TEM その場観察による ヘリウムバブルの動的挙動の研究

小 野 興太郎* 宮 本 光 貴**
荒 河 一 渡*** R. C. Birtcher****

1. は じ め に

固体中の水素やヘリウムの挙動、格子欠陥との相互作用の問題は、物理学的にも工学的にも興味ある重要な課題である。特にヘリウムは、溶解度が極めて低いことや、原子空孔などの格子欠陥との相互作用が強いために、しばしばバブルとして偏析する。成長したバブルは、材料の内部組織を大きく変化させ、スエリングや粒界脆化などの機械的性質の劣化をもたらすことから、原子炉材料や核融合炉材料の開発にはヘリウムを含んだ照射損傷挙動の解明が重要な課題となっている⁽¹⁾。ITER(国際熱核融合実験炉)の建設が現実になり、炉構造物候補材料における照射効果・ヘリウム効果について広範な試験研究が行われているが⁽²⁾⁻⁽⁴⁾、本稿では、その基礎となるバブル挙動の素過程に焦点を当てて進めた研究成果を紹介する。

2. 試料とイオン照射その場観察システム

ここで紹介する実験に用いた試料は、高純度の Al, Cu(同和鉱業株式会社製), Fe(昭和電工株式会社製), Au(田中貴金属工業株式会社製), Fe-Cr 合金と Fe-16Cr-17Ni 合金(母材: Johnson-Matthey 社製), SUS316L, SUS304(原子力安全基盤機構提供)などである。

イオン照射その場観察システム⁽⁵⁾は、電子顕微鏡 JEM-2010 を中心として、これに 1~20 keV のイオン加速器 ORIGIN-RIB-20S が直結されており、光軸に対して 17° の

角度で照射が可能である。Gatan 社製高温試料ホルダーと高感度 CCD カメラシステムにより、1273 K までの照射とその場観察のビデオ記録が可能になっている。バブルの挙動などの画像の計測処理は ImagePro-Plus などのソフトウェアを用いて行った。

本研究では、上記装置を用いて、5~10 keV に加速した He⁺ イオンを 470~870 K の間で 10²⁰ ions/m² のオーダーまで照射することによりバブルを導入した。バブルのサイズや密度は照射温度、照射量を変えることにより制御できる。大きいサイズのバブルは移動し難いので、位置測定のためのマーカーとして導入した。バブルの試料内深さ分布は、20~90 nm 程度に分布し、SRIM コード⁽⁶⁾によって計算されるヘリウムイオンと原子空孔の深さ分布の積の分布に近い。

ヘリウムバブルを予め導入した試料に、アルゴン国立研究所の IVEM 装置を用いて、高エネルギー自己イオンを照射し、照射下でのバブルの挙動のその場観察を行った。IVEM 装置は、Hitachi-300 kV 電子顕微鏡に高エネルギーイオン照射装置が直結されているもので、我々と同様な照射その場観察が可能なシステムになっている。

3. バブルの挙動の解析とブラウン運動

今、拡散しているバブルが図 1 のように、O を原点として、時間 Δt の間に $P_1, P_2, \dots$ と移動し、 $i\Delta t$ 後に P_i 点に達したとする。 P_i 点の位置ベクトルを $R_i (R_{xi}, R_{yi}, R_{zi})$ とすると、移動距離の二乗平均は、

$$\langle R_i^2 \rangle = \langle R_{xi}^2 + R_{yi}^2 + R_{zi}^2 \rangle \quad (1)$$

* 島根大学教授; 総合理工学部物質科学科(〒690-8504 松江市西川津町1060)

** 島根大学助手; 総合理工学部物質科学科

*** 大阪大学超高压電子顕微鏡センター助手

**** Materials Science Division, Argonne National Laboratory, USA

Study of Dynamical Behavior of Helium Bubbles by *In-Situ* TEM Observation; Kotaro Ono*, Mitsutaka Miyamoto**, Kazuto Arakawa***, B. C. Birtcher**** (*,**Department of Materials Science, Shimane University, Matsue. ***UHV-EM Center, Osaka University, Osaka. ****MSD, Argonne National Laboratory, Argonne, IL, USA)

Keywords: irradiation damage, helium, diffusion, lattice defects, nuclear materials, electron microscopy

2005年10月7日受理

図1 バブルの移動の模式図.

となる. バブルの拡散が等方的でありランダムな確率過程であるとするとき $\langle R_{xi}^2 \rangle = \langle R_{yi}^2 \rangle = \langle R_{zi}^2 \rangle$ であるから, アインシュタインの関係式により, バブルの拡散係数を D とし, 改めて $i\Delta t = t$ とおき i を落とすと,

$$\langle R^2 \rangle = 6Dt \quad (2)$$

$$= 4Dt \quad (2')$$

と表せる.

電子顕微鏡では, 3 次元のバブルの運動は投影されて 2 次元の運動として観察されるが, 上記のような議論から, バブルの移動距離の二乗平均について式 (2)' のような等式が試料の傾斜を変えた測定によっても成立することが実験的に示されれば, 実際の結晶中では 3 次元のブラウン運動⁽⁷⁾ が起こっていると推定でき, 拡散係数を実験的に決定することができるはずである. 次節に示すように, 結晶粒界面内でのバブルの 2 次元の運動, 転位線に沿った 1 次元の運動についても, 同様な議論からバブルの拡散係数を求めることができる.

また, 単なる $\langle R^2 \rangle$ の平均値だけではなく, 確立論的に R^2 の値の分布をチェックしておくことも重要と思われる. ある時刻 t において, R^2 から $R^2 + dR^2$ の範囲にバブルが見出される確率を $P(R^2, t)dR^2$ とすると, ブラウン運動の場合は,

$$P(R^2, t) = (4Dt)^{-1} \exp(-R^2/4Dt) \quad (3)$$

で与えられる. 実際に, 移動距離の二乗値を測定した時に, R_1^2 から R_j^2 の値が測定される回数 N は, 全測定回数を N_0 として

$$N = N_0 \int_{R_1^2}^{R_j^2} P(R^2, t) d(R^2) \quad (4)$$

で与えられから, R^2 の測定値の分布と比較することが出来, 測定の妥当性を検証できる.

バブルは, しばしば球で近似される. 直径を d , 体積を V とすると, その内圧 P は, 例えば Carnahan and Stirlin による高圧下での状態方程式から

$$P = nkT(1 + \chi + \chi^2 - \chi^3) \cdot (1 - \chi)^{-3} V^{-1} \quad (5)$$

で与えられる⁽⁸⁾. ここで, k はボルツマン定数, n はバブル中のヘリウム原子の数, $\chi = n(\lambda/d)^3$ で与えられる. λ は Lennard-Jones ポテンシャル等によって見積もられる実効的ヘリウム球の直径である. 内圧はもちろん n/V に依存するが, 自己拡散の起こるような高温では, 原子空孔の放出・吸収によってバブルの表面張力と釣り合い, 平衡圧 $P = 4\gamma/d$

程度になると考えられる. ここで γ は表面エネルギーである. 実際 d が数 nm のバブルでは, 多くの材料でその平衡圧は数 GPa にもなる. なお, 実際のバブルでは, 内圧や表面エネルギーに依存して形状も変化するので, 拡散係数の値の評価に当たっては注意が必要である.

4. バブルの熱的移動

イオン照射その場観察システムによりヘリウムバブルを導入した後, 段階的に昇温し, バブルの熱的挙動をその場観察した.

(1) バブルの移動と合体

高純度 Cu 中のヘリウムバブルの挙動の例を図 2 に示す. 焼鈍温度は, 915 K で, 比較的小さいバブル A, B, E はランダムな方向に顕著に動いているが, 大きいバブル C, D はこの時間内では殆ど動いていない. バブル B は 20 秒付近でバブル A と合体し, さらに 50 秒付近でバブル D と合体した. このときの, 瞬時に起こる合体の様子の詳細が画面から見て取れる. これらのバブルの合体前後の体積は保存されていた. 興味深いのは, 50.35~50.39 秒の写真に見られるように, 1 nm 程度まで互いに接近すると相互作用が始まること, また, 50.39~50.55 秒に見られるように, 大きいバブルの重心位置が合体後は小さいバブルの方に移動していることである. このことは, 単に小さいバブルが大きいバブルに吸収されるということではなく, 二個のバブルが内圧差に基づいた相互作用をしながら新たな球形状のバブルへ再構成が行われたことを示している. この瞬時に起こる再構成は, バブルの表面張力を駆動力とした表面拡散によることを示唆していると思われる. バブルの粗大化に関して, Ostwald 成長の機構⁽⁹⁾ も提案されたが, 我々の観察した限りでは, 平衡圧のバブルがヘリウムを放出して収縮・消滅したという例は観察されず, 比較的小さいバブルでも移動して試料表面で消滅するか, 移動中に合体して成長するかであった⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾.

(2) 結晶粒内と粒界に沿った移動の比較⁽¹²⁾

バブルの移動は, 完全結晶中だけでなく, 粒界に沿っても見られる⁽¹³⁾. もちろんその移動は粒界構造に依存するが, 一般粒界の例を紹介する. 図 3 は, Al 中の一般粒界に沿って移動するバブル(C, D)と, 結晶粒内を移動するバブル(A, B)の挙動を比較した連続写真である. 2 秒毎に測定したバブル A と D の重心位置の軌跡を図 4 に示す.

バブルの移動を定量化するために, 移動距離の二乗の平均値を移動に要した時間に対してプロットすると, 図 5 に示すように比例関係が得られた. ここで粒界に沿った移動では試料表面に平行な成分のみを採用した. 比例関係から式 (2)' より拡散係数を評価すると, 結晶粒内のバブル A では, $D_m = 1.4 \times 10^{-19} \text{ m}^2/\text{s}$ (バブル直径 $d = 1.8 \text{ nm}$), 粒界にあるバブル D では $D_g = 1.6 \times 10^{-18} \text{ m}^2/\text{s}$ ($d = 2.7 \text{ nm}$) という値が得られた. 正確な比較にはサイズの補正が必要であるが, 粒界に沿った拡散係数は結晶粒内のものより 1 桁以上高い

図2 純Cu中のヘリウムバブルの挙動を示す連続ビデオ画像。バブルAはBと合体し、さらにDと合体した。バブルは、ここではオーバーフォーカスの条件で観察されている。バックノイズを低減させるために、1/30秒毎に撮られたフレームが2枚重ねられている。

図3 793 Kにおける純Al中の結晶粒内と一般粒界に沿ったバブルの挙動；(a) 0秒，(b) 60秒，(c) 120秒，(d) 180秒，(e) 240秒，(f) 295秒。バブルDは、粒界に沿って移動しながら253秒で試料表面で消滅した。

図4 図3中のバブルAについて2秒毎に測定した重心位置の軌跡(a)。粒界に沿ったバブルDについての同様な軌跡(b)。

ことが分かる。さらに、バブル B について、 R^2 の測定値の分布をみると図 6 のようになる。実線は、図 5 から得られた拡散係数を用い、式 (3)、(4) を用いて計算した結果である。両者は良い一致を示している。以上のことから、図 5、6 の結果は、バブルがブラウン運動をしていることを示す定量的・統計的証拠であるといえる。これまでも、バブルの移動が観察された例は散見されるが⁽¹⁴⁾⁻⁽¹⁶⁾、全てブラウン運動の関係式 (2)' を仮定した解析がなされておりブラウン運動の根拠に乏しい。従って、本研究の結果は、固体中のブラウン運動が可視化され定量的・統計的に証明された最初の成果であると思われる。

このようなブラウン運動は、FCC 金属のみならず、BCC 金属⁽¹⁷⁾、半導体 Si などでも観察された。

以上見てきたように、バブルは熱揺動によりランダムに移動すると考えられるが、その移動機構としては、バブルの拡散係数 D_m が d^{-3} に比例する体拡散機構⁽¹⁸⁾、 d^{-4} に比例する表面拡散機構⁽¹⁹⁾、ファセットを持ったバブルについてはファセット核形成機構⁽²⁰⁾などが提案されている。我々の観察結果でも、ファセットを持ったバブルは移動度が落ちることが分かっている。球状バブルを確認して測定した拡散係数

図 5 バブル A, B, C, D について、移動距離の二乗平均値対移動に要した時間。両者に比例関係があることは、バブルがブラウン運動をしている証拠である。

図 6 R^2 の測定値の分布。実線は計算結果。

のサイズ依存の例を図 7 に示す。これらの拡散係数 D_m は d^{-4} – d^{-5} の依存性を示す。また、図 2 に示したようにバブル同士の合体・再構成が瞬時に起こることや、ファセットを持ったバブルは動き難いことなどから、バブルの移動度は表面張力によって制御された表面拡散によって律速されていると考えられる。

(3) 転位との相互作用

バブルは、しばしば転位に捕獲され転位線上を移動する⁽²¹⁾。図 8 は、Cu 中の転位ループから発達した刃状転位に沿って小さいバブル A が往復運動している写真である。また、初めランダムに移動していたバブル B は、やがて転位の方に移動していき、最後にはバブル A と B は、C と合体した。バブル A と B の軌跡を図 9、10 に示す。これらの挙動から、バブル B は転位の歪場の影響を受け引き寄せられたものと思われる。また、転位線上の往復運動は、転位の熱揺動に追従するため 2 次元的であることが分かる。

(4) 添加元素の効果

実用的な意味では、合金元素がバブルの挙動に及ぼす効果の知見は重要である。我々は、イオン照射、電子顕微鏡観察とともに、STEM-EELS、四重極質量分析計によるヘリウムの熱放出特性などの測定から添加元素の効果を調べた。図 11 は、日本原子力研究所の STEM-EELS 装置を用いて、低放射化フェライト鋼系核融合炉候補材料の基合金である Fe-9Cr 中のヘリウムバブル周囲の STEM-EELS 分析を行った例である⁽¹⁷⁾。これからバブルによる Fe の減少と、バブル周囲に Cr の偏析があることが分かる。バブルの拡散係数を

図 7 915 K における純 Cu 中のバブルの拡散係数のサイズ依存。

図8 915 Kにおける純Cu中のバブルの挙動。右側の写真は140秒後。バブルAは転位線に沿って2次元限的往復運動を示す。Bは転位の歪場の影響を受け移動し、最後はCと合体した。

図9 図8中のバブルAの2秒毎の軌跡。○は表記時刻における位置を示す。転位の熱揺動によって2次元限的往復運動を示す。

図10 図8中のバブルBの2秒毎の軌跡。○は表記時刻における位置を示す。転位に引き寄せられ、212秒でバブルCと合体した。

同様な方法で測定し純Feの場合と比較してみると、図12に示すように、Fe-9Cr中のバブルの拡散係数は純Feの場合よりかなり小さい⁽¹⁷⁾。これらのことは、バブル周囲に偏析したCrが、バブルの移動を抑制していることを示唆していると思われる。このことは、同様にヘリウムイオン照射したFe-9Crでは、ヘリウムの熱放出スペクトルのピークが純Feの場合より高温側にシフトすることと良く対応している⁽²²⁾。また、Fe-16Cr-17Ni オーステナイトステンレス鋼においては、バブル周囲のCrの枯渇と、Niの偏析が見られ、やはり図12に比較して示したように、バブルの移動度は押さえられた⁽²³⁾。偏析元素は、バブルの表面拡散や表面形状などを変え移動度の低下をもたらすものと思われる。

また、最近の我々の研究では、原子炉実用鋼であるSUS304とSUS316Lを同様にヘリウムイオン照射しバブルの挙動を比較したところ、SUS316L中のバブルの方が移動

図11 上図は、バブルのAnnular暗視野像。下図は白線に沿って測定した L_{23} エッジからのSTEM-EELSスペクトルから得られたFe, Crの分布図。縦軸は電子数である。バブルによるFeの減少と、Crのバブル周囲への偏析傾向が見られる。

図12 純Fe, Fe-9Cr および Fe-16Cr-17Ni 中のヘリウムバブルの拡散係数のアレニウスプロット.

度が低いことが分かった. 移動度が低いことで, 試料表面などに拡散消滅し難く, より高温まで試料中に残存し, 粒界などに多く偏析した⁽²⁴⁾. SUS316Lの方が高温でのヘリウム粒界脆化, 溶接割れを来し易い⁽²⁵⁾ことの一因と考えられる. 高経年化した原子炉構造物の補修溶接割れの問題と関連して, ヘリウムの高温挙動, 粒界挙動に関する更なる研究が望まれる.

5. 高エネルギー自己イオン照射効果

高エネルギー中性子やイオンの照射によって導入されるカスケード損傷や熱スパイク効果の動的過程の可視化は, 現象を理解する上で重要である. 本研究では, 高エネルギーイオン照射下でのバブルの応答挙動のその場観察からカスケード損傷効果の知見を得ることを目的とした. 以下に, アルゴン国立研究所のIVEM装置を使って, 高エネルギー自己イオン照射下でのバブルの挙動のその場観察を行った例を紹介する.

(1) 高温領域

自己拡散が起こり, バブルがブラウン運動をすることが出来るような高温域では, 高エネルギーのイオン照射によっても格子間原子型転位ループなどの点欠陥集合体は形成されない. しかし, 照射によって形成される点欠陥のバブルでの吸収・放出がバブルの挙動に影響を及ぼす可能性がある. 図13はそのような例で, 高純度Alにあらかじめ大きいサイズのヘリウムバブル($d=7$ nm)を導入しておき, これに898 Kで100 keVのAl⁺イオン(フラックス $=1.2 \times 10^{16}$ ions/m² s)を照射した時の同一バブルの軌跡の変化を示している. (a)はイオン照射直前の120秒間の軌跡, (b)は照射開始後120秒間

図13 バブルを含んだ純Alに, 898 Kで100 keV Al⁺イオンを照射した時の同一バブルの軌跡. (a)照射前, (b)照射開始後120秒間, (c)14分間照射の最後の120秒間, (d)照射中止後の120秒間.

の軌跡, (c)は引き続き14分間照射した時の最後の120秒間の軌跡, (d)は照射中止後120秒間の軌跡である. 一見して分かるように, 照射によってバブルの移動度は低下するが, 照射を止めるとこの移動度は回復している. いずれの場合も, 移動距離の二乗平均値は時間に比例していたので, これから得られた拡散係数は, (a)の場合には $D_m = 1.3 \times 10^{-18}$ m²/s, (c)の場合には 8×10^{-19} m²/sとなった. 僅かではあるが照射中にバブルのサイズも増加していた. これからバブルは, 照射によって導入された点欠陥反応の末に残った正味の原子空孔を吸収し, 体積増加を来したことによって移動度が低下したものと考えられる. しかし, 照射を止めると, 原子空孔を放出して熱平衡サイズまで収縮し移動度も回復したと思われる.

イオン照射下で, 全てのバブルの移動度が低下するわけではなく, 低い確率ではあるが移動度が上昇するバブルも見られた. このような移動度の上昇の原因として, カスケード格子間原子の吸収, あるいはイオンとの直接的衝突によるバブル内のヘリウムのはじき出しなどによるバブルの収縮効果が考えられる.

(2) 中間温度領域⁽²⁶⁾

バブルが熱的に移動できる温度よりやや低い温度領域でも, イオン照射下では特異な間歇的移動が誘起されることが分かった. 図14は, あらかじめヘリウムバブルを導入した純Cuに, 650 Kで400 keVのCu⁺イオンを照射した時のバブルの挙動を示す写真である. 写真(a), (b)は照射前で, バブル位置の変化は見られない. (c)~(f)は照射下で, 矢印で示すように移動が見られる. 2秒毎に測定したバブルBの軌跡を図15に示す. 極短距離範囲の移動と共に, ある時刻で2

～5 nm 程度の直線的移動が誘起されていることが分かる。図14の写真の右側に見られる陰影は転位ループであり、この温度では、形成・消滅を繰り返している。前項でも示したように、バブルは転位と相互作用し、容易に転位に沿って移動したり、転位の移動に追従する。従って、この場合は、形成・消滅する転位ループに出会ったバブルが、転位に捕獲され、転位歪場の効果と熱的助けを受けて、間歇的に数 nm 程度の移動を起こしたものと考えられる。

(3) 低温領域⁽²⁷⁾

観察されるような大きさのバブルの熱的移動が全く期待できないような室温域でのバブルの挙動を調べた。図16は、あらかじめバブルを導入した純 Au 試料に、室温で 400 keV の Au⁺ イオンを照射したときの、0 秒を基準にして、7 秒、14 秒後のバブルの位置の変化を示したものである。実線の円は、0 秒におけるバブルをなぞったもので、破線円は明瞭に位置が変わったと思われるバブルを示す。これから、7 秒では全バブルの約20%が、14秒で約35%のバブルが移動していたことが分かる。バブルの位置の時間経過の例を図17に示す。バブルが1～1.5 nm の範囲で瞬時に移動している。これは、バブルとカスケードとの相互作用によると考えて、バブルがカスケードと出会う確率 M を以下の式で簡単に見

図14 純 Cu 中に 650 K で 400 keV Cu⁺ イオンを照射したときのバブルの挙動。(a), (b)は照射前,(c)～(f)は照射下である。照射下でバブルの瞬間的移動が見られる。右側の陰影は照射によって形成される格子間原子型転位ループ。

図15 前図中のバブル B の 2 秒毎の軌跡。★は表記時刻における位置を示す。2～5 nm の間歇的移動が誘起されている。

図16 Au 試料に 400 keV Au⁺ イオンを室温で照射した時のバブルの変位の比較。0 秒を基準にして(実線円でバブルを示す), 7 秒(破線円), 14 秒(破線円)でのバブルの位置。

図17 1/3秒毎に測定した400 keV Au⁺イオン照射下でのバブル重心位置の変位。

積もる。

$$M = 4\pi r^3 \kappa \Phi / 3Z \quad (6)$$

ここで、 r は相互作用範囲の半径、 κ はイオン1個あたり形成されるサブカスケードの数、 Φ はイオンフラックス、 Z はカスケードとバブルの共存する領域(深さ)である。SRIMコード⁽⁸⁾によりカスケードサイズの深さ分布を計算し、バブルの直径2 nmよりも大きいサブカスケード数を採用すると $\kappa=7$ 程度となり、 $M=3\%/s$ 程度となる。この値は、実験結果とほぼ一致する。非常に簡略化した見積もりではあるが、サブカスケード領域における熱スパイク効果によって誘起された移動の可能性を強く示唆していると思われる。

6. おわりに

バブルの電子顕微鏡その場観察によって得られたブラウン運動をはじめとする最近の研究成果を述べた。バブル自体の挙動についての知見とともに、バブルをセンサーとして利用することで、直接的情報が十分でない粒界や転位での拡散、合金系などにおける定量的拡散情報や照射欠陥との相互作用などについての新しい知見が得られることを示した。今後は、MDなどの計算機シミュレーションを含めた更なる発展が期待される。

ヘリウムの高温域での挙動はとかく看過されがちである。しかし、一度材料中に取り込まれたヘリウムは、粗大化したバブルとなって高温域まで残留し易く、照射材の補修溶接のような場合には溶接割れの要因となる。原子炉・核融合炉材として定常的使用温度域における耐照射特性の検討が必要なのはもちろんであるが、ヘリウムの関係した欠陥については、実機環境や保守面も想定したさらに広範な温度域での研究が必要と思われる。

文 献

- (1) 例えば, E. E. Bloom *et al.*: Journal of Nuclear Materials, **329-333**(2004), 12-19.
- (2) 例えば, H. Bolt *et al.*: *ibid*, **329-333**(2004), 66-73.
- (3) R. L. Klue and D. R. Harries: *High-Chromium Ferritic and*

Martensitic Steels for Nuclear Applications, ASTM, MONO3, PA, (2001).

- (4) K. Morishita, H. Iwakiri, S. Takamura, N. Yoshida, A. Hasegawa and S. Muto: J. Plasma Fusion Res., **81**(2005), 12-47.
- (5) K. Arakawa, T. Tsukamoto, K. Tadakuma, K. Yasuda and K. Ono: J. Electron Microsc., **48**(1999), 399-405.
- (6) J. P. Biersack and L. G. Haggmark: Nucl. Inst. Meth., **174**(1980), 257-269.
- (7) 例えば, 米沢富美子: ブラウン運動, 共立出版, 1986.
- (8) I. R. Brealy and D. A. MacIness: J. Nucl. Mater., **95**(1980), 239-245.
- (9) G. W. Greenwood and A. Boltax: J. Nucl. Mater., **5**(1962), 234-240.
- (10) K. Ono, S. Furuno, K. Hojou, T. Kino, K. Izui, O. Takaoka, N. Kubo, K. Mizuno and K. Ito: J. Nucl. Mater., **191-194**(1992), 1269-1273.
- (11) K. Ono, S. Furuno, K. Hojou, K. Izui, T. Kino, K. Mizuno and K. Ito: Defect and Diffusion Forum, **95-98**(1993), 335-340.
- (12) K. Ono, K. Arakawa, K. Hojou, M. Oohasi, R. C. Birtcher and S. Donnelly: J. Electron. Microsc., **S51**(2002), 245-251.
- (13) K. Ono, S. Kanamitsu and K. Hojou: Phil. Mag. Let., **75**(1997), 59-64.
- (14) L. E. Willert and P. G. Shewmon: Metall. Trans., **1**(1970), 2217-2223.
- (15) H. Yamaguchi, I. Hashimoto, H. Mitsuya, F. Nakamura, E. Yagi and M. Iwaki: J. Nucl. Mater., **161**(1989), 164-168.
- (16) J. H. Evans and A. van Veen: J. Nucl. Mater., **168**(1989), 19-23.
- (17) K. Ono, K. Arakawa and K. Hojou: J. Nucl. Mater., **307-311**(2002), 1507-1512.
- (18) F. A. Nichols: J. Nucl. Mater., **30**(1969), 143-165.
- (19) E. E. Gruber: J. Appl. Phys., **38**(1967), 243-250.
- (20) S. K. Tyler and P. J. Goodhew: J. Nucl. Mater., **74**(1978), 27-33.
- (21) K. Ono, K. Arakawa and R. C. Birtcher: *Electron Microscopy; Its Role in Materials Science*, eds. J. R. Weertman, M. Fine, K. Faber, W. King and P. Liaw, TMS, PE, (2003), 347-354.
- (22) K. Ono, K. Arakawa, H. Shibasaki, H. Kurata, I. Nakamichi and N. Yoshida: J. Nucl. Mater., **329-333**(2004), 933-937.
- (23) K. Ono, K. Arakawa, M. Oohasi, H. Krata, K. Hojou and N. Yoshida: J. Nucl. Mater., **283-287**(2000), 210-214.
- (24) 森 祐介, 下房大悟, 宮本光貴, 小野興太郎: 第137回日本金属学会講演概要, (2005), 359-360.
- (25) C. A. Wang, M. L. Grossbeck and B. A. Chin: J. Nucl. Mater., **225**(1995), 59-68.
- (26) K. Ono and K. Arakawa and R. C. Birtcher: Nucl. Inst. Meth. Phys. Res., **B207**(2003), 114-117.
- (27) K. Ono, M. Miyamoto, K. Arakawa and R. C. Birtcher: Nucl. Inst. Meth. Phys. Res., **B242**(2006), 455-457.

小野興太郎

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★
小野興太郎

1973年 広島大学大学院理学研究科博士課程終了
広島大学助手, Northwestern 大学 Post
Doc.Fel./Lect.
島根大学助教授(理学部)を経て
1994年 島根大学教授(理学部, 総合理工学部(現職))
1998年 Argonne 国立研究所客員研究員
専門分野: 格子欠陥, 照射損傷, 原子力・核融合炉材
料

電子顕微鏡その場観察による照射欠陥の動的挙動, プラズマ・壁相互作用の研究に取り組んでいる。

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★

宮本光貴

荒河一渡

R. C. Birtcher