

주 승 환

고려공업검사(주) 연구소장/공학박사/
방사선관리 기술사/RI & SPI

방사선과 발전용 원자로

“정상적으로 운전 중인 한 원자력 발전소에서 나오는 방사선의 양은 대충 얼마나 될까?” ‘아닌 밤중에 홍두깨’ 처럼 갑자기 이런 질문을 독자가 받게 된다면, 어떻게 그 대답을 해야 할지 막연할 것이다. 하지만 차분히 생각해 본다면 답변 못 할 일도 아닐 것이다.

제2차 세계 대전 때, 미국이 일본에 떨어트린 두 개의 핵 폭탄들은 그 유형이 서로 달랐다. 히로시마시에는 우라늄으로 만든, 그리고 나가사키시에는 플루토늄으로 만든 핵 폭탄이 터져 온 인류를 놀라게 했던 사실을 독자께서도 잘 아실 것이다. 우라늄(U)과 플루토늄(Pu)은 양쪽이 모두 핵 폭탄의 원료 물질인 것은 그로부터 확인된 것이다(플루토늄의 물리적 성질을 좀더 눈여겨보면, 플루토늄의 원자핵 한 개가 쪼개질 때마다 생겨나는 중성자의 수효(3 개 이상)는 우라늄의 것(평균 2.5 개)보다는 더 많다. 그래서 플루토늄으로 만든 핵 폭탄이 일으킬 가공할 핵 폭발력(연쇄 반응)은 우라늄보다는 그 속도가 빠르고 그 효율도 훨씬 크다)

원자력 발전소(‘원전’)에서 전력을 얻으려면 불을 지펴야한다. 원전에서 한 화로의 구실을 하는 원자로에 뭘 연료 물질(핵연료)도 알고 보면 그 두 물질들이 쓰인다. 보통 사람들에게는 뒤쪽도 원자로의 핵연료로 쓰인다는 사실이 쉽게 이해되지 않을 지도 모른다. 국내의 발전용 원자로들은 모두가 우라늄만 태우는 원자로 형태(노형)이다. 그래서인지는 모르겠지만, ‘플루토늄’이란 놈은 원전 연료라기보다 핵 폭탄의 원료로 더 잘 알려져 있는 듯 하다. 사실은 우라늄을 주된 원료로 쓰는 원자로에서도 우라늄으로 만든 핵연료 다발의 중심(노심)에서 핵이 쪼개어지는 반응(핵반응)이 일어나면 우라늄의 연료가 타면서 또 다른 보조적인 연료 물질(플루토늄)이 새로 생겨난다. 마치 자동차의 기화기 속에서 기화할 분위기에서는 기름에 섞인 물이 기름과 함께 타면서 보조 연료로써 열량을 높여 주는 것과 같

국제원자력 기구인 IAEA는 우리가 원전에서 태운 사용된 핵연료의 보관 상태를 철저히 감시하고 단속하고 있다. 그 까닭은 그놈의 플루토늄이 그 속에 들어있기 때문이다. 북한에서 그놈의 상당량을 IAEA 몰래 생산하여 보유하고 있다고 해서 미국은 거금을 북한에 그저 주고 북한 금창리 지하에 건설된 방대한 시설물이 핵 폭탄을 만들 시설인지를 확인한 적이 있었다.

은 이치이다.

원전의 연료에서 약 3% 정도는 우라늄-235이고, 그 나머지 97%는 우라늄-238로 이뤄진다. 두 원자들은 같은 우라늄이므로 화학적 성질은 서로 같다. 하지만 그들 원자핵의 물리적 성질은 서로가 전혀 다르다. 무게도 앞쪽이 뒤쪽보다는 더 가볍다. 그리고 보다 중요한 것은 앞쪽이 외부에서 중성자가 들어오면 그 원자핵 자체가 우라늄-236(우라늄-235 + 중성자 1 개)으로 되면서 두 쪽으로 쪼개어지나, 뒤쪽은 그 원자핵이 노심의 분위기에 휩싸이면, 중성자 1 개를 잡아 챙겨 찰나 동안 우라늄-239로 된다. 그리고는 곧바로 두 번의 베타 입자를 내어보내면서(1 번의 베타 입자를 내어보내면 원자번호 1 번이 더 높은 다른 원자로 변함. 우라늄은 원자번호 92 번인 원자, 그리고 플루토늄은 94 번인 원자임) 플루토늄-239로 변신해 버린다. 변신한 그놈도 같은 노심의 분위기 속에서는 우라늄-235처럼 함께 쪼개지면서 우라늄에 버금가는 열을 낸다. 미처 쪼개지지 못한 플루토늄은 쓰고 난 핵연료 봉(뒤에 설명)에 남게 된다.

국제 원자력 기구인 IAEA는 우리가 원전에서 태운 사용된 핵연료의 보관 상태를 철저히 감시하고 단속하고 있다. 그 까닭은 그놈의 플루토늄이 그 속에 들어있기 때문이다. 북한에서 그놈의 상당량을 IAEA 몰래 생산하여 보유하고 있다고 해서 미국은 거금을 북한에 그저 주고 북한 금창리 지하에 건설된 방대한 시설물이 핵 폭탄을 만들 시설인지를 확인한 적이 있었다.

그리고 이웃인 일본은 ‘풀 서멀 계획(일본의 한 에너지 정책: 1994년부터 원자력 발전소에서 사용한 연료를 외국에서 재처리하여 플루토늄을 재활용하는 내용)’을 세워 프랑스와 영국에서 그네가 보낸 사용 후 핵연료를 재처리하고 나서 생산된 상당량의 플루토늄을 도로 돌려 받으려고 배로 운송하려는 데 그 배의 항로 문제로 뉴스 매체들은 떠들썩하다(중앙일보, 1999). 일본은 플루토늄을 원전용 연료로 쓰려고 플루토늄의 상당량(약 30 톤)을 이미 비축해 놓았다고 전하면서, 다행히 그놈을 실은 배가 우리의 영해를 통과하지

않을 것이라고 한다.

뉴스를 타는 일본의 플루토늄 문제도 국제법으로 따진다면 합법적이다. 모든 핵폐기물은 발생시킨 당사국이 수거, 관리 그리고 처분토록 규정하고 있어 도로 일본으로 돌려보내는 것은 당연하다. 하지만 플루토늄은 나가사키에 투하된 핵폭탄처럼 핵 병기의 원료 물질로 쓰일 수 있다는 그 점 때문에 보통 사람들은 흥분한다. 북한은 국제법을 무시하고 원자로에서 사용된 핵연료를 임의로 재처리하여 상당량의 플루토늄을 보유하고 있다는 소문이 자주 뉴스의 중심에 놓여 우리를 긴장시킨다.

미국 스탠포드 대학 부설 가속기 센터 명예 소장이신 Panofsky(1997) 교수는 “냉전의 물리학적 유산: 과잉 병기의 플루토늄”이란 글에서 냉전 시대의 핵 병기의 유산으로 미국과 옛 소련에서 생산하여 지금까지 보유하고 있는 핵무기 등급인 플루토늄의 총량은 약 250 톤(세계적으로 보유한 원전 연료에 쓰일 등급은 약 1,000 톤 정도, 그리고 매년 발전용 원자로에서 생산되는 양은 약 70 톤 정도)이나 된다고 한다. 핵 폭탄 등급인 플루토늄으로 기본적인 핵폭탄 1 개를 만드는데 소요되는 양은 약 4 kg이므로 양쪽이 가지고 있는 양을 모두 핵폭탄으로 만든다면 그 수효는 자그마치 62,500 개이다.

그는 그 글에서 플루토늄 1 톤의 가치를 다음과 같이 재미나게 묘사하고 있다.

정부 예산 담당관	미화 2,500만 불 손실
에너지 보존 주의자들	연간 전력 1 기가와트 생산
옛 소련 공산당	노동당원 연간 2,000 명 구호금 총당
사담 후세인	250 개 핵폭탄 제조

위의 예에서도 분명하지만, 플루토늄은 보는 이의 관점에 따라 그 모습이 다른 것이다. 플루토늄의 생산은 미국 예산 당국자의 눈에 단순히 국가 예산의 낭비로 비춰지고, 옛 소련은 경제 사정이 어려워 달라 박스인 고가의 수출품으로, 에너지 보존주의자들에게는 원전 연료로, 그리고 사담 후세인과 북한의 군사 전문가에게는 대량의 살상 병기로 비친다. 플루토늄에 대한 필자의 시각은 물론 에너지 보존주의 쪽이다.

필자는 서두에서 던진 질문에 답하기에 앞서 발전용 원자로와 핵 폭탄과의 차이점을 잠시 생각해 보고자 한다. 먼저 발전에 쓰이는 원자로(‘발전로’)의 메커니즘을 간략하게 요약할 필요가 있을 것이다. 발전로는 주된 기능별로 나뉘져 있다. 독자가 한 원자로를 이해하는 데 도움이 될 한 예로서 오래 전부터 우리 조상들이 도자기를 굽을 때 써오던 한 화로를 생각해 보자.

화로는 굽을 도자기가 놓일 공간을 내화 벽돌을 쌓아서 만든 한 덩의 형태를 이룬다. 그런 화로의 경우는 압력을 높여 쪼아 할 일이 없으므로 돔을 이룬 구조는 높은 열만 가두면

되고, 높은 압력을 견뎌낼 수 있게 단단하게 만들 필요는 없을 것이다. 거기에 중요한 것이라곤 보온만 잘 되면 충분하다. 그와는 달리 원자로 속은 높은 압력을 유지시켜야 한다. 그러므로 아주 단단한 구조로 만들어지게 된다. 뿐만 아니라 화로는 그 속의 온도가 올라가면 압력이 스스로 조절되게 돔의 안과 밖이 터진 구조이다. 원자로의 경우는 운전이 시작되면 그 속에 방사성 물질들이 생겨나므로 그 물질들이 밖으로 탈출하지 못하게 문짝으로 막힌 폐쇄된 한 용기의 형태로 이뤄진다. 따라서 원자로의 속은 정상적으로 운전하는 동안 상당한 압력을 받게 되므로 보통의 용기들과는 다르게 설계(원자로 벽의 두께는 3피트의 콘크리트에다 4인치의 철판이 덧붙여진 단단한 구조)하여 만든다. 이것이 '격납 용기'이다.

다음으로는 불을 쥘 일 연료이다. 도자기는 높은 온도로 굽어야 본래의 특성을 가지게 된다. 화로인 돔 안의 온도를 높이는 데 쓰이는 연료는 나무, 기름, 또는 천연 가스를 태운 열, 또는 전기의 열을 쓴다. '열'이란 물질이 빠른 속도로 운동하면 그 운동 때문에 생기는 자연 현상의 하나이다. 자동차의 시동을 걸려면 전기 스위치를 넣고, 가속 페달을 발로 살짝 건드려 줘야 한다. 가솔린 또는 연료 가스를 자동차의 기화기에 공급시켜 연소시키려는 동작이다. 연료가 연소한다는 것은, 좀더 고급스럽게 표현한다면 일종의 '화학적 반응(화학 반응)'이 일어나는 현상이다. 화학 반응은 물질을 이룬 분자들이 분자 단위의 원소들끼리 분자들에 속박돼 있는 전자들을 서로 '빅딜(맞바꿈)' 하는 현상이다. 분자들에 속박된 전자들이 빅딜로 그것들이 움직이는 속도에서 열이 생겨난다. 이것은 화학에서 '발열 반응'이라고 하지만 물리적인 현상으로 보면 전자들이 빅딜하는 속도에서 '운동 에너지의 열'이 생긴 것이다.

요즘 대기업의 빅딜은 정부가 추진하는 경제 정책의 핫 이슈이다. 수개월 아니면 몇 년을 두고 시장 논리에 따라 자연스럽게 빅딜이 이뤄지게 하면 탈이 없을 듯 한데, 그 속도를 인위적인 강압적 수단으로 너무 빠르게 추진시킨다면, 단순한 한 자연 현상을 이해하지 못한 것이다. 분자들끼리의 빅딜은 사람이 하는 인위적 기업의 그것과는 달리 그 속도는 분자의 종류에 달려있다. 분자에 속박된 전자들끼리 서로 '맞바꿈' 하는 속도는 물질이 갖는 고유한 특성이며, 물질에 따라 다르고, 그리고 같은 물질이면서 연소의 조건이 같으면 어느 때나 일정하다. 전자들의 빅딜은 빛의 속도로 진행되므로 높은 열이 발생된다. 그런 열은 물질의 종류에 따라 단위 무게마다 일정하게 정해진다. 우리는 이런 열이 물질의 화학반응으로 생겨나므로 '화학 에너지'로 구분한다.

하지만, 원자로의 연료는 그들과는 전혀 다르다. 그것은 한 원자의 중심에 놓인 원자핵의 물질(핵자)들의 빅딜(주승환, 1999a)로 이뤄지므로 한 원자 속의 핵자들끼리 쉽게 빅딜이 이뤄질 수 있는 물질이어야 한다. 이런 성질을 가진 것들이 핵연료 물질이다.

독자께서도 잘 아시겠지만, 한 원자핵을 이룬 핵자들은 양성자, 중성자 그리고 양성자와 중성자 사이에 채워진 질량을 갖지 않은 중간자 등으로 이뤄진다. 질량이 없는 것으로

알려진 중간자 질량의 유무를 확인하려고 거대한 실험이 일본을 중심으로 구성된 한 국제 연구팀이 연구를 시작하지 꽤 오래 되었고, 최근에 놀라만한 연구 성과를 올리고 있다.

앞의 화학적 에너지와는 달리 원자핵의 물질인 핵자들끼리 이뤄지는 빅딜의 속도는 인간의 상상을 뛰어넘는다. 아울러 거기에서 생겨나는 열도 상상을 초월한다. 이런 열을 이용하는 것이 바로 원자로이다. 원자로 안에서 타는 연료는 '핵연료'라 불려진다. 그리고 핵연료가 탈 때 생기는 것은 '핵에너지'라고 따로 구분한다.

다음으로 화로인 돔은 한정된 열만 이용하면 바라던 목적이 이뤄지므로 문제가 없다. 하지만 원자로의 경우는 핵자들의 빅딜로 주체할 수 없는 엄청난 열이 찰나에 원자로 안에서 생겨나므로 그 열을 적당히 식혀서 조절해 줄 장치가 필요하다. 말하자면, '냉각수 시스템'으로 된 장치가 이에 해당된다. 냉각수 시스템은 원자로의 안전한 운전과 아주 밀접한 관계를 가지긴 해도 필자가 이 글에서 요약코자 하는 방사선과는 별로 관련이 없으므로 자세한 설명을 생략한다. 이들 이외에도 화로의 돔과는 별로 관계없는 원자로의 노심에 놓일 핵연료 다발의 모습, 핵 외부의 중성자로 핵연료의 핵을 때리는 기술(감속재, 제어봉...) 등도 논의로 한다.

위에서의 얘기는 독자의 머리 속에 단순히 한 원자로와 핵연료의 모습을 그려 놓으려는 필자의 한 그림 설명에 불과한 것이다. 이를 바탕 삼아 좀더 자세히 원자핵의 빅딜이 일어나는 과정을 살펴볼 필요가 있을 것이다.

원자력 발전에 쓰이는 원자로와 핵 폭탄과는 어떻게 다른가? 원자로는 원자핵 물질들의 빅딜이 느리게 일어나도록 조절하여 핵에너지를 우리가 원하는 쪽으로 이용하자는 것이므로 핵연료 물질의 물리적 성질에서 크게 차이가 있다.

먼저 생각할 점은 핵연료 물질을 이룬 원자들의 구성비를 들 수 있을 것이다. 천연에 있는 우라늄 원자들은 U-238, U-235 그리고 U-234 등이며, 각각의 구성 비율은 99.3%, 0.7% 그리고 마지막의 것은 %로는 나타내기 어려울 정도로 낮은 비율을 차지한다. 우리의 발전용 원자로들은 모두 우라늄을 연료로 쓰고 있다. 월성에 건설된 원자로들은 천연 우라늄의 원료를 쓰고, 그 외 지역인 고리, 울진 그리고 영광에 건설된 원자로들은 U-235를 약 3%로 농축시킨 원료가 쓰인다. 반면, 핵 폭탄의 등급은 U-235의 구성비가 90% 이상(Jager, 1991 p. 105; 플루토늄의 순도는 93% 이상, Panofsky, 1997 p. 61) 이어야 하므로 원전 연료의 경우와는 전혀 다르다.

둘 째로 생각해야 할 점은 원전 원료 물질의 모습이다. 원전 연료 물질은 금속 우라늄(UO₂)의 가루를 압축기를 써서 성형하고 나서 그것을 높은 온도의 열에 굽은 고체 덩어리이다. 이것을 새끼손가락 크기의 특수 금속(지르칼로이, zircaloy) 속에 담은 것이 원전 연료의 최소 단위인 '펠렛(pellet)'이다. 이것들의 200-300 개를 한 개의 '원통형 관(cladding)'에 담은 것이 '연료봉(fuel element)'이다. 그리고 연료봉 약 260 개를 한데

목은 한 개의 다발이 곧 '핵연료집합체(fuel assembly)' 인 것이다. 핵연료집합체의 중심은 연료봉 180 개가 균형을 이루면서 원통형으로 배열되며 이곳이 바로 '노심' 이다. 핵 폭탄의 경우는 임계질량(연쇄 반응이 일어날 수 있는 핵 물질의 최소량)이란 기준이 있다. 핵 폭탄이 연쇄 반응으로 폭발하려면 핵 물질이 최소한의 무게로 한 덩어리가 돼야 한다(주승환, 1999b). 원전 연료의 경우는 원료 물질을 위와 같이 이중 삼중으로 칸을 질러 나뉘어 연료봉으로 만든 것이므로 구조적으로는 핵 폭탄처럼 원료 물질이 임계질량으로 합칠 수도 없을 뿐만 아니라, 핵폭발도 일어날 수가 없다. 그리고 연료봉 주위를 9 인치의 특수한 금속관으로 둘러싸서 만일의 사태에 대비하여 놓는다.

셋 째로 생각할 점은 핵연료가 연소하는 과정이다. 화학연료가 화학 반응을 일으키면서 타 들어가는 경우와는 전혀 다르다. 원자로 안에서 핵연료의 원자핵을 때려부수는 기술은 간단치가 않다. 이미 기초 실험으로 확립된 이론에 바탕을 두고 원자력 발전용 원자로에 활용되는 기술이긴 하지만, 일반적인 핵반응에 적용시키려고 계속하여 그 기술을 발전시켜 안전하고 효율성이 보장된 기술을 확보하려고 계속 연구하고 있다.

그에 관한 원리는 그림처럼 간단하게 그려 놓을 수는 있을 것이다. 하지만 아직 알려지지 아니한 많은 현상들은 지금 우리가 알고 있는 부분보다는 더 많을 것이다. 마치 원자핵

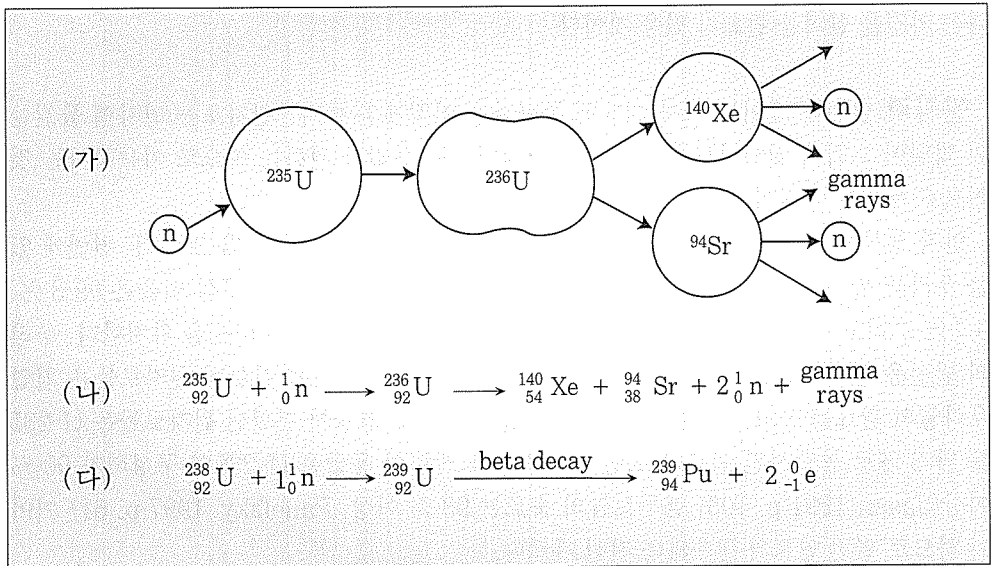


그림 (가) 발전용 원자로의 핵연료 노심에서 우라늄-235 원자핵이 중성자의 충격으로 우라늄-236 이 되면서 ${}^{140}\text{Xe}$ 원자와 ${}^{94}\text{Sr}$ 원자로 갈라지는 모습의 그림

(나) (가)의 그림을 핵붕괴 수식으로 나타낸 것임

(다) 우라늄-238이 중성자 1개를 포획하여 우라늄-239로 되면서 베타 입자의 붕괴로 플루토늄-239의 원자로 변화하는 핵붕괴 수식

의 덩어리가 양성자, 중성자 그리고 중간자들 이외에 어떤 종류의 핵자들이 어떠한 모습을 이루고 있는지, 그리고 우리의 상상을 초월한 마치 한 블랙홀의 정체처럼, 어떤 모습인지 우리는 아직 모르고 있다. 원자력 발전소에서 방사선의 문제는 바로 핵연료가 타면서 생겨나는 방사선, 방사 원자(방사성동위원소)들, 그리고 그것들을 포함한 물질들이 일으킨다.

이제 서두에서 던져본 문제로 돌아가 보자. 원자력 발전은 천문학적인 돈을 쏟아 붓고 우리가 필요한 전력 에너지를 생산하자는 것이 주된 목적이다. 따라서 한 원자력 발전소의 발전 용량의 크기는 경제적으로 득을 보는 규모로 설계되어야 한다. 나라마다 에너지의 공급 방식에 따라 그 규모가 경제적으로 유리한 경우가 있을 것이다. 여기에 '한국형 원자로' 라는 용어가 생겼다.

대체로 한 발전용 원자로에서 전력을 생산할 수 있는 경제적인 용량은 1,000 메가와트 규모가 가장 적합한 표준형으로 알려진다. 이런 규모의 원자로는 농축된 우라늄의 연료가 총 200여 톤이나 노심에 놓여지고, 거기에서 생산되는 발열량은 약 3,000 메가와트라고 한다. 그리고 RI협회 회원들에게 관심의 대상인 방사능의 발생 양은 그런 규모의 원자로가 정지하지 아니하고 그 원자로가 계속 운전된다면 연간 총량으로 약 100억 퀴리(Ci)의 방사능을 쏟아낼 것으로 추정하고 있다(Lewis, 1980). 이 양을 라듐으로 환산하면 10,000 톤과 같다.

이런 규모의 방사능은 주로 핵연료 다발 속에 갇히게 되고, 대부분의 짧은 수명의 방사 원자들은 곧바로 소멸하게 된다. 핵연료가 타면서 만들어내는 주요 방사 원자들은 이 글의 뒤 표에 정리돼 있다.

이들 방사 원자들(표에서 보여준)의 대부분은 앞 그림에서 본 것처럼, 우라늄-235인 한 개의 원자핵이 중성자 1 개를 받아 질량수가 전혀 다른 140(Xe-140)과 94(Sr-94)인 원자들로 나뉘지는 데($235 + 1 = 140 + 94 + \text{중성자 } 2$), 질량수 140과 94인 두 그룹인 안팎 약 10 정도의 증감된 질량수에 모여진다. 대표적인 예를 든다면, 우리가 핵의학에서 많이 쓰는 요오드-131(^{131}I)도 140 그룹에서 질량수 9가 모자란 한 방사 원자에 해당한다.

여느 방사 원자들은 대부분이 베타선을 방출하는 것들이다. 그들은 노심에서 핵연료를 감싼 주변 물질들과 노심 속을 이룬 다른 물질들이 연료가 쪼개질 때 생겨나는 중성자들에 맞아 방사능을 띠게 된('방사화된') 것들이다. 그 표에서 삼중수소(^3H)는 냉각수와 다른 노심의 공기 중에 있던 물의 분자에 적은 양이 들어있는 중수소(D_2)가 중성자 1 개를 그의 핵 속에 잡아 가둔 것이다. 같은 모습은 노심 환경에 있던 공기 중에 탄산가스($^{13}\text{CO}_2$)가 중성자를 잡아 가뒀 $^{14}\text{CO}_2$ 가 생긴 것이다.

앞에서 여러 번 되풀이한 문제의 플루토늄(^{239}Pu)은 핵연료 다발 속에서 U-238이 중성자 1 개를 잡아 가뒀 변신한 것이며, 앞에서 핵 물질의 가치를 논한 바로 그놈에 해당한다. 이런 설명은 핵연료 다발 속에서 이론적으로 그려볼 수 있는 주된 원자핵 반응의 한 단면

에 불과하다. 우리는 아직 이론적으로 설명할 수 없는 부수적인 많은 현상들이 노심 속에서 핵반응이 일어날 때, 주된 핵반응들과 함께 일어나고 있다는 사실을 인식해야 할 것이다.

원전 연료와 핵 폭탄의 원료 물질들이 서로 같은 것은 어쩔 수가 없다. 이점은 독자의 오해를 불러일으킬 소지가 있을 것이다. 하지만 과학자의 철학은 양쪽에 대한 접근 방식이 '전쟁과 평화' 라는 '방사선의 두 얼굴' (주승환, 1999c)처럼, 전혀 달랐다는 사실을 독자는 기억하셔야 한다. 쉽게 보면, 한 원자핵의 빅딜이 찰나(1/100만 초안에 완결됨)에 끝나게 만든 것이 핵 폭탄에 해당하고, 원자핵의 빅딜이 우리 마음대로 서서히 이뤄지게, 수년 아니면, 아예 이뤄지지 않게, 제어할 수 있는 것이 발전용 원자로이다. 그러므로 핵 폭탄의 원료 물질과 원자로의 연료 물질은 서로 같을 수 밖 없는 것이다.

과학자의 머리로 만든 핵 폭탄이 인류에게 가공할 살상의 무기로 쓰인 점은 안타가운 일이다. 이런 잘 못된 과거를 뉘우친 과학자들이 핵 폭탄의 목적과는 전혀 다른 철학으로 인류의 복지를 위하여 개발했던 분야가 바로 원자력 발전과 연구용 원자로인 것이다. 그러므로 이것들은 '원자력의 평화적 이용' 의 한 대명사이다.

필자는 노파심에서 핵폭발용의 '핵 병기' 와 원자로 사이의 다른 몇 가지 점을 좀더 설명해 두고자 한다. 원자력 발전소가 "어떻게 안전한가?"에 대한 기초 개념의 이해를 돕는데 필요할 것이란 기대를 가지고 요약한다. 원자로의 안전성과 밀접하게 관계되므로 이 점에 대한 많은 설명이 필요할 것이다. 하지만 방사선의 논의와는 거리가 있다는 판단에 따라 원리적인 차이점만을 지적할 것이다.

우선 생각할 수 있는 점은 원료 물질들의 원자핵을 쪼갬 중성자들의 물리적인 특성에 차이가 있다. 병기용 핵물질(이하 '앞쪽')은 빠른 중성자들을 이용하고, 발전용 원자로(이하 '뒤쪽')는 느린 중성자를 이용한다. 대개 한 원자핵이 쪼개지는 것은 '연쇄 반응' 이란 작용을 일으킨다. 앞쪽은 느린 중성자(열중성자)들이 연쇄 반응에 참여하기 전에 이미 폭발 작용이 종료된다. 뒤쪽은 빠른 중성자들을 우리가 마음대로 조정할 수가 없으므로 느린 중성자들만 원자핵을 쪼개는데 참여토록 설계된다. 여기서 빠른 중성자들이란 '불청객' 에 불과하다. 원전 연료에서 우라늄-235의 농축 등급을 3% 내외로 유지시키는 것은 원자핵의 쪼개짐을 적당히 조절할 수 있도록 하자는 데 있다.

둘째는 원자로 노심의 온도이다. 노심의 온도는 원자로에서는 가장 중요한 요소이다. 원자로의 '중대사고(핵 연료봉이 녹는 사고)' 는 노심의 열이 정해진 온도보다 더 높ی 올라갈 때 일어난다. 노심의 온도가 정해진 것보다 높이 올라가면 당연히 원자핵이 쪼개지는 회수는 줄어들게 된다. 그 까닭은 3 가지를 생각할 수 있을 것이다. (1) 연료의 우라늄-235는 초과할 온도에 따라 급격히 팽창되므로 열중성자들이 그들의 핵을 빗겨갈 것이다.

(2) 연료에 들어있는 우라늄-238은 열이 올라가면 그 활동이 왕성해져 열중성자들을 더 많이 잡아먹게 되므로 우라늄-235를 때릴 열중성자의 수가 급격히 줄어들게 된다. (3) 대개 발전용 원자로에서 핵반응에 쓰일 열중성자들의 수효는 적당한 연쇄 반응을 유지시키려고 빠른 중성자들의 속도를 '감속재(우리는 물을 이용)'를 써서 줄여 부족한 열중성자들을 공급한다. 노심에서 감속재가 지정된 온도보다 높게 올라가면, 물은 감속재로서의 기능이 급격히 떨어진다. 따라서 열중성자의 공급에 큰 타격을 준다.

마지막으로 방사성 물질의 누출에 대한 철저한 단속이다. '가압 경수로(월성 이외의 원전 원자로들)'의 경우인데, 노심을 통과하면서 노심의 열을 운반하던 파이프에 높은 압력으로 담겨진 냉각수의 흐름은 오로지 정해진 파이프 속으로만 흐른다. 이 물은 노심을 통과하면서 센 방사성 물질에 오염된다. 하지만 이 냉각수는 원자로 격납 용기를 벗어날 수 없도록 완벽하게 설계되므로 격납 용기 밖으로 방사성 오염 물질들이 빠져나갈 수 없다.

이런 설명 외에도 원자로 인근에 사는 주민들이 방사선 사고에 대한 안전을 위하여 격납 용기 밖으로 이탈하는 방사선의 세기를 연간 0.001 rem(0.00001 Sv) 이하로 제한하고 있다. 여기에 대한 조사 결과들은 참고 자료들(Eisenbud, 1987; Lave와 Freebug, 1973; UNSCEAR, 1988 그리고 McBride 외, 1978 등)에서 현장 조사를 통하여 확인된 바 있다.

덧붙인다면, 국제적으로 인정된 개인이 쬐일 수 있는 한도량의 선량은 연간 0.5 rem(0.005 Sv)이다. 그리고 미국의 핵규제위원회(NRC)의 권고는 원자력 발전소 경계 울타리에서 연간 선량은 국제적으로 인정된 값의 1/50에 해당하는 0.01 rem(0.0001 Sv)이다(Eisenbud, 1987, P.213).

방사선 방호에서 '치사선량'이란 용어를 쓴다. 한 집단(적어도 10명 이상)이 500-600 rem(5-6 Sv)의 선량을 전신에 받게 되면 절반이 사망한다고 한다. 물론 동물의 실험에서 확인된 것이긴 해도 사람에게 그와 같은 효과가 나타날 것이란 보장은 누구도 장담할 수 없다. 원자력 발전소에서 아무리 심각한 원자로의 사고가 일어난다 할지라도 몇 명만이 그와 같은 높은 방사선에 쬐일 수 있을 것이라는 데 전문가들의 대부분이 이에 동의한다. 그리고 많은 사람들은 그 선량보다 낮은 방사선에 노출될 것이다. 방사선에 피폭된 후 30-40년 동안 나타날 잠재적 장애(암)에 대한 공포가 있을 것이다. 전문가들은 그러한 경우, 10,000 명-rem 당 1명 꼴의 잠재성 암 환자가 발생할 것이라고 예상한다. 방사선의 생물학적 효과 분석에 이용되는 '선형 가설(the Linearity hypothesis)'은 이런 논리에 바탕을 둔다. 그러나 문제는 그 가설을 이룬 독립된 변수들인 선량, 사람 수효, 피폭된 기간 그리고 다른 요소들이 매년 규칙적으로 유사하게 나타날 수 없다는 점에서 선형 모델이 완벽하다고는 말할 수 없다(Lewis, 1980).

원자력 발전소 울타리 경계에서 1년 동안 0.010 rem(0.0001 Sv)의 선량도 방사선 평가의 한 선형 모델에서는 해롭다는 뜻이 담겨져 있다. 하지만, 제트 여객기로 서울에서 미

국 LA를 왕복하는 여행자도 그 정도의 선량을 받게 된다는 사실을 안다면, 아마도 원자력 발전소 주변에 거주하는 사람들은 그 선량의 1/10에 해당하는 방사선(0.001 rem)이란 자기들에게는 어떤 장애도 주지 않는다고 인식할 수 있어 마음이 한결 편해질 수 있을 것이다.

감사: 이 원고는 한국원자력연구소 핵연료주기시험팀장이신 민덕기 박사님이 필자의 부탁으로 사전에 검토해 주셨습니다. 바쁘신 중에도 필자를 위해 수고하여 주신데 감사를 표합니다. **KRIA**

〈참고 문헌〉

- 주승환, 1999a, "원자의 빅딜", 동위원소회보 1999.3, pp. 44-48, 한국방사성동위원소 협회.
- " , 1999b, 『누설 현장』 p.226, 백산출판사 간.
- " , 1999c, "방사선의 두 얼굴", 동위원소회보 1999. 6, pp. 44-49, 한국방사성동위원소 협회.
- 중앙일보, 1999, "일본행 플루토늄 탄약과 함께 수송". 7월 13일자 8쪽. 중앙일보사.
- Eisenbud, M., 1987, 『Environmental Radioactivity(3rd ed.)』. Orlando, FL: Academic Press.
- Jager, J., 1991, 『The Nuclear Lion』, Prentice Hall, New York and London.
- Lave, L. B. and L. C. Freeburg, 1973, "Health effects of electricity generation from coal, oil, and nuclear fuel," Nuclear Safety 14, 409-428.
- Lewis, H. W., "The Safety of Fission Reactor", Scientific American, March 1980, pp. 33-45.
- McBride, J. P., R. E. Moore, J. P. Witherspoon, and R. E. Blanco, 1978, "Radiological impact of airborne effluents of coal and nuclear plants," Science 202, 1045-1050.
- Panofsky, W. K. H., "A Physical Heritage of the Cold War: Excess Weapons Plutonium", Physics Today, April 1997, pp. 61-62.
- UNSCEAR, 1988, "Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation," United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 1988 Report to the General Assembly, with annexes. New York United Nation.

<표> 한 발전용 원자로에서 생산되는 주요 방사 원자들 (Jager, 1991 p.367)

원소 이름	방사 원자	반감기	방사선 장해		
			섭취	흡입	목표 집단
중성자에 충격받은 생성물들^a					
Tritium (g) ^b	³ H	12 년	x	x	모든 조직들
Carbon	¹⁴ C	5,600 년	x	x	"
Argon (g)	⁴¹ Ar	2 시간		x	폐
Manganese	⁵⁴ Mn	1 년	x		모든 조직들
Iron	⁵⁵ Fe	3 년	x		헤모글로빈
Cobalt	⁶⁰ Co	5 년	x		GI 로
Niobium	⁹⁴ Nb	20,000 년	x		뼈
핵분열 생성물들					
Krypton (g)	⁸⁵ Kr	11 년		x	폐
	⁸⁸ Kr	3 시간			
Strontium	⁹⁰ Sr	30 년	x	x	뼈 (mimics Ca)
Iodine	¹²⁹ I	17,000,000년	x		갑상선
	¹³¹ I	8 일		x	
Xenon (g)	¹³³ Xe	5 일		x	폐
Cesium	¹³⁴ Cs	2 년		x	모든 조직
	¹³⁷ Cs	30 년	x	x	(mimics)
우란 계열^c					
Lead	²¹⁰ Pb	22 년	x		간
Radon	²²² Rn	4 일		x	폐
Thorium	²²⁹ Th	7,000 년	x		뼈
천이원소들^d					
Neptunium	²³⁷ Np	2,000,000 년	x		┐
Plutonium	²³⁸ Pu	90 년		x	
	²³⁹ Pu	24,000 년	x	x	모든 조직,
Americium	²⁴⁰ Pu	7,000 년	x	x	간 제외.
	²⁴¹ Am	500 년	x	x	후에 뼈에 집적
	²⁴³ Am	8,000 년	x	x	┘

^a 핵분열 때, 방출된 중성자의 충격으로 생김.

^b 모든 생성물들은 기체임. 공기 중에 입자로 존재. 물에 녹음.

^c 분열 생성물들은 우라늄과 플루토늄의 분열에서 생김.

^d 모두가 알파 입자를 방출시킴.

(g) : 가스 상태의 물질.