



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

2. 溶融塩 Flibe システムの研究

2.1 溶融塩 Flibe の化学挙動

寺井隆幸¹⁾, 深田 智²⁾, 波多野雄治³⁾, 大矢恭久⁴⁾

¹⁾東京大学工学系研究科, ²⁾九州大学総合理工学研究院, ³⁾富山大学水素同位体科学研究センター, ⁴⁾静岡大学理学部

(原稿受付: 2009年4月11日)

Keywords:

molten-salt, Flibe, chemistry, tritium, blanket, Radox, corrosion, solubility, diffusivity, mobilization

2.1.1 研究の背景と目的

LiF-BeF₂混合フッ化物溶融塩(習慣的に Flibe と呼ぶ)は、たとえば代表組成 2 LiF-BeF₂で融点が459°C と少し高いものの、化学的に安定、低密度で、電気伝導率が小さいことから MHD 効果が小さく、循環のために必要なポンプ動力も少なく済み、冷却材と増殖材を兼用することができる等の利点を持っている。これらのことから、中性子増倍能を補う意味でベリリウム(Be)を併用することにより、ITER 計画の先の実証炉を見据えた先進ブランケットとして、Flibe を用いた概念設計[1]が行われている。図1にブランケット構造の例を示す[1]。また、Flibe は慣性核融合炉の概念設計でも冷却材およびトリチウム増殖材料として検討されている。

Flibe はかつて米国で溶融塩原子炉の冷却材としてその利用が検討され、その物理化学的性質等に関するデータが取得されてきており、リチウム(Li)がトリチウム(T)に核変換された時に生じるフッ化トリチウム(TF)やフッ素原子(F)により、体系内のフッ素ポテンシャルが上昇し、構造材料に対する腐食性が増大するので、これを如何に抑えるかということが重要であると認識されてきた。また、Flibe を核融合炉ブランケットトリチウム増殖材料として

使用する場合には、T インベントリの評価や T 回収方法の検討のために Flibe 中での T の挙動が重要になるが、これに関する研究はこれまであまり行われてこなかった。さらに、Flibe の構成要素である F には短寿命の放射性核種が存在し、ブランケット中の Flibe 配管の破断等により、これらが環境中に漏洩した時の安全性評価のために、高温 Flibe に空気や水蒸気が接触した時の Flibe 成分の移行挙動の研究が重要であると認識された。そこで、自己冷却 Flibe ブランケットを用いた核融合炉計画を念頭に置き、Flibe の化学挙動に関するタスクが JUPITER-II 計画の中に作られた。なお、Flibe を熱媒体として用いる場合には同材料が高プラントル数流体であるということが重要となるので、Flibe の熱流動特性に関する研究が併せて行われた。これについては、次節の「Flibe 模擬流体の熱流動特性」で記述される。

本研究を実施する上で、原料からの Flibe の調製と精製を行う必要があり、また、Flibe と T を併用した研究を行うための設備整備を合わせて行う必要があった。これらの点も踏まえ、具体的な研究課題として、(1)Flibe の原料からの調製と精製、(2)高温での Flibe の噴出事故を想定した Flibe 構成成分の移行(mobilization)挙動の測定、(3)精製後の Flibe を使用した Be による酸化還元(Redox)制御法の確立、(4)還元状態制御中および制御後の Flibe による JLF-1 の腐食挙動の研究、(5)精製した Flibe 中のトリチウム溶解度と拡散係数の測定を設定した。

2.1.2 使用した研究設備

これまで日本国内では、その危険性のために Flibe を用いた経験がそれほど多くなく、また本研究では、Flibe に加えて、作業環境中濃度を厳しく管理する必要がある HF や Be, T の使用が不可欠であったため、本タスクの実験はすべて、適切な設備を保持している米国アイダホ研究所の STAR (Safety and Tritium Applied Research) 施設内に設

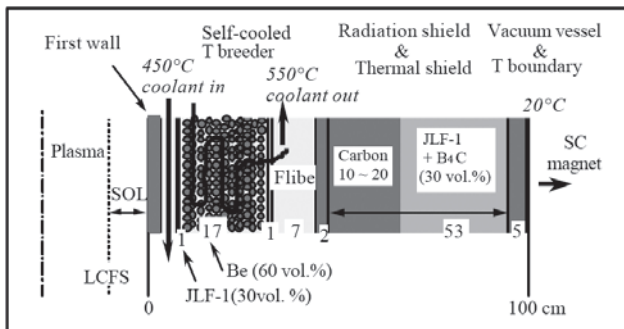


図1 溶融塩 Flibe を用いたブランケットの例 (FFHR) [1].

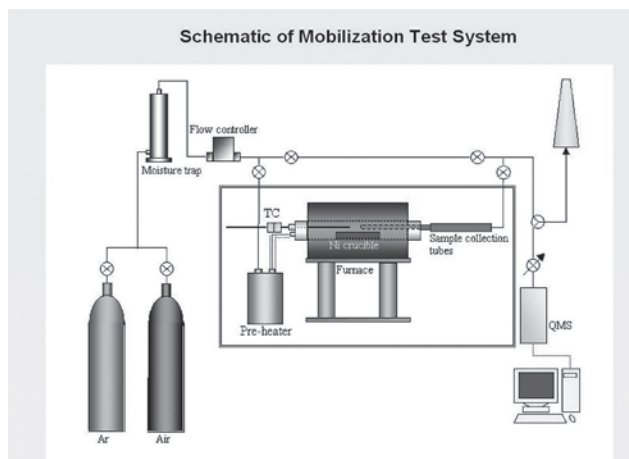


図4 溶融 FLiBe 成分の移行実験に用いた装置。

分圧を図5に示す。基本的には、すでに求められている実験値や計算値と良い一致を示した。また、空気流通条件や湿潤空気流通条件においても、本質的には同じ結果が得られた。これらの結果から、FLiBe 構成成分の移行速度は、平衡気相中の各成分の分圧とパージガス流速により決定されること、液相中へのバブリングの場合には、同伴する飛沫の影響を受けることが明らかになった。なお、Ar 気流中試験における FLiBe からの質量移行速度は表2に示すような値となった。これらの結果は、低流量下および事故解析条件下での FLiBe 移行量の評価において重要である。

2.1.5 FLiBe の還元制御^[3, 4]

FLiBe と構造材料の両立性を確保するためには、Li の核反応の結果生成する TF や F を除去し、体系内を還元状態に保持することが重要であると考えられる。実際に、前述の FFHR の概念設計でも FLiBe 流路内に Be ペブルを設置し、中性子増倍機能を持たせるとともに Be による体系内

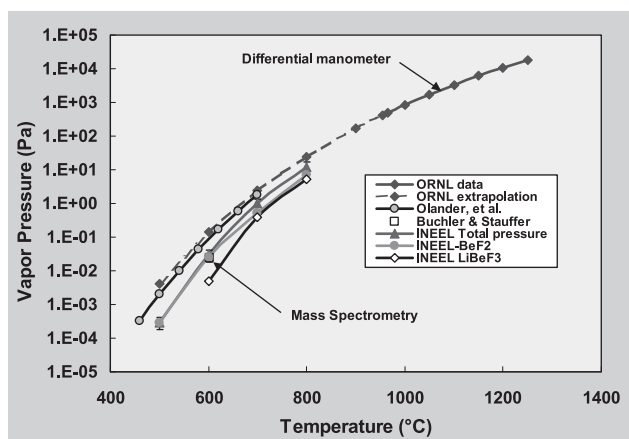
図5 溶融 FLiBe 上の BeF₂ と LiBeF₃ の分圧 (他の文献値も併せて示す。INEEL と記載されているものが本研究より得られた値であり、Ar ガス流通条件下におけるものである)。

表2 アルゴン気流中試験における FLiBe からの質量移行速度。

773 K	873 K	973 K	1073 K
$2.6 \times 10^{-2} \text{ g/m}^2\cdot\text{h}$	$7.7 \times 10^{-2} \text{ g/m}^2\cdot\text{h}$	$3.1 \times 10^{-1} \text{ g/m}^2\cdot\text{h}$	$2.6 \times 10^{-2} \text{ g/m}^2\cdot\text{h}$

の還元状態の保持を狙っている。本研究では、そのような状況も勘案し、酸化還元状態の制御方法として、Be を浸漬する方法についての試験を行った。

図6に示す実験装置を用いて、反応容器中で高温に保持した FLiBe 中に HF ガスを吹き込み、同時に Be 試料を FLiBe 中に挿入したときの反応容器出口での HF 濃度変化を四重極質量分析計 (QMS) と自動滴定装置 (titrator) により連続的に測定した。反応容器出口での HF 濃度は還元状態制御の指標になり、反応容器出口での HF 濃度が入口でのそれと比べて低下していれば、還元状態制御が行われていることになる。530℃に保持した FLiBe 溶融塩 500 g 中に長時間 HF+He 混合ガス供給して定常状態に保持した後、Be 試料を FLiBe 中に挿入し、一定時間保持したのち引き上げた。この操作は Be が HF の還元状態制御に使えるかどうかを調べるためである。

固体の Be を一定時間浸漬させると、図7の例で示すように HF 濃度は一度ゼロ付近まで低下する。これは FLiBe 中に物理的に Be が溶解した後、 $\text{Be} + 2\text{HF} = \text{BeF}_2 + \text{H}_2$ の反応で HF が還元され、H₂になると同時に BeF₂が FLiBe 中に溶解するからである。図中の数字は FLiBe 中に Be を浸漬保持した時間であるが、Be 試料引き上げ後も HF 濃度は急には上昇せず、ゆっくりと上昇しており、還元状態が維持されていることがわかる。同様の実験を、入口 HF 濃度：200–2000 ppm、ガス流速：60–310 cm³/min、Be 浸漬時間：2–60 min の範囲内で変化させ、合計34回を行った。得られた結果に対して、完全混合反応容器条件を仮定し、不純物

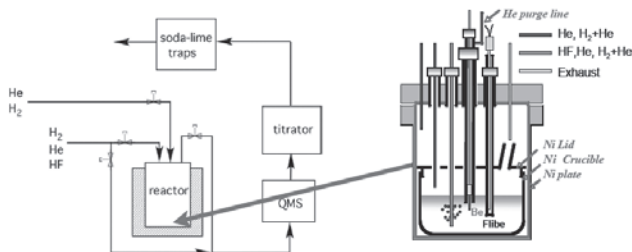


図6 FLiBe の酸化還元制御のための実験装置。

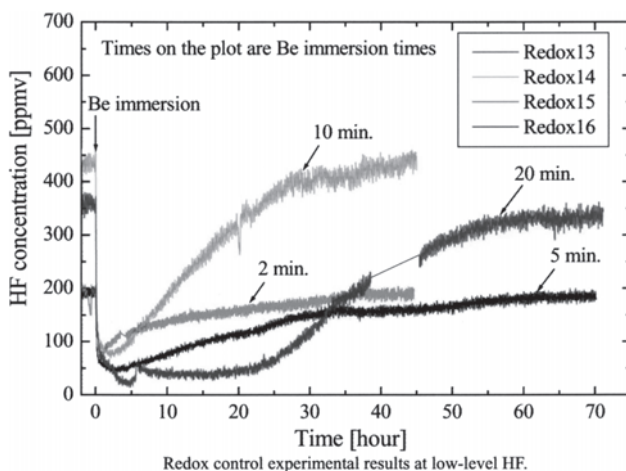


図7 FLiBe の酸化還元制御実験結果の例 (数字は FLiBe 中に Be を浸漬保持した時間。Be 試料引き上げ後も HF 濃度は急には上昇せず、ゆっくりと上昇しており、還元状態が維持されていることがわかる)。

の寄与を無視し、適当な反応速度定数と Be の溶解速度を入力することにより計算した結果は、実験結果とよく一致した。行ったすべての実験で、HF から H_2 への反応は二次反応で、反応速度定数は $1.5 \times 10^6 \text{ mol/m}^3\text{s}$ であると決定された。

Be の浸漬時間を変化させたところ、Be の物理溶解度は、図 8 に示すように直線的に増加した。この結果、Be の溶解速度は時間によらず一定で、溶出速度は $8.9 \times 10^{-8} \text{ Be/(Li}_2\text{BeF}_4)/\text{s}$ と表せることが判明した。この結果より、実際のブランケットの Flibe 量が決まると、必要な Be 量が決定される。Be の浸漬をさらに長時間続けた後の Flibe 中の溶解 Be 量を ICP-MASS で測定したところ、Be の Flibe への飽和溶解量は $2.7 \times 10^{-4} \text{ Be/Li}_2\text{BeF}_4$ であることが判明した。

なお、Be の溶出速度は、Be が Flibe 容器と電気的に絶縁されているか否かによって大きく異なり、Be を絶縁した場合には、溶出速度が大幅に低下した。これは、Be の溶出が、単純な化学反応や物理現象のみならず、電気化学的な作用によっても大きく影響を受ける可能性があることを示している。

2.1.6 還元状態制御中および制御後の Flibe による JLF-1 の腐食挙動 [5]

前述の還元状態制御条件下での低放射化フェライト鋼 JLF-1 の腐食挙動実験を、還元状態制御用反応容器を改造した図 9 に示す容器および試料を用いて実施した（試料はすべて電気絶縁状態に保持した）。実験では、HF 濃度：1075 ppm, H_2/HF 比：11, 流速：140 cm^3/min のバージガスを連続的に流しながら、5 時間 Be ロッドを浸漬したのち引き上げ、その間およびその後の容器出口での HF 濃度を連続的に測定するとともに、一定時間ごとに Flibe の一部を採取し、ICP 分析により Flibe 中の Fe, Cr, W, Ni の濃度を測定した。また、実験後に JLF-1 試験片を取り出し、SEM, AES, XPS, XRD, RBS により分析を行った。

図 10 は時刻 0 で Be ロッドを浸漬し、5 時間保持して引き上げたときの Flibe 中の Fe と Cr の濃度変化を示している。Be ロッド引き上げ後も Fe と Cr の濃度が低く維持さ

れ、還元状態に保持されていたことがわかる。出口ガス中の HF 濃度の積算値に対応する NaOH 滴定当量の増加速度が Be ロッド浸漬期間終了後も低下していることもこのことを裏付けている。還元状態終了後の腐食条件下では、JLF-1 の腐食の結果、Flibe 中の Fe の濃度は増加したが、

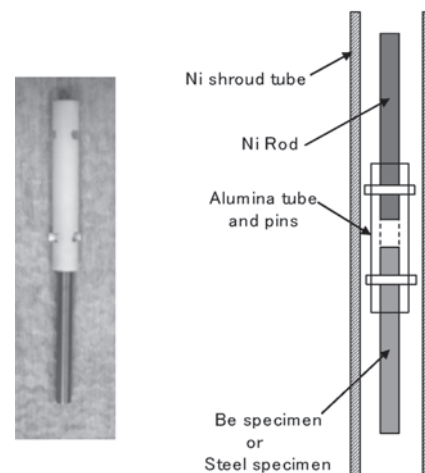
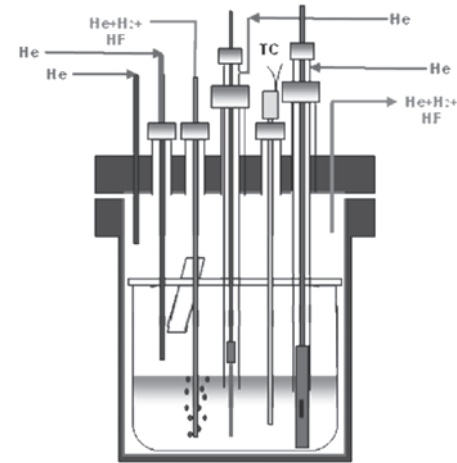


図 9 還元状態制御した Flibe による JLF-1 の腐食挙動実験用装置および使用した試料。

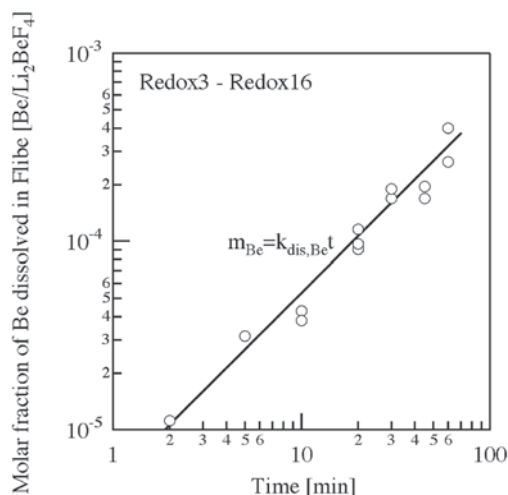


図 8 Flibe への Be の溶解量の時間変化。

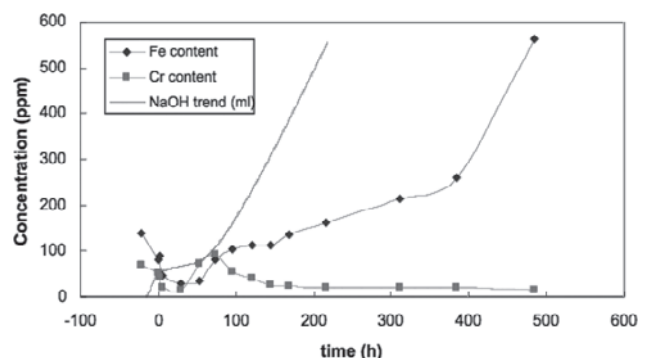


図 10 還元状態制御した Flibe による JLF-1 の腐食挙動実験における Flibe 中の Fe と Cr の濃度変化 (時刻 0 で Be ロッドを浸漬し、5 時間保持して引き上げた。Be ロッド引き上げ後も Fe と Cr の濃度が低く維持され、還元状態に保持されていたことがわかる。出口ガス中の HF 濃度の積算値に対応する NaOH 滴定当量の増加速度が Be ロッド浸漬期間終了後も低下していることもこのことを裏付けている)。

Crの濃度は低く維持された。

還元状態制御終了後の腐食によるJLF-1試料断面のSEMによる観察結果を図11に示す。本実験で実施した500時間の平均腐食量は50 μm （腐食速度としては0.1 $\mu\text{m/hr}$ ）であった。これは、主にBe ロッド引き上げ後、すなわち還元状態が終了した後の腐食による結果であることに注意する必要がある。なお、試料表面に約10 μm のCrが濃縮した酸化被膜が形成していることが確認されたが、これは、腐食中もFlibe中のCr濃度が低く維持されていることと整合

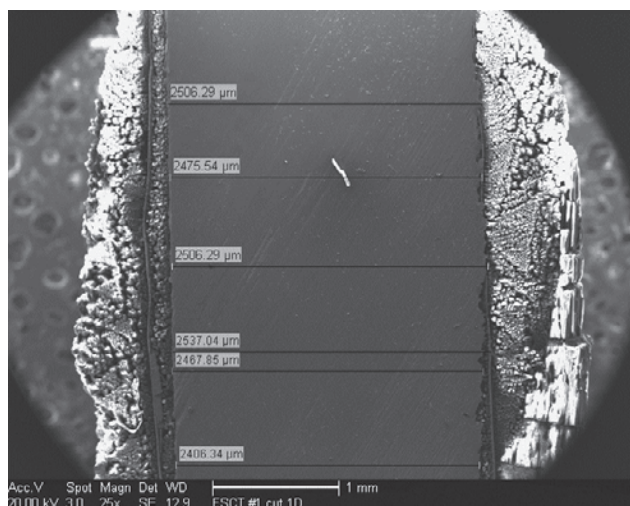


図11 腐食後のJLF-1試験片断面のSEM画像。

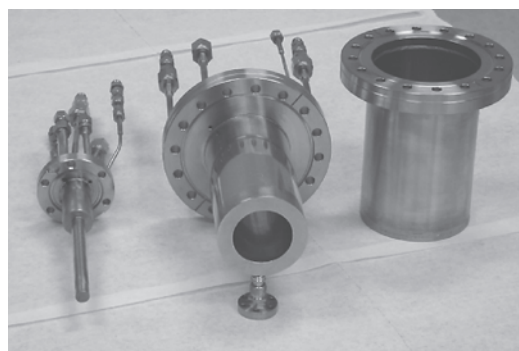


図12 Flibeの還元状態制御を行わないときの重水素移行実験装置。

している。

2.1.7 Flibe中のトリチウム（水素同位体）拡散係数と溶解度[6-10]

Flibe中のトリチウムの拡散係数と溶解度はFlibeブランケットの設計にとってきわめて重要である。また拡散化学種や溶解化学種が異なると、溶解度、拡散係数が変化する可能性があるため、まずFlibeの還元状態制御を行わないときの水素同位体の物質移行挙動を測定した。

使用した実験装置を図12に示す。一次元の拡散モデルを適用するために、同心円型の構造となっている。中心のプロープ1に重水素ガス (D_2) を導入したときに、Flibe中を溶解・拡散し、プロープ2に透過するD流束を四重極質量分析計 (QMS) で測定し、求めた透過速度の定常値と透過の時間遅れより拡散係数と溶解度を算出するものである。本研究では400 cm^3 のFlibeを使用し、600 $^{\circ}\text{C}$ と650 $^{\circ}\text{C}$ で D_2 を用いた実験を行った。拡散係数の測定結果を図13

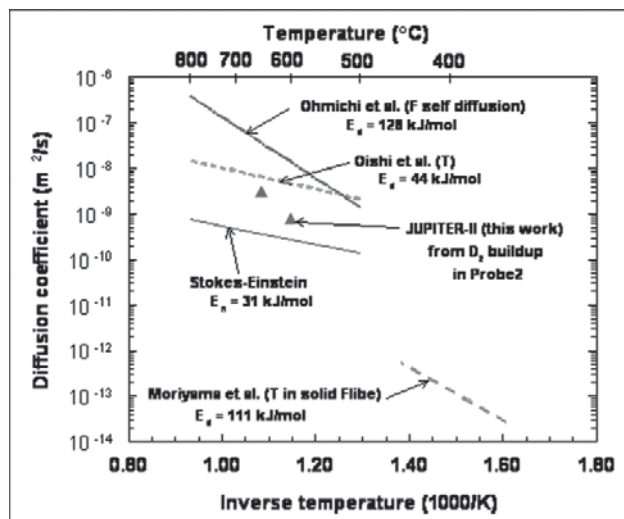


図13 Flibeの還元制御を行わないときのFlibeに対する重水素拡散係数。

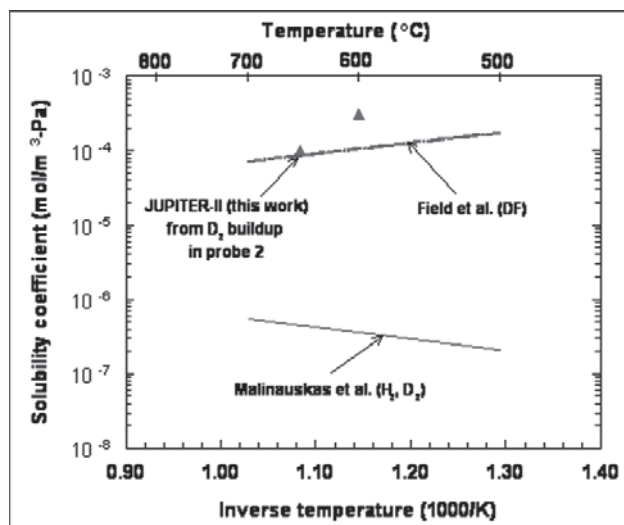


図14 Flibeの還元制御を行わないときのFlibeに対する重水素溶解度。

に、溶解度の測定結果を図14に文献値とともに示す。拡散係数やその活性化エネルギー、溶解度の値は溶解拡散している化学形がDFであると仮定した時の結果とよく一致しており、還元状態制御しない場合のFlibe中の水素同位体存在化学形はフッ化水素であると結論できた。

最終年度にトリチウム移行実験装置を使用してTを含む水素同位体の溶解度と拡散係数を測定した。実験装置を図15に示す。T測定装置としてはラジオガスクロマトグラフを用いた。この装置は、溶融Flibeの層を形成することにより一次元の拡散を実現させるものであり、Flibeの対流を抑えるために拡散実験容器を溶融塩の中に浸漬し、恒温条件を維持している。500–700℃の範囲で実験を行い、図16および図17に示す結果を得た。そしてその結果は、以下のArrheniusの関係式にまとめることができた。

$$D_{\text{Flibe}, T} = 9.3 \times 10^{-7} \exp(-42 \times 10^3 \text{ J/mol} / R_g T) \quad [\text{m}^2/\text{s}]$$

$$K_{\text{Flibe}, T} = 7.9 \times 10^{-2} \exp(-35 \times 10^3 \text{ J/mol} / R_g T) \quad [\text{mol}/\text{m}^3 \text{ Pa}]$$

本結果は、必ずしも完全に還元状態に保持されたFlibe中のものではなく、Flibe中を拡散するTの化学形も T_2 が主であると考えられるものの、それほど明確ではないが、世界で初めて測定されたTの拡散係数であり、貴重な結果である。

2.1.8 まとめ

本研究の成果は以下のようにまとめられる。

- 1) Flibeの調製と精製の手法を確立した。具体的には、原料試薬を混合したのち、溶融し、520℃でHe- H_2 -HF混合ガスを流通したのち、Niメッシュフィルタを通して移送することで、実現できた。
- 2) Flibe成分の移行挙動については、Flibe構成成分の移

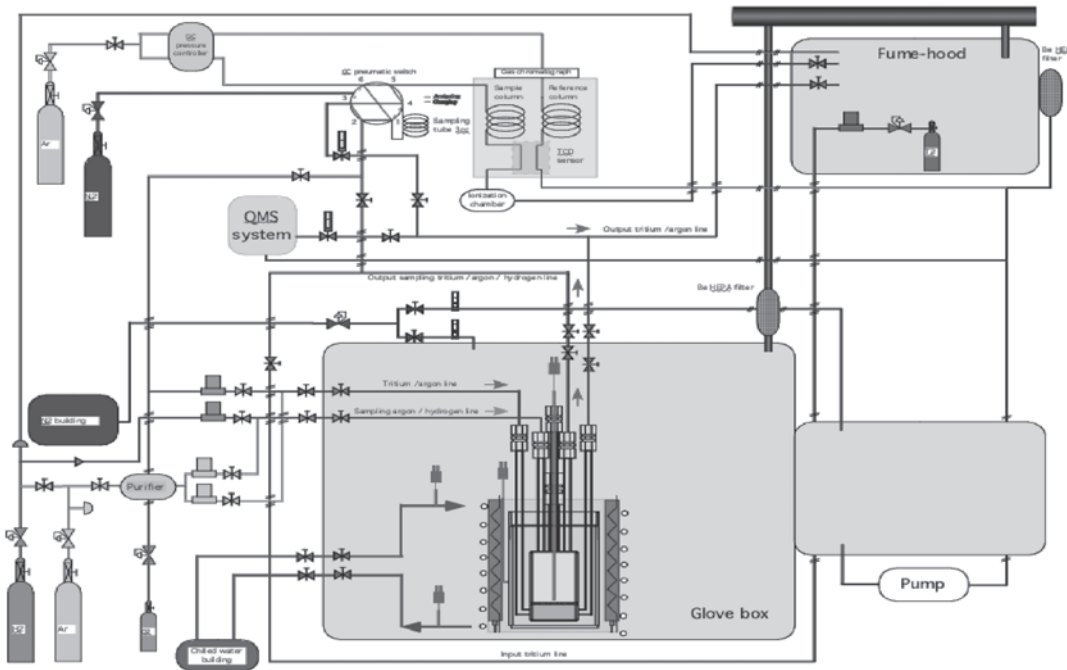


図15 Flibe中トリチウム移行実験装置。

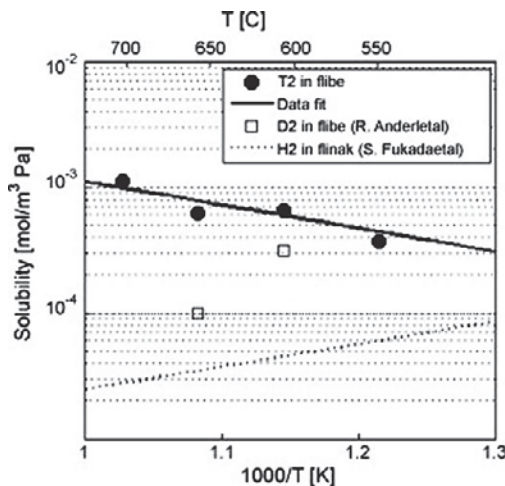


図16 Flibe中のトリチウム溶解度の測定結果。

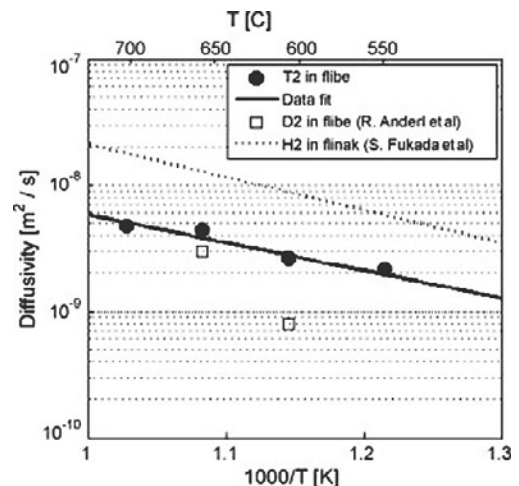


図17 Flibe中のトリチウム拡散係数の測定結果。

行速度が平衡気相中の各成分の分圧とパーシガス流側により決定されること、液相中へのバブリングの場合には、同伴する飛沫の影響を受けることが明らかになった。

- 3) 溶融FLiBe中にBeを浸漬することで、FLiBeの還元状態制御が実現できることを実証した。そして、その反応速度定数やBeの溶解速度、飽和溶解度に関するパラメータを確定した。また、Beの溶解に電気化学的作用が影響することを確認した。
- 4) 還元状態制御されたFLiBe中ではJLF-1の腐食が抑制され、還元状態が解消されることによって腐食が促進することを確認した。

5) FLiBe中のDおよびTの溶解度と拡散係数を測定した。本研究により、Beによる還元状態の制御と腐食の抑制が実証されたことは、ブランケットの成立性に見通しを与える重要な成果である。また、得られたFLiBeに関する技術、移行過程や水素同位体挙動に関する知見は、FLiBeブランケットの設計や研究開発に大きく寄与するものである。

参考文献

- [1] A. Sagara, T. Tanaka, T. Muroga, H. Hashizume, T. Kunugi, S. Fukada and A. Shimidzu, *Fusion Sci. Technol.* **47**, 524 (2005).
- [2] D.A. Petti, G.R. Smolik, M.F. Simpson, J.P. Sharpe, R.A. Anderl, S. Fukada, Y. Hatano, M. Hara, Y. Oya, T. Terai, D.K. Sze and S. Tanaka, *Fusion Eng. Des.* **81**, 1439 (2006).
- [3] S. Fukada, M.F. Simpson, R.A. Anderl, J.P. Sharpe, K.

Katayama, G.R. Smolik, Y. Oya, T. Terai, K. Okuno, M. Hara, D.A. Petti, S. Tanaka, D.K. Sze and A. Sagara, *J. Nucl. Mater.* **367-370**, 1190 (2007) 1190.

- [4] M.F. Simpson, G.R. Smolik, J.P. Sharpe, R.A. Anderl, D.A. Petti, Y. Hatano, M. Hara, Y. Oya, S. Fukada, S. Tanaka, T. Terai and D.K. Sze, *Fusion Eng. Des.* **81**, 541 (2006).
- [5] P. Calderoni, P. Sharpe, H. Nishimura and T. Terai, *J. Nucl. Mater.* **386-388**, 1102 (2009).
- [6] S. Fukada, R.A. Anderl, Y. Hatano, S.T. Schetz, R.J. Pawelko, D.A. Petti, G.R. Smolik, T. Terai, M. Nishikawa, S. Tanaka and A. Sagara, *Fusion Eng. Des.* **61-62**, 783 (2002).
- [7] S. Fukada, R.A. Anderl, R.J. Pawelko, G.R. Smolik, S.T. Schuetz, J.E. O'Brien, H. Nishimura, Y. Hatano, T. Terai, D.A. Petti, D.K. Sze and S. Tanaka, *Fusion Sci. Technol.* **44**, 410 (2003).
- [8] S. Fukada, R.A. Anderl, F.R. Smolik, R.J. Pawelko, S.T. Schuetz, J.P. Sharpe, B.J. Merrill, D.A. Petti, H. Nishimura, M. Nishikawa, T. Terai and S. Tanaka, *Proc. 6th International Be Workshop*, Miyazaki, Japan, Dec. 3-5, 2003, pp. 275-286.
- [9] R.A. Anderl, D.A. Petti, G.R. Smolik, R.J. Pawelko, S.T. Schuetz, J.P. Sharpe, B.J. Merrill, M.F. Simpson, T. Terai, S. Tanaka, H. Nishimura, Y. Oya, S. Fukada, M. Nishikawa, K. Okuno, Y. Morimoto, Y. Hatano and S.K. Sze, *Proc. 6th International Be workshop*, Miyazaki, Japan, Dec. 3-5, 2003, pp. 265-274.
- [10] P. Calderoni, P. Sharpe, M. Hara and Y. Oya, *Fusion Eng. Des.* **83**, 1331 (2008).

2.2 FLiBe 模擬流体の熱流動特性

功刀資彰¹⁾, 佐竹信一²⁾, 結城和久³⁾, 横峯健彦⁴⁾

¹⁾京都大学工学研究科, ²⁾東京理科大学基礎工学部, ³⁾東北大学工学研究科, ⁴⁾九州大学総合理工学研究院

(原稿受付: 2009年2月7日)

Keywords:

FLiBe, KOH solution, high prandtl number fluid, magnetohydrodynamics, lorentz force, hartmann flow, thermofluid research, turbulence, PIV measurement, direct numerical simulation, heat transfer, laminarization

2.2.1 はじめに

溶融塩FLiBeは、高温安定性に優れ、電磁流体力学(Magneto-Hydro-Dynamics: MHD)的圧力損失が低いため魅力的な自己増殖冷却材であるが、冷却材にFLiBeを用いたブランケット設計では、いくつかの課題が指摘されている: 1) FLiBeが低い熱伝導率(1.0 W/mK)を有していること, 2) 融点近傍で高い動粘性を示すこと(11.5 mm²/s at 500 °C), 3) トリチウム増殖能力が小さいため、付加的中性子増倍材を必要とすること, そして4) 構造材は650 °C以上の高温環境に耐えられることなどである。この

大きな粘性と低い熱伝導率を有するFLiBeは高プラントル数流体と呼ばれ、十分に大きな伝熱性能を引き出すためには、強い磁場環境下でも流れを大きく乱して乱流状態を形成する必要がある。したがって、高プラントル数流体の熱流動特性に及ぼす磁場の影響を調べることはきわめて重要な課題である。

2.2.2 流動特性

図1はUCLAに設置した円管内乱流熱流動実験装置“FLiHy”(FLiBe Hydrodynamics)の概要を示したものであ

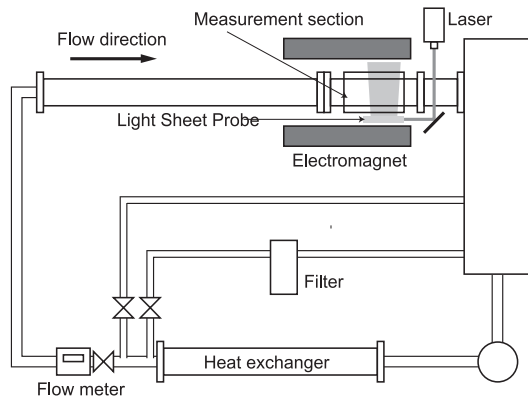


図1 FLiHy 実験装置概要.

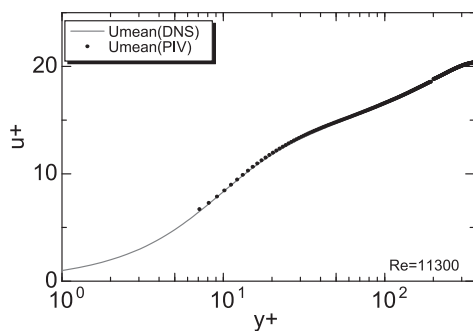
る. 試験部は直径 88 mm の円管, ポンプ, 流量計, 加熱用ヒータ, 熱交換器付配管, 液タンク, 2 T の電磁石, 可視化計測部から構成されている. 試験には Flibe 模擬流体として, プラントル数が同等な 30% 濃度の KOH 水溶液を用いた.

円管内の流速分布の測定は, 管内にシードしたトレーサ粒子をレーザー照射によって可視化し, 試験部に設置した高速カメラで撮影した連続する 2 時刻の画面の粒子イメージから粒子位置の相関を画像解析で求めて流体の速度を計測する方法, すなわち, PIV (Particle Image Velocimetry) を適用し, 非磁場および磁場下の円管内乱流速度分布および乱流統計量を求めた.

本実験装置の妥当性を検討するため, 既報の直接数値シミュレーション (DNS: Direct Numerical Simulation) データベースを用い, 実験で得られた非磁場下の円管内乱流特性量を比較した.

図 2 は管直径 D と平均速度 u および動粘度 ν に基づくレイノルズ数 $Re=11300$ における, 普遍速度分布 (横軸は壁面摩擦速度 $u_* = \sqrt{\tau_w/\rho}$ で規格化した壁からの無次元距離 $y^+ = u_* y/\nu$, 縦軸は無次元化した速度 u^+) を示しており, 実線が DNS 結果[1]であり, プロット点は PIV 計測結果である. 両者はきわめて良く一致しており, また既往の文献値 (Eggles, 1994) とも良く一致していることを確認した. したがって, 本計測手法は十分な測定精度を有していると言える. また, 非磁場条件での熱伝達実験を実施し, 円管内乱流の発達領域で壁面熱伝達率が Dittus-Boelter 相関式と 10% 以内で一致することを確認した[2, 3].

次いで, 磁場下の MHD 乱流挙動を把握するため, 300 A

図2 普遍速度分布 ($Re=11300$).
($u^+ = u/u_*$, $y^+ = u_* y/\nu$, $Re = uD/\nu$)

の電流を流して最大 2 テスラの磁場を発生させ, 1.4 m 長の磁場内に形成された幅 15 cm × 高さ 25 cm × 長さ 1 m の一様磁場空間 (主流方向の磁場変動は約 5%) に試験流路を設置し, 磁場強さを表す無次元数であるハルトマン数 $Ha = BR\sqrt{\sigma/\rho\nu} = 0, 5, 10, 15, 20$ について円管内の平均流速を測定した. このときの Ha は管半径 R と電気伝導率 σ を基準としている. 図 3 は横軸に無次元半径位置, 縦軸に無次元流速 (中心流速 U_c で規格化) として示されており, 実線は DNS による非磁場の円管内乱流速度分布である. Ha が増加する (つまり, 磁場強度が増加する) に従い, 平均速度分布の形状が平坦化する様子がわかる. これと同時に, 壁面近傍では Ha の増加に伴って急峻になり, 所謂, 「ハルトマン流れ」の特徴が再現されている.

図 4 は $Re=5300$ の条件における, 主流方向速度成分の速度変動強度 $u_{rms}^+ = \sqrt{u'^2}/u_*$ の径方向分布を示している. 実線は非磁場下の乱流に対する DNS 結果を示しており, Ha が増加するに従い乱流強度が減少していることがわかる. 図中, 実験値が不連続となっているが, これは PIV 計測の際に, 可視化領域を管中心部と壁面領域の 2 つに分けて撮影したことによるものであり, 実際の物理量は連続的に変化している. 図 3 および図 4 の結果は, 磁場印加による Lorentz 力による「乱流の層流化」の発生を明瞭に示していると言える. これらの結果は, MHD 円管乱流の DNS[4]と一致しており, MHD 乱流モデリング[5]にも反映された.

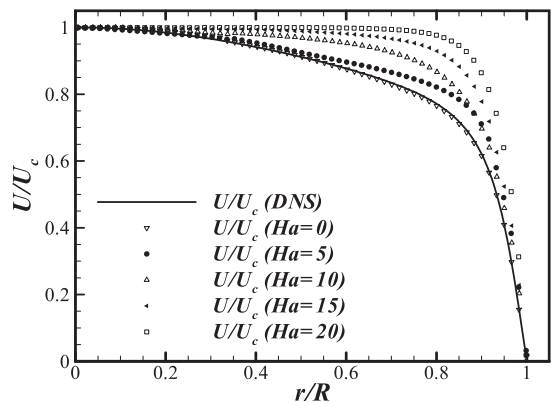
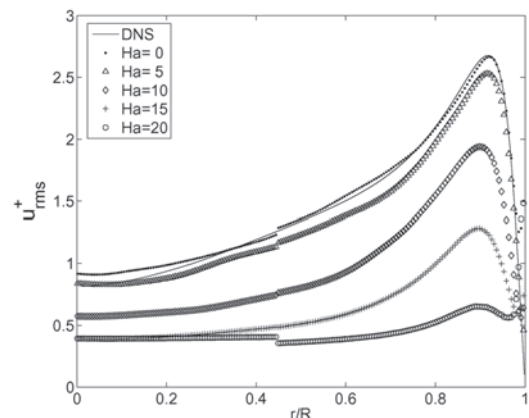
図3 平均速度の径方向分布 Ha : ハルトマン数.

図4 主流方向速度変動強度の径方向分布.

2.2.3 熱伝達特性

熱伝達実験は、2 テスラの磁場下で FLiHy ループ試験部の一部を加熱テープで一様加熱して実施した[6]。試験部には直径 0.75 mm の T 型熱電対を40本(1 断面あたり 4 本で管軸方向10箇所、各熱電対は管の内壁面から 1 mm の管壁内位置)設置した。KOH 水溶液の温度は熱電対で管の出入口において計測し、管軸方向の任意位置の断面平均温度は出入口温度差から線形補間で求めた。管断面内における流体の径方向温度分布は、6 本の直径 0.13 mm のインコネル製 K 型シース熱電対をタワー状に組み上げた TC タワーを壁面近傍から管中心まで移動機構により位置を調整しながら測定した。この熱電対の 63% 応答時間は 2 ms であった。TC タワーと磁場の角度は 0 度と 90 度の 2 通り設定した。 $Re = 5000 \sim 20000$ で、 $Ha = 0 \sim 15$ 、また $Pr = 6$ と 10 について実験した。

図 5 は $Re = 9000$ の場合の無次元温度 T^+ の分布を壁からの距離 y^+ で示したものである。実線は既存の Kader 相関式であり、青丸は $Ha = 0$ (非磁場条件) であり、相関式と一致している。しかし、緑丸の $Ha = 5$ と赤丸の $Ha = 10$ の実験結果は相関式から離れている。このことは、MHD 流れでは、非 MHD 流に比べて管内の流体温度が上昇することを意味しており、伝熱から見た磁場による「乱流の層流化」の証拠である。

図 6 は、無次元熱伝達率 Nu の管軸方向 (z/D) の分布を示している。横磁場が強いほど、熱伝達率が低下する様子がわかる。

2.2.4 まとめ

円管内の FLiBe 模擬流体の非 MHD 乱流特性を、PIV 計測法を適用して計測し、既存 DNS データベースときわめてよい一致を示したことから、本 PIV 計測法の精度と適用妥当性を検証した。また、UCLA に構築した FLiHy ループが流動実験装置として十分な精度を有していることも確認できた。ついで、PIV 計測法を用いて MHD 乱流の流動特性について平均流速分布を測定し、ハルトマン流れを確認するとともに、MHD 乱流統計量の結果から、磁場効果による「乱流の層流化」現象が生じていることを定量的に示すことができた。また、熱伝達実験を実施し、管内温度分布や管軸方向熱伝達から磁場効果による「乱流の層流化」の発生を確認できた。

以上のように、MHD 乱流の熱流動特性の詳細なデータベースを構築できたことから、今後の現在の MHD 乱流モデルの改良が可能となり、核融合炉設計へ大きく貢献する

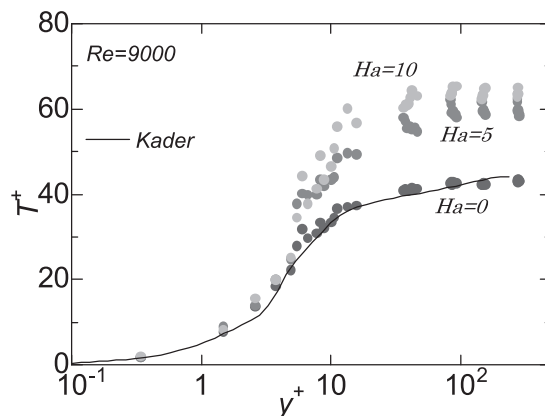


図 5 無次元温度分布。

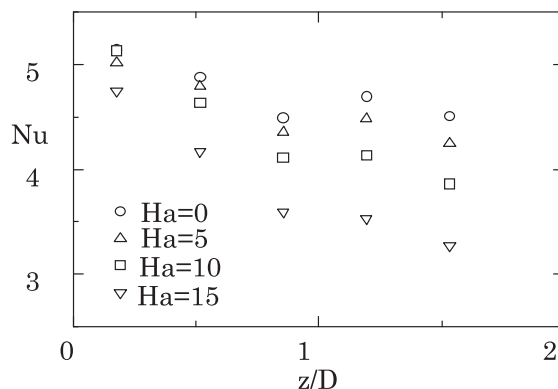


図 6 無次元熱伝達率の管軸方向変化。

ことが期待できる。

参考文献

- [1] S. Satake, T. Kunugi and R. Himeno, *Lecture Notes in Computer Science 1940* (M. Valero *et al.*, Ed., Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 2000).
- [2] J. Takeuchi, S. Satake and R. Miraghaie *et al.*, *Fusion Eng. Des.* **81**, 601, (2006).
- [3] J. Takeuchi, S. Satake, N.B. Morley, T. Kunugi, T. Yokomine and M.A. Abdou, *Fusion Eng. Des.* **83**, 1082 (2008).
- [4] S. Satake, T. Kunugi and S. Smolentsev, *J. Turbulence* **3**, 020, (2002).
- [5] S. Smolentsev, M.A. Abdou and N.B. Morley *et al.*, *Int. J. Eng. Sci.* **40**, 693, (2002).
- [6] H. Nakaharai, J. Takeuchi, T. Yokomine, T. Kunugi and S. Satake, N.B. Morley and M.A. Abdou, *Experimental Thermal and Fluid Science* **32**, Issue 1, 23 (2007).