



2015년 1월 15일  
 독립행정법인 일본원자력연구개발기구  
 TANAKA 홀딩스 주식회사

## 핵융합로에서 트리튬을 효율적으로 회수하기 위한 새로운 촉매 개발에 성공 ~세계 최고 효율을 달성, 핵융합로의 기술적 과제 해결에 밝은 전망~

### 【발표 포인트】

- 핵융합로의 연료로서 필요한 트리튬을 회수하는 새로운 촉매 제작법을 확립.
- 촉매 부피당 종전 최고 성능 제품의 약 1.3 배에 상당하는 세계 최고의 트리튬 교환 효율을 실현.
- 핵융합로의 기술적 과제로 여겨졌던 트리튬 회수 시스템의 신뢰성 향상과 고효율화의 기술적 장벽을 뛰어넘을 것이라는 전망.

독립행정법인 일본원자력연구개발기구(본부: 이바라키현 나카군, 이사장: 마쓰우라 쇼지로, 이하, 원자력기구), TANAKA 귀금속공업주식회사<sup>[1]</sup>(본사: 도쿄도 치요다구, 대표이사 사장: 타나에 아키라), 이하 TANAKA 귀금속공업)는 핵융합로의 실현을 위해 트리튬<sup>[2]</sup>을 회수하기 위한 새로운 소수성<sup>[3]</sup> 백금 촉매의 개발에 성공했습니다.

핵융합로에서는 트리튬을 중수소와 함께 연료로 사용합니다. 트리튬은 희소한 물질이며, 핵융합로 내에서는 촉매 반응을 이용해서 트리튬수로서 농축하고, 최종적으로 트리튬 가스의 형태로 회수하는 시스템이 필요<sup>[4]</sup>합니다.

트리튬 회수에 사용하는 촉매는 백금 등의 귀금속을 베이스로 한 '소수성 귀금속 촉매'라고 불리는데, 일본에서는 고분자로부터 만들어진 소수성 귀금속 촉매가 신형 전환로 후겐<sup>[5]</sup>의 중수 정제<sup>[6]</sup>에 사용된 실적이 있습니다. 그렇지만, 이 촉매는 방사선에 대한 취화(脆化)나 내열성에 관한 과제가 있어 고농도의 트리튬수로부터의 회수가 필요한 핵융합로에 적용하기 위해서는 기술적인 과제를 해결할 필요가 있었습니다.

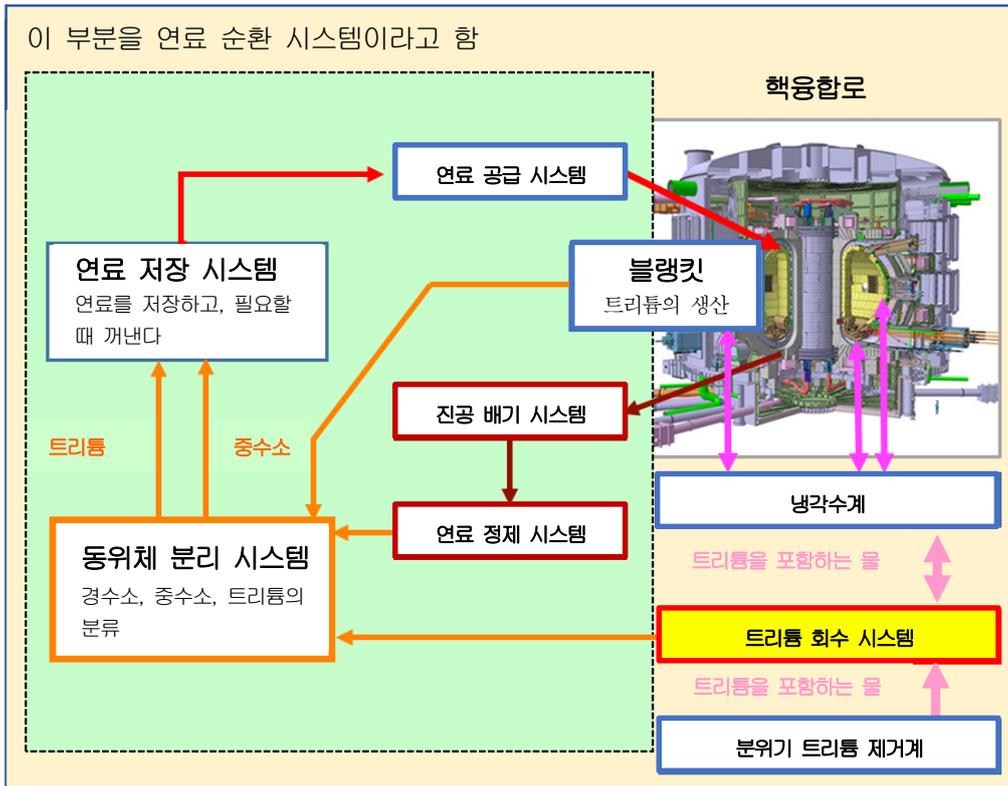
이를 위해 원자력기구와 TANAKA 귀금속공업에서는 무기 물질을 베이스로 소수화 처리를 하는 새로운 촉매 제작법을 개발했습니다. 그 결과, 내방사선성의 표준이 되는 530kGy의 방사선 조사에 대해 성능 열화가 없고, 또한 통상 사용되는 온도인 70℃를 크게 웃도는 600℃ 이상의 내열성 확보에도 성공하여 지금까지의 기술적 과제를 해결했습니다. 또한, 이 방법으로 제작한 촉매는 종전의 약 1.3 배에 상당하는 세계 최고의 교환 효율을 달성한다는 것도 확인했습니다.

이에 따라 본 촉매를 액상 화학 교환 프로세스<sup>[7]</sup>에 적용시킴으로써 트리튬수로부터의 트리튬 회수 시스템의 신뢰성 향상과 고효율화에 관해 큰 기술적 장벽을 넘을 수 있다는 전망을 얻을 수 있었습니다.

나아가, 본 촉매에 적용하고 있는 소수성 백금 촉매의 제작 기술은 핵융합 연구뿐만 아니라 폭넓은 분야에의 응용도 기대할 수 있고, 수소 산화 촉매<sup>[8]</sup>에 적용한 경우에는 상온에서도 수소의 효율적 산화가 가능하다는 것을 실증했습니다. 또한, 본 촉매는 상기 취약성을 해결함으로써 원자력 분야 이외의 일반 수소 취급 플랜트의 안전성 향상에도 기여할 수 있습니다.

**【연구개발의 배경과 목적】**

핵융합의 실현을 위한 연구개발로서 핵융합로에서 발생할 수 있는 1kg 당 수백억에서 수천억 벵크렐의 트리튬수의 감용·농축 기술의 개발은 중요한 과제입니다. 수소의 동위체인 방사성 트리튬을 연료로 해서 대량으로 사용하는 핵융합 플랜트에서는 로내에서 리튬과 중성자의 반응을 이용해서 트리튬이 생산됩니다. 그 트리튬의 일부는 고온의 금속을 통해 냉각수에 혼입되어 트리튬수가 됩니다. 또한 환경으로의 트리튬 방출을 억제하기 위해 로내 기기를 유지 보수하는 시설 내의 분위기 속의 트리튬은 산화반응기에서 산화 처리해서 트리튬수로 만든 후 수분 흡착제 등으로 회수, 제거하는 분위기 트리튬 제거계를 설치합니다. 귀중한 자원인 트리튬을 연료로 해서 재순환시키기 위해 핵융합 플랜트에서는 회수한 트리튬수를 농축하고, 가스 형태로 재변환하는 트리튬 회수 시스템을 설치합니다.



구체적으로는 회수한 트리튬수는 경수소(통상의 수소 가스)와 수증기-수소 간의 수소 동위체의 교환을 가능하게 하는 촉매 속에서 접촉시켜 감용·농축합니다. 일반적인 촉매에서는 수증기 분위기 속에서는 촉매 성능이 사라지기 때문에 촉매에는 고농도의 수증기 분위기에서도 촉매의 활성을 유지하기 위해 고도의 소수성이 필요합니다. 트리튬수로부터의 트리튬 회수 시스템은 그 기술적 난이도 때문에 소수성 촉매의 개발이 큰 기술적 장벽이 되고 있었습니다.

**【연구 방법】**

트리튬수의 농축·감용 용도에 사용할 수 있는 소수성 귀금속 촉매는 소수성 고분자로 제작된 것이 과거에 몇 가지 개발된 실적이 있으며, 일본에서는 신형 전환로 후겐의 중수 정제에 사용한 실적이 있습니다. 그렇지만, 고분자로 제작된 촉매는 방사선 영향이나 내열성의 기술적 관점에서 핵융합에의 적용에 대한 문제점이 표면화되어 있었습니다. 또한, 제조 비용이 비싸다는 문제도 표면화되어 있었습니다. 본 연구에서는 새로운 발상으로서 무기 재료를 소수화시킨 후 촉매화하는 기술을 적용하고 있습니다. 촉매 제조 공정에서는 무기 재료를 소수화시키는 방법 외에 촉매가 되는 백금의 담지량<sup>[9]</sup>, 무기 재료의 표면 상태나 세공 직경<sup>[10]</sup> 등 다양한 파라미터가 존재하고 있으며, 그들의 촉매 성능에 미치는 영향에 대해 트리튬과 수증기 간에 수소 동위체를 교환하는 효율을 실험으로 평가하고, 제조 파라미터의 최적화를 실시해서 고성능의 촉매 개발에 성공하기에 이르렀습니다.

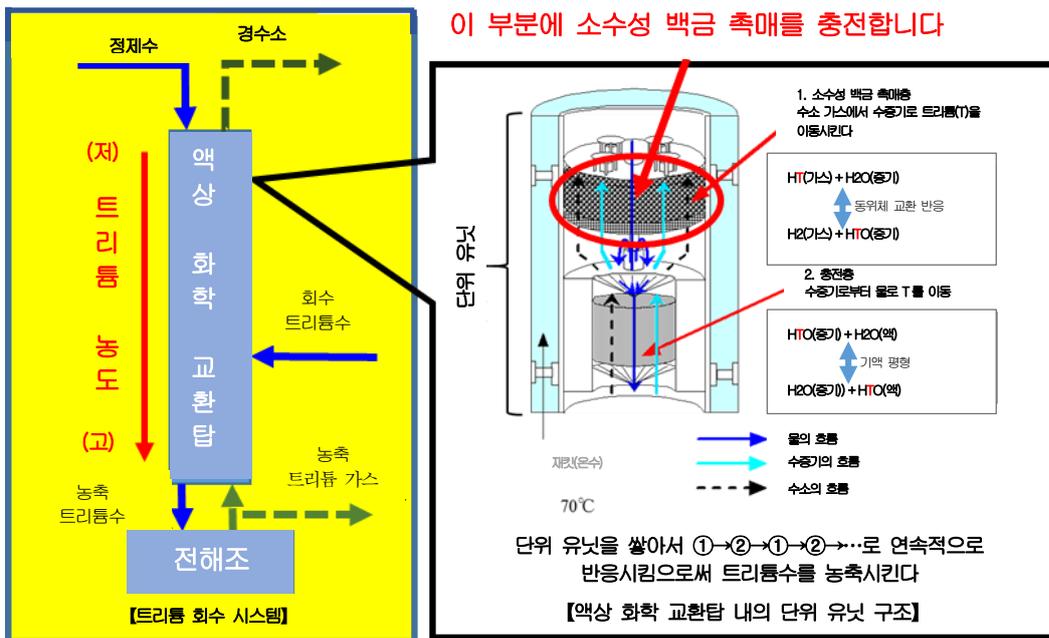
**【얻어진 성과】**

일반적으로 방사선에 비해 약한 고분자로 제작되던 신형 전환로 후겐의 중수 정제에 사용한 실적을 가진 종전 제품에 비해 본 제품은 2 년의 기간 동안 1kg 당 9 조 베크렐의 트리튬을 포함한 물을 연속 처리한 경우의 선량에 상당하는 530kGy 의 방사선 조사에 대해서도 성능에 대한 영향이 없습니다. 또한, 일반적으로 내열성이 약하고, 조건에 따라서는 불에 타서 부서질 가능성이 지적되던 고분자를 사용하던 종전 제품에 비해 본 제품은 통상 사용 온도인 70℃를 크게 웃도는 600℃ 이상의 내열성을 확인하였습니다. 이렇게 트리튬 안전을 담당하는 시스템에의 적용에 있어서 우려되던 각종 문제를 본 제품은 해결하였습니다. 또한, 트리튬과 수증기 간에 수소 동위체를 교환하는 효율이 촉매 부피당 종전 제품의 약 1.3 배(세계 최고)인 것을 보여주고 있습니다. 이것은 같은 성능을 얻는 데 촉매량이 종전 제품의 3/4 이면 된다는 것을 의미합니다. 본 촉매를 액상 화학 교환 프로세스에 적용시킴으로써 트리튬수 중의 트리튬 농도를 높일 수가 있어 효율적인 트리튬수로부터의 트리튬 회수가 가능합니다. 또한, 본 촉매를 필요로 하는 트리튬수로부터의 트리튬 회수에 대해 비용적으로도 유리합니다. 트리튬수로부터의 트리튬 회수 시스템은 본 촉매의 개발에 의해 실증을 위한 큰 기술적 장벽을 넘을 것이라는 전망을 얻었습니다. 본 촉매 기술에 대해서는 원자력기구와 TANAKA 귀금속공업주식회사에서 특허를 공동 출원한 상태입니다.



개발한 입상 소수성 백금 촉매(입자 직경 3mm)

이것은 같은 성능을 얻는 데 촉매량이 종전 제품의 3/4 이면 된다는 것을 의미합니다. 본 촉매를 액상 화학 교환 프로세스에 적용시킴으로써 트리튬수 중의 트리튬 농도를 높일 수가 있어 효율적인 트리튬수로부터의 트리튬 회수가 가능합니다. 또한, 본 촉매를 필요로 하는 트리튬수로부터의 트리튬 회수에 대해 비용적으로도 유리합니다. 트리튬수로부터의 트리튬 회수 시스템은 본 촉매의 개발에 의해 실증을 위한 큰 기술적 장벽을 넘을 것이라는 전망을 얻었습니다. 본 촉매 기술에 대해서는 원자력기구와 TANAKA 귀금속공업주식회사에서 특허를 공동 출원한 상태입니다.



**【향후 예정】**

본 촉매는 새로운 방법으로 제작되고 있기 때문에 실용화를 위해서는 동일 조건으로 장기간 반복했을 때 성능 저하가 나타나지 않는 것을 확인하는 장기 성능 안정성 등의 착실한 확인 시험의 진전이 현재의 과제라고 여기고 있습니다. 본 촉매에 적용하고 있는 소수성 백금 촉매의 제작 기술은 폭넓은 응용을 기대할 수 있습니다. 그 한 예로서 수소 산화 촉매에 적용한 경우 종전 제품은 촉매를 가열하지 않으면 수소 산화를 할 수 없었던 것에 비해, 본 제품은 상온에서도 폭넓은 농도로 수소의 효율적 산화가 가능하다는 것을 실증하였습니다. 이 성능은 대량의 수소를 취급하는 수소 사회의 도래를 앞두고 있는 지금, 사고 시나 전력 상실 시 수소 폭발을 방지하는 재결합기 용도에 유망하다고 생각합니다. 이처럼 본 촉매는 상기 취약성을 해결함으로써 핵융합로 전체의 안전성을 크게 높일 것으로 기대됨과 동시에 원자력 분야 이외의 일반 수소 취급 플랜트의 안전성 향상에도 기여할 수 있다고 생각하고 있습니다.

## 용어 설명

- [1] TANAKA귀금속공업주식회사…TANAKA홀딩스주식회사를 지주회사로 하는 TANAKA귀금속 그룹에서 제조 사업을 전개하는 그룹의 핵심 기업.
- [2] 트리튬…수소 방사성 동위체. 삼중수소.
- [3] 소수성…물에 대한 친화성이 낮고, 물에 잘 용해되지 않는 성질.
- [4] 트리튬 회수 시스템의 필요성…핵융합로의 로심에서 생성된 불순물을 미연소 연료와 함께 배기하고, 이것을 처리해서 연료 성분을 재이용하기 위해 추출해서 다시 로심의 플라즈마로 공급하는 시스템을 연료 순환 시스템이라고 부릅니다. 연료 순환 시스템은 1) 로심으로부터 플라즈마 배기가스를 배출하는 진공 배기 시스템, 2) 플라즈마 배기가스로부터 수소 동위체 성분을 분리, 회수하는 연료 정제 시스템, 3) 수소를 동위체별로 분리함으로써 연료 성분을 분리 회수하는 동위체 분리 시스템, 4) 연료 성분을 저장하는 연료 저장 시스템, 5) 로심의 플라즈마에 연료를 공급하는 연료 공급 시스템으로 크게 나뉩니다. 또한, 핵융합에서는 연료로 소비한 양의 트리튬은 로내의 불랭킷으로 생산, 증식함으로써 보충합니다. 그때 장기운전에 기인해서 트리튬이 금속을 통해 냉각수에 혼입되기 때문에 대형의 트리튬수로부터의 트리튬 회수 시스템이 필요합니다. 따라서 이 트리튬수로부터의 트리튬 회수 시스템의 고농도 대응 및 소형 효율화를 위한 촉매 개발이 과제였습니다.
- [5] 신형 전환로 후겐…열중성자로 세계 최대인 MOX(혼합산화물) 연료 집합체의 이용을 통해서 일본의 플루토늄 리사이클 기술을 확립. 현재는 폐지 조치중.
- [6] 중수 정제…경수가 혼입되어 농도가 저하된 열화 중수를 원자로의 감속재로 사용할 수 있는 농도의 원자로급 중수로 재농축하는 것입니다.
- [7] 액상 화학 교환 프로세스…리튬수로부터의 트리튬 회수 시스템은 수소에서 수증기를 통해 물로 트리튬을 이행시킴으로써 트리튬수를 농축하는 액상 화학 교환탑과 농축한 트리튬수를 전기분해해서 농축 트리튬 가스로 만드는 전해조로 구성됩니다. 액상 화학 교환탑 내에는 반응부와 흡수부(충전층)가 세트로 된 유닛을 탑 내에 쌓고, 반응부에서는 트리튬을 수소에서 수증기로 이행시키고, 흡수부에서는 트리튬을 수증기에서 물로 이행시킵니다. 이 반응을 연속시킴으로써 탑 하부를 향해 서서히 트리튬수를 농축시킵니다. 이번에 개발한 촉매는 본 프로세스의 촉매부에 사용합니다. 촉매 프로세스를 장기간에 걸쳐 실시하기 위해서는 촉매의 높은 안정성이 필요합니다. 이번에 개발한 촉매는 트리튬을 취급하는 설비가 가져야 할 난연성의 확보와 트리튬수의 고농축 시 문제가 되는 내방사선성의 향상에 맞추어 높은 반응률을 실현하고 있으며, 트리튬의 농도에 관계없이 트리튬수의 농도를 높일 수가 있습니다.
- [8] 수소 산화 촉매…소수 성능을 부여한 촉매는 수증기에 의한 반응 억제 효과를 받지 않고 상온 부근 온도에서 사용할 때도 수소의 효율적인 산화가 가능합니다. 산화 효율이 나쁜 극저농도 수소에서도 상온 산화가 가능합니다.
- [9] 백금의 담지량…촉매는 많은 백금의 미세한 입자가 무기 재료의 표면에 분산되어 있습니다. 표면에 얹는 백금의 양이 담지량입니다. 무기 재료의 용적당 백금의 무게로 나타냅니다.
- [10] 세공 직경…촉매인 무기 재료에는 다수의 작은 구멍이 뚫려 있습니다. 그 구멍의 평균 직경을 가리킵니다. 다수의 구멍이 뚫려 있어서 용적당 백금을 담지할 수 있는 표면적을 늘릴 수가 있습니다.