

連載
講座今、核融合炉の壁が熱い！
—数値モデリングでチャレンジ

第7回 VI-2 壁の中は傷まないか

京都大学 森下 和功, カリフォルニア大学 Shahram SHARAFAT

Ⅱ. 放射線の照射によって受ける壁材料
のダメージをいかに予測するか

1. はじめに

前章においては、(1)核融合炉が商用炉として成立するには、プラズマ燃焼だけでなく、放射線照射下での材料劣化の問題(照射損傷)も重要であること、(2)高エネルギー粒子の照射によって材料内には多数の格子欠陥が生成し、それらが移動・集合化することによって、ナノ～サブミクロンサイズの、より複雑な欠陥集合体が形成されること、(3)そのようなミクロ構造変化が、材料のマクロな特性を変化させ、材料機能の低下、さらには核融合炉の寿命そのものを決定する可能性があること、などを述べた。本章では、照射損傷によるミクロ構造変化をいかにモデル化するかについて解説する。なお、以後で頻出するフェムト、ピコ、ナノは、それぞれ、 10^{-15} 、 10^{-12} 、 10^{-9} を表す接頭語である。

2. 構造階層性を有する核融合炉システム

核融合炉のような巨大プラントは、いくつかのサブシステムの組合せで構成される。サブシステムは多数の機器や装置から構成され、機器や装置は数多くの部品から構成される¹⁾。そして、部品はやはり数多くの材料から構成される。材料(固体物質)は原子の集団である。その途中の段階では、原子配列に応じて、結晶粒とか、粒界とか、転位といった中間的な構造が存在する。また、原子そのものは、電子と原子核から構成される。このよう

に巨大プラントのシステムは、サブシステム—機器・装置—部品—材料—結晶・粒界・転位—原子—原子核・電子等、多数の要素から構成され、それらは互いに階層的な構造をもつ。材料の階層構造を、模式的に第VI-5図の横軸に示す。

これらの要素はさまざまな機能をもつ。電子は原子同士を結びつけ固体を安定化させる。固体中の粒界は、結晶粒同士を結び付け、転位や析出相などとともに、時に、材料強度において重要な役割を担う。そして、そのような要素から構成される材料は、全体として、巨大構造物を支えるとか、容器内を真空中に保つとか、熱を除去するとか、放射性同位元素を外部に漏らさないなどの役割をもつ。さまざまな役割(機能)を負わされたこうした材料の寄せ集めにより、たとえば、核融合炉ブランケット(核融合発電プラントに必要なサブシステムのひとつ)が構成される。

こうした機能の発現は、階層構造の各層に固有である。すなわち、構造材料の強度は、粒界・転位・析出相等の材料要素の組合せで決まるのであって、それより下の階層(原子や電子)の性質をいくら調べても、それだけで理解できるものではない。同様に、いくら材料要素の熱的特性を調べたところで、それだけで材料全体の除熱特性は得られない。いわゆる“要素還元論”の成立しない世界がここにある。系の機能は、各要素独自の性質だけでなく、それらの組合せ方を指定して初めて明らかになる。

系を表現する方法はさまざまである。たとえば板材なら、寸法、形、重さなどである。場合によっては、硬さとか熱伝導度も必要であろう。が、それらを含めたとしても、マクロな視点から系を表現するのに必要なパラメータの数(自由度の数)は有限である。一方、同じ板材でも、原子という単位で系をとらえると、そこには、たとえば1モルなら 6×10^{23} 個もの、事実上、無限の数の原子が存在する。それぞれの原子がもつ3次元の位置および速度情報、原子の種類の情報、そして、原子1個あたり数10個にも及ぶ電子の情報までもを含めると、1モルの系の自由度は全体で 10^{26} 以上になる。さらに原子を分割して、その中身(原子核)の情報(内部自由度)までも詳述することは可能だが、切りがない。このように、同じ系でも、マクロな視点かミクロな視点かによって、系

The Fusion Reactor Wall is Getting Hot!—A Challenge towards the Future for Numerical Modelling (7):

Chap. VI How is the wall damaged?—2. How to Predict Radiation Damage in Materials: Kazunori MORISHITA, Shahram SHARAFAT.

(2008年 10月 3日 受理)

各回タイトル

第1回 I. はじめに

II-1 壁の前で何が起こっているか?(物理モデル)

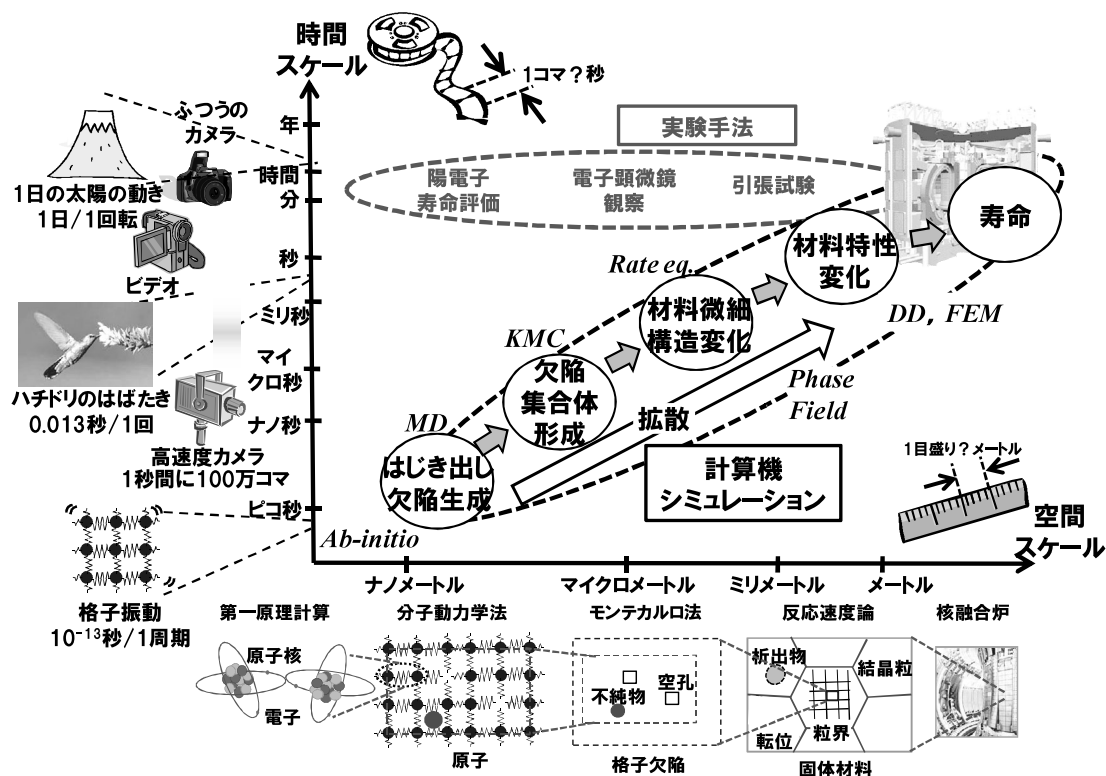
第2回 II-2 壁の前で何が起こっているか?(プラズマの攻撃)

第3回 III. 壁の表面で何が起こっているか

第4回 IV. 壁の中で何が起こっているか

第5回 V. 壁はどのくらい熱くなるか

第6回 VI-1 壁の中は傷まないか(放射線の照射によって受ける壁材料のダメージ)



第VI-5図 階層性を有する構造をもち、かつ、多要素である系の中で起こる時間的にも空間的にもマルチスケールな材料照射損傷プロセスのマルチスケールモデリング

の記述に必要なパラメータの数はかなり異なる。ただし、ミクロ世界のパラメータとマクロ世界のそれとは当然関係があるはずで、それは一般に、統計力学によって与えられる。系が熱平衡状態にありさえすれば、たとえミクロ世界の無数の原子の速度に関する情報も、マクロ世界においては温度というたった1つのパラメータで表現できる。そして、状態方程式のようなマクロな表現をする際には、原子1個1個の情報は必要でなく、温度など、ごく少数のパラメータで十分になる。詳しい方がいいだろうと、ミクロ世界で通用する無数の原子の膨大な情報を与えたとしても、マクロ世界では、逆に、そのデータ量の多さに困ってしまう。各階層によって適切なパラメータの数というものがある。しかし残念なことに、ミクロとマクロの関係が明確なのは、熱平衡という特別な場合に限定される。前章の材料照射損傷のような非平衡プロセスでは、両者の関係は必ずしも自明でない。この場合、無限の自由度をもつミクロ世界の情報を、いかに、少数自由度のマクロな世界に練り込むかが問題になる。

一般に材料は多要素な系である。多要素とは、ここでは系が不均一であることを意味する。ただし、この不均一性は、どのような空間尺度(スケール)で系を眺めるかに依存する。すなわち、数ミクロンの空間スケールで材料を眺めると、まず、結晶粒が見え、その隣に粒界が見え、そして時に、転位や表面などが見える。これらは、それぞれが異なる原子配列をもつ材料要素である。しかしながらこの空間スケールでは、決して原子そのものは

見えない。そこで今度は、系をサブナノの空間スケールで眺めてみる。結晶粒、粒界、転位など、各要素に依存した原子配列が見えてくる。しかし、あまりに空間スケールが小さいので、たとえば、結晶粒は見えても粒界は見えない。その場から粒界は遠すぎるのだ。要するに、原子配列の多様性に基づく材料の不均一な性質は、典型的には、ミクロンオーダー以上の空間スケールではじめて気付く性質であって、原子・電子レベルの空間スケールでは気にならない。

3. さまざまな時間スケールで現象を見る

ここでは、時間スケール(現象の時定数や観測の時間分解能)について考える(第VI-5図の縦軸)。通常、物理法則は、なんらかの物理量の時間微分に関する方程式で表される。たとえば、ニュートンの運動方程式なら、運動量の時間変化率がその質点に働く力に等しいとおく。ただし、このような方程式を解くとき、どの時間スケールで現象を眺めるかで見え方が異なってくる²⁾。ここで、「どの時間スケールで」というのは、時間分解能、すなわち、現象をビデオ撮影するときのコマとコマの間の時間間隔を意味する。

たとえば、100万コマ/秒の撮影が可能な高速度カメラで地上からの太陽の動きを観察する。しかし、1コマ目と100万コマ目の太陽の位置に違いはない。すなわち、この時間刻みで見た場合の太陽の位置座標の時間変化率は実質上ゼロとなる。このときの微分方程式は、太陽が

止まっている場合と全く同じになる。だからといって、本当に太陽が止まっているわけではないのだが、この時間スケールで太陽を眺める観測者には、「太陽は止まっている」と認識される。(もちろん、このカメラで1時間ほど撮影を続けるなら、「太陽も動き出す」のだが、その場合、10°コマという事実上無限の情報を扱わなければならない。そんな解析は不可能である。)

一方、1秒間に約80回の羽ばたきをするハチドリの撮影を考える。通常のカメラやビデオ(30コマ/秒)では、羽ばたきの詳細はわからない。せめて1秒間に数100コマの撮影が可能な高速度カメラが必要になる。ただし、先ほどの太陽の動き(遅い動き)を高速度カメラ(高い時間分解能)で見るとは違い、今度の羽ばたき(速い動き)を通常のカメラ(低い時間分解能)で見るとは、羽ばたき速度などの詳細は不明でも、羽ばたきの事実は「一瞬の出来事(“デルタ関数的な出来事”)」として認識される。

以上要するに、ある現象をその時定数より極端に短い時間スケールで眺める場合、それは止まって見え、逆に、極端に長い時間スケールで見るとは、それは「詳細不明の一瞬の出来事」として認識される。「物理現象の観察で重要なのは時間微分である」という考えに立てば、短すぎる時間スケールはその現象が起こっていないのと同じであり、逆に、長すぎる時間スケールは、多くの情報が「詳細不明の一瞬」の中に押し込まれることになる。これらから、「現象の時定数に適した時間分解能を選ぶ必要がある」という結論もいえるのだが、一方で、多くの現象が同時に起こるような場合(“マルチスケールな現象”と呼ぶ)、すなわち、太陽の下で羽ばたくハチドリを見る場合は、どの時間スケールを選ぶかによって、ハチドリの羽ばたきを見るのか、あるいは、太陽の動きを見るのかに分かれることになる。

以上、時間・空間スケールを変えたときの現象の見え方を説明した。我々は、多くの異なるスケールを同時に見ることはできないので、正しく現象を見ようとするなら、多種多様の時間分解能のカメラと、多種多様の空間分解能の顕微鏡が必要になる。これは、材料照射損傷プロセスの解析においても同様である。そこでは、個々のスケールにおける適切な解析と、それらの接続(マルチスケールカップリング)が重要になる。

4. マルチスケールな照射損傷プロセス

VI-1章によると、照射損傷プロセスは、(1)高エネルギー粒子(中性子やイオンなど)が材料内に入り、(2)はじき出し欠陥が導入される。(3)さまざまな点欠陥は熱活性化過程により材料内を拡散するので、照射の影響は時間をかけながら徐々に材料全体にひろがっていく。(4)拡散によって点欠陥同士が会おうと、種々の欠陥反応が起こり、時に、ボイドやヘリウムバブルなどの欠陥集合体が

形成される。(5)このようなミクロ構造の変化は材料劣化の要因となる、ということであった。このプロセスに関与する時間・空間スケールは、以下のとおりである。

まず、外界から高エネルギー粒子が入射し、材料構成原子と衝突するプロセスであるが、これはサブフェムト～フェムト秒、かつ、フェムト～0.1ナノメートルの現象である。衝突した材料構成原子を1次はじき出し原子(PKA)と呼ぶ。この時間スケールでは、固体中の格子振動(周期0.1ピコ秒)でさえ止まって見える。次に、PKAの発生から数10ピコ秒程度の時間に原子間衝突の連鎖反応が起こる(いわゆるカスケード損傷)。このプロセスにより、数10ナノメートルの領域に、はじき出し欠陥が高密度に形成される。こうして生成した格子欠陥は、時間をかけながら徐々に材料内を拡散し、ミクロ構造が変化する。すなわち、この拡散過程は、時間スケールの増大に伴い空間スケールが広がるプロセスである(第VI-1図の左下から右上への流れ)。

5. いかに照射損傷プロセスをモデル化するか?

さて、時間的にも空間的にもマルチスケールな現象である照射損傷プロセスをいかにモデル化するか?しかも、この現象が起こる場所は、結晶粒、粒界、転位、表面など、多様な要素を含む系である。

まず、材料の階層構造化を考えずに、全体を原子や電子で表すことを考える。この表現法を使うと、たとえば、核融合炉であれば 10^{31} 個以上の原子核とその数10倍の電子が必要になる。これは、事実上無限大の自由度の系を扱うことを意味する。解析は不可能である。仮に 10^{31} 個もの原子の10年間の挙動(位置座標の情報)が正しく予測できたとしても、果たして10年後の炉の健全性が判断できるか、という問題も発生する。膨大な量のデータの評価に、それこそ10年以上かかってしまう。

さてここで、物理現象は時間微分の方程式で書かれていること思い出そう。時間変化率がゼロのものは無視できるのであった。しかもそこでは、本当に止まっているかどうかは問題でなく、観測者の時間スケールにおいて止まっているとみなせるもの(たとえば、高速度カメラで撮影した地上の太陽)も無視できる。この考えに立てば、事実上無限個にもなる原子や電子をあらかじめ系内に並べておく必要はなく、注目する時間スケールの間に動くものだけを考えればよい。つまり、フェムト秒の時間スケールでは、1個の入射粒子と1個の材料構成原子の衝突のみを考えればよい。(実は、この時間スケールに限定しても、核融合炉システム全体に目を向けるのであれば、同様の衝突現象はやはり無限個存在する。しかし、やはりこの時間スケールに限定するならば、それらの現象は互いに独立なので、それらは分離して考えてよい。)

問題はそれ以降である。外界から系に注入されたエネ

ルギーは、原子間衝突連鎖や欠陥の拡散を通して散逸する。このプロセスに関与する系の大きさは、第VI-5図に示すように、時間とともに増大する。そのため、原子や電子を最小単位とする方法では、系の自由度(系の記述に必要なパラメータの数。解析対象の原子や電子の数に比例する。)はすぐに発散する。解析に使うパラメータの数には上限があるので、結局、解析対象が大きくなるに従い、系の記述を簡略化しながら、パラメータ数をはしょっていくしかない。

ところで、そもそも我々が必要とする情報は何であったか？それは、材料劣化の要因となるミクロ構造変化である。それを知るには、どのくらいの非平衡欠陥が生成し、それらがどのように移動して欠陥集合体が形成されるかがわかればよい。そのような観点からすると、電子の挙動よりは原子(イオン)の挙動が、また、原子(イオン)の挙動よりは格子欠陥の挙動が重要になる。もちろん、原子(イオン)のふるまいは電子のふるまいに影響されるし、格子欠陥のふるまいは周囲の原子のふるまいに影響されるのであるが、系のパラメータ数の発散を抑えるには、このように、系内の解析対象に優劣をつけるしかない。そこで、電子に関する情報ははしょって系を原子(イオン)のみで表現するとか、あるいは、原子に関する情報ははしょって系を格子欠陥のみで表現するなどの工夫が必要になる。ただし、はしょるといっても無視することではない。たとえば、多くの電子のふるまいを、より少ないパラメータ数で表現される原子間ポテンシャル関数の中に繰り込み、それを使って、原子(イオン)の位置を追跡する。これが、古典的分子動力学(MD)法である。あるいはまた、格子欠陥の周囲にある多くの格子原子(正規位置にある原子)のふるまいを欠陥移動エネルギーなどの少数のパラメータの中に繰り込み、それを使って、欠陥の位置のみを追跡する。これがキネティックモンテカルロ(KMC)法である。そしてさらに、KMC法における欠陥1個1個の詳細な位置情報を、空間上に作成したメッシュ内の欠陥濃度の情報に置き換え、それを使って欠陥濃度の時間発展を追跡する。これが反応速度論解析である。空間メッシュ内部の欠陥の相対的な位置情報は失われ、メッシュ内部は空間的に均質化されることになる。

こうして、さまざまな情報ははしょることにより、すなわち、異なる解析手法間での接続における繰り込み作業(事実上無限個にもなる情報を少数自由度の情報に置き換える作業)をうまくこなすことにより、解析に必要なパラメータ数(自由度)の発散を抑えながらも、解析対象の系を大きくするとか、シミュレーション時間を伸ばすなどが可能になる。このように、系の自由度を徐々に減らしながら、逆に、解析可能な時間・空間スケールを大きくしていくモデル化の手法をマルチスケールモデリングと呼ぶ。次節では、MD法やKMC法を使ったモデ

リング例を示す。

なお、特に非平衡現象を扱うときには、系の自由度を徐々に減らす行為、すなわち、ミクロ世界の多数自由度の情報を少数自由度のマクロ世界の記述法に繰り込む際の作業の妥当性が問題になる。たとえば、欠陥集合体の形成過程が最もよく現れる時間・空間スケールを、反応速度式を使って解析する場合、それよりずっと小さなスケールのカスケード損傷プロセス(数10ピコ秒かつ数10ナノメートルで起こる原子間衝突連鎖による欠陥生成プロセス)は、「デルタ関数で記述される、詳細不明な一瞬の出来事」になる。本来なら、そこには、「どの程度のエネルギーの粒子がどの角度で材料に入射し、標的原子にどの程度のエネルギーを与えたのか？続く原子間衝突連鎖によって、どれくらい欠陥が生成したのか？それらのうち、どの程度が即座に自発的に再結合したのか」などの詳細情報が含まれるはずである。しかし、それらの情報は積分作業(時間的かつ空間的な均質化・平均化の作業)の中で捨象され、すべてはdpaというパラメータの中に押し込まれてしまう。dpa(displacement per atom)は、照射量の単位として広く使われているものであり、反応速度論解析の欠陥生成項(source term)にはdpa/sが使われる。しかしながら、たとえば、同じdpa量の高エネルギー電子線照射と中性子照射では、異なる材料ミクロ構造変化を示すことが知られており、これは、すなわち、dpaによる繰り込みが、決して広い範囲で妥当でないことを意味する。

理想的には、古典的MD法による原子挙動解析にも関わらず、電子挙動を含む第一原理MD解析と同じ結果を得るとか、あるいは、格子原子を扱わないKMC解析にも関わらず、MD解析と同じ結果が得られればよい。現実にはもちろん、そのような繰り込み作業を完璧に行うことは難しい。

その他、材料の不均一性に起因する問題もある。材料要素が異なると、たとえば、結晶粒内と粒界では、欠陥移動の活性化エネルギーや欠陥集合体のできやすさなどが異なる。そこで解析対象が大きくなると、ひとつの空間メッシュも拡大し(粗視化)、そこに多様な材料要素が内包されるようになる。そうすると、そのメッシュの中の欠陥の移動エネルギーは、果たして、結晶粒での値を使うべきか、それとも粒界での値を使うべきか？などの判断が難しくなる。本来なら、粗視化され、不均質化した空間メッシュに有効な実効的移動エネルギーを設定する必要があるのだが、そのモデル化にはさまざまな任意性が入りこむ。すなわち、粗視化されたメッシュは多様な内部自由度をもつので、その多様性に対応できないのであれば、材料挙動の予測性が低下する。あるいは、そのような面倒を避けるために空間メッシュ内の均一性を確保するのであれば、ひとつのメッシュの大きさは精々結晶粒程度に限定される。空間メッシュの全数は実質的

に解析が可能な有限個に抑える必要があるのですが、すなわち、解析可能な系の大きさに上限ができることになる。

6. ヘリウム損傷のマルチスケールモデリング

ここでは、核融合材料に特徴的なヘリウム損傷のモデル化研究を紹介する。ヘリウム損傷を含む照射損傷の詳細は、前章を参照されたい。

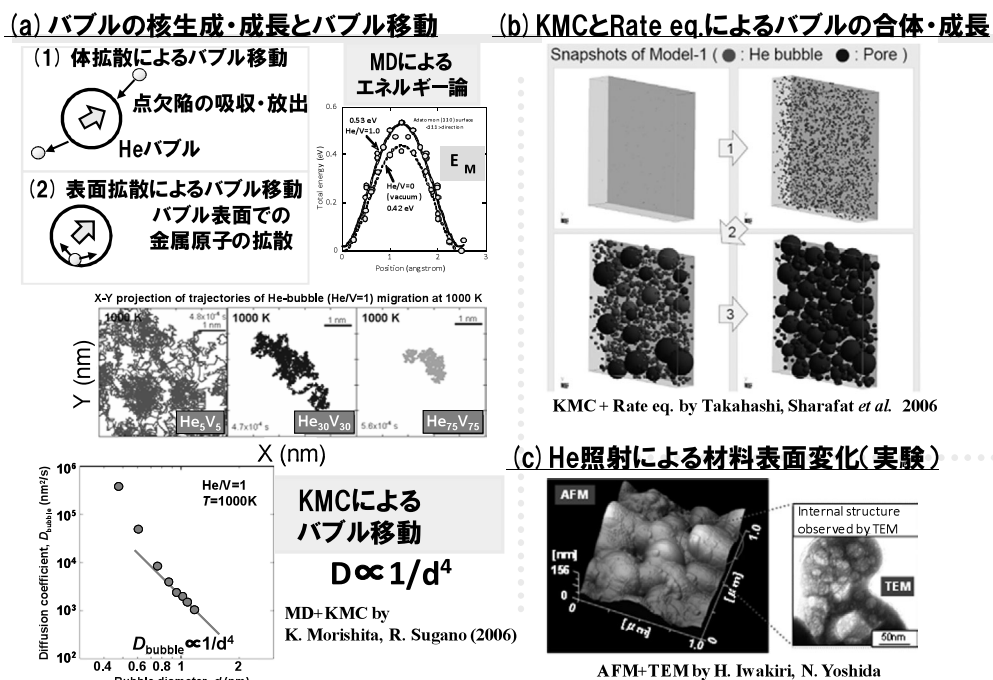
ヘリウム損傷の特徴は、ヘリウムバブル(空孔集合体である材料内の空洞に、ヘリウムがつまっている構造)をもつ。照射による体積膨張現象(スエリング)の発生や材料強度変化の要因である)の形成である。ゆらぎによって核生成するバブルの形成を予測するには、まず、ヘリウムバブルの点欠陥結合エネルギーが必要になる。これは、点欠陥の集合化によるエネルギー利得であり、集合体近傍においては、同時に起こる配置エントロピー減少に対応する自由エネルギー損失とつりあう。また、これはバブルの熱的安定性を定量的に評価するための指標でもある。このような欠陥のエネルギー論は、量子力学計算、MD 解析、熱力学的解析など、いくつかの方法を用いて評価できる。こうした評価をバブルに対して行うと、(1)ヘリウムには、バブルを熱的に安定化させる効果があること、(2)バブル内のヘリウム密度が極端に高い場合には、バブル界面の材料構成原子をマトリクス内に放出し、結果として、バブルを成長させる効果があること、などが明らかになる。このような欠陥集合体の核生成・成長挙動の時定数は、一般に、MD 法で解析可能な時間

スケールよりも十分に長く、そのため、MD 法と KMC 法の組合せによりモデル化される³⁾。

次に、KMC 解析において、バブル界面の原子の運動を考慮すると、第VI-6図(a)に示すように、バブル自身の移動が見えてくる⁴⁾。バブル移動は、実験的にも観察される事実⁵⁾であるが、これは、バブル界面上の多くの原子による無限に継続可能なジャンプ運動の寄せ集めである。バブルの拡散距離と経過時間の関係から拡散係数を導出することができるが、これは、無限回に及ぶ界面原子の運動が、拡散係数というひとつのパラメータに繰り込まれたことを意味する。このような繰り込みが可能になると、もはや、界面原子の運動は忘れてもよい。マクロな世界のモデル化においては、バブルの拡散係数のみを使えばよい。バブルの拡散係数は、バブル径の4乗に反比例する⁴⁾。そこでさらに、別の KMC および反応速度論解析から、バブルの移動および合体現象をモデル化する⁶⁾。ただし、このモデルにおけるバブル移動は、拡散係数のみを考慮し、先述の界面原子の移動はもはや扱わない。バブル同士の接触・合体により、バブルは徐々に成長し、そして、第VI-6図(b)に示すように、材料のミクロ構造は次第にポーラスな構造へと変化する。これは、ヘリウム照射実験によって得られる電子顕微鏡観察結果(第VI-6図(c))⁷⁾をよく再現する。

7. プラズマとのダイナミックな相互作用

階層構造化および多要素性をもつ材料の中で起こる照



第VI-6図 (a) ポテンシャルを使ったMD解析による欠陥エネルギー論およびKMC解析から、バブルの核生成・成長とバブル移動の両方を模擬する
(b) KMCとRate eq.より、バブルの移動・合体吸収を模擬し、スポンジ構造を得る
(c) 実験的に得られる材料表面のスポンジ構造

射損傷プロセスについて、その現象の時間的・空間的マルチスケール性に留意しつつ、いかにモデル化するかにについて述べた。第VI-6図のように、表面付近にポーラス構造やブリスターが形成されると、それらは塊として剥離し、核融合炉のプラズマ側へと輸送される。そうした不純物の影響によりプラズマ特性は劣化し、今度はそれが原因となって、プラズマ粒子の材料への入射特性が変化する。すなわち、材料とプラズマは動的に相互作用するのである。このような相互作用は、プラズマおよび材料の両方に対して、ダイナミックな境界条件を与える。もちろん、このダイナミックなプラズマ-材料相互作用も、注目する時間・空間スケールによって、多様な表情を見せるであろう。

核融合材料開発や材料健全性に基づく炉の保全是、材料の照射下挙動に関する正しい理解とそれに基づく予測・制御法の確立が前提である。そのためには、現象のマルチスケール性を十分に考慮したモデルの構築が必要になる。次章では、解析手法と応用例について、より具体的に説明する。

—参 考 文 献—

- 1) 日本保全学会編, 保全のリテラシー, (2007).
- 2) 吉田善章, 非線形とは何か, 岩波書店, (2008).
- 3) K. Morishita, *Phil. Mag.*, **87**, 1139 (2007).
- 4) K. Morishita, *et al.*, *Nucl. Instrum. Methods*, B **255**, 52 (2007).
- 5) M. Miyamoto, *et al.*, *J. Nucl. Mater.*, **367-370**, 350 (2007).
- 6) A. Takahashi, S. Sharafat, *et al.*, *Proc. ANS TOFE*, Nov. 13-16, 2006, New Mexico, USA, (2006).
- 7) 吉田直亮, プラズマ・核融合学会誌, **83**, 1003 (2007); 岩切宏友, プラズマ・核融合学会誌, **81**, 19 (2005).

著 者 紹 介

森下和功(もりした・かずのり)

本誌, 50[11], pp.729参照。

Shahram SHARAFAT(シャールム・シャラファット)

本誌, 50[11], pp.729参照。

新刊紹介

Fundamentals of Nuclear Reactor Physics

E. E. Lewis, 280 p. (2008. 1), Elsevier 社.
(価格 USD 94.95) ISBN 978-0123706317

本書はタイトルに Fundamentals と付いているとおり、原子炉物理学をこれから学ぼうとする学生、若い研究者や技術者を対象として書かれた原子炉物理学の入門書である。著者の長年の教育経験を踏まえ、これまで原子力分野に関する学習をほとんどしていない者であっても、この1冊で“原子炉”の物理の全体概要が容易にわかるように配慮された構成および内容となっている。

近年になって、いくつか原子炉物理学に関する書物が刊行されてきているが、本書では、多くの原子炉物理学の本に見られる詳細な数式や数値解法に関する記述はほとんどなく、現象の物理的な解釈・理解に重点が置かれた内容となっている点で他と趣を異にしている。そのため本書はこれまでの書物と比して章構成にも特徴がある。前半で記述されることが多い中性子拡散方程式の導出は前半では行われず、前半部分では原子炉物理学と他の学問分野がどのように関連しているかに重点を置いた記述となっている。特に、発電炉の型式・構造や原子炉動特性(核分裂連鎖反応の時間依存性)を前半に配置することにより、後半部分で記述される中性子拡散方程

式を解くことで得られる出力の空間分布、原子炉内の温度分布と熱輸送や反応度フィードバックなど、原子炉の中で起こっている物理現象をイメージしやすいよう構成されている。

全体的に図表を用いながら平易に記述されており、本書は原子炉物理学以外を専門とする方々にも一読していただきたい1冊であるといえる。

本書の章構成

1. Nuclear Reactions
2. Neutron Interaction
3. Neutron Distributions in Energy
4. The Power Reactor Core
5. Reactor Kinetics
6. Spatial Diffusion of Neutrons
7. Neutron Distributions in Reactors
8. Energy Transport
9. Reactivity Feedback
10. Long Term Core Behavior

(大阪大学・北田孝典)

