

《해 설》

爐心損傷 狀態로 분석한 TMI-2 原子爐 事故

李基淳

韓國 에너지 研究所

(1988. 9. 24. 접수)

1. 머리말

TMI-2 원자로는 상업발전 3개월만인 1979년 3월 28일 復水器의 이상을 발단으로 해서 소위 重大爐心事故를 이르게 爐心が 용융되는 등 심한 損傷을 가져왔다. 이 事故는 상용 발전소에서 일어난 가장 심각한 事故의 하나로, 비록 발전소 주변의 住民安全에 큰 영향을 주지는 않았지만^{1,2)}, 爐心の 일부가 붕괴되어 壓力容器的 하부공간(lower plenum)으로 떨어져 내려가는 등 爐心の 광범위한 再配置가 일어났다^{3,4)}. 그뿐만 아니라, 多量の 핵분열생성물이 연료봉으로 부터 유출되어 冷却材 및 爐心構造材로 갔으며⁵⁻⁸⁾ 극히 일부이기는 하지만 핵분열생성물이 原子爐 외부로 流出되는 등^{9,10)}, 爐心の 損傷 및 핵분열생성물의 放出이 重大爐心事故시에 일어날 것으로 예상한 것보다 심하게 나타나 많은 문제점을 제시했다. 이에 따라 TMI-2 原子爐의 事故 分析과 重大爐心損傷事故時의 원자로 安全性에 대한 評價등을 위하여 막대한 研究費를 투입, TMI-2 原子爐 事故의 分析평가에 관한 광범위한 研究가 수행되었다.

本 解説은 原子力界에서 많은 관심을 갖고 있는 TMI-2 原子爐의 事故에 관한 이해를 돕고자 事故 당시 原子爐의 운전상태, 原子爐內 계측기의 계측자료, 爐心材(core material)의 핫셀시험결과와 Idaho 국립연구소(INEL)의 TMI-2 事故분석 전문가와 討議한 자료등을 중심으로, TMI-2 원자로 事故狀態를 爐心の 損傷進行 過程에 초점을 맞추어 기술하였다.

2. 事故狀態 分析

TMI-2 原子爐 事故는 일반적으로 冷却材 상실

단계, 爐心加熱 및 붕괴단계, 崩壞爐心 재가열단계 및 爐心 再配置 단계 등으로 나누어 분석하고 있는 바, 여기서도 事故상태를 上記의 4단계로 구분하여 爐心の 狀態變化 過程을 중심으로 하여 분석하고자 한다.

2.1 冷却材 상실 단계 (事故발생후 100분간)

97% 出力으로 그림 1과 같이 定常狀態로 운전 중이던 TMI-2 原子爐는 二次 冷却系統의 이상으로 터빈이 정지되면서 二次冷却系의 冷却機能이 급격히 저하되었다. 이에 따라 爐心에서 발생하는 熱을 二次冷却系가 충분히 除熱하지 못하므로, 冷却材의 온도가 상승하기 시작하여 事故발생 3초후에는 原子爐의 壓力가 定格壓力인 2150 psig에서 安全발브 (pilot operation relief valve)의 개방 설정壓力인 2255 psig까지 급상승하여 安全발브가 개방되었다. 그러나 安全발브의 개방으로 冷却材가 유출됨에도 불구하고 原子爐內 壓力는 계속 증가하여 事故발생 8초후에는 爐內壓力가 原子爐의 긴급정지 (reactor scrambling) 設定壓力인 2355 psig까지 상승하여 原子爐는 긴급정지 되었다.

이에 따라 事故발생 8초후 부터는 原子爐의 熱出力이 급속히 감소되어 事故발생 13초후에는 爐內壓力가 安全발브의 개방설정壓力인 2255 psig보다 50 psig가 낮은 2205 psig까지 떨어졌으나, 安全발브는 폐쇄되지 않고 계속 開放狀態로 있어 冷却材의 유출이 계속되었다.

이러한 결과로 爐內壓力가 계속 낮아짐에 따라 포화증기압온도 (saturation temperature)도 계속 낮아져, 그림 2에서 보는 바와 같이 事故발생 6분경 부터는 포화증기압온도가 爐心溫度 보다 낮아져¹¹⁾ 冷却材의 비등이 시작되었으며 事故발생 20분경 부터는 冷却材에 상당양의 수증기 氣泡(bubble)가 생성되었다. 이러한 사실은 그림 3에서 보

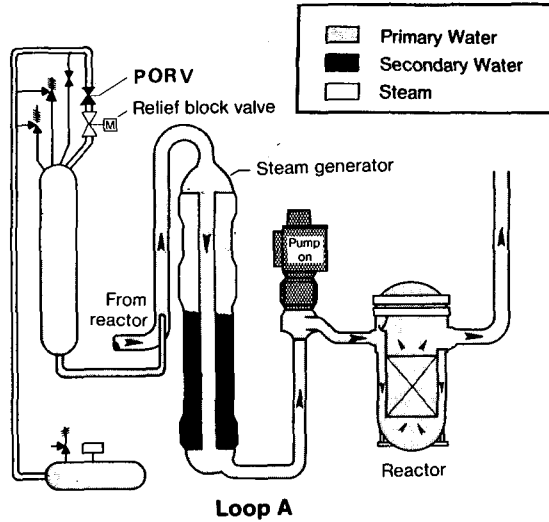


그림 1. 定常運轉時的 冷却系統 상태도

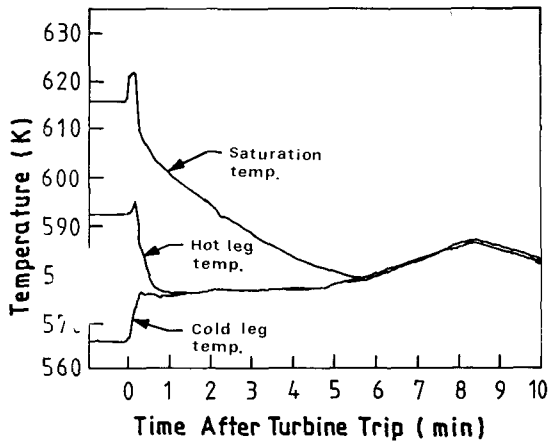


그림 2. 事故경과 시간에 따른 壓力容器의 冷却材 入口側 및 出口側 온도와 포화증기압溫度

는 바와 같이 壓力容器와 방사선 차폐벽(biological shield)와 사이에 설치된 SRM(source range monitor) 에서 측정된 中性子束 強度가 照射核燃料의 붕괴곡선(decay curve)에 따라 감소하지 않고 상당히 완만하게 감소하는 현상^{12,13)}으로 부터 알 수 있다. 冷却材內 수증기 氣泡의 함유량은 二次系의 冷却材 水位저하에 따른 냉각기능의 惡化와 一次系 冷却材의 계속 유출에 의해 생기는 포화 증기압온도의 下降에 따라 증가되어서, 事故발생 50분경 부터는 冷却材의 순환이 비정상적순환(slug flow)으로 바뀌었다. 이러한 사실한 그림 3에서 보는

마와 같이 壓力容器 외부에서 측정된 누출 中性子 強度가 serration화 하는 것으로 부터 확인 할 수 있다.

事故발생 시간이 지나면서 冷却材의 비정상적 순환이 더욱 심화됨에 따라 loop 펌프의 진동이 심하여 事故발생 74분경에는 B-loop 펌프의 가동을, 그리고 100분경에는 A-loop 펌프의 가동을 中止하였다. 이로써 原子爐는 자연순환에 의해서만 爐心이 냉각되었는데, 事故발생후 90분경의 原子 爐 冷却材의 비정상적 순환상태의 추정도가 그림 4에 있다.

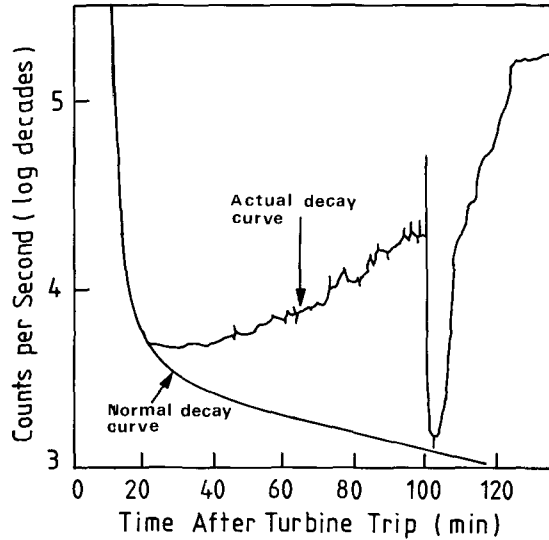


그림 3. 壓力容器와 방사선차폐벽(biological shield) 사 이에 설치한 SRM (source range minitor) 에서 측정된 中性子束 強度

2.2 爐心加熱 및 붕괴 단계 (事故 발생 후 100~174 분간)

그림 3에서 보는 바와 같이 壓力容器 외측에 설치한 SRM에서 측정된 누출 中性子束 強度가 100 분경에 급속히 증가하는 것으로 보아, 事故後 100 분경 부터 爐心 상단부가 冷却材로 부터 노출되기 시작하였다고 보여진다. 그럼에도 불구하고 安全 발브는 계속 개방상태로 있었음으로, 冷却材의 상 실이 계속되었으며, 그외에도 冷却材의 일부가 蒸 氣發生器에 응축됨으로 인하여 冷却材의 水位는 더욱 낮아졌다. 이에 따라 연료봉이 冷却材로 부터 安全발브는 事故 발생후 148분경에 수동으로 폐쇄

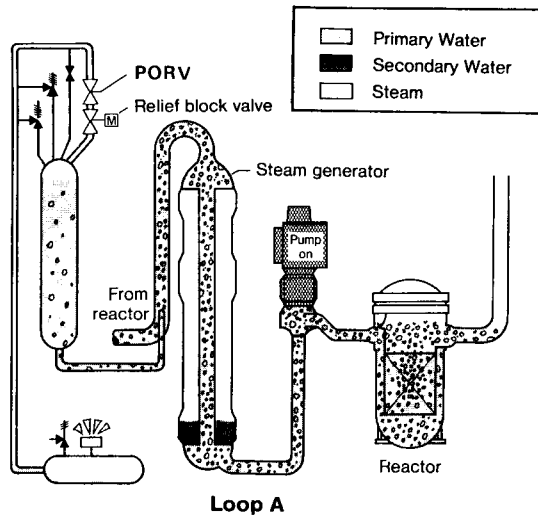


그림 4. 事故발생 후 90분경의 冷却系統의 狀態 추정도:
一次系冷却材에 수증기 함유량이 많아져 冷却材가 물과 수증기의 2相 혼합상태로 되었다.

노출하기 시작하였는데, 연료봉의 노출시간을 冷却材 水位로 부터 추정하여 보면 대략 114분에서 120분 사이로^{13,14)} 그리고 壓力容器的 冷却材 出口側 온도 (hot leg temperature)로 부터 보면 113분경으로 비슷하게 추정되고 있다¹⁵⁾.

燃料棒이 冷却材로 부터 노출하기 시작하면 노출부위는 냉각조건이 극도로 惡化되어 온도가 급속히 상승하게 되는데, 重大爐心事故 분석용 코드인 SCDAP(severe core damage accident package) 코드로 계산한 바에 의하면, TMI-2 原子爐의 경우 冷却材로 부터 노출된 연료봉은 붕괴연에 의해 매초당 0.3~0.5K 온도가 상승되었다¹⁶⁾. 이와 같은 온도상승은 皮覆管의 酸化度를 증가시키는 동시에 연료봉내 압력도 증가시켜, 결국은 연료봉의 破損을 유발시켜 多量의 핵분열생성물이 연료봉으로부터 流出하게 되었는데, 그 중의 일부는 安全발브를 통하여 格納容器내로 放出되었다. 따라서 事故시 연료봉이 대량으로 破損된 時間은 格納容器에 설치되어 있는 방사선 계측기의 측정자료로 부터 推定 할 수 있는데, 格納容器內 방사선 강도는 事故 발생 후 142~145분 사이에서 급격히 증가하였다^{16,17)}. 그러나 TMI-2 原子爐의 경우에 壓力容器的內의 放射能物質이 安全발브를 통하여 原子爐 외부로 流出되어 계측기에서 측정되기까

지에는 3~5분 가량이 소요되는 것으로 보아 冷却材로 부터 노출된 핵연료봉은 137~142분 사이에서 대량으로 破損되었다고 보여지며, 이 정도의 핵분열생성물이 放出될 수 있는 연료봉의 破損에는 적어도 1100k 내지 1200k 사이의 高温이 필요한 것으로 보아 事故발생 후 137~142분 사이의 爐心溫度는 1100k 이상으로 추정되고 있다.

한편 爐心에 설치한 SPND(self-powered neutron detectors)의 Zry-2 인출선(lead cable)에서 발생한 전류량으로 부터도 爐心溫度를 알 수 있는데, SPND 인출선에서 발생한 전류량으로 爐心溫度를 추정하여 보면 그림 5에서 보는 바와 같이 事故발생 후 150분경에는 연료봉하단에서 2.86m 상위부위가, 그리고 165분경에는 0.76m 상위부위까지 1350K 이상에 도달한 것으로 나타났다¹⁸⁾.

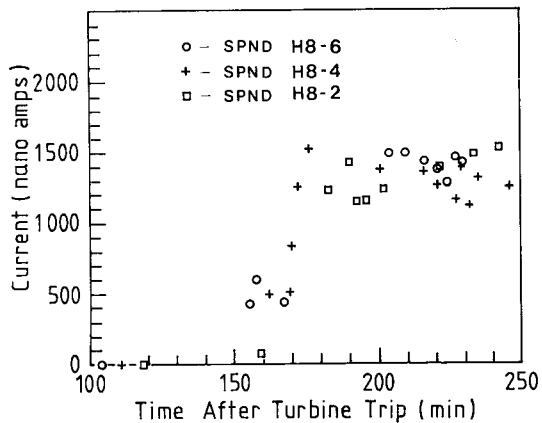


그림 5. SPND의 Zry-2 인출선에서 發生한 전류량: SPND H8-2, SPND H8-4 및 SPND H8-6은 燃料棒 하단으로 부터 각각 0.76m, 1.82m, 및 2.86m 上部에 설치하였음.

SPND의 Zry-2 인출선에서 발생한 전류와 事故後 100분경 부터 爐心上端部가 冷却材로 부터 노출되었다는 경계조건을 사용하여 SCDAP코드로 추정한 爐心溫度등을 종합하여 炉内온도를 추정하여 보면, 事故발생 후 160분경에는 爐心の 최고온도가 1600K 부근, 즉 지르카로이 皮覆管에 격렬한 酸化反應을 일으킬 수 있는 온도까지 상승되

⁺⁺ Zry-2인출선은 1350K부터 負電流가 陽電流로 변화하면서 온도상승에 따라 전류생성량증가

있다고 볼 수 있다. 그런데, 지르카로이 皮覆管에 격렬한 酸化反應이 일어나기 시작하면 다음과 같은 發熱反應, $Zr+2H_2O \rightarrow ZrO_2+2H_2+5.86 \times 10^5 J/mole$,에 의해 多量の 熱이 발생하여 연료봉의 온도는 급격히 상승하게 된다. 이와 같은 사실은 독일의 Karlsruhe연구소에서 핵연료봉 다발을 수증기분위기에서 일정한 속도로 加熱시켜 본 결과^{19, 20)}, 1100K를 지나면서 부터 지르카로이 皮覆管의 酸化反應이 활발하여져 加熱速度가 증가하기 시작하였는데, 1900K를 넘으면 酸化反應은 더욱 맹렬하여져 수분내에 연료봉 온도가 2500K 이상으로 상승하였다.

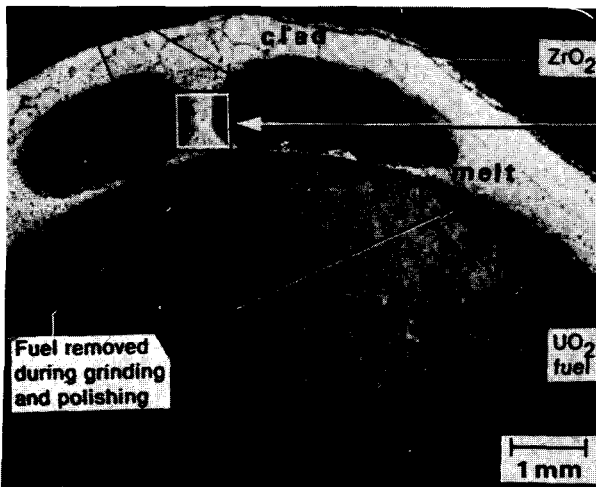
이와 같은 실험결과를 본다면, TMI-2 原子爐의 경우도 연료봉이 冷却材로 부터 노출되면 붕괴열에 의해 온도가 상승하기 시작하다가 1100K 부근까지 상승하게 되면 지르카로이 皮覆管의 酸化反應이 활발하여져 多量の 熱이 발생하게 되므로 연료봉의 온도는 단시간내에 지르카로이 皮覆管을 용융시킬 만큼 충분히 높아지게 된다고 볼 수 있다. 이에 따라 皮覆管이 용융되어 연료와 皮覆管 사이의 틈(gap)으로 흘러내리면서 핵연료를 용해시켜 U-Zr-O 酸化物溶融材를 만들게 되는데, 이러한 사실은 테브리스 그림 6의 爐心材 (debris)의 狀

態실험결과²¹⁾에서 보는 바와 같이 연료와 皮覆管 사이에 다량의 U-Zr-O 酸化物溶融材가 존재하는 것으로 알 수 있다. 그런데, 연료와 皮覆管 사이에 溶融材의 量이 많아지게 되면, 溶融材는 皮覆管 외면의 酸化皮膜을 파괴하여 연료봉 외면을 따라 흘러내려 冷却材와 接하는 부위에서 응고하게 된다. 이러한 사실은 그림 7에 있는 독일의 Karlsruhe 연구소의 실험결과¹⁹⁾에서도 잘 보여주고 있다.

그리고 지르카로이 皮覆管의 급산화시에 생긴 多量の 熱은 그외에도 爐心上部까지도 加熱시켜 그림 8에서 보는 바와 같이 核燃料集合體의 인코 持支格子 널 는 물론 304SUS 상부노즐(top nozzle) 등을 용융시켰을 뿐만 아니라²²⁾, 그림 9에서 보는 바와 같이 爐心上部の 核燃料集合體 持支格子板 (grid plate)의 일부도 용융시켰다¹⁵⁾.

事故시의 지르카로이 皮覆管의 酸化舉動은 핵연료집합체에 남아 있는 切損된 燃料棒의 皮覆管을 핫셀시험한 결과 그림 10에서 보는 바와 같이 동일위치에서도 방향에 따라 산화피막의 두께가 적게는 $30\mu m$ 에서 크게는 $300\mu m$ 이상으로 근접부위에서도 酸化狀態에 큰 차이가 있었으며, 制禦棒案内管의 水素化 舉動도 그림 11에서 보는 바와 같이

Steam-oxidized voids



Melt surfaces oxidized by steam

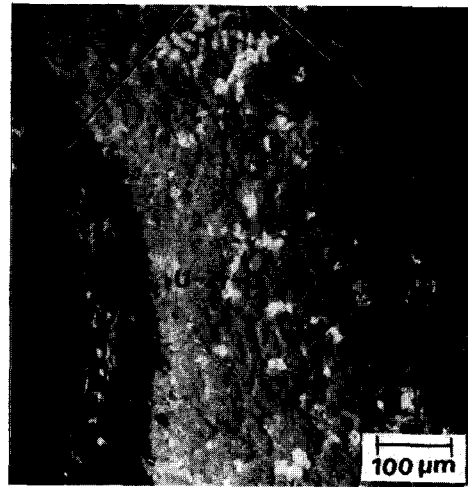


그림 6. 爐心 H8 위치에서 채취한 燃料-溶融材-皮覆管으로 구성된 테브리스의 組織寫眞; 이 테브리스는 皮覆管이 용융되어 燃料과 皮覆管 사이의 틈으로 흘러 내리면서 燃料을 溶解하여 생긴 U-Zr-O 酸化物이 燃料과 皮覆管 사이에서 固化되어 生成되었다.



그림 7. 冷却材 상실 사고시 燃料棒 損傷狀態를 관찰하기 위한 ESBU-1 實驗의 例 : 용융된 皮覆管이 UO_2 核燃料를 溶解시켜 生成된 $U-Zr-O$ 酸化物이 燃料棒 外면을 따라 흘러내리면서 冷却材와 接觸한 部位에서 응고된 狀態.

근접부위에서 큰 차이가 있었다. 이러한 실험결과로 보아 事故시 TMI-2 원자로의 爐心은 근접거리에서도 熱水力的 條件에 차이가 컸다는 것을 알 수 있다.

2.3 붕괴爐心 加熱 단계(事故 발생 후 174~224 분간)

事故 발생 후 137~142분경 부터 일부 燃料봉이 破損되기 시작한 爐心에 174분경 2B loop 펌프를 約 19분간 가동하였다. 그러나 壓力容器的 冷却材 出口側(hot leg)에서 冷却材의 流量을 측정할 바에 의하면 冷却材는 15초간만 순환되었으며, 순환된 量은 約 $28m^3$ 에 불과하였다²³⁾. 그럼에도 불구하고 이와 같은 冷却材의 순환은 결과적으로 壓力容器的 內의 압력을 상승시켜서 이때 생긴 熱-機械的 응

력에 의한 충격으로 高酸化되어 극도로 취약해진 爐心上部쪽의 燃料봉 部位가 조각조각으로 破損되어 많은 核燃料集合體가 그림8에서 보는 바와 같이 두 부분으로 切損되었다.

前述한 바와 같이 皮覆管이 용융되어 燃料와 皮覆管 사이의 틈으로 흘러 내리면서 UO_2 핵燃料를 溶解시켜 生成된 $U-Zr-O$ 酸化物溶解材는 量이 많아지게 되면 皮覆管을 파괴하여 燃料봉 外면을 따라 흘러내려 冷却材와 接觸하는 部位에서 응고됨으로 냉각수의 흐름을 방해하는데, 미국의 Idaho 국립연구소의 PBF(power burst facility) 실험 결과에 의하면^{24~26)} 冷却材에서 노출된 燃料봉이 용융되어 흘러내리면서 冷却材와 接觸하는 部位에서 응고되는 경우 冷却材의 순환율을 70~95%까지 방해하여 爐心의 냉각조건을 상당히 惡化시켰다. 따라서 174분경의 冷却材 일시 순환은 爐心外周部에 있는 核燃料集合體의 온도만 일시적으로 下降시켰을 뿐, 爐心中央部에서는 冷却材의 순환이 적어 온도가 계속 상승되었는데, 이는 192~197분 사이에 측정된 冷却系統의 수증기 生成량이 계속 증가한 사실에서도 알 수 있다.²⁷⁾

事故 발생 후 200분경에는 冷却材 보충을 위하여 約 17분간 高압주입 (high pressure injection) 펌프를 가동시켜, 207 분경에는 冷却材가 壓力容器的 冷却材 出口부위까지 채워졌다. 그럼에도 불구하고 前述한 바와 같이 溶解爐心材가 燃料봉 사이에서 응고되어 冷却材의 흐름을 방해하였을 뿐만 아니라 붕괴된 爐心材인 $U-Zr-O$ 酸化物의 낮은 熱傳導도와 붕괴된 爐心材가 갖고 있던 多量의 潛熱로 인하여 인하여 爐心外周部에서의 상당한 냉각에도 불구하고 爐心에서 생기는 붕괴열을 충분히 除熱하지 못했다. 따라서 爐心中央部는 冷却材속에 잠겨 있었음에도 불구하고 계속 加熱되어 事故 후 224분경에는 約 25 ton가량의 爐心材가 냉각재속에서 용융상태로 존재하였다.²⁸⁾

그림 12는 爐內관찰²⁹⁾ 및 爐心굴착(core boring) 시료의 실험결과를^{30,31)} 토대로 하여 事故 발생 후 224분경의 爐心狀態를 추정할 것으로 爐心上부의 핵燃料봉이 대부분 切損되어 아래로 떨어져서 爐心上部에 커다란 空洞(void)이 생성된 것을 보여주는 동시에, 붕괴된 爐心材가 冷却材속에 잠겨 있으면서도 붕괴열에 의해 계속 加熱되어 용융상태로 존재하는 것을 보여주고 있다.

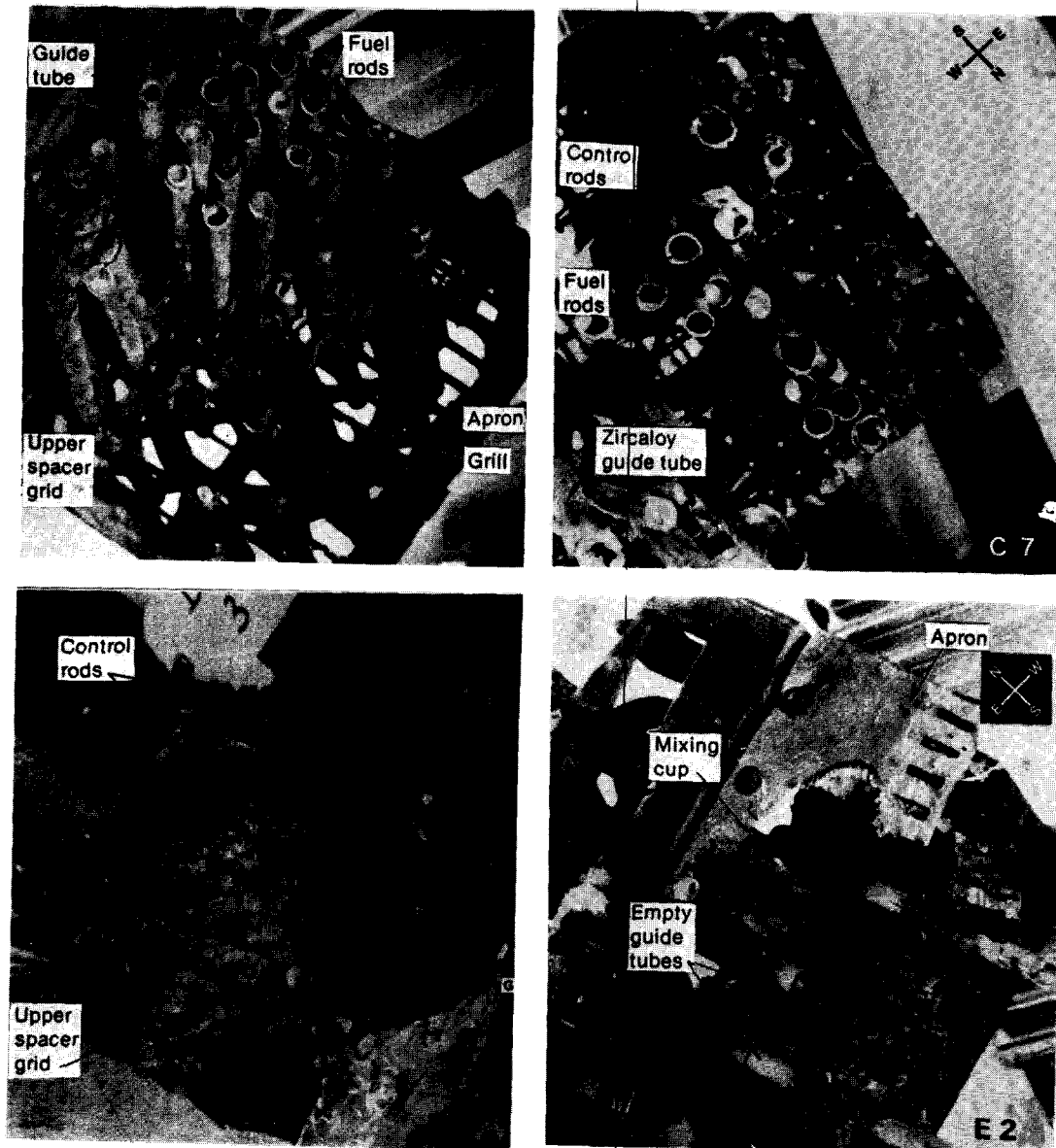


그림 8. TMI-2 原子爐의 損傷 核燃料集合體 : Inconel 600 上部持支格子와 304SUS 上部노즐이 용융되어 損傷된 狀態 및 Zry-4 燃料皮覆管과 制御棒案内管의 切損狀態 그리고 304SUS 制御棒皮覆管의 溶융 파손 狀態등을 보여주고 있다.

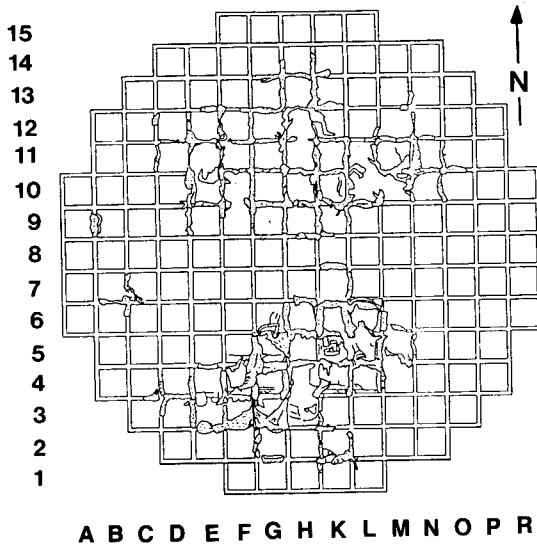


그림 9. 爐心上部の 核燃料集全體 支持格子板 (upper fuel assembly grid plate) 의 蝕傷부위.

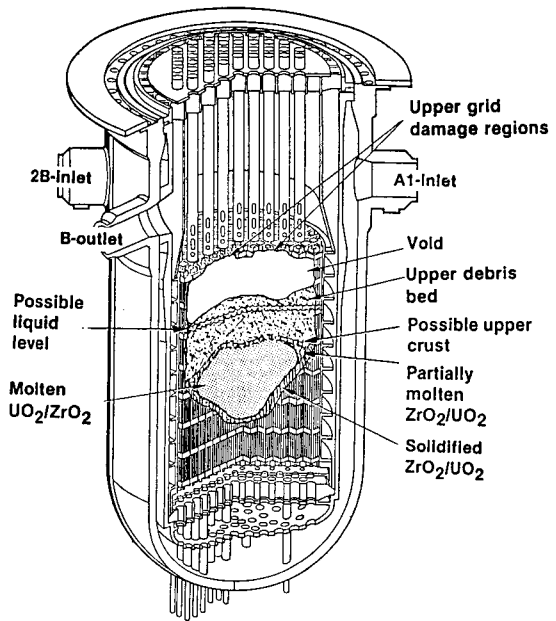


그림 12. 事故後 224분경의 爐心 損傷狀態 推定도

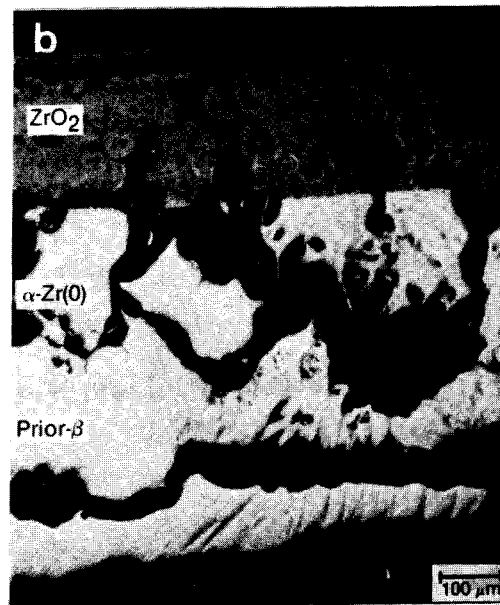
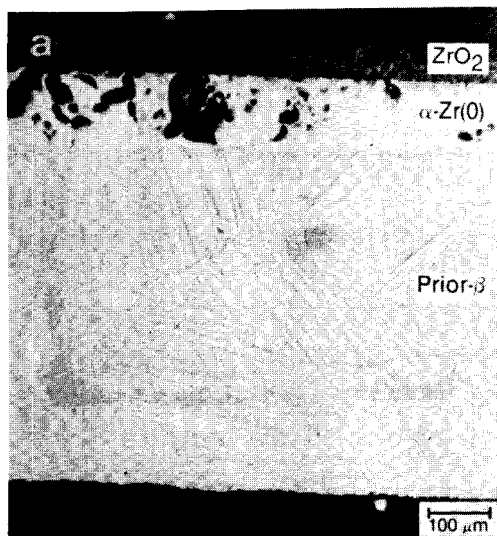


그림 10. 核燃料集全體에 남아있던 切損 燃料皮覆管의 酸化狀態 ; 燃料棒 上단으로 부터 16cm 下部의 0°(a) 와 180°(b) 부위의 組織寫眞으로 근거리간에도 酸化狀態에 큰 差異가 있는 것을 보여주고 있다.

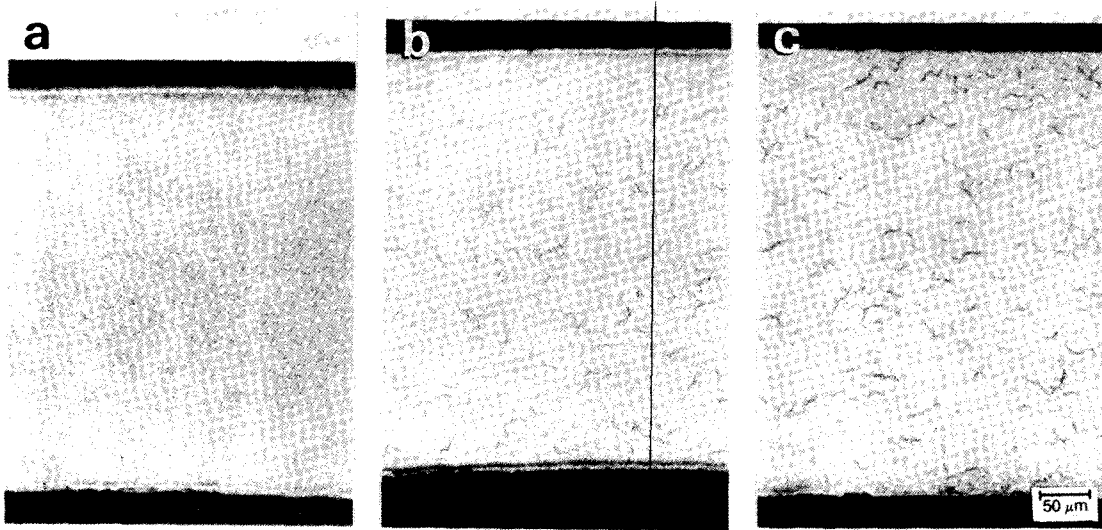


그림 11. 核燃料集合體에 남아있던 切損된 制禦棒索內管의 水素化狀態 : 燃料棒 上단을 기준으로 12cm 下部의 0°(a) 와 180°(b) 부위 및 27cm 下部(c)의 組織寫眞으로 근거리간에도 水素化狀態에 큰 차이가 있는 것을 보여주고 있다.

2.4 爐心 再配置 단계(事故 발생후 224~230분 간)

그림 12와 같았던 爐心狀態는 事故발생후 224~226분 사이에서 그림 13에서 보는 바와 같은 광범위한 爐心材의 이동이 일어났다. 이는 그림 14에서 보는 바와 같이 中性子束 強度, 爐內 압력 및 壓力容器的

冷却材 入口側(loop cold leg) 온도의 급격한 변화등으로 부터 확인할수 있다. 즉, 爐心으로부터 中性子束 強度가 224~226분 사이에서 약 200%가 증가하는 현상과 壓力容器的 A-loop 入口側의 冷却材 온도가 12초 사이에 80K나 상승하는 현상은 이 기간내에 爐心의 광범위한 再配置가 일어났다는 것을 알려준다. 그 외에도 壓力容器 하부공간에 설치한 SPND의 경보장치가 224~226분 사이에서 작동하였는데, 이것도 이 기간에 爐心材의 일부가 壓力容器 하부공간으로 이동했다는 것을 예시한다.

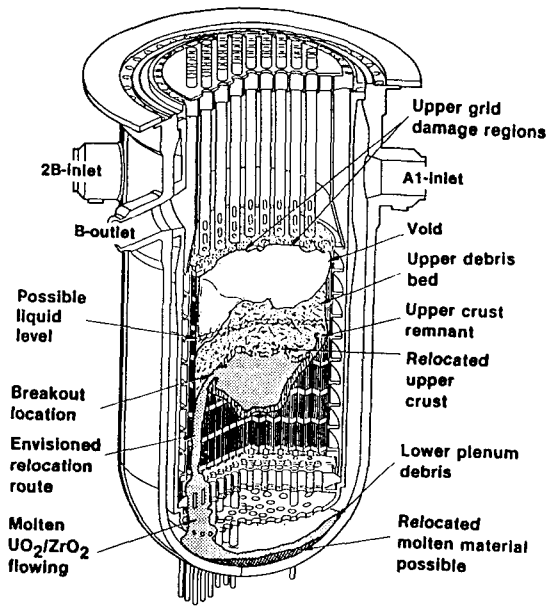


그림 13. 事故後 224~226분 사이의 爐心 再配置 추정도.

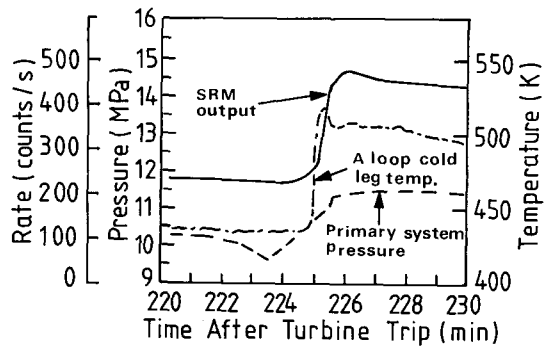


그림 14. 事故後 224~226분 사이의 中性子束 強度, 爐內 압력 및 壓力容器的 冷却材 入口側 온도 변화.

爐心材의 광범위한 再配置는 용융된 爐心材를 둘러싸고 있던 外皮(crust)가 파괴되어 熔融爐心材가 壓力容器 하부공간으로 떨어짐으로 일어났는데 爐心の P5, P6 위치³²⁾와 L14 위치의³³⁾ 外皮가 파괴되어 일어난 것으로 확인되었으며 약 2200K 정도로 높은 온도상태에 있던 16 ton 가량의 용융된 爐心材가 壓力容器 하부공간으로 떨어져 내려간 것으로 알려졌다³⁾. 그럼에도 불구하고 baffle의 일부분만이 용융 관통되는 손상을 입었을 뿐³⁴⁾, 壓力容器는 거의 손상을 입지 않았다³⁵⁾. 그림 15에 용융된 爐心材가 壓力容器 하부공간으로 떨어져 생성된 데브리스(debris)의 사진이 있다.

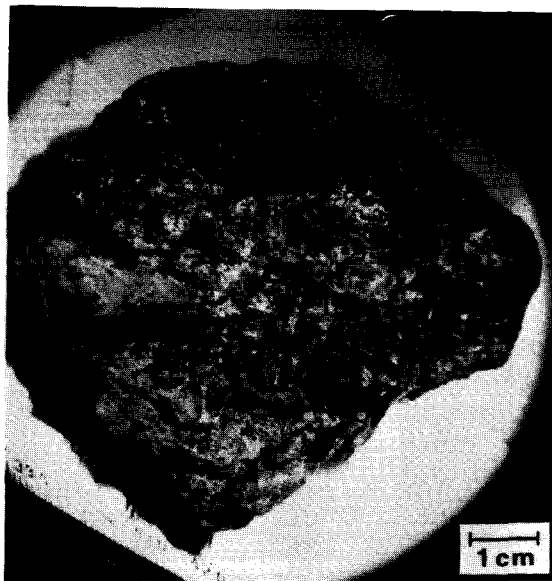


그림 15. 壓力容器 下部에서 채취한 데브리스(debris)의 例

爐心 再配置의 주요원인인 熔融爐心材 外皮의 파괴원인에 대해서는 아직까지 정확한 해석은 못하고 있는데, 용융에 의한 파괴와 熱-機械의 응력에 의한 파괴의 두 측면에서 많은 研究가 수행되었다^{31, 36)}. 外皮의 용융에 의한 파괴에 관해서는 最惡의 냉각조건으로 外皮에서의 냉각이 열복사(thermal radiation)에 의해서만 일어난다고 가정하여도 冷却材속의 熔融材外皮의 온도는 약 1710 K까지만 상승된다³⁶⁾. 따라서 外皮가 제어봉재료나 304SUS로 덮혀있다면 外皮 용융에 의해 파괴 될 수 있지만, ZrO_2 U-Zr-O 및 UO_2 등 酸化物로 덮혀 있다

면 外皮용융에 의한 파괴는 일어날 수 없다. 다만 熔融材 外皮가 연료봉 피복재인 지르카로이로 덮혀 있다면 수증기분위기에서의 맹렬한 酸化反應으로 外皮가 용융될 가능성도 있으나, 이 경우도 지르카로이의 酸化皮膜이 $67\mu m$ 이상이면 용융파괴의 가능성은 없다. 또한 그림 14의 SRM 측정자료에서 보는 바와 같이 爐心の 再配置가 1분이내에서 빠른 속도로 일어난 것도 용융파괴의 가능성을 배제한다. 따라서 熔融材 外皮에 작용하는 應力에 의한 파괴로 보고 있는데, 그중에서도 붕괴열에 의한 熔融材의 온도 상승에 따라 일어나는 熔融材의 체적증가가 外皮에 加해서 생기는 응력에 의한 破壞說, 冷却材 주입에 따라 일어난 壓力容器내의 급격한 압력증가 때문에 熔融材 外皮에 작용하는 응력에 의한 破壞說, 爐心 하부지지체(lower supporting assembly)와 熔融材 外皮와의 상호작용에 의한 破壞說등이 유력하게 제안되고 있다. 爐內 관찰 결과²⁹⁾와 爐心 굴착(core boring) 시료의 핫셀시험결과^{30, 31)} 등으로 解析한 사고후 TMI-2 原子爐의 爐心損傷 狀態가 그림 16에 있다.

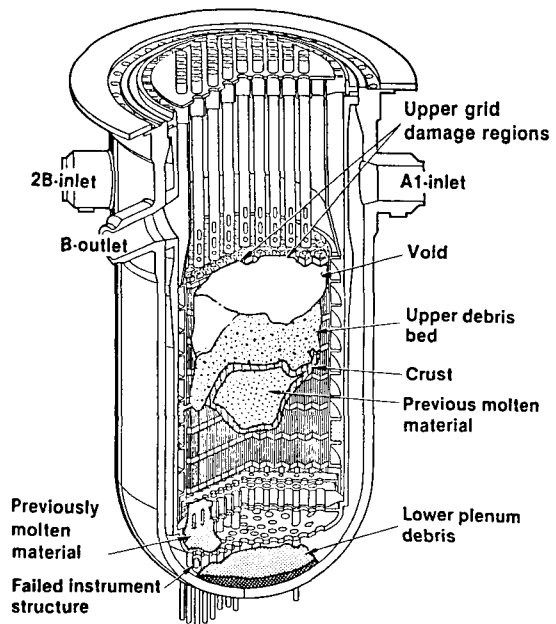


그림 16. 事故後 TMI-2 原子爐의 爐心狀態: 爐心 上部에 약 $9.3m^3$ 의 空洞(void)이 形成되었으며 熔融 爐心材가 壓力容器 下部로 이동한 狀態를 보여주고 있다.

3. 맺음말

TMI-2 原子爐 事故는 爐心이 대량 용융된 重大 爐心損傷事故로 爐心の 광범위한 再配置가 일어난 동시에, 극히 일부이기는 하지만 핵분열생성물이 原子爐 외부로 유출되는 등 原子爐의 안전성에 관해 많은 문제점이 제기되어 事故分析을 위한 광범위한 研究가 수행되었다.

이 事故로 TMI-2 原子爐는 전체 爐心材의 35%에 해당하는 25ton 가량의 爐心材가 용융되었는데, 그 가운데 약 16ton 가량의 爐心材가 압력용기 하부 공간으로 떨어져 내려가서 爐心上部에는 9.3m³ 크기의 空洞(void)이 형성되었다. 그리고 대부분의 爐心材가 事故시에 2200K 이상의 高温狀態에 있었으며, 극히 일부의 核燃料는 3100K 부근까지 상승되었던 것으로 알려졌다³⁷⁾.

TMI-2 原子爐에는 177개의 核燃料集合體가 장전되었는데, 그 중에서 비교적 損傷을 적게받아 燃料봉이 切損되지 않은 集合體는 爐心外周部에 위치한 단 2개뿐으로 그외의 모든 集合體는 燃料봉이 切損되었는데 장전된 集合體의 4분의 3에 해당하는 133 개 集合體는 燃料봉이 모두 破損되어 集合體가 두 조각으로 切損되었다. 그리고 R-6 核燃料集合體는 baffle과 용융고착 되어 있었다.

그 외에도 지르카로이 燃料皮覆管의 急酸化時에 생긴 多量の 熱로 인하여 많은 核燃料集合體의 特支格子와 상부노즐등이 부분적으로 용융되었으며, 集合體를 지지하는 爐心上部の 特支格子板의 일부도 용융되었다. 그러나 2200K 이상의 온도상태에 있던 16ton 가량의 溶融爐心材의 낙하에도 불구하고 baffle의 일부분만이 용융되어 관통된 損傷을 입었을 뿐, 壓力容器는 거의 損傷을 입지 않았으며 다만 壓力容器 하부에 삽입된 계측선의 304SUS 案内管 2개 만이 용융되어 없어졌다.

이러한 사실로 보아 原子爐의 爐心이 대량 溶融되어 광범위하게 再配置되는 重大爐心損傷事故의 경우에 있어서도 原子爐 압력용기의 健全性은 확보될 수 있다고 사료된다.

참고문헌

1. U.S.N.R.C., "Final Programmatic Environmental Impact Statement Related to Decontamination and Disposal of Radioactive Waste, Resulting from Mar. 28, 1979, Accident Three Mile Island Nuclear Station Unit 2", NUREG-0683
2. M. Rogovin and G.T.Frampton, Jr., "Three Mile Island - A Report to the Commissioners and to the Public", USNRC Report, NUREG/CR 1250.
3. J. Adams and R.Smith, "Lower Plenum Video Data Summary", EGG-TMI-7429(1987).
4. Quick Look Inspection, "Report on the Insertion of a Camera into TMI-2 Reactor Vessel Through a Lead Screw Opening", GEND-030(1983).
5. L.A.Neimark, R.V.Strain, J.E.Sanecki and W.D.Jackson, "The Microstructural and Microchemical Characterization of Samples from the TMI-2 Core", 15th Water Reactor Safety Research Meeting, Oct. 1987.
6. K.Vinjamuri, D.W.Akers and R.R.Hobbins, "Examination of H8 and B8 Leadscrews from Three Mile Island Unit 2", GEND-INF-052(1987)
7. S.Langer, M.L.Russel and D.W.Akers, "Fission Product and Core Material Behavior", Proceedings of the First International Meeting on the TMI-2 Accident, CONF-8510166, p123, Oct., 1985.
8. C.S.Carlson, D.W.Akers and R.K.McCardell, "Examination of Debris from the Lower Reactor Head of the TMI-2 Reactor", EGG-TMI-7573(1987).
9. D.E.Qwen, T.E.Cox and J.M. Broughton, "Fission Product Transport at Three Mile Island", Proceeding of the First International Information Meeting on the TMI-2 Accident, Conf- 8510166, p97, Germantown, MD, USA(1985).
10. C.V.Maclsaac and D.G.Keefer, "TMI-2 Reactor Building Source Term Measurement, Surfaces and Basement Water and Sediment", GEND0-042(1984).
11. EPRI, Nuclear Safety Analysis Center, "Analysis of Three Mile Island Unit 2 Accident", NSAC-80-1, Revision 1(1980).
12. R.D.McCormick, "Determination of Void Fraction from Source Range Monitor and Mass Flow Rate Data", EGG-TMI-7324(1986).
13. EPRI, Nuclear Safety Analysis Center, "Interpretation of TMI-2 Instrument Data", NASC-28(1980).

14. C.M.Allison, S.T.Polkinghorne and M.S.Sohal, "SCDAP/MODI Analysis of the Progression of Core Damage During the TMI-2 Accident", SECMD-84(1985)
15. E.L.Tolman, J.P.Adams, J.L.Anderson, P.Kuan, P.K.McCardell and J.M.Broughton, "TMI-2 Accident Scenario Update", EGG-TMI-7489(1986).
16. H.Y.Wu, A.J.Baratta, M.Y.Hsiao and B.R.Bandini, "Analysis of the TMI-2 Source Range Monitor During the TMI Accident, A Final Report to EGG, Contract NO. C85-130880(1987).
17. R.D.McCormick, J.L.Anderson and D.W.Golden, "TMI-2 Data Summary Report" EGG-TMI-7483 (1987).
18. D.J.N.Taylor, "TMI-2 Self-Powered Neutron Detector - Data Interpretation", EGG-TMI(Draft).
19. S.Hagen, H.Malauscek, S.O.Peck and K.P.Wallenfels, "Temperature Escalation in PWR Fuel Rod Simulator Bundles due to Zircaloy/Steam Reaction Test", KfK-3508(1983).
20. V.F.Urbanc and T.R.Heidrick, "High Temperature Oxidation of Zircaloy-2 and Zircaloy-4 in Steam, J Nucl. Mater., 75, 251(1978).
21. D.W.Akers, E.R.Carson, B.A.Cook, S.A.Ploger and J.O.Carson, "TMI-2 Core Debris Grab Samples - Experimental and Analysis", Part 1, GEND-INF-075(1986)
22. S.M.Jensen, D.W.Akers, R.W.Garner and G.S.Roybal, "Examination of the TMI-2 Core Distinct Components", GEND-INF-082(1987).
23. A.Adron and D.Cain, "TMI Accident Core Heat Up Analysis", NSAC-24(1981).
24. J.Adams, "Quick Look Report on OECD LOEF Experiment", LP-FP-02, OECD-LOFT-T-3804(1985).
25. A.D.Knipe, S.A.Ploger and D.J.Osetek, "PBF Severe Fuel Damage Scoping Test" NUREG/CR-4683 (1986).
26. Z.R.Martinson, D.A.Petty and B.A.Cook, "PBF Severe Fuel Damage Test 1-1", NUREG/CR-4684 (1986).
27. R.Henry, H.K.Fauske, M.E.Epsteen, M.N.Hutcherson and M.A.Kenton, "Core Relocation Phenomenology", Proceeding of the International Information Meeting on the TMI-2 Accident, CONF-8510166, p 143, Germantown, Md, USA, Oct., 1985
28. P.Kuan, "TMI-2 Core Debris Bed Coolability", EGG-TMI-7150(1986).
29. V.F.Fricke, "Reactor Lower Head Video Inspection", TMI-2 Technical Bulletin, EGG-TMI, TB-86-3 Rev. 0(1986).
30. C.S.Olsen, D.W.Akers and R.K.McCardell, "TMI-2 Core Bore Examination Results", DOE-Contract No DE-AC07-76-ID01570, 16th Water Reactor Safety Research Meeting, Oct., 1987.
31. E.L.Tolman, "TMI-2 Core Bore Acquisition Summary Report", EGG-TMI-7385(1987).
32. R.K.McCaddell, Personal Communication (1987), EG G, Idaho Falls, ID, USA
33. D.W.Akers, Personal Communication, EGG, Idaho Falls, ID, USA(1988)
34. A.W.Cronenberg, S.R.Behling and J.Broughton, "Analysis of Damage Potential to the TMI-2 Lower Head by Core Debris", Trans. Amer. Nucl. Soc., 217, 50(1985).
35. A.W.Cronen and E.L.Tolman, "Thermal Interaction of Core Meli Debris With the TMI-2 Baffle, Core-Former and Lower Head Structures" EGG-TMI-7811(1987).
36. P. Juan, "Core Relocation in the TMI-2 Accident", EGG-TMI-7402(1986).
37. C.S.Carson, Personal Communication, EGG, Idaho Falls, ID,USA, 1988

inserted when required. The Hf shroud is composed of 4.5 mm thick natural hafnium and the composition is listed in Table.1. The outer core consists of 8 circular