

부품 폐기물입니다. 철(Fe)이나 코발트(Co), 니켈(Ni) 등으로 만들어지는 일반 자석과 달리, 작지만 매우 강한 자기장을 형성할 수 있는 특수 자석에는 반드시 희토류 원소가 들어갑니다. 때문에 폐기물에 자석을 대는 것만으로 남아있는 희토류 원소를 회수할 수 있습니다.

하드디스크나 집적회로 등의 다양한 전자 부품은 귀금속과 희토류의 집합체입니다. 특히 전자회로는 높은 전도율로 전기가 흘러야 하고 산소와 접촉해도 녹이 슬지 않아야 하기 때문에 보통 귀금속인 금으로 만듭니다. 현재 폐기되고 있는 전자제품의 양을 고려한다면 폐기물 속에 어마어마한 양의 금이 묻혀 있는 상황입니다.

뿐만 아니라 하드디스크 속 자석은 30%가량이 희토류 원소들로 이뤄져 있고, 자동차 전기모터의 영구자석에는 약 1 kg의 네오디뮴이 들어있습니다. 우리가 사용하는 스마트폰의 스크린, 전자부품, 배터리와 외형을 만드는 데에도 8가지 희토류와 3가지의 귀금속 등 총 25가지 이상의 원소가 사용됩니다.

이러한 희토류를 회수해 재사용하는 노력은 환경을 위해서도 중요합니다. 희토류 생산 방식은 엄청난 양의 독성 물질과 산성 오염 물질을 발생시킵니다. 주위 환경이 급속도로 오염되죠. 희토류 원소를 포함한 제품들이 지속적으로 폐기되는 현실을 생각하면, 단순히 고갈이나 수급 불안정의 이유가 아니더라도 안정적이고 친환경적인 희토류 생산법을 개발해낼 필요가 있습니다. 또한 일상에서 우리가 편하게 사용하는 제품들의 재료와 가치를 생각하며 소중하게 사용해야겠습니다.

Q

아이언맨처럼  
팔라듐으로 소형 원자로를  
만들 수 있나요?

22



장흥제 교수가 답하다

영화 ‘아이언맨(Iron Man)’에 등장하는 히어로 아이언맨은 ‘아크 리액터(Arc Reactor)’라 불리는 소형 에너지 발생장치를 가슴에 달고 엄청난 힘을 발휘합니다. 아크 리액터는 팔라듐(Pd)을 원료로 하는 소형 원자로라는 게 영화의 설정이죠. 과연 팔라듐으로 핵반응을 유도할 수 있을까요?

팔라듐은 원자번호 46번에 해당하는 전이금속 원소로, 10족 5주기에 자리잡고 있습니다. 구조로 보면 d오비탈에 배치된 전자가 핵심적 역할을 하는 원소입니다. 은백색의 광택을 띠며 안정성이 뛰어납니다.

팔라듐은 ‘백금족 원소’로 귀한 대접을 받습니다. 수많은 금속 원소들 중, 귀금속으로 분류되는 원소는 7족의 레늄(Re), 8족의 루테튬(Ru)과 오스뮴(Os), 9족의 로듐(Rh)과 이리듐(Ir), 10족의 팔라듐과 백금(Pt), 11족의 구리(Cu), 은(Ag), 금(Au), 12족의 수은(Hg) 등 총 11개입니다. 이 중 7, 8, 9족의 원소 6가지가 백금족 원소로 구분됩니다. 이들은 공통적으로 화학 반응이

좀 더 쉽게 일어날 수 있도록 도와주는 촉매로서의 기능이 뛰어납니다.

이 같은 이유로 팔라듐은 촉매, 축전지 등의 전자 부품, 장신구 등을 만드는 데 널리 활용되고 있습니다. 자동차 배기가스를 무해하게 변환시키는 3원 촉매 변환기의 핵심 원소 중 하나이고, 2010년에는 팔라듐을 촉매로 유기화합물을 쉽게 합성할 수 있는 ‘교차결합 반응’을 발견한 과학자들이 노벨화학상을 수상했습니다.

### 최고의 촉매, 하지만 핵반응에는 부적합

팔라듐은 이처럼 촉매로서의 기능성과 안정성이 뛰어나지만 이것만으로 팔라듐이 핵분열(Nuclear fission)이나 핵융합(Nuclear fusion) 반응에 적합한 대상이라고 판단하기에는 어려움이 있습니다. 영화 속 아크 리액터에서 ‘아크(Arc)’는 기체가 초고온 상태로 가열돼 임계점을 넘었을 때 양전하를 띤 이온과 전자로 분리돼 존재하는 플라즈마(Plasma)를 뜻합니다. 리액터는 핵분열 또는 핵융합이 일어나는 반응로를 의미한다고 생각할 수 있습니다. 즉 영화 속 아크 리액터를 현실로 만들려면 초고온의 핵반응이 일어나는 소형 원자로를 사람 가슴 중앙에 박아 넣을 수 있을 정도의 작은 크기로, 게다가 안전하게 만들어야 합니다. 사실상 불가능합니다.

아크 리액터의 크기나 안전 문제를 차치하고서도 이는 쉬운 일이 아닙니다. 가장 큰 이유는 팔라듐이 방사성 붕괴를 하지 않는 안정한 원소이기 때문입니다. 핵분열 반응으로 에너지를 내기 위해서는 우선 자연적으로 어느 정도 핵분열이 가능한, 쉽게 말해 핵분열 반응을 선호하는 원소를 핵연료로 사용해야 합니다. 대표적인 핵연료가 우라늄-233(<sup>233</sup>U), 우라늄-235(<sup>235</sup>U), 플루토늄-239(<sup>239</sup>Pu) 등입니다. 이들에 중성자가 충돌하게 되



**팔라듐(Pd)**

주기율표 10족에 속하는 ‘백금족’ 원소. 은백색 광택이 있는 무른 금속으로, 백금과 화학적 성질이 유사해 촉매로 활용된다. 6개의 안정한 동위원소가 존재한다. ‘아이언맨’은 팔라듐을 재료로 사용하는 소형 원자로를 가슴에 달아 에너지를 얻지만, 실제로는 팔라듐이 핵반응을 일으키기에는 안정한 원소여서 한계가 있다.

면 핵연료는 에너지를 방출하며 분열합니다. 정확히는 두 개의 분열된 원소와 세 개의 중성자를 생성합니다. 이때 생성된 중성자는 또 다른 핵연료에 충돌하고, 이렇게 연쇄적으로 핵분열 반응이 계속됩니다. 핵분열 반응을 조절할 수 있도록 설계한 경우 원자력 발전을 위한 원자로가 되는 것이고, 그렇지 않으면 핵무기로 작동하는 거죠.

하지만 팔라듐은 6가지 동위원소(<sup>102</sup>Pd, <sup>104</sup>Pd, <sup>105</sup>Pd, <sup>106</sup>Pd, <sup>108</sup>Pd, <sup>110</sup>Pd)가 모두 매우 안정한 원소들입니다. 플루토늄-238(<sup>238</sup>Pu), 스트론튬-90(<sup>90</sup>Sr), 프로메튬-147(<sup>147</sup>Pm)과 같은 방사성 원소들이 자발적으로 붕괴해 소량의 핵에너지를 발생시키는 원자력 전지 같은 것을 팔라듐으로는 만들기가 어렵습니다. 원자력 전지에 팔라듐과 같은 족 원소인 니켈-63(<sup>63</sup>Ni)을 사용하는 것처럼(니켈-63처럼 합성된 인공 동위원소는 방사성 붕괴가 가능하기 때문입니다), 지구상에 극소량 존재하며 베타붕괴를 하는 팔라듐의 방사성 동위원소인 팔라듐-103(<sup>103</sup>Pd)을 넣을 수는 있지만 극도로 비효율적입니다.

**상온 핵융합 기술이 가능해진다면?**

팔라듐으로 핵융합을 일으킬 순 없을까요? 핵융합은 현재 지속적으로 연구가 이뤄지고 있는 차세대 분야입니다. 유출 시 어마어마한 재난을 유발할 수 있는 핵분열 발전과 달리, 환경을 위해할 만한 요소가 적어 많은 관심을 받고 있습니다. 핵융합의 기본 원리는 두 원자가 충돌해 합쳐지는 과정에서 발생하는 질량 손실로 에너지를 발생시키는 것입니다. 태양이 빛과 열을 내는 과정이 수소의 핵융합이라는 사실을 생각해 볼 때, 만약 지구에서 핵융합을 실현하기만 한다면 태양에너지와 같은 엄청난 에너지를 확보할 수 있다는 장점이 있습니다.

문제는 이런 수소 핵융합 반응이 태양과 같은 매우 높은 온도와 압력 조건에서만 일어난다는 점입니다. 지구상에 상온 상압으로 존재하는 수소들이 서로 부딪히며 핵융합 반응을 일으킬 리는 만무하죠. 팔라듐을 원료로 한 아크 리액터가 실현되기 위해서는 실내온도(상온)에서 핵융합 발전을 일으키는 ‘상온 핵융합(Cold fusion)’ 기술이 뒷받침돼야 합니다.

상온 핵융합이 가능할까요? 여기에 대한 생각은 과학자들마다 다르지만 상온 핵융합 연구는 전 세계적으로 꾸준히 진행되고 있습니다. 1989년에는 미국 유타대 연구팀이 팔라듐을 이용해 상온 핵융합 실험에 성공했다는 사실을 전 세계 언론에 발표했습니다. 연구팀은 중수(D<sub>2</sub>O)에 팔라듐으로 구성된 전극을 넣고 전류를 흘려보내 전기분해로 중수소(<sup>2</sup>H) 분자를 발생시키는 실험에서 상온 핵융합 반응이 일어나 며칠 동안 용액의 온도가 상승한 채로 유지됐다고 주장했습니다. 하지만 다른 연구자들이 실험을 재현했을 때 같은 결과가 나오지 않아 해프닝으로 끝났죠.

그해 북한 김일성종합대에서도 백금과 팔라듐 전극으로 중수를 전기분해 해서 상온 핵융합에 성공했다고 보도했으나 역시 검증에 실패했습니다. 이후로도 상온 핵융합에 대한 여러 시도가 이어졌지만 수소와 헬륨 같은 가벼운 원소를 융합하려는 연구가 주를 이루었습니다.

결론적으로 팔라듐을 사용해 소형 원자로를 구현하는 것은 현재 기술로는 불가능합니다. 아주 소량 존재하는 방사성 팔라듐(<sup>105</sup>Pd)을 통해 에너지를 얻을 수는 있으나, 원자로를 제작하고 발전시키는 목적이 적은 비용으로 많은 에너지를 얻기 위함임을 고려할 때, 현실적으로 의미가 없습니다. 이쯤되면 아이언맨 시나리오를 쓴 작가에게 물어보고 싶어집니다. 왜 팔라듐인지, 왜 하필 핵반응과 관계없는 화학 분야 최고의 촉매 원소를 골랐는지 말입니다.

Q

수소와 산소로  
물을 만들어  
쓸 수 있을까요?

23