

# 103番元素ローレンシウムの第一イオン化エネルギー測定 Measurement of the first ionization potential of lawrencium, element 103

佐藤 哲也 重元素核科学研究グループ  
Tetsuya K. Sato Research Group for Heavy Element Nuclear Science

現在、地球上では118種類の元素が確認されている。つい最近、113, 115, 117, そして118番元素の元素名が提案された。なかでも113番元素は、初めて日本に命名権が与えられた元素としてにわかに注目を集めている。元素周期表を眺めてみると、名実共に第7周期が完成され、我々はいよいよ第8周期に踏み出そうとしていることがわかる。

このような原子番号が大きい領域の元素を、超重元素と呼ぶ。重い元素領域では、原子核に近い軌道を運動する電子の速さが光速に近づいて、相対論効果による影響を受けるために、最も外側の電子（価電子）軌道までが変化する。価電子軌道は化学的性質を特徴付ける軌道であるため、元素の化学的性質が周期表からの予想と異なる可能性があることが指摘されている [1]。

このような超重元素のひとつ、アクチノイド系列の末端に位置する103番元素ローレンシウム (Lr) は、半世紀近く前から“周期性から逸脱する元素”の候補として注目されていた。しかしながら、加速器を用いた重イオン核融合反応でしか生成できず、しかも合成された同位体はすべて短寿命であるという実験上の制約から、その物理的・化学的性質はほとんど明らかになっていない。実際、これまでに幾度か化学的挙動が調べられたものの、Lrがアクチノイド末端の元素として振舞うかどうかすら実験的に確かめられたことはなかった。

今回、我々のグループは、高温の金属表面で起こる表面電離過程というイオン化プロセスを応用して、Lrの第一イオン化エネルギー (IP<sub>1</sub>) を求めることに成功した [2]。原子の価電子の結合エネルギーを直接反映するIP<sub>1</sub>を調べることで、電子配置に関する情報を得ることができる。求められたLrのIP<sub>1</sub>は4.76 ± 0.8 eVであり、現在知られているなかで5番目に低いものだった。原子番号に対するアクチノイドおよびランタノイドのIP<sub>1</sub>の変化を図1に示す。ランタノイドでは、テルビウム (Tb) からイッテルビウム (Yb) まで単調にIP<sub>1</sub>が増加し、ルテチウム (Lu) で急激に小さくなることが知られている。今回Lrが非常に小さいIP<sub>1</sub>をもつことが示されたことで、Lrでアクチノイドが終わることがはじめて実験的に確かめられた。一方、相対論効果を考慮した最新の理論計算との比較をおこなったところ、本実験値は、Lrの電子配置が周期表からの予想とは異なることを強く示唆した。

原子番号が100を超える重い元素領域で、直接的な原子の情報が求められるのはこれが初めてのことであり、本成果は、超重元素の原子の性質を調べるといった新たな領域を拓くものとしてNature誌に掲載され、表紙を飾ることとなった。

Currently, 118 elements are confirmed on the earth. Just recently, element names of 113, 115, 117, and 118 have been suggested. Among them, element 113 is attracting attention as an element for which

naming rights are given to Japanese team for the first time. Looking at the Periodic Table of the Elements, we can see that the seventh period is completed for both in name and reality, and we are finally about to take a step forward into the eighth period.

An element in such a region having a large atomic number is called a superheavy element. In the heavy element region, the velocity of an electron moving in an orbital close to the nucleus approaches the speed of light and the electron is influenced by the relativistic effect, so that the outermost electron (valence) orbital could change. It is pointed out that since the valence electronic orbital would characterize the chemical properties, the chemical properties of the element may differ from the expectations from the periodic table [1].

Lawrencium (Lr), one of such superheavy elements, element 103 located at the end of the actinide series, has been drawing attention as a candidate for "element deviating from periodicity" for nearly half a century. However, due to experimental restrictions that only the heavy ion nuclear fusion reaction using an accelerator can produce, and all the synthesized isotopes are short-lived, its physical and chemical properties are hardly elucidated. Actually, although chemical behavior has been investigated several times so far, it has never been confirmed experimentally even whether Lr behaves as the last element of the actinide series.

In this work, our group has been successfully measured the first ionization energy (IP<sub>1</sub>) of Lr by applying an ionization phenomena called surface ionization process occurring on a metal surface at high temperature [2]. Precise and accurate experimental determination of IP<sub>1</sub> gives information on the binding energy of valence electrons. Obtained IP<sub>1</sub> value of Lr was 4.76 ± 0.8 eV, which was the fifth lowest value among known elements. Changes in IP<sub>1</sub> of actinides and lanthanides with atomic numbers are shown in Figure 1. It is known that IP<sub>1</sub> value of lanthanide



ところで、現在の周期表では、ランタノイドとアクチノイドはそれぞれ Lu と Lr で終わり、それぞれ 3 族元素であるスカンジウム (Sc)、イットリウム (Y) の真下に置かれ、別表に記載されている (図 2)。しかし、かねてより Lu と Lr をランタノイド、アクチノイドと区別し、Sc、Y とともに 3 族元素とすべきという指摘がある。今回、本成果がきっかけとなって IUPAC (国際純正・応用化学連合) は、Lu と Lr の周期表上の位置について議論を開始した [3]。既にワーキンググループが立ち上げられ、議論が進められている。注視して見守りたい。

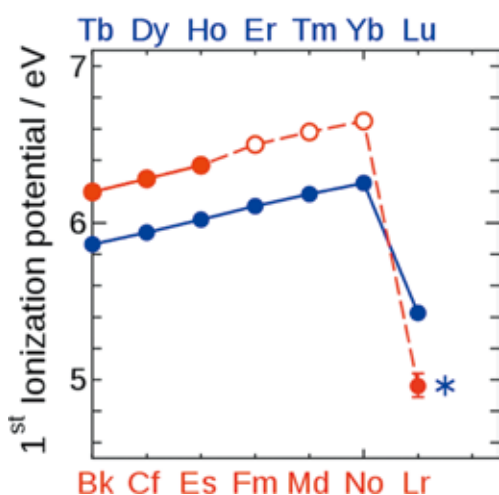


図 1. 原子番号に対するアクチノイドおよびランタノイドの第一イオン化エネルギー (IP<sub>1</sub>) の変化 (●, ●: 実験値, ○: 推定値, \*: 理論値 [2])

Fig.1 The first ionization potential of heavy lanthanides (●) and actinides including our present results for Lr (●: experimental, ○ estimated value, \*: theoretical value for Lr [2])



monotonically increases from terbium (Tb) to ytterbium (Yb) and sharply decreases at lutetium (Lu). We have experimentally shown that the IP1 value of Lr is distinctly lower than that of other actinide elements, this means it has been experimentally confirmed for the first time that actinide is terminated with Lr.

On the other hand, by comparison between the experimental value and that calculated with a state-of-the-art relativistic calculation, this experimental result strongly suggested that the electronic configuration of Lr is different from the prediction from the periodic table.

It is the first time that direct information of atom property was provided in a heavy element region whose atomic number is greater than 100. This work was published from Nature and was on its cover page for the reason that it opens up new perspectives on determining basic atomic properties of the superheavy elements.

By the way, in the today's periodic table, the lanthanide and the actinide series end with Lu and Lr respectively. These series are placed directly under the group 3 elements scandium (Sc) and yttrium (Y) and are listed separately from main table (Figure 2). However, it has been pointed out that Lu and Lr should be distinguished from lanthanides and actinides, and put together with Sc and Y as Group 3 elements. The achievement of this work triggered discussion on this issue again. IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) started discussing the position on the periodic table of Lu and Lr [3]. A working group has already been set up and debate is under way.

## 参考文献 References

- [1] P. Pyykkö, Chem. Rev. **88**, 563 (1988) .
- [2] T. K. Sato et al. Nature, **520**, 209 (2015) .
- [3] E. Scherri, Chem. International, March-April 22-23 (2016) .

図 2. 元素周期表。第一イオン化エネルギーの大きさが、バーの高さで示されている。

Fig.2 Periodic Table of the Elements (Ln: Lanthanides, An: Actinides). Bar sizes reflect the energies of the first ionization potentials. The result for Lr in our first time measurement is shown in red.