

## 加速器多重照射が誘う未知の材料物性 Novel Material Properties Induced by Irradiation

近藤 創介  
Sosuke Kondo

東北大金研  
IMR, Tohoku Univ.

### 1. はじめに

運動エネルギーをもった粒子が材料に入射すると、そのエネルギーを使って原子配列に変化が起こる。これが、核融合炉材料劣化の端的な仕組みである。使用前の材料は（使用前という特殊な環境での）平衡状態にある。上述の変化の速度が大きければ材料は変化し続ける非平衡状態にあるし、同時にふんだんに利用できる入射粒子から得たエネルギーを使って（使用前とは異なる真の）基底状態に近づこうともするので、やがて両者の速度が釣り合えば（擬）平衡状態に達する。その状態の材料は元の材料とは異なる新しい物性をもった材料であり、それが我々に都合が悪ければ材料劣化と呼び、そうでなければ新奇な材料の創製ともいえる。本発表ではこの観点から、粒子線照射を被った材料が、過酷環境の中で自身の本来の姿になると試みた結果現れた例を、新しい材料科学への布石となるべくいくつか紹介する。

### 2. 反結晶の創製

小題からは何のこともよくわからないかもしれないが、特定の結晶面に由来するファセットをもったボイド（空孔集合体）と言えば材料分野の方はすぐにご理解いただけると思う。ただし、セラミックス、特に2元素以上を含む共有結合性結晶では結合に制約が多く、興味深い形になることが多い。図1は炭化ケイ素（SiC）を長時間高温で粒子線照射した後のTEM像であるが、空洞（照射誘起ボイド）が多数形成されている[1]。解析によってこれは4枚の111面で囲われた四面体であることが分かった。照射誘起ボイドは照射によってできた空孔原子が表面積を減らそうと集まった結果形成される。主として表面エネルギーの増加を極力抑制するため（高圧ガスを内包しない場合には）、低エ

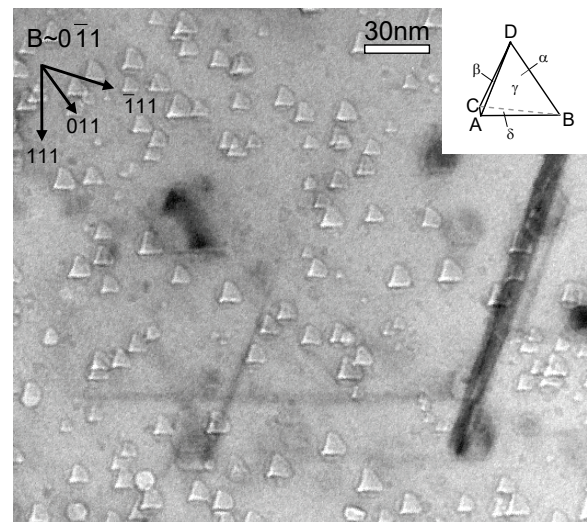


図1. SiC中に形成された四面体ボイド[1].

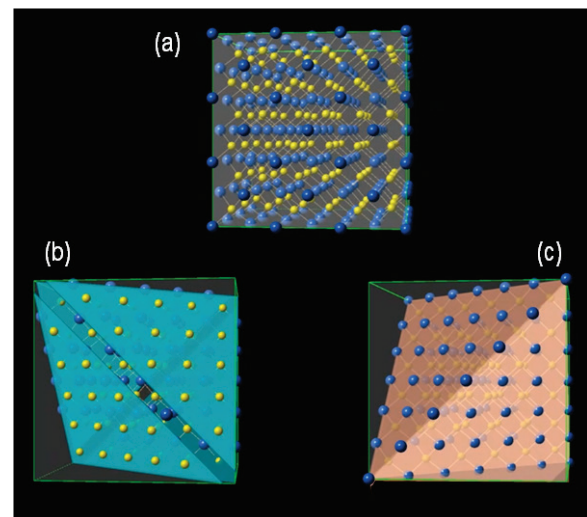


図2. SiC中のボイドの構造模式図.

ネルギー面で構成された多面体としてしばしば観察される。例えば、FCC金属では8つの111面に囲まれた八面体ボイドが一般的である。四面体の形成は、体積/表面積比から考えて八面体より不利である。図1をよく見ると同一粒内

ではそのすべての頂点が同一方向を向いており、ここにヒントが隠されている。図2(a)はSiCの3×3スーパーセルであるが、図2(b)の111四面体では炭素原子が4つの表面となり、図2(c)の四面体ではSi原子が表面となる。八面体ポイドを作ろうとすると、これら両種の原子面がそれぞれ4面ずつ必要となる。すなわち、四面体ポイドの一方配列は照射下でSiあるいはC{111}原子面のどちらか一方のみが結晶内部表面として許されることを示している。

これらの構造は結晶成長時に自然には認められず、結晶内を空孔がSiC結晶の海を上下左右関係なく動き回る、かつポイドへの空孔の流束が高い条件下でのみ得られる構造である。そして、前述を思い出していただきたいのだが、この四面体こそSiCの基底状態の結晶を反映した形であると考えられる。ただし、空洞であるのが小題を造語の反結晶とした所以である。

### 3. 欠陥の化学量論組成

上で空孔集合体の例が出たので、関連してSiCの格子間原子集合体の例を挙げようと思う。格子間原子集合体も、粒子線と材料の構成原子との衝突ではじき出された原子が結晶の隙間で集まって格子ひずみをなるべく減らそうとした結果、形成される。しかし、無作為にSiとC格子間原子が集まるわけではないようである。図3はイオン照射下での格子間原子型のフランク転位ループの成長と損傷量の関係を示している[2]。白抜きシンボルははじき出し損傷のみが入る条件での、緑のソリッドシンボルはそれに加えてSiイオンを追加で同時注入した条

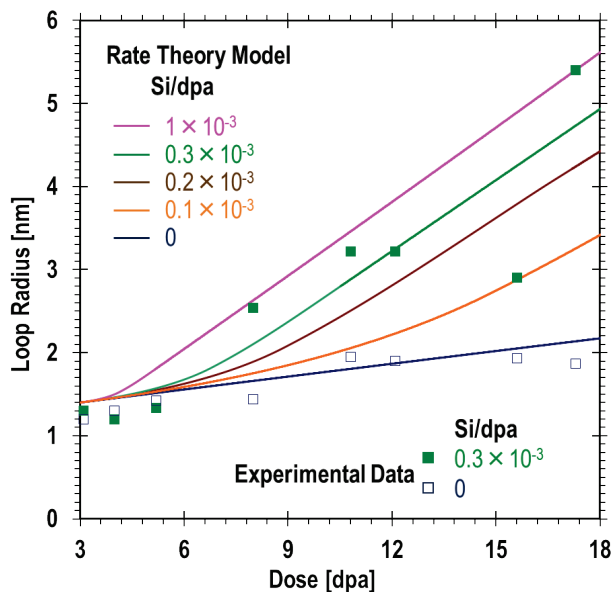


図3. SiCのループ成長に及ぼすSi注入の効果。

件でのTEM観察結果である。図から明らかなように、Siイオンを同時に注入した方がはじき出し損傷だけの時より成長速度が大きいことがわかる。SiCのはじき出し損傷ではCの方がSi原子よりはじき出されやすいので、母相中ではC格子間原子がSiよりも高濃度な(Cのフラックスが大きい)状態が続いている。同時Si注入はSi格子間原子を外部から補充しているような状況である。図中の直線や曲線は反応速度式による成長予測モデルであるが、転位ループがSi/C比を化学量論比である1を保持した状態でのみ成長するという条件を付してある。結果、実験データと完全に一致しているわけではないがSiC中の転位ループはC格子間原子だけでは安定に成長できないことを示唆している。

格子像観察により111面上に形成された転位ループの構造解析を行ったところ、こちらも観察結果とSi/C比を保持した転位ループ像シミュレーションとがよく一致していた(紙面が限られているのでこちらは講演内で)。ポイドの話と同様に、照射下では照射前の秩序を乱しながらもただ乱雑になるだけでなく、そこに適応する新しい秩序が形成されていることがわかる。

### 4. まとめ

ここで挙げた例以外でも、反結晶の他の例[3]や照射下でのクラックヒーリングによる自己修復挙動[4]などがあり、講演では紹介する予定である。「はじめに」で述べたようにいずれの材料挙動も急速な構造の破壊と、急速な修復が同時に起こった結末である。新しい構造は新しい材料物性や機能を生む可能性も秘めている点から、講演では、新しい材料科学としての可能性を議論したい。

### 参考文献

- [1] S. Kondo, Y. Katoh, L. L. Snead, Appl. Phys. Lett. 93, 163110 (2008).
- [2] S. Kondo, Y. Katoh, A. Kohyama, Mechanical Properties and Performance of Engineering Ceramics and Composites III, Published by Wiley Default, 2007, pp.91-99 (2007).
- [3] S. Kondo, C.M. Parish, T. Koyanagi, Y. Katoh, Appl. Phys. Lett. 110 142106 (2017).
- [4] V. Casalegno, S. Kondo, T. Hinoki, M. Salvo, A. Czyska-Filemonowicz, T. Moskalewicz, Y. Katoh, M. Ferraris, J. Nucl. Mater., 501 172-180 (2018).