重管では 1,603m²であった。設計裕度として 20%を考慮すると伝熱管長さおよび本数は前者が 13m×150 本、後者が 25m×600 本となった。これより、硫酸分解器形状寸法を左右するのは二重管部であり、想定した伝熱管寸法を基に硫酸分解器へ展開すると図-11 に示したようになりかなり大型の熱交換器となる。

(3) パラメータサーベイ

(i) 計算条件

前述の伝熱計算にて、機器構造寸法を決める上で支配的となるのは高温ヘリウム—三酸化硫黄間の熱交換部位であり、想定した伝熱管寸法では大型の熱交換器となることがわかった。そこで、本項では高温ヘリウム—三酸化硫黄間の伝熱部構造寸法をパラメータとして流体流速を変化させ、伝熱管長さおよび管素材物量が最適となるようにサーベイを行った。

計算条件を表-7に示す。計算式および流体条件は前述の伝熱計算と同様とし、伝熱部である二重管の形状(径と板厚)を表に示す9ケースを仮定し、それぞれ二重管が200本から700本の場合について伝熱計算を実施し、必要伝熱面積から二重管の長さおよび管素材物量(部材重さ)を求めた。

CASE1~3は二重管内管の寸法を先に述べた伝熱計算と同じ形状寸法とし、外管の内径を変化させて内外管の間隙3~5mmとしたものである。なお、CASE2が前述の計算条件と全く同じ条件である。次にCASE4~6は二重管内管の内径はCASE1~3と同じ寸法とし、管の板厚を5mmとしたものである。これは、内管の耐圧強度設計を内部流体圧力に対する4MPaの全圧設計から2MPaの内外差圧設計に変更した場合を仮定して設定した。外管内径は前記同様に間隙が3~5mmとなるように設定した。最後にCASE7~9は内径を5mm大きくして15mmとし、管の板厚および外管の設定はCASE4~6と同様にした。

(ii) 計算結果

伝熱計算を行って求めた二重管長さの結果を図-13に、二重管部材重さを図-14に示す。

全体的な傾向として、当然本数を増やせば二重管長さは減少していくものの、本数が多くなるとその効果は低くなっている。また、内外管の間隙が小さい、つまり、その間隙を流れる三酸化硫黄の流速が速いほど顕著に二重管長さは短くなっている。その他、三酸化硫黄の流速が速いほど内管内ヘリウムの流速を上げて二重管長さを短くする効果が大きくなっている。

一方、二重管の重さは、全体的に本数が増加すれば重さも増加しており、本数増加に伴う長さ低減による効果は薄く、管部材重さは本数が支配的だと言える。値そのものは管を全圧設計として厚みを増したCASE1~3が斗出して大きく、差圧設計としたものでは内管径が小さいCASE4~6が小さい。

(4) 最適化検討結果

パラメータサーベイ結果を踏まえて、現実的に最適な構造寸法を検討する。図-13,14にてグラフ化した結果の具体的数値を表-8に示す。二重管長さおよび管部材の重さ以外に管内、管外それぞれの流体流速の計算値も記載している。本表において最適構造を絞り込むに当たり、まず、配管材重さが70tを超えるものおよび管長さが25mを超えるものを除外することとした。表中マスキングした部分である。当該二重管部は950℃で腐食性流体である三酸化硫黄と接する部位であるため、セラミックコーティングの耐熱合金の使用を想定しており、

管部材 kg 当たり 1 万円程度の材料コストがかかる。したがって、できる限り材料コストを抑えるべく 70t をしきい値として選定した。また、機器サイズ（全高）を左右する管の長さは、先の伝熱計算で求めた 25m 以下としなければ合理化検討の意味がなくなるためこれをしきい値とした。この絞り込みにより CASE4 の管本数 300～700 本の場合と CASE7 の管本数 300、400 本の場合が候補として残った。機器全体をコンパクト化するためには長さが短い方が有利であり、管単体の材料コストおよび管板等の加工や組み立てコストを抑えるためには本数を抑えた方が有利である。これらは相反するものであるが、両方の合理性を考え、ほぼ中間に位置する CASE4 の伝熱管 500 本の場合を採用することとした。本パラメータサーベイにより、一体型硫酸分解器の二重管長さは 20m、管部材重さは約 5.3t となり、先の伝熱計算で求めた 25m、23.4 t に対して、長さは約 20%削減、管部材重さは約 77%の削減を可能とした。

3.3 構造簡素化検討

伝熱部の構造最適化検討結果を踏まえ、一体型硫酸分解器の全体構造の簡素化を検討する。図-11 に示した一体型硫酸分解器概念では機器上部に単管の上熱交換器部を設け、二重管を通して上部に達したヘリウムを折り返し、予熱した硫酸又は三酸化硫黄を加熱する構造とした。これは硫酸を完全にガス化させて二重管部に導入することを狙ったものであるが、この場合でも、硫酸ミストの飛沫が二重管部に達することが懸念され、一方で伝熱管を支える管板が 7 枚となり、構造も複雑化していた。そこで、ヘリウムと硫酸系流体との熱交換は二重管部のみとし、ヘリウムを上部で折り返すことなく機器をワンスルーさせるだけで機器外に出す簡素化させた構造を提案する。

二重管長さを 20m とし、上記概念を展開した硫酸分解器の構造概念を図-15 の(A)に示す。全高 23.5m、直径 3m の縦型円筒形の熱交換器で、中央に 500 本の二重管、周りに 150 本の単管を配している。加熱源となる高温ヘリウムは円筒容器の下部鏡板から流入し、二重管内管を通る過程で熱交換をし、上部鏡板から外部に流出する。液体硫酸は円筒容器の下部から流入し、単管内を通る生成二酸化硫黄で予熱されながら上部に達し、そこで折り返して二重管の内外管の間隙に流入する。二重管を上から下に流れる過程でヘリウムにより加熱分解されて三酸化硫黄、二酸化硫黄となり、生成した二酸化硫黄は下部で再度折り返して単管内を通り容器上部から流出する。本構造により、パラメータサーベイする前の図-11 に比較して全高で 3.5m、直径で 0.8m コンパクト化が達成でき、管板も 5 枚に減らすことができた。

さらに、本構造を簡素化、コンパクト化する構造概念を図-15 の(B)に示す。基本的な構造は(A)と同じであるが、中央の二重管の代わりに管外側流路を形成するラッピングワイヤを巻いた単管とし、これを密に配することで、二重管の内外管間隙の流路を単管同士の間隙の流路に置き換えた。(A)では二重管間隙の流速が 3.1m/s であり、これと同等の流速は内径 510mm 程度の円筒状のライナ内に外径 20mm の単管を 500 本配すれば達成できる。このライナの外側に断熱層を設けても内胴外径は 1m 程度となり、(B)図に示すように外胴外径も 2m で抑えることができる。ただし、この場合は単管の間隔がラッピングワイヤの直径分と非常に狭く

なるため、単管全体を支持する板厚の厚い管板では穴あけ加工等製作が困難である。したがって、単管をいくつかのグループに分けてそれぞれ毎に板厚の薄い管板で支持し、その集合体を機器の容器に固定する工夫が必要となる。(B)は(A)に比べて胴外径を1mコンパクト化でき、中央の伝熱管も二重管ではなく単管のため、構造の簡素化も可能とした。

3.4 硫酸分解器のまとめ

一体型とした硫酸分解器のさらなる合理化を目的に伝熱性能および構造面の高度化検討を実施した。伝熱性能面ではパラメータサーベイを行うことにより伝熱部位の構造最適化を図り、構造面ではヘリウム熱交換部位を中央の伝熱管に集中させることおよび二重管を単管に変更することによる簡素化、コンパクト化した構造概念を提案した。

提案した構造概念により、ヘリウムと硫酸の効果的な熱交換による二酸化硫黄生成が期待できるが、今後設計段階に応じて、伝熱性能試験や構造解析を行う。また、耐熱合金へのセラミックコーティング技術は引き続き、原子力機構外での開発状況を注視する。

4. おわりに

本報では、HTTR-IS システムの実現に向けてシステムを構成する主要な機器であるブンゼン反応器と硫酸分解器の高度化検討を行った。HTTR-IS システムの実現は原子力による水素製造プラントの商用化に向けた重要なステップであり、そのためには採算性を見通せるプラント建設コストが達成できる設備、機器の概念構築が必要不可欠である。本検討では、単一機能の複数の機器を一体化した概念をベースにさらなる合理化を目指し、ブンゼン反応器および硫酸分解器に対して、性能向上や構造簡素化を図り、より具現化した概念構造を提案した。ブンゼン反応器では一体化したミキサセトラ型ブンゼン反応器をベースに混合および分離性能を向上させるため、マイクロバブルによる気液混合、スタティックミキサと攪拌槽を組み合わせた混合、粗分離と静置を組み合わせた分離構造等を取り込んだ構造概念とした。また、硫酸分解器ではパラメータサーベイを行うことにより伝熱部位の構造最適化を図り、ヘリウムの熱交換部位を中央の伝熱管に集中させることおよび二重管を単管に変更することによる構造簡素化、コンパクト化した構造概念を提案した。

今後はHTTR-IS システムの系統設計を進めていくと同時に、系統を構成する機器の製作展開を念頭においた機器の実設計を設計段階に応じて実施する。

謝辞

本報の執筆にあたり貴重なご助言を頂いた原子力機構原子力基礎工学研究部門核熱応用工学ユニット長 小川益郎氏、研究推進室長 日野竜太郎氏および高温工学試験研究炉部 HTTR 技術課長 西原哲夫氏に感謝いたします。本検討の一部にご尽力頂いた三菱重工業(株)福井 裕氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) J.L.Russell: "Water Splitting - A Progress Report", 1st World Hydrogen Energy Conference,1A105-1A124(Year).
- 2) Fujikawa, S., Hayashi, H., Nakazawa, T., Kawasaki, K., Iyoku, T., Nakagawa, S., and Sakaba, N.: "Achievement of reactor-outlet coolant temperature of 950°C in HTTR", Journal of Nuclear Science and Technology 41, pp.1245-1254 (2004).
- 3) Kubo, S., Nakajima, H., Kasahara, S., Higashi, S., Masaki, T., Abe, H., and Onuki, K.: "A demonstration study on a closed-cycle hydrogen production by the thermochemical water-splitting iodine-sulfur process", Nuclear Engineering and Design 233, pp.347-354 (2004).
- 4) Sakaba, N., Kasahara, S., Ohashi, H., Sato, H., Kubo, S., Terada, A., Nishihara, T., Onuki, K., and Kunitomi, K.: "Hydrogen production by thermochemical water-splitting IS process utilizing heat from high-temperature reactor HTTR", Proceedings of 16th World Hydrogen Energy Conference WHEC2006,S04-43,
- 5) 坂場成昭, 佐藤博之, 原輝夫, 加藤竜馬, 大橋一孝, 西原哲夫, and 國富一彦: "HTTR-IS 水素製造システムの概念設計", JAEA-Research 2007-058, (2007).
- 6) 梅田幹, 杉川進, 重面隆雄, 三好慶典, 宮内正勝, and 井澤直樹: "臨界安全形状ミキサセトラの設計、製作及び機能試験", JAERI-Tech 96-058, (1997).
- 7) 熊谷俊弥, 岡本千絵, and 水田進: "硫酸マグネシウムの熱分解および生成ガスの分離", DENKI KAGAKU 52, (1984).
- 8) 清水三郎, 小貫薫, 中島隼人, and 佐藤章一: "ニッケル・ヨウ素・硫黄系熱化学水素製造プロセスⅣ. ブンゼン反応", DENKI KAGAKU 53, (1985).
- 9) 南川久人, and 山田哲史: "マイクロバブルによる酸素溶解", 化学工学 第 71 卷 第 3 号, (2007).
- 10) 寺坂宏一: "マイクロバブル発生法と工業装置への適用", 化学工学 第 71 卷 第 3 号, (2007).
- 11) 高田一貴, 岡本幸道, 菊池雅彦, and 伊藤久善: "高効率攪拌翼の開発", 日本流体力学会誌ながれ 22, pp.201-207 (2003).
- 12) S.Nagata: "Mixing Principles and Applications", Kodansha (1975).
- 13) 動力炉・核燃料開発事業団東海事業所: "高速炉燃料パルスカラム技術開発", PNC T N8410 88-039, (1988).
- 14) "Nuclear reactors and earthquakes Reactor Technology TID-4500 22nd Ed."
- 15) Rong, T., and Goto, T.: "Corrosion Behavior of Ceramics-Coated Hastelloy-XR Alloy in an Ar-SO₂ Atmosphere", Materials Transactions 44, pp.962-967 (2003).

- 16) Barbarossa, V., Brutti, S., Diamanti, M., Sau, S., and De Maria, G.: "Catalytic thermal decomposition of sulphuric acid in sulphur-iodine cycle for hydrogen production", *International Journal of Hydrogen Energy* 31, pp.883-890 (2006).
- 17) 野口弘喜, 大田裕之, 久保真治, 小貫薫, and 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* 6, pp.1-4 (2007).
- 18) 日本機械学会: "伝熱工学資料 改訂第4版", (1986).

表-1 ブンゼン反応器設計条件

| 項目 | | 条件 |
|---------|----|-------------|
| 流体条件 | 流量 | 240 t/h |
| | 圧力 | 液頭圧 |
| | 温度 | 100°C (冷却後) |
| 容器内滞留時間 | 混合 | 1min |
| | 静置 | 5min |

表-2 マイクロバブル発生方法

| 型式 | 原理 | 特徴 |
|--------------|--|--|
| 旋回液流式 | 液を高速で円筒状本体に圧入することで内部に高速旋回流を発生させ、この回転運動による圧力降下により下端面の小孔よりガスを自給。ガスは容器内で渦巻状の気体柱を形成し、上端面の中央小孔より排出させ、その際のせん断力により気体柱は粉碎されマイクロバブルとなって、液と共に放出。 | 発生器構造はシンプルだが、ポンプが必要で、液深が深いとコンプレッサが必要。液、ガスの流路が比較的広いいため閉塞しにくく、メンテナンス性がよい。貝の養殖、ダム貯留水の浄化、生物化学的排水処理に実績有り。 |
| スタティックミキサー式 | 流路内の構造を複雑にし、液の流通駆動力により発生した渦流由来の大きな粘性せん断力によって気体を破碎。一例として、管内に旋回流を起こす案内板を設けて遠心力によって気体柱を発生させ、別途管内壁に設けた突起によりこれを破碎してマイクロバブルを生成。 | 他に液噴流に伴うせん断力により気泡を破碎する方法や充填槽を通過させる方法も有り。パイプライン輸送を利用した気液混合促進、曝気槽のガス分散器に実績あり。 |
| エゼクター式 | 狭い流路を高速で通過する液流によって生じる負圧を利用してガスを吸引し、下流における管路拡大より生じたキャビテーションによりガスを微細に破碎。 | 装置構成がシンプル。この種の発生器は多く、段階的に流路を変化させたもの、流路に球状の障害物を設置したもの、スリットを用いるもの等がある。 |
| ベンチェリ式 | 断面積の縮小と拡大を持つ流路中に気泡を含んだ液を通過させることにより、急激な減圧によって気泡を一旦膨張させ続いて急激な圧力上昇で気泡を崩壊させる。 | 最少絞り径を 3mm と比較的大きく設定できる。 |
| 加圧溶解式 | ガスと液の混相をポンプで昇圧して過飽和まで溶解させ、加圧タンク内の未溶解気泡を分離した後、減圧弁を経て常圧液中にフラッシュすることにより析出させる。 | 動力が大きい。従来から排水処理で利用。過飽和液の放散により得た気泡のため、これを再度溶解させるガス吸引プロセスには不適。 |
| 極微細孔式 | 最少孔径 50nm のシラス多孔質ガラス膜からガスを圧入し、水溶液中にマイクロバブルを生成。 | 界面活性剤の添加要、純水不可。 |
| 超音波付加中空針状ノズル | 注射針状の微細管から生成する気泡に超音波振動を付与して離脱を促し、生成気泡をマイクロ化。 | 大型化困難。小さな空間の静止液中へのマイクロバブル供給に適。 |
| 蒸気凝縮式 | 非凝縮性ガスを含んだ加圧水蒸気をノズルから冷却水中に噴射し、サブミリサイズの蒸気泡を分散。その直後、蒸気泡は界面から冷却され急速に凝縮し、非凝縮性ガスのみマイクロバブルとして残存。 | 高压スチームの有効利用によって任意の非凝縮性ガスのマイクロバブルが製造可能で微細孔やポンプなどの機械的動力が不要。 |

表-3 硫酸分解器設計条件

| 項目 | | ヘリウム側 | 硫酸側 |
|-------------|----|-------|-----|
| 流量 (t/h) | | 8.3 | 7.5 |
| 流体圧力 (MPaG) | | 4 | 2 |
| 流体温度(°C) | 入口 | 880 | 410 |
| | 出口 | 532 | 495 |

表-4 液体硫酸-二酸化硫黄間伝熱計算条件

| 項目 | | | 液体硫酸 | 二酸化硫黄 |
|------|------------|----|-----------------------|-------|
| 流体条件 | 流量 (t/h) | | 7.5 | 7.5 |
| | 温度(°C) | 入口 | 410 | 853 |
| | | 出口 | 485 | 495 |
| 幾何条件 | 形状寸法 (伝熱管) | | 外径 40mm、板厚 5mm | |
| | 材質 | | インコイ 800H(SiC コーティング) | |

表-5 高温ヘリウム-三酸化硫黄間伝熱計算条件

| 項目 | | | 高温ヘリウム | 三酸化硫黄 |
|------|------------|----|---|-------|
| 流体条件 | 流量 (t/h) | | 8.3 | 7.5 |
| | 温度(°C) | 入口 | 880 | 485 |
| | | 出口 | 532 | 853 |
| 幾何条件 | 形状寸法 (二重管) | | 内管：外径 40mm、板厚 15mm 外管：外径 59mm、板厚 7mm | |
| | 材質 | | インコイ 800H(SiC コーティング) | |

表-6 各熱交換部位の必要伝熱面積

| | 下部単管部 | 二重管部 |
|--------------------------|-----------|-----------|
| 交換熱量 (kW) | 1,564 | 4,169 |
| 必要伝熱面積 (m ²) | 195 | 1603 |
| 伝熱管本数、長さ | 150 本、13m | 600 本、25m |

表-7 伝熱部計算条件

| 計算 CASE | 二重管内管 | 二重管外管 |
|---------|------------------------------|------------------|
| 1 | 外径 40mm、板厚 15mm (内径 10mm) | 内径 43mm (間隙 3mm) |
| 2 | | 内径 45mm (間隙 5mm) |
| 3 | | 内径 47mm (間隙 7mm) |
| 4 | 外径 20mm、板厚 5mm (内径 10mm) | 内径 23mm (間隙 3mm) |
| 5 | | 内径 25mm (間隙 5mm) |
| 6 | | 内径 27mm (間隙 7mm) |
| 7 | 外径 25mm、板厚 5mm (内径 15mm) | 内径 28mm (間隙 3mm) |
| 8 | | 内径 30mm (間隙 5mm) |
| 9 | | 内径 32mm (間隙 7mm) |

表-8 パラメータサーベイ結果

| 伝熱管サイズ | | 伝熱管本数 | | | | | |
|-------------|------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 内管 | 外管 | 200本 | 300本 | 400本 | 500本 | 600本 | 700本 |
| d:10, do:40 | d:43 | 82637 26.9 71.4 | 105984 23 47, 2.7 | 127795 20.8 35, 2 | 148224 19.3 28, 1.6 | 168653 18.3 24, 1.3 | 188160 17.5 20, 1.1 |
| | d:45 | 110205 35.3 71, 2.3 | 143766 30.7 47, 1.6 | 175454 28.1 35, 1.2 | 205269 26.3 28, 0.9 | 234147 25 24, 0.8 | 262244 24 20, 0.7 |
| | d:47 | 139247 43.9 71, 1.6 | 184129 38.7 47, 1.1 | 226474 35.7 35, 0.8 | 265647 33.5 28, 0.7 | 304503 32 24, 0.5 | 341932 30.8 20, 0.5 |
| d:10, do:20 | d:23 | 27386 25.5 71, 7.7 | 36568 22.7 47, 5.1 | 44891 20.9 35, 3.8 | 53161 19.8 28, 3.1 | 60893 18.9 24, 2.6 | 68411 18.2 20, 2.2 |
| | d:25 | 40236 35.8 71, 4.4 | 54116 32.1 47, 2.9 | 67210 29.9 35, 2.2 | 79516 28.3 28, 1.8 | 91373 27.1 24, 1.5 | 102669 26.1 20, 1.3 |
| | d:27 | 54819 46.7 71, 3 | 74129 42.1 47, 2 | 92265 39.3 35, 1.5 | 109462 37.3 28, 1.2 | 126072 35.8 24, 1 | 142154 34.6 20, 0.9 |
| d:15, do:25 | d:28 | 35608 26.9 32, 6.2 | 47852 24.1 21, 4.2 | 59302 22.4 16, 3.1 | 70488 21.3 13, 2.5 | 81011 20.4 11, 2.1 | 90807 19.6 9, 1.8 |
| | d:30 | 50001 36.4 32, 3.6 | 67790 32.9 21, 2.4 | 84618 30.8 16, 1.8 | 100277 29.2 13, 1.4 | 115388 28 11, 1.2 | 130292 27.1 9, 1 |
| | d:32 | 66198 46.5 32, 2.5 | 90115 42.2 21, 1.7 | 112465 39.5 16, 1.2 | 133820 37.6 13, 1 | 154177 36.1 11, 0.8 | 173894 34.9 9, 0.7 |

注)表中の各欄の中央は伝熱管長さ(m、伝面裕度20%)、上段重量(kg)、下段管内流速(m/s、左:管内、右:管外)
 :材料物量が70tを超えるもの、
 配管長さ25mを超えるもの

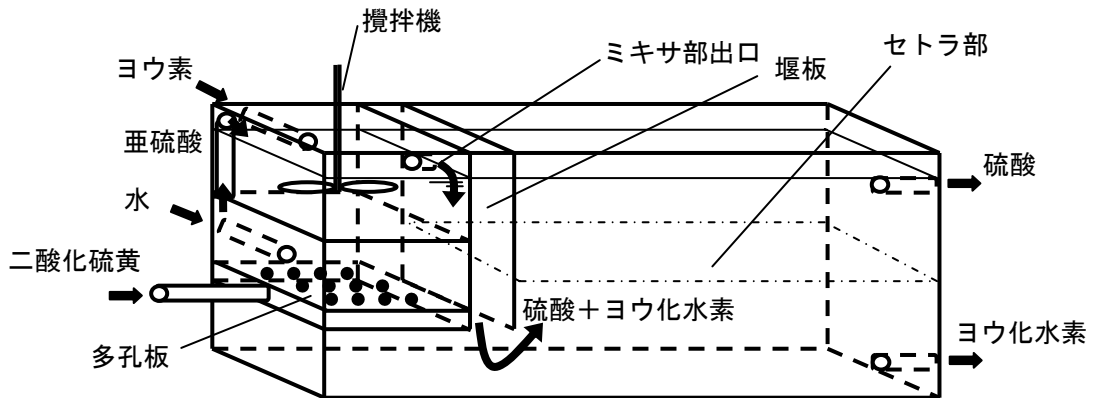


図-1 ミキサセトラ型ブンゼン反応器構造概念

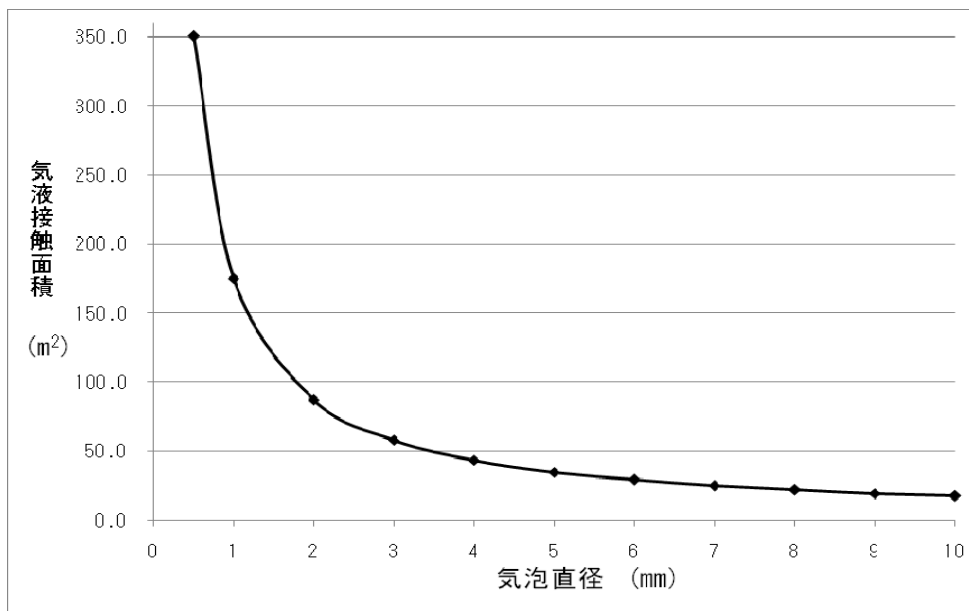


図-2 ブンゼン反応器における気泡直径と気液接触面積

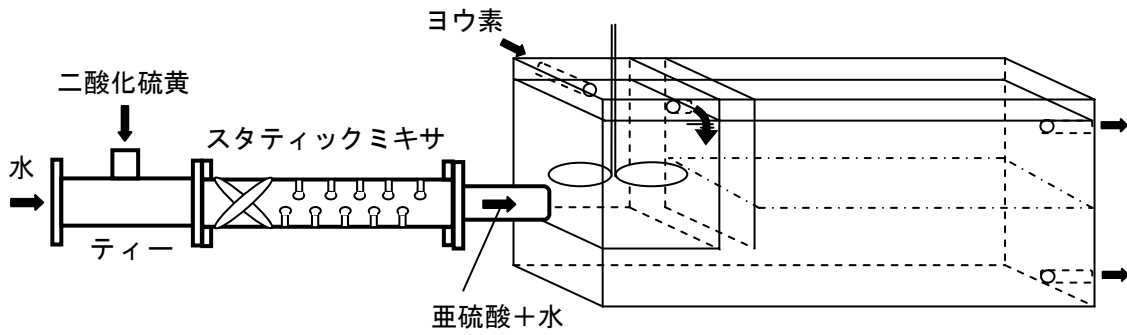


図-3 1 段階目スタティックミキサ採用概念図

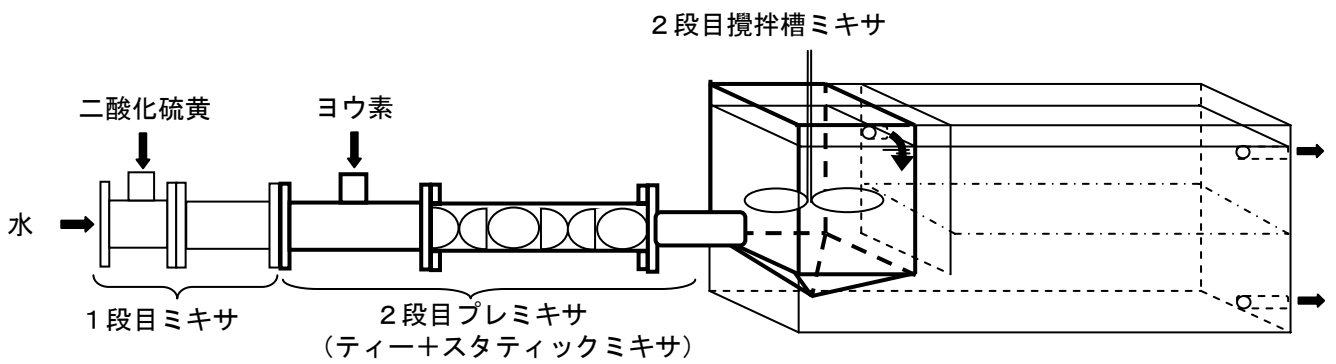


図-4 2 段階目ミキサ採用概念図

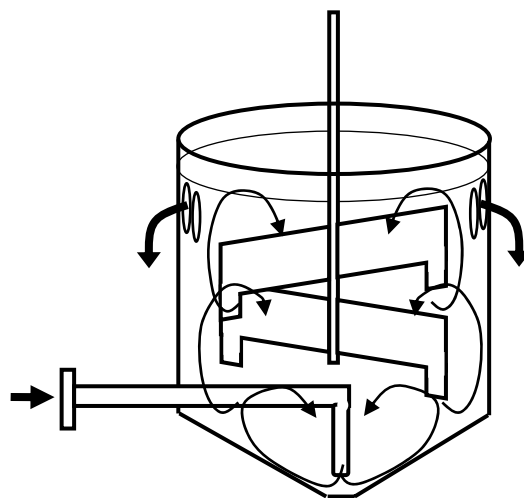


図-5 2 段階目ミキサ攪拌槽部詳細

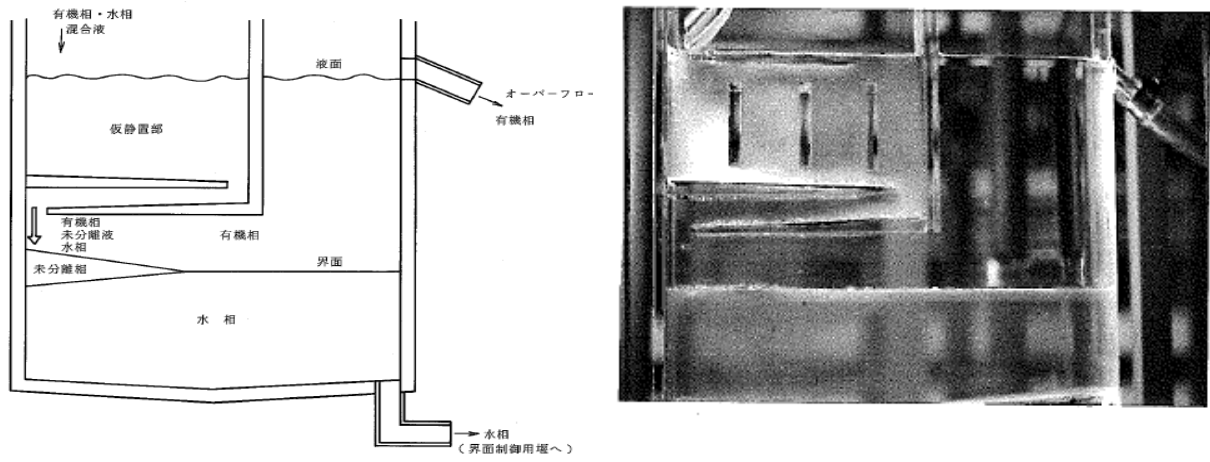


図-6 セトラ構造及び試験状況¹³⁾

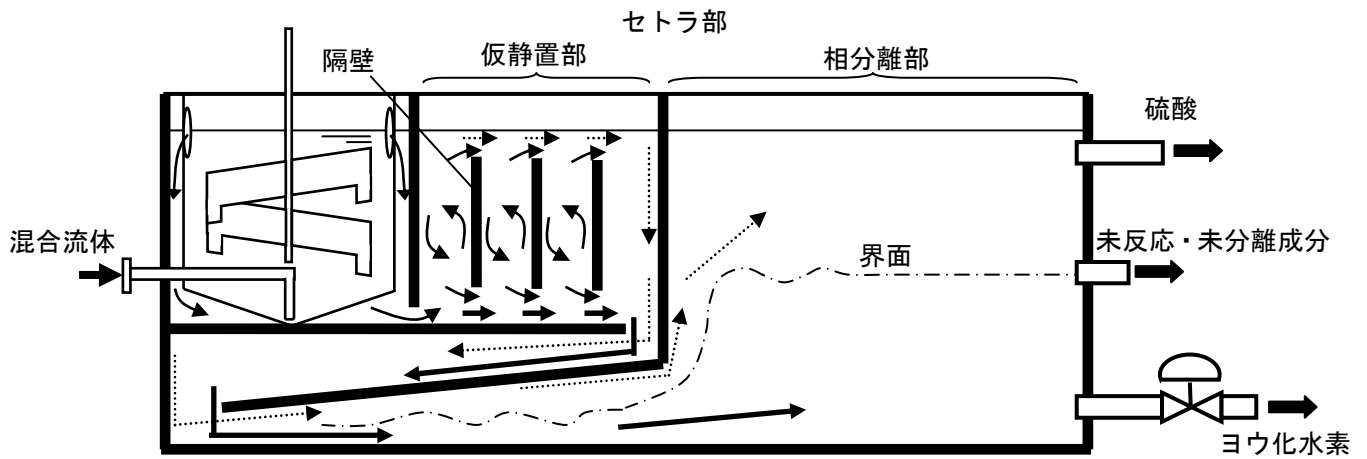


図-7 セトラ部概念図

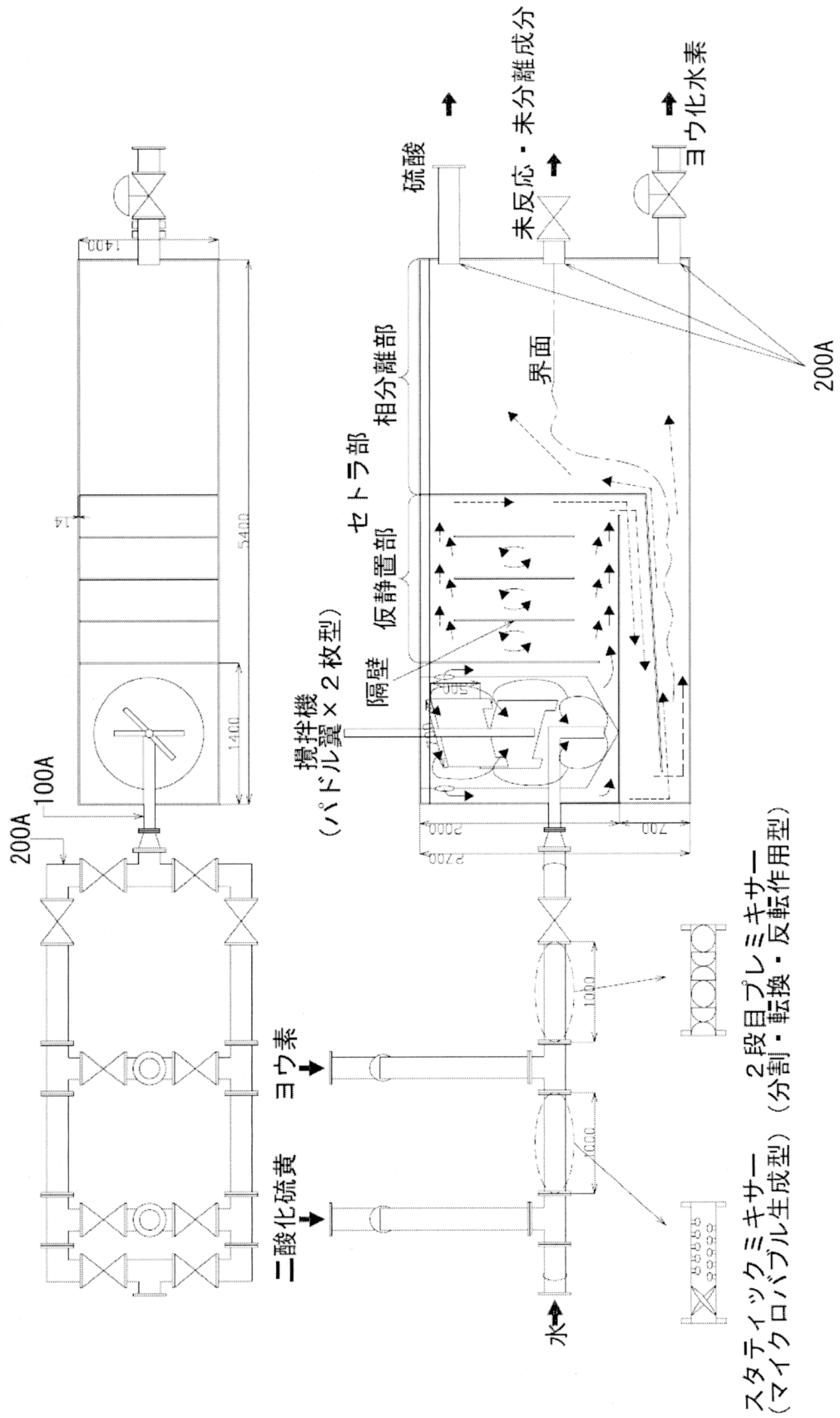


図8 プンゼン反応器構造概念図

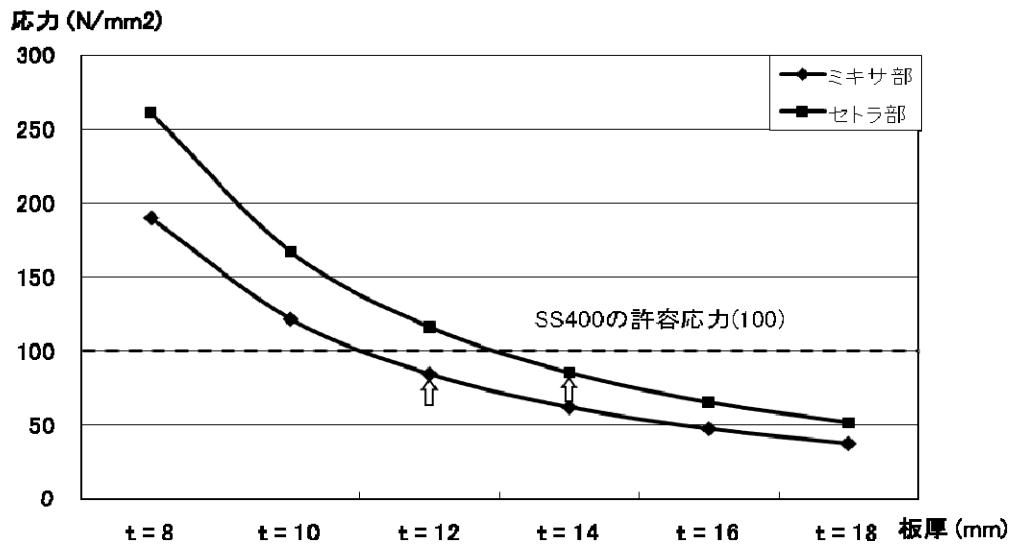


図-9 ブンゼン反応器板厚と発生応力

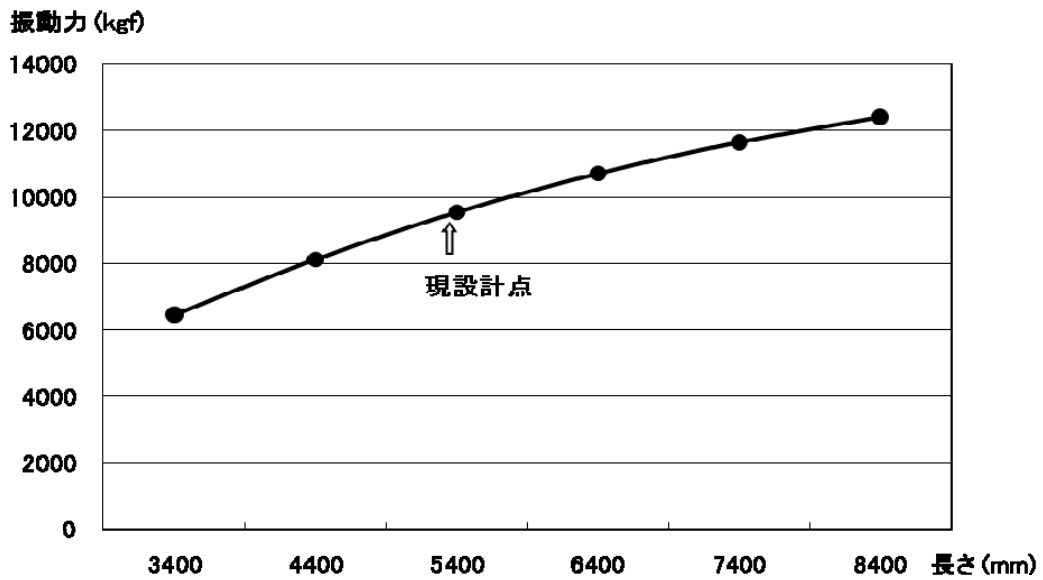


図-10 矩形容器長さ（長辺）と振動力

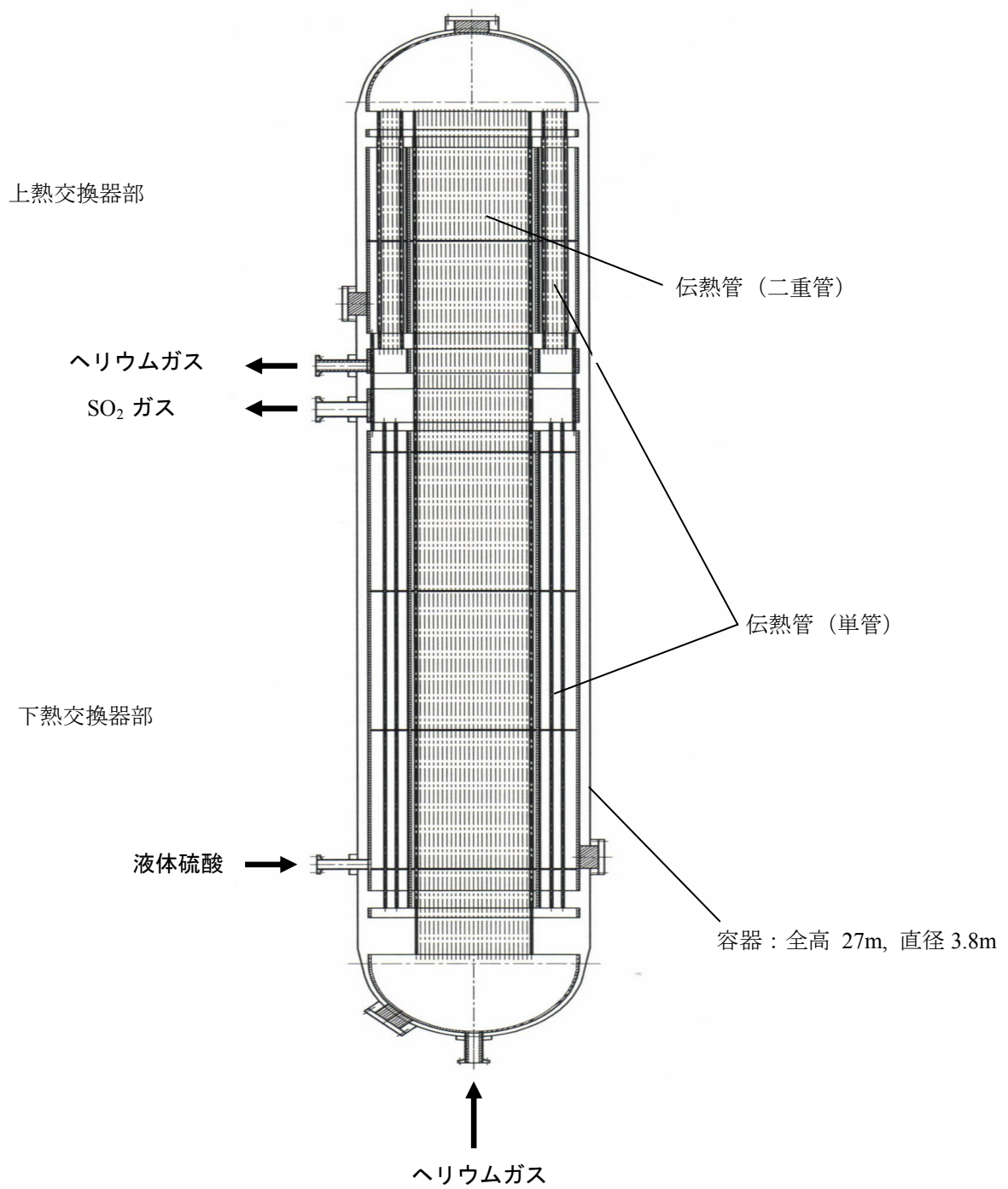


図-11 一体型硫酸分解器構造概念

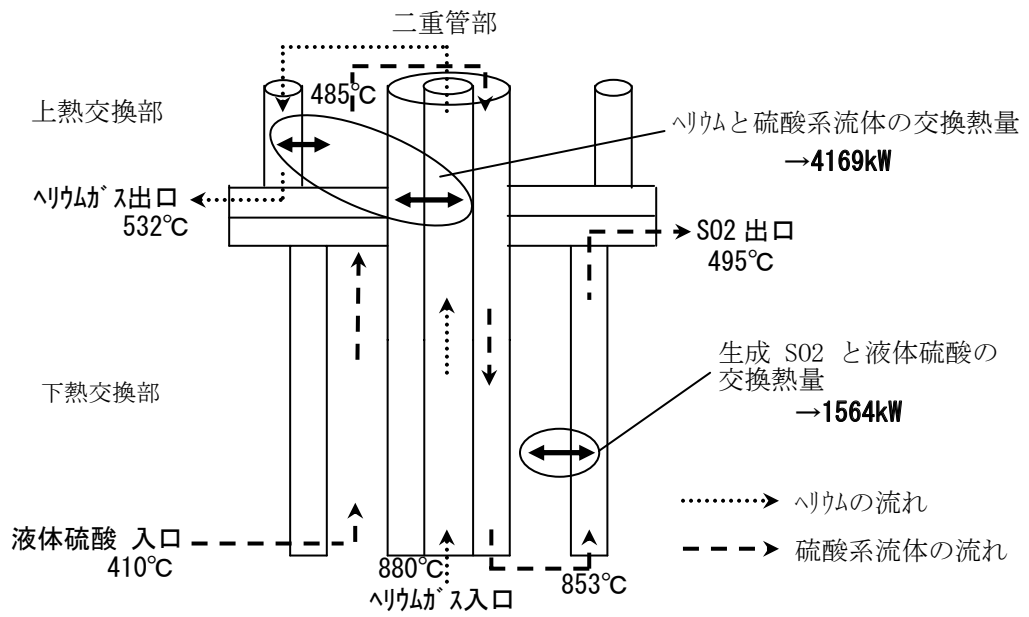


図-12 硫酸分解器伝熱部概略図

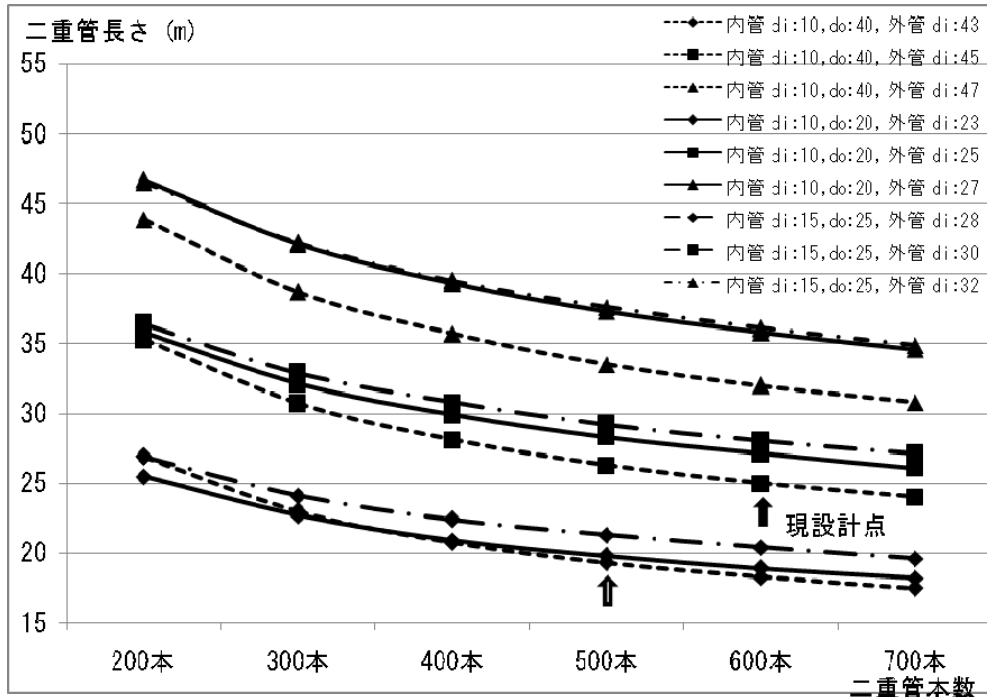


図-13 伝熱部形状と二重管長さ

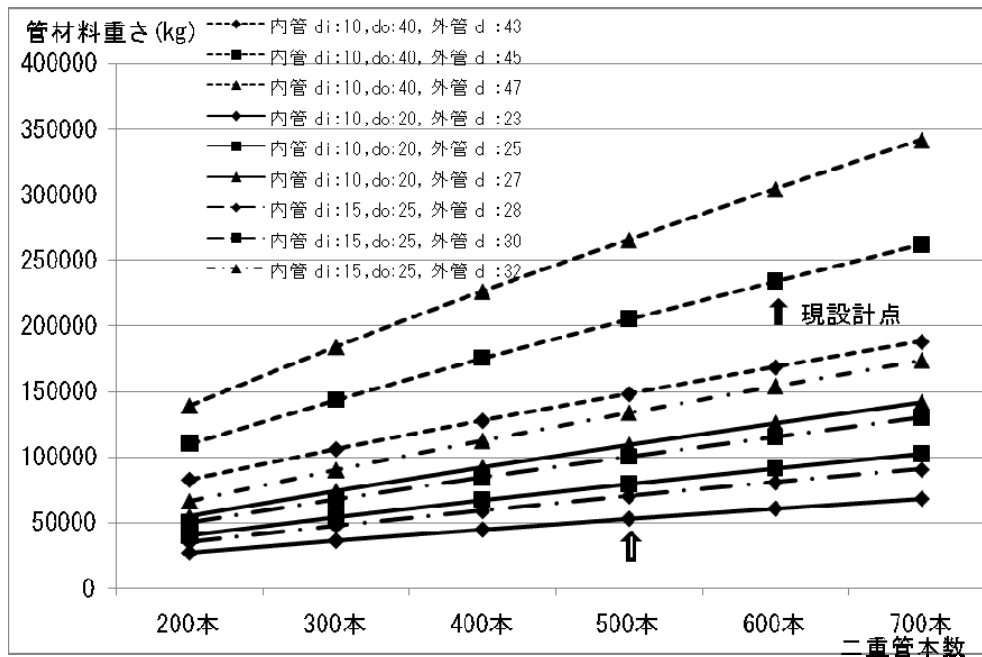


図-14 伝熱部形状と二重管部材重さ

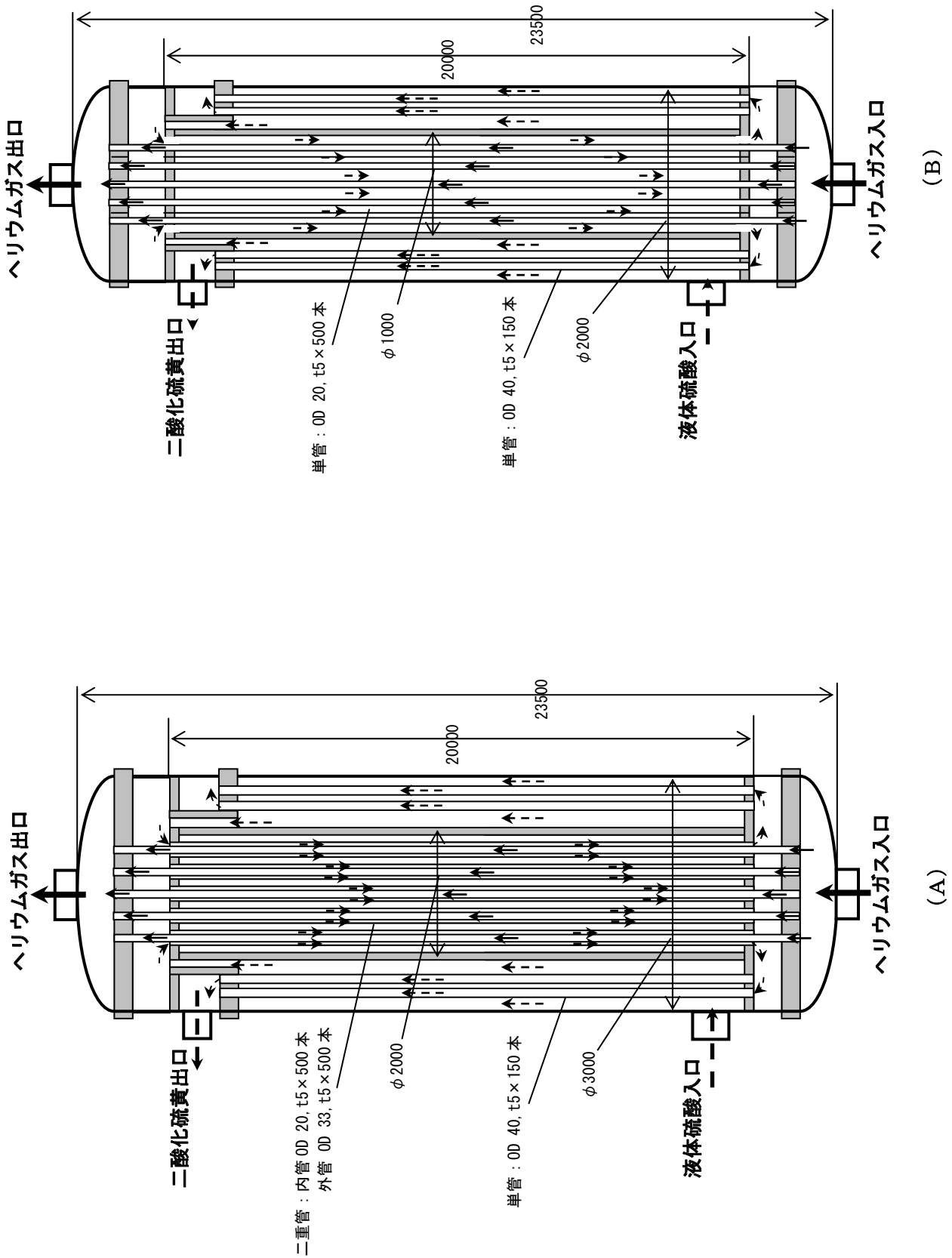


図-15 硫酸分解器構造概念図

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 |
| (物質量の) 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 | エクスト | 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 ⁻² =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 ⁻¹ ・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 | セルシウス度 ^(d) | °C | | K |
| 光照射度 | ルーメン | lm | cd・sr ^(c) | m ² ・m ⁻² ・cd=cd |
| (放射性核種の) 放射能 | ベクレル | Bq | lm/m ² | m ² ・m ⁻⁴ ・cd=m ⁻² ・cd |
| 吸収線量, 質量エネルギー分与, 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 | m ² ・s ⁻² |
| | 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 | ニュートンメートル | N・m | m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² |
| 表面張力 | ニュートン毎メートル | N/m | kg ⁻¹ ・s ⁻² |
| 角速度 | ラジアン毎秒 | rad/s | m ² ・m ⁻² ・s ⁻¹ =s ⁻¹ |
| 角加速度 | ラジアン毎平方秒 | rad/s ² | m ² ・m ⁻² ・s ⁻² =s ⁻² |
| 熱流密度, 放射照度 | ワット毎平方メートル | W/m ² | kg ⁻¹ ・s ⁻³ |
| 熱容量, エントロピー | ジュール毎ケルビン | J/K | m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・K ⁻¹ |
| 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毎ケルビン | J/(kg・K) | m ² ・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 ⁻¹ ・A |
| 電気変位 | クーロン毎平方メートル | C/m ² | m ⁻² ・s ⁻¹ ・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 |
| モル熱容量 | 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 ⁻¹ ・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 | 1h=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 | 1l=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³ |
| トン | t | 1t=10 ³ kg |
| ネーパ | Np | 1Np=1 |
| ベル | B | 1B=(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 | 1eV=1.60217733(49)×10 ⁻¹⁹ J |
| 統一原子質量単位 | u | 1u=1.6605402(10)×10 ⁻²⁷ kg |
| 天文単位 | ua | 1ua=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 | 1a=1 dam ² =10 ² m ² |
| ヘクタール | ha | 1ha=1 hm ² =10 ⁴ m ² |
| バール | bar | 1bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 ⁵ Pa |
| オングストローム | Å | 1Å=0.1nm=10 ⁻¹⁰ m |
| バイン | b | 1b=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 |
| スチルブ | 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. 国際単位系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=1 cSv=10 ⁻² Sv |
| X線単位 | | 1X unit=1.002×10 ⁻⁴ nm |
| ガンマ | γ | 1γ=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 | fm | 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 = (101 325/760) Pa |
| 標準大気圧 | atm | 1 atm = 101 325 Pa |
| カロリ | cal | |
| マイクロン | μ | 1 μ = 1μm=10 ⁻⁶ m |

