

ディビジョン番号	17
ディビジョン名	資源・エネルギー・地球化学・核化学・放射化学

大項目	3. 核化学・放射化学
中項目	3-1. 核化学・放射化学
小項目	3-1-9. エキゾチックアトムの化学

<p>概要（200字以内）</p> <p>通常の原子は正の原子核と負の電子からなるが、正と負の別の粒子からも原子系は生成される。この内、負のミュオンやパイ中間子が電子の代わりに入って形成される人工原子は、中間子(素粒子)原子と呼ばれ、実際に生成可能である。これらの原子の形成過程と新しい化学種としての可能性が化学的観点から研究されている。</p>	
<p>現状と最前線</p>	
<p>1. エキゾチックアトムとは</p> <p>通常の原子は正の原子核と負の電子からなるが、図に示すように、正と負の別の粒子からも原子系は生成される。このうち、陽電子と電子からなるポジトロニウム (Ps) や正のミュオンに電子が回って出来るミュオニウム (Mu) などは、すでに物性研究や化学反応の研究などにユニークなプローブとして広く応用されている。これら以外で実際に生成可能な人工原子として、負のミュオンやパイ中間子が電子の代わりに入って形成される中間子(素粒子)原子がある。現在のところ1個の粒子が入った原子しか作るのは出来ないため、真の意味での中間子原子は水素原子のみであるが、周期表全ての原子について1s電子よりはるかに内側に1個のミュオンやパイ中間子が回っている奇妙な人工原子であるミュオン原子やパイ中間子原子を生成することが出来る。</p> <p>これらの原子は、物質中で負のミュオンやパイ中間子が静止し、周りの原子のクーロン場に捕まることで形成される。その後、その粒子の原子軌道をカスケードダウンし、原子核の近くにまで達することになるが、遷移のエネルギーは粒子の質量に比例するため、電子の200倍以上の質量が有るこれらの粒子の特性X線は200倍程度高いエネルギーを持つ特徴的なものとなり、容易に原子の形成が確認できる。</p>	<p>図. いろいろなエキゾチックアトム</p>

## 2. 日本の核放射化学グループによるこれまでの研究成果

第2世代物質系の化学展開とミュオンやパイ中間子の物質研究への新たな応用を最終的ゴールとして、中間子原子の形成機構と物質中における挙動を化学的観点から解明することを目的として、研究が進められている。分子への捕獲過程は、単にZに依存するのではなく、分子の電子分布や構造を反映する。また、水素に捕獲された場合は、擬中性子のように物質中を動き、より重い原子に衝突するとパイ中間子が転移する現象が起こる。これらのメカニズムを、種々の分子(もしくは分子の混合物)への捕獲率の変化を測定し、分子構造等との関連から調べ、ある程度解明されてきた[1]。

特に、D化したアルコールとカルボン酸を利用して、特定部位の水素起源の中間子水素原子の挙動を初めて観測し、元の水素の化学状態により中間子水素原子の転移速度が変化することを見出した[2]。また、これ以外にも多くの化学効果が観測されており、これらの実験結果を総合的に説明できる捕獲モデルとして、これまでの巨大中間子分子モデルに転移過程を結合した新しいモデルを提唱された。このような中間子原子・分子現象は、新しい元素分析法や水素状態分析のプローブなどの新たな応用も期待される。

## 3. 現状と将来

ミュオン原子はその長い寿命から、化学種として利用可能な唯一のエキゾチックアトムと考えられる。しかしながら、ミュオン原子の化学を実現するには、ある程度理解が進んだ形成過程に加え、形成後の原子状態の動的な機構を理解する必要がある。そこで、パイ中間子原子およびミュオン原子について、その形成後に放出される電子の特性エックス線の測定により、原子内殻過程が詳しく調べられつつある。特に原子番号 70 番以前の比較的軽い元素領域について初めて電子の特性エックス線のエネルギーシフトが観測され、理論計算との比較を行うことでエキゾチックアトム形成後の電子状態に関する知見を得た。さらに、ミュオン原子による化学反応の検出を目指した予備的実験も試みられている。将来的には、次世代加速器による強力なミュオンビームを使って、ミュオン原子をビームとして取り出し、その化学反応を調べるなど本格的に化学種としての可能性が探求されるであろう。

参考文献

[1] A. Shinohara, "Formation Process of Pionic Atoms and their Behavior in Material", J. Nucl. Radiochem. Sic., 1(1), 33 (2000).

[2] A. Shinohara, et al., "Selective Measurements of Pion Transfer Process in Alcohols and Carboxylic Acids Using Deuterated Compounds", Phys. Rev. Lett., **76(14)**, 2460 (1996).

### 将来予測と方向性

- ・ 5年後までに解決・実現が望まれる課題  
ミュオンやパイオンの分子への捕獲機構の微視的な理解  
ミュオンX線測定による物体分析法の開発、応用
- ・ 10年後までに解決・実現が望まれる課題  
ミュオン原子ビームの生成  
ミュオン原子の化学反応

### キーワード

ミュオン、ミュオン原子、パイ中間子原子、エキゾチックアトム、捕獲過程、化学効果

(執筆者：篠原厚)