

プログラム名：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

PM 名： 藤田玲子

プロジェクト名：核反応データ取得及び新核反応制御法

委 託 研 究 開 発

実 施 状 況 報 告 書 (成果)

平成 29 年度

研究開発課題名：

負ミューオン捕獲反応

研究開発機関名：

国立研究開発法人理化学研究所

研究開発責任者：

松崎禎市郎

I 当該年度における計画と成果

1. 当該年度の担当研究開発課題の目標と計画

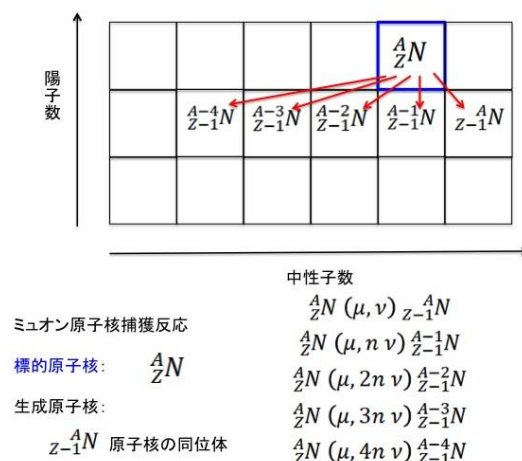
負ミュオンは重い原子核に捕獲されると 100%の確率で捕獲反応が起こり核変換が起こるため、核変換誘発粒子として注目されている。しかし、ミュオン原子核捕獲反応後の生成核種とその生成確率に関する実験データに乏しく、核変換経路をデザインすることができない。この状況を打破するために、負ミュオン原子核捕獲反応実験データを取得し、またこのデータを理論計算と比較して理論基盤を確立し、核変換経路の定量的議論ができるようにする。藤田 PM の掲げる高レベル放射性廃棄物の資源化としての重要核種である ^{107}Pd と ^{93}Zr に注目し、この核の周辺の安定核標的を利用して基礎データを取得する。

負ミュオン実験が実施できる国内の J-PARC や大阪大学の加速器施設および諸外国の施設を利用して研究を進める。二つの測定方法を利用する。一つは、(1) 時間的に連続して供給される負ミュオンを利用してミュオンインビーム分光法で即発事象を観測して反応生成物の同定を行う。もう一つは(2) パルスビームを利用してミュオン放射化学法で遅延事象を観測して反応生成物の同定を行う。実験データ(反応分岐比)を理論計算と比較検討しながらミュオン原子核捕獲反応による長寿命核分裂核種の核変換経路の特定を行う。

2. 当該年度の担当研究開発課題の進捗状況と成果

2-1 進捗状況

ミュオンはパイオンの崩壊で生まれる。湯川秀樹博士が1935年に中間子(パイオン)の存在を予言し、仁科芳雄博士が1937年に宇宙線のなかにミュオンを発見した。高エネルギー加速器で発生させた陽子ビームを炭素原子核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の素粒子で、正ミュオン(μ^+)と負ミュオン(μ^-)があり、その寿命は2.2 マイクロ秒である。ミュオン質量は電子の207倍、陽子の1/9倍であり、物質中で負ミュオンは「重い電子」、正ミュオンは「軽い陽子」として振る舞う。 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、高いミュオン軌道から最低準位の1s軌道までミュオン原子X線等を放出して段階的に遷移する。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確率をもっているが、原子番号が40より大きい原子核では、原子核捕獲確率がほぼ100%となる。原子番号 Z 、質量数 A をもつ原子核 $N(Z, A)$ においてミュオン原子核捕獲が起こると原子核内で負ミュオン(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($p + \mu^- \rightarrow n + \nu$)。大部分のミュオン静止質量エネルギーは ν の運動エネルギーとして使われ、その残りは生成原子核の励起エネルギーとなる。陽子が中性子に変換するので、生成原子核の A は不変だが、 Z が1つ小さい($Z-1$)の原子核の励起状態($N((Z-1), A)^*$)が形成される($\mu^- + N(Z, A) \rightarrow N((Z-1), A)^* + \nu$)。生成した($Z-1$)原子核の励起状態から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。いくつもの中性子を放出する反応がどれくらいの確率で同時に起こるかを示す指標が「反応分岐比」である。下図に示すようにミュオン原子核捕獲反応は Z の原子核を($Z-1$)の原子核の同位体へと核変換する反応であり、一個の μ^- は必ず一個の原子核を核変換する。



長寿命核分裂核種(LLFP)である ^{107}Pd を標的とするミュオン原子核捕獲反応は以下のように表せる。これらの反応がどれくらいの確率(反応分岐比)で起こるかを実験で決定することが最終目標である。この記述が示すように、中性子を放出しない $^{107}\text{Pd} (\mu^-, \nu) ^{107}\text{Rh}$ 反応以外の反応では ^{107}Pd 原子核を安定な Pd や Rh 原子核に核変換できることがわかる。

$^{107}\text{Pd} (\mu^-, \nu) ^{107}\text{Rh}$ (^{107}Rh は半減期 21.7 分で β^- 崩壊し ^{107}Pd (不安定核) に核変換する)

$^{107}\text{Pd} (\mu^-, n \nu) ^{106}\text{Rh}$ (^{106}Rh は半減期 30 秒/2.2 時間で β^- 崩壊し ^{106}Pd (安定核) に核変換する)

$^{107}\text{Pd} (\mu^-, 2n \nu) ^{105}\text{Rh}$ (^{105}Rh は半減期 35.5 時間/45 秒で β^- 崩壊し ^{105}Pd (安定核) に核変換する)

$^{107}\text{Pd} (\mu^-, 3n \nu) ^{104}\text{Rh}$ (^{104}Rh は半減期 42 秒/4.4 分で β^- 崩壊し ^{104}Pd (安定核) に核変換する)

$^{107}\text{Pd} (\mu^-, 4n \nu) ^{103}\text{Rh}$ (^{103}Rh (安定核) に核変換する)

平成 29 年度は、Pd や Zr 原子核を標的としたミュオン原子核捕獲反応の反応分岐比を決定するために、連続状ミュオンビームによる捕獲反応に伴う即発事象の中性子とガンマ線を計測をし、また、パルス状ミュオンビームによる捕獲反応で生成した核種の β 崩壊に伴う遅延事象のガンマ線を計測する実験を実施した。

2-2 成果

(1) 連続状ミュオンビーム実験

大阪大学核物理研究センターの連続状負ミュオンビームを ^{107}Pd 原子核の周囲に位置する 4 種類の安定同位体濃縮 Pd 標的 ($^{104}, ^{105}, ^{106}, ^{110}\text{Pd}$) に照射し、ミュオンインビーム分光法で $^A\text{Pd} (\mu^-, x n \nu) ^A\text{Rh}$ 反応における中性子多重度(反応分岐比)の直接測定を実施した。この実験では 21 台の中性子検出器、2 台のガンマ線 Ge 検出器、7 台のガンマ線 BaF_2 検出器からなる中性子スペクトルメータ”Seamine”を構築し、「ミュオンインビーム分光法」の技術を確認した。実験データから即発中性子のエネルギーとその多重度、即発ガンマ線のエネルギーと時間スペクトル、そして、ミュオン原子 X 線エネルギーが得られることを確認している。

(2) パルス状ミュオンビーム実験

英国の理研-RAL 施設のパルス状負ミュオンビームを 5 種類の同位体濃縮 Pd 標的 ($^{104}, ^{105}, ^{106}, ^{108}, ^{110}\text{Pd}$) に照射し、ミュオン放射化法により遅延事象の反応生成核種を同定し、 $^A\text{Pd} (\mu^-, x n \nu) ^A\text{Rh}$ 反応の反応分岐比を求める実験を実施した。

また、国内の J-PARC ミュオン施設においても同位体濃縮 Pd 標的 ($^{104}, ^{105}, ^{106}, ^{108}, ^{110}\text{Pd}$) と ^{93}Zr の周囲に位置する 5 種類の安定同位体濃縮 Zr 標的 ($^{90}, ^{91}, ^{92}, ^{94}, ^{96}\text{Zr}$) にパルス状負ミュオンビームを照射し、それぞれの負ミュオン原子核捕獲反応の反応分岐比を求める実験を実施した。

さらに、 $^{107}\text{Pd} (\mu^-, x n \nu) ^{107-x}\text{Rh}$ 反応の反応分岐比を決定するために、 ^{107}Pd を 15.3% 含む Pd 標的のミュオン放射化法実験を実施した。この実験データから安定 Pd 原子核標的の実験データを差し引くことで、 $^{107}\text{Pd} (\mu^-, x n \nu) ^{107-x}\text{Rh}$ 反応 の反応分岐比を最終的に決定できる。

この研究課題を通して「ミュオン放射化法」の実験手法を確立できた。実験データから得られる反応分岐比は複合核統計モデルとの比較検討に適用可能になった。

2-3 新たな課題など

特に大きな課題は発生していない。この実験では新規の実験手法として全ての検出器からの出力信号をフラッシュ ADC で取得しているため実験データの蓄積量が膨大となった。フラッシュ ADC (Digital to Analog Converter) では検出器からの出力信号波形全体を取得してデータ化するので蓄積容量が大きくなる。今後他の LLFP やその周辺核種を対象とする測定では、大量実験データの高効率解析システムの展開は重要となる。

3. アウトリーチ活動報告

2017 年度についてはありません。