

해설



산업광물과 나노기술

채수천·장영남·배인국

한국지질자원연구원 자원활용소재연구부

산업발달은 기존의 전통적인 기술의 확보는 물론 새로운 특성을 가진 물질의 개발을 요구하고 있다. 이러한 기술의 확보는 곧 국가 경쟁력의 중요한 지표로 평가받고 있다. 따라서 세계 각국은 국가 경쟁력의 증진을 위한 기술 개발에 박차를 가하고 있으며, 우리나라의 경우에도 중점 핵심기술(6T 기술)의 개발이란 기치 하에 지속적인 연구를 수행하고 있다. 이들 6T 산업은 생명공학분야의 BT(Biology Technology), 환경공학분야의 ET(Environment Technology), 정보통신 분야의 IT(Information Technology), 초정밀 원자세계 분야의 NT(Nano Technology), 우주항공분야의 ST(Space Technology) 그리고 문화관광 콘텐츠 분야의 CT(Culture Technology) 등으로 구분된다. 이러한 산업 또는 기술의 분류 체제는 각각이 별개의 분야라기 보다는 상호 기술 교류를 통하여 하나의 완성품을 만든다는 점에서 기존의 개별적인 산업분류와 차이를 보인다.

이들 기술 중 나노기술은 무기질 광물과 밀접한 관계를 가지고 있다. 나노기술은 산업광물의 부가가치를 향상시킬 수 있는 주요한 기술이며, 다양한 종류의 광물들이 나노기술에 적용될 수 있다. 나노(Nano)라는 용어는 $10^{-9}m$ 를 표현하는 단위로 그리스어로는 난쟁이라는 의미의 'nanos'에서 유래되었듯이, 광물 분류상 가장 작은 입도를 갖는 점토광물, 특히 할로이사이트가 나노기술 분야에 있어 관심 대상이 되고 있

다. 이들 점토광물 이외에 다양한 종류의 비금속 광물들이 독특한 분자구조적 특성에 기인되어, 급변하고 있는 나노 분야의 원료물질로써 각광을 받고 있다. 또한 나노기술은 물질구조상 완전하고도 비용 효율이 높아 기술적 주도권을 선점할 수 있는 것으로 평가되고 있다.

호주 시드니에 본사를 가진 'Stratum Resources'사의 광물 전문가인 'Murray Lines'는 현재 가장 빠르게 성장되고 있는 최대 규모의 시장으로 '몬모릴로나이트(벤토나이트의 주요 성분)로부터 나노점토의 생산 분야'를 꼽고 있다. 특히 이러한 나노점토는 방염전선과 자동차 부품에 사용되고 있다.

이와 같이 산업광물과 나노기술과의 만남은 기간 산업에서 사용되는 일상적인 광물의 용도 차원을 넘어 무한한 발전의 가능성이 있다. 따라서 본고에서는 'Industrial Minerals(2006년 5월)'에 기고된 내용(Brace, 2006)을 토대로 나노기술에서 사용되고 있는 산업광물의 현황 등을 소개하고자 하였다.

나노기술에서 사용되는 주요 산업광물

미국 텍사스의 'Southern Clay Product'사는 나노입자로 구성된 점토물질을 나노기술과 접목시켜 산업용 빌딩 벽돌을 생산할 계획이다.

나노입자는 직물, 메모리 칩 및 차량부품 등 다양한 종류의 제품에 사용될 수 있는데, 예를 들어 2004년형 시보레 임팔라(Chevrolet Impala: 자동차 모델명)의 외관에 나노물질을 첨가하여 7%이상 경량화하여, 연비를 높이는데 성공한 바 있다.

호주의 퀸즈아일랜드 대학의 'The NanoMaterials Center' (이하 NanoMac 센타)에서는 점토분말인 나노물질이 어떻게 폴리머 물질의 기계적 특성, 내구성 및 안정성을 향상시키는 가하는 원리에 대한 연구를 수행하고 있다. 또한 나노 크기의 다공성 필라(pillar)로 사용되는 점토들과 산화물 점토를 조사하고 있으며, 나노 합성물들이 고급 흡착제 및 유기물의 제거를 위한 촉매로써, 그리고 물의 색깔의 원인이 되는 유기물의 제거제로써 어떻게 활동하는가에 대하여 연구하고 있다. 호주의 빅토리아주 소재 'Nanovic' 사 역시 방벽(barrier) 특성을 이용한 나노점토의 사용을 고려하고 있다.

흑연은 탄소 나노튜브의 원료 및 재단된 초탄소(super carbon)의 재료로써 사용되고 있다. 단층벽 탄소(single wall carbon) 나노튜브는 이론상 하나의 흑연 층(graphene layer)이 둥글게 말려서 이음새가 없는 실린더 형태로 만들어진 물질이다. 호주의 'NanoMac' 센타는 탄소 나노튜브의 효용가치와 에너지 축적(H₂의 축적)용 초탄소 그리고 차세대 리튬 이온 전지에 대하여 연구하고 있다.

나노 실리카는 'DC Chem Korea'에서 반도체 웨이퍼, 광섬유 및 태양전지용으로 생산되고 있다. 'NanoMac' 센타의 연구원들은 가스분해용 미소공 구조(microporous)를 가진 실리카 멤브레인, 연료전지 응용물 및 H₂ 생성용 멤브레인 반응기 등을 연구하고 있다.

중질탄산칼슘(Ground calcium carbonate: GCC)은 자동차의 하부 방수제, 유향수지

(mastics), 잉크 그리고 문과 문 또는 문과 구조물 사이를 밀봉시키는데 사용되는 고무부품의 원료 등 다양한 용도로 사용되고 있다.

가장 놀라운 산업제품의 하나는 희토류 산화물(REO)인 세리아로, 이는 고체 산화물 연료전지용 물질(ionic 전도체)로써 주목을 받고 있다. 이는 기존의 에너지 자원 고갈에 따른 가격상승 때문에 매우 중요한 분야의 하나이다. 희토류 금속 산화물은 연료 전지를 만들 때, 여러 가지 면에서 유용하며, 특히 전극의 부품 및 고체 산화물 연료전지의 저온성 전해질로써 효용가치가 높다. 또한 나노 세리아와 혼합 희토류 금속 산화물 역시 연료전지 관련 적용시험을 통하여 유망한 물질임이 입증되었다. 세리아는 새로운 타입의 화학적 기계 연마(CMP: chemical mechanical polishing)용 연마제로 각광을 받고 있으며, 'Envirox' 등과 같은 차세대 연료 첨가제의 개발과 밀접한 관계를 가지고 있다.

특히 언급할만한 두 가지 물질로 티타니아(titania)와 아연산화물(zinc oxide)을 들 수 있는데, 이들은 벤토나이트와 더불어 가장 진보된 나노광물로 평가되고 있다. 티타니아는 보통은 페인트 제조 및 목재 코팅제로 주로 사용되는데, 이는 태양광으로부터 장기적으로 노출된 경우에도 탈색되지 않는 특성(자외선에 대한 높은 내구성)을 가지고 있기 때문이다. 'NanoMac' 센타는 광촉매¹⁾인 동을 도핑한 TiO₂(Cu-doped TiO₂)가 어떠한 원리에 의해 수질정화 효과를 보이는 가를 연구하고 있으며, 'Nanovic' 사는 티타니아를 소수성/자동세척용 표면처리제로서 개발할 계획이다.

또한 티타니아는 항균성 제품 등의 용도로써 사용되기도 한다. 아연 산화물은 햇빛 차단제 및 화장품으로 널리 사용되고 있으며, 자외선을 흡수하는 특성 때문에 직물 업계에서도 사용 빈도가 증가하는 추세이다.

1) 빛과 나노기술(nano-tech)을 이용해 생활 주변의 악취나 곰팡이, 세균 등을 제거해주는 환경 개선 신물질.

나노점토

나노기술은 매년 산업 광물의 새로운 용도가 발견되어 개발될 정도로 빠르게 진보하고 있다. 모든 산업광물들이 기능성을 부여 받는다면, 방출제어형 제제²⁾(controlled release drug)로 사용되는 광물과 휴대전화로부터 나오는 전자파 및 방사열을 차단할 수 있고, 오일 제제(oil-based) 폴리머 제품을 대체할 수 있으며, 하루 종일 탈취효과를 나타낼 수 있는 기능성 페인트의 출현을 보게 될 것이다.

할로이사이트(halloysite)와 이모골라이트(imogolite) 등의 점토광물의 내부에는 천연 나노튜브가 존재하는데, 일반적으로 직경이 100 nm 이하이고, 길이가 500nm~1.2 μ m 정도인 매우 얇고 속이 비어 있는 튜브 또는 섬유상 모양을 가지고 있다. 나노 튜브모양의 물질들은 기능성 나노입자의 합성 및 이들을 다양한 분야에 적용하여 나노 크기의 미세한 장치를 만들 수 있다는 점에서 나노기술에 대한 중요한 초석이라 말할 수 있다.

할로이사이트는 특별히 흥미를 자아내는 물질이다. 과거 수세기동안 할로이사이트는 단순히 자기제품을 만드는 원료로 간주되어 왔다. 1950년대에 이르러 전자현미경을 이용하여, 점토내의 입자들이 튜브모양이라는 사실이 발견되었고, 이러한 입자들의 구조적 특성은 그 후 40년이 지나서야 비로써 이용되기 시작하였다.

할로이사이트가 튜브형태를 지니는 원인은 전단변형(shearing)에 기인된 것이지만, 또 다른 원인으로서는 물과의 반응에 따라 할로이사이트의 판이 동그랗게 말려서 튜브화 된다는 것이다. 할로이사이트가 알루미늄, 실리콘, 수소 및 산

소로 구성된 알루미늄노규산염 광물의 풍화산물이란 점을 제외하고는, 이것의 튜브 모양은 나노기술의 모든 영역에서 사용되고 있는 인조 나노 탄소튜브와 매우 유사한 특성을 가지고 있다.

할로이사이트의 특성 및 활용

전통적으로, 할로이사이트는 자기류(porcelain, bone china and fine china)를 만드는데 사용되어 왔으나, 오늘날에는 할로이사이트 나노 튜브의 독특한 기하학적 형태가 다수의 새롭고도 잠재성 있는 응용물의 개발에 대한 중요한 열쇠임이 발견되었다. 그림 1은 전자현미경(SEM 및 TEM)을 통해 관찰된 나노입자인 Ni를 증착시킨 할로이사이트의 형태를 보여주고 있다. 흰색의 할로이사이트는 짧은 실린더 형태(그림 1a)를 보여주고 있으며, 전형적인 속이 빈 튜브모양의 구조(그림 1b)를 나타내고 있다. 할로이사이트는 약 1~2 μ m인 평균 길이 및 75~150nm의 직경을 가지고 있으며, 세공의 평균 직경은 15nm이다(Fu와 Zhang, 2005).

본 분야의 선도적 회사는 뉴욕 소재 'Natural Nano'사로, 이 회사는 다수의 잠재적인 할로이사이트의 용도에 대한 연구를 수행하고 있다. 본 회사는 현재까지, 200여 가지 이상의 상품을 개발한 바 있다. 또한 다양한 크기인 천연산 나노 튜브는 고급 용도로 사용 시 요구되는 품질 기준에 적합하지 않다. 따라서 규격화된 나노 튜브를 생산하기 위한 추출, 분별 및 분류 기법과 관련된 특허 기술을 개발하고 있다. 이들 고급 응용 상품으로는 화장품, 폴리머, 플라스틱 및 기타 분야에서 사용되는 방출제어형 상품 등이 있다.

2) 고혈압처럼 일정하게 약물의 혈중농도를 유지해야 하는 질환의 경우, 작용시간이 짧은 약물은 여러 번 투여해야 하지만, 방출제어형(서방형제제)의 경우는 작용지속시간이 길어 1일 1회 투여하여도 동일한 효과를 보임.

할로이사이트의 미세관들은 시간 경과에 따라 서서히 용해 방출이 가능한 캡슐의 역할을 할 수 있기 때문에, 미세관 내에 오손방지 페인트(antifouling paint), 이물질 제거제(antiscalants), 제초제(herbicides), 방충제(pest repellents) 및 기타 매질 등을 가득 채워 방출 제어 효과를 증대시킬 수 있다.

2006년 2월, 'NaturalNano'사의 사장인 'Michael Riedlinger'는 고급 고분자 복합재료 분야가 첨가물로서 나노 물질의 수요를 획기적으로 증가시킬 수 있는 분야이며, 이 분야가 'NaturalNano'사의 중요한 시장이라고 말하였다. 또한 'NaturalNano'사의 고분자 제품에서 사용되고 있는 할로이사이트 나노 튜브는 고분자의 제조 시, 강도 및 내열성을 증가시키며, 천연 나노물질로부터 최근 들어 발견된 장기적인 방출제어적 특성(extended and controlled release characteristics) 등 새로운 유용한 기능성을 접목시킬 수 있다는 점에서 매우 우수한 물질로 평가하였다.

할로이사이트의 용도는 'Riedlinger'가 포장 재료산업계, 제약 및 의료산업계, 화장품 제조, 고분자 세라믹, 플라스틱, 음식, 전자, 흡수제, 차체, 페인트 및 휴대전화업계 그리고 세계적인 대형 운송산업, 엔지니어링 및 농산물 업계 등 다양한 분야의 학회에서 동일한 연설을 할 만큼 무궁무진하다.

'NaturalNano'사는 할로이사이트 튜브에 물을 채운 후, 이 튜브와 고분자를 혼합시킴으로써 전도성 플라스틱을 만들 수 있다고 믿고 있다. 살균제가 채워진 할로이사이트 입자를 페인트와 혼합하면 곰팡이의 생성을 막을 수 있다. 방출 제어 형 코팅 또한 장기적인 효과를 발휘하는 방취제 제조에 첨가될 수 있다. 개발된 시제품으로

나노 튜브가 다량 함유된 페인트가 있는데, 이는 핸드폰의 신호 등과 같은 라디오 주파수 신호를 막을 수 있으며, 이와는 대조적으로 은폐된 환경에서 라디오 주파수 신호를 수신할 수 있는 기술 등도 이에 포함된다. 부가적으로, 생분해성 플라스틱 복합체와 오일 제제(oil-based) 폴리머의 대안품인 'green composites'³⁾ 등 할로이사이트 나노 튜브의 특성을 살린 상품의 개발은 환경 분야에서의 무한한 잠재성을 지시하고 있다.

'NaturalNano'사의 연구 개발 부장인 'Aaron Wogner'는 농업 용도로써 일반 살충제를 나노 튜브 속에 넣어 살포하는 경우, 접촉만으로도 살충효과를 보일 수 있다고 말하였다. 또한 오늘날 농업에서 살충제로써 다량의 역겨운 냄새를 풍기는 화학제품을 살포하고 있는데, 이런 방법을 이용하면, 적은 양으로도 살충효과를 나타내기 때문에, 기존의 방법에 의해 농토에 뿌려지는 독성물질인 살충제의 양을 70~80% 정도까지 줄일 수 있다고 예측하였다.

반도체 및 기타 기술의 개선 등 많은 이상적인 방안들을 개발하는데 수년을 보냈지만, 나노기술을 응용하기 시작한 최초의 세대는 자동차 연비의 개선, 자동차 도어 패널의 경량화, 먼지가 묻지 않는 바지, 그리고 우수한 기능성 플라스틱의 제조 등 보다 일상적인 아이টে에 초점을 맞췄다.

'Biophan Technologies'사의 차세대 의료 기술의 개발자는 할로이사이트에서 발견된 천연 나노 튜브를 이용한 새로운 약물 전달 기술을 'NaturalNano'사와 공동으로 포괄적인 특허를 신청하였다고 2006년 3월에 발표했다.

'Biophane Technologies'사가 새로 신청한 특허에는 붕대, 상처 치료용 제품 및 기타 의료용 나노 튜브의 생물 의학적 기술을 포함하고 있다.

3) 석유를 원료로 만들어지는 비분해성 플라스틱대신 자연 섬유를 원료로 만든 플라스틱류 등 환경 친화 물질

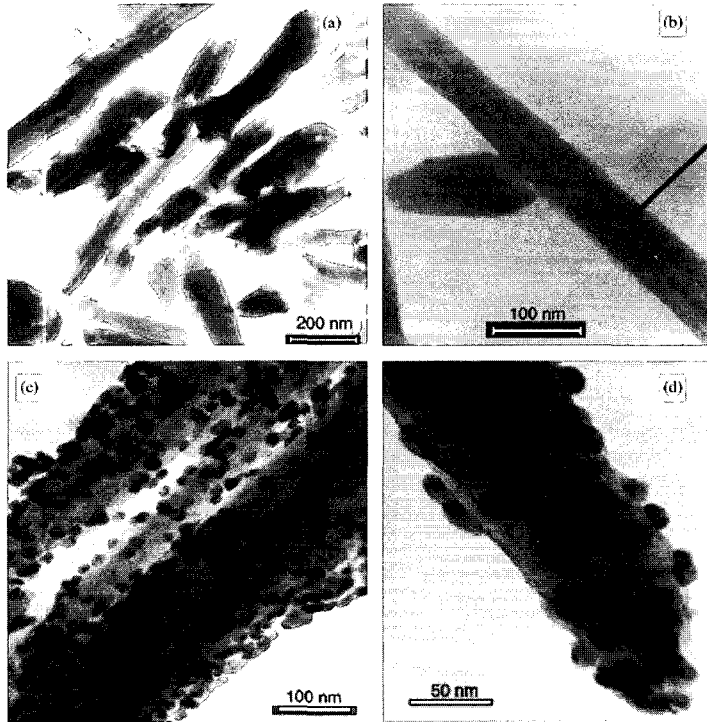


그림 1. 전자현미경(TEM 및 SEM 분석) 사진. 할로이사이트의 (a) 실린더 모양, (b) 속이 빈 튜브 모양 (화살표), (c) 및 (d) 할로이사이트의 표면에 증착된 Ni 나노입자 (Fu and Zhang, 2005).

이모골라이트

할로이사이트의 사촌격인 이모골라이트는 나노기술자들이 상당한 관심을 가지고 있는 광물이다. 이모골라이트의 나노 크기의 입자들은 화산재로 이루어진 토양에 분포하고 있다.

자체의 벽면 구조(wall structure)는 알루미늄(III) 수산화물(또는 김사이트) 층과 동일하며 또한 내부 벽은 규산염 그룹 등과 연결되어 있다(그림 2).

호주의 'Western Sydney' 대학에서, 연구자들은 이들 천연산 단층벽을 가진 알루미늄규산염 나노 튜브에 대한 연구를 수행하고 있다. 이들 입자들의 인위적 생산기술의 개발은 수초(water weed) 등과 같은 유해 물질의 성장을 촉진시키는 염화물, 황산염 및 인산염 등의 물

질에 대한 토양의 흡수 능력을 증가시키는데 목적을 두고 있다. 예를 들어, 이러한 나노입자의 흡착 특성을 접목시킨 애완 동물의 깔판은 동물의 몸이나 배설물 등으로부터 야기된 악취제거에 상당한 효과가 있다. 이러한 공정은 전통적인 점토의 성질을 이용한 것으로, 점토는 여러 장의 카드로 구성되어 있는 한 갑의 카드와 같이 여러 개의 층으로 이루어진 층상광물이기 때문에, 높은 표면적을 가지고 있어 유해물질에 대한 흡수력을 증가시킬 수 있다.

할로이사이트 및 이모골라이트의 공급 현황

이러한 놀라운 점토인 할로이사이트가 어디에 존재하고 있는가? 호주에는 상당량의 할로이사이트와 이모골라이트가 부존되어 있기는 하지만,

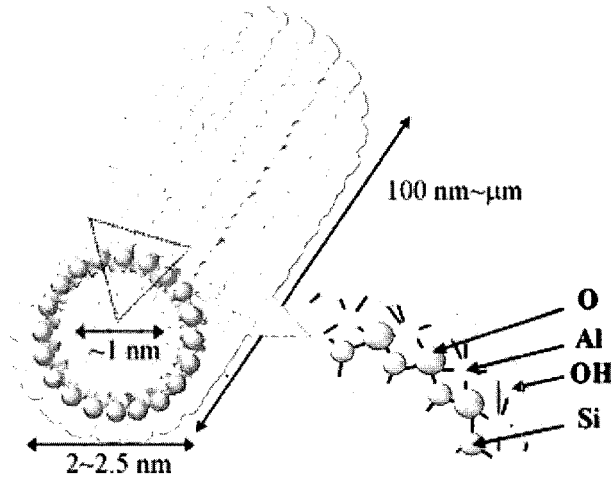


그림 2. 이모골라이트의 구조 (Yamamoto *et al.*, 2005).

오늘날에는 미국의 유타주의 'Atlas Mining' 사가 보유하고 있는 'Dragon mine'에서 채광되고 있다. 'NaturalNano' 사는 채광된 500톤의 할로이사이트를 구매하기 위해 'Atlas Mining' 사와 접촉하고 있다.

2006년 2월 9일 'Atlas Mining' 사는 고품질 나노물질 생산의 선두주자인 'NanoDynamics' 사로부터 가공 처리된 할로이사이트를 톤당 500불인 가격으로 5,000톤의 구매요청을 받은 상태라고 밝혔다.

'Atlas Mining' 사의 대표이사인 'William Jacobson' 은 할로이사이트의 잠재적인 사용처가 매일같이 계속적으로 높은 증가율을 보이고 있으며, 할로이사이트 미세관의 방출제어 특성은 일부 나노기술 회사들에 있어 흥미 있는 토픽이 되었다고 전하고 있다. 또한 그는 아시아의 바이오텍 회사들이 할로이사이트의 방출제어

특성을 지니는 미세관의 복용상의 유효성에 대하여 조사하고 있다고 말하였다.

미세한 튜브를 함유하고 있는 할로이사이트를 섭취 가능한 제품으로 고려하고 있는 비타민 제조업자 역시 이 회사와 접촉하고 있다. 방향제로부터 가정용 건강보조제 등 다양한 제품을 'Dragon mine'에서 생산되는 할로이사이트를 통하여 캡슐화 시키는 기술이 많은 제조업자들로부터 관심의 대상이 되고 있다.

그렇지만, 할로이사이트를 수중에 얻는다는 것은 그리 간단한 일은 아니다. 할로이사이트 나노 튜브가 지구상에 상당량 존재하지만, 채광과 선별 공정 역시 개발되어야 한다 'NaturalNano' 과학자 및 엔지니어들은 할로이사이트 점토로부터 특정 타입의 할로이사이트 나노 튜브를 추출, 분리 및 분류할 수 있는 특허 기술을 개발하고 있다.

4) 사람의 오른손과 왼손은 서로 거울상이지만 포개질 수 없다. 이와 같은 물질의 성질을 손성(chirality)이라고 하며, 자신의 거울상과 포개어질 수 없는 분자를 키랄(chiral) 분자라고 한다. 생체 내에서 손성을 갖고 있는 화합물이 작용할 때, 두 개의 거울상이성질체 중 하나는 우리가 원하는 반응성을 보이지만, 다른 하나는 원하는 반응성이 없거나 혹은 부작용을 나타낼 수 있다.

나노기술의 연구 현황 및 문제점

미국 조지아 공대(Georgia Institute of Technology)의 연구원들은, 무기 나노 튜브의 잠재적인 나노기술의 응용에 대한 연구를 수행하고 있다. 그 중에는 비교적 쉽게 합성할 수 있으며, 탄소 나노 튜브와 차별화된 유용한 특성을 가지고 있는 이모골라이트(imogolite)가 포함되어 있다. 또한 나노 튜브의 성장기구(growth mechanism)를 철저히 파헤친 체계적인 연구가 거의 수행된 바 없기 때문에, 이러한 연구는 나노 물질의 형성 원리를 이해하는데 매우 가치가 높으며, 이를 통하여 얻은 지식은 새로운 기능성 물질의 합성에 사용될 수 있다.

탄소 나노 튜브 기술에 있어, 극복되어야 할 문제는 높은 수율을 갖는 저온 합성법의 개발, 나노튜브의 크기와 손성(chirality)⁴⁾에 대한 정밀한 조절, 화학조성의 한계에 대한 극복 그리고 3차원적으로 나노 크기인 탄소 나노 물질의 생산 등이다.

나노 연구가 현재의 추세대로 계속 진행된다면, 향후 수년 내에 나노 분야에서의 비금속 산업 광물의 수요가 폭발적으로 증가될 것이 분명하다. 그러나 이런 경우, 어떻게 수요과 공급을 맞출 수 있는가 하는 또 다른 문제가 야기될 것이다.

맺는 말

다각화된 산업발전에 따라, 산업광물은 전통적 용도는 물론 신기술 창조의 동반자적 역할을 하고 있다.

특히 나노기술과 산업기술의 접목은 기능성 재료의 개발은 물론, 새로운 시각에서 광물의 특성을 재조명할 수 있는 계기가 되었다. 따라서 향후 산업광물은 나노기술은 물론 다양한 기술과의 연계성에 초점을 맞추어 연구될 가치 있는 중요한 자원이자 대상임에 틀림없다.

참고 문헌

- Yamamoto, K. Otsuka, H., Wada, S., Sohn, D.W., Takahara, A., 2005, Preparation and properties of [poly(methyl methacrylate)/imogolite] hybrid via surface modification using phosphoric acid ester, *Polymer*, 46, pp. 12386-12392.
- Fu, Y. and Zhang, L., 2005, Rapid communication simultaneous deposition of Ni nanoparticles and wires on a tubular halloysite template: A novel metallized ceramic microstructure, *J. Solid State Chem.*, 178, pp. 3595-3600.
- Matthew Brace, 2006, Nanominerals aim big, *Industrial Minerals*, May, pp. 46-49.