

核融合炉増殖ブランケットにおける機能性液体金属の組成と性能の評価

Composition and performance evaluation of functional liquid metals for fusion reactor breeding blanket

*小林 真^{1,2}、宮澤順一^{1,2}、後藤拓也^{1,2}、濱地志憲^{1,2}、FFHR 設計グループ
KOBAYASHI Makoto I.^{1,2}, MIYAZAWA Junichi^{1,2}, GOTO Takuya^{1,2}, HAMAJI Yukinori^{1,2}, FFHR design group

¹ 核融合研、² 総研大
¹NIFS, ²SOKENDAI

背景

液体増殖ブランケットはトリチウム増殖材が冷媒機能を有するため、設計がシンプルで効率的な炉設計が可能である。一方で、高温の液体金属と構造材の接触面における腐食やMHD圧損など課題も存在するため、腐食耐性や構造材界面の絶縁性を維持する機能性液体金属材料が検討されている。さらに、ヘリカル型核融合原型炉FFHR-b3で適用が検討されているメンテナンスが容易なカートリッジ型ブランケットでは、カートリッジ取り外しのため、液体増殖材は真空容器底面のプールに一旦貯めて循環させる。従って、液体増殖ブランケットはトリチウム増殖比、密度、融点だけでなく、プラズマ維持に影響がない程度の低い蒸気圧を有する必要がある。本研究では設計可能な液体増殖ブランケットを検討するため、腐食耐性や構造材界面の絶縁性を維持する機能性液体金属材料に対し、トリチウム増殖比(TBR)、密度、融点、蒸気圧などを関数とし、その組成と性能を評価・比較した。

評価手法

液体金属増殖材の構成元素は、低融点、安価、化学的反応性が低い、中性子捕獲断面積が低い、中性子増倍効果を有する、といった性質を持つ、鉛(Pb)、ビスマス(Bi)、スズ(Sn)に絞り、また、配管金属材中に溶解した酸素と結合し、表面に安定層が自己形成すると共に損傷した安定層の自己修復を期待して、微量のエルビウム(Er)を含有することとした。これらの元素とリチウムの化合物について、融点、蒸気

圧、トリチウム増殖性能、中性子遮蔽率、放射化物の生成量などを検討した。融点については熱力学平衡計算コードであるFactsageを用いて評価した。蒸気圧については組成比から概算した。また、トリチウム増倍率についてはもっとも簡単な球形ブランケットモデルを用い、MCNP6により計算した。放射化物の生成量や炉運転後の濃度変化についてはDCHAIN-SP2014を用いて評価した。

結果・考察

構成元素が増えると融点が増え設計が困難になるが、液相が存在すれば流動させることに支障はないと考え、250℃程度で液相がある各機能性液体金属組成を絞り込んだ。これらの液体金属について性能を表にまとめた。全ての候補金属について、ローカルTBRは1を上回り、ベリリウムを併用することによりさらに大きなTBRが期待できる。蒸気圧については、Snを含んだ金属以外はやや高い値であった。Snを含んだ液体金属は融点は高いものの、液相が出現する温度は低く、密度が小さく蒸気圧も低いなど利点が多い。しかし、Snは配管金属材料を侵すことが知られているため、液体金属中に含まれるErにより配管内壁に安定層が自己形成することが示されれば、有望な液体増殖ブランケット材となることが予測された。

一方、残留放射能計算から、Snに起因する比較的長半減期の放射性同位元素が発生することや、他の材料と比較してややTBRが低いことが懸念事項として挙げられた。

各機能性液体金属の性能 (赤文字はベリリウム使用時)

Name	Composition (atm.%)	%Li enrichment (atm.% in Li)	Density (g/cm ³)	Liquid phase temp. (°C)	Melting point (°C)	Vapor pressure (Pa at 500°C)	TBR (Spherical model)	Neutron loss (10 ⁻⁷ n/cm ² /source)
LP-17	Pb ₈₃ Li ₁₇	90	9.4	←	235	1.6 x 10 ⁻³	1.41	1.73
ELP-17	Pb _{82.8} Li ₁₇ Er _{0.2}	↑	9.5	(185)	(210)	(1.6 x 10 ⁻³)	1.41	1.71
ELP-25	Pb _{74.8} Li ₂₅ Er _{0.2}	↑	8.7	(186)	(328)	(1.4 x 10 ⁻³)	1.47	1.41
ELP-25 with Be	Pb _{74.8} Li ₂₅ Er _{0.2}	↑	↑	↑	↑	↑	1.90	0.60
ELB-25	Bi _{74.8} Li ₂₅ Er _{0.2}	↑	8.3	(252)	(422)	(1.4 x 10 ⁻³)	1.41	1.60
ELB-25 with Be	Bi _{74.8} Li ₂₅ Er _{0.2}	↑	↑	↑	↑	↑	1.89	0.67
ELS-25	Sn _{74.8} Li ₂₅ Er _{0.2}	↑	5.6	(215)	(468)	(1.8 x 10 ⁻⁵)	1.22	1.1
ELS-25 with Be	Sn _{74.8} Li ₂₅ Er _{0.2}	↑	↑	↑	↑	↑	1.70	0.53
ELPS-25	Sn _{68.8} Pb ₆ Li ₂₅ Er _{0.2}	↑	5.9	(177)	(477)	(8.4 x 10 ⁻⁵)	1.25	1.1
ELPS-25 with Be	Sn _{68.8} Pb ₆ Li ₂₅ Er _{0.2}	↑	↑	↑	↑	↑	1.72	0.51
ELBS-25	Sn _{43.3} Bi _{31.5} Li ₂₅ Er _{0.2}	↑	6.9	(135)	(599)	(4.2 x 10 ⁻⁴)	1.30	1.23
ELBS-25 with Be	Sn _{43.3} Bi _{31.5} Li ₂₅ Er _{0.2}	↑	↑	↑	↑	↑	1.78	0.54