

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 23 日現在

機関番号：82502

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420891

研究課題名(和文)水素吸蔵材料高機能化に及ぼす量子ビーム照射による欠陥デザイン

研究課題名(英文)The hydrogen occlusion materials high function in the defect design by the quantum beam irradiation

研究代表者

阿部 浩之 (ABE, Hiroshi)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・高崎量子応用研究所 先端機能材料研究部・主任研究員(定常)

研究者番号：30354947

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：量子ビーム(イオン・電子・レーザー)照射による水素吸蔵材料の表面改質・表面活性化等を施す事で水素吸蔵材料高機能化(例として自動車のバッテリーや乾電池など)を図るため、水素吸蔵測定系は電気化学的充放電測定装置を構築し、水素吸蔵初期反応速度を測定できる系を構築した。また、種々の量子ビーム照射を実施した結果、未照射に比べ、照射による水素吸蔵機能性は向上することが判明した。それぞれの照射によって表面構造がランダムな状態(乱れ)になる事がわかり、表面層に対して、欠陥導入、希土類酸化膜の形成、非熱加工効果や衝撃波による構造の乱れさせることが吸蔵機能を向上させる因子であることを突き止めた。

研究成果の概要(英文)：The hydrogen storage system of measurement built electrolytic cell apparatus to plan hydrogen absorption material high function by giving surface modification, the surface activation of hydrogen absorption material by the quantum beam (ion, electron and laser) irradiation. We built the system that could measure initial hydrogen absorption reaction rate. As a result of having carried out various kinds of quantum beam irradiation, the hydrogen storage functionality by the irradiation was proved to improve in comparison with non-irradiation. The respective irradiation showed that the surface structure will be in the random state (disorder). It was discovered to the surface layer that defect introduction, formation of a rare earth oxidation film and the case that non-thermal process effect and the structure by the shock wave make them be disordered are the factor which improves the occlusion function.oxidation film, a non-heat processing effect and the shock wave.

研究分野：量子ビーム応用工学

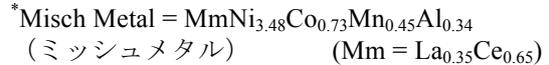
キーワード：量子ビーム 水素吸蔵合金 水素吸蔵初期反応速度 欠陥デザイン 表面改質 格子欠陥

1. 研究開始当初の背景

地球環境負荷の軽減とともに早急に進められている自然エネルギーの開発などにより、新しいエネルギー体系の開発・構築が進められている。その一つとして水素エネルギーシステムがあり、その中でも水素吸蔵(合金)材料研究があり、それらは水素貯蔵・運搬、水素精製等のより安全かつ効率的な材料開発・新規材料創製の研究を進めている。近年、水素吸蔵合金を利用したものとして、Ni-MH 蓄電池(ニッケル水素電池)が挙げられる。既に繰り返し利用可能な充電式蓄電池(単一~単四等)として一般に流通しており、更にハイブリッドカー(HV: Hybrid Vehicle)のバッテリーとしても搭載されている。また高機能水素貯蔵型電池開発や水素の吸・放出を利用した“ソフトな応答”によるアクチュエーターへの応用が期待されている。それらの利用は地上に限らず、人工衛星、宇宙ステーションなどに搭載されるバッテリーや駆動系のアクチュエーターへ応用するといった提案もなされている。加えて爆発危険性のある水素ガスを水素吸蔵材料に安定的に吸蔵させることで、爆発危険性のないものとして扱えるようになるので、安全の観点からも大きな利点があるため、来たるべき自然エネルギーを利用した水素社会では重要な位置を占めると考える。現在、水素吸蔵に関わる材料研究において、水素吸蔵反応についてはメカニズムやそのプロセスについては完全に解明されておらず、これら合金の水素吸蔵性能のさらなる高機能化や新規水素吸蔵材料の開発において、それら解明を進めることが、次世代材料の指針になり、研究が急務とされている。従来、水素吸蔵材料の研究分野では表面改質・表面活性化処理といえば、アルカリ溶液などによるエッチング技術といった、化学的処理方法やMA(メカニカルアロイ)法などによる物理的処理方法にて行っている。

我々は、既に水素吸蔵材料の水素吸蔵能力が表面に対して非常に敏感であることに着目し、量子ビーム照射(イオン・電子線)を利用した水素吸蔵材料の表面改質に関する研究を進めてきた。これまで Pd(パラジウム)単体金属を用いた予察実験を行っており、これらの材料についてイオンや電子線照射を行うことで水素吸蔵初期反応速度がおよそ5倍向上することを明らかにしている[1]。さらにイオン照射により水素吸蔵能が向上するプロセスについて陽電子プローブ(陽電子消滅法)による研究では 100keV 水素イオン照射した Pd では表面近傍(表面から深さ方向)400nm 付近に単一原子空孔レベルの空孔型欠陥が形成されていることを測定により確認した[2]。また、実用材料 MmNi_{3.48}Co_{0.73}Mn_{0.45}Al_{0.34} や LaNi₅、AB2 合金といった TiCr₂、TiO₂ 材料について、クロムやカリウム、ビスマスイオンの様なその材料表面活性を促進させる原子のイオン照射を施すことで、条件によっては5倍以上の吸蔵能が向上することを突き止めた[3, 4]。

本研究では上述にある過去の知見を基にして、水素吸蔵能向上のため、量子ビーム照射による材料のミクロな構造変化を測定・解析することで表面の局所構造変化やナノボイド生成による水素の吸蔵メカニズムを解明する。



2. 研究の目的

燃料電池やその他バッテリー、アクチュエーター等に利用されている水素吸蔵(吸収)材料の研究分野において、材料の高機能化を目指す研究(材料の組成・構造制御や科学処理などによる機能性向上の研究や合金材料創生の研究など)がなされている。そういった研究の中で量子ビーム(イオン・電子線・レーザー)照射による材料研究に着目し、照射により材料の表面改質あるいは表面活性化・触媒効果処理を施すことで、水素吸蔵材料の高機能化を図り、量子ビーム照射による欠陥デザインさせた水素吸蔵の開発を実施する。

水素吸蔵と材料表面に与える影響について、材料のミクロな構造変化とマクロな水素吸蔵変化との相関を調べ、材料表面の構造変化による水素の吸蔵メカニズムについて、量子ビーム照射を通じてその素過程を明らかにする。

3. 研究の方法

水素吸蔵材料(AB5 型合金(MmNi₅ や LaNi_{4.6}Al_{0.4})に対して、量子ビーム(イオン・電子線・レーザー)照射後の材料評価(水素吸蔵初期反応速度測定)及びその測定装置の構築を行う。図1は材料への量子ビーム照射の概念図を示す。イオンビーム照射、電子線照射レーザー照射をそれぞれ行い、材料に表面改質(表面活性・触媒効果)させ、量子ビームによるナノボイドと表面構造の相関について水素吸蔵初期反応速度測定を通じて調べる。新たな水素吸蔵モデル構築を目指すため、局所的なランダムな表面状態を形成させる。その際の表面構造の詳細測定については、放射光実験の歪み測定による材料表面構造解析を実施する。

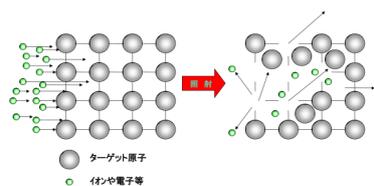


図1. 材料への量子ビーム照射

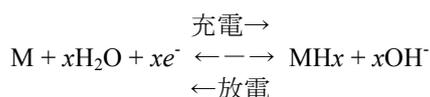
具体的には以下の3点について実施する。

1) 水素吸蔵反応測定系の構築。

水素吸蔵材料照射サンプルと未照射サンプルは電気化学的手法を用いて水素吸蔵能を評価するための測定系として、水素吸蔵初期反応速度測定と水素吸蔵放出の繰り返し充放電が可能な装置として構築する。

本測定系は、反応媒質に6Mの強アルカリ溶液を用いて、正・負極がそれぞれ電気化学的に酸化還元を行えば、水素を可逆的に吸蔵・

放出することができる。以下にその時の電気化学反応式を示す。



水素吸蔵合金(M)はアルカリ電解液中で電気化学反応を行う。水素吸蔵初期反応速度についてジベルツ装置を用いた気相実験よりも緩やかな反応速度(分のオーダー)測定が可能となり、高精度な水素吸蔵初期反応速度測定が可能となるようにデザインする。

2) 量子ビーム(イオン・電子線・レーザー)照射後の水素吸蔵材料、未照射材料の水素吸蔵初期反応速度測定。

水素吸蔵実験前後、あるいは量子ビーム照射前後の各サンプルについては、X線回折を放射光施設(SPring-8)にて実施し、歪み測定、局所構造解析といった表面モロロジーについての測定を実施する。

量子ビーム照射によって材料に表面改質(含、表面活性・触媒効果)や非科学両論組成を形成させ、その時の照射により生成されたナノサイズのボイドの情報(欠陥サイズや材料表面から欠陥生成量(濃度)の測定)と水素吸蔵放出過程におけるそれぞれの表面構造の相関について、水素吸蔵放出実験を通じて基礎データを取得する。サンプルの水素吸蔵初期過程について、照射エネルギー依存性、フルエンス依存性、それぞれ照射サンプルについて水素吸蔵実験を1)で構築した測定系を用いて行う。量子ビーム照射実験の照射エネルギー依存性についてはビームエネルギーの高領域(高エネルギー: MeV領域)から低領域(keV領域)照射において、水素吸蔵量の変化を表面深さ方向依存性として調べる。また照射フルエンス依存性においては、照射により生成される欠陥量と水素吸蔵量について調べる。特に電子線照射では照射環境(大気、真空、ガス雰囲気)の違いによる水素吸蔵能の特性影響についても調べる。またレーザー照射については、短パルスレーザー(ナノ秒、フェムト秒)それぞれをサンプルへ照射し、パルス幅の違いにより材料との相互作用も異なる(特にフェムト秒では非熱加工効果がある)ことから、照射後のそれぞれのレーザー照射による材料表面状態などの差異について水素吸蔵能の変化を調べる。これら照射と共に形成される歪みや欠陥についての原子配列や構造変化に関しては、表面観察としてX線光電子分光法(XPS)や走査型電子顕微鏡(SEM)、構造変化の測定にはX線回折測定として大型放射光施設SPring-8のBL22XUビームラインにて歪み測定を実施し、材料の表面層の構造解析を行い、水素吸蔵能効果の変化とその最大効果となる最適値を調べる。

イオン照射は量子科学研究開発機構(旧、日本原子力研究開発機構)高崎量子応用研究

所イオン照射研究施設(TIARA)に設置されている400 kVイオン注入装置(keV領域照射)と3 MVタンデム加速器(MeV領域照射)を用いる。また電子線照射についても、同機構に設置されている2 MV電子線加速器(1~2 MeV領域照射)を用いる。レーザー照射については、日本原子力研究開発機構レーザー共同研究所(福井県敦賀市)保有の短パルスレーザーを利用する。短パルスレーザーはフェムト秒レーザー(チタンサファイア)やナノ秒レーザー(YAG)を利用する。

3) 10 サイクルまでの水素吸放出(充放電)を繰り返した照射・未照射サンプル表面の原子配列や構造変化について、X線・電子線をプローブとした表面構造解析や表面観察を実施する。

構築した測定系により種々の量子ビーム照射された水素吸蔵合金サンプルと未照射サンプルについて、水素吸放出を10サイクルまで繰り返して実施し、その1サイクルからの水素吸蔵曲線の推移を調べる。サイクル毎に材料に微粉化が生じてくるので、それらと水素吸蔵初期反応測定との関係を調べると共に、基本的な測定方法などは2)の場合と同様の測定を実施する。

4. 研究成果

1) 水素吸蔵反応測定系の構築

測定系の構成は、ポテンショガルバナスタット電源(3極電源)や電位差計を用いて正極に水酸化ニッケル板(Ni(OH)₂; 30 mm x 30 mm x 0.3 mm)、負極に水素吸蔵材料(12.3 mmφ x 1.3 mm)、そして負極付近に参照電極(Hg/HgO)を設置した(図2)。媒質であるアルカリ電解溶液中(6 M-KOH)で電気化学的手法により充放電を行う。この際、充放電反応は298Kに維持された恒温槽中にて行われる。参照電極にかかっている電圧-0.93 Vはこの系では1気圧の状態を意味する。つまり常温常圧にて水素吸蔵を行うことができる。そして

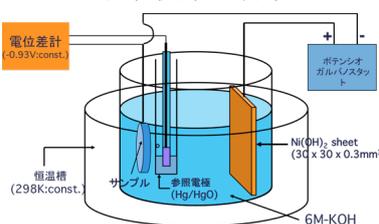


図2. 水素吸蔵反応測定用充放電装置

水素吸蔵反応時の電流を参照電極により測定し、その電流量(クーロン数)が水素イオン量に対応しているため、その値を測定することで、サンプル内に吸蔵した水素量(MH)を測定することになる。水素吸蔵量測定では水素吸蔵/放出(充放電)について水素吸蔵(充電)120分させる。その後30分で放電させ、それら充放電の一連動作を1サイクルとし、繰り返しのサイクル測定が可能にした。また充/放電時間設定をオフにすることで、無限に長い充電時間となり、つまりは最大水素吸蔵量の測定を可能とした。

2) 量子ビーム (イオン・電子線・レーザー) 照射後の水素吸蔵材料、未照射材料の水素吸蔵初期反応速度測定。

①イオン照射と水素吸蔵測定

照射エネルギー依存性が確認できた。エネルギーが低い (より表面層で生成される欠陥が多い) ほど、水素吸蔵初期反応速度 (蓄電池でいうと急速充電) が速くなる傾向を見出した。

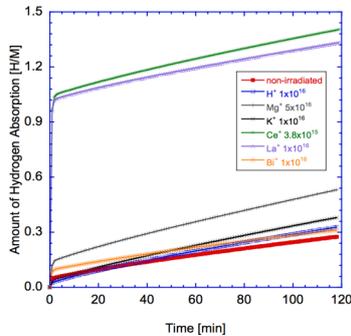


図3. 種々のイオン照射による水素吸蔵曲線

図3に種々のイオン照射による水素吸蔵曲線を示す。横軸は水素吸蔵 (充電) を開始してからの時間 (分) を示し、縦軸は吸蔵材料に吸蔵された水素量を示す。特に Ce, La イオンが材料表面

に対して高密度に欠陥を生成し、そのため、表面からの侵入水素の核成長を促進させ水素吸蔵初期反応速度が速くなった。

②電子線照射と水素吸蔵測定

水素吸蔵材料の水素吸蔵初期反応速度が未照射のものを比較し速く反応する (吸蔵能向上) ことが判明した (図4)。XPS による材料深さ方向分析の結果では表面近傍に多量の酸素が存在していることから、表面には酸化膜が形成されているものと考えられ、さらに待機中照射時

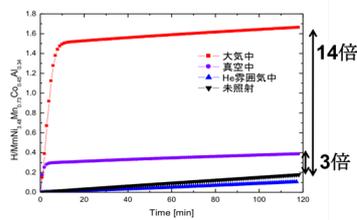


図4. 電子線照射による水素吸蔵曲線

機中照射時が最も酸化膜が厚く、ついで真空中、未照射、He 雰囲気中の順になっていることがわかった。SEM 観察では大気中照射時の表面の凹凸が多く表面粗さが目立つのに対し、真空中、He 雰囲気中の表面の凹凸は少なく、試料表面状態に明らかな違いが認められた。これは低温酸化のメカニズムが深く関与していると考えられる[5]。材料に対し、電子線照射雰囲気 (大気、真空、ガス雰囲気: 酸素分圧) を変化させることによって、水素吸蔵材料表面に形成される希土類酸化物が変化し、反応性の高い非科学量論組成の希土類酸化物が形成される。その結果、材料表面の仕事関数が低下し、水素吸蔵初期反応速度が速くなった。

③短パルスレーザー照射と水素吸蔵能

ナノ秒とフェムト秒といった短パルスレーザー照射を施し、各フルエンス (単位面積当たりのレーザー照射エネルギー量) とその水素吸蔵能変化について、水素吸蔵初期反応速度

測定を実施した。種々のレーザー照射条件の規格化を図るためにフルエンス (単位面積当たりのレーザー照射エネルギー $[J/cm^2]$) を定義し、ナノ秒、フェムト秒レーザー照射により各フルエンスとその水素吸蔵能変化について調べた。図5はレーザー照射のフルエンス (照射密度) と水素吸蔵開始から120分後の水素吸蔵量 H/M 値との関係を示す。左図フェムト

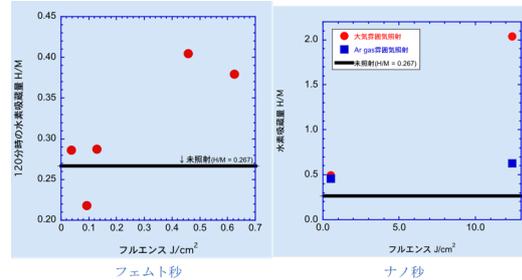


図5. 短パルスレーザー照射密度と水素吸蔵量

秒のフルエンス $0.2 J/cm^2$ 以下時の H/M 値よりもそれ以上のレーザーフルエンスで照射した場合の方が水素吸蔵機能向上に寄与していることがわかる。レーザー照射により材料表面を乱すことで、水素吸蔵初期反応速度が速くなるということが放射光の応力歪み測定により判明した。ナノ秒とフェムト秒レーザー照射では、そのパルス幅の違いで後者は非熱加工効果があり、照射によって表層部に GPa という超高压波が発生し、表面モロロジーが大きく変化してランダムな表面状態の形成 (表面積増加) が一因で水素吸蔵反応速度向上となったことがわかった。

3) 15 サイクルまでの水素吸放出 (充放電) を繰り返した照射・未照射サンプル表面の原子配列や構造変化について、X 線・電子線をプローブとした表面構造解析や表面観察を実施する。

複数回サイクルの水素吸放出実験について、短パルスレーザー照射を行い、照射前後のサンプルは SPring-8BL22XU の X 線回折による応力歪み測定や XPS を用いてサンプル表面構造変化について応力歪み測定や表面状態分析

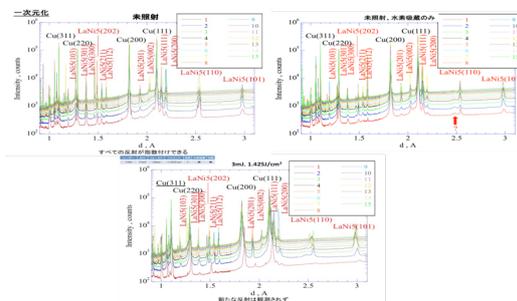


図6. 水素吸蔵と応力歪みの関係

を通して、レーザー照射と水素吸蔵能変化の相関を調べた (図6)。その結果、吸蔵サイクルを繰り返すほどに応力歪みが大きくなっていることが判明し、また、フルエンスの違いによって材料表面層に形成された歪みが観測され、表面層の乱れが顕著であり、表面構造

がランダムな状態であることが分析により判明した。これらは非熱的レーザー加工反応、衝撃波等によって形成され、これらが水素吸蔵機能向上に寄与していると考えられる。

4) その他

大気中における電子線照射実験において、照射後サンプルの表面状態について、走査型電子顕微鏡 (SEM) 観察を実施したところ、合金表面層にナノワイヤが生成していることが判明した。図7のSEM観察によれば、未照射と照射では明らかに異なり、また照射でも1MeV, 2MeV とエネルギーの違いにより生成されたナノワイヤのサイズが照射エネルギーに依存し、異なる事も判明した。これらナノ

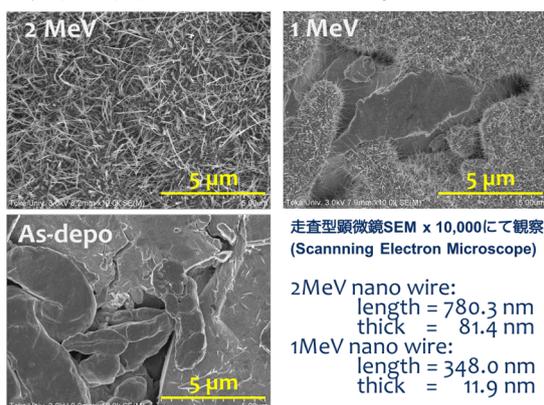


図7. 電子線照射による合金表面 (SEM 観察)

ワイヤの一つ一つの表面積が結果として水素吸蔵初期反応速度を速める (吸蔵能向上) ことに寄与している事も判明した。

電子線照射で、かようなナノワイヤ生成は予期できなかった結果であり、かつ水素吸蔵能向上には重要な知見である。現状では現象論でのみの解釈でしかならず、今後表面観察やエネルギー以外のパラメータ (照射温度や環境) による依存性とそれら表面観察により相関関係を追求していきたい。

最後に本課題研究は従来からの水素吸蔵機能性向上としては、化学処理やメカニカルアロイという物理的処理で行うことが主であったが、量子ビームを用いることで、従来処理よりも数倍も向上し、かつ短時間・安全にそして効率よく実施できる。またレーザーについてはさらに荷電粒子線照射よりも短時間であり、非放射化の見地からしても有用であるということがわかった。

<引用文献>

- ① H. Abe, S. Aone, R. Morimoto, H. Uchida and T. Ohshima, Trans. Mat. Res. Soc. Jap., 36[1](2011)pp.133-135.d
- ② H. Abe, H. Uchida, Y. Azuma, A. Uedono, Z. Q. Chen and H. Itoh, Nucl. Ins. and Meth., B206(2003)pp.224-227.
- ③ H. Abe, R. Morimoto, F. Satoh, H. Azuma and H. Uchida, J. Alloy and Comp., 408-412(2006)pp.348-350.

- ④ Y. Yoneda and H. Abe, Trans. Mat. Res. Soc. Jap., 36[1](2011)pp.23-26.
- ⑤ E. Fromm, "Kinetics of Metal-Gas Interactions at Low Temperatures", Springer, 1998. P. 78, ISSN 0931-5195.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3件)

- ① Hiroshi Abe, Shinnosuke Tokuhira, Hirohisa Uchida, Takeshi Ohshima, Surface Modification of Hydrogen Storage Alloy by Heavy Ion Beam with keV to MeV Irradiation Energies, Nuclear Instruments and Method in Physics Research, 査読有, Section B365, 2015, pp. 214-217, <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2015.07.085>
- ② H. Abe, S. Tokuhira, H. Uchida, Surface Modification Effects of Electron Beam Irradiation on the Hydriding Property of Hydrogen Storage Alloy, JAEA-Review, 査読有, 2015-022, 2015, p. 17. <https://doi.org/10.11484/jaea-review-2015-022>
- ③ Hiroyuki Daido, Hiroshi Abe, Takashi Shobu, Takuya Shimomura, Shinnosuke Tokuhira, Yusuke Takeyama, Takehiro Furuyama, Akihiko Nishimura, Hirohisa Uchida, Takeshi Ohshima, X-Ray Characterization of Short Pulse Laser Illuminated Hydrogen Storage Alloys Having Very High Performance, Proceedings of SPIE, 査読有, Vol. 9589, 2015, pp. 95890K-1-95890K-6. <https://doi.org/10.11712.2186898>

[学会発表] (計 13件)

- ① 阿部浩之、徳平真之介、内田裕久、水素吸蔵合金の電子線照射を利用した表面改質による吸蔵能変化、2017年 (平成29年) 第64回応用物理学会春季学術講演会、2017年3月14-17日、パシフィコ横浜 (神奈川県・横浜市)。
- ② Hiroshi ABE, Shinnosuke TOKUHIRA, Takeshi HARAHI, Hirohisa UCHIDA, Surface Modification in Electron Irradiation on Hydrogen Property of Hydrogen Storage Alloy, 15th International Symposium on Metal-Hydrogen Systems (MH2016), 7-12/August/2016, Interlaken (Switzerland).
- ③ H. Daido, H. Abe, T. Shobu, T. Shimomura, A. Nishimura, H. Uchida, X-ray Characterization of a High Performance Hydrogen Storage Alloy with Laser Surface Modification, The 15th International Conference on X-ray Lasers, 22-27 May, 2016, Nara Kasugano International Forum (Nara city, Nara, Japan),

Invitation lecture.

- ④ H. Daido, H. Abe, T. Shobu, T. Shimomura, A. Nishimura, H. Uchida, High Performance Hydrogen Storage Alloy Produced by Short Pulse Laser Surface Modification, OPTICS&PHOTONICS International Congress Laser Solution for Space and Earth 2016: LSSE2016, 17-20/May, 2016, Pacifico Yokohama (Yokohama city, Kanagawa, Japan), Invitation lecture.
- ⑤ 阿部浩之、下村拓也、菖蒲敬久、徳平真之介、宮下敦巳、西村昭彦、大道博行、内田裕久、短パルスレーザー照射による水素吸蔵合金の表面改質効果、2016年(平成28年)第63回応用物理学会春季学術講演会、2016年3月19-22日、東京工業大学(東京都)。
- ⑥ 大道博行、阿部浩之、菖蒲敬久、西村昭彦、下村拓也、パルスレーザーによる表面改質を用いた水素吸蔵合金の高性能化、レーザー励起X線源とその応用研究会、「国土強靱化に資するレーザー利用調査」技術専門委員会、平成27年(2015年)12月3日、広島大学(広島県、広島市)。
- ⑦ Hiroyuki Daito, Hiroshi Abe, Takashi Shobu, Takuya Shimomura, Shinnosuke Tokuhira, Yusuke Takeyama, Takehiro Furuyama, Akihiro Nishimura, Hirohisa Uchida, Takeshi Ohshima, X-Ray Characterization of Short Pulse Laser Illuminated Hydrogen Storage Alloys Having Very High Performance, SPIE Optical Engineering +Applications Conference, 09-13/Aug./2015, San Diego (California, USA), Invitation lecture.
- ⑧ Hiroshi Abe, Takuya Shimomura, Shinnosuke Tokuhira, Yukihiko Shimada, Yusuke Takenaka, Tkehiro Furuyama, Akihiko Nishimura, Hirohisa Uchida, Hiroyuki Daido, Takeshi Ohshima, Surface Modification Effects on Hydrogen Absorption Property of a Hydrogen Storage Alloy by Short Pulse Laser Irradiation, The 7th International Congress of Laser Advanced Materials Processing (LAMP2015), 26-29/May/2015, KITAKYUSHU INTERENATIONAL CNFERENCE CENTER (Kitakyushu-shi, Fukuoka, Japan).
- ⑨ H. Abe, S. Tokuhira, H. Uchida, T. Ohshima, Surface Modification of Hydrogen Storage Alloy by Heavy Ion Beam at Energy From keV to MeV, The 19th International Conference on Ion Beam Modification of Materials (IBMM2014), Sep. 14-19, 2014, Leuven (Belgium).

〔その他〕

ホームページ等

日本原子力研究開発機構レーザー共同研究所「レーザー照射による様々な材料の改質等に関する研究開発」

<https://www.jaea.go.jp/04/turuga/laser/research/development08.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

阿部 浩之 (ABE, Hiroshi)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・高崎量子応用研究所・先端機能材料研究部・主任研究員

研究者番号：30354947

(2)は削除。

(3)連携研究者

内田裕久 (UCHIDA, Hirohisa)

東海大学・工学部・教授

研究者番号：20147119

大道博行 (DAIDO, Hiroyuki)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究部門・研究主席

研究者番号：70144532

西村昭彦 (NISHIMURA, Akihiko)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門・研究主幹

研究者番号：90370452

大島 武 (OHSHIMA, Takeshi)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・高崎量子応用研究所・先端機能材料研究部・プロジェクトリーダー

研究者番号：50354949

菖蒲敬久 (SYOUBU, Takahisa)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門・物質科学研究センター・サブリーダー

研究者番号：90425562

原木岳史 (HARAKI, Takeshi)

東海大学・未来科学共同研究センター・技術員

研究者番号：70439735

(4)研究協力者

下村拓也 (SHIMOMURA, Takuya)

徳平真之介 (TOKUHIRA, Shin-nosuke)

島田幸洋 (SHIMADA, Yukihiko)

竹仲祐介 (TAKENAKA, Yusuke)

古山雄太 (FURUYAMA, Yuta)