

연구과제명	방사성 폐액 내 핵종 제어용 금속-유기 골격 나노소재 제조 및 적용		
연구기간	2020년 3월 ~ 2020년 12월(10개월)		
연구비	총 연구비 20,000천원 (참여기업부담금 : 현금 3,000천원, 현물 3,000천원)		
과제분류	연구분야 및 세부연구분야		
	하폐수 처리	상수도 및 정수	수질관리
<input type="checkbox"/> 정책연구 <input type="checkbox"/> 조사연구 <input type="checkbox"/> 기술개발연구 <input checked="" type="checkbox"/> 산학연연구	<input type="checkbox"/> 물리화학적 처리 <input type="checkbox"/> 생물학적 처리 <input type="checkbox"/> 막처리 및 재이용 <input type="checkbox"/> 하수처리 시스템 <input type="checkbox"/> 질소 및 인 제거 <input type="checkbox"/> 하폐수 처리 기타 <input type="checkbox"/> 축산폐수 처리	<input type="checkbox"/> 막분리 <input type="checkbox"/> 정수처리 및 수질관리 <input type="checkbox"/> 고도정수처리 <input type="checkbox"/> 상수관망	<input type="checkbox"/> 수질 오염 <input type="checkbox"/> 수질 모델 <input checked="" type="checkbox"/> 수질관리기타
	자연환경분야	폐기물관리	대기관리
	<input type="checkbox"/> 환경정책 <input type="checkbox"/> 생활환경 <input type="checkbox"/> 건강위해성 <input type="checkbox"/> 생태관리 <input type="checkbox"/> 환경오염사고대비 <input type="checkbox"/> 소음관리 <input type="checkbox"/> 청정기술개발	<input type="checkbox"/> 매립 및 침출수 처리 <input type="checkbox"/> 슬러지 처리 <input type="checkbox"/> 소각 및 열분해 <input type="checkbox"/> 재활용 및 자원화 <input type="checkbox"/> 음식물 쓰레기 처리 <input type="checkbox"/> 폐기물 관리 기타	<input type="checkbox"/> 대기오염측정 및 관리 <input type="checkbox"/> 대기오염모델링,위해도 <input type="checkbox"/> 대기오염 처리기술 <input type="checkbox"/> VOCs 및 악취 처리
	토양지하수오염	기타환경분야	기후변화대응분야
	<input type="checkbox"/> 오염토양처리관리 <input type="checkbox"/> 폐광토양오염,지하수처리 <input type="checkbox"/> 지하수 환경관리	<input type="checkbox"/> 기타	<input type="checkbox"/> 온실가스배출량산정 <input type="checkbox"/> 온실가스배출량감축연구 <input type="checkbox"/> 배출권거래 <input type="checkbox"/> 기타
연구의 목적 및 필요성	<p>○ 연구의 배경 및 필요성</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ 원자력 산업에서 발생하는 저준위 방사성 액체 폐기물의 대부분은 중 · 장반감기 핵종과 B, Na, K 등과 같은 다량의 비방사성 화학종, 그리고 기타 단반감기 핵종을 포함하고 있음</li> <li>■ 특히, 원자력 발전소에서 발생하는 액체 폐기물에 포함된 방사성 핵종으로는 <math>^{137}\text{Cs}</math>, <math>^{90}\text{Sr}</math>, <math>^{60}\text{Co}</math> 등이 대표적이며, 이들이 가지는 긴 반감기와 방사선 방출로 인해 인체노출 시 기형아 출산이나 암을 유발하는 원인이 됨</li> <li>■ 이중 <math>^{137}\text{Cs}</math>은 반감기 30.17년의 방사성 핵종으로 강력한 beta-gamma선을 방출하며, <math>^{90}\text{Sr}</math>은 반감기가 28.8년으로 beta선을 방출하는 핵종으로 알려져 있음</li> </ul>		

연구의 목적 및  
필요성  
(계속)

- 2011년 3월 630,000~770,000 TBq(Terabecquerels)에 이르는  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  등의 방사성 핵종이 유출된 일본의 후쿠시마 원전사고는 방사성 오염 폐수의 위험성 및 처리의 중요성을 다시 한 번 인식하는 계기가 되었으며, 방사성 핵종의 처리 문제는 시급히 해결해야 할 중요한 과제로 대두되고 있음
- 2016년 12월 기준 국내에는 총 25기의 원전이 가동 중에 있으며, 부산/울산 지역을 중심으로 한 동남권과 경북 동해안 지역에 국내 원전의 76%가 밀집하고 있어 방사성 액체 폐기물의 안정적 처리를 위한 지역에서의 기술개발 및 투자가 절실히 필요함
- 특히, 2017년 6월 부산 지역 내 원전인 고리1호기의 영구정지(폐로)가 결정됨에 따라 국내 최초로 지역에서 원전 해체산업 시장이 열릴 것으로 전망되고 있으며, 원전 제염/해체를 위한 고도의 요소기술 개발이 요구되고 있는 실정임 (실제 해체 작업은 2022년 시작될 계획, 부지 복원까지 향후 30년, 총 비용 약 7천억 원 소요 예상)
- 본격적인 원전 제염/해체 시장이 열릴 경우, 기술개발, 인력 양성, 일자리 창출 등을 통해 관련 산업이 부산 지역의 신성장동력 산업으로 부각될 전망임
- 현재 가동 중인 원전의 설계수명을 고려해 향후 수명 연장이 없다고 가정할 때, 2060년까지 거의 모든 원전에 대한 영구정지(폐로)가 예상되며, 향후 국내 원전 해체산업과 관련된 시장 규모는 기하급수적으로 늘어날 것으로 예상됨
- 방사성 액체 폐기물의 안정적 처리를 위해서는 방사성 핵종의 선택적 제거와 부피감량이 선행되어야 하며, 2차 오염을 발생시키지 않는 경제적인 처리/처분 공정이 개발 적용되어야 함
- 핵종 이온을 분리/제거하기 위한 증발, 공침, 막분리, 이온교환, 용매 추출, 유리화, 흡착, 생물축적 등의 방법 중 흡착 공정은 기술 적용이 복잡하지 않고, 액상에서 고상으로의 분배비가 100~10,000 정도로 효율적인 분리 농축이 가능하여 다양한 흡착제를 이용한 수중 방사성 핵종 제거 연구가 많이 진행되었음 (zeolite, silicotitanate, hexacyanoferrate complex, ammonium molybdophosphate 등)
- 하지만, 다수의 흡착제 및 이온교환 소재들이 대상 핵종 이온에 대한 선택성 및 분리 농축의 효율성 측면에서 여전히 단점과 한계를 보이고 있어, 이를 극복하기 위한 **고선택적 맞춤형 소재의 개발과 적용기술 개발**이 절실히 필요한 시점임
- 최근에 금속-유기 골격체(MOFs, metal-organic frameworks)로 알려진 무기-유기 하이브리드 다공성 물질의 개발 및 응용에 대한 관심이 증가하고 있음

연구의 목적 및  
필요성  
(계속)

- MOFs는 금속 이온 또는 금속 클러스터가 유기리간드와 배위결합하여 형성되는 나노사이즈의 기공을 갖는 소재로, 금속 이온과 유기리간드의 종류 및 이들의 조합에 따라 기공의 크기, 기공 형태, 그리고 구조를 다양하게 조절할 수 있어 지금까지 약 2만 여 종의 MOFs 소재가 개발된 것으로 보고됨
- MOFs 소재의 비표면적은 1,000~10,000 m<sup>2</sup>/g 범위로 활성탄과 제올라이트와 같은 고전적인 다공성 재료의 비표면적보다 훨씬 큰 것으로 알려짐
- 상업용 MOFs 소재는 대부분 독일의 BASF사에서 solvothermal법과 전기화학적 방법을 통해 대량 생산(aluminium terephthalate (MIL-53(Al)), zinc 2-methylimidazolate (ZIF-8), coppertrimesate (HKUST-1), iron trimesate (MIL-100(Fe)) 등)하여 Basolite라는 상품명으로 독점적 판매가 이루어지고 있으며, 주로 가스저장, 발광, 센서, 화학촉매, 이산화탄소 포집, 에너지 생성, 생물 의학 이미징 등에 이용되고 있는 반면, 환경 분야에의 적용은 극히 미미한 실정임
- 환경 분야(흡착 분리)에의 적용에 있어서 MOFs 소재는 용도에 따라 중심금속과 유기리간드의 종류를 선택하여 합성하는 맞춤형 소재의 개발이 가능하기 때문에 무한한 잠재력을 가질 것으로 판단됨
- 또한, 특정 오염물질에 대한 고선택성과 경제적 효율성이 확보된다면 기존의 흡착제를 대체하여 수처리 분야의 성장을 주도하는 신소재로서의 가치가 클 것임
- 이에 본 연구에서는 MOFs 소재의 환경적 응용 연구로 수중 방사성 핵종의 고효율/고선택적 분리를 위한 흡착제로서의 MOFs 소재 합성과 적용기술을 개발하고자 함
- 본 연구를 통해 향후 MOFs 소재를 활용한 다양한 환경적 응용연구(대기오염제어(산업공정, 공공실내, 독가스), 산업폐수처리, 오염토양 및 지하수 복원 등)로 그 저변을 확대시킬 수 있을 것으로 기대됨

○ 연구의 목적

- 부산시는 원전 밀집지역에 해당하며, 지역 내 고리1호기의 영구정지(폐로)가 결정됨에 따라 방사성 폐기물의 안정적 처리와 향후 원전 제염/해체를 위한 고도의 요소기술 개발이 절실히 요구되고 있음
- 방사성 액체 폐기물 내 핵종 제어를 위해 고전적으로 사용되는 다수의 흡착제 및 이온교환 소재들이 핵종 이온에 대한 선택성 및 분리 농축의 효율성 측면에서 한계성을 보이고 있어, 본 연구에서는 이를 극복하기 위한 고선택적 맞춤형 소재의 제조 및 적용기술을 개발하고자 함
- 이에 무기-유기 하이브리드 다공성 물질의 일종인 금속-유기 골격체(MOFs, metal-organic frameworks)를 제조하고, 이를 활용한 수중 스트론튬(Sr<sup>2+</sup>) 및 세슘(Cs<sup>+</sup>) 이온의 고선택적 흡착 제거기술을 개발하여 핵종 제어효율을 향상시키고 안정적 처리기술을 확보하고자 함

연구의 목적 및  
필요성  
(계속)

○ 국내외 선행연구 및 기술 동향

- 인하대학교에서는 3년간 전이금속 전구체와 새로운 유기리간드를 선택/조합하여 안정성이 우수한 MOFs계 물질들을 합성하고, 물성조사를 수행한 후 이들을 대표적인 정밀화학 촉매 반응에 적용하여 활성 및 선택성이 기존 촉매보다 향상된 새로운 촉매계를 제안하였음
  - MOFs 촉매의 합성 및 screening을 Cu, Cr, Zn(금속)과 carboxylate계 리간드 활용, 표준 용매열 합성과 마이크로파/초음파 합성법 비교 및 MOFs 물성 최적화를 위한 분리/정제 방법 도출, bis-pyridinecarboxylic acid 및 2,5-pyridinedicarboxylic acid를 유기 리간드로 사용하는 MOF 촉매 제조 및 정밀화학 반응 특성조사 결과를 1차년도에 제시함
  - 2차년도에서는 전이금속 함유 MOFs 촉매의 루이스산 및 액상 산화 촉매 반응 연구, 아미노 기능화 MOF-5 합성 및 이를 이용한 Mn 고정화 촉매 제조, 올레핀의 epoxidation 반응과 MOF의 수분 및 기타 흡착 특성을 조사함
  - 3차년도에서는 초음파를 이용한 ZIF-8 및 COF-1 구조체 합성과 1L 규모의 scale-up 합성, Pd 담지 MIL-101 촉매의 제조 및 산화, 수소화, C-C 커플링 반응 특성 조사, MOFs 구조체들의 아민 기능화 및 이들을 이용한 액상 CO<sub>2</sub> cycloaddition 반응 연구, 그리고 redox 반응성이 있는 Ti 및 Zr의 MOF 구조 내 치환 및 산화탈황과 cycloaddition 반응 연구를 수행함으로써 초음파를 이용한 MOF 촉매 합성법을 제안하고 국내 MOF 촉매의 연구 기반을 확립함
- 가천대학교에서는 금속-유기 구조체를 사용하여 유기 염료의 선택적 흡착과 흡착 속도 해석 등 흡착 특성에 대한 연구를 수행
  - MOFs 소재로 UiO-66, UiO-67, MIL-100(Fe)를 합성하였고, 유기 염료에 대한 선택적 흡착 특성을 규명함
  - 흡착 효율은 금속-유기 구조체의 비표면적에 크게 영향을 받는 것으로 확인되었으며, MOFs 소재는 다양한 전하를 가진 분자의 흡착에 활용성이 높은 것으로 보고함
- 한국화학연구원에서는 초다공성 하이브리드 나노세공체의 고수율 합성 구현과 수분 흡착 응용을 위한 특성 규명, 하이브리드 나노세공체 성형기술 탐색, 그리고 혼합기질형 활성층 소재 탐색 및 하이브리드 나노세공체의 혼합에 따른 물리화학적 특성 평가를 통해 하이브리드 나노세공체 대량 합성 및 특성 분석, 성형체 제조 기술을 개발함
  - 하이브리드 나노세공체 함유 복합막의 N<sub>2</sub>, SF<sub>6</sub>의 기체투과도 향상, 성형조건 확립 및 분말 대비 손실 없는 다공성 및 흡착특성 확인, 액상 파과실험을 통한 하이브리드 성형체의 물리화학적 안정성 확보, 그리고 하이브리드 나노세공체의 구조적 특징과 H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> 흡착의 상관관계를 규명함

연구의 목적 및  
필요성  
(계속)

- Minnan Normal University에서는 MIL-125(Ti) 소재를 활용하여 유기 염료 오염물질 중 대표적인 rhodamine B의 제어효율 시험을 수행하였으며, 대상오염물질에 대한 효과적인 제어효율을 확인함
- 연구사례 분석 결과, MOFs가 가지고 있는 물리화학적 특성을 활용한 촉매, CO<sub>2</sub> 흡착 및 환원, 염료성 오염물질의 제거 연구가 주로 이루어지고 있으며, MOFs 소재의 대량 합성을 위한 합성법 정립에 연구가 집중되고 있음
- 국내 연구는 거의 전무하나 MOFs 소재를 활용한 방사성 핵종 제어에 관한 국외 연구 사례를 정리하면 아래 표와 같음

Table 1. MOFs를 이용한 방사성 핵종 제어 연구

연구자	연도	대상물질	연구내용	저널명
De Decker et al.	2017	U(VI)	Ship-in-bottle CMPO in MIL-101(Cr) for selective uranium recovery from aqueous streams through adsorption	J. Hazard Mater., 335, 1-9
Li et al.	2017		Direct extraction of U(IV) from alkaline solution and seawater via anion exchange by metal-organic framework	Chem. Eng. J., 330, 1012-1021
Bai et al.	2015		Introduction of amino groups into acid-resistant MOFs for enhanced U(VI) sorption	J. Mater. Chem. A, 3, 525-534
Howarth et al.	2015	Se(IV)	High efficiency adsorption and removal of selenate and selenite from water using metal-organic frameworks	J. Am. Chem. Soc., 137, 7488-7494
Howarth et al.	2015	Se(VI)	High efficiency adsorption and removal of selenate and selenite from water using metal-organic frameworks	J. Am. Chem. Soc., 137, 7488-7494
Li et al.	2017		Experimental and theoretical study on selenate uptake to zirconium metal-organic frameworks	Chem. Eng. J., 330, 1012-1021
Agulia et al.	2016	Cs(I) Sr(II)	Selective removal of cesium and strontium using porous frameworks from high level nuclear waste	Chem. Comm., 52, 5940-5942
Zhu et al.	2017	Re(VII)	Exceptional perrhenate/pertechnetate uptake and subsequent immobilization by a low-dimensional cationic coordination polymer: overcoming the Hofmeister bias selectivity	Environ. Sci. Technol. Lett., 4, 316-322
Zhang et al.	2017	Th(IV)	Extending the use of highly porous and functionalized MOFs to Th(IV) capture	ACS Appl. Mater. Interfaces, 9, 25216-25224

## 주요 연구내용

### ○ 연구의 목표

- 본 연구의 목표는 금속 이온(혹은 금속 클러스터)과 유기물(혹은 유기 링커) 간의 배위결합으로 형성되는 다공성 나노구조체(금속-유기 골격체, MOFs)를 합성하고, 합성된 소재를 맞춤형 흡착제로 적용하여 수중 방사성 핵종 이온의 고효율/고선택적 제거기술을 개발하는데 있음
- 본 연구목표를 달성하기 위하여 방사성 핵종 이온에 대한 선택성과 흡착능이 있는 MOFs 소재를 lab-scale로 합성 제조하고,
- 합성 소재의 물성 분석과 수중 방사성 핵종 이온( $\text{Sr}^{2+}$ ,  $\text{Cs}^+$ )의 분리 흡착능 평가(회분식)를 통한 최적 운전인자 도출을 핵심 내용으로 연구를 진행하고자 함

### ○ 연구의 추진 전략 및 방법

- MOFs 소재 선정 및 실험실 규모 합성
  - 문헌조사를 통한 방사성 핵종 이온 흡착 가능 MOFs 소재 선정 및 설계
  - Lab-scale 합성 시스템 구축 및 MOFs 소재 합성 제조
  - 합성 MOFs 소재의 물리화학적 특성 분석(XRD, SEM/EDX, TEM, FTIR, BET, UV-vis 등)
- 방사성 핵종에 대한 고효율 흡착능 확보
  - 수중 방사성 핵종 이온( $\text{Sr}^{2+}$ ,  $\text{Cs}^+$ )에 대한 분리 흡착능 및 흡착특성 평가
  - 회분식 단일성분계 흡착 및 복합성분계 경쟁흡착 실험을 통한 선택적 흡착능 및 흡착특성 규명
- 수처리제로서 소재의 안정성 검증
  - 수중 흡착 후 소재의 물성 분석을 통한 안정성 평가

### ○ 주요 연구 내용

- 국내외 문헌조사를 통하여 방사성 폐기물 발생과 처리 현황을 파악하고, 핵종 이온 흡착 처리에 적용되고 있는 흡착제와 흡착성능 등을 종합적으로 분석
- 다공성 MOFs 소재에 대한 문헌 연구를 통해 소재의 합성 방법론과 적용 가능 분야 및 기능을 검토하여 방사성 핵종 이온 흡착이 가능한 MOFs 소재를 선정 및 설계
- MOFs 소재의 lab-scale 합성시스템(반응기 100 mL 규모)을 구축하고, 소재 합성 진행
- 합성된 MOFs 소재의 물리화학적 특성 파악을 위해 XRD, SEM/EDX, TEM, FTIR spectroscopy,  $\text{N}_2$  adsorption/desorption(BET), UV-vis 등의 분석을 수행
- 합성 MOFs 소재의 수중 방사성 핵종 이온 흡착능 평가를 위한 회분식 흡착 실험 진행
  - 흡착 대상 방사성 핵종 이온 : 스트론튬( $\text{Sr}^{2+}$ ), 세슘( $\text{Cs}^+$ ) 이온

주요 연구내용  
(계속)

-흡착 변수 조건 : 초기농도( $C_i = 5 \sim 200$  mg/L), 반응시간( $t = 0 \sim 12$  hr), 온도( $T = 10 \sim 40^\circ\text{C}$ ), pH(3~10), 단일성분계 및 복합성분계 조건

- 각 변수 조건에서의 실험결과를 아래(Table 2)의 adsorption kinetic model과 adsorption isotherm model에 적용하여 흡착속도 및 평온 흡착 parameter를 도출하고, 흡착 거동 및 특성을 평가
- 흡착 변수 조건에 따른 최대 흡착량( $q_{max}$ )을 산정하여 본 합성 MOFs 소재의 흡착능 평가
- 수중 흡착실험 이후 해당 MOFs 소재에 대한 물성분석을 실시하여 흡착 전후의 변화 양상을 파악하고, 수처리제로서의 안정성을 평가 검증함

Table 2. Model equations for adsorption kinetic and adsorption isotherm analysis

Model equations		
Adsorption kinetic models	Pseudo-first order kinetic model (PFOM)	$\frac{dq}{dt} = k_{1,s}(q_{e,s} - q(t))$
	Pseudo-second order kinetic model (PSOM)	$\frac{dq(t)}{dt} = k_{2,s}(q_{e,s} - q(t))^2$
Adsorption isotherm models	Freundlich model	$q = K_F C^{1/n}$
	Langmuir model	$q = \frac{Q^o b_L C}{1 + b_L C}$
	Sips model	$q = \frac{q^o (b_S C)^{1/n_S}}{1 + (b_S C)^{1/n_S}}$
	Redlich-Peterson model	$q = \frac{a C}{1 + b_{RP} C^{n_{RP}}}$

○ 연구결과의 기대효과 및 파급효과

- 본 연구에서 합성하여 적용하고자 하는 MOFs 소재는 적용될 응용 분야에 따라 다양한 종류의 금속 또는 유기리간드를 선택하여 기공의 크기 및 부피, 흡착 특성 등과 같은 물리화학적 특성을 조절하는 것이 가능한 장점을 가짐
- 또한 다공성과 결정성 골격 구조 및 골격 구조의 유연성 등을 특징으로 하고 있어 지금까지 알려진 수많은 물질 중 가장 넓은 비표면적을 제공하는 다공성 결정체로 알려져 있음
- 상기 MOFs 소재를 수중 방사성 핵종 제거에 적합한 고선택적 흡착 소재로 개발하여 적용한다면 기존의 전통적인 처리방법이 가지는 고에너지 사용이나 분리농축 효율 저하 등의 단점과 한계성을 극복할 수 있는 새로운 유형의 흡착제로서 그 활용 가치가 매우 높을 것임
- 그리고 방사성 핵종으로 오염된 토양 및 지하수를 처리하고 복원하는데 핵심 소재로도 적용이 가능할 것으로 기대됨

<div>주요 연구내용 (계속)</div>	<div> <div> <div>■ 현재까지 MOFs 소재를 활용한 방사성 핵종 제어 연구가 극히 제한적으로 이루어지고 있는 상황에서 본 연구가 성공적으로 추진된다면 MOFs에 의한 방사성 핵종의 흡착 거동 및 특성을 과학적으로 이해하는데 도움이 될 것이며, 수처리제로서의 안정성을 검증함으로써 실제 현장 적용 가능성을 확보할 수 있을 것임</div> <div>■ 본 연구개발 과제는 기존 흡착 소재의 한계성을 극복하기 위한 신소재를 개발하여 방사성 핵종의 제거효율을 높이하고자 하는 융합응용 연구로서 재료공학 및 환경공학 분야의 연구역량을 향상시킬 수 있을 뿐만 아니라, 기존 수처리 공정의 문제점을 개선 보완함으로써 최종적으로 지표수 및 지하수, 해수를 포함하는 수환경의 수질을 향상시키는데 역할을 할 것으로 판단됨</div> <div>■ 추후 본 연구결과의 상용화를 위해서는 방사성 핵종뿐만 아니라 중금속 및 다양한 유무기 오염물질(염료, PPCPs 등 포함)에 적용할 수 있는 MOFs 소재의 후속 개발 연구가 뒤따라야하기 때문에 관련 연구개발 분야에 대한 상당한 파급효과가 예상됨</div> <div>■ 수처리 분야뿐만 아니라 자원 확보 측면의 다양한 유가금속 흡착 및 회수 분야에서도 뛰어난 응용 특성을 보일 것으로 예상되며, 금속, 산화물, 고분자, 바이오 분자 등 다른 소재와의 복합화가 가능하기 때문에 향후 고선택적 나노복합체 등과 같은 새로운 유형의 흡착 소재로 활용이 가능할 것으로 기대됨</div> </div> </div>																												
<div>연구성과 활용방안</div>	<div> <div>○ 연구 성과 지표 및 목표</div> <table> <tr> <th>성과 지표</th><th>성과 목표(정량적 기재)</th></tr> <tr> <td>비표면적(<math>S_{BET}</math>)</td><td><math>\geq 1,500 \text{ m}^2/\text{g}</math></td></tr> <tr> <td>대상 방사성 핵종 분리 흡착능</td><td><math>\geq 100 \text{ mg/g}</math></td></tr> <tr> <td>특허 출원</td><td>1건</td></tr> <tr> <td>SCI(E)급 학술논문 게재</td><td>1편</td></tr> <tr> <td>국내학술대회 논문 발표</td><td>1건</td></tr> </table> <div>○ 연구 성과 활용내용(계획)</div> <table> <tr> <th>활용내용(계획)</th><th>활용기관</th><th>활용가능기간/대상</th></tr> <tr> <td>선택적 방사성 핵종 제어 복합소재 합성법 정립 및 개발</td><td>기업체</td><td>3년/합성법 정립 및 특허 출원</td></tr> <tr> <td>방사성 핵종을 선택적으로 제거할 수 있는 신공정 개발</td><td>기업체</td><td>2년/특허 출원</td></tr> <tr> <td>고농도 폐수에서 중금속 및 염료 제거 응용 연구</td><td>대학</td><td>3년/후속 연구사업</td></tr> </table> <table> <tr> <td>과제 담당부서</td><td>한국종합환경산업(주)</td></tr> <tr> <td>과제 담당자(감독원)</td><td>박한배 연구소장 (010 - 7683 - 4444)</td></tr> </table> </div>	성과 지표	성과 목표(정량적 기재)	비표면적( $S_{BET}$ )	$\geq 1,500 \text{ m}^2/\text{g}$	대상 방사성 핵종 분리 흡착능	$\geq 100 \text{ mg/g}$	특허 출원	1건	SCI(E)급 학술논문 게재	1편	국내학술대회 논문 발표	1건	활용내용(계획)	활용기관	활용가능기간/대상	선택적 방사성 핵종 제어 복합소재 합성법 정립 및 개발	기업체	3년/합성법 정립 및 특허 출원	방사성 핵종을 선택적으로 제거할 수 있는 신공정 개발	기업체	2년/특허 출원	고농도 폐수에서 중금속 및 염료 제거 응용 연구	대학	3년/후속 연구사업	과제 담당부서	한국종합환경산업(주)	과제 담당자(감독원)	박한배 연구소장 (010 - 7683 - 4444)
성과 지표	성과 목표(정량적 기재)																												
비표면적( $S_{BET}$ )	$\geq 1,500 \text{ m}^2/\text{g}$																												
대상 방사성 핵종 분리 흡착능	$\geq 100 \text{ mg/g}$																												
특허 출원	1건																												
SCI(E)급 학술논문 게재	1편																												
국내학술대회 논문 발표	1건																												
활용내용(계획)	활용기관	활용가능기간/대상																											
선택적 방사성 핵종 제어 복합소재 합성법 정립 및 개발	기업체	3년/합성법 정립 및 특허 출원																											
방사성 핵종을 선택적으로 제거할 수 있는 신공정 개발	기업체	2년/특허 출원																											
고농도 폐수에서 중금속 및 염료 제거 응용 연구	대학	3년/후속 연구사업																											
과제 담당부서	한국종합환경산업(주)																												
과제 담당자(감독원)	박한배 연구소장 (010 - 7683 - 4444)																												