

JAERI-M
9910

蒸気圧縮型蒸発処理装置の
建設と運転結果

1982年1月

西沢 市王・坂本 勉・勝山 和夫
進士 義正・三戸 規生・松元 章

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

JAERI-M 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。
入手の問合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）
あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城
県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.
Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Section, Division
of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun,
Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1982

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 山田軽印刷所

蒸気圧縮型蒸発処理装置の建設と運転結果

日本原子力研究所大洗研究所管理部

西沢 市王・坂本 勉・勝山 和夫
進土 義正・三戸 規生・松元 章⁺

(1981年12月25日受理)

3m³/Hの処理能力をもつ蒸気圧縮型蒸発装置を、1978年3月に設置した。設置後、コールド試験、ホット試験を実施し装置の特性、最適運転条件を調べた。続いて実廃液の処理運転及び装置のメンテナンスについて経験を積んできた。これらの経験から、次のことが確認された。

- (1) 設計条件である定格処理量 3m³/Hが満足できた。また処理量を50%まで制御して運転できた。さらに除染係数(DF)は 10³以上が得られた。
- (2) 運転維持費に関する蒸発比は、単効用蒸発処理装置と比較して14倍になった。したがって加熱源としてのエネルギーは 1/14 ですむ。
- (3) 伝熱面に付着したスケールは、化学除染法でほぼ完全に除去できた。
- (4) 実廃液を約 3,000 m³処理した時点においても、主要機器の性能低下は見られない。このことから、放射性廃液の処理に蒸気圧縮式蒸発処理法も有力な処理手段であることが実証された。

+) 東海研究所保健物理部

Construction and Operation of the Vapor Compression Evaporator
Radioactive Waste Treatment Facility

Ichio NISHIZAWA, Tsutomu SAKAMOTO, Kazuo KATSUYAMA,
Yoshimasa SHINJI, Norio MITO and Akira MATSUMOTO⁺

Division of Administrative Services,
Oarai Research Establishment, JAERI

(Received December 25, 1981)

The vapor compression evaporator plant with a capacity of $3 \text{ m}^3/\text{hr}$ was installed at the Japan Atomic Energy Research Institute, Oarai Establishment in March of 1978. After completion, in order to ascertain both the characteristic inherent in the plant and the optimum operating condition, a series of tests were conducted using both non-radioactive liquid and a radioactive solution which were prepared for these purposes. As a final step we ran the facility to gain experience in the operation and maintenance of the plant using real liquid radioactive waste.

The items ascertained through conducting these tests, the operation and maintenance of the facility were as follows; (1) the designed treatment capacity of $3 \text{ m}^3/\text{hr}$ was attained; (2) the controllability of the plant was satisfactory down to the half capacity ($1.5 \text{ m}^3/\text{hr}$); (3) the decontamination factor was greater than 10^3 ; (4) the evaporation factor which has strong bearings on the operating cost was 14 times as high as a common single-effect evaporator, therefore, only one-fourteenth the energy is needed as a heat source to run the plant; (5) scales on the heat transferring region could be entirely removed with a chemical agent; and (6) after having processed actual radioactive liquid waste of $3,000 \text{ m}^3$, no main component of the plant showed any sign of deterioration.

The results obtained showed that the vapor multi-effect compression evaporator is one of the most promising ways for radioactive liquid waste treatment.

Keywords: Vapor Compression Evaporator, Decontamination Factor, Evaporation Factor, Operating Cost, Chemical Descaling, Vapor Compressor, Antifoaming Effect, Over-All Heat Transfer Coefficient, Mass and Heat Balance

+) Division of Heat Physics, Tokai Research Establishment, JAERI

目 次

1. はじめに.....	1
2. 装置の設計仕様.....	1
2.1 装置の概要.....	1
2.2 装置の設計条件.....	2
2.3 各機器の設計.....	3
3. 建 設.....	4
4. 試運転.....	5
4.1 コールド試験.....	5
4.2 ホット試験.....	8
5. 運転実績.....	9
6. メンテナンス.....	10
7. まとめ.....	11
7.1 装置の運転特性.....	11
7.2 メンテナンス結果.....	12
8. おわりに.....	12
参考文献.....	13

1. Introduction	1
2. Design Specification	1
2.1 Dutline of Facility	1
2.2 Design Basis	2
2.3 Design of Component	3
3. Construction	4
4. Operation Test	5
4.1 Cold Test	5
4.2 Hot Test	8
5. Operating Result	9
6. Maintenance	10
7. Gained Experience	11
7.1 Experience in Operation	11
7.2 Experience in Maintenance	12
8. Conclusion	12
Reference	13

1. はじめに

原研、大洗研究所を中心とする大洗地区から発生する低レベル廃液 ($< 1 \times 10^{-3} \mu\text{Ci}/\text{ml}$) については、これまで化学処理装置 ($10 \text{ m}^3/\text{H}$) で対処してきた。その後、排出される廃液の性状が多様化の傾向にあることと、処理済廃液の海洋放流放射能低減のため、さらに $3 \text{ m}^3/\text{H}$ の処理能力をもつ蒸気圧縮型蒸発処理装置を設置した。

放射性廃液の「蒸気圧縮式蒸発処理法」は、廃液の処理過程で発生する蒸発蒸気を圧縮して温度を高め、これを加熱蒸気として再利用する方式である。

本方式は、従来採用されてきた「単効用蒸発処理法」¹⁾（廃液の加熱蒸気を別途製造して供給する）に比べ、加熱源が大巾に軽減できること、冷却水量が少量ですむことなどの利点をもっているので、比較的大容量の処理が必要な施設では本方式が有利であり、諸外国、特に欧州諸国では、この方式が採用されてきている例が多い。^{2), 3)} しかし、国内では実用化が試みられたことがあるものの、操作が複雑であるなどの理由で、実用に供されるまでに至っていなかった。

本報告は、この蒸気圧縮型蒸発処理装置の設計、建設、コールド試験、ホット試験、実処理及びメンテナンス結果についてまとめたものである。

2. 装置の設計仕様

2.1 装置の概要

本装置は $3 \text{ m}^3/\text{H}$ の処理能力をもつ蒸気圧縮型蒸発装置であり、そのフローを Fig. 1 に、また装置の熱収支を Fig. 2 に示す。

装置のスタートアップにあたっては、蒸発缶内廃液を予め補助加熱器で 100°C まで加温し、蒸気室、蒸気圧縮機及び主加熱器内を蒸発した蒸気で空気を置換する。その後、蒸気圧縮機をスタートし、処理量を上昇させる。

被処理廃液は給液ポンプにより、ベント復水器から給液予熱器に供給される。供給液は、ここで処理済廃液と熱交換により約 95°C に予備加熱された後、蒸発缶内へ入る。この廃液は、蒸発缶内で堅型斜流式の強制循環ポンプにより主加熱器、蒸気室を循環する。廃液はシェルアンドチューブ型の主加熱器で加熱され、蒸気室で蒸発する。蒸気室はサイクロン状になっており、蒸気室で発生した蒸気は、ここで液相と分離され、蒸気室上部にある邪魔板、デミスターで更に精製される。蒸気室を出た蒸気は、蒸気圧縮機で約 $0.4 \text{ kg}/\text{cm}^2 \text{ G}$ に圧縮され、主加熱器のシェル側に送られて廃液の加熱源として使用される。この蒸気は主加熱器で自身の蒸発潜熱を廃液側に与えて凝縮液となり、凝縮液サージタンクを経て、凝縮液ポンプで給液予熱器へ送られる。給液予熱器では、被処理廃液と熱交換して、約 40°C に冷却され、処理済液槽に受けられる。

1. はじめに

原研、大洗研究所を中心とする大洗地区から発生する低レベル廃液 ($< 1 \times 10^{-3} \mu\text{Ci}/\text{mL}$) については、これまで化学処理装置 ($10 \text{ m}^3/\text{H}$) で対処してきた。その後、排出される廃液の性状が多様化の傾向にあることと、処理済廃液の海洋放流放射能低減のため、さらに $3 \text{ m}^3/\text{H}$ の処理能力をもつ蒸気圧縮型蒸発処理装置を設置した。

放射性廃液の「蒸気圧縮式蒸発処理法」は、廃液の処理過程で発生する蒸発蒸気を圧縮して温度を高め、これを加熱蒸気として再利用する方式である。

本方式は、従来採用されてきた「単効用蒸発処理法」¹⁾（廃液の加熱蒸気を別途製造して供給する）に比べ、加熱源が大巾に軽減できること、冷却水量が少量ですむことなどの利点をもっているので、比較的大容量の処理が必要な施設では本方式が有利であり、諸外国、特に欧州諸国では、この方式が採用されてきている例が多い。^{2), 3)} しかし、国内では実用化が試みられたことがあるものの、操作が複雑であるなどの理由で、実用に供されるまでに至っていなかった。

本報告は、この蒸気圧縮型蒸発処理装置の設計、建設、コールド試験、ホット試験、実処理及びメンテナンス結果についてまとめたものである。

2. 装置の設計仕様

2.1 装置の概要

本装置は $3 \text{ m}^3/\text{H}$ の処理能力をもつ蒸気圧縮型蒸発装置であり、そのフローを Fig. 1 に、また装置の熱収支を Fig. 2 に示す。

装置のスタートアップにあたっては、蒸発缶内廃液を予め補助加熱器で 100°C まで加温し、蒸気室、蒸気圧縮機及び主加熱器内を蒸発した蒸気で空気を置換する。その後、蒸気圧縮機をスタートし、処理量を上昇させる。

被処理廃液は給液ポンプにより、ベント復水器から給液予熱器に供給される。供給液は、ここで処理済廃液と熱交換により約 95°C に予備加熱された後、蒸発缶内に入る。この廃液は、蒸発缶内で堅型斜流式の強制循環ポンプにより主加熱器、蒸気室を循環する。廃液はシェルアンドチューブ型の主加熱器で加熱され、蒸気室で蒸発する。蒸気室はサイクロン状になっており、蒸気室で発生した蒸気は、ここで液相と分離され、蒸気室上部にある邪魔板、デミスターで更に精製される。蒸気室を出た蒸気は、蒸気圧縮機で約 $0.4 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ に圧縮され、主加熱器のシェル側に送られて廃液の加熱源として使用される。この蒸気は主加熱器で自身の蒸発潜熱を廃液側に与えて凝縮液となり、凝縮液サーチタンクを経て、凝縮液ポンプで給液予熱器へ送られる。給液予熱器では、被処理廃液と熱交換して、約 40°C に冷却され、処理済液槽に受けられる。

蒸発缶内で濃縮された廃液は、所定の塩濃度に達した時点で運転を停止し、全量排出する。また、蒸発缶内の廃液密度を一定にした濃縮液の連続排出も行えるようになっている。

一方、装置内の非凝縮性ガスは、50℃以下に冷却され、別途設けられている排気フィルタを介してスタックから排出される。

なお、装置から排出される濃縮液は、別途設けられている中レベル廃液処理用の単効用蒸発処理装置でさらに減容し、最終的にはビチューメン固化装置で固化する。

2.2 装置の設計条件

装置の基本設計は、下記9項目を前提にした。

(1) 処理能力

- 1) 定格処理量：3 m³/H、さらに定格値の50%まで処理量を低下させて運転できること。
- 2) 除染係数(DF)：10³以上(缶液基準)

(2) 被処理廃液の性状

- 1) 放射性物質濃度： $1 \times 10^{-3} \mu\text{Ci}/\text{m}\ell$ 以下
- 2) 給液温度：5～25℃

(3) 濃縮液

- 1) 沸点：105℃以下
- 2) 最大塩濃度：50 g/ℓ

(4) 処理済液

排出温度：50℃以下

(5) 排気ガス

排出温度：50℃以下

(6) ユーティリティ

- 1) 冷却水：2 kg/cm²G、最大5 m³/H
- 2) スチーム：6 kg/cm²G、最大600 kg/H
- 3) 電力：150 Kw
- 4) 圧縮空気：5 kg/cm²G、30 m³/H
- 5) ベント能力：-500 mmHg時に4 m³/H

(7) 耐震強度

- 1) 水平震度：0.4 G
- 2) 垂直震度：0.2 G

(8) 放射線管理

装置設置区画における空間線量率は、5 mR/H以下、制御室は1 mR/H以下。

(9) 運転モード

1日の運転は、起動停止操作時間を含めて8時間とする。また、処理対象廃液は通常200 m³単位とする。したがって、1日約20 m³(3 m³/H × 7 H)処理した場合、10日間同一条件で廃液を供給し濃縮するものとし、最終時に蒸発缶から濃縮液を全量排出する。

処理に当っては、 200 m^3 バッチで予め廃液の放射性物質濃度、核種、塩、含有イオン、洗剤、電導率、pH等の管理分析及び濃縮試験を行う。

上記に示した基本設計条件から、単効用蒸発処理装置との大きな相違は、次の2点があげられる。

- (1) 濃縮液の沸点は低く抑えた。これは、被加熱体の沸点を低く抑えることにより、加熱体と被加熱体間に適度の温度差を確立し、蒸気圧縮システムの設計が容易になるよう配慮したためである。したがって、装置では沸点上昇の大きい廃液、又は、高濃縮処理を避けるようにしなければならない。（この装置による処理に適さない高塩濃度の廃液、及びこの装置から排出される濃縮廃液の二次濃縮は、単効用蒸発処理装置に期待する。）
- (2) 単効用蒸発処理装置で同程度の処理能力を有するためには、冷却水は、冷却塔を持たない場合に $200\text{ m}^3/\text{H}$ 、スチームは $5,000\text{ kg}/\text{H}$ の設備容量が必要となる。本装置は、本来これらの節減を特徴とするので、それぞれ、単効用型の場合の $1/40$, $1/8$ とした。

2.3 各機器の設計

各機器の設計仕様を Table 1 に示す。計装機器の設計仕様を Table 2 に示す。材質の選定に当っては、使用温度 Max. 150°C 、圧力 Max. $3.4\text{ kg}/\text{cm}^2\text{G}$ 及び廃液中に含まれる可能性のある塩素イオン濃度が約 100 ppm であることから、使用実績のあるオーステナイト系ステンレス鋼とした。このうち、廃液が濃縮される系統については、SUS 316L, SCS 16、その他の系統は、SUS 304, SCS 13 に統一した。

また、容器、配管等の接続法は、内面除染と分解の容易さを考慮して、突合せ溶接及びフランジ接続とした。

装置の設計圧力は、異常時の最大圧力を想定して決めた。即ち、補助加熱器に供給されるスチームの最大圧力 ($2.0\text{ kg}/\text{cm}^2\text{G}$) が蒸気室側に直接かかり、さらに蒸気圧縮機で圧縮（絶対圧比 : 1.4）した場合の圧力を設計圧力とした。この想定に基づいて設計圧力は、 $3.5\text{ kg}/\text{cm}^2\text{G}$ とした。

各機器の設計に当っては、特に次の点を配慮した。

- (1) 本装置は低レベル廃液の処理用であるため、廃液が濃縮される部分でも特に遮蔽は考えなくともよい。しかし、濃縮液の滞留量の大きい部分は、メンテナンス頻度の多い機器とは離して配置した。装置の配置を Fig. 3 に示す。
- (2) 蒸気圧縮機は、構造が複雑でないこと、また、処理量の変化に十分対応できることが必要である。このため、型式はモータ駆動ギア増速単段ターボブロワーとし、蒸気の流量制御は、一次側のガイドベーン制御を採用し、サーボング領域の小さいタイプのものを選定した。回転数は $13,000\text{ rpm}$ と高速のため、軸封をラビリンスシールとし、この部分からの蒸気洩れは、すべてペント系に回収する方式を採用した。

蒸気圧縮系のフローシートを Fig. 4 に、また、蒸気圧縮機本体の概略図を Fig. 5 に示す。

- (3) 強制循環ポンプは、メンテナンスが容易に行えるよう軸封部を蒸発缶液位より高位置とした。そのため堅型斜流式とした。回転数は可变速とし、廃液の沸点上昇やスケール付着

等による主加熱部での熱交換率の低下があつても、循環流量で補償して処理量を一定に保てるようにした。また、系内への空気流入は、蒸気圧縮機の負荷を大きくするため、蒸気室は微正圧とし、さらに、ポンプの軸封は、メカニカルシールを採用して気密性を高めた。

- (4) シェルアンドチューブ型主加熱器は、浮遊固体物のチューブ内堆積が極力少なくなるよう、また、加熱廃液の流れが円滑になるように傾斜させて配置することにした。垂直配置は、蒸発缶システムの全高が大きくなるので避けた。このため据付方法が多少複雑になることは、敢えて許容した。
- (5) 安全対策として、蒸発缶の空だき防止、蒸発缶の異常昇圧防止、及び蒸気圧縮機の異常振動時の自動停止等ができるよう配慮した。
- (6) 電源、計装空気、冷却水等に異常があつても、装置を安全に停止できるよう、バックアップ系を装備した。
- (7) 濃縮液排出バルブは、液詰りが生じないよう、缶本体に直付けすることとした。
- (8) 計装設備は、各部の特性を調べるため、できるだけ多く測定できるよう配慮した。
- (9) 蒸発缶のホールドアップ量が最小限になるよう、蒸気室－主加熱器－強制循環ポンプの配置を工夫した。

3. 建 設

装置の建設は、まず、建家及び装置基礎工事を先行して 1976 年 7 月から 1977 年 3 月まで行った。機器の製作は、1977 年 8 月から工場で開始し、さらに 1977 年 12 月からは、機器類の据付、配管工事、計装、電気工事、保温、塗装工事等現地工事を開始し、1978 年 3 月に竣工した。この間に、科学技術庁原子力安全局の使用前検査を受けてきた。

建設期間中における工程管理、品質管理については、計画に基づいて実施してきた。各機器等について実施した検査の一覧を Table 3 に示す。検査は、材料の品質管理を含めた材料検査、溶接施工法及び溶接技量の確認を含む製品の溶接部検査、機器・配管の耐圧・気密検査、単体機器の性能検査、及び装置全体の性能検査に分類される。

建設期を通して、特に考慮したことは、蒸気圧縮機、強制循環ポンプ、凝縮液ポンプ等の単体機器の初期性能を現地据付後も把握して、工場検査時データと比較した。このことは、装置のメンテナンスに当って、性能の低下を知るうえで重要なことである。

製作時における蒸気圧縮機の性能検査は、試験用気体に蒸気を用いることができなかつたため、空気を用いて実施した。この場合、蒸気と空気の分子量、断熱指数の違いから、モーター回転数を小さくして試験を行い、測定結果は、コンピューターにより使用条件に換算を行った。

等による主加熱部での熱交換率の低下があつても、循環流量で補償して処理量を一定に保てるようにした。また、系内への空気流入は、蒸気圧縮機の負荷を大きくするため、蒸気室は微正圧とし、さらに、ポンプの軸封は、メカニカルシールを採用して気密性を高めた。

- (4) シェルアンドチューブ型主加熱器は、浮遊固体物のチューブ内堆積が極力少なくなるよう、また、加熱廃液の流れが円滑になるように傾斜させて配置することにした。垂直配置は、蒸発缶システムの全高が大きくなるので避けた。このため据付方法が多少複雑になることは、敢えて許容した。
- (5) 安全対策として、蒸発缶の空だき防止、蒸発缶の異常昇圧防止、及び蒸気圧縮機の異常振動時の自動停止等ができるよう配慮した。
- (6) 電源、計装空気、冷却水等に異常があつても、装置を安全に停止できるよう、バックアップ系を装備した。
- (7) 濃縮液排出バルブは、液詰りが生じないよう、缶本体に直付けすることとした。
- (8) 計装設備は、各部の特性を調べるため、できるだけ多く測定できるよう配慮した。
- (9) 蒸発缶のホールドアップ量が最小限になるよう、蒸気室－主加熱器－強制循環ポンプの配置を工夫した。

3. 建 設

装置の建設は、まず、建家及び装置基礎工事を先行して 1976 年 7 月から 1977 年 3 月まで行った。機器の製作は、1977 年 8 月から工場で開始し、さらに 1977 年 12 月からは、機器類の据付、配管工事、計装、電気工事、保温、塗装工事等現地工事を開始し、1978 年 3 月に竣工した。この間に、科学技術庁原子力安全局の使用前検査を受けてきた。

建設期間中における工程管理、品質管理については、計画に基づいて実施してきた。各機器等について実施した検査の一覧を Table 3 に示す。検査は、材料の品質管理を含めた材料検査、溶接施工法及び溶接技量の確認を含む製品の溶接部検査、機器・配管の耐圧・気密検査、単体機器の性能検査、及び装置全体の性能検査に分類される。

建設期を通して、特に考慮したことは、蒸気圧縮機、強制循環ポンプ、凝縮液ポンプ等の単体機器の初期性能を現地据付後も把握して、工場検査時データと比較した。このことは、装置のメンテナンスに当って、性能の低下を知るうえで重要なことである。

製作時における蒸気圧縮機の性能検査は、試験用気体に蒸気を用いることができなかつたため、空気を用いて実施した。この場合、蒸気と空気の分子量、断熱指数の違いから、モーター回転数を小さくして試験を行い、測定結果は、コンピューターにより使用条件に換算を行った。

4. 試 運 転

4.1 コールド試験

装置の諸特性を把握すること、及び廃液の性状に応じた最適運転条件を見い出す目的で、次の5種類のコールド試験を行い、装置各部の特性、装置全体の処理能力、及び除染係数を調べた。

- (1) 水たき試験：沪過水
- (2) 洗剤の影響試験：沪過水+洗剤
- (3) 消泡剤の能力試験：沪過水+洗剤+消泡剤
- (4) 塩による影響試験：硝酸ナトリウム溶液
- (5) 模擬廃液による試験：硝酸ナトリウム溶液+洗剤+消泡剤+硝酸ストロンチウム(DF測定用トレーサー)

コールド試験全体を通して、装置の起動、停止時の過渡特性、定常運転時の安定性を調べた。

(1) 運転過渡特性

装置を起動してから停止するまでの1サイクルにおける運転記録を、Fig.6.1～Fig.6.8に示す。(図中の記号は、Table 2に示す計器記号である。)

この記録に示す運転状態は以下に示す操作に基づいている。

- 9:00 : 運転開始、蒸発缶内濃縮液（このときはNaNO₃ 30 g/l溶液）の昇温。
- 9:30 : 100°Cまでの昇温終了、徐々に蒸発させ系内の空気を蒸気で置換させる。
- 9:40 : 蒸気への置換終了、蒸気圧縮機運転開始、処理量上昇。
- 9:55 : 定格処理量に到達、定格運転に入る。
- 10:15 : 各部温度も定常状態に達する。
- 16:00 : 停止操作開始、処理量を低下させ蒸気圧縮機停止。
- 16:05 : 処理量ゼロになる。
- 16:15 : 蒸気室内圧が大気圧に戻る。系全体の停止完了。

このように、起動時においては、廃液の昇温に要する時間は約30分、系全体の蒸気での置換と処理量上昇に要する時間は約20分である。また、停止操作は約15分である。したがって、起動、停止操作には約1時間を要するが、それ以外は、定常運転にあてることができる。また、定常運転時には、Fig.6.1～Fig.6.8に示すように、各部の状態が一定にコントロールされており、安定していることがわかる。

(2) 処理量制御

装置の処理量は、強制循環ポンプの回転数と蒸気圧縮機のガイドペーンの開度で制御できる。

まず、強制循環ポンプ回転数と処理量の関係をFig.7に示す。200 rpm～370 rpmの変化で処理量も2,800 kg/H～3,400 kg/Hと変化している。このとき、主加熱器チューブ内の模擬液の流速は、約0.1～1.0 m/secと推定される。

また Fig. 8 に蒸気圧縮機の流量と圧縮比、及び消費電力の関係を示す。図中の細線に示すように、ガイドベーンの開度で圧縮比と処理量が変るので、ガイドベーンの開度をコントロールすることにより処理量を定格の50%まで安全に変化させることができた。この場合、消費電力は、処理量の変化に伴なって80 kw～40 kwに変化している。

(3) 蒸気圧縮機の性能

定格処理量 3,000 kg/H のときの蒸気圧縮機の熱効率 η_1 、及び機械効率 η_2 を求めてみると、

	測 定 点		可逆断熱圧縮
	蒸気圧縮機一次側	蒸気圧縮機二次側	
蒸 気 の 状 態	飽和蒸気	過飽和蒸気	過飽和蒸気
処 理 量 Q kg/H	3,000	3,000	3,000
圧 力 P kg/cm ² A	P ₁ = 1.057	P ₂ = 1.348	P ₃ = 1.348
温 度 t °C	t ₁ = 100	t ₂ = 134	t ₃ = 120
エンタルピ i kcal/kg	i ₁ = 639	i ₂ = 653	i ₃ = 650
消 費 電 力 W kw	70		

蒸気圧縮機熱効率

$$\eta_1 = \frac{i_3 - i_1}{i_2 - i_1} = \frac{650 - 639}{653 - 639} = 0.79$$

蒸気圧縮機機械効率

$$\eta_2 = \frac{(i_3 - i_1) Q}{W \times \eta_1 \times 860} = \frac{(650 - 639) \times 3,000}{70 \times 0.79 \times 860} = 0.70$$

となる。

これらの結果は、工場検査時に空気を用いて試験し、蒸気に換算したデータとよく一致している。また、工場検査時に確認したサージング領域と、装置負荷特性曲線の間隙が、運転条件の変化に対応できる範囲でもある。Fig. 8 の特性は、運転条件の変化に余裕をもって対応できることを示している。

(4) 発泡抑制

洗剤を用いた発泡と消泡剤による抑制効果等について次のように調べた。

- 1) 洗剤が混入し発泡があれば、運転にどう影響を与えるか。
- 2) どの程度の発泡状態まで運転が可能であるか。
- 3) 消泡剤による発泡抑制によって、処理能力がどの程度回復するか。

消泡剤は Table 4 に示す 3 種類（非イオン性高分子表面活性剤とシリコン油 2 種類）について予備評価し、最も効果の高かった、非イオン性高分子表面活性剤を用いることにした。Fig. 9 に洗剤の影響と消泡剤の効果を示す。図から分かるように、消泡剤の効果は大きい。消泡剤の添加量は洗剤濃度によって多くする必要がある。2,000 ppm と高い洗剤濃度の廃液についても、220 ppm の消泡剤添加により、約 15% 処理能力を回復させることができた。

(5) 塩濃度と処理量

硝酸ナトリウム溶液を用いて、塩濃度による処理量の変化を調べた。その結果、Fig. 10 に

示すように、 10 g/l までは定格の $3 \text{ m}^3/\text{H}$ で処理できているが、 50 g/l まで濃縮されると、処理量は6%低下した。この低下の原因が沸点上昇であるかを確認するため、前記消泡剤をFig. 10に示すように添加してみた。その結果、処理量が大巾に回復している。このことは、硝酸ナトリウム溶液の濃度が 40 g/l であれば沸点上昇は 0.5°C となるが、この程度では沸点上昇による処理量の影響は無視できることを示している。しかし、塩濃度の上昇に伴なう発泡を抑制する必要があることが分かった。

(6) 模擬廃液処理試験

前項までの結果を参考にして、実廃液を模擬した非放射性廃液を用いて、処理能力、除染係数、蒸発比を調べた。蒸発缶内模擬廃液の濃度は、硝酸ナトリウムが 50 g/l 、洗剤が $2,500 \text{ ppm}$ まで上昇させた。Fig. 11に示すように、濃縮の進行と並行して消泡剤を添加していくことにより、処理量の低下は抑えられている。塩濃度が 50 g/l 、洗剤濃度が $2,500 \text{ ppm}$ のとき、添加している消泡剤は、 860 ppm である。

除染係数は、トレーサーとして硝酸ストロンチウムを用いて測定して求めた。トレーサーは濃縮液中に添加し、濃縮液、デミスタ前の蒸気、凝縮液をサンプリングした。ストロンチウム濃度は原子吸光分析法で測定した。

	ストロンチウム濃度
濃縮液	531 ppm
デミスタ前の蒸気	0.011 "
凝縮液	0.005 "

(検出限界濃度： 0.001 ppm)

以上から、除染係数は次の通り算定される。

$$\text{総合除染係数} = \frac{531}{0.005} = 1.06 \times 10^5 \text{ (缶液基準)}$$

$$\text{デミスタの除染係数} = \frac{0.011}{0.005} = 2.2$$

実測された除染係数（缶液基準） 10^5 は設計目標値の 10^3 の100倍に相当する。又、ステンレスワイヤを充填した2層のデミスタの除染係数は2.2であった。

蒸発比は、運転維持費のめやすとして使われ、単位重量当たりのスチームで処理できる廃液量で表わされる。本装置の場合は、加熱源に電力も用いているので、これもスチームの消費量に換算した。

蒸発比に最も影響を与える因子は、主加熱器の加熱側（シェル側）からベントと同伴して排氣される蒸気量である。ベント量を多くすると、同伴蒸気量も多くなって、主加熱器で濃縮液側に蒸発潜熱を与える割合が小さくなる。したがって蒸発比が小さくなる。このことから、ベント量は、主加熱器にイナートガスが帶留しない程度に絞るのが経済的運転となる。下表は2つの運転条件において蒸発比を測定した結果である。

	廃液の處理量 Q kg/H	蒸気圧縮機消費電力 P kw	スチーム使用量 q _c kg/H	電力スチーム流量換算 q _s kg/H * 1	蒸発比 Ee * 2
通常の運転時	3,030	74.5	15.4	99.2	12.0
ベント量を絞った経済的運転条件	2,900	73.0	33.7	97.2	22.2
単効用蒸発処理装置の場合 * 3	1,000	—	1,180	—	0.85

注) * 1 : 電力をスチーム流量に換算するに当ってはスチーム圧力を 1.0 kg/cm² G とする。

$$\text{したがって } q_c = \frac{P \times 860}{646.1}$$

$$* 2 : \text{蒸発比 } Ee = \frac{Q}{q_s + q_c}$$

* 3 : 中レベル廃液の処理用に設置されている装置の実測値

このように、通常の運転時で蒸発比は12が得られている。単効用蒸発処理装置は、蒸発比が0.85であるから、本装置は、使用熱源が1/14ですんでいることになる。また、ベント量を絞った経済的運転時は、使用熱源が1/26ですむことになる。

4.2 ホット試験

ホット試験は、コールド試験で得た知見に基づいて定められた運転条件にしたがって、実廃液を処理したものである。Table 5 にホット運転に用いた廃液、処理済液及び濃縮液の性状を示す。4回の試験運転で合計 665 m³ の廃液を 213 時間で処理し、14.05 m³ の濃縮液に減容した。

Table 6 に各試験運転毎の処理能力、除染係数及び濃縮度を示す。このように処理能力、除染係数は、各々 3.1 m³/H, > 2.8 × 10⁴ が得られており、設計条件である 3.0 m³/H, > 1 × 10³ が満足できた。

さらに装置各部の温度、圧力、流量等は Fig. 6.1 ~ Fig. 6.8 に示したと同様に安定しており、ほど同様の指示値であった。

蒸発比は、コールド試験時と同様の測定を行って求めた。その結果、蒸発比は、通常の運転状態で14、ベント量を絞った経済的運転状態で19が得られた。この値は、コールド試験時のデータとはほぼ一致している。

また、主加熱器の総括伝熱係数 U * (Kcal/m² · °C · H) は、Run. 1 ~ 4 の間に 1,150 から 1,050 に減少した。

$$* U = \frac{Q(e_1 - e_2)}{A \Delta t}$$

ここで、U : 総括伝熱係数 (Kcal/m² · °C · H)

- Q : 处理量 (kg/H)
 e_1 : 蒸発蒸気エンタルピ 100 °C 鮫和蒸気の場合 $e_1 = 638.8 (\text{Kcal}/\text{kg})$
 e_2 : 蒸発缶入口における給液のエンタルピ (Kcal/kg)
 A : 主加熱器伝熱面積, $A = 220 (\text{m}^2)$
 Δt : (蒸気圧縮機二次側鮫和蒸気温度) - (濃縮液温度) (°C)

この減少は、主加熱器伝熱面にスケールが付着したことによるが、処理量への大巾な影響は現われていない。

5. 運転実績

実廃液の処理は、ホット試験時を含めて 1979 年 6 月に開始した。Table 7 に実廃液の処理実績を示す。このように 1981 年 2 月までの 1 年 9 ヶ月で 1 回毎に平均 139 m^3 の処理を 21 回行い、合計 $2,928 \text{ m}^3$ の廃液を処理した。この間に処理した各運転時毎の廃液の性状を Table 8 に示す。

被処理廃液の放射性物質濃度は、平均 $1.07 \times 10^{-5} \mu\text{Ci}/\text{m}\ell$ (主要核種は $^{60}\text{Co}, ^{137}\text{Cs}$)、塩濃度は $0.5 \text{ g}/\ell$ 、洗剤濃度は、DBS * 換算で最大 23 ppm、平均 4.8 ppm、この他塩素イオンは平均 40 ppm であった。

* DBS ; Dodecyle Benzene Sulfonic acid sodium salt, 上記数値は JIS K-3363 「合成洗剤の生分解度試験法」に基づく。

また、スケール成分にもなる Ca, Mg, Fe 各イオン等は、それぞれ 6.5 ppm, 3.2 ppm 及び 3.4 ppm であった。装置の除染係数は、処理済液の放射性物質濃度が検出限界濃度 ($8.8 \times 10^{-9} \mu\text{Ci}/\text{m}\ell$) 以下であるので、缶液基準で $> 1.57 \times 10^4$ となっている。

運転によって発生した濃縮液は、合計 71.6 m^3 である。したがって減容比は、 $2,928 \text{ m}^3 / 71.6 \text{ m}^3 = 41$ となる。なお、これらの濃縮液は単効用蒸発装置で再濃縮し、最終的にはビチューメン固化した。

これらの処理に要した運転時間は、合計 956 時間である。したがって平均の処理能力は、 $2,928 \text{ m}^3 / 956 \text{ H} = 3.06 \text{ m}^3/\text{H}$ となる。

これらの廃液を処理する過程で、主加熱器の伝熱面 (細管の内面) へのスケールの付着が生じた。このスケールの付着現象は、総括伝熱係数の低下や主加熱器外表面における放射線線量率の上昇をもたらした。このため、後述のようにスケール除去のため機械的ブラッシング 1 回と 2 回の化学除染を実施した。

化学除染前における主加熱器の外表面の線量率は、最大 $0.9 \text{ mR}/\text{H}$ であったが化学除染後は、バックグラウンドレベルまで低下した。また、実廃液の処理における蒸発比は、Fig. 12 に示すように 10 ~ 14 となっている。

- Q : 处理量 (kg/H)
 e_1 : 蒸発蒸気エンタルピ 100 °C 鮫和蒸気の場合 $e_1 = 638.8 (\text{Kcal}/\text{kg})$
 e_2 : 蒸発缶入口における給液のエンタルピ (Kcal/kg)
 A : 主加熱器伝熱面積, $A = 220 (\text{m}^2)$
 Δt : (蒸気圧縮機二次側鮫和蒸気温度) - (濃縮液温度) (°C)

この減少は、主加熱器伝熱面にスケールが付着したことによるが、処理量への大巾な影響は現われていない。

5. 運転実績

実廃液の処理は、ホット試験時を含めて 1979 年 6 月に開始した。Table 7 に実廃液の処理実績を示す。このように 1981 年 2 月までの 1 年 9 ヶ月で 1 回毎に平均 139 m^3 の処理を 21 回行い、合計 $2,928 \text{ m}^3$ の廃液を処理した。この間に処理した各運転時毎の廃液の性状を Table 8 に示す。

被処理廃液の放射性物質濃度は、平均 $1.07 \times 10^{-5} \mu\text{Ci}/\text{m}\ell$ (主要核種は ^{60}Co , ^{137}Cs)、塩濃度は $0.5 \text{ g}/\ell$ 、洗剤濃度は、DBS * 換算で最大 23 ppm、平均 4.8 ppm、この他塩素イオンは平均 40 ppm であった。

* DBS ; Dodecyle Benzene Sulfonic acid sodium salt, 上記数値は JIS K-3363 「合成洗剤の生分解度試験法」に基づく。

また、スケール成分にもなる Ca, Mg, Fe 各イオン等は、それぞれ 6.5 ppm, 3.2 ppm 及び 3.4 ppm であった。装置の除染係数は、処理済液の放射性物質濃度が検出限界濃度 ($8.8 \times 10^{-9} \mu\text{Ci}/\text{m}\ell$) 以下であるので、缶液基準で $> 1.57 \times 10^4$ となっている。

運転によって発生した濃縮液は、合計 71.6 m^3 である。したがって減容比は、 $2,928 \text{ m}^3 / 71.6 \text{ m}^3 = 41$ となる。なお、これらの濃縮液は単効用蒸発装置で再濃縮し、最終的にはビチューメン固化した。

これらの処理に要した運転時間は、合計 956 時間である。したがって平均の処理能力は、 $2,928 \text{ m}^3 / 956 \text{ H} = 3.06 \text{ m}^3 / \text{H}$ となる。

これらの廃液を処理する過程で、主加熱器の伝熱面(細管の内面)へのスケールの付着が生じた。このスケールの付着現象は、総括伝熱係数の低下や主加熱器外表面における放射線線量率の上昇をもたらした。このため、後述のようにスケール除去のため機械的ブラッシング 1 回と 2 回の化学除染を実施した。

化学除染前における主加熱器の外表面の線量率は、最大 $0.9 \text{ mR}/\text{H}$ であったが化学除染後は、バックグラウンドレベルまで低下した。また、実廃液の処理における蒸発比は、Fig. 12 に示すように 10 ~ 14 となっている。

6. メンテナンス

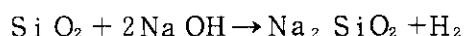
コールド試験、ホット試験を経て実処理を行ってきた間に、① 蒸気圧縮機、強制循環ポンプ等の回転機及び計装機器の性能、② 热交換器、配管、槽類の腐食状況について点検したが、異常な性能低下及び腐食は観測されなかった。また、点検時に後述のように装置の部分的改善措置を4点程行った。装置のメンテナンスで重要なものは、主加熱器細管部へのスケールの付着に関連したものであった。単効用蒸発装置の場合、加熱スチームと濃縮液の温度差が20～40°Cであるのに比べ、本装置では約10°Cと小さい。したがってスケールの付着による伝熱効率の低下は、処理能力に大きく影響するため、スケールの除去法を確立しておくことが必要である。

1) スケール除去対策

実廃液を約1,200m³処理した時点で観測されたスケールの付着状況写真をFig.13に示す。写真的場所は、主加熱器の管板部及び補助加熱器Uチューブである。スケールの付着量は、約0.3kg/m²であった。

給液予熱器等主加熱器以外の熱交換器、蒸気室、強制循環ポンプについては、濃縮度や温度条件が厳しくないため、スケールの付着はあまりみられなかった。

実廃液の処理時を例にとり、スケール付着量の尺度となる主加熱器の総括伝熱係数U Kcal/m²・°C・Hの変化とスケール除去操作の効果をFig.14に示す。このUの値が設計値を下廻っている部分では、定格処理量が得られていない。都合、3,000m³の処理期間中に3回のスケール除去を試みた。700m³を処理した時点での第1回のスケール除去は、機械的ブラッシング法により行ったものである。このときは、機器の分解に多大な労力を要し、機械的損傷に対して十分な注意を払ったが、その割にはスケールを完全に除去することができなかった。そこで装置の分解を伴なわない化学除染について検討した。まず、主加熱器からスケールの試料を採取し主成分の分析を行うとともに、各種の酸、塩溶液及びこれにEDTA又はオキシンのキレート剤を加えた薬剤⁴⁾を用いたスケールの溶解試験、母材の腐食試験を行った。スケールの分析結果は、Si, Ca, Mgが主で、そのモル比は2:1:1であった。Table 9にスケールの組成を示す。ここでSiの組成、一般式xM₂O·ySiO₂を推定し、先に酸可溶なものをまず溶かしておき、残渣を薄い水酸化ナトリウム溶液に浸漬すると、



という簡単な原理で完全に溶解することができた。

このように第Ⅰ工程でHNO₃、第Ⅱ工程でNaOHを用いているため母材への腐食は全く心配ない。なお、酸性薬剤のみを用いる場合、その濃度、温度、時間など条件を変化させても、フッ酸の如く著しく母材に影響を与える薬品以外は50～60%のスケールしか溶解しなかった。

この結果を第2回目のスケール除去に適用した。ブラッシング法による脱スケールから約400m³処理した時点で実施した。実施にあたっては、装置に付着しているスケール量から必

要な酸、アルカリ量を前記試験結果を参考にして定めた。その結果 Table 10 に示すように第Ⅰ工程で 0.4M の HNO₃ (80°C, 4 時間循環) 第Ⅱ工程で 0.1M の NaOH (80°C, 4 時間循環), 第Ⅲ工程で 0.08M の HNO₃ (80°C 2 時間循環) の条件を採用した。この結果は Fig. 14 に示すように総括伝熱係数は大巾に回復しており、さらに、Table 10 に示すようにスケールの除去試験結果は非常に良好であった。また、Fig. 13 の脱スケール後の写真にも示すように、母材表面がよく見えるまでスケールがほぼ完全に除去された。なお、本作業は 3 人／日で 5 日間で終了した。この後、1,600 m³処理した時点（1 年後）での第 3 回目のスケール除去に同様の化学除染を適用したが、この時も良好な結果が得られた。

2) 部分的な改善措置

- ① 主加熱器管板及び細管部の観察が容易に行えるよう、主加熱器水室に取付けてある補助加熱器の着脱機構に改良を加えた。
 - ② 化学除染条件を決めるため、スケール付着量の測定及びスケール溶解試験用として、テストピースを機器内に取付けた。
 - ③ 給液予熱器を含めた化学除染が行えるよう、給液ラインにノズルを付けて、サービスタンクから試薬が送れるようにした。また、このことによりメンテナンス後の性能確認のための済過水を用いた試運転が行えるようになった。
 - ④ 蒸気圧縮機のラビリンスシール部は、微負圧に保つため、ベント配管に接続されている。このベントは蒸気が同伴され液留まりを生じ易い。このためベントラインにドレン抜き対策をした。
- また、シール部には負圧測定用圧力計を付けた。

7. まとめ

蒸気圧縮型蒸発装置の設計を 1976 年 4 月から開始し、1977 年 8 月から 1978 年 3 月までに機器の製作・据付を行った。その後コールド試験を 1 年行い、1979 年 6 月からホット運転に入り 1981 年 2 月までに 956 時間運転し、約 3,000 m³ の実廃液を処理した。この間、メンテナンス方式の改善を計りながら、より安定した運転方法を確立した。

7.1 装置の運転特性

1) 処理量の可変範囲

蒸気圧縮型蒸発処理法の欠点とされている処理量可変範囲が狭いことに関連して、本蒸発装置では定格処理量からその 50% の範囲まで可変制御できることを確認した。このことは、処理量の低下をきたすような性状の廃液にも対処し易いことを示している。

2) 装置の操作性

通常の操作において、スタートアップには約 45 分、シャットダウンは約 15 分必要であることが分かった。

要な酸、アルカリ量を前記試験結果を参考にして定めた。その結果 Table 10 に示すように第Ⅰ工程で 0.4 M の HNO_3 (80°C , 4 時間循環) 第Ⅱ工程で 0.1 M の NaOH (80°C , 4 時間循環), 第Ⅲ工程で 0.08 M の HNO_3 (80°C 2 時間循環) の条件を採用した。この結果は Fig. 14 に示すように総括伝熱係数は大巾に回復しており、さらに、Table 10 に示すようにスケールの除去試験結果は非常に良好であった。また、Fig. 13 の脱スケール後の写真にも示すように、母材表面がよく見えるまでスケールがほぼ完全に除去された。なお、本作業は 3 人／日で 5 日間で終了した。この後、 $1,600 \text{ m}^3$ 処理した時点（1 年後）での第 3 回目のスケール除去に同様の化学除染を適用したが、この時も良好な結果が得られた。

2) 部分的な改善措置

- ① 主加熱器管板及び細管部の観察が容易に行えるよう、主加熱器水室に取付けてある補助加熱器の着脱機構に改良を加えた。
 - ② 化学除染条件を決めるための、スケール付着量の測定及びスケール溶解試験用として、テストピースを機器内に取付けた。
 - ③ 給液予熱器を含めた化学除染が行えるよう、給液ラインにノズルを付けて、サービスタンクから試薬が送れるようにした。また、このことによりメンテナンス後の性能確認のための沪過水を用いた試運転が行えるようになった。
 - ④ 蒸気圧縮機のラビリンスシール部は、微負圧に保つため、ベント配管に接続されている。このベントは蒸気が同伴され液留まりを生じ易い。このためベントラインにドレン抜き対策をした。
- また、シール部には負圧測定用圧力計を取付けた。

7. まとめ

蒸気圧縮型蒸発装置の設計を 1976 年 4 月から開始し、1977 年 8 月から 1978 年 3 月までに機器の製作・据付を行った。その後コールド試験を 1 年行い、1979 年 6 月からホット運転に入り 1981 年 2 月までに 956 時間運転し、約 $3,000 \text{ m}^3$ の実廃液を処理した。この間、メンテナンス方式の改善を計りながら、より安定した運転方法を確立した。

7.1 装置の運転特性

1) 処理量の可変範囲

蒸気圧縮型蒸発処理法の欠点とされている処理量可変範囲が狭いことに関連して、本蒸発装置では定格処理量からその 50% の範囲まで可変制御できることを確認した。このことは、処理量の低下をきたすような性状の廃液にも対処し易いことを示している。

2) 装置の操作性

通常の操作において、スタートアップには約 45 分、シャットダウンは約 15 分必要であることが分かった。

また、定常運転中の操作は余り必要としない。プロセスの自動制御も良好であった。したがって定常運転中は監視業務が中心となる。

3) 運転維持費

運転維持費の目安として蒸発比が使われるが、通常の運転時で 12.0、経済的運転状態で 22.2 の蒸発比が得られた。この値は、単効用蒸発装置の 0.85 と比較して加熱源が大巾に節減されている。ちなみに、電力料金を 20 円／kw・H、スチーム代を 8 円／kg (1 kg のスチーム発生に必要な燃料費代のみとして) とすれば、廃液の処理に要する加熱源の費用は、Table 11 運転コストの比較に示すように、蒸気圧縮法は電気代とスチーム代合計で 571 円／m³～888 円／m³、単効用蒸発法はスチーム代が 9,440 円となる。したがって蒸気圧縮法は単効用蒸発法と加熱源の費用で比較しても 1/16.5～1/10.6 に節減されている。

4) 装置の除染係数

蒸発缶本体の除染係数は、約 1×10^5 、デミスターは約 2 であり、低レベル廃液の処理用としては十分な除染係数が得られている。

5) 廃熱の処理

単効用蒸発装置の場合は、蒸発した蒸気の復水のための冷却水及び蒸発缶加熱済スチームドレンの冷却のための冷却水が大量に必要である。しかし本装置は処理液の加熱に用いるため廃熱の処理を必要とせず、したがって、冷却水が少量ですむ。運転結果からもこのことが実証された。

7.2 メンテナンス結果

1) スケール対策

廃液の処理に伴なって伝熱面に付着するスケールは、化学除染法でほぼ完全に除去できることが分かった。このとき用いる薬品は、母材の腐食には影響を与えない硝酸-水酸化ナトリウムの希薄溶液で十分であることが分かった。またスケール除去は、主加熱器の総括伝熱係数の低下状況をみて行うことにしたが、その除染頻度は年 1 回程度であった。化学除染にあたっては予めスケールを採取して溶解試験を行って実施するのが確実である。

2) 蒸気圧縮機の性能

本装置の主要機器である蒸気圧縮機の性能は、運転時間が約 1,000 時間の時点でも異常なく運転できている。

8. おわりに

廃液の蒸発処理方法は、内外の原子力施設で最も広く用いられている方法である。蒸発処理で国内では、単効用蒸発法が最も普及しているが 1) 運転維持費が高い 2) 廃熱の処理が必要、このため大量の冷却水が必要という欠点もある。

蒸気圧縮蒸発方式は、単効用蒸発方式のこれらの欠点を補うものである。しかし、蒸気圧縮蒸発方式は廃液の高濃縮には適していない。操作が若干複雑である等の欠点もあるので、廃液

また、定常運転中の操作は余り必要としない。プロセスの自動制御も良好であった。したがって定常運転中は監視業務が中心となる。

3) 運転維持費

運転維持費の目安として蒸発比が使われるが、通常の運転時で 12.0、経済的運転状態で 22.2 の蒸発比が得られた。この値は、単効用蒸発装置の 0.85 と比較して加熱源が大巾に節減されている。ちなみに、電力料金を 20 円／kw・H、スチーム代を 8 円／kg (1 kg のスチーム発生に必要な燃料費代のみとして) とすれば、廃液の処理に要する加熱源の費用は、Table 11 運転コストの比較に示すように、蒸気圧縮法は電気代とスチーム代合計で 571 円／m³～888 円／m³、単効用蒸発法はスチーム代が 9,440 円となる。したがって蒸気圧縮法は単効用蒸発法と加熱源の費用で比較しても 1/16.5～1/10.6 に節減されている。

4) 装置の除染係数

蒸発缶本体の除染係数は、約 1×10^5 、デミスターは約 2 であり、低レベル廃液の処理用としては十分な除染係数が得られている。

5) 廃熱の処理

単効用蒸発装置の場合は、蒸発した蒸気の復水のための冷却水及び蒸発缶加熱済スチームドレンの冷却のための冷却水が大量に必要である。しかし本装置は処理液の加熱に用いるため廃熱の処理を必要とせず、したがって、冷却水が少量ですむ。運転結果からもこのことが実証された。

7.2 メンテナンス結果

1) スケール対策

廃液の処理に伴なって伝熱面に付着するスケールは、化学除染法ではほぼ完全に除去できることが分かった。このとき用いる薬品は、母材の腐食には影響を与えない硝酸－水酸化ナトリウムの希薄溶液で十分であることが分かった。またスケール除去は、主加熱器の総括伝熱係数の低下状況をみて行うことにしたが、その除染頻度は年 1 回程度であった。化学除染にあたっては予めスケールを採取して溶解試験を行って実施するのが確実である。

2) 蒸気圧縮機の性能

本装置の主要機器である蒸気圧縮機の性能は、運転時間が約 1,000 時間の時点でも異常なく運転できている。

8. おわりに

廃液の蒸発処理方法は、内外の原子力施設で最も広く用いられている方法である。蒸発処理で国内では、単効用蒸発法が最も普及しているが 1) 運転維持費が高い 2) 廃熱の処理が必要、このため大量の冷却水が必要という欠点もある。

蒸気圧縮蒸発方式は、単効用蒸発方式のこれらの欠点を補うものである。しかし、蒸気圧縮蒸発方式は廃液の高濃縮には適していない。操作が若干複雑である等の欠点もあるので、廃液

処理システムの選定にあたっては、小型の第2段濃縮器など他の関連設備との組合せを考えて設置する必要がある。このような理由で蒸気圧縮蒸発処理装置は、大容量の廃液処理に適している。

大洗研究所の放射性廃棄物処理施設に設置された蒸気圧縮蒸発装置は、国内で稼動している唯一の装置である。

本報告がこれから同種設備の導入を計画している機関等の参考になれば幸いである。

大洗研究所、放射性廃棄物処理施設では、今後も同装置を低レベル廃液の処理に供用し、蒸気圧縮機等の長期間運転による性能変化等のデータを蓄積していく考えている。

参 考 文 献

- 1) 福本勤、廃棄物処理技術 共立出版 P. 195 (1973年)
- 2) " Management of Low-and Intermediate-Level Radioactive Wastes " SM-137/1, SM-137/12. (1970年)
- 3) " Practices in the Treatment of Low-and Intermediate-Level Radioactive Wastes " SM-71/11, SM-71/23, SM-71/48, SM-71/49, SM-71/66, SM-71/68, (1965年)
- 4) I SU編、軽水炉一次冷却系の放射能蓄積抑制対策と除染 P. 137 (1978年)

処理システムの選定にあたっては、小型の第2段濃縮器など他の関連設備との組合せを考えて設置する必要がある。このような理由で蒸気圧縮蒸発処理装置は、大容量の廃液処理に適している。

大洗研究所の放射性廃棄物処理施設に設置された蒸気圧縮蒸発装置は、国内で稼動している唯一の装置である。

本報告がこれから同種設備の導入を計画している機関等の参考になれば幸いである。

大洗研究所、放射性廃棄物処理施設では、今後も同装置を低レベル廃液の処理に供用し、蒸気圧縮機等の長期間運転による性能変化等のデータを蓄積していく考えている。

参 考 文 献

- 1) 福本勤、廃棄物処理技術 共立出版 P.195 (1973年)
- 2) " Management of Low-and Intermediate-Level Radioactive Wastes " SM-137/1, SM-137/12, (1970年)
- 3) " Practices in the Treatment of Low-and Intermediate-Level Radioactive Wastes " SM-71/11, SM-71/23, SM-71/48, SM-71/49, SM-71/66, SM-71/68, (1965年)
- 4) I SU編、軽水炉一次冷却系の放射能蓄積抑制対策と除染 P.137 (1978年)

List of Tables

- Table 1 Specification of major components
 Table 2 Specification of instrumentation
 Table 3 Inspection in construction
 Table 4 Detergent and antifoam used in non-radioactive test
 Table 5 Operating result (solution properties)
 Table 6 Operating result (processing capacity - 1)
 Table 7 Operating result (processing capacity - 2)
 Table 8 Operating result (properties of processed solution)
 Table 9 Composition of scale formed on mainheater
 Table 10 Result of descaling test
 Table 11 Operating cost comparison between single-effect evaporator
 and vapor compression evaporator

List of Figures

- Fig. 1 Piping diagram
 Fig. 2 Mass and heat balance for evaporator
 Fig. 3 Major component layout
 Fig. 4 Flow sheet of vapor compressor
 Fig. 5 Cross sectional view of vapor compressor
 Fig. 6.1 Operational results from measurement with instrumentation
 ~6.8
 Fig. 7 Relation between revolution number of circulation pump and
 processing capacity
 Fig. 8 Load characteristic of vapor compressor
 Fig. 9 Effect of antifoaming agent on detergent
 Fig. 10 Effect of antifoaming agent on salt
 Fig. 11 Effect of antifoaming agent on detergent and salt present
 together
 Fig. 12 Evaporation factor from operation using real liquid waste
 Fig. 13 Photographs of scale on tube sheet and descaled tube sheet
 Fig. 14 Dependence of over-all heat-transfer coefficient on processed
 waste volume

Table 1 Specification of major components

機器の名称	型式	機能	主要部材質	備考
給液予熱器 (LE-1)	27連二重管式	伝面 : 16.7 m ²	SUS 304 TP	外管 65 A, 内管 40 A
ベント復水器 (LE-2)	シェルアンドチューブ式	伝面 : 0.44 m ²	SUS 304 SUS 304 TB	伝熱管 19 mm φ × 2.3 mm t × 8 本
蒸気室 (LE-3)	堅型円筒式	上部に2層のディスク 中部に邢魔板 下部はサイクロン形状	SUS 316 L	デミスター: ステンレスワイヤで 下部 0.25 mm φ × 144 kg/m ³ 上部 0.12 mm φ × 432 kg/m ³
主加熱器 (LE-4)	シェルアンドチューブ式	伝面 : 216 m ²	SUS 316 L SUS 316 LT B	伝熱管 25.4 mm φ × 2.3 mm t × 910 本
補助加熱器 (LE-5)	U字管式	伝面 : 5.5 m ²	SUS 316 L SUS 316 LT B	伝熱管 19 mm φ × 2.3 mm t × 48 U
缶強制循環ポンプ (LA-1)	堅型斜流ポンプ	780 m ³ /h × 2.5 mH × 22 kW	SCS 16	バイエル変速機付 200 rpm ~ 415 rpm
蒸気圧縮機 (LC-1)	ギヤ増速単段 ターボプロワ	85 m ³ /min (100 °C 饱和蒸気) × 1.033 kg/cm ² A (吸込圧力) × 1.385 kg/cm ² A (吐出圧力) × 90 kW	G-X6CrNiMo 1810 X2CrNiMoN22.5 (SUSF 304相当品)	インペラ回転数 : 14000 rpm 軸封: ラビリンスシール 吸入側に流量制御用ガイド ベーン付
補助冷却器 (LE-6)	シェルアンドチューブ式	伝面 : 0.44 m ²	SUS 304 SUS 304 TB	伝熱管 19 mm φ × 2.3 mm t × 8 本
濃縮液受槽 (LV-1)	横型円筒	容量 : 3 m ³	SUS 316 L	
濃縮液排出ポンプ (LVP-1)	堅型渦巻ポンプ	10 m ³ /h × 10 mH × 2.2 kW	SCS 16	
凝縮液サージタンク (LV-2)	堅型円筒	容量 : 0.25 m ³	SUS 304	
凝縮液ポンプ (LVP-2)	キャンドモータ式	3.2 m ³ /h × 15 mH × 0.75 kW	SCS 13	冷却用ジャケット付
消泡剤貯槽 (MV-1)	堅型円筒	容量 : 0.1 m ³	SUS 304	

Table 2 Specification of instrumentation

記号	測定位置	測定対象	検出方式	測定範囲	備考
FRS -401	給液ベント復水器入口	流量	電磁流量式	0~4m ³ /h	記録積算計
FR -421	凝縮液フラッシングライン	同上	オリフィス式 d/pセル	0~200 l/h	記録計
FR -411	濃縮液ダウンフローライン	同上	超音波流量式	0~800 m ³ /h	記録計
FR -423	廃液蒸気蒸気圧縮機入口	同上	オリフィス d/pセル	0~4000 kg/hr	記録計
TR -401	給液ベント復水器入口	温度	測高抵抗式 (pt)	0~100 °C	6打点記録計
TR -402	給液ベント復水器出口	同上	同上	同上	
TR -403	給液予熱器出口	同上	同上	同上	
TR -424	凝縮液予熱器出口	同上	同上	同上	
TR -411	濃縮液ダウンフローライン	同上	同上	0~150 °C	
TR -412	濃縮液アップフローライン	同上	同上	同上	
TR -413	濃縮液受槽	同上	同上	同上	6打点記録計
TR -421	廃液蒸気蒸気圧縮器入口	同上	同上	同上	
TR -422	廃液蒸気カランドリア入口	同上	同上	同上	
TR -423	凝縮液予熱器入口	同上	同上	同上	
PRA -421	蒸気室	圧力	d/pセル	-500~-+500 mmH ₂ O	記録計(PRCA-422)2ペン, 警報(H)計
PRCA-422	廃液蒸気蒸気圧縮機入口	同上	同上	同上	2ペン(PR-421)記録, 調節, 警報(L)警報(H)で加熱用スチーム停止
PrRC-423	蒸気圧縮機出入口	圧縮比	同上	1.0~1.4	2ペン(PR-431)記録, 調節計
PIA -424	ベント	圧力	同上	-500~-+500 mmH ₂ O	指示警報(H)計
PR -431	加熱蒸気	同上	同上	0~5 kg/cm ² G	記録計(PrRC-423)2ペン
LRCA-411	蒸気室	液面	エアバージ式 d/pセル	0~1,000 mmH ₂ O	記録調節警報(H), 警報(L)で加熱用スチーム停止
LIA -412	濃縮液受槽	同上	同上	0~1,200 mmH ₂ O	指示計及びLVP-1の停止(L)(DI-412)2ペン
LA -413	同上	同上	静電容量式	—	レベルスイッチ(H)
LRCA-421	凝縮液サージタンク	同上	エアバージ式 d/pセル	0~600 mmH ₂ O	指示調節警報(H,L)計
LA -441	消泡剤貯槽	同上	静電容量式	—	レベルスイッチ(L)
LA -451	蒸発装置ピット	同上	同上	—	同上(H)
FOA -441	蒸気室	発泡	同上	—	同上(H)
FOC -442	同上	同上	同上	—	同上(バルブON-OFF制御)
DRC -411	濃縮液蒸気室出口	密度	エアバージ式 d/pセル	0.9~1.1 g/cm ³	調節記録計
DI -412	濃縮液受槽	同上	同上	0.9~1.2 g/cm ³	指示計(LIA-412)2ペン
PI -401	給液ライン	圧力	d/pセル	-1~-+4 kg/cm ² G	指示計
LI-13~16	低レベル廃液貯槽	液面	フロート式	0~5 m	指示計のみ4台
LR-31~34	中レベル廃液貯槽	同上	エアバージ式 d/pセル	同上	4ペン記録計1台

Table 3 Inspection in construction

機 番	試験検査項目	工 場						現 場						総 合 作 動 備 考			
		全 般	材 料	溶 接 施 行 法	溶 接 技 量 認 定	溶 接 施 行 法	放 射 線 透 過	外 観 寸 法	耐 圧 氣 密	性 能	絶 縁 抵 抗	液 体 浸 透 探 傷	放 射 線 透 過	外 銀 寸 法	耐 圧 氣 密	性 能	絶 縁 抵 抗
LE-1	給 液 波 予 熱 器	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
LE-2	ベント復水器	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
LE-3	蒸 気 室	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
LE-4	主 加 热 器	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
LE-5	補 助 加 热 器	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
LE-6	補 助 冷 却 器	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
LA-1	強制循環ポンプ	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
LVP-1	濃縮液排出ポンプ	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
LVP-2	凝縮液ポンプ	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
LC-1	蒸 気 圧 縮 機	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
LV-1	濃縮液受槽	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
LV-2	凝縮液サージタンク	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
MV-1	消泡剤貯槽	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	バルブ・配管類	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	電気・計装															○	○
	装置全體																○

Table 4 Detergent and antifoam used in non-radioactive test

試験に用いた洗剤の成分

成 分	w/o
D B S	12.5
N T A	30.0
クエン酸	6.25
硫酸ナトリウム	25.0
トリポリリン酸ナトリウム	25.0
C M C	1.25

試験に用いた消泡剤の種類

品名 項目	シリコン系 A社	シリコン系 B社	非イオン高分子系
型式	エマルジョン型 非イオン性	エマルジョン型 非イオン性	高分子系
比重 (25°C)	1.0	1.01~1.04	1.03~1.04
粘度 (25°C)	—	—	400~500 cps
有効成分	10%	39±2%	100%
希釈液	水	水	水
色	乳白色	乳白色	白色

Table 5 Operating result (solution Properties)

区分		Run No	1	2	3	4
給 主 液	処理量 (m^3)	1.77	1.52	1.70	1.66	
	$\beta(\gamma)$ 放射性物質濃度 ($\mu Ci/ml$)	1.3×10^{-6}	7.0×10^{-6}	1.0×10^{-5}	1.3×10^{-5}	
	主要核種	^{54}Cr	$^{60}Co, ^{137}Cs$	$^{60}Co, ^{137}Cs$	$^{60}Co, ^{137}Cs, ^{84}Mn$	
液 固 液	pH	7.0	6.2	5.9	6.5	
	洗剤濃度 (ppm)	0.13	2.2	2.8	7.7	
	固体分含量 (g/l)	< 0.1	0.5	0.8	0.4	
處理 液	電気伝導度 ($m\sigma/cm$)	0.04	0.62	0.40	0.26	
	$\beta(\gamma)$ 放射性物質濃度 ($\mu Ci/ml$)	$< 8.8 \times 10^{-9}$				
	pH	7.3	8.7	8.8	8.5	
濃 縮 液	電気伝導度 ($m\sigma/cm$)	$< 1 \times 10^{-8}$	1.5×10^{-2}	1.5×10^{-2}	9×10^{-3}	
	濃縮液量 (m^3)	3.4	3.5	3.5	3.7	
	$\beta(\gamma)$ 放射性物質濃度 ($\mu Ci/ml$)	1.1×10^{-5}	2.2×10^{-4}	3.3×10^{-4}	4.1×10^{-4}	
濃 縮 液	pH	8.5	6.5	6.1	6.5	
	洗剤濃度 (ppm)	3	1.53×10^2	1.69×10^2	1.81×10^2	
	固体分含量 (g/l)	2.6	1.51×10^1	1.24×10^1	8.9	
電気伝導度 ($m\sigma/cm$)		3.3	1.6	1.5	9.5	

Table 6 Operating result (processing capacity - 1)

Run-No	運転時間		処理量		濃縮液(m ³)	除染係数	処理能力(m ³ /hr)	備考
	日数	時間(hr)	(m ³)	(mCi)				
1	1 0	5 7.8	1 7 7	0 2 3	3.4	> 1.3 × 1 0 ³	3.1	
2	7	4 7.9	1 5 2	1 0 6	3.5	> 2.5 × 1 0 ⁴	3.2	
3	8	5 3.5	1 7 0	1 7 0	3.5	> 3.8 × 1 0 ⁴	3.2	
4	8	5 3.7	1 6 6	2 1 6	3.7	> 4.7 × 1 0 ⁴	3.1	
合計	3 3	2 1 2.9	6 6 5	5 1 5	1 4 1	> 2.8 × 1 0 ⁴	3.1	平均濃縮比 4 7.2

[除染係数は缶液基準で示す。凝縮液の放射性物質濃度は、全て検出限界濃度 ($8.8 \times 10^{-9} \mu\text{Ci}/\text{ml}$) 以下である。]

Table 7 Operating result (Processing capacity - 2)

運転時間(hr)	処理量		濃縮液(m ³)	除染係数	処理能力(m ³ /hr)	濃縮比	備考
	m ³	mCi					
1 5 6	9 5 6.3	2,9 2 8	3 1	7 1.6	> 1.5 7 × 1 0 ⁴	3.0 6	4 1

Table 8 Operating result (Properties of Processed solution)

Run -No	処理量 m ³	放射性物質濃度 ($\beta\gamma$) $\mu\text{Ci}/\text{m}^3$	主 要 核 種	PH	固形分 含 量 g/ ℓ	電 気 伝 導 度 m Ω /cm	洗 剤 濃 度 ppm	含有イオン濃度 (ppm)			
								Ca ²⁺	Mg ²⁺	Fe ³⁺	Cl ⁻
54 - 1	177	1.3×10^{-6}	⁵¹ Cr	7.0	< 0.1	0.04	0.13	0.7	0.96	0.11	5
2	152	7.0×10^{-6}	⁶⁰ Co, ¹³⁷ Cs	6.2	0.5	0.62	2.2	9.5	0.63	0.63	79
3	170	1.0×10^{-5}	"	5.9	0.8	0.40	2.8	7.5	4.0	0.74	41
4	166	1.3×10^{-5}	⁶⁰ Co, ¹³⁷ Cs, ⁵⁴ Mn	6.5	0.4	0.26	7.7	5.7	2.8	0.51	22
5	52	9.6×10^{-6}	"	6.3	0.5	0.35	16.3	6.1	4.6	2.0	43
6	85	6.2×10^{-6}	⁶⁰ Co, ⁵⁸ Co, ¹³⁷ Cs	6.2	0.5	0.32	22.5	6.9	4.8	0.97	35
7	83	6.2×10^{-6}	"	6.2	0.5	0.32	22.5	6.9	4.8	0.97	35
8	164	3.2×10^{-6}	⁶⁰ Co, ¹³⁷ Cs	6.8	0.3	0.41	2.3	1.9	3.4	12.0	50
9	160	5.1×10^{-6}	"	8.5	0.4	0.25	2.2	2.1	3.6	13.3	19
10	165.5	6.0×10^{-6}	⁶⁰ Co, ¹³⁷ Cs, ⁵⁸ Co	6.2	0.2	0.26	2.5	6.5	4.3	0.16	25
55 - 1	169	1.0×10^{-5}	⁶⁰ Co, ⁵⁸ Co, ⁵¹ Cr	6.6	0.2	0.25	1.9	6.0	1.3	0.25	22
2	173	6.2×10^{-6}	"	5.9	< 0.1	0.25	1.1	8.5	2.1	0.09	45
3	158	3.8×10^{-6}	⁶⁰ Co, ⁵⁸ Co, ⁵⁴ Mn	6.3	0.4	0.55	6.5	16.2	4.2	0.23	40
4	126	1.3×10^{-5}	⁶⁰ Co, ¹³⁷ Cs, ⁵⁸ Co	6.8	0.4	0.60	6.9	10.8	3.5	1.3	48
5	20	2.1×10^{-5}	"	7.8	0.7	1.48	7.6	8.4	3.9	9.0	45
6	59.3	7.1×10^{-6}	"	7.2	0.7	0.95	3.2	10.9	4.1	1.7	46
7	152	2.8×10^{-5}	"	7.5	0.8	0.95	4.4	4.3	3.5	5.0	57
8	177	2.9×10^{-5}	"	7.1	0.5	0.53	4.2	3.6	3.9	1.4	34
9	167	2.1×10^{-5}	⁶⁰ Co, ⁵⁸ Co, ⁵⁴ Mn	6.8	0.4	0.52	5.6	8.6	3.8	19.3	52
10	169	1.3×10^{-5}	"	7.0	1.6	1.20	3.5	5.6	2.9	0.35	57
11	183	7.5×10^{-6}	⁶⁰ Co, ¹³⁷ Cs, ⁵⁴ Mn	6.9	0.6	0.83	2.4	6.3	3.6	1.6	47
合計 2927.8	平均 1.02 $\times 10^{-5}$		—	—	0.5	—	4.8	6.5	3.2	3.4	39.7

Table 9 Composition of scale formed on mainheater

元素	Si	Ca	Mg	Cr	Fe	Mn	Cu
分析値(w/o)	2.3	1.5	8	0.1	0.04	0.03	0.005
モル比	2	1	1	—	—	—	—
推定される スケールの形態	$xM_2O \cdot ySiO_2$	$M : Ca, Mg$ 等	$SiO_2 \cdot nH_2O, CaSO_4(CO_3^{2-})Mg(OH)_2$	酸化物又は水酸化物			

Table 10 Result of descaling test

工 程	試 薬	条 件	スケール除去率(%)				
			重 量	放 射 能	Si	Ca	Mg
第 1	HNO ₃ (0.4 mol/ℓ)	80 ℃, 4 時間循環	5.7	9.7	約 15	9.9	9.9
第 2	NaOH (0.1 mol/ℓ)	同 上	4.1	3	約 80	0	0
第 3	HNO ₃ (0.08 mol/ℓ)	80 ℃, 2 時間循環	2	0	約 5	1	1

(除去効果は、分解し目視によつて確認)

Table 11 Operating cost comparison between single-effect evaporator and Vapor compression evaporator

	廃液の処理量 Q ton/hr	スチーム使用量 kg/hr	電力 kw	使用量 円/hr	運転コスト 円/hr·ton
単効装置	1.00	* ¹ 1,180	* ² 9,440	—	9,440
蒸気発蒸装置	3.03	3.0~154	240~1,232	745~73	1,490~1,460
使用量の比	($\frac{\text{単効用}}{\text{蒸発装置}}$) $\frac{\text{蒸発装置}}{\text{蒸気圧縮}}$ (蒸発装置)	3.93~7.7	—	—	16.5~10.6

※1 : 1 kg のスチーム発生に必要な燃料代は、8 円として計算

※2 : 電力料金は、20 円/kw·H として計算

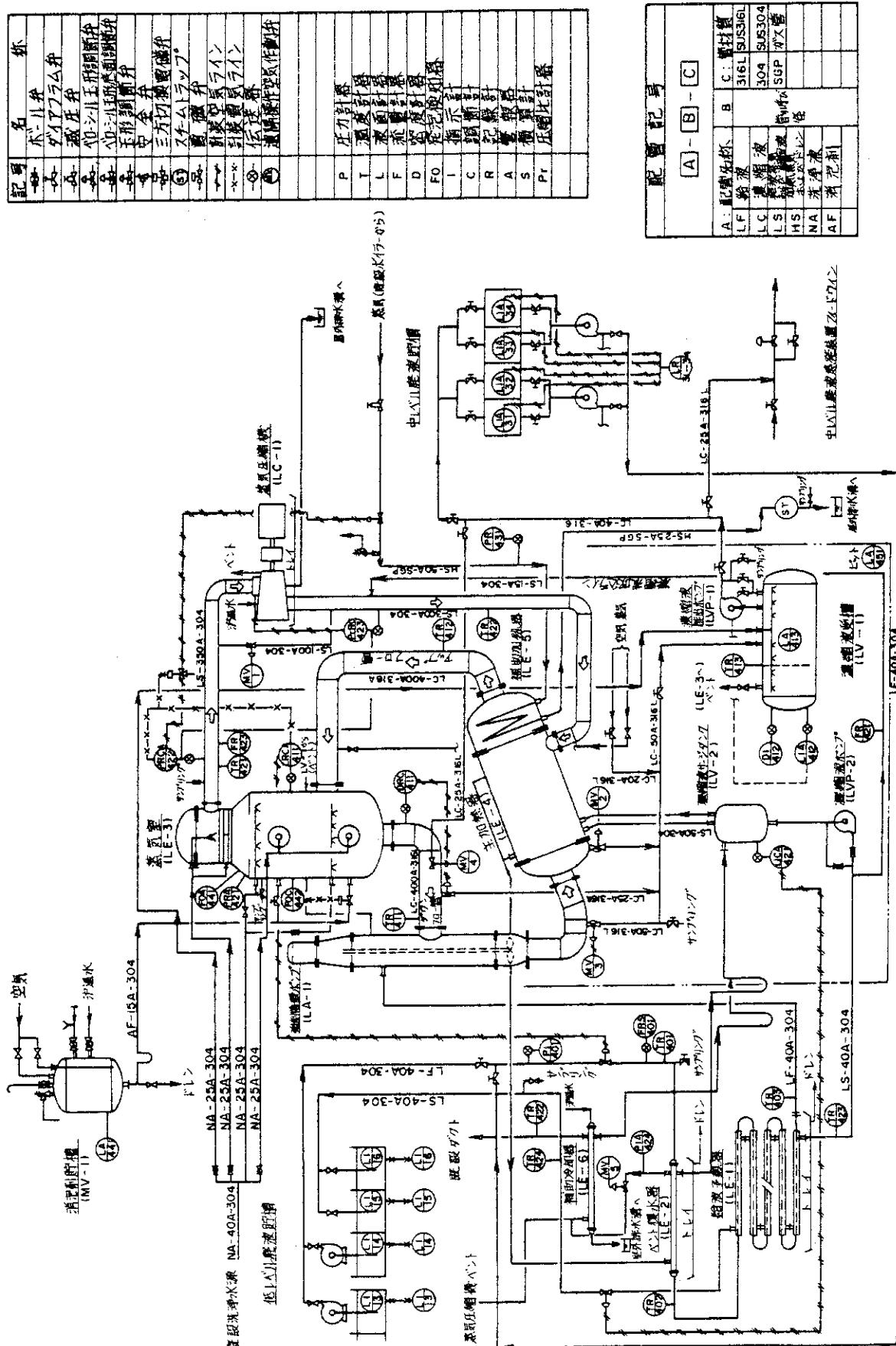


Fig. 1 Piping diagram

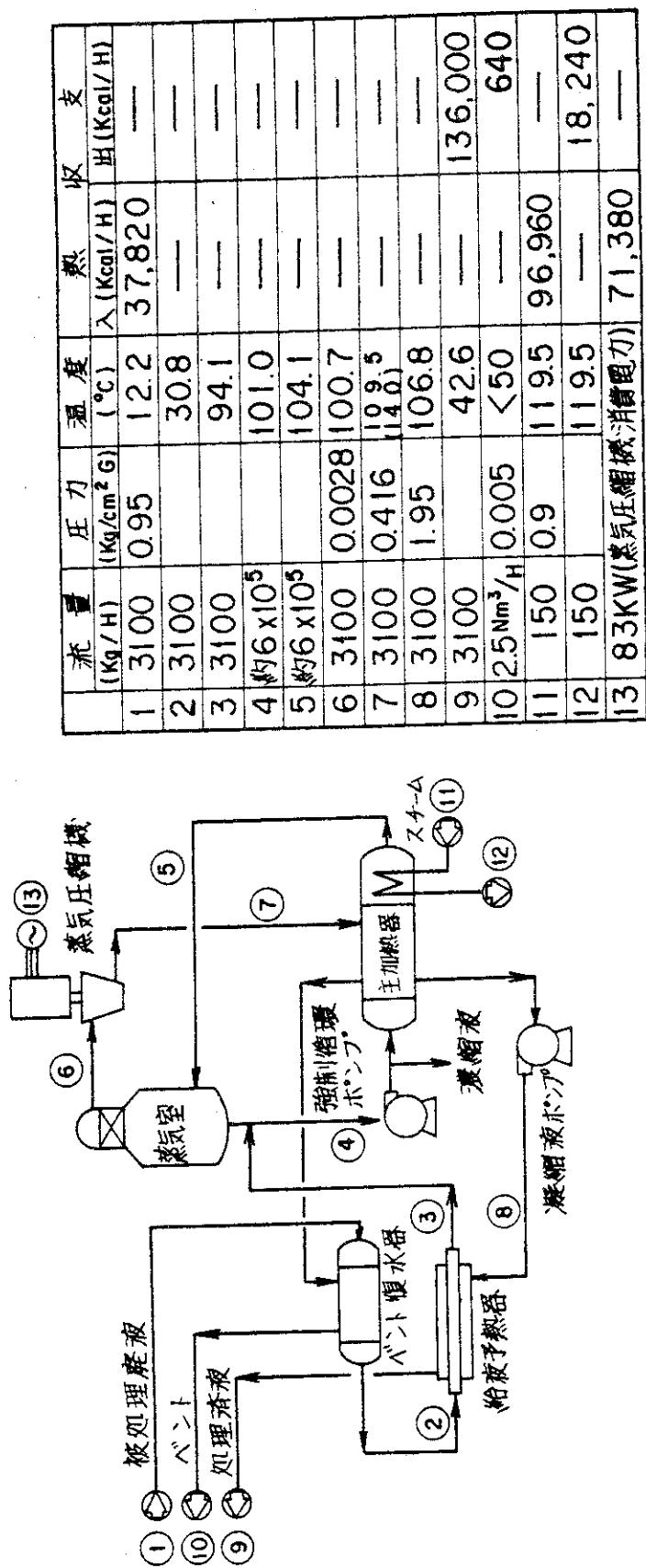


Fig. 2 Mass and heat balance for evaporator

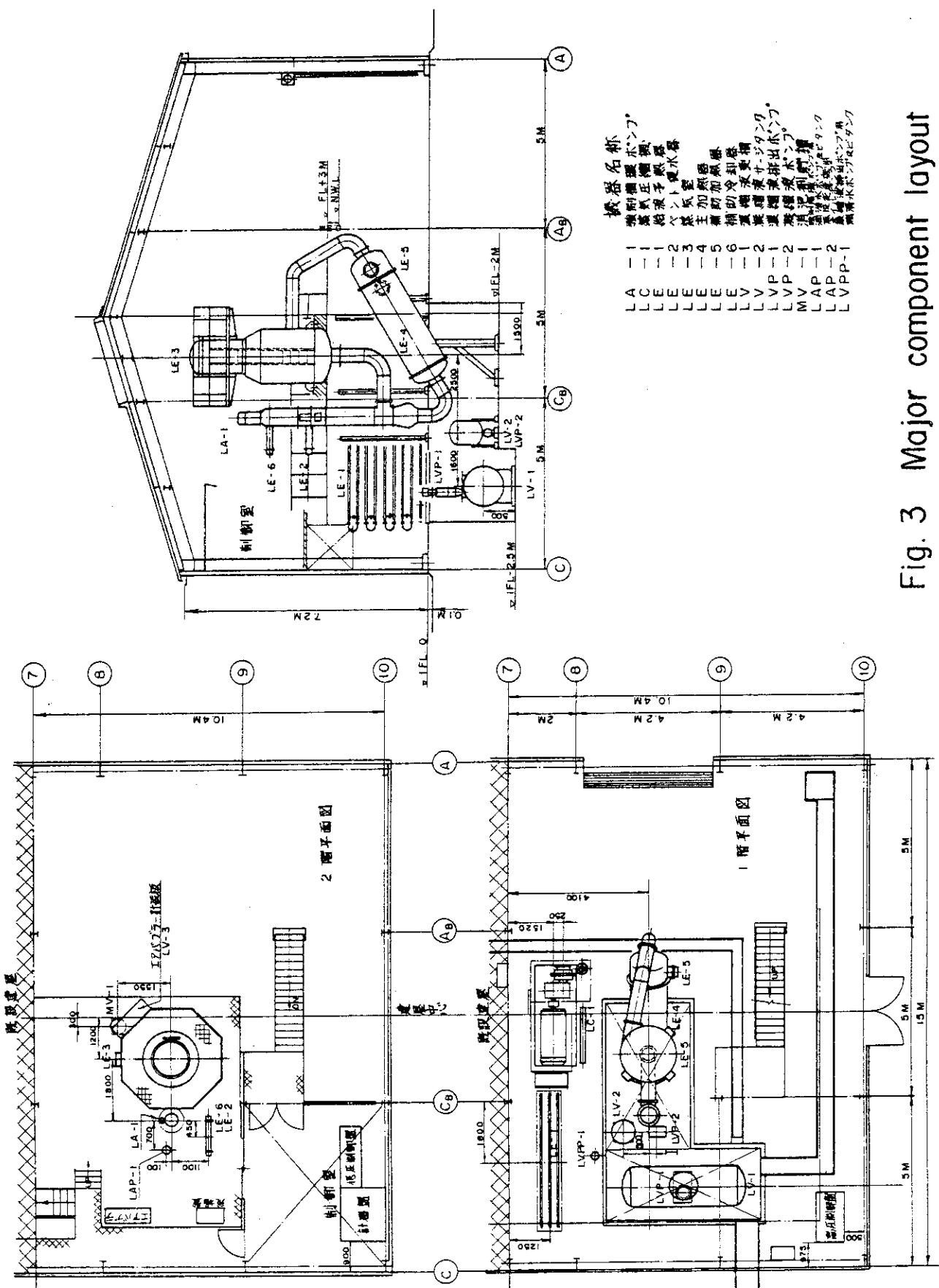


Fig. 3 Major component layout

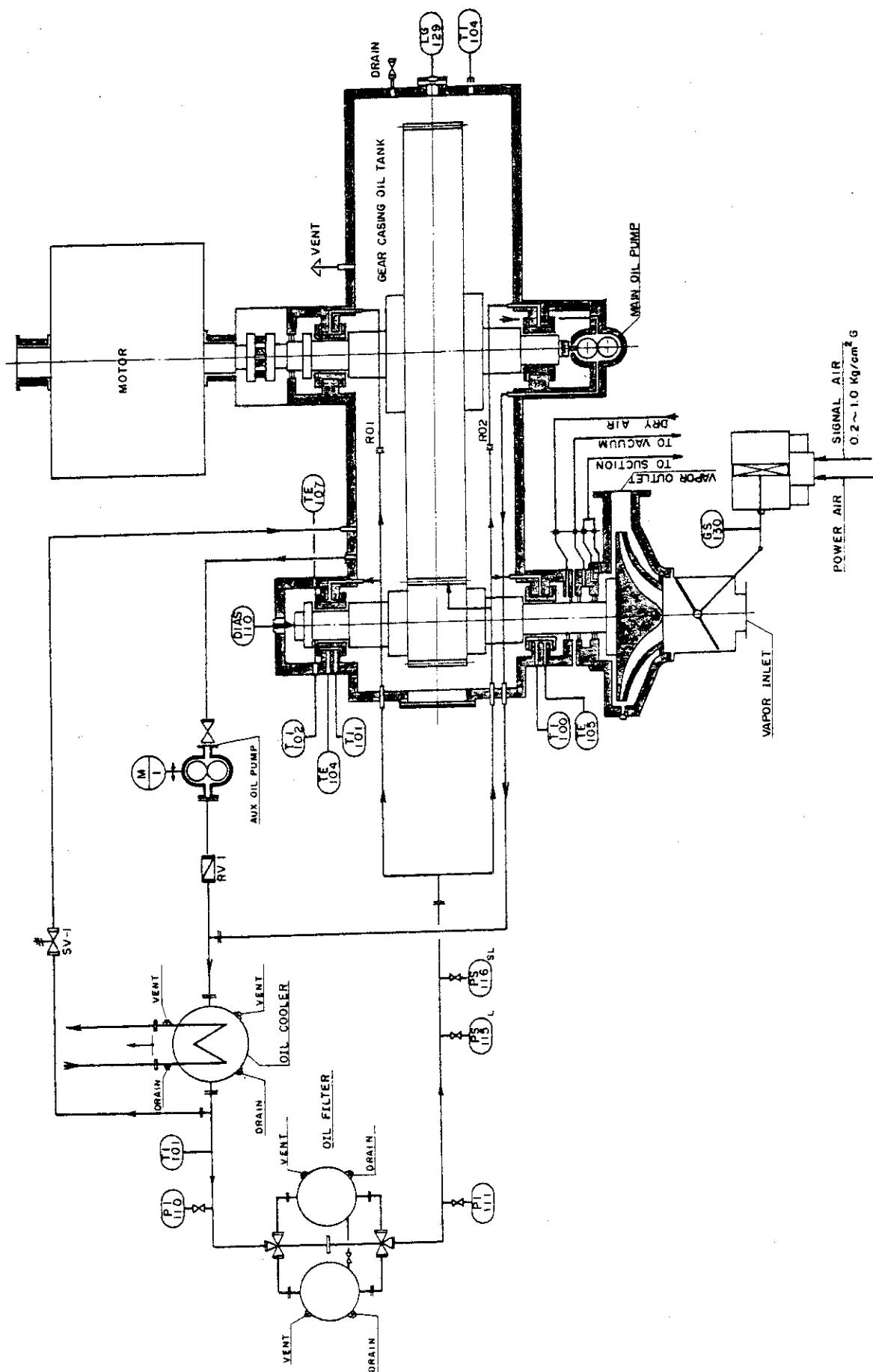


Fig. 4 Flow sheet of vapor compressor

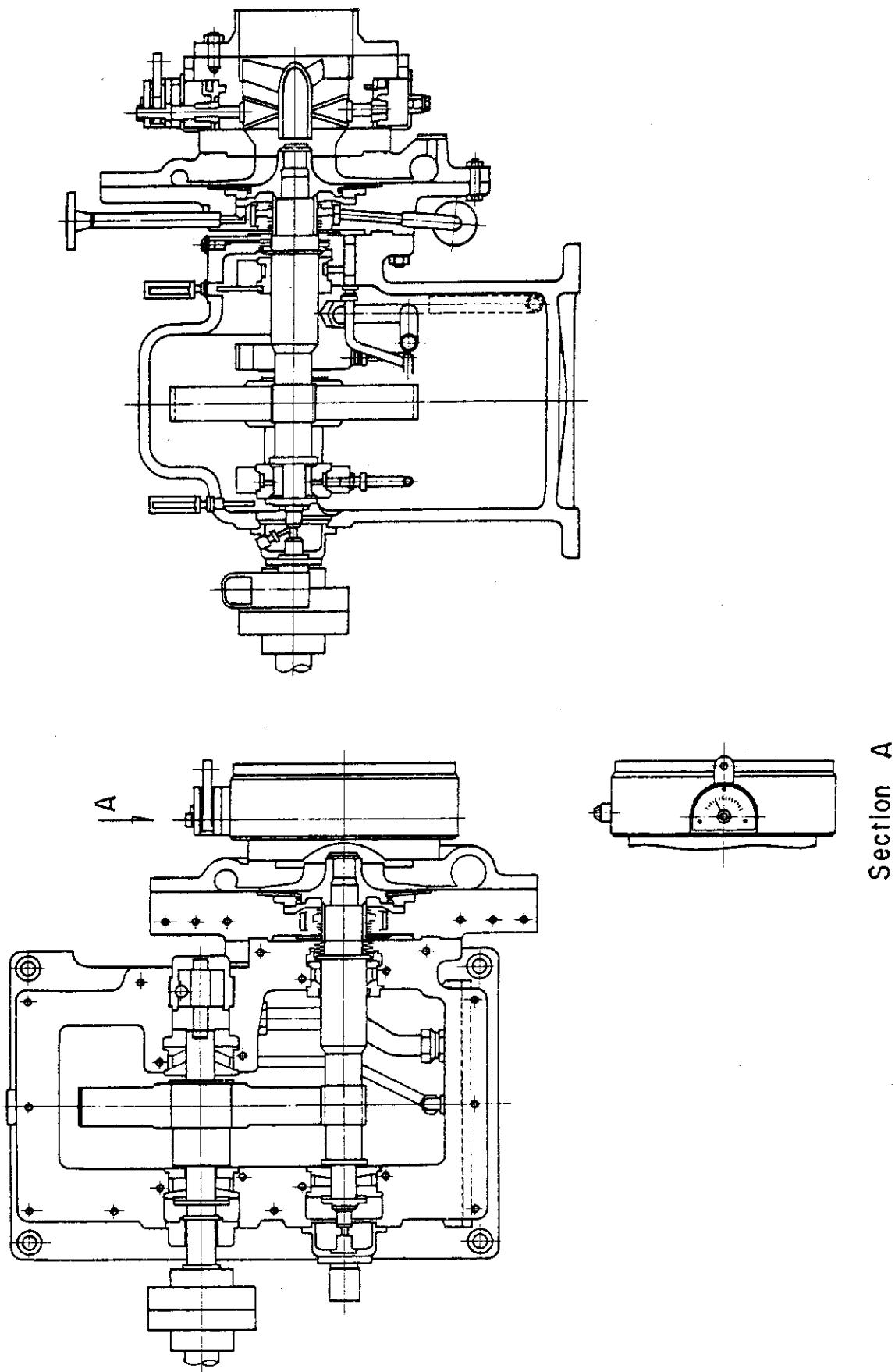
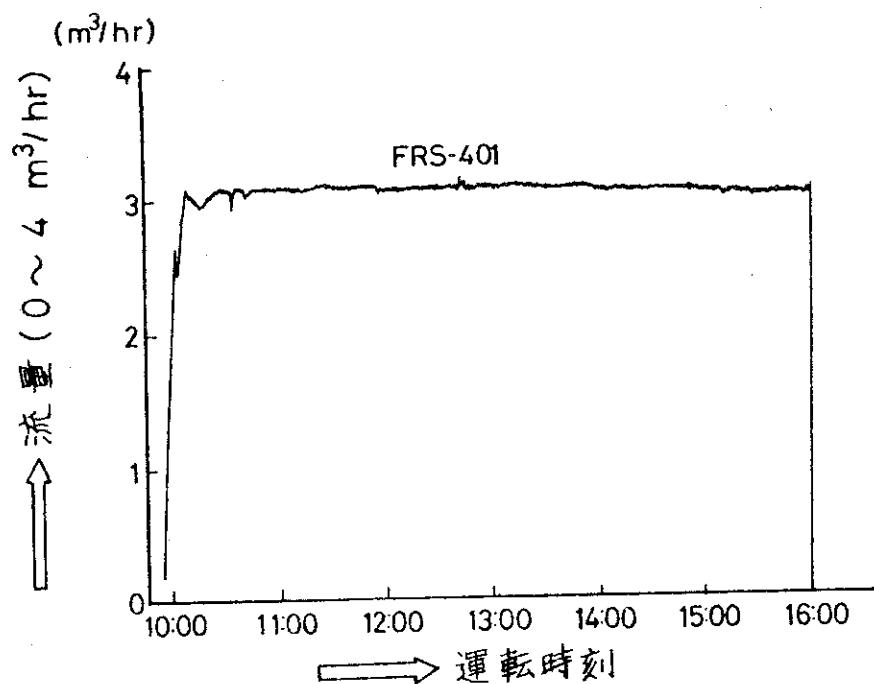


Fig. 5 Cross sectional view of vapor compressor



給液ベント復水器入口流量 (FRS-401)

Fig.6.1 Operational results from measurement with instrumentation

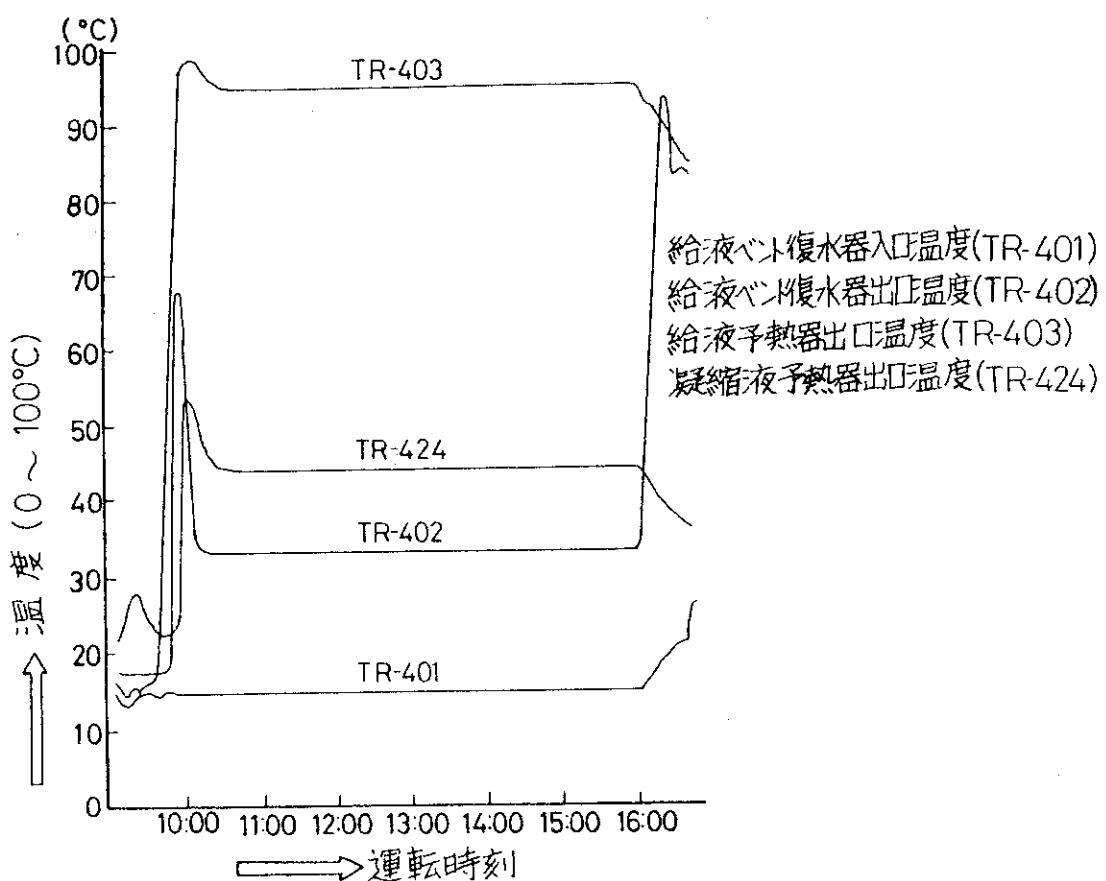


Fig.6.2 Operational results from measurement with instrumentation

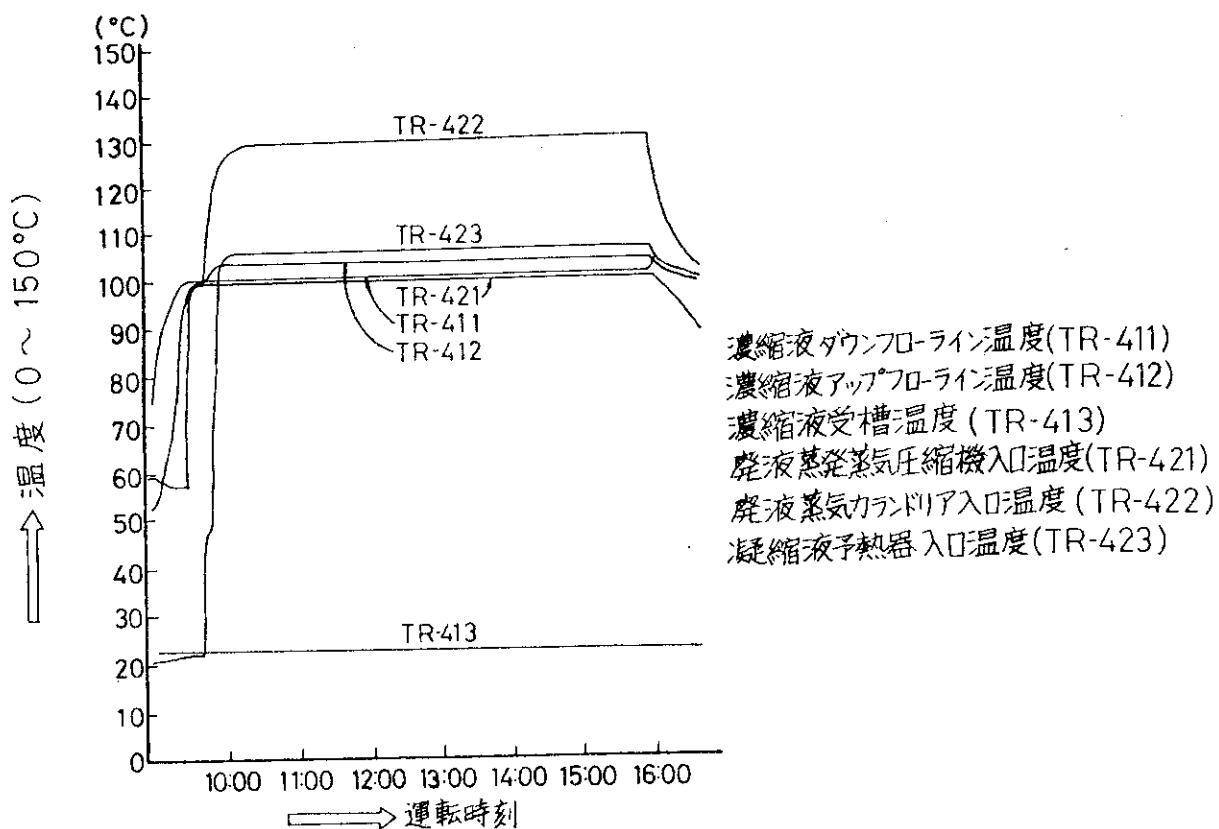


Fig.6.3 Operational results from measurement with instrumentation

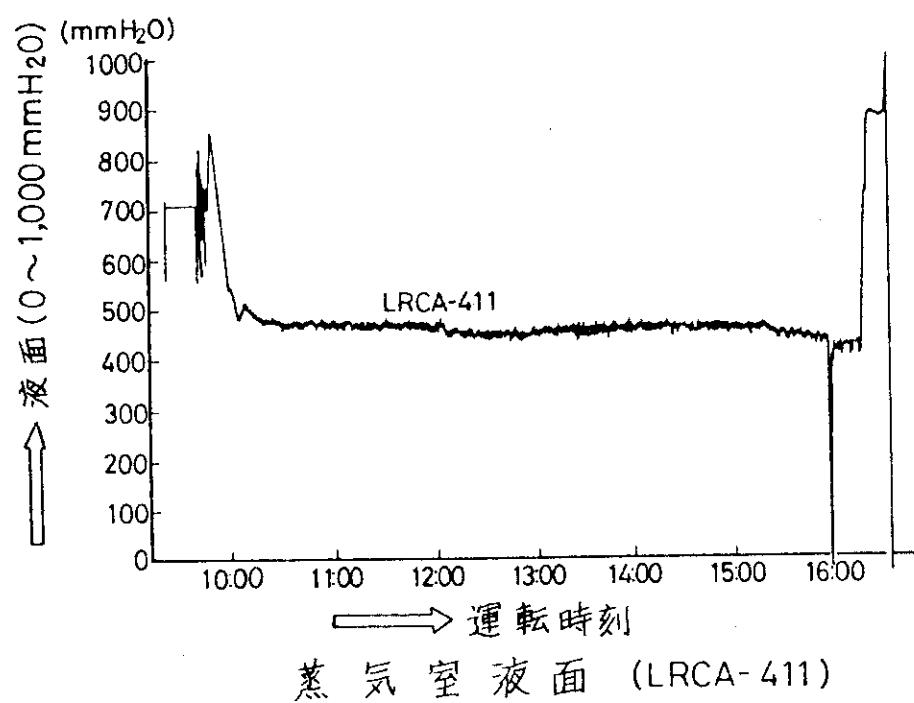


Fig.6.4 Operational results from measurement with instrumentation

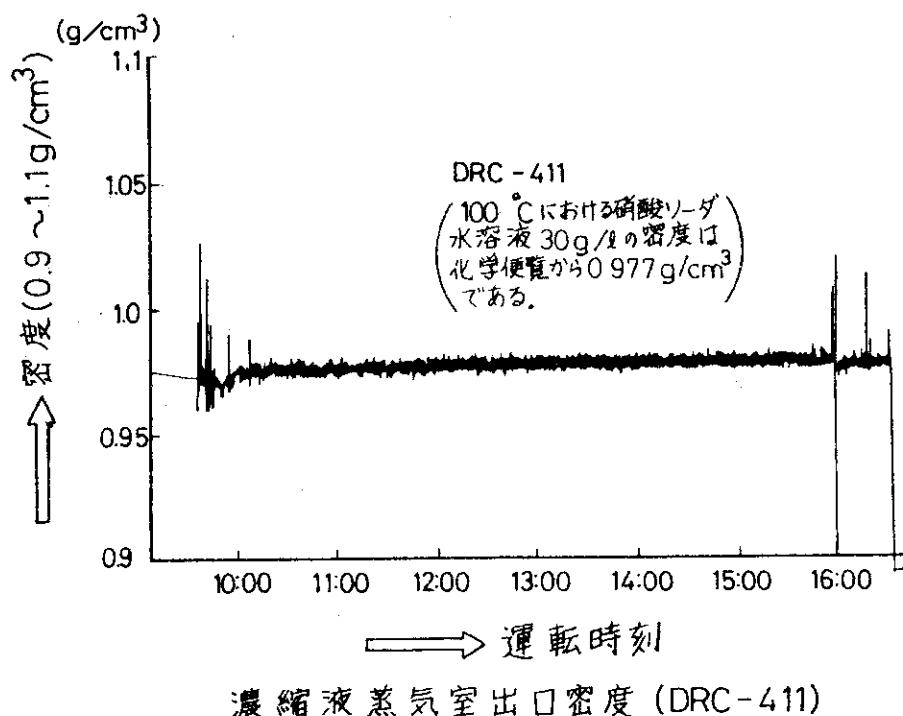


Fig.6.5 Operational results from measurement with instrumentation

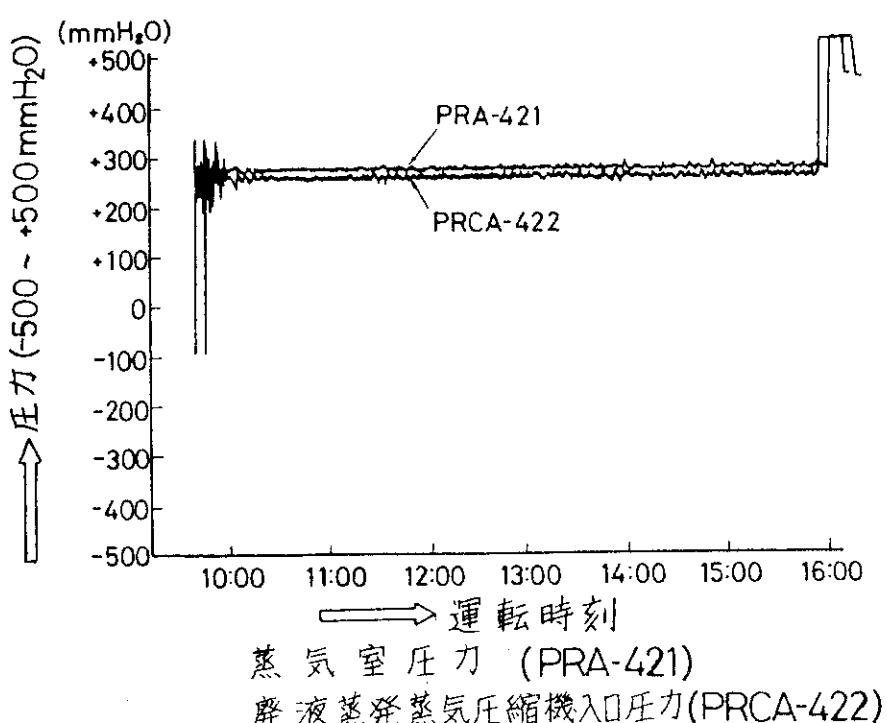


Fig.6.6 Operational results from measurement with instrumentation

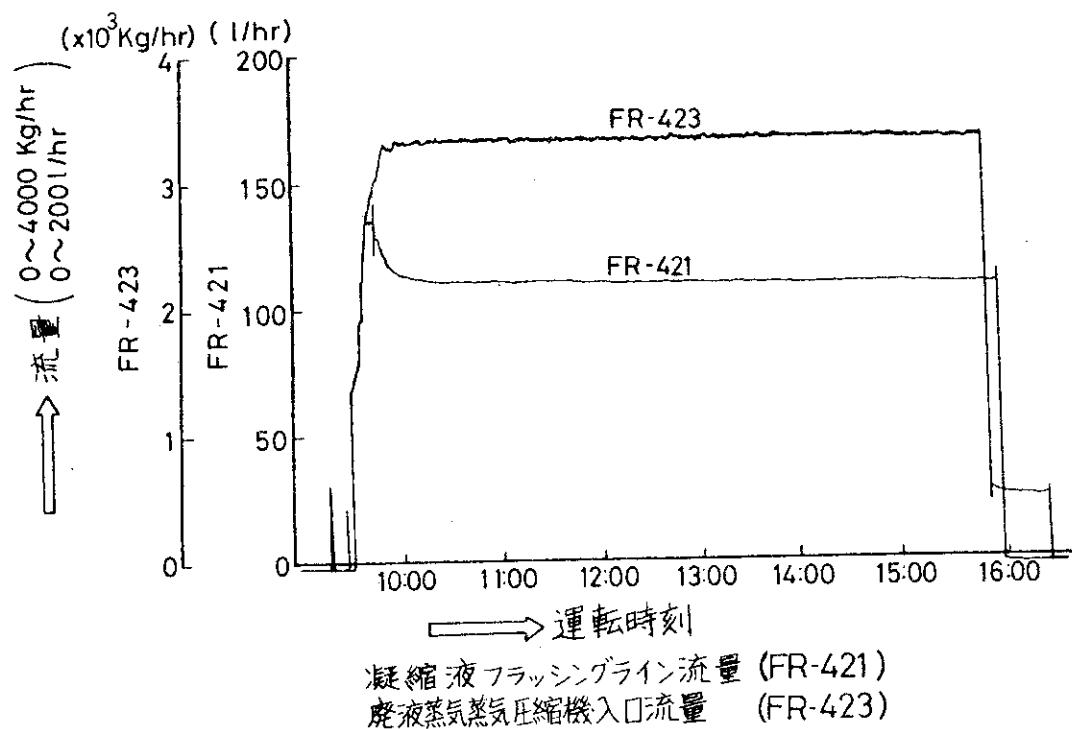


Fig.6.7 Operational results from measurement with instrumentation

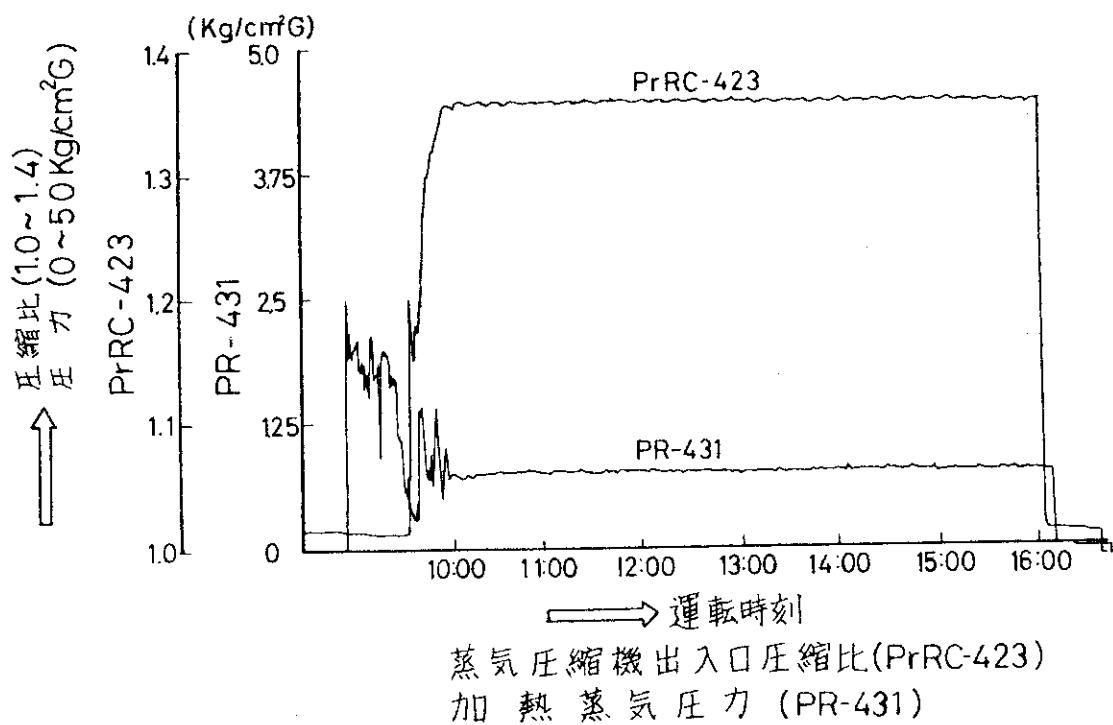


Fig.6.8 Operational results from measurement with instrumentation

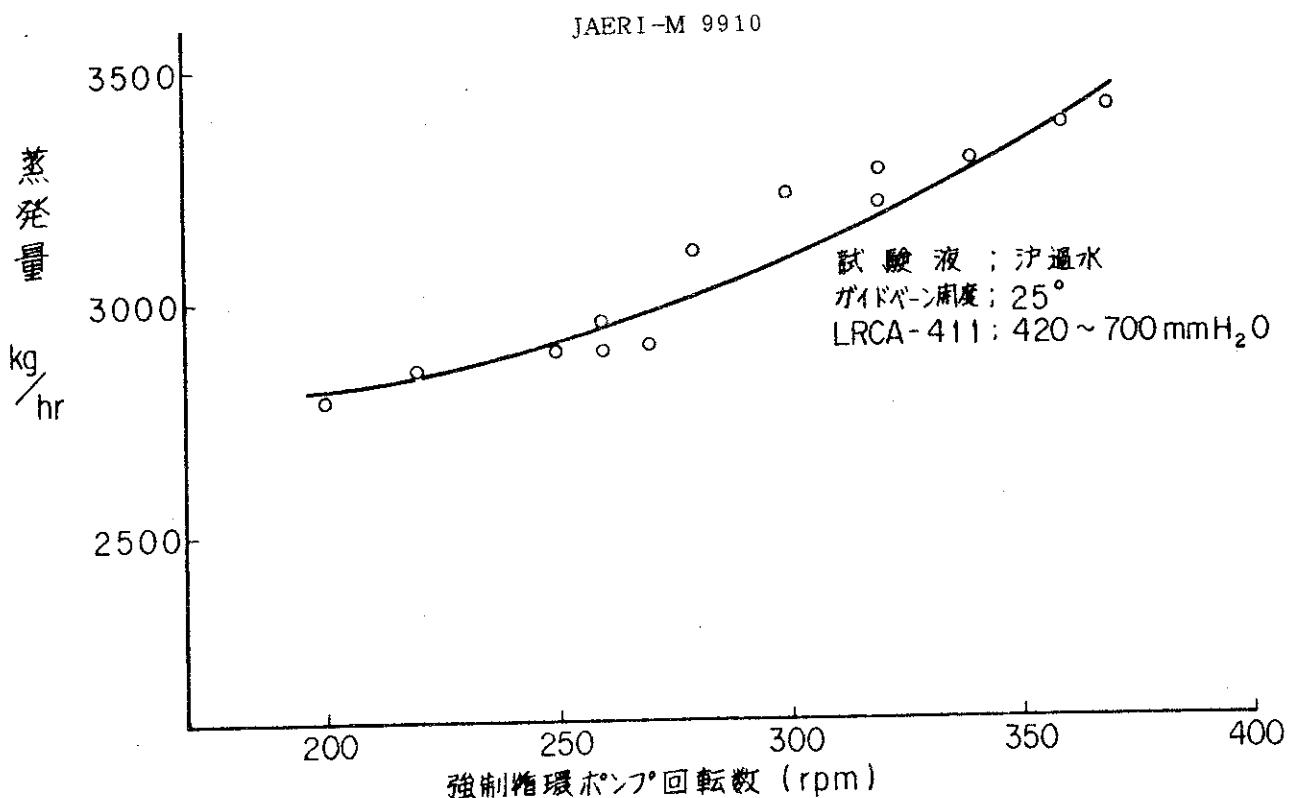


Fig. 7 Relation between revolution number of circulation pump and processing capacity

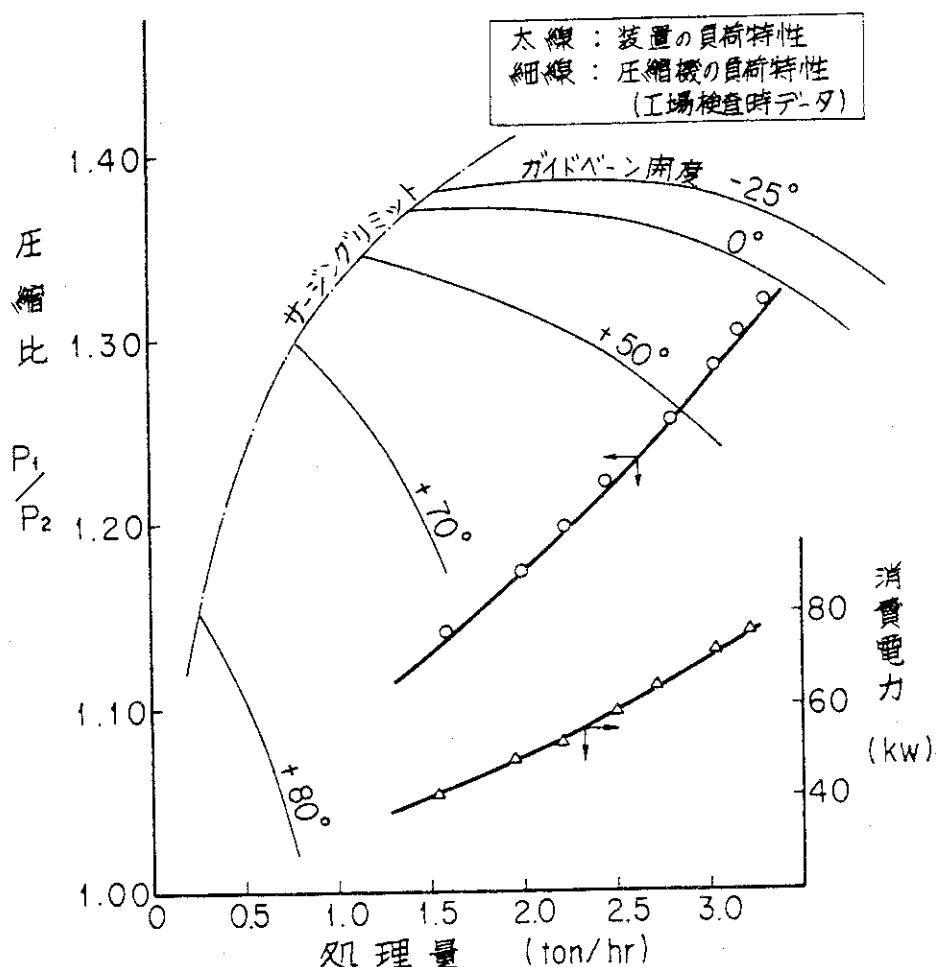


Fig. 8 Load characteristic of vapor compressor

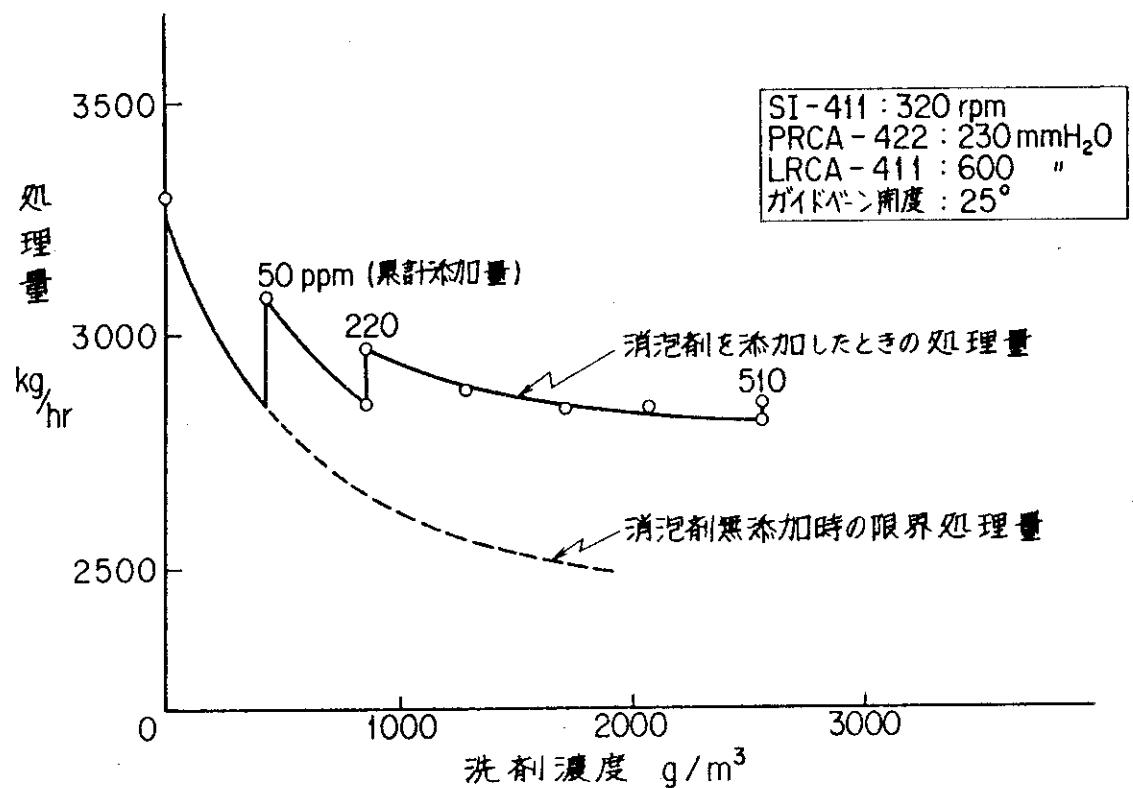


Fig. 9 Effect of antifoaming agent on detergent

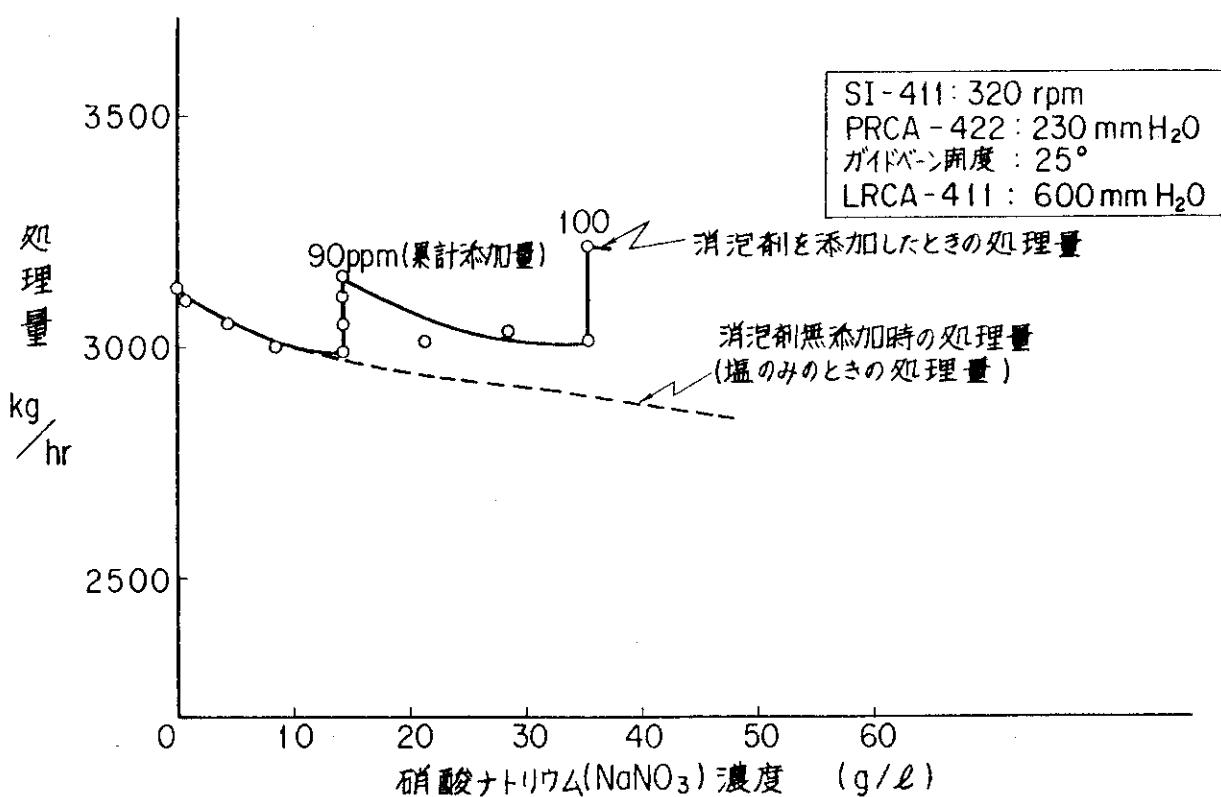


Fig. 10 Effect of antifoaming agent on salt

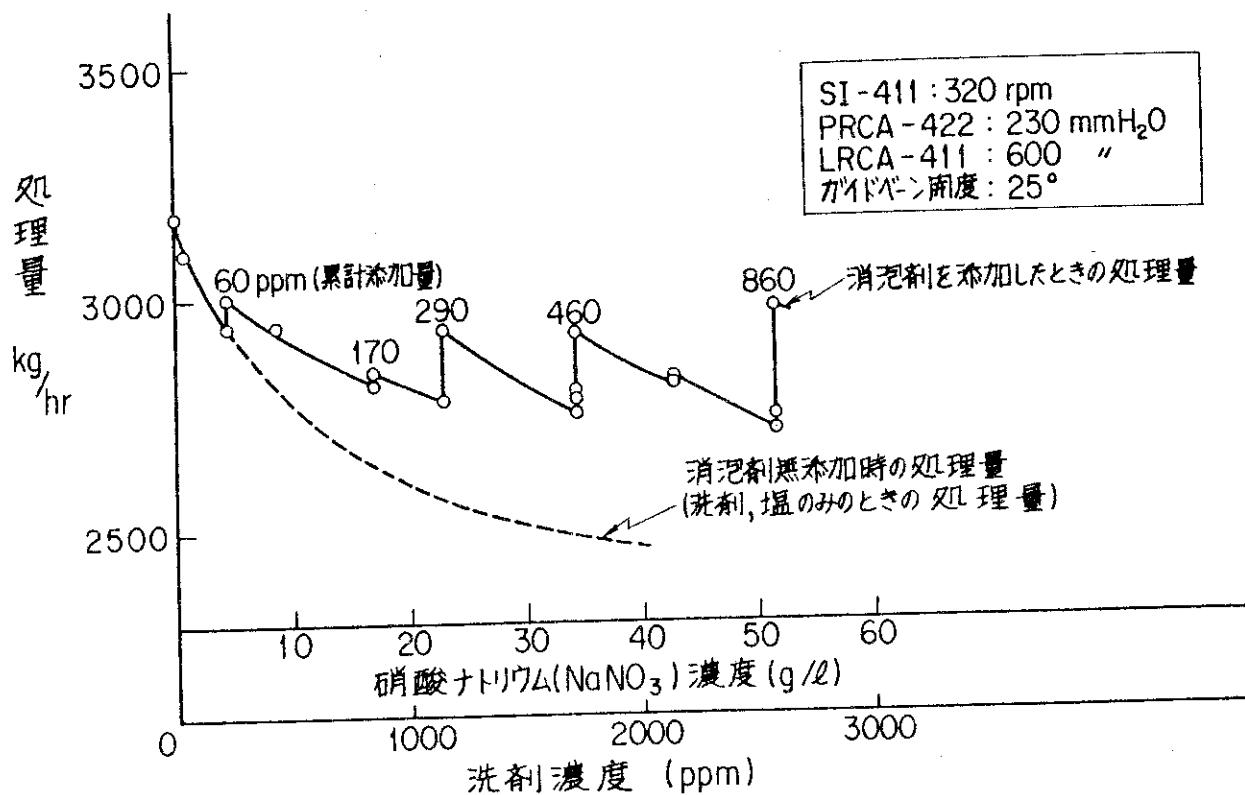


Fig. 11 Effect of antifoaming agent on detergent and salt present together

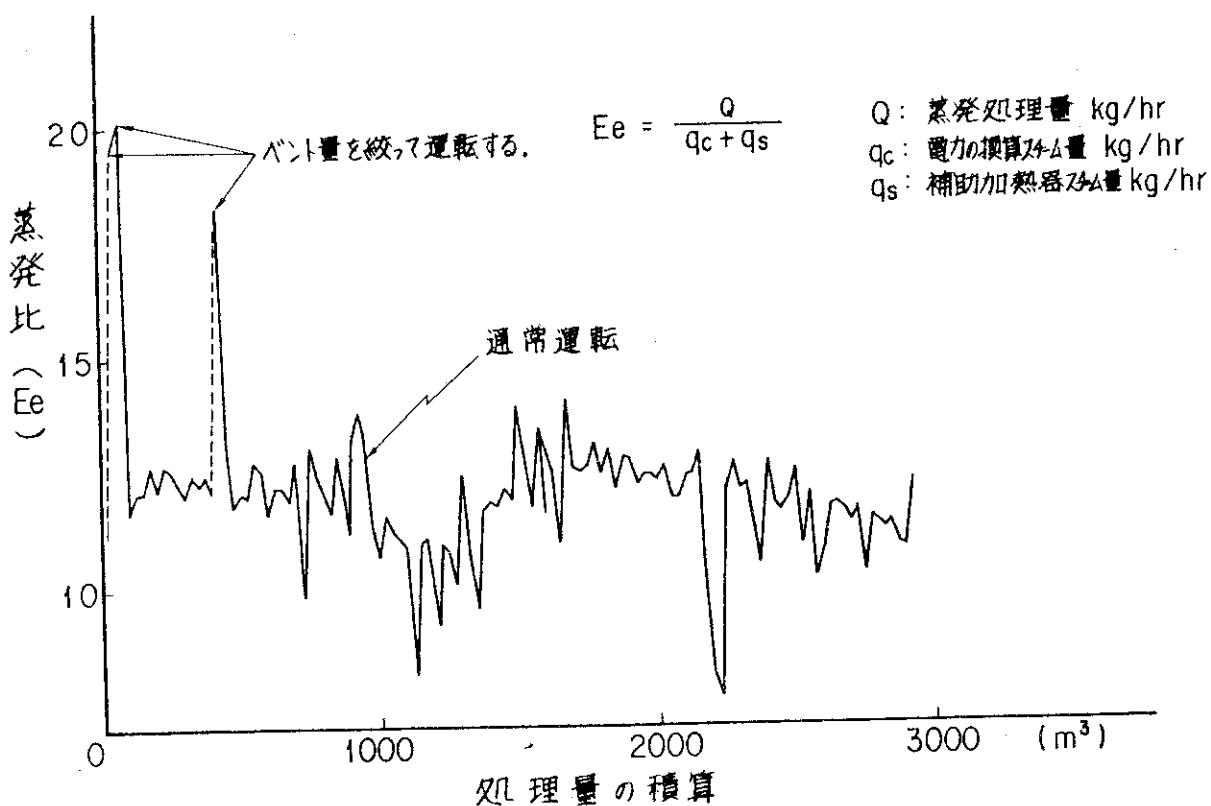
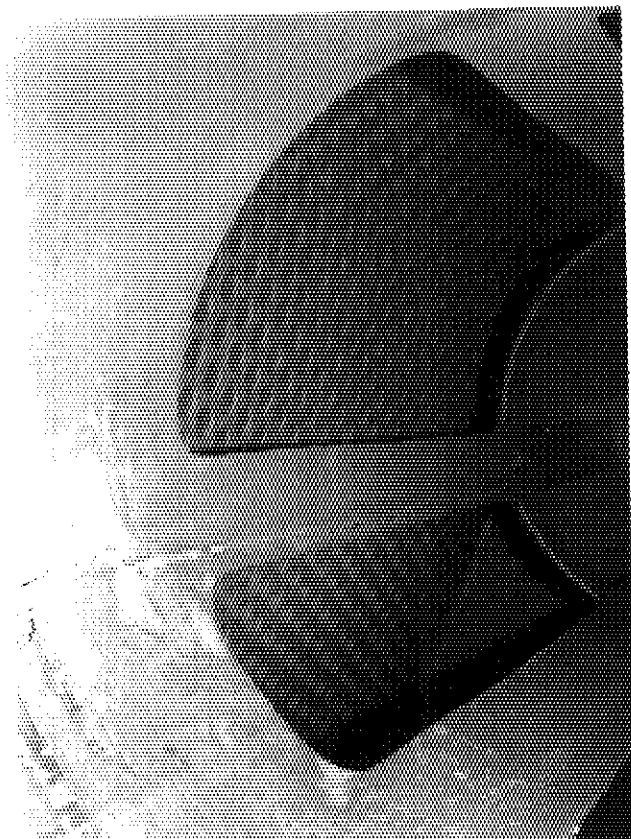
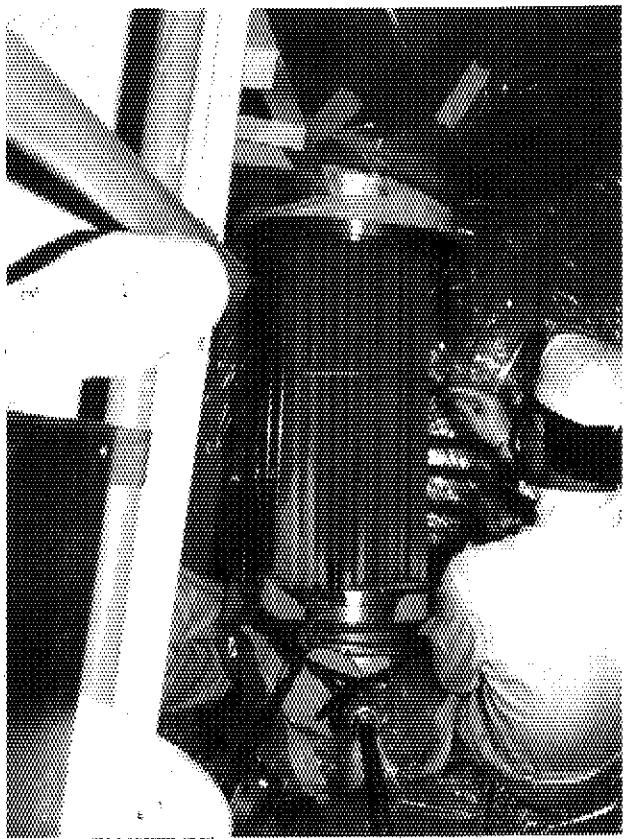


Fig. 12 Evaporation factor from operation using real liquid waste

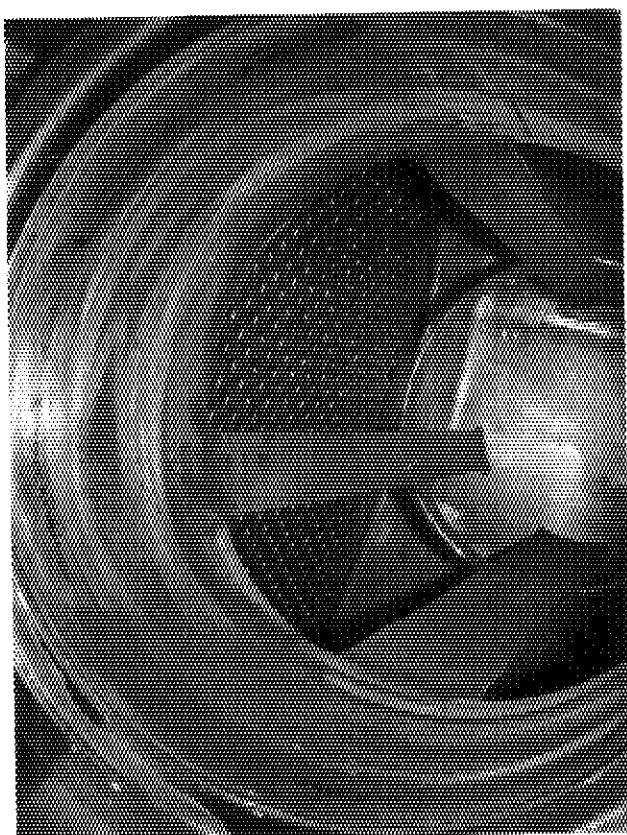


主加熱器管板



補助加熱器Uチューブ

スケール付着写真



化学除染後の写真



Fig. 13 Photographs of scale on tube sheet and descaled tube sheet

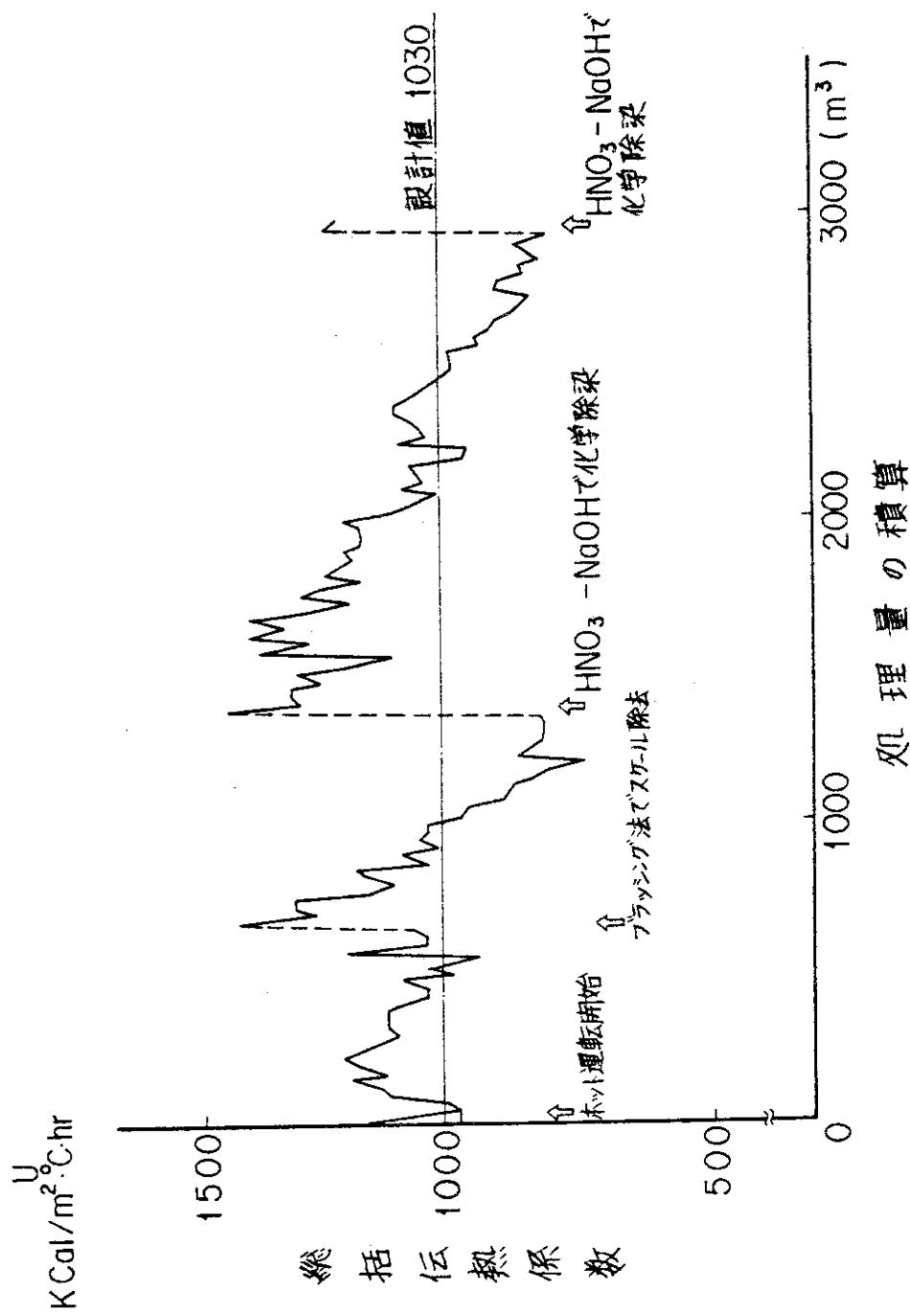


Fig. 14 Dependence of over-all heat-transfer coefficient on processed waste volume