

JAERI-M

7 2 1 4

高温ガス冷却炉における気体軸受
循環機の応用状況

1977年8月

根本 政明*・岡本 芳三

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

高温ガス冷却炉における気体軸受循環機の応用状況

日本原子力研究所東海研究所原子炉工学部

根本 政明*・岡本 芳三

(1977年7月20日受理)

多目的高温ガス実験炉(VHTR, 50MWt)の開発過程で必要となる高精度の試験や環境への安全性等の要求項目を満たす有力な方式の1つにガス軸受循環機の適用がある。

本稿では、今迄に高温ガス冷却炉用のプロトタイプとして実用ないしは計画されたガス軸受循環機につき調査を行い、次のような事実を明らかにした。

(1) すでに、テストループや原子炉補機には多数の小型ガス軸受循環機が用いられている。

(2) 現在では、熱出力20MWt程度の実験炉用サーキュレータへ、ジャッキアップガス機構付きガス軸受の応用開発がなされている。

(3) 実証炉級の2,000~3,000HPの出力を必要とする大型ガス軸受循環機は基礎研究の段階にある。

* 三菱重工業株式会社

A Survey on Gas-Bearing Circulators of
High-Temperature Gas Cooled Reactors

Masaaki NEMOTO* and Yoshizo OKAMOTO

Division of Reactor Engineering,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received July 20, 1977)

In development of multi-purpose high-temperature gas cooled experimental reactor VHTR with 50 MWt, the usage of gas-bearing blowers with high precision and environmental safety is one of important problems.

A survey in this connection revealed the following:

- (1) Gas-bearing compressors are used not only in test loops but also in auxiliary systems.
- (2) Main circulators of self-acting gas lubricated bearings with jacking gas systems are practically used in case of Dragon reactor (20 MWt).
- (3) To develop a large gas-bearing blower (2,000 ~ 3,000 HP output) for proven reactors, a hydrostatic gas lubricated bearing of large load capacity and high speed stability must be studied under reactor conditions.

Key words: circulator, gas-lubricated bearing, HTGR, VHTR, test loop, safety, UHTREX, Dragon Reactor, THTR, bibliographic Survey.

* On leave from Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.

目 次

1. 緒 論	1
2. 小型循環機への気体潤滑軸受の応用例	3
2.1 General Atomic 社	3
2.1.1 HTGR インパイルループ用循環機	3
2.2 General Electric 社	3
2.2.1 PRTR ガスループ用循環機	3
2.2.2 DR-1 ガスループ用循環機	4
2.3 Los Alamos 科学研究所	5
2.3.1 Turret Reactor ループ用循環機	5
2.3.2 UHTREX 炉補機用循環機 (MTI 社製)	5
2.3.3 UHTREX 炉補機用循環機 (Societe Rateau 社製)	6
2.4 Oak Ridge 国立研究所	6
2.4.1 実験用ガス軸受圧縮機	6
2.4.2 GABE-1 圧縮機	6
2.4.3 ORR-2 圧縮機	7
2.4.4 CBR 社製プロトタイプ循環機	7
2.5 O.E.C.D.	8
2.5.1 Pegase 炉用 CO ₂ 圧縮機	8
2.5.2 Dragon 炉補機用循環機	8
2.6 考 察	8
3. 大型循環機への気体潤滑軸受の応用状況	24
3.1 UHTREX 炉	24
3.1.1 MTI 社製ガス軸受循環機	24
3.2 Dragon 炉	24
3.2.1 BBC 社製ガス軸受循環機	25
3.2.2 Societe Rateau 社製ガス軸受循環機	26
3.3 HTGR 炉	27
3.3.1 GA 社の大型ガス軸受循環機の計画	27
3.4 THTR 炉	28
3.4.1 Brown-Boveri 社における大型ガス軸受循環機の計画	28
3.5 直接ヘリウムサイクル炉	28
3.5.1 Societe Rateau 社における大型ガス軸受循環機の計画	28
3.5.2 Societe Rateau 社における大型ガス軸受の研究開発	29
3.6 考 察	30

4. 循環機の安全性に関する検討	43
4.1 ヘリウムテストループでの安全性に関する試験	43
4.2 実験炉における循環機の安全性に関する対策	44
4.3 考 察	45
5. 結 言	51
参 考 文 献	53

1. 緒 論

高温ガス冷却炉（以下HTGRと略称）用循環機の軸受潤滑方式としては、従来の一般機械で培われた技術を踏襲した油潤滑ないしはグリース潤滑と、近年新しく誕生した技術である気体潤滑がある。HTGR用のプロアにこれ等3潤滑方式が採用された理由を各軸受型式につき比較してまとめると表-1のようになる。さらにその選定理由を大分類すると次の4項目に代表される。

- (1) 安全対策 : 原子力開発において、安全審査の通過は最重要事項の1つである。
- (2) 純度管理 : 燃料や黒鉛のクレーント中の不純物による腐蝕を防ぐためには、作動ガスの高純度の管理が不可欠となる。
- (3) 製品性能 : 製品の性能、操作性、保守点検の必要性等はユーザにとっての関心事である。
- (4) 運転実績 : 製品の生産台数や運転実績が機種信頼性を証明する。

以上の項目の内、原子力技術開発を行う上で従来の油やグリース油滑による循環機では即応出来ない(1)、(2)の項目が登場したために、作動流体をそのまま潤滑剤として利用するガス軸受循環機の開発が強く要望されるようになり、ここ15~20年にわたり欧米を中心に研究が続けられて来た。

一方、1,000℃の高温を達成する多目的高温ガス実験炉（以下VHTRと略称）にとっても、基礎データ取得のために必要となる原子炉燃料、高温用金属材料及び黒鉛材料等の試験、高温の配管、炉心部構造ないしは熱交換器等のコンポーネントの試験を実施するために多くの循環機が使用されることになる。

すでに、HTGRのシステムに多くの用途が見出されているガス潤滑軸受を採用した循環機に焦点を合わせ、Nuclear Science Abstracts (U. S. Energy Research and Development Administration 発行, 1947~75年)をもとに調査収録したガス軸受文献一覧表をJAERI-Mレポートとして発表している⁽¹⁾。これ等の資料を活用し、テストループないしは原子炉補機に使われている比較的小型のガス軸受循環機と原子炉主冷却系に使用しないしは計画されている大型のガス軸受循環機に分け、第2章及び第3章にそれぞれの循環機につき調査結果を記述し検討を加えた。その他、原子力機器の開発において欠かすことの出来ない安全性について、とくに、ガス軸受循環機の採用及び運転時に重要なテーマになるとの見地から第4章で取り上げ、その概要について報告した。

表 1-1 高温ガス冷却炉用循環機における軸受潤滑方式の比較

分類	気体潤滑軸受	グリース潤滑軸受	油潤滑軸受
1. 安全対策	<ul style="list-style-type: none"> 完全密閉型循環機にすることにより、多量の核分裂生成物を含んでいるクランツの外部漏洩を許容値以内に収めることが出来る。 	<ul style="list-style-type: none"> 過渡変動等の条件時に軸受部の圧力がインペラ部より高くなり、グリースが炉心内に流入することがないよう、シール部の差圧制御が必要となる。 	<ul style="list-style-type: none"> 潤滑油が炉心内に流出しないよう、パッファガスによるシールが必要となり、そのためにガス供給装置やガス・油分離装置等の付属設備が追加されることになる。
2. 純度管理	<ul style="list-style-type: none"> 作動媒体 (He や CO₂) それ自身を潤滑剤として利用するので、不純物の混入が防げる。 	<ul style="list-style-type: none"> グリース中の油分によるクランツ純度の低下を防止するため浄化装置が必要となる。 放射線照射によるグリースの劣化を補うため頻ばんな保守が必要である。 	<ul style="list-style-type: none"> バックディフュージョンによるクランツ中への浸入油分子を除去するための純化系統が必要となる。 油分のタール化やカーボナイズに注意する必要がある。
3. 製品性能	<ul style="list-style-type: none"> コンプレッサの高温化等の循環機の高温無冷却への進展が画れる。 循環機の保守期間の延長ないしは、無開放運転が可能となる。 	<ul style="list-style-type: none"> 設計やシステムの簡素化が可能となる。 油潤滑軸受でおきたシールの問題の解決策となる。 	<ul style="list-style-type: none"> 連続使用時間の増大が画れる。 油で軸受の潤滑と冷却を兼用させられる。
4. 運転実績	<ul style="list-style-type: none"> 新規技術であり、これからの研究開発が望まれる。 	<ul style="list-style-type: none"> 一般機械における長年の技術及び運転実績の経歴がある。 	

2. 小型循環機への気体潤滑軸受の応用例

2.1 General Atomic 社

2.1.1 HTGRインパイルループ用循環機⁽²⁾

R. Stella は、HTGRインパイルループにおける燃料要素の試験を目的に、図-1に示すような動圧型気体軸受を用いたヘリウムコンプレッサについて発表している。

この循環機メーカは、de Havilland Engine Companyである。そこで用いられている軸受に関しては、長さが12mmであることしか明示されていない。

サーキュレータの主要な運転条件は次のようである。

- ・入口ガス温度：204°C (norm), 343°C (max)
- ・吸入圧力：24 kg/cm²
- ・揚程：0.7 kg/cm² g
- ・流量：31 g/sec (norm), 68 g/sec (max)
- ・ハウジングの設計圧力：28 kg/cm²

本サーキュレータの特徴は、スタート時の軸受部での摩擦力に打ち勝つために、起動時の一時的な電力増加をスターティングトランス回路の組み込みによって解決している点にある。また、運転中に軸受は外部からの異物と水分の凝縮による事故をおこしており、フィルタの正しい選定に注意するよう忠告している。

2.2 General Electric 社

2.2.1 PRTRガスループ用循環機⁽³⁾

General Electric Co. のHanford Atomic Products Operationでは、PRTR (the Plutonium Recycle Test Reactor) の材料開発における一連の計画をもっている。その試験を行うためのガスループの所要条件は次のようである。

- ・ガスの種類 : CO₂
- ・最高温度 : 816°C
- ・フロア温度 : 427°C
- ・流量 : 252 ~ 1,890 g/sec
- ・圧力 : 35.1 kg/cm²
- ・吸収熱量 : 680 PS

特に、このループでは炉心の黒鉛と冷却媒体である炭酸ガスとの反応試験に重点がおかれている。試験精度を上げるため、黒鉛と激しく反応する水蒸気と油分の純度に厳しい制限をもうけている。前者は計器が感知し得る量以下、後者は2 ppm が許容濃度である。

J. F. Fletcher はこのような環境条件をつくり出すのに最も適合した循環機として、キャンド型ガス潤滑軸受コンプレッサ (Bristol-Siddeley Engines, Ltd., of Coventry Eng.) を選んだ。そのサーキュレータの全体図を図-2に示し、主要諸元を以下に掲げる。

- ・モータ出力 : 75 HP, 100 HP (max)
- ・流量 : 945 g/sec
- ・ガス : CO₂
- ・入口圧力 : 31.6 kg/cm²g
- ・揚程 : 3.5 kg/cm²
- ・回転数 : 10,000 rpm, 12,000 rpm (max)

また、次項のような特長を有している。

(1) スラスト軸受に常時荷重を掛け、運転を安定させるために、インベラ側を下にし水平から3°傾けて循環機を設置する。

(2) 流量制御はスロットル弁、フロア回転数 (4,000~10,000 rpm) 及びバイパスの3種類の方式で行う。

(3) インベラ (305 mm 径) の裏側には、モータと軸受をオーバヒートから守るため熱遮蔽体として、バッフルディフューザを設けてある。

(4) また、ディフューザのうしろには、モータを冷却するためのガスを送る小さな補助のファンが付けてある。

軸受に関して言えば、ジャーナル軸受はダイヤフラム支持の動圧型軸受であり、スラスト軸受は剛性支持の動圧型軸受である。

2.2.2 DR-1 ガスループ用循環機⁽⁴⁾

E. C. Bennett は、MGC R (Maritime Gas Cooled Reactor) の開発計画の一環である燃料要素試験用のループ (the DR-1 Gas Loop) の製作において、ループの冷却媒体が潤滑剤によって汚染されるのを防ぐ目的から、静圧気体潤滑軸受を採用したサーキュレータの開発研究を行った。

その気体軸受循環機の断面図を図-3に示す。また、主な仕様は次のようである。

- ・フロア流量 : 57 g/sec, 252 g/sec窒素の時
- ・潤滑剤 : ヘリウム (または窒素)
- ・揚程 : 0.46 kg/cm²g
- ・作動圧力 : 1.4 kg/cm²g
- ・入口温度 : 93°C
- ・モータ馬力 : 10 HP
- ・モータ回転数 : 24,000 rpm
- ・軸受ガス流量 : 1.1 g/sec

E. C. Bennett はこの静圧型気体軸受を適用した循環機の試験運転を行い、予備運転時に種々の不具合点に遭遇したにもかかわらず、それ等の対策と解決をはかり、正常運転に漕ぎつけた後で次のような結論を下している。

「要するに、DR-1ループの主たる問題点は静圧型気体軸受循環機に不可欠の静圧軸受給気用圧縮機に関するものであった。サーキュレータ自体は非常に信頼性が高く、したがって、気体潤滑軸受がヘリウムガス循環機における軸シールの実践的な解決策になり得るものと考えられる。動圧気体軸受が同じように高い信頼性をもって設計出来るならば、補機はなくなり、保守の問題も大幅に減少する等の利点が生じて来る。動圧型気体軸受の研究開発に多くの努力が払われて然るべきである。」

2.3 Los Alamos 科学研究所

2.3.1 Turret Reactor ループ用循環機⁽⁵⁾

W. E. Crowe は the Turret Reactor (出力 3 MW) 用ガスループに使用すべきサーキュレータについての検討を行っている。

このガス冷却炉は 1 次冷却剤中に多量の核分裂生成物を含んでいるため、作動ガスは 10^{-8} atm cm³/sec 以上の外部漏洩が許されない。その主な仕様は次のようである。

- ・冷却剤 : ヘリウム
- ・フロア流量 : 1.291 g/sec
- ・フロア入口ガス温度 : 315°C
- ・ガス作動圧力 : 35 kg/cm²
- ・揚程 : 0.56 kg/cm²

W. E. Crowe は上述のように厳しい放射性ガスのシール方式として、動圧型気体軸受を装備した完全密閉式フロアが最良の解決策であると結論づけている。

2.3.2 UHTREX 炉補機用循環機 (MTI 社製)⁽⁶⁾

UHTREX 炉におけるガス浄化ループの主な条件は次のようである。

- ・ヘリウム温度 : 37.7°C
- ・ヘリウム圧力 : 34.6 kg/cm²
- ・揚程 : 1.05 kg/cm²
- ・流量 : 14.5 g/sec
- ・循環機冷却ヘリウム流量 : 24 g/sec

Mechanical Technology Incorporated (MTI と略称) が製作した UHTREX 炉の補機用ガス軸受循環機の断面図を図-4 に示す。また、このサーキュレータの特徴は次のようである。

(1) 出力 : 3.8 HP

(2) 回転数 : 12,000 rpm

(3) スタート及びストップ時の軸と軸受の固体接触による摩耗を避けるため、静圧ヘリウムジャーナル軸受付き動圧ヘリウムジャーナル軸受(外部からのガス供給圧力は 0.86 kg/cm²)を応用した循環機の開発を行った。軸受型式は円弧角 80°のティルティングパッド型であり、3,600 rpm で浮上し、14,000 rpm まで安定した運転が可能であった。

(4) スラスト軸受は2枚のWhipple グループプレートから成る内向流スパイラルグループ軸受である。

なお、MTI社製のUHTREX炉主冷却ループ用大型ガス軸受循環機に関しては、第3.1.1章で述べる。

2.3.3 UHTREX炉補機用循環機 (Societe Rateau社製)⁽⁷⁾

Los Alamos Scientific Lab. ではUHTREX炉補機用循環機をSociete Rateau社にも発注した。そのガス軸受サーキュレータの断面図を図-5に示す。主な特徴は次のようである。

- (1) 出力 : 5HP
- (2) ジャーナル軸受は円弧角 115° のティルティングパッド3枚より構成され、1枚のパッドはスプリングによりプリロードがかけられている。
- (3) スラスト軸受は円弧角 60° のティルティングパッド3枚より成り立っている。
- (4) 軸受表面はテフロン含長黄銅“Glacier DU”でコーティングされている。
- (5) すべてのパッドがタングステンカーバイドのピボットで支持されている。
- (6) モータ室内のヘリウムを上部軸受のすぐ上にあたる位置に明けられた中空軸の穴を遠心フロアとして利用することにより循環し、フロア回転部の冷却を行っている。
- (7) ジャーナル軸及びスラストランナと軸受パッド間の接触はパッド内に埋め込まれた熱電対を用いて温度測定することにより監視している。

2.4 Oak Ridge 国立研究所

2.4.1 実験用ガス軸受圧縮機⁽⁸⁾

Oak Ridge National Laboratory (ORNLと略称)は次のような使用条件のガス冷却炉用インバイループ(GCR-ORR2)を有している。

- ・ 温度 : 315°C
- ・ 圧力 : 22 kg/cm^2
- ・ 流量 : 126 g/sec
- ・ 揚程 : 0.7 kg/cm^2

このループ用の循環機として、図-6にBristol Siddeley Engines Ltd., of London, 社製のガス潤滑コンプレッサを示す。ジャーナル軸受は動圧型でフレキシブルダイアフラム支持、スラスト軸受は動圧型でジンバル支持となっている。モータと軸受を含むハウジングは水冷却されている。

2.4.2 GABE-1 圧縮機⁽⁹⁾

図-7は、冷却用の補機をはぶき、モータのステータをセラミックにより電気絶縁し、 426°C までの高温で、 $8,000\text{ hr}$ のメンテナンスフリーでの使用を可能にしたコンプレッサ(GABE-1)である。ジャーナル軸受は剛性支持である。なお、サーキュレータの温度限界はロータを

構成しているエンドリングの青銅材料にあり、これにかわる材料さえ見つければ537℃まで使用限界の向上が画かれそうである。

2.4.3 ORR-2 圧縮機⁽¹⁰⁾

D. C. Gray は Bristol Siddeley Engines, Ltd. 社より ORNL へ収められた気体潤滑軸受を装着したコンプレッサ2機種について述べている。

第1の機種は図-8に示す第2.4.1章で述べた Experimental Gas Bearing Compressor であり、もう一つはこの改良型である第2ステップとなる図-9に示す ORR-2 Compressor である。これ等2機種の相異点は次の4点にある。

- (1) 内部冷却用インペラの位置
- (2) 冷却ジャケットの位置
- (3) 外部加熱器の追加
- (4) シュラウド付きインペラの採用

いずれの2機種においても、気体潤滑軸受は動圧型である。即ち、ジャーナル軸受はナットクラッカ型であり、スラスト軸受はスパイラルグループ型である。

この報告で特筆すべきは、ガス冷却炉における安全性に関する試験である。この詳細については、第4.1章で述べる。

2.4.4 CBR社製プロトタイプ循環機⁽¹¹⁾

軸受専門メーカーである Continental Bearing Research Corporation (CBR社と略称)の J. Cherubim と S. Abramovitz は契約機関である the Union Carbide Nuclear Company, ORNLより電動機回転子、固定子及び圧縮機ホイールの供給を受け、軸受その他は自ら製作し $28 \text{ kg/cm}^2 \text{ abs}$, $426 \sim 538^\circ\text{C}$ のヘリウム雰囲気中で気体潤滑軸受を装備したサーキュレータの連続運転を目指し、試験を行っている。サーキュレータの概略図を図-10に示す。軸受としては動圧型気体軸受を選定している。すなわち、直径89mmの正方平ジャーナル軸受とスパイラルグループスラスト軸受の組合せと、3個のシューよりなるジャーナル軸受と5パッドのスラスト軸受の組合せ2種類につき試験を行っている。

ジャーナル軸受パッドはインコネル-S、軸は電気処理したインコネル-Xの材料を使い、また、スラスト軸受パッドはステライト No. 6、スラスト軸受ランナは電気処理したインコネル-Xである。軸及び軸受のいずれの表面にも、起動時の摩擦を緩和するよう、二硫化モリブデンの薄膜コーティングをほどこした。

常温試験では、24,000 rpm の運転に成功しているが、高温試験においては、18,000 rpm でモータのブロンズとリングが膨張し、モータ巻線の破断事故をおこしている。その試験結果から、彼等は高速サーキュレータ用のモータとしては、従来の巻線型モータから、かご型モータに変更すべきであると結論づけている。

2.5 O. E. C. D.

以下に Societe Rateau 社製の気体潤滑軸受を装備した 2 種類のコンプレッサについて述べる。

2.5.1 Pegase 炉用 CO₂ 圧縮機⁽¹²⁾

その一つは、図-11 に示す炭酸ガスを作動媒体とするコンプレッサであり、フランスの Pegase Reactor の燃料試験用のインパイルテストループに使われたものである。その仕様を次に示す。

- ・ 吸入圧力 : 24.5 kg/cm²
- ・ 吸入温度 : 271~399 °C
- ・ ガス流量 : 吸入状態で 8.49 m³/min
- ・ 圧力上昇 : 5.95 kg/cm²
- ・ 回転速度 : 12,000 rpm
- ・ 出力 : 45 HP
- ・ ステンレス鋼構造
- ・ 水中サブマージト型
- ・ ロータ重量 : 41 kg
- ・ スラスト面圧 : 0.17 kg/cm²
- ・ 浮上回転数 : 1,200 rpm

なお、3,000 回の起動停止で軸受はおろか循環機にも何らの損傷を生じなかった。

2.5.2 Dragon 炉補機用循環機

この他、Societe Rateau 社では Dragon 炉補機用循環機のガス軸受サーキュレータの開発を行っている。その特徴は次のようである。

- (1) 動圧型ガス軸受を適用することによりジャッキアップガスなしでの運転を可能にする。
- (2) 用途はヘリウムガスの清浄純化システムのサーキュレータである。
- (3) 出力は 5 HP と小さくて済む。

なお、Societe Rateau 社製の Dragon 炉主冷却系用大型ガス軸受循環機に関しては、第 3.2.2 章で述べる。

2.6 考 察

以上 5 研究機関 (12 機種) に亘り述べて来た内容を、循環機メーカー、使用条件及び軸受型式につきまとめると表-2 のようになる。この表をもとに検討を行った結果を次に述べる。

- (1) ガス軸受循環機を採用し高温ガス冷却炉の研究開発を行っている機関には、米国では、
 - ① General Atomic 社, General Electric 社等の高温ガス冷却炉の開発メーカー
 - ② Los Alamos 科学研究所, Oak Ridge 国立研究所のような高温ガス冷却炉の仕事

に従事している研究所
があり、欧州では、

③ 英、仏、独等の共同出資により構成されている欧州経済協力開発機構 (OECD) がある。

なお、国内においては日本原子力研究所の JMTTR 炉を利用した高温ヘリウムガステストループ (OGL-1) に Societe Rateau 社製のガス軸受循環機が組み込まれている。

今後、世界的な規模で高温ガス冷却炉の開発が進むにつれ各種のテストループが必要となり、その分野への国産のガス軸受循環機の進出が望まれるようになるであろう。したがって、現時点において小型ガス軸受循環機の開発の要点となる動圧型ガス軸受の設計チャートを前以って完備しておくことは最低限の必要条件である。

(2) 小型ガス軸受循環機の開発メーカーには、

- ① de Havilland Engine Company (英)
- ② Bristol-Siddeley Engines, Ltd. (英)
- ③ Societe Rateau (仏)
- ④ General Electric Company (米)
- ⑤ Mechanical Technology Incorporated (米)
- ⑥ Continental Bearing Research Corporation (米)

の 6 社があることが分かった。この内、①、②、③及び④は航空機ないしは重工業メーカーであり⑤及び⑥は軸受の研究開発機関である。

国内においても、それに類したメーカーないしは研究機関による高温ガス冷却炉用の小型ガス軸受循環機の開発が望まれる。

(3) ここでまとめたガス軸受循環機の作動ガスとしてはヘリウムと炭酸ガスの 2 種類であった。VHTR 炉の冷却ガスはヘリウムであり表-2 のデータが多いに参考になる。但し、 CO_2 の比重は He に比べほぼ 1 桁高い点に注意しておくべきである。

(4) ガス軸受循環における最高ガス温度の実績は $400 \sim 500^\circ\text{C}$ であり、VHTR の計画値 (400°C) を充分賄っている。

(5) しかし、最高ガス圧力は 35 kg/cm^2 と VHTR の計画値 (40 kg/cm^2) よりやや低いので今後の研究ないしは確認が必要である。

(6) ガス流量の最高値はヘリウムの場合 $1,000 \text{ g/sec}$ である。これは例えば OGL-1 が 100 g/sec であることを考えるとテストループへの応用には十分な値であり、ガス軸受循環機が小型ガスループから大型ループまでかなり広範囲に適用出来ることを物語っている。

(7) 揚程はヘリウムの場合 1 kg/cm^2 と低く、高温ガスループ用圧縮機は流量型プロアの設計であることが分かる。

(8) 動圧型ガス軸受を用いた循環機のモータ最高出力は 100 HP 位である。

(9) モータの回転数は、プロア性能とモータ回転子の強度及び高周波変換器の設計から定まり $12,000 \text{ rpm}$ (200 Hz) ないしは $24,000 \text{ rpm}$ (400 Hz) の高周波に統一されている。

(10) テストループ用循環機の寿命は、放射性ガスを取り扱う性質上、 $8,000 \text{ hr}$ もの長時間

の無開放が要求され、それに答え得る循環機がまさにキャンド型ガス軸受圧縮機である。

(11) 小型ガス軸受循環機のジャーナル軸受には、動圧型と静圧型の両型式が応用されている。

動圧型軸受としては、ティルティングパッド型やナットクラッカ型等の高速安定性に富む軸受型式が使用されている点に目が引かれる。また、動圧型軸受の欠点を補った静圧軸受付動圧型軸受が信頼性向上を意図して用いられている。

軸受支持方式としてはダイヤフラム支持の可撓性支持と剛性支持の2型式がある。

(12) スラスト軸受にも動圧型と静圧型の2型式のガス軸受が応用されている。

動圧型軸受としてはティルティングパッド型の他に負荷容量の大きなスパイラルグループ型軸受が用いられている点に注意すべきである。

軸受支持方式として剛性支持の他ジンバル支持が採用され、組立精度の緩和及び熱変形等による軸受片当りの除去により信頼性の向上を企んでいる。

第2.1章から2.5章の間で述べた内容から、ガス軸受循環機の開発において注意すべき項目につき抽出しまとめたのが表-3である。これ等の各項目につきさらに考察を進めてみる。

(13) ガス軸受の循環機への選定理由として、燃料試験、材料試験及び放射性ガスのシールが挙げられているが、この他、ヘリウム中の不純物濃度の影響を大きく受けるあるいはメンテナンスフリーを要求するような高温機器のテストにもガス軸受循環機が必要となるであろう。

(14) 事故対策の項から判断されるように、ガス軸受循環機の開発には高周波モータの技術をもつ電機メーカーと信頼性の高い動圧型ガス軸受をもつ圧縮機メーカーの相互協力が基本事項となる。

(15) 循環機の改良設計は表-3中の項目3-(1), (4), (5)及び(8)にあげられているように、主にブローの冷却にむけられている。これは循環機を構成する材料の強度と高精度の軸受寸法を保つためである。

(16) この他、表中の3-(2), (7)及び(9)項に示すように、循環機の信頼性向上及び(3)項に挙げられているように循環機の技術向上に力点がおかれている。

(17) また、動圧型ガス軸受にとって、起動時の多数回の固体接触に耐え、しかも高速時の瞬間的な接触にも十分な信頼性をもつ軸受材質(含コーティング)の開発は今後に残された大きな課題である。静圧型ガス軸受をHTGR用循環機に利用する場合には、軸受用給気源である補助圧縮機のトラブルに注意すべきである。

(18) ガス軸受循環機の普及に連がるコスト低減に努力すべきである。

表-2 高温ガス冷却炉に応用された各種小型ガス軸受循環機に関する使用条件と軸受型式

研究機関	圧縮機	開発会社	圧縮機の使用条件							軸受型式		特記事項	
			作動ガス	入口温度 (°C)	入口圧力 (kg/cm ²)	流量 (g/sec)	揚程 (kg/cm ²)	出力 (HP)	モータ回転数 (rpm)	寿命 (hr)	ジャーナル軸受		スタスタ軸受
1. General Atomic 社	HTGRインバイル ループ用循環機	de Havilland Engine Company	He	204 (norm) 343 (max)	24	31 (norm) 68 (max)	0.7				動圧型 (L=12 mm)	動圧型	・燃料要素の試験。 ・スターティングトラ ンス回数を超過す。 ・炉心黒錆とCO ₂ ク ラントの反応試験。
	PBRガスループ用 循環機	Bristol-Siddeley Engines, Ltd.	CO ₂		32	945	3.5	75	10,000		動圧型ダイヤフラム支持	動圧型剛性支持	
	DR-1ガスループ用 循環機	General Electric Co.	He	93	14	57	0.46	10	24,000		静圧型	静圧型	・M.G.C.R.の燃料要素 試験。 ・動圧型ガス軸受開発 の必要性。
2. Los Alamos 科学研究所	Turret Reactor ガスループ用循環機		He	315	35	1,291	0.56						・核分裂生成物を含ん でいるガスループの 外部漏洩を10 ⁻⁸ atm cm ² /sにお さめる。
	UHTREX炉補機用 循環機 (MTI)	Mechanical Technology Incorporated	He	38	35	15	1.05	3.8	12,000		ピポットパッド 動圧型静圧軸受付 (α=80°)	動圧型スライダルグルー プ (2枚)	・ガス浄化ループ用 循環機。
	UHTREX炉補機用 循環機 (Rateau)	Societe Rateau	He	38	35	15	1.05	5			動圧型ピポットパッド (α=115°, 3枚)	動圧型ピポットパッド (α=60°, 3枚)	・ガス浄化ループ用 循環機。 ・DUコーティング。 ・高温・無冷却への発 展。 ・保守期間の延長。
4. Oak Ridge 国立研究所	実験用ガス軸受循環機	Bristol-Siddeley Engines, Ltd.		315	28	47	0.84		3,000		動圧型フレキシブル ダイヤフラム支持	動圧型シンバル	・冷却用補機を除去。 ・実験用ガス軸受循環 機の改良。
	GABE-1圧縮機			426					8,000		剛性支持		
	ORR-2圧縮機	Bristol-Siddeley Engines, Ltd.		315	28	47	0.84				ナットクラックカ型	スライダルグループ型	
5. O. E. C. D.	CBR社製プロトタイプ 循環機	Continental Bearing Research Corp.	He	426 ~538	28				24,000		スクエアプレーン型 (D=89 mm) 動圧型ピポットパッド (3枚)	スライダルグループ型 動圧型ピポットパッド (5枚)	・軸受部のみを開発。
	Pegase炉用循環機	Societe Rateau	CO ₂	271 ~399	25	3,326	6	45	12,000		動圧型ピポットパッド	動圧型ピポットパッド	・燃料試験用。
	Dragon炉補機用循環機	Societe Rateau	He					5			動圧型	動圧型	・ガス浄化ループ用 循環機。

表-3 高温ガス冷却炉用の小型ガス軸受循環機開発における参照事項

項 目	内 容
1. 選定理由	(1) 燃料要素試験のため作動ガス純度を上げる必要がある。 (2) 材料要素(黒鉛)試験のため作動ガスの不純物濃度を下げる必要がある。 (3) 作動ガスが放射性を帯びているためその外部シールドを完全に行う。
2. 事故対策	(1) モーター巻線の破断事故があり, かご型モーターに変更。 (2) 静圧軸受給気用圧縮機にトラブルが生じた点を考慮し, 動圧型ガス軸受の開発を提唱。 (3) 作動ガス中の異物と水分の凝縮による軸受の損傷があり, フィルタの正しい選定を対策案にする。
3. 改良設計	(1) インペラ, ジャケット及びヒータの改良により循環機ハウジングないしは軸受部の熱変形を減少。 (2) スロット弁, プロア回転数及びバイパスの複数因子による流量制御を行う。 (3) スタートインクランランスをもうけて動圧型ガス軸受の起動時の問題を解決する。 (4) モータステータをセラミック構造にすることにより, 冷却用補機をはぶく。 (5) モーター及び軸受部を水冷。
4. 軸受材質	(6) モータ室内のガスを遠心プロアにより循環し, 回転体と軸受の冷却を行う。 (7) 循環機を水平から3°傾けて設置することにより, 常時スラスト軸受に負荷がかかるようにする。 (8) インペラ裏部にバップデフィューザを設けて作動ガスの熱遮蔽を行う。 (9) 軸受に熱電対を埋込み, 回転軸の接触を監視する。 (1) ジャーナナル軸の材質として電気処理したインコネルX, 軸受としてインコネルSが用いられている。 (2) スラスタランナの材質としてインコネルX(電気処理)及び軸受としてステライトNo.6が使われている。 (3) 軸受表面に2硫化モリブデンの薄膜コーティングが行われた。 (4) また, 軸受表面に“Glacier Metal社のDU”コーティングが施された製品もある。 (5) ピポット・パッド軸受のピポットはタンクステンカーバイドを使い耐摩性を増している。

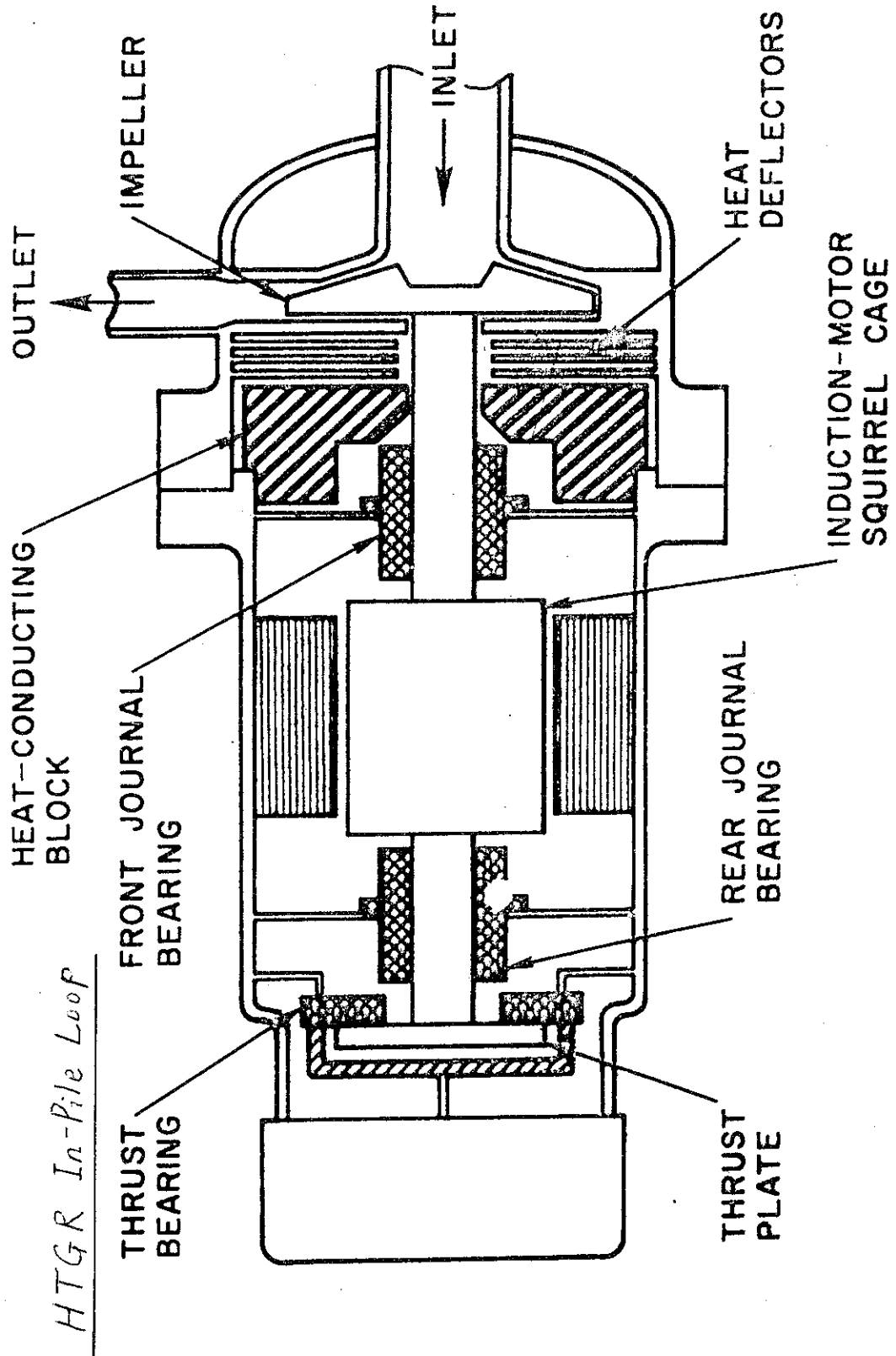


図.1. ハリウム圧縮機単体の概略図(2)

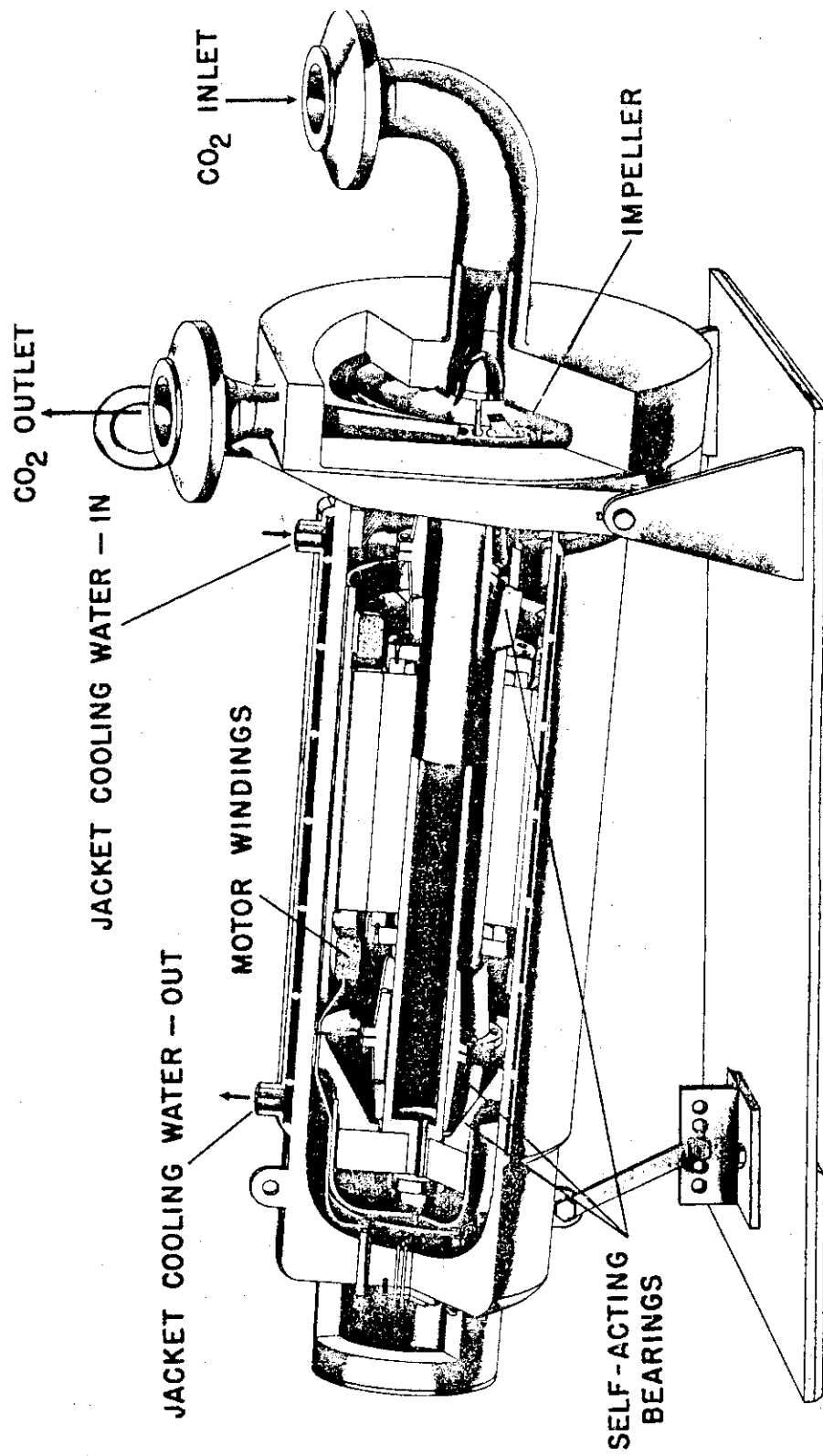
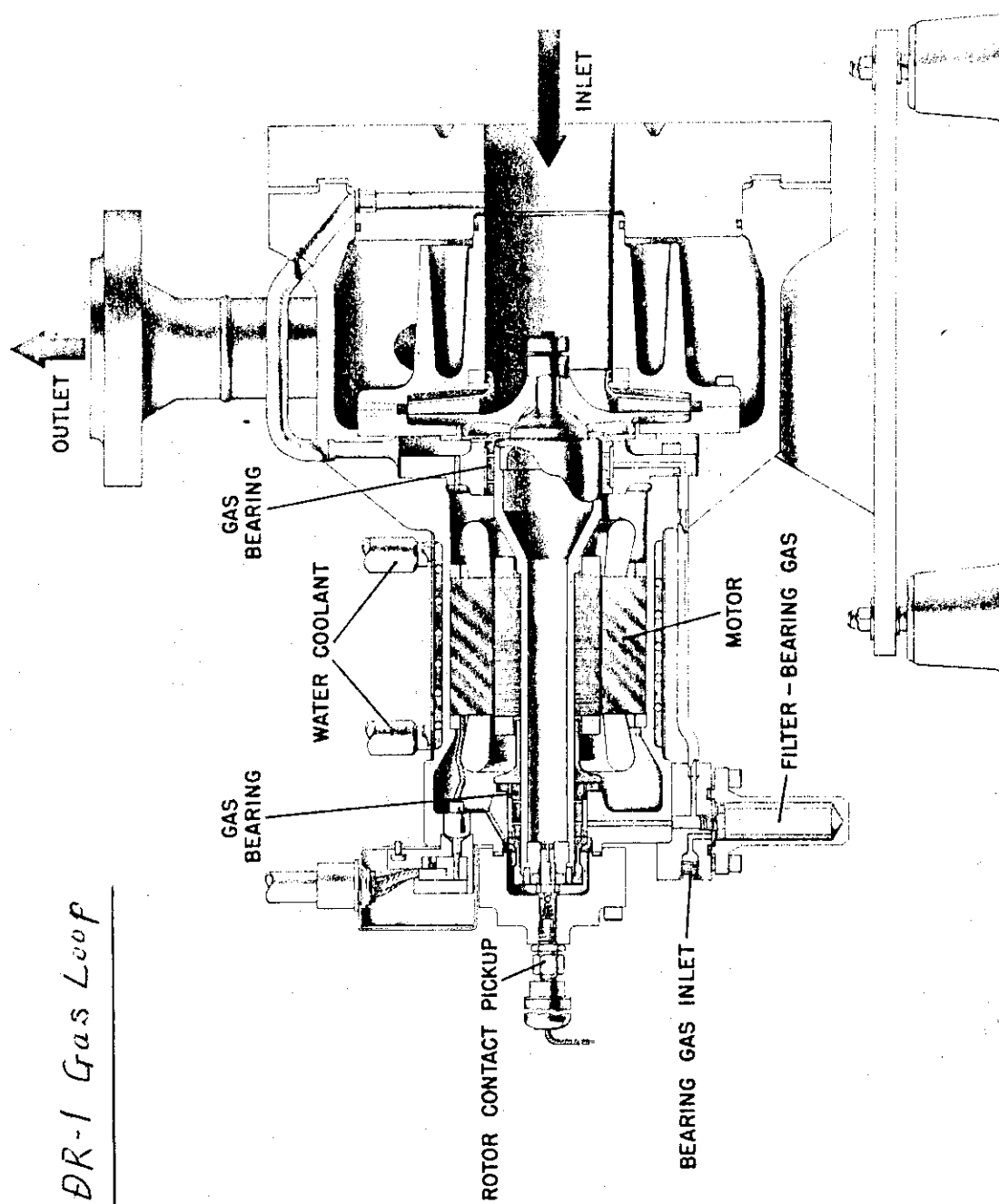


図.2. PRTRガスル-フ-圧縮機⁽³⁾



The DR-1 Gas Loop

図.3. ガス軸受循環装置の断面(4)

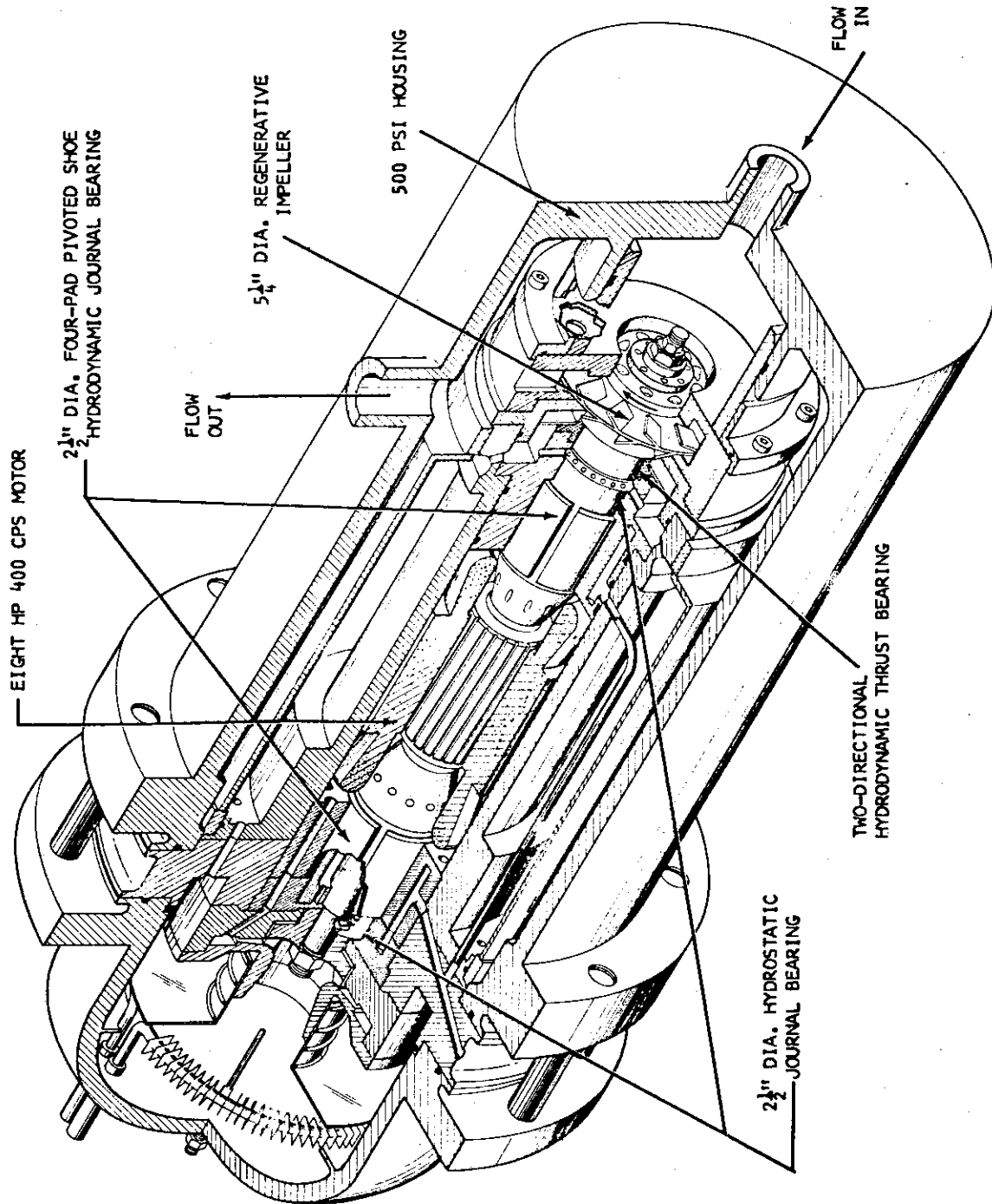


図.4. UHTREX ガス純化系の再生プロダクト

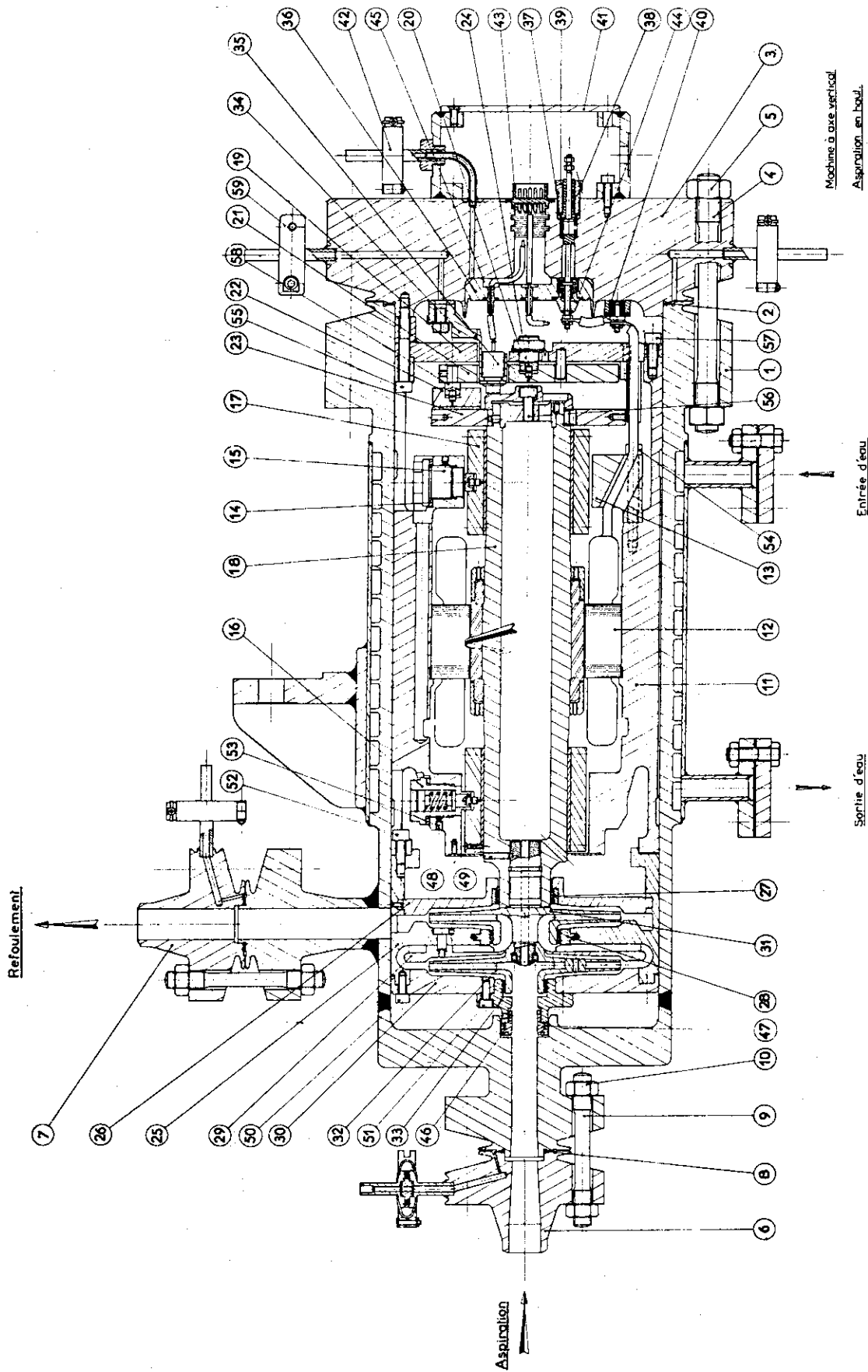


図.5. 遠心ポンプの断面図 (7)

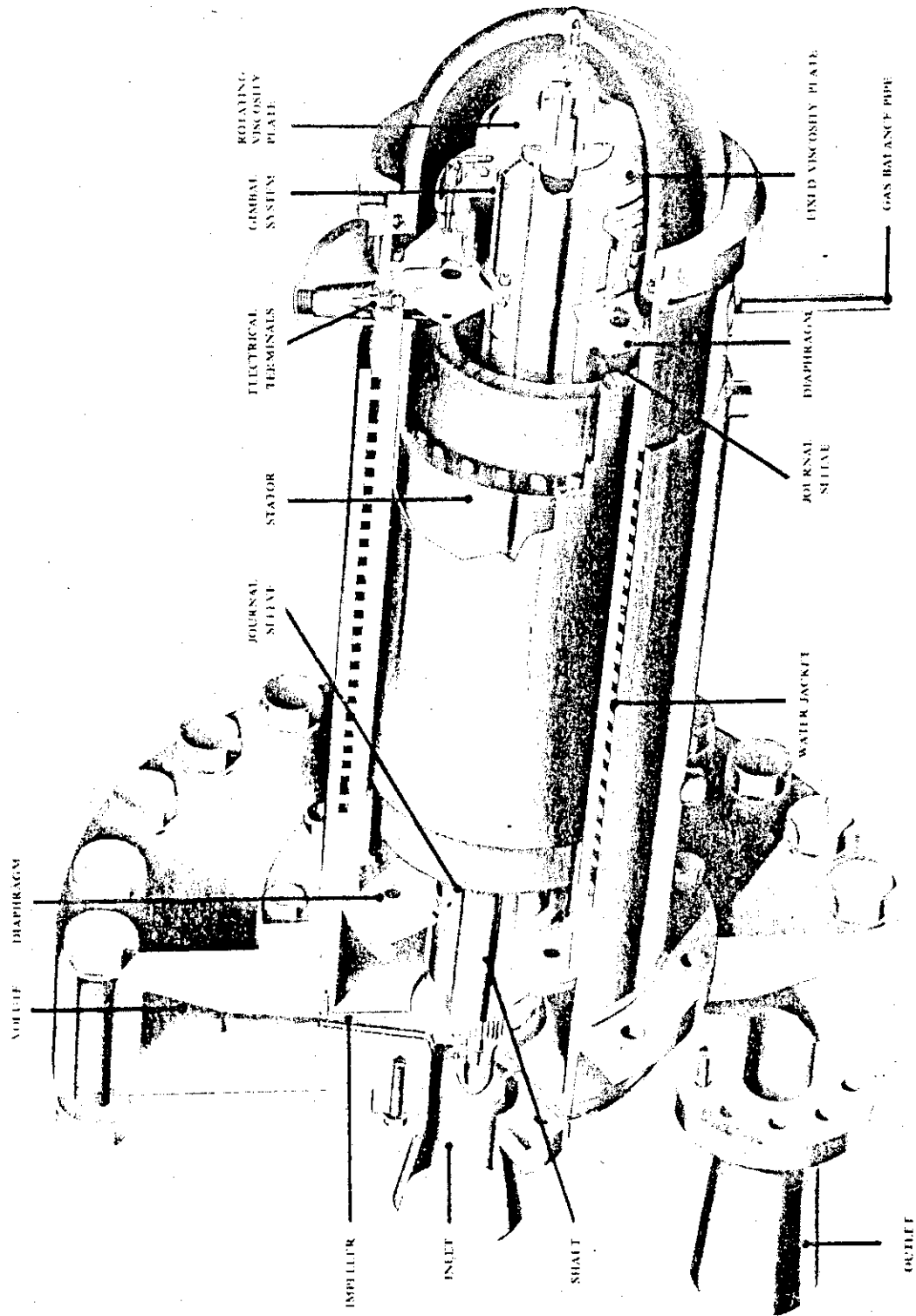


図.6. Bristol Siddeley Engines Ltd 設計のガス車軸受圧縮機⁽⁸⁾

UNCLASSIFIED
ORNL-LR-DWG 43144

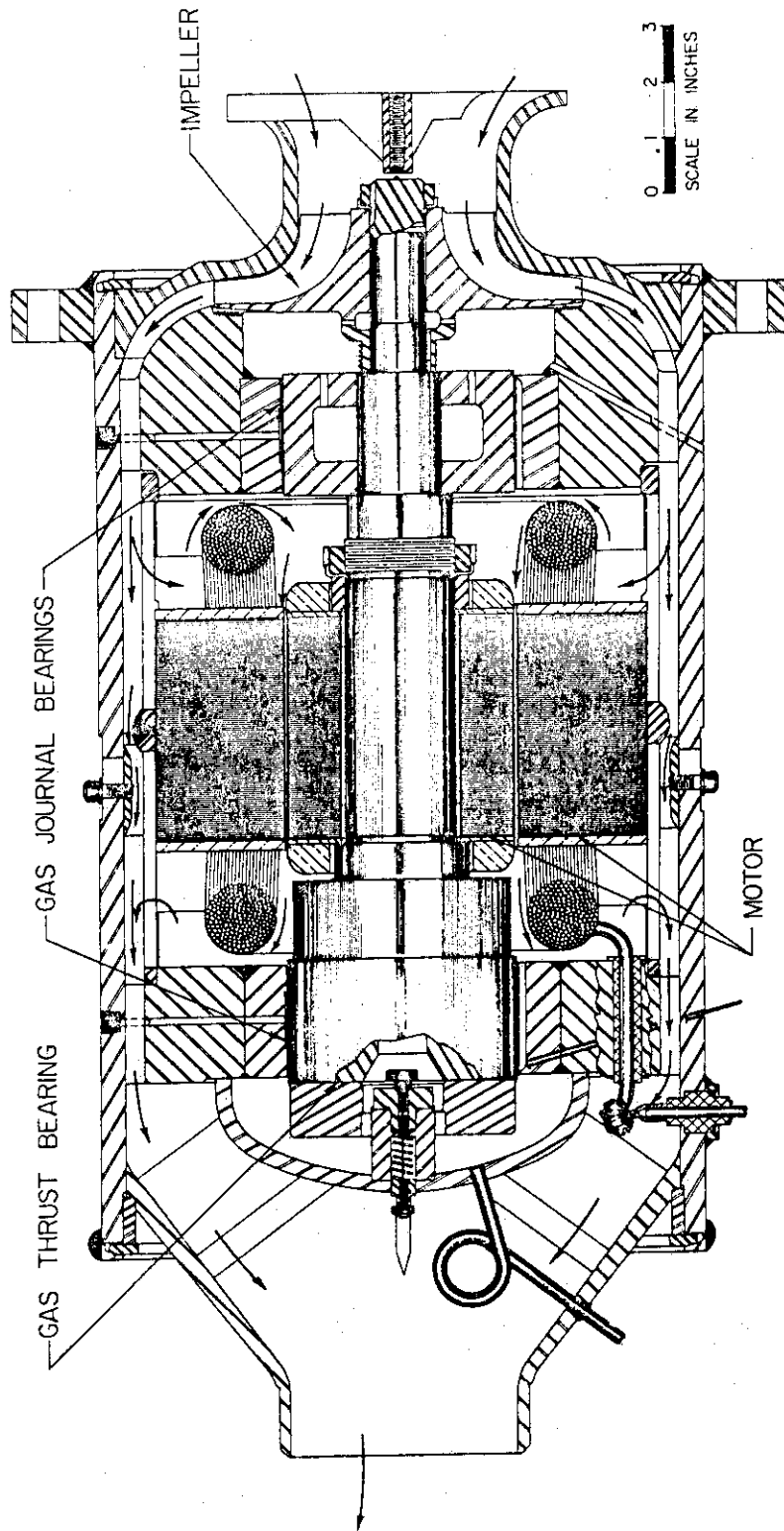


図.7. GABE-1 圧縮機 (8)

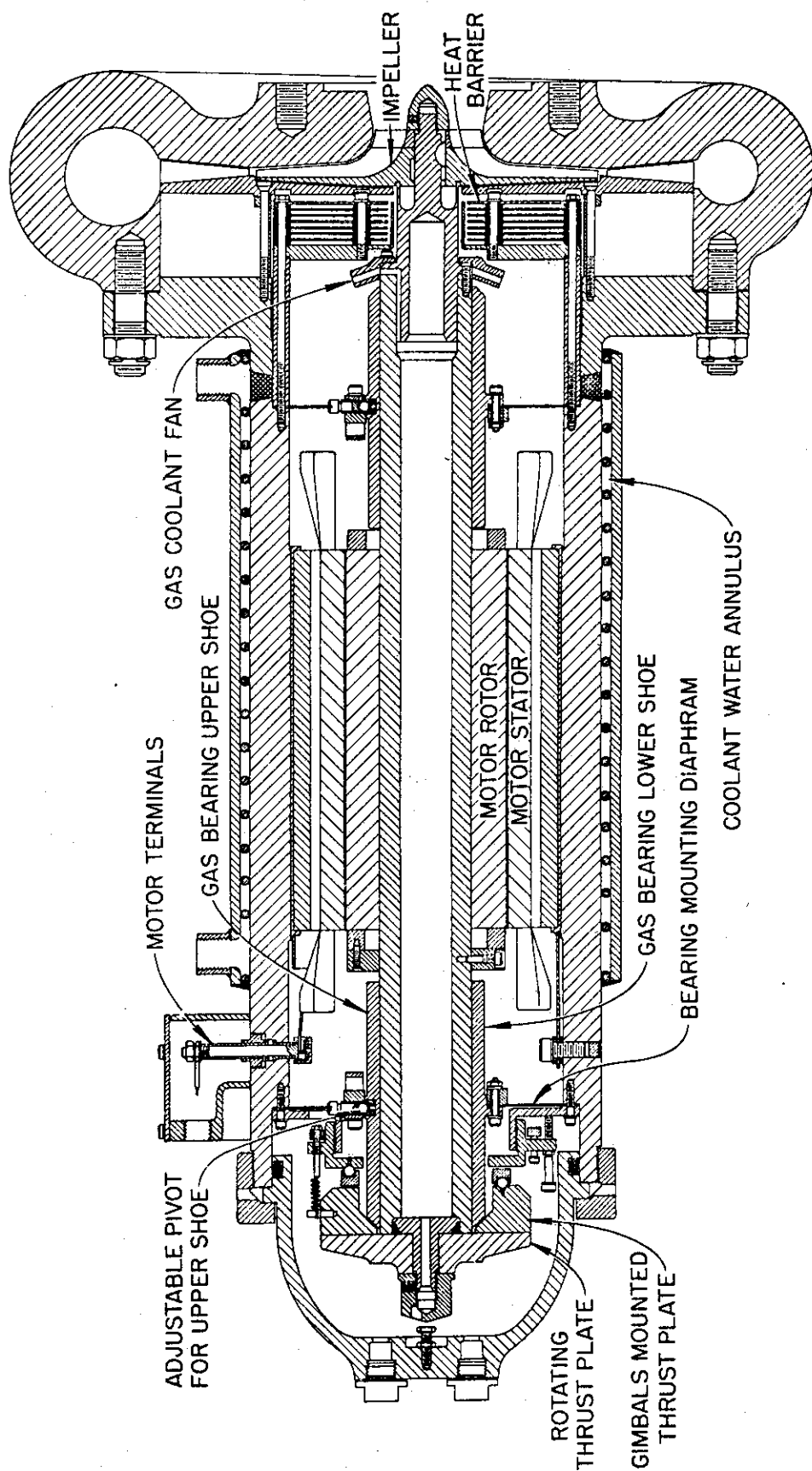


図.8. Bristol-Siddeley 実験用ガス軸受圧縮機⁽⁹⁾

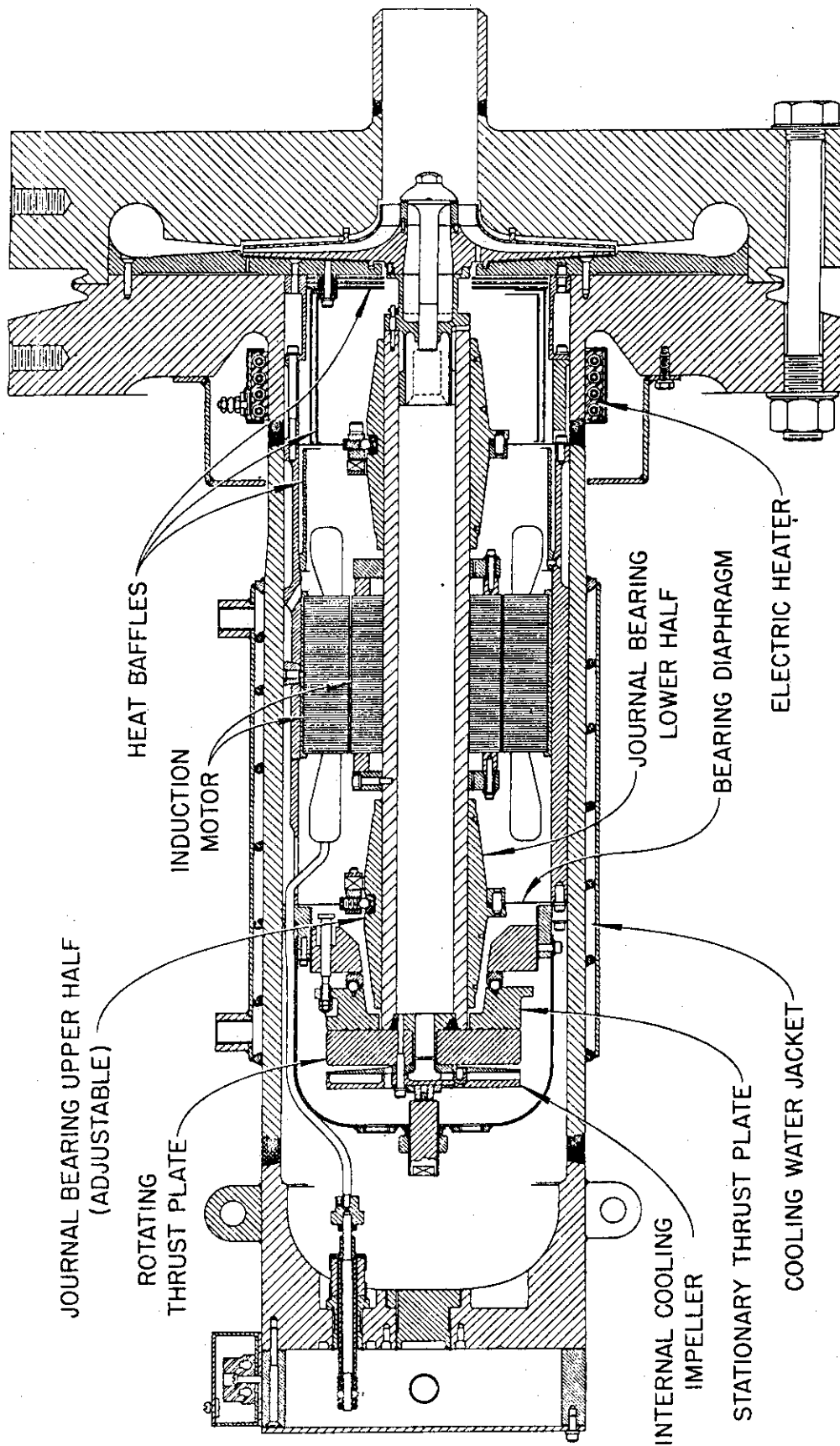


図. 9. Bristol-Siddeley Φ RR-2 圧縮機⁽⁹⁾

Continental Bearing Research Co.

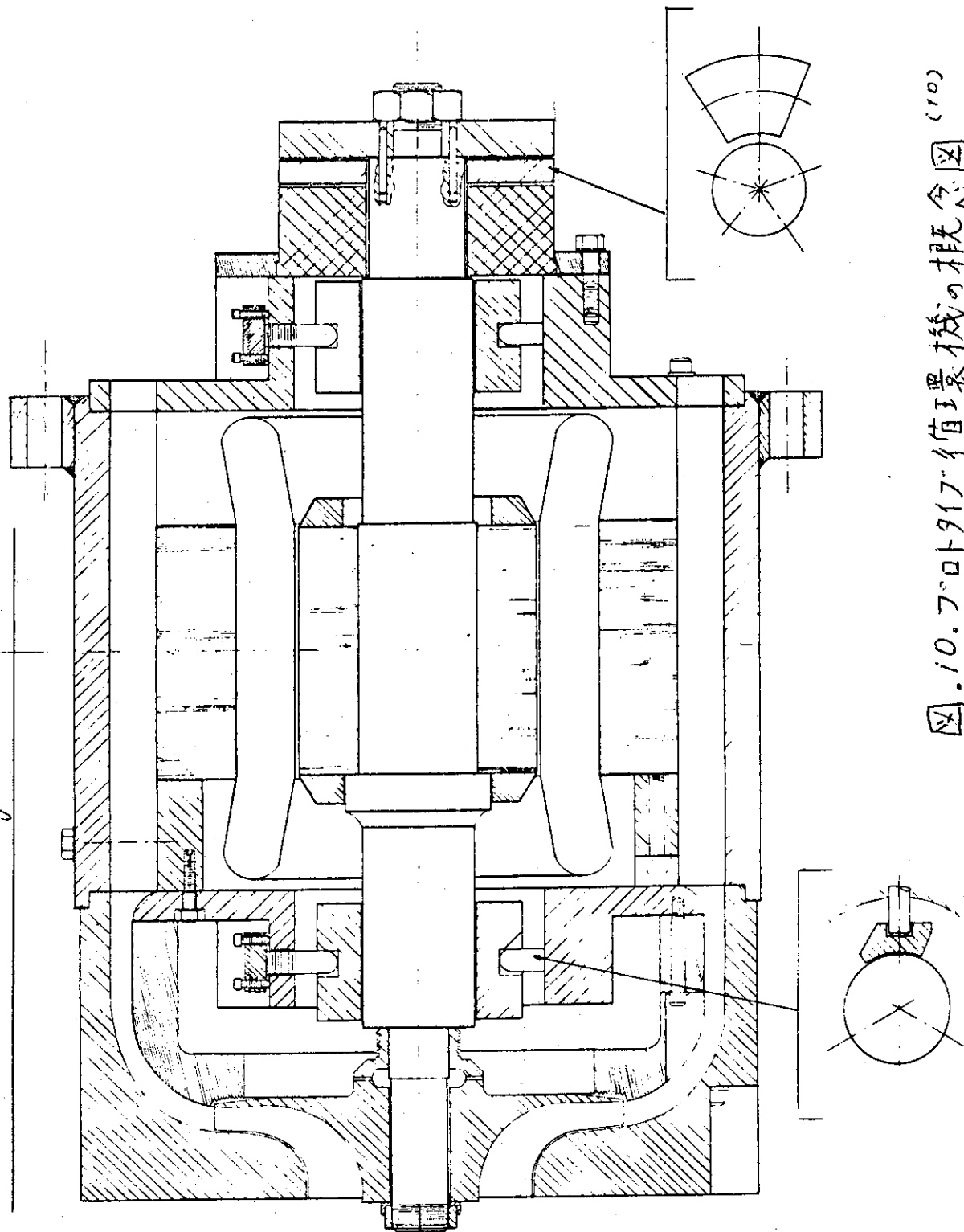


図.10. 10葉型循環機の概念図 (10)

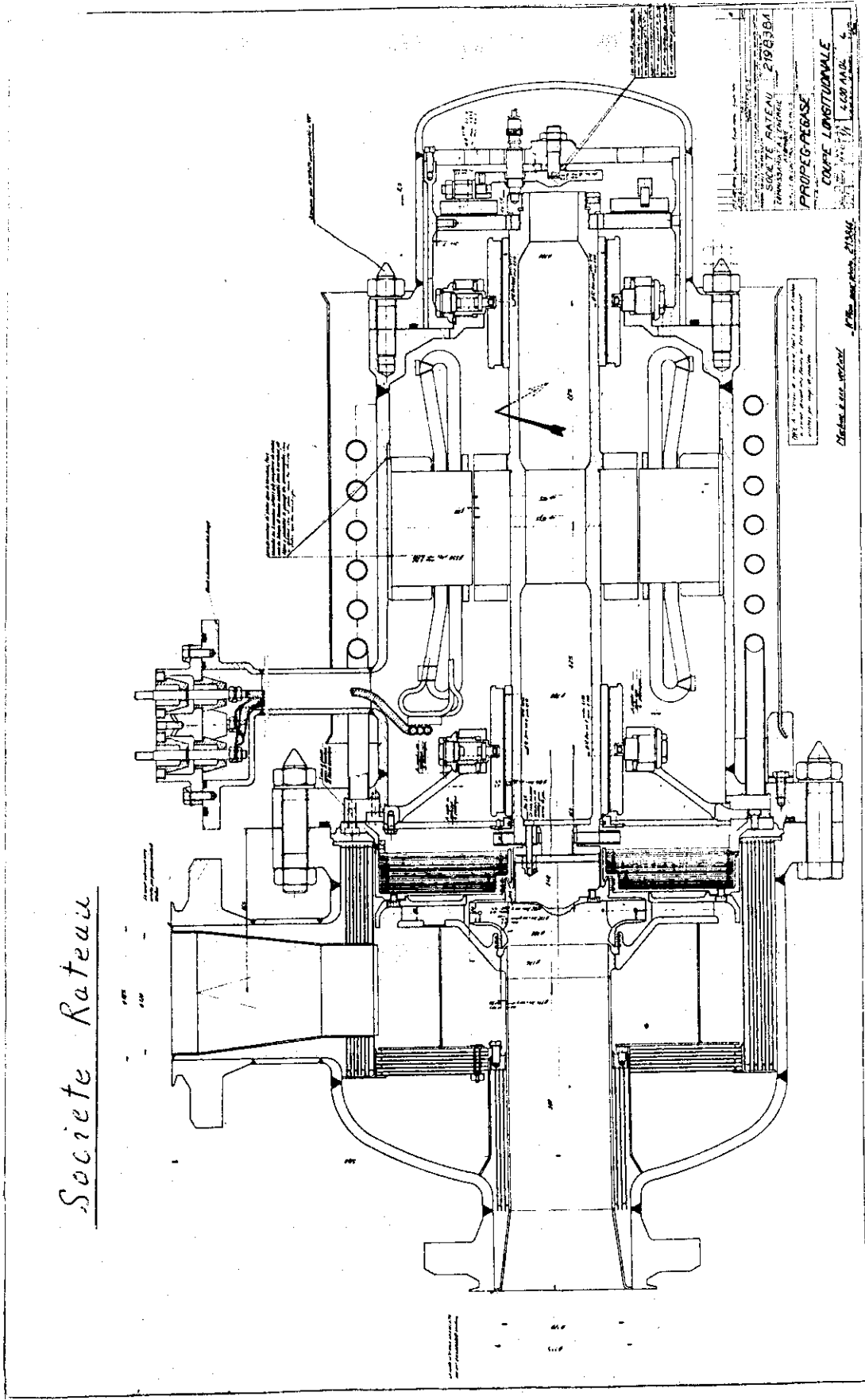


図.11.75: Pegase 炉用ガス軸受CO₂圧縮機 (1)

3. 大型循環機への気体潤滑軸受の応用状況

3.1 UHTREX炉⁽⁶⁾

California UniversityのLos Alamos Scientific Laboratoryでは、ヘリウム冷却で熱出力3 MW(t)、最大ガス温度1,316°Cの超高温ガス冷却実験炉(Ultra High Temperature Research Experiment)の開発を行った。被覆のない燃料要素を使用するので、冷却系統は高度の放射能汚染を受ける。それ故、循環機にはクーラントをそのまま潤滑剤に使用出来るガス潤滑軸受が採用された。

UHTREX炉における主ヘリウム冷却ループの主要条件を以下に示す。

- ・ヘリウム温度 : 315.5°C
- ・ヘリウム圧力 : 35.7 kg/cm²
- ・揚程 : 0.68 kg/cm²
- ・流量 : 1,291 g/sec
- ・循環機冷却ヘリウム : 121 g/sec

3.1.1 MTI社製ガス軸受循環機

UHTREX炉における主ヘリウムループ用循環機は、MTI社で製作された。それはガス潤滑軸受を装備したサーキュレータであり、その断面図を図-12に示す。また、本ブローの特徴は以下のようである。

- (1) 出力：65 HP
- (2) 回転数：12,000 rpm
- (3) 21.8 kgの重量をもつロータアセンブリを支えるジャーナル軸受として、ヘリウム潤滑の静圧軸受付き動圧型軸受を開発し適用した。静圧軸受への供給ガス圧力は1.75~2.1 kg/cm²である。
- (4) スラスト軸受はティルティングパッド型であり、スラストランナの背面を冷却翼として利用した。

3.2 Dragon炉

ヘリウム冷却の高温ガス実験炉として、Dragon炉(熱出力20 MWt)の開発が英国を中心にOECDのメンバーにより、1959年より開始され、その後一連の試験研究が行われ、1976年に終了した。Dragon炉の主循環機はガス潤滑軸受を採用した機種であり、Brown Boveri Corporation(以下BBCと略称)により設計製作された。さらに、そのバックアップ機種としてSociete Rateau社にも発注されている。これ等2社のガス軸受循環機について以下に詳述する。

3.2.1 BBO社製ガス軸受循環機

Dragon 炉用ヘリウム循環機の主要諸元を以下に挙げる。

- ・型式 : 単段速心
- ・流量 : 1,694 g/sec
- ・揚程 : 0.35 kg/cm²
- ・吐出圧力 : 8~25 kg/cm²
- ・運転温度 : 室温~420°C
- ・回転数 : 1,100~12,000 rpm
- ・駆動馬力 : 77 PS

循環機の断面図と据付け状態時における循環機と熱交換器を結ぶ経路断面図をそれぞれ図-13と図-14に示す。さらに、炉内の循環機の位置を明示するために炉全体配置断面図を図-15に掲げる。

Dragon 炉の主循環機は次のような特徴を有している。

- (1) すべての実験条件を通じて、循環機は比較的急激な温度、圧力及び速度変化に耐えなければならない。
- (2) 軸と軸受は窒化鋼で作られており、この硬化されたすべり面は、ガス潤滑軸受に適した性質をもっている。
- (3) 2個のラジアル軸受はケーシング内に取り付けた軸方向に可焼性のあるダイアフラムで支えられている。したがってケーシングの如何なる変形も軸受には伝えられず、軸受は自動調心性をもつことになる。
- (4) スラスト軸受用固定ディスクはスラストカラに対し調心性をもつよう可撓性のあるチンバル支持で支えられている。したがって、ディスクは回転カラの急激な変動に追従可能となる。
- (5) 循環機のスタートストップ時における軸と軸受の接触を回避するため、フレキシブルな配管を通じジャッキアップガスを軸受に送っている。ジャッキアップガス系統は非常に簡単な系であり、減圧弁付きのガス容器、ストップ弁、圧力スイッチ、逆弁、ガスフィルタ及び速度制御装置より成り立っている。また、ジャッキアップガスの消費を出来るだけ少なくするため、直流ブレーキによって軸の回転停止時間を短くしている。このような方法により、軸受の寿命延長と信頼性の増大を確保出来る。
- (6) モータ室とディフューザハウジング間の熱遮断はステンレス鋼の平板と波板を交互に重ねて輻射熱を遮蔽する構造にすることで効果を上げた。
- (7) 軸と軸受間のたった40°Cの温度差による熱膨脹により、非常に小さな軸受すきまは埋まってしまう。これを防ぐために、インペラは高温のガスと接触する部分が狭い断面積をもつ熱抵抗の大きな長いピースをハブと結合するような構造とした。
- (8) さらに、軸と結合する個所には、接触面積を減すため多数のリセスをもうけた。これ等のリセスには冷却ファンを取り付け、高速流の低温ヘリウムガスによってこの部分の熱を強力に持ち去るようにした。
- (9) ガス潤滑軸受の開発当初では円筒軸受を対象に研究を進めたが、コニカルホワール及びシリンドリカルホワールが発生したのでこの型式の軸受を断念し、円筒軸受の無負荷側に軸方

向にグループを切った軸受及び3個のウェッジをもうけた軸受にすることにより高速安定性を改善した。しかし、いずれの方式においても軸受負荷容量が著しく減少した。そこで、軸受の両端部のみに3個のウェッジをもうけた円筒軸受に変えることにより、1,000 rpm でも10 kgf の負荷能力を有し、無負荷でも12,000 rpm まで定安した運転が出来る軸受の開発に成功した。なお、軸受の寸法は直径が100mm、長さが250mmである。

(10) 第2段階では、実機循環機と同一寸法のモデルにより、モックアップ試験を行った。この機種では、インペラのかわりに実機と同一重量をもち、同一の慣性モーメントをもつディスクを取り付けた。それによって実験精度の向上を計った。

(11) ギンバル支持のスラスト軸受ではフラッタが起き、軸受端部に接触傷を生じた。次に挙げる3種類の対策によりこの問題の解決を行った。

- ① ティルティングピボット支持のパッドとする。
- ② ウェッジかポケットあるいはグループをもつスラスト軸受とする。
- ③ カウンタスラスト軸受をもうける。

(12) その他、試験運転の初期に電氣的なスパーク腐蝕によるスラスト軸受の損傷を経験した。それは静電気をロータからアースへ伝導する物質を接続することにより解決した。即ち、ドライヘリウム中での撹動では激しい摩擦が生ずるので、非接触でも電気を通すことの出来る電導体を見つけ、放射性供給源を使うことにより解決した。

(13) ガス潤滑軸受を用いたより大型の機種の成立が正当化された。動圧型軸受の限界は大部分その運転される速度領域によって定まるので、ある寸法以上の機種については、どんなに軸受材料の改良をはかっても、スタートストップ時におけるジャッキアップガスの利用が必須となる。

(14) Dragon Project において、ガス軸受循環機をDragon 実験炉に装備した後、実機環境条件下でのサーキュレータにつき、高速安全性、材料の適性、軸受温度分布等の確認把握のための試験が行われている。

3.2.2 Societe Rateau 社製ガス軸受循環機^(12,15,16)

Dragon 炉用主循環機として Societe Rateau 社が開発したガス軸受サーキュレータの断面図を図-16に示す。その主たる仕様は次のようである。

- ・軸受型式 : ティルティングパッド型
- ・ガス : 高純度ヘリウム
- ・吸入圧力 : $20 \sim 24 \text{ kg/cm}^2$
- ・吸入温度 : 349°C
- ・ガス流量 : 吸入状態で $74 \text{ m}^3/\text{min}$
- ・圧力比 : 1.06
- ・回転数 : 12,000 rpm
- ・出力 : 120HP, 185HP (max)
- ・供給出力 : 周波数可変 (200Hz)
- ・低合金鋼構造 : (0.5Cr-0.5Mo)

- ・ロータ重量 : 100 kg
- ・軸受面圧 : 0.15 kg/cm^2

この循環機は次項に挙げるような特徴をもつ。

- (1) サーキュレータは炉内に水平に設置されている。但し、スラスト軸受に幾分自重がかかるように、僅かの傾きをつけている。
- (2) Dragon 炉に装着する前に、 110°C の高温空気中の試験を行い、次にヘリウムループ中の確認試験と過渡応答試験を行った。その結果、良好な成績を収めた。
- (3) この循環機の開発過程で上部軸受パッドのピボット部におけるタングステンカーバイド製ペレットが損傷し停止する事故があったが、設計変更により解決した。
- (4) 直径200mmの軸受大型化により、負荷能力を435kgまで上げ、さらに、ジャッキアップガスをスタート時に使うことにより Dragon 炉用循環機の開発に成功した。

3.3 HTGR炉

3.3.1 GA社の大型ガス軸受循環機の計画⁽¹⁷⁾

General Atomic Division of General Dynamic Corp. が受注した Philadelphia Electric System における40MW(e)のHTGR発電計画では、燃料要素にグラファイトクラッドを使用するために、冷却剤であるヘリウムガスが核分裂生成物によって汚染され、したがって主冷却ループ及びクリーンアップループの循環機のシールが開発上の大きな課題となった。

メインループの主な条件は次のようである。

- ・炉入口温度 : 343°C
- ・炉出口温度 : 732°C
- ・ループガス圧力 : $21 \text{ kg/cm}^2 \text{ abs}$
- ・循環機出力 : 2,500HP
- ・循環機揚程 : 0.7 kg/cm^2
- ・循環機入口温度 : 332°C

P. H. Monroe は、HTGRのシールの問題について検討を行い、次のような結論と将来動向を述べている。

(1) 油潤滑のキャンド型サーキュレータにおけるヘリウムバッファシールは、もし、フローティングブッシュ型シールを用いる場合には、シールの冷却に必要な水と炉心グラファイト間の腐蝕の問題がある。また、もし、ラビリンスシールを用いる場合には、1次ループ内への油のバックディフュージョンを最小に抑えなければならないやっかいな問題をかかえている。

(2) 今迄、HTGR補機系に使用されてきたガス軸受小型圧縮機は、最小20,000hrの長時間の運転寿命を必要とするインパイルループでの唯一の解決策と考えられる。その上、ガス軸受コンプレッサの主ループおよびクリーンアップループへの応用は今後の非常に興味深いテーマと言える。

なお、第2.1.1章で述べた小型ガス軸受循環機を組込んだHTGRインパイルテストループ

での燃料要素に関する試験は、この考えにもとずき、そのはじめのステップとして行われたものである。

3.4 THTR炉

熱出力20MW(t)のDragon炉用ヘリウム循環機の開発に成功したAG Brown Boveri社、Badenはさらに大型のガス軸受循環機の開発に力を注いでいる。経済性の点から、今日必要とされる炉は電気出力400MWe位であり、全冷却プロアの電気出力はその内の4%すなわち、16,000kWとなる。ヘリウムのサーキュレーションを7機の冷却プロアでまかなうことにすれば、機械効率を効慮に入れて計算すると1機当たり約2,800kWの総合出力をもつ循環機が必要となる。これ位の出力を要求する炉にEuratomのBrown Boveri/KruppとJülichのKFAが計画しているTHTR炉(Thorium Hoch Temperatur Reactor)がある。

3.4.1 Brown-Boveri社における大型ガス軸受循環機の計画⁽¹⁸⁾

Brown Boveri社では、2,800kWのガス軸受プロアの模擬実験用プロトタイプシミュレータの製作を行っている。この実験機では次のような2項目の工夫がなされている。

(1) 圧縮機のインペラ部分は重量と慣性モーメントを実機と合わせるため、等価円板におきかえ、回転体の理想モデル化により試験データの精度を上げ解析を容易にした。

(2) インペラ部以外はすべて従来のプロアで使っていた軸、ラジアル軸受、スラスト軸受、電動機、モータ固定子及びハウジングを流用し、製作費の節減をはかった。

さらに、原子炉への装填を考え、実際のインペラをつけた圧縮機の製作についても計画されており、この装置は定常時及び事故時において炉内でおこる問題点の調査研究用を目途として設計が進められている。

Brown Boverie社はこのような大型ガス軸受循環機の研究開発に対し、次のような見解を有している。

「開発ステップの大きな跳躍には、新しくしかも難解な多数の問題が待ちかまえているだろうが、経済的な支援と不屈の意志によりこれらの克服は可能であろう。」⁽¹⁸⁾

3.5 直接ヘリウムサイクル炉

3.5.1 Societe Reteau社における大型ガス軸受循環機の計画⁽¹⁹⁾

Societe Reteau社では、原子力エネルギーを利用したヘリウムガスによる直接サイクルガスタービン発電の検討を行っている。作動ガス温度と圧力はそれぞれタービン入口において800°Cと72.9kg/cm²であり、電気出力は600MW(e)である。このタービン軸受の開発が計画され、負荷荷重3,000kgから10,000kgまでの試験が行われる予定である。

原子力直接ヘリウムサイクルガスタービンにガス潤滑軸受を採用した理由として、C.Mech等は次のような項目を挙げている。

(1) 原子炉1次冷却系の汚染が防げる。したがって、

- ① 保守点検期間が延長する。
 - ② 炉心の腐蝕が軽減される。
- (2) 1次系は完全密封とするので、付属機器等の外部接続部からの作動ガスの漏洩がない。したがって、原子炉からの放射性物質に対して安全であるばかりでなく、ヘリウムガスの浪費もなくなる。
- (3) 完全密封装置としたため、軸シールに関する多数の補機がはぶけ、機器の信頼性が増加することになる。
- (4) 補機が少なくなれば、ターボマシン全体の価格も安くなる。
- (5) さらに、ガス軸受をそなえた機器特有の次のような長所を有する。
- ① 応答性が良い。
 - ② 高温に耐えられる。
 - ③ 機構の簡素化が画れる。

3.5.2 Societe Rateau 社における大型ガス軸受の研究開発^(20,21)

Societe Rateau 社に所属する C. Mech等は、大型ターボマシン用用のガス軸受として、静圧ティルティングパッド型軸受の研究開発に関し、1971年と1974年の2回にわたり、University of Southampton で開催された Gas Bearing Symposium で発表を行っている。この軸受の開発に成功すれば、その有力な候補の1つとして、HTGR用主冷却サーキュレータへの応用が可能となる。

静圧型ガス軸受の長所は、動圧型ガス潤滑軸受に比較し次にあげるような諸点にある。

- (1) 軸受負荷が優れている。
- (2) 軸受フィルム厚さが回転速度に独立である。
- (3) 発停回数に制限がない。

一方、大型ターボマシンでは、回転体の重量が増大していくこと、大出力の高周波変換器は莫大なコストを必要とするため用いられず、大型プロパのモータ回転数は通常の3,000 rpm (50Hz) を直接使うため比較的低い回転速度となること等により、負荷能力が回転速度に依存する動圧型軸受は望ましくなく、必然的にそれ等の拘束のないしかも信頼性に富む静圧型軸受の必要性が叫ばれるようになった。

Societe Rateau 社は大型静圧軸受として、3枚パッドからなる静圧型ティルティングパッドガス軸受(図-17, 図-18)を次のような理由から選定した。

- (1) 1枚のパッドをフレキシブル支持にすることにより、軸受は自動調心性が得られるようになるので、軸受クリアランス比(C/R)の小さい大径軸受にとって片当り防止能力が大巾に増加される。
- (2) 1パッドがフレキシブルであるため、熱及び機械的変形許容能力が改善される。
- (3) したがって、同等の円筒型静圧軸受に較べ、平均作動フィルム厚さを薄くし得るようになり、その結果、軸受への供給ガス流量の減少と、軸受剛性及び軸受減衰性能を増加させられる。
- (4) ティルティングパッド軸受の特質である高速安定性に富むサーキュレータの製作が可能

になり、ホワールの発生を遅らすことが出来る。

さらに、静圧型ティルティングパッドガス軸受の設計上、次の点に工夫をこらしている。

(1) 3枚のすべてのパッドにジャッキングガスを図-17に示すように、ピボット中央に明けた穴より供給し、その上、ピボットとソケット部を精密加工することによりガスシールを行っている。したがって、ガス配管や複雑なガスシール機構がなくなり、比較的簡単な構造にすることが出来た。

(2) また、オリフィスとリセスをパッド内にもうけることにより、ガス圧力分布の最適化を計った。

(3) 1枚のフレキシブルパッドをガスシリンダにより支持するようにしたため、軸受の剛性と減衰性能を改良することが出来た。

C. Mech等は上述した静圧型ティルティングパッド気体軸受に関し、2種類の試験を行っている。

まず、第1のテストは、供試軸受直径300mmの大型テストにより、

- ・ 負荷荷重 : 3 ton(norm), 10 ton(max)
- ・ 最大周囲圧力 : 20 atm
- ・ 供給ガス : 空気

の試験条件下における次のような軸受特性を求める試験である。

- (1) 軸受の静特性
- (2) 軸受のニューマティックハンマ現象
- (3) 軸受の高速不安定現象

その試験結果の1例を図-19に挙げる。

次のステップとして、軸受直径40mmの回転軸を収容する小型高速試験機により多数のデータを取得し、さらに、理論との対比を行い軸受特性より詳細な把握に努めている。

ここでは、ジャーナル軸受のみでなくスラスト軸受の両方の軸受型式につき、最高回転数60,000rpmまでの試験がなされている。

その試験結果を図-20と図-21に引用して示す。

3.6 考 察

以上の節で述べた高温ガス冷却炉用の大型ガス軸受サーキュレータ(6機種)の実用例ないしは計画例につき、それ等の循環機使用条件及び軸受型式をまとめると表-4のようになる。この表をもとに考察を進めた結果を以下に箇条書きにする。

(1) これ等6機のサーキュレータの内分けは、UHTREX炉(3MWt)用のMTI社製循環機とDragon炉(20MWt)用のBBC社製及びSociete Rateau社製の循環機が炉内に収められ運転されており、残りのHTGR炉(40MWe)、THTR炉(400MWe)及び直接ヘリウムサイクル炉(600MWe)用の大型循環機はいずれも計画ないしは研究開発段階の機種である。

日本原子力研究所で開発計画を有している高温ガス実験炉(VHTR)は熱出力50MWtであ

り、Dragon 炉の 2.5 倍となる。したがって、循環機についても Dragon 炉の延長上にあり、その結果を参考にすべきである。

(2) 循環機のカス入口温度としては $300\sim 400^{\circ}\text{C}$ 、また、カス圧力は $20\sim 35\text{ kg/cm}^2$ が多用されており、VHTR 炉の計画値 400°C 、 40 kg/cm^2 に較べ幾分低く、VHTR 炉にカス軸受循環機を採用するようになれば明らかに技術の進展が必要であり、用途範囲の拡大につながる。ただし、直接ヘリウムサイクル炉のタービンは他の循環機とは違い出力を取り出す役目を担っているため、カス温度： 800°C 、カス圧力： 73 kg/cm^2 と従来のカス軸受循環機の使用条件に比べ一段と厳しく、今後の開発にはより高度の技術が要求されることになるであろう。

(3) 現在実用に供されている UHTREX 炉及び Dragon 炉用のヘリウムカス循環機の流量は、 $1.3\sim 2.3\text{ kg/sec}$ であり、また、所要馬力は $65\sim 120\text{ pS}$ の中型圧縮機の条件に相当する。

他方、HTGR 炉や THTR は上述の実験炉とは違い、電気出力を取り出す実証炉であるため、循環機の所要馬力は、 $2,500\sim 3,000\text{ ps}$ と実験炉用プロアに較べ 1 桁高くなる。直接ヘリウムサイクル炉用の出力タービンも同じ位の馬力が要求される。

(4) 実験炉用の中型循環機 3 機種はいずれも高周波モータの採用により $12,000\text{ rpm}$ の高い回転数を設計点に取り、簡素な軸受型式である動圧カス軸受を可能にしている。

しかし、発停時の軸受負荷能力の不足を補うために、スタートストップ時専用の静圧軸受ないしはジャッキアップカス機構を設けている。

(5) Dragon 炉用の循環機におけるカス潤滑軸受に関する次の思想は開発に際し注目すべき事項である。

① BBC は負荷容量の大きな円筒軸受を主体にし、その欠点を克服するために軸受の 1 部にウェッジをもうけて高速安定性をはかる思想であり、軸受寸法は $D=100\text{ mm}$ と小型である。

② Societe Rateau 社は本質的に高速安定性に優れたピボットパッド軸受を基本に、この型式の軸受の欠点である負荷容量不足を 3 枚パッド型式と $D=200\text{ mm}$ と大型にすることによって補っている。

(6) 実証炉用の大型循環機にカス潤滑軸受を採用する場合には、もはや、回転体重量を支えるための軸受負荷能力及び大出力用の高周波モータのコストから来る制約のために動圧型軸受は不可能となり、Societe Reteau 社が提案しているような負荷能力が大きく、高速安定性に富むティルティングパッド型静圧軸受が適しているとの考えに賛成である。

前章と同様に、大型カス軸受循環機においても、開発にあたり参考となる項目を表-5にまとめた。表中で取り上げた項目のうち 1~3 は小型カス軸受循環機でも検討したものであり、新しく大型カス軸受プロアの開発でクローズアップされる項目は第 4 項の試験方法である。

以下に各項目につき検討を行ってみる。

(7) 高温カス炉用の大型循環機にカス潤滑軸受を応用する理由としては、小型カス軸受循環機での理由であったカス純度管理の他に、長時間の無開放運転の可能性とバッファシールや差圧制御用の補助機器の不要がある。

(8) 大型カス軸受循環機の開発上のトラブルはすべてカス軸受に関しており、軸受の研究開

発の重要性を改めて認識した。

(9) 改良設計点は小型循環機同様、作動ガスのモータ室及び軸受に及ぼす熱遮断に重点が置かれており、この他、中型ガス軸受循環機として新しく取り付けられたジャッキアップガス系統に関する工夫が目を引く。

(10) 大型機器の開発の最大のポイントは莫大な経費がかかることと、試験に多くの人手を要することにあると云っても過言でない。表-5中の試験方法で取り上げられた項目のすべてが上のいずれかに関する内容である。この内第4項に挙げた *Societe Rateau* の選んだ方法については、むしろその逆のやり方、即ち、小型テストで軸受の基本的な特性を十分に把握し、その後で、大型化への技術を延長し発展させていくのが正統的で且つ成功法と考える。

表-4. 高温ガス冷却炉用の各種大型ガス軸受循環機における使用条件と軸受型式

炉 (所属)	UHTREX (Los Alamos Scientific Lab.)	Dragon (O. E. C. D.)	HTGR (Philadelphia Electric)	THTR (Brown Boveri KruppとKFA)	直接ヘリウムサイクル炉 (Societe Rateau)
熱出力 (MWt)	3	20			
電気出力 (MWe)			40	400	600
ガス	He	He	He	He	He
入口温度 (kg/cm ²)	315.5	~420	332		800
入口圧力 (kg/cm ²)	35.7	~25	21		72.9
流量 (kg/sec)	1.29	1.69			
揚程 (kg/cm ²)	0.68	0.35	0.7		
回転数 (rpm)	12,000	~12,000			3,000
所要馬力 (Hp)	65	77	2,500	2,800	
台数	1	6	1	7	
メーカー	MTI	BBC	GA	BBC	Societe Rateau
型式	静圧軸受付動圧型軸受	両端に3枚のウエッジをもつ円筒軸受*	ティルティンクバンド型*	静圧型 ティルティンクバンド	静圧型 ティルティンクバンド
負荷容量 (kg)	21.8		100		3,000~10,000
材質		窒化鋼			
支持方式		ダイアフラム			
型式	ティルティンクバンド型*				静圧型 ティルティンクバンド
負荷容量 (kg)					
材質					
支持方式		チンバル			
備考	* スラストランナ背面を冷却翼として利用。	* 発用のジャッキアップガス機構付き。	* ジャッキ・アップガスをよる助けを借りる。		

表-5. 高温ガス冷却炉用大型ガス軸受循環機の開発における参照事項

但し、*印を付した内容は小型ガス軸受循環機(表-3)でも取り上げたもの。

項 目	内 容	炉 (循環機)
1. 選 定 理 由	<p>*① 被覆のない燃料要素試験のため、作動ガスであるヘリウムの純度を上げる必要がある。</p> <p>*② 燃料要素試験のため高純度の作動ガスヘリウムが必要である。</p> <p>③ 高温ガス冷却炉では保守点検の難があるもので、20,000 hrの長寿命の循環機が必要となる。</p> <p>④ 高温ガス冷却炉用の循環機における軸受として、ガス潤滑軸受の利点(1次冷却系の汚染を防げる。放射性ガスの外部漏洩がない。軸シールに関する補機を除ける。)を重視する。</p> <p>① チンパル支持のストラスト軸受にフラッタが発生したので、3点の改良(ティルティングピボット支持。ウェッジボケットあるいはグループ付ストラスト軸受、カウンタストラスト軸受。)により対策を講じる。</p> <p>② スラスト軸受がスパーク腐蝕をおこしたので、アースを取ることでより解決した。</p> <p>③ パッドピボット部のタングステンカーバイドが損傷したので、設計変更により解決を計った。</p>	<p>UHTR EX (MTI)</p> <p>HTGR (GA)</p> <p>直接ヘリウムサイクル (Rateau)</p> <p>Dragon (BBC)</p> <p>Dragon (Rateau)</p> <p>UHTR EX (MTI)</p>
3. 改 良 設 計	<p>*① スラストランナ背面を冷却翼として利用する。</p> <p>② モータ室とディフェューザーハウジング間にステンレス鋼製の平板と波板からなる輻射熱をさえぎる遮蔽体を設ける。</p> <p>*③ インペラと軸ハブ間に断熱ピースを挿入する。</p> <p>④ 軸とピース結合部に多数のリセスを設けると同時に冷却ファンを取り付ける。</p> <p>⑤ 軸受ジャッキアップガス系統の簡素化を計る。</p> <p>⑥ 直流プロレキを用いプロア回転停止時間の短縮化をはかり、軸受を保護する。</p>	<p>Dragon (BBC)</p> <p>Dragon (Rateau)</p>
4. 試 験 方 法	<p>*⑦ 循環機を水平から僅か傾けて設置することにより、ストラスト荷重の安定化をはかる。</p> <p>① 実機インペラと同一の慣性モーメントを有するディスクを取り付け、シミュレート試験を行う。</p> <p>② 実際のインペラをつけた圧縮機により、定常時及び事故時における炉内の問題点の調査研究を行う。</p> <p>③ 従来プロアのパーツを流用し、テストのコスト低減につとめる。</p> <p>④ まず、実機適用の大型軸受の使用限界及び可能性を調べ、次に小型軸受により多数のデータ取得と詳細な解析を行う。</p>	<p>Dragon (Rateau)</p> <p>Dragon (BBC)</p> <p>及び THTR (BBC)</p> <p>THTR (BBC)</p> <p>直接ヘリウムサイクル (Rateau)</p>

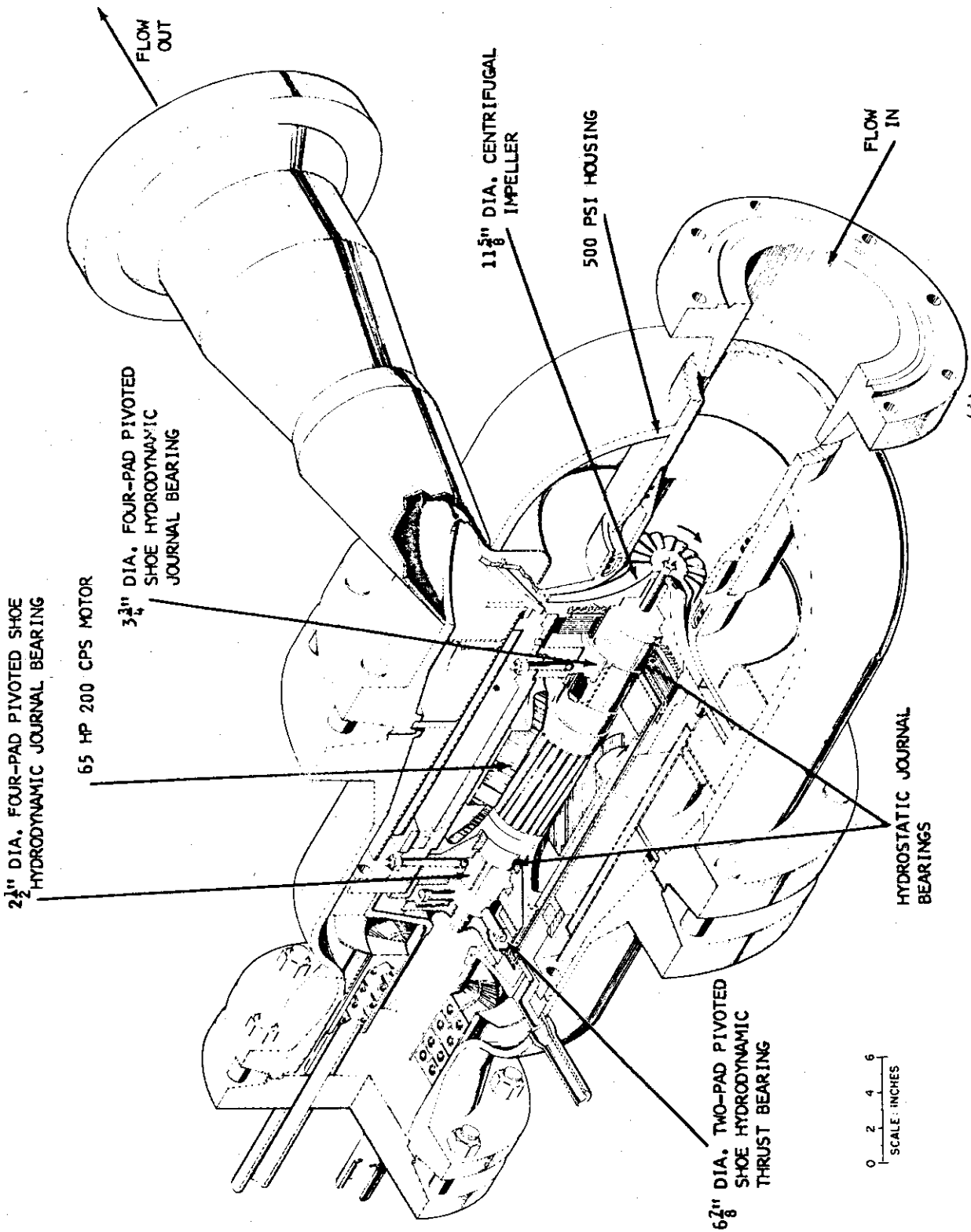


図.12. UHTREX 鋰リウム循環機⁽⁶⁾

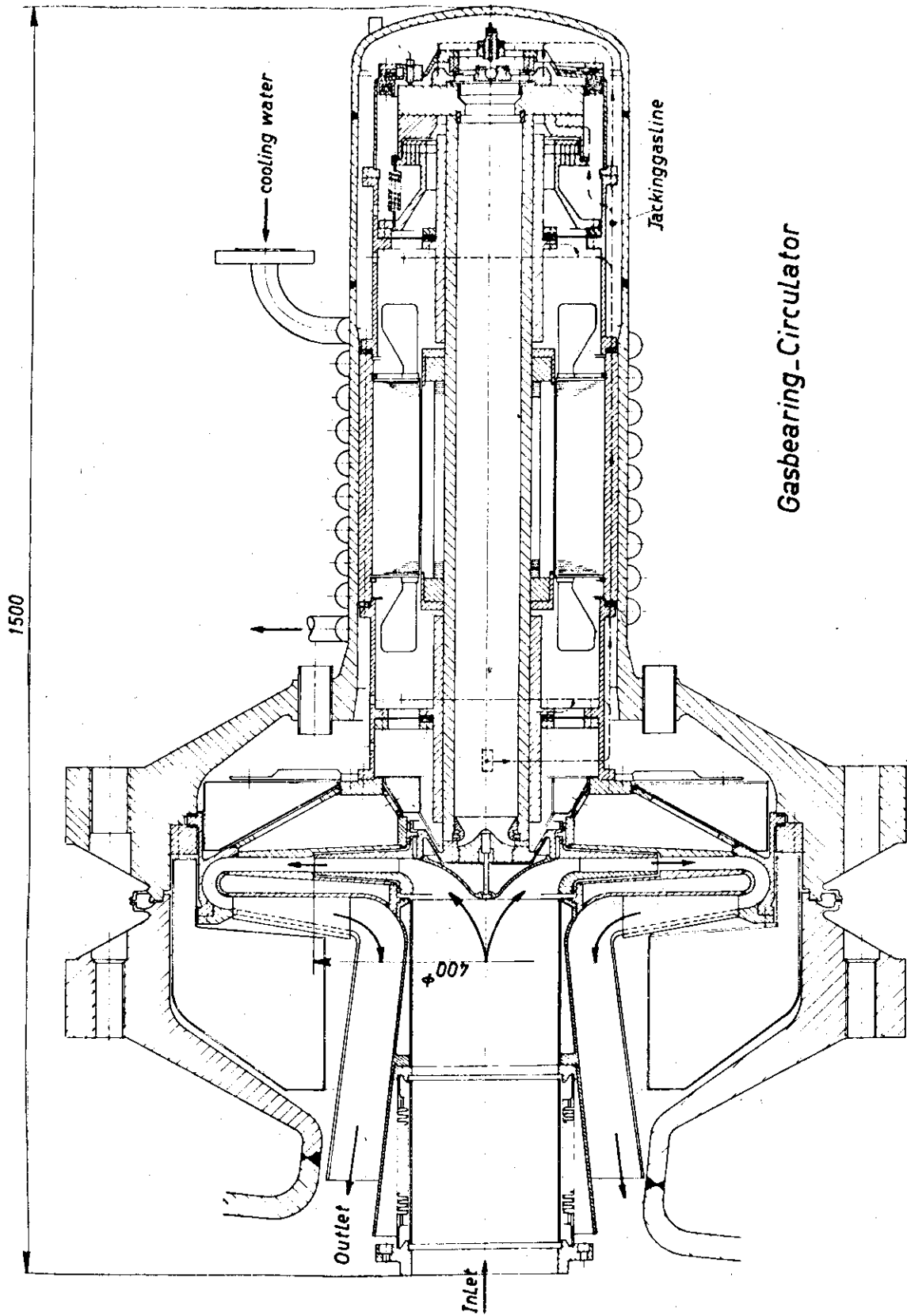


図.13. ガス軸受循環工器機 (13)

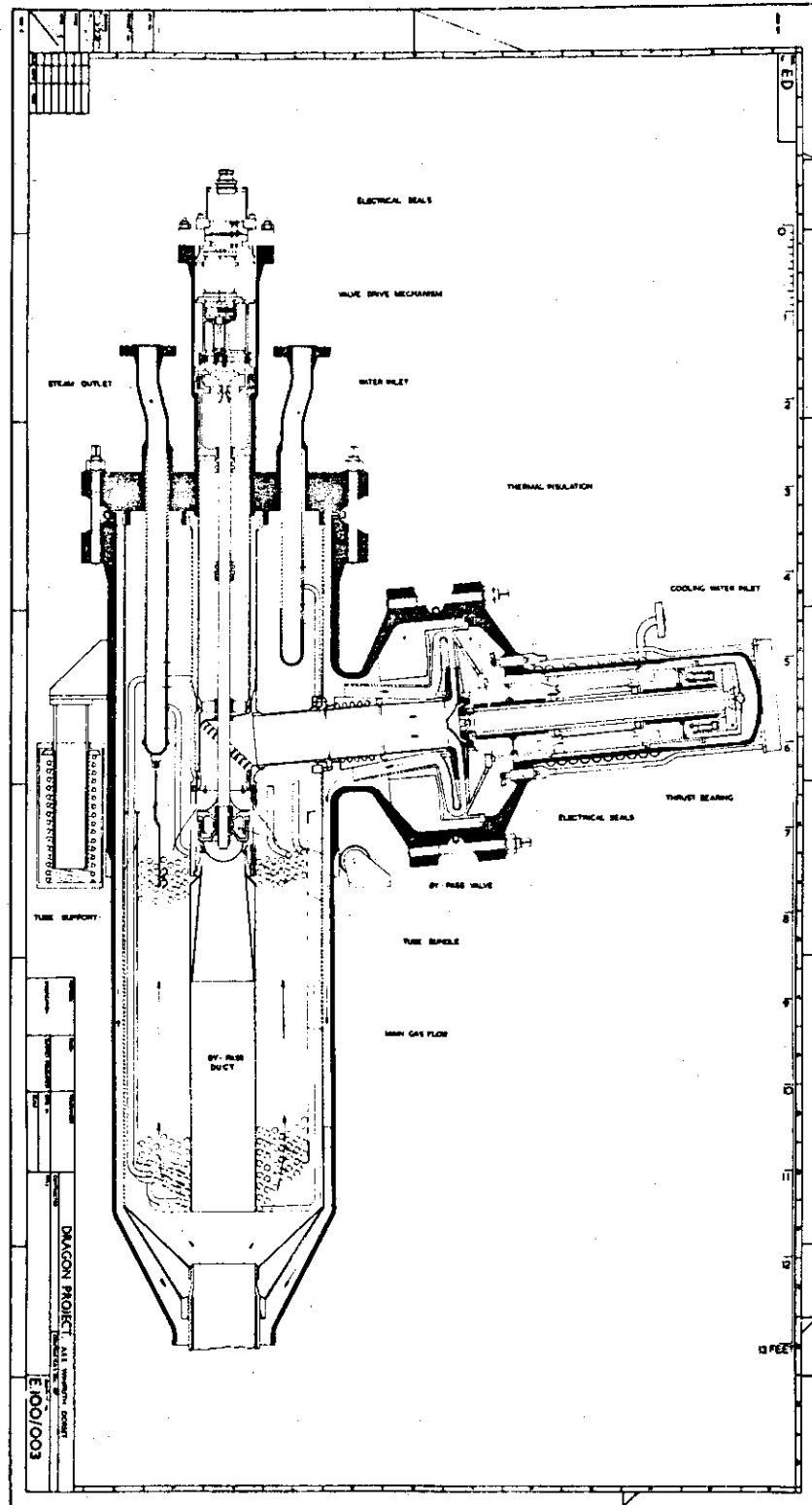
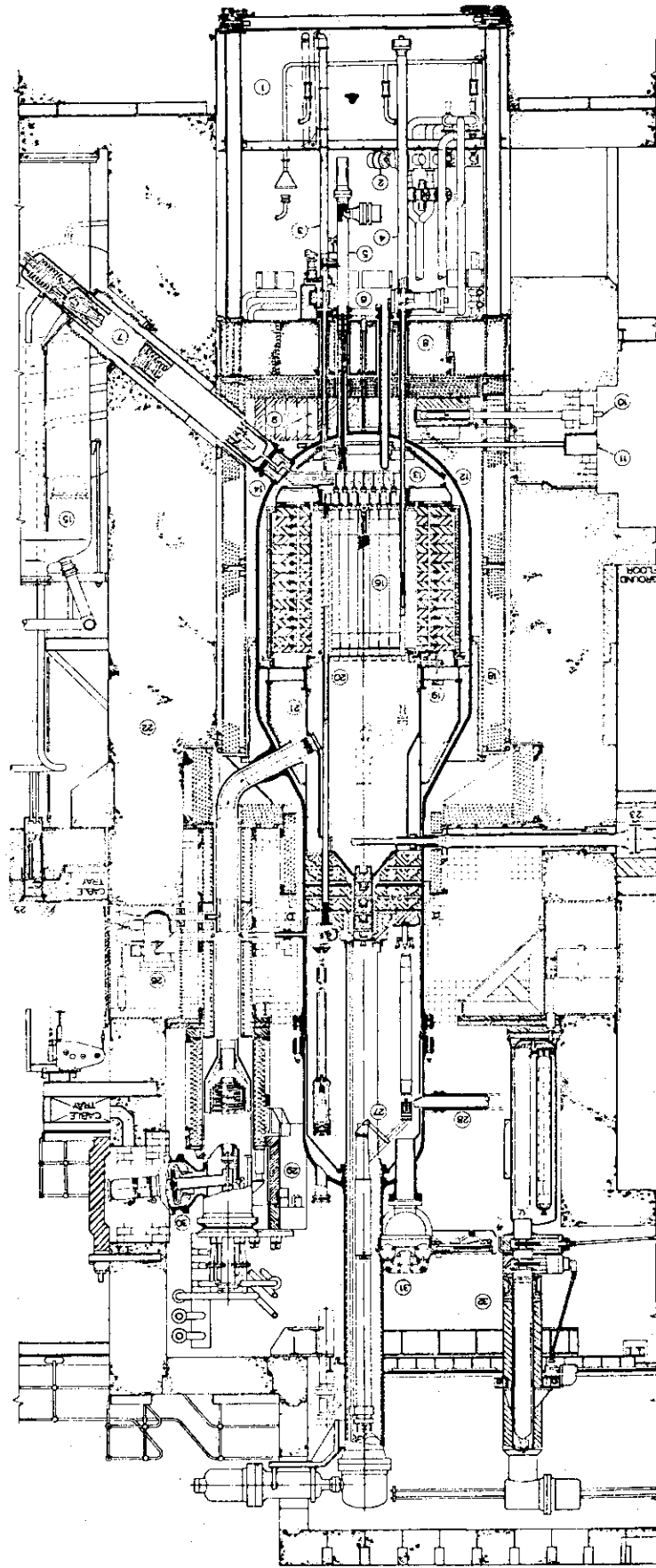


図.14. 熱交換器と循環機の断面図(12)



NO.	INTERNAL CODE	DESCRIPTION
1	1001	LOCAL OPERATING INSTRUMENT
2	1002	LOCAL OPERATING INSTRUMENT
3	1003	LOCAL OPERATING INSTRUMENT
4	1004	LOCAL OPERATING INSTRUMENT
5	1005	LOCAL OPERATING INSTRUMENT
6	1006	LOCAL OPERATING INSTRUMENT
7	1007	LOCAL OPERATING INSTRUMENT
8	1008	LOCAL OPERATING INSTRUMENT
9	1009	LOCAL OPERATING INSTRUMENT
10	1010	LOCAL OPERATING INSTRUMENT
11	1011	LOCAL OPERATING INSTRUMENT
12	1012	LOCAL OPERATING INSTRUMENT
13	1013	LOCAL OPERATING INSTRUMENT
14	1014	LOCAL OPERATING INSTRUMENT
15	1015	LOCAL OPERATING INSTRUMENT
16	1016	LOCAL OPERATING INSTRUMENT
17	1017	LOCAL OPERATING INSTRUMENT

NO.	INTERNAL CODE	DESCRIPTION
1	1001	LOCAL OPERATING INSTRUMENT
2	1002	LOCAL OPERATING INSTRUMENT
3	1003	LOCAL OPERATING INSTRUMENT
4	1004	LOCAL OPERATING INSTRUMENT
5	1005	LOCAL OPERATING INSTRUMENT
6	1006	LOCAL OPERATING INSTRUMENT
7	1007	LOCAL OPERATING INSTRUMENT
8	1008	LOCAL OPERATING INSTRUMENT
9	1009	LOCAL OPERATING INSTRUMENT
10	1010	LOCAL OPERATING INSTRUMENT
11	1011	LOCAL OPERATING INSTRUMENT
12	1012	LOCAL OPERATING INSTRUMENT
13	1013	LOCAL OPERATING INSTRUMENT
14	1014	LOCAL OPERATING INSTRUMENT
15	1015	LOCAL OPERATING INSTRUMENT
16	1016	LOCAL OPERATING INSTRUMENT
17	1017	LOCAL OPERATING INSTRUMENT

図.15. 炉全体配置図 (12)

Caractéristiques

Fluide véhiculé : Helium
 Vitesse de rotation : 12000 l/min
 Po : 203 kg/cm²
 L : 0.8 kg/cm²
 T : 350°C
 T : 356°C
 Puissance absorbée : 120 cv

Societe Rateau

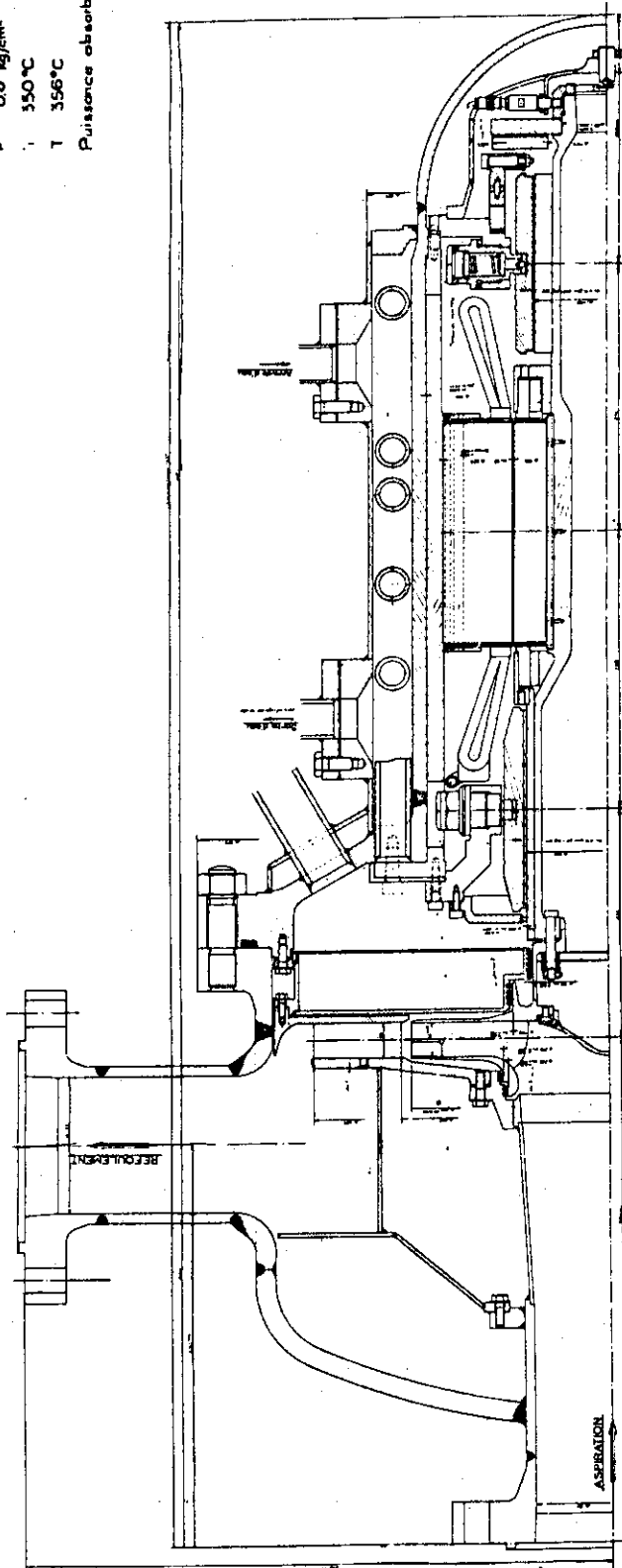


図.16.ドラゴン計画用のヘリウム圧系宿機(15)

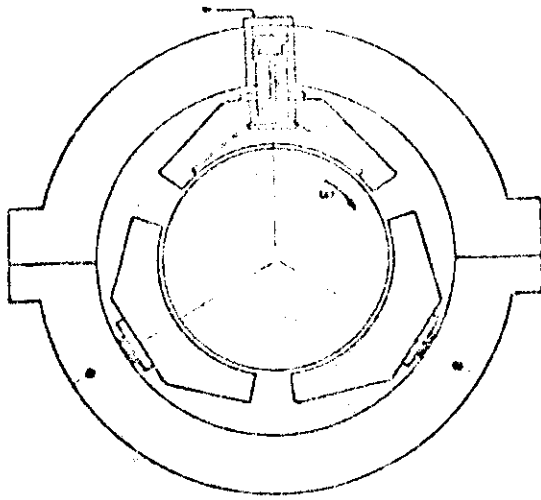


図.17. 3パッド軸受⁽²⁰⁾

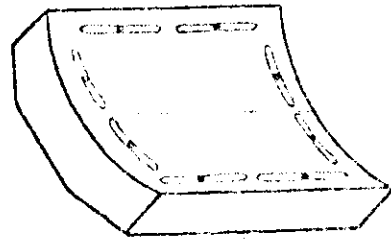


図.18. パッドの作動表面⁽²⁰⁾

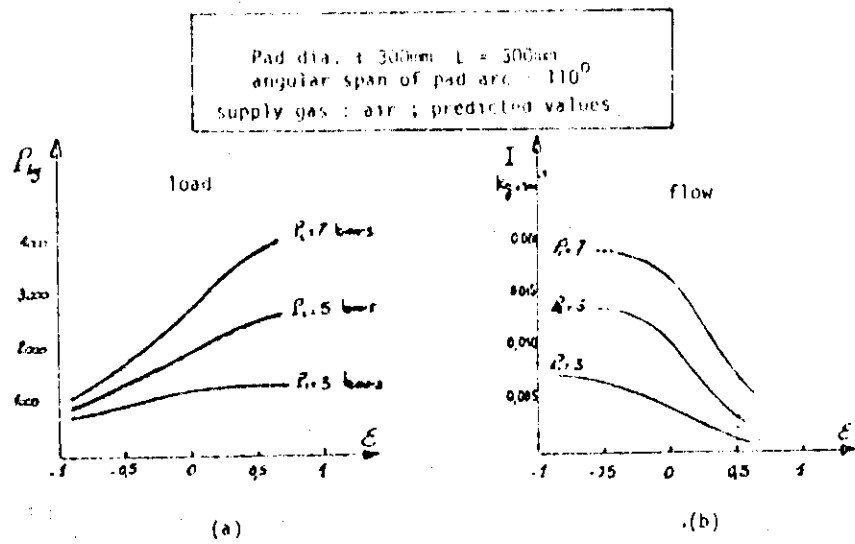


図.19. 軸受の荷重と流量⁽²⁰⁾

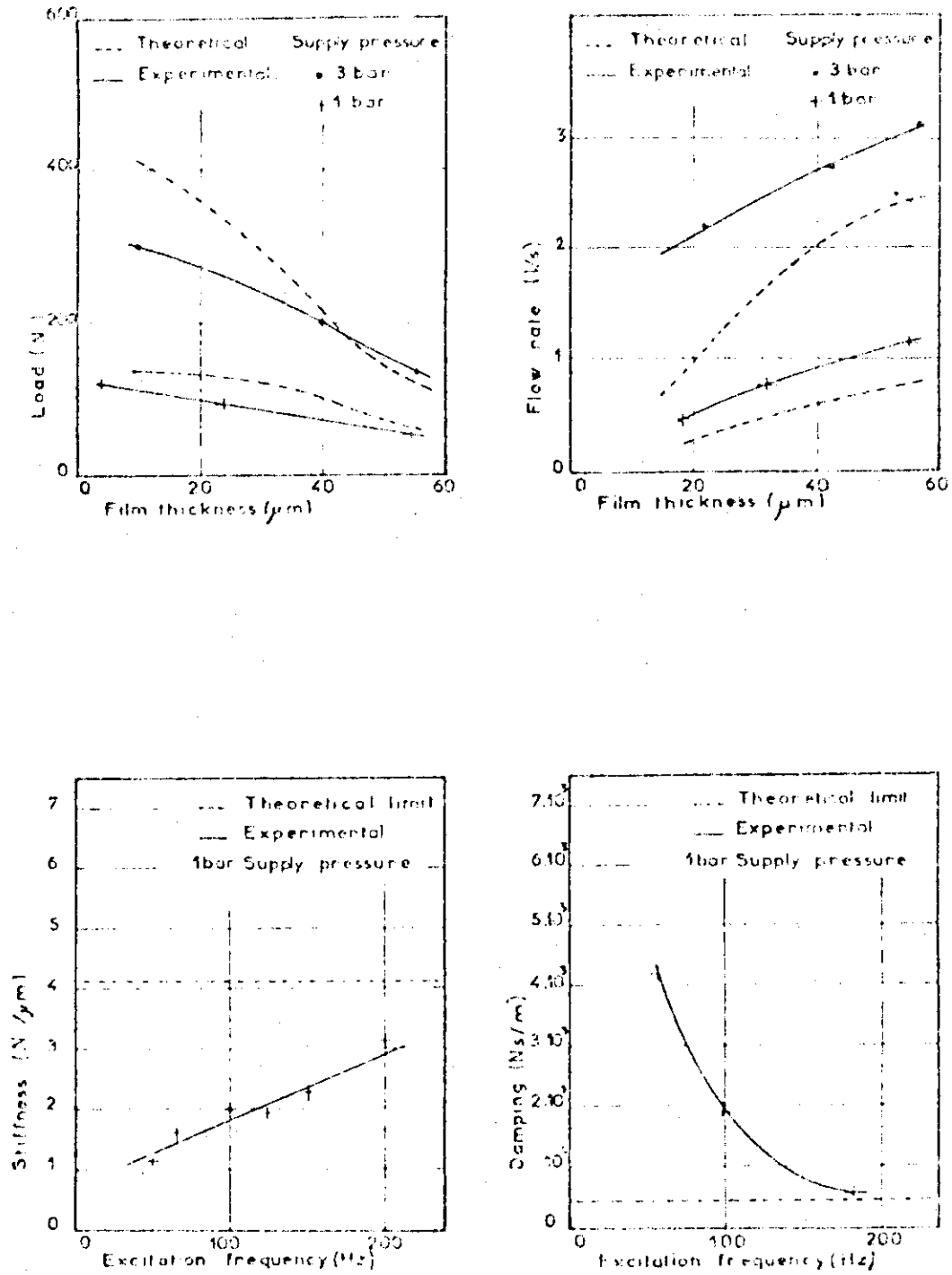


図.20. ジャーナル軸受の性能曲線 (21)

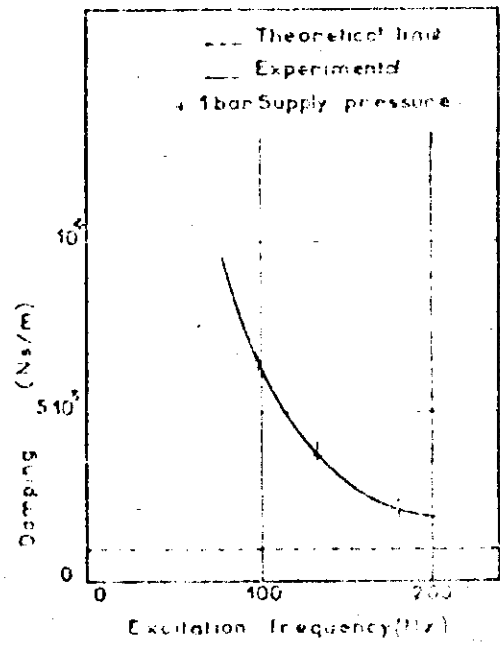
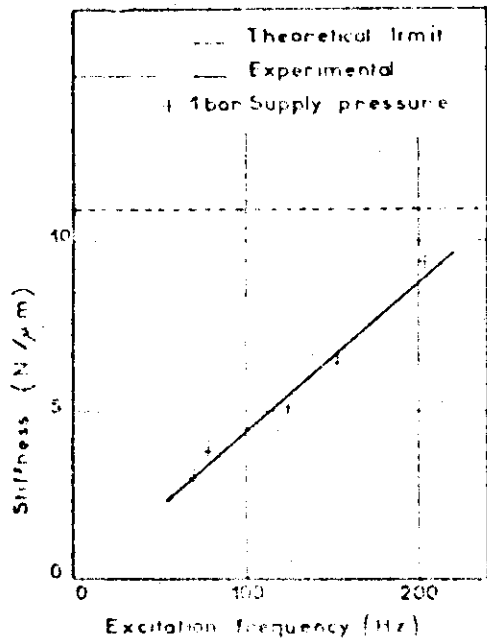
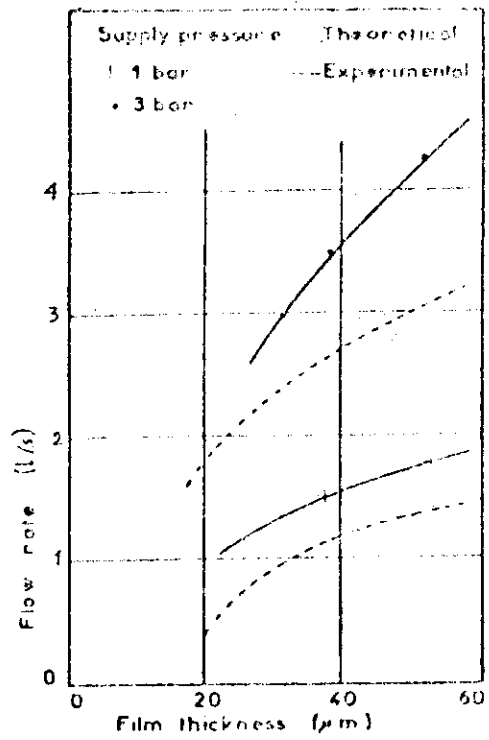
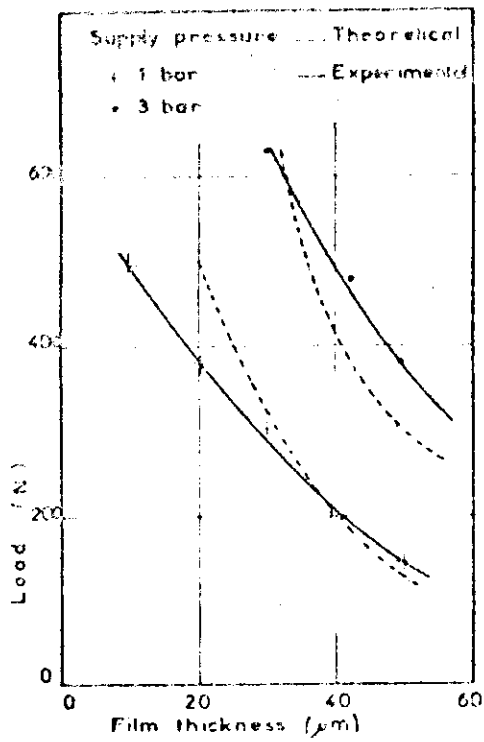


図.21. スラスト軸受の性能曲線 (21)

4. 循環機の安全性に関する検討

極度の安全性を要求する原子炉においては、事故時の状況を解析把握し、それ等のすべてのデータが定められた基準値内に入ることを安全審査で義務付けている。即ち、この内のどの1つの条件でも満足しないものがあれば審査を通過出来ない。

循環機に対する安全設計条件は、表-6に示すように、定格以外に変動時及び事故の特性が与えられている。⁽²²⁾

本章では、上記条件をふまえ、さらに用途に応じた補足条件を加味した上で、ガス軸受循環機に関する安全性を実証するために行われた実験及び対策案につき、取りまとめた。

4.1 ヘリウムテストループでの安全性に関する試験⁽⁹⁾

第2.4.3章で述べたように、the Oak Ridge National Laboratory では、the Bristol Siddeley Engines社製の気体軸受圧縮機を組んだヘリウム試験ループで、循環機の安全性に関する試験を行っている。

循環機の主要諸元を表-7に示す。また、その断面図は第2.4.1章に記述した図-6である。ORN Lテストループのフローダイアグラムを図-22に示す。

主な試験条件は次のようである。

- ・全運転時間 : 770 hr
- ・吸入圧力 : 0.07 ~ 34.5 kg/cm² abs
- ・吸入温度 : 26.6 ~ 315.5°C
- ・回転数 : 4,000 ~ 16,500 rpm

圧縮機の流量-揚程性能曲線さらに総合効率を求めたあと、次のような安全性に関する試験を行っている。

(1) 急減圧試験 (depressurization test)

圧縮機の軸受が損傷をおこさずに運転できるループでの急減圧条件の限界値を求めるために、瞬時に弁を開放しヘリウムを大気へ放出させることにより圧力を下げ、配管破断事故を模擬した試験を行った。

試験条件として、軸と軸受間の接触がおこり易く、軸受の被害が軽くて済む定格回転より低い回転(6,000 rpm)を選んだ。時間に対する圧力降下の状態はSanborn記録計で画かせた。

その結果、圧縮機は8.4 kg/cm²の高い急減圧まで軸受部の接触なく運転可能なることを明らかにした。

(2) 冷却剤喪失試験 (loss of coolant test)

圧縮機への冷却剤喪失がおこった場合に講ずべき処置に必要な時間を明らかにする目的で、15,120 rpmの回転数、ガス圧力と温度が各々21 kg/cm² gauge及び315.5°Cのルー

ブ条件で、冷却水の入口温度を 37.7°C 一定にした後、流量を停止する試験を行った。

その結果、試験を取り止めた限界条件は、軸受温度が 85°C 、ステータの最高温度が 140.5°C の時であった。少なくとも流量停止後 18 分間は、冷却水出口温度が 88°C で前方軸受温度は 82.2°C 、インベラ側ステータ巻線温度は 114.4°C で運転出来たが、スラストランナとプレート間に接触があったことを考慮すれば、安全なのは流量停止後 10 分位の運転であろう。

(3) その他の試験

以上に述べた試験の他に、次のような安全性に関する試験を行った。

- ① 電源喪失試験 (power supply cut off)
- ② 電源回復試験 (power reconnected)
- ③ オーバースピード試験 (overspeed)
- ④ ループ真空試験 (loop evacuated)
- ⑤ 再スタート試験 (restart)
- ⑥ 加振試験 (vibration induced by solenoid)

①は $6,000 \sim 12,000 \text{ rpm}$ での駆動電源が切れた時の試験、⑥は最大振幅 $2.8 \mu\text{m}$ での加振試験であるが、いずれの試験においても軸と軸受間の接触は認められなかった。

4.2 実験炉における循環機の安全性に関する対策⁽¹²⁾

Dragon 炉では、考え得る事故に対する重大な損害を回避するために次のような特色をもつ事故対策を施している。

- (1) 電源喪失事故の場合には、循環機は独立した供給源により運転可能とする。
- (2) 循環機ユニットはループの急激な圧力低下に対し、圧力変化を食い止め、少なくとも 350°C 大気圧下のヘリウム雰囲気中で運転を継続出来るようにする。
- (3) 循環機は定常状態ガス温度 (350°C) より高い 420°C の温度でも運転出来なければならない。
- (4) また、定常時 20 kg/cm^2 よりも高い圧力 24.5 kg/cm^2 で運転出来なければならない。
- (5) インベラの事故があった場合、圧力管を破壊してはならない。
- (6) 循環機は 3°C/sec の温度変化に耐えなければならない。
- (7) 循環機は 350°C の冷却ガス中で急速な発停に耐えなければならない。

図-23 に示す電気供給系統の開発により、上述のいくつかの項目が達成された。

2 系列の可変周波数供給装置の各々が 6 機全部の循環機を全出力で運転させることが出来る。個々の循環機についての回転数制御はなく、すべての運転ユニットが同時にスタートし、同一の回転速度で運転される。通常時はただ一機の可変周波数供給装置 (V. F. G. S.) が作動し、もう一機はスタンバイの状態にある。V. F. G. S. をバックアップするために 2 機の緊急装置 (E. V. F. G. S.) があり、その装置を用いれば全循環機を $4,000 \text{ rpm}$ の回転数まで運転出来る。これ等の緊急装置は次の 3 種類の供給源から補給を受けることが出来る。

- ① 整流された交流供給源。

② 蓄電器（但し、第3の供給源が作動するまでの限られた時間内の供給である。）

③ ディーゼル発電機。

また、事故停止に対して、次のようなシーケンスを組み対応策としている。

(1) 炉が何らかの理由によりスクラムされた時、すべての循環機は定常回転数（12,000 rpm）から1,300 rpmに30秒以内で減速される。

(2) 何らかの理由で1つの循環機が残りのものに比較し速度が変化した場合には、炉は停止されすべての循環機は1,300 rpmに減速した後故障したユニットはさらに停止される。なお、炉は6基の循環機により構成されている。

(3) 故障したユニットを隔離弁により止じ逆流による回転を防止してから、残りの循環機を再び最高回転数まで加速する。

4.3 考 察

高温ガス冷却炉に使用されるガス軸受循環機の安全性に関する試験につき、設計条件として規定されている項目とORNLテストループ及びDragon炉で行われた項目をひとまとめにすると表-8のようになる。

これからVHTR炉の循環機を計画していくにあたり、ガス軸受循環機の検討においては、これ等の項目につき理論解析手法の確立をはかり、さらに試験での補足をあわせ、出来るだけ炉に組み込む前に安全性を立証出来るような方法を見つけ出していくべきと考える。

表-6 安全上の要求条件

作 動 条 件		特 性
定 格 時		長時間 (20,000 hr) の信頼性, 安定性
変 動 時 (起 動) (停 止 時)		温度 50 C/hr, 圧力 1 kg/cm ² /hr (流量: 上記に準ずる)
事 故 時	電 源 喪 失 (power trip)	流量 100% → 1.5% / 10秒 1.5% アイドリング (緊急電源)
	主 配 管 破 断 (loss of coolant)	圧力 100% → 10% / 10秒 流量 100% → 10% / 10秒
	反 応 度 挿 入 (reactivity insertion)	出口ガス温度上昇 200°C / 20秒

表-7 Bristol Siddeley Engines, Ltd 製 Experimental Gas-Bearing Compressor 諸元

1. 翼の型式 及び諸元	(1) 遠心式単段型ユニット (2) オープン・フェース, 半径流型インペラ (3) インペラ直径 = 8.75 in (222 mm)
2. 圧縮機の性能	(1) 作動流体: ヘリウム (2) 流量: 0.55 lb / sec (3) 揚程: 4.8 psi (0.336 kg / cm ²) (4) 吸入圧力: 406 psia (28.4 kg / cm ²) (5) ガス温度: 600°F (315.5°C)
3. 圧縮機の寸法	(1) 長さ: 35.875 in (911 mm) (2) 高さ: 20.875 in (530 mm) (3) 幅: 19.875 in (505 mm)
4. 電動機	(1) 相×極: 3相×2極 (2) 型式: かご型 (3) 馬力: 30 hp (4) 回転数: 15,050 rpm (5) 制御方法: 周波数変調 (1.5 ボルト / サイクル)
5. ジャーナル 軸受の諸元	(1) 潤滑剤: ヘリウム (2) 型式: 動圧ナット・クラッカ型 (上部セグメントは軸受に対し調節可能) (3) 直径軸受すきま (平常): 0.002 in (50.8 μm) (4) 360° 軸受を切断して2個のシューを作る (下部セグメント ≲ 240°, 上部 120°) (5) L / D = 2.6 (6) 支持方式 { (a) 下部軸受はダイヤフラムに装着 (自動調心) 。 (b) 上部軸受はコニカル・リセス内にピボット・ボールで支持。 (7) 軸受面圧: 1.74 psi (0.12 kg / cm ²) (8) 上部シューのクリアランスはスクリューで調節 (ホワール防止)
6. スラスト軸受 の諸元	(1) 潤滑剤: ヘリウム (2) 型式: 動圧型スパイラルグループ (3) 支持方式: 固定プレートをジンバル支持
7. 冷却方式	(1) 電動機のステータを水冷却 (外殻外側にあるスパイラル状ジャケットにより水冷) (2) 中空軸と水冷外殻を通り, ヘリウムを強制循環 (3) 輻射熱の遮断 (4) 渦巻室から電動機空間への熱を低熱伝導金属を組込むことにより減少
8. 計測項目	(1) 熱電対 { (a) 熱遮断の裏側表面 (b) 前方軸受の中央部 (c) 前方軸受の外側端部 (d) ステータ巻線の前方端部 (2) 軸受接触指示計 (6 ボルト直流電源, 0.5 MΩ 可変抵抗, 20 μ アンペア電流計, スプリング負荷カーボンブラシ) (3) 回転計 (固定コイル, 回転磁石)

表-8 高温ガス冷却炉用のガス軸受循環機に関する安全性の試験

試験項目	ORNL	テストグループ	Dragon炉
<p>安全設計条件</p> <p>1. 定格時 (20,000 hr)</p> <p>2. 変動時 (50°C/hr)</p> <p>3. " (1%/hr)</p> <p>4. 電源喪失 (流量100%→1.5%/10秒)</p> <p>5. 主配管破断 (圧力100%→10%/10秒)</p> <p>6. " (流量100%→10%/10秒)</p> <p>7. 反応度挿入 (200°C/20秒)</p>	<p>○</p> <p>○</p> <p>○</p> <p>○</p> <p>○</p> <p>○</p>	<p>○</p> <p>○</p> <p>○</p> <p>○</p> <p>○</p> <p>○</p>	<p>○</p> <p>○</p> <p>○</p> <p>○</p> <p>○</p> <p>○</p>
<p>その他の条件</p> <p>8. 冷却剤喪失</p> <p>9. 電源回復</p> <p>10. オーバースピート</p> <p>11. 再スタート</p> <p>12. 加振</p> <p>13. 120%ガス温度</p> <p>14. 120%ガス圧力</p> <p>15. インペラ破壊</p> <p>16. ループ真空</p>	<p>○</p> <p>○</p> <p>○</p> <p>○</p> <p>○</p> <p>○</p> <p>○</p> <p>○</p> <p>○</p> <p>○</p> <p>○</p>	<p>○</p> <p>○</p> <p>○</p> <p>○</p> <p>○</p> <p>○</p> <p>○</p> <p>○</p> <p>○</p> <p>○</p> <p>○</p>	<p>○</p> <p>○</p> <p>○</p> <p>○</p> <p>○</p> <p>○</p> <p>○</p> <p>○</p> <p>○</p> <p>○</p> <p>○</p>

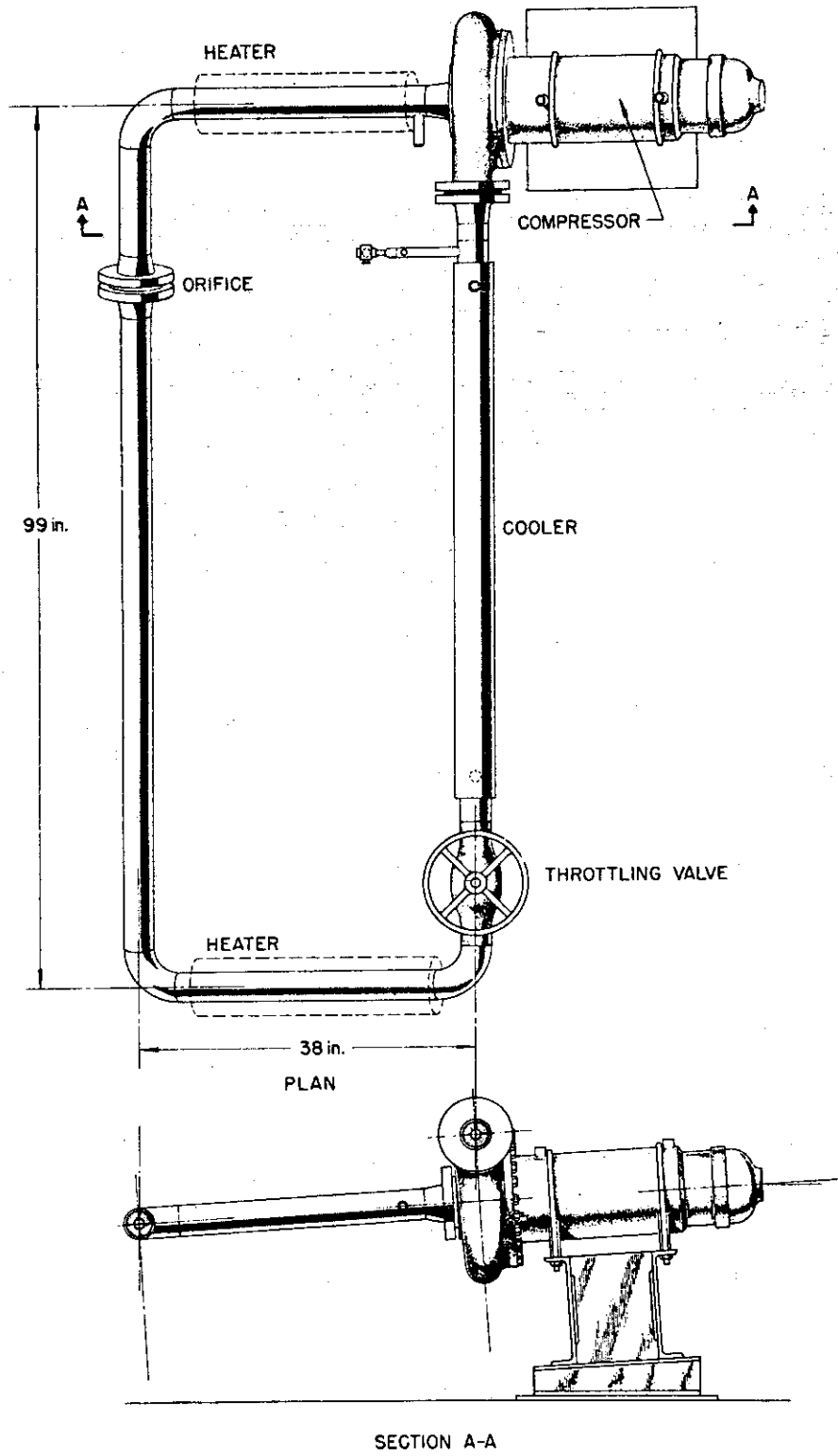
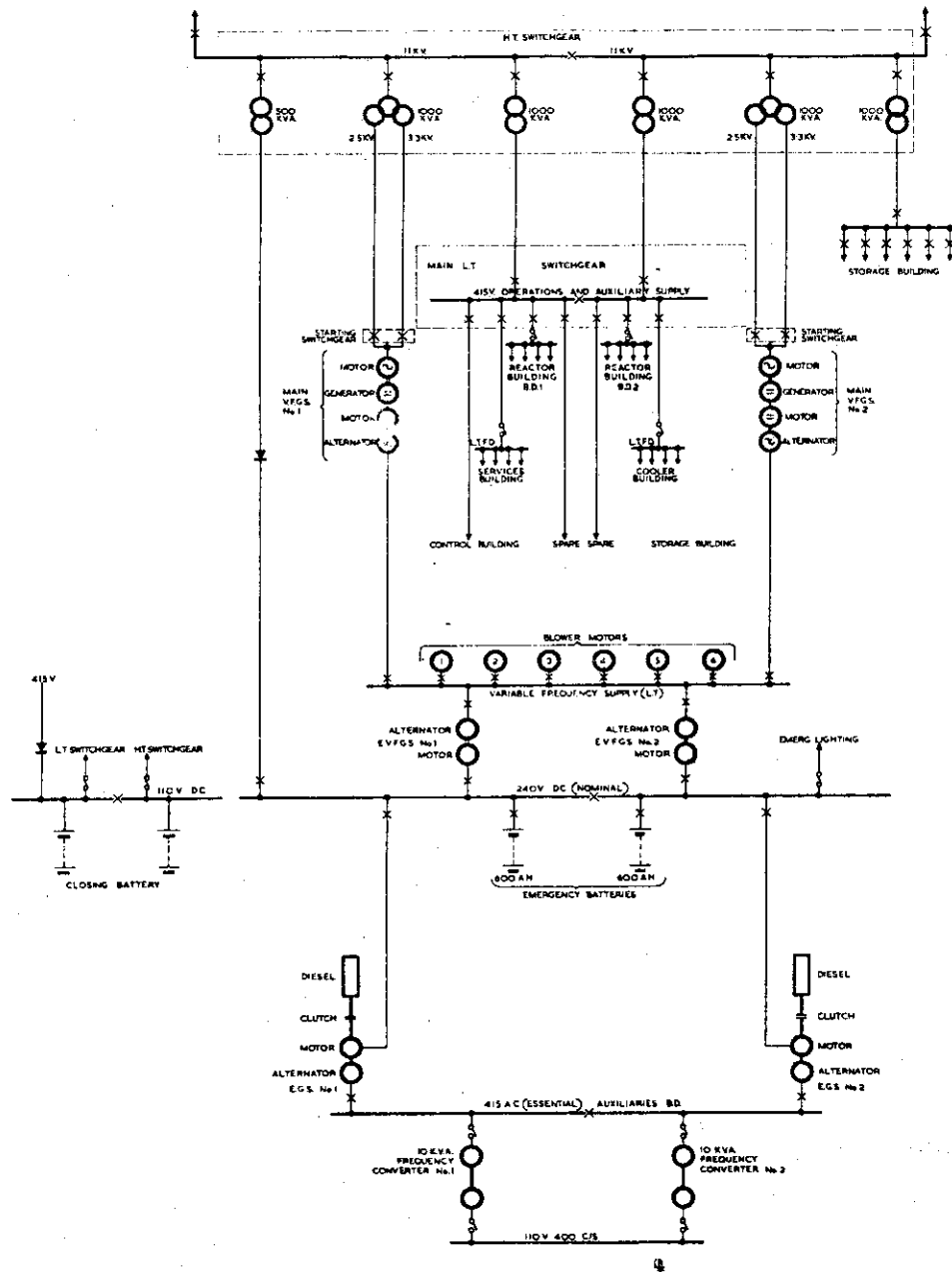


図.22. Bristol-Siddeley 圧縮機 1L-7⁽⁹⁾



LEGEND:-
 VFGS- VARIABLE FREQUENCY GENERATING SET.
 EVFGS- EMERGENCY VARIABLE FREQUENCY GENERATING SET
 LT.FD- LOW TENSION FUSE DISTRIBUTION BOARD
 LOCATED IN THE SERVICES BUILDING (ALL OTHERS ARE LOCAL)
 EGS- EMERGENCY GENERATING SET.

図.23. 電気回路 (12)

5. 結 言

高温ガス冷却炉用の循環機として多くの利点をもつプロセス流体潤滑のガス軸受サーキュレータにつき、実用または計画中のテストループをはじめ実験炉や実証炉の補機ないしは主冷却機を調査検討し次のような成果を得た。

(1) 高温ガス冷却炉研究のためのテストループや原子炉補機として用いられている小型ガス軸受循環機を所有している機関には、General Atomic 社、General Electric 社及び O. E. C. D. 等の HTGR 開発機関と、Los Alamos 科学研究所、Oak Ridge 国立研究所等の研究機関がある。

(2) また、小型ガス軸受循環機メーカーとしては、de Havilland Engine Company, Bristol-Siddeley Engines Ltd, Societe Rateau, General Electric Company 等の重工業メーカーと、Mechanical Technology Incorporated, Continental Bearing Research Corporation 等の軸受専門メーカーがある。

(3) このような小型循環機に適用されているガス軸受は軸受給気源等の付属設備を必要としない動圧型が主流をしめている。ジャーナル軸受としては高速安定性のあるナットクラッカ型やティティングパッド型、スラスト軸受としては負荷容量の優れているスパイラルグループ型や自動調心性のあるティルティングパッド型が使用されている。

(4) これ等の実用機種の使用条件は、ガス温度及び圧力ともに $300\sim 400^{\circ}\text{C}$ 、 $\sim 35\text{ kg/cm}^2$ と VHTR の計画条件 400°C 、 40 kg/cm^2 よりやや低く、多目的高温ガス実験炉の開発にガス軸受循環機を採用する場合には確認試験を欠かすことが出来ない。

(5) 高温ガス冷却炉用の主冷却プロアとして、大型ガス軸受循環機が UHTREX 炉 (3MWt) や Dragon 炉 (20 MWt) のような実験炉に実用化され、さらに、HTGR 炉 (40 MWe)、THTR 炉 (400 MWe) 及び直接ヘリウムサイクル炉 (600 MWe) のような実証炉用に計画されている。

(6) この内、UHTREX 炉用主循環機が MTI 社製、Dragon 炉用メインサーキュレータが BBC 社製及び Societe Rateau 社製である。いずれも 60~120HP 程度の中型プロアであり動圧型軸受を採用している。但し、発停時の軸受負荷容量不足を補うために専用の静圧軸受ないしはジャッキアップガス機構をそなえている。

(7) Dragon 炉用ガス軸受循環機において、BBC 社のガス軸受は負荷容量の優れた円筒型軸受を基本に軸受両端にウェッジを切り高速安定性を増す思想にもとづいており、Societe Rateau 社のガス軸受は本質的に高速安定性の高いティルティングパッド軸受を採用し、負荷能力不足を 3 枚パッドでしかも軸径の増大により補う思想によったものである。

(8) 大型ガス軸受循環機 (2,000~3,000HP) の開発計画をもつメーカーとしては、HTGR 炉の GA 社、Dragon 炉用ガス軸受循環機の実績をもつ、THTR 炉の BBC 社及び直接ガスサイクル炉の Societe Rateau 社がある。この内、Societe Rateau 社は直径 300 mm の大型ガス軸受につき基礎試験を行い、負荷容量、ニューマティックハンマ及び高速安定性に関する性能を確認し、充分実用に耐えることを証明している。

(9) 小型ガス軸受サーキュレータの開発の要点は、動圧型ガス軸受と高周波モータの研究にある。動圧型ガス軸受に関する技術は実用化まで漕ぎつけているが、国産の高温ガス冷却用循環機は未開発であり、今後のHTGRの開発テンポにしたがいそのニーズに応ずるためには、まず、設計チャートの整備が必須と考える。

(10) 一方、実証炉用の大型ガス軸受サーキュレータの開発はこれからであり、HTGR炉循環機の新発メーカーであるBBC, Rateau, GA等でも計画ないしは基礎研究の段階である。この開発のポイントは大容量かつ高速安定性のある大型ガス軸受の研究にあり、その型式は静圧型ガス軸受となるであろう。国内でもこれから力を入れて研究開発に取り組むべきテーマである。

(11) 各社のガス軸受循環機の開発において起った主なトラブルを総合すると、巻線型モータの高速時における遠心膨張によるリングの破損、シンバル型スラスト軸受の追従性不足から来た接触事故、スラスト軸受のスパーク腐蝕、また、ジャーナル軸受に関しては、異物あるいは水分の混入による軸受の摩耗、ティルティングパッドピボット部の摩耗等があり、いずれも高周波電動機が軸受についての事故である。これ等の事実からも言えるように、ガス軸受循環機開発上の最大のテーマはガス軸受と高周波モータにある。

(12) ガス軸受循環機の開発過程において、多くの改良や工夫がなされて来た。その主なものは、フロアへの高温作動ガスに対する各パーツの耐熱性の維持や熱変形の減少をはかるためになされた、ステンレス鋼製の波板構造によるヘリウムガス輻射熱の遮蔽体、フロアと軸ハブ間にもうけた断熱ピース、モータと軸受を冷却する小型ファン、冷却水ジャケット、及び高温用セラミック等の利用である。

また、中型ガス軸受フロアにおいては新たに加わった発停用のジャッキアップガス機構の簡素化に重点がおかれている。

その他、熱電対による軸受接触を感知するためのモニタ、起動を容易にするためのスターティングトランス、軸受の摩耗を減少させる直流ブレーキ、運転の安定性を増す僅かな角度もうけた循環機の水平取り付け等の配慮により、機器の信頼性及び耐久性の向上に勤めている。

(13) その他、動圧型ガス軸受を用いた小型循環機特有の問題である、発停時の軸と軸受間の摩耗寿命の延長をはかった軸受材料試験はこれからも継続すべき重要なテーマである。

(14) 大型ガス軸受循環機の開発に必要な莫大な費用の節約をねらった試験機の構造及び製作方法あるいは試験方法は開発のスタートにあたり充分計画検討すべき項目である。かつ、小型ガス軸受循環機のコスト低減もその普及にあたり努力すべき課題である。

(15) 一般機械と異なり、原子力機器においては安全性を格段に重視する必要がある。HTGRに関する安全設計条件として定常時の他に変動時及び事故時（電源喪失、主配管破断、反応度挿入）に対し規定が作成されている。

この他に、従来のHTGR用ガス軸受循環機開発に、テストループや実験炉を用いて、冷却剤喪失、加振、オーバースピード、再スタート、電源回復、ループ真空及びインペラ破壊等の安全性確認試験が行われている。

(16) HTGR用循環機的设计製作及び開発に際し、今迄は定常時における特性の把握に重点がおかれて来たが、これからは機器の信頼性増加をはかるために、過渡時の特性解析にも多くの努力をはらう必要がある。

参考文献

- (1) JAERI-M 7015
“原子力関係の軸受に関する文献調査”, (1977) 根本政明, 岡本芳三。
- (2) TID-7631
“Performance of a Gas Bearing Compressor in the General Atomic HTGR In-Pile Loop”, (1962) R. Stella
- (3) TID-7604
“The Plutonium Recycle Test Reactor Gas-Loop”, (1959)
J. F. Fletcher
- (4) TID-7631
“Operating Experiences with Gas Bearing Circulators in an In-Reactor Test Loop”, (1962) E. C. Bennett
- (5) TID-7604
“Seal Problems of the Turret Reactor Equipment”, (1959)
W. E. Crowe
- (6) TID-7690
“Development of UHTREX Gas-Bearing Compressors”, (1963)
pp. 253 - 262
- (7) TID-7690
“Gas-Bearing Blower Manufactured by Societe Rateau for the Ultra High Temperature Reactor Experiment”, (1963) pp. 365 - 370
W. E. Crowe
- (8) TID-7604
“Development of Small Compressors for Gas-Cooled In-Pile Loops”, (1959) A. G. Grindell
- (9) TID-7631
“Operating Characteristics of Gas-Bearing Compressors Built by Bristol Siddeley Engines, Ltd”, (1962) D. L. Gray
- (10) TID-7631
“A High-Temperature Motor Test Unit Utilizing Gas-Bearings”, (1962) J. Cherubim and S. Abramovitz
- (11) TID-7631
“Gas Bearing Development at the Societe Rateau”, (1962)
J. S. Chaboseau and C. Mech
- (12) TID-7690
“The Role of Gas-Bearing Circulators in the Dragon Reactor”, (1963) pp. 207 - 218 W. F. Shillings

- (13) TID-7690
 "Description and Performance of the Primary Circulators for the O. E. C. D. High Temperature Reactor Project Dragon, England", (1963) pp. 189-206 H. Baumann
- (14) "Totally Enclosed Blowers with Gas-Lubricated Bearings", (Proc. Instn Mech Engrs 1966-67) N. A. VanZijl and J. Eggmann
- (15) TID-7690
 "Experience of Societe Rateau in the Construction and Operation of Gas-Bearing Compressors", (1963) pp. 219-235 J. P. Chaboseau and C. Mech
- (16) TID-7690
 "Development and Prospect of Multi-Pad Type Gas-Bearings", (1963) pp. 263-272 J. P. Chaboseau and C. Mech
- (17) TID-7604
 "HTGR Seal Problems", (1959) P. H. Monroe
- (18) "Gaslagergebläse", (Neue Technik Vol. 10, 1968 pp. 112-117) H. Baumann
- (19) "Application des paliers a gaz hydrostatiques de grosse capacité aux turbomachines d'un cycle nucléaire direct á hélium", (Bull. Inform. A. T. E. N. 1970 Vol. 83) C. Mech and J. Poulain
- (20) "Gas-Bearings for Turbomachines", (Gas-Bearing Symposium, 1971) C. Mech and J. H. Anspach
- (21) "Externally Pressurized Gas-Bearings for High Speed Turbomachines", (Gas-Bearing Symposium, 1974) C. Mech and J. P. Besse
- (22) "設計実例 7 「原子炉」", (機械設計, 1976 Vol. 20 No. 6 pp. 47-50) 岡本芳三