



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～

4. 伝熱・MHD 特性研究の現状

4. Current Status of MHD Thermofluid Study

横峯健彦¹⁾, 橋爪秀利²⁾

YOKOMINE Takehiko¹⁾ and HASHIZUME Hidetoshi²⁾

¹⁾京都大学, ²⁾東北大学

(原稿受付: 2015年12月2日)

液体金属・溶融塩を核融合炉内で使用する場合、磁場の影響は避けられない。この章では、液体金属・溶融塩の基本的な伝熱特性を踏まえつつ、これまでに日米科学協力事業などを通じて明らかになった伝熱流動に関する様々な電磁相互作用を概説する。さらに、流路のMHD圧力損失低減法についても解説する。

Keywords:

liquid blanket, MHD, turbulence, heat transfer, MHD pressure drop

4.1 水じゃない伝熱特性

熱物性から見れば、大まかに水と溶融塩は高プラントル数流体として特徴付けることができ、一方の低プラントル数流体である液体金属と伝熱機構を区別することができる。プラントル数とは、運動量の粘性拡散と熱拡散の比を表す無次元数であり、水が大気圧常温で7.01、加圧水型原子炉(PWR)条件で1.53、溶融塩FLiBeが20~40、一方、液体金属LiPbは 1.4×10^{-3} 程度である。高プラントル数流体では乱流熱伝達が、低プラントル数流体では熱伝導が支配的な伝熱機構となる。水は大変優れた冷却材で、発電ボイラ、動力用原子炉(BWR, PWR)において豊富な経験を持ち、ITERダイバータの冷却にも用いられている。一方、液体金属に関しても、高速増殖炉(FBR)の開発における液体Naのデータベースがあり、熱伝達特性、流動は比較的良好に予測することができる。溶融塩についても、1960年代から70年代にかけて米国では溶融塩実験炉計画MSRE(Molten-Salt Reactor Experiment)[1]において、臨界後17,665時間の運転実績を残し、データの蓄積がなされた。

ところが、磁場、特に核融合炉のような強磁場がかかった場合には、液体金属・溶融塩は、“液体だけど水じゃない”姿をみせ、これまでの非磁場環境で蓄積されたデータでは、工学設計に資するに十分ではない。もちろん、磁場下での両者の研究はこれまでも盛んに行われてきた。特に、よく知られたMHD圧力損失に関しては、様々な系で詳細に調べられているが[2]、伝熱に関しては十分ではない。例えば、溶融塩のMHD乱流熱伝達には、従来Blumの式 $Nu/Nu_{Ha=0} = 1 - 3Ha^2/Re$ が用いられてきた[3]。(図1)ここで、ヌセルト数 $Nu = aL/\lambda$ は、伝熱の大きさを示す無次元数、レイノルズ数 $Re = UL/\nu$ 、ハルトマン数 $Ha = hB\sqrt{\sigma/\rho\nu}$ はそれぞれ慣性力と粘性力の比、電磁力と

粘性力の比を表す無次元数である。 $a, \lambda, \sigma, \rho, \nu, U$ はそれぞれ流体の熱伝達率、熱伝導度、導電率、密度、動粘度、代表速度、 B は一様磁場 \mathbf{B} の大きさである。 h および L はいずれも代表的な長さスケールであるが、 h は磁場に垂直な方向の代表スケールであり、必ずしも流体運動の代表スケール L とは一致しない。 Ha^2/Re は電磁力と慣性力の比を表し、インタラクションパラメータと呼ばれる。因みにBlumの式は、磁場の強さ(インタラクションパラメータ)が大きくなると、温度に関する乱れの大規模構造は維持しつつ、速度場に関する乱流変動が抑制され、熱伝達が低下する傾向を表しているが、日米科学技術協力事業JUPITER-II[4]において行われた研究から、Blumの式よりもさらに大きく熱伝達は低下することが明らかとなり[5]、この実験式はYamamoto & Kunugiによる直接数値計算(DNS)[6]によって再現され、新たにインタラクションパラメータの関数として $Nu/Nu_{Ha=0} = 1 - 5.5Ha^2/Re$ が提唱された。例えば、FLiBeブランケットを考えた場合、レ

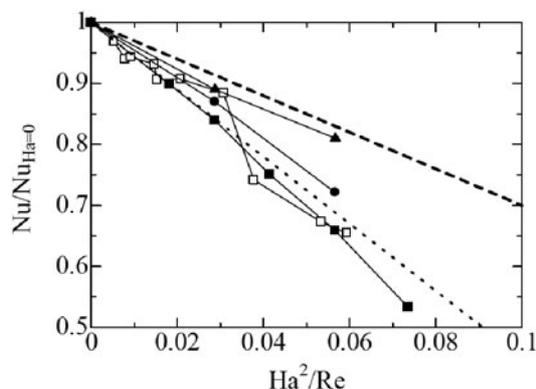


図1 インタラクションパラメータの関数としての伝熱劣化[6].

Kyoto University, KYOTO 615-8540, Japan

corresponding author's e-mail: yokomine@nucleng.kyoto-u.ac.jp

イノルズ数が10000 (代表寸法 25 mm) の時、磁場の強さが約 5 T で熱伝達率が非磁場下に比べおよそ10%, 約 8 T でおよそ30%の低下が見積もられる。伝熱性能の過小評価は、安全性に直結する重大な問題となる。

溶融塩のような高プラントル数流体を冷却材として用いるには、熱混合を促進する工夫が必要となる。そのひとつとして、球充填管 (Sphere-Packed Pipe:SPP) が提案され、東北大学の TNT (Tohoku-NIFS Thermofluid) ループにおいて、これまで多くの伝熱流動実験が実施されている [7, 8, 9]。それらの実験結果に基づき、FFHR FLiBe ブランケットへの適用検討されたものが図 2 である [9]。図には実験で用いた SPP 写真も載せる。FFHR FLiBe ブランケットでは、熱伝達率が 20,000 W/m²K 以上を必要とする。図 2 では、平滑管あるいはスワール管で得られる熱伝達率の数倍の値、すなわち数倍の除熱能力を SPP によって達成することができることを示している。これは、管内の球による流路の複雑化および球の後方に生じる管壁への衝突流により高プラントル数流体固有の薄い温度境界層、熱抵抗層を攪拌することによる効果であることがわかっている。SPP の場合、圧力損失の増大が懸念されるが、図 3 のように、同じ除熱能力を得るのに、直管に比べて過大なポンプ動力を必要としないこともわかった [9]。

図 1 で見られたように、磁場下における液体金属や溶融塩などの導電性流体の伝熱には、ハルトマン数およびレイノルズ数が主要なパラメータとして影響するが、それは同時に流れ場 (MHD 流れ) の構造変化に対する影響パラメータでもある。特に、磁場下の伝熱は MHD 乱流と強く相関しており、この両無次元数で整理する MHD 乱流遷移のマップを図 4 に示す [10]。領域は大きく、「乱流」およ

び「層流または擬 2 次元乱流」に分けられる。

3 次元乱流が、磁場の影響により 2 次元化する機構についてはよく理解されているが [11], ブランケットなど実際の工学的な側面から考えると、新たな問題が現れてくる。

たとえば、液体金属と流路壁との濡れ性の問題がある。一般的に、濡れ性が悪い壁面上に非常に薄い速度境界層が形成された場合、壁面で流動スリップが生ずることが知られているが、強磁場中の液体金属流れは MHD 効果により急峻な速度境界層が形成される。金属壁面の場合、液体金属を流し続けている間に中間金属層を形成し濡れ性の問題はなくなる。しかし、現在 MHD 圧力損失低減策として流路内に挿入が検討されている FCI (Flow Channel Insert) では、液体金属がセラミック壁面上を流れることになる。セラミックの場合、たとえ高温であっても液体金属との間で化学反応は生じないので、濡れ性が改善されることは期待できない。DCLL ブランケットの場合、He バブルの存在がスリップを助長することも懸念される。流路壁面で流動スリップが生じる場合、MHD 擬似二次元流がハルトマン境界層 (磁場に垂直な壁面近傍の速度境界層) 内においてジュール散逸し、粘性散逸が減少するという特異な渦構造となり、流れが不安定化することがわかっている [12]。

また、液体金属が導電壁流路を流れる際に磁場と平行な壁面の近傍には高速度ジェット流が、主流部では一様流速分布が形成される M 字型の流速分布をとることが知られている。(図 5) 核融合炉環境下と同等の強磁場が印加される場合、ジェット流分布が有する変曲点においては Kelvin-Helmholtz 型の流動不安定性により、流れが不安定化して最終的に乱流化することが明らかにされている [13]。

このほかにも、ブランケット内では液体金属自身の核発熱により流体内に温度差が生じ、鉛直方向に長い流路内では浮力の影響が顕在化し MHD 混合対流となる。そうすると、図 6 のように、強乱流領域においては渦・壁面相互作用と様々な渦間相互作用が支配的となり、一方、弱乱流領

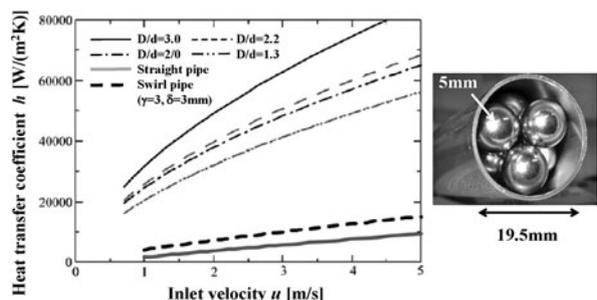


図 2 SPP による FLiBe の熱伝達率促進効果: D/d は円管と充填球の直径比 [9]。

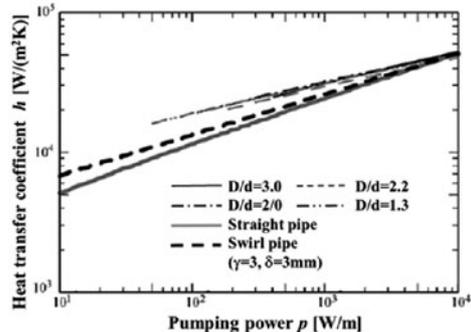


図 3 円管、スワール管および SPP のポンプ動力比較 [9]。

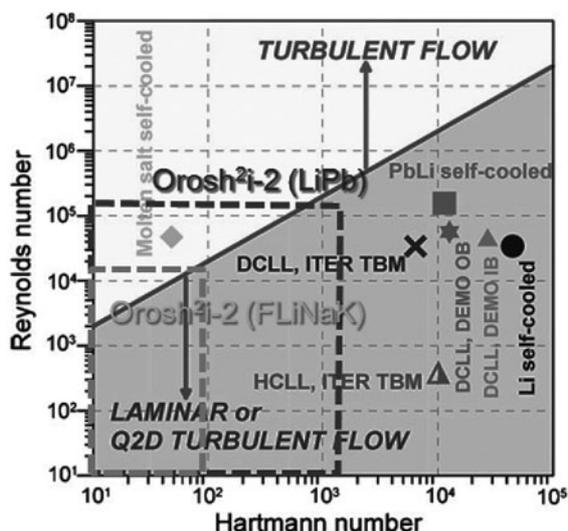


図 4 MHD 乱流の遷移マップと液体ブランケット [10]。

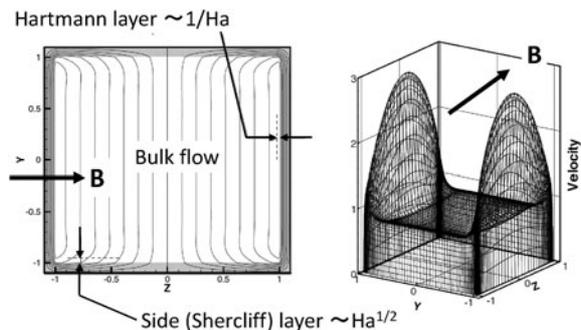


図5 薄い導電壁のダクト内MHD層流における誘起電流(左)と速度分布(右): $Ha = 200$ [13].

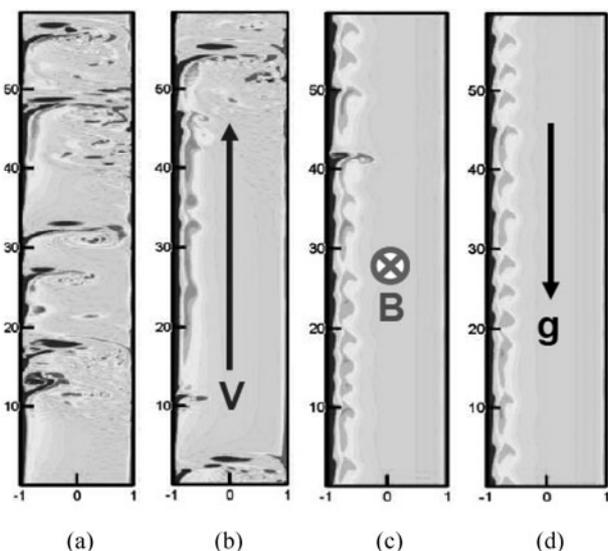


図6 核発熱によって生じる混合対流における乱流場(渦度): $Re = 5000$, $Gr = 10^8$ (グラスホフ数 Gr は、浮力と粘性力の比を表す無次元数); 強乱流場 (a) $Ha = 50$, (b) $Ha = 60$; 弱乱流場 (c) $Ha = 100$, (d) $Ha = 120$ [14].

域においては流れの渦は速度分布の変曲点近傍に局所的に存在するなど、複雑な流動を示すことも明らかとなっている [14]. また, Satake らは、一様磁場下での液体金属(低プラントル数流体)混合対流に関するDNS(直接数値計算)を行い、磁場下においても大規模渦構造が存在するものの、熱伝達率が低減することを示した [15].

図4には、各種ブランケットでのMHD乱流がどの領域に含まれるかも示している。また、表1には、文献から得られる液体金属ブランケットに関する各パラメータを示す。さらに図には、核融合科学研究所の熱・物質流動ループ装置 Oroshhi-2での実験可能条件も載せている。流れに直交する3T超伝導マグネットを有する世界最大級の新しい装置であり、現在準備されている溶融塩 FLiNaK、液体金属 LiPb いずれも乱流-層流遷移をカバーできるようになっている [10].

4.2 水にはない圧力損失—MHD 圧力損失低減法の開発—

伝熱機構に加え、液体金属や溶融塩が水と大きく異なるのは、核融合炉で使用される際の最大の課題となる MHD 圧

力損失である。MHD 圧力損失を低減するためには、流路壁内側に絶縁材を設け、電気的に絶縁することにより発生する電流を抑制する必要があるが、絶縁材料として主に想定されるセラミックには、金属で構成される流路壁との熱膨張率の違いによりクラックが生じる可能性が高く、また、セラミックは熱伝導率が低い材料であるため除熱性能が低下するといった問題もある。先に述べた FCI もそのひとつであり、米国や欧州において研究が進められている。

一方、日本オリジナルの MHD 圧力損失低減法として、図7に示すような三面複層コーティング流路が提案されており [19], 金属層厚さ 0.10 mm の三面複層コーティング流路の試作が行われ、図8に示すように磁場 1.8 T の環境下での MHD 圧力損失低減効果が実験により実証された [20].

しかしながら、実際の核融合炉ブランケットに適用する

表1 液体金属ブランケットにおける MHD 関連パラメータ.

ブランケット	HCLL (TBM) [16]	DCLL (TBM) [17]	DCLL (DEMO) [18]
磁場強度 (T)	4	4	10
代表流速 (m/s)	0.07	0.1	0.1
Ha	1.1×10^4	6.5×10^3	3.0×10^4
Re	670	3.0×10^4	1.2×10^5
インタラクションパラメータ	1.8×10^5	1.4×10^3	7.5×10^3
Gr	1.0×10^9	7.0×10^9	1.6×10^{12}

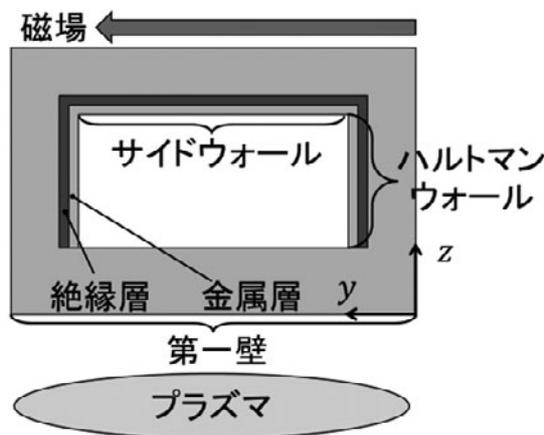


図7 三面複層コーティング流路 [19].

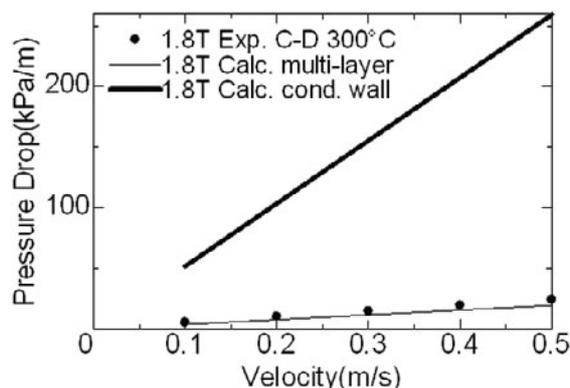


図8 三面コーティング流路での MHD 圧力損失低減結果 [20].

ためには圧力損失の観点から金属層の厚さは0.02 mm程度の厚さにすることが要求される[19]。この厚さの金属層を実炉において用いることを考えた場合、強度が問題となることが想定される。そこで、圧力損失はハルトマンウォールの金属層構造に依存することが明らかにされていることから、図9に示すような金属層に補強材を配置した金属層構造にすることによって金属層の強度を高めることが提案されている[21]。

そこで、yz断面の補強材が幅2 mm、中空形状のものをx軸方向となす角度を15~75に変化させてxz断面に配置した金属層構造のx軸回りの0.02 mmの金属層の曲げ剛性を圧力損失で規格化した曲げ剛性倍率および圧力損失倍率の評価結果を表2に示す。(解析体系は図10) この結果から、角度30°であれば、0.10 mm厚の金属層と同等のx軸回りの剛性を示すと同時に、圧力損失については0.02 mm厚の金属層の6%程度の増加で抑えられることがわかる。また、角度が大きくなるほど圧力損失の増加割合が大きくなった。これは、角度が大きくなるほど流動場の未発達域が増加するためであると考えられる。

さらに、様々な金属層構造とMHD流動場の関係性について評価が行われた結果、補強材を配置することによってMHD圧力損失は増大するものの、金属層構造によっては

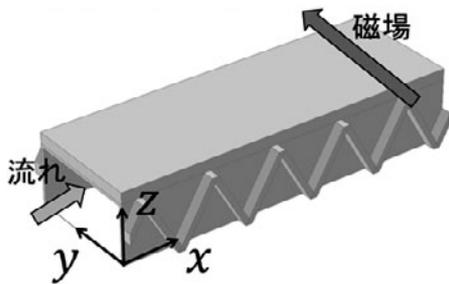


図9 補強材付金属層[21].

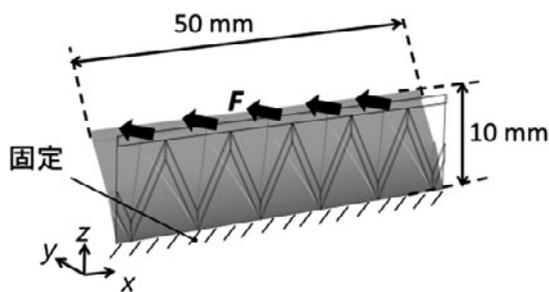


図10 剛性解析方法[21].

表2 xz断面における金属層構造依存性評価.

金属層厚さ[mm]	補強材角度[°]	x軸回り剛性倍率	圧力損失倍率
0.1	-	125	2.38
	15	83	1.04
	30	143	1.06
0.02	45	191	1.08
	60	233	1.11
	75	243	1.13

作動流体が高速部と低速部の領域に分かれることが示されている[21]。

したがって、金属層構造の最適化により、MHD圧力損失低減、金属層強度、除熱性能の3つの要求性能をすべて満たすことができるような補強材付三面複層コーティング流路を設計できる可能性がある。

4.3 まとめ

最後に、いくつか既に述べたが、MHDに関連した課題を挙げておく。(図11)

- (1) MHD圧力損失(複雑形状による3次元MHD圧力損失, フリンジ磁場など)
- (2) 電気絶縁(MHD圧力損失低減法)
- (3) フリンジ磁場における流れ(3次元MHD圧力損失によって誘起される流れ)
- (4) 浮力流れ(混合対流)
- (5) MHD不安定性と乱流(伝熱に大きな影響)
- (6) 複雑形状流れ(マニフォールドや非対称磁場下での流れなど)
- (7) 電磁カップリング(流路が絶縁されていない場合は近傍のダクトへ電流が流れ、圧力損失など流れ場を変化させる可能性がある)
- (8) 界面現象(固液界面でのスリップ, 熱・電気の接触抵抗などは流れ場に影響を与える)

液体ブランケットに関するこれらのMHD関連課題は、各種ブランケットごとに重要性が異なるが、(3)~(5)ほどのタイプのブランケットに対しても共通して喫緊の課題と考えられる。

これらは、流路内内部流れについてであるが、液体金属による流体壁では、自由界面流表面はプラズマからの強加熱により高温化し、プラズマ維持のためには液膜流表面の蒸発量を抑制する必要がある。このため、乱流渦によって液膜内を攪拌し、表面温度を低下させることが必須であり、強熱入力がある場合の(自由界面の変動も考えられる)液膜内の乱流熱輸送機構の解明、乱流促進法の開発が重要となる。

ここでは、MHD乱流と伝熱の関連のみを述べたが、実際は、MHD乱流と熱移動および物質移動の三位一体で考えなければならない。物質移動は、トリチウムやHeの移動だけでなく、腐食や腐食生成物の移動も含まれる。上述の(5)や(8)などは特に強く物質移動に影響する。

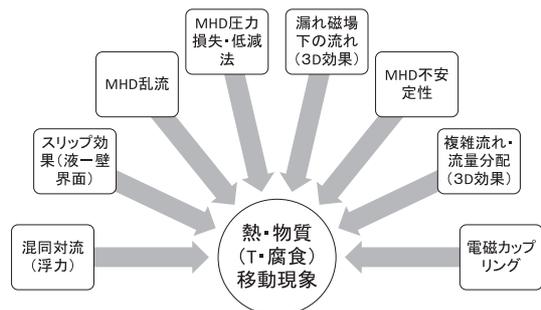


図11 MHDに関連する課題.

磁場によるさまざまなインパクトは磁場強度が大きいほど顕著に現れ、重畳効果となる。たとえば、MHD 圧力損失や伝熱の影響は、磁場強度の二乗に比例する。これまでのMHD 研究は磁場強度が1 T 以下で得られたものが多く、さらに強磁場下では、それらの結果に基づいて求められたモデルあるいはこれまでの数値解析では追いきれていない未知の現象発現の可能性もある。

これら、磁場、熱、物質移動を統一的に取る扱える強磁場大型実験装置はこれまで国内にはこれまでなかったため、複雑な乱流遷移、流動現象に対応する熱・物質移動に関する実験研究は、まだ緒に就いたばかりであり、3T の Oroshhi-2 に大きな期待が寄せられている。

参考文献

- [1] 溶融塩増殖炉研究専門委員会報告書「溶融塩増殖炉」(日本原子力学会, 1981).
- [2] I.R. Kirillov *et al.*, *Fusion Eng. Des.* **27**, 553 (1995).
- [3] E.Y. Blum, *High Temp.* **5**, 68 (1967).
- [4] 阿部勝憲 他: プラズマ・核融合学会誌 **85**, 247 (2009).
- [5] T. Yokomine *et al.*, *Fusion Sci. Technol.* **52**, 625 (2007).
- [6] Y. Yamamoto and T. Kunugi, *Prog. Nucl. Sci. Technol.* **2**, 550 (2011).
- [7] K. Yuki *et al.*, *J. Thermophysics Heat Transf.* **22**, 632 (2008).
- [8] S. Ebara *et al.*, *Fusion Eng. Des.* **89**, 1251 (2014).
- [9] H. Hashizume *et al.*, *Fusion Sci. Technol.* **56**, 892 (2009).
- [10] A. Sagara *et al.*, *Fusion Sci. Technol.* **68**, 303 (2015).
- [11] J. Sommeria and R. Moreau, *J. Fluid Mech.* **118**, 507 (1982).
- [12] S. Smolentsev, *Theo. Comput. Fluid Dyn.* **23**, 557 (2009).
- [13] S. Smolentsev *et al.*, *Phys. Fluids* **24**, 024101 (2012).
- [14] N. Vetcha *et al.*, *Phys. Fluids* **25**, 024102 (2013).
- [15] S. Satake *et al.*, *Fusion Eng. Des.* **87**, 798 (2012).
- [16] G. Rampal *et al.*, *Fusion Eng. Des.* **75-79**, 917 (2005).
- [17] S. Smolentsev *et al.*, *Fusion Eng. Des.* **83**, 771 (2008).
- [18] S. Smolentsev *et al.*, *Fusion Eng. Des.* **85**, 1007 (2010).
- [19] H. Hashizume, *Fusion Eng. Des.* **81**, 1431 (2006).
- [20] M. Aoyagi *et al.*, *Proc. NTHAS18*, Beppu, Japan, Dec. 9-12 (2012).
- [21] D. Isshiki *et al.*, 25th Int. Toki Conf., *to be presented*, Nov. 3-5 (2015).