

원자로 압력 용기 및 주요 기기 건전성 평가 기술 개발

김 병 철

한국원자력연구소 원자력재료기술개발팀

책임연구원



국 내 전기 에너지의 주공
급원으로 자리잡은 원자
력 발전의 특성상 각종
압력 용기 및 주요 기기, 그리고 배
관부의 건전성 확보는 원전의 이용
률 향상과 경제성 제고에 필수적일
뿐만 아니라 원전에 대한 국민의 불
안감을 해소시킬 수 있는 핵심 사항
이라 할 수 있다.

원전에 대한 건전성 진단 기술로
서 비파괴 기술을 이용한 주요 기기

및 배관부에 대한 가동 전·중 검사
(PSI/ISI)와 원자로 압력 용기 재료
의 증성자 조사 취화에 따른 건전성
평가를 원전 가동 전 및 계획 예방
정비 보수 기간 중에 주기적으로 수
행하고 있다.

이러한 원전 안전성 검사 및 평가
기술은 고리 원자력 1호기의 건설
과 발전소의 안전성 확보를 위하여
비파괴 검사가 필수적으로 요구되
었던 1977년부터 국내 최초로 한국
원자력연구소에서 비파괴시험연구
실을 신설하여 비파괴 검사 기초 연
구는 물론, 외국 검사 기술의 국내
적용 및 기술 자립을 꾀함으로써
1990년대에 들어서면서 세계 수준
의 고급 기술 확보로 연구소가 보유
한 원전 PSI/ISI 기술을 외국에 수
출하기에 이르렀으며, 연구소 조사
재 시험 시설을 이용하여 원전의 핵
심 부품인 원자로 압력 용기 재료의
증성자 조사에 의한 기계적 성질 변

화를 평가할 수 있는 조사 취화 평
가 기술을 확보함으로써 독자적으
로 국내 원전의 수명 기간 동안 원
자로 용기의 건전성을 보장할 수 있
게 되었다.

이 글에서는 원전 건전성 진단 평
가 기술인 가동 전·중 검사에 응용
되고 있는 비파괴 기술 개발 및 원
자로 압력 용기 조사 취화 평가에
대하여 정리하였으며, 이와 관련하
여 본인이 수행한 연구 사례 일부를
요약하였다.

원전 가동 전·중 검사(PSI/ISI) 기술 개발

1. 원전 PSI/ISI 기술 국산화 및 기술 수출

비파괴 평가(NDE) 기술은 원자
력발전소·석유 화학 플랜트 등 거
대 시스템의 건전성을 주기적으로
평가하는 데 활용되는 중요한 검사



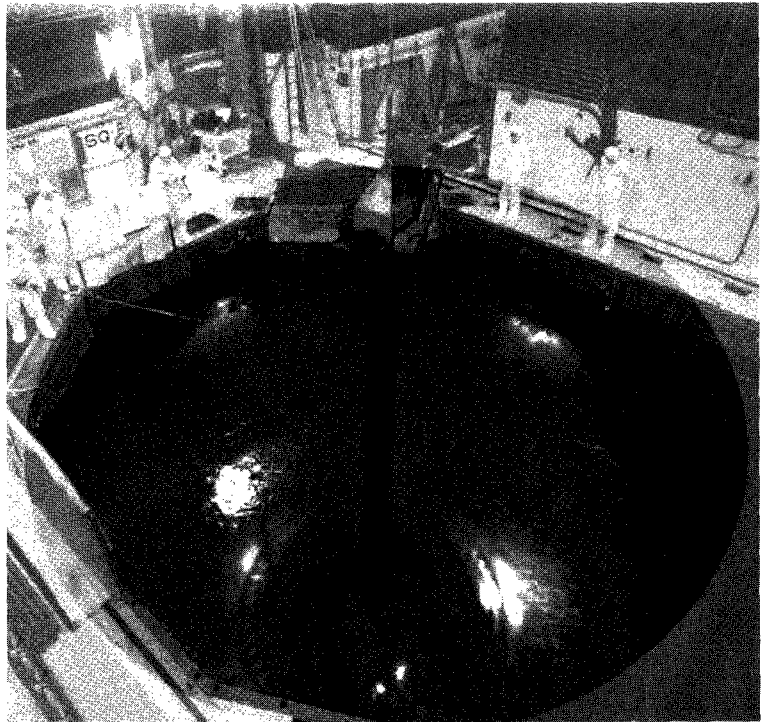
기술이다.

비파괴 평가 기술을 이용한 원전 주요 압력 용기, 부품 및 압력 경계 배관 용접부에 대한 PSI/ISI는 원전 안전 운전을 보장할 수 있는 필수적인 검사 기술로서 ASME Code의 요건에 의거 계획 예방 정비기간중에 주기적으로 수행한다.

국내 원전의 PSI/ISI는 고리 1호기 건설과 관련하여 그 안전성 확인을 위해 NDE가 필수적으로 요구됨에 따라 NDE 기술 확보가 시급한 당면 과제로 대두되었으며, 신뢰도가 높은 PSI/ISI의 수행을 위해서는 고급 기술 인력과 검사 장비 확보, 많은 검사 경험의 축적과 새로운 검사 기술에 관한 연구 개발이 뒷받침되어야 한다.

따라서 한국원자력연구소에서는 PSI/ISI 기술을 확립하여 원전 안전성 확보와 가동을 향상에 기여하고 외화를 절약함은 물론 NDT 기술 자립을 통한 일반 산업 분야에서의 NDE 기술 수준도 향상시키고자 1977년에 비파괴시험연구실을 신설하여 NDE 기초 연구는 물론, 연구원들을 미국 SwRI에 파견하고 1979년에 SwRI가 주관한 고리 1호기 제1차 ISI에 참여시킴으로써, PSI/ISI 기술 국산화 계획을 본격적으로 추진하였다.

1980년대에 접어들어서는 원전의 PSI/ISI 기술을 수동 검사 분야, 와전류 검사 분야 및 자동 초음파



원자로 용기 원격 자동 초음파 검사

검사 분야로 세분화하여 본격적으로 NDE 기술 국산화를 추진하여 1985년 고리 4호기 PSI를 시작으로 한국원자력연구소 독자적으로 검사 및 평가를 수행함으로써 기술 자립을 이룩하였으며, 지속적인 검사 기술의 연구 개발을 통한 원전 PSI/ISI 검사 기술 향상으로 평가 결과의 신뢰도 증진 및 원전 안전성을 확보하였고, 축적된 고급 검사 평가 기술을 일반 산업체에 기술 이전시킴으로써 국내 비파괴 검사 기술의 기술 수준을 높일 수 있는 계기를 마련하였다.

현재 PSI/ISI에 활용되고 있는 NDE 기법으로는 원자로 압력 용기에 대한 자동 초음파 검사 기술 사

진을 비롯하여 가압기·증기발생기 등 주요 압력 용기 및 기기와 제1 & 2차 압력 경계 부위의 배관 용접부에 존재하는 결함 검출 기술로서 자동·수동 초음파 검사 기술, 액체 침투 검사 기술, 자분 검사 기술, 증기발생기 전열관 결함 검출을 위한 와전류 검사 기술, 그리고 육안 검사 기술 등이 활용되고 있다.

먼저 가동중 원자로 압력 용기의 구조적 건전성에 영향을 미칠 수 있는 결함 검출에 대한 검사 기술로서 원자로 용기의 고평사능 특성상 원격 방식에 의한 초음파 검사 기술이 적용된다. 검사 장비는 미리 작성된 검사 변수들을 입력시켜 자동으로 구동시키는 PaR(Program and

Remote) 시스템과 출력된 검사 데이터를 여러 형태로 수집·저장 및 처리시키기 위한 DAS(Data Acquisition System)로 구성되며, 원전 PSI/ISI 기술의 핵심이라 할 수 있다.

또한 가압기와 증기발생기 용접부의 결함 검출에도 자동 및 수동 초음파 검사 기술이 적용되며 가동 조건에 의해 발생될 수 있는 각종 결함을 사전에 검출하여 보수 유지 및 추적 검사를 통하여 압력 용기의 구조적 건전성을 확보하고 있으며, 연구소에서 독자적으로 수행한 PSI시 고리 4호기와 영광 2호기 가압기 및 울진 2호기 증기발생기 용접부에 존재하는 중대한 결함을 검출함으로써 국내 검사 기술 수준을 세계적으로 공인받았으며 원전의 안전성 확보에도 크게 기여하였다.

증기발생기 전열관은 1차 계통과 2차 계통 사이의 경계 면적 중 대부분을 차지하며 전열관에 결함이 존재할 경우 1차 냉각수의 유출 사고를 일으키게 된다.

전열관은 주로 Inconel 600 재질로써 관벽의 두께는 1mm 정도, 길이는 약 16~18m이며, 1개의 증기발생기 속에 수 천개의 전열관들이 밀집되어 있다.

전열관 검사는 와전류 검사 기술이 적용되며, 동 검사는 극도의 정밀성이 요구되는 기술로서 1985년 고리 1호기 제6차 ISI 때에는 국내

에서 처음으로 증기발생기 전열관에 심각한 결함들이 다량 검출됨에 따라, 미국 웨스팅하우스사와 독일 BBR사의 전문가도 참여하여 결함 평가에 대한 의견을 각각 제출함으로써 이 분야에서 외국 기관과 경쟁을 해야 하는 계기를 맞게 되었다.

이때부터 신호 평가 기술의 고급화에 더욱 주력하여 고리 1·2호기 등에서 많은 결함들을 검출함으로써 전열관에 대한 건전성 평가의 신뢰도를 높이게 되었다.

국내 원전의 PSI/ISI를 연구소 독자적으로 수행함에 따라 검사 기술 및 결함 평가 기술에 풍부한 경험과 고급 검사 기술 인력을 확보하게 되었으며, 1991년 2월에는 중국 광둥 원전 1 & 2호기의 PSI에 중국 핵동력은행연구소(RINPO)와 한국 원자력연구소가 비파괴 검사 기술과 검사 평가 기술 지원 협약을 체결하여 2년간에 걸친 기술 수출을 성공적으로 완수하여 연구소의 원전 검사 기술을 국제적으로 인정받았다.

계속적으로 광둥 원전 1·2호기의 ISI, 핀란드 Lovisa란 원전 ISI의 원자로 자동 초음파 검사, 미국 Calvert cliffs 원전 및 Palo Verde 원전 ISI의 증기발생기 와전류 검사에 검사 및 신호 평가 기술을 지원함으로써 1990년대에는 원전 검사 기술 수입국에서 기술 수출국으로의 전환점을 마련하였으

며, 연구소의 원전 검사 기술이 국제적으로 인정받음에 따라 이를 토대로 한국전력공사·한국전력기술(주) 및 한전기공(주) 등도 원전 운전·정비·보수 등 관련 기술을 외국에 수출할 수 있는 계기가 되었다.

2. 비파괴 검사 기술 연구 개발

NDE 기술 연구 개발은 1977년 이전에는 주로 방사성 동위원소를 이용한 방사선 투과 검사 기술에 대한 연구가 수행되었으나, 원전 PSI/ISI 기술 자립화라는 국가적 목표를 달성하기 위하여 초음파 검사 기술과 와전류 검사 기술 등 PSI/ISI의 핵심 기술을 위주로 연구가 수행되었다.

그 동안 연구 개발 활동을 요약하면, 첫째, PSI/ISI의 현장 검사에서 발생하는 문제점 해결을 위주로 연구 과제를 선택하고 결함 검출 및 평가의 정밀도를 높임으로써 검사 결과의 신뢰도를 향상시키기 위한 것으로, 원전 1차 계통 주배관부의 원심 주조 스테인리스강 용접부의 검사 기술 및 결함 크기 평가 기술에 관한 초음파 검사 기술 연구와 다중 주파수 와전류 검사 기술에 의한 잡음 신호 제거 기술 및 자기 포화 방식에 의한 투자법 연구들이 수행되었다.

둘째, 재료 특성에 관한 연구로 재료의 기계적 성질을 초음파 에너지의 감쇠 현상을 이용하여 조사하



는 연구와 초음파를 이용하여 잔류 응력 측정 기술에 관한 연구들이 수행되었다.

셋째, PSI/ISI에서 필요로 하는 검사 장비들의 국산화를 위하여 각종 표준 시험 편의 설계 및 제작 기술에 관한 연구와 초음파 검사용 탐촉자의 성능 평가 및 제작 기술, 검사 장비의 검교정 기술 등에 관한 연구가 수행되었으며, acoustic emission을 이용한 결함 발생 및 성장의 Online monitoring 기술 등 새로운 NDE 기술에 관한 연구들이 수행되었다.

또한 1980년대에 PSI/ISI 기술 자립으로 축적한 경험과 기술을 바탕으로 인공 지능을 이용한 검사 신호의 자동 평가 기술(전문가 시스템), 결함 신호의 화상 처리 기술 및 검사 장비의 자동화 기술, 손상 핵연료 검출 기술 등 첨단 기술의 연구 개발이 중점적으로 추진되었으며, 검사 장비 및 검사 요원의 검사 신뢰성 평가를 위한 기량 검증 시스템(Performance Demonstration Initiative System)을 마련하고자 원전 압력 용기 및 배관부의 결함 시험편 제작 기술과 검증 기술 개발을 위한 연구를 추진하였다.

원자로 압력 용기 재료 중성자 조사 취화 평가

원자로 압력 용기 노심대 재료

(core beltline materials)는 가동 중 고속 중성자($E \geq 1.0\text{MeV}$)에 조사됨으로써 재료의 기계적인 성질이 변하게 되어 파괴 저항성이 떨어지게 된다.

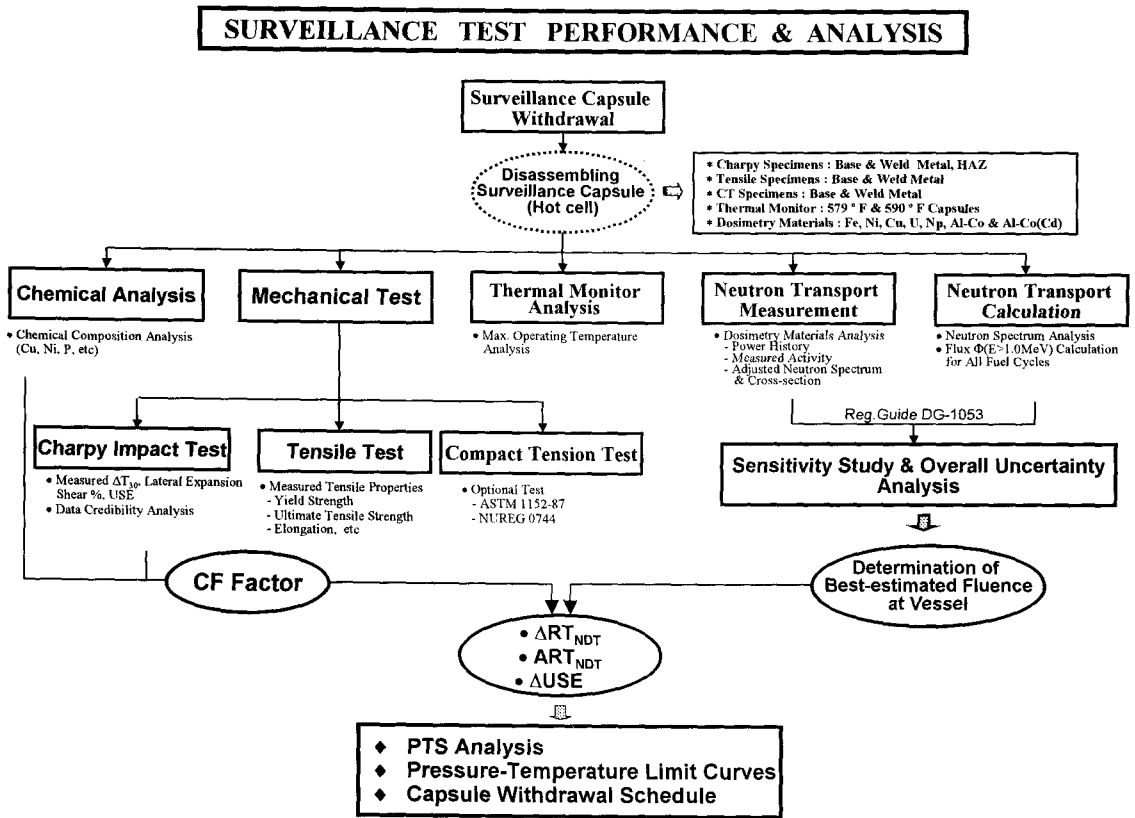
즉 가동중 높은 에너지의 고속 중성자와의 충돌에 의해 재료의 구성 원자가 이동하게 되어 재료 고유의 기계적 특성이 변하여 취화된다.

일반적으로 고속 중성자 조사에 의한 재료 물성 변화로써 강도와 경도의 증가와 연성 및 인성이 감소하는 조사 취화(Irradiation embrittlement) 현상이 나타나므로 재료의 조사 취화는 천이 온도(RTNDT)와 최대 흡수 에너지(USE)의 변화로써 평가되며, 원자로 가동중 충분한 안전성을 입증하기 위해서는 이 두 가지 기계적 성질이 원자로 수명 기간 동안 USNRC 10CFR50 및 과학기술부 고시 등의 규제 기준치를 만족하여야 한다.

원자로 용기 중성자 조사 취화 평가 기술은 원전 가동전에 원자로 용기 재료의 감시 시험편(Surveillance specimens)을 압력 용기 내에 장입해 두고 과학기술부 고시에 따라 주기적으로 인출하여 원자로 조사 취화의 정도 및 경향을 평가하여 설계 수명 기간 동안 원자로의 건전성 유지 여부를 평가하고 취화 정도에 따라 원자로 안전 운전 조건을 설정하는 원전 건전성 평가의 가장 핵심적인 기술이다.

원자로 용기 조사 취화 평가는 크게 2가지로 수행되는데, 먼저 감시 시험편은 고방사능 물질로써 조사 재 시험 시설을 이용하여 충격 및 인장 시험 등의 기계적 시험을 수행하여 가동중 발생된 중성자 조사에 의한 재료의 RTNDT와 USE의 변화를 측정한다. 다음, 원자로 운전 조건에 따른 시험편 인출 시점까지의 중성자 조사량 측정 및 계산 결과와 기계적 성질 변화량을 조합하여 원자로 설계 수명 말까지의 건전성을 평가하고, 평가 결과에 따라 원자로 구조적 건전성에 영향을 미칠 수 있는 문제점들을 사전에 대비할 수 있도록 한다.

국내 원전의 조사 취화 평가는 국내 기술 및 경험이 없어 1979년 고리 1호기 제1차 감시 시험에서 미국 SwRI 연구소와 공동으로 시험 평가를 수행한 이래 1986년 고리 2호기 1차 감시 시험부터는 원자력연구소 독자적으로 수행함으로써 원자로 용기 조사 취화 평가 기술을 확보하였으며, 조사 취화 평가의 기술 자립을 위한 지속적인 연구 개발 결과 시험 평가와 관련된 관련 규정을 충족할 수 있도록 각종 시험 및 원자로 용기의 최적 중성자 조사량 수송 계산 절차를 확립시켰으며, 원자로 가압 열충격 해석, 원자로 안전 운전 조건 해석, 평가 절차서 확립 및 국내 가동 원전의 조사 취화 data base를 구축함으로써 원자로 압력



<그림> 원자로 용기 조사 취화 평가 흐름도

용기 건전성 확보와 수명 관리에 활용토록 하였다.

국내 가동 원전의 조사 취화 평가 결과 전발전소가 설계 수명 말까지 조사 취화에 따른 문제점은 없는 것으로 평가됨에 따라 발전소의 경제성 측면에서 이제는 수명 연장을 위한 구체적인 방안이 마련되어야 할 시점이다.

특히 수명 연장을 고려하고 있는 고리 1호기의 원자로 가압 열충격 문제 해결 방법으로는 Master curve fracture toughness 기술을

이용한 발전소 고유 해석으로 해결이 가능하며, 조사 취화에 따른 원자로 안전 운전 확보 방안 및 감시 시험 이후 수명 연장시 원자로 용기 중성자 조사 취화 평가 방안으로서 Ex-vessel dosimetry 기술 등을 활용하면 보다 효율적이고 경제적인 수명 관리가 가능하다.

또한 기존의 원자로 용기 중성자 조사 취화 평가시의 불확실도를 줄이고 기존의 파괴적 해석 방법의 문제점을 개선할 수 있는 비파괴적 해석 방법에 대한 연구 수행으로 새로

운 해석 방법의 적용 가능성을 확인하는 데 주력하고 있다.

원자로 제어봉 안내관 지지핀 손상 원인 규명

원자로 제어봉 안내관 지지핀 재료인 니켈계 석출 경화형 합금 인코넬 X-750은 고온 내부식성이 강하기 때문에 고온 운전 환경의 원자로 부품에 널리 사용되고 있었으나, 1978년 일본 미하마 원전 3호기의 제어봉 안내관 지지핀에서

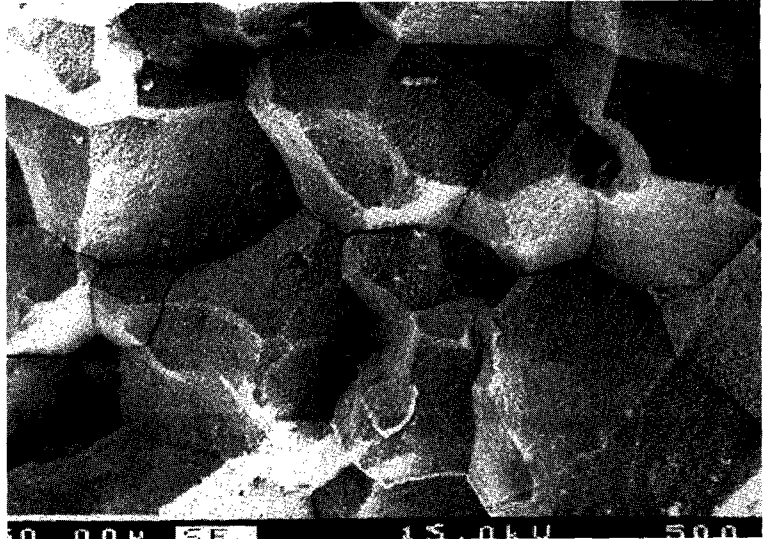


PWSCC(primary water stress corrosion cracking)에 의한 파손 사례가 보고된 이래, 프랑스 Framatome사 원전, 미국 Westinghouse사의 PWR 원전 및 1986년 고리 1호기 제8차 정기 보수 검사시 발견된 제어봉 안내관의 Flexure(인코넬 X-750재료) 손상도 PWSCC에 기인한 것으로 판명되어 제작사의 권고에 의거, 지지핀을 개선된 형(Rev. B type)으로 교체하였다.

국내 원전의 원자로 제어봉 안내관 지지핀은 재료의 열처리 조건 및 지지핀 형상 개선으로 crack 생성에 대한 저항성이 향상된 제2세대 핀(Rev. A type)에 해당하나, 제3세대의 냉간 가공 스테인리스 재질(CW316SS)의 신형 지지핀에 비해서는 PWSCC에 대한 저항성이 낮고 손상 사례가 발생함에 따라 제3세대 신형 지지핀으로 교체하였다.

영광 2호기 제10차 계획 예방 정비 중 증기발생기 "A", "B" 1차측 수실 내부에서 발견된 이물질들 수거하여 원자력연구소 조사재 시험 시설을 이용하여 분석한 결과, 원자로 상부 내장물 안내관 지지핀 부품 조각으로 판명되었다.

이에 따라 동 부품에 대하여 초음파 검사 및 육안 검사를 수행한 결과, 안내관 지지핀의 이탈 및 crack성 결함이 확인됨으로써 관련 지지핀을 교체 정비하였다.



인코넬 X-750 합금의 PWSCC 판단 사진

일반적으로 인코넬X-750 재질의 지지핀 파손은 PWSCC에 기인한 것으로 알려져 왔으나 국내에서는 지지핀 파손 기구에 대한 정확한 분석이 수행된 적은 없었다.

따라서 국내 원전의 운전 조건하에서의 정확한 파손 원인을 규명하고자 파손된 지지핀의 파단면 양상 및 금속 미세 조직 분석을 수행하였다.

분석 결과 지지핀 파손 기구는 인코넬 X-750 합금의 전형적인 파손 기구인 원자로 1차 계통 냉각수에 의한 PWSCC에 기인하여 발생하였음이 확인되었으며, 동 재료에 대한 파손 기구 규명은 국내에서 최초로 시도된 것으로써 국내 원전의 인코넬 X-750 합금 재질 부품의 PWSCC에 대한 주의 관찰을 경각시켰다.

수상 소감

본인은 1985년도에 원자력연구

소에 입소하여 원전 주요 기기 및 부품의 구조적 건전성 진단 평가의 핵심 기술인 PSI·ISI 관련 기술과 원전 수명 관리의 기준이 되는 원자로 용기 조사 취화 평가 업무를 수행하면서 본인의 업무 분야가 원전 안전성 확보에 직결된다는 것에 많은 보람과 책임감을 느껴왔다.

업무 성격상 항상 원전 실무자 분들과 접촉하면서 연구 업무의 실질적인 현장 적용과 효율적이고 경제적인 원전 수명 관리에 도움이 될 수 있는 연구가 절실히 요구된다는 것을 생각하여 왔으며, 본인에게 이러한 연구 여건을 제공해 주신 연구소 및 원전 관계자 분들께 깊은 감사의 말씀을 드립니다.

본인에게 주어진 한국원자력기술상은 아직도 부족함이 많은 자신에게 더욱 분투하기를 기대한다고 믿으며 연구소 동료 연구원들과 한국원자력산업협회에 진심으로 감사드립니다. ❀