業 解説

リチウム鉛液滴からの水素同位体の回収

Hydrogen Isotope Recovery from Li-Pb Droplets

興 野 文 人 OKINO Fumito 京都大学 エネルギー理工学研究所 (原稿受付:2022年9月26日)

核融合炉に於いて液体金属方式ブランケットループの作動流体候補の一つである液体リチウム鉛からのトリ チム回収に関連する過去の研究,京都大学エネルギー理工学研究所で提唱している液滴回収方式に関する理論と 原理検証,及び核融合科学研究所にて実施している連続検証試験について現在までの研究結果を記載した.また その間に得られた知見を基にリチウム鉛を使用する装置設計に際しての注意点を記述した.

Keywords:

lithium-lead, droplet, tritium, hydrogen isotope, recovery, blanket, ITER, DEMO

1. はじめに

核融合炉の研究開発に於いては国際熱核融合実験炉(以 下 ITER と記述)の製造が進展しており2035年頃から本 格的な実験が開始される予定である. また ITER の次 の核融合炉 Demonstration Fusion Power Plant (以下 DEMO と記述)に関する調査研究が世界的に推進されて いる. DEMO に於いては実用発電を見据えた厳しい要求 仕様が検討されており、核融合反応の燃料であり炉内で 生成されるトリチウム(以下Tと記述)に関しても安全 性の観点から回収率80%以上が必要とされる.この条件 を満たすため幾つかの生成と回収に関する方式が現在研 究されている.本稿では方式の一つである液体リチウム 鉛(以下 LiPb と記述)を使用した T 回収に関連する過去 の研究,京都大学エネルギー理工学研究所(以下 IAE と 記述) で提唱している LiPb 液滴回収方式(以下 VST と 記述)に関する理論と原理検証,及び核融合科学研究所(以 下 NIFS と記述)にて実施している連続検証試験につい て現在までの研究結果を記載した.またその間に得られ た知見を基に LiPb を使用する装置設計に際しての注意点 を記述した。なお、本文中で用いた定義式や呼称に関し ては本稿内限定であることに御留意ください.また以下 の文章では H, D, T をそれぞれ水素, 重水素, 三重水素 の原子及び分子の略, Qを水素同位体全般の原子及び分 子の略称として記述します.

1.1 LiPb からの T回収に関する歴史的経緯

LiPb は T 平衡圧が低く真空中での直接回収が可能であ り回収装置がシンプル,融点が235℃と低い,また T 生成 により減量する Li の補給が容易,等を兼ね備える有望な 液体金属材料として '80-'90代に Plute 他により積極的に 研究された[1-4].しかし抽出能率に最も影響する物質移 動係数に関して報告者間での乖離が大きいこと,推定し た実用規模の抽出装置の寸法が数十メートル[1,2]と非現 実的であった為"有望な方式ではあるが解決すべき課題 が多い"とされた[5]. これらは静的拡散係数に基づいて 理論推定したことに起因すると考えられる. T 抽出に関係 する物性値である静的拡散係数 D, ジーベルツ定数 K_s , 再 結合係数 k_r 他に関しては '90年代以降の研究が文献[6]に 良く総括されており有用である. LiPb からの T 回収に関 する研究は2022年現在では主に下記の 3 方式が実施され ている.

Gas Liquid Contactor(GLC);最も先行しており CEA (仏)の Alpy らのグループが Sulzer 社製の Structured Packing MellaPak 750Yを使用したガス対流方式で試験 を行った[7,8]. その後 ENEA(伊)に継承され実用化の 試験が継続しており15-44%の抽出率が報告されている [9,10].既存の工業製品を使用する技術リスクの少ない 方式であるが対流ガスを使用する為T抽出には分離工程 が必要となる. ITER に於いて LiPb 仕様の抽出方式とし て Conceptual Design Review(CDR)で検討された[11]. 現在は EU-DEMO 用 LiPb 仕様の抽出方式として研究さ れている.二層流間の拡散原理を応用している為,高能 率な抽出には限界がある.DEMO 炉を見据えた抽出率を 得るにはカスケード化が必要であり装置の全体規模が問 題となる可能性がある[12].

Permeation Against Vacuum (PAV);乱流下での物質 移動係数の増大を利用して LiPb を高速流動させ溶解して いるTを管壁から透過回収する方式である. CIEMAT(西) 及び ENEA で研究されている. 配管をスパイラル形状と して接触面積を拡大させ透過の能率を上げる,水素透過 材料の溶接強度向上等の工夫がなされている. 現在は実

Institute of Advanced Energy, Kyoto University, Uji, KYOTO 611-0011, Japan

author's e-mail: fumito.okino@iae.kyoto-u.ac.jp

験装置を製作中の段階であるが[13]数値解析では 0.1 m/s の流速では80% 程の回収率も可能と報告されているが実 測は未確認である[14]. 大流量への対応が容易であり想 定通り実現できれば EU-DEMO 炉に適した抽出法と考 えられ研究が積極的に推進されている. 2022年度開催の 32nd Symposium on Fusion Technology (SOFT2022) に も最新状況が報告されている[15, 16].

Vacuum Sieve Tray (以下 VST と記述); Tを含有した LiPb を真空中で液滴化して落下させ、その間に放出された Tを直接回収する方式.カウンターガスを使用しない為、T 分離工程が不要でシンプル、液滴の球体振動による移流拡散により高能率な T 回収が可能、常時新鮮な液滴からの放出で回収率の時間劣化が無い、等のメリットがある.一方で必要流量を確保する為、多数のノズル配置が必要となり DEMO 炉に対応する為には装置のコンパクト化が課題となる.2010年以来 IAE を中心に研究されており2章以降に今日までの研究状況を記述する.

1.2 DEMO 炉への適応と課題

ITER が製造の段階に進みつつあることをうけて DEMOのブランケット構造とT回収が現在議論されて いる. EU DEMO に関しては4方式のブランケットが当 初検討され内3種が LiPb を使用する液体方式であった [17,18],現在は Helium Cooled Pebble Bed (HCPB)と Water Cooled Lithium Lead (WCLL)が検討されている [19].運転条件も ITER とは桁違いに厳しく生成された Tの透過放出に対しても安全規制の順守と高い技術成熟 度が求められる. インヴェントリー及び透過の観点から WCLL に於いてはT回収率80%以上が必要とされている [20].現在研究されている3方式は,いずれも条件を満 足しておらず問題点を克服する研究開発が現在進められ ている.

1.3 リチウムハイドライドの生成に関して

ブランケットで LiPb 中に生成された Q はリチウムハ イドライド LiQ を生成しガス単体として回収できない のではとの懸念が提起される. 図1に Li と LiH の低濃 度域での状態図を示す[21,22]. 温度300° ~400域では 濃度比約1%程度が β 相 LiQ 生成限界となる. 核融合 ブランケットで通常使用される LiPb 中の Q 濃度比は 10^{-6} ~ 10^{-8} at.fr と想定されており LiQ は生成されず Q はガスとして回収可能であり実験により確認されている.

2. VST 方式の原理

IAE 及び NIFS にて研究及び試験が実施されてきた VST 方式回収装置について、その原理及び試験状況につ いて記述する. 図2 に液体 LiPb ブランケットループの 構成図を示す. ブランケット中で主に⁶Li+n \rightarrow T+ α 反 応により生成された T は液体 LiPb に溶解し外部に移流さ れトリチウム回収装置(TES)にて一定率 ϕ (ϕ <1)回 収される. 残留した T は LiPb と共にブランケットへ還 流される. LiPb ブランケットループ中でのT インベント リー平衡値は概略 ϕ に反比例する. したがって ϕ の高能 率化(1に近づける)がインベントリー低減のキーとなる.



9 Projection of phase diagram of $\text{Li}-\text{H}_2$ on to 1/T-logx coordinates with isobars. The α -and α' -phases are metallic to ionic liquids, the β -phase is the ionic solid LiH with melting point at 694°C. Phase diagrams of $\text{Li}-\text{D}_2$ and $\text{Li}-\text{T}_2$ are similar¹⁰





図2 液体 LiPb 使用ブランケットループ[®]構成図. ブランケット中で主に⁶Li+n → T+α 反応により生成された T は液体 LiPb に溶解し外部に移流され TES にて一定率 ¢ 回収される. TES の ¢ の高能率化(1に近づける)がイン ベントリー低減のキーとなる. 一部の LiPb ブランケット 方式では T と併せ熱回収(HEX) も実施する[23].

LiPb ブランケットではTと併せて熱回収(HEX)することも原理的に可能であり IAE ではその研究も実施しているが、本稿では記述対象外とする[23].

円柱ノズルによるガス中での液滴生成は過去に多数の 研究がなされ、ノズルからの放出流速 Uと液滴生成形状 には図3に示す関係があり式(1)として定式化されてい る[24].式中 ρ , U, a, σ はそれぞれ LiPb 密度[kgm⁻³], 流速[ms⁻¹]、ノズル半径[m]、表面張力[Nm⁻¹], 添え字 1,2 は液体及び周辺気体を表す. JET BREAKUP 89



Figure 2 Schematic diagram of the jet breakup length curve.

 図3 流速 Uとガス中での液滴生成形態. 横軸 Uの低速側 A-B では一定径の大径液滴(Rayleigh モード)が生成され, 高速側 C-D では分布を持つ小径液滴(Taylor モード)が 生成される[24].

$$\begin{split} \frac{A}{a} &= 9.02 \frac{(1+0.45Z^{0.5})(1+0.4T^{0.7})}{(1+0.87We_2^{1.67})^{0.6}} \\ & (1) \\ Z &= We_1^{0.5}/Re_1 \quad T = ZWe_2^{0.5} \quad We_1 = \rho_1 U^2 a / \sigma \\ We_2 &= \rho_2 U^2 a / \sigma \quad Re_1 = Ua / \nu \end{split}$$

VST は真空中で領域 A-B(Rayleigh 領域)にて生成される一定粒径液滴を使用する. $We_2 = 0$, $Z \approx 0$ となる真空条件下では式(1)は式(2)に簡略化され液滴半径として式(3)が得られる. 真空中では液滴径は表面張力, 密度等に関係なくノズル径のみで決定されるシンプルな関係となる. なお真空中に於いては $\rho_2=0$ であり式(1)からわかる様に領域 C-D(微細液滴)を生成するのは困難であり別の手法が必要となる.

$$\frac{\Lambda}{a} \cong 9.02 \tag{2}$$

$$r = \left(\frac{3}{4} \ 9.02\right)^{\lfloor 3 \rfloor} \ a = 1.89a \tag{(3)}$$

図4に真空中で生成された液滴が落下する状況を捉えた高速写真を示す.また図5に各種ノズル径に対して生成された液滴径をH₂O及びLiPbについて測定した値を示す.先に式(3)に示した理論式に良く整合し液滴径は密度や表面張力に依存しないことを示している[25].参考値は $\rho_{\rm H_2O} = 1.0 \times 10^3 \, \rm kgm^{-3} \, \rho_{\rm LiPb} = 9.7 \times 10^3 \, \rm kgm^{-3} \, \sigma_{\rm H_2O} = 0.07 \, \rm Nm^{-1} \, \sigma_{\rm LiPb} = 0.45 \, \rm Nm^{-1}[6]$ である.



図 4 落下中 LiPb 液滴の高速撮影.液滴は落下中に球体振動し 内部流動により溶解している Q の放出を促進する.ノズ ル径 0.6 mm, 400℃,1コマ約1 ms.



図5 ノズル径と液滴径の関係. ▲は H₂O, ●は LiPb での結果 を示す. 横軸はノズル径, 縦軸は液滴径. Rayleigh モー ドでは液滴径は密度や表面張力に依存せずノズル径のみで 決定される.

3. トリチウム回収

LiPb ブランケットループに於いて T の単位時間回収量 はマスフラックス式の流動項[26]より式(4) で記述され る.ここに ϕ , A, v_T , c, Q_T はそれぞれ, T 放出能率(回 収率)[無次元](以下 TEE と記述), LiPb 移流断面積[m²], T 移流速度[ms⁻¹], T濃度[mol m⁻³], T 移流能力[m³s⁻¹] (以下 TFC と記述) を表す.以下に各項目の詳細を記述 する.

$$\phi(Av_{\rm T})c = \phi(Q_{\rm T})c \tag{4}$$

単粒液滴からの TEE は球体の拡散式より時間 t の間に 球体から放出される量 M(t) と総放出量 $M(\infty)$ との比で 表され式(5)となる[27]. 落下中の球体は球体振動によ り内部に流動が発生する為, Eには静的拡散係数ではな く移流拡散係数が該当する. r_0 は液滴球の半径[m].

$$\phi = \frac{M(t)}{M(\infty)} = 1 - \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(1 - En^2 \pi^2 t / r_0^2\right) (5)$$

図4に示した落下液滴を使用しLiPb 中に溶解させたD (実験は D で T を模擬した)の放出能力を 4 種のノズル径 (0.4, 0.6, 0.8, 1.0mm)を使って測定した. 落下中 LiPb 液 滴から放出される D フラックスを式(5)を使い E に変換 した測定結果を図6に示す. ◆印で落下中の LiPb 液滴か ら放出された E[28], ○印で Reiter の先行研究[29] から 得られた静的拡散係数をプロットした. 液滴から放出さ れる E は静的な拡散係数に対し2桁程大きい値を示した. また静的な測定結果と異なり温度に依存せず放出が拡散 とは異なるメカニズムで駆動されていることを示している. 図4に示す様に落下中の液滴を高速カメラで観察すると 球体振動が観察された. これに依る変形が液滴内に溶解 している D の流動を喚起し放出を増大させることが判明 した[30]. 先に説明した E 値を使い単粒液滴からの TEE をシミュレーションしたものを図7に示す[31].実際の 回収装置に於いては LiPb 流量に対応する為. 多数のノズ ルから同時に液滴を落下させる必要がある. その際には



 図 6 液滴落下中に放出される移流拡散係数のアレニウスプロット.静的拡散係数を併せて表示. ◆ 落下 LiPb 液滴からの E 値 (今回の測定結果),○ 静的拡散係数 Reiter[29],横軸は1000/T.



図7 落下中 LiPb 液滴から放出される TEE 推定値. 縦軸;回収 率,横軸;液滴落下時間. 4種のノズル径(0.4, 0.6, 0.8, 1.0 mm) について計算.

放出されたTが隣接する液滴に吸収干渉され総合的な回 収能率が低下する懸念がある.入射した粒子の表面滞留 時間は液滴落下時間に比して何桁も短い為その懸念は少 ないと考えられるが今後の検証課題のひとつである[32].

4. 液体金属試験ループによる連続機能検証

IAE での単体試験装置による原理検証(proof-ofprinciple)結果を踏まえブランケットループを模擬した LiPb 流動場に於ける連続運転条件でのT移流挙動,TEE 計測,及びT放出安定性の検証を実施した.試験はNIFS に設置されている液体金属連続試験ループ(Oroshhi-2) に実験装置を組み込んで実施した[33, 34].

4.1 試験装置

図8に製作した試験装置の構成図を示す.図中で記号 $\{j\}$ は機能ユニット番号を表し、 $\{0\}$:重水素 D_2 ガス、 $\{1\}$: D_2 ガス溶解装置、 $\{2\}$:液体 LiPb、 $\{3\}$:濃度検 出部(VST 回収前)、 $\{4\}$:流量計、 $\{5\}$:VST、 $\{6-1\}$; 液滴生成ノズル、 $\{6-2\}$:LiPb 液滴、 $\{7\}$:シャットバ ルブ、 $\{8\}$:濃度検出部(VST 回収後)、 $\{9\}$:循環用電 磁ポンプ(EMP)を示す.図中で記号 <k>は LiPb ルー プに於ける流路ポイント番号を示す.また図9の左;VST 試験装置全体、右上;VST本体 $\{5\}$ 、右下;D溶解筒 $\{1\}$ の写真を示す.LiPb 温度は 350℃、ループ循環時間はポ ンプ吐出量 0.3 L min⁻¹の場合約 160 min である.

試験の目的は

- ① LiPb 流動場に於ける T の移流特性を拡散理論を基 に移流項と拡散項に分離して明確化する,
- ② TEE を測定し3項に記した計算結果を検証する,
- T 放出の長時間安定性を確認する

である.

4.2 LiPb 流動場に於ける D の移流項と拡散項明確化

TFC は従来以下の方法で記述し解析されてきた.第一 は LiPb の体積流量 volumetric flow rate $[m^3 s^{-1}]$ (注, 流速 $[ms^{-1}]$ との混同を防ぐ為,以下記号 Q_L と記述)を TFC に等しいと仮定し式(6)に示す様に記述する. T は



図8 連続試験装置構成図

{0};重水素 D₂ガス, {1}; D₂ガス溶解装置, {2};液体LiPb, {3};濃度検出部(VST回収前), {4};流量計, {5};
 VST, {6-1};液滴生成ノズル, {6-2};LiPb液滴, {7};シャットバルブ, {8};濃度検出部(VST回収後), {9};循環用電磁ポンプ(EMP).



図9 連続試験装置. NIFS Oroshhi-2に設置して試験実施. 左; VST 試験装置全体,右上;VST 本体 [5] 断熱被覆取外し状態,右下;D 溶解筒 [1] 断熱被覆上半分取外し.

LiPb に乗って移流し拡散による移動は微小で無視できる とする考え方である[35]他.

$$Q_{\rm T} = Q_{\rm L} \tag{6}$$

第二はレジデンスタイム (τ_i)を用いて式(7)で TFC を表す.式中 V_i はTが通過する各装置の容積[m^3]を示す. τ_i は各装置固有の独立変数として定義されるが物理的な根 拠は不明確[36]他.

$$Q_{T_{\rm i}} = V_{\rm i}/\tau_{\rm i} \tag{7}$$

上記いずれの記述にても実際に数値確認がなされたの は筆者の知る限り Fedrov の報告のみと考えられる[37]. Fedrov による測定は実験原子炉にて実施されブランケッ トループとは試験条件が異なった為,低い値の拡散係数 が得られた.以降拡散項は TFC に影響を与えないとされ てきた.

測定は D を矩形波状に溶解しその濃度分布の時間変化 式(8)(9)を基に計算と実測を比較して移流拡散係数E を求めた[27]. 得られた結果を図10に示す. 実測値(図中 の□) は Taylor の理論式(10)(図中の○) と概ね一致し層 流流動場に於いて拡散係数が増大する Taylor dispersion 理論に合致する結果が得られた[38]. 図10には参考に静 的状態での Dの LiPb に対する拡散係数の平均値を併せ プロットした[6]. 静的拡散係数は 10⁻⁹ m²s⁻¹オーダーに 対し層流流動場での移流拡散係数は10-2~10-1と約7桁 も拡大することを確認した. 移流項に関しては短距離で の到達時間測定より LiPb の流動と同一であることが確認 できた、この結果より LiPb 流動場(層流)に於いては拡 散項の影響は無視できず従来の記述式(6)或いは(7)で は不十分であり移流拡散理論に沿った解析が必要である ことが判明した. 核融合炉のパルス燃焼運転等の非定常 状態に際してはTインベントリー推移の見直しが必要と 考えられる.



 図10 移流拡散係数 測定結果.
 □;今回の測定結果,○;Taylor dispersion 理論式による計算結果.
 —;静的拡散係数(平均値).
 移流条件下(層流)では拡散係数が静的条件に比べ約7桁 程上昇しTaylorの理論値と良く一致した.

$$x_{i}^{*} = x_{i} - v_{f} t_{i}$$
 (8)

$$R_{\rm it} = \frac{C_{\rm it}}{C_{\rm 0t}} (E, t_{\rm i}, x_{\rm i}^{*}) = \frac{1}{2} \left[\exp\left(\frac{h - x_{\rm i}^{*}}{\sqrt{4Et_{\rm i}}}\right) + \left(\frac{h + x_{\rm i}^{*}}{\sqrt{4Et_{\rm i}}}\right) \right] (9)$$

4.3 VST 方式回収装置の TEE 測定

TEE の測定は当初 LiPb 中の VST 通過前と通過後 D 濃 度(図8の{3}と{8})を比較測定して検証する計画であっ たが度重なる実験施設の長期閉鎖間により濃度センサー {3}, {8}に感度不良が発生し有意な測定が実施できてい ない.別方式による計測を2022年4月より実施中であり 結果が集約できしだい発表予定である.

4.4 VST 方式回収装置の長時間安定性

T回収装置の"計画外停止ゼロ"及び"回収率の長時間 安定"は実用運転時のインベントリー管理,メンテナンス効 率及び安全性に影響する重要な事項である.図11に9.5時間 連続運転中の VST 回収フラックスを時間推移で示す.時間 経過に伴い回収フラックスが微増しているのは LiPb 中の D 未回収分 $(1-\phi)$ が循環することによる D 濃度の増加による. 同様の測定を運転時間累計 200 h 程いずれも無停止で実施 できており VST 方式の回収安定性は担保できた.

5. LiPb 装置設計時の注意点

液体 LiPb を使用した装置を計画する場合には通常 300℃以上で使用される(融点約235℃)ことから装置の 真空度維持(外気の流入防止),他の金属に対する腐食, 分解交換の容易性,熱膨張,及び高密度に対し事前に対 策を検討しておく必要がある.

5.1 真空度維持と分解交換の容易性

短時間使用を前提とした Proof of Principle (POP) レ ベルの実験装置には全溶接構造が多く採用されるが、よ り本格的な試験装置としては分解交換は不可避であり接 続箇所にシール構造が必要となる。1/4"系配管の接続に は Swagelok 社の VCR 接手が使用されるが1/2"系では LiPb 溶着により流動後の分解はかなり困難となる。ICF 規格フランジ用の Cu ガスケット、SUS-O リングに Ag や Au をメッキしたものはいずれも LiPb との接触箇所に は腐食漏洩により使用できない。今回の試験装置には真



図11 TEE 9.5h 連続測定結果. VST{5} で9.5h 連続回収した D フラックスを示す. 横軸は時間軸. 値が時間と共に微増し ているのは VST での D 未回収分(1-φ)が循環し D 濃度 が増加することに起因しており系の不安定性とは異なる.

空(10⁻⁵ Pa 程度)の維持, LiPb 漏洩防止, 及び部品交 換を意図して図12写真左に示す様にグラファイトシール とAgメッキ SUS-Oリングを組み合わせた2重シール構 造を ϕ 50 mm から ϕ 250 mm まで採用した.小径側グラファ イトで LiPb をシールし大径側 SUS-O リング(軟 Ag メッ キ O リング+接触面鏡面仕上げ) で真空度を維持する方 式で10⁻⁴~10⁻⁵ Paまでの真空を380℃連続運転で維持 した. 寸法を自由に設計できるのもメリットである. 但 し、Oリングとグラファイトシールの抑え代を均等にす る寸法調整が必要となる. またグラファイトシールはフ ランジへの固着防止と粉末の混入防止の為、現場ノウハ ウであるがシールテープを巻いて使用する.シール組立 後 LiPb 循環開始時には目詰まり防止の為フラッシングを 行うことも目詰まりトラブル防止に有用となる.フラン ジに抜ネジ用タップを加工しておくことも分解容易化の 為に必要である.

5.2 相変化による熱膨張

LiPbの体積膨張率βは固体時8.0×10⁻⁵ [1/K] に対し 融点以上の液体状態では12.0×10⁻⁵と不連続に拡大する [39]. このため配管系内にLiPbが残留固化した状態で再 加熱すると局部溶融した箇所での体膨張により配管が膨 張し,最悪破断する.電縫管を使用して破損した具体例 を図12右写真に示す.停電等によりLiPbが配管内に残留 固化する可能性は必ずあるとし,以下に示す様な対策を 準備しておく必要がある.配管系路にLiPb滞留点を作ら ない.また配管冷却時には事前に残留LiPbをArガスで パージし配管内を空にする.管内にLiPbが残留固化して しまった場合は下流(ダンプタンク)側から順次加熱し て局部溶融を防止する.配管にはシームレス管を使用し 溶接管(電縫管)を使用しない.

5.3 高密度

LiPb は密度が 9.7×10^3 kgm⁻³ (H₂O の約10倍) と重い 為,装置及び配管支持方法に注意が必要となる.また開 閉バルブの通過流量は,Swagelok カタログ記載 Cv 値計 算式(11) にある様に同差圧での H₂O 流量の約0.3倍であ ることに留意が必要であり,ここで Q, ΔP , G は流量 L/ min, 圧力降下 MPa,比重 (H₂O に対する密度比).

$$Q \propto C_{\rm V} \sqrt{\frac{\Delta P}{G}} \tag{10}$$

他にはポンプの吐出量等に注意が必要となる.



図12 左;2重シール 右;電縫菅破損状況.

5.4 腐食, 蒸気圧

LiPb と他の金属との腐食に関しては SUS316に関する 古典的な報告から高温対応材に関する最新のものまで多 数の報告がなされており詳細は関連文献を参照願いたい ([40-42]他多数). 蒸気圧も多数の文献に記載がある([43] 他多数). 一般的に飽和蒸気圧が 10⁻³ Pa を超えると経路 内への蒸着が問題となり特にターボポンプ(TMP)への 直接流入を防ぐ対策が必要となる.

5.5 使用温度

LiPb に対し高温耐久性のある材料が単体試験片として は幾つか提案されているが LiPb を使用する回路を構成 するには配管の接合,開閉用バルブ,駆動ポンプは必須 であり,総合的な観点から使用温度を設定する必要があ る.液体金属回路に多数使用される Swagelok 社のベロー ズシールバルブ SS-UW 両端 VCR 仕様の最高使用温度は 537℃.腐食や蒸気圧の観点からも500℃前後が LiPb 回路 の現実的な使用上限温度と考えられる.

5.6 装置耐圧

Ar ガスパージにより真空装置内にガス圧が付加される ため、試験装置は真空規格でなく内圧容器規格で設計す る必要がある。特に観察用ビューポートは耐圧が低い為 パージ圧遮断が必要となる。

6. 纏め

液体 LiPb を使用した T 回収に関して過去からの経緯, 基本原理,検証及び装置設計上の注意点に関して記述した.基本原理の理論と検証に関してはほぼ確立できたが 連続運転による実用化検証は長期閉鎖による設備不具合 等により未だ不完全な状態にある.今後早期に設備を修 復し残項目を検証し LiPb 使用ブランケットループによる T 回収を実用可能な方式として確立させたい.

謝 辞

本稿に記載した研究の一部は核融合科学研究所共同研究(NIFS18KOBF039)の支援を受けて実施されました.

参考文献

- [1] K.E. Plute et al., Nucl. Tech. Fusion 4, 407 (1983).
- [2] G. Pierini et al., Fusion Tech. 1, 463 (1984).
- [3] R. Baratti et al, Fusion Tech. 10, 266 (1986).
- [4] T.J. Dolan *et al.*, G.R. Longhurst, Fusion Tech. 21, 1949 (1992).
- [5] H. Moriyama et al., Fusion Eng. Des. 28, 226 (1995).
- [6] E. Mas de les VAlls *et al.*, J. Nucl. Mater. **376**, 353 (2008).
- [7] N. Alpy et al., Fusion Eng. Des. 39-40, 787 (1998).
- [8] http://www.sulzer.com/ja/Products and Services/Separation Technology/Structured packings.
- [9] M. Utili *et al*, Poster session P3.084, ISFNT-12 14-18 September 2015 at Jeju Korea.
- [10] M. Utili et al., Nucl. Fusion 62, 066036 (2022).
- [11] Review Panel Report for CDR of the HCLL TBS + HCPB TBS and Associated IO activities, IO report 26-June-2015.
- [12] Ricapito et al., Fusion Eng. Des. 89, 1469 (2014).

- [13] D. Rapisarda *et al.*, Oral session O3A.4, ISFNT-12 14-18 September 2015 at Jeju Korea.
- [14] P. Martinez et al., Fusion Eng. Des. 87, 1466 (2012).
- [15] M. Utili et al., Poster session P-2.93, 32nd Symposium on Fusion Technology, 18–23 September 2022, Dubrovnik, Croatia.
- [16] F. Papa *et al.*, Poster session P-2.210, 32nd Symposium on Fusion Technology, 18–23 September 2022, Dubrovnik, Croatia.
- [17] G. Federici et al., Fusion Eng. Des. 89, 882 (2014).
- [18] A. Del Nevo et al., Fusion Eng. Des. 146, 1805 (2019).
- [19] P. Arena *et al.*, Poster session P1-259, 32nd Symposium on Fusion Technology, 18–23 September 2022, Dubrovnik, Croatia.
- [20] D. Demange et al., Fusion Eng. Des. 89, 1219 (2014).
- [21] C. E. Meser, NYO-9470 (1960) Tufts University.
- [22] H. Wenzl, (1982) International Metals Reviews, 27:1, 140-168, DOI: 10.1179/imr.1982.27.1.140.
- [23] 小西哲之: プラズマ・核融合学会誌 98,349 (2022).
- [24] S.P. Lin et al., Annual. Rev. Fluid Mech. 1998. 30: 85-105.
- [25] F. Okino et al., Fusion Eng. Des. 87, 1014 (2012).
- [26] E.L. Cussler, *Diffusion* 3rd ed., Ch. 3.4 (Cambridge Univ. Press, 2009), ISBN 978-0-521-87121-1.
- [27] J. Crank, *The Mathematics of Diffusion* 2nd ed., Ch.
 6.3 (Oxford University Press, 1979), ISBN 978-0-19-853411-2.
- [28] F. Okino et al., Fusion Sci. Tech. 64, 543 (2013).
- [29] F. Reiter, Fusion Eng. Des. 14, 207 (1991).
- [30] F. Okino et al., Fusion Sci. Tech. 64, 549 (2013).
- [31] F. Okino et al., Fusion Eng. Des. 109-111, 1748 (2016).
- [32] F. Okino et al., Fusion Sci. Tech. 71, 575(2017).
- [33] F. Okino *et al.*, Fusion Eng. Des. **146**, 898 (2019).
- [34] T. Tanaka et al, Fusion Sci. Tech. 75, 1002 (2019).
- [35] G.R. Longhurst *et al.*, TMAP4 User's Manual, EGG-FSP-10315 DE92 018044 (1992).
- [36] F. Cismondi et al., Fusion Eng. Des. 157, 111640. (2020).
- [37] A. Fedorov et al., Fusion Eng. Des. 86, 2370 (2011).
- [38] G. Taylor, Proc. R. soc. Lond. A 1953 219, doi: 10.1098/ rspa.1953.0139.
- [39] S. V. Stankus et al., High Temperature 44, 829 (2006).
- [40] S. Smolentsev et al., J. Nucl. Mater. 432, 294 (2013).
- [41] H.U. Borgstedt et al., J. Nucl. Mater. 179-181, 596 (1991).
- [42] M. Kondo, Corros. Sci. 197, 110070 (2022).
- [43] M. Kondo, Fusion Eng. Des. 88, 2556 (2013).



興野文人

京都大学エネルギー理工学研究所協力研 究員.民間企業で開発技術者として勤務, 定年後に大学院に入学し博士課程を経て現

在に至る超超 late comer. 会社で経験した ことが研究の世界でこれほど役に立つとは思ってもいなかっ た. 一日でも早く retire するのを旨とする欧米人から"海 外旅行でもしたら良かろうになんでまた?"と良く言われる. 高齢化社会の先行 model なのだと答えるが unbelievable と 共感者は少ない.