

熱化学水素製造法ISプロセスのための
硫酸流動機器健全性試験装置の試験運転
(受託研究)

Shakedown of Sulfuric Acid Flow Test Loop
for Thermo-Chemical Hydrogen Production Technology by IS Process
(Contract Research)

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

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います。

〒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

© Japan Atomic Energy Agency, 2007

熱化学水素製造法 IS プロセスのための 硫酸流動機器健全性試験装置の試験運転 (受託研究)

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 6 月 8 日受理)

日本原子力研究開発機構では、高温ガス炉を熱源として水素を製造する技術の確立を目指して、熱化学法 IS プロセスの研究開発を進めている。IS プロセスではプロセス流体の一つとして腐食性の強い硫酸を使用する。計画中の工業材料で製作するパイロット試験装置を成立させるため、硫酸分解器の設計に不可欠な硫酸の伝熱流動特性の把握及び付帯するポンプ、配管及び計装の適用性の確認を行うため、硫酸流動・機器健全性試験装置 (SFTL) を製作した。SFTL は 2.5L/min の硫酸沸騰伝熱試験ループ及び 20L/min の高温硫酸機器試験ループから構成される。本報では、製作した硫酸流動・機器健全性試験装置の概要と試験運転結果について報告する。

本報告書は、旧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」の成果の一部です。
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

*) 株式会社 東芝（2006 年 10 月まで IS プロセス技術開発グループに出向）

Shakedown of Sulfuric Acid Flow Test Loop
for Thermo-Chemical Hydrogen Production Technology by IS Process
(Contract Research)

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
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received June 8, 2007)

JAEA has been conducting R&D on thermo-chemical water splitting hydrogen production technology by an iodine-sulfur cycle (IS process) aiming to establish the technology with high-temperature gas-cooled reactors (HTGRs). The IS process uses sulfuric acid as a process fluid, which is a very corrosive fluid. For development of the sulfuric-acid decomposer in the pilot plant, the sulfuric-acid flow test loop (SFTL) was constructed to obtain flow boiling characteristics, and to confirm applicability of components such as pipelines, pumps and instrumentations. The SFTL consists of a sulfuric-acid boiling heat transfer test loop and a high temperature component test loop, whose maximum flow rates are 2.5L/min and 20L/min, respectively. This report presents outline of the SFTL and shakedown test results.

Keywords : Thermochemical IS Process, Hydrogen Production, HTGR, Sulfuric-Acid Flow Test Loop, Shakedown Test Results

This work was performed as a part of the “Development of Nuclear Heat Utilization Technology” entrusted to JAEA by the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology of Japan (MEXT).

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

目 次

1. はじめに	1
2. 硫酸分解器の概要	3
3. 硫酸流動・機器健全性試験装置	7
3.1 目的	7
3.2 硫酸流動・機器健全性試験装置の概要	7
3.3 主要機器の仕様	8
3.4 運転方法	14
3.5 試験運転	14
4. まとめ	30
謝 辞	30
参考文献	30

Contents

1. Introduction	1
2. Outline of Sulfuric Acid Decomposer	3
3. Sulfuric Acid Flow Test Loops	7
3.1 Objectives	7
3.2 Outline of Test Loops	7
3.3 Specifications of Test Loops	8
3.4 Operating procedure	14
3.5 Test Operation	14
4. Concluding Remarks	30
Acknowledgement	30
Reference	30

This is a blank page.

1. はじめに

日本原子力研究開発機構（以後、原子力機構）では、原子力エネルギー利用の多様化を図るため、高温ガス炉を熱源として水素を製造する熱化学法 IS プロセスの研究開発を進めている[1]。IS プロセスは、水を原料としてヨウ素と硫黄の化学反応を組み合わせることにより、水を熱分解して水素と酸素を発生させる方法であり、高温ガス炉の熱を利用することにより地球温暖化の原因とされている二酸化炭素（CO₂）を排出することなく水素を製造することができる。

IS プロセスは、水（H₂O）、ヨウ素（I₂）及び二酸化硫黄（SO₂）から硫酸（H₂SO₄）とヨウ化水素（HI）を生成するブンゼン反応工程、生成した硫酸を分解する硫酸分解反応工程、及び、HI を分解する HI 分解反応工程の三つの反応工程から構成される。この三つの反応工程を達成させる閉サイクル運転が、IS プロセスの懸案であった。

原子力機構の IS プロセス技術開発グループは、ガラス製の連続水素製造試験装置を製作して、世界で始めて 1 週間にわたる連続水素製造（水素製造量 0.03Nm³/h）に成功した[2]。この成果により実用化の見通しが得られ、それを確証するために、高温ガス炉システムを模擬したヘリウムガス加熱方式による実用材料製のパイロットプラントを建設し、30Nm³/h 規模の水素製造試験を行うことを計画している。パイロットプラントの主要機器構成を図 1-1 に示す[3]。

この機器構成を成立させる上で、IS プロセスではプロセス流体の一つとして腐食性の強い硫酸を使用するため、硫酸を使用する工程に付帯するポンプ、弁、配管及び計装のプラント適用性の確認する必要がある。また、最も腐食の厳しい硫酸沸騰環境である硫酸分解器では、SiC セラミックスを適用したブロック型熱交換器の適用が考えられている[4]。硫酸分解器では、材料腐食のみならず、機器の構造健全性の確証が不可欠である。硫酸分解器の構造健全性を確保する上で、過大な熱応力の発生を抑制することが重要である。熱応力は、硫酸の沸騰熱伝達特性に大きく影響を受けるため、硫酸の沸騰伝熱特性を把握する必要がある。そこで、硫酸の沸騰伝熱特性の把握、及びポンプ、弁、配管、計装等のプラント適用性を確認するために硫酸流動・機器健全性試験装置（SFTL: Sulfuric-acid Flow Test Loop）を製作した。SFTL は 2.5L/min の硫酸沸騰伝熱試験ループ及び 20L/min の高温硫酸機器試験ループから構成される。硫酸沸騰伝熱試験ループは、硫酸分解器の伝熱管 1 本を模擬した沸騰伝熱試験体を有するもので、300℃までの硫酸の沸騰状況が可視化でき、かつ沸騰伝熱相関式を評価することを目的とした装置である。高温硫酸機器試験ループは、ポンプ、弁、配管等の構造・機能健全性を硫酸実流試験によって得ることを目的とした装置である。本ループは全領域で硫酸は液相であり、最大 300℃まで昇温することができる。

本報告書は、上記の硫酸流動・機器健全性試験装置の製作および試運転について報告するものである。

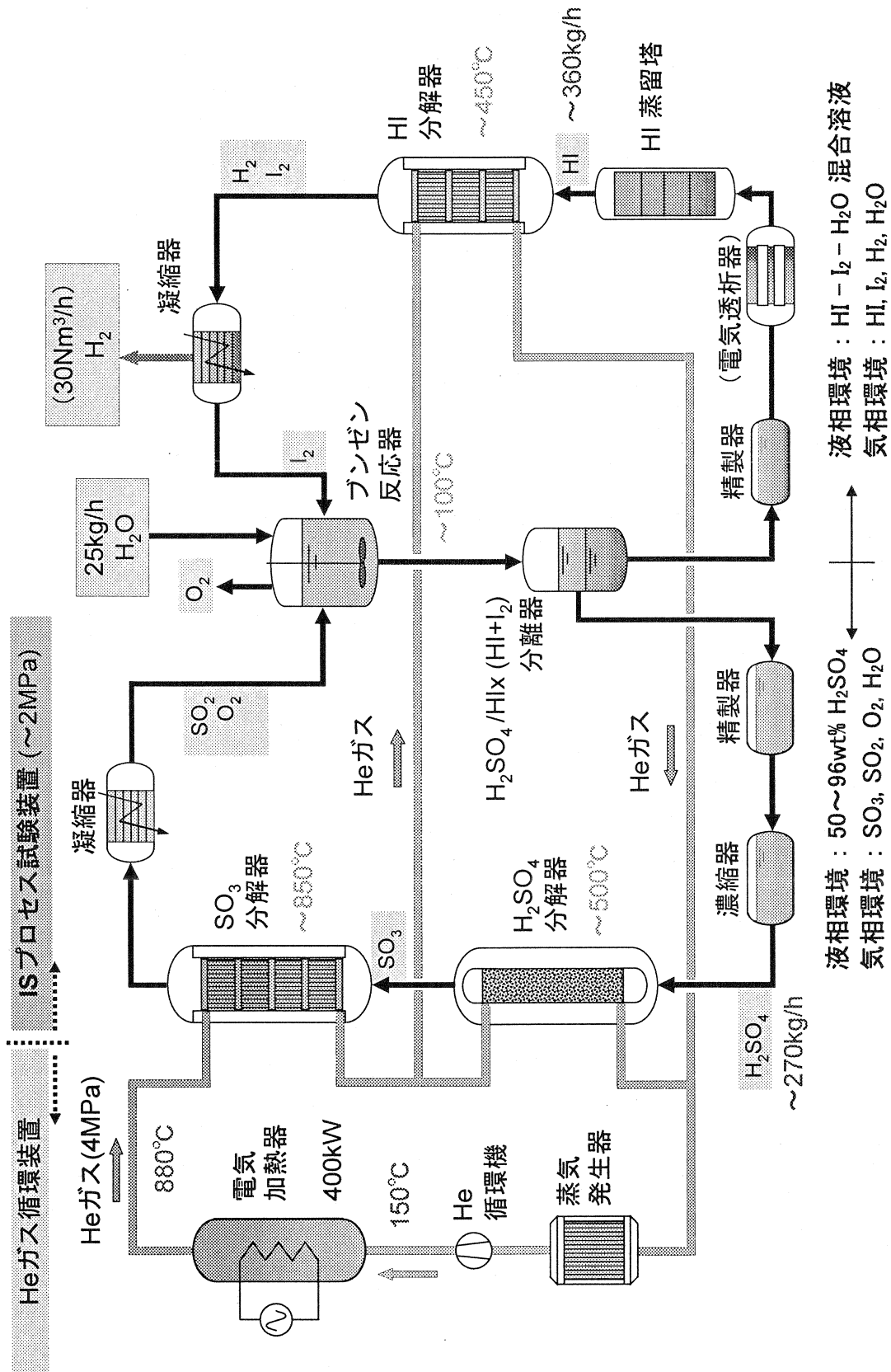


図1-1 パイロットプラント主要機器構成

2. 硫酸分解器の概要

硫酸分解器は、高温ヘリウムガスの熱により約 90wt%の硫酸を沸騰蒸発させ、更に、硫酸を三酸化硫黄 (SO_3) ガスと水蒸気に分解する装置である。硫酸分解器の硫酸接液部は高温でかつ厳しい腐食条件に晒されることから、本硫酸分解器は熱交換器の材料に硫酸に対する良好な耐食性、高強度及び高伝熱特性を持つ SiC セラミック製の伝熱ブロックを用いる。パイロットプラント試験装置規模（水素製造量 $30\text{Nm}^3/\text{h}$ ）の硫酸分解器に要求される主要仕様を表 2-1 に、また、考案した硫酸分解器の鳥瞰図を図 2-1 に、上下プレナム部の詳細図を図 2-2 にそれぞれ示す。

伝熱ブロックには 14.8mm 径の孔を硫酸用に 32 本、He 用に 38 本加工し、その孔に硫酸と He を並行対向流として通過させて熱交換を行う。伝熱ブロックの全長は 1.5m であるが、SiC セラミック製ブロックは、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、製作時の歩留まりを考慮して、全長 0.75m のブロックを上下に 2 体接続する構成とした。

また、SiC セラミック製ブロックの接続部のシールについては、高温硫酸に対する耐食性を考慮して、金製ガスケットを用いる。上下プレナムとの接続も同様に金製ガスケットを用いる。ガスケットによるシールでは、高温時においても締付力が変化しないようにする必要があるので、伝熱ブロックをタイロッドで軸方向に締付け、このとき、構造部材間の運転時の熱膨張差を吸収する皿ばね機構や、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、伝熱ブロックと耐圧構造容器の熱膨張公差を吸収できる構造を採用した。詳細な設計検討は参考文献[5]に示す。

表 2-1 硫酸分解器設計諸元

項 目	細 目	数 値
硫酸	圧力	2 MPaG
	流量	4.0 kg/min
	出入口温度	460 / 435 °C
	硫酸濃度	90 wt%
	沸騰温度	455 °C
ヘリウム	圧力	4 MPaG
	流量	5.5 kg/min
	出入口温度	710 / 535 °C
熱交換量		83 kW
最大熱流束		80 kW/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	14.8 mm/ 1500 mm

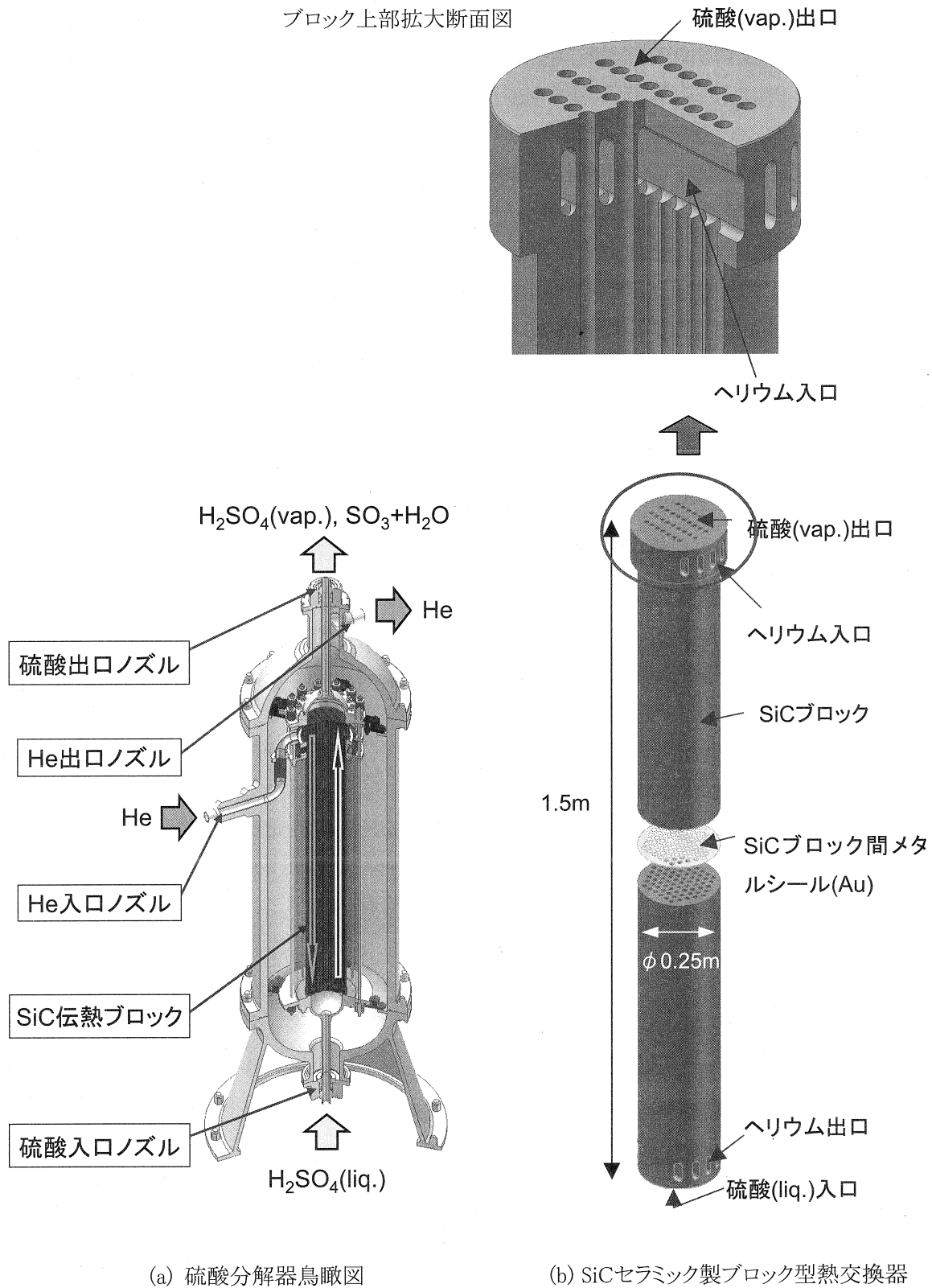
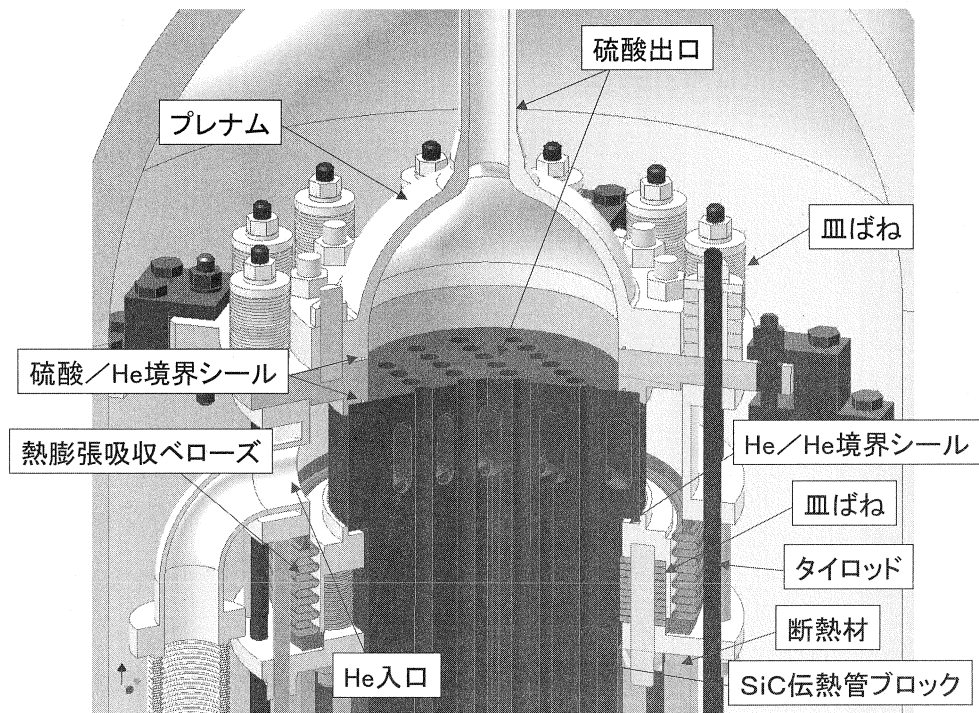
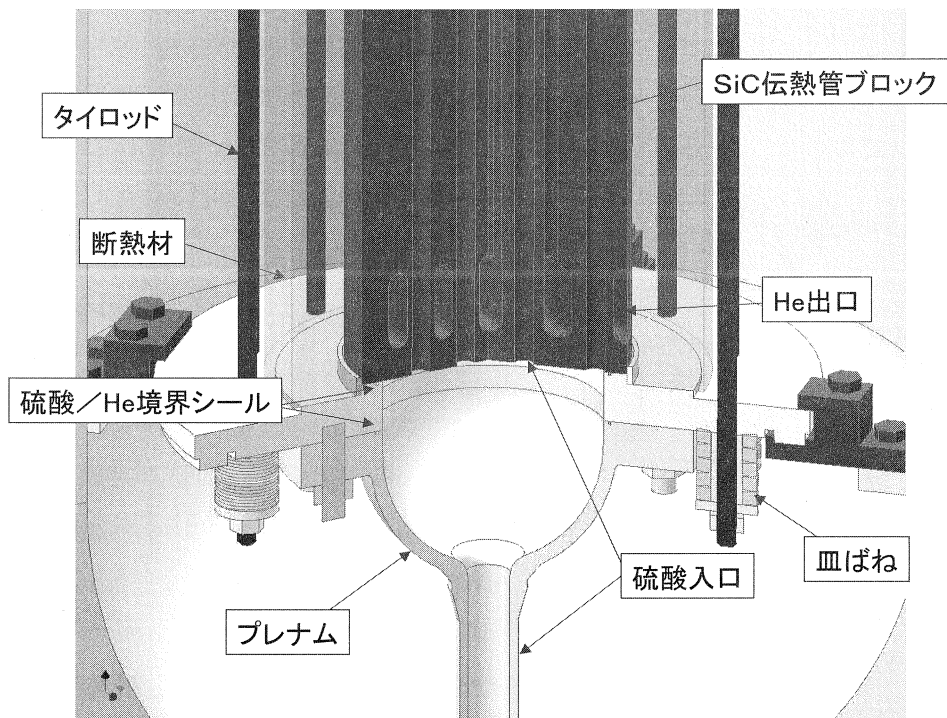


図 2-1 硫酸分解器の構造概念図



(a) 上部プレナム部



(b) 下部プレナム部

図 2-2 硫酸分解器プレナム部の主要構造図

3. 硫酸流動・機器健全性試験装置

3.1 目的

IS プロセスの硫黄循環系の主要機器である硫酸分解器を設計するにあたり、二成分系流体である硫酸の沸騰伝熱特性は水のそれとは大きく異なることが予測されることから、硫酸の沸騰伝熱特性データの取得に加えて、硫酸を使用する機器に付帯するポンプや弁などに代表されるプロセス制御機器や配管及びプロセス計測装置等の健全性等を評価する必要がある。そこで、硫酸流動・機器健全性試験装置を製作し、下記の試験を行うこととした。

- (1) 硫酸の沸騰伝熱特性の取得
- (2) ポンプ、弁、配管等の健全性評価

3.2 硫酸流動・機器健全性試験装置の概要

本試験装置の概要及び設計条件を図 3.2-1、表 3.2-1 及び表 3.2-2 に示す。試験装置は、流量 2.5L/min の硫酸沸騰伝熱試験ループ（硫酸インベントリ 30L）及び 20L/min の高温硫酸機器試験ループ（同 30L）、及びドレンタンク等のユーティリティから構成される。

硫酸沸騰伝熱試験ループは、上述したように硫酸分解器の設計製作に必要となる硫酸沸騰伝熱特性の取得を目的とし、沸騰伝熱試験体、硫酸凝縮冷却器、膨張タンク、硫酸ポンプ、及び予熱器から構成される。沸騰伝熱試験体は硫酸分解器の硫酸流路 1 本を模擬したものであり、沸騰時の温度分布データを取得しつつ、硫酸の沸騰伝熱相関式の評価に必要な硫酸の沸騰状況が可視化できる。膨張タンクに貯められた硫酸は硫酸ポンプにより昇圧され、予熱器により約 160℃に昇温された後、沸騰伝熱試験体に供給する。沸騰伝熱試験体では直流電源装置により硫酸を沸騰蒸発させ、約 300℃の硫酸蒸気は凝縮冷却器で 30℃の液体に凝縮冷却され、膨張タンクに戻る。

一方、高温硫酸機器試験ループは長中期的な硫酸の連続実流試験によって、上述したようにポンプ、弁、配管等の構造及び機能健全性を評価することを目的とするもので、加熱器、供試配管（ガラスライニング配管）、硫酸冷却器、吸込ドラム及び硫酸循環ポンプから構成される。本ループでは加圧条件（0.35MPa）により硫酸は全領域液相である。硫酸循環ポンプで昇圧された 30℃の硫酸は加熱器で 300℃まで昇温され、図 3.2-2 に示すガラスライニング配管を通過した後、硫酸冷却器で 30℃まで冷却されポンプに戻る。これらのループは閉ループ構成であり、通常運転時は硫酸が系外に放出されることはない。上記主要試験ループのほかに、電気設備、硫酸貯留用のドレンタンク及び上記試験ループの系統加圧用の窒素ガス供給系、局所換気設備、キャッチパン等のユーティリティも併せて設置される。

上記の設備は図 3.2-3 に示すように、主に架台 2 階のパネルハウス内に格納され（ドレンタンクは 1 階）、硫酸漏洩時の一時的貯留槽となるキャッチパン上に図 3.2-4（工場組

立時写真) に示すように設置される。キャッチパンは硫酸による腐食を防止するためにテフロンコーティングが施され、その貯留容積は硫酸が全量漏洩した場合でも十分な容量を確保している。また、パネルハウス内の環境を維持するために、図 3.2-5 に示す換気装置が架台 1 階及び 2 階のパネルハウスに独立に設置されている。本排気装置はパネルハウス外の空気をガラリより吸気し、HTTR 開発棟外へ換気率約 3/h (400m³/h) で排出する。特に、硫酸漏洩時に気体状の硫酸の発生が考えられる 2 階の換気装置にはフィルタが設置され事故時の環境負荷を時間平均許容濃度 1mg/m³ 以下に低減している。

本装置の全硫酸インベントリは 110L であり、運転時に使用しない 50L はドレンタンク内に溜め置かれる。これは、緊急ドレン時にドレンタンクに流下した高温の硫酸を常温の貯留硫酸で冷却するためである。また、機器、配管等に使用した材料は常温の硫酸接液部及びカバーガス部は SUS316L、常温を超える接液部には SX (Sandvik 社の高 Si オーステナイト系ステンレス鋼)、沸騰伝熱試験体には SiC セラミックスを適用している。なお、タンク等の常温で使用するものには、SUS316L の表面にテフロンライニングを施している。

なお、本試験装置は高温の硫酸を使用するため、通常運転時、及び地震時、故障時等の異常時にフェールセーフの原則に基づき、十分な安全性を確保した設計としている。特に異常事象として想定される硫酸の漏洩時は、漏洩検知器の警報により運転員に知らせめ、インターロックにより安全に事象を収束できるよう対策を図っている。更に、漏洩硫酸が噴流化しないよう、配管等を外装板で二重化を行っている。定期的な検査として、超音波厚さ計 (JFE アドバンテック TI-65C) による板厚測定並びにビデオスコープを内部に挿入しての内視検査、並びにポンプの分解検査を行う。

以下に主要な構成部品を示す。法的規制として、本試験装置は特定化学物質取扱い設備であり、また、ドレンタンクは第二種圧力容器に該当する。製作した試験装置の外観写真を図 3.2-6、図 3.2-7 に示す。各試験ループを構成する機器の仕様を以下に記す。

3.3 主要機器の仕様

3.3.1 硫酸沸騰伝熱試験ループ

(1) 沸騰伝熱試験体

要求機能 : 硫酸分解器の熱流動特性/安定性評価を主目的とし、沸騰現象が可視化可能なものである。このため、伝熱管は透明石英ガラスを使用し、SiC セラミックヒータ内挿とする。また、伝熱管の外周は伝熱管を視認できる断熱容器内に設置し、断熱効果及び安全上のため当該伝熱管を 2 重構造にする。

型式 : 2 重石英ガラス管内挿電気ヒータ加熱型チューブ式

入口運転温度 : 硫酸最高 270℃

出口運転温度 : 硫酸最高 300℃ (飽和温度 280℃+過熱度 20℃)

流体 : 硫酸:85-90%
 定格流量 : 0.15 kg/min (0.082 l/min at 0.1MPa、20℃)
 定格圧力 : 0.05 MPaG
 最高使用圧力 : 内圧 0.095 MPaG 外圧-0.1MPaG
 使用温度 : 最高 310℃

(a) 沸騰試験体電気ヒータ

型式 : 伝熱管内挿型直流シースヒータ
 材質 : 硫酸接液部 SiC
 容量 : 3.75 kW
 最大熱流束 : 0.15MW/m²
 寸法 : 外径 17mm 有効ヒータ長 (有効発熱部) 1.5m

(b) 伝熱管

材質 : 透明石英ガラス管
 寸法 : 内径 24mm 長さ 1.9m (有効ヒータ長に前後等価直径の約 10 倍の距離を設定)
 板厚 : 2mm

(c) 断熱保護管

材質 : 透明石英ガラス管
 寸法 : 内径 約 80mm 長さ約 1.9m
 最高使用圧力 : 外圧時 0.1MPa (差圧) 内圧時 0.095MPa (差圧)
 使用温度 : 300℃ (最高値)

(2) 硫酸ポンプ

型式 : マグネットカップリング式ギアポンプ
 材質 : 接液部 SUS316
 流体 : 硫酸:85-90%
 使用圧力 : 最高 0.95MPaG
 使用温度 : 最高 100℃
 定格流量 : 4.6 kg/min (2.5 l/min at 0.1MPa、20℃)
 運転流量調整 : インバータ及び戻し弁による制御
 運転温度 : 30℃

供給電圧 : AC200V

数量 : 1 台

(3) 予熱器

型式 : 電気ヒータ加熱方式

材質 : SX

流体 : 硫酸:85・90%

最高使用圧力 : 0.95MPaG

使用温度 : 最高 290℃

入口運転温度 : 30℃

出口運転温度 : 最高 270℃

定格流量 : 0.15kg/min (0.082 l/min at 0.1MPa、20℃)

電気ヒータ : 3.5kW

必要入熱量 : 1.2kW

内容積 : 4.8L

数量 : 1 基

(4) 硫酸凝縮冷却器

型式 : 水冷式

材質 : SX

流体 : 硫酸:85・90%

最高使用圧力 : 0.95MPaG

使用温度 : 最高 310℃

入口運転温度 : 最高 300℃

出口運転温度 : 30℃

定格流量 : 0.15kg/min (0.082 l/min at 0.1MPa、20℃)

付帯設備 : 水冷却器

容量 : 4.0kW

内容積 : 4.8L

数量 : 1 基

(5) 膨張タンク

型式	: 密閉型
材質	: テフロンライニング SUS316
流体	: 硫酸:85・90%
運転温度	: 30℃
最高使用圧力	: 0.95MPaG
使用温度	: 100℃
内容積	: 39L
数量	: 1 基

3.3.2 高温硫酸機器試験ループ

(1) 硫酸加熱器

型式	: 電気ヒータ加熱式
材質	: SX
流体	: 硫酸:85・90%
最高使用圧力	: 0.95MPaG
使用温度	: 最高 320℃
入口運転温度	: 最高 140℃
出口運転温度	: 最高 300℃
低格流量	: 36.4kg/min (20 l/min at 0.1MPa、20℃)
容量	: 3.5kW
内容積	: 4.8L
数量	: 1 基

(2) 硫酸冷却器

型式	: 水冷式
材質	: SX
流体	: 硫酸:85・90%
最高使用圧力	: 0.95MPaG
使用温度	: 最高 320℃
入口運転温度	: 最高 300℃
出口運転温度	: 最高 140℃

定格流量 : 36.4kg/min (20 l/min at 0.1MPa、20℃)
 付帯設備 : 水冷却器
 容量 : 1.5kW
 内容積 : 4.4L
 数量 : 1 基

(3) 硫酸循環ポンプ

型式 : マグネットカップリング式ギアポンプ
 材質 : 接液部 SUS316
 流体 : 硫酸:85-90%
 使用圧力 : 最高 0.95MPaG
 使用温度 : 最高 50℃
 定格流量 : 36.4 kg/min (20 l/min at 0.1MPa、20℃)
 運転流量調整 : インバータ及び戻し弁による制御
 運転温度 : 30℃
 供給電圧 : AC200V
 数量 : 1 台

(4) 吸込ドラム

型式 : 密閉型内部隔壁
 材質 : テフロンライニング SUS316
 流体 : 窒素、及び硫酸:85-90%
 設計圧力 : 0.95MPaG
 使用温度 : 最高 50℃
 内容積 : 39L
 数量 : 1 台

(5) 高温供試配管

型式 : 配管内面ガラスライニング (旭テクノグラス製)
 材質 : ガラスライニング鋼管
 流体 : 硫酸:85-90%
 設計圧力 : 0.95MPaG

使用温度 : 最高 320℃
 寸法 : 1B 肉厚 3.2mm 直管長さ 500mm、200mm (図 3.2-2 参照)
 形状 : U字管形状 (配管曲がり部 2 個、直管 3 個、レデューサ 2 個)
 取り合い : フランジ取り合い
 数量 : 1 式

3.3.3 共通設備及びユーティリティ

(1) ドレンタンク

型式 : 密閉型 (第二種圧力容器)
 材質 : テフロンライニング SUS316
 流体 : 硫酸:85-90% 水:balance
 内容積 : 192.5 L
 最高使用圧力 : 0.95MPaG
 使用温度 : 最高 160℃
 数量 : 1 基

(2) 窒素ガス供給系

最高使用圧力 : 1 次圧 15MPaG 2 次圧 0.8MPaG
 使用温度 : 最高 50℃
 流体 : 窒素ガス
 付帯設備 : 圧力計、流量計付きレギュレーター
 数量 : 2 基

(3) キャッチパン

使用温度 : 200℃ (最高値)
 材質 : テフロンライニング SUS316L
 数量 : 1 式

(4) 換気空調設備

換気風量 : 最大 400m³/h (換気率 3/h) 以上
 吸気は HTTR 開発棟内からガラリーを介して、排気は同棟建屋外に行う
 フィルタ : 硫酸ガストラップフィルタ

捕集効率	: 室温硫酸濃度 1.5mg/m ³
使用温度	: 20℃～25℃
数量	: 1 式

3.4 運転方法

本試験装置は硫酸沸騰伝熱試験ループと高温硫酸機器試験ループの 2 種類の閉ループ中を独立に硫酸を循環させるものであり、操作は基本的にループが格納されているパネルハウスの外にある制御室から行う。ただし、本試験装置の起動において流量調整作業、系統内ガス充填等のため、パネルハウス内での手動弁の操作が必要である。ループ起動後は、装置制御盤からの自動制御を行う。定常運転時の圧力、温度及び流量のプロセス値を図 3.4-1 に示す。また、緊急停止については、一般的要因として停電、ポンプ異常、非常停止（手動）、硫酸漏洩及び冷却水伝導率異常、並びに石英ガラス部の安全のために伝熱試験体圧力高を想定した。

3.5 試験運転

(1). 試験の概要

今回製作した硫酸流動・機器健全性試験装置の機能を確認、すなわち、設計条件（設計仕様）を確認することを目的として、耐圧・漏洩検査、電気検査を行った後に、試験装置内に硫酸を循環させて、単体機能試験、インターロック検査、予熱試験、系統運転試験を実施した。硫酸沸騰伝熱試験ループと高温硫酸機器試験ループで実施した予熱試験と系統運転試験についての概要を以下に示す。

i). 硫酸沸騰伝熱試験ループ

硫酸を充填した状態で、沸騰伝熱試験体、予熱器及び配管ヒータの昇温を行い、系統の昇温が可能であること、並びに沸騰伝熱試験体で硫酸沸騰が発生し視認できることを確認する。また、硫酸凝縮冷却器での硫酸の冷却が可能であることを確認する。

ii). 高温硫酸機器試験ループ

硫酸を充填して循環運転している状態で、加熱器や配管ヒータの昇温を行い、系統の昇温が可能であること、また、硫酸冷却器での硫酸の冷却が可能であることを確認する。

(2). 試験結果

以下に硫酸流動・機器健全性試験装置による予熱試験、系統運転試験の結果を示す。

i). 硫酸沸騰伝熱試験ループ

図 3.5-1 に示すように、硫酸を充填した状態で約 100℃/h の昇温速度で約 280℃

の飽和温度まで昇温させ、沸騰試験体内で沸騰させることが可能であることを確認した。また、沸騰試験体内の沸騰状況が良好に目視確認できることを確認し、設計仕様を満足することを確認した。

ii). 高温硫酸機器試験ループ

図 3.5-2 に示すように、流量約 0.1L/min の硫酸循環運転状態で、速度約 100°C/h で試験温度 300°C まで昇温できることを確認した。また、硫酸冷却器出口での硫酸温度が所定値 (30°C) 以下で制御できることを確認した。これらにより設計仕様を満足することを確認した。

また、伝熱流動試験とは別に表 3.5-1 に示す試験検査を行った。届出の必要な法定検査については、第 2 種圧力容器にドレンタンクが該当し、溶接、耐圧・漏洩検査を行った。硫酸は特定化学物質第 3 類に該当するため特定化学物質取扱設備として労働基準監督署に届出を行った。また硫酸は消防活動阻害物質であるため、消防への届出を行った。

以上の結果より本試験装置の機能及び性能は、所定の仕様を満足していることを確認した。

表 3.2-1 試験装置の設計条件 (2.5 L/min 硫酸沸騰伝熱試験ループ)

系統部位	流体	設計流量 [l/min]	運転流量 [l/min]	最高使用 温度 [°C]	運転温度 [°C]	最高使用 圧力 [MPaG]	運転圧力 [MPaG]	主要材料
伝熱管試験体入口～ 硫酸凝縮冷却器出口	H ₂ SO ₄ (90%)	2.5* 4.55 kg/min	0.082* 0.15 kg/min	310	282	0.95	0.07	石英ガラス/SX
硫酸凝縮冷却器出口～ 膨張タンク出口	H ₂ SO ₄ (90%)	2.5* 4.55 kg/min	0.082* 0.15 kg/min	100	30	0.95	0.05	SUS316L
膨張タンク出口～ 硫酸ポンプ入口	H ₂ SO ₄ (90%)	2.5* 4.55 kg/min	0.082* 0.15 kg/min	50	30	0.95	0.05	SUS316L
硫酸ポンプ入口～ 予熱器入口	H ₂ SO ₄ (90%)	2.5* 4.55 kg/min	0.082* 0.15 kg/min	50	30	0.95	0.21	SUS316L

(*体積流量は室温大気圧の値)

表 3.2.2 試験装置の設計条件 (20L/min 高温硫酸機器試験ループ)

系統部位	流体	設計流量 [l/min]	運転流量 [l/min]	最高使用 温度 [°C]	流体温度 [°C]	最高使用 圧力 [MPaG]	運転 圧力 [MPaG]	主要材料
加熱器入口～ 供試配管入口	H ₂ SO ₄ (90%)	20* 36.4 kg/min	0.082* 0.15 kg/min	320	300	0.95	0.44	SX
供試配管入口～ 硫酸冷却器出口	H ₂ SO ₄ (90%)	20* 36.4 kg/min	0.082* 0.15 kg/min	320	300	0.95	0.43	SX
硫酸冷却器出口～ 硫酸循環ポンプ入口	H ₂ SO ₄ (90%)	20* 36.4 kg/min	0.082* 0.15 kg/min	50	30	0.95	0.41	SUS316L
硫酸循環ポンプ入口～ 加熱器入口	H ₂ SO ₄ (90%)	20* 36.4 kg/min	0.082* 0.15 kg/min	50	30	0.95	0.58	SUS316L

(*体積流量は室温大気圧の値)

表 3.5.1 硫酸流動・機器健全性試験装置完成検査

	主な試験検査項目	
法的検査	第2種圧力容器検査	ドレンタンクのみ該当 溶接、耐圧・漏洩検査(ボイラー協会)
	届出	特定化学物質取扱設備(第3類)として労基省に届出 硫酸は消防活動阻害物質として消防に届出
	溶接検査	継手全数に対して JIS Z 2342 に基づく PT
自主検査	耐圧・漏洩検査	最高使用圧力(0.95MPa)の 1.25 倍の気圧での耐圧及び継手全数に 対し漏洩確認
	電気検査	導通、メガー試験
	単体機能試験	ポンプ動作確認、弁解閉確認、計測機器指示値確認
	インターロック検査	模擬信号によるインターロック動作確認
	予熱試験	硫酸なしで 300℃まで昇温し、昇温特性の確認 昇温状態で窒素ガスにより運転圧力での耐圧確認
	系統運転試験	硫酸循環運転の実施による総合性能確認

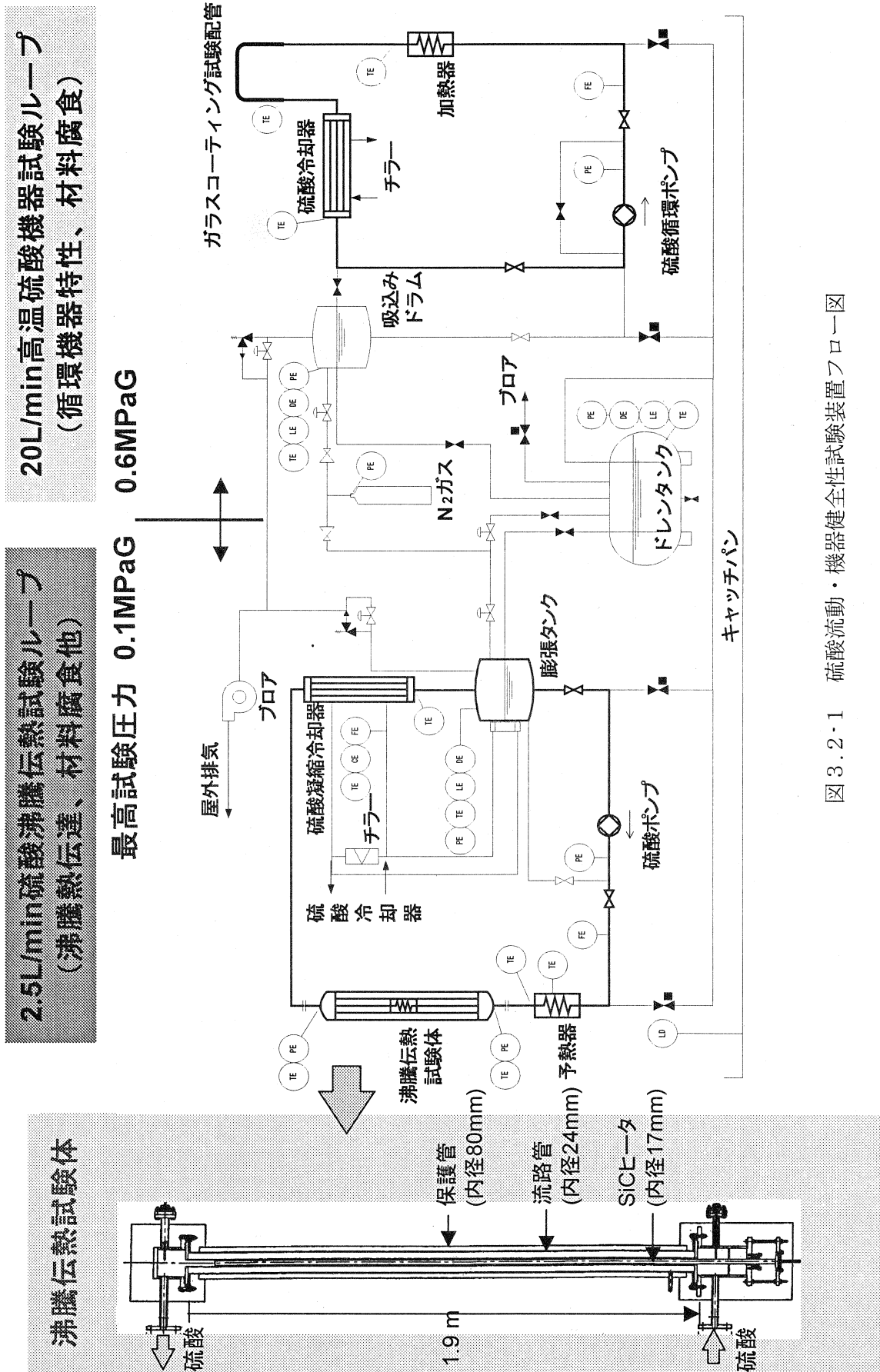


図 3.2-1 硫酸流動・機器健全性試験装置フロー図

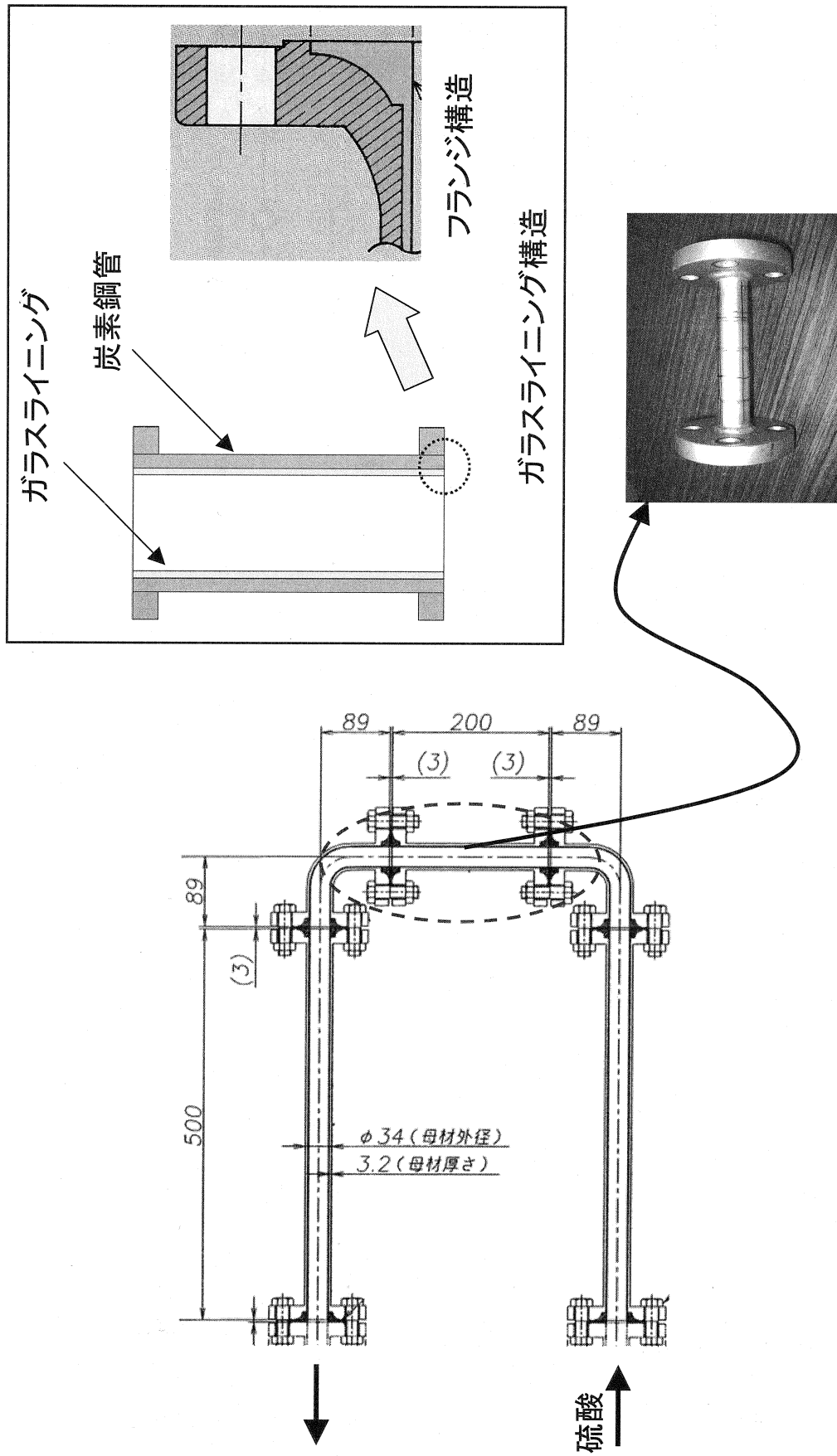


図 3.2-2 ガラスライニング配管

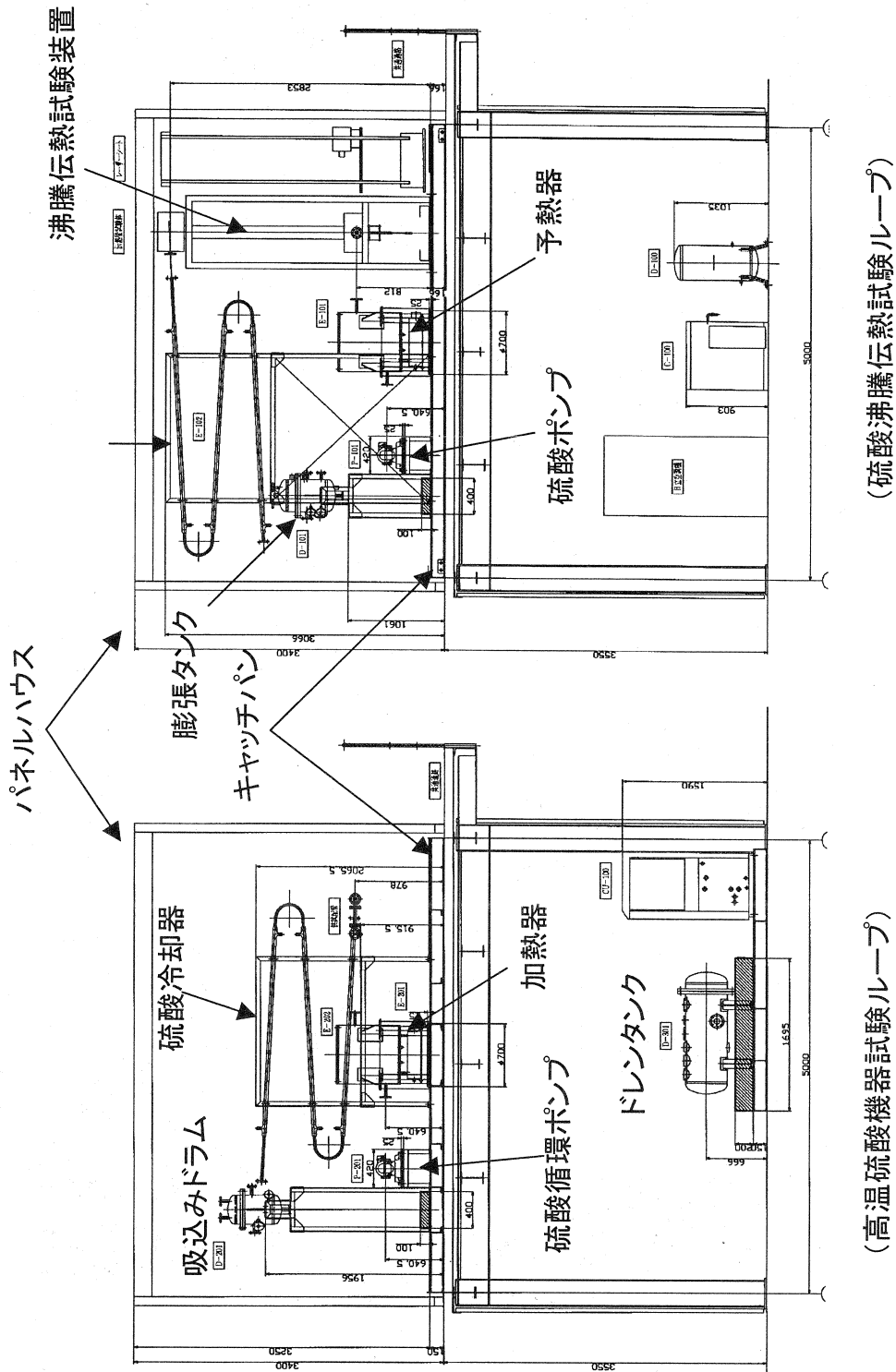
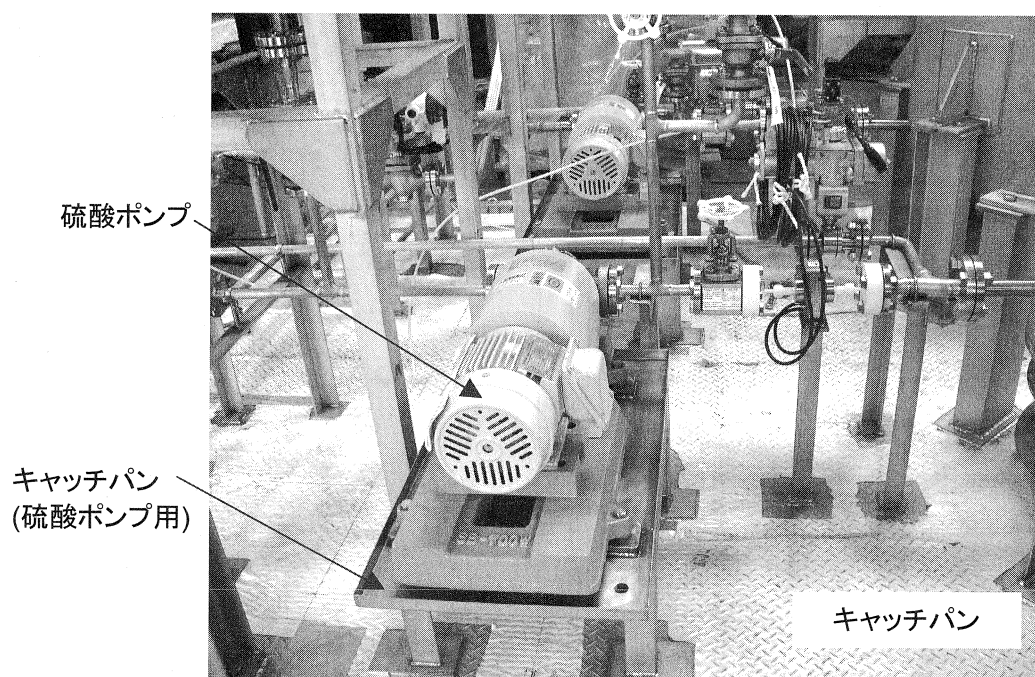
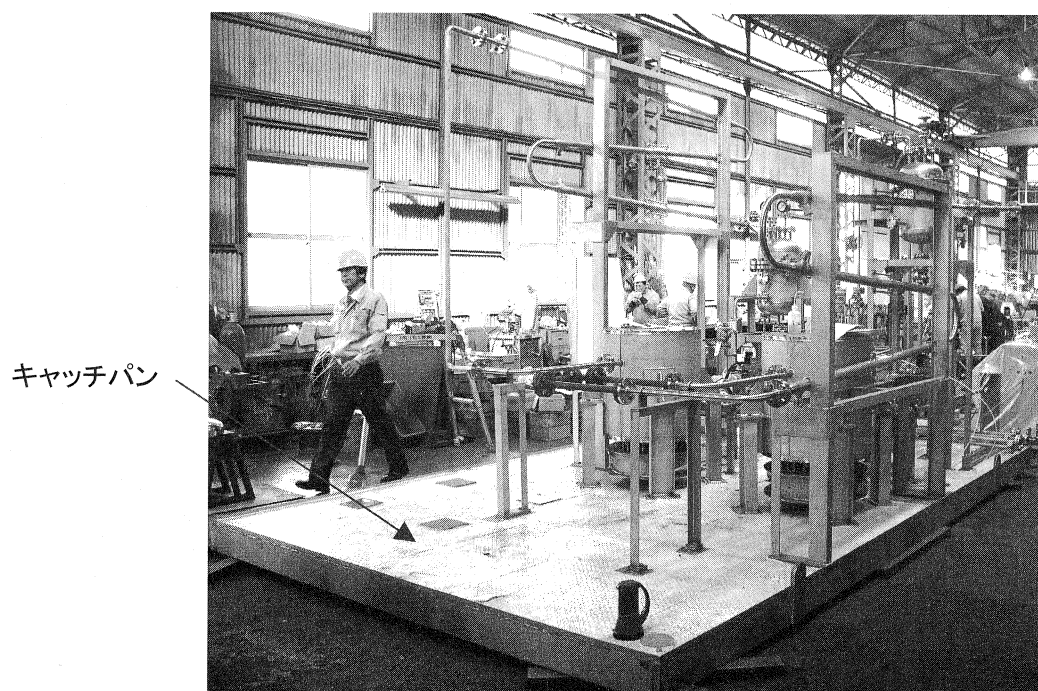


図 3.2・3 硫酸流動・機器健全性試験装置構造



硫酸ポンプ及びキャッチパン



試験装置工場耐圧試験時写真

図 3.2-4 硫酸流動・機器健全性試験装置組立写真

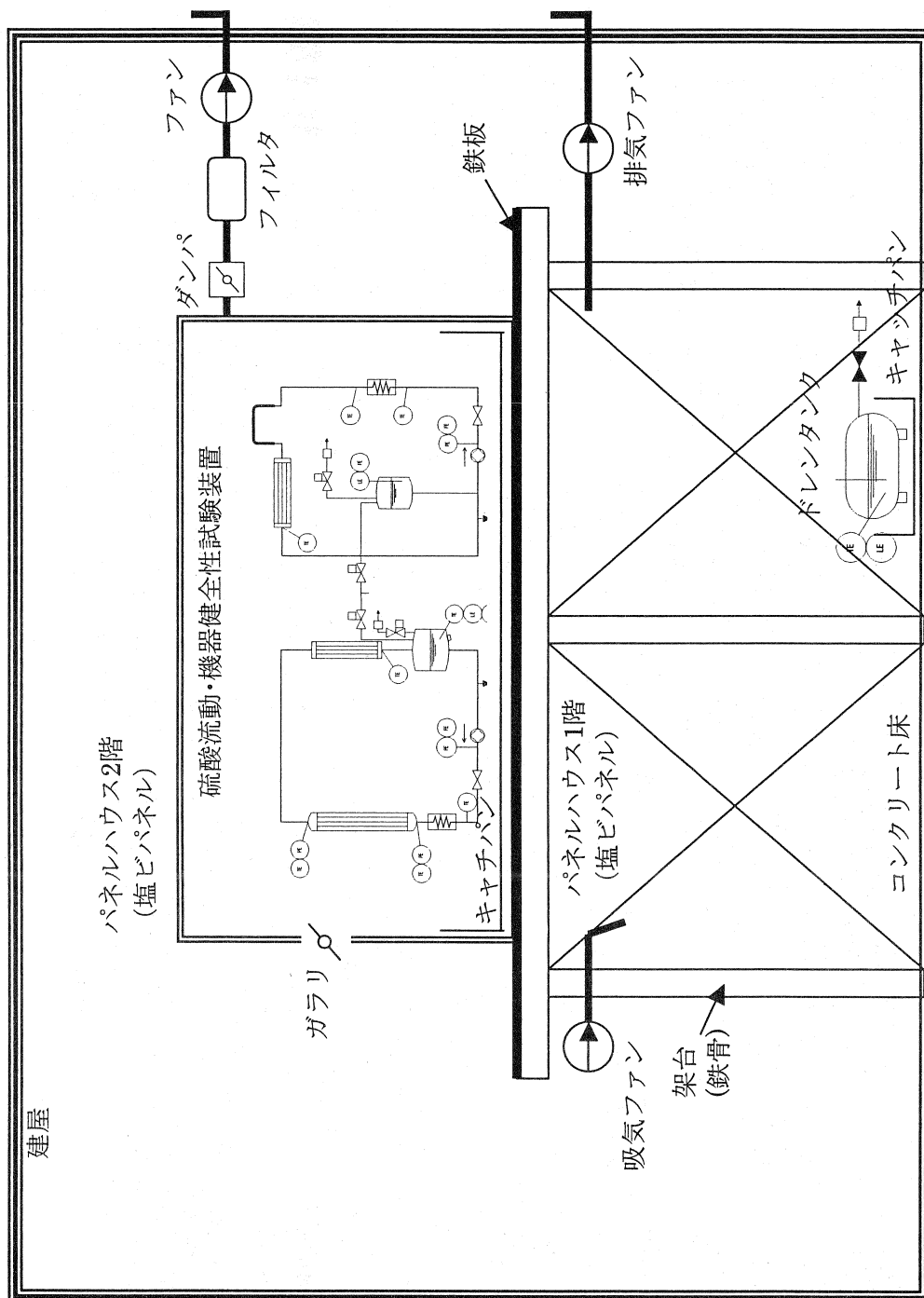


図 3.2.5 硫酸流動・機器健全性試験装置換気装置概念図

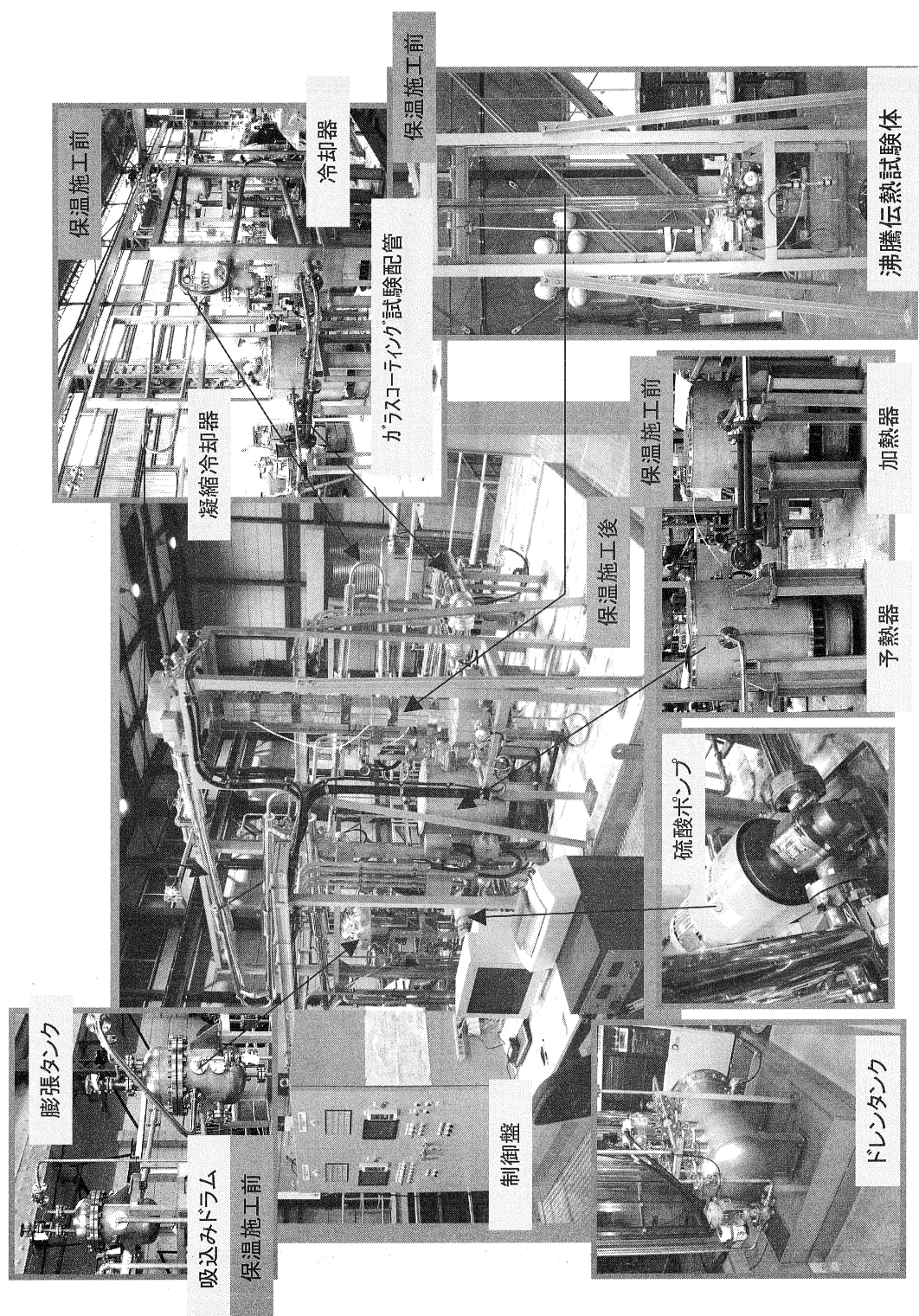


図 3.2-6 硫酸流動・機器健全性試験装置概観写真



図 3.2-7 硫酸流動・機器健全性試験装置概観写真

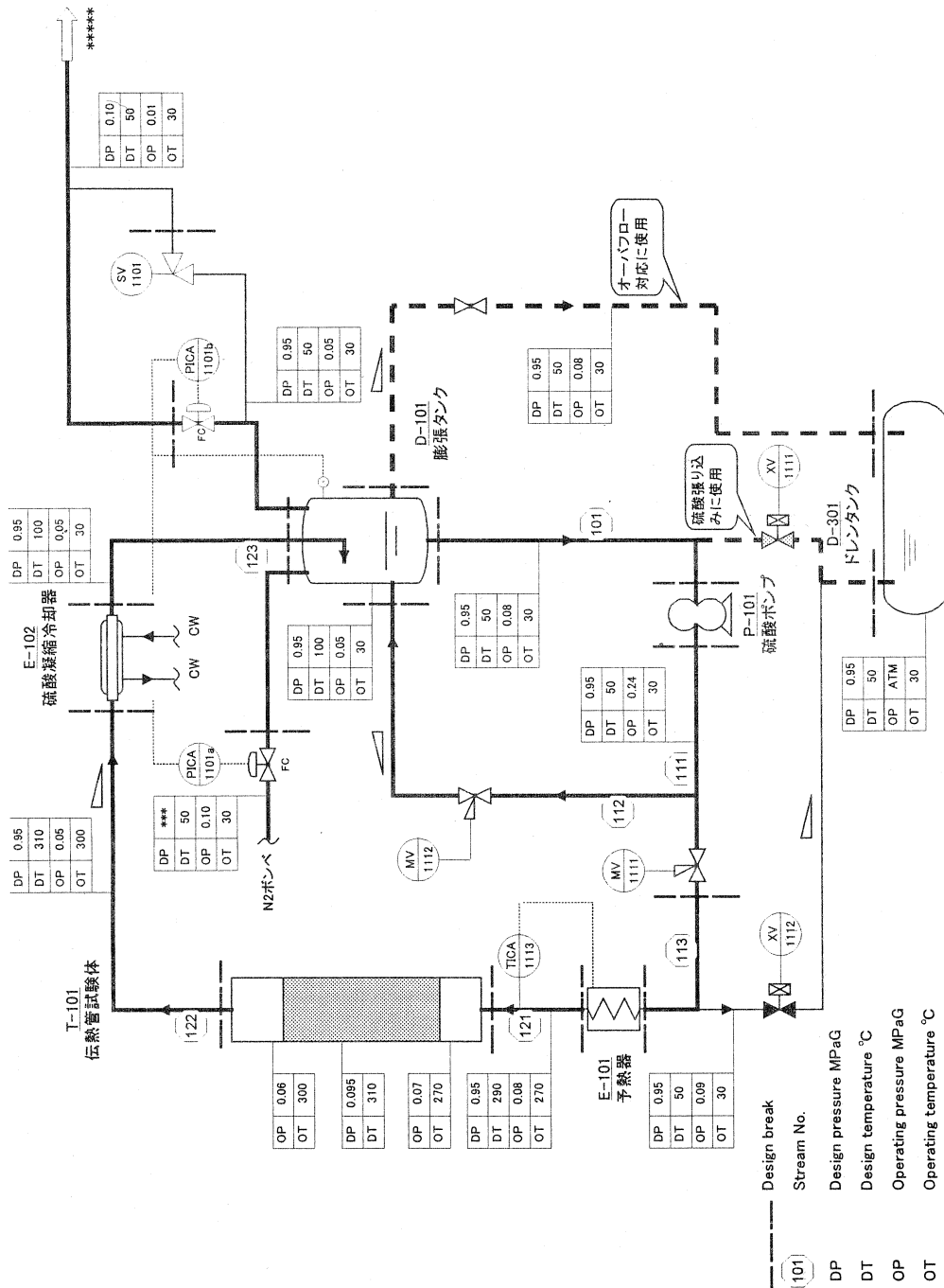


図 3.4・1 硫酸流動・機器健全性試験装置定常運転時のプロセス値 (1/2)
(硫酸沸騰伝熱試験ループ)

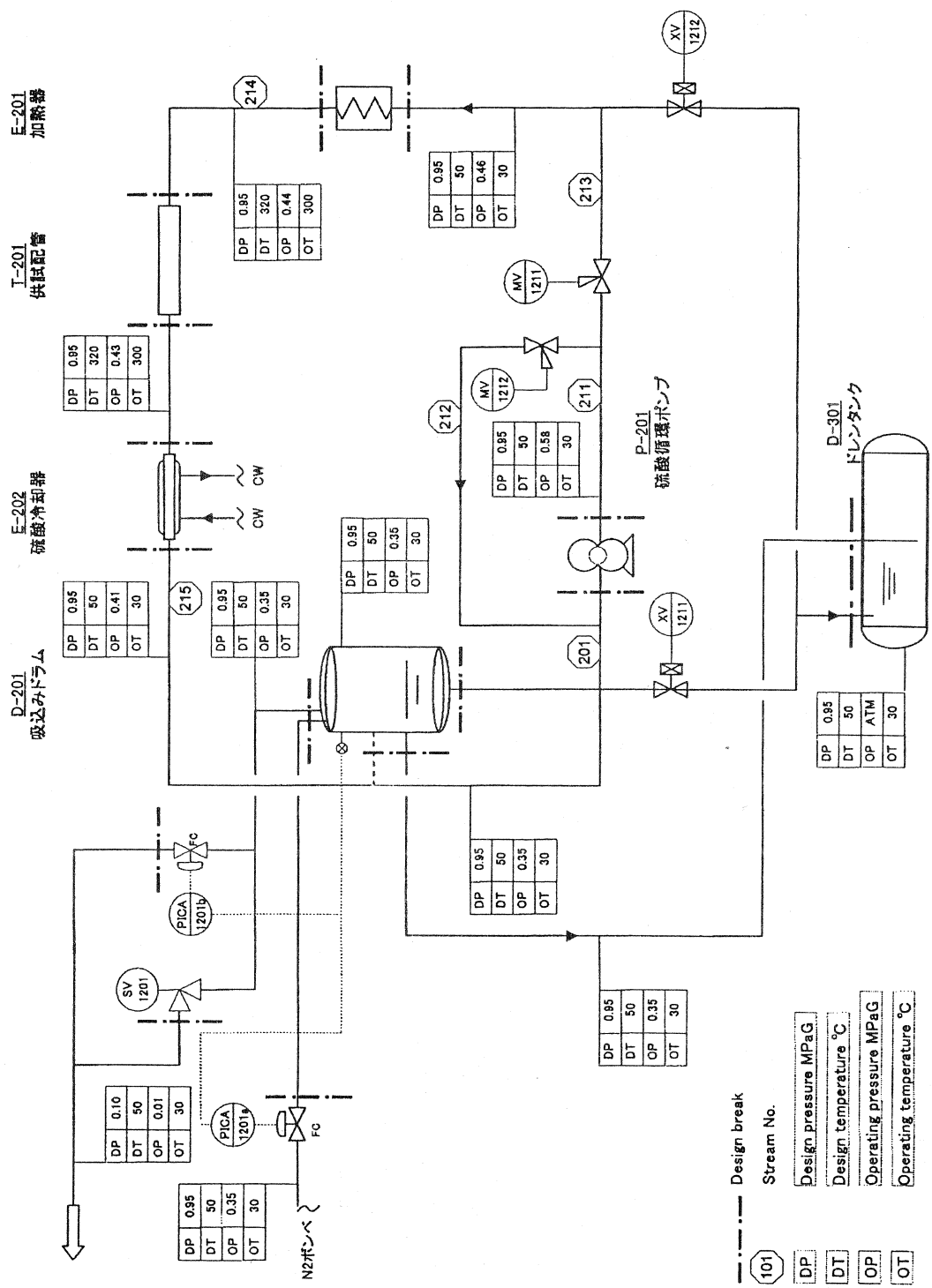
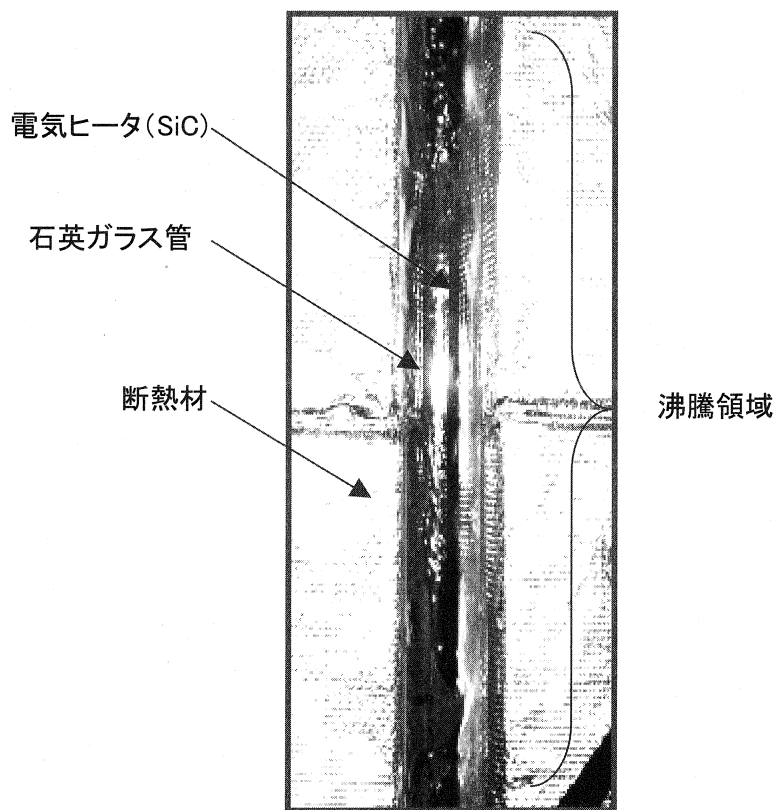
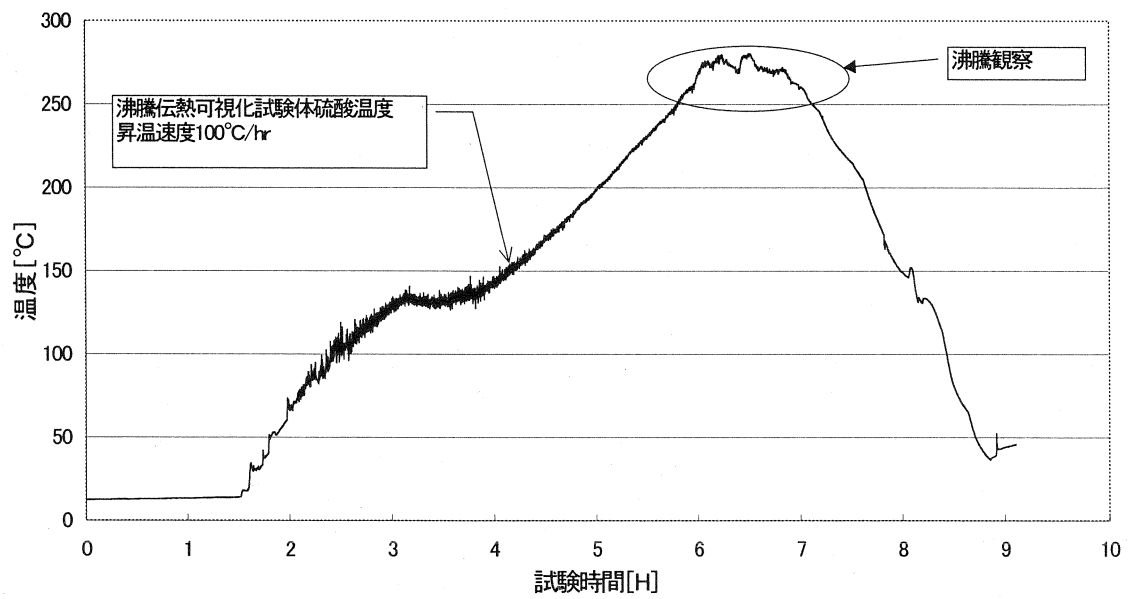


図 3.4-1 硫酸流動・機器健全性試験装置定常運転時のプロセス値 (2/2)
(高温硫酸機器試験ループ)



沸騰伝熱可視化試験体の硫酸沸騰状況写真

図 3.5・1 硫酸沸騰伝熱試験ループ試験結果

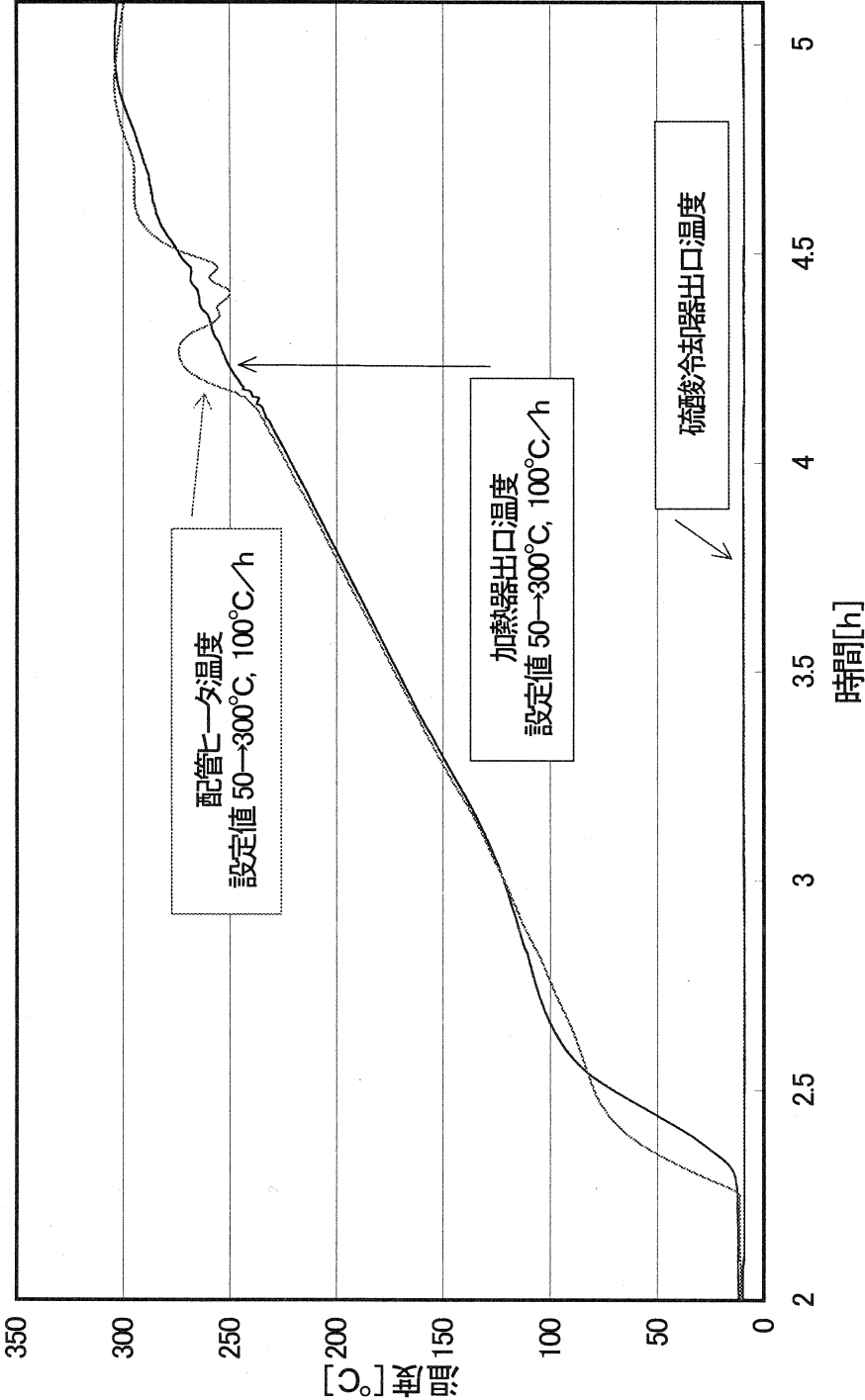


図 3.5・2 高温硫酸機器試験ループ試験結果

4. まとめ

熱化学 IS プロセスの硫黄循環系の主要機器である硫酸分解器を設計するために、未知である硫酸の沸騰伝熱特性の取得、及び硫酸を使用する機器に付帯する配管及び計器等のプラント健全性を評価することを目的とした硫酸流動・機器健全性試験装置を製作した。本試験装置は、硫酸沸騰伝熱特性の取得を目的とした 2.5L/min の硫酸沸騰伝熱試験ループとポンプ、弁、配管等の構造・機能健全性の確認を目的とした 20L/min の高温硫酸機器試験ループから構成される。耐圧・漏洩検査、電気検査、機器の単体機能試験、インターロック検査等を行った後、予熱を含む系統の運転試験を行い、設計通りの機能を有していることを確認した。

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、旧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」の成果です。

参考文献

- [1] K. Onuki, H. Nakajima, I. Ioka, M. Futakawa and S. Shimizu, "IS Process for thermo-chemical hydrogen production", JAERI-Review 94-006 (1994).
- [2] S. Kubo, H. Nakajima, S. Kasahara, Y. Inaba, S. Ishiyama, K. Onuki and R. Hino, "A pilot test plan of thermochemical water-splitting Iodine-Sulfur process", Nucl. Eng. Des., Vol. 233, pp. 355-362 (2004).
- [3] A. Terada, S. Kubo, H. Okuda, S. Kasahara and 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.

- [4] 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)
- [5] 野口弘喜、大田裕之、寺田敦彦、久保真治、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試作試験」、JAEA-Technology 2007-041 (2007)

This is a blank page.

国際単位系 (SI)

表 1. SI 基本単位

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

表 2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立法メートル	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)	キログラム毎立法メートル	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	モル毎立法メートル	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	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 ^(a)	rad		m・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・s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ ・kg・s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N・m	m ² ・kg・s ⁻²
工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² ・kg・s ⁻³
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 ² ・kg・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・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	ルーメン毎平方メートル	lm	cd・sr ^(c)	m ² ・m ⁻² ・cd=cd
(放射性核種の) 放射線吸収線量, 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
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa・s	m ⁻¹ ・kg・s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N・m	m ² ・kg・s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg・s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m・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・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・s ⁻³
質量熱容量 (比熱容量), 質量エントロピー	ジュール毎平方メートル	J/K	m ² ・kg・s ⁻² ・K ⁻¹
(比エネルギー)	ジュール毎キログラム	J/(kg・K)	m ² ・s ⁻² ・K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² ・s ⁻² ・K ⁻¹
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m・K)	m・kg・s ⁻³ ・K ⁻¹
電界の強さ	ジュール毎立法メートル	J/m ³	m ⁻¹ ・kg・s ⁻²
体積電荷	ボルト毎メートル	V/m	m・kg・s ⁻³ ・A ⁻¹
電気変位	クーロン毎立法メートル	C/m ³	m ⁻³ ・s・A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² ・s・A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m ⁻³ ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・A ⁻²
モルエントロピー	ジュール毎モル	J/mol	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・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・A
吸収線量率	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・s ⁻³ =m ² ・kg・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・s ⁻³ =kg・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	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=0.1 MPa=100 kPa=1000 hPa=10 ⁵ Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=10 ⁻¹⁰ m
バール	b	1 b=100 fm 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 =0.1 Pa・s
ストークス	St	1 St=1 cm 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=1/(1000/4π) A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx=10 ⁻⁸ Wb
スチル	sb	1 sb=1 cd/cm ² =10 ⁴ cd/m ²
ホト	ph	1 ph=10 ⁴ lx
ガル	Gal	1 Gal=1 cm/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=1 cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
X線単位		1 X unit=1.002×10 ⁻¹⁴ nm
ガンマ	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	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	
ミクロン	μ	1 μ=1 μm=10 ⁻⁶ m



古紙配合率100%
白色度70%再生紙を使用しています