

사용후핵연료 집합체 캐스크 감온, 감압 공정의
방사성 액체폐기물 처리 대한 연구

Study on the Radioactive Liquid Waste Treatment of Cooling and
Decompression Process of Spent Fuel Assembly Cask

손영준, 전용범, 김은가, 엄성호, 권형문, 민덕기, 양송열,
이은표, 이형권 황용하, 서항석, 김길수,
한국원자력연구소

요 약

조사후시험시설내에는 사용후핵연료 집합체의 취급을 위하여 감온, 감압 공정이 있다. 이 공정에는 3가지 공정으로 분류하는데 첫째, 사용후핵연료 집합체 캐스크를 제염하기 위한 제염시키는 공정, 둘째, 사용후핵연료 집합체 내의 붕괴열에 의해 온도, 압력이 상승된 폐액을 감온, 감압 시키기 위한 냉각 공정 셋째, 사용후핵연료 피폭관 결합에 의해 발생되어 캐스크 내에 존재하는 불용성 입자를 여과기를 통해 여과하는 공정으로 되어 있다. 본 보고서에서는 감온, 감압 공정과 관련하여 현재까지 수행된 기술검토와 사용후핵연료 집합체에 의한 감온, 감압의 실용적 이론에 관해 고찰하였고 또한 각종 시험을 통한 시운전 내용과 실제 원자력발전소로부터 수송해온 사용후핵연료 집합체 J-44, K-23 대한 감온, 감압 결과들을 상세히 기술하였다. 본 보고서는 향후 지속적인 가동과 도출되지 않은 문제점 등을 계속 보완하여, 원만하고 안전한 정상조업을 수행하는데 효과적으로 이용될 수 있을 것으로 본다.

Abstract

A temperature- and pressure-reducing process is utilized to handle the spent fuel assembly in the post-irradiation examination facility. This process includes three separated unit processes. First one is the decontamination process to clean the spent fuel assembly casks. The second process is the temperature-reducing process to reduce the temperature elevated by decay process in the spent fuel assembly. The third process is the filtration process to remove insoluble particles existed in the casks using filters.

Up-to-date technologies as well as practical theories related to the temperature- and pressure-reducing process is reviewed in this report. The test-operation process for various tests and the test results of the temperature- and pressure-reducing process for J-44 and K-23 spent fuel assemblies are also described in detail. This report must be effectively used for the normal operation of the facility with the awareness of unprecedented problems which could occur by continuing operation of the PIE facility.

1. 서론

원자력발전소로부터 수송해온 사용후핵연료 집합체가 담겨있는 수송용기는 고준위방사성 물질을 함유하는 고온, 고압의 상태로 본 시설에 운반되어진다. 이 수송용기가 사용후핵연료 저장수조에 하역하기 전에 조사후시험시설내 설치된 감온, 감압계통에서 고준위방사성 물질을 제거하여 용기 자체의 내부방사성 물질로 인한 외부 피폭을 줄여야하며 사용후핵연료 집합체의 결함에 의한 붕괴 열로 상승된 온도와 압력을 감온, 감압시켜야한다. 조사후시험시설의 핵연료 저장수조에는 저장되어있는 사용후핵연료 집합체는 J-44와 K-23 2개가 저장되어있다. J-44는 1993년도 고리1호기에서 K-23은 2001년도 영광 2호기에서 수송하여 저장되어 있다. 두개의 사용후핵연료 집합체에 대한 감온, 감압 시험을 수행하여 그 결과들을 비교 평가하였으며 또한 본 보고서에는 사용후핵연료 집합체의 감온, 감압 공정의 전반적인 운전 경험에 의한 수집 데이터 및 운전 기술을 보고하고자 한다.

2. 사용후핵연료 집합체의 감온, 감압공정의 구성

조사후 시험시설내의 사용후 핵연료집합체의 감온, 감압 공정의 관리의 기술적인 요구들은 고준위 방사성 물질들을 제거하는 필터정화계통, 환기계통, 감온,감압시키기위한 냉각계통이 포함된다. 사용후 핵연료집합체의 감온, 감압 공정의 냉각계통은 저장되어 있는 사용후 핵연료 집합체에서 생성되는 붕괴열을 제거시켜 사용후 핵연료 저장조에 저장 전에 수온을 미리 설정된 제한치 이내로 유지시킨다. 사용후 사용후 핵연료집합체의 감온, 감압 공정의 필터정화계통은 고준위 방사성 물질들의 불순물을 제거하여 용기 자체의 내부방사성 물질로 인한 외부 피폭을 줄여야한다. 그리고 조사후 시험시설내의 사용후 핵연료집합체의 감온, 감압 공정의 공정도는 그림 1에 나타내었다.

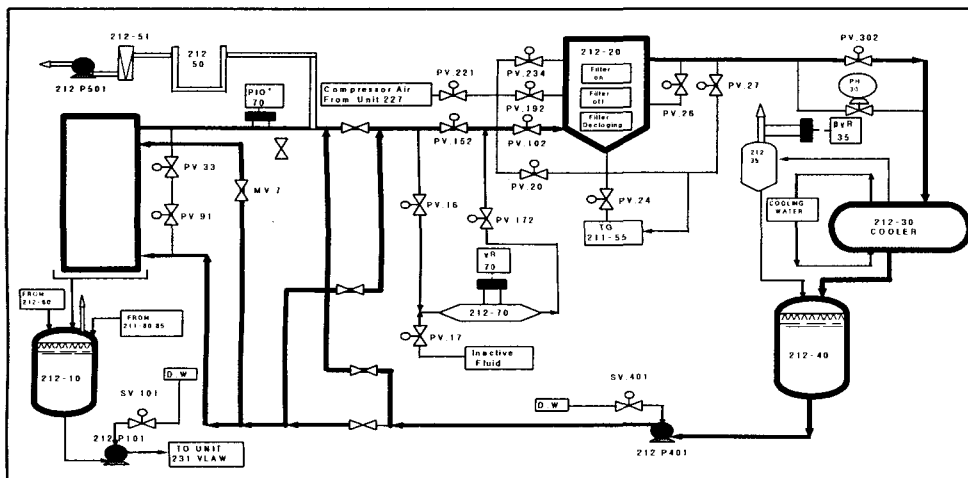


그림 1. 조사후시험시설의 감온, 감압공정 공정도

3. 사용후핵연료 감온, 감압 공정의 운전경험

조사후시험시설의 핵연료 저장수조에는 저장되어있는 사용후핵연료 집합체는 J-44와 K-23 2개가 저장되어있다. J-44는 1993년도 고리1호기에서 K-23은 2001년도 영광 2호기에서 수송하여 저장되어 있다. 이러한 사용후핵연료 집합체는 고온, 고압의 상태로 운반되어 저장수조에 하역 전에 전처리 과정인 감온, 감압 공정을 거치게 된다. 본 보고서에는 사용후핵연료 집합체의 감온, 감압 공정의 전반적인 운전 경험에 의한 수집 데이터 및 운전 기술을 보고하고자 한다.

가) 운전조건

표 7과 같은 운전조건하에서 감온, 감압 공정을 운전하였으며 사용후핵연료 집합체 내에 함유한 방사능들은 본 공정에 설치된 Unit 212-20 카트리리지형 필터를 이용하여 제거하였으며, 감온, 감압은 Unit 212-30 열교환기를 사용하였다. 운전기간 중에 사용후핵연료 집합체의 방사선량을 기준치는 200mR/hr로 정하였으며, 일정시간을 정하여 본공정

표 1. 감온, 감압 공정의 운전조건

운전온도	25℃
운전시간	8hr/day
운전기간	J-44 : 1993년도
	K-23 : 2002년도
처리유량	15 m ³ /hr
사용된 필터형태	카트리리지형 금속 필터망
분석항목	방사선량을, 캐스크 내,외부온도, 압력

에 설치된 RMS 방사선량을 측정기를 이용하여 측정하였다.그리고 온도 기준치는 25로 정하고, 감압 기준치는 5bar로 정하여 운전 하였다.

나) J-44, K-23 사용후핵연료 집합체 캐스크 외부온도 측정결과

조사후시험시설의 사용후핵연료 집합체 J-44의 캐스크 외부온도 측정지점 및결과를 그림 14에 나타내었으며, K-23의 외부온도 측정지점 및 결과는 그림 15에 나타나있다. 두 개 집합체 외부온도 측정은 캐스크 상부(4개 지점: ⑥,⑦,⑧,⑨), 캐스크 중간(5개 지점 : ⑩,⑪,⑫,⑬,⑭), 캐스크 하부(5개 지점 : ①,②,③,④,⑤)로 나누어 측정하였다. 측정시간은 8시간 간격으로 총 4회 측정 하였으며 측정기기는 로 사용했으며 측정 부위별 온도 센서를 부착하여 측정 결과를 얻었다. J-44의 캐스크 외부 최저온도는 34.7℃, 최고 온도 지점은 61.6℃로 나타났으며, K-23 캐스크 외부 최저온도는 44.2℃, 최고 온도 지점은 54.7℃로 나타났다. J-44 사용후핵연료 집합체 캐스크 측정 지점별 외부 평균온도 분포는 상부지점(4개지점) : 51.88℃, 중간지점(5개 지점) : 59.03℃, 하부지점(5개 지점) : 42.56℃로 나타났으며 캐스크 중심 부분과 하부 지점 사이의 평균 온도차는 16.47℃의 차이가 나타 났다. K-23 측정 지점별 외부 평균온도 분포는 상부지점(4개지점) : 44.13℃, 중간지점(5개 지점) : 53.33℃, 하부지점(5개 지점) : 47.65℃로 나타났으며 캐스크 중심 부분과 상부 지점 사이의 평균 온도차는 9.20℃의 차이가 나타 났다. J-44와 K-23의 평균 최대 온도차는 J-44가 K-23에 비해 평균 5.70℃의 평균온도가 상승하였다. 이는 집합체 결함 정도에 따른 붕괴열에 의한 기인한 것으로 본다. J-44, K-23의 지점별 온도 분포를 그림 16, 17에 그래프로 나타내었다.

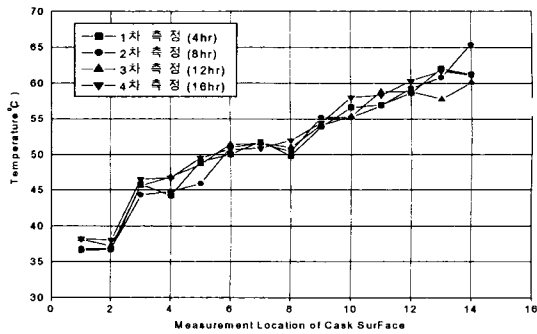
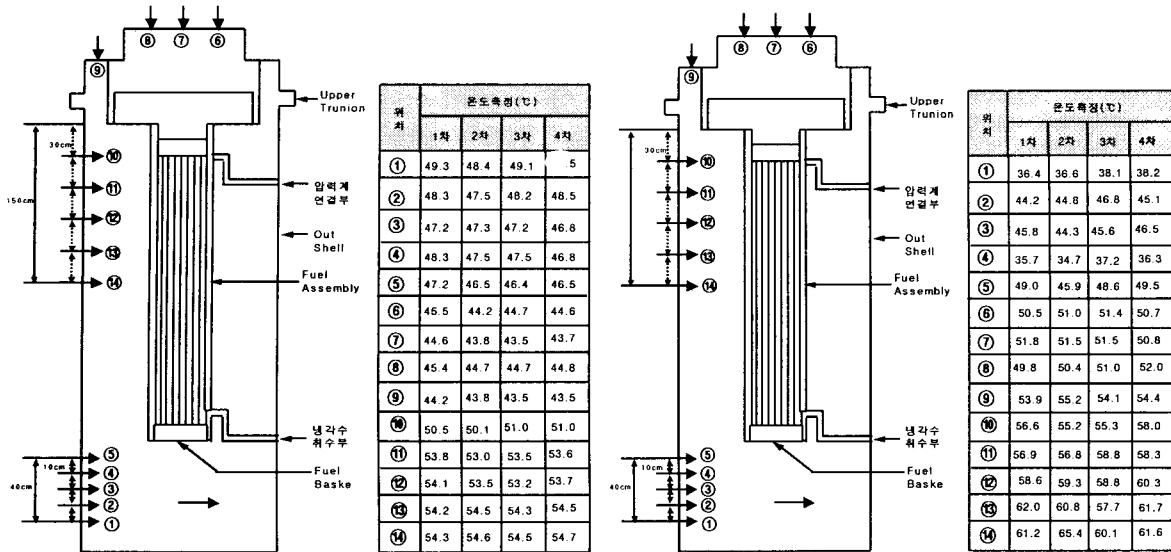


그림 2. 사용후핵연료 집합체 캐스크의 외부온도 측정결과(J-44)

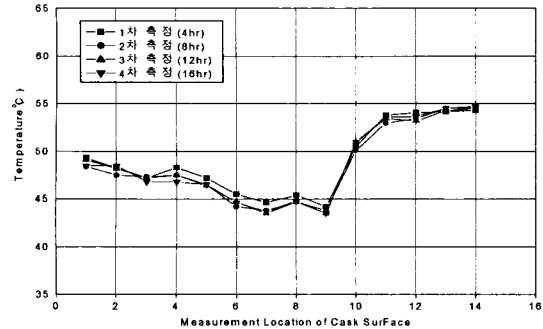


그림 3. 사용후핵연료 집합체 캐스크의 외부온도 측정결과(K-23)

다) J-44와 K-23 사용후핵연료 집합체 수송용기의 감온, 감압 운전결과

핵연료를 담은 수송용기가 원자력발전소로부터 수송되어 왔을 때 수송용기 내부의 고온, 고압 상태를 감온, 감압 시키기 위한 공정으로 본 시설에서는 J-44와 K-23의 수송용기에 대한 감온, 감압 운전결과를 아래에 나타내었다. 세밀한 운전 방법은 본 보고서 뒤편에 부록으로 첨부해 두었다. J-44와 K-23의 두 개 집합체에 대한 감온, 감압 운전 결과를 표 8, 9에 나타내었으며, 이들 결과에 대한 그림을 그림 18, 19에 나타내었다. J-44에 대한 감온, 감압 운전에서는 필터 내부 온도(TI-20), 폐액탱크 내부 온도(TI-40), 냉각수 입구 온도(Tx-30.1), 냉각수 출구 온도(Tx-30.2)에 의한 온도 결과를 점검하였으며 압력은(PIO⁻-70)에 의하여 1분 간격으로 점검하였다. 수송용기 내부온도를 표시하는 TI-20의 경우에 최초온도는 44.5°C로 나타났으며 20분 후에 28°C로 감온 되었으며, 냉각수 입구온도 최초온도는 27°C로 나타났으며 20분 후에 24°C, 냉각수 출구온도 최초온도는 26°C로 나타났으며 20분 후에 23°C로 냉각수 계통의 온도 변화는 크게 나타나지 않았다. 이는 본 시설에 설치되어 있는 냉각시스템이 이과식 냉각수계 형태로 되어 있기 때문에 열교환 장치를 단 1회 통과한 냉각수가 외부로 바로 배출되기 때문에 온도차가 거의 없는 것으로 판단된다. 감압 운전은 PIO⁻-70에 의하여 점검 했으며 최초압력이 3.7bar에서 0.2bar까지 감압되었다. K-23에 대

한 감온, 감압 운전도같은 조건하에 운전되었으며, TI-20의 경우에 최초온도는 28.5℃로 나타났으며 20분 후에 25.3℃로 감온 되었으며, 냉각수 입구온도 최초온도는 25℃로 나타났으며 20분 후에 23℃, 냉각수 출구온도 최초온도는 24℃로 나타났으며 20분 후에 20℃로 냉각수 계통의 온도 변화는 크게 나타나지 않았다. 감압 운전결과는 최초압력이 1.8bar에서 0.2bar까지 감압되었다. J-44와 K-23의 두 개 집합체에 대한 감온, 감압 운전 결과에 따르면 수송용기의 최초 내부온도는 J-44가 44.5℃이고 K-23이 28.5℃로 나타났으며 최초 내부압력은 J-44가 3.7bar, K-23이 1.8bar로 나타났다. 두 개의 집합체를 비교했을 때 온도는 J-44가 K-23에 비해 16℃가 더 상승했으며 압력은 1.8bar 더 높은 것으로 나타났다. 이는 수송용기 내부에 담겨있는 핵연료 집합체의 결합에 의한 차이인 것으로 판단된다.

표 2. 감온, 감압 공정의 온도와 압력 변화(J-44)

Time (min)	T1 20	T1 40	Tx 30.1	Tx 30.2	PIQ 70
0 (15:20)	(T.C:℃)	(T.C:℃)	(T.C:℃)	(T.C:℃)	(P.l:bar)
5	44.5	40.4	27	26	3.7
6	43.1	37.1	26	25	3.6
7	41.6	36.2	25	24	3.0
8	40.0	35.5	24	23	2.5
9	38.7	32.6	24	23	2.4
10	37.5	31.3	24	23	2.3
11	36.4	30.6	24	23	2.0
12	35.3	30.3	24	23	1.8
13	34.1	30.2	24	23	1.7
14	33.2	29.3	24	23	1.4
15	31.9	28.2	24	23	1.0
16	31.2	27.8	24	23	0.6
17	30.3	27.5	24	23	0.4
18	27.4	26.5	24	23	0.3
19	28.7	25.9	24	23	0.3
20	28.0	25.8	24	23	0.2

표 3. 감온, 감압 공정의 온도와 압력 변화(K-23)

Time (min)	T1 20	T1 40	Tx 30.1	Tx 30.2	PIQ 70
0 (15:20)	(T.C:℃)	(T.C:℃)	(T.C:℃)	(T.C:℃)	(P.l:bar)
5	28.5	23.5	25	24	1.8
6	28.4	23.4	24	23	1.7
7	28.3	23.3	23	20	1.6
8	28.1	22.9	23	20	1.4
9	28.0	22.5	23	20	1.2
10	27.9	22.2	23	20	1.1
11	27.5	21.4	23	20	1
12	27.0	21.0	23	20	1
13	26.1	20.5	23	20	0.9
14	26.0	20.5	23	20	0.8
15	25.9	20.5	23	20	0.7
16	25.9	20.5	23	20	0.6
17	25.4	20.5	23	20	0.5
18	25.3	20.5	23	20	0.4
19	25.3	20.5	23	20	0.2
20	25.3	20.5	23	20	0

FLOWRATE OF COOLANT WATER : 15m³/h
 FLOWRATE OF PROCESS WATER : 15m³/h
 INVENTORY OF CAVITY WATER : 230 L
 * Value of L140 When Pump 401 is Working : 50% (1220 L)
 * Value of L140 When Pump 401 is not Working : 60% (1450 L)

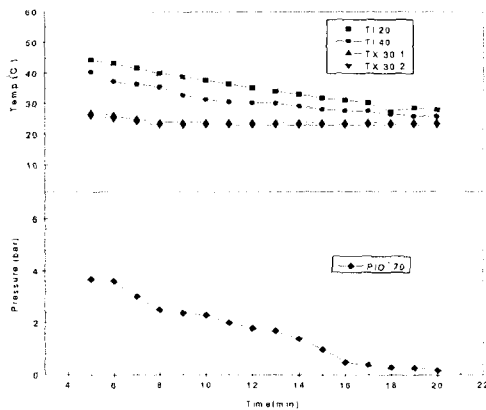


그림 4. 감온, 감압 공정의 온도와 압력 변화(J-44)

FLOWRATE OF COOLANT WATER : 15m³/h
 FLOWRATE OF PROCESS WATER : 15m³/h
 INVENTORY OF CAVITY WATER : 230 L
 * Value of L140 When Pump 401 is Working : 50% (1220 L)
 * Value of L140 When Pump 401 is not Working : 60% (1450 L)

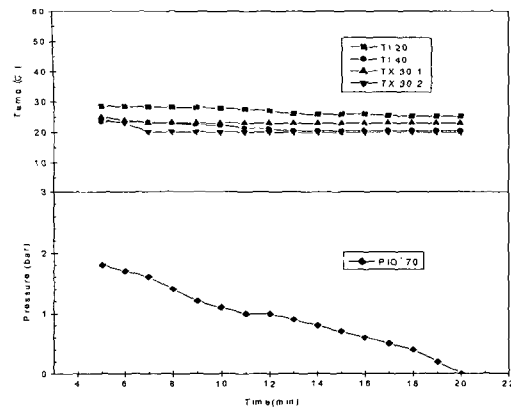


그림 5. 감온, 감압 공정의 온도와 압력 변화(K-23)

라) J-44와 K-23 사용후핵연료 집합체 수송용기 내의 방사선량을 측정결과

J-44, K-23의 사용후핵연료 집합체 수송용기 내의 방사성 액체의 방사선선량율은 본 공정에

설치된 RMS 장치에 부착된 v-Monitor로 필터의 압력은 콘트롤 패널에 부착된 압력기록계로 측정 하였으며, 측정결과를 표 10과 그림 20에 나타내었다. 측정시간은 5분 간격으로 측정 하였으며, 여기에서 필터의 압력이 5bar 이상이되면 이미 필터에 오염물질이 흡착이 다된 것을 의미하며 이 때에는 필터를 탈착 시켜 다시 운전을 하여야한다. 따라서 그림 에 나타낸 것과 같이 두 집합체 대하여 방사선량율이 저감될수록 필터의 압력은 점차 증가하는 현상을 볼 수 있다. 그리고 표 에 볼수 있듯이 J-44의 집합체의 경우는 최초방사선량율이 1650(mR/hr)으로 나타났고 K-23은 246(mR/hr)로 나타났다. J-44가 K-23에 비해 1404(mR/hr) 더 높은 방사선량율이 측정되었으며 이는 J-44는 결함이 있는 집합체이며 K-23은 결함이 없는 집합체이기 때문인 것으로 판단된다. 방사선을 감소현상은 J-44의 경우는 1시간 운전후 300(mR/hr) 까지 방사선량율이 감소하였고 K-23의 경우는 76(mR/hr) 까지 방사선량율이 감소하는 현상이 나타났다. 그리고 방사선량율을 낮추기 위한 정화 처리용 필터의 최초 압력은 J-44가 1.2(bar), K-23이 0.7(bar)로 나타났으며 최종 운전 종료시 필터의 압력은 J-44가 6.0(bar), K-23이 4.2(bar)로 나타났으며 운전 종료후 필터의 탈작공정 운전 절차에 따라 필터의 탈착을 실시 하였으며 필터 오염에 대한 안전을 고려하여 필터 제염 작업도 병행하여 실시하였다.

표 4. 사용후핵연료 집합체 수송용기 내의 방사선량율 측정결과표(J-44, K-23)

Time (min)	Cask 내부 방사능 측정치 (mR/hr)		dPIA+20 (Filter Pressure) (bar)	Vessel-40 Water Level (%)
	v-Detector (상부)	v-Detector (하부)		
5	1650	1040	0	54
10	890	850	0	54
15	850	850	2	53
20	400	470	3	53
25	350	350	4	53
30	190	200	5	53
35	180	180	6	53
40	250	260	7	53
45	270	300	10	53
50	300	320	12	53

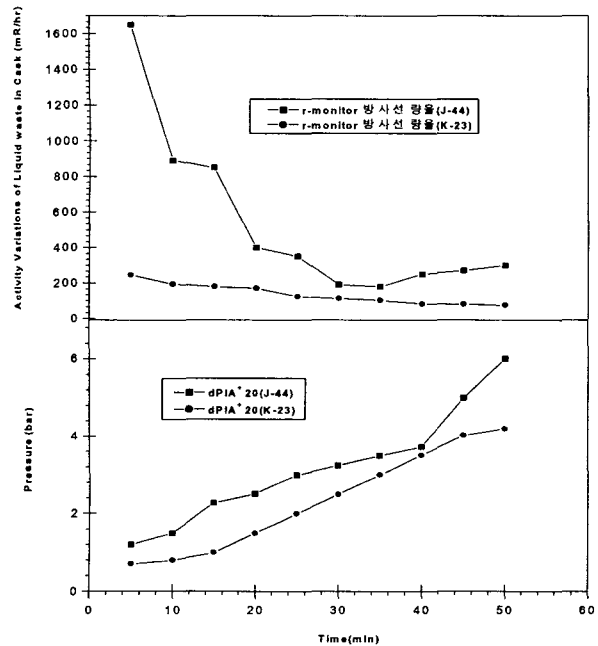


그림6. 사용후핵연료 집합체 수송용기 내의 방사선량율 측정결과(J-44,K-23)

제4장 결론

1. 조사후시험시설내 사용후핵연료 집합체 캐스크의 감온, 감압 운전 경험

가) 사용후핵연료 집합체 캐스크 외부온도 측정지점 및 결과(J-44, K-23)

두 집합체에 대해서 캐스크 외부온도 측정을 수행하였으며 측정지점은 캐스크 상부, 중앙,

하부지점으로 크게 3부분으로 나누어 측정하였다. J-44의 캐스크 외부 최저 온도는 34.7℃, 최고 온도는 61.6℃로 나타났으며 K-23의 캐스크 외부 최저 온도는 34.7℃, 최고 온도는 61.6℃로 나타났다. 최대 온도차는 J-44가 K-23에 비해 10.5℃가 높게 나타났다. 온도 분포는 두 집합체가 동일하게 캐스크 중앙 지점 > 캐스크 상부 지점 > 캐스크 하부 지점 > 온도 순으로 나타났다. 이는 캐스크 중앙 지점에 핵연료 집합체가 위치해 있으므로 집합체 결합에 의한 붕괴열에 기인한 것으로 본다.

나) J-44, K-23 사용후핵연료 집합체 수송용기의 감온, 감압 운전 결과

J-44와 K-23의 감온에 대한 운전결과는 J-44의 경우 집합체 내부 폐액의 최초 온도는 44.5℃로 나타났으며 K-23은 28.5℃ 나타냈다. 두 개의 집합체에 대하여 열교환기로 이용하여 냉각한 결과 20분 후에 J-44는 28℃, K-23은 25.3℃ 까지 감온 현상을 보였으며 열교환기로 주입되는 냉각수 입구 온도는 J-44의 경우 27℃에서 23℃의 출구 온도로 배출되었으며 K-23은 25℃에서 20℃로 크게 온도 변화가 나타나지 않았다. 이는 본 공정의 냉각시스템이 이과수 냉각수계 형태로 되어 있기 때문에 냉각수가 열교환 장치를 1회 통과한 후 온도차가 없는 것으로 본다. J-44와 K-23의 감압에 대한 운전결과는 bar의 사용후핵연료 집합체 캐스크의 내부 압력은 J-44가 3.7bar, K-23은 1.8bar로 나타났으며 20분간 운전 결과 내부 압력은 J-44가 0.2bar, K-23이 0bar 까지 감압 되었다. 두 개의 사용후 핵연료 집합체를 비교 할때 최고 온도는 J-44가 K-23에 비해 16℃가 더 높았으며 최고 압력도 1.9bar가 더 높은 것으로 나타났는데 이는 캐스크 내부에 담겨있는 핵연료 집합체 결합 정도에 의한 차이인 것으로 판단된다.

다) J-44, K-23 사용후핵연료 집합체 수송용기내의 방사성 선량을 측정 결과

사용후핵연료 집합체 수송용기 내의 방사성 액체의 선량을 낮추기 위해 본 공정에 설치된 카트리지 형태의 금속 판형의 여과기를 이용하여 정화 처리 하였다. 방사성 선량을 측정해 의하면 여과기 정화하기 전 최초 방사선량이 J-44는 1650mR/hr의 고방사선량이 나타났으며 K-23은 246mR/hr으로 나타났다. 두 개의 사용후 핵연료 집합체를 비교 할때 J-44가 K-23에 비해 1404mR/hr이 더 높게 나타났는데 이는 J-44는 결합이 있는 집합체이며 K-23은 결합이 없는 집합체이기 때문인 것으로 판단된다. 방사성 선량을 낮추기 위해 여과기로 1시간 동안 정화 처리한 결과 J-44는 300mR/hr 까지 K-23은 76mR/hr 까지 감소되었으며 그리고 운전초기의 필터의 압력은 J-44가 1.2bar, K-23이 0.7bar 였으며 최종 운전 종료시 여과기의 압력은 J-44가 6.0bar, K-23이 4.2bar 까지 상승하였다.

라) 사용후핵연료 집합체 수송용기의 감온, 감압 공정 안전성 분석

조사후시험시설내 감온, 감압 공정의 정상 조업시 예상되는 각 부분에 대한 이상 현상 및 주요 원인 및 조치 방법 등을 안전성 분석을 하였으며 운전을 수행하기 위한 원만한 조업을 위해 만전을 기하였다.

참 고 문 헌

1. Guide book on Spent Fuel Storage, IAEA, T.E 240(1984)
2. Guide book on Spent Fuel Storage, IAEA, T.E 240, Second Edition (1991)
4. Chemical Engineering note P-GM/MGC-N⁰ H 0160, S.G.N (Unit-211)
5. Process flow sheet 1900 H 1026, S.G.N (Unit-211)
6. Operating Procedures Note B/PB/CC N⁰ H 0160, S.G.N (Unit-211)