JAEA-Technology
2013-020

IS プロセス信頼性試験装置（硫酸分解系機器）の安全対策

Safety Measures for Integrity Test Apparatus for IS Process
(Sulfuric Acid Decomposition Section)

野口 弘喜　久保 真治　岩月 仁　小貫 薫
Hiroki NOGUCHI, Shinji KUBO, Jin IWATSUKI and Kaoru ONUKI

原子力水素・熱利用研究センター
水素利用研究開発ユニット
Hydrogen Application Research & Development Division
Nuclear Hydrogen and Heat Application Research Center

July 2013
Japan Atomic Energy Agency
日本原子力研究開発機構

JAEA-Technology

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

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

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

© Japan Atomic Energy Agency, 2013

JAEA-Technology 2013-020

IS プロセス信頼性試験装置（硫酸分解系機器）の安全対策

日本原子力研究開発機構 原子力水素・熱利用研究センター　水素利用研究開発ユニット
野口　弘喜、久保　真治、岩月　仁、小貫　薫

(2013 年 4 月 8 日　受理)

熱化学水素製造法 IS プロセスでは、硫酸、二酸化硫黄、ヨウ化水素酸等の有害な化学物質を使用するため、試験研究を行う際には作業者の安全、外部への影響について十分な対策を講じる必要がある。現在、実用材料製の主要反応機器について、実プロセス環境における信頼性確認を目的とした IS プロセス信頼性試験を進めており、IS プロセス信頼性試験装置（硫酸分解系機器）の設計・製作が完了した。本試験装置では、硫酸（H_2SO_4）、二酸化硫黄（SO_2）等の有害な化学物質を取扱い、また、加圧条件で試験運転を行うため、本試験開始に先立ち、試験装置の安全対策、作業の安全対策及び異常時の対策について検討を行った。本報告書は、これらの検討結果を取りまとめたものである。

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

JAEA-Technology 2013-020

Safety Measures for Integrity Test Apparatus for IS Process (Sulfuric Acid Decomposition Section)

Hiroki NOGUCHI, Shinji KUBO, Jin IWATSUKI and Kaoru ONUKI

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

(Received April 8, 2013)

Hazardous substances such as sulfuric acid, sulfur dioxide and hydrogen iodide acid are employed in thermochemical Iodine-Sulfur (IS) process. It is necessary to take safety measure against workers and external environments to study experimentally on IS process. Presently we have been conducting to verify the soundness of main components made of engineering material in actual corrosive condition. An integrity test apparatus for the components of sulfuric acid decomposition was set up. We will use the hazardous substances such as sulfuric acid and sulfur dioxide and perform the experiment in pressurized condition in this integrity test. Safety measures for the test apparatus, operation and abnormal situation were considered prior to starting the test. This report summarized the consideration results for the safety measures on the integrity test apparatus for the components of sulfuric acid decomposition.

Keywords: Thermochemical Water-splitting Process, Iodine-sulfur Process, Safety Measure, Hazardous Substance, Sulfuric Acid, Sulfur Dioxide

目　次

1.　はじめに …… 1
2.　試験装置の概要 …… 2
2.1　試験装置の構成と機能 …… 2
2.2　試験装置の設置場所 …… 3
2.3　試験計画 …… 4
2.4　主要な機器・設備の詳細仕様 …… 5
3.　試験装置の安全対策 …… 10
3.1　適用法令・基準 …… 10
3.2　安全確保の方針 …… 12
3.3　試験装置の安全対策 …… 13
3.4　危険物・有害物質の管理 …… 18
3.5　定期自主検査・点検 …… 18
4.　作業の安全対策 …… 20
4.1　運転要領書の整備 …… 20
4.2　作業の安全対策 …… 20
4.3　連絡手段の確保 …… 21
4.4　作業者の資格･経験･教育訓練等 …… 21
4.5　体制 …… 21
5.　異常時の対策 …… 22
5.1　予想される異常とその対策 …… 22
5.2　異常時の通報連絡体制と方法 …… 24
5.3　異常時を想定した訓練 …… 24
6.　まとめ …… 25
謝辞 …… 26
参考文献 …… 26

Contents

1. Introduction 1
2. General description of test apparatus 2
2.1 Overall of test apparatus 2
2.2 Arrangement of test apparatus 3
2.3 Test plan 4
2.4 Specifications of main components 5
3. Safety measures for test apparatus 10
3.1 Applied laws and regulations 10
3.2 Basic policy of safety measure for test apparatus 12
3.3 Safety measure for test apparatus 13
3.4 Storage management of hazardous material and toxic substance 18
3.5 Periodic voluntary inspection 18
4. Safety measures for operation 20
4.1 Preparation of operation manual 20
4.2 Safety measure for operation 20
4.3 Communication method 21
4.4 Requirements, experiences, and education for operators 21
4.5 Organization 21
5. Safety measures in abnormal situations 22
5.1 Prospective errors and its countermeasure 22
5.2 Emergency communication system 24
5.3 Training for prospective errors 24
6. Summary 25
Acknowledgements 26
References 26

1. はじめに

日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構）では、我が国初の高温ガス炉である高温工学試験研究炉（以下、HTTR）を建設し[1]、950℃という高温ヘリウムガスの炉外取り出しに成功する[2]とともに、高温ガス炉を用いた水素製造システムの研究開発を進めている。高温ガス炉の熱利用技術として、ヨウ素(I)と硫黄(S)の化学反応を利用して、水を熱分解する熱化学法 IS プロセスの研究開発を進めている。IS プロセスの概要を Fig. 1.1 に示す。IS プロセスは、ブンゼン反応、硫酸分解反応、ヨウ化水素分解反応の 3 つの化学反応で構成され、最高 900℃の高温熱を用いて、水を分解し水素を製造するものであり、大規模水素製造に適した熱化学プロセスである。これまでに、ガラス製の試験装置を用いて世界で初めて 30NL/h 規模の連続水素製造を約 1 週間行うことに成功した[3]。また、過酷なプロセス環境で用いる装置材料についても、腐食試験等により候補材料を選定するとともに[4~6]、最も過酷な高温高圧下での硫酸蒸発のための機器について、耐食性に優れたセラミックスを用いる大型熱交換型反応器の一概念を提示するなどの成果を挙げてきた[7]。

現在、これらの研究成果を踏まえ、実プロセス環境（腐食・加圧）に耐える実用装置材料製反応機器を用いた試験（IS プロセス信頼性試験）を進めている[8]。試験のスケジュールを Fig. 1.2 に示す。IS プロセス信頼性試験は、実用装置材料の候補材料を用いて、各反応工程の主要機器を製作し、それらの機器の実プロセス環境における健全性を確認することを目的としている。これまでに、IS プロセス信頼性試験（ブンゼン反応系機器）を設計・製作し、原子力水素・熱利用研究センター安全技術検討会において、「IS プロセス信頼性試験（ブンゼン反応系機器）の安全対策」について審議が行われた。その審議結果を反映させて、ブンゼン反応系機器の信頼性確証に向けた耐久性試験が進められている[8-10]。また、IS プロセス信頼性試験（硫酸分解系機器）についても設計・製作が行われ、機器の信頼性確証に向けた耐久性試験の準備を進めている[11]。IS プロセス信頼性試験（硫酸分解系機器）では、腐食性流体（硫酸（H_2SO_4）、二酸化硫黄（SO_2）等）を取扱い、また、加圧条件で試験運転を行うため、試験の実施に際して、ブンゼン反応系機器と同様に作業者の安全、外部への影響などについて十分な配慮が必要となる。本件に関し、平成 24 年 12 月に原子力水素・熱利用研究センター安全技術検討会において、「IS プロセス信頼性試験（硫酸分解系機器）の安全対策」について審議が行われ、その審議結果を反映させて、IS プロセス信頼性試験（硫酸分解系機器）に着手することができた。

本報告書は、今後の試験研究における安全対策に資することを目的として、同検討会に提出した資料を基に取り纏めたものである。第 2 章に試験装置の概要、第 3 章に試験装置の安全対策、第 4 章に作業の安全対策、第 5 章に異常時の対策を記載した。

2. 試験装置の概要

ISプロセス信頼性試験装置（硫酸分解系機器）は、ISプロセスの主要反応系の一つである硫酸分解系の主要機器である硫酸分解器の機能と信頼性を検証することを目的とするものである。以下に本試験装置の構成、設置場所、及び試験計画について説明する。

2.1　試験装置の構成と機能

硫酸分解系の主要機器である硫酸分解器の概念図、及び試作体の写真をFig. 2.1に示す。硫酸分解器はSiCセラミックス製のバイヨネット型触媒反応器であり、バイヨネット流路を構成する外管と内管、内部の温度を測定する温度計さや管の3つのSiC管から構成される。マニフォールド部は、グラスライニング材料で構成される。硫酸分解器内部では、以下の化学反応が行われる。

H_2SO_4（Liquid）　→　H_2SO_4（Vapor：約300℃）
→　SO_3+H_2O（約500℃）　→　$SO_2+0.5O_2+H_2O$（約850℃）

本硫酸分解器の機能と信頼性を確認するためのISプロセス信頼性試験装置（硫酸分解系機器）の概略フロー図、主要機器組立図、外観写真をFig. 2.2、Fig. 2.3、Fig. 2.4にそれぞれ示す。また、設計条件と試験条件をTable 2.1に示す。本試験装置は、主要反応器である硫酸分解器と、硫酸を硫酸分解器へ供給する系統、硫酸分解ガスを冷却分離する系統、SO_2ガスを無害化する系統から構成される。本試験装置は、供給された硫酸をワンスルーで加熱・分解する試験装置である。本試験装置の加熱はすべて電気ヒータで行われ、硫酸分解器内部のプロセス流体は最高850℃まで加熱される。付帯設備として、電力を供給するための電気設備、プロセス条件を制御する制御盤、系統加圧用のN_2ガス供給系、プロセス流体の冷却用の冷却水供給系、換気設備が設置されている。

試験では、まず、N_2ガスにより系内を試験圧力（約0.5 MPaG）に昇圧し、圧力コントローラにより圧力を制御する。次いで、硫酸供給タンク内の硫酸を、硫酸供給ポンプを用いて硫酸分解器へ送る。硫酸は、硫酸分解器の外側の流路を上昇するが、この際、電気ヒータ加熱によって沸騰蒸発し、蒸気はさらに触媒との接触によりSO_2と酸素（O_2）に分解される。硫酸分解ガスは、塔頂で折り返し、硫酸分解器の内側の流路を外側の流路の硫酸（液・ガス）と熱交換しながら下降し、塔底部分から排出される。この気液混相のプロセス流体は、分解後ガス凝縮器とSO_2ガス冷却器で冷却して、気液分離器で凝縮液（未分解硫酸と水）を回収する。残りの気体及び硫酸ミストについては、後者をデミスタで捕集した後、圧力コントローラで減圧し、SO_2ガス吸着処理器で無害化する。

本試験装置の主要な機器、設備を以下に列挙する。

(1)　硫酸分解器
(2)　硫酸供給タンク

(3)　気液分離器
(4)　デミスタ
(5)　分解後ガス凝縮器
(6)　SO_2 ガス冷却器
(7)　硫酸供給ポンプ
(8)　SO_2 ガス吸着処理器
(9)　N_2 ガス供給ライン
(10)　冷却水供給ライン
(11)　硫酸分解系機器試験装置用チラー
(12)　パネルハウス
(13)　電気計装制御設備

本試験装置は、Table 2.1 に示すように設計圧力が 0.95 MPaG であるため、すべての機器は実用材料を用いて製作する。装置材料として、硫酸分解器の主要部には SiC セラミックス及びグラスライニング材料を用いる。その他の接液部にはグラスライニング材料あるいはテフロンライニング材料、接ガス部にはテフロンライニング材料あるいは SUS316L を使用する。本試験装置の規模は水素発生量換算で 150 NL-H_2/h（75 NL-O_2/h）であり、耐圧、耐食性を有する実用材料が適用できる最小規模とした。各機器、設備の詳細仕様を 2.4 節に示す。

2.2　試験装置の設置場所

本試験装置は、HTTR 開発棟の既設鉄骨架台（2 階構造）に設置する。既設鉄骨架台の仕様を以下に示す。

構造種別　：鉄骨造
規模　：階数 1 階
骨組形式　：X 方向　ブレース構造、Y 方向　ラーメン構造
基礎種別　：既設土間コンクリートスラブに設置（ケミカルアンカ止め）
外壁　：透明塩ビ板（2 mmt）　貼り
寸法　：6.0 m×14.0 m ×3.85 mH
積載装置荷重　：12 ton
耐震計算　：Co = 0.3　（水平 0.3 G 相当）
避難路　：1 階　出入口 3 箇所
　　2 階　通路 1 箇所及び階段 1 箇所
床　：1 階　コンクリート床に耐酸塗装
　　2 階　鉄板 4.5 mmt

Fig. 2.5 に示すように、試験装置は鉄骨架台の 2 階の既設パネルハウス内に設置する。腐食性溶液である硫酸の漏えい対策として、試験装置本体はキャッチパン上に設置する。有毒ガスである SO_2 ガスの漏えい対策として、パネルハウス内に試験装置を設置し、パネルハウス内を常時換気する。Fig. 2.6 に、各階の機器レイアウトを示す。ここで本試験装置に関連する機器、

設備は斜線で示した。なお、1 階部分は透明塩ビパネルで囲われており、換気空調設備が設置されている。本試験装置を構成する機器、設備の設置場所を下記に示す。

- 2 階
  ① IS プロセス信頼性試験装置（硫酸分解系機器）本体
  ② パネルハウス
  ③ N_2 ガス用ヘッダー
  ④ 制御盤（電気計装制御設備）

- 1 階
  ① 硫酸分解系機器試験装置用チラー
  ② N_2 ガスボンベ置場
  ③ チラー用ヘッダー

本試験装置における溶液の全インベントリは 35 L（硫酸供給タンク 20 L、気液分離器 15 L）であり、キャッチパンは全量を保持可能な容積とし、硫酸供給タンク及び気液分離器の下部にそれぞれ 40 L 以上、25 L 以上の塩ビ製キャッチパン、装置全体を囲うように 80 L 以上の鉄製のキャッチパンをそれぞれ設置する。パネルハウスには排気ブロアが設置されており、換気率約 10 回/h で HTTR 開発棟内の空気を吸気し、HTTR 開発棟外へ排出する。試験装置から排出される SO_2 ガスは SO_2 ガス吸着処理器の化学吸着材により無害化され、パネルハウスの排気口へ放出され、そのまま HTTR 開発棟外へ排出される。パネルハウスには SO_2 ガス検知器を設置し、有害ガスの漏えいを検知できる。

なお、本試験装置は、硫酸及び SO_2 ガス等の有害物質を使用するため、通常運転時及び地震等の異常時においても安全を確保できるように、異常の発生を警報により運転員に周知し、インターロック等によって異常事象を安全に収束させることができる。具体的な対処方法は、第 3 章に試験装置の安全対策、第 4 章に作業の安全対策、第 5 章に異常時の対策に記載するとともに、「運転要領書」を策定し、遵守することで安全確保に努める。

2.3 試験計画

本試験装置を用いた試験として、下記の機能試験と信頼性試験を予定している。本試験装置の温度、圧力等の試験条件を Table 2.1 に示す。

(a) 機能試験

硫酸分解器の SO_3 分解に関する機能検証を行うために、150 NL-H_2/h 規模（75 NL-O_2/h 規模）の硫酸分解反応試験を行う。

(b) 信頼性試験

硫酸分解器及びその周辺機器（容器、配管、計装等）の信頼性確認を行うために、曝露時間約 100 時間を目標に硫酸分解反応試験を行う。本試験では、10 NL-H_2/h 規模（5 NL-O_2/h 規模）に流量を制限して試験を行う。

2.4 主要な機器・設備の詳細仕様

本試験装置の主要な機器・設備の詳細仕様を示す。

(1) 硫酸分解器

機器番号	:	HX-S003
本体型式	:	バイヨネット型反応器
数　量	:	1 基
流　体	:	[Liq.] H_2SO_4, H_2O
		[Vap.] O_2, SO_2, SO_3, H_2O
交換熱量	:	1.09 kW（加熱 0.83 kW, 再生熱交換 0.26 kW）（定格）
流　量	:	[In] 0.0276 L/min(L)（定格）
		[Top] 7.30 L/min(V)（定格）
		[Out] 6.22 L/min(V)（定格）
設計温度	:	950℃
設計圧力	:	0.95 MPaG
主要材質	:	SiC+グラスライニング配管　または相当品
付属品	:	触媒、SiC 球、SiC 試験片

(2) 硫酸供給タンク

機器番号	:	D-S005
本体型式	:	縦型円筒容器
数　量	:	1 基
流　体	:	[Liq.]H_2SO_4, H_2O
流　量	:	0.0276 L/min（定格）
容　量	:	35 L
設計温度	:	150℃
設計圧力	:	0.95 MPaG
主要材質	:	SUS304＋テフロンライニング

(3) 気液分離器

機器番号	:	D-S003
本体型式	:	縦型円筒容器
数　量	:	1 基

流　体　　：　[Liq.] H_2O, H_2SO_4
　　[Vap.] O_2, SO_2, H_2O
流　量　　：　[Liq.] 0.0072 L/min（定格）
　　[Vap.] 1.38 L/min（定格）
容　量　　：　20 L
設計温度　　：　150℃
設計圧力　　：　0.95 MPaG
主要材質　　：　SUS304＋テフロンライニング

(4)　デミスタ

機器番号　　：　D-S007
本体型式　　：　縦型配管容器+ミストエリミネータ
数　量　　：　1 基
流　体　　：　[Vap.] O_2, SO_2, H_2O
流　量　　：　3.21 L/min(V)（定格）
容　量　　：　5 L
設計温度　　：　150℃
設計圧力　　：　0.95 MPaG
主要材質　　：　SGP（SS400）＋テフロンライニング配管
　　テフロン（デミスタ）

(5)　分解後ガス凝縮器

機器番号　　：　HX-S005
本体型式　　：　空冷式熱交換器　または相当品
数　量　　：　1 基
流　体　　：　[Mix] O_2, SO_2, H_2SO_4, H_2O
交換熱量　　：　0.2kW（定格）
流　量　　：　[In] 6.22 L/min(V)（定格）
　　[Out]0.0072 L/min(L), 1.38 L/min(V)（定格）
伝熱面積　　：　0.27 m^2 以上
設計温度　　：　300℃
設計圧力　　：　0.95 MPaG
主要材質　　：　SGP（SS400）+グラスライニング配管　または相当品

(6)　SO_2 ガス冷却器

機器番号　　：　HX-S006
本体型式　　：　二重管式熱交換器　または相当品
数　量　　：　1 基

流　体　　：　[Mix] O_2, SO_2, H_2SO_4, H_2O
交換熱量　　：　0.1 kW（定格）
流　量　　：　0.0072 L/min(L), 1.38 L/min(V)（定格）
伝熱面積　　：　0.1 m^2 以上
設計温度　　：　150℃
設計圧力　　：　0.95 MPaG
主要材質　　：　STPG（S25C）+グラスライニング配管　または相当品

(7)　硫酸供給ポンプ

機器番号　　：　P-S010
本体型式　　：　イワキハイセラポンプ V-10SCC3
数　量　　：　1 台
流　体　　：　[Liq.] H_2O, H_2SO_4
負荷電力　　：　10 W（標準モータ時）
流　量　　：　0.0303 L/min（定格）
運転最高温度　：　50 ℃
運転最高圧力　：　0.7 MPaG
主要材質　　：　SCS14（ポンプブラケット）
SiC（プランジャーシリンダー）
PTFE（シール）

(8)　SO_2 ガス吸着処理器

機器番号　　：　D-S008
本体型式　　：　縦型矩形容器+化学吸着材
数　量　　：　1 基
流　体　　：　[Vap.] O_2, SO_2
流　量　　：　3.21 L/min(V)（定格）
容　量　　：　450 L
設計温度　　：　40℃
設計圧力　　：　大気圧
主要材質　　：　硬質ポリ塩化ビニル（PVC）または相当品

(9)　N_2 ガス供給ライン

数　量　　：　1 式
流　体　　：　N_2
流　量　　：　1 L/min(V)　（定格）
運転最高温度　：　50℃
主要材質　　：　SUS

付属品　　：　縦置きボンベスタンド　　1 式
　　ヘッダー　　1 式

(10)　冷却水供給ライン

数　量　　：　1 式
流　体　　：　N_2
流　量　　：　20 L/min(L)　（定格）
運転最高温度　：　20℃
主要材質　　：　SUS
付属品　　：　ヘッダー　　1 式

(11)　硫酸分解系機器試験装置用チラー

機器番号　　：　HX-U001
本体型式　　：　外部循環型恒温水槽
仕　様　　：　オリオン機器　RKED2200A-V
温　度　　：　5～35 ℃
精　度　　：　±1 ℃
冷却能力　　：　7900 W（20℃）
熱媒体　　：　水
ポンプ　　：　28 L/min
継　手　　：　Rc1
数　量　　：　1 基
交換熱量　　：　0.40 kW 以上

(12)　パネルハウス

型　式　　：　鋼材骨組み透明塩ビ板組み立て式
概略寸法　　：　縦 3.3 m、横 5.2 m、高さ 3 m
数　量　　：　1 式
主要材質　　：　炭素鋼（支柱、サポート）
　　透明塩ビ板（壁）
付属品　　：　排気ファン　　1 基
　　SO_2 除害装置（化学吸着材）　　1 基

(13)　電気計装制御設備

型　式　　：　金属製箱型
数　量　　：　1 式
概略重量　　：　700 kg
主要機器　　：　電源

機器制御システム用シーケンサ
ディストリビュータ
インバータ
直流電源
温度調節器

3. 試験装置の安全対策

IS プロセス信頼性試験装置（硫酸分解系機器）の安全対策として、適用法令・基準の整理、安全確保の方針、危険物・有害物質の管理等を以下に示す。

3.1　適用法令・基準

本試験装置に関連する法令を以下に示す。

(1) 労働安全衛生法（労安法）
(2) 毒物及び劇物取締法（毒劇法）
(3) 消防法
(4) 大気汚染防止法
(5) 高圧ガス保安法
(6) その他の関連法令

これらの法令に関して、適用規制項目とその内容について整理した。

3.1.1　本試験装置で取り扱う化学物質が該当する法令

本装置で取り扱う化学物質は、硫酸（H_2SO_4）、二酸化硫黄（SO_2）、三酸化硫黄（SO_3）、酸素（O_2）、水（H_2O）及び窒素（N_2）である。硫酸及び二酸化硫黄は労働安全衛生法の特定化学物質第三類（法施行令別表第三）に指定される有害物である。硫酸は本試験で使用する原料であり、二酸化硫黄は硫酸分解反応により生成される。

また、硫酸は毒劇法の劇物（毒劇法第二条二別表第二）に指定されるが、使用においての届出等の手続きは必要ない。ただし、劇物の表示、盗難防止等の対策を講じる必要がある。

硫酸は 200 kg 以上において消防法の消防活動阻害物質に指定される（危険物の規制に関する政令 第一条十別表第二）。本試験装置では、薬品庫貯蔵量も含めて硫酸の貯留量は最大 70L 程度（約 140 kg）であるため、届出は不要である。

二酸化硫黄は、大気汚染防止法におけるばい煙（第七条の二）となるが、本試験装置はばい煙発生施設（令第二条別表第一）に該当しないため、排出規制は受けない。

また、本試験装置は窒素ガスにより、昇圧して試験を行う。本試験装置は設計圧力 0.95 MPa であり、運転圧力はこれ以下となるため、高圧ガス保安法の適用は受けない。

装置で使用する薬品の最大保有量、該当する法令を Table 3.1 に示す。

3.1.2　本試験装置に関連する法規制と手続き

本試験装置に関する法手続きを以下に示す。

(1) 労安法　ボイラー及び圧力容器安全規則

① 適用法令　：　労安法　ボイラー及び圧力容器安全規則
第五章　第九十条の二（検定）
第九十三条（安全弁の調整）
第九十四条（定期自主検査）

② 対象　　：　気液分離器（小型圧力容器）
③ 届出内容　　：　小型圧力容器の製造時に検定を受ける（合格証の表示）
④ 届出先　　：　製造メーカが登録個別検定機関の検定を受験

(2) 労安法　ボイラー及び圧力容器安全規則
① 適用法令　　：　労安法　施行令
第十三条第二十六号
簡易ボイラー等構造規格
② 対象　　：　硫酸分解器　（簡易ボイラー）
③ 届出内容　　：　不要、規格の遵守（耐圧試験、安全弁の設置）

(3) 労安法　特定化学物質障害予防規則
① 適用法令　　：　労働安全衛生規則
第八十六条一項（計画の届出等）
第八十八条一項（計画の届出をすべき機械等）
：　特定化学物質障害予防規則
第十二条の二（ぼろ等の処理）
第十三条（腐食防止措置）
第十四条（接合部の漏えい防止措置）
第十五条（バルブ等の開閉方向の表示等）
第十六条（バルブ等の材質等）
第十七条（供給原材料等の表示）
第十八条（出入口）
第十九条の一（警報設備等）※100L 未満であるが準用
第十九条の二（緊急遮断装置の設置等）
第二十条（作業規定）
第二十二条（設備の改造等の作業）
第二十三条（退避等）
第二十五条（容器等）
第二十六条（救護組織等）
第二十七条（特化物作業主任者の選定）
※試験研究のための取り扱い作業は除害されるが準用
第二十八条（作業主任者の職務）
第三十一条（定期自主検査　特定化学設備）
第三十二条（定期自主検査の記録）
第三十四条（点検　特定化学設備）
第三十四条の二（点検の記録）
第三十五条（補修等）

第三十九条（健康診断の実施）
第四十条（健康診断の結果の記録）
第四十条の二（健康診断の結果について医師からの意見聴取）
第四十条の三（健康診断の結果の通知）
第四十一条（健康診断結果報告）
第四十二条（緊急診断）
第四十三条（呼吸保護具）
第四十四条（保護衣等）
第四十五条（保護具の数等）

② 対象 ： 特定化学設備（特定化学物質を使用する試験装置）

③ 届出内容 ： 一、事業場の周囲の状況及び四隣との関係を示す図面
二、敷地内の建設物及び主要な機械等の配置を示す図面
三、原材料又は製品の取扱い、製造等の作業の方法の概要を記載した書面
四、建設物の各階の平面図及び断面図並びにその内部の主要な機械等の配置図及び概要を示す書面又は図面
五、前号の建設物その他の作業場における労働災害を防止するための方法及び設備の概要を示す書面又は図面

④ 届出先 ： 所管の労働基準監督署長

(4) 消防法

① 適用法令 ： 消防法第九条の三第一項

② 対象 ： 消防活動阻害物質（硫酸（200 kg 以上））の使用

③ 届出内容 ： 取扱量が 200 kg 以下のため届出不要
（貯蔵・取扱量、貯蔵しまたは取り扱う施設等の構造を記載した届出）

④ 届出先 ： 不要

3.2 安全確保の方針

本試験装置の運転時の安全確保の方針を以下に示す。

3.2.1 作業者の安全確保

試験装置の運転中に作業者が被災する可能性のある事象として、高温部への接触による熱傷、薬液曝露による化学的熱傷、有害物質の吸入、高所からの落下によるけがなどが挙げられる。ただし、本試験装置の運転は、パネルハウスに隣接して設置された制御盤により行われ、必要な場合を除き、試験中はパネルハウス内へ立ち入りらないものとする。サンプリング作業については、パネルハウスに設置した小窓から行うものとする。上記事象に対する安全確保の方針を以下に示す。

(1) 高温部への接触を防止するため、高温部であることを表示板等により明示し、注意

喚起を図る。

(2) 薬液被曝を防止するため、取り扱い薬品を明示し、MSDS 等を用いた薬品の安全な取扱いに関する教育訓練（OJT：On Job Training）を実施する。また、配管や弁等は保温材等による外装を施し、薬液の噴流が生じにくい構造とする。パネルハウス内作業、薬品を取り扱う作業時には保護具（頭部及び顔面の保護具、防毒マスク、実験着、手袋、安全靴）の着用を徹底する。万一の薬液曝露に備えて、応急措置用の器具、洗浄水等を常備する。

(3) 有害物質の吸引を防止するため、パネルハウス内は常時換気（10 回/h）を行い、防毒マスク着用を徹底する。

(4) 高所作業時には安全帯を使用し、落下防止措置を図る。

(5) 保護具（頭部及び顔面の保護具、防毒マスク、実験着、手袋、安全靴）着用を徹底する。万一の事態に備えて、緊急時の通報連絡体制を周知徹底する。

3.2.2 有害物質の外界への放出に対して

通常時、硫酸、二酸化硫黄等の有害物質は反応器・配管に内包されているため、外部へ放出されることはない。また、試験装置から排気されるガスは、SO_2 ガス吸着処理器により無害化されて放出される。万一の異常事態においても、パネルハウス外へ影響を及ぼさないように、以下の基本方針により安全確保を図る。

(1) 試験装置の設計、製作に関しては、3.1 節で示した関連法規・規格を準拠し、適切な構造とする。

(2) 警報装置・インターロック等の安全装置を備える（Table 3.2）。

(3) 万一、装置内の硫酸が漏えいした場合においても、全量貯留可能なキャッチパンを設置し、漏えいの拡大を防止する。また、キャッチパン内には漏えい検知帯を設置し、漏えいの早期発見を行う。

(4) パネルハウス外へ有害な気体（SO_2 等）が拡散することを防止するために、試験装置の排気ガスは化学吸着剤を通ってパネルハウス内排気口へ適切に放出される。万一、パネルハウス内に有害な気体が放出された場合に備えて、パネルハウス内に化学吸着材を備えた換気設備を設置する。さらに、パネルハウス内にガス検知器を設置し、有害な気体の放出の早期発見を行う。

3.3 試験装置の安全対策

3.3.1 設備構造

a. 適用規格・基準

法的規制を受ける機器として、気液分離器が小型圧力容器に該当する。当該規則に基づき製造時に検定を受けている。硫酸分解器は簡易ボイラーに該当し、簡易ボイラー等構造規格に基づき、耐水圧試験を実施している。また、試験装置全体は、第三類特定化学物質を取り扱う特定化学設備に該当する。試験装置全体の健全性は、気密試験等により担保する。

b. 材料・構造等

容器及び配管の材料、特に接液部材料には、耐食性を考慮して、テフロンライニング材料、グラスライニング材料、SiC セラミックスを使用している。これまでの腐食試験等の知見から十分な耐食性が見込まれる[4-6, 12]。ただし、定期的な膜厚測定等により材料の健全性を確認する。

c. 架台の耐震性

既設鉄骨架台の耐震計算においては、建築基準法に基づきルート 1-1 （小規模な建築物用)の条件を満足することを確認している。本計算における実効入力地震動は 、300～400 ガル （約 0.3～0.4 G） である。

d. 防爆構造

該当なし。

e. 気密構造

試験装置全体に対し、設計圧力による気密試験を行い、気密構造を担保する。

f. 継手部溶接等

フランジ継手は JIS 規格に基づいたフランジを使用し、シール材は PTFE 系の耐酸性に優れた材料を使用する。

g. 制御システム

本試験装置はパネルハウスに隣接して設置された制御盤により運転制御される。制御盤により、圧力、マスフローコントローラ流量、ポンプ流量、ヒータ出力が制御され、計測器からの温度、圧力等の出力値に応じて、警報、インターロックが起動する。制御盤には、過負荷時、漏電時に自動で電源 OFF になる漏電ブレーカーを用い、アースを適切にとることにより漏電時の感電災害を防止する。また、本試験装置には予備動力はない。

h. インターロック機構

温度異常、圧力異常、流量異常、漏えい等の異常信号、並びに停電等の発生時には、警報及びインターロック機構（Table 3.2）を設けることにより試験装置を安全に停止させる。

i. 安全装置

試験装置の圧力が異常上昇した場合、硫酸、SO_2 ガス等が存在する過酷な環境下においても、設定圧力において確実な圧力開放を行うため、バネ、弁棒、ガイドなどの可動部、摺動部を持たない破裂板を採用した。破裂板は、小型圧力容器に 1 基、圧力上昇が想定されるポンプ出口に 1 基ずつ設置する。

j. 換気設備

試験装置を収納したパネルハウスは、換気風量 850m^3/h（パネルハウス換気率 10 回/h）で換気される。本換気設備には、有毒ガスを除害可能な化学吸着材が設置されている。HTTR 開発棟から吸引された空気は、排気ブロアにより HTTR 開発棟外に設置された高さ 10 m の排気口より放出される。

k. 廃液処理

50wt%程度硫酸が、気液分離器内に試験廃液として貯留される。試験終了後、試験装置からポリタンクに移し、鍵のかかる場所で保管し、産業廃棄物処理業者へ委託して処理する。また、少量であれば、IS 実験棟に設置されている排液処理設備で中和処理を行う。

l. 運搬

本試験装置では、特殊な運搬手段を要する重要物、長尺物等はなく、一般的な手段で安全に運搬できる。ガラス製品、セラミックス製品については、過度な衝撃を与えないように梱包に十分留意する。

3.3.2 危険・有害物に対する対策

a. 高温部への対策

高温になるヒータ部は不燃物の断熱体で覆うとともに高温部であることを明示し、可燃物をヒータ近傍に置かないように注意喚起を行う。電気ケーブルの被覆は、難燃性材料を使用している。

b. 有害物質の拡散防止

試験装置はキャッチパン上に設置し、装置内に格納されている硫酸の全インベントリが漏えいした場合にも、キャッチパン内に全量保持できる構造となっている。また、試験装置はパネルハウス内に格納されており、装置内の有毒ガスが全量漏えいした場合にも、パネルハウス内に保持され、さらに化学吸着材を備えた換気設備により無害化されて HTTR 開発棟外へ放出される。

c. 漏えい検知

試験装置下部のキャッチパンに漏えい検出器を設置し、溶液漏えいを早期に検知する。また、有毒ガス（SO_2 ガス）漏えいに対し、パネルハウス排気口付近にガス検知器を設置し、有毒ガスの漏えいを検知する。パネルハウス外の有毒ガスの検知には、有毒ガス濃度測定用の検知管を使用する。

d. 漏えい時の警報装置

上記漏えい検知センサーの異常信号により警報が発報し、作業者に漏えいを知らせると

ともに、インターロック等により必要な停止措置を講じ、試験装置を安全に停止する。

e. 停電時の予備動力

予備動力は持たない。停電時は硫酸供給ポンプ、ヒータ、マスフローコントローラが停止することで試験装置を安全に停止する。ただし、換気設備も停止するため、停電時はパネルハウス内への立入りを禁止する。

f. 誤操作防止措置

バルブの誤操作を防止するために、すべてのバルブに開閉表示タグを付ける。ドレン弁については、万一誤操作による硫酸放出が考えられるため、常時閉止タグを設置するとともに、操作ハンドルを取り外すことで誤操作を防止する。

g. 圧力上昇への対策

試験装置の圧力が異常上昇した場合、警報が発報することで周囲に異常を知らせ、さらにインターロック機構によりポンプ、ヒータ、マスフローコントローラを停止する。さらに上昇し、設計圧力を超えた場合には、破裂板式安全装置が作動し、速やかに大気圧へ減圧される。

h. 除害処理

通常運転時に排出される有毒ガス（SO_2）は、化学吸着剤を有する SO_2 吸着処理器により捕集される。化学吸着材の破過を検知するためにガスクロを設置し、常時、試験装置から排出されるガスの濃度を測定する。万一、有毒ガスがパネルハウスに漏えいした場合には、パネルハウスに付帯される除害設備に吸着され、無害化されて HTTR 開発棟外に放出される。

i. 漏えい・付着した溶液の洗浄・清掃

有害物質（硫酸等）が漏えいし、身体に付着した場合に備えて、身体を水洗いするための洗浄水を入れたポリタンク、洗瓶をパネルハウス周辺に常備する。また、漏えいした溶液を清掃するために吸収材（紙ウェス等）を常備する。

3.3.3 作業環境に対する安全対策

a. 換気

試験装置が設置されたパネルハウス内の雰囲気は、パネルハウス側面に設置されたガラリより HTTR 開発棟内の空気を吸気し、排気ブロアにより風量 850 m^3/h（パネルハウス換気率 10 回/h）で換気され、除害装置を介して HTTR 開発棟外に設置された高さ 10 m の排気口から放出される。結露対策として、パネルハウス内に除湿器を設置する。これらにより、十分な換気量を確保し、酸欠も防止できる。

b. 採光、照明

HTTR 開発棟の天井に設置された照明を利用し、さらにパネルハウス内天井に蛍光灯を設置する。

c. 振動、騒音

有害な騒音振動を発生する機器として、パネルハウスの換気設備の排気ブロアが想定される。排気ブロアを架台に適切に固定すると共に、防振継手等により振動の低減を図る。

d. 出入口、通路、避難路

試験装置を設置しているパネルハウスには、出入口を 2 ヶ所設ける。パネルハウスを設置している HTTR 開発棟グリーンブース 2 階フロアには、出入口を 2 ヶ所設ける。N_2 ガスボンベ等が設置されている既設 HTTR 開発棟グリーンブース 1 階には、3 ヶ所の出入口を設置されている。

e. 高所作業

本試験装置を設置している 2 階フロアには、手すりが設置されている。高所作業時には、安全帯の着用を義務づける。

f. 運転時の作業・操作

試験中は、原則として原子力水素・熱利用研究センターＩＳプロセス信頼性確証試験グループ員 2 名以上で作業を行う。試験中の操作は、パネルハウス外に設置された制御盤により行う。必要な場合を除き、試験中は原則パネルハウス内には立ち入らない。試験中に操作が必要なバルブ（サンプリング用バルブ等）については、パネルハウスに小窓を設け、パネルハウス外から操作する。

g. 保守点検作業

試験装置の高さ 1.5 m の範囲の機器については、容易に保守点検作業が可能である。高さ 1.5 m 以上の硫酸分解器、デミスタ等については、脚立及び安全帯等を使用して作業を行う。硫酸分解器の分解作業は、天井クレーン及びパネルハウス内の作業ピットを用いてパネルハウス外へ搬出する。

h. 局所排気装置

配管等の分解点検作業時には、配管内に有毒ガス（SO_2）が残っている可能性があるため、局所排気装置及び SO_2 ガス検知器を設置し、適切な作業環境を確保する。

3.3.4 維持管理による安全対策

a. 試験装置の維持管理

長期運転停止時は試験溶液をドレンし、十分な水洗を行う。

b. 危険物保管・管理

本装置は、1回の試験に約5Lの90wt%硫酸を使用する。試験後には約4Lの50wt%硫酸の廃液が発生するため、ドレン弁よりポリタンクに移し、薬品庫に保管する。これらを廃棄業者に引き渡す。

3.4 危険物・有害物質の管理

本試験装置に関連する危険物、有害物質は硫酸（90wt%、50wt%）、二酸化硫黄であり、薬品庫、試験装置内部に存在する。これらの管理を以下の方針で行う。

(1) 薬品庫、パネルハウスは施錠する。
(2) 薬品庫の鍵の使用状況を管理簿に記録する。
(3) 薬品庫への薬品の入出量を管理簿に記録するとともに定期的に点検を実施する。
(4) 薬品庫、試験装置には適切な表示を掲げ、安全データシート（MSDS）を常備する。
(5) 廃液はポリタンク等に貯留し、架台 1F または薬品庫等に一時保管し、廃棄業者に引き渡して処分する。

3.5 定期自主検査・点検

3.5.1 定期自主検査

本試験装置では、ボイラー及び圧力容器安全規則の小型圧力容器に該当する機器を有し、また、特定化学物質等障害予防規則の特定化学設備に該当する。そのため、法令に則った年一回以上の定期自主検査が必要となる。検査項目は以下に示す法令に定められた内容を包含し、定期自主検査用チェックシートを定め、検査を実施する。必要に応じて、補修・交換するなどの措置を講じる。

(1) ボイラー及び圧力容器安全規則　第九十四条に基づく定期自主検査（1年1回）

① 気液分離器（小型圧力容器）

本体、蓋の締め付けボルト、管及び弁の損傷の有無又は摩耗の有無

(2) 特定化学物質等障害予防規則に基づく定期検査

① 特定化学設備又はその付属設備（配管を除く）（第三十一条第一項）

（2年に1回）

a. 設備の内部にあってその損壊の原因となる恐れのある物の有無
b. 内面及び外面の著しい損傷、変形及び腐食の有無
c. ふた板、フランジ、バルブ、コック等の状態
d. 安全弁、緊急しゃ断装置、その他の安全装置及び自動警報装置の機能
e. 冷却装置、加熱装置、撹拌装置、圧縮装置、計装装置及び制御装置の機能
f. その他、特定第二類物質又は第三類物質の漏えいを防止するため必要な事項

② 特定化学設備　配管（第三十一条第二項）　（2年に1回）

a. 溶接による継手部の損傷、変形及び腐食の有無

b. フランジ、バルブ、コック等の状態
c. 配管に近接して設けられた保温のための蒸気パイプの継手部の損傷、変形及び腐食の有無

本試験装置は、局所排気装置を有するが特定化学物質等障害予防規則の局所排気装置、排ガス処理装置には該当しない。ただし関連する点検項目を以下に示す。点検の際には以下の項目を参考に点検を実施する。

① 局所排気装置（第三十条第一項一号）（1 年 1 回）
a. フード、ダクト及びファンの摩耗、腐食、くぼみ、その他の損傷の有無及びその程度
b. ダクト及び排風機におけるじんあいの堆積状態
c. ダクトの接続部における緩みの有無
d. 電動機とファンとの連結するベルトの作動状態
e. 吸気及び排気の能力
f. その他、性能を保持するために必要な事項

② 排ガス処理装置（第三十条第一項三号）（1 年 1 回）
a. 構造部分の摩耗、腐食、破損の有無及びその程度フード・ダクト・ファンの摩耗、腐食、くぼみ、その他の損傷の有無
b. 処理薬剤、洗浄水の噴出量、内部充てん物等の適否
c. 処理能力
d. その他、性能を保持するために必要な事項

(3) 検査記録の保存
定期自主検査の記録は法令に則り、以下の事項を記録し、これを 3 年間保管する。
a. 検査年月日
b. 検査方法
c. 検査箇所
d. 検査の結果
e. 検査を実施した者の氏名
f. 検査結果に基づいて補修等の措置を講じた時はその内容

3.5.2 定期自主点検
本試験装置では、特定化学物質等障害予防規則の特定化学設備に該当するため、法令に則った定期自主点検が必要となる。試験装置を分解して改造若しくは修理を行ったとき、または引き続き 1 月以上使用を休止した後に使用するときは、上記検査項目と同項目について点検を行う。点検記録は、上記検査記録と同じ事項を記録し、これを 3 年間保管する。

4. 作業の安全対策

4.1　運転要領書の整備

本試験装置の運転・保守点検を行うための運転要領書を整備する。運転要領書は、以下で構成される。

(1)「安全作業マニュアル」
　化学物質の取り扱い方法、高温部等の危険物を取り扱う際の作業方法を定めたもの。

(2)「運転操作マニュアル」
　通常時の操作方法を定めたもの。

(3)「異常時対処マニュアル」
　火災、人身事故、停電、断水及び地震等の異常事象が発生した際の対処方法を定めたもの。

4.2　作業の安全対策

本試験装置を用いる作業を実施する前には、必ずリスクアセスメント及び TBM（Tool-box meeting）を行い、作業時に発生する危険とその対策を講じる。本試験で想定される危険因子として、以下のものが考えられる。

(1) 腐食性溶液（硫酸）
(2) 有害な気体（二酸化硫黄）
(3) 高温部（硫酸分解器ヒータ）
(4) 高圧環境（0.95 MPaG）

以上を踏まえ、危険と考えられる作業、その安全対策を以下に示す。

a. 試験溶液・廃液の運搬作業
　今回取り扱う試験溶液の量は、最大でも試験溶液 35 L（硫酸供給タンク 20 L、気液分離器 15 L）であり、運搬時はそれらをポリタンク等に小分けにして手動により運搬する。運搬作業時には保護具（頭部及び顔面の保護具、防毒マスク、実験着、手袋、安全靴）の着用を義務づける。

b. 試験溶液の仕込み作業
　試験溶液の仕込みは、ポンプ等により行う。仕込み作業時には、保護具（頭部及び顔面の保護具、防毒マスク、実験着、手袋、安全靴）の着用を義務づける。

c. サンプリング、廃液に伴う抜き出し作業
　サンプリングはパネルハウスに設置した小窓から行い、パネルハウス内には立ち入らない。廃液の抜き出し作業は、温度・圧力ともに常温・常圧のときに実施する。これらの作業時には、保護具（頭部及び顔面の保護具、防毒マスク、実験着、手袋、安全靴）の着用を義務づける。

d. 高温機器近傍での作業

高温機器として、硫酸分解器加熱ヒータ及び分解後ガス凝縮器がある。原則、高温状態にある場合は、近くで作業を実施しないこととする。また、これらの機器周辺には、高温部であることを明示し、注意喚起を行う。

e. 高圧機器近傍での作業

本試験は高圧（0.5 MPaG）で試験を行うため、必要な場合を除き、試験中はパネルハウス内に立ち入らないことで安全確保を図る。また、万一、圧力が異常上昇した場合は、破裂板式安全装置が作動し、速やかに大気圧へ減圧される。

f. 配管等の開放点検作業

配管開放作業は、試験装置内部に内包されている硫酸、二酸化硫黄などの有害物質に接触する危険性がある。配管開放前に、硫酸ドレン、N_2 ガス置換等を行い、有害物質を取り除く。配管開放時には、局所排気装置、ポータブルガス検知器を設置し、有毒ガスの有無を確認しながら作業を進める。作業時は保護具（頭部及び顔面の保護具、防毒マスク、実験着、手袋、安全靴）の着用を義務づける。

これらの作業を行う前に、作業内容、作業の注意事項等を定めた「運転要領書」（運転操作マニュアル）を作成し、これを遵守する。

4.3 連絡手段の確保

本試験装置の試験運転はパネルハウスに隣接設置された制御盤から行い、特別の通信機器は必要としない。保守・点検時には、パネルハウス内外、及び、1F、2F に担当者が別れて作業することが想定されるが、PHS または肉声により相互に連絡する。HTTR 開発棟外との緊急連絡手段は、PHS、HTTR 開発棟に設置されている固定電話、ページングを用いる。

4.4 作業者の資格･経験･教育訓練等

運転開始に先立って OJT を含む教育訓練（装置取り扱い、薬液取り扱い等）を作業者に対して行うとともに、運転開始後も再教育を徹底する。具体的には、試験装置の操作手順、薬品の取り扱い、緊急時の通報連絡体制、保護具の着用方法等の訓練を行う。また、特定化学物質及び四アルキル鉛等作業主任者を選任する。

4.5 体制

試験は、原則として原子力水素・熱利用研究センターIS プロセス信頼性確証試験グループ員 2 名以上で作業を行い、作業責任者は職員より選任する。試験運転は 1 日区切り（朝起動、夕方停止）で行い、昼夜連続運転は実施しない。

5. 異常時の対策

5.1 予想される異常とその対策

5.1.1 火災

火災発生時は、原子力水素・熱利用研究センターの通報連絡体制に従う。また、火災の発生防止、拡大防止の手段として、以下の対策を講じる。

(1) 火災発生及び延焼防止のため、高温になる部位は不燃性、その他の部位も難燃性の材料を使用する。(金属・セラミックスによる機器製作、塩化ビニル樹脂(着火温度 391℃)によるパネルハウス製作)

(2) 高温部は表示板等によりで明示し、近傍に可燃物を置かないようにする。

(3) 消火器を設置する。

(4) 漏えいした硫酸が電気配線に付着しないような配置とする。

(5) 消防活動阻害物質に該当する硫酸を有するため消火用の砂を配備する。

(6) 試験装置は、常時、作業員の監視のもとで運転する。

(7) パネルハウス内に火災報知器を設置し、火災の早期発見を行う。

5.1.2 漏えい

漏えいは、本試験中に最も発生する可能性が高い事象である。その中でも最も過酷な事象は、運転中に本試験装置が破損し、全インベントリー（液・ガス）がパネルハウス内に放出される事象である。この場合、装置内の液体として硫酸（硫酸供給タンク 20 L、気液分離器 15 L 保有）が継手部等から漏えいし、また、気体としては、SO_2、O_2 の混合ガス（SO_2：O_2 ＝2：1）の放出（全量約 200 L（SO_2 は約 130 L））が考えられる。

このようなプロセス流体漏えいに対して、以下の対策を講じる

(1) 液体の漏えいに対して、全量貯蔵可能なキャッチパン上に試験装置を設置し、試験装置外への漏えいを防止する。また、配管や弁等は保温材等による外装を施し、薬液の噴流が生じにくい構造とする。気体の漏えいに対して、試験装置は換気率 10 回/h で換気されているパネルハウス内に設置することで外部から隔離する。また、外部に放出される気体は、化学吸着材により無害化された後に放出される。

(2) 作業者の薬液被曝を防止するために、運転中は必要な場合を除き、パネルハウス内には立ち入らない。運転中にバルブ操作が予想されるサンプリング等は、パネルハウスに設置した小窓から操作する。また、運転中にパネルハウス内への立ち入る際、小窓からのバルブ操作を行う際には、保護具（頭部及び顔面の保護具、防毒マスク、実験着、手袋、安全靴）の着用を徹底する。

(3) 漏えいを早期発見するために、キャッチパンには漏えい検知器、パネルハウス内に SO_2 検知器を設置し、警報等により作業員に漏えいを知らせる。

(4) 万一の漏えい、薬液被曝に備えて、洗浄水を入れたポリタンク、洗瓶、液体吸収用の紙ウェス等を常備する。

5.1.3　地震

地震が発生した場合には、パネルハウス内にて作業中の者は、パネルハウスから速やかに退去する。また、本試験装置は制御盤内に感震装置を備えており、100 ガル以上の地震加速度を検知した場合、ヒータ、ポンプ、マスフローコントローラが停止する。退去後、事態の推移を見守りつつ、以下の方針に沿って、装置の停止や点検等の措置を講じる。また、点検結果の報告については、原子力水素・熱利用センターの地震対応マニュアルに従う。なお、震度に係わらず機器の破損、漏えいが認められる場合には、速やかに試験を中止し、試験装置の停止操作を行う。

震度 1～2　：特に対処しない。

震度 3　　：特に対処はしないが、パネルハウス外から試験装置の異常の有無を点検する。

震度 4 以上　：原則として試験装置を停止し、異常の有無を点検する。

5.1.4　ヒータの入熱異常

本試験装置では、硫酸分解器において電気ヒータにより硫酸が加熱される。温度調節器、直流電源の動作不良等により異常入熱が生じた場合、ヒータ温度が上昇による火災の発生、または内部流体温度の上昇による圧力上昇が考えらえる。異常入熱発生によりヒータ温度が上昇した場合、警報が発報され、インターロック機構によりヒータ、ポンプ、マスフローコントローラが停止する。また、火災を防止するために、ヒータ構成要素（断熱材など）は不燃性のもので製作する。

5.1.5　圧力上昇

試験装置は、N_2 ガスにより加圧され、圧力コントローラにより圧力制御が行われる。予想される圧力異常事象として、硫酸分解器または圧力コントローラの閉塞による圧力上昇、ポンプ異常による吐出圧上昇、停電時にヒータの余熱により気体・液体が加熱されることによる圧力上昇が予想される。圧力は各タンク、ポンプ出口等で測定され、異常な圧力上昇が発生した際には警報が発報され、インターロック機構によりヒータ、ポンプ、マスフローコントローラが停止する。さらに圧力が上昇する場合は、試験装置に設置した破裂板式安全装置が作動し、試験装置内の圧力を開放する。

5.1.6　セラミックス熱交換器の破損

本試験装置の主要機器に硫酸分解器は、SiC セラミックスである。本反応器で予想される異常事象は、継手部からの漏えい、閉塞による圧力上昇、セラミックスの破損である。継手部からの漏えい、閉塞による圧力上昇は、それぞれ 5.1.2 節、5.1.5 節に示したとおりである。セラミックスの破損の原因として、異常過熱による熱応力、セラミックスの高温部への低温流体の接触により発生する熱応力が考えられる。異常過熱が発生した場合には、ヒータ断のインターロック機構を設けることで対処する。高温部に低温流体が接触する原因として、反応器後流側に設置されている圧力コントローラの開放による急減圧が考えられる。そのため、

圧力コントローラをフェイルクローズに設定することで、停電時においてもバルブ開放による急減圧を防止できる。

万一、セラミックスが破損した場合、セラミックス内部で発生する局所的な熱応力によりセラミックスにクラックが生じ、クラック部分からの漏えいが想定される。漏えい対策は、5.1.2 節に示すように、パネルハウスに立ち入る際には、保護具（頭部及び顔面の保護具、防毒マスク、実験着、手袋、安全靴）着用を徹底することで安全確保を図る。

5.1.7　換気設備の異常

換気設備の排気ブロアが停止した場合、本試験装置の運転を手動により停止する。パネルハウス内へ有毒ガスが漏えいした場合に備え、パネルハウスの吸気ガラリを閉止し、内部のガスが HTTR 開発棟内に漏れ出ることのないように対処する。パネルハウス内で作業中の者は、速やかにパネルハウス外へ退去する。

5.1.8　停電

停電時には、電源を必要とする全ての構成機器（ポンプ、ヒータ、チラー、計測制御設備、換気設備、及び照明）が停止する。パネルハウス内で作業中の者は、速やかにパネルハウス外へ退去する。ポンプ、ヒータが停止することで、有毒ガスを発生させる硫酸分解反応は停止する。マスフローコントローラ及び圧力コントローラはフェイルクローズにより閉止され、有害物質（硫酸、二酸化硫黄）は装置内に封じ込める。このとき、ヒータの余熱によりプロセス流体が加熱され、圧力が上昇することが懸念される。装置内の圧力は、装置に設置されたブルドンカン式圧力計により確認できる。圧力が設計圧力を超えると破裂板式安全装置が起動し、速やかに圧力は解放される。（圧力上昇時の詳細な対応は 5.1.5 節に示す）。停電時は照明が失われ、換気設備が停止するため、パネルハウスは立入禁止とし、立入りが必要な場合には保護具の着用を義務付ける。

5.1.9　断水

本試験装置に濾過水等の水を使用する設備はない。

5.2　異常時の通報連絡体制と方法

火災、爆発、人身事故、HTTR 開発棟への立ち入り制限が必要となる漏えいが生じた場合には、大洗研究開発センター通報連絡基準に従い通報する。通報は、原子力水素・熱利用研究センター及び核熱利用研究施設通報連絡系統に従う。

5.3　異常時を想定した訓練

運転開始時までに、地震、火災、停電、人身事故及び上記装置異常を想定した訓練を実施する。

6. まとめ

実プロセス環境に耐える実用装置材料製反応機器を用いた試験の一環として、IS プロセス信頼性試験装置（硫酸分解系機器）を設計・製作した。本試験装置では、腐食性流体（硫酸（H_2SO_4）、二酸化硫黄（SO_2）等）を取扱い、さらに、加圧条件で試験運転を行うため、作業者の安全確保、外部への影響などについて、十分な配慮が必要となる。そこで、試験開始に先立ち、試験装置の安全対策、作業の安全対策及び異常時の対策について検討を行った。

本試験装置は、硫酸分解系の主要機器である SiC セラミックス製の硫酸分解器の機器健全性を確証する試験装置であり、すべての機器は実用材料を用いて製作されており、実プロセス環境での試験が可能である。装置材料として、SiC セラミックス、グラスライニング材料、テフロンライニング材料、ステンレス鋼で構成されている。本試験装置の規模は水素発生量換算で 150 NL-H_2/h（75 NL-O_2/h）であり、耐圧、耐食性を有する実用材料（グラスライニング材料、テフロンライニング材料）が適用できる最小規模とした。試験では、主要機器である SiC セラミックス製の硫酸分解器の機能試験及び硫酸分解器を含めた各機器の耐環境性に着目した信頼性試験を実施する。

本試験装置では、特定化学物質第三類である H_2SO_4 と SO_2 を取り扱うため、これらの溶液、ガスの大量漏えいに備えた対策が必要となる。そのため、全量貯留可能なキャッチパンと漏えい検知帯の設置、換気機能付きのパネルハウスの設置、SO_2 ガス漏えい検知器の設置、インターロックシステムの具備等の安全対策を行った。さらに、作業者の安全確保のために、保護具（頭部及び顔面の保護具、防毒マスク、実験着、手袋、安全靴）着用を徹底し、作業に関する運転要領書を整備した。また、万一の薬液被曝に備えて、洗浄水を入れたポリタンク、洗瓶、液体吸収用の紙ウェス等を常備した。本試験装置は、漏えい以外の火災、地震、停電、圧力異常、温度異常等の異常事象に対しても、警報・インターロックシステム、破裂板式安全装置等の対策を講じ、試験装置が安全に停止するように設計した。

これらの対策により、硫酸分解試験時の作業者の安全を確保し、特定化学物質の漏えいによる環境への影響を抑制することができる。今後、硫酸分解器試験装置の各機器の機能確認を行い、硫酸を用いた硫酸分解試験を実施し、反応器の健全性を確認する予定である。

謝辞

本報告書は、原子力水素・熱利用研究センター安全技術検討会における、「IS プロセス信頼性試験（硫酸分解系機器）の安全対策」の審議内容を取りまとめたものである。同検討会において、委員長 国富一彦氏（小型高温ガス炉研究開発ユニット長）を始めとし、稲垣嘉之氏（水素利用研究開発ユニット長）、大橋弘史氏（原子炉設計グループ・サブリーダー）、稲葉良知氏（国際共同試験グループ）、寺田敦彦氏（熱利用システム設計グループ）に貴重なご意見をいただいた。緑川 浩氏（技術開発部核熱利用試験技術課長）には、試験装置の運転・保守管理に関わる安全技術の観点から、沢和弘氏（高温工学試験研究炉部 HTTR 技術課長）には化学機器の保守管理の観点から、井岡郁夫氏（原子力エネルギー基盤連携センター放射線作用下界面現象研究特別グループ・サブリーダー）には防食技術の観点から貴重なご意見をいただいた。また、事務局松本裕之氏（計画室長） は円滑な検討会運営に貢献していただいた。これら皆様に謝意を表します。

参考文献

(1) S. Shiozawa et al., “Overview of HTTR design features”, Nucl. Eng. Des., 233, pp.11-21 (2004).

(2) S. Fujikawa et al., “Achievement of Reactor-Outlet Coolant Temperature of 950°C in HTTR”, J. Nucl. Sci. Technol., 41 [12], pp.1245-1254 (2004).

(3) S. Kubo et al., “A demonstration study on a closed-cycle hydrogen production by thermochemical water-splitting Iodine-Sulfur process”, Nucl. Eng. Des., 233, pp.347-354 (2004).

(4) N. Tanaka et al., “Study on corrosion resistance of glass lining and gold plating in high temperature sulfuric acid for thermochemical hydrogen production IS process”, Proceedings of 15th Int. Conf. Nucl. Eng., ICONE-15-10331, 22-26 April 2007, Nagoya, Japan (2007).

(5) B. Wong et al., “Construction materials development in sulfur–iodine thermochemical water-splitting process for hydrogen production”, Int. J. Hydrogen Energy, 32, pp.497-504 (2007).

(6) 西山直紀 他, “沸騰濃硫酸腐食による脆性材料の耐食性評価”, 材料, 48(7), pp.746-752 (1999).

(7) A. Terada et al., “Development program of hydrogen production by thermo-chemical water splitting IS process,” Proceedings of 13th Int. Conf. Nucl. Eng., ICONE-13-50183, 16-20 May 2005, Beijing, China (2005).

(8) K. Onuki et al., "R&D on thermochemical IS process for nuclear hydrogen production at JAEA", Proceedings of GLOBAL 2011, Paper No. 392206, 11-16 Dec. 2011, Makuhari, Japan (2011).

(9) S. Kubo et al., "R&D progress in thermochemical water-splitting iodine-sulfur process at JAEA", Proceedings of the HTR2012, Paper HTR2012-2-005, 28 Oct.-1 Nov. 2012, Tokyo, Japan (2012).

(10) 久保真治 他, "IS プロセス信頼性試験（ブンゼン反応系機器）の安全対策", JAEA-Technology 2012-043 (2013).

(11) H. Noguchi et al., "RComponents for Sulfuric Acid Processing in the IS process", Proceedings of the HTR2012, Paper HTR2012-2-010, 28 Oct.-1 Nov. 2012, Tokyo, Japan (2012).

(12) 野口弘喜 他, "硫酸流動機器健全性試験装置の運転試験", 日本原子力学会和文論文誌, 9(3), pp.288-295 (2010).

Table 2.1　Design and test conditions and test condition of the integrity test apparatus for the components of sulfuric acid decomposition

項目	単位	設計条件	試験条件
硫酸供給ポンプ 供給流量 （試験規模）	mL/min	12.8 （150 NL-H_2/h）	12.8 （150 NL-H_2/h）
			0.6 （10 NL-H_2/h）
硫酸供給タンク　温度	℃	150	RT
硫酸分解器　温度	℃	950	850
気液分離器　温度	℃	150	50
設計圧力	MPa[G]	0.95	0.5

Table 3.1　Maximum stockpile of hazardous material and applied laws and regulations

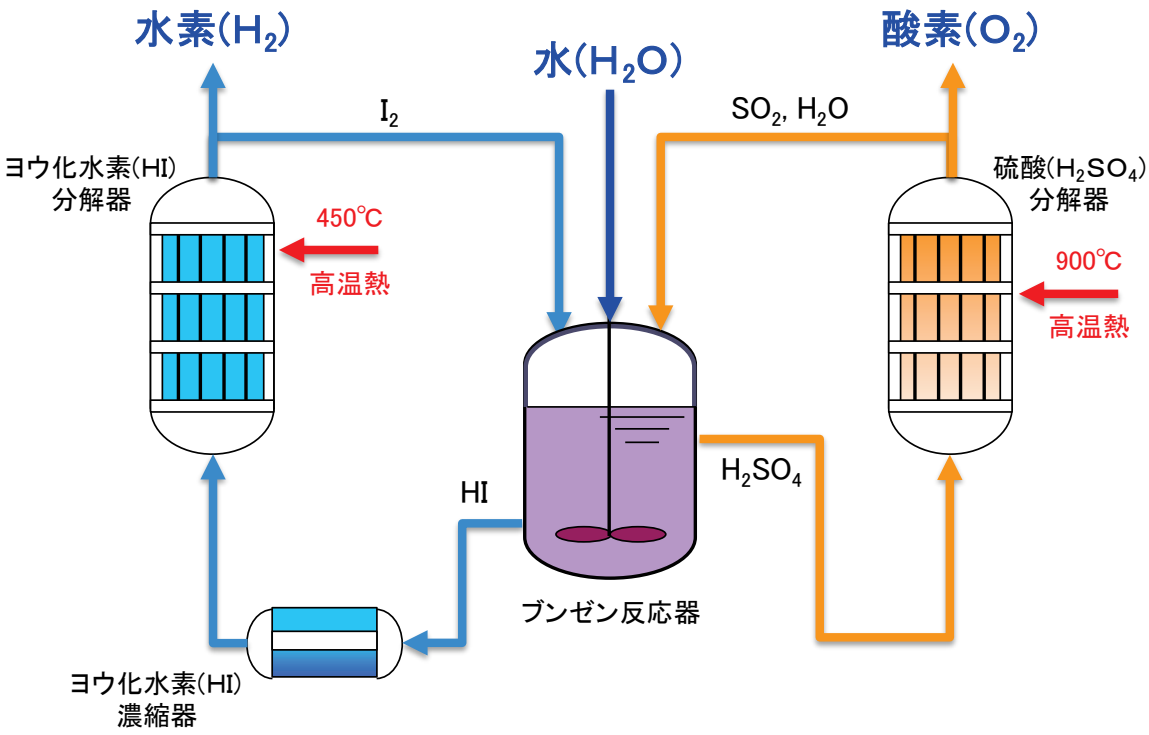
試薬名	最大保有量			適用法令		
	装置内	保管庫	合計	特化物	劇物	消防法
硫酸 (90wt%)	70 kg	70 kg	140 kg	○	○	× (200 kg 以下)
二酸化 硫黄	0.4 kg	-	0.4kg	○	-	-

Table 3.2 Interlock list (1/2)

No	警報名称	警報		インターロック					原因計器
		設定値	動作	設定値	動作	点数	計器番号		機器番号 計測箇所
1	TI-S101 硫酸供給タンク 温度高	100℃	ブザー鳴動	–	–	1	TI-S101	D-S005	硫酸供給タンク液温(鞘管)
2	TI-S102 分解後ガス凝縮器 出口温度高	70℃	ブザー鳴動	90℃	ポンプOFF、硫酸分解器ヒータOFF	1	TI-S102	HX-S005	分解後ガス凝縮器 出口温度
3	TI-S103 気液分離器 温度高	70℃	ブザー鳴動	–	–	1	TI-S103	D-S003	気液分離器液温(鞘管)
4	TI-S104 圧力コントローラ 出口温度高	40℃	ブザー鳴動	–	–	1	TI-S104	FCV-S101	圧力コントローラ 出口温度
5	–	–	–	–	–	1	TI-S105	FI-S101	流量計 内部温度
6	–	–	–	–	–	1	TI-S106	L-S202	マスフローコントローラ 出口温度
7	TC-S101 SO2ガス冷却器 出口温度高	70℃	ブザー鳴動	–	(手動で冷却水流量調整バルブを操作)	1	TC-S101	HX-S006	SO2ガス冷却器 出口温度
8	TI-S201 硫酸分解器 SiC表面温度 放熱防止下部ヒータ 下端温度高	230℃	ブザー鳴動	–	–	1	TI-S201	HX-S003	硫酸分解器 SiC表面温度 放熱防止下部ヒータ 下端
9	TI-S202 硫酸分解器 SiC表面温度 加熱ヒータ ① 下端温度高	350℃	ブザー鳴動	–	–	1	TI-S202	HX-S003	硫酸分解器 SiC表面温度 加熱ヒータ ① 下端
10	TI-S203 硫酸分解器 SiC表面温度 加熱ヒータ ② 下端温度高	500℃	ブザー鳴動	–	–	1	TI-S203	HX-S003	硫酸分解器 SiC表面温度 加熱ヒータ ② 下端
11	TI-S204 硫酸分解器 SiC表面温度 加熱ヒータ ③ 下端温度高	700℃	ブザー鳴動	–	–	1	TI-S204	HX-S003	硫酸分解器 SiC表面温度 加熱ヒータ ③ 下端
12	TI-S205 硫酸分解器 SiC表面温度 加熱ヒータ ④ 下端温度高	1000℃	ブザー鳴動	–	–	1	TI-S205	HX-S003	硫酸分解器 SiC表面温度 加熱ヒータ ④ 下端
13	TI-S206 硫酸分解器 SiC表面温度 加熱ヒータ ④ 上端温度高	1000℃	ブザー鳴動	–	–	1	TI-S206	HX-S003	硫酸分解器 SiC表面温度 加熱ヒータ ④ 上端
14	TI-S207 硫酸分解器 SiC表面温度 放熱防止上部ヒータ 上端温度高	1000℃	ブザー鳴動	–	–	1	TI-S207	HX-S003	硫酸分解器 SiC表面温度 放熱防止上部ヒータ 上端
15	–	–	–	–	–	1	TI-S208	HX-S003	硫酸分解器 流体温度(金メッキ) 入口部
16	–	–	–	–	–	1	TI-S209	HX-S003	硫酸分解器 流体温度(金メッキ) 加熱開始部
17	–	–	–	–	–	1	TI-S210	HX-S003	硫酸分解器 流体温度(金メッキ) ヒータ① 上端部
18	TI-S211 硫酸分解器 金メッキ熱電対 温度低	415℃	ブザー鳴動	–	–	1	TI-S211	HX-S003	硫酸分解器 流体温度(金メッキ) SiC充填層の直前
19	TI-S212 硫酸分解器 SiC鞘管上端 温度高	930℃	ブザー鳴動	–	–	1	TI-S212	HX-S003	硫酸分解器 流体温度(SiC鞘管) 鞘管上端
20	–	–	–	–	–	1	TI-S213	HX-S003	硫酸分解器 流体温度(SiC鞘管) 触媒層と同じ高さ
21	–	–	–	–	–	1	TI-S214	HX-S003	硫酸分解器 流体温度(SiC鞘管) SiC充填層の直前と同じ高さ
22	–	–	–	–	–	1	TI-S215	HX-S003	硫酸分解器 流体温度(SiC鞘管) ヒータ① 上端部と同じ高さ
23	–	–	–	–	–	1	TI-S216	HX-S003	硫酸分解器 流体温度(SiC鞘管) 加熱開始部と同じ高さ
24	TI-S217 硫酸分解器 SiC鞘管入口部 温度高	200℃	ブザー鳴動	250℃	ポンプOFF、硫酸分解器ヒータOFF	1	TI-S217	HX-S003	硫酸分解器 流体温度(SiC鞘管) 入口部
25	TI-S218 硫酸分解器 SiC鞘管出口部 温度高	200℃	ブザー鳴動	250℃	ポンプOFF、硫酸分解器ヒータOFF	1	TI-S218	HX-S003	硫酸分解器 流体温度(SiC鞘管) 出口部
26	TC-S301・TI-S301 硫酸分解器 放熱防止下部ヒータ温度高	950℃	ブザー鳴動	1000℃	ポンプOFF、硫酸分解器ヒータOFF	2	TC-S301 TI-S301	HX-S003	硫酸分解器 放熱防止下部ヒータ温度 制御用、監視用
27	TC-S302・TI-S302 硫酸分解器 加熱ヒータ①温度高	950℃	ブザー鳴動	1000℃	ポンプOFF、硫酸分解器ヒータOFF	2	TC-S302 TI-S302	HX-S003	硫酸分解器 加熱ヒータ①温度 制御用、監視用
28	TC-S303・TI-S303 硫酸分解器 加熱ヒータ②温度高	950℃	ブザー鳴動	1000℃	ポンプOFF、硫酸分解器ヒータOFF	2	TC-S303 TI-S303	HX-S003	硫酸分解器 加熱ヒータ②温度 制御用、監視用
29	TC-S304・TI-S304 硫酸分解器 加熱ヒータ③温度高	950℃	ブザー鳴動	1000℃	ポンプOFF、硫酸分解器ヒータOFF	2	TC-S304 TI-S304	HX-S003	硫酸分解器 加熱ヒータ③温度 制御用、監視用
30	TC-S305・TI-S305 硫酸分解器 加熱ヒータ④温度高	950℃	ブザー鳴動	1000℃	ポンプOFF、硫酸分解器ヒータOFF	2	TC-S305 TI-S305	HX-S003	硫酸分解器 加熱ヒータ④温度 制御用、監視用
31	TC-S306・TI-S306 硫酸分解器 放熱防止上部ヒータ温度高	950℃	ブザー鳴動	1000℃	ポンプOFF、硫酸分解器ヒータOFF	2	TC-S306 TI-S306	HX-S003	硫酸分解器 放熱防止上部ヒータ温度 制御用、監視用
32	–	–	–	–	–	1	TI-S307	HX-S003	硫酸分解器 放熱量推算用 加熱ヒータ①
33	–	–	–	–	–	1	TI-S308	HX-S003	硫酸分解器 放熱量推算用 加熱ヒータ①
34	–	–	–	–	–	1	TI-S309	HX-S003	硫酸分解器 放熱量推算用 加熱ヒータ②
35	–	–	–	–	–	1	TI-S310	HX-S003	硫酸分解器 放熱量推算用 加熱ヒータ②
36	–	–	–	–	–	1	TI-S311	HX-S003	硫酸分解器 放熱量推算用 加熱ヒータ③
37	–	–	–	–	–	1	TI-S312	HX-S003	硫酸分解器 放熱量推算用 加熱ヒータ③
38	–	–	–	–	–	1	TI-S313	HX-S003	硫酸分解器 放熱量推算用 加熱ヒータ④
39	–	–	–	–	–	1	TI-S314	HX-S003	硫酸分解器 放熱量推算用 加熱ヒータ④
40	–	–	–	–	–	1	TI-S315	HX-S003	硫酸分解器 下部放熱防止ヒータ制御用 下部放熱防止ヒータ 上端

Table 3.2 Interlock list (2/2)

41	-	-	-	-	-	1	TI-S316	HX-S003	硫酸分解器 下部放熱防止ヒータ制御用 加熱ヒータ① 下端
42	-	-	-	-	-	1	TI-S317	TI-S317	硫酸分解器 上部放熱防止ヒータ制御用 加熱ヒータ④ 上端
43	-	-	-	-	-	1	TI-S318	TI-S318	硫酸分解器 上部放熱防止ヒータ制御用 上部放熱防止ヒータ 下端
44	TC-U101・TI-U101 チラー温度高	30℃	ブザー鳴動	-	-	1	TC-U101 TI-U101	HX-U001	チラー 内臓温度計
45	-	-	-	-	-	1	TI-U102	TI-U102	SO2ガス冷却器用冷却水ライン 入口温度
46	TI-U103 SO2ガス冷却器用冷却水ライン 出口温度高	30℃	ブザー鳴動	-	-	1	TI-U103	TI-U103	SO2ガス冷却器用冷却水ライン 出口温度
47	-	-	-	-	-	1	TI-U104	TI-U104	硫酸分解器ヒータ用冷却水ライン 入口温度
48	TI-U105 SO2ガス冷却器用冷却水ライン 出口温度高	30℃	ブザー鳴動	-	-	1	TI-U105	TI-U105	硫酸分解器ヒータ用冷却水ライン 出口温度
49	-	-	-	-	-	1	FI-S101	L-S113	吸着処理器出口 プロセスガス流量
50	FC-S101 N2ガス供給系 マスフローコントローラ流量高	0.95NL/min	ブザー鳴動	0.95NL/min	マスフローコントローラ OFF	1	FC-S101	L-S202	N2ガス供給系 マスフローコントローラ
51	FC-U101・FI-U101 SO2ガス冷却器用冷却水ライン 冷却水流量低	0L/min	ブザー鳴動	-	-	1	FC-U101 FI-U101	L-101	SO2ガス冷却器用冷却水ライン 冷却水流量
52	FC-U102・FI-U102 硫酸分解器ヒータ用冷却水ライン 冷却水流量低	0L/min	ブザー鳴動	-	-	1	FC-U102 FI-U102	L-103	硫酸分解器ヒータ用冷却水ライン 冷却水流量
53	PI-S101 硫酸供給ポンプ 吐出圧力高	0.65MPaG	ブザー鳴動	0.75MPaG	ポンプOFF、硫酸分解器ヒータOFF、 マスフローコントローラ OFF	1	PI-S101	L-S104	硫酸供給ポンプ 吐出圧力
54	PI-S101 硫酸供給ポンプ 吐出圧力低	0.1MPaG	ブザー鳴動	-	-				
55	PI-S102 硫酸分解器 入口圧力高	0.65MPaG	ブザー鳴動	0.75MPaG	ポンプOFF、硫酸分解器ヒータOFF、 マスフローコントローラ OFF	1	PI-S102	HX-S003	硫酸分解器 入口圧力
56	PI-S102 硫酸分解器 入口圧力低	0.1MPaG	ブザー鳴動	-	-				
57	PI-S103 硫酸分解器 出口圧力高	0.65MPaG	ブザー鳴動	0.75MPaG	ポンプOFF、硫酸分解器ヒータOFF、 マスフローコントローラ OFF	1	PI-S103	HX-S003	硫酸分解器 出口圧力
58	PI-S103 硫酸分解器 出口圧力低	0.1MPaG	ブザー鳴動	-	-				
59	PI-S104 気液分離器 圧力高	0.65MPaG	ブザー鳴動	0.75MPaG	ポンプOFF、硫酸分解器ヒータOFF、 マスフローコントローラ OFF	1	PI-S104	D-S003	気液分離器 圧力
60	PI-S104 気液分離器 圧力低	0.1MPaG	ブザー鳴動	-	-				
61	PC-S105・PI-S105 圧力コントローラ 圧力高	0.65MPaG	ブザー鳴動	0.75MPaG	ポンプOFF、硫酸分解器ヒータOFF、 マスフローコントローラ OFF	1	PC-S105 PI-S105	FCV-S101	圧力コントローラ
62	PC-S105・PI-S106 圧力コントローラ 圧力低	0.1MPaG	ブザー鳴動	-	-				
63	-	-	-	-	-	1	PI-S106	L-S201	N2ガス供給系 供給圧力
64	PI-S107 N2ガス供給系 マスフローコントローラ 前 圧力低	0.2MPaG	ブザー鳴動	-	-	1	PI-S107	L-S202	N2ガス供給系 マスフローコントローラ 前 圧力
65	-	-	-	-	-	1	PI-S108	L-S202	N2ガス供給系 マスフローコントローラ 後 圧力
66	-	-	-	-	-	1	PI-S109	L-S204	N2ガス供給系 ブルドンカン式圧力計 プロセス圧力
67	-	-	-	-	-	1	PI-S110	L-S113	吸着処理器出口 湿式流量計内圧力
68	PI-S111 硫酸供給タンク 入口圧力高	0.65MPaG	ブザー鳴動	0.75MPaG	ポンプOFF、硫酸分解器ヒータOFF、 マスフローコントローラ OFF	1	PI-S111	D-S005	硫酸供給タンク 圧力
69	PI-S111 硫酸供給タンク 入口圧力低	0.1MPaG	ブザー鳴動	-	-				
70	PI-U101 チラー 冷却水圧力高	0.75MPaG	ブザー鳴動	-	-	1	PI-U101	HX-U001	チラー 冷却水圧力
71	LI-S101 硫酸供給タンク 液位高	450mm	ブザー鳴動	-	-	1	LI-S101	D-S005	硫酸供給タンク 液位
72	LI-S101 硫酸供給タンク 液位低	160mm	ブザー鳴動	-	-				
73	LI-S102 気液分離器 液位高	525mm	ブザー鳴動	-	-	1	LI-S102	D-S003	気液分離器 液位
74	-	-	-	-	-	1	AI-S101	L-S114	ガスクロ
75	AI-S102 SO2ガス検知器 SO2濃度高	3ppm	ブザー鳴動	-	-	1	AI-S102	-	パネルハウス内
76	漏洩検知器	-	ブザー鳴動	-	-	1	-	-	パネルハウス内
77	非常停止ボタン	非常停止ボタンを押す	ブザー鳴動	-	ポンプOFF、硫酸分解器ヒータOFF、 マスフローコントローラ OFF	1	-	-	パネルハウス内



ブンゼン反応工程	$2H_2O + I_2 + SO_2 \rightarrow 2HI + H_2SO_4$
硫酸分解工程	$H_2SO_4 \rightarrow SO_2 + H_2O + 0.5O_2$
ヨウ化水素分解工程	$2HI \rightarrow I_2 + H_2$

Fig. 1.1　Schematic of Thermochemical IS process

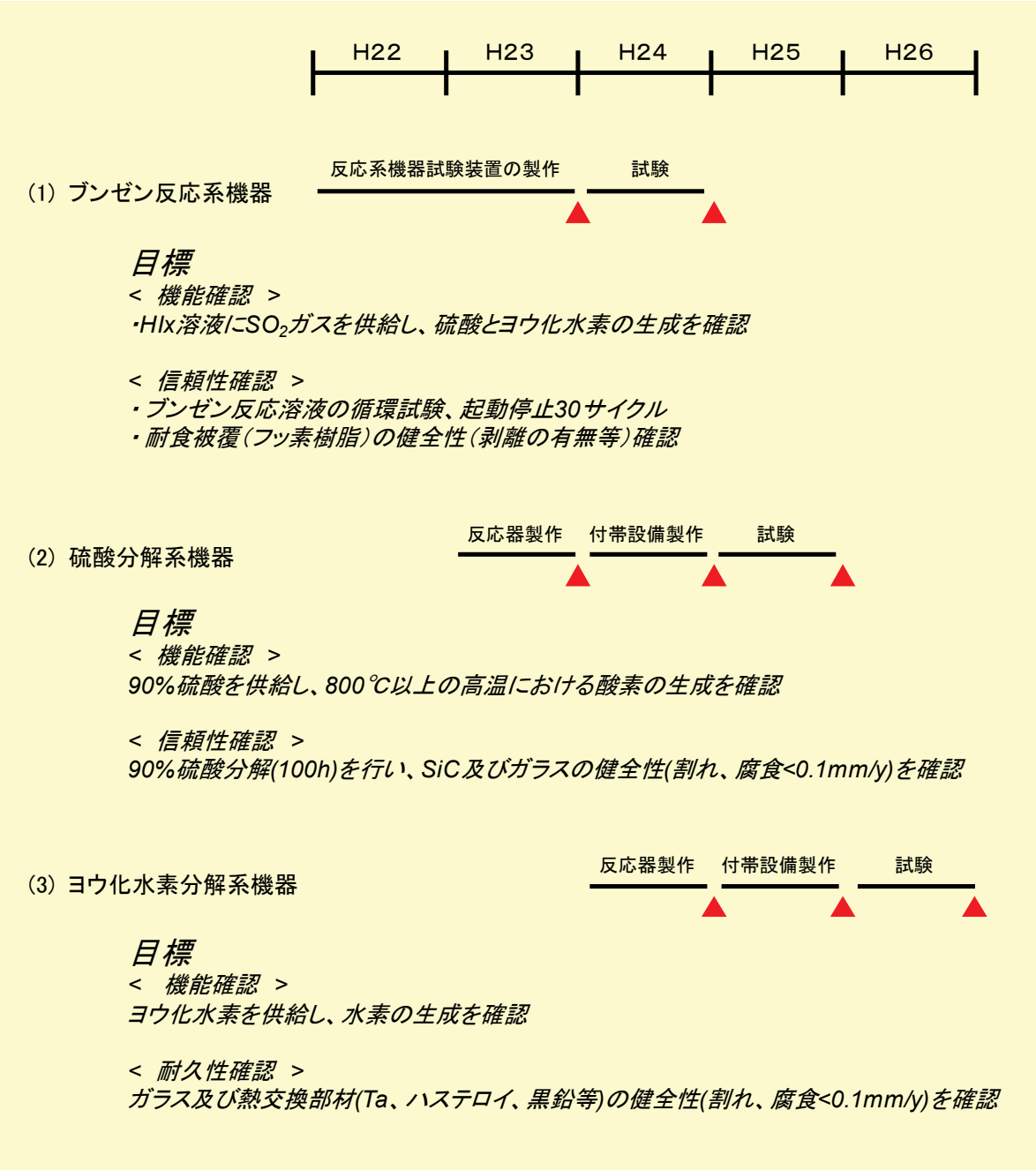


Fig. 1.2 Schedule of integrity test for IS process

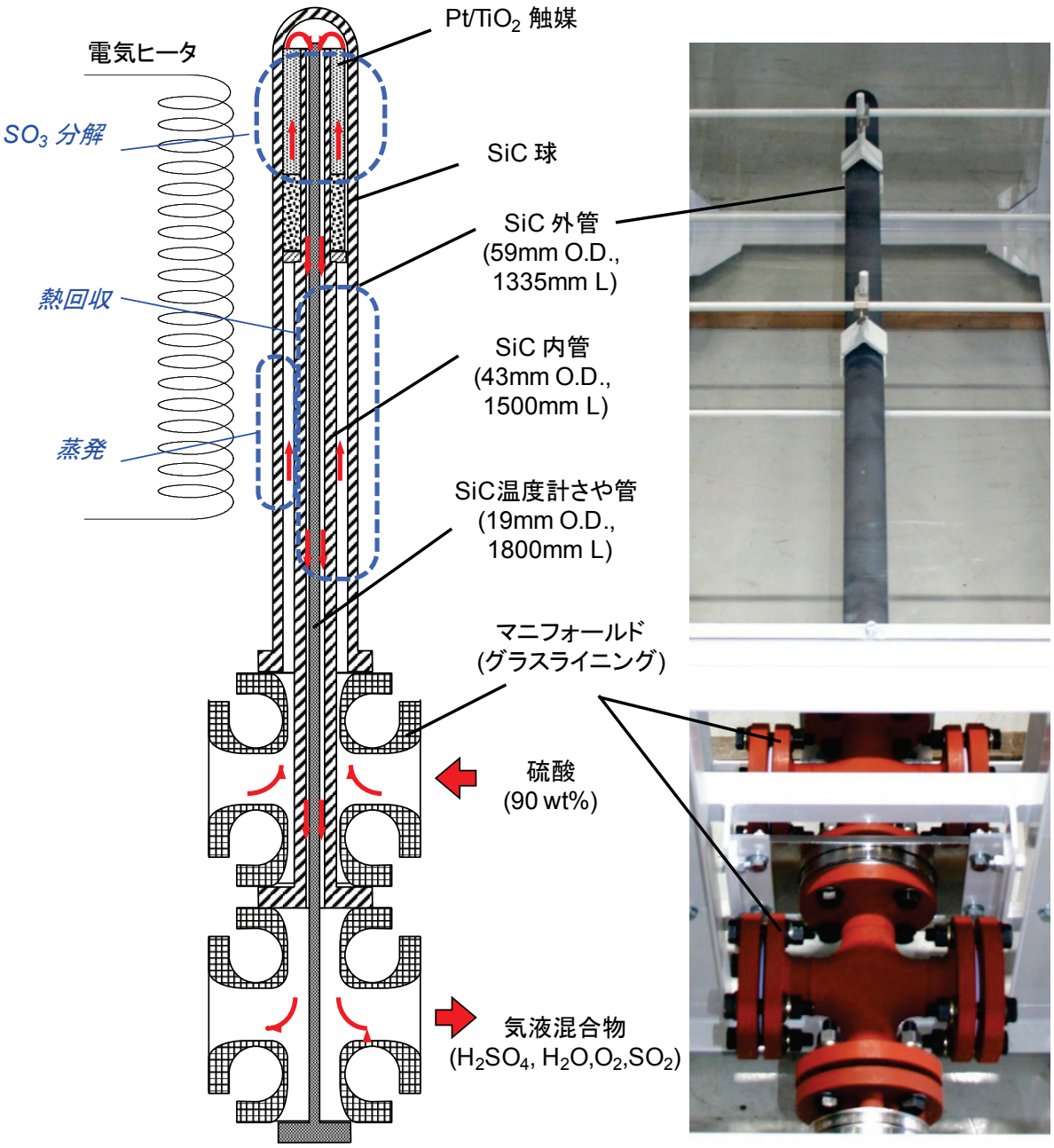


Fig. 2.1　Conceptual diagram and photo of sulfuric acid decomposer

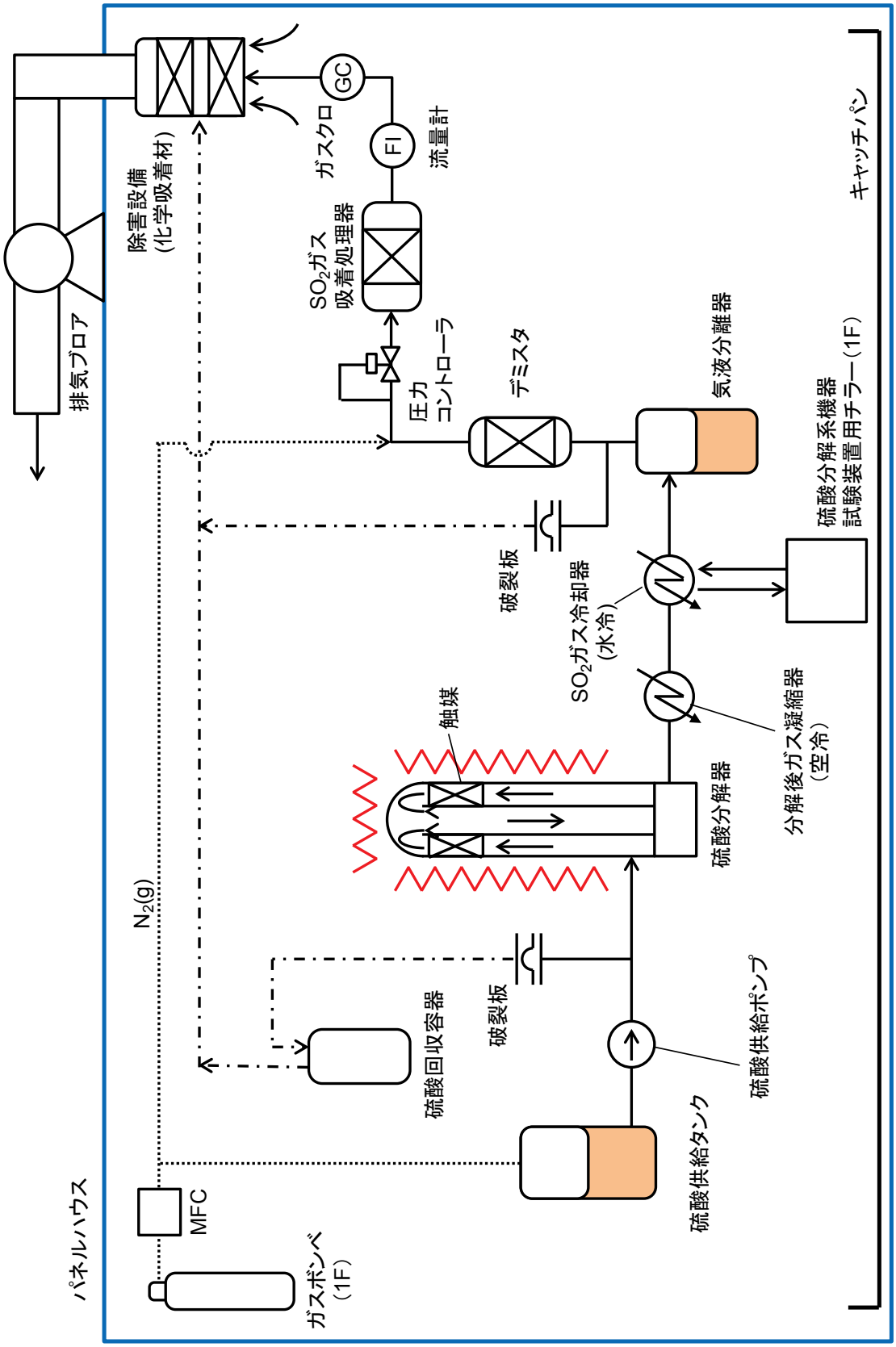


Fig. 2.2 Flow diagram of integrity test apparatus for the components of sulfuric acid decomposition

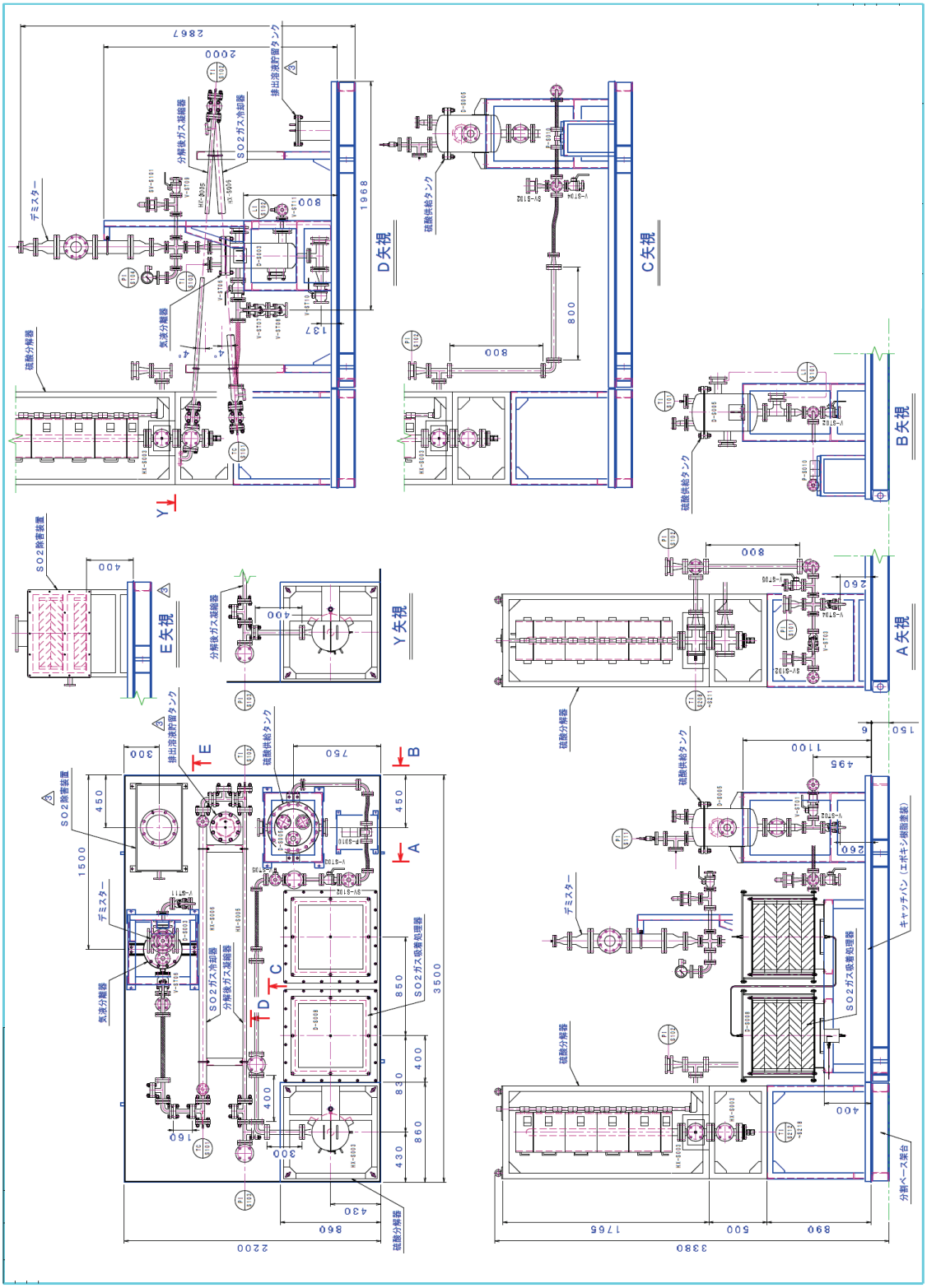


Fig. 2.3 Assembly drawing of the integrity test apparatus for the components of sulfuric acid decomposition

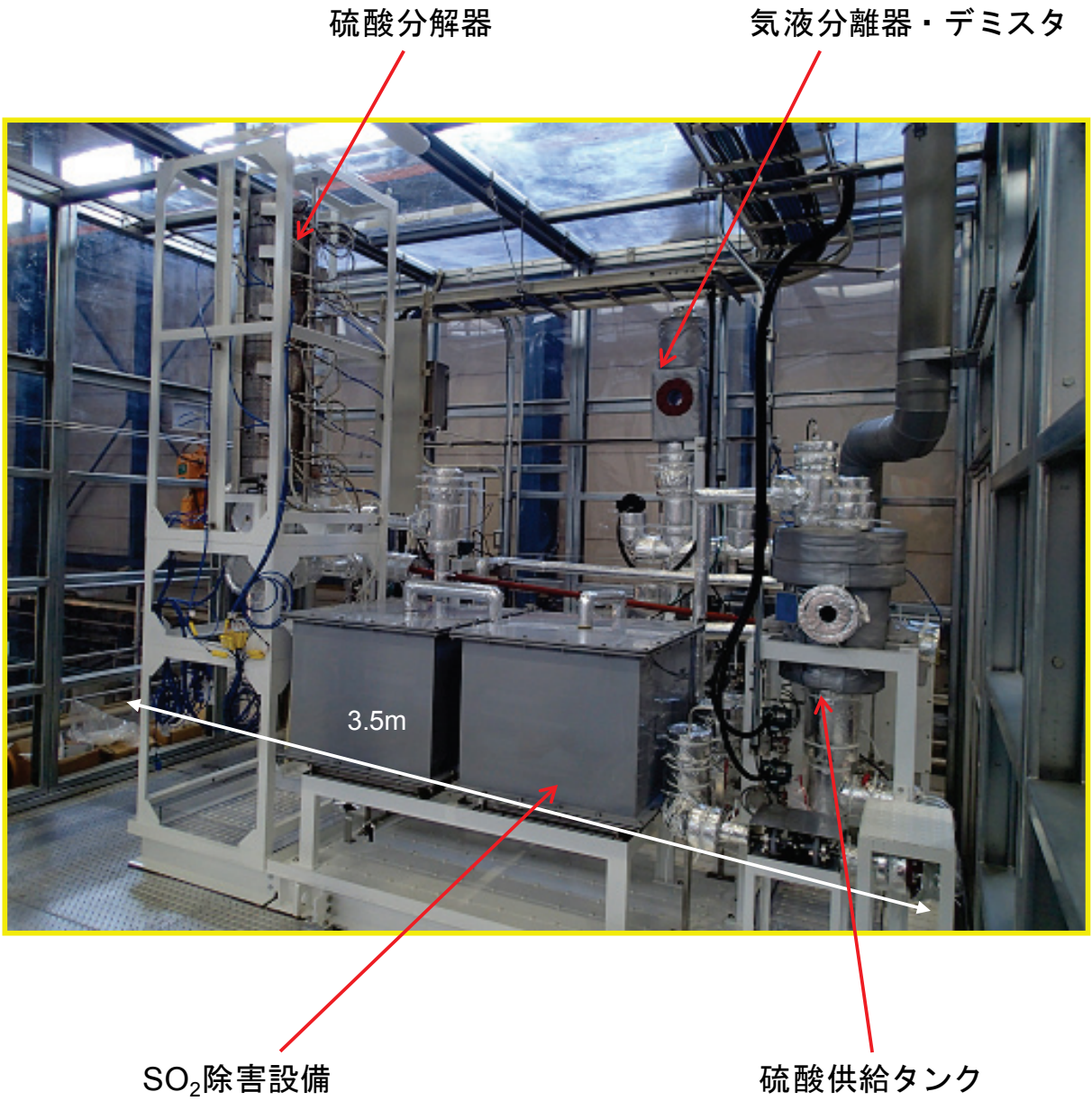
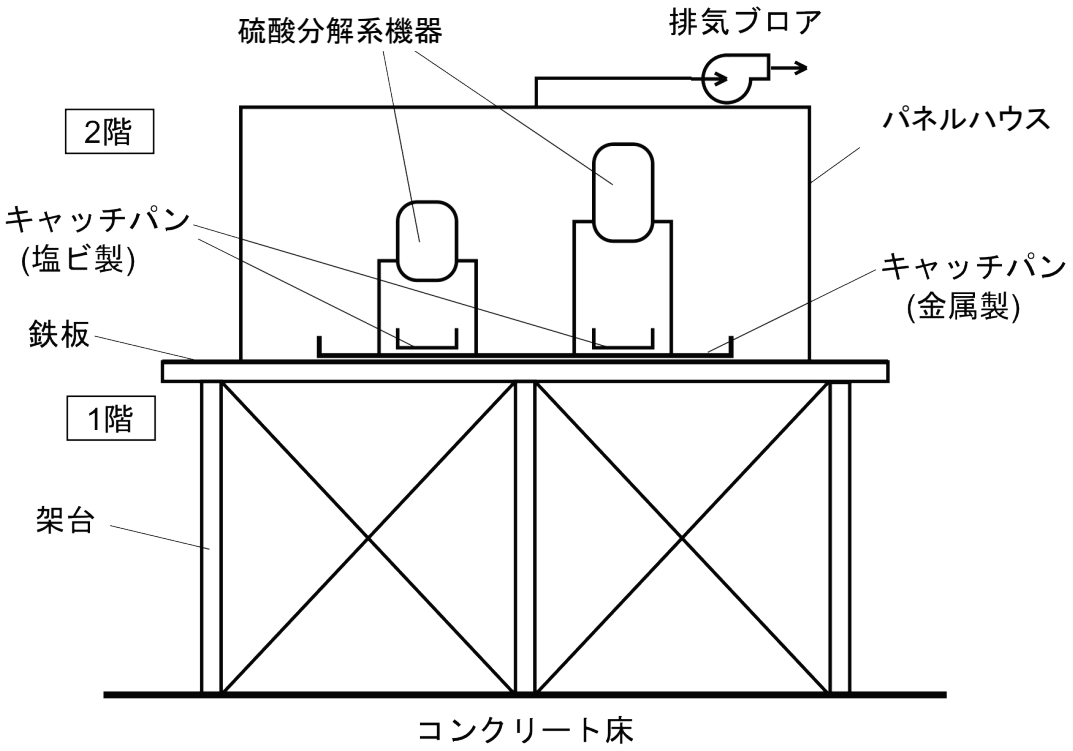
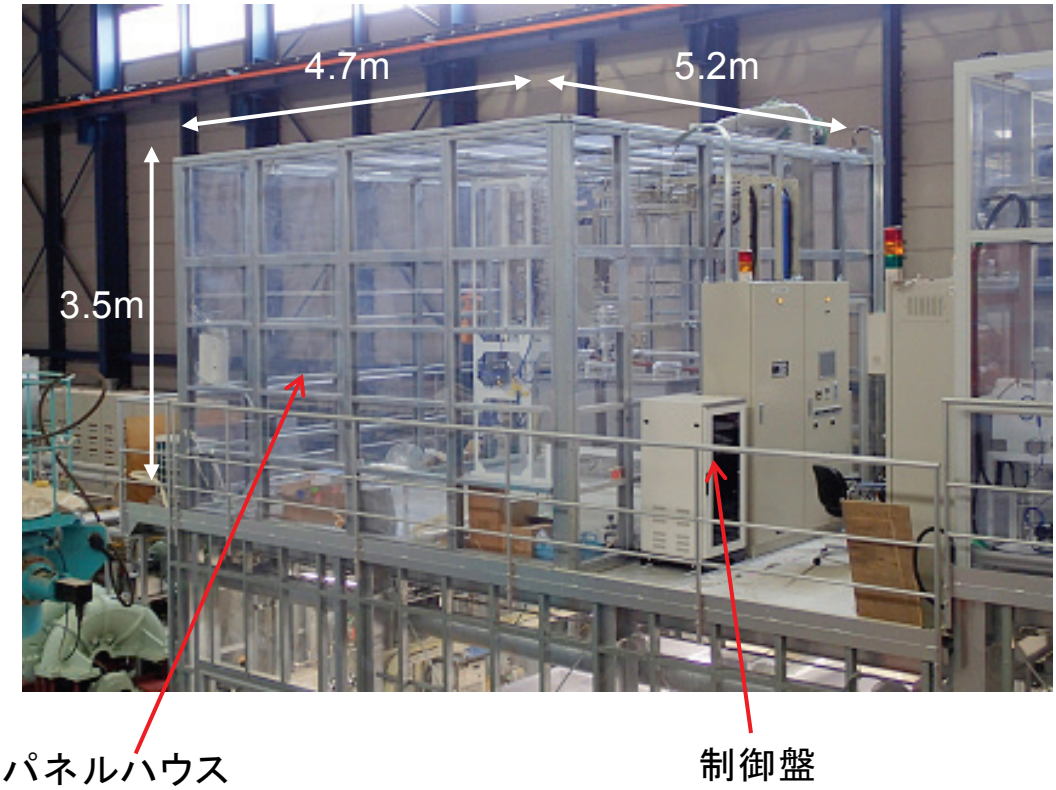


Fig. 2.4 Picture of the integrity test apparatus for the components of sulfuric acid decomposition





設置場所の外観写真

Fig. 2.5 Installation of the integrity test apparatus for the components of sulfuric acid decomposition

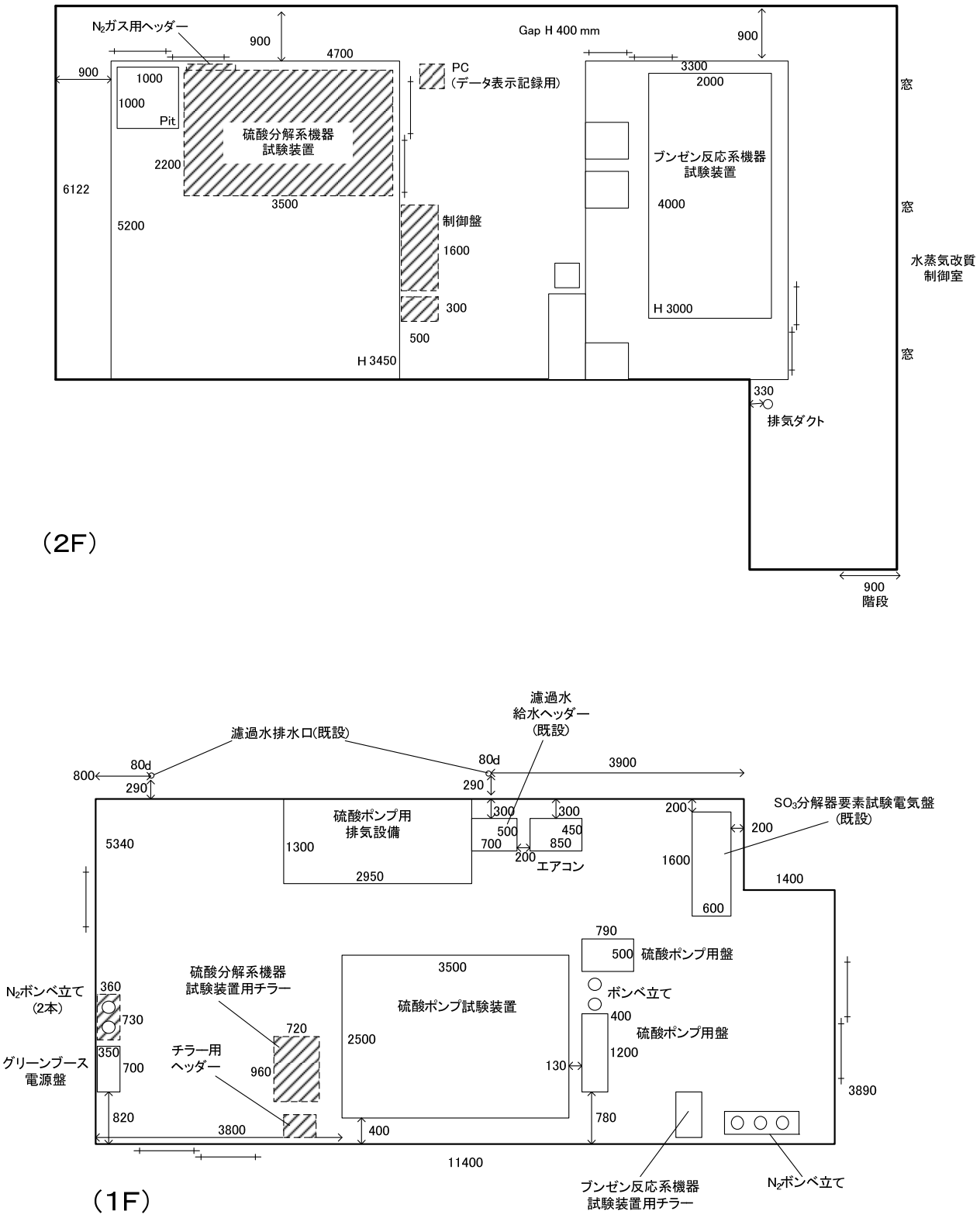


Fig. 2.6　Layout of the integrity test apparatus for the components of sulfuric acid decomposition

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
速さ，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
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m^2
比体積	立方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
量濃度[a]，濃度	モル毎立方メートル	mol/m^3
質量濃度	キログラム毎立法メートル	kg/m^3
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m^2
屈折率[b]	（数字の） 1	1
比透磁率[b]	（数字の） 1	1

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

表３．固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン[b]	rad	1 [b]	m/m
立体角	ステラジアン[b]	sr[c]	1 [b]	m^2/m^2
周波数	ヘルツ[d]	Hz		s^{-1}
力	ニュートン	N		$m\ kg\ s^{-2}$
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	$m^2\ kg\ s^{-2}$
仕事率，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	$m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-2}$
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^3\ A^2$
磁束	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-1}$
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	$m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-2}$
セルシウス温度	セルシウス度[e]	℃		K
光束	ルーメン	lm	cd sr[c]	cd
照度	ルクス	lx	lm/m^2	$m^{-2}\ cd$
放射性核種の放射能[f]	ベクレル[d]	Bq		s^{-1}
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト[g]	Sv	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
酸素活性	カタール	kat		$s^{-1}\ mol$

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

表４．単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	$m^{-1}\ kg\ s^{-1}$
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	$m^2\ kg\ s^{-2}$
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	$kg\ s^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$m\ m^{-1}\ s^{-1}=s^{-1}$
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	$m\ m^{-1}\ s^{-2}=s^{-2}$
熱流密度，放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	$kg\ s^{-3}$
熱容量，エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2\ kg\ s^{-2}\ K^{-1}$
比熱容量，比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^2\ s^{-2}\ K^{-1}$
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	$m\ kg\ s^{-3}\ K^{-1}$
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m^3	$m^{-1}\ kg\ s^{-2}$
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	$m\ kg\ s^{-3}\ A^{-1}$
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m^3	$m^{-3}\ sA$
表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m^2	$m^{-2}\ sA$
電束密度，電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m^2	$m^{-2}\ sA$
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	$m\ kg\ s^{-2}\ A^{-2}$
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2\ kg\ s^{-2}\ mol^{-1}$
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)	$m^2\ kg\ s^{-2}\ K^{-1}\ mol^{-1}$
照射線量（X線及びγ線）	クーロン毎キログラム	C/kg	$kg^{-1}\ sA$
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	$W/(m^2\ sr)$	$m^2\ m^{-2}\ kg\ s^{-3}=kg\ s^{-3}$
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m^3	$m^{-3}\ s^{-1}\ mol$

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６．SIに属さないが、SIと併用される単位

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

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

名称	記号	SI 単位で表される数値
電子ボルト	eV	$1eV=1.602\ 176\ 53(14)\times10^{-19}J$
ダルトン	Da	$1Da=1.660\ 538\ 86(28)\times10^{-27}kg$
統一原子質量単位	u	1u=1 Da
天文単位	ua	$1ua=1.495\ 978\ 706\ 91(6)\times10^{11}m$

表８．SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

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

表９．固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エルグ	erg	$1\ erg=10^{-7}\ J$
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	$1\ St\ =1cm^2\ s^{-1}=10^{-4}m^2\ s^{-1}$
スチルブ	sb	$1\ sb\ =1cd\ cm^{-2}=10^4cd\ m^{-2}$
フォト	ph	$1\ ph=1cd\ sr\ cm^{-2}\ 10^4lx$
ガル	Gal	$1\ Gal\ =1cm\ s^{-2}=10^{-2}ms^{-2}$
マクスウェル	Mx	$1\ Mx = 1G\ cm^2=10^{-8}Wb$
ガウス	G	$1\ G\ =1Mx\ cm^{-2}\ =10^{-4}T$
エルステッド[c]	Oe	$1\ Oe \triangleq (10^3/4\pi)A\ m^{-1}$

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

表10．SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	$1\ Ci=3.7\times10^{10}Bq$
レントゲン	R	$1\ R = 2.58\times10^{-4}C/kg$
ラド	rad	$1\ rad=1cGy=10^{-2}Gy$
レム	rem	$1\ rem=1\ cSv=10^{-2}Sv$
ガンマ	γ	1 γ =1 nT=10-9T
フェルミ		1フェルミ=1 fm=10-15m
メートル系カラット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg
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	1cal=4.1858J（「15℃」カロリー），4.1868J（「IT」カロリー）4.184J（「熱化学」カロリー）
ミクロン	μ	1 μ =1μm=10^{-6}m

（第8版，2006年改訂）

この印刷物は再生紙を使用しています