核データ部会セッション「ミューオンの物質内輸送とその学際的応用」

(1) 原子力分野へのミューオン応用：核変換と触媒核融合

(1) Applications of muons to atomic energy fields: nuclear transmutation and fusion

松崎 禎市郎 [1]

[1]理化学研究所 仁科加速器研究センター

1. ミューオン核変換（ミューオン原子核捕獲反応）

負ミューオンは、質量が電子の 207 倍であり物質中では「重い電子」として振る舞う。負ミューオンは物質中の原子核のクーロン場に捕われてミューオン原子を形成し、n=14 程度のミューオン軌道から 1 s 軌道までオージェ電子やミューオン原子 X 線を放出してカスケードをする。1s 軌道にある負ミューオンは、自然崩壊と原子核捕獲の 2 つの競争過程をもっていて、その崩壊確率は、自然崩壊の平均寿命の逆数と原子核捕獲確率の和で記述できる。1s 軌道にある負ミューオンの寿命は、原子番号 Z=6 から Z=40 の範囲では Z^4に反比例して減少し、より大きい Z の原子核では、80-100 nsec の値をとる。原子番号が Z=40 より大きい原子核では、ミューオン 1 s 軌道半径が原子核半径より小さくなるので、大きい Z の原子核ではミューオン原子核捕獲確率は 100%に近い値となる。

負ミューオン原子核捕獲が起ると、原子核内の素過程として、ミューオン（μ^-）が陽子（p）と結びつき中性子(n)とニュートリノ(ν) が形成される。

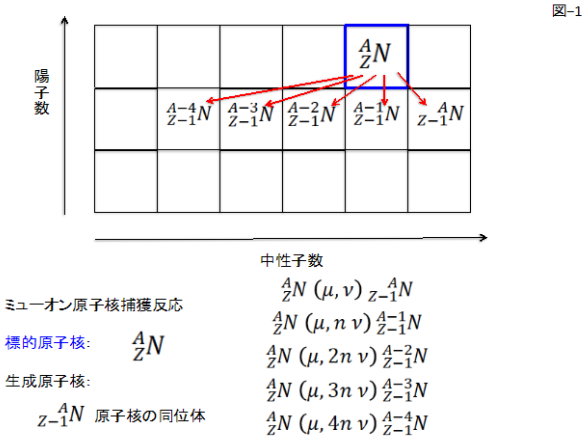
$$p + \mu^- \rightarrow n + \nu$$

ミューオン静止質量エネルギー（106 MeV）の殆どはミュートリノが運動エネルギーとして持ち去り、原子核励起エネルギーとして 10-20 MeV 程度が残されると考えられている。陽子が中性子に変換するので、生成する原子核の質量数は不変だが、原子番号は 1 つ小さい（Z-1）原子核の励起状態（複合核状態）が形成される。

$$\mu^- + N(Z, A) \rightarrow N'((Z-1), A)^* + \nu$$

図 1 に示すように、Z 原子核のミューオン原子核捕獲反応では、Z-1 原子核の複合核励起状態から複数個の中性子放出が起こり、Z-1 原子核の同位体が生成する。ミューオン原子核捕獲反応は、原子番号 Z の原子核を原子番号 Z-1 の原子核同位体に核変換する反応である。

図-1



Teiichiro Matsuzaki[1]

[1]RIKEN Nishina Center for Accelerator-Based Science

Z-1 原子核の複合核励起状態からは、低い確率であるが、陽子やα粒子の放出があることも知られているが、この場合でも、それぞれ Z−2 原子核や Z−3 原子核へ核変換することになる。このように、一個の負ミューオンは一個の原子核を必ず核変換するので、この手法を「ミューオン核変換」を呼ぶ事にする。

ミューオン原子核捕獲反応による核変換の具体例として、同位体濃縮した ^{108}Pd 標的のミューオン原子核捕獲反応を考えてみる。以下の原子核反応が、それぞれの反応に固有の反応確率（反応分岐比）をもって同時に進行する。

^{108}Pd (μ−, ν) ^{108}Rh (半減期 16.8 秒で ^{108}Pd へ β$^-$崩壊)

^{108}Pd (μ−, n ν) ^{107}Rh (半減期 21.7 分で ^{107}Pd へβ$^-$崩壊)

^{108}Pd (μ−, 2n ν) ^{106}Rh (半減期 30 秒/2.2 時間で ^{106}Pd へβ$^-$崩壊)

^{108}Pd (μ−, 3n ν) ^{105}Rh (半減期 35.5 時間/45 秒で ^{105}Pd へβ$^-$崩壊)

^{108}Pd (μ−, 4n ν) ^{104}Rh (半減期 42 秒/4.4 分で ^{104}Pd へβ$^-$崩壊)

^{108}Pd (μ−, 5n ν) ^{103}Rh (安定核)

過去の実験論文を調べると、中性子 5 個を放出する反応も観測されているので、ここでは（μ−, 5n ν）反応までを記述してみた。中性子を 1 個放出できるエネルギー（中性子分離エネルギー）が 6-8 MeV 程度であるにもかかわらず、10-20 MeV の複合核励起状態から 5 個もの中性子が放出される確率があることは大変興味深い。同位体濃縮 ^{108}Pd を標的とするミューオン原子核捕獲反応の生成核種は Rh の放射性同位体核種であり、大部分はβ$^-$崩壊して安定核の Pd の同位体となる（^{107}Rh の場合を除く）。ここでの（μ−, 5n ν）反応の生成核は ^{103}Rh（安定核）となる。

図−2

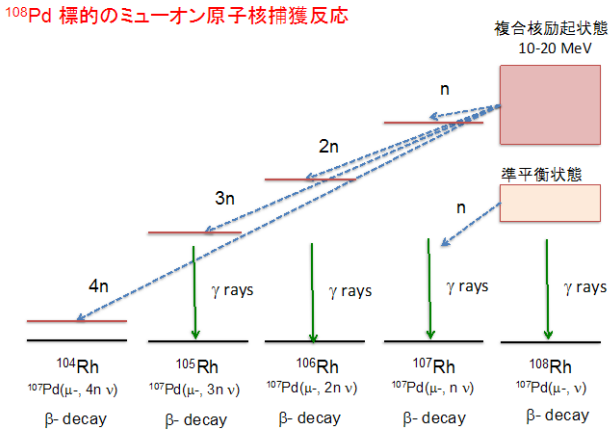


図 2 は、^{108}Pd 標的の 4n 反応までを想定したミューオン原子核捕獲反応過程のイメージ図である。負ミューオンを原子核捕獲した ^{108}Pd は ^{108}Rh の複合核励起状態を形成し、さらに複数個の中性子を放出し、Rh の放射性同位体の励起準位を作り、それらの励起準位からはγ線崩壊により Rh 同位体の基底準位が生成される。Rh 同位体の生成確率は反応分岐比に支配されるので、この反応分岐比を精密に決定することは重要である。また、放出中性子個数分布や中性子エネルギー分布を実験で求めると、中性子の放出機構を複合核蒸発模型や原子核内部カスケード模型を用いた理論との比較ができる。ミューオン原子核捕獲反応機構を実験的に解明し、その反応機構の理論の構築を目指し、さらに、ミューオン核変換を応用する研究を進めたいと考えている。

2. ミューオン触媒核融合

水素に負ミューオンを入れるとミューオン水素原子が形成され、その大きさは水素原子の 1/207 とある。この特徴を生かした典型例がミューオン触媒核融合（μCF）である。

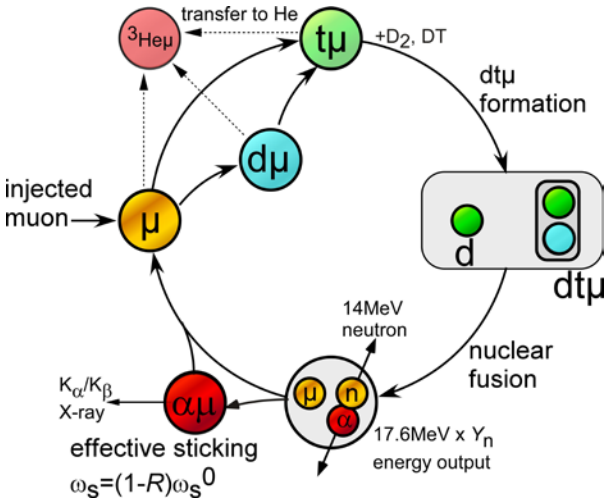
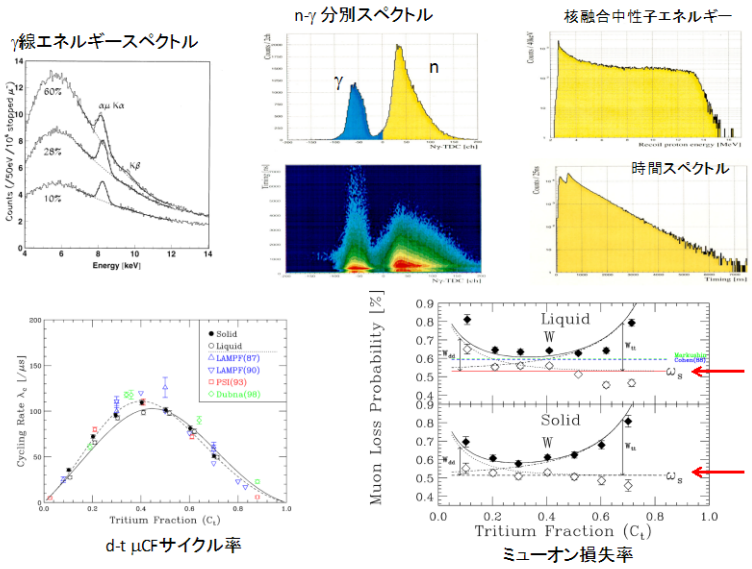


図３に示すように、負ミューオン(μ⁻)が二重水素(D)と三重水素(T)の混合系に静止すると、主に tμ原子が形成される。電気的中性の tμ原子は、クーロン力を感じないで D_2分子と衝突し、３体の束縛状態である dtμ分子を共鳴的に生成する。この dtμ分子の大きさは小さいので、自発的に分子内で d+t →α+n 核融合反応が起こる。反応後、大部分のμ⁻は解放され、次の核融合サイクルを引き起こす。一方、核融合生成されたα粒子にミューオンが付着してαμ 原子となる確率があり、さらにαμ 原子の減速過程で付着しているミューオンがはぎ取られて核融合サイクルにもどる確率もある。このμCF 現象は、入射μ⁻ビームを制御することにより d-t 核融合反応を制御することができ、低炭素社会に向けた有望なクリーンエネルギー源となりうる可能性を秘めている。

理化学研究所では英国に設置した理研 RAL ミューオン施設において、大強度ミューオンビームと、先端的トリチウム取り扱いシステムを生かして、主に D_2-T_2標的中で起きるミューオン触媒 d-t 核融合研究を推進してきた。実験では、d-t 核融合に伴う中性子、ミューオン原子 X 線、μ-e 崩壊電子を計測した。



その実験結果のまとめを図４に示す。上段の左から（１）ミューオンがα粒子に付着して発生する 8.2 keV のミューオン原子 X 線スペクトル、（２）NE213 液体シンチレーションカウンターによる中性子−ガンマ線の分離スペクトル、（３）右の上段は核融合中性子エネルギースペクトルであり 14.4 MeV の d-t 核融合中性子が確認できる。右の下段は中性子の時間スペクトルである。そして、下段左側は（４）D_2-T_2 比を変化させた核融合サイクル率の測定結果であり、右側は（５）D_2-T_2液体標的または固体標的で D_2-T_2 比を変化させたミューオン損失率の測定結果である。実験中のミューオン強度や標的量にもよるが、通常では毎秒約 100 万回程度の d-t 核融合を計測している。

核融合サイクル率は、温度・密度・D_2-T_2混合比に依存し、固相・液相・気相などの状態によっても変化するが、観測された最大核融合サイクル数はミューオン 1 個あたり約 120 回である。核融合 1 個あたりの放出エネルギーは 17.6MeV であるので、これは 2.1GeV のエネルギー出力に相当する。一方、1 個のミューオン生成に必要な加速器ビームエネルギーは約 5GeV とされている。現状では、出力エネルギーは入力エネルギーの約 40% 程度となっている。次の目標は、エネルギー出力値が必要値を超えること（ブレークイーブン）を目指すことである。核融合サイクル率は、（１）dtμ分子の生成率(生成速度)、（２）核融合後μ^-がαに付着して失われるαμ損失率、（３）αμイオンがその減速過程で物質との相互作用により付着していたμ^-が乖離して次のμCF サイクルに参加する確率、（４）D_2-T_2標的の密度、等に起因している。もし何らかの方法でα粒子に付着しているミューオンを全て解離させる事が出来れば、現在実験で得られている dtμ分子生成率値で見積ることができる核融合サイクル数は D_2-T_2液体で 290 回、固体で 340 回になり、ブレークイーブンを達成できることになる。技術的には極めて難しいが、D_2-T_2標的密度を液体水素密度の 5 倍程度まで増やすことができれば、核融合回数は 1200 回まで増加することが見積もられる。また、D_2-T_2ガスの分子状態の（レーザーによる）制御、D_2-T_2標的に外的条件（電場、磁場、高周波共鳴、衝撃波、等）を加えることで核融合サイクル数を増やすアイデアもある。いままで系統的に液体と固体の D_2-T_2標的のμCF 実験を行ってきたが、μCF サイクル数を上げるためには、高温・高圧(1000K・1000 気圧程度)状態の D_2-T_2標的が適しているという指摘もある。高温・高圧状態の D_2-T_2標的では D_2-T_2ガスが金属容器壁を容易に透過してしまうため、μCF 実験を安全に実施するためには入念な実験装置の設計製作が必要である。