'2000 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

Fission Mo-99 분리, 정제를 위한 공정 Parameters 연구

Study on Process Parameters for Fission Mo-99 Separation and Purification

정원명, 박진호, 황두성, 이규일, 김연구, 박경배

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

Tc-99m은 짧은 반감기(6.02hr)와 낮은 에너지준위(14keV)로 인한 장점으로 의료용 방사성 동위원소로서 가장 많이 활용되고 있으며, Mo-99는 Tc-99m의 모핵종으로서 Mo-99가 β 붕괴하여 Tc-99m이 생성된다. 본 연구에서는 fission Mo-99의 국내 제조를 위한 Mo 분리, 정제공정으로 benzoin oxime 침전공정, activated 흡착공정, 알루미나 흡착공정의 단위공정들을 조합하여 구성하였으며, 각 공정을 대상으로 실험을 수행하여 주요 조업변수들의 변화에 따른 Mo 회수율 및 정제율을 측정하여 최적 조업조건을 제시하고, 공정 장치의 설계를 위한 기초 자료들을 확보하였다. 또한 각 단위공정들을 조합하여 fission Mo-99 제조를 위한 종합공정을 설치하고 단위공정 별로 선정된 조업조건을 적용하여 종합공정의 성능평가 시험을 수행하였으며, 그 결과 Mo 회수율 85%, Mo 정제율 98%로서 목표치인 Mo 회수율≥80%, Mo 정제율 ≥95%를 상회하는 것으로 확인되었다.

Abstract

Tc-99m is an extremely useful tool for medical diagnosis because it has good nuclear properties, short half life (6.02 hours) and low gamma energy (140keV), and the radioisotope Mo-99 is the only parent nuclide, and converted to Tc-99m by β-decay. In this study, the chemical process is proposed for domestic production of fission Mo-99. The process is combined with several unit processes such as benzoin oxime precipitation process, activated adsorption process, alumina adsorption process. And the optimum process parameters in each unit process are suggested to get the highest Mo recovery and purification yields by experiments. As the results of performance test of the comined process under optimum process parameters, the recovery and purification yield of Mo reach to 85% and 98%, higher than the goal(80% and 95%).

1. 서 론

Fission Mo-99는 의료용 방사성 동위원소 세계 수요량의 80%를 차지하는 Tc-99m의 모핵종으로서 Mo-99가 β 붕괴하여 Tc-99m이 생성된다. Tc-99m은 짧은 반감기(6.02시간)와 낮은 에너지준위(140Kev)로 인해 같은 용도로 사용되고 있는 다른 방사성 동위원소(Au-198, I-131, Sr-98m)에 비해 의료 진단시 피폭선량이 매우 적다. 또한 인체조직의 투과성, 이상 조직과의 친화성 및 결집성이 양호하고 산란성이 적어 핵의학용 진단제로서 정확성이 높기 때문에 뼈, 심장, 뇌, 기타 장기의 암 등 난치성 질환의 진단에 가장 많이 활용되고 있는 의료용 동위원소이다.

현재 세계 수요는 약 40만 Ci-Mo(약 800억원 규모)이며, 그 수요가 계속 증가하여 2004년에는 약 60만 Ci-Mo까지 증가할 것으로 예상된다. 그러나 세계시장의 75%를 카나다 Nordion사가 독점 공급하고 있으며, 새로운 원자로 건설 투자로 인한 가격 상승과 공급 불안정, 방사성 동위원소의 장거리 운반으로 인한 손실 등 문제점으로 인해 IAEA를 중심으로 점차 자국 내 생산, 공급 및 권역별 back-up 체계 구축을 권장하고 있다. 현재 국내 수요는 약 3000 Ci-Mo로서 전량 수입에 의존하고 있으며, 한국원자력연구소에서는 우선 국내 수요량을 충당하기 위한 fission ^{99}Mo 제조공정의 연구개발을 수행 중에 있다.

Mo-99 제조방법으로는 Fig.1에서와 같이 Mo-98로부터 생성되는 중성자 포획(neutron capture) 방법과 U-235의 핵분열(fission)에 의해 생성되는 방법이 있으나, U-235의 핵분열 방법에 의해 제조되는 Fission Mo-99가 비방사능(specific activity)이 높고 대량 생산으로 인한 높은 경제성 때문에 세계적으로 상업생산에 이용되고 있다.

Fission Mo-99를 제조하기 위해서는 Mo 분리, 정제기술과 함께 조사용 원자로, 차폐시설, 고준위 폐액 처리기술 등의 확보가 필수적이며, 이를 위해서는 많은 재원이 소요된다. 그러나 국내에서는 한국원자력연구소에 연구용 원자로인 '하나로'와 동위원소 생산을 위한 차폐시설이 건설되어 1995년 초부터 가동을 시작함으로서 이를 위한 기반시설을 확보하고 있다.

Fission Mo-99 제조공정은 Fig.2에 표기된 바와 같이 우라늄 표적제조, 원자로 조사, 표적 용해, Mo 분리.정제, 폐가스 및 폐액 처리공정 등으로 구성되며, 제조된 fission Mo-99는 Tc-99m generator에 loading하여 β-decay에 의해 생성되는 ^{99m}Tc만을 분리하여 병원에 공급하게 된다. 그러나 Fission Mo-99 제조를 위한 Mo 분리, 정제공정은 Mo-99의 품질 규격을 안전하게 만족시키기 위해서 3개 이상의 서로 다른 단위공정을 조합하여 사용하는 것이 일반적이다.

따라서 본 연구에서는 기술적 타당성 검토를 수행하여 1차 Mo 분리, 정제공정으로 현재 상용화된 공정 가운데서 핵분열생성불순물(fission impurities)의 제거 능력인 DF(Decontamination Factor) 값이 가장 크면서, 표적의 용해 용액인 산 매질에서 공정처리가 가능한 BO(α-Benzoin Oxime) 침전공정을 선정하였으며, 2차 Mo 분리, 정제공정으로는 1차 공정에서 사용된 유기물, 잔존 iodide, Mo-BO 침전물 용해에 첨가된 과산화수소 및 불순물 제거에 효과적이면서 1차 공정처리후 NaOH 매질인 Mo 용액을 부가적인 전처리 없이 연속적으로 공정처리가 가능한 장점을 고려하여 은이 함침된 활성탄 흡착공정을 선정하였다. 그리고 3차 Mo 분리, 정제공정으로는 공정이 가장 간단하고 공정기술이 가장 잘 확립되어 있는 알루미나 흡착공정을 선정하였다.

선정된 Mo 분리, 정제를 위한 각 단위공정별로 실험을 수행하여 공정 변수에 따른 Mo의 회수율과 정제율을 측정하여 각 단위공정별 최적 조업조건을 확립하고 공정 및 장치 설계를 위한 공정자료를 확보하였으며, 최적 조업조건을 적용한 조합공정을 설치하고, 공정실험에 의한 성능평가에 의해 Mo 분리, 정제 조합공정의 Mo의 회수율과 정제율을 확인함으로서 fission Mo-99의 국내 제조를 위한 공정으로서의 적용가능성을 확인하기 위하여 본 연구를 수행하였다.

2. 실 험

가. Benzoin Oxime 침전공정

1) 시약

- Mo 용액 : ADM[Ammonium Di-Molybdate]을 자유산도 1N 3N 황산용액에 용해시켜 Mo 농도 50ppm의 용액을 제조하였다.
- B.O.(Benzoin Oxime) 용액 : 0.4N NaOH 용액에 α-Benzoin Oxime을 용해시켜, 2% 농도의 Benzoin Oxime 용액을 제조하였다.

2) 실험 방법

Mo 농도가 50ppm인 150 ㎖의 황산용액의 산도를 1.0, 1.5, 2.0, 3.0N로 변화시키면서 BO/Mo의 질

량비가 5, 10, 20, 25, 30이 되도록 제조된 B.O. 용액을 첨가하여 20분간 침전 반응시킨 후 침전물을 여과하고(pore size: 1.0 ㎛), 증류수 및 0.1N황산용액으로 세척한 후 침전물을 H_2O_2가 1% 포함된 0.4N NaOH 용액에 25분간 용해하여 용액 중 Mo 농도와 여액의 Mo 농도를 ICP와 AA(모델명 GBC 906)로 분석하여 Mo의 회수율을 계산하였다.

나. Activated carbon 흡착공정

1) 시약

• Activated carbon : Ag가 0.4% 함침된 Speakman activated carbon을 사용하였으며, 입도는 14x40 U.S.mesh, 비표면적 1233m^2/g, 평균 pore 지름 17.1Å이고 micro pore가 전체 pore의 95%를 차지한다.

• B.O.(Benzoin Oxime) 용액 : 0.4N NaOH 용액에 α-Benzoin Oxime을 용해시켜 10 1000ppm 농도의 Benzoin Oxime 용액을 제조하였다.

2) 실험방법

• BO 흡착평형 시험 : BO 농도가 10 1000ppm 용액 100cc에 Activated carbon을 0.05g 2g을 주입하고 shaking한 후 2일 동안 방치하여 흡착평형에 도달한 후 용액 내의 activated carbon을 제거하고 용액 내에 TOC를 측정하여 benzoin oxime의 흡착량을 측정하였다.

• Column 시험 : 흡착평형 자료를 기준으로 activated carbon을 12g이 충진되도록 설계된 18(지름)x100(길이)mm 크기의 column을 이용하여 TOC 농도 500ppm 기준의 BO 용액을 유량 10 100 cc/min 범위에서 공급하면서 흡착능을 측정하였다.

다. Alumina 흡착공정

1) 시약

• Mo 용액 : ADM [Ammonium Di-Molybdate: $(NH_4)_4(Mo_2O_8)$], 질산, 증류수를 이용하여 Mo 농도 50 ppm, 자유산도 2 0.001 N의 Mo 용액 제조

• 알루미나(Al_2O_3) : Merck사 제품의 산성알루미나(입도: 70 230mesh, 비표면적: 230㎡/g)

2) 실험방법

• Mo 흡착평형 및 탈착시험 : Mo 농도 10 50ppm인 용액의 산도 2 0.001 N에서 알루미나/Mo 무게비가 40 600 되도록 알루미나를 첨가하여 8시간 shaking 후 48시간 방치한 후 여과하여 용액 내 Mo 농도를 AA와 ICP를 이용하여 분석하여 흡착량을 측정하였으며, 흡착된 알루미나를 증류수로 세척한 후 NH_4OH를 첨가하여 4시간 shaking한 후 여과하여 용액 내 Mo 농도를 같은 방법으로 측정하였다.

• Column 시험 : 흡착평형 자료를 기준으로 alumina 33g이 충진되도록 설계된 18(지름)x145(길이)mm 크기의 column을 이용하여 Mo 농도 50ppm이고 산도 0.3N인 용액을 이용하여 흡착유량을 15 30cc/min 기준으로 흡착시킨 후 1N NH_4OH을 이용하여 유량 10, 15, 20cc/min에서 탈착하여 용액 내 Mo 농도를 AA, ICP로 분석하여 Mo의 회수율을 측정하였다.

라. 조합공정 성능시험

1) 모의 시료 제조 : 종합 공정평가를 위한 모의용액은 '하나로' 조사조건에서 fission Mo 국내 수요량을 기준으로 제시된 표적 설계안을 기준하였으며, 100시간 조사후에 1일 냉각후부터 Fission Mo 제조를 시작하는 것으로 기준하여 생성되는 fission products의 조성을 ORIGEN 코드에 의해 계산하였다. 생성되는 fission products 원소 중에서 Mo 분리, 정제 공정에서 영향을 미치는 주요 원소들을 선정하여 황산 2N 용액에 용해하여 모의 용액을 제조하였으며, 제조된 용액의 원소별 조성은 Table 1과 같다.

2) Fission Mo-99 제조를 위한 조합공정 장치를 Fig.의 사진과 같이 설치하여 각 단위공정에

서 선정된 최적 조업조건을 적용하고 성능평가를 위한 실험을 수행하여 각 단계별 Mo 회수율과 정제율을 측정하였다.

3. 결과 및 토론

가. Benzoin Oxime 침전공정

몰리브덴은 산, 알칼리 용액에 용해시 몰리브덴산염의 형태로 존재하고, 용액의 산도에 따라 다양한 이온 형태를 가지며, 몰리브덴산 이온의 등전점이 pH 0.9로서 그 이상의 산성에서는 몰리브딜 이온(MoO_2^{+2})으로 존재하는 것으로 알려져 있다.[1]

또한 몰리브덴의 B.O.와의 침전 반응식이 반응식 (1)[2]과 반응식 (2)[3]로 상이하게 발표되었으나 1 3N 황산용액 내의 몰리브덴은 몰리브딜 이온 형태로 존재하게되는 것을 고려하면 반응식 (2)로 표기되는 것이 정확한 것으로 판단된다.

$$MoO_4^{2-} + 2[C_6H_5CH(OH)C(:NOH)C_6H_5] + 2H^+ \rightarrow MoO_2[C_6H_5CH(O)C(:NOH)C_6H_5]_2 + 2H_2O \quad (1)$$

$$MoO_2^{2+} + 2[C_6H_5CH(OH)C(:NOH)C_6H_5] \rightarrow MoO_2[C_6H_5CH(O)C(NOH)C_6H_5]_2 + 2H^+ \quad (2)$$

실험 결과 Mo를 함유한 황산용액의 자유산도와 B.O/Mo 무게비에 따른 Mo 침전 회수율은 측정 결과는 Fig43에 나타난 바와 같다. 자유산도가 낮을수록 B.O/Mo 무게비가 높을수록 Mo 회수율이 높아지는 경향을 보이고 있다. 자유산도의 영향은 황산의 경우 산도에 따른 B.O.의 용해도가 거의 차이가 없으므로 산도에 따른 몰리브덴의 이온 상태의 차이에서 기인하는 것으로 보인다. 그리고 B.O/Mo 무게비의 영향은 B.O.량이 많을수록 몰리브덴이 B.O.와 반응에 의해 중합체 형성이 잘되기 때문으로 무게비 25 이상에서는 몰리브덴 회수율 차이가 크지 않은 것으로 판단된다. 또한 Fig.5에서는 침전 여액 내의 Mo 농도가 Mo 모액의 자유산도가 높을수록, 그리고 B.O/Mo 무게비가 작을수록 큰 것으로 나타나 Fig.1의 결과와 잘 일치하는 것으로 보인다. 또한 B.O.-Mo 침전물의 세척액의 자유산도 변화에 따른 세척액 내 Mo 농도 측정 결과도 세척액의 자유산도에 의한 영향이 없이 2.5 2.8ppm 사이의 일정한 값을 갖는 것으로 나타났으며, 침전물 용해시간은 Fig.6에 나타난 바와 같이 25분 이상이면 95% 이상의 수율을 보이며 5분 정도의 용해시간에서도 90% 이상의 수율을 얻을 수 있었다.

이상의 실험 결과로부터 황산 매질에서 Mo의 분리, 정제를 위한 B.O. 침전공정에서 Mo 회수율 95% 이상을 얻기 위한 조업 조건으로 자유산도 1-1.5N, B.O/Mo 무게비 25, 용해시간 25분을 기준 조건으로 설정하였다.

나. AC(Activated Carbon) 흡착공정

Activated carbon 표면에 형성되는 active sites는 active carbon 원자들 사이의 binding force가 saturation 되지 못한데서 기인하며, Vander Waals force와 유사한 attractive force에 의해 유기물들이 carbon 표면에 물리적으로 흡착된다. 또한 activated carbon 표면에 함침된 Ag는 용액 중에 잔류하는 iodide 이온을 반응에 의해 화학적으로 흡착하여 제거하게된다.[4]

실험 결과 Fig.7의 흡착평형곡선에 나타난 바와 같이 농도가 높을수록 흡착능이 증가하는 일반적인 경향을 보이고, 비교적 Freundlich equation과 일치하는 것으로 나타났으며, 본 공정에서 취급하게되는 TOC 농도 600ppm에서는 흡착량이 최대 130mg- TOC/g-AC으로 나타났다. 이상의 실험결과를 기준으로 설계된 column에서의 dynamic 실험결과는 Fig.8에 나타난 바와 같이 유량을 40cc/min, 체류시간을 10분 이상 유지하면 용액의 TOC 농도를 기준치인 5ppm 이하로 낮출 수 있었다.

다. Alumina 흡,탈착 공정

산성 용액에서 알루미나는 (+) 하전을 띠고, Mo은 molybdate 이온(MoO_4^{-2})의 중합체인 (-)

이온으로 존재(pH 1.5 0.9)하여 알루미나에 정전기적으로 흡착되며, 알칼리 용액에서 알루미나는 (-) 하전을 띠고, Mo은 음이온인 molybdate 이온으로 존재하여 알루미나로부터 정전기적으로 탈착된다.[5]

실험 결과 알루미나의 일정량을 알려진 H^+이온 농도의 용액에 주입하여 알루미나 표면의 -OH기와 반응한 H^+이온의 양의 측정 결과는 pH 4까지는일정한 (+)하전의 양을 가지는 것으로 나타나 (-)이온의 흡착은 pH 4 이상의 산도에서 수행하는 것이 바람직하며, 이론적으로 하나의 (+)하전이 하나의 음이온에 해당한다면 알루미나의 흡착 능력은 0.034 mole eq/g-alumina로 예상된다. 알루미나 단위 무게당 Mo의 흡착능력은 Fig.9와 같으며, pH 2.4에서 24mg-Mo/g-Al_2O_3까지 흡착능력이 증가하였다.

Mo의 흡착능력은 pH에 따라서 많이 변화하여 pH의 값이 적어질수록 흡착의 효율은 급속히 감소하지만 이는 알루미나의 흡착력의 감소 때문이라기 보다는 molybdate이온이 점차 산성으로 갈수록 (-)이온인 polymer를 형성하고 더 산성이 될수록 molybdyl [MoO_2^{+2}], 또는 molybdenyl 이온과 같은 (+)이온으로 바뀌기 때문에 높은 산농도에서는 흡착이 가능하지 않다. 또한 흡착된 Mo를 1 N 암모니아수를 이용하여 탈착 후 계산된 Mo 회수율은 Fig.10에서와 같이 알루미나/Mo 무게비 250 300사이의 값에서 최대가 되며, 약 600까지는 90% 이상의 회수율을 보임으로서 250 이상에서는 회수율에 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 흡착공정의 설계 또는 특성의 예측을 위한 흡착등온곡선은 Freundlich equation에 잘 일치하는 것으로 나타났다. 이상의 실험 결과를 기준으로 설계된 column에서의 dynamic 실험 결과는 Fig.11과 같으며, 흡착을 위한 체류시간이 가능한 짧고, 탈착을 위한 체류시간이 길수록 Mo 회수율이 높은 것으로 나타났는데 이는 흡착시간이 길수록 탈착이 용이하지 않은 알루미나 기공 내부에 까지 Mo가 흡착되어 상대적으로 탈착이 어렵기 때문으로 판단 된다. 이상의 실험 결과로부터 알루미나 흡착공정에서의 최적 공정조건으로 Mo 용액의 산도 0.2 0.3N, 알루미나/Mo 무게비 250, 흡착유량 25 30cc/min, 탈착유량 10cc/min 이하로 설정하였다.

라. 조합공정 성능

조합공정의 성능 시험 결과 각 공정별 Mo 수율 및 운전 소요시간 등을 정리하여 Fig.13에 표기하였다. 각 공정별 특성은 BO 침전공정의 경우 Mo 수율이 95% 이상이고, impurities의 ICP 분석결과 Zr과 Ru을 제외하고는 모두 분석한계치 이하로 나타났으며, 단일 공정만으로도 Mo 정제도 95% 이상으로 측정되었다. AC 흡착공정에서는 column에서 체류시간이 7분 이상만 유지되면 용액의 TOC 농도가 5ppm 이하로 유지되고, Mo 수율도 97% 이상으로 나타났으며, Alumina 흡,탈착공정 운전결과 운전시 주의를 기울이지 않으면 column에서의 유량제어, channeling 현상 등의 문제점이 일부 발생하나 Mo 회수율 93%로서 만족할만한 결과를 얻을 수 있었다. 최종 Mo 용액의 impurities의 ICP 분석결과는 Table 2에 나타난 바와 같이 모든 원소가 분석한계치 이하로 나타났으며, 정제율 98%로서 fission Mo-99의 기준사양 95%를 만족하였고, Mo의 총 회수율이 85%로 나타나 일반적으로 보고된 80%[6] 보다 높은 결과를 얻을 수 있었다.

4. 결 론

본 연구결과로 fission Mo-99 분리,정제를 위한 단위공정별 공정변수의 최적화 연구를 통하여 최적 공정조건을 아래과 같이 설정하였으며, 조합공정을 구성하여 설정된 공정변수를 적용하여 수행한 성능시험 결과 Mo 총회수율 85%, 정제율 98%로서 만족할 결과를 얻음으로서 fission Mo-99의 국내 제조를 위해 Fig.12에 표기된 Mo 분리, 정제공정을 선정하였다.

가. Benzoin Oxime 침전공정

- Mo 용액의 산도 : 황산 1 1.5N
- BO/Mo 무게비 : 20 25배
- Mo 회수율 ≥95%, Mo 회수정제율 ≥95%

나. Activated Carbon **흡착공정**

- Activated Carbon loading **량** : 12 g
- Mo **용액의 유량(체류시간)** : 40 cc/min **이하** (8**분 이상**)
- Mo **회수율** ≥97%, **잔류** TOC ≥5 ppm

다. Alumina **흡착공정**

- Alumina loading **량** : 33 g
- **흡착용액 유량(체류시간)** : 25 30 cc/min (25 30**분**)
- **탈착용액 유량(체류시간)** : 8.5 10 cc/min (35 40**분**)
- Mo **회수율** ≥90%, Mo **회수정제율** ≥95%

감 사

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 중장기 계획사업의 일환으로 수행된 연구결과입니다.

참 고 문 헌

1. Wu-Long Cheng, Chung-Shin Lee, Chang-Chyuan Chen, and Gann Ting : Radiochimia Acta, 47, 69 (1989)
2. D. G. Tally, et al., "Initial generation and separation of ^{99}Mo at Sandia National Lab." J. Radioanalytical and Nucl. Chem. 236, Nos 1-2(1998)
3. E. JDID, P. BLAZY, "Separation of molybdenum from uranium in sulfuric acid leaching solution by ionic flotation", Ind. Miner., Mines Carrier Tech., Vol.2, 83-89 (1989)
4. I. Ray, B. Altshuer, "Adsorption with activated carbon", Chemical Processing, Nov.(1997)
5. A. ALi. SAMEH and ACHE. HANS. J., "Production Techniques of Fission Molibdenum-99", Radiochimia Acta 41, 65-72(1987)
6. IAEA, "Fission Molybdenum for Medical Use", IAEA-TECDOC-515(1989)

Table 1. The chemical composition in mother liquor.

Components	U	Mo	Te	Ba	Y	Zr	Nd	Ce	La	Pr	Ru	Sr	Cs
Concen. in feed sol. (ppm)	15000	47	14	15.6	11	64	50	39	8.6	13	34	25	6.7

Table 2. The Mo and impuritiesl composition in final products.

Components	Mo	U	Te	Ba	Y	Zr	Nd	Ce	La	Pr	Ru	Sr	Cs
Concen. in feed sol. (ppm)	40.5	≤0.5	≤0.1	≤0.01			≤0.1						

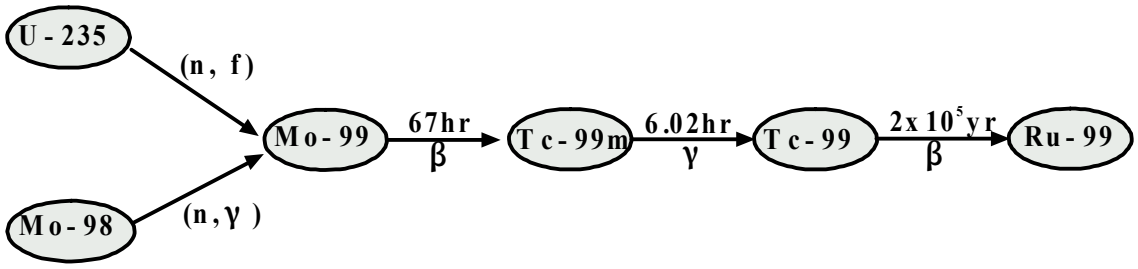

Fig. 1. Decay sequences of Mo-99 to Ru-99.

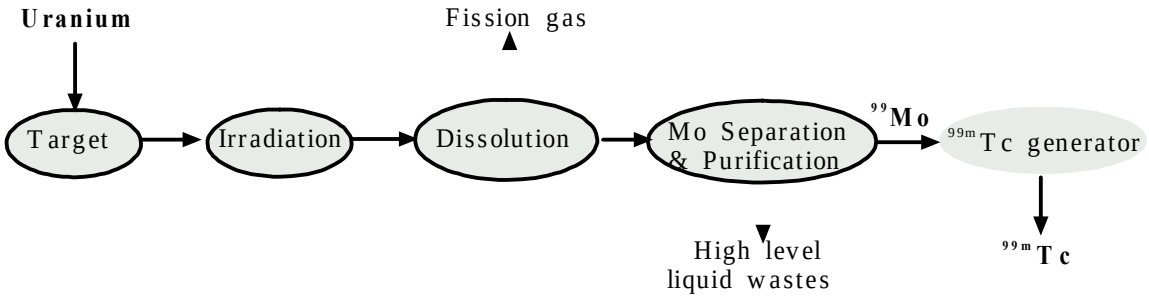

Fig. 2. Typical flow chart for fission Mo production.

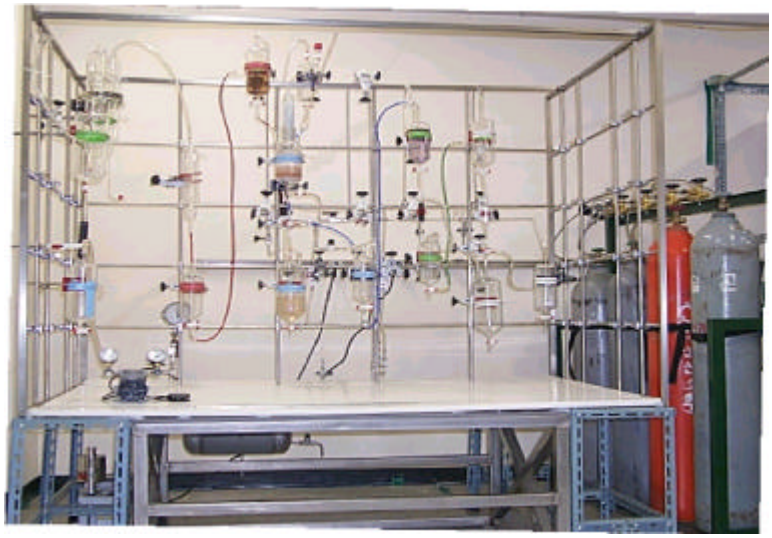

Fig. 3. The photograph of experimental combined process for Mo recovery and purification.

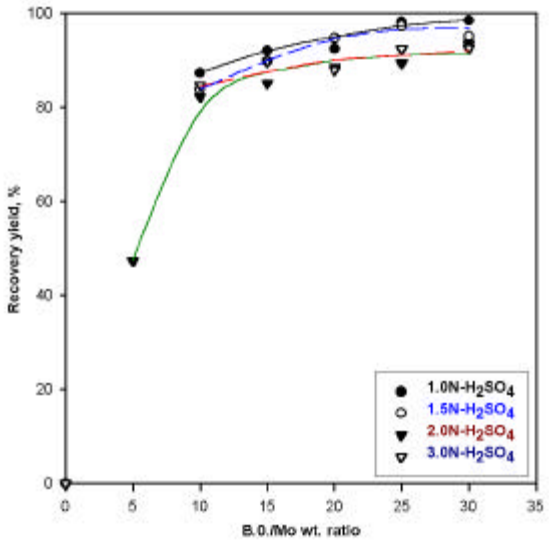

Fig.4. Mo recovery yield vs. B.0./Mo wt. ratio.

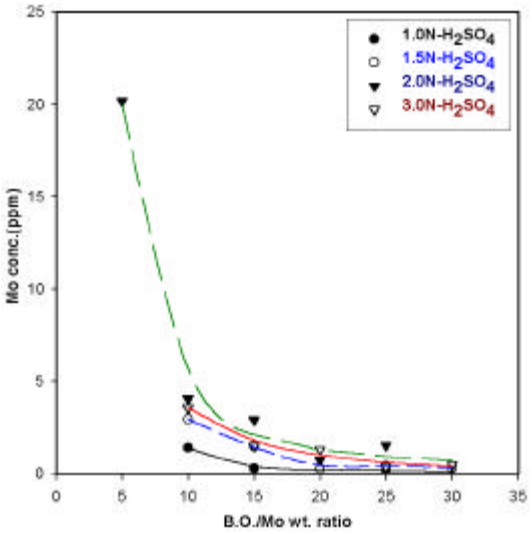

Fig.5. Mo concentration in filtrate.

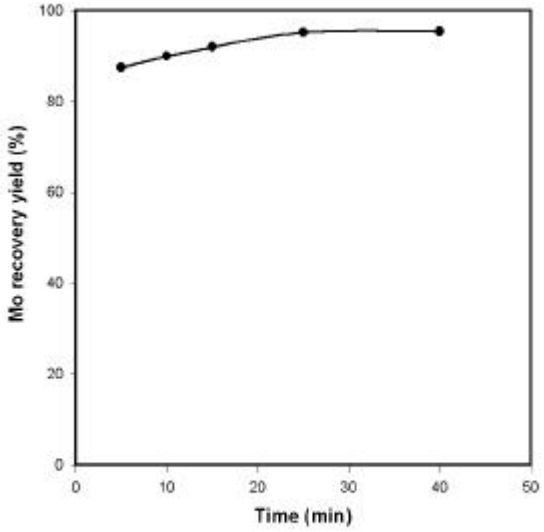

Fig.6. Mo concentration vs dissoution time.
(1.5N H_2SO_4, B.O./Mo=25)

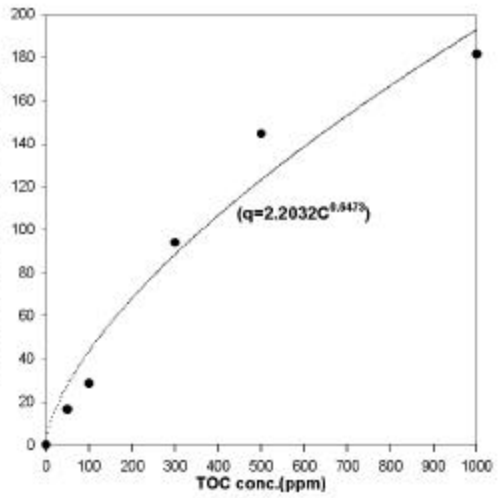

Fig.7. Adsorption equilibrium.
(0.4N-NaOH)

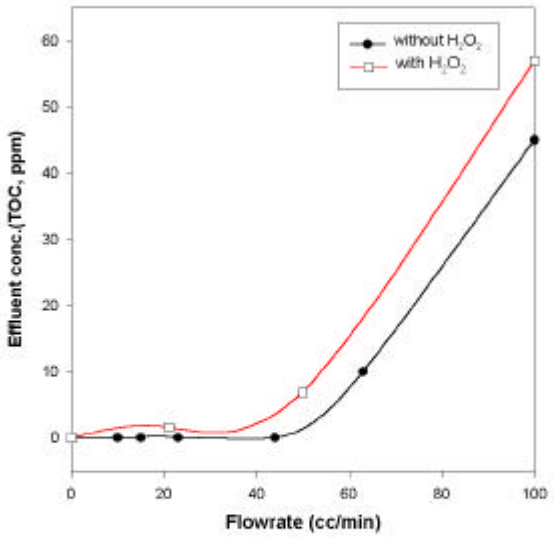

Fig. 8. The results of column operation.
(18mm dia. x 100mm L, 12g-0.4%Ag/AC, 500ppm TOC - 350cc)

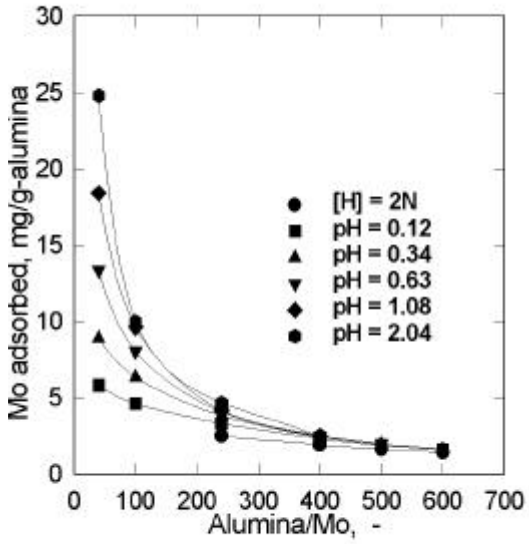

Fig.9. Effects of weight ratio alumina/Mo on adsorption.

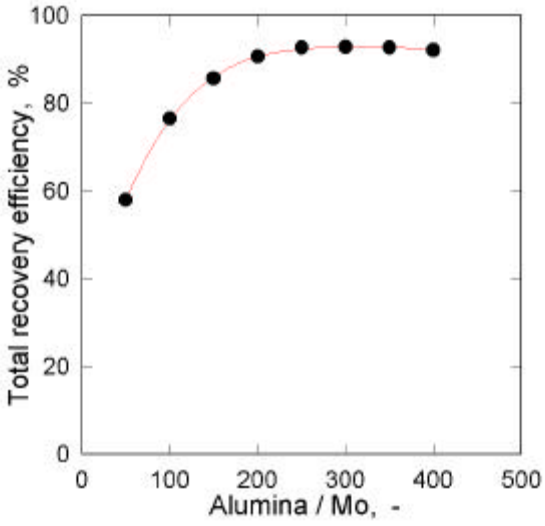

Fig.10. Change of total recovery efficiency of Mo as a function of alumina/Mo weight ratio.

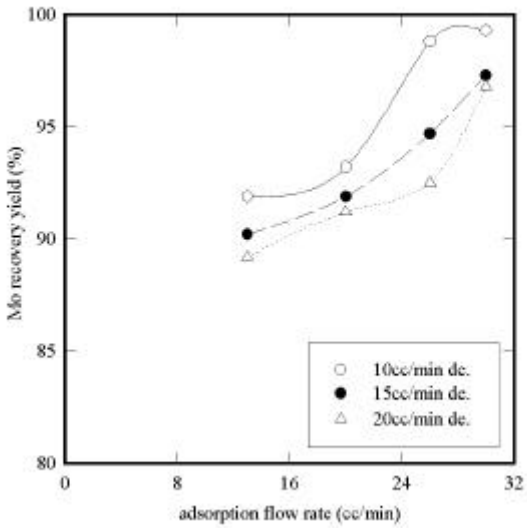

Fig.11. Mo recovery yield.

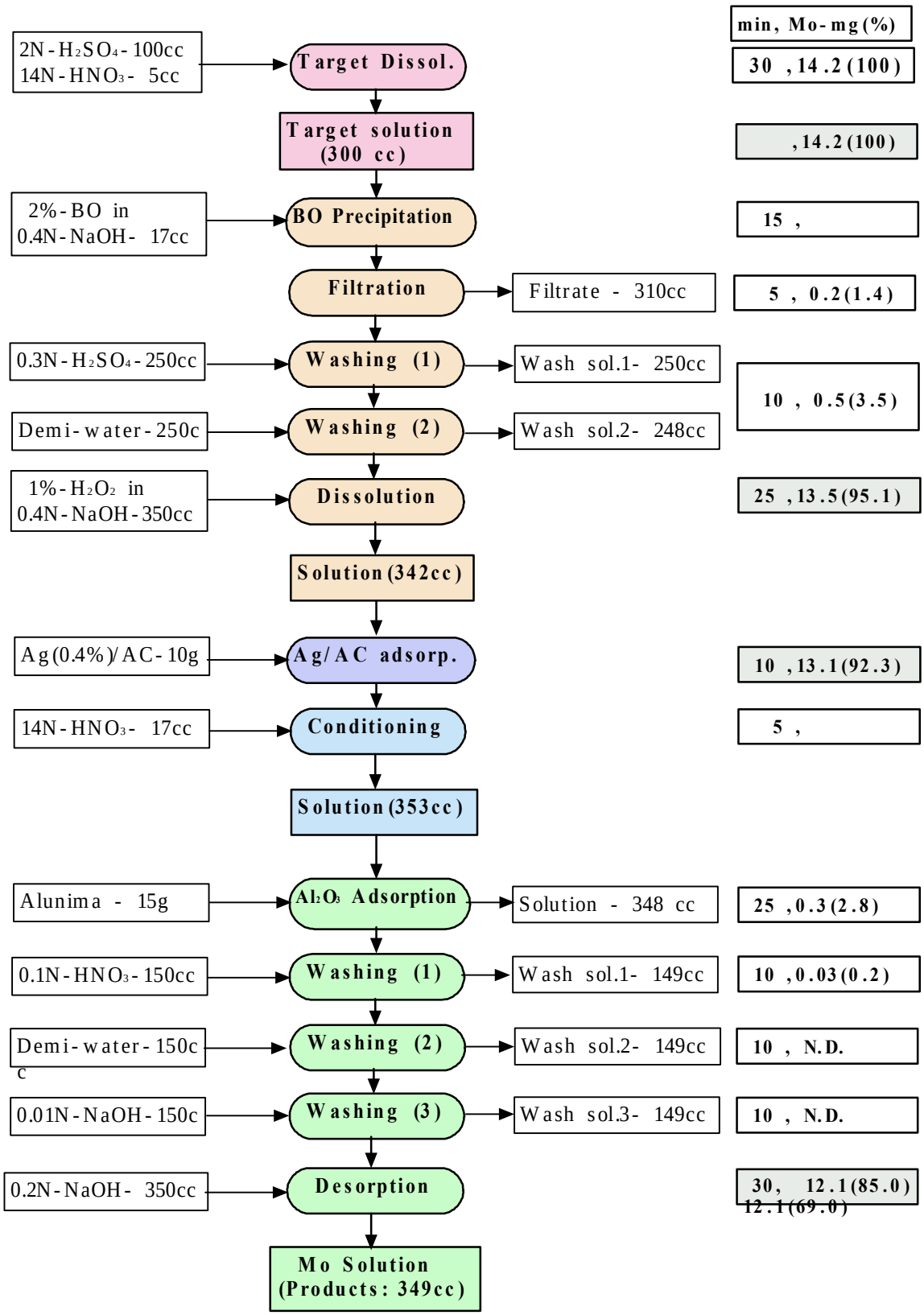

Fig.12. Mo material balance and operating time.

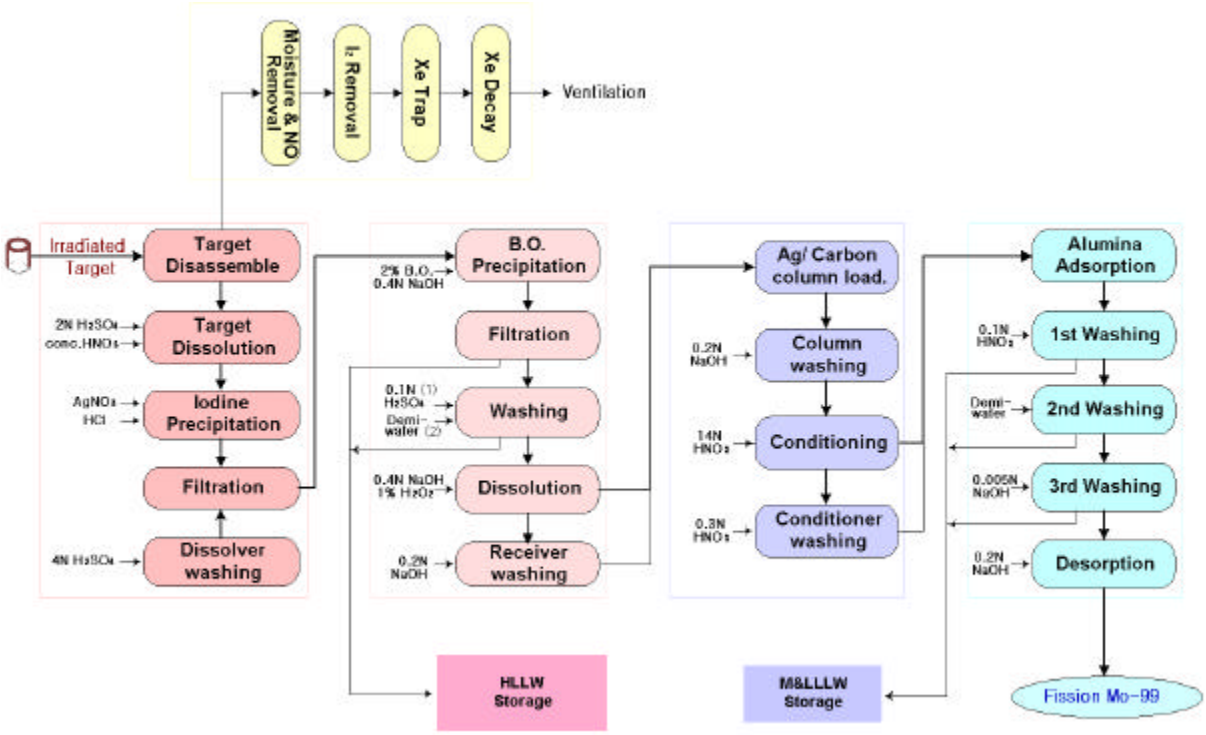

Fig. 13. Process flow diagram for Mo-99 separation and purification.