

JAERI-Tech
2001-080

JP0250007



IASCC照射試験のための
水環境制御装置に関する設計検討

2001年12月

菅野 勝・鍋谷 栄昭・森 雄一郎・松井 義典・飛田 正浩
井手 広史・板橋 行夫・小森 芳廣・塚田 隆・辻 宏和

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。
入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 滋城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。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 滋城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領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

I A S C C 照射試験のための水環境制御装置に関する設計検討

日本原子力研究所大洗研究所材料試験炉部

菅野 勝・鍋谷 栄昭・森 雄一郎*・松井 義典・飛田 正浩**
井手 広史・板橋 行夫・小森 芳廣・塙田 隆+・辻 宏和+

(2001年10月26日受理)

高経年軽水炉の信頼性・安全性を確保する上で、炉内構造物に発生するおそれのある照射誘起応力腐食割れ (IASCC ; Irradiation Assisted Stress Corrosion Cracking) は重要かつ緊急な検討課題とされており、このための材料照射研究が計画されている。このために、軽水炉 (BWR) の炉内環境を模擬した照射試験を行うことができる高度材料環境照射装置をJMTRに設置するための設計検討を進めている。

高度材料環境照射装置は、照射試験片を収納し炉内に装荷される飽和温度キャップセル、飽和温度キャップセルに高温高圧水を供給する水環境制御装置から構成される。本報告は、このうち、水質制御機能を備えた水環境制御装置に関し、各構成機器の仕様・性能等、主に、1999年度に行った設計検討の結果をまとめたものである。

大洗研究所；〒311-1394 茨城県東茨城郡大洗町成田町新掘 3607

+ 東海研究所エネルギーシステム研究部

* 外来研究員(川崎重工業(株))

** 外来研究員(原子力エンジニアリング(株))

Design of Water Feeding System for IASCC Irradiation Tests at JMTR

Masaru KANNO, Hideaki NABEYA, Yuichiro MORI*, Yoshinori MATSUI
Masahiro TOBITA**, Hiroshi IDE, Yukio ITABASHI, Yoshihiro KOMORI

Takashi TSUKADA⁺ and Hirokazu TSUJI⁺

Department of JMTR
Oarai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Oarai-machi, Higashibaraki-gun, Ibaraki-ken,

(Received October 26, 2001)

In relation to the aging of light water reactors (LWRs), the irradiation assisted stress corrosion cracking(IASCC) has been regarded as a significant and urgent issue for the reliability of in-core components and materials of LWRs, and the irradiation research is now under schedule. It is essential for IASCC studies to irradiated materials under well-controlled conditions simulating LWR in-core environment. Therefore, a new water feeding system to supply high temperature water into irradiation capsules in the Japan Materials Testing Reactor(JMTR) has been designed and will be installed in near future. This report describes the specification and performance of the water feeding system that is designed to supply high temperature water to simulate BWR conditions in irradiation capsules. This design work was performed in the fiscal year 1999.

Keywords : IASCC, Saturated Temperature Capsule, Advanced Irradiation Facility,
Water Feeding System, Irradiation Test, High Temperature Water

+ Department of Nuclear Energy System, Tokai Research Establishment

* On leave from Kawasaki Heavy Industries LTD.

** On leave from Nuclear Engineering

目 次

1.	はじめに	1
2.	水環境制御装置の基本的仕様	1
2.1	基本的設計条件	1
2.2	安全設計上の要求	2
2.3	その他の設計要求	3
2.4	装置の構成及び所要条件	3
2.5	各機器の必要性能に関する検討	5
2.6	主要な計測制御	7
3.	運転特性等に係わる設計検討	8
3.1	熱特性	8
3.1.1	装置内温度分布計算	8
3.1.2	加熱器容量の計算	9
3.1.3	予熱管の性能計算	9
3.1.4	冷却管の性能計算	10
3.1.5	サンプリング冷却器性能計算	11
3.2	系統の圧力損失	12
3.3	系統内圧力変動の緩和方法の検討	13
3.4	しゃへい計算	13
4.	まとめ	14
	謝辞	15
	参考文献	15
	添付資料 系統内圧力変動の緩和方法の検討	41

Contents

1. Introduction	1
2. Specification of Water Feeding System	1
2.1 Design Requirements for Design	1
2.2 Safety Requirement	2
2.3 Others Requirements for Design	3
2.4 Construction of Water Feeding System	3
2.5 Necessary Performance of Components	5
2.6 Instrumentation for Control	7
3. Design Study of Operational Characteristics	8
3.1 Heat Characteristics	8
3.1.1 Calculation of Heat Mass Balance	8
3.1.2 Calculation of Heater Capacity	9
3.1.3 Calculation of Heat Exchanger Performance	9
3.1.4 Calculation of Cooler Performance	10
3.1.5 Calculation of Sampling Cooler Performance	11
3.2 Pressure Drop of Evaluation	12
3.3 Absorption Method of Pressure Fluctuation	13
3.4 Shielding Design	13
4. Conclusions	14
Acknowledgements	15
References	15
Appendix Study on Absorption Method of Pressure Fluctuation	41

1. はじめに

炉内構造物に使用されているオーステナイト系ステンレス鋼は、高線量の中性子照射を受けると、高温水中で照射誘起応力腐食割れ（以下、「IASCC」という）を起こす可能性がある。そして、中性子照射、ガンマ線照射、高温高圧水による腐食及び応力が同時に作用するような条件下での IASCC 挙動についての研究が、国内外で計画されている。このような状況から、BWR 型軽水炉の炉内環境を模擬した条件下で IASCC の照射試験が行なえる高度材料環境照射装置を新たに JMTR に設置するための検討を行った。高度材料環境照射装置は、照射試験片を収納し炉内に装荷される飽和温度キャップセル（以下、「キャップセル」という）とキャップセルへ高温高圧水を供給する水環境制御装置等から構成される。高度材料環境照射装置の構成を図 1 に、水環境制御装置の概念図を図 2 に示す。水環境制御装置は、水質調整系、給水系、補給水系、計測制御系等からなり、水質調整系は、キャップセルへの供給水の精製及び水質制御、給水系は、キャップセルへの高温高圧水の給水、補給水系は、水環境制御装置への所要の純水供給、計測制御系は、各系統の監視及び制御を主に行うものである。

原研材料試験炉部では、これらの設備の予備設計検討のための部内ワーキンググループを設置し検討¹⁾を行い、その結果を踏まえ、キャップセルに高温高圧水を供給するとともに、給水の温度、水質の維持・制御機能を備えた水環境制御装置の設計検討を 1999 年度に実施した。

本報告は、水環境制御装置の各機器の仕様・性能等に関する設計検討についてまとめたものである。

2. 水環境制御装置の基本的仕様

水環境制御装置の設計検討では、基本的設計条件を決定するにあたり、機器の強度、安全性等、通常の照射装置の設計に係わる事項について調査検討するとともに、以下の点を特に考慮した。

- ・ BWR 炉内と同等の温度条件下で試験片の照射を行うため、温度を制御した高温高圧水を安定してキャップセルに供給できること。
- ・ 効率的に照射試験を行えるようにするため、複数のキャップセルに同時に給水できること。
- ・ 供給する高温高圧水の水質制御が可能であること。このため、必要に応じ供給水中へ、酸素、水素、ヘリウムを注入して給水の溶存酸素・水素濃度を制御できること。
- ・ 水質維持・制御の観点から供給水の全量精製ができること。また、腐食生成物の除去等に十分留意した設計とすること。
- ・ 水質モニタリングのため供給水のサンプリングが容易に行え、またサンプリングが装置の運転に影響を及ぼさない設計とすること。
- ・ 実機 BWR 環境に近づけるため、試験片表面での供給水流速をできるだけ大きくすること。

2.1 基本的設計条件

- (1) 供給水温度 : 最高使用温度は 320°C とし、通常運転時は照射試験片温度（中心部）が 288°C

になるように供給水温度を制御できること。

- (2) 供給水圧力 ; 最高使用圧力は 10MPa とし、通常運転時は試験片照射目標温度を達成できるように 7.5MPa を目途に供給水圧力を任意に設定できること。装置内の最高使用圧力及び最高使用温度区分図を図 3 に示す。
- (3) 供給水の加熱・冷却の能力を考慮し、最大 5 本のキャップセルを本装置に接続し給水が可能であること。
- (4) 供給水の定格流量は、キャップセル 1 系統あたり最大 0.2m³/h、装置全体で最大 1m³/h とする。
- (5) キャップセル入口において、BWR 炉内環境を模擬して以下の水質を維持できること。
 - ・電気伝導度 : 0.1 μ S/cm 以下
 - ・pH : 5.5~7.0
 - ・SO₄²⁻ : <5ppb
 - ・溶存酸素濃度目標 : 数 ppb~約 200ppb で調節可能
 - ・溶存水素濃度目標 : 最大 1ppm で調節可能
- (6) 本装置の主要機器の種別は、通産省告示第 501 号「発電用原子力設備の構造等に関する技術基準」に定める第 4 種機器」相当とする。
- (7) 耐震性 : 地震力 水平方向 0.4G、垂直方向 0.2G

2.2 安全設計上の要求

(1) 原子炉の安全性への影響

本装置はキャップセル照射装置の一部であることから、JMTR 原子炉施設の設置許可上、「事故により破損した場合のエネルギー放出により炉心に大きな損傷を与えず、また、炉心に係わる主要な核的、熱的制限値以内である」ことが求められる。このため、本装置に接続され炉心に装荷されるキャップセル本体は以下の条件を満足するように設計される。

- ・原子炉冷却水とのバウンダリである外筒は、供給水の圧力、流量喪失という最も厳しい場合の異常を想定しても健全であること。
- ・上述の異常の場合にも炉心への反応度付加は 0.5% $\Delta k/k$ 以下であること。本装置の場合、最大 5 本のキャップセルが同時に接続される可能性があるため、キャップセル 1 本当たり 0.1% $\Delta k/k$ 以下とする必要がある。
- ・キャップセル 1 本当たりの発熱量は 100kW 以下であること。

(2) 照射装置及び照射試験片の保護

上述のように本装置に異常が生じても原子炉の安全性への影響は生じないように設計されるが、装置自体の保護はもとより、万一の異常時にも照射試験の目的に大きな支障が生じないよう以下のように設計する。

- ・本装置では、供給水の流量と圧力の維持が最も重要である。このため、機器の単一故障、電源喪失等の想定される異常時にも必要最低限の供給水流量が確保され、また、圧力調節のための弁等の機器は信頼性の高い設計とすること。
- ・電動弁及び空気作動弁等は、駆動源である電源、圧縮空気の喪失時に、フェイル・セーフ

の観点から、安全な状態に維持されるよう動作すること。

- ・試験片の温度制御のために供給水により試験片の除熱を行うが、キャップセル構造材のガンマ発熱は原子炉の一次冷却水により除熱されるような構造とする。

(3) 水素燃焼・爆発の防止

本装置を用いた照射試験では、照射中の腐食電位調整の目的でヘリウム・水素混合ガスを注入する場合があるが、その際に、万一、水素ガスの滞留、漏洩等が生じた場合でも燃焼、爆発等のおそれがないように水素濃度管理等の安全管理を行うこと。

2.3 その他の設計要求

- (1) 供給水の水質の維持・制御能力の検討、特に溶存酸素及び溶存水素濃度の制御に関する検討では、炉心部における放射線分解も考慮する。
- (2) 部材の腐食防止、供給水の水質維持の観点から、主要配管、容器等の材料にはできる限り 316 型オーステナイト系ステンレス鋼を使用し、高温高圧部については特に 316L 型オーステナイト系ステンレス鋼を使用すること。また、ろう接や銅材の使用等、水質の劣化を生じる恐れのある施工方法、材料、機器は使用しない。
- (3) 主要機器の溶接設計は、総理府令に基づき、国の溶接検査の対象として、関連する基準に従って行う。
- (4) 照射試験片等のガンマ発熱を考慮し、キャップセル 1 系統当たり最大 40kW（試験片の最大発熱量約 20kW、キャップセル構造材、熱媒体などの最大発熱量約 20kW）の熱を除去できるようにする。

2.4 装置の構成及び所要条件

水環境制御装置は、キャップセルへ供給する水をクラッド除去フィルター、イオン交換塔により精製し、水質調整タンクで試験条件に適応した水質に再調整する機能を有する水質調整系、水質調整された供給水を主ポンプで昇圧、加熱器で加熱し、キャップセルへ給水する機能を有する給水系、サンプリングなどによる系外への供給水の流出を補給する機能を有する補給水系、供給水の温度、圧力及び水質の計測・制御を行う計測制御系から構成される。各系統の機器構成及び所要条件は以下のとおりである。

(1) 水質調整系

水質調整系は、クラッド除去フィルター、イオン交換塔、水質調整タンク等から構成される。IASCC 照射試験では、供給水の水質の制御が特に重要であることから、主配管に混床式のイオン交換樹脂塔を設け供給水の全量精製が行える設計とする。イオン交換塔の上流側には、キャップセルから戻る供給水中のクラッド除去のためのフィルターを設ける。

水質調整タンクでは、ヘリウム、ヘリウム・酸素、ヘリウム・水素の混合ガスをそれぞれ専用のポンベから注入できる構造とし、溶存酸素濃度を数 ppb～200ppb、水素濃度を最大 1ppm の範囲内で調整できるようにする。また、水素注入に係わる安全対策の一環として水質調整タンクに水素ガス濃度計を設け、気相部の水素ガス濃度が異常に上昇した場合には水素注入の中

止等、必要な安全操作を自動的に行う。

(2) 給水系

給水系は、主ポンプ、サージタンク、予熱管、加熱器、冷却管、圧力調節弁等から構成される。本制御装置と原子炉内のキャップセルとの間で高温高压水を給水するための系統である。プランジャ型の主ポンプにより所定の圧力まで昇圧された供給水は予熱管を経て、各キャップセル系統に分岐し、それぞれ加熱器により自動的に温度調整された後、キャップセルに至る。キャップセルを経た供給水は制御装置の予熱管に戻り、冷却管、圧力調節弁を経て、精製のためのクラッド除去フィルター、イオン交換塔に至る。その後、水質調整タンクを経て主ポンプに戻る。

供給水流量としては、キャップセル1系統当たり $0.2\text{m}^3/\text{h}$ 、従って、給水系の総流量は、飽和温度キャップセルを5本接続した場合において、最大 $1.0\text{m}^3/\text{h}$ とする。試験片表面での供給水の流速は、軽水炉環境に近づける意味ではさらに流量が大きい方が望ましいが、流量の増加に対応して加熱器、冷却管の容量を増加させる必要があり、装置の規模・経費が大きくなりすぎること、原子炉施設側が本装置に供給できる電力にも限りがあること、本装置からキャップセルに至る内径 6mm の給排水管内の流速を適切な範囲にとどめる必要があること等から、上述の値に設定した。

また、系内の圧力変動をなるべく低減するためサージタンクを設ける。安全上の目的のほか、照射下試験時の荷重制御等に対し圧力を一定に保つことは特に重要である。これについては、添付資料に別途まとめた。

(3) 補給水系

補給水系は、補給水タンク及びその付属機器から構成され、J M T R 純水補給系統から供給された脱気純水を貯え、精製し、照射装置の運転前に飽和温度キャップセル及び水環境制御装置に所要の純水を供給するとともに、サンプリング等による系外への流出等を補うため運転中にも適宜自動的に純水を供給する。供給水の水質を一定に維持するため、給水タンクには、イオン交換樹脂、UVランプ等による精製運転を行うためのラインを設ける。

(4) 計測制御系統

供給水の圧力の制御は、主に圧力調節弁により行う予定であるが、サージタンクも系内の圧力変動を抑制、制御する機能を有しているため、具体的な制御方法は、装置据付け後の性能試験において、それぞれの機能の応答を確認した上で決定する。供給水の総流量の調整は主ポンプストロークを、各キャップセル系統毎の流量の調整は系統毎の流量調節弁を、それぞれ手動調節（遠隔）することにより行う。各系統の流量調節弁は手動設定、自動制御のいずれの運転も可能であり、運転当初の各系統の流量設定時等は自動制御の状態で行うことも考えられる。

試験片の照射温度の制御は基本的に加熱器による供給水温度調節により行うこととし、個々の系統の細かな流量調整は通常は行わない予定である。急激な流量変更、特に低下は流動不安定を引き起こすおそれがあるため照射試験中に1系統の流量変更が必要となった場合には、他の系統にも影響が及ぶことを十分考慮し慎重な運転操作が必要である。

試験片を所要温度（約 288°C ）で照射するための供給水温度の調節はキャップセル内の温度

実測値を基に加熱器の自動制御により行う。その他、運転、保守に必要な箇所に、圧力計、流量計、温度計等を設置する。

供給水の水質を測定するため、pH 計、電気伝導度計、導電率計、溶存水素濃度計を設け、弁の切り替えにより、キャップセル入口（5系統一括）、キャップセル出口（各系統毎）で水質の測定ができるようとする。また、サンプリングボックスを設け供給水の分析のためのサンプリングが行えるようとする。

本制御装置が設置されるキュービクルは、原子炉運転中は原則として立入りしない。このため、原子炉停止中の保守点検時等にキュービクル内で行う操作等を除き、本制御装置に係る必要な監視、操作は全て J M T R 炉室 1 F の照射制御室にて遠隔で行う。

2.5 各機器の必要性能に関する検討

水環境制御装置を構成する主要な機器の性能等に関する検討結果を以下に記す。各機器の主な仕様については表 1 に、また構造等については図 4～図 12 に、全体系統図を図 13 に示す。

(1) 主ポンプ（図 4 参照）

主ポンプでは、供給水を大気圧から所定の圧力まで昇圧し一定の流量でキャップセルに供給し。かつ、照射下試験等においては、照射中に試験片に荷重を付加することから供給水の脈動を極力抑える必要がある。このため、大型になり設置スペースの点で不利ではあるが、3 連シリンダから構成される脈動の少ないプランジャ型ポンプを使用する。これにより運転中のプランジャ駆動による水圧変動は $\pm 0.2 \text{ MPa}$ 程度に抑えることが期待できる。また、万一のダイアフラム破損に備えダブルダイアフラム方式を採用し油圧中間室液には純水を使用する。

供給流量としては、キャップセル 1 系統あたり定格 $0.2 \text{ m}^3/\text{h}$ 、従って、総定格流量は、キャップセルを 5 本接続した場合において $1.0 \text{ m}^3/\text{h}$ である。主ポンプは 3 台設置し、定常運転時は常時 2 台を並列運転することにより定格流量 $1.0 \text{ m}^3/\text{h}$ （主ポンプ 1 台当たり $0.5 \text{ m}^3/\text{h}$ ）を供給することとし、1 台は商用電源で、もう 1 台はディーゼル電源で駆動する。これにより、ポンプの故障や商用電源喪失時にも供給水の流量が喪失しないようにする。残りの 1 台は予備機とする。

接続されるキャップセル数は照射計画により最低 1 本から最大 5 本までの範囲で変化するため、供給水の総流量もこれに応じて変える必要がある。主ポンプは、ストローク調整により $0.1 \sim 1.4 \text{ m}^3/\text{h}$ （2 台並列運転時）の範囲での流量制御が可能であるが、圧力調節弁は制御性の関係から最低でも $0.4 \text{ m}^3/\text{h}$ 程度の流量を必要とするため、キャップセルへの総給水流量がこれを下回る場合には、使用していない系統のバイパス運転を行うことにより総流量を $0.4 \text{ m}^3/\text{h}$ 以上にする。

(2) 加熱器（図 5 参照）

各キャップセルについて、試験片温度（中心部）が 288°C になるように供給水温度を制御する能力を有する。系統の熱収支計算（ヒートマスバランス）の結果については後述するが、加熱器容量を約 26 kW と設定することにより、予熱管での再生熱交換とあいまって加熱器出口で供給水を最高約 290°C まで昇温できる見込みである。

(3) 予熱管（図 6 参照）

本装置は全量精製であるため、一巡毎に供給水は約 50℃から最高約 290℃まで加熱されキャップセルに送水され、キャップセルを経由して装置に戻り再び 50℃まで冷却される。このため、給水の加熱及び冷却を効率良く行うために再生熱交換を行うための予熱管を設け、加熱器、冷却管の負荷を軽減させる。

本装置で使用する予熱管は、高温の給水が内管を、低温の給水が外管を対向流で流れる二重管構造である。予熱管での交換熱量は最大約 120kW であり、後述する熱収支計算の結果に示すように 70~120℃程度の給水加熱／冷却を行うことができる。

(4) 冷却管（図 7 参照）

冷却管はイオン交換樹脂の性能などに支障のない温度まで供給水を冷却する。使用予定のイオン交換樹脂の耐熱温度は約 60℃（陰イオン交換樹脂）であるため、運転時の供給水の冷却管の出口温度は、50℃を目安に、予熱管、冷却管の性能を考慮して設定する。

(5) サージタンク（図 9 参照）

後述する設計検討（「3.3 項、系統内圧力変動の吸収方式」及び添付資料参照）のように、アキュムレータとサージタンクの利害得失の比較を行った結果、系内の圧力変動を吸収する等のためにサージタンクを設けることとした。3連シリンダの主ポンプの採用とあいまって定常運転中の給水の圧力変動はかなり低減すると期待される。

国内外の炉内あるいは炉外の試験ループでは、圧力別に複数のアキュムレータを設けている例もあるが、サンプリング等、定的な系外への流出及び小漏れ等の異常な流出等に対してはサージタンクの方が有利であるため、検討の結果サージタンクを採用した。

(6) 炉外テストセクション

キャップセルからの戻りの 1 系統に試験片の装荷、取り出しが可能な炉外テストセクションを設け、キャップセル内とほぼ同様な水環境下で腐食試験が行えるようにする。キャップセルからの戻りラインにおいて給水温度が低下した分を再加熱するためのヒーターを備える。

(7) クラッド除去フィルタ（図 10 参照）

本装置及びキャップセルの高温高圧部は可能な限り 316L 型あるいは 316 型オーステナイトステンレス鋼を使用する等、クラッド低減には十分留意した設計を行っているが、ある程度の量のクラッド発生は不可避であるため、イオン交換塔の上流側にクラッド除去のためのフィルターを設ける。フィルターには無数の微小な穴が外表面から内表面へ貫通している特殊ポリエチレン製の中空糸膜をモジュール化したものを使用し、逆洗可能な機器構造とする。中空糸膜フィルターは、粒径 $0.45 \mu\text{m}$ 以上に対し 99%以上の除去性能があり、焼結金属フィルターより逆洗し易く、ろ紙状フィルターよりろ過面積が大きく確保できる等の利点があり、国内 BWR でも使用実績を有する。

設置個所については、圧力調節弁保護のためには圧力調節弁の上流側が良いが、低温・低圧配管からサンプリングレクラッド等の分析も行うことから、圧力調節弁の下流側となった。上流側への設置は、フィルター容器が高圧仕様となりフィルター交換時のフランジ取り外しの被ばく等の点でも不利である。圧力調節弁の保護としては別途ストレーナを設置することとした。

(8) イオン交換塔（図 11 参照）

混床式のイオン交換樹脂を使用する。陽イオン樹脂からは硫酸イオン、陰イオン樹脂からは硝酸イオンが流出し易いので、全有機炭素(TOC)を制限した樹脂を使用する。イオン交換塔は、供給水の電気伝導度を $0.1 \mu\text{S}/\text{cm}$ 以下に維持するに十分な量の樹脂を装荷できる構造とする。イオン交換塔下流にはフィルターを設ける。給水水質の管理の観点から、樹脂の再生は行わず、使用済み樹脂の廃棄のための配管を設け、必要に応じて原子炉の排水槽に流体移送する。定常運転開始後は、樹脂の交換は年 2 回程度を予定している。

(9) 水質調整タンク（図 12 参照）

キャップセルへの供給水中の溶存酸素濃度を数 ppb～200ppb、溶存水素濃度を最大 1ppm までの範囲で調整できるようにするために、酸素ガス、ヘリウム、ヘリウム/水素混合ガスを注入できる構造とする。溶存酸素濃度の調整は、ヘリウムのバーリング又は酸素ガスの注入により行う。溶存水素濃度の調整のためヘリウム/水素混合ガスを注入することから、万一の水素ガスの滞留等による燃焼等を防止するため、ガスボンベの屋外設置や水質タンク気相部の濃度管理等、水素ガス使用に係わる安全対策を講じる。この点については別途作成される水質調整等に係わる報告書の中でまとめる予定である。また、水質調整タンク内での供給水の水質劣化を防ぐため、専用の精製ラインを設ける。

(10) 補給水タンク

JMTR 純水補給系統から供給された水を貯え、サンプリングなどによる系外への流出などを補うため水質調整タンクへ純水を供給する。タンク内に貯水中にもタンク単独での精製運転を行えるようにするために、補給水タンクには、イオン交換塔、UV ランプなどを備えたラインを設ける。

(11) 圧力調節弁

従来 J M T R に設置されていたワンスルー型の飽和温度キャップセル制御装置では系統の圧力調節にバネを用いた自立式の保圧弁を使用していた。これは、構造が単純であり誤信号による制御不良のおそれもない等、信頼性の高い弁である。本装置でも当初は同型の調節弁を使用する予定であったが、本装置では給水流量が従来の装置の 10 倍以上であり同型の保圧弁が入手できない等の理由から、空気作動弁を使用することとした。

圧力調節弁では、約 6～8MPa から大気圧まで減圧する必要があるが、急激に減圧すると弁内部で気泡が発生し流動が不安定になるおそれがあるため、弁体に複数段のオリフィスを備え段階的に圧力を低下させる構造を採用している。弁の設計上、弁座のストロークが約 4mm と小さいため、クラッド付着等により圧力特性が極端に変わらないよう十分な運転管理が必要である。

系統の圧力保持は流量確保とともに最も重要であるので、信頼性を十分考慮するとともに並列に 2 台設置し弁の異常時には切替可能な設計とする。

2.6 主要な計測制御

(1) 装置の運転制御のため、主要な箇所に、圧力計、流量計、温度計を設ける。

- (2) 機器、配管等からの漏水を検知できるように、キュービクル内に漏水検知器を設置しループ制御室（以下、「制御室」という）で監視できるようにする。
- (3) 供給水の水質測定のため、pH計、導電率計、溶存酸素濃度計、溶存水素濃度計をキャップセルの出入口、水質調整タンク等に設ける。キャップセル出入口の水質測定用の測定器は共用とし、弁の切り替えにより入口（一括）あるいは出口（系統毎）の水質を測定する。
- (4) 系統にサンプリングラインを設け、サブキュービクル内に設置するサンプリングボックスでサンプリングが行なえるようにする
- (5) キュービクル内にガンマ線エリアモニターを設置し、制御室で監視できるようにする。
- (6) 制御盤には、ディーゼル電源を使用し、同電源の瞬時停電時にも装置の状態を示す主要なパラメータ監視ができるように必要に応じ無停電電源を設ける。

3. 運転特性等に係わる設計検討

3.1 熱特性

3.1.1 装置内温度分布計算

(1) 温度分布計算その1（初期設計時）

以下の計算条件における系統のヒート・マスバランスを計算する。

①計算条件

・キャップセル : 入口温度 290°C、圧力 7.5 MPa、流量 0.2m³/h
接続本数 5 本

②計算結果

図 14 に計算結果に基づいて定めた設計温度等を示す。

(2) 温度分布計算その2

上記(1)項の条件を基に放散熱量及び圧力損失を考慮した場合の系統のヒート・マスバランスを計算する。

①計算結果

図 15 に計算結果に基づいて定めた設計温度等を示す。

(3) 温度分布計算その3

上記の条件に加えガンマ加熱率を考慮し、以下の計算条件における系統のヒート・マスバランスを計算する。

①計算条件

・キャップセル : ガンマ加熱率 10W/g (Ti)、入口温度 240°C、出口温度 282°C、
圧力 7.5 MPa、流量 0.2m³/h
接続本数 5 本

②計算結果

図 16 に計算結果に基づいて定めた設計温度等を示す。

(4) 温度分布計算その3

上記(3)の場合とキャップセル温度が違う場合の系統のヒート・マスバランスを計算する。

①計算条件

- ・キャップセル : ガンマ加熱率 10W/g (Ti)、入口温度 150°C、出口温度 232°C、
圧力 7.5 MPa、流量 0.2m³/h
接続本数 5 本

②計算結果

図 17 に計算結果に基づいて定めた設計温度等を示す。

3.1.2 加熱器容量の計算

(1) 設計条件

各系統の定格流量 (0.2 m³/h) で、加熱器出口温度を 290°Cまで昇温できる容量とする。

(2) 計算条件

- ・キャップセル接続本数 5 本
- ・キャップセル流量 150 kg/h (290°Cで 0.2m³/h に相当)
- ・キャップセル戻り温度 260°C
- ・主ポンプ出口温度 20°C (冬期を考慮)

(3) 計算結果

- ・予熱管出口温度 $T_1 = 156^\circ\text{C}$

- ・加熱器ヒータ容量

加熱器ヒータ容量を、Q kW とする。

加熱器出口温度 T_2 は 290 °C、比熱 C_p は 4.65 kJ/kg K

$$Q = (T_2 - T_1) \times C_p \times G / 3600 = 26 \text{ kW} \quad (G: \text{キャップセル流量 } G=150 \text{ kg/h})$$

加熱器ヒータは、26 kW とする。但し加熱器本体からの熱損失については別途見込む必要がある。

3.1.3 予熱管の性能（熱交換量）計算

(1) 設計条件

- ・形式 二重管式熱交換器
- ・内部流体 水
- ・基數 3 基
- ・交換熱量 (Q) 146432 kJ/h
- ・流量 (G) 244 kg/h
- ・温度 内管 (高温側) 入口/出口温度 290°C/160°C
外管 (低温側) 入口/出口温度 50°C/190°C
- ・管寸法 内管 (高温側) $\phi 25.4 \times t3.5$
外管 (低温側) $\phi 48.6 \times t5.1$
- ・物性値
比熱 (C) 内管 (高温側) 4.19 kJ/kg K

	外管（低温側）	4.60 kJ/kg K
熱伝導率(k)	内管（高温側）	6.88×10^{-1} W/m K
	外管（低温側）	6.40×10^{-1} W/m K
流体粘度(μ)	内管（高温側）	2.31×10^{-4} Pa s
	外管（低温側）	1.22×10^{-4} Pa s
流体密度(ρ)	内管（高温側）	945.5 kg/m ³
	外管（低温側）	838.3 kg/m ³

(2) 計算方法

外管側境膜伝熱係数及び内管側境膜伝熱係数を計算し、総括伝熱係数を求めて、必要伝熱面積を求める。必要伝熱面積から伝熱長さを計算し、余裕をみて採用する伝熱長さを決定する。

(3) 計算結果

- ・総括伝熱係数 ; 6.18×10^2 W/m² K
- ・必要伝熱面積 ; 6.27×10^{-1} m²
- ・必要伝熱長さ ; $0.627/\pi \cdot 0.0254 = 7.86$ m
- ・採用伝熱長さ ; 9.6 m

3.1.4 冷却管の性能計算

(1) 設計条件

・形式	二重管式熱交換器	
・内部流体	水	
・基数	3 基	
・交換熱量 (Q)	115443 kJ/h	
・流量 (G)	内管（高温側）	244 kg/h
	外管（低温側）	6667 kg/h
・温度	内管（高温側）	入口/出口温度 160°C/50°C
	外管（低温側）	入口/出口温度 34°C/38°C
・管寸法	内管（高温側）	$\phi 25.4 \times t3.5$
	外管（低温側）	$\phi 48.6 \times t5.1$
・物性値		
比熱 (C)	内管（高温側）	4.19 kJ/kg K
	外管（低温側）	4.60 kJ/kg K
熱伝導率(k)	内管（高温側）	6.86×10^{-1} W/m K
	外管（低温側）	6.22×10^{-1} W/m K
流体粘度(μ)	内管（高温側）	2.78×10^{-4} Pa s
	外管（低温側）	8.83×10^{-4} Pa s
流体密度(ρ)	内管（高温側）	958.0 kg/m ³

外管（低温側） 993.9 kg/m^3

(2) 計算方法

外管側境膜伝熱係数及び内管側境膜伝熱係数を計算し、総括伝熱係数を求めて、必要伝熱面積を求める。必要伝熱面積から伝熱長さを計算し、余裕をみて採用する伝熱長さを決定する。

(3) 計算結果

- ・ 総括伝熱係数 ; $7.71 \times 10^2 \text{ W/m}^2 \text{ K}$
- ・ 必要伝熱面積 ; $7.91 \times 10^{-1} \text{ m}^2$
- ・ 必要伝熱長さ ; $0.791/\pi \cdot 0.0254 = 9.91 \text{ m}$
- ・ 採用伝熱長さ ; 12.4 m

3.1.5 サンプリング冷却器性能計算

(1) 設計条件

・ 形式	二重管式熱交換器	
・ 内部流体	水	
・ 基数	1 基	
・ 交換熱量 (Q)	45797 kJ/h	
・ 流量 (G)	内管（高温側）	44 kg/h
	外管（低温側）	5000 kg/h
・ 温度	内管（高温側）	入口/出口温度 290°C/50°C
	外管（低温側）	入口/出口温度 34°C/36°C
・ 管寸法	内管（高温側）	$\phi 21.7 \times t3.2$
	外管（低温側）	$\phi 48.6 \times t5.1$
・ 物性値		
比熱 (C)	内管（高温側）	4.36 kJ/kg K
	外管（低温側）	4.19 kJ/kg K
熱伝導率(k)	内管（高温側）	$6.83 \times 10^{-1} \text{ W/m K}$
	外管（低温側）	$6.22 \times 10^{-1} \text{ W/m K}$
流体粘度(μ)	内管（高温側）	$1.64 \times 10^{-4} \text{ Pa s}$
	外管（低温側）	$8.83 \times 10^{-4} \text{ Pa s}$
流体密度(ρ)	内管（高温側）	901.6 kg/m ³
	外管（低温側）	993.9 kg/m ³

(2) 計算

外管側境膜伝熱係数及び内管側境膜伝熱係数を計算し、総括伝熱係数を求めて、必要伝熱面積を求める。必要伝熱面積から伝熱長さを計算し、余裕をみて採用する伝熱長さを決定する。

(3) 計算結果

- ・総括伝熱係数 ; $5.00 \times 10^2 \text{ W/m}^2 \text{ K}$
- ・必要伝熱面積 ; $2.96 \times 10^{-1} \text{ m}^2$
- ・必要伝熱長さ ; $0.296/\pi \cdot 0.0217 = 4.34 \text{ m}$
- ・採用伝熱長さ ; 4.8 m

予熱管、冷却管、サンプリング冷却器の計算結果を表2から表4に示す。

3.2 系統の圧力損失

主配管の圧力損失を以下の方法で求めた。

(1) 圧力損失評価式

$$\Delta P = \left\{ \sum \left(\lambda \frac{L}{d} \right) + \sum \zeta \right\} \frac{\rho U^2}{2}$$

ΔP : 総圧力損失 (Pa)
 λ : 管摩擦係数 (-)
 L : 配管長さ (m)
 d : 配管内径 (m)
 ζ : 損失係数 (-)
 ρ : 密度 (kg/m³)
 U : 管内平均流速 (m/s)

ここで管摩擦係数λは、以下の Blasius の式を適用する。

$$\lambda = 0.3164 \text{Re}^{-0.25} \quad (\text{Re} ; \text{レイノズル数})$$

(2) 計算条件

- ①流体 ; 水
- ②流量 ; 1 Nm³/h (1000kg/h)
- ③温度、圧力
 - ・水質調整タンク～主ポンプ ; 50°C/0.1MPa
 - ・主ポンプ～予熱管 ; 50°C/7.5MPa
 - ・予熱管～加熱器 ; 190°C/7.5MPa
 - ・加熱器～予熱管 ; 290°C/7.5MPa
 - ・予熱管～冷却管 ; 160°C/7.5MPa
 - ・冷却管～圧力調節弁 ; 50°C/7.5MPa
 - ・圧力調節弁～水質調整タンク ; 50°C/0.1MPa

(3) 圧力損失計算

- ①機器の圧損
 - ・予熱管（内管側） ; 10,579 Pa (0.11 kg/cm²)
 - ・予熱管（外管側） ; 34,517 Pa (0.35 kg/cm²)
 - ・加熱器 ; 0.04 Pa

・冷却管	; 6050 Pa (0.06 kg/cm ²)
・クラッド除去フィルタ	; 29,420 Pa (0.3 kg/cm ²)
・イオン交換塔	; 19,613 Pa (0.2 kg/cm ²)
・合計	; 100,197 Pa (1.0 kg/cm ²)

②配管及び配管要素

主配管における水質調整タンク出口から主ポンプを経て水質調整タンクに戻る区間について評価した配管及び配管要素の圧損を表5に示す。

③まとめ

主配管における機器の全圧損は、100,197 Pa (1.0 kg/cm²)、配管及び配管要素の全圧損は、495,000 Pa (5.0 kg/cm²)であり、主配管における全圧損は595,000 Pa (6.0 kg/cm²)と評価される。

3.3 系統内圧力変動の緩和方法の検討

(1) 検討方針

主ポンプの脈動、供給水サンプリング時の系統の圧力低下などの供給水の圧力変動を緩和するため、サージタンク方式／アキュームレータ方式の比較検討を行い、系統内圧力変動の緩和方法を検討する。

(2) 検討内容

サージタンク方式並びにアキュームレータ方式のポンプ起動時（最小流量；75リットル/h）、定格運転時（最大流量；1000リットル/h）及びサンプリング時における動解析を行い、キャップセルでの圧力変動を（脈動）を算出した。

<サージタンク方式>

水張り後、サージタンクカバーガス圧力を7.5MPaにし、系統内圧力を7.5MPaに保持した後、ポンプを起動させ、その後、定格流量で運転する。

<アキュームレータ方式>

水張り後、系統内圧力を0.1MPaの状態でポンプを最小流量で起動させ、その後、定格流量で運転する。

(3) 検討結果

初期立上げ時、サンプリング時において脈動はサージタンク方式のほうがアキュームレータ方式より少ない、特にサンプリング時においては、サージタンク方式は系統内圧力を保持できるが、自由液面を持たないアキュームレータ方式では、系統内圧力が低下してしまう。これらのことから、サージタンク方式を採用する。

検討の詳細を添付資料に示す。

3.4 しゃへい計算

(1) 計算の考え方

キャップセル戻り水の主な放射線源である腐食生成物は、予熱管、冷却管、高温配管を経由し

てその一部はクラッド除去フィルターへ、残りはイオン交換塔へ蓄積される。従って腐食生成物の存在量を計算し得られた線源強度をもとに、しゃへい計算コード「QAD-CGGP2」²⁾を用いて、キューピクル外壁部表面の線量当量率を計算し、キューピクル外壁部表面におけるしゃへい目標値 $10 \mu\text{Sv/h}$ 以下であることを確認する。なお、腐食生成物の計算にあたり、ステンレス鋼の溶解速度を $0.1\text{mg/m}^2 \cdot \text{h}^3)$ を採用した。

(2) 計算の方法

キューピクル外壁表面での評価点を図 18 に示す A～E の各場所とし、各評価点が各機器から受ける放射線線量当量率の総和として求める。なお、クラッド除去フィルターに蓄積される量はこれまでのキャップセル等の実績から全溶出量の 1/10 と仮定して評価した。

(3) 計算条件

- ・評価に使用した機器の自己しゃへい効果を考慮する。イオン交換塔については 7cm の鉄しゃへいを考慮する。
- ・ ^{16}N については炉心から冷却管までの機器に寄与するものとし、それ以降は充分減衰するので考慮しない。
- ・計算に用いる中性子束は燃料領域の平均中性子束を用いる。
- ・使用計算コードは、腐食生成物存在量の計算では、ORIGEN2²⁾、しゃへい計算は QAD-CGGP2 を使用した。

(4) 計算結果

各評価点の放射線線量当量率を以下に示す。

評価点 A ; $1.09 \times 10^{-1} \mu\text{Sv/h}$

B ; $2.42 \times 10^{-1} \mu\text{Sv/h}$

C ; $1.52 \times 10^{-0} \mu\text{Sv/h}$

D ; $3.36 \times 10^{-2} \mu\text{Sv/h}$

E ; $3.80 \times 10^{-2} \mu\text{Sv/h}$

評価点の位置を図 18 に示す。いずれも目標である $10 \mu\text{Sv/h}$ を十分満足している。

なお、本しゃへい計算の詳細については別途報告される予定である。

4. まとめ

本報告書は、高度材料環境照射装置を JMTR に設置するための設計検討のうち、水質制御機能を備えた水環境制御装置の設計検討を行った結果をまとめたものである。本報告書で記載した設計に関する検討内容は、そのほとんどが水環境制御装置の製作設計に反映された。また、本装置は、高温高圧水を炉内に装荷されたキャップセルに送る装置であるため、本設計を基に安全性の検討、原子炉への影響などの検討も行われた。

水環境制御装置の製作は、本報告書に記述した設計・検討をもとに、製作設計及び製作が進められ、平成 13 年度には JMTR 炉室地下 1 階に 2 系統（1 系統当たり 5 本のキャップセルそれぞれに高温高圧水の供給が可能）据付ける予定である。

謝 辞

本設計検討に際し、原研材料試験炉部原子炉第1課横川誠課長代理、同部照射第2課本間建三課長、北島敏雄課長代理、小山昇課長代理、同部原子炉第2課熊原肇課長、同部検査技術課横内猪一郎課長代理、元同部プランケット照射開発室池島義昭課長代理（現大洗研究所保安管理室保安管理課課長代理）、元同部照射第1課水越昇課長代理（現大洗研究所保安管理室保安管理課課長代理）、原研エネルギーシステム研究部複合環境材料研究グループの加治芳行副主任研究員、同グループ宇賀地弘和副主任研究員にご協力戴いた。また本報告をまとめるにあたっては、高橋秀武材料試験炉部長、伊藤治彦材料試験炉部次長、核熱利用研究部熱利用システム研究室の椎名保顕室長に御指導いただいた。ここに記して深く感謝する。

参考文献

- 1) 照射第1課、私信
- 2) 原田康典/ 笹本宣雄 ; 線量当量評価用パソコン版 (ORIGEN-2) 及び遮へい計算 (QAD,G33)
コードの開発 JAERI-DATA/CODE-97-013
- 3) 防食技術 37 (Boshoku Gijutsu) 198-204 (1988)

表 1 主要機器の設計仕様 (1/3)

(1)主ポンプ

①型式	; プランジャー型定量ダイヤフラムポンプ（油圧中間室液；純水）
②数量	; 3 基 (1 系統当り)
③最高使用圧力	; 10 MPa
④最高使用温度	; 70°C
⑤定格流量	; 0.5m ³ /h/1 基 (ストローク調整により最大 0.75m ³ /h まで可能)
⑥吐出圧力	; 10 MPa
⑦主要材料	; SUS316
⑧機器種別	; 第 4 種管に接続されるポンプ
⑨絶縁種別	; F 種 (モ-タ 7.5kW×4 極)

(2)加熱器

①型式	; たて置円筒形電気ヒータ加熱式
②数量	; 5 基 (1 系統当り)
③最高使用圧力	; 10 MPa
④最高使用温度	; 320°C
⑤ヒータ容量	; 約 30 kW
⑥定格流量	; 150kg/h (キャップセル流量 0.2m ³ /h (290°C) に対応)
⑦加熱器出入口温度	; 入口約 150°C/出口約 290°C
⑧主要材料	; SUS316L
⑨機器種別	; 第 4 種容器

(3)予熱管

①型式	; 二重管式熱交換器
②数量	; 1 基 (1 系統当り)
③最高使用圧力	; 外管 10 MPa/内管 10 MPa
④最高使用温度	; 外管 320°C/内管 320°C
⑤熱交換量	; 約 124kW
⑥定格流量	; 外管 730 kg/h/内管 730 kg/h (流量は、キャップセル流量 1.0m ³ /h に対応)
⑦運転温度	; 外管側 入口約 290°C/出口約 160°C 内管側 入口約 50°C/出口約 190°C
⑧主要材料	; SUS316L
⑨機器種別	; 第 4 種管
⑩伝熱面積	; 約 1.7m ²

(4)冷却管

表 1 主要機器の設計仕様 (2/3)

①型式	; 二重管式熱交換器
②数量	; 1 基 (1 系統当り)
③最高使用圧力	; 外管 10 MPa/内管 10 MPa
④最高使用温度	; 外管 320°C/内管 320°C
⑤熱交換量	; 約 96 kW
⑥定格流量	; 外管 20m³/h/内管 730 kg/h (流量は、キャップセル流量 1.0m³/h に対応)
⑦運転温度	; 外管側 入口約 34°C/出口約 38°C 内管側 入口約 160°C/出口約 50°C
⑧主要材料	; SUS316L
⑨機器種別	; 第 4 種管
⑩伝熱面積	; 約 2m²
(5)圧力調節弁	
①型式	; ダイヤフラム駆動式圧力調節弁
②数量	; 2 基 (1 系統当り)
③最高使用圧力	; 10 MPa
④最高使用温度	; 70°C
⑤主要材料	; SUS316
⑥機器種別	; 一般弁 (第 4 種管に接続される弁)
⑦呼び径	; 20A
(6)サージタンク	
①型式	; たて置円筒形
②数量	; 1 基 (1 系統当り)
③最高使用圧力	; 10 MPa
④最高使用温度	; 70°C
⑤容量	; 0.08m³
⑥主要材料	; SUS316
⑦機器種別	; 第 4 種容器
(7)炉外テストセクション	
①型式	; たて置円筒形
②数量	; 1 基 (1 系統当り)
③最高使用圧力	; 10 MPa
④最高使用温度	; 320°C
⑤容量	; 1 リットル
⑥主要材料	; SUS316L
⑦機器種別	; 第 4 種管
⑧特記事項	

表 1 主要機器の設計仕様 (3/3)

炉外テストセクション入口側に加熱器 1 基を設置する。

(8)クラッド除去フィルター

①型式	; フィルターエレメント方式
②エレメント材質	; 中空糸膜
③数量	; 1 基 (1 系統当り)
④最高使用圧力	; 0.5 MPa
⑤最高使用温度	; 70°C
⑥容量	; 55 リットル
⑦捕集粒径	; 0.45 μm 99%以上
⑧流量	; 最大 1m ³ /h
⑨主要材料	; SUS316
⑩機器種別	; 第 4 種容器

(9)イオン交換塔

①型式	; 混床式イオン交換樹脂塔
②数量	; 1 基/2 基 (1 系統当り)
③最高使用圧力	; 0.5 MPa
④最高使用温度	; 70°C
⑤容量 (樹脂)	; 0.04m ³ (オルガノ製アンバーライト)
⑥主要材料	; SUS316
⑦機器種別	; 第 4 種管容器

(10)水質調整タンク

①型式	; たて置円筒形
②数量	; 1 基 (1 系統当り)
③最高使用圧力	; 0.5 MPa
④最高使用温度	; 70°C
⑤容量	; 2m ³
⑥主要材料	; SUS316
⑦機器種別	; 第 4 種管容器

(11)気水分離器

①型式	; たて置円筒形
②数量	; 1 基 (1 系統当り)
③最高使用圧力	; 0.1 MPa
④最高使用温度	; 70°C
⑤主要材料	; SUS316
⑥機器種別	; 機器区分外

表 2 予熱管の性能計算結果

		内管（高温側）	外管（低温側）
流路面積	A	2.66×10^{-4} m ²	6.51×10^{-4} m ²
等価直径	D	1.84×10^{-2} m	1.30×10^{-2} m
流速	V	2.69×10^{-1} m/s	1.24×10^{-1} m/s
質量速度	G	2.55×10^2 kg/m ² .s	1.04×10^2 kg/m ² .s
レイノズル数	Re	2.03×10^4	1.11×10^4
環膜伝熱係数	h	2.70×10^3 W/m ² .K	2.24×10^3 W/m ² .K
総括伝熱係数	U	6.18×10^2 W/m ² .K	
対数平均温度差	ΔT _m	105 °C	
必要伝熱面積	F	6.27×10^{-1} m ²	(内管外径基準)
必要伝熱管長	L	7.86 m	
採用伝熱管長	—	9.60 m	

表 3 冷却管の性能計算結果

		内管（高温側）	外管（低温側）
流路面積	A	2.66×10^{-4} m ²	6.51×10^{-4} m ²
等価直径	D	1.84×10^{-2} m	1.30×10^{-2} m
流速	V	2.86 m/s	2.66×10^{-1} m/s
質量速度	G	2.55×10^2 kg/m ² .s	2.83×10^3 kg/m ² .s
レイノズル数	Re	1.75×10^4 m/s	4.19×10^4 m/s
環膜伝熱係数	h	2.51×10^3 W/m ² .K	1.35×10^4 W/m ² .K
総括伝熱係数	U	7.78×10^2 W/m ² .K	
対数平均温度差	ΔT _m	52 °C	
必要伝熱面積	F	7.91×10^{-1} m ²	(内管外径基準)
必要伝熱管長	L	9.91 m	
採用伝熱管長	—	12.4 m	

表 4 サンプリング冷却器の性能計算結果

		内管(高温側)	外管(低温側)
流路面積	A	1.84×10^{-4} m ²	7.88×10^{-4} m ²
等価直径	D	1.53×10^{-2} m	1.67×10^{-2} m
流速	V	7.36×10^{-2} m/s	1.77 m/s
質量速度	G	6.64×10^1 kg/m ² .s	1.76×10^3 kg/m ² .s
レイノズル数	Re	6.21×10^3 m/s	3.33×10^4 m/s
環膜伝熱係数	h	1.14×10^3 W/m ² .K	9.37×10^3 W/m ² .K
総括伝熱係数	U	5.00×10^2 W/m ² .K	
対数平均温度差	ΔTm	86 °C	
必要伝熱面積	F	2.96×10^{-1} m ²	(内管外径基準)
必要伝熱管長	L	4.34 m	
採用伝熱管長	—	4.80 m	

配管及び配管要素の圧損 (1/2)

表 5 配管及び配管要素の圧損 (2/2)

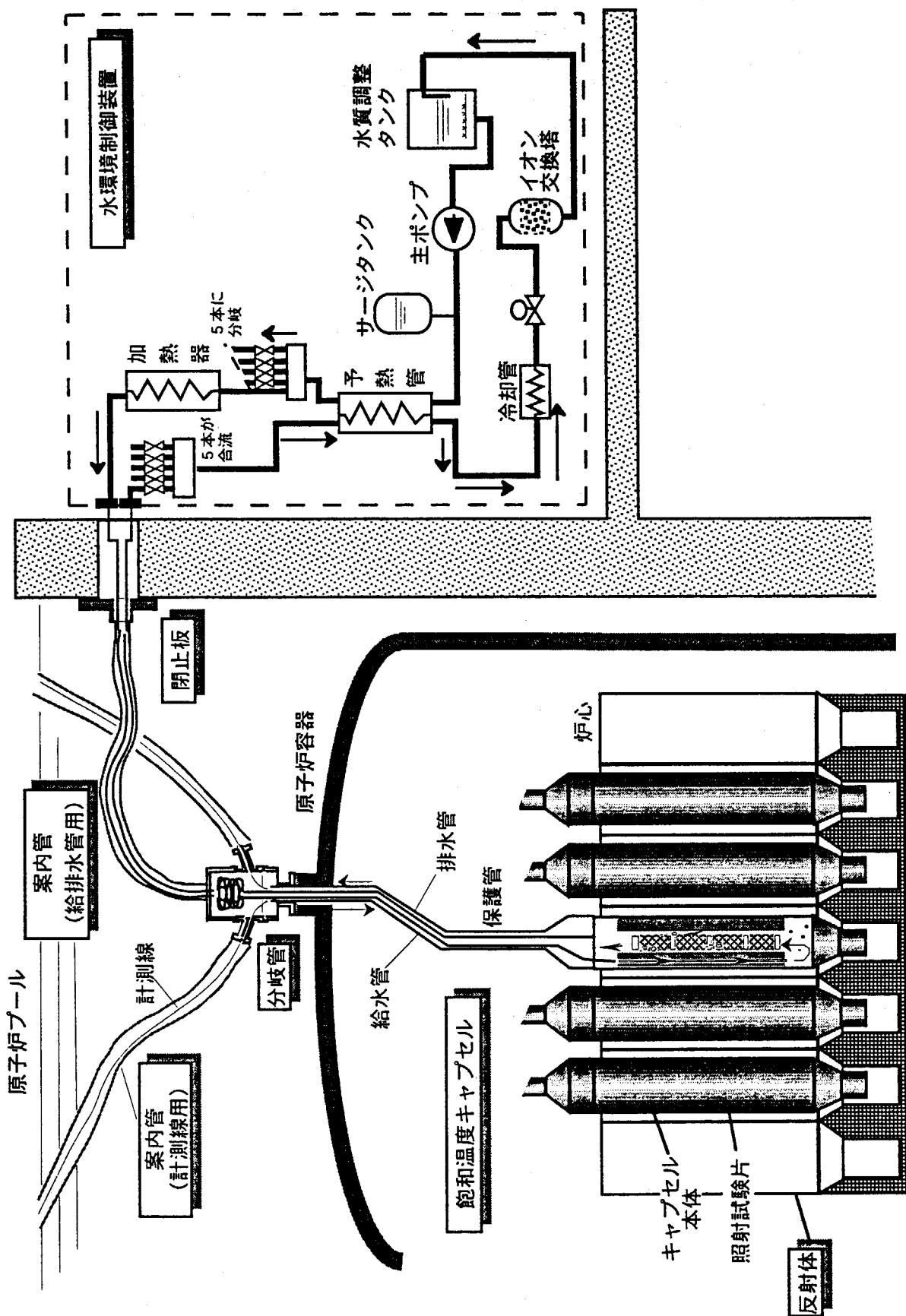


図 1 高度材料環境照射装置の構成

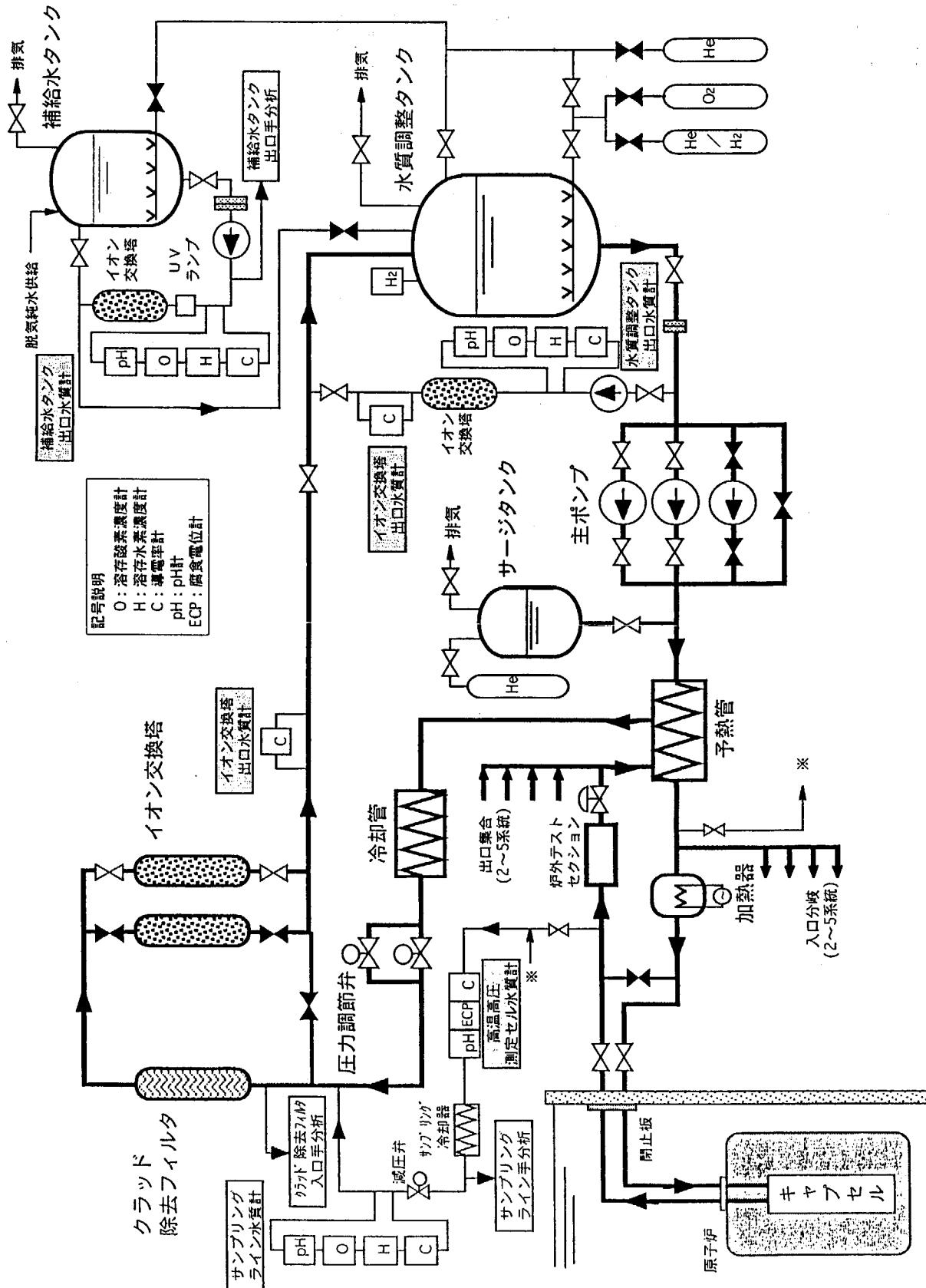


図 2 水環境制御装置の概念図

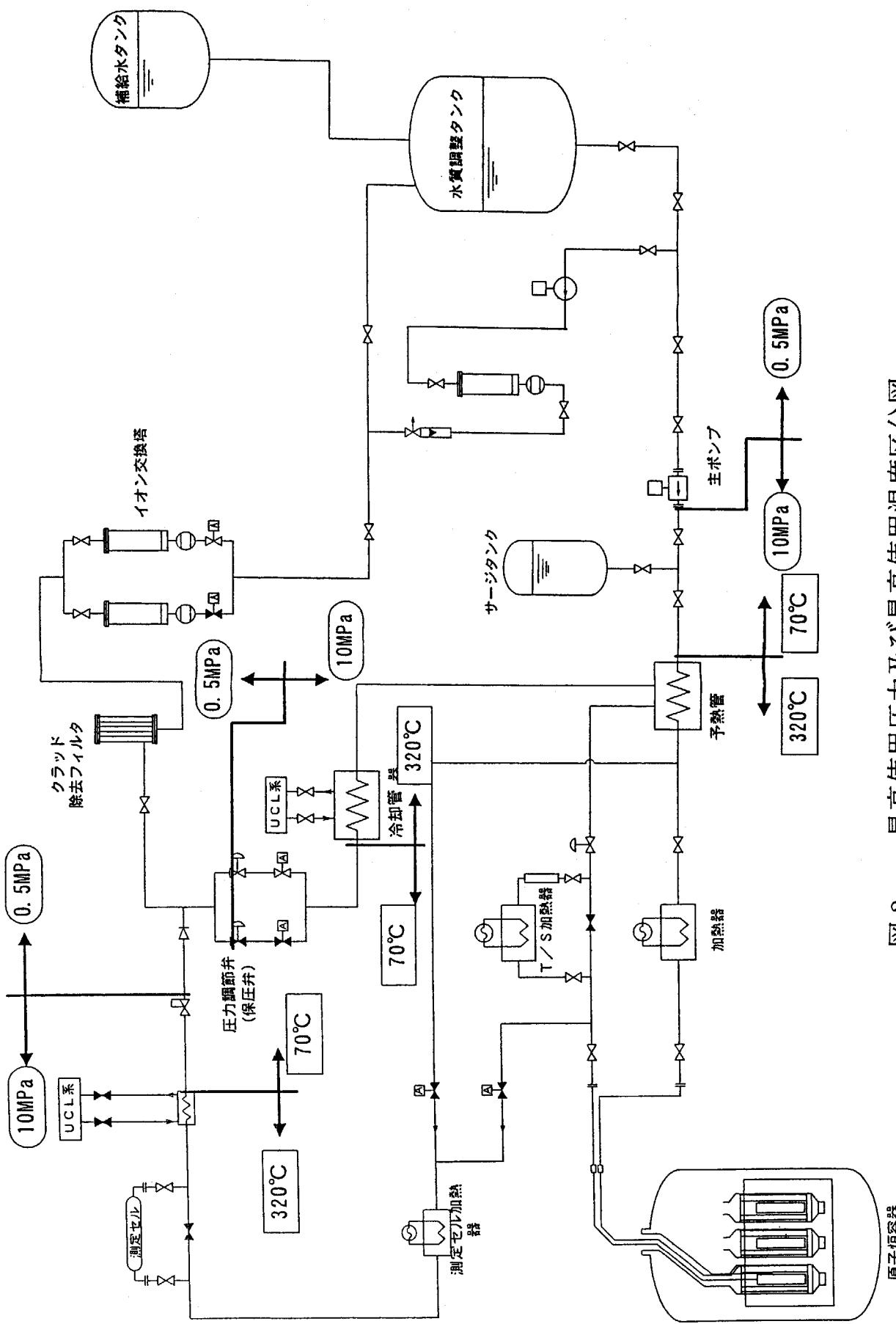
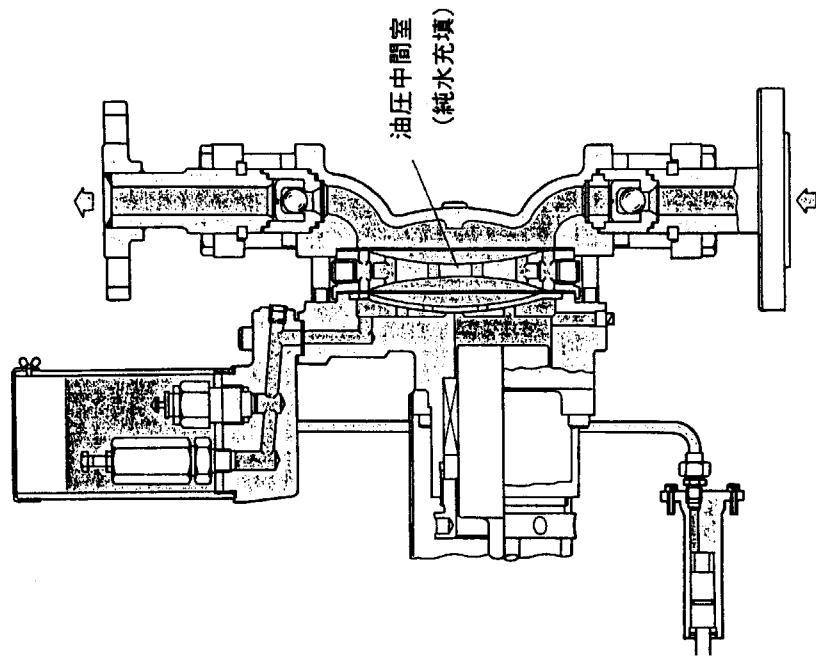


図 3 最高使用圧力及び最高使用温度区分図



ダイヤフラムの破損が極めて危険を伴う場合は、油圧中間室に任意の液を入れることにより、油圧作動油が取扱液に混入することを防止でき、これにより2重の安全性が得られます。

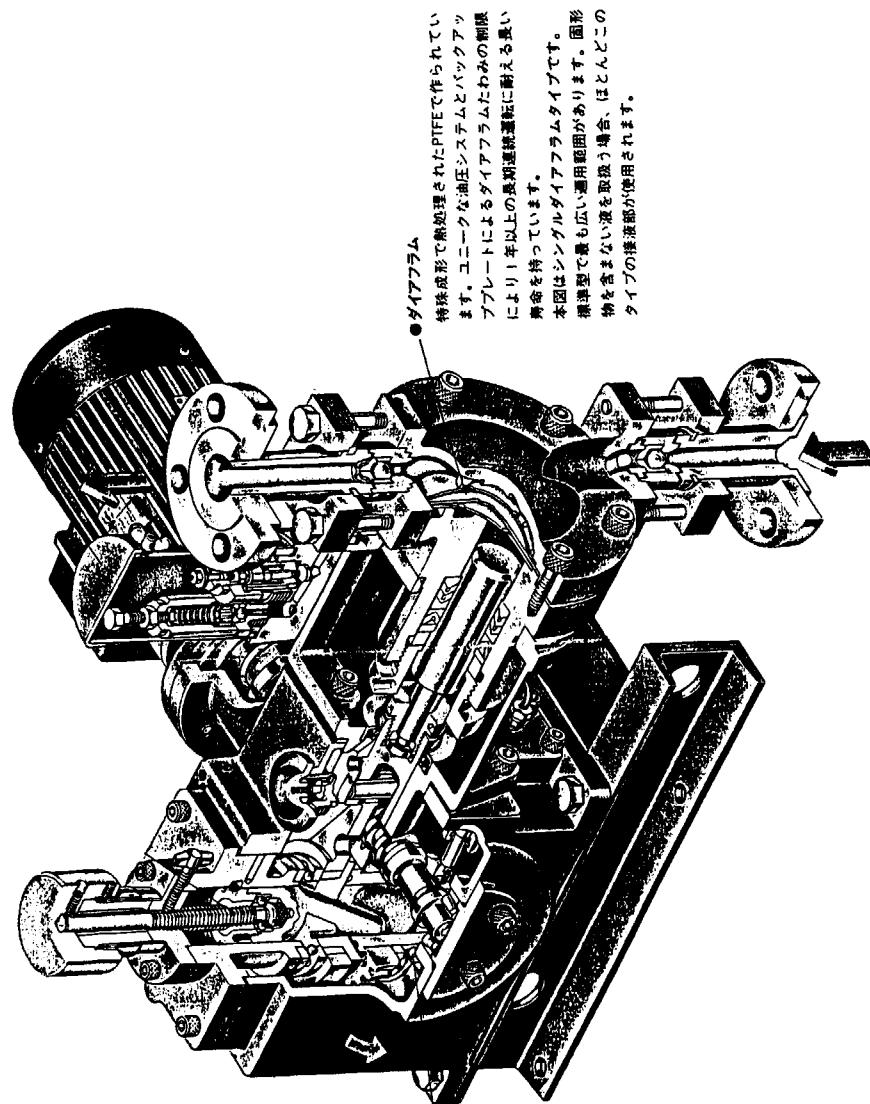
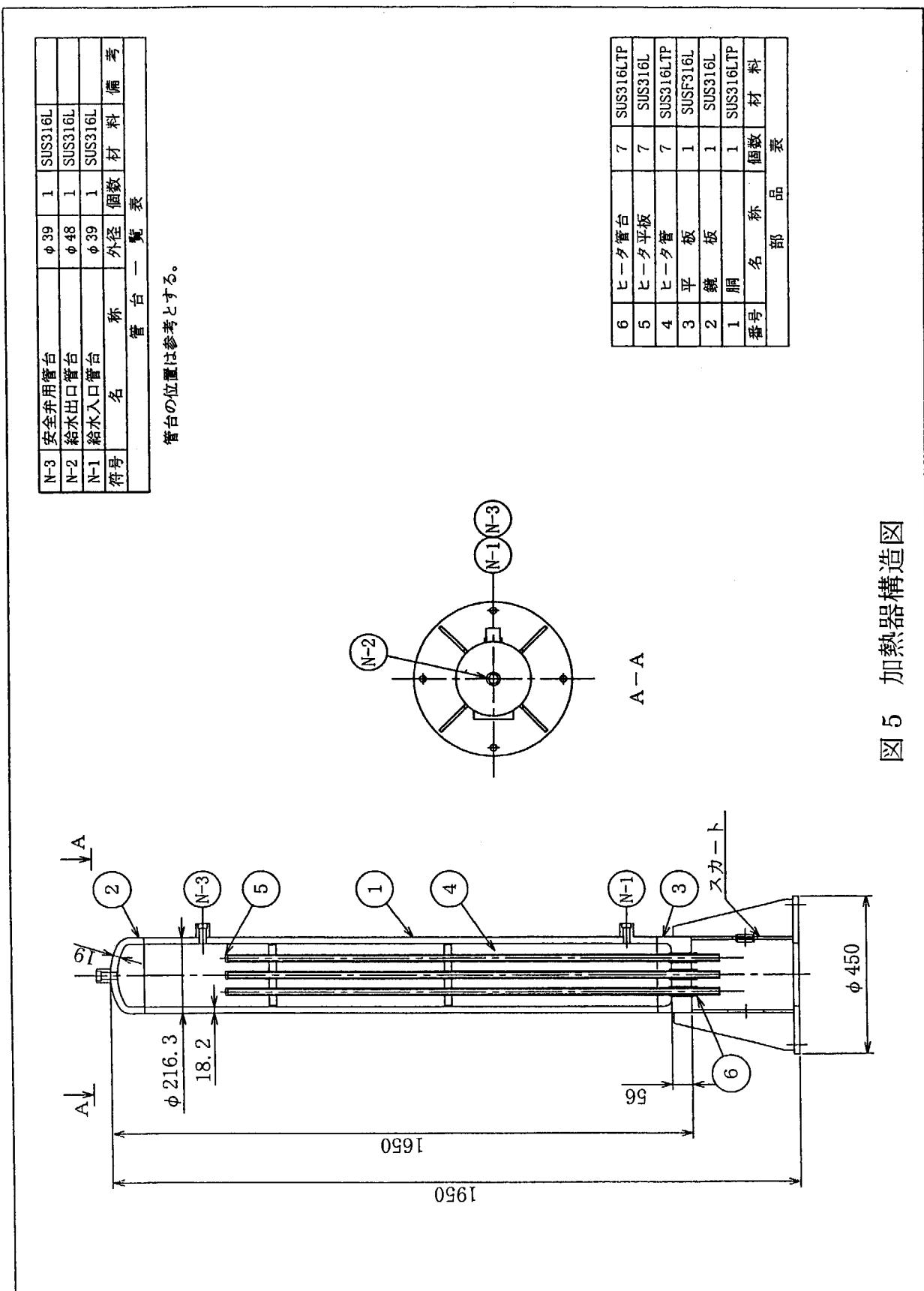
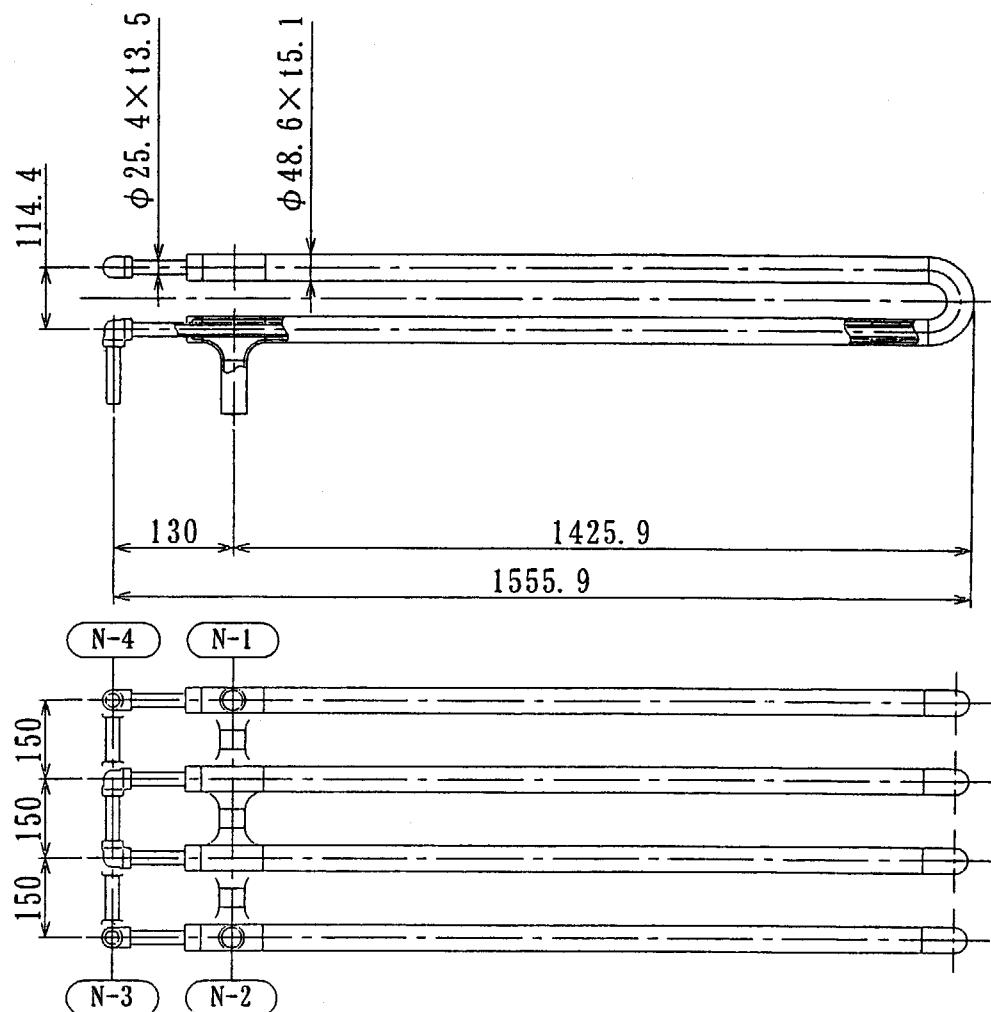


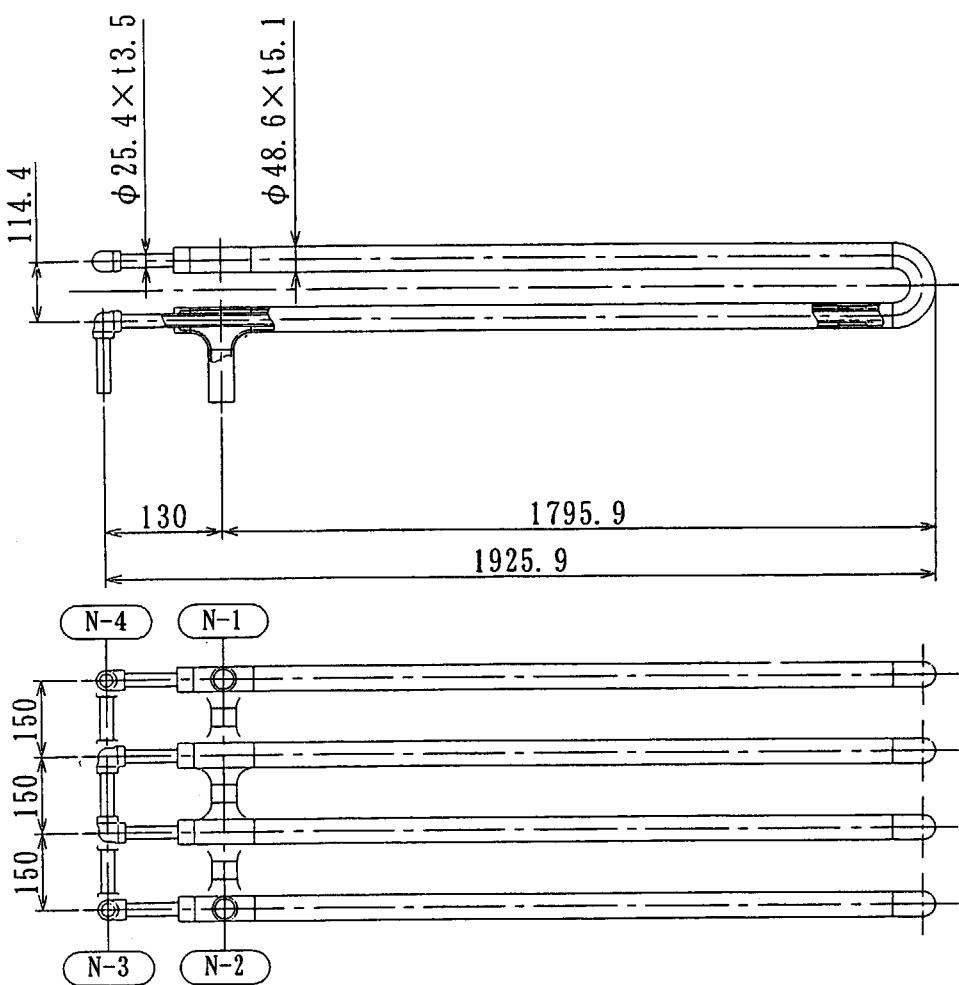
図4 主ポンプ構造図





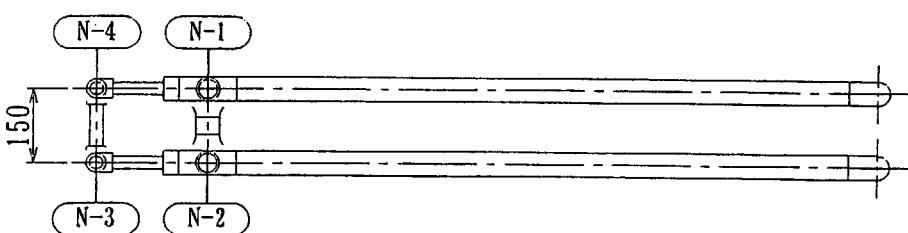
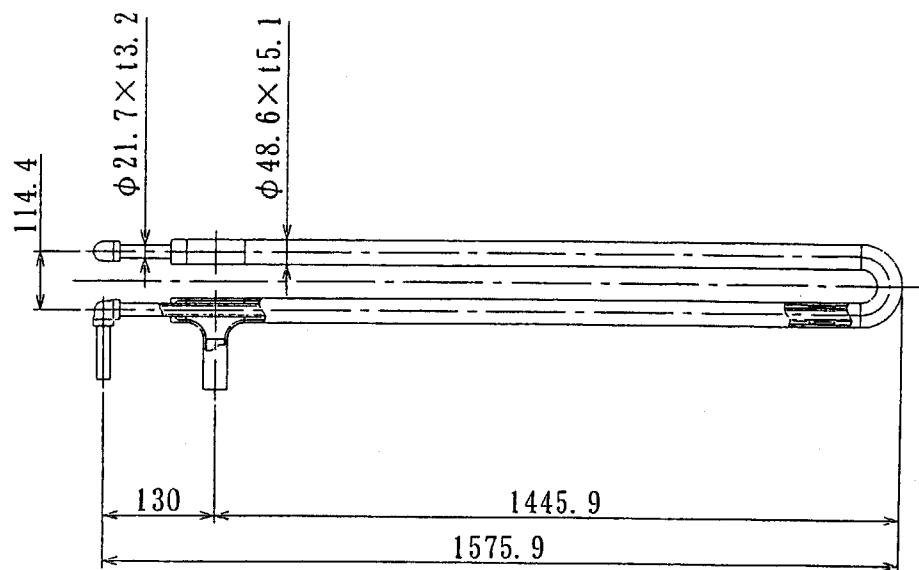
N-4	高温側出口	$\phi 25.4$
N-3	高温側入口	$\phi 25.4$
N-2	低温側出口	40A
N-1	低温側入口	40A
管台番号	管台名称	呼び径

図 6 予熱管構造図



管台番号	管台名称	呼び径
N-4	高温側出口	φ 25.4
N-3	高温側入口	φ 25.4
N-2	低温側出口	40A
N-1	低温側入口	40A

図 7 冷却管構造図

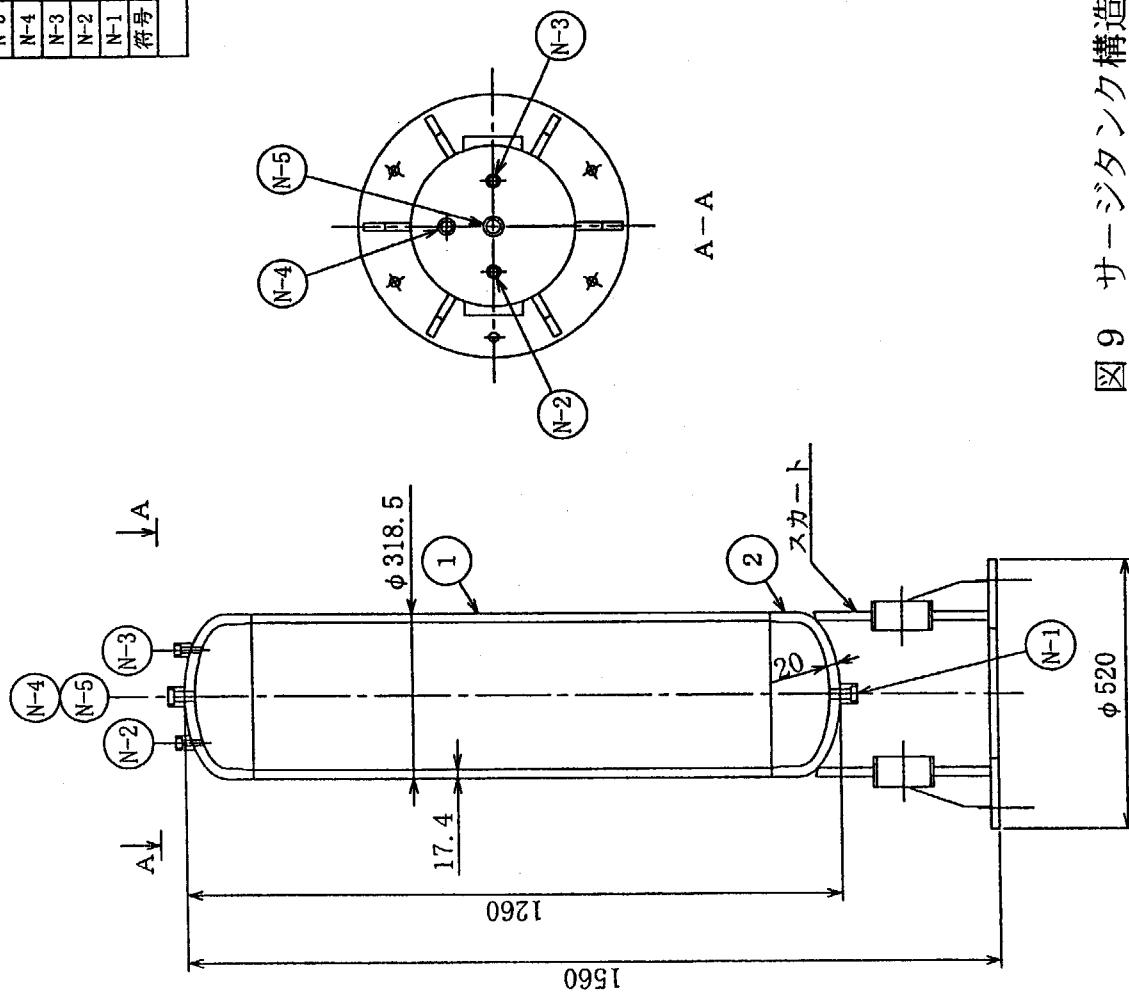


N-4	高温側出口	$\phi 21.7$
N-3	高温側入口	$\phi 21.7$
N-2	低温側出口	40A
N-1	低温側入口	40A
管台番号	管台名称	呼び径

図 8 サンプリング冷却器構造図

N-5	安全弁用管台	$\phi 39$	1	SUS316
N-4	圧力検出用管台	$\phi 33$	1	SUS316
N-3	カバーガス出口管台	$\phi 27$	1	SUS316
N-2	カバーガス入口管台	$\phi 27$	1	SUS316
N-1	給水加压用管台	$\phi 39$	1	SUS316
符号	名 称	外径	個数	材 料 備 考
	管 台 一 覧 表			

管台の位置は参考とする。



2	鏡 板	2	SUS316
1	脇	1	SUS316TP
番号	名 称	個数	材 料
	部 品 表		

図 9 サージタンク構造図

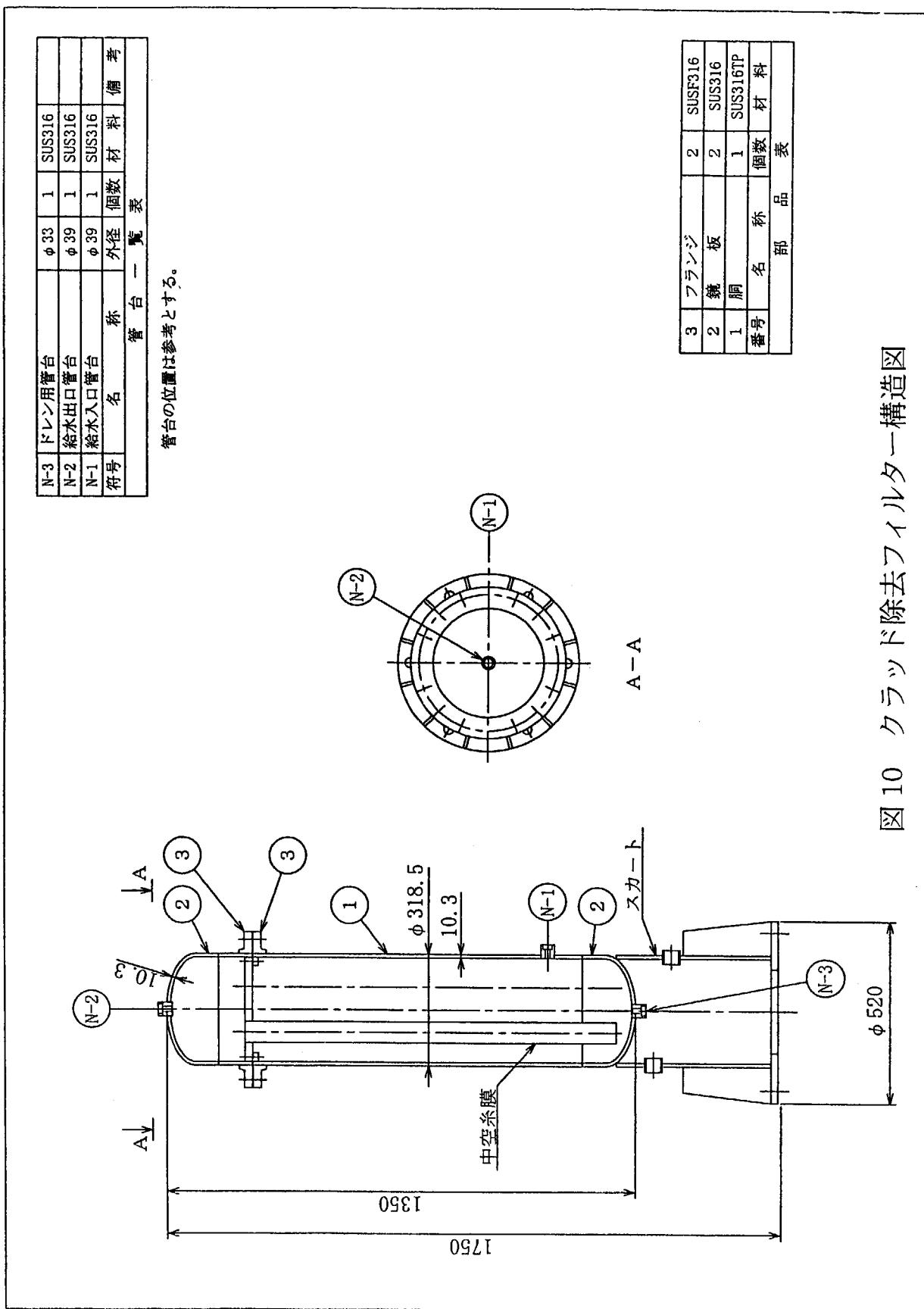
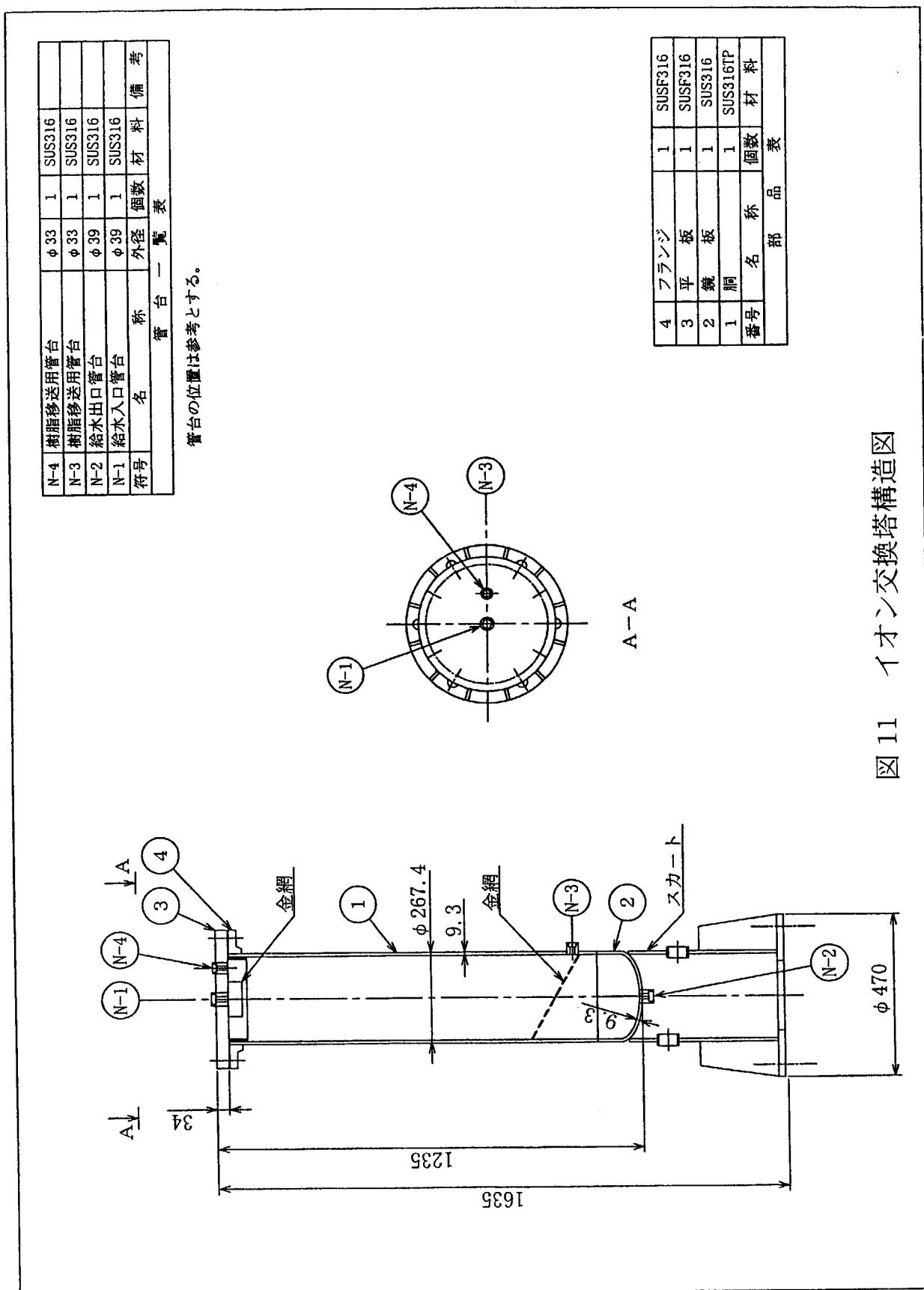


図 10 クラッド除去フィルター構造図



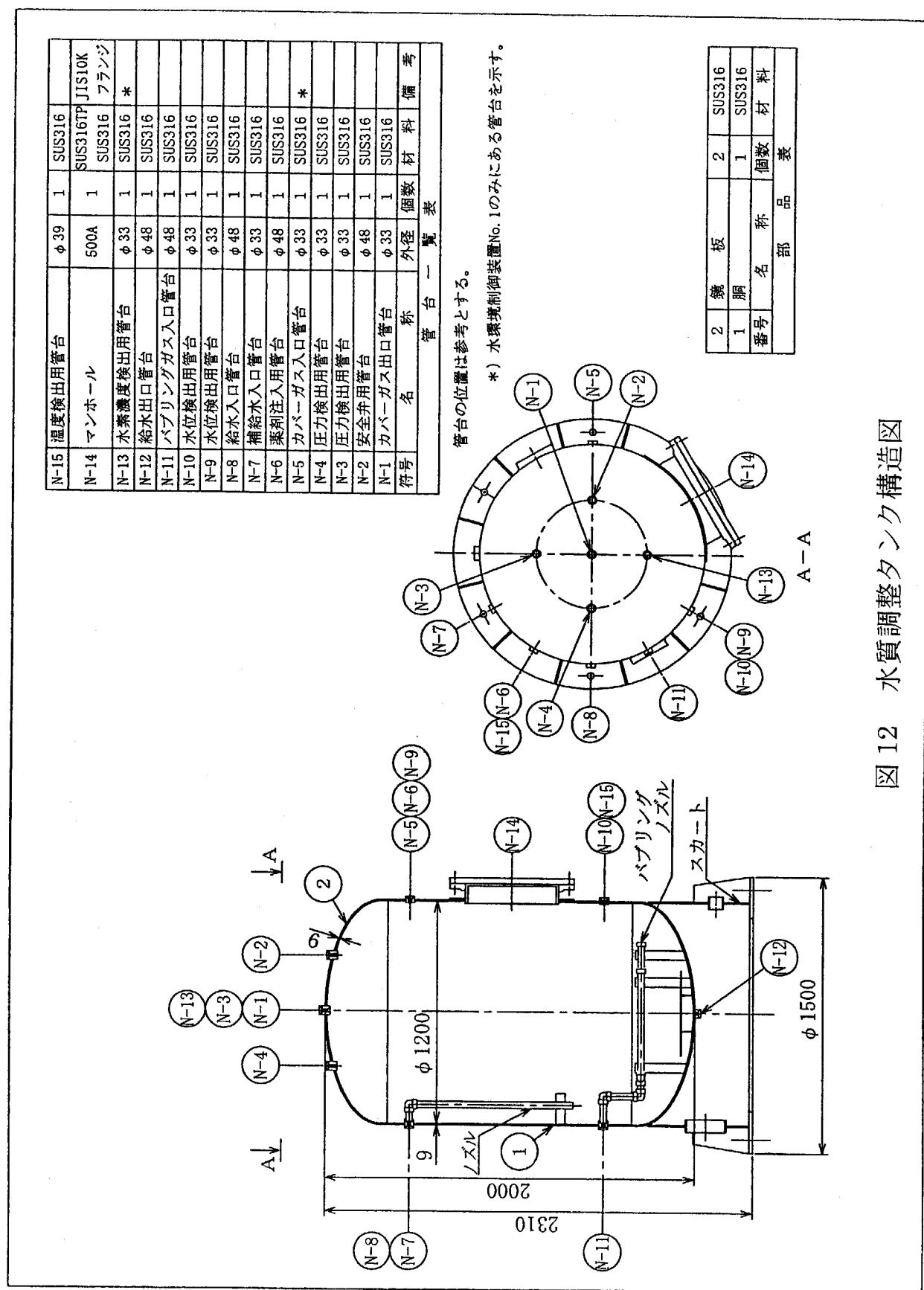


図 12 水質調整タンク構造図

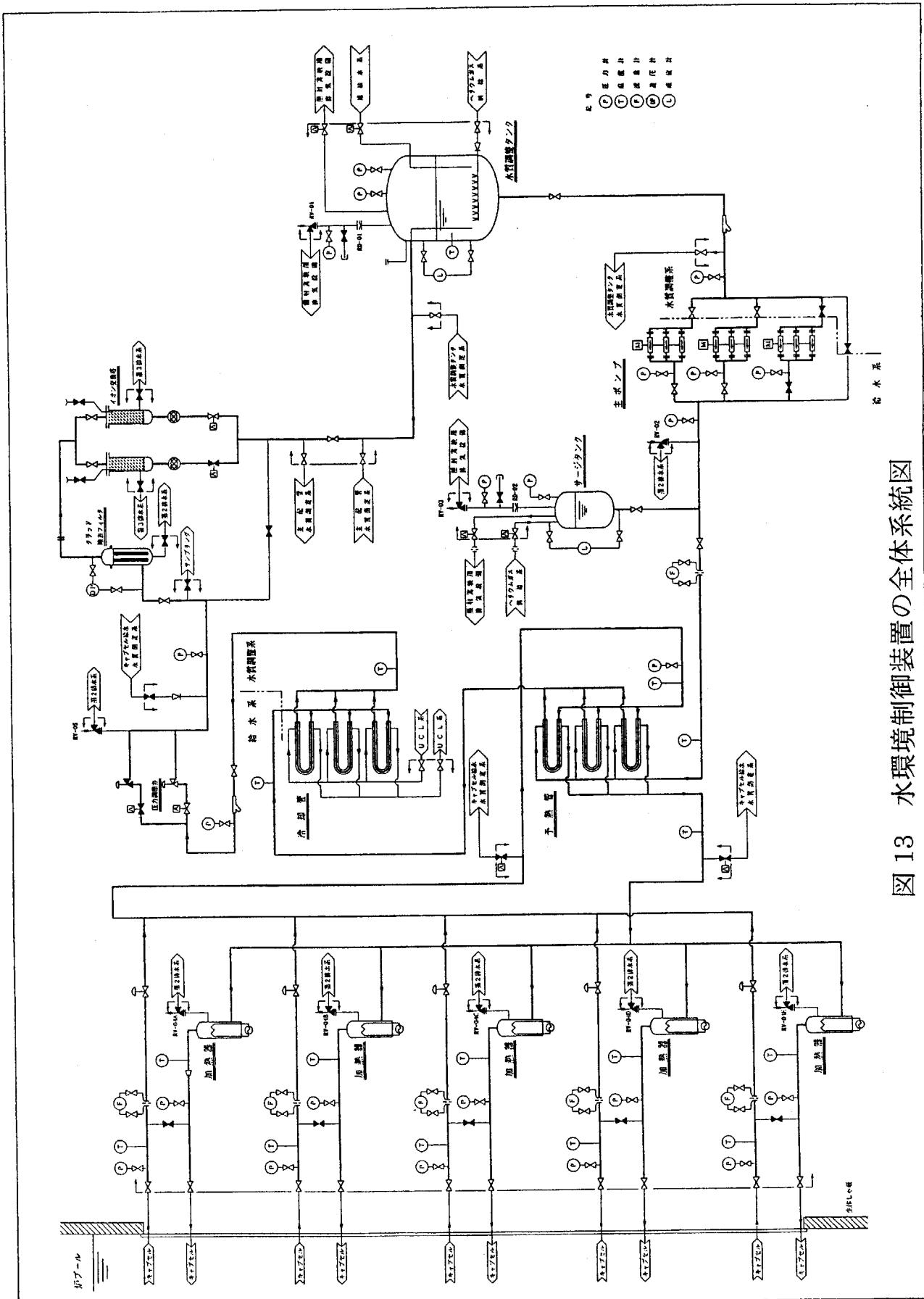


図 13 水環境制御装置の全体系統図

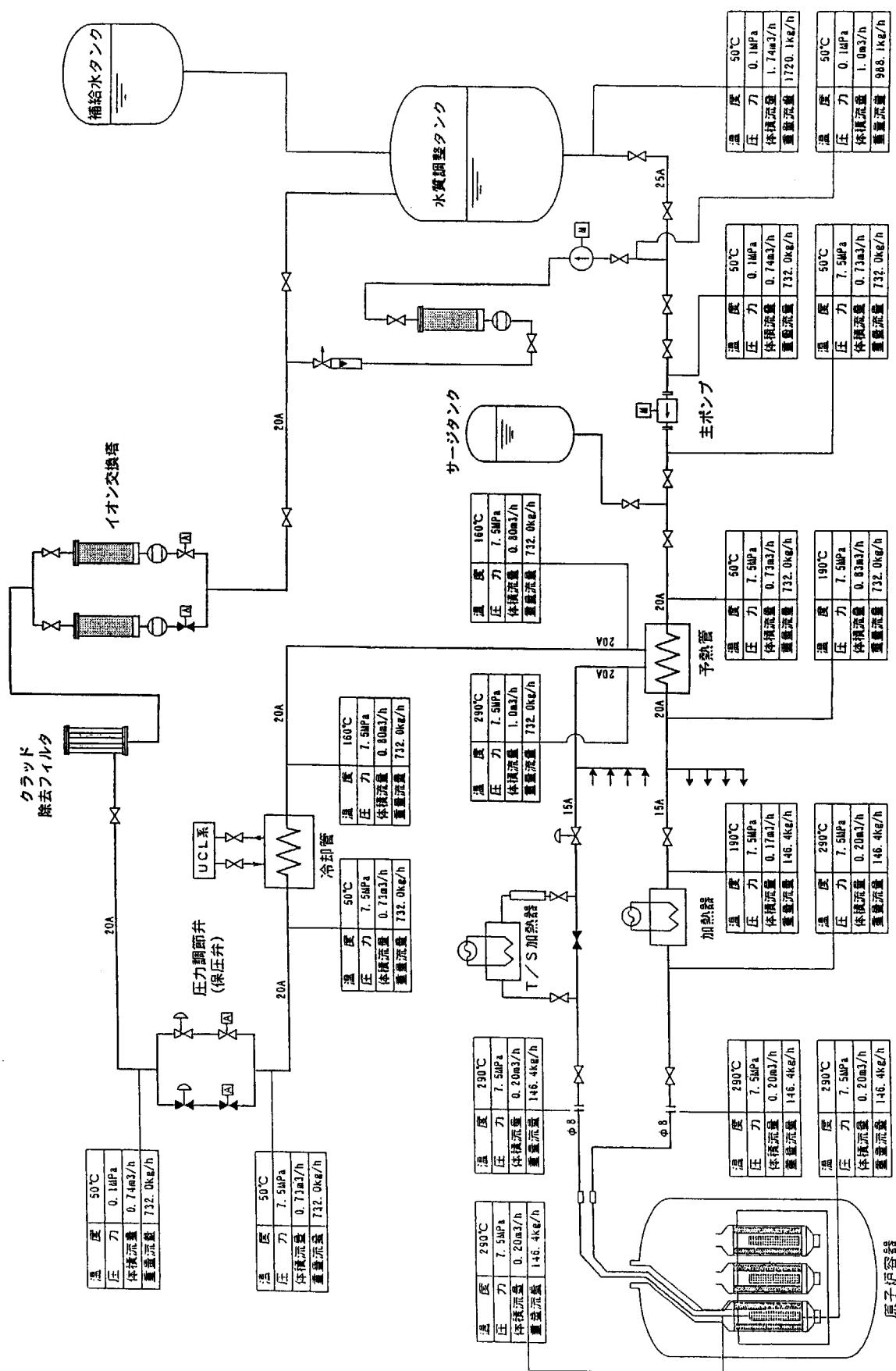


図 14 ヒートマスバランス (初期設計時)

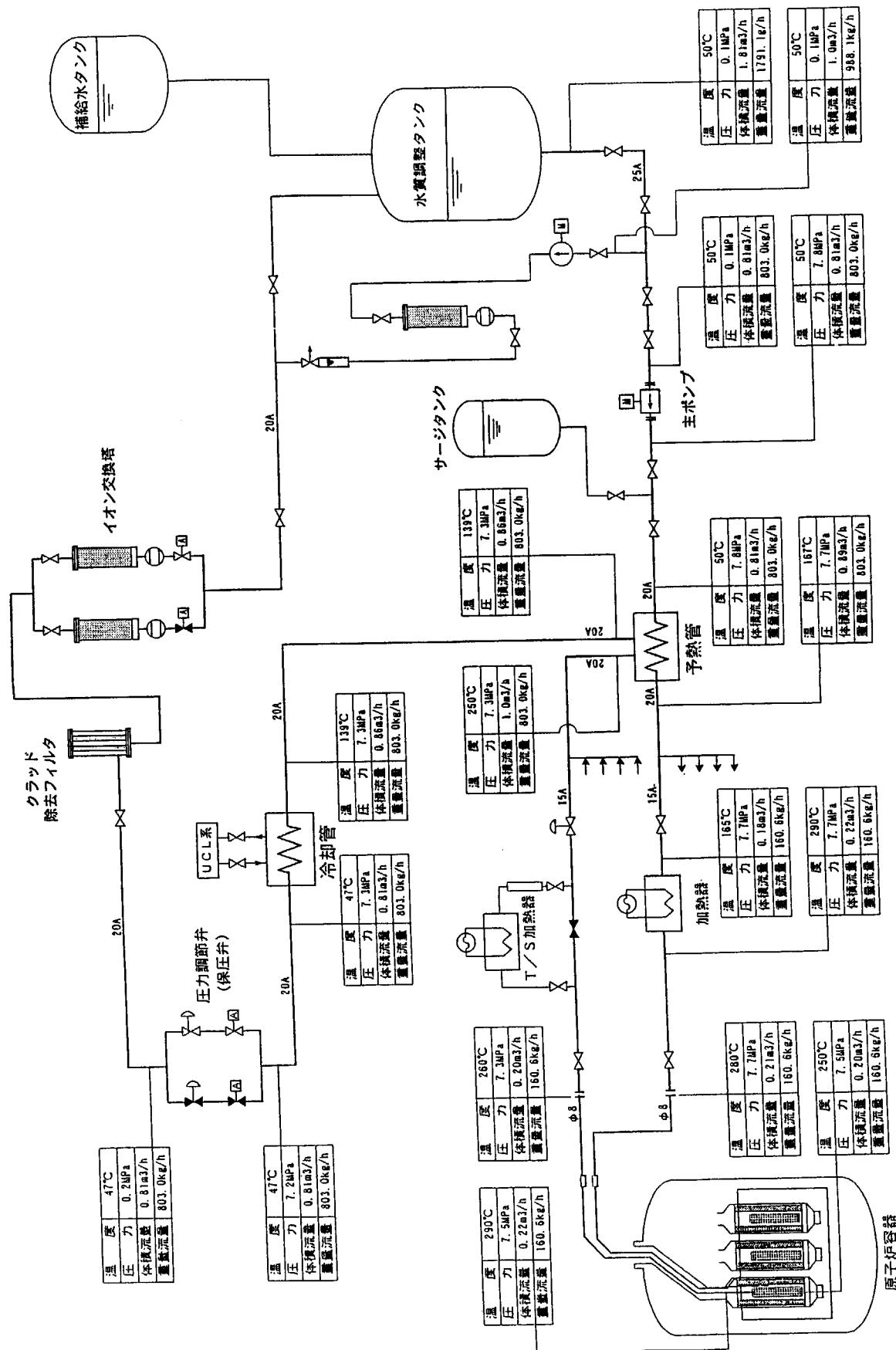


図 15 ヒートマスバランス (放散熱量、圧力損失を考慮)

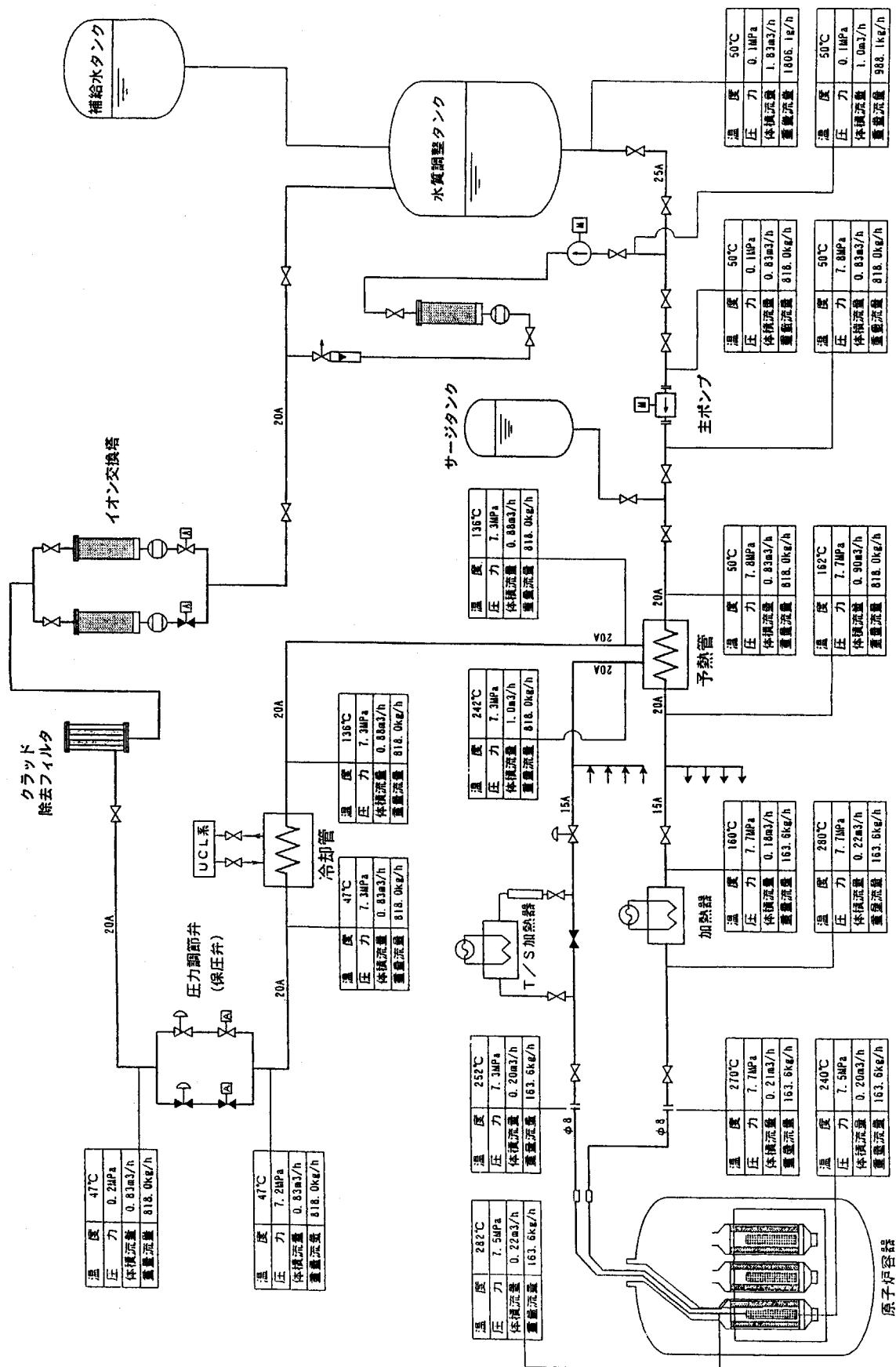


図 16 ヒートマスバランス(キャップセル入口 240°C/出口 282°C)

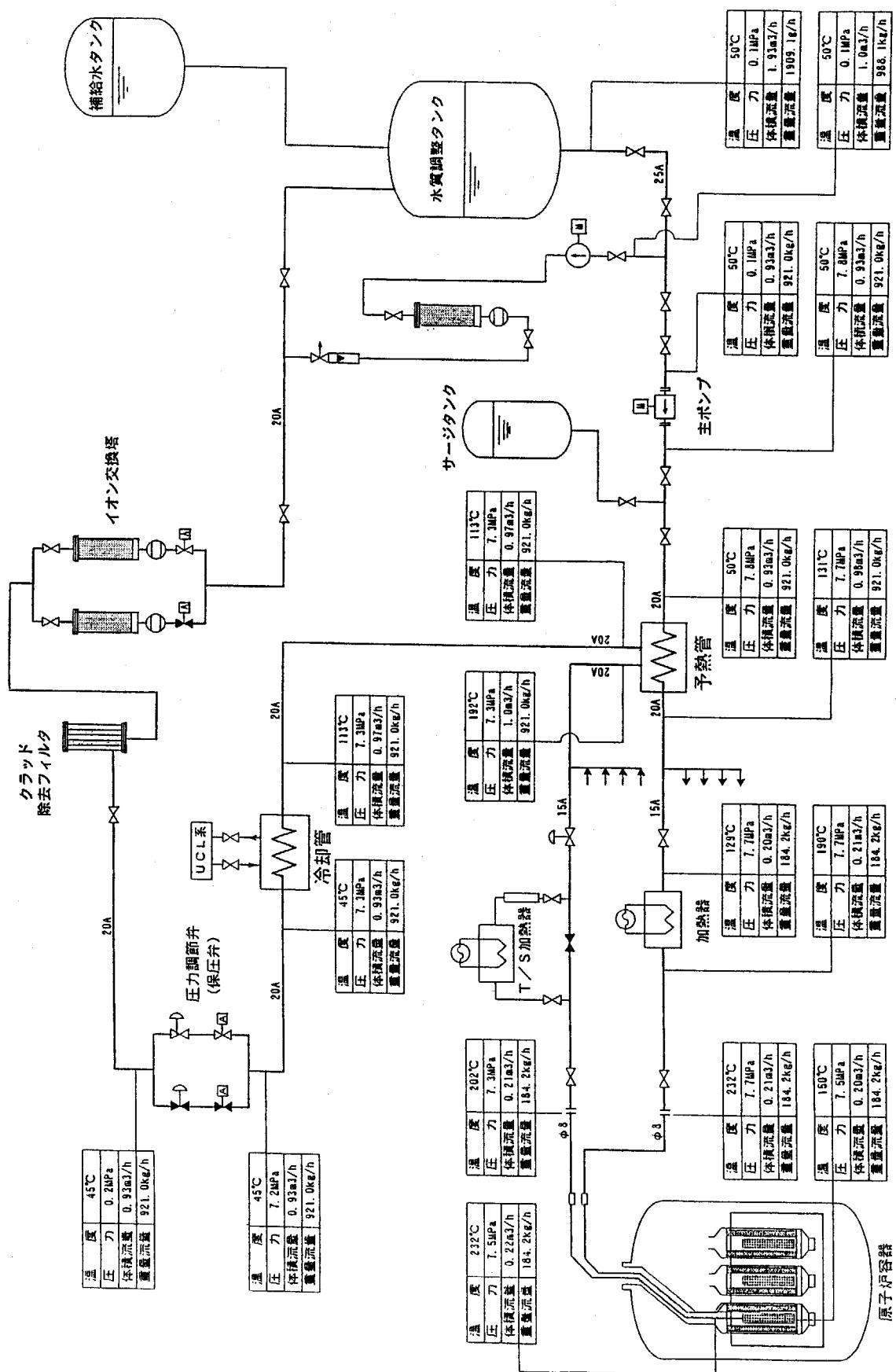
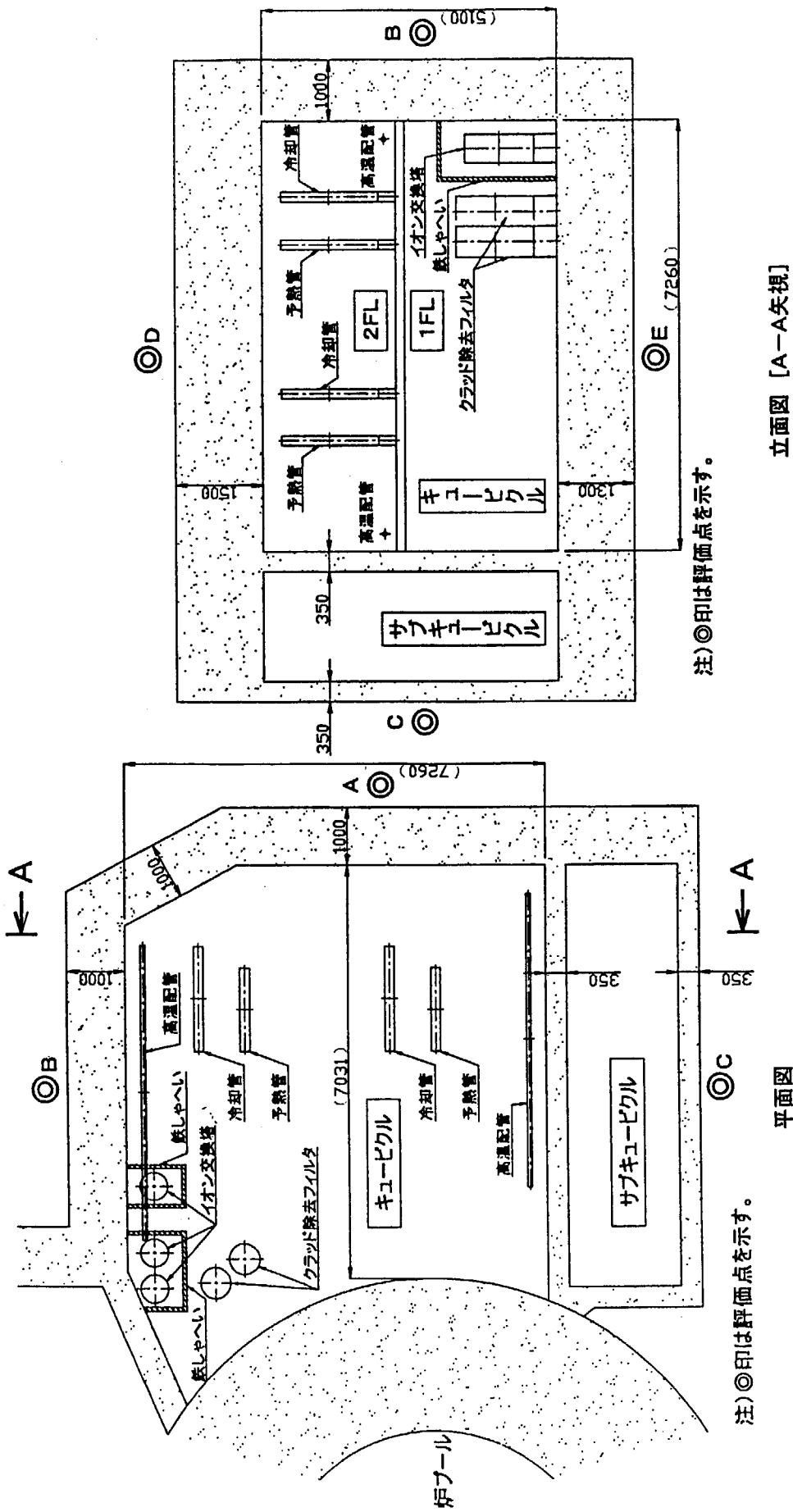


図 17 ヒートマスバランス(キャプセル入口 150°C/出口 232°C)



添付資料

系統内圧力変動の緩和方法の検討

はじめに

本検討の目的は、主ポンプの脈動、循環水サンプリング時の系統圧力低下などの循環水の圧力変動を吸収するため、サージタンク方式、アクチュームレータ方式の比較検討を行い、系統内圧力変動の緩和方法を決定するために行ったものである。

1. 解析対象

LASCC 水環境制御装置における主配管（主ポンプ出口から水質調整タンクまで）を解析対象とした。主配管は、原子炉容器入口で 5 系統に分岐されるが、今回は 5 系統のうちの 1 系統をモデル化し、計算・評価を実施した。モデル図を図 1-1 に、キャプセルの構造を図 1-2 に示す。

2. 解析使用コード及び解析項目

1 次元動解析コード「SOWACS」^{*1)}を用い、ポンプ出力をパラメータとしてサージタンク方式／アクチュームレータ方式における系統内圧力の解析を実施した。

3. 解析条件

(1) 材料定数

管材質	: SUS316
縦弾性係数	: 1.93×10^{10} kg/m ²
管内流体	: 水
水比重	: 998.2 kg/m ³
水体積弾性係数	: 2.38×10^8 kg/m ²
水動粘性係数	: 1.01×10^{-6} m ² /sec

(2) 境界条件

水質調整タンク	: 圧力一定 (1kg/cm ²)
サンプリングライン出口	: 圧力一定 (1kg/cm ²)
主ポンプ出力	: 4 項に示す。

4. 解析条件

系統内の圧力変化が懸念される初期立上時(最小流量 75ℓ/h)及び定格流量(1000ℓ/h)での運転時における、サージタンク方式／アクチュームレータ方式の系統内圧力の解析を実施した。また、サンプリング時の圧力変化についても解析を実施した。表 4.1 に解析条件を示す。

表 4.1 解析条件

解析条件		サージタンク方式	アキュームレータ方式
初期立上時	ポンプ出力	最小流量 (75ℓ/h; 実流量変化模擬)	
	圧力調整弁設定 ^{*1}	74kg/cm ² ^{*2}	
	初期系統内	ポンプ～圧力調整弁 ：75 kg/cm ² 圧力調整弁～タンク ：1 kg/cm ²	1 kg/cm ²
定格運転時	ポンプ出力	最大流量 (1000ℓ/h; 実流量変化模擬)	
	圧力調整弁設定 ^{*1}	75kg/cm ²	
	初期系統内	ポンプ～圧力調整弁 ：75 kg/cm ² 圧力調整弁～タンク ：1 kg/cm ²	解析実施せず。 定格運転時では、アキュームレータが機能するため、圧力変動は、±1～2%である。
サンプリング時	ポンプ出力	最大流量 (1000ℓ/h; 一定)	
	圧力調整弁設定 ^{*1}	74kg/cm ²	
	サンプリング流量	200cc/min	
	初期系統内	ポンプ～圧力調整弁 ：75 kg/cm ² 圧力調整弁～タンク ：1 kg/cm ² 減圧器～サンプリングライン出口 ：1 kg/cm ²	

*1：圧力調整弁（保圧弁）は差圧約 74kg/cm²の固定オリフィスとして条件設定を行った。

*2：サージタンク方式解析時、保圧弁は1秒にて差圧約 75kg/cm²になるよう条件設条件設定を行った。

5. 解析結果

5.1 初期立上時（最小流量 75ℓ/h）

(1) サージタンク方式

図 5-1 に圧力変化を、図 5-2 に流量変化を示す。初期ポンプ起動時においてはキャップセルで振幅約 0.6kg/cm²の脈動が発生するが、定常状態時では振幅約 0.02kg/cm²と小さい値となる。

(2) アキュームレータ方式

図 5-3 に圧力変化を、図 5-4 に流量変化を示す。キャップセルでの圧力変化は振幅約 0.04kg/cm²と小さい値となっているが、初期圧力上昇率は 30 kg/cm²/5s と大きい。

5.2 定格流量時（最大流量 1000ℓ/h）

(1) サージタンク方式

図 5-5 に圧力変化を、図 5-6 に流量変化を示す。定格流量においてはキャップセルで振幅約 0.3kg/cm²の脈動が発生する。

5.3 サンプリング時

(1) サージタンク方式

図 5-7 にサンプリング時の圧力変化を示す。サンプリング開始時は振幅約 0.5 kg/cm^2 程度の脈動が生じるが、約 3 秒ほどで元の圧力に回復している。

(2) アキュームレータ方式

図 5-8 に圧力変化を示す。サンプリング開始時から圧力降下がはじまり、約 5 秒で 1.8 kg/cm^2 降下したまま定常となり、圧力は回復しない。

6. 評価

初期立上時、定格流量時、サンプリング時の 3 つの条件においてサージタンク方式／アキュームレータ方式の系統内圧力変化について解析を実施した。

初期立上時及び定格流量時においては、サージタンク方式／アキュームレータ方式ともに圧力変化は目標値である 1.0 kg/cm^2 以下であり問題ないが、アキュームレータ方式では、初期圧力上昇率が $30 \text{ kg/cm}^2/5\text{s}$ と大きい。また、サンプリング時において、サージタンク方式は系統内圧力を保持できるものの、自由液面を持たないアキュームレータ方式では系統内圧力が約 1.8 kg/cm^2 降下してしまう。

アキュームレータ方式で上記圧力降下を無くすためには、サンプリングライン出口に圧力調整弁を設置し、さらに主配管に流量調節弁を設置する等の対応が必要となる。

以上より、系統内の圧力変化を最小限にするため、サージタンク方式を採用する。サージタンク容量は、水容積 50ℓ ／空間容積 25ℓ 、合計 75ℓ とする。 200cc/min ($12\ell/\text{h}$) でサンプリングした場合、サージタンク液位が約半分となる 2 時間の連続サンプリングが可能である。また、サージタンク液位が低下した場合は、液位計 L.L. 警報にて液位低下を検知しポンプストローク調整により N.L. までサージタンク液位を回復する自動的シーケンスとする。

- 1) SOWACS-III; Sodium water reaction in compressible Sodium-III 大リーグ Na-水反応解析コード/前川勇、進藤嘉久（川崎重工業（株））

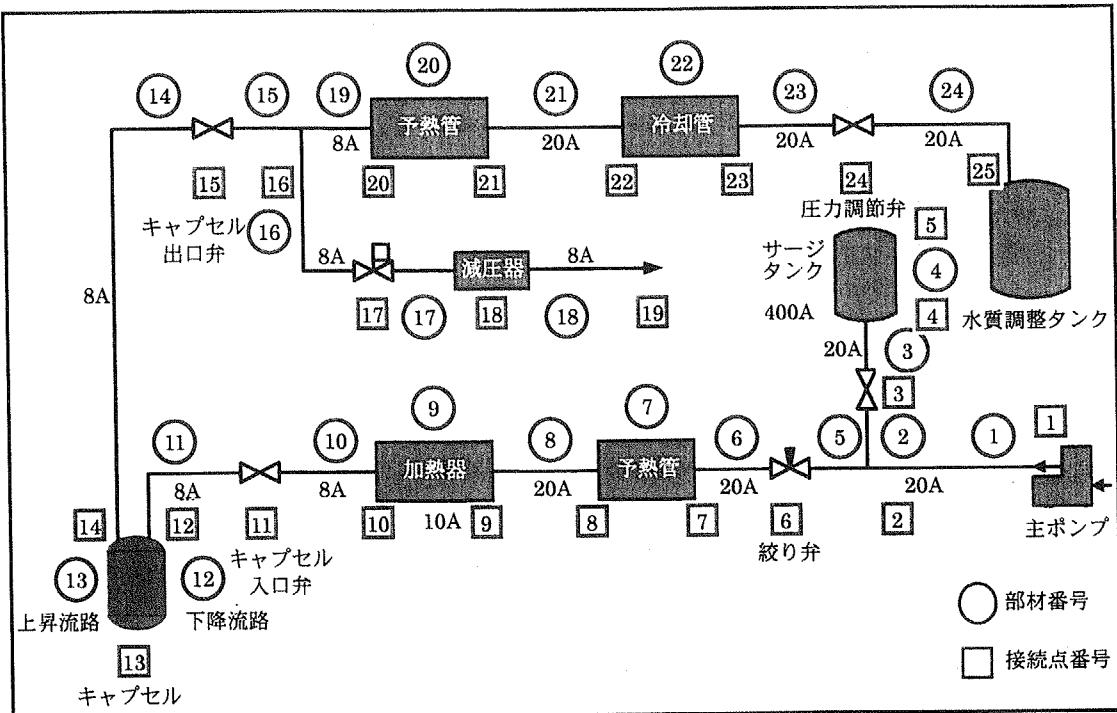


図 1-1. 解析モデル図

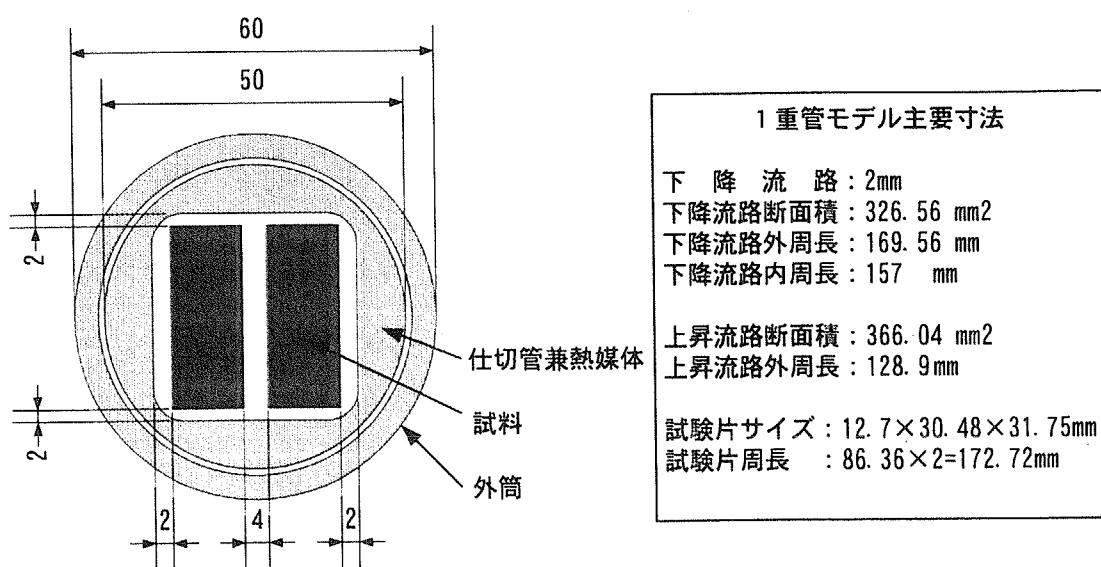


図 1-2. キャプセル構造図（1重管モデル）

This is a blank page.

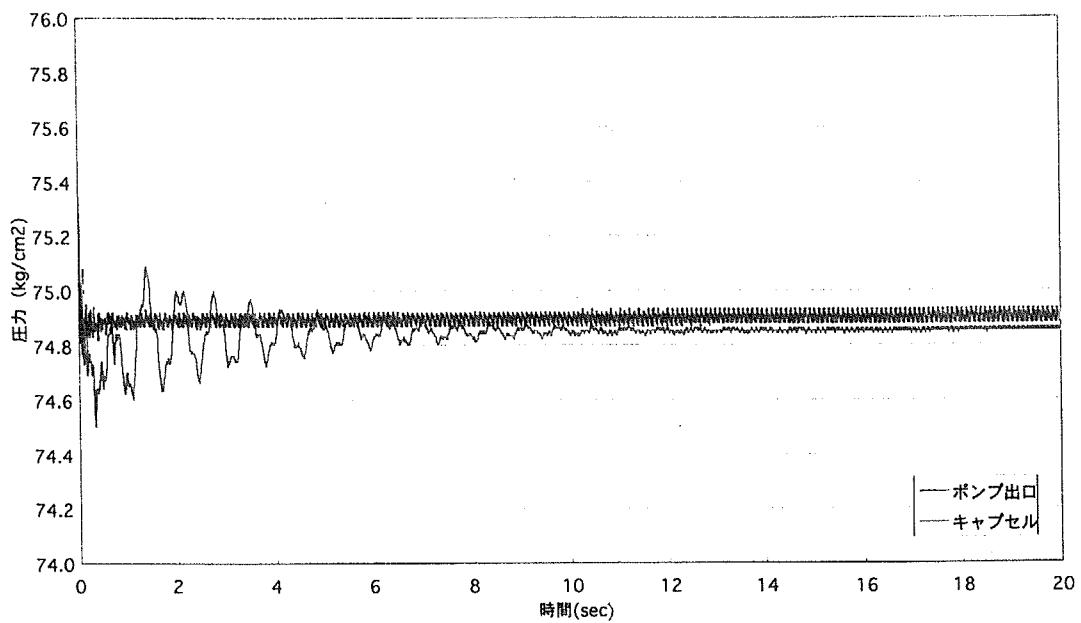


図 5-1. サージタンク方式最小流量時圧力変化
(起動時)

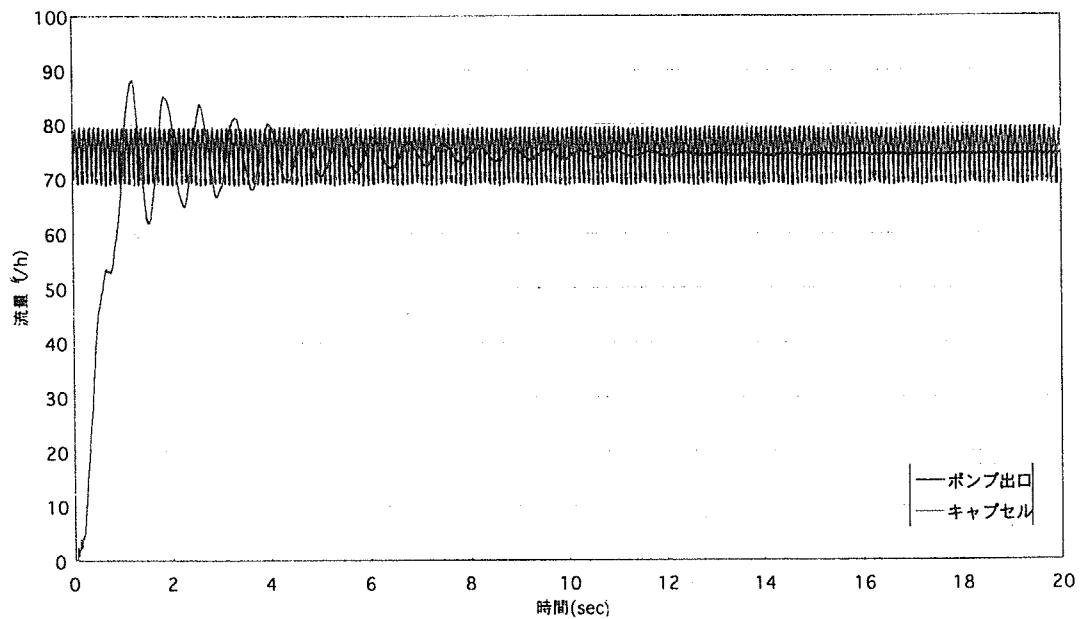


図 5-2. サージタンク方式最小流量時流量変化
(起動時)

This is a blank page.

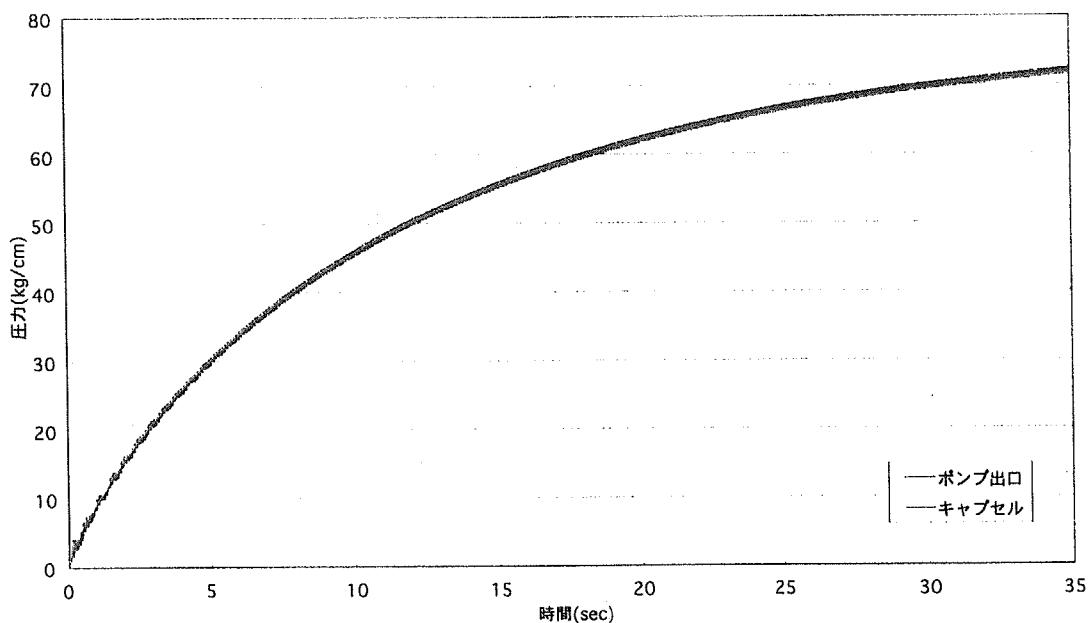


図 5-3. アキュムレータ方式最小流量時圧力変化
(起動時)

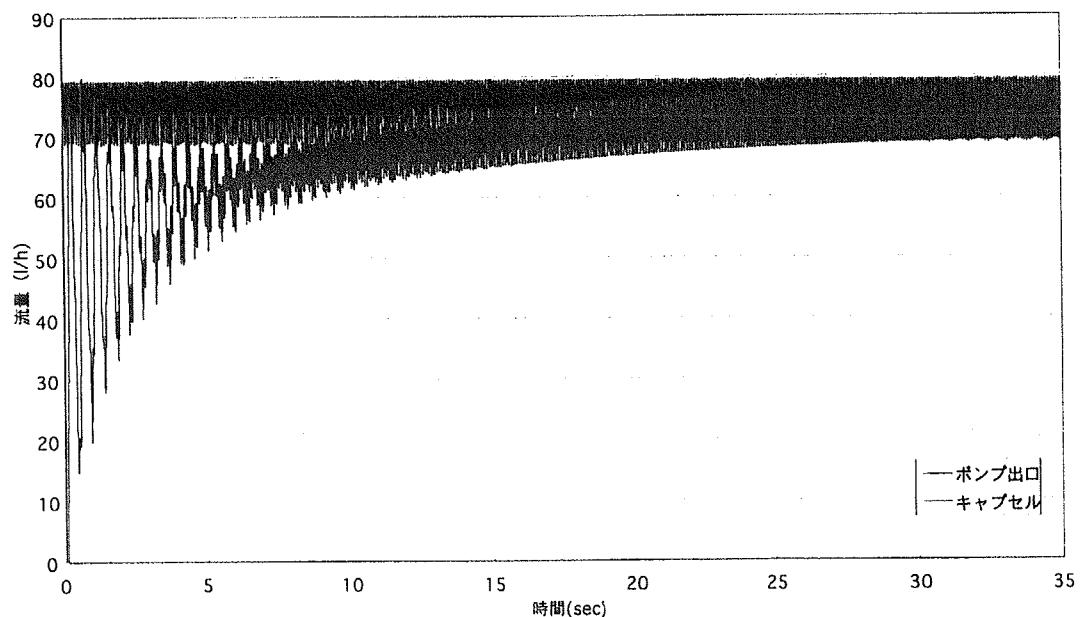


図 5-4. アキュムレータ最小流量時流量変化
(起動時)

This is a blank page.

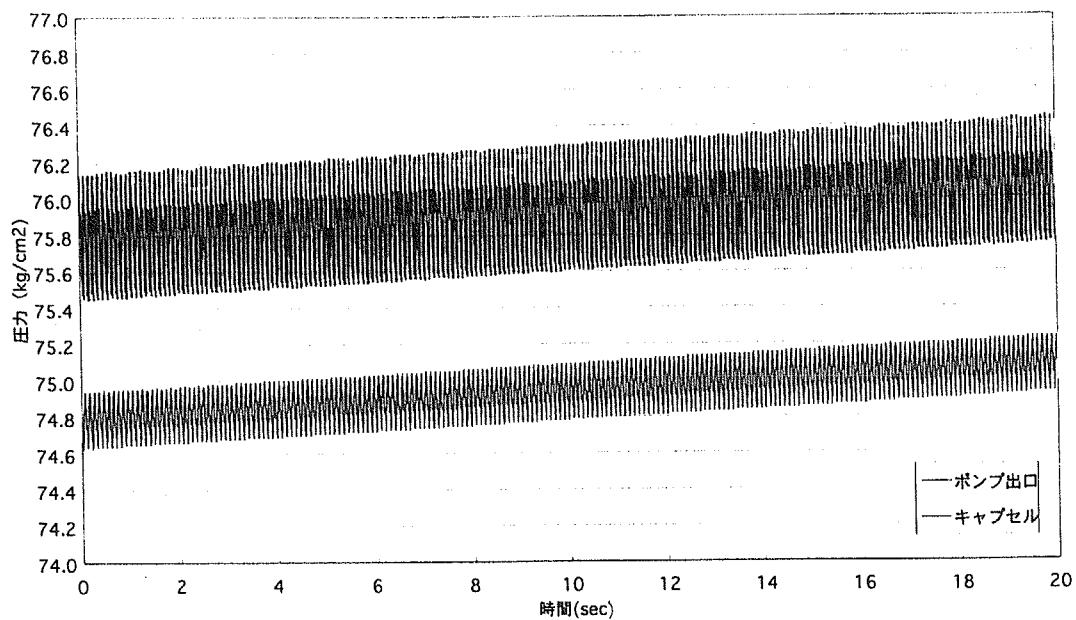


図 5-5. サージタンク方式定格流量時圧力変化
(定格運転時)

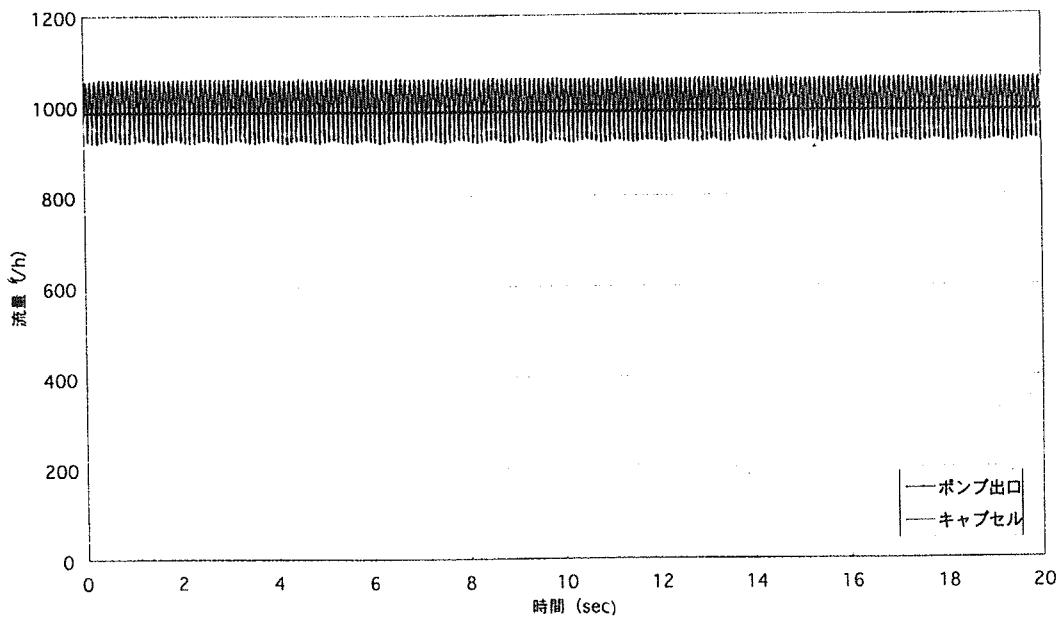


図 5-6. サージタンク方式定格流量時流量変化
(定格運転時)

This is a blank page.

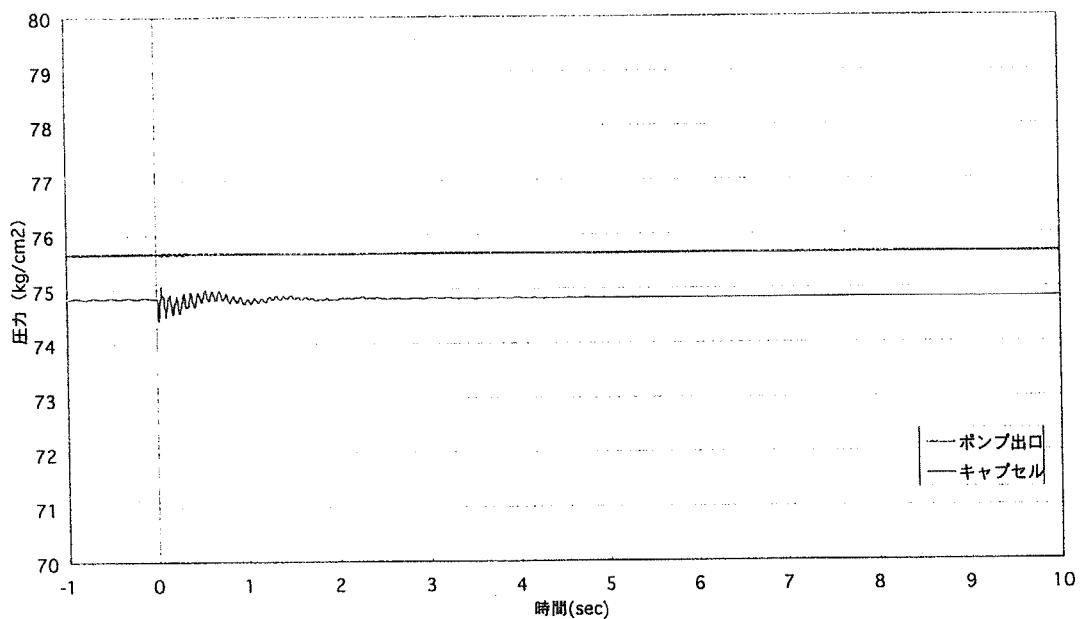


図 5-7. サージタンク方式サンプリング時圧力変化

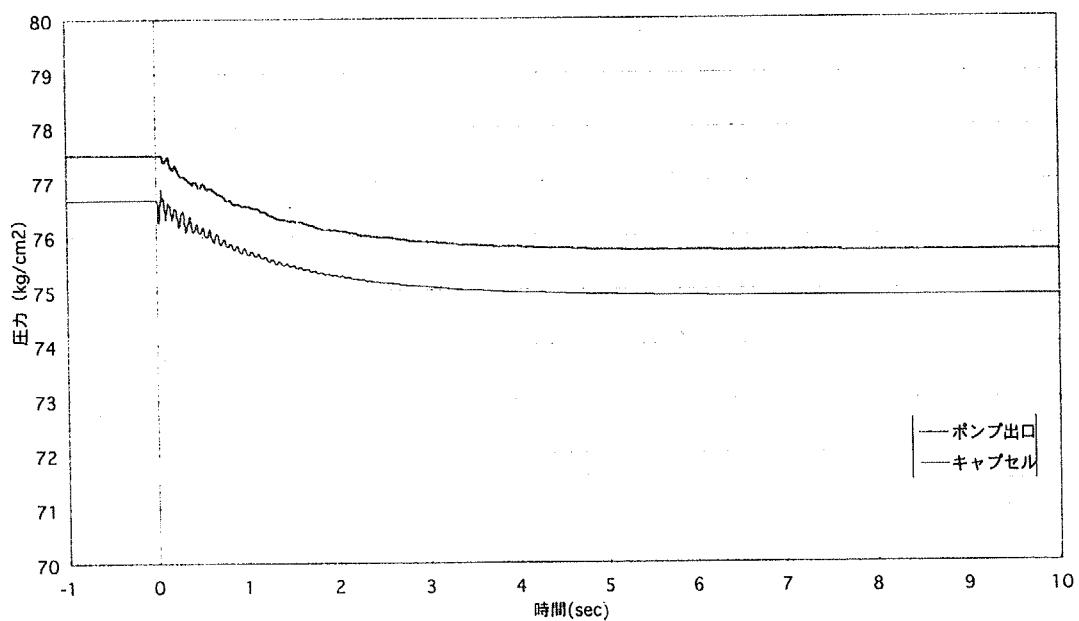


図 5-8. アキュームレータ方式サンプリング時圧力変化

This is a blank page.

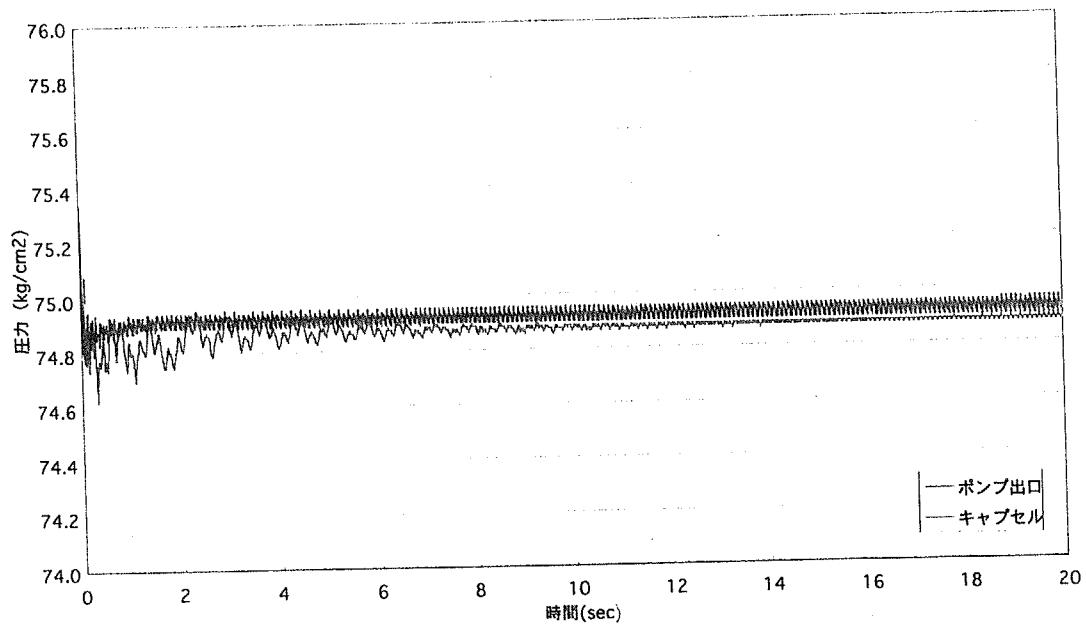


図 5-9. サージタンク方式最小流量時圧力変化
(起動時：圧力調整弁開時間 2秒)

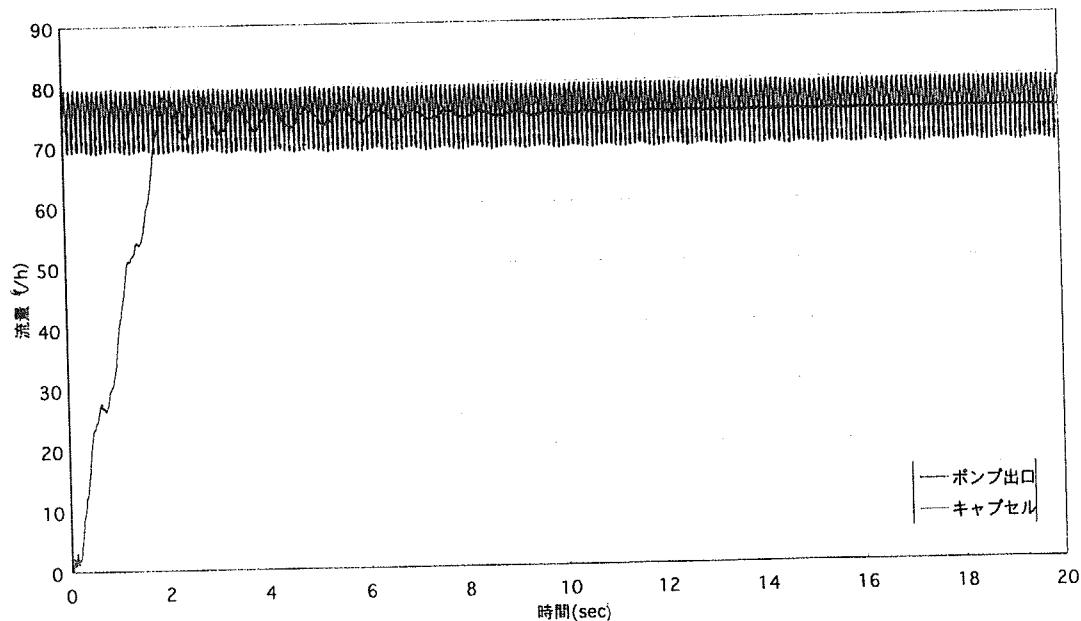


図 5-10. サージタンク方式最小流量時流量変化
(起動時：圧力調整弁開時間 2秒)

This is a blank page.

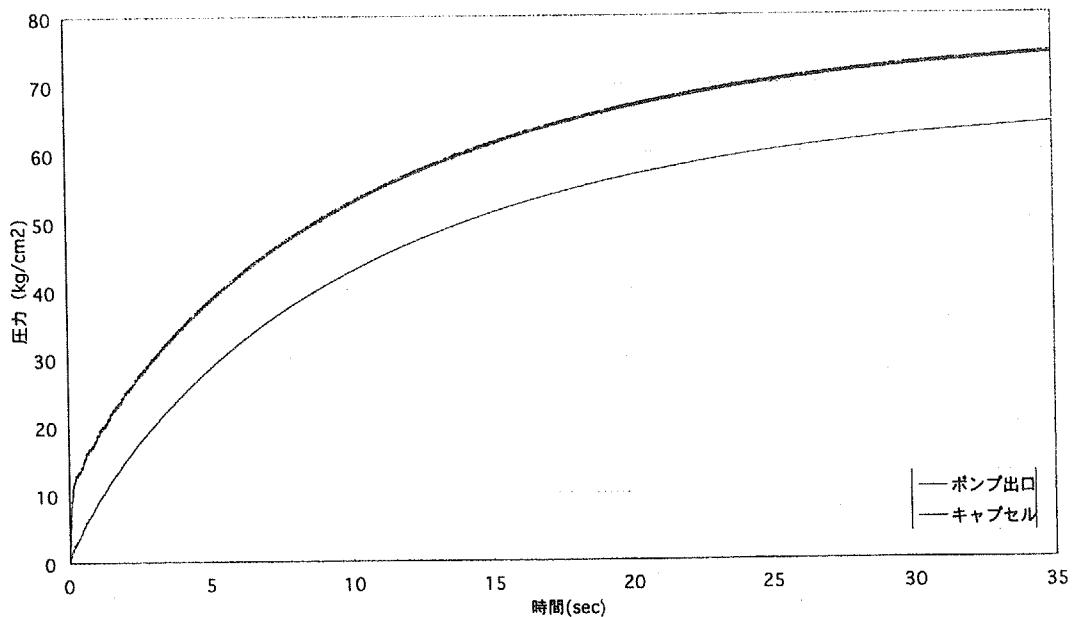


図 5-11. アキュームレータ方式最小流量時圧力変化
(起動時：絞り弁差圧 10kg/cm²に設定)

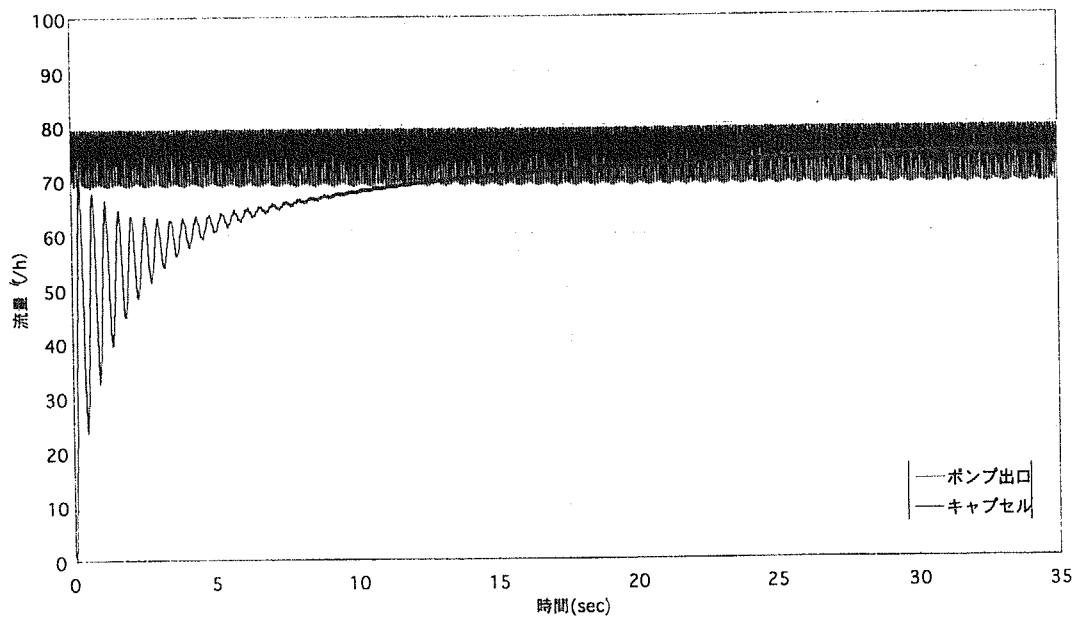


図 5-12. アキュームレータ方式最小流量時流量変化
(起動時：絞り弁差圧 10kg/cm²に設定)

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
功率、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	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束密度	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	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	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

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

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atto	a

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、メット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

力	N(=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
1	0.101972	0.224809	
9.80665	1	2.20462	
4.4822	0.453592	1	

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s} = 10 \text{ P(ポアズ)} (\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St(ストークス)} (\text{cm}^2/\text{s})$$

圧力	MPa(=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
力	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
0.0980665	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
0.101325	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
1.33322 × 10 ⁻⁴	1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²
6.89476 × 10 ⁻³	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 cal = 4.18605 J(計量法)
1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸	= 4.184 J(熱化学)	
9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹	= 4.1855 J(15 °C)	
3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵	= 4.1868 J(国際蒸気表)	
4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹	仕事率 1 PS(仏馬力)	
1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹	= 75 kgf·m/s	
1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸	= 735.499 W	
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		

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad
1	2.70270 × 10 ⁻¹¹		1	100	
3.7 × 10 ¹⁰		1	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	

(86年12月26日現在)

—ASCC照射試験のための水環境制御装置に関する設計検討

R100

古紙配合率100%
白色度70%再生紙を使用しています。