

令和 2 年 6 月 5 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H02441

研究課題名(和文)再堆積層の水素バリアを活用した水素吸蔵と水素リサイクルの制御

研究課題名(英文)Control of hydrogen recycling using hydrogen barrier effect of deposition layer

研究代表者

花田 和明 (HANADA, KAZUAKI)

九州大学・応用力学研究所・教授

研究者番号：30222219

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,600,000円

研究成果の概要(和文)：エネルギー源としての核融合発電を目指した高温プラズマの定常化を行うために、提案された水素バリアモデルの概念にしたがってプラズマ対向壁の壁温制御をにより燃料粒子バランス制御を実現した。従来にない方法で、プラズマ対向壁への粒子束や放出束を計測する方法を確立し、放出束が壁温で制御できていることを確認した。放電中に壁温を低下させることでプラズマ維持時間の伸長を確認し、燃料粒子バランス制御の原理実証に成功している。また、核融合炉で想定されている500 に近い400 の壁温でプラズマ放電に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

建設中の国際熱核融合実験炉(ITER)では制御された熱核融合反応により発電に供することが可能となる熱エネルギーを発生する実験が行われる。一方、ITERの運転時間は1000秒程度で、今後必要とされる1年にもわたる定常運転に至るまでのハードルは高い。本研究では、燃料粒子である水素の循環に関して定常運転を実現するための研究を実施した。結果としてプラズマと固体壁の相互作用により形成されたわずか100ナノメートルの層が巨大な核融合炉の燃料粒子循環を担っているという事実を明らかにすることができた。また、これまで誰も考えていなかった壁温が粒子循環を制御するノブとして機能することを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The realization to control of fuel particle balance with plasma facing wall temperature for future steady state operated fusion power plants has been demonstrated, based on the concept of the proposed hydrogen barrier model. Monitoring of incoming and outgoing flux of the plasma facing wall could be established with newly proposed method and controllability of outgoing flux from the plasma facing wall using wall temperature control is confirmed. The wall cooling during long duration discharges has been applied and consequently extend of the plasma duration could be achieved. Finally, the wall temperature up to 400 degree which is comparable to that expected in future fusion power plant could be operated and plasma for 10 s could be achieved under the wall temperature.

研究分野：プラズマ物理学

キーワード：高温壁 核融合炉 粒子バランス制御 長時間放電

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

- (1) 発電装置としての核融合炉において最も大切なことは安定な電気出力であり、そのためには燃料水素循環制御による粒子バランスを達成する必要があること、
 - (2) 粒子循環の理解には“プラズマ”、“気体中性粒子”、“固体内中性粒子”を巡る粒子の大半が“固体内中性粒子”として壁に滞留しつつ一部がプラズマ領域に戻るリサイクリング過程を理解することが重要であること、
 - (3) 燃料粒子リサイクリングの主たる担い手がプラズマ・壁相互作用によって生じる再堆積層(プラズマ粒子にスパッタリングされた対向壁材料が再び対向壁面に堆積して形成される層で多くの実験装置で観測され、厚みは10nm~10 μ m程度)である可能性が示唆されていたこと、
 - (4) 試料実験やシミュレーションでは再現できない実機高温プラズマのリサイクリングに対する再堆積層の関与の理解が必要であること、
 - (5) 九州大学の球状トカマク QUEST は高温プラズマの長時間維持性能を有する世界的にもユニークな装置であり、長時間運転時の水素循環特性についてマクロ・ミクロ的視点から研究が実施されていたこと
 - (6) プラズマ暴露試料の観測から再堆積層における水素ダイナミクスを定式化したモデルとして再堆積層から母材への水素の拡散が制限させる“水素バリア”の形成が重要な素過程として提案されていたこと¹
- が研究開始当初の背景である。

2. 研究の目的

- (1) 従来の母材の拡散・再結合に基づく定式化に対して水素バリアに基づく水素リサイクリングの新しい定式化の実機実験での検証
- (2) 再堆積層内での水素ダイナミクスに基づく、水素同位体吸蔵・透過やリサイクリングを含む水素循環の理解を通じた粒子循環制御の実証。
- (3) 新しい水素ダイナミクスの評価に基づく主プラズマ密度制御と水素同位体吸蔵抑制両道の道を拓くこと。

3. 研究の方法

本研究の目的達成のための研究は以下のように計画され、実施された。

(1) 実機実験による水素バリアモデルの検証

水素バリアモデルで予想される放電中に壁に吸蔵された粒子数の2乗と放電終了後に放出される水素分子ガスの放出束の間に比例関係があること、およびその比例係数が壁温により変化することにより検証された²。また、比例定数から実機でリサイクリングを決定している表面再結合係数に関連した係数を算出できることを示した²。このことから再堆積層が実機プラズマの粒子循環の主要な担い手であることがわかった。

(2) 試料による水素バリア形成効果の軽水素、重水素の比較

重水素と軽水素の比較ではなく、重水素と三重水素(トリチウム)の比較で行った。QUEST 実機プラズマに暴露した試料を大気に晒すことなくトリチウム施設に運んでトリチウムガスに暴露して表面近傍にトリチウムが吸蔵されていることから水素バリア効果がトリチウムでも存在することが確認された³。

(3) 再堆積層膜厚分布計測

偏光計、GD-OES や FIB + TEM による断面観察を比較した結果、カラーメータを用いた方法が金属を多く含む再堆積層でも範囲を限れば適用可能であることを示した⁴。堆積層厚の分布計測及びその形成理由について考察し、炭素の均一な堆積と比較的エネルギーの高い水素イオンか酸素等の不純物イオンのスパッタリングにより再堆積層が形成されていることを確認した⁴。

(4) 壁管理による再現性改善と実機昇温脱離計測

実機昇温脱離実験として、120 での長時間放電終了後に 250 まで昇温する実験と、プラズマなしで 400 まで昇温する実験を行った。結果として、プラズマ放電後に 250 までで大きな脱離ピークはなく、放電中の温度変化による脱離効果は限定的であることが判った。

(5) ダイバータへの加熱・冷却パネルの設置

本研究で実施した長時間放電はリミタ放電であったために、ダイバータへの熱負荷は小さく、ダイバータ部に設置したリミタ型ダイバータによる熱除去により実験を遂行が可能と判断した。

(6) センタースタックへの加熱・冷却パネルの設置

センタースタック部は、主に放射やプラズマからの熱負荷による加温が主で加熱の必要はなかったため、冷却パネルを設置した。

(7) 水素束の空間分布評価

水素の衝突輻射モデル計算によるイオン化率と荷電交換率と水素原子のバルマー線放射束が比例関係にあることを衝突輻射モデルで確認し²、可視光領域のバルマー線発光である H γ 線計測と粒子束の比較実験を実施し、比例関係を確認した²。また、光ファイバーをポロイダル方向に 25ch 設置して H α 線強度分布の空間分布を計測し、高温壁が設置されていない赤道面でのリサイクリングの増大により放電が停止している様子を観測した。

4. 研究成果

(1) 高温壁の活用による長時間放電の実現

本研究開始前には 1000 秒程度の放電時間に留まっていたが、2 つの大きな研究の進展により 1 時間を超える長時間放電の繰り返し放電が可能となった。1 つは高温壁の壁温制御による放電が可能になったことである。高温壁設置前には真空容器壁がプラズマ対向壁であり、壁温は 100 が上限であった。一方、高温壁では 100 から 400 までの範囲で設定可能で、150 を超えると壁表面での表面再結合が活発となり、“壁飽和”の発生までの放電時間が短くなり、リサイクリング率が 1 を超えて密度ランナウェイで放電が停止しやすくなる。一方、壁温が低いと放電間での粒子放出が少なく、放電履歴が残りやすく再現性が劣化する。実験での最適な壁温は 150 付近で、1 時間を超える放電もこの温度帯で実現されている。もう 1 つはイオンのトロイダルドリフト方向を上から下に変更したことである。QUEST では下側にはダイバータ板の背面側に 3 台のクライオポンプが設置されており、球状トカマク特有のナチュラルダイバータ配位により、イオンや中性粒子の流れが下側に集中することにより実効的排気性能が向上したことが原因である。また、壁表面に据え置かれた試料表面の観測から弱磁場側ではイオンのトロイダルドリフトの方向が損耗主体で、逆方向が堆積主体になっていたこと⁵から、再堆積層⁶による粒子排気作用も期待できた。これらのことから放電時間は図 1 に示すように、高温壁設置後に大幅に伸長し、低パワーでは 6 時間放電に成功している。

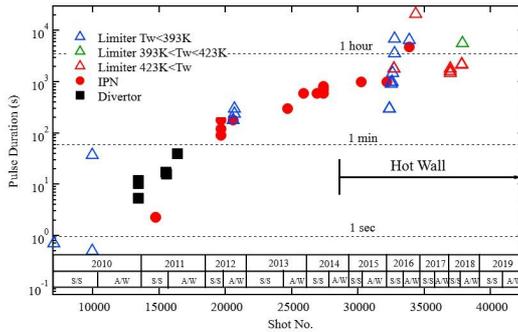


図 1 放電時間で見る研究の進展。2016 年の本研究開始以降放電時間の伸長が著しい。

(2) 能動的壁制御による放電時間の伸長

高温壁に設置された水冷配管への通水とヒータの連動により放電中に壁温を上下させることが可能である。長時間放電中に通水を開始して、通水を行わない放電との比較を実施した。この放電ではイオンのトロイダルドリフトは上側で、上側にはクライオポンプがダイバータ板の背面側に 1 台設置されている。両者の放電の様子を図 2 に示す。放電は壁温 200 で開始され、通水は放電開始後 300 秒あたりから遠隔で実施されている。400 秒あたりから高温壁のプラズマ側の壁温が下がり始めていることが判る。通水を行わない放電では、通電開始後 700 秒あたりで放電が停止している。ポロイダル断面で計測された H 線発光強度の空間分布計測によると、高温壁が設置されていない赤道面近傍の H 線発光強度が徐々に増加し、やがて真空容器上方の発光強度が増大していることが観測された。このことは赤道面近傍のリサイクリングが増大していることを意味している。計測機器や加熱装置が設置されているポートが多数存在する赤道面近傍は、ポート以外は輻射シールドで覆われており、ポート部分についてはプラズマからの輻射を直接受けている。真空容器は温度制御されているが、ポート部や輻射シールド部分については温度制御が充分ではない。このため一部のプラズマ対向壁の温度が上昇し、脱離ガスを発生させた可能性がある。この脱離ガスは、粒子循環の統合シミュレーションで電子密度の時間発展から予想されていた未知の粒子供給⁹の原因と考えられる。一方、通水を行った放電では放電開始から 700 秒では特に顕著な変化は観測されなかったが、通水を行わない場合と同様に 1100 秒あたりで赤道面近傍から H 線発光強度が徐々に増加し放電が停止した。放電が停止する前にはイオンドリフト方向である上側で強い発光が観測された。これらの実験結果から、壁温を放電中に下降させる能動的壁制御により放電時間が伸長されたことが確認された。今後は密度ランナウェイに至る不測の脱離ガスの発生を抑えるとともに、一旦下げた壁温をどのように昇温して元の状態に戻すかを検討する必要がある。

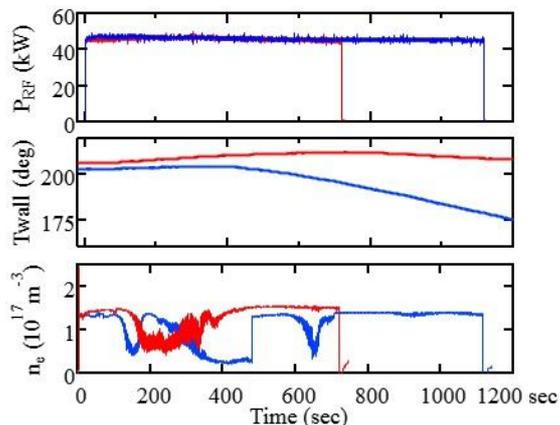


図 2 高温壁通水あり（青線）となし（赤線）での放電波形。上からプラズマ生成用の高周波電力、高温壁の壁温、プラズマ中の電子密度。

(3) 水素バリアモデルの検証

本研究の開始前に、プラズマ暴露試料に重水素ビームを照射した後に観測された昇温脱離スペクトルと実験室の重水素プラズマに照射しながら核反応法により計測された試料表面の重水素分布から提案されていた水素バリアモデルの実機での検証が行われた。水素バリアモデルでは、壁に吸蔵された水素原子の拡散が再堆積層と金属母材の境界で堰き止められると考える。再堆積層厚は一般的には 100nm 以下なので拡散は早く、再堆積層内の水素原子分布は一樣と近似できる。この場合、表面密度は単位面積あたりに吸蔵された粒子数を再堆積層厚で割った値となり、

表面再結合でリサイクリングする粒子束は吸蔵された水素原子数の2乗に比例することが期待される。このことを実機で確認する実験を実施した。リサイクリングされる粒子束は、プラズマ放電を停止させた直後の放出束で評価した。プラズマからの壁への流入粒子束が止まっても壁からの放出束はすぐには変化しないことを利用した計測法である。放電時間や壁への粒子束を変えた種々のプラズマで計測した結果を図3に示す。結果は水素バリアモデルの予想通りの直線上にあり、比例定数は壁温に依存した。このことから実機でも水素バリアモデルが成立していること、及び壁温によりリサイクリングの制御が可能であることが示された⁷。

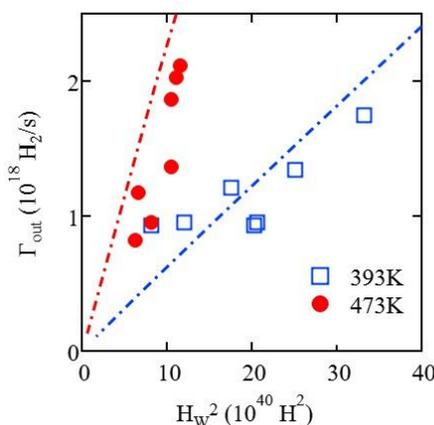


図3 放電終了後の放出ガス束と壁吸蔵水素原子数の2乗との関係

(4) 粒子バランスモデルの構築

粒子バランスを理解するためには“プラズマ”、“気体中性粒子”、“固体内中性粒子”でそれぞれに起こる現象とその相互作用を定量的に考察する必要がある。この目的のシステム全体を模擬できる粒子バランスモデルを構築した。中性粒子をイオン化したり荷電交換したりするプラズマ部、中性粒子が排気されたりプラズマ中に侵入したりする真空部、粒子を吸蔵し、リサイクルする壁部を組み合わせて考察する。電子温度はイオン化に必要な値である30eV程度を仮定し、真空部の排気量はQUESTの値を使用した。壁の面積やプラズマ体積等もQUESTの値を使用し、壁部も水素バリアモデルを取り込んで、再結合係数や再堆積層膜厚も実際のQUESTの実測値を使用した。供給粒子束も実際の実験値を使用し、電子密度の時間変化を計算して実測値と比較した。放電は1時間55分の長時間放電である。計算した電子密度の時間変化は放電後半で減少していくが、実験では徐々に増加する。この差を説明するために水素原子による水素誘導脱離を仮定して計算したが、密度の時間発展を再現することはできなかった。そこで未知のガス放出を仮定して計算したところ、放電途中から時間的に増加する粒子束を仮定した場合に図4に示すように電子密度を再現することができた⁸。これはその後行われたH線強度のポロイダル分布計測から高温壁が設置されていない赤道面近傍からの粒子放出だと考えられる。本研究によりQUEST実機でモデルに必要な種々の量を実測できたことで定量的考察が可能となった。

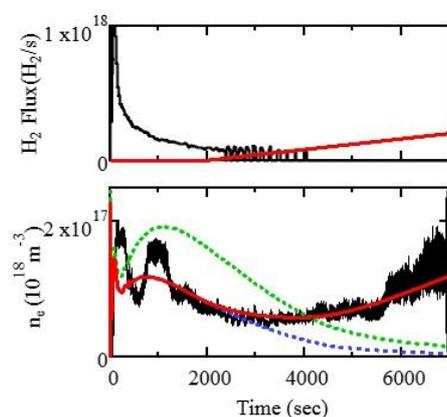


図4 上：長時間放電中に供給した水素分子束（黒線）と未知の水素分子束（赤線） 下：実験で得られた電子密度（黒線）と粒子バランスモデルで計算された密度（青点線）、5%のプラズマ誘導脱離を含めた場合（緑点線）、未知の水素分子束を含めた場合（赤線）

引用文献

- Hanada, K., Zushi, H., Yoshida, N., Yugami, N., Honda, T., Hasegawa, M., et. al., Particle balance in long duration RF driven plasmas on QUEST. *Journal of Nuclear Materials*, 463, 1084-1086. (2015) [48871].
- Hanada, K., Yoshida, N., Hasegawa, M., Hatayama, A., Okamoto, K., Takagi, I., et. al., Particle balance investigation with the combination of the hydrogen barrier model and rate equations of hydrogen state in long duration discharges on an all-metal plasma facing wall in QUEST. *Nuclear Fusion*, 59(7), (2019) [076007].
- Matsuyama, M., Zushi, H., Tokunaga, K., Kuzmin, A., Hanada, K., Effect of heating temperature on tritium retention in stainless steel type 316 L. *Nuclear Materials and Energy*, 16, (2018) 52-59.
- Wang, Z., Hanada, K., Yoshida, N., Shimoji, T., Miyamoto, M., Oya, Y., et. al., Measurement of thickness of film deposited on the plasma-facing wall in the QUEST tokamak by colorimetry. *Review of Scientific Instruments*, 88(9), (2017) [093502].
- Wang, Z. Study on thickness profile of the deposited film forming on the plasma-facing wall in the QUEST tokamak. Doctor thesis in Kyushu University (2018.01).
- Oya, Y., Sano, A., Sato, Y., Nakata, M., Zhou, Q., Togari, A., Hanada, K., Effect of carbon impurity reduction on hydrogen isotope retention in QUEST high temperature wall. *Fusion Engineering and Design*, 146, (2019) 1480-1484.
- Hanada, K., Yoshida, N., Honda, T., Wang, Z., Kuzmin, A., Takagi, I., et. al., Investigation of hydrogen recycling in long-duration discharges and its modification with a hot wall in the spherical tokamak QUEST. *Nuclear Fusion*, 57(12), (2017) [126061].
- Hanada, K., Yoshida, N., Takagi, I., Hirata, T., Hatayama, A., Okamoto, K., et. al., Estimation of fuel particle balance in steady state operation with hydrogen barrier model. *Nuclear Materials and Energy*, 19, (2019) 544-549.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計22件（うち査読付論文 22件 / うち国際共著 20件 / うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Hanada K., Yoshida N., Takagi I., Hirata T., Hatayama A., Okamoto K., Oya Y., Shikama T., Wang Z., Long H., Huang C., Oya M., Idei H., Nagashima Y., Onchi T., Hasegawa M., Nakamura K., Zushi H., Kuroda K., Kawasaki S., Higashijima A., Nagata T., Shimabukuro S., Takase Y., Murakami S., et al.	4. 巻 19
2. 論文標題 Estimation of fuel particle balance in steady state operation with hydrogen barrier model	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nuclear Materials and Energy	6. 最初と最後の頁 544 ~ 549
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.nme.2019.03.015	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Hanada K., Yoshida N., Hasegawa M., Hatayama A., Okamoto K., Takagi I., Hirata T., Oya Y., Miyamoto M., Oya M., Shikama T., Kuzmin A., Wang Z.X., Long H., Idei H., Nagashima Y., Nakamura K., Watanabe O., Onchi T., Watanabe H., Tokunaga K., Higashijima A., Kawasaki S., Nagata T., Shimabukuro S., et al.	4. 巻 59
2. 論文標題 Particle balance investigation with the combination of the hydrogen barrier model and rate equations of hydrogen state in long duration discharges on an all-metal plasma facing wall in QUEST	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 076007 ~ 076007
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1088/1741-4326/ab1858	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Hanada K., Yoshida N., Honda T., Wang Z., Kuzmin A., Takagi I., Hirata T., Oya Y., Miyamoto M., Zushi H., Hasegawa M., Nakamura K., Fujisawa A., Idei H., Nagashima Y., Watanabe O., Onchi T., Kuroda K., Long H., Watanabe H., Tokunaga K., Higashijima A., Kawasaki S., Nagata T., Takase Y., Fukuyama A., Mitarai O.	4. 巻 57
2. 論文標題 Investigation of hydrogen recycling in long-duration discharges and its modification with a hot wall in the spherical tokamak QUEST	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 126061 ~ 126061
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/aa8121	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Hanada K., Zushi H., Idei H., Nakamura K., Ishiguro M., Tashima S., Kalinnikova E. I., Nagashima Y., Hasegawa M., Fujisawa A., Higashijima A., Kawasaki S., Nakashima H., Mitarai O., Fukuyama A., Takase Y., Gao X., Liu H., Qian J., Ono M., Raman R.	4. 巻 18
2. 論文標題 Power Balance Estimation in Long Duration Discharges on QUEST	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Plasma Science and Technology	6. 最初と最後の頁 1069 ~ 1075
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1009-0630/18/11/03	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Oya Yasuhisa, Sano Atsuko, Sato Yurina, Nakata Moeko, Zhou Qilai, Togari Akihiro, Yoshida Naoaki, Hanada Kazuaki	4. 巻 146
2. 論文標題 Effect of carbon impurity reduction on hydrogen isotope retention in QUEST high temperature wall	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Fusion Engineering and Design	6. 最初と最後の頁 1480 ~ 1484
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) http://dx.doi.org/10.1016/j.fusengdes.2019.02.110	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Matsuyama M., Zushi H., Tokunaga K., Kuzmin A., Hanada K.	4. 巻 16
2. 論文標題 Effect of heating temperature on tritium retention in stainless steel type 316?L	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nuclear Materials and Energy	6. 最初と最後の頁 52 ~ 59
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.nme.2018.05.024	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Okamoto K., Tatsumi R., Abe K., Hatayama A., Hanada K.	4. 巻 58
2. 論文標題 Modelling of plasma and its wall interaction for long-term tokamak operation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Contributions to Plasma Physics	6. 最初と最後の頁 602 ~ 607
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/ctpp.201700129	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hasegawa Makoto, Nakamura Kazuo, Hanada Kazuaki, Kawasaki Shoji, Kuzmin Arseniy, Idei Hiroshi, Tokunaga Kazutoshi, Nagashima Yoshihiko, Onchi Takumi, Kuroda Kengoh, Watanabe Osamu, Higashijima Aki, Nagata Takahiro	4. 巻 129
2. 論文標題 Modification of plasma control system and hot-wall temperature control system for long-duration plasma sustainment in QUEST	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Fusion Engineering and Design	6. 最初と最後の頁 202 ~ 206
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.fusengdes.2018.02.069	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Wang Z., Hanada K., Yoshida N., Shimoji T., Miyamoto M., Oya Y., Zushi H., Idei H., Nakamura K., Fujisawa A., Nagashima Y., Hasegawa M., Kawasaki S., Higashijima A., Nakashima H., Nagata T., Kawaguchi A., Fujiwara T., Araki K., Mitarai O., Fukuyama A., Takase Y., Matsumoto K.	4. 巻 88
2. 論文標題 Measurement of thickness of film deposited on the plasma-facing wall in the QUEST tokamak by colorimetry	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 093502 ~ 093502
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5000739	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Takase Y., Ejiri A., Fujita T., Fukumoto N., Fukuyama A., Hanada K., Idei H., Nagata M., Ono Y., Tanaka H., Uchida M., Horiuchi R., Kamada Y., Kasahara H., Masuzaki S., Nagayama Y., Oishi T., Saito K., Takeiri Y., Tsuji-Iio S.	4. 巻 57
2. 論文標題 Overview of spherical tokamak research in Japan	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Nuclear Fusion	6. 最初と最後の頁 102005 ~ 102005
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1741-4326/aa62c1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 XU Yue, KUZMIN Arseniy, HIROOKA Yoshi, HANADA Kazuaki, ASHIKAWA Naoko, the QUEST group	4. 巻 12
2. 論文標題 Hydrogen Permeation through Sputter-Deposited Tungsten Coated F82H in QUEST	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 1305038 ~ 1305038
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1585/pfr.12.1305038	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 A.Kuzmin, H.Zushi, I.Takagi, S.K.Sharma, Y.Hirooka, M.Kobayashi, M.Sakamoto, K.Hanada, T.Onchi, Y.Oyama, N.Yoshida, K.Nakamura, A.Fujisawa, H.Idei, Y.Nagashima, M.Hasegawa, K.Mishra	4. 巻 129
2. 論文標題 Hydrogen flux measurements with permeation probes in spherical tokamak QUEST	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Vacuum	6. 最初と最後の頁 178-182
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.vacuum.2016.04.025	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Makoto Hasegawa, , Kazuo Nakamura, Hideki Zushi, Kazuaki Hanada, Akihito Fujisawa, Kazutoshi Tokunaga, Hiroshi Idei, Yoshihiko Nagashima, Shoji Kawasaki, Hisatoshi Nakashima, Aki Higashijima	4. 巻 112
2. 論文標題 Current status and prospect of plasma control system for steady-state operation on QUEST	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Fusion Engineering and Design	6. 最初と最後の頁 699-702
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.fusengdes.2016.04.016	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計84件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 37件)

1. 発表者名 花田和明
2. 発表標題 Plan for contribution of plasma start-up from Japanese STs
3. 学会等名 ITPA Integrated Operation Scenarios Topical Group Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuaki Hanada, Hiroshi Idei, Yoshihiko Nagashima, Ryuya Ikezoe, Makoto Hasegawa, Takumi Onchi, Makoto Oya, Kengo Kuroda, Shoji Kawasaki, Aki Higashijima, Takahiro Nagata, Shun Shimabukuro, Shinichiro Kojima, Hatem O ELSerafy, Naoaki Yoshida, Kazuo Nakamura, Atsushi Fukuyama, et al
2. 発表標題 Overview of recent progress on the QUEST experiments
3. 学会等名 20th International Spherical Torus Workshop (ISTW2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 岳其霖、花田和明、大宅諒、小島信一郎、松尾祥吾、出射浩、恩地拓己、黒田賢剛、吉田直亮
2 . 発表標題 QUESTにおける高速試料搬送装置での動的吸蔵量の計測
3 . 学会等名 第36回プラズマ・核融合学会年会
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 T. Shikama, K. Hanada, K. Nii, A. Fujikawa, H. Zushi, T. Onchi, M. Hasegawa, N. Yoneda, S. Mori, M. Hasuo, H. Idei, K. Nakamura, Y. Nagashima, K. Kuroda, A. Higashijima, and T. Nagata
2 . 発表標題 Measurement of the ion species dependence of the intrinsic edge rotation in spherical tokamak QUEST
3 . 学会等名 PSI 2018 (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 K. Hanada, N. Yoshida, I. Takagi, T. Hirata, A. Hatayama, K. Okamoto, Y. Oya, T. Shikama, Z. Wang, H. Long, M. Oya, H. Idei, Y. Nagashima, T. Onchi, M. Hasegawa, K. Nakamura, H. Zushi, K. Kuroda, S. Kawasaki, A. Higashijima, T. Nagata, S. Shimabukuro, Y. Takase, S. Murakami, X. Gao, H. Liu, J. Qian, R. Raman, and M. Ono
2 . 発表標題 Estimation of Fuel Particle balance in steady state operation with hydrogen barrier model
3 . 学会等名 PSI 2018 (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Shogo Matsuo, Hao Long, Kazuaki Hanada, Hiroshi Idei, Akihide Fujisawa, Yoshihiko Nagashima, Makoto Hasegawa, Takumi Onchi, Shoji Kawasaki, Aki Higashizima, Kengoh Kuroda, Takahiro Nagata, Sadayoshi Murakami, Yuichi Takase, and QUEST group
2 . 発表標題 Investigation of hydrogen recycling with local partial pressure measurement in QUEST
3 . 学会等名 9th Japan-Korea Seminar on Advanced Diagnostics for Steady-State Fusion Plasmas (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1. 発表者名	K. Hanada, N. Yoshida, M. Hasegawa, A. Hatayama, K. Okamoto, I. Takagi, T. Hirata, Y. Oya, M. Miyamoto, M. Oya, T. Shikama, A. Kuzmin, Z. X. Wang, H. Long, H. Idei, Y. Nagashima, K. Nakamura, O. Watanabe, T. Onchi, H. Watanabe, K. Tokunaga, A. Higashijima, S. Kawasaki, H. Nakashima, T. Nagata, S. Shimabukuro, Y. Takase, S. Murakami, X. Gao, H. Liu, J. Qian, R. Raman, M. Ono
2. 発表標題	Particle balance investigation with the combination of rate equations of hydrogen state and hydrogen barrier model in long duration discharges on all-metal PFW QUEST
3. 学会等名	27th IAEA Fusion Energy Conference (FEC2018) (国際学会)
4. 発表年	2018年

1. 発表者名	K. Hanada, N. Yoshida, M. Hasegawa, A. Hatayama, K. Okamoto, I. Takagi, Y. Oya, M. Miyamoto, M. Oya, T. Shikama, A. Kuzmin, Z. X. Wang, H. Long, S. Kojima, H. Idei, Y. Nagashima, K. Nakamura, O. Watanabe, T. Onchi, H. Watanabe, K. Tokunaga, A. Higashijima, S. Kawasaki, H. Nakashima, T. Nagata, S. Shimabukuro, Y. Takase, S. Murakami, X. Gao, H. Liu, J. Qian, R. Raman, M. Ono
2. 発表標題	Fuel particle balance for steady state operation on all-metal fusion experimental device, QUEST.
3. 学会等名	2nd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (AAPPs-DPP2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年	2018年

1. 発表者名	岳其霖, 花田和明, 大宅諒, 小島信一郎, 出射浩, 恩地拓己, 黒田賢剛, 吉田直亮
2. 発表標題	動的吸蔵評価用高速試料搬送装置の開発
3. 学会等名	第35回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年	2018年

1. 発表者名	河野香, 川崎昌二, 山下雅典, 長谷川真, 恩地拓己, 花田和明
2. 発表標題	QUEST高温壁温度制御のための単一パネル試験
3. 学会等名	第35回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年	2018年

1. 発表者名 吉田直亮, 島袋瞬, 牟田口崇史, 波多野雄治, 出射浩, 花田和明
2. 発表標題 超長時間放電を担う高温プラズマ対向壁用タングステン材料の水素吸蔵・放出特性評価
3. 学会等名 第35回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 花田和明
2. 発表標題 長時間放電での燃料粒子バランスにおける壁の影響
3. 学会等名 第35回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小池彩華, 戸苅陽大, 仲田萌子, 周啓来, 趙明忠, 孫飛, 吉田直亮, 花田和明, 大矢恭久
2. 発表標題 クエスト2017秋冬キャンペーンにてプラズマに曝された高温タングステン壁における水素同位体滞留挙動評価
3. 学会等名 第35回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 米田奈生, 四籠泰一, 花田和明, 藤川祥巨, 森暁, 出射浩, 恩地拓己, 新居邦亮, 凶子秀樹, 蓮尾昌裕, 中村一男, 永島芳彦, 池添竜也, 長谷川真, 黒田賢剛, 東島亜紀, 永田貴大
2. 発表標題 QUEST ECHプラズマにおける不純物イオントロイダル流れの磁場配位依存性
3. 学会等名 第35回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岳其霖, 花田和明, 大宅諒, 小島信一郎, 出射浩, 恩地拓己, 黒田賢剛, 吉田直亮
2. 発表標題 高速試料搬送装置による動的吸蔵量の計測計画
3. 学会等名 第22回プラズマ・核融合学会支部会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中岡翼, 花田和明, 出射浩, 中村一男, 永島芳彦, 長谷川真, 恩地拓己, 川崎昌二, 東島亜紀
2. 発表標題 QUESTにおけるH _β 線絶対感度校正による壁水素吸蔵特性評価
3. 学会等名 第22回プラズマ・核融合学会支部会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 花田和明, 吉田直亮, 長谷川真, 畑山明聖, 岡本浩輔, 高木郁二, 平田貴大, 大矢恭久, 宮本光貴, 大宅諒, 四竈泰一, 出射浩, 永島芳彦, 中村一男, 渡辺理, 恩地拓己, 渡辺英雄, 徳永和俊, 東島亜紀, 川崎昌二, 永田貴大, 島袋瞬, 高瀬雄一, 村上定義
2. 発表標題 QUESTの長時間放電を用いた粒子バランスのモデリング
3. 学会等名 日本物理学会第74回年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M.Hasegawa, K.Nakamura, K.Hanada, S.Kawasaki, H. Idei, K.Tokunaga, Y.Nagashima, T.Onchi, K.Kuroda, O.Watanabe, A.Higashijima, and T.Nagata
2. 発表標題 Modifications of Plasma Control System and Central Control System for Integrated Control of Long Plasma Sustainment on QUEST
3. 学会等名 11th IAEA Technical Meeting on Control, Data Acquisition, and Remote Participation for Fusion Research (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 花田 和明
2. 発表標題 QUEST における定常プラズマ実験
3. 学会等名 RIAMフォーラム2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 花田 和明
2. 発表標題 QUESTにおけるプラズマ電流立上げ実験
3. 学会等名 核融合科学研究所 平成29年度一般共同研究 「先進トカマク概念の深化」研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 T. Onchi, H. Idei, K. Nakamura, M. Hasegawa, K. Yamasaki, O. Watanabe, K. Mishra, K. Kuroda, A. Kuzmin, H. Ohwada, A. Ejiri, H. Togashi, N. Matsumoto and K. Hanada
2. 発表標題 Present status of current-drive system in QUEST spherical tokamak
3. 学会等名 AAPPS-DPP2017 1st Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M.Hasegawa,K.Hanada,N.Yoshida,A.Kuzmin,H.Zushi,K.Nakamura,A.Fujisawa,H.Idei, Yoshihiko Nagashima, Osamu Watanabe, Takumi Onchi, Kengoh Kuroda, H. Watanabe, K. Tokunaga, A.Higashijima, S. Kawasaki, and T.Nagata
2. 発表標題 Efforts toward Steady State Operation in Long Duration Discharges with the Control of Hot Wall Temperature on QUEST
3. 学会等名 AAPPS-DPP2017 1st Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 K.Hanada, H.Idei, N.Yoshida, M.Hasegawa, K.Nakamura, H.Zushi1, A.Fujisawa, Y.Nagashima, T.Onchi, K.Kuroda, S.Kawasaki, A.Higashijima, T.Nagata, S.Shimabukuro, A.Fukuyama2, O.Mitarai3, Y.Takase, R.Raman, and M.Ono
2. 発表標題 Overview of recent progress on plasma current start-up and long-duration plasma maintenance in QUEST
3. 学会等名 19th International Spherical Torus Workshop (ISTW 2017) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 龍 昊、花田 和明、小島 信一郎、大宅 諒、出射 浩、長谷川 真、吉田 直亮、恩地 拓己、黒田 賢剛
2. 発表標題 高速試料搬送装置を用いたQUESTにおける動的リテンションの測定
3. 学会等名 Plasma Conference 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 花田 和明
2. 発表標題 実機での水素循環の理解と制御
3. 学会等名 Plasma Conference2017 PLASMA2017シンポジウム (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 花田和明
2. 発表標題 昨年度までの内容と原型炉条件におけるモデル化について
3. 学会等名 原型炉設計特別チーム共同研究「原型炉における熱・粒子制御に関する物理課題の検討とモデル化」第二回会合
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 花田 和明, 吉田直亮, 高木郁二, 畑山明聖, 大矢恭久, 四竈泰一, 王正興, 龍昊, 大宅諒, 宮本光貴, 出射浩, 永島芳彦, 恩地拓己, 長谷川誠, 中村一男, 図師秀樹, 黒田賢剛, 川崎昌二, 東島亜紀, 永田貴大, 島袋瞬, 渡辺理, 高瀬雄一, 村上定義
2. 発表標題 QUEST壁モデルを用いた実機での粒子バランスの考察
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Hanada, N. Yoshida, T. Honda, Z. Wang, A. Kuzmin, I. Takagi, Y. Oya, M. Miyamoto, H. Zushi, M. Hasegawa, K. Nakamura, A. Fujisawa, H. Idei, Y. Nagashima, O. Watanabe, T. Onchi, H. Watanabe, K. Tokunaga, A. Higashijima, S. Kawasaki, H. Nakashima, Y. Takase, A. Fukuyama, and O. Mitarai
2. 発表標題 Investigation of the role of deposition layer in hydrogen recycling property on QUEST
3. 学会等名 PSI2016 (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 A. Kuzmin, H. Zushi, I. Takagi, S. K. Sharma, M. Kobayashi, Y. Hirooka, T. Onchi, Y. Oyama, K. Hanada, N. Yoshida, K. Nakamura, A. Fujisawa, H. Idei, Y. Nagashima, M. Hasegawa, T. Mutoh, K. Mishra, H. Ohwada
2. 発表標題 Spatial distribution of the hydrogen retention in long duration discharges
3. 学会等名 PSI2016 (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 花田和明, 中村一男, 出射 浩, 長谷川 真, 図子秀樹, 吉田直亮, Kuzmin Arseniy, 恩地拓己, 渡辺理, 川崎昌二, 中島寿年, 東島亜紀, 永田貴大, 藤澤彰英, 永島芳彦, 渡辺英雄, 川口晃, 荒木邦明, 高瀬雄一, 福山淳, 御手洗修, 高木郁二, 大矢恭久, 宮本光貴, 他10名
2. 発表標題 QUESTにおけるプラズマ長時間維持研究の進展
3. 学会等名 第11回核融合エネルギー連合講演会 (招待講演)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 岡本浩輔、矢本昌平、畑山明聖、花田和明
2. 発表標題 「プラズマ・壁相互作用を考慮した核融合プラズマ粒子バランスの解析
3. 学会等名 第11回核融合エネルギー連合講演会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 吉田直亮、花田和明、波多野雄治、宮本光貴、大矢恭久、時谷政行、矢嶋美幸、永田大介、川口晃、
2. 発表標題 QUEST 高温プラズマ対向壁における表面特性変化とプラズマ制御への影響
3. 学会等名 第11回核融合エネルギー連合講演会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 花田和明
2. 発表標題 QUESTにおける動的リテンション特性
3. 学会等名 核融合科学研究所共同研究「ダイバータの学理とその応用」研究会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 花田和明
2. 発表標題 QUESTにおける高温壁実験の現状
3. 学会等名 球状トカマク研究会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 龍昊
2. 発表標題 QUESTの長時間放電後の粒子排出特性
3. 学会等名 球状トカマク研究会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 龍昊、花田和明、中村一男、藤澤彰英、出射浩、永島芳彦、長谷川真、川崎昌二、東島亜紀、Kuzmin Arseniy、恩地拓巳、黒田賢剛、永田貴大、高瀬雄一、福山 淳、御手洗 修、QUEST グループ
2. 発表標題 QUESTにおける長時間放電後の対向壁から放出される水素アウトガスの評価
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会 第55回プラズマ若手夏の学校
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 K. Hanada, N. Yoshida, T. Honda, Z. Wang, A. Kuzmin, I. Takagi, T. Hirata, Y.Oya, M.Miyamoto, H. Zushi, M. Hasegawa, K. Nakamura, A. Fujisawa, H. Idei, Y. Nagashima, O. Watanabe, T. Onchi, H. Watanabe, K. Tokunaga, A. Higashijima, S.Kawasaki, H.Nakashima, T.Nagata, Y.Takase, A.Fukuyama, and O.Mitarai
2. 発表標題 Investigation of hydrogen recycling property and its control with hot wall in long duration discharges on QUEST
3. 学会等名 FEC-26(IAEA) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Y. Takase, A. Ejiri, T. Fujita, K. Hanada, H. Idei, M. Nagata, Y. Ono, H. Tanaka, A. Fukuyama, Y. Kamada, N. Fukumoto, R. Horiuchi, Y. Nagayama, Y. Takeiri, and S. Tsuji-lio
2. 発表標題 Overview of Spherical Tokamak Research in Japan
3. 学会等名 FEC-26(IAEA) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 花田和明、中村一男、出射浩、長谷川真、岡子秀樹、吉田直亮、Kuzmin Arseniy、恩地拓巳、渡辺理、川崎昌二、中島寿年、東島亜紀、永田貴大、大和田裕晃、龍昊、藤澤彰英、永島芳彦、渡辺英雄、川口晃、荒木邦明、高瀬雄一、福山淳、御手洗修、高木郁二、大矢恭久、宮本光貴、QUESTグループ
2. 発表標題 QUEST高温壁における一時間を超える長時間放電の粒子バランス解析
3. 学会等名 プラズマ核融合学会第33回年会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 龍昊、花田和明、中村一男、藤澤彰英、出射浩、永島芳彦、長谷川真、川崎昌二、東島亜紀、Kuzmin Arseniy、恩地拓巳、黒田賢剛、永田貴大、高瀬雄一、福山淳、御手洗修、QUEST グループ
2. 発表標題 QUESTにおける長時間放電後対向壁から放出された水素アウトガスの評価
3. 学会等名 プラズマ核融合学会第33回年会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 大和田裕晃、出射浩、花田和明、吉田直亮、QUEST group
2. 発表標題 QUEST長時間放電時における発光強度の上下非対称性観測
3. 学会等名 プラズマ核融合学会第33回年会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 佐藤優理奈、植村有希、桜田翔大、藤田啓恵、東奎介、周啓来、吉田直亮、花田和明、近田拓未、大矢恭久
2. 発表標題 クエスト高温プラズマ対向壁における水素同位体滞留拳動評価
3. 学会等名 プラズマ核融合学会第33回年会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名	Z. Wang, K. Hanada, N. Yoshida, T. Shimoji, M. Miyamoto, Y. Oya, H. Zushi, H. Idei, K. Nakamura, A. Fujisawa, Y. Nagashima, M. Hasegawa, S. Kawasaki, A. Higashijima, H. Nakashima, T. Nagata, A. Kawaguchi, T. Fujiwara, K. Araki, O. Mitarai, A. Fukuyama, Y. Takase, K. Matsumoto, and QUEST group.
2. 発表標題	Investigation of the colorimetry to measure the deposition thickness on the plasma-facing wall in QUEST tokamak
3. 学会等名	CSS-EEST18 (国際学会)
4. 発表年	2016年

1. 発表者名	Hao LONG, Kazuaki HANADA, QUEST group
2. 発表標題	Quantitative analysis of hydrogen outgassing from the vessel wall after long duration discharge in QUEST
3. 学会等名	CSS-EEST18 (国際学会)
4. 発表年	2016年

1. 発表者名	花田 和明、吉田 直亮、龍 昊、王 正興、中村 一男、出射 浩、藤澤 彰英、永島芳彦、長谷川 真、恩地 拓巳、渡辺 理、Kuzmin Arseniy、 関子 秀樹、渡辺 英雄、川崎 昌二、東島 亜紀、永田 貴大、島袋 瞬、荒木 邦明、高木 郁二、大矢 恭、宮本光貴、高瀬 雄一、福山 淳、御手洗 修
2. 発表標題	QUESTにおける高温壁を用いた水素リサイクリングの壁温依存性評価
3. 学会等名	日本物理学会 第72回年次大会
4. 発表年	2017年

1. 発表者名	藤川祥亘, 新居邦亮, 米田奈生, 四電泰一, 花田和明, 恩地拓己, 蓮尾昌裕, QUESTグループ
2. 発表標題	QUEST周辺プラズマにおける水素原子分子比の空間分解分光診断
3. 学会等名	日本物理学会 第72回年次大会
4. 発表年	2017年

1. 発表者名 Long Hao, Kazuaki HANADA
2. 発表標題 QUESTにおける長時間放電後対向壁の水素放出特性
3. 学会等名 九州大学 エネルギーウィーク 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 H. Ohwada, K. Hanada, N. Yoshida, K. Nakamura, K. Yamazaki, Hao Long, QUEST group
2. 発表標題 Investigation of plasma wall interaction based on plasma radiation measurement in long duration discharge on QUEST
3. 学会等名 Ninth IAEA Technical Meeting (TM) on the Steady State Operation of Magnetic Fusion Devices (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考