

## 液体ダイバータ研究の現状 Current Status of Liquid Divertor Research

嶋田道也<sup>1)</sup>、宮澤順一<sup>2)</sup>、廣岡慶彦<sup>2)</sup>  
Michiya SHIMADA<sup>1)</sup>, Junichi MIYAZAWA<sup>2)</sup>, Yoshi HIROOKA<sup>2)</sup>

原子力機構<sup>1)</sup>、核融合科学研究所<sup>2)</sup>  
JAEA<sup>1)</sup>, NIFS<sup>2)</sup>

### 1. 序(研究の動機)

ダイバータには、プラズマからの熱流束及び粒子束が集中する。そのためダイバータは核融合炉でもっとも設計が困難な機器である。核融合原型炉開発のための技術基盤構築の中核的役割を担うチーム報告[1]は、ダイバータは「原型炉で想定される運転条件と現在の科学的理解及び技術成熟度とのかい離が極めて大きい」ため、ダイバータの研究開発は、「原型炉での技術的成立性を判断する上で、技術成熟度を現状から最も高める必要」があり、「クリティカルパスと認められ、最も喫緊に今以上に資源を投入すべき」研究テーマであると明言している。

液体金属ダイバータは、効率よく対流できる方策が確立できれば、原型炉、商業炉において活躍できるダイバータとなりうる。またディスラプションの影響が軽減でき、保守作業が軽減でき、炉のコンパクト化に貢献できる可能性もある。本講演においては、液体金属ダイバータの研究のこれまでの経過を展望し、将来の研究課題を議論する。

### 2. これまでの経過

液体金属を用いたプラズマ対向機器は1970年代から検討されている。この分野については廣岡による優れたreviewがある[2]。とくに液体リチウムを材料に用いたプラズマ対向機器の磁気閉じ込め装置への応用に関して隔年でワークショップが開催されている[3-5]。

液体金属ダイバータが最初に提案されたのはUWMAK-1設計においてである[6]。この主目的は自由落下するリチウムを用いて強力な排気を行うということであった。自由落下するカーテン状のガリウムがT-3Mトカマクで[7,8]、毛管孔隙を用いたリチウム入射システムがT-11Mトカマクで[8]試験された。リチウムをプラズマ対向機器に用いると、閉じ込め性能改善、ELM安定化、及びHモード遷移パワーの低減など、トカマク運転に好都合な成果が最近得られたため、実験及び理論の研究が盛んになりつつある[3-5]。ガイドプレート及び自由落下シャワー方式の(Sn, Ga, Li)液体金属ダイバータが、ダイバータの寿命を長くする方式として提案された[9]。

毛細管現象によってモリブデンのメッシュ間から液体リチウムを透過させるCPS(capillary porous system)方式のリミターを用いた実験がT-11M[10], FTU[11], TJ-2[12]などで行われ、プラズマ性能の改善が観測された。これは水素リサイクリング粒子束が低減したためと考えられる[2]。Vehicle-1の実験では、水素リサイクリング粒子束が、液体リチウム上では固体リチウム上に比べて約30%低減した[13]。飽和時間を長くして閉じ込めへの効果を確認することを期待して、NSTXにおいて最初の液体リチウムダイバータ(LLD)実験が行われた。しかしながら水素で飽和する時間は、リチウムで被覆されたダイバータの場合と大差なかった[14]。この実験結果から、液体金属ダイバータにおいては能動的に対流を起こすことが重要であることが示唆される。

実際、Vehicle-1の実験において、液体リチウムを手動で攪拌させたところ水素及びヘリウムのリサイクリング束が低下した[15]。米国のAPEXプログラム[16]の一環で液体金属をノズルから噴出させバックプレート上を流動させる実験が行われた[17]。しかしながら液体金属が磁場を横切ると $v \times B$ の起電力が生じ電流が流れる。 $j \times B$ の力は磁場を横切る運動を妨げる(mhd drag)ので、液体金属の流動が不安定になる[18]。

mhd dragの問題を克服し、かつ強制対流を起こさせるために、液体金属ダイバータを対流させるアイデアがいくつか提案された。そのひとつが熱電電磁流体力学thermo-electric MHD (TEMHD) [19]と呼ばれるものである。TEMHDの原理は液体金属表面と底面の間の温度差のためのSeebeck効果によって生じる電流とトロイダル磁場による電磁力を用いて液体金属を駆動するというものである。原理検証実験[20]のあと、リミター配位ではあるがプラズマ閉じ込め装置(HT-7)に応用された[21]。この方式の短所は、電流値が熱流束によって自動的に決まり、外部から制御することができないこと、液体金属の流動を導く溝をバックプレートに付けることが必要であることである。

最近、嶋田と廣岡は、能動対流型液体金属ダイバータActively convected liquid metal divertor (ACLMD)と呼ばれる、トカマクのダイバータに応用することを念頭に置いた

液体金属の能動的対流法を考案した[22]。トロイダル状の容器に液体金属を満たし、その中に電極を設置して電極と容器の間に電圧を印加することにより液体金属中に電流を流し、この電流とトロイダル磁場によるローレンツ力で液体金属を駆動する。液体金属が強制的に対流させることができるので、ダイバータに流入する熱を急速に広い面積に拡散させて熱除去を容易にする、というものである。簡単なモデル計算によれば、100 MW/m<sup>2</sup>の熱負荷を受けて温度上昇を200° C程度に抑えるために必要な流速は、0.3 m/sである[22]。印加する電圧を急激に上昇させると、膨大な電流が流れるが、たとえば60秒程度のゆっくりした上昇ならば電流値は10A程度に抑えられる[23]。熱除去とともに、粒子排気によるリサイクリング制御もできる可能性がある。不純物除去による壁調整もできる可能性もある。500° Cにおける蒸気圧は、Lithiumでは~5 mPaであるが、Galiumでは4x 10<sup>-8</sup> Pa, Snでは2 x 10<sup>-10</sup> Paであり[22]、燃料の圧力(1Pa前後)に比べて無視できる。

液体金属の円筒状容器を、円盤状の一对の永久磁石の間に配置した。磁場強度は~0.1 T。左面と右面がアクリル製の円板、側面がSUS304製の容器の中心にSUS304製の電極を設置した。常温で液体であるため取り扱いが容易なGaInSnを液体金属として用いた。中心電極に容器側面に対して~0.2 Vを印加し、~20 A液体金属中に流したところ液体金属の回転(6~7rpm)を確認できた[23]。また流体流動が起こると水素粒子リサイクリング束が約15%減少することが再現性良く観測された[24]

核融合科学研究所ではヘリカル型核融合炉FFHR-d1の概念設計活動が進められている[25]。ディスラプションがないヘリカル型核融合炉においても定常熱負荷はトカマク炉と同様に厳しいため、20 MW/m<sup>2</sup>以上、あるいはもし可能ならば100 MW/m<sup>2</sup>を超える定常熱負荷にも耐えるダイバータが必要とされている。

最近、宮澤らによってFFHR-d1用液体金属ダイバータの新概念が提案された。これは、チェーン等に沿わせて減速・安定化しつつ鉛直落下させる直径1 cm程度の液体金属流を適宜配列したものであり、REVOLVER-D (Reactor-oriented Effectively VOLumetric VERTical Divertor) と名付けられている[26]。液体金属には低融点(~505 K)かつ低蒸気圧[27]のスズが用いられる。村瀬による有限要素法計算ツールANSYSを用いた試算によれば、溶融スズの流速が2-3 m/s以上であれば、200 MW/m<sup>2</sup>の熱負荷条件でも最高温度を1,000 K以下とし、蒸気圧を10<sup>-5</sup> Pa以下に抑えることが可能である[28]。

#### 参考文献

[1] 核融合原型炉開発のための技術基盤構築の中核的役割を担うチーム報告(平成27年1月19日)  
[http://www.naka.jaea.go.jp/kankoubutu/PDF/goudouko\\_a\\_201501.pdf](http://www.naka.jaea.go.jp/kankoubutu/PDF/goudouko_a_201501.pdf)  
 [2] Y. Hirooka et al., Fusion Science and Technology 68

(2015), Proceedings of TOFE-2014.  
[dx.doi.org/10.13182/FST15-125](http://dx.doi.org/10.13182/FST15-125)  
 [3] Y. Hirooka et al., Nucl. Fusion 50 (2010) 077001,  
[doi:10.1088/0029-5515/50/7/077001](http://dx.doi.org/10.1088/0029-5515/50/7/077001)  
 [4] M. Ono et al., Nucl. Fusion 52 (2012) 037001,  
[doi:10.1088/0029-5515/52/3/037001](http://dx.doi.org/10.1088/0029-5515/52/3/037001)  
 [5] G. Mazzitelli et al., Nucl. Fusion 55 (2015) 027001,  
[doi:10.1088/0029-5515/55/2/027001](http://dx.doi.org/10.1088/0029-5515/55/2/027001)  
 [6] B. Badger et al 1974 'UWMAK-I-A Wisconsin Toroidal Fusion Reactor Design' UWFD-68  
<http://fti.neep.wisc.edu/pdf/fdm68.pdf>  
 [7] S.V. Mirnov et al., J. Nucl. Mater. 196-198 (1992) 45  
 [8] S.V. Mirnov et al., Fusion Eng. Des. 81 (2006) 11.  
 [9] K. Maki in "Tokamak Concept Innovations", IAEA-TECDOC-373 (1986), p 87  
[www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/Public/17/056/17056491.pdf](http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/Public/17/056/17056491.pdf)  
 [10] S. Mirnov, J. Nucl. Mater. 390-391 (2009) 876  
 [11] G. Mazzitelli et al., Fusion Eng. Des. 86 (2014) 580  
 [12] J. Sanchez et al., Nucl. Fusion 48 (2009) 104018  
 [13] Y. Hirooka et al., J. Nucl. Mater. 337-339 (2005) 585  
 [14] H.W. Kugel et al., Fusion Eng. Des. 87 (2012) 1724  
 [15] Yoshi Hirooka et al., Fusion Eng. Des. 89 (2014) 2833  
 [16] M.A. Abdou and the APEX TEAM, Fusion Eng. Des. 54 (2001) 181  
 [17] A. Ying et al., Fusion Eng. Des. 72 (2004) 35  
 [18] M. Narula et al., Fusion Eng. Des. 81 (2006) 1543  
 [19] M.A. Jaworski et al., Phys. Rev. Lett. 104 (2010) 094503  
 [20] D.N. Ruzic et al., Nucl. Fusion 51 (2011) 102002  
 [21] G.Z. Zui et al., Fusion Eng. Des. 89 (2014) 2845  
 [22] Michiya Shimada and Yoshi Hirooka, Nucl. Fusion 54 (2014) 122002  
 [23] Michiya Shimada, Hishan Zhou and Yoshi Hirooka, Proc. 41st EPS conf. on Plasma Phys. Berlin, 2014.  
 [24] Y. Hirooka et al., 4<sup>th</sup> Int. Symp. Lithium applications for fusion devices (ISLA-4), ranada, Sep. 28-30, 2015.  
 [25] A. Sagara et al., Fusion Eng. Des. 89 (2014) 2114.  
 [26] J. Miyazawa et al., 1st IAEA Technical Meeting on Divertor Concepts, P-7 (29 Sep. - 2 Oct., 2015, IAEA Headquarter, Vienna),  
<http://www-naweb.iaea.org/napc/physics/meetings/TM49934.html>.  
 [27] M. Kondo and Y. Nakajima, Fusion Eng. Des. 88 (2013) 2556.  
 [28] T. Murase, private communication.