

## S1-2

## 炭素循環エネルギー供給における高効率エネルギー変換技術の開発 Development of Efficient Energy Transformation Technology in Carbon Recycling Energy Supply

田辺光昭<sup>1</sup>, ○浅井朋彦<sup>1</sup>, 飯島晃良<sup>1</sup>, 木村元昭<sup>1</sup>, 小紫誠子<sup>1</sup>, 田中勝之<sup>1</sup>, 中根昌克<sup>1</sup>, 吉田幸司<sup>1</sup>  
Mitsuaki Tanabe<sup>1</sup>, \*Tomohiko Asai<sup>1</sup>, Akira Iijima<sup>1</sup>, Motoaki Kimura<sup>1</sup>, Satoko Komurasaki<sup>1</sup>, Katsuyuki Tanaka<sup>1</sup>,  
Masakatsu Nakane<sup>1</sup>, Koji Yoshida<sup>1</sup>

Abstract: Novel energy conversion techniques for transportation system based on the carbon-cycle system have been proposed. In terms of energy density and portability, “hydrocarbon” is still most reliable and useful fuel especially for transportation systems. To establish the sustainable carbon-cycle system, the hydrocarbon fuel has to be produced from carbon dioxide. In this project, we have addressed two critical development challenges of (1) solar thermal hydrogen production and (2) innovative thermal engine with highly compatible for various hydrocarbon fuels. The current state of research field and the fundamental phenomena in the proposed techniques have been explored.

### 1. 序論

輸送分野のエネルギー消費と、それに伴う環境負荷の削減は、地球環境と経済活動の持続可能性を広げるものであり、社会の要求するところである。輸送機器の多くは、これまで化石燃料を用いてきたが、有限の資源に頼らない持続可能なエネルギー源の確保と、それにより得られるエネルギーを蓄えるのに適した媒体が求められている。このような社会的要請を受け、自然／原子力エネルギー由来の炭化水素をエネルギー媒体として輸送機器の動かすことが一つの解と考えられる。炭化水素燃料はエネルギー密度が高く携帯に適している。また動力への変換に際して現在の石油系燃料を利用する技術を流用可能であり、かつ金属系の媒体と違い、原料が安価で保持するエネルギーの価格を物質価格とほぼ同等にすることができるため他用途との競合が少ないなどの利点がある。本プロジェクトでは、この炭化水素を媒体としたエネルギー利用技術開発のための熱工学分野の研究を行っている。

### 2. プロジェクト活動概要

4年計画のうち、前半2年間は研究者ごとの個別研究を実施し、その成果を考慮し共同研究として取り組むべき課題を絞り込み、装置整備を行った。優先的課題として、以下の2項目の研究を現在遂行している。

- ① 自然エネルギーによる効率的な水素生成法開発
- ② 燃料利用効率化のための新方式機関開発

炭素循環では二酸化炭素から燃料を得る必要があり、光合成による方法や水素を利用する方法が有望である。前者ではバイオ燃料研究が盛んであり、後者では原子炉による水素生成を前提とした方法が研究されている。

本プロジェクトでは、これに次いで有望な自然エネルギーからの水素生成法を扱う。また、新方式機関の開発では、従来型の実用型熱機関の欠点を見極め、サイクルを含めて機関の基本動作を新たにし、高効率で低環境負荷が実現できるエンジンを研究対象とする。それぞれのサブテーマにつき、以下の課題を設けた。

- ① 太陽熱水素生成：
  - a) 太陽熱・集光型・亜鉛化学ポンプ
  - b) 太陽熱・蓄熱型熱電変換
- ② 新機関：
  - c) PI (Plasma Ignition) エンジン
  - d) HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition) エンジン
  - e) ガソリン・サバテサイクルエンジン
  - f) タービンレスブレイトンサイクルエンジン

これまでの成果は、口頭発表 14 件、国際会議 12 件、学術雑誌 2 件にて公開した。また、企業の研究者（富士重工業およびスズキ）との連携も進め、産学共同発表 1 件を行うに至った。加えて、学会から 2 件の贈賞を得た。その他、新技術要素としては特願 2 件である。

### 3. 各研究要素の概要および成果

#### 3-1. 太陽熱水素生成に関する研究

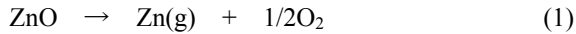
本研究では、太陽エネルギーを集光して高温条件下において亜鉛を媒体とした水の熱分解サイクルによる水素生成方法（集光型・亜鉛化学ポンプ）の研究をおこなっている。また、曇りの日や夜間など、亜鉛化学ポンプにおける反応に十分な高温条件が得られない、中低温域の熱エネルギーを利用した蓄熱型熱電変換水素生成方法についても研究を進め、総合的なエネルギー

1 : 日本大学理工学部, College of Science and Technology, Nihon University

一変換効率を上げることを考えている。

a) 集光型・亜鉛化学ポンプ型水素生成装置

太陽光を集光してエネルギー密度を増大し、1300 K 以上の到達温度が望める太陽集光システムは、有望な熱源として期待されている<sup>[1]</sup>。ここでは、Zn/ZnO 系を用いた金属酸化物による二段階水熱分解サイクルについて研究を進めている。Zn/ZnO 系のサイクル反応は下記のように進行する。



この反応を促進するため、点集光型反応装置を考案した。本装置は太陽光を点集光させるフレネルレンズ、反応容器、過熱蒸気発生器より構成されている。フレネルレンズの寸法は 1400×1050 mm、厚さ 3 mm、焦点距離 1200 mm であり、1300 K 以上の到達温度が確認された。反応容器 (図 1) は内径 95 mm、深さ 120 mm の真空チャンバーであり、太陽光導入面には耐熱温度 623 K、透過率 90 % のコーディアルガラスを採用した。容器には真空ポンプ、発生ガス採集装置、過熱蒸気導入管、熱電対、圧力計が装着されており、容器内の各種状態をモニターできるような仕組みとなっている。また、容器内に粉末状の試料を入れる場合のセラミックス製のつぼ、あるいは板状の試料が設置可能である。

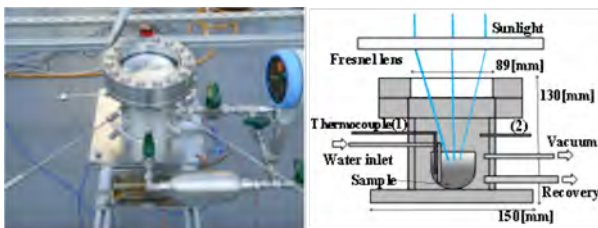


Figure 1 Experimental apparatus with a Fresnel lens and Zn/ZnO cycle for producing hydrogen system

過熱蒸気発生器はガラス製フラスコ内の純水を太陽光で沸騰させ、さらに水蒸気が通過するステンレス管を加熱して過熱蒸気を反応容器内に導入するものである。高温熱還元反応 (式 1) と高温水熱分解反応 (式 2) は交互に発生する必要があるが、本研究では、実験装置の簡単化と各過程ごとの反応を確認するために、二つのプロセスを分けて実施した。両プロセスが確認された後、サイクルとして実現可能な装置に改造する方針である。

b) 蓄熱型熱電変換水素生成装置

蓄熱型熱電変換型水素生成装置は、中低温の熱エネルギーを電気エネルギーに変換し、その電力で水を電気分解し、水素を生成する。中低温の熱エネルギーとしては、上記の集光型・亜鉛化学ポンプ型水素生成装

置からの排熱のほか、集熱器による太陽熱も考える。研究を遂行するに当たり、太陽熱集熱器による熱エネルギーを利用することから始める。

図 2 に太陽熱集熱器を用いた装置の概念図を示す。集熱器内の蓄熱流体は、太陽熱で温度が上昇し、流体の密度差による自然対流で循環する。温められた蓄熱流体は、熱電変換モジュールが設置された熱交換器からなる熱電発電機に移動し、熱交換器外側は放熱器内の冷媒によって冷却され、そのときの熱電変換モジュールの両端における温度差によって電力が発生する。蓄熱流体は、熱電発電機内で冷却されて温度が低下し、集熱器に戻る。このときの電力により水を電気分解し、水素を生成する。

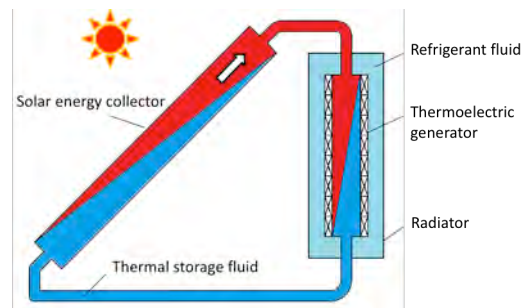


Figure 2 Schematic diagram of the test apparatus with thermal storage fluid and thermoelectric generator for producing hydrogen system

本研究では、中低温域の熱エネルギーに対して利用する温度領域に対して最適な水素の生成条件を探索すべく、実機試験のほか、蓄熱流体の集熱部および熱電変換発電機の熱交換部における熱流動解析をおこない、蓄熱流体の選定や充填条件などを明らかにする。そのため、実機試験装置の製作ほか、高温温度差を伴う非圧縮流れの数値計算のための計算スキームを開発し、極めて高温かつ高レイノルズ数の複雑な流れ場の構造解析を実施した。今後、これらの計算モデルを用いて蓄熱流体の流れの解析を行う予定である。

3-2. 新型機関に関する研究

ガソリン機関の高効率化に必要な、希薄域での点火技術として「プラズマ点火 (PI)」、ピストンエンジンの高効率クリーン化技術として HCCI 燃焼、ガソリン・ディーゼルの枠に囚われずに理想形を追求した新エンジンとして「ガソリン・サバテサイクル」の提案、ジェットエンジンの新たなハイブリッド化コンセプトの提案を行い、研究を行った。成果概要を以下に示す。

c) PI (Plasma Ignition) エンジン

ガソリン機関の熱効率を飛躍的に向上させるには、希薄燃焼が必要である。しかし、従来方式では、希薄条件での安定燃焼が困難である。そこで、希薄燃焼の火炎伝播の基礎データを収集する<sup>[2]</sup>と共に、プラズマによる革新的点火技術の確立を目指し研究を行った。

実験で用いたプラズマ生成法は、低周波（～10kHz）インバータを用いたもので、10kV 程度のピーク電圧で大気中でストリーマ状のコロナ放電を形成する。

図 3 に、試作したプラズマ点火機関の 3D 図と放電時の写真を示す。燃焼室中心でプラズマを発生させ、観測窓を介し、その時の燃焼を高速度撮影する。当量比 0.77，プラズマ点火時の可視化画像の一例を図 4 に示す。プラズマの発光が起こった後、その周囲に火炎が生じ、その後燃焼室全体で自着火が起こる。つまり、プラズマによって燃焼が誘発されることがわかった。

今後、このプラズマアシスト点火法についての効率の評価を行うため、燃焼状態の放電電圧や周波数への依存性を実験的に評価する計画である。

また、電極距離、電極の先端形状、電極周りのガス流速などが、プラズマ点火の効果に影響を及ぼす可能性がある。これらのパラメータを最適化するため、点火機関の周りを数値解析し、最適化を行う予定である。

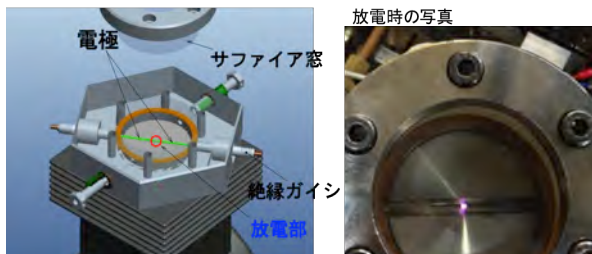


Figure 3 Schematic view of the test engine

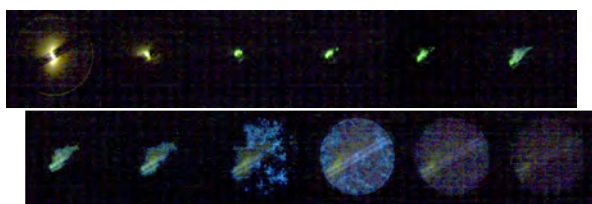


Figure 4 Color photos of plasma assisted combustion

d) HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition) エンジン

HCCI は、高圧縮比で希薄運転できるため、高効率化とクリーン化が両立可能な燃焼方式である。しかし、高負荷時に筒内圧力振動を伴う異常燃焼が発生する。

本研究では、ボア全面を可視化したエンジンを用いて、異常燃焼発生時の HCCI 燃焼挙動を明らかにした<sup>[3]</sup>。

図 5 に、異常燃焼が起きていない場合と起きている場合それぞれにおける、測定結果を示す。図中の「1」の条件では、シリンダ内圧力に振動が起きているのが

分かる。その時の可視化写真を見ると、図中の赤い波線で囲われている時期に、筒内で多くの混合気が急速に自着火しているのが分かる。これにより、HCCI で異常燃焼が起こる理由を明らかにした。今後、燃焼開始前の混合気のシリンダ内での広がり具合を推定するため、流体数値計算による混合気の移流拡散解析も合わせて行う。

この異常燃焼を防ぐ手法を考案し、特許出願を行った（特願：2012-249455）。現在、その効果を実証するためのエンジンを試作中である。

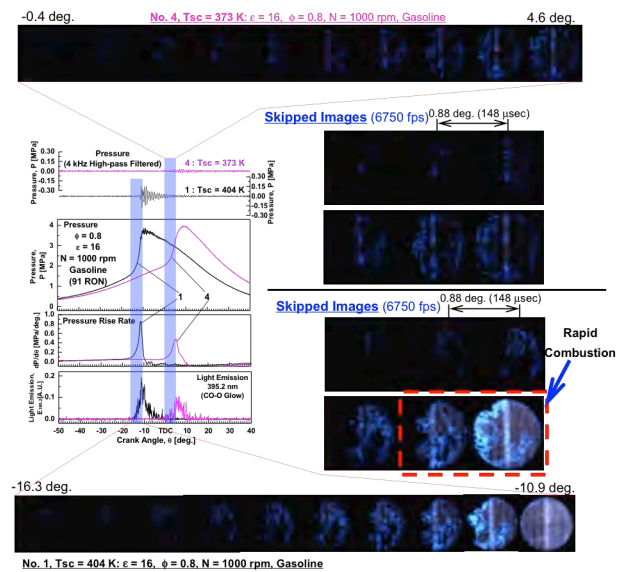


Figure 5 Visualization of abnormal HCCI combustion

e) ガソリン・サバテサイクルエンジン

現在の自動車用内燃機関では図 6 に示すように、ガソリン機関は定容燃焼である Otto サイクルで、低速ディーゼル機関は定圧燃焼であるディーゼルサイクルで作動している。また、自動車用の高速ディーゼル機関は、燃焼期間が短いため定容及び定圧燃焼を行うサバテサイクルで作動している。ここで、サバテサイクルにおいて、図中に示すように理論熱効率は定容燃焼分が高い程向上するものの、高速ディーゼル機関の定容燃焼は着火遅れ期間に噴射された燃料が急激に燃焼するため、制御することが不可能であり、また急速燃焼のため燃焼騒音及び NOx が発生し、定容燃焼分は少ない方が良く考えられている。

本研究では、ガソリン機関をサバテサイクルで作動することを提案する。ガソリン機関をサバテサイクルにて作動するために、希薄予混合燃焼と気筒内燃料直接噴射を導入する。すなわち、希薄予混合気を火花点火で着火することで定容燃焼を行い、次いでディーゼル機関のように気筒内に燃料を直接噴射することで定

圧燃焼を発生させる。この全く新しい燃焼方式によって以下の効率向上、排出ガス低下効果が期待される。

- ・ 定容燃焼期間が予混合燃焼であるため制御が可能となり、NOx と燃焼騒音が減少。
- ・ 希薄燃焼であるため高圧縮比により熱効率が向上。
- ・ 空気の酸素を全て利用するため高熱効率が可能。
- ・ 最高燃焼圧力の低下によりエンジンの軽量化が可能。
- ・ 量論比燃焼であるため三元触媒が使用可能。

内燃機関が発明されて以来 120 年が経過しているが、ガソリン機関をサバテサイクルで作動した例はなく、高効率、低公害な全く新しい熱機関となる。

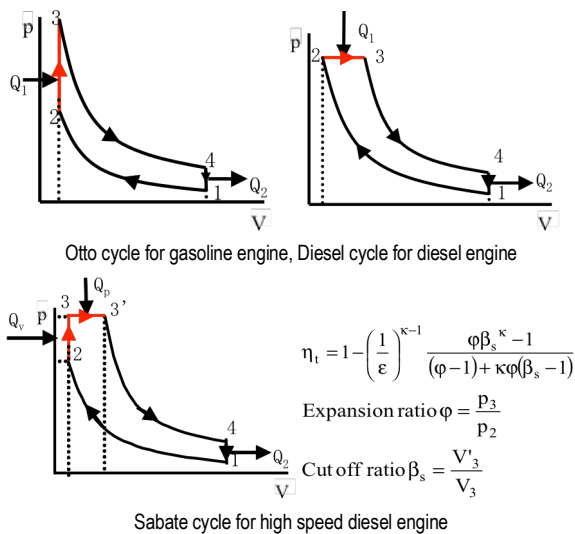


Figure 6 Theoretical cycles for reciprocating engine

f) タービンレスブレイトンサイクルエンジン

従来ジェットエンジンはガスタービンをコアエンジンとして用いて高温高压のガスを生成し、それをノズルで膨張させるて推進のための噴流を作り出している。コアエンジンからのガスは十分高压でなければならないが、エンジン内で熱サイクルを動作させるためにさらに高压が必要であり、そのための圧縮動力や系の高温高压化が問題となり、性能向上が困難となっている。この問題を解決するために、コアエンジンを熱機関ではなく、定圧高温動作の燃料電池 (SOFC など) による発電・発熱と、その電気をを用いた電動機駆動の圧縮機で担うことを考え、系の高温高压化を回避しつつ、高い熱効率が実現できるかどうかの検討を行った。

図 7 は本発案のエンジンと従来型エンジンのシステム図の比較である。圧縮機を電動機駆動とすることで、コストの大半を占めるタービンが不要となることが分かる。また、熱仕事変換の観点からは、ブレイトンサイクルとして動作することで燃料電池の排熱を回収できるサイクルであることも特徴である。図 8 に性能試

算結果を示す。圧縮機の断熱効率 90%、圧力損失率 20%、電極損 30%、電気駆動系損 10%での推算である。熱サイクルとしては低温低圧動作にもかかわらず高い効率と比出力を得られることが確認できた。

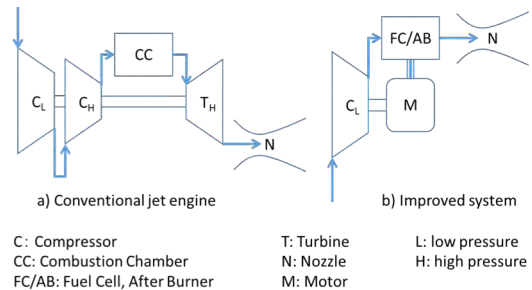


Figure 7 Turbinelles design of jet engine system

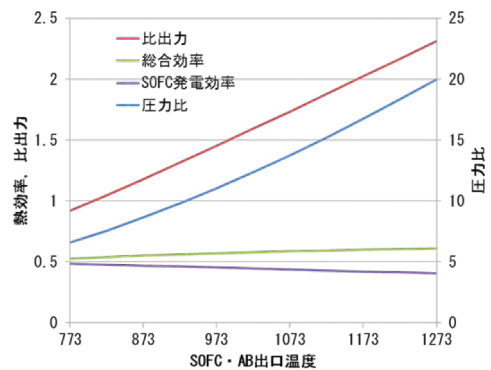


Figure 8 Predicted performance of the new system

4. まとめ

輸送機器への再生可能エネルギーの導入を早期に実現する上で有効なエネルギー変換効率向上を目指し、現在普及していない太陽熱利用の燃料生成と新型熱機関に関する調査・基礎現象把握を行い、複数の新技術を発案するに至った。今後、実現に向けた知見の獲得と技術開発を継続し、実現可能性を明らかにしていく。

謝辞

この研究は理工学部シンボリックプロジェクトにより実施されたものである。また富士重工業(株)勝俣氏、スズキ(株)中間氏始め諸氏、日本機械学会 E S 部門研究会 (A-TS 07-52) のご協力に謝意を表します。

参考文献

[1] 郷右近ほか, J. Japan Inst. Energy, Vol.90, p.339, 2011  
 [2] Tanabe, M., Nakane, M., Asai, T., Komurasaki, S., Kimura, M., Yoshida, K., Iijima, A., Nakama, K., Katsumata, M., 5th PACME, B1-4-0056, 2012, 2011  
 [3] Iijima, A., Tanabe, M., Yoshida, K., Shoji, H. et al., AE paper 2013-32-9166, 2013.