

美浜原電의 技術論

-안전성 재확립을 위한 전환점-

사고경위를 더듬어 본다.

이번 사고는 매우 알기 쉬운 사고였다. 모든 것이 손에 잡히듯 분명했다. 가압수형 원전에서 긴급노심냉각장치가 동작하는 경우는 튜브에 균열이 생기던가, 더 심한 때는 튜브가 절단 파열되는 경우다. 「원자로설치허가신청서」에도 「傳熱管손상사고」에 관해 상세한 분석자료가 첨부돼 있고 이것은 현장에서 우선순위가 가장 높은 훈련사항으로 들어 있다. 이번 사고는 몇가지 점에서 예상밖의 요인이 있었다고는 하지만 바로 교과서에서 예상하고 있는 것과 똑같은 경로를 밟았다고 할 수 있다.

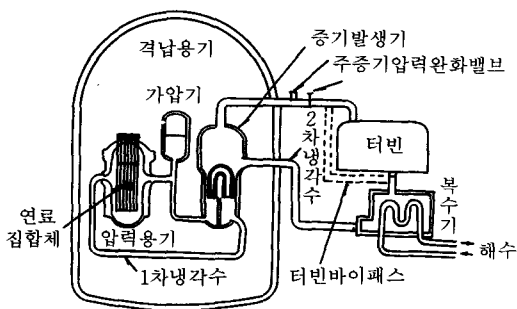
「원자로설치허가신청서」에 의하면 關西電力은 원자로 熱流動分析 프로그램(MARVEL)을 사용해서 사고분석을 하고 있다. 주요분석조건은 ①정격출력으로 운전중에 증기발생기 튜브 1개가 「절단 파열」, ②「원자로압력 낮음」 신호에 의한 원자로 긴급정지, ③긴급노심냉각장치의 고압주입펌프 2대 동작, ④보조급수펌프 3대중 2대가 동작, ⑤1차냉각수의 2차측으로의 유출량과 환경으로의 방사능방출량을 평가하기 위해 주증기압력완화밸브가 자동동작하는 것으

로 가정, ⑥신중한 평가를 위해 외부전원이 없는 것으로 가정, ⑦사고를 가급적 빨리 종식시키기 위해 운전원조작으로 하고 원자로긴급정지 약 10분후에 문제의 증기발생기를 격리, 원자로긴급정지 약 20분후에 다른 증기발생기의 주증기압력완화밸브를 동작시켜 1차계통 열제거, 또 1차냉각수의 고온측 배관온도가 274℃가 되었을 때에 가압기 압력완화밸브를 열고 1차계통의 압력이 문제의 증기발생기의 2차측 압력과 같게 되었을 때 폐쇄, 그 직후에 1차계통 압력이 다시 상승(10kg/cm²)하는 것을 확인하고 나서 긴급노심냉각장치를 정지한다는 것 등이다. 또한 분석과정에서는 원자로 출력을 정격열출력의 102%로 하고 온도는 정격온도 플러스 2.2℃, 압력을 정격압력 플러스 2.1kg/cm²로 하고 있다. 「원자로설치허가신청서」에는 「튜브재료가 延성이 높고 발생가능한 파손은 시간과 함께 조금씩 누설이 증가하는 것으로 순간적인 절단 파열은 일어날 수 없다」고 되어 있다.

분석결과에 따르면 1차냉각수가 2차측으로

유출됨으로써 가압기 수위와 원자로압력이 낮아져 「원자로압력 낮음」 신호에 따라 사고발생 약 4분후에 원자로는 안전하게 자동정지하는 것으로 되어있다. 또 1차냉각수가 유출됨으로써 「원자로압력 낮음」 신호와 「가압기수위 낮음」 신호가 일치해 긴급노심냉각장치가 동작, 노심에는 봉산수가 주입된다. 운전원은 사고발생 약 14분후에 문제의 증기발생기 격리밸브를 닫고 다른 증기발생기의 주증기압력완화밸브를 열어 1차냉각수의 除熱을 촉진시킨다. 사고발생 약 29분후에 가압기압력완화밸브를 열어 減壓조작을 해서 1차계통의 압력이 2차측의 압력과 같아지고 1차계통 압력이 다시 높아지는 것을 확인하고 사고발생 약 32분후에 긴급노심냉각장치를 정지시키도록 되어있다. 그후 다른 증기발생기의 주증기압력완화밸브를 열어 除熱과 減壓을 하고 사고발생 약 34분후에 냉각재 유출이 정지하게 되어있다. 1차냉각수의 2차측으로의 유출량은 40톤이고 이중 환경에 방출되는 증기량은 13톤으로 되어 있다.

사고에 의해 연료피복관은 손상되지 않고 초기의 연료피복관 결함률을 1%로 했을 경우의 냉각재중의 옥소(옥소 131 상당)를 약 320킬리, 希가스(감마선 에너지 0.5MeV 상당)를 약 4,900킬리로 잡고 1차계통의 減壓조작에 의해 냉각수중에 추가 방출되는 옥소를 약 3,500킬리, 希가스를 약 49,000킬리로 잡고 있다. 피폭량을 평가하기 위해 환경으로 방출되는 증기량은 20톤으로 하고 있다. 환경으로 방출되는 옥소는 약 1.2킬리이고 希가스는 약 5,400킬리로



〈그림 1〉 加壓水型原電의 시스템圖

평가하고 있다. 이로 인한 원전부지 경계선 밖에서의 아동의 갑상선피폭량은 약 0.37rem이고 감마선에 의한 전신피폭량은 약 0.040rem로 되어있다.

이상은 「원자로설치허가신청서」에서 특히 중요하다고 생각되는 부분을 요약한 것이다.

사고의 흐름을 4개의 「사고구분」으로 분류

關西電力은 3월1일 사고에 관한 상세한 정보를 공개했다. 사고의 전체적인 경위를 〈그림 2〉에 표시했는데 여기서는 사고의 흐름을 이해하기 쉽도록 4개의 「사고구분」으로 분류해서 설명하기로 한다(분류하는 방법은 필자의 주관에 따른 것으로 절대적인 의미가 있는 것은 아니다).

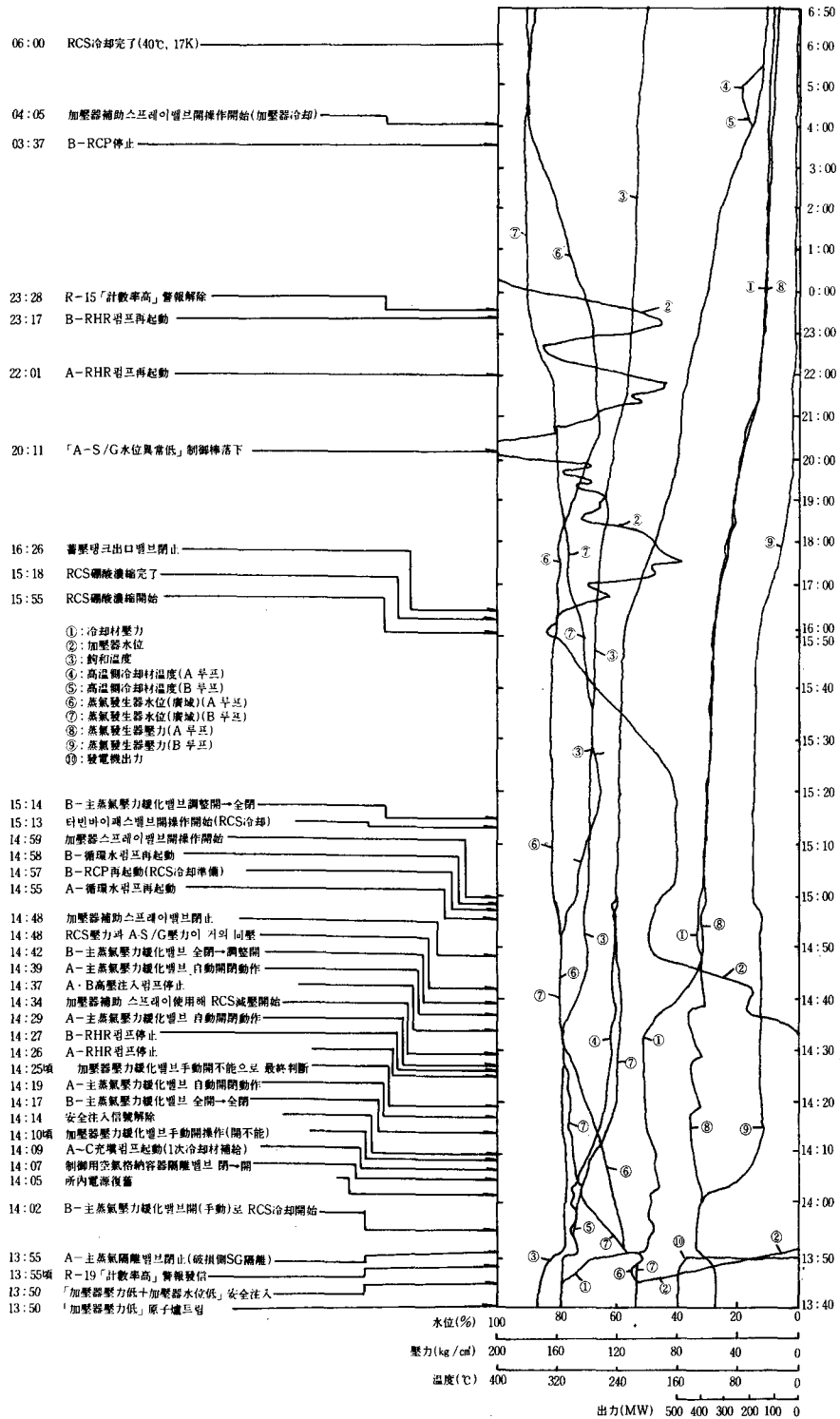
제1구분 「사고발단이 된 事象으로 부터 긴급노심냉각장치 동작전까지」

2월9일 12시40분 : 증기발생기의 blowdown 水의 모니터(R-19)가 약간 상승경향을 보였기 때문에 증기발생기의 2차측 냉각수의 샘플링을 시도했다. 또 이 보다 16분전인 12시24분에는 컴퓨터가 R-19의 「주의 신호」를 내고 있었다. R-19의 통상치는 매분 60카운트로 돼 있었다. 그후 12시33분에는 컴퓨터가 복수기 air ejector의 가스모니터(R-15)의 주의신호를 내고 있었다. 이 R-15의 통상치는 매분 약 800카운트로 주의신호 설정치는 매분 900카운트로 돼 있었다. 이 시점에서 R-19와 R-15의 지시치를 확인했지만 상당한 변화를 찾아볼 수 없었다.

13시00분 : 증기발생기 2대의 2차측 냉각수의 샘플링을 실시했다.

13시20분 : 샘플분석결과 A증기발생기의 방사능농도는 cm^3 당 6.0×10^{-3} 베크렐, B증기발생기의 그것은 검출한계 미만인 것으로 밝혀졌다. 또 再샘플링을 13시45분에 실시했다.

13시40분 : R-15가 「計數率 주의」 경보를 냈다. R-15의 통상치는 매분 약 800카운트가



〈그림 2〉美浜原電 2號機「昇止破斷事故」經緯

고 주의경보 설정치는 매분 900카운트로 돼 있었다.

13시45분 : R-19가 계수율 주의경보를 냈다. R-19의 통상치는 매분 약 35카운트이고 주의경보 설정치는 매분 400카운트로 돼 있었다. 이 시점에서 증기발생기의 blowdown水の 격리밸브(AOV-1923 A/B), 동 blowdown tank 수위제어밸브(LCV-1903)은 모두 자동적으로 닫혀져 있었다. 원자로압력은 보통 약 150.7kg/cm²였지만 이 시점에서는 이미 상당히 낮아져 155.2kg/cm²로 돼있었기 때문에 「가압기 압력 낮음」신호에 따라 보조 heater가 자동으로 투입돼 있었다. 이 설정치는 155.0kg/cm²로 돼있었다. 가압기 압력과 수위가 낮아졌기 때문에 B충전펌프를 수동으로 추가로 가동했다. 이에 따라 충전펌프는 3대 운전된 셈이다. 이때의 가압기압력은 약 151.4kg/cm², 가압기수위는 약 43.9%가 돼있었다.

13시48분 : 출력을 내리기 시작했다. 강하율 목표는 매분 약 5%로 돼있었다.

13시49분 : 이때에는 가압기 수위가 약 20.8%로 돼있었기 때문에 「가압기 수위낮음」신호에 따라 보조heater가 자동으로 끊겼다.

제2구분 「긴급노심냉각장치 동작으로 부터 증기발생기 격리까지」

13시50분 : R-19가 「計數率 높음」 경보를 냈다. 이것은 보통 매분 약 800카운트에 설정 돼있지만 경보설정치는 매분 10⁶카운트로 돼있었다. 원자로는 「가압기 압력 낮음」신호에 따라 긴급정지되었다. 「가압기압력 낮음」신호의 설정치는 134.3kg/cm²지만 약 135.1kg/cm²에서 긴급 정지되었다. 그런데 안전분석에서는 보다 보수적인 평가를 위해 132.2kg/cm²를 적용하고 있다. 원자로의 긴급정지와 함께 「터빈 트립」 신호와 「발전기 트립」 신호가 나왔다. 곧 이어서 「가압기압력 낮음」신호와 「가압기 수위 낮음」신호에 따라 긴급노심냉각장치가 동작해 노심에 냉각수가 주입되기 시작했다. 긴급노심냉각장치는 가압기압력 약 130.2kg/cm²에서 가압기수위가 약 5.7% 될 때에 동작

했는데 설정치는 128.3kg/cm²와 5.5%로 돼있었다.

또 안전분석에서는 보다 신중을 기하기 위해 126.2kg/cm²와 0.0%를 적용하고 있다. 긴급노심냉각장치는 A와 B의 2대의 고압주입펌프가 자동적으로 동작했다. 한편 A와 B의 2대의 殘留熱除去(RHR) 펌프도 자동으로 동작했다. 또한 원자로격납용기는 자동적으로 격리돼 6.6kV의 常用母線도 자동으로 차단됐다.

13시55분 : R-19가 「計數率 높음」의 경보를 냈다. 이것은 보통 매분 약 35카운트에 설정돼 있었지만 경보설정치는 매분 3,000카운트로 돼 있었다.

13시55분 : A증기발생기를 격리시키기 위해 주증기격리밸브(V-2001)를 닫으려고 시도했다. 이것은 중앙제어실에서 닫으려고 했지만 완전하게 닫혀지지 않아 7분후에 현장으로 가서 수동으로 완전히 닫았다.

14시02분 : V-2001이 완전히 닫혔다.

제3구분 「증기발생기 격리에서 減壓조작을 거쳐 긴급노심냉각장치를 정지할 때까지」

14시02분 : 사고를 될수록 빨리 종식시키기 위해 1차계통(RCS) 냉각을 시작했다. 이를 위해 운전지침서 대로 B증기발생기의 주증기발생기의 주증기압력완화밸브(PCV-482B)를 수동으로 열었다.

14시05분 : 1차냉각재펌프(RCP)와 순환수펌프를 재시동하기 위해 常用母線의 6.6kV를 수동으로 복구했다(WH사 설계에서는 원자로가 긴급정지하면 1차냉각재펌프도 동시에 정지하지만 TMI원전 2호기와 같이 B&W사 설계에서는 1차냉각재펌프는 계속 운전하도록 돼있다 (이것은 원전안전에 대한 설계방침의 차다).

14시07분 : 제어용 공기격리밸브(V-3323)을 열기 위해 격납용기격리 신호를 수동으로 해제했다. 가압기압력완화밸브를 조작하기 위해 V-3323을 수동으로 열었다.

14시09분 : A와 B의 고압주입펌프 정지와 A와 B의 1차냉각재펌프 재시동에 대비해 1차계통에 충분한 수량을 확보하기 위해 A와 B와 C

의 충전펌프를 수동으로 시동했다.

14시10분 : 운전지침서 대로 1차계통의 減壓 조작을 위해 2개의 가압기압력완화밸브(PCV-455C, PCV-456)을 수동으로 열려고 했지만 몇번 해보아도 열리지 않았는데 이때 압력은 약 94.3kg/cm²였다.

14시14분 : A와 B의 고압주입펌프와 A와 B의 잔류열제거펌프를 정지시키기 위해 안전주입신호를 해제했다. 이때 동시에 원자로의 긴급정지신호를 해제했다.

14시17분 : 1차계통의 온도가 목표치인 약 258.2℃에 달했기 때문에 B증기발생기의 주증기압력완화밸브(PCV-428B)를 수동으로 닫았다. PCV-428B는 15분간 열린 상태로 있었던 셈이다.

14시18분 : 충전펌프용의 급수가 體積제어 탱크(VCT)에서 연료교체용 물탱크로 자동 전환되었다. 전환 설정치는 4%로 돼있었다. 실제로 전환시킨 것은 3% 때였다.

14시19분 : 문제의 A증기발생기의 주증기압력완화밸브(PCV-482A)가 자동적으로 동작했다. 이 PCV-482A의 open설정치는 73.8kg/cm²이고 close설정치는 71.8kg/cm²였다. 약 73.0kg/cm²에서 열렸다.

14시25분경 : 2개의 가압기압력완화밸브(PCV-45C, PCV-456)이 수동으로 열리지 않아 최종적으로 조작불능이라고 판단했다.

14시26분 : A잔류열제거펌프를 보호하기 위해 이것을 수동으로 정지시켰다.

14시27분 : B잔류열제거펌프로 보호하기 위해 이것을 수동으로 정지시켰다.

14시29분 : 문제의 A증기발생기의 주증기압력완화밸브(PCV-482A)가 다시 자동적으로 동작했다.

14시34분 : 1차계통의 減壓조작을 하기 위해 긴급조치로 가압기 sub-spray밸브(V-202)를 수동으로 열었다.

14시37분 : 1차냉각수의 2차측으로의 유출량을 줄이기 위해 A와 B의 고압주입펌프를 수동으로 정지시켰다. 이때의 가압기수위는 약 17%, 냉각수의 subcooling도는 약 60℃였다.

제4구분 「긴급노심냉각장치를 정지하고 나서 冷態정지까지」

14시39분 : 문제의 A증기발생기의 주증기압력완화밸브(PCV-182A)가 다시 자동으로 동작했다.

14시42분 : 1차계통의 냉각을 재개하기 위해 B증기발생기의 주증기압력완화밸브(PCV-428B)를 수동으로 열었다.

14시48분 : 1차계통의 압력(약 63.8kg/cm²)과 A증기발생기의 2차측 압력(약 64.0kg/cm²)가 거의 같아졌기 때문에 가압기 Sub-spray 밸브(V-202)를 수동으로 닫았다.

14시55분 : 터빈 바이패스밸브를 열기 위해 A순환수펌프를 수동으로 재시동했다.

14시57분 : 1차계통을 냉각시키기 위해 B의 1차냉각재펌프를 수동으로 재시동했다.

14시58분 : 터빈 바이패스밸브를 열기 위해 B순환수펌프를 수동으로 재시동했다.

14시59분 : 1차계통 압력을 제어하기 위해 가압기 스프레이밸브(PCV-455B)를 수동으로 열었다.

15시13분 : 터빈 바이패스밸브(PCV-482C, PCV-482G)를 열고 B증기발생기에서 1차계통의 냉각을 시작했다.

15시14분 : B증기발생기의 주증기압력완화밸브(PCV-482B)를 닫았다.

15시55분 : 冷態정지상태(1차계통 온도 93℃ 미만)로 移行하기 위해 1차냉각재의 봉산농축조작을 수동으로 시작했다. 냉태정지에 필요한 봉소농도는 1,283ppm 이상이 돼있었다.

16시18분 : 봉소농도가 1,397ppm이 됐기 때문에 농축조작을 끝냈다.

16시24분 : 수동으로 제어봉 인출조작을 시작했다.

16시26분 : 긴급노심냉각장치의 하나인 蓄壓 탱크를 격리하기 위해 그 출구밸브(V-1856A, V-1856B)를 수동으로 닫았다. 이때의 1차계통의 압력은 약 55.2kg/cm²였다. 이 출구밸브를 그대로 놔두면 압력이 계속 내려가 50kg/cm²가 되었을 때에 불필요한데도 동작하고 만다. 격리조작은 이를 방지하기 위해서다.

16시32분: 제어봉의 인출조작을 끝냈다.

20시11분: A증기발생기의 「수위 異常하게 낮음」 신호에 따라 제어봉이 낙하, 이 통상치는 약 51.1%지만 異常설정치는 10.0%로 돼 있었다.

22시01분: A잔류열제거펌프를 수동으로 재시동했다.

23시17분: 냉각능력을 확보하기 위해 B잔류 열제거펌프도 수동으로 재시동했다.

23시28분: R-15의 「計數率 높음」 경보신호를 해제했다.

2월10일 02시30분: 1차계통의 冷態정지에 도달했다.

03시37분: B 1차냉각재펌프를 수동으로 정지시켰다.

04시05분: 가압기 정상부를 냉각시키기 위해 가압기 sub-spray밸브(V-202)를 수동으로 열었다.

06시00분: 1차계통의 냉각을 끝냈다. 이때의 온도는 40℃이고 압력은 약 17.1kg/cm²였다.

역시 關西電力은 현상을 정확히 파악하지 못하고 있었다.? -실제 데이터의 한계-

「원자로설치허가신청서」내용과 실제사고의

경위를 비교해보면 그 「타당성」과 함께 「문제점」도 몇가지 떠오른다. 關西電力이 지금까지 공개했던 모든 사고정보를 형식적이고 표면적으로 해석해보면 「WH사의 가압수형 원전은 충분한 안전여유도를 가지고 있고 매우 우수하다」 또는 「사고는 예상한 대로 진행되었고 몇가지 점을 제외하고는 운전원은 사전에 정해진 운전지침서 대로 적절하게 대응해 안전하게 사고를 종식시켰다」고 말할 수도 있다. 그러나 앞으로 원전의 안전성을 생각할 때 매우 중요한 문제도 몇가지 있어 이것들을 무시하고 논의할 수는 없다. 독자들은 이미 「원자로설치허가신청서」와 실제의 사고경위를 비교해서 문제점이 무엇인지 아셨을 것으로 생각된다. 또한 지금까지 關西電力이 공개해왔던 사고정보의 문제점에 대해서도 충분히 아셨을 것으로 생각한다. 이것들을 종합해서 <표 1>에 나타냈다.

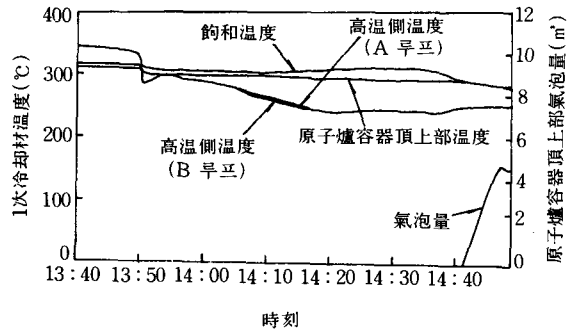
關西電力이 공개해왔던 사고의 「실제 데이터」에 의하면 긴급노심냉각장치가 동작하고 나서 冷態정지까지 1차냉각수의 방사능은 전혀 높아지지 않았다. 이것은 연료봉에는 바늘구멍

<표 1> 事故對應의 問題點

問題項目	安全分析	實際의 事故	備考
蒸氣發生器隔離	約 14 分後	12 分後	5分後에 不完全閉
加壓器壓力緩化밸브	約 29 分後	실 패	44分後에 서브·스프레이
緊急爐心冷却裝置停止	約 32 分後	47 分後	운전지침서대로는 아니다.
冷却材流出停止	約 34 分後	58 分後	實際는 豫想보다 2倍의 時間
1次系注入量	?	約 67t	事故 1個月後에 修正
冷却材流出量	約 40t	約 55t	事故 1個月後에 修正
蒸氣放出量	約 20t	約 15t	事故 1個月後에 修正
放出放射能量	約 5412퀴리	約 0.6퀴리	事故 1個月後에 修正

도 생기지 않았다는 것을 의미하는 것으로 「긴급노심냉각장치는 설계대로 성능을 발휘했다」고 해석할 수 있다. 안전기준에 의하면 긴급노심냉각장치는 다음 조건을 만족시켜야 하는 것으로 돼있다. ① 연료피복 온도의 계산치는 1,200℃ 이하일 것. ② 연료피복의 산화량 계산치는 산화반응이 심해지기 전의 피복관 두께의 15% 이하일 것. ③ 노심에서 연료피복 및 구조재가 물과 반응함에 따라 발생하는 수소의 양은 격납용기의 견전성이 유지되도록 충분히 적은 양일 것. ④ 연료의 형태변화가 있다 하더라도 붕괴열의 제거가 장시간에 걸쳐 가능할 것.

〈그림 2〉에서도 알 수 있는 바와 같이 표면적으로는 1차냉각재 온도는 항상 포화온도 이하로 돼있어 沸騰현상은 일어나지 않은 것으로 해석된다. 학문적으로 엄밀하게 표현하면 포화온도 보다 낮아도 「subcool(核沸騰)」은 일어나고 있다. 그러나 일반적으로 눈에 보일 정도로 큰 기포가 발생하고 있을 때 이것을 沸騰이라고 한다. 긴급노심냉각장치가 동작한 직후인 13시55분부터 14시20분까지의 7분간이 비등 직전이었다고도 볼 수 있다. 그러나 실제 데이터의 온도는 원자로내에서 측정치가 아니기 때문에 이 데이터를 가지고 「비등은 일어나지 않았다」고 단정할 수 없다. 최근에 通産省은 국회에서 「사고발생 1시간후에 원자로내에서 비등이 일어나 5m³의 증기가 발생했을 가능성이 높다」고 증언하고 있다. 이것은 현상을 평가하는 사고분석 프로그램 MARVEL로 분석한 결과이고 실제 어떠한지에 대해서는 아직 아무도 모른다. 〈그림 2〉에서도 알 수 있는 바와 같이 사고발생 1시간후의 subcool度는 40℃로 이 데이터로는 비등은 생각할 수 없다. 이것은 원자로내에 부분적으로 큰 온도傾斜가 있다는 것을 말해주고 있다. 통산성으로부터 비공식적으로 입수한 데이터에 의하면 원자로압력용기 頂上部的 온도는 關西電力이 제시한 고온측 배관온도 보다 50℃나 높다. 이 온도는 포화온도를 넘고 있다. 긴급노심냉각장치가 동작한 직후부터의 원자로압력용기 정상부의 온도와 고온측



〈그림 3〉 原子爐壓力容器頂上部에서 沸騰이 일어났음을 보여주는 MARVEL의 計算値

배관온도 및 포화온도와의 관계를 〈그림 3〉에 나타냈다. 그 수치 데이터를 〈표 2〉에 표시했다. MARVEL로 계산한 〈그림 3〉의 고온측 배관온도가 〈그림 2〉의 실측온도와 매우 근사하다는 것을 보면 이 프로그램은 현상을 대략적이 아니고 상당히 정확하게 추정하고 있는 것으로 생각된다. 이것은 關西電力이 발표한 실제 데이터를 통해 모든 것을 알 수 있는 것은 아니라는 것을 말해준다. 關西電力이 발표한 실제 데이터를 가지고는 긴급노심냉각장치가 동작했을 때의 원자로압력용기의 「급수 노즐부분」이나 「內壁부분」의 急冷정도도 정확히 알 수 없다. “미하마” 원전사고의 엄밀한 평가는 실제 데이터만으로는 불충분하고 시스템을 3차원적으로 모델화할 수 있는 best estimate program인 TRAC(원자로 熱流動분석 프로그램)이나 PTS-SOLA(원자로 加壓熱衝擊분석 프로그램)에 의한 분석이 필요한 것으로 생각된다. 미하마 원전사고의 세부적인 사항은 아직 밝혀지지 않은 사태도 있다. 그리고 오해가 가지 않도록 보충설명해 두지만 긴급노심냉각장치가 동작하게 되는 현상이 일어났을 때 비등현상이 일어나서는 안된다고 보아서는 안된다. 냉각에 지장이 없는 범위내에서 부분적으로 비등이 일어나는 것도 인정하고 있다. 특히 大口徑배관의 파열에서는 압력강하가 심해 1차계통 냉각수는 순간적으로 비등하는 것은 확실하다. 문제는 아직 현상이 충분히 해명되지 않고 있다는 점이다.

〈표2〉 “그림 3”의 數值 데이터

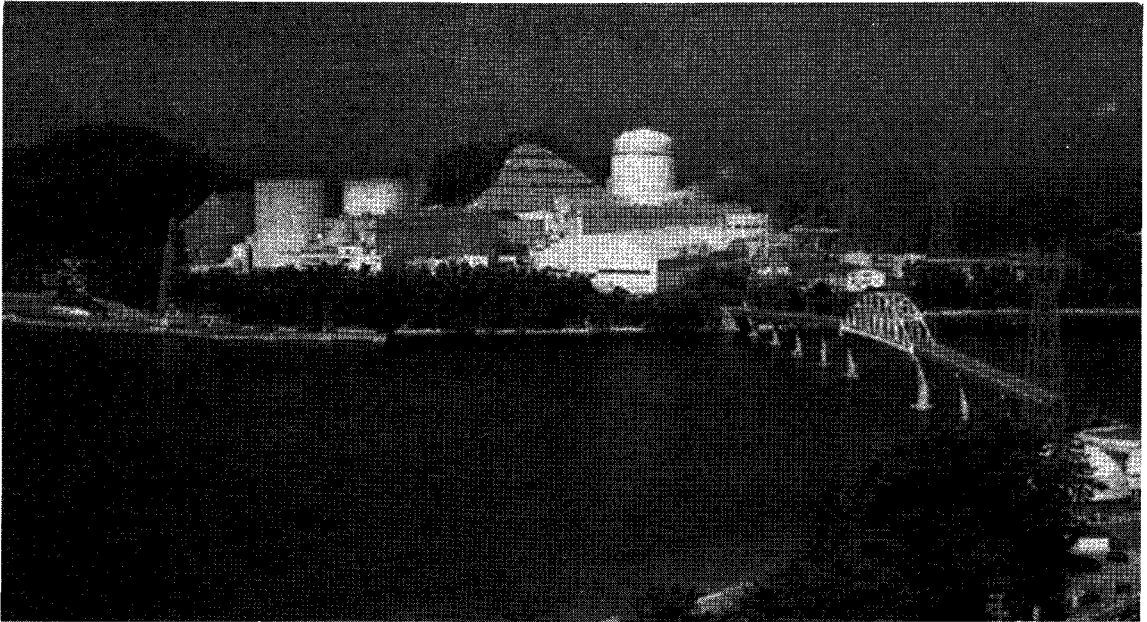
時刻	飽和溫度 (℃)	原子爐容器 頂上部溫度 (℃)	高溫側溫度 A부프 (℃)	高溫側溫度 B부프 (℃)	氣泡量 (m ³)
13:40	344.8	310.0	316.0	316.0	0.0
41	344.7	310.0	315.9	315.9	0.0
42	344.7	310.0	315.9	315.9	0.0
43	344.7	309.9	315.8	315.8	0.0
44	344.7	309.9	315.8	315.8	0.0
45	343.3	309.8	315.9	315.7	0.0
46	341.1	309.6	315.8	315.6	0.0
47	338.9	309.5	315.6	315.5	0.0
48	336.8	309.4	315.4	315.3	0.0
49	334.9	309.3	315.3	315.3	0.0
50	332.0	309.2	313.2	312.6	0.0
51	310.9	301.4	288.8	288.3	0.0
52	309.6	301.0	292.7	292.5	0.0
53	308.8	301.0	296.3	296.1	0.0
54	307.9	301.0	299.4	299.0	0.0
55	306.6	301.0	301.0	300.5	0.0
56	307.1	301.1	296.4	296.4	0.0
57	307.6	301.2	294.1	294.1	0.0
58	308.1	301.3	293.1	293.0	0.0
59	308.1	301.4	291.9	291.7	0.0
14:00	308.1	301.4	290.4	289.8	0.0
01	307.9	301.5	288.6	287.7	0.0
02	307.8	301.4	286.7	285.6	0.0
03	308.1	301.4	284.9	283.6	0.0
04	308.2	301.4	283.3	281.8	0.0
05	308.0	301.3	281.9	280.1	0.0
06	307.8	301.2	280.2	278.0	0.0
07	307.6	301.1	278.1	275.4	0.0
08	307.4	301.0	275.7	272.4	0.0
09	307.2	300.8	272.9	269.4	0.0
10	307.2	300.6	269.9	266.4	0.0
11	307.4	300.3	266.9	263.4	0.0
12	307.6	300.0	264.0	260.5	0.0
13	307.9	299.7	261.0	257.6	0.0
14	308.3	299.3	258.2	254.9	0.0
15	308.7	298.9	255.5	252.3	0.0
16	309.2	298.6	253.2	249.8	0.0
17	309.5	298.2	250.6	247.4	0.0
18	309.9	297.9	247.8	245.1	0.0
19	310.6	297.7	245.5	243.3	0.0
20	311.2	297.5	243.8	242.4	0.0
21	311.5	297.3	243.1	242.3	0.0
22	311.8	297.1	243.0	242.7	0.0
23	311.9	296.8	243.3	243.2	0.0
24	312.0	296.4	243.7	243.6	0.0
25	312.1	296.1	244.0	243.9	0.0
26	312.2	295.8	244.2	244.1	0.0
27	312.3	295.5	244.4	244.1	0.0
28	312.3	295.1	244.4	244.2	0.0
29	312.1	294.8	244.5	244.0	0.0
30	312.0	294.4	244.1	243.7	0.0
31	312.0	294.1	243.8	243.4	0.0
32	312.0	293.7	243.4	243.1	0.0
33	312.1	293.4	243.1	242.9	0.0
34	312.1	293.0	242.9	242.7	0.0
35	310.3	292.6	242.4	241.8	0.0
36	308.7	292.2	240.8	240.0	0.0
37	307.7	291.8	239.0	238.0	0.0
38	304.5	291.3	239.9	240.6	0.0
39	300.0	290.9	242.8	243.5	0.0
40	297.0	290.5	246.1	245.3	0.0
41	293.3	290.1	247.8	246.4	0.0
42	289.7	289.6	248.3	247.3	0.0
43	288.2	288.2	248.2	249.1	0.9
44	286.8	286.8	248.8	249.9	1.8
45	285.3	285.3	249.3	250.4	2.7
46	283.7	283.7	249.8	250.6	3.4
47	282.3	282.3	250.0	250.7	4.1
48	281.1	281.1	250.1	250.7	4.6
49	282.4	279.6	250.3	250.5	4.6
50	283.4	278.6	250.4	250.4	4.5

가압기압력완화밸브 고장이 가져온 불확실성

사고가 나면 반드시 문제가 되는 것은 안전 계통이 동작하지 않았다는 것이다. 사고는 예상한 대로 일어나 안전계통이 모두 완전히 동작하고 운전지침서에 정해진 방법에 따라 종식 되는 일은 드물다. 이번에도 운전지침서를 벗어난 부분이 있다. 오해가 가지 않도록 부연하지만 「운전원은 운전지침서 대로 사고에 대응하지 않으면 안된다」고 하는 규칙은 없는 것으로 생각한다. 안전계통중의 어느 하나라도 동작하지 않으면 이에 대응하는 순간적인 판단이 필요할 것이다. 따라서 운전원이 그렇게 판단하지 않을 수 없었던 원인이 무엇이었는가를 문제삼지 않으면 안된다.

운전원은 운전지침서 대로 문제의 A증기발생기를 격리시키기 위해 중앙제어실에서 닫는 조작을 했지만 완전히 닫혀지지 않았다는 것을 나타내는 표시등을 보고 몇번이나 이를 교정하려고 했지만 그래도 완전히 닫혀지지 않기 때문에 현장으로 달려가 제어실에서 조작을 시작하고 나서 7분후에 완전히 닫았다. 미하마 원전 2호기의 중앙제어실은 1호기의 것과 공동으로 사용하고 있어 터빈실과는 두꺼운 벽(입구 도어는 보통 철판)으로 격리돼 있을 뿐이다. 내가 방문했던 2월26일에는 1호기가 정기점검을 마치고 30만kW로 조정운전중이었다. 격리밸브와 주증기압력완화밸브는 중앙제어실과 터빈실이 있는 층의 바로 아랫층에 있었다. 나는 중앙제어실에서 천천히 걸어 1분정도되는 거리의 현장에 도착했다. 격리밸브는 곧 뛰어갈 수 있는 거리에 있는 것이 다행이었다. 현장은 작업성이 좋다고는 할 수 없는 상황이었다. 그러나 완전히 밸브가 닫혀진 시간이 늦었다고는 하지만 이 정도는 치명적인 것은 아니었다. 그러나 당연히 기술관리의 방법은 문제가 된다.

큰 문제는 운전원이 운전지침서 대로 가압기압력완화밸브를 열어 減壓조작을 시작하려고 했을 때 일어났다. 2개의 압력완화밸브가 전혀 동작하지 않았기 때문이다. 운전원은 보조 스



프레시시스템으로 감압을 시도했지만 그 효과는 적어 안전분석결과 보다도 15분이 더 걸려 1차계통과 2차측의 압력이 같아졌다. 보조 스프레이 시스템에서는 가압기의 증기부분에 냉수를 스프레이해 증기의 응축을 이용해서 압력을 내리고 있지만 이것은 압력완화밸브를 열었을 때 정도의 효과는 없다. 운전지침서에는 1차계통과 2차측의 압력이 같아진 다음에 어느 정도 1차계통의 압력이 높아지는 것을 확인하고 나서 긴급노심냉각장치를 정지하도록 돼있었지만 스프레이에 의한 감압으로는 예상보다 압력이 내려가지 않기 때문에 긴급노심냉각장치를 정지시킴으로써 압력상승을 억제하고 있다. 가압기압력완화밸브가 동작하지 않음으로써 1차냉각수의 유출정지까지 안전분석결과 보다 24분이나 더 시간이 걸렸다. 이것은 또 유출량(환경으로의 증기방출량 포함)이 많아진 원인이기도 하다.

대규모 기술에 뒤따르는 인간의 불확실성

원전은 12~14개월 정도 연속운전한 후에

2~3개월간 정기점검을 실시한다. 歐美에서는 일본 만큼 세부적인 검사는 하지 않고 있고 대형기의 점검이 주가 돼있다. 일본은 「예방보전」 방식을 취하고 있는데 비해 구미에서는 일이 벌어지고 나서 대처하는 「트러블 처리」 방식을 취하고 있다. 미국에서는 증기발생기 튜브를 검사할 때마다 전체의 3% 정도 체크하면 되는 안전기준으로 돼있고 프랑스에서는 10년에 100%가 되면 좋은 것으로 돼있다. 또한 구미에서는 튜브에 균열이 생기는 것은 불가피하다고 보고 「leak 운전」을 허용하고 있다. 미국에서는 시간당 230리터 미만이면 leak 운전을 하고 있다. 일본과 같이 성실하게 정기점검을 해도 튜브의 절단 파열을 방지할 수는 없고 이것은 아직도 검사의 방법이나 항목 및 頻度에 문제가 있음을 의미한다.

지금의 정기점검에서는 연인원 3,000명의 근로자가 어떠한 일이던 간에 관계하고 있지만 그 90%는 하청 근로자들이다. 이때문에 불확실요소가 끼어드는 것을 전에 문제삼은 일이 있지만 이번 사고도 역시 나의 지적이 맞았다는 것을 증명하고 있다. 나는 원자력안전분석소에 근무하고 있을 때 아직 건설중(5년전)이

있던 하마오카(浜岡) 원전 3호기 현장을 방문한 일이 있다. 그후 그곳 소장과의 대화한 일이 있는데 그때 그의 입에서 예상외의 말이 나왔다. 그는 「이 원전에는 세계최상급의 엔지니어도 있지만 정기점검때에는 자기 이름조차 쓸 줄 모르는 사람의 협력을 얻지 못하면 원전을 움직일 수 없고 이렇게 위와 아래의 능력에 차이가 나는 직장이 또 없는 것이 아니냐」고 반문한 일이 있다. 지금도 이 말이 컷전에서 울리는 것 같다. 격리밸브가 왜 적절하게 동작하지 않은 이유에 대해서는 아직도(3월29일 현재) 밝혀지지 않고 있지만 역시 下請작업에 의존하는 체제의 나쁜 면이 나타난 것 같다. 가압기압력 완화밸브에 대해서는 關西電力의 엔지니어(?)가 확신을 가지고 압력완화밸브를 동작시키는 공기밸브를 닫았기 때문인 것으로 판명되었지만 지금까지 장기간 「normal open」 상태에 있었던 것을 왜 확신을 가지고 「normal close」로 변경하지 않으면 안되었는지, 이해가 가지 않는다. 이같은 중요한 판단이 현장 엔지니어 한 사람의 판단에 맡겨지고 있는 기술관리상의 허점을 문제삼고저 한다. 원전의 수가 늘고 현장 엔지니어의 질도 떨어지고 있다. 이것을 조직적으로 커버하지 못하고 있다.

와전류탐상법(ECT)에 의한 튜브검사도 같은 문제를 안고 있다. 이 방법에서는 튜브에 thinning이나 균열이 일어나지 않더라도 「지지판」이나 「진동방지용 지지물」에서 異常신호가 나오도록 돼있다. 검사결과는 磁氣테이프에 기억돼 컴퓨터에서 이러한 “가짜”신호를 자동적으로 제외해서 필요한 신호만을 잡고 있지만 문제는 실제 데이터의 내용을 확인도 하지 않고 데이터를 blackbox化해 데이터를 처리하게 검토했다면 진동방지 지지물이 없음으로 해서 나와야 할 곳에 가짜 신호가 나와 있지 않다는 것을 확실하게 알았을 것이다. blackbox화의 배경에는 「메이커는 사양서 대로 확실하게 물건을 만들고 있다」는 선입감이 있기 때문이다. 이번 사고는 메이커에 더 의구심을 갖고 신중히 대처하지 않으면 안된다는 것을 말해주고 있다. 과거의 예로 보아 사고는 설계 대로의

재질과 치수로 만들어져 있지 않기 때문에 일어나는 경우가 결코 적다고 할 수 없다. 이 blackbox화는 미하마 원전 2호기 뿐만 아니라 다카하마(高浜) 원전 2호기에서도 하고 있으니 문제가 심각한 것이다.

關西電力은 사고 당일 정확하게 1차냉각재 유출량과 환경으로의 증기발출량 및 방사능방출량은 파악하고 있었지만 사고규모를 작게 보았기 때문에 모두 몇분의 1로 축소 발표했다. 격리밸브와 가압기압력완화밸브가 동작하지 않은 것도 처음에는 감추고 있었다. 사고충격이 가신 다음에 의도적으로 서서히 진실을 발표하고 있다. 전문가가 보면 당초 발표된 1차냉각재 유출량이 이상하다고 금방 알 수 있는 일이다. 이것은 1차계통에 주입된 양에서 10톤(처음에는 가압기수위가 50%였는데 사고종식시에는 滿水가 되어있어 여기에 약 5톤 정도 들어간다. 또 1차계통의 냉각수온도가 내려감으로써 체적수축이 일어나 이것이 전체의 몇%에 해당하는 약 5톤) 정도를 빼면 정확한 유출량이 된다는 것은 상식적인 얘기다. 또한 안전분석결과와도 모순돼 있었다. 나는 이같은 근거에서 「적어도 50~60톤은 누출되었다」고 문제를 제기했지만 그 몇일후에 55톤 누출되었다는 것이 발표되었다. 원전의 제어계통은 주입량과 유출량을 정확히 알 수 없을 정도로 조작하게 돼있지는 않다. 사고시의 원자로의 상태를 정확히 파악할 수 없다면 대형사고를 방지할 수 없다는 얘기가 된다. 사고시에 괴롭겠지만 사실을 빨리 사회에 알리는 것이 신뢰를 얻을 수 있는 기본적인 요소인데 關西電力은 이를 이행하지 않았다.

나의 평론은 기술면에서 엄격한 것인지는 몰라도 다른 누구 보다도 따뜻한 마음으로 대하고 있다. 그리고 무슨 일이 있어도 원전에서 대형사고가 일어나서는 안된다는 마음으로 가득 차있다. 사고로 부터 겸허하게 배운다는 자세가 아니고서는 안전은 지켜질 수 없는 것이다. 문제가 있으면 이를 적극적으로 개선해 나가려는 마음가짐이 필요한 것이다.