

소련형 원자로는 100만배나 위험

- 동독 원전4기는 폐로에, 다른 14기는 가동중 -

- 소련원자로의 대부분은 위험한 것
- 소련·동구에서는 가공할 원자로 사고가 일상적으로 발생하는가
- VVER-440형은 30기, 그중 14기가 특히 위험

櫻井 汚
〈일본기술평론가〉

현재 원전을 둘러싼 문제점은 크게 두가지로 나눌 수 있다. 하나는 미국산과 소련산의 원전 사이에는 너무 큰 안전성의 갭이 존재하고 있다는 사실이며, 다른 하나는 상대적으로 안정성이 높은 미국형이라 할지라도 안정성에는 문제가 없는가 라는 점이다. 이러한 전자의 모순이 통일독일(統一獨逸)의 탄생으로 한꺼번에 표면화 되었다.

통일독일 탄생까지의 경위

서독은 미국형의 원전을 개량하여 세계적으로 신뢰성이 높은 시스템을 완성함으로써, 동독에 있는 소련제 가압수형 원전의 안전성을 높이기 위해 서독의 「안전기준」을 적용키로 방침을 세웠다.

소련제 가압수형 원전을 VVER이라 부르고 있는데, 이것은 가압수형 원자로의 러시아어 약어로서, 구조와 운전조건은 대충 서방에서 운전중인 가압수형 원자로(PWR)와 비슷하다.

VVER에는 초기에 개발한 VVER-1440과 그것을 다시 개량 규모를 높인 VVER-1000이 있다. 440은 원전의 전기출력을 의미하고 있는데 440MW, 좀더 알기 쉽게 말하면 44만 kW급이 된다. 이들 원전은 소련·동구에 집중하고 있는데 특히 월등하게 위험한 것은 VVER-440형 모델 V230이다. 이러한 형은 소련·동구에 현재 14기가 있다(「뉴클리어·엔지니어링·인터내셔널」1990년 7월호).

소련·동구의 페레스트로이카와 글라스노스트, 그리고 통일독일의 탄생이라는 시대적 배경을 엮고, 국제원자력기구 IAEA의 조사단이 금년 2월12일 부터 16일까지 동독의 글라이프스발트원전을 방문하여, 과거에 발생한 사고와 위험한 과도사상(過渡事象)을 조사하는 한편 안전성의 검토를 했다. 또 서독정부 조사단도 동 원전을 방문하고 동-1호기와 동-2호기의 원자로 압력용기의 「중성자취성화」(中性子脆性化)와 「취성회복 열처리」(脆性回復熱處理)를 중심으로 한 안전성을 검토 끝에 매우

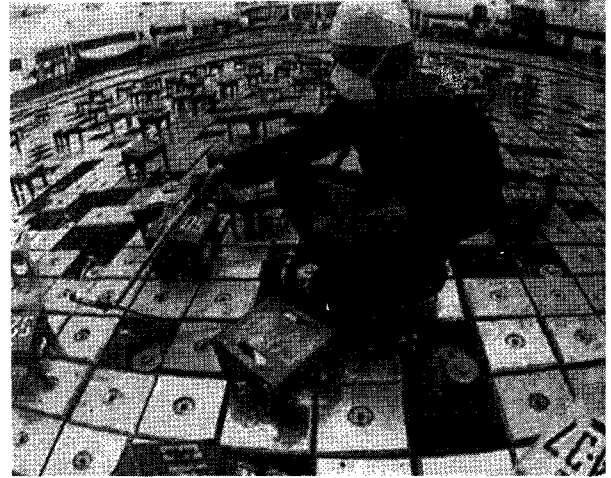
엄격한 보고서를 공표 했다.

부족한 정보에서 문제점을 찾는다

미국형 원전에 적용되고 있는 기술과 안전기준은 비교적 잘 이해되고 있으나, 소련형에 대한 상세한 내용은 거의 알려지지 않고 있다. 체르노빌사고가 발생했을 때만 해도, 문제의 RBMK원자로가 어떠한 구조와 특성을 갖고 있는지 사고후 즉시 파악한 전문가는 거의 없었다. 그것은 RBMK 뿐만 아니라 VVER에 대해서도 정도의 차이는 있어도 똑 같다.

VVER-440의 설계상의 문제점을 파악하기 위해 원자력안전위원회 소련조사단(內田秀雄 단장의 12명)의 보고서를 해독해 보았다(동 보고서 1990년3월). 이 보고서 내용에는 놀랄만한 사실이 있음을 알았다. 전체 57페이지의 보고서중에 불과 22행 밖에 되지 않는 짧은 내용이기는 하나 중요하므로 그 부분을 전문 인용하기로 한다.

「소련은 VVER형 원자로의 초기에 만들어진 제1세대의 VVER-440형 모델 V230의 원자로 압력용기의 재소둔(再燒鈍)을 실시하고 있다. 이 제1세대의 원자로 압력용기는 내면의 스테인레스강의 라이닝이 없으며 또 노심외측 연료와 압력용기 내측과의 간격이 약 34cm(웨스팅하우스사 제품 PWR은 약 47cm)로 좁은 것이 특징이다. 원자로용기의 크기가 서방측의 것과 비교하여 약간 작은 것은 철도수송을 위한 것이라고 한다. 이 때문에 중성자조사(中性子照射)에 의한 취성화가 예상보다는 빨리 진행되고 있다. 그 이유로서 소련의 용접봉을 포함한 강재(鋼材)에는 중성자조사에 예민성을 가져오는 인(燐)과 동(銅)의 불순물 함량이 많으며 중성자 차폐(遮蔽)의 역할을 하는 경수층(輕水層)이 얇다는 것을 들 수 있다. 중성자의 감속, 차폐에 대해서는 경수층의 두께가 지수관수적(指數關數的)으로 효과가 있기 때문이다. 소련의 관계자들 간에는 원자로용기의 설계에 있어서 수송성에 계속 치중할 것인가 아니면 중성자취성화에 대한 고려에 역점을 들



것인가에 대하여 논의중에 있다. VVER-1000형의 경우는 노심외측연료와 압력용기내측과의 간격이 약 48cm로 되어 있어 100만kW급 PWR의 약 50cm와 큰 차이는 없다고 할 수 있다(동 보고서 9페이지). 「(中略) 원자로 압력용기의 재소둔은 전소련 원자력발전소연구소가 주체가 되어 실시했다. 현재 소둔(燒鈍)을 위한 기계는 1세트로 91년에 또 1세트를 만들 예정이다. 이제까지 6기에 대해서 실시되었는데, 90년에는 동독의 글라이프스발트원전에서 실시할 예정으로 있다. 가열은 100kW의 전기 히터를 압력용기 속에 넣어 실시하여 용접부를 소둔 한다. 압력용기의 보증을 30년으로 하기 위해, 15년에서 20년정도 사용한 爐에서 실시했다. 이 때의 고속중성자 플루엔스는 약 2×10^{20} 개/평방cm이 었다. 재소둔의 전후에 시험편을 압력용기 내측의 용접선에서 깎아 내고 (깊이 5, 6, 7, 12mm), 재소둔전후의 취성전이온도(脆性遷移溫度: 이하 천이온도)를 경도(硬度), 전자특성 등에 의해 확인 했다. 재소둔에 의해 천이온도는 190℃정도에서 20~30℃정도로 회복 했다(동 보고서 27페이지). 그러나 이 보고서에는 안전 여부를 판단하는 취성화회복 열처리(재소둔)의 온도와 시간은 쓰여져 있지 않았다. 천이온도가 이 정도로 높으면 사고시에 긴급노심냉각장치(緊急爐心冷却裝置) ECCS의 고압주입계(高壓注入系) HPI가 작동하여 가압

열충격 PTS가 일어나 압력용기의 노심부 바로 옆의 내벽을 천이온도 이하로 냉각시킬 가능성이 높게 되는데, 만약 그렇게 되면 압력용기에 균열이 생길 확률이 높아 진다. 압력용기에 균열이 생기면 최악의 경우 노심용융으로 이어 진다. 천이온도 190℃의 위험도는 상상으로 크며, 세계는 지금 전을할 사실에 직면하고 있다.

압력용기의 파괴확률을 추정 한다

일본의 「아사히신문」은 이 뉴스를 크게 보도했으나(90년 3월 20일자), 정보는 보고서의 범위내에 불과하여 취성화회복 열처리가 안전한지 그 여부를 밝히는 데는 실패 했다.

웨스팅하우스사 제품 PWR의 천이온도 설계치(設計值)는 93℃이며, 이 천이온도 이하인 경우, 압력용기의 파괴확률은 연간 평균 약 1억분의 1 정도로 평가되고 있다(「마살·레포트」에서). 미국에서는 8기의 PWR의 천이온도가 93℃를 초과했을 때 원자력규제위원회는 폐로(廢爐)조치 하느냐, 운전을 계속하느냐를 검토하고 안전기준을 132℃로 완화 했다.

미국에서 과거에 일어난 과냉각사상(過冷却事象)의 32개 예를 분석하고, 그중 7개 예를 핵심한 PTS로 판단 100분의 1이하의 확률에서 일어나는 PTS는 제외하여, 과냉각의 온도 하한선을 320°F로 평가하고, 다시 50°F의 안전여유를 고려하여 최종적으로 270°F(132℃)로 했다(원자력규제위원회 내부자료 SECY-82-465에서). 이에 따라 압력용기의 파괴확률은 이때까지의 500배의 연간 평균 약 20만분의 1로 증가했다. 미국은 결국 취성화회복 열처리를 하지 않고 안전기준을 변경하는 길을 선택하게 되었다.

PWR은 일시냉각재펌프의 열손실 만으로 1차체를 약 300℃로 승온(昇溫)하는 것이 가능하며, 그 상태에서 2주간 정도의 공운전을 실시하여 천이온도를 약 1할에서 2할 개선할 수가 있다. 미국은 그것조차도 하지 않고 안전기준을 변경한 점에 주의할 필요가 있다.

천이온도는 압력용기 강재(鋼材)중의 「銅」 불순물량에 크게 의존 된다. 「마살·레포트」에 따르면, 미국의 강재중에는 평균 0.117중량%의 銅불순물이 함유되고 있으나, 일본의 강재에는 평균 0.0054중량% 밖에 함유되지 않고 있다.

미국 란체세코의 원전은 안전관리에 문제가 있어 주민투표로 정지폐로(停止廢爐)의 길로 몰아 넣었으나, 사실 천이온도만 해도 이상하게 높아 이것만으로도 정지는 시간문제였었다. 원인은 銅불순물량 0.35중량%에 있다. 이것은 치명적인 양이다. 일본의 PWR은 설계수명의 40년운전을 해도 80℃정도의 천이온도로 수습될 것으로 추정 된다. 그러나 미하마(美浜)원전 1호기의 압력용기는 완성품을 컨퍼션·엔지니어링사에서 수입한 것이기 때문에 충분한 주의가 요구되고 있다.

일본도 10년에서 20년의 수명연장을 하면, 가볍게 설계치의 93℃를 넘게되므로 미국과 같이 안전기준을 132℃로 하는 것이 된다(현재 안전기준은 그렇게 되어 있으나 해당하는 원전이 없기 때문에 통상성에 의해 공인되지 않고 있다). (BWR은 압력용기부의 고속중성자속이 PWR 보다도 한단계 낮으므로 천이온도는 지나치게 상승하지 않을 것으로 보고 논의 대상에서 제외 한다).

소련제 VVER-440과 미국형의 PWR은 완전히 똑같지 않으나 기초적인 안전문제를 감안할 경우 가깝다고 생각해도 좋을 듯 하다. 그 때문에 천이온도에서 압력용기의 파괴확률의 order를 추정하는데는 SECY-82-465가 참고 된다. 소련제 VVER-440형 모델 V230으로 천이온도가 190℃로 되어 있다고 한다면, 압력용기의 파괴확률은 연간 평균 약 1000분의 1에서 약 100분의 1의 범위가 될 것이다. 이것은 일본의 것과는 100만배에 필적한다. 대상이 되는 이와같은 원전이 소련·동구에 포함 14기가 존재하며, 그 가운데 6기에 대해서는 이미 취성화회복 열처리가 실시되고 나머지 8기는 그대로 이다. 설비이용률에 의해 천이온도에는 차가 있는 것으로 생각되나 그렇다고 해도 이

상하게 높다.

안전위원회 보고서의 고속중성자 플루엔스(照射量)에서 압력용기부의 고속중성자속을 산출하고 그것과 강제중의 동불순물에서 천이온도를 추정하면, 70년대 후반부터 80년대 전반에 운전개시한 것도 천이온도가 150℃정도에 달하고 있으며, 파괴확률은 연간 평균 약 1만분의 1 정도로 추정 된다. 역시 이상하게도 높다. 이와같은 원전의 운전이 허락될리 없다.

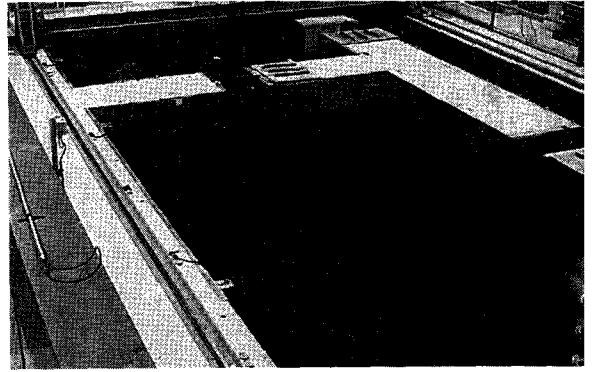
마침내 열린 기밀정보

안전위원회 조사단의 한사람에게 취성화회복 열처리의 온도와 시간에 대한 질문을 한 결과 「소련은 아직 오픈하지 않고있다」는 답신이 왔다. 그러나 그후 87년에 노보볼네지원전-3호기가 430℃로 열처리 되었음을 알았다. 그러나 시간은 분명하지 않았다. 시간은 안전과 위험을 판단할 수 있는 요소가 된다.

소련의 VVER-440형 모델 V230과 같은 설계에서는 천이온도의 급상승은 피할 수 없다. 너무나 난폭한 재료의 사용방법에 그저 놀랄 뿐이다. 이와같은 기술이 허락될리 없다. 소련에서는 취성화가 진행되면, 취성화회복 열처리를 미리부터 생각하고 있었을지도 모른다. 천이온도가 190℃나 되면 비로서 취성화회복 열처리를 실시하는 사실로 미루어보아 천이온도의 설계치가 상당히 높다는 것을 예측할 수 있다.

일본과 구미의 압력용기재료는 A533 B클래스 1과 A508 클래스 2 아니면 클래스 3이며, 그 제조사의 응력제거 소둔온도는 美·日이 610℃에서 625℃, 유럽은 500℃에서 550℃로 되어 있다(「마살·레포트」에서). 응력제거 소둔시간은 2할의 안전여유도를 고려하여 40시간으로 해석되고 있다.

VVER-440형 모델 V230의 압력용기재료는 취성화에 강한 A387이며, 응력제거 소둔온도는 670℃에서 720℃로 해석되고 있다. 그러나 소련의 압력용기 제조기술은 오픈되어 있지 않으므로 확실한 것은 알 수 없으나 단지 서방



제국의 안전기준을 참고로 하는 길 밖에 방법이 없다.

일본 원산연차대회(日本原産年次大會)에 소련 원자력발전·산업성대표단이 초청되어 있음을 알고 질문서를 보냈다. 질문내용은 ① VVER-440의 천이온도 설계치 ② 취성화회복 열처리의 온도와 시간 ③ 취성화회복 열처리장치와 구체적인 방법 등이다. 이러한 것들은 어느것도 기밀정보임을 알고 있었으나 과감히 불가능의 벽에 도전해 보았다.

회합은 4월13일 가스미가세키의 어느 빌딩의 회의실에서 있었다. 소련원자력발전·산업성대표단 멤버는, 단장: E·N·포지세프(원자력발전·산업성차관), 단원: G·F·내포도프(원자력발전·산업성 국제국차장), G·A·시치로프(원자력발전·산업성 칼리닝원자력발전소장), B·Y페레진(원자력발전·산업성 전소련 원자력발전소 운전과학연구소 과학연구원), M·F트로야노프(원자력발전·산업성 오프닝 스크블리에너지연구소장)이다.

나의 질문에 예기하지 못했던 답신이 왔다. 「소련을 떠나기 전에 질문항목을 받은 것은 아니지만, 확실한 것은 말할 수 없으나 천이온도의 설계치는 80℃, 취성화회복 열처리 온도는 480℃, 시간은 72시간, 방법은...이라고 기억하고 있다」고.

최근의 「뉴클리어·엔지니어링·인터내셔널」(90년 7월호)에 글라이프스파르토원전-1호기의 취성화회복 열처리의 조건이 보도되고 있었다. 이에 따르면 온도는 완전일치 하고 있

으나, 시간은 152시간으로 되어 있다. 이때까지 실시한 6기의 취성화회복 열처리의 조건이 모두 같지 않으며, 최적조건을 모색하고 있음을 알 수 있다.

역시 위험한 조건

압력용기의 파괴확률은 천이온도에 좌우 된다. 설계치를 넘을 경우 미국과 같은 선택이 현실적이다. 그러나 소련의 것은 그 정도에서는 대응할 수 없어 설계시 부터 취성화회복 열처리를 상정하고 있었음이 확실하다.

그러나 상식적으로 판단한다면 설계치를 넘기 전에 취성화회복 열처리를 하는 것이 타당함에도 설계치를 훨씬 넘은 190℃까지 방치하고 있었던 점에 의문을 느끼기 않을 수 없다.

나는 소련과 서방제국의 안전기준에 차이가 있음을 상정하고 천이온도의 설계치가 200℃정도가 될 것이라고 추정하고 있었으나 실제로는 그렇지 않고 소련의 안전성에 대한 생각이 얼마나 무책임한가를 통감했다.

나는 최초 과거의 서방제국의 데이터에서 판단하여 취성화회복 열처리 온도는 400℃에서 450℃, 시간은 수10시간 이내로 추정하고 있었으나, 실제의 조건은 나의 추정 보다도 훨씬 심한 내용이었다. 서방제국에서 사용되고 있는 재료의 취성화회복의 연구예(研究例)는 몇가지 있으나, 소련에서 사용되고 있는 재료의 그같은 연구는 거의 없는 것과 같아 추정 조차 곤란 했다.

세계의 상업용 원전에서 취성화회복 열처리를 실시한 것은 소련제 VVER-440 뿐으로서 서방제국에는 이와같은 계획은 현재로서는 없다. 아마도 소련과 같은 방법의 취성화회복 열처리는 앞으로도 「절대」 없을 것이며, 그것은 너무나도 위험한 도박이 된다.

미국에서는 67년에 군용로 SM-1A의 취성화회복 열처리를 실시한바 있으나, 그 때의 조건은 운전온도의 221℃ 보다는 높은 300℃에서 144시간 정도 핵가열운전(核加熱運轉)을 하고 있다. 이에 의해 천이온도는 73%나 회복 되었

다고 보고 되고 있다. 소련의 경우는 약 90%가 회복되고 있다. 상상할 수 없는 회복률이다.

소련의 취성화회복 열처리조건에서 그 안전성을 검토해 보면 극히 중대한 사실에 직면하게 된다. 480℃로 152시간의 조건에서 「열시효(熱時効)파라미터」를 계산하여 제조시 소둔조건에 있어서의 열시효파라미터와 비교하면, 제조시의 소둔시간은 빠듯하거나 혹은 그것을 수시간 초과, 최악의 경우는 모든 안전여유도를 다 깎아 먹었을 가능성이 높다. 확정적인 것을 말할 수 없는 것은 안전기준의 차이와 제조시의 소둔조건이 명백히 되어 있지 않기 때문이다.

소련은 취성화회복 열처리를 실시할 때, 안전성을 유지할 수 있는 빠듯한 조건에서 최대의 회복률을 얻기 위한 방법이 모색되었던 것으로 추정 된다. 실로일발승부의 위험한 도박이 아닐 수 없다. 취성화회복 열처리장치와 구체적인 수순에 대해서 아직 의문점이 남으나 대체로는 추정이 가능하다. 문제는 압력용기의 모재(母材)와 용접부를 노심 바로 옆 영역 전체에 걸쳐 균일하게 승온할 수 있었느냐 없었느냐에 있다. 불과 100kW의 히터를 노내에 넣을 것 만으로는 전체를 한번에 목적온도로 균일하게 유지할 수는 없는 일이다. 아마도 대단히 복잡한 일을 하고 있는 것이 틀림이 없다. 소련의 대표단으로 부터 상세한 것을 들을 수는 없었다.

소련은 앞으로도 천이온도의 설계치를 훨씬 넘는 원전의 운전을 계속하며 똑 같은 취성화회복 열처리를 되풀이 할 것으로 본다. 위험하기 짝이 없는 열처리를 즉각 중지하고 모든 VVER-440형 모델 V230은 폐로조치 하는 것이 가장 옳은 방법이 될 것이다.

취성화경감(脆性化輕減)의 방법은 있다

0.1MeV이상의 고속중성자가 원자로구조재(原子爐構造材)와 압력용기재료의 원자에 충돌하면, 그 원자를 튀게 함으로써 격자결함이 생기고 재료는 무르게 된다(照射損傷).

천이온도의 상승을 억제하는데는 압력용기에서 새는 0.1MeV 이상의 고속중성자속을 줄이면 되나, 소련의 설계에는 고속중성자속이 일본의 것 보다 20~40배나 되고 있다.

취성화대책으로서 가장 확실한 방법은 미국의 H·B·로빈슨원전-2호기에서 실시된 특수한 연료집합체의 사용일 것이다. 노심의 최외주(最外周)의 연료집합체를 부분적으로 스테인레스 스틸봉으로 바꾸어 놓은 특수한 집합체를 사용함으로써, 압력용기에서 새는 고속중성자속을 약 7분의 1로 감소시킬 수가 있다. 그리고 현실적으로는 수년에 한번 정도의 비율로 원자로의 공운전(연료를 빼고 1차냉각펌프의 열손실로 300℃로 승온시켜 2주간 정도 취성화회전운전)을 실시하여 천이온도를 1회에 1할 또는 2할 낮추는 것도 가능하다. 이 방법은 소련의 취성화회복 열처리보다도 훨씬 안전한 공학적 방법이다. 압력용기의 최초의 취성화회복 열처리는 87년말에 노보볼내지원전-3호기에서 실시되었다. 노내구조물과 코어바렐은 모두 철거되고 히터를 내벽부 가까이 세트하여 가열하고 있다. 88년에는 아르메니아원전-1호기와 글라이프스파르토원전-1호기에서 실시, 다시 89년에는 코러원전-1호기와 코즈로도이원전-1호기, 90년에는 글라이프스파르토원전-2호기에서도 실시 되고 있다.

무서운 사고는 현실에 일어나고 있다

아무리 면밀하게 검사했다고 해도 지금의 기술로서는 재료와 용접부의 균열을 완전히 평가할 수는 없으며, 압력용기의 파괴를 방지하는데는 천이온도 이하로 급냉하지 않도록 하는 것이 절대조건이 되고 있다.

미국에서는 무서운 PTS가 32건이나 발생, 그 가운데 8건은 180℃ 이하로 급냉되고 있었다. TMI원전-2호기는 107℃, 크리스털리버원전-2호기는 121℃, 란체세코원전은 140℃로 급냉되고 있었다. 이들 원전에서는 천이온도가 냉각온도 이하였기 때문에 별다른 사고는 없었으나 위험한 현상에는 틀림이 없었다.

미국에서는 무서운 PTS가 수 없이 발생하고 있으나, 이것 보다도 기술이 낮은 소련·동구에서는 전율할 현상이 일상적으로 일어나고 있는 것을 상상할 수 있다. 그러나 사회주의제국은 원전사고를 공표하지 않고 있으며, 따라서 상세한 사실을 파악한다는 것은 불가능한 일이다. 그래도 통일독일 탄생이 부상하면서부터 특정의 원전사고는 명백히 밝혀지게 되었다.

글라이프스파르토원전-1호기에서는 75년 12월17일에 대규모인 케이블 화재사고가 발생하여 제어불능에 빠졌으나, ECCS의 저압주입계(低壓注入系)LPI의 전원만을 회복시키는데 성공하여 간신히 노심용융을 면했다.

화재사고가 발단이 되어 TMI원전-2호기와 같이 가압기 압력밸브가 개방이 되어 1차계통의 압력이 저하 됐으나 ECCS의 HPI는 작동하지 않고 LPI만이 작동했다. 이때 HPI가 작동 했다면 압력용기는 파괴되었을지도 모른다. 그리고 이 원전은 사고가 일어 났을 때, 운전을 개시한지 1년정도 밖에 되지 않았던 탓으로 천이온도도 극단으로 높지 않았던 것이 그나마 다행한 결과가 되었다. 그러나 언제까지 이러한 행운이 계속될 것이라고는 생각되지 않는다.

서독조사단은 글라이프스파르토원전 모두에 정지를 강력히 권고했다. 현재 동-1호기부터 동-4호기는 모두 정지중에 있다. 이들 원전에 서독의 안전기준이 적용 된다면 그것은 개선하는 것보다도 새로 서독제 PWR을 건설하는 것이 훨씬 유리하게 된다. 현실적으로는 이들 원전은 사실상 폐로가 된 것파도 같다. 건설중에 있는 동-5호기와 동-6호기는 VVER-440형 모델 V213으로 그대로 운전될 가능성이 높다.

그러나 VVER-440형 모델 V213과 VVER-1000이 아무리 개선된다고 해도 안전성은 이미 알려진 수준에 지나지 않을 것이다. 따라서 대사고의 가능성은 높다. 전세계 원전의 안전을 지키기 위해 신뢰성이 낮은 원전에 대해서는 정지권고를 할 수 있는 권위 있는 국제기관의 존재가 시급히 요구 된다.