JOURNAL OF RADIATION INDUSTRY

Technical article

17(4) : 543-549 (2023)
https://doi.org/10.23042/radin.2023.17.4.543

납 표준물질을 이용한 방사성동위원소 Thallium-201의 화학적 분리공정 개발

이준영[1], 김태현[1], 박정훈[1,*]

[1]한국원자력연구원 가속기동위원소연구실

Development of Chemical Separation Process for Thallium-201 Radioisotope with Lead Standard Material

JunYoung Lee[1], TaeHyun Kim[1] and JeongHoon Park[1,*]

[1]Accelerator Radioisotope Research Section, Korea Atomic Energy Research Institute, 29 Geumgu-gil, Jeongeup-si, Jeollabuk-do 56212, Republic of Korea

Abstract Thallium-201 (^{201}Tl) is a medical radioisotope which emits gamma rays when it decays and used in myocardial perfusion scans in single-photon emission tomography due to its similar properties to potassium. Currently, the Korea Institute of Radiological & Medical Sciences is the only institution producing ^{201}Tl in Korea, and optimization of ^{201}Tl production research is necessary to meet supply compared to domestic demand. To this end, technical analysis of plating target production and chemical separation methods essential for ^{201}Tl production research is conducted. It deals with the process of generating and separating ^{201}Tl radioisotope and target production, It can be generated through a nuclear reaction such as ^{nat}Hg(p,xn)^{201}Tl, ^{201}Hg(p,n)^{201}Tl, ^{nat}Pb(p,xn)^{201}Bi → ^{201}Pb → ^{201}Tl, ^{205}Tl(p,5n)^{201}Pb → ^{201}Tl, and considering impure nuclide generated simultaneously with the use of proton beam energy of 35 MeV or less, it is intended to be produced using the ^{203}Tl(p,3n)^{201}Pb → ^{201}Tl nuclear reaction. In particular, the chemical separation of Tl is a very important element, and the chemical separation methods that can separate it is broadly divided into four types, including solid phase extraction, liquid-liquid, electrochemical, and ion exchange membrane separation. Some chemical separations require additional separation steps, such as methods using selective adsorption. Therefore, this technical report describes four chemical separation methods and seeks to separate high-purity ^{201}Tl using a method without additional separation steps

Key words: Radioisotope, Thallium-201, Single photon emission computed tomography, Myocardial perfusion, Electroplated target

1. 서 론

Thallium-201 (^{201}Tl) 방사성동위원소는 다양한 의학적 연구 용도로 이용되고 있으며, 3.04 일의 반감기를 가지고 있다[1]. 생산법으로는 직접법과 간접법으로 나뉘어 ^{nat}Hg(p,xn)^{201}Tl, ^{201}Hg(p,n)^{201}Tl 또는 ^{nat}Pb(p,xn)^{201}Bi → ^{201}Pb → ^{201}Tl, ^{205}Tl(p,5n)^{201}Pb → ^{201}Tl [2,3] 등의 핵반응을 이용하여 생성시킬 수 있다. 그러나 앞선 방법에서는 높은 불순 핵종 생성 및 높은 양성자 빔 에너지가 필요하기 때문에 본 연구에서는 간접법으로 ^{203}Tl(p,3n)^{201}Pb → ^{201}Tl [4] 핵반응에 주목하고자 한다. 생성되는 불순 핵종으로는 ^{200}Tl과 ^{202}Tl으로 반감기가 각각 26시간, 12일이면서

http://www.ksri.kr/

Copyright © 2023 by
Korean Society of Radiation Industry

***Corresponding author.** JeongHoon Park
Tel. +82-63-570-3571 Fax. +82-63-570-3579 E-mail. parkjh@kaeri.re.kr

Received 1 December 2023 **Revised** 6 December 2023 **Accepted** 11 December 2023

^{201}Tl과 동일한 화학적 성질을 가지고 있어 분리해 낼 수 없기 때문에, ^{201}Tl 생산 시 이들 불순 핵종을 최소량의 생성 조건으로 확립해야 한다.

^{201}Tl은 1970년에 Kawana가 potassium과 유사한 특성이 있어 심근 관류 스캔에 처음으로 이용되었다[5]. 이후 전 세계 Tl-201의 시장 규모는 2016년 157.5 백만 달러 규모에서 연평균 성장률(CAGR)16.64%로 성장하여 2024년 460.9 백만 달러로 약 3배 증가할 것으로 예측되고 있다[6]. Tl 이온은 potassium과 rubidium 이온의 중간 크기로 세포막을 통한 passive penetration이 가능하여 유사한 체내 분포와 신경생리학적 기능을 가지고 있다[7,8]. ^{201}Tl은 electron capture에 의해 붕괴하여 mercury-201 안정동위원소로 변환된다. 방출되는 방사선은 X-ray 9 keV, K X-ray 68~82 keV와 γ-ray 135~167 keV이다[9,10]. 이때 방출되는 방사선으로 단일광자방출 단층 촬영에 이용될 수 있으며, 심근 관류 영상 평가를 통해 환자의 진단에 사용할 수 있다.

현재 국내에서 ^{201}Tl을 생산하는 기관은 원자력의학원이 유일하며 국내 수요 대비 공급을 충족시키기 위해 ^{201}Tl 생산 연구 최적화가 필요하며, 원자력의학원에서 사용되는 양성자 빔 에너지는 본 연구와 동일한 28 MeV를 사용하나 ^{201}Tl의 화학적 분리 시 고체상 추출법과 액체-액체 추출법을 혼용한 방식을 이용한다. 이 방법 또한 고순도의 ^{201}Tl을 추출할 수 있으나, 작업자 피폭 감소와 화학적 분리 절차 간소화를 위한 연구가 필요하다. 이를 위하여 ^{201}Tl의 생산 연구에 필수적인 도금 표적 제작과 화학적 분리 방법에 관한 기술 분석이 선행되어야 한다. 이러한 Tl의 화학적 분리 절차에 고려해야 할 사항으로 분리된 ^{201}Tl의 산화수가 중요하다. 심근 관류 질병 진단을 위한 방사성의약품으로 이용하기 위해서는 ^{201}Tl의 산화수가 3가 형태로 존재해야 되기 때문에 화학적 분리 시 이용되는 용매에 대한 pH를 정확히 조절해야 한다. 물속의 Tl(III)은 pH＜7 (25°C)에서 $Tl(OH)_3$로 침전될 가능성이 있지만, $Tl(OH)_2^+$ 및 $Tl(OH)_2^-$는 pH＜2에서도 형성될 수가 있으며, $TlCl_4^-$ (logK＝18)와 같은 안정한 복합체가 형성되지 않는 한 높은 환원 전위(＋1.26 V)로 인해 Tl(III)에서 Tl(I)로의 환원이 자발적으로 일어난다[11,12].

Tl을 분리할 수 있는 화학적 분리법으로는 크게 4가지로 구분되며, 그 방법으로는 액체-액체 추출법, 고체상 추출법, 전기화학적 분리법, 이온 교환막 분리가 있다. 액체-액체 추출법은 금속 방사성동위원소 분리를 위해 많이 이용되고 있으며 밀도가 서로 다른 유기 또는 수용성 용매에 금속 방사성동위원소를 넣고 충분한 반응시간을 두고 금속과 수소결합을 이루어 추출하는 방식이다. 하지만 추출 효율이 낮아 추출 공정을 반복하여 분리해야 하는 큰 단점을 가지고 있다. 고체상 추출법은 분리하고자 하는 금속 이온과 매질에 혼합된 불순금속들을 선택적으로 흡착시켜 목적 금속 이온과 선택성이 높은 용매를 흘려주어 목적 금속 이온 흡착, 불순물 제거, 목적 금속 이온 용출 순으로 이용될 수 있다. 방사성동위원소의 높은 비방사능 값을 유지하기 위해 적은 부피의 용매로 적용할 수가 있다는 큰 장점을 가지고 있다. 전기화학적 이용 금속 분리법은 음극 기판에 금속 이온의 선택적 흡착 반응을 이용하여 전착시키는 방식으로 고순도의 금속 이온을 분리할 수 있는 장점을 가지고 있지만 전기적 장치 및 고순도 기판 등이 사용되어 큰 비용이 필요하다. 이온교환수지는 희토류를 대량으로 분리하는 데 많이 이용됐으며, 양이온, 음이온 및 양쪽성 이온 교환 수지로 나뉜다. 이 분리 방법은 불순물 제거에 효과적이며, 최종적으로 용출되는 표적 금속 이온이 함유된 용매의 부피를 최소화할 수가 있어 추출된 금속의 응용 연구 및 농축하기에 유리하다.

본 연구에서는 RFT-30 사이클로트론을 기반으로 ^{203}Tl(p,3n)^{201}Pb → ^{201}Tl 핵반응을 이용한 생산 방법으로 표준물질을 이용한 Tl의 전기도금 표적 제작 및 고체상 추출법으로 화학적 분리 절차의 최적화 조건을 확립하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 재료

도금 표적 준비 과정에서 사용된 plate는 silver (bar shape 1×12 cm, 두원기계)를 사용하였으며, 도금에 사용된 표준물질은 thallium(I) chloride (≥99.999% trace metals basis, Sigma-aldrich, #229962)이다. 사용된 시약으로는 BRIJ-35 (30% Aqueous solution, #203724)은 Sigma-Aldrich Korea에서 구매하여 사용하였으며, peptone은 (#P5905) DUKSAN에서 구매하였다. 표적 녹임 및 정제 과정에 이용된 Nitric acid (HNO_3, #A467-500), water (H_2O, # AAJ71786AP)는 Thermo Scientific™사의 제품을 사용하였다. 고체상 추출법에는 Triskem사의 PB resin (PB-B50-A, 100~

150 μm)을 사용하였다.

2.2. 탈륨(^{201}Tl) 생성 조건

탈륨-201 (^{201}Tl) 생산을 위해 사전 문헌 조사를 통해 직/간접적 생성 조건 및 동시에 생성되는 불순 핵종(^{200}Tl & ^{202}Tl) 억제에 관한 분석을 수행하였으며, 표적 종류 및 핵반응에 따른 생성 핵종 및 기초연구를 통해 도금 표적 제작 및 화학적 분리 절차를 최적화하였다. SRIM code를 활용하여 양성자 빔 에너지 선정 및 감쇠 조건을 확립하였으며, 도금 표적 제작을 위해 자체 제작한 도금 컨트롤 시스템과 도금조를 이용하였다. 또한, 간접 생산방식으로 생성되는 ^{201}Pb의 분리를 위해 PB resin을 이용한 흡착분배계수 평가를 수행하였다.

2.3. Natural Tl 도금표적 제작

고가의 ^{203}Tl 농축물질을 이용하기 전 natural Tl을 이용한 표적물질 전기도금 방식으로 제작하였으며, ^{201}Tl 생성을 위한 양성자 빔 에너지에 따른 두께 및 필요량을 아래 계산식을 통해 유추하였다. 5도 기울어진 경사 표적 시스템을 이용하여 소량의 표적물질로 최대의 ^{201}Tl 생성 효율을 도출하고자 하였다.

Thickness: 70 μm

$\sin 5° = d\ \text{thickness}^{-1}$

$d = \text{thickness} \times \sin 5° = 6.1\ \mu m = 0.00061\ cm$

$\text{Amount of Tl} = d\ (cm) \times A\ (cm^2) \times p\ (g\ cm^{-3})$

$0.00061\ cm \times 12.167\ cm^2 \times 11.85\ g\ cm^{-3}$

d: 5도 기울어진 표적물질의 두께,
A: 표적물질 면적, p: 표적물질 밀도

Tl 도금 용액은 1 g의 Tl(I) chloride를 자석 교반 막대가 들어있는 500 mL 비커에 증류수 350 mL를 넣어 실온에서 450 rpm으로 1시간 동안 교반 후 anode로 사용되는 platinum (Pt) rod에 Tl oxide 생성을 방지하기 위해 1 g의 peptone을 추가하였으며, 동시에 도금면에 크리스탈 형성을 억제하기 위해 비이온성 계면활성제(BRIJ-35)를 1 mL 추가하였다. 최종 용액을 silver plate가 장착된 도금조에 넣은 후, 파형(톱니형), 전극(백금), 전압(2.2 V) 및 전극 거리(25 mm)를 포함한 최적화된 조건에서 silver plate에 도금하였다.

2.4. 흡착분배계수 평가

납 표준물질을 이용한 Tl의 화학적 분리 절차를 최적화하기 위해 Tl으로부터 Pb를 분리 후 Tl을 재분리하는 방식을 이용해야 하므로, PB resin을 이용하여 다양한 HNO_3 농도에 따른 Pb의 흡착능 평가를 수행하였다. 0.01, 0.1, 0.2, 0.4, 0.8, 1.0, 2.0 M의 HNO_3에 포함하고 있는 Pb를 동일한 조건(25°C, 250 rpm, 1시간 교반)에서 PB resin 50 mg당 흡착 분배계수 결과를 확인하였으며, 흡착능 단위는 PB resin 그램당 Pb 용액의 부피(mL)로 환산하여 분배계수(kd) 결과를 도출하였다.

2.5. Tl 화학적 분리

표적물질의 로딩, 세척 용액으로 1 M HNO_3 용액을 선정하였으며, 이는 ^{203}Tl 표적물질을 양성자 빔 조사 후 생성된 ^{201}Pb를 추출해야 하므로, 고농도의 HNO_3를 최종 선택하였다. 화학적 분리 절차는 양성자 빔이 조사된 표적물질을 conc. HNO_3에 녹여 0.45 μm 주사기 필터를 이용하여 불순물을 제거 후 H_2O를 첨가하여 1 M HNO_3 농도로 맞춘다. 이후, PB resin이 충진된 컬럼에 충분한 흡착 시간을 두기 위해 0.5 mL min^{-1}의 유속으로 로딩 후 1 M HNO_3으로 표적물질 회수 및 불순물을 완전히 제거한 후, 0.01 M HNO_3로 ^{201}Pb를 추출할 수 있다.

3. 결 과

3.1. 탈륨(^{201}Tl) 생성 조건

^{201}Tl 생산법으로는 직접법과 간접법으로 나뉘며 Table 1에 명시되어 있는 양성자 빔을 이용한 ^{201}Tl 생성 핵반응으로 ^{nat}Hg(p,xn)^{201}Tl, ^{201}Hg(p,n)^{201}Tl 또는 ^{nat}Pb(p,xn)^{201}Bi → ^{201}Pb → ^{201}Tl, ^{205}Tl(p,5n)^{201}Pb→^{201}Tl 등을 이용하여 생성시킬 수 있다. 표적물질에 따른 ^{201}Tl 생산 수율이 각기 다르며 불순 핵종 생성 및 높은 양성자 빔 에너지를 이용하지 않는 간접법으로 ^{203}Tl(p,3n)^{201}Pb→^{201}Tl 핵반응을 이용하여 생성시키고자 한다. 30 MeV 급 사이클로트론을 이용한 ^{201}Pb 생성 조건으로 28 MeV의 양성자 빔을 활용하기 위해 SRIM code를 이용하여 알루미늄 degrader 두께를 500 μm로 최적화하였다(Fig. 2). 생성되는 불순 핵종 ^{200}Tl과 ^{202}Tl의 반감기가 각각 26시간, 12일로 ^{201}Tl과 동일한 화학적 성질을 가지고 있어 분리해 낼 수 없어, 최소량의 생성 조건을 선정하였다(Fig. 1).

Table 1. ^{201}Tl production details related to nuclear reaction

Nuclear reaction	Proton beam energy (MeV)	Target materials	Production yield (mCi μAh^{-1})	Radionuclidic impurities
^{nat}Hg(p,xn)^{201}Tl ^{201}Hg(p,n)^{201}Tl	20~0	Hg, HgO, HgCl	0.3	–
^{nat}Tl(p,xn)^{201}Pb → ^{201}Tl	28~20	Tl metal Tl_2SO_4	0.7	^{200}Tl
^{203}Tl(p,3n)^{201}Pb → ^{201}Tl		^{203}Tl	2.2	^{202}Tl
^{205}Tl(p,5n)^{201}Pb → ^{201}Tl	46~38	^{205}Tl	1.9	^{200}Tl, ^{202}Tl
^{nat}(p,xn)^{201}Bi → ^{201}Pb → ^{201}Tl	55~47	Pb metal	0.61	^{200}Tl

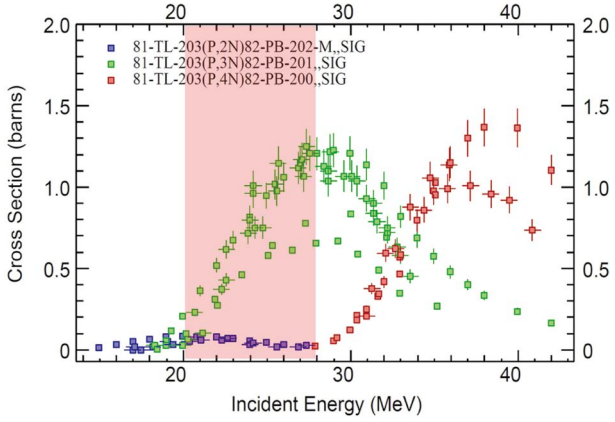


Fig. 1. (p,2n), (p,3n), (p,4n) cross-section as a function of ^{203}Tl proton beam energy.

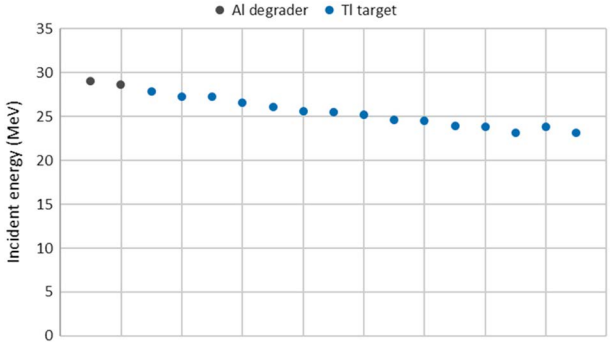


Fig. 2. Proton energy attenuation depending on the thickness of Al degrader and Tl target material.

3.2. Natural Tl 도금표적 제작

Tl (I) chloride가 녹아 있는 표적 용액에 peptone을 추가하여 양극 소재 (Pt rod)에 Tl oxide 생성을 방지하였으며, 비이온성 계면활성제 (BRIJ-35)를 넣어 도금 면에 크리스탈 형성을 억제하였다. 음극 소재로 Silver plate를 이용하여

Table 2. Tl plating conditions using standard material

No	Parameters	Specification
1	Waveform	Sawtooth
2	Frequency	100 Hz
3	Amplitude	1000
4	Tau	−1
5	Phase	0
6	Chop freq	1000 Hz
7	Chop duty	50%
8	Square duty	50%
9	Pos/Neg (%)	50/50
10	Offset	0
11	Turn time	8 s

Tl 도금을 수행한 결과, 핵반응 생성 조건에 따라 Table 2의 파라미터를 최적화 후 도금량 계산식을 통해 도출한 ^{201}Pb 최대 생성 효율인 Tl 90 mg이 도금되었으며, 현미경을 통해 단일 층으로 고르게 도금 (Fig. 3)된 것을 확인하였다.

3.3. 흡착분배계수 평가

^{203}Tl(p,3n)^{201}Pb → ^{201}Tl 핵반응 시 생성되는 ^{201}Pb를 흡착 후 붕괴하여 나오는 ^{201}Tl을 재분리하기 위해 Pb의 흡착능 평가를 수행한 결과, Pb의 흡착분배계수는 0.2 M HNO_3 농도 이상에서 Kd값 >1,000 mL g^{-1}을 확인하였으며 (Fig. 4), 양성자 빔 조사 후 표적물질을 고농도 HNO_3에 녹여내야 하므로 컬럼을 이용한 고체상 추출법에 안정적으로 Pb를 흡착할 수 있는 1 M HNO_3을 선정하였다.

3.4. Tl 화학적 분리

PB resin을 이용하여 확립된 다양한 농도의 HNO_3 용

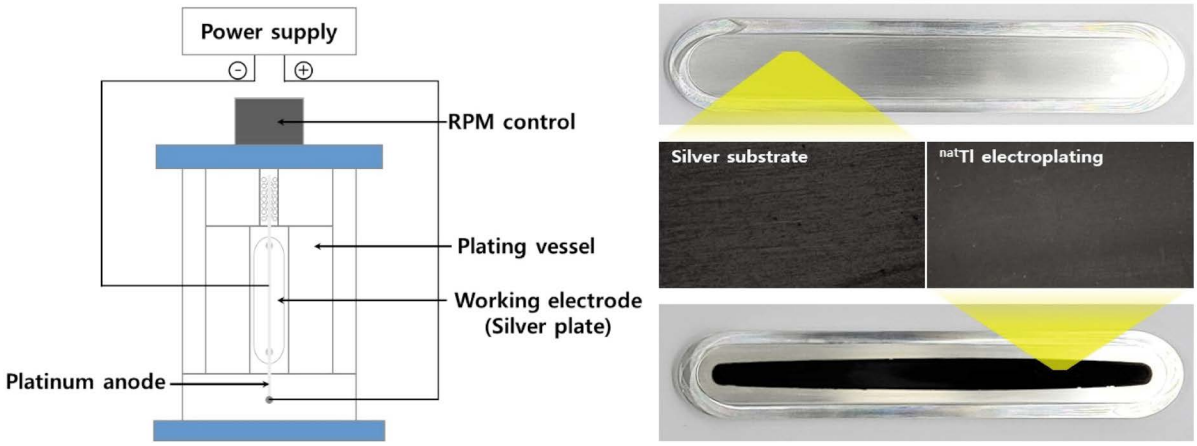
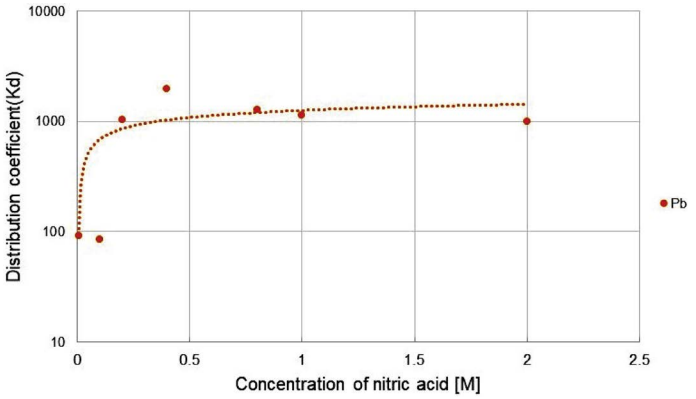


Fig. 3. Plating equipment and ^{nat}Tl electrodeposition on silver plate.



HNO_3 [M]	0.01	0.1	0.2	0.4	0.8	1	2
Pb	91.05 ± 5.31	85.54 ± 3.15	1028 ± 8.47	1945 ± 10.1	1272 ± 9.80	1133 ± 9.11	988.5 ± 10.5

Fig. 4. Pb adsorption distribution coefficient at various nitric acid concentrations using solid PB resin.

액에서의 분배계수 결과를 기반으로 Tl 표적물질 회수 및 Pb의 화학적 분리 절차를 확립하였으며, 방사화 표적 녹임, 여과, 불순물 제거 및 Tl 용출의 4단계로 최적화하였다 (Fig. 5).

4. 고 찰

양성자 빔을 활용한 ^{201}Tl의 생산은 직/간접적으로 구분할 수있으며, ^{nat}Hg(p,xn)^{201}Tl, ^{201}Hg(p,n)^{201}Tl 또는 ^{nat}Pb(p,xn)^{201}Bi → ^{201}Pb → ^{201}Tl, ^{205}Tl(p,5n)^{201}Pb → ^{201}Tl 등의 핵반응을 이용하여 생성시킬 수 있다. 본 연구는 30 MeV 급 사이클로트론을 이용한 ^{201}Tl 생산으로 간접 생산 방식인 ^{203}Tl(p,3n)^{201}Pb → ^{201}Tl 핵반응을 이용하여 생성시키고자 하였다. 이때 동시에 생성되는 ^{200}Tl과 ^{202}Tl는 비교적 긴 반감기를 가지고 있으며, ^{201}Tl과 동일한 화학적 성질을 가지고 있어 분리해 낼 수 없다. 따라서, 최소량의 생성 조건을 확립하여 불순 핵종의 생성을 감소시켜야 하므로 ^{201}Tl 핵반응 생성 조건을 최적화하는 사전 문헌 분석을 수행하였다. SRIM code를 통한 핵반응 단면적 및 degrader에 따른 에너지 감쇠 정도를 확인하여 30 MeV 급 사이클로트론의 양성자 빔을 활용한 ^{201}Tl 생성 조건을 확인하였다. 또한, 본 연구에서는 고가의 표적물질을 이용 전 표준물질 (Natural Tl)을 이용한 도금 표적을 제작하였으며, silver

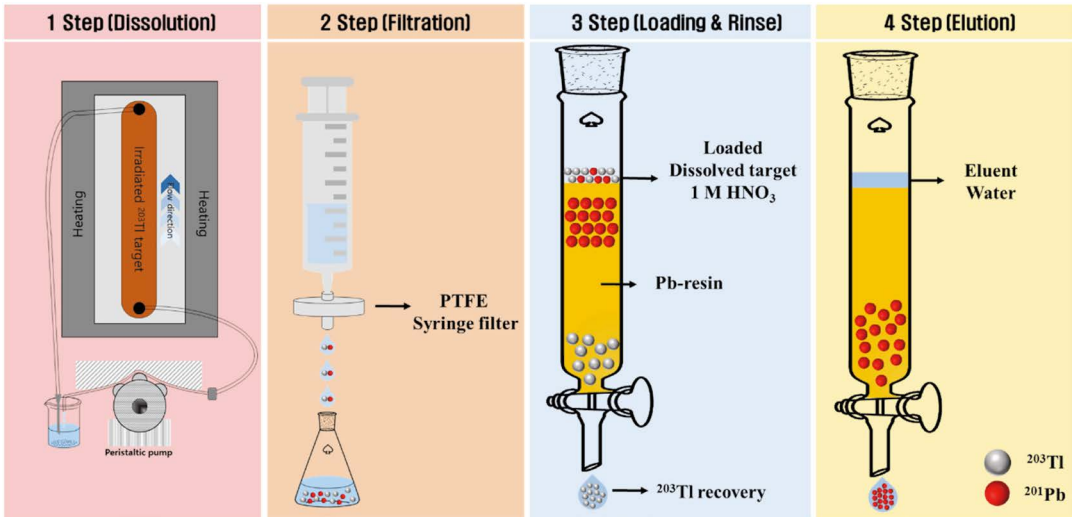


Fig. 5. Pb/Tl chemical separation procedure.

plate에 Tl (I) chloride를 이용하여 산화물 생성 및 크리스탈 형성 억제를 위해 계면활성제와 단백질을 추가하여 단일층으로 고르게 분포된 Tl 도금 표적을 제작하였다.

본 연구에서는 표적물질에 양성자 빔 조사 후 표적물질 재사용을 위한 회수 및 고순도의 ^{201}Tl을 분리하기 위해 PB resin을 이용한 Pb의 흡착분배계수 평가를 수행하여 0.2~1.0 M HNO_3에서의 높은 흡착 효율을 보였다. 이는 표적물질에 양성자 빔 조사 후 화학적 분리로 정제하기 위해 강한 산 용액으로 회수해야 하므로 1 M HNO_3 용액을 이용한 표적 용액 로딩, 세척 단계에 도입하였다. 컬럼 크로마토그래피 방식으로 PB resin이 충진된 컬럼에 1 M HNO_3에 용해되어 있는 표적 용액을 로딩, 세척 후 0.1 M 농도 이하의 HNO_3으로 최종 용출하는 방법으로 최적화하였다.

고가의 표적물질인 ^{203}Tl을 대체하여 ^{nat}Tl을 사용한 전기도금법을 통해 표적 제작 절차 및 화학적 분리 절차를 최적화함으로써 고효율의 ^{201}Tl 생산 및 분리를 가능하게 할 것으로 사료된다.

5. 결 론

30 MeV 급 사이클로트론을 이용한 ^{201}Tl의 생산을 위하여 핵반응, 표적 제작 및 화학적 분리 조건을 최적화한 결과, 최소량의 농축표적물질(^{203}Tl)과 고체상 추출법을 이용한 추가 분리 단계 없이 고순도의 ^{201}Tl을 생산할 수 있는 가능성을 확인하였다. Silver plate에 표준물질로 사용된 Tl을 도금하였으며, ^{201}Tl의 화학적 분리를 위해 PB resin을 이용한 흡착분배계수 평가(Pb 흡착능 $Kd > 1000$ mL g^{-1}) 결과를 토대로 화학적 분리 절차를 최적화하였다. 이러한 연구는 의학 및 핵의학 분야에서 ^{201}Tl의 활용을 향상하게 시키고, 고효율의 ^{201}Tl 생산 및 분리를 가능하게 함으로써 의학적 진단 및 연구에 이바지할 수 있을 것으로 사료된다

사 사

본 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국원자력연구원 주요사업(수출형 35 MeV 사이클로트론 시스템 개발, 523530-23)의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Nelson BJ, Wilson J, Schultz MK, Andersson JD and Wuest F. 2023. High-yield cyclotron production of ^{203}Pb using a sealed ^{205}Tl solid target. *Nucl. Med. Biol.* **116**:108314. https://doi.org/10.1016/j.nucmedbio.2023.108314.
2. National Nuclear Data Center. Accessed Dec 1, 2023. www-nds.iaea.org/exfor/servlet/X4sSearch5.
3. Oranj LM, Jung N, Bakhtiari M, Lee A and Lee H. 2017. Cross sections of proton-induced nuclear reactions on bismuth and lead up to 100 MeV. *Phys. Rev. C* **95**(4):044609. https://doi.org/10.1103/PhysRevC.95.044609.

4. Zaitseva N, Deptula C, Khan KS, Khwan KK, Mikolaewsky S and Khalkin V. 1991. Separation of thallium-201 from Tl, Pb and Bi cyclotron target materials. *J. Radioanal. Nucl. Chem*. **149**:235-245. https://doi.org/10.1007/bf02062049.
5. Chang WK, Young JK, Joon CP, Jae PL, Young SL, Hee YK, Jong JK, Ki BS, Tae HR, Jang SC, Jae HK, Soon JH, Kyu BC and Si WK. 1998. Diagnostic Value of Dipyridamole Tc-99m Tetrofosmin SPECT for Detection of Coronary Artery Disease. *Korean Circ. J.* **28**(6):923-930. https://doi.org/10.4070/kcj.1998.28.6.923.
6. 2020 KARA RT REPORT. Present and Future of Global Nuclear Medicine Radioisotope. No. 3-1:7.
7. Sty JR and Starshak RJ. 1985. Thallium-201 myocardial imaging in children. *J. Am. Coll. Cardiol.* **5**(1):128S-139S. https://doi.org/10.1016/s0735-1097(85)80154-6.
8. Yu H-b, Li M, Wang W-p and Wang X-l. 2016. High throughput screening technologies for ion channels. *Acta Pharmacol. Sin*. **37**(1):34-43. https://doi.org/10.1038/aps.2015.108.
9. Qaim S, Weinreich R and Ollig H. 1979. Production of ^{201}Tl and ^{203}Pb via proton induced nuclear reactions on natural thallium. *Int. J. Appl. Radiat. Isot.* **30**(2):85-95. https://doi.org/10.1016/0020-708X(79)90138-8.
10. AC07607271. 2009. A. Cyclotron produced radionuclides-physical characteristics and production methods; Internat. Atomic Energy Agency.
11. Martin LA, Wissocq A, Benedetti M and Latrille C. 2018. Thallium (Tl) sorption onto illite and smectite: Implications for Tl mobility in the environment. *Geochim. Cosmochim. Acta* **230**:1-16. https://doi.org/10.1016/j.gca.2018.03.016.
12. Lin TS and Nriagu J. 1998. Revised hydrolysis constants for thallium(I) and thallium(III) and the environmental implications. *J. Air Waste Manag. Assoc*. **48**(2):151-156. https://doi.org/10.1080/10473289.1998.10463658.