

Hotcell Examination of TMI-2 Debris (1)

이기순, 김은가, 정양홍, 유병옥, 서항석, 박대규, 안상복, 주용선, 정경환, 김태국
한국원자력연구소

305-353 대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

TMI-2 사고는 2차냉각계통의 이상을 발단으로 해서 노심이 용융되는 중대사고로 진행하였는데, 노심의 손상이 실제 예상한 것보다 심하게 나타났다. 따라서 이 사고를 계기로 하여 원자로 안전성에 대해 큰 문제점이 제기되어 안전성의 재평가의 필요성이 크게 대두되었다. 이와 같은 필요성에 따라 TMI-2 원자로에서 채취한 노심재 시료에 대한 광범위한 핫셀시험이 수행되었는데, 이 연구에서는 노심 상부에서 채취한 데브리시 시료에 대한 핫셀시험을 수행하여 그 결과를 검토 분석하였다.

1. 서 론

TMI-2 사고는 2차냉각계통의 이상으로 터빈이 정지되면서 시작되어 노심이 용융(melting)되는 중대 노심손상 사고로 진행하였다[1~3]. 즉, 복수기의 이상으로 2차냉각계의 냉각기능이 급격하게 저하되어 1차냉각재의 온도가 상승하게 되었으며, 이에 따라 로내압력이 허용치 이상으로 증가되어 압력용기 안전발브(reactor operating relief valve)가 개방되었는데, 원자로의 긴급정지로 로내압력이 허용치 이하로 감소하였음에도 불구하고 안전발브는 폐쇄되지 않고 그대로 개방상태로 있어 냉각재의 유출은 계속되어 핵연료체가 냉각재로부터 노출하게 되었다[4]. 이에 따라 감마 붕괴열에 의해 핵연료의 온도가 상승하기 시작하여 질르칼로이 피복관에서 극렬한 산화반응이 일어날 수 있는 온도까지 상승하였으며, 질르칼로이의 발열 산화반응에 의해 피복관이 용융되었다. 그리고 용융된 피복관은 연료봉을 따라 흘러내리면서 냉각재와 접하는 부위에서 응고되어 냉각재의 흐름을 막아 노심 제열을 방해하므로 붕괴된 노심재에서 감마 발열에 의해 발생하는 열을 충분히 제열하지 못했다. 그 결과 노심 중앙부는 냉각재속에 잠겨있음에도 불구하고 계속 가열되어 노심 구조재의 약 35%가 냉각재속에서 용융된 상태로 존재하였으며, 용융된 노심재를 둘러싸고 있던 외피(crust)의 파손도 일어나 중국에는 약 16ton의 용융 노심재가 압력용기 하부로 떨어지는 등 노심의 손상이 중대 노심사고시에 일어날 것으로 예상하였던 것보다 심하게 나타났다. 그림 1에 사고후의 노심 상태가 있다[5].

이 사고로 TMI-2원자로에 장전된 177개의 핵연료집합체 가운데 비교적 손상을 적게 받아 연

료봉의 절손이 없는 집합체는 노심 가장자리에 위치한 2개뿐이며, 그 외의 집합체에서는 연료봉의 절손 손상이 일어났는데, 특히 장전된 집합체의 4분의 3에 해당하는 133개 집합체는 모든 연료봉과 안내관이 절손되어 집합체가 두 조각으로 파손되었다[6]. TMI-2사고는 상용 가압경수로에서 일어난 가장 심각한 사고로는 중대노심 사고시에 일어나는 노심 손상에 관한 자료를 얻을 수 있는 유일한 기회를 제공하고 있다. 그러므로 중대 노심손상 사고시에 일어나는 노심 재료의 거동에 관한 정보를 얻기 위해 손상 노심에서 채취한 시료에 대한 광범위한 핫셀시험이 요구되는데, 본 연구에서는 손상노심 상부에서 채취한 데브리시 시료에 대한 핫셀시험을 수행하여 그 결과를 검토 분석하였다.

2. 시험방법

핫셀시험에 사용한 TMI-2 데브리시는 노심 상부 데브리시 층에서 채취한 것으로 크기는 약 15mm의 것으로 모양이 그림 2에 있다. 이 데브리시는 EPMA로 성분을 분석하기 위하여 우선 레진으로 clod mounting하였으며, 그 다음 200, 400 및 600 grid의 emery paper로 조연마하였다. 이렇게 조연마한 시료는 다시 15 μ 및 1 μ 의 diamond paste로 미세 연마한 다음 가볍게 핵연료 애칭액으로 애칭하였다. 이와 같이 처리한 TMI-2 데브리시 시료는 우선 핫셀 현미경으로 전체적으로 조직을 검사하였으며, 그 다음 차폐형 EPMA에서 반사전자상(backscattered electron image, BSE) 또는 2차전자상(secondary electron image, SE)으로 상세하게 조직을 관찰하였다. 그 다음 WDS로 전체적인 조성 상태를 정성적으로 분석한 다음 중대 노심사고시 핵연료를 포함한 노심 구조재의 거동에 대해 중요한 자료를 획득할 수 있는 부위를 선정하여 상세하게 정성 분석을 하였다.

3. 결과 및 검토

핫셀 현미경으로 촬영한 데브리시의 거시 조직사진이 그림 3에 있다. 그림에서 알 수 있듯이 이 데브리시는 한 종류의 노심재로 구성되어 있는 것이 아닌 것으로 판단되어 개략적인 조성을 파악하기 위하여 여러 구역으로 나누어 정성분석을 하였다. 그 결과 이 데브리시는 대부분이 제어봉(control rod)과 연료집합체 구조 재료인 스테인레스 강으로 구성된 것을 알았으며 주위부분에 핵연료가 부착된 것을 알 수 있었다.

그림 3의 "A"부위와 "B"부위가 U-Zr-O 산화물인지 또는 금속인지를 확인하기 위해 EPMA 정량 분석을 하여 본 결과 이 부위는 우라늄 산화물은 아니고 금속인 것을 확인하였는데, 성분은 Ag가 주성분이고 그 외에 In 과 Cd가 합금원소로 포함되어 있는 것을 확인하였다. 따라서 이 부위는 노심 용해시에 Ag-In-Cd 제어봉이 용융(melting)된 것으로 정량 분석한 결과에 의하면 Ag성분이 80wt%를 초과하였다. 이는 Ag-In-Cd 제어봉의 제작시 조성이 80wt%Ag-15wt%In-5wt%Cd임을 고려해 보면 Ag가 제작시 조성보다 높은데, 이는 다음과 같은 두 가지 이유에 의해 Ag가 표준조성보다 높은 것으로 생각된다. Ag의 조성이 높아진 첫째 이유는 Ag, Cd, In, In 과 Cd가 Ag보다 산소와의 친화력이 좋으므로 즉 산화가 잘 일어나며, 둘째 이유로는 비등점이

Ag가 2423K인데 비해 1040K 그리고 In은 2286K로 Ag에 비해 낮으므로 용융중에 Cd나 In의 휘발이 잘 일어나기 때문으로 생각된다.

그림 3은 그림 2의 "C"부위로, 그림에서 표시한 부분을 정량 분석한 결과가 표 1에 있다. 표에서 보는 바와 같이 이 부위에는 핵연료 성분인 우라늄과 산소가 주성분이고 그 외에 피복관 성분이 질트코늄이 일부 포함되어 있었다. 이러한 분석 결과로 이 부위는 핵연료가 금속 데브리스에 부착되어 있는 생긴 것을 알 수 있다. 그리고 UO_2 핵연료의 조성이 88.15wt%U-11.85wt%O인데 비해 이 부위의 조성은 대부분에서 우라늄이 85wt%이하이며, 산소는 많은 경우에 15wt% 이상 함유되어 있으며, 특수한 경우를 제외하면 Zr도 2~5wt% 함유되어 있었다. 이러한 결과를 보면 이 데브리스에 붙어있는 핵연료는 UO_2 나 U-Zr-O 산화물보다는 (U,Zr) O_2 산화물에 가까운 것을 알 수 있다. 따라서 (U,Zr) O_2 의 용융점이 2810K[8]인 것을 생각하면 이 연료 부위는 TMI-2 사고시에 2800K 정도까지는 온도가 상승하였다고 판단할 수 있다.

그림 4는 그림 2의 "D"부위의 보이드(void)를 중심으로 반사전자상(BSE)으로 관찰한 사진이며 그림 5는 그림 4의 "G"부위, 즉 보이드의 내면을 2차전자상으로 관찰한 사진이다. 그리고 그림 6은 그림 2의 "E"부위를 반사전자상으로 관찰한 사진으로 용융되어 생성된 것을 보여준다. 그리고 많은 미세한 보이드가 있는데, 이러한 보이드는 용융 상태에서 냉각될 때 노심내의 수증기 분위기가 영향을 준 것으로 보인다. 이 부위의 주성분은 Fe, Cr, Ni로 핵연료집합체의 상부 및 하부노즐과 지지격자 그리고 제어봉 안내관중에서 용해되어 생성된 것으로 보인다.

4. 결 론

TMI-2 노심 상부에서 채취한 데브리스를 핫셀시험을 수행하였는데 주요 결과를 요약해 보면 다음과 같다.

- 1) 이 데브리스의 대부분은 스테인레스 강과 그리고 제어봉 이 용융되어 생성되었으며 주변에는 핵연료가 부착되어 있다.
- 2) 데브리스와 결합해 있는 핵연료의 조성은 UO_2 가 아니고 (U, Zr) O_2 에 가까운 조성을 갖고 있는 것으로 보아 사고시에 최소한 2810K 부근까지는 도달한 것으로 보인다.
- 3) 피복관의 합금원소와 제어봉의 합금원소가 데브리스 여러 위치에서 검출되는 것으로 보아 핵연료봉과 구조재는 사고시 활발한 상호반응이 있었다.

참 고 문 헌

- [1] 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)
- [2] 이기순, 노심손상 상태로 분석한 TMI-2 원자로 사고, 원자력학회지, 20, 265(1988)
- [3] EPRI, Nuclear Safety Analysis Center, "Analysis of Three Mile Island-Unit 2 Accident" NASC-1(1979)

- [4] EPRI, Nuclear Safety Analysis Center, "Interpretation of TMI-2 Instrument Data", NASC-28(1980)
- [5] J. Broughton, Proceedings of the First International Information Meeting on the TMI-2 Accident (S. Langer ed.), CONF-8510166
- [6] S. M. Jensen, D. W. Akers, R. W. Garner and G. S. Roybol, "Examination of the TMI-2 Core Distinct Components", GEND-INF-082(1987)
- [7] K. F. Smith, Reactor Handbook, ed. by C. R. Tipton Jr., Vol 2, Interscience Publ., NY, 1960
- [8] 이기순, "핵연료개론" 출판예정

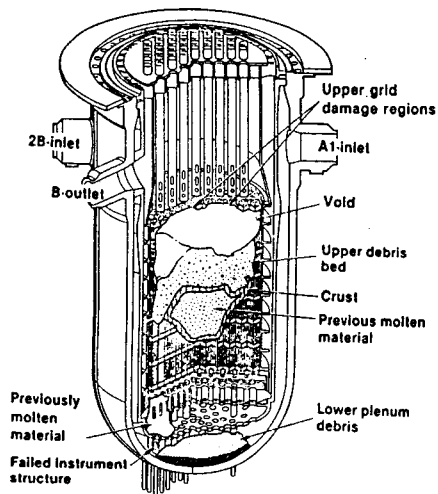


그림 1. 사고후의 TMI-2 노심손상 상태



그림 2. TMI-2 노심 상부 데브리층에서 채취한 데브리

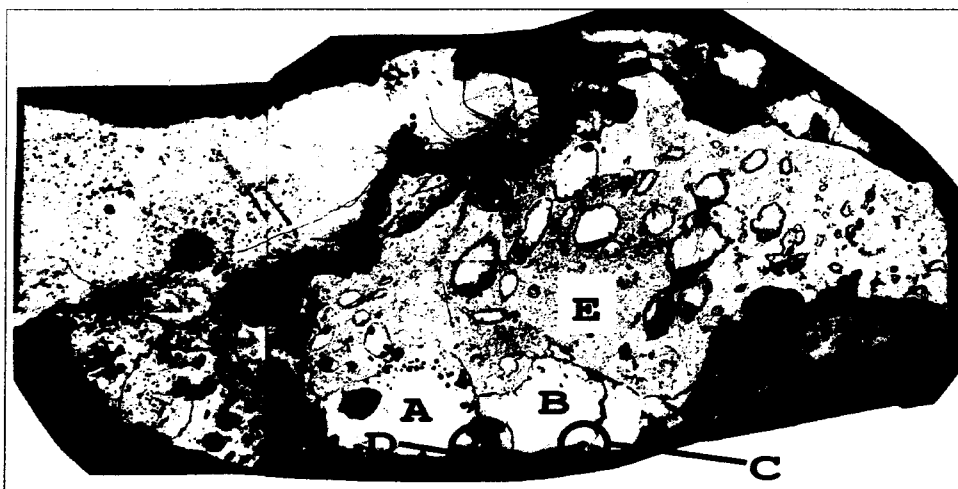


그림 3. 데브리스 단면 거시조직 사진

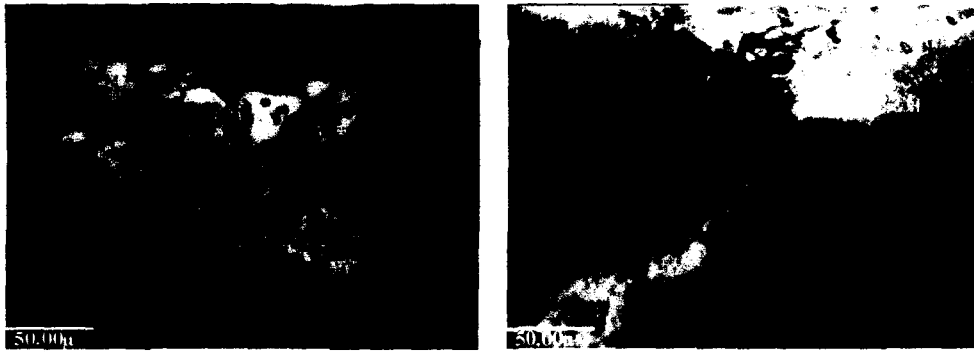


그림 4. 그림 3의 "C"구역 반사전자상(BSE)

표 1. 그림 4에 표시한 Line 1, Line 2 그리고 Line 3의 각 위치에서의 정량분석

Line 1 (wt%)					Line 2 (wt%)					Line 3 (wt%)				
위치	O	Zr	U	Ag	위치	O	Zr	U	Ag	위치	O	Zr	U	Ag
1	16.32	9.33	34.09	2.95	1	13.51	1.72	84.94	0.34	1	-	0.011	-	87.87
2	14.54	1.84	83.84	0.22	2	13.18	4.58	81.75	0.17	2	0.38	0.59	-	66.4
3	13.79	1.25	78.35	0.22	3	13.49	2.01	85.45	0.22	3	15.59	2.72	82.91	-
4	38.45	27.64	3.55	-	4	5.62	0.14	10.36	-	4	14.29	1.83	82.31	0.01
5	24.39	5.43	52.19	0.02	5	7.12	3.75	22.41	0.26	5	12.46	4.576	83.72	-
6	13.11	2.08	83.65	0.18	6	15.88	40.68	30.91	4.16	6	19.01	72.16	1.50	-
7	24.71	4.8	51.74	0.08	7	13.17	1.80	87.85	0.19	7	-	-	-	0.92
8	22.94	42.91	18.73	-	8	13.38	6.31	81.42	0.18	8	-	0.08	-	83.17
9	14.29	1.89	83.82	0.14	9	13.51	35.43	53.60	0.07	9	-	0.02	-	82.26
10	14.14	24.60	61.94	0.05	10	12.74	6.01	81.74	0.08	10	-	0.7	-	79.79

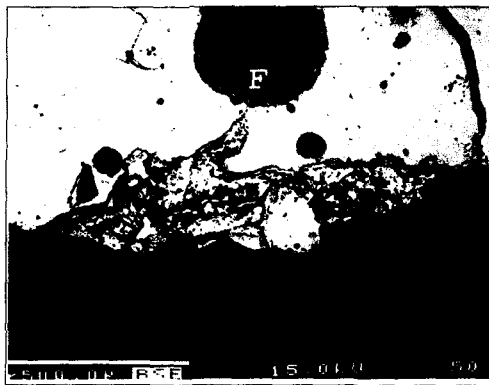


그림 5. 그림 3의 "D"구역 반사전자상(BSE)

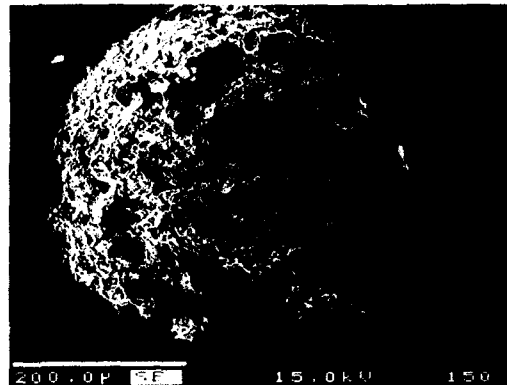


그림 6. 그림 5의 "F"구역 2차전자상(SE)



그림 7. 그림 3의 "E" 구역 반사전자상(BSE)