

原子爐事故時 核燃料 舉動

1. 序 論

原子爐의 運轉은 필연적으로 核分裂生成物의 生成을 수반한다. 즉, 原子爐에서의 核燃料은 에너지의 發生源인 동시에 核分裂生成物의 發生源이기도 하다. 핵분열생성물의 방출에 대해서는 被覆管이 障壁이 되며, 被覆管의 健全性이 확보되면 核分裂生成物이 外部로 누출되는 일은 없다.

따라서 原子爐의 異常이나 事故時의 核燃料 舉動을 研究할때 가장 중요한 것은 被覆管이 破損되는 한계와 그 機構를 규명하는 것이다. 두 번째로 중요한 것은 만일 被覆管이 破損된다면, 原子爐1次系統에 어떤 영향이 미치는가 또는 燃料集合體가 冷却可能形狀을 유지할 수 있는 가를 파악하는 것이다.

原子爐는 通常運轉條件에서 크게 변하지 않는 한 燃料內的 發熱과 냉각재에 의한 除熱이 균형을 이루어서 燃料棒이 異常 高温으로 되지 않도록 설계되어 있다. 그러나 原子爐시스템의 어떠한 異常에 의해 發熱이 除熱보다 상회하게 되면 燃料봉은 과도하게 高温이 되어 극단의 경우에는 燃料펠릿이나 被覆이 용융되거나, 피복관의 온도상승에 의한 強度低下나 酸化脆화에 의한 피복관 파손의 가능성이 생긴다.

원자로의 異常이나 事故時의 核燃料 舉動은 出力 또는 冷却條件에 따라 變한다. 그러므로 原子爐의 異常이나 事故를 出力이나 冷却條件에 의존하는 事故現象으로 분류하고, 이 분류마다 핵연료의 舉動을 論하는 것이 합리적이다.

事故現象에 의한 분류에 의하면, 原子爐의 異常이나 事故는

- (1) 反應度投入事象
- (2) 出力-冷却不均衡
- (3) 冷却材喪失事故
- (4) 爐心損傷事故

등으로 大別된다.

여기서 (1)의 反應度投入事象이란 제어봉이 爐心에서 急速하게 빠져나감으로서 爐心に 큰 反應도가 加해진 결과, 出力이 急上昇하는 현상이다. 그 極端의 경우에는 燃料溫度가 급상승하여 燃料破損에 이른다. 이것을 反應度事故(reactivity insertion accident, RIA)라고 한다. 한편, 除熱能力의 低下에 기인하는 最大의 想定事故는 冷却材喪失事故(loss-of-coolant accident, LOCA)이다. 이때, 冷却材는 완전히 상실되고 水蒸氣雲圍氣中에서 燃料가 高温이 된다.

出力-冷却不均衡(power cooling mismatch, PCM)은 反應度投入事象과 冷却材喪失事故의 中間에 위치한다. 즉, 出力-冷却不均衡은 通常運轉狀態에서 原子爐의 出力이 서서히 增加한다든가, 冷却能力이 서서히 低下하기 때문에 發熱과 除熱이 균형을 잡지 못하게 되는 것이다. 그리고 爐心損傷事故(severe core damage accident, SCDA)는 爐心の 再冷却에 실패한 냉각재상실사고라고 볼 수 있다.

원자로의 이상이나 사고는 安全評價의 觀點에서도 분류된다. 이때, 원자로의 이상이나 사

고는

- (1) 運轉時의 異常과 過渡變化
- (2) 事故
- (3) 重大事故 및 假想事故

로 분류된다.

(1)의 運轉時의 異常한 過渡變化와 (2)의 事故는 일본의 경우 安全設計審査指針에서 정의되며, 發電用 輕水爐의 안전설계에 관한 기본방침에 대해 심사를 할때 평가지침으로 되어 있다.

한편 (3)의 重大事故 및 假想事故는 일본의 경우 原子爐立地審査指針에서 정의되며, 원자로의 입지조건을 평가하기 위해 想定하는 사고이다. 현재 일본에서는 이들 지침의 再檢討가 행해지고 있는데, 장래에는 重大事故와 假想事故를 정리해서 立地評價事故(site evaluation accident, SEA)라고 불려질 것이다.

事故現象으로 부터의 분류와 安全評價로 부터의 분류를 대응시키면 「反應度投入事象」은 「運轉時의 異常한 過渡變化」와 「事故」에 걸리는 현상이며, 「出力-冷却不均衡」은 「운전시의 이상한 과도변화」의 範圍內에 머문다. 한편 「냉각재 상실사고」는 「事故」와 「重大事故 및 假想事故」에 걸리는 현상이다.

원자로의 異想이나 事故時의 核燃料 舉動에 관한 연구는 현재 爐內實驗, 爐外實驗 모두 매우 활발하게 진행되고 있으며, 특히 TMI 사고 후 심각한 爐心損傷事故의 평가에 노력이 집중되고 있는 것 같다.

2: 反應度事故

어떠한 원인에 의해서 爐心に 단시간에 1달러 이상의 큰 異常反應도가 加해지면, 원자로의 출력이 급상승하여 燃料溫度가 거의 斷熱의으로 급상승한다. 그 결과 極端의 경우에는 爐心이 파괴되어 水蒸氣爆發이 발생한다. 이와 같은 사고를 反應度事故라고 한다.

異常反應도가 加해지는 원인으로 PWR에서는 制御棒이 튀어나오는 사고, BWR에서는 制御棒 落下事故 등을 想定하고 있다. 爐心에서 最大反應度價値를 가진 제어봉이 1개 빠져나감으로서 反應度事故가 일어난다고 想定되고 있다.

실제로 일어난 가장 큰 反應度事故는 1961년의 SL-1事故이다. SL-1은 美國 Idaho 國立原子爐實驗所에 설치된 소형의 BWR로서 열출력 3,000kW, 전기출력 200kW, 暖房用熱源 400kW로 설계되어 있었다. SL-1事故는 爐心の 보수작업을 하고 있던 작업원 한사람이 制御棒을 손으로 급속하게 빼냈기 때문에 일어났다고 생각하고 있다. 그 결과 原子爐는 暴走出力狀態가 되어 爐心中央 16개의 연료가 溶融破損되었고, 이 파손에 의해 溶融燃料과 냉각수가 접촉하여 냉각수가 급격히 가열됨으로서 水蒸氣爆發이 생겼고, 이 破壞力에 의해 原子爐가 파괴되었다.

이 사고에서 알 수 있는 바와 같이

(1) 燃料는 斷熱에 가까운 상태로 단시간에 고온에 달한다,

(2) 付加反應도가 클 경우에는 연료파손에 의해서 큰 파괴력이 발생한다

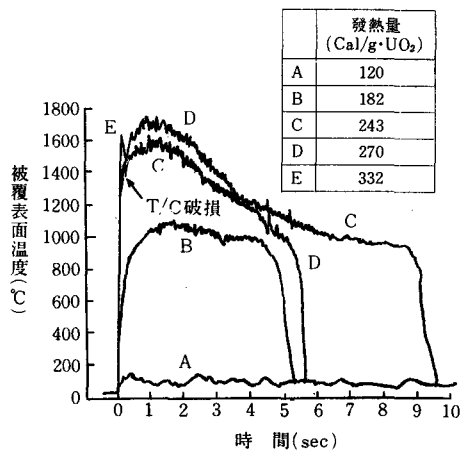
는 것이 이 反應度事故에서 보여지는 특징이다.

反應度事故에서는 핵연료내의 發熱이 극히 단시간에 생기는데, 그동안 연료봉에서 냉각재로의 熱移動은 적다. 따라서 燃料펠릿의 發熱量이 그후 연료봉의 舉動을 결정하게 된다.

그림1과 表1에 NSRR(原子爐安全性研究爐, 日本)에서 反應度事故를 模擬해서 행한 실험의 결과를 나타내었다. 이들 結果는 결함이 없는 未照射, 즉 標準燃料에 대해서 얻어진 것이다. 이들 圖表는 다음과 같은 것을 나타내고 있다.

發熱量 約140cal/g·UO₂까지는 暴走出力에 의해서도 被覆表面溫度의 상승이 그다지 현저하지 않으며, 펠릿에 均열이 생기나 被覆管外觀上에는 아무런 변화가 보이지 않는다. 發熱量

〈그림1〉 標準燃料試驗에서의 被覆表面溫度의 時間的經過



〈表1〉 標準燃料試驗結果

發熱量(cal/g·UO ₂)	140	260	380
破損/非破損	非破損	破損	破損
燃料損傷의 特徵	펠릿에 크랙이 생기거나 被覆管外 觀上은 變化 없음	被覆管表面 酸化 및 근 소한 燃料 棒 變形	크랙發生 및 그 결과 생긴 燃料의 分斷 機械力은 發生하지 않음
損傷 機構	펠스發生時의 半徑方向 出力歪(溫度 勾配)에 의한熱應力	DNB의 發生 및 펠릿 熱膨脹에 의한 被覆管 管의 變形	細片化한 펠릿의 水中으로의 分散 및 急激한 UO ₂ -水反應 (FCI)의 結果 생긴 水蒸氣爆發에 의한 機械力의 發生

使用燃料: NSRR標準燃料, 冷却條件: 大氣壓靜水, 流路管

이 140cal/g·UO₂ 이상이 되면 暴走出力直後에 膜沸騰狀態가 되어 被覆溫度는 1,000°C 以上으로 급상승하여 0.5초~1초에서 最高值에 도달하였다가 다시 안정된 膜沸騰狀態를 유지하면서 數秒間高温狀態를 유지하여 急冷된다.

이에 對應해서 發熱量이 140cal/g·UO₂ ~ 260 cal/g·UO₂에서는 被覆表面이 고온으로 노출되

기 때문에 實効燃料길이 全體에 걸쳐서 酸化膜으로 덮히는 동시에 펠릿의 열팽창에 의해서 破損에 약간의 변형이 발생한다. 發熱量的 증대에 의해 변형은 더욱 현저해지며 산화막도 두꺼워진다. 그러나 燃料棒內의 核分裂生成物이 被覆外部로 누출되는 燃料破損에는 이르지 않는다.

發熱量 260cal/g·UO₂ ~ 380cal/g·UO₂에서는 破損의 산화에 의한 脆化, zircaloy-US₂反應에 의한 두께의 얇아짐, 被覆의 용융 등에 의해 보다 약해진 부분이 급냉되어 燃料棒의 分斷이 생긴다. 그러나 發熱量 380cal/g·UO₂까지는 수증기폭발에 의한 機械力은 발생하지 않는다. 發熱量이 380cal/g·UO₂以上이 되면 UO₂ 펠릿이 완전히 용융되어 冷却水中에 분산된다. 이때 급격한 熔融燃料과 冷却材의 反應에 의해 水蒸氣爆發이 생겨 파괴적인 機械力이 발생한다.

燃料의 破損문턱值(Threshold value, 標準燃料에서는 260cal/g·UO₂)는 연료의 設計條件, 燃料棒內外壓差와 冷却條件에 현저하게 의존한다. 실제의 原子爐에서는 그 數가 극히 적기는 하지만, 欠陥燃料에 대해서 그 파손문턱치와 破損舉動을 알아둘 필요가 있다. 被覆表面에 상처가 있는 燃料에서 상처가 未貫通인 경우에는 파손문턱치에 거의 영향이 없으나, 燃料棒內에 물이 들어간 浸水燃料의 파손문턱치는 健全燃料의 破損문턱치를 대폭 下회한다. 한편 照射後燃料에서는 燃燒度의 증가와 함께 파손문턱치도 下회하여 파괴에너지의 발생도 적어진다.

이와 같은 실험에 의해서 얻어진 지식은 새로 정해지는 反應度投入事象에 관한 評價指針에 받아들여지고 있다.

3. 出力-冷却不均衡

通常運轉下의 原子爐에서는 爐心出力에 따라 冷却材流量이 확보되고 있다. 따라서 燃料棒表面에서의 熱傳達는 매우 양호하다. 그러나 어

던 원인에 의해 異常한 出力上昇(단, 附加反應度는 1달러 이하) 또는 冷却材流量低下가 생겨서 이들의 外亂이 한도를 넘으면 燃料表面은 水蒸氣膜으로 덮히는 膜沸騰狀態가 되어 열전달이 악화된다. 이 결과 燃料被覆管溫度가 상승하여, 과대하게 상승될 경우에는 燃料破損에 이른다고 想定되고 있다. 이와 같이 爐心出力과 冷却能力이 均衡을 이루지 못할 경우를 出力-冷却不均衡이라고 한다.

代表的인 出力-冷却不均衡의 例로 制御棒誤引出事故에 의한 爐心出力의 異常上昇, 循環펌프軸固着事故, 펌프트립사고 등에 의한 冷却材流量의 低下 등이 想定되고 있다. 실제로 가동 중인 輕水爐에서는 局所的인 과열에 의해서 燃料봉이 파손된 例는 있으나, 燃料봉 또는 燃料 집합체 전체가 出力-冷却不均衡에 의해서 파손된 경우는 報告되어 있지 않다.

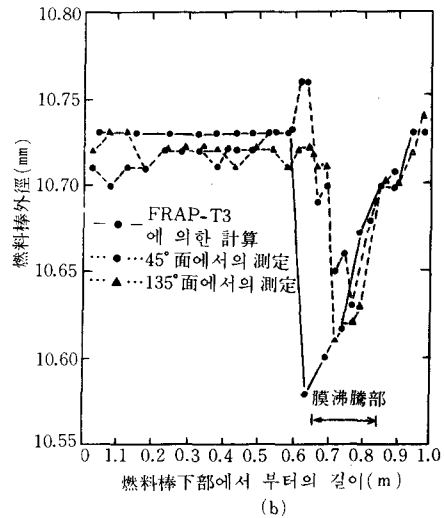
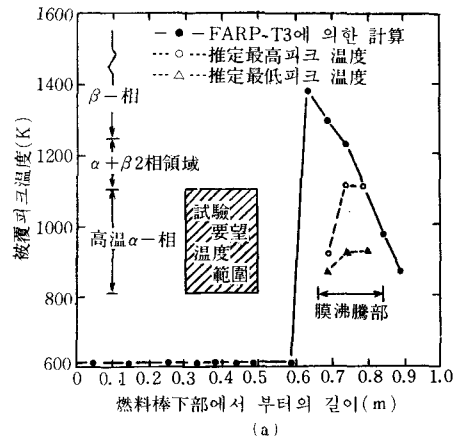
지금까지의 實驗結果에 의하면 出力-冷却不均衡時 核燃料의 舉動은 대체로 다음과 같다.

膜沸騰의 開始와 함께 燃料棒表面의 熱傳達率이 대폭 저하하기 때문에 被覆溫度가 상승하여 최고 1,000°C 이상에 달한다. 그 결과 被覆의 強度가 저하하여 内外壓力差에 견디지 못하는 곳이 생긴다든가, 被覆表面에서는 酸化가, 内面에서는 zircaloy-UO₂反應이 진행되며 또한 出力-冷却不均衡의 정도가 현저할때는 被覆이나 펠릿의 용융까지 進展한다. 出力-冷却不均衡에서는 現象의 全經過가 수십초이상에 걸쳐서 서서히 진전된다는 점에서 反應度事故와 크게 다르다.

그림2에서와 같이 被覆의 손상은 膜沸騰이 발생하는 영역에 한정된다. 膜沸騰開始直後에 被覆溫度가 650°C 이상으로 되어 軟化한 被覆이 外壓에 견디지 못해서 손상을 받는 것으로 생각된다.

被覆溫度가 約900°C 이상이 되면 지르칼로이-물反應에 의해 被覆表面에 酸化膜이, 그 内側

〈그림2〉 出力-冷却不均衡時 被覆의 軸方向溫度分布와 直徑變化



에 安定化 α-Zr層(酸素를 多量으로 固溶하여 融點에 이르기까지 α-상이 安定하게 존재할 수 있는 지르코늄金屬層)이 형성된다. 그 内側은 prior β-相(酸素濃度 約15at%以下)이 된다. 한편 손상을 받음으로서 지르칼로이와 이산화우라늄이 직접 접촉하며 또한 피복온도가 α-β變態의 上限溫度(約980°C)이상이 되면 被覆内面에서 지르칼로이-UO₂反應이 진행된다. 이때 UO₂에 의해 지르칼로이가 산화함과 함께 지르칼로이와 UO₂의 사이에 얇은 Zr-U金屬層이 형성된다. 被覆이 파손되기전 被覆内外面に 산

화에 의해 생성된 安定化 α -Zr相은 저온에서 대단히 무르므로 두꺼운 α -Zr相의 형성은 急冷時點以後에 燃料破損의 직접적인 원인이 되고 있다.

膜沸騰에 遭遇하고 있지 않는 燃料펠릿의 영역에서는 使用前과 거의 같은 상태이다. 한편 膜沸騰과 遭遇하는 영역에서는 펠릿周邊部에 다수의 갈라짐이 발생하여 중심부에서는 현저한 結晶成長이나 부분적인 갈라짐이 진행된다. 또 피복이 파손되어 펠릿과 직접 접촉하는 부분에서는 被覆이 펠릿과 펠릿사이의 틈에 들어가서 펠릿이 피복에 의해서 拘束된다.

燃料棒의 線出力密度가 높아지면 펠릿의 중심부가 용융한다. 中心溶融한 연료펠릿은 중심에 空洞이 생긴다. 中心空洞에서 펠릿周邊方向으로 溶融領域, 結晶粒成長領域, 粉末領域 및 不變領域이 環狀으로 형성되고 있다. 그리고 粉末領域 및 중앙부의 結晶粒界를 따라 균열이 진행되고 있는데, 이 현상은 出力-冷却不均衡의 경우 中心溶融한 연료의 특징이다. 이들 균열은 膜沸騰의 終了에 따르는 急冷時의 熱衝擊에 의해서 발생하는 것이라고 생각되고 있다.

실제의 원자로에서는 다소의 冷却不全으로 연료의 中心溶融은 생기지 않으며, 만약 燃料溶融이 생겼다고 하더라도 연료펠릿에 파손의 원인이 되지 못하며, 出力-冷却不均衡時 燃料棒의 파손은 (1)被覆의 산화에 의한 脆化破損, (2) 燃料棒內壓上昇에 의한 破損, (3)被覆의 溶融破損, (4)펠릿-被覆力學的相互作用에 의한 破損 등의 機構에 의해서 생긴다고 생각되고 있다. 실제로 (2) 또는 (4)의 기구에 의한 破損可能性은 매우 적고, 出力-冷却不均衡時의 연료파손은 대부분 (1)의 被覆의 酸化脆화에 의한 것이라고 생각된다. 따라서 出力-冷却不均衡時에 연료의 파손이 생기지 않게 하기 위해서는 被覆의 酸化量이 一定限度를 넘지 않게 하는 것이 중요하다.

4. 冷却材喪失事故

輕水爐 1次冷却系統의 배관 등의 壓力바운더리가 어떤 이유로 파손되어 補給能力以上の 냉각재가 상실되는 사고를 冷却材喪失事故라고 부른다.

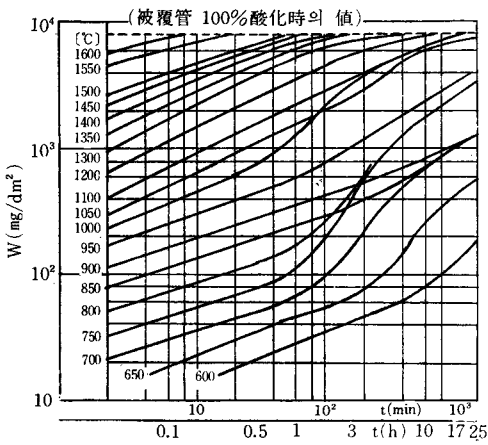
冷却材喪失事故는 定常出力運轉中인 原子爐의 壓力바운더리가 파손됨으로서 시작된다. 定常狀態下에서 大口徑配管이 破斷되면 냉각재는 급격히 原子爐容器에서 부터 방출되어 原子爐 壓力이 저하한다. 系統의 壓力이 格納容器內壓과 거의 같아지면 냉각재의 噴出은 멈춘다. 이 과정을 블로우다운이라고 한다. 核分裂은 감속재인 물의 密度低下 또는 喪失에 의해서 자동적으로 정지한다.

블로우다운終了부터 非常用爐心冷却系統의 注入水가 爐心底部に 달하는 再浸水(refill)까지는 연료의 붕괴열이 수증기의 自然對流에 의해서 제거되는 것 뿐이므로 燃料溫度는 계속 상승한다. 최종적으로 水位가 상승하여 爐心이 완전히 물에 차면 被覆의 온도상승은 정지한다. 再浸水에서 여기까지의 과정을 再冠水(reflooding)라고 한다.

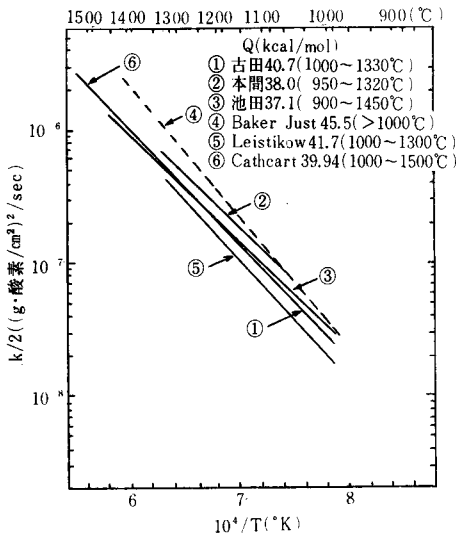
冷却材가 流出되면 연료봉은 除熱能力이 낮은 水蒸氣中에 노출되며 또한 燃料棒周圍의 壓力은 저하한다. 이로 인해 燃料被覆管은 온도가 상승하고 수증기와 反應해서 물러지는 동시에 機械的強度가 저하하기 때문에 燃料棒內外의 壓力差에 의해 破裂을 일으킬때도 있을 수 있다. 그러나 피복관의 용융이나 極端의 脆화가 없으면 연료집합체는 거의 원형을 유지하며 또한 피복관의 변형에 의한 流路閉鎖가 없으면 非常用爐心冷却水의 注入에 의해서 냉각되므로 多量の 核分裂生成物을 시설밖으로 방출하는 상태로는 되지 않는다. 이와 같은 考察에서 冷却材喪失事故時 核燃料의 舉動에 관해서는

(1) 水蒸氣와의 반응에 의해서 피복관의 延성이 어느정도 저하하는가(지르칼로이-水蒸氣反

〈그림3〉 지르칼로이-4의 水蒸氣中에서의 重量增加-時間曲線



〈그림4〉 지르칼로이-4 水蒸氣反應速度定數



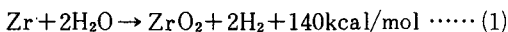
應에 의한 酸化脆化),

(2) 非常用爐心冷却水の 流路가 皮복관의 變형에 의해서 얼마만큼 감소하는가(皮복의 變형과 流路閉鎖)

등의 이해가 필요하게 된다.

4.1 지르칼로이-水蒸氣反應에 의한 酸化脆化

想定한 大破斷發生後 再冠水할때 까지 연료 집합체는 水蒸氣霧圍氣中에서 고온이 되어 지르칼로이-水蒸氣反應



이 進行한다. 이 反應의 速度則은 조건에 따라 變化하며, 하나의 速度式으로서 나타낼 수는 없다. 최근의 研究(그림3)에 의하면 反應의 초기에는 1,000°C 以下에서 3乘則, 1,000~1,600°C에서 放物線則을 나타내며, 反應의 進行과 함께 600~800°C 및 1,000°C에서는 3乘則에서 直線則으로, 850~950°C에서는 3乘則에서 放物線則으로 變한다. 近似的으로는 反應量 W(重量增, ZrO₂ 두께 등)와 時間 t의 사이에 放物線則

$$W^2 = kt \dots (2)$$

이 성립하는 것으로 하고, 反應速度定數 k를

$$k = k_0 \exp(-Q/RT) \dots (3)$$

으로 표시할 수 있다. 여기서 k₀는 定數, Q는 反應(1)의 活性化에너지, R은 氣體定數, T는 溫度(K)이다.

反應速度定數의 實測例를 그림4에 나타내었다. 지르칼로이-水蒸氣反應은 온도의 상승과 함께 指數函數의으로 증대하며 또 反應 그 자체가 發熱反應이기 때문에 正(+의 피드백효과가 작용한다. 그래서 高温下에서는 현저하게 反應의 進行이 가속된다. 安全評價上에서 反應速度를 크게 잡는 것은 安全側이므로 日本의 非常用爐心冷却系統의 性能評價指針에서는

$$W^2 = 33.3t \exp(-45,500/RT) \dots (4)$$

를 사용하도록 지시하고 있다.

高温에서 水증기와 反應한 지르칼로이 皮복관은 外表面에서 ZrO₂, 安定化 α-Zr相, prior β-相 등 3層으로 나누어진다. 이들중 ZrO₂와 安定化 α-Zr相은 무르고 皮복관의 延性에는 전혀 寄與하지 않는다. 또한 冷却材喪失事故時에 皮복관이 變형되어 파열하면 開口部로 물 또는 水증기가 侵入하여 破裂場所近傍의 内面에서도 지르칼로이-水증기反應에 의한 산화가 進行되므로 外面과 마찬가지로 反應이 進行한다고 가정하도록 日本의 指針에 정해져 있다.

冷却材喪失事故時 被覆管脆化에는 酸素吸收 뿐만아니라 水素吸收도 기여한다. 따라서 被

覆管脆化에 대한 許容限界를 정할때에는 이점도 고려해야 한다.

冷却材喪失事故에서 燃料集合體 損傷의 원인으로 急冷時에 생기는 熱衝擊力과 기계적인 힘이 동시에 작용한다고 생각된다. 기계적인 힘 중에서 최대의 원인이 되는 것은 再冠水時에 被覆管보다 먼저 냉각되는 支持格子 被覆管에 대한 拘束力이다. 그러나 皮복관의 변형이 커지고, 管의 두께가 얇아질 경우에도 現行 被覆管脆化에 대한 指針의 許容範圍(被覆管最高溫度 1,200°C 以下, 酸化量 15% 以下)에서는 拘束下의 急冷時에 皮복관의 파손이 일어나지 않는다고 추정되고 있다.

被覆管的 破損限界에 대해서는 再冠水時 冠水速度도 영향을 주는데, 冠水速度가 높으면 적은 酸化量으로 皮복관의 파손이 생긴다. 그러나 日本의 경우 現行指針의 허용범위내에서는 파손이 인정되지 않는다(그림5).

4.2 被覆의 變形과 流路閉鎖

냉각재상실사고시 변형이나 파열의 最大關心事는 流路閉鎖이다. 被覆이 변형되어 冷却水流路를 局所閉鎖하면 연료봉의 表面에서 熱傳達가 나빠져서 被覆이 파열될 우려가 생긴다.

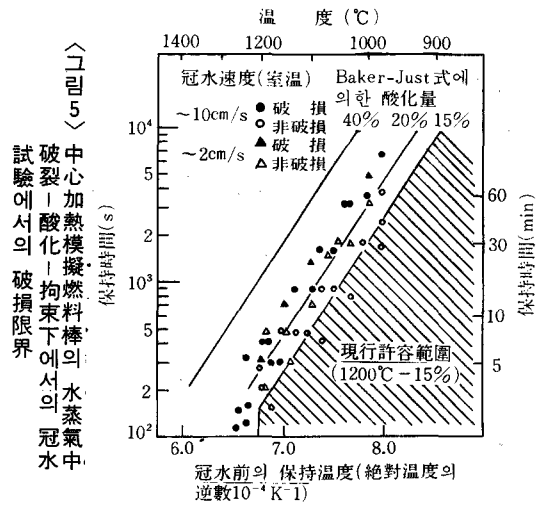
變形量에 가장 영향을 주는 因子는 皮복관 온도이다. 變形量과 온도의 사이에는 그림 6에서와 같은 관계가 있음이 발견되고 있다. 變形量과 온도와의 사이에는 대체적인 경향은 있으나, 實驗方法이나 조건에 따라 그 결과는 흩어진다. 또한 皮복관의 周方向溫度差도 전체의 變形量을 결정하는 중요한 인자이다. 즉, 온도차가 클 경우에는 작은 變形量에서 파열하며, 온도차가 작을 경우에는 큰 變形量에서 파열한다.

皮복관의 변형에 영향을 미치는 여러가지 요인을 바꾸는 시험결과에서 最大流路斷面減少率은 40~90%의 범위임이 발견되고 있다. 또 90%의 流路閉鎖가 있다고 하더라도 再冠水速度가 約2.5cm/sec以上이면 閉鎖場所 및 그 上·下

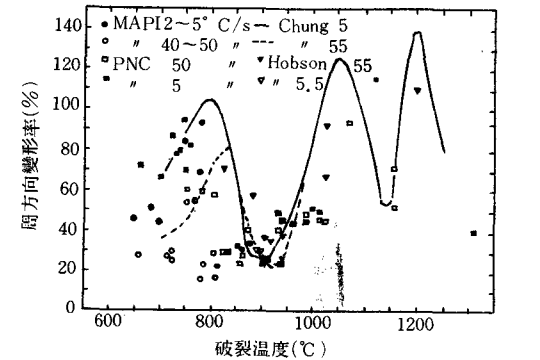
流에서 冷却効果는 거의 영향을 받지 않는다는 것도 밝혀져 있다.

5. 爐心損傷事故

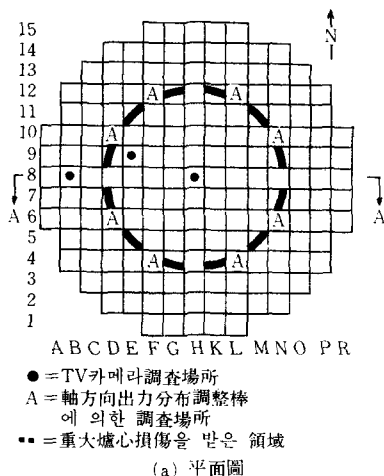
反應度投入事象, 出力-冷却不均衡 및 冷却材喪失事故는 안전평가 또는 立地評價를 위해 想定된 事故시나리오의 조건하에서 발생하는 異常 또는 事故이다. 한편 爐心損傷事故는 尙定된 事故시나리오를 넘는 사고로서 1979년 3월 TMI2號爐(電氣出力 90萬kW의 PWR)에서 발생한 사고에 의해서 현실의 것이 되었다. TMI事故는 現象으로 보아 냉각재상실사고임이 분명하다. 그러나 이 사고에서는 냉각재상실사고 후 爐心再冷却이 저해된 결과, 燃料破損이 진행



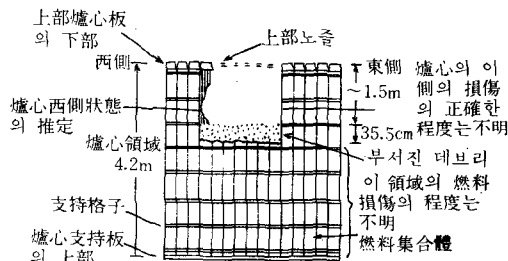
〈그림5〉 中心加熱模擬燃料棒의 破損限界



〈그림6〉 지르칼로이管的 內壓破裂變形率에 미치는 破裂溫도의 影響



〈그림7〉.TV카메라調査에 의해서 명백해진 TMI2號爐의 爐心損傷



(b) A-A의 斷面圖

되어 사고현상은 예상외의 방향으로 진전했다.

想定된 異常 및 事故에서는 現象이 爐心の 일부에 한정되는데 대해, 爐心損傷事故에서는 爐心全體가 심각한 조건에 노출되어 그 결과 다량의 연료가 파손되는 것이 특징이다.

TMI事故의 經過는 여러 報告에서 공포되고 있다. 또 TMI2號爐 爐心損傷의 狀態는 TV카메라관찰, 기타에 의해서 조사가 행해져서 상당한 사실이 명백해졌다. 조사결과를 그림 7에 나타내었다. 爐心中央部の 적어도 上部 約1.5m에 큰 空洞(void)이, 그 하부에 대체로 35.5cm의 破碎層(rubble bed, 瓦礫層)이 존재하며, 破碎層表面은 粒狀의 debris層(debris bed)으로 이루어지고 있다. 이들의 결과는 이전에 행해진 推定結果를 대체로 支持하고 있다.

즉, 급수펌프정지후 爐心水位는 爐心の 半分以下가 되어 거의 平衡狀態에 달했다. 그후 水蒸氣中에 露出하여 현저하게 高温이 된 연료집합체상부에서는 피복관의 산화가 현저하게 진행되었다. 酸化에 의해 脆化된 연료피복은 펌프起動에 의해서 水位가 급격하게 회복되었을 때의 熱衝擊에 의해서 破碎되어 물속에 남아있던 연료봉위에 落下集積하여 高温下에서 생성된 U-Zr-O 3元共晶體에 의해 一體化하여 破碎

層을 형성했다. 그리고 水素發生量이나 핵분열 생성물의 放出量에 지르칼로이의 50%가 산화했으며 또 피복의 상당한 비율이 변형과 파열에 의해 손상을 받았다고 추정되고 있다.

爐心損傷事故에 관한 연구에서 日本原子力研究所에서는

(1) 核燃料의 舉動(a:燃料의 融解와 再配置, b: 지르칼로이-水蒸氣反應, 지르칼로이-UO₂反應, c:debris形成)과 debris의 冷却可能性

(2) 水素의 舉動과 格納容器的 健全性

(3) 核分裂生成物의 舉動(a:高温燃料에서 부터 核分裂生成物의 방출, b:1次系統에서 核分裂生成物의 舉動, c:格納容器內의 核分裂生成物의 舉動

(4) 코드의 개발과 解析

등과 같이 분류하여 추진하고 있다.

관련되는 諸現象은 個別로 實驗에 의해서 해명되어 가고 있으며, 얻어진 데이터는 爐心損傷事故의 평가를 위한 계산코드에 신속하게 받아들여지고 있다. 爐心損傷事故의 경과에 있어서는 많은 현상이 복잡하게 얽혀있다. 따라서 個個의 현상을 충분히 규정된 조건하에서 해명하는 것도 중요하나, 실제 사고조건에서 現象相互間의 연휴에 대해서도 이해를 깊게 해둘 필요가 있다.