液体ブランケット研究の現状 Current status of studies on liquid blanket systems

¹⁾田中 照也、²⁾乗松孝好 Teruya Tanaka, Takayoshi Norimatsu

1)核融合研、2)大阪大学

NIFS, Osaka Univ.

核融合炉の発電ブランケットは、磁場閉じ込め方式では炉心プラズマ、レーザー方式では燃料ターゲットを取り囲むように設置される厚み0.3-0.8m程度(設計による)の大型コンポーネントである。ブランケットに求められる機能は、(1)中性子エネルギーから熱エネルギーへの変換と炉外への取り出し、(2)中性子とリチウム(Li)原子の核反応を利用した、炉心で消費される以上のトリチウム燃料の生産(トリチウム増殖)と炉外への取り出し、(3)放射線(中性子・ガンマ線)遮蔽、の3つである(図1)[1,2]。

ブランケットには、いくつかの材料の組み合わせや冷却方式が提案されているが[3,4]、液体金属や溶融塩などの高温流体をトリチウム増殖材として用いるものを、特に"液体"ブランケットと呼ぶ。(これに対して"固体"ブランケットは、トリチウム増殖材にリチウム元素を含むセラミック材料を用いるものを指す。)また、熱エネルギーを炉外に取り出すための冷却材については、増殖材が液体である利点を生かして、増殖材自身が冷却材も兼ねて循環する"自己冷却"液体ブランケットと、Heガスを冷却材として循環させる"He冷却"液体ブランケット あいずれも水を冷却材とするよりも、高いブランケット温度(500℃以上)

での、高効率発電を目指すことができる。 この液体トリチウム増殖材については、全て の特性について優れた特性を有する完璧な候 補材は存在しない[5.6] (表1)。 ブランケット内に おける熱とトリチウム燃料増殖の観点からは、 最もシンプルな組成である純リチウム(Li)を用 いることが可能である。しかし、熱とトリチウ ム燃料を炉外へ取り出す際、プラズマ閉じ込め 強磁場下での循環(電気伝導度が高くMHD圧力 損失が大)やトリチウム燃料の回収(溶解水素 の平衡分圧が低い)が困難であり、高い技術開 発が必要である。また、高速中性子遮蔽能力が 低い他、高温液体リチウムは化学的な活性が高 いために燃焼しやすく、事故事象時の安全確保 が大きな課題である。そこで、リチウム元素を 含み、かつ化学的活性度が低く、トリチウム燃 料の回収も容易となる増殖材の候補として、溶 融塩フリーベ(FLiBe)、フリナーベ(FLiNaBe)、 液体金属リチウム鉛(LiPb)が精力的に研究され ている。これらについては、高温金属壁からの 水素同位体透過や材料腐食が課題となる。核融 合科学研究所では、特に安全性の観点から溶融 塩FLiBeやFLiNaBeをトリチウム増殖材/冷却材 (自己冷却方式)の候補としたヘリカル型磁場閉 じ込め核融合炉FFHRの設計研究[1]が、また、



図 1. (a) ヘリカル型磁場閉じ込め核融合炉、(b) レーザー核融合炉の液体ブランケット概略図 [1,2]

| 表1. | 特徴が異な | る液体ト | . IJ | チウ | 'ム増殖材の特性 | [5] |
|-----|-------|------|------|----|----------|-----|
|-----|-------|------|------|----|----------|-----|

| | Li | Li ₁₇ Pb ₈₃ | FLiBe (BeF ₂ :43mol%) |
|--------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| 融点(℃) | 低 | 中 | 高 ~ 400 |
| | 180 | 235 | (FLiNaBe:315) |
| 重量密度 | 小 | 大 | 中 |
| (g/cm ³) | 0.461[727℃] | 9.15[500℃] | 2.0[525℃] |
| 粘性 | 低 | 中 | 高 |
| (Pa・s) | 3.6x10 ⁻⁴ [527℃] | 2.0x10 ⁻³ [527℃] | 1.5x10 ⁻² [527℃] |
| 熱伝導率 | 高 | 中 | 低 |
| (W/m/K) | 60.1[727℃] | 16 | 1.00[527℃] |
| 電気伝導 | 高 | 高 | 低 |
| 度(S/m) | 2.5x10 ⁶ [727℃] | ~5x10 ⁵ [527℃] | 1.7x10²[527℃] |
| 1appm水 素の平衡 分圧(Pa) | 低 ~1x10 [°] [527℃] | 中 ~10 [527℃] | 高 ~1x10⁵[527℃] |
| 大気との 反応度 | 高 | 低 | 低 |

大阪大学では、液体金属LiPbを増殖材/冷却材 (自己冷却方式)として用いるレーザー核融合炉 KOYO-Fの設計研究[2]が進められている。

液体ブランケットを実現させるための材料 特性、要素技術開発に関する研究については、 大学、核融合科学研究所、日本原子力研究機構 において精力的に実施されている。これまでの 研究では比較的小型の試験容器や試作ユニッ トを用い、材料物性、静止場・流動場材料腐食 (材料共存性)、酸化還元制御、磁場下熱流動 特性、水素同位体輸送・回収、配管被覆技術、 センサー技術等の各種特性や機能の単独試験 が実施され、多くの成果が蓄積されてきている。

これらに加えて、TNTループ(東北大)[7] やOrosh²i-1ループ(核融合研)[8]における高温 溶融塩循環に関わる基盤技術研究成果を基に、 核融合科学研究所では平成25年度、核融合炉で 想定される熱や磁場の条件を模擬し、液体ブラ ンケットに必要とされる技術や機能の統合的 な開発研究、試験を行うための熱・物質流動ル ープ、Oroshhi-2 (オロシ-2、Operational Recovery Of Separated Hydrogen and Heat Inquiry – 2) を構 築した(図3) [9]。本装置は、溶融塩FLiNaK(基 本運転温度500℃)、及び液体金属LiPb(300℃)を 個別に循環させるツイン・ループシステムであ り、共に1インチ配管内を最大流速1.5m/sで循環 させることが可能である。これにより、様々な 特性が対照的な溶融塩と液体金属の挙動、取り 扱いについて比較しながら研究を推進する。ま た、熱流動特性に対する強磁場のMHD効果を研 究するために、長さ50cmの領域を横切る直線配 管に対して最大3テスラの均一垂直磁場を印加 可能な超伝導磁石を設置している。これは現在、 同目的・同磁場形状としては世界最強である。 本装置の構築は、装置パラメーター検討の段階 から京都大学、九州大学等との協力により実施 しており、液体ブランケット研究開発における 国内共同研究の供用プラットフォームとして

運用を開始している。熱と水素同位体燃料の分離回収や配管材料の腐食、熱流動に対する強磁場効果等の学術研究についても、複雑な温度、流速、磁場分布変化を持ち、様々な異種材料が混在する循環系を対象にして推進することが可能となる。また、得られた知見やデータは発電ブランケット設計時の根拠となる。これまでに3T磁場下で直線配管中を流動するLiPbに対するMHD圧力損失評価を行い、現在、1T永久磁石を利用したFLiNaKの強磁場下材料腐食実験の準備を進めている。最終的には、熱交換器及び二次系発電システムの模擬までを目指している[9]。

ヘリカル型発電炉FFHRの設計では、研究開 始時より、液体ブランケットが発電システムと して選択され、設計活動とR&D活動が並行して 進められてきている。また、トカマク型核融合 原型炉の計画においても、運転開始後の第一段 階では固体増殖・水冷却ブランケットにおける 発電実証を目指し、その第二段階では、液体ブ ランケット方式等の先進ブランケット試験体 の装着による高効率発電と経済性の見通しを 示すことが提言されている[10]。レーザー核融 合炉用液体ブランケットについても、強磁場に 関わる課題が存在しない他は、必要とされる技 術について、磁場閉じ込め方式とほぼ共通であ る。熱・物質流動ループ装置Oroshhi-2の運用開 始は、液体ブランケットの実現に向けた道筋の 中で、要素技術開発研究から循環システム開発 研究に移行する大きなステップであり、中性子 照射を除く統合的なブランケット機能実証を 目指している。



図2. 熱・物質流動ループOroshhi-2 [8]

- [1] 相良明男他、J. Plasma Fusion Res. 89 (2013) 359-402.
- [2] 神前康次、乗松孝好他、J. Plasma Fusion Res. 83(2007)19-27.
- [3] 小西哲之他、日本原子力学会誌 47 (2005)488-494.
- [4] 相良明男他、J. Plasma Fusion Res. 79 (2003) 663-671.
- [5] 相良明男、日米協力事業 JUPITER-II 資料をもとに作成
- [6] 西川正史他、J. Plasma Fusion Res. 79 (2003) 678-686.
- [7] T. Satoh et al., Fusion Science and Technology 60 (2007) 618-624.
- [8] A. Sagara et al., Fusion Science and Technology 60 (2011) 3-10.
- [9] A. Sagara et al., Fusion Science and Technology 68 (2015) 303-307.
- [10] 合同コアチーム報告書、NIFS-MEMO-72 (2015).