

放射線の照射によって受ける壁材料 のダメージ

1. はじめに

核融合炉が商用炉として成立するには、まだ、多くの 克服すべき課題がある。燃料をどうすればうまく燃やせ るかという課題(プラズマ燃焼の問題)のほか, 放射線照 射の特殊な環境で使われる材料の劣化の問題(材料照射 損傷)もある。この放射線照射による材料劣化の問題は, 既存の核分裂炉においても共通であり、つまり、炉の寿 命というのはそれを構成する材料の健全性によって決ま るのである。炉寿命をある程度以上に確保するには、材 料の健全性を維持しなくてはならない。放射線照射の過 酷な環境において、果たして材料は持ちこたえられるの か?ということの懸念は、1940年代初頭、最初の原子炉 が建設された当初からあった。かのウィグナーは、原子 炉内の核分裂反応によって生成する中性子および核分裂 生成物の影響により,材料のミクロ構造が変化し,それ が原因となって、いくつかの技術的な問題が生じるかも しれない、とすでに指摘していた。そのような彼の指摘 は全く正しかったにもかかわらず、材料の問題がしっか りと認識されるようになったのは、実は、高速増殖炉の 開発以降のことであった。

高速増殖炉の構造材料は,数 MeV 程度のエネルギー をもつ中性子の照射を受けるが,これによる材料の機械 的特性の劣化は,熱中性子の照射を受ける既存の原子炉 内の材料に比べ,とても激しいものになる。ましてや, さらに高いエネルギー(14 MeV)の中性子照射を受ける 核融合炉材料に至っては,材料損傷の問題は,おそらく 炉の寿命を決定するほどのインパクトがあるだろう。こ

The Fusion Reactor Wall is Getting Hot!—A Challenge towards the Future for Numerical Modelling (6): Chap. VI How is the wall damaged ?—1. Radiation damage in materials: Shahram SHARAFAT, Kazunori MORISHITA. (2008年 9月5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5回 V.壁はどのくらい熱くなるか

のような機械的特性の劣化のほかにも,照射によって 時々刻々ミクロ構造が変化する材料においては,それに 伴う除熱機能の低下やトリチウム透過特性の劣化なども 懸念される。

本章では、核融合炉材料の放射線照射損傷において特 徴的なヘリウム損傷を中心にその概略を説明する。これ をもとに次章 VI-2では、照射損傷モデリングについて述 べる。

2. 材料のミクロ構造変化

核融合炉は主に結晶性の固体材料から構成される。そ もそも固体というのは、原子の集団である。しかもそれ ぞれの原子は決められた位置(格子点)に行儀よく配列し ている。これが完全結晶といわれる固体材料の基本であ る。核融合炉内のプラズマを囲む壁(第一壁)やダイバー タといわれる部位も、このような結晶性の材料から構成 されている。高エネルギーの中性子がこうした材料に侵 入すると、中性子は材料内の原子と衝突し、その結果、 原子の種類が変わったり(核変換),あるいは、正規の格 子点から原子がはじき飛ばされたりする(原子はじき出 し)。そして、原子をもたない格子点が形成されたり(原 子空孔とよぶ),格子点でない位置に原子が存在したり するようになる(格子間原子とよぶ)。このような原子配 列の不完全性を一般に格子欠陥と呼ぶが、中性子の照射 により、材料内には多くの格子欠陥が生成することにな る。

こうした空孔や格子間原子などの点欠陥は、十分に高 温であれば、固体内を移動(拡散)することができる。こ の移動によって、材料内の特定の場所に多数の欠陥が集 合し、それらが互いに結合をすると、よりサイズの大き な欠陥集合体が形成される。たとえば、多数の空孔が3 次元状に集まるとボイドと呼ばれる空洞が材料内に形成 される。また、この空洞にヘリウムなどの希ガスが混入 すると、ガスバブルと呼ばれる高温でも比較的安定な気 泡になる。どちらの欠陥集合体もサブナノからサブミク ロン程度の大きさにまで成長するが、こうした欠陥の形 成は、照射によって材料の体積が膨張する現象(スエリ ング)の要因とされる。以下では、まず、どのように材 料内部へへリウムが混入するのかについて説明し、その 後、そのヘリウムがどのように材料ミクロ構造を変化さ せていくかについて述べる。

3. 材料内部へのヘリウムの混入

材料内へヘリウムが混入する方法は2通りある。ひと つは材料内の核変換反応に伴うヘリウム生成であり、も うひとつはエネルギーをもったヘリウム粒子が材料の外 から内部へ直接入射(注入)する場合である。

重水素 D およびトリチウム T を燃料とする DT 核融 合反応では、14 MeV の中性子と3.5 MeV のアルファ粒 子 (ヘリウム原子核)が生成する。この中性子が材料内に 混入すると、材料内部では核変換反応(*n*, α)が起こり、 ヘリウムが生成される。このときの反応断面積を第 **N-1** 図(左)に示す。また、第 N-1図(右)には、各金属におけ る反応断面積の中性子エネルギー依存性を表す。中性子 のエネルギーが 6 ~16 MeV のときに反応断面積が非常 に大きくなることがわかる。核融合中性子のエネルギー はまさにこの範囲内にある。すなわち、たとえ材料に含 まれる元素を慎重に選んだとしても、完全にヘリウム生 成を抑えこむことは難しい。

このような材料内のヘリウム生成とは別に,DT 核融 合反応によって生成する高エネルギーヘリウム粒子が材 料に直接入射する場合がある。特に慣性核融合方式 (ICF)の第一壁では,入射したヘリウム粒子は,材料内 に衝撃波を発生させ,極短時間(10⁻⁷~10⁻⁴s)のうちに熱 を付与する。そして,表面の数ミクロン層にブリスタリ ング(材料表面に形成する火脹れのような形状変化)やエ ロージョン(摩耗)などの表面損傷を引き起こす。

一方,磁場閉じ込め方式の場合,DT 核融合反応によっ て生成したヘリウム粒子のうち,高々1%が第一壁材料 に混入する。しかも,そのときの衝突のエネルギーはせ いぜい100 eV 程度である。このような低エネルギーの 粒子が起こす損傷のほとんどはスパッタリング(材料表 面に位置する原子が衝突反応により真空中へはじき飛ば される現象)である。ただし、ヘリウムの悪い影響はこ こで終わりではない。こうして材料内部に侵入したヘリ ウム原子の多くは、2次的な作用として材料内の格子欠 陥と強く相互作用し、その結果、ブリスタリングやスポ ンジ層の形成といった、より激しい材料表面損傷をひき 起こす。

参考のために、各金属を第一壁に使った場合の磁場閉 じ込め方式に対するはじき出し損傷速度およびヘリウム 生成速度を第 №-1表に、また、さまざまな炉型に対する はじき出し損傷速度およびヘリウム生成速度を第 №-2表 に示す。比較のために、高速増殖炉における値も示して おく。なお、dpa ははじき出し損傷量の単位である。

第[№]-1表 磁場閉じ込め核融合装置における第一壁材料の 損傷速度とヘリウム生成速度

第一壁材料	年間はじき出 し損傷量 (dpa・a ⁻¹)	年間ヘリウム 生成量 (appm・a ⁻¹)	He/dpa 比 (appm/dpa)
ステンレス鋼	11.6	145	12.7
(AISI-316)			
バナジウム合	11.7	59	5.0
金(V-2011)			
モリブデン	7.5	47	6.3

dpa: displacements per atom, appm: atom parts per million

第11-2表 各照射場における照射損傷速度

炉型	はじき出し 損傷速度 (dpa・s ⁻¹)	ヘリウム生成 速度 (appm・s ⁻¹)	年間出力 サイクル数
慣性核融合炉	10^{-1}	10^{-1}	10^{8}
磁場閉じ込め	10^{-6}	10^{-5}	10^{5}
(トカマク)			
高速増殖炉	10^{-6}	10^{-7}	$5 \sim 10$



725

4. 金属中のヘリウムの基本的な性質

照射によって材料内にヘリウムが混入すると,スエリ ング,粒界脆化(結晶粒界が弱って,材料が脆くなる現 象),ブリスタリングなどが起こる。このときのヘリウ ム挙動をよく理解することは,材料の寿命評価,材料設 計,材料劣化の低減に有効である。そのためには,(1)移 動特性を含む材料内でのヘリウム原子の諸特性,(2)ヘリ ウムとその他の欠陥の間の相互作用,もしくは,ヘリウ ムバブルの核生成に重要なヘリウムとヘリウム・空孔複 合体の間の相互作用,(3)照射下のバブル成長に重要なヘ リウムや点欠陥とバブルの間の相互作用などに関する知 見が必要になる。これらの諸特性は,おおよそ欠陥のサ イズによって,第**N-3表**に示すように分類される。ここ では詳細は触れないが,材料内のヘリウム挙動を明らか にするには,非常に多くの実験手法・解析手法が必要に なることがわかる。

5. 材料内におけるヘリウム原子の特性

材料中のヘリウム挙動を定量的に理解するためには, 材料中のさまざまな位置(サイト)におけるヘリウム原子 のポテンシャルエネルギーに関する情報が必要になる。 第Ⅱ-2図に,例として Ni 金属中のヘリウム原子のポテ ンシャルエネルギーを模式的に示す。ヘリウム原子は, このような材料内の山あり谷ありのデコボコ道を移動す る。移動のしかたは図の谷から谷へのジャンプである。 そのときのヘリウム原子の跳躍力の指標が温度である。

	第Ⅵ-3表	バブルの発達フェ-	-ズと理論的・	・実験的評価手法のサイズレンシ	2
--	-------	-----------	---------	-----------------	---

カイネティックス	移 動	核生成	成 長	マクロ特性
代表長さ	~0.2 nm	~0.2-1nm	\sim 1 nm–0. 1 $\mu{\rm m}$	$\sim 0.1 - 1 \mu{ m m}$
欠陥数(He, 空孔)	1-3	3-10	$10 - 10^7$	
クラスタータイプ	欠陥	バブル核	非理想気体バブル	理想気体バブル
中睑手计	THDS, FIM, NDP,	TEM, EELS, SAS, NSC,	In situ TEM, SEM, NDP,	Swelling, Creep
天映于広	NRA, PAS, SANS	NDP, NRA, PAS, SANS	MCT, PAS, SANS	fatigue, Strain tests
理論解析	計算機シミュレーション	非平衡統計力学	反応速度論,モンテ カルロ法,熱力学	ミクロ/マクロ力学

THDS:He 熱放出スペクトル,TEM:透過型電顕,SEM:走査型電顕,SAS:中性子・X線小角散乱,NSC:核散乱法, FIM:電界イオン顕微鏡,NDP:中性子深さ方向分析,NRA:中性子共鳴減衰法,MCT:マイクロコンピュータートモグラ フィー,SANS:小角中性子散乱,PAS:陽電子消滅法



第 \mathbb{N} -2図 金属格子およびキャビティ中のヘリウムのポテンシャルエネルギー He¹ は格子間ヘリウム, HeV は置換型ヘリウムを示す。Ni 中では, ヘリウムの溶解熱 $E_{He}^{B(1)} = E_{He}^{S} = 3.5 \text{ eV}$,大きなキャビティに対するヘ リウム結合エネルギー $E_{He}^{B(2)} = 2.9 \text{ eV}$,小さなキャビティに対するへ リウム結合エネルギー $E_{He}^{B(2)} = 2.5 \text{ eV}$,空孔に対するヘリウム結合エ ネルギー $E_{Hev}^{B} = 2.1 \text{ eV}$,格子間ヘリウムの移動エネルギー $E_{He}^{m} = 0.1 \text{ eV}$ 程度になる。

谷と谷の間の山は一気に飛び越えなくてはならず,山が 高いと何度もの跳躍失敗を繰り返すことになる。そのと きの跳躍力に対して山が高すぎたり,谷が深すぎたりの 場合は,実質的にそのヘリウム原子は移動できない。深 い谷は,材料内のその場所に特有の欠陥が存在すること を意味する。そのような深い谷にヘリウムが捕捉される 状態を"へリウムがその欠陥にトラップされた"と表現す る。

完全な電子的閉殻構造をもつヘリウム原子は,材料内 において周囲の原子と電子軌道を分け合うことはない。 そのため,格子間にあるヘリウム原子の周囲には非常に 高いひずみ場が形成される。とても窮屈な状態がそこに ある。そのため,格子間ヘリウムのポテンシャルエネル ギー(E⁶_L:溶解熱)はとても高く(2~4 eV 程度),ヘリ ウム原子は材料内にほとんど溶解しないことになる。こ れは金属内のヘリウム原子がもつ一般的な特徴である。 この性質があるがゆえに,たとえ,非常に高いイオン化 ポテンシャルをもつため原子同士の凝集が弱いとされる ヘリウム原子であっても,材料内で容易に集合化(析出) するのである。

格子間のヘリウム原子が空孔にトラップされるとひず み場はかなり解消される。この状態を置換型のヘリウム 原子という。また,置換型ヘリウム原子が自己格子間原 子(材料を構成する原子のうち,格子間位置にあるもの。 SIAともいう。)に出会うと,SIAはヘリウム原子を格子 間位置へ追い出し,自らは原子空孔と再結合して消滅す る。このように,ヘリウム原子は,材料内で移動しなが ら,さまざまな点欠陥と反応し,トラップ(捕獲)反応や デトラップ(解離)反応を繰り返す。そしてやがて,材料 内で析出(バブルを形成)する。 高温脆化した構造材料では、しばしば多数のバブルが 結晶粒界に観察されることがある。これは、なんらかの メカニズムにより、ヘリウム原子が粒界へ輸送されたこ とを意味する。一般に、結晶中のヘリウム原子の拡散機 構は第 NI-3 図のようになっている。いくつかの代表的な 移動メカニズムを簡単に説明すると、以下のようにな る。

格子間ヘリウムの移動(第VI-3図の1)は,格子間位置 から隣りの格子間位置へのジャンプである。これは,ヘ リウム原子がほかの欠陥に強くトラップされるまで続 く。どんな材料にも必ず多くの欠陥(粒界,空孔,転位 線,転位ループ,析出物,格子間原子,…)が存在する ので,ヘリウム原子が格子間原子の状態で長時間拡散し 続けることはない。

置換型ヘリウム(第VI-3図の4)は、空孔の助けを使っ て移動する(空孔拡散機構)。このメカニズムが働くに は、置換型ヘリウムの極近傍に別の空孔が存在しなけれ ばならない。一般に熱空孔濃度(熱平衡状態で存在する 空孔の濃度)はとても低いので、熱平衡な状態では、こ の移動メカニズムは事実上機能しない。しかしながら、 照射等の方法で過剰な空孔が材料内に導入されるのであ れば、空孔が移動可能な温度域において、置換型ヘリウ ムも移動することが可能になる。

材料内の空孔濃度がこのように十分高いときには, さらに, 空孔(V)が置換型ヘリウム(He₁V₁)と出会って結合し, He₁V₂クラスタを形成する。この反応は, 欠陥サイズが1だけ大きくなったことを意味する。こうした反応が積み重なると,より多くの空孔が結合していくことになるので,より大きなサイズのバブルが形成されることになる。



第**Ⅵ-3**図 結晶格子中のヘリウムの移動メカニズム

1:格子間ヘリウムの移動,2:空孔移動,3:置換型ヘリウムからのヘリウム の熱的解離,4:空孔から別の空孔へのヘリウムの跳躍,5:置換型ヘリウムと 自己格子間原子の置き換わり反応による格子間へのヘリウムの放出,6:原子 間衝突による置換型ヘリウムからの非熱的な解離

6. バブルの核生成と成長

ヘリウムバブルは、空孔とヘリウム原子の複合的な集 合体である。この集合体が成長するには、バブルが空孔 を吸収するか、もしくは、バブル/母相界面の金属原子 を SIA もしくはその集合体として母相に放出しなけれ ばならない。後者をループパンチングと呼ぶ。もちろん、 それらの逆の反応(空孔の放出や SIA の吸収)が起こる と、そのバブルは収縮する。つまり、空孔や SIA の吸 収・放出の差引で、そのバブルの成長・収縮挙動が決定 される。点欠陥吸収フラックスは周囲の点欠陥濃度やそ の欠陥のジャンプ頻度で決まり、一方、点欠陥放出フラッ クスはバブルの熱的安定性などで決まる。

実際のヘリウムバブルの核生成・成長は、低温($T < 0.3 T_m$)と高温($T > 0.3 T_m$)ではかなり異なる(T_m はK単位で示した材料の融点)。第VI-4図(左)に示すように、低温かつヘリウム導入速度が高い条件では、ヘリウム原子は容易に集合化し、熱力学的なバリアを感じることなく、自発的にバブルへと変化する。たとえ空孔が十分に存在しなくとも、集合体内のヘリウム圧力が十分に高いのであれば、ループパンチング等のメカニズムにより集合体は成長する。

一方,核融合第一壁材料の使用条件においては,ヘリ ウムバブル(キャビティ)が核生成するための熱力学的障 壁が存在する。この場合,バブル核(エンブリオ)が"た またま"空孔を続けざまに吸収するなどの確率論的な効 果(バブルが吸収する空孔フラックスに対するゆらぎの 効果)が必要になる。こうしてできたバブルは,第 II-4 図(右)のように,高温において,それ自体が移動し合体・ 成長することもある。特に粒界では,高速移動によって 成長が促進されるので,粒界脆化の要因になる⁴。

このようなバブルの核生成・成長機構の解明には,一 般に3種類の解析が行われる。1つ目は,アトミスティッ クなアプローチであり,適当な原子間ポテンシャルを仮 定することにより安定核構造等が調べられる。このアプ

ローチの欠点は、大きなクラスタに適用できないことで あり, また, 照射によるキネティックな効果が評価でき ないことである。2つ目のアプローチは、キャビティの 核生成・成長に関して純粋にキネティックな表現を使っ て"臨界キャビティサイズ"を求める方法である。このア プローチでは、上述したゆらぎの効果を無視している。 3つ目のアプローチは、熱力学的な考察を通して核生 成・成長を調べる方法である。そこでは、ヘリウムバブ ルの形成自由エネルギーが評価される。第Ⅵ-3表で示し たように,材料内の照射損傷,特にここで示したヘリウ ムバブルの形成は、多くの物理過程が複雑に絡みあう現 象であり、すなわち、ミクロからマクロにわたる幅広い 空間スケール、そして、ピコ秒から炉寿命にわたる幅広 い時間スケールに及ぶマルチスケールな現象である。こ のような現象を解析する方法論として、多角的なアプ ローチが必要になる。

7. まとめ

核融合照射環境下における材料の内部では,不可避的 にヘリウムが生成もしくは直接注入され,それがはじき 出し欠陥と相互作用する結果,材料内にバブルが形成さ れ,材料のバルク特性が劣化する。これは,核融合炉の 成立性に関して,プラズマ燃焼の問題に次ぐ深刻な問題 である。

この数十年間,材料のバルク特性に及ぼすヘリウムの 効果を理解するための研究が継続的に行われてきた。核 融合炉照射環境そのものは現実には存在しないので,イ オン加速器照射技術や計算機シミュレーション技術など を相補的に用いた研究も行われてきた。しかしながら, バブルの核生成・成長は,サブミクロンレベルの話であ るため,まだあまりよく理解されてない部分もある。更 なる研究が必要である。

本章では,照射による材料ミクロ構造変化のプロセス の概略を説明した。次章では,このようなプロセスをど



第 Ⅶ-4図 (左) ヘリウム照射により Si 中に形成したヘリウム析出物の XTEM 像³, (右) 高温における Fe 中の粒界移動とそれに伴うバブルの掃き出し (ビデオ映像)⁴。

のようにモデル化するかについて解説する。

本記事作成にあたり,琉球大学 岩切 宏友,島根大学 宮本光貴の両先生にお世話になりました。深く感謝いた します。

一参 考 文 献一

- G. L. Kulcinski, D.G. Doran, M.A. Abdou, ASTM STP 570, p. 329 (1975).
- J. Halil, G. L. Kulcinski, in Radiation Effects and Tritium Technology for Fusion Reactors, Gatlinburg, (1975); USERDA Report CONF-750989, 1, 437 (1976).
- C. H. Zhang, S. E. Donnelly, V. M. Vishnyakov, J. H. Evans, T. Shibayama, Y. M. Sun, *Nucl. Instrum. Methods*, B 218, 53 (2004).
- K. Ono, M. Miyamoto, K. Arakawa, J. Nucl. Mater., 367-370, 522 (2007).

著 者 紹 介

Shahram SHARAFAT $(\hat{\nu} \times - \bar{\nu} \wedge \hat{\nu} \times \bar{\nu} \times$



カルフォルニア大学ロサンゼルス校 (専門分野/関心分野)放射線・材料相互作 用,照射下材料挙動モデリング,プラズマ およびレーザープロセッシング,核融合工 学,核融合炉構造設計

森下和功(もりした・かずのり)



京都大学 (専門分野/関心分野)核融合材料の照射効 果に関するマルチスケールモデリング

