

スターリングエンジンに用いるセラミックス製熱交換器の開発

エネルギー・環境評価部門 *平田 宏一, 今井 康之, 川田 正國
(株)eスター 赤澤 輝行, 村尾 景司

1. まえがき

昨今の地球温暖化防止や省エネルギー化の観点から小型で高効率な動力源が必要とされている。高熱効率性、熱源の多様性、低公害性といった優れた特徴を持つスターリングエンジンは、それらのエネルギー事情に適合しうる動力源の一つである。

19世紀初頭に発明されたスターリングエンジンは、現在までに多くの研究者・技術者によって実用化が試みられてきた。しかし、製作コストが高いことやエンジン寸法・重量が大きいこと等の諸問題により民生レベルでの普及に至っていないのが実情である。特に、高効率なスターリングエンジンを実現するためには、高温条件下での材料強度の制限から、ヒータ材料としてインコネル等の特殊なニッケル合金を用いる必要がある、製作コストを高める要因となっている。本研究では、スターリングエンジンの高効率化と普及を目指して、高温条件下で使用が可能なセラミックス製ヒータの開発を進めている。本報では、試作したセラミックス製ヒータ並びにその性能を評価するために開発した評価用スターリングエンジンについて概説する。

2. スターリングエンジンの高効率化

スターリングサイクルの理論熱効率は、カルノーサイクルの熱効率に一致し、低温空間温度と高温空間温度との比によって表される(図1)。スターリングエンジンの低温空間温度は常温付近で運転させるのが一般的である。したがって、スターリングエンジンの高効率化を図るためには高温空間温度を高めることが有効である。本研究で開発しているセラミックス製ヒータは、高温条件下での使用が可能のため、作動温度の高温化が可能である。

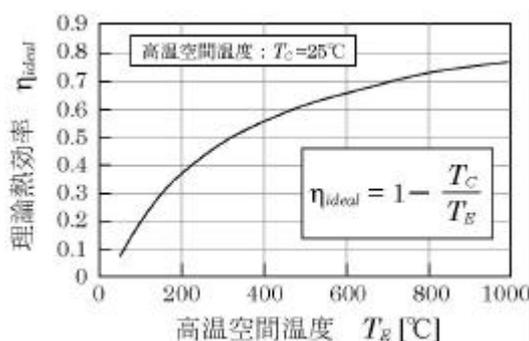
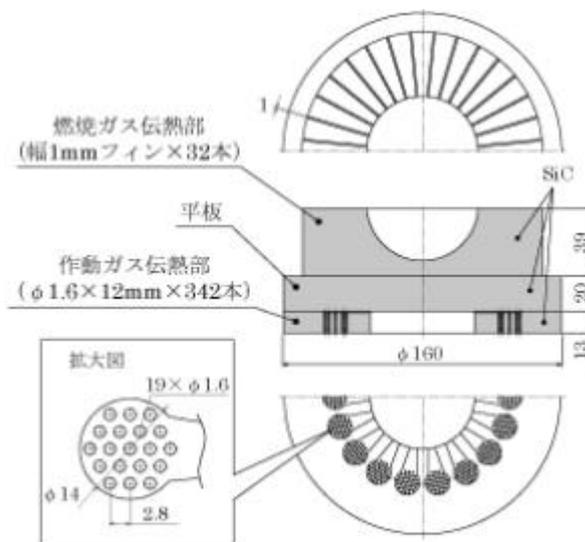


図1 スターリングサイクルの理論熱効率

3. セラミックス製ヒータの開発

高性能ヒータの材料は、高い熱伝導率を有することが要求される。また、スターリングエンジンの作動空間は数 MPa まで加圧されるため、高温条件下での強度特性が重要である。そのような観点から、様々なセラミックス材料を検討した結果、ヒータ材料に炭化珪素(SiC)を用いることとした。炭化珪素は、ステンレス鋼の5倍程度の熱伝導率があり、高温条件下での強度が高い材料である。しかし、金属材料と比べて、加工時の損傷の影響を受けやすいため強度のばらつきが大きく、破壊靱性に大きく劣る。そのため、特殊な形状の評価用ヒータを試作し、耐熱性・耐圧性を確認し、実際のスターリングエンジンにおける運転が適切に行われることを実証することとした。

図2に開発したセラミックス製ヒータの構造並びに外観を示す。従来のスターリングエンジンに用いられ



(a) 構造



(b) 外観

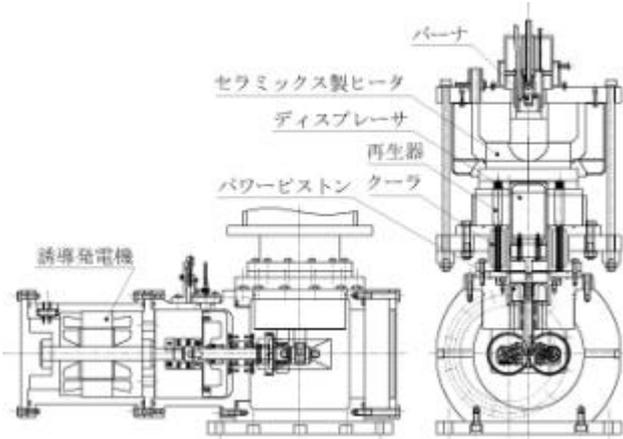
図2 開発したSiC製熱交換器

てきた金属製ヒータの多くは、数十本の伝熱管で構成される多管式熱交換器である⁽¹⁾。一方、本セラミックス製ヒータは、燃焼ガスからの熱を受け取るフィンを設けた燃焼ガス伝熱部、耐圧強度を受け持つ平板並びに作動ガスに熱を与えるための多数の小孔を設けた作動ガス伝熱部から構成されている。

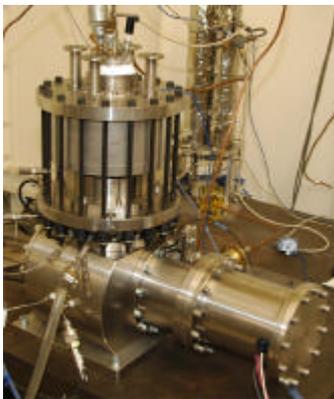
4. 熱交換器評価用スターリングエンジン

図3に熱交換器評価用スターリングエンジンの構造および外観を示す。本エンジンは、ディスプレイサとパワーピストンを1つのシリンダ内に配置した形と呼ばれる形式である。高効率化を実現するために、ヒータとクーラを連結する再生器ハウジングの材料として熱伝導率が極めて低い石英ガラスを使用している。また、ピストン駆動機構には、ピストンの直線運動が可能なロンピック機構を採用している。さらに、圧力容器構造とした誘導発電機がクランクケースに直接配置されており、高圧の作動ガスの動的シールを用いていないのが特徴である。

図4は性能測定結果の一例であり、(i) 平均ガス圧力 P_m を 1.5 MPa、全入熱量 Q_{total} を 5 kW とした運転条件、(ii) 平均ガス圧力 P_m を 2.5 MPa、全入熱量 Q_{total}



(a) 構造



(b) 外観

図3 熱交換器評価用スターリングエンジン

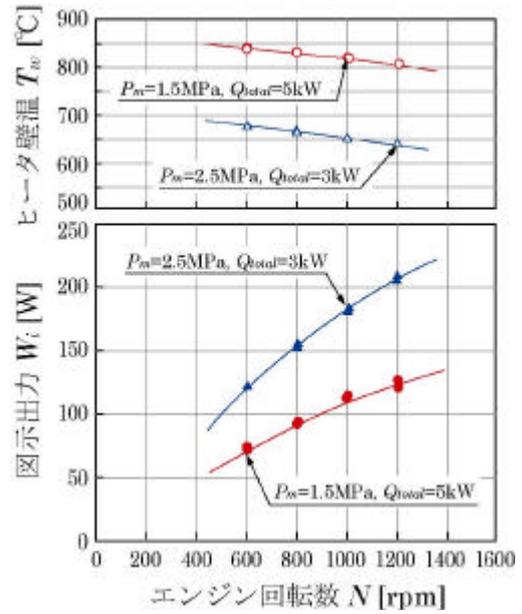


図4 図示出力およびヒータ壁温の測定結果

を 3 kW とした運転条件におけるエンジン回転数に対する図示出力 W_i およびヒータ壁温を示している。これより、本セラミックス製ヒータは最高 850 という高温条件下で運転していることがわかる。これは一般のステンレス鋼では、高圧下での運転が極めて難しい温度領域である。また、温度は低下しているものの、平均ガス圧力を 2.5 MPa に高めた場合においても適切な運転が可能であることを実証された。

5. あとがき

本報では、スターリングエンジンの高効率化を目指して開発を進めているセラミックス製ヒータについて概説した。そして、評価用スターリングエンジンによる実験から、試作したセラミックス製ヒータが高温・高圧条件下で適切に使用できることを確認した。しかし、熱交換器や燃焼器に関連する各種熱損失の低減が図られておらず、エンジン全体の熱効率は十分に高くない。今後、それらの熱損失の詳細な解析並びに低減を行い、システム効率の向上を図る予定である。さらに、別途開発を進めている高効率リニア発電機と合わせることでエンジンのさらなる高効率化並びに小型化を図る予定である。

本報で紹介したセラミックス製ヒータ並びに評価用スターリングエンジンは、NEDO 委託研究「セラミックス製熱交換器と新形式リニア発電機を用いた次世代エンジンの開発」により実施されているものであり、関係各位並びに共同研究メンバーに対し、深い感謝の意を表したい。

参考文献

- (1) 山下他, スターリングエンジンの理論と設計, 山海堂, 1986