

JAERI-Tech
2001-032



JP0150391



連続水素製造試験装置（毎時50NL規模）
の安全対策

2001年3月

小貫 薫・秋野 詔夫・清水 三郎・
中島 隼人・東 俊一・久保 真治

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の間合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 〒319-1195, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 2001

編集兼発行 日本原子力研究所

連続水素製造試験装置（毎時 50NL 規模）の安全対策

日本原子力研究所大洗研究所核熱利用研究部
小貫 薫・秋野 詔夫・清水 三郎・中島 隼人・東 俊一・久保 真治

（2001 年 2 月 23 日受理）

熱化学水素製造法 I S プロセスでは、硫酸、ヨウ素、ヨウ化水素酸等の有害な薬品を使用するため、試験研究の実施に際しては安全性に対する配慮が重要である。そこで、I S プロセスの閉サイクル運転制御方法に関する研究を行うことを目的とする水素発生量毎時 50NL 規模の連続水素製造試験装置の製作にあたり、その設計製作仕様から装置を用いた試験内容に関して、安全性確保の観点から検討を行った。特に、連続水素製造試験装置は主要材料にガラスを用いているため装置破損防止対策及び地震等の異常時の評価と安全対策に重点をおいた。本報告書はそれらの検討結果を取りまとめたものである。

本報告書は、科学技術庁の受託研究「核熱利用システム技術開発」の成果の一部である。
大洗研究所：〒311-1394 茨城県東茨城郡大洗町成田町新堀 3607

JAERI-Tech 2001-032

Safety Considerations for Continuous Hydrogen Production Test Apparatus with Capacity
of 50 N-Litter Hydrogen per Hour

Kaoru ONUKI, Norio AKINO, Saburo SHIMIZU, Hayato NAKAJIMA,
Shunichi HIGASHI and Shinji KUBO

Department of Advanced Nuclear Heat Technology
Oarai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received February 23, 2001)

Since the thermochemical hydrogen production Iodine-Sulfur process decomposes water into hydrogen and oxygen using toxic chemicals such as sulfuric acid, iodine and hydriodic acid, safety considerations are very important in its research and development. Therefore, before construction of continuous hydrogen production test apparatus with capacity of 50N-litter hydrogen per hour, comprehensive safety considerations were carried out to examine the design and construction works of the test apparatus, and the experimental plans using the apparatus. Emphasis was given on the safety considerations on prevention of breakage of glasswares and presumable abnormalities, accidents and their countermeasures. This report summarizes the results of the considerations.

Keywords : Thermochemical, Water-splitting, Hydrogen Production, IS Process, Sulfuric Acid, Iodine, Hydriodic Acid, Hazardous Chemicals, Safety, Power Failure, Water Supply Failure, Earthquake

目次

1. まえがき	1
2. 一般概要	1
2.1 連続水素製造試験装置（毎時 50NL 規模）の目的	1
2.2 連続水素製造試験装置（毎時 50NL 規模）の構成概要	2
2.3 連続水素製造試験装置（毎時 50NL 規模）の運転構想	7
2.4 建家及び付帯設備の概要	8
3. 施設装置等の安全に対する配慮	8
3.1 適用法規・基準	9
3.2 安全に関する基本方針	9
3.3 使用条件	12
3.4 機器構造	16
3.5 構成材・構成品	18
3.6 運搬手段、運搬装置	18
3.7 エネルギー供給系の制御システム	18
3.8 安全装置・警報系	19
3.9 危険・有害箇所の防護処置	19
3.10 その他安全上必要な処置	20
4. 作業環境の安全に対する配慮	20
4.1 位置、広さ、高さ	20
4.2 換気、温度、湿度	20
4.3 採光、照明	21
4.4 騒音、振動	21
4.5 出入口、通路、避難路	21
4.6 高所からの墜落防止対策	21
4.7 保守点検の容易さ	21
4.8 作業・操作位置と姿勢	22
5. 作業の安全に対する配慮	22
5.1 作業手順	22
5.2 危険・有害な作業内容とその対策	22
5.3 連絡・確保手段	23
5.4 安全作業マニュアル	23
5.5 従事者の資格経験教育訓練等	24
5.6 作業責任者、作業分担	25
6. 異常時の評価と対策	25
6.1 予想される異常又は事故とその対策	25
6.2 停電・断水等異常時の危険性とその対策	27

6.3 排ガス、排水、廃棄物等の環境保全対策	29
6.4 異常時の通報連絡体制と方法	29
6.5 異常時の応急措置マニュアルと訓練	29
7. まとめ	30
謝辞	30
付録	
付録1. 容器下部に設置するトレイについて	57
付録2. ガラス管に生じる応力と固有振動数	59

Contents

1. Introduction	1
2. General Description of Test Apparatus	1
2.1 Objectives	1
2.2 Overall and Details of Apparatus	2
2.3 Test Plans	7
2.4 Building and Safety Facilities	8
3. Safety Considerations on Test Apparatus	8
3.1 Applied Rules and Standards	9
3.2 Basic Safety Basis	9
3.3 Test Operational Conditions	12
3.4 Main Components	16
3.5 Materials and Basic Parts	18
3.6 Transportation and Handling	18
3.7 Utilities	18
3.8 Safety and Alarm Devices	19
3.9 Safety Guard for Dangerous Works	19
3.10 Other Considerations	20
4. Safety Considerations on Working Environments	20
4.1 Site Planning, Area and Height of Laboratory	20
4.2 Ventilation, Temperature and Humidity	20
4.3 Lighting and Illumination	21
4.4 Noise and Vibration	21
4.5 Doorways, Passages and Evacuation Exits	21
4.6 Safety Guards for Work Operations at Elevated Spots	21
4.7 Feasibility Considerations of Inspection and Maintenance	21
4.8 Working Position and Posture	22
5. Safety Considerations on Works	22
5.1 Working Procedures	22
5.2 Dangerous Works and Safety Guidelines	22
5.3 Emergency Communication Measures	23
5.4 Safety Manuals for Works	23
5.5 Qualification and Training of Workers	24
5.6 Safety Manager and Responsibility	25
6. Safety Considerations on Presumable Accidents and Countermeasures	25
6.1 Presumable Abnormalities and Accidents, and Their Countermeasures ..	25
6.2 Power Failure and Cooling Water Failure	27

6.3 Environmental Effects by Exhaust Gas, Drainage and Wastes	29
6.4 Emergency Communication System	29
6.5 Emergency Manuals and Training Program	29
7. Summary	30
Acknowledgements	30
Appendixes:	
Appendix 1. Trays to Catch Hazardous Chemicals beneath Vessels	57
Appendix 2. Stress and Natural Frequency of Glass Pipes	59

1. まえがき

熱利用技術研究室では、高温ガス炉の熱利用プロセスの候補である熱化学水素製造法 I S プロセスの研究開発を進めており、その一環として、閉サイクル運転制御方法に関する研究を行うことを目的とする水素発生量毎時 50NL 規模の連続水素製造試験装置を製作した。

連続水素製造試験装置は小規模ではあるが、硫酸、ヨウ素、ヨウ化水素酸等の有害な薬品を扱うため、その設計、製作、運転にあたっては、安全性に対する十分な配慮が必要である。このため、連続水素製造試験装置の製作に先立ち、平成 12 年 7 月 12 日から同年 8 月 30 日の期間において計 6 回にわたり、大洗研究所所内一般施設安全審査委員会が開催され、同装置の製作及び運転に係わる安全性に関する審議が行われ、その審議結果を得て、装置製作に取りかかることができた。

本資料は、上記委員会に提出した連続水素製造試験装置の設計製作仕様から同装置を用いた試験内容にわたる安全性に関する検討資料をベースとして、審議内容を反映させたものであり、今後の試験研究における安全管理に役立てることを目指してとりまとめたものである。なお、本資料では、上記委員会での審査項目に即して、第 2 章に一般概要、第 3 章に施設装置等の安全に対する配慮、第 4 章及び第 5 章に作業環境及び作業の安全に対する配慮、第 6 章に異常時の評価と対策、についてそれぞれ記述した。

2. 一般概要

本章では、連続水素製造試験装置の設計、製作及び運転保守における安全性を述べるにあたり、本試験装置の目的、構成、運転構想、建家及び付帯設備等の概要を次の各項に示す。

2.1 連続水素製造試験装置（毎時50NL規模）の目的

本試験装置は、高温ガス炉の核熱利用系として有望な熱化学法 I S プロセスの開発のために使用する試験装置である（水素発生量：毎時50リットル=50NL/h）。本試験装置を用いる閉サイクル試験により、熱のみを用いて水を分解し水素を製造するための研究開発の一環として、閉サイクル運転制御方法を開発する。

閉サイクル試験に関しては、これまでに、水素発生量毎時1リットル規模装置（1NL/h）で48時間の連続水素製造試験を実施して、I S プロセスの原理的実証に成功している。本試験装置は、約50倍にスケールアップして、各部の流量・組成等を計測し、閉サイクル運転制御方法を開発するために実施するものである。なお、本閉サイクル試験では、1) 未反応硫酸・未反応ヨウ化水素酸をブンゼン反応工程に循環させない、2) ブンゼン反応工程を70～90℃でヨウ素過剰な条件下に進行させることにより循環する水量の低減を図る、等の熱収支改善を意図したプロセスフローの改良を組込んでいる。

熱化学法 I S プロセスの開発は、本試験の後、1) 実用材料を用いる工学試験、2) ヘリウム加熱による炉外試験、3) H T T R 接続試験を予定している。本試験で明らかにする閉サイクル運転制御方法は、プロセス内を循環するヨウ素や二酸化硫黄を損耗することなく連続的に水を分解して水素を製造するために不可欠な、熱化学プロセスに特徴的な先進的運転制御方法であり、工学試験装置等の設計製作に反映される。

2.2 連続水素製造試験装置（毎時50NL規模）の構成概要

本試験装置の規模（50NL/h）は、流量計等の機器性能の観点から規模の下限を、また、装置のインベントリー、廃液量、操作性等の観点から規模の上限を、それぞれ検討し、最適規模として選定したものである。また、機器材料としては、耐食性ととも、開発段階にある装置の常として手直しや改良が容易であり、機器内部の観察（必要に応じてビデオまたは目視による）が容易なように、主として透明ガラスを使用する。表2-1に、本試験装置の主要諸元を示す。

ガラス製機器の安全性については、規格に準拠したガラス素材、部品等を用いること、熟練したガラス工作者が加工・製作を行うこと、架台の取付枠に適切に支持固定させることにより、健全性を確保する（3章及び6章参照）。

本試験装置の製作にあたり、これまでに実施した1NL/h試験装置の運転経験を十分に反映させた。すなわち、前試験では、1) 溶液輸送に起因するトラブル、2) 反応・分離に起因するトラブルを経験している。そこで、閉サイクル試験を、安全を確保しつつ円滑に遂行して目的を達成するため、溶液の輸送については、以下の配慮を行った：

- ・ 主要な容器類や配管系の温度、圧力の上昇に対し警報及び機器停止の安全対策を講じた（前試験でのポンプ吐出側圧高によるシール部からの液漏れトラブルを教訓とした）。
- ・ 重力流れを積極的に利用しポンプ使用台数を減少させた（溶液輸送に係わるトラブル全般の低減を図った）。

反応分離操作に関しては、安全に直接関係するものではないが、試験を円滑に遂行するため、以下のように配慮した：

- ・ 温度の計測制御、溶液供給の流量計による計測制御、液面の計測制御をそれぞれ充実させ、反応及び分離操作が定常的に進行するよう工夫した。
- ・ 前試験の経験を生かして蒸留塔等の各機器を設計し、溶液の流れ、生成物の取出等を最適化した。

2.2.1 プロセスの概要

本試験装置の構成概要を述べるに先立って、プロセスを簡略に説明する。熱化学法 I S プロセスは、幾つかの化学反応を組み合わせ、高温熱のみを用いて水を分解して水素を製造する熱化学サイクルであり、①高温吸熱反応と低温発熱反応を含む、②ヨウ素と硫黄の化合物を循環物質として用いる、③水素の製造熱効率の理論値は60%台である、等の特徴を有する。

熱化学法 I S プロセスによる水素製造では、プロセス内を循環する硫酸やヨウ化水素酸を損耗させることなく、すなわち、閉サイクルとして、連続的及び安定に水を分解させることが必

要である。熱化学法 I S プロセスは、以下の 3 つの反応工程から構成される。

- (1) ブンゼン反応工程
- (2) 硫酸分解反応工程
- (3) ヨウ化水素 (HI) 分解反応工程

図2-1に I S プロセスの反応構成を、図2-2に I S プロセスの簡略フローを、それぞれ示す。各反応工程の概要は以下のとおりである。

(1) ブンゼン反応工程

水、ヨウ素と二酸化硫黄を反応させて硫酸とヨウ化水素とに転化させるブンゼン反応を行う工程で、液相の水とヨウ素に気相の二酸化硫黄を70～90°Cの条件下で接触させて反応させる。



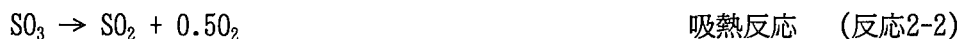
反応原料の水、及び、リサイクルされてくるヨウ素と二酸化硫黄が反応して硫酸（濃度：40～50wt%）とヨウ化水素酸が生成する。反応液は、溶媒の水と化学量論上過剰のヨウ素を含んでいるため、生成物が二液相に分離し、硫酸溶液とポリヨウ化水素酸 (HI_x) 溶液とが得られる。分離した二液相は、各々、プロセス下流の硫酸分解反応工程とHI分解反応工程に供給される。

(2) 硫酸分解反応工程

ブンゼン反応工程で生成した硫酸溶液中に微量混入するヨウ化水素酸を、逆ブンゼン反応を利用して除去し、水分を蒸発させて硫酸を濃縮した後、外部加熱により蒸発させ、850°Cまで昇温して触媒の存在下で分解する。昇温過程で硫酸は分解を開始し、



さらに、850°C程度的高温下で、



の反応により、SO₂及びO₂が生成する。分解生成物のうち、酸素を製品として取り出し、その他(SO₂, SO₃, H₂O)はすべてリサイクルさせる。

(3) HI 分解反応工程

ブンゼン反応工程で生成したHI_x溶液中の硫酸を、逆ブンゼン反応を利用して除去し、次に、蒸留塔でヨウ素を分離して、水-ヨウ化水素の混合気体を得る。塔底より回収したヨウ素は、ブンゼン反応器へリサイクルする。塔頂より留出する水-ヨウ化水素の混合気体は、加熱し、300～500°Cの高温下で分解して、水素を生成させる。



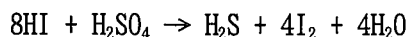
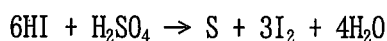
生成ガスから水素を製品として取り出し、他はリサイクルさせる。

以上の反応を加えると、次式に示すように、水分解による水素と酸素の発生反応となる。



従って、これらの3つの反応工程を同時に連続的に運転することにより、有害な物質を排出することなく、800～900°Cの熱のみを用い、水を水素と酸素とに定量的に分解する連続水素製造プロセスが成立する。

なお、本試験装置による閉サイクル試験では、以下の副反応により単体硫黄及び硫化水素の生成する可能性が有る。



しかしながら、これまでの研究により、副反応の生起する運転操作条件領域（温度、反応原料組成）を明らかにしており、これらの領域を避けてブンゼン反応を行わせることにより、硫黄と硫化水素の生成は十分に抑制できる。硫黄が生成するとすれば、後述のプロセスフローダイアグラム中の硫酸精製塔（R-103）及び脱硫塔（R-102）廻りの気相生成物が凝縮する配管系で最も生起し易いと想定している。硫黄が生成した場合、配管系の閉塞が懸念されるが、2.2.3項「試験装置に組込んだ機器の警報及び機器の停止」に述べるように、圧力高の警報を設置してあるので、警報受信後、直ちに、これらの機器への溶液供給の停止、温度降下等の措置をとることにより、機器の損傷を未然に防ぐことができる。また、硫化水素が生成した場合、硫化水素は、ブンゼン反応器（R-101）を経て、酸素に同伴されて、酸素分析系へ導かれる。硫化水素の生成は、本分析系の後流で検知管等により、検出できる。硫化水素発生量の上限は、上記の硫酸精製塔（R-103）でも硫酸処理量の数%程度、毎時1～2NL程度と考えられる。仮にこの量の硫化水素が発生しても、毎時2000m³の換気によりパネルハウス（次項参照）内の硫化水素濃度は1ppm程度の、試験従事者についての許容値10ppmを下回る濃度に、希釈される。また、硫化水素を含む換気は、活性炭処理されるので環境に対する影響も無視できるレベルである。（換気設備等については、3.2.4項「安全確保の基本対策」を参照）。

2.2.2 試験装置の構成概要

本試験装置の構成は、下記のとおりである。

- (1) ブンゼン反応工程機器
- (2) 硫酸分解反応工程機器
- (3) HI分解反応工程機器
- (4) プラント電源盤
- (5) 計測制御機器及び分析機器
- (6) 架台

図2-3にプロセスフローダイアグラム（1/2～2/2）を、図2-4に機器配置図（1/3～3/3）を、それぞれ示す。本書では「パネルハウス」という用語を用いるが、これは、上記(6)の架台の天井及び側面を透明硬質塩化ビニル板で覆ったものである。パネルハウスは、内部に(1)～(3)の3つの反応工程の機器を収納し、外部に対する安全を確保する上で重要な境界となる。

図2-3のプロセスフローダイアグラムに基づき、(1)～(3)の各反応工程に必要な機器の構成について以下に記す。

(1) ブンゼン反応工程

原料の水は、O₂ガス分離槽（V-101）に供給され、ブンゼン反応器（R-101）から排出される分解生成物（酸素及びキャリアーガス）と気液接触した後、R-101に供給される。R-101では、ブンゼン反応によりHIx溶液と硫酸溶液の混合した2液相溶液が生成する。この2液相は、反応器下流に設置した二相分離槽（S-101）において分離される。

HIx溶液には、不純物として微量の硫酸が溶存しており、粗HIx溶液と称す。同様に、硫酸溶

液には、HIやI₂が溶存しており、粗硫酸溶液と称する。高低差を利用した重力流れにより、粗HIx溶液はHI分解反応工程へ、また、粗硫酸溶液は硫酸分解反応工程へ送られる。

このHI分解生成物には、飽和量のヨウ素蒸気が同伴されるが、R-101出口に設置される薄膜冷却器(E-105)にて冷却され、ヨウ素蒸気が微結晶として析出し、水とともにV-101を経てR-101へ戻される。

(2) 硫酸分解反応工程

硫酸精製塔(R-103)では、粗硫酸溶液の精製が行われる。加熱により自発的に進行する逆ブンゼン反応を利用し、粗硫酸溶液に溶解してきたヨウ化水素が二酸化硫黄とヨウ素に変換され窒素気流により除去される。すなわち、R-103の塔頂ガスはR-101へ、また、塔底液(精製硫酸溶液)は硫酸精製塔ボトムポンプ(P-105)にて移送され硫酸フィード予熱器(E-206)で昇温された後、硫酸濃縮塔(C-201)に供給される。ここで、硫酸は水分を蒸発させることにより90重量%程度まで濃縮される。C-201の塔頂蒸気は、蒸気凝縮器(E-106)で凝縮した後、V-101を経てR-101へリサイクルされる。塔底の硫酸液は、硫酸蒸発器(E-203)に送られる。硫酸溶液は、E-203で加熱され気化する。気化した硫酸蒸気は、E-203で400°C程度まで加熱され、さらに、硫酸分解器フィードヒーター(E-204)で約650°Cまで昇温された後、硫酸分解器(R-201)に送られる。E-204中で硫酸は分解を開始し、R-201で850°C程度の高温度で、SO₂及びO₂が生成する。

この反応ガスは、硫酸分解ガス冷却器(E-204、E-205、E-206)により40°Cまで冷却され、硫酸分離器(V-202)に送られる。この過程で、未分解の三酸化硫黄は十分水に吸収され硫酸に戻される。V-202で分離されたSO₂、O₂及びキャリアーN₂ガスは、R-101にリサイクルされ、凝縮分離液は、硫酸リサイクルポンプ(P-202)によりC-201へリサイクルされる。

(3) HI分解反応工程

脱硫塔(R-102)では、逆ブンゼン反応が起こり、粗HIx溶液に溶解してきた硫酸が二酸化硫黄とヨウ素に変換され除去される。同時に、塔底液中の過剰な水が窒素により除去されるとともに、水分が蒸発して水-ヨウ化水素の共沸組成(I₂を含む)に近づく。R-102の塔頂ガスはR-101へ、また、塔底液(精製HIx溶液)は重力流れにて移送され、HI蒸留塔フィード予熱器(E-304)で昇温された後、HI蒸留塔(C-301)に供給される。C-301では、主にヨウ素が塔底より回収され、I₂溶液リサイクルポンプ(P-303)によりR-101へリサイクルされる。塔頂からは、水-ヨウ化水素の蒸気が回収される。この蒸気は、HI分解器予熱器(E-302)により約350°Cまで加熱され、HI分解器(R-301)へ送られる。

R-301では、300~500°Cの高温度で、ヨウ化水素が分解され水素を生成する。E-302にて、反応ガスを260°C程度まで冷却した後、HI回収塔(C-302)に供給する。C-302では、反応ガス中の水素が洗浄され、塔頂より水-水素の蒸気が回収される。この蒸気は、HI回収塔コンデンサー(E-303)で冷却され、HI回収塔リフラックスドラム(V-301)で水素と水が分離され、製品水素が得られる。凝縮水は、高低差を利用した重力流れにより、一部はC-302に還流液として、残りはV-101を経てR-101へリサイクルとして送られる。C-302の塔底液は、C-301に還流液として戻される。

(4) プラント電源盤

プラント電源盤は、既設分電盤から必要電力を取り出し、ヒーター、ポンプ、攪拌器等に電力を供給するものである。また、(5)項に記載する計測制御データを集約して表示する役目をもつ。さらに、ポンプを手動で起動及び停止する機能、温度調節器の設定を行う機能、異常時の警報を知らせる機能を有する。安全確保上重要な警報等については、次項(2.2.3項)に記述する。なお、盤に設置される制御機器(温度調節器等)は、将来のデータ処理演算用に電気信号を取り出す/受け取る機能を有するものとする。

プラント電源盤については、漏電防止のため、各機器の上流側にブレーカーを設置するものとする。また、盤の製作に際しては、非常用電源、無停電電源が設置された場合に、切り替え可能となるよう配慮するものとする。

(5) 計測制御機器及び分析機器

本試験装置を連続的に安定に運転するためには、プロセス変数を常時計測制御しておく必要がある。計測制御するプロセス変数は、流量、温度、圧力、液面等であり、重要なポイントは測定値が電気信号として出力される。装置の運転上、特に重要なプロセス変数に関しては、一定値を維持できるよう個別にコントロールする必要がある。反応器の温度制御においては、カスケード制御方式の温度制御を採用するものとする。コントロールが必要と考えられる計測制御機器を、図2-3のプロセスフローダイアグラムに示した。個別のコントローラーは、現在の状態を測定・表示でき、あらかじめ与えた任意の設定値になるように、入熱量、流量、モーター回転数等を制御するものとする。

閉サイクル運転制御方法の開発にあたっては、静的及び動的変動に対するプロセスの特性を明らかにする必要がある。そのためには、まず、工程毎の運転を行い、変動因子(温度、流量等)と各工程出口成分(組成、流量等)の因果関係を取得し、これらの運転データを蓄積することが必要である。これに基づき、変動因子の変動許容範囲を定義し、最終的に、この結果をプログラムとして記述し、装置全体の制御へと発展させる。

以上の目的に沿うために、本試験装置は、将来的に、計算機にデータを収録すると同時に、その集録データをもとに、プログラミング結果に基づいた適切な制御信号を自動的に(インテリジェントに)送信する機能を有するよう拡張が可能なものとする。

分析機器は、プロセス変数のうち、組成をモニターするものである。本試験装置に組み込み、(オンラインで)目的とするストリームの組成を連続的に分析する。分析項目は、次のとおりである。

- ① 二液相分離器で分離した硫酸溶液中のヨウ素濃度、
硫酸精製塔釜液から出る精製硫酸溶液中のヨウ素濃度
- ② ブンゼン反応器出口ガス中の酸素濃度
- ③ ブンゼン反応器出口生成ガス中の二酸化硫黄濃度
- ④ HI分解反応工程生成ガス中水素濃度

測定箇所は、図2-3のプロセスフローダイアグラム(図中記号: AI)に示した。

2.2.3 試験装置に組込んだ機器の警報及び機器の停止

本試験装置には、閉サイクル試験における運転状態を計測するため、流量・圧力・温度・液

レベルを測定するためのセンサー及び制御用コントローラーが設置されている。さらに、本試験装置では、運転試験時の安全を確保するため、幾つかの個別の機器に対し、警報を発生させるとともに機器を自動的に停止させる機能を持たせた。

(1) 機器の警報

装置の異常を早急に検知するために、下記計測点のプロセス変数に対して、設定値から大きな偏りが生じた場合には警報を出すものとする。警報の表示場所はプラント電源盤とする。表2-2に、機器の警報について、計測点、プロセス変数、対象事象を示す。これらの計測点は、装置の安全を確保するための重要なポイントとして選定した。温度に関しては、高温反応器である硫酸分解器（反応温度850°C）とHI分解器（500°C）、固体ヨウ素析出を防止するためにトレースヒーターを設置する配管の温度測定が重要である。圧力に関しては、圧力上昇による配管・継手の破損を防止するため、ポンプ吐出側を、また、硫酸及びHIx溶液を取り扱う機器の内、特に、プロセス蒸気の圧力上昇を抑制したい計測点を選定した。なお、警報は、上述のように、プラント電源盤に表示される。

(2) 機器の停止

前項の警報を発する機器のうち、異常発生時に装置に損傷を与える可能性が大きい機器については、自動的に運転を停止する機能を有するものとした。表2-3に、自動停止機器を示した。これらの警報や機器の停止は、その対象がポンプと反応器等の容器類に分類できる。容器類とポンプ吐出側配管の設計圧（耐圧）、機器停止信号発信圧、警報信号発信圧及び通常運転圧の関係を図2-5に示す。容器などの機器の耐圧テスト圧力に比べて警報信号発信圧や使用圧力は低く、機器の安全性は確保できる。警報及び機器停止の関連を、アラーム/トリップ系統図として図2-6に示す。運転停止機器については、警報システムと同様に、プラント電源盤上に表示する。

2.3 連続水素製造試験装置（毎時50NL規模）の運転構想

閉サイクル試験は、平成12年度後半から平成16年度にわたり実施する。試験項目は、以下の2項目である。

(1) 工程別特性試験	12年度後半～14年度
(2) 連続水素製造試験	15年度～16年度

工程別特性試験では、まず、ブンゼン反応工程、硫酸分解反応工程及びHI分解反応工程の各工程について、個別機器の特性及び工程全体での運転特性を解明する。次いで、全反応工程を連結した場合の起動及び停止の運転手順を明らかにして、連続水素製造試験に備える。連続水素製造試験では、3つの反応工程を連結し、定常状態における閉サイクル運転制御方法を明らかにするとともに、水素製造速度を変化させる等の非定常条件下の、さらに、熱源喪失等の外乱時における運転制御方法を開発する。

工程別特性試験では、基本的にワンスルー運転を行うことを計画している。すなわち、硫酸分解反応工程については、硫酸模擬溶液を原料として供給し、生成物として酸素と二酸化硫黄を得る。ブンゼン反応工程を組込んだ場合では、硫酸模擬溶液とHIx模擬溶液を供給し、ブンゼン反応、硫酸分解及びHI分解の3つの反応を行わせて酸素と水素を発生させるとともに、

生成物として、供給した模擬溶液と同等の溶液を得る。これに対し、連続水素製造試験では、工程別特性試験で得られる知見を総合し、模擬溶液を使用することなく、閉サイクル運転により水のみを供給して水素と酸素を発生させる。これらの関係を、図2-7に、連続水素製造試験装置運転モードとして示した。

なお、本説明資料で用いる「サイクル」とは、循環物質である二酸化硫黄が硫酸を経て再び二酸化硫黄に戻るような繰り返しの事象を指し、例えば1サイクルに要する時間は、循環物質ホールドアップ量(t/l)を循環物質の循環速度(t/h)で除して得られる。熱化学プロセスでは、副反応の微量な生起や溶液組成の定常状態からの僅かな偏りであっても、後続する反応・分離操作に繰り返して影響を及ぼすので、定常状態の確保が重要な課題となる。しかも、これら溶液組成の偏り等は、一般のワンスルーの化学プロセスで許容される偏りの幅に比較して、著しく小さい。そこで、連続水素製造試験では、一定のサイクル数を経た後に副反応の生起や溶液組成を解析することにより、定常状態からの偏り、その原因及び修復方法等を解明して、閉サイクル運転制御方法を開発しようとするものである。

これらの運転試験においては、プロセス流体として硫酸やヨウ化水素酸溶液を使用するとともに、ガラスを主な製作材料とする装置を使用する。このため、運転試験を効率良く、かつ、安全に遂行するため、「運転要領書(安全作業マニュアル、運転操作マニュアル、及び、異常時対処マニュアルで構成する。5.2節参照)」を定め、これを遵守する。

2.4 建家及び付帯設備の概要

2.4.1 建家

本試験装置は、HTTR研究・開発棟附属建家IIのIS実験棟の大実験室に設置する。附属建家IIの位置を図2-8に、また、IS実験棟における大実験室及び本試験装置の位置関係を図2-9に示す。

2.4.2 付帯設備

本試験装置を用いる閉サイクル試験の実施にあたって、通常では考えられない想定事故事象が生じた場合でも、外部へ有害物質を流出させないことを安全確保の重要事項の一つとした。

このために、既に平成11年度に設置した①有害な気体を処理するための換気設備、②酸性溶液を処理するための排水処理装置を活用する。換気設備では、活性炭吸着により、二酸化硫黄、ヨウ素ガス、ヨウ化水素ガス等を処理する。また、排水処理装置では、アルカリ溶液を用いて中和することにより、硫酸やヨウ化水素酸を含む排水を処理する。

3. 施設装置等の安全に対する配慮

本章では、本試験装置の機器・装置に対する安全上の配慮について述べる。

3.1 適用法規・基準

本試験装置の設計製作は、次に示す法規、規格等に準拠する。

- (1) 労働安全衛生法
- (2) 消防法
- (3) 日本工業規格
- (4) 電気規格調査会規格
- (5) 日本電気工業会標準規格
- (6) 大洗研究所電気工作物保安規程
- (7) 茨城県条例
- (8) その他関連する法規、規格及び内規等

表 3-1 に、関係法規、規制数量等を、規制対象物質ごとにまとめた。表 3-2 に、本試験装置内に保有する規制対象物質（薬品）の数量（インベントリー）を、規制値等と共に示した。また、本試験に関連して使用する薬品の保管量（試薬及び廃液）を表 3-3 に示す。これらの薬品の内、試薬は局所排気設備を備えた小実験室（H T T R 附属建家II）及び熱利用技術研究室実験室（H T T R 建設管理棟）に、また、廃液は小実験室（H T T R 附属建家II）に保管する。以上の保有数量は、いずれも、規制値を下回っている。

本試験装置に関して、上記法規・基準の直接の規制対象となるのは、下記の条例である。

規制法規等：茨城県公害防止条例施行規則に定められた排水基準

規制内容：「排水の pH を規制値（pH5.8～8.6）とする。」

このために必要となる排水処理装置は、法規等上必要となる手続きを「保安管理課」を通じて済ませており、平成 11 年度に、換気設備（該当法規制なし）と共に、付帯設備として設置済みである。

「大洗地区安全衛生管理規則」中の別表第 6 「協議を要する施設・設備等」に記載されている物質のうち、本試験装置で取り扱う物質には、①危険物（第 6 類）中の濃硫酸、②特定化学物質（第 3 類）中の二酸化硫黄及び硫酸がある。上記物質の処理量及び保管量は、表 3-2 及び表 3-3 に示すように、大洗地区安全衛生管理規則が協議を要すると規定している数量以下である。

3.2 安全に関する基本方針

3.2.1 連続水素製造試験装置の特徴

- (1) 本試験装置は、水を熱のみで分解し水素を製造する実験装置であり、装置内部に存在する有害な物質は、硫酸、二酸化硫黄、ヨウ素、ヨウ化水素である。
- (2) 架台に組み付けられたガラス（及び石英）を主要材料とする実験装置である。
- (3) 構成要素は、容器（反応容器、貯槽）、配管、配管要素（弁、継ぎ手）、ポンプ、ヒーター、制御機器、計測機器である。
- (4) 本試験装置の容器等は、原則として、常圧条件で使用される。（2.2.3 項及び 3.3 節参照）

- (5) 内容積、物質のインベントリーは小さい。(表 3-2 参照)
- (6) プロセス流体保温のため、容器及び配管は断熱材被覆が施される。
- (7) 本試験装置の主要構成要素はパネルハウス内に設置し、排水・排気は換気設備及び排水処理装置を通して系外に接続する。

3.2.2 本試験装置で取り扱う物質及び想定される危険

(1) 有害・危険な物質

硫酸、二酸化硫黄、ヨウ素、ヨウ化水素、水素

(2) 予想される危険

- ①有害な物質（硫酸、二酸化硫黄、ヨウ素、ヨウ化水素）の外界への放出
- ②水素の爆発
- ③試験従事者の被災（化学的熱傷、有害な物質の吸入）

3.2.3 安全確保の基本方針

上記の予想される危険に対して、各々、以下の方針の下に安全確保を図る。

(1) 有害な物質の外界への放出

通常の試験においては、プロセスの性格上、硫酸、二酸化硫黄、ヨウ素、ヨウ化水素酸の有害な物質が装置から放出されることはない。装置破損等の異常事態において有害物質が装置から排出された場合、外界に放出される危険がある。これに対しては、2章に述べたように試験装置主要構成要素をパネルハウス内に設置し、パネルハウスからの排気及び排水を除害設備（換気設備及び排水処理装置）を通して系外に接続することにより、有害な物質の外界への放出を防ぐ。

(2) 水素の爆発

水素の爆発下限濃度は4%である。本試験装置による水素発生量を遙かに上回る換気を行い、爆発下限濃度を遙かに下回る水素濃度の排気として大気に放出することにより、爆発の可能性を排除する。換気設備の故障時には、装置停止により水素発生を停止させ、爆発の可能性を排除する。

(3) 試験従事者の被災

本試験装置を用いた試験の実施に際して、試験従事者が受ける可能性のある主たる被災として、薬液被爆による化学的熱傷及び有害な物質の吸入が挙げられる。

化学的熱傷に対しては、第一議的に、危険な物質の安全な取り扱いに関する教育訓練の充実及び必要に応じた保護具着用の徹底を図ることにより、安全確保に努める。ガラス製機器の破損等の異常事態に起因する危険な物質の装置外への排出による被災の可能性に対しては、容器等を不燃性のシリカ系断熱材で覆うため液体の飛散、気体の噴出等による瞬間的な作業者の被災の可能性は少ないと考えられるが、さらに、上述した保護具着用等の作業側側の注意・対策及び漏洩液の受け皿を設ける等の機器装置面での対策により、異常事態の発生に際しての急激な被災の可能性を極小化し、パネルハウス外への安全な退去を確保する。

有害な物質の吸入の危険に対しては、原則として、作業環境を化学ドラフトに準ずる換気環

境とすることにより、安全確保を図る。

3.2.4 安全確保の基本対策

上記の基本方針に従い、以下の対策を施す。

- (1) 換気設備、排水処理装置は、最も過酷な条件として、全インベントリーがパネルハウス内に放出された場合に対処できるものとする。

排水処理装置は、本試験装置を設置する実験棟に隣接して設置した容積 760L (本試験装置ホールドアップの約 10 倍の容積) の貯槽と酸性溶液の自動中和装置 (中和液: 苛性ソーダ溶液、pH 管理槽: 容積 140L、pH 調整槽: 容積 440L) からなる。図 3-1 に、装置から全インベントリーが放出されるような事故に備えた排水処理系統図を示す。

換気設備は、本試験装置を設置する実験棟に隣接して設置した活性炭排気吸着装置 (活性炭充填量: 1,050kg) と排気ファン (排気量: 9,800Nm³/h、静圧: 0.69kPa) 及びこれらと実験室のパネルハウスを接続する塩ビ製排気ダクトからなる。図 3-2 に、排気系統図を示す。

- (2) 換気設備の排気量 (通常 2,000Nm³/h、異常時 9,800Nm³/h) は、発生水素 (最大 0.05N m³/h) を爆発下限濃度 (4%) より 3 桁以上希釈できる能力を有するものとする。換気設備の停止時は、水素発生反応器への原料供給を停止することにより、数分以内に水素発生を停止するものとする。
- (3) 有害な物質に対しては、パネルハウスの上方及び下方の 2 カ所から吸引排気し、一様な換気を実現するものとする。パネルハウス内へ入る場合に関しては、原則として、以下のようにして安全を確保する。

① 酸溶液を、直接、身体に浴びない対策を徹底する。

- i) 流体の加熱・保温を目的とする装置各部 (容器、配管、継ぎ手) の被覆 (シリカ系断熱材等) の施工に当たって、液体の飛散、気体の噴流状流出防止の観点からも有効となるよう配慮する。
- ii) 頭部及び顔面の保護具、テフロン被覆実験着、手袋、安全靴を装着する。
- iii) 容器の下には、トレーを設置し、漏洩溶液を受け止める (付録 1 参照)。また、必要に応じて、ガラス板、透明塩ビ板等を通路側に取り付ける。

② 異常事態 (装置の破損、漏れ、温度圧力の異常状態) が生じたら、直ちに、パネルハウス (安全境界) 外へ退去する。必要な処理はその後に行う。

- iv) 異常時には、まず人員の安全を確認し、直ちに装置を停止 (降温・液供給断) し、反応を減速・終息させる。
- v) 同時に、換気流量を増加 (通常時の 5 倍) する。その後、パネルハウス内へ入る場合には、有害な物質の濃度を検知管等を用いて測定し、許容値以下であることを確認する。
- vi) パネルハウス内 (トレー及び床) に漏出した液体は、事態整定後、状況に応じて、手作業で拭き取る、あるいは、大量の水で洗浄希釈し、トレンチを通じて貯槽に貯留した後、中和処理する。

- vii) 作業時には、複数の要員を安全境界の内と外に配し、連絡を取りながら点検・作業等を実施する。

(4) プロセスフロー改良への対処

本試験装置のプロセスフローは、1 NL/h 規模装置と比べ2点の改良が組込まれている(2.1 節参照)。未反応硫酸及び未反応ヨウ化水素酸がブンゼン反応工程へ循環しないようにしたことは、硫酸とヨウ化水素酸が直接的に混合する可能性を取り除いたことになり、副反応生起に対して安全サイドへの変更となっている。一方、温度 70~90°C (ヨウ素過剰条件下) でブンゼン反応工程を操作することにより、高濃度溶液ラインの数が増加し、固体ヨウ素析出の危険性は増大した。しかし、前装置での経験を生かして、配管や容器等の必要箇所には断熱材による保温・トレースヒーター加熱等を行うとともに警報やポンプ等の自動停止のシステムを講じてあり、配管内でのヨウ素析出に対して十分な安全対策を施している。

- (5) その他、定期的に保守点検を実施し、溶液漏洩等の異常発生 of 早期検出及び装置の健全性維持に努める。また、マニュアル等(5.2 節参照)の整備充実と教育訓練の充実を徹底する。なお、本試験装置において火災が発生する蓋然性は低いと考えられるが、万一、パネルハウス内で火災が発生した場合、(必要に応じて換気装置を含む)装置を停止し、(火災の規模に応じて)初期消火あるいはパネルハウスからの退去、(通常の火災と同様の)非常通報及び避難を迅速に行うものとする。パネルハウス外の火災についても同様とする。

3.3 使用条件

主たる構成機器は、容器、塔類、配管、ヒーター、ポンプ、計測制御、及び、ユーティリティー設備である。主たる構成材料は、温度に応じて選択される2種のガラスであり、これまでの研究開発の経験により耐食性が確認されているものを使用する。

本試験装置の使用圧力は溶液の静圧頭及び極くわずかの流動差圧に起因する。容器、塔類及び配管等からなる系統の使用圧力は、ほとんどの場合、0.01~0.2 kg/cm²G の範囲にある。図 3-3~図 3-5 に代表的な系統の使用圧力を示す。一部の配管系では 0.7~1.5 kg/cm²G の使用圧力となる。図 3-6 にそれらの配管系を示す。ブンゼン反応器下流の反応液移送ポンプ出口から二相分離槽までの配管(最大 1.5 kg/cm²G)、硫酸精製塔ボトムポンプから硫酸濃縮塔までの配管(最大 0.8 kg/cm²G)、硫酸リサイクルポンプから硫酸濃縮塔までの配管(最大 0.8 kg/cm²G)、二相分離槽から脱硫塔入口バルブまでの配管(最大 0.7 kg/cm²G)、I₂ 溶液リサイクルポンプからブンゼン反応器までの配管(最大 0.8 kg/cm²G) の5ヶ所である。

本試験装置は使用圧力を十分考慮して設計し、製作据え付け後に耐圧テストを行うことによりその健全性を確認する。ほとんどの系統の使用圧力上限値である 0.2 kg/cm²G の 1.5 倍に相当する 0.3 kg/cm²G を耐圧テスト圧力とする。上記5ヶ所の配管については、当該配管区間を取り外し、それぞれの最大使用圧力の 1.5 倍で耐圧テストを実施する。

以下、本試験装置を構成する容器、塔類及び配管等の材質、使用温度、使用圧力及び使用前に行う耐圧テスト時の負荷圧力を列挙する。なお、材質欄の記号は次の材料を意味する。Q : 石英、P : ホウ珪酸ガラス、T : テフロン。

3.3.1 ブンゼン反応工程

本工程は、反応器を含む6個のタンクと2個の分離槽、2台のポンプ、2基の熱交換器からなる。

機器	材質	使用圧力	耐圧テスト圧力	使用温度
硫酸相フィードタンク	: P	0.03kg/cm ² G	0.3 kg/cm ² G	70°C
HIX フィードタンク	: P	0.03kg/cm ² G	0.3 kg/cm ² G	70°C
リサイクル水回収タンク	: P	0.02kg/cm ² G	0.3 kg/cm ² G	70°C
軽液相回収タンク	: P	0.03kg/cm ² G	0.3 kg/cm ² G	70°C
重液相回収タンク	: P	0.08kg/cm ² G	0.3 kg/cm ² G	70°C
ブンゼン反応器	: P	0.09kg/cm ² G	0.3 kg/cm ² G	80°C
二相分離槽	: P	0.1kg/cm ² G	0.3 kg/cm ² G	80°C
O ₂ ガス分離槽	: P	0.01kg/cm ² G	0.3 kg/cm ² G	40°C
凝縮水循環ポンプ	: T	0.2 kg/cm ² G @吐出口	—	70°C
反応液移送ポンプ	: T	1.5 kg/cm ² G @吐出口	—	80°C
R-101 OH コンデンサー	: P	0.01kg/cm ² G	0.3 kg/cm ² G	80/30°C
薄膜冷却器	: P	0.01kg/cm ² G	0.3 kg/cm ² G	熱落差 65°C(=80°C-15°C*1) 80/30°C

注記: *1 は、冷却水温度を示す。

熱交換器類の使用温度欄には、shell side 温度/tube side 温度を記載した。

3.3.2 硫酸分解反応工程

以下の5基の容器、2台のポンプ、5基の熱交換器からなる。主要使用条件を以下に記す。

機器	材質	使用圧力	耐圧テスト圧力	使用温度
硫酸精製塔	: P	0.16kg/cm ² G	0.3 kg/cm ² G	100°C
硫酸濃縮塔	: Q	0.07kg/cm ² G	0.3 kg/cm ² G	260°C
硫酸蒸発器	: Q	0.19kg/cm ² G	0.3 kg/cm ² G	400°C
硫酸分解器	: Q	0.18kg/cm ² G	0.3 kg/cm ² G	850°C
硫酸分離器	: P	0.18kg/cm ² G	0.3 kg/cm ² G	40°C
硫酸精製塔ボトムポンプ	: T	0.8 kg/cm ² G @吐出口	—	70°C
硫酸リサイクルポンプ	: T	0.8 kg/cm ² G @吐出口	—	40°C
蒸気凝縮器	: P	0.04kg/cm ² G	0.3 kg/cm ² G	110/40°C

硫酸分解器フィードヒーター	:	Q	0.17kg/cm ² G	0.3 kg/cm ² G	850/650°C 熱落差 95°C(=110°C-15°C*1)
硫酸分解ガス冷却器	:	P	0.17kg/cm ² G	0.3 kg/cm ² G	170/40°C 熱落差 450°C(=850°C-400°C*2)
硫酸フィード予熱器	:	Q	0.17kg/cm ² G	0.3 kg/cm ² G	570/160°C 熱落差 153°C(=170°C-15°C*1)
硫酸濃縮塔リボイラー	:	(マントルヒーター)			— 熱落差 490°C(=570°C-80°C*2)

注記： *2 は、2 次側流体温度を示す。

3.3.3 HI 分解反応工程

以下の 5 基の容器、1 台のポンプ、5 基の熱交換器からなる。主要使用条件を以下に記す。

機器	材質	使用圧力	耐圧テスト圧力	使用温度
脱硫塔	: P	0.17kg/cm ² G	0.3 kg/cm ² G	100°C
HI 蒸留塔	: P	0.15kg/cm ² G	0.3 kg/cm ² G	188°C
HI 分解器	: Q	0.05kg/cm ² G	0.3 kg/cm ² G	500°C
HI 回収塔	: P	0.05kg/cm ² G	0.3 kg/cm ² G	130°C
HI 回収塔リフラクストラム	: P	0.01kg/cm ² G	0.3 kg/cm ² G	40°C
I ₂ 溶液リサイクルポンプ	: セラミック	0.8 kg/cm ² G @吐出口	—	188°C
HI 蒸留塔リボイラー	: (マントルヒーター)		—	
HI 分解器予熱器	: Q	0.07kg/cm ² G	0.3 kg/cm ² G	500/350°C 熱落差 373°C(500°C-127°C*2)
HI 回収塔コンデンサー	: P	0.02kg/cm ² G	0.3 kg/cm ² G	130/40°C 熱落差 115°C(130°C-15°C*1)
HI 蒸留塔フィード予熱器	: P	0.08kg/cm ² G	0.3 kg/cm ² G	188/130°C 熱落差 88°C(188°C-100°C*2)
HI 回収塔スタートアップ予熱器	: (マントルヒーター)		—	

3.3.4 配管および弁

各場所の配管及び弁の設計温度、配管材料及び通過流体を以下に示す。

場所	材質	使用圧力	耐圧テスト圧力	使用温度
----	----	------	---------	------

(1) 硫酸系配管

ブンゼン反応器

↑↓	P	0.09kg/cm ² G	0.3kg/cm ² G	80°C
↑↓	P	1.5~0.05kg/cm ² G	2.3kg/cm ² G	80°C
↑↓	P	0.16kg/cm ² G	0.3kg/cm ² G	80°C
↑↓	P	0.2kg/cm ² G	0.3kg/cm ² G	80°C
↑↓	T	0.8~0.05kg/cm ² G	1.2kg/cm ² G	40°C
↑↓	Q	0.2kg/cm ² G	0.3kg/cm ² G	260°C
↑↓	Q	0.18kg/cm ² G	0.3kg/cm ² G	850°C
↑↓	Q	0.17kg/cm ² G	0.3kg/cm ² G	850°C
↑↓	P	0.17kg/cm ² G	0.3kg/cm ² G	170°C
↑↓	T	0.16kg/cm ² G	0.3kg/cm ² G	40°C
↑↓	T	0.18kg/cm ² G	0.3kg/cm ² G	40°C
↑↓	T	0.8~0.05kg/cm ² G	1.2kg/cm ² G	40°C
↑↓	P	0.04kg/cm ² G	0.3kg/cm ² G	110°C

O₂ ガス分離槽

(2) ヨウ素系配管

二相分離槽

↑↓	P	0.1~0.7kg/cm ² G	1.1kg/cm ² G	100°C
↑↓	P	0.17kg/cm ² G	0.3kg/cm ² G	100°C
↑↓	P	0.2kg/cm ² G	0.3kg/cm ² G	130°C

HI 蒸留塔

↑↓	P	0.07kg/cm ² G	0.3kg/cm ² G	130°C
HI 分解器予熱器(tube)				
↑↓	Q	0.07kg/cm ² G	0.3kg/cm ² G	350°C
HI 分解器				
↑↓	Q	0.05kg/cm ² G	0.3kg/cm ² G	500°C
HI 回収塔				
↑↓	P	0.01kg/cm ² G	0.3kg/cm ² G	130°C
HI 回収塔リフラックスドラム				
↑↓	T	0.01kg/cm ² G	0.3kg/cm ² G	40°C
水素出口				
HI 回収リフラックスドラム				
↑↓	P	0.2kg/cm ² G	0.3kg/cm ² G	40°C
O ₂ ガス分離槽				
HI 蒸留塔				
↑↓	P	0.15kg/cm ² G	0.3kg/cm ² G	188°C
I ₂ 溶液リサイクルポンプ				
↑↓	P	0.8~0.01kg/cm ² G	1.2kg/cm ² G	188°C
ブンゼン反応器				
脱硫塔				
↑↓	P	0.17kg/cm ² G	0.3kg/cm ² G	100°C
ブンゼン反応器				
HI 回収塔				
↑↓	P	0.08kg/cm ² G	0.3kg/cm ² G	130°C
HI 蒸留塔				
(3) その他				
ブンゼン反応器				
↑↓	P	0.01kg/cm ² G	0.3kg/cm ² G	80°C
O ₂ ガス分離槽				
↑↓	T	0.01kg/cm ² G	0.3kg/cm ² G	40°C
酸素出口				

3.4 機器構造

本試験装置を設置する建家(HTTR 付属建家II)は、建築基準法施工令に準拠して設計・建築されている。耐用年限中に数度は遭遇する程度の地震(中地震動、気象庁震度段階5強程度)に対しては建築物の機能を保持し、耐用年限中に一度遭遇するかもしれない程度の関東大震災級

の地震（大地震動、気象庁震度段階6強～7）に対しては建築物の架構に部分的なひび割れ等が生じても最終的に崩壊から人命の保護を図ることができる。

本試験装置を据え付けるための架台は、床に剛的に据え付ける。容器・反応器等の構成要素間をヘッド差利用により流体を移送する方式を実験するために、高さ・配置空間等を考慮する。架台の各稜は角型鋼（100mm×100mm×厚み3.2mm）及びH型鋼（150mm×75mm×厚み7mm）からなり、各面は2対から4対（合計13対）の棧（プレス）で補強する。架台の設計に当たっては、原子力発電所耐震設計指針（JEAG4601-1989）Cクラスの耐震設計（耐震設計条件：水平震度0.36G）に準拠し、転倒モーメント、復帰モーメント等を評価することにより耐震性を実現する方針である。

パネルハウス（幅5.3m、奥行き3.25m、高さ5.25m）は、2.2.1項「試験装置の構成概要」で述べたように、架台の側面及び上面の5面を透明硬質塩化ビニル板（パネル）で覆うことによって構成する。パネルは最大1810mm高×810mm幅×厚み5mmの大きさとし、架台の角型鋼にL型鋼（30mm×30mm×厚み3mm）を溶接し、それにネジ止めする（ネジ止めの列の間隔は1000mmを超えないように必要に応じて補強する）。ネジ頭部側には弾性のある座金を用いる。このように、パネルの破損、落下等に対する配慮を行い、架台と同等の耐震性を実現する。パネルハウスは、運転時に微量排出され、異常時には大量に排出される可能性のある有害な物質（硫酸、二酸化硫黄、ヨウ素、ヨウ化水素、水素）を内部に閉じ込め、全量を既設の換気設備（活性炭吸着装置）及び排水処理装置へ導く安全施設の役割を果たすものである。

ガラス製反応器、塔類（代表例：図3-7参照）、容器類（代表例：図3-8参照）は、目的に応じた特殊な構造であるので、高度なガラス工作技術で十分な品質管理のもとに製作する。構造・機能の設計、強度に留意した形状・仕上げを行い、十分な熱処理を施し、残留応力等のないようにする。なお、ホウ珪酸ガラス管の耐圧は300℃において4.0kg/cm²Gである（JIS R 3802-1995 [ガラス製化学プラント用構成部品]に準拠）。石英管についてはJIS規格にはないが、ガラスベンダーの資料によると、石英の持つ引張強度はホウ珪酸ガラスに比し十分大きく（2～3倍）、従って、石英管の耐圧も4.0kg/cm²G以上あるものと考えられる。ガラス機器・配管はJIS R 3802-1995に定める注意事項に従って運搬・保管・据え付け工事等を進める。

機器の支持では熱膨張及び耐震性等を考慮し、支持固定の方法・個数・位置・長さ・曲率に配慮した配置・施工を行う。この際、ガラス専門業者の経験を十分生かすとともに、ガラスに生じる応力と振動数を評価（付録2参照）して、これらの安全を実現する。さらに容器等の破損時の対策として、容器を液を貯留できるトレーの上に設置し、また、外面をシリカ系の断熱材で覆い、薬液の噴霧状・噴流状の飛散、及び、ガラス破片の直接的飛散を防止する効用を含めた仕上げ施工を行う。

大規模な地震（例：阪神淡路大震災）におけるガラス製プラントの耐震性に関しては、ガラス機器製造メーカー及び神戸大学関係者によると、固定・支持されていたガラス機器・装置は破損しなかった実績がある。従って、本試験装置のようなガラス製化学プラントは、極めて大規模な地震以外には耐えるものと判断できる。

継ぎ手は、分解・組立が可能な特殊耐食継ぎ手を用いる。ポンプは、使用条件に応じて、ランジャーポンプ、電磁駆動式渦流ポンプ等の漏洩に留意したものを選択する。

3.5 構成材・構成品

本試験装置は、主としてガラスで構成される実験装置である。ガラスは、これまでの経験により、I Sプロセス環境で耐食性の点で問題はなく、化学実験装置や小型プラントの材料として豊富な実績を有する。本試験装置では、温度に応じて石英ガラスとホウ珪酸ガラスを選択して使用する。

2種のガラスの選択基準は、以下の通りである。

ガラス材料	適用機器	耐サーマルショック ^{*4}
(1) ホウ珪酸ガラス	200°C以下の機器	250°C
(2) 石英ガラス	200°Cを超える機器	700°C

注記： *4 は、急激なサーマルショック（温度変化）を与えた場合に材料が耐え得る温度差であり、熱交換器内に生じる定常温度差（熱落差）によって生じる熱応力状態より過酷な条件である。

継ぎ手に用いられるシール材料は、研究室での経験を踏まえて、プロセス流体に耐食性を有するエラストマーを採用する。高温部分では、シール部を断熱・冷却する等の工夫を行う。低温部分には、一部（120°C以下の配管の一部、試験溶液供給、ドレン等）に、テフロンを用いる。ポンプ摺動部には、耐食性を確認済みの炭化ケイ素、アルミナ等のセラミック部品を用いる。

3.6 運搬手段、運搬装置

3.6.1 工場からの輸送

ガラス製部品は、割れや表面の傷が強度・安全性に大きな影響を与えるので、工場検査後、保管に留意し、緩衝材を十分使用して養生した上で梱包し、過度な衝撃を与えないように据え付け場所まで運搬する。

3.6.2 所内輸送・現場搬入・保管

工場より現場まで直接移送し、有害な傷等の生じていないことを確認した後、安全な場所に保管する。

3.6.3 据え付け作業

据え付けに当たっては、移動に留意し、有害な応力を作用させないように据え付ける。適切な支持具を用いて、有害な応力を生ぜしめないように、他の配管からの応力、熱膨張等に留意して、試験装置に組み込む。

3.7 エネルギー供給系の制御システム

3.7.1 プラント電源盤

プラント電源盤は、ヒーター、ポンプ、攪拌器等に電力を供給し、また、計測制御データを集約して表示する役目をもつ。ポンプを手動で起動及び停止する機能、温度調節器の設定を行う機能、異常時の警報を知らせる機能を有する。

プラント電源盤については、漏電防止のため、各機器の上流側にブレーカーを設置するものとする。また、平成13年度には、非常用電源、無停電電源を設置する。

3.7.2 冷却水供給系

本試験装置では、凝縮器にて冷却水が用いられる。冷却水が停止すると、有害な物質（ヨウ化水素）が排気ダクト内に放出される。しかし、換気設備に流入した有害な物質は活性炭により吸着除害されるので、安全上の問題は生じない。

3.8 安全装置・警報系

本試験装置では、閉サイクル試験における運転状態を計測するため、流量・圧力・温度・液レベルの測定用センサー及び制御用コントローラーを設置する。さらに、本試験装置では、安全を確保するため、警報（アラーム）及びトリップ系を設置する。詳細は、2.2.3 項に記した通りである。

3.8.1 警報

表 2-2 に示す装置では、装置の異常を早急に検知するために、計測点のプロセス変数に対して設定値から大きな偏りが生じた場合には警報を出す。

3.8.2 トリップ動作

表 2-3 に示す機器は、異常発生時に装置の損傷を防ぐため、自動的に運転を停止する機能を有する。

3.9 危険・有害箇所の防護処置

保温のためのシリカ系断熱材被覆に際して、火傷防止上も有効となるように配慮する。

配管、容器等の破損等の異常事態に起因する溶液または気体の飛散・放出に対しては、これらによる化学的・物理的・火傷、呼吸器障害等の危険を防止するため、以下の対策を講じる。

影響緩和対策： シリカ系断熱材被覆による酸液の飛散防止、気体の噴流発生防止、
トレイ捕集による拡散防止、
パネルハウスによる外部飛散・拡散防止、
排水処理装置、換気設備による外界への影響を阻止
(中和・吸着捕集)

放出される水素に起因する爆発、火災に対しては、以下の対策を講じる。

発生防止対策： 大量大気による希釈（25ppm<<4% 爆発下限濃度）

3.10 その他安全上必要な処置

有害物質が身体に付着した場合に備えて、身体を水洗するシャワー及び眼球洗浄口がねを有する流しを設置してある。また、有害物質用ガスマスクを準備する。

パネルハウスの要所には、身体の予期せぬ不安定を介助する手すり等を設けるとともに、十分明瞭な視野を確保するため局所照明を設置する。

4. 作業環境の安全に対する配慮

本章では、本試験装置の製作及び運転保守時における作業環境、手段等の安全性に関する配慮について述べる。

4.1 位置、広さ、高さ

大実験室内にパネルハウスを設置する際、既存の設備に支障をきたさないように（既存の設備によって本試験装置が支障を受けないように）、その位置・広さ・高さには以下の配慮をする。

- (1) 大実験室シャッター付近にトラックヤードを確保する。
- (2) パネルハウスの上端(天井)を既設クレーンの下端部を超えない高さとする。
- (3) パネルハウスと既設周辺設備(実験装置等)との距離を適切に保ち、通路を確保する。
- (4) 大実験室の壁との距離を適切に保ち、通行や電源盤の作業に支障がないようにする。

本試験装置の全高(パネルハウスにおいて)は5.25mであり、同等の高さの架台に機器、配管、バルブ等を設置する。これらの運転保守性を考慮し、架台は1階部分と2階部分とに分けた構造にする。パネルハウス内において、運転時に作業を行う機器前面部には十分な通路幅(1.22m)を設け、また、保守時に作業を行う機器背面部には適切なスペース(幅0.76m)を確保する。

4.2 換気、温度、湿度

パネルハウスは既設の換気設備に接続し、パネルハウスと床面との間には、その外周すべてにわたり高さ0.15mの間隙を設け、この部分より吸気させる。これらの配慮により、十分な換気量を確保でき、酸欠も防止できる。事故時の換気量は、160(m³/分)（パネルハウスは毎分1回以上換気される）とし、パネルハウス内に有毒ガス及び可燃性ガスが滞留することを防止する。通常時にも、パネルハウスは一定量の換気(33 m³/分)を行うものとする。これによりパネルハウス内の温湿度は、パネルハウス外とほぼ同等となり、パネルハウス内の環境が外部と著しく異なることはない。

4.3 採光、照明

パネルハウスを設置する大実験室には必要採光面積を確保しており、また、四面の壁には、照明として水銀灯(250W)8台、蛍光灯(40W)12台を設けてある。パネルハウスの側壁には、透明塩化ビニル板を使用し、外部から中の様子が観察でき、かつ、外部照明を活用できる構造とする。パネルハウス内の要所(外部照明の影になる部分を含めて)には蛍光灯を設置し、100ルクス以上の十分な照度が得られるようにする。停電時対策として、バッテリー内蔵型蛍光灯を使用する。

4.4 騒音、振動

本試験装置には、有害な騒音振動を発生する機器はない。ポンプ等の回転部を有する機器は架台に適切に固定すると共に、配管のサポートを適切に行い、振動の低減を図る。

4.5 出入口、通路、避難路

パネルハウスの出入口は、1階に2ヶ所、2階に1ヶ所設ける。2階出入口には、昇降用階段を設置する。いずれの出入口の敷居も段差のない構造とする。2階の床には、グレーチングを用い、台車が通行可能なように極力目の細かいものを選択する。2階に、事故時用の非常口を一カ所設け、この非常口には一階へ退去するための梯子を設置する。

4.6 高所からの墜落防止対策

本試験装置に関連した墜落の危険は、

- (1) 階段の昇降時の転落
- (2) 階段2階部のおどり場からの墜落
- (3) パネルハウス内で脚立を用いた作業中の転落

である。(1)に関しては、両手で荷物を持って階段を昇降しないようにし、両手が塞がるような荷物の搬送は別途設置するリフトを用いるものとする。(2)に関しては、適切な高さの手すりを設けることで対応する。(3)に関しては、機器架台に手すりを取り付けるとともに単独で作業しないようにし、重量物の取り扱い時には別途用意するハンドリフターを用いる。

4.7 保守点検の容易さ

保守点検は、パネルハウス内の通路を用いて行う。その際、1階部高さ2.75m、2階部高さ2.5mの範囲の機器等を扱うが、これらは脚立等の使用で容易に作業できる。主要な機器、弁類、配管に、銘板、弁開閉表示板を取り付け、保守点検作業が容易になるように配慮する。主要な配管には、流体の種類、方向、相状態、温度を表示し、作業時の安全に配慮する。

4.8 作業・操作位置と姿勢

操作頻度の高い計器、バルブ等は極力、作業員が操作し易い位置に設置する。例えば、一階に設置する機器の内、最下層である移送ポンプを床面より 0.5m の高さに設ける等、作業性に配慮する。

5. 作業の安全に対する配慮

5.1 作業手順

本試験装置の製作、据え付け、運転に至る一連の作業は、次の過程を経る。

- (1) 業者工場での機器製作・検査
- (2) 製品の輸送
- (3) 原研における組立、据え付け作業
- (4) 原研における装置調整、作動テスト作業
- (5) 原研による運転、保守作業

(1)、(2)、(3)については、安全な作業環境に重点を置き、業者に「工事の安全管理要領書」を作成させ、これを遵守させる。(4)については、「テスト・検査要領書」を作成させ、これを遵守させる。(5)については、原研独自に「運転要領書 (5.4 節参照)」を作成し、安全な試験の実施、装置の保守に努める。なお、「運転要領書」は、試験を重ねる中で得られる経験を基に、内容を見直し、よりよいものとするように改良に努める。

5.2 危険・有害な作業内容とその対策

本試験装置では以下に挙げる事項に起因して危険性が予想される。

- (1) 腐食性酸性溶液(硫酸、ヨウ化水素酸等)の取り扱い
- (2) 有害な気体(二酸化硫黄等)の発生
- (3) 可燃性気体(水素)の発生
- (4) 高温部(最高 870°C)の存在

すなわち、危険と考えられる作業は、

- (ア) 試験液調製作業
- (イ) 溶液の運搬作業
- (ウ) 試料の仕込み作業
- (エ) サンプリングや排液に伴う溶液の抜き出し作業
- (オ) 高温機器近傍での作業
- (カ) その他破損ガラスに係わる作業

である。

これらの作業を必要とする試験運転、装置点検、また、異常事態への対処に際しての注意事項及び行動規範を「運転要領書 (5.4 節参照)」中に定め、これを遵守する。

5.3 連絡・確保手段

本試験装置は、装置本体を大きさ幅 5.3m×奥行き 3.25m×高さ 5.25m のパネルハウスに納め、プラント電源盤をパネルハウスに隣接して設置する。パネルハウスは、2階構造であるものの、1階と2階の仕切りは見通しの良いグレーチングであり制御盤との距離も近いため、運転時、保守時における作業員間の連絡は肉声で可能であり、従って、特別の通信機器は必要としない。

建家外部への緊急連絡は、建家に設置してある電話、ページングを用いる。

5.4 安全作業マニュアル

業者による現地据え付け作業は、5.1 節に述べた「工事の安全管理要領書」中に明記し、これを徹底する。運転操作、保守点検等の作業、異常時の安全作業等の指針については、「運転要領書」に定めて、これを徹底する。また、危険性を有する作業に対しては、必要に応じて安全チェックシートを作成し、慎重に作業を進める。

「運転要領書」は、本試験装置で用いる化学物質の取り扱い等の作業、運転操作手順及び異常時の対応について定めるもので、「安全作業マニュアル」、「運転操作マニュアル」、「異常時対処マニュアル」で構成する。概略、以下の内容とする。

5.4.1 安全作業マニュアル

本試験装置は、腐食性酸性溶液、有害な気体、可燃性気体等を取り扱うものであり、作業従事者はこれらの物理的、化学的性質を熟知した上で作業を進める。溶液の取り扱い及びパネルハウス内作業に当たっては、必要に応じて、頭部及び顔面の保護具、テフロン被覆実験着、手袋、安全靴の着用を義務づける。有害な気体の発生する可能性がある取り扱いでは、局所排気を行い、作業の安全を確保する。また、各種作業は、相互監視下もしくは2人以上で行い、異常時に備える。

(1) 試料調製作業

装置の運転に必要な溶液の調製を行う作業である。有害な蒸気の発生する可能性があるため、専用のフードで行う。

(2) 溶液の運搬作業

栓付きの容器を用いて運搬時の飛散を防止する。パネルハウスの2階へは、専用のリフトを使用する。

(3) 仕込み作業

溶液については、室温で、テフロンチューブ、ポンプ等を用いて行う。固体ヨウ素は容器上部より少量ずつ投入する。いずれの場合も必要に応じて局所排気を行う。

(4) サンプルング

ガスのサンプルングは換気に注意する。溶液のサンプルングでは、その飛散に十分注意する。

(5) 高温機器近傍での作業

表示温度を確認し、火傷に注意して作業を行う。

(6) 試験後の溶液処理

溶液の抜き出し時には飛散に十分注意する。抜き出した溶液の処分は産廃業者に委託する。ビンの洗浄時に発生する廃液は既設の排水処理装置を用いて処理する。

5.4.2 運転操作マニュアル

工程別特性試験及び連続水素製造試験における装置破損、系内化学物質の想定外排出等を防ぐための運転時の操作手順及び注意事項を定める。(装置の試運転までに、マニュアルの整備を行う)

5.4.3 異常時対処マニュアル

地震等、装置の破損あるいは系内化学物質のリークにつながる事象が発生した場合の対処を定める。

(1) 装置の崩壊、落下が生じた時

ただちに、パネルハウスから退去し、負傷者、火災の有無を確認し、必要に応じて関係箇所に通報するとともに、それぞれの事象に即した措置(治療、消火等)を行う。

(2) 装置の部分的な破損、リークが生じた時

前項に準ずる。装置の運転中であれば運転を停止し、換気設備を点検、異常がなければパネルハウスの換気量を増やす。

(3) 装置の破損はないが、リークのおそれがある時

運転を停止し、継ぎ手部分を重点的に点検を行う。

(4) 換気設備が故障した時

直ちに運転を停止する。

(5) 溶液が身体に付着した時

該当箇所を流水で十分に洗浄後、医師の治療を受ける。

5.5 従事者の資格経験教育訓練等

5.5.1 据え付け工事等の作業時

必要に応じ、業者において、以下の資格、経験者を選任させ、作業に従事させる。
安全衛生管理者、工事監督責任者、溶接士、電気工事士、クレーン運転士、玉掛作業者

5.5.2 運転保守の作業時

検取後、当所での作業にあたって法的資格は必要としないが、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）を従事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。また、危険物取扱主任者、毒物劇物取扱責任者、クレーン運転士等の資格取得に努め、事故が発生することのないように徹底する。

5.6 作業責任者、作業分担

据え付け工事等の作業時に、業者から、「工程表」と「作業日報」を提出させ、責任の所在を明確化し安全確保に努める。また、工事や運転保守の際には、「組織系統図」を定め、その中において施設管理者、作業責任者を任命し、原研を含めた監督管理体制を明確化する。

検収後、当所において平成14年まで実施する工程別特性試験では交代勤務を必要とする作業は行わない。この年度までは、原則として、特会要員、業務協力員を含む熟利用技術研究室員4名以上が作業を担当する。平成15年以降に予定している連続水素製造試験時の作業体制は、工程別特性試験の結果や知見を生かして適切に計画する。

6. 異常時の評価と対策

本章は、連続水素製造試験装置運転時において予想される異常又は事故と、その安全対策等について述べるもので、その内容を次の各項に示す。

6.1 予想される異常又は事故とその対策

6.1.1 系外事故の対策

(1) 地震

地震発生時の主な想定事象及び基本的対処方針を下表に示す。地震発生時に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。退去後、事態の推移を見守りつつ、本方針に沿って、装置の停止や装置の点検等の措置をとる。

装置の点検等の処置・処理の詳細は、「運転要領書（異常時対処マニュアル）」に定める。

震度階級	一般状況	本試験装置状況	本試験装置基本対処方針
1 微震	屋内にいる人がわずかの揺れを感じる。	液面に波紋を生ずる。	対処は不要とする。
2 軽震	屋内にいる多くの人が揺れを感じる。吊り下げ物がわずかに揺れる。	ガラス容器内の液体が動揺する。支持していないテフロン配管が揺れる。	基本的に対処は不要とする。反応の増進・不安定等生じないか留意する。
3	屋内にいるほとんどの人が	容器内の液体が動揺	現地工事中、初期試験運転中に

弱震	揺れを感じる。電線が少し揺れる。	する。一部の細い配管が揺れる。	は、必要に応じて点検を行う。
4中震	恐怖感を感じる。吊り下げ物は大きく揺れる。	ガラス機器、配管の揺れが認められる。	状況により、装置を停止する。安全確認後に、点検を行う。
5弱強震	多くの人が身の安全を図ろうとする。食器、書籍が落ちることがある。	固定していない容器（ビーカー等）が転落破損する。	漏洩が生じることを前提として、運転を停止する。安全を確認した後に、点検を実施する。
5強強震	非常な恐怖感を感じ、多くの人が行動に支障を感じる。食器、書籍のほとんどが落ちる。耐震性が弱い建物が損傷する。	固定していない機器（パソコン、計測器等）が転倒する。	直ちに運転を停止し、装置の破損に備え、建屋から退去する。状態が安全に復していることを確認した後に、点検、復旧する。
6弱烈震	固定していない家具が転倒し、開かなくなるドアが多くなる。かなりの窓ガラスが破損落下する。	ガラス機器で支持が不適切な部分、内部のコイル管部等が破損することがある。	震度5強に準ずる。余震等に留意する。
	地震加速度：0.3～0.4G		
6強烈震	立っていることができず、はわないと動けない。固定していないほとんどの大型家具が転倒し、窓ガラス・壁タイルが落ちる。弱い建物が倒壊する。	建屋・架台の耐震設計レベルに達する。	可能なら装置を停止し、建屋から速やかに退去する。
7激震	揺れに翻弄され行動不能になる。耐震性が高い建物でも、傾いたり、大きく破損することがある。	建屋、架台、ガラス機器の強度限界に達する。	即刻、建家から退去する。

(2) 落雷

本試験装置を据え付ける実験棟は、研究棟の避雷針でカバーされており、本試験装置への落雷は考慮外とする。

(3) 火災

火災が発生しても、装置本体には可燃性材質を使用していないため、延焼の可能性は低い。しかし、強度が低下し、装置からリークを生じるため、運転は継続できなくなる。火災（パネルハウス内部火災、外部火災の両ケースとも）発生時には、パネルハウスから速やかに退出し、装置の運転を停止する。さらに、状況に応じて、換気設備の運転を停止する。

なお、火災防護のために、次のような対策をほどこす。

- ・ 火災発生及び延焼防止のため、装置には極力不燃性又は難燃性の材料（ガラスによる

機器製作、塩化ビニル樹脂によるパネルハウス製作)を使用する。

- ・ 架台内部には不必要な可燃物を置かないと共に、消火器(電気火災用及び油火災用)・砂を設置する。

6.1.2 系内事故の対策

(1) ライン閉塞

ヨウ素の系内での析出・固化等によるライン閉塞が生じた場合、流量喪失が起こり、圧力の異常上昇が起こる。そのまま継続すると装置に破裂が生じる。そのため、ライン閉塞が生じた場合、早急に検知し、対策をとることが必要となる。本試験装置においては、2章に記載したように、ポンプの吐出ラインの圧力計に、圧力高でアラームを発生させると共に、さらに圧力が高まった場合には装置が自動停止するよう設計している。

また、ヨウ素が気相に存在し気相ラインが閉塞する可能性のある機器に関しては、安全弁を設置し、圧力異常上昇に対処できるよう設計している。

(2) 異常入熱

反応器、蒸留塔に、電気炉を使用しており、温度コントローラー作動不良の場合に、異常入熱が生じる可能性がある。異常入熱が継続すると、装置内の圧力が上昇し、破裂する可能性がある。そのため、反応器には、温度コントローラーと別個に温度計を設置しており、温度異常上昇を検知した場合、ヒーターは自動的に停止される。蒸留塔に異常入熱を生じた場合は、塔内の蒸気量が増加する。そのため、異常時に圧力上昇の可能性のある蒸留塔に関しては、安全弁を設置している。

(3) ファン故障

換気装置のファンに何らかのトラブルが生じ、運転できなくなった場合には排出される水素がパネルハウス内に蓄積される可能性がある。また、ファン停止時に装置本体から有害物質のリークが生じた場合、パネルハウス内での作業従事者が危険な環境にさらされることとなる。そのため、ファンが停止した場合には「運転要領書(異常時対処マニュアル)」に基づき、本試験装置の運転を停止する。

(4) 冷却水停止

6.2.2 項に記述する。

6.2 停電・断水等異常時の危険性とその対策

6.2.1 停電

停電が発生すると、照明の喪失、換気設備の停止と共に、装置本体にも多大な影響がでるが、装置への入熱が停止し水素発生は停止し、ポンプによる液移送も停止されるため、安全上、特に問題となることはない。

ただし、換気設備の停止は装置からの有害な物質の漏洩による人的災害に対する大きな防護が失われることを意味し、また、計装システムがダウンすると装置の再スタートが難しくなることから、新たに無停電電源の設置及び非常用電源装置を設置すると、制御系を常時維持でき、

換気装置等の動力系も停電後 60 秒程度で復旧し電力を供給できることとなる。

実験計画上、無停電電源・非常用電源を設置するまでは、水素発生工程の実験及びヨウ素固化の可能性がある工程の実験は行わない方針であり、停電に対して十分な安全面の配慮を行う。

6.2.2 断水

本試験装置への冷却水供給は、水道蛇口より直接配管で行う。そのため、断水や水道管元圧の低下が生じた場合、冷却水の喪失が生じることとなる。冷却水喪失が長時間生じた場合、蒸留塔の塔頂系で蒸気が凝縮せずに系外へ排出される。すなわち、通常は排出されることのないヨウ化水素が装置から排出されることとなるが、換気設備の吸着剤（活性炭）にて吸着除去されるため、系外には排出されない。

なお、本試験装置のポンプには冷却水を使用しているものではなく、冷却水喪失による影響はない。

6.2.3 装置破損

(1) 想定状況

最も過酷な状況として、本試験装置の定常運転中に本試験装置の大規模な破損事故が起こり、その結果、全インベントリーがパネルハウス内に放出されるような状況を想定する。

(2) 状況の評価

機器の破損に伴って、装置内の溶液・気体はパネルハウス内に放出される。有害な物質の大部分は液体状態で落下し、量的にはわずかな気体（二酸化硫黄、ヨウ化水素、ヨウ素、水素）が放出される。

液体は、トレーあるいは床に落下し、ヨウ素等はその場で冷却固化する。床に落下した液体の一部はトレンチを通して排水処理装置の貯槽に流入し保持される。

気体は、換気設備が健全な場合には、換気設備の吸着装置に導かれその大部分は活性炭に吸着される。換気設備が停止した場合には、パネルハウス内に滞留する。

(3) 対策

作業者は、パネルハウスから直ちに退去し自らの安全確保に努める。退去後、装置の運転を停止する。換気設備が健全ならば、換気能力を $2,000\text{Nm}^3/\text{h}$ から $9,800\text{Nm}^3/\text{h}$ へとアップさせる。換気設備が停止した場合には、換気設備の速やかな復旧を図るとともにパネルハウスを目張りする。さらに、パネルハウスから大実験室に隣接する小実験室の化学ドラフトへ排気ホースを設置しパネルハウスの補助排気を行う。事態整定後、漏洩溶液は自動中和装置あるいは産廃業者への委託によって処理する。

(4) 本件に係わる安全性の評価

事故直後に作業員が退去する際に酸溶液の飛沫を直接身体に浴びる可能性がある。機器の被覆、防護板、トレー等の事前の対策により、このような溶液被曝は最小限に留めることができる。排水処理装置の貯槽の容量は、本試験装置内の全溶液量に比して十分大きいので、漏洩溶液が環境へ放出することはない。また、本試験で用いる液体及び固体は、いずれも冷却時の蒸気圧は低いので、事態整定後に行う後処理作業は、安全に行うことができる。

有害気体については、事故発生後、装置の運転停止措置あるいは事故に伴う熱源の喪失により、有害気体の発生反応が停止するため有害気体のパネルハウス内への放出は急速に停止する（有害気体発生反応は事故発生後数分以内に停止すると想定できる）。事故直後にパネルハウス内に放出される有害気体(二酸化硫黄[6ppm]、ヨウ素[7ppm]、ヨウ化水素[56ppm]。[]内の数値は、装置破損後、当該気体が本試験装置定常運転時の流量で流出し続けると仮定した場合の排気中の濃度である)は、その大部分を換気設備の活性炭で捕集する。吸着装置に充填する活性炭は、二酸化硫黄及びヨウ素除去用活性炭 650kg とヨウ化水素除去用活性炭 400kg である。これは、仮に有害な気体が本試験装置定常運転時の流量で試験装置から流出し続けるとした場合でも、二酸化硫黄及びヨウ素については約 110 時間またヨウ化水素については約 20 時間にわたってそれぞれの気体の換気設備出口濃度を 0.1ppm^{*} 以下に抑えることができる量に相当する。従って、パネルハウス内環境の安全性の速やかな回復及び外部環境の安全確保は十分可能である。無停電電源・非常用電源の設置以前の実験において、破損事故と換気設備停止が同時に発生した場合、二酸化硫黄放出が懸念されるが、発生量を急速に停止することが可能であり、また、放出気体のパネルハウスからの漏洩も防止できる。補助排気系から大気へ放出する気体中の二酸化硫黄濃度は 1ppm 以下にできるので、外部環境の安全を保つことができる。

*) 大気汚染防止法におけるボイラー等からの二酸化硫黄排出規制値の 1/10 に相当する。排気設備の概要は 3.2.4 項及び図 3-2、排気に関連する法規等については表 3-1 を参照されたい。

6.3 排ガス、排水、廃棄物等の環境保全対策

連続水素製造試験装置からの排水は、茨城県公害防止条例施行規則に定められた排水基準を満たすよう、排水処理装置にて中和処理され、排水される。また、排出される気体は、換気設備の吸着装置にて、大気汚染防止法に定められた排出基準を満たすよう、有害成分を吸着除去した後、大気中へ放出される。(3.2.4 項及び 6.2.3 項参照)

本試験装置から出る廃棄物として、吸着剤（活性炭）がある。吸着剤は、定期的に交換する際に、産業廃棄物業者に依頼して処理する。

6.4 異常時の通報連絡体制と方法

異常時の通報は、大洗研究所防護活動要領に従って定めた核熱利用研究部の異常時通報体制系統にもとづいて行う。

6.5 異常時の応急措置マニュアルと訓練

本試験装置の完成後、工程別特性試験開始までに、「運転要領書（異常時対処マニュアル）」を整備し、マニュアルにそった応急措置訓練を実施する。

7. まとめ

熱利用技術研究室では、高温ガス炉の熱利用プロセスの候補である熱化学水素製造法 I S プロセスの研究開発を進めており、水素発生量毎時 50NL 規模の連続水素製造試験装置を用いた閉サイクル運転制御方法に関する研究を予定している。連続水素製造試験装置は小規模ではあるが、硫酸、ヨウ素、ヨウ化水素酸等の有害な薬品を扱うため、安全性に対する十分な配慮が必要であり、製作から実験における安全管理に役立てることを目的に、連続水素製造試験装置の設計製作仕様から装置を用いた試験内容にわたって安全性について検討した。

本報告書は、I S プロセスによる連続水素製造試験の安全性に関する最初の検討結果であり、試験研究における安全確保の基礎資料となるものである。今後は、5章に述べた「運転要領書」を整備するとともに、その内容について不断の見直しを行い、連続水素製造試験装置を用いた研究開発の安全指針として充実させていく方針である。

謝辞

本資料の取りまとめに際し、大洗研究所所内一般施設安全審査委員会での質疑を反映させ、改訂を重ねた。この間、当時の一般施設安全審査委員長 管理部次長 大畑勉氏をはじめ、所付次長 大岡紀一氏、管理部 山崎弘司氏、工務課長 長谷川進氏、材料試験炉部照射第2課課長代理 本間健三氏、高温工学試験研究炉開発部調査役 佐藤治志氏、国際原子力総合技術センター研究主幹 佐伯正克氏の各委員、ならびに委員会幹事をされた保安全管理課の斎藤春雄氏に、貴重なご意見をいただき、また、大変お世話になった。ここに謝意を表します。

表 2-1 連続水素製造試験装置主要諸元

装置目的	: ISプロセスに基づく水の熱化学的分解による水素製造 閉サイクル運転制御方法の開発
装置能力	: 水素製造量 50 $\text{kg}/\text{時}$
装置構成	: ブンゼン反応工程機器、硫酸分解反応工程機器 HI分解反応工程機器、計測制御／分析設備 付帯設備(排水処理・排気処理・電気設備)
加熱方式	: 電気ヒーター
装置材質	: 石英ガラス、硼ケイ酸ガラス&テフロン
装置サイズ	: 5,300mm長 x 3,950mm幅 x 5,250mm高
装置特徴	: <ul style="list-style-type: none"> - 重力利用した設備構成 - 精密な反応器温度コントロール - ホールドアップ小の配管／機器 - ヨウ素析出防止対策 - 多様な運転モード対応 - 安全対策

表 2-2 機器の警報

計測点	対象異常事象	警報設定値	根拠
硫酸分解器用ヒーター上部 下部	ヒーター上部温度高 下部温度高	870℃ 870℃	通常運転値+20℃ 通常運転値+20℃
H I 分解器用ヒーター上部 下部	ヒーター上部温度高 下部温度高	520℃ 520℃	通常運転値+20℃ 通常運転値+20℃
トレースヒーター	トレース温度低	70-113℃	通常運転値-10℃
反応液移送ポンプ吐出	圧力 高	2.0kg/cm ² G	通常運転値+ 0.5kg/cm ²
硫酸精製塔ボトムポンプ吐出	圧力 高	1.3kg/cm ² G	通常運転値+ 0.5kg/cm ²
硫酸精製塔塔頂	圧力 高	0.25kg/cm ² G	通常運転値+ 0.2kg/cm ²
脱硫塔塔頂	圧力 高	0.25kg/cm ² G	通常運転値+ 0.2kg/cm ²
硫酸リサイクルポンプ吐出	圧力 高	1.3kg/cm ² G	通常運転値+ 0.5kg/cm ²
硫酸濃縮塔塔頂	圧力 高	0.25kg/cm ² G	通常運転値+ 0.2kg/cm ²
I 2 溶液リサイクルポンプ吐出	圧力 高	1.3kg/cm ² G	通常運転値+ 0.5kg/cm ²

通常運転値＝使用圧力、使用温度（3.3節参照）

表 2-3 自動停止機器

計測異常事象	運転停止機器
硫酸分解器用ヒーター上部温度高 下部温度高 H I 分解器用ヒーター上部温度高 下部温度高	硫酸分解器用ヒーター 硫酸分解器用ヒーター H I 分解器用ヒーター H I 分解器用ヒーター
反応液移送ポンプ吐出圧力高 硫酸精製塔ボトムポンプ吐出圧力高 硫酸リサイクルポンプ吐出圧力高 I 2 溶液リサイクルポンプ吐出圧力高	反応液移送ポンプモーター 硫酸精製塔ボトムポンプモーター 硫酸リサイクルポンプモーター I 2 溶液リサイクルポンプモーター

表3-1. 連続水素製造試験装置(毎時50NL規模)関係法規

	関係法規	規制
硫酸 H ₂ SO ₄	消防法	消防法第9条の二第一項六危険物政令第一条の10の(別表2)により保有量200kg以上は届け出必要(*1)
	労働安全衛生法	特定化学物質第3類に相当、適用外(*2)
	毒物及び劇物取締法	硫酸は劇物に相当、適用外(*3)
亜硫酸ガス SO ₂	高圧ガス保安法	圧力10Kを超える場合は規制対象
	大気汚染防止法	(煙突高3mとして排出口で1ppm以下) 設計: 排出口0.1ppm
	労働安全衛生法	(硫酸に同じ)
	毒物及び劇物取締法	SO ₂ は毒劇物に該当せず
ヨウ素 I ₂	消防法	消防法第9条の二第一項六危険物政令第一条の10の(別表2)により保有量200kg以上は届け出必要(*1)
	水質汚濁防止法	COD、160mg/L (=5mmol/L) 以下 ヨウ素を直接管理する法律なし
	毒物及び劇物取締法	劇物に相当、適用外(*3)
ヨウ化水素 HI	毒物及び劇物取締法	劇物に相当、適用外(*3)
	水質汚濁防止法	COD、160mg/L (=5mmol/L) 以下 ヨウ化水素を直接管理する法律なし
水素 H ₂	高圧ガス保安法	圧力10Kを超える場合は規制対象 排出時、希釈して対応

*1) 火災予防又は消火活動に重大な支障を生ずるおそれのある物質と定義されているが、消防法上の危険物ではない。

*2) 労安法の適用範囲

研究所などで自家消費のために特化物を扱う場合は作業主任者選任などの法律適用外となる。

*3) 毒劇法の適用範囲

販売又は授与の目的で行う製造について規定しているもので、工場や研究所などで自家消費のために毒物や劇物を製造する場合はこの法律による登録を必要としない。

表3-2. 連続水素製造試験装置(毎時50NL規模)内 滞在量

	H ₂ SO ₄ kg	SO ₂ mol	HI kg	I ₂ kg	H ₂ mol	O ₂ mol
1 硫酸分解系(含. ブンゼン反応系) 単位:容積 軽液部 1.4 liter + 2.8liter (*) 濃硫酸部 1.0 liter vapor部 1.5 liter	2 + 4 (*) (46wt% 硫酸) 2 (90wt% 硫酸)	0.05				0.01
2 HI分解系 単位:容積 重液部 2.6 liter + 12liter (*) ヨウ素部 2.3 liter vapor部 10.0 liter			1 + 4 (*)	5 + 23 (*) 9	0.01	
計	8kg 5 liter (液)	0.05 1liter (気)	5kg	37kg	0.01 0.3liter (気)	0.01 0.3liter (気)
消防法 労安衛法	200kg			200kg		
大洗地区安全衛生管理規則 濃硫酸 二酸化硫黄 硫酸、ヨウ素	60kg 100リットル(液)	50Nm ³ (気)				

(*) 工程別試験の際には閉サイクル運転時の滞在量にタンク内の溶液量が加わる。タンク内の滞在量を+で示した。

表3-3. 連続水素製造試験装置(毎時50NL規模) 試薬・廃液保管量

	HTTR付属建家Ⅱ小実験室	HTTR建設管理棟実験室	合計
1 試薬 96wt% 硫酸 48wt% 硫酸 56wt%ヨウ化水素酸 ヨウ素(粒状)	500g × 2本 = 1kg 500g × 20本 = 10kg 500g × 20本 = 10kg 500g × 20本 = 10kg	500g × 10本 = 5kg 500g × 10本 = 5kg 500g × 20本 = 10kg	1kg (0.6 リットル) 15kg (11 リットル) 15kg (9 リットル) 20kg
2 廃液 混酸(HI, H ₂ SO ₄ , I ₂)	10リットル × 2缶 (20リットル・ポリ缶入り)		max 60kg (20 リットル)

高温ガス炉で得られる約1000°Cの高温核熱を用いて水を分解し、水素を製造するプロセス

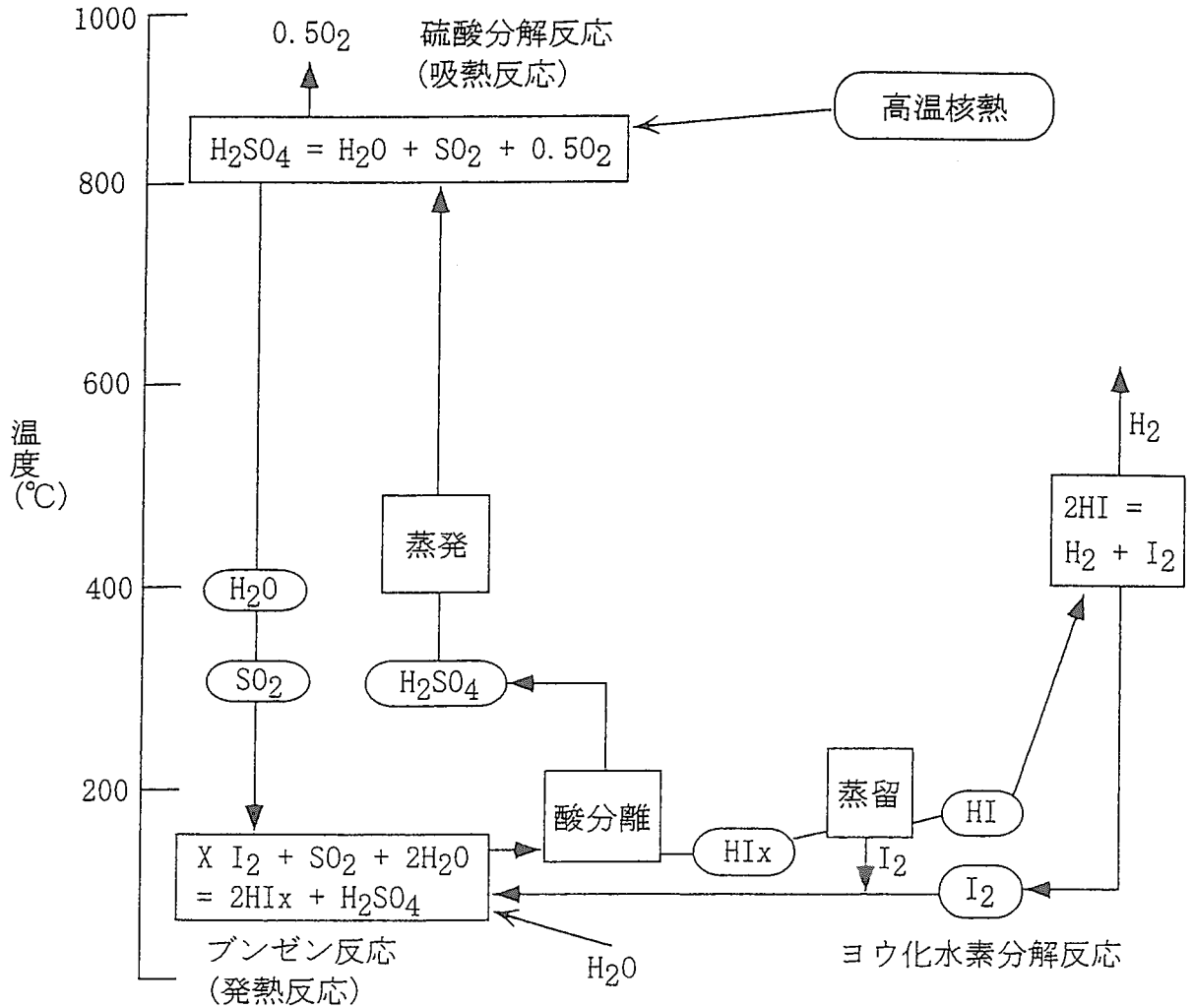


図 2-1 I Sプロセスの反応構成

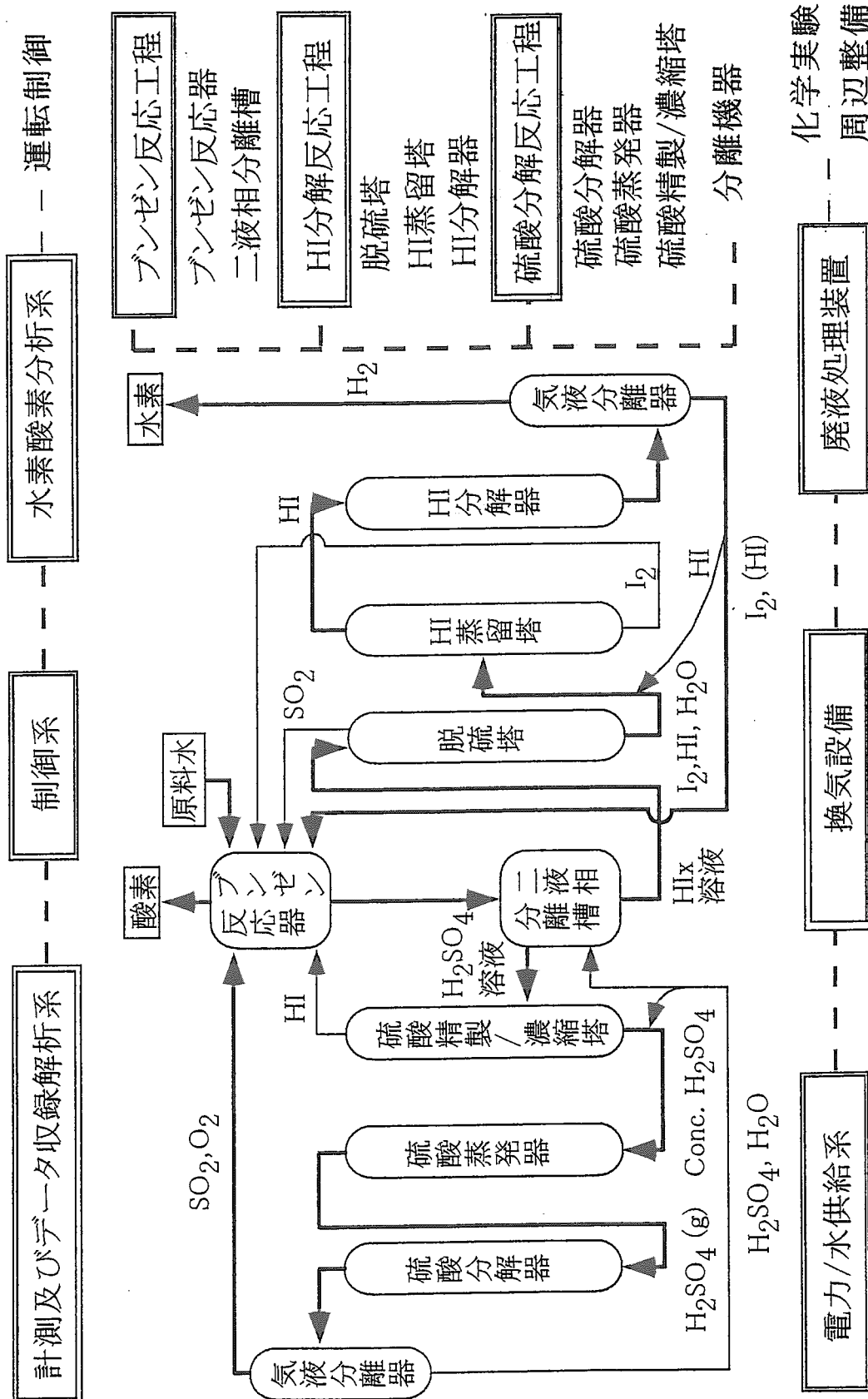


図2-2 ISプロセスの簡略フロー

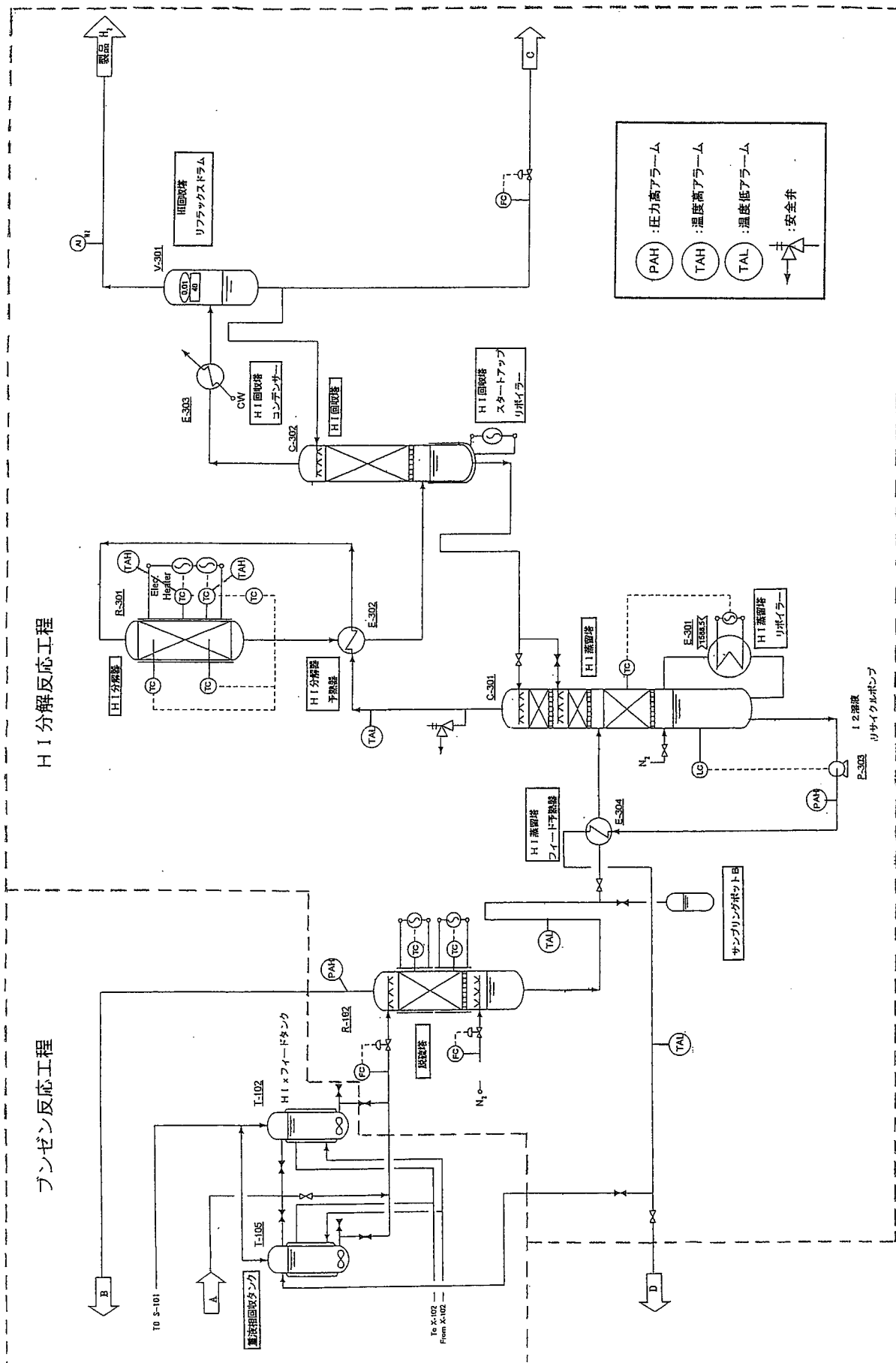
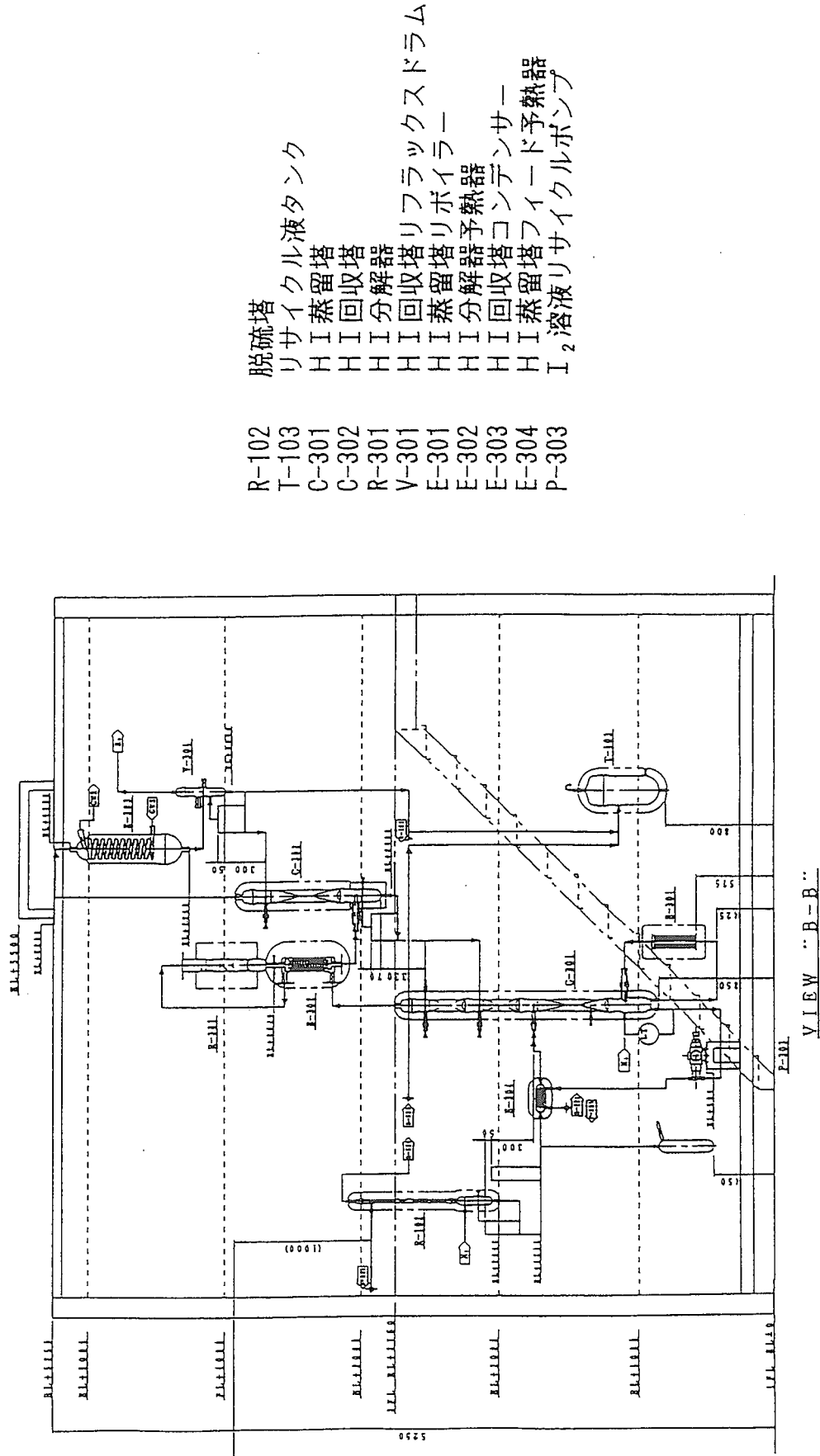


図 2-3 プロセスフローダイアグラム (2/2)

機器配置図 HI分解反応工程



- | | |
|-------|----------------------------|
| R-102 | 脱硫酸イリサイクラー |
| T-103 | 液タンク |
| C-301 | HI蒸留塔 |
| C-302 | HI回収塔 |
| R-301 | HI分解塔 |
| V-301 | HI回収塔 |
| E-301 | HI蒸留塔 |
| E-302 | HI分解塔 |
| E-303 | HI回収塔 |
| E-304 | HI蒸留塔 |
| P-303 | I ₂ 溶液リサイクラーポンプ |

図 2-4 機器配置図 (3/3)

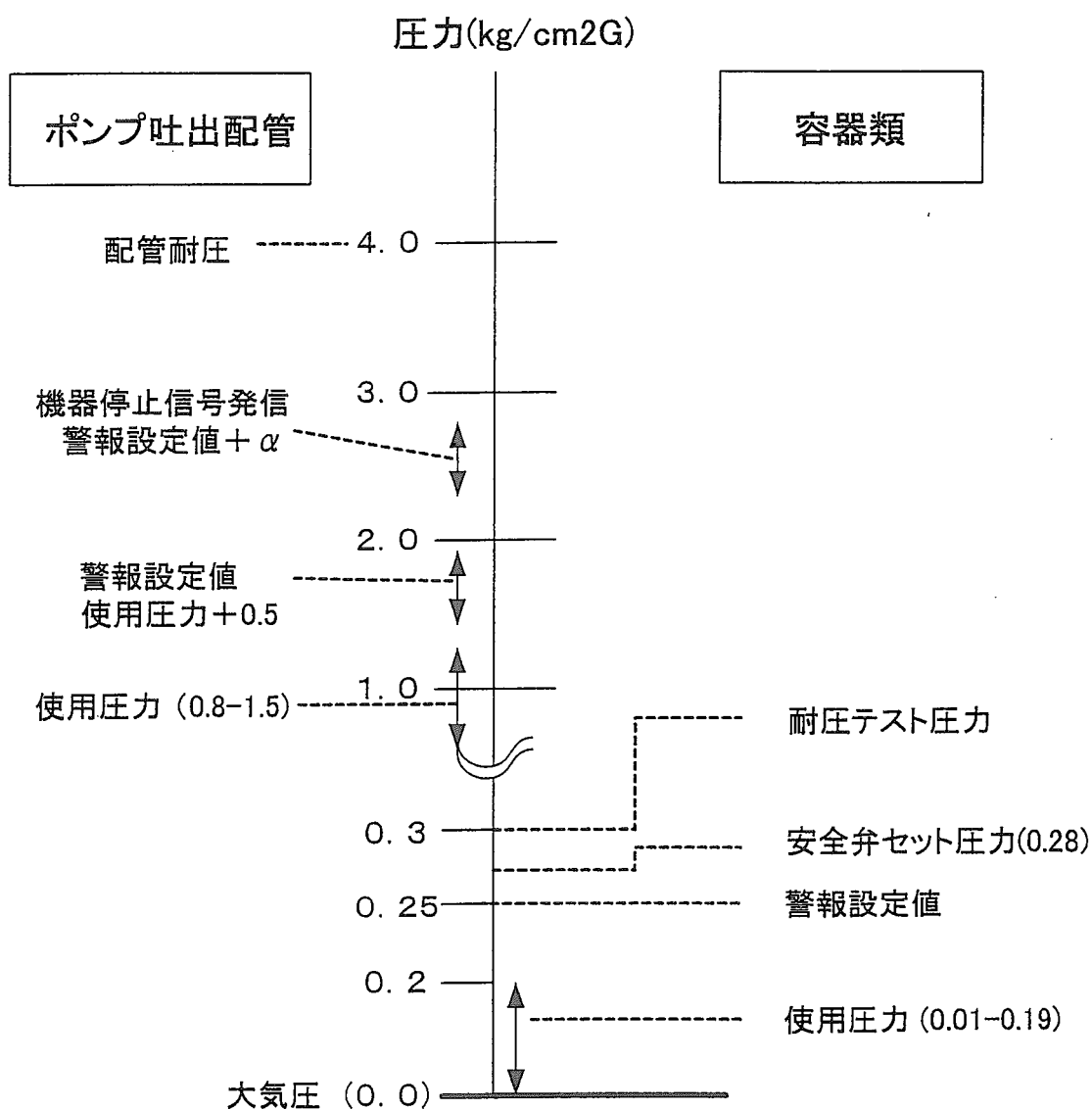


図2-5 警報／機器停止圧カレベル

◇ アラーム : プラント電源盤上に表示

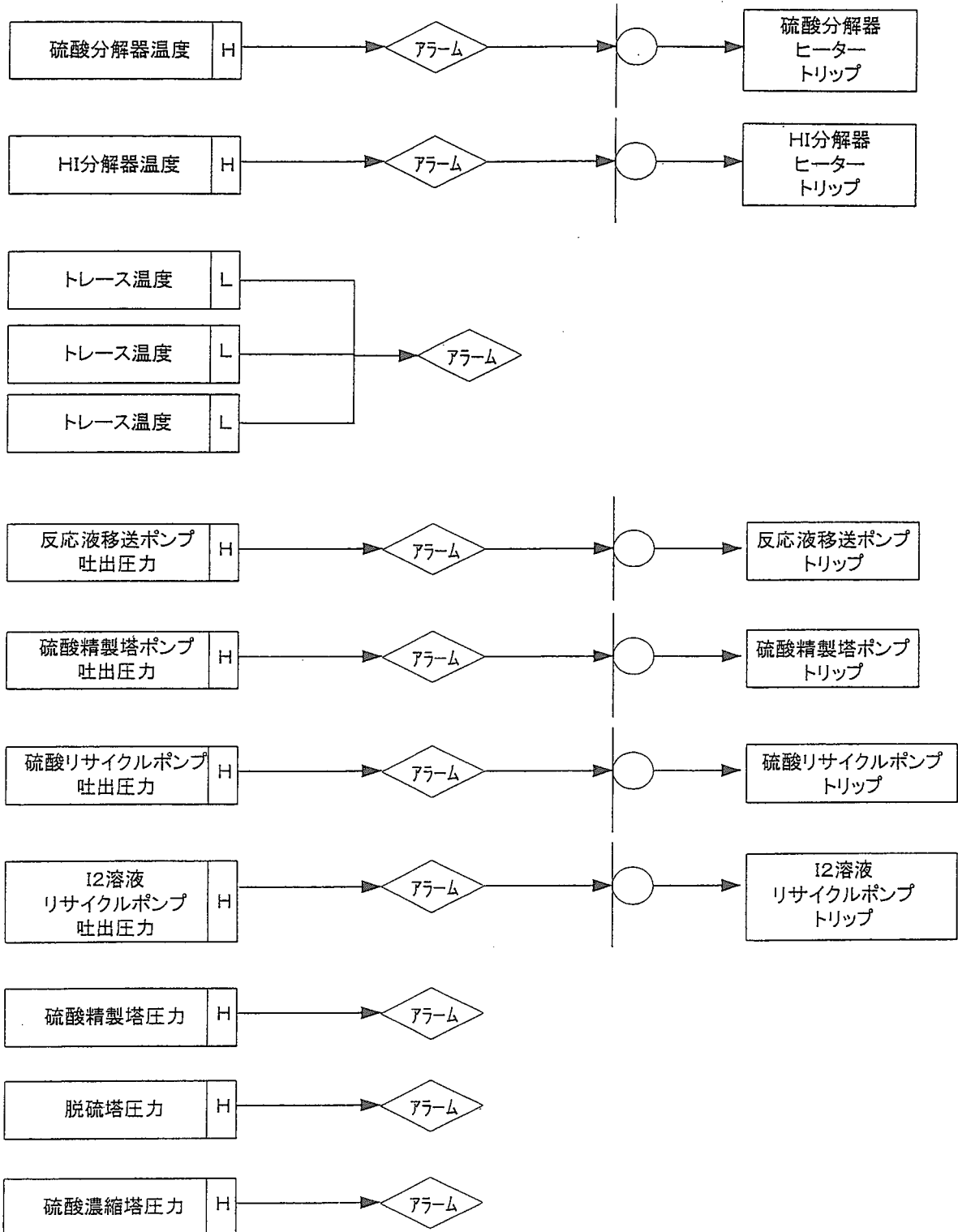
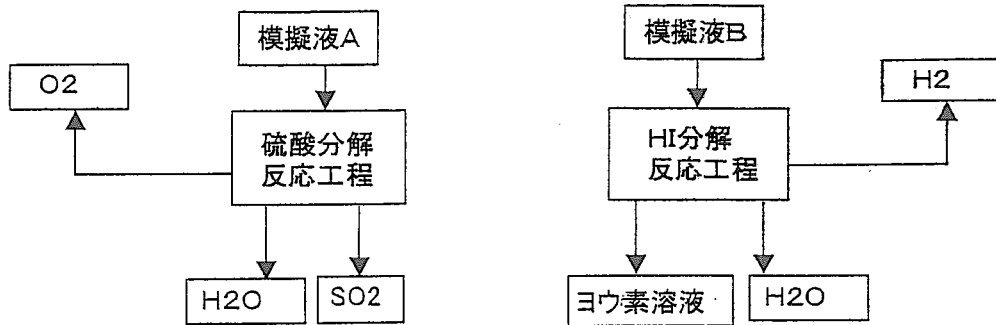
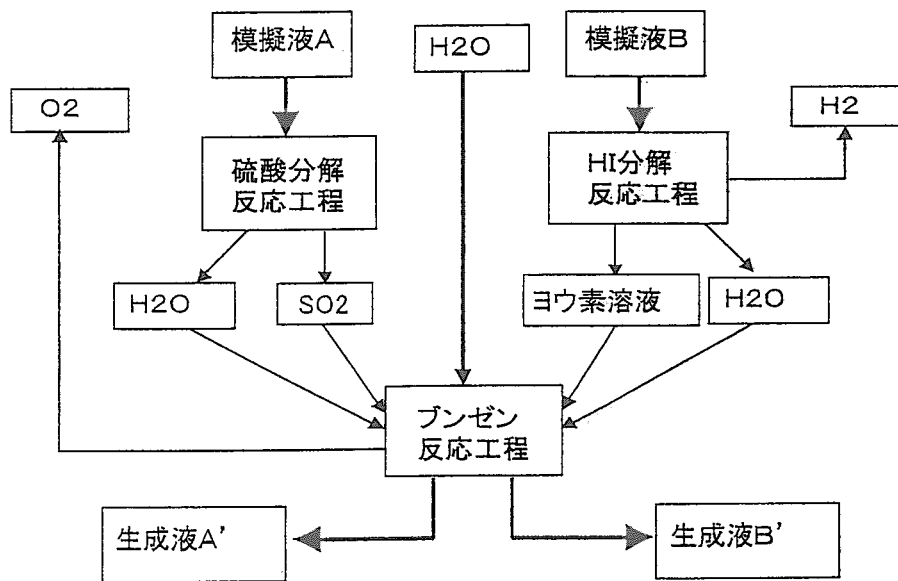


図2-6 アラーム/トリップ 系統図

運転モードⅠ：硫酸分解反応工程、HI分解反応工程 各々ワンスルー単独運転



運転モードⅡ：ブンゼン反応工程を組み込んで プロセス全体をワンスルー運転



運転モードⅢ(final)：模擬液使用なし、プロセス全体を閉サイクル運転

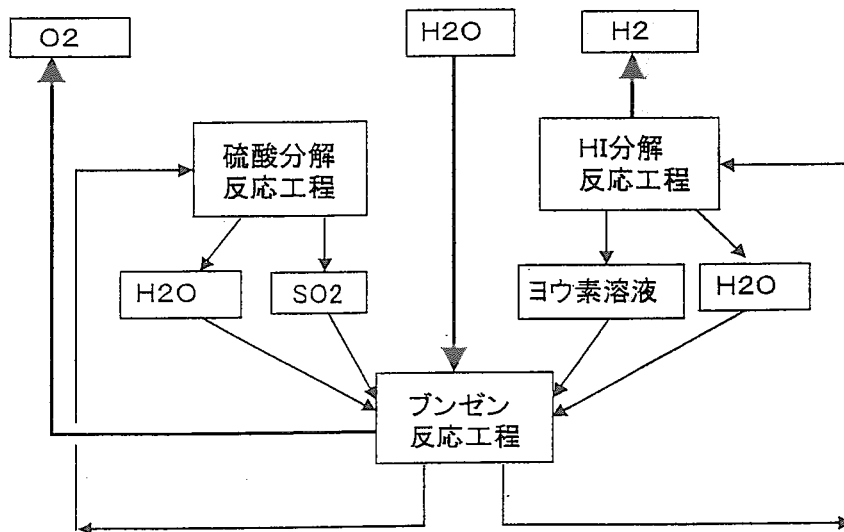


図2-7 連続水素製造試験装置運転モード

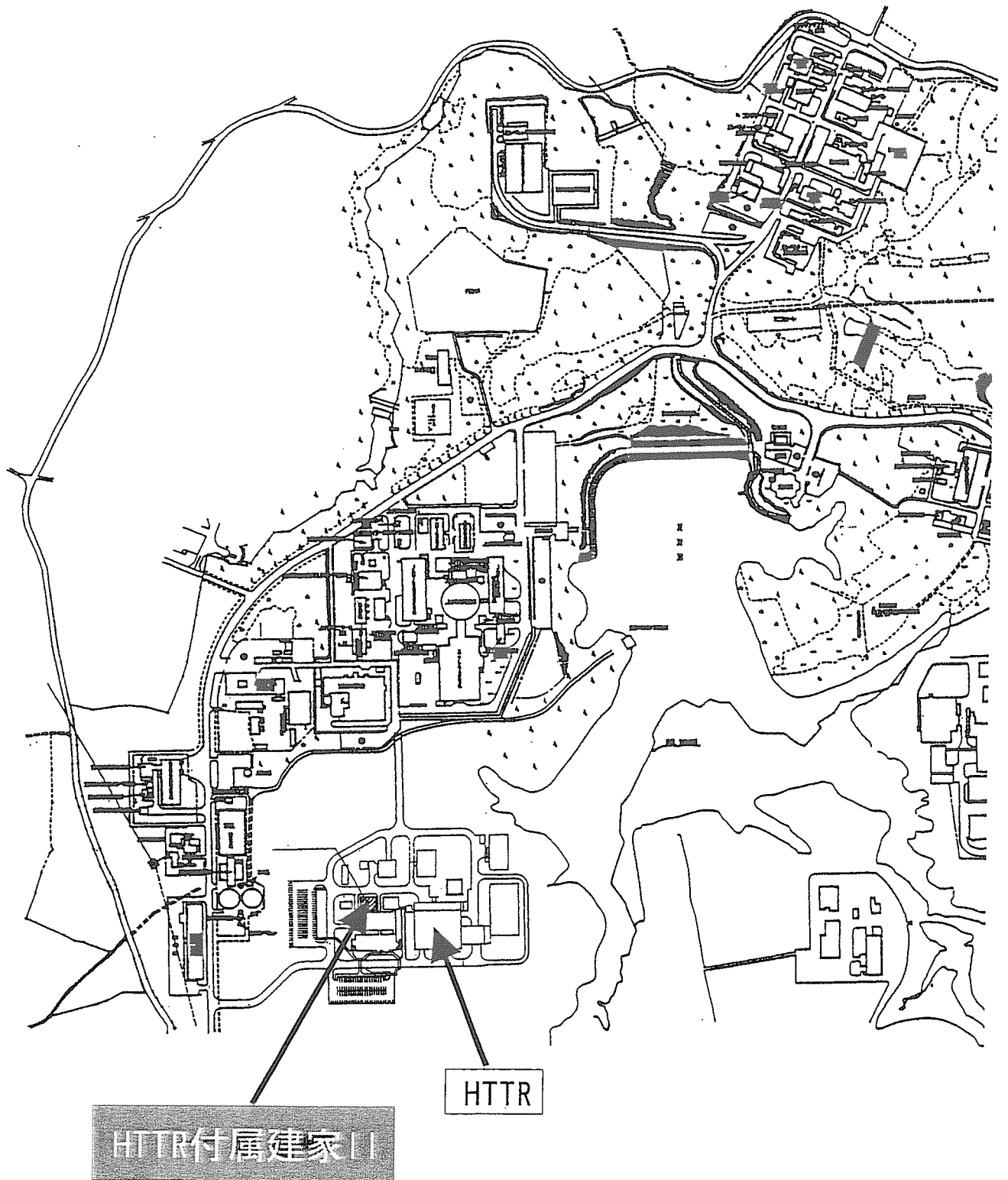


図 2-8 HTTR附属建家II の位置

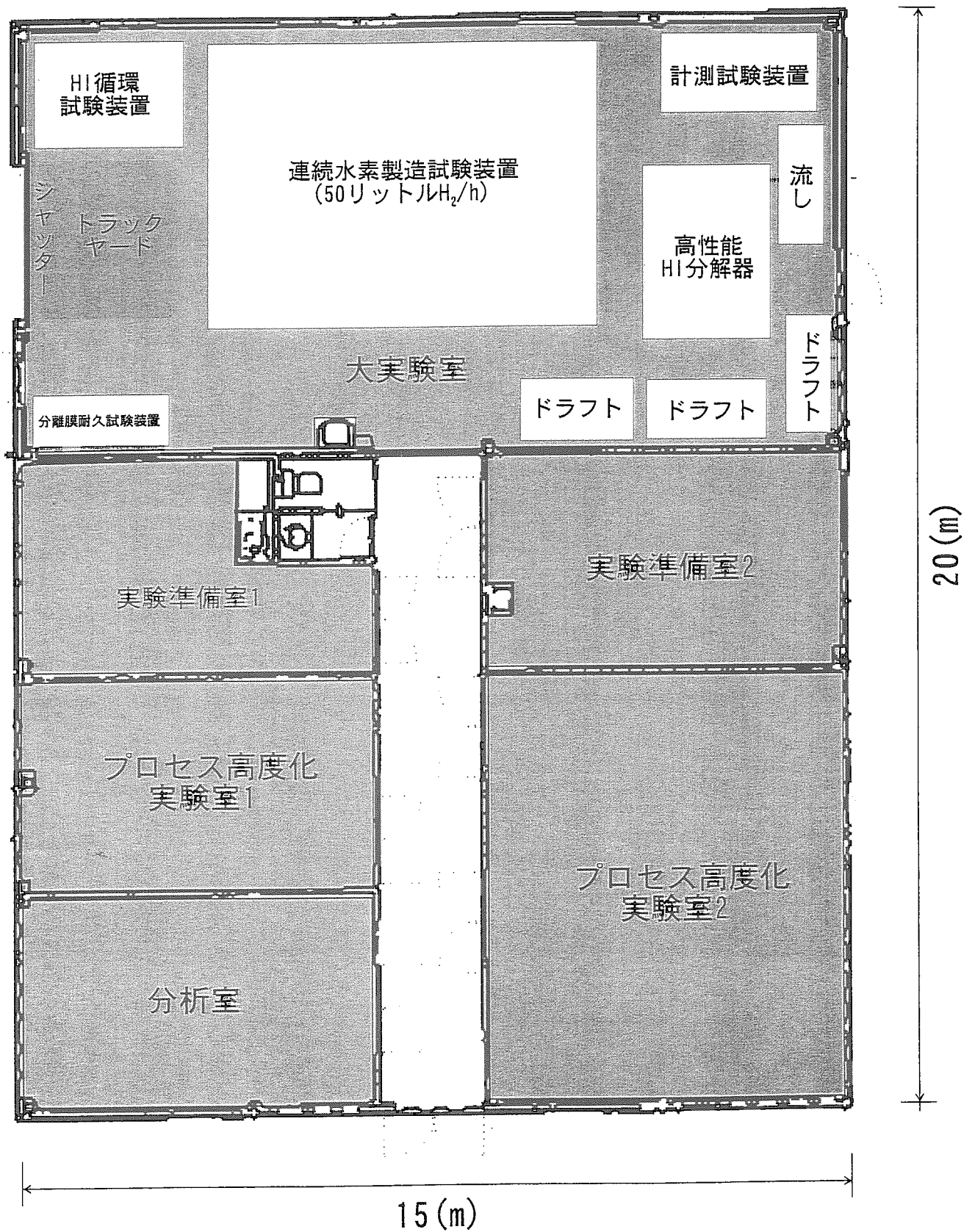


図 2-9 HTTR付属建家II配置図

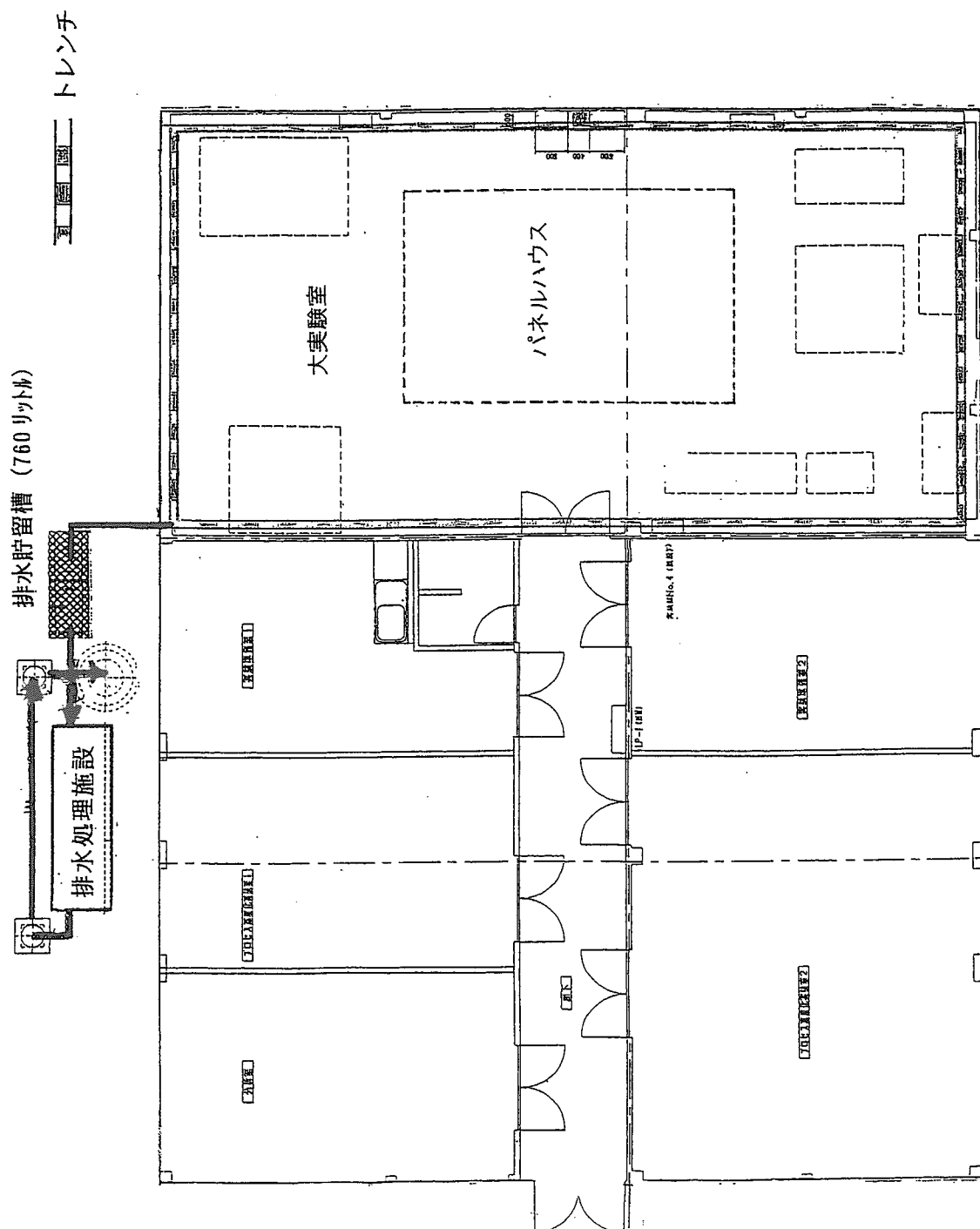


図 3-1 排水処理系統図

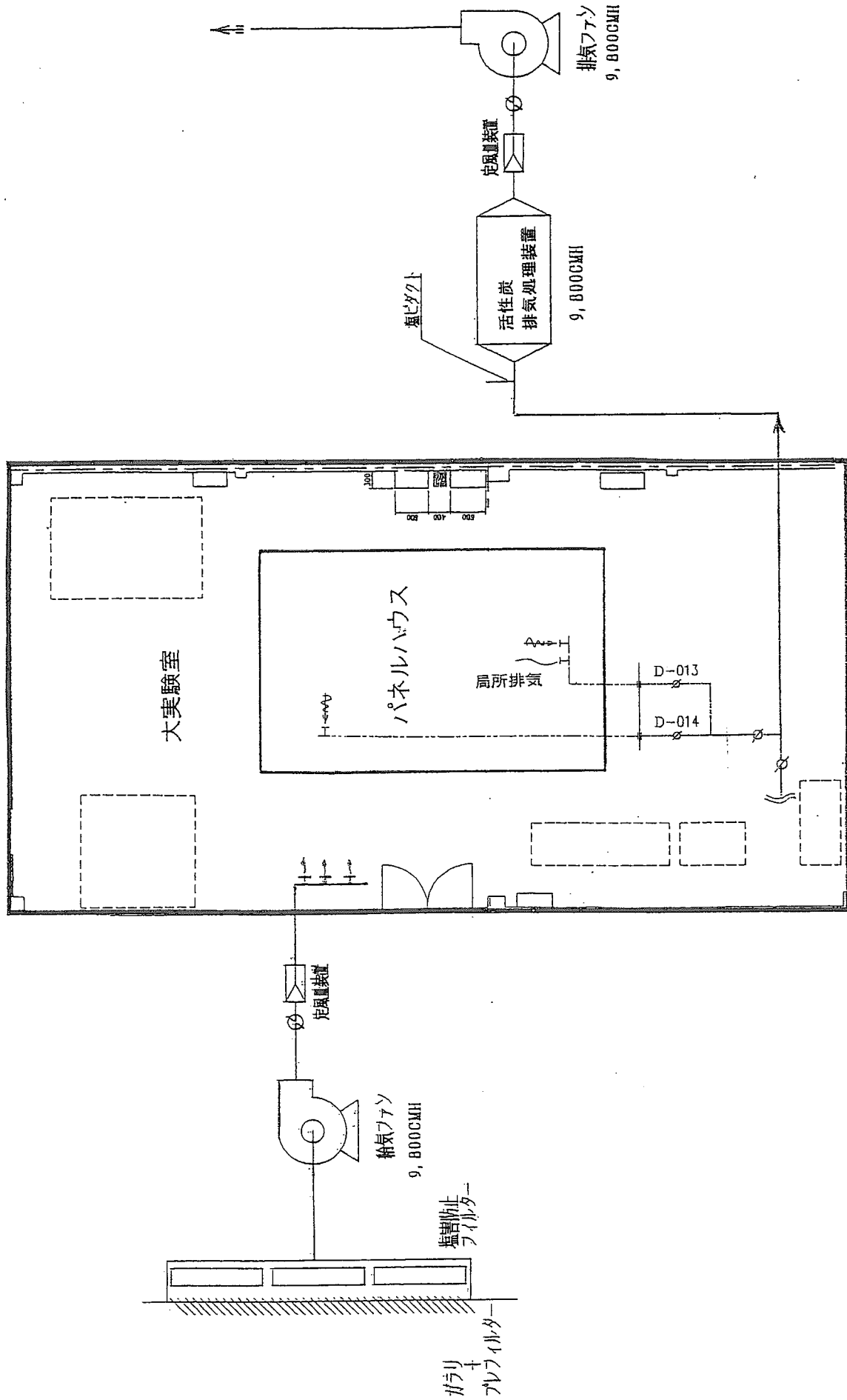
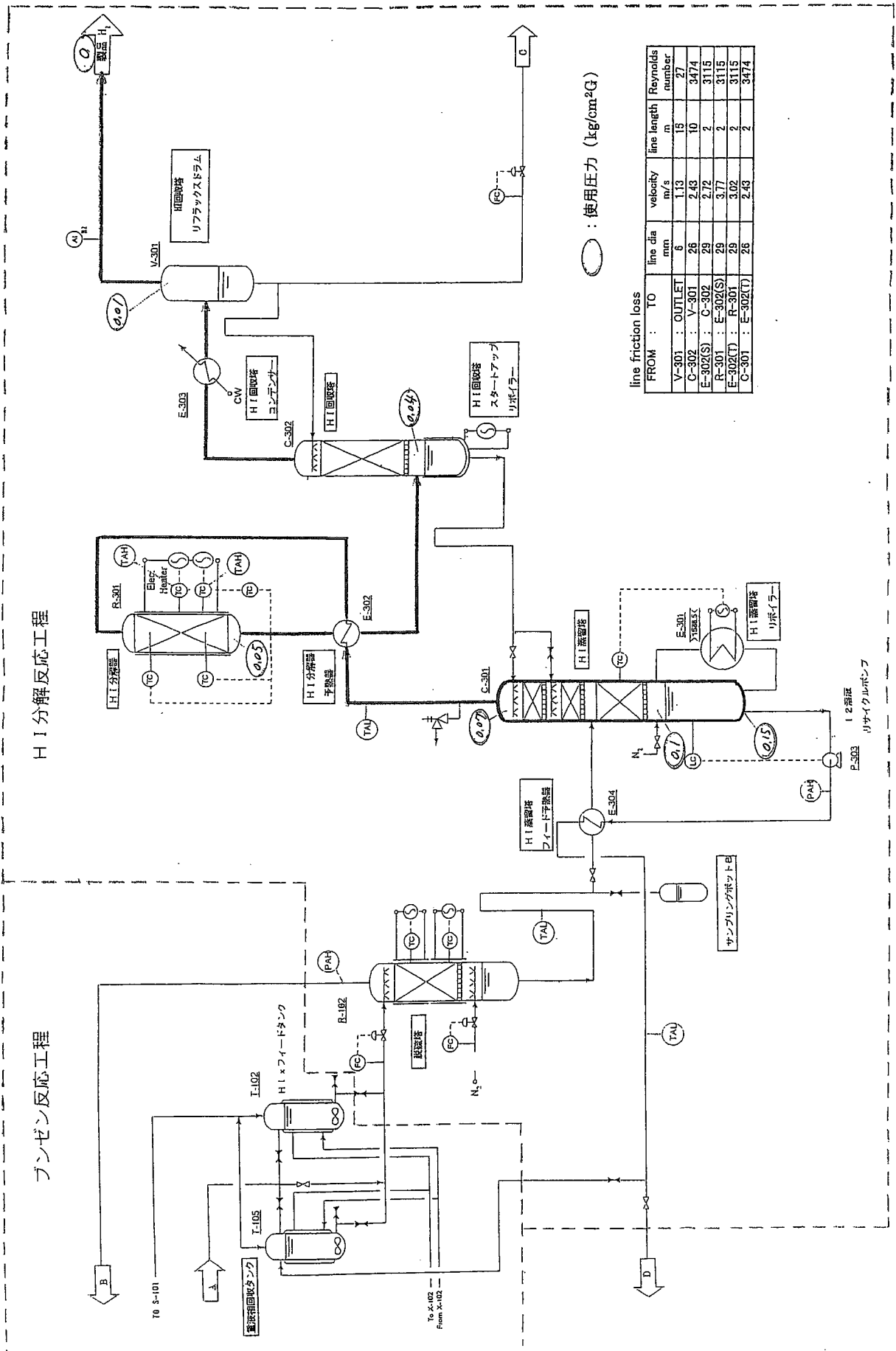


図3-2 排気系統図



line friction loss

FROM	TO	line dia mm	velocity m/s	line length m	Reynolds number
V-301	OUTLET	6	1.13	15	27
C-302	V-301	26	2.43	10	3474
E-302(S)	C-302	29	2.72	2	3115
R-301	E-302(S)	29	3.77	2	3115
E-302(T)	R-301	29	3.02	2	3115
C-301	E-302(T)	26	2.43	2	3474

○ : 使用圧力 (kg/cm²G)

図3-5 C-301系の使用圧力

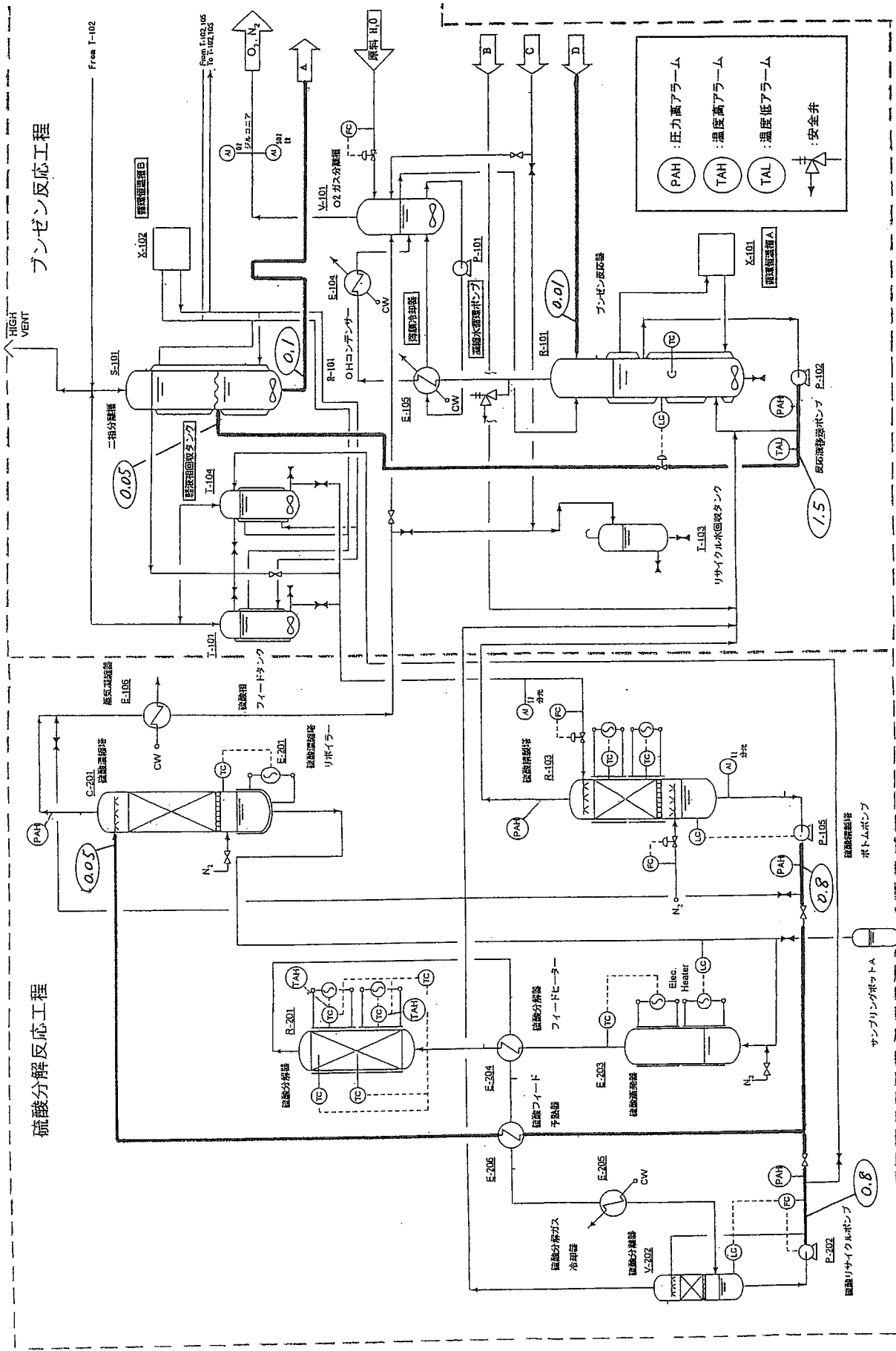


図3-6 使用圧力0.7~1.5kg/cm²Gの配管系(1/2) ○ : 使用圧力 (kg/cm²G)

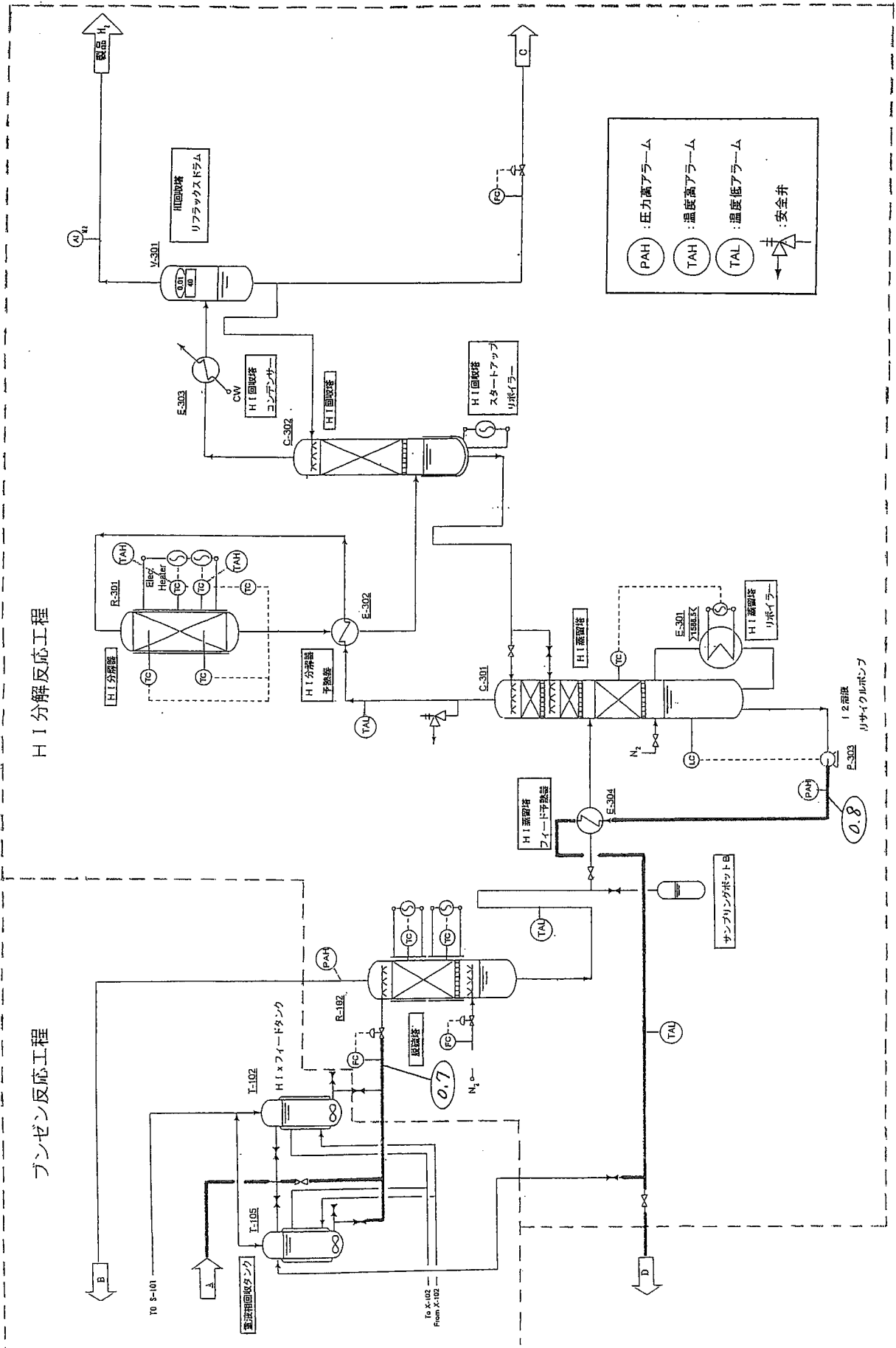


図3-6 使用圧力0.7~1.5kg/cm²Gの配管系(2/2) ○ : 使用圧力(kg/cm²G)

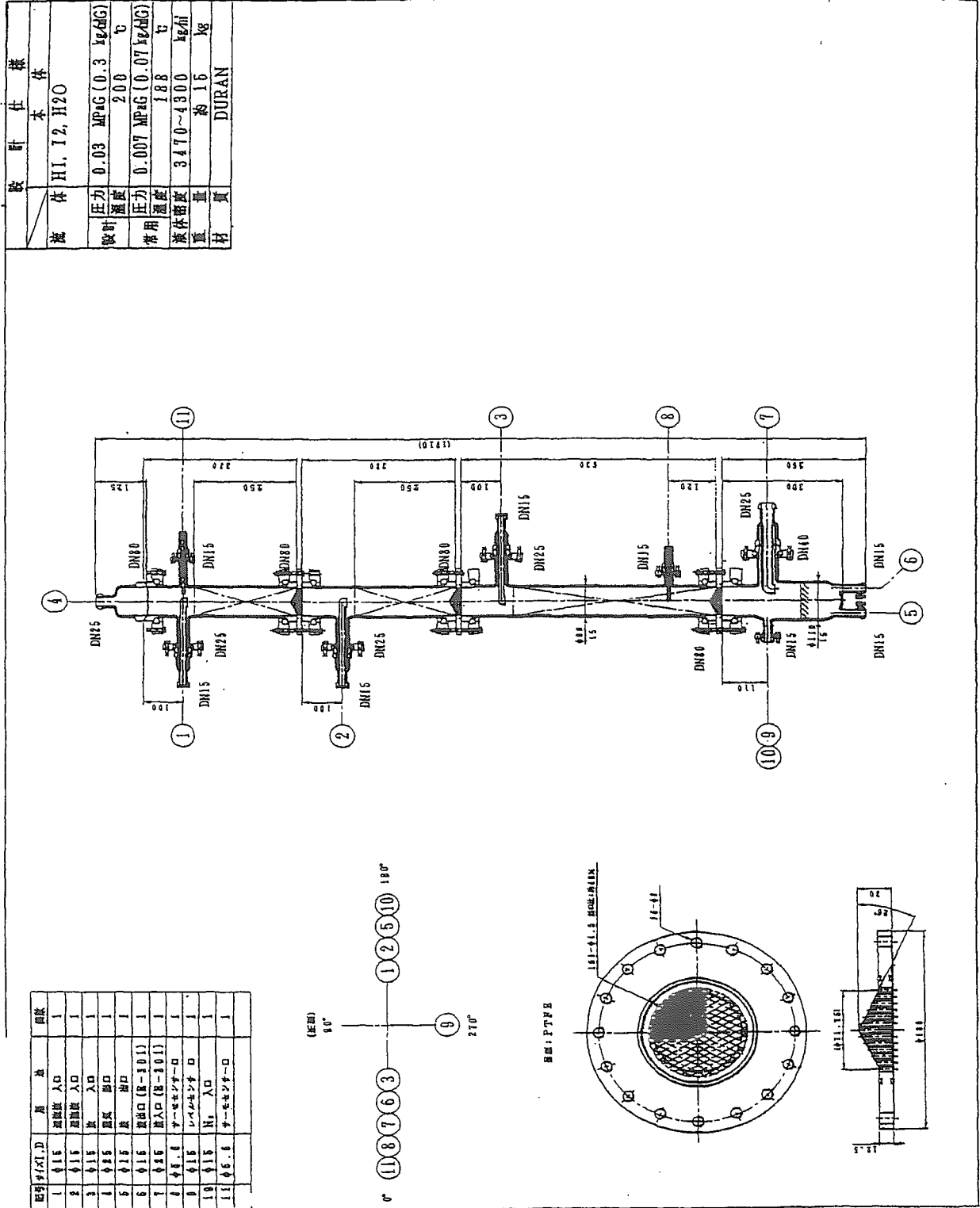


図3-7 代表的な塔 (HI 蒸留塔)

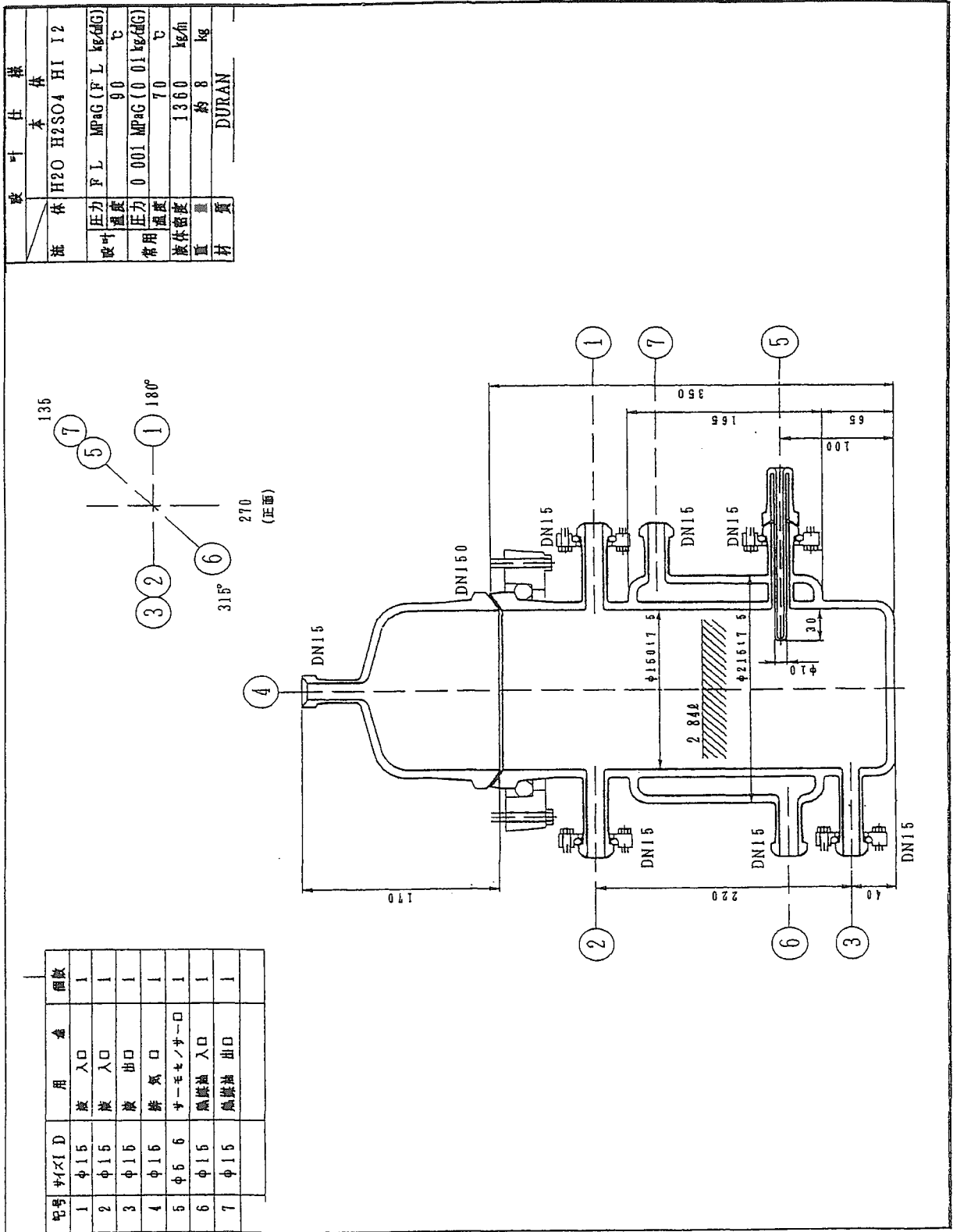


図3-8 代表的な容器 (軽液相回収タンク)

付録 1. 容器下部に設置するトレイについて

1. 目的

パネルハウス内に設置する機器(容器, 反応器等)の下部にはトレイを設置する. 本トレイは, 機器等からの漏洩液を受けとめることにより, 運転, 点検作業時に従事者を防護するものである.

2. 液の漏洩

各機器とパイプの接続部には O リング(ヨウ素, ヨウ化水素酸, 硫酸で実績のある)を用いており, 液が漏洩する可能性は低い. 本トレイは, 少量の漏れに対処でき(万全を期す意味で), かつ容器破損時等に大量の漏洩に備えるものである.

3. 設置に際して

3.1 位置と材質

トレイは1階では実験室の床面, 2階ではグレーチング面に設置する(図 1). 設置位置は容器の下部で通路以外の部分とする. 材質は塩化ビニルとし, 必要に応じて表面をテフロンシートで覆うものとする.

3.2 大きさや形状

トレイの大きさは, その上部に設置されている機器の全ホールドアップに比して十分な大きさを持つようにする. 例えば, パネルハウス 2F に設置されている機器の総内容を約 30 リットル(安全を考慮して過大に見積もっている)とすると, この溶液と同等の体積を持つ直方体状のトレイの大きさは, 底面積 幅 2m×奥行き 0.5m とすれば, 高さ 0.03m である. 従って高さ 0.1m 程度のトレイを設置すれば 3 倍強の余裕を持たせることができる. トレイの大きさはこのように決定する.

4. 後処理

容器の破損等を理由として溶液が大量に漏洩した場合において, トレイに溜まった溶液の処理法を以下に示す.

- (a) 換気設備の風量を増やすとともに溶液が室温まで冷却するまで放置する.
- (b) トレイの中身は手作業で取り除く. 室温まで冷却した溶液の蒸気圧は小さいものの蒸気の吸引に注意し必要に応じて防毒マスクを使用する. 飛散したガラスがある場合は, ゴム手袋にさらに軍手をはめる等の対処をして作業にあたる.

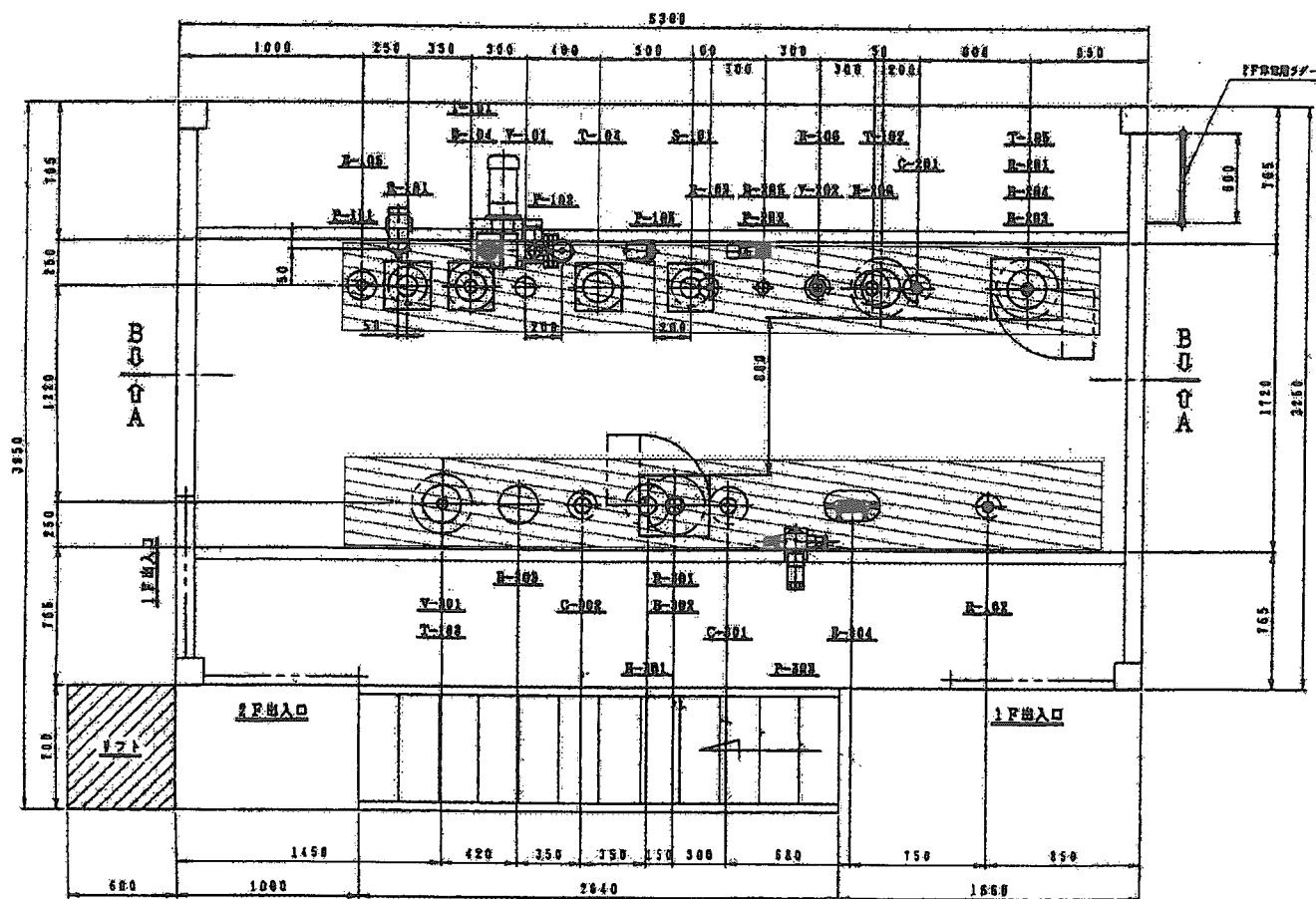


図 1. トレイの設置位置

付録 2. ガラス管に生じる応力と固有振動数

1 目的

本機器の耐震性向上対策のため架台に取り付けられた機器に荷重が加わった場合に生じる応力および固有振動数を評価する。

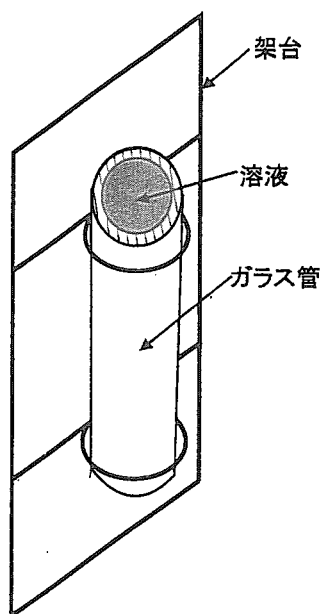


図 1: 架台に固定されたガラス管

2 考え方

長尺のガラス管が架台に取り付けられているとする。このガラス管を“両端支持ばり”と考える。“はり”は溶液を満たしたガラス管とし、移動支点で支持されているとする。地震によって生じる加速度に起因して、架台が加速度運動し、“はり”は相対的な荷重を均等に受けるものとする。簡単のため荷重は“はり”に静的に作用するとする。

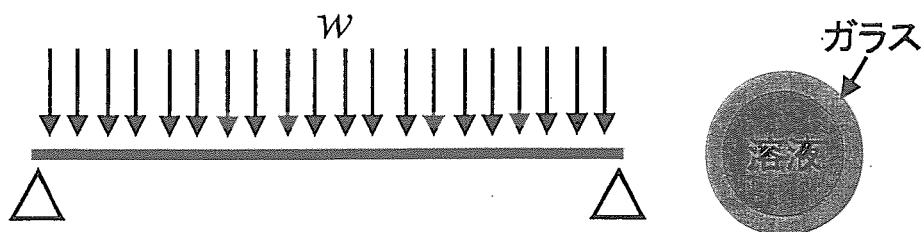


図 2: 両端支持ばり

3 計算例

3.1 最大引張(圧縮)応力

計算条件は HI 蒸留塔を想定して

肉厚	$t=0.005$ m
外径	$d_2=0.090$ m
内径	$d_1 = d_2 - 2t$ m
長さ	$l=2$ m
ガラス密度	2230 kg/m ³
溶液密度	4000 kg/m ³
加わる加速度	$G=0.36 \times g$ m/s ²

とする。重力加速度: g , 単位長さあたりの重量(管+溶液)を m kg, 単位長さあたりの荷重 w N/m とすると

$$w = mG \quad (1)$$

である。2重管の断面2次モーメント I_z , 両端支持ばりに生じるモーメント M , 断面に生じる応力 σ は以下の通りである。

$$I_z = \frac{\pi}{64}(d_2^4 - d_1^4) \quad (2)$$

$$M = 0.5wlx - 0.5wx^2 \quad (3)$$

$$\sigma = \frac{M}{I_z}e_1 \quad (4)$$

ここで, l m は“はり”の長さ, x m は“はり”端から距離である。最大応力は“はり”の中央 $x = l/2$ かつ 中心からの距離 $e_1 = d_2/2$ の点で発生する。この時の応力を σ_{max} とすると

$$\sigma_{max} = 15.5 \text{ kg/cm}^2 \text{ (最大変位 : } 0.000227\text{m)} \quad (5)$$

である。また, ガラス管 (DN15) を想定して $d_2=0.021$ m, $d_1=0.015$ m, $l=2.0$ m のときは

$$\sigma_{max} = 29.0 \text{ kg/cm}^2 \text{ (最大変位 : } 0.00183\text{m)} \quad (6)$$

となる。図3に支持点間長さ と最大応力の関係を示す。

3.2 固有振動数について

図2に示した一様断面の“はり”の横振動数 f は以下であらわされる。

$$2\pi f = \lambda_i^2 \left(\frac{EI}{\rho A} \right)^{0.5} \quad (7)$$

$$\sin(\lambda l) = 0 \quad \text{振動数方程式} \quad (8)$$

ここで、ガラスの縦弾性係数: $E = 6.3 \times 10^9 \times g \text{ Pa}$, 固有値の係数: λ , “はり”の密度: ρ , “はり”の断面積: A である。最も低周波である振動次数 $i = 1$ の時の f と “はり”の長さとの関係を図 4 に示す。

図には HI 蒸留塔とガラス管 (DN15) とを想定した場合をプロットしてある。前項と同様に、HI 蒸留塔を想定した場合には $f = 22.3 \text{ Hz}$, ガラス管 (DN15) を想定した場合には $f = 7.87 \text{ Hz}$ である。

4 耐震性向上対策

4.1 応力と振動数

4.1.1 ガラスの強度

下記表 1 に示した値: 40 kg/cm^2 は、安全率を見込んだ強度である。ちなみに、JISR3802-1995 によれば、ガラスの破壊は、引張応力によって起こり、その強度はガラス表面の状態によって影響を受ける。よって、構成部品の設計強度としては、安全率を見込んで次の値を基準としている。

- ・ すり又は研磨加工が施されている場合の引張強度 $6 \text{ N/mm}^2 = 61.2 \text{ kgf/cm}^2$
- ・ 火加工だけの場合の引張強度 $10 \text{ N/mm}^2 = 102.0 \text{ kgf/cm}^2$

ガラスの変形特性は温度と共に時間に依存しており単純ではないので、温度依存性を含んで十分な安全率を見込んだ許容応力値が定められている。ホウ珪酸ガラス (DURAN) では、最高使用温度は $200 \text{ }^\circ\text{C}$, 耐サーマルショック値は $250 \text{ }^\circ\text{C}$ とされており、安全率を考慮した引張強度は 40 kg/cm^2 とされている。石英ガラスでは、温度が上がるほど強度は増し $800 \sim 900 \text{ }^\circ\text{C}$ で最高に達し、耐サーマルショック値は $700 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上である。

4.1.2 最大引張 (圧縮) 応力

脆性材料の分離破壊に良く合致すると言われている最大主応力説にて判定する。ここでは、“はり”に発生する曲げモーメントにより断面に生じる引張 (圧縮) 応力にて評価する。この値 (図 3) がガラス (デュラン) の引張強度 (小さい方の値) より小さくなるように機器を支持する。

表 1: デュランの強度

デュランの引張強度	40 kg/cm^2
デュランの圧縮強度	1000 kg/cm^2

4.1.3 固有振動数

構造物に関して地震の震動的特性を表現する上では、応答曲線(固有周期 sec. に対して加速度応答最大値をプロットしたもの)がよく用いられる。この図から一般的に、応答値は固有周期 0.1 ~ 1 秒(振動数:10 ~ 1 Hz)で大きくなり、減衰比が小さいほど増大することが知られている。従って、耐震性の向上対策として

- (1) 構造物等の固有周期を 0.1 秒以下(固有振動数を 10Hz 以上)にする
- (2) 構造物等の固有周期を 1 秒以上(固有振動数を 1Hz 以下)にする
- (3) 構造物等の固有周期が 0.1 ~ 1 秒である時(固有振動数が 10 ~ 11Hz である時)は減衰を付与する

が考えられる。

本件は支持された機器に関する問題ではあるが、これらの構造物等に関する考え方を参考とし、(1)の方法を以て耐震性向上対策とする。つまり図 3 を用いてガラス管の固有振動数が 10 Hz 以上になるように機器類を支持する。

4.2 支持点間の距離の決定

引張応力については、保守的な余裕度 3 を自主的に定めた。以下の表のいずれも満たすように支持点間距離 l を決定し、ガラス機器据え付けに関する安全を計る。

$$\begin{array}{ll} \text{引張応力} & \sigma_{max} < \frac{40}{3} \text{ kg/cm}^2 \\ \text{固有振動数} & f > 40\text{Hz} \end{array}$$

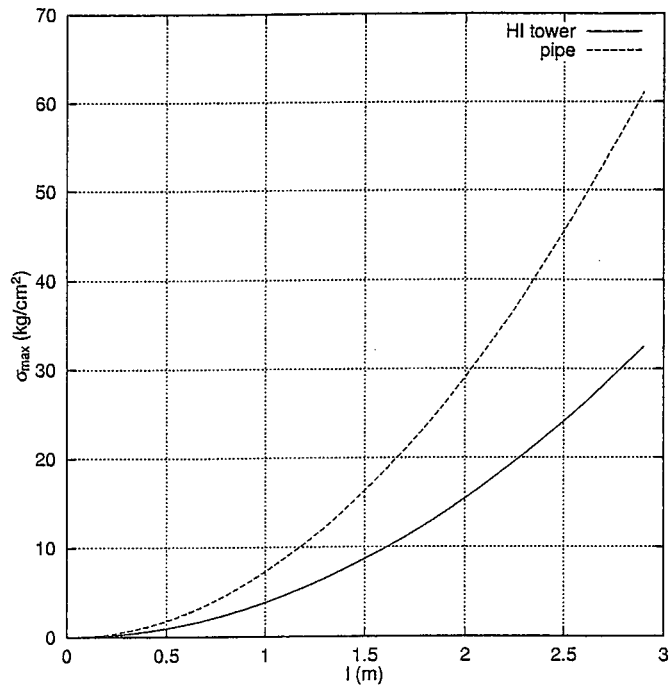


図 3: ガラス管断面に生じる最大引張 (圧縮) 応力

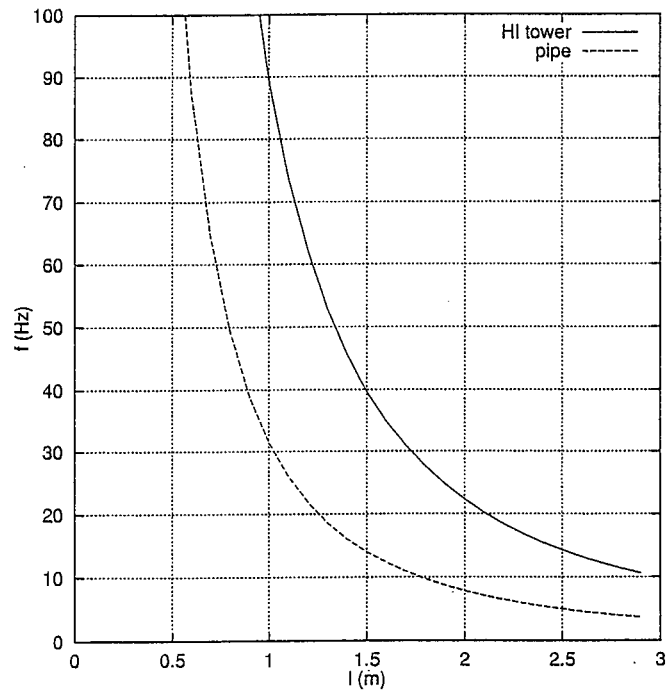


図 4: ガラス管の固有振動数

This is a blank page.

国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	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
物質質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	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
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N·m
工率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光度	ルーメン	lm	cd·sr
照射線量	ルクス	lx	lm/m ²
放射線量当量	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分, 時, 日	min, h, d
度, 分, 秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV = 1.60218 × 10⁻¹⁹ J
1 u = 1.66054 × 10⁻²⁷ kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バール	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å = 0.1 nm = 10⁻¹⁰ m
1 b = 100 fm = 10⁻²⁸ m²
1 bar = 0.1 MPa = 10⁵ Pa
1 Gal = 1 cm/s² = 10⁻² m/s²
1 Ci = 3.7 × 10¹⁰ Bq
1 R = 2.58 × 10⁻⁴ C/kg
1 rad = 1 cGy = 10⁻² Gy
1 rem = 1 cSv = 10⁻² Sv

表5 SI接頭語

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

(注)

- 表1-5は「国際単位系」第5版、度量衡局1985年刊行による。ただし、および1uの値はCODATAの1986年値による。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘルも含まれているが日常の単位なごでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表お合に限り表2のカテゴリーに分類さる。
- EC関係理事会指令ではbar, barri及び「血圧の単位」mmHgを表2のカに入れてる。

換算表

力	N (=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘度 1 Pa·s(N·s/m²) = 10 P(ポアズ)(g/(cm·s))

動粘度 1 m²/s = 10⁴ St(ストークス)(cm²/s)

圧	MPa (=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²
	6.89476 × 10 ⁻³	7.03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 10 ⁻²	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J (=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft·lbf	eV
	1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸
	9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹
	3.6 × 10 ⁵	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸
	1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1

1 cal = 4.18605 J (計量法)
= 4.184 J (熱化学)
= 4.1855 J (15 °C)
= 4.1868 J (国際蒸仕事率)
1 PS (仏馬力)
= 75 kgf·m/s
= 735.499 W

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹
	3.7 × 10 ¹⁰	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 ⁻⁴	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

