

IFMIF 液体金属リチウムターゲット流に関する実験研究

近藤浩夫,金村卓治,顧和平,山岡信夫,宮本斉児, ¹⁾井田瑞穂,¹⁾中村博雄,²⁾松下出,³⁾室賀健夫,堀池 寛 大阪大学大学院工学研究科,¹⁾日本原子力研究開発機構,²⁾株式会社神菱ハイテック,³⁾核融合科学研究所 ^(原稿受付:2007年12月3日/原稿受理:2008年7月25日)

本研究は国際核融合材料照射施設(IFMIF)の液体リチウム(Li)ターゲットの自由表面流に関する実験研究 である.Liターゲットは流速15 m/s ほどの平板状のジェット流であり,その表面には微細な波が発生する.本研 究では,Li表面を発光半値幅20 µs のストロボスコープを照明に用い高感度 CCD カメラで撮影し,その表面の波 の流速に対する変化を明らかにした.さらに,表面に発生する波を接触式の液面計を用い計測し,その不規則な 波群の統計的な波高値と,その波高分布を明らかにした.

Keywords:

liquid metal, liquid lithium, IFMIF, liquid Li target, beam target, free surface flow, liquid jet

1. はじめに

核融合炉材料開発を進めるにはエネルギー14 MeV の強 力中性子源が必要不可欠である.そこで国際協力の下,国 際核融合材料照射施設(IFMIF)の設計が始められた.IF-MIF は重陽子(D⁺)ビームを液体 Li のジェット流(噴流) に入射させて D-Li ストリッピング反応で中性子を得る方 式であり,その施設は最大40 MeV,125 mAの2基の重陽 子加速器,ビーム輸送系,液体 Li ターゲット系,試験片と 照射設備を収納するテストセル,照射後試験設備およびこ れらを収納する建屋から構成される.IFMIFの設計の詳細 やその経緯は参考文献[1-3]などに詳しい.

本研究で取り扱う Li ターゲット系は、主に、高速の Li ターゲット流を形成し,重陽子ビームの照射を行うター ゲットアセンブリーと、ターゲットアセンブリーに温度、 不純物濃度を制御したLiを供給するループシステムから成 る. Li ループからターゲットアセンブリーに供給された Li 流は、整流器を通して流速分布を平坦化された後、ノズル により幅 260 mm, 厚さ 25 mm の板状のジェット流を形成 する.ノズルは安定な高速Li流を実現するため、ポテン シャル流理論による島のモデル[4,5]に基づいた二段絞り 方式が採用されている. Dビームは, 凹面壁(バックウォー ル)に沿って流下する Li ジェット流自由表面の幅 200 mm, 高さ 50 mm の領域 (ビームフットプリント) に入射され中 性子を生成する. ビームフットプリントはノズルの中性子 損傷を避けるため、その中心がノズルから175mm下流の 位置に設定されている. Liターゲットでは最大のLi流速20 m/s時にも10⁻³ Paの真空中で25 mmのジェット流厚さを 安定に維持すると共に、ビーム入射時には、Liの沸騰や自

由表面から真空中への蒸発を抑制しなければならない.こ のためバックウォールは半径 250 mmの曲率を持ち,遠心 力による圧力をジェット流内に発生させてLiの沸騰を抑制 させる構造となっている.自由表面での波高の許容値は, Li流中のビーム入熱分布の変動からバックウォールを保護 するため,1 mmを目標としている.

IFMIF ターゲット流の流動に関する研究は, Fusion Material Irradiation Test facility 計画 (FMIT) [6-8] での R& Dを参照しつつ, ESNIT (Energy Selective Neutron Irradiation Test facility) [9]の検討や, IFMIF 概念設計活動(Conceptual Design Activity, IFMIF-CDA) など[10,11]を経 て,主に水を用いた流動模擬実験や熱流動解析によって進 められてきた.水流動模擬実験では高速カメラによる表面 の可視化や超音波探傷装置を用いターゲットの厚さ変化の 計測[12],さらにレーザー測定装置を用いターゲット表面 に発生する表面波の計測[13]とその理論解析[14]等詳細な 研究が行われた.また,同時に熱流動解析[15-17]が行わ れ、ターゲットが沸騰抑制に対し十分な尤度があることが 確認された.

これら実験研究を受けて、本研究では大阪大学の既存の 液体Li循環装置にターゲットアセンブリー設計の1/2.5 スケールの二段縮流ノズルと水平流路を取りつけた試験部 を設置し流動実験を行ってきた.ターゲット流動に焦点を 当てた当試験では、IFMIF-CDA で設計されたノズル形状 によりLi流が飛散や激しい波を伴わず安全・安定に流れる ことを確認した上で、表面に発生する波の挙動を実験的に 把握し、ノズル・流路設計の確証を得ることを目的とし た.高速の液体金属Li流の表面に生じる微小な波の波

Experimental Study on IFMIF Liquid Lithium Target Flow

KONDO Hiroo, KANEMURA Takuji, KO Kaduhira, YAMAOKA Nobuo, MIYAMOTO Seiji, IDA Mizuho, NAKAMURA Hiroo, MATSUSHITA Izuru, MUROGA Takeo and HORIIKE Hiroshi corresponding author's e-mail: h-kondo@nucl.eng.osaka-u.ac.jp 長,振幅,速度などの特性を計測する手法が確立されてお らず、それら計測法の提案と確立、さらにその計測も主要 な目的の一つに据えた.本報では、液体Liターゲット流の 表面を可視化し、そこに生ずる微小な波の波長を計測し、 さらに液面と直接接触する方式の液面計を導入し波高計測 を試みた結果について報告する.

実験装置

図1にLi循環装置の全景およびフロー図,表1にその概 要を示す. 主ループは噴流試験部 (Free surface test section), ALIP 式電磁ポンプ (EMP, ElectroMagnetic Pump), 空冷却器 (Cooler), 電磁流量計 (ElectroMagnetic flow meter), ダンプタンク (Dump tank) からなり, 配管は2 インチで SUS304を使用している.サブループには Li 純化 のためのコールドトラップ (Cold trap) が設置されている.

図2に噴流試験部断面図を示す.Liの流れは図中右から 左であり、SUS304製のハニカムと3枚の多孔版からなる 整流部を通り整流されたのち、2段階縮流ノズルにより厚 さ10mm,幅70mmの平板状の噴流となる.2段階縮流ノ ズルはIFMIFモデルを使用している. ノズルより吐出され たLi噴流はチャンバー内のほぼ水平に設置された流路壁 (バックウォール) 上を流れる. IFMIF の設計ではバック ウォールは半径 250 mm の曲率を持ち垂直方向に設置され るが、本装置では装置簡略化のため水平のバックウォール を採用した.これは既設装置の制約によるところが大きい が、上述の水実験では水平流路にて詳細なリチウム模擬試 験を行っており、それと比較検討できること、また高流速 領域では流体の慣性力の寄与が大きく重力の影響は無視で





表1 循環装置概略.

EMP	ALIP 5001/min, 0.5MPa
	Max. velocity at test section: 15m/sec
Nozzle	70mm width 10mm height
Open channel	- 100cm long
Dump tank	420 liter
Cold trap	6l∕min, operating temp. >220 ℃
Evacuation	Dry pump down to 15Pa



自由表面試験部.

きるという点が考慮された.ただし運転停止時にバック ウォール上のLiを残さずダンプタンクに回収するため, バックウォールにはおよそ 2.5°の傾斜がつけられている. チャンバーには、流動観測・計測用ポートが設けてあり、 ポートの中心はそれぞれノズルから15mm,175mm,450 mmの距離に位置し、バックウォールに垂直である.本 ポートから CCD カメラによる運転時モニタリングや, Li 流自由表面の撮影,波高の計測を行った.

3. 実験

3.1 自由表面波の可視化と波長計測

液体Li噴流の表面をカメラ等で撮影し可視化しようとす る際に、液体Li流表面では光の鏡面反射が起こるため、イ メージセンサーを用いた表面の画像撮影を行うには明暗に ついてのダイナミックレンジが非常に大きい高ダイナミッ クレンジのイメージセンサーが必要である.本研究では高 ダイナミックレンジ且つ高速度シャッタの CCD カメラ (PCO 社製 Sensicam qe) と発光半値幅 20 µs の極短時間発 光ストロボスコープ(日進電子社製 CF-15S3)を準備して, 単位時間当たりの記録可能な画面数は少ないが、1枚1枚 の映像のシャッタは非常に短時間で切れ明瞭な画像を取得 することで、表面波の可視化を行った.ノズル出口付近と、 ノズルより 175 mm 下流に位置する計測用ポートに CCD カメラを設置し、ストロボスコープはノズル直上のポート から試験部内に光が拡散するように照明を行った.

図3にCCDカメラで撮影した自由表面の写真を示す.右 の写真がノズル出口付近, 左が175mm下流の写真である. 自由表面に発生する波の様相は、流速範囲に対して、大き く分けて3つの形態をとった.流速3.0m/sより低い比較 的低流速の場合,図3(a)のノズル付近の写真にあるよう に自由表面は完全に滑らかであり波は発生しなかった.流 速が増加すると徐々に流れ方向に進行する波が発生し、流 速5.0 m/s以上になると図3(b)の写真のようにノズル出口 から細かな波が表面全体にわたって発生し始めた.図3 (b) は 7.0 m/の写真であるが、 5.0 から 8.0 m/s の範囲でノ ズル近くにおいて流れ方向に直行した規則性が高い波が観 測された. 図3(b)の左図に示すように、ノズルより175 mm 下流の重陽子ビーム照射領域では、そのような規則性 はなくなった. さらに流速を上げていくと, 流速 9.0 m/s 程度以上では、もはや規則性は見られず表面全体が不規則



(c) Um =15 m/s
 図 3 リチウム流表面の流速に対する変化.

な波で覆われるようになった.図3(c)は流速15m/s時の 流れの写真である.これはノズル出口において境界層が乱 流状態に移行したためと考えられる.このような表面波の 様相は前述の水実験のものと一致する.波の波長は、ノズ ル出口における境界層の運動量厚さを代表長とするウエ バー数によって整理し、自由表面せん断層の不安定性理論 の予測結果と比較し、よい一致を得た[18].

3.2 自由表面波の波高計測

3.2.1 計測装置·原理

表面に発生した波の波高を計測するために,接触式の波 高計測装置(接触式プローブと呼ぶ)を導入した.これは,

SS304製の先端を細く加工した直径3mm程度の針(プロー ブ)を液面上部より挿入し,液面とプローブとの接触を直 接電気的に検知する装置である.図4(a)に接触式プロー ブの写真を示す.本装置は, 主に2本のプローブとこれら を動かすステッピングモータからなり計測ポートに取りつ け使用する. 接触式プローブは図4(b)のように、ノズル より 175 mm 下流の試験部ポートに設置し、流路中心(側 壁より 35 mm) とおよそ 1/4 (側壁より 16 mm) の位置の 2点の計測を行った. 計測はプローブを Li 液面上方から 徐々に降下させ、Liと接触し始めた位置からプローブ位置 を固定し20秒間,接触-非接触の電圧信号(ON-OFF 信号) を AD 変換器により記録した. その後, 0.1 mm 間隔で降下 させ20秒間の記録を繰り返し、プローブと液面が常時接触 するまで計測を行った. 前節に流れの写真を示したように 生じる波の波長は高々数 mm 程度であり, 流速は1~15 m /sまでの範囲で測定を行っているので、この計測時間20秒 内に十分に多くの波(数千波長以上)がプローブ位置を流 れる.

3.2.2 実験結果とその整理

プローブ計測法は当研究グループの従来の研究報告 [19,20]で詳しく述べているので、ここでは得られた結果 については簡単に触れるにとどめ、次節でさらに踏み込ん だ分析を行う.プローブを液面上方より徐々に挿入して計 測を行った結果、プローブが液面の平均的な高さに比べて 高い位置にあるとき、プローブと液面の接触の時間間隔は 長くその回数も少なかった.その位置から徐々に挿入する につれ、その接触間隔は短くなり、やがて接触回数は最大 値をとった.さらに挿入していくと接触の時間が長くな り、接触 - 非接触の切り替わりも少なくなっていき、完全 に接触状態に至る結果を得た.これらの接触信号は単位時 間あたりの接触回数(接触の時間頻度)により整理した.

図5に,流路中心位置と,流路幅の1/4の位置での接触の時間頻度の計測結果を示す.横軸にはプローブの流路底からの距離を取っており,実験では高い位置から低い位置へとプローブを徐々に挿入した.ここで,ノズル出口高さ,すなわち初期液面高さは10 mmであり,図中黒線で示している.流速3 m/sの場合,プローブ高さが12.3 mm付近で 側壁側のプローブ(青三角印)が液面と接触し始め,12 mm



図4 電気接触式プローブ.

付近で頻度が最大を取る. その後,液面と常時接触状態に なる.流路中心(赤丸印)では,高さ11mm付近から接触 をはじめ,10.5mm付近で頻度最大となり,10mmで常時 接触となる.この場合,流路中心位置と1/4の位置では,液 面の高さにおよそ1.5mm程度の差があることがわかり, 流れ断面方向に厚さの分布があることが考えられる. 流速 の増加とともに,接触の頻度と幅も増加していく. 流速7 m/sや14m/sでは,接触開始から暫くのあいだ接触はある もののその頻度が小さい領域が続く.このことから表面波 に孤立的な非常に振幅の大きな成分を含んでいることが予 想できる.この傾向は常時接触状態付近でも同様に観測さ れた.

3.2.3 表面波の波高分布

本研究では図5の接触の頻度をさらに分析し,振幅および波高の分布を算出し,これまでの水面波のものと比較した.以下にその手順を示す.



図6に実験で得た接触の頻度の模式図を示す. 図中の高 さ H₁における接触周波数は,波の山の高さが H₁以上の波 が単位時間あたりに通過する数と捉えることができる. H₁ よりわずかにプローブを挿入した位置 H₂(=H₁- Δ H)にお ける接触の周波数と,H₁における周波数の差は,波の山 (波頭)の高さが H₁から H₂の高さにある波が単位時間あた りに通過した数と考えられる.



図7には上述の方法によって波頭の分布を算出した結果 を示す. 接触の範囲の上限から接触の中心まで0.1 mm 間 隔でその間隔にある波頭の単位時間当たりの数で示した. ここで波の分布は横軸に波高, すなわち振幅の2倍をとっ た.図7には代表的な例として、流路中心での測定結果の うち主流速度が3,7,14m/sのものを示した.流速が 3m/sの場合,接触範囲,すなわち計測時間中における最 大波高は 1.2 mm であった. しかしながらその数は非常に 少なく、僅か数回の接触があったのみである.この流速に おいては,波高が0.2~0.4 mmの波の割合が多いことがグ ラフよりわかる.7m/sの場合,最大波高は1.2mm である が、3m/sの場合と同様に0.2~0.4mmの波高をもつ波の割 合が多い.7m/sの場合はより分布に広がりが見られる. 高流速になると、接触の範囲は非常に大きいことが、前述 の接触周波数のグラフからもわかる.14m/sの場合,最大 波高は4mmを超えるが,分布の最大は0.8mm付近にあ り、高振幅の波の存在の割合は少ないことがわかる。現在 の設計では IFMIF ターゲットの自由表面での波高の許容 値は,1mmとなっているが、これらの結果から、高流速に おいても大部分は1mm以内に収まり、わずかに許容を超 える波が発生することが明らかになった.

図8に、図7で示した振幅分布を、横軸を平均波高Ha で縦軸を全波高に対する確率密度で規格化したものを示 す.平均波高は波高分布から算出した度数平均である.図 8の実線は次式で示されるレイリー分布である.不規則な 波群に含まれる波の波高は、Longuet-Higginsによってレ イリー分布によって表されることが示されており[21]、い ま波高Hの確率密度関数をp(H)とするとレイリー分布は

$$p(H) dH = \frac{\pi}{2} \frac{H}{H_a^2} \exp\left[-\frac{\pi}{4} \left(\frac{H}{H_a}\right)^2\right] dH$$

とかかれる. 図8に示すように,計測値の波高分布はレ イリー分布と非常によく一致し,波高分布は不規則である ことがわかった.

図9に175 mmの位置における計測の結果得られた,平 均波高 (Average wave),有義波高 (Significant wave),最 大波高 (Maximum wave)を示す.ここで,有義波とは,波 群中での波高の大きい方から数えて,全体の波数 N の 1/3 の数の波について波高および周期を平均し,その値に等し い波高と周期を持つ波を言う.不規則な波群を取り扱う場 合,有義波は目視観測によって報告されている波の波高, 周期にほぼ等しいとされる.有義波を $H_{1/3}$ とすれば、レイ リー分布に従う場合, $H_{1/3} = 1.60H_a$ と書ける.また,最大 波高は接触の範囲で定義した.図中には流路中心位置と側 壁より 16 mm の位置 (流路幅 1/4 の位置) における計測結 果を示した.平均波および有義波は流速の増加とともに 徐々に成長し,流路中心位置において,流速 15 m/s 時でそ れぞれ 0.93 mm, 1.5 mm であった.一方,最大波高は 4.5 mm にも達した.

本研究において,計測位置はノズルより175mm下流で あり,生じる波は十分に発達しており,その波高分布はレ イリー分布に従う不規則波であることがわかった.またそ



の波高値も明らかとなった.

4. まとめ

液体金属流動第一壁や先進ブランケットの研究への適用 も視野に入れつつ,近い将来にも建設が見込まれる強力中 性子源 IFMIF の液体金属ターゲット研究の推進と実機設 計に資することを目的とした実験研究に関するレビューを 行った.

Li 流の自由表面を発光半値幅 20 µs のストロボスコープ を照明に用いて高感度CCDカメラで撮影し,その表面の流 速に対する変化を明らかにした.さらに,接触式プローブ 装置を導入し,その波の波高の計測を行った.流速をパラ メータとし,記録した接触 - 非接触を繰りかえす時系列信 号から,単位時間あたりの接触(接触の頻度)を算出し,さ らに波高の分布を算出する手法を提案し,波高分布を得た.このような波高分布に無次元規格化を施し,整理した結果,得られた無次元波高分布は、1~15 m/s の流速範囲において,不規則な水面波の波高分布であるレイリー分布と非常に良い一致を示すことが明らかになった.この時の計測位置はノズルより175 mm下流であり,波は十分に発達した不規則な波であることが示された.また波高分布より,波群を特徴づける統計的な波高値である平均波高,有義波を算出した.平均波および有義波は流速の増加とともに徐々に成長し,流路中心位置において,流速15 m/s 時でそれぞれ0.93 mm,1.5 mm であり,最大波高が4.5 mm を示す場合もあるが,大部分の波は設計目標値1 mm 以内に納まることがわかった.

謝 辞

本研究は、自然科学研究機構核融合科学研究所のLHD 共同研究(NIFS05KOBF009)のご支援のもと遂行した.ま た、東北大学教授の松井秀樹先生にはご協力、ご助言をい ただいた.ここに記して謝意を表す.

参考文献

- [1] 勝田博司他: "国際核融合材料照射施設 (IFMIF) の設 計活動"日本原子力学会誌 40,162 (1998).
- [2] 松井秀樹他:小特集「国際核融合材料照射施設(IFMIF)
 の設計と開発の現状」プラズマ・核融合学会誌 82, (2006).
- [3] IFMIF International Team, IFMIF Comprehensive Design Report, IEA on-line publication, http://www.iea.org /Textbase/techno/technologies/fusion/IFMIF-CDR? partA.pdf and partB.
- [4] 島 章:東北大学,高速力学研究所報告 第16巻154号 (1960/1961).
- [5] 島 章:東北大学,高速力学研究所報告 第17巻164号 (1961/1962).

- [6] J.A. Hassberger, Proc. 10th Sym. Fusion Engineering Philadelphia, (Pennsylvania, December5-9, 1983).
- [7] J.A. Hassberger, Nucl. Technol./Fusion 4, 433 (1983).
- [8] C.E. Annese *et al.*, HEDL report, HEDL-SA-2722, November 1982
- [9] K. Noda et al., J. Nucl. Mater. 174, 319 (1990).
- [10] IFMIF-CDA team (edited by M.Martone), IFMIF International Fusion Materials Irradiation Facility Conceptual Design Activity Final Report, ENEA Frascati Report, RT/ERG/FUS/96/11, December 1996.
- [11] IFMIF team (edited by A.Moeslang), IFMIF International Fusion Materials Irradiation Facility Conceptual Design Evaluation Report, A Supplement to the CDA by the IFMIF team, FZK Report, FZKA 6199, January 1999.
- [12] H. Nakamura, *Proc. NURETH-8* (Sep. 30-Oct.4, 1997, Kyoto) Vol.3, 1268.
- [13] K. Itoh, Y. Tsuji, H. Nakamura and Y. Kukita, Fusion Techol. 36, 69 (1999).
- [14] K. Itoh, Y. Tsuji, H. Nakamura and Y. Kukita, Fusion Techol. 37, 74 (2000).
- [15] M. Ida, Y. Kato, H. Nkamura and H. Maekawa, JAERI-Research 97-030.
- [16] M. Ida, Y. Kato and H. Nakamura, JAERI-Research 98-022.
- [17] M. Ida, H. Nakamura, H. Nakamura, H. Nakamura, K. Ezato and H. Takeuchi, Fus. Eng. Des. 63-64, 333 (2002).
- [18] H. Kondo, A. Fujisato, N. Yamaoka, S. Miyamoto, M. Ida, H. Nakamura, I. Matushita, T. Muroga and H. Horiike, Fusion Eng. Des. **75-79**, 865 (2005).
- [19] H. Horiike, H. Kondo, H. Nakamura, S. Miyamoto, N. Yamaoka, I. Matsushita, M. Ida, K. Ara, T. Muroga, H. Matsui, *Proc. 21st IAEA Fusion Energy Conference*, (16 - 21 October, 2006, Chengdu, China).
- [20] T. Kanemura, H. Kondo, N. Yamaoka, S. Miyamoto, M. Ida, H. Nakamura, I. Matsushita, T. Muroga, H. Horiike, Fusion Eng. Des. 82, 2550 (2007).
- [21] 堀川清司:海岸工学(1973, 東京大学出版会) 50.