
中性子照射した金属中の点欠陥集合体の高温での
動的挙動の電子顕微鏡観察による研究

平成11～12年度科学研究費補助金（基盤研究（C）（2））研究成果報告書
（研究課題番号 11650683）

平成 13 年 3 月

研究代表者 向 田 一 郎
(広島大学工学部助手)

目次

I. はしがき

| | |
|------------------|---|
| 1. 本報告書の構成 | 3 |
| 2. 研究目的 | 3 |
| 3. 研究者組織 | 4 |
| 4. 研究経費 | 4 |
| 5. 研究発表 | 4 |
| (1) 学会誌等 | |
| (2) 口頭発表 | |
| (2-1) 国際会議等 | |
| (2-2) 国内学会等 | |

II. 研究成果

| | |
|-------------------------|----|
| II-1. 研究経過の概要 | 11 |
| II-2. 公表した研究成果の概要 | 12 |

III. 研究論文

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Atomistic processes of damage evolution in neutron-irradiated Cu and Ni at high temperature: Y. Shimomura, I. Mukouda, K. Sugio and P. Zhao, Radiation Effects and Defect in Solids, 148 (1999) 127-159. | 19 |
| 2. Computer simulation on the void formation in neutron-irradiated Cu and Ni at high temperature: Y. Shimomura, I. Mukouda and K. Sugio, J. Nucl. Mater. 271&272 (1999) 225-229. | 52 |
| 3. Damage Evolution in Neutron-irradiated Cu during Neutron Irradiation, I. Mukouda and Y. Shimomura, J. Nucl. Mater. 271&272 (1999) 230-235. | 57 |
| 4. Void formation in neutron- and ion-irradiated copper and nickel: Y. Shimomura and I. Mukouda, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 540 (1999) 527-532. | 63 |
| 5. Formation of voids in pure copper and Fe-Cr-Ni alloys irradiated by simultaneous | |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| multi-ion beam of hydrogen, helium and Ni ions: I. Mukouda, Y. Shimomura, T. Iiyama Y. Katano, D. Yamaki, T. Nakazawa and K. Noda, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 540 (1999) 549-554. | 69 |
| 6. Development of vacancy clusters in neutron-irradiated copper at high temperature, Y. Shimomura and I. Mukouda, J. Nucl. Mater., 283-287 (2000) 249-254. | 75 |
| 7. Microstructure in pure copper irradiated by simultaneous multi-ion beam of hydrogen, helium and self ions, I. Mukouda, Y. Shimomura, T. Iiyama, Y. Harada, Y. Katano, T. Nakazawa, D. Yamaki and K. Noda, J. Nucl. Mater., 283-287 (2000) 302-305. | 81 |
| 8. Annihilation of Interstitial Atoms to Dislocations in Neutron-irradiated Cu and Ni at High Temperature, I. Mukouda and Y. Shimomura, Materials Science & Engineering: A. (2001) in press. | 85 |
| 9. Atomistic Mechanism of Nucleation and Growth of Voids in Cu studied by Computer Simulation: Y. Shimomura and I. Mukouda, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. (2001) in press. | 89 |
| 10. Dynamical Behavior of Voids in Neutron-irradiated Copper at Elevated Temperature: I. Mukouda and Y. Shimomura, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. (2001) in press. | 95 |
| 11. Point Defects Observed in D-T neutron irradiated Copper, Silver and Gold at 288K with a Rotating Target in FNS JAERI: Y. Shimomura, K. Sugio, H. Ohkubo, I. Mukouda, C. Kutsukake and H. Takeuchi, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. (2001) in press. | 101 |

I. はしがき

I. はしがき

1. 本報告書の構成

このはしがきには、まず科学研究費補助金計画調書より研究目的を引用し、次いで、研究組織、研究費、研究発表リストを記載する。

第2章には研究経過の概要を述べた後、第3章に研究論文を収録する。

2. 研究目的（「研究計画調書」より転載）

中性子照射した材料中では高速中性子が材料構成原子を弾き出し多くの原子空孔および格子間原子を形成する。これらの点欠陥は熱活性化過程にて移動し大半は再結合して消滅するが、残存したものが集合体を形成して点欠陥集合体を形成する。これらの集合体の中でもボイドと呼ばれる原子空孔集合体は結晶中に原子空孔が3次元的に集合した空洞を作り出しボイドスエリングと呼ばれる体積膨張を導くため材料強度特性の顕著な低下をもたらす。そのため照射した材料中でのボイド形成過程を調べる事は非常に重要である。また格子間原子集合体の挙動は原子空孔の状態に大きな影響を与えるために同時に検討すべき課題である。

従来の我々の研究結果、中性子照射した銅・ニッケルの欠陥構造の発達過程を日本原子力研究所材料試験炉 JMTR において温度制御照射した結果と分子動力学コンピュータ・シミュレーションの結果をリンクさせることによって、面心立方金属の損傷欠陥発達過程に関して以下の結論を得た。

1) 変位カスケード損傷が生じて第一ノックオン原子が停止する。初めに格子間原子およびその集合体が移動して格子間原子集合体グループを形成し、高温においてはこれらが合体して転位へと発達する。格子間原子およびその集合体の移動エネルギーは非常に低いのでそれらの移動はわずかな歪み場の影響で運動する。

2) 原子空孔集合体は照射温度が T_{sft} 以下の温度 (Cu, Ni では 200°C 付近) では 積層欠陥四面体 (SFT) を形成する。300°C 以上の高温では (T_{void} 以上) ではボイドになる。これらの中間温度では SFT とボイドが共に形成される。

3) 残留ガス原子は 10^{-3} dpa (1×10^{18} n/cm²) 程度の低照射量ではボイドの形成にほとんど寄与しない。SFT は原子空孔のクラスタリングにより形成され高温において紐状構造の原子空孔集合体に緩和して、一次元的に原子空孔が結合した構造になる。この SFT の緩和は高温において SFT の最近接原子がジャンプすることによって引き起こされる。このジャンプの活性化エネルギーは SFT のサイズに依存し、サイズが大きくなるとこの値も大きくなる。緩やかに結びついたこのような原子空孔集合体は銅中では 0.2 eV という低いエネルギーで移動する。

4) ボイドは紐状構造の原子空孔集合体が移動して集合することにより形成される。ボイド形成に及ぼすガス原子の影響は、原子空孔集合体にトラップされることにより原子空孔集合体の移動度を減少させる効果があると考えられる。

これらの結果の中で特にボイドが移動して合体するという考え方は新しいものである。ボイドスエリングを扱う理論においてはボイド成長はブラウン運動とオストワルト成長によるとされている。しかし我々のコンピュータ・シミュレーションの結果微小なボイドは一次元紐状構造に緩和して移動することを見出した。ブラウン運動ではランダムな動きと考えるために構造緩和は起きない。この現象を調べるために電子顕微鏡中で照射試料を高温で焼鈍した試料の観察を行った結果焼鈍前後でボイドが移動していることが確認された。しかしその過程においてボイドがどのような構造変化をおこして移動しているかはまだ観察できていない。ボイドの移動過程を知ることによりボイド形成過程が解明できると確信する。

3. 研究者組織

研究代表者 向田一郎 (広島大学工学部助手)

研究分担者 下村義治 (広島大学工学部教授)

4. 研究経費

平成 11 年度 1, 800 千円

平成 12 年度 1, 000 千円

計 2,800 千円

5. 研究発表

(1) 学会誌等

1. Atomistic processes of damage evolution in neutron-irradiated Cu and Ni at high temperature: Y. Shimomura, I. Mukouda, K. Sugio and P. Zhao, Radiation Effects and Defect in Solids, 148 (1999) 127-159.

2. Computer simulation on the void formation in neutron-irradiated Cu and Ni at high temperature: Y. Shimomura, I. Mukouda and K. Sugio, J. Nucl. Mater. 271&272 (1999)

225-229.

3. Damage Evolution in Neutron-irradiated Cu during Neutron Irradiation, I. Mukouda and Y. Shimomura, *J. Nucl. Mater.* 271&272 (1999) 230-235.
4. Void formation in neutron- and ion-irradiated copper and nickel: Y. Shimomura and I. Mukouda, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* Vol. 540 (1999) 527-532.
5. Formation of voids in pure copper and Fe-Cr-Ni alloys irradiated by simultaneous multi-ion beam of hydrogen, helium and Ni ions: I. Mukouda, Y. Shimomura, T. Iiyama Y. Katano, D. Yamaki, T. Nakazawa and K. Noda, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* Vol. 540 (1999) 549-554.
6. Development of vacancy clusters in neutron-irradiated copper at high temperature, Y. Shimomura and I. Mukouda, *J. Nucl. Mater.*, 283-287 (2000) 249-254.
7. Microstructure in pure copper irradiated by simultaneous multi-ion beam of hydrogen, helium and self ions, I. Mukouda, Y. Shimomura, T. Iiyama, Y. Harada, Y. Katano, T. Nakazawa, D. Yamaki and K. Noda, *J. Nucl. Mater.*, 283-287 (2000) 302-305.
8. Annihilation of Interstitial Atoms to Dislocations in Neutron-irradiated Cu and Ni at High Temperature, I. Mukouda and Y. Shimomura, *Materials Science & Engineering: A.* (2001) in press.
9. Atomistic Mechanism of Nucleation and Growth of Voids in Cu studied by Computer Simulation: Y. Shimomura and I. Mukouda, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* (2001) in press.
10. Dynamical Behavior of Voids in Neutron-irradiated Copper at Elevated Temperature: I. Mukouda and Y. Shimomura, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* (2001) in press.
11. Point Defects Observed in D-T neutron irradiated Copper, Silver and Gold at 288K with a Rotating Target in FNS JAERI: Y. Shimomura, K. Sugio, H. Ohkubo, I. Mukouda, C. Kutsukake and H. Takeuchi, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* (2001) in press.

(2) 口頭発表

(2-1) 国際会議等

(A) IUMRS-ICAM'99 (Beijing China, June 13-18, 1999)

1. Y. Shimomura, I. Mukouda, K. Sugio and M. Kiritani: Atomistic mechanism of nucleation, growth and annihilation of stacking fault tetrahedron in gold and copper by molecular dynamics simulation and TEM experiments
2. I. Mukouda and Y. Shimomura: Development of dislocation structure due to interstitial clustering during high temperature neutron-irradiation in Cu and Ni

(B) Gordon Research Conference of Materials Processes Far From Equilibrium (Plymouth, NH, July 11 - 16, 1999)

1. Y. Shimomura, I. Mukouda, K. Sugio and M. Kiritani: Experiments and computer simulation of vacancy generation in thin metal film under deformation

(C) ICFRM9 (Colorado Springs, October 10-15 1999)

1. Y. Shimomura and I. Mukouda: Development of vacancy clusters in neutron-irradiated copper at high temperature
2. I. Mukouda, Y. Shimomura, T. Iiyama, Y. Harada, Y. Katano, T. Nakazawa, D. Yamaki and K. Noda: Microstructure in pure copper irradiated by simultaneous multi-ion beam of hydrogen, helium and self ions

(D) An International Conference on the Fundamentals of Plastic Deformation (Dislocations 2000) (Gaithersburg, Maryland, USA June 19-June22, 2000)

1. Y. Shimomura, I. Mukouda, K. Sugio and M. Kiritani: Annihilation of Interstitial Atoms to Dislocations in Neutron-irradiated Cu and Ni at High Temperature

(E) FEMMS 2000 (Matsue, November 13 - 17, 2000)

1. I. Mukouda, S. Yamaguchi and Y. Shimomura: Vacancy Cluster Observation by Electron Holography

(F) MRS 2000 Fall Meeting (Boston MA November 27 – December 1, 2000)

1. I. Mukouda and Y. Shimomura: Dynamimcal behavior of voids in neutron-irradiated copper at elevated temperature
2. Y. Shimomura and I. Mukouda: Atomistic mechanism of nucleation and growth of voids in Cu studied by computer simulation
3. Y. Shimomura, K. Sugio, H. Ohkubo, I. Mukouda, C. Kutsukake and H. Takeuchi: Point defects observed in DT-neutron irradiated Cu, Ag and Au at 15°C with a rotating target in FNS JAERI

(2-2) 国内学会等

1. 高エネルギーイオン照射した金属の FIB による損傷欠陥断面観察試料の作製
向田一郎 飯山智紀 原田雄造 下村義治 片野吉男 中沢哲也 八巻大樹 野田健治、日本電子顕微鏡学会学術講演会 (1999 年 5 月 18 日～21 日)
2. 電子線ホログラフィによる原子空孔集合体の観察
向田一郎 山口智史 下村義治、日本電子顕微鏡学会学術講演会 (1999 年 5 月 18 日～21 日)
3. 銅中の格子間原子およびその集合体の転位への集積の計算機シミュレーション
下村義治 向田一郎 杉尾健次郎、日本金属学会秋期大会 (1999 年 11 月 20 日～22 日)
4. KUR 温度制御中性子照射した銅・ニッケルの損傷組織
向田一郎 下村義治 義家敏正、日本金属学会秋期大会 (1999 年 11 月 20 日～22 日)
5. 引張変形した超薄膜金属での原子空孔形成の実験とコンピュータ・シミュレーション
下村義治 向田一郎、日本金属学会シンポジウム「微細材料の力学特性と信頼性」
(2000 年 1 月 13 日)
6. 高温で中性子照射した銅とニッケルにおけるボイドの核形成機構
下村義治 向田一郎、日本金属学会春期大会 (2000 年 3 月 29 日～3 月 31 日)

7. 高崎研 TIARA での純銅のマルチイオンビーム照射実験 II

向田一郎 駒川智哉 下村義治 八巻大樹 中沢哲也 片野吉男 菱沼章道、日本金属学会春期大会 (2000年3月29日~3月31日)

8. 引張り破断した Al-Cu, Al-Mg, Al-Sc 中の原子空孔集合体の電子顕微鏡観察

大窪秀明 向田一郎 下村義治、日本金属学会春期大会 (2000年3月29日~3月31日)

9. 室温温度制御して 14MeV 中性子照射した金、銀、銅の損傷欠陥の形成

下村義治 杉尾健次郎 大窪秀明 向田一郎 沓掛忠三 竹内浩、日本物理学会年次大会 (2000年9月22日~9月25日)

II. 研究成果

II. 研究成果

II-1. 研究経過の概要

JMTR 温度制御中性子照射を用いて $10^{-2} \sim 10^{-1}$ dpa の照射量の範囲で詳細な実験が行われた。本研究では、さらに損傷欠陥形成の初期過程を調べるために、より低照射量 ($10^{-4} \sim 10^{-3}$ dpa) の温度制御中性子照射を京大原子炉 (KUR = Kyoto University Reactor) で行い、その結果より純銅・純ニッケル中の損傷欠陥形成過程を調べることを目的とする。試料は高純度の純銅および純ニッケルを用いた。また、残留ガスの効果を調べるために超高真空中で熔解することによりガス除去を行った試料を同時に照射した。温度制御中性子照射は京大原子炉において 300°C にて行った。純銅においては、電子顕微鏡観察の結果、転位周辺の格子間原子集合体の密集および微小なボイドおよび積層欠陥四面体 (SFT) が観察された。照射量の増加に伴ってボイド・SFT の数密度は減少した。この数密度は未処理試料と残留ガス除去試料での差はない。また、ボイド・SFT 共に照射量の増加にしたがって成長するがボイドの成長は SFT に比べて著しく大きかった。これらの結果は、ボイドが自由点欠陥の原子空孔を吸収するだけでは大きく成長できないと考えられる。そこで中性子照射中にボイドが移動して合体することにより成長すると考えた。実証するために照射試料の焼鈍実験を行った。焼鈍は 250°C において 10, 20, 30 分と時間を段階的に変化させて昇温した後、室温まで冷却して観察を行った。その結果、直径 3nm 程度のボイドは 250°C で移動することがわかった。合計 37 個のボイドを観測し、その内 8 個のボイドが移動した。最大で 23.9nm 移動していた。また、移動方向は FCC の [110] 方向に近い方位に移動していた。さらに SFT の熱的安定性を調べるために 300°C で焼鈍実験を行った。 300°C で SFT が消滅した。JMTR 温度制御中性子照射の結果 ($10^{-2} \sim 10^{-1}$ dpa) では、 200°C 照射ではボイドは照射量の増加と共に数密度の減少、サイズの増大、SFT は数密度が増加してサイズが変化しない。また、 300°C 照射ではボイド・SFT は照射量の増加と共に数密度の減少、サイズの増大がみられた。さらに本研究によって、より低照射量の領域でもこの傾向があることがわかった。純ニッケルにおいては、電子顕微鏡観察の結果、転位周辺への格子間原子の集合および高い数密度でサイズ 3nm のボイドが観察された。JMTR 温度制御中性子照射範囲 ($10^{-2} \sim 10^{-1}$ dpa) の数密度と比べると 1 ケタ大きい。このように照射量に伴って数密度が減少する傾向は、純銅の傾向と一致している。これらの実験結果と分子動力学コンピュータ・シミュレーションと実験結果をリンクさせて点欠陥集合体の移動過程の原子レベル機構を明らかにする。特に移動過程におけるボイド表面の構造緩和が移動の源になっていると考えられるので、詳細に検討した。

本研究においてはさらに、ボイド形成過程を調べるために核変換ガスの発生しない自己イオン照射および制御してガスイオンを同時照射する実験を行った。

II-2. 公表した研究成果の概要

1. Atomistic processes of damage evolution in neutron-irradiated Cu and Ni at high temperature, *Radiation Effects and Defect in Solids*, 148 (1999) 127-159.

銅およびニッケルの日本原子力研究所材料試験炉(JMTR)温度制御中性子照射実験の結果を基にして、高温における損傷欠陥形成過程を分子動力学コンピュータ・シミュレーションの結果と観察結果より高温における損傷欠陥形成過程の考察を行った。実験的に高温におけるボイドの移動および積層欠陥四面体の安定性を調べた。またコンピュータ・シミュレーションにより点欠陥集合体の形式機構を検討した。

2. Computer simulation on the void formation in neutron-irradiated Cu and Ni at high temperature, *J. Nucl. Mater.* 271&272 (1999) 225-229.

JMTR 温度制御中性子照射実験の結果を基にして銅およびニッケル中のボイド形成についてコンピュータ・シミュレーションにより調べた。原子空孔集合体の形態によるエネルギーの安定性について調べた。また、微小な原子空孔集合体は高温では紐状の構造に変化して移動することができることがわかった。

3. Damage Evolution in Neutron-irradiated Cu during Neutron Irradiation, *J. Nucl. Mater.* 271&272 (1999) 230-235.

JMTR を用いて温度制御多段多分割中性子照射実験を行った。この実験は高温での初の系統的な実験であり非常に重要な実験である。その結果、純銅における原子空孔集合体(ボイド・積層欠陥四面体)数密度の照射量依存性、照射温度依存性を明らかにした。

4. Void formation in neutron- and ion-irradiated copper and nickel, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* Vol. 540 (1999) 527-532.

中性子・イオン照射した純銅・ニッケル中に形成される原子空孔集合体の形成・発達機構について系統的な中性子照射実験結果から考察した。ボイドと呼ばれる空洞は従来の概念では原子空孔とガス原子によって形成されると言われているが、本実験結果より原子空孔集合体の合体により形成される可能性を示した。

5. Formation of voids in pure copper and Fe-Cr-Ni alloys irradiated by simultaneous multi-ion beam of hydrogen, helium and Ni ions, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* Vol. 540 (1999) 549-554.

核融合炉候補材料であるオーステナイト合金にニッケル・ヘリウム・水素イオンを同時照射したときに形成される損傷欠陥を観察した。イオン照射した試料においては損傷欠陥は数ミクロンのわずかな領域のみ形成されるため集束イオンビーム薄膜作製装置を用いた FIB 研磨試料作製法を用いた。その結果水素・ヘリウムイオンのポイド形成に及ぼす影響を明らかにした。

6. Development of vacancy clusters in neutron-irradiated copper at high temperature, J. Nucl. Mater. 283-287 (2000) 249-254.

中性子照射した純銅中に形成される原子空孔集合体の形成・発達機構について系統的な中性子照射実験結果から考察した。ポイドと呼ばれる空洞は従来の概念では原子空孔とガス原子によって形成されると言われているが、本実験結果より原子空孔集合体の合体により形成されることを示した。

7. Microstructure in pure copper irradiated by simultaneous multi-ion beam of hydrogen, helium and self ions, J. Nucl. Mater. 283-287 (2000) 302-305.

純銅に銅・ヘリウム・水素イオンを同時照射したときに形成される損傷欠陥を観察した。イオン照射した試料においては損傷欠陥は数ミクロンのわずかな領域のみ形成されるため集束イオンビーム薄膜作製装置を用いたクライオ FIB 研磨試料作製法を用いた。その結果水素・ヘリウムイオンのポイド形成に及ぼす影響を明らかにした。

8. Annihilation of Interstitial Atoms to Dislocations in Neutron-irradiated Cu and Ni at High Temperature, Materials Science & Engineering: A. (2001) in press.

中性子と金属原子の衝突により形成する中心部が原子空孔よりなり周りを格子間原子が取り囲んでいる変位カスケードにて格子間原子は照射前に試料中に存在していた転位の歪み場により転位の周りに偏析して集まり、格子間原子集合体がデコレートしてついた状態になる。このような現象は照射前に存在していた転位が拡張転位になっており拡張した jog を形成して消滅することが困難であることに起因していると説明した。純銅ではこれらの転位の周りの格子間原子集合体はお互いが合体して転位に沿って高密度の転位ループを形成する。これらの転位は所謂 platelet 状構造になっているために点欠陥吸収効率が非常に高く、照射量 10^{18} n/cm² 辺りより転位に沿ってのデコレーションは観察されなくなり、転位は弦状に成長する。ピン止め点はポイドが果たしている。ポイド間は転位密度の高い状態になり EBR-II で高温で照射した純銅での典型的な損傷組織になる。純ニッケルでは転位の周りに格子間原子集合体が集ま

るまでは同じであるが、格子間原子集合体は<112>方向に沿って<110>のバーガス・ベクトルを持つ dislocation dipole が形成して並列に形成して束になり繋がった特徴ある転位組織に発達する。これら転位は照射量が 10^{20} n/cm² に増加すると孤立した転位線になり、ボイドと出会い交差するが純銅の場合と異なり転位が強いピンニング点とならないようである。EBR-II にて高温で照射した純ニッケルでは多数のボイドが非常に均一に一面に形成しており転位はほとんど存在していない異常な損傷組織になる。ニッケルでは積層欠陥エネルギーが大きくて転位が簡単に点欠陥およびそれら集合体を吸収して上昇運動をするし、ボイドに交差して表面にて二つに分かれた転位が反対側で容易に同一の位置にて合体する。一方純銅ではこのようにボイド表面上にての再合体がきわめて難しいと考えられる。

9. Atomistic Mechanism of Nucleation and Growth of Voids in Cu studied by Computer Simulation, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. (2001) in press.

高温で中性子照射した金属では変位カスケード芯の原子空孔が集合して積層欠陥四面体とボイドが形成する。実験的に調べられた結果によると積層欠陥四面体とボイドは同時に形成しており、積層欠陥四面体に含まれている原子空孔数は 200 個以下であるに反して、ボイドに含まれている原子空孔数は 500 個以上であることが明らかになった。分子動力学法コンピュータ・シミュレーション結果によるとこれらの微小な原子空孔集合体はそれらから原子空孔が蒸発して他の大きい集合体を成長さず機構ではなくて、それら自身が string-like 構造に緩和した後に Damask-Dienes-Weizer 構造への緩和機構を通じての原子の移動を生じて原子空孔集合体を保ったままで移動することが可能であることを明らかにした。原子空孔数が 200 個以下である場合には(111) platelet 集合体の構造が最も安定であるために積層欠陥四面体に緩和する。集合体での原子空孔数が 500 個を超えるように大きくなると二次元の広い綿状を保つことが困難になり三次元の球状を保つようになる。実際には{111}面よりなる多面体を構成して次第にボイドへと成長するようになる。

10. Dynamical Behavior of Voids in Neutron-irradiated Copper at Elevated Temperature, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. (2001) in press.

低照射量の温度制御中性子照射は京大原子炉精密制御照射管 (KUR-SSS) において 300℃にて行った。試料は放射線冷却の後、電解研磨を行い透過電子顕微鏡試料とした。試料は加熱ステージに装填し、300 および 350℃においてその場観察を行った。純銅中に形成されたボイド (サイズ: 3~16nm) の観察を行った結果、10nm 以下のボイドは 300℃以上において移動することが確認された。ボイドが移動する際には円状に白く観察されるボイドが楕円状に変化して長手方向に一次元運動をして移動す

る。その移動方向は FCC の[110]方向に近い方位に移動していた。このコントラストの変化はボイド周辺の原子の構造緩和によると考えられる。さらに大きなボイド(サイズ:16nm)は楕円状の構造緩和は起こさないが、観察中に3つに分裂してそれぞれが移動できるサイズに変化することが観察された。

11. Point Defects Observed in D-T neutron irradiated Copper, Silver and Gold at 288K with a Rotating Target in FNS JAERI, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. (2001) in press.

日本原子力研究所の Fusion Neutron Source (FNS) 施設にて核融合 D-T 中性子照射実験を行なった。D-T 中性子照射の場合には PKA エネルギーが核分裂中性子の 10 倍も大きいので葡萄の房のような多数のサブ・カスケードよりなるカスケード構造をもっていると考えられる。これを反映するように照射後に電子顕微鏡観察した試料中のカスケード損傷より出来た原子空孔集合体は多数の集合体よりなるグループを作っている。このような集合体のグループング化は点欠陥集合体の移動により発生しているとの考えを実験結果とシミュレーション結果より結論した。