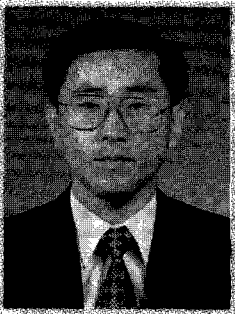


사용후연료 소내 저장 기술 현황

정진엽

한국전력기술(주) 원자력기술처 책임연구원



여기에서는 그동안 수행한 사업의 경험을 바탕으로 사용후연료의 습식 및 건식 저장 기술에 대한 기술 현황을 정리하였다.

사용후연료 습식 저장

1. 현황

습식 저장 기술은 일반적으로 원전 건설시에 사용후연료의 소내 저장용으로 설치하는 기술로서, 사용후연료 저장 능력을 증대시키기 위하여 기존 사용후연료 저장 시설을 중심으로 다음과 같은 방법들이 적용되고 있다.

가. 조밀 저장대로의 교체 방법 (Reracking)

소내 저장 능력 확장을 필요로 하는 원전에서 사용하는 가장 일반적인 방법으로서, 저장대 재질을 중성자 흡수 물질(붕소·카드뮴 등)이 포함된 재질을 사용하여 연료간의 간격을 줄임으로써 동일 크기의 저장조 면적에 약 2배 가량의 사용후연료를 저장하는 방식이다.

상용화된 재질로는 보라플렉스(Boraflex), 보랄(Boral), 붕소스테인리스강(Borated Stainless Steel), Cadminox 등이 있다.

나. 이중 저장 방법 (double tiering)

조밀 저장대로의 교체로도 저장 능력에 한계가 있는 원전에서 사용하는 방법으로서, 기존의 저장대 위에 이중으로 저장대를 설치하는 방법이다.

이 방식은 저장조 하중 및 수조 깊이 등의 제약으로 내진 구조 안전성, 임계도 안전성, 방사선 안전성 등의 문제가 있다.

다. 해체 연료 저장 방법 (Rod Consolidation)

저장 대상 연료를 해체하여 연료봉만을 밀집 저장하는 방법으로서, 연료 집합체를 해체하여 연료봉 이외의 구조물체는 저준위 폐기물로 처리하고, 연료봉만을 모아 다시 원래 연료 집합체와 같은 크기의 저장 용기(캐니스터)에 넣어 저장하는 방법이다.

해체 저장까지 2년간의 냉각 기간

우 리 나라의 사용후연료는 96년말을 기준으로 가압 경수로 사용후연료 약 1,823톤(4,447다발), 가압 중수로 사용후연료 약 1,410톤(74,680다발)이 발생되어 소내에 습식 혹은 건식으로 저장되어 있으며, 중앙 집중식 사용후연료 저장 시설의 건설 지연으로 인해 가압 경수로형 원전은 조밀 저장대로의 교체 또는 추가 설치를 통하여, 가압 중수로 원전은 건식 저장 시설의 설치를 통하여 성공적으로 소내 저장 능력을 확충하여 왔다.

(표 1) 호기별 사용후연료 관리 현황 (97년말 기준)

호기	울진 2호기	고리 3호기	울진 1호기	고리 4호기 영광 1호기 영광 2호기
노심 크기	157 FAs	157 FAs	157 FAs	157 FAs
예상 방출량	52 FAs/yr	52 FAs/yr	52 FAs/yr	52 FAs/yr
초기 저장 용량	472 FAs (9/3 노심) → 893 FAs	746 FAs (14/3 노심) → 1201 FAs	472 FAs (9/3 노심)	746 FAs (14/3 노심)
저장 연료수	417 FAs	644 FAs	468 FAs	792 FAs/ 587 FAs/ 462 FAs
조밀 저장대 설치 개념	-1차: C.R. ²⁾ (1990) -2차: P.R. ³⁾ (1996)	추가 설치 (1994)	전면 교체 (1995)	추가 설치 (1996 & 1997)
최종 저장 용량	875 FA	1201 FA	1114 FA	1152 FA
조밀 저장대 재질	보랄	붕소스테인리스강	보랄	보랄

주 : 1) 초기 확장 용량에 근거한 것임.
 2) C.R.: 기존 저장대를 전면적으로 교체하여 설치
 3) P.R.: 기존 저장대를 부분적으로 교체하여 설치

과 저장조 내에 장비 설치 공간을 두어야 한다는 점을 고려하면, 동일 크기의 피치에서 저장조 용량은 약 1.8 배로 증가된다.

국내에서도 조밀 저장대 설치를 통한 소내 저장 능력 확장 사업을 실시해 오고 있으며, 그 내용은 <표 1>과 같다.

이와 같이 조밀 저장대 설치에 해외에서도 설치 및 운영 경험이 풍부하며, 현재까지도 소내 사용후연료 저장 용량을 확장시키기 위한 가장 보편적인 방법으로 이용되고 있다.

현재 조밀 저장대 설치로 인해 증가되는 최대 저장 밀도(저장대 벽을

포함하여 하나의 연료 집합체를 저장하는 데 필요한 저장조 면적에 대한 저장셀의 면적)는 가압경수로의 경우 약 91.6 %에 달하는 것으로 알려져 있으며, 기술의 진보로 인해 사용후연료 저장조에서의 저장 연료간 배치 간격이 원자로 내에서의 간격에 근접할 정도로 저장 밀도가 높아지고 있다.

미국의 경우는 조밀 저장대의 설계, 재질 및 제작 기술이 계속 향상됨에 따라 한 발전소를 대상으로 세 차례까지 조밀 저장대를 설치하여 저장 용량을 계속적으로 증가시킨 경우도 있다.

2. 조밀 저장대 설계 요건

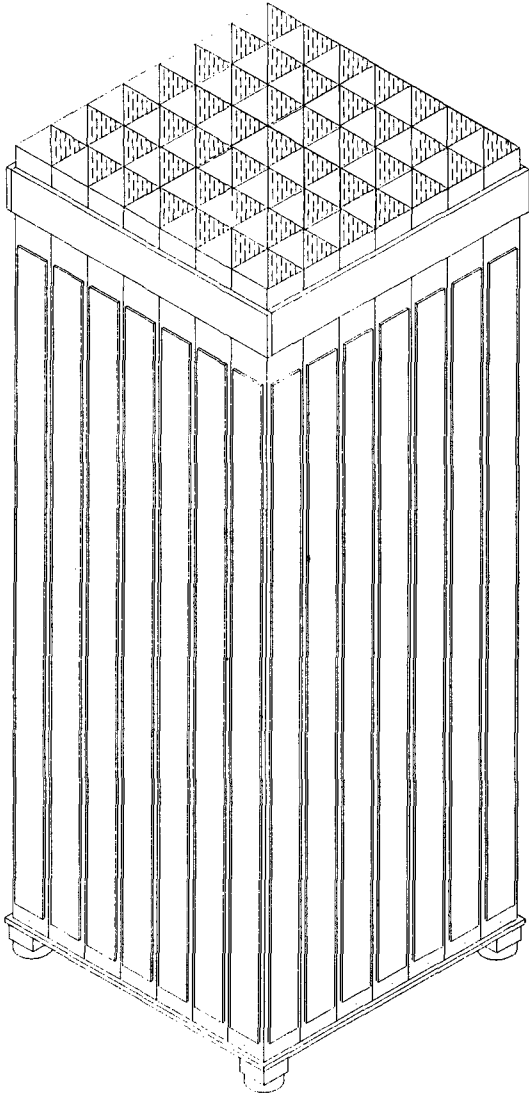
조밀 저장대는 신연료 또는 사용후연료를 저장하는 구조물로서 연료를 지속적으로 냉각시킬 수 있는 기하학적 구조를 가져야 하고, 적절한 배치 및 설계를 통해 임계에 이르지 못하도록 하며, 연료를 과도한 기계적 또는 열부하로부터 보호하는 기능을 수행한다.

비고정식(free standing)으로 설계되는 조밀 저장대는 사용후연료에서 발생하는 열로 인한 저장조 라이너에서의 응력을 감소시킬 수 있을 뿐만 아니라, 지진으로 인해 발생된 에너지를 흡수하는 데에도 유리한 설계이다.

조밀 저장대는 미국원자력규제위원회(NRC) 규제 지침 1.29의 정의에 따라 내진 범주 I급 기기로 설계한다.

기존의 저장대는 일률적으로 신연료의 초기 최대 농축도인 3.5 w/o에 근거하여 설계되었으나, 근래에는 노심 해석 결과의 정확성이 향상되어 사용후연료 저장조의 임계도 계산에서도 연소도를 고려할 수 있게 됨으로써, 동일한 저장 공간 내에 저장 용량을 극대화할 수 있는 2영역 개념(Two Region Concept) 적용이 가능해졌다.

즉 제1영역(Region I) 저장대는 신연료나 불완전 연소 연료를 저장할 수 있는 조밀 저장대로서 신연료의 최대 농축도를 설계 변수로 하는 반



(그림) 사용후연료 조밀 저장대의 구조(제2영역용 기준)

면, 제2영역(Region II) 저장대는 사용후연료 저장용인 조밀 저장대로서 사용후연료의 최소 연소도를 고려함으로써 제1영역 저장대에 비해서 중심간 간격 또는 중성자 흡수체의 양을 줄일 수 있는 장점을 지니고 있다.

조밀 저장대의 대략적인 구조는 <그림>과 같다.

3. 주요 기술적 현안

가. 붕소 크레딧

붕소 크레딧은 사고시에 적용되는 이중 사고 원리(double contingency principle)를 제외하고는 일반적으로 인정되지 않는다.

그러나 미국 NRC는 97년 12월 정상 운전시에도 가압경수로의 사용후연료 저장조 내에서 용존 붕소를

일부 인정하는 것에 대해 허가를 내린 바 있다.

즉 붕산수로 침수되었을 경우 최대 허용 농축도를 가진 연료를 사용후연료 저장대에 저장했을 때의 유효 증배 계수(계산 및 제작상 불확실도 포함)가 95% 확률, 95% 신뢰도(95/95) 구간에서 0.95 이하이고, 붕산이 포함되지 않은 순수로 침수되었을 경우는 유효 증배 계수가 95/95 구간에서 1.0 미만을 유지하는 것을 요건으로 하여 용존 붕소에 대한 일부 크레딧을 인정하고 있다.

NRC가 인정한 방법론은 웨스팅하우스사가 제시한 방법론으로, 앞으로 동일한 방법을 사용하는 입계도 안전성 해석에서는 NRC의 심사가 생략된다.

다음은 NRC가 웨스팅하우스사의 방법론에 대해 허가를 내린 이유이다.

- ① 기계적 오차 및 저장대 크기상의 불확실도(제작공차 포함)가 95/95 구간에서 결정되고 보수적인 방향으로 반영되었다.
- ② 연소도 계산에서 불확실도를 보수적으로 고려하였다.
- ③ 정상 운전시 유효 증배 계수가 95/95 구간에서 저장조 내에 존재하는 붕소 농도보다 훨씬 적은 붕소 농도에서도 0.95 이하를 유지할 수 있기 때문에 충분한 안전 여유도가 있다.
- ④ 붕소가 없는 경우에도 95/95

구간에서 미입계 상태를 유지하기 때문에 10 CFR 50의 부록 A 기준 62(연료 저장 및 취급에서의 입계 상태 방지) 요건을 만족한다.

위와 같은 방법을 적용하기 위해서는 저장조 내 붕소 농도가 항상 2300ppm이상이고, 붕산 농도를 1 주일 단위로 확인하는 것을 비롯하여 몇 가지 요건을 충족시켜야 하며, 최대 농축도가 5.0 w/o보다 큰 연료에는 적용되지 않는다.

우리 나라의 경우는 아직 붕소 크레딧을 인정하지 않고 있기 때문에 앞으로의 인허가 심사에 있어 중요한 참고 사항이 될 수 있을 것으로 판단된다.

나. 사용후연료 연소도

사용후연료는 수년간의 연소를 통해 농축도가 감소하게 되나, 입계도 해석시에는 연료의 수명 기간중 가장 높은 반응도를 갖는 조건을 적용한다.

또한 저장조 내의 용존 붕소는 붕산 회석 사고 등을 고려하여 인정하지 않으며, 냉각수 상실 사고 또는 기포 생성을 가정하여 물의 밀도는 0~1.0 g/cm³사이에서 최적 감속 효과가 발생하는 물의 밀도를 고려한다.

이와 함께 제2영역 조밀 저장대에는 일정 연소도 이상으로 연소된 연료만 저장할 수 있으므로 연소도 평가가 가장 중요한 현안으로 부각되고

있다.

노심에서 방출된 연료의 실제 연소도를 결정하는 데 있어서의 불확실도는 노심 계측기의 수량 및 설치 위치, 사용 주기 및 교정 절차 등을 포함한 원자로 운전과 발전소에서 사용하는 전산 코드 등에 영향을 받는다.

통상적으로 저장대 설계에서는 이러한 원자로 운전과 관련된 불확실도를 5~10%로 고려하고 있다.

원자로 정지 후에 방출되는 사용후연료에서 대부분의 핵분열 생성물은 화학적으로 안정한 핵종들이므로 일부 방사성 핵종들을 제외하고는 입계도 계산에 영향을 주지 않으며, 핵분열 생성물이 축적되면서 연소도에 따라 반응도가 낮아지게 된다.

한편 사용후연료에 포함되어 있는 방사성 핵종의 경우에는 안정된 핵종으로 붕괴하는 과정을 고려하여 입계도를 계산하게 되나, 계산 결과 입계도에 큰 영향을 미치지 않는다.

원자로 정지 후 반응도에 가장 큰 영향을 미치는 핵종은 I-135의 붕괴로 생성되는 단수명 핵종 Xe-135이며, Pm-149의 붕괴로 생성되는 Sm-149는 안정되어 반응도 감소 효과가 미미하다.

또한 시간에 따른 반응도 변화에 주로 영향을 미치는 인자들은 초우라늄 핵종들의 거동과 관계가 있는데, 예를 들어 핵분열성 핵종인 Pu-241의 붕괴와 중성자 흡수 핵종인 Am-241의 축적이 여기에 속한다.

국내 조밀 저장대 설치 사업에서는 이러한 효과들을 고려하여 시간에 따른 반응도 변화를 계산하였는데, 초기 수일간(5일 미만)은 반응도가 증가하나 그 이후에는 Xe-135 붕괴에 이어 약 0.14k 만큼의 반응도가 감소하는 것으로 평가된 바 있다.

이와 같은 반응도 변화는 방출 연소도 및 연료 농축도의 함수이지만 입계도 안전성의 보수적 평가를 위하여 시간에 따른 반응도 감소 효과는 고려하지 않는 경우도 있다.

다. 조밀 저장대 재질

중성자 흡수체 재질은 사용후연료 저장대뿐만 아니라 사용후연료 저장 또는 수송 캐스크에서도 사용되는 것들로서, 저장 용량을 극대화시키기 위해 두께를 가능한 한 얇게 제작하고, 외부 충격에 대한 저항성을 높이며, 차폐 및 중성자 감쇄 성능을 향상시키기 위해 계속적으로 연구되고 있다.

현재까지 사용후연료 저장대의 중성자 흡수체로 사용되어 온 주요 재질로는 B-10을 이용한 보랄, 보라플렉스 및 붕소스테인리스강과 카드뮴을 이용한 Cadminox 등이 있다.

B-10은 열중성자에 대한 흡수 단면적이 3,840barns에 이르고 입사 중성자의 속도에 반비례하기 때문에, 상대적으로 복잡한 공명 흡수 단면적을 갖는 핵종에 비해 물리적 계산이 단순화될 수 있다.

또한 핵반응으로 생성되는 헬륨과

리튬-7이 심각한 방사선적 문제를 야기하지 않는 점과 0.42 MeV의 감마선 및 알파선을 방출하는 것이 B-10의 이점이다.

반면에 카드뮴은 6 MeV에 달하는 2차 감마선을 방출하고 4개의 방사성 동위원소를 생성시키므로 시설 해체에 상대적으로 불리하게 작용된다.

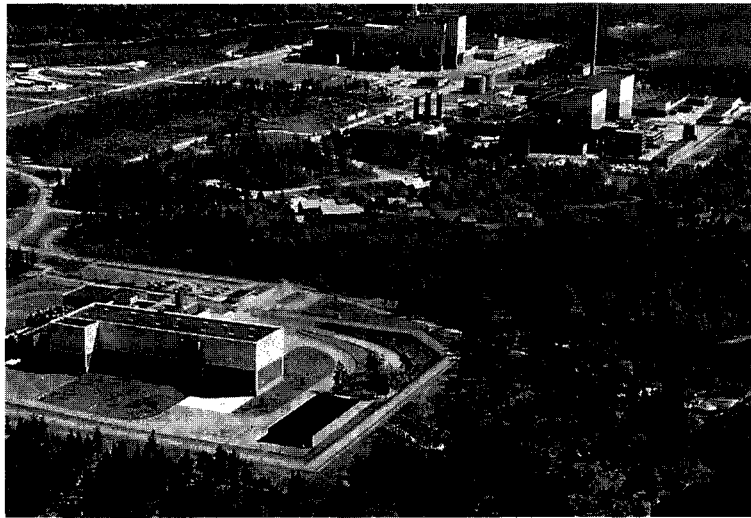
조밀 저장대에 사용되는 중성자 흡수 물질은 중성자가 흡수되지 않고 투과되는 채널링 효과로 인해 증배 계수가 증가되는 것을 막기 위하여 균일하게 분포되도록 제작되어야 하며, 화학적 환경에 대한 저항성 및 내식성을 필수적으로 갖추어야 한다.

① 보랄(Aluminum-clad Boral:

Boron-aluminum base dispersions/alloys, CERMET)

이 재질은 1949년 이후 저장대, 연료 수송 용기 및 원자로 내장물의 재질로 많이 사용되어 온 것으로, 탄화 붕소(B₄C)와 알루미늄 1100 합금으로 구성된 복합재이며 3개의 층으로 구성되어 있어 샌드위치형으로도 불린다.

즉 보랄의 외부 두층은 물리적으로 안정하고 화학적으로도 불활성인 탄화 붕소 입자(Boron Carbide, B₄C)에 강한 내식성의 산화 피막을 가지는 알루미늄 1100 합금 재질로 덮여 있는 반면, 내부층은 중성자 흡수 재질인 미세한 탄화 붕소 입자(ASTM C750 Type III)가 알루미늄과 균일하게 혼합된 재질로 이루어져 있다.



스웨덴의 사용후연료 중간 저장 시설인 CLAB.

보랄판의 피복재로 쓰이는 알루미늄은 티타늄 및 마그네슘과 같은 내식성 합금들과 마찬가지로 수용액에서 부식 방지를 위한 보호 피막(Al₂O₃ · 3H₂O)을 형성하게 된다.

보호 피막을 형성하는 과정에서 약간의 수소가 발생하나, 발생 기간이 설치 초기 수일(2~3일)간에 한정되고, 방사선 영향 측면에서도 미미한 것(10⁻⁶ mR/hr 미만)으로 나타나 있다.

이와 같은 수소 기포의 발생은 안정화 단계(보호 피막 형성 과정)를 거치면서 더 이상 발생되지 않게 되나, 경우에 따라서는 조밀 저장대 제작시부터 미리 안정화 단계를 거친 재질을 사용하여 초기의 수소 발생을 방지할 수도 있다.

그러나 초기 수소 기체 발생으로 인해 임계도 안전성에 미치는 영향은 없는 것으로 알려져 있다.

B-10의 함량은 필요에 따라 0.06 gm/cm²까지 조절할 수 있다.

② 사용 경험

보랄은 미국 NRC로부터 인허가를 받았으며 올진 1·2호기, 고리 4호기 및 영광 1·2호기를 비롯하여 프랑스·남아프리카공화국·스위스·대만 등지에서 사용되고 있고, 특히 미국에서 광범위하게 사용되고 있다.

현재 이 재질의 조밀 저장대는 Holtec 및 PaR 등에서 주로 공급하고 있다.

③ 운영상 문제점

일반적으로 보랄판이 팽창하게 되면 저장대 내부에서 물이 차지하는 부피가 감소되고, 따라서 저장대 셀 간의 간격이 줄어드는 효과를 나타내게 된다.

Maine Yankee 발전소의 해석에 의하면 셀간 간격의 감소 효과는 경우에 따라 약 50~92.5%에 달하나,

저장조 냉각수 내의 보론 농도를 0 ppm으로 가정해도 증배 계수가 0.95 미만으로 유지되는 것으로 밝혀졌다(농축도는 3.3%, 수온은 68°F로 가정).

또한 동일 조건에서 보론 농도를 1720ppm으로 가정할 경우에는 증배 계수를 약 30% 정도 낮추는 효과가 있음이 밝혀졌다.

이러한 보랄판의 팽창은 알루미늄의 보호 피막 형성(passivation)으로 인해 pH가 높을수록 증가할 수도 있으나, 다른 조건에 의해 팽창 현상이 발생하지 않는 한 현재 운영중인 pH 범위에서 팽창으로 인한 문제는 발생하지 않는 것으로 밝혀져 있다.

또한 보랄판의 팽창은 재질 자체의 보편적인 문제라기보다는 제작상의 핵심 기술인 알루미늄 피막 기술, 제작중 불순물 제거 기술(Koeborg에서의 조사에 의하면 보랄 내 불순물의 존재로 기포가 막혀 수소가 빠져나가지 못하고 축적되면서 팽창될 수 있는 것으로 나타났음) 및 B-10을 고르게 분포시키는 기술이 부족했기 때문인 것으로 알려져 있다.

이와 같은 핵심 기술 외에도 저장대 재질로 사용되기 위해서는 알루미늄 피폭재 두께, B₄C 입자의 크기 분포 및 균일성, 용출 시험 결과, 기체(수소) 발생 여부, 시험 시편 분석 등과 관련된 요건을 만족시켜야 한다.

B-10의 함량과 분포의 균일성은 습식 화학 분석법(wet chemistry

analysis)이나 중성자 감쇄 시험법(neutron attenuation test)으로 검사할 수 있으나, 지금까지의 운영 및 시험 결과에 의하면 B-10의 함량과 균일성에는 큰 변화가 없으며, 보랄로부터 붕소와 할로겐이 용출되지 않는 것으로 보고되고 있다.

한편, 88년 Holtec 및 Brooks and Perkins에서 실시한 시험에 의하면, 팽창 현상의 주된 원인은 탄화붕소 분말(B₄C)에 포함된 철 또는 수산화나트륨 등의 불순물인 것으로 나타난 바 있으며, 이는 용접시 열처리를 비롯한 제작상 결함에 기인한 것으로 판명되었다.

결론적으로, 보랄판의 운영상 문제점(재질 팽창)은 오래 전에 제작 및 설치된 저장대에서 발생된 것으로, 최근 들어서는 설계 및 제작 기술의 향상으로 거의 보고되고 있지 않으며, 가동중 성능 검사를 통하여 주기적으로 재질의 이상 여부를 조사하도록 되어 있어 운영상 특별한 문제점은 없는 것으로 판단된다.

② 붕소스테인리스강 (Borated Stainless Steel, BSS)

Carpenter Technologies가 개발한 BSS는 중성자 흡수 물질인 붕소와 스테인리스강의 합금체(Type 304 austenitic chrome-nickel stainless steel)로서, 스테인리스강 내에 붕소를 균일하게 첨가하여 제작하며, 재질의 특성은 오스테나이트 스테인리스강과 같다.

이 재질은 중성자 감쇄 성능뿐만 아니라 연성 및 충격에 대한 저항성이 뛰어난 것으로 알려져 있다.

그러나 붕소의 함유량이 커지면 항복 및 인장 강도가 커지지만 연성 및 충격 강도가 감소하므로, 붕소의 양은 스테인리스강의 물리적 성질에 영향을 주지 않을 정도로 충분히 낮게 유지해야 한다.

이 재질은 ASTM A887-88에 따른 Grade A와 원자로, 사용후연료 수송 용기 및 저장대에 많이 이용되어 온 Grade B가 있는데, Grade A가 Grade B에 비해 제작성, 연성, 충격에 대한 저항성, 용접 부위의 건전성 및 중성자 감쇄 성능(붕소 입자의 균일한 분포) 등이 우수한 반면 가격은 더 비싼 편이다.

Grade B인 경우는 제작성이 나쁘기 때문에 1.3% 이상의 붕소를 함유하는 BSS를 0.185인치 미만의 두께로 제작하는 것이 경제성이 없지만, Grade A 재질은 붕소의 농도 및 두께의 조절이 훨씬 유연(2.25%까지의 붕소 첨가가 가능함)한 것으로 알려져 있다.

③ 사용 경험

BSS 재질은 고리 3호기를 비롯하여 독일·헝가리·스페인·브라질·핀란드 등 주로 유럽 지역에서 많이 사용되고 있으나 미국 내에서는 거의 사용된 바가 없다.

수년 전에 미국 EPRI에서는 용접 등 제작 특성 및 재질 안전성과 관련

하여 미국 내에서 붕소스테인리스강을 저장대 재질로 사용하기 위한 연구를 수행한 바 있으나 아직까지 특별한 결론이 도출되지 않고 있다.

이 재질의 조밀 저장대는 독일의 지멘스와 프랑스의 ATEA 등에서 공급하는데, 지멘스형은 중성자 흡수체와 구조재가 일체형으로 제작되어 견고하게 제작할 수 있다.

반면에 ATEA형은 BSS의 용접을 피하기 위해 중성자 흡수체 판과 구조재인 스테인리스강 셸이 따로 분리되어 있다.

지멘스가 공급하는 조밀 저장대는 광범위한 장기간의 성능 시험을 거쳐 독일 정부로부터 운영중 성능 검사 시험을 면제 받은 바 있다.

⑤ 운영상 문제점

현재까지 운전 경험에 따른 문제점은 보고된 바 없으나 용접을 비롯한 제작상 어려운 점이 있으며, 붕소의 함량이 증가함에 따라 인장(Tensile), 항복(Yield) 강도와 경도는 증가하지만 연성(Ductility), 충격(Impact) 강도 및 내부식성은 감소되는 특성을 갖고 있다.

일반적으로 붕소의 주입량이 제한되어 그만큼 재질의 두께가 두꺼워지므로 저장 밀도가 낮아진다.

③ 보라플렉스 (Boraflex: Boron carbide filled silicon rubber)

이 재질은 70년대 중반 Brand Industrial Services, Inc.(BISCO)에 의해 개발되었으며, 실리콘 폴리



우리 나라의 사용후연료 저장조

머(polydimethylsiloxane, silicon rubber) 내에 미세한 입자의 탄화 붕소 입자(B₄C)를 넣어 만든 것이다.

이 재질은 보라플렉스 판재가 스테인리스강 판 사이에 들어있기 때문에 보랄과 마찬가지로 샌드위치형에 속한다.

이 재질은 약 25%의 실리카(폴리머의 구조재로서 인장 강도를 향상시킴), 25%의 폴리머 및 50%의 탄화 붕소 입자(NRC IN 95-38)로 구성되어 있으며, 주로 내열성을 요하는 원자력 분야에서 많이 사용되어 왔다.

보라플렉스는 다른 재질에 비해 비교적 가격이 저렴하고, 제작 및 설치가 용이하며, 화학 물질에 대한 내식성과 400°F 이상의 고온에서 열적 안정성을 갖고 있는 것이 장점인 반면에, 재질의 취성 및 방사선 조사시 수축 등이 단점으로 지적되고 있다.

② 사용 경험

보라플렉스 역시 NRC로부터 인허가를 받은 사용후연료 저장대의 중성자 흡수체로서, 울진 2호기를 비롯하여 벨기에·프랑스·미국 등 전세계 약 75개의 사용후연료 저장조에서 사용되고 있는 재질이다.

⑥ 운영상 문제점

보라플렉스의 주요 문제점으로는 방사선 조사로 인한 재질의 수축 및 열화 문제로 US NRC IN 87-43 (87. 9), EPRI TR-103330 (93. 12), INPO SER 12-95 (95. 6), IN 95-38 (95. 9), Generic Letter 96-04 (96. 6) 등의 문서에 잘 설명되어 있다.

지금까지의 연구 결과에 의하면, 보라플렉스에서의 용출 현상에 영향을 미치는 요인은 저장조 수온, 감마선 조사량, 보라플렉스 판재의 설계 및 저장조 냉각수 유속 등으로 알려져 있다.

따라서 보라플렉스 재질의 열화를 감소시키기 위해서는 가능한 한 저장조 수온을 낮게 유지하고, 연료 재장전시마다 새로 방출되어 나오는 (방사선 준위가 비교적 높은) 연료를 동일한 저장대에 반복하여 저장하는 것을 피하는 것이 바람직하다.

그러나 수온이 낮아지면 저장조 내 물의 유속이 빨라져서 보라플렉스 주위의 실리카 농도 평형이 깨져 용출이 다시 재개될 수 있는 가능성도 제기되고 있다.

미국에서는 실리카가 1차 계통으로 유입되어 연료봉에 침착되면서 연료의 열적 성능을 저하시키지 않는 한 실리카 농도 증가로 인한 안전성 문제는 없는 것으로 결론짓고 있으며, 이에 대한 추가적인 규제 요건은 아직 발표된 바가 없다.

참고적으로 현재 보라플렉스 저장대가 사용중인 모든 저장조에서는 실리카가 검출되고 있으며, 발전소(미국)에 따라서는 100ppm에 달하는 곳도 있다.

현재 EPRI는 보라플렉스 재질의 저장대를 사용하고 있는 미국 내 전력 회사를 지원하기 위해 약 10년간 연구를 수행하고 있으며, 저장조 상황을 평가할 수 있는 성능 평가 모델(RACKLIFE) 및 현장에서 B-10의 밀도를 측정하기 위한 장비(BADGER)를 개발하고 있다.

EPRI는 NRC의 요건을 충족시키기 위해서 감시 및 해석, 측정, 완화

조치의 3단계 심층 방어 전략(three level defence-in-depth strategy)을 제시하고 있으며, 이를 통해 NRC Generic Letter의 요구 조건을 충족 시킴으로써 저장대를 교체하지 않아도 될 것으로 예상하고 있다.

결론적으로 보라플렉스 용출 현상은 점진적이며 국부적이고, 저장조 내 실리카 농도를 통해 쉽게 인지할 수 있다. 또한 저장대 설계시에 충분한 보수적 가정으로 인해 안전 여유도가 있다.

따라서 미국의 경우는 보라플렉스 용출 현상을 즉각적인 안전상 조치를 취해야 할 문제로 인식하고 있지 않다.

보라플렉스는 장기간의 감마선 조사 및 붕산수와의 화학 반응으로 재질이 열화되고, 이에 따라 실리카와 탄화 붕소 입자가 방출될 수 있으나, 실리카 농도 자체는 미국의 경우 큰 문제가 되고 있지 않으며, 다만 탄화 붕소 입자의 방출로 인한 입계도 안전성이 검토해야 할 항목으로 남아 있다.

이를 위하여 지속적인 추적 및 감시(입계도 재해석 포함), 저장대 교체(실제로 저장대 교체를 한 발전소는 그리 많지 않음), 저장 용량 감소, 장기판 형태로의 저장 배치(checkerboard type configuration), 저장 연료에 대한 제어봉 삽입 또는 연소도 크레딧/저장조 내 붕소 크레딧 고려 등의 방법들이 사용될 수 있으며, 미국의 경우는 지속적인 추적 및 감

시 활동이 그 주종을 이루고 있다.

④ Cadminox

과거 붕소를 기본으로 하는 저장대 재질에 대해 일부 문제점이 보고되어 카드뮴을 중성자 흡수 물질로 사용하는 재질을 개발하였다.

그러나 현재는 붕소를 사용하는 저장대는 재질의 문제점이 확인되어 보완된 반면, Cadminox는 운영 경험이 거의 없어 아직까지 뚜렷한 장단점을 파악하기가 곤란하다.

또한 누설 방지용 샌드위치 가 별도로 필요할 것으로 판단되며, 구성 물질의 용해도 문제로 인해 가동중 성능 검사도 필요할 것으로 판단된다.

Cadminox의 가격은 다른 재질에 비해 가격이 비싼 편이다.

⑤ 가동중 성능 검사 방법

미국은 78년 발행된 NRC OT Position Paper에 의해 사용후연료 저장대에 사용된 중성자 흡수체에 대해 장기적인 건전성을 증명할 수 있는 방법을 규정하여 가동중 성능 검사를 요건화하고 있으며, 이는 재질에 관계없이 미국 내에서 사용되는 모든 저장대 재질에 적용된다.

그러나 구체적인 방법은 규정하고 있지 않아 최근 수년동안 운영상 문제점이 발견되지 않은 재질에 대해서는 일상적인 시험만을 실시하고 있다.

이에 따라 특별한 문제가 없는 재질에 대해서는 Blackness 시험과 같은 정밀 시험을 실시하지 않고 있다.

㉔ 일상 시험

- 육안 검사 및 사진 촬영
 - 길이, 너비 및 두께 측정
 - 중량 및 비중 측정
- ㉕ 정밀 시험 : 일상 시험에 이상 징후가 발견된 재질에 대해 수행
- 중성자 조사(열중성자의 투과율을 측정하여 B-10의 양 평가) 시험
 - 방사선 사진 촬영(열중성자를 투과시켜 B₄C가 균일하게 분포되어 있는가를 평가)
 - 습식 화학 시험(강산에 넣어 알루미늄을 용해시킨 후 여과/건조하여 중량을 측정하고 B₄C의 양 평가)
 - Blackness 시험(중성자 흡수 시험 : 저장조에 설치된 시편을 설치한 상태에서 Californium-252를 이용하여 열중성자의 투과율을 측정. B-10의 양 및 중성자 흡수 물질의 건전성을 평가)

사용후연료 건식 저장

1. 개요 및 현황

사용후연료 건식 저장 방식은 보통 5년 이상 저장조에서 냉각된 연료를 대상으로 자연 냉각되는 건식 용기에 저장하는 방법으로, 미국의 경우는 먼저 조밀 저장대 설치에 의해 저장 능력을 확장한 다음 추가 저장 능력을 확보하기 위해 많이 사용되는 방법이다.

현재 전세계적으로 설치 또는 운영되고 있는 사용후연료 건식 저장 시설의 현황(소내 및 소외 시설 포함)은 <표 2>와 같으며, 미국의 경우는 2010년까지 약 60기의 발전소에서 독립적 사용후연료 건식 저장 시설(ISFSI)이 운영될 것으로 전망되고 있다.

우리 나라도 월성 원자력발전소에 자연 냉각식 콘크리트 사일로 시설이 건설되어 92년부터 성공적으로 운영되고 있다.

현재의 사용후연료 건식 저장 기술의 전개 과정을 이해하기 위해 미국에서의 사용후연료 정책 및 수행 과정을 간략히 살펴보면 다음과 같다.

미국은 사용후연료 관리 정책면에서 크게 세 번의 시대적 흐름이 있었다고 볼 수 있다.

60년대에서 70년대초까지는 재처리를 포함하는 사용후연료 재순환 정책 및 폐기물의 심지층 처분에 관심이 집중되었고, 미국 과학아카데미도 심지층 처분이 안전하다고 결론을 내리기도 하였다.

이 기간 동안 미국 내에서는 많은 발전소가 건설되었고, 사용후연료는 좁은 사용후연료 저장조내에서 기하학적 배치에 의해서만 임계도를 제어할 수 있는, 즉 배치 간격이 넓은 습식 저장 방식에 의해 저장되었다.

76년 재처리 정책이 포기된 이후에 산업계에서는 임계도 제어를 위해 기하학적 배치뿐만 아니라, 중성자

흡수체를 채택한 조밀 저장대를 사용하여 저장 배치 간격을 줄이고 저장 밀도를 증가시킨 습식 저장 방식을 개발하기 시작했다.

이 기간을 첫 번째 흐름이라고 볼 수 있다.

70년대 후반에서 80년대초기까지는 미국 정부가 각 발전소에서 발생된 사용후연료를 수납·저장하는 계획에 대해 불확실성이 대두되었고, 재처리에 대한 대안으로 직접 처분이 검토되기도 하였다.

82년 핵폐기물정책법(두 번째 흐름으로 전환하는 계기가 됨)에 의해 DOE가 영구 처분장 부지를 개발하고, 98년까지 발전소에서 발생하는 연료를 저장할 수 있는 MRS(최수 가능한 사용후연료 감시 저장 시설)를 개발할 것을 위임받았으나, 정부 주도 사업이 부진해지자 각 발전소에서는 조밀 저장대를 이용한 습식 저장 방식이 계속적으로 채택되었다.

이와 동시에 그동안 수행된 바 있는 수송 사업 경험으로부터 소내 건식 저장이 유리한 대안이 될 수 있다는 인식이 형성되기 시작했다.

건식 저장은 초기에 Virginia Electric Power Company (현 Virginia Power)를 중심으로 금속 캐스크 방식에 비중을 두었다.

그러나 금속 캐스크 방식이 초기 투자비가 너무 과도한 단점을 보완하기 위해 콘크리트 캐스크 방식이 개발되기 시작했으며, 이것이 두번째

〈표 2〉 사용후연료 건식 저장 시설 현황 (소내외 포함)

국명	시설/전력 회사	연료 형태	저장 형태	저장 방식	용량(설계)		현 황	비 고
					FA/캐스크	캐스크 수		
미국	Surry 1, 2 / Virginia Electric & Power	PWR	AR	Castor V/21	21	25	85.9.30 TSAR 승인 86 부지 고유 허가(SNM-2501)	최초로 허가받은 캐스크임
				Castor X/33	33 (Intact PWR)	1 (27개까지 증가)	94.4 TSAR 승인 부지 고유 허가	
				MC-10	24	1	87.9.30 TSAR 승인 부지 고유 허가	INEL에서도 1개의 캐스크가 시용중임
				NAC-128 S/T	28	2	90.2.1 TSAR 승인 부지 고유 허가	
				TN-32	32	14 (96년 중반)	96.11 TSAR 승인 부지 고유 허가	VEPCO의 North Anna에서 도 5개의 캐스크 사용 예정
	H.B. Robinson 2 / Carolina Power & Light	PWR	AR	NUHOMS-7P	7	8 HSM 총56 FA	86.3.28 TSAR 승인 86.8.13 부지 고유 허가 (87 부지 고유 허가 개점) 89.3 최초 연료 장입	Brunswick에서도 인허가를 신청한 바 있으나 건설되지는 않음
	Oconee 1, 2, 3, / Duke Power	PWR	AR	NUHOMS-24P (Standardized NUHOMS)	24	88 HSM 2112 FA	89.4.21 TSAR 승인 90.1.29 부지 고유 허가 95.1.23 COC 승인 90.7 최초 연료 장입	
	Fort St. Vrain / Public Service of Colorado	HTGR	AR	MVDS	6 FA/ position (canister)	6 vaults, 45 position/vault, 총1482 FA 제어봉 37, 중성자원 6	88 LWR용 인허가 91.2 HTGR용 인허가 개점 91. 11. 4. 부지 고유 허가 92. 6 운영	
	Calvert Cliff 1, 2 / Baltimore Gas & Electric	PWR	AR	NUHOMS-24P	24	120HSM, 2880FA	89.4.21 TSAR 승인 92.11.25 부지 고유 허가 93.11 최초 연료 장입 95.1.23 COC 승인	
	Palisades(Michigan) /Consumers Power Co.	PWR	AR	VSC-24P	24	24 (97.1 현재 13 캐스크에 장입)	91.3.29 TSAR 승인 93.5.7 COC 승인 93.5.11 일반 허가	TranStor 운영도 검토중
	Prairie Island 1, 2 (Minnesota) /Northern States Power	PWR	AR	TN-40 (14x14 fuel)	40	1단계: 5 2단계: 4 3단계: 8 총17 캐스크	93. 10. 19 부지 고유 허가	
	Davis-Besse / Toledo Edison	PWR	AR	NUHOMS-24P	24	30	95.8 일반 허가 95.12 최초 연료 장입	
Point Beach 1, 2 / Wisconsin Electric Power	PWR	AR	VSC-24P	24	48	95 일반 허가	96.5.28 수소 연소 사고 발생	
ANO Station(Arkansas Nuclear One) 1, 2/Entergy Operations, Inc. (Arkansas Power & Light)	PWR	AR	VSC-24P	24	67	93.6 NRC에 인허가 신청. 96. 일반 허가 (96년 운영 연기되었다가 12월부터 재개됨)		
스페인	Almaraz Nuclear Station	PWR	AR	NAC-126 S/T	26	1	운영 예정	

〈표 2〉 사용후연료 건식 저장 시설 현황 (소내외 포함)

국명	시설/전력 회사	연료 형태	저장 형태	저장 방식	용량	현황	비고
영국	Wylfa	MAGNOX	AR	MVDS	70년 3 cells, 총 20000 FA (약 700 톤) 78년 추가로 30000 FA 용량 추가	운영(71)	Scottish Nucl. Ltd.가 2기의 AGR(Hunterston & Torness) 연료 저장 방식으로 선정. 95년 영국 규제 기관으로부터 인허가를 받음
헝가리	Paks/ Hungarian Power Co.	VVER-440	AFR	MVDS	초기 4950 FA, 확장시 14850 FA(1,080 톤)	95년 헝가리 규제 기관으로부터 건설 허가 받음	미국 규제 기준을 기본으로 하여 헝가리 규제 기준이 추가 됨. 수납률: 9600 FA/yr
프랑스	Cadarache	GCHWR /HLW	AFR	CASCAD	약 470다발 (200 톤)	운영(90)	
캐나다	Gentilly-2/ Hydro-Quebec	CANDU	AR	CANSTOR (MACSTOR)	초기 1.모듈(12000 bundle, 228MTHM)건설, 1개모듈 추가 건설, 20 cavity/모듈, 10 canister/cavity 60 bundle/canister	95.5 캐나다 규제 기관(AECB)으로부터 인허가를 받음 95.9 최초 연료 장입	총 16모듈(3648MTHM)의 저장을 인허가 받음
	Gentilly-1	CANDU	AR	Concrete silo	67 MTHM 11 silo, 8 basket/silo	운영(85)	
	Whiteshell WR-1 reactor (Manitoba)	CANDU	AR	Concrete silo	24.6 MTHM 20 silo, 6 basket/silo	운영(78)	
	Douglas Point(Ontario)	CANDU	AR	Concrete silo	298 MTHM 47 silo, 9 basket/silo	운영(87)	
	Chalk River NPD(Ontario)	CANDU	AR	Concrete silo	75 MTHM 12 silo, 9basket/silo	운영(89)	
	Point Lepreau/ New Brunswick Power	CANDU	AR	Concrete silo	91년 20 silo, 92년 20 silo, 95년 60 silo 총 100 silo (1026 MTHM) 9 basket/silo, 5x20 bundle/basket	91.6 캐나다 규제 기관(AECB)으로부터 인허가를 받음. 91년 운영	총 300개의 콘크리트silo (3078MTHM)를 저장할 수 있도록 허가 받음. 99년 MACSTOR 건설 예정
한국	Wolsong/KEPCO	CANDU	AR	Concrete silo	92년 60 silo(616 MTHM) 건설. 9basket/silo, 5x12 bundle/basket	KINS 및 AECB로부터 인허가를 받음 92년 운영	총 3078 MTHM의 저장을 허가 받음
독일	Gorleben (PKA)/DWK	PWR, BWR	AFR	Castor	4000 톤 (420 캐스크)	83.9.5 인허가, 88.9.6 고연소도 연료 저장을 위해 인허가 개정, 반핵 단체 소송으로 운영 유보. 96년말 운영 재개 예정	96.12.31 현재 Castor 1a 및 TS28V를 각각 1개씩 운영중 콘크리트 건물 내에 설치
	Ahaus	THTR	AFR	Castor	4000 톤	87.4.10 인허가, THTR 연료 저장을 위해 92.3.17 인허가 개정, 92.7 운영	92년 이후, 305개의 Castor THTR 운영중
	Rheinsberg	-	-	Castor 440/84	2 캐스크	현재 운영중	-
스위스	Wuerenligen/Paul Scherrer Inst.	PWR/HLW	AFR	Castor 1c-Diorit	약 600 톤	운영(83)	1 캐스크 운영중
체코	Dukovany	VVER	AFR	Castor 440/84	약 600 톤 (60 캐스크)	운영(95. 12), 독일 BAM, 스위스 HSK 및 에너지부로부터 허가 받음	20 캐스크 운영중 (검용 캐스크)
일본	Fukushima No.1/ Tokyo Electric Power Co.	BWR	AR	TN-24	20 캐스크	예정	90년대초 캐스크 방식 선정

흐름의 주종을 형성하게 된다.

사용후연료의 저장만을 고려했을 때 콘크리트 방식은 금속 방식에 비해 초기 투자비가 약 30 내지 40%인 것으로 알려졌으며, 80년대말에서 90년대초까지 미국 내의 건식 저장 시장에서 약 70%의 점유율을 보인 것으로 나타나 있다.

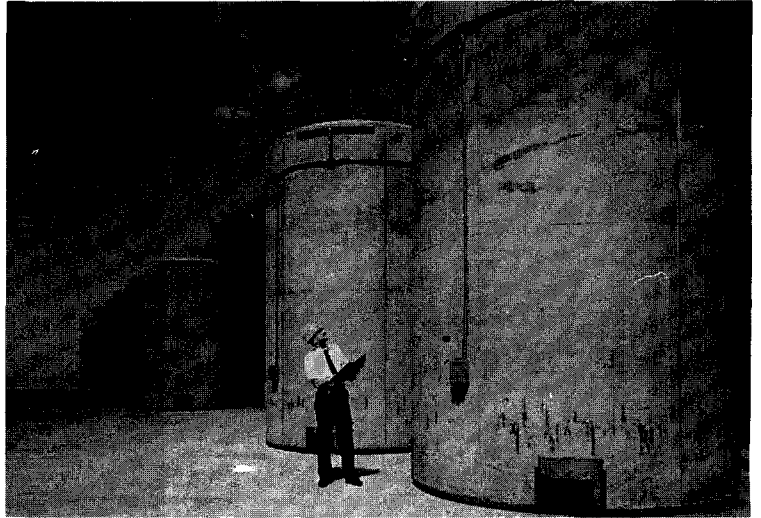
물론 이 시기에도 조밀 저장대를 이용한 습식 저장 방식이 널리 사용되었고 경제성면에서도 우월한 것으로 나타났으나, 상당수의 전력 회사들이 향후 건식 저장의 중요성이 더욱 부각될 것에 대해서는 인식을 같이 하고 있었다.

이 시기에 DOE는 처분장 건설 시한을 2003년으로 연기했다가 다시 2010년으로 연기했으며, 대신에 2010년까지 MRS(회수 가능한 사용후연료 감시 저장 시설)를 건설하기로 하였다.

그러나 부지 문제로 인해 MRS와 DOE가 중심이 되어 추진중이던 수송 캐스크 설계 및 인허가 프로그램도 중단되게 되었다.

이에 대한 타개책으로 DOE 장관은 향후 세 번째의 흐름을 주도하게 될 내용을 담은 편지를 의회에 보내게 되고, 여기에서 Virginia Power에 의해 처음 논의된 바 있는 범용 컨테이너 방식(universal container system)이 제기되었다.

범용 컨테이너 방식은 다시 캐니스터를 기본으로 하는 방식(canister-



미국 Palisades 원전에 있는 건식 저장 시설

based system)인 다목적 캐니스터(MPC, multi-purpose canister)방식으로 발전되었다.

DOE는 미국 산업계와 공동으로 MPC에 대한 규격 및 요건들을 개발하였지만 비용 등의 문제로 정부 주도의 MPC 개발이 중단된 대신에, 민간 회사들은 다음과 같은 예측 및 인식을 바탕으로 MPC 개념의 가치를 새롭게 인정하기 시작하였다.

① 민간이 주도하는 사용후연료 소외 저장 시설이 DOE의 연방정부 시설보다 조기에 건설 및 운영된다(현재 전력 회사들은 컨소시엄 등을 구성하여 민간 주도의 사용후연료 저장 시설 부지를 물색중에 있음).

② 미국 NRC로부터 발전소의 수명 연장 허가 또는 해체 허가를 받기 위해서 뿐만 아니라 사용

후연료 소내 저장 시설 자체에 대한 지방 정부의 인정을 받기 위해서는 소내에 수송 겸용의 저장 시설을 보유하는 것이 유리하다.

이상과 같은 요인들이 새로운 저장 기술, 즉 MPC를 기본으로 한 수송 겸용 저장 시설의 추진 요인으로 작용되었고, 이것이 세 번째 흐름을 주도하는 것으로 볼 수 있다.

향후 미국 시장에서는 언젠가는 민간 또는 정부 주도의 사용후연료 저장 시설로 수송해야 하기 때문에 저장 전용의 건식 저장 방식보다는 수송에도 사용될 수 있는 MPC 개념이 우위를 점할 것으로 예상된다.

2. 방식의 분류

건식 저장 방식은 크게 저장 전용 방식과 저장·수송 겸용 또는 다목적

방식의 두 가지로 나눌 수 있으며 편의상 다음과 같이 분류할 수 있다.

가. 저장 전용 방식

저장 전용 방식의 경우는 그동안 많이 소개되어 왔으므로 자세한 설명은 생략하고, 각 방식에 대한 제작사별 현황을 정리하면 다음과 같다.

- ① 콘크리트 모듈 (Dry Concrete Modular Storage): NUHOMS(Vectra), MACSTOR/CANSTOR(AECL)
- ② 콘크리트 볼트 (Dry Vault Storage): MVDS(GEC-Alsthom), CASCAD(SGN), FUELSTOR(Siemens)
- ③ 금속 캐스크 (Dry Metal Cask Storage): TN 시리즈 (Transnuclear), MC-10(Westinghouse), Castor 시리즈 (GNSI/CNS), NAC S/T(NAC)
- ④ 콘크리트 사일로 (Dry Vertical Concrete Cask Storage): VSC-24(BNFL/SNC), Concrete Silo(AECL)

나. 저장·수송 겸용 또는 다목적 방식

저장용 금속 캐스크는 소내 또는 소외로 운반하기 위한 별도의 이송 캐스크 또는 수송 캐스크를 필요로 하고 있지만, 겸용 캐스크는 별도의 캐스크 없이 저장한 상태 그대로 이송 또는 수송할 수 있다.

현재까지 NAC-STC만이 NRC의 허가(수송 부문만 COC를 받음)를 받

은 바 있으며, 최근 들어 HI-STAR 100이 최초의 일반 허가를 받았다.

한편 다목적 방식은 MPC를 기본으로 하며 별도의 저장용·수송용 (또는 처분용) 포장 용기를 사용하여 다목적으로 사용할 수 있는 방식이다.

지금까지의 DOE 연구에 의하면 안전성, 운전 특성, 공정 및 비용, 저장/수송 요건, 인허가 요건, 처분장 설계 고려 사항 등을 기준으로 판단할 때, MPC를 이용한 방식이 별도의 저장, 수송 (및 처분) 캐스크에 비해 유리하다고 결론을 내린 바 있다.

특히 MPC는 일단 내부에 사용후 연료를 장전하기만 하면 캐니스터 자체를 저장·수송(및 처분)용 포장 용기에 넣어 취급할 수 있기 때문에 연료 취급 절차를 줄일 수 있는 장점이 있다.

인허가 일정상 MPC는 10 CFR 72 및 71의 요건에 따라 저장/수송 겸용의 용기로 먼저 인허가를 받을 것으로 예상되며, 처분에 관한 인허가 요건 만족 여부는 처분장에서의 열 및 임계도 불확실성 등과 관련하여 별도 항목으로 취급될 것으로 전망된다.

MPC 사업은 94년 6월 DOE가 사업제안요구서(RFP)를 발급함에 따라 웨스팅하우스(WEC)사가 캐니스터를 설계하면서 시작되었다.

MPC는 각 발전소에서 사용되는 연료, 크레인 용량 및 기타 물리적 제한점 등을 이유로 가압 경수로용

(125톤급 용기, 75톤급 용기, long ton 기준) 및 비등 경수로용으로 각각 2개씩 총 4개가 개발되고 있다.

이러한 개념은 현재 미국에서 운영 중인 121기의 상업용 원자로 중에서 구형 발전소 19기만 제외하고는 모든 발전소에 적용 가능한 것으로 밝혀졌다. 이 프로그램은 한때 98년 채택을 목표로 진행되었으나, 예산 부족 및 의회에서 진행되고 있는 새로운 폐기물 관련 법안에 의해 현재 중단된 상태이다.

따라서 정부 차원이 아닌 민간 기업 차원에서의 MPC 사업이 진행되고 있으며, 거의 모든 제작사가 MPC 개발에 참여하고 있다.

- ① 저장/수송 겸용 금속캐 캐스크 (Transportable or Dual Purpose Cask Storage): NAC STC (NAC), TN-24, 32, 40(Transnuclear, 저장 전용 또는 겸용으로도 사용 가능), Castor 시리즈 금속 캐스크 (GNSI/CNS)
- ② 다목적 캐니스터 (MPC, Multi-purpose Canister): HI STAR-100/HI STORM-100 (Holtec), MP-187 (Vectra), TranStor(BNFL/SNC), TSC-21P, 24P (Westinghouse), UMSTM (NAC)

3. 인허가 절차

국내의 경우 소내 사용후연료 건식

저장 시설에 대한 기술 기준이 별도로 마련되어 있지는 않은 상태이므로 상당 부분은 기존에 개발된 소외 중앙 집중식 사용후연료 중간 저장 시설(습식)의 기술 기준 및 인허가 절차를 준용해도 될 것으로 판단된다.

즉 현재 개발된 소외 저장 시설의 기술 기준이 소내 시설보다 훨씬 엄격하므로 더 강화된 기준을 선택적으로 적용하여도 큰 무리는 없을 것으로 판단된다.

그러나 가까운 시일 내에 소내 저장 시설 건설이 예상되므로, 소내 건식 저장 시설의 특성에 적합한 기술 기준 및 인허가 절차가 마련되어야 한다.

현재 사용후연료 저장 시설의 건설 및 운영을 위해서는 안전성분석보고서(품질 보증 계획 포함), 환경영향 평가서 및 부지특성보고서의 작성이 필수적이다.

미국에서는 각각 습식 및 건식 소내의 저장 시설에 대한 기술 기준 및 인허가 절차가 개발되어 있으며, 건식 시설인 경우 발전소 운영자는 서로 다른 두 개의 허가(일반 및 부지 고유 허가)하에 시설을 운영할 수 있다.

부지 고유 허가를 획득하는 과정은 설계상의 기술적 특성을 NRC가 평가한다는 점에서 발전소 운영 허가를 얻기 위한 과정과 유사하다.

이 과정에서 인허가 신청자는 부지 특유의 필요 조건을 충족시키기 위해

초기 단계에서 캐스크 설계를 부지 조건에 맞출 수 있으며 주민 공청회를 거쳐야 한다.

기타 인허가 개정 절차는 발전소에 대한 인허가 개정 절차와 동일하다.

일반 허가는 90년 8월, NRC가 원자로 운영 허가를 소지하고 있는 사업자에 한해 일반 인허가 규칙(generic license rule)에 따라 승인 받은 바 있는 건식 저장 시설을 건설 및 운영할 수 있도록 10 CFR 72을 개정된 것에 근거를 두고 있다.

캐스크 설계에 대해 일단 승인을 받으면 NRC가 설계가 적합하다는 인증서(COC)를 캐스크 설계자에 발급하게 되고, 승인된 캐스크를 법제화(rulemaking)하여 승인 목록에 추가하게 된다.

현재 10 CFR 72, Subpart K에 규정되어 일반 허가하에 발전소 부지 내에서 연료를 저장하는 목적으로 사용할 수 있는 캐스크로는 <표 3>과 같은 캐스크들이 있다.

이와 같이 부지 고유 안전성에 대한 심사를 생략하는 것에 대해 논란이 있을 수 있으나, NRC는 하나의 특별한 부지에 대해 적합하도록 제작된 캐스크보다는 (기존에 인허가 받은) 모든 부지에서 사용할 수 있도록 제작한 캐스크가 더 바람직한 것으로 판단하고 있다.

NRC가 인증한 캐스크를 소내에서 사용하기 위해서는 내진 해석, 환경영향 평가, 보안/핵물질 안전 조치 등

이 선행된 발전소 부지 경계 내에서 사용하되, 사용 예정인 부지에서의 여러 가지 조건(지진·태풍 등)들이 캐스크 제작사와 NRC에 의해 고려되고 검증된 조건들의 범주 내에 드는 것을 미리 입증해야 한다.

다음은 부지 고유 허가 및 일반 허가에 대한 차이점이다.

가. 부지 고유 허가

(Site-Specific License)

- 10 CFR 50에 근거한 발전소 운영 허가를 가진 자가 아니어도 신청 가능.
- 소외 시설인 경우에도 적용됨.
- 1기 이상의 발전소로부터 연료를 수납받을 수 있음.
- 10 CFR 50의 발전소 인허가와 유사하여 안전성 및 환경에 대한 심사를 거쳐야 함.
- 10 CFR 72 Subparts A 내지 I의 요건들을 충족시켜야 함.
- 허가 기간은 20년으로 제한되거나 연장할 수 있음.
- 해체 발전소에도 적용되며 결합 연료도 저장 가능.
- 환경에 대한 영향 및 사용후연료 건식 캐스크 저장 시설의 설계에 대해 광범위한 검토가 필요하고, 주민 공청회의 가능성이 있으므로 비용 및 시간이 많이 소요됨.
- 일반 인허가 과정에서 필요로 하는 모든 문서 및 자료와 사용 캐스크의 인허가에 필요한 자

〈표 3〉 사용후연료 건식 저장 방식에 대한 미국 NRC 허가 현황

제작사	저장 방식	용량 (연료 집합체)	저장 설계 승인일 (Topical Report)	C of C 승인일 (Certification SAR, 10 CFR 72, Subpart K or 10 CFR 71)	비고
General Nuclear Systems, Inc.	Castor V/21 (Metal cask)	21 PWR	85. 9. 30	90. 8. 17. No. 72-1000 저장 COC	
Vectra Technologies, Inc.	NUHOMS-7P (Concrete module)	7 PWR	86. 3. 28		
Westinghouse Electric Cor.	MC-10 (Metal cask)	24 PWR	87. 9. 30	90. 8. 17. No. 72-1001 저장 COC	
Foster Wheeler Energy Applications, Inc.	MVDS (Concrete vault)	83 PWR 또는 150 BWR	88. 3. 22		
Nuclear Assurance Cor.	NAC-126 S/T (Metal cask)	26 PWR	88. 3. 29	90. 8. 17. No. 72-1002 저장 COC	
Nuclear Assurance Cor.	NAC-C28 S/T (Metal cask)	28 Canisters (56개의 PWR 연료 집합체로부터 인출)	88. 9. 29	90. 8. 17. No. 72-1003 저장 COC	
Transnuclear, Inc.	TN-24 (Metal cask)	24 PWR	89. 7. 5	93. 11. 4. No. 72-1005 저장 COC	
Nuclear Assurance Cor.	NAC-128 S/T (Metal cask)	28 PWR	90. 2. 1		
Pacific Sierra Nuclear Associates	VSC-24 (Concrete cask)	24 PWR	91. 3. 29	93. 5. 7. No. 72-1007 저장 COC	
Nuclear Assurance Cor.	NAC-STC	26 PWR	95. 7. 17 (저장 승인)	94. 9. 30.(수송 COC) 저장 COC는 심사중	저장 COC는 NRC 심사중임
Vectra Technologies, Inc.	NUHOMS-24P NUHOMS-52B (Concrete module)	24 PWR 52 BWR	89. 4. 21 (for 24PWR Topical Report)	95. 1. 23. No. 72-1004(for PWR & BWR) 저장 COC	
Holtec Int'l	HI-STAR 100	24 PWR 68 BWR		98. 10. 30 No. 72-1008	

주 : COC (Certificate of Compliance) : 품질 보증에 대한 인증서

료를 모두 구비하여 제출하고 이에 대해 심사를 받아야 함.

- 예 : Surry, Oconee, H.B. Robinson, Ft. St. Vrain, Prairie Island, Calvert

Cliffs
나. 일반 허가

(General License)

- 10 CFR 72의 Subpart K에 근거하여 Subpart L하에서

기타 시설

- Browns Ferry/Tennessee Valley Authority(미국) : Castor-1C (1 캐스크) 운영
- Trojan/Portland General Electric Company(미국) : TranStor (36 캐스크) 예정
- Rancho Seco/SMUD(미국) : MP-187 및 NUHOMS (2개 캐스크 및 21 HSM) 예정
- J.A. Fitzpatrick 및 Oyster Creek/General Public Utility(미국) : NUHOMS-52 예정
- North Anna Units 1,2(미국) : TN-32 (1824 핵연료 집합체) 운영 예정
- 벨기에 Doel/Synatom : TN-24D (53 캐스크에서 111 캐스크로 용량 확장 예정) 운영
- 아르메니아 Metsamor Unit 2 : NUHOMS 예정 (현재 주건물 완성)
- 스페인 Trillo, Garona, Zorita, Cofrentes : ENSA-DPT (NAC-STC를 기본으로 한 검용 캐스크) 운영 예정
- 리투아니아 Ignalia : Castor 캐스크 운영 예정
- 우크라이나 Zaporozhe : VSC-24 (175 캐스크) 운영 예정
- 이외에 아르헨티나(Erbalse, CANDU600, 콘크리트캐스크방식) 및 인도(Rajasthan/RAPS, PHWR, 콘크리트캐스크방식) 등지에서 운영 또는 예정중임.

COC를 발급받은 모든 캐스크에 적용되며, 허가 기간은 COC 보유 캐스크를 최초로 사용한 후부터 20년간임(연장 가능).

- 발전소 운영 허가를 보유한 자가 신청. 따라서 부지 고유 허가에 필요한 환경 영향 검토 및 안전성 평가를 생략할 수도 있음(시설에 대한 새로운 SAR의 제출이 필요 없으며, 이에 대한 SER도 작성하지 않음. 또한 이미 허가를 받은 캐스크를 사용하므로 캐스크 자체에 관한 심사 과정은 불필요하며, 동 캐스크를 이용한 시설에 대해서도 별도의 심사 과정을 거치지 않음).
- 단 인허가 신청자는 일반 허가의 요건들이 만족됨을 반드시 입증하여야 하나, NRC가 건식 캐스크 저장 시설의 설계를 재평가할 필요는 없음(인허가 신청자는 SAR 작성이 필요하지는 않으나 NRC가 이에 관한 정보를 추후 요구할 경우에 대비하여 관련 설계, 해석, 도면 및 절차서 등을 미리 구비해야 하며, 10 CFR 50.59에 대한 평가를 자체적으로 수행해야 함).
- 건식 캐스크 저장 시설의 설계에 대해 별도의 인허가 심사를 하지 않으므로 비용과 시간을 절약할 수 있으나, 일반 허가 적용 과정에서 하자가 있을 가능성에 대해 법적으로 소송이 제기될 경우는 시간과 경비가 더 많이 소요될 수 있음.

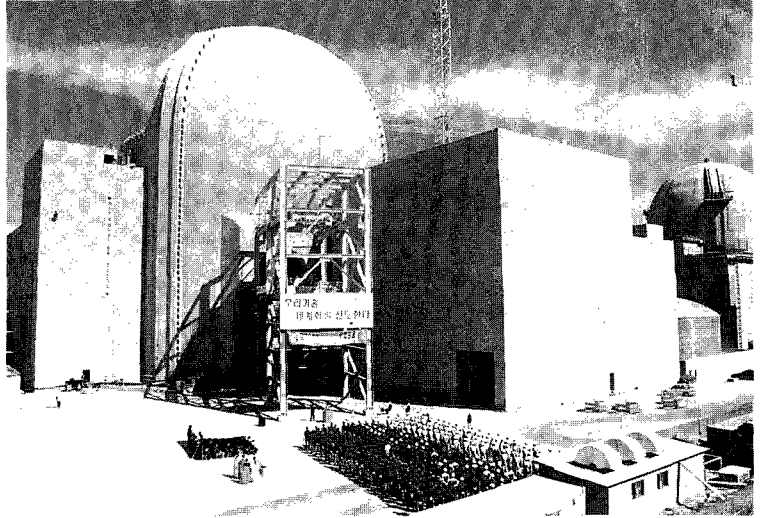


사진 3. 4호기. 우리나라의 사용후연료는 96년말을 기준으로 가압경수로 사용후연료 약 1,823톤, 가압중수로 사용후연료 약 1,410톤이 발생되어 습식 혹은 건식으로 저장되어 있다.

- 발전소를 해체할 경우는 부지 고유 허가로 전환하여 신청(별도 심사 필요)하여야 하며, 결합 연료는 저장할 수 없음.
- 일반인들의 의견은 COC 부여를 위한 캐스크 심사 과정에서 반영되므로 일반 허가 과정에서는 생략됨.
- 예 : Dresden, Palisades, Point Beach, Davis Besse, Arkansas Nuclear One

4. 주요 기술적 현안

사용후연료 건식 저장에 있어 검토를 필요로 하는 기술적 현안들은 피복재 산화, 최대 허용 온도, 핵임계(대부분의 건식 저장은 물과 접촉할 확률이 적어 핵임계 가능성이 적음), 차폐, 충전기체의 안전성, 중성자 단면적 라이브러리, 열전달 평가 보수성, 방사선 조사에 따른 사

용후연료의 크기 변화, 용접 결합 및 캐스크로의 연료 장전 후 배수 시간 외에 많은 항목들이 있으나 여기에서는 최근 미국에서 많이 논의되는 인허가 관련 현안들을 위주로 간략히 기술하였다.

가. 연소도 증가(장주기 고연소 연료의 건식 저장)

연소도가 증가되면 폐기물 발생량 감소, 연료 주기 비용 감소, 가동률 증가 및 피폭량 감소 관점에서 유리하다.

그러나 EOL에서의 연료봉 내압 증가, 조사 시간의 증가로 인한 지르코늄 합금 피복재의 부식 증가, 피복재 부식 증가로 인한 피복재 내 수소 농도의 증가 등의 문제가 야기될 가능성이 있다.

미국 PNL에서 수행한 연구에 따르면 UO_2 의 열전도도 저하가 연료봉의 열 성능에 가장 큰 영향을 미

치는 것으로 나타났으며, 열 전도도는 10 GWD/MTU당 5~7%의 비율로 감소하는 것으로 알려져 있다.

장주기 운전으로 인해 영향을 받는 변수들은 일반적으로 연료의 저장 에너지, 핵분열 기체의 방출 및 연료봉 내압이며 가압 경수로 연료의 평균 연소도가 50 GWD/MTU 부근일 때는 핵분열 기체의 방출이 가속화된다.

따라서 장주기 연료를 건식 저장할 경우에는 이와 같은 특성들을 고려하여야 한다.

나. 연소도 크레딧

지금까지는 캐스크의 임계도 해석에서 모든 사용후연료를 신연료로 보고 임계도를 계산하였다.

그러나 실제로는 연소도에 따라서 핵분열성 물질의 양 감소, 중성자를 흡수하는 액티나이드 핵종 및 핵분열 생성물의 존재 등을 고려해야 하며, 이와 같이 반응도가 감소되는 효과를 고려하는 것을 연소도 크레딧이라 한다.

미국의 DOE는 95년과 97년에 향후 DOE 사업에서 액티나이드 핵종만을 고려한 연소도 크레딧을 허가받기 위해 이에 관한 보고서(TSAR)를 NRC에 제출한 바 있으며, 핵분열 핵종까지 고려한 연소도 크레딧은 예산상의 문제로 추후에 제출할 예정이다.

연소도 크레딧을 인정받을 경우에는 중성자 흡수체(독물질)의 삽입

이 불필요해짐에 따라 제작 비용이 감소되고, flux trap의 제거로 저장 용량을 증가시키거나 저장 가능한 연료의 농축도를 상향시킬 수 있어 경제성이 향상된다.

연소도 크레딧을 고려하게 되면 캐스크의 용량을 약 20% 정도 증가시킬 수 있고, 수송을 위해 추가되는 중성자 흡수체의 비용을 캐스크당 약 5만달러 정도 줄일 수 있는 것으로 평가되고 있다.

현재 DOE에서 주도하고 있는 액티나이드 핵종에 대한 연소도 크레딧은 NRC가 기술적 현안에 대해 심사중이며, 향후 늦어도 5년 이내에 허가될 것으로 전망되고 있다.

이 부문에 인허가를 받기 위해서는 연소도 크레딧 평가에 관한 총체적인 방법론과 행정 기록 및 측정이 우선되어야 하며, 축방향 농축도가 균일하지 않은 연료 및 평균 연소도가 50 GWD/MTU 이상인 사용후연료 집합체는 이 허가 대상에서 제외된다(50 GWD/MTU까지의 연소도 범위에서만 축방향의 연소도를 평균 연소도로 모델링하는 것이 보수적이기 때문이다).

이에 따라 건식 저장 또는 수송 대상 연료를 선정할 경우에는 1차적으로 원자로 운전 기록을 기준으로 선정하고, 연료 장전시 연소도 계측기를 이용하여 검증하게 된다.

한편 핵분열 생성물에 대한 연소도 크레딧은 NRC가 캐스크 설계시

이 부분의 안전 여유도를 유지하는 것을 원하고 있기 때문에 향후 10년 내에 승인받기는 어려울 것으로 전망되고 있다.

영국에서도 가까운 시일 내에 수송시 연소도 크레딧을 허가하지 않을 것으로 전망된다.

다. 붕소 크레딧

미국의 경우 건식 저장에서는 습식 저장과 달리 저장 캐스크에 한해 캐스크에 연료를 장전하는 과정에서 의 보른 크레딧을 인정한 바 있다.

즉 안전성분석보고서의 기술지침서에 저장조에서의 최소 붕소 농도가 규정되어 있는 경우는 저장조 내 붕소 농도가 균일하게 유지되고, 비붕산수로 캐스크가 침수되지 않음을 증명하는 경우에 한해 캐스크로의 사용후연료 장전 또는 인출시에 붕소에 대한 크레딧을 인정하고 있다.

그러나 수송 또는 건식 저장 상태에서의 붕소에 대한 크레딧은 인정하지 않는다.

라. 코팅재

건식 저장 캐스크에 사용되는 코팅재는 붕산수와 접촉할 경우 수소 발생 가능성과 건식 저장 환경에서의 열 및 방사선에 의한 유기 물질 파손 가능성 관점에서 검토되어야 한다.

96년 5월 28일 미국 Point Beach 발전소에서 발생한 사고에 의하면 VSC-24 캐스크 내부의 차

폐 뚜껑을 용접하는 과정에서 가연성 기체(수소)가 연소되는 사건이 발생한 바 있으며, 수소는 캐스크에 사용된 아연 코팅재(Carbo Zinc 11)와 사용후연료 저장조 내 붕산 수와의 반응으로 발생된 것으로 추정된 바 있다.

이로 인해 용접 작업은 즉각적으로 중지되었으나, 측정 결과 캐스크로부터 방사능이 누출되지 않은 것으로 판명되었으며, 저장중인 연료도 손상되지 않았다.

그러나 저장중이던 모든 연료는 다시 사용후연료 저장조로 되돌려 보내졌으며, 그외에 동 부지 내에서의 운전 중이던 두 기의 발전소에 다른 영향은 없었다.

사고 조사 결과, CZ11의 제작 회사인 Carboline사는 Point Beach 발전소측에 동 재질을 산성 환경에서 사용하지 말라는 권고를 한 바가 있었고, 연료를 캐스크에 장전하는 일련의 작업중에도 작업자가 기체 발생을 육안으로 목격하는 등 적어도 4번 정도의 사전 인지 기회가 있었음에도 불구하고, 비정상적인 현상을 제대로 문서화하지 않고 이에 대한 철저한 평가 및 대비가 없었음이 확인되었다.

이 사건 후에 전식 저장이 시급했던 ANO 발전소에서는 용접 작업중 캐스크 내부의 공기를 연속적으로 배기시킴으로써 캐스크 내부에 가연성 수소의 축적을 방지하겠다는 계

획을 제출하여 NRC로부터 승인받기도 하였다.

한편 VSC-24 캐스크의 제작사인 Sierra Nuclear는 새로운 코팅재의 사용을 검토하고 있다.

그러나 현재까지는 알루미늄 스프레이코팅(붕산수와 접촉시 수소 발생)을 포함하여 완벽한 코팅재는 없는 것으로 판단되며, Trojan 발전소(Portland General Electric Company)에서는 Point Beach에서의 사고에도 불구하고 CZ11을 계속 코팅재로 사용할 예정에 있다.

마. 품질 보증 프로그램

일부 제작사의 경우 품질 보증 프로그램의 결함 또는 실행 미비로 인하여 수차례 NRC로부터 지적받은 바 있으며, 이로 인해 Vectra사는 NRC 및 NUHOMS를 운영하는 전력 회사들로부터 감사를 받은 바 있다.

이 과정에서 제작이 중단되고 경영난에 빠지게 된 Vectra사는 Transnuclear사에 합병되기도 하였다.

NRC는 현재의 규제 범위를 저장 캐스크 설계에 대한 인증(COC) 보유자(또는 신청자) 뿐만 아니라, 그 계약자(전력 회사) 및 하도급자에게 까지 확대하여 적용시킬 것을 검토하고 있다.

이 검토안에는 앞에서 언급한 사업주들에 대한 기록 유지 및 보고 의무까지 포함되어 있다.

바. 사용후연료 수송(Transport)

우리 나라의 경우는 현재 소내 이송과 소외 수송에 관한 명확한 법적 정의가 규정되어 있지 않으나, IAEA Safety Series 6 (1990 수정판) 「수송 규정(Transport Regulations)」에 의하면, “수송에 관한 규제 요건은 한 부지에서 타부지로 수송중에 있는 저장 상태를 제외하고는 방사성 물질이 생성, 사용 또는 저장되고 있는 시설 내에서는 적용되지 않는다”고 정의하고 있다 (103항 및 104항).

특히 영국의 경우는 IAEA Safety Series 6에 입각한 「방사성 물질의 도로 수송 규정」에서 수송을 ‘도로를 통한 수송’으로 규정하고 있으며, 도로란 ‘일반인이 접근 가능한 ... 고속도로... 등’으로 표현하고 있어 일반인이 쉽게 접근할 수 없는 원자력발전소 부지 내에서의 행위에 대해서는 적용하지 않는 것으로 되어 있다.

이에 의하면 소내 이송인 경우는 수송 규정을 따르지 않아도 될 것으로 판단되나, 적용 규정에 관한 최종 판단은 규제 기관의 입장에 따라야 할 것으로 판단된다.

현재 사용후연료의 수송에 관련된 국제적인 요건으로는 국제원자력기구(IAEA)의 「방사성 물질의 안전 수송에 관한 규제」와 「핵물질의 물리적 방호에 관한 국제 협정」이 있다.

국제원자력기구에서 제정한 규제 요건은 수송 포장물의 설계 및 시험에 관한 지침을 제시하고 있는 반면, 「핵물질의 물리적 방호에 관한 국제 협정」에서는 수송 및 저장시에 다양한 핵물질에 대한 물리적 방호의 수준에 대해 규정하고 있다.

동 협약은 74년 미국이 제출한 초안에 기초하여 87년부터 발효되었으며 현재 21개국이 준수하고 있다.

국제원자력기구에서는 96년 12월 「방사성 물질의 안전 수송에 관한 규정 (safety Standard Series No. ST-1)」을 발표하였는데, 동 수송 규정에서는 ICRP 60의 최근 개정판과 국제원자력기구 기본 안전 표준(Basic Safety Standards)의 개정판을 참고로 하고 있다.

새로운 수송 규정에서의 주요 변경 내용은 다음과 같다.

- ① 수송 포장물의 방사능 제한치(면제 제한치 포함)에 대한 개정
- ② B형 수송 포장물보다 기준이 엄격한 C형 수송 포장물 정의
- ③ 저확산성 방사성 물질(LDM)을 항공 수송할 수 있도록 B형 수송 포장물의 범위를 확장
- ④ 새로운 포장 요건의 채택 및 임계 안전성에 대한 광범위한 검토 : 임계 안전 지수 개념을 채택하고 기존의 운반 지수는 방사선 방호를 위해 별도로 적용, 임계도 평가와 관련하여

동위원소 조성을 확증할 수 있는 측정을 통해 보수성 확보) 사. 저장 방식에 따른 냉각 기간, 연소도 및 농축도의 고려

건식 저장에서 사용후연료에 관한 기본적인 설계 변수로는 사용후 연료의 냉각 기간, 연소도 및 농축도 등을 들 수 있다.

이들은 임계도 안전성, 냉각 능력 및 방사선 안전성 측면 등을 고려하여 저장 용량과 연계하여 결정해야 한다.

습식 저장에서는 중성자속이 매우 낮고, 물이 중성자를 흡수하는데 매우 효율적이므로 방사선 방호 및 냉각 능력 측면에서 중성자의 중요도가 낮아진다.

그러므로 원자로 정지 후 냉각 기간이 짧으면 방사선원항 및 냉각 특성이 연료의 비출력에 따른 포화 단수명 핵종에 의해 지배되므로, 연료의 비출력과 냉각 기간이 중요한 인자가 되는 반면 연소도는 부차적인 인자가 된다.

따라서 연소도와 연계하여 이에 따른 농축도 차이에 의한 효과도 미미해진다.

이에 비해 건식 저장에서는 차폐 관점에서 중성자가 중요해지고, 보통 최소 5년 이상의 냉각 연료를 저장하기 때문에 단수명 핵종보다는 장수명 핵종이 중요한 인자가 되고 따라서 연소도가 중요한 인자가 된다.

그러므로 차폐 설계 및 해석에서는 보수성을 높이기 위해 중성자 생성률을 높이도록 해야 한다.

건식 저장에서는 동일한 연소도일 경우 농축도가 낮을수록 플루토늄의 생성량이 높아지므로 해석시 목표로 하는 설계 연소도를 결정한 후 연소도를 달성하는 데 필요한 최소 농축도를 보수적으로 결정해야 한다.

즉 건식 저장에서는 농축도 변화에 따른 차이를 중요하게 고려하여야 하고, 연소도는 캐스크가 수용할 수 있는 발열량에 따라 결정되어야 한다.

5. 습식저장과 건식저장의 비교

습식은 사용후연료에서 발생하는 열 및 방사능을 물에 의해 차폐 및 냉각하는 방식인 반면, 건식은 금속 또는 콘크리트와 같은 구조물과 자연 냉각을 통하여 차폐 및 냉각하는 방식으로 다음과 같은 특징이 있다.

- ① 일정 기간 냉각된 연료만 저장 가능(주로 5년 이상 냉각된 연료 저장).
- ② 용량 증설이 용이(저장 용량 및 저장 부지에 대한 유연성이 있음).
- ③ 2차 폐기물의 발생이 거의 없음.
- ④ 초기 투자비가 적음.
- ⑤ 운영 유지비가 적음(유틸리티 소요량이 적음).

⑥ 습식 저장과 달리 저장수 취급, 저장조의 열화, 누수, 오염 확산 등의 문제가 없음

⑦ 감속재를 사용하지 않고, 사용후연료를 저장하므로 부주의한 임계도 사고가 발생할 가능성이 적음. 또한 중성자 감속이 제한되므로 좀 더 조밀하게 저장할 수 있음.

⑧ 습식과 달리 별도의 건물이 필요 없음(단 유럽에서는 차폐 등을 이유로 건물을 두고 있는 경우가 있음).

그러나 습식 저장과 건식 저장은 서로 보완적인 관계이며, 미국의 경우에도 일단 조밀 저장대 설치로 사용후연료 저장 용량을 최대한 확장한 후 건식 저장을 하는 것이 일반적이므로, 소내 또는 소외에서의 사용후연료 저장 방식을 결정할 경우에는 제반 여건 및 경제성을 함께 고려하여 결정하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

맺음말

일반적으로 사용후연료에 대한 시각은 크게 위험하고 관리하기 어려운 폐기물로 보는 시각과 충분히 안전하게 관리할 수 있으며 유용한 자원이라고 보는 시각 두 가지로 나눌 수 있다.

이와 같은 시각의 차이와 경제적인 득실에 따라 사용후연료는 재처

리 또는 최종 처분될 수 있다.

예를 들어, 미국 및 스웨덴 등은 비용과 안전성 등을 이유로 사용후연료를 최종 처분할 것을 결정한 바 있는 반면, 유럽·러시아·일본 등의 국가들은 재처리를 선호하고 있다.

과거에는 재처리가 단기적으로 핵확산의 위험을 높이고, 부산물인 고준위 폐기물이 직접 처분에 비해 비용 및 환경에 대한 영향면에서 불리하다는 인식이 지배적이었으나, 최근 들어 핵확산의 위험을 최소화시킬 수 있는 재처리 방법들이 제시되고 있어 재처리에 대한 부정적인 면이 완화되는 경향이 있다.

또한 미국 내(상원 및 오크리지 국립연구소)에서도 사용후연료를 직접 처분하는 경우에도 핵확산을 근본적으로 막을 수 없다는 주장이 제기되고 있으며, 잉여 플루토늄의 소비를 위하여 DOE가 MOX 연료의 인허가를 추진중에 있기도 하다.

우리 나라의 경우 현재 특별하게 결정된 정책은 없지만 중장기 연구 개발 차원에서 사용후연료를 활용한 다양한 신연료를 개발중에 있다.

결론적으로 사용후연료는 지금까지 안전하게 저장 또는 이용되어 왔고, 또 앞으로도 소내의 임시 저장, 직접 처분 또는 재처리를 통하여 안전하게 관리할 수 있을 것으로 판단된다.

그러나 좀 더 효율적인 사용후연

료의 관리를 위해서는 사용후연료에 대한 명확하고도 통일된 전략을 수립하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

이를 위하여 참고할 만한 다른 나라의 사례는 있는지, 없다면 우리의 특수성을 감안한 바람직한 추진 방향은 무엇인지에 대한 입장이 재정립되어야 한다고 생각한다.

그동안 사업 또는 연구 개발 측면에서 사용후연료 저장, 수송 및 처분 등을 포함한 관리 분야에 적지 않은 투자를 해 온 우리로서는 안전 조치 강화 체제나 폐기물에 관련된 국제 협약 등을 비롯한 국내외 여건을 고려하여 추진 방향을 재검토해 보고, 그에 따라 효율적인 투자 전략을 세우는 것이 국가적으로 어려움에 처해있는 우리 현실에도 부합될 것이라고 생각한다.

사용후연료 정책에 관한 한 이미 여러 번의 시행 착오를 겪은 나라로서 똑같이 부지 문제로 고생을 하고 있는 미국이나 나름대로의 이용 계획을 갖고 사용후연료 소외 저장 시설의 건설을 추진하고 있는 일본의 예를 우리에게 그대로 적용하기에는 부적합한 면이 많이 있겠지만, 그 흐름을 살펴보면 우리에게 적절한 국가적인 차원 및 사업자 측면에서의 추진 전략을 수립하는 데 참고가 될 수 있을 것이며 그에 따라 투자를 최소화시킬 수 있을 것으로 판단된다. ☞