U.D.C. 621.311.22:[621.165.1:547.412.262.3]:621.181.232.9-681
662.994-976:666.942.041.496

中低温排熱回収-油・フロンサイクル発電プラント“OFTG”の開発

Development of Oil-Fluorocarbon Rankine Cycle Waste Heat Recovery Generating Plant

関和富一* *Tomikazu Sekiwa*
渋谷恭一** *Kyôichi Shibuya*
滝　孝光*** *Takamitsu Taki*

エネルギー価格の上昇に伴い，各産業界の生産設備では省資源，高効率化の必要性がいっそう高まり，積極的な省エネルギーと排熱有効利用を目的とし，電力又は熱源として回収する計画が立てられつつあるが，セメント製造業界でも，その製造工程から排出される200～400℃の排熱の電力回収を検討してきた。

住友セメント株式会社は，日立製作所が開発した従来困難とされていた中低温排熱を効率的に回収できるOFTGを，住友セメント株式会社赤穂第2工場のAQCの排ガスダクトに設置して，昭和56年4月に我が国で初めて発電を開始し，目下順調に運転中である。このOFTGは，特殊な油とフロンの安定混合液で200～400℃の中低温排熱を回収し，フロンだけが蒸発しフロンタービン発電機を駆動発電する画期的技術による発電システムである。

なお，本発電システムの構成機器である油加熱器は，その主要部に通商産業省工業技術院「ムーンライト計画」の一環として開発された直接接触熱交換器の応用である。

1 緒　　言

OFTG(Oil-Fluorocarbon Turbine-Generator：油・フロンサイクル発電プラント)は，ポリオールエステル油と呼ばれる特殊な油で排熱を回収して，フロンR113に直接熱交換し，フロンだけを蒸発させフロンタービンを駆動させる発電システム[1]である。従来の低沸点媒体利用の発電プラントでは，フロンの劣化上限温度である約150℃以下の熱源にだけ設置されていたが，本システムは，特性の安定した低価格の媒体であるポリオールエステル油とフロンR113の完全混合液で200～400℃の中低温熱源の熱回収を可能にしたものである。本発電プラントを設置したセメント製造設備のAQC(Air Quenching Cooler：エア クエンチング クーラ)の排熱は，従来はEP(電気集塵装置)を通し煙突で大気中に排出されていたものを電力回収したもので，以下に本発電プラントの開発成果について報告する。

2 OFTGの概要

本発電プラントは，次に述べるような特長をもっている。

(1) ポリオールエステル油で排熱を回収して，フロンR113へ熱交換することで，特性の安定した低価格の媒体により，200～400℃の中低温排熱源の熱回収を可能にした。

(2) ポリオールエステル油とフロンR113を油加熱器(フロン蒸発器)内で直接熱交換することにより，設備を小形化した。

(3) 油加熱器に自然循環方式を採用したことにより，設備所内動力を大幅低減した。

(4) ポリオールエステル油の蓄熱作用により，変動する排熱源に対し回収電力が平滑化されている。

以上の特長をもつ本発電プラントの原理，系統，構造及び制御について次に概略述べる。**図1**に運転中の油加熱器とフロン予熱器の，**図2**にフロンタービン発電機とフロン凝縮器

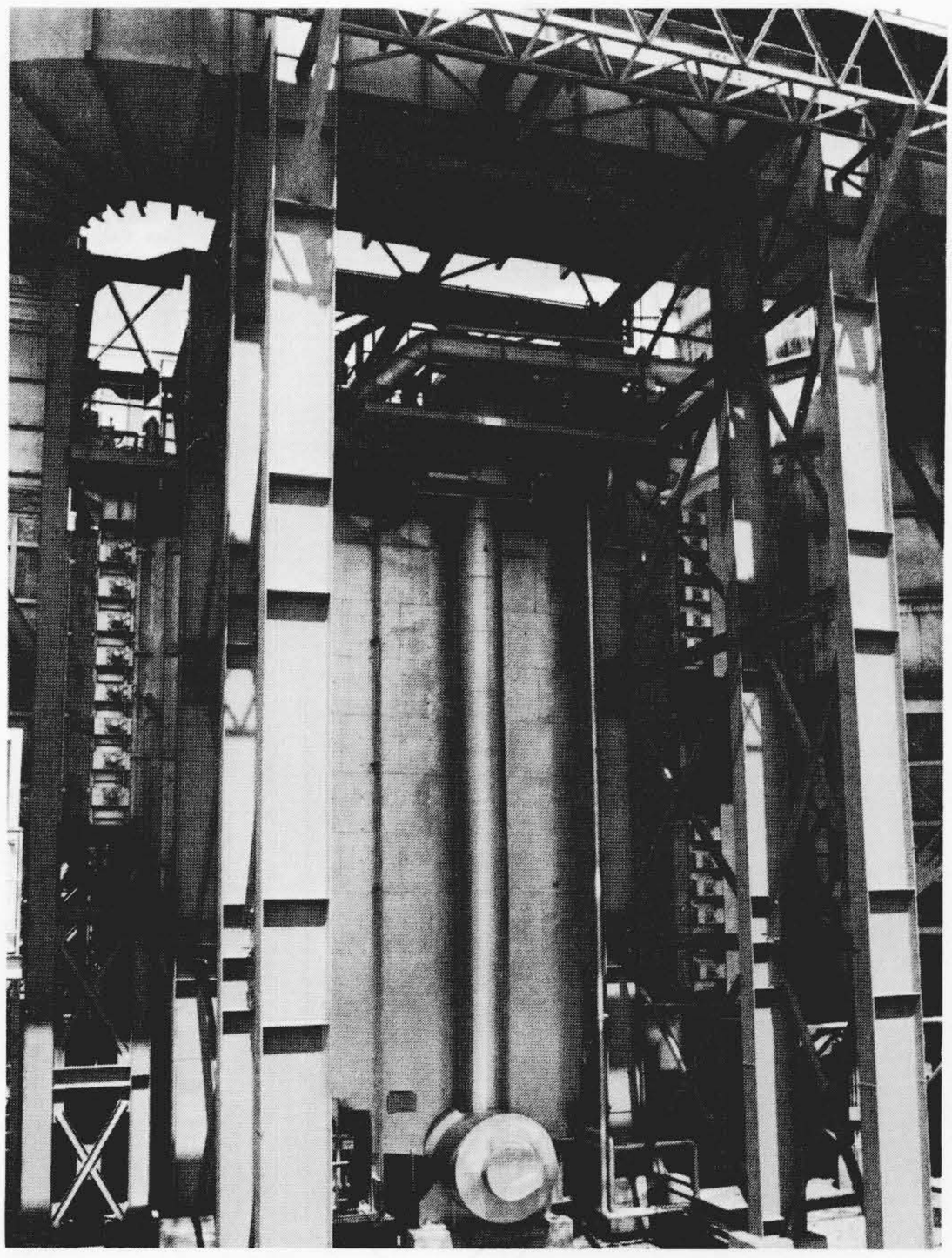

図1　運転中の油加熱器とフロン予熱器の全景　排ガスは右手から左手に流れ，右手にガス入口ダンパが上，下2段設けられ，中央に油加熱器の降水管が見える。また，左手のガス出口ダンパとの間にフロン予熱器がある。

* 住友セメント株式会社赤穂工場　** 住友セメント株式会社技術開発部　*** 日立製作所日立工場

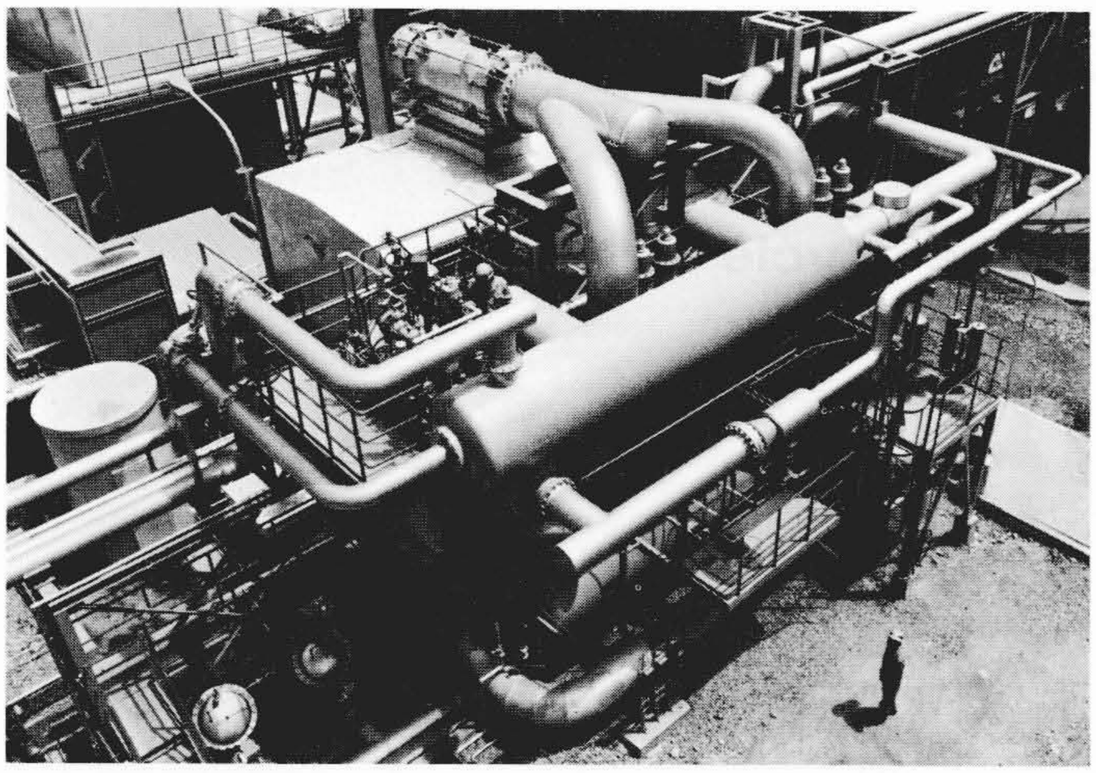

図2 フロンタービン発電機とフロン凝縮器の全景 上方にフロンタービン発電機が屋外形ラギングでカバーされ，フロンタービン排気管が途中で2本になって下方のフロン凝縮器へ連結されている。フロン凝縮器上部には，タービンバイパス用エネルギーダンパ管が見える。

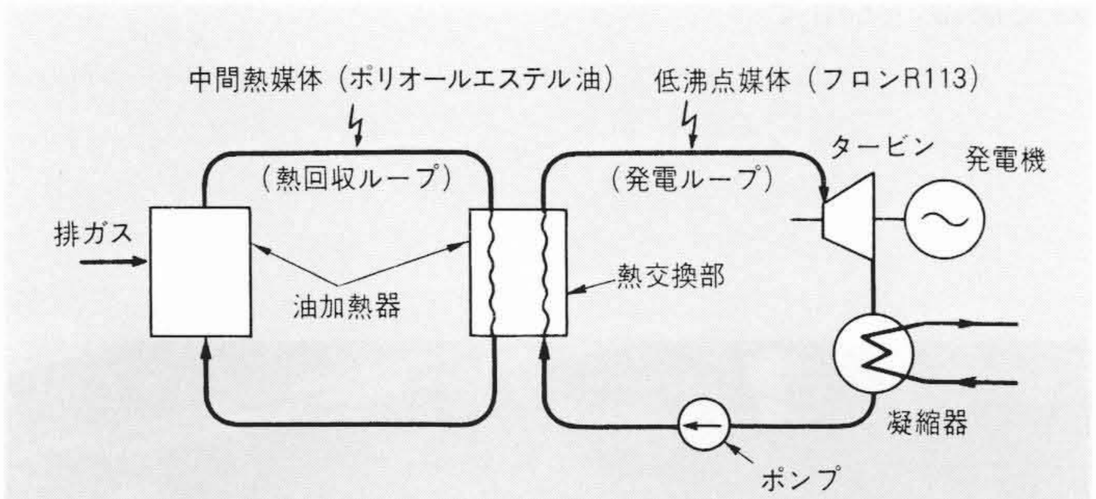

図3 油・フロンサイクル発電プラントの基本系統 ポリオールエステル油とフロンR113とは完全に混合し，加熱されるとフロンだけが蒸発する。

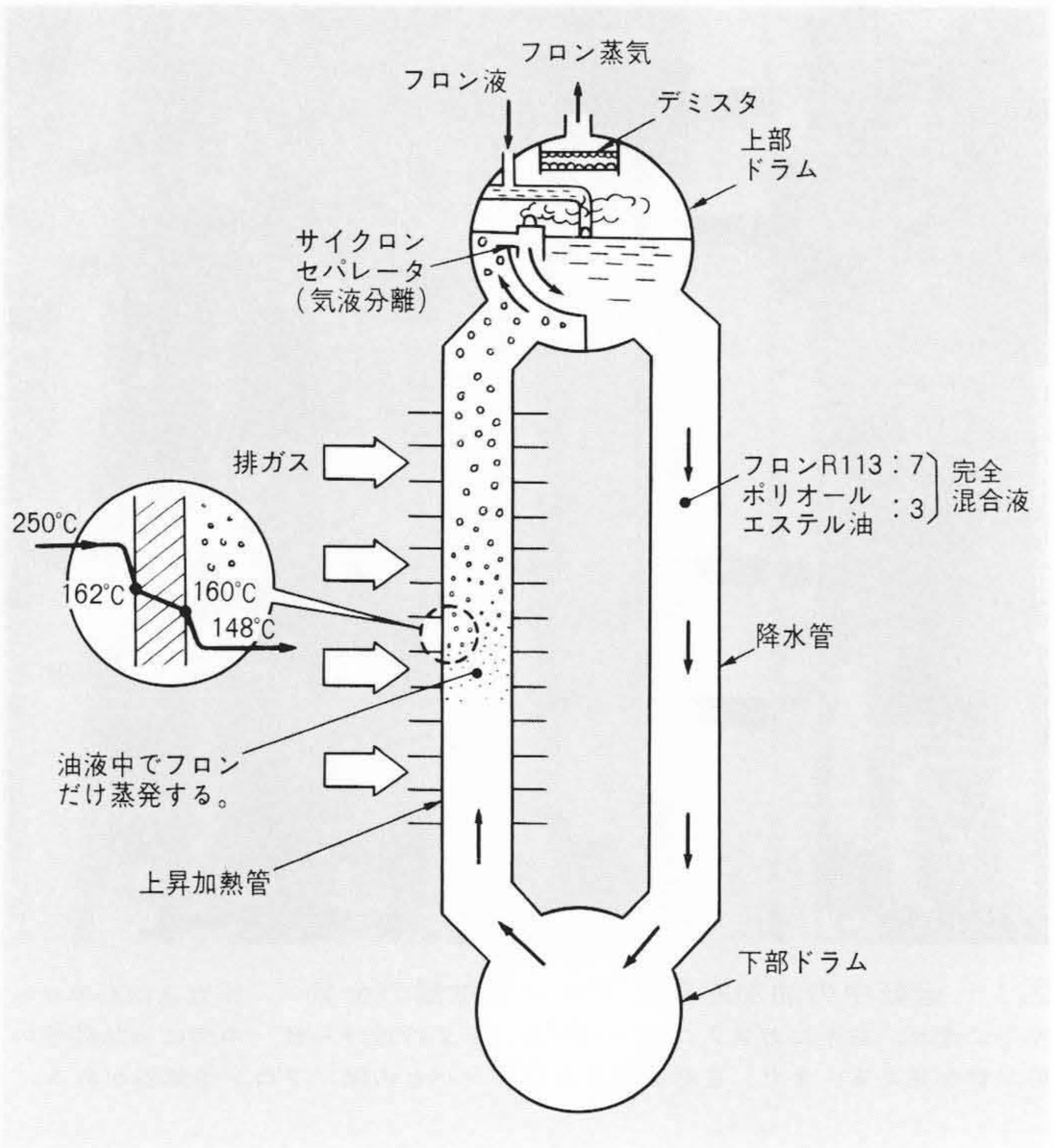

図4 油加熱器内フロン蒸発状況 上昇加熱管中の気液の流速は，約2 m/sで上昇する。

の全景をそれぞれ示す。

2.1 OFTGのシステム原理

図3に本発電プラントの基本系統を示す。本システムは大きく分けると熱回収ループと発電ループから成り，熱回収ループは排ガスから中間熱媒体(ポリオールエステル油，発火点400℃)で熱回収して，低沸点媒体(フロンR113，実用劣化上限温度約160℃)へ直接熱交換されるとフロン蒸気が発生し，発電ループでフロンタービン及び発電機を駆動し，膨張したフロン蒸気はフロン凝縮器で凝縮液化し，フロンポンプにより油加熱器の熱交換部へ送られるサイクルとなっている。本発電プラントに使用されている熱媒体の物性は**表1**に示すとおりであるが，この熱媒体の組合せが本システムの基本となっており，フロンR113はポリオールエステル油を混合することで，熱分解による劣化が防止され，一方，ポリオールエステル油はフロンR113の消火効果により，高温での難燃化に役立っており，また，これらの媒体は比重が異なるにもかかわらず完全に混合し，熱回収時の局部加熱による媒体劣化を防止している。

本発電プラントのサイクル原理は，フロンR113は，

(1) 質量が大きく，かつ低温で蒸発する特性があるため，比較的低温で大きなエネルギーを回収できる。

(2) タービン内で膨張しても，乾き領域にある。

ポリオールエステル油は，

(1) フロンR113液と完全に混合する。

(2) フロンが飽和温度に達すると，フロン蒸気として容易に混合液から分離する。

(3) 蓄熱効果が大きく，フロンを短時間で加熱するとともに，高温下でのフロン劣化を抑制する。

の条件で成り立っている。**図4**に油加熱器内フロン蒸発状況を示す。油加熱器上部ドラムではフロン液が供給され，ポリオールエステル油と7対3の割合で完全に混合し，降水管を通して下部ドラムに降り，上昇加熱管で加熱されると油液中のフロンだけが蒸発しフロン蒸気となる。このとき，油は蒸発せず上部ドラムでフロン液と再び混合され，油加熱器内を循環する。この循環力は，降水管中の混合液と上昇加熱管中の気液混合液の水頭差(比重差)と，降水管と上昇加熱管の流動圧力損失の差によって生じ，自然に循環することで，循環ポンプなどの動力源を必要としない。したがって，本発電プラントはフロンR113のランキンサイクルであり，**図5**でフロンR113の圧力-エンタルピ線図に示してある。

表1 熱媒体物性 ポリオールエステル油とフロンR113は，比重は異なるが完全に混合できる。

項目＼熱媒体		ポリオールエステル油	フロンR113
分子式		C(CH_2—OOCR)	CCl_2F—$CClF_2$
分子量		735	187.38
沸点		なし	47.6℃
凝固点		—25℃(流動点)	—35℃
熱分解点		320℃	299℃(石英中)
可燃性		難燃性	不燃性
発火点		400℃	なし
引火点		272℃	なし
比容積	(気体)	—	0.1355 l/g(47.6℃)
	(液体)	1.13cc/g(20℃)	0.639cc/g(25℃)
比熱	(気体)	—	0.218cal/g℃(25℃)
	(液体)	0.45cal/g℃(80℃)	0.161cal/g℃(60℃)

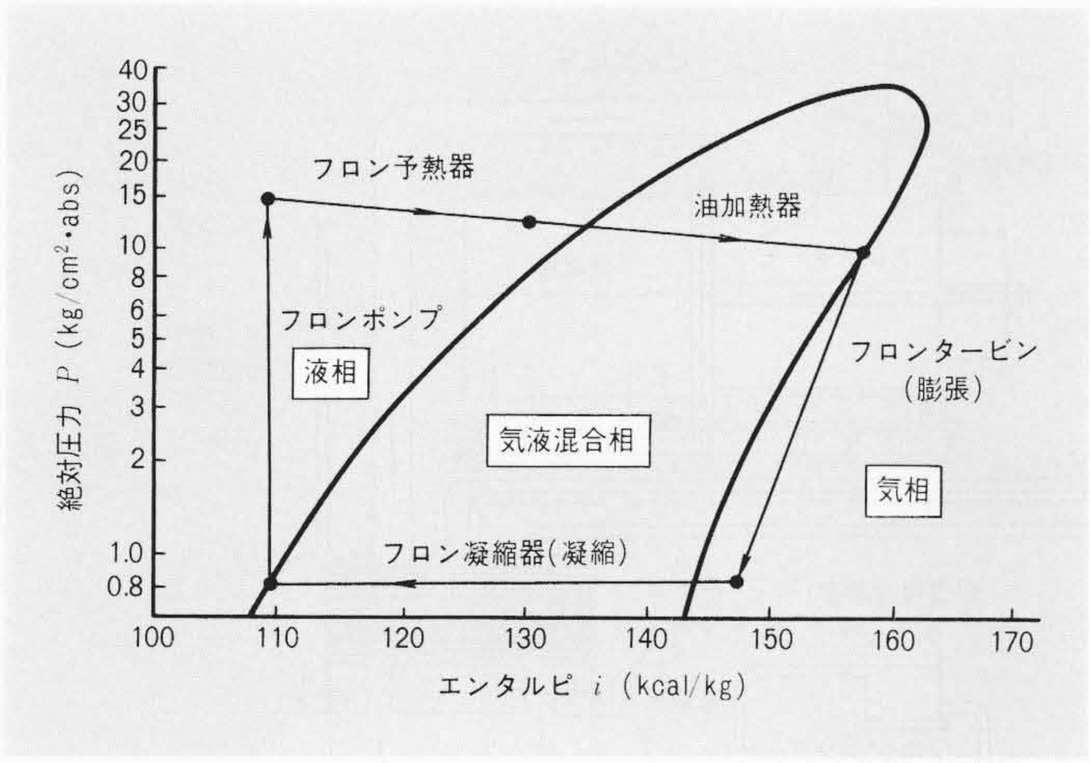

図5　フロンR113のランキンサイクル　フロン蒸気はフロンタービン内で膨張しても，乾き領域である。

2.2　セメント製造設備における電力回収系統

図6にセメント製造設備のAQC排熱源に設置した本発電プラントの系統を示す。AQC排熱は，本発電プラントが設置される以前は，EPで清浄ガスとなり，IDF(誘引通風機)により煙突から排出されていた。今回開発された本発電プラントは，EPとIDFの間のダクト中に設置され，排熱回収系は上流側に油加熱器，下流側へフロン予熱器を置きガス入口，出口へダンパを設け，本発電プラントを停止するときのために，ダンパ付バイパスダクトを設けた。

AQC排熱条件は次のとおりである。

排ガス量……480,000Nm³/h
温　　度……平均250℃
ガス組成……加熱空気
ダスト濃度……0.004g/Nm³

2.3　発電プラント設備構成

図7に本発電プラントの設備構成を示す。排熱回収系は排ガスダクトに油加熱器を設け，その排ガス側下流にフロンを飽和温度近くまで予熱するフロン予熱器を設けてある。発電系は，油加熱器で発生したフロン蒸気がフロンタービンで膨張し，発電機を駆動して発電する。フロンタービンには，起動時又はフロンタービントリップ時のためにタービンバイパス系統が設けられ，フロン余剰蒸気はフロン凝縮器へ流す。フロンタービンで膨張したフロン蒸気はフロン凝縮器で凝縮液化し，ホットウェルタンクに一時ため置かれ，フロンポンプにより加圧されてフロン予熱器へ送られる。フロン予熱器で予熱されたフロン液は，排ガス熱源量に応じて油加熱器上部ドラムへ供給され，フロンポンプ最少循環流量分又は余剰フロン液をフロン逃し弁を通してフロン凝縮器へもどされる。また，フロン液系にはフロン初充塡時などのためにフロン退避槽があり，油系には油初充塡時と油加熱器内での余剰油のもどしのために油退避槽が設けてある。以下，各設備の構造，機能について説明する。

2.4　油加熱器，フロン予熱器

図8に油加熱器，フロン予熱器の構造を示す。油加熱器は水蒸気ボイラと同じ構造で，縦形フィン付上昇加熱管と降水管の上部と下部にそれぞれドラムをもち，上部ドラムの内部は**図4**に示したように，油とフロン蒸気を気液分離するサイクロンセパレータがあり，ここで分離されたフロン蒸気は油・フロン混合により上昇した過熱温度分をフロン液供給トレイからのシャワーにより減温し，デミスタで油分を除いたフロン蒸気としてフロンタービンへ送る。一方，サイクロンセパレータで分離された油は，フロン予熱器から供給されたフロン液と混合され，降水管を通って下部ドラムへ下降する。フロン予熱器はフィン付加熱管を横置きにして，側面にヘッダがあり8折流方式を採用している。油加熱器，フロン予熱器ともに自立据付形で，工場で全組立の上一体輸送した。油加熱器，フロン予熱器の仕様を**表2**に示す。

2.5　フロンタービン発電機

フロンタービン発電機は，**図9**に示すようにフロン蒸気が大気中に漏れるのを防ぐため完全一体形となっており，主蒸気止め弁，タービン加減弁の弁棒部もベローシール構造を採用している。このため，発電機は励磁装置をもたないフロン冷却誘導発電機を採用しており，タービン発電機潤滑油はフロン蒸気が非接触形軸封を通して軸受室に漏れ潤滑油に溶けても差し支えないように，油加熱器の中間熱媒体と同じポリオールエステル油を使用している。

潤滑油中に許容以上のフロンが混入しないように，フロン脱気装置が設けられ，常に一定のフロン混入率以下が確保さ

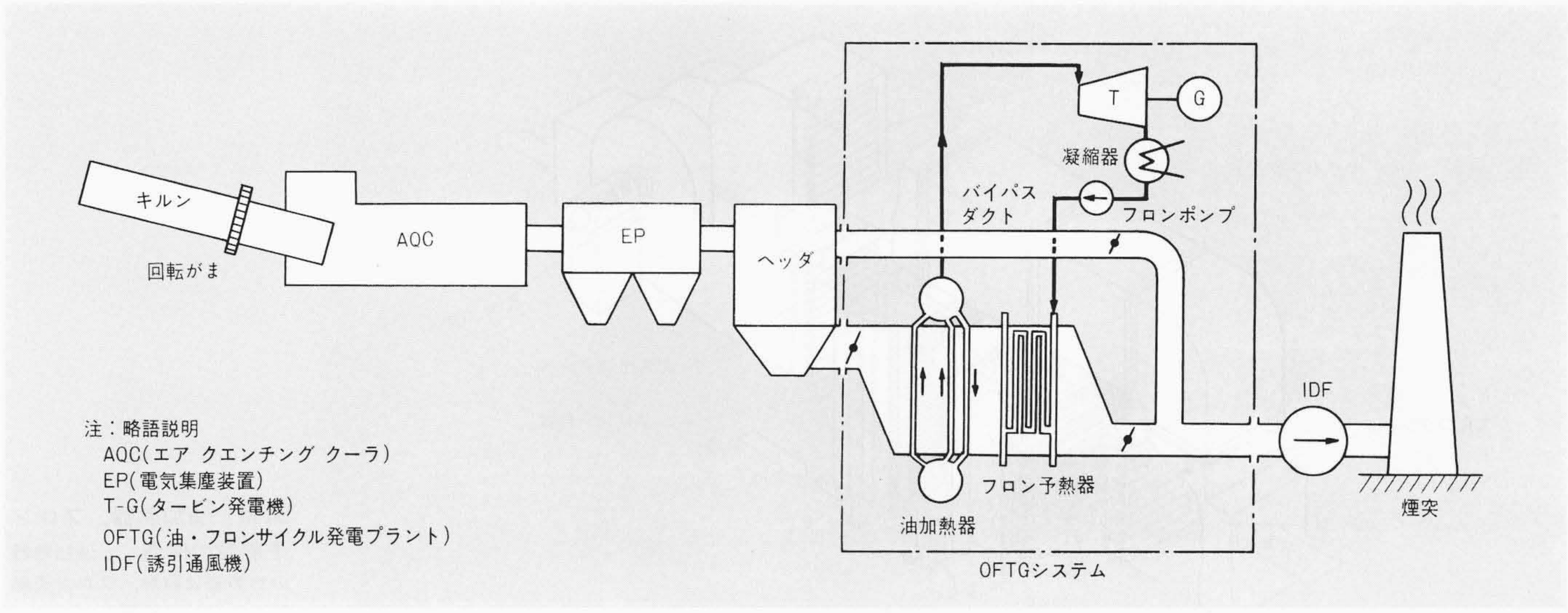

図6　セメント製造設備における電力回収系統　OFTGプラント停止時のため，バイパスダクトが設けてある。

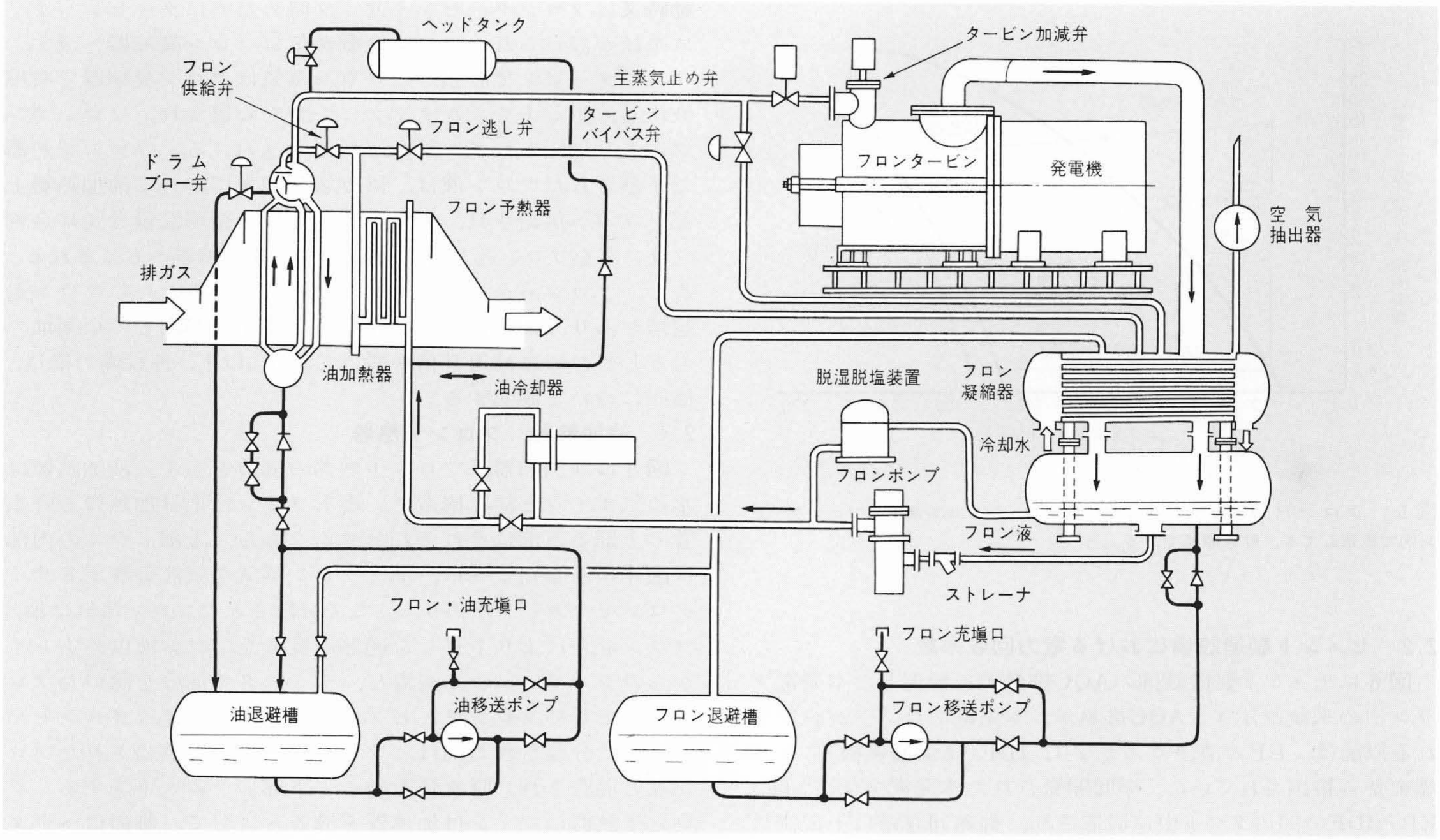

図7 発電プラント機器構成 油退避槽，フロン退避槽はフロン凝縮器と配管で連絡され，フロン凝縮器の過圧を防いでいる。

表2 油加熱器，フロン予熱器仕様 排ガスの流れに対する配置は，高温側から油加熱器，フロン予熱器の順で並べてある。

項目		仕様
油加熱器	回収熱量	14,000kW(熱量)
	フロン液入口温度	130℃
	フロン蒸気出口温度	140℃
	フロン蒸気圧力	9.4atg
	フロン蒸発量	406T/h
フロン予熱器	回収熱量	9,540kW(熱量)
	フロン入口温度	44.2℃
	フロン出口温度	130℃

れている。フロンタービン発電機仕様を**表3**に示す。

2.6 フロン凝縮器及び付属装置

図10にフロン凝縮器の構造を示す。フロン凝縮器はフロン凝縮室とホットウェルタンクに分かれ，フロン凝縮器には，タービンバイパスフロン蒸気の減圧装置であるエネルギーダンパ管も接続されており，凝縮されたフロン液はホットウェルタンクへ流れ落ちる。

ホットウェルタンクは，本発電プラントを循環するフロン流量を一時ため置く役目をさせるために，必要以上の容量をもたせてある。フロン凝縮器には付属装置として次の機器が設置されている。

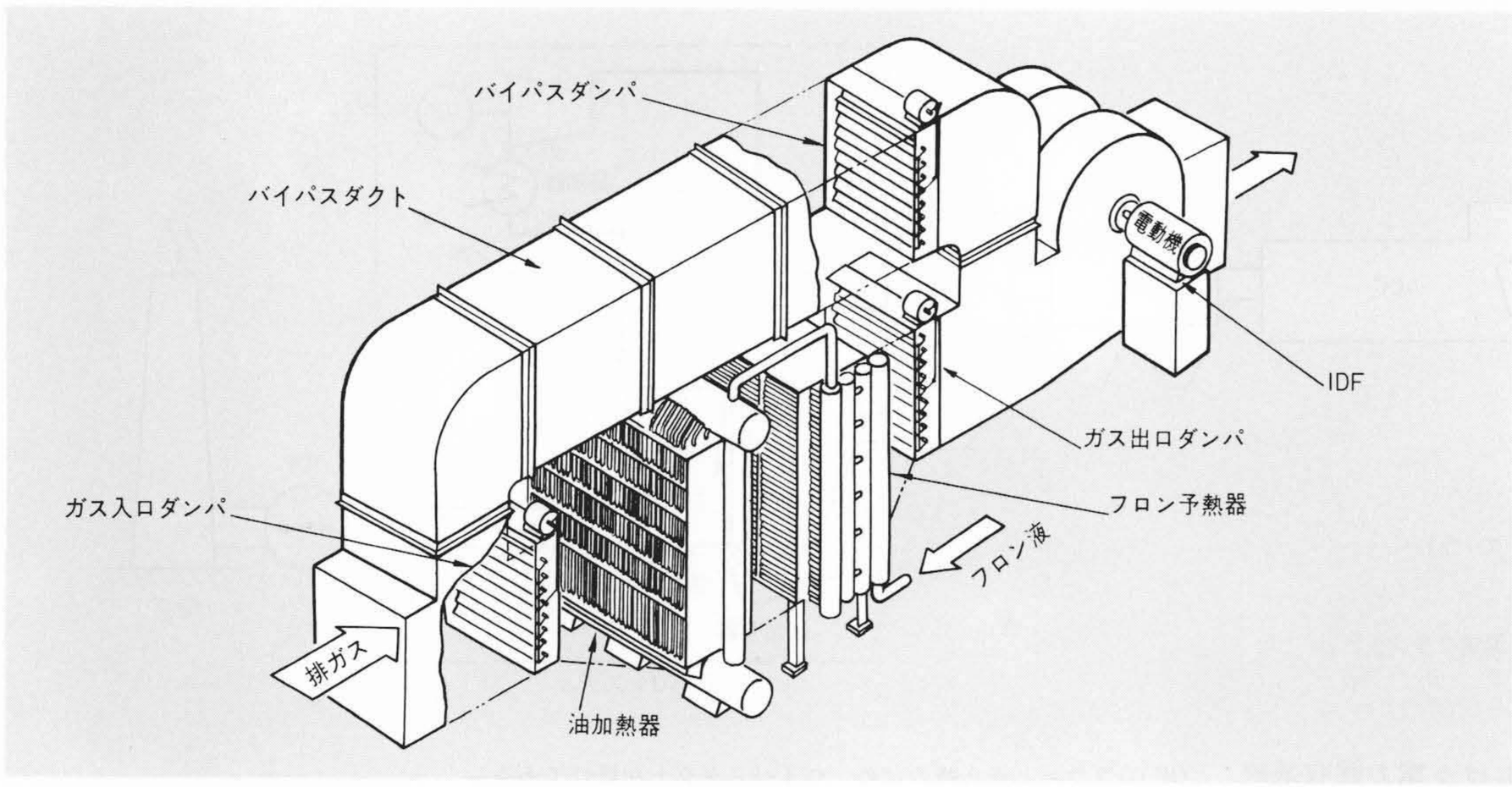

図8 油加熱器，フロン予熱器の構造 油加熱器の加熱管は縦形，フロン予熱器の加熱管は横置きとなっている。

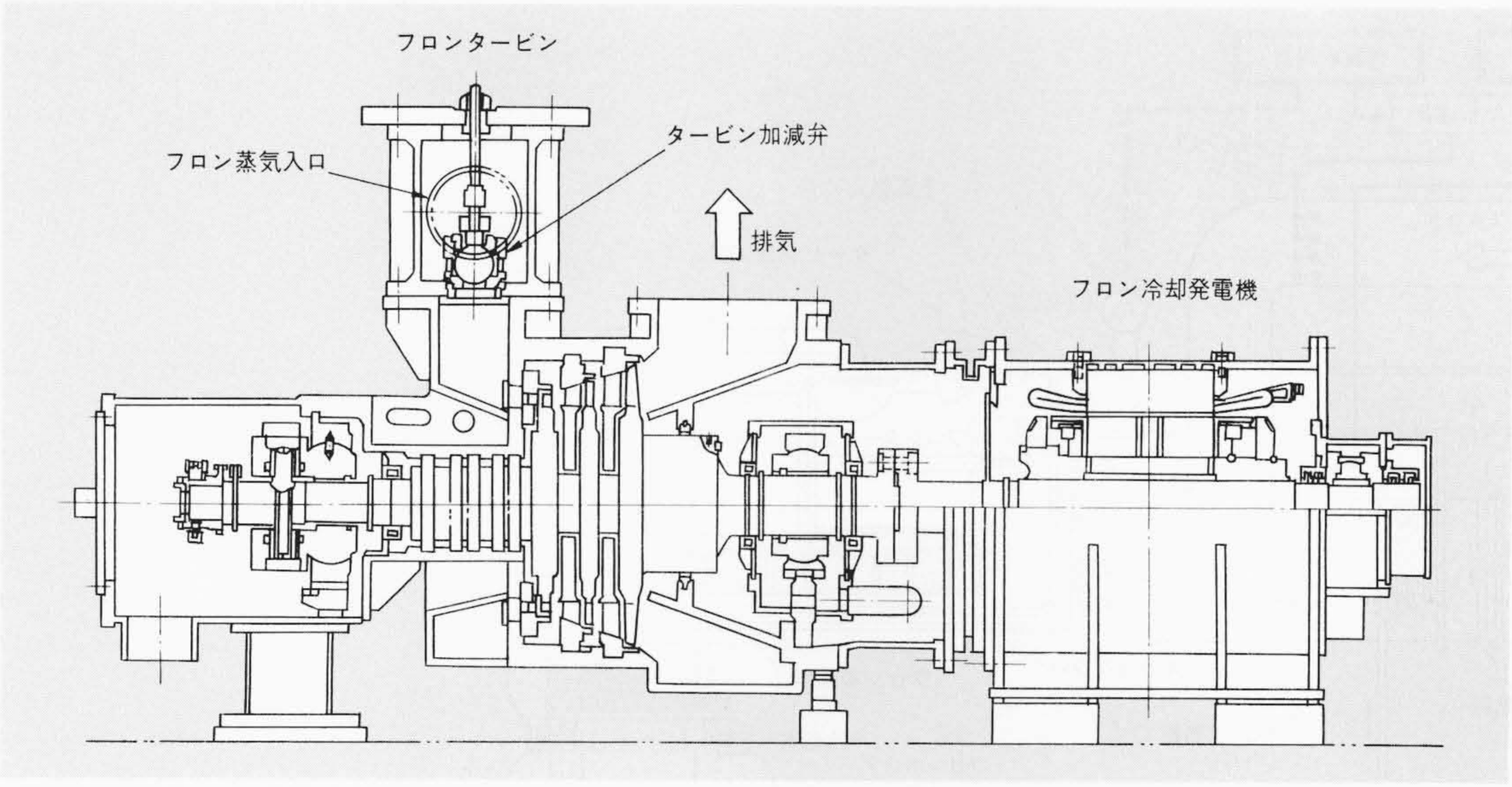

図9　フロンタービン発電機　タービン，発電機ともにフロンが大気に漏れることを防ぐため，ケーシングとハウジングが一体構造になっている。

表3　フロンタービン発電機仕様　誘導発電機は，同期速度以上で「すべり」運転するため，出力上昇とともにタービン回転数が上昇する。

項目		仕様
フロンタービン	形式	3段落衝動軸流形
	定格出力	3,000kW
	タービン入口圧力	9.0atg
	タービン入口温度	138℃
	タービン排気圧力	142mmHg
	回転数	1,816rpm
発電機	形式	全閉フロン冷却誘導発電機
	容量	3,667kVA
	電圧	6,600V

(1)　フロン脱湿脱塩装置

フロンは加熱すると約150℃ぐらいで熱分解して塩素イオンが生成し，水分と化合して塩酸となり金属を腐食させる。本発電プラントではフロン予熱器，油加熱器でフロンが加熱され，ごく微量の塩素イオンが生成するが，これを除きプラント構成機器の腐食を防ぐため，フロンポンプ出口側へフロン脱湿脱塩装置(吸着剤としてネオビードとモレキュラシーブを充填)を設けてある。

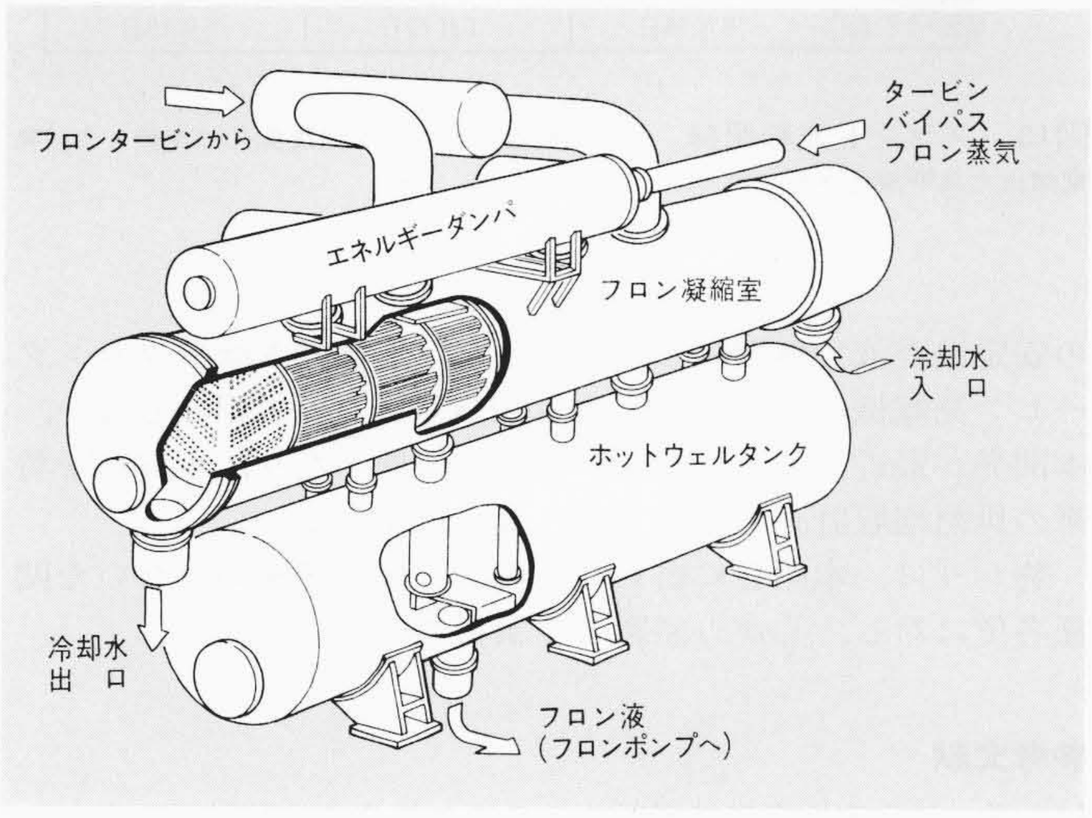

図10　フロン凝縮器　フロン凝縮器とホットウェルタンクは，工場で全体組立の上，一体輸送した。

(2)　空気抽出器

フロン凝縮器内は真空であるので，空気が漏れ込むおそれがあるため，空気などの不凝縮ガスを抽出する空気抽出器が設けてある。

(3)　フロンポンプ，油冷却器

フロン凝縮器ホットウェルタンク内のフロン液を昇圧するため，多段遠心式フロンポンプが設けてあり，その出口系統に，タービン発電機潤滑油を冷却する油冷却器を置き，タービン発電機軸受での機械損失を熱回収するシステムを採用している。

3　OFTGの制御系統

本発電プラントの制御系統は，排ガス制御系統と発電プラント制御系統の2系統に大別される。

3.1　排ガス制御系統

図11に排ガス制御系統を示す。AQC内の圧力は一定に制御する必要があるため，発電プラント運転中はAQC内圧力信号で油加熱器ガス出口ダンパを制御し，発電プラント停止時には，バイパスダンパを制御している。

3.2　発電プラント制御系統

発電プラント制御系統は，次の4系統から構成されている。

(1)　油加熱器ドラムレベル制御

ドラムレベル一定制御のため，フロン蒸気流量，ドラムレベル，フロン液供給流量の3要素によりフロン供給弁を制御している。

(2)　フロン液供給制御

フロンポンプの出口流量信号でフロン逃し弁を制御し，フロン予熱器内に常に一定流量以上流れるようにしている。

(3)　タービンバイパス弁制御

タービン起動時，又はタービントリップ時に，タービン入口圧力上昇信号によりタービンバイパス弁を開く制御をしている。

(4)　タービン調速，調圧制御

タービンの制御系は併入時，又は解列時は調速制御を行ない，負荷運転中にタービン入口圧力により調圧制御で運転している。

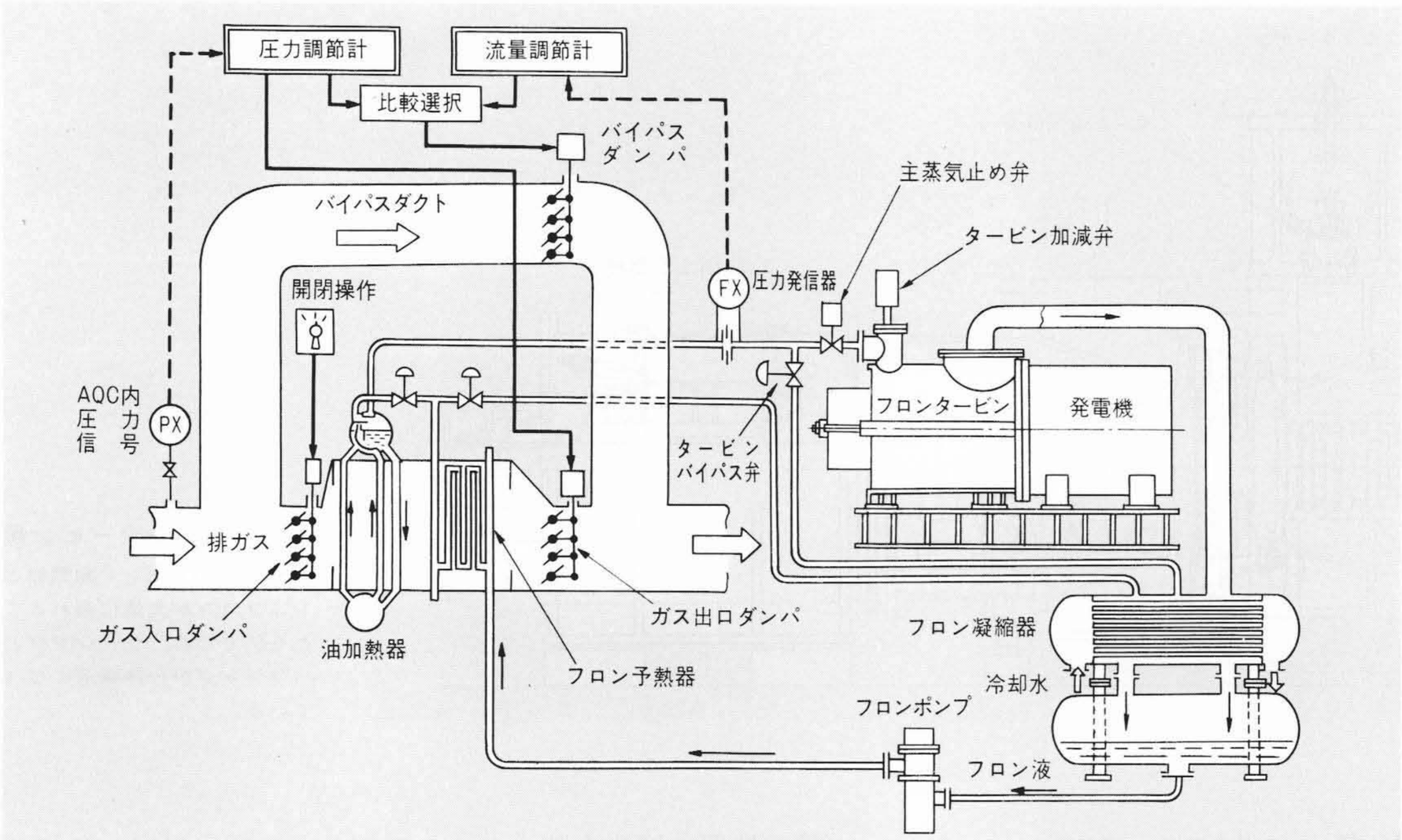

図11 排ガス制御系統
油加熱器ガス入口ダンパは，手動開，自動閉制御となっている。

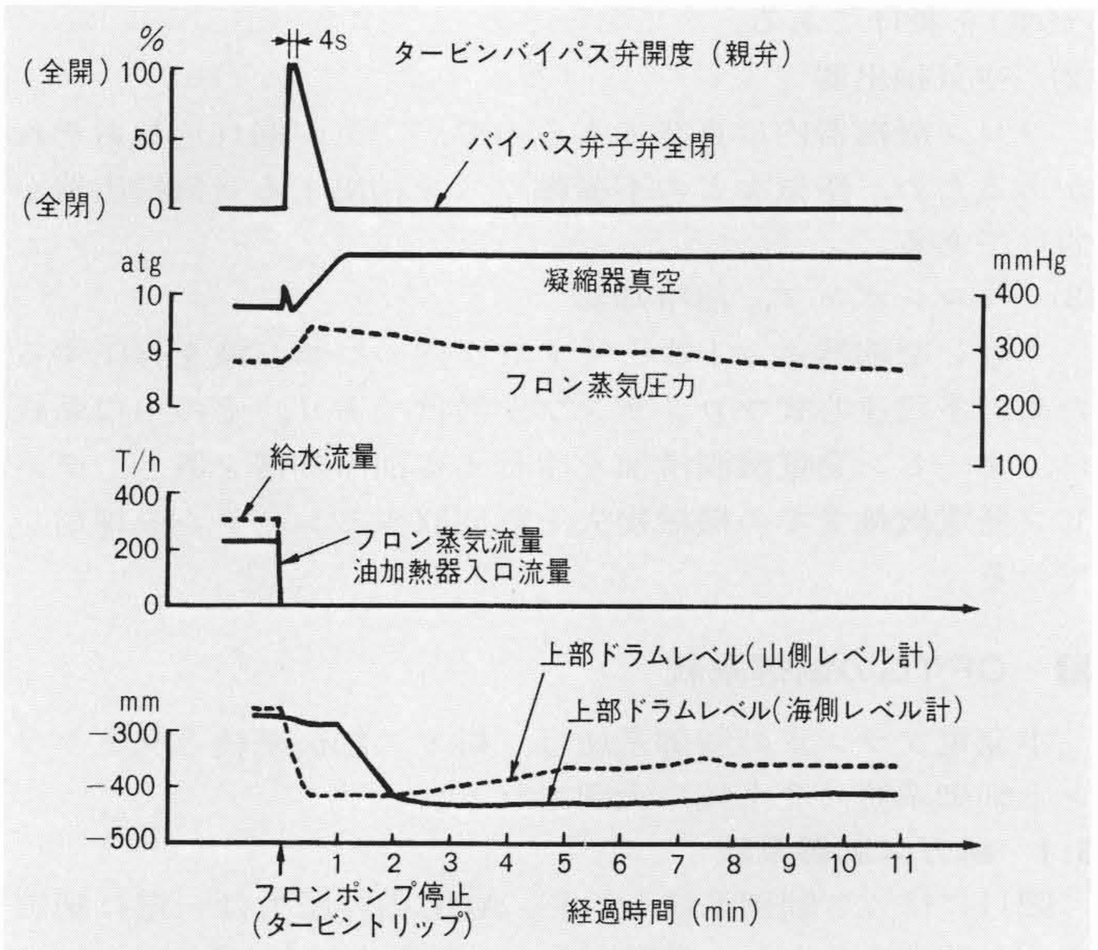

図12 フロンポンプ非常停止試験結果 本試験は，負荷1,500kWで実施し，フロンポンプ停止と同時に，油加熱器ガス入口，出口ダンパを急閉した。

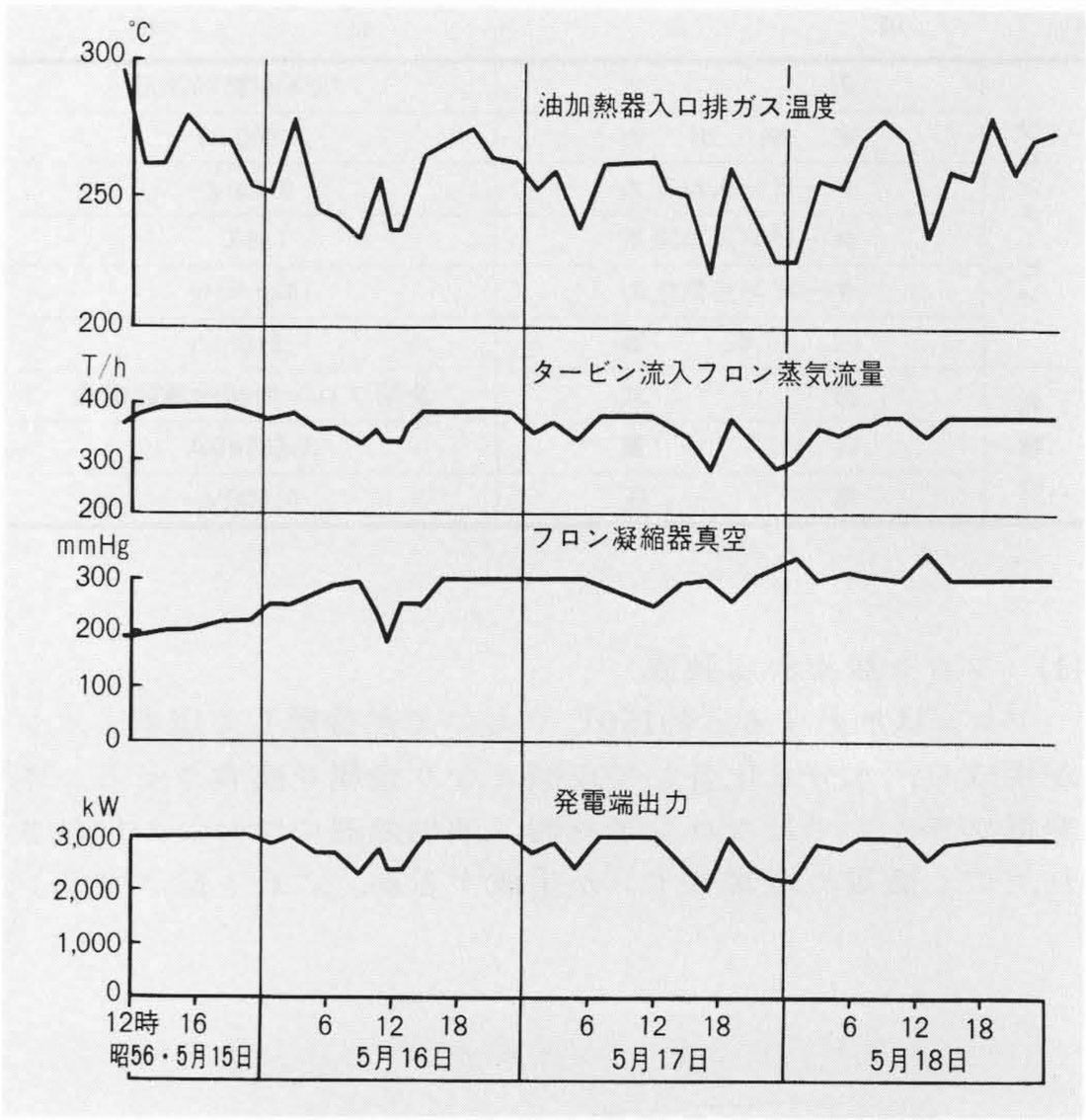

図13 プラント運転記録 油加熱器入口排ガス温度変化に比較して，発電端出力は平滑化されている。

4 プラント運転結果

本発電プラントの連続運転に先立ち，**図12**に示すフロンポンプ非常停止試験を実施し，安全にプラントが停止できることを確認した。この試験では，油加熱器過熱防止の**図7**に示したヘッドタンクのフロン液が油加熱器へ流入し冷却したため，油加熱器フロン蒸気圧力(飽和温度)，ドラムレベルも整定している。

図13にプラント運転記録を示す。冷却水温度が設計点よりも低いため，フロン凝縮器真空が高く，タービン流入フロン蒸気流量は設計点以下であるが，発電端出力は安定した運転となっている。

5 結 言

以上，セメント製造設備からの排熱を，特殊な油とフロンの安定混合液で熱回収し，フロンだけを蒸発させてフロンタービン発電機を駆動し発電するOFTGについて紹介したが，本開発が最近の省エネルギー対策の一助となり，本実績が将来の排熱回収計画の参考となれば幸いである。

終わりに，本開発に当たり全面的に御支援をいただいた関係各位に対し，心から感謝する次第である。

参考文献

1) 滝，外：中低温排熱回収油・フロンサイクル発電システム，別冊「電気と管理」，電気書院，省エネルギーシリーズ1, 319～324(昭55-8)