

宇宙用太陽熱集光式レシーバーのための高集積式アルカリ金属熱電変換器 (AMTEC)の熱設計

工藤 宏太 (芝浦工大・院), 田中 耕太郎 (芝浦工大), 河邊 真之介 (芝浦工大・院),
藤井 孝博 (産総研), Min-Soo Suh (KIER)

Thermal Design of highly integrated alkali metal thermal to electric converter (AMTEC) for space solar concentrating receiver

Kota Kudo*, Kotaro Tanaka, Shinnosuke Kawabe, Takahiro Fujii, Min-Soo Suh

*Shibaura Institute of Technology Graduate School, 3-7-5 Toyosu, Koto-ku, Tokyo 135-8548
E-Mail: md18030@shibaura-it.ac.jp

Abstract: This report describes the application of Alkali Metal Thermal to Electric Converter (AMTEC), a kind of thermal regenerative concentration cell using Na as a working medium, to small solar thermal power generation systems that are expected to be used in space environment. We analyze the design of the highly integrated type AMTEC cell (1 kWe) for the solar power generation receiver and report thermally and electrochemically analyzed performance.

Key words; AMTEC, sodium, β "-alumina, concentrated type solar receiver

1. はじめに

アルカリ金属熱電変換(AMTEC)は、 Na^+ イオン伝導性固体電解質を用いる濃淡電池の一方式である。AMTECは25~35%の高い変換効率と小型・軽量化が可能であるため、宇宙環境における各種応用が期待できる。AMTEC高温側作動温度は 600°C ~ 900°C である。本研究では、小型太陽熱発電レシーバーへの組み込みに注目し、レシーバー構造に対応させるための高集積式セル設計の解析結果を報告する。

2. 発電原理と特徴

AMTECは、 β "アルミナ固体電解質(BASE)と呼ばれるセラミック材料の Na^+ 伝導性を利用する。高温側に位置するBASE両端の電極より、温度差で生じるギブズ自由エネルギー差を電気エネルギーとして取り出す仕組みである。詳細なAMTECサイクルの原理と性能解析方法は、以前の論文に示されている。

AMTECの特徴は、電気化学セルであるため装置大きさに性能が依存しないこと、熱機関と同等の高い効率が得られること、 Na が作動媒体のため高熱流束が可能で、小型化が可能であること、構造が簡素で長期メンテナンスが不要であることなどである。宇宙環境における比較的小規模電源に適する発電方式であるといえる。

一方、AMTECセルを具体的に作製しようとすると、気密性保持が難しく、熱サイクル繰り返し特性、カソード電極材料の開発が難しい点などの課題が残されている。現在までに市販されたセルは、米国AMPS社が宇宙探査衛星用に開発した例に限られている。AMTECの開発レベルは現在まだ研究室レベルである。

3. 高集積式セル構造の検討

米国AMPS社-NASAが開発したPXシリーズセルは、

直径30~50mm, 長さ100 mm程度の円筒形で、3~10Wの発電特性が達成されている。図1はPX-8と呼ばれる探査衛星用電源に設計されたセルである。このシリーズのセル体積あたりの出力密度は $60 \text{ kWe}/\text{m}^3$ 程度である。スターリングエンジンは形式に依存するが、小型発電機で $10\sim 500 \text{ kW}/\text{m}^3$ である。AMTECは電池構造であるセル体積あたりの発電効率を高めるためことで、用途を広げることができるといえる。

また、単位体積あたりの出力密度を上げるために、体積あたりの電極面積を増加させると、電極面積あたりの熱損失の低減効果が期待できる。すなわち、高集積式セルにより、体積あたりの出力密度と変換効率の両者を同時に向上させることが期待できる。

まず検討したのが、より細かいBASE管を用いるセル構造である。図2は、芝浦工大・産総研による直径3mmのBAEE管を用いたセル構造である。直径30mmの円筒容器中にBASE管が27本設置される。性能解析による計算結果により、効率26%、体積あたりの出力密度は $90 \text{ kW}/\text{m}^3$ 程度への改善が期待できる。

より細かいBASE管を用いる図2のセル構造において、管径をより小さくした場合の性能を計算により検討した。



Fig. 1 AMPS-NASA PX-8 cell (21% efficiency, power density $60 \text{ kWe}/\text{m}^3$)²⁾

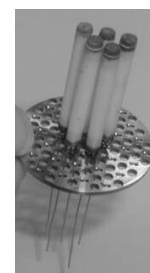


Fig. 2 SIT-AIST Cell Inside (design value: efficiency 26%, power density $90 \text{ kW}/\text{m}^3$)

その結果、管径は1mm程度で最大出力が得られる解析結果を得た。管径をこれ以上小さくすると、低压側空間を流れるNa蒸気圧力損失の影響が大きくなることで電極面積あたりの出力密度が小さくなり、全体の出力密度が低下する。細管形状の固体電解質を用いる場合、管径1~2 mm程度が最適で限界であることがわかった。

ここで、図2のセル構造においては高温側発電部に外部熱源からの熱移動の難しいことが指摘できる。解析モデルでは、高温部の温度差は生じないと仮定して計算している。実際には特に側壁から離れた中央部まで温度差を小さく伝える方法を導入する必要がある。1つの方法は、Naヒートパイプである。細管ヒートパイプをBASE管に沿わせて配置することで、小さな温度差で大きな熱移動が期待できるが、構造的には複雑となる。

そこで、本研究では高温側熱源から電極部への熱移動促進方法として、発泡金属を用いる方法を検討した。これまでの研究により、熱移動促進効果により、効率15%から19%(950K-500K)に向上する解析結果を得られている³⁾。

4. 発電レシーバー概要

図3は円筒形状セルを小型太陽熱レシーバーに組み込んだ設計例である。元となるレシーバーは地上用の1 kWeスターリングエンジン用の設計³⁾である。同じ1kWe出力となるようにレシーバーユニットを設計すると、図3の右側のような構造となる。AMTECによる発電装置は、体積あたりスターリングエンジンの半分以下が可能で、宇宙環境用として小型・軽量化に適した設計である。

5. 平板BASEセルと間隔、電極面積の影響

さらなる高出力なセル構造について検討したのが、薄板BASEを用いる平板型セルである。従来のセルはすべて円筒BASE管を用いた構造である。平板型セルは、気密性保持の点で課題は残されているが、どの程度まで性能向上が可能であるか計算による検討を行った。図4は平板構造の概略である。円筒構造と比較して、BASE両端の空間の寸法が、自由に最適化できることが特徴である。

図5は計算結果である。BASE板の設置間隔を変えた際の、電極面積あたりの出力(左軸)と体積あたりの出力(右軸)である。この計算値にも温度差の効果は含まれていない計算結果であるが、1100Kの際の最大出力密度は700 kW/m³が得られることがわかった。小型熱機関と比較して同等以上の出力密度である。

6. 将来型熱電子-AMTEC複合セル

図6はAMTECの高温側に熱電子発電素子(Cs)を複合させたセル構造である。両者を電気・熱的に直列接合させた点の特徴で、入力温度1600K、中間温度1000K、排熱温度577Kの際の変換効率は33%である。またAMTEC排熱温度は300℃程度ある。さらにボトムでゼーバック熱電、小型熱機関を設けるこ

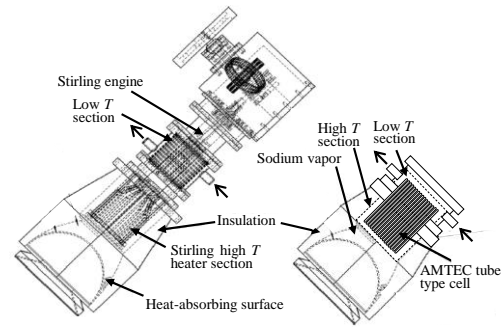


Fig. 3 Stirling generator incorporated in solar thermal receiver⁴⁾ and comparison with AMTEC (1 kWe)

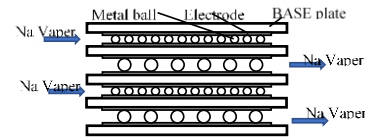


Fig. 4 AMTEC cell structure using flat solid electrolyte

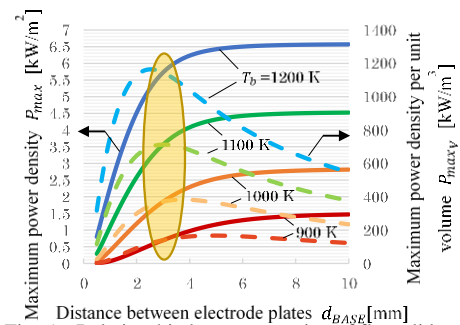


Fig. 5 Relationship between spacing of flat solid electrolyte and power density

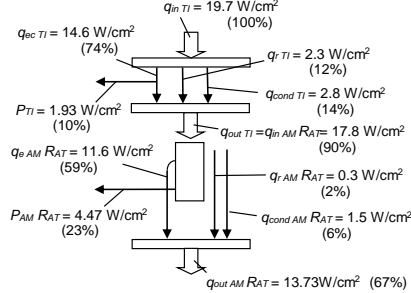


Fig. 6 Performance of thermionic-AMTEC combined power generation element

とで50%を超える総合効率が可能と計算される。

7. おわりに

宇宙環境において太陽エネルギーを変換する際、太陽電池と比較して熱発電の特徴を生かしやすい。雲等に遮られない連続的直達日射と熱損失低下により、効率的な高温集光集熱が可能である。一方、排熱はラジエーター装置が課題と予想できる。本報では、円筒型に加え平板型AMTECセル構造とその発電特性を検討した。現状で変換効率20~25%程度、出力密度100 kWe/m³、将来型である平板形状セルで30~35%、700 kWe/m³の解析結果を得た。複合化によりさらに効率向上が期待できることを示した。

参考文献 1)田中ら, J. Jpn. Inst. Energy, 98, 11(2019), 285-291. 2) J. E. Pantolin, et al., Proc. 36th IECEC, CT-43, (2001). 3)工藤ら, 第28回日本エネルギー学会大会講演要旨集, 5-2-1, (2019), 168-167. 4) H. Chang, et al., Energy Conversion and Management 106, (2015) 1362-1369.