

ゼロからの研究開発 鉛ビスマス冷却高速炉

原子核工学専攻
高橋 実 研究室

高橋 実 教授 1953年長野県生まれ。東京工業大学大学院理工学研究科原子核工学専攻博士課程修了。2007年より、同原子炉工学研究所准教授、2013年より同教授。



高橋研究室では将来の原子力発電において利用が検討されている鉛ビスマス冷却高速炉について研究を行なっている。本稿では原子力発電の基本的な分類や発電方法を取り上げ、その中でも高橋研究室で行われている、鉛ビスマス冷却高速炉における設計・理論の提唱、炉材料の腐食実験や酸素濃度の制御について深く掘り下げていく。

原子力発電とは

私たちが普段使っている電力はどのように作られているだろうか。現在の日本では、総発電量に占める火力発電の比率が最も高い。それ以外にも、風力発電や太陽光発電、地熱発電などの自然エネルギーによる発電、そして原子力発電がある。

原子力発電と一口に言っても、核融合炉と核分裂炉がある。核融合炉では、重水素と三重水素を核融合させ、その反応時に得られた高速中性子の運動エネルギーを熱として取り出し発電する（図1）。核融合炉における高速中性子とはエネルギーが14メガeV程度の速い中性子のことである。eVとは1Vの電位差がある空間内で電子1つが得るエネルギーのことである。

核融合炉の利用には、処分しにくい高レベル放射性廃棄物が従来の核分裂炉とは違って発生しないなどの利点があると考えられている。しかし、巨大な設備と莫大な予算が必要であり、技術的な

問題もあるため、実用化するにはいたっていない。

核分裂炉には一般に、軽水炉と高速増殖炉の2種類がある。軽水炉は主に燃料棒、減速材、制御棒、冷却材、これらを収めた原子炉圧力容器とそのまわりの格納容器で構成される。

燃料棒とは、ペレットと呼ばれるウラン235などの核分裂反応を起こす物質を固め、ジルコニウム合金でできた細長い筒の中に収めたものである。核分裂反応とは、ウラン235のように核

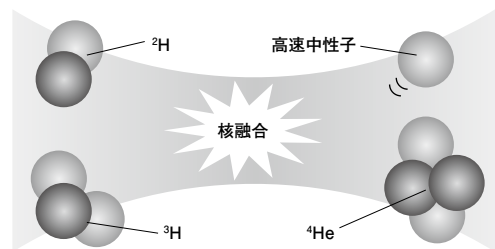


図1 核融合の模式図

D-T反応と呼ばれる反応では、重水素と三重水素が反応しヘリウム原子核と高速中性子を発生させる。

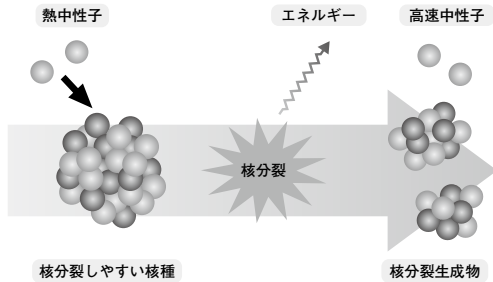


図2 核分裂の模式図

ウラン235のように重い原子核は、熱中性子が当たることにより核分裂を起こし、核分裂生成物とエネルギーを放出する。

分裂しやすい核種と、エネルギーが約0.025 eV程度の遅い中性子である熱中性子を反応させ、核分裂生成物と呼ばれるウランよりも原子番号の小さい元素と2個から3個の高速中性子を放出する反応を指す(図2)。軽水炉ではウラン235に衝突させる中性子の速度を熱中性子の状態まで遅くして、ウラン235の反応確率を高める必要がある。そのため、核分裂反応時に出てきた高速中性子を熱中性子まで減速させる効果をもつ減速材を用いる。制御棒は燃料棒の中で起きている核分裂反応を制御するために使われる。熱中性子は新たなウラン235に衝突して再び核分裂反応が起こり、この繰り返しによって核分裂反応は連鎖的に進む。

核分裂反応により放出されたエネルギーは冷却材によって発電部分まで熱として送られる。軽水炉の冷却材には水が使われており、減速材と冷却材の両方の役割を兼ねている。このとき、水が原子炉压力容器内からなくなってしまうと、原子炉を冷却することが困難になる。その結果、炉心溶

融と呼ばれる、燃料棒が溶融する重大な事故が発生する。

軽水炉はさらに沸騰水型と加圧水型の2種類に分けられる(図3)。沸騰水型の軽水炉では水を沸騰させ、蒸気を発生させる。高温高压となった蒸気を原子炉压力容器外のタービンに送り、タービンを回転させることによって発電する。

それに対して加圧水型の軽水炉では水に圧力がかかっているため、水は沸騰しないまま原子炉压力容器外の蒸気発生器に送られる。蒸気発生器は加圧により高温高压となった水から熱を受け取って蒸気を発生させる役割があり、蒸気発生器で発生した蒸気がタービンを回すことで発電する。

加圧水型の場合は沸騰水型とは違い、燃料棒で発生する放射線により冷却水が放射能汚染されても、蒸気発生器を介しているため、冷却水がタービン系に行くことはなく、汚染された冷却水を一次冷却系に閉じ込めることができる。

軽水炉と異なり、高速増殖炉は研究開発中の炉である。高速増殖炉では原子核から放出された高速中性子をあまり減速させずに反応に用い、燃料を作りながら発電する。燃料棒はMOX燃料を主成分としたペレットをステンレス鋼でできた細長い筒の中に収めたものである。MOX燃料とは、主にプルトニウム239とウラン238からなる混合酸化物燃料である。これを炉心の中心に配置し、核分裂をほとんど起こさないウラン238で周りを囲む。この燃料棒内のプルトニウム239に高速中性子が衝突すると、プルトニウム239は核分裂反応を起こし、核分裂生成物と2個から3個の高速中性

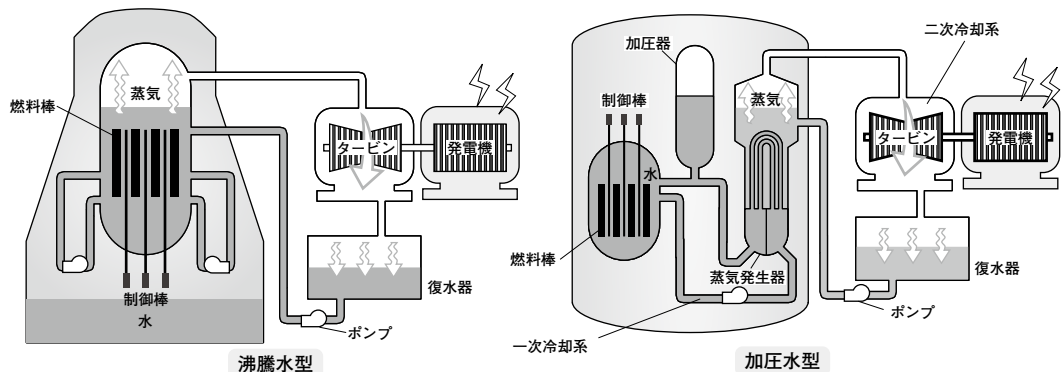


図3 沸騰水型・加圧水型の軽水炉

子を放出する。放出された高速中性子のうち1つはウラン238に衝突して捕獲され、燃料であるプルトニウム239を生成する。残りは新たな核分裂反応を起こす元として燃料であるプルトニウム239に衝突するか、反応に寄与しなくなる。これらの反応の繰り返しにより、高速増殖炉では燃料を作りながら軽水炉と同じようにタービンを回して発電する。

軽水炉では水が減速材と冷却材の役割をもっていたが、高速増殖炉は減速材が存在しない。なぜなら、高速中性子を減速させずにプルトニウム239と反応させた方が中性子をより多く発生させることができ、燃料をより多く作ることができるからである。冷却材に関してはナトリウムが使用されている。

さらに、高速増殖炉は高い持続性をもっている。高速増殖炉における持続性とは、ウランなどの燃料を使用したとき、どれだけの年数使用できるかを測る指標である。軽水炉を用いて発電する場合、使用できるウランはおよそ85年間で使い切ってしまう。しかし、高速増殖炉を使用すれば、ウラン238からプルトニウム239の燃料を作りながら発電するので、数千年にわたってウラン資源を持続して利用することができるようになる。

以上のように高速増殖炉と軽水炉はほぼ同じ機構をもっているが、燃料棒と反応機構、冷却材に大きな違いがある。

鉛ビスマス冷却高速炉

現在研究開発中の高速増殖炉は、前述の通り冷却材にナトリウムを使用している。

ナトリウム冷却材を用いる利点は、中性子の速度を大きく落とさず、高速中性子を高速のまま燃料棒に衝突させ、燃料であるプルトニウム239を増殖させながら発電できることである。その反面、ナトリウムは水や酸素に触れると激しく反応するという問題点もある。日本にある高速増殖炉の一つであるもんじゅでは、ナトリウム漏洩による火災事故が起きたこともあり、事実としてナトリウムの取り扱いには細心の注意を要してきた。

ナトリウム冷却材の代わりに、鉛ビスマス冷却

材を使うこともできる。鉛ビスマスは鉛が44.5%、ビスマスが55.5%という組成の合金である。常温では固体だが、高速増殖炉の冷却材として使う場合には流動性が必要なため、融点である124.5度以上で利用する。鉛ビスマスはナトリウムと異なり水と反応しないため、取り扱いがナトリウムより容易である。また、ナトリウムよりも鉛ビスマスの方が密度が大きいため、高速中性子がナトリウム原子核に衝突したときに比べ、鉛ビスマスに衝突したときに失う運動エネルギーの方が少なく、より高速の中性子を反応に利用できる。

高橋研究室では鉛ビスマスが水と反応しないことを利用し、Pb-Bi冷却直接接触沸騰水型小型高速炉（Boiling Water Lead-cooled Fast Reactor 以下、BLFRとする）という方式について研究した。BLFRの発電の仕組みは、鉛ビスマスと水を混合したものを原子炉压力容器内で循環、水蒸気を発生させ、水蒸気を原子炉压力容器外のタービンに送り、タービンを回して発電するというものだ（図4-左）。

鉛ビスマスと水を混合した場合、原子炉压力容器内で適切に循環しているかを確認するために、先生は大型のPb-Bi水直接接触沸騰試験装置と呼ばれる実際の高速炉を模擬した大型の装置を作った（図5）。この装置では、燃料棒を模擬したヒーターを用いて鉛ビスマスを加熱し、高温の鉛ビスマスに給水して蒸気を発生させる。これによって、実際の高速炉と同じ圧力で、鉛ビスマスが適切に循環することと、所定の蒸気温度や流量が得られることを確認した。

しかし、BLFRには欠点がある。BLFRでは、沸点に達した水から蒸気を発生させる。その結果、原子炉压力容器の上部で突沸が起き、突沸に伴って大きな振動が発生する。さらに、鉛ビスマスに中性子捕獲反応と呼ばれる $^{209}\text{Bi} + n \rightarrow ^{210}\text{Bi}$ （ n は中性子）という反応が起きた後、 $^{210}\text{Bi} \rightarrow ^{210}\text{Po}$ という β 崩壊と呼ばれる反応が起き、ポロニウムなどの放射性物質が発生して発電用のタービン部分を汚染してしまう。このポロニウムは、放置していれば半減期が138.4日の α 崩壊を起こし鉛206となる。ポロニウムは α 線を出す危険な物質であるため、できる限り原子炉内で閉じ込めなければな

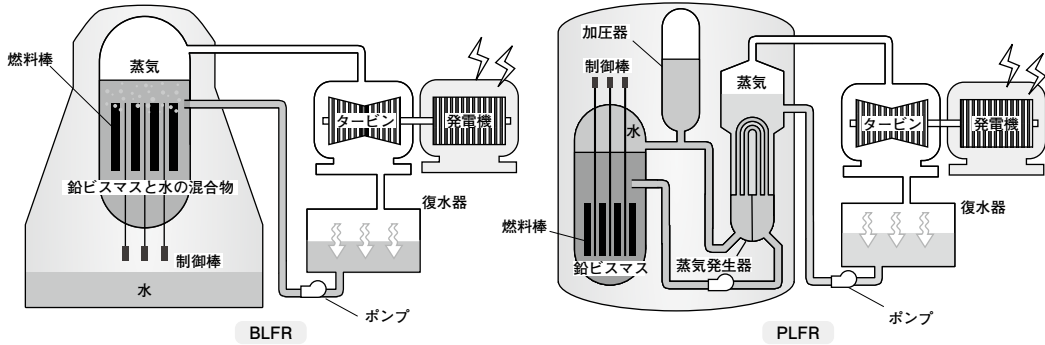


図4 BLFRとPLFRの比較

らないのだ。

この問題の解決法として、高橋研究室では原子炉圧力容器内の水に圧力をかけ、沸騰しないように蒸気発生器まで送り発電するPb-Bi冷却直接接触加圧水型小型高速炉（Pressurized Water Lead-cooled Fast Reactor 以下、PLFRとする）という概念を提唱している。BLFRとPLFRの関係は軽水炉における沸騰水型と加圧水型と同様である。水を沸騰させない加圧水型では突沸しない上に、蒸気発生器を介することで、燃料そのものやポロニウムなどの放射性物質を含んだ冷却水を一次冷却系に閉じ込められるという大きな利点がある（図4-右）。しかし、この方式を採用したとしても酸素濃度や腐食の程度を適切に制御しなければならない。酸素濃度を制御しなければ、鉛ビスマスと酸素が反応し、主に酸化ビスマス（Ⅲ）や酸化鉛（Ⅱ）などの固体が生成してしまう。このような固体の酸化物が生成することで、冷却材の流動度が下がると、炉心の流路が詰まってしまうなどの問題が生じるので不都合である。

そこでBLFRやPLFRを実現するために、高橋

研究室では酸素濃度の制御に関する研究も行なっている。酸素濃度を制御する方法として、粒状の酸化鉛を用いるものがある（図6）。原子炉内で鉛ビスマスが流れている配管の一部に迂回路を作り、迂回した先に粒状の酸化鉛を設置しておく。粒状の酸化鉛に鉛ビスマスが触れると、その時点の鉛ビスマスの温度によって粒状の酸化鉛から酸素が溶け出すか、流れている鉛ビスマスから酸素が酸化鉛となって析出する。つまり、鉛ビスマスの温度制御を行うことで酸素濃度を制御することができるというものである。

ほかにも、酸素濃度の制御方法として、鉛ビスマスに水蒸気とアルゴン、水素の混合ガスを吹き込み、鉛ビスマス内に溶け込んでいる酸素を水蒸気に還元し、放出させるという方法もある。だがこの方法で酸素を過度に水蒸気に還元すると、鉛ビスマスに溶け込んでいる酸素の濃度が必要以上に下がってしまうため、原子炉内の構造物や蒸気発生器などの表面にある酸化皮膜まで除去し、腐食を起こしてしまう問題がある。

また、高橋研究室では腐食の制御をするために、鉛ビスマスがどのような材料を腐食するか調べた（図7）。その結果、タングステンなどの単体としては腐食されにくい金属や、アルミニウムあるいはケイ素を含む鉄鋼材では腐食が起きなかった。

しかし、タングステンなどの金属を用いるには別の問題がある。タングステンのみで原子炉圧力容器や配管を製作するのは予算や鈹物量などの問題から困難だ。タングステンをコーティングした鋼材を用いるとしても、過度の圧力がかかるなどして一度破損するとその部分から腐食が始まり、

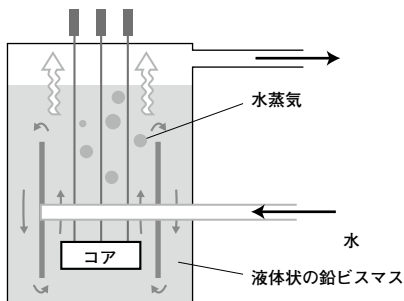


図5 Pb-Bi水直接触沸騰試験装置

鋼材は使い物にならなくなる。これに対し、アルミニウムやケイ素を含む鋼材を使うと、多少壊れたとしても壊れた部分から酸化皮膜を再生することができる。これはアルミニウムやケイ素が酸化皮膜を自動的に再生する機能を備えているためであり、この機能は腐食抑制のために大きく貢献している。

さらに実験を進め、アルミニウムやケイ素を含む鋼材の表面に何が起きているか電子顕微鏡などで観察した結果、酸化皮膜の厚さが20 μm程度であることがわかった。この酸化皮膜は、厚すぎる場合は酸化皮膜と鋼材の熱膨張率の差から力を受けて破損の原因となるが、薄すぎても信頼性が低くなるので、厚さの適切な制御が課題となっている。高橋研究室では、腐食抑制の効果が確認されているアルミニウムやケイ素を含む鋼材を、BLFRやPLFRに使用していく方針を掲げている。

BLFRとPLFRの未来

福島第一原発の炉心溶融事故に伴って、原発や核関連施設の安全性に関する新規制基準が作られた。新規制基準は国内にあるすべての原子力発電所について、利用・開発・継続についての審査を通らない限り稼働を認めないという厳重なものだ。仮に新たに高速増殖炉を建設、稼働しようとしても新規制基準に従う必要がある。

BLFRやPLFRについても同様であり、現時点で高橋研究室では実用化を急がず長期的に研究していくことを考えている。具体的には、核融合炉の実用化は現段階で2050年以降、鉛ビスマスを用い

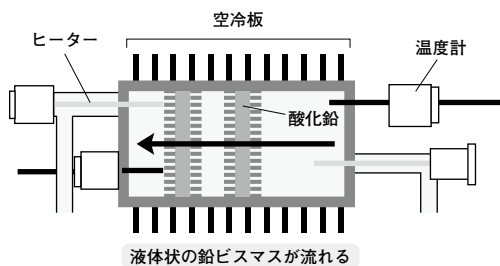


図6 酸素濃度の制御装置

配管内を液体状の鉛ビスマスが流れ、酸化鉛の部分に鉛ビスマスが接触すると、酸化鉛から酸素が溶け出すか、流れている鉛ビスマスから酸化鉛が析出する。

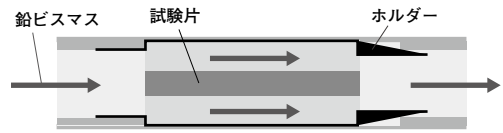


図7 腐食実験装置

配管内を液体状の鉛ビスマスが流れ、試験片に接触する。この試験は500時間以上行われる。

た高速炉は、国際的には2030年以降に実用化することを目標としている。

将来の発電方法を研究する上で、高橋研究室ではほかの研究室とは異なり、鉛ビスマスを用いた高速炉におけるさまざまな分野を研究している。BLFRに関しては高橋先生がシステム概念を構築してきた。PLFRに関してはこれから提案していく段階である。これらの炉を実用化するために、酸素濃度の制御や腐食の実験などの基礎実験を行っており、設計と実験の両方から鉛ビスマスを用いた高速炉の実用化を目指している。

高橋先生は自身で実験装置を設計・製作し、鉛ビスマスを用いた高速炉に関する研究をゼロから行ってきたため、原子炉に関することには自信をもっている。現在の日本で冷却材に鉛を用いた原子炉を研究している研究室は高橋研究室以外なく、鉛ビスマス冷却高速炉と言えば高橋先生という名前が浮かぶほどだ。

原子炉と言えど、その原理には多様さがある。エネルギー資源の賢い選択が求められている昨今、次世代型の原子炉の研究は原子力発電の技術的課題を打開する切り札となるかもしれない。先生の研究するBLFRやPLFRを通じて原子力発電の技術的課題や、昨今のエネルギー問題が解決することに期待したい。

執筆者より

高橋研究室の研究内容は原子炉関係ということもあって、学部生にはあまり馴染みがないものです。しかし、懇切丁寧に説明していただいたためスムーズに執筆を終えることができました。お忙しい中、取材を引き受けていただきありがとうございました。

(辻 祐樹)