

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360061

研究課題名(和文) 残留応力緩和に及ぼす結晶学的微視構造の影響

研究課題名(英文) Effects of crystal microstructure on residual stress relaxation

研究代表者

秋田 貢一 (AKITA, Koichi)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 量子ビーム応用研究センター・研究主幹

研究者番号：10231820

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,200,000円、(間接経費) 4,260,000円

研究成果の概要(和文)：ショットピーニング(SP)に代表されるピーニング技術は、金属材料表面に圧縮残留応力を導入でき、疲労破壊や応力腐食割れの防止に有効なため、プラント構造物などに適用されている。しかし、そうして導入した圧縮残留応力はプラント稼働中に機器の各部に作用する熱的・機械的負荷により緩和する可能性がある。

そこで本研究では、機械的負荷および熱サイクル負荷における圧縮残留応力の緩和挙動をその場中性子回折技術を用いて評価した。また、SPおよびレーザーピーニングによって材料に導入される微視組織構造を、X線回折プロファイル解析によって評価し、その微視組織構造と残留応力緩和性の関係を考察した。

研究成果の概要(英文)：Peening techniques, such as shot-peening and laser-peening, introduce compressive residual stresses in the surface layer of metallic materials. The compressive residual stress is effective for preventing stress corrosion cracking and fatigue fracture, therefore the peening techniques have been applied to power plant structures. However, the compressive residual stress might decrease due to thermal and/or mechanical loading in service, and it reduces the benefit.

In this study, the relaxation behavior of the compressive residual stress due to mechanical and thermal cyclic loading were investigated by in-situ neutron diffraction techniques. Also, the microstructures introduced by shot-peening and laser-peening were observed by an X-ray diffraction line profile analysis, and the relationships between the microstructures and the relaxation behavior of the compressive residual stress were discussed.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学、機械材料・材料力学

キーワード：残留応力緩和 ショットピーニング レーザーピーニング 中性子回折 X線回折プロファイル解析

1. 研究開始当初の背景

レーザーや超音波、また、キャビテーションを利用した各種ピーニング技術による圧縮残留応力の導入は、プラント構造物の特に溶接部における応力腐食割れ対策として有効である。ただし、こうして導入した圧縮残留応力は、プラント稼働中に各部に作用する熱的・機械的負荷によって徐々に低下する可能性があるため、圧縮残留応力の持続性評価は重要である。また、ピーニングの方法によって異なる結晶学的微視組織構造が導入され、それに起因して残留応力の持続性に差があるものと考えられるが、そういった観点での報告はみあたらない。

2. 研究の目的

本研究では、ピーニングによって導入される圧縮残留応力の熱的・機械的負荷による緩和挙動を明らかにするとともに、ピーニングによって変化する微視組織構造が残留応力の緩和性におよぼす影響を検討する。これにより、残留応力緩和が生じ難い微視構造や、それを発生させるための方法・条件の検討が可能となり、したがって、さらなる耐応力腐食割れ性の向上や強度評価精度の向上、そしてそれに伴い、プラントの長寿命化や検査期間の低減が可能で、莫大な経済的効果が期待できる。

3. 研究の方法

本研究を進めるために必要な基盤技術として、ピーニングによる材料の塑性変形の程度を評価する技術、また、熱的・機械的負荷中に残留応力や結晶構造を高精度にその場観察する技術を構築する。具体的には、まず、塑性ひずみと、X線回折プロファイルから得られる転位密度との関係を検討した。また、中性子回折によるひずみ測定精度におよぼす中性子の吸収の影響を検討した。次いで、中性子回折を用いて、引張負荷および熱サイクル負荷中の残留応力その場測定技術を構築した。

SPとLPとでほぼ同様の残留応力分布を発生させた試験片における微視組織構造をX線回折プロファイル解析や、各種顕微鏡観察により評価し、残留応力緩和性との関係を検討した。また、中性子回折により、ピーニングを施した材料の機械的負荷および熱サイクル負荷における残留応力緩和過程をその場測定し、その緩和機構を検討した。

4. 研究成果

(1) 塑性ひずみと転位密度との関係 [学会発表⑧]

図1はS45Cの600°C1時間の応力除去焼きなまし材における引張負荷と転位密度との関係である。なお、転位密度はX線プロファイル解析法によって求めている。塑性変形が生じる負荷応力400MPa以上で転位密度が単調

増加することが分かる。この実験における塑性ひずみ ϵ_p と転位密度 ρ との関係を図2に示す。両者の間には一義的關係が存在し、 $\rho = \rho_0 + C\epsilon_p^\alpha$ の形で表せる。ここで、 C 、 α は材料定数である。したがって、この関係を用いることで、塑性ひずみをX線的手法によって推定できる可能性が示された。

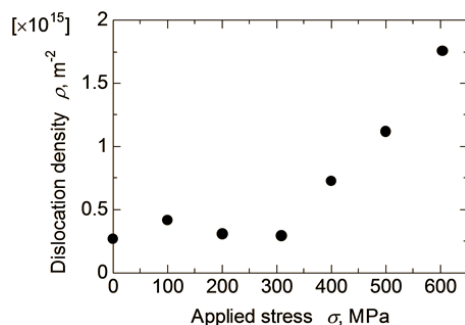


図1 引張負荷応力と転位密度の関係(S45C).

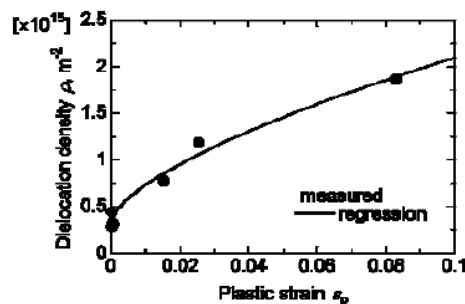


図2 塑性ひずみと転位密度の関係(S45C).

(2) 中性子ひずみ測定の精度向上 [学会発表⑨、⑩、雑誌論文④]

本研究では、機器の実働下(熱的あるいは機械的負荷を受けている状態)におけるその場中性子回折測定を実施する。ここでは、中性子回折測定における見かけひずみの問題を検討した。回折法による試料法線方向のひずみ測定では、図3に示すように反射光学系となり、この場合、材料による中性子の吸収により、表面側に重みの付いた平均的回折情報となり、これが回折角に影響する。ひずみは回折角とBragg則から求められるため、結果として回折角のずれが見かけひずみを発生させる。

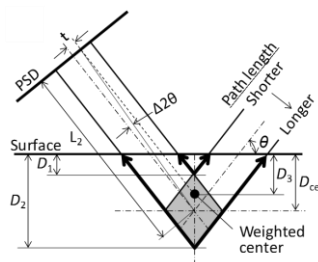


図3 回折法における見かけひずみの問題。

ここでは詳細は省略するが、中性子の吸収に伴う回折角度の補正および回折重心位置変化による測定位置の補正を施すことで、ひずみ測定精度が向上する可能性を示した(図4)。

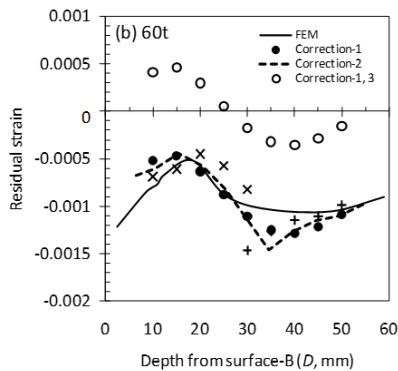


図4 溶接材の法線方向歪における実測値、補正值およびFEM解析結果との比較(低合金鋼-ステンレス鋼の異材溶接継手)。

(3) 機械的引張負荷におけるピーニング残留応力の挙動 [雑誌論文⑤, ⑥, ⑦、学会発表⑥]

実機の稼働時に機械的負荷が作用する部材を想定し、LPによって表層に圧縮残留応力を導入した試料に引張負荷を与え、圧縮残留応力緩和過程を検討した。残留応力測定にはX線回折(図5)と中性子回折(図6)を用いて、表面から内部にかけての残留応力挙動を引張負荷過程においてその場測定し、また、有限要素法(FEM)による数値解析も実施した。

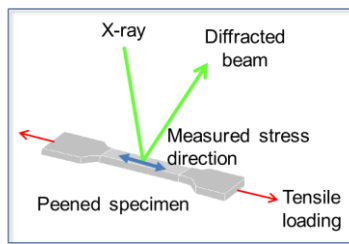


図5 X線回折による負荷中残留応力測定のレイアウト。

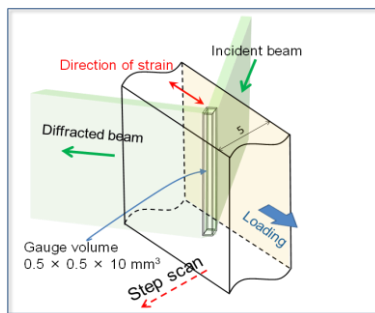


図6 中性子回折による負荷中の内部残留応力測定のレイアウト。

図7は、両面にLPを施した板厚5mmの溶接用鋼材(SM41)の全板厚内残留応力をX線回折及び中性子回折によって非破壊測定した結果である。試験片内部には表層の圧縮残留応力とつりあう形で引張残留応力が発生している。図中の実線はこの残留応力分布をFEMで模擬した結果である。この試験片に引張負荷したときの表面および内部の残留応力挙動を、それぞれ図8および図9に示す。

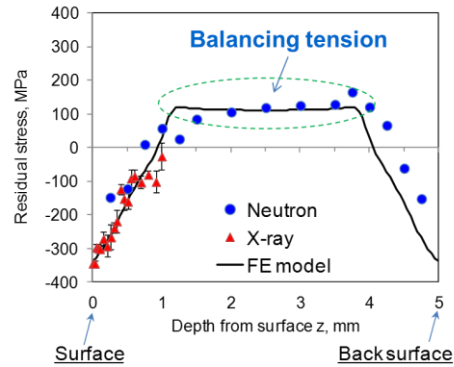


図7 試験片全板厚における初期残留応力分布(両表層にLPによる圧縮残留応力が発生)。

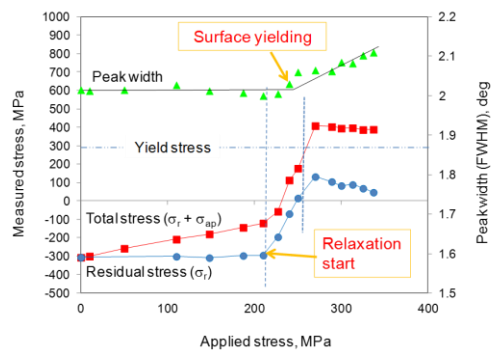


図8 引張負荷における表面の残留応力とX線回折線半価幅の挙動(X線回折法, SM41)。

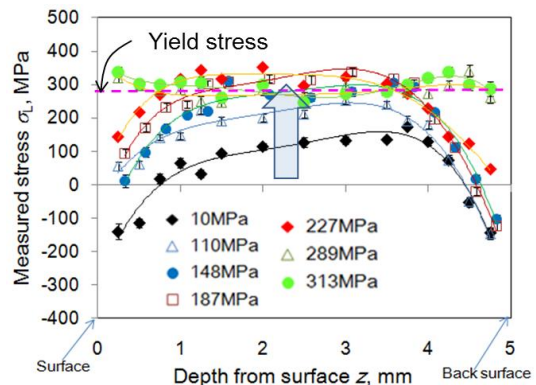


図9 引張負荷における試験片残板厚における残留応力挙動(中性子回折法)(SM41)。

ここでは詳細は省略するが、図 8 および図 9 における実測結果は、FEM による数値解析結果と非常によく一致した。これらの結果から、LP 施工材に作用する引張荷を増加していくと、LP によって形成された表面圧縮残留応力に釣り合う形で存在する内部の引張残留応力領域がまず塑性変形する。そして、表面に先駆けて内部から先に塑性変形、すなわち残留応力緩和が始まり、そのとき残留応力再配分が生じて表面残留応力が緩和し始めることが実証された。したがって、内部も含めた部材全体の残留応力分布を把握することで、臨界負荷応力（残留応力が緩和し始める時点の負荷応力）を推測できることが明らかとなった。

(4) 熱サイクル過程におけるピーニング残留応力の挙動 [学会発表①, ②, ③, ④, ⑦]

ニッケル基合金(NCF600)–ステンレス鋼(SUS316L)異材溶接継手の昇温・降温過程における内部引張残留応力の挙動を中性子回折により実測した。供試材は母材が SUS316L と NCF600、溶接金属が Alloy 82 であり、溶接後、超音波ショットピーニングによって表層に圧縮残留応力を導入したものである。熱サイクル中の残留応力測定は大強度陽子加速器施設物質・生命科学実験施設 J-PARC/MLF のパルス中性子工学回折装置「TAKUMI (匠)」を用いて実施した (図 10)。

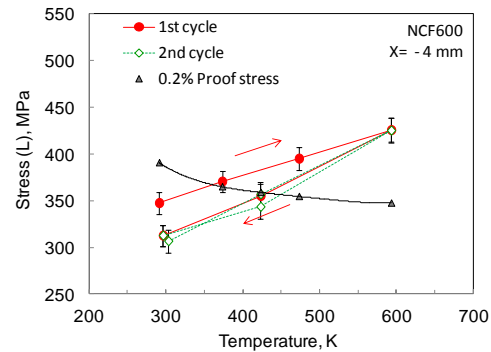


図 10 大強度パルス中性子による工学回折装置 TAKUMI における装置セットアップ。

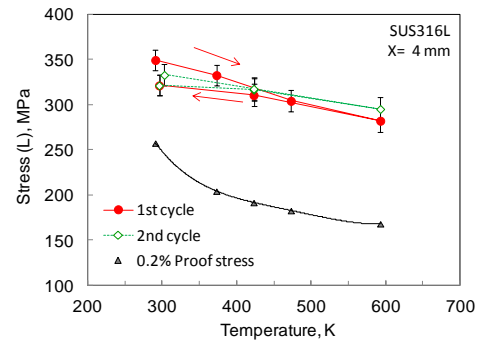
その結果、昇温に伴いニッケル基合金内部では引張残留応力が上昇し(図 11(a))、一方、ステンレス鋼内部では引張残留応力が下降する(図 11(b)) ことを明らかにした。これらの挙動は、溶接引張残留応力に熱サイクル中に発生する熱応力が重畳した結果生じることが明らかとなった。また、昇温過程でニッケル基合金側の残留応力が 0.2%耐力を超えることが分かった。したがって、本試験体のニッケル基合金側の第 1 サイクル目における残留応力低下原因のひとつは、昇温過程で塑性変形するためであることが明らかとなった。

(5) X 線回折プロファイル解析によるピーニング施工面の微視組織評価 [雑誌論文①, ②, ③, 学会発表⑤]

SP 施工面と LP 施工面の微視組織を X 線回折プロファイル解析によって検討した。供試材には SUS316 を用いた。なお、SP, LP ともに施工条件(圧力やかバレージなど)によって微視組織は異なると考えられる。ここでは両ピーニング法によって導入される微視組織の比較のために、両ピーニング法で同じ残留応力が発生する施工条件を探索した。その結果、図 12 に示すように、両ピーニング法でほぼ同様の残留応力を発生させることに成功した。



(a) ニッケル合金側(ビード中心から 4 mm)。



(b) ステンレス鋼側(ビード中心から 4 mm)。

図 11 熱サイクル中の残留応力挙動(試験片表面から深さ 4 mm) (SUS316)。

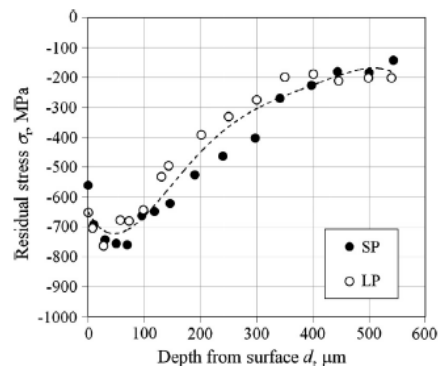


図 12 本研究における SP 施工材と LP 施工材の残留応力深さ分布。各施工条件を調整して、両者で同様の残留応力分布を発生させた (SUS316)。

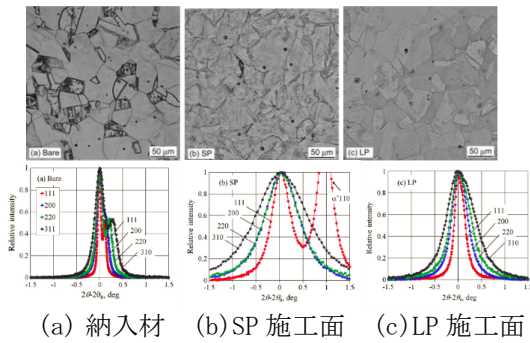


図 13 ピーニングを施工した SUS316 の微視組織(上段)と X 線回折プロファイル(下段)。

このように同様の残留応力分布を持つ SP 施工材、LP 施工材の微視組織を比較した。図 13 に納入材、SP 施工面および LP 施工面の金属組織と X 線回折プロファイルを示す。両ピーニング面ともに結晶内にすべり線が観察され、転位が増加していることが分かる。また、X 線回折プロファイルはピーニングによって拡張しているが、LP 施工面よりも SP 施工面の拡張が著しい。さらに、LP 施工面では α' 相の回折線が新たに観察される。すなわち、SP 施工時に加工誘起マルテンサイト変態が生じたことが分かる。

図 14 は、図 12 に示した X 線回折プロファイルを用いて修正 Williamson-Hall/Warren-Averbach 法によって解析して得られた転位密度と結晶子サイズである。転位密度は両ピーニング法で明らかに増加しているが、SP のほうがその増加率が高い。また、結晶子サイズはどちらも低下しているが、LP よりも SP の低下が大きい。

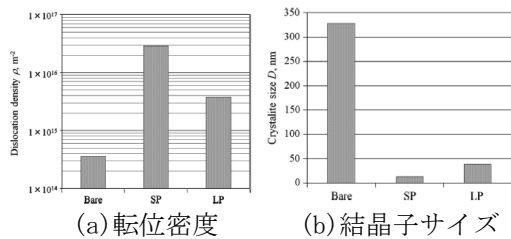


図 14 納入材、SP 施工面および LP 施工面における転位密度と結晶子サイズ(SUS316)。

以上のように、SP と LP とで同様の残留応力分布を発生させた場合でも、微視組織状態は明らかに異なり、SP のほうが転位密度が高く、結晶子サイズが小さいことが分かった。また、SP ではマルテンサイト変態が生じたことも判明した。これは、ピーニング施工時の変形機構が SP と LP とで異なることが原因であると考えられる。また、ここでは結果は省くが、SP、LP とで残留応力をそろえても、SP のほうが熱時効による残留応力緩和が生じやすいこ

とも分かった(板野祐太、平成 24 年度東京都市大学大学院工学研究科修士論文)。これは、SP のほうが転位密度が高く、すなわち微視的なひずみエネルギーが高い状態にあるため不安定であり、したがって、エネルギー的に安定な状態に移行しやすく、その結果、熱時効による残留応力緩和が生じやすかったものと考えられる。熱時効による耐残留応力緩和性が高い圧縮残留応力を導入するためには、LP のように転位密度の増加を抑えつつ、すなわち微視的ひずみエネルギーの増加を抑えることが重要と考えられる。以上から、ピーニングによって圧縮残留応力を導入する際には、導入される残留応力の大きさだけでなく、導入される微視組織構造にも着目すべきであることが示された。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 7 件)

- ① M. Kumagai, K. Akita, Y. Itano, M. Imafuku, S. Ohya, Workhardening and the microstructural characteristics of shot-and laser-peened austenitic stainless steel, Mater. Sci. & Eng., 査読有り, A608 (2014) 21–24. DOI: 10.1016/j.msea.2014.04.061
- ② M. Kumagai, K. Akita, Y. Itano, M. Imafuku, S. Ohya, X-ray line profile study on shot/laser peened stainless steel, Material Science Forum, 査読有り, 2014 (掲載決定) .
- ③ M. Kumagai, K. Akita, Y. Itano, M. Imafuku, S. Ohya, X-ray diffraction study on microstructures of shot/laser-peened AISI316 stainless steel, J. Nucl. Mater. 査読有り, 443 (2013) 107–111. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2013.07.010
- ④ 鈴木裕士, 秋田貢一、中性子回折法による溶接残留応力測定精度に関する考察; 無ひずみ状態の格子定数の影響、材料、査読有り、61(2012)604-611. DOI : 10.2472/jsms.61.604
- ⑤ 宮下大輔、竹田和也、大谷眞一、佐野雄二、斎藤利之、秋田貢一、アルミニウム合金におけるレーザーピーニング残留応力の機械的負荷による緩和挙動、材料、査読有り、60(2011)617-623. DOI : 10.2472/jsms.60.617
- ⑥ Y. Sano, K. Akita, K. Takeda, R. Sumiya, T. Tazawa, T. Saito and C. Narazaki, Stability of Residual Stress Induced by Laser Peening Under Cyclic Mechanical Loading, International Journal of Structural Integrity, 査読有り, 2(2011)42-50. DOI:10.1108/175798611111108608
- ⑦ Koichi AKITA, Kengo HAYASHI, Kazuya TAKEDA, Yuji SANO, Hiroshi SUZUKI, Atsushi MORIAI and Shin-ichi OHYA, Relaxation Behavior of Laser-Peening Residual Stress under Tensile Loading

Investigated by X-ray and Neutron
Diffraction, Mechanical Engineering journal,
査読有り (投稿中) .

[学会発表] (計 9 件)

- ① 秋田貢一、西川聡、柴原正和、生島一樹、鈴木裕士、盛合敦、Harjo/Stefanus、相澤一也、異材溶接継手における熱サイクル中その場中性子応力測定、中性子科学会第13回年会、2013年12月、柏市.
- ② 秋田貢一、西川聡、鈴木裕士、盛合敦、Harjo Stefanus、異材溶接継手の高温下中性子残留応力測定、材料力学カンファレンスM&M2013、2013年10月、岐阜市.
- ③ Koichi Akita, Hiroshi Suzuki, Satoru Nishikawa, Atsushi Moriai, Stefanus Harjo and Vladimir Luzin, Thermal Relaxation Behavior of Residual Stress in Peened Dissimilar Weld Joints Investigated by Neutron Diffraction, 7th International Conference on Mechanical Stress Evaluation by Neutron and Synchrotron Radiation, 2013年9月、シドニー (オーストラリア) .
- ④ 秋田貢一、鈴木裕士、盛合敦、Harjo Stefanus、西川聡、異材溶接継手の熱サイクル過程における中性子残留応力測定、第47回X線材料強度に関するシンポジウム、2013年7月、東京.
- ⑤ 熊谷正芳、秋田貢一、今福宗行、大谷眞一、ピーニング処理したオーステナイト系ステンレス鋼における微視組織のX線回折を用いた評価、日本材料学会第62期学術講演会、2013年5月、東京.
- ⑥ K. Akita, K. Takeda and Y. Sano, Relaxation of Peening Residual Stress during Mechanical Loading, The 9th International Conference on Residual Stresses, 2012年10月、ガルミッシュ・パルテンキルヘン (ドイツ) .
- ⑦ 秋田貢一、鈴木裕士、西川聡、大北茂、USP処理した異材溶接継手の熱負荷前後における残留応力マッピング、日本材料学会第61期学術講演会、2012年5月、岡山市.
- ⑧ 熊谷正芳、今福宗行、秋田貢一、大谷眞一引張負荷を加えた鋼材のX線回折法による転位密度測定、第55回日本学術会議材料工学連合講演会、2011年10月、京都市.
- ⑨ H. Suzuki, J. Katsuyama, K. Akita, Effect of neutron absorption on strain measurement of thick butt weld, The 6th International Conference on Mechanical Stress Evaluation by Neutrons and Synchrotron Radiation, 2011年9月、ハンブルグ (ドイツ) .
- ⑩ 鈴木裕士、勝山仁哉、秋田貢一、中性子回折法によるひずみ分布測定に及ぼす吸収の影響とその補正、第45回X線材料強

度に関するシンポジウム、2011年7月、東京.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

無し

6. 研究組織

(1) 研究代表者

秋田 貢一 (AKITA, Koichi)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 量子ビーム応用研究センター・研究主幹

研究者番号：10231820

(2) 研究分担者

鈴木 裕士 (SUZUKI Hiroshi)

独立行政法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 量子ビーム応用研究センター・研究副主幹

研究者番号：10373242

今福 宗行 (IMAFUKU Muneyuki)

東京都市大学・工学部・教授

研究者番号：001803012

黒田 雅利 (KURODA Masatoshi)

熊本大学・自然科学研究科・准教授

研究者番号：00432998

(3) 連携研究者

無し