

ITER-TBM 及び炉工学全般の開発状況と原型炉での要求

原子力機構 那珂 榎枝幹男

JAEA Naka Enoeda Mikio

核融合炉におけるブランケットは、燃料の生産、発電のためのエネルギー取り出し、中性子の遮蔽、という3つの機能を具備する機器である。ブランケットに求められる性能について整理し、ブランケットの設計例と、ITERで試験をするためのテストブランケットモジュール (TBM)、及びブランケットに関連する炉工学全般の開発状況を、概観する。

キーワード: ブランケット、燃料増殖、発電、遮蔽

1. はじめに

核融合炉におけるブランケットは、真空容器の内側、プラズマと対向する領域に設置され、燃料の生産、発電のためのエネルギー取り出し、中性子の遮蔽、という3つの重要な役割を持つ中核機器である。そのため、その性能は、原型炉の成立性や性能を検討する上で非常に重要な要素である。ITERでは、中性子の遮蔽と熱の除去のみを行う遮蔽ブランケットを主として使用し、ITERのテストポートを用いて、原型炉に向けて、燃料の生産とエネルギーの取り出しの機能も有するブランケットの試験を行う計画である。ITERのテストブランケットモジュール (TBM)試験を行うために、日本は固体増殖・水冷却方式のブランケットを開発している。また、原型炉のための重要な炉工学技術の開発が進められている。

2. ブランケットの設置環境と負荷

ブランケットは図1に示すように真空容器の内側に設置される。核融合プラズマからは、主に輻射による熱負荷と、D-T反応によって生成した14 MeVの中性子がブランケットに与えられる。表面熱負荷は第一壁と呼ばれるプラズマ対向面で受け、中性子は奥行き方向に減衰させつつ核(体積)発熱に変換する。これらの熱負荷により、ブランケットには熱応力が生じる。もう一つの負荷は、プラズマディスラプションによって生じる電磁力である。プラズマ電流の消滅に伴い、ブランケット内に誘起された電流とコイル磁場とが作用して大きな力が発生する。冷却材として高圧の水またはガスを利用する場合には、冷却材の内圧にも耐える構造でなければならない。



図1. 真空容器とブランケット

3. ブランケットの機能

先に述べた3つの機能のうち、燃料の生産は最も重要であり、トリチウム増殖比(Tritium Breeding Ratio: TBR)という指標で評価する。TBRは、プラズマの核融合反応で消費したトリチウムとブランケットで生産したトリチウムとの比であり、代表的にはTBR>1.05を目標値としている。発電に関しては、冷却材の出口温度を高くすることで効率を上げることができるが、構造材料、増殖および増倍材料の使用温度、共存性などの面から制限される。遮蔽については、単純にはブランケットの厚さを大きくすることで必要な遮蔽能を得ることができるが、スペースの制限があるために、炉設計と整合した解を得る必要がある。

ブランケット設計の難しさは、これらの性能を一つの機器の中で同時に成立させることにある。図2に各性能の関係を示すが、例えば、高い熱負荷に耐えるために冷却材の量を増やせば、増殖および増倍材料、構造材料の割合が減少し、結果としてTBRや構造強度が減ってしまう。燃料の確保は第一優先であるので、ブランケットの設計は次のような方針で進めている。想定する開発時期から使用できる材料を決定し、TBRを確保できる構造とする。この際には、材料の使用温度、共存性などの制限事項を考慮する必要がある。この設計に対して除熱や構造強度の観点から最適化を行い、TBRが確保できる範囲で許容できる最大の熱負荷、中性子負荷、ディスラプション条件、冷却材の圧力条件などを評価する。これらの条件は、プラズマの運転シナリオ、炉設計と関係するため、プラント全体の設計および要求性能と一致することを確認しつつ、設計を進めることが必要となる。

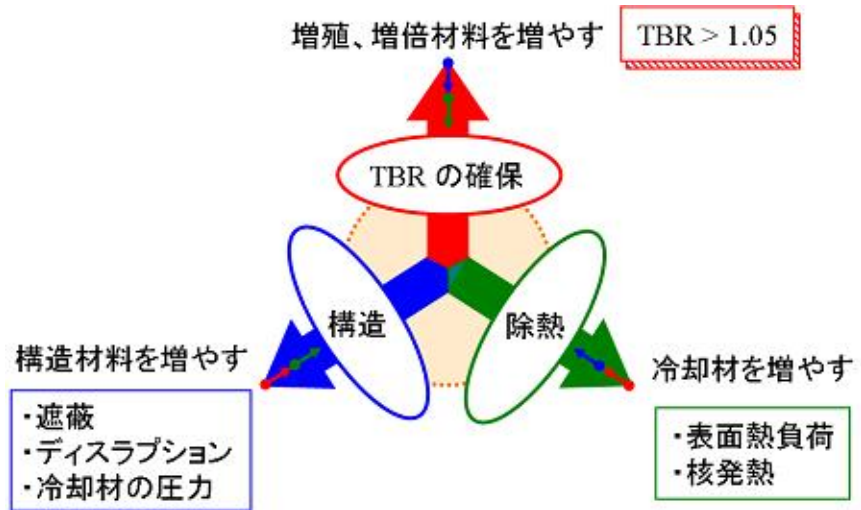


図2. ブランケットに求められる性能の関係

4. 設計の一例 – 固体増殖材料・水冷却方式 –

ブランケットには複数の概念があるが、燃料生産についてリチウムと中性子との反応を用いる点は共通である。リチウムだけではTBRが確保できない場合が多いため、ベリリウムや鉛といった中性子増倍材料を同時に用いる。リチウムを含む増殖材料と増倍材料には複数の候補があり、これらの材料の使用温度や共存性などの違いにより、構造材料や設計が異なる複数の概念が検討されている [1]。

ここでは、原子力機構が開発を進めているブランケットを紹介する [2,3]。その位置づけは、現時点において実用化規模での使用が想定可能な材料(F82H, Li₂TiO₃, Be)で設計し、ITERでのD-Tプラズマ実験後、なるべく早く原型炉の設計、建設に取り掛かるという方針に基づいている。図3に示すように、プラズマ側から順に増殖材料と増倍材料の層を並べ、

効率よくトリチウムを生産できるように設計している。増殖および増倍材料がプラズマに対向している部分の局所的なTBRは1.4程度であり、したがって増殖材料を充填した領域の割合がプラズマ対向面の75%であれば、 $TBR > 1.05$ の目標を達成できる。炉内にはダイバータや計測用のポートが設置される領域が必要であり、また、ブランケットモジュールそのものにも箱構造の筐体や補強リブなどの充填材料以外の領域があるために、TBRを確保するのは容易なことではない。モジュール間のギャップや交換のためのアクセス孔も必要であり、これらの条件は遠隔保守性と整合する必要がある。設計の裕度を上げるため、より特性のよい材料の開発を進めるとともに、ディスラプションや事故時の挙動評価などを進めている。

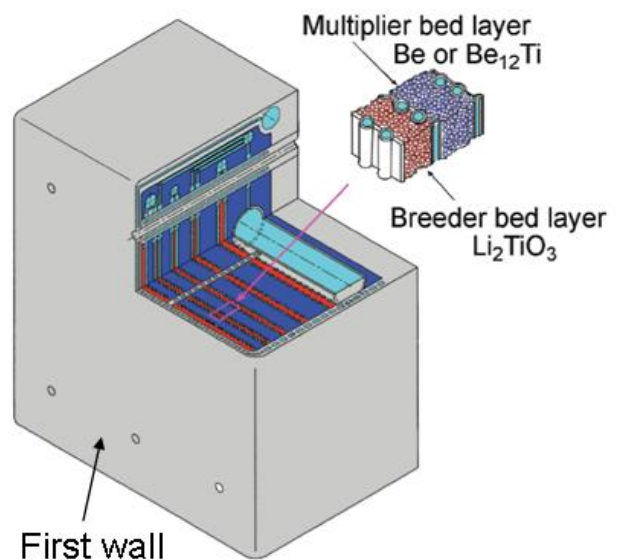


図3. 固体増殖・水冷却方式のブランケット

このような構造概念に基づいたTBMをITERのテストポートに設置し、発電に利用できる高温・高圧水（300°C、15 MPa）の取り出しや、トリチウムの生産などの機能を実証することを計画している。また、ITERと原型炉では環境条件が異なるため、TBM試験を補完するための工学試験にも取り組んでいる。講演では、これらの試験計画とこれまでに得られた実績についても説明する。

5. まとめ

- ・燃料生産、発電、遮蔽の機能をもつブランケットは、原型炉において初めて本格的に設置、運用される機器であり、その性能は原型炉の性能を左右する。
- ・ブランケットの設計条件としては、材料の選択、表面熱負荷、中性子負荷、ディスラプションによる電磁力、冷却材の内圧などがあり、プラズマ条件や炉設計と密接に関係している。
- ・ブランケットの設計では、まず想定する材料による制限を考慮しつつTBRを確保し、次にTBRを確保できる範囲内で、除熱性能や構造強度を上げるための最適化を行う。
- ・原子力機構では、早期実用化を目指す選択の一つとして、固体増殖・水冷却方式のブランケットについて開発を進めており、ITERでのTBM試験計画にも取り組んでいる。

参考文献

- [1] 関昌弘編, 「核融合炉工学概論」 日刊工業新聞社 (2001)
- [2] M. Enoeda et al., Nucl. Fusion 43 (2003) 1837-1844.
- [3] K. Tobita et al., Nucl. Fusion 49 (2009) 075029 (10pp).