

# 원자력발전설비의 재료열화에 대한 신뢰성 향상

정 한 설 · 한국전력공사 전력연구원, 수석연구원

\_e-mail : hschung@kepri.re.kr

원자력발전설비의 재료열화(materials aging degradation)는 신뢰성을 저하시킬 수 있는 주요 요인이다. 특히 응력부식균열(stress corrosion cracking)은 원자력발전설비의 주된 재료열화기구로서 적절히 대응하지 못하는 경우에는 심각한 사고를 유발할 수도 있다. 원자력발전설비의 재료열화에 대응하여 설비의 신뢰성을 높은 수준으로 유지하기 위하여 각별한 노력이 필요하며, 이는 적극적이고 체계적인 기술기반 프로그램으로 구체화된다.

## 원자력발전설비의 재료열화

국내에서는 20기의 원자로를 가동하고 있으며 국가 전력의 약

40%를 생산한다. 뿐만 아니라 최근 국가적인 현안으로 부각되고 있는 기후변화 대응 이산화탄소 감축을 위해서도 향후 원자력의 비중이 지속적으로 증대될 전망이다.

원자력발전설비는 다른 어떤 산업설비보다도 높은 신뢰성을 요구한다. 방사선피해가 발생할 수 있는 사고를 확실히 봉쇄할 수 있어야 하기 때문이다. 방사선피해가 발생하지는 않더라도 원자력발전설비의 압력경계(pressure boundary)를 통한 소량누설과 같은 사례는 대중수용성(public acceptance)에 매우 나쁜 영향을 미칠 수 있다. 원자력발전사업을 지속하고 확장시키기 위해서는 대중수용성이 매우 중요하다.

그림 1은 국내에서 운전 중인

가압경수로 발전소의 배치를 나타낸다. 원자로 건물은 핵증기공급계통(Nuclear Steam Supply System)을 감싸고 있는 콘크리트구조물로서 원자로, 증기발생기, 냉각재펌프, 가압기 등으로 구성된다. 핵증기공급계통은 터빈에 고압증기를 공급하므로 화력발전소의 보일러와 같은 기능이다. 원자로에서 핵연료의 핵분열반응으로 발생하는 열은 냉각재를 통하여 증기발생기로 공급되며, 증기발생기는 열교환기로서 증기계통에서 공급받는 응축수를 다시 증기로 가열하여 터빈으로 공급한다.

## 재료열화프로그램

원자력발전설비는 ASME PV&P Code Section III에 따라서 설계하고 건설한다. 방사선

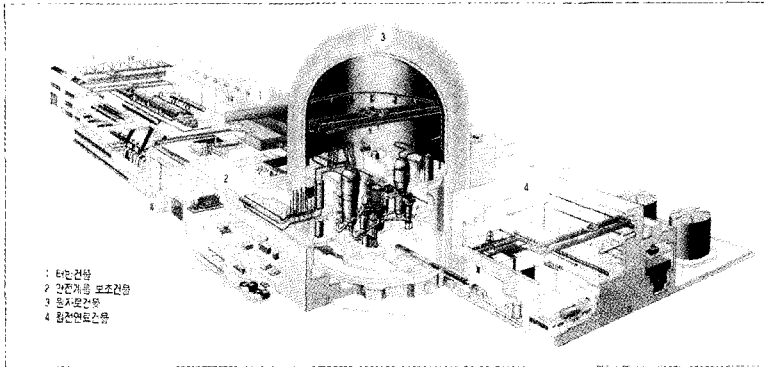


그림 1 가압경수로 발전소 개요도

피해를 봉쇄할 수 있도록 안전여유를 반영하여 설계하며 제작과 건설도 철저한 품질보증 절차를 따른다. 따라서 건설단계에서는 원자력발전설비의 안전성이 확보된 것으로 간주한다. 그러나 300℃ 이상 고온에서 오래 동안 발전소를 운전하면서 재료열화가 발생한다. 응력부식균열, 피로, 마모, 부식 등 다양한 재료열화 기구가 작용한다. 원자력발전소는 설계수명이 40년이며 최근에는 60년으로 수명을 연장하는 사례도 많다. 300℃ 이상 고온에서 오랜 동안 운전하면서 진행되는 재료열화는 설계에 반영되지 않은 변수로서 발전설비의 안전여유를 잠식하며 심각한 사고를 유발할 수도 있다. 따라서 원자력발전설비의 신뢰성을 확보하기 위해서는 운전하면서 계속 주기기의 재료열화를 감시하면서 충분한 안전여유를 유지할 수 있도록 해야 한다. 재료열화관리프로그램은 운전하면서 발생하는 재료열화를 감시하여 안전성을 확보하

는 제반 업무를 통칭한다.

재료열화관리프로그램은 아래와 같은 요소로 구성된다.

- 가동중검사(in-service inspection): 주기적으로 비파괴검사를 수행하여 건전성을 확인한다. 초음파검사, 와전류탐상검사, 육안검사 등이 주된 검사방안이다.
- 정비(repair): 가동중검사를 통해서 지시(indication)가 탐지된 기기를 정비한다. 정비 기준(repair criteria)을 적용한다면 정비기준보다 큰 지시는 모두 정비해야 한다.
- 예방정비(preventive repair & mitigation): 정비 기준보다 작은 지시라도 미리 정비할 수 있다. 지시가 없더라도 취약할 것으로 예상되는 기기는 미리 정비할 수도 있다. 정비와 대비되는 개념으로 균열이 발생하지 않도록 사전조치를 취할 수도 있다. 피닝, 용접, 표면처리, 세정 등을 들 수 있다. 이러한 제반

업무를 예방정비라 통칭한다.

- 수질관리: 발전설비의 응력부식균열과 부식은 수질에 크게 의존한다. 핵연료를 보호하고 방사선준위를 낮추기 위해서도 수질관리가 중요하다. 원자력발전설비는 이런 목적을 달성하도록 엄격한 수질관리를 수행한다.
- 설비교체: 취약할 것으로 예상되는 설비를 미리 교체할 수도 있다. 증기발생기, 원자로 상부헤드, 가압기 등을 교체하는 데에는 큰 비용이 소요되므로 경제성평가를 포함한 기술적인 판단이 선행되어야 한다.

### PWSCC

가압경수로의 주냉각재는 약염기성 환원성환경(수소농도 25~50cc H<sub>2</sub>/kgH<sub>2</sub>O)으로 운전한다. 일부 니켈합금은 이러한 고온 환원성환경에서 응력부식균열에 취약하다. 이를 PWSCC(Primary Water Stress Corrosion Cracking)이라 칭하며 Alloy 600 합금이 특히 취약하다. 가압경수로의 증기발생기 전열관이 Alloy 600으로 제작되었으며 그 외에도 원자로상부헤드와 하부헤드관통관, 이중금속용접노즐 등 다양한 기기가 Alloy 600 모재 또는 용접으로 제작되었다.

### 증기발생기

그림 2는 증기발생기 구조도를

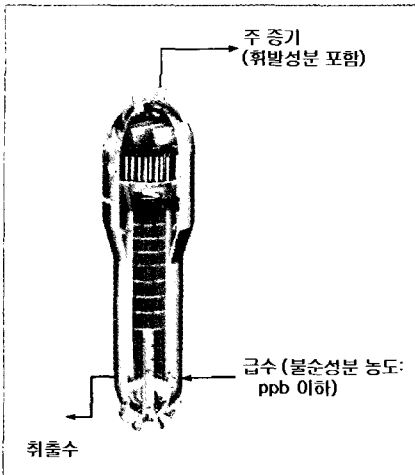


그림 2 증기발생기 개요도

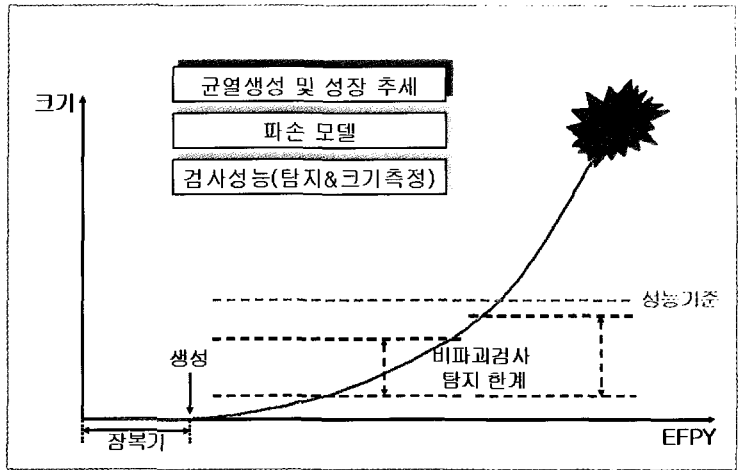


그림 3 증기발생기 전열관 건전성평가 개념도

보인다. 증기계통에서 응축된 급수를 공급받아서 비등시킨 후 터빈으로 증기를 공급한다. 전열관은 1mm 두께의 세관으로서 냉각재의 압력경계기능을 수행한다. 급수는 매우 순도가 높은 물이나 비등되면서 불순성분 농축이 일어난다. Na, Cl, SO<sub>4</sub> 등 제반 불순성분 농도가 증가하여 부식을 유발할 수 있다. Alloy 600 전열관은 원자로 운전환경에서 PWSCC에 취약하다. 또한 유속이 매우 빠르기 때문에 유체유발 진동이 불가피하며 이는 전열관의 마모를 일으킨다. 이러한 환경 때문에 증기발생기는 가압경수로서 가장 취약한 설비로 간주된다. 최근에는 전열관을 Alloy 600 대신 Alloy 690 대체하여 응력부식균열에 대한 저항성을 강화하였다.

### 증기발생기 프로그램

가압경수로의 핵심취약설비인 증기발생기의 건전성을 확보하기 위하여 2005년부터 증기발생기프로그램을 시행 중이다.

성능기준 건전성평가 증기발생기프로그램의 핵심은 성능기준 건전성평가로서 전열관에 균열

이 발생하여도 기존 설계의 안전여유를 만족시킬 수 있는 수준으로 성능기준을 설정하여 이를 감시하는 개념으로서 그림 3에 개념을 나타내었다.

전열관에 응력부식균열이 발생하여 성장하다가 누설 또는 파손 사고가 난다. 사고가 날 수 있는 크기에 안전여유를 반영한 균열의 크기를 성능기준으로 정의한다. 즉, 성능기준보다 큰 균열이 존재하지 않도록 관리를 하면 설계당시 고려하

였던 안전여유를 확보하는 것이다.

### 검사 성능

성능기준보다 큰 균열이 존재하지 않도록 하는 방안이 검사와 정비이다. 가동중검사에서 외전류탐상검사를 주기적으로 수행하여 지시가 탐지되는 전열관을 정비한다. 증기발생기 전열관의 검사에 사용하는 외전류탐상검사 탐촉자를 그림 4에 나타내었다. 보빈탐촉자는 일반검사용으로서 검

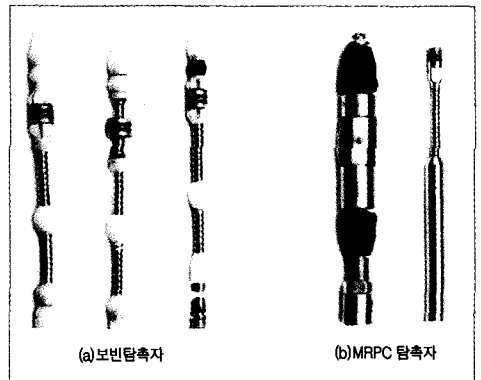


그림 4 외전류검사

사 속도가 빠른 반면 MRPC 탐촉자는 검사 속도가 느린 반면 균열 탐지능력이 우수하다. 균열성장속도를 감안하여 충분한 빈도로 가동 중검사를 반복하면 성능 기준보다 큰 균열이 존재하지 않도록 관리할 수 있다. 이때 검사의 성능이 매우 중요한 요소이다.

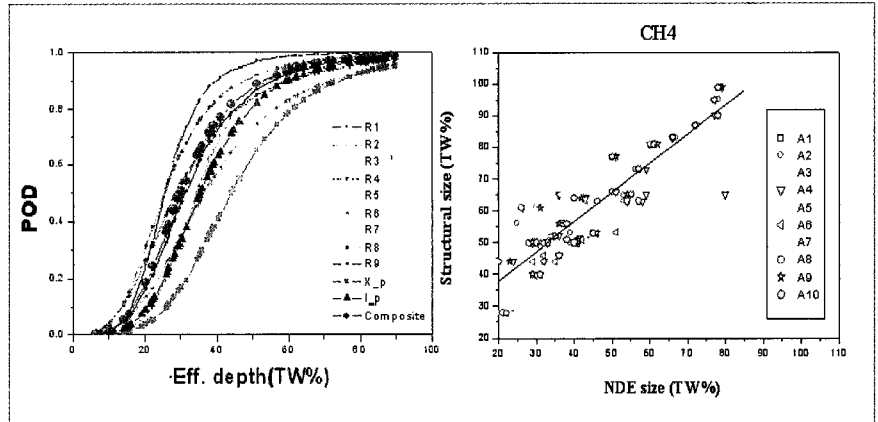


그림 5 검사성능 견본 데이터 POD & sizing(전열관 외경 축균열)

검사의 성능은 아래와 같이 구분하여 정량화할 수 있다.

- POD(Probability of Detection): 탐지 확률
- 크기평가능력(sizing capability): 통상 root mean square error로 정량화한다.

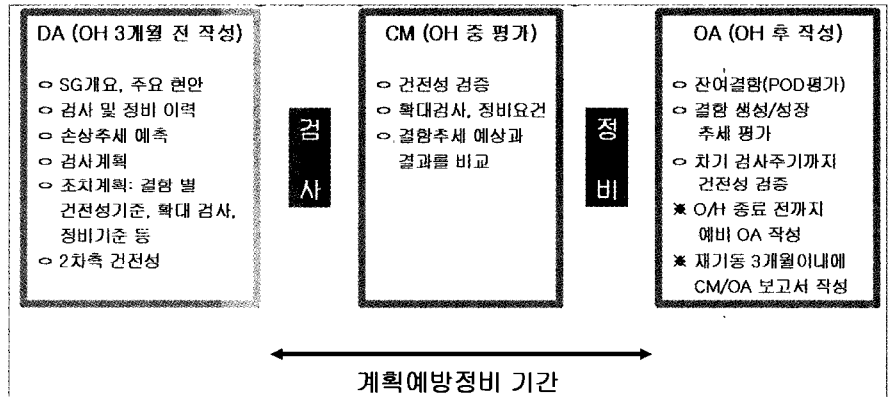


그림 6 증기발생기 프로그램 3단계 건전성평가

POD는 검사장비와 절차, 평가자의 기량, 신호의 품질, 균열의 위치와 모양 등 다양한 변수에 따라서 달라진다. 이러한 변수에 따른 POD 데이터는 건전성평가를 위한 매우 중요한 자료이다. 그림 5의 왼편에 POD 견본 데이터를 제시하였다. 국내 평가자 27명이 참여한 round robin 결과로서 균열의 크기에 따른 POD를 나타낸다. 서로 다른 평가팀간의 POD 분포를 확인할 수 있다. 그림 5 오른편에는 검사로 측정된 균열의 깊이와 실제로 확인한

균열의 깊이를 비교하여 검사기술의 크기평가 오차를 정량화하였다. 그림 5에 제시한 데이터를 도출하기 위하여 1988년 고리1호기에서 증기발생기를 교체한 후 교체된 증기발생기 전열관의 실제 균열을 활용하였다.

### 3단계 건전성평가

증기발생기프로그램을 시행하는 메커니즘으로서 핵연료교체를 위한 계획예방정비기간을 전후하여 아래와 같이 3단계로 건전성평가를 시행한다.

- 열화평가(Degradation Assessment): 계획예방정비 3개월 전까지 해당 증기발생기에서 어떠한 열화가 발생할 것인지를 예측하고 대응방안을 수립한다. 가동중검사 계획은 열화평가를 기반으로 작성한다.
- 상태감시평가(Condition Monitoring Assessment): 가동중검사 결과로부터 건전성평가를 수행한다. 지난 운전 주기 동안 성능기준을 초과하는 균열이 없었음을 확인한다.

○ 운전평가(Operation Assessment): 계획 예방정비를 끝내고 기동한 후 3개월 이내에 차기 가동중검사까지 건전할 것인가를 평가한다.

그림 6은 증기발생기 프로그램에서 시행하는 3단계 건전성평가의 데이터 흐름을 나타낸다. 그림 증기발생기 프로그램 3단계 건전성평가

### 니켈합금 프로그램

증기발생기 전열관이 아닌 다른 Alloy 600 기기의 PWSCC에 대한 관리를 강화하고자 니켈합금프로그램을 시행할 예정이다. 그림 7은 특정 노형 가압경수로서 Alloy 600 기기가 분포되어 있는 현황을 나타낸다. 발전소별로 200개 이하에서 400개 이상의 Alloy 600 기기가 존재한다.

PWSCC 균열성장속도 니켈합금 기기의 PWSCC에 대한 건전성

평가는 균열성장속도를 기반으로 한다. 그림 7은 미국 전력중앙연구소(Electric Power re-

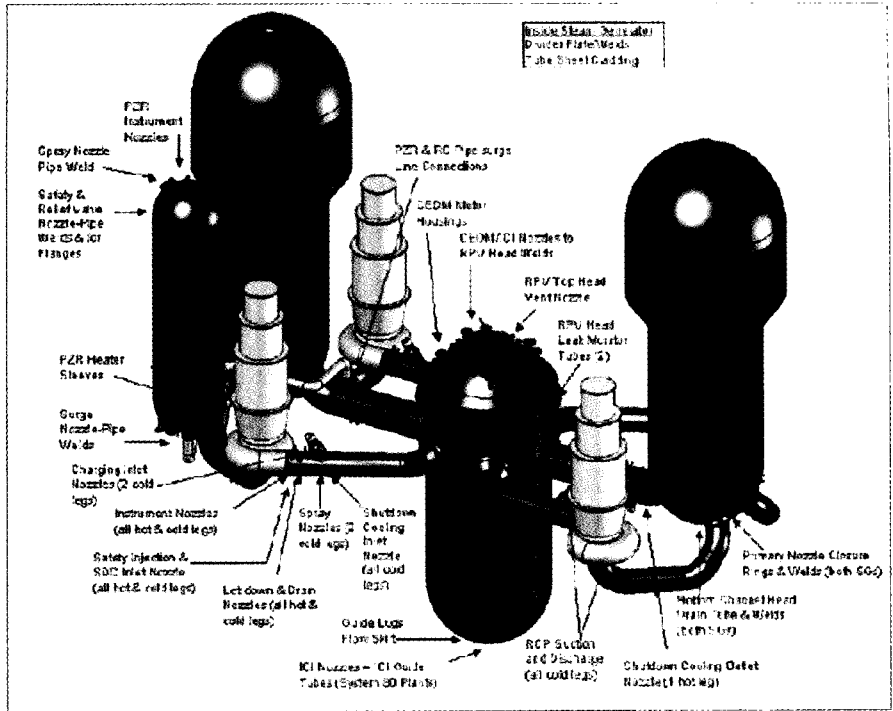


그림 7 니켈합금분포 개요(CE 원전, 건본)

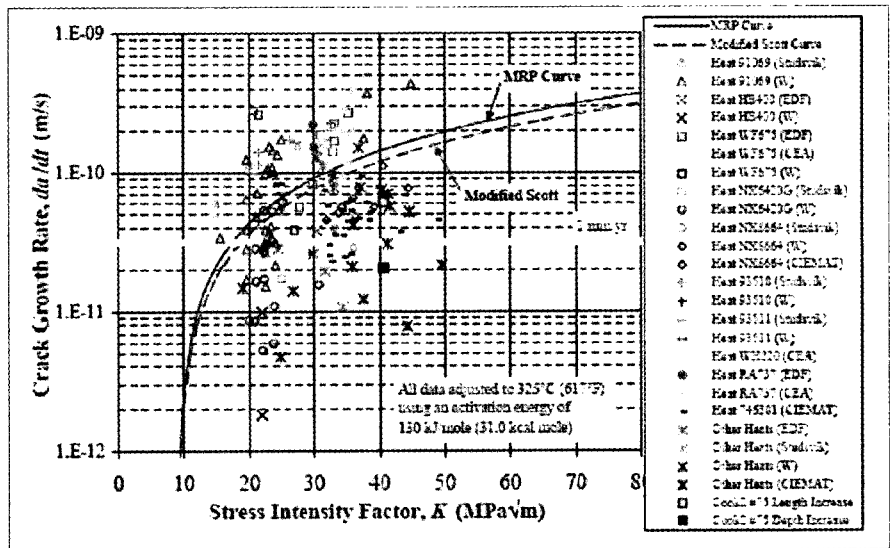


그림 8 Alloy 600 모재 PWSCC 균열성장속도 모델(MRP-55)

search Institute)에서 제시한 Alloy 600 모재의 균열성장속도 모델이다. 균열성장속도는 응력집

중계수에 의존하는 것으로 간주한다. 300°C를 넘는 고온고압 원자로 실증환경에서 PWSCC 균

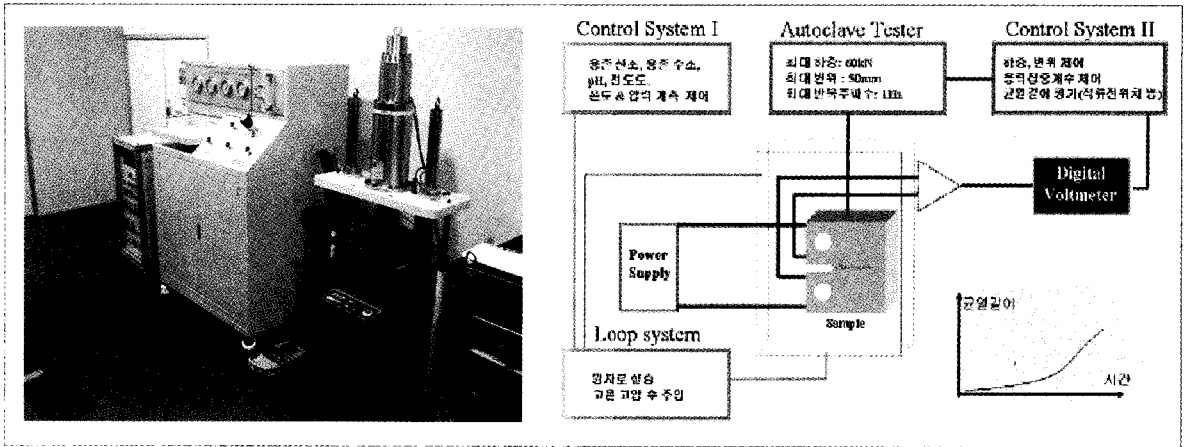


그림 9 PWSCC 균열성장속도 측정시험장치(340°C, 160bar)

열성장속도를 정밀하게 측정하는 것은 결코 쉬운 일이 아니며 실험 실별로 큰 편차가 존재한다. 시험 기술의 진보로 시험편차가 많이 줄기는 하였지만 여전히 많은 데이터들이 큰 편차를 나타낸다. Alloy 600 PWSCC 성장속도는 미세조직의 영향을 많이 받는다. 그림 8에서 나타나는 편차는 일부는 재질별 편차 때문에, 일부는 시험기술의 편차 때문일 것으로 추정한다.

그림 9는 전력연구원에서 수행 중인 PWSCC 균열성장속도 시험장치를 나타낸다.

### 균열성장 해석

기기별로 그림 8에 나타낸 PWSCC 균열성장속도 평가모형을 이용하여 균열성장해석을 수행할 수 있다. 미세한 균열이 성장하는 거동을 응력집중계수의 함수로 예측하여 평가하는 것이다.

균열이 생성되는 단계에서는

균열의 존재를 확인할 수 있는 방법이 없다. 비파괴검사를 통해서 균열을 탐지할 수 있다. 그러나 비파괴검사는 균열이 상당히 큰 크기로 성장하여야 탐지가 되므로 비파괴검사로 탐지할 수 있는 크기의 균열이 성장하여 누설이나 파손이 발생할 때까지 소요되는 시간이 중요한 의미를 가진다. 즉, 균열성장속도를 근거로 설정된 주기적인 빈도로 가동중검사를 수행한다면 누설이나 파손이 발생하기 전에 균열을 탐지할 수 있는 것이다.

### 예방정비

가동중검사가 곤란한 경우, 또는 균열성장해석으로 평가한 안전여유가 충분하지 못한 경우에는 균열이 발생하기 전에 예방정비를 수행한다. 예방정비는 용접, 피닝, 소성변형 등 다양한 기술이 가능하다.

## 맺음말

300°C 이상 고온에서 장시간 운전하는 원자력발전설비의 높은 신뢰성을 유지하기 위하여 재료열화에 대한 엄격한 관리가 필요하다. 적극적이고 체계적인 기술 기반 관리로서 높은 신뢰도를 유지하면서 경제적인 부담도 경감할 수 있다.

가압경수로 원전의 대표적인 재료열화기구인 증기발생기 전열관 손상과 니켈합금의 PWSCC 균열에 대응하고자 증기발생기프로그램과 니켈합금프로그램을 시행 중이다. 검사기술의 성능개선, PWSCC 균열성장속도 평가모델의 개선, 수질관리 및 예방정비 기술 등의 발전으로 원자력발전설비를 장시간 운전하면서도 계속 매우 높은 신뢰도를 유지할 수 있을 것으로 기대한다.