

독일의 나노안전성(EHS) 프로그램을 통해 본  
나노안전 정책과 시사점

2014. 12.

국가나노기술정책센터

# 머릿말

미래사회는 융합기술의 시대이며, 나노기술은 그 기반이 되는 핵심기술로서 다양한 분야에 적용됨으로써 기존의 기술 영역을 뛰어넘어 새로운 영역을 창출해 낼 것으로 기대되고 있습니다. 2014년 Lux Research 보고서에 의하면, 2012년 전 세계의 나노분야 투자 규모는 약 185억 달러에 달하며, 나노기술 기반제품 매출규모도 2010년 3,390억 달러에서 116% 증가한 7,310억 달러, 그리고 나노물질의 가치도 2010년 대비 29% 증가한 14억 달러로 평가하고 있습니다.

그러나 나노기술의 영향에 대한 우려 역시 증대됨에 따라 미국, EU 등 주요 선진국을 중심으로 나노안전에 대한 규제가 강화되고 있어 우리 기업들에게 무역장벽 요인으로 작용할 가능성이 높습니다. 따라서 나노기술에 대한 초기 관리를 철저히 하여 나노 안전관리를 통한 책임 있는 나노기술의 개발과 상용화 체제를 구축, 이를 통해 우리 산업의 경쟁력을 강화해야 할 것입니다.

본 보고서는 독일의 나노기술 2차 안전성 평가기간(2009년~2014년)에 해당하는 NanoCare 및 NanoNature 프로그램에 속한 총 19가지 프로젝트의 목표와 결과를 중심으로, 독일에서의 나노기술 안전성에 대한 문제 인식과 이에 대해 어떠한 대책을 수립하고 있는지 살펴봄으로써 나노안전성 확보를 위한 우리의 정책적 시사점을 제시하고자 합니다. 본 보고서가 정부 정책 당국자는 물론 산학연 관계자들이 세계 나노기술 정책 동향을 파악하는데 도움이 되길 바랍니다.

끝으로 보고서 집필에 참여한 독일 프라운호퍼 연구소의 한태영 연구원 및 국가나노기술정책센터 배성훈, 신광민, 이슬희 연구원의 노고에 감사드리며, 여기에 수록된 내용은 집필진의 의견으로서 국가나노기술정책센터의 공식의견은 아님을 밝혀둡니다.

2014년 4월  
국가나노기술정책센터  
소장 **김 창 우**

## 요 약

- 나노기술은 세계적으로 가장 빠르게 발전하고 있는 전략적 첨단기술 산업으로 산업 및 경제발전, 국방안전을 보장하는 중요한 추진력이 되고 있으나 나노물질이 인간의 건강에 미칠 수 있는 위해성으로부터 인간을 보호하기 위해, 미국과 EU 등을 중심으로 ‘나노안전’에 대한 규제가 강화되고 있는 추세임
  
- 본 보고서는 독일 나노기술 분야의 안전성 검증을 위해 어떻게 문제를 인식하고 있으며, 어떠한 계획과 대책을 수립하고 추진하고 있는지에 대해 조사·분석하여 주요 시사점을 도출하고자 함
  - 2006년 독일은 나노물질의 안전성 연구를 위해 NanoCare('06.3~'09.7) 프로젝트와 Trace('06.3~'09.2) 및 Innos('06.1~'09.4) 프로젝트를 진행함
    - 나노물질이 인체와 환경에 위해성을 가지는 것은 구조, 형태, 화학 성분 조성 등에 연관성이 있으며 따라서 나노물질의 위해성이 사례에 따라 개별적으로 이루어져야 한다는 것이 밝혀짐
    - 독일 연방 교육연구부는 나노물질이 인간과 환경에 미치는 영향의 범위를 넓혀 살펴보고자 세분화된 프로젝트를 계획하였으며, 총 19가지의 프로젝트가 2009년에서 2014년 사이 NanoCare와 NanoNature라는 프로그램을 통해 진행되고 있음
  
- 본 보고서에서는 총 19가지 프로젝트의 목표와 결과를 바탕으로 독일 나노기술 분야의 안전성에 대한 문제 인식과 이에 대한 어떠한 대책을 마련하고 있는지에 대해 살펴보고자 함
  - 나노기술의 위해성 인식에 대해 독일은 2011년 산업보호, 소비자 보호, 환경보호 세 가지 측면을 기준으로 위험성에 대한 평가를 실시하였으며, 그 결과를 토대로 다음과 같은 연구 테마에 중점을 두고 추진함
    - 국민보건/소비자보호/식품안전
    - 인간에 미치는 영향
    - 산업안전

- 환경에 미치는 영향
- 또한, 독일 연방 교육 연구부의 WING 프로그램(산업과 사회를 위한 소재 혁신)을 통해 NanoNature(환경 보호를 위한 나노기술-사용과 영향) 프로젝트와 NanoCare(인간에 대한 합성 나노물질의 영향) 프로젝트를 추진하였으며 총 19개의 프로젝트에 약 3,600만 유로의 재정지원이 이루어짐
  - NanoCare 프로그램은 합성 나노물질의 생산, 가공 및 사용에서 발생하는 인간 독성학적 영향 및 상호작용에 대해 연구함
  - NanoNature 프로그램은 나노물질의 잠재적 시장(market segment)을 강화하여 친환경 소재 및 연관 기술 수출을 확대시키는 것을 목표로 합성 나노입자 및 나노소재의 체계적인 목록 작성 및 분류, 소재, 영향 및 측정 방법 등 나노기술이 환경에 미치는 영향을 연구함
- 독일은 이러한 프로그램을 통해 나노물질의 독성학적 평가를 위한 정확한 측정 기술이 개발되었고 실제 현장에서 사용될 수 있는 기술이 연구될 수 있도록 산/학/연 간 철저한 분업 및 유기적인 협업을 이룬 것이 가장 큰 성과라고 볼 수 있음
  - 나노물질에 대한 장기적 연구 마스터플랜을 통해 나노기술 관련 시장의 불확실한 변화에 능동적이고 유연하게 대처함으로써 국제적 입지를 견고히 하고 있음
- 나노기술(물질)의 뛰어난 특성과 함께 잠재적 위험성에 대한 과학적인 방법을 이용한 입증은 나노기술(물질)이 상용화/제품화 되어 일상생활에 사용되는데 필수불가결한 사항임. 이에 대한 체계적인 연구가 추진되지 않으면, 연구개발 결과는 상용화되지 못하고 사장되어 버릴 것임
  - 한국도 범부처 나노기술종합발전계획 및 나노안전관리 종합계획에서 나노 EHS 관련 사항을 다루고 있지만, 해당 연구 결과는 실제 기술을 응용하기 위한 연구개발 분야의 결과들과 연계되지 못하고 실험실 수준에서 마무리되거나 단기적 사항에만 치우치고 있음
  - 따라서 기존 정부정책에 부합하는 체계적인 중장기 계획을 세우고, 이를 추진하기 위한 예산을 확보하고 연구개발 결과를 효율적으로 배포하고 이용하는 것이 절실한 상황임

## <차 례>

I. 서론 .....	1
II. 나노기술의 위해성 인식 .....	2
가. 국민 보건/ 소비자 보호/ 식품 안전 .....	3
나. 인간에 미치는 영향 .....	5
다. 산업안전 .....	6
라. 환경에 미치는 영향 .....	7
III. 2009~2014 NanoCare/ NanoNature .....	9
가. NanoCare 지원 정책 .....	9
나. NanoNatur 지원 정책 .....	10
IV. NanoCare 분야 종료 프로젝트 .....	11
가. CarbonBlack 프로젝트 .....	11
나. CarboTox 프로젝트 .....	12
다. NanoExpo 프로젝트 .....	13
라. NanoGEM 프로젝트 .....	13
마. NanoKon 프로젝트 .....	15
바. NanoMED 프로젝트 .....	16
사. Nanosilberpartikel 프로젝트 .....	18
V. NanoNature 분야 종료 프로젝트 .....	19
가. Fe-NANOSIT 프로젝트 .....	19
나. NADINE 프로젝트 .....	20
다. NanoFlow 프로젝트 .....	21
라. NanoKiesel 프로젝트 .....	22
마. NanoMembrane 프로젝트 .....	23
바. NanoPharm 프로젝트 .....	25
사. NanoPurification 프로젝트 .....	26
아. NAPASAN .....	27
자. NANO-SCR .....	28
차. NanoSan 프로젝트 .....	29
카. NanoTrack .....	30

타. Umsicht 프로젝트 .....	31
VI. 진행 프로젝트 .....	33
가. DaNa 2.0 .....	34
나. NanoBioDetect .....	34
다. nanoCOLT .....	35
라. Nanomobil .....	36
마. NanoSuppe .....	36
바. InhalT-90 .....	37
사. NANOUMWELT .....	38
아. DENANA .....	39
VII. 결론 및 시사점 .....	41

# I. 서론

나노기술 안전성과 관련하여 최근 NanoCare(나노기술이 인간에 미치는 영향 연구)와 NanoNature(나노기술이 환경에 미치는 영향 연구)의 두 가지 프로그램이 총 19가지 프로젝트 종료와 함께 마무리 되었다. 나노물질의 안전성 연구를 위해 처음 시행되었던 NanoCare(2006년 3월 ~ 2009년 7월) 프로젝트와 Tracer(2006년 3월 ~ 2009년 2월) 및 Innos(2006년 1월 ~ 2009년 4월) 프로젝트를 통해 1차적으로 나노물질이 인체와 환경에 위해성을 가지는 것은 구조, 형태, 화학 성분 조성 등에 연관성이 있으며 따라서 나노물질의 위해성이 사례에 따라 개별적으로 이루어져야 한다는 것이 밝혀졌다. 이러한 결과에 따라 독일 연방 교육 연구부는 나노물질이 인간과 환경에 미치는 영향에 대해 좀 더 범위를 넓힘과 동시에 사례별로 세분화 된 프로젝트를 계획·지원하였다. 대부분의 프로젝트들이 2009년에서 2014년 사이 NanoCare와 NanoNature라는 프로그램을 통해 진행되었으며, 프로그램에 속한 총 19가지 프로젝트의 결과를 기반으로 현재(2014년) 제 3차 나노기술 안전성 평가가 진행되고 있다.

이번 보고서에서는 현재 독일이 나노기술 분야의 안전성 검증을 위해 어떻게 문제를 인식하며, 어떠한 계획과 대책을 세우고 진행하고 있는지에 대해 짧게 살펴보고자 한다. 이는 나노기술 분야 프로젝트 다수의 지원 및 계획을 담당하는 독일 정부 소속의 ‘독일 연방 교육 연구부’에서 발행한 자료들을 토대로 진행할 것이다. 이후에는 2차 나노기술 안전성 평가기간(2009년 ~ 2014년)에 해당하는 NanoCare 및 NanoNature 프로그램에 속한 총 19가지 프로젝트의 목표와 그 결과를 중심으로 살펴보고, 나노기술 안전성 평가기간 동안의 성과를 기반으로 계획된 현재 진행 중인 프로젝트(3차 나노기술 안전성 평가)의 목표와 이를 통해 예상되는 기대사항 등을 서술하고자 한다. 마지막으로 결론에서는 나노기술 안전성 확보를 위해 진행된 모든 프로젝트의 결론을 종합하여 현재 독일에서의 나노기술 안전성에 대한 인식과 연구개발, 성과, 향후 계획 그리고 시사점을 요약하여 살펴 볼 것이다.

## II. 나노기술의 위해성 인식

모든 기술이 그러하듯 나노기술 또한 인간과 환경에 긍정적, 부정적 영향을 미치며 특히 부정적 영향에 따른 위해성을 지니고 있다. 독일 연방 정부는 기술 거점 차원에서 나노기술의 기회를 활용할 뿐만 아니라 인간 및 환경 보호에 대한 책임 의식을 지니기 위해 노력한다. 그 일환으로 지속적이고 친환경적이며, 인간친화적인 나노기술 육성을 지원하는 것이다.

나노기술의 안전성 입증을 위한 초기 프로젝트(NanoCare 및 INOS, TRACER)의 결과를 통해 나노기술 평가에 있어 나노스케일 소재 자체가 위험성을 판단할 수 있는 근거가 될 수 없으며 오히려 구조, 형태, 화학 성분 조성과 같은 다양한 파라미터가 연관성을 가지고 있는 것으로 밝혀졌다. 나노기술의 잠재적인 위험성은 각 사례에 따라 개별적으로 관찰되어야 하며, 그 결과는 오랜 기간의 연구 보장을 통해 입증되어야 한다.

위험 예방 및 위험관리 대책의 효과는 독일 연방 정부의 지속적인 기술 지원 프로세스를 통해 평가 및 적용 되고 있다. 나노기술의 안전한 취급은 오로지 승인된 측정 방법 및 평가 방법에 기반을 둔 국제적인 제품 기준과 안전 기준을 통해서만 이루어 질 수 있다. 독일 연방 정부는 이를 위해 진행 중인 국제적 기준의 조정에 관련된 수많은 이니셔티브를 지원하고 있다.

최종 소비재에서 나노소재의 사용은 점차 증가하고 있으며, 이로 인하여 나노소재가 나노기술 관련 노동자, 소비자 및 환경에 노출될 가능성이 있다. 하지만 이러한 나노소재의 노출과 직접적 연관이 있는 위험성에 대한 기초 지식은 매우 부족한 상황이다. 이러한 배경에서 독일 연방 산업 안전 보건 연구소와 독일 연방 환경부, 독일 연방 위험성 평가 연구소에서 2007년 독일 연방 소재 연구소, 독일 연방 물리-기술 연구소가 참여하는 나노기술 공동 연구 전략을 발표하였다. 이는 산업 보호, 소비자 보호, 환경 보호 세 가지 측면을 기준으로 2011년 첫 번째 평가를 실시하였으며, 이를 토대로 지속적인 전략들이 세워졌을 뿐만 아니라 연구 테마의 중점들이 정해지게 되었다.

### 가. 국민 보건/ 소비자 보호/ 식품 안전

소비자 보호 및 식품 안전은 화장품, 세제 및 생활 용품과 같은 나노기술에 기반을 둔 생필품의 보급에 따라 점차적으로 중요성이 증대되었다. 지금까지는 제품에 나노소재가 사용되는 것에 대한 정보제공이 법률상의 규제가 아닌 제품 생산자의 결정에 달려 있었다. 또한, 승인 절차가 규정되어 있는 나노기술의 응용분야의 경우에는 승인 요청에 한해서만 중요 정보들을 제공해 왔다. 그러나 2009년 공포된 유럽 법령에 따라 2013년부터는 화장품에 사용된 나노스케일 구성 요소의 표시가 의무화 되었다.

## 1. 식품

현재 독일에서는 특정하게 생산된 나노스케일의 원료 사용이 아직까지는 큰 의미를 갖지 못하지만, 향후 몇 년 뒤에는 나노스케일 원료 사용을 통하여 식품에 특정한 성질을 부여하는 것이 가능할 것으로 보인다. 식품에서 안전성은 가장 중요한 요소이기 때문에 이를 충분히 보장하기 위한 관련 법규 적용을 통한 필수적 원칙이 성립된다면 식품 첨가에 대한 허가는 의심할 여지가 없다.

2009년 유럽 식품 안전청(European Food Safety Authority, EFSA)의 과학 위원회는 나노물질의 위험성 평가를 위해 확증된 국제적 기준이 기술적으로 생산된 나노물질에 적용될 수 있어야 한다는 입장을 발표한 바 있다. 결론적으로 이러한 결정은 각 케이스 별로 다른 접근 방식이 필요하다는 것을 의미한다.

## 2. 식품 접촉 물질

식품 접촉 물질 분야에는 이미 나노기술을 응용하여 생산되거나 나노물질을 포함하고 있는 다양한 제품들이 시장에 진출해 있다. 여기에는 수분, 산소 또는 자외선의 접촉 차단 효과를 위해 코팅이 된 포장지뿐 만 아니라 항균 포장재 및 부패된 식품을 감지하고 표시하는 기능이 있는 포장 재료 등이 포함된다. 또한 식품의 생산 과정에서 사용되는 컨베이어 벨트의 표면 기능화(세척성, 에너지 효율성, 접착성)를 위해 나노물질이 사용될 수 있다. 공동법(community law) 제정에 있어 최근 독일 연방 정부는 합성수지로 구성된 식품 접촉 물질에 나노입자를 사용하는 것을 허용했다. 합성수지의 형성에 있어 생산 효율을 증대시키기 위한 티타늄 질화물 나노입자가 여기에 속한다. PET병 생산에서의 나노입자의 사용은 1kg당 최대 20mg으로 사용이 제한된다. EFSA의 소견에 따르면 식품 접촉 물질에 사용하는 이러한 특수한 조건에서 나노원료가 식품에 전달되거나 이를 통한 소비자 피해가 있을 것으로 기대하지 않는다. 즉, 건강에 위해 하지 않은 것으로 판단된다.

### 3. 화장품

화장품에서 나노입자는 대부분 응결된 형태로 존재하기 때문에 피부를 통한 흡수 또는 침투가 일반적으로 이루어지지 않는다고 볼 수 있다. 따라서 화장품이 건강한 피부에 사용되고, 피부가 20 nm 이상 크기의 나노입자에 노출된다는 가정 하에 지금까지 소비자에게 직접적인 위해가 된 것은 보고된 바 없다.

### 4. 의약품 및 의료 기기

의약품은 환자에 대한 안정성이 확인되었을 경우에만 사용이 허가되며, 이 평가는 규제 당국의 승인을 통해서만 가능하다. 의료기기의 경우에는 적합성 평가 절차를 거쳐야만 한다. 이는 나노메디슨 개념 범주에 들어가는 제품에 경우에도 동일하게 적용된다. 유럽 연합 및 국제적인 차원에서 현재 나노메디슨 제품 위험성 평가의 개발을 위한 방법들이 논의되고 있다.

### 5. 관련 활동

#### 가) 관련 법률의 조정

관련 법률의 조정은 나노기술과 관련하여 필요에 따라 수행된다.

#### 나) 과학적 기반의 위험성 평가

독일 연방 위험성 평가 연구소는 독일 연방 식품, 농업부의 사업을 통해 소비자 중심의 제품, 화장품, 식품 및 식품 접촉 물질에서 나노기술을 사용하는 것에 대한 과학적 기반의 위험성 평가를 진행하고 있다. 이를 위해 많은 연구프로젝트가 직접적으로 진행되고 있거나 타 기관에 위임되고 있으며, 전문가의 설문조사 및 최신 연구가 진행되고 있다.

#### 다) 농업 및 식품분야 나노기술 모니터링 및 안전연구

독일 연방 위험성 평가 연구소, 막스-루브너 연구소, 독일 연방 식품, 농업 연구소 및 여러 연구기관들이 농업 및 식품분야 나노기술 모니터링 및 안전연구를 진행하고 있다. 이러한 연구 활동을 협력, 조정하기 위해 '합성 나노소재' 연구그룹을 구성하였다.

## **리) 복잡한 매트릭스 내 나노입자 분석**

독일 연방 위험성 평가 연구소와 막스-루브너 연구소는 현재 식품 매트릭스 나노분석을 위해 많은 물질, 인적 자원을 투자하고 있다.

## **마) 화장품 안정성 연구**

지금까지의 연구결과를 통해 화장품에 사용되는 나노입자는 입자 크기 분포와 관련 하여 피부 외부 또는 각질층 내부를 연구해야 하는 것으로 밝혀졌으며 이에 따라 적합한 측정 방법들이 개발될 것이다.

## **나. 인간에 미치는 영향**

인간과 환경에 나노소재가 미치는 영향을 테마로 한 광범위한 연구 활동에도 불구하고 여전히 메꿔져야만 하는 나노기술에 대한 지식적 간격(knowledge gap)이 존재한다. 이를 위해 이미 포괄적인 대책들이 수립되고 있는 상황이다. 하지만 그럼에도 나노기술의 위험성 연구는 향후 더욱 확대되어야 할 것이다. 이 연구의 중심에는 나노소재의 독성학적 영향 연구 및 나노기술이 응용되는 분야의 전체 사이클 과정에서 발생 가능한 노출 시나리오 분석 등이 포함된다. 몇몇 나노소재는 생물학적 장벽을 침투하여 유기체 내부에 도달 할 수 있는 것으로 밝혀졌다. 이러한 특성을 지니지 않은 소재를 개발하기 위해 나노소재가 인간 및 환경에 미치는 영향을 연구하는 포괄적인 평가가 요구되는 실정이다.

### **1. 관련 활동**

#### **가) 나노소재의 독성학적 위험성 평가**

다양한 합성 나노소재의 사용이 증가함에 따라 나노소재의 독성학적 평가를 위한 작용 메커니즘을 추론하는 것은 매우 중요하다. 유전 독성(genotoxicity), 발암성 (carcinogenicity), 특정 기관에서의 집합체 또는 덩어리의 붕괴(disintegration of agglomerates and aggregates), 의도적으로 수정된 표면 특성의 영향에 대한 문제들이 가장 우선적으로 해결될 것이다.

#### **나) NanoCare : 합성 나노소재가 인간에 미치는 영향**

NanoCare 프로젝트는 사람에 미치는 합성 나노소재의 독성 영향 및 사람과 나노물

질 사이의 상호작용에 대한 체계적인 연구, 나노소재 노출 문제, 측정 기술 및 테스트 시스템 개발 그리고 나노소재의 라이프 사이클에 따라 인간에게 미칠 수 있는 발생 가능한 독성 영향 증명 및 평가 등을 주요 포커스로 한다.

#### **다) 주변 환경에 존재하는 인위적 기원의 나노물질**

어느 정도 크기의 인위적 기원으로 생성된 나노물질이 토양, 물 그리고 공기의 오염을 통해 우연한 확률로 식품에 유입되는지에 대한 연구가 아직까지 이루어지지 않았다. 그렇기 때문에 식품에 기대치 않게 포함된 나노물질에 대한 검사 및 평가가 이루어져야 한다. 이를 위하여 적합한 분석 기술과 분석 방법이 지속적으로 연구개발 될 것이다.

주변 환경을 통해 사람이 나노물질에 노출되는 것은 나노입자가 소비재에 점차적으로 많이 사용되고 있는 현실에 따라 점점 증가하고 있다. 분석 방법의 지속적인 연구 개발, 체내에 축적된 나노입자의 영향 연구 및 다양한 종류의 나노입자의 흡수와 분포에 대한 연구 등이 향후 진행될 것이다.

#### **라) 건강에 미치는 영향에 대한 장기적 연구 이행**

지금까지 대부분의 연구는 단기간에 이행되어 왔다. 세포나 조직에 축적된 나노물질에 대한 장기적 관찰을 위해 위험성 평가가 장기적으로 이행될 것이다.

### **다. 산업안전**

작업장에서 나노소재를 안전하게 다루는 것은 생산자와 사용자에게 특히 요구되는 사항이다. 독일 연방 산업안전 보건연구원은 근로자의 안전과 건강을 위해 액션 플랜이 진행되는 동안 작업장 안전, 독성학적 위험성 특성화, 예방전략 마련 등에 우선순위를 두었다.

#### **1. 관련 활동**

##### **가) 나노물질이 사용되는 작업장 안전**

근로자에 대한 나노물질 노출의 신뢰성 있는 조사를 위해 적합한 측정 기술과 전략이 요구된다. 이러한 맥락에서 나노물질에 노출되는 근로자의 경험 데이터 획득 및 검증, 표준화 그리고 재료 구별, 충분한 수준의 필터기술, 개인 샘플링, 나노물질의 먼지

작용 특성화 등이 핵심 연구 주제가 된다.

#### **나) 작업장에서 나노물질 노출에 대한 예방 전략**

작업장에서 나노물질로 인한 건강 위험 평가의 부족한 점을 해결하기 위해 우선 엄격한 안전 대책이 마련되어야 하며 이 대책은 관련 지식이 증가할수록 실제적으로 조정 되어야 한다. 이 과정에서 독일 연방 산업안전 보건연구원은 감정, 프로젝트, 실제적인 방법들을 통해 법률적, 비법률적으로 규제 조치를 마련하고 나노기술 분야에 속한 기업이 자체적으로 책임을 지는 분위기를 조성하는데 기여한다.

#### **다) 나노 물질의 안전한 취급을 위한 기업 상담**

안전성 연구 및 컨설팅을 통해 나노기술 소재 혁신 지원이 실험실 수준의 작은 범위에서부터 시험생산 및 응용기술에 이르기 까지 이루어진다. 독일 연방 산업안전 보건 연구원에서는 컨설팅 및 나노입자로 인한 피해 측정 분야를 지원한다.

### **라. 환경에 미치는 영향**

나노물질의 잠재적인 환경 위험에 대한 연구 활동은 최근 몇 년간 급속도로 증가하였다. 그럼에도 불구하고 환경 분야에 여전히 지식 격차가 존재한다. 특히 그 중심에는 나노물질로 인하여 발생된 환경에 대한 혜택과 위해성을 동시에 고려하는 것을 포함하여 지속 가능성에 대한 의문점들이 있다. 또한 참조 물질(reference materials)의 생산 및 안정적인 테스트 여건을 조성하는 것이 어려운 문제에 속한다.

## **1. 관련 활동**

### **가) NanoNature**

환경 보호를 위한 나노기술의 이점 및 영향에 대한 연구 활동 범위에는 구조-영향-관계 및 작용 메커니즘 분석 외에 위해성 평가를 위한 적합한 측정, 테스트 방법 개발이 포함된다. 또한 나노입자의 이동성, 환경 매질(environmental medium)에서 다른 물질들과의 상호 작용 및 먹이사슬에 따른 생물학적 축적에 대한 연구가 중점적으로 이루어진다.

### **나) 환경행동(작용)에 따른 나노입자의 그룹화**

환경에서의 나노물질의 행동(작용) 및 행방(소재)을 설명하기 위해 우선적으로 주요 요소들이 확인되어야 한다. 입자 크기, 입자 분포, 형태, 형태적 표면 구성뿐 아니라 응집(agglomeration), 흡착, 환경에서 다른 화학물질과의 상호작용, 촉매 작용 또는 운반 기능들이 이 요소에 포함된다.

#### **다) 안전성 평가를 위한 방법 개발**

기존의 화학물질의 연구 과정에서 발생 가능한 안전 위험(safety hazard)을 파악할 수 있는 표준화 테스트가 개발되었다. 이 방법은 나노물질 연구 적합성 여부가 판별되어야 하며 경우에 따라 그에 맞게 변경될 것이다.

#### **라) 나노 물질의 환경 노출에 대한 연구**

나노 물질의 배출 및 노출에 대한 포괄적인 평가는 현재 제한적으로만 가능한 상황이다. 제품에서 나노물질이 방출되는 양을 측정하는 방법의 개발이 미진하며, 정량적인 정보들이 현재까지는 매우 적은 상황이다. 복합소재의 나노입자 방출에 대한 발생 가능한 메커니즘 또는 가능성 등이 연구 및 추정되어야만 한다. 또한 나노입자의 배출 및 노출에 대한 평가는 전체 라이프 사이클 과정 동안 이루어져야 한다. 나노입자가 포함된 제품의 사용 후 필터링 또는 처리에 있어 노출보호를 위한 연구가 진행 되어야 하며 경우에 따라 적절한 폐기 기술 또한 개발되어야 할 것이다.

#### **마) 환경에 미치는 영향에 대한 장기적인 연구**

장기 노출 영향에 대한 연구가 필요하다. 이를 위해 프로토콜의 개발이 요구되며 생체 독성학적 테스트 동안 물질 묘사를 위한 기술적 표준이 결정될 것이다.

#### **바) 환경 영역에서 나노물질의 규정(측정)을 위한 측정기술 개발**

물, 토양, 퇴적물 및 그 환경 속에서 살아가는 유기체에 존재하는 나노물질을 측정하기 위해 적합한 측정 방법이 개발되어야 한다. 기존에 존재하는 테스트 방법이 적용 될 수 있으며 경우에 따라 새로운 방법이 연구 개발될 것이다.

#### **사) Green Nanotechnology**

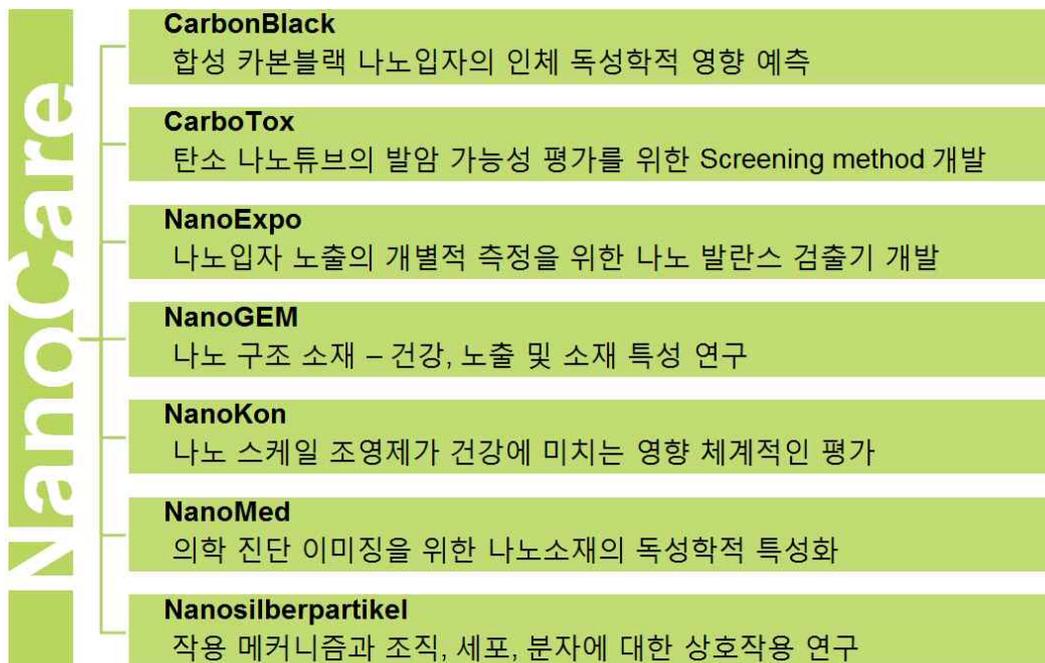
환경 보호, 식량 및 물 공급, 희소 자원 대체와 같은 생활 기초 분야의 지속적인 안전성 확보를 위해 그린 나노기술의 확대가 지속적으로 진행된다. 라이프 사이클 분석, 물질 및 에너지 흐름 그리고 제품 전체 라이프 사이클에 대한 안전성 측면을 기반으로 하여 나노기술 개발 영향이 평가되며 대안이 검토된다.

### III. 2009~2014 NanoCare/ NanoNature

2008년 “Nanonature: 환경 보호를 위한 나노기술 - 사용과 영향” 프로젝트와 “NanoCare: 인간에 대한 합성 나노물질의 영향” 프로젝트가 독일 연방 교육 연구부의 WING-프로그램(WING - 산업과 사회를 위한 소재 혁신)을 통해 공고되었다. 이는 NanoCare-Clusters 프로젝트에서 이루어낸 성과들을 기반으로 하여 인간과 환경에 대한 나노물질의 영향 및 상호작용 분야에 존재하는 무지의 영역을 해결하고, 독일 경제 분야에서 나노기술을 안전하고 책임감 있게 사용하는 데에 목표를 두고 있다. 공고 이후 2009년에서 2014년 사이 20개의 프로젝트에 약 3600만 유로의 재정지원이 이루어졌다.

#### 가. NanoCare 지원 정책

NanoCare 지원 정책의 목표는 합성 나노물질의 생산, 가공 및 사용에서 발생하는 인간 독성학적 영향 및 상호작용을 체계적, 지속적으로 연구하는 것이다. 나노 물질의 라이프 사이클 기간 동안 인간에 대해 발생할 수 있는 모든 독성 영향을 증명해 낼 뿐만 아니라 사전에 미리 예측하기 위해 외부적, 내부적 노출의 정량화와 유독성에 대한 물질 고유의 주요 파라미터 결정 및 작용 메커니즘이 연구 되었다.



## 나. NanoNatur 지원 정책

NanoNature 지원 정책의 목표는 독일에서 나노물질의 잠재적 시장 구분(market segment)을 강화하고 친환경 소재 및 연관 기술 수출을 확대시키는 것이다. 추가적으로 합성 나노입자 및 나노소재의 체계적인 목록 작성 및 분류, 소재(위치), 영향 및 측정 방법을 연구개발 하는 것을 통해 나노기술이 환경에 미치는 영향을 연구한다.



## IV NanoCare 분야 종료 프로젝트

### 가. CarbonBlack 프로젝트

- 연구기간 : 2010년 8월 1일 ~ 2013년 7월 31일(2013년 12월 31일까지 연장)
- 지원금액 : 250만 유로
- 참여기관
  - 주관기관 : 보어스텔 연구 센터
  - 협력기관 : 마부르크 필립스 대학, 칼스루헤 기술연구소, 튀빙 대학, 프라운호퍼 독성학 및 실험 의학 연구소, 라이프니츠 의학, 생명과학 연구소

#### 1. 프로젝트 목표

- **합성 카본블랙 나노입자의 인체 독성학적 영향 예측**

Carbon Black은 특수하게 조정된 연소 공정을 통해 생산된 물질로서 약 10~100 나노미터 크기의 탄소 나노입자로 구성되어있다. Carbon Black은 주로 자동차 타이어, 플라스틱, 인쇄용 잉크 및 코팅제와 같은 제품에 대량 사용되고 있으며, 세계 보건 기구는 현재 이 입자가 암을 유발 할 수 있는 위험성이 있다고 판단하였다.

Carbon Black 공동 프로젝트의 목표는 변형되고 특성화된 Carbon Black 나노입자의 독성학적 영향을 기도와 폐에서 확인 가능한 테스트 모델 시스템을 연구개발 하는 것이다. 이 멀티-레벨 테스트 시스템으로는 단순한 세포 배양 모델부터 조직 배양 모델 그리고 동물 모델을 통한 흡입 연구 검사가 진행 된다.

#### 2. 부분 프로젝트 계획

- 가) 기상합성(gas phase synthesis)을 통한 특수 변형 카본블랙 나노입자(칼스루헤 기술 연구소)
- 나) 체외 독극물 스크리닝, 체내 독극물 흡입(프라운호퍼 독성학 및 실험 의학 연구소)
- 다) 기관 상피(tracheal epithelium)에 카본블랙 나노입자가 미치는 영향(튀빙 대학)
- 라) 카본블랙 나노입자가 기도 영역에 미치는 영향(보어스텔 연구센터)
- 마) 클라라 세포(clara cell)와 타입 2 폐포세포(pneumocyte)에 대한 카본블랙 나노입자의 독성 영향(마부르크 필립스 대학)

### 3. 프로젝트 결과

프로젝트 결과, 나노입자의 노출로 발생하는 부정적 영향이 애초에 예상했던 것과 비교하여 현저하게 낮았으며, 오히려 많은 경우에서 세포 및 조직의 양성 방어 반응이 야기된 것을 확인할 수 있었다. 또한 기도 내 다양한 부위의 세포들이 Carbon Black 나노입자에 서로 다르게 반응한다는 사실을 발견하였다. 이러한 연구를 통해 순수 나노입자가 세포 및 조직에 미치는 영향은 미비한 수준으로 확인되었으며, 다양한 크기의 나노입자에 대한 신체의 반응은 표면에 증착된 화학 물질에 의존된다는 결론을 얻을 수 있었다.

#### 나. CarboTox 프로젝트

- 연구기간 : 2010년 9월 1일 ~ 2013년 8월 31일(2013년 12월 31일 까지 연장)
- 지원금액 : 125만 유로
- 참여기관
  - 주관기관 : 프라운호퍼 독성학 및 실험의학 연구소
  - 협력기관 : 라이프니츠 고체, 재료연구소, 바이어 재료과학

#### 1. 프로젝트 목표

- **탄소 나노튜브의 발암 가능성 평가를 위한 선별 기술(screening method) 개발**

탄소 나노튜브는 다양한 길이와 두께를 지닌 섬유로서 수축되는 특성과 복잡한 구성으로 다양한 표면 특성을 부여 할 수 있는 특징을 가지고 있으며, 흡입 시 폐에 좋지 않은 영향을 일으킬 수 있는 것으로 알려져 있다. CarboTox 프로젝트의 목표는 탄소 나노튜브가 석면과 같이 생물학적으로 부정적인 영향을 야기하는가에 대한 진위를 연구를 통해 밝혀내는 것으로, 동물 실험과 같이 많은 비용과 시간을 필요로 하는 실험 방법을 사용하지 않고, 다양한 형태의 탄소 나노튜브가 지닐 잠재적 위험성을 판별할 수 있는 안전한 검사 방법을 개발하는 것을 목표로 한다. 이러한 검사 방법의 개발을 통해 탄소 나노튜브의 생산 초기 단계부터 그 위험성을 확인할 수 있을 것이며, 탄소 나노튜브의 생산 과정에서뿐만 아니라, 탄소 나노튜브가 포함된 제품의 생산 또는 컴포넌트의 가공과정에 있어 잠재 하고 있는 건강에 대한 위협이 현저하게 감소할 것으로 예상된다. 특히, 이러한 검사 방법은 산업분야에서 안정적인 독성 평가를 위해 그 중요성이 매우 강조된다.

# 프로젝트 과정 및 결과에 대한 공개 자료 부족

## 다. NanoExpo 프로젝트

- 연구기간 : 2010년 5월 1일 ~ 2013년 4월 30일(2013년 10월 31일까지 연장)
- 지원금액 : 50만 유로
- 참여기관
  - 주관기관 : 브라운슈바이크 공대 반도체 기술 연구소
  - 협력기관 : 프라운호퍼 목재 연구소

### 1. 프로젝트 목표

- **나노입자 노출의 개별적 측정을 위한 나노 밸런스 검출기**

합성 물질에서 방출되는 나노에어로졸의 실제적인 노출 양 평가를 위해 스위치를 작동시키면 바로 가동되는 사용하기 쉽고 견고한 센서를 기반으로 하는 새로운 측정 기술이 요구된다. 이 기술의 구현을 위해서는 센서의 가격과 센서 성능 사이에 절충이 필요하다. 현재는 500유로 미만의 가격대에서 실제 현장에서 합성 나노입자의 노출을 측정할 수 있는 휴대용 나노입자 탐지기 제품이 없는 실정이다.

### 2. 프로젝트 결과

NanoExpo 프로젝트를 통해 “Cantor”라는 이름의 캔틸레버(cantilever) 나노입자 검출기가 개발되었다. 이 기기는 마이크로 제어 MEMS-캔틸레버-공진저울과 전기 영동 나노입자 분리기로 구성되어 있으며, 나노입자의 질량 농도를 분석할 수 있다. 이 기기는 기존의 방법에 비해 시간을 크게 단축시키는 장점을 지니고 있으며, 멤브레인 필터를 통해 마이크로입자를 필터링 할 수 있다. 또한, 이 기기는 약 200 유로대의 경쟁력 있는 가격대 형성이 가능하다.

“Cantor”시스템을 이용하여 탄소, 이산화 티탄 및 이산화 규소 에어로졸에 대한 검출 테스트가 진행되어 그 성능이 검증되었으며, 지속적인 최적화 연구를 통해 1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  미만의 검출 한계 및 1분 내에 측정이 가능한 기기를 개발 하고자 한다.

## 라. NanoGEM 프로젝트

- 연구기간 : 2010년 8월 1일 ~ 2013년 7월 31일(2013년 10월 31일로 연장)
- 지원금액 : 독일 연방 교육 연구부 및 산업분야 프로젝트 참여기관의 지원을 통해 총 650만 유로

- 참여기관
  - 주관기관 : 에너지, 환경기술 연구소
  - 협력기관 : 도르트문트 응용학문 대학, 잘란트 대학, 뮌스터 빌헬름 대학, 독일 연방 산업안전 보건연구원, 바스프(BASF), 독일 연방 위험성 평가 연구소, 바이어 재료과학, ItN, IBE, IGFM, ZAUM 알레르기 환경 센터

## 1. 프로젝트 목표

### • 나노 구조 소재 - 건강, 노출 및 소재 특성 연구

NanoGEM 은 대학, 민간 연구기관, 산업 및 정부기관으로 구성된 컨소시엄으로 특별한 전략을 통해 지속 가능한 개발을 이루어내고, 위험성 평가에 대한 다양한 의문점들을 해결하고자 하는 목표를 세웠다. 이를 통해 나노입자 및 나노소재와 이를 이용하여 가공/생산된 제품의 위험성 평가를 진행한다. 생물 동학(biokinetics) 측면에서 살펴보면, 인간의 신체에 나노입자가 흡수, 분포(확산)될 때는 나노입자의 크기, 구조, 표면특성에 영향을 받는다.

나노소재의 생산, 가공, 사용, 처리에 있어 산업 안전 및 제품 안전에 대한 의문 사항들은 새롭게 개발되는 휴대용 측정 장비를 통해 해결되어야 할 것이며, NanoGEM 프로젝트의 위험성 평가를 통해 유기체에 대한 나노입자의 내부 및 외부 접촉 관련 데이터가 수집된다.

## 2. 프로젝트 결과

NanoGem 프로젝트를 통해 “나노”의 뜻이 자동적으로 독성 이라는 의미를 지니지 않는다는 것이 증명되었다. 하나의 물질이 건강에 부정적인 영향을 미치는 데는 물질의 크기뿐 아니라 다양한 많은 요소들이 연관되어 있다. NanoGem 프로젝트를 통해 위험성 평가를 위한 간편하고, 특정 물리-화학적 특성에 따라 분류할 수 있는 기준이 마련되었다. 이는 향후 새롭게 개발될 나노물질을 특성에 따라 분류하여 안전하게 사용할 수 있는 발판이 될 것이다.

이번 프로젝트에서는 16개의 다양한 나노입자들이 연구 되었으며 무엇보다도 나노입자를 흡입하거나 삼켰을 때 일어나는 반응과 신체 내부에서 일어나는 작용들에 대해 연구되었다. 이 다양한 나노입자에는 스크래치 저항을 높여주는 특성 때문에 코팅 소재에 사용되는 이산화규소(실리카), 이산화지르코늄과 태양광기술에 이용되는 은나노입자 등이 포함된다. 순수 나노 입자뿐 아니라 제품의 작업성, 안정성, 가용성을 높

여주는 기능성 나노입자들도 동시에 연구되었다.

또한, 구강을 통해 흡수된 나노입자는 입자의 종류가 기능성 입자이든 순수 입자이든 인체에 심각한 독성 영향을 미치지 않은 것으로 밝혀졌다. 나노입자의 영향은 입자 표면 특성에 따라 달라지며, 복합 나노소재가 함유하고 있는 나노입자의 경우, 이 입자가 방출될 경우에만 인간 체내에 흡수되는 것으로 밝혀졌다. 뿐만 아니라, 공기에 존재하는 나노입자를 분별할 수 있는 측정 기술의 개발을 통해 나노소재가 사용되는 산업 현장의 안정성 평가에 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

### 3. 프로젝트 워킹 패키지

- 1) 생산, 기능화, 특성화
- 2) 노출
- 3) 라이프 사이클에서 나노소재의 변화
- 4) 흡수 및 분포
- 5) 독성
- 6) 작용 메커니즘
- 7) 위험성평가
- 8) 커뮤니케이션

프로젝트 개요 자료

#### 마. NanoKon 프로젝트

- 연구기간 : 2010년 10월 1일 ~ 2013년 9월 30일(2013년 12월 31일까지 연장)
- 지원금액 : 220만 유로
- 참여기관 :
  - 주관기관 : Sarasto GmbH
  - 참여기관 : 라이프니츠 신소재 연구소, 요하네스 구텐베르크 마인츠 대학, Nanogate, 잘란트 대학

#### 1. 프로젝트 목표

- *나노 스케일 조영제가 건강에 미치는 영향 체계적인 평가*

NanoKon 프로젝트는 새로운 종류의 나노입자가 위장관(gastro-intestinal tract)에 미치

는 영향을 체계적으로 연구, 분석, 평가하는 것을 목표로 하여, 나노입자가 각각의 세포에서 어떻게 행동(작용)하는지, 이로 인한 위험 발생 여부를 연구한다. 이 연구를 위해 고해상도 현미경 기술과 토모그래피 기술이 사용되며, 생화학적 방법을 통해 각각의 세포가 어떻게 이러한 입자들에 반응하는지를 연구한다. 이렇게 연구, 조사된 결과를 기반으로 나노 입자와 세포사이의 상호작용을 미리 예측할 수 있는 컴퓨터 시뮬레이션이 진행된다. 연구진은 이번 프로젝트를 통해 의학 분야에 사용될 새로운 종류의 나노입자에 대한 안전 수칙 및 테스트 방법을 개발하고, 나노입자가 인간의 신체(특히 내장 기관)에 어떠한 영향을 미치는지에 대해 평가함으로써 새로운 조영제의 안전성을 보장하고 바이오 메디슨 분야에서 나노입자에 대한 안전하고 책임감 있는 사용에 기여할 것으로 평가된다. 또한 질병 진단을 위한 이미지 퀄리티를 현저하게 향상시킬 수 있는 특수 나노-조영제도 연구된다. 그리고 다양한 표면 성질과 특정한 물리-화학 특성을 지닌 나노입자 연구를 통해 나노입자와 개별 신체 세포 또는 전체 기관 간의 상호작용을 규정한다.

## 2. 프로젝트 결과

연구진은 최신 질량 분광계 법(mass spectroscopic method)을 통해 혈액 속에서 백 여 개가 넘는 다양한 혈액 단백질들이 나노입자를 짧은 시간 안에 덮어씌우는 것을 관찰 하였다. 또한, 단백질 껍질(protein shell)이 오랜 시간 안정적으로 유지되며, 혈액 시스템 세포가 나노입자에 반응하는 것을 이미 조기에 결정하는 것으로 밝혀졌다. 단백질 코로나(protein corona)는 나노입자 표면구조가 자신의 일을 수행하는 것을 방해한다. 이번 프로젝트에서 다양한 나노입자의 체계적인 연구를 통해 코로나의 복잡성과 시간 의존성이 이해되었을 뿐 아니라 나노입자의 특성이 이러한 과정에 미치는 영향을 알게 되었다.

### 바. NanoMED 프로젝트

- 연구기간 : 2010년 9월 1일 ~ 2013년 8월 31일
- 지원금액 : 약 200만 유로
- 참여기관 :
  - 주관기관 : Chemecell GmbH
  - 협력기관 : PerkinElmer Chermagen Technologie GmbH, HTS Systeme GmbH, 프리드리히-쉴러 예나 대학, 예나 의과대학, 라이프니츠 광학 기술 연구소

## 1. 프로젝트 목표

### • 의학 진단 이미징을 위한 나노소재의 독성학적 특성화

NanoMED 프로젝트를 통해 컴퓨터 토모그래피 및 자기-공명-토모그래피 분야의 이미징 기술에 사용되는 새로운 종류의 자기 나노입자의 내부 노출을 파악한다. 특히 혈뇌관문(blood-cerebral barrier) 및 혈액 태반 관문(blood-placenta barrier)에서의 노출경로에 대한 체내(in vivo), 체외(in vitro) 노출 시나리오가 연구된다. 규제차원에서 나노입자의 독성 연구를 위한 특정 표준이 없기 때문에 사용된 모델 시스템은 체계적으로 광범위하고 표준화된 사용을 위해 유효성이 확인되어야 한다.

## 2. 연구 내용

- 1) 중요한 나노입자 파라미터의 체계적인 결정
- 2) 레퍼런스 입자 세트 개발
- 3) 혈액 태반 관문 및 혈뇌관문과 나노입자의 상호작용 체내, 체외 실험
- 4) 구조 활성 관계(structure-activity relationship) 및 용량 반응 관계(dose-response relationship) 연구
- 5) 나노입자의 위험성 평가
- 6) 체내 및 체외 실험의 상관관계
- 7) 메인 테스트 시스템의 유효성 확인
- 8) 표준 운영절차 개발
- 9) 데이터베이스 형식 개발

## 3. 프로젝트 결과

프로젝트 내 연구개발을 통해 다양한 외피로 구성된 철, 금, 은 나노입자가 생산되었으며, 이를 통해 물리적, 화학적, 이미징 특성으로 생물학적 시스템에서 사용하기 가장 적합한 나노입자들이 식별되었다. 이러한 입자들을 통해 독성 평가를 위한 품질 보증 테스트 시스템이 구축 되었으며, 이후 표준 운영 절차의 개발과 레퍼런스 입자들이 정의되었다. 이러한 지식에 기반을 두어 체내, 체외에서 생물학적으로 중요한 관문들(barriers)이 나노입자와 직면(직접적인 접촉)할 수 있게 되었고 물리적, 화학적, 면역조직 화학 방법을 통해 그 효과가 측정 되었다. 이러한 과정을 통해 체외에서의 독성 영향과 체내 상태의 연관성이 입증 될 수 있었다. 이러한 연구 결과는 의학 분야에서 이미징 방법에 필요한 최적화된 나노입자를 개발 하는데 상당한 진전을 이끌어 낼 것으

로 평가된다. 수집된 방대한 양의 데이터는 마찬가지로 프로젝트를 통해 개발된 데이터 베이스에 저장 되었으며 DaNa 프로젝트를 통해 개발된 나노소재 지식 기반 데이터 베이스에도 저장 되었다.

## 사. Nanosilberpartikel 프로젝트

- 연구기간 : 2010년 10월 1일 ~ 2013년 9월 30일(2014년 3월 31일 까지 연장)
- 참여기관 :
  - 주관기관 : Biomaterials GmbH
  - 협력기관 : EXcorLAB GmbH, Rent-a-scientist GmbH, 유스투스-리비히 기센 대학, 뒤스부르크-에센 대학

### 1. 프로젝트 목표

#### • *작용 메커니즘과 조직, 세포, 분자에 대한 상호작용 연구*

Nanosilberpartikel 프로젝트의 목표는 은나노 입자를 포함하고 있는 다양한 종류의 의료용 재료시스템에서 은과 용해된 은을 구분(식별)하는 것을 가능하게 하는 방법을 연구개발 하는 것이다. 이를 위해 다양한 은나노 입자가 함유되어 있는 실버-베어링 보철물이 개발되었다. 또한 은입자의 방출이 테스트 되었으며 은나노 입자가 인간에 미치는 위험성이 연구 되었다. 은나노 입자가 세포 및 조직에 미치는 영향을 연구하고 은나노 입자의 예상치 못한 부작용을 인식하고 증명한다.

# 프로젝트 과정 및 결과에 대한 공개 자료 열람 권한 제한

## V. NanoNature 분야 종료 프로젝트

### 가. Fe-NANOSIT 프로젝트

- 연구기간 : 2010년 5월 1일 ~ 2013년 4월 30일(2013년 10월 31일 까지 연장)
- 참여기관
  - 주관기관 : 헬름홀츠 환경 연구소
  - 협력기관 : IBL 환경, 바이오기술 GmbH, proaqua GmbH & Co. KG, 프라운호퍼 세라믹 기술 시스템 연구소, 드레스덴 공과대학, 포츠담 대학, ECT Oekotoxikologie GmbH

#### 1. 프로젝트 목표

- **수질 정화를 위한 맞춤형 반응성 나노입자 연구개발**

FE-NANOSIT 프로젝트의 목표는 폐수 및 지하수 정화를 위한 새로운 에너지 및 자원 친화적인 청정기술을 개발하는 것이다. 그리고 이 프로젝트는 철/탄소-복합체 및 자성 나노촉매에 기반을 둔 새로운 종류의 맞춤형 반응성 나노입자 연구개발이 프로젝트의 중심에 있으며, 이에 대해 전반적인 위험성 평가 및 생태학적 독성 평가가 진행된다. 이렇게 새롭게 개발된 소재는 오염된 수자원의 정화를 저렴한 비용으로 상대적으로 빠르게 처리 할 수 있는 장점이 있다. 또 무엇보다 지하수 및 폐수 정화를 위한 새로운 방법을 통해 중소기업들이 경제적인 혜택을 누릴 수 있다는 이점이 있다.

#### 2. 프로젝트 역할 분배

새로운 입자 개발 및 개발된 입자의 환경 유해 가능성 평가가 헬름홀츠 환경 연구소에서 진행된다. 지하수 및 폐수 정화를 위한 철 기반 나노입자 및 나노 구조 복합소재가 연구개발 되는 것과 동시에 개발된 나노입자의 방출에 따른 환경 위해 가능성이 연구된다.

프라운호퍼 세라믹 기술 시스템 연구소는 개발된 입자의 특성화 분야를 책임진다. 그리고 지하수 및 폐수 정화를 위한 기술적 사용의 측면에서 입자들을 평가하며, 나아

가 생태독성학적 매개물에서 나노입자 작용의 연구를 통해 프로젝트 진행 과정에서 생태독성학적 테스트의 분석을 위한 기반을 마련한다.

ECT Oekotoxikologie GmbH에서는 철-기반 나노입자 및 나노 복합체가 수생 생물에 미치는 영향과 화학 물질, 살충제, 농약 및 의약품의 생태 독성을 연구, 평가한다.

드레스덴 공대의 재료과학 연구소와 막스-베르크만-바이오소재 연구소는 나노입자와 세포 및 유기체간의 상호 작용을 연구한다. 이를 통해 전자 현미경 기술에 적합한 제조 방법을 개발하고 유기체에서의 나노입자 흡수 및 분포(확산), 세포와 조직의 분석함으로써 생태독성학적 평가 및 작용 메커니즘 식별에 기여할 것으로 평가된다.

산업 분야에서 proaqua GmbH & Co. KG는 산업 폐수의 산화 처리 분야를 담당하고 IBL 환경, 바이오기술 GmbH는 연구개발 기술의 실제적 사용 분야 연구를 담당 한다.

# 프로젝트 결과에 대한 공개 자료 부족

## 나. NADINE 프로젝트

- 연구기간 : 2010년 5월 1일 ~ 2013년 4월 30일(2013년 12월 31일 까지 연장)
- 지원금액 : 독일 연방 교육 연구부 및 프로젝트 참여기관을 통해 총 540만 유로
- 참여기관
  - 주관기관 : CONDIAS GmbH
  - 협력기관 : Esau & Hueber GmbH, 독일 가스 및 수도 협회, EVAC GmbH, 프라운호퍼 레이저- 및 표면기술 연구소, 프라운호퍼 세라믹 기술 시스템 연구소, m-u-t AG, eins Energie in Sachsen GmbH & Co., 뮌헨 공과대학

### 1. 프로젝트 목표

- **다양한 분야에서 사용 가능한 인라인 소독 공정을 위해 나노변성 다이아몬드 전극 개발**

NADINE 프로젝트는 효과적인 나노변성 다이아몬드 전극을 개발하여 보다 현실적인 조건에서 다양한 애플리케이션을 검사, 확인 하는 것을 목표로 한다. 이 기술은 건강과 인간의 환경을 위한 조건을 지속적으로 향상시키고 수자원의 재사용을 현저하게 증대시킬 수 있다.

# 프로젝트 과정 및 결과에 대한 공개 자료 부족

## 다. NanoFlow 프로젝트

- 연구기간 : 2009년 10월 1일 ~ 2012년 9월 30일
- 지원금액 : -
- 참여기관
  - 주관기관 : 아헨 공과대학, 엔지니어링 & 수문지질학과
  - 협력기관 : Postnova Analytix GmbH, 울리히 연구센터 생명공학 & 지구과학 연구소

### 1. 프로젝트 목표

#### • *물포화, 부분 물포화 지반에서 합성 나노입자의 이동*

NanoFlow 프로젝트는 암반 및 물포화 상태의 토양, 부분포화 상태의 토양에서의 합성 나노입자의 이동(transport behavior)과 관련하여 실험실 테스트 및 필드 테스트를 진행한다. 탄소기반 나노물질(다중 벽 탄소 나노튜브)과 안정화 된 은 나노입자가 연구대상으로 고려된다.

### 2. 프로젝트 결과

실험실 테스트를 통해 탄소 나노튜브의 이동성이 탄소 나노튜브의 초기 농도와 토양 입자의 크기에 좌우된다는 것이 밝혀졌다. 침루계(lysimeter) 필드 테스트에서는 다중 벽 탄소 나노튜브가 토양 최상층에 머물러 있는 것이 밝혀졌다. 전반적인 실험의 결과를 통해 토양이 탄소 나노튜브에 대해 강력한 요지로써의 역할을 하는 것으로 추측된다. 이로 인해 불포화대(vadose zone)에서 다중 벽 탄소 나노튜브의 이동이 적고 이는 지하수 오염 위험성이 낮은 결과로 나타날 것으로 평가된다.

안정화된 은 나노입자의 실험실 테스트에서 나노입자가 특정 조건하에서 높은 이동성을 보이며, 이 이동거리가 수 미터에 달하는 것으로 나타났다. 이는 순수 사암 또는 모래 함량이 높은 토양에서 주변 용액에 1가의 이온이 있는 실험 모델 토양에서 입증되었다. 다른 조건에서는, 예를 들어 복잡한 광물 조성의 사암 또는 기공 크기가 작은 사암, 점토 함량이 높은 촘촘한 토양, 높은 이온 강도 및 2가의 이온이 존재하는 토양

용액에서는 은 나노입자의 이동이 매우 제한되는 것으로 나타났다. 폭우가 내리는 경우 또는 2가의 이온이 1가의 이온으로 대체되는 경우와 같이 이온 강도가 감소하는 경우에는 은 나노입자가 토양에서 다시 방출 될 수 있다. 은 나노입자의 이러한 재이동은 은 나노입자의 운반자 역할을 하는 토양 콜로이드의 방출을 통해 발생한다. 또한 부서진 사암의 환경에서도 은 나노입자의 이동성이 비교적으로 높은 것으로 나타났다.

## 라. NanoKiesel 프로젝트

- 연구기간 : 2010년 5월 1일 ~ 2012년 4월 30일
- 참여기관
  - 주관기관 : 독일 바이마르 응용 건설 연구소
  - 협력기관 : SUC 작센 환경 컨설팅 GmbH, Chemiewerk Bad Köstritz GmbH, MWT Gesellschaft für industrielle Mikrowellentechnik mbH, ArmoTec Pressenbau GmbH, August Lücking GmbH & Co. KG, H+H Deutschland GmbH, Fenger Beton und Kies GmbH & Co. KG, 바이마르 바우하우스 대학, 독일 연방 재료 연구 및 검사 연구소, Brückner Grundbau GmbH

### 1. 프로젝트 목표 및 결과

- **나노스케일 실리카머드 - 재료 특성 향상 및 미네랄 건축자재 활용을 위한 기술연구개발**

실리카를 함유하고 있는 필터 잔여물은 수분을 지니고 있는 필터 케이크(filter cake)로써 화학 산업 폐수의 정화를 통해 발생한다. 이러한 잔여물은 많은 비용으로 매립 처리되거나 노천을 메우는데 사용된다. 비정질 실리카의 높은 함량 및 크고 특별한 표면적을 보면 필터 잔여물의 특징이 마이크로실리카와 유사하다.

Nano Kiesel 연구 프로젝트의 목표는 다양한 생산 과정에서 발생하는 두 종류의 필터 잔여물을 건축 자재 생산에서 특성 개선을 위해 활용하는 기술을 개발하는 것이다. 필터 잔여물은 고 비정질 부분을 증명하면서 상세하게 특성화 되었다. 검증된 설페이트, 클로라이드 성분은 활용에 있어 제한적일 수 있는 것으로 나타났다. 특성화 결과에 근거하여 사용 가능한 분야의 사전 선택이 진행 되었고 실험적으로 검사 되었다.

- 1) 벽돌 제조를 위한 다공성 재료 → 필터 잔여물 사용을 통한 밀도의 감소 입증

- 2) 콘크리트 첨가제 → 두 가지 필터 잔여물의 강도 증가 입증
- 3) 복합 시멘트의 구성 요소 → 두 가지 필터 잔여물의 강도 증가 입증
- 4) 특수 세척을 위한 첨가제 → 무효과 입증
- 5) 벤토나이트 서스펜션 스테빌라이저 → 특성 악화

벽돌 및 콘크리트 제품의 제조에 이용하기 위한 기술적인 전제 조건이 제시되었다. 에너지 소비에 대한 고려와 그로 인해 발생하는 비용을 비교하여 볼 때 필터 잔여물을 벽돌 생산에 사용하는 옵션은 매우 저렴한 방법으로 평가된다.

#### 마. NanoMembrane 프로젝트

- 연구기간 : 2010년 5월 1일 ~ 2013년 4월 30일
- 참여기관
  - 주관기관 : Merck KgaA
  - 협력기관 : 프라운호퍼 세라믹 기술 시스템 연구소, Rauschert Kloster Veilsdorf GmbH, Fa. Andreas Junghans, Benseler Sachsen GmbH & Co. KG, Color Textil Veredelung Peppermint Holding GmbH, PTS Papiertechnische 재단, Koehler Kehl GmbH, 슈투트가르트 대학 건설 물리학

#### 1. 프로젝트 목표

- **순환 종결을 통한 지속 가능한 물, 용매 절감을 위한 나노기공 세라믹 멤브레인**

NanoMembrane 프로젝트에서는 화학적 안정성이 증대되고 컷오프가 감소한 새로운 종류의 세라믹 나노필터-멤브레인이 연구개발 되었다. 이 멤브레인은 다양한 응용환경에서 실험 되었다. 이러한 다양한 환경에서의 실험은 멤브레인의 안정성과 분리 효율성을 사용 조건하에서 확인하는데 기여하였으며, 한편으로는 이런 방법을 통해 멤브레인의 요건, 즉 멤브레인 개발 동안 목표된 분리 특성의 최적화에서 직접적으로 반영되어야 할 것을 명확하게 찾아내는 것에 기여하였다. 특히 다음과 같은 과학적, 기술적인 목표가 추구 되었다.

- 1) 컷오프 200 g/mol 나노필터-멤브레인 개발

- 2) pH안정 나노필터 멤브레인 개발
- 3) 유기성 나노필터 멤브레인 개발
- 4) 테스트 시설 구성 및 피팅
- 5) 화학, 섬유, 금속, 종이 분야 용매 및 폐수의 실험실 테스트 및 파일럿 테스트
- 6) 환경 균형 / 전반적인 균형

## 2. 프로젝트 결과

NanoMembrane 프로젝트를 통해 최초로 9리터( $9 \text{ l/m}^2\cdot\text{h}\cdot\text{bar}$ )의 물 흐름에서 컷오프  $200 \text{ g/mol}$ 의 합성 세라믹 나노필터-멤브레인 합성에 성공하였다. 2시간 동안의 염산 및 수산화 나트륨 필터링을 통한 pH안정성의 체계적 연구에서 염산에서는 25도에서  $2 \text{ mol/l}$  (7.2 %)까지 수산화 나트륨에서는 60도에서  $4 \text{ mol/l}$  (16%)까지 그 안정성이 나타났다. 유기 용매에서 나노필터-멤브레인은 사용된 용매에 따라 매우 다양한 결과를 나타내어 결론을 내리기 어려운 것으로 밝혀졌다. 가장 좋은 성능을 기록한 것은 테트라하이드로퓨란에 용매에서  $3.5 \text{ l/(m}^2\cdot\text{h}\cdot\text{bar)}$  컷오프  $350 \text{ g/mol}$  도달한 것이다.

새로운 세라믹 나노필터-멤브레인 생산 환경이 실험실 규모  $0.0055 \text{ m}^2$  에서 산업 규모  $0.25 \text{ m}^2$ 로 바뀌었다. 프로젝트를 통해 10개의 다양한 실험실과 파일럿 설비가 멤브레인 특성화 및 멤브레인 테스트를 위해 사용되었다. 더 나아가 유기 용매를 위한 필터 테스트 설비의 개발과 설치에 성공하였고 이 장비는 Merck사에서 파일럿 테스트를 위해 사용 되었다.

화학, 금속 가공 산업, 섬유 정련 가공, 종이- 및 펄프 생산에서 테스트를 통해 새로운 세라믹 나노필터-멤브레인이 기존에 시장에 판매되고 있는 멤브레인에 비해 우수한 성능을 지닌 것이 확인 되었다. 금속 부품의 세정에서 생성되는 침액의 정화 또는 펄프 생산에서 사용되는 표백액의 정화를 통해 멤브레인이 경제적으로 사용 가능성이 있는 것으로 나타났다.

전반적인 균형 테스트를 통해 세라믹 나노필터-멤브레인을 액체 폐기물 및 폐수 정화에 사용하는 것이 생태학적으로 유의미한 것으로 밝혀졌다. 구체적인 사례 분석 및 다양한 결과와 보고의 일반화 과정을 거쳐, 향후 세라믹 나노필터-멤브레인의 사용을 위한 기본적인 노하우가 생성, 축적 될 것으로 기대된다.

### 마. NanoPharm 프로젝트

- 연구기간 : 2010년 6월 1일 ~ 2013년 5월 31일(2013년 9월 30일 까지 연장)
- 지원금액 : 28만 5395유로
- 참여기관
  - 주관기관 : UMEX GmbH
  - 협력기관 : NAMOS GmbH, proAqua GmbH & Co. KG, 드레스덴-로젠도르프 헬름홀츠 연구소, 안할트 대학, 라이프니츠 촉매 연구소, 드레스덴 공과대학 수질 연구소, 튀네부르크 대학 환경연구소, 헬름홀츠 환경연구 센터

## 1. 프로젝트 목표

- **의약품 폐기물 제거를 위한 광촉매적으로 활동적인 새로운 합성소재 개발**

NanoPharm 프로젝트의 목표는 다양한 방법을 통해 변성된 아연 또는 이산화티탄과 같은 나노입자를 사용하여 물 속에 존재하는 다양한 종류의 약품으로 인한 오염을 감소시킬 수 있는 새로운 기술적 접근 방법을 개발하고 테스트 하는 것이다.

## 2. 프로젝트 결과

S-Layer 사용을 통해 생성되는 바이오 복합소재와 은 이온으로 도핑된 아연 나노입자 알갱이가 특히 효과적인 것으로 증명 되었다. 더 나아가 충분히 안정적인 압타머가 선택된 작용물질(약물)의 검출과 농축을 위해 선택 되었고 특성화 되었다.

기존에 알려진 소재들에 비교하여 상당히 증가된 안정성과 활동성을 지닌 새로운 종류 광촉매가 수많은 분해 테스트를 통해 연구 되었다. 이를 위해 개별 약품뿐 아니라 혼합 약품이 실험실 설비 및 테스트 설비에서 입증, 구현되었다. 이 테스트에서는 광범위한 화학 분석 평가가 이루어졌으며 변환제품(transformation product)의 독성 평가 또한 동반 진행 되었다.

습득된 연구결과 및 지식의 실제적인 구현을 위해, 광촉매 프로세스가 광산화가 연결되고 동일한 반응 챔버 내에서 실행 될 수 있는 수자원 처리 컨셉이 개발되었다. 이 방법으로 에너지 및 옥시던트의 소비가 약 20~30% 감소될 수 있다.

사. NanoPurification 프로젝트

- 연구기간 : 2010년 5월 1일 ~ 2013년 4월 30일(2013년 10월 31일 까지 연장)
- 참여기관
  - 주관기관 : 프라운호퍼 환경, 안전- 에너지기술 연구소
  - 협력기관 : Gelsenwasser AG, EnwiroChemie GmbH, KRYSCHI Wasserhygiene, 킬 크리스티안-알브레히츠 대학, Cornelsen Umwelttechnologie GmbH

## 1. 프로젝트 목표

- **기능성 나노 복합 재료를 사용하여 물 및 폐수 처리를 위한 신소재 및 방법 개발**

독일에서 수돗물을 마신다거나 정화된 하수를 자연에 배출하는 것은 가능하다. 하지만 독성 물질 또는 약품 잔여물이 점차적으로 수질을 오염시키고 있는 상황이다. 이러한 오염수를 깨끗하게 필터링 할 뿐만 아니라 트레이스 물질을 분해 할 수 있는 멀티 배리어 시스템(multi-barrier systems)은 장벽으로써 고체 물질뿐 아니라 액체 물질에도 영향을 미친다.

NanoPurification 프로젝트를 통해 프로세스 단계에서 파티클 오염 및 미생물을 역학적으로 억제하고 추가적으로 화학적, 생물학적 오염물질을 분해하거나 제거 할 수 있는 “NanoPur” 하이브리드 시스템을 개발한다. 이 하이브리드 시스템에는 표면 활동 금속 필터 복합 마이크로 여과기가 나노 이산화티타늄 광촉매 코팅 및 UV-LED-오염제거 기능과 결합되어 구성되어 있다. 이 프로젝트의 결과로 식수 정화, 폐수 처리, 폐수 정화 및 제품 처리의 과정이 강화 될 수 있다.

## 2. 프로젝트 결과

다양한 물리적, 화학적 이산화 티타늄 코팅방법과 비교하여 볼 때, 이 습식화학 코팅은 가장 적합한 방법으로 증명되었으며, 이 방식을 통해 실험 물질(메틸렌 블루)의 최대 분해 가능치 까지 도달되었다. 또한 이 코팅 방법은 심지어 매우 거친 환경에서도 영구적으로 안정성을 나타내는 것으로 드러났다.

복합 마이크로 여과기는 새로운 종류의 LED 조명 시스템이 결합된 모듈로 구현되었으며, 파일럿 설비에 결합되어 도시 하수 처리장 및 정수장에서 설치 및 가동되었다. 양쪽의 경우에서 이 기기는 특정 트레이스 물질을 분해하는 목적에서는 좋은 성능을

발휘하는 것으로 나타났으나 오염물질을 제거를 위한 광범위한 시스템으로는 적합하지 않은 것으로 나타났다.

수많은 연구 및 실험을 통해 나노이산화티타늄은 수생 환경에서 생태독성학적 가능성을 지니고 있는 것으로 밝혀졌으나, 응집 및 흡착 공정의 결과를 통해 독성적으로 무해한 마크로 입자로 매우 빠르게 변환 되는 것이 밝혀졌다. 기존의 대부분의 나노입자-서스펜션 광촉매 반응기에 비교하여 NanoPur시스템이 가진 장점은 나노입자가 캐리어 물질(carrier material)에 고정 된다는 것이다.

## 아. NAPASAN

- 연구기간 : 2010년 5월 1일 ~ 2013년 4월 30일(2013년 10월 31일 까지 연장)
- 참여기관
  - 주관기관 : 슈투트가르트 대학 물, 환경시스템 모델링 연구소, VEGAS
  - 협력기관 : Hermes Messtechnik, 베를린 공과대학 환경보호 연구소, 킬 크리스티안-알브레히츠 대학 지구과학 연구소, DECHEMA 연구소, DVGW 수질 기술 연구소, 아헨 공과대학 환경 연구소, UVR-FIA GmbH, Fugro Consult GmbH, IBL Umwelt- und Biotechnik GmbH

## 1. 프로젝트 목표

### • **지하수 수질 오염 개선을 위한 나노입자의 사용**

NAPASAN 프로젝트는 오염 물질의 정화와 경제적 관점을 고려하여 철, 비철 나노입자의 생산 공정을 지속적으로 개발하는 것을 목표로 한다. 나노입자는 토양에서 이동이 가능하고, 오염 물질과 접촉하여 분해 할 수 있도록 변형되어야 한다. 이와 평행하게 나노입자의 사용에 대한 위험성 평가가 실시되어야 하며, 오염 물질의 처리 및 정화에 대한 안전한 사용이 증명 되어야 한다.

### • **프로젝트 워킹 패키지**

- 1) 철 나노입자의 생산 및 특성화
- 2) 지하에서 나노입자 반입과 확산에 대한 연구
- 3) 대수층 오염물질 및 나노입자의 검출을 위한 인-시츄 측정기술의 개발 및 공급

- 4) 현장 조사, 입자 주입 및 모니터링 시스템의 모델링 및 모델 기반 설계
- 5) 과학적으로 수반된 현장 적용을 위한 계획 및 이행

# 프로젝트 과정 및 결과에 대한 공개 자료 부족

## 자. NANO-SCR

- 연구기간 : 2010년 5월 1일 ~ 2013년 4월 30일
- 참여기관
  - 주관기관 : HJS Emission Technology GmbH
  - 협력기관 : NANO-X, NanoScape AG, 칼스루헤 기술연구소 내 기술 화학, 고분자 화학 연구소

### 1. 프로젝트 목표

- **디젤 엔진의 결합 질소 산화물 및 매연의 감소를 위한 나노스케일 SCR-촉매 연구개발**

Nano-SCR 프로젝트를 통해 산화 질소 배출 감소를 위한 촉매가 마운팅 되어 있는 디젤 모터의 매연 입자 필터 개발을 목표로 한다. 이 새로운 필터-촉매 시스템은 가능한 작은 촉매를 생산하는 것 외에도 공간 절약 및 무게 감소 등 시스템 내구성 증대를 위한 전반적인 향상을 목표로 한다. 또한 자동차 배기가스의 처리를 위해 손쉽게 설치되어야 하고 디젤 모터 시스템에도 간편하게 설치되어야 한다.

### 2. 프로젝트 결과

Nano Scape사는 Nano-SCR 프로젝트 동안 디젤 모터에서 발생하는 연소 배기가스의 질소 산화물(NOx, NO, NO2)을 감소시키기 위한 새로운 종류의 나노스케일 제올라이트-촉매를 연구하였다. 이를 통해 Nano Scape사는 직접적으로 수성 현탁액(aqueous suspensions)에서 매우 얇은 레이어로 표면에 적용될 수 있는 새로운 종류의 촉매를 생산하는데 성공하였다. 이 촉매-현탁액은 확장성(scalable)이 있으며 응집 없이 생산될 수 있고 표준 촉매처럼 유사한 SCR-특성을 지닌다. 게다가 여러 금속 이온은 이미 액

상과정에서 혼입 될 수 있는 것으로 나타났다.

프로젝트 동안 NANO-X사는 혼합 산화물 수성 코팅 시스템이 SCR-촉매로써 소결 금속에서는 350 °C 부터, 특히 450 °C 부터 질소산화물 환산율에 있어 최적의 성능을 나타내는 것으로 밝혀졌다. SCR 조건하에서 활성 물질이 350 °C 에서는 50 %, 450 °C 에서는 70~80 % 까지 질소 산화물로 변환된다. 1 mol % 미만의 산화세륨과의 도핑은 활성의 현저한 증가에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 소결 금속 기질(substrate)의 구조가 혼합 산화물 코팅에서 촉매 활성에 뚜렷한 영향을 미치며, 이는 코팅 용액의 애플리케이션- 및 건조 파라미터에 의해 영향을 받을 수 있다.

HJS사는 프로젝트 기간 동안 코팅 현탁액의 사양을 정의하고 다공성 소결 금속을 새로 개발된 나노-현탁액으로 코팅하였으며, 특성화한 뒤 테스트 필터를 제작하여 엔진 테스트 베드에서 측정하였다. 새로운 나노-현탁액은 금속 기질에 대한 양호한 접착성을 보여 가동 중에 촉매-입자의 배출이 이루어지지 않았으며, 엔진 테스트 베드에서 합성 가스 테스트 베드의 산화질소 감소가 유사하게 나타났다.

프라이베르크 공과대학에서는 많은 양의 SCR-물질이 스크리닝 되었다. 추가적으로 다양한 물질들이 광범위하게 특성화 되었으며 내구성이 테스트 되었다. 또한 세리아 함유 촉매의 디자인 구현을 위해 UV/VIS-스펙트로스코피에 기반을 둔 방법이 개발되었다. 스펙트로스코피 방법을 통해 나노스케일 BEA-제올라이트의 SCR-반응 메커니즘이 성공적으로 밝혀졌다.

## 차. NanoSan 프로젝트

- 연구기간 : 2010년 7월 1일 ~ 2013년 6월 30일(2014년 6월 30일 까지 연장)
- 참여기관
  - 주관기관 : Isodetectr GmbH
  - 협력기관 : 뮌헨 헬름홀츠 보건 & 환경 연구소, 예나 프리드리히-쉴러 대학, ARCADIS GmbH, ibn 생물 다양성 연구소

### 1. 프로젝트 목표

- **나노정화기술 - 오염지역의 유해물질 제거를 위한 산화철 나노입자의 현장 적용**

NanoSan 프로젝트의 목표는 가솔린, 타르 등을 통해 오염된 지하수를 생물학적 방

법을 통해 정화시키는 오염 현장 정화기술을 개발하는 것이다. 오염 대수층에서 미생물에 의한 자정 작용이 종종 일어나지 못하는데 이는 생물 분해의 자극제 역할을 할 수 있는 산화철의 이용이 불가능하기 때문이다. 환경 독성학적으로 입증된 특별한 산화철-나노입자를 오염 발생지에서 직접적으로 사용하는 것을 통해 생체 이용률 (bioavailability)이 향상되고 이를 통해 혁신적인 현장 정화 방법이 개발 될 수 있다. 이 새로운 방법은 기존의 방법에 비해 효율성이 매우 높고 저렴하며 친환경적인 장점을 지니고 있다.

# 프로젝트 과정 및 결과에 대한 공개 자료 부족

### 카. NanoTrack

- 연구기간 : 2010년 5월 1일 ~ 2013년 4월 30일(2013년 7월 31일 까지 연장)
- 참여기관
  - 주관기관 : 드레스덴-로덴도르프 헬름홀츠 연구소
  - 협력기관 : 헬름홀츠 자원생태학 연구소, Cetelon Nanotechnik GmbH, 라이프니츠 표면 변성 연구소

### 1. 프로젝트 목표 및 결과

#### • *수분포화 지하 또는 유동 수분포화 지하에서 합성 나노입자의 이동성*

독일 연방 교육 연구부의 지원을 받는 NanoTrack 프로젝트에서 산업 및 연구기관의 프로젝트 참여를 통해 표면코팅(나노복합체 코팅)에서 방출 가능한 은 나노입자 및 이산화 티탄 나노입자를 연구한다. 또한, 이렇게 방출된 나노입자의 환경 내 지속적인 이동 과정에서부터 선충과 같은 수생생물에 의한 흡수에 이르는 과정이 핵심적으로 연구된다. 여기서 나노입자를 매우 복잡한 매질뿐만 아니라 매우 낮은 농도에서도 추적하기 위하여 방사성 물질로 이를 표시하였다. 프로젝트에 참여하는 모든 협력기관의 실험실 테스트를 위한 방사성 동위 원소 식별 나노입자의 사용을 가능하게 하기 위해 그에 적합한 라벨링 기술이 개발되었다. 나노입자의 라이프사이클 시뮬레이션을 위해 인공 나노복합체 코팅이 이루어졌고, 이로 인해 가속화 된 풍화가 발생하였으며 분해 제품을 연구, 조사하여 그 방출을 추적하였다.

연구 결과를 통해 조사된 코팅 제제의 분해 제품이 상대적으로 넓은 크기 분포의 입

자들로 구성되어 있다는 것이 밝혀졌다. 중요한 것은 부러진 조각이 약 150 나노미터에서 250 나노미터 사이의 크기를 가지고 있다는 것과 동시에 이 조각의 크기가 마이크로미터 범위 수준까지 발견 된다는 것이다. 또한 분해 생성물이 원래 사용된 나노입자로 구성되어 있지 않았으며 코팅 모재를 포함하고 있었다. 즉, 분해 과정은 코팅 모재 뿐 아니라 사용된 나노입자의 영향을 받은 것이다.

따라서 환경에서 방출된 나노입자의 수송 및 이동성은 각각의 물 상태(조건)에 따라 다른 결과를 낳았다. 경수에서는 상대적으로 나노입자의 이동성이 낮았으며 모래와 같은 지질물질 또는 퇴적물질에 빠르게 정착되어 물에서 제거 되었다. 상대적으로 연수 또는 부식물(humic substance)과 같은 자연 유기 물질이 존재하는 물에서는 경우에 따라 이동성을 현저히 증가시키는 현탁 안정성이 상당히 높아졌다.

지표수에서는 특히 나노입자의 침강을 통해 물 바닥의 수생생물과의 접촉과 흡수가 이루어진다. 그리고 이는 대부분 다음 단계의 수생 생물의 식량으로 사용될 미생물막(Biofilm)을 형성한다.

## 타. Umsicht 프로젝트

- 연구기간 : 2010년 5월 1일 ~ 2013년 4월 30일(2013년 7월 31일 까지 연장)
- 참여기관
  - 주관기관 : 브레멘 대학 환경 연구 및 지속 가능 기술 센터
  - 협력기관 : 호헨슈타인 섬유 혁신 연구소, 프라운호퍼 분자생물학 및 환경생태학 연구소, 독일 연방 환경청, 드레스덴 공과대학 공정 공학, 환경기술 연구소, AG 기계 공정 공학, 마부르크 필립스 대학, IWT 재단 재료기술 연구소, 지질 및 천연자원 연방 연구소, Bremer Umweltinstitut GmbH, CHT R. Beitlich GmbH, Rent-a-Scientist GmbH, Lauffenmühle GmbH, 섬유, 합성소재 검사 연구소

### 1. 프로젝트 목표

#### • 은 나노입자의 환경 위험성 평가 : 화학 입자부터 기술 제품까지

Umsicht 프로젝트의 목표는 은 나노입자의 행동, 행방(소재), 영향 등을 더욱 잘 이해하는 것이다. 용해작용(dissolving behavior), 수송작용(transport behavior), 안정성, 수생 - 및 토양 생물에 미치는 영향이 여러 조건 하에서 다양하게 생산된 입자를 통해 연구

된다. 이 과정에서 표준 방법이 사용되며 새롭게 개발 되거나 최적화 되는 기술도 있다.

## 2. 프로젝트 결과

프로젝트 내에서는 은 나노입자가 포함된 섬유뿐만 아니라, 입자, 섬유, 직물 생산에서의 마모작용과 세탁작용을 거쳐 하수 처리장 처리까지 광범위하게 연구되었다. 섬유 제작의 유형이 입자의 환경 접근성 및 그 양을 결정하는데 결정적인 사실이 된다는 것이 명확하게 밝혀졌다. 은 나노입자가 하수 처리장에서 완전하게 처리되지 않기 때문에 미량의 입자가 물속에 도달할 수 있다. 하지만 대부분의 입자들은 농업용 하수 슬러지를 지나 지면에 도달하게 된다.

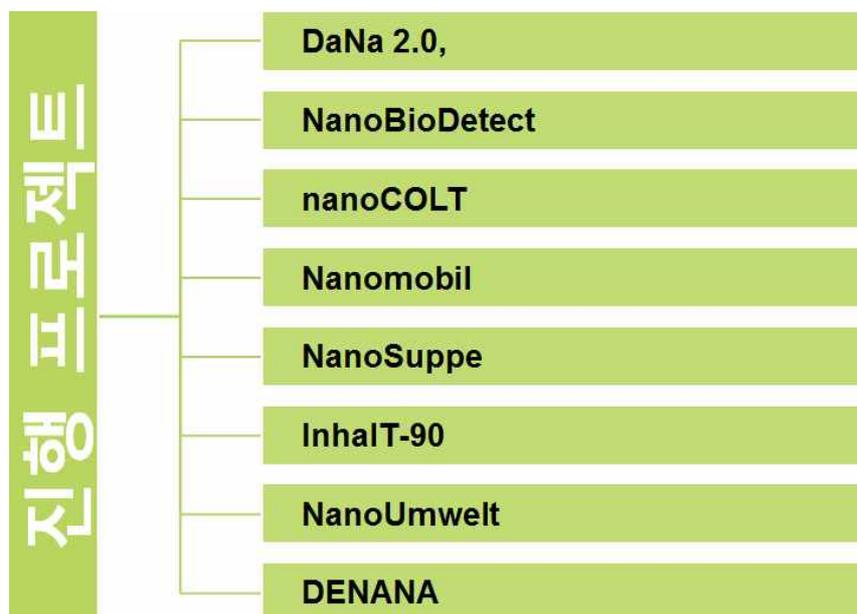
연구과정을 거친 거의 모든 미생물에게서 나노입자 또는 나노입자에서 나온 용해은이 매우 독성이 높은 것으로 나타났다. 하지만 최종적으로 외부 환경에 도달된 양은 비교적 낮았다. 은은 분해되지 않기 때문에 수십 년, 수백 년의 과정에서 토양생물이 손상될 수 있다. 여기에는 특히 제조 방법이나 함유하고 있는 은의 양 그리고 생산량이 충분히 알려져 있지 않은 수입 제품의 잔유물이 해당한다. 제품 시장의 복잡성은 신뢰성 있는 예측에 있어 가장 큰 장애물로 입증되었다.

## VI. 진행 프로젝트

독일 연방 교육 연구부는 “산업과 사회를 위한 소재 혁신 - WING” 지원 프로그램을 통해 합성 나노소재의 안전한 취급 - 인간과 환경에 대한 영향 연구 - NanoCare 관련 연구계획 및 개발계획을 지원하고 있다.

글로벌 과제를 해결하기 위해 나노기술은 중요한 자극이 되며 의료, 환경, 에너지 분야와 같은 잠재적인 시장이 나노기술 앞에 놓여 있다. 점차적으로 증가하는 나노기술의 경제적 중요성과 제품에서 합성 나노입자 및 나노소재의 사용 증가는 사용된 나노입자 및 나노소재와 그 주변 환경과의 상호작용에 대한 정확한 지식을 요구한다. 나노기술의 잠재력을 최대한으로 활용하고 동시에 합성 나노물질의 책임감 있는 관리를 보장 하는 것은 독일 정부의 국가적 계획인 “첨단 기술 전략 2020(Hightech Strategy 2020)”과 “나노기술 행동계획 2015(Nanotechnology Action Plan 2015)”의 목표이다.

이 지원정책은 독일 연방 정부의 “첨단 기술 전략 2020” 정책의 한 부분이며 이 정책은 독일 산업의 혁신과 성장을 목표로 한다. 이 정책을 통해 기업과 대학내부, 외부 연구 기관과의 긴밀한 협력이 생겨나며 무엇보다 중소기업 협력과 프로젝트 활용 측면에서 큰 의미가 있을 것으로 기대된다. 이 지원정책은 이미 최근 종료한 NanoCare, NanoNature 지원 프로젝트와 함께 연결되어 기존의 획득된 연구 결과 및 경험을 바탕으로 더욱 큰 성과를 올릴 것으로 기대된다.



## 가. DaNa 2.0

- 연구기간 : 2013년 8월 1일 ~ 2017년 7월 31일
- 참여기관
  - 주관기관 : DECHEMA e.V.
  - 조정기관 : 칼스루헤 기술 연구소 응용 컴퓨터공학
  - 협력기관 : 헬름홀츠 생물 분석 및 생태 독성학 연구소, ivta 에너지, 환경기술 연구소, 프랑크푸르트 괴테 대학 제약 기술 연구소, 오스트리아 잘츠부르크대학 분자 생물학과, 오스트리아 빈 대학 환경, 지질학과, 영국 Exeter 대학 생명, 환경 과학과, 스위스 EMPA 재료과학 기술 연구소, 덴마크 공과대학 환경 공학과

### 프로젝트 목표

- **나노물질에 대한 데이터 및 지식 - 사회적으로 중요한 과학적 사실의 통계적 평가**

DaNa 2.0 프로젝트의 목표는 인간과 환경에 미치는 영향들을 비 전문가들도 쉽게 이해할 수 있도록 나노물질에 대한 연구 결과에 대해 인간 독성학적, 생태독성학적, 생물학적, 물리적, 화학적, 제약학 등 학제간 접근을 통한 통계적 데이터베이스를 통해 나타내는 것이다. 또한 독일 연방 교육 연구부의 지원 프로그램인 NanoNature 및 NanoCare의 자료들을 제공하며 지식 플랫폼의 확장을 위해 다양한 과학적 테마들을 통계적으로 정리해 놓는 것이다.

## 나. NanoBioDetect

- 연구기간 : 2014년 8월 1일 ~ 2017년 7월 31일
- 참여기관
  - 주관기관 : IBE R&D Institute for Lung Health gGmbH

### 프로젝트 목표

- **조직 내부의 나노입자 : 검출, 정량화 및 생물학적 마커를 이용한 표현**  
# 구체적인 목표에 대한 공개 자료 부족

## 다. nanoCOLT

- 연구기간 : 2014년 10월 1일 ~ 2017년 9월 30일
- 지원금액 : 약 240만 유로
- 참여기관
  - 주관기관 : 마부르크 필립스 대학 호흡기학(pneumology)과
  - 협력기관 : 라이프니츠 의학, 생명공학 센터, 프라운호퍼 독성학, 실험의학 연구소, 칼스루헤 기술연구소, 뤼벡 대학교 해부학 연구소 AG Barriere-Organe

#### □. 프로젝트 목표

- **건강한 폐 및 손상된 폐에서 변형 카본 블랙 나노입자가 미치는 장기적 영향**

탄소 나노입자는 가장 폭넓게 사용되는 인공 나노입자로서 그 크기는 1백만 분의 1 밀리미터(1 나노미터)이며 몇 개의 원자로 구성되어 있다. 나노미터 범위에서 입자의 크기는 물리적 특성에 영향을 미친다. 즉, 같은 구성에도 작은 입자와 큰 입자의 작용이 다르며 미세한 크기 특성 때문에 사람에 신체에 쉽게 흡수된다. 특히 산업분야에서 연간 메가톤 단위로 생산되는 Carbon Black은 세계 보건 기구에 의해 사람에게 위대한 물질로 분류 되었다.

nanoCOLT 프로젝트의 목표는 다양한 표면에서 탄소 나노입자가 장기간 미치는 영향을 연구하는 것으로, 이번 컨소시엄의 특색은 다양한 기능성 폐 기관(기관, 기관지, 폐포)의 전문가들을 회합시키는 것이다. 이를 통해 각각 연구 그룹의 결과가 모자이크 처럼 하나의 그림으로 짜 맞춰질 것으로 기대된다.

기존에 진행 되었던 Carbon Black 프로젝트를 기반으로 인공적으로 생산된 나노입자가 건강에 미치는 측면을 살피는 새로운 연구 계획이 수립될 것이며, 나노입자가 건강한 폐뿐만 아니라 손상된 폐에서 미치는 영향을 장기적으로 연구하여 재료연구의 기반을 마련 할 것으로 기대된다.

특히 Carbon Black 나노입자의 산업 생산 및 사용에서 독성학적으로 허용되는 입자 표면의 변형을 통해 입자의 기술적 사용 범위를 제한하지 않고도 건강을 위협하는 요소를 감소시킬 수 있을 것으로 기대된다.

#### 라. Nanomobil

- 연구기간 : 2014년 8월 1일 ~ 2017년 7월 31일
- 참여기관

- 주관기관 : 아헨 공과대학 지질공학, 수리지질학과(Engineering Geology and Hydrogeology)

□. 프로젝트 목표

- **토양 및 지하수에서 합성 은 나노입자의 이동성 연구**

주변 환경에 미치는 영향 연구, 수권, 생물권, 지권(hydrosphere, biosphere, pedosphere) 사이의 상호작용 연구

# 프로젝트 목표에 대한 공개 자료 부족

마. NanoSuppe

- 연구기간 : 2014년 8월 1일 ~ 2017년 7월 31일
- 참여기관
  - 주관기관 : 드레스덴-로젠도르프 헬름홀츠 연구소
  - 협력기관 : AUD 분석 서비스, 환경 서비스 GmbH, Vita 34 AG BioPlanta

□. 프로젝트 목표

- **폐수 경로(하수 슬러지, *sewage sludge*)에서 합성 나노입자의 작용 연구**

하수 슬러지에서 나노입자의 행동(작용)이나 하수 슬러지의 지속적인 사용에서 나노입자의 경로에 있어 상당한 지식 격차(knowledge gap)가 존재한다. 이러한 이유로 이번 NanoSuppe 프로젝트에서는 기존 도시 및 산업 폐수 정화 과정이 나노입자에 미치는 영향에 대한 연구가 세 군데의 정화 시설에서 공동으로 이루어지며, 이를 통해 관련 물질의 경로 및 그 과정이 확인된다. 식물에 의한 입자 흡수 가능성에 따라 하수 슬러지에서 나온 입자의 환경 내 분포가 연구된다. 또한 식물 성장의 다양한 단계마다 나노입자의 흡수 및 그에 상응하는 작용 메커니즘이 연구되며, 나노입자의 이동연구를 바탕으로 토양에서 나노 입자의 가용성이 연구된다. 이 모든 연구를 위해 특별히 방사성 동위원소 마킹 나노입자가 실험실에서 실제 물, 토양, 식물시료 연구에 사용된다. 이번 프로젝트를 통해 다양한 정수 과정뿐 아니라 하수 슬러지, 토양, 식물에서 나노입자의 행동(작용)에 대한 상세한 지식이 축적 될 것으로 기대된다.

마. InhalT-90

- 연구기간 : 2014년 8월 1일 ~ 2017년 7월 31일
- 참여기관
  - 주관기관 : 프라운호퍼 독성학·실험의학 연구소
  - 협력기관 : 라이프찌히 대학 의학 물리학, 생물 물리학 연구소

□. 프로젝트 목표

• **실험용 쥐 90일간 세륨 산화물( $CeO_2$ ) 흡입 세스트 및 독성/발암 효과의 초기 발견을 위한 유전자 발현 프로파일 분석**

기술적으로 다양하게(화학, 의학, 환경, 에너지) 사용 가능한 합성 나노입자는 지난 10년간 독성학적 특성화 및 평가에 엄청난 관심을 받아왔다. 주된 이유는 나노입자가 ‘바이러스’와 비슷한 크기로 잠재적으로 마이크로스케일의 물질보다 상대적으로 큰 반응 표면과 전좌(translocation) 능력을 지니고 있기 때문이다. 또한, 나노입자가 호흡기를 통해 체내로 흡수 된 이후 종양을 발생시키는 잠재성이 있는 것으로 논의되어 유럽 연합의 NanoREG 프로젝트를 통해 쥐를 이용한 발암 연구 진행이 제안되었다. 여기서 폐 과부하(lung overload)를 피하기 위해 투여량은  $0.1-3 \text{ mg/m}^3$  로 낮게 정하였다. 장기적으로 진행되는 이 연구는 BASF SE의 지원을 받으며 현재는 세륨 산화물 나노 입자를 사용하여 진행하고 있다.

독일 연방 교육 연구부가 지원하는 InhalT-90 프로젝트는 BASF SE의 장기 프로젝트와 평행하게 프라운호퍼 독성학·실험 의학 연구소에서 세륨 산화물 나노입자를 실험 쥐를 사용하여 동일한 노출 조건 하에 실행된다. 혁신적이고 새로운 접근을 통해 차후 발견 될 수 있는 독성 및 발암영향의 초기 지표를 확인한다. 유전자 발현 분석법이 사용되며 이를 통해 유전자 발현의 변화에 대한 추론이 가능하다. 특정 농도의 나노입자 또는 나노 먼지가 이러한 변화의 계기(trigger)가 되는지를 연구하는 것이 이번 프로젝트의 핵심 주제이다. 이러한 연구를 통해 프로젝트 초기 단계에서 나노입자의 독성 영향이 확인 될 수 있다. 소위 바이오 마커라 불리는 특정 반복 효과의 확인은 다른 나노 입자에 전달 될 수 있으며 이를 통해 나노 입자의 독성과 관련하여 빠른 스크리닝 기술을 개발 할 수 있을 것이다.

이번 프로젝트에서 선택된 연구 방법은 나노입자의 잠재적인 유전독성의 구조적인 규명(mechanistic elucidation)에 기여 할 것으로 평가된다. 이번 프로젝트에 사용되는 나노입자는 특수 세리아(산화 세륨) 나노입자로 디젤 연료의 연소를 촉진하기 위해 사용되는 첨가제이다. 세륨 산화물 나노입자가 폐와 신체 안에서 퍼지는 과정이 이온빔 현

미경(IBM) 및 공초점(confocal) 라만 마이크로분광기(CRM)을 통해 추적된다.

## 사. NANOUMWELT

- 연구기간 : 2014년 10월 1일 ~ 2017년 9월 30일
- 참여기관
  - 주관기관 : Postnova Analytics GmbH
  - 협력기관 : 프라운호퍼 바이오 의료기술 연구소, 프라운호퍼 분자 생물학, 응용 생태학 연구소, 트리어 대학 토양학과, Senova 생명과학 기술 mbH, PlasmaChem GmbH, Rheingütestaion Worms, 프랑크푸르트 괴테 대학 분자 생명과학 - 식물 세포 생물학 연구소

### □. 프로젝트 목표

- **환경에서 합성 나노물질의 위해성 평가: 식별, 정량화, 인간-생태독성학적 영향 연구**

나노기술 기반의 소비재 사용이 점차 증가함에 따라 나노물질을 통한 오염문제도 꾸준히 증가할 것으로 예상된다. 합성 나노물질의 생태독성학적, 인간독성학적 문제뿐 아니라 나노물질의 소재(행방)에 대한 기술적 증명이 점차 요구되는 실정이다. 이러한 배경에서 NanoUmwelt 프로젝트는 출발하였으며 다양한 환경적 격실(environmental compartment)에서 합성 나노물질의 오염을 정량화하여 그 형태를 특성화한다. 이후 새로운 기술과 분석을 통해 합성 나노물질의 생태독성학적 인간독성학적 영향에 대한 확실한 결과를 얻는 것이 목표이다. 또한 프로젝트를 통해 얻은 지식 데이터를 기반으로 나노물질을 통한 환경오염으로 예상되는 위험성의 현실적인 평가가 이루어지고 인간과 환경을 보호하기 위한 새로운 규정에 대한 적절한 권고를 마련하고자 한다.

프로젝트를 통해 다음 세 가지의 핵심 연구개발이 이루어진다.

- 가) 미세 나노입자의 검출 및 정량화 - 양
- 나) 낮은 용량 범위에서 나노입자의 생태독성학적 인간독성학적 체외 연구
- 다) 표준화 되고 재생 가능한 나노입자 합성

NanoUmwelt 프로젝트를 통해 개발된 기술은 나노물질의 안정성, 이동성, 기능성, 반응성의 측면에서 광범위하게 평가할 수 있게 할 것이다. 주사 전자 현미경 또는 투과

전자 현미경과 같은 고해상도 광 판별 방식뿐 아니라 나노물질의 농축을 위해 면역 필터 및 필드 플로 프랙셔네이션(field flow fractionation)과 같은 방법들이 사용된다. 커플링된 유도 플라즈마 질량 분광 분석과 동적인 광산란의 결합을 통해 나노물질의 특성화가 가능하다. 검출 방법은 나노물질을 사용하여 평가되며 이후 이 방법은 실제 시료(토양, 하수 슬러지, 흐르는 물) 및 생태 시스템을 대표하는 지렁이, 조개, 생선 그리고 인간 시료(소변, 전혈) 내 나노물질의 정량적 검출을 위해 사용된다. 또한 이 검출 방법은 적은 양의 투여 범위에서 나노 독성 효과와 관련한 데이터를 생성하는데 기여 할 것이다.

NanoUmwelt 프로젝트에서 연구된 나노물질은 상업적으로 의미가 있고 쉽게 분해되지 않는 철(은, 이산화티탄), 탄소(탄소나노튜브) 및 합성수지 기반(폴리스티롤)의 나노물질과 같은 합성 나노물질이다.

NanoUmwelt 프로젝트의 계획은 우선 선정된 생태 시스템에서 나노물질을 검출하고 정량화하는 연구를 진행하는 것이며 추가적으로 나노물질의 유전독성 및 심독성을 연구하고 생물학적 경계 또는 장벽과의 상호작용을 연구하여 장벽 투과성에 대해 확인, 보고하며 인간과 환경에 대한 나노물질의 위험 잠재성을 평가하는 것이다.

## 아. DENANA

- 연구기간 : 2014년 10월 1일 ~ 2017년 9월 30일
- 참여기관
  - 주관기관 : 브레멘 대학
  - 협력기관 : 프라운호퍼 분자생물학, 응용생태학 연구소, 드레스덴 공과대학 공정 기술, 환경기술 연구소, 독일 연방 지질학, 자원 연구소, 독일 연방 위험성 평가 연구소, ivta 에너지기술, 환경기술 연구소, 독일 연방 환경청, 요하네스 구텐베르크 마인츠 대학, IWT 재단 재료기술 연구소, Klüber Lubrication.

## □. 프로젝트 목표

### • *지속 가능한 나노물질을 위한 설계 기준*

DENANA 프로젝트의 목표는 지속 가능한 나노물질 생산을 위한 기준을 연구개발하는 것이다. 이러한 나노물질에는 윤활제, 배기가스 촉매, 의료 기기 및 연마제 등에 사용되는 실리카, 은, 세리아 입자 등이 속한다. 나노입자가 생산단계에서부터 변형되

고 잠재적 위험성에 대한 테스트가 이루어진다. DENANA 프로젝트에서 다양한 문제들의 상호 결합을 통해 향후 3년 안에 기술적 요구를 충족시키고 잠재적 위험성이 최소화된 나노물질의 설계를 위한 기준이 도출될 것으로 기대된다.

프로젝트를 통해 호수, 늪, 하천, 바다와 같은 모든 물과 토양, 퇴적물 등의 실제와 비슷한 조건 하에서 나노입자의 장기적 영향이 연구되며, 한편으로는 제어된 실험실 조건에서 나노입자의 행동 및 작용, 영향 등도 연구된다. 가장 중요한 핵심은 단기 테스트 및 장기 연구 결과의 결합을 통해 나노입자의 장기적 영향에 대한 조기 경고 지표를 밝혀내어 국내적 국제적 환경 정화에 기여하는 것이다.

## VII. 결론 및 시사점

1차 나노기술 안전성 평가(2006년 ~ 2009년)에서 나노물질의 위해성에 대한 기초지식을 획득한 것이 그 수확이라면, 이 지식을 기반으로 좀 더 폭넓은 범위에서 사례별 나노물질의 위해성 및 기능성을 연구하고 그에 따른 객관적 결론의 도출을 통한 대책 수립 및 기술응용과 실제적 적용이 NanoCare와 NanoNature 프로그램을 통해 진행된 제 2차 나노기술 안전성 평가(2009년 ~ 2014년)의 긍정적 결과로 정의할 수 있다.

NanoCare 프로그램의 7개의 프로젝트에서 나노물질이 인간에 미치는 독성학적 영향 및 상호작용을 연구 하는 것이 전반적인 목표였다면, 이 외에도 나노 소재의 특성 연구, 나노입자 노출 측정 검출기 개발, 연구기관의 랩베이스 실험 결과에 제한되지 않고 실제 산업 응용 분야 까지 커버 한 것이 추가적으로 획득된 구체적 결과로 볼 수 있다.

NanoNature 프로그램의 12개의 프로젝트에서 나노물질이 환경에 미치는 독성학적 영향 및 상호작용을 연구 하는 것이 전반적인 목표였다면 환경 개선을 위한 나노입자의 사용, 나노입자를 통해 예상되는 환경오염 검사, 나노소재의 특성에 따른 체계적인 목록 작성, 적합한 측정 방법 연구개발 등이 이번 기간을 통해 얻은 결과로 볼 수 있다.

2차 나노기술 안전성 평가를 위해 진행된 프로그램을 살펴보면 그 특징이 연구개발의 목적에 따라 프로젝트를 주관하는 참여기관이 다양하게(연구기관, 대학기관, 산업기관) 구성 되었다는 것이고 대부분의 프로젝트가 실험실 수준의 연구의 차원을 넘어 현장에서 실제적으로 사용, 응용 할 수 있는 기술들의 연구개발 단계까지 확장 되어 있다는 점이다. 나노물질의 독성학적 평가를 위해 정확한 측정을 위한 측정 기술이 개발되고 이를 통해 다양한 환경에 따른 나노물질의 작용이 측정되며 얻어진 결과를 통해 실제 현장에서 상황을 개선 할 수 있는 기술들이 연구 될 수 있도록 산학연 간의 철저한 분업 및 유기적인 협업이 이루어 진 것이 큰 성과 중 하나이다.

1차 기초 지식 획득, 2차 사례별 연구 개발 및 현장 응용을 각 시기별 키워드로 정의한다면 이 모든 것을 기반으로 2014년부터 진행되고 있는 3차 나노기술 안전성 평가는 인체에 무해하고 친환경적인 나노소재의 장기적 관점의 연구 및 테스트를 그 키워드로 정의할 수 있다.

독일은 과학적으로 입증된 인체와 환경에 무해한 나노소재를 연구·개발하여 친환경 소재 및 연관 기술의 수출을 확대하고자 할 뿐만 아니라 나노물질의 더욱 세분화된

장기적 연구 마스터플랜을 진행하고 있다. 이를 통해 국내적, 국제적 환경 개선에 이바지 할 뿐 아니라 연구 지식의 공유와 더욱 세분화된 연구 진행을 통해 독일 나노기술의 국제적 입지를 견고히 하고 있다. 또한, 관련 기술의 이전을 통한 수출 증대를 장려하여 향후 국제 규제에 따른 발생 가능한 다양한 제한사항에 대해 발 빠르게 대처할 수 있는 나노기술에 대한 광범위한 노하우가 축적 되었을 것으로 평가된다. 결과적으로, 독일은 향후 나노기술 시장의 예측할 수 없는 변화에 능동적이고 유연하게 대처할 수 있는 기반을 쌓아가고 있다고 볼 수 있다.