

99番元素アインスタイニウム Einsteinium: Element 99

西尾 勝久 重元素核科学研究グループ
Katsuhisa Nishio Research Group for Heavy Element Nuclear Science



概要

重元素核科学研究グループは、米国オークリッジ国立研究所（米国エネルギー省 DOE 管轄、以下 ORNL）との協力で、アインスタイニウム (Es) 0.5 μ g を特別に入手した。Es の抽出は ORNL でも 2003 年以降のこととなり、日本がこれを入手するのは初めてである。ここでは入手の経緯と Es を用いた研究について簡単に紹介する。

1. アインスタイニウムとその生成方法

アインスタイニウム（原子番号 $Z = 99$ 、元素記号 Es）は、1952 年に水爆実験の放射性降下物の中から発見された。現在では、研究用原子炉内での材料照射で生成される。今回利用するアインスタイニウム 254 (^{254}Es 、半減期 276 日) は、ORNL のアイソトープ生成用原子炉 (High Flux Isotope Reactor, HFIR) で生成された。HFIR は中性子線源として利用されるカリホルニウム 252 (^{252}Cf 、 $Z = 98$)などを生成しているが、今回の ^{254}Es は、この ^{252}Cf を生成する際の副産物として図 1 のような経路をたどり生成された。密封容器に入れられた数十 g の Am/Cm 試料を炉心の中心に入れ、一か月単位の照射を何回か繰り返すことによってようやく ^{254}Es が生成される。

今回の運転も ^{252}Cf を生成するのが目的で、運転当初、Es を抽出する計画はなかった。一方、計算によれば、 ^{254}Es が 1 μ g (1g の 100 万分の 1) 生成されることが

Abstract

The research group for heavy element nuclear science has obtained an einsteinium isotope (half micro-gram) under collaboration with Oak Ridge National Laboratory, USA (ORNL, under the jurisdiction of DOE). After the production of Es, Einsteinium extraction was recently performed at ORNL, which has not been performed for 14 years since 2003. The circumstances under which Es was obtained and our research plans for Es are briefly introduced in this paper.

1. Einsteinium and its production

Einsteinium (Es, atomic number $Z = 99$) was discovered in 1952 from the radioactive fallout produced by the hydrogen bomb. Nowadays, this isotope can be produced by irradiating seed nuclides with neutrons in a nuclear reactor. Einsteinium-254 (^{254}Es , half-life = 276 days), obtained recently by JAEA, was generated in the High Flux Isotope Reactor (HFIR) at ORNL. HFIR is used to produce actinide isotopes such as Californium-252 (^{252}Cf , $Z = 98$) as well as a neutron source. In the present case, ^{254}Es was produced as a by-product of ^{252}Cf . The formation paths from the seed to ^{254}Es is shown in Fig. 1. Several tens of grams of americium (Am, $Z = 95$) and curium (Cm, $Z = 96$) were enclosed in an air-tight container, which

見込まれた。そこで当グループは ORNL/DOE と交渉を重ね、計画外であった Es 抽出作業を実現した。“どうして入手できるようになったのか？”とよく聞かれるが、背景を簡単に述べたい。

2. 国際協力・ユニークな研究・技術の継承

Es を入手するためには、まず原子力機構が開発し、ここでしかできないユニークな実験技術を有すること、しかも $0.1 \mu\text{g}$ 程度の試料で実現できることが重要であった。さらに、Es を投資することで期待される結果が議論された。具体的には、タンDEM 加速器からの重イオンビームを用いた核分裂研究である。あわせて、SPring-8 の放射光を利用し、物質科学研究センターが進める研究に活用することを JAEA 内で議論した。

(1) ORNL との国際協力

ORNL との協力研究は、先端基礎研究センターの黎明研究制度から始まったもので、核分裂とは異なるが、同じく JAEA タンDEM 加速器を用いた研究を進めていた。一方、当グループは核分裂に関する新たな測定方法を開発し、ネプツニウムやキュリウムなど様々なアクチノイド同位体の新しい核分裂データを次々に取得していた [1-3]。ORNL とは広く核物理に関する様々な議論を行い、 ^{254}Es を標的試料として用いればかつてユニークな核分裂様式が発見されたフェルミウム (Fm , $Z = 100$) 領域の核分裂を調べることができるという結論を得て、最終的に今回の入手へと至った。すなわち、このような取り組みがなければ ^{254}Es の入手の実現はなかった。

(2) 技術の継承

was then irradiated by neutrons in the reactor core to accumulate ^{254}Es .

ORNL had no plan to extract einsteinium during ^{252}Cf production. However, our calculation estimated the produced amount of ^{254}Es to reach one micro-gram during the irradiation. Thus, our group negotiated with ORNL/DOE to allow the extraction of the produced Es for our experimental studies, which was then finally realized.

2. International collaboration, Unique Research Program, and Succession of Technical Skills

For the negotiation to obtain ^{254}Es , it was important to be able to conduct unique experiments with original techniques developed by JAEA and to realize such experiments with only approximately $0.1 \mu\text{g}$ of ^{254}Es . We concluded that, in-beam fission measurements, using heavy-ion beams from the JAEA tandem accelerator is possible. Furthermore, EXAFS measurement of hydrated Es complex at the SPring-8 synchrotron radiation facility using a setup developed at JAEA was contemplated.

(1) International Collaboration with ORNL

Based on the Reimei research program, we have been collaborating with ORNL for nuclear physics programs at the JAEA tandem facility. This relationship created a wide discussion on potential collaborative nuclear physics experiments, including fission physics. Our group developed a fission-measurement setup that allowed us to obtain new data for various actinide isotopes such as neptunium and curium [1-3]. The discussion concluded that ^{254}Es , which will be produced

冒頭でも述べたが、今回の Es の抽出は ORNL にとっても 14 年ぶりであった。Es はマクロ量の試料を用いる事ができる究極に重い元素である。ORNL からは、この取り扱い技術を継承させる意義があると伝えられており、実際にこの作業を行うため彼らは技術者を 1 年間雇用している。当グループも化学分離技術を有しているが、その技術がなければ実験戦略が立たず、本プログラムは成立しない。半減期の短い ^{254}Es はわずか 2 ヶ月で 14% が壊変して他の元素になってしまうため、高純度 ^{254}Es を用いた実験の前には分離精製が必須となるからである。

3. まとめ

アインスタイニウム の話題は、分野を超え、重い元素の物理や化学への興味を再び駆り立てることになった。フェルミウムで起こる核分裂様式の変化、アインスタイニウムの水和状態など、ここで得られる知見が、各分野における重元素科学の理解や発展につながることを期待したい。

参考文献 References

- [1] R. Léguillon et al., Phys. Lett. B, 761, 125 (2016).
- [2] K. Hirose et al., Phys. Rev. Lett. 119, 222501 (2017).
- [3] A.N. Andreyev, K. Nishio, K.-H. Schmidt, Rep. on Prog. Phys. 81, 016301 (2018).

in the HFIR campaign in 2016–2017, would offer a unique opportunity to study the fission of fermium ($Z = 100$) isotopes, in which case a sudden change in the fission-fragment mass distributions was found for neutron-rich isotopes. The unique setup and novel technique developed at JAEA was essential to create the einsteinium program.

(2) Succession of Technical Skills

As mentioned before, Es was extracted after an interval of 14 years at ORNL. Es is the heaviest element among those of which a macro amount is available for chemical studies. In ORNL, it was considered an important subject to hand down the necessary skills of chemical separation and purify such heavy actinide elements to the next generation, and thus, they employed technical staff to carry out the separation. Our group, too, has the skills to chemically separate actinide elements. Chemical purification of ^{254}Es is necessary at intervals of 1 or 2 months for use in experiments using highly purified ^{254}Es ; 14% of ^{254}Es decays to its daughter nuclide only in 2 months. Thus, this technique is essentially required to perform all our experiments using purified ^{254}Es .

3. Summary

The production of the rare ^{254}Es reinvigorated a great interest in the physics and chemistry of the heaviest elements and nuclei. In nuclear physics, this finding provides us an opportunity to attack the open question about fission in the fermium region. From the EXAFS measurement, we can obtain information on hydrated complexes of Es, such as hydrated radius, for the first time. I hope that the program can help promote research activities related to the heaviest actinides.

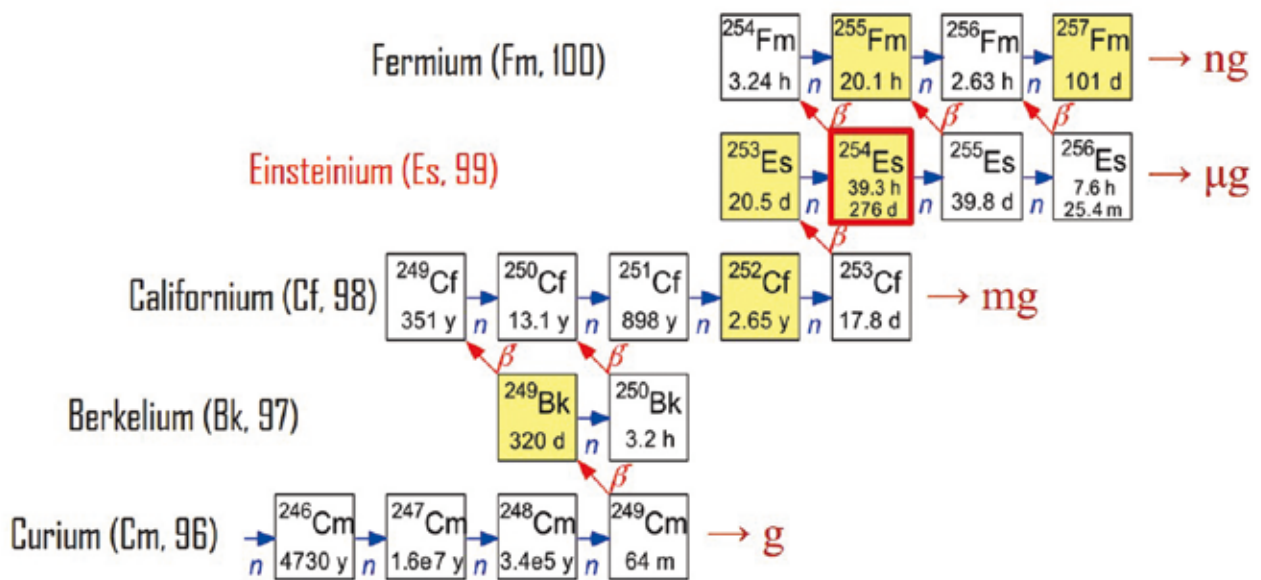


図 1

原子炉内でアインスタイニウムが生成される経路。Cm 同位体を種として、次々に中性子を捕獲して質量数が大きな同位体が生成されるとともに、特定の同位体が β^- 崩壊して原子番号が 1 つ大きな同位体 (元素) が生成される。Es だけでなく Fm もナノグラム (1 g の 1 億分の 1) 程度は生成できる。なお、Fm 同位体は β^- 崩壊をしないので、原子炉ではこれより重い元素を生成することはできない。

Fig. 1

Paths to produce einsteinium in a high-flux reactor. Neutron capture and β^- decay processes are repeated to reach ^{254}Es . Through the reaction and decay network, a few nanograms of fermium isotopes, the heaviest element that can be produced in the reactor, will be generated.