

KAERI/RR-3330/2011

연구용 악티나이드 동위원소
국내 생산 타당성 연구

Feasibility Study of Actinide Radio-Isotopes
Production for Research

KAERI

한국원자력연구원

제 출 문

한국원자력연구원장 귀하

본 보고서를 2011 연도 “연구용 액티나이드 동위원소 국내 생산 타당성 연구” 과제의 최종보고서로 제출합니다.



2011. 12. 31.

주관기관명 : 한국원자력연구원

과제책임자 : 김 원 호

요 약 문

I. 제 목

연구용 악티나이드 동위원소 국내 생산 타당성 연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

국제적으로 새로운 초중원소(super-heavy elements)를 발견하기 위하여 가속기를 이용한 초중원소 생산 기술은 이미 잘 알려져 있다. 원자력 선진국에서는 표적 제조, 핵반응으로 생산된 새로운 원소의 분리, 핵적 특성 및 이화학적 특성을 분석할 수 있는 기술이 꾸준히 발전되어 왔으며, 이를 이용한 악티나이드 기초연구를 독점하여 왔다. 연구용 악티나이드 원소와 초중원소를 자체 생산할 수 없는 원자력 연구기관의 악티나이드 관련 기초연구는 악티나이드 동위원소를 보유한 연구기관과의 협력연구를 제외하고는 매우 제한적으로 수행되어 왔다.

악티나이드 동위원소는 미국 Oak Ridge National Laboratory (ORNL), Brookhaven National Laboratory(BNL) 또는 Los Alamos National Laboratory(LANL)에서 생산되고 있다. ORNL의 High Flux Isotope Reactor(HFIR)는 그 건설 목적이 Trans-plutonium 원소 생산에 있기에, 이제까지 국제적으로 공급되어 왔던 gram 이상의 악티나이드 동위원소는 주로 미국 ORNL의 HFIR에서 생산되고 있다. 특히, 소량(milligram 이하)의 연구용 악티나이드 동위원소는 ORNL의 Isotope Business Office of the National Isotope Development Center(舊 Isotope Distribution Office)를 중심으로 국제적인 수요를 공급하여 왔으나, 911 테러 사건 이후 핵물질을 포함한 연구용 악티나이드 원소의 운송 또는 공급이 거의 단절된 상태이다.

국내 가속기 관련 연구가 활성화되고 있으며, 연구용 원자로 운영 기술과 함께 산업용 ^{192}Ir 생산 및 의료용 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 생산을 위한 계장기술, 고방사능 선원의 Hot-Cell 작업 기술 등 국내 원자력 기반기술이 확보됨에 따라, 연구용 악티나이드 동위원소의 국내 생산 및 보급이 가능한 시기가 다

가고 있다. 특히, 이미 확보된 기반 기술과 향후 건설될 동위원소 생산 전용로, 또는 입자가속기 시설을 활용하여 연구용 악티나이드 동위원소를 국내에서 생산함으로써, 사용후핵연료 활용 및 고준위 방사성폐기물 관련 악티나이드 기초 연구를 적극적으로 추진할 수 있는 환경이 조성될 수 있을 것으로 판단된다.

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

1. 악티나이드(An) 동위원소 생산 핵반응 검토 및 국내 생산이 가능한 An 동위원소 선정
 - An 동위원소 생산 핵반응 조사 및 선정
 - 표적 제조 및 조사된 표적으로부터 특정 An원소 분리/정제 기술
2. An 동위원소 국내 생산에 따른 실험실 요건 및 인허가
 - An 동위원소 생산에 따른 shielding requirement
 - An 동위원소 생산 및 이송에 따른 인허가 사항
3. 연구용 악티나이드 동위원소 생산체계 수립

Ⅳ. 연구개발 결과

악티나이드(An) 동위원소들의 decay chain과 An 동위원소 생산 핵반응을 검토한 결과, U-238 산화물 표적에 중성자 선원, 또는 ^2H 선원을 충돌시키는 핵반응이 연구용 An 동위원소를 국내에서 생산하는 가장 현실적인 방법으로 확인되었다. Transplutonium 원소($^{241}_{95}\text{Am}$, $^{242}_{96}\text{Cm}$)를 생산하는 경우, Pu-239 표적을 만들 수 있을 정도의 일정량 Pu-239 물질이 확보되어야 하고, Curium보다 무거운 An 원소, 즉 transcurium 원소($^{243}_{97}\text{Bk}$, $^{245}_{98}\text{Cf}$)를 생산하기 위해서는 Am 또는 Cm 표적을 만들 수 있는 일정량의 Am, Cm 물질이 확보되어야 한다. 이와 같이, transplutonium 원소, 또는 transcurium 원소를 생산하는 일은 수 십 내지 수 백 그램의 핵분열성 핵물질인 Pu-239를 다루어야 하기 때문에 현재 국내 여건 상 실현 가능성이 매우 낮아 보인다.

악티나이드(An) 동위원소 생산에 중이온 입자 선원을 이용할 수도 있

으나, 현재 국내 여건으로 중이온 입자 가속기를 활용하여 동위원소를 생산하는 것은 시기적으로 적절하지 못한 상황이다. 따라서, 국내에서 연구용 An 동위원소를 미량 생산하는 일은 비교적 손쉽게 취급할 수 있는 U-238 산화물을 표적으로 사용하는 $^{239}_{93}\text{Np}$, $^{237}_{93}\text{Np}$, $^{238}_{94}\text{Pu}$, $^{239}_{94}\text{Pu}$ 핵종들로 제한될 수 밖에 없을 것이고, Pu-239 핵물질을 표적으로 활용하는 transplutonium 원소를 생산하는 방법은 본 연구에서 고려하지 않았다.

An 동위원소 생산의 출발물질은 국내에서 비교적 손쉽게 취급할 수 있는 U-238 산화물이 될 것이며, 종이, 파라핀(플라스틱) 또는 구리 기관에 고순도 U-238 산화물의 얇은 막을 입히거나, U-Al, 또는 U-Si 합금봉을 준비하여 표적물질로 사용할 수 있다. 초기 TRU 발견 당시와 비교하면, 국내에서 보유하고 있는 표적제조 기술은 매우 우수한 것으로 판단된다. 또한, 표적물질 내 생성된 TRU 핵종분포는 표적물질 내 우라늄 동위원소의 순도, 중성자 조사시간 또는 입자의 가속 에너지, 냉각시간 및 분리/정제 시기에 따라 결정된다.

조사된 U-238 산화물 표적 내에는 짧은 반감기(23.5 min.)를 갖는 베타방출 핵종인 U-239와 딸 핵종인 Np-239와 Pu-239를 미량 함유하고 있기 때문에 특정한 An 동위원소를 생산하기 위하여 정밀한 화학분리/정제가 이루어져야 한다. 주로 산화수 변화에 따른 화학특성을 바탕으로 공침전, 추출 또는 이온교환수지를 이용한 분리/정제 과정을 거쳐 특정한 An 원소를 분리할 수 있으나, 순도 높은 특정한 질량을 갖는 An 동위원소 핵종만을 얻을 수는 없다. 즉 화학적 분리를 통한 특정원소의 개별 분리는 가능하나, 특정한 질량을 갖는 $^{239}_{93}\text{Np}$, $^{237}_{93}\text{Np}$, $^{238}_{94}\text{Pu}$, $^{239}_{94}\text{Pu}$ 핵종들을 순수하게 개별적으로 얻을 수는 없다. 이러한 측면에서 입자가속기를 사용한 핵반응을 활용한다면, 비교적 고순도 An 동위원소를 선택적으로 얻을 수 있는 장점을 갖는다고 볼 수 있다.

중성자 선원(연구용 원자로, 예를 들면 하나로), 양성자, 또는 중이온 입자 가속기를 이용하여 미량의 An 동위원소를 생산하는 시설로는 target room, hot-cell, glove box를 갖춘 실험실들이 필요하다. 조사된 표적물질 내 강한 베타, 감마선을 방출하는 핵분열생성물을 함유하고 있기 때문에, 특정 An 동위원소를 화학적으로 분리하기 위한 실험실은 hot-cell과

glove box가 설치되어 있어야 한다. 표적과 가속 입자가 충돌하게 되는 target room은 중성자와 감마선이 차폐되어야 한다. 현재, 국내 원자력시설 및 방사선에 대한 안전 규제에 따르면, 이러한 실험실들은 “기타 원자력 시설”로 분류되며, 방사선원, 방사성폐기물, 환경 방사능, 방사선 피폭, 방사능 방재에 관한 사항들을 자체적으로 관리하여야 하고, 품질보증 검사를 포함한 정기 검사 및 운영 변경사항에 대한 심사를 규제기관으로부터 정기적으로 받아야 한다. 원자력발전소 외 “기타 원자력 시설”로 분류되는 국내 원자력 시설로는 연구로(하나로) 및 교육용 원자로, 원전 연료 또는 연구용 연료 가공시설, 사용후핵연료 처리 시설과 같은 핵연료주기 시설, 방사성동위원소 폐기물 폐기 시설들이 있다.

최근 상용 원자력발전소 및 연구용 원자로의 해외 수출이 이루어짐에 따라 국내 원자력 연구 및 기술개발이 더 이상 선진국의 기술을 답습하는 수준에서 탈피하여 자체적인 원천기술을 확보하여야 할 필요성이 크게 대두되고 있다. 또한, 국내 양성자 가속기 건설(경주, 진행중)과 중이온 입자 가속기 건설(세종시 과학비즈니스 벨트 내, 계획중)이 추진되면서 기초 원천기술 개발에 대한 요구가 증대되고 있는 실정이다. 원자력 산업의 원천기술을 확보하는 첫 단계는 Nuclear Data Base를 자체적으로 확보하는 일과 함께 악티나이드 원소의 기초 연구가 활발히 전개되어야 할 것으로 판단된다. 따라서, 이러한 연구의 대상물질인 transuranium 원소를 포함한 미량의 연구용 An 동위원소가 절실히 필요하게 될 것이다. 이전에는 미국 Oak Ridge National Laboratory(ORNL)로부터 수입해 왔던 미량의 연구용 An 동위원소를 더 이상 해외에서 공급받기 어려운 국제적인 상황을 고려한다면, 이제는 국내에서 조그만 규모가 되더라도 자체적으로 생산할 수 있는 방안이 모색되어야 할 것이다.

본 과제에서는 정치/외교적인 문제를 제외하고 기술적인 타당성을 검토하여 미량의 연구용 An 동위원소를 자체적으로 생산할 수 있는 방안을 수립하고자 한다. 앞서 검토한 바와 같이, 국내 여건을 고려하여 U-238 산화물을 표적으로 사용하고 $^{239}_{93}\text{Np}$, $^{237}_{93}\text{Np}$, $^{238}_{94}\text{Pu}$, $^{239}_{94}\text{Pu}$ 핵종들을 우선적으로 자체 생산할 수 있을 것으로 생각된다. 첫째, 표적으로는 우라늄/알루미늄, 우라늄/실리콘 합금 봉, 또는 우라늄 산화물 막이 될 것이며, 표

적을 제조하는 일은 기술적으로 전혀 문제가 되지 않을 것으로 판단된다. 둘째, 중성자 선원으로는 하나로 연구용 원자로(열중성자속 $\sim 10^{13}$ 내지 10^{14} n·cm²/sec)를 활용하고, 입자빔 선원으로는 양성자 가속기, 또는 중이온 입자 가속기를 활용하는 것이 타당해 보인다. 중수소(²H) 입자 가속이 필요한 ²³⁸₉₄Pu 생산의 경우, 양성자 가속기에서 중수소 입자를 가속할 수 있을 것으로 생각된다. 셋째로 대부분 핵분열생성물을 함유한 조사된 표적 물질 내 특정 An 원소를 분리/정제하는 방사화학 실험실로 원자로 혹은 가속기 시설 내 기존 실험실을 활용할 수 있으나, 특정한 목적을 수행할 수 있는 hot-cell과 glove box를 갖춘 방사화학 실험실 설비가 준비되어야 한다. 이러한 신규 원자력시설이 만들어 진다면, 당연히 이에 따른 안전관리 절차가 준비되어야 하고 정기적으로 규제기관으로부터 심사 또는 검사가 이루어져 자체적으로 수행할 원자력 연구활동이 투명하게 보여 져야 한다. 특히, An 원소들 가운데, 국내 원자력법에서 정하고 있는 핵물질과 방사성동위원소를 구분하여 핵 및 방사성 물질의 물질수지를 명확히 관리하여 투명한 핵물질 보장조치가 이루어져야 한다. 마지막으로 앞서 언급한 시설은 국내 원자력시설 및 방사선에 대한 안전 규제에 따라 “기타 원자력 시설”로 분류되며, 방사선원, 방사성폐기물, 환경 방사능, 방사선 피폭, 방사능 방재에 관한 사항들을 자체적으로 관리하여야 하고, 품질보증 검사를 포함한 정기 검사 및 운영 변경사항에 대한 심사를 규제기관으로부터 정기적으로 받아야 한다.

V. 연구개발결과의 활용계획

현재, 추적자 수준(tracer-level)의 악티나이드 동위원소를 사용하고 있는 국내 악티나이드 관련 연구는 타 원자력 선진국에 비하여 매우 제한적인 연구만을 수행하여 왔다. 향후, 국내에서는 사용후핵연료 활용 및 고준위 방사성폐기물 관련 연구 또는 기술 개발에 따른 악티나이드 동위원소를 사용하는 수요는 크게 늘어날 것으로 예상된다. 국내 원자력 기반기술을 활용한 연구용 악티나이드 동위원소 생산은 향후 관련 연구 및 기술 개발에 필요한 국내 악티나이드 동위원소 공급을 안정적으로 지원할 수

있을 것으로 판단된다. 따라서, 악티나이드 동위원소 국내 생산은 악티나이드 물질을 대상으로 한 관련 연구 및 기술개발을 활성화시킬 뿐만 아니라, 이러한 악티나이드 관련 연구는 원자력 대형기술 개발의 안전성을 제고하는데 일익을 담당함으로써의 원자력 기술에 대한 대국민 수용성을 증진시키는데 매우 중요한 역할을 하게 될 것으로 사료된다. 한편, 이는 우리 연구원의 악티나이드 관련 연구 능력을 향상시킬 수 있는 기회가 될 것이고, 국제적으로 경쟁력 있는 중요한 원자력 기술의 기반을 구축할 수 있을 것으로 기대된다.



SUMMARY

I. Project Title

Feasibility Study of Actinides RI Production for Research

II. Objective and Importance of the Project

It is a well-known technology to produce new super-heavy elements by the bombardment of target material with accelerated particles or the heavy ion beam in the international academic society of nuclear physics. Scientific technologies for producing new super-heavy elements, such as target preparation, particle acceleration, isotopes and elements separation, have been developed in the major countries, and they have a strong background in this area, especially the basic research on the actinide elements, with understanding their nuclear physical and chemical properties. For any research institutes without the capabilities of the actinide RI production, the basic research on the actinide elements has been very much limited, besides their collaboration research with the advanced institutes that can handle the actinides material with their knowledge.

Most of actinides RI, such as Np, Pu, Am and so on, have been produced in the Oak Ridge National Laboratory(ORNL), Brookhaven National Laboratory(BNL), or Los Alamos National Laboratory(LANL), USA. Especially, High Flux Isotope Reactor(HFIR) in ORNL is running for the production of gram quantity of trans-plutonium elements, and they have been distributed by the Isotope Business Office of the National Isotope Development Center(former Isotope Distribution Office) in world-wide. However, its international service activity for supply and transportation of the actinide RIs, including any nuclear materials,

for the research purposes has been stopped, since the 911 accident of the year of 2001.

The research area utilizing the high energy and the strong beam accelerator will be rapidly expanded in the country. We have a strong infra-structure for the RI production, such as ^{192}Ir production for industrial use and $^{99\text{m}}\text{Tc}$ production for medical use, and a good technical background for handling highly radioactive materials inside the hot-cell with the instrumental test technologies for the irradiated materials and the experiences of HANARO research reactor operation. It is about the time to be able to produce and to distribute the actinide RIs for the research purposes, domestically. Utilizing a new reactor for RI production and heavy ion beam accelerator with the reserved technologies, the domestic production of the actinide RIs will gearing up the basic actinide research, related to the reuse of spent nuclear fuel and high-level radioactive waste disposal.

III. Scopes and Contents of Project

1. the investigation of nuclear reactions for the actinide RIs production and the selection of the actinide RIs that could be produced domestically in the present situation
 - the investigation of nuclear reactions and the selection of the actinide RIs
 - the target preparation and the specified element separation with its purification from the irradiated target
2. the licensing requirements for the domestic production of the actinide RIs
 - the shielding requirement for the production of the actinide RIs
 - the licensing requirements for the production of the actinide RIs and their transportation

3. the system establishment for the actinide RIs production in the research purposes

IV. Result of Project

Reviewing the decay chain and the nuclear reactions of the actinide RIs, it is confirmed that the bombardment of neutron or the accelerated deuterium(${}^2_1\text{H}$) particle onto the uranium oxide(${}^{238}\text{UO}_3$) target material is the best way in reality for the domestic production of the actinide RIs. For the production of transplutonium elements such as ${}^{241}_{95}\text{Am}$ and ${}^{242}_{96}\text{Cm}$, least amounts of Pu-239 should be available for the target preparation. For the production of transcurium elements such as ${}^{243}_{97}\text{Bk}$ and ${}^{245}_{98}\text{Cf}$, a certain amounts of Am and Cm should be available for its target preparation. As mentioned earlier, it seems to be unrealistic in our present situation for the domestic production of transplutonium, or transcurium elements, because of handling tens to hundreds grams of fissile material like Pu-239, that is very tightly and seriously regulated under the international nuclear security measure.

For the domestic production of the actinide RIs, the heavy ion beam from the particle accelerator could be used as an ion source, however, it is not a good timing to do so under our present situation at the moment. Therefore, the domestic production of the actinide RIs less than a gram quantity for the academic research will be limited to a production of ${}^{239}_{93}\text{Np}$, ${}^{237}_{93}\text{Np}$, ${}^{238}_{94}\text{Pu}$, and ${}^{239}_{94}\text{Pu}$, since they can be produced from uranium oxide(${}^{238}\text{UO}_3$) target material. It will be relatively easy to handle in our facility and it could be managed under the international regulation of the nuclear security measure. In our present study, we do not consider the production of transplutonium elements that comes from Pu-239, as a target material.

A uranium oxide would be a starting material for the domestic

production of the actinide RIs used in the academic research. Thin film of high purity uranium oxide($^{238}\text{UO}_3$) on the paper, or the plate of paraffin(plastic), or copper metal, as well as U-Al, or U-Si alloy rod will be used as a target. It is well known to us that our technology for a target preparation is far more advanced than the classical techniques when the transuranium elements were discovered at the first time. The isotope distribution of the transuranium elements produced in the target totally depends on the purity of uranium nuclide in the target, the irradiation time under the neutron flux, the accelerated particle energy, the cooling time after the irradiation, and their separation time.

Since there are U-239, beta emitter and a half-life of 23.5 min., with its daughter nuclides, Np-239 and Pu-239 in the irradiated uranium oxide($^{238}\text{UO}_3$) target, very neat separation and purification should be carried out, in order to isolate the specific nuclide of the TRU elements. The specific TRU elements can be separated by the co-precipitation, extraction, and/or ion exchange methods, based on the chemical properties depending on the change of their oxidation states. However, very high purity of the TRU element with a specific mass can not be obtained by these methods. In other words, it is possible to separate the specific TRU elements individually, however, the nuclides with a specific mass such as $^{239}_{93}\text{Np}$, $^{237}_{93}\text{Np}$, $^{238}_{94}\text{Pu}$, and $^{239}_{94}\text{Pu}$ can not be obtained individually by the chemical separation methods. There is an advantage that relatively high purity of the actinide nuclide could be produced selectively, when they are produced by the nuclear reactions using the high energy particle bombardment in the accelerator.

To produce the specific TRU elements by neutron beam from the research reactor such as HANARO, and deuteron or heavy ion beam from the accelerator, it is necessary to build up the target room and the laboratories with a proper number of hot-cells and glove boxes, as

a production facility. Since there are so many kinds of fission products, that give off a strong beta and gamma radiation, in the irradiated target, a proper number of hot-cells and glove boxes are set up in the laboratory, in order to separate the TRU elements chemically. It is required to shield the neutron and gamma radiation in the target room, where the accelerated particle beam bombards into a target. According to the national safety regulation against the domestic nuclear and radiation facilities, laboratories for the production of TRU elements such as target room and chemical separation laboratory are categorized as a "non-specific nuclear facility" unlike a nuclear power plant. In order to operate this facility, a number of legal conducts such as a safety management on the radiation sources and the radioactive wastes, a regular monitoring for an radiation exposure to the operators with an environmental radioactivity around it, and measures of the prevention against the possible nuclear accident should be carried out by themselves. And the regular inspection on the operation and its modification of the facility, including its quality control and quality assurance, should be undertaken from the regulatory body(Korea Institute of Nuclear Safety, KINS). There are a research reactor(called HANARO), a nuclear fuel fabrication facility, back-end fuel cycle facilities dealt with a spent nuclear fuel, or a radioactive waste treatment facility, categorized as a "non-specific nuclear facility".

Recently, the national achievement on our export of the commercial nuclear power plant to UAE, and a research reactor to Jordan makes a great influence on our nuclear technology development. For the further technology transfer to the other country, it is necessary to build up our own technology under the domestic nuclear R&D program. And there will be a rapid growth of our need to develop the world top-class technology in our academic nuclear society, and also, in nuclear industry, when they are talking about the construction of the

proton accelerator(undergoing at Gyeongju) and the heavy ion beam accelerator(planned in the Science Business Belt at Sejong). One of the most important step at first to develop our own technology in nuclear industry would be an intensive investment on the basic research of the actinide elements with a production of Nuclear Data Base by ourselves. It is necessary to produce the transuranium elements as a starting material for the basic research on the actinide elements. Considering the international regulation on the transfer of the transuranium elements from other institutions such as Oak Ridge National Laboratory(ORNL), USA, we have to find out how we can produce even a trace amount of the actinide RIs, or provide them by ourselves.

In this study, we try to build up how we can produce a trace amount of the actinide RIs domestically for the research, based on the scientific technology only, besides any political or diplomatic dispute. As mentioned earlier in the report, we could produce $^{239}_{93}\text{Np}$, $^{237}_{93}\text{Np}$, $^{238}_{94}\text{Pu}$, and $^{239}_{94}\text{Pu}$ at first by the bombardment of neutron or deuteron particle to the uranium oxide($^{238}\text{UO}_3$) target. First, a thin film of high purity uranium oxide($^{238}\text{UO}_3$) as well as U-Al, or U-Si alloy rod will be used as a target for the domestic production of the actinide RIs. And there will be no technical barriers on our technology for a target preparation nowadays. Secondly, it seems reasonable that the HANARO research reactor(thermal neutron flux : ca. 10^{13} to 10^{14} n·cm²/sec) can be used as a neutron source, and so does a proton accelerator or a heavy ion beam accelerator as a beam source. In case of $^{238}_{94}\text{Pu}$ production by the bombardment of deuterium(^2_1H) particle, the deuteron beam can be generated from the MC50 cyclotron(10 to 25 MeV/30 μA for deuteron) in KIRAM(Korea Institute of Radiological and Medical Sciences at Seoul). Thirdly, the radiochemistry laboratory, where a proper number of hot-cells and glove boxes are set up to their own purposes, should be prepared for the separation and purification of a

specific TRU element in the irradiated target holding a number of fission products. When we operate a new radiochemistry laboratory for such a purposes, a number of legal conducts on nuclear safety will be carried out and the regular inspection on the facility should be undertaken from the regulatory body. Thus, nuclear R&D activities done in the facility should be transparent internationally. Especially, the TRU elements are classified into a fissile material and an isotope by the law, and the material balance account(MBA) on them should be managed and clarified to the IAEA. Finally, this facility are categorized as a "non-specific nuclear facility" like a research reactor. By the law, the safety management on the radiation sources and the radioactive wastes, the regular monitoring for an radiation exposure to the operators with an environmental radioactivity, and measures of the prevention against the possible nuclear accident should be carried out by themselves. And also, the regular inspection on the operation and its modification of the facility, including its quality control and quality assurance, should be undertaken from the regulatory body.

V. Proposal for Applications

At present, the domestic R&D activities on TRU elements have been very much limited to the case, that is used a tracer-level of TRU elements. One can easily expect the growth of our needs on the usage of TRU elements from now on, in order to carry out the domestic R&D program, such as the development of pyroprocess, that is, the utilization of spent nuclear fuels to the fast breeder reactor and the nuclear safety research on the severe accident or the high-level radioactive wastes disposal. Thus, the domestic production of the actinide RIs for the academic research will meet their needs steadily in such R&D programs. It will be gearing up the academic research on the actinide RIs that makes an important role on the nuclear safety of

the technology development in our nuclear industry. And also, it will give us a great opportunity to improve our capability of the basic research on the TRU elements and an expectation to build up our competent ability in the field of world nuclear industry.



CONTENTS

Chapter 1. Introduction	1
Section 1. Importance of the Project	1
Section 2. Scopes and Contents of the Project	2
Chapter 2. Current Status of the Project	3
Section 1. Current Status of the Project	3
Chapter 3. Results and Discussion	4
Section 1. Nuclear Reactions, Selection of Isotope and Target Preparation of the Actinide Elements Production	4
Section 2. Separation and Purification of the Actinide Elements in the Irradiated Target	8
Section 3. Shielding Requirement and License of the Laboratory for the Actinide Elements Production	9
Section 4. Establishment of the Actinide Elements Production for the Academic Research	13
Chapter 4. Attainment of the Research Goal and Its Contribution	15
Chapter 5. Application Plan of the Results	16
Chapter 6. References	17
Appendix	18

목 차

제 1 장. 서론	1
제 1 절. 연구개발의 필요성	1
제 2 절. 연구개발의 내용 및 범위	2
제 2 장. 국내·외 연구개발 동향	3
제 1 절. 국내·외 연구개발 동향	3
제 3 장. 연구개발수행 내용 및 결과	4
제 1 절. 악티나이드 동위원소 생산 핵반응, 핵종선정 및 표적 제조기술	4
제 2 절. 조사 표적 내 특정 악티나이드 원소 분리/정제	8
제 3 절. 악티나이드 동위원소 생산에 따른 실험실 차폐요건 및 인허가	9
제 4 절. 연구용 악티나이드 동위원소 미량 생산체계 수립	13
제 4 장. 연구개발목표 달성도 및 대외 기여도	15
제 5 장. 연구개발결과의 활용계획	16
제 6 장. 참고문헌	17
부록	18

제 1 장. 서론

제 1 절. 연구개발의 필요성

국제적으로 새로운 초중원소(super-heavy elements)를 발견하기 위하여 가속기를 이용한 초중원소 생산 기술은 이미 잘 알려져 있다. 원자력 선진국에서는 표적 제조, 핵반응으로 생산된 새로운 원소의 분리, 핵적 특성 및 이화학적 특성을 분석할 수 있는 기술이 꾸준히 발전되어 왔으며, 이를 이용한 악티나이드 기초연구를 독점하여 왔다. 연구용 악티나이드 원소와 초중원소를 자체 생산할 수 없는 연구기관의 악티나이드 기초연구는 원자력 선진국의 연구기관과 협력연구를 제외하고는 매우 제한적으로 수행되어 왔다.

악티나이드 동위원소는 미국 Oak Ridge National Laboratory(ORNL), Brookhaven National Laboratory(BNL) 또는 Los Alamos National Laboratory(LANL)에서 생산되고 있다. ORNL의 High Flux Isotope Reactor(HFIR)는 그 건설 목적이 trans-plutonium 원소 생산에 있기에, 이제까지 국제적으로 공급되어 왔던 gram 이상의 악티나이드 동위원소는 주로 미국 ORNL의 HFIR에서 생산되고 있다. 특히, 소량(milligram 이하)의 연구용 악티나이드 동위원소는 ORNL의 Isotope Business Office of the National Isotope Development Center (舊 Isotope Distribution Office)를 중심으로 국제적인 수요를 공급하여 왔으나, 911 테러 사건 이후 핵물질을 포함한 연구용 악티나이드 원소의 운송 또는 공급이 거의 단절된 상태이다.

○ 기술적 측면

국내 가속기 관련 연구가 활성화되고 있으며, 연구용 원자로 운영 기술과 함께 산업용 ^{192}Ir 생산 및 의료용 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 생산을 위한 계장기술, 고방사능 선원의 Hot-Cell 작업 기술 등 국내 원자력 기반기술이 확보됨에 따라, 연구용 악티나이드 동위원소의 국내 생산 및 보급이 가능하다. 특히, 이미 확보된 기반 기술과 향후 건설될 동위원소 생산 전용로, 또는 입자가속기 시설을 활용하여 연구용 악티나이드 동위원소를 국내에서 생산함으로써, 사용후핵연료 활용 및 고준위 방사성폐기물 관련 연구를 적극적으로 추진할 수 있는 환경이 조성될 수 있다고 사료된다. 이는 우리의 악티나이드 관련 연구능력을 향상시켜 국제 경쟁력을 확보할 수 있는 중요한 원자력 기술의 기반을 구축할 수 있을 것으로 기대된다.

○ 경제·산업적 측면

악티나이드 동위원소의 해외 수입이 단절된 현 상황에서 향후 국내 사용후핵연료 활용 및 고준위 방사성폐기물 관련 연구 또는 기술 개발에 따른 악티나이드 동위원소의 수요는 크게 늘어날 것으로 예상된다. 현재, 추적자 수준(tracer-level)의 악티나이드 동위원소를 사용하고 있는 국내 악티나이드 관련 연구는 타 원자력 선진국에 비하여 매우 제한적인 연구만이 가능하다. 국내 원자력 기반기술을 활용한 연구용 악티나이드 동위원소 생산은 향후 관련 연구 및 기술 개발에 필요한 국내 악티나이드 동위원소 공급을 안정적으로 지원할 수 있을 것으로 판단된다.

○ 사회·문화적 측면

향후 국내에서는 사용후핵연료 활용 및 고준위 방사성폐기물 관련 연구 또는 기술 개발에 따른 악티나이드 동위원소의 수요는 크게 늘어날 것으로 예상된다. 특히, 악티나이드 동위원소 국내 생산은 악티나이드 물질을 대상으로 한 관련 연구 및 기술개발을 활성화시킬 것으로 판단된다. 이러한 악티나이드 관련 연구는 원자력 대형 기술 개발의 안전성을 제고하는데 일익을 담당함으로써의 원자력 기술에 대한 대국민 수용성을 증진시키는데 매우 중요한 역할을 하게 될 것으로 사료된다.

KAERI

제 2 절. 연구개발의 내용 및 범위

○ 연구개발의 최종 목적

연구용 악티나이드 동위원소 국내생산 방안 수립

○ 연구개발 내용

- 연구용 악티나이드(An) 동위원소 생산을 위한 관련 기술 파악
 - An 동위원소 생산에 적합한 핵반응 조사, 선정 및 표적 제조기술
 - 조사된 표적으로 부터 특정 An원소 분리/정제 기술
 - An 동위원소 생산에 따른 shielding requirement 및 인허가 사항
- 국내 생산 연구용 악티나이드 동위원소 선정
- 연구용 악티나이드 동위원소 생산체계 수립

제 2 장. 국내·외 기술개발 현황

제 1 절. 국내·외 연구개발 동향

○ 국내·외 연구개발 동향

- 선진국에서는 가속기를 이용하여 악티나이드(An) 원소와 초중원소를 자체 생산하고 An 기초연구를 독점하여 왔으며, 아국은 선진국과 협력연구를 제외하고는 매우 제한적으로 수행되어 왔다.
- 국내 가속기 관련 연구가 활성화되고 RI 생산 기반기술이 확보됨에 따라, 연구용 An 동위원소를 국내 생산하여 후행 핵연료주기 관련 기초 연구를 적극적으로 추진할 수 있는 환경이 조성됨.
- 따라서, An 동위원소를 국내에서 생산할 수 있는 기술적 타당성을 검토함으로써 An 기초 연구능력을 향상시켜 국제 경쟁력을 확보할 수 있을 것으로 기대된다.
- 국가 과학기술 정보서비스(National Science and Technology Information Service, NTIS) 검색결과에 의하면, 지금까지 국내에서 연구용 악티나이드 동위원소 생산에 관한 연구개발이 수행된 기록은 없는 것으로 조사되었다. 다만, 과학기술부가 시행한 원자력연구개발사업의 일환으로 1999년 10월 제주대학교(연구책임자 이윤준)를 주관 연구기관으로 “방사성 동위원소 국내 생산방안에 관한 연구”가 수행된 바 있다. 본 보고서에서는 의료용 또는 산업용 방사성 동위원소 국내 생산방안에 관한 연구내용을 비교적 자세히 기술하고 있다.
- 매년 한국동위원소협회에서는 “방사선 이용 통계”라는 통계 책자를 발간하여 왔으며, 본 책자는 우리나라에서 생산, 관리되는 방사성 동위원소의 전반적인 인·허가 사항을 포함하여 연간 수출입 현황, 종사자 현황 및 폐기물 현황을 수록하고 있다. 특히, 최근에는 핵의학 전문의, 방사선사 등의 의료계 종사자, 의료장비, 의료용 동위원소 이용 및 분야별 검사 현황도 수록하고 있다.

제 3 장. 연구개발수행 내용 및 결과

연구용 악티나이드(An) 동위원소 국내 생산 방안을 수립하기 위하여, An 동위원소 생산을 위한 핵반응을 조사하고, 현실적으로 국내 생산이 가능한 An 동위원소를 선정하였음. 기술적으로는 An 동위원소 생산을 위한 표적 제조기술, 조사된 표적으로 부터 특정 An 원소를 분리/정제하는 기술을 검토하였으며, An 동위원소 생산에 따른 실험실의 차폐요건(shielding requirement)과 An 동위원소 생산 및 이송에 따른 인허가 사항을 검토하였음. 이러한 결과를 종합하여 현재 국내에서 연구용으로 사용할 수 있는 미량 An 동위원소 생산체계를 수립하였다.

제1 절. 악티나이드 동위원소 생산 핵반응, 핵종선정 및 표적 제조기술

악티나이드(An) 동위원소들의 decay chain(그림 1.)을 고려하여 천연 우라늄 내 99.3%를 함유하고 있는 U-238 산화물을 우선적으로 표적물질로 선정하였다.

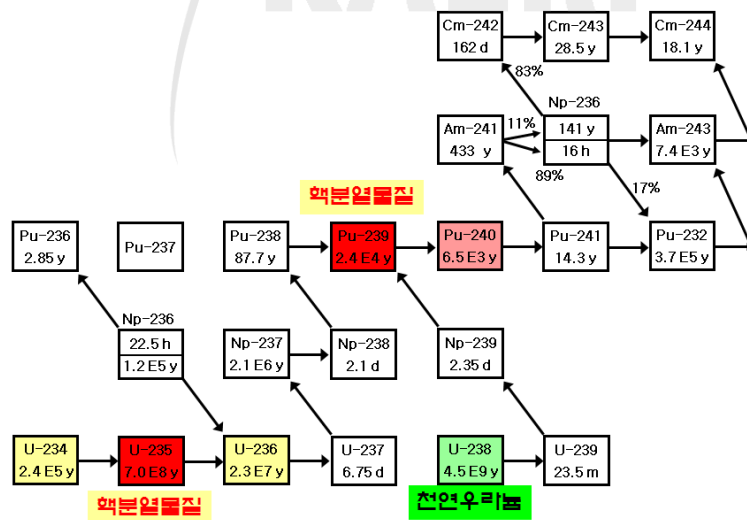


그림 1. An 동위원소들의 decay chain

U-238 산화물 표적에 중성자를 포함한 입자를 가속 충돌시킴으로써 초우란원소 (Transuranium elements, TRU)를 생산할 수 있는 핵반응을 검토하였으며, 현실적으로 국내에서 표적제조가 어려운 Pu-239 표적물질을 출발물질로 하는 transplutonium 원소($^{241}_{95}\text{Am}$, $^{242}_{96}\text{Cm}$) 생산 핵반응은 본 연구에서 고려하지 않았음. 국내에서 이용 가능한 중성자 선원, 국내 가속기를 활용한 중수소입자(^2_1H) 가속 그리고 출발물질로 U-238을 고려한다면, 다음의 핵반응 (1), (2), (3), (4)를 이용하여 $^{239}_{93}\text{Np}$, $^{237}_{93}\text{Np}$, $^{238}_{94}\text{Pu}$, $^{239}_{94}\text{Pu}$ 와 같은 악티나이드 동위원소를 생산하는 것이 우선적으로 가능할 것으로 판단된다. 그러나, 기존의 양성자 가속기 외에도 향후 중이온 입자를 가속할 수 있는 가속기가 국내에 설치된다면, 다양한 종류의 이온입자(예를 들면, ^{12}C , ^{16}O , ^{22}Ne , ^{40}Ca 등)를 가속하여 transplutonium을 포함한 An 원소는 물론 새로운 초중원소(super-heavy elements)의 존재도 확인할 수 있는 수준에 도달하게 될 것이다.

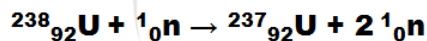
1) $^{239}_{93}\text{Np}$ 생산에 따른 핵반응



$\beta^- \downarrow$ ($t_{1/2} = 23.5 \text{ min.}$)

$^{239}_{93}\text{Np}$ ($t_{1/2} = 2.35 \text{ days}$)

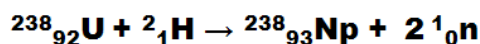
2) $^{237}_{93}\text{Np}$ 생산에 따른 핵반응



$\beta^- \downarrow$ ($t_{1/2} = 6.75 \text{ days}$)

$^{237}_{93}\text{Np}$ ($t_{1/2} = 2.14 \times 10^6 \text{ years}$)

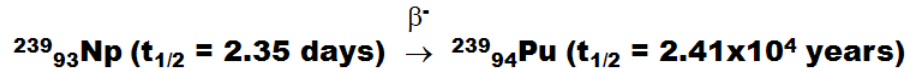
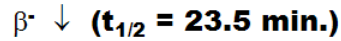
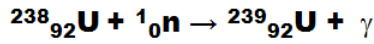
3) $^{238}_{94}\text{Pu}$ 생산에 따른 핵반응



$\beta^- \downarrow$ ($t_{1/2} = 2.12 \text{ days}$)

$^{238}_{94}\text{Pu}$ ($t_{1/2} = 87.7 \text{ years}$)

4) $^{239}_{94}\text{Pu}$ 생산에 따른 핵반응



악티나이드(An) 동위원소 생산의 출발물질은 국내에서 비교적 손쉽게 취급할 수 있는 U-238 산화물이 될 것이며, 종이, 파라핀(플라스틱) 또는 구리 기관에 고순도 U-238 산화물의 얇은 막을 입히거나, U-Al, 또는 U-Si 합금 봉을 준비하여 표적물질로 사용할 수 있다. 국내 나노물질 또는 핵연료 연구그룹의 기술력을 고려한다면, An 동위원소 생산을 위한 표적 제조는 더 이상 어려운 기술이 아니다. 초기 TRU 발견 당시의 표적제조 능력에 비하면, 국내에서 보유하고 있는 기술력은 매우 우수한 표적을 제조할 수 있을 것으로 판단된다.

그러나, transplutonium 원소($^{241}_{95}\text{Am}$, $^{242}_{96}\text{Cm}$)를 생산하는 경우, Pu-239 표적을 만들 수 있을 정도의 일정량 Pu-239 물질이 확보되어야 하고, Curium보다 무거운 An 원소, 즉 transcurium 원소($^{243}_{97}\text{Bk}$, $^{245}_{98}\text{Cf}$)를 생산하기 위해서는 Am 또는 Cm 표적을 만들 수 있는 일정량의 Am, Cm 물질이 확보되어야 한다. $^{243}_{97}\text{Bk}$, $^{245}_{98}\text{Cf}$ 과 같은 transcurium 원소를 생산하기 위하여 Pu-239를 출발물질로 고려한다면, 중성자속이 큰 연구로에서 Pu-239를 Pu-242, Am-243 및 Cm-244로 변환하는 작업이 선행되어야 한다. 예를 들면, 미국 Oak Ridge National Laboratory의 High Flux Isotope Reactor(HFIR, neutron flux = $5 \times 10^{14} \text{ } ^1_0\text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$)를 중성자 선원으로 활용하는 경우, 1 kg Pu-239/Aluminum 합금 봉 출발물질로부터 0.06 kg의 Pu-242, 0.03 kg의 $^{243}_{95}\text{Am} + ^{244}_{96}\text{Cm}$ 과 0.91 kg의 핵분열생성물을 얻을 수 있다. 물론 조사시간에 따라 표적물질 내 생성되는 An 핵종과 생성량은 크게 달라질 수 있다. HFIR 내에서 10 g의 Pu-242를 함유하는 표적을 18개월 동안 조사시키는 경우, 약 1.7 g의 $^{244}_{96}\text{Cm}$ ($^{246}_{96}\text{Cm} + ^{248}_{96}\text{Cm}$), 0.46 mg의 $^{249}_{97}\text{Bk}$, 5.2 mg의 $^{252}_{98}\text{Cf}$ 이 생성된다.(그림 2.)(R. D. Baybarz, Atomic Energy Review 8, 327(1970))

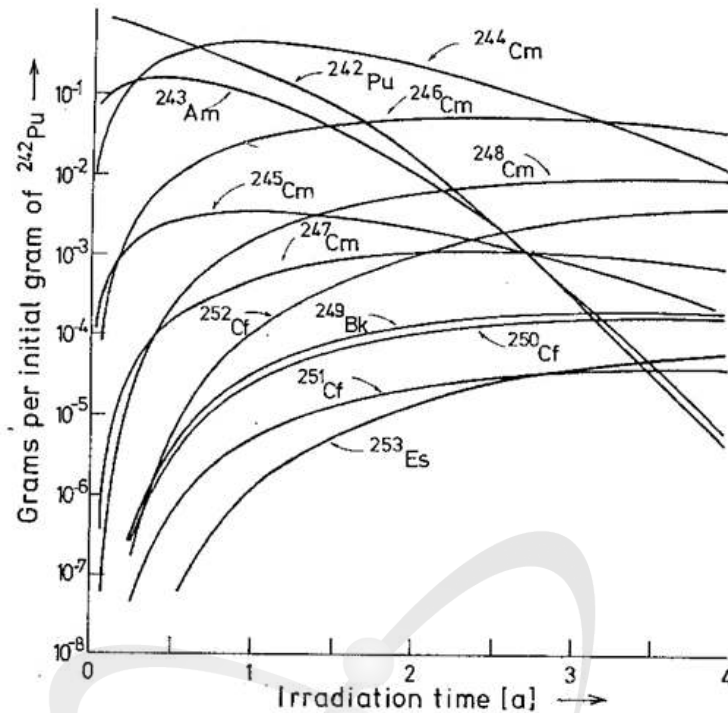


그림 2. Transplutonium elements production by the irradiation of $^{242}_{94}\text{Pu}$ in the High Flux Isotope Reactor at ORNL

KAERI

앞서 언급한 내용과 같이 transplutonium 원소, 또는 transcurium 원소를 생산하는 일은 수 십 내지 수 백 그램의 핵분열성 핵물질인 Pu-239를 다루어야 하기 때문에 현재 국내 여건 상 실현 가능성이 매우 낮아 보인다.(그림 3.) 따라서, 국내에서 연구용 An 원소를 미량 생산하는 작업은 비교적 손쉽게 취급할 수 있는 U-238 산화물을 표적으로 사용하는 $^{239}_{93}\text{Np}$, $^{237}_{93}\text{Np}$, $^{238}_{94}\text{Pu}$, $^{239}_{94}\text{Pu}$ 핵종들로 제한될 수 밖에 없을 것이다.

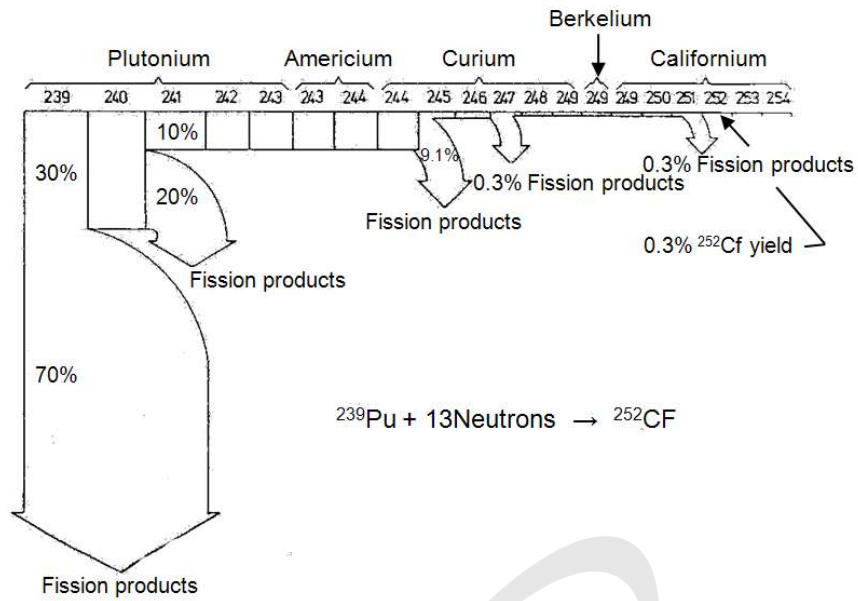


그림 3. The yield of $^{252}_{98}\text{Cf}$ on irradiation of $^{239}_{94}\text{Pu}$ with reactor neutrons. The thick arrows indicate fission on neutron capture. Thus, 100% $^{239}_{94}\text{Pu}$ gives 0.3% $^{252}_{98}\text{Cf}$, the remaining 99.7% of the initial $^{239}_{94}\text{Pu}$ undergoing fission in the course of the production process.

제 2 절. 조사 표적 내 특정 악티나이드 원소 분리/정제

조사된 표적 내에는 다량의 우라늄 핵분열생성물과 중성자를 포획한 우라늄 동위원소를 함유하고 있다. 앞서 언급한 핵반응에서 나타난 바와 같이, 표적 내에는 짧은 반감기(23.5 min.)를 갖는 베타방출 핵종 U-239와 딸 핵종인 Np-239와 Pu-239를 미량 함유하고 있기 때문에 특정한 An 동위원소를 생산하기 위하여 정밀한 화학분리 기술을 보유하고 있어야 한다. 주로 산화수 변화에 따른 화학특성을 바탕으로 공침전, 추출 또는 이온교환수지를 이용한 분리/정제 과정을 거쳐 특정한 An 원소를 분리할 수 있다. 사용후핵연료 연소도 측정 경험을 보유하고 있는 국내에서는 이미 사용후핵연료 내 핵분열생성물, 산화수 3가의 란탄족 원소와 Minor An(Am, Cm 등) 원소, 우라늄과 플루토늄을 화학적으로 분리/정제할 수 있는 기술력을 보유하고 있다.(그림 4.)

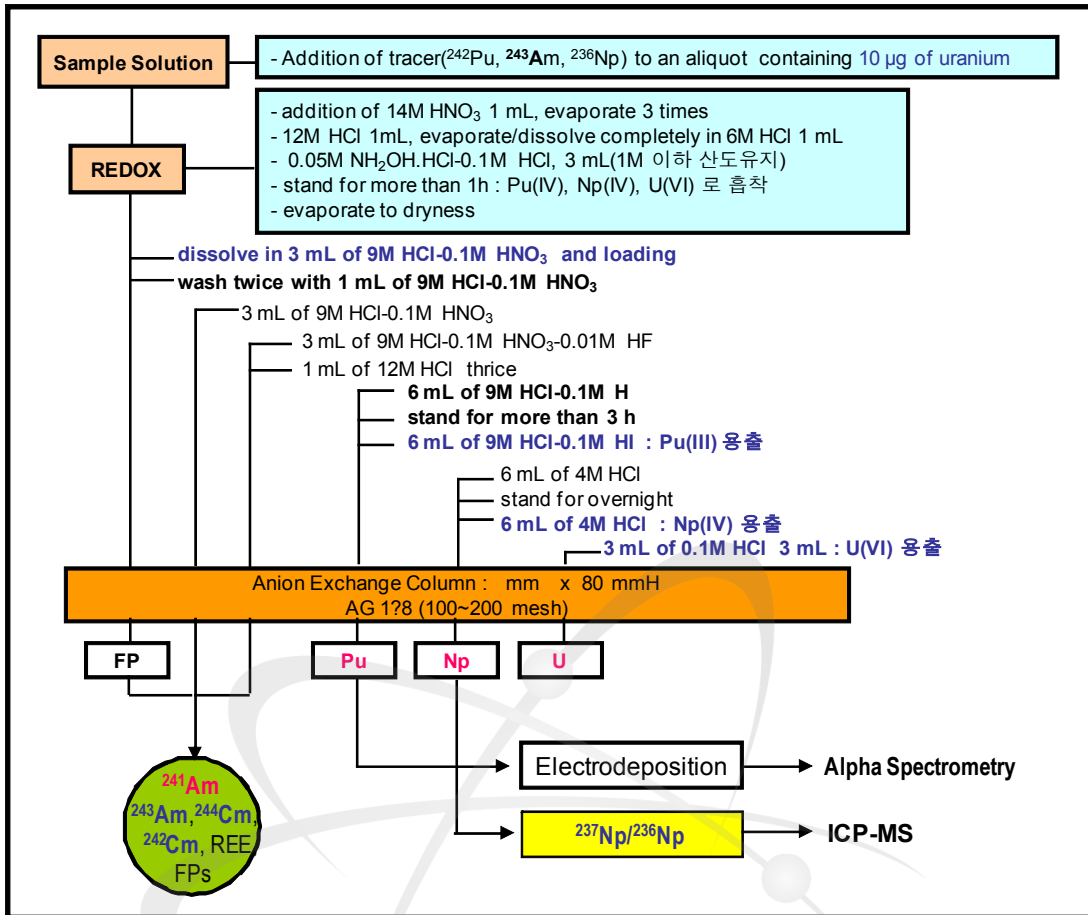


그림 4. 조사후 target 내 An 원소 개별 분리/정제를 위한 화학분리 흐름도

그러나, 중성자 선원을 이용하는 경우, 표적물질 내 TRU 핵종분포는 표적물질 내 우라늄 동위원소의 순도, 중성자 조사시간 또는 입자의 가속 에너지, 냉각 시간 및 분리/정제 시기에 따라 결정될 뿐만 아니라, 정밀한 화학적 분리/정제만으로는 순도 높은 특정한 질량을 갖는 An 동위원소 핵종만을 얻을 수는 없다. 즉 화학적 분리를 통한 특정원소의 개별 분리는 가능하나, 특정한 질량을 갖는 $^{239}_{93}\text{Np}$, $^{237}_{93}\text{Np}$, $^{238}_{94}\text{Pu}$, $^{239}_{94}\text{Pu}$ 핵종들을 순수하게 개별적으로 얻을 수는 없다. 이러한 측면에서 입자가속기를 사용한 핵반응을 활용한다면, 비교적 고순도 An 동위원소를 선택적으로 얻을 수 있는 장점을 갖는다고 볼 수 있다.

제 3 절. 악티나이드 동위원소 생산에 따른 실험실 차폐 요건 및 인허가

중성자 선원(연구용 원자로, 예를 들면 하나로), 양성자, 또는 중이온입자 가속기를 이용하여 미량의 An 동위원소를 생산하는 시설로는 target room, hot-cell, glove box를 갖춘 실험실들이 필요하다. 조사된 표적물질 내 강한 베타, 감마선을 방출하는 핵분열생성물을 함유하고 있기 때문에, 특정 An 동위원소를 화학적으로 분리하기 위한 실험실은 hot-cell과 glove box가 설치되어 있어야 한다. 표적과 가속 입자가 충돌하게 되는 target room은 중성자와 감마선이 차폐되어야 한다. 현재, 국내 원자력시설 및 방사선에 대한 안전 규제에 따르면, 이러한 실험실들은 “기타 원자력 시설”로 분류되며, 방사선원, 방사성폐기물, 환경 방사능, 방사선 피폭, 방사능 방재에 관한 사항들을 자체적으로 관리하여야 하고, 품질보증 검사를 포함한 정기 검사 및 운영 변경사항에 대한 심사를 규제기관으로부터 정기적으로 받아야 한다. 원자력발전소 외 “기타 원자력 시설”로 분류되는 국내 원자력 시설로는 연구로(하나로) 및 교육용 원자로, 원전 연료 또는 연구용 연료 가공시설, 사용후핵연료 처리 시설과 같은 핵연료주기 시설, 방사성동위원소 폐기물 폐기 시설들이 있다.

가. 차폐셀의 크기 및 구조 요건

An 동위원소 생산은 조사후 target의 시료전처리, 방사성핵종 화학분리, 방사성핵종 회수 단계 등으로 구분될 수 있으며, 각 단계별로 적정용량의 핫셀이 필요하다. 시료전처리, 화학분리 및 회수단계에서 요구되는 화학 hot-cell은 6 m(L) × 2 m(W) × 4 m(H) 정도의 크기가 각각 필요하다. 또한 폐액저장조용 별도의 hot-cell이 필요하다. 차폐 셀의 구조는 조사후 target의 용해과정에서 발생되는 iodine, xenon 등의 fission gas를 고려하여야 하며, 공정용액, 액체폐기물 등의 고준위 방사성물질을 안전하게 취급할 수 있는 차폐능을 갖는 α-γ type hot-cell로서 중량 콘크리트로 건조된 차폐체이어야 한다.

나. 차폐셀 기능 및 표준선원 기준 조건

An 동위원소들은 조사후 target으로부터 화학 분리/정제 과정을 거쳐 개별적으로 얻어진다. 이때 처리 과정에서 발생하는 액체폐기물은 다량의 핵분열생성물을 포함하므로 고준위 폐액으로 분류되며, 폐액 저장조로 이송되어 일정기간

보관 후 처리된다. 조사후 target에 대한 기준 선원 평가결과의 예를 들면, U-235의 농축도가 93 w/o인 우라늄 표적을 core zone에서 5일 동안 조사시킬 때 약 1,400 Ci/g의 방사능이 발생하는 것으로 알려져 있다. 우라늄 기준 선원을 hot-cell 내에서 8.5 g 사용한다고 가정하면, 시료전처리 및 화학분리 단계에서 약 11,800 Ci의 방사능을 보이며, 또한 2차 폐기물로 발생하는 폐액은 10,220 Ci로 알려져 있다.

다. 취급 기준선원 및 차폐기준

원자력법과 한국원자력연구원 기존 시설의 설계기준을 고려하여 피폭선량은 평가하여야 하는데, 이에 대한 hot-cell의 설정기준은 다음과 같다.

- 벽면 (정면/측면/뒷면) : 1 mrem/hr
- 천정과 바닥면 : 15 mrem/hr

이와 같은 피폭선량 기준에 의하여 hot-cell 벽은 중량 콘크리트(3.45 g/cm^3) 재료로 구성할 때 정면, 옆면, 뒷면의 두께는 102 cm, 천정은 84.5 cm로 차폐하여야 한다. 이때 차폐된 시료로부터 발생하는 선량율은 정면, 옆면, 뒷면에서 각각 1 mrem/hr 이고, 천정의 경우는 14.5 mrem/hr의 선량율로, 설정된 기준이하의 결과를 얻을 수 있다.

라. 차폐체의 환기설비

차폐 셀 내에서는 항상 대기압보다 낮은 압력을 유지하여 방사성물질이 외부로 유출되는 것을 방지하도록 설계되어야 하고, 조사후 target를 취급하게 됨에 따라 α - γ 차폐 셀이어야 한다. 따라서, 동위원소 생산을 위한 hot-cell은 한국원자력연구원 보유 hot-cell을 참조로 다음과 같은 설계기준(표 1.)이 적합할 것으로 여겨진다.

마. 핵물질 취급을 위한 방사화학 실험실 인허가 법규

관련 법규를 근거로 다음과 같이 핵연료물질의 사용허가 신청서를 규제기관에 작성하고 제출하여야 한다.

- 신청인의 성명 및 주소

- 핵연료 물질의 사용 또는 소지의 목적 및 방법
- 핵연료 물질의 종류 및 연간 사용 또는 소지의 예정량
- 핵연료 물질의 사용 또는 소지의 장소
- 사용 시설의 위치/구조 및 설비
- 저장시설의 위치/구조 및 설비와 저장능력
- 폐기 시설의 위치/구조 및 설비

(표 1.) 동위원소 생산을 위한 hot-cell의 설계기준과 한국원자력연구원 보유 hot-cell의 설계기준 비교

구 분		설계기준	KAERI 보유 hot-cell	
			조사재 시험시설	고화체 시험시설
핫셀 내부 온도		18 ~ 30 ℃	18 ~ 30 ℃	18 ~ 27 ℃
핫셀 내부 압력		-25 ~ -50 mmAq	-15 ~ -25 mmAq	-25 ~ -50 mmAq
환기횟수		12회/hr 이상	10회/hr 이상	12회/hr 이상
면속도		0.75 m/sec.	0.5 m/sec.	
필터 조건	급기 필터	PRE+HEPA+Charcoal	PRE+HEPA	PRE+HEPA+Charcoal
	셀내 필터	PRE+HEPA+Charcoal	PRE+HEPA	PRE+HEPA+Charcoal
	배기 필터	HEPA+Charcoal	HEPA+Charcoal+HEPA	HEPA+Charcoal

이외 핵연료 물질 사용에 필요한 기술능력에 관한 설명, 방사선차폐와 오염된 물질의 폐기에 관한 설명, 사고에 따른 재해방지 조치에 관한 설명, 계획된 실험실 내부 평면도의 자료를 별첨하여 제출되어야 한다. 관련 법규는 다음과 같은 원자력법과 원자력법 시행령(별첨자료 참조)을 기준으로 한다.

- 원자력법 제43조(핵연료주기 사업의 허가등)
- 원자력법 제44조(허가등 기준)
- 원자력법 시행령 제14조(지정신청)

제 4 절. 연구용 악티나이드 동위원소 미량 생산체계 수립

최근 상용 원자력발전소 및 연구용 원자로의 해외 수출이 이루어짐에 따라 국내 원자력 연구 및 기술개발이 더 이상 선진국의 기술을 답습하는 수준에서 탈피하여 자체적인 원천기술을 확보하여야 할 필요성이 크게 대두되고 있다. 또한, 국내 양성자 가속기 건설(경주, 진행중)과 중이온 입자 가속기 건설(세종시 과학비즈니스 벨트 내, 계획중)이 추진되면서 기초 원천기술 개발에 대한 요구가 증대되고 있는 실정이다. 원자력 산업의 원천기술을 확보하는 첫 단계는 Nuclear Data Base를 자체적으로 확보하는 일과 함께 악티나이드 원소의 기초 연구가 활발히 전개되어야 할 것으로 판단된다. 따라서, 이러한 연구의 대상물질인 transuranium 원소를 포함한 미량의 연구용 An 동위원소가 절실히 필요하게 될 것이다. 이전에는 미국 Oak Ridge National Laboratory(ORNL)로부터 수입해 왔던 미량의 연구용 An 동위원소를 더 이상 해외에서 공급받기 어려운 국제적인 상황을 고려한다면, 이제는 국내에서 조그만 규모가 되더라도 자체적으로 생산할 수 있는 방안이 모색되어야 할 것이다.

본 과제에서는 정치/외교적인 문제를 제외하고 기술적인 타당성을 검토하고 미량의 연구용 An 동위원소를 자체적으로 생산할 수 있는 방안을 수립하고자 한다. 앞서 검토한 바와 같이, 국내 여건을 고려하여 U-238 산화물을 표적으로 사용하고 $^{239}_{93}\text{Np}$, $^{237}_{93}\text{Np}$, $^{238}_{94}\text{Pu}$, $^{239}_{94}\text{Pu}$ 핵종들을 우선적으로 자체 생산할 수 있을 것으로 생각된다. 첫째, 표적으로는 우라늄/알루미늄, 우라늄/실리콘 합금 봉, 또는 우라늄 산화물 막이 될 것이며, 표적을 제조하는 일은 기술적으로 전혀 문제가 되지 않을 것으로 판단된다. 둘째, 중성자 선원으로는 하나로 연구용 원자로(열중성자속 $\sim 10^{13}$ 내지 10^{14} n·cm²/sec)를 활용하고, 입자빔 선원으로는 양성자 가속기, 또는 중이온 입자 가속기를 활용하는 것이 타당해 보인다. 중수소(^2_1H) 입자 가속이 필요한 $^{238}_{94}\text{Pu}$ 생산의 경우, 양성자 가속기에서 중수소 입자를 가속할 수 있을 것으로 생각된다. 셋째로 대부분 핵분열생성물을 함유한 조사된 표적 물질 내 특정 An 원소를 분리/정제하는 방사화학 실험실로 원자로 혹은 가속기 시설 내 기존 실험실을 활용할 수 있으나, 특정한 목적을 수행할 수 있는 hot-cell과 glove box를 갖춘 방사화학 실험실 설비가 준비되어야 한다. 이러한 신규 원자력시설이 만들어 진다면, 당연히 이에 따른 안전관리 절차가 준비되어야 하고 정기적으로 규제기관으로부터 심사 또는 검사가 이루어져 자체적으로 수행할 원자력 연구활동이 투명하게 보여 져야 한다. 특히, An 원소들 가운데,

국내 원자력법에서 정하고 있는 핵물질과 방사성동위원소를 구분하여 핵 및 방사성 물질의 물질수지를 명확히 관리하여 투명한 핵물질 보장조치가 이루어져야 한다. 마지막으로 앞서 언급한 시설은 국내 원자력시설 및 방사선에 대한 안전 규제에 따라 “기타 원자력 시설”로 분류되며, 방사선원, 방사성폐기물, 환경 방사능, 방사선 피폭, 방사능 방재에 관한 사항들을 자체적으로 관리하여야 하고, 품질보증 검사를 포함한 정기 검사 및 운영 변경사항에 대한 심사를 규제기관으로부터 정기적으로 받아야 한다.



제 4 장. 연구개발목표 달성도 및 대외 기여도

연구목표	연구결과	달성도 (%)
국내생산 연구용 An 동위원소 선정 및 표적제조 기술	<ul style="list-style-type: none"> • TRU원소 생산 관련 핵반응 검토 • 국내 생산이 가능한 연구용 An 동위원소 선정, 현 국내 실정을 감안하여 ^{237}Np, ^{239}Np, ^{238}Pu, ^{239}Pu로 제한 설정 • TRU원소 생산 관련 표적제조 기술 검토 	100 %
조사 표적 내 특정 An원소 분리/정제 기술 체계 수립	<ul style="list-style-type: none"> • 조사 표적 내 TRU원소 개별 분리/정제 절차 확보 • 표적 조사 및 TRU원소 개별 분리/정제에 따른 실험실 요건 검토 	100 %
An생산에 따른 실험실 shielding 요건 및 인허가 사항 확보	<ul style="list-style-type: none"> • 실험실 방사선 차폐 및 인허가 관련 국내 현황 검토 • 실험실 방사선 차폐 및 인허가 관련 사항 파악 및 법적 규제 요건 검토 	100 %
연구용 An동위원소 생산체계 수립	<ul style="list-style-type: none"> • 표적제조, TRU 원소 개별 분리/정제 절차, 실험실 차폐 및 인허가 관련 법적 규제요건 검토 • 국내 생산이 가능한 연구용 TRU 원소(^{237}Np, ^{239}Np, ^{238}Pu, ^{239}Pu) 선정 • An 동위원소 미량 생산체계 확립 	100 %

제 5 장. 연구개발결과의 활용계획

산업적 활용	후속연구 연계	기 타
<input type="checkbox"/> 사업화추진 () <input type="checkbox"/> 기술이전 및 지도 () <input type="checkbox"/> 산업적 활용 가능()	<input type="checkbox"/> 결과물(관련 DB등)제공() <input type="checkbox"/> 후속연구추진() <input type="checkbox"/> 교육 및 연구목적()	<input type="checkbox"/> 기타 (O) <input type="checkbox"/> 계획 없음()
향후 연구개발 결과의 활용계획(현재 ~ 과제 종료후 5년까지)		
가. 활용개요	<ul style="list-style-type: none"> • 연구용 TRU 원소의 국내 생산하거나, 또는 TRU 원소를 이용한 연구와 관련된 과제 기획에 반영 • TRU 원소를 이용한 연구 과제의 대상물질로 사용 	
나. 활용일정	<ul style="list-style-type: none"> • 과제 종료후 2년 : 연구용 TRU 원소의 국내 생산, 또는 TRU 원소를 이용한 연구와 관련된 과제 기획에 반영 • 과제 종료후 3년~5년 : TRU 원소를 이용한 연구 과제의 대상물질로 사용 	
다. 활용방법	<ul style="list-style-type: none"> • TRU 원소를 이용한 연구과제의 대상물질로 활용 	
라. 기대효과	<ul style="list-style-type: none"> • 해외 수입이 단절된 연구용 악티나이드 동위원소를 국내에서 생산함으로써, 사용후핵연료 활용 및 고준위 방사성폐기물 처분과 관련된 악티나이드 기초/기반 연구를 활성화 할 수 있을 것으로 기대함. 	

제 6 장. 참고문헌

1. 이윤준 외, “방사성 동위원소 국내 생산방안에 관한 연구”, 과학기술부(제주대학교) 1999
2. 한국동위원소협회, “2009년도 방사선 이용 통계”, 2010
3. G. T. Seaborg and W. D. Loveland, “The Elements beyond Uranium”, 1990, John Wiley & Sons, Inc.
4. C. Keller, “The Chemistry of the Transuranium Elements”, 1971, Verlag Chemie GmbH



원자력법

- 제43조(핵연료주기사업의 허가등) ① 핵원료물질 또는 핵연료물질의 정련 사업 또는 가공사업(변환사업을 포함한다)을 하고자 하는 자는 대통령령이 정하는 바에 따라 교육과학기술부장관의 허가를 받아야 한다. 허가받은 사항을 변경하고자 할 때에도 또한 같다. 다만, 교육과학기술부령이 정하는 경미한 사항의 변경은 이를 신고하여야 한다.
- ② 사용후 핵연료처리사업을 하고자 하는 자는 대통령령이 정하는 바에 따라 주무부장관의 지정을 받아야 한다. 지정받은 사항을 변경하고자 할 때에는 주무부장관의 승인을 얻어야 한다. 다만, 교육과학기술부령이 정하는 경미한 사항의 변경은 이를 신고하여야 한다.
- ③ 제1항의 규정에 의한 허가를 받고자 하는 자는 교육과학기술부장관에게, 제2항의 규정에 의한 지정을 받고자 하는 자는 주무부장관에게 각각 그 허가 또는 지정신청서에 방사선환경영향평가서·안전관리규정·설계 및 공사방법에 관한 설명서·사업의 운영에 관한 품질보증계획서 기타 교육과학기술부령이 정하는 서류를 첨부 제출하여야 한다.
- ④ 사용후핵연료의 처리·처분에 관하여 필요한 사항은 교육과학기술부장관과 지식경제부장관이 관계부처의 장과 협의하여 위원회의 심의·의결을 거쳐 결정한다.
- ⑤ 제13조의 규정은 제1항 및 제2항의 경우에 이를 준용한다. 이 경우에 제13조제3호중 "제17조"는 "제46조"로 본다.

제44조(허가등 기준) 제43조제1항 및 제2항의 규정에 의한 허가 또는 지정 기준은 다음과 같다.

1. 삭제 <2005.12.30>
2. 사업을 수행하는 데 필요한 교육과학기술부령이 정하는 기술능력을 확보하고 있을 것
3. 핵연료주기시설의 위치·구조·설비 및 성능이 교육과학기술부령이 정하는 기술기준에 적합하여 방사성물질등에 의한 인체·물체 및 공공의 재해방지에 지장이 없을 것
4. 핵연료주기시설의 운영으로 인하여 발생하는 방사성물질등으로부터 국민의 건강 및 환경상의 위해를 방지하기 위하여 대통령령이 정하는 기준에 적합할 것

원자력법 시행령

- 제145조(지정신청) ① 법 제43조제2항 본문전단의 규정에 의하여 사용후핵연료처리사업의 지정을 받고자 하는 자는 사업소마다 교육과학기술부령이 정하는 바에 의하여 지정신청서를 작성하여 주무부장관에게 제출하여야 한다.
- ② 제125조제2항의 규정은 제1항의 규정에 의한 지정신청에 관한 안전위원회 심의에 이를 준용한다.



서 지 정 보 양 식					
수행기관보고서번호	위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드		
KAERI/RR-3330/2011					
제목 / 부제	연구용 악티나이드 동위원소 국내 생산 타당성 연구				
연구책임자 및 부서명	김원호 원자력화학연구부				
연구자 및 부서명					
출판지	대전	발행기관	한국원자력연구원	발행년	2011
페이지	35 p.	도표	있음(O), 없음()	크기	Cm.
참고사항					
공개여부	공개(O), 비공개()		보고서종류	연구보고서	
비밀여부	대외비 (), _ 급비밀				
연구위탁기관			계약번호		
초록 (15-20줄내외)	<ul style="list-style-type: none"> • 현재까지 국내에서 TRU원소를 대상으로 한 연구는 선진국과 협력연구를 제외하고는 매우 제한적으로 수행되어 왔다. 국내 가속기 관련 연구가 활성화되고 RI 생산 기반기술이 확보됨에 따라, 연구용 An 동위원소를 생산하여 핵연료주기 관련 기초 연구를 적극적으로 추진할 수 있는 환경이 조성되고 있다. 따라서, An 동위원소의 국내 생산 가능성을 기술적으로 검토하였다. • 연구수행 내용으로는 TRU원소 생산과 관련된 핵반응을 조사하고, 국내 생산이 가능한 TRU원소를 선정하였으며, 국내 표적제조 기술 능력을 확인하였다. 조사된 표적 내 특정 TRU원소 분리/정제 기술 절차를 수립하고, 관련 실험실의 방사선 차폐 및 생산 및 이송에 따른 인허가 사항을 검토하여 국내에서 생산 가능한 연구용 악티나이드 동위원소 생산체계를 수립하였다. • 해외 수입이 단절된 연구용 TRU원소의 국내 생산 타당성을 검토함으로써, 사용후핵연료 활용 및 고준위 방사성폐기물 처분과 관련된 악티나이드 기초/기반연구를 활성화할 수 있을 것으로 기대함. 				
주제명키워드 (10단어내외)	국내 생산 타당성, TRU원소 선정, 표적제조, 특정 TRU원소 개별 분리/정제, 방사선차폐 및 인허가 사항				

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET					
Performing Org. Report No.		Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No.	INIS Subject Code
KAERI/RR-3330/2011					
Title / Subtitle		Feasibility Study of Actinide Radio-Isotopes Production for Research			
Project Manager and Department		Won-Ho Kim, Nuclear Chemistry Research Division			
Researcher and Department					
Publication Place	Daejeon	Publisher	KAERI	Publication Date	2011
Page	35 p.	Ill. & Tab.	Yes(O), No ()	Size	Cm.
Note					
Open	Open(O), Closed()		Report Type	Research Report	
Classified	Restricted(), ___Class Document				
Sponsoring Org.				Contract No.	
Abstract(15-20 Lines)		<p>At present, the domestic R&D activities on TRU elements have been very much limited to the case, that is used a tracer-level of TRU elements. Along with a discussion on the establishment of high energy accelerator, it is about the time for an investigation on the possibility for the domestic production of the TRU elements.</p> <p>After the investigation of nuclear reactions for the TRU elements production, the TRU elements that could be produced domestically are selected under the present situation. Technologies for the target preparation and the specified element separation with its purification from the irradiated target are reviewed with the licensing requirements of the facilities, related to the domestic production of the TRU elements. The domestic production system of the TRU elements for the academic research is established.</p> <p>The domestic production of the TRU elements will give us a great opportunity to improve our capability of the basic research on the TRU elements for our nuclear R&D programs and our nuclear industry.</p>			
Subject Keywords (About 10 words)		Possibility of domestic production, the TRU elements, Target preparation, Separation and purification, License			