

原子力 發電所의 防災 對策

(FIRE SAFETY IN NUCLEAR POWER STATIONS)

김 동 석/기술 지원부

- ABSTRACT -

The Chernobyl disaster, the most serious and recent incident at an atomic plant, focussed worldwide attention on the danger of nuclear power.

In this article, we discuss the fire hazards in nuclear power stations and some of the precautions necessary.

Also this deals with each of the reactor components in turn, and the examples of incidents in the nuclear power stations are briefly described.

1. 머리말

세계 최초의 원자력 발전은 1951년 12월에 미국 아이다호주 국립 원자로 시험장의 고속 증식로에서 불과 150kW의 발전에 성공하여, 사막속의 아로코라는 마을에 1시간정도 송전한 것이 최초이다.

실용 규모의 원자력 발전소는 최초로 소련의 오프닝스크발전소가 1954년에 5000kW를 발전하였으며, 1956년 영국 콜더홀발전소가 상업용 발전소로 최초로 국가적 운전을 개시했다.

그후 1963년경의 오일쇼크 이후 탈석유 노선속에 적극적으로 원자력 발전이 계획 건설되어 현재 29개 국가에서 전기를 생산하는 400여개의 원자로가 있으며 130여개가 건설중에 있다.

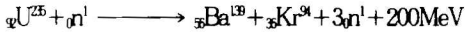
비록 원자력 발전소의 화재 위험은 재래의 화력 발전소의 화재보다 만드시 높지 않지만 화재의 결과는 1986년의 체르노빌 원자력 발전소의 참사에서 보았듯이 매우 심각하다.

본고에서는 원자력 발전소의 시스템 및 각원자로 구성요소에 대한 방재대책의 개요를 소개하기로 한다.

2. 원자력 발전의 시스템

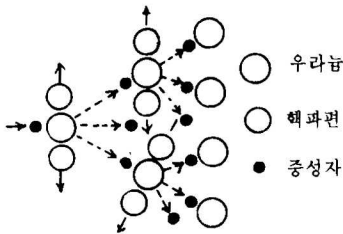
1938년 하안과 스트라스만은 우라늄(^{235}U)에 속도가 느린 중성자를 충돌시키면, 질량이 거의 같은 두 개의 원자핵으로 분열되면서 두, 세개의 중성자와 막대한 에너지가 방출되는 것을 발견하였다.

이 때의 반응식은 다음과 같다.



이와 같이 원자 번호가 큰 원자핵이 깨어져서 질량이 보다작은 둘 이상의 원자핵들로 나뉘어지는 것을 핵분열(核分裂)이라 한다.

원자핵이 분열할 때 방출되는 중성자가 또다른 원자핵과 반응하여 핵분열이 연쇄적으로 진행된다. (그림1 참조)



<그림 1> 핵분열의 연쇄반응

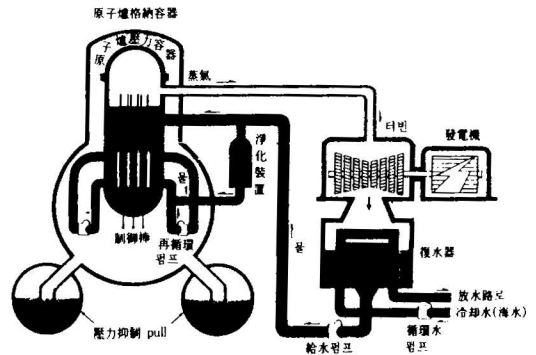
이 핵분열의 연쇄반응을 서서히 진행시켜 그 에너지를 이용할 수 있으며, 또 동위원소를 생성할 수 있는 장치를 원자로(原子爐)라 한다.

원자로에는 보통 농축우라늄이 사용되며, 핵분열은 비교적 느린 중성자를 흡수할 때 쉽게 일어나므로 빠른 중성자를 중수나 흑연등의 감속제(moderator)속을 지나게 하여 이들과 충돌해서 에너지를 잃도록 해주면 다음 분열이 쉽게 일어나고, 이때 연쇄반응이 지나치게 활발하면 폭발할 우려가 있으므로, 반응 속도를 조절하기 위해서 중성자를 잘 흡수하는 카드뮴(Cd)이나 붕소(B)등으로 만든 제어봉(制御棒)을 이용하여 반응속도를 조절한다.

화력 발전과 원자력 발전의 차이는 화력발전의 열원이 석유, 석탄, LPG, LNG를 연료로 하는 보일러인데 반해 원자력 발전은 우라늄, 플루토늄등이 핵분열시 생기는 열을 이용하여 증기를 발생시키는 원자로를 이용한다는 점이며 그 증기로 터빈을 회전시키고 직결한 발전기에 의해 전력이 발생한다.

모든 원자로는 연료, 감속제, 냉각제, 제어봉과 원자로로부터 방사선을 차단하는 차폐재(생체 차폐장

치)등으로 구성된다. (그림2 참조)



<그림 2> 표준형 원자로의 예

원자로의 종류는 크게 열원자로(thermal reactors)와 소비되는 연료보다 더 많은 연료를 생성하는 증식로(breeder reactors)로 크게 구분할 수 있으며 세부형식 및 구성요소는 표1과 같다.

<표 1> 원자로의 종류와 구성요소

원자로의 종류	연료	감속제	냉각제	비 고	
경수로	비동수형(BWR)	농축우라늄	경수	세계적으로 사용	
	가압수형(BWR)	농축우라늄	경수	세계적으로 사용	
가스로	가스냉각로(GCR)	천연우라늄	흑연	탄산가스	영국을 중심으로 사용
	고온로(HITGR)	농축우라늄 토륨	흑연	헬륨	서독, 미국에서 개발 중
중수로	경수냉각형	농축우라늄 천연우라늄 플루토늄	중수	경수	드물게 사용
	중수냉각형	천연우라늄	중수	중수	캐나다를 중심으로 사용
고속증식로(FBR)	열화우라늄 플루토늄	없음	나트륨-칼륨합금	넉은 연료보다 새로 만들어 내는 연료가 많은 이상 원자로 프랑스, 서독 등 세계적으로 개발 중	

3. 원자력 발전소의 구성요소에 따른 위험 고찰

가. 연료(Fuel)

열원자로(thermal reactors)는 보통 천연 우라늄이 보통 사용되고 드물게 Th(thorium)이 사용되며 증식로(breeder reactors)는 농축우라늄 또는 플루토늄이 이용되며 감속제를 필요로 하지 않는다.

우라늄 연료는 스테인레스강, 마그네슘, 지르코늄 합금으로 밀봉된 금속 또는 이산화물로 존재하며, 이 이산화물은 일반적으로 가압되어 펠렛(pellets)로 당화되어 점차 도기와 결합한다.

우라늄 원자의 분열은 질량수 75와 160사이의 크세논(xenon), 크립톤(krypton), 요오드증기와 같은 가스를 생성하며 이 가스들은 연료 용기의 폭발, 부풀어오름, 휘을 발생 시켜 방사능 물질을 냉각수로 방출 시킬 수 있다.

우라늄, 토륨, 프루토늄, 지르코늄은 모두 금속이고 세분된 상태에서 쉽게 타며 약간은 분말형태에서 스스로 타다.

각 원소의 성질및 소화방법은 다음과 같다.

(1) 우라늄(Uranium)

산소, 이산화탄소, 질소는 우라늄과 반응하므로 소화약제로 사용할수 없으며, 하론은 고체우라늄의 연소율을 제어하는 것으로 알려져 있으나, 세밀하게 세분된 금속과 격렬하게 반응하므로 부적합하며 TEC와 칼슘플루오리드가 소화약제로 사용된다.

(2) 토륨(Thorium)

토륨은 우라늄과 유사한 특성을 가지고 있으나 분말은 낮은 점화온도를 갖고 있어 헬륨과 아르곤 분위기에서 건조상태로 취급한다.

공기나 용기의 벽과 부딪히는 운반시에 점화를 일으킬수 있는 정전기를 발생시킬수 있으며, 부적당한 압착펠렛는 질소와 산소의 흡수를 통해 충분한 열을 발생시켜 용기를 적열상태까지 가열 시킬수 있다.

TEC 또는 특수목적의 소화약제를 사용해야 한다.

(3) 플루토늄(Plutonium)

플루토늄은 우라늄보다 더 점화에 민감하며, 분말은 임계점문제 때문에 제한되어, 통제상태에서 타버

리도록 허용된다.

TEC와 특수목적의 소화약제를 사용하여야 한다.

(4) 마그네슘(Magnesium)

마그네슘은 증기와 반응하여 산화물과 수소가 형성되며, 수소는 폭발할 가능성이 있다.

마그네슘은 산소와 높은 친화력을 갖고 있으며 이산화탄소에서도 타고 질소와 반응하므로 이들 두가스 어느것도 소화제로 사용할수 없으며 하론도 타고 있는 마그네슘과 격렬하게 반응한다.

아르곤, 네온, 헬륨이 효과적인 소화약제이며 TEC 분말 또는 칼슘플루오리드, 흑연분말이 역시 사용된다.

(5) 지르코늄(Zirconium)

지르코늄은 이산화탄소와 질소에서 타며 자활(self-sustaining)되기 위해서는 높은 온도가 필요하다.

이것은 하론과 격렬하게 반응하지만 대기상태나 아르곤에서는 타지 않는다.

TEC분말과 칼슘플루오리드는 소화약제로 사용된다.

나. 감속제(Moderators)

감속제로는 경수, 중수, 흑연이 주로 사용되며 물은 위에서 언급된 타고 있는 금속, 방사능에 의한 화학적 분해 또는 과열된 연료에 의해서 수소와 산소로 해리된다.(Three Mile Island 사고)

흑연은 점화되기 매우 어려우며 화염없이 타다.

550°C 이상에서 이것의 산화작용은 자기가열하며 1000°C 이상에서 증기와 반응하여 일산화탄소와 수소가 발생하며, 600°C 와 1000°C 사이에서는 이산화탄소와 수소를 발생시킨다.

약 200°C 이상의 온도에서는 잘 일어나지 않지만 저온의 흑연 감속제를 사용하는 연구로에서 방사선은 흑연 결정구조를 일그러뜨려 에너지를 저장할수 있으며 온도를 올림으로써 규칙적으로 이 에너지가 흩어지지 않으면 에너지가 갑자기 방출되어 급격한 온도상승이 일어나 화재를 낚는 "Wigner Effect"라 불리는 현상이 발생할 수 있다. (Windscale사고)

흑연화재는 이산화탄소에 의해 소화되며 이반응은

열을 흡수하는 흡열반응이다. 아르곤가스와 저농도의 염소는 흑연 산화 억제에 효과적이며, 물은 폭발가능성이 있는 수소와 일산화탄소생성의 가능성에도 불구하고 대형화재의 유일한 실제 소화방법일 수 있다.

다. 냉각제(Coolant)

연쇄반응으로 부터 발생된 열을 제거하는 액체 또는 기체로서 CO₂, 헬륨, 물, 중수, 유기용액, 액체나트륨, 나트륨-칼륨 합금이 사용되며, 나트륨과 칼륨은 반응성이 높은 금속이고, 물을 산소와 수소로 해리시킨다.

칼륨의 반응열은 수소를 점화시키기에 충분하며, 이금속들은 많은 부식성 산화물을 방출하면서 자유로이 탄다.

제한된 구역에서의 소형화재는 타도록 허용되며 TEC 또는 특수소화약제가 사용된다.

냉각제 시스템의 안전성은 로가 운행정지시에 상당기간동안 작동하는 능력이다. 노심내에서 생성되는 잔류붕괴열은 일반적으로 로의 운행정지 직후는 전 에너지의 7%이고 1시간후에는 약 2%이고 점차 감소하므로 이 열이 제거되지 않는다면 연료의 온도가 상승하여 연료와 피복의 용융(melt-down)을 일으킬 수 있다.

펌프는 이중으로 되어 있어야 하며 냉각제 비축분이 항상 준비 되어 있어야 한다.

라. 제어 시스템(Control Systems)

원자로의 운전은 중성자 밀도의 변동에 의해 제어하며 카드뮴, 하프늄, 붕소와 같은 중성자 흡수재료를 노심안밖으로 이동시켜 행한다.

이 제어봉은 자동적인 "Fail Safe" 긴급운행정지시스템(시스템의 일부가 고장이 있더라도 안전이 확보되도록 함)이 필수 불가결 한 요건이다.

대부분의 가스냉각 또는 물냉각 원자로는 최종안전 운행정지 시스템으로 노심으로 분사될 수 있는 붕소와 같은 중성자를 흡수하는 중성자독(neutron poison)을 장치시킨다.

그러나 이 중성자독은 연쇄반응을 멈출수 있을 정

도로 중성자를 흡수하나 회수방법 때문에 로가 수리 불가능될 수 있다.

마. 기타

(1) 방화구획

터어빈실은 원자로 구역과 분리되어야 하며 실제상 불가능하다면 최소한 방화벽으로 구획되어야 한다.

뼈대(frame work)는 불연성이고 작동중 이하는 3시간 내화, 이상은 1시간이상의 내화성이 있어야 하며 지붕은 자동 통풍구를 설치해야 한다.

(2) 케이블(Cables)

약 1700마일의 여러형태의 케이블이 원자력 발전소에서 사용되며 대개 콘크리트 닥트나 터널내부에 설치하고 모든 케이블은 사용중에 열을 발생시키므로 적절한 냉각과 통풍장치가 필요하다.

(3) 변압기(Transformers)

광물성 기름을 포함하는 변압기는 폭발과 화재위험이 있다.

이 변압기 화재는 오래 잔류하고 독성이 강한 물질을 발생시키므로 건물밖에 설치 하거나 벽돌과 콘크리트벽으로 인접건물과 구획하고 적절한 드레인 시설이나 흡수제를 설치 하여야 한다.

(4) 방사성 폐기물(Radio Active Waste)

이것은 강도에 있어서 낮은 활동성의 것으로부터 매우 높은 활동성의 것 까지 여러가지이며 핵종의 반감기에 따라 다르다.

아주 낮은 준위의 폐기물은 특별한 처리를 필요로 하지 않으나 대부분의 폐기물은 안전한 준위까지 활동성이 감소 하도록 수개월 동안 안전한 저장을 필요로 한다.

액체 상태의 폐기물은 일반적으로 오염된 물을 말하며, 분리된 드레인시스템에 의하여 저장되어 여과, 증발, 화학적처리등의 방법으로 물과 분리시켜 고체상태로 처리하거나 보호호기에 보관한다.

고체 상태의 폐기물은 그 활동성이 안전한 수준까

지 붕괴될때까지 용기나 드럼에 가압하여 채워넣거나, 매립, 조각등의 방법으로 처리한다.

4. 방화대책(FIRE PROTECTION)

일반적으로 원자력 발전소는 소방소와 멀리 떨어져 있으며, 방사성 위험 때문에 접근이 제한되거나 금지되는 구역이 있으므로 화재는 자동설비나 자체 소방대에 의해 초기에 발견되어 소화되어야 한다.

자동경보설비는 케이블닥트나 터널, 개폐기실, 배터리실, 비상발전실, 연료저장소등 고정식자동소화설비가 부적절하거나 연소성재료가 많은 장소 및 무인 지역에 설치하며, 시간과 발신지역이 표시 및 기록되는 중앙통제실과 연결되어야 한다.

주요 자동소화설비는 다음과 같다.

○ 스프링클러 소화설비

스프링클러설비를 최고의 소화설비이나 물이 감속제로 사용되므로 임계점위험을 발생시킬 수 있어, 원자로 구역내에서의 사용은 핵안전전문기관으로 부터 특별한 검토와 동의가 있어야 한다.

○ 포소화설비

포소화설비는 유류화재나 외부의 연료탱크방호에 사용될 수 있으며 고풍창포는 케이블 닥트나 터널화재시에 매우 유용하다.

○ 하론소화설비

하론소화설비는 제어실, 컴퓨터 및 기기실, 케이블실, 지하저장실등 스프링클러설비를 사용할 수 없는 곳에 사용한다.

○ 이산화탄소소화설비

CO₂소화설비는 무인변압기실, 배전실, 터빈 자동시동장치, 장갑상자등의 방호에 사용한다.

이 로는 공기냉각방식이고 화재는 흑연과 150개의 연료관으로 번졌다.

화재는 물로 소화됐으나, 주위 농장에 방사능 오염이 있었다.

이 원자로는 발전소용이 아니며, 현재는 대부분 더 높은 온도에서 작동되므로 이러한 Wigner Energy는 축적되지 않으며 더우기, 공기냉각시스템은 거의 사용하지 않는다.

나. BROWNS FERRY ALABAMA, USA(1975, 3, 22)

한 작업자가 원자로 건물벽의 관통케이블 주위의 공기누설을 검사하기 위하여 촛불을 사용했고 폼프 라스틱 충전재를 점화시켜 케이블에 불이 붙었다.

소화작업이 지체되었으며, 붕괴열을 흡수하는 냉각 시스템에서 문제가 발생했으나 임기응변의 수동조작으로 큰사고를 피했다.

나중에 여러 안전과 관련된 케이블이 파괴된 것이 발견되었으나 어떤 다른화재나 방사능 누출이 없었다.

이 사고이후 세계의 모든 원자력 발전소는 종래의 전력용 케이블과 제어용 케이블이 같은 관에서 사용되어 오던 것을 방화구획된 통로를 이용하거나 케이블을 이중으로 하는 필요 조치를 취했다.

다. THREE MILE ISLAND, USA (1979, 3, 28)

이 사고는 순환펌프의 정지로 부터 시작하여 연쇄적인 실수에 의해 발생했다.

순환펌프의 정지는 안전시스템에 의해 터버빈을 정지시켰으며 1차 냉각시스템의 릴리프 밸브를 개방시키고, 로(爐)가 운행정지(shut down)됐다.

압력이 강하되도 이 릴리프밸브는 닫히지 않았으나 제어실 기기는 닫힌 것으로 잘못표시 되었다.

밸브가 개방된 채 비상냉각펌프가 자동적으로 작동될 때 까지 압력이 계속 강해졌다.

통제실에서의 잘못된 기기표시로 조작자는 너무 많은 물이 흐르고 있는것으로 잘못알고 흐름을 줄였으며 결과 노심이 과열되고 연료요소에 큰 피해를 입혔다.

방출된 핵분열 물질과 증기가 열린 릴리프 밸브를

5. 사고의 예

가. WINDSCALE(1957, 10, 10)

이 사고는 위그너에너지(Wigner Energy)의 일상적인 방출기간 동안 발생했다.

연료의 국부적인 과열이 발생하여 알루미늄 피복재가 녹았다.

통해 누설되었으며, 응축수는 봉쇄시설내에 잔류했으나, 약간의 핵분열 물질이 보조건물의 물탱크로 옮겨져 건물 주위로 소량의 방사성 크세논과 요오드증기를 누설 시켰다. 더많은 연료방출이 일어나, 물과 고온급속의 반응에 의해 수소가 발생하여 최소한 한번이 수소-공기 폭발이 있었으나 건물은 설계된대로 이 압력을 견디어 냈다.

라. CHERNOBYL (1986, 4, 26)

이 원자로는 모두 4개 구성되어 있고 흑연 감속재 및 지르코늄합금 피복으로 피복된 농축 우라늄 이산화물펠레트를 사용하는 비등수형의 4×100MW 출력의 원자로이다.

이 원자로는 연료삽입구의 증기의 양이 증가하면 냉각계의 밀도가 감소해서 중성자 흡수의 감소가 일어나 더 많은 중성자가 목표(target)에 도달하여 로의 동력을 증가시키며, 이것은 연료의 온도가 상승하면 팽창해서 중성자의 감소가 일어난다는 "Doffer Effect"에 의해 평형이 이룩된다.

최종 평형은 동력 셋팅에 달려있으며 이 원자로는 전동력의 20%가 교차점(cross-over point)이다.

또한 중성자는 신속중성자(prompt neutrons)과 지연중성자(delayed neutrons) 두 종류가 있으며 신속중성자는 분열 즉시 방출되고 원자로에서의 대부분을 차지하며 지연중성자는 분열후 약 0.2초후에 방출되어 원자로 제어에 중요한 역할을 한다. 신속중성자는 원자로가 자급 연쇄반응을 얻는 임계점을 유지(흡수되는 것보다 더 많은 임계중성자 생산)할 만큼 충분해야 하며 급속한 중성자의 증가는 통제불능(runaway)을 낳을 수 있다.

이것이 체르노빌 발전소에서 실험중에 발생 했다.

자동제어봉시스템이 정지되었지만 조작자가 실수로 자동통제시스템 셋트포인트의 리셋트에 실패해서 통제의 불능을 가져와서 로의 동력이 초기 동력감소 후에 연료의 크세논독에 의해 격화되어 20%이하로 떨어 졌다. 임시 제어가 얻어졌으나 그때 벌써 증기와 물의 온도와 압력의 이상이 생겨 조작자가 낮은 증기발생을 보상하기 위해 더 많이 제어봉을 꺼냈다.

로의 운전을 정지 하지 않은 상태에서 발전기로 가는 주증기라인을 닫자, 순환수와 냉각수의 감소를 가져와 로온도의 증가와 증기가 발생했다.

증기의 발생으로 중성자수의 증가를 가져와 로의 출력이 증가하였다. 이 로출력의 증가가 감지되어 로운전을 정지 시켰으나 제어봉이 완전히 꺼내진 상태에서 삽입에의 시간지연을 가져와 로의 통제불능(runaway)를 가져왔다.

연료봉의 열은 급속히 상승하여 연료봉이 파괴되어 폭발적인 증기압과 결합하여 압력관을 파열시켜 증기가 감속제 영역으로 침투했고 물은 연료삽입구로 되돌려 졌다.

연료와 냉각제사이의 반응과 고온 흑연과 증기사이의 격렬한 반응의 징표로서 350bar의 압력펄스가 발견되었다.

또한 수소 또는 CO-공기 폭발이 있었을 가능성이 있으나 지금까지 확인되지 않았다.

소련당국은 수초동안에 전동력의 100배에서 400배의 동력이 증가한 것으로 평가했다.

약 3000°C의 로내의 연료가 연료삽입구에서 물과 증기와 혼합하여 압력의 증가를 가져왔다.

폭발은 원자로의 지붕을 날려 버렸으며 노심내 물질을 분출시켜 다른건물의 지붕위로 떨어졌고 대기로 매우높은 방사성물질을 방출시켰다.

화재는 수일동안 모래, 점토, 납, 붕소등의 혼합물에 의해 소화되었다.

이것은 원자력 발전소 역사 이래 최악의 사고였다.

6. 결 언

현재 우리나라의 원전시설은 1978년 고리 원자력1호기가 운전을 개시한 이래 현재 9기가 운전중에 있으며 2기가 건설중에 있고 전체발전 용량의 55%이상을 담당하고있다.

석유에너지의 재해와는 달리 원자력재해의 영향은 범위가 크고 더욱 무서운것은 시간적으로 장기간 동안 남아있다는 것이다.

아직 우리나라에서는 원자력에 대한 큰재해는 없

있고 그 안정성에 대해서 여러가지 평가를 행하고 있지만, 국내외에서 발생한 이상, 사고등에 대해서도 가능한한 재검토하고 필요한 것에 대해서는 조치를 강구하고 중대 사고발생시의 대응방법이 준비되어야 할 것이다.

*** 참고문헌**

1. Loss Prevention News

- Fire Safety in Nuclear Power Stations - I. II. III.

2. 소방기술 : 1990. 봄호

- 체르노빌 원자력발전소 사고

: 일본자치소방청, 寺村映

- 일본원자력발전소 방재대책 ①

: 일본기술청 ; 上原哲

"

②

: 통상산업성, 浦野完一

3. 물리학 개론(화학사) : 배호철, "원자와 원자핵"

4. 자치소방 - '90. 10. 11. 12월호

어떤 방화제품을 시험할 수 있는가?

- 건축 재료: 난연성재료, 고분자화합물 등 내장재료.
- 방염물품: 방염선처리물품, 난연성섬유 등 물품, 방염후처리물품
- 건축구조부재: 벽, 보, 바닥, 지붕 등
- 건축방화설비: 방화문, 방화샷타
- 기초소화설비: 각종 소화기 및 소화약제, 포소화약제
- 경보설비: 감지기
- 소화설비: 스프링클러
- 기타 방화관련제품