

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5回 V. 壁はどのくらい熱くなるか？

(株)IU 真木 紘一，日本原子力研究開発機構 今野 力

V. 壁はどのくらい熱くなるか？

前章では、核融合反応で発生した中性子が核融合装置を構成する材料と核的な相互作用しながら引き起こす挙動を概観してきた。

核融合反応で生成される中性子は、ダイバータや第一壁、ブランケット等を構成している材料と相互作用して、2次中性子や荷電粒子、ガンマ線を発生する。このような中性子との相互作用では、標的原子核は反跳を受ける。反跳を受けた原子核と生成された荷電粒子は、その運動エネルギーを最終的には熱エネルギーとして放出する。これを格子原子的なミクロな視野で見ると、反跳エネルギーが格子の拘束エネルギーより大きい場合には、反跳を受けた原子核は格子配列を乱し、材料の損傷を引き起こす。

そこで、この章では、もう少し核反応の現場まで近づいて、核的な相互作用がどのようなメカニズムで、熱エネルギーとなって放出され、また材料に放射線損傷を与えるかを眺めてみよう。

1. 熱エネルギーとは

中性子やガンマ線のエネルギーが熱エネルギーとして放出されるのであるから、まず熱エネルギーとは何かについて簡単に触れておこう。

熱や温度という言葉は日常的に用いられているが、皮膚の熱感だけでそれを理解しようとする、熱現象を深く理解できない。そこで、分子運動の原点に戻って概観してみよう。温度とは物質を構成する分子あるいは原子の一つ一つの平均的な運動エネルギーを表す概念で、熱エネルギーとは、その運動エネルギーの総和である。動いていない物体でも、分子レベルで見れば、四方八方に

動いたり、振動したりしており、その物質構成粒子の微視的な分子の熱運動の平均エネルギーを表す尺度が温度である。単に「熱」という概念は、温度差のある物体間の熱エネルギーの流れの現象を意味している。

この熱運動の程度により、固体、液体、気体という相が現れるのである。

- (1) 固体：個々の分子がそれぞれの安定した位置を中心に、狭い範囲で不規則な振動を行っている状態
- (2) 液体：分子の熱運動が固体より激しく、固体のように分子間の安定した位置はないが、その間隔はあまり変化しない程度の運動を行っている状態
- (3) 気体：分子の熱運動がさらに激しくなって、分子間の間隔が大きくなり、分子は自由に不規則で活発な運動を行っている状態

分子の熱運動の平均エネルギーを表す尺度が温度であるから、分子が動かなくなった状態が最低の温度で、これが絶対零度(−273.15℃)である。

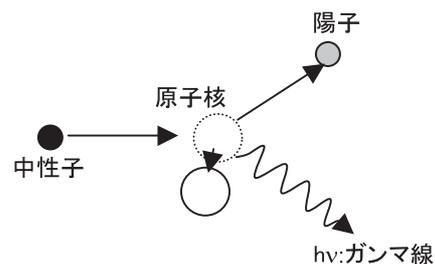
2. 核反応で発生したエネルギーの熱化

それでは、核反応で発生したエネルギーは、どのようにして熱エネルギーになるのかを考えてみよう。

第V-1図に示すように、中性子が物質に入射して、物質の格子を構成している原子の原子核と反応し、陽子とガンマ線を放出する場合を考えてみる。

陽子は運動エネルギーを持って放出され、原子核は反跳を受ける。この様子を物質の格子の中で眺めて見たのが第V-2図である。

反跳した原子核は格子の振動を引き起こし、その運動エネルギーを熱エネルギーに変える。また、陽子は格子を構成している原子と衝突し運動エネルギーを失ってい



第V-1図 中性子が原子核と反応し、陽子とガンマ線を放出する核反応の概念図

The Fusion Reactor Wall is Getting Hot!—A Challenge towards the Future for Numerical Modelling (5):Chap.V How hot does the wall get? :Koichi MAKI, Chikara KONNO. (2008年 7月14日 受理)

各回タイトル

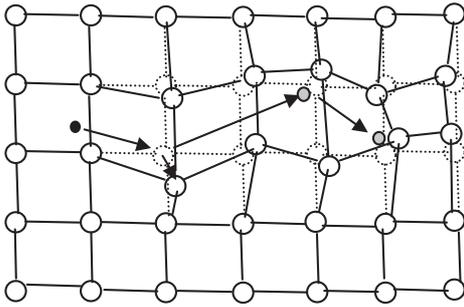
第1回 I. はじめに

II-1 壁の前で何が起きているか？(物理モデル)

第2回 II-2 壁の前で何が起きているか？(プラズマの攻撃)

第3回 III. 壁の表面で何が起きているか

第4回 IV. 壁の中で何が起きているか



第V-2図 核反応後、周囲の原子と衝突することにより格子に振動を引き起こし、熱として周囲に伝播する概念を示す図

く。衝突された格子の原子は格子間力で束縛されているので、他の格子原子を巻き添えにしながら格子振動，すなわち、陽子から受け取ったエネルギーを熱エネルギーとして周囲に拡散する。なお、発生したガンマ線は、物質との相互作用に伴う反応エネルギーとして中性子の核反応とは別に考慮する。

このように、核反応によって発生したエネルギーは、原子核の反跳や核反応で発生する粒子の運動エネルギーとして放出され、物質の中で格子振動という形で熱エネルギーに変換される。その結果、中性子の照射を受けた物質は、いわゆる‘熱い’という状態になる。それでは、どれくらい熱くなるのかを次の節で考察してみる。

3. 核反応で発生する熱エネルギーによる壁の温度

「壁がどれくらい熱くなるか？」に答えるためには、核反応で発生する熱エネルギーがどのくらいで、発生した熱が物質中のどの程度の領域まで広がるのかを見積もらなければならない。この節では、最初に、核反応で発生する熱エネルギーを算出する方法を紹介し、次に、代表的な国際熱核融合実験炉 ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor)¹⁾クラスの第一壁で過渡的にどの程度の温度になるのか、定常運転時にはどのような制約条件から熱設計によって決められるのかを眺めてみよう。

(1) KERMA ファクタ

核反応で発生する熱エネルギーは、一般に「核発熱」と呼ばれているので、ここでも、以下、「核発熱」と記すことにする。核発熱には、大きく分けて、中性子入射による核発熱とガンマ線入射による核発熱がある。

中性子入射の単位時間当たり単位体積当たりの核発熱率は、中性子のエネルギーごとに、

$$\begin{aligned} & \text{[中性子による核発熱率 (J/cm}^3\cdot\text{s)]} \\ & = \text{[核反応を起こす標的原子核の原子数密度 (個/cm}^3\text{)]} \\ & \quad \times \text{[核反応で発生する熱エネルギー (eV)]} \\ & \quad \times \text{[エネルギー変換係数 (J/eV)]} \\ & \quad \times \text{[核反応の断面積 (cm}^2\text{)]} \end{aligned}$$

$$\times \text{[中性子フラックス (個/cm}^2\cdot\text{s)]} \quad (1)$$

を計算し、すべての核反応、すべての中性子エネルギー、すべての標的原子核について和をとることにより計算できる。ガンマ線入射の場合も中性子核反応の代わりに、電子対生成、エネルギー吸収、コンプトン散乱、光電効果の全過程の反応ごとのエネルギーの出入りを考慮することによって、中性子核反応の場合と同様に計算できる。

(1)式の核反応に関する部分、

$$\text{[KERMA ファクタ (eV barn (1 barn = 10}^{-24}\text{cm}^2\text{))]} \\ = \text{[核反応で発生する熱エネルギー (eV)]}$$

$$\times \text{[核反応の断面積 (cm}^2\text{)]} \quad (2)$$

をある標的原子核で起こるすべての核反応について和をとったものをその標的原子核のKERMA (Kinetic Energy Release in MAterials) ファクタと定義し、中性子入射の場合は中性子 KERMA ファクタ、ガンマ線入射の場合はガンマ線 KERMA ファクタと呼んでいる。KERMA ファクタの単位は(2)式からもわかるようにエネルギーと面積の積で、eV-barn (1 barn = 10⁻²⁴cm²)で表される。第IV章で述べた放射線輸送計算コードを用いた数値シミュレーションで中性子フラックスが求まっていれば、中性子入射の核発熱率は、中性子フラックスに中性子 KERMA ファクタと標的原子核の原子数密度を乗じて、すべての中性子エネルギーについて和をとることにより簡単に計算できる。ガンマ線入射の場合もガンマ線 KERMA とガンマ線フラックスを用いれば、中性子入射の場合と同様である。

ここまでは KERMA ファクタがすでにわかっているように述べてきたが、KERMA ファクタを計算するのは簡単ではない。KERMA ファクタは(2)式で計算できるために、核反応のデータベースである核データライブラリーから算出するのが一般的であり、その方法として2通りの方法がある。一つは、エネルギーバランス法で、もう一つは直接法と呼ばれる方法である。以下、中性子 KERMA ファクタの場合についてそれぞれの方法について説明しよう。

エネルギーバランス法とは、入射中性子のエネルギーと核反応で発生したエネルギーの和から、核反応が起こった領域ではエネルギーを放出しない中性子とガンマ線のエネルギーの和を差し引いたものが発生する熱エネルギーである、つまり、

$$\begin{aligned} & \text{[発生する熱エネルギー]} \\ & = \text{[入射中性子のエネルギー + 核反応で発生したエネルギー]} \\ & - \text{[放出中性子のエネルギー + 放出ガンマ線のエネルギー]} \quad (3) \end{aligned}$$

とし、すべての核反応の種類について和をとって中性子 KERMA ファクタを算出する方法である。ここで、核反応で発生したエネルギーというのは、一般に Q 値と呼ばれる量で、核反応の前後での物質の質量の差をエネルギー単位で表したものである。例えば、核融合炉で利用する重陽子とトリチウムの核反応では、発生するエネルギー17.6 MeV がこの核反応の Q 値である。

(3)式の核反応で発生したエネルギー、放出中性子のエネルギー、放出ガンマ線のエネルギーはすべて核データライブラリーに含まれているので、中性子 KERMA ファクタを算出することができる。ただし、この方法は、物理的には問題ないが、(3)式のように、大きな数値の差として与えられるため、核データライブラリーに含まれているデータの精度が問題となる。例えば、鉄などの中性子 KERMA ファクタを計算する場合には、 Q 値は ~ 10 MeV と大きい、(3)式で発生する熱エネルギーはその数%以下となる。古い核データライブラリーでは核反応の前後でエネルギーが保存されていないことが多く、中性子 KERMA ファクタが中性子エネルギーによってその精度が大きく変動したり、負の値になってしまうことがしばしば起こり問題になっていた²⁾。

これに対して、直接法では、熱エネルギーとなる核反応での標的原子核の反跳エネルギーや陽子等の荷電粒子のエネルギーを運動量保存則とエネルギー保存則を用いて計算し、それらのエネルギーの総和に核データライブラリーの核反応断面積を乗じて中性子 KERMA ファクタを導出するため、中性子 KERMA ファクタが、中性子エネルギーによってその精度が大きく変動したり、負の数になることは原理的に起こらない。真木ら³⁾は、1990年代に核融合炉の核設計のために日本の核データライブラリー JENDL-3.1⁴⁾からこの手法で KERMA ファクタを計算し、公開している。ただし、直接法では核データライブラリーに含まれていない生成荷電粒子のエネルギースペクトルのデータが必要なため、他のコードを用いて荷電粒子のエネルギースペクトルを別途計算しなければならない。

最近の核データライブラリーでは、核反応の前後でエネルギーが保存されるように評価が行われるようになってきているため、世界中で広く使われている核データライブラリー処理コード NJOY⁵⁾では、KERMA ファクタを計算するのにエネルギーバランス法を採用している。このコードを用いて小迫ら⁶⁾が、日本の最新の核データライブラリー JENDL-3.3⁷⁾から KERMA ファクタを計算している。ただし、一部の原子核では核反応の前後でエネルギーが保存されていないものがあり、その場合は、NJOY のオプションとして組み込まれている直接法^{a)}で計算された KERMA ファクタが入っている。中性子 KERMA ファクタの一例として、JENDL-3.3の⁵⁶Fe データを NJOY のエネルギーバランス法で計算した⁵⁶Fe の

中性子 KERMA ファクタを第 V-3図に示す。

(2) 壁の温度は?

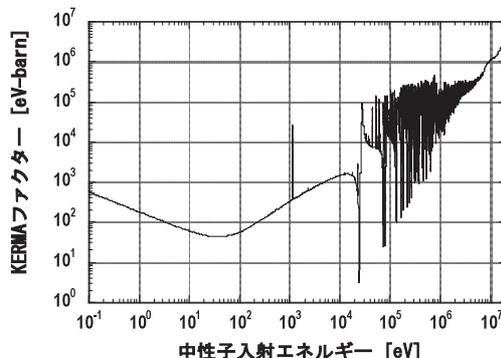
それでは、実際に壁はどの程度熱くなるのかを概算してみよう。最初に考察したように、温度とは物質を構成する分子あるいは原子の一つ一つの平均的な運動エネルギーを表す概念である。平均的な運動エネルギーといっても、どの程度の時間で考えるかによって、すなわち、エネルギーが発生した直後の過渡的な温度を考慮するのか、熱が十分行き渡ってからの状態を考慮するのかで温度がまるで異なる。ここでは、両者を考察してみる。

温度を算出するには問題とする領域に発生する熱エネルギーを求め、それを分子あるいは原子で平均化する必要がある。熱エネルギーはある領域に留まっておらず、振動として振動の激しいところから振動の少ないところへ伝播し移動していく。定常の発熱率であれば、伝播して逃げるエネルギーとバランスするところで、ある領域の定常的な温度を考慮することができる。平均化する際にはマクロな物理量として熱容量を用いる。

まず核反応で発生した荷電粒子が格子原子に衝突し、その平均自由行程程度の範囲、代表長が ~ 10 nm 程度の領域(代表長が格子原子的なミクロな視野の数千倍の領域)に熱エネルギーが与えられ、過渡的な短い時間の間は断熱近似が成り立つとして温度を求める。ここで、“短い時間”とは、熱エネルギーが拡散する速さから求まる 10 nm の領域に広がる時間のことで、フォノンの伝播速度、すなわち音速程度、材料をステンレス鋼とすると、音速は $\sim 5,000$ m/s 程度なので、

$$10^{-8}/5,000 \sim 10^{-12} \text{ s}$$

となる。一方、核反応の時間が 10^{-15} s 以下で、荷電粒子の衝突時間はさらに短い。したがって、“短い時間”が衝突時間に比べて十分長いので断熱近似が成り立つ。1回の反応で 100 keV のエネルギーが発生すると、ステンレス鋼の熱容量 $0.5 \text{ J/K} \cdot \text{g}$ を用いて、衝突の平均自由行程の領域の体積は、



第 V-3図 ⁵⁶Fe の中性子 KERMA ファクタ

^{a)}NJOY コードの直接法では、反跳原子核のエネルギー等を物理的に最大になる値を使って KERMA ファクタを計算しているため、正確にいうと、KERMA ファクタの上限値を算出している。

体積 = $4/3 \cdot \pi (0.5 \times 10^{-6})^3 \text{ cm}^3 \approx 5 \times 10^{-19} \text{ cm}^3$
 となり、密度 = 8 g/cm^3 を適用すると、温度は、

$$T = \frac{100 \times 10^3 \times 1.6 \times 10^{-19}}{0.5 \times 8 \times 5 \times 10^{-19}} \approx 8,000 \text{ K}$$

となる。すなわち、代表長が格子原子的なマイクロな視野の数千倍の領域であるマクロな視野で見ると、ステンレス鋼は局所的にかつ短時間の間、溶融していることを意味している。その後、フォノンの速度で振動が伝わり、すなわち熱エネルギーが広がり、中性子束に応じた発熱密度として材料が加熱される。このときの温度は、その物体の発熱密度と質量による総発熱率と冷却による除熱率によって決まる。

実際の設計では、材料によって使用温度の上限があり、それを超えないように熱設計をする。代表的な核融合実験炉である ITER¹⁾ では、第一壁中性子負荷 1 MW/m^2 で運転するとして、このときの第一壁近傍の核発熱率は 10 W/cm^3 である。ITER での第一壁や遮蔽ブランケット、増殖ブランケット領域の温度は、構造材の使用温度条件や生成したトリチウムの回収可能な温度となるように熱設計によって決定されるものである。第一壁にアーマ材^{b)}としてベリリウムを用いている ITER では、第一壁の表面最高温度を 700°C としている(もっとも第一壁の表面は、核発熱だけではなく、プラズマからの直接の熱負荷によって決まる)¹⁾。また、トリチウム増殖をしない遮蔽ブランケットでは、熱源は核発熱のみで、冷却材の温度を入口で 100°C 、出口で 148°C とし、遮蔽ブランケットの最高温度が 340°C 程度になるように設計している¹⁾。第 X 章「壁の熱をどうするか?」の章で別途詳しく解説されているので、その章を参照されたし。

4. 核反応による原子の弾き出し

V-2節で述べたように、格子原子的なマイクロな視野で見ると、中性子入射の核反応によって標的原子核は反跳を受ける。V-3節では、これを反跳による格子振動である熱エネルギーとしてとらえた。これを熱化する以前の極短時間現象として眺めると、材料の照射損傷という現象が見えてくる。

反跳エネルギーが弾き出しエネルギーより大きい場合には、原子は格子から弾き出される。最初に弾き出された原子を第 1 次ノックオン原子 (PKA: Primary Knock-on Atom) と呼び、第 1 次ノックオン原子のエネルギーが弾き出しエネルギーよりも十分大きいと、2 次、3 次等の弾き出しが連鎖的に引き起こされる。この現象をカスケード損傷と呼んでいる。ほとんどのカスケード損傷は極短時間で消滅するが、一部は空孔の集合体等の格子欠陥が残る。これらの集合した空孔はボイドを形成し

^{b)} アーマとは鎧のことで、核融合炉では第一壁をプラズマからの荷電粒子の照射から防護するための保護板を表す用語である。

エリングを引き起こし、ヘリウム生成とともに材料を劣化させる。さらに周囲がイオン化されることによっても材料が劣化する。このような反跳原子核による材料の劣化を評価する物理的指標として、Lindhard⁸⁾、Robinson⁹⁾らにより原子当たりの弾き出し数 dpa (displacements per atom) が導入された。

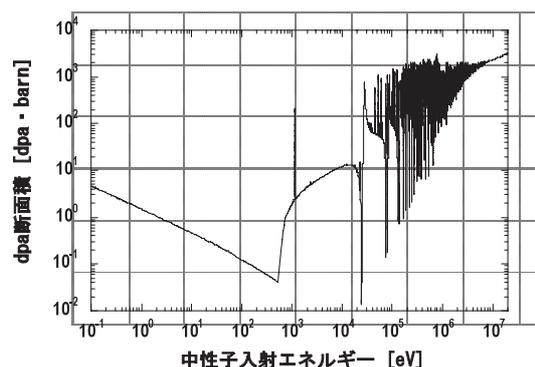
dpa は、弾き出し断面積 σ_{dpa} に中性子フラックスを乗じて時間積分することによって計算できる。入射中性子エネルギー E_n による弾き出し断面積 σ_{dpa} は、格子原子の弾き出しに有効に使われるエネルギーを $T_d(E_n)$ で表すと、

$$\sigma_{\text{dpa}}(E_n) = \frac{0.82}{\varepsilon_d} \frac{T_d(E_n) \bar{\sigma}(E_n)}{\bar{\sigma}(E_n)} \quad (4)$$

となる。ここで、 ε_d は原子の弾き出しエネルギーで、鉄では通常 40 eV が使われている。 $T_d(E_n)$ は、反跳原子核の運動エネルギーから、Lindhard⁸⁾、Robinson⁹⁾らの電子スクリーニング理論により計算される因子を、核反応断面積で重み付けして反跳エネルギーと反跳角で平均し、核反応の種類について和をとった格子原子の弾き出しに有効に使われるエネルギーである。また、 $\bar{\sigma}(E_n)$ は、中性子エネルギー E_n により核反応で生ずる標的原子核の反跳エネルギーと反跳角で積分し、核反応の種類について和をとった核反応断面積である。KERMA ファクタの算出と同様にして、反跳原子核の運動エネルギーは、核データライブラリーを用いて計算することができる。計算の詳細については、文献10)が詳しい。

弾き出し断面積 σ_{dpa} についても、真木ら¹⁰⁾が1990年代に核融合炉の核設計のために核データライブラリー JENDL-3.1 から弾き出し断面積 σ_{dpa} 計算し、公開している。また、NJOY コードでも弾き出し断面積 σ_{dpa} を算出することができ、小迫ら⁶⁾が日本の最新の核データライブラリー JENDL-3.3 から弾き出し断面積 σ_{dpa} を計算している。弾き出し断面積 σ_{dpa} の一例として JENDL-3.3 の ^{56}Fe データを NJOY で処理して作成した ^{56}Fe の弾き出し断面積を第 V-4 図に示す。

代表的な例として、国際熱核融合実験炉 ITER¹⁾ の設計で、構造材として使用されている SUS 316 と、第一壁



第 V-4 図 ^{56}Fe の弾き出し断面積

やダイバータの冷却管材である銅の dpa を算出する。ITER において第一壁中性子フルエンス 1 MWa/m^2 で運転後の SUS 316 と銅の dpa は 10 dpa, 13 dpa である。ここで、10 dpa とは、中性子の照射を受けているある期間中に格子原子核が 10 回弾き出されることを意味している。SUS 316 の場合には、10 回程度の弾き出しを受けると、材料としての使用限界に達する。

放射線照射による材料劣化の指標として、dpa は歴史的経緯があるが、いろいろな線種やエネルギーの照射による材料劣化を必ずしも統一的にかつ精度よく評価していないことは多くの人が認めるところである。指標が有効であるためには、照射損傷の基礎過程の深い理解に基づくものでなければならない。これまで、dpa に代わる指標として、いろいろな損傷過程やモデルが提唱されてきた¹¹⁾。例えば、V-3(2)項で述べたように、カスケード損傷を引き起こしていると考えられている照射中心部は、溶融状態にあることが推測されることから、カスケード損傷の極短時間の消滅というモデルとは、全く別の損傷過程が想定される。すなわち、溶融状態から極短時間に冷却が起り、固化状態に移行する過程で収縮が起こると内部に空洞が生じ、これが欠陥となる、というモデルでは、Lindhard や Robinson らが想定していたモデルとは全く別の過程を示唆している。

しかし、Lindhard や Robinson らが想定していたモデルを格子原子的なミクロな視野からとらえたモデルであると考え、代表長がその数千倍の領域というマクロな視野でとらえたのが溶融から冷却へのモデルと見ると、両者は視野の大きさが異なるだけで、同じ現象を異なる視野の大きさからとらえていると考えられる。すなわち、数十格子間にわたって弾き出された多数の格子原子をマクロ的に見れば溶融状態にあり、ほとんどのカスケード損傷が極短時間で消滅する過程は冷却過程であると考えられる。

汎用的な新たな指標を見出すことに期待があるものの、長年 dpa を指標として利用し、多くの照射データが中性子照射の dpa をベースに議論され蓄積されている現在、これに替わる新たな指標を見出すのは、困難であるといわざるを得ない。

5. まとめ

核融合炉で使用される材料について、以上述べたような方法に従って算出された KERMA ファクタが用意されている。この KERMA ファクタを用いれば、核融合炉の第一壁やブランケット等で発生する核発熱を容易に算出することができる。

原子当たりの弾き出し数 dpa は照射損傷を評価する物理量として、Lindhard, Robinson らにより導入され

たものであり、以上概観したように、弾き出し断面積が用意されているので、照射損傷の指標として dpa を用いることができる。しかし、同じ dpa 値でも線種やエネルギーによって損傷が異なる等の問題点も指摘されている。このような点から、新たな照射損傷評価指標が求められている。

—参考文献—

- 1) 下村安夫, 他, “ITER 工学設計”, プラズマ・核融合学会誌, 78, 増刊, (2002).
- 2) 相良明男, 他, 日本原子力学会「昭51年会要旨集」, A 18 (1976); Y. Seki, JAERI-M 6726, 20 (1976).
- 3) 真木紘一, 他, 核発熱定数 KERMA ライブラリーの作成—核融合群定数セット FUSION-J 3 用核発熱定数ライブラリー, JAERI-M 91-073, (1991).
- 4) K. Shibata, et al. (Ed.), *Japanese Evaluated Nuclear Data Library, Version 3-JENDL-3*, JAERI 1319, (1990).
- 5) R.E. MacFarlane, D.W. Muir, *The NJOY Nuclear Data Processing System, Version 91*, LA-12740-M, (1995).
- 6) K. Kosako, et al., “The Libraries FSXLIB and MATXSLLIB based on JENDL-3.3”, JAERI-Data/Code 2003-011, (2003).
- 7) K. Shibata, et al., *J. Nucl. Sci. Technol.* **39**, 1125 (2002).
- 8) J. Lindhard, V. Nielsen, M. Scharff, P. V. Thomsen, *Kgl. Danske Vidensk. Selsk. Mat.-fys. Medd.*, **33**[10], (1963).
- 9) M. T. Robinson, “Energy Dependence of Neutron Irradiation Damage in Solids,” *Proc. BNES Nuclear Fusion Reactor, Conf.*, British Nuclear Energy Society, London, p 364 (1970).
- 10) K. Maki, et al., *Development of Displacement Cross Section Set for Evaluating Radiation Damage by Neutron Irradiation in Materials Used for Fusion Reactors*, JAERI-Data/Code 97-002, (1997).
- 11) 室賀健夫, プラズマ・核融合学会誌, **74**[1], 9 (1998).

著者紹介

真木 紘一(まき・こういち)



(株)IUU

(専門分野/関心分野)原子力分野の電磁診断技術の研究開発、核融合炉放射線工学
原子力および医療等の放射線利用分野の放射線遮蔽工学

今野 力(こんの・ちから)

本誌, 50[9], pp.579 (2008) 参照。