

〔解説〕

アルカリ金属熱電変換 (AMTEC)

Alkali Metal Thermoelectric Converter (AMTEC)

増田 俊久 本多 武夫 藤井 孝博
T. MASUDA T. HONDA T.FUJII

The alkali metal thermoelectric converter (AMTEC) utilizing the sodium ion conducting β'' -alumina is a device to convert directly heat energy to electric energy. It is characterized by high conversion efficiencies, high power densities, no moving parts and low maintenance requirements. Because of these merits, AMTEC is one of the most promising candidates for dispersed small-scale power station, remote power station and aerospace power systems.

The AMTEC research efforts are reviewed. At present, advanced radioisotope power system (ARPS) for deep space probe is under development in NASA Jet Propulsion Lab. This system consists of General Purpose Heat Source and AMTEC and supplies the electricity to the deep space probe such as Europa Orbiter to be launched in 2003 and Pluto-Kuiper Express in 2004. In ETL, the basic research on the electrode materials, the electrode structures, the specific power densities, the conversion efficiencies, the series connected cells experiments, the high temperature seal system, β'' -pump and wick pump have been conducted.

§ 1 まえがき

宇宙開発が人工衛星，通信衛星の段階から宇宙ステーション，月面基地，宇宙工場などへと段階が進むにつれ，宇宙での有人宇宙活動において見込まれる電力や熱のエネルギー需要は，大幅に増大すると考えられている。Fig.1 に宇宙開発において想定されている電力需要の動向予想を示す。1970年代の人工衛星の電力需要は1kW以下であり，おもに太陽電池など信頼性の高い静止機器が使用されていたが，2000年代初頭の宇宙ステーションでは 100kW，さらに後年の月面基地では300kW～1 MW程度の電力需要が見込まれている。これに応えるためには，クリーンで無尽蔵な太陽エネルギーを一次エネルギーとする宇宙熱利用技術の基礎を構築するとともに，エネルギー利用の高度化を図ることが必要である。

アルカリ金属熱電変換器 (AMTEC) は Na^+ イオン導電性の β'' アルミナ固体電解質を使用した直接熱電変換器であり，この概念は1962年 Ford Motor社の J.T.Kummer により最初に提案され，その後1968年には J.T.Kummer と N.Weber により特許が取得されている。当初この熱電変換器は Sodium Heat Engine(SHE) と呼ばれていたが， Na^+ イオン導電性の固体電解質ばかりではなく，他のアルカリ金属イオン導電性の固体電解質にも適用できるため，Alkali Metal Thermoelectric Converter(AMTEC)と呼ばれている。この熱電変換方式の変換効率は15～30%と試算され，また出力密度は約 $1\text{W}/\text{cm}^2$ 程度が可能であり，他の熱電変換方式や燃料電池などと比べても大きく，原理的可能性が大きい変換方式であるといえる。AMTECは出力密度が大きく，発電効率も比較的高いので小型軽量電源として最も有望な発電システムと考えられる。宇

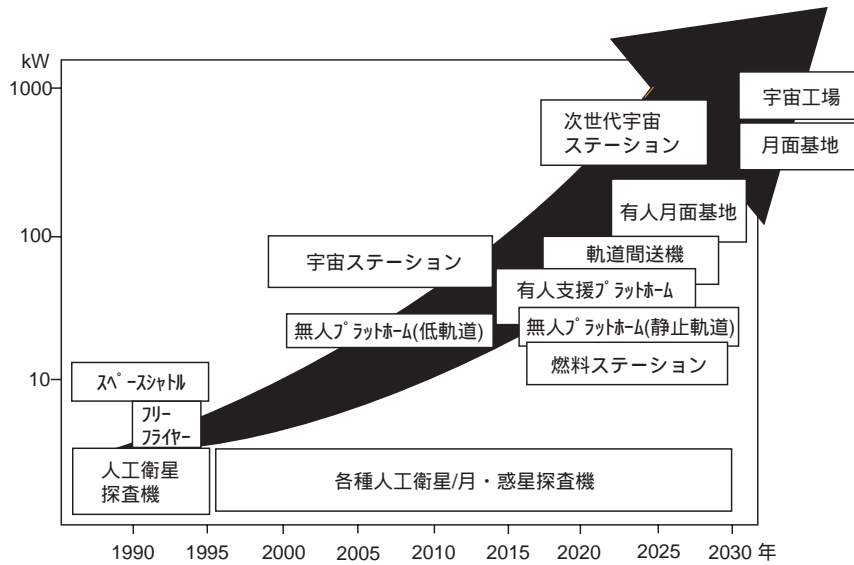


Fig.1 Power demand estimate in space development

宇宙電力システムはすべて地球上より打ち上げるため、システムの単位出力あたりの比質量を小さくすることが最も重要な課題となっている。このため信頼性の高い従来の発電システムに代わり、出力密度の高い種々の発電方式が宇宙用電源として開発、検討されている。太陽エネルギーを用いた宇宙用エネルギー変換システムとしては、集中太陽光を熱源とするブレイトンサイクル、スターリングサイクル、アルカリ金属熱電変換+半導体熱電変換および熱電子発電+アルカリ金属熱電変換+半導体熱電変換などが提案されている。後者2つは静止型発電であり、最近のシステム解析により、太陽電池の変換効率を超える高い変換効率が期待できることが明らかにされており、太陽エネルギーを一次エネルギーとする宇宙用エネルギー変換システムとして、有用なものと考えられる。

本報告では、AMTECの発電原理および開発課題を述べ、内外の研究機関の開発現状を述べる。

§ 2 AMTECの発電原理と課題

Fig.2 にAMTECの動作原理を示す。真空容器の高温側に置かれたアルミナ固体電解質 (BASE) の両端に電流リードであるSecondary Wickと多孔電極を置く。Wickポンプである Primary Wick から蒸発したNa蒸気は Secondary Wick を通過してアルミナ固体電

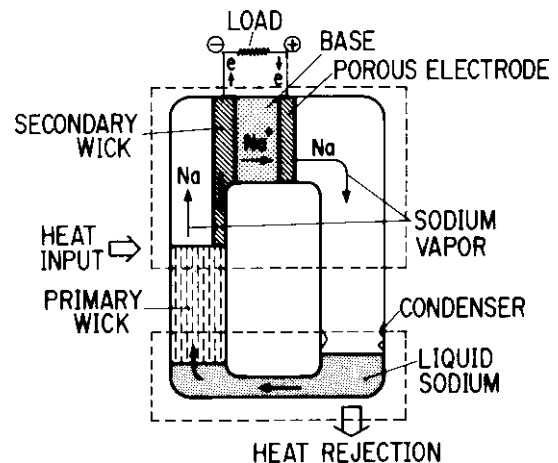


Fig.2 Principle of AMTEC

解質にナトリウムを供給する。Secondary Wickとアルミナの界面で Na^+ イオンと電子が発生し、電子は外部負荷で電力を発生し多孔電極に達する。一方、アルミナを通過した Na^+ イオンは多孔電極面で中性化され真空中に蒸発し低温側で凝縮する。すなわちアルミナ両端のナトリウム蒸気圧差すなわち高低温度差により発電する。発電を持続させるためには、低温側のNa液を高温側に連続的に移動させる必要がある。このために電磁ポンプやウイック毛細管力を利用したウイックポンプが利用されているが、宇宙用としては無重力でも容易に作動するウイックポンプが利用されている。

AMTECの発電性能は高温側温度，低温側温度，内部抵抗，熱損失で決まる。高温側温度は高いほど発電性能は増大するが，「アルミナ管にNaを供給する金属管の耐熱温度により，その上限温度は1200K程度である。一方，低温側温度は，550K以下ではNa蒸気圧が無視できる程小さいが，550Kを超えるとNa蒸気圧が急激に大きくなるため圧力差が小さくなり，動作電圧が急激に小さくなる。このため低温側温度は550K程度が最適である。内部抵抗には「アルミナ抵抗，電極薄膜抵抗，電流母線抵抗，各種Na蒸気流圧力損失，電極反応抵抗などがある。現在最も大きい内部抵抗は「アルミナの抵抗であり，肉厚を薄くして「アルミナの抵抗を小さくすると大幅な出力密度の改善が期待でき，必要な機械的強度を考慮して最適化する必要がある。電極薄膜抵抗は電極の多孔性と肉厚に依存し，これらを最適化する必要がある。現在は電極から電流を集電するために，電極面に金属メッシュを巻き，この上に数本に電流母線を沿わせ，これを針金で巻き締める方式が一般的である。もう少し簡便な電流集電リード構造を開発する必要がある。また電流母線には抵抗率の小さな無酸素銅が使用されるであろうが，電流母線の一端が高温で他端が室温であれば，母線を通して大きな熱伝導損失が生じ，変換効率が低下する。このため電流母線は動作温度と等温にする必要がある。また同時に「アルミナ管中に挿入した電流母線は気密にする必要があり，「アルミナと金属の高温シール技術の開発は重要である。その他，蒸気圧力損失，反応抵抗などの大きさを見積り，これらを低減化する必要がある。熱損失は基本的には真空中の高温側から低温側へのふく射熱損失である。ふく射熱損失はふく射率，反射率の最適化，すなわちセル構成材料の選定およびふく射面積の低減化，すなわちセル構成により決まるので，最適なセル構造を開発する必要がある。また，単セルの動作電圧は0.5~0.7V程度であり，動作電圧を上げるため多数のセルを直列接続し，これらをスタック化する構造を開発する必要がある。

§ 3 米国における研究開発の現状

米国におけるAMTECの研究は深宇宙探査衛星用電

源として研究開発されている。NASA Jet Propulsion Lab.(JPL)は2003年にEuropa Orbiter，2004年にPluto-Kuiper Express (PX Mission)などの深宇宙探査衛星を打ち上げる計画である。Europa(エウロパ)は木星の衛星の一つであり，表面の氷層の下に水や生命の存在が期待されており，またPluto(冥王星)はまだ近接探査されていない惑星である。これらの探査衛星用の電源としてARPS(Advanced Radioisotope Power System)の開発がなされている。この電源は放射性同位元素(酸化プルトニウム)をグラファイトで覆ったGeneral Purpose Heat Source(GPHS)を熱源として，出力150W，運用年数~15年(Europaまでの飛行時間3.5年，Plutoまでの飛行時間9年)の性能が要求されている。このARPS計画のもとに，JPL，Advanced Modular Power Systems(AMPS)，Orbital Sciences Corporation(OSC)，USAF Research Lab. Phillips Research Site(AFRL)，The University of New Mexicoなどの研究機関がAMTECの研究を行っている。

OSC社はGPHSとAMTECとを組み合わせた発電システムの詳細設計を行っている。Fig.3にGPHSとAMTECとを組み合わせたARPSを示す。AMTEC発電セルは，その内側に9個の「アルミナ発電素子を内包する筒状形状で，いわゆるパイプ型発電セルである。発電システムは，中央に合計熱出力約1kWのGPHSモジュールを置き，その両側に4個ずつの発電セル，合

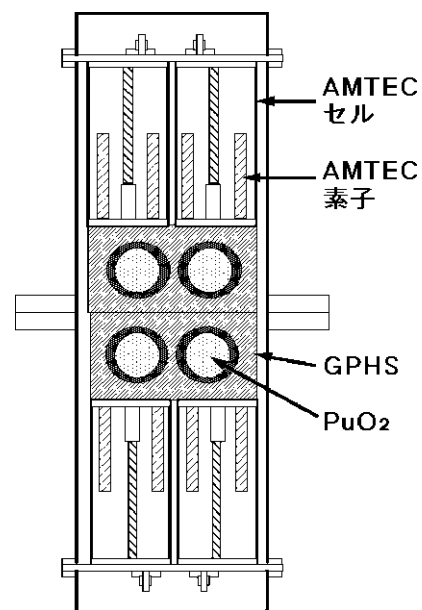


Fig.3 OSC AMTEC generator design

計8個の発電セルでGPHSモジュールを挟む構造である。種々の詳細設計を行った結果、ミッション終了時(EOM)の性能は、出力176W、効率18.4%、質量6.55 kg、比出力26.9W/kgと試算されている¹⁾。

AMPS (<http://www.ampsys.com/>) はAMTEC発電セルを製作できる唯一の会社であり、ARPS計画の中心的役割を果たすとともに、AMTECの地上用電源としての応用研究も積極的に展開している。AMTECの発電性能は " アルミナ発電素子の寸法 (出力電流を決める), " アルミナ発電素子の数 (出力電圧を決める), 高温動作温度, 熱シールド方式および使用材料 (発電効率を決める), 電極耐久性などのパラメータで決定される。Pluto-Kuiper Express (PX) およびEuropa Orbiterに対応出来るシステムとしてEPXシリーズの詳細最適化設計を行っている。EPX-1Eセル設計では、外径0.4インチ、長さ1インチの "アルミナ管を用いて発電素子を製作し、この発電素子8個を外径2インチ、長さ4インチの管に収め、これを発電セルとする。この発電セル4個をGPHSの4辺に置き発電モジュールとし、このモジュールを4段に重ね発電システムとしている。これによりミッション開始時(BOM)において電圧28V、出力140~143Wのミッション性能を試算している²⁾。現在、PXシリーズの発電セルの性能試験が行われている。PX-5発電セルは6個の発電素子を内包する発電セルであり、動作温度1023Kにおいて開放電圧3.2V、短絡電流3.3A、出力約3Wが、動作温度1123Kにおいて短絡電流4.6A、出力約5Wが得られている³⁾。またこのタイプの発電セルは USAF Research Lab. で耐久性の評価試験が行われており、現在までに累積15000時間以上の耐久性能が実証されている。またAMTECの地上用電源として応用も検討されており、電気出力500Wの家庭用マイクロコジェネシステムの概念設計がなされている⁴⁾。燃焼ガス加熱AMTECシステムでは、発電セルのステンレス管壁を通して極微量の水素分が浸入し発電性能を低下させることが判明した。窒素ガス中に1%の水素ガスを混合したガスを毎秒1ccの流量で流し発電出力の変化を見たところ、水素ガスを流す前の出力1Wが水素ガスを流すことにより0.88Wに低下し、水素ガスを止めることにより出力はしだいに回復することが報告されている⁵⁾。

JPLは電極の耐久性の評価研究を行っている。電極

材料には Mo, W, Rh, Pt を選定し、スパッタリング法により薄膜電極を作製し、評価試験装置によって詳細に電極性能を評価し、その劣化機構を検討している。その結果、Rh/W合金膜電極が現在主流であるTiN電極より耐久性に優れていること、動作温度を低温化すれば耐久性は増大することなどを報告している⁶⁾。

§4 電総研における研究開発の現状

電総研においては、昭和63年から平成5年まで、先導的基盤的省エネルギー技術研究としてAMTECの研究を行い、Na液温度1173Kにおいて出力密度0.79W/cm²、最大出力密度が得られる動作点において変換効率30%、2本単セルを直列接続してNa液温度1073Kにおいて出力12Wを達成し、これらの成果は別報で報告されている^{7,8)}。本報告ではこれ以降の成果についてとりまとめ報告する。

モリブデン薄膜電極より耐久性が優れている窒化チタン薄膜電極を開発して、各種のセラミック基板の上に、反応性スパッタ法により窒化チタン薄膜電極を作成し、抵抗率の基板の種類、膜厚および温度に対する依存性を調べた。抵抗率は基板と薄膜との線膨張率の違いにより温度依存性が異なり、抵抗率の温度係数は、マグネシアの場合は正、アルミナの場合はほぼ一定、シリカの場合は負の値を示した。" アルミナは高温領域で導電性を持つため測定出来ないが、その線膨張率はアルミナとほぼ同じであり、抵抗率も同じ値を持つと推定できる。窒化チタン薄膜電極を用いた発電実験を行い、Na液温1134Kにおいて開放電圧は1.29V、最大出力密度は0.47W/cm²を得た。これらの値はモリブデン薄膜電極で得られた結果とほぼ同等であった。

アルカリ金属熱電変換は1100K程度で動作し、ナトリウム蒸気圧差を利用する発電技術であるため、高温でのセラミックと金属との気密・接合技術の開発が必要である。これには、活性金属法による " アルミナ固体電解質と金属との接合技術を開発した。Ti, Ni, Cuの各組成を変え、粉末混合法および線材圧接法によりロー材試料を作成し、真空炉およびDTAによって評価試験した。粉末混合法では、各組成間の接触度合いは良く、均一に溶け合ったロー材が得られた。線材圧接法では各組成材間の接触は充

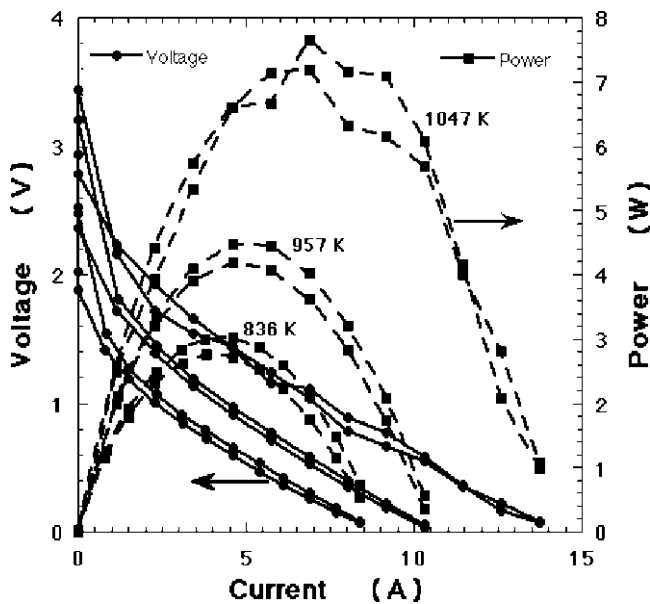


Fig.4 Current-voltage-power curves of 3 series connected cells

分であるが、組成がずれるなどの問題がある。融点を制御するため、これに Zr を添加した Ti-Cu-Ni-Zr ロータを用いて " アルミナ管を直接金属管に高温接合し、TiN 電極膜を持った発電セルを試作し、3セル直列発電実験を行った。Fig.4に3セル直列発電の電圧・出力・電流特性を示す。Na液温 1047 K において開放電圧 3.4V、短絡電流約 14A、最大出力 7.6 W が得られた。

アルカリ金属熱電変換の作動媒体はナトリウムであり、これを加圧・循環することにより発電が持続する。従来は電磁ポンプが用いられていたが、微小重力場では液状ナトリウムをポンプ部に集めることが困難であり、これに代わる " アルミナポンプおよびウイックポンプを開発した。ナトリウム液中に浸漬した " アルミナ管に、電流を通電した " アルミナポンプと " アルミナ発電セルを一体化したポンプ一体型 AMTEC セルを試作し、100時間連続発電実験を行った。温度 994K、面積 4.7cm²の窒化チタン電極を持つ発電セルと温度 543K、動作面積 24cm²を持つ " ポンプとを組み合わせた装置で、動作電流 3.2A において最大出力 1.05W を得た。その後、動作電流 1.5A にして 100 時間の連続発電を行った。総通電電荷量は 128Ah に達し、これは " 管内のナトリウムが約 8 回循環したことに相当しており、これにより " ポンプの原理的可能性が明らかになった。さらに、金属メッ

シュウイックポンプを400メッシュSUS金網をSUS管の中に圧挿入することにより作製し、このポンプ圧を水およびアルコールで評価した。測定されたポンプ圧は水で 975mm水柱 (9.57kPa)、アルコールで 320mm水柱 (3.14kPa) であった。それぞれの室温での表面張力の1073Kのナトリウムの表面張力に対する倍率でポンプ力を換算すると、水で 15.8kPa、アルコールで 16.9kPa である。Na換算ポンプ力が水およびアルコールでほぼ同程度であり、このウイックのポンプ力は 16kPa 程度であると推定される。ナトリウムの飽和蒸気圧は 973K で 14.4kPa、1073K で 45.6kPa でありこのウイックポンプは 1073K では動作出来ないが、973K では動作できると考えられる。

§ 5 まとめ

アルカリ金属熱電変換器は、高効率であるとともに高い出力密度を有しており、その効率は発電規模によらない。また外燃式であるため多様な熱源に対応できる、扱う Na 量が少ない、環境に与える影響が比較的小さい、立地上の制約が少ない、等の特長を持つ。これらの特長のため、アルカリ金属熱電変換器は地上用分散型電源としてあるいは宇宙用電源として注目される。現在、米国においては深宇宙探査用電源として開発研究が精力的になされており、2003年に Europa Orbiter、2004年に Pluto-Kuiper Express に搭載され打ち上げられる予定である。電総研においては、現在までに電極材料、電極構造、出力密度、変換効率、直列接続発電、高温接合技術、" アルミナポンプ、ウイックポンプなど基礎的研究を行い多くの知見を得た。

今後、残された電極の耐久性能の評価、多数セルの直並列化、" アルミナの薄膜化など研究上の課題はあるが、最大の課題は、地上用電源としてどのような分野に応用していけるのか検討していくことである。多分数百WからkW程度の小型電源や、コジェネ電源の分野から実用化することになると考えられる。

参考文献

- 1) A. Schock et al. : 33rd Intersociety Engineering Conference on

- Energy Conversion (IECEC), Colorado Springs, 1998, IECEC-98-245.
- 2) Terry J. Hendricks et al. : 34th IECEC, Vancouver, 1999, IECEC-99-01-2655.
 - 3) Robert K. Sievers et al. : 33rd IECEC, Colorado Springs, 1998, IECEC-98-359.
 - 4) Rahul Mital et al. : 33rd IECEC, Colorado Springs, 1998, IECEC-98-266.
 - 5) R. Mital et al. : 34th IECEC, Vancouver, 1999, IECEC-99-01-2557.
 - 6) M. A. Ryan et al. : 34th IECEC, Vancouver, 1999, IECEC-99-01-2704.
 - 7) 増田他 : 電子技術総合研究所彙報,**57**,5,6 (1993) 551.
 - 8) 田中他 : 電子技術総合研究所研究報告,**973** (1995).

(2000.2.24受付)