

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 23 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400288

研究課題名(和文)液体Li超音波キャビテーションによるDD核融合反応の増強

研究課題名(英文)Enhanced dd fusion reaction in liquid Li under super-sonic cavitation operation

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) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：液体Liキャビテーションを生成する標的システムが整備された。60 keV重陽子を液体Liに照射し、液体中のD(d,p)T反応からの荷電粒子スペクトルがビームON/OFF、超音波作用ON/OFFの条件下で測定された。ビームOFF時のスペクトルに、超音波作用ON/OFFに対して無視し得ない効果が現れた。超音波ON時のスペクトルからOFF時のスペクトルを差し引くことにより、2 MeV付近にバンプ構造を見出した。現在のところ、このバンプ構造は、ビームOFF時に超音波キャビテーションにより引き起こされるD(d,p)T反応からの陽子ではないかと推測される。

研究成果の概要(英文)：A target system has been developed to produce liquid Li cavitation. Charged particle spectra were measured from the D(d,p)T reaction in liquid Li irradiated by a 60-keV deuteron beam. Measurements were performed under the conditions; beam ON and OFF with ultrasonic operation ON and OFF. In the spectrum at the time of beam off, an effect which cannot be ignored with respect to ON/OFF of the ultrasonic operation appeared. By subtracting the spectrum at OFF of ultrasonic operation from the spectrum at ultrasonic ON, we found a bump structure near 2 MeV. Currently, this bump structure is presumed to be due to protons from the D(d,p)T reaction caused by ultrasonic cavitation at the time of beam off.

研究分野：数物系科学

キーワード：dd核融合 液体Li 超音波キャビテーション 重陽子ビーム照射

1. 研究開始当初の背景

超音波キャビテーションを用いた机上サイズの小型装置による核融合反応の研究は、この 15 年の間に主に米国において推進されてきた。S. Putterman (UCLA) は、ソノルミネッセンスからキャビテーション核融合へのエネルギー変換法により、既に 1997 年に米国特許を得ている [U.S. Patent #5659, 173, 1997]。R.P. Taleyarkhan (ORNL) は、重陽子化アセトン (C_3D_6O) への超音波照射によりバブル(キャビテーション)核融合に成功したと、2002 年に報告している [Science 295, 1868, 2002]。しかしながら、DD 核融合からの中性子を観測したとするこの実験は、その後、他のグループによる追実験では結果が再現されていない [D. Shapira et al., Phys. Rev. Lett. 89, 104302, 2002; R. Geisler et al., Europhys. Lett. 66, 435, 2004]。一方、理論的には、キャビテーションバブルの崩壊時には、衝撃波の発生により $10^8 K$ の温度と 10^3 気圧もの高温高压プラズマ状態が生成され、適切な条件下では核融合生起が可能と結論されている [A. Bass et al., Phys. Rev. Lett. 101, 234301, 2008]。国内では、ソノルミネッセンスにおける化学反応の研究がされているものの、核反応研究を進めているのは我々だけである。我々は、液体 Li に重陽子ビームを照射し、同時に超音波を作用させることにより、温度 $10^6 K$ 以上に及ぶ重陽子高温プラズマの生成に成功した [Phys. Rev. C 85, 054620, 2012]。この結果は、キャビテーション核融合の可能性を明白に示すものとなり、今後の実験研究の更なる進展が望まれる状況である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、これまでの成果を進展させ、未来のエネルギー利用を展望して、液体 Li キャビテーション核融合へ向けた基礎的データの蓄積、各種パラメータの最適条件の探索、メカニズムの系統的理解等に基づき、超音波キャビテーション核融合の確立を目指すものである。

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る。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る。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 Li を作る。

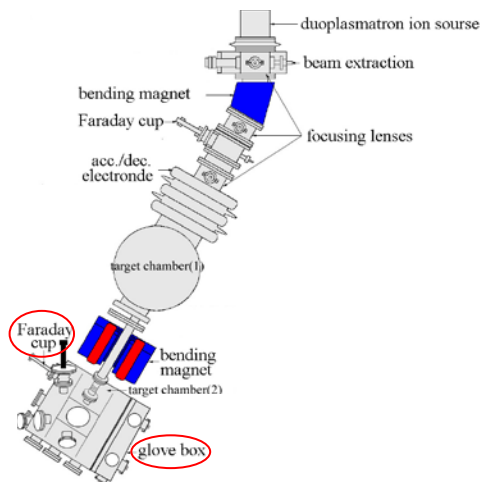


図 1. 低エネルギー重陽子ビーム照射装置

液体金属超音波キャビテーション内での $d+d$ 核融合反応は以下のように行う。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 の金属塊を置き、真空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み、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する。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する。

実験では、60 keV の重陽子ビームが液体 $6Li$ 液体標的 (95%濃縮 $6Li$) に照射され、液体 Li 中で生じる $d(d,p)t$ 反応からの陽子スペクトルを観測した。測定はビーム照射 ON/OFF と超音波作用 ON/OFF を組み合わせ、1 サイクルは次の 4 ステップで構成される。①ビーム照射 ON (Beam-ON)、超音波作用 OFF (US-OFF)、②Beam-ON、US-ON、③Beam-OFF、US-ON、④Beam-OFF、US-OFF。液体 Li に対する超音波作用の影響を見るために、このサイクルを繰り返してデータ取得を実行した。①～④の状況に対応したデータが蓄えられた。

4. 研究成果

(1) Beam-ON 時の収量比 $Y(US-ON)/Y(US-OFF)$ 最初に、2012 年に発表した論文 (Phys. Rev. C85, 054620 (2012)) の再現を目指し、Beam-ON 中の超音波作用下での $d(d,p)t$ 反応を観測した。約 200 度 C では、Beam-ON 時に US-ON 時の陽子収量比が US-OFF 時に比べて 1.2 倍以上 ($Y(US-ON)/Y(US-OFF) > 1.2$) となるのが時々観測された。しかしながら、この US-ON の効果は時間的に持続せず、収量比は、ビーム照射開始後短い時間の後に 1 になってしまうことが判明した。液体 Li 表面の汚れが主たる原因と考えられた。

液体金属表面をきれいに長時間保つに、インジウムや錫等の他金属で有効であった様に、液体 Li を、より高い温度 ($T_{Li} \sim 300$ 度 C) に保ち観測した。液体 Li 表面の汚れの問題

は大幅に改善し、表面をきれいに保ったままビーム照射を数時間の続けることは可能になった。図2に、観測された荷電粒子スペクトルを示す。US-ONの時のスペクトルは、図2(a)の黒線で示したスペクトルで、US-OFF時のスペクトルは図2(b)の緑線で示されている。図中、2.85 MeVのピークがd(d,p)t反応からの陽子に対応している。解析の結果、Beam-ON時の収量比は、ほぼ1を保ったままで、2012年の論文で報告したような大きな収量比は、現在までのところ得られていない。

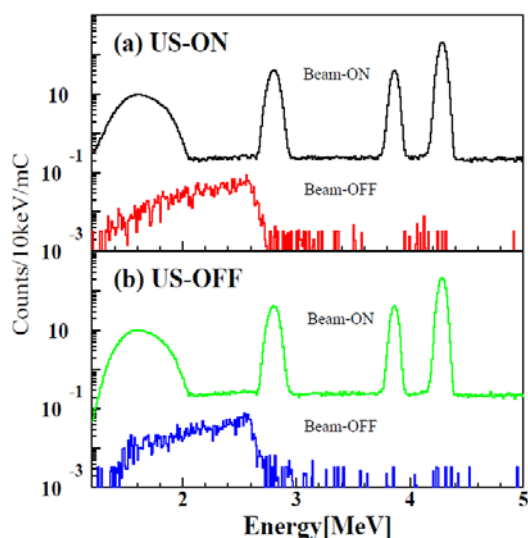


図2. 液体Liからの荷電粒子スペクトル。

(2) Beam-OFF時の収量比

Beam-OFF時に蓄えられたデータは、以下に述べるように、明らかなUS-ON/US-OFFの効果を示した。

Beam-OFF時のスペクトルは、図2(a)の赤線(US-ON)と図2(b)の青線(US-OFF)で示されている。特徴は、US-ON、US-OFFに関わらず、約2.7 MeVのエッジまで連続的に分布していることである。これは主に、真空槽内に設置されているビームストッパーで発生する中性子による ${}^6\text{Li}(n,t){}^4\text{He}$ 反応からのt粒子と考えられる。

US-ONの効果を詳細にみるため、図2(a)と(b)のBeam-OFFのスペクトルの収量差のスペクトルを作製した。図3に、US-OFFのスペクトルをUS-ONから差し引いたスペクトルを示す。スペクトルの各点の統計的変動を小さくするため、図2のスペクトルよりもビン幅を大きくしている。

図3に見るように、2.3 MeV近傍にUS-ON時に過剰な収量が存在し、1.7 MeVから2.8 MeVにわたる幅広いバンプ構造を示している。バンプの収量は 0.012 ± 0.0046 counts/sec、統計的有意度は、 2.6σ であった。

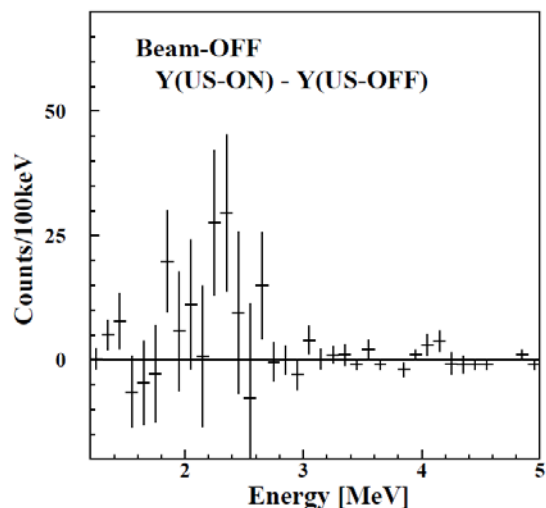


図3. US-OFFからUS-ONを差し引いたスペクトル。

この現象の再現性を見るために、統計を上げたスペクトル(US-ON-OFF)を図4に示す。図3と比較すると、US-ON時の過剰収量のピーク位置が多少エネルギーの小さいところに移動し、バンプの幅も減少している。

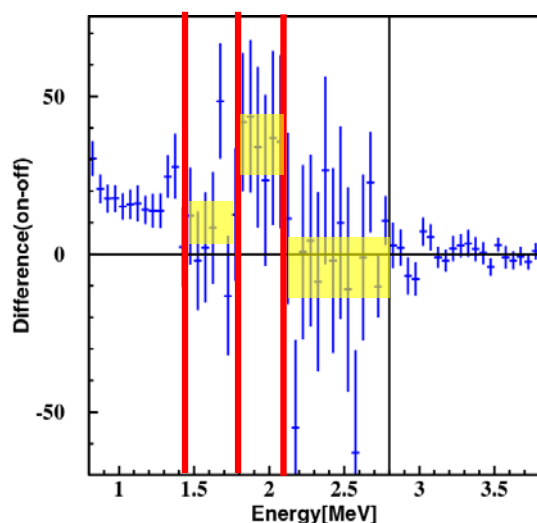


図4. US-OFFからUS-ONを差し引いたスペクトル。黄色のバンドは各領域の平均値。

ピークとその前後のエネルギー領域でのUS-ON時の過剰収量を求めた。表1に結果を示す。

表1. 各エネルギーでの過剰収量

エネルギー領域	過剰収量
1.45 - 1.8 MeV	56 ± 40
1.8 - 2.1 MeV	203 ± 58
2.1 - 2.8 MeV	-53 ± 125

表1から判るように1.8 MeV から 2.1 MeV の領域では、統計的有意度 2.9σ で US-ON 時の収量は US-OFF 時よりも増強されていることが明らかになった。

現時点では、ビーム照射がない時の超音波作用下での過剰な荷電粒子放出は、液体 Li のキャビテーションにより注入された重陽子が高温高密度プラズマとなり、その際生じる $d(d,p)t$ 反応ではないかと推測している。この反応を仮定すると、放出源は液体 Li の表面から $160\sim 200\ \mu\text{m}$ に渡って分布していることになる。

この現象をより明確にするためには、Beam-OFF 時のバックグラウンドイベント (ビームストッパーで生成される中性子起源の反応) を減らすことが決定的である。そのため、標的真空槽内でのビームストッパーを用いて Beam-OFF 状態にすることをやめ、液体標的真空槽上流の偏向電磁石の前に静電デフレクターを設置して、ビームの ON/OFF を制御する方式を開発した。この方式による精度の良いデータが今後得られることを期待している。

(3) 静電デフレクター

図5に本研究で設計・製作した、ビーム ON/OFF 制御のための静電デフレクターを示す。2枚の平行平板の間に最高 30 KV の電圧が瞬間的に付与され、標的を照射するビームが OFF となる。スイッチングは Fast high voltage transistor switch HTS-301-03-GSM を使用し、データ取得系 PC から制御される。デフレクターは、図1の target chamber (1) の中に設置され、真空中での高電圧の立ち上がりテストされた。結果は、60 keV の D_3 ビームを OFF するのに必要な時間 (印加電圧 1.2 KV) は、20 ns 以下であることが判り、今後の測定に十分であることが判った。

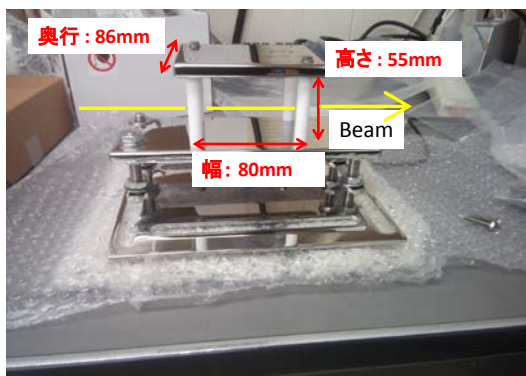


図5. ビームトランスポート系に組み込まれた静電デフレクター。

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 6件)

1. K. Fang, J. Zou, H. He, Q. Wang, J. Zhao, and J. Kasagi, Astrophysical S factor for the ${}^6\text{Li}(d, \alpha){}^4\text{He}$ and ${}^6\text{Li}(d, p_0/p_1){}^7\text{Li}$ reactions and their astrophysical implications, Phys. Rev. C 94 (2016) 054602-1 - 8; 査読有、DOI: 10.1103/PhysRevC.94.054602
2. J. Kasagi and Y. Honda, Screening energy of the D+D reaction in an electron plasma deduced from cooperative colliding reaction, J. Condensed Matter Nucl. Sci. 19 (2016) 127 - 134; 査読有
3. J. T. Zhao, Q. Wang, D. D. Lin, Z. H. Wang, T. S. Wang and J. Kasagi, Dynamical concentration and static retention of deuterium in tungsten foil studied by low energy D(d, p)T reaction and elastic recoil detection, Nucl. Instr. Meth. B 360 (2015) 139 - 144; 査読有、DOI: 10.1016/j.nim.2015.08.069
4. K. H. Fang, J. Zou, E. Yoshida, T. S. Wang and J. Kasagi, Temperature effect on screening effects and stopping power for low-energy $d-{}^6\text{Li}$ interaction in liquid Li, Europhys. Lett. 109 (2015) 22002-p1-p5; 査読有、DOI: 10.1209/0295-5075/109/2202

[学会発表] (計 8件)

1. Y. Honda, J. Kasagi, Low-energy cooperative DD collision in liquid metal and electron screening effect, The 20th International Conference on Condensed Matter Nuclear Science ICCF20, Sendai, Japan, October 6, 2016
2. 笠木治郎太、キャビテーション核融合—液体中の超高圧・超高温マイクロバブルの探索—、2015年度ウオータージェット学会年次報告会、東京都調布市、2016年2月26日 (招待講演)
3. J. Kasagi, Y. Honda, Screening energy of the D+D reaction in an electron plasma deduced from cooperating colliding reaction, The 19th International Conference on Condensed Matter Nuclear Science ICCF19, Padua, Italy, April 14, 2015
4. 本多佑記、笠木治郎太; D_3^+ ビーム照射による液体 Bi, Pb 中での $d(d, p)t$ 反応の遮蔽ポテンシャル測定、日本物理学会第70回年次大会、早稲田大学、2015年3月24日

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：

(4) 研究協力者

()