サイエンスよみのもの

原子力分野への負ミュオンの応用 負ミュオンによる核変換・核融合・核分裂

理化学研究所 松崎 禎市郎

負ミュオン誘起原子核反応による原子核変換を3つ紹介する。ミュオンが原子核に捕獲されて陽子数が変わり核変換する方法がミュオン原子核捕獲反応であり、長寿命核分裂片(LLFP)の核変換への応用が期待されている。また、ミュオンは二重水素と三重水素の混合系に静止すると d-t 核融合を繰り返すミュオン触媒核融合を起こし、核融合エネルギー源や核融合中性子(14.4 MeV)源に向けた検討がなされている。さらに、ミュオンはマイナーアクチノイド(MA)原子核に捕獲されるとミュオン核分裂を起こすので、MA 原子核の核変換への応用が可能である。

KEYWORDS: *Muon nuclear transmutation, Muon nuclear capture reaction, Muon catalyzed d-t fusion, Muon nuclear fission*

1. ミュオン

ミュオンはパイオンの崩壊で生まれる。日本では、湯川秀樹博士が1935年に核力の源として中間子(パイオン)の存在を予言し、仁科芳雄博士が1937年に霧箱で宇宙線のなかにミュオンを発見した。現在では、パイオンもミュオンも高エネルギー陽子加速器によって人工的に作ることができる。陽子ビームを炭素原子核等に入射させるとパイオンが生成され、パイオンが崩壊してミュオンができる。ミュオンは電子の仲間に属する素粒子で、正ミュオン(μ^+)と負ミュオン(μ^-)があり、真空中の寿命は2.2マイクロ秒である。ミュオンの質量は電子の207倍または陽子の1/9であり、物質中では負ミュオンは「重い電子」、正ミュオンは「軽い陽子」のように振る舞う。

2. ミュオン原子核捕獲反応

負ミュオン(μ^-)は、物質中の原子核のクーロン場に捕われてミュオン原子を形成し、 $n=14$ 程度のミュオン軌道から最低準位の1s軌道までオーグメント電子やミュオン原子X線を放出して段階的に遷移(カスケード)する。1s軌道にある負ミュオンは、自然崩壊と原子核捕獲の競争過程をもっていて、その崩壊確率は、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ナノ秒である。原子番号(Z)が40より大きい原子核では、ミュオン1s軌道半径が原子核半径より小さくなるので、 Z の大きい原子核ではミュオン原子核捕獲確率は約100%となる。

原子番号 Z 、質量数 A をもつ原子核 $N(Z, A)$ において負ミュオン原子核捕獲が起ると、原子核内の素過程として、ミュオン(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。

ミュオン静止質量エネルギー(106 MeV)の殆どはニ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是不変だが、原子番号が1つ小さい($Z-1$)原子核の励起状態(複合核状態) $N'((Z-1), A)^*$ が形成される。

図1に示すように、 Z 原子核のミュ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 $Z-1$ の原子核同位体へと核変換する反応である。 $Z-1$ 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、一個の負ミュオンは一個の原

Application of muon induced reaction to atomic energy research:
Teiichiro Matsuzaki.

(2016年6月30日受理)

図1 ミューオン原子核捕獲反応

子核を必ず核変換する。

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)で同時に進行する。

- $^{108}\text{Pd} (\mu^-, \nu) ^{108}\text{Rh} (T_{1/2}: 16.8 \text{ 秒で} ^{108}\text{Pd} \rightarrow \beta^- \text{崩壊})$
- $^{108}\text{Pd} (\mu^-, n \nu) ^{107}\text{Rh} (T_{1/2}: 21.7 \text{ 分で} ^{107}\text{Pd} \rightarrow \beta^- \text{崩壊})$
- $^{108}\text{Pd} (\mu^-, 2n \nu) ^{106}\text{Rh} (T_{1/2}: 30 \text{ 秒/2.2 時間で} ^{106}\text{Pd} \rightarrow \beta^- \text{崩壊})$
- $^{108}\text{Pd} (\mu^-, 3n \nu) ^{105}\text{Rh} (T_{1/2}: 35.5 \text{ 時間/45 秒で} ^{105}\text{Pd} \rightarrow \beta^- \text{崩壊})$
- $^{108}\text{Pd} (\mu^-, 4n \nu) ^{104}\text{Rh} (T_{1/2}: 42 \text{ 秒/4.4 分で} ^{104}\text{Pd} \rightarrow \beta^- \text{崩壊})$
- $^{108}\text{Pd} (\mu^-, 5n \nu) ^{103}\text{Rh} (\text{安定核})$

過去の論文¹⁾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 $(\mu^-, 5n \nu)$ 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 $(\mu^-, 5n \nu)$ 反応の生成核は ^{103}Rh (安定核)となる。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が重要である。また、放出中性子個数分布(多重度)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の理論との比較ができる。

図2 ミューオン原子核捕獲反応過程のイメージ図

現在、 ^{107}Pd , ^{93}Zr , ^{79}Se 等の長寿命核分裂片(LLFP)の原子核変換に向けたミューオン原子核捕獲反応研究が進められていて、核変換経路の解明や核変換効率の測定を目指している²⁾。

3. 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となる。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 $t\mu$ 原子が形成される。電気的中性の $t\mu$ 原子は、クーロン力を感じないで D_2 分子と衝突し、3体束縛状態である $dt\mu$ 分子を共鳴的に生成する。この $dt\mu$ 分子のサイズは小さいので、分子内で $d+t \rightarrow \alpha+n$ 核融合反応が自発的に起こる。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、生成された α 粒子にミューオンが附着して $\alpha\mu$ 原子となる確率があり、さらに $\alpha\mu$ 原子の減速過程で附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 過程は、加速器駆動型d-t核融合炉を実現し、低炭素社会に向けた有望なクリーンエネルギー源となる可能性を秘めている。

図3 ミューオン触媒 d-t 核融合過程の概略図

図4 理化学研究所で得られたミュオン触媒 d-t 核融合実験結果のまとめ

理化学研究所では英国に建設した理研 RAL ミュオン施設において、大強度ミュオンビームと、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 標の中で起きるミュオン触媒 d-t 核融合過程を研究してきた³⁾。実験では、d-t 核融合に伴う中性子、ミュオン原子 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。(1)上段左：ミュオンが α 粒子に付着して発生する 8.2 keV のミュオン原子 X 線スペクトル、(2)上段中央：NE213 液体シンチレーション検出器による中性子—ガンマ線分離スペクトル、(3)上段右：上段は核融合中性子エネルギースペクトル(14.4 MeV)、下段は中性子の時間スペクトル、である。そして、(4)下段左側： D_2 - T_2 比を変化させた核融合サイクル率(水素標的密度とミュオン寿命で規格化した1マイクロ秒あたりの核融合数)、(5)下段右側： 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オン損失率の測定結果、である。ミュオン強度や標的量に依存するが、通常では毎秒約100万回程度の d-t 核融合イベントを計測している。

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、最大核融合サイクル数はミュオン1個あたり約120回が観測された。核融合1回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個のミュオン生成に必要な加速器ビームエネルギーは約5GeV(核融合300回)とされている。

る。現状では、出力エネルギーは入力エネルギーの約40%程度である。次の達成目標は、エネルギー出力が必要エネルギーを超えること(ブレイクイーブン)を実現することである。核融合サイクル率は、(1)dt μ 分子の生成率(生成速度)、(2) μ^- が α に付着して失われる $\alpha\mu$ 損失率、(3) $\alpha\mu$ イオンがその減速過程で付着していた μ^- が乖離して次の μ CF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。 α 粒子に付着したミュオンを100%解離させる事が出来れば、実験で得られたdt μ 分子生成率値で見積ると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、ブレイクイーブンを達成することになる。技術的に難しいが、 D_2 - T_2 標的密度を液体水素密度の5倍に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 ガス分子状態の制御(レーザー励起)、プラズマ D_2 - T_2 標的、 D_2 - T_2 標的への外的条件(電場、磁場、高周波共鳴、衝撃波)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。理化学研究所では系統的に液体と固体の D_2 - T_2 標的の μ CF実験を行ってきたが、 μ CFサイクル数増加には、高温・高圧(1000K・1000気圧程度)状態の D_2 - T_2 標的が適す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 ガスの金属容器壁の透過や水素脆性への課題があるが、是非とも μ CF実験を実現したい。この研究は、d-t核融合エネルギー源や核融合中性子(14 MeV)源へと応用できる可能

図5 2つのミュオン核分裂過程のイメージ図

性がある。

4. ミュオン核分裂

超ウラン元素やマイナーアクチノイドと呼ばれる原子核では自発核分裂準位 (fission isomer 準位) が 2MeV 程度まで下がってくるので、何らかの方法でこのエネルギー準位より高い励起状態を形成できれば自発核分裂を引き起こす事ができる。この方法のひとつとして、ミュオン原子核捕獲反応が考えられる¹⁾。

一つの例として ^{243}Am 原子核を考えてみる。 ^{243}Am 原子核のミュオン軌道に負ミュオンが捕われてミュオン原子を形成すると、2つの過程で核分裂を引き起こす。図5と図6に、ミュオン核分裂過程のイメージ図と ^{243}Am 原子核の同重体の励起準位構造を示す。

一つ目のミュオン核分裂過程は、ミュオン原子内カスケードで発生するミュオン原子 X 線を ^{243}Am 原子核が吸収し励起して、 ^{243}Am 原子核の巨大共鳴状態を形成し、その準位よりエネルギーの低い自発核分裂準位 (2.3 MeV) を経由して核分裂する過程がある。 ^{243}Am の近くに存在する ^{238}U の 2p-1s 間のミュオン原子 X 線のエネルギーは 6.3 MeV で、3d-1s 間の X 線は 9.5 MeV である。もし ^{243}Am 原子核において 6-10MeV エネルギー域に巨大共鳴状態が存在すれば、ミュオン原子 X 線を ^{243}Am 原子核が吸収して、その共鳴状態が形成される。図6に示すように、この 6-10MeV のエネルギーを有する巨大共鳴状態は、自発核分裂準位 (SF: 2.3MeV)、陽子分離準位 (S_p : 4.8MeV)、中性子分離準位 (S_n : 6.4MeV) より高いエネルギーに位置する。この巨大共鳴準位の崩壊に伴い、 ^{243}Am 原子核の自発核分裂、陽子放出、中性子放出のどれかの過程が引き起こされ、 ^{243}Am 原子核が核

変換する。図5の上部にこの反応過程のイメージ図を示す。この核分裂の場合では、ミュオンは 1s 軌道に留まっている状態で、その内側の ^{243}Am 原子核が自発核分裂して2つの核分裂片へと核変換する。自発核分裂に伴い、核分裂中性子が 2-3 個放出される。取り残されたミュオンは、より大きな原子番号をもつ核分裂片の原子核へ捕獲され、その原子核のミュオン原子を形成し、ミュオン原子 X 線を放出する。一般的に核分裂片の原子核は不安定であり、この過程ではミュオンが未知の不安定原子核と形成するミュオン原子から放出するミュオン原子 X 線を観測できる。これはとても興味ある現象であり、ミュオン原子 X 線エネルギーを精密測定すると核分裂片の核種同定ができる。また、 ^{243}Am 原子核が陽子を放出する反応では ^{242}Pu の励起状態が形成され、 ^{242}Pu の 2.2MeV 付近にある自発核分裂準位を經由して核分裂する。この過程では、一旦、 ^{242}Pu のミュオン原子を形成してから核分裂するので、 ^{242}Pu のミュオン原子 X 線が観測できる。さらに、 ^{243}Am 原子核の励起準位から中性子を放出する過程では ^{242}Am の励起状態が形成され、 ^{242}Am の 2.2MeV 付近にある自発核分裂準位を經由して核分裂する。この過程でも、ミュオンと ^{242}Am がミュオン原子を形成したあとに核分裂するので ^{242}Am のミュオン原子 X 線が観測できる。以上に述べた反応過程はすべてミュオン原子を形成するプロセスに伴って進行するので、ミュオン到着時間を基準とすると「即発事象」となる。

二つ目のミュオン核分裂過程は、1s 状態にあるミュオンを ^{243}Am 原子核が核内に捕獲して ^{243}Pu 原子核の 10-20 MeV の励起状態を形成する過程である。この励起状態は ^{243}Pu 原子核の自発核分裂準位 (SF: 1.7 MeV)、

図6 ^{243}Am 原子核の同重体の励起準位構造

中性子分離準位 (S_n : 5.0 MeV), 陽子分離準位 (S_p : 6.9 MeV) より高いエネルギーに位置する。従って, この励起状態を経由して ^{243}Pu 原子核の自発核分裂, 中性子放出, 陽子放出のどれかの過程が引き起こされ, ^{243}Am 原子核が核変換する。

図5の下部にこの反応過程のイメージを示す。自発核分裂過程では, 励起状態にある ^{243}Pu 原子核が核分裂して2つの核分裂片へと核変換し, 核分裂中性子が2-3個放出される。 ^{243}Pu 原子核から陽子を放出する過程では ^{242}Np 原子核の励起状態が形成される。 ^{243}Pu 原子核から中性子を放出する過程では ^{242}Pu の励起状態が形成され, 2.2MeV 近辺にある自発核分裂準位を経由して核分裂する。これまでの説明では陽子放出過程についても記述したが, Am 近傍の原子核ではクーロン障壁が高いため陽子の核外放出確率は無視できるので, 核変換プロセスはミュオン核分裂と中性子放出が支配的となる。これらの過程は1s状態からのミュオン原子核捕獲反応後に生じるので, ミュオン到着時間を基準にすると「遅延事象」となる。

ミュオン核分裂については未知の部分が非常に多く, この研究を進展させる事は重要である。是非, 日本のミュオン施設でミュオン核分裂実験を実現してみたいものである。実験としては, 密封型 ^{243}Am 標的の周囲にゲルマニウム検出器や中性子検出を配置し, ミュオン核分裂に伴う γ 線や中性子を測定する。密封型 ^{243}Am 標的でも, ミュオン運動量を調整してミュオンを内部 ^{243}Am 標的に静止させて実験が可能である。そして, ミュオン核分裂で生成する不安定な放射性核分裂核種を密封標的

内部に留めておける。この実験では, ミュオン原子核分裂過程の即発事象と遅延事象に伴う中性子や γ 線を時間的に分離して測定する。次の実験として, 非密封 ^{243}Am 標的と fission chamber を用いて核分裂片の質量測定を行い, 核分裂片の核種同定をする。ミュオン核分裂が起ると核分裂中性子が2-4個放出することが知られているが, その中性子放出量やエネルギー分布をより正確に測定することが重要となる。私は原子炉物理工学の専門家ではないが, ミュオン核分裂と核分裂中性子を種火として, マイナーアクチノイド(Np, Am, Cm)核種の核変換用未臨界炉が実現できるのではないかと妄想している。

以上, 3つの負ミュオンによる原子核変換について概説したが, 少しでも皆様にお役に立てば幸甚である。

— 参考資料 —

- 1) D.F. Measday, Physic Report 354(2001)243
- 2) ImPACT 藤田プログラム「核変換による高レベル放射性廃棄物の大幅な低減・資源化」<http://www.jst.go.jp/impact/program/08.html>
- 3) K.Ishida et. al., Nuclear Physics B Proc. Suppl.149(2005)348, 松崎禎市郎, 理研ニュース No.332(2009)

著者紹介

松崎 禎市郎 (まつざき・ていいちろう)
国立研究開発法人 理化学研究所
(専門分野/関心分野) ミュオン誘起原子核反応