

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2007~2010

課題番号：19340051

研究課題名(和文) 凝縮系プラズマにおける低エネルギー核融合反応

研究課題名(英文) Low-energy nuclear fusion reactions in condensed matter plasmas

研究代表者

笠木 治郎太 (KASAGI JIROHTA)

東北大学・電子光物理学研究センター・名誉教授

研究者番号：10016181

研究成果の概要(和文)：

液体Li及び固体Liを標的にして ${}^6\text{Li}+\text{D}$ 反応が入射エネルギー25~75 keVにわたり測定され、液体/固体中での遮蔽ポテンシャル( $U_s$ )が求められた。 $U_s$ の値は、液体中、固体中で、各々、 $488\pm 40$ 、 $395\pm 40$  eVと求められた。液体Li中での $U_s$ の温度依存性も測定され、 $U_s$ は標的の温度の上昇に伴い減少することが判明した。これらの結果は、液体Li中では、伝導電子に加え、 $\text{Li}^+$ イオンが遮蔽効果に寄与するものと定性的には理解される。さらに、液体Li中での超音波キャビテーション生成に成功し、全く異なった環境下で核反応研究の道が切り開かれた。

研究成果の概要(英文)：

The  ${}^6\text{Li}+\text{D}$  reaction was measured with liquid and solid Li target for incident energies between 25 and 75 keV. The screening potential ( $U_s$ ) for the  ${}^6\text{Li}(\text{d},\alpha){}^4\text{He}$  reaction was deduced as  $U_s = 488\pm 40$  and  $395\pm 40$  eV, respectively for liquid and solid target. The temperature dependence of  $U_s$  was also measured and it is shown that  $U_s$  decreases as the temperature increases. The results are qualitatively interpreted in such a way that  $\text{Li}^+$  ions can contribute to the screening in liquid Li in addition to the electronic screening. Moreover, we have succeeded to produce ultrasonic acoustic cavitations in liquid Li; a new environment which may affect the reaction rates strongly has been developed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	6,000,000	1,800,000	7,800,000
2008年度	3,900,000	1,170,000	5,070,000
2009年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2010年度	1,700,000	510,000	2,210,000
年度			
総計	13,500,000	4,050,000	17,550,000

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：実験核物理、凝縮系核反応、低エネルギー核反応、プラズマ・核融合、液体金属、粒子線、遮蔽効果、超音波キャビテーション

## 1. 研究開始当初の背景

凝縮系内での低エネルギーD+D核融合反応が環境に大きく依存することが、10年程前に我々の研究により明確に示された(JETP Letters **68** (1998) 823-829)。D+D反応の反応率

は、裸の反応と比較すると、金属環境において大きく増大する。その要因は、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であると結論された。金属中での

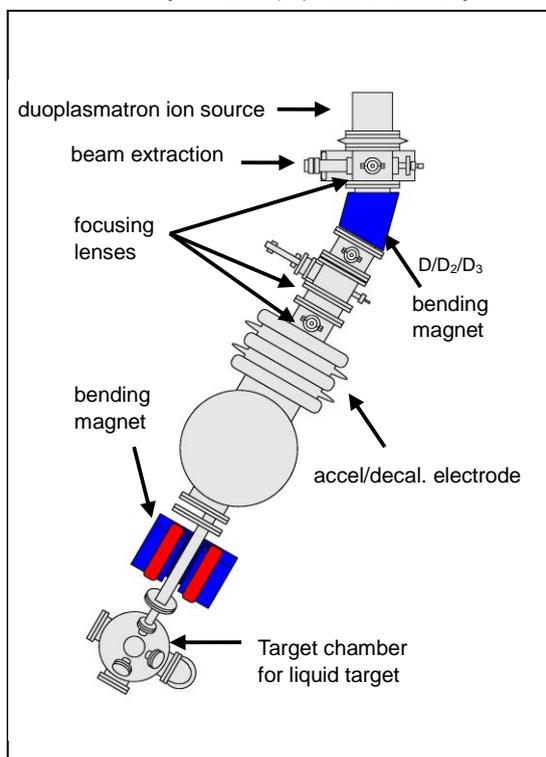
D+D 反応の反応率の増大現象は、その後、ドイツの Rolfs 達 (Eur. Phys. J. A13(2002)377) と Czernski 達 (Europhys. Lett. 54 (2001) 449) の実験でも再現され、多くの金属中で観測された遮蔽エネルギーの値は 300 eV 以上にもなることが判明した。また、Li+p、Li+d 反応についても調べられ、D+D 反応と同様に、金属中では反応率が大きく増大することが判明した (J. Phys. Soc. Jpn. 73 (2004) 608-612)。これらの実験値は、Thomas-Fermi 遮蔽モデルから予想される値の数倍以上となり、伝導電子以外の要素が、金属中核融合反応の遮蔽効果に寄与しているものと考えられ、そのメカニズムの究明が求められていた。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、D+D や Li+d 等の核融合反応が金属中で異常に増大するメカニズムを解明し、将来的な利用応用の検討を可能にすることにある。特に、本研究期間中においては以下の3点を具体的目的に研究を推進した。(1) 固体/液体 Li 中での D, Li を標的に D+D, Li+D 反応の反応率測定と遮蔽ポテンシャルの決定、(2) 液体 Li 中での  ${}^6\text{Li}(d, \alpha){}^4\text{He}$  反応率の温度依存性測定、更に、(3) 液体金属超音波キャビテーション内での核反応率測定装置構築。

## 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。下図に装置全体を示す。



液体標的は、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  ${}^6\text{Li}$  の塊を置き、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まれ、標的内で、 ${}^6\text{Li}(d, \alpha){}^4\text{He}$  反応及び D(d,p)T 反応を起こす。反応で放出される陽子、 $\alpha$  粒子等の荷電粒子を Si 半導体検出器で測定し、核反応の収量を得た。

入射重陽子エネルギー 25keV から 75keV までの間変化させ、各々の反応からの荷電粒子を計測し収量の励起関数を測定した。結果を、遮蔽ポテンシャルを考慮した計算値と比較することにより、固体/液体 Li 中での D, Li を標的に D+D, Li+D 反応の遮蔽ポテンシャルのが求められた。

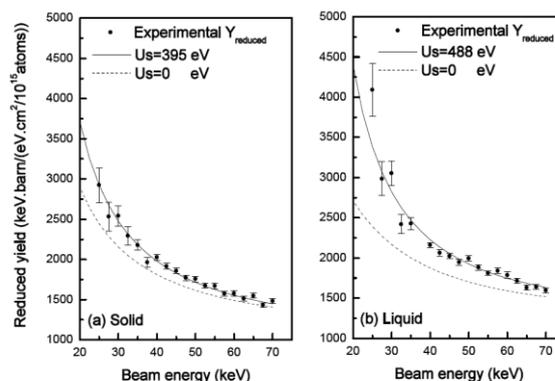
また、液体 Li の標的の温度 490K, 530K, 570K 及び 600K の 4 点で励起関数が測定され、各々の温度における遮蔽ポテンシャルが求められた。

さらに、液体金属+超音波キャビテーションを標的とする核反応実験研究を可能とするため、専用の標的真空槽を製作した。

## 4. 研究成果

### (1) ${}^6\text{Li}(d, \alpha){}^4\text{He}$ 反応の励起関数:

測定された  ${}^6\text{Li}(d, \alpha){}^4\text{He}$  反応の reduced yield の励起関数を下図に示す。(a) 図が固体 Li 標的、(b) 図が液体 Li 標的の場合である。黒丸が実験値を示し、点線は  $U_s = 0$  eV、即ち遮蔽効果がない場合に予想される励起曲線である。



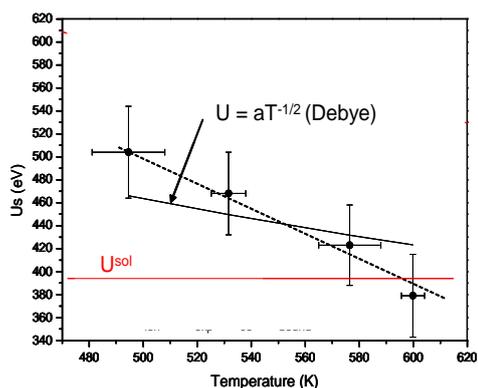
図から判るように、実験値はいずれも  $U_s = 0$  eV に較べて大きな値を示しており、実験値を再現するように  $U_s$  の値が求められた。実線は、 $U_s = 385$  eV (固体)、488 eV(液体)の計算値で、各々の実験値を良く再現している。

遮蔽効果は、金属中の分極電荷により引き起こされる。液体金属 Li の場合、Li イオンの束縛電子、金属中の伝導電子及び Li+イオンがその原因となる。束縛電子の効果は既に LiF 標的の実験等で約 240 eV と求められている。今回求められた、固体 Li と液体 Li の実験値と、束縛電子の値を用いて、伝導電子による

遮蔽ポテンシャル  $U_{ce}$  と Li+イオンによる遮蔽ポテンシャル  $U_{ion}$  をもとめると、 $U_{ce} = 160$  eV 及び  $U_{ion} = 300$  eV となる。伝導電子は、フェルミ縮退状態であるので、Thomas-Fermi 模型から遮蔽エネルギーを予測すると 75 eV となり、実験値の約半分程度である。ビーム照射中の電子状態は、単純な状態ではない可能性が大きい。また、Li+イオンは古典統計に従うので、Debye 模型から遮蔽エネルギーを予測すると 670 eV である。すなわち、イオンによる遮蔽効果は単純な見積りから大きく抑制されている。イオン質量が大きいため、荷電空間状態の変化に対するレスポンスが遅くなり遮蔽効果が小さくなる可能性が考えられる。

## (2) 遮蔽ポテンシャルの温度依存性

液体標的  ${}^6\text{Li}(d, \alpha){}^4\text{He}$  反応において、反応収量の励起関数を、標的温度 490K, 530K, 570K 及び600Kの4点で測定した。解析から得られた遮蔽ポテンシャルの温度依存性を下図に示す。

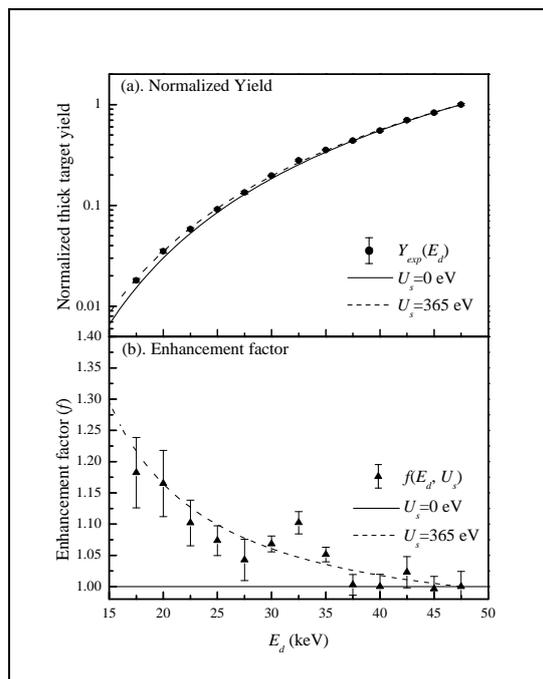


図から判るように、遮蔽ポテンシャルは、温度の増加に伴い520 eV から 400 eVへと単調に減少する。この傾向は単純なデバイ模型が予想する温度依存性と定性的に一致する。しかしながら、Debye模型の温度依存性は図の実線に示されているように、 $T^{-1/2}$ に比例しており、実験値よりは緩やかな減少である。

この結果と上述の(1)の結果とを合わせて考えると、液体金属標的中での低エネルギー核融合反応は遮蔽ポテンシャルにより大きく影響を受けていると結論される。電子による遮蔽エネルギーは、単純なThomas-Fermi模型の予測を2倍程度上回る遮蔽エネルギーを示し、一方、イオンによる遮蔽エネルギーはDebye模型の予想値の1/2程度である。液体金属は、電子とイオンの遮蔽効果が作用するため、核反応率を増強させる興味深い環境を提供している。

## (3) 液体Li中でのD+D反応 (予備的結果)

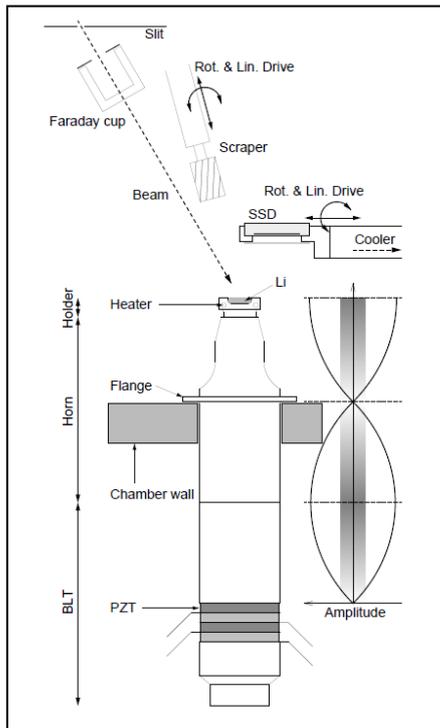
液体Li中でのD(d,p)T反応の収量の励起関数(a)と予備的な解析結果(b)を下図に示す。



予備的な解析の結果ではあるが、液体Li中でのD+D反応の遮蔽ポテンシャルは、約360 eVと求まった。固体Li中の遮蔽ポテンシャルについては、Czerskii達が150 eVと報告している。従って、D+D反応もLi+D反応と同様に、液体Li中で反応率が增强することがわかる。今後の解析を進めることにより、核融合反応を促進させる液体金属の役割が更に明確になるもの期待される。

## (4) 液体金属超音波キャビテーション標的:

下図に、設計された液体金属超音波キャビテーション標的装置の概要模式図を示す。図の下側に書かれている部分が4枚のPZT圧電素子からなるランジェヴァン型超音波発生装置(BLT)部である。ここで発生された超音波(〜20 kHz)はAl製のホーンにより、標的ホルダーに伝播される。この系は、標的表面に振幅の腹を持つ超音波定在波がたつように設計された。装置の右側に定在波の振幅の様子を示しているが、節の部分は真空フランジの位置に対応しており、フランジ部で振動の影響が最小となる。Liは酸化された表面を削りとられ、標的ホルダーに置かれ加熱・液化される。ビームは、真空槽上部から斜め入射される。ビーム照射時の標的温度は、放射温度計によりのぞき窓を通して常時測定される。反応で放出される荷電粒子をSi半導体検出器(SSD)により測定する。標的からの放射熱のため、検出器は冷却されている。



設置された装置により、これまで液体金属標的として使用してきた液体 Li の超音波キャビテーションを得ることに成功した。さらに、テスト的に低エネルギー重陽子ビームを照射し、 ${}^6\text{Li}(d, \alpha){}^4\text{He}$ 反応と  $\text{D}(d, p)\text{T}$ 反応が調べられた。超音波キャビテーションの効果は、後者の反応において顕著であることが判明した。後者の反応 ( $\text{D}+\text{D}$ ) においては、超音波キャビテーションの効果非常大いことが判明した。キャビテーションにより、標的  $\text{D}$  が高温ガス状態であると仮定すると、その温度は  $10^6\text{K}$  にもものぼることが示された。

#### 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 13 件)

1. 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)
2. Y. Toriyabe, E. Yoshida and J. Kasagi, Temperature dependence of  $\text{YAlO}_3(\text{Ce})$  scintillation response for alpha-ray excitation, *Nucl. Instr. and Meth. A611* (2009) 69 – 75 (査読有)
3. J. Kasagi, H. Yonemura, Y. Toriyabe, A. Nakagawa, T. Sugawara and T. Wang, Ionic

Debye screening in dense liquid plasmas observed for the  $\text{Li}+\text{p,d}$  reactions in liquid Li target, *Nuclear Physics Review* 26 Suppl. (2009) 44 – 48 (査読有)

4. D. Sekiba, H. Yonemura, T. Nebiki, M. Wilde, S. Ogura, H. Yamashita, M. Matsumoto, J. Kasagi, Y. Iwamura, T. Itoh, H. Matsuzaki, T. Narusawa and K. Fukutani, Development of micro-beam NRA for 3D-mapping of hydrogen distribution in solids: Application of tapered glass capillary to 6 MeV  ${}^{15}\text{N}$  ion, *Nucl. Instr. and Meth. B 266* (2008) 4027 – 4036 (査読有)
5. T.S. Wang, Z. Yang, H. Yonemura, A. Nakagawa, H.Y. Lv, J.Y. Chen, S.J. Liu and J. Kasagi, The screening effect of  $\text{D-D}$  fusion in  $\text{Sm}$  in a sub-low energy region ( $< 20\text{keV}$ ), *J. Phys. G34* (2007) 2255 – 2263 (査読有)

[学会発表] (13 件)

1. J. Kasagi, Low energy  ${}^6\text{Li}+\text{d}$  reaction with liquid Li target: Screening effects due to electrons and ions, 241st ACS National Meeting, Anaheim CA, USA, 平成 22 年 3 月 27 日
2. J. Kasagi, Dynamical screening effects on alpha-decay in metal during deuteron beam bombardment, The 16th international conference on Condensed Matter Nuclear Science ICCF16, Chennai, India, 平成 22 年 2 月 8 日
3. J. Kasagi, Low-energy nuclear reactions in low-temperature dense plasmas, Tours Symposium on Nuclear Physics and Astrophysics VII, Kobe, Japan, 平成 21 年 11 月 18 日
4. J. Kasagi, Electronic and ionic screening for low energy nuclear reactions in condensed matter (invited talk), International Conference on Heavy Ion Fusion Reaction FUSION08, Chicago II, USA, 平成 20 年 9 月 25 日
5. J. Kasagi, Low energy  $\text{Li}+\text{p,d}$  reactions in liquid plasmas and the effect of liquefied  $\text{Li}^+$  ions on the screening potential, The 10th International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies OMEG07, Sapporo, Japan, 平成 19 年 12 月 6 日

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称 :

発明者 :

権利者 :

種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況（計0件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

笠木 治郎太 (KASAGI JIROHTA)  
東北大学・電子光物理学研究センター・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：