

汎用スターリングエンジン

—中間評価を終えて—

Development of Stirling Engines for Wide Use and Its Interim Assessment

山下 巖*

Iwao Yamashita

1. ま え が き

「汎用スターリングエンジンの研究開発」は、通商産業省工業技術院が進めている大型省エネルギー技術研究開発いわゆるムーンライト計画の一環として、昭和57年から62年度までの6ケ年計画で進行中である。副題に掲げられた「中間評価」は、開発の進捗状況を中間段階で評価し、その後の研究開発の方向を定めることを目的として、昭和59年度末に産業技術審議会省エネルギー技術開発部会評価分科会によって実施された。これに先立ち、評価の基礎データを得るための運転試験が、昭和59年12月から翌年の3月にかけて、4機種の基本エンジンを対象として行われた。本稿では、この中間評価の内容を中心に述べるべきであろうが、実施以来既に約2年を経過しており、むしろ昭和62年度末に予定されている最終評価が目前に迫っている段階にある。そこで、以下では、利用システムの開発も開始された中間評価以後の進捗状況に重点を置いて、ムーンライト計画におけるスターリングエンジン研究開発の現状を紹介することにする。

周知のように、スターリングエンジンは19世紀初頭に発明された外燃機関であるが、出力の割に寸法や重量が極めて大きなエンジンであったために、その後登場した蒸気機関や内燃機関に対抗できず、20世紀には事実上姿を消してしまった。近代的なエンジンとしての歴史は、1930年代中頃からのオランダのPhillips社による研究開発への着手に始まる。その後種々の経緯を経たが、現在では、(1)燃料・熱源の多様性、(2)高効率性、(3)低公害性(排気・騒音・振動)を三大特長としてもつ新型エンジンとして、世界各国で開発が進められつつある。もちろん、そこでは内燃機関に競合すべく、小型軽量化が重要な課題とされていることは言うまでもない。

欧米でのスターリングエンジンの開発は、1979年にPhillips社が撤退して以来、スウェーデンのUnited Stirling社(USAB)と米国エネルギー省(DOE)による自動車用エンジン開発プロジェクトが中心になっている。USABはU4式ダブルアクティング型エンジン(4-95等)及びV2式2ピストン型エンジンV160の開発と多方面にわたる用途開拓を行っており、現在では最も実績のあるメーカであると言ってよい。V160は米国にある子会社Stirling Power Systems社(SPS)を通じて発電機やヒートポンプ駆動用として一部実用に供されている。一方、1978年に開始されたDOEの上記プロジェクトは、現在第2段階のMod IIエンジンの開発中であり、1987年秋には車載試験が予定されている。米国ではこの他にも、DOEによるヒートポンプや太陽熱発電システムの開発、NASAによる宇宙用発電システムの開発、ガス研究協会(GRI)によるヒートポンプやコージェネレーション・システムの開発等が、フリーピストン型エンジンを含めて行われている。

これに対して、日本においては、基礎的な研究は各所で行われてきたものの、本格的な開発研究はアイシン精機一社に限られてきたのが数年前までの状況であった。しかし、ムーンライト計画による研究開発の開始を契機として、その開発に本格的に算入するメーカが急増した。ムーンライト計画に参加している三菱電機、東芝、アイシン精機及び三洋電機に加えて、フリーピストン型エンジンの開発を進めている川崎重工、松下電器等がある。そして、現在では、運転時間等の実績ではまだ及ばないものの、性能的には欧米の水準に並ぶまでになっており、スターリングエンジンの実用化に向けての日本の動向が国際的にも注目されている。このような状況を反映して、昭和61年から2年間の予定で国際エネルギー機構(IEA)による共同研究が情報交換を主題としてスタートし、米国、スウェーデン、デンマーク及び日本が参加している。

* 機械技術研究所エネルギー機械部エネルギー変換課長

〒305 茨城県新治郡桜村並木1-2

表1 ムーンライト計画における基本的な開発目標

用途		冷暖房用システム		発電機システム	
容量		3kW級		30kW級	30kW級
メーカー名		三菱電機	東芝	アイシン精機	三洋電機
エンジン名		NS03M	NS03T	NS30A	NS30S
エンジン本体	エンジン型式	Wクランク式	V2式	回転斜板式	U4式
		ディスプレイサ型	2ピストン型	ダブルアクティング型	ダブルアクティング型
	エンジン重量	75kg		220kg	300kg
	主燃料	都市ガス(13A)			
	作動ガス	ヘリウム			水素(ヘリウム)
	熱効率	約32%		約35%	約37%(約35%)
排ガスレベル		ボイラー規制以下(NOx150ppm以下, O ₂ 5%換算)			
利用システム	方式	外部コンプレッサ駆動によるランキンサイクル		内蔵コンプレッサによるランキンサイクル	外部発動機駆動
	冷房成績係数	0.92 (給湯時1.43)		1.09 (給湯時1.57)	電圧変動率±0.2% 周波数変動率 ±0.5Hz
	暖房成績係数	1.49		1.63	
	騒音レベル	45dB(A)以下		60dB(A)以下	
	耐久性	10年			
	メンテナンス	1回/年			

2. プロジェクトの概要

ムーンライト計画では、スターリングエンジンを民主部門を中心に省エネルギー化及び石油代替化を期待できる熱機関として位置づけ、その実用化技術を確立することを目差している。研究開発は、基礎的研究と評価用試験を担当する国立研究所と新エネルギー総合開発機構を通して委託を受け、エンジン及び利用システムの開発を行うメーカー4社によって進められており、昭和61年度までの開発資金は約60億円である。基本的な開発目標を表1に示す。

本プロジェクトでは、表1に加えて、さらに詳細な諸元、予測性能曲線図及び運転条件が具体的な開発目標として設定されており、評価試験の基準にもなっている。

2.1 国立研における研究

機械技術研究所は、研究用エンジンの運転実験とシミュレーション手法の開発に基づく試験評価方法の研究、往復動シールの機構と材料に関する研究、並びにヒータにおける管外伝熱促進、再生器、アンモニア

添加によるNOx低減等の熱交換器に関する研究を行っている。また、本プロジェクトで開発されるエンジン及び利用システムの試験も機械技術研究所が担当している。航空宇宙技術研究所では、ガス燃料燃焼器の研究をNOx低減法の開発に焦点を当てて進めている。一方、公害資源研究所は、スターリングエンジンの燃料多様化を図るために、木質系燃料の燃焼技術について研究している。

2.2 エンジン本体の開発

メーカー4社によって開発されているエンジンは、表1に示されているように、軸出力が3kWと30kWの2つの容量のエンジンに大別され、それぞれ2機種計4機種からなる。作動ガスにはヘリウムを使用し、最高熱効率点での目標熱効率は、3kW級エンジンで32%、30kW級エンジンで35%である。しかし、発電機システム用の30kW級エンジンでは、作動ガスに水素を使用することも予定されており、その場合の目標熱効率は37%とやや高く設定されている。熱効率は冷却水入口温度25℃、低位発熱量基準の値であり、ブローヤや制御機器に要する補機電力は、30kW級では軸出力

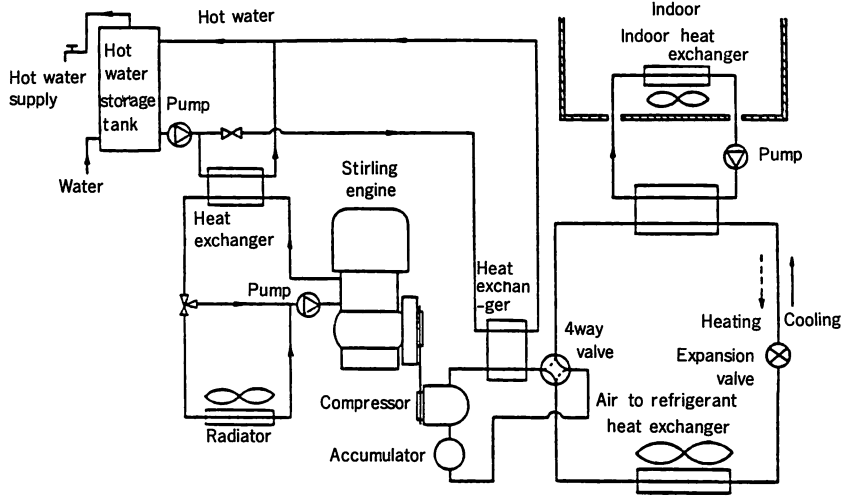


図-1 ヒートポンプシステムの構成例(NS03M)

から差引かれる。3 kW級ではこの差引は行われないが、補機電力は100W程度にできるものと推定されている。燃料には、石油代替、安定供給及び夏期の電力ピークカットを考慮して都市ガス(LNG)を採用しているが、石油やアルコールの使用もバーナ系の若干の改造で可能である。

一方、表1に示されたエンジン重量は、在来エンジンに比べて低い値ではないが、想定している利用システムに組込んだ場合には、十分に競合できるものと考えられている。しかし、さらに軽量化あるいは小型化を進める努力は、コスト低減とともに、スターリングエンジンの実用化ひいては普及を図るうえで不可欠であろう。

2.3 利用システムの開発

利用システムの開発は冷暖房用ヒートポンプシステムを中心に進められている。これは、図-1のようなシステムを構成することにより、スターリングエンジンの欠点である大きな冷却水放熱量を暖房あるいは給湯に利用することができ、総合的なエネルギー利用効率を高められるからである。また、外燃機関であるために本質的に制御性や比出力に劣るスターリングエンジンにおける三大特長、中でも静粛性を最大限に活かす用途だからでもある。電動式に比べて、寒冷地での使用が可能というメリットもある。性能的には、現在実用化が進みつつあるガスエンジン・ヒートポンプを凌駕するシステムの開発を狙っている。表1に掲げられた成績係数はエンジン単体の場合とは異なり、高位発熱量基準である。給湯温度はなるべく高いことが望ましいが、その上昇はエンジン熱効率の低下を招く

ので、許容される下限の45°Cに設定されている。なお冷暖房能力の変率率は約1:3である。

これに対して、在来のディーゼルエンジン発電機の代替を狙った可搬式及び定置式の発電機システムの開発では、その使用パターンの違いから、出力の変率は1:10とかなり高く設定されている。在来システムに比べて、高効率、低騒音、低振動が主な利点となる。

2.4 低公害性及び耐久性

排ガスレベル及び利用システムにおける騒音レベルの目標も表1に併せて示されている。エンジン単体の場合の騒音レベルは、利用システムに比べて15~20dB高く設定されている。これらは本来スターリングエンジンの本質的な特性となるべき点であるが、例えば、NOxの低減は熱効率の向上と相反する要求であること、また、全体的な騒音レベルの低下につれて燃焼騒音すら目立ってくることもあり、現実にはその達成が重要な技術的課題となっている。

一方、耐久性10年は、想定しているシステムでは2万時間以上の運転時間に相当し、シール等にとって極めて厳しい目標となっている。プロジェクトの限られた期間内では、当然その実証は不可能であるが、数百時間の連続運転及び数千時間のシール単体試験を通じて、耐久性に対する見通しを得ることが計画されている。

3. 中間評価

昭和59年度末に行われた中間評価は、それまで約2年半をかけて開発されてきた基本エンジンを対象に、出力、熱効率を中心とした基本的目標に対する達成度

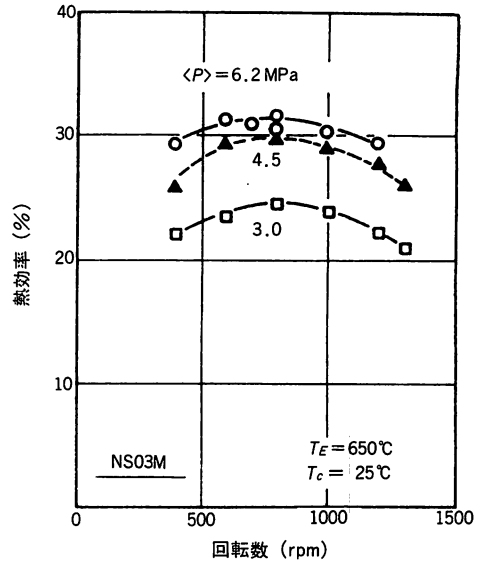
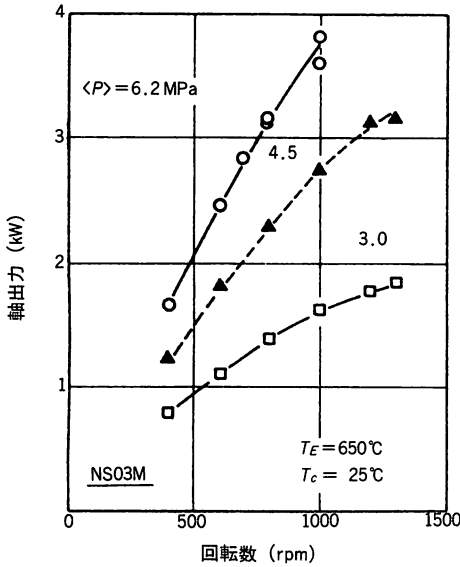


図-2 エンジン特性 (NS03M, 昭和59年度)

を評価するとともに、技術的な課題を抽出し、その後の実用型エンジン及び利用システムの研究開発の方向を定めることに重点を置いて実施された。そのため、重量、排ガス特性、騒音レベル等は参考データとして扱われた。

中間評価の基礎データを収集するため、4台の基本エンジンの運転試験が機械技術研究所のテストベンチで順次行われ、熱入力、軸出力のほか指圧線図、冷却水放熱量、各部の温度分布及排気ガス特性等について40項目以上にわたる測定が行われた。試験条件のうち、回転数、作動ガス圧力及び冷却水入口温度を広範に変えた運転により、各エンジンの特性が捉えられた。また、熱バランス等の解析により、実用型エンジンの開発に向けての開発課題が抽出された。このような統一した試験が行われた例は世界的に見ても過去になく、スターリングエンジンの分野では画期的なことであったと思われる。この試験の波及効果として、試験条件、計測及び解析方法が統一され、エンジンデータの相互比較が可能になったことが挙げられよう。

上記の試験結果は、中間評価報告書にまとめられ、公表されている^{1) 2)}。中間評価により、各エンジンは基本的な目標をほぼ達成できたものと認められ、実用型エンジン及び利用システムの開発に進むことになった。しかし、ヒータ部伝熱性能の向上、再生器熱損失の低減、ピストンリングのシール性の安定化、NO_xの低減等の必要性が明らかにされた。もちろん、重量や寸法は目標に程遠く、第2段階における重要課題とし

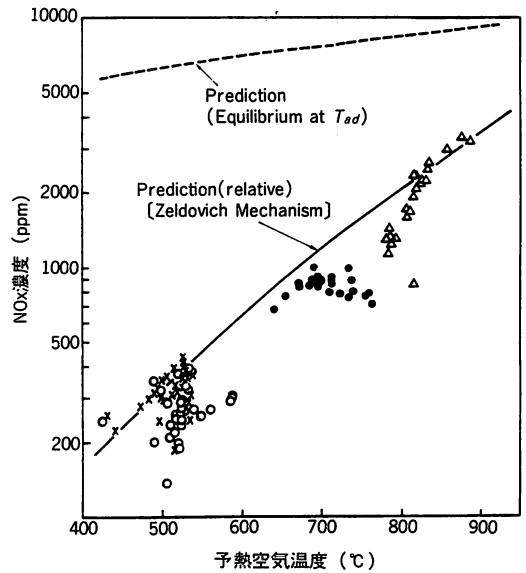


図-3 NO_x排出濃度に対する予熱空気温度の影響 (燃料: 13A, 空気過剰率: 約1.25)

て指摘された。

エンジン特性の一例として、3kW級エンジンNS03Mの軸出力及び熱効率の回転数依存性を図-2に示す。高温部温度は、膨張空間平均作動ガス温度を650°Cに保つように、制御されている。同図に見られるように約32%の熱効率が実証されている。これはNS03Tでも同様であった。このような小型エンジンによって30%を超える熱効率が達成できるのは、在来エンジンに見られない特徴と言える。スターリングエンジンの

今後の方向を示唆している可能性がある。

図-3には、4台のエンジンにおける排ガス中のNO_x濃度の測定結果が予熱空気温度の関数としてまとめられている。NO_x濃度は断熱火炎温度 T_{ad} に基づいて予測される傾向(実線)と良く一致している。NO_x低減にとっては、予熱空気温度の低下が本質的であり、ヒータ部伝熱性能の向上を基本とする熱効率を維持したNO_x低減法の開発が重要なことが分かる。

4. 開発の現状

中間評価以後、最終目標の達成を目差して各エンジンでは各種の改良が進められており、並行して利用システムの開発も開始された。エンジン本体について見ると、重量の低減、耐久性の向上及び始動性を含む制御性の改善を図り、また実用化時におけるコスト低減に対する見通しを得ることが共通した主要課題になっている。

これまでの開発成果は、新エネルギー総合開発機構及び各社を通じて、毎年のエネルギー変換国際会議(IECEC)あるいは隔年に開催されているスターリングエンジン国際会議を中心に発表されている。また、昭和61年12月にはムーンライト計画を中心としたスターリングエンジンに関するシンポジウムが開かれ、成果報告が行われた³⁾。そこで、以下に紹介する4機種のエジンソン及び利用システムの開発の現状についての詳細は、上記の文献を参照されたい。

ムーンライト計画で開発されているスターリングエンジンは、耐久性と低騒音性に重点を置いており、また主作動ガスとしてヘリウムを採用しているために、欧米の自動車用エンジンに比べて、低速型に設計されている。その結果、最高回転数は1500ないし1800rpmであり、最高効率点も、小型発電機システム用としての要求から最高出力点にはほぼ一致しているNS30Sエンジンを除いて、750~1000rpmの比較的低い回転数に設定されているのが共通的な特徴と言える。一方、平均作動ガス圧力は3kW級エンジンで最高6MPa、30kW級エンジンで15MPaであり、前者におけるかなり低い圧力の設定が目立っている。

4.1 NS03M (三菱電機)

3kW級エンジンNS03Mは単シリンダのディスプレサ型であるが、Phillips社のロンビック駆動ではなく、Wクランク駆動を採用している。クランクケースは加圧式であり、作動ガスの外部とのシールは出力軸に取付けたメカニカルシールによって行われる。再生

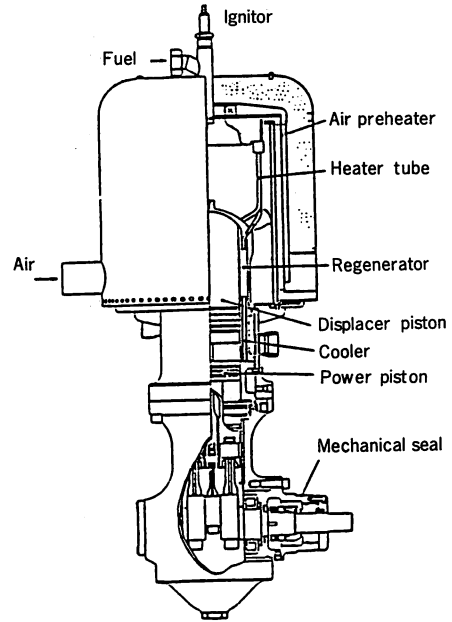


図-4 NS03Mエンジン(昭和61年度)

器はディスプレサを取り囲むアニューラ型であり、それによってヒータ及びクーラもアニューラ配置になっている。

中間評価の後、開発に力が注がれた点として、小型軽量化、部品点数の削減及びNO_xの低減が挙げられる。軽量化については、重量で3分の1以下になっており、出力や熱効率を維持しながら、目標に近い重量が既に達成されている。図-4に昭和61年度のNS03Mエンジンの断面図を示す。NO_x低減については、排ガス再循環及び三元触媒の効果を調べ、いずれによっても目標をクリアできることが確かめられている。一方、利用システムの開発では、エンジンとの整合性の点から見てスクロール型コンプレッサが勝れているとの結果に基づき、これを組込んだチラー式ヒートポンプシステム(図-1)を試作し、起動特性等が調べられている。

4.2 NS03T (東芝)

3kW級エンジンNS03Tは、USAB及びSPSのV160にも採用されたV2式の2ピストン型である。60度Vであるが、Wクランクによりピストン位相差は100度に設定されている。加圧式クランクケースであること及び外部シールの方法はNS03Mと同様であるが、ヒータにバイヨネット管を採用しているのが大きな特徴である。

図-5に昭和61年度のNS03Tエンジンの断面図を示す。中間評価の後に行われた改良では、小型軽量化を

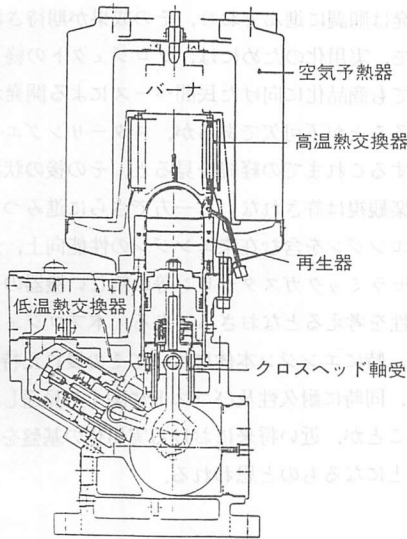


図-5 NS03T エンジン(昭和61年度)

目的として、従来の円筒型から NS03M と同じアニューラー型再生器への変更、バイオネット管の細管化、それに伴う12本構成の傾斜型ヒータから24本構成の垂直ヒータへの変更が目立っている。クーラは、再生器下部と圧縮シリンダ上部をつなぐように、水平に配置されている。ピストンリング材にはポリイミドを使用しているが、シリンダにセラミック・コーティングを施すことにより、良好な摩擦摩耗特性を得ているのが注目される。利用システムに関しては、ロータリ型コンプレッサを駆動する空冷パッケージ式ヒートポンプシステムの開発を進めている。

4.3 NS30A(アイシン精機)

30kW級エンジンNS30Aは、以前に開発された回転斜板式ダブルアクティング型エンジンMT79がベースになっている。クランクケースは非加圧であり、外部シールは、往復動するピストンロッド部で、油を介して密封する液封式のシールシステムによって行われている。このエンジンの特徴は、通常は軸出し型のエンジンであるが、ヒートポンプシステムに適用する場合には、図-6のように、4つのクロスヘッドの下部をフロン用のコンプレッサとして使用し、エンジン・コンプレッサ一体型となるように設計されている点である。ただ、そのせいか作動ガスにヘリウムを用いた場合には速度変動が生じ易くなるため、現在は作動ガスとして窒素が用いられているのが問題点と言えよう。これは、図-7に見られるように、ヘリウムの場合にはエンジンのトルク曲線がコンプレッサのそれと2点で交叉するためと説明されている。なお、アイシン精機

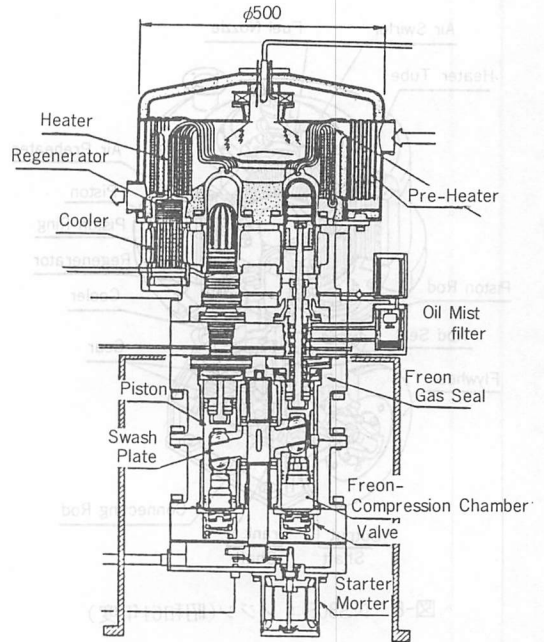


図-6 NS30A エンジン(コンプレッサ内蔵型)

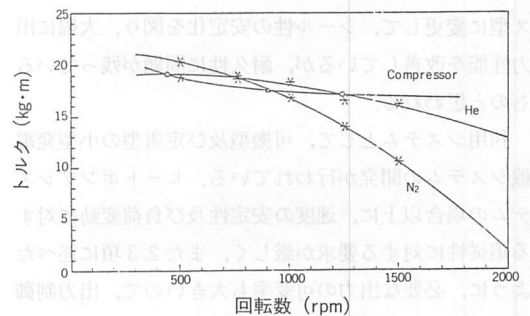


図-7 エンジン(作動ガス: He, N₂)及びコンプレッサのトルク特性(NS30A)

は、燃料多様化研究の一環として、木質燃焼炉とナトリウム・ヒートパイプを組合せてスターリングエンジンのヒータ部を加熱するシステムの開発も行っている。

4.4 NS30S(三洋電機)

30kW級エンジンNS30Sは、USABの4-95やDOEのMod 1に類似したU4式のダブルアクティング型エンジンである(図-8)。NS30Aと同じく、クランクケースは非加圧であるため、外部シールはピストンロッド部で行われるが、駆動系には在来エンジンの部品をそのまま利用できる利点がある。2本のクランク軸と1本の出力軸の間の結合には高精度の山齒歯車を使用し、騒音等の低減が図られている。中間評価後の主な変更点として、ヒータがインポリュート型から単純なヘアピン型の管で構成される形式に変わったことが挙げられ

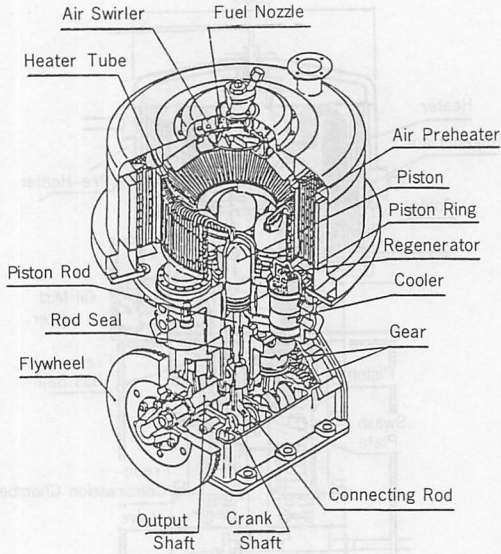


図-8 NS30Sエンジン(昭和61年度)

る。また、ピストンリングを、従来の3ピース型からX型ゴム製リングによってバックアップしたエンドレス型に変更して、シール性の安定化を図り、大幅に出力性能を改善しているが、耐久性に問題が残っているものと思われる。

利用システムとして、可搬型及び定置型の小型発電機システムの開発が行われている。ヒートポンプシステムの場合以上に、速度の安定性及び負荷変動に対する追従性に対する要求が厳しく、また2.3項に述べたように、必要な出力の変率も大きいので、出力制御装置の開発が重要な課題と言えよう。

5. あとがき

ムーンライト計画におけるスターリングエンジンの研究開発は、当面の用途として最も実現性の高いと考えられるヒートポンプシステムを利用システムを中心に据えていること、DOEによる自動車用エンジンの開発を別にすれば、研究開発体制及び投入資金においてこれまでに例のない極めて本格的なプロジェクトであることから、各国からその推移が注目されている。また、欧米とは異なり、我が国における研究開発が、研究から商品化まで一貫して行いうるメーカーによって実施されていることも注目を受ける理由として挙げられよう。

本プロジェクトは、開始以来約5年を経過しており、昭和62年度末には最終評価試験が行われようとしている。これまでに述べてきたように、新エネルギー総合開発機構とメーカー4社によるエンジン及び利用システ

ムの開発は順調に進んでおり、その成果が期待される。ところで、実用化のためには、プロジェクトの終了後においても商品化に向けた民間ベースによる開発が継続されることが不可欠であるが、スターリングエンジンに関するこれまでの経緯を見ると、その後の状況について楽観視は許されない。一方でさらに進みつつあるガスエンジンを含む在来エンジンの性能向上、燃料電池やセラミックガスタービン等の新しい機器の登場の可能性を考えるとなおさらである。本プロジェクトにより、特にエンジン本体についてその優れた特性を実証し、同時に耐久性及びコストに関する見通しを得ておくことが、近い将来における実用化の基盤を確立することになるものと思われる。

引用文献

- 1) 産業技術審議会省エネルギー技術開発部会評価分科会；汎用スターリングエンジンの研究開発に関する中間評価報告書(1985)、工業技術院。
- 2) 斎藤敬三；汎用スターリングエンジン開発計画の中間評価について、省エネルギー、37巻、7号(1985)、13～21。
- 3) スターリングエンジン及びヒートポンプシステム等への応用に関する国際シンポジウム論文集(1986)、工業技術院、新エネルギー総合開発機構、ヒートポンプ技術開発センター。

