

체르노빌原電事故에 對한

蘇聯의 報告

지난 8월 25일부터 29일까지 國際原子力機構 (IAEA)는 本部所在地인 오스트리아의 비엔나에서 特別會議을 가졌다. 이 會議에서는 全적으로 蘇聯의 체르노빌原電 4號機 原子爐의 4月 事故가 集中討議되었는데, 蘇聯代表는 많은 量의 資料를 公開하였다.

다음은 Nuclear News誌의 유럽特派員 Simon Rippon氏가 이 會議에 參席하여 蘇聯側의 發表와 이에 대한 外部 僞서버들의 分析을 取材한 內容이다.

체르노빌原電 4號機의 事故는 實驗과 關聯된 여러가지 잘못된 措置와 節次로 因해 發生하였다. 이 말은 지난 8월26日 5時間에 걸쳐 行해진 發表中에서 蘇聯代表團 團長인 발레리·알레크세비치·렐가소브氏가 밝힌 率直한 告白中의 하나이다. 蘇聯의 公開內容은 會議에 參席한 모든 사람을 滿足시키기에는 技術的인 細部事項이나 節次上의 正當性에 있어서 充分히 解明이 안되었지만 蘇聯 基準으로 볼때 렐가소브氏의 發表는 異例的으로 情報가 豊富했고, 自家批判的이었다.

이 實驗의 目的은 系統停電과 同時에 터빈發電機가 트립되었을때 터빈·로터의 慣性으로 非常用디젤發電機 起動前의 致命的인 몇秒동안 補助電力을 供給할 수 있는지를 實驗해보는 데 있었다. 이와 같은 方法은 여러 나라에서 給水펌프와 非常用爐心冷却系統(ECCS)에 電力을 供給하고 또한 瞬間始動으로 因한 디젤發電機의 磨耗와 破損을 防止하기 위해 使用되어 왔던 것이다.

이로 미루어 보아 西方國家 專門家들에게는

蘇聯에서는 主循環펌프에 대한 電力도 역시 減速되고 있는 터빈發電機에서 供給하려고 試圖하고 있는 것 같아 놀라움을 자아냈다. 왜냐하면 이들 펌프의 flywheel은 自然循環이 이루어질때 까지 慣性에 의한 回轉이 오래 持續되도록 미리 設計가 되어 있기 때문이다. 이러한 誤解는 當初 主循環펌프中 4台는 系統에 連結했다고 말한 것이 發端이 되었다. 이러한 連結은 터빈發電機의 慣性에 의한 回轉이 減速되고 있는 동안 4台의 펌프로 冷却材를 순환시킴으로서 原子爐의 出力이 維持되고 따라서 이 試驗을 재빨리 反復하기 위해 必要時 蒸氣밸브를 다시 한번 關閉할 수 있도록 하기 위한 것이었다. 試驗用 터빈發電機에 連結된 4台의 펌프는 蒸氣밸브가 먼저 닫혀서 給水펌프만이 減速하고 있는 터빈으로부터 動力을 받고 있을때 正常的으로는 이러한 動力供給으로 부터 끊기게 되어 있었다.

實際로 이러한 種類의 試驗은 이미 1982年과 1984年에 체르노빌 4號機에서 實施한 일이 있었다는 것이었다. 이 試驗에서는 發電機의 界磁卷線의 調整 電圧이 터빈·로터의 慣性에너지

보다 훨씬 빠르게 떨어졌다. 最近의 試驗에서는 새로운 電壓調整시스템을 使用해서 이것을 解決할 수 있는지를 確認해보려는 것이었다.

人間의 過失은 여기서 始作되었다. 一般의인 實驗프로그램에 대해서는 많이 論議되었으나, 이 特定한 試驗프로그램에 대해서는 蘇聯의 公式報告(會議開會 몇日前에 發表된)에 의하면 不適切하게 作成되었다는 것이다.

즉, 프로그램의 品質이 좋지 않았으며, 安全對策에 대한 規程도 아주 形式的으로 作成되었다(이 安全規程에 의하면 實驗進行中 實施하는 모든 스위치의 操作은 發電所 交代主任의 承認을 받을 것, 危急時에는 責任者들은 發電所 指示에 따라 行動할 것, 實驗 始作前에 擔當責任者(電氣技術者였으며 公교롭게도 原子炉플랜트의 專門家가 아니었다)는 當直 安全責任者에게 連絡을 取해야한다고 되어 있다).

이 시험프로그램은 追加安全對策이 不充分하였고, 시험계획은 ECCS가 動作치 못하도록 되어 있어서 循環펌프가 減速하고 있을때 自動停止되지 않았으며, 이에 대한 言及이 전혀 없었다. 또한 節次書에는 補助電力供給을 위하여 追加 事項이 記載되어 있었다.

비엔나에서 記者 質問에 答辯하면서 蘇聯代表中 한사람은 체르노빌 4号機에 대한 試驗을 要請한 것은 電機메이커인 Domtechenergo側이라고 했다. 이로 미루어보아 Domtechenergo가 이 實驗에서 試驗한 새로운 電壓調整 시스템의 開發을 擔當했던 것으로 推測된다.

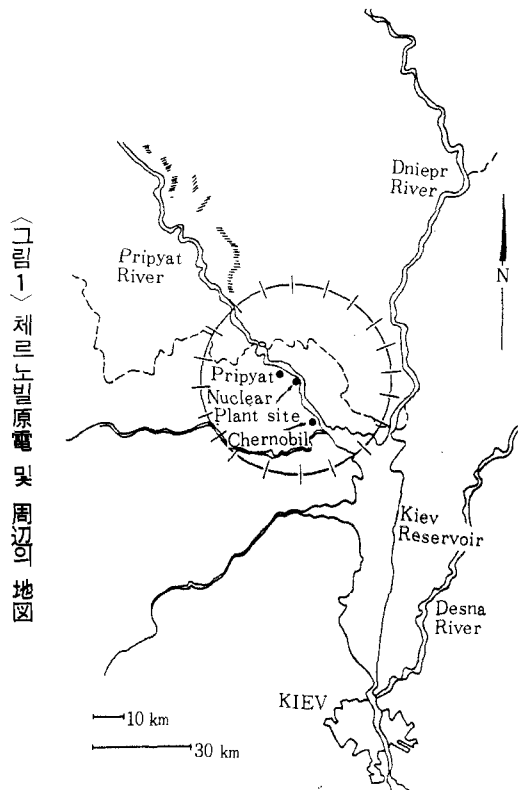
**事故經緯**

체르노빌 4号機의 事故經緯에 대해서는 事故內容의 檢討를 위한 첫날 午後 會議에서 레가소브氏로부터 자세한 說明이 있었다. 그는 說明書에 매우 忠實하게 說明해 나갔지만, 한두가지 重要한 補充說明을 했다. 예를 들면, 運転員들은 다음의 計劃補修가 1年後가 될 것이므로 이

번 停止期間中에 試驗을 마치도록 壓力을 받고 있었다고 그는 말했다. 또한 그는 말하기를 지난 얘기이지만 運転員들로 하여금 安全防禦시스템을 無視하지 않도록 다시 말해서 節次를 違反하지 않도록 하게 하는 技術的인 方法을 쉽게 講究할 수 있었을 것이라고 했다. 이러한 人間의 過失에 대해 適切한 豫防策을 마련하지 않았다는 것은 RBMK型原子炉 設計者들의 “엄청난 心理學的 過誤”였다.

事故의 發端은 4月 25日 午前 1時에 原子炉 出力을 100% (3,200MWt)에서 5分間에 걸쳐 50%로 내렸을때 始作되었다. 이때 不必要한 터빈發電機를 停止시켰다. 4臺의 循環펌프와 2臺의 給水펌프를 包含하여 이 터빈發電機에 連結되어 있던 플랜트系統은 아직 살아있는 터빈發電機의 전력부스로 轉換되었다.

午後 2時에 ECCS가 自動的으로 作動되지



않도록 하기 위해 이것을 遮斷하였다. 그러나 試驗 開始는 그 地方 給電司令室의 要請으로 延期 되었다. 結果적으로 플랜트가 그後 9 時間동안 ECCS가 없는 承認받지 않은 狀態에 놓여 있었다. 그러나 이러한 異例的인 規程違反은 實際적으로 다음에 일어났던 일에 대해서는 重要的 影響을 미치는 것은 아니었다. 그러나 이러한 遲延은 試驗에 대한 運轉員들의 焦燥感을 加重시켜 플랜트 運轉員들로 하여금 플랜트 出力을 試驗에 맞추기 위해 節次를 無視하고 安全시스템을 遮斷하는 마음가짐을 갖게 하였다.

午後 11時 10분에 負荷가 上昇하였으나, 시험 출력인 700~1,000 MWt로 減少시킨 狀態에서 試驗은 繼續되었다. 出力分布를 安定시키기 위해 炉心の 12個 Zone의 制御棒그룹을 制御하는 自動制御시스템을 低出力條件에 맞추기 위해서 끊었다. 高出力에서는 이들 Zone의 制御棒은 또한 平均出力도 自動調整한다. 制御器를 끊으면 全炉心 平均出力分布의 信号에 따라 自動制御器가 動作을 始作한다. 그러나 運轉員들이 이 自動시스템을 재빨리 必要한 出力整定値에 맞추지 못한 것 같다. 그 結果로 出力減少가 너무 甚하여 30MWt以下로 떨어졌다.

4 月 26日 午前 1時까지는 出力을 200MWt로 回復하여 安定시킬 수 있었다. 그러나 이 出力은 크세논毒作用때문에 올릴 수 있는 最大限度의 것이었다. 크세논毒作用은 原子炉익스커션 中에 始作되어 出力을 減少시켰으며 繼續되고 있었다.

原子炉 出力을 200MWt까지 끌어올리기 위해 運轉員들은 原子炉로 부터 너무 過多하게 手動制御棒을 引出했으며, 그 結果 炉心内の 中性子束分布狀況을 炉心으로 몇 cm 插入될때 부터 有効한 制御棒에 相當하는 反應도가 6~8個의 完全히 插入된 制御棒에 相當하는 것으로 制限된 狀態로 되었다.

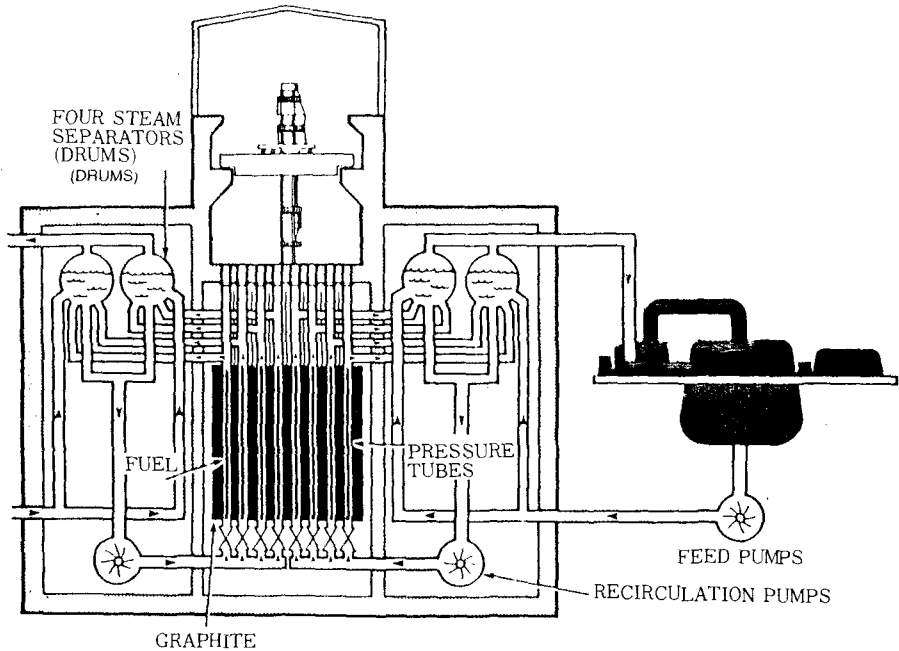
規程에 의하면 이 反應도의 運轉마진은 發電

所의 主任技師의 特別許可없이는 30個 制御棒相當量以下로 내릴 수 없게 되어있다. 레가소브氏는 이 마진이 15個의 制御棒相當量以下로 떨어진다면 이 世上의 누구도 - 設使 首相일지라도 - 原子炉의 繼續運轉을 許容할 수 없을 것이라고 말했다. 그러나 運轉員들은 原子炉를 試驗에 必要한 出力레벨까지 올리는데 너무 熱中한 나머지 - 마음가짐에서 온 또하나의 態度 - 原子炉의 危險狀態를 等閑視했다.

이와 같이 체르노빌 4 号機 運轉員들은 強行하기로 決定하여 午前 1時 3分과 7분에 各各 試驗直前 準備를 위해 여섯번째와 일곱번째의 主循環펌프를 始動하였다. 原子炉 出力과 이에 따라 炉心과 再循環回路의 流体에 대한 抵抗이 計劃値보다 굉장히 낮았으므로 全 8 台의 펌프가 原子炉를 통해 大量的의 冷却材 흐름(56,000~58,000 m<sup>3</sup>/hr)을 일으켰다. 이들 펌프中 몇 台에서는 流量이 正常運轉時의 7,000 m<sup>3</sup>/hr에 비해 8,000 m<sup>3</sup>/hr였다. 이것은 또하나의 잘못이었다. 왜냐 하면, 펌프의 空洞現象으로 因해 펌프의 破損과 振動을 일으킬 危險性이 있기 때문이다. 그러나 流量增加로 일어나는 가장 深刻한 結果는 冷却材가 飽和狀態에 아주 가까와져 若干의 溫度上昇으로 蒸氣로 甚한 flashing을 일으킬 可能性이 있다는 것이다. 蒸氣分離드럼内の 蒸氣圧력과 水位도 非常레벨以下로 떨어졌으나, 試驗을 始作할 수 있도록 原子炉를 長時間 繼續 稼動시키기 위해서 運轉員들은 非常防禦시스템으로 連結되는 低레벨信号도 遮斷하였다.

午前 1時 19분에 蒸氣分離드럼의 水位를 回復시키기 위해 給水供給은 처음 量의 4 倍로 增加하였다. 이에 따라 原子炉 冷却材의 入口溫度는 低下하고, 核燃料 채널의 蒸氣發生量이 減少되어 結果적으로 負의 反應도를 나타냈다. 이 負의 反應도로 말미암아 30秒內에 自動制御棒이 完全히 引出되었으며, 運轉員들은 手動制御棒도 引出하려고 試圖하였다. 그러나 運轉員들은 또

〔그림 2〕  
RBMK-1, 000, 水·黒鉛채널型原子炉의  
概略圖



다시 過補償을 했으며 自動制御棒이 다시 插入  
되기 始作하였다.

午前 1時22分 原子炉의 파라미터들이 大体  
로 安定됨에 따라 實際의 터빈試驗을 始作하기  
로 決定하였다. 運転員들은 試驗을 빨리 다시  
反復할 수 있도록 하기 위해 닫히려고 하는 터  
빈遮斷밸브의 非常保護信號를 遮斷하여 原子炉  
가 트립되지 않도록 해놓았다. 또한 運転員들은  
터빈으로 供給되는 蒸氣를 遮斷하기 直前に 試  
驗條件에 맞는 當初의 水位를 維持하기 위해 給  
水流量을 急激히 減少시켰다. 이 結果로 冷却材  
入口溫度가 上昇하여 過渡狀態가 造成되었으나,  
安全시스템이 遮斷되어 있었으므로 이것이 傳達  
되지 않았다.

午前 1時22分30秒에 高速反應度評價프로그램  
으로부터 프린트·아웃가 나왔는데, 여기서  
는 모든 制御棒의 位置와 運転中인 反應度마진  
이 原子炉를 即刻 停止해야할 레벨로 떨어졌  
는 것이 나타나 있었다. 그러나 運転員들은 試  
驗을 始作하기 위해 훨씬 더 遲延시켰다. 이  
것은 分明히 시스템의 基本的인 原子炉理論을 等

閑視하는 過誤를 犯한 것이며, 制御棒을 相對  
으로 無用之物로 만드는 結果를 가져왔다. 炉心  
內 中性子束의 分布는 大部分의 制御棒이 吸收  
效果를 내기에 充分한 中性子束을 만나기 前에  
炉心に 깊이 插入된 것과 같은 歪曲된 形態가  
되어버렸다.

午前 1時23分4秒에 터빈遮斷밸브가 닫혔다.  
터빈이 隔離된 狀態에서 4臺의 1次循環펌프가  
減速되기 始作했다. 이것은 또하나의 過渡狀態  
이었으나, 이에 대한 自動的인 反應裝置들도 모  
두 끊겨 있었다.

試驗을 始作한後 곧 原子炉 出力이 急激히 上  
昇하기 始作했다. 冷却材는 大部分이 바로 氣化  
될 수 있는 飽和點에 아주 接近해 있었다. 왜냐  
하면 運転員들이 低出力으로 原子炉를 運転하고  
있을때 이미 펌프 8臺 全部를 稼動시켜 過大한  
流量으로 運転하고 있었기 때문이다. RBMK型  
原子炉는 正의 보이드係數를 갖고 있기 때문에  
이러한 蒸氣發生에 대해서는 反應도와 出力을  
增加시켜 對應하므로 繼續的인 溫度上昇과 蒸氣  
發生量의 增加를 가져와 結局은 暴走狀態가 되

# 체르노빌原電事故綜合

어버린다.

午前 1時23分40秒에 스크램 버튼(모든 制御棒을 炉心에 挿入시키는)이 눌러졌다. 레가소브氏は 이 會議에서 이러한 操作을 하게 된 動機에 대해서는 若干 애매한 點이 있는 것 같다고 말하였다. 이 指示를 내린 張本人인 致命的인 負傷을 입은 交代主任과의 對話에서 밝혀진 바에 따르면, 그가 反應度마진의 프린트·아웃트에 뒤늦게 對處하려고 했던 것 같았고 原子炉出力이 急激히 增加한데 대한 對應策이었거나 試驗이 長時間 繼續되었으므로 原子炉를 停止해도 된다고 單純하게 생각했던 것 같다는 것이다.

몇秒後에 制御室에서 몇번의 衝擊을 느낄 수 있었으며, 制御棒이 下部限界點에 到達되지 않은 것이 運転員의 눈에 떠었다. 그래서 그는 制御棒들이 重力에 의해 떨어지도록 하기 위해 이것들을 끊었다.

午前 1時24分頃에 發電所 밖의 目擊者들로부터 爆發이 두차례 일어났고, 타고있는 物件과 스파크가 原子炉 上空으로 치솟았으며 其中 一部가 터빈·홀의 지붕위로 떨어져서 火災가 일어났다는 報告가 있었다.

運転員들의 違反事項을 要約한 表1을 說明하는 가운데 레가소브氏は 이 表中의 처음 5個

項目中 어느 것이 됐던 한가지만 犯하지 않았더라면 事故는 일어나지 않았을 것이라고 말했다.

## 原子炉内部狀況

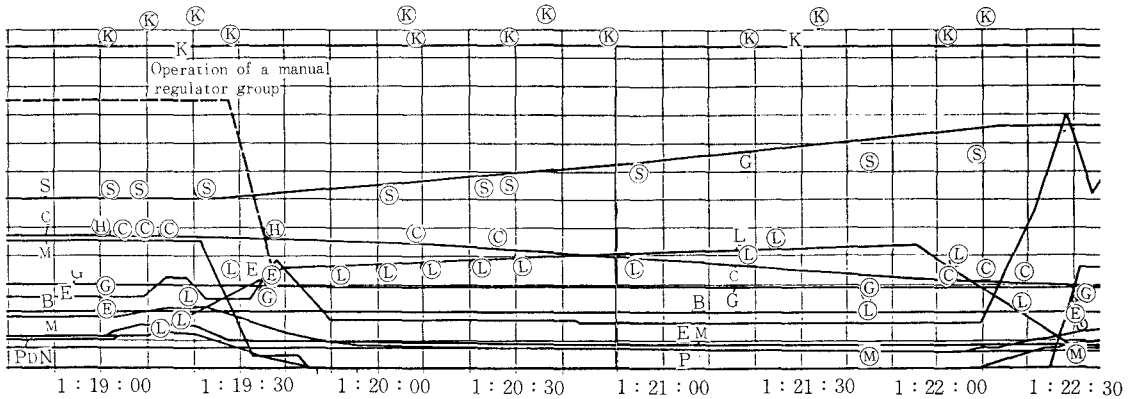
事故의 메카니즘, 특히 文字 그대로 原子炉의 頂上部를 날려버린 爆發直前 數秒사이의 事故過程은 이 會議에 實務者의 한사람으로 參席한 사람에게는 大端한 關心의 對象이었다. 週末에 가서 各國의 專門家들의 一致된 見解는 蘇聯側 報告書에 記載된 事故메카니즘인 即發臨界反應度익스커션과 蒸氣爆發은 事故에 대한 아주 그럴듯한 辯明이라는 것이었다. 아직도 이 事故메카니즘에 대한 詳細한 解明이 必要했고, 첫번째 爆發이 일어난 몇秒에 일어난 것으로 알려진 두번째 爆發의 原因에 대한 疑問이 가지지 않았다.

蘇聯側의 分析은 主로 事故 4分前인 1時19分에서 부터의 原子炉狀態에 대한 컴퓨터 모델링에 根據한 것이었다(그림 3). 이 時點이 運転員들이 蒸氣分離器의 水位를 回復시키기 위해 給水流量을 增加시킴으로서 原子炉시스템에 큰 混亂을 惹起시킨 始發點이었다. 데이터記錄시스템에는 이 時點에서의 3세트로 되어있는 自動制御棒 全部에 대한 位置도 記錄되어 있어, 이 모델링 커브에 대해 좋은 基準點이 되었다.

〈表 1〉 체르노빌 4号機 運転節次上 가장 危險했던 規程違反事項

規 程 違 反	動 機	結 果
1. 許容値以下로 反應度 運転마진을 減少시켰음.	크세논 毒作用을 防止하기 위한 措置였음.	非常保護系統이 機能을 喪失했음.
2. 出力레벨이 試驗프로그램仕樣보다 낮았음.	現場의 自動制御器 스위치를 過失로 썼음.	原子炉制御가 困難해졌음.
3. 承認된 放出量을 超越하여 全循環펌프를 稼動시켰음.	試驗條件에 맞추기 위해서였음.	冷却材溫度가 飽和點에 이르렀음.
4. 터빈發電機로 부터의 停止信號를 遮斷했음.	必要時 試驗을 反復할 수 있도록 하기 위해서였음.	自動停止機能이 喪失됐음.
5. 氣水分離器로 부터의 水位 및 蒸氣압력 트립信號를 遮斷했음.	原子炉 不安定狀態에서 試驗을 強行하기 위해서였음.	保護系統이 熱의 變動値와 無關하게 動作하였음.
6. 非常 炉心冷却系統(ECCS)을 遮斷시켰음.	ECCS의 誤投入을 防止하기 위해서였음.	事故規模를 縮小시킬 수 있는 機會를 喪失했음.

〈그림 3 - 1〉 체르노빌事故의 모델링



Parameter	Scale (Min.)	Scale (Max.)	Parameter	Scale (Min.)	Scale (Max.)
A Neutron power, low range(%)	0	120	K Main circulation flow(m <sup>3</sup> /h)	2	8
B Reactivity, sum(%)	-1	+5	L Feedwater flow(kg/s)	0	600
C Steam drum pressure(bar)	54	90	M Steam flow(kg/s)	0	600
D Neutron power, high range(%)	0	480	N Fuel temperature(°C)	200	2000
E Auto-rod, group 1(fraction in)	0	1.2	O Mass steam quality(%)	0	6
G Auto-rod, group 2(fraction in)	0	1.2	P Volumetric steam quality(void fraction)	0	1.2
H Auto-rod, group 3(fraction in)	0	1.2	S Steam drum water level(mm)	-1200	0

데이터 기록시스템으로 부터의 實測値와 運轉者들과의 對話에서 蒐集한 情報資料가 컴퓨터 모델의 커브와 함께 그림상에 表示되었고(円内に 該當되는 文字記호를 넣어) 이 모든 것이 相當히 잘 連結되는 것 같이 보였다. 그러나 公報롭게도 데이터 기록장치로 부터 比較의 幾個 안되는 原子爐 測定値들이 나타나 있었다. 이것은 데이터 기록장치 容量의 많은 部分이 터빈減速試驗과 連關된 데이터를 기록하기 위해 使用되었기 때문이다.

給水流量이 增加함에 따라(커브 L, 1時19分부터 1時22分사이) 蒸氣分離器드럼内の 水位가 回復되었으며(커브 S) 蒸氣壓力은 減小하였다(커브 C). 드럼으로부터 더 低溫의 물이 原子爐 爐心에 到達함에 따라 核燃料채널內에서의 蒸氣發生量은 減少되었을 것으로 推測되며, 蒸氣의 質이 低下하였다(커브 O와 P). 이로 因해 誘發된 負의 反應度에 따라 自動制御棒이 引出되었다(커브 E, G, H가 내려갔는데 이것은 爐

心內에 吸收材가 적었음을 나타내는 것이다). 이것은 運轉員들이 出力을 200MWt로 維持하기 위해 手動制御棒을 使用해서 自動制御를 우려하였고(點線커브, 1時19分30秒) 이에 따라 反應度마진이 더 減少된 것으로 生覺된다.

給水流量은 實際 터빈減速試驗을 始作하기 1分前인 1時22分에 減少시켰으므로 核燃料채널內의 蒸氣의 質은 다시 높아졌으며, 自動制御棒이 再插入되기 始作했고(커브 E와 H), 이에 따른 過渡의인 反應度も 잘 補償해 나갔다.

1時22分30秒에서의 出力分布와 制御棒位置를 詳細히 나타낸 프린트·아웃트를 보면, 이 時点에서의 中性子狀態를 知할 수 있다. 이에 의하면, 半徑方向으로 모든 有效한 中性子束이 円滑한 블록形으로 나타났으나, 垂直方向으로는 이 커브가 二重곡의 모양으로 나타나 爐心上部에서 더 많이 에너지가 放出된 것을 알 수 있었다. 이러한 中性子の 分布狀態는 爐心이 燒損되고 實際의으로 모든 制御棒이 引出됐으며 爐心 上部



水素와 炭酸가스가 發生했으며, 이것이 原子炉 위에서 空氣와 接觸해서 2次爆發을 일으킨 것 같다.

### RBMK型 原子炉의 改造

蘇聯과 西方國家 專門家들이 가장 敏感한 反應을 보인 問題中의 하나가 設計仕樣이 어느 程度 이 事故에 影響을 미쳤는지 그 範圍에 대한 것이었다. 蘇聯代表들은 人間的인 過失이 너무 많았었다는 것을 強調하였지만, 一面 比較的 率直하게 몇가지 設計上의 弱點이 있었음을 承認했으며, 단지 앞으로 있을 改造作業만으로 充分히 다른 RBMK型 原子炉의 繼續運轉이 保障될 것이라고 말하였다.

다른 나라에서 온 專門家들中 많은 사람들이 自己들의 原子炉는 基本的인 設計面에서 RBMK型과 判異하기 때문에 이러한 種類의 事故는 일어난 수 없다는 主張을 證明하려고 애썼다.

設計上의 缺陷으로 레가소브스가 첫마디에서 特別히 指摘한 것은 運轉員들의 規程違反을 事前豫防하기 위한 自動시스템이 缺如되어 있었다는 것이었다. 그는 이 境遇를 飛行中 操縱士로 하여금 門을 試驗해 보지 못하도록 하기 위해 自動자물쇠를 마련한다는 것은 操縱士가 敢히 이러한 바보같은 짓을 하리라고는 아무도 상상할 수 없기 때문에 不必要하다고 생각하는 航空機 設計者들의 境遇와 比喩해서 말했다. 그는 蘇聯이 이러한 種類의 人間的인 錯誤에 대한 事前豫防策의 必要性을 다른 나라들 보다 약간 뒤늦게 깨달았다고 말했다.

가장 深刻한 規程違反, 即 原子炉를 承認된 反應度마진限度 훨씬 以下에서 運轉한 것에 대한 質問을 받고 그는 다음과 같이 答辯하였다. 이것을 豫防하기 위한 自動시스템이 初期의 設計段階에서는 考慮되었었다. 그러나 그 當時에는 이러한 시스템을 炉心内の 出力分布와 原子炉의 모든 自動制御棒에 相當하는 反應도에 대

한 매우 複雜한 計算에 根據를 두었기 때문에 自動停止시스템에 包含시키기에는 信賴性이 不足한 것으로 생각됐다고 말했다.

체르노빌事故의 방아쇠役割을 한 것은 即發臨界反應度익스커션이었으므로 設計에 대한 批判은 大部分이 原子炉理論에 置重하는 것이었다. 그러나 누구라도 많은 專門家들이 이 狀況에 대해 說明하는 것을 듣는다면 그들의 原子炉에 대해 잘못 理解하고 있다고 非難을 받고있는 運轉員들에게 약간은 同情이 갈 것이다.

核燃料채널內에서의 輕水冷却材의 正의 보이드係數는 이 原子炉型의 가장 重要한 特性이지만, 本來 이것은 適切한 個數의 效果의인 制御棒만 갖추고 있으면 原子炉를 制御不能狀態로 만들지는 않는다. 低濃縮核燃料과 高效率의 黑鉛減速材를 使用하는 큰 사이즈의 原子炉에서도 큰 사이즈때문에 局部的인 出力의 不安定을 招來하는 傾向이 있다. 이러한 것은 좋은 計測器들과 連結된 自動調整시스템만 갖춘다면 制御가 可能하다. 그러나 低出力에서는 出力의 不安定이 더 甚해지므로 計測器들의 效能은 줄어든다.

RBMK型原子炉에서 너무 많은 制御棒을引出하면 危險하게 되는 理由를 理解하려면(비록 插入할 수 있는 制御棒을 더 많이 갖고 있어 狀況이 比較的 安全하게 보일지라도) 連鎖反應收支方程式에서의 喪失된 中性子の 役割을 생각해 보아야 한다. RBMK型 原子炉가 높은 中性子 效率을 갖고 있다는 것은 매우 큰 炉心으로 부터의 漏洩에 의한 中性子 損失과 炉心内の 各種材料에 吸收되어 생기는 中性子 損失은 比較的 적다는 것을 意味한다. 이러한 狀況下에서는 輕水冷却材는 炉心內에서 더욱 重要한 吸收材가 되며, 沸騰으로 因해 이것이 減少되면 中性子 增殖에 대해 매우 큰 正의 效果를 가져온다. 또한편으로 아주 많은 制御棒이 部分的으로 插入되어 있을 때에는 一部 물을 除去해도 效果는 적어진다.



다른 RBMK型 原子炉에 대해서 直刻적으로 取해진 措置中の 하나가 炉心으로 最少 1.2m插入을 保障하기 위한 制御棒 驅動機構에 대한 装置이다. 또한 反應도에 대한 最少運轉마진 許容值도 30個 制御棒 當量에서 80個로 늘렸다. 이것은 制御棒이 插入되는 直時 80個 制御棒을 全長 插入한 것에 相當하는 反應度效果(反應度바이트라고도 함)가 있어야 한다는 것을 意味한다.

약간 長期的인 作業으로 提案된 改造中에는 制御棒의 增設과 어떠한 形式의 流体注入에 의한 多重高速停止시스템의 設置 등이 包含되어 있다. 多重停止시스템이 具備되어 있지 않다는 점이 다른 나라에서 온 專門家들, 특히 캐나다에서 온 사람들로 부터 辛辣한 批判을 받은 RBMK型 原子炉의 一面이었다. 캐나다의 專門家들은 그들이 이미 1950年代에 Chalk River에서 NRX型 研究用 原子炉의 臨界事故를 겪은後 이러한 시스템의 必要性에 대한 教訓을 얻었다고 指摘했다.

正의 보이드係數를 克服하기 위한 또 한가지 變更事項은 2%濃縮 核燃料 代身에 2.5%濃縮 核燃料를 使用한다는 것이다. 이 變更은 來년에 始作할 豫定이지만, 몇년에 걸쳐 稼動中에 施行해야 하므로 完全히 轉換하기까지는 相當한 時日을 要한다고 했다. 濃縮도가 더 높은 核燃料가 設計中인 보다 大型의 RBMK型 原子炉를 위해 開發되었다. 이 RBMK型 原子炉는 체르노빌의 1,000MWe 유니트와 크기는 같으나, 出力은 1,500MWe가 될 것이다. 이러한 狀況을 改善하기 위해서 炉心에 더 많은 分裂性物質을 넣는다는 것은 分明히 矛盾되는 것이며, 이것은 또한 精通한 原子炉 物理學者의 말에 의하면 監界收支方程式에서 中性子を 捕獲하는 非水系 原子의 比率를 크게 하는 것과 같은 것이다.

外國으로 부터 批判의 對象이 되었던 또 하나의 RBMK型의 特徵은 正常運轉時의 黑鉛減速

材의 높은 溫度이다. 그러나 이것이 체르노빌事故에 重要な 要因이 되었는지는 아직 確實하지 않다. 700~750℃에서 黑鉛은, 減速材가 熱에 대해 큰 排出口 役割을 하는 다른 黑鉛減速原子炉나 重水原子炉에 비해, RBMK型 原子炉에서는 重要な 熱源이 된다. 또한 事故直前に 체르노빌 4号機 原子炉가 低出力에서 運轉되고 있는 동안 黑鉛의 部分冷却을 위해서 使用되었던 窒素/헬륨 混合가스가 熱除去能力이 떨어지는 窒素로 變했던 것 같다. 이것이 核燃料채널内の 冷却材에게 黑鉛으로 부터의 熱을 除去하도록 追加의인 負擔을 주었을 것이고 또한 1次爆發로 破裂했던 部分의 核燃料채널 頂上部에서 지르코늄合金과 스테인레스鋼사이의 變形조인트를 弱化시켰을지도 모른다.

格納容器에 관한 乍증스러운 質問을 받고 蘇聯側은 플랜트의 大部分은 設計基準으로 삼은 冷却材喪失事故에 對備한 格納容器 役割을 하는 튼튼한 복스 칸막이속에 들어가 있어 原狀대로 남아있는 것으로 나타났다고 主張했다. 設計壓力이 4.5氣壓 0.45MPa 이므로 이들 칸막이들은 1次回路의 機器類와 配管에 대해 高度한 防禦를 할 수 있다. 原子炉上部 空間으로 放射性核種이 漏洩되는 것을 防止하기 위해 核燃料裝填機와 壓力減少 및 閉鎖를 위해서 使用되는 使用後核燃料貯藏槽를 收容하기 위해 設計上 巨大한 부피의 建物を 마련하였다. 체르노빌 4号機 原子炉의 蒸氣爆發은 設計基準事故를 超過했음은 말할 것도 없다. 그러나 蘇聯 專門家들은 過去나 現在에도 이렇게 巨大한 原子炉위에 輕水炉型에서의와 같이 모든 것을 收容하는 壓力格納容器 建物を 마련하는 것은 實際적으로 可能性이 없다는 그들의 主張을 固執하였다. 이 보다는 蘇聯側은 設計基準을 超過하는 事故는 發生할 수 없다는 것을 確認시키려고 努力하였다.

記者會見席上에서 輕水炉型の 格納容器라면 이와 같은 蒸氣爆發을 지탱할 수 있느냐라는 質

問을 받고, 西方國家 專門家들의 첫 應答는 체르노빌 4号機에서 일어났던 것으로 보이는 核燃料-冷却材의 相互作用을 誘發하는 即發臨界反應이 일어날 수 있는 可能性은 自己네들의 原子炉에는 없다는 것이었다. 蒸氣爆發의 可能性을 생각할 수 있는 單 한가지 시나리오는 相當한 時間遲滯下에 일어나는 炉心の 溶解落下와 溶解貫通을 들 수 있는데, 이러한 時間遲滯로 해서 蒸氣爆發이 일어난다해도 훨씬 적게 放出되는 結果를 가져온다고 했다. 그러나 체르노빌 4号機에서와 같은 에너지爆發이 그들의 格納容器를 破壞시킬 수 있는냐는 質問에 대해서는 大体的인 意見이 이러한 爆發로 龜裂과 몇군데 구멍이 날지는 모르지만, 構造物이 完全히 破壞되지는 않을 것이며 放射能 放出을 減少시키는데 그래도 相當한 效果를 發揮할 것이라고 하였다.

必然的으로 이 會議에서는 맨/머신 인터페이스 改善의 必要性에 대해서 많이 論議되었다. 蘇聯 專門家들은 이 分野에서만은 西方世界에 뒤져 있다는 것을 是認하는 것 같았다. 이들은 또한 시뮬레이터를 더 많이 使用해서 改善된 訓練과 再教育의 必要性도 是認했다. 그러나 오히려 點數를 깎이면서까지 敢히 그들은 말하기를 自己들의 플랜트가 지금까지 훌륭한 通常運轉 實績을 내왔다는 것이 체르노빌의 運轉員들이 이러한 異常事態를 解決하는데 未熟했었다는 理由가 될 수 있다고 했다. 체르노빌 4号機가 蘇聯의 全發電所 實績에서 最上位에 있었다는 事實도 運轉員들을 自慢에 빠지게 했다는 可能性 있는 理由로 提示되었다.

### 事故의 結果

체르노빌 4号機의 被害狀況은 爆發事故發生 2日後 主로 헬리콥터에서 찍은 비데오寫眞의 스크린畫面으로 보여주었다. 여기에는 原子炉위의 殘骸사이로 보이는 炉心の 빨간 빛을 두번 훑듯 본 場面이 있었다. 그러나 이것으로 이들

寫眞의 一部가 削除된 것이 틀림없었다. 왜냐하면 지난 5월에 체르노빌을 訪問했던 IAEA 代表들에게 分明히 새빨갳게 달아있는 炉心場面을 훨씬 길게 찍은 場面을 보여준 일이 있기 때문이다. 그러나 비데오의 나머지 部分과 蘇聯側의 事故被害報告는 事故被害調查團員들이 原子炉 天井板 全体가 爆發에 의해 들러져서 原子炉 한 쪽으로 비스듬히 내려 앉았다는 것을 充分히 알 수 있었다. 作業過程에서 모든 核燃料과 制御棒 채널(全部 約2,000個)이 除去되었다.

事故調查團은 出力익스커션과 蒸氣爆發은 이에 必要한 에너지를 發生할 수 있었다는 點에 合意하였다. 프랑스代表團의 計算에 의하면 에너지放出量은 200MJ程度였고, 天井板 아래로 數千氣圧이 形成됐을 것으로 推算되었다. 概略的인 計算에 의해 天井板을 들어올리는데는 2氣圧이면 充分했을 것으로 나타났다.

一部 傭서버들에게는 核燃料채널의 破裂은 R-BMK型 原子炉의 設計上의 弱點을 들어내는 것으로 指摘되었다. 正常運轉時 黑鉛溫度가 700℃ 이상이고, 冷却材 채널에서 熱이 除去되는 경우에는 지르칼로이 圧力 튜브는 이것이 쉽사리 破裂될 수 있는 溫度에 接하게 되며, 이것은 특히 原子炉 바로 위의 스테인레스鋼과의 變移 조인트 部分에서 그러하다.

터빈室 天井의 火災는 消防員들에게는 가장 큰 直接的인 걱정거리였다. 터빈內的 뜨거운 潤滑油와 發電機의 水素冷却材가 가장 影響받기 쉬운 弱點이었으며, 불이 隣接한 3号機와 더 나아가 긴 터빈室을 같이 쓰고있는 1号機와 2号機에게 까지 擴大될 수도 있을 것이라는 恐怖心이 더해갔다. 原子炉 위의 불은 主로 消防員들과 事故의 直接的인 收拾에 臨한 非常作業員들이 擔當하였다.

蒸氣火傷과 떨어지는 殘骸에 의해 各各 現場에서 即死한 두 사람을 除外하고는 그外 모든 死亡者들은 甚한 放射性疾患으로 入院한 203名

의 患者中에서 일어났다(그외의 사람들은 덜 甚한 微勢로 入院되었다). 다른 나라에서 온 醫療 專門家들은 專門인 醫療班이 現場에 到着한 迅速性和 甚한 患者를 選別하여 能率에 對해 讚詞를 보냈다.

203名의 生体吸收線量測定 結果 이들 全員이 1Gy (100 rads) 以上の 放射線量을 받았으며, 이 들中에 35名은 4 Gy 以上, 몇사람은 12~16Gy의 極甚한 線量에 照射되었다. 지금까지의 死亡者 全員은 4Gy 以上 被曝된 사람들中에서 發生하였다.

犧牲者 治療에 關한 아주 貴重한 資料가 蘇聯 醫師들로부터 提供되었다. 이것 역시 다른 專 門家들로부터 훌륭한 것으로 評價받았다. 또한 널리 알려져 있던 骨髓移植手術에 反對되는 훌륭한 在來式 治療法을 大部分의 犧牲者들에 適用한 것에 對해서도 稱讚을 받았다. 骨髓移植手術은 다만 一定한 範圍內의 線量을 받은 患者들 에게만 適用되었지만, 大部分 成功하지 못했다.

체르노빌現場 境界線밖에 있던 사람으로서 直接인 放射性疾患의 微勢를 보인 것으로 報告된 사람은 아무도 없다. Pripyat市로 부터 온 45,000名을 包含해서 30 km 撤收地域內에 있던 135,000名은 大部分이 放射性雲으로부터 25rem 以下の 外部被曝線量을 받았다. 가장 甚하게 汚染된 地域의 마을에 살고 있던 몇사람이 30~40 rem을 받은 것 같다. 이 外部被曝線量은 1百 60萬人/rem의 集團被曝線量에 該當되는 것으로 推算되었다. 앞으로 70年間 이 住民의 自然的인 癌으로 因한 豫想 死亡者數 14,000名을 勘案한다면, 事故로 因한 追加死亡者數는 最大로 잡아 2%에 不過할 것이라고 蘇聯側 報告는 말하고 있다.

青年層 自願者들을 動員하여 매우 効率的인 運營을 함으로서 Pripyat市와 그 周邊 몇군데 地域에서 沃化澆澆를 配布해서 使用할 수 있었다고 蘇聯代表들은 말했다. 이것은 沃素 被曝線

〈表 2〉 체르노빌事故에서 放出된 放射性核種의 推定值

Nuclide	Released activity (MCi) by May 6	Released (percentage) by May 6
Xe-133	45	up to 100
Kr-85m	-	up to 100
Kr-85	0.9	up to 100
I-131	7.3	20
Te-132	1.3	15
Cs-134	0.5	10
Cs-137	1	13
Mo-99	3	2.3
Zr-95	3.8	3.2
Ru-103	3.2	2.9
Ru-106	1.6	2.9
Ba-140	4.3	5.6
Ce-141	2.8	2.3
Ce-144	2.4	2.8
Pu-238	0.8E-3	3.0
Pu-239	0.7E-3	3.0
Pu-240	1E-3	3.0
Pu-241	0.14	3.0
Pu-242	2E-6	3.0
Cm-242	2.1E-2	3.0
Sr-89	2.2	4.0
Sr-90	0.22	4.0
Np-239	1.2	3.2

\*Estimated error ± 50%

量이 甲狀腺으로 轉移되는 것을 防止하는 方法의 첫 大規模 實驗이 되었다. 最初로 報告된 內容은 이 方法이 効果적이었으며, 아무런 副作用도 없었다는 것이었다. 測定結果 이 地域의 大部分의 사람들이 30rads未滿의 甲狀腺 被曝을 받은 것으로 나타났다. 事故後 一定期間 동안 거의 10萬名에 가까운 未成年者들을 包含해서 撤收地域과 그 周邊 人口의 大部分에 對해서 甲狀腺內의 放射性沃素에 對한 檢診이 實施되었다. 檢診結果 測定值가 어떠한 健康上의 障害를 일으킬 수 있는 數值보다 훨씬 낮은 水準이라고 報告되었다.

30km撤收地域밖에서는 自然 백그라운드 0.008~0.012mR/hr의 7倍의 直接放射線量 測定值

가 기록되었다. 30km 撤收地域밖의 유럽에 屬하는 蘇聯領內의 放射線 測定值의 平均은 外部 照射에 의한 個人當 被曝量은 1986년에는 1.5 rem을 넘지않을 것이며, 앞으로 50年間에 걸쳐 50rems未滿일 것이다. 따라서 蘇聯側의 報告는 이 地域住民에 대해서는 체르노빌 放射性雲으로 인한 外部被曝의 結果로 健康上의 危險은 없을 것이라고 結論짓고 있다.

放射性物質의 落塵에 의한 被曝線量의 問題는 地上으로 부터의 外部 감마放射線과 汚染된 飲食物 攝取에서 오는 内部被曝線量 다 같이 될 것 더 複雑한 것이다. 蘇聯側 報告는 체르노빌 事故로 인한 放射能의 約10%의 落塵이 있었던 것으로 推測되는 Ukraine地方과 Byelorussia地方에 대해서 어떠한 特別医療措置가 必要한지 與否에 대해서 빨리 判斷을 내리려고 모든 段階에서 最大로 잡은 假定을 適用하여 더욱 慎重한 數値를 내도록 試圖한 것이다. 이 落塵에 의한 外部 放射線에 대해서는 集團被曝線量의 上限值를 1986년에 8.6百萬人/rem, 向後 50年間에 29百萬人/rem이 될 것으로 推算하고 있다.

더욱 더 어려운 問題는 세슘으로 汚染된 食品의 消費에서 오는 内部被曝線量을 推算하는 것으로서 向後 70年間 210百萬人/rem이라는 數値가 算出되었으나, 비엔나에서의 實務者會合에서 討議한 結果 蘇聯側이 가장 悲觀的인 方向으로 推算하기 위해 10倍의 安全率로 過大評價한 것 같다고 結論지었다. 이러한 意見을 뒷받침할 만한 資料가 그 地域의 約千名을 對象으로 이미 實施된 全身測定에서 나왔다. 이들中에 97%가 세슘攝取에 대한 悲觀的인 假定에 根據를 둔 豫想值보다 10배나 낮은 水準을 보였다. 蘇聯側 報告書에는 最大로 推算한 數値를 基準한다면 Ukraine나 Byelorussia地方의 癌으로 인한 死亡率은 外部被曝에 의해 0.05% 以內, 内部被曝에 의해 0.4%未滿 增加할지 모른다고 記述되어 있다.

## 생각할 수 없는 事故

》安全은 不斷한 努力에 의해서 確保《

安全은 不斷한 努力에 의해서 確保되는 것이며, 安全에 대한 放心이나 慢心이 대단히 重大한 結果를 야기시킬 수 있다는 것을 再認識하여야 할 必要가 있다.

체르노빌原電의 原子炉는 우리나라의 原子炉와는 構造와 特性 등이 크게 다르며, 冷却材보이드係數가 正(+)으로 큰데 對해서 原子炉停止機能을 위시한 安全對策이 충분히 고려되고 있지 않았던 점 등 設計上의 문제점을 갖고 있었다. 安全性이 確認되지 않은 實驗計劃 및 常識을 벗어난 規則違反 등 運轉管理上의 문제가 동기가 되어서 이번의 大事故가 발생하여 막대한 被害를 가져왔다고 할 수 있다.

原子力安全確保에 反映할 必要가 있는 事項의 有無가 검토되었으나, 이번 事故는 우리나라에서는 생각하기 어려운 사고임이 明白하다.

앞으로 追加적으로 입수되는 情報를 검토하여 事故에 이른 경위 등에 대해서 더욱 상세하고 定量的인 解析에 重点을 둔 評價를 함과 동시에 蘇聯이 실시한 事故時의 緊急對應措置 등에 대해서도 폭 넓게 검토하여 배울 點이 있다면 教訓으로 삼는 것이 필요하다.

이번 蘇聯事故에서는 安全確保를 최우선으로 해야 할 原子力에서 實驗의 遂行을 第1로 하였다는 姿勢가 있었다는 점과 이것이 大事故로 이어졌음이 明白하다.