

## 平成 17 年度科学研究費補助金 ( 基盤研究 ( S ) ) 研究状況報告書

ふりがな(ローマ字)		HASEGAWA MASAYUKI		所属研究機関・部局・職		東北大学・金属材料研究所・教授	
研究代表者氏名		長谷川 雅幸					
研究課題名	和文	原子炉压力容器鋼中の照射誘起ナノ析出物および欠陥の形成・発達過程の解明と制御					
	英文	Clarification and Control of Irradiation-Induced Nano-Precipitates and Defects in Nuclear Reactor Pressure Vessel Steels					
研究経費	平成15年度	平成16年度	平成17年度	平成18年度	平成19年度	総合計	
17年度以降は内約額 金額単位：千円	32,300	22,600	12,600	6,200	4,700	78,400	
研究組織 ( 研究代表者及び研究分担者 )							
氏名	所属研究機関・部局・職		現在の専門	役割分担 ( 研究実施計画に対する分担事項 )			
長谷川 雅幸	東北大学・金属材料研究所・教授		原子力材料・金属物性	研究総括・高放射性試料取り扱い・試料作成			
永井 康介	東北大学・金属材料研究所・助教授		原子力材料・放射線物性	陽電子消滅測定 ( 寿命・同時計数ドップラー ) ・アトムプローブ測定・陽電子消滅測定装置開発			
唐 政	東北大学・金属材料研究所・助手		計算物理・固体物性	第一原理計算およびモンテカルロ・シミュレーション			
井上 耕治	東北大学・金属材料研究所・助手		原子力材料・放射線物性	2次元角相関測定・電気抵抗測定			
畠山 賢彦	東北大学・金属材料研究所・助手		原子力材料・金属物性	電子顕微鏡観察・試料作成			
当初の研究目的 ( 交付申請書に記載した研究目的を簡潔に記入してください。 )							
<p>電力エネルギーに関し、その規模、安全性、コスト、環境、セキュリティの主要必須条件すべてを理想的に満たすものは現在無い。この状況の中、我が国は、現今程度の原子力発電を数 10 年程度以上維持していくことは不可欠であると考えられる。この原子力発電では、発電用原子炉 ( 52 基稼働中、電力の約 30%強を担う ) は今将に高経年化時代を迎えようとしている。これら高経年化原子炉の安全性確保は最重要の現実課題である。</p> <p>安全確保のための材料の問題に原子炉压力容器 ( RPV ) 鋼の照射脆化がある。この主原因とされているナノ Cu ( 富裕 ) 析出物 ( CRP )、マトリックス欠陥 ( MD ) などの原子レベルでの機構解明は、従来の多くの研究にもかかわらず未だ不十分である。そこで本研究では、最近我々が見いだした CRP の陽電子量子ドット現象を利用するとともに最新の高分解能 3 次元アトムプローブ ( 3D-AP ) も併用し、ナノ Cu 析出物および MD などの形成と発展、構造などを明らかにする。先ず照射脆化の予測式に現れる Cu, Mn, Ni, P を含むモデル鉄合金試料、次いで RPV 鋼試料および実機監視試験片について実験および計算機シミュレーション ( 第一原理計算、分子動力学計算など ) を行う。なお本計画での現在稼働中の監視試験片の学術研究は我が国で初めてのことであり、これらによって RPV 鋼の照射脆化の原子レベルでの機構解明と制御方法の提案を行う。</p> <p>さらに、原子力材料の安全に関し、最先端の学術文化を築き、それを基に世界の主要研究機関と密接な国際連携を進め、この分野を一層発展させ、原子力の安全を願う国民の期待に応えたい。</p>							

これまでの研究経過（研究の進捗状況について、必要に応じて図表等を用いながら、具体的に記入してください。）

- 1)原子炉压力容器鋼の照射脆化 [ 図 1 ] の主要原因である不純物 Cu の超微小析出物（ナノ析出物）やナノポイドに関する基礎研究として、照射によって導入された原子空孔と溶質（不純物）原子との相互作用を調べるため、Fe-X(X=C,Si,P,Mn,Ni,Cu)希薄合金の電子線照射を行い、陽電子消滅同時計数ドップラー拡がり (Coincidence Doppler Broadening: CDB)などの実験を行った。その結果、Fe-Cu, Fe-Ni, Fe-C 系では空孔 - 溶質原子複合体が存在すること、Fe-Ni や Fe-P 系では空孔クラスター（ナノポイド）形成が促進されること、Fe-Cu 系では空孔の隣の原子位置（8 個最近接原子位置）を 6 個程度以上の Cu 原子が占めることなどを明らかにした [ Phys. Rev. **B67** (2003) 224202 ] CDB 法を使って、Fe-Cu モデル合金中では殆ど欠陥のない Cu ナノ析出物が生じていることやナノポイドの内面は殆ど Cu 原子で覆われていることなども明らかにした [ 図 1 ]
- 2)我々が見いだした陽電子量子ドット（鉄中の Cu ナノ析出物はその例、図 1 参照）状態の 2 次元角相関（2D-ACAR）実験により、体心立方(BCC)構造の Cu ナノ析出物の運動量分布の詳細を明らかにした[Phil. Mag. **85** (2005) 467]。さらに熱時効 Fe-Cu モデル合金中の Cu ナノ析出物の形成・成長過程に伴う運動量分布の変化、特に Cu ナノ析出物のフェルミ面近傍の運動量 Smearing [ 図 2 ] を測定し、この方法によるとナノ析出物の電子構造、さらには 3D-AP でも検出できない直径 0.5nm 程度の Cu ナノ析出も検出できる [ 図 3 ] ことを明らかにした [ Phys. Rev. Lett. 再投稿予定 ]
- 3)デジタル・オシロスコープを用いた新方式の陽電子寿命・運動量相関（AMOC）装置を完成させた。この装置を用い、FeCu モデル合金中に生ずる Cu ナノ析出物は熱時効析出の初期から既に純 Cu であることや Cu ナノ析出物を含む試料の陽電子動力学パラメータや析出物数密度などを求めた。その結果は 3D-AP から得られた Cu ナノ析出物の平均半径、数密度 [ 図 4 ] とほぼ一致することを明らかにした。
- 4)モデル合金を用いた基礎研究も大切であるが、本研究の方法を実機監視試験片の解析に応用することも不可欠である。そこで、日本原電東海 1 号炉（コルダール炉、約 7 年前に停止・廃炉）やベルギー-Doel 炉（加圧水型炉）実機監視試験片の解析を行い、従来の研究では分からなかった照射速度(Flux)効果や不純物 Cu 濃度効果など新たな知見（次ページに詳述）を得た（東海 1 号炉監視試験片の結果については現在 Phys. Rev. Lett. に再投稿中）。これらは、非常に重要な結果であり内外から注目されている。尚、稼働中原子炉の実機監視試験片が大学や公的機関での研究に供されるのは、我が国では初めてである
- 5)さらに最先端のナノ材料科学手法としての陽電子消滅法の発展を目的として、固体中の陽電子状態の新たな理論計算法の開発を行った。その例として結晶中の陽電子と多電子系の効果を正しく取り入れた理論（電子間の多体効果に由来する自己エネルギーを考慮した GW 方式）の開発を行った [Phys. Rev. Lett. **94** (2005)106402]。

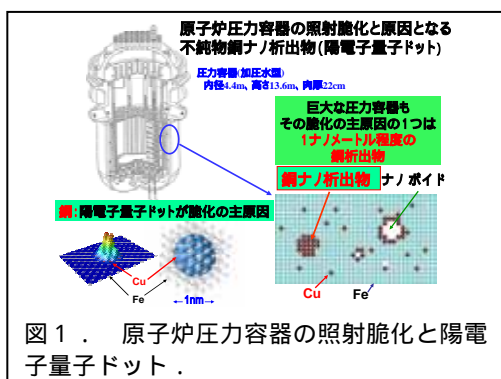


図 1 . 原子炉压力容器の照射脆化と陽電子量子ドット .

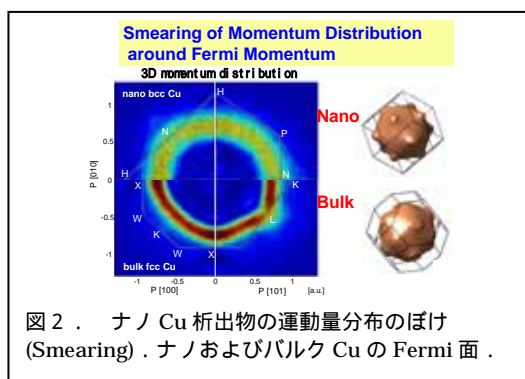


図 2 . ナノ Cu 析出物の運動量分布のぼけ (Smearing) . ナノおよびバルク Cu の Fermi 面 .

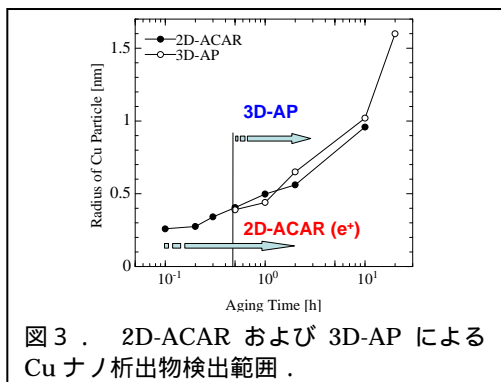


図 3 . 2D-ACAR および 3D-AP による Cu ナノ析出物検出範囲 .

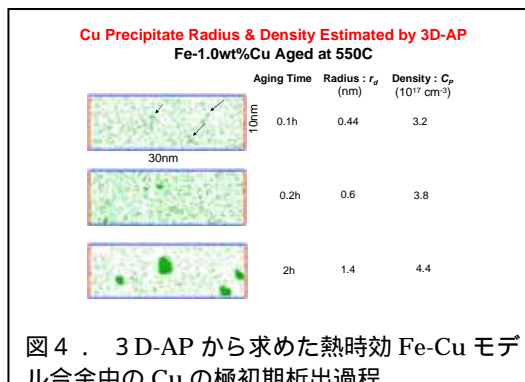


図 4 . 3D-AP から求めた熱時効 Fe-Cu モデル合金中の Cu の極初期析出過程 .

特記事項 (これまでの研究において得られた、独創性・新規性を格段に発展させる結果あるいは可能性、新たな知見、学問的・学術的なインパクト等特記すべき事項があれば記入してください。)

1) 照射誘起、促進ナノ析出物、ナノボイド検出のための新陽電子消滅法 (実験および理論) の開発

原子炉圧力容器(RPV)鋼の照射脆化に関しては、従来から多くの研究が行われてきたが、脆化で一番問題になる 1nm 前後の析出物、照射欠陥を検出することは殆ど不可能であった。その理由は、母体の鉄が強磁性であることから電子顕微鏡での検出に限界があることなどから、それらを検出する実験方法がなかったためである。我々は、この問題を解決すべく、陽電子量子ドット現象の発見とそれを利用した最先端の陽電子消滅実験・理論を開発し、この分野の不可欠な手段とした。さらにこの実績に加え、3次元アトムプローブなどの併用実験により、この分野の世界の研究拠点として評価されてきている。

2) 日本原電東海1号炉(1998年廃炉)実機監視試験片の解析(原研東海との共同研究)

原子炉圧力容器(RPV)鋼の照射脆化を調べるには、発電炉の実機監視試験片を解析することが欠かせない。しかしながら、実機監視試験片のナノ材料学的な解析が行われたことは殆どないのが現状である。我々はこの点を解決すべく、日本原子力発電の東海1号炉(約20年間稼働後1998年廃炉)の監視試験片を入手し、(i)いわゆる照射欠陥は殆ど認められず、Cuナノ析出物のみが形成していること、(ii)しかしながら、試験片と同じ試料を材料試験炉でほぼ同じ硬化(脆化)を与えるような線量(7日間照射、約10000倍早い照射速度)まで照射したところ、逆にCuナノ析出物は認められず、照射欠陥のみが生じていること[図5]などを明らかにした。これらは従来の研究では分からなかった新たな知見であり(Phys. Rev. Lett.に再投稿中)、さらに3次元アトムプローブでもこの結果を確認[図6]した。この結果は、材料試験炉を用いた加速試験や非照射では起こらない事象が長期間の低線量率照射条件下で起こることを示している。

3) ベルギー-Doel炉 実機監視試験片(ベルギー-SCKCENとの共同研究)

次にベルギーのDoel2号炉監視試験片(溶接部)を入手し、低Cu材(0.15wt%)と高Cu材(0.3wt%Cu)では、照射線量の増加に伴うCuナノ析出物と照射欠陥の形成・発展挙動が大きく異なる[図7]ことを見いだした。これら実機試験片に関する結果は、この分野で非常に重要な新知見である。尚、稼働中原子炉の実機監視試験片が大学での基礎研究に提供されるのは、我が国では初めてである(日米では皆無、ヨーロッパでも殆ど無い)。これは、これまでの我々の研究成果が世界的にも高く評価され、このように貴重な実機監視試験片の提供を受けることが出来た結果と自負している。

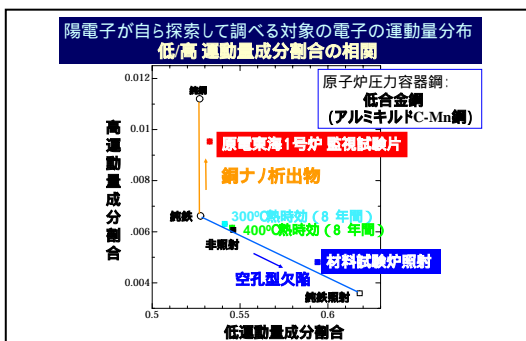


図5. Calder Hall 炉 RPV の CDB 運動量分布 高・低運動量成分相関 (JMTR 照射との比較)。

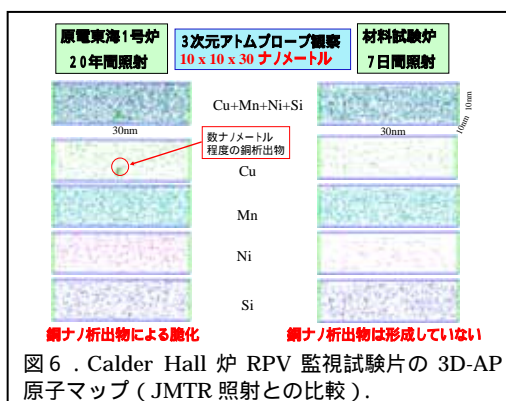


図6. Calder Hall 炉 RPV 監視試験片の 3D-AP 原子マップ (JMTR 照射との比較)。

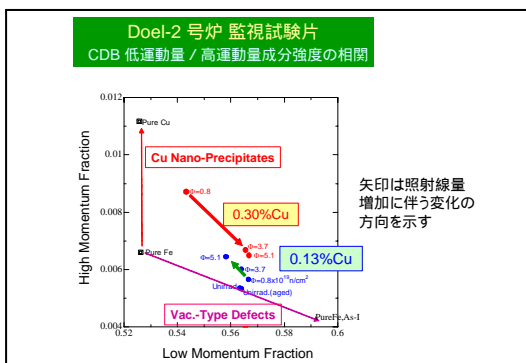


図7. Doel-2 炉 高濃度および低濃度 Cu 圧力容器鋼監視試験片で、CDBで照射線量増加に伴うCuナノ析出と照射欠陥形成の挙動の差異。

研究成果の発表状況 (この研究費による成果の発表に限り、学術誌等に発表した論文(掲載が確定しているものを含む。)の全著者名、論文名、学協会誌名、巻(号)、最初と最後のページ、発表年(西暦)、及び国際会議、学会等における発表状況について記入してください。なお、代表的な論文3件に を、また研究代表者に下線を付してください。)

## 発表論文

### 2005

- 1) M. Hasegawa, Z. Tang, Y. Nagai, T. Chiba, E. Kuramoto, and M. Takaneka : Phil. Mag. **85** (2005) 467-478, "Irradiation Induced Vacancy and Cu Aggregations in Fe-Cu Model Alloys of Reactor Pressure Vessel Steels: State-of-the-Art Positron Annihilation Spectroscopy".
- 2) K. Fujii, K. Fukuya, N. Nakata, K. Hono, Y. Nagai and M. Hasegawa: J. Nucl. Mater. **340** (2005) 247-258, "Hardening and microstructural evolution in A533B steels under high-dose electron irradiation".
- 3) Z. Tang, Y. Nagai, K. Inoue T. Toyama, T. Chiba, M. Saito and M. Hasegawa: Phys. Rev. Lett. **94** (2005) 106402-1~4, "Self-energy correction to momentum-density distribution of a positron-electron pair".
- 4) 永井康介、長谷川雅幸 : まてりあ (日本金属学会報) (印刷準備中)、  
"陽電子をプローブとしたナノ・サブナノスケールの局所分析" (解説)。
- 5) Y. Ishijima, H. Kurishita, M. Hasegawa, Y. Hiraoka, T. Takida and K. Takebe: Mater. Trans. (in press), "Enhanced Room Temperature Ductility of Tungsten Alloys Developed by Mechanical Alloying".

### 2004

- 1) T. Honma, S. Yanagita, K. Hono, Y. Nagai and Y. Hasegawa: Acta Mater. **52** (2004) 1997-2003, "Coincidence Doppler broadening and 3DAP study of the pre-precipitation stage of an Al-Li-Cu-Mg-Ag alloy".
- 2) Z. Tang, M. Hasegawa, Y. Nagai, M. Saito: Mater. Sci. Forum **445-446** (2004) 390-394, "First-Principle Calculation of Positron Annihilation Characteristic in Solids: From Positron to Positronium".
- 3) T. Onitsuka, M. Takenaka, H. Abe, E. Kuramoto, H. Ohkubo, Y. Nagai, M. Hasegawa: Mater. Sci. Forum **445-446** (2004) 168-170, "Irradiation-Enhanced Cu-Precipitation in Fe-Cu Alloys Studied by Positron Annihilation Spectroscopy and Electrical Resistivity Measurement".
- 4) M. Eldrup, D.J. Edwards, B.N. Singh, Y. Nagai, H. Ohkubo, M. Hasegawa: Mater. Sci. Forum **445-446** (2004) 21-25, "Neutron irradiated copper: Is the main positron lifetime due to Stacking Fault Tetrahedra?".
- 5) H. Ohkubo, Y. Nagai, K. Inoue, Z. Tang, M. Hasegawa: Mater. Sci. Forum **445-446** (2004) 165-167, "Vacancy-Solute Binding Energies in Aluminum by Positron Annihilation".
- 6) Y. Nagai, T. Toyama, Z. Tang, M. Hasegawa, T. Ohkubo, K. Hono: Mater. Sci. Forum **445-446** (2004) 11-15, "Embedded Ultrafine Clusters Investigation by Coincidence Doppler Broadening Spectroscopy".
- 7) T. Toyama, Y. Nagai, Z. Tang, H. Hasegawa, T. Ohkubo, K. Hono: Mater. Sci. Forum **445-446** (2004) 195-197, "Irradiation-Induced Defects and Cu Precipitates in Ternary Fe-Based Model Alloys for Nuclear Reactor Pressure Vessel Steels Studied by Positron Annihilation and 3D Atom Probe".
- 8) T. Chiba, Y. Nagai, Z. Tang, T. Akahane, M. Hasegawa, M. Takenaka, E. Kuramoto: Mater. Sci. Forum **445-446** (2004) 380-384, "Electronic Structure of Nanosized bcc Cu Precipitates in Fe-Cu Alloys Studied by Positron 2D-ACAR".
- 9) Manori P. Nadesalingam, S. Kim, N. G. Fazleev, J. L. Fry, Y. Nagai, M. Hasegawa, A. H. Weiss : Mater. Sci. Forum **445-446** (2004) 156-158, "Search for Positron Trapping at Quantum-Dot Like Cu Nano Particles on the Surface of Fe Using Positron Annihilation Induced Auger Electron Spectroscopy(PAES)".
- 10) Y. Ishijima, H. Kurishita, K. Yubuta, H. Arakawa, M. Hasegawa, Y. Hiraoka, T. Takida and K. Takebe: J. Nucl. Mater. **329-333** (2004) 775-779, "Current status of ductile tungsten alloy development by mechanical alloying".

### 2003

- 1) Y. Nagai, K. Takadate, Z. Tang, H. Ohkubo, H. Sunaga, H. Takizawa, and M. Hasegawa : Phys. Rev. B **67** (2003) 224202-1~6, "Positron annihilation study of vacancy-solute complex evolution in Fe-based alloys".
- 2) Y. Nagai, Z. Tang, H. Ohkubo, K. Takadate and M. Hasegawa : Rad. Phys. Chem. **68** (2003) 381-386, "Elemental Analysis of Positron Affinitive Site in Materials by Coincidence Doppler Broadening Spectroscopy".
- 3) H. Ohkubo, Z. Tang, Y. Nagai, M. Hasegawa, T. Tawara and M. Kiritani : Mater. Sci. Eng. A **350** (2003) 95-101, "Positron annihilation study of vacancy-type defects in high-speed deformed Ni, Cu and Fe".
- 4) 永井康介、長谷川雅幸、柳田誠也、宝野和博 : 「金属」 Vol. **73**, No.8 (2003)771-774、「压力容器鋼モデル合金中の超微小Cu析出物の検出 : 陽電子消滅と3次元アトムプローブ」。
- 5) 永井康介、長谷川雅幸 : 日本分析化学会「ぶんせき」No. **7** (2003) 374-381、「埋め込みナノ粒子の陽電子消滅法による解析」

## 国際会議Proceedings

- 1) Y. Nagai, K. Takadate, Z. Tang, H. Ohkubo and M. Hasegawa: The Effect of Radiation on Materials: 21<sup>st</sup> International Symposium, ASTM STP 1447, M. L. Grossbeck, T. R. Allen, R. G. Lott, and A. S. Kumar, Eds., ASTM International, West Conshohocken, PA, (2004) 590-602, "Irradiation Induced Vacancy-Cu Aggregations in Fe-Cu Model Alloys of Reactor Pressure Vessel Steels Studied by Positron Annihilation".
- 2) Y. Nagai, Z. Tang and M. Hasegawa: Proc. of 2<sup>nd</sup> Int. Conf. on Multiscale Materials Modeling, (Oct. 11-15, 2004, Los Angeles, USA), Ed. By N.M. Ghoniem, pp349-351, "Analysis of Embedded Nano-clusters by Positron Annihilation Spectroscopy".
- 3) T. Toyama, Y. Nagai, Y. Nishiyama, M. Suzuki, T. Ohkubo, K. Hono and M. Hasegawa: Proc. of 2<sup>nd</sup> Int. Conf. on Multiscale Materials Modeling, (Oct. 11-15, 2004, Los Angeles, USA), Ed. By N.M. Ghoniem, pp370-372, "Nano Cu Precipitation in Pressure Vessel Steel of Nuclear Power Reactor Studied by Positron Annihilation and 3D Atom Probe".
- 4) Y. Nagai, T. Toyama, Z. Tang, H. Ohkubo, K. Inoue and M. Hasegawa: Proc. of 11<sup>th</sup> Int. Conf. On "Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems – Water Reactors", (August 10-14, 2003, Stevenson, Washington, USA), (ANS, La Grange Park, Illinois, USA, 2003) (CD-ROM) pp103-109, "Ultrafine Cu Precipitates in RPV Model Alloys Studied by Positron Annihilation and 3D Atom Probe".
- 5) Z. Tang, Y. Nagai, K. Takadate, and M. Hasegawa: Proceedings of the Seventh China-Japan Symposium, Materials for Advanced Energy Systems and Fission & Fusion Engineering, World Scientific, 2003, pp277-284, "Positron annihilation study for electronic structure of Cu precipitates in dilute Fe-Cu alloys".

## 国際会議

### 招待講演

- 1) M. Hasegawa, Y. Nagai and Z. Tang: The International School of Solid State Physics and NATO Advanced Study Institute (**NATO School**): The 30<sup>th</sup> Course, " **Radiation Effects in Solids**", Jul. 17-29, 2004, Erice, Sicily, Italy, "Formation and evolution of nanovoids and nano-precipitates in irradiated Fe-Cu model alloys and RPV steels",
- 2) M. Hasegawa, Y. Nagai and Z. Tang: The International School of Solid State Physics and NATO Advanced Study Institute (**NATO School**): The 30<sup>th</sup> Course, " **Radiation Effects in Solids**", Jul. 17-29, 2004, Erice, Sicily, Italy, "Positron annihilation methods in the studies of irradiation-induced defects in metals and semiconductors: Identification of the defects by positron annihilation".
- 3) Y. Nagai, Z. Tang, The 35<sup>th</sup> Polish Seminar on Positron Annihilation, Turawa, Poland, Sep. 20-24, 2004, "Coincidence Doppler Broadening Spectroscopy in Embedded Nano-Materials".
- 4) Y. Nagai, Z. Tang, and M. Hasegawa: Second International Conference on Multiscale Materials Modeling (MMM-2), Oct. 11-15, 2004, LA, USA, "Analysis of Embedded Nano-clusters by Positron Annihilation Spectroscopy".
- 5) M. Hasegawa, Y. Nagai, Z. Tang, T. Chiba, E. Kuramoto and M. Takenaka: The 2003 Annual TMS (The Minerals, Metals & Materials Society) Meeting Symposium on "Microstructural Processes in Irradiated Materials", March 2-3, 2003, San Diego, USA (Opening Invited Talk), "Irradiation Induced Vacancy and Cu Aggregations in Fe-Cu Model Alloys of Reactor Pressure Vessel Steels: The State-of-the-Art Positron Annihilation Spectroscopy".
- 6) Y. Nagai, Z. Tang and M. Hasegawa: The 13<sup>th</sup> International Conference on Positron Annihilation (**ICPA-13**), Sept. 7-13, 2003, Kyoto, Japan (Plenary Talk), "Application of Coincidence Doppler Broadening Spectroscopy to Materials Science".
- 7) Z. Tang, M. Hasegawa, Y. Nagai and M. Saito: The 13<sup>th</sup> International Conference on Positron Annihilation (**ICPA-13**), Sept. 7-13, 2003, Kyoto, Japan, "First-Principles Calculations of Positron Annihilation Characteristics in Solids: From Positron to Positronium".
- 8) T. Chiba, Y. Nagai, Z. Tang, T. Akahane, M. Hasegawa, M. Takenaka and E. Kuramoto: "Electronic Structure of Nanosize bcc Cu precipitates in Fe-Cu Alloys Studied by Positron 2D-ACAR", (**ICPA-13**) 13<sup>th</sup> International Conference on Positron Annihilation, Kyoto, Japan, Sep. 7-12, 2003
- 9) M. Hasegawa, Y. Nagai and Z. Tang: The 11<sup>th</sup> International Group on Radiation Damage Mechanisms in Pressure Vessel Steels (IGRDM-11), Sept. 11-16, 2003, San Diego, USA, "Positron Annihilation Studies of Nanostructure in RPV Steels and Their Model Alloys" (only one invited talk).
- 10) M. Hasegawa, Y. Nagai and Z. Tang: Positron Annihilation CNRS School, Nov. 20-21 2003, CERI-CNRS, Orleans, France, "Nanoprecipitates".



**一般講演**

- 1) Y. Nagai, T. Toyama, Z. Tang, Y. Hosoda, K. Inoue and M. Hasegawa: The 12<sup>th</sup> International Group of Radiation Damage Mechanisms (IGRDM-12), April 11-15, 2005, Arcachon, France: "Application of Positron Annihilation Spectroscopy to RPV Materials --- Methodological Point of View towards Quantization ---".
- 2) M. Hasegawa, Y. Nagai, T. Toyama, Z. Tang, Y. Hosoda, K. Inoue, Y. Nishiyama, M. Suzuki, A. Almazouzi, E. Van Walle, T. Ohkubo and K. Hono: "Positron Annihilation and 3DAP Results on Surveillance Specimens ---Flux and Fluence Effects --- (P024)".
- 3) T. Toyama, Y. Nagai, Y. Nishiyama, M. Suzuki, T. Ohkubo, K. Hono, M. Hasegawa: "Nano Cu precipitate in pressure vessel steel of nuclear power reactor studied by positron annihilation and 3D atom probe ", Second International Conference on Multiscale Materials Modeling, Oct. 11-15, 2004, LA, USA
- 4) Y. Nagai, K. Takadate, Z. Tang, H. Ohkubo and M. Hasegawa: The Effect of Radiation on Materials: 21st International Symposium, ASTM STP 1447, M. L. Grossbeck, T. R. Allen, R. G. Lott, and A. S. Kumar, Eds., ASTM International, West Conshohocken, PA, (2004) 590-602, "Irradiation Induced Vacancy-Cu Aggregations in Fe-Cu Model Alloys of Reactor Pressure Vessel Steels Studied by Positron Annihilation".
- 5) Y. Nagai, T. Toyama, Z. Tang, H. Ohkubo, K. Inoue and M. Hasegawa : Proc. of 11<sup>th</sup> Int. Conf. On "Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems - Water Reactors", (August 10-14, 2003, Stevenson, Washington, USA), (ANS, La Grange Park, Illinois, USA, 2003), "Ultrafine Cu Precipitates in RPV Model Alloys Studied by Positron Annihilation and 3D Atom Probe".
- 6) T. Toyama, Y. Nagai, Z. Tang, M. Hasegawa, S. Yanagita, T. Ohkubo and K. Hono: "Irradiation-induced defects and Cu precipitates in ternary Fe-based model alloys for nuclear pressure vessel steels studied by positron annihilation and 3D atom probe", (ICPA-13) 13th International Conference on Positron Annihilation, Kyoto, Japan, Sep. 7-12, 2003.

**国内会議****招待講演**

- 1) 永井康介、唐政、井上耕治、長谷川雅幸：「陽電子量子閉じ込めを利用した金属中埋め込みナノクラスタの電子構造解析」、日本物理学会第 60 回 2005 年次大会 2005 年 3 月 24 ~ 27 日 (東京理科大学・野田)

**一般講演 (金属学会、物理学会など)**

2003 年 7 件  
 2004 年 11 件  
 2005 年 4 件