

液体だけど水じゃない～次世代ブランケット・ダイバータ研究開発の現状と課題～

<トリチウム・安全性研究の現状>

Current Status of Tritium and Safety Study

片山一成¹⁾, 興野文人²⁾

Kazunari KATAYAMA¹⁾, Fumito OKINO²⁾

九大総理工, Kyushu Univ.¹⁾, 京大エネ研, Kyoto Univ.²⁾

1. はじめに

環境および公衆に対する DT 核融合炉の安全性を確保する上で最も重要となるのは、プラント内にトリチウムを閉じ込めることである。通常運転時のみならず異常発生時においても、環境へのトリチウム放出量が規制値以下となるよう、プラント全体として適切にトリチウムを閉じ込めるシステムが構築されなければならない。基本的には、多重の物理障壁と独立したトリチウム除去設備の組み合わせにより、施設内にトリチウムを閉じ込めることができる。ただし、区画内の空間容量や除去設備の性能は、内包する機器のトリチウムインベントリー並びに定常的トリチウム漏洩量を正しく評価した上で、適切な規模で設計することが重要である。

トリチウムは高温で比較的容易に金属壁を透過するため、炉心周辺や増殖トリチウム回収系、発電系において、トリチウムは定常的に透過・漏洩する。空間内に漏洩したトリチウムは、室内の負圧維持系を通して回収され、冷却材に透過したトリチウムはループ内に設置されたトリチウム除去設備で回収され、再び燃料として利用される。しかしながら、燃料として利用できる状態に処理する工程に相当の時間を要するため、燃料サイクル成立性の観点からも透過・漏洩量は少ない方が望ましい。冷却材中のトリチウム量の評価は、配管破断におけるリスク評価のソースタームとして重要である。

液体トリチウム増殖材および液体ダイバータを用いた場合のトリチウムインベントリーおよび透過量を評価するためには、液体材料中でのトリチウム挙動の把握が重要である。安全性および燃料の効率的利用の観点から、適切なトリチウム回収技術の開発も不可欠である。

2. 液体トリチウム増殖材におけるトリチウム挙動研究の現状

液体リチウム増殖材として、液体金属リチウム(Li)、リチウム鉛(Li-17Pb)およびフッ化物熔融塩フリーベ(Flibe)が有力な候補材である。これらの材料における水素同位体挙動については、古くから研

究が行われており、トリチウム挙動の理解は深まってきている。トリチウムインベントリーおよび透過量を評価する上で重要となるのが各材料中への水素同位体溶解度である。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。もっとも、インベントリーや透過量のリスク評価は、プラント全体のトリチウムバランスを考慮して判断されなければならない。

液体金属リチウムやリチウム鉛中の水素同位体溶解度は、水素同位体の圧力の1/2乗に比例するジューベルトズ則に従い、フリーベは水素同位体の圧力の1乗に比例するヘンリー則に従う。フリーベ中には、腐食性の強いHFの化学形でも存在できるがBeを用いた酸化還元制御により、H₂として回収できることが確認されている[1]。図1に大気圧水素に対する溶解度(mol-H/mol)を示す。

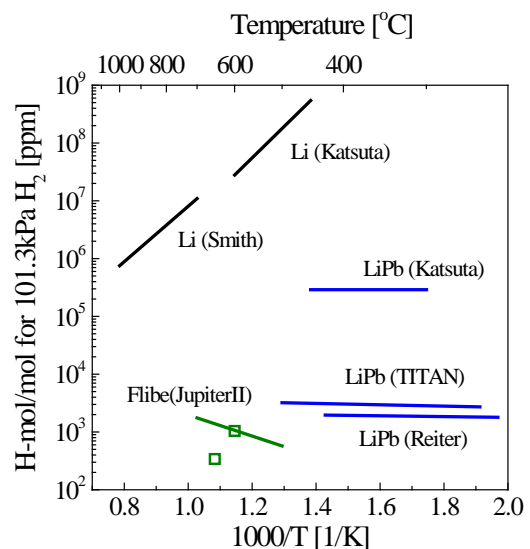


図1 水素圧力 101.3kPa に対する水素溶解量 [2-6]

なお、水中への溶解度は水素大気圧下 0℃から 80℃において 15ppm 程度である[7]。液体トリチウム増殖材は、液体だけど水とは異なる水素溶解度を持っているのである。リチウム鉛やフリーベに比べて、液体金属リチウムの水素溶解量が桁違いに大きいことがわかる。トリチウムインベントリーが高くなる一方で、定常的な透過量は大きくない。逆にフリーベは定常的なトリチウム透過量が高いため、透過抑制膜による対策が必要であろう。透過抑制膜の開発は酸化エルビウムを中心に着実に進展しており、実用化を目指した研究が精力的に進められている[8]。水素吸蔵金属を添加して、トリチウムを吸収させることで透過量を抑制させる試みも検討されている[9]。リチウム鉛中の水素溶解量には研究者間で大きな開きがあり、信頼性のある評価が困難となっていた。2007 年から 6 年間実施された日米科学技術協力事業 TITAN プロジェクトでは、リチウム鉛中のトリチウム挙動の把握のため、様々な方法を用いて水素同位体溶解度の測定が行われた[6]。得られた溶解度は 2 桁程度の範囲に収まるものの、表面不純物層や蒸発リチウムへの捕捉、充填容器との化学反応、Li/Pb 比の変化等により溶解度にバラつきが生じたものと考えられる。

液体トリチウム増殖材におけるトリチウム挙動に関する研究は、静的状態での実験から流動状態での実験に移行しつつある。流動する増殖材からトリチウムが金属壁を透過する場合、固液界面の境膜と呼ばれる移動障壁を考える。増殖材の流速により移動障壁の厚みが増えるため、境膜内の拡散と金属壁内の拡散のどちらが律速段階となるかは条件により変わってくる。九州大学では、トリチウム挙動の把握のため、液体トリチウム増殖材の流動実験が実施され、有益なデータが得られ始めている。核融合科学研究所でも熱・物質流動ループ、Oroshi-2 が整備され、流動下でのトリチウム挙動の把握に向けた研究が本格化している。これらの実験を通じて得られるトリチウム物質移動パラメータを用いることで、液体ブランケットおよび液体ダイバータにおけるトリチウム挙動をより正確に評価することが可能となるであろう。

3. 液体トリチウム増殖材からのトリチウム抽出システムの検討

リチウム鉛やフリーベは水素溶解度が小さく、トリチウムが増殖材から脱離しようとするため回収は比較的容易である。現在精力的に研究されているリチウム鉛については次の方式が検討されている。

A. Gas liquid contactor (GLC) : 最近の発表では 15-30%の抽出率が報告されている[10]。

B. Permeation Against Vacuum (PAV) : GLC がガス対流方式であるのに対し、リチウム鉛の長所を活かしてトリチウムを真空中に抽出する方式などが研究されている。

C. Vacuum Sieve Tray (VST) : 真空中を落下するリチウム鉛液滴上では、溶解しているトリチウムが静的拡散に比して 2 桁程度高速で移動することが実験で確認されトリチウム抽出に応用されている[11]。

液体金属リチウムからのトリチウム抽出には、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。九州大学では、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。

4. まとめ

液体ブランケット・液体ダイバータを用いた核融合の実現に向けては、燃料サクルシステムの成立性および安全性の観点から、液体材料流動下でのトリチウム挙動の把握は最重要課題の一つと言える。液体金属リチウム、リチウム鉛およびフッ化物溶融塩フリーベについては、静的条件下でのトリチウム移動パラメータが定量されてきており、現在、動的条件下でのトリチウム挙動把握研究が本格的に進められていく段階にある。

参考文献

- [1] Satoshi Fukada, J. Plasma Fusion Res. vol. 10 (2013) 22-26.
- [2] E.M.Larsen et al., "Comments on the hydrogen solubility data for liquid lead lithium and lithium-lead alloys and review of a tritium solubility model for lithium-lead alloys, 1981.
- [3] R.A.Anderl et al., J.Nuc.Mater., 329-333 (2012) 1327-1331.
- [4] P.Calderoni et al., Fusion. Eng. Des. 83 (2008) 1331-1334.
- [5] F.Reiter, Fusion. Eng. Des. 14 (1991) 207-211.
- [6] S.Fukada et al., Materials Transactions. Vo.54, No.4 (2013) 425-429.
- [7] 改訂4版 化学便覧 基礎編、丸善
- [8] A.Suzuki et al., J.Plasma Fusion Res. Vol.89, No.6 (2013) 349-358.
- [9] A. Sagara et al., Fusion Eng. Des. 89 (2014) 2114-2120.
- [10] M. Utili et al, Poster session P3.084, ISFNT-12 14-18 September 2015 at Jeju Korea.
- [11] F. Okino et al., Fusion Sci. Tech. 64-3, 543 (2013).