



대상

중수로형 원전 운영 기술 개발

이 철 언

한수원(주) 월성원자력본부장

우 리 나라는 70년대 원자력 발전을 시작한 이후 지속적인 성장을 거듭한 결과 오늘날은 세계 6위의 원자력 선진국이 되었으며 현재 가동중인 18기의 원전은 국내 총발전량의 40% 이상을 점유하면서 석유 의존도를 크게 낮추고 있으며, 6기의 원전이 건설중이거나 건설을 추진중에 있어 주력 발전원으로서 안정적 전력공급의 중추적 역할을 하고 있다.

현재 우리 나라에는 가압경수로형(PWR) 원전 14기와 가압중수로형(PHWR) 원전 4기가 운영되고 있는데 월성원자력본부는 국내 유일의 가압중수로형 원전이 운영중인 곳이다.

가압중수로형 원전은 연료로 천연 우라늄을 사용하고 있으며 냉각재와 감속재가 분리되어 중수를 사용하도록 설계되어 있다. 또한 천연 우라늄을 사용하기 때문에 연료 교체를 위하여 발전소를 정지할 필요

없이 출력 운전중에도 연료 교체를 하면서 연속 운전할 수 있는 특성을 갖고 있다.

가압중수로형 원전은 캐나다에서 설계한 원전으로써 우리 나라와 캐나다·루마니아·중국·아르헨티나 등에서 운전되고 있다.

월성 1호기는 1983년 4월 최초로 상업 운전을 시작하였고 이후 14년 뒤인 1997년에 월성 2호기, 1998년에 월성 3호기, 1999년에 월성 4호기가 상업 운전을 시작했다. 그동안 월성 1호기는 3주기 연속 '한 주기 무고장 안전 운전'으로 1,118일 연속 무고장 운전 및 이용률 세계 1위를 3회에 걸쳐 달성하였으며 2002년에는 중수로형 원전 세계 최초로 누계 발전량 1,000억kWh를 돌파하였고 월성 3·4호기 역시 연속으로 한 주기 무고장 안전 운전을 달성하여 원전 운영의 우수성을 세계에 알렸다.

다음의 사항들은 필자가 월성 원

자력 제1발전소장과 월성 원자력본부장으로 근무하는 동안 전 직원과 함께 월성 원전의 운영 기술과 안전성 및 신뢰성을 더욱 향상시키기 위해 노력해 온 일들의 일부분을 기술한 것이다.

탄소(C)-14 방출량의 감소 기술 개발

1. 기술 개발 배경

중수로 원전에서 대기로 방출되는 주요 방사능 핵종은 탄소(C)-14와 삼중수소(H-3)가 있다. 특히 감속재 계통에서 주로 생성, 방출되는 C-14는 반감기(5,730년)가 길기 때문에 각별한 관리가 요구되는 핵종이며, 과기부 고시(제98-12호)에 의거 환경 감시 항목으로 지정되어 1998년 2월부터 감시를 시작하여 왔으며, 법적 방출 제한치는 57,900Ci/년·호기이다.

월성 2·3·4호기 최종 안전성 분



석 보고서(Final Safety Analysis Report)에는 설계사인 AECL(캐나다원자력공사)에서 캐나다에서 운영 중인 CANDU-600MWe급 원전의 정상적인 평균 방출 자료에 근거하여 연간 방출량을 14.4Ci/년·호기로 예상했다.

그런데 1999년도 말 월성 1·2호기 C-14 방출량이 월성 2호기 FSAR에 명시된 연간 예상 방출량(14.4Ci/년·호기)을 상회했음이 밝혀졌다.

따라서 연간 예상 방출량을 준수하여 원전 주변 환경 영향을 최소화하고 보다 엄격해질 규제에 대응하기 위해 지속적인 C-14 방출량 저감 대책 추진이 필요했고 이를 위한 연구 개발 및 설비 개선, 운전 방법 개선을 추진한 결과 월성 2호기 FSAR에 명시된 예상 방출량(14.4Ci/년·호기)의 20% 이내로 방출량을 감소시킬 수 있었다.

2. C-14 저감을 위한 연구 및 개선 대책 추진

1999년 11월부터 C-14 저감화를 위한 종합 대책을 수립하고 추진하여 왔는데 그 내용으로는 Task Force를 구성하여 「C-14 증가 원인 분석, 연구」 및 「C-14 저감 대책 수립 및 수행 결과 평가」 등을 수행하였고 한전 전력연구원 및 외부 기관과의 공동 연구를 수행하여 C-14 제거 장치 개발 및 감속제 이

〈표 1〉 C-14 방출량 저감 실적

연도	호기	1호기	2호기	비 고
1998		11.8	11.9	- 1998년 2월부터 감시 시작
1999		23.8	50.8	
2000		6.57	2.87	- 저감 대책 추진 시작
2001		1.33	1.05	- 1999년 대비 72.22 Ci 감소
2002		0.64	1.83	- 2002년 9월 말 기준

〈표 2〉 C-14 저감 대책 수행 내용 요약

항 목	수 행 내 용
원인 분석 및 연구	• 감속제 계통 C-14 거동 모델 개발
자체 대책 수립 시행	• 계획 예방 정비 및 정상 운전시 계통 내 공기 유입 억제 • 계획 예방 정비 후 가동시 계통 내 공기 완전 퍼지 방안 수립, 시행 • 감속제 상층 기체 운영 방법 개선 • 이온 교환 수지탑 운영 관리 개선 • 방출량 감시 강화 • 중수 공급 탱크 공기 차단(헬륨 Sparging)
기술 개발 공동 연구	• C-14 제거 장치 개발 • 감속제 이온 교환기 관리 기술 개발 • 감속제 이온 교환기 연장 운전 시험 수행

온 교환 수지 관리 기술을 개발하여 적용했다.

방사성물질 배출량 및 피폭 저감화

1. 삼중 수소 배출량 저감화 연구

중수로형 원자력발전소의 기체 방사성 물질인 삼중 수소의 배출량은 국민적인 관심사일 뿐만 아니라 중수로형 원전의 안전성 및 신뢰성을 1차적으로 확인하는 요소로서 작용하고 있다. 따라서 원자로 건물 내 삼중 수소 농도 저감화 및 이에 따른 배출량 감소는 아주 중요한 부분이라 할 수 있다.

중수중기 회수 계통은 원자로 건물 내의 냉각재 및 감속제로부터 누

3. C-14 저감화에 따른 효과

C-14 방출량을 기존보다 감소시켜 원전 주변의 환경 영향을 최소화할 수 있었으며, C-14 저감 기술을 중수로 원전 설계사인 캐나다 AECL 수준 이상으로 향상시킴과 동시에 감속제 이온 교환 수지 사용 기간 연장으로 운영 비용 절감 및 방사성 폐기물 발생량을 감소시킬 수 있었다.

설되는 중수증기를 회수하여 원자로 건물 내의 삼중수소 농도를 낮게 유지시키는 설비로서 이 계통의 운전 성능에 따라 중수증기 회수량에 변화를 가져올 수 있다. 이 점에 착안하여 중수증기 회수량을 최대로 하기 위한 중수증기 회수 계통 건조기의 계절별/발전소 상태별 최적 운전 모드(흡착/재생)를 시도하게 되었다.

또한 원자로 건물 내로 인입되는 공기의 습분을 최소화 하도록 제습기를 신설하고 제습기의 최적 운전 방법을 연구하여 적용한 결과, 원자로 건물 내의 냉각재와 감속재로부터 누설되는 중수증기를 중수증기 회수 계통에서 최적으로 회수할 수 있었다.

그 외에도 삼중수소 배출원별 배출량 조사 및 저감화, 핵연료 중수 제어 계통 누설 중수 수집 방법 개선, 중수 제어지 건조 설비 설치 및 중수 소모 저감 대책 시행 등 중수 누설 최소화를 위한 관리 방법 개선을 통해 원자로 건물 내 삼중수소 농도 및 배출량을 감소시킬 수 있었다.

2. 액체 및 고체 폐기물 배출량 저감을 위한 기술 개발

최근 방사성 폐기물 관리 시설 부지 확보와 관련하여 국민적인 관심이 고조되고 있다. 현재 각 원전 내에 임시 저장 되어있는 중·저준위

〈표 3〉 삼중수소 농도 및 배출량 저감 실적

항 목	1997년 ~ 1999년	2000년 ~ 2001년
원자로 건물 내 삼중수소 농도	연평균 3.0 DAC 유지	연평균 0.9 DAC 유지
기체 삼중수소 배출량	연간 배출량 11,070 Ci	연간 배출량 5,041 Ci
- DAC : Derived Air Concentration (유도 공기중 농도) - 법적 방출 제한치 : 10,800,000 Ci/년·호기		

〈표 4〉 방사성 폐기물 배출량 저감 실적

항 목	1997년 ~ 1999년	2000년 ~ 2001년
액체 폐기물	연간 배출량 2,935 Ci	연간 배출량 2,685 Ci
고체 폐기물	연간 생성량 447 드럼	연간 생성량 294 드럼

방사성 폐기물은 2008년이면 포화 상태에 이를 것으로 예상하고 있다.

그렇기 때문에 방사성 폐기물 발생량 감소는 원전을 운영하는 모든 종사자들의 주요 목표 중의 하나라고 할 수 있다. 이를 위해 신기술 및 신장비 개발이 계속 진행중에 있다.

그에 대한 일환으로 액체 폐기물 배출량 감소를 위해 폐액 제염 설비 제작 설치, 제염 설비 필터 개선, 액체 유출물 감시기 설비 개선 및 액체 폐기물 처리용 백필터 등을 적용한 결과 연간 250Ci의 액체 폐기물 발생을 감소시킬 수 있었다.

또한 고체 폐기물 발생량 감소를 위해서는 사용후 중수 흡착제 처리 방법 개선, 비압축성 고체 방사성 폐기물 처리용 분쇄기 설치, 잡고체 방사성 폐기물 초고압 압축 설비 설

치, 비방사성 폐기물 보관 창고 및 방사물 운반 차량 차고 설치, 방사선 물차폐체 제작 활용 및 A형 방사성 물질 운반 용기 제작 운용 등 기술 개발 및 운영 개선을 통해 연간 153드럼의 고체 폐기물 발생을 감소시킬 수 있었다.

3. 종사자 피폭 방사선량 저감화 기술 개발 및 운영 개선

원전에 근무하는 방사선 작업 종사자의 피폭 방사선량을 저감시킬 목적으로 현장 구조물에 적합한 신행 납차폐체, 이동식 호흡용 공기 공급 분배기, 삼중수소 방어 호흡기 음성 통화 장치 적용 및 Bar-code 시스템을 이용한 출입 관리 시스템 개선 등을 통해 1997년부터 1999년까지 3년 동안 연간 피폭 선량 1,938 man-Sv이던 것을 2000년



이후에는 연간 피폭 선량을 1,767 man-Sv로 줄일 수 있게 되었다.

발전소 안전성 및 신뢰성 향상을 위한 기술 개발

원자력발전소를 운영함에 있어 원전의 안전성 증진과 신뢰성 확보는 아무도 부인할 수 없는 최우선 과제라고 생각한다. 이를 위해 끊임 없는 기술 개발 노력은 계속되어야 할 것으로 믿으며 최근 발전소에서 추진했던 기술 개발 현황을 소개하고자 한다.

1. 압력관 SLARette 수행 관련 기술 개발

중수로형 원전에는 압력관과 원자로관 사이의 환형 공간을 유지하기 위해 가터 스프링이 설치되어 있다. 이들 가터 스프링의 위치가 변동될 경우 압력관과 원자로관이 접촉하여 압력관 이상 고장이 발생할 수 있을 것으로 예상되기 때문에 월성 1호기는 1995년 이후 「가터 스프링 위치 교정 작업(SLAR)」을 수행하여 스프링의 위치를 교정하고 있는데 SLAR 수행과 관련하여 수행되는 각종 기술을 자체적으로 개발하여 대체하고 신기술을 개발, 적용하여 장기간 소요되는 작업 기간을 단축하고 압력관 및 핵연료 관련 기술을 상당 부분 국산화할 수 있었다.

가. 노심재 설계 기법 개발

SLAR 수행시 해당 연료관 내 연료를 모두 제거해야 하는데 전체 노심의 약 1/4에 해당하는 연료를 비울 수 없으므로 노심 재배치(Fuel Shuffling)가 불가피하며 이는 노심 출력 분포의 근간을 뒤흔드는 중대한 작업이었다.

노심 재배치를 위해 AECL에 기술 지원을 요청하였으나 상당액의 기술 지원료를 요구하여 AECL의 기술 지원없이 자체적으로 초기 방출 연료관 선정 기술 및 핵연료 재배치를 위한 프로그램을 개발, 수행한 결과 매 SLAR 작업시 노심 재배치와 재기동시 양호한 출력 분포를 얻을 수 있었다.

나. 차폐 마개 회수 설비 및 자동 운전 프로그램 개발

SLAR 수행시 핵연료 및 원자로 차폐 마개 재배치 작업을 수행하기 위해서는 차폐 마개를 사용후 연료 방출조에 임시 저장후 회수하여 재사용 하여야 하나, 기존 핵연료 교환 설비로는 회수가 불가능 했다.

이에 따라 핵연료 교환기의 부족한 행정 거리를 보상할 수 있는 차폐 마개 회수 설비를 개발하여 사용후 연료 방출조로 방출한 원자로 차폐 마개를 회수, 재사용함으로써 핵연료 및 차폐 마개 재배치 공정을 3개 연료관 단위에서 9~12개 연료관 단위로 확대 시행하여 SLAR 수행 공기 단축이 가능하게 되었다.

또한 차폐 마개 회수 설비를 이용하여 사용후 연료 방출조의 차폐 마개를 자동으로 회수할 수 있도록 자동 운전 프로그램을 개발, 적용하여 수동 운전 때 따른 운전원 오조작을 방지하고 운전 시간 단축이 가능하게 되었다.

2. 교체 연료관 통합 관리 및 기술 개발

중수로형 원전은 발전소 출력 운전중에도 연료를 교체하도록 설계되어 있어 핵연료 교체에 수반되는 노심 상태 파악 및 분석, 교체 연료관 선정, 교체 후 교체 이력 관리 등 제반 업무를 수행하고 있는데 이러한 업무 수행을 위한 통합 관리 프로그램을 개발, 교체 연료관 선정 업무에 활용하여 개선된 노심 관리 환경을 제공할 수 있게 되었다.

3. 해수 냉각 계통 '간헐 염소 주입 기술' 개발

원자력발전소에서는 주요 기기의 냉각을 위해 해수가 사용되고 터빈/발전기에서 사용된 증기를 응축시키는 복수기에도 해수가 사용되고 있는데 해수 냉각 계통에 해양 생물의 착생 및 서식을 억제하기 위해 차아염소산소다(NaOCl)를 생산/주입하고 있다.

이러한 염소 주입 방식을 24시간 연속 주입 방식에서 여름에는 10분 간격, 겨울에는 2시간 간격으로 간

혈 투입토록 변경할 수 있는 기술을 개발, 적용한 결과 해양 환경 개선 효과 및 설비 운영비 감소 효과를 가져올 수 있었으며 해수를 사용하는 국내외의 원자력발전소 및 화력 발전소에 확대 적용이 가능할 것으로 판단된다.

4. 국내 최초 소내 전력 계통 분석 진단 수행

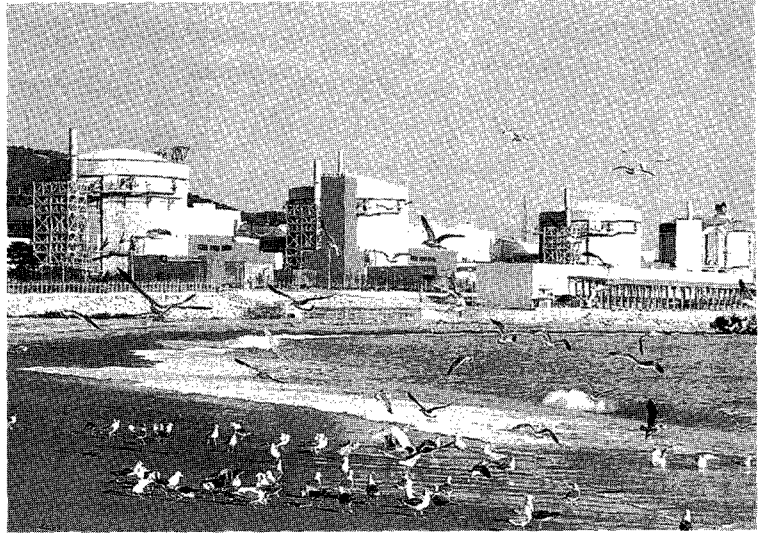
원자력발전소 소내 전력 계통은 최초 설계시 안전성을 고려하여 적정 부하에 맞게 설계되었으나 발전소 운전 기간이 경과함에 따라 필요에 의해 부하가 추가 또는 변경됨으로써 각종 소내 전력 설비의 안전성에 대한 재검증이 필요했다.

그러나 국내에서는 운전중인 원자력발전소의 소내 전력 설비에 대해 안전성 검증을 수행한 경험이 없어 이를 국내 연구 기관의 협력을 얻어 자체적으로 기술을 개발하여 적용, 소내 전력 계통 진단이 가능하게 되었다.

수상 소감

이 상을 받기까지 도와주신 많은 분들이 있음에도 불구하고 필자가 대표로 상을 받게 된것에 대해서 매우 송구스럽게 생각한다.

필자는 정부가 에너지 다원화 정책을 도입하던 1970년대 초 한전에 입사하여 국내 최초의 원전인 고리



월성 원자력 1~4호기

1호기의 건설이 한창 추진되던 1973년 한전 전원개발부 원자로과에서 근무를 시작하여 원자력 발전에 몸을 담은 이후 현재까지 29년간 원자력 발전 및 연구 분야에서 일해오면서 미력이나마 원자력 산업 발전에 참여할 수 있었다는 것을 매우 기쁘게 생각하고 있다.

IMF 이후 변화와 개혁이라는 큰 흐름 속에서 전력 산업 구조 개편에 따라 발전 부문이 6개 회사로 나뉘고 경쟁이 도입되었다.

이러한 상황에서 어느 때보다 원전의 안전성 및 경제성을 동시에 확보하기 위한 원전 운영 능력 강화와 관련 기술 개발이 필요한 때라고 생각한다.

기본과 원칙에 충실한 조직 문화 가운데 기술력 강화가 이루어진다

면 원전 기술 선진국으로서의 자리 매김뿐만 아니라 더 나아가 국민의 신뢰를 받는 원전이 될 것이라고 생각한다.

아무쪼록 원전에 대한 안전성을 신뢰받고 경제성을 확보하는 데 부족하나마 가진 역량을 최대한 발휘하여 최선을 다할 것을 다시 한번 다짐해 본다.

다시 한번 이와 같은 영광이 있기 까지 필자를 지도해 주시고 격려해 주신 원자력산업계 선·후배님들과 어려운 여건 속에서도 월성 원전의 운영 기술 수준과 안전성 향상을 위해 노력해 주신 모든 분들께 감사의 말씀을 드리면서 수상 소감에 갈음하고자 한다. ☺