

深宇宙探査向け超小型原子力電池の概念設計

Conceptual design of ultra compact RTG for deep space exploration

*橋本 ゆうき¹, 山崎 颯馬¹, 長谷川 京吾¹, 松前 信伍¹, 櫻井 裕希¹,
根本 雄作¹, 矢口 陽樹¹, 三枝 翻¹, 高木 直行¹
¹東京都市大学

現在の人工衛星の電源は太陽電池が主流であるが、木星以遠の宇宙探査などでは太陽光が届かず電源の確保が困難となる。本研究では α 崩壊核種を熱源とし熱電変換素子を用いて発電を行い、利用開始から40年経過した後も安定的に1[W]の電力を得られるような超小型の原子力電池(RTG)の概念設計を行った。

キーワード:宇宙用小型電源, 原子力電池, RTG (Radioisotope Thermoelectric Generator)

1.緒言 RTG(英:Radioisotope thermoelectric generator;RTG)は放射性同位体の崩壊熱を利用して発電を行うため、外部からエネルギーを受ける事なく、長期にわたり電力を供給することができる。この特徴からRTGはNASAのボイジャー計画を始めとし複数の宇宙探査に活用されているが、日本では未だRTGを利用した探査機は実用化されていない。よって我々は日本初のRTGとして、単一のモジュールを用いた単純な構造で40年間にわたり1[W]の電力を供給できる超小型RTGを設計した。また、 α 線源には ^{227}Ac と ^{238}Pu との2核種を検討した。 ^{238}Pu の使用は放射性廃棄物の有効利用法の提案と同時に、放射性廃棄物のイメージ向上にも寄与することを期待している。

2.熱源の入手 熱源となる ^{238}Pu の入手には原子炉での中性子照射を用いる。濃縮度4.7[w%]のPWRの使用済み燃料には ^{237}Np が1[ton]あたりに約750[g]存在する。これを同炉で13か月照射すると、 ^{238}Pu が約160[g]生成されることから、本RTGに必要な量の ^{238}Pu は調達可能と考えられる。計算には燃焼計算コードORIGEN2、核データライブラリにはJENDL-4.0を用いた^[1]。

^{227}Ac は自然放射性核種であり、天然ウラン1[ton]あたりに0.5[mg]存在するが、必要量である6.4[g]の ^{227}Ac を得るためには1.3万[ton]の天然ウランからの回収であり困難が予想されるため、 ^{226}Ra の原子炉での中性子照射による入手を検討した。 α 内用療法向けRIとして注目されるAc-225の生成に伴う副産物として必要量を調達できる可能性がある。

3.設計手順と概要 熱源及び躯体の形状は輻射を低減するために表面積の割合が小さい円柱形とし、躯体には遮蔽能力の高いPbを用い、事故時の放射性同位体拡散を防止するためにサーメット(炭化タングステン)でその周囲を覆っている。躯体の厚さは放射線量が20[mSv/y]となるように計算し、決定した。なお遮蔽解析にはPHITSコードver2.93を用い、熱電素子には熱伝導率と発電効率に優れ、融点の高い Bi_2Te_3 を選定した。40年後に1[W]の電気出力から必要な燃料を逆算すると、燃料は ^{238}Pu の質量で62.86[g]、高い融点や、変質点が存在しないといった優れた特性を持つ二酸化物の形態^[2]で71.31[g]必要であった。また、低温端となる放熱板は輻射により宇宙空間へと排熱を行うため輻射率の高い炭素繊維を用い、更に輻射率を向上させるために表面をポリウレタン塗装し、常に200~230[K]の温度が保てるよう大きさの設定を行った。各部品の仕様を表1に示す。図1には ^{238}Pu を熱源とした熱電対の高温端、低温端の温度変化から計算される熱電変換効率の時間変化を示す。上記仕様のRTGにより、40年間、1[W]以上の発電が可能の見通しを得た。

4.納言 熱源である放射性核種(^{238}Pu もしくは ^{227}Ac)の入手は、原子炉での中性子照射による核変換が有効であることが分かった。設計目標とした40年間、1[W]以上の発電は、約70gの ^{238}Pu を用いた超小型RTGで達成できる可能性を示した。

参考文献

- [1] 櫻井祐希, 高木直行「使用済み燃料を活用した超小型原子力電池の設計」日本原子力学会 関東・甲越支部第14回学生研究発表会, SR-Pr08, (2021)
[2] 渡辺孝章, 「セラミック核燃料」日本材料学会 材料試験 (1962), 11巻 106号, p406

表1 超小型長寿命RTGの仕様

熱源	$^{238}\text{PuO}_2$	$^{227}\text{Ac}_2\text{O}_3$
質量	71.3[g]	7.08[g]
躯体	Pb	
サーメット	WC	
熱電素子	Bi_2Te_3	
熱伝導率	1.5[W/mK]	
放熱板	炭素繊維(表面塗装:ポリウレタン)	
放射率	0.89	

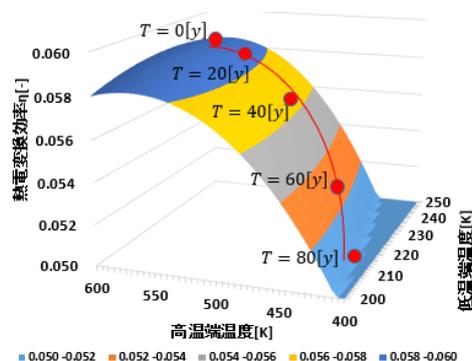


図1 ^{238}Pu を熱源とするRTGの変換効率変化

*Y. Hashimoto¹, S. Yamazaki¹, K. Hasegawa¹, S. Matsumae¹, Y. Sakurai¹, Y. Nemoto¹, H. Yaguchi, H. Saigusa¹, N. Takaki¹,

¹Tokyo city Univ