

日本機械学会エンジンシステム部門
第1回 スターリングシステムによる未利用エネルギー活用技術に関する研究会
A-TS 07-55 議事録

開催日時：平成26年2月10日（月）14:00～17:00

開催場所：日本機械学会第1会議室 東京都新宿区信濃町35番地

出席者：7名（オブザーバ含む）

- ※平田 宏一（主査 海上技術安全研究所）
- 市川 泰久（幹事 海上技術安全研究所）
- ※鈴木 伸治（サクシヨン瓦斯機関製作所）
- 鶴野 省三（NPO日本スターリングエンジン普及協会）
- 澤田 大作（元トヨタ自動車）
- 中野 恭介（住友重機械工業）
- 平山 貴士（住友重機械工業）

（敬称略、順不同、※印 話題提供者）

議事内容：

1. 研究会設置主旨の解説

主査である平田氏から本研究会設置の主旨についての説明があった。

<質疑>

Q（澤田氏）：本研究会では、未利用スターリングエンジンの方向性に対して提案書のとりまとめなどは必要とされているのか。

A（平田氏）：義務はないが、そのような提案が出来れば最善と考えている。

2. 講演1：『バイオマスボイラーを用いた10kW級スターリング発電システム』

サクシヨン瓦斯機関製作所 鈴木伸治氏

要旨：サクシヨン瓦斯機関製作所で開発が行われてきた低温度差スターリングエンジンの開発経緯の紹介と、バイオマスボイラーを用いた10kW級スターリング発電システムの開発状況についての話題提供があった。

初期は100～150℃程度をターゲットとした大気圧エンジンを開発した。その後、独自のピストン荷重のバランスに優れる、 α +型エンジンを考案する。また複数の熱源から熱媒体で熱を回収し、スターリング発電および各所に熱を輸送して利用をするシステムを提案している。現在はバイオマスボイラーで熱媒体を加熱しスターリング発電を行うシステムを開

発している。本システムには4MPaの高圧ヘリウムを作動流体とし、第2種 α +形式を2基連結したエンジンを用いている。また本エンジンはシリンダをジャケット冷却しており、ピストンリングの耐久性向上などを可能にしている。エンジン試験の結果、熱媒体入口温度300℃、ガス圧力4.0MPaの条件において10kWの発電性能を確認した。

エンジンの暴走対策には、バッファ空間と作動空間を連通させるアンロード弁と機械式制動装置を併用している。またブラックアウト時など、制御が不可能になった場合を想定して作動ガスを放出するリリーフ弁を取り付けている。

起動シーケンスは、まずボイラ点火後炉内温度が所定温度に達したら熱媒ポンプを駆動し、熱媒体温度が所定温度に達したらアイドル運転を開始する。その後、熱媒体温度の上昇に伴い、発電運転に移行する。その後、熱媒温度は熱媒クーラによって一定温度に維持される。停止シーケンスは、熱媒体温度が所定温度以下になるとアイドル運転に、さらに温度が低下するとエンジン停止、熱媒ポンプの停止を行う。

<質疑>

Q（澤田氏）：熱媒を用いることは、熱源の熱を直接利用するのに比べてどの程度優位性があるのか。

A（鈴木氏）：様々な熱源に対して、高い自由度を持つことが最大の利点と考えている。

Q（澤田氏）：このエンジンでは、すべてがパワーピストンになるがピストンリングからの漏れは問題にならないか。

A（鈴木氏）：現在のところ漏れによる問題は生じていない。

Q（澤田氏）：300℃程度なら潤滑油を有効に利用できる領域だと思うが、機構部には潤滑油は使用しているか。

A（鈴木氏）：作動空間にオイルが上がり、内部が汚損し性能が低下することが懸念されるので、現在はすべてグリース封入式のベアリングを用いている。

Q（澤田氏）：暴走をしてもすぐに膨張空間温度が低下しエンジンは停止するのではないか。

A（鈴木氏）：余熱のため暴走状態はすぐには収まらないため、暴走に対しては即座にブレーキで対応する必要がある。

Q（澤田氏）：安全対策として作動ガスを抜くことになっているが、急激な作動空間圧力の低下はピストンを破壊することにならないか。

A（鈴木氏）：その虞はあるが、アンロード弁も同時に開けることで、その対策としている。

Q（平田氏）：作動空間のガスを抜くのは、過剰な対応ではないか。

A（鈴木氏）：リリース弁は基本的に動作しない、最悪の状態を想定して設置している。

Q（平田氏）：機械式制動機は必要か、電気ブレーキで十分ではないか。

A（鈴木氏）：暴走時に確実に停止できるように設置している。

Q（平田氏）：ロッドシールはヒータ部に入れているのか。

A（鈴木氏）：ロッドシールはクーラ側のみに設置している。

Q（平田氏）：高圧のエンジンとなっているが、再生器ハウジング部の耐圧性に問題はならないのか。高圧容器の規格は順守しているのか。

A（鈴木氏）：規格は順守して設計している。またエンジン各部に歪ゲージを張った状態で水圧テストを実施し、耐圧性は確認している。

Q（中野氏）：高温側のピストンを断熱しているとのことだが、どのように断熱を行っているのか。

A（鈴木氏）：ピストンの上面にガス層ができるようステンレスキャップを取り付けている。

3. 講演2：『排熱利用スターリングエンジンの制御技術』

海上技術安全研究所 平田宏一氏

要旨：海上技術安全研究所で研究を行ってきた、船用排熱利用スターリングエンジンについての話題提供あった。

海上技術安全研究所では、船舶のディーゼル機関の排熱から発電をするスターリングエンジンの開発を鉄道・運輸機構（JRTT）の補助を受けて（株）eスター、東海運（株）と共同で進めてきた。当初開発したシステムでは、船舶の発電用ディーゼルエンジンの排気管に、3台の500W級排熱利用スターリングエンジンを設置したもので、航行中に排熱発電を行い鉛蓄電池に充電し、停泊中は充電した電力を船内に供給するものである。このシステムによって停泊中に発電機を停止することが可能となり、港湾域の大気汚染を防止することができる。陸上での性能試験の後、セメント運搬船のパシフィック・シーガルの発電用ディーゼルエンジンの排気管に取り付けて実船搭載試験を行い、システムの有効性を実証した。その後、陸上で3000時間程度の耐久試験を実施した。このとき出力変換機構のリニアベアリングの破損など課題が明らかになった。

次に、大出力化をした3kW級排熱利用スターリングエンジンの開発を行った。本エンジンは電気推進セメント運搬船の鶴洋丸へ搭載するもので、3基ある主機発電用ディーゼル

エンジンの一基の排気管に取り付ける。発電した電力は、インバータ、コンバータを介して船内の100VACに系統連携される。エンジンはインバータによって回転数制御が行われている。制御システムの開発では、初めから実エンジンで試験を行うことは危険であると判断し、誘導モータでエンジンの出力特性を再現させるスターリングエンジンシミュレータを製作して行った。

暴走時の対応は、作動空間とバッファ空間を連通するアンロード弁と回生抵抗を採用している。またブラックアウトやインバータトリップ時は、発電電力は回生抵抗に流れるような構造になっており、暴走を起こさないよう安全策がとられている。エンジンは当研究所のディーゼルエンジンの排気管に取り付け、基本性能の確認と、制御シーケンスの開発、JG船級取得を行った。

2011年10月にエンジンを船舶に搭載し、実運用を開始した。当初は安定した発電を維持していたが、2012年8月以降に性能低下を確認した。2013年1月に解放して内部を確認したところ、ピストン駆動機構が損傷していることが確認された。また、作動空間内部（特にクーラ/再生器間）が汚損している状態であった。現在は、修理を行い再度船舶に搭載し運用を再開している。

<質疑>

Q（鶴野氏）：300℃程度の排熱を利用するスターリングエンジンの熱交換器が十分な伝熱面積を確保することを考えた場合、どのような制約があるか。

A（平田氏）：細い伝熱管を多数配置することができれば、熱交換器性能を向上することは十分可能であると考えている。ただし、実際にはスートの付着や製造コストによって制限が生じている。

Q（澤田氏）：排熱利用機器にコストをかけるなら、元のエンジンの効率向上に資金を投入することが優先事項と思えるが、どのように考えているか。

A（平田氏）：ご指摘の通り、現状の排熱利用機器の性能では、採算はとれないと考えている。

Q（鶴野氏）：LNGの冷熱利用ではスターリングサイクルは大きなメリットがあるのではないか。

A（平田氏）：エンジン自体は高効率なものを製作できるが、排熱とLNG気化潜熱とのバランスが悪いため、大きな出力が得られないことが課題である。LNG再液化などのアプリケーションを考えると良いのではないかと考えている。

Q（澤田氏）：冷却水に海水を直接用いることが出来れば、圧縮空間温度をより下げることが出来るのではないか。

A（平田氏）：現状では、ディーゼルエンジン用に温調された清水を用いている。

Q（中野氏）：3kWの排熱スターリングエンジンは修理・再設置後、性能は回復したか。

A（平田氏）：まだディーゼルエンジンの負荷をかけた状態での性能を確認していないので不明である。

4. 討議

- ・ 複雑で高価なエンジンではなく、単純な構造のエンジンを量産し、安価なエンジンを多く取り付けることで発電量を確保することが、今後のエンジン開発の方向性になるのではないか。
- ・ スターリングエンジンを簡略な構造にすることはよいが、単純な構造では、十分な性能は確保できないのではないか。
- ・ 電気損失が大きくなるため、多くのエンジンを設置したとしても、シャフトは共通して、発電機を少なくするとよい。
- ・ 排熱利用スターリングエンジンにとっての最適な圧縮比を検討する必要がある。
- ・ 現状の規則では、スターリングエンジンを実用運転するときの解釈が難しい。今後、スターリングエンジンに関連した安全規格のルール策定を進める必要がある。

以上