

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 22 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540333

研究課題名(和文) 固体・液体金属における核融合及び核崩壊の促進

研究課題名(英文) Acceleration of nuclear fusion and decay in solid and liquid metal

研究代表者

笠木 治郎太 (KASAGI, Jirohta)

東北大学・電子光理学研究センター・名誉教授

研究者番号：10016181

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円、(間接経費) 1,170,000円

研究成果の概要(和文)：(1) 金属への重陽子ビーム照射による動的遮蔽効果の影響を、Sm金属板中の崩壊核 ^{147}Sm の粒子放出で調べた。ビーム照射に伴う遮蔽エネルギーの上限値が19.3 keVと求まった。(2) 超音波を作用した液体Liに重陽子ビームを照射することにより、液体Li中に高温重陽子プラズマを生成することに成功した。超音波キャビテーション中の重陽子プラズマは100万度以上の高温状態となることが判明した。(3) 液体金属にD3分子ビームを照射することにより、分子ビームに特有な協力衝突d+d反応過程が存在することを初めて見出した。この反応を利用して液体Inと液体Sn中のd+d反応の遮蔽エネルギーが求められた。

研究成果の概要(英文)：(1) A dynamical screening effect induced by deuteron beam bombardment was studied for alpha-decay nucleus ^{147}Sm in a metal Sm plate. An upper limit of the screening energy was deduced to be 19.3 keV. (2) A high temperature deuterium plasma was generated by irradiating a deuteron beam on liquid Li under ultrasonic operation. The temperature of the deuteron plasma in ultrasonic cavitation is deduced to be more than 10^6 K. (3) Cooperation colliding d+d reaction, which is unique for molecular deuteron beam bombardment, was found for the first time. The screening energy of the d+d reaction in liquid In and Sn was measured using this reaction.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学、素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：核融合反応 崩壊 遮蔽エネルギー 超音波キャビテーション 重陽子ビーム照射 液体金属 協力衝突反応

1. 研究開始当初の背景

凝縮系内での低エネルギーD+D 反応の反応率は、金属環境において大きく増大することが、これまでの我々の研究により明らかにされた。その大きな要因は、入射 D-D 間に働くクーロン斥力が金属中の電子により遮蔽され、実効的なクーロン力が弱められる遮蔽効果にある。金属中での D+D 反応の反応率の増大現象は、その後、ドイツの Rolfs 達と Czernski 達の実験でも再現され、多くの金属中で観測された遮蔽エネルギーの値は 300 eV 以上にもなることが明白となった。また、Li+p、Li+d 反応についても調べられ、D+D 反応と同様に、金属中では反応率が大きく増大することが判明した。

一方、米国の Teleyarkhan 達は、全く異なるアプローチによる凝縮系内での核融合生起を報告した。彼らは、重水素化アセトン液体に超音波を作用し、液体内に発生した空洞（キャビテーション）中に生じる高温高压状態を利用し、D+D 反応を生じさせたと報告している。これまでのところ、彼らの実験を否定する報告もなされ、実際に核反応が生じているかについては未だ論争になっている。しかしながら、超音波キャビテーションによる光発生現象が確認されており、キャビテーションが収縮崩壊する際に dd 核融合反応が起こるほど高温になることは、理論的に支持されている。

このような背景のもとに、我々は凝縮系内での核反応・核崩壊の反応率増大の開発研究をさらに押し進めることにした。核反応率の増大に関しては、液体金属中に超音波を作用させ液体金属キャビテーション中で核融合反応の可能性を追求し、また、核崩壊率の増大に関しては、金属中伝導電子による遮蔽効果を利用することにより、 α 崩壊核の寿命短縮を試みることにした。

2. 研究の目的

本研究は、これまでの成果に基づき、固体・液体金属中での核反応率や核崩壊率を、大きく変化・増大させる方法の開発、そのメカニズムの理解、更に、それらの応用利用を目的とする。具体的には、(1)液体 Li を用いて取得されたデータの詳細な解析をすすめる、(2)液体 Li 以外の液体金属中での超音波キャビテーションの可能性を探る、及び、(3) 重陽子照射固体金属中での動的遮蔽効果による ^{147}Sm 核の崩壊促進現象の観測を目指す。

3. 研究の方法

実験は東北大学電子光理学研究センターの低エネルギー重陽子ビーム照射装置を用いて行われた。図 1 に装置全体を示す。イオン源(duoplasmatron ion source)で生成された重陽子イオンは、約 25KV の引出し電極 (beam extraction) で引き出され、液体標的真空槽まで輸送された。その間、最初の偏向電

磁石(bending magnet)により原子/分子イオンが選択され、加減速電極(acc/dec electrode)により照射エネルギーが決められた。ビームは第 2 の偏向電磁石(bending magnet)により、垂直方向に 60 度偏向され液体標的真空槽に導かれた。液体標的真空槽の中心部付近に、水平に設置されている標的容器内に液体金属が作られる。

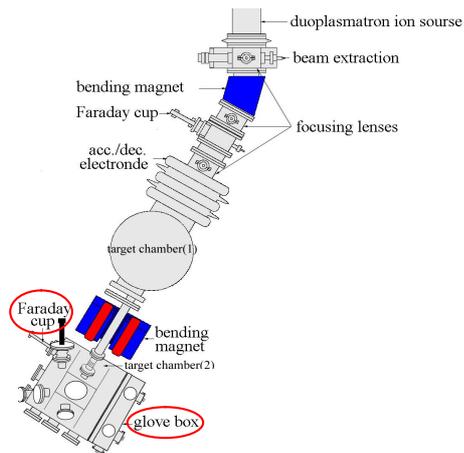


図 1. 低エネルギー重陽子ビーム照射装置

重陽子ビームを各種ターゲットに照射し、照射中に放出される荷電粒子を用い、ターゲットから 4cm 程の距離に設置した Si 検出器を用いて測定した。

固体金属中での動的遮蔽効果による崩壊促進の研究は以下のように行った。 α 崩壊核 ^{147}Sm を 20% 程自然に含んでいる Sm 金属板を標的とした。 ^{147}Sm の半減期は 1.08×10^{11} 年 ($E_{\alpha} = 2.23$ MeV) と非常に長い。崩壊率は一定と見做せる。ビーム照射時に $^{143}\text{Nd}-\alpha$ の系の遮蔽エネルギーが増大し、遮蔽エネルギー差 ($U_s(\text{beam on}) - U_s(\text{beam off})$) が生じれば、ビーム照射時に α 粒子収量は増加する。Sm 金属板を低エネルギー重陽子ビームで照射し、放出 α 粒子のスペクトルをビーム照射 on/off の条件で比較し、収量の変化を観測した。

液体金属超音波キャビテーション内での d+d 核融合反応の研究は以下のように行った。液体金属標的は、真空槽内に水平に置かれた標的ホルダー内に、表面の汚れを削った ^6Li , Ga, In 等の金属塊を置き、真空中に引いた後ヒータにより加熱・液化した。重陽子ビームは、垂直軸と 30 度なす角度で真空槽上方から標的に打ち込まれ、標的内で生じる D(d,p)T 反応からの陽子を Si 半導体検出器で測定し、核反応の収量を得た。超音波照射の ON/OFF 時の収量の変化と陽子スペクトルの変化を観測し、キャビテーションにより d+d 反応が通常の 2 体反応とどのように異なるのかを調べた。

4. 研究成果

(1) 金属中への重陽子ビーム照射中に動的遮蔽効果により金属中の α 崩壊核の α 崩壊が促進している可能性を示し、遮蔽エネルギーの上限値が求められた。: α 崩壊核 ^{147}Sm を 20% 程自然に含んでいる Sm 金属板を対象に実験を行った。Sm 金属板を低エネルギー重陽子ビームで照射し、放出 α 粒子のスペクトルをビーム照射 on/off の条件で比較した。 ^{147}Sm は Sm 金属板中に一様に分布しているため、 ^{147}Sm 崩壊の α 粒子スペクトルは、エネルギー損失のため $E_\alpha=2.23$ MeV まで収量が一定の連続分布スペクトルである。入射ビームは表面から 100 nm 程度内で止まるため、ビーム照射の動的効果が期待されるのは、表面付近部の ^{147}Sm 崩壊である。従って、 $\Delta U_s > 0$ ならば $E_\alpha=2.23$ MeV 付近のみ収量が大きくなる。実験では、15keV D_3^+ ビームを用いて、10 秒照射 - 10 秒照射無しの測定サイクルを長時間行い、金属板表面付近に対応する $E_\alpha=2.0 \sim 2.23$ MeV 部分の収量比(R)が求められた。結果は、 $R=1.19 \pm 0.22$ となり、 $R=1.0$ とは統計的に有意の差を見いだせなかったものの、ビーム照射に伴う遮蔽エネルギーの上限値は、19.3 keV と求められた。

(2) 超音波を作用した液体 Li に重陽子ビームを照射することにより、液体 Li 中に高温重陽子プラズマが生成されることが判明し、 $\text{d}(\text{d},\text{p})\text{t}$ 反応の収量と陽子スペクトルの解析から、重陽子プラズマの温度が求められた。: 液体 Li への超音波照射の ON(照射)/OFF(非照射)を繰り返しながら、ビーム照射中に生じる $\text{D}(\text{d},\text{p})\text{T}$ 反応からの陽子の収量とエネルギースペクトルが測定された。その結果、超音波 ON 時にのみ、陽子収量が著しく増加する(図 2 に反応収量の比較を示す)、及び、陽子のピークの裾が高エネルギー側に広がる(図 3 に陽子スペクトルを示す)という顕著な現象が観測された。

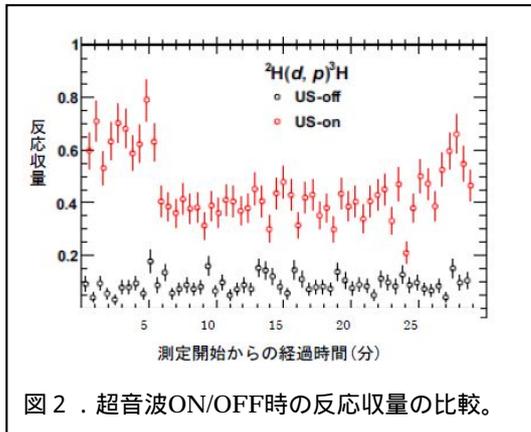


図 2 . 超音波 ON/OFF 時の反応収量の比較。

図 2 に超音波 ON/OFF 時の $\text{d}(\text{d},\text{p})\text{t}$ 反応の反応収量を示す。赤丸が超音波を作用させた時 (ON)、黒丸が作用させない時 (OFF) の収量である。超音波 ON 時が OFF 時に比べて著しく大きいことが明白である。図 3 に、

図 2 の超音波 ON/OFF 時に対応する陽子スペクトルを示す。黒丸が超音波 ON 時、黒点線が OFF 時の形状を表す。ON 時の形状は、明らかにエネルギーの高い側に裾が広がっており、通常の 2 体反応から得られる形状とは異なる。この広がりには標的重陽子が高温状態での熱運動の温度が定量的に決められる。

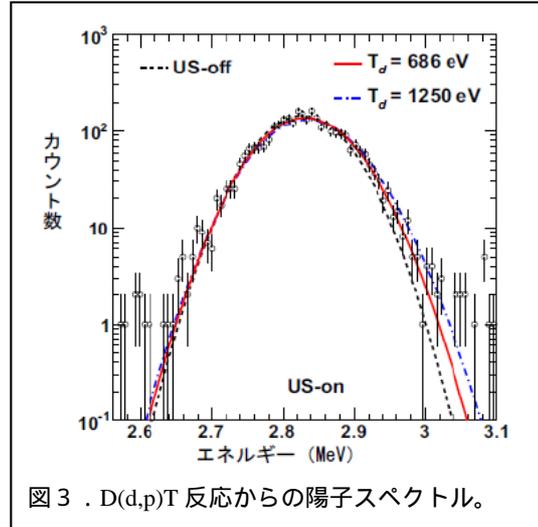


図 3 . $\text{D}(\text{d},\text{p})\text{T}$ 反応からの陽子スペクトル。

図 3 の赤実線は、重陽子が温度 $7 \times 10^6 \text{K}$ ($kT = 686 \text{eV}$) の熱平衡状態にあり、そのような標的に 50 keV のビーム重陽子が反応して放出された時のスペクトルを計算したものである。黒丸の実験値を良く再現している。

このように、運動学的な解析結果から、液体 Li キャビテーション内で生じている重陽子プラズマは、100 万度以上の高温状態にあることが判明した。また、反応収量を説明するためには、キャビテーション内の重陽子数密度は、少なくとも $10^{24}/\text{cc}$ であることがわかり、重陽子照射下の液体 Li キャビテーション内には、高温高密度の重陽子プラズマが生成されていると結論された。この実験では、キャビテーション核融合 (高温プラズマ内の重陽子同士の核融合) が生じた証拠は見出せなかったものの、液体金属 Li 中での超音波キャビテーションによる 10^6K を超える重陽子高温プラズマの生成は、キャビテーション核融合実現への大きなステップである。

(3) 液体金属中での分子ビームに特有な協力衝突反応が生じることを初めて見出し、液体金属中での $\text{d}+\text{d}$ 反応の遮蔽エネルギーを精度良く求めることに成功した。: 上述の(2)の超音波キャビテーションの効果は液体 Li 以外の Ga, In, Sn 等の液体金属では観測されなかった。しかしながら、 D_3^+ 分子ビームの照射時には、陽子のスペクトルが通常の反応とは非常に異なる形状であることが明らかになった。

液体 In の照射時に測定された陽子のピーク形状を図 4 に示す。黒点が液体 In で青線は固体 In に対するものである。固体時のス

ペクトル形状は、通常の thick-target 実験で得られるものであるが、液体時の分布は、ピーク位置が高く、幅が広く、非対称性が大きくなっている。また、測定された収量の入射エネルギー依存性も、通常の $d(d,p)t$ 反応では説明されないことが判った。

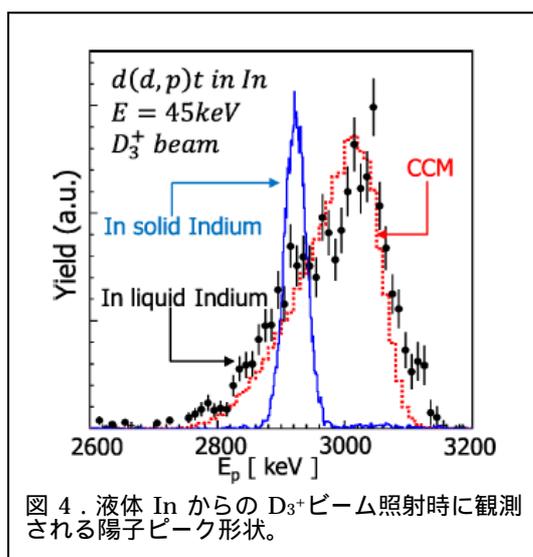


図 4 . 液体 In からの D_3^+ ビーム照射時に観測される陽子ピーク形状。

解析の結果、この反応は、分子ビームの一つの重陽子が標的 In と弾性散乱し、引き続き同じ分子内の重陽子と $d(d,p)t$ 反応を生じる分子ビームに特有な反応メカニズムによるものと判明した。我々はこのメカニズムを Cooperative Colliding Mechanism (CCM) と名付けた。金属伝導電子中の $d+d$ 反応の遮蔽エネルギーを求める上で、CCM はこれまでの方法に比べて、標的重陽子数が一意的に定まるため非常に優位である。収量の入射エネルギー依存性のデータ解析が進行中であるが、現在まで、液体 In と Sn 中での $d+d$ 反応の遮蔽エネルギーは、In 中では $270 (\pm 50)$ eV、Sn 中では $450 (\pm 50)$ eV との値が得られた。いずれも、単純な Thomas-Fermi 電子遮蔽モデルでは説明できない大きな値であることが明白となった。特に興味深いのは、In と Sn では原子番号が一つしか変わらないのに遮蔽エネルギーに 180 eV もの差が生じている点である。

5 . 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 10 件)

J.T. Zhao, T.S. Wang, Q. Wang, X.X. Xu, S. Zhang, Y.S. Zhou, K.H. Fang and J. Kasagi, Dynamical saturated concentration of deuterium in a beryllium foil studied by low energy $D(d,p)T$ reaction, Nucl. Instr. Meth. B. 316 (2013) 13 – 16; 査読有、DOI: 10.1016/j.nimb.2013.08.028

S. Narita, T. Hitora, E. Yamaguchi, Y. Sakemi, M. Itoh, H. Yoshida, J. Kasagi and

K. Neichi, Effects of high-energy proton and electron irradiation on GaN Schottky diode, Nucl. Instr. Meth. A 717 (2013) 1- 4; 査読有、DOI: 10.1016/j.nima.2013.04.003

J.T. Zhao, T.S. Wang, Q. Wang, X.X. Xu, S. Zhang, Y.S. Zhou, K.H. Fang and J. Kasagi, Effect of multiple scattering on proton spectrum from $D(d,p)T$ reaction in low energy region, Nucl. Instr. Meth. B299 (2013) 54 – 60; 査読有、DOI: 10.1016/j.nimb.2013.02.002

A. Murase, N. Takahashi, S. Hibi, T. Hioki, T. Motohiro and J. Kasagi, TOF-SIMS Investigation on Nuclear Transmutation from Sr to Mo with Deuterium Permeation through Multi-layered Pd/CaO, J. Condensed Matter Nucl. Sci. 6 (2012) 34-39; 査読有 Y. Toriyabe, E. Yoshida, J. Kasagi, and M. Fukuhara, Acceleration of Nuclear Fusion in Metal Lithium Acoustic Cavitation, Phys. Rev. C85 (2012) 054620-1-20; 査読有

K.H. Fang, T.S. Wang H. Yonemura, A. Nakagawa, T. Sugawara and J. Kasagi, Screening Potential of ${}^6\text{Li}(d,\alpha){}^4\text{He}$ and ${}^7\text{Li}(p,\alpha){}^4\text{He}$ Reactions in Liquid Lithium, J. Phys. Soc. Jpn., 80 (2011) 084201-1-6; 査読有

Y. Iwamura, T. Itoh, N. Yamazaki, J. Kasagi, Y. Terada, T. Ishikawa, D. Sekiba, H. Yonemura and K. Fukutani, Observation of Low Energy Nuclear Transmutation Reactions Induced by Deuterium Permeation through Multilayer Pd and CaO thin Film, J. Condensed Matter Nucl. Sci. 4 (2011) 132-145; 査読有

T. Hioki, H. Azuma, T. Nishi, A. Itoh, S. Hibi, J. Gao, T. Motohiro and J. Kasagi, Absorption Capacity and Heat Evolution with Loading of Hydrogen Isotope Gases for Pd Nanopowder and Pd/Ceramics Nanocomposite, J. Condensed Matter Nucl. Sci. 4 (2011) 69-80; 査読有

T. Hioki, H. Azuma, T. Nishi, A. Itoh, J. Gao, S. Hibi, T. Motohiro, J. Kasagi, Hydrogen/Deuterium Absorption Property of Pd Fine Particle Systems and Heat Evolution Associated with Hydrogen/Deuterium Loading, Proceedings of ICCF15, 2011, pp. 88-93; 査読有

Y. Toriyabe, E. Yoshida and J. Kasagi, Li+D and D+D Fusion Assisted with Acoustic Cavitation, Proceedings of ICCF15, 2011, pp. 257-262; 査読有

[学会発表](計 7 件)

J. Kasagi, New measurement of screening potential by cooperative colliding process for the $d+d$ reaction in metallic electron environment, The 18th International Conference on Condensed Matter Nuclear

Science ICCF18, Columbia, Missouri, USA, July 24, 2013 (invited talk)

Y. Honda and J. Kasagi, “Cooperative colliding” d+d reaction caused in liquid Indium bombarded by low-energy D₃⁺ molecular beam, International Nuclear Physics Conference INPC2013, Firenze, Italy, June 4, 2013

本多佑記、笠木治郎太；液体 In 中の D+D 反応に観測される異常現象、日本物理学会第 68 回年次大会、広島大学、2013 年 3 月 26 日

J. Kasagi and K.H. Fang, Astrophysical $S_{\text{bare}}(E)$ factor of the ${}^6\text{Li}(d,\alpha){}^4\text{He}$ and ${}^7\text{Li}(p,\alpha){}^4\text{He}$ reactions, ND2013 International Conference on Nuclear Data for Science and Technology, New York, USA, March 6, 2013

J. Kasagi and Y. Honda, Anomalous behavior of the d+d reaction in liquid indium bombarded by low-energy deuterons, CLUSTER12 10th International Conference on Clustering Aspects of Nuclear Structure and Dynamics, Debrecen, Hungary, Sept. 26, 2012

本多佑記、笠木治郎太；超音波照射液体金属中の D+D 核反応の研究、日本物理学会 2012 年秋季大会、京都産業大学、2012 年 9 月 13 日

J. Kasagi, Low-energy nuclear reactions in liquid metal, FUSION11, International Conference on Reaction Mechanisms and Nuclear structure around Coulomb Barrier, Saint-Malo, France, May 5, 2011 (invited talk)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

笠木 治郎太 (KASAGI, Jirohta)

東北大学・電子光理学研究センター・名誉教授

研究者番号：10016181

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：