

宇宙用原子炉の開発と常陽を活用した SMFR への展開

Development of a small space reactor and application to SMFR by using Joyo

*奈良林直¹

¹北海道大学

抄録：火星以遠の宇宙船の大型化や長期の航行に必要なエネルギー源としては、熱出力 MW 級の原子炉を熱源としたスターリングエンジン発電システムの優位性が明確になってくる。さらに長年の運転実績のある常陽を SMR として MA などの燃焼炉として活用する SMFR の基本概念を検討した。

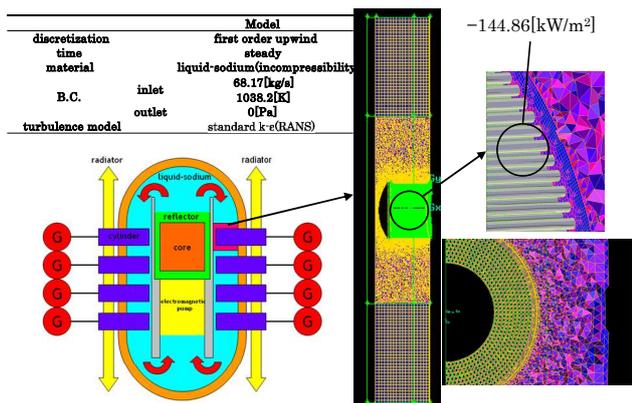
キーワード：SMR、MA 燃焼炉、常陽、高速炉、FR、SMFR、高レベル廃棄物地層処分、短半減期化

1. 緒言 筆者は、原子炉システムの応用分野の一つとして宇宙開発、特に有人深宇宙探査用宇宙船についてのフェージビリティ研究やスターリングエンジンの開発実験を行ってきた^{[1][2][3]}。今回の発表では、これを発展させ、ナトリウム冷却高速炉を熱源としたスターリングエンジン発電システムなどの適用検討を行った。一方、米国を中心に小型モジュール炉（SMR）の開発が盛んになってきたが、まだ概念検討の段階で、実用化には 10 年～20 年といった歳月が必要である。一方、中国では営業運転を始めた AP1000 を 200MWe に小型化した CAP200 を SMR と称して型式認定して、既に石炭暖房の代わりに熱電併給炉として建設を開始している。我が国も公募事業で SMR の開発に着手したが、中国に先行されてしまうと国際競争には生き残れない。そこで、常陽を SMR として活用して、国際的開発競争の先頭に立つことを提案する。MA 燃焼を考慮し、SMFR と名付けた。

2. スターリングエンジン発電モジュールの開発 スターリングエンジンの高温源側のヘリウム温度は 600℃、低温源側はラジエータパネルで宇宙空間に輻射で放熱するため、高温にした方がラジエータパネルを小型化できるため、300℃とした。実験に用いたスターリングエンジンは、定格で 3.3kW の電気出力が得られる。出力がスケール S の 3 乗に比例する仮定すると 110kWe の出力となる。

実機のスターリングエンジンは、高速炉の冷却剤である液体金属ナトリウム加熱とすると、シリンダーヘッドの伝熱面積を増やす工夫が必要である。そこで、図に示すように Fluent を用いて CFD 解析を実施した。解析の結果、シリンダーヘッドの外側の伝熱管の配置とバッフル板などの形状を工夫することにより、伝熱管周りの液体金属ナトリウムの温度が均一化し、753℃の高温ナトリウムで 600℃のヘリウムガス温度が得られることが確認できた。

3. SMR 型高速炉と原子力推進宇宙船の開発 小型モジュール炉（SMR）タイプのナトリウム冷却高速炉の出力制御は反射体バッフル板で、中心部の 1 本の制御棒をバネで挿入し、万一の場合の炉停止とする。この高速炉は小型のため、炉心解析をすると、沸点 920℃のナトリウムが沸騰しても、炉心のボイ



ド係数は負に維持されることがわかった。原子力推進宇宙船は地球火星間の航行を実現するための軌道設計を行った結果、プラズマロケット搭載基数 1 基の場合、約 8 か月での火星到達が可能であることがわかった。なお、この高速炉は、水を用いておらず、作動流体はヘリウムであるため、ナトリウム-水反応のリスクは無く、SMR として有利である。

常陽の発電モジュールに適用すると、中間熱交換器や Na 2 次系が不要となり、常陽の炉心周りは極めてシンプルとなる。万一の場合の崩壊熱除去冷却のヒートシンクは空気とする。

4. 結言 MA 燃焼を目的とした小型高速炉およびスターリングエンジン発電システムからなる SMR、す

なわち SMFR は、蒸気発生器などの Na 水反応のリスクがある機器を用いないため、シンプルかつ安全な原子炉となる。また、MA 燃焼を目的とすることで、バックエンドのうち地層処分の負担の軽減にもなる。

参考文献 [1] T. Narabayashi, et al., "Total Energy-System for Manned Spaceship using Nuclear Reactor", ICONE15, 10865 (2007). [2] T. Kitamura, Y. Yoshida, Y. Honma, T. Narabayashi, Y. Shimazu and M. Tsuji, Study on a Nuclear Spaceship for Interplanetary Cruise - Core Design of a Small Fast Reactor, Proc. of ICAPP2009, (2009).

[3] 奈良林 直、SMR 型ナトリウム高速炉を熱源としたスターリングエンジン発電システムを搭載した原子力推進宇宙船の開発、機械学会動力エネルギーシンポジウム B114 (2019)。

*Tadashi Narabayashi¹, ¹Tokyo Institute of Technology