

液体金属の適用と技術課題 Applications and technical issues of liquid metals

片山一成
KATAYAMA Kazunari
九大総理工
Kyushu Univ.

1. はじめに

大規模なシステムに液体金属を利用するためには、安定して流動制御するための技術や、適切な純度を維持するための不純物濃度計測技術、精製技術などが不可欠となる。これらの技術開発は、段階的に進める必要があり、実現までには相当な時間を有するものと考ええる。DT 核融合炉開発では、大学を中心として液体ブランケット概念に基づき、リチウム、リチウム鉛、熔融塩等を対象とした研究開発実績が積みあげられている。少量・静止状態の基礎実験から始め、近年では大規模な流動試験も実施されてきた。これらの知見は、大変貴重であり、科学的なデータのみならず、実際に取り扱う際の経験も含めて継承されていくことが望まれる。

液体ブランケット開発においては、燃料サイクル成立性および核融合炉安全性の観点から、トリチウム挙動に関する研究や、腐食挙動に関する研究が精力的に進められてきた[1,2]。得られた知見は、DT 核融合炉の先にある DD 炉や D-³He 炉開発においても有益なものであり、炉工学的な観点から実現可能な設計領域を与えるものとなる。これらの炉では燃料としてトリチウムを利用しないことから、トリチウムを生産する技術は要しないものの、DD 反応により一定量のトリチウムが発生し続けることから、トリチウムの制御・管理は不可欠な技術である。ここではリチウムやリチウム鉛を中心に炉工学分野における液体金属に対するこれまでの知見の一端を紹介するとともに、最近の研究状況を示す。

2. 液体金属における水素同位体溶解度

液体金属を取り扱う場合の基本的なトリチウム挙動を考える際に、水素溶解度は重要なパラメータとなる。ある水素同位体圧力に対して、材料中に存在することが可能な水素同位体量を示すものである。溶解度が大きい場合、トリチウムインベントリーが大きくなり、潜在的危険性が高くなることを示唆する。一方、溶解度が小さい場合、水素同位体は材料から脱離しようとするため、トリチウム透過・漏洩量が大きくなることを示唆する。

リチウム中の水素溶解度は大きく、多量のトリチ

ウムを取り込むことができる。プラズマ対向壁として液体リチウムを用いた場合は、炉内インベントリーが高くなると想定される。温度が低いほど溶解度は大きくなることから、流動過程で温度分布があると、低温領域で取り込んだ水素同位体が高温領域で放出されるため、プラズマ容器内での圧力変動にも注意を要するものと考えられる。水素同位体の出入りを緩和させるために、一定量の水素同位体を含む状態で流動運転させることになるのではないだろうか。トリチウムを燃料として利用する炉では、流動するリチウム中に滞留するトリチウム量を正確に評価し、必要な増殖比を設定しておくことが重要となる。DD 炉や D-³He 炉でも、安全性の観点から、運転期間とともに増加するトリチウム量を予測し、トリチウム回収系を設計・配備しておく必要がある。

リチウム鉛中の水素溶解度は小さく、気相からは取り込まれにくく、リチウムと中性子との反応で内部に生成されたトリチウムは、気相へ排出されやすい。プラズマ対向壁として用いた場合は、プラズマから入射された水素同位体の多くは気相に放出されると考えられ、炉内インベントリーは低く抑えられると想定される。炉内流動中に気相に排出される水素同位体は、真空ポンプ系で回収され、残留水素同位体の一部は、リチウム鉛輸送過程で配管を通じて外部に透過漏洩すると想定される。循環過程での配管を通じた透過漏洩量を抑制するために、炉心からの出口付近で液相から気相への水素同位体排出を促す機構を設置するなどすることが有効と考えられる。水素挙動を正確に予測するためには、溶解度を精度よく求めることが必要であるが、現状では、報告値に 2 桁程度のばらつきがあり、より正確な溶解度の測定が望まれる。

3. 液体金属からの水素同位体回収

リチウム鉛など水素溶解度が小さい液体では、水素同位体が気相に脱離しようとするため回収は比較的容易であるが、効率的な回収には脱離を促進する工夫が必要となる。リチウム鉛については、Gas liquid contactor (GLC)、Permeation Against Vacuum (PAV)、Vacuum Sieve Tray (VST)等の方

式が検討されている。

リチウムからのトリチウム回収には、リチウムよりも水素吸蔵能の高い金属を利用する方法が有力であると考えられ、イットリウム充填層に、水素を吸蔵させたリチウムを流通させ、水素回収率を評価する実験が実施されている。イットリウムは反応性が高く、表面酸化層が形成されることで水素同位体の吸収速度の低下が予測される。そこで、予めイットリウムをフッ酸に接触させることで吸収速度を高める方法が提案されている。九州大学では、中性子照射によりリチウム中にトリチウムを生成し、モリブデン坩堝内でイットリウムとともに加熱した際のトリチウム移行量が調べられている。一定期間加熱後、室温に冷却して、リチウム中およびイットリウムをそれぞれ溶解し、放出されるトリチウム量を測定するものである。イットリウムをフッ酸処理することで吸収速度が格段に速くなることが確かめられた。トリチウムは、イットリウムに移行するだけでなく、液体リチウム自由界面から気相へも脱離することから、これを踏まえた移行速度の解析が必要となる。図1は、400℃で2時間加熱を行った際の気相へのトリチウム脱離挙動と加熱後のリチウムおよびイットリウム中のトリチウム量からそれぞれの濃度変化を解析したものである。水素同位体溶解度が大きいリチウムであるが、イットリウムへの移行量の2倍程度が気相に脱離していることがわかる。安全対策上流動システム内でのリチウム自由界面からのトリチウム脱離量にも留意が必要である。

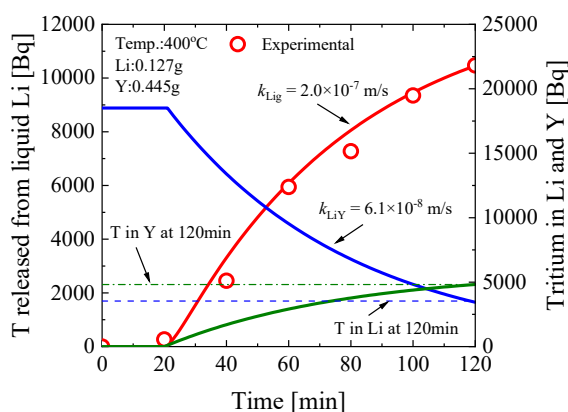


図1 リチウム中トリチウムのイットリウムへの移行と気相への脱離

4. 液体金属による構造物腐食

液体金属を安全に取り扱うためには、これと接触する材料の腐食特性を理解しておかなければならない。液体金属には、金属元素も溶解しうるため、高い溶解度を持つ金属元素を含む構造物からは

液体金属中への移行量が多くなる。例えば、リチウム中のニッケル溶解度は非常に高いことが知られている。リチウム流動実験に用いたステンレス鋼内面の元素分析を行ったところ、検出された金属中でニッケル濃度が最も高いことが観測された。ステンレス鋼からリチウム内に溶出したニッケルが表面に固着したのと考えられる。液体金属による腐食速度は、窒素や酸素などの非金属不純物により促進されることが知られている。リチウムは窒素との反応性が高く、取扱雰囲気中に窒素が存在すると、すぐに表面が黒く変色する。グローブボックス内の窒素や水蒸気濃度を極力低減した上で、リチウムを取り扱うものの、液体リチウム中の窒素濃度を測定すると予想以上に高いことが少なくない。現実的には、流動システム内にリチウムを装荷後に、窒素を回収する必要があると考えられ、Tiトラップ等を用いた回収実証試験が望まれる。

九州大学では、小さな坩堝内にリチウムと金属片を充填し、アルゴンガス流通下で加熱する、小規模な静的腐食実験を行っている。一定期間加熱後に取り出し、リチウムを水で溶解して金属片の質量を測定すると、基本的には増加する傾向にある。これは、金属元素と窒素、リチウムが化合物を形成した結果、リチウムが水に溶解せず固着した結果と推測している。腐食が激しい場合は、金属片の一部が坩堝に固着して取り出す際に欠けることで質量が減少することもある。液体金属中の非金属不純物を低減することで、腐食を抑制できると想定されるものの、安全側で考えると、想定される範囲内で高濃度に非金属不純物を含む場合の腐食の進展についても把握しておくことが必要である。

5. まとめ

液体金属を用いる際には、流動技術や不純物制御技術が不可欠であり、開発途上にあると考える。磁場下で用いる場合には、MHD圧損への対策が必要であり、腐食抑制には、非金属不純物の制御・管理技術が必要である。放射線安全管理の観点から、トリチウムの制御・管理、放射化金属ダスト等の制御・管理など、確立すべき課題は多い。基礎実験を進めつつ、比較的大規模な統合システムでの流動試験など、プロジェクト研究等により集中的に開発を進めることが有効ではないかと考える。

参考文献

- [1] 片山一成ら，プラズマ・核融合学会誌,92, No.2 (2016) 136-141.
- [2] 近藤正聡ら，プラズマ・核融合学会誌,86, No.7 (2010) 408-412.