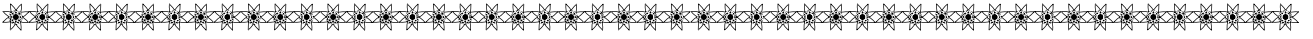


# 連載講座 よくわかる核融合炉のしくみ

## 第6回 エネルギー変換を行い、燃料を生産するブランケット

京都大学 小西 哲之, 日本原子力研究所 榎枝 幹男



核融合プラントは外からみれば、リチウムと重水素が入り、電気と熱が出る、というブラックボックスで、プラズマは見えません。エネルギーと物質の出し入れの特性は核融合の社会への適合性を左右する特徴であり、その役割を担う、核融合反応と一般社会との接点になる装置が、ブランケットです。熱、中性子、放射線、材料の問題として原子力工学で培われてきた知識が最もよく利用される部分でもあります。

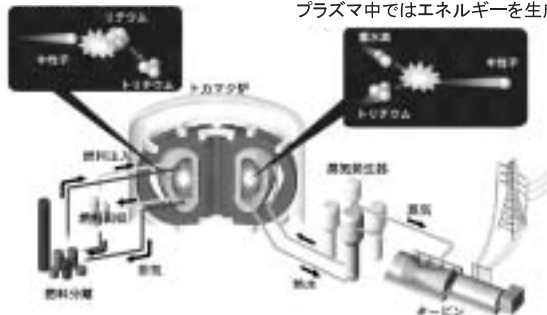
### ・ブランケットはどのような機能を持っていますか？

核融合発電の仕組みを第1図に示します。ブランケットは、プラズマからの中性子を受け止め、エネルギーを熱媒体に与えるエネルギー変換、トリチウムをつくる燃料生産、中性子遮蔽、の3つの機能を持っています。

核融合のエネルギーは、

- ①エネルギーを変換
- ②トリチウムを生成
- ③中性子を遮蔽

プラズマ中ではエネルギーを生成



第1図 核融合炉とブランケット

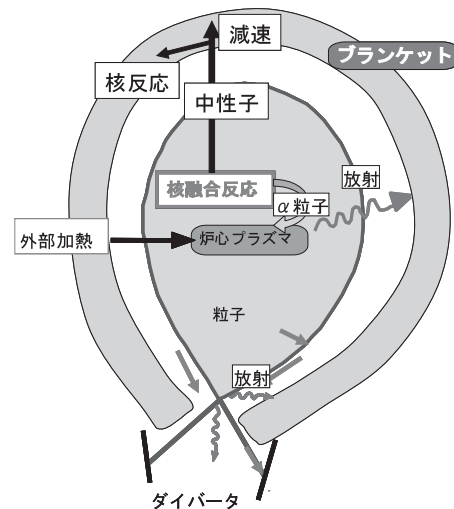
*Intelligible Seminar on Fusion Reactors ( 6 )Blanket that converts energy, and produces fuels: Satoshi KONISHI, Mikio ENOEDA.*  
( 2005年 5月23日 受理 )

$$D + T \rightarrow {}^4\text{He} (3.52 \text{ MeV}) + n (14.06 \text{ MeV})$$

( 第1章(1)式 )

の核反応で発生し、それを工学的に利用可能な形にするのが、の機能です<sup>1)</sup>。

第2図に示すように、核融合炉心のエネルギーの流れには、反応で発生するα線、中性子線からの2つの経路があります。α粒子はプラズマの温度を上げ、反応を開始、維持するために、外部からのエネルギーとともに使われます。定常状態では同量のエネルギーが放射や粒子の形でプラズマから出ていき、周りを囲むブランケット第一壁やダイバータの表面に熱負荷を与えます。一方、発生エネルギーのうち約80%をもつ高速中性子はプラズマと相互作用せず、周りのブランケットの内部まで侵入します。ブランケットは厚さ1m前後の容器で、中にトリチウム増殖材であるリチウム含有物質を充填し熱媒体(冷却材)を流します。中性子はこの中で減速して充填物を加熱し、またトリチウムを生成する ${}^6\text{Li} + n = \text{T} + \alpha$ などの核反応でも発熱が起きます。これら2つの経路の熱を熱媒体が運び出すことで核融



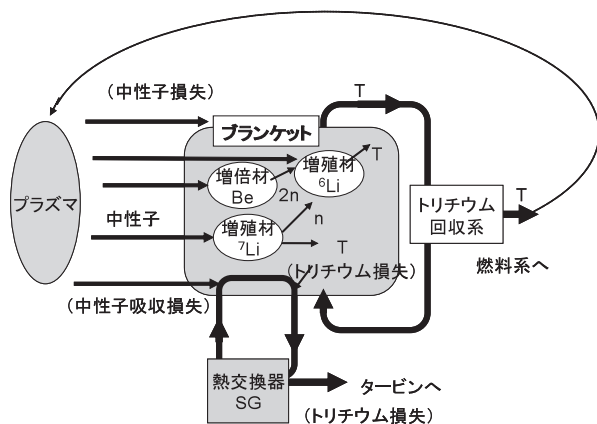
第2図 核融合炉のパワーフロー

合エネルギーが利用可能な形に変換されます。ブランケットは熱を中間熱交換器や蒸気発生器に供給するループが閉じて完成することになります。

エネルギーを発生するプラズマ部分と、それを受け、変換するブランケットが空間的機能的に離れていることが核融合炉ブランケットの工学的な特徴の原因となっています。このため、ここではトカマク型を例にしていますが、ヘリカル型や他のプラズマとじ込め、レーザー等の慣性閉じ込め核融合など、プラズマの部分が違っててもブランケットの基本的な機能は共通です。一方、同じ炉心プラズマに対しても、取り出される温度は、構成材料や熱媒体によって様々です。このため核融合のエネルギー利用系も、軽水炉と類似の蒸気タービン、高温ガス炉で考えられている高効率ガスタービン、高温熱利用など様々な可能性があります。これは核分裂炉で冷却材とともに炉心構造が変わるのとの大きな違いで、軽水炉や液体金属炉、ガス炉など、分裂炉の異なる炉型とその利用法の違いは、核融合ではブランケットの違いになります。

ブランケットの第2の重要な機能は、核融合反応の直接の燃料であるトリチウム<sup>3</sup>Hの製造です。ブランケットでの中性子とトリチウムの流れを第3図に示します。DT反応では1個の中性子発生とともにトリチウム1原子が失われます。トリチウムは天然資源がないので、ブランケットでは

${}^6\text{Li} + n \rightarrow \text{T} + {}^4\text{He} + 4.8 \text{ MeV}$  (第1章(4)式)などの反応で、中性子をリチウムと反応させてトリチウムを1個以上生成し、それをプラズマに供給することで反応を維持します。DT反応中性子1個に対するブランケットでのトリチウムの発生数をTBR(Tritium Breeding Ratio, トリチウム増殖比)



第3図 ブランケットと中性子とトリチウム

といい、TBRが1を超えないと運転を継続できないという、非常に重要なパラメータです。中性子の散逸や材料、熱媒体による吸収、ブランケットの設置できない面がある(被覆率 $< 1$ )ため、この反応のみではTBRが1を超えることはなく、中性子の増加が必要となります。高速中性子による

${}^7\text{Li} + n \rightarrow \text{T} + \text{He} + n - 2.5 \text{ MeV}$  (第1章(5)式)反応や、 $n-2n$ 反応を起こすBeやPbを中性子増倍材として利用して、局所的なTBRをだいたい1.3か1.4にすることで、プラントで総合したTBR $> 1$ が確保できます。

こうしてブランケットで生成したトリチウムを回収し、プラズマに供給するループが機能してはじめて、核融合プラントは成立します。つまりDT核融合炉は本質的に増殖炉であり、高速炉燃料サイクルと比較すれば、トリチウムはPu、 ${}^6\text{Li}$ は ${}^{238}\text{U}$ に相当することになります。消費される燃料資源として外部から供給されるのは重水素とリチウムですが、燃料サイクルは炉に直結してブランケットとプラズマの間で閉じており、外部からは見えません。

100万kW級の発電炉の消費するトリチウムは1日数百gですが、プラズマ中に存在する燃料(DT)は高々数秒分、燃料サイクルに相当するトリチウム循環系でもせいぜい数日分で、ブランケットで製造されたトリチウムはその日のうちに消費されます。このことは年単位の燃料をプラントで持っている核分裂とは大きな違いです。燃料がすべて燃えると仮定したときの潜在的な保有エネルギーが少ない、燃料サイクルがプラントで閉じて、外の社会で燃料や核物質の運搬を必要としない、というのは長所です。

3番目の重要な機能は遮蔽です。上記のような核融合中性子の減速(エネルギー変換)、吸収(燃料製造)に伴い、プラズマからの中性子はブランケットで遮蔽され、その外には出ません。核反応に付随して発生する $\gamma$ 線も遮蔽します。ブランケットの外側には真空容器、さらにその外には超伝導磁石があり、照射損傷から守る必要があります。特に超伝導磁石中の絶縁材は照射に敏感です。また核発熱は磁石の冷却系への大きな熱負荷になるため、これも可能な限り低減します。ブランケットと、その外側にさらに設置する遮蔽の能力が十分高ければ、さらに外側にある機器の放射化を極めて低いレベルに保ち、それが放射性物質として判定されるレベルを下

回れば核融合炉で発生する放射性廃棄物の量を大幅に減らすことも可能です<sup>2)</sup>。

(磁場)核融合炉の設計では、ブランケットはプラズマと真空容器に挟まれて厚さが厳しく制限されます。必要な遮蔽性能を満たすブランケットが厚いと真空容器や超伝導磁石の大きさがそれだけ大きくなり、装置の建設コストに大きく影響します。インボード側といわれるドーナツの中心側では、ブランケットの設計は特に厳しい空間的制約で行います。外側では、プラズマ加熱用のポートなどブランケットの設置できない部分があり、ストリーミング等の遮蔽上の問題があります。

これら三大機能のほかにも、ブランケットは、プラズマからの粒子や放射によるエネルギー負荷をプラズマ側の面 第一壁で受け止めたり、またプラズマに対しては導電性の壁としてプラズマの不安定性の抑制に寄与したり、あるいは磁性体であるフェライト鋼の特色を生かして、磁場の不均一(リップル)を緩和したり、といった役割もあります。受動的には、プラズマのディスラプションの時には、発生する電磁力に耐える機能も必要です。ブランケットは、中性子照射による構造材の照射損傷によりプラント全体に比べると短い寿命となると考えられています。また、トリチウム親物質である<sup>6</sup>Liは消耗されるので、定期的に交換や補充する必要があり、放射性廃棄物 稼働率に大きく影響します。これらも、「機能」とは少し違うかもしれませんが、ブランケットに要求される特徴です。

以上のようにブランケットは、どのようなエネルギーを供給し、どのような廃棄物を出すか、といった特性を大きく左右すると考えられ、将来、核融合炉が社会に受け入れられ、エネルギー供給に貢献するための視点を取り入れた、総合的な性能を考慮しながら開発が進められています。

## ・ブランケットにはどのような種類がありますか？

前述のようにブランケットは、複数の方式が同じトカマク型の核融合炉に対して適用が考えられ、選択しながら開発を進めたり、交換の機会に性能を向上したり、という柔軟性があり、多種類の研究開発が現在同時に進行しています。これは、核分裂炉で炉型ごとに開発戦略を独自に構築する必要があったのと違って、短期間に合理的に技術開発を進めるこ

とができます。一方、ブランケットは、当面最重要課題であったプラズマ性能の向上と関係がなかったため、ほかの構成機器と異なり、今までに一度も試作 試験されていない、という特徴(?)があります。ITERではじめて、複数の形式のテストブランケットモジュール(TBM)が各極によって試験される計画です。本格的な発電能力を持つブランケットはその次の発電実証段階を待つこととなります。

現在考えられているブランケットの使用材料を整理して第1表にまとめて示します。それぞれ、構造材料、トリチウム増殖材、中性子増倍材、熱媒体(冷却材)の組合せにより技術的な難易度や、期待される性能、開発の進展度合いや取組みに特徴があります。

まず「固体ブランケット」と「液体ブランケット」があり、これは増殖材の違いで分かれます。固体は、リチウム化合物(酸化リチウム  $\text{Li}_2\text{O}$ 、チタン酸リチウム  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$ など)を焼結した小球体を充填したペブルベッドが代表的です。生成したトリチウムはヘリウムガスをパージして回収します。液体では、金属Li、LiPb(共融点合金)、熔融塩FLiBeなどが増殖材として考えられ、この液体を流動してブランケット外でトリチウムを回収します。熱媒体を兼ねることができるとブランケット構造を簡略化できる可能性があり、また運転中に常にLi含有量を調整できるという利点があります。

熱媒体により、ガス冷却ブランケット、水冷却ブランケット、などの分け方もできます。ヘリウムガスは化学的に安定で安全性が高い一方、水や液体金属の方が高い発熱密度に適用することができ、装置の小型化が可能です。液体増殖材を、他のヘリウムなどの熱媒体で冷却する概念もあり、欧州による

第1表 ブランケット材料の組合せ

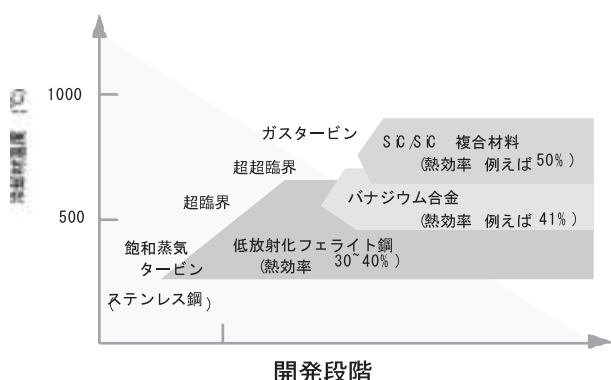
	近未来	先進
増殖材	$\text{Li}_2\text{O}$ 、 $\text{Li}_2\text{TiO}_3$ 、 $\text{Li}_4\text{SiO}_4$ 、 $\text{Li}_2\text{ZrO}_3$	$\text{Li}_2\text{O}$ 、 $\text{Li}_2\text{TiO}_3$ 、 Li、FLiBe、LiPb、LiSn
増倍材	Be、 $\text{Be}_{12}\text{Ti}$ (LiPb)、 (FLiBe)	Be、 $\text{Be}_{12}\text{Ti}$ (LiPb)、 (FLiBe)
熱媒体	圧力水、He	超臨界水、He、LiPb、 Li
構造材	低放射化フェライト 鋼	ODS鋼、 バナジウム合金 SiC・SiC複合材

ITER テストブランケットの概念がこれに当たります。液体増殖材とヘリウムの両方で冷却する dual coolant と呼ばれる概念もあり、材料の進展により段階的な高温化を目指すものです。材料の組合せについては、古くは1984年に Blanket Comparison and Selection Study<sup>3)</sup>があり、いま現在検討されているブランケット 増殖材、増倍材、冷却材(熱媒体)、構造材の組合せ については、このころすでに提案がなされています。

ブランケットは定期的な交換を必要とするので、そのための構造によっても分類されます。ITER では数百個のモジュールに分けて1つずつ交換しますが、将来炉の設計では、ドーナツ型を10個程度のセクターに分け、一括で交換する方法が多くみられます<sup>4)</sup>。交換時間の短縮、工程の簡素化には有効ですが技術開発はこれからです。

第1表のように、近未来/先進ブランケットという分け方もできます。近未来型としては、現在ITERでの試験が予定されている、ヘリウムガス冷却ペブルベッド、水冷却ペブルベッド、ヘリウム冷却LiPb、が候補です。使用温度は300 程度から将来的には500 程度で、軽水炉を上回る高効率期待されます。構造材には低放射化フェライトマルテンサイト鋼を用い、わが国では、次章のように、水冷却固体ブランケットが主案として、日本原子力研究所を中核として開発が進められています。

先進ブランケットは、高温ヘリウムガスや、液体金属Li、LiPb、熔融塩を用いて500 以上の温度帯の高温を得る概念で、より一層の先進性を材料に要求します。材料と得られる温度の関係を第4図に示します。先進材料はより使用温度が高く、超臨界水の火力発電で得られるような高い熱効率が期待できる一方、開発段階は鉄鋼材料より遅れています。900



第4図 ブランケットの温度と対応できる材料

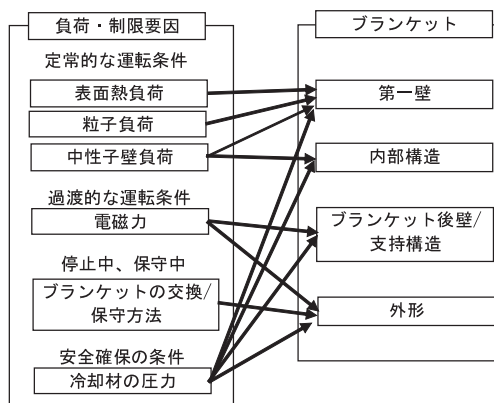
以上の温度帯ではSiC 複合材があり、動力炉設計では最近LiPb との組合せが注目されて、前記 dual coolant 方式による開発が考えられています。ガスタービンによる50%以上の発電効率や、水素製造等の熱利用により、今世紀後半のエネルギー供給により大きな貢献が期待されます<sup>5)</sup>。

ブランケットはこのように、開発段階、目標性能で様々な種類があり、ITER でもTBM は各極独自の研究として、今後の国際競争の場になると考えられています。社会がエネルギー技術に求めるものは、供給力、安全性、信頼性、燃料自給、経済性、環境影響、社会受容性、廃棄物、実現性など様々です。これらを市場や社会の要求にあわせて、必要なタイミングで満足することが、核融合の実用化に際して重要であり、多種類のブランケットで未来の要求に応えることを考えているということが出来ます。

### ・ブランケットはどのように設計しますか？

#### 1. 設計のポイント

ブランケットは、プラズマで発生する中性子を利用して、核融合炉の運転に必要な燃料(トリチウム)の生産とエネルギーの取出しを同時に行うものです。言い換えると、ブランケットは、プラズマに最も近接して設置され、強い熱や中性子の負荷を受け止めて、利用できるものに変換する機器ともいえます。ブランケットの設計をするときに考慮しなければならない重要な点を第5図に整理して示します。表面熱負荷は、第一壁の詳細構造と寸法の決定の主要因となり、中性子壁負荷は、ブランケットの内部構造の決定の主要因となります。また、後方の機器、



第5図 ブランケットの設計の要因の整理



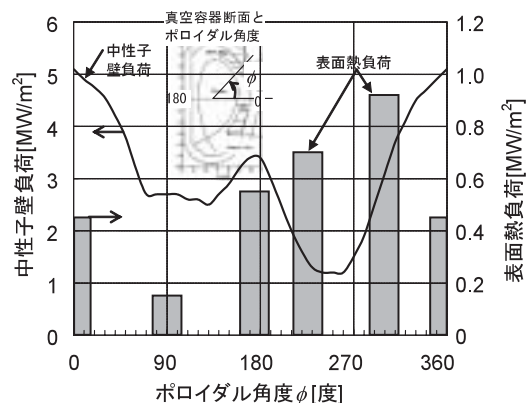
特に超電導磁石への中性子照射が強いと、核発熱により超電導状態消失するクエンチという現象が発生します。これを防ぐための中性子の遮蔽も重要な役目です。粒子負荷により、プラズマに面する第一壁は、スパッタリングをうけて損耗し減肉していきます。その防止のために、第一壁表面には保護材を取り付ける必要があります。ブランケットに作用する主要な負荷のうち、表面熱負荷や中性子壁負荷などは、定常的に作用する運転条件ですが、それら以外に、プラズマが急速に消滅する「ディスラプション」のときには、ブランケットに渦電流やハロー電流が誘起され、その電流とトロイダル磁場との相互作用で強い電磁力が発生します。この電磁力は、ブランケットの外形構造や後壁の支持構造の決定の主要因になります。本連載講座の第2回に述べられていますが、発電するための高性能のプラズマではディスラプションの可能性が出てきます<sup>2)</sup>。ディスラプションが発生すると、ブランケットを鉄鋼材料のような金属で構成している場合は、渦電流やハロー電流が流れ、大きな電磁力が発生します。そのような場合でもブランケットや他の機器が壊れないようにする必要があります。また、ブランケットを設計するときは、ブランケットが受けるこれらの負荷に対して、構造や材料の健全性を保ちつつ機能を発揮するように、使う材料を選び、構造と各部分の寸法を決めていきます。また、ブランケットは、中性子照射を受けますので、材料の照射損傷や、トリチウム生成による増殖材のリチウムの損耗が許容範囲内となるように、ある期間の運転後にブランケットの交換をします。そのため、交換保守機器と整合する構造にする必要もあります。また、エネルギーの効率の取出しのために、高温高圧の冷却材を使用するので、その漏洩などに対して安全性を確保できる設計とする必要もあります。これらの設計の要因は、相反する設計要求となるものがあり、これらをうまく整合を取ることが重要な設計課題です。たとえば、表面熱負荷に耐えることと、高いTBRを得ることと、構造の剛性を高めること、などは相反する設計要求の典型的な例です。

## 2. 設計のコンセプトを決める

ブランケットが受ける負荷はプラズマの設計で決まります。一般的には、高性能のプラズマにすればするほど、ブランケットが受ける負荷は強くなり、

またブランケットの取付けに許されるスペースも狭くなりますので、ブランケットの設計や製作が難しくなります。ですから、ブランケットの具体的な設計の前に、炉システムの設計の初期の段階で、これらの値は、「ブランケット構造としてこの程度は許容できる」、「プラズマとしてこれなら発電プラントの可能性はある」、「他の炉工学機器はこの程度が可能」というように、すべての機器の間でよく方針を検討してバランスよく基本設計条件を決めることが重要です。ブランケットの設計例を、構造材として鉄鋼材料を使用し、増殖材にリチウムセラミックの固体増殖材を使用する場合を例に取って説明します。

典型的な設計条件<sup>3)</sup>は、表面熱負荷  $1 \text{ MW/m}^2$ 、中性子壁負荷  $5 \text{ MW/m}^2$  です。これらの値は、これまでの設計研究の経験から、鉄鋼材料/固体増殖材/水冷却の場合の「だいたいこれらの値が上限」と思われる値です。実際には、第6図に示すように、ブランケットの置かれる場所によって分布があります<sup>6)</sup>。詳細な設計ではこれらの分布を考慮して最適化をする必要がありますが、基本設計の段階では最高値で設計を進めます。もうひとつの設計の重要な荷重となる電磁力は、ディスラプションのシナリオとブランケットの外形構造・真空容器内の配置といった詳細情報をもとに、計算で推定します。しかし、このような詳細情報は、設計情報がなければ得られませんので、設計を進めつつ電磁力解析と応力解析を行い、さらに設計の改良をするという試行錯誤を行って設計を進めます。現時点で詳細設計が進んでいるITERを例に取ると、典型的なブランケットの大きさとして、幅  $1.4 \text{ m} \times$  高さ  $1.1 \text{ m} \times$  厚さ  $0.45 \text{ m}$  の場合、ブランケットの外形構造に発生する渦



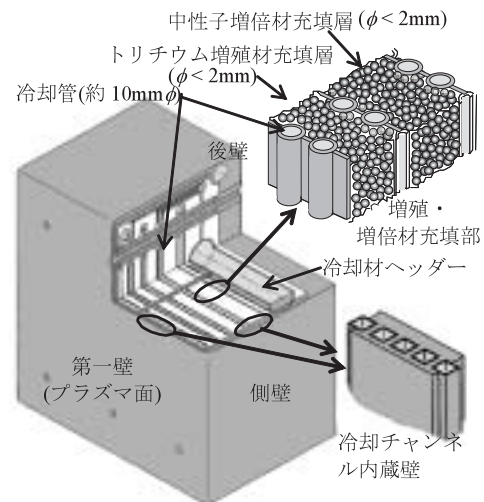
第6図 中性子壁負荷と表面熱負荷分布の例<sup>6)</sup>

電流を小さくするために、外形構造に工夫をしました。最終的には、幅0.35 mの間隔で縦方向に「きれめ(スリット)」を設けることで、渦電流の低減と外形構造の剛性を両立しつつ、電磁力により発生するトルクを支持構造で受け止めることが可能な設計としています<sup>7)</sup>。これをそのまま、発電をするための増殖ブランケットに当てはめると、構造物が多すぎて十分なトリチウム増殖性能が得られなくなったり、ブランケット後壁に取り付ける支持構造物が大きくなりすぎて必要な配管を配置できなくなる、といった不都合が生じますので、核融合発電の実現のためには、ディスラプションを回避したり条件を緩和する技術の開発は、ブランケットの設計にとっても大変重要なことです。また、考慮すべきディスラプションのシナリオの情報も設計条件として重要です。

設計を始めるには、冷却材の種類、温度、圧力を決める必要があります。これらはブランケットの構造設計の基本条件です。鉄鋼材料を構造材に使用する場合、冷却材の種類は、水冷却とガス冷却があります。水冷却の場合、除熱性能が良好で、発電プラントの実績も豊富ですが、ブランケットの内部に冷却水が漏洩した場合、高温での増殖材や増倍材との反応性を考慮しなければなりません。一方、ガス冷却でヘリウムを使用する場合は、反応性はありますが、除熱性能が劣ります。これらを勘案して、どちらか選ぶ必要があります。また、温度と圧力は、構造材の温度を適正に保つことと、より高温で高い発電効率を得ることを考慮して決めます。冷却システムの全体構成は、ダイバータの冷却もしなくてはならないこと、その熱も利用しなければならないことを考慮して、プラント全体として整合が取れるものにすることも重要です。

### 3. 設計を具体化する

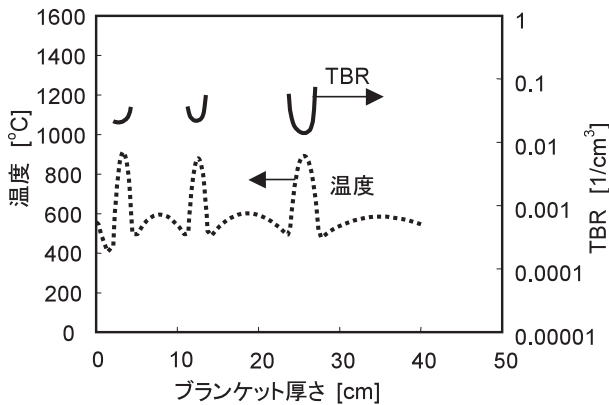
冷却材の条件を決めたら、ブランケットの構造設計を始めることができます。第一歩は、トリチウム増殖材と中性子増倍材をどのような構造で配置するかという、構造概念の「たたき台」を作ることから始まります。高いTBRが得られるか、除熱のための冷却が効率的にできるか、配管を引き回せるか、実際には作れないような矛盾する構造になってないか、などを考え合わせながら、構造案を作ります。第7図に、構造概念の例を示します<sup>8)</sup>。この構造案



第7図 ブランケットの構造例<sup>8)</sup>

は、プラズマに面して平行に、増殖材、増倍材と交互に配置し、各層の間を冷却パネルで仕切る案です。この場合、配置が単純で、増殖材層、増倍材層が中性子の入射方向に垂直な方向に区分けされているために、リチウム燃焼度や照射損傷、ヘリウム生成量などのダメージの多少に応じた効率的な増殖材のリサイクルが可能というメリットがあります。

構造案が決まったら、次に設計条件の中性子壁負荷に応じた核計算をし、TBRと中性子照射による発熱率(核発熱率)の値を計算します。そして、その核発熱率をもとに温度分布の計算をして、構造の各部の温度が、それぞれの材料の許容範囲内であるか確かめます。また、トリチウムの増殖比(TBR)が十分な値かどうかを確かめます。満足していないなら、構造案を改良して満足できる結果が得られるまで繰り返します。詳細な核計算は、労力、時間や費用が掛かりますので、初期検討の段階では、構造を1次元に均質化したモデルで概略の計算が有効です。第8図にその結果の例を示します<sup>8)</sup>。計算の対象としているモデルのTBRは、計算で得られたTBRの分布を積分することで計算でき、この値が十分な値かどうかを判定します。第7図のような構造の場合は、この1次元の計算でもかなりよい推定値が得られます。1次元の均質化モデルが実際の構造案とかけ離れている場合も、第1近似値として有効です。その場合は、モジュール規模で3次元の核計算を行う必要があります。簡略化した構造のモジュール1個分程度なら、パソコンでも十分可能です。構造寸法や真空容器内の配置や他の機器の構造が決まったら、真空容器1セクター全体を含むモデ



第8図 ブランケットの各構成部分での核発熱率，トリチウム増殖比と温度分布の計算例<sup>8)</sup>

ルで3次元の核計算をして，プラントとしてのトリチウム増殖性能が十分であることを確認します。

第一壁の構造設計では，プラズマによる前方からの表面熱負荷，構造材の核発熱，そして，増殖材の核発熱による後方からの熱負荷を考慮します。また，第一壁の厚さは，ブランケットモジュールが保持すべき圧力とモジュールの外形寸法と使用する構造材の機械強度から決めます。また，第一壁のプラズマ側の肉厚は，表面熱負荷と構造材の熱伝導度，冷却材温度と熱伝達率から最高温度を計算できますので，簡単な計算でも，材料の許容温度範囲内かどうかの推定はできます。

ここまで，寸法の設定ができたら，より詳細な設計や解析を始めます。ブランケットが本当に作れるか，作るためにどんな研究や技術開発をしなければならないかを洗い出ししながら，構造設計を進めていきます。また，安全性を確保するためにどんな構造にしなければならないかも考慮して構造を改良していきます。

ブランケットの設計は，研究開発の成果である最新の設計データを反映して，常に更新し改良を加えていくべきもので，設計自体が研究活動でもあります。また，設計を進めることで，研究開発の指針を示すこともできます。設計と研究開発は相互に補完しあうもので，両者を同時に進めることによって開発が前進するものです。

#### 参考文献

- 1) 上田良夫，井上多加志，栗原研一，“連載講座 よくわかる核融合炉のしくみ；第1回核融合炉の概要”，原子力誌，46(12)，845～852(2004)。
- 2) K. Tobita, *et al.*, “Fusion reactor design towards radwaste minimum with advanced shield material”, *J. Plasma Fusion Res.*, 77(10), 1035～1039(2001)。
- 3) *Blanket Comparison and Selection Study Final Report*, ANL/FPP-84-1 (1984)。
- 4) S. Nishio, *et al.*, “Conceptual design of Tokamak High Power Reactor(A-SSTR2)”, *J. Plasma Fusion Res.*, 78(11), 1218～1230(2002)。
- 5) 小西哲之，他，“ブランケット開発の最新動向”，プラズマ・核融合誌，79(7)，650～690(2003)。
- 6) Fusion Reactor System Laboratory, JAERI, *Concept Study of the Steady State Tokamak Reactor(SSTR)*, JAERI-M 91-081,(1991)。
- 7) “特集/ITER工学設計”，プラズマ・核融合誌，78，1月増刊，p.55(2002)。
- 8) M. Enoda, *et al.*, “Design and technology development of solid breeder blanket cooled by supercritical water in Japan”, *Nucl. Fusion*, 43(12), 1837～1844(2003); <http://stacks.iop.org/0029-5515/43/1837>.

#### 著者紹介

小西哲之(こにし・さとし)



1979年東京大学工業化学科，81年原子力工学専攻修士課程修了，日本原子力研究所入所。博士(工学)。トリチウム技術研究室，核融合炉システム研究室長を経て，2003年より京都大学エネルギー理工学研究所教授。専門はトリチウム，核融合炉工学，炉設計，エネルギーシステム。

榎枝幹男(えのえだ・みきお)



1987年九州大学大学院工学研究科博士課程卒業。同年日本原子力研究所入所，那珂研究所所属。主な研究分野は，核融合ブランケット研究開発。核融合ブランケットの設計全般や熱，機械的な挙動に関する研究に従事している。