

■ 技術報告 ■

スターリングサイクル機器の開発と応用

Development Status and Its Applications of Stirling Cycle Machine

菅波拓也*

Takuya Suganami

1. まえがき

スターリングエンジンは高効率・低公害な外燃機関として、ここ10数年の間で技術的にも大きく進歩した。さらに、スターリングエンジンの逆サイクルであるスターリング冷凍機についても、その高効率・小型軽量といった利点を生かして低温分野で新しい技術開発が進行中である。

本文はスターリングサイクルのエンジンおよび冷凍機の特長や可能性について説明し、その最新の開発状況について報告する。

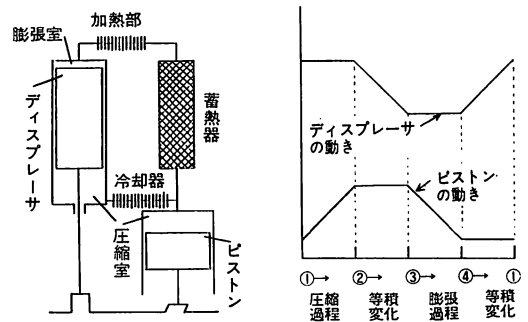
2. スターリングサイクルとは

スターリングサイクルは密閉したガスを外部から加熱冷却することによって、膨張させたり圧縮したりして構成する熱力学的サイクルである。熱力学的サイクルであるので熱エネルギーを動力に変換する、すなわちエンジンとして作動させることもできるし、逆に、動力を与えて低温を作り出す、すなわち冷凍機として作動させることもできる。ここでは、エンジンの場合を例にあげて簡単にその動作を説明することにする。

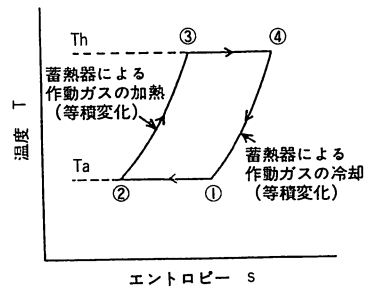
図-1はディスプレイ型スターリングエンジンの原理構成図とこのサイクルのT-s線図を示す。スターリングエンジンは2つのピストンで圧縮室と膨張室を作り、その間に蓄熱器を配して構成される。以下にこのエンジンプロセスについて説明しよう。

①から②の過程では、ディスプレイは上部にある状態、すなわち、膨張室の容積は零の状態ではピストンが上昇する。したがって、内部の作動ガスは圧縮され圧力が上昇する。圧縮熱はシリンダの表面から放熱され温度は一定に保たれる。

②から③の過程では、ピストンは静止した状態でディスプレイが動き、圧縮室のガスは蓄熱器を通



(a) 原理構成図



(b) T-s線図

図-1 スターリングエンジンの動作

って加熱され膨張室に移る。この過程は、ディスプレイが位置を変えただけであり等積変化となる。

③から④の過程では、ディスプレイは下に位置した状態で、作動ガスは外部加熱源から熱を得てピストンを上死点から下死点に動かして仕事をする。

④から①の過程では、ピストンは下死点に静止した状態のままディスプレイが下から上に動く。このため、膨張室のガスは蓄熱器を通して冷却されながら圧縮室に移送される。

以上の過程をT-s線図に表せば図-1(b)のようになる。スターリングサイクルの効率は、高温熱源 T_h と低温熱源 T_c の熱機関として考えれば、熱力学的に最高の効率であるカルノーサイクルの効率と等しくなる。このエンジンの効率には蓄熱器の役割がきわめて重要

*三菱電機(株)中央研究所エネルギー研究部次長
〒661 尼崎市塚口本町8丁目1-1

である。蓄熱器は作動ガスの熱エネルギーを蓄えたり、作動ガスに熱エネルギーを放出したりしながら熱の授受をおこなう。このため、蓄熱器のことを再生器ともいう。

3. エンジンの開発と応用

スターリングエンジンの特長や実証されている性能について紹介し、このエンジンの応用システムの開発状況を以下に報告する。なお、内容的には重複する部分もあるがエンジンについての解説報告^{1,2)}もあるので御参考としていただきたい。

3.1 エンジンの特長

- ①燃料の多様性；スターリングエンジンは外燃機関であり、アルコールなどの液体燃料および天然ガスなどの気体燃料は勿論のこと、固体燃料さらには太陽熱、ラジオアイソトープの使用も可能なエンジンである。
- ②高効率；スターリングエンジンは、前章で説明したように高い熱効率が期待できる。
- ③低公害；内燃機関に見られる爆発行程がないためエンジンの騒音レベルは低い。さらに、クローズドサイクルであるため外部に排気する行程を熱力学的に持たない。外部加熱にバーナを使用する場合でもバーナの排ガスの制御と浄化は容易である。
- ④エンジン排熱が利用しやすい；熱機関として外部に熱を放出する冷却器を有しており、エンジン排熱は冷却水の循環によっておこなわれる。このため、エンジンの排熱が集中しているのでこれを利用しやすい。
- ⑤高信頼性；内燃機関では定期的に潤滑油を交換または補給する必要があるが、スターリングエンジンでは、潤滑油は高温にさらされないため劣化もなく長寿命である。
- ⑥出力制御幅が大きい；ガスサイクル機関であるため温度・圧力を任意に設定できる。このため、出力のレベルを温度や圧力によって広範囲に制御できる。以上がこのエンジンの特長である。しかしながら、次に述べる諸点はこのエンジンの課題といえよう。
- ①大出力化；スターリングエンジンの大出力化には作動ガスの高圧化と高速・高圧縮比での運転が有効である。しかしながら、高圧化では材料強度的な制約から10MPa前後で設計されるのが普通である。また、高速化にともなって作動ガスが往復流動する損失が大きくなり効率が低下する。このため、エン

ジンの出力としては小・中容量で数10kW以下が適している。

- ②小型化；外燃機関であるため外部加熱装置が必要となる。このため、エンジンのサイズとしては内燃機関よりやや大きくなる。
- ③出力応答性；エンジンの出力は作動ガスの圧力を変化させることによって、大きな負荷変動にも応答できる。しかしながら、外燃機関であるため、急激な負荷変動に対する応答性は内燃機関に劣ると考えられる。

3.2 エンジンの型式

これまでに、種々の型式のスターリングエンジンが開発されており、ここでは簡単にその型式について説明しておこう。図-2にそれぞれのエンジンの構成の仕方を示す。

(1) ディスプレーサ型

膨張室と圧縮室の中間にディスプレーサを配置したものをディスプレーサ型と呼ぶ。ディスプレーサ型には図-1のように2つのシリンダで構成するものと図-2(a)に示すように1つのシリンダで構成するものがある。軸の1回転に対応して1サイクルを描く。このため、比較的小出力(10kW程度以下)に適している。他の

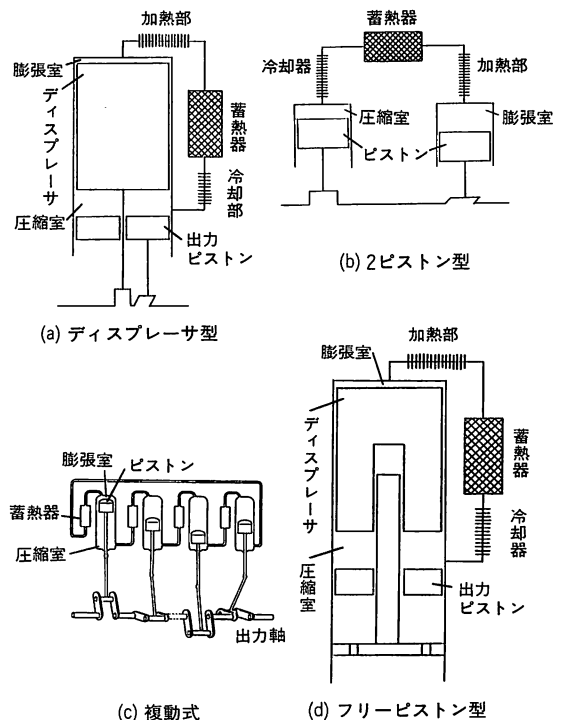


図-2 エンジンの型式

型式と比較して機械損失を小さく、圧力比を高くできる。ディスプレイサピストンと出力ピストンは90°程度の位相差を持ってクランク軸に取り付けられている。

(2) 2ピストン型

2つのピストンと2つのシリンダによって図-2(b)のように構成されるエンジンである。軸の1回転に対応して1サイクルを描くことはディスプレイサ型と同じであるが、エンジンの高さを小さくできるなど寸法配分に自由度がある。エンジンの出力としてはディスプレイサ型と同じく小出力に適したものである。

(3) 複動式

4つのシリンダとピストンによって構成される膨張室と圧縮室を順次つなぎ、各ピストンが90°づつ位相を変えて出力軸に結合されたものを複動式(ダブルアクティング)と呼ぶ。その構成の一例を図-2(c)に示す。軸1回転に対して4つのサイクルが完了することになり出力のトルク変動は小さい。このため、複動式は数10kWの中出力に適する。

(4) フリーピストン型

フリーピストン型と呼ばれるものは基本的にはディスプレイサ型と同じである。これまで説明したものはピストンがクランク機構によって駆動されるため、そのストロークや位相が一定であるのに対し、フリーピストン型ではこの機械的な結合をほどこき、図-2(d)に示すような構成をとる。ディスプレイサとピストンの位相は共振を利用して与えるために運転周波数を適切に

設定することが必要である。また、ピストンの出力は振幅の変化する往復動となるのでリニア発電機で取り出すのが便利である。フリーピストン型は、①構造が簡単となること、②ピストンに側方向の力が作用しないので無潤滑で作動させることができるなどの特長がある。しかしながら、エンジンの出力制御や効率の面では不利である。

3.3 エンジン性能

スターリングエンジンの開発は、ここ10数年の間に着実に高性能なエンジンとして結実しつつある。これまでのエンジンの試作研究によって、このサイクルの熱力学的理解も深まり、効率や出力を確保するための熱流体設計技術^{3,4)}は大きく進歩している。さらに、このエンジンを実現するうえで必須の要素技術である高温耐熱材料、無潤滑ピストンシール、高温加熱バーナ、エレクトロニクス制御などの技術も着実に進歩している。

スターリングエンジンはどのような性能(効率)を実証しているのだろうか? 過去10数年間に開発された代表的なエンジンの性能について調査した結果を表1に示す。これはIECEC(国際エネルギー変換技術会議)に発表された論文を調査した結果である。表の中でエンジン型式は、K(D):ディスプレイサ型、K(2P):2ピストン型、K(DA):複動式、F:フリーピストン型を表す。エンジンの出力にアンダーラインを施した値については、最高効率に対応する出力

表1 スターリングエンジンの出力と性能

エンジン	型式	出力 (Watt)	製作	熱源	効率			参考
					η_{it}	η_{bt}	η_{st}	
① TMG	F	170	Homach	プロパン		9.5	8.6	McBride (1984)
② RE-1000	F	1200	Sunpower	電気	31	29		Schreiber (1984)
③ TDE	F	1200	M. T. I	天然ガス	24	19	13.0	Dochat (1981)
④ SPIKE	F	1300	Sunpower	天然ガス	27	21		Berchowitz (1983)
⑤ Proto 2	F	1750	G. E.	天然ガス	24	14	9.0	Crowrey (1984)
⑥ NS03M	K (D)	<u>2030</u>	三菱電機	天然ガス			35.9	* * (1988)
⑦ NS03T	K (2P)	<u>3080</u>	東芝	天然ガス			32.9	* * (1988)
⑧ MELSE-H	K (2P)	3060	機技研	ケロシン	40	19		Azetsu (1984)
⑨ GPU-3	K (D)	4200	G. M.	ディーゼルオイル	41	34		Crowrey (1984)
⑩ V-160	K (2P)	10700	United Stirling	天然ガス	48	38	31.0	Crowrey (1981)
⑪ NS30A	K (DA)	<u>23200</u>	アイシン精機	天然ガス			37.5	* * (1983)
⑫ SPDE	F	25000	M. T. I	原子力	22			Slaby (1984)
⑬ 4-120	K (DA)	25000	STM	太陽熱	47		32	Holtz (1987)
⑭ MOD-II	K (DA)	<u>26700</u>	M. T. I	ガソリン			38.5	Karl (1987)
⑮ NS30S	K (DA)	<u>30700</u>	三洋電機	天然ガス			37.2	* * (1988)
⑯ 4-95	K (DA)	52000	United Stirling	ガソリン	38	35	32.0	Crowrey (1984)

であり他の場合は公称値である。また、エンジンの効率は η_{it} =図示出力/エンジンヘッド入力、 η_{bt} =軸出力/エンジンヘッド入力、 η_{gt} =軸出力/燃料入力でそれぞれ定義されている。この調査結果から次のことがわかる。

- ①日本のムーンライト計画（昭和57年度～62年度，6年間）において開発されたNS03M，NS03T，NS30A，NS30Sの各エンジンはそれぞれ高い効率を実証しており，エンジン出力で約2～30kWのレベルにわたって35%以上の効率が達成されている。スターリングエンジンは小出力でも高効率を実現できるエンジンと言えよう。
- ②エンジンの出力では，数百Wから50kW程度のものが試作されており，大出力化も可能であろうが，小・中容量に適したエンジンと言えよう。
- ③フリーピストン型は2kW以下の小出力のものに適用が多いが，その効率は10数%が実現している。

なお，この表には示していないが，特殊な応用を除いてエンジンは高圧型として設計されており，作動ガスはヘリウムで10MPa前後で運転されている。

3.4 エンジン利用システム

スターリングエンジンの特長を生かした用途としてヒートポンプや発電への応用を取り上げ，最近の開発状況について以下に紹介する。

(1) ヒートポンプシステムへの応用

スターリングエンジンを利用してヒートポンプの圧

縮機を駆動し，冷房や暖房などを効率よくおこなう開発が進んでいる。このスターリングエンジン駆動ヒートポンプ（SEHP）における省エネルギー効果を電動ヒートポンプ（EHP）と比較して検討してみよう。表2はその比較結果である。電気の利用端における効率は燃料入力に対して36%としている。SEHPはEHPと比較して約30%の省エネルギー効果が燃料ベースで試算されることになる。この応用では，エンジンの高効率性，排熱の利用しやすさなどが生かされている。また，エンジンの排熱はヒートポンプの冬期暖房能力の確保に振り向けることもできる。

日本では通産省工技院ムーンライト計画でスターリングエンジンが採り上げられ，昭和56～62年度の6年間に，その先導的基盤⁵⁾が与えられた。本計画ではエンジンの開発と並行して，3kW級（三菱電機・東芝），30kW級（アイシン精機）についてヒートポンプへの利用を考えた研究開発がおこなわれ，SEHPの高いエネルギー利用効率を実証された。図-3は本計画で試作された三菱電機のSEHPパッケージの外観⁶⁾を示す。中央がヒートポンプの室外機であり左端は給湯タンクである。

このムーンライト計画での成果をふまえて，SEHPの実用化技術開発^{7,8)}が昭和64年～平成3年の4年計画で進められている。実用化に向けての大きな課題はエンジンシステムの耐久性（2万時間）の実証と経済性（低コスト化）の向上である。実用試作機によって，

表2 電気ヒートポンプとスターリングエンジン駆動ヒートポンプの比較

	電 気 駆 動	スターリングエンジン駆動
冷 房 時	<p>送電損失 2 送電力 36 燃料入力 100 発電損失 62 冷房熱 119</p>	<p>熱損失 20 給湯 48 廃熱 68 燃料入力 100 軸出力 32 冷房熱 109 冷房熱と給湯 157</p>
暖 房 時	<p>送電損失 2 送電力 36 燃料入力 110 発電損失 62 大気熱源 暖房熱 133</p>	<p>熱損失 20 廃熱 68 燃料入力 100 軸出力 32 大気熱源 90 暖房熱と給湯 170</p>

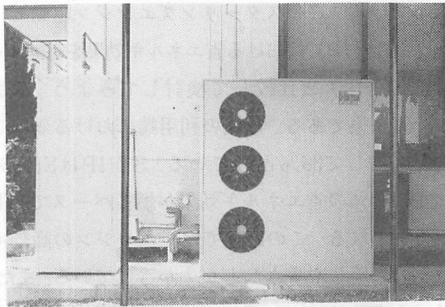


図-3 NS03M-SEHPパッケージ (三菱電機)

冷・暖房の幅広い運転条件のもとに試験がおこなえるようになっており、高効率・低公害の次世代ヒートポンプシステムとして期待されている。なお、米国においてもDOE/GRIを中心としてヒートポンプへの応用をターゲットとしてその開発が進展している。

(2) 発電・コージェネレーション

発電は最も基本的な応用の一つであるが、現在開発が進んでいるのは軍用発電機と太陽熱発電機である。ともに、スターリングエンジンの特長が発揮できる応用である。軍用発電機としての開発は米国においてMTI社、Sunpower社、SPS社などにおいて展開されている。軍用発電機としては静かで信頼性が高く多様な燃料を使用できることが要求される。静かさについては100m離れて音が聞こえない、燃料としてはディーゼル、JP4、ガソリンなどの多様な液体燃料に対応できるようになっている。

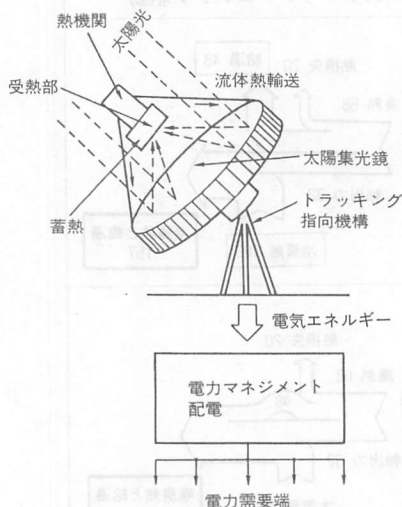


図-4 太陽熱発電システムの構成

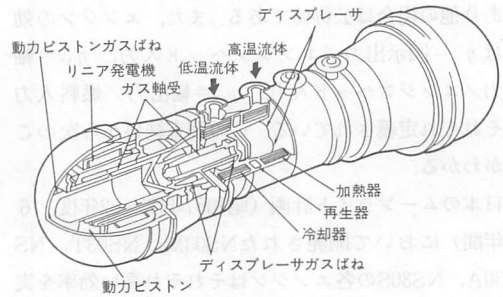


図-5 25kWeのSPDE (MTI社)

太陽熱発電は集光器によって集熱したエネルギーを熱機関に与えて発電しようとするもので図-4のような構成をとる。太陽光発電に比較して熱効率も高く燃料なしで発電できるメリットがある。

スターリングエンジンを利用したこの太陽熱発電の開発は1970年代後半からスタートし、スウェーデンのUnited Stirling社の4-95エンジンが適用された。そして1984年、直径11mの集光鏡を用いたデモンストレーションで31.6%という高い発電効率を実証⁹⁾した。現在では、米国のSPS社、STM社、MTI社、Sunpower社などがこの応用に取り組んでいる。この地上における太陽熱発電の展開で着目されるのが次に述べる宇宙熱発電であろう。

宇宙における電力需要は長寿化、すなわち、長期間安定に電力を供給することと、大容量化の動向にあり、太陽集光熱発電が将来の宇宙システムの中に位置付けられるようになってきた。米国においては、NASAを中心にSpace power programとして1980年代に入りスターリングエンジンによる熱発電を検討している。MTI社のSPDE (Space Power Demonstration Engine, 1986年)の成果をふまえて本格的にStirling Space Engine開発 (1988~1992, 5年間)の計画がスタートしている。図-5はMTI社の試作したSPDEの構成¹⁰⁾を示す。このエンジンは650Kで作動する。フリーピストン型を対向で配置し振動はきわめて小さく抑えられている。容量は25kWeであるが単シリンダ当たり12.5kWeとして設計されている。この計画では、寿命6万時間、発電効率25%、重量6kg/kWeなどの目標が掲げられている。

4. 冷凍機の開発と応用

4.1 スターリング冷凍機の特長

スターリングエンジンは図-1で説明したように熱エネルギーを動力に変換するものであった。これを冷凍機

として作動させるには、外部から動力をインプットして駆動すればよい。そうすることによって図-1の加熱部には冷凍作用が発生する。

低温を実現する冷凍機にも種々のものがあるが、スターリング冷凍機のようなものはガスサイクルと呼ばれる。これに対し、我々の身近にあるフロンを使用した冷蔵庫は蒸気圧縮式である。この両者を比較すれば以下ようになる。

- ① 冷凍能力/所要動力、すなわち、効率の観点から比較すると、蒸気圧縮式は -100°C 以上で、ガスサイクル式はそれ以下で優れている。
- ② 蒸気圧縮式は使用する冷媒によって定まる特定の蒸発・凝縮温度に対応して動作するが、ガスサイクル式は広範な温度域で動作させることができる。
- ③ 蒸気圧縮式ではフロンを使用する。これに対し、ガスサイクル式では一般にヘリウムガスを使用する。また、ガスサイクル式の中でもスターリング冷凍機は高効率、小型軽量に適した利点を持っており、低温の利用分野の拡大にあわせて次に述べるような開発事例が報告されるようになってきている。

4.2 最近の開発事例

図-6は赤外線撮像素子冷却用のリニア駆動スターリング冷凍機¹¹⁾である。冷凍機はスプリット型と呼ばれる構成を採っており、コールドフィンガと圧縮部が分離されている。固体撮像素子を使用する赤外線カメラにおいて、この超小型冷凍機で素子を冷却して鮮明な画像を得るといふ。冷凍機はカメラヘッドに内蔵され、冷凍能力は $1\text{W}/77\text{K}$ であり、消費電力は 50W 以下、

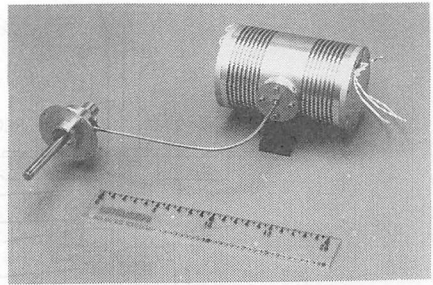


図-6 赤外線素子冷却用小型スターリング冷凍機

重量も 1.9kg ときわめて軽量である。

図-7はクライオ真空ポンプとして開発・商品化されている複動式スターリング冷凍機¹²⁾である。気体分子は極低温に冷却された面に衝突すると凝縮し捕獲される。約 20K 程度まで下げると高真空のポンプとして作動する。ロッドのシールにはダイアフラムを使用している。モータ入力で 6.6kW 、冷凍能力 $15\text{W}/20\text{K}$ 、 $120\text{W}/80\text{K}$ の容量のものから、モータ入力で 14kW まで実用化している。

スターリング冷凍機は宇宙の分野¹³⁾でもそのニーズが顕在化している。地球観測、天体観測、赤外線天文学などの高分解能な観測機器が極低温に冷却される必要があるためである。宇宙用のセンサ冷凍機として特に重要な点は寿命であり数万時間故障しないという高い信頼性が要求される。図-8はOxford大学にて開発されたスターリング冷凍機¹⁴⁾である。ピストンとシリンダが接触しないようにピストンをスプリング支持す

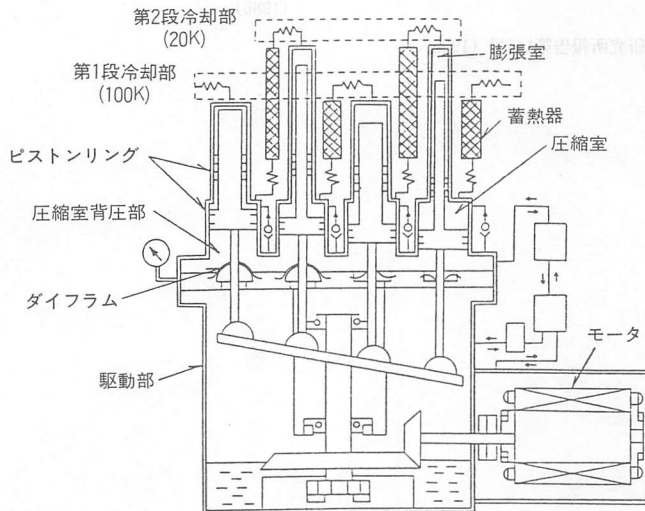


図-7 クライオポンプ用スターリング冷凍機

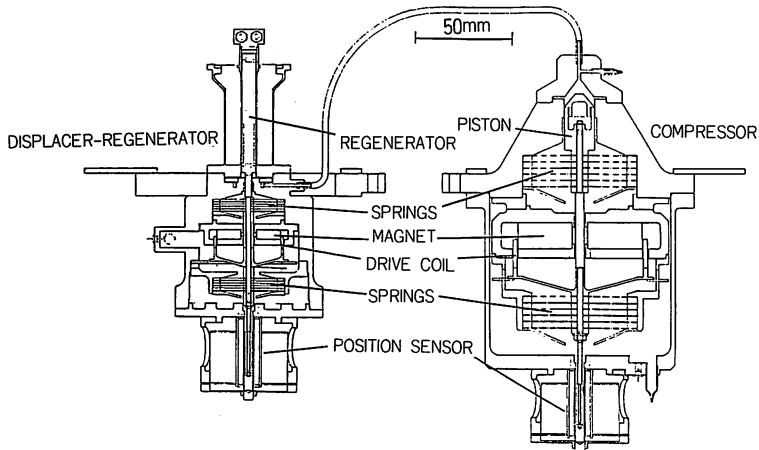


図-8 宇宙用センサー冷凍機

る工夫がなされているところに大きな特長がある。

5. むすび

スターリングサイクル機器の最新の開発状況について報告した。エンジンとしては高効率・低公害な外燃機関として、今後ますます重要となる省エネルギーや太陽エネルギー利用に大きく貢献するであろう。また、冷凍機についても、低温の利用が超電導、宇宙、バイオなどに拡大していくにつれて、さらに発展することが期待できよう。

参 考 文 献

- 1) 山下; 日本機械学会誌, 1990年2月号.
- 2) 野間口, 藤原, 数本; エネルギー・資源, Vol. 3, No. 3 (1982).
- 3) 山下, ほか10名; 機械技術研究所報告第145号 (1988).
- 4) Kawajiri, Fujiwara and Suganami; IECEC (1989).
- 5) RESEARCH AND DEVELOPMENT OF STIRLING ENGINES FOR WIDE USE FY 1987 ANNUAL REPORT (1988), New Energy Development Organization.
- 6) 菅波ほか4名; 三菱電機技報 Vol. 62, No. 10 (1988).
- 7) Haramura, et al.; International Gas Research Conf. Nov. (1989).
- 8) Suganami and Tsushi; International Gas Research Conf. Nov. (1989).
- 9) Leonard; IECEC (1984).
- 10) Slaby and Alger; IECEC (1987).
- 11) 数本, ほか4名; 三菱電機技報 Vol. 64, No. 2 (1990).
- 12) 浜田; 日経メカニカル 1987年10月.
- 13) 川田, ほか3名; 電子技術総合研究所報告書第50巻12号 (1986).
- 14) Werrett, et al.; Adv. in Cryogenic Eng., Vol. 31 (1986).