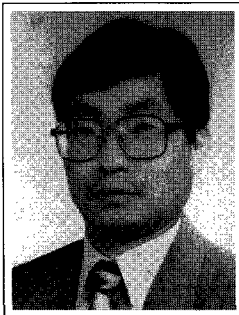


한국의 핵임계 안전성 현황

- 일본 도카이무라의 JCO사사고와 비교 -

김 풍 오

한전원자력연료(주) 생산관리처장



일본 도카이무라 JCO에서 발생한 핵임계 사고

1. 사고 개요

지난 9월 30일 오전 10시 35분 일본의 핵연료 가공 회사 JCO의 변환 시험동에서 고속증식로 「조요(常陽)」에 공급할 우라늄 변환 작업 중 핵임계 사고가 발생하여 외부로의 방사능 누출 및 3인의 작업자를 비롯하여 총 49명이 피폭되었다.

핵임계 사고 발생시 작업하던 작업자에 의하면 푸른 섬광을 보았으며 이후 연쇄 반응은 다음날 아침 4시경까지 무려 17시간 계속되었다. 여기에서의 푸른 섬광은 체렌코프 방사선으로, 물속에서 높은 에너지의 입자가 빛 속도보다 빠른 속도로 운동할 때 방출되는 방사선으로 인해 생기는 현상이다.

2. 사고 원인

우라늄을 질산에 녹이는 과정에서 프랑스에서 수입한 농축도 18.8%의 산화 우라늄을 침전용 탱크에 취급 제한치인 2.4kg보다 7배 가까운 16kg을 한꺼번에 주입해 처리하려다 핵임계 사고가 발생했다.

3. 사고 경위

9.30(목)

10:35 임계 사고 발생, 방사선 감시기 경보

11:34 JCO에서 이바라키현에 사고 통보

12:15 도카이무라 재해대책본부 설치

12:19 부지 경계 최대 피폭 선량률이 시간당 0.84 μ Sv로 상승

12:30 사고 현장 주위 200m 내의 일반인 출입 금지 조치

15:30 과학기술청 대책본부 설치
• 반경 350m 이내 주민 대피 권고

17:00 오부치 수상을 본부장으로서 하는 정부 대책 본부 설치

• 반경 5km 이내 주민 옥내 대피 권고

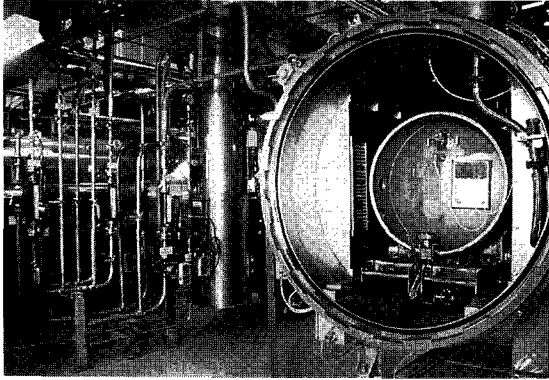
• 사고 등급을 INES 4등급으로 판정

22:00 반경 10km 이내 교통 통제

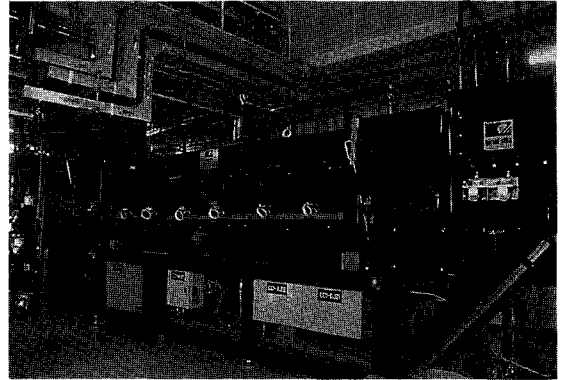
10.1(금)

05:30 침전 용기 냉각수의 배수 및 봉소 주입으로 미임계 및 방사능 준위 정상 복귀

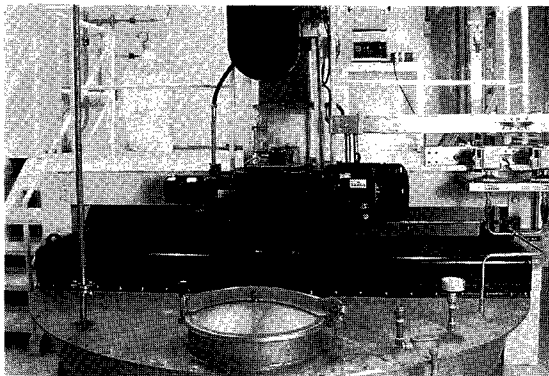
한전원자력연료(주)의 DC 재변환 공정



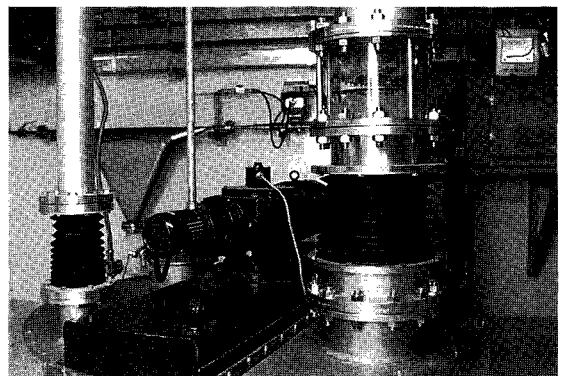
기화기(Autoclave) 내 UF₆ 실린더 장착 상태



변환로 Conversion Kiln



UO₂ 분말 균질 혼합기(Homogenizer) 상부



UO₂ 분말 혼합기(Blender) 상부

15:00 주민 옥내 대피 권고 해제

4. 방사능 누출 영향

- 방사선 피폭 피해자
 - 작업자 3명 중 2명은 8Sv (800rem) 피폭으로 구토·설사·발열 및 의식 상태 불안정
 - JCO 직원 36명, 일반인 10명 등 46명은 경증
- 누출 방사능량

- 자연 방사능 준위(0.2 μ Sv/hr)의 4,000배 증가(0.84 μ Sv/hr)
- 핵분열 생성물인 Cs-138이 토양 시료에서 측정됨

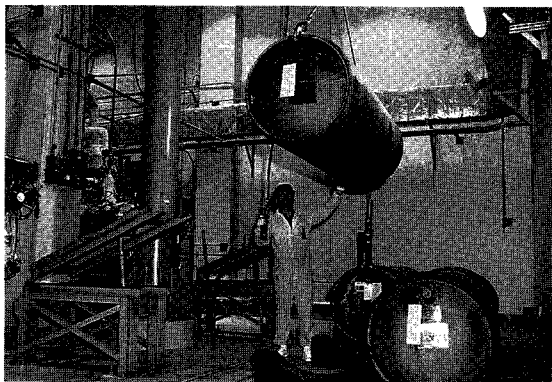
5. 사고 등급

이번 사고는 국제적인 INES (International Nuclear Event Scale) 등급에서 잠정적으로 4등급 (Level 4)으로 판정되었다.

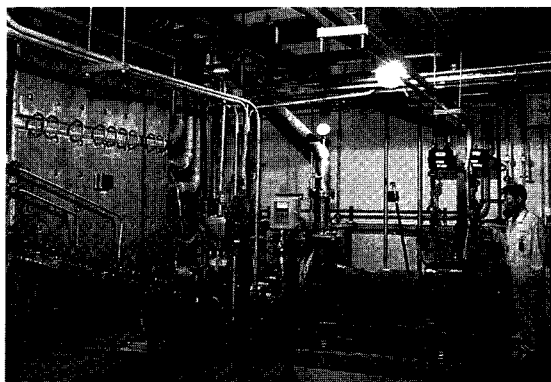
이같은 등급 분류는 심각한 외부로의 방사능 누출 위험이 없는 사고(Accident)로 정의되는 것으로 지금까지 심각한 외부 오염이 없다는 사실이 이 같은 등급 분류를 뒷받침하고 있다. 일본 과학기술청이 내린 이 등급 판정은 공식적으로 일본의 최초의 원자력 사고라는 것을 인정한 셈이다.

이 레벨 이하는 사고(Accident)가 아니고 사건(Incident)으로 분류

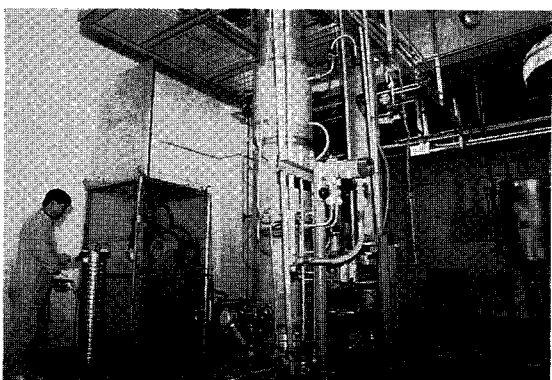
한전원자력연료(주)의 AUC 재변환 공정



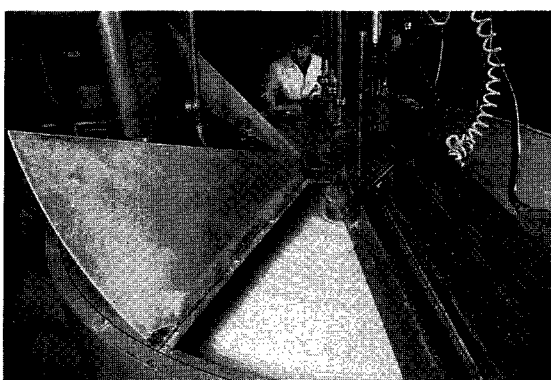
AUC 기화기 내 실린더 장착 준비



AUC 침전조(Precipitator)



AUC 여과 장치(Filter)



AUC 유동층 반응기(Fluidized Bed Reactor)

된다. INES 등급은 7단계로 분류되어 있으며 지진에서의 Richter scale과 비슷하게 바로 아래 단계보다 10배의 피해 규모가 크다는 것을 나타낸다.

참고로 86년에 일어난 옛 소련 체르노빌 원전 사고 등급은 7등급, 79년의 미국 쓰리마일 원전 사고는 5등급이었고, 97년에 같은 장소에서 일어난 도카이무라 재처리 시설 화재 사고는 3등급이었다.

6. JCO 현황

○ 사업 내용

육불화우라늄(UF₆)을 이산화우라늄 분말(UO₂)로 변환하여 성형 가공 회사에 공급하는 회사로 경수로 핵연료용 저농축 우라늄 및 고속 증식로용 고농축 우라늄 취급

○ 생산 능력

• 경수로 핵연료용 변환 시설 : 840톤/년

• 고속 증식로 핵연료용 변환 시설 : 3톤/년

○ 인원 및 매출액

73년 설립되었고 종업원 154명이며 1998년 매출액은 172억엔

○ 변환 공정

습식 공정의 하나인 ADU (Ammonium Di-Uranate) 변환 공정

발생 원인 추정

사고 발생 일주일여 지난 시점에서 정확한 사고 발생 원인을 외신 및 국제원자력기구(IAEA)가 발표한 것을 중심으로 추정해 보면 다음과 같다.

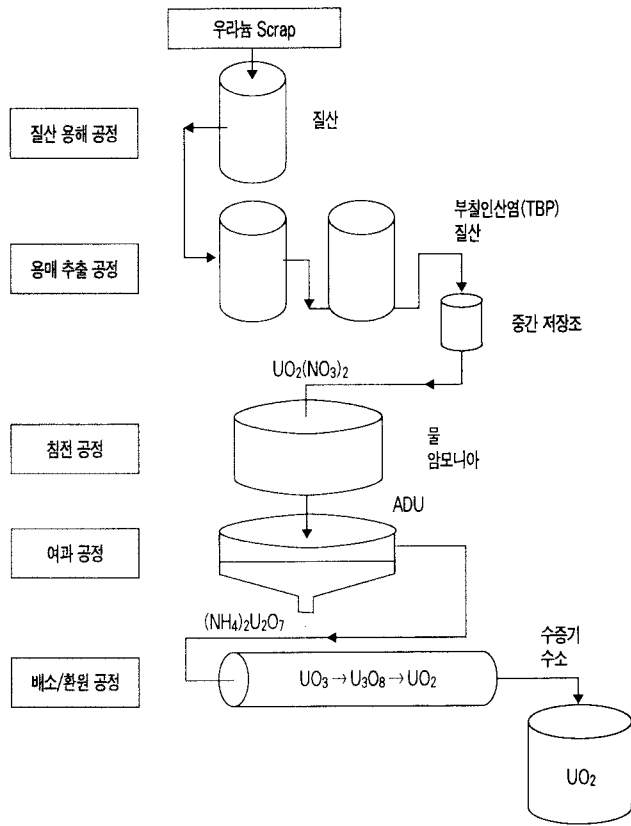
1. 규정을 벗어난 작업 방법의 채택

JCO의 인가된 우라늄 처리 공정은 <그림 1>과 같이 질산 용해 공정, 용매 추출 공정, 침전 공정, 여과 공정 및 배소/환원 공정으로 구성되어 있다.

그런데 이번 작업에서는 이같은 인가된 시설의 용해탑을 사용하지 않고, 비인가된 10리터 크기의 스테인리스 용기를 사용하여 용해 작업을 한 후 수작업으로 침전조에 주입한 것이다.

지금까지 조사한 바에 의하면 JCO에서는 최소한도 4,5년전부터 현장의 작업원들이 산화우라늄을 질산에 용해할 때 작업성의 편의를 위해 승인받은 정규의 절차서(용해탑의 사용)를 무시하고 스테인리스 용기로 용해 작업을 하여 왔다는 것이다.

97년 10월에는 제조부장이 이것을 승인하여 정규의 절차서를 개정한 '이면 절차서'를 만들어 그때까지의 작업을 추인하는 형식을 갖추게까지 되었다.



<그림> JCO의 우라늄 처리 공정

2. 안전 교육의 미비

JCO의 한 간부는 이바라키현 도카이무라의 마을 의회에 출석하여 "임계에 대한 교육 및 훈련을 시행하지 않았다"고 진술하였다.

에치시마 도카이 사업소장은 "매년 2회의 교육 훈련은 시행하였지만 임계에 대한 것은 결여되어 있었다"고 말하였다.

또한 사고를 일으킨 작업원의 한 사람은 "임계의 의미를 몰랐다"고 말한 것을 보면 JCO가 원자력 사고에 관한 사원 교육을 제대로 시키지 않은 것을 알 수 있다.

3. 사건 원인 추정

상기와 같은 상황을 종합해 볼 때 이번 핵임계 사고는 다음과 같이 추정할 수 있을 것이다.

JCO에서는 저농축 우라늄(5% 이하)과 고농축 우라늄의 두 가지를 처리하여 왔는데 고농축 우라늄의 취급은 빈번하지 않았고 이번의 경우에는 3년만에 처음있는 일이었다.

허가받은 시설인 용해탑을 거치지 않고 비공인된 10리터짜리 스테인리스 용기를 사용하여 질산에 녹이는 작업을 저농축 우라늄에 대해서 몇년 동안 아무일 없이 실시하여 왔다.

〈표〉 일본 JCO와 한전원자력연료(주)의 시설 비교

	일본 JCO	한전원자력연료(주)
생산 연료 및 용량	• 경수로 연료(840톤) • 고속증식로 연료(3톤)	• 경수로 연료(400톤) • 중수로 연료(400톤)
취급 우라늄 농축도	• 5% 이하(경수로) • 15%~20%(고속증식로)	• 5% 이하(경수로) • 0.71%(중수로)
재변환 공정	• 습식 공정(ADU) • 불연속 공정	• 건식 공정(DC), 습식 공정(AUC) • 모두 연속 자동화 공정
가동 시기	1979년	• 건식 공정: 1998년 • 습식 공정: 1990년

그런데 이번에 고농축 우라늄(18.8%)을 처리하는 과정에서 작업자들은 임계에 대한 개념이 없는 관례로 저농축 우라늄을 취급하듯이 매뉴얼 작업으로 고농축 우라늄을 용해시켜 침전조에 부은 것이다.

허용 용량이 2.4kg인 줄도 모르고 16kg을 쏟아 부은 것이 일본 최악의 원자력 사고인 핵임계 사고를 일으킨 것으로 추정된다.

우리 나라에서의 유사 사고 발생 가능성

1. 세계의 핵연료 취급 시설 핵임계 사고

45년 이후로 전세계적으로 60여 건의 크고 작은 임계 사고가 있었으나 대부분 미국과 옛 소련의 군사 관련 시설에서 일어났다. 이 중 두 건만 제외하고는 80년대 이전에 일어난 사건이었고, 두 건도 97년에 러시아 군사 관련 시설에서 일어난 것이었다. 60건중 36건은 연구용 원자로나 실험실에서 일어났는데 어느 것도 심각한 방사능 누출은 없었으나 10명이 사망하였다. 총 발생 건수의 3분의 1에 해당하는 21건은 핵연료 주기 시설에서 일어났는데, 이들 사고로 7명이 죽고 40여명이 심각한 피폭을 받았다. 이들 경우에도 외부 환경으로의 심각한 방사능 누출은 없었다. 21건 중 20건은 핵분열성 물질의 용액과 관련

하여 사고가 일어났고, 대부분의 사고 원인이 작업자의 실수에서 유발된 것이었다. 상기와 같이 핵임계 사고는 대부분 80년대 이전에 일어난 것이고 상업용 핵연료 가공 시설에서는 한 건의 핵임계 사고가 없었던 것으로 미루어, 이번 JCO에서의 사고는 오부치 총리의 표현대로 일본과 같이 현대화된 선진국에서 일어난 것은 의외였고 수치스럽기까지 한 것이었다.

2. 한전원자력연료(주)의 핵임계 안전성 평가

가. 보유 시설의 재변환 공정

한전원자력연료(주)가 보유하고 있는 재변환 시설은 건식 공정(연산 200톤)과 습식 공정인 AUC 공정(연산 200톤)이 있는데, 현재는 주로 건식 공정을 가동하고 있고, AUC 시설은 스크랩 회수 등 보완 공정으로 보유하고 있다.

건식 공정은 UF₆와 스팀에 의해 UO₂F₂가 생성되는 가수 분해 반응과 생성된 UO₂F₂가 수소 및 스팀과 반응하여 열가수 분해 반응인 탈

불화 및 환원 반응이 단일 구조로 된 Rotary Kiln에서 일어난다.

습식 AUC 공정은 UF₆와 CO₂·NH₃·H₂O를 작용시켜 AUC를 제조하고, 여과된 AUC를 유동층 반응기에 배소 및 환원 반응되어 UO₂가 만들어진다.

나. 핵임계 안전성 평가

① KNFC의 핵연료 가공 시설은 임계 방지를 위해 핵분열성 물질의 양·조성·배치 상태·농도·밀도·수분 등을 고려하여 임계가 일어나지 않도록 각 단계별로 설계되었다.

② 제작 공정이 자동으로 되어있으며, 각 공정에서 사용되는 용기는 임계가 발생하지 않도록 근본적으로 안전하게 설계·제작하여 사용하고 있으므로 작업자 실수에 의한 사고가 발생되지 않도록 관리되고 있다.

③ 변환 공정에서 설비에 대한 임계도 계산 결과가 유효 승배 계수 제한치 0.95 이하를 만족하는 것으로 설계되어 있다. 이 같은 설계 기준은 정부의 인허가 심사시 임계 해석에 사용되는 KENO-Va 컴퓨터 코드로 확인을 받은 것이다.

④ 임계 사고의 방지를 위해서 핵연료 물질이 임계 질량 이상으로 모이지 않도록 공정중이나 핵연료 물질 저장에 규정된 용량 및 형태의 용기를 사용하도록 엄격히 제한하고, 여러 개의 용기를 다수 배열하는 경우에도 공간적 배치 및 이격 거리 등의 안전 변수들을 준수하고 있다.

⑤ 또한 내진 설계도 발전용 원자로와 동일한 기술 기준이 적용되었고 홍수시에도 시설 침수의 우려가 없도록 되어 있어 지진 및 홍수시에도 임계 사고가 일어나지 않도록 설계되어 있다.

3. 결론

JCO와 한전원자력연료(주)는 유사한 핵연료 가공 시설을 보유하고 있지만 JCO에서와 같은 핵임계 사고는 일어날 수 없다는 것을 다음과 같은 이유로 알 수 있다.

첫째는 일본 JCO 시설은 우라늄 농축도가 20%인데 비해 우리는 5% 이하의 저농축 우라늄만 사용하기 때문이다.

둘째는 이번 사건의 핵심은 인가된 시설을 사용하지 않고 허가되지 않은 용기를 사용하여 임의로 용해시켜 침전조에 과도한 우라늄을 주입하여 발생한 것이다. 한전원자력연료(주)에서는 기화 공정부터 전공정이 자동적으로 투입 및 이동되게 설계 및 건설되어 있어 JCO에서와 같이 작업자가 임의로 우라늄을 취

급할 수 없도록 되어 있다.

셋째는 핵임계 제어 방법의 철저한 도입이다. 핵임계 제어 방법에는 취급하는 우라늄 물질의 질량을 핵임계 질량 이하로 제어하는 질량 제어(Mass Control), 우라늄을 취급하는 모든 용기의 직경·폭 등의 크기를 일정 임계 조건 이하로 하는 기하학적 제어(Geometry Control) 및 감속재의 역할을 하는 수증기 및 물을 용기 주변에 존재하지 않게 하는 감속 제어(Moderation Control) 방법 등이 있는데, 재변환 및 가공 시설에 이를 최대도 도입하여 설계 및 건설하였다.

이와 같은 이유로 JCO 시설에서와 같은 임계 사고는 우리에게서 발생할 수 없다고 결론지을 수 있으며, 또한 현재까지 전세계적으로 5% 이하인 우라늄을 취급하는 핵연료 주기 시설에서는 핵임계 사고가 한 건도 없었다는 것은 이를 뒷받침하고 있다고 하겠다.

우리의 대책

이번 JCO에서 일어난 핵임계 사건을 교훈삼아 핵연료 가공을 맡고 있는 한전원자력연료(주)는 물론, 원자력산업에 종사하고 있는 모든 원자력인들은 경각심을 가지고 원자력 안전에 한치의 소홀함도 없도록 하여야겠다. 이번 사건에서 시사하는 몇 가지 문제는 특별한 관심을

가지고 대책을 마련해야 할 것으로 보인다.

1. 규정 준수 관행의 중요성

이번 사고는 당국으로부터 인가받은 용해탑을 사용하지 않고 작업자의 편의를 위해 만들어진 비공인 용기로 작업을 한데서 비롯되었다. 여기에 2.4kg의 제한치 규정을 무시하고 7배 가까운 16kg을 주입하여 핵임계 사고가 발생한 것이다. 당국의 인가받은 규정을 준수해야 한다는 것을 다시 한번 일깨워 주고 있다.

2. 안전 교육의 철저

관련 조사에서 드러났듯이 안전 교육을 제대로 시키지 않아 작업자들이 임계 개념을 갖고 있지 않아 고농축 우라늄을 취급하면서도 임계 사고를 염두에 두지 않았던 것이다. 우라늄을 취급함에 있어서 임계 등의 안전 사고는 물론이고 각 개인의 안전을 위한 보건 물리 교육이 철저히 수행되어야 할 것이다.

3. 안전 관리 규정 및 절차의 확립

모든 작업은 관련 절차서의 작성과 이에 대한 것을 작업자가 숙지하고 있어야 한다. 시설 각 공정에 대해 인적 요소에 의한 사고 가능성 여부를 상세히 검토하고 점검을 하여 미비한 규정과 절차를 확립해야 할 것이다. ☞