

小特集 核融合炉の除熱技術～実用から先進技術まで～

3. 核融合炉における熱流体工学の実際

3.2 テストブランケットモジュールにおける伝熱流動の問題

関 洋治, 榎枝幹男

日本原子力研究開発機構

(原稿受付: 2009年7月10日)

テストブランケットは、原型炉ブランケットの機能を ITER の核融合環境下で試験し、設計手法を検証するものである。伝熱流動の課題は、狭隘な冷却流路での十分な冷却性能の確保、固体増殖方式では、増殖材の微小球充填層の伝導による除熱性能の適切な評価、液体増殖材については、MHD 効果の評価精度の向上と MHD 圧損の低減が課題である。

Keywords:

test blanket module, first wall, pebble bed, liquid breeder, thermal fluid MHD

3.2.1 ITER テストブランケット試験

ITER テストブランケット・モジュール (TBM) 試験は、ITER を核融合環境のテストベッドとして利用し、モジュール規模のブランケットのプロトタイプを装着して機能試験を実施するものである。TBM 試験は、原型炉ブランケットを開発するうえで最も重要なマイルストンのひとつであり、原型炉ブランケットと同規模の寸法、構造を持つ TBM を用いて、性能解析手法や設計データの検証を行い、設計精度を高め、トリチウムの生産、熱の取り出し、放射線の遮蔽などの原型炉ブランケットの機能の有効性と構造の健全性を核融合環境下で示すことを目的としている [1]。

TBM の試験計画として現在提案されているものは、次のようなものである。ITER 運転開始後、HH 運転期の間、TBM の冷却装置やトリチウム計測回収装置の基本性能確認を行い、また、表面熱負荷の除熱性や電磁力に対する耐久性に関する TBM の機能試験を実施する。次いで、DD 運転期では、中性子の照射環境測定を行い、その後 DT 運転期に、DT 核融合環境下での除熱・熱の取り出し、トリチウムの生産と回収に関するデータ取得と設計手法の検証を実施する計画である。また、ITER 運転後半の DT 運転期では、長期間のモジュール健全性などについて、実証的な評価データを取得するとともに、先進的なブランケットの TBM 試験を行う、という計画である [1]。

ITER における TBM の設置概念を、図 1 に示す。2つの独立した TBM を、共通フレームに装着し、共通フレームごと ITER の水平ポート (テストポート) に装着して試験をする。冷却材の種類や温度、圧力などの運転条件は、それぞれの TBM の開発目標である原型炉の冷却条件を採用し、その固有の冷却条件で TBM 試験をするために、個々の

TBM で独立に冷却システムを有する。また、生成トリチウムの測定や回収、トリチウム管理も重要な試験項目であり、トリチウム回収システムも各 TBM で個別に備える。テストブランケットモジュール用の冷却水、トリチウム回収パージガス、中性子フラックスセンサー、熱電対などの計測ケーブル類をテストポートの閉止プレートや生体遮蔽プラグを貫通して、ITER のクライオスタットの外に導き、TBM 用の冷却装置、トリチウム計測回収装置、測定装置などを用いて、運転管理しつつ試験データを取得する計画である。冷却システムは ITER のトカマク冷却系 (TCWS) の

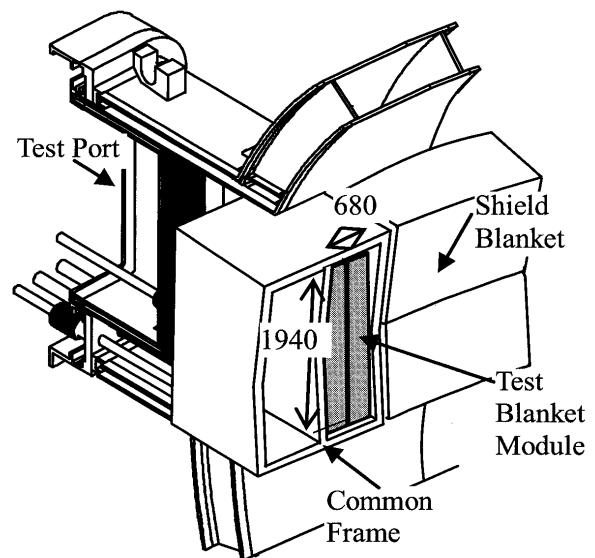


図 1 ITER テストブランケット用のテストポート、共通フレーム、とテストブランケット (水冷却固体増殖 TBM) の構成概念図。

設備室の一角に設置する計画である。また、トリチウム回収システムは、トリチウム建屋にグローブボックス等に格納して設置する計画である[2]。

TBMに要求される熱や中性子照射、電磁力などの負荷は、ITERの運転に伴うものとしてITERの運転シナリオ、試験ポートの位置などの条件から決定されている。TBMの設計条件[1]をDEMOブランケット[3]の設計条件とともに表1に示す。TBMはITERの設計条件のもとで以下の要件を満足する必要がある。

- ・構造体として試験期間中、健全性を有すること。
- ・ITERのシステムと整合すること。
- ・ITERの安全性に影響を与えないこと。
- ・原型炉ブランケットに対して、設計手法と成立性の検証データを取得すること。

TBMは、原型炉ブランケットの設計手法の検証が出来るように考慮をし、同時に、ITERの運転条件で健全性を維持できるように設計することが重要である。

熱流動の観点からは、冷却材の出入り口温度と流動条件を、原型炉ブランケットと同じ条件となるように設計し、テストブランケットの除熱性能と冷却システムの機能試験を行うことを計画している。また、TBMの構造の温度を、原型炉ブランケットの温度と同様に保つことで、TBMの構造物としての熱機械的な挙動の試験も行うことを計画している。従って、TBMと原型炉での熱的な条件の違いを設計で考慮する必要がある。TBMの受ける熱負荷に着目すると、表1からわかるように、TBMでは、原型炉ブランケットに比べて、表面熱負荷が1/2であるのに対して、中性子負荷は、約1/7であり、中性子の照射による体積発熱率も約1/7である。TBMの設計と熱流動特性評価ではこのことを考慮する必要がある。

3.2.2 提案されているTBMと冷却システムの概要

TBM試験には、中国、EU、インド、日本、韓国、ロシア、アメリカが参加する意向を示しており、それぞれの国の核融合原型炉開発計画に基づくTBMをITER運転の初期10年間での試験に提案している。冷却材、増殖材、構造

表1 ITER TBMの設計条件と原型炉ブランケットの設計条件 [1, 3].

Item	ITER[1]	DEMO[3]
Surface Heat Flux (MW/m ²)	0.3 (max. 0.5)	0.5 (max. 1)
Neutron Wall Loading (MW/m ²)	0.56 (max. 0.78)	3.5 (max. 5)
Typical Pulse Length (sec)	400	Continuous operation
Duty cycle	< 0.3 (400 s Burn, 1200 s Dwell)	
Life Burn Number	30,000 shots	
Fluence (MWa/m ²)	0.5	>7.5
Thermal Shock by Disruption*	for 5 cm recessed position: 0.5 MJ/m ² during 1-10ms	TBD

*: MARFE < 10 sec

*NWL 1 MW/m² = 4.45 × 10¹³n/cm²/s

材の種類により、(1)水冷却固体増殖 (WCCB) TBM[4] (図2参照)、(2)ヘリウム冷却固体増殖 (HCPB) TBM [5-9] (図3参照)、(3)ヘリウム冷却液体リチウム鉛増殖 (HCLL) TBM[10]、(4)ヘリウム冷却液体リチウム鉛増殖二重冷却 (DCLL) TBM[11,12]、(5)ヘリウム冷却液体リチウム増殖バナジウム合金構造材 (Li/V) TBM [13,14]、(6)ヘリウム冷却液体リチウム鉛・固体増殖

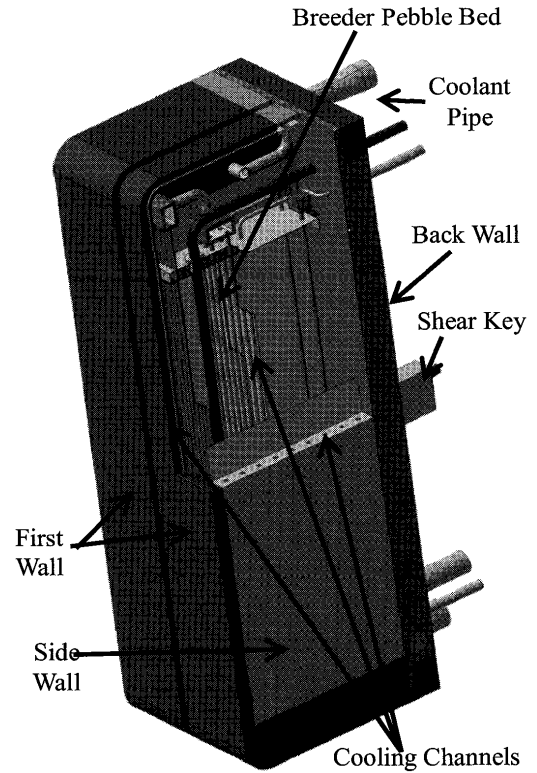


図2 水冷却固体増殖 TBM の構造概念[4].

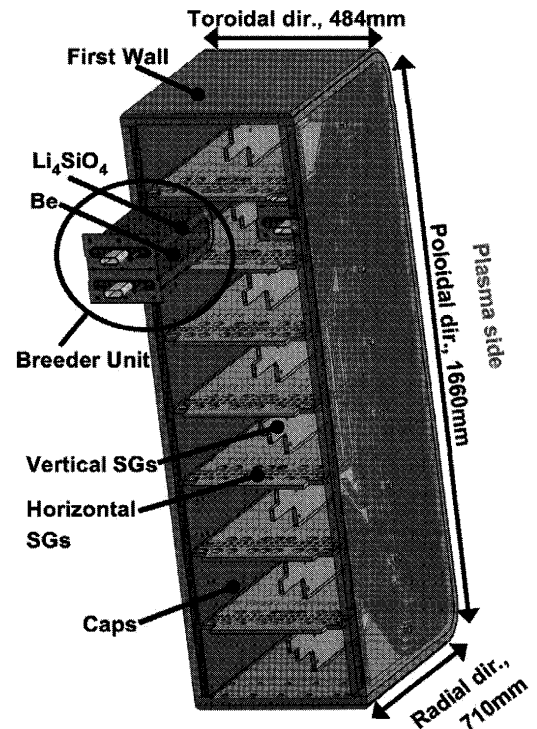


図3 ヘリウム冷却固体増殖 TBM の構造概念[5].

(LLCB) TBM[15], の5つの方式に分類できる。TBMで提案されている冷却方法としては、図4 [5, 11, 16]に示すように、水冷却、ヘリウム冷却、ヘリウム・リチウム鉛二重冷却方式の通常温度モード、高温モード、の4種類に大別できる。

3.2.3 TBMの伝熱流動の問題

TBMにおける伝熱流動の問題は、異なる種類のTBMの間で共通な項目が多い。以下に、課題を検討するために、(1)WCCB, (2)HCPB, (3)HCLL, (4)DCLLを例として取り上げる。

(1) 水冷却固体増殖 TBM

図2に、水冷却固体増殖(WCCB) TBMの構造を示す。また、テストブランケットモジュールの基本仕様を表2に示す[16]。モジュールは、縦1940×横680×厚さ600で、構造材としては低放射化フェライト鋼 F82H製の箱構造の内部に、トリチウム増殖材として Li_2TiO_3 などのリチウムセラミックスの微小球、中性子増倍材としてBeあるいはBeTi合金の微小球を充填する。冷却は、図4(a)に示すように、加圧軽水(入口/出口温度285/325℃, 圧力15 MPa)を、第一壁などの箱構造の壁体の冷却チャンネルと増殖材充填領域の冷却管に流通し冷却を行う[16]。

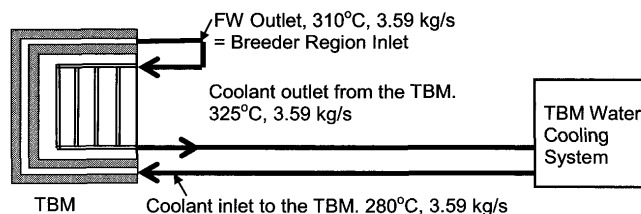
第一壁は表面熱負荷を受け、TBM全体では中性子の照射による体積発熱も生じるために、TBMの箱の壁には冷却チャンネルを設けて適切に除熱する必要がある。第一壁での熱負荷は、表面熱負荷に加えて、表面保護材として表面に接合されているベリリウムタイルの核発熱により、さらに 0.1 MW/m^2 に相当する熱負荷が加わる。また、第一壁構造材の核発熱として 9 MW/m^3 を考慮する必要がある。さらに、第一壁に接する増殖材の核発熱により、後方からは 0.018 MW/m^2 相当の熱負荷を受けることになる[4]。TBMの第一壁における伝熱流動設計の課題は、1辺8 mm程度の狭隘な並列冷却チャンネルにより、この除熱を行うことである。

TBMの箱の内部に充填した増殖増倍材層にも適切に冷却配管を配置して、増殖増倍材微小球充填層での核発熱を、冷却パネルへの熱伝導により除熱し、適切な温度に保つ必要がある。これらの冷却方法の概念は、TBMに共通である。

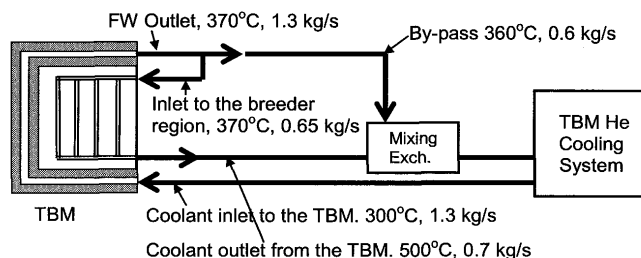
ブランケットを設計するうえでは、冷却を十分に行い強度の高い構造とする必要がある一方で、増殖性能を最大にするためには構造材と冷却水の占める体積を最小にする必要がある。増殖材微小球充填層で生成したトリチウムは、ヘリウムパージガスを流通することによって、TBMの外に運ばれ回収される。

水冷却固体増殖 TBMの熱流動の課題は、

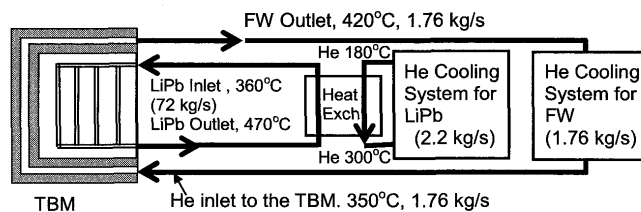
- 箱構造と冷却水ヘッダなどの構造は、ヘッダ寸法の制限は多数の並列な冷却チャンネルでの流量配分扁平の発生を抑制しつつ、構造物を最小の寸法となるように設計すること。
- 増殖材・増倍材微小球充填層の伝熱特性を考慮して、増殖材・増倍材の適正使用温度範囲を維持すること。



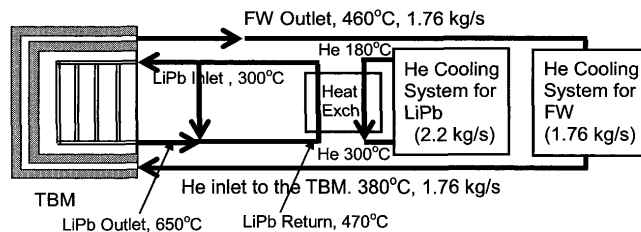
(a) 水冷却固体増殖 TBM (WCCB) の冷却システムの構成 [16].



(b) ヘリウム冷却固体増殖 TBM (HCPB) 及びヘリウム冷却液体リチウム鉛増殖 TBM (HCLL) の冷却システムの構成 [5].



(c) ヘリウム冷却液体リチウム鉛増殖二重冷却 TBM (DCLL) の低温運転モードにおける冷却システムの構成 [11].



(d) ヘリウム冷却液体リチウム鉛増殖二重冷却 TBM (DCLL) の高温運転モードにおける冷却システムの構成 [11].

図4 主要な TBM の冷却システムの構成。

表2 水冷却固体増殖 TBM の主要諸元 [16].

Items	Unit	
Structural Material		F82H
Coolant		Water
Multiplier		Be, or BeTi alloy
Breeder		Li_2TiO_3 , other Li ceramics
Total Heat Deposit	MW	0.904
Total Tritium Production	g/FPD	0.134
Coolant Pressure	MPa	15.5
Coolant Inlet Temperature	℃	280.0
Coolant Outlet Temperature	℃	325.0
Coolant Flow Rate	kg/s	3.59

c) ブランケットの性能予測手法の確立の観点から、増殖材微小球充填層での、生成したトリチウムの放出挙動を、パージガスに流動挙動を考慮して予測する手法を確立すること。

である。これらの課題に対する研究状況は、本小特集の2.2章に述べられているとおりでである。

(2) ヘリウム冷却固体増殖 TBM

図3に、ヘリウム冷却固体増殖 (HCPB) TBM の構造概念の例を示す[5]。水冷固体増殖 TBM と同様に冷却チャンネルを内蔵する低放射化フェライト鋼製の箱構造を採用し、増殖材・増倍材の微小球を内部に充填する。増殖領域は、図5に示すような、1辺3mm程度の矩形の冷却チャンネルを内蔵するリブパネルで区切り、区切られたスペースに、増殖ユニットを装着する構造である。増殖ユニットは、層状のトリチウム増殖材 (Li_4SiO_4) 微小球と中性子増倍材 (Be) 微小球の充填層を、冷却パネルで区切った構造である。冷却材には8MPaのヘリウムを採用している。冷却ループの概念を図4(b)に示す。ヘリウム冷却方式のTBMは第一壁の冷却に用いた冷却材の一部をバイパスして、増殖領域の冷却流量を減ずることで、冷却材の出口温度を試験温度の500℃とする設計である[5]。

ヘリウム冷却固体増殖 TBM における熱流動の課題は、

- 箱構造の壁とリブパネル、増殖ユニットの冷却パネルに内蔵される狭隘な冷却チャンネルとヘッダ構造で、流量配分を低減し、TBM全体の圧損を0.3MPa以下[17]に保ちつつ、必要な除熱性能を確保すること
- ヘリウムの作動温度が第一壁で300℃から370℃と広いため、この温度差を第一壁の熱機械設計に考慮する必要があること

である。増殖・増倍材微小球充填層での伝熱流動に関する

Insert in the TBM Box Structure

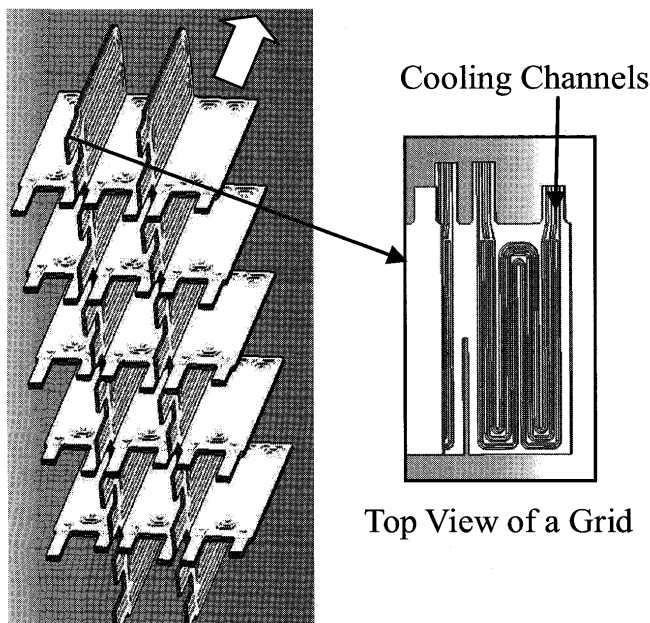


図5 ヘリウム冷却固体増殖 TBM とヘリウム冷却リチウム鉛増殖 TBM のリブパネルの構造概念。

課題は、水冷固体増殖 TBM と共通である。上述の課題 b) については、第一壁の熱機械挙動に影響を与えるため、詳細な解析が行われており、冷却チャンネルの配置を適切に行うことで、ホットスポットの回避が可能と報告されている[5]。

(3) ヘリウム冷却液体リチウム鉛増殖 TBM

ヘリウム冷却液体リチウム鉛増殖 (HCLL) TBM の箱構造は、基本的にはヘリウム冷却固体増殖 TBM と同じであり、リブパネルに区切られた空間にさらに冷却パネルが挿入され、その空間を液体リチウム鉛が増殖材として、小さい流量で流通される構造となっている[10]。第一壁、リブパネル、冷却パネルのすべての冷却はヘリウムによって行われる。一般的に、磁場閉じ込め方式の核融合炉においては、液体増殖ブランケットは、磁場による MHD 効果により圧損が発生し、循環のためのポンプ動力が過大となることが問題であるが[18]、液体リチウム鉛の流動は増殖領域のみで、その流量は小さく、MHD 圧損は大きな影響を及ぼさない範囲である[19]。ただし、MHD 圧損の測定は TBM の試験項目として重要である。

この方式の伝熱流動の課題としては、構造物のヘリウム冷却に関しては、ヘリウム冷却固体増殖 TBM と同じ課題であるが、それに加えて、

- 小さい流速の液体リチウム鉛の冷却を、冷却パネルにより適切に行われること。

である。

(4) ヘリウム冷却液体リチウム鉛増殖二重冷却 TBM

図6にヘリウム冷却液体リチウム鉛増殖二重冷却 (DCLL) TBM 構造概念を示す。この型の TBM は、原型炉ブランケットとして、高温で作動する液体リチウム鉛の自己冷却方式のブランケットを開発目標にしている[11]。第一壁などの構造は低放射化フェライト鋼製で、冷却チャンネル内蔵型であり、ヘリウムにより冷却される。増殖領域

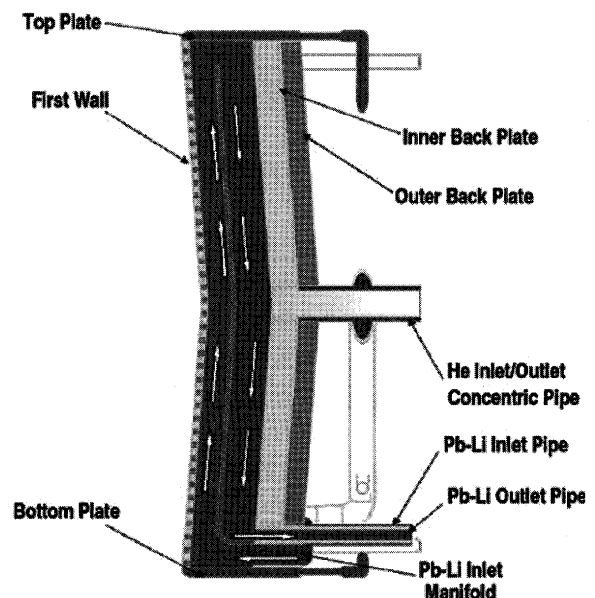


図6 ヘリウム冷却液体リチウム鉛増殖二重冷却 (DCLL) TBM 構造概念[8]。

には、液体リチウム鉛が流通される。その流路を形成するための隔壁には冷却チャンネルが内蔵されヘリウムで冷却される。液体リチウム鉛の流路は、複数の並列流路で、TBMの下方から第一壁に近い流路を上昇した後、折り返して下降し、TBMの外部に出る。液体リチウム鉛の流路は、Flow Channel Insert (FCI) と称する SiC 複合材製のライナーで覆われ、構造材の低放射化フェライト鋼の温度上昇を防ぐための断熱層とするとともに、MHD 圧損の低減のための電気絶縁層とする。図 4 (c), (d) に、冷却方法の概念を示す [11]。通常運転温度モードと高温運転モードを設定している。高温運転モードでは、最高 700°C の液体リチウム鉛を取り出す試験をする計画である。第一壁はヘリウム冷却で、増殖材の液体リチウム鉛を 2 次冷却系のヘリウムで、TBM の外部で冷却し、自己冷却方式の作動試験を実施するものである。

この方式における熱流動の課題は、

- a) 液体リチウム鉛自己冷却ブランケットの課題としては、液体リチウム鉛の流動に伴う MHD 圧損を、3 次元の複雑な形状に対して評価する手法を確立し、MHD 圧損を低減し、液体リチウム鉛の温度分布を制限温度に維持すること。

である。ヘリウムによる箱構造の冷却に関する課題はヘリウム冷却固体増殖 TBM と同じである。現在、3 次元の複雑形状での液体金属の MHD 流動評価手法の開発が、解析コードの開発と実験的な検証によって進められており、また、電気絶縁皮膜の開発も進められている [18]。

3.2.4 まとめ

現在提案されている TBM を概観して、伝熱流動の観点から課題を整理した。

- 1) 第一壁などの TBM の箱構造と増殖部の冷却パネルの伝熱流動については、すべてのモジュールに共通して、狭隘な冷却チャンネルを並列に冷却材を流し、

両々配分と圧損を最小にしつつ適切に冷却をすることが課題である。

- 2) 固体増殖材微小球充填層、あるいは液体リチウム鉛増殖材層では、冷却パネルによる冷却が有効に行われることが課題である。
3) 液体増殖材で自己冷却を行う TBM では、MHD 効果を考慮した流動伝熱の予測手法の確立と圧損低減が課題である。

TBM 試験にあたっては、これらの課題への対策を検討し考慮して、DEMO ブランケットの設計手法の検証を行い、原型炉ブランケットの成立性を予測するデータ取得を確実にすることが最も重要である。

参考文献

- [1] L. Giancarli *et al.*, *Fusion Eng. Des.* **81**, 393 (2006).
[2] V.A. Chuyanov *et al.*, *Fusion Eng. Des.* **83**, 817 (2008).
[3] S. Konishi *et al.*, *Fusion Eng. Des.* **63-64**, 11 (2002).
[4] M. Enoeda *et al.*, *Fusion Eng. Des.* **81**, 415 (2006).
[5] F. Cismondi *et al.*, *Fusion Eng. Des.* (2009), doi:10.1016/j.fusengdes.2008.12.042.
[6] K. M. Feng *et al.*, *Fusion Eng. Des.* **83**, 1149 (2008).
[7] A. Yu. Leshukov *et al.*, *Fusion Eng. Des.* **83**, 1199 (2008).
[8] A. Ying *et al.*, *Fusion Eng. Des.* **81**, 433 (2006).
[9] S. Cho *et al.*, *Fusion Eng. Des.* **83**, 1163 (2008).
[10] J.-F. Salavy *et al.*, *Fusion Eng. Des.* **83**, 1157 (2008).
[11] C.P.C. Wong *et al.*, *Fusion Eng. Des.* **81**, 461 (2006).
[12] Y. Wu *et al.*, *Fusion Eng. Des.* **82**, 1893 (2007).
[13] I. R. Kirillov *et al.*, *Fusion Eng. Des.* **81**, 425 (2006).
[14] M. Kwon *et al.*, *Fusion Eng. Des.* **83**, 883 (2008).
[15] E. Rajendra Kumar *et al.*, *Fusion Eng. Des.* **83**, 1169 (2008).
[16] Y. Nomoto *et al.*, *Fusion Eng. Des.* **81**, 719 (2006).
[17] L. V. Boccaccini *et al.*, *Fusion Eng. Des.* **81**, 407 (2006).
[18] C.P.C. Wong *et al.*, *Fusion Eng. Des.* **83**, 850 (2008).
[19] S. Malang *et al.*, *Fusion Eng. Des.* (2009), doi:10.1016/j.fusengdes.2009.02.049.