



プロジェクトレビュー ITER 計画の機器開発・製作の進展

10. ITER テストブランケット計画

10. Test Blanket Program in ITER

河村 繕範, 廣瀬 貴規, 西 宏, 谷川 尚, 中島 基樹,
権 暁星, 宮田 訓, 竹村 真, 山西 敏彦

KAWAMURA Yoshinori, HIROSE Takanori, NISHI Hiroshi, TANIGAWA Hisashi,

NAKAJIMA Motoki, GWON Hyoseong, MIYATA Satoru, TAKEMURA Makoto and YAMANISHI Toshihiko

* 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

(原稿受付: 2016年1月13日)

テストブランケットモジュールは、参加極が各々の計画に基づき ITER の核融合環境を利用して実施する、原型炉に向けたトリチウム増殖ブランケットの試験に用いる機器であり、ITER の調達機器ではない。日本は固体増殖水冷テストブランケットシステムの実施極として、2014年11月に ITER 機構と取決めを結び、本格的にテストブランケット計画の実施に向けた活動を開始した。2015年2月の概念設計レビューで指摘された解決が必須な課題3件は、解決の見通しが得られる所まで来た。今後、概念設計の承認を得て詳細設計へ進むが、原型炉とは異なる ITER 環境での試験において、どのような結果が得られれば原型炉への見通しが得られるのかを考慮し、そのための機能、性能への要求を満たすように設計を詳細化する。さらに実機製作に向けたフランス規制対応を進める。

Keywords:

ITER, Test Blanket Module, DEMO, tritium, ceramic breeder, neutron multiplier, pressurized water

10.1 はじめに

増殖ブランケットは、真空容器内壁にブロックあるいはタイルのように取り付ける複数のモジュールで構成され、中性子遮蔽、エネルギーの取り出し、燃料トリチウムの製造の役割を担い、発電を行う核融合炉では重要な機器である。図1に示すようにモジュールは箱構造をしており、中に中性子増倍材並びにトリチウム増殖材が充填され、核融合中性子との核反応で生成するトリチウムは不活性ガスを

通気するなどして取り出し、精製して燃料として用いる。箱を構成する構造部材には冷却材の流路が設けられ、核反応に伴う発生熱を冷却材の流通によって取り出し発電に用いる。

前章までに紹介されてきた機器は、ITER (国際熱核融合実験炉) の構成機器で、日本が ITER 機構 (IO) に物納し、ITER 運転時の所有権は ITER 機構にある。これに対してテストブランケットモジュール (TBM) は、ITER を利用して「発電のための高品質な熱の取り出し」、「燃料トリチウムの自己補給」を実証する計画 (TBM 計画) のための試験機器であって物納品ではなく、所有権は ITER 参加極 (ITER Member: IM) にある。各 IM は各々の原型炉設計に基づくブランケットモジュールを ITER に設置 (EU 2 機, 日中韓印各 1 機, 米露 0) して試験を行う。ITER の達成目標の一部は TBM 計画を通してのみ実証できるものであり、国内でも TBM 計画が原型炉の工学設計移行, 建設判断の指標となるなど、重要な位置づけとなっている。

本章では、日本の TBM 計画の経緯と現状について紹介する。

10.2 TBM 計画の経緯と詳細

日本をはじめ核融合先進国は独自のブランケットを開発している。その中で、ITER 機構発足前の1994年12月にテストブランケット作業部会 (TBWG) が設置され、TBM

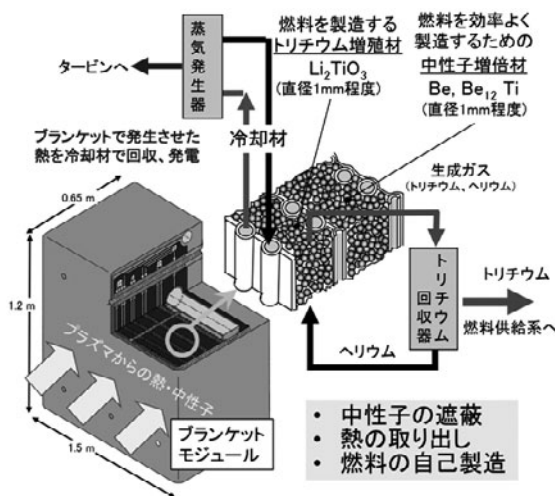


図1 ブランケット概略図。

* 現在の所属: 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構

corresponding author's e-mail: kawamura.yoshinori@qst.go.jp

計画の技術的な調整を開始した。国内では2000年8月の核融合会議[1]、2005年10月の原子力委員会核融合専門部会[2]等で、ITERを用いたTBM試験が我が国の方針として明示された。2006年にはアドホックグループ(ADHG/TBM)が設置され法的枠組、コスト分担の議論を開始した。常設委員会の設置も提案されて、2008年11月のITER理事会でTBM計画委員会(TBM-PC)の設置が承認され、TBM計画はITER協定に基づく活動として承認された。

TBM計画はTBMリード(TL)極、ポートマスター(PM)極、TBMパートナー(TP)極によって実施される。TBMはITER水平ポートのうちの3つに2台ずつ計6台が設置される。TL極は、TBM開発、製作、試験、廃棄に責任を持つ。PM極は、ポートを共有する別のTL極のTBMとの技術的調整を行う。TP極はTL極と取決めを締結して、そのTL極の計画に協力・参加する。我が国は、核融合エネルギーフォーラムと核融合ネットワークが合同で組織したTBM作業会で協議し、2009年3月のTBM-PCにて、固体増殖水冷却TBMのTL極となること、当該ポートのPM極になること、固体増殖水冷却以外の概念についてはTP極として参加することを表明した。TBM-PCで合意された実施体制を表1に示す。

TL極は、TBM計画の実施にあたり、開発から廃棄までITER機構との間で取決めを締結する。これはITERの調達取決め(PA)に相当するが、権利義務関係が異なることからTBM取決め(TBMA)と称する。TBMAの特に重要な項目は以下の三点である。

- 知的財産について

ITERのサイトで得られた知見は共有。それ以外は所有権を持つTL極の財産とする。サイト外での照射後試験による知見は共有を推奨するが、拒否は可能。

- 賠償責任について

ITER機構に引渡した時点で、TL極は所有物に対する責任(例えば修理や交換)のみを負う。それ以外の全ての責任をITER機構が負う。核的災害に対する責任はITER機構が負うことを確認した。

- 廃棄物について

TL極はTBMの運転及び運転後に発生する廃棄物の処理に責任を持ち、それに伴う費用を負担する。フランスでの処分を想定し、ITERフランス(Agence ITER France, ITERのホスト機関)、ITER機構との三者間の取決めについて協議する。

表1 TBM試験計画の実施体制。

ポート	PM極	TL極と概念	
		EU	EU
16	EU	EU 固体増殖 He冷却(HCPB)	EU 液体(LiPb)増殖 He冷却(HCLL)
18	日本	日本 固体増殖 水冷却(WCCB)	韓国 固体増殖 He冷却(HCCR)
2	中国	中国 固体増殖 He冷却(HCCB)	インド LiPb固体増殖 He冷却(LLCB)

日本は、国内機関(JADA)である日本原子力研究開発機構がTBM計画に基づく業務を実施することとし、2014年11月にJADAがITER機構との間でTBMAに署名し、日本のTBM開発は、ITERのスケジュールと整合するように活動する段階に入った。(2015年3月のインドの署名をもってTL極全てがTBMAを締結しており、米国とロシアはTL極ではなくTBMAを用意していない。)TBMはITERのプラズマ試験計画に合わせて複数機を持ち込んで試験する予定であるが、現在締結しているTBMAは最初の運転段階であるH-Heフェーズに試験する1号機及び補機の設計、製作、輸送までを規定しており、それ以降については最終設計レビュー後に改訂して対応する。

先述のように全てのTL極はプラズマ試験計画に合わせて最大4機のTBMを準備する。H-He期の電磁力モジュール(EM-TBM)、DD期の熱核モジュール(TN-TBM)、DT短パルス期の中性子/トリチウム/熱機械モジュール(NT/TM-TBM)、DT長パルス期の統合モジュール(INT-TBM)である。DD期が短いことから、日本はTN-TBMとNT/TM-TBMを合理化して1機とした3機案を提案している。TBMの交換時期は定められており、交換時は韓国のTBMと共に、フレームに取り付けたポートプラグごと取り扱うため、不具合が生じたTBMを自由に取出す、あるいは取出したTBMを再利用することはできない。TBMの数と交換時期を一致させる必要がある点は日韓双方理解しており、詳細設計開始と共に本格的な計画の調整を開始する。

2015年5月のTBM-PCでは、安全にかかる部分以外の設計レビューは各TL極が事前に国内で行うという提案が行われ、国内でのより確実な設計が求められている。

10.3 TBM研究開発の展開と技術的課題

TBM1号機のITERへの据付けは、初プラズマ後に炉内機器を設置する組立第2期(Assembly Phase II)に設定されており、据付前にITER機構で受入試験を行い、韓国のTBMと共に共通フレームに組み込まれ、リークテスト等を行った上で据え付けることになる。1号機は、概念設計、詳細設計、最終設計を経て製作発注し、製作設計、製作を経て国内受入試験を行った後に、ITER機構へ輸送する。

日本がITER機構へ持ち込む機器は、TBMと遮蔽体から成るTBMセット、水冷却システム(WCS)、トリチウム回収システム(TES)等の補機システム並びに補機ユニット(AEU)で、テストブランケットシステム(TBS)と総称する。図2にTBS構成機器の配置と外観を示す。TBMは低放射化フェライト鋼F82Hで作られるが、遮蔽体はステンレス製である。表面熱負荷並びに中性子壁負荷はそれぞれ0.3 MW/m²と0.78 MW/m²である。機能材は、トリチウム増殖材としてチタン酸リチウム(Li₂TiO₃)微小球(直径1mm)、中性子増倍材として金属ベリリウム(Be)微小球(直径1mm)を2号機から充填する。よって2号機以降はTBM内にトリチウムが生成するので、ヘリウムガスを通気して取り出す。ヘリウムガス循環システムであるTESの系統圧は1気圧を超えないよう制御し、増殖材からのト

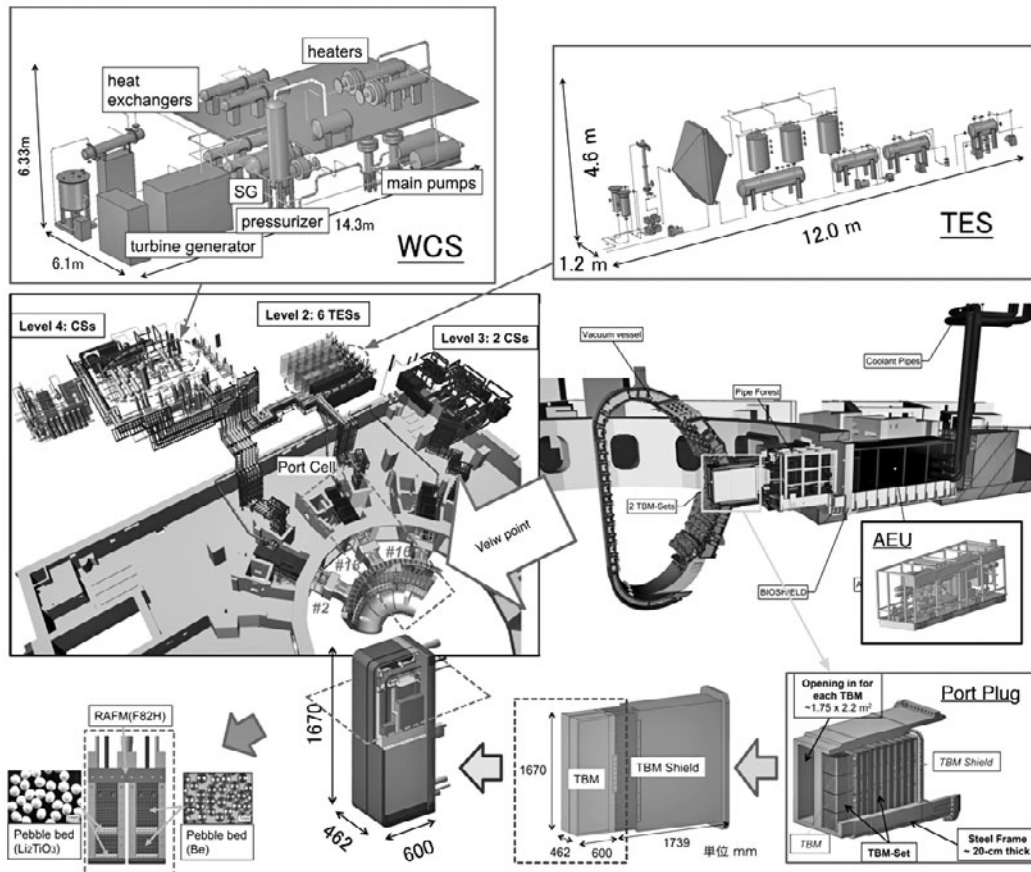


図2 TBS 構成機器の配置並びに補機系の外観図。

リチウムの放出を促すために水素をヘリウムに添加し、濃度を0.1%程度に制御する。TESは、室温並びに液体窒素温度の合成ゼオライト充填塔、及びパラジウム拡散器で構成され、グローブボックスに収納される。トリチウムを含む水素同位体をヘリウムから吸着除去し、除去したトリチウムを計量システム (TAS) で計量後、トリチウムプラントに送る。TBMの除熱はWCSで行う。冷却水運転圧力15.5 MPa、温度はTBM入口並びに出口で各々280℃と325℃で、加圧水型原子炉に類似する。WCSは溶存酸素濃度の調整や放射化腐食生成物の除去機能も有する。冷却水は定期的に交換し、冷却水中のトリチウムはITERのトリチウムプラントの一部である水処理システムで処理する。TBMから取り出した熱はITERの2次冷却水系であるCCWS-1に放出するが、DT長パルス期間には発電実証を計画している(水冷却式を選択した日本のみが実証可能)。TBSの主な仕様を表2に示す。

2015年2月に韓国と共にITER機構が開催する概念設計レビュー(CDR)を受審した。このレビューでは主に、TBSの設計がITERの安全要求を満たすか否か、ITER本体との取合いを考慮あるいは認識しているか否かを審査された。このレビューで3件の解決すべき重要課題が指摘された。これまでにすべての課題について解決策を提示しており、承認されれば概念設計活動が完了する予定である。水冷却式であるために、ITERの運転とともに冷却水が放射化してN-16, 17同位体が生成し、これらが放射する放射線の遮蔽が問題となる。WCS本体を設置するLevel 4

表2 WCCB-TBSの主な仕様。

Structural Material	F82H
Dimensions (TBM)	H 1.67 m × W 0.462 m × T 0.6 m
Surface Heat Flux	0.3 MW/m ²
Neutron Wall Load	0.78 MW/m ²
Breeder	Li ₂ TiO ₃ 37 kg
Multiplier	Be 200 kg
Coolant	Water 15.5 MPa, 280 - 325 °C
Flow Rate	3.59 kg/s

の実効線量、計測機器の一部が配置されるポートセルにおけるシリコン(電子機器の集積回路を想定)の吸収線量を評価し、必要とされる放射線量の低減の程度を明らかにした。緩和策を具体的に反映するのは詳細設計からになる。

図2のようにTBSは小規模ながらプラントと言って良い。そのためITER本体との取合いは多い。概念設計では認識だけで済まされた取合い部分の設計も、詳細設計ではより具体化・詳細化する必要がある。また、ITER並びにTBM計画の目標達成と、原型炉につながる技術の実証を主張するには、ITERとTBMという制限された環境で何をどう実験・評価すべきなのか精査し、反映させる必要がある。

実機製作に向けて動き始めたTBM開発は、設計活動に加えて規制対応を進めるべき段階にある。各TL極が独自の低放射化フェライト鋼の開発を掲げるなかで、压力容器の構造基準への登録に着手しているのはEUのみである。日本のF82H鋼については、ASME压力容器設計規格に登

録済みのGrade91鋼との比較により特性を明らかにすることで、合理的に材料認証の特例を受けることができると考えている。また、TBMの冷却材は圧力が高くトリチウムを含むため、フランス原子力圧力容器規制の要求が課せられる可能性が高い。規制により設計等に課せられる要求事項を満たしつつ、試験目標を達成するのは容易でないと予想され、材料の規格化と合わせて認証機関を巻き込んだ圧力容器規制をクリアするTBMの設計作業が必要である。また、これら活動と並行して、実規模モックアップなどを製作する。これは製作性検証に加えて、安全性確証試験に供用するため必須であるが、実規模モックアップの試験環境は国内に存在せず、その整備が喫緊の課題である。

10.4 まとめ

TBM計画はこれから詳細設計活動に移行する。原型炉ブランケット設計に見通しを得るために、ITERの限られた環境でどのようなデータを取得すべきか、現在の技術基盤の合理的な外挿の中でTBMが満足すべき具体的性能を定量的に定義する段階にある。

参考文献

- [1] 核融合会議計画推進小委員会, 核融合会議第三期科学技術基本計画「核融合炉ブランケットの研究開発の進め方」2000(平成12)年8月.
- [2] 原子力委員会核融合専門部会「今後の核融合研究開発の推進方策について」2005(平成17)年10月.