

令和 4 年 6 月 7 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H01871

研究課題名(和文) 溶融塩Flibeを用いた革新的な超長寿命液体ダイバータの設計開発

研究課題名(英文) Development of a novel fusion liquid divertor with very long lifetime using molten salt Flibe

研究代表者

江原 真司 (Ebara, Shinji)

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：30325485

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：PIVを用いた流れの可視化実験から、ペブルによる乱流促進効果を明らかにした。伝熱実験にて得られた温度分布から、底面に設置されたペブルにより流れ表面にて流体の攪拌が起こり、表面温度の低下をもたらすことを明らかにした。これらの結果から、流路底面のペブルによる乱流促進効果を利用することで、液体Flibeにおいても流れ表面の温度上昇幅を低下させると考えられ、実機における流速の低減、蒸発量の減少が期待されFlibeを用いた液体ダイバータの実現可能性が大いに向上したと考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

底面に大きな粗面を持つ自由表面流れについて、その乱流促進効果および自由表面における熱(スカラー量)輸送促進効果を実験的に明らかにした。自由表面における温度の計測については改良の余地があるものの、表面張力などの影響の強い自由表面流れの自由表面におけるこれらの効果を実験的に明らかにした意義は大きいと考える。また、この応用としてのFlibe液体ダイバータの開発についても、その実現可能性が高められ、今後の核融合炉開発への貢献が期待できる。

研究成果の概要(英文)：From a flow visualization experiment utilizing PIV, turbulence promotion effect due to pebbles installed on the channel bottom was clarified. It was found from heat transport experiment in which free surface of the flow was heated by Halogen heaters that fluid mixing was enhanced by the pebbles arranged on the channel bottom and surface temperature decreased compared to that without pebble case. These results can enable us to hope slower flow velocity of Flibe and smaller amount of evaporation in the vacuum vessel in a fusion reactor, and to envisage that the feasibility of liquid divertor using Flibe is greatly improved.

研究分野：核融合炉工学

キーワード：液体ダイバータ 溶融塩 流れの可視化 乱流伝熱促進

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

核融合炉ダイバータの受ける熱負荷は、核融合出力 50 MW の ITER ですら 5~20 MW/m<sup>2</sup> が予想されており、工業装置が定常的に受ける熱負荷としては人類史上最高である。加えて、ダイバータには ELM と呼ばれる、ms オーダーの周期をもつパルス状超高熱負荷が流入する。ELM の熱流束は、ITER より小型の実験炉である JET や JT-60 でも 30~70 MW/m<sup>2</sup> という高い値を計測しており、これの低減策が最重要課題の一つとして検討されている。加えてダイバータで生じる大きな温度差による熱応力も、設計を困難とさせる一因となっており、固体壁ダイバータではほぼ解がない状況となっている。このように現在建設中の ITER ですら、ダイバータ設計については裕度などというものはなく、核融合出力が ITER よりも格段に大きい原型炉以降では、そのダイバータの成立性が非常に困難なことは容易に予想される。

これに対し、これまでに様々なダイバータの概念が検討され、その内の一部については継続して研究開発が行われてきている。現在具体的な検討がされているダイバータはほとんどが固体壁で熱を受け、ガスや液体でこの固体壁を冷却するというものであり、液体が直接熱を受ける「液体壁」ダイバータについては液体金属を用いたものが提案されているが、その開発状況としては初歩的な研究に留まっており、強磁場中で生じる過大な MHD 圧力損失についての対策や、プラズマ・ディスラプション時の液体挙動が問題となると考えられる。

### 2. 研究の目的

本研究では溶融塩 Flibe を用いた液体壁ダイバータを提案し、具体的な検討を行う。Flibe は LiF BeF<sub>2</sub> 混合フッ化物溶融塩であり、トリチウム増殖を行う先進ブランケットの冷却材兼増殖材としての使用が検討されている。代表組成である 2LiF BeF<sub>2</sub> で融点が 459 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む。また、低蒸気圧であることから、プラズマを保持している真空容器内に露出させても、プラズマ中への不純物としての混入が少なく、また混入したとしても低原子番号で構成されているため、プラズマ温度を低下させる効果が小さいなど、多岐にわたる利点を持つ。Flibe の欠点としては高プラントル数流体であることに起因する低い伝熱性能、磁場下での高速流動による高腐食性のフッ素ガス発生が挙げられる。しかし低い伝熱性能については固体壁を通した伝熱に関してのことであり、今回想定している Flibe ダイバータでは冷やすべき固体壁は無い。Flibe に直接入射するエネルギーは体積発熱として与えられるため、高プラントル数流体であるが故の欠点は問題にならない。もう一方の腐食については、詳細に評価する必要があると考えられるが、Flibe 液体壁ダイバータの実現可能性を提示することにより、原型炉以降の現実的なダイバータ開発については核融合炉開発について、ブレークスルーを与えることができる。

Flibe 液体壁ダイバータは、その概念は検討されているものの、これまでに具体的な研究は行われておらず、実現可能性についての議論は皆無である。本研究を遂行することにより具体的な Flibe 液体壁ダイバータの形が与えられ、模擬流体を用いての実証ではあるがその実現可能性を示すことが出来れば、原型炉、商用炉へと続いていく核融合研究に大きく資するものであり、そのもたらすインパクトは十分大きいと言える。

### 3. 研究の方法

まず数値解析による流体計算を行い、自由表面の加熱方法や加熱量について検討し、流速をパラメータとして液膜中の温度分布などを評価する。次いで、この数値解析で求められたパラメータ(液膜厚さ、流速)に基づき、模擬流体として水を用いた流動実験を行う。流路底面壁の傾き流路中に流体混合促進体(ペブル)を設置し、その混合効果について、粒子画像流速測定法(PIV、particle image velocimetry)により評価を行う。また、自由表面を加熱する伝熱実験を実施し、ペブルの有無による自由表面流れの表面温度の低減効果について実験的に評価し、Flibe 液体壁ダイバータの実現可能性について評価を行う。

### 4. 研究成果

実験では、自由表面流れの表面加熱をハロゲンヒーターにより行うこととしていたが、加熱範囲が十分な幅を有していること、さらに実験に有用な温度上昇が得られるかどうかを確認するために数値解析を行なった。図 1 に計算体系を示す。解析は COMSOL Multiphysics 5.4a を使い、流れの乱流モデルには低レイノルズ k- モデルを、温度場には Kays-Crawford モデルを採用した。れの境界条件は側面は non-slip、上面及び底面は slip となっており、上流側(x=0 mm)からは 1.3 m/s の速度にて一様流入とし、下流側(x=500 mm)は流出としている。伝熱の境界条件は上面及び流出口は流出とし、入口及び側面は 20 とした。また赤外線が表層 1 mm にて吸収されると想定しそこにヒーターの出力(850 W×4)が入射効率 17%で入射すると想定した。

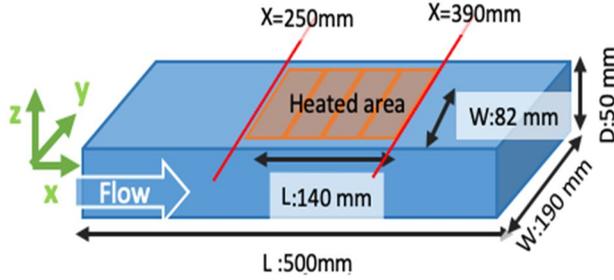


図1 数値計算体系

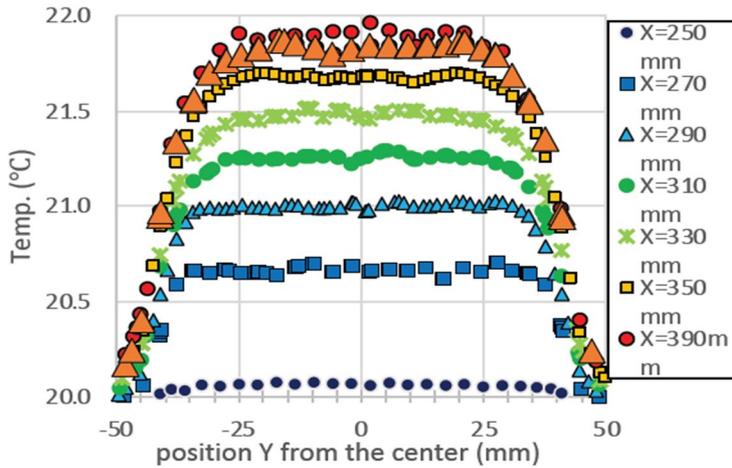


図2 表面の温度分布

自由表面の温度分布を図2に示す。表面温度の最高値は22 Kとなり、さらに流れ方向の各の位置での温度分布からは各地点でのy方向温度分布は $\pm 25$  mmの範囲で安定しており、このことから本体系では2次元流れが形成されており、実験における加熱、計測領域を均一に加熱できるという結果であることが示された。この結果をもって、実験では850W $\times$ 4本のハコゲンヒーターを実装することとした。

実験装置の概要を図3に示す。本研究で用いている流路は上部壁のない開水路であり、実験では計測箇所(図のHeating and measurement section)にて液膜厚さおよび流速が一定となる「等流」条件となるよう、装置全体を傾斜させる機構を備えている。計測箇所では流路幅は190 mmとなっている。流路底面には乱流促進のためのペブル(直径40 mmの球、図4参照)を敷きつ

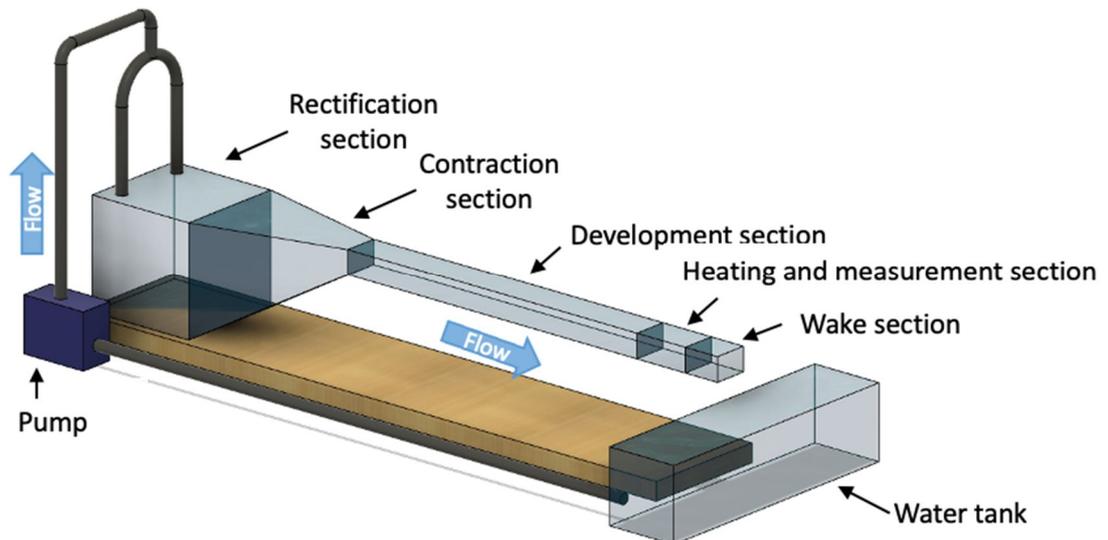


図3 自由表面流動伝熱実験装置の概略

め、PIV 計測する領域においてはレーザー光の反射防止のため黒く塗っている。温度計測には図 5 に示す温度計測用 XYZ ステージユニットを用いた。



図 4 乱流促進用ペブル

実験条件を表 1 に示す。実験では 2 種類の平均流速、液膜厚さは約 30 mm としており、対応するレイノルズ数は約 6000 および 12000 となっている。

表 1 実験条件

U [m/s]	h [mm]	d [mm]	Re [-]	[deg]
0.28	30	0	6361	0.15
0.25	31	40	6043	0.30
0.46	34	0	12019	0.80
0.49	30	40	11348	0.80

PIV 計測による実験結果について、液膜の深さ方向の時間平均速度分布および乱流エネルギー分布をそれぞれ図 5 および 6 に示す。平均流速だがペブルを用いた際の流速 0.25 m/s の場合、流速 0.49 m/s の場合の両方において底面から速度の立ち上がりが緩やかになっており以降も速度が立ち上がりきらず、なだらかに速度は上昇している。これはペブルが存在するため底面は粘着条件を満たしていないからであると考えられる。らに乱流エネルギーは表面付近では d40U0.49 の場合と d40U0.25 の場合が最も大きく、その次に d40U0.49 が大きく、d0U0.27 の場合が最も小さいという結果となった。これは同じ液膜厚の時、ペブルを設置した場合は流速が約半分であっても乱流促進効果によって同様の大きさの乱流エネルギーが得られることを示している。

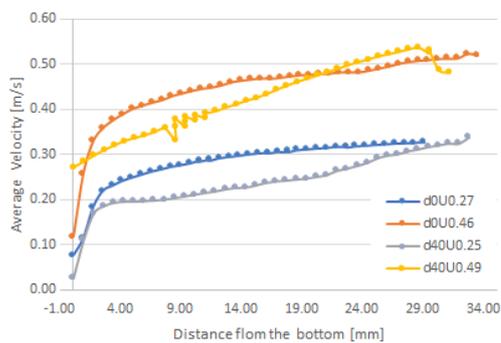


図 5 時間平均速度分布

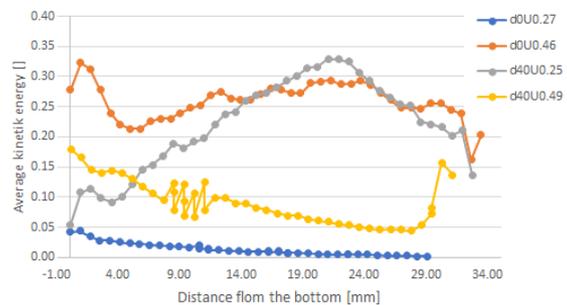


図 6 乱流エネルギー分布

伝熱実験の結果として、図7にそれぞれの条件における液膜厚さ方向の温度分布を示す。U=0.25 m/sのペブル有り無しの結果を比較すると、表面の温度上昇が50%低下(乱流強度は約6倍)となっており、ペブルの乱流促進による自由表面での熱輸送促進の効果が良く見られている。

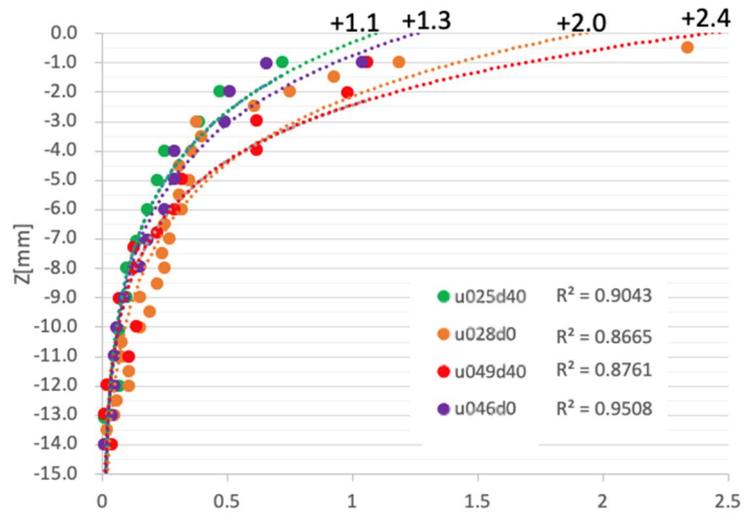


図7 液膜厚さ方向の温度分布の比較 (X=0)

以上、流れの可視化実験および伝熱実験から、ペブル設置により約6倍にもなる大きな乱流エネルギーを生み出し表面温度を50%低減させる試算が得られた。これにより、ペブルを用いる液体Flibeダイバータは流速を抑えながら高い表面除熱性能を持つことができる、と言える。

今後の課題として、ペブル設置間隔を変化させるなどの手法により、乱流エネルギー、表面除熱性能の最大化を図る必要がある。最終的には液体Flibeを用いた実証実験を行わなければならない。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 高橋史弥
2. 発表標題 数値解析による液体 FLiBe ダイバータの乱流熱輸送評価
3. 学会等名 日本原子力学会東北支部第44回研究交流会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 江原真司
2. 発表標題 乱流促進体を用いた熔融塩液体ダイバータの実現可能性の検討
3. 学会等名 第14回核融合エネルギー連合講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------