CLEAN TECHNOLOGY, Vol. 18, No. 3, September 2012, pp. 250~258

총 설

나노폐기물 처리의 새로운 패러다임

엄하늬, 이병천†, 김영훈*

광운대학교 화학공학과
139-701 서울특별시 노원구 월계동 447-1
†국립환경과학원 환경건강연구부
404-708 인천광역시 서구 경서동 환경복합연구단지

(2012년 7월 5일 접수; 2012년 7월 19일 수정본 접수; 2012년 7월 30일 채택)

New Paradigm for Nanowastes Treatment

Ha Nee Umh, Byoung-Cheun Lee†, and Younghun Kim*

Department of Chemical Engineering, Kwangwoon University
447-1 Wolgye-dong, Nowon-gu, Seoul 139-701, Korea
†Environmental Health Research Department, National Institute of Environmental Research
Environmental Research Complex, Kyungseo-dong, Seo-gu, Incheon 404-708, Korea

(Received for review July 5, 2012; Revision received July 19, 2012; Accepted July 30, 2012)

요 약

최근 나노기술의 급격한 발전은 산업 및 바이오의약 등 다양한 분야에 새로운 활용 가능성을 제시하고 있다. 그러나 나노물질과 나노소비재의 연간 생산량이 증가하고 있어서, 의도하지 않은 환경 노출이 야기되고 있다. 따라서 지속적인 나노기술의 발전을 위해서도 나노폐기물에 관한 효과적인 관리가 필요하다. 현재까지는 나노폐기물을 효율적으로 처리할 수 있는 기존의 처리시설이 없는 실정이다. 이에 본 총설에서는 몇 가지 주제에 관하여 기술하고자 한다. 국내외의 나노물질 및 나노소비재 현황을 파악하고, 나노폐기물의 정의와 주요 발생원이 무엇인지 파악하였다. 또한 기존의 폐기물 처리시설로 나노폐기물을 처리 가능한지를 살피고, 개발되고 있는 새로운 처리법을 조사하였다. 마지막으로 나노물질에 관한 환경 규제를 거론하고, 나노폐기물에 관한 책임 있는 관리에 관한 새로운 나노폐기물 패러다임을 제시하고자 하였다.

주제어 : 나노물질, 나노소비재, 나노폐기물, 환경 위해성

Abstract : Recent rapidly growth in nanotechnolgies is promised novel benefits through the exploitation of their unique industrial and biomedical applications. In addition, the production amount of these nanomaterials and nanoproducts has increased, and thus their uncontrolled release into the environment is anticipated to grow dramatically in future. Therefore, nanowaste streams must be effectively managed for sustainable nanotechnology. However, the effectiveness and capability of the current systems to handle nanowastes are yet to be established. In this review, we investigated several key topics for new paradigm of nanowaste treatment, (i) global and domestic production of nanomaterials and nanoproducts, (ii) definition and key resources of nanowaste, (iii) current and developing treatment method for nanowaste, and (iv) regulations for nanomaterials and nanoproducts.

Keywords : Nanomaterials, Nanoproducts, Nanowaste, Environmental risk

1. 서 론

석면, 프레온가스, 비스페놀A 등은 우리에게 무해할 것이라고 생각하고 수십년간 사용해 왔지만, 사용하기 시작한지 수년 내에 그 잠재적 위해성 논란이 있었다. 그러다가 10~20년이 지나서야 해당 성분을 포함한 제품의 문제점이 심각하게 대두되어 사용이 전면 금지되거나 대체 제품이 개발되었다. 즉, 석면에 의한 진폐증 급증, 프레온가스에 의한 온실가스 문제, 비스페놀A에 의한 성조숙증을 야기하는 환경호르몬 등이 그 예라 할 수 있다.

2000년 이후 나노기술의 급격한 발전으로 인해 나노기술이 적용된 제품과 나노소비재가 시장에 속속 등장하고 있다. 나노물질에 대한 잠재 위해성 논란이 지속적으로 야기되고 있으며, 최근에는 나노물질이 환경에 노출될 경우 생태계의 생물체에게도 악영향을 줄 수 있다는 다양한 연구 결과가 보고되고 있다

* To whom correspondence should be addressed.
E-mail: korea1@kw.ac.kr

doi:10.7464/ksct.2012.18.3.250

[1-3]. 학문적인 연구결과로서의 나노물질의 인체 및 환경 위해성 논란 이외에, 실질적으로 나노물질이 인체에 악영향을 줄 수 있다는 국내외 보고가 수차례 있었다. 2006년 독일의 매직 나노라는 제품은 욕실 용품에 오염물질이 고착화되는 것을 방지하는 제품으로 판매되었었는데, 사용자가 해당 제품을 사용 시 호흡기 질환을 유발한다는 보고가 있었다[4]. 2009년 한국산업안전보건공단 조사에 의하면 카본블랙을 취급하는 사업장에서 심혈관질환 관련 직업병이 발생하는 사례가 있었다[5]. 2011년 가습기 살균제에 의한 호흡기 급성 폐질환도 에어로졸 상으로 분무되는 나노입자(살균성분 함유)에 의한 영향으로 보고되고 있다[6]. 이와 같이 나노제품이 시장에 상품화 된지 얼마 되지 않아서 인체에 대한 영향력이 일찍부터 나타나고 있다.

나노물질 자체의 위해성 문제 이외에, 나노물질을 취급하거나 나노소비재를 사용하는 과정에서 나노폐기물이 배출되게 되는데 이들에 관한 관심도 증가하고 있다. 2012년 3월 독일 뮌헨에서 나노폐기물의 안전관리라는 주제로 경제협력개발기구(organization for economic cooperation and development, OECD) 워크샵이 개최되었다[7]. 이 회의의 목적은 나노폐기물 또는 나노물질이 포함된 폐기물의 잠재적 위해성을 이해하고, 나노폐기물 처리에 관한 초기 경험이나 정보를 공유하기 위함에 있었다. 우리나라의 경우, 환경부가 나노위해성에 관한 작업반으로서 활동하며 OECD 회의에 참석하고 있다. 그러나 나노물질의 위해성과 환경 모니터링, 환경 규제 마련 등에만 집중하고 있고 나노폐기물에 관해서는 여전히 관심을 갖고 있지 않은 상태이다.

미래학자 아마라의 이름을 딴 아마라의 법칙(Amara's law)과 같이[8], 신기술의 영향에 대해서 우리는 단기적으로는 과대평가하면서도 장기적으로는 과소평가하는 경향이 있다. 즉, 단기적 과대평가라 함은 해당 기술의 긍정적인 측면을 바라본다는 점이고, 장기적 과소평가는 해당 기술이 가져올 수 있는 부정적인 효과를 간과한다는 것이다. 나노기술의 발전은 나노소비재의 제품군과 수량을 급증시킬 것이며, 현재 전세계적으로 1,000개 이상의 나노제품이 생산되고 있다[9]. 기술의 발전은 우리의 삶을 풍요롭고 윤택하게 만들지만, 해당 기술로 만들어진 소비재들은 결국 폐기물을 양상하게 된다. 나노폐기물에 관한 심각성에 대해 이해하고 해당 문제점을 적극적으로 홍보하고 있는 연구자도 있다. 남아공의 Musee[10] 박사는 여러 국제 논문과 다양한 인터뷰를 통해 오늘날의 나노제품은 곧 내일의 나노폐기물이 될 수 있다는 점을 강조하고 있다.

이와 같이 나노기술과 나노제품의 급증은 당연히 나노물질의 환경노출과 나노폐기물 급증을 야기하며, 현재 기술력으로 나노폐기물을 처리할 수 있을지에 관한 의구심을 갖게 한다. 이에 본 총설에서는 국내외 나노제품 및 나노물질의 유통 현황을 살펴보고, 나노폐기물의 노출원과 기존 처리방법의 문제점을 파악한 다음, 새로운 나노폐기물 처리에 관한 패러다임 제시가 필요함을 강조하고자 한다.

2. 나노물질 및 제품 현황

2.1. 나노물질 유통현황

전세계 나노물질의 생산량을 처음으로 예측한 곳은 영국왕립학회(2004년)로서 그 당시 나노물질을 크게 5가지 사용처로 나누어 연간 전세계 생산량을 톤 단위로 예측하였다[11]. Table 1과 같이 구조물 응용에 사용하는 세라믹, 촉매 등의 소재는 2020년에는 연간 10^4~10^5톤, 화장품 계열로 사용되는 TiO_2, ZnO는 사용량이 꾸준히 유지될 것으로 예측하였다. 환경분야에 사용되는 나노소비재와 IT 분야에 사용되는 나노물질도 10년에 10배씩 그 사용량이 증가할 것으로 예측하고 있다. 해당 예측값은 벌써 10년이 지난 자료라서 자료의 신뢰도는 떨어지지만, 경향성만은 현재 나노기술의 발전 속도와 나노소비재의 생산현황 증가폭과 유사하다고 할 수 있다. 좀 더 구체적인 자료는 우드로 윌슨센터(Woodrow Wilson Center)에서 2005년 이후 꾸준히 조사하고 있는 나노소비재의 현황에서 확인할 수 있다[9].

국내에서는 환경부를 중심으로 2007년부터 2011년 사이에 4회에 걸쳐서 국내 나노물질 유통량 현황을 조사한 바가 있다[12]. 아직까지는 대외비라서 실제 유통량 값을 공개하지는 못하지만, 나노물질을 취급하는 업체수가 현재 200곳이 넘었으며 사용량도 연간 9천톤에 육박하고 있는 것으로 파악되었다. 카본블랙, 실리카, 알루미나, 타이타니아, 세리아, 은나노, 탄소나노튜브 등의 순서로 연간 사용량이 높게 집계되었다. 해당 나노물질이 사용되어 시판되는 제품으로는 실리카, 타이타니아,

Table 1. Estimated global production of nanoparticles (NP) and nanomaterials

Applications	Nanomaterials	Examples	Production (ton/y)[11]		
			2003	2010	2020
Structural applications	Ceramics, catalysts, films & coatings, composites, metals	SiO_2, Al_2O_3, PtNP, PdNP	10	10^3	10^4-10^5
Skincare products	Metal oxides	TiO_2, ZnO	10^3	10^3	10^3
Information & communication technologies	Carbon nanotube, electronic materials, organic light emitting diode, nanophosphors	SWCNT, MWCNT, AgNP, AuNP, fullerene	10	10^2	$> 10^3$
Biotechnology	Nanocomposites, encapsulates, drug delivery, diagnostic markers, biosensors	AgNP, AuNP, Fe_2O_3, liposome, dendrimer	< 1	1	10
Environmental	Nanofiltration, membranes, adsorbents, photocatalyst	Al_2O_3, SiO_2, TiO_2, CdS, CdSe, nanoclay	10	102	10^3-10^4

은나노 등의 순서를 차지하고 있다. 현재 집계된 유통량 현황은 초기 자료로서 나노물질을 취급하는 작업장, 연구소 등에 대한 전수 조사가 아니므로 정확하지는 않지만, 국내에서도 상당히 많은 양의 나노물질과 나노소비재가 생산되어 유통되고 있다는 점은 확인할 수 있다.

2.2. 나노소비재 현황

전세계에서 생산되고 있는 나노소비재에 관한 현황은 우드로윌슨센터의 PEN (project on emerging nanotechnologies)의 일환으로 2005년부터 지속적으로 조사하면서 웹페이지를 통해 공개하고 있다[9]. 여기서 나노소비재는 나노물질, 나노입자를 이용하여 생산된 제품과 나노기술을 이용하여 제조한 IT 관련 제품도 포함되어 있다. 총 30개 국가에서 나노소비재가 생산되고 있으며, Figure 1처럼 미국의 전세계 생산 제품군의 거의 절반을 차지하고 있으며, 독일, 한국, 영국, 중국 순서로 많은 나노소비재를 생산하고 있다. 우리나라는 현재 126가지 나노소비재가 판매되고 있는 것으로 조사되었다. 미국은 587건, 유럽은 367건, 동아시아는 261건의 제품을 시장에 선보이고 있다.

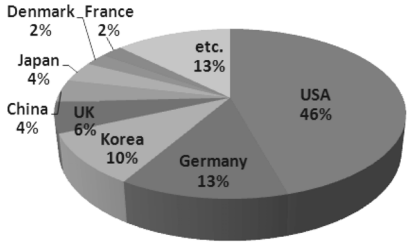

Figure 1. Inventory of nano-consumer products by country (raw data : Woodrow Wilson International Center for Scholar).

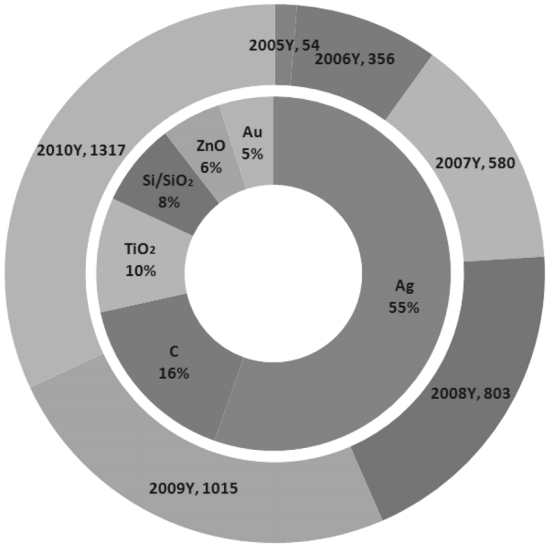

Figure 2. Commercial nano-consumer products growth from 2005 to 2010 (outer circle) and major nanomaterials used in nanoproducts (inner circle) (raw data : Woodrow Wilson International Center for Scholar).

Figure 2의 외부 원형 그래프에서 보듯이, 2005년부터 현재까지 매년 243개의 제품이 증가하는 것으로 파악되어, 나노소비재는 거의 선형적으로 증가하고 있다. 지수함수 형태로 급증하지 않은 것은 최근 나노물질의 위해성 논란과 나노기술의 거품이 빠지면서 실효성이 큰 소비재만 살아남으면서 제품 시장이 제한되기 때문인 것으로 보인다. 나노소비재에 사용되는 나노물질은 제품의 응용분야에 따라서 천차만별이겠지만, 조사된 바에 의하면 Figure 2의 내부 원형 그래프처럼 파악되었다. 은나노입자(AgNP)는 본연의 살균, 항균, 살충 효과가 뛰어나서 환경, 생활, 식품, 의료, 가전제품 등 다양하게 사용될 수 있다. 이에 전체 사용되는 나노물질 중에서 55%를 차지하였으며, 다음으로는 탄소계(카본나노튜브, 플러렌 등)와 TiO_2, SiO_2, ZnO 등의 순서로 나타났다. Figure 3에서도 확인되겠지만, 썬크림 소비재는 33가지로 전체 제품 종류의 2%를 차지하지만 사용량에서는 TiO_2, ZnO를 합치면 16%를 차지할 정도로 널리 사용되고 있다.

나노소비재를 제품군으로 분류하면 7가지로 구분이 가능하며, Figure 3과 같이 항목별로 생산제품의 차이가 나는 것을 알 수 있다. 생활건강 부분은 개인건강, 의복, 화장품, 스포츠제품, 썬크림, 정수 등의 제품이 있으며, 전체 1311개 제품중에서 56%를 차지하고 있다. 이는 일반 소비자가 일상에서 가장 쉽게 접하는 제품군으로 가장 널리 활용되는 나노물질이 함유된 소비재라 할 수 있다. 다음으로는 자동차, 식품, 전자제품 등의 순서로 소비재들이 많이 생산되고 있었다. 생활건강 부분을 보다 자세히 살펴보면, 의외로 썬크림 제품은 제한적인데 반해 정수, 화장품, 의복 등에 대한 소비재가 상당히 많이 시장에 나와 있음을 알 수 있다.

이상과 같이 전 세계적으로 나노물질을 이용한 나노소비재가 상당히 다양한 제품군으로 생산되고 있으며, 이미 우리 생활 깊숙이 침투해 있음을 알 수 있다. 양치질을 할 때 사용하

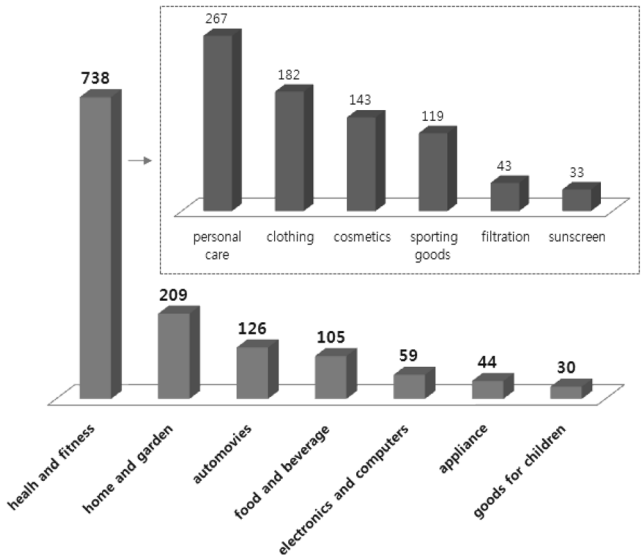

Figure 3. Categories of nano-consumer products (inse : subcategory of heat and fitness) (raw data : Woodrow Wilson International Center for Scholar).

는 금나노 치약, 은나노 정수 필터에서 받아 마시는 음용수, 은나노 향균 마우스, 자외선 차단용 TiO_2가 함유된 썬크림 등 이미 우리는 일상에서 나노물질과 나노소비재에 친숙해져 있다. 이 말은 나노물질이 가지고 있는 잠재적인 인체 및 환경 위해성 때문에 사용상의 주의를 하라는 식으로 이야기를 이끌어 낼 수도 있지만, 본 총설의 취지와는 맞지 않기에 나노위해성 얘기는 생략하기로 한다. 그러나 우리가 소비하고 있는 모든 제품은 나노소비재가 아니라도 사용 후에 반드시 쓰레기 형태의 폐기물이 나오게 된다. 따라서 나노물질이 함유된 나노소비재의 폐기물, 즉 나노폐기물은 나노소비재의 급증과 사용자의 증가로 인해 급증할 수밖에 없다는 것이다. 따라서 나노폐기물을 정확히 정의하고 이를 기존 일반폐기물과 동일하게 처리하여 소각, 매립, 하수처리해도 될 것인지 고민해 봐야 한다. 이들의 방법이 옳지 않다면 최소한 중금속 폐기물을 처리하는 방식이라도 준용해야 할 것이다.

3. 나노폐기물 현황 및 처리 방법

3.1. 나노폐기물 현황

나노폐기물을 정의하기 위해서는 나노물질을 먼저 정의해야 하겠지만, 여기서는 물질의 최소 1개 차원이 100 nm 미만인 것으로 간주하고자 한다. 나노물질의 정의만을 마련하는 것도 쉽지 않아서, 2012년 현재 범부처간 논의가 진행 중에 있다. 나노폐기물에 관한 정의가 필요한 이유는 향후 나노폐기물에 대한 법적 규제나 배출자 스스로 일반폐기물과 구분할 수 있는 가이드라인을 만들기 위해서도 필요하다.

나노폐기물은 다양하게 정의할 수 있겠지만, 미국화학학회의 정의에 의하면 다음과 같다[13]. 순수 나노물질(원료물질), 나노물질로 오염된 것(개인보호장비, 휴지), 나노물질이 함유된 액체(분산액), 나노물질이 포함된 고형물(은나노 양말) 등으로 구분하고 있다. Table 2에서 다시 세분화하면, 독립적으로 유동이 가능한 상태(free-bound)와 표면에 고정된 상태(surface-bound), 고체상에 고정된 상태(bulk-bound)로 구분할 수 있다[10]. 인체 및 환경 노출수준은 독립적인 유동상태가 가장 크다고 볼 수 있다. 고체 매트릭스에 고정된 나노물질은 외부의 물리적인 작용으로 떨어져 나올 수 있으며, 이는 환경 노출을 야기하게 된다. 용액상에 분산된 나노물질은 하수를 통해 수계에 노출되면 수상 생물체에 악영향을 줄 수도 있다.

좀 더 구체적인 사례를 들자면, 자동차의 연료 첨가제, 매연 저감제, 윤활제 등에 사용되는 다양한 나노물질이 사용된다. 자동차 운행 중에도 이러한 나노물질들은 대기로 노출되고 토양이나 수계로 침전하게 되어 비의도적인 노출과 함께 추후 제품의 교환으로 인해 나노폐기물을 양상하게 된다. 또한 썬크림에 빠지지 않고 들어가는 TiO_2, ZnO는 화학성분으로만 구성된 썬크림보다 투명성이 우수하여 자외선 차단제의 무기 첨가제로 널리 사용된다. 사용 중에 세안이나 수영을 할 경우 해당 나노물질은 환경에 노출되고 사용 후 썬크림 용기는 일반 쓰레기(플라스틱)로 분류하여 버리고 있다. 이처럼 나노소비재는 필연적으로 의도적이건 비의도적이건 사용자로 하여금 나노폐기물을 양산하게 만드는 특징을 지니고 있다.

3.2. 나노폐기물의 발생원

나노물질의 환경 매질로의 노출원 파악은 OECD WPMN SG8[14] 및 EU Framework Programme[15]을 중심으로 상당부분 연구가 진행되고 있으며, 환경 매질내 이들의 농도를 예측하는 방법론까지 제시하고 있다. EU의 나넥스(NANEX) 보고서에서는[15], 섬유제품에 사용된 AgNP와 썬크림에 사용된 TiO_2, 복합소재로 사용된 카본나노튜브를 대상물질로 선정하여 작업장 및 소비자 노출 시나리오를 작성하였다. 해당 보고서에 따르면, 환경 노출은 직접노출에 의한 점오염원이나 제품 사용에 의한 확산노출로 구분되며, 대부분 토양과 수계 노출이 지배적임을 알 수 있다(Table 3).

또한 나노폐기물이 발생하는 지점은 나노물질을 취급하는 시점에 따라서 달라진다. 나노물질을 직접 생산하거나 취급하는 작업장에서는 작업 설비 사용 시 배출되는 고형물이나 폐수(나노물질 포함)가 곧 나노폐기물이 된다. 연구실에서는 나노물질과 접촉했던 휴지, 글러브, 분진마스크 등이 되며, 물질을 제조하면서 사용했던 각종 초자류와 이를 세척한 세척수가 나노폐기물이 된다. 개인 사용자는 앞서 설명한 바와 같이 나노소비재를 사용하면서 세척을 통한 폐수 발생과 나노소비재의 파기를 통한 나노폐기물 발생을 초래한다. 폐기물 처리시설에서도 나노폐기물이 발생된다. 다양한 경로를 통해 발생된 폐기물은 소각시설이나 하수처리시설로 모이게 되는데, 이들 기존 설비는 나노물질을 완벽하게 제거하는 능력이 부족하다. 따라서 해당 시설에서 나오는 소각재, 슬러지, 침전물 등이 추가적인 나노폐기물이 된다.

Table 2. Nanostructures loci identification in nanoproducts and postulated potential levels of exposure[10]

Types	Categories	Releasing feature	Exposure levels
Free-bound	Solid-bound	Release easily from surface via mechanical stress or wear/tear processes	Low to medium
	Liquid-suspended	Easily get into contact with living organisms	Highly likely
	Solid-suspended	Feasible after matrix or coating falls off	Low to high
Surface-bound	Surface-bound nanostructures	Release via mechanical stress or normal wear/tear processes	Very low to medium
Bulk-bound	Bulk-material bound nanostructures	Release via extreme mechanical force	Very low to low

Table 3. Key compartments of nanoparticles' exposure[15]

Source	Example	Compartment
Point sources (direct release or release from technical compartments)	Groundwater remediation	Groundwater
	Application of agrochemicals	Soil, air
	Use for water treatment	Water
	Release from waste incineration plants	Air, soil
	Release from wastewater treatment plants	Water, soil
	Leaching/draining from landfills	Groundwater, soil
Diffuse sources (release from products)	Wear during use, e.g. nano-Ag in texiles, nano-Si in tyres etc.	Air, soil, water
	Nano-TiO_2 wash-off from sunscreen (in lakes etc.)	Water
	Weathering of nano-TiO_2 from paints	Soil, water
	Use of CeO_2 in fuels	Air, soil, water
	Spreading of biosolids onto land	Soil

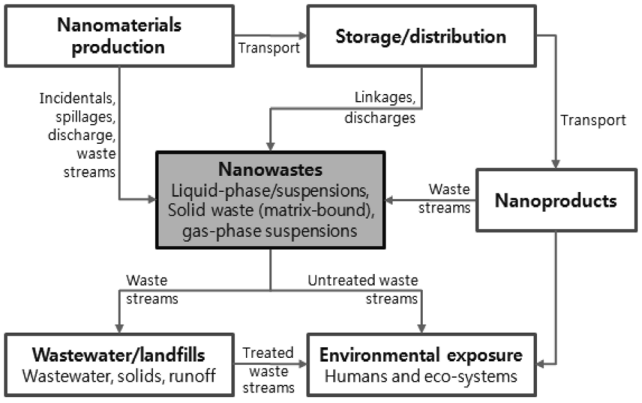

Figure 4. Nanowastes generation and exposure pathways.

Figure 4는 상기 내용을 정리한 것으로, 나노물질 생산과 이송, 저장 과정에서 비의도적인 폐기물 발생을 야기할 수 있음을 보이고 있으며, 나노소비재 또한 최종 소비 후 폐기 처리된다. 발생된 나노폐기물은 매립, 폐수 라인을 거쳐서 궁극적으로는 수계 및 토양 노출을 유발하게 되고, 이는 인체 및 생태계에 영향을 주게 된다. 현재는 나노물질이 환경 중에 어떻게 노출되고 있는지를 모니터링하고, 이를 바탕으로 나노폐기물을 정량화하는 방향으로 연구가 진행되고 있다.

2009년 영국 랑케스터 환경연구소(Lancaster Environment Centre)에서 보고한 바에 의하면[16], AgNP은 의료, 건강 보건, 가정용품 등 다양한 산업분야에 사용되고 있으나 대부분이 폐수처리장이나 매립으로 폐기물이 처리되고 있었다. 이들은 화학물질과는 다르게 제조과정이나 사용 후 폐기에 관한 적절한 규제 정책이 갖춰져 있지 않아서 다양한 경로를 통해 환경에 노출될 가능성이 높다. 즉, 우선적으로 나노물질에 대한 여러 경로 중 의도적/비의도적으로 인체 및 환경에 가장 큰 위험을 미치는 노출 경로에 대한 정보를 파악해야 한다.

2008년 영국 왕립환경오염위원회의 보고에 의하면[17], 플러렌을 생산하는 제조공정에서 약 10%의 플러렌만 소비재 생산에 사용되고 나머지는 폐기물로 처리되어 매립된다고 보고했다. 즉, 제조되는 나노물질의 상당 부분은 소비재 생산 과정에서 약 90%까지 나노폐기물을 양산하게 된다는 점이다. Table 1에서 살펴본 바와 같이 나노물질의 생산량이 현재 10~10^3톤 정도 되므로, 연간 나노폐기물의 양은 1~100톤에 이를 것으로 추정된다. 이렇게 많은 양의 나노폐기물이 배출될 것으로 예측되고 있지만 정작 나노폐기물 처리에 관한 관심이 부족하고, 현재 폐기물 처리설비로 해당 나노폐기물을 처리할 수 있을지도 의문이 드는 것이다. 따라서 현재 하수처리시설을 통해 나노폐기물을 처리할 수 있는지를 우선 평가해 보고, 시설의 수용능력이 부족하다면 새로운 방법을 제시해야 한다.

3.3. 나노폐기물 처리 방법

나노물질은 생산 과정에서 대기로 쉽게 노출되지만 궁극적으로는 수계 및 토양에 침적되게 된다. 따라서 폐기물 처리시설은 하수처리장이나 소각 시설에 집중되게 된다. 매질 흐름 분석법을 통해 소각, 매립, 하수처리에 따른 환경 매질(대기, 토양, 수계)로의 노출되는 양을 모델링한 사례가 보고되었다. 해당 기법을 통하여 주로 노출되는 매질을 결정할 수 있게 되며, 환경예측농도를 파악할 수 있다. 예로 TiO_2는 제품이나 원료물질로부터 직접적인 환경 노출이 발생될 수 있으며, 하수처리장, 소각장, 매립 과정을 거치게 된다[18]. 썬크림 제품의 사용 및 폐기 과정에서 노출되는 TiO_2가 소각, 매립, 하수처리 시설로 이동할 경우, 70% 정도는 매립되어 토양에 노출되며, 하수처리장의 침출수로는 12% 정도가 노출되는 것으로 파악되었다. 대기로는 1% 미만으로 나노 소비재에 의한 대기 노출은 거의 없으며, 대체로 수계와 토양에 노출되는 것으로 판단된다.

하수처리장내 나노입자가 노출된 경우, 잔류 특성을 보고한 사례도 있다. 기존의 하수처리장 설비를 그대로 이용하며, 처리공정별로 노출 농도를 분석하는 방법을 취하였다. TiO_2는 이온화된 형태로 존재하지 않는다는 가정 하에, 산분해법으로 이온화하여 ICP (inductive coupled plasma)로 측정하였다. 미국 애리조나에 있는 하수처리장을 대상으로 수계 노출 평가를 실시하였을 때[19], 254 ppb의 유입수에 대해 1차, 2차 유출수에는 각각 138, 20 ppb가 존재하는 것으로 평가되었다. 즉, 하수처리장에 일단 나노입자가 유입되면 완벽하게 나노입자가 제거되지는 않는다는 것을 나타낸다. SiO_2의 폐수처리에 따른 환경 거동을 살핀 결과에서는, 잔류중인 나노입자가 생물학적 처리조에 영향을 줄 수 있음을 지적한 결과도 있다. 수계에 노출된 나노입자가 폐수처리시설로 이동하여, 1차 침전조를 거쳐 모두 제거 된다면 환경에 영향이 없겠지만, 잔류중인 나노입자는 2차 생물학적 처리조에 영향을 미치게 된다[20]. 즉, Tween (polysorbate 계열 계면활성제)으로 표면처리

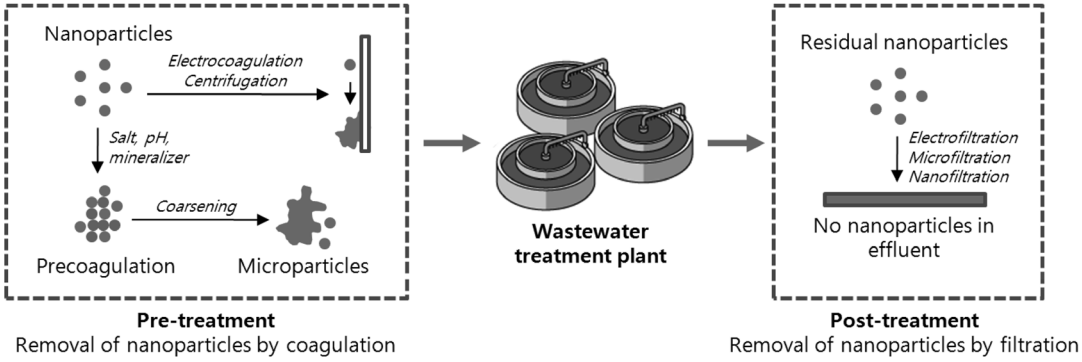

Figure 5. Schematics toward nanowaste reduction by pre- and post-treatment in waste and wastewater treatment plant.

한 SiO_2는 폐수내 빠른 응집이 발생하여 1차 침전조에서 쉽게 제거되지만, 표면처리가 되지 않은 SiO_2는 일반적인 체류시간 동안에는 침전이 발생하지 않고 2차 반응조까지 이동하는 것으로 나타났다.

이와 같이 기존 하수처리시설로는 나노물질이 포함된 폐수를 완벽하게 처리할 수 없다는 것이 현재까지의 결론이다. Limbach 교수에 의한 연구에 따르면 CeO_2가 하수처리장의 최종 라인에서도 6 wt%가 발견할 수 있었다고 하였고, 기존의 생물학적 처리법이 그다지 효과적이지 않다는 결론을 내렸다[21]. 나노폐기물을 매립하는 경우, 우수에 의해 나노물질이 토양 내 구조적 기공을 통해 자유롭게 이동할 수 있게 되어 매립지로부터 상당히 먼 거리까지 이동이 가능하게 된다. 따라서 나노폐기물의 토양 내 매립도 적당하지 않은 방법으로 보고 있다.

현재 나노폐기물, 특히 폐수 내 포함된 나노물질을 제거하는 방법이 몇 가지 제시되고 있다. 크게 응집법과 필터링 방법으로 나뉜다[22]. 응집법은 나노입자를 성장시켜서 마이크로 크기로 만들어서 제거하거나 다른 물질과 공침시켜서 제거하는 방법을 사용한다. 몇 가지 예를 들자면 다음과 같다. 광화제(mineralizer)를 이용하여 크롬(VI)을 포함한 20 nm의 $Mg(OH)_2$ 나노폐기물을 수 μm 크기로 성장시키는 방법이 보고되었다[23]. 광화제로 Na_2CO_3, $NaHCO_3$가 사용되었으며, 수열법을 이용한 결정립 조대화(hydrothermal coarsening) 방법을 이용하였다. 최종 산물은 $Na_2Mg(CO_3)_2$가 되며 크롬은 회수하여 재사용하였으며, 톤 단위의 나노폐기물을 처리할 수 있는 것으로 파악되었다. SiO_2 나노입자를 $Fe(OH)_2$와 전기응고(electrocoagulation)시켜서 침전시키는 방법도 제시되었으며[24], $FeCl_2$와 $FeCl_3$를 이용하여 자성을 띄는 물질이 합성되면서 실리카가 함께 응집되는 방법도 보고되었다[25]. 액상에 분산중인 금속 나노입자의 경우는 원심분리기를 이용하여 침전시키는 것이 가능하지만, 14,000 rpm 이상의 고속 회전이 필요하며 1회당 1 L 미만만을 처리할 수 있다는 한계점이 있다. 이상의 공침법 또는 응집법은 나노크기를 마이크로 크기로 성장시킨다. 이는 물리적 크기를 변화시켜서 기존의 폐수처리시설(침전법)에서 수용할 수 있게 변형시킨 방법이다. 나노입자의 응집에는 pH, 광화제, 염(salt), 온도, 교반 등 다양한 변수 제어를 이용할 수 있으며, 전극을 통한 응집도 시도되고 있다. 장점은 응집을 시켜 입자가 수 마이크로로 커지면 기존의 정화 시설을 이용할 수 있다는 것이 특징이다. 그러나 고가의 나노입자(Pt, Pd, Au, Ag)를 회수하여 재사용하기에 어렵고, 최종 부산물은 매립해야 하므로 추후 토양 노출이 발생할 수 있다.

필터링 방법은 멤브레인이나 나노필터를 사용하는 방법으로, 입자를 회수하여 재이용 가능하다는 장점이 있다. 단점은 처리 용량이 응집법에 비해 떨어지며, 기존 정화 시설의 전처리 설비나 사후 설비로 사용하는 부수적인 기법이 된다. 몇 가지 예를 들자면 다음과 같다. TiO_2/Al_2O_3로 구성된 멤브레인을 이용하여 SiO_2 나노입자(100 nm)가 포함된 폐수를 처리하는 전기여과(electrofiltration) 기법이 소개 되었다[26]. 제거 효율은 약 90% 정도로 나타났다. 500 nm의 기공을 갖는 PTFE (polytetrafluoroethylene) 멤브레인을 이용하여 진공하에서 나노 SiO_2를 제거하는 정밀여과(microfiltration)법도 개발되었다[27]. 해당 기법은 멤브레인의 기공이 크기 때문에 나노폐수를 필터에 통과시키기 전에 입자를 성장시키는 염 처리를 해야 하는 불편한 점이 있었다. 최근에는 표면을 탄소처리한 나노섬유 멤브레인을 이용하여 금나노입자를 크기별로 선별하는 기법도 소개되었다[28]. 해당 기법은 나노입자를 크기별로 회수할 수 있다는 장점이 있지만 대용량 처리에는 한계가 있다. 이상의 멤브레인을 이용하는 나노폐기물, 특히 나노폐수 처리 기법은 나노입자의 회수를 통한 재이용면에서는 우수하지만, 기존 처리시설에 적용하기가 어렵고 처리용량의 한계점을 지닌다. 따라서 현장적용면에서는 입자를 성장시키는 전처리방법과 정화시설의 말단 노출부를 필터링 시키는 후처리방법을 적용하는 것이 바람직하다(Figure 5).

3.4. 나노물질에 관한 규제 동향

나노폐기물에 의해 발생될 수 있는 문제점을 사전에 억제하기 위한 목적으로 나노물질이 포함된 원료물질이나 나노소비재를 규제 또는 등록하는 규제를 마련하는 것도 중요하다. 이에 관해서는 미국을 비롯한 선진국이 앞장서서 규제화를 진행 중이며, 이는 추후 환경무역규제로 작용할 가능성이 있기 때문에 우리나라 환경부의 관심도 높은 분야이다.

Table 4. Regulations for nanosafety in major countries

Country	Regulations*	Target materials	Report
USA	TSCA, FIFRA, FFDCA	SiO_2, Al_2O_3, CNT, AgNP	> 10 ton/y
EU	REACH, CLP, RoHS, CR	CNT, AgNP	> 1 ton/y
Japan	Informations gathering by MOE and METI	-	-
Thailand	Work by NANOTEC	Labelling with Nano Q	-
Australia	NICNAS	Industrial nanomaterials	> 100 kg/y
Korea	Comprehensive plans for nano-safety (2011. 10)	-	-

* TSCA : Toxic Substances Control Act
FIFRA : Federal Instecticide, Fungicide, and Rodentricide Act
FFDCA : Federal Food, Drug, and Cosmetic Act
REACH : Registration, Evaluation, Authorization and Restriction of Chemicals
CLP : Classification, Labelling and Packaging of chemical substances
RoHS : Restriction and use of certain Hazardous Substances
CR : Cosmetic Regulation
MOE : Ministry of Environment
METI : Minitstiry of Economy, Trade and Industry
NANOTEC : National Nanotechnology Center
NICNAS : National Industrial Chemical Notification and Assessment Scheme

현재 나노물질 안전관리에 관한 규제나 법령이 마련된 국가는 미국, EU, 호주 3개국이지만 이들 국가들도 아직까지는 강제성이 거의 없는 편이다. 우리나라를 비롯하여 일본, 태국은 관련 규제를 마련하고자 나노물성 정보와 독성 정보를 수집하고 있는 수준이다. 관련 규제를 마련한 국가들의 특징은 나노물질을 이용한 나노소비재를 주로 생산하는 국가(미국-가전제품, EU-화장품)로서 향후 이들 규제를 강제화시키고 신고대상 범위도 사용량을 더욱 줄일 수 있을 것으로 보아, 환경무역규제로 작용할 수 있는 소지가 다분하다. 따라서 아직까지 명확한 규제가 마련되지 않은 후발 국가들은 해당 규제를 맞추거나 자국의 규제를 마련하고자 노력을 경주하고 있다.

규제 대상물질이 매년 1~2가지씩 증가하면서 발표되고 있다. 이는 점차적으로 나노물질 전분야로 확대될 수 있는 사항으로, 아직까지는 규제 관리 대상이 아니더라도 향후 대부분의 물질이 충분히 관리대상이 될 수 있음을 나타낸다. 또한, 나노물질이 함유된 제품에 대해서는 라벨링제를 도입하여 성분, 조성, 형태 등에 관한 정보를 공개하도록 유도하고 있다. 이는 일반 소비자로 하여금 정보 제공을 통해 제품에 관한 신뢰도 확보나 위해성 정보를 사전에 고지하기 위함에 있다. 이는 추후 전자제품의 안전관리 인증마크처럼, 수출입시에 나노소비재 및 나노물질을 취급하는 인증마크를 받아야만 할 경우가 발생될 것으로 보인다. 이러한 나노소비재에 대한 라벨링제나 인증마크는 일반인으로 하여금 나노폐기물에 대한 인식을 고취시킬 것이며, 일반폐기물과는 다른 취급법을 취해야 함을 인지하게 될 것이다.

3.5. 나노폐기물에 관한 새로운 패러다임 제시의 필요

기존 환경오염 문제를 해결하는 방법은, 제조자가 생산 초기부터 최종 폐기물 처리까지 일괄 관리하는 방법이다. 해당 개념은 제품의 전주기 관리라는 관점에서 중요한 개념이다. 그러나 나노폐기물은 현재 갖춰진 하수처리시설로는 완벽한 제거가 불가능하여 나노물질 및 나노소비재의 폐기물 처리 및 관리가 불가하다. 즉 매립지내 토양오염 및 침출수 발생 등의 추가적인 오염원으로 작용하게 된다. 따라서 나노물질이 포함된 나노폐기물과 이를 처리한 하수처리시설의 말단부의 배출수는 다른 방식으로 관리 되어야 한다.

본 총설의 마지막 세부 절에서는 나노폐기물에 대한 관리 개념으로, 나노폐기물을 원천발생지인 원료물질로 되돌려 보내자는 개념을 제시하고자 한다. 이는 기존 처리시설로 완벽한 제거가 불가능 하다면, 나노소비재를 제조하는 데 사용했던 원료물질로서의 나노물질은 나노폐기물이 되더라도 다시 원료물질로 회수할 수 있어야 한다는 뜻이다. 이를 구체화하기 위해서는 3R (recover, recycle, reuse)을 통한 나노폐기물의 감소와 환경 노출을 억제하는 방법이 필요하다. 현재까지 사용할 수 있는 나노폐기물 내 나노물질 회수법은 Figure 5와 같이 필터링 방법이나 입자의 재결정화를 통한 응집법이 있지만, 복합물질일 경우는 이들의 사용법이 제한적일 수 있다. 그러나 7~80년대 환경문제를 사후관리에서 90년대 이후 사전관리로 개념을 정립하고 나서, 현재는 환경 및 청정기술이 급속도로 발전해 왔다. 따라서 우리가 간과했던 나노폐기물에 대한 관리 개념을 사후처리가 아닌 지속적인 관리를 통한 무배출 쪽으로 방향을 잡아야 할 것이다.

해당 개념을 Figure 6과 같이 정리하였다. 일반적으로 볼 수 있는 재활용 개념의 그림으로도 볼 수 있겠지만, 현재까지는 나노폐기물을 완벽하게 원료물질로 환원시키는 기술력이 부족한 상태이며, 그래서 그림에서 물음표로 나타내었다. 현재 상태는 나노물질 및 나노폐기물의 인체 및 환경 위해성의 개념이 뚜렷하지 않기 때문에 법적 규제나 제품 사용상 주의사

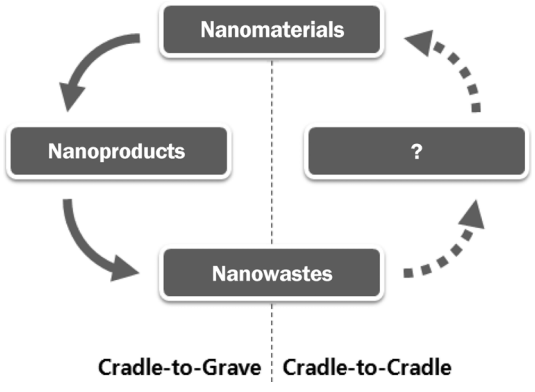

Figure 6. New paradigm for nanowaste treatment.

항 등이 제시되지 않고 있어서, 나노폐기물은 일반폐기물로 처리되고 있다. 향후 나노물질에 관한 잠재적 위해성 정보가 취합되면, 나노폐기물의 처리 개념도 더욱 뚜렷해 질 것이다. 이러한 시점이 도래하면 새로운 처리방법이 개발되거나 기존 처리시설의 개선을 위한 방법이 도출될 것이다. 해당 방법론이 구축되면 3R을 통한 나노폐기물의 감소와 환경 노출 억제 개념이 완성되게 될 것이다. 즉 원료인 나노물질에서 잠시 동안 나노폐기물을 거치지만 다시 나노물질로서 회수될 수 있을 것이다.

4. 결 론

본 총설에서는 나노물질 및 나노소비재의 급증으로 인한 나노폐기물의 증가 가능성을 파악하고, 기존의 처리방법이 나노폐기물 처리에 적합한지 문헌조사를 통해 분석하였다. 문헌조사 결과, 현재 나노폐기물을 처리할 수 있는 확실한 방법이 없는 상태이고, 기존의 소각 및 하수처리시설이 나노폐기물을 수용하지 못하므로 새로운 해법에 관한 연구가 필요함을 인식하게 되었다. 해당 답안이 나오기 전까지는 나노폐기물을 중금속 폐기물처럼 간주하여 취급해야 한다는 주장도 있고, 방사능 폐기물 처리처럼 밀봉 처리하여 매립해야 한다는 의견도 있다. 후자의 경우는 나노물질의 위해성에 관한 과도한 염려라고 여겨지지만, 전자의 의견처럼 나노폐기물 처리에 적합한 방법이 나오기 전까지는 나노물질 및 나노소비재를 일반폐기물로 간주해서는 안될 것이다. 정부의 나노폐기물에 관한 어떠한 시책이 나오기 전까지는, 연구자 및 일반인 스스로 나노물질의 환경 노출을 억제하고 가능한 대상물질을 재회수하여 재사용 가능하도록 해야 할 것이다.

감 사

본 연구는 2009년 국립환경과학원의 연구비 지원으로 이루어졌습니다.

참고문헌

1. Park, E., Roh, J., Kim, Y., and Choi, K., “A Single Instillation of Amorphous Silica Nanoparticles Induced Inflammatory Responses and Tissue Damage Until Day 28 After Exposure,” *J. Health Sci*., **57**, 60-71 (2011).
2. Park, E., Kim, H., Kim, Y., and Choi, K., “Repeated-Dose Toxicity Attributed to Aluminum Nanoparticles Following 28-Day Oral Administration, Particularly on Gene Expression in Mouse Brain,” *Toxicol. Environ. Chem*., **93**, 110-119 (2011).
3. Park, E., Roh, J., Kim, Y., and Park, K., “Induction of Inflammatory Responses by Carbon Fullerene (C_{60}) in Cultured RAW264.7 Cells and in Intraperitoneally Injected Mice,” *Toxicol. Res.*, **26**, 267-273 (2010).
4. Bubnoff, A., “Magic Nano Shows Industry Need for Standard Terminology,” *Solid State Technol.*, April (2006).
5. Kim, J.-K., Kang, M.-G., Cho, H.-W., Han, J.-H., and Yang, J.-S., “Inhalation Toxicity Study of Carbon Black Nanoparticles in the Rat Model,” Report of the Korea Occupational Safety and Health Agency (2010).
6. http://www.mdtoday.co.kr/mdtoday/index.html?no=187480
7. OECD, “Safe Mangement of Nanowaste,” OECD Workshop, May 9, Munich, Germany (2012).
8. http://en.wikipedia.org/wiki/Roy_Amara
9. http://www.nanotechproject.org/inventories/consumer
10. Musee, N., “Nanotechnology Risk Assessment from a Waste Management Perspective: Are the Current Tools Adequate?,” *Human Experi. Toxicol.*, **30**, 820-835 (2011).
11. Royal Society and Royal Academy of Engineering, “Nanoscience and Nanotechnologies: Opportunities and Uncertainties,” RS Policy Document 19/04 (2004).
12. Internal Report of the Environmental Health Research Department, National Institute of Environmental Research (2011).
13. Hallock, M. F., Greenley, P., BiBerardinis, L., and Kallin, D., “Potential Risks of Nanomaterials and How to Safety Handle Materials of Uncertain Toxicity,” *J. Chem. Health Saf.*, **16**, 16-23 (2009).
14. OECD WPMN SG8, “Preliminary Analysis of Exposure Measurement and Exposure Mitigation in Occupational Settings: Manufactured Nanomaterials,” ENV/JM/MONO6 (2009).
15. Gottschalk, F., Nowack, B., and Gawlik, B., “Report on Exposure Scenarios and Release of Nanomaterials to the Environment,” NANEX Work Package 5 (2010).
16. Whiteley, C. M., Valle, M. D., Jones, K. C., and Sweetman, A. J., “Challegnes in Assessing the Environmental Fate and Exposure of Nano Silver,” *J. Phys. Confer. Series*, **304**, 012070 (2011).
17. Royal Commission on Environmental Pollution, Report on Sep. (2008).
18. Mueller, N. C., and Nowack, B., “Exposure Modeling of Engineered Nanoparticles in the Environment,” *Environ. Sci. Technol.*, **42**, 4447-4453 (2008).
19. Kiser, M. A., Westerhoff, P., Benn, T., Wang, Y., Perez-Rivera, J., and Hristovski, K., “Titanium Nanomaterial Removal and Release from Wastewater Treatment Plants,” *Environ. Sci. Technol.*, **43**, 6757-6763 (2009).
20. Jarvie, H. P., Al-Obaidi, H., King, S. M., Bowes, M. J., Lawrence, M. J., Drake, A. F., Green, M. A., and Dobson, P. J., “Fate of Silica Nanoparticles in Simulated Primary Wastewater Treatment,” *Environ. Sci. Technol.*, **43**, 8622-8628 (2009).
21. Musee, N., “Nanowastes and the Environment: Potential New Waste Management Paradigm,” *Environ. Internation*., **37**, 112-128 (2011).
22. Bystrzejewska-Piotrowska, G., Golimowski, J., and Urban, P. L., “Nanoparticles: Their Potential Toxicity, Waste and Environmental Management,” *Waste Manag.*, **29**, 2587-2595 (2009).
23. Liu, W., Huang, F., Liao, Y., Zhang, J., Ren, G., Zhuang, Z.,

Zhen, J., Lin, Z., and Wang, C., "Treatment of Cr^{VI}-Containing $Mg(OH)_2$ Nanowaste," *Angew. Chem. Int. Ed.*, **47**, 5619-5622 (2008).
24. Den, W., and Huang, C., "Electrocoagulation for Removal of Silica Nanoparticles from Chemical-Mechanical-Planarization Wastewater," *Colloids Surf. A*, **254**, 81-89 (2005).
25. Chin, C.-J. M., Chen, P.-W., and Wang, L.-J., "Removal of Nanoparticles from CMP Wastewater by Magnetic Seeding Aggregation," *Chemosphere*, **63**, 1809-1813 (2006).
26. Yang, G. C. C., and Li, C.-J., "Electrofiltration of Silica Nanoparticle-Containing Wastewater Using Tubular Ceramic Membranes," *Sep. Purif. Technol.*, **58**, 159-165 (2007).
27. Pan, J. R., Uang, C., Jiang, W., and Chen, C., "Treatment of Wastewater Containing Nano-scale Silica Particles by Dead-end Microfiltration: Evaluation of Pretreatment Methods," *Desalination*, **179**, 31-40 (2005).
28. Liang, H.-W., Wang, L., Chen, P.-Y., Lin, H.-T., Chen, L. F., He, D., and Yu, S.-H., "Carbonaceous Nanofiber Membranes for Selective Filtration and Separation of Nanoparticles," *Adv. Mater.*, **22**, 4691-4695 (2010).