The Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research

J. Plasma Fusion Res. Vol.92, No.2 (2016) 136‐141

小特集　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～

6．トリチウム・安全性研究の現状

6. Current Status of Tritium and Safety Study

片山一成[1)]，興野文人[2)]

KATAYAMA Kazunari[1)] and OKINO Fumito[2)]

[1)]九州大学大学院総合理工学研究院，[2)]京都大学エネルギー理工学研究所

（原稿受付：2015年11月21日）

次世代ブランケット及びダイバータへの適用が期待される液体金属及び溶融塩におけるトリチウム挙動研究について，これまでの研究成果を整理して概説し，トリチウム回収に関して最新の研究動向を紹介する．

Keywords:

tritium, liquid blanket, liquid metal, molten salt, solubility, diffusivity

6.1　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，プラント内にトリチウムを閉じ込めることが可能である．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，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．微量なトリチウムであっても貴重な燃料資源であり，回収することが重要である．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，冷却配管破断事故時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．

6.2　液体トリチウム増殖材へのトリチウム溶解挙動

液体トリチウム増殖材として，液体金属リチウム（Li），リチウム鉛（LiPb）およびフッ化物溶融塩フリーベ（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．水素同位体溶解度とは，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（トリチウム滞留量）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，増殖材あるいは増殖ブランケットの特性のみで考えるべきものではなく，プラントシステム全体でのトリチウムバランス・トリチウム移行量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への水素同位体溶解量は，水素同位体圧力の1/2乗に比例するジーベルツ則に従う．これは，水素同位体分子が解離し，原子状で溶解することを示す．一方，フリーベへの水素同位体溶解量は，水素同位体圧力の1乗に比例するヘンリー則に従う．これは，水素同位体分子として溶解することを示す．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，H_2として回収できることが確認されている[1]．**図1**に液体金属リチウム，リチウム鉛，フリーベについて，大気圧水素に対する水素溶解量（mol-H/mol）を示す．

Kyushu University, Kasuga, FUKUOKA 816-8580, Japan

corresponding author's e-mail: kadzu@nucl.kyushu-u.ac.jp

©2016 The Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research

NII-Electronic Library Service

The Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research

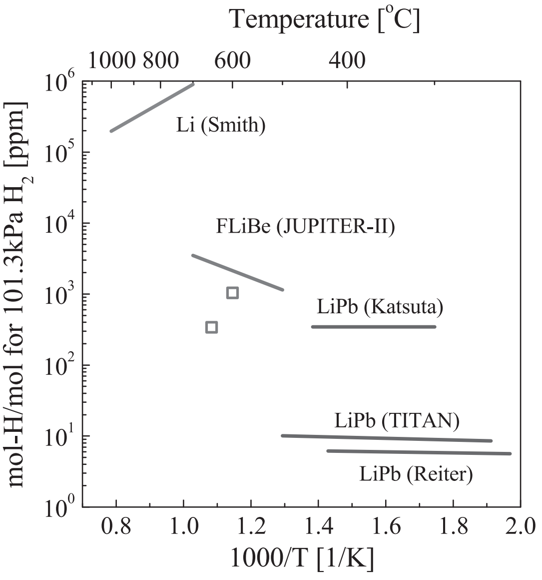

図1　水素圧力 101.3 kPa に対する水素溶解量[2-7].

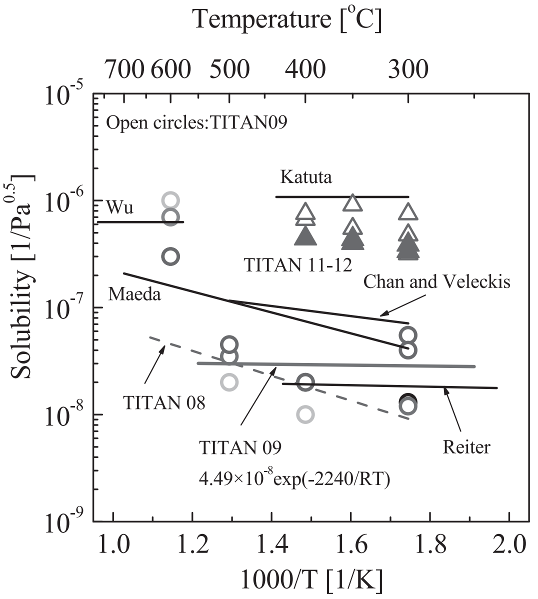

図2　リチウム鉛への水素同位体溶解度.

なお，水への水素溶解量は水素大気圧下 0 ℃から80℃において 15 ppm 程度である[8]．液体トリチウム増殖材が“液体だけど水じゃない”，ことを示す性質の一つである．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ことを示唆する．逆にリチウム鉛や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とされている．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，実用化をめざした研究が精力的に進められている[9]．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[10]．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，信頼性のある透過量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，水素同位体溶解度の測定が集中的に行われた[6]．**図 2** に示すように，得られた溶解度は 2 桁程度の範囲に収まるものの，より正確な溶解度の測定が望まれる．データのばらつきの原因としては，表面不純物層への水素捕捉や，実験容器内での蒸発リチウム付着層への捕捉，充填容器との化学反応，Li/Pb 比の変化等が考えられる．

6.3　液体トリチウム増殖材におけるトリチウム拡散挙動

液体トリチウム増殖材を静置した状態で用いるブランケット設計も有りうるが，流動状態で利用することで固体トリチウム増殖材では不可能な，魅力的なブランケットシステムが想定できる．液体トリチウム増殖材を冷却材として用いることでブランケット構造が比較的簡単になる．流動ループ内で連続処理できるためトリチウム生産に伴って失われていくリチウムを運転しながら適宜添加することが可能であり，常に最適なリチウム濃度を維持することができる．固体増殖材を用いる方式では，一度装填した増殖材は保守時まで取り出せないため，リチウム核燃焼及びリチウム蒸発に伴うトリチウム増殖率の低下，結晶粒成長によるトリチウムインベントリーの増加及び放出速度の変化等を精度よく評価した上でブランケット設計が行われなければ，燃料自己補給性及び安全性の観点から重大な問題が生じうる．さらには，ブランケットモジュールの変形によりリチウムセラミックス微小球が粉砕された場合，トリチウム増殖率の低下やパージガス流路の閉塞などが生じるため，十分な強度も必要となる．液体ブランケットでは，このようなリスクを負うことはない．液体トリチウム増殖材を流動させて，ブランケット外においてリチウム濃度や不純物濃度等をモニタリングし，適宜制御することにより安定したトリチウム生産・回収が可能である．

液体トリチウム増殖材におけるトリチウム挙動を考える場合，先に述べた水素同位体溶解度に加えて拡散係数も重要なパラメータである．液体金属リチウム，リチウム鉛，フリーベ中の水素同位体拡散係数を**図 3** に示す．各材料中における水素同位体拡散係数は，溶解度に比べると材料間の違いが比較的小さい．リチウム鉛に比べて，液体金属リチウムやフリーベ中の水素同位体拡散挙動に関する報告は少ないものの基本的な移動現象は理解されている．液体金属リチウム中では，トリチウムは T として移動するだけでなく，LiT としても移動する．この場合，リチウム中でのリチウムの自己拡散係数に近い，比較的大きな拡散係数が報告されている[11]．フリーベ中では，トリチウムは T_2 としてだけでなく TF としても移動し，この場合の拡散係数も報告されている[12]．したがって，液体トリチウム増殖材中の水素同位体拡散挙動を予測する場合には，材料中でのトリチウムの存在状態を考慮することが必要となる．静止状態での実験により拡散係数を同定する場合は，液体材料の自然対流による影響も考慮する必要がある．TITAN プロジェクトにおいて，リチウム鉛からの水素同位体脱離

NII-Electronic Library Service

The Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research

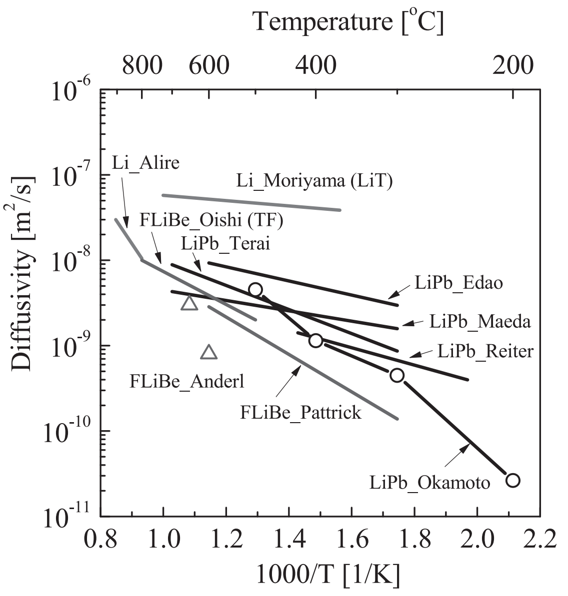

図3　リチウム，リチウム鉛，フリーベ中の水素同位体拡散係数．

挙動から見積もられた拡散係数は，文献値よりおよそ2桁大きな値となり，リチウム鉛充填部に生じた温度分布により自然対流が生じていたことを示唆した．

固体材料においては，溶解度と拡散係数が得られれば，その積として導出される透過係数と材料厚み，水素分圧差によって透過量が評価できる．一方，液体材料の場合，流動下において水素同位体とともにそれ自身が混合されることから，流体本体中での水素同位体濃度は一様となり，壁材料との間に想定される境膜と呼ばれる移動障壁内での拡散が，透過量に寄与することになる．境膜内における水素同位体拡散係数として，静止状態で得られた拡散係数を適用することができるが，透過挙動の見積には，境膜厚みの評価も必要となる．例えば，拡散係数，代表長さ，物質移動係数の関係を示す無次元数であるシャーウッド数については，円管内強制対流についてDittus-Boelter式[13]が提案されており，これを用いた透過量評価も行われている[14]．実際のトリチウム透過現象は，境膜内の拡散，液体材料－金属界面での移動（酸化膜中の拡散），金属材料中の拡散，金属表面－気相界面での移動（酸化膜中の拡散，再結合反応など）が直列に繋がった現象であり，材料の組み合わせ，条件によって律速段階は異なる．これらの移動過程のうち，境膜厚みは液体材料の流速により変化するため，液体トリチウム増殖材の流動実験によって透過量に流量依存性が見られた場合，境膜内の拡散が律速過程であることを意味する．流動状態における液体材料からの水素同位体透過挙動と流速との関係を明らかにすることは重要な課題であり，TITANプロジェクトにおいてもリチウム鉛流動ループの作製計画が検討された．流動ループ内に水素同位体透過テストセクションを設置した場合の水素同位体移行モデルと数値計算例を**図4**に示す．この計算は，テストセクションでの水素供給を停止し，流速を変化させた際の過渡的なリチウム鉛内水素濃度変化や配管からの水素透過速度変化を計算したものである．残念ながら，TITANプロジェクト期間内にリチウム鉛流動ループ実験装置を製作することはかなわなかった．

現在，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本格的に移行しつつある．例えば，九州大学では，自然対流及び強制対流リチウム鉛からの水素同位体透過実験が実施されており，水素同位体挙動への流速の影響などの議論が進んでいる[15,16]．核融合科学研究所でも熱・物質流動ループOroshhi-2が整備され，液体トリチウム増殖材流動下での水素同位体挙動及び腐食挙動の把握に向けた研究が始まろうとしている[17]．なお，Oroshhi-2ではトリチウムではなく水素を使い，フリーベではなくフライナック（FLiNaK）を用いた試験が行われる．過去にも液体材料の流動ループを用いた研究が行われているが，水素同位体挙動に関する知見は十分ではない．例えば，リチウム鉛の強制対流ループ実験装置であるTRITEXは，当初トリチウム抽出研究のために設計されたが，腐食挙動と精製法の研究へ目的が変更された[18]．これは，金属と水分との反応により発生するバックグラウンド水素濃度が高いことやリチウム鉛中の金属不純物濃度が運転時間とともに増加すること等により，低濃度重水素及びトリチウムを定量的に評価することが困難となったためである．特に長期間にわたる流動実験では，液体材料中の組成比の変化や金属不純物濃度などを把握しつつ，水素同位体挙動を追跡しなければな

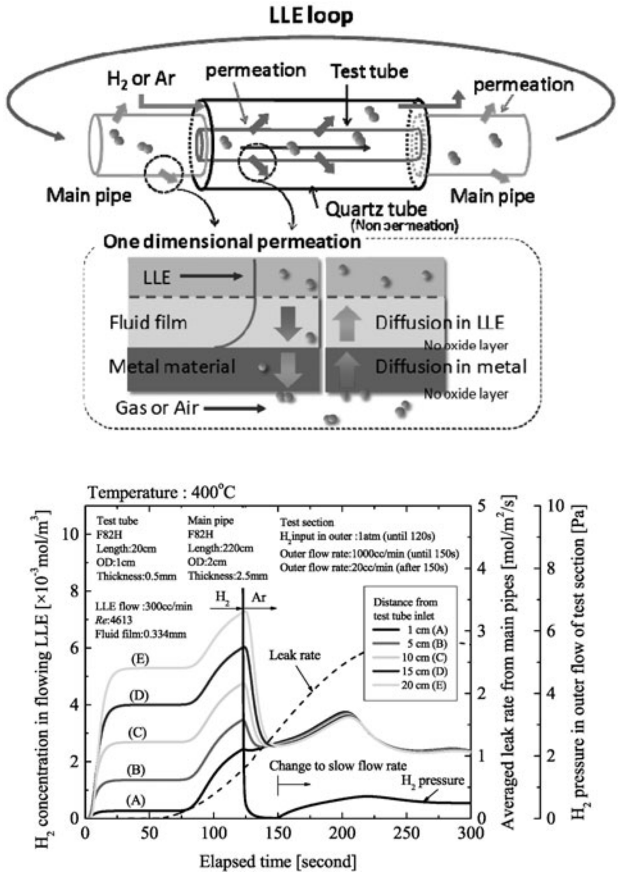

図4　二重管型水素透過テストセクションを有するリチウム鉛（LLE : Lead Lithium Eutectic）ループにおける水素透過モデルと数値計算例．

NII-Electronic Library Service

The Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research

らない．流動実験により得られる情報は，複合的な現象の結果として観測されるものが多く，それまでの履歴を含んだものとなるため，その解析には十分注意を払う必要がある．必要に応じて静的状態での実験も行いながら，流動実験を進めていくことで，液体ブランケット及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．

6.4 リチウム鉛からのトリチウム回収システムの検討

液体金属媒体からのトリチウム抽出は本来の目的である燃料回収以外にブランケットループに於けるトリチウムの透過放出，即ち安全性に最も影響を与える要因である．ここでは，まずITER及びDEMO炉で現在候補とされているリチウム鉛（LiPb）に絞ってトリチウム抽出に関する歴史的背景，現在の研究状況，DEMO炉への適応と今後の課題に関する概要を紹介する．

6.4.1 歴史的背景

リチウム鉛からのトリチウム抽出は他の液体金属媒体に比して溶解度が小さいことから抽出が容易という利点がある．また液体金属方式に共通の特徴である，増殖材の劣化に対する補給が容易，ブランケット構造がシンプル等を兼ね備える有望な方式として‘80－‘90代に Plute 他により積極的に研究された[19-22]．しかし抽出能率（'Tritium Extraction Efficiency'-TEE）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，推定した抽出装置（'Tritium Extraction System'-TES）の寸法が数十メートル[19,20]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”[23]とされた．これらは静的な条件での測定結果に基づいてのみ推定がなされ実験確認が実施されなかった影響が大きいと考えられる．トリチウム抽出に関係する物性値である拡散係数 D，ジーベルツ定数 k_s（溶解度），再結合係数 k_r 他に関して’90年代からの研究が文献[24]に良く総括されており有用である．その後のITER-TBM（Test Blanket Module）の検討に際してリチウム鉛は構造材料に対する腐食，MHD圧損等の問題があった為，総合的に固体増殖方式の方がより実現に近いとされ6台のITER-TBMの内4台に固体方式ブランケットが採用された[25-27]．リチウム鉛はEU分担分2台のTBM中の1台（HCLL: Helium Cooled Lithium Lead）及びインドのLLCB（Lead Lithium Ceramic Breeder）のみに採用された[28,29]．

6.4.2 現在の研究状況

リチウム鉛を用いたTES研究は現在では主に下記の3方式が研究されている．**図5**に各方式の構造図他を示す．

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[30,31]．その後ENEA（伊）に継承され実用化の試験が行われており最新の発表では15-30%の抽出率が報告されている[32]．確立された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トリチウム抽出には煩雑な分離工程が必要である．ITER HCLL-TBM用の抽出方式としてConceptual Design Review（CDR）で検討対象とされている[33]．二層面間の流動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．必要な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[34]．

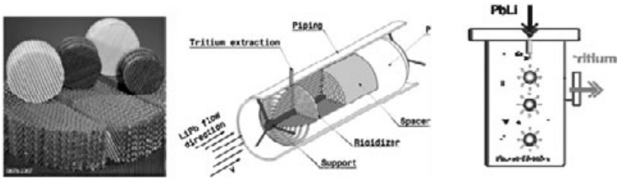

図5　TES各方式 左 GLC用MellaPak[31]，中 PAV構造図[36]，右 VST構造図[37]．

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生かしたトリチウムを直接真空中に抽出し，工程を簡素化する研究がなされている．CIEMAT（西）ではリチウム鉛を二重配管中に流動させ，その間に外側の真空配管に透過したトリチウムを回収する方式（PAV）が研究されている．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工夫がなされている．現在は実験装置を製作中の段階であるが[35]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[36]．大流量への対応が容易でありDCLL（Dual Coolant Lead Lithium）方式に適した抽出法と考えられる．

Vacuum Sieve Tray（VST）；真空中を落下するリチウム鉛液滴（直径約1 mm）上では溶解しているトリチウムが静的拡散に比して2桁程高速で移動することをIAE（日）の小西らのグループが実験で確認しTESに応用した[37]．約200ヘルツと高速の球体振動に励起された内部流動と小径液滴によりトリチウムの移動が拡大すると考えられている[38]．HCLLを対象とした試算では0.75－0.95と高いTEEが可能とされる[39]．TESの小型化，移流拡散により温度変化の影響が少ない等の利点もある．現在は単ノズルでの検証のみであり複数液滴の相互作用，ノズルの耐久性，必要流量の確保と調整といった実用化に向けた手法の確立が必要である．

6.4.3 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次期核融合炉Demonstration Fusion Power Plant（DEMO）に関する議論が開始されつつある．EU DEMOに関しては4方式のブランケットが検討対象とされ内3種がLiPbを使用する液体方式である[40]．運転条件もITERとは桁違いに厳しく生成されたトリチウムの透過放出に対しても安全規制値の順守と高い技術成熟度（TRL）が求められる．試算ではTEE 0.8以上が不可避とされる[41]．現在研究されている3方式は，いずれもこの条件を満足しておらず，それぞれの問題点を克服する研究開発が必要であり**図6**にその概念図を示す．

NII-Electronic Library Service

The Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research

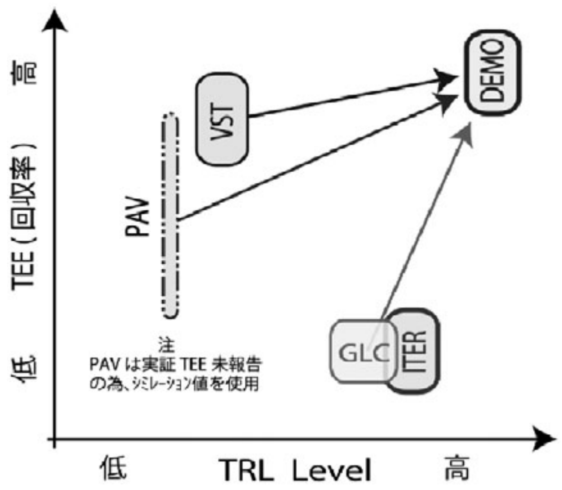

図6 TES各方式の現状とITER及びDEMOの目標を示した概念図.

6.5 溶融塩フリーベ及び液体金属リチウムからのトリチウム回収

フリーベは，リチウム鉛同様に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り，リチウム鉛と同様な手法が適用できる．先に述べたようにフリーベ中でトリチウムはTFでも存在できるが腐食性が高いことから，ベリリウムを用いた酸化還元制御によりTFをHTに変換して回収する方法が検討された．2001年から6年間実施された日米科学技術協力事業JUPITER-IIプロジェクトでは，酸化還元制御の実証実験が行われた．フリーベ中にHFをバブリングさせながら，金属ベリリウムロッドを一定時間浸漬させることで，出口ガス中のHF濃度が急激に減少し，ベリリウムロッド引き上げ後もしばらくは溶解したベリリウムによる還元反応が続くことが観測された．ベリリウムによる酸化還元法と気液向流抽出法（GLC）等を組み合わせることで，機器の腐食を回避したトリチウム回収の見通しが得られている[42]．深田らは，ヘリカル型核融合炉設計FFHR-2のフリーベ流動条件において，ベリリウム充填塔とラヒシリングを充填したフリーベ－ヘリウム気液向流塔の組み合わせによるトリチウム抽出法を提案し，適切に設計することで，効率的なトリチウム回収が可能であることを示した[43]．

液体金属リチウムへの水素同位体溶解度は大きいため，トリチウムの抽出は容易ではない．有望視されている方法は，イットリウムを用いたトリチウム回収法である．イットリウムは，リチウムよりも大きな水素同位体溶解度を有し，リチウムとの共存性も良好である．IFMIF/EVEDA活動の下，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動ループさせ，水素回収率を評価する実験が実施されている[44]．酸素や窒素などのリチウム中不純物の影響など実用上有益なデータが蓄積されつつある．イットリウムからのトリチウム回収方法のひとつは，真空あるいは不活性ガス雰囲気での高温加熱であるが，比較的長い加熱時間が必要となる．加熱温度が高い程，操作時間は短縮されるが，イットリウムに付着していたリチウムによる金属容器の腐食や，脱離トリチウムの透過・漏洩も考慮した操作条件の選定が必要である．250℃程度でトリチウムを吸収したイットリウムを600℃程度でリチウムと接触させ，イットリウムからリチウムにトリチウムを移行させる方法も提案されている[45]．

リチウムのハロゲン化合物であるLiF-LiCl，LiCl-KCl，LiBr-RbBrなどの溶融塩と液体金属リチウムを接触させるとリチウム中のトリチウムが一部溶融塩中に移行する．この現象を利用した溶融塩抽出法も提案されている．溶融塩中に移行したトリチウムは，電気分解により回収することが有望と考えられているが[46]，コストが高いとの指摘もある[47]．

6.6 液体トリチウム増殖材の安全取扱

これまで述べてきた液体トリチウム増殖材における水素同位体挙動の基礎的研究は，着実に進展してきており，今後はより実用条件に近い環境下での実験が進められていくと予想される．また，二次冷却系への利用が想定されるフライナック（FLiNaK）や融点が比較的低いフリナーベ（FLiNaBe）の研究も始まっている．金属リチウムを除く液体トリチウム増殖材料は，化学的に安定であり，空気に接しても激しい反応は生じない．例えば，500－800℃の液体リチウム鉛を100℃の水中に投入してもそれほど激しい反応は観測されないとの報告もある[48]．しかしながら，材料の調合過程においては，化学的に活性な金属リチウム，人体に有害なベリリウムや鉛を扱うことになり，安全上の注意が必要である．ここでは，これらの物質について安全取扱上の注意点をまとめる．実験者の健康あってこその研究成果であることを肝に銘じたい．

リチウムは，消防法の危険物第三類（自然発火性物質及び禁水性物質）に指定されており，危険な火災リスクとして細心の注意を払って取り扱わなければならない[49]．最近では，ボーイングの最新型機787のリチウムイオン電池の発火事故が記憶に新しい．180.5℃ の融点付近で，水，窒素，酸，酸化剤などに接触すると発火する危険があるため，火災時には，黒鉛を主成分とする粉末消火剤Lith-X等を用いなければならず，決して水，砂，二酸化炭素消火器を用いてはならない[50, 51]．実験室にはリチウム用消火器を設置しておく必要がある．リチウムは，大気中の酸素や窒素，水蒸気と容易に反応するため，安全上も，実験試料としての不純物低減の観点からも，アルゴンなどの不活性ガス置換型グローブボックス内で取り扱う必要がある．

ベリリウムは，労働安全衛生法の特定化学物質第1類に指定されており，取り扱いが厳しく規制されている．粉じんの発生源を密閉する設備，局所排気装置を設置するとともに防じんマスク，空気呼吸器等の保護具も必要である．作業空気中の許容濃度は，0.002 mg/m^3（日本産業衛生学会）であり，定期的に作業環境中の空気をサンプリングし，フィルターに捕捉されたダストの微量成分をICP発光分析装置等で分析し，ベリリウムが許容濃度以下であることを確認する必要がある[50]．リチウム同様，消防法の危険物第三類に指定されており，消火には水や炭酸ガスを用い

NII-Electronic Library Service

The Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research

ず，粉末消火剤を用いる[51]．ベリリウムの取り扱いについては，文献[52]に詳しく説明されている．

鉛は多量に摂取すると人体に影響を及ぼすことが知られており，労働安全衛生法の規定に基づき，鉛中毒予防規則が定められている．ベリリウム同様に粉じんの発生源を密閉する設備，局所排気装置を設置するとともに防じんマスク，空気呼吸器等の保護具も必要である．作業空気中の許容濃度は，0.1 mg/m^3（日本産業衛生学会）と定められており，定期的な濃度確認が必要である[51]．

6.7 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，燃料自己補給性および安全性の観点から，液体トリチウム増殖材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．液体材料の安全取扱に留意しつつ，トリチウム・熱・腐食に関わるデータを着実に集積していくことにより，近い将来，魅力的な液体ブランケットシステム及び液体ダイバータシステムを備えた原型炉概念設計が進められると期待される．

参考文献

［1］S. Fukada, J. Plasma Fusion Res. SERIES, **10**, 22 (2013).
［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 (Fusion Engineering Program, University of Wisconsin, 1981).
［3］H. Katsuta *et al.*, J. Nucl. Mater. **133&134**, 167 (1985).
［4］F. Reiter, Fusion. Eng. Des. **14**, 207 (1991).
［5］R.A. Anderl *et al.*, J. Nucl. Mater. **329-333**, 1327 (2012).
［6］P. Calderoni *et al.*, Fusion. Eng. Des. **83**, 1331 (2008).
［7］S. Fukada *et al.*, Mater. Trans. **54**, 425 (2013).
［8］改訂4版 化学便覧 基礎編（丸善，1993）．
［9］鈴木晶大 他：プラズマ・核融合学会誌 **89**, 349 (2013).
［10］A. Sagara *et al.*, Fusion Eng. Des. **89**, 2114 (2014).
［11］H. Moriyama *et al.*, J. Nucl. Mater. **191-194**, 190 (1992).
［12］J. Oishi *et al.*, Fusion Eng. Des. **8**, 317 (1989).
［13］R.H. Perry and D.W. Green, *Perry's Chemical Engineers' Handbook,* 7 th ed. (McGrawHill, New York, 1997).
［14］S. Fukada *et al.*, Fusion Eng. Des. **83**, 747 (2008).
［15］S. Fukada *et al.*, Fusion Sci. Technol. **64**, 636 (2013).
［16］S. Fukada *et al.*, Fusion Eng. Des. **96-97**, 95 (2015).
［17］A. Sagara *et al.*, Fusion Sci. Technol. **68**, 303 (2015).
［18］H. Feuerstein *et al.*, *TRITEX* (Forschungszentrum Karlsruhe Technik und Umwelt, FZKA6287, 1999).
［19］K.E. Plute *et al.*, Nucl. Tech. Fusion **4**, 407 (1983).
［20］G. Pierini *et al.*, Fusion Tech. **1**, 463 (1984).
［21］R. Baratti *et al.*, Fusion Tech. **10**, 266 (1986).
［22］T.J. Dolan *et al.*, Fusion Tech. **21**, 1949 (1992).
［23］H. Moriyama *et al.*, Fusion Eng. Des. **28**, 226 (1995).
［24］E. Mas de les Valls *et al.*, J. Nucl. Mater. **376**, 353 (2008).
［25］関 昌弘 他：核融合炉工学概論（日刊工業新聞社，東京，2001）p. 152.
［26］山﨑耕造 他：プラズマ・核融合学会誌 特集／テキスト核融合炉 **87**, 129 (2011).
［27］L.M. Giancarli *et al.*, Fusion Eng. Des. **87**, 395 (2012).
［28］I. Ricapito *et al.*, Fusion Eng. Des. **89**, 1469 (2014).
［29］P. Chaudhuri *et al.*, Fusion Eng. Des. **87**, 1009 (2012).
［30］N. Alpy *et al.*, Fusion Eng. Des. **39-40**, 787 (1998).
［31］http://www.sulzer.com/ja/Products-and-Services/Separation-Technology/Structured-Packings
［32］M. Utili *et al.*, Poster session P3.084, ISFNT-12 14-18 September 2015 at Jeju Korea.
［33］Review Panel Report for CDR of the HCLL TBS + HCPB TBS+Associated IO activities, IO report 26-June-2015.
［34］I. Ricapito *et al.*, Fusion Eng. Des. **89**, 1469 (2014).
［35］D. Rapisarda *et al.*, Oral session O3A.4, ISFNT-12 14-18 September 2015 at Jeju Korea.
［36］P. Martinex *et al.*, Fusion Eng. Des. **87**, 1466 (2012).
［37］F. Okino *et al.*, Fusion Sci. Tech. **64-3**, 543 (2013).
［38］F. Okino *et al.*, Fusion Sci. Tech. **64-3**, 549 (2013).
［39］F. Okino *et al.*, Fusion Eng. Des. 10.1016/j. fusengdes.2015.10.004.
［40］G. Federici *et al.*, Fusion Eng. Des. **89**, 882 (2014).
［41］D. Demange *et al.*, Fusion Eng. Des. **89**, 1219 (2014).
［42］阿部勝憲 他：プロジェクトレビュー日米科学技術協力事業 JUPITER-II プロジェクト，プラズマ・核融合学会誌 **85**, 247 (2009).
［43］S. Fukada *et al.*, Fusion Sci. Technol. **52**, 677 (2007).
［44］K. Hiyane *et al.*, Poster session P2.074, ISFNT-12 14-18 September 2015 at Jeju Korea.
［45］D.K. Sze *et al.*, Fusion Eng. Des. **8**, 339 (1989).
［46］V.A. Maroni *et al.*, Nucl. Technol. **25**, 83 (1975).
［47］深田 智，西川正史：富山大学水素同位体機能研究センター研究報告 14:1-21 (1994).
［48］寺井隆幸：プラズマ・核融合学会誌 **70**, 704 (1994).
［49］勝田博司：日本原子力学会誌 **27**, 100 (1985).
［50］G.D. Clayston，F.E. Clayton 編，内藤裕史，横手規子監訳：化学物質毒性ハンドブックⅢ（丸善，2000）．
［51］上原陽一 監修 化学物質安全情報研究会編：化学物質安全性データブック改訂増補版（オーム社，1997）．
［52］柴山環樹 他：プラズマ・核融合学会誌 **87**, 259 (2011).

NII-Electronic Library Service