

液体金属 P F C の化学的両立性 Chemical compatibility of liquid metal plasma facing components

近藤正聡
Masatoshi KONDO

東京工業大学 科学技術創成研究院 先導原子力研究所
Laboratory for advanced fusion energy, Institute of innovative research
Tokyo Institute of Technology

1. 緒言

液体金属は優れた熱輸送性能を有する流体であり、原子炉をはじめ様々なエネルギープラントの冷却材として期待されている。表1に、代表的な液体金属の特徴を示す。リチウム(Li)やナトリウム(Na)、ナトリウムカリウム合金(NaK)は、低融点の優れた冷媒である。特に、Liは核融合炉の燃料であるトリチウム(T)を生成する上で欠かす事のできない元素である。また、後述するように、高い純度を維持できれば、優れた材料共存性を示す。課題は、アルカリ金属特有の化学的反応性である。鉛(Pb)や鉛ビスマス共晶合金(Pb-Bi)は、中性子経済の優れた冷媒であり、化学的に不活性である事から、第4世代型炉の冷却材として期待されている。Pbは、核融合中性子に対して中性子増倍効果を示す。Liと組み合わせると鉛リチウム合金(Pb-16Li)にする事より、T増殖性能と化学的安定性を兼ね備える優れた冷却材となる。水銀(Hg)は

常温においても液体であるが、強い毒性には注意が必要である。錫(Sn)は、他の液体金属に比べて蒸気圧が非常に低いという特徴があり、本稿で述べるプラズマ対向材料(PFC)としても重要な液体金属冷媒であると言える。

大きな熱流束が与えられる原型炉ダイバータに関して、除熱性能の観点から液体ダイバータ概念が検討されてきた。これは、液体金属の液膜流を用いるプラズマ対向機器概念であり、高融点のタングステン(W:融点3422°C)を用いる固体壁概念と大きく異なる。

世界中で様々な液体ダイバータ概念が提案されているが、共通の課題となるのは化学的両立性、つまり冷媒と構造材料との共存性である。本発表では、ダイバータの冷媒として注目を集めるLiやSnを中心に上げ、これらの液体金属冷却材の材料共存性の課題について解説する。

表1 冷却材として用いられる液体金属の種類と特徴

	組成(質量比)	融点(°C) [1]	主な核的特徴や課題	化学的特徴や課題
リチウム	Li	180.55	${}^6\text{Li}$ による T の生産	化学的に活性
ナトリウム	Na	97.85	${}^{24}\text{Na}$ の γ 線放出	非金属不純物により共存性が低下
ナトリウムカリウム合金 (通称: NaK)	33.4Na-66.6K	-12.4	小さい熱中性子吸収断面積	(Li:高トリチウム溶解度)
鉛	63Sn-37Pb	327.55	核融合中性子に対して中性子増倍効果を示す。	化学的に不活性
鉛ビスマス合金 (通称: LBE)	44.5Pb-55.5Bi	123.85	${}^{210}\text{Po}$ の α 線放出	鉛は鋼材組成に対して、高い溶解度を示す。(共存性の課題)
鉛錫	63Sn-37Pb	183	-	-
鉛リチウム合金	Pb-16Li(モル比)	235	中性子増倍効果と T 増殖性	-
水銀	Hg	-38.87	大きな中性子吸収断面積	強い毒性 低沸点 357°C
錫	Sn	231.95	長半減期の放射性核種 ${}^{121\text{m}}\text{Sn}$	極めて低蒸気圧
錫リチウム合金	Sn-20Li(モル比)	334	多くの短半減期核種を生成	乏しい材料共存性(鉄系材料)
ガリウム	Ga	29.7646	-	低融点 乏しい材料共存性(鉄系材料)
ガリウムインジウム錫合金 (通称: ガリスタン)	68.5Ga-21.5In-10Sn	-19	-	低融点 乏しい材料共存性(鉄系材料)

2. 液体金属 PFC の構造と化学的両立性の課題

図 1 に典型的な液体金属 PFC の構造を示す。構造材料自体もしくは液膜流との界面に W のような耐熱材料を用いれば、物理エロージョンによる一時的な液膜流の破れも許容できると想定される。また、除熱の観点からダイバータの構造材料に銅及び銅合金を用いる事も提案されている。Li を PFC 冷却材とし構造材料の冷却に加圧水を用いる場合は、Li-水反応に配慮した設計が必要である。Li 中の水素(同位体)溶解度は高いため、吸収された T の回収も重要な課題である。一方、Sn を PFC 冷却材に用いた場合には、これらの課題を実際上なくす事(practically eliminated)ができるが、材料共存性が大きな課題となり、後述するように運転温度の制限を受ける可能性が高い。

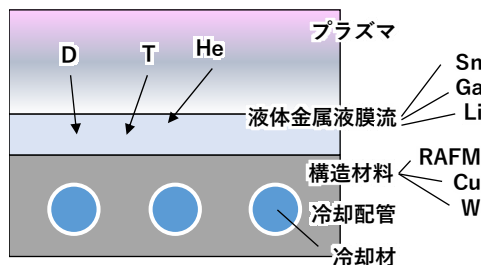


図 1 液体金属 PFC の構造

3. PFC 冷却材の材料共存性

3-1 リチウムと候補構造材料との材料共存性における非金属不純物感受性

液体金属と鋼材との共存性に関しては、溶解型腐食を中心に論じられる事が多いが、窒素や酸素などの非金属不純物を含まない液体 Li は鋼材成分に対する溶解度が小さく、極めて良好な共存性を示す事が分かっている。ただし、Li 内に溶存する非金属不純物により共存性が大きく低下する事も分かっている。Li は同じアルカリ金属の Na に比べて、窒素や炭素に関して大きな溶解度を持つ。溶存窒素濃度が上昇すると、鋼材成分の Fe や Cr と化学的に不安定な 3 元系化合物を形成しながら鋼材表面を腐食する。溶存酸素に関しても同様の効果がある事が分かっている。溶存炭素に関しては、逆に低い化学ポテンシャルとなった場合に限り、鋼材の表面脱炭が生じる事がわかった。

高融点材料である W に対しては、比較的良好な共存性を示す事が分かっている。一方、Li に対して、高い熱伝導率を有する銅もしくは銅合金を組み合わせる事は、高熱流束機器として魅力であるが、最近になり乏しい共存性が報告されている。減圧下で Li を高純度に維持したとしても、347°C という比較的低温において、純銅は 15 時間で形状も保てない程度にまで腐食してしまう[2]。

3-2 液体 Sn の共存性改善への取り組み

液体 Sn は、Li に比べて化学的に不活性ではあるが、高温の条件で水と化学的に反応しうる点には注意が必要である。Sn 中において、鉄系材料は合金化による腐食を生じ、乏しい共存性が報告されてきた。Ga を用いる場合も同様である[3]。Sn 腐食における温度依存性が、独のグループにより図 2 のように纏められた[4]。500°C を超える辺りから急激に共存性が低下する事が示唆された一方で、温度を調整する事により、腐食率を許容しうるレベルにまで抑制できる可能性もある。また、最近の成果から、表面に緻密で保護性に優れたアルミナ酸化被膜を形成する Al 含有鋼を用いる事により、合金化腐食を抑制できる可能性が示唆された。このように液体 Sn の共存性改善に関しては、一定の見通しが立つ状況となった。今後は、ダイバータ構造材料の破壊に直結する液体金属脆化に関する研究も必要である。

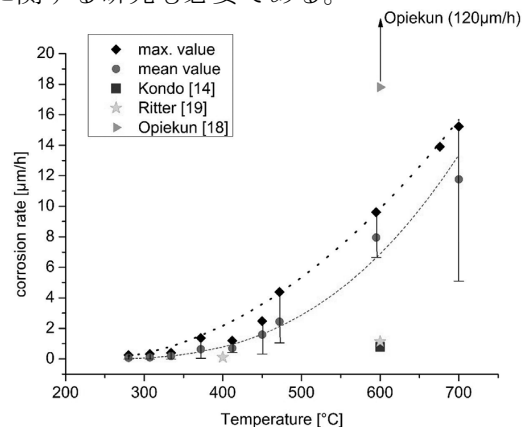


図 2 液体 Sn 中における 316L オーステナイト鋼の腐食の温度依存性 [4]

4. 結論

液体金属を冷媒とする PFC 概念が検討されている。PFC の構造多様性や運転条件は、液体金属冷媒と構造材料との化学的両立性により制限を受ける可能性が高い。液体ダイバータの設計研究と密接に連携した化学的両立性研究が必要である。

参考文献

- [1] JSME Data Book: Heat Transfer 5th Edition (2009).
- [2] X.C.Meng et.al., Corrosion characteristics of copper in static liquid lithium under high vacuum, J. Nucl. Mater., (2018 in press).
- [3] M. Kondo, M. Ishii, T. Muroga, Corrosion of steels in molten gallium(Ga), tin (Sn) and tin lithium alloy (Sn-20Li), Fusion Eng. Des., 98-99, 2003-8 (2015).
- [4] A. Heinzl, A. Weisenburger, G. Muller, Corrosion behaviors of austenitic steel AISI316L in liquid tin in the temperature range between 280 and 700°C, Materials and Corrosion, 9999:1-7 (2017).