

加壓輕水爐에서 트랩프우라늄의 重要性

世界各國의 電力會社들은 누설이 없는 완벽한 核燃料性能을 추구하고 있다. 따라서 트랩프(Tramp) 우라늄은 가압경수로(PWR)에서 생성되는 핵분열생성물의 방사능에서 중요한 소스텀(Source Term)이 되고 있으며, 이에 대한 지식과 量을 파악하는 것이 중대한 문제로 대두되고 있다. 다음은 Nuclear Engineering International誌 90年 11月號에 발표된 트랩프 우라늄에 대한 정의와 핵연료성능에 관한 내용이다.

가압경수로(PWR) 원자로냉각재계에 함유된 핵분열생성물의 방사능은 작업자의 방사선피폭문제와 운전 및 보수유지 비용의 증가를 유발할 수 있다. 발전소 기술사양은 원자로냉각재계통 比放射能을 $1-131$ 선량당량으로 $1.0\mu\text{Ci/g}$ 을 한정하고 있으며, 또한 규제측면에서도 문제로 대두될 수 있다.

원자로냉각재계에 함유되는 핵분열생성물 방사능의 중요한 원인은 일반적으로 「Leakers」라고 일컬어지는 핵연료핀 피폭관의 균열에서 기인한다. 핵분열생성물이 핵연료핀에서 피폭관의 균열된 틈사이로 원자로냉각재계통내로 새어 들어가 원자로냉각재계통의 비방사능을 증가시킨다.

화학체적제어계통(CVCS)은 핵연료가 1% 손상될때까지 원자로냉각재계통의 비방사능을 그 제한치 이내로 억제할 수 있도록 설계되어 있다. 그러나 여러가지 이유로 인해서 이 제한치 수준으로 발전소를 운영하는 것은 바람직스럽지 못하다. 거의 모든 전력회사들은 핵연료

성능에 대해서 「No Leaker」철학에 따라 그 이행을 적극적으로 추구하고 있으며, 손상된 핵연료핀이 하나라도 검출되면 즉시 그 핵연료집합체를 원자로노심에서 제거시키고 있다.

트랩프(Tramp) 우라늄이란 무엇인가?

처음에 트랩프 우라늄은 핵연료 성형가공과정에서 핵연료피복관 외부표면에 부착된 산화우라늄분말의 코인형태로 존재한다. 따라서 핵연료집합체가 원자로내에 장전되면 이 트랩프 우라늄은 핵분열하게 되며, 그 결과 핵분열생성물이 즉시 원자로냉각재계통으로 유입되게 된다. 이때 전형적인 핵분열생성물 이외에 상당한 양의 Np-239 도 원자로냉각재계통에 유입되게 된다.

그러나 핵연료집합체 제작업체들이 철저하게 깨끗한 핵연료요소 생산에 지대한 노력을 기울이고 있으며, 또한 Np-239 은 어떤 특정한 환경의 원자로냉각재계통에서만 관측되기 때문에

이 트랩프 우라늄 소스는 일반적으로 무시되고 있다.

그러나 원자력산업계는 결합 핵연료에서 씻겨나와 핵연료피복관 외부표면과 기타 원자로 표면에 부착된 (Plated-out) 핵분열성 동위원소인 트랩프 우라늄의 두번째 소스를 인식하였다. 이 핵분열성 동위원소는 핵분열하여 곧바로 원자로냉각재계통에 유입될 것이다. 이 경우 트랩프 우라늄이란 용어는 잘못된 명칭이 된다. 이 핵분열성 물질에는 우라늄 뿐만 아니라 초우라늄원소도 포함되어 있기 때문에 트랩프 핵분열성 물질이라고 하는 것이 더 적합한 용어가 된다. 그러나 산업계는 트랩프 우라늄이란 용어를 그대로 사용하고 있다.

마지막으로 트랩프 우라늄의 세번째 소스는 핵연료피복관과 기타 원자로재질내에 함유된 우라늄 불순물로 정의된다. 이러한 재질에 포함되어 있는 우라늄 불순물도 핵분열하여 핵분열생성물이 원자로재질 밖으로 튀어나와 바로 원자로냉각재계통에 유입될 것이다.

核燃料性能指標

트랩프 우라늄의 분석을 지속하기 위해서는 핵연료성능을 모니터링하는 분야를 파악하는 것도 중요한 과제다. 핵연료성능모니터링에 주로 이용되는 방사성 동위원소는 요오드이다.

이 요오드족은 선행핵에 대하여 긴 반감기를 갖는 동위원소이기 때문에 유용하며, 화학체적 제어계통(CVCS)은 그 계통에 투입되는 요오드의 거의 100%를 제거하도록 설계되어 있다. 또한 요오드는 넓은 범위의 반감기를 갖고 있어서 요오드의 핵적 거동이 요오드의 화학적 거동과 구분될 수 있다.

핵연료성능모니터링에 일반적으로 이용되는 동위원소는 4가지 종류이다.

5.3litre /sec(84gpm)의 화학체적제어계통 클린업비율을 사용하면 원자로냉각재계통의 평형비방사능비율은 트랩프 우라늄으로 인해 다음과 같이 예측된다.

$$\cdot I-131 / I-133 = 0.065$$



$$\cdot I-131 / I-134 = 0.019$$

$$\cdot I-131 / I-135 = 0.036$$

이 비율들은 핵분열에 의해서 생성된 방사성 요오드가 곧바로 원자로냉각재계통에 유입되는 경우의 원자로냉각재계통내 요오드의 특정한 평형방사능에 대한 이론적 비율이기 때문에 중요하다. 그러나 핵연료피복관에 작은 균열이 있다면 핵연료핀에서 방사성 요오드가 빠져나오는데 소요되는 이동시간으로 인해서 전술한 비율은 무효가 될 것이다. 즉, 전술한 비율은 방사성 요오드가 원자로냉각재계통에 들어가기 전에 동위원소 붕괴가 없는 것으로 가정하였기 때문이다.

몇개의 누설개소가 있는 계통에서 측정된 I-131 / I-133의 전형적인 비율은 0.5 보다 크다. 원자로냉각재계통 I-131 / I-133의 비율이 0.5로 측정된 경우 단순확산모델을 사용하면 방사성 요오드가 원자로냉각재계통으로 유입되기 전에 핵연료핀이 방사성 요오드를 평균 3일간 억류하고 있는 것으로 나타난다. 핵연료피복관내에서 3일간 억류되면 I-134는 원자로냉각재계통에 유입되기 전에 매우 낮은 준위로 붕괴될 것이다.

그러나 I-134는 원자로냉각재계통에서 측정되는 중요한 동위원소이다. 따라서 핵분열생성물중 일부는 바로 원자로냉각재계통으로 反跳(Recoil)되는 것이 확실하다. 원자로냉각재계통에서 측정되는 I-134는 원자로냉각재계통으로 바로 反跳됨으로서 생성되어진다고 생각할

〈표 1〉 핵연료성능을 모니터링하는 동위원소

Isotope	Half-life	Cumulative fission yield
I-131	8.04day	2.9%
I-133	20.8hours	6.7%
I-134	52.6minutes	7.8%
I-135	6.59hours	6.5%

수 있다. 즉, 측정되는 I-134의 소스는 원자로 재질의 불순물인 외부에 부착된 것이든 트랩프 우라늄이다.

원자로냉각재계통으로 바로 反跳되는 다른 종류의 방사성 요오드는 원자로냉각재계통에서 측정되는 I-134에 의해서 계산할 수 있다.

다른 종류의 방사성 요오드에 대한 트랩프 우라늄의 기여분은 원자로냉각재계통에서 측정되는 그들의 값에서 공제될 수 있으며, 보정된 트랩프 요오드는 핵연료성능의 계산에 이용할 수 있다. 보정된 트랩프 요오드는 「Leakers」의 특성을 파악하는데 매우 유효한 지표가 된다.

부착된 (Plated-out) 트랩프 우라늄

부착된(Plated-out) 트랩프 우라늄은 구멍이 나있는 핵연료봉에서 씻겨져나온 핵분열성 물질로서 핵연료 표면에 부착되어 있다가 핵분열을 하게 된다. 그때 핵분열생성물은 바로 원자로냉각재계통으로 反跳한다.

부착된 트랩프 우라늄의 정확한 구성은 알려져있지 않으나, 이론적으로는 이산화우라늄의 펠렛재료라기 보다는 초우라늄핵종으로 구성되어 있는 것으로 평가되고 있다. 이 이론은 이산화우라늄의 불용해성과 트랩프 우라늄의 부착이 상당한 증가를 보여도 원자로냉각재계통에서 Np-239가 측정되지 않는다는 사실에 근거를 두고 있다.

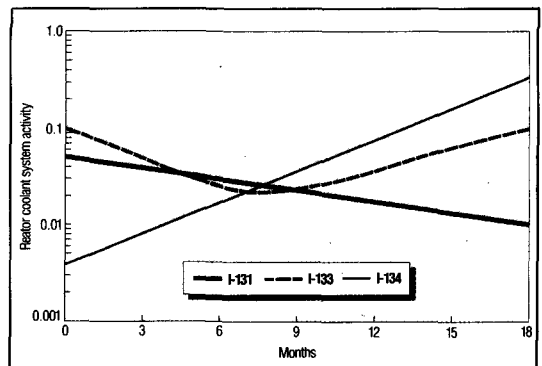
보정된 트랩프 핵분열생성물은 18개월 핵연료주기 초기에 도입된 수개소의 「Leaker」를 갖고 있는 핵연료주기의 거동을 설명하는데 이용되고 있다. 이와 같은 핵연료주기에서 관찰

된 I-131은 처음에는 높게 시작하여 핵연료주기가 경과함에 따라 점점 낮아지는 경향을 보인다. 또한 I-133도 높게 시작하여 점점 낮아지는 경향을 보이거나 핵연료주기의 반을 지나면서 회복되기 시작한다. I-134는 핵연료주기 전기간에 걸쳐 지속적으로 상승 경향을 보인다.

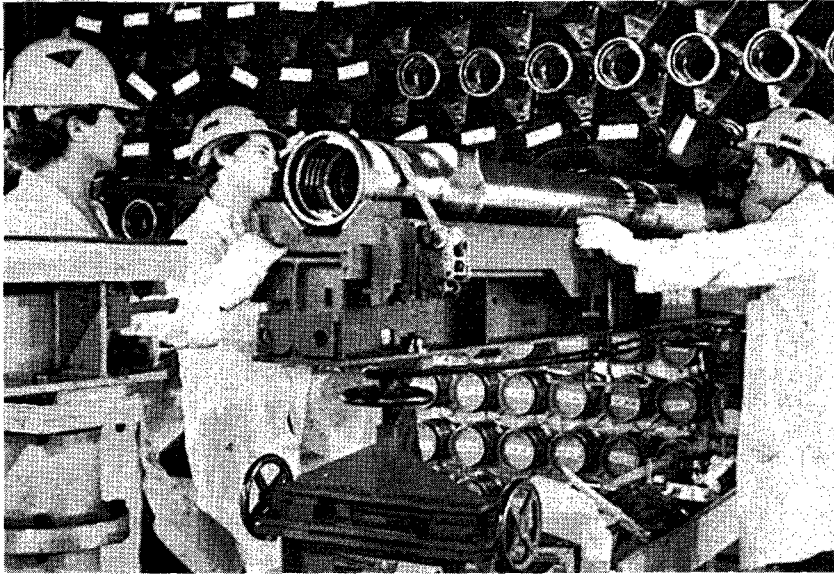
〈그림1〉은 「Leaker」를 갖고 있는 이 가정된 핵연료주기를 도식화하여 나타낸 것이다. 부착된(Plated-out) 트랩프 우라늄의 존재를 인식하지 않으면 이와 같은 거동은 설명될 수가 없다. 그렇지만 핵분열성 물질이 핵연료 표면에 부착되어 있다고 가정하면 이러한 거동은 쉽게 설명이 된다.

(1)원자로냉각재계통에서 측정되는 I-131의 방사능은 시간이 경과함에 따라 낮아진다. 이는 피복재의 균열틈이 크러드로 막히게 되고, 또한 핵연료펠렛은 크러드층을 발달시키기 때문이다. 이러한 두가지 작용은 I-131이 원자로냉각재계통으로 방출되기전에 억류되는 시간을 연장시킨다. 따라서 원자로냉각재계통에서의 I-131 평형상태가 줄어들게 된다. 이와 같은 현상의 부수적인 영향은 원자로가 정지한후 I-131 스파이크가 증가되는 것이다.

(2)원자로냉각재계통에서 I-134의 방사능은 핵연료표면에 많은 방사성 물질이 부착되어 있기 때문에 시간이 지남에 따라 증가 경향을 보인다.

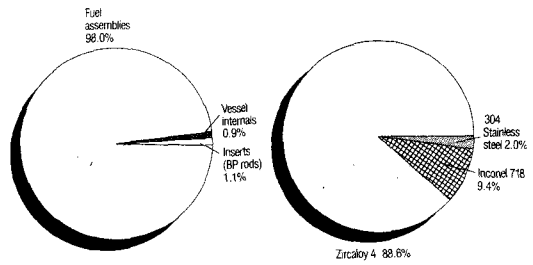


〈그림 1〉 「Leaker」가 있는 핵연료주기에서 방사성요오드의 거동



(3)원자로냉각재계통에서 I-133은 초기에는 (1)과 같은 영향으로 낮아지나, 부착된 트랩프 우라늄의 기여가 많아짐에 따라 핵연료주기 후반기에서는 원자로냉각재계통에서의 I-133 방사능이 증가 경향을 보인다.

상기와 같은 분석이 각각 다른 발전소의 많은 핵연료주기에서 방사성 요오드의 거동을 설명하는데 이용되고 있다.



〈그림 2〉 PWR 원자로노심구성비율

지르칼로이-4의 우라늄 불순물

원자로에서 원자로냉각재계통과 직접 접촉하는 재질은 세가지 종류이다. 트랩프 우라늄의 소스가 원자로재질내에 함유된 우라늄 불순물이므로 원자로냉각재계통과 직접 접촉하는 재질의 표면면적과 종류를 아는 것이 매우 중요하다.

전형적인 가압경수로(PWR)의 원자로노심구성물 분석을 〈그림2〉에 나타냈다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 원자로노심플럭스에 照射되는 재질의 대부분은 핵연료집합체와 그 부품들로서 거의 모든 재질이 지르칼로이-4이다.

지르칼로이-4 피복재에서 측정되고 있는 천연우라늄 불순물은 약 0.25ppm이다. 0.25ppm 이라면 매우 적은 양으로 생각될 수 있으나, 이 양은 가압경수로의 원자로냉각재계통에서 I-131의 방사능준위를 $6 \times 10^{-6} \mu\text{Ci/g}$ 정도가 되도록 한다.

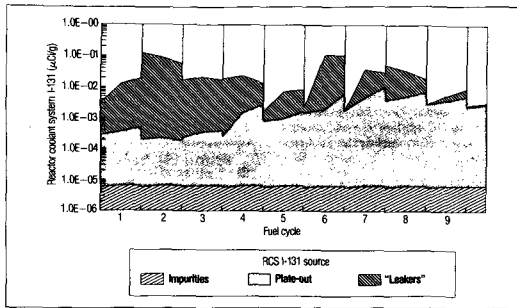
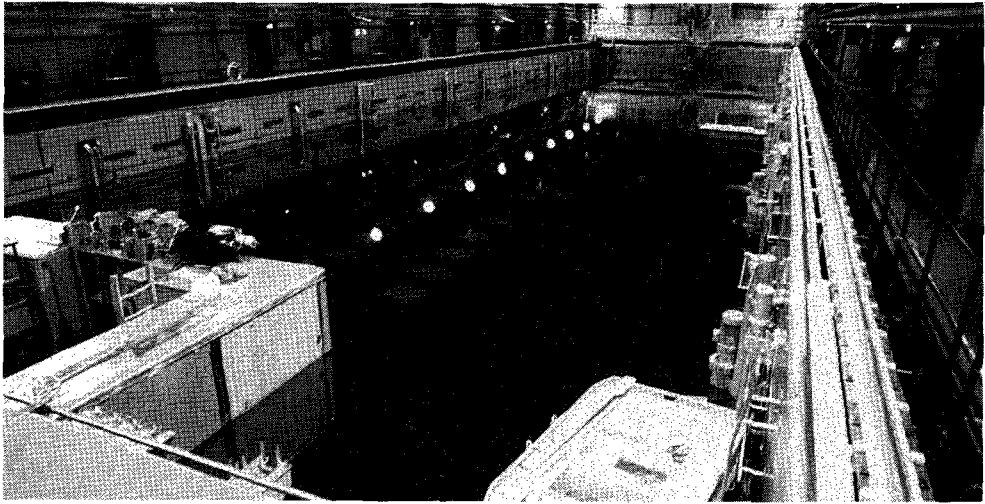
복합적인 영향

트랩프 우라늄의 가장 중요한 특성은 가압경수로의 방사능준위에 기여한다는 것이다. 가압경수로에서 핵분열생성물의 소스는 다음 세가지가 있다.

- 누출되는 핵연료
- 부착된(Plated-out) 우라늄
- 원자로재질에 함유된 우라늄 불순물발전소 A의 핵연료주기성능추이를 〈그림3〉에 나타냈다.

이 발전소는 좋지 않은 핵연료성능이력을 갖고 있다. 만족스럽지 못한 1,2,3,4,6,7,8주기의 핵연료성능은 부착된 트랩프 우라늄의 증가를 가져왔으며, 부착된 트랩프 우라늄은 핵연료주기동안에 원자로냉각재계통의 I-131 방사능을 계속 증가시켰다.

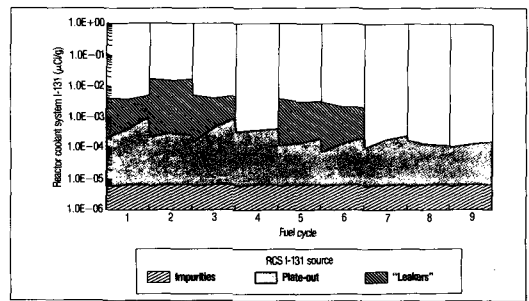
부착된 트랩프 우라늄의 감소는 오염된 핵연



〈그림 3〉 만족스럽지 못한 핵연료성능이력을 갖고 있는 발전소 A의 핵연료주기성능추이

료를 노심에서 꺼내고 새로운 핵연료를 정상적인 핵연료재장전절차에 따라 노심에 장전하는 핵연료주기 사이에서 일어났다. 부착된 트랩프 우라늄의 감소가 6주기 완료 이후 현저하였음에 유의하여야 한다. 이와 같은 부착된 트랩프 우라늄의 특별한 감소는 노심에서 「Leaker」를 제거하기 위해서 수행된 노심 전체에 대한 핵연료검사의 결과였다.

〈그림4〉는 발전소 A와 동일한 가압경수로이지만 핵연료성능이 우수한 발전소 B의 경우이다. 이 발전소에서는 주기 1과 2에서는 상당수의 「Leaker」가 있었고, 주기 3,5,6에서는 하나의 누설 핵연료핀만을 가졌었다. 그러나 이 발전소는 9번의 핵연료주기중 4번의 핵연료주기에서 「Leaker」가 없었다. 따라서 부착된 트랩



〈그림 4〉 우수한 핵연료성능을 보이는 발전소 B의 핵연료주기성능추이

프 우라늄이 매우 낮다.

원자력발전소들은 핵연료성능에 대해서 「No-Leaker」철학을 추구하기 때문에 원자로냉각재계통의 비방사능을 즉각 낮추는 것이 중요하다. 그러나 누설되는 핵연료집합체를 즉시 제거하더라도 발전소는 트랩프 우라늄문제와 직면하게 될 것이다.

〈그림 3과 4〉에서 알 수 있듯이 원자로냉각재계통에서 핵분열생성물의 방사능준위를 대폭 저감시키기 위해서는 몇번의 핵연료주기를 거쳐야 한다.

가압경수로 원자로냉각재계통에서의 I-131은 원자로재질 자체에 함유되어 있는 천연우라늄으로 인해서 $6 \times 10^{-6} \mu\text{Ci/g}$ 이라는 최저한계가 존재한다.