



「超重元素の核物理・核化学」ワークショップ 日本原子力研究所 先端基礎研究センター 主催

日本原子力研究所 先端基礎研究センター

池添 博* ikezoe@popsvr.tokai.jaeri.go.jp

永目 諭一郎 nagame@popsvr.tokai.jaeri.go.jp

西中 一朗 ichiro@popsvr.tokai.jaeri.go.jp

西尾 勝久* nishio@popsvr.tokai.jaeri.go.jp

1. はじめに

原子核の液滴モデルによると、原子核の核分裂障壁は原子番号 Z が約 106 番近傍で消滅し、これ以上大きな原子核は存在しないとされる。しかし、殻効果によって原子核は安定化され、 $Z=114\sim 126$ 領域でも測定可能な寿命をもって存在することが期待されている。この領域は、鉛 ($Z=82$) の次の魔法数に相当すると考えられている。このような原子核を合成し、 α 崩壊や自発核分裂など崩壊の性質を測定することは、原子核に対する理解を深めるうえで重要である。超重元素を合成する取り組みが独、露、米、仏国等で行われており、日本においては理研において $Z=111$ の原子核の合成に成功している。超重元素は重イオン融合反応によって合成されるが、その断面積は極めて小さく（ピコ・バーン程度）、反応のメカニズムを理解することが効率の良い合成に重要である。

一方、超重元素領域では、相対論効果によって元素の化学的性質を決める外殻電子の波動関数が増加し、族で特徴づけられる化学的性質からずれることが予測され、これをうらづける実験結果が報告されはじめている。これらは、まれにしか合成することのできない超重核を 1 イベントずつ化学分析にかけることから「単一原子化学」とよばれている。

日本原子力研究所先端基礎研究センターにおいては、タンデム-ブースター加速器を用いて重イオン融合反応のメカニズムを解明し、超重元素の合成に有利な反応を探る研究を行っている。また、 ^{248}Cm 等のアクチノイドターゲットを利用できる施設をいかし、Rf や Db の化学的性質を調べてきた。重・超重元素領域において、研究の現状を理解し、将来への展望をはかることを目的として、2003 年 2 月 27 (木)、28 日 (金) の両日、日本原子力研究所先端基礎研究センター交流棟にてワークショップを開催した。

* 2003 年 4 月 1 日より物質科学研究部

本ワークショップでは、原研と高エネルギー加速器研究機構の間で進められている不安定核ビームプロジェクト、さらに大強度陽子加速器プロジェクトにおける核変換実験施設計画に関する講演を企画した。また、重核に特有の崩壊様式である核分裂についてのセッションも設けた。

会議には、日本の大学及び原研を含む研究機関から大学院生・学部学生 11 人を含む 46 名が参加した。さらに、ドイツとハンガリーの研究者を招いた。

表 1 にプログラムを示す。ワークショップのまとめとして 2 日目の最後に、東京都立大学名誉教授 中原弘道氏による研究会の **Concluding Remarks** が述べられた。日本でも超重元素の合成実験と単一原子化学が進展していること、今後も世界で重要な役割を担っていく必要があると述べられた。

以下、講演順に内容を記す。

2. 講演の概要

セッション：超重元素 (I)

- ・最初の講演では、理化学研究所における超重元素合成実験が報告された。 $^{64}\text{Ni} + ^{208}\text{Pb}$ 反応により原子核 $^{271}[110]$ が 14 イベント合成された事、さらに $^{64}\text{Ni} + ^{209}\text{Bi}$ による $^{272}[111]$ 合成の確認など新しいデータが報告された。ワークショップの最中であっても $Z=111$ の合成実験が行われており、最新のデータが披露された。得られた断面積励起関数は、ピーク値においてドイツ重イオン研究所のものよりわずかに高エネルギー側にシフトしていた。理研で行なわれているように、ビームエネルギーを正確に決定することが重要である
- ・変形したターゲット (^{154}Sm など) を用いた融合反応断面積の計算において、瞬間トンネル近似を用いた計算が、厳密なチャンネル結合法による計算と比較された。融合障壁より高いエネルギー領域ではほぼよく近似される。融合障壁より低い衝突エネルギーにおいても、 $^{16}\text{O} + ^{154}\text{Sm}$ では厳密な計算と 10~20% 内で一致する。一致の度合いは、系が重くなると悪くなる。
- ・原研タンデムで行われた融合反応実験 $^{82}\text{Se} + ^{138}\text{Ba}$ と $^{82}\text{Se} + ^{134}\text{Ba}$ において、後者は融合反応が大きく阻害されているのに対し、前者はまったく阻害されていなかった。これは、 ^{138}Ba が中性子魔法数 82 を有しており、この殻効果が融合反応に有利に働いたと考えられる。
- ・分子動力学計算によって、超重元素を合成する新しい反応が提案された。核子あたり約 10 MeV の比較的高エネルギーで重い原子核 (たとえば U や Pb) 同士を衝突させ、質量数が目指す超重核の 2 倍程度の合成系をつくる。この合成系はおおよそ 10^{-21} 秒後に分裂するが、質量非対称な核分裂片の中に超重元素が含まれる。
- ・超重元素合成の断面積は、融合する確率と、核分裂で壊れることなく軽粒子を放出し

て生き残る確率で決まる。生き残る確率は統計モデルによってよく評価できる。一方、融合確率を計算するため障壁透過モデルを超重元素領域に適用すると、計算値は実験値を過大に評価する。これを克服するため、原子核が接触してから合成するまでの過程を散逸動力学によって計算し、融合の阻害が断面積評価に取り入れられた。

- ・従来の融合断面積の計算には衝突する原子核間の融合障壁の形状が必要で、これは融合障壁より高い衝突エネルギーでの実験値に合わせるよう調節・決定されている。それゆえ、この方法はデータの少ない重イオン間の反応、たとえば超重元素合成を目的とする反応には使えない。ここで提案された2重たみこみポテンシャルによる融合断面積の計算で、未知の反応に対する融合断面積の評価が期待できる。

セッション：核化学 (I, II)

- ・超アクチノイド元素の化学的性質を予測するための相対論的な電子状態計算法が講演された。筆者らの相対論密度汎関数法は、全電子を内殻からすべて計算するもので、有効内殻ポテンシャル法、すなわち内殻の電子状態をポテンシャルとして置き換えてしまう方法と異なる。本講演では、計算にスピン状態が取り入れられた。この結果、 Ag_2 , Au_2 , Pt_2 の結合距離、結合エネルギーの計算値は、実験値を良く再現した。
- ・大阪大学における人工原子研究が紹介された。(1) 原研との共同研究で、ノーベリウム $\text{No}(3+)$ のイオン半径の測定から相対論効果を調べる。(2) RI ビームを利用した物性研究。理研において、 ^{19}O 不安定核ビームを試料に打ち込み、 γ 線摂動角相関による実験データが示された。
- ・理化学研究所において、単一原子化学の実験準備が進められている。超重元素の合成・分離に使われている気体充填型反跳分離装置にガスジェット輸送装置を結合することで、超アクチノイドの化学挙動を調べる事が検討されている。Z=112 元素の揮発性を調べることを目標に立てている。
- ・原研タンデム加速器は、現在、日本において唯一超アクチノイド元素の化学実験ができる施設である。ここでの単一原子化学の研究が紹介された。液相化学として、(1) Rf (Z=104) の HCl 及び HNO_3 中での化学挙動は、第4族に位置づけられること、(2) 5族の性質が予測される Db(Z=105) の HF 系の陰イオン交換挙動は、5族元素 Ta 及び Nb そして擬5族の Pa と異なることが示された。液相に加え、気相化学実験がスタートした。

セッション：加速器施設・核変換・RI ビーム

- ・大強度陽子加速器プロジェクトにおける核変換研究計画が紹介された。核的設計に必要な中性子核データが満足いくものでないことが指摘された。最も重要な核種は ^{237}Np , ^{241}Am , ^{243}Am で、エネルギー範囲として中性子捕獲反応で 1 keV~1 MeV、核分裂反応

で数百 keV～数 MeV が重要である。また、核破碎中性子の数、エネルギー分布、角度分布は、中性子源強度及び高速中性子を遮蔽するためのデータとして重要である。

- ・ 原研と KEK との間で進めている RNB (Radioactive Nuclear Beam) 施設の紹介がされた。施設の特徴はタンデムで加速した陽子をウランターゲットに当て、核分裂片としての中性子過剰核をつくり、これを分離・加速することである。既存の装置で 1.1 MeV/核子までの加速からスタートし、ブースターを使った 5 MeV/核子までの加速を目標とする。重要な技術として、電荷数を増加させる装置 (チャージブリーダ) の開発成果が示された。この施設によって、原子核や材料・物性などの分野で新しい研究テーマがスタートする。
- ・ 中性子ハローはドリップライン近くの不安定核だけでなく、励起準位に上がった中性子軌道にもみられる。 ^{13}C の第 1 励起準位、 ^{12}B の第 2、第 3 励起準位に入った中性子がハローを示すことが $^{12}\text{C}(\text{d,p})$ と $^{11}\text{B}(\text{d,p})$ の反応断面積から示された。また、(d,p) 反応断面積から中性子捕獲(n, γ)断面積が導出できることが、 ^{12}C ターゲットで示された。

セッション：核分裂

- ・ ハンガリー原子核研究所の Krasznahorkay 氏により ^{234}U , ^{236}U 原子核の超変形状態に関する実験結果が紹介された。形状異性体で知られる原子核は、核分裂ポテンシャル上の第 2 極小値としての準安定状態に存在する。これに対し、超変形状態は、さらに変形の大きな第 3 の極小値に存在する。Krasznahorkay 氏らは、この上に現れる振動・回転準位を、共鳴トンネル核分裂断面積のスペクトルとして観測し、慣性モーメントを決定した。この値は、理論的に予測される原子核の超変形状態に相当した。
- ・ 原子核の初期の振動運動が、核分裂過程にどのように影響するかを調べる実験が報告された。 $^{239}\text{Pu}(\text{d,pf})$ 反応において、 ^{240}Pu の形状異性体上に生成される β 振動状態を経由したときの核分裂質量数分布が求められた。この分布は $^{239}\text{Pu}(\text{n}_0, \text{f})$ と有意な変化を持たなかった。初期の β 振動状態が質量数分布に与える効果は少なかった。
- ・ フェルミウム 258 の自発核分裂は、アクチノイド原子核とは対照的な、質量対称の分布を示すことが知られている。この核分裂の経路 (モード) が計算で示された。計算ではまず、変形に対するポテンシャル面を構成し、系の時間発展を Langevin 方程式で解いた。この結果(1) 質量対称で形状がコンパクトなモード、(2) 質量非対称モード、(3) 質量対称で形状が長いモード、が見出された。(2) はポテンシャル構造に現れるものでなく、動力学的効果で初めて現れるものである。

セッション：超重元素 (II)

- ・ 原子核質量を決定する KUTY 公式を用いて α 崩壊と自発核分裂寿命が計算され、超重元素領域のそれぞれの原子核において、どちらの崩壊が支配的かが議論された。Dubna

で報告された α 崩壊連鎖とこれに続く自発核分裂は、計算で示された領域と一致した。また、超重元素を合成する重イオン融合反応の Q 値は、実験上極めて重要であるが、異なる質量公式間で 4 MeV の違いがあり、反応断面積励起関数の幅程度の不一致をもたらすことが指摘された。

- ・原研タンデム-ブースター加速器と反跳生成核分離装置を用いての、融合反応実験のレビューが行なわれた。変形したターゲットをつかった反応 $^{64}\text{Ni}+^{154}\text{Sm}$ 、 $^{76}\text{Ge}+^{150}\text{Nd}$ において、入射イオン (^{64}Ni , ^{76}Ge) がターゲット核の先端部 (長軸側) にぶつかる場合、融合が阻害されるが、胴部分 (短軸側) での衝突では融合が阻害され難いことが報告された。現在、 $^{82}\text{Se}+^{176}\text{Yb}$ や $^{64}\text{Ni}+^{198}\text{Pt}$ の実験が進行中である。

文責 西尾 勝久

表 1 原研先端基礎研究会「超重元素の核物理・核化学」プログラム

◆◆◆ 2月27日 (木) 9:10-20:00 ◆◆◆

9:10- 9:15 開会挨拶 岩本 昭 (原研 東海研究所 副所長)

— 超重元素 (I) — 座長 池添 博 (原研 先端基礎研究センター)

9:15- 9:55 「理研における超重元素合成実験」

森田 浩介 (理研)

9:55-10:35 「超重核生成反応断面積の計算に向けて」

滝川 昇 (東北大学)

10:50-11:20 「重イオン融合反応における殻効果」

佐藤 健一郎 (原研 先端基礎研究センター)

11:20-12:00 「Dynamics of Superheavy Composite Systems」

丸山 敏毅 (原研 先端基礎研究センター)

13:10-13:50 「超重元素合成反応の理論の現状と問題点」

阿部 恭久 (京都大 基礎物理学研究所)

13:50-14:30 「二重たたみ込みポテンシャルを用いた重イオン核融合反応断面積の計算」 武樋 孝幸 (東北大学)

— 核化学 (I) — 座長 工藤 久昭 (新潟大学)

14:30-15:20 「The status of atomic and molecular calculations in the superheavy element

region」 B. Fricke (ドイツ Kassel 大学)

—核化学 (II) — 座長 横山 明彦 (金沢大学)

15:40–16:20 「人工原子の化学 (阪大における研究計画)」

篠原 厚 (大阪大学)

16:20–17:00 「理研における重元素化学研究—現状と今後の計画—」

羽場 宏光 (理研)

17:00–17:40 「原研における超アクチノイド元素の化学研究について」

塚田 和明 (原研 先端基礎研究センター)

◆◆◆ 2月28日 (金) 9:00–15:45 ◆◆◆

—加速器施設・核変換・RI ビーム— 座長 竹内 末広 (原研 加速器管理室)

9:00–9:40 「大強度陽子加速器プロジェクトにおける核変換実験施設計画」

大井川 宏之 (原研 中性子科学研究センター)

9:40–10:20 「KJ-RNB 施設の概要」

宮武 宇也 (高エネルギー加速器研究機構)

10:20–10:50 「Neutron halo in excitation states of ^{12}B and ^{13}C 」

林 承鍵 (中国原子能科学研究院)

—核分裂— 座長 永目 諭一郎 (原研 先端基礎研究センター)

11:10–12:00 「Exotic nuclear shapes and clusterization in the actinide region」

A. Krasznahorkay (ハンガリー原子核研究所)

13:00–13:30 「 β 振動状態を経由する $^{239}\text{Pu}(d, pf)$ 反応の核分裂質量数分布」

西尾 勝久 (原研 先端基礎研究センター)

13:30–14:00 「フェルミウム同位体における核分裂モードの動力学計算」

浅野 大雅 (甲南大学)

—超重元素 (II) — 座長 滝川 昇 (東北大学)

14:20–15:00 「原子核質量公式から見た超重元素の合成と崩壊」

小浦 寛之 (理研/早大理工総合研究センター)

15:00–15:40 「JAERI-RMS を用いた変形核による重イオン融合反応機構の研究」

光岡 真一 (原研 先端基礎研究センター)

15:40–15:45 閉会挨拶 中原 弘道 (東京都立大学)