방사성동위원소의 붕괴 속도 가속으로 원전 수거물 처리*

원전 수거물 처리는 원자력발전소를 대중이 수용하는 데 있어서 오랫동안 가장 큰 걸림돌이 되어 왔다. 방사성 폐기물을 장기간 보관해도 안전성에 아무런 문제가 없다는 것을 대중에게 확신시키는 것은 매우 어렵다. 핵변환이 이 문제에 대한 한 가지 해결책이 될 수 있을 것이다.

원전 수거물의 처리는 정계·과학계 그리고 엔지니어링 분야에서 계속해서 논란의 대상이 되어 왔다. 실현 가능한 해결책이 몹시 필요한 현실에도 불구하고 객관적으로 볼 때 아직 널리 인정된 답이 없는 것 같다

다른 비재래식 접근 방식에 의한 해결책이나 탐구가 필요한 것 같다. 다행스럽게도 이들 비재래식 접근 방식 중 한 가지 방법이 실험에서 성공적으로 실용 가능성이 입증되어 장래 원전 수거물 처리에 밝은 전망을 주고 있다.

이 방법은 「모스바우어 효과(Mossbauer Effect)」를 사용하는데, 이 효과는 지금까지는 대부분의 핵물리학자들에게 극히 제한적인 관심의 대상이 되고 있는 과학 이론이다.

모스바우어 효과의 기본 특성은 광자(photon)가 원자핵과 충돌시 발생하는 효과를 기술하는 데 있다. 이 방법은 화학자들이 가변 에너지원의 광자와 물질의 반응으로부터 원자와 분자들의 화학적 특성을 찾아내는 데 널리 사용하는 분광기와 유사하게 보이나, 이들은 광자와 원자핵의 반응에 있어서 상당한 차이가 있다.

모스바우어 효과는 Co-57에서 방출된 광자를 안정된 상태에 있는 Fe-57에 충돌시키는 실험에서 가장 잘 볼 수 있다.

Co-57은 270일의 반감기를 가지고 있는데, 붕괴하면서 14.4kev 광자를 발생한다. 방출된 광자는 10^{-5}ev나 되는 큰 밴드폭(band bandwidth)과 10^{10}에 달하는 엄청난 Q(방출 에너지/밴드폭)값을 가진다.

광자를 포획하여 여기 상태가 된 Fe-57은 반감기가 약 10^{-3}초로 잠시 동안 방사능 상태에 있다가 기저 상태로 떨어진다. Fe-57의 포획 단면적은 100만 반(barn) 이상이나 되는데 이것은 매우 큰 중성자 포획 단면적을 가지는 소수의 다른 원자핵을 제외하고는 가장 큰 단면적이다 (1 barn = $10^{-28}m^2$).

이러한 Fe-57의 포획 단면적은 특이한 특성을 가지고 있다. 만일 Co-57 선원이 방만한 화학적 구조로 얽매어 있으면 도플러 반동으로 광자 에너지가 14.4kev 이하로 낮아져서 Fe-57 site에서 포획이 일어나지 않는다.

도플러 영향을 받지 아니하고 자유스럽게 공명 포획이 일어나기 위해서는 광자를 방출하는 Co-57이

---

* 〈Nuclear Engineering International〉 2003년 11월호(Vol.48, No.592) P.18
번역 : 서중석 한국원자력산업회의 사무총장(jssuh@kaif.or.kr)

나 받아들이는 Fe-57이 모두 단단하게 결합이 되어야 한다.

모스바우어 효과의 두 번째 특성은 Co-57이 Fe-57의 화학적 배열과 다른 안정된 화학적 배열을 가진 상태에 있으면, 공명 포획 후 광자가 방출되는 현상이 발생하지 않는다는 것이다.

이러한 현상은 광자를 받아들이는 Fe-57 화합물이 약 1mm/s 속도로 이동을 하여 Co-57과 Fe-57이 모두 동일한 유효 공명 주파수를 갖도록 도플러 shift를 제어함으로서 발생시킬 수 있다. 우리는 화학적 결합이 핵에 미치는 영향에 관한 정보를 이 시험으로부터 얻을 수 있다

마지막 특성은 14.4kev의 핵선원을 대체할 공학적 선원이 없다는 것이다. 아직까지는 10^{-5}ev의 밴드폭을 가진 단색 X-ray를 인공적으로 제조할 수 없다

원전 수거물 처리에 응용 가능성

이 개념을 어떻게 방사성 폐기물 제어에 적용할 수 있을까? 지금까지 모스바우어는 단지 안정된 핵에만 적용되어 왔다. 방사능 물질에서도 백만 barn 이상이나 되는 포획 단면적의 이점을 실현하는 것이 가능한지?

첫째, 변환 대상인 방사성 핵의 공명 에너지 준위를 알아야 한다. 만일 방사성 핵의 특성이 분자 경우와 비슷하면 방사능 붕괴에 존재하는 붕괴 패턴 보다 더 많은 공명 준위가 존재한다.

만일 방사성 핵이 정수배의 공명 에너지를 가진 광자와 반응하면 핵자(nucleon)들의 구성이 조정되고 이로 인해 원래 반감기와 다른 방사성 붕괴 패턴으로 바뀔 것인가?

여기된 원자 에너지 상태는 공명 광자에 의하여 자극되면 붕괴 시간이 10^{-3}초에서 10^{-12}초로 짧아질 수 있다. 이러한 기법을 이용할 수 있도록 어떻게 적절한 에너지 준위를 설정할 수 있을 것인가?

어떻게 10^{10}Q와 10^{-5}ev 밴드폭, 그리고 핵붕괴 변경을 초래하는 정확한 준위의 에너지를 가진 광자를 발생하는 것이 가능한가?

보통의 시스템에서 발생된 X-ray는 10^{-5}ev 광자를 포함하고 있지만 그 수가 극히 적기 때문에 핵반응을 일으키는 X-ray 선원을 얻었다고 하더라도 많은 반응이 일어나기 위해서는 충분한 시간이 필요하다.

이들 실험에서는 싱크로트론과 같이 1~60kev 광자를 발생하는 광대역 X-ray 선원이 사용되었으며, 이 스펙트럼대에 있는 각 이산 원소(discrete element)가 모스바우어 특성을 가진 광자, 다시 말해서 밴드폭이 10^{-5}ev인 광자인 것으로 추정을 하였다. 이들 광자는 특정의 방사성 핵들에 대하여 공명 광자를 생산할 수 있다

그리고 10^{-5}ev 공명 광자 flux가 아주 낮기 때문에 시험하는 방사성 핵종의 농도 변화를 측정하기 위해서는 조사 시간을 충분히 길게 하여야 한다.

실험실 시험은 매우 간단하다. 방사성 샘플을 싱크로트론으로부터의 광대역 에너지 X-ray 스펙트럼으로 조사를 한 후, 빔(beam)이 샘플의 방사능에 미친 영향을 측정하며 조사 시간이 충분히 경과한 후에 여러 제어(control) 결과들을 비교한다

싱크로트론을 조작하는 사람이 방사능 피폭 사고를 당하지 않도록 안전한 방사성 샘플을 사용해야 한다. 보통 의료 조사(irradiation)에서 사용되는 I-125가 보건 물리 측면에서 이 실험에 적절한 샘플이 될 수 있다.

처음 실험에서 샘플이 주빔(main beam)의 조사를 수 주간 받은 후에 방사능이 12.4% 감소하였다. 빔피크(beam peak)에서 벗어난 샘플은 2.0% 감소하였다. 제어(control)를 하면서 측정한 결과 방사능이 I-125의 정상 방사능치의 0.5% 이내임을 보여 주었다.

주빔의 반복 실험에서 샘플의 방사능이 13.% 감소되는 것으로 나타났다. 빔 주변의 타샘플들에서는 6.8%, 3.9%, 3.4% 감소가 있었는

데 여기서 제어(control)는 0.4% 또는 그 이하로 조정되었다.

실험에 있어서 wipe test, 온도 측정을 하고 광자 이외의 입자가 핵과 반응하는 일이 없도록 예방 조치를 하였다.

싱크로트론으로부터의 X-ray와의 반응은 방사성 핵의 여기 준위를 공명 에너지 만큼 높임으로써 핵 특성을 변화시키는데, 이로 인하여 핵의 방사능이 감소되는 것으로 추정된다.

다시 말하면 핵이 공명 에너지를 흡수하면 광자 방출이 촉진되고 이로 인하여 방사성 핵의 에너지 준위가 낮아진다

다음 단계 실험들

위에서 기술한 변화들은 실험실이 수용할 수 있는 안전한 방사성 물질을 가지고 시험한 결과들이다. 다음 단계는 원자력 산업계에서 관심의 대상이 되는 방사성 핵들에 대한 R&D이다.

광대역 에너지 싱크로트론이 필수품은 아니다. 65kv 치과용 X-ray 시스템으로도 시험을 할 수 있다. X-ray 조사 시간은 빔속(beam current)에 크게 좌우된다.

65kv 광자가 어떤 특정의 방사성 샘플의 반감기 감소에 미치는 효과를 확인하기 위해서는 수 주의 조사가 필요할 수도 있다.

원전 수거물 처리는 원자력발전소를 대중이 수용하는 데 있어서 오랫동안 가장 큰 걸림돌이 되어 왔다. 방사성 폐기물을 장기간 보관해도 안전성에 아무런 문제가 없다는 것을 대중에게 확신시키는 것은 매우 어렵다. 핵변환이 이 문제에 대한 한 가지 해결책이 될 수 있을 것이다.

치과용 65kv X-ray 시스템을 갖추기 위해서는 2만 불 이상이 소요되지만 중고 장비를 구입하거나 임차하여 사용할 수도 있다. 초기에 가장 간단하게 해 볼 수 있는 실험은 X-ray 시스템을 방사성 폐기물 처리에서 관심의 대상이 되는 여러 가지 방사성 핵종의 샘플로 둘러싸는 것이다.

조사 시간은 X-ray flux 강도에 좌우되지만 방사성 샘플의 변화를 측정하는 데는 수 주의 조사가 필요할 수도 있다.

방사성 핵종의 공명 흡수에 필요한 X-ray increment를 65kv에서 정확하게 발생시키는 것은 어렵다. 보다 큰 신축성을 가진 X-ray 선원으로서 500kv, 1kw 장비가 대안이 될 수 있다.

역시 여기서도 X-ray 장비를 방사능 물질로 둘러싸고 조사한 후 격리된 샘플과 비교한다. 이 장비의 구입가는 약 5만 불 정도이다

이 방법의 흥미 있는 특성은 이러한 광대역 에너지 시스템은 조사 과정에서 새로운 방사성 핵을 생성하지 않으면서 여러 가지 형태의 방사성 물질의 반감기를 동시에 감소시킨다는 것이다. 이러한 특성은 앞으로 실험에서 확인이 필요하다

어느 주어진 핵의 반감기 감소에 관련된 공명 에너지를 내포하고 있는 최적의 X-ray 에너지 밴드가 결정되면 X-ray의 범위, flux 및 차폐 등에 있어서 특별한 사양을 갖춘 X-ray 발생 장치를 제작하여 사용함으로써 원전 수거물의 핵변환을 가속시킬 수 있을 것이다.