

# 원자력재료기술 개발 현황

## (원자력 구조재료 평가 및 개발)

홍준화 | 한국원자력연구소

### 1. 머리말

‘재료열화(materials degradation)는 안전성 저해의 시발이며, 재료개발은 새로운 원자력시스템 개발의 초석’ 이듯이 원자력재료분야는 원자력산업에서 가장 기초, 기반이 되는 중요한 분야이다. 최근 원전에서 발생되어 커다란 안전성 문제가 되었던 열전달완충관 이탈사고 및 증기발생기 전열관 파단사고, 배관 파단사고, 그리고 원자로 관통관 부식 문제는 물론 수명연장에 있어서도 구성재료의 경년열화에 의한 건전성, 신뢰성 문제가 가장 핵심이며, 제4세대 원자력시스템 개발에 있어서도 고온재료, 내방사선재료 등의 개발이 필수임을 고려할 때 원자력재료 분야의 중요성은 아무리 강조해도 지나치지 않는다.

원자력재료 연구개발의 대상, 범위와 상호 연계성은 그림 1과 같이 나타낼 수 있다. 원자력시스템의 주요 기기 부품은 4대 원자력 특유환경 하에서 운전되며, 온도, 압력, 냉각재부식, 방사선조사 환경이 이에 해당된다. 모든 재료열화 및 손상은 단독 또는 복합 환경 하에서 일어나며, 이들 재료거동에 대한 평가 및 예측, 환경열화 원인규명과 이해를 바탕으로 한 경년열화 관리 및 대처, 그리고 이들을 극복하기 위한 재료개발, 신소재 개발로 원자력재료 연구를 특성화 할 수 있다.

신규 원전을 위한 부지확보 및 원전폐기로 인한 환경영향 문제 때문에 미국 등 원자력 선진국에서는 가동 중인 원전을 가능한 고효율/장수명 연장운전하려는 전략적 계획이 수년전부터 추진되고 있다. 이는 국토가 좁고 에너지 수요가 많은 우리나라에서도 최우선적으로 추진되어야 할 것으로, 최근 고리1호기에 대해 추진 중이다. 가동 중인 원전의 수명연장은 물론, 안전성과 경제성이 개선된 신형 원자로의 개발을 위해서는 무엇보다 부품의 건전성을 보증할 수 있는 기술이 필요하다. 이를 위해서는 부품소재의 장기간 사용에 따른 재료 경년열화 문제를 예측하고, 운전을 위한 적합성을 정확히 평가할 수 있는 기술의 개선이 필수적으로 요구된다.

원자력재료 연구는 가동중 및 미래형 원전의 주요 부품 구조재료에 대해 각각 고유 분위기에서의 내 환경 특성을 종합적으로 평가하고, 손상에 대한 대처기술 개발, 열화원인규명에 근거한 개량재료 및 신재료를 개발하는데 목적이 있다.

단기적으로는 가동 원전의 건전성을 보증하고, 안전운전/수명관리 (주기적안전성평가(PSR) 등), 설계 및 제조시방 개선, 그리고 안전규제시침 개발에 필요한 기반기술 및 기술자료(data)를 생산·제공하며, 중·장기적으로는 미래형 원자력시스템 개발에 필요한 소재특성 데이터베이스와 기술을 개발하여 국가적 기술요구에 부응하여야 한다.

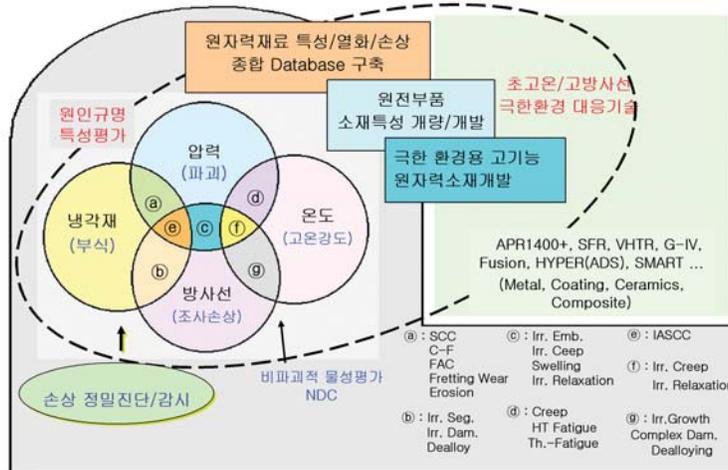


그림 1. 시스템 개략도 및 콘텐츠간 통신

이를 위하여 첫째, 원전부품의 건전성을 보증하는 소재 평가기술의 확보, 둘째, 조사취화/파괴/부식/물성/손상 관련 데이터 생산 및 손상에 대한 대처방안 수립, 셋째, 현용 원전소재 개량 및 미래형 원전소재 개발 등의 3가지 수행목표를 통하여 원전의 설계/제조/운전/규제/수출/연구에 종합적으로 필요한 국가적 재료기술기반을 구축하여야 한다.

원자력 기술분야 중에서 특히 우리나라의 재료연구는 핵물리나 설계·해석 등에 비해 뒤쳐져있고 발전 속도도 더디다. 이는 대부분의 재료연구가 장기간의 실험결과에 바탕을 둔 투자 지속형 하드웨어 연구이기 때문이다. 가동 중인 원전의 안전성뿐 아니라 개념 설계 중인 미래형 원자력시스템을 실제로 구현하기 위해서는 신뢰성 높은 재료특성이 뒷받침 되어야 한다. 원자력재료 연구를 위해서는 다양한 종류의 방사능 시편의 취급이 불가피하며, 제한된 인력과 설비를 가지고 선진국의 오랜 경험을 따라잡기 위해서는 국가적으로 지속적인 투자가 필요하다.

본고에서는 현재 가동 원전 그리고 개발 중인 미래 원자력시스템 주요부품 구조재료의 특성과 현황을 간략히 소개하고, 해외 및 국내의 원자력재료 연구개발 동향과 현황을 살펴보고 우리가 추진해야 할 연구개발 방향을 검토해 보고자 한다.

## 2. 원자력재료의 특성 및 현황

### 2.1 가동 원전 원자력재료

원자력발전소 기기부품의 구조재료는 기존의 발전소와는 달리 높은 에너지의 중성자 조사를 받으며, 고온, 고압(약 300℃, 2500 psig)의 냉각재(다양한 온도 및 불순물 농도)와 접촉해야 하는 등 원자력 특유의 환경에 처해 있고, 수명기간 중 부품 및 소재의 경년열화에 대비한 건전성이 유지되어야 하는 등 높은 안전성이 확보되어야 하는 특성 때문에 특별한 고려 하에 선택되고 있다.

원자력 시스템을 구성하는 재료는 현용의 경.중수로의 경우를 볼 때, 원자로압력용기, 1차 배관 등의 내압부품에

사용되는 탄소강, 합금강, 오스테나이트계강, 노내부품 등에 사용되는 스테인리스강, Zr-합금, 열교환기 전열관 등에 사용되는 Ni-합금, Ti-합금, 그리고 고온, 고방사선 분위기하의 내마모, 내부식용 부품에 사용되는 고기능 용 세라믹스, 복합체 등과 같이 매우 다양하다.

표 1. 경수로 주요 부품 구조재료

Reactor Component	Materials
○ Reactor Vessel - Shell, Flange, Nozzle - Cladding - Closure - Support - Core Support Pad	- Low-Alloy Steel(SA 533B1, SA 508-2, -3) - SS Weld (308L, 309L) - SA 540 Cr-Ni-Mo steel - SA 516, SA 533 - SB 166, Ni-Cr-Fe Alloy
○ Steam Generator - Shell - Tube - Support	- Low-Alloy Steel(SA 533, SA 508) - Ni-Base Alloy(Alloy 600, 690, 800) - SA 515, C-Steel, SA508, SA533
○ Piping, Valve, Pump, Pressurizer	- Duplex Cast Stainless Steel (SA351, SA451), SA508-1a, SS
○ Turbine - Rotor, Disc - Blade	- Ni-Cr-Mo-V steel, Cr-Mo-V steel - SS Type 410, 403(12 Cr SS)
○ Condenser Tube	- Ti, Super Austenitic SS
○ Bolting, Fastener, Pins, Spring	- Low-Alloy Steel, Alloy X-750, SA 286, SS

압력용기, 증기발생기, 가압기 등 1차계통 주요 내압기기의 동체(shell)로는 파괴저항성이 좋으며, 균질등방성과 용접성이 좋고, 내부결함이 최소화된 Mn-Mo-Ni계 저합금강이 주로 사용되며, 특히 원자로용기에 사용되는 SA 533B-1 판재나 SA 508-2, -3 단조재는 가동중 높은 중성자 조사에 따른 조사취화를 최소화하기 위해, 1983년부터는 조사손상에 민감한 원소인 Cu, P 및 S를 각각 0.1%, 0.015% 및 0.018%이하로 규제하고 있다.

1차 냉각재가 닿는 점액부는 부식손상 보호를 위해 오스테나이트계 스테인리스강이나 Ni기 합금(증기발생기 전열관)으로 구성되어 있으며, 예로 압력용기 내벽은 308L 또는 309L 등의 스테인리스강으로 용접 피복(cladding) 되어있다.

2차 계통에는, 기기 배관에 탄소강, 복수기관에는 Ti, Super Austenitic Stainless Steel 등, 그리고 터빈에서의 로터나 디스크는 Ni-Cr-Mo-V강, Cr-Mo-V강 등이, 블레이드는 페라이트계나 마르텐사이트계 스테인리스강이 주로 사용된다. 한편 각 부품 및 원자로내부구조물에 사용되는 볼트, 너트 등의 fastener나 pin, spring 등에는 저합금강이 주로 쓰이나 비교적 고온에서 높은 응력을 받는 부위에서는 시효경화형의 오스테나이트계 합금(Ni기 합금, 스테인리스강계 합금)이 사용된다.

부품 구조재료는 사용되는 동안에 역학적, 화학적, 열적효과에 의해 시간이 경과됨에 따라 점차 재료의 질이 저

하되어가고 (경년열화, aging degradation), 원자력 특유의 방사선조사도 받아 찻수, 형상 및 내부조직이 변화되는 등 여러 가지의 손상으로 사용상 지장을 초래하게 된다. 즉 수명 말기에 가까워지는 경우 고장이나 파손이 빈번히 일어날 수 있다. 이의 원인에는 설계 및 시공 불량, 제조결함, 조업과실, 재료열화 등 여러 가지가 있으나, 설비를 노후화 시키는 재료열화에 기인한 즉 경년열화에 의한 손상이 대부분이라 할 수 있다.

표 2는 경수로 부품 구조재료에서 발생하고 있는 재료열화기구를 종합한 것으로 각각의 열화기구에 대해 민감한 재료 및 손상 부품과 부위를 함께 보여준다. 중성자 조사손상 및 조사취화 (radiation embrittlement) 외에도 피로, 부식, 마모 등 거의 모든 기구에 의한 손상이 일어나고 있음을 알 수 있다. 경년열화 관리를 통한 기기부품의 건전성/신뢰성 확보를 위해서는 온도, 압력, 냉각재부식, 중성자 조사의 원자력 4대 환경 각각 또는 이들의 조합/복합 환경과 재료와의 상호작용에 대한 기본 이해가 바탕이 되어야 한다.

표 2. 원자력발전소 부품소재에서의 경년열화 기구(Aging Degradation Mechanism)

Degradation Mechanisms	Materials*	Degradation Sites, Components
1. Irradiation Embrittlement	All (LAS, CS)	All Reactor Components (Pressure Vessel, Vessel Support)
2. Irradiation Assisted Stress Corrosion Cracking(IASCC)	SS, IN	Reactor Internals, Spring, Pin, Bolt, Piping, Pressure Vessel
3. Thermal Embrittlement	CSS	Pipe, Valve, Pump, Casing, CRDM
4. Fatigue (Thermal, Mechanical, Flow Induced Vibration)	All	Pressure Vessel, Pipe, Nozzle, Rotating Equipment supports and Piping Attached to Large Components
5. Corrosion Fatigue (Eac, Env. Ass. Cracking)	All (CS, LAS)	Pressure Vessel, Pipe, Thermal Mixing Regions
6. General Corrosion	All	Low and No Flow Components
7. Pitting, Wastage, Denting, Crevice, Microbe Corrosion	All	Crevices and Hide out Regions, Stagnant Regions, Service Water, SG Tube
8. Stress Corrosion Cracking (SCC)	LAS, SS, IN	SG Tube, Pipe, RV, Internals, Weld Vicinity in Components, Off Chemistry Conditions
10. Erosion-Corrosion	All	Steam Piping, Steam Separator, Turbine Blade
11. Wear, Fretting	All	Rotating Equipment
12. Hydrogen Embrittlement	LAS, CSS	Internals, Vessel Cladding, Components Supports
13. Creep and Swelling	All	Internals (Radiation Assisted)
14. Weld Related Cracking (Lack of Fusion, Hot Ductility, Ferrite Deposition, Crevice)	All	Similar Metal Welds, Wrought Materials to Castings, Low Ferrite Filler Joints, Seam Welds
15. Dilution Zone Cracking	All	Dissimilar Metal Welds, Vessel Cladding, Nozzle to Safe Ends, Valve or Pump to Pipe (CS to SS)

\* CS(Carbon Steel), LAS(Low Alloy Steel), SS(Stainless Steel), IN(Inconel), CSS(Cast Stainless Steel)

## 2.2 개량 원자력재료 개발

개량재료 및 신소재를 적용함으로써 원자력발전소의 기기, 부품을 장수명화하고 신뢰성 및 건전성을 향상시키려는 연구가 많이 이루어지고 있다. 특히 일본에서는 기술연구조합 원자력용 차세대 기기개발 연구소(ANERI)를 설립하여 경/중수로의 기술 고도화의 일환으로 물리적, 화학적 안전성이 우수한 신소재를 원자력 발전소의 기기, 부품에 적용하여 발전소의 장수명화와 신뢰성 향상을 위한 연구개발을 행하고 있다. 진행되고 있는 연구과제를 소재별로 정리하면, 금속계 소재 32건, 세라믹스 소재 43건, 고분자계 소재 16건, 3가지 소재에 공통된 것이 2건으로써 각 재료별로 연구내용을 간단히 소개한다.

### (가) 금속계 재료

경수로는 고온, 고압의 시스템으로서 구성하는 기기의 수가 매우 많지만 어느 기기에 있어서도 사용 재료는 주로 금속계 재료로 이루어져 있다. 구체적으로는 해수펌프, 밸브, 노내 구조물(노내 지지판, 체결부품 등), 압력용기, 해수배관, 폐기물처리용 배관, 저압터빈 등을 대상으로 개발이 수행되고 있다. 요구되는 품질은 기기에 따라 다르지만 크게 나누면 해수에 대한 내식성의 향상, 응력부식균열의 저감, 내마모성 향상(장수명화, Co 용출량의 저감) 등이 있다. 신소재로서는 금속계 본래의 성분과 조직을 개량한 것(개량형 스테인리스강, 저Co 슈퍼스테인리스강, 결정제어합금, 분산강화합금 등) 뿐만 아니라, 최근 급격히 진보하고 있는 표면처리 분야의 최첨단기술과 복합재료에도 미치고 있다. 또한 대형과제인 Co-free 내마모성 재료의 개발에 이바지하기 위해 조합원 10개 회사의 공동연구로 “Co-free 내마모성 재료의 연구”가 행해졌으며 마모기구의 해석, 내마모성 재료개발의 설계지침 등에 관한 새로운 지식을 얻을 수 있었다.

### (나) 세라믹계 재료

세라믹계 재료의 개발 대상은 단체(單體) 세라믹스(구조용 세라믹스), 세라믹스 코팅, 절연체, 가스켓, 수처리용 필터, 계측장치용 부품 등, 다양한 분야에 걸쳐 있다. 지금까지의 연구개발 결과 단체 세라믹스 가운데 탄화규소는 원자로 냉각계 펌프의 mechanical seal, 질화규소는 해수 펌프 축수용 재료로 우수한 특성을 가진 것이 개발되었으며, 탄화크롬도 우수한 안정성과 내마모성을 가져 제어봉 구동장치용 가이드 롤러로서의 적용이 기대되고 있다. 세라믹스 코팅에 있어서도 다양한 재료 및 프로세스에 대해 연구개발이 이루어져 왔지만 특히 CrN 코팅은 고온, 고압수중에서 우수한 안정성, 내마모성을 가져 밸브시트 등에 대한 Co 용출 방지용 코팅재료로서 연구개발이 진행되고 있다. 그 외에 내열성이 우수한 전기 penetration seal 재료, 내기밀성이 우수한 펌프용 탄소섬유강화 탄소복합재 가스켓, 고온에서도 수처리가 가능한 탄화규소 필터, 장기 안정성이 우수한 중성자 검출기 기밀 seal 재료 등 다양한 분야에서 우수한 특성을 가진 부품이 개발되고 있다.

### (다) 고분자계 재료

고분자계 재료는 고온, 고압의 조건하에서 사용이 곤란하기 때문에 연구과제 수는 적지만 성형성을 가진 유리섬유 강화 플라스틱(FRP)의 해수배관과 소수성, 내열성에 착안한 테프론 농축막 필터, 혹은 자기연마성을 가진 해수생물 부착방지 도료 등 갖가지 기능을 가진 독특한 연구가 이루어지고 있다.

### (라) 공통 재료연구

이상의 각 소재별 연구과제와는 달리 각 소재에 공통되는 연구로서는 중성자 조사시험, ANERI 데이터베이스의 구축 등의 연구가 행해지고 있다. ANERI의 데이터베이스 구축은 현재 보고서의 형식으로 보관되어 있으며 지금까지 10여년간에 걸친 ANERI 프로젝트의 방대한 연구성과를 데이터베이스화하고 필요시에 검색 가능한 시스템

을 구축하여 연구에의 활용을 계획하고 있다.

### 2.3 미래 원자력시스템 원자력재료

현재 가동 중인 원자로는 1950-60년대에 개발된 것으로 (특히 사용재료는 40년 이상 전에 개발되고 선정된 것임) 전력공급의 중핵을 담당하여 왔으나, 최근 선진 각국에서는 열효율이 좋고 안전성이 뛰어난 그리고 신뢰성, 유지성, 경제성을 고려한 제4세대 원자로 (G-IV, Generation IV Reactor)의 개발에 박차를 가하고 있다. 우리나라를 포함하여 미국, 영국, 프랑스, 일본 등 10여국이 2030년 실용화를 목표로 21세기 원자력시스템 개발을 위해 공동 노력 중이다. 6개의 개발 후보 원자력시스템으로는, 가스냉각고속로 (GFR, Gas Cooled Fast Reactor), 용융 염원자로 (MSR, Molten Salt Reactor), 납합금냉각고속로 (LFR, Lead-Alloy Cooled Fast Reactor), 소듐냉각고속로 (SFR, Sodium Cooled Fast Reactor), 초임계압경수로 (SCWR, Supercritical Water Cooled Reactor), 초고 온가스로 (VHTR, Very High Temperature Reactor)가 있다. 우리나라에서는 SFR, SCWR, VHTR에 관심을 갖고 공동 개발에 참여하고 있다. 특히 VHTR은 수소생산원자로로서 주 관심 대상이다. 위에 열거된 6종류의 차세대 원자로는 공히 현용 경수로 등에서 보다 높은 온도, 높은 중성자 조사조건, 다양한 냉각재 등 더욱 가혹한 환경에서 운전된다. 이의 실현을 위해서는 높은 온도의 냉각재와 높은 방사선 조사 조건에서 견딜 수 있는 고온재료, 방사선저항성 재료, 헬륨가스, 액체금속, 초임계수 등 다양한 냉각재와의 양립성 확보가 가능한 내부식재료의 개발이 선결 조건임을 쉽게 짐작할 수 있다.

표 3은 현재 검토되고 있는 6종의 차세대원자로 각각에서의 가동온도, 핵연료, 핵연료피복재, 노심 및 기타부품 구조재료에 대한 요구조건 및 후보재료의 목록을 보여준다.

차세대 원자로 주요부품의 후보재료로는 대부분 고온재료로 높은 크롬 함유의 페라이트-마르텐사이트계 강 (FMS)과 스테인리스강 류 그리고 Ni-합금이 주류를 이룬다. 또한 산화물분산강화합금 (ODS), 나노결정립합금, 결정립조절합금 등도 포함된다.

다음은 원자력시스템에서 사용온도 구역에 따른 일반적인 재료요건을 종합한 것이다.

- 300-600°C 에서 사용되는 재료 : 이 온도구역에서 사용되는 금속재료는 충분한 피로 및 파괴 저항성과 충분한 강도를 가져야하며, 조사유기편석, 석출, 공공 생성/성장, 전위환성장, 크리프, 고온부식, 응력부식균열 등과 같은 확산유기 현상에 대한 충분한 저항성을 가져야 한다. 후보재료로는 오스테나이트계 철 및 니켈합금, 페라이트-마르텐사이트 합금, 산화물 분산강화 페라이트 또는 오스테나이트계 합금이 포함된다.
- 600-900°C : 이 온도구역에서는 조사유기 기구 보다는 열적인 기구가 금속계 재료의 거동을 좌우한다. 용점의 60% 이상의 온도 (0.6Tm) 에서는 조사유기결함 (조사손상)은 점차 소멸되기 때문이다. 통상의 오스테나이트-, 페라이트-, 페라이트-마르텐사이트 강은 어느정도의 하중을 받는 600°C 이상에서는 사용할 수 없다. 분산강화강이 800°C 까지는 크리프 저항성을 줄 수 있는 재료로 알려져 있다. 다른 후보재료로 고온강도 및 고온 크리프 저항성을 갖는 석출경화형 철 및 니켈기 초합금, 코팅재료, Mo, Nb, Ta의 내화물합금을 들 수 있다. 그러나 고온 조사조건하에서의 미세조직 변화에 대한 자료가 보완되어야 하고 내화물합금에서의 인성 및 산소불순물 흡수에 의한 취화 문제가 해결되어야 한다.
- 900°C 이상 : 900°C 이상 온도에서의 금속재료로는 오직 W- 이나 Mo-기 합금만이 사용될 수 있다고 거론된다. 그러나 이 재료들도 조사조건에서의 미세조직에 대한 자료가 매우 부족하다. 금속계 합금의 제한으로

표 3. 차세대 원자로 사용조건 및 후보재료

System	Neutron Spectrum, Toutlet	Fuel	Fuel Cladding	Structural Materials	
				In-core	out-of-core
GFR	Fast, 850°C	MC/SiC	Ceramics	Refractory metals and alloys, Ceramics, ODS Vessel: F-M	Primary Circuit: Ni-based superalloys 32Ni-25Cr-20Fe-12.5W-0.05C Ni-23Cr-18W-0.2C F-M w/therm barriers Turbine: Ni-based alloys or ODS
LFR (Pb Alloy)	Fast, 550°C and Fast, 800°C	MN	High-Si F-M, Ceramics, or Refractory alloys		High-Si Austenitics. Ceramics, or Refractory alloys
MSR	Thermal, 700°C	Salt	Not Applicable	Ceramics, refractory metals, High-Mo Ni-base alloys (e.g., INOR-8), Graphite, Hastelloy N	High-Mo Ni-base alloys (e.g., INOR-8)
Na-LMR (Metal)	Fast, 520°C	U-Pu-Zr	F-M (HT9 or ODS)	F-M ducts 316SS grid plate	Ferritics, Austenitics
Na-LMR (MOX)	Fast, 550°C	MOX	ODS	F-M ducts 316SS grid plate	Ferritics, Austenitics
SCWR-Thermal	Thermal, 650°C	UO <sub>2</sub>	F-M (12Cr, 9Cr, etc.) (FE-35Ni-25Cr-0.3Ti) Incoloy 800, ODS Incoloy 690, 625 & 718	Same as cladding options	F-M
SCWR-Fast	Fast, 650°C	MOX, MN, Metal Dispersion	F-M (12Cr, 9Cr, etc.) (FE-35Ni-25Cr-0.3Ti) Incoloy 800, ODS Incoloy 690 & 625	Same as cladding options	F-M
VHTR	Thermal, 900-950°C	TRISO UOC in Graphite Compacts; ZrC coating	ZrC coating and surrounding graphite	Graphites PyC, SiC, ZrC Vessel: F-M	Primary Circuit: Ni-based superalloys 32Ni-25Cr-20Fe-12.5W-0.05C Ni-23Cr-18W-0.2C F-M w/therm barriers Turbine: Ni-based alloys or ODS

**Abbreviations :**

GFR : Gas Cooled Fast Reactor	F-M : Ferritic-Martensitic stainless steels (typically 9 to 12 wt.% Cr)
LFR : Lead-Alloy Cooled Fast Reactor	ODS : Oxide dispersion-strengthened steels (typically ferritic-martensitic)
MSR : Molten Salt Reactor	MN : (U,Pu)N
Na-LMR : Na-Liquid Metal Reactor	MC : (U,Pu)C
SCWR : Supercritical Water Cooled Reactor	MOX : (U,Pu)O <sub>2</sub>
VHTR : Very High Temp. Reactor	

세라믹스가 고온부품재료로 유력시 되나 이 또한 조사성능에 대한 자료가 필요하다.

- 차세대 원자로에서 필요한 공통적인 재료로는 조사저항성 내방사선재료, 저방사화재료, 부식 및 응력부식저항성재료, 고온/고강도/고인성 재료 등을 들 수 있고, 높은 온도 및 방사선환경에서도 강도, 인성, 피로특성, 크리프성질 등 기계적성질이 우수하여야 하며 부식과 응력부식저항성이 우수한 등 높은 온도의 다양한 냉각재 (물, 가스, 액체금속) 와의 양립성이 유지되어야 한다.

### 3. 원자력재료 연구개발 현황

#### 3.1 해외 연구개발 동향

원자력 선진 10개국은 가동 중인 원전의 장수명/고출력 연장운전을 위한 기술개발에 전략적 연구개발 프로그램들을 가동하고 있으며, 동시에 안전성과 효율이 향상된 제4세대 원자력시스템 개발을 위하여 GIF (Generation-IV International Forum)를 구성하고 각 나라 자체는 물론 국제공동연구를 적극 추진하고 있다. 그 세부내용 중에서는 가동 중 혹은 미래형 원자력시스템 환경에서 재료 열화 및 손상에 대응하기 위한 최적 기술의 개발 분야가 첫 번째로 지목되며, 이에 대한 기술개발은 중장기적으로 꾸준한 투자가 필요한 분야로 분류되어 있다.

미국 에너지성(DOE)은 가동원전의 최적화를 목표로 2000년도부터 시작된 NEPO (Nuclear Power Plant Optimization) 프로그램에서는 2/3 이상의 예산이 원자로압력용기 및 배관, 증기발생기의 재료에서 발생하는 경년 열화 및 손상에 대처하기 위한 연구과제에 집중되고 있다. 또한 미국 전력연구소인 EPRI에서는 장기적으로 수행되고 있는 MRP (Materials Reliability Program) 실험연구 과제를 통해 재료 신뢰성에 관한 실제 적용 가능한 많은 기술 및 자료를 생산하고 있다. 미국 DOE/NPI 는 Strategic Plan for LWR R&D를, NEI는 NEI-03-08 Managing NPP Materials Issues를 발표하였으며, 여기에는 재료열화 관리기술이 지속적인 장기 연구개발 목표의 첫 번째로 명시되어있다. 그리고 최근 문제시 된 Alloy 600 및 이종금속용접부에서의 재료열화문제가 주요 현안이 되고 있으며 RPV head penetration의 Alloy 600/182 용접재의 1차측 응력부식균열 (PWSCC) 관련연구가 미국 원자력규제위원회(USNRC)를 중심으로 활발히 진행되고 있다.

유럽연합(EU)은 지속적인 EURATOM Framework 프로그램을 통해, AMES (Aging Materials Evaluation and Studies), ENIQ, NESC 등 원전의 수명관리와 관련된 재료열화, 감시진단, 건전성 해석기법 등의 기술개발분야를 network으로 묶은 SAFELIFE (Safety of Aging Components in NPP) 프로그램을 수행 중이다. 또한 파괴역학 건전성 해석기법의 최적화 및 국제 표준화를 위해 유럽 내의 많은 연구기관이 공동 참여해 온 SINTAP 프로그램

의 후속으로 FITNET 프로그램이 운영되고 있다.

또한, 최근 선진국에서는 원전재료손상에 대해서 건전성 평가를 수행하는 수동적 접근(reactive)의 틀을 벗어나, 사전사고 발생이전에 예방적 차원의 능동적 대처(proactive)를 수행할 수 있는 원천기술을 확보하는 패러다임으로 전환하고 있다. 미국 NRC 주관의 PMDA (Proactive Material Degradation Assessment) program과 EPRI 주관의 MRP (Material Reliability Program), 그리고 EU Framework (EU-FP) 프로그램이 대표적인 예이다.

이상 제시한대로 미국과 유럽연합의 연구개발 분야에는 공통적으로 재료열화문제에 대한 중장기 연구개발이 첫 번째로 제시되고 있으며, 여기에는 조사취화, 부식 및 응력부식균열, 피로, 이종금속 용접부 건전성, 비파괴 탐지, 진단감시, 파괴역학 기법의 개선 및 영향에 대한 연구 분야가 핵심을 이루고 있다.

### 3.2 국내 연구개발 현황

우리나라는 1980년대 중반부터 경수로 원자력발전소의 설계를 한국원자력연구소에서 국산화하여 한국표준형 원전기술로 정착시켰고 (현재 설계는 한국전력기술(주)로 사업 이관), 대형 원자력 기기 및 부품의 제조는 두산중공업(주)를 중심으로 꾸준히 국산화를 추진하여 국제적인 경쟁력을 갖추어 가고 있다. 또한 원전기기의 기능에 핵심적인 역할을 하는 소재기술력도 기기별로 확보되고 있어서 원자로압력용기를 포함하여 주요 부품 재료들을 국산화하였다. 그러나 고도의 건전성 확보와 해외 수출부문에서 국제적인 경쟁력 우위에 서기 위해서는 원자로압력용기 및 각종 용기(shell)류, 일부 1차 배관부품, 증기발생기 세관 및 관련 용접, 표면처리기술 등에 있어서 지속적인 품질향상이 필요하다. 이러한 종합적인 기술력 확보를 위해 원자력중장기사업 등을 통한 원자력재료 관련 과제에서는 유관기관과 유기적인 협력체제 하에 주요부품 소재의 열화문제에 대한 상세평가 기술 및 데이터를 축적하고 있으며, 산학연 기술협력체제가 다양한 형태로 운영되고 있다. 관련 연구로는 한국원자력연구소 및 학교를 중심으로 한 핵심기반기술 및 자료생산연구와 한전전력연구원(KEPRI), 한국수력원자력(주) 등 산업계를 주축으로 한 실용화, 현장 적용 연구, 그리고 원자력안전기술원(KINS)을 중심으로 한 규제기준 관련연구로 대별된다.

또한 선진국에서는 현재는 경수로에서 축적된 이러한 재료기술의 바탕위에 고속로, 초임계로, 고온가스로, 핵융합로 등 미래형 원전재료 개발에도 많은 투자를 하고 있는 것을 감안하여, 우리나라에서도 원전기기재료의 경년열화 등에 의한 노화특성 예측 및 관리기술 구축은 물론 원자력 특수환경 하에서 재료 특성 및 열화손상에 대한 국내 고유의 종합 데이터베이스의 확보 그리고 미래 원자력시스템 시장의 개척을 위해 원자력소재의 개량 및 신소재 개발 연구도 국가적인 목표로 추진하고 있다.

한국원자력연구소 (이하 KAERI) 에서의 원자력재료 연구는 원전 특수 환경에서 부품·소재의 열화특성을 평가·예측하는 기술을 개발하여 능동적으로 손상을 대처할 수 있도록 하고 (PMDA, Proactive Materials Degradation Assessment), 실제 사용소재에 대한 원전환경에서의 장기간 특성시험을 통한 데이터베이스를 구축하며, 원자력 환경 저항성이 우수한 원자력재료를 개선하고 개발하는 것을 목표로 하고 있다. 이를 통하여 원자력 부품·소재 신뢰성 확보 및 안전성 향상에 기여할 뿐 아니라, 수소생산 고온가스로 등 제 4세대 원자력시스템 (Gen-IV), 핵융합로와 같은 미래 원자력시스템용 소재개발을 위한 기술기반을 제공한다. 개발된 재료기술 및 재료물성 데이터베이스는 국내 원자력계의 설계자, 제작자, 운영자, 규제자, 연구자 등 산·학·연 전 분야에 활용될 수 있다.

KAERI에서의 재료연구는 4대 원자력 특유환경에 따른 재료성능 평가 및 향상을 위해 파괴, 부식, 고온·신재료, 조사손상 그리고 손상 정밀진단/감시의 5개 세부분야로 구분할 수 있다. 이 외에도 원자로계통 부식방지 및 방사선량 저감화를 위한 수화학 기술개발, 중수로 압력관 건전성 평가기술 및 원격유도 초음파 등 최신 비파괴평가 기술을 이용한 물성 및 결합 평가기술 개발, 그리고 나노소재응용 연구와 고온 초전도체 연구, 원자로 감시시험 연구도 함께 수행되고 있다.

본 고에서는 KAERI 재료연구 분야의 연구개발 현황을 간략히 소개한다. 원자력재료의 기계적, 화학적, 물리적 거동 특성을 거시적 및 미시적으로 시험, 분석하고 평가할 수 있는, 그리고 금속, 세라믹 및 신소재를 제조하고 가공할 수 있는 각종 시설 장비를 보유하고 있다. 각 세부 연구실별 연구현황, 보유기술 등을 소개하면 다음과 같다.

파괴특성평가 및 향상기술개발 연구실에서는 가동중 원자로의 건전성 보증 및 고출력/장기운전을 위해 원자로 압력용기 및 계통배관을 대상으로 고신뢰도의 파괴거동 평가/예측 신기술을 개발하고 있으며, G-III+, G-IV 등 미래원전을 위한 내압기기용 철강소재 개량연구를 수행하고 있다.

주요 보유기술로는 저온/고온, 정적/동적 파괴역학 특성평가, 소형시편을 이용한 조사재 평가시험, 열피로 균열 특성시험, 탄소성 FEM 해석에 기초한 재료미세 파괴거동 예측 등 재료역학적 시험평가 및 해석기술 분야이다. 원전재료의 조사취화특성과 LBB 배관의 탄소성 J-R 파괴저항특성 시험평가의 경험 및 데이터베이스는 국내 관련 분야에 원천기술 중심지로서 선도역할을 담당하고 있다. 최근에는 수명연장을 위한 고리 1호기 원자로의 조사취화 파괴역학 평가를 수행함으로써 국내원전의 계속운전 안전성 보증에 기여하고 있다. 연구실에서 보유하고 있는 관련 기술들은 원전 운영자/설계자/제작자 등에서 요구되는 문제해결을 위해 수탁과제 형태로 직접 산업체에 적용되고 있으며, IAEA, USNRC 등 외국 유관기관과의 공동/협력 연구를 통해 기술의 선진화 및 신뢰도를 확보해 가고 있다. 또한 엄격한 품질보증체계를 확립함으로써 연구 결과의 고급화를 지향하고 있다. 그림 2는 열피로 시험장치 및 방사성시료인 조사재 파괴인성 시험 시스템을 보여준다.

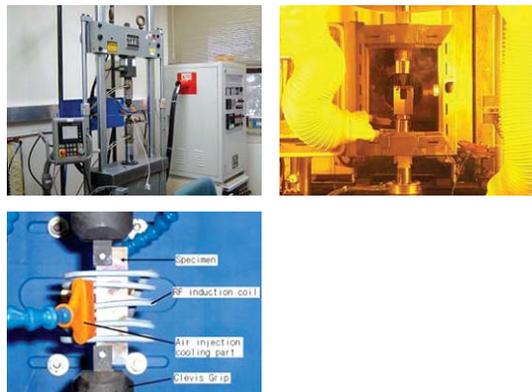


그림 2. 열피로 특성시험 및 조사재 파괴인성시험 시스템

부식 연구실에서는 재료부식 기구와 속도론에 관한 근본적 원리를 연구하며, 동시에 부식관련 건전성평가기술, 재료개선기술, 보수기술, 현장지원기술 등을 산업현장에 접목시키는 연구를 병행하고 있다. 주요 연구대상은 증기발생기 전열관 및 이중금속 용접부위 등이다. 재료부식연구의 대표적인 사례로 고온고압 분위기에서 ‘1차측에서 수소분압과 응력확대계수에 따른 응력부식균열 속도론 연구’, ‘2 차측 환경에서 전열관재료의 응력부식연구’, ‘응력부식에 영향을 주는 부동태피막의 물리화학적 성질에 관한 연구’, ‘전해도금기구 규명’, ‘부식억제제의 부식억제기구 연구’ 등을 들 수 있다. 산업현장 지원 대표적인 연구사례로 ‘원전 증기발생기 전열관 손상원인분석’, ‘울진4호기 증기발생기 전열관 파단원인 분석’, ‘영광5호기 원자로 용기 부식실증시험’ 등을 들 수 있다. 또한 USNRC 주관의 ISGTIP-3, PINC, PMDA program, ICG-EAC 등 국제공동연구 및 round robin test 참여를 통해 선진화 및 신뢰도를 확보하고 있다. 그림 3은 대표적 PWSCC test loop 을 보여준다.



그림 3. PWSCC test loop

고온강도 및 신재료기술 연구실에서는 고온환경에서의 재료특성 평가를 바탕으로 고온금속재료 및 고온 구조세라믹재료 개발연구를 수행하고 있다. 또한 재료물성 데이터베이스(DB)도 구축하고 있다. 개량 316NG강과 고온재료로 고크롬 FMS (Ferritic-Martensitic Steel) 강, 고크롬 ODS (Oxide-Dispersion Strengthened) 강, 고밀도 SiC/SiC 복합체를 개발하며, 장시간 고온특성시험과 조사시험을 통하여 고온물성을 검증하고 실험데이터를 생산하고 있다.

내방사선특성 및 고온 기계적 특성이 우수한 초정밀 고기능 세라믹스 연구 세부 분야에서는 20cm 이상의 크기를 갖는 대형 구조물에 대한 SiC 화학증착 기술 및 장섬유 강화 세라믹 복합체와 같은 SiC계 복합재료의 제조기술을 개발하고 있다. 주요 보유기술로는, 대면적 기판의 고순도 SiC 코팅기술, C-C 복합체 플라즈마 대면재의 내식성, 내산화성 증진을 위한 기능경사 코팅 기술, CVI 방법을 이용한 탄소 및 SiC 장섬유 강화 SiC 기지 복합재료 개발기술, 연소합성법을 이용한 삼중수소 증식재용 소재 및 산화물, 금속 나노분말 제조기술, 고온가스로용 연료입자 피복기술, 세라믹스 소재의 방사선 조사특성 평가기술 등이 있다.

원자력재료 국가지적재산 생산을 위한 재료물성 종합DB 구축 세부분야에서는, KAERI에서 생산된 재료 물성 및 특성을 DB화하여 국가지적재산으로 보존하고, 국내 관계자에게 공개하고 있다(<http://matdb.kaeri.re.kr>). 현재

인장, 충격, 피로, 파괴인성/저항성, 부식, 균열속도, Creep 특성 등 9종의 원전재료물성 DB를 구축하였고, 약 400건의 재료물성자료집을 발간하였다.

조사손상 연구실에서는, 원자로재료에서의 고에너지 중성자 조사에 의한 손상 즉 조사손상을 평가, 예측하기 위한 기술개발을 목표로, 첫째, 간이 조사재 시험시설(semi hot-lab)의 구축, 둘째, 조사결합의 정밀 측정을 위한 분석기술개발, 셋째, 조사손상 기구 이해와 예측을 위한 전산모사 코드 개발을 수행하고 있다. 조사결합 종류별 분석 기술 확보, 전자현미경에 의한 다양한 조사결합의 분포 및 성장거동 분석 기술 개발, 전산모사에 의한 조사결합의 생성/성장 및 조사취화 거동 해석, 분자동력학(MD)에 의한 결합생성 전산모사기술 개발, 키네틱 몬테카르로 방법(KMC)에 의한 결합 성장거동 모사기술 개발, 전위동력학(DD)에 의한 조사취화 거동 모사기술 개발, 조사결합의 열처리 회복기구 규명, 조사손상 소멸결과 평가기술 개발, 미소자성측정 등 비파괴적 방법을 이용한 조사손상 평가기술 개발 등 관련 연구를 심층 연구 중에 있다. 또한 중저준위 조사재 시험분석을 위한 간이 조사재 시험시설을 구축하여 IMEF(조사재시험시설)와 상호 보완적으로 활용하고 있다. 대표적 보유기술로는 전자현미경, 양전자소멸장치(PAS), 소각중성자산란장치(SANS), 미소자성측정장치(MMMS) 등을 이용한 미세 조사결합 분석기술과 조사손상 전산모사기술 등이 있다.

구조재손상 정밀진단/감시 연구실에서는, 원전 증기발생기 및 구조재의 손상 정밀진단/제어와 관련된 혁신적인 기술개발, 개발기술의 신뢰도 검증, 상세기술 체계화를 통한 기술 실용화 연구, 개발기술 이용, 손상결합 정밀진단 및 평가, 원전 가동중검사 기술지원, 안전규제/보수 기준 기술지원, 설계/제작 반영자료 생산 및 Feedback 등의 연구를 수행하고 있다. 주요 연구성과로는 증기발생기 전열관 미소 형상변화 측정용 신형 ECT D-probe, P-probe 개발, 전열관 축방향균열 관통 판정 기술 및 자동평가 프로그램 개발, 가압경수로형 증기발생기(CE type) 상부 반진동구조물 개량모델 개발, 증기발생기 전열관 자연결합 제조 및 단위집합체 제작기술 개발을 들 수 있다. 주요 장비로는, MIZ 70 ECT instrument 및 평가용 전산장비, 자연결합 생성용 변형률 가변 부식시험 장치, Laser 검사시스템, 수압확관 장비 등이 있다.

수화학 연구실에서는, 조사환경 하에서 원전 계통의 물/증기와 구조 재료, 핵연료 사이의 상호작용을 연구하고 있다. 원전 계통의 수화학적 조건(pH, 포텐셜, 용존 원소 농도)에 따라 원전 구조재 부식 특성, 핵연료 피복재 산화특성, 원전 출력 특성, 방사화학 특성이 크게 변화한다. 따라서 적절한 수화학 제어 기술을 이용해서 수화학 조건을 최적화하면, 1) 원전 주요기기 부식 방지, 2) 핵연료 건전성 향상, 3) 출력 증강 및 4) 원전 방사선 저감 효과를 얻을 수 있다. 원전 수화학 제어 기술은 원자로의 건전성 및 경제성에 큰 영향을 미치는 중요한 기술이다. 부식에 미치는 1, 2차 계통 수질(용존 수소) 및 첨가제(나노입자)의 영향 평가/시험, 틈새 수화학 감시/제어 기술, Zn 주입 기술에 의한 부식과 방사선 저감 효과에 대한 연구가 진행 중이다.

중수로재료 및 비파괴평가 연구실에서는, 중수로 압력관 Zr-2.5Nb 합금 등에서의 열화거동을 평가할 수 있는 고방사능 압력관의 재료물성시험/건전성평가 기술 및 열화 진단 기술 개발을 수행하고 있다. 핫셀에서 고 방사능 압력관으로부터 재료시험시편 제조기술과 원격 재료시험 장비, 절차를 독자 개발하였으며, 압력관의 핵심 열화현상인 수소지체균열(DHC) 현상을 세계에서 처음으로 규명하였고, 자체개발 DHC 모델은 기존 압력관 검사관련 기술기준 수정에 반영될 예정이다. 아울러, 압력관과 칼란드리아관의 접촉으로 발생되는 블리스터의 초음파 진단기술 및 상용 압력관보다 성능이 우수한 2종의 압력관 개발의 괄목한 만한 성과도 올렸다.

원전배관 및 피터관의 비파괴 진단/감시기술 소분야에서는, 기존의 비파괴검사기술을 적용하기 어려운 경우에

대비한 원거리 유도초음파 검사법을 개발하고 있다. 유도초음파 전파 특성을 해석하여 전자기음향(EMAT) 센서와 자기변형센서를 적용한 유도초음파 기술을 개발하고 있다. 특히 최근에는 자기변형 센서 재료로써 기존에 사용하던 Ni 재료 외에 Fe-Co 합금 재료의 우수한 성능을 검증하였으며 이를 바탕으로 배관에 발생한 결함은 물론 미시적인 변화인 열화현상까지도 진단/감시하기 위한 기술을 개발중이다. 또한 적용이 곤란하였던 증기발생기 전열관이나 복수기 세관에 대해 내삽형 자기변형 센서를 개발하여 유도초음파 검사법을 적용하는 연구도 수행중이다.

원자력 나노소재응용 연구실에서는 나노개량소재 개발 및 미래형 전력소재, 에너지 저장소재로의 초전도 벌크 및 선재 개발을 수행하고 있다. 연구과제로는, 나노 복합재 분산용 금속 및 세라믹 분말 제조기술 개발, 나노개량 고강도 내침식 소재 기술 개발, 나노입자를 이용한 의료센서 개발, 에너지 저장소재인 베어링용 초전도 벌크 및 고전류 특성 초전도 선재 개발, 초전도 박막의 증착기술 개발 등이 있다. 보유 기술로는 크기 제어가 가능한 금속 및 세라믹 나노분말 제조기술 (전기선 폭발법, 부양증발가스응축법, 펄스전자빔법 등), 자기 Pulse 를 이용한 초고강도 나노분말 제품 동적성형기술, 나노기술 이용 장수명 구조소재 제조기술, 나노입자의 전기영동 특성을 이용한 손상부위 보수 기술, 초전도 단결정 벌크 및 선재 제조기술 등이 있다. 보유시설 장비로는 다양한 나노분말 제조장치, 자기펄스 이용 나노분말 동적성형장치 및 MOCVD 초전도 박막 제조장치가 있고, 전기선 폭발장치를 이용한 나노분말 제조 장치와 나노분말을 이용한 엔진치료제 “나노닥터” 개발하여 (주)나노기술에 기술이전 한 바도 있다. 그림 4는 나노분말 제조장치를 보여준다.

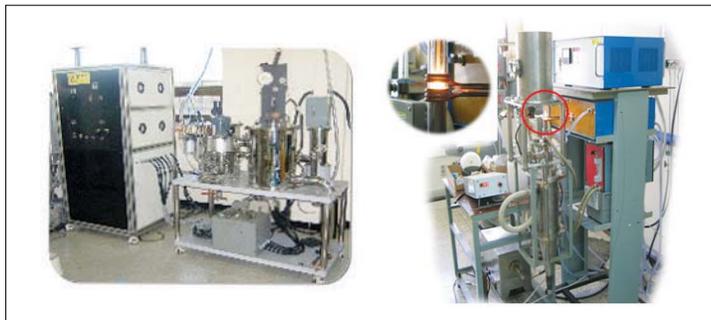


그림 4. 나노분말 제조장치 (전기선 폭발장치 및 부양증발가스 응축장치)

원자로 감시시험 연구실에서는, 국내 모든 경수로 원자로 압력용기 재료의 중성자 조사취화 감시업무를 수행하고 있다. 수명말까지 압력용기 건전성을 평가하고 안전운전 조건인 압력온도한계곡선을 생산하여 발전소에 제공한다. 또한 원자로 외부에 대체감시자를 설치, 주기적 인출, 평가하여 (Ex-vessel dosimetry) 감시시험결과의 신뢰도를 높이는 업무도 수행하고 있다.

이상에서 기술하였듯이 KAERI 원자력재료 연구는 원자력발전소의 설계, 제조, 운전, 규제 및 수명연장 시 필요한 재료물성 data 생산과 고온, 고압, 냉각재 부식, 방사선조사 등 원자력 특유 환경에서의 경년열화(aging) 및 손상기구(mechanism) 규명, 그리고 원자력환경 저항성이 우수한 개선재료, 대체재료 및 신소재 개발 연구로 대별된다. 상세는 KAERI 재료부 홈페이지 (<http://matdb.kaeri.re.kr>)를 참고하기 바란다.

## 4. 맺는말

원자력 시스템을 구성하는 다양한 부품들은 각기의 가동 환경에 적합하다고 판단되는 재료들로 제조되고 있으나, 불행히도 실제 재료의 특성은 항상 일정하지도 못할 뿐 아니라, 예상되는 혹은 예기치 못한 가동 환경의 변화에 의해서 40년의 설계수명도 다하지 못하고 파손되는 경우가 종종 보고 되고 있다. 이는 곧바로 원자력 시스템의 안전성에 대한 사회적 불신감으로 이어지기 때문에 이에 대한 대비가 무엇보다 필요하다. 가동 중인 원전의 안전성뿐만 아니라 개념설계중인 미래형 원자력시스템을 실제로 구현하기 위해서는 재료열화 및 재료거동에 대한 근본 이해는 물론 고성능의 재료개발이 뒷받침 되어야 한다. 이를 위해서는 국가적 지속적인 투자가 필요하며, 이로부터 얻어지는 특성시험결과 및 관련기술, 개량소재 및 원전환경 저항성 신재료 등은 바로 원전의 설계/제조/운전/규제/연구를 위한 기반이 된다. 우리나라는 현재 20기의 원전 가동으로 약 40%의 전력을 공급하고 있고 원자력산업국산화를 이룩하고 중국 등 해외시장을 노크하고 있으며, 수소생산원자로 개발 착수, Gen-IV 미래원자력시스템 공동개발 참여, ITER 가입 핵융합로 연구 착수 등으로 조만간 원자력 선도국이 될 것이 확실시 된다. ‘재료열화는 안전성 저해의 시발이며, 재료개발은 원자력시스템개발의 초석’ 임과 최근 우리나라에서도 추진 중인 계속운전(수명연장) 그리고 최근 우리나라에서도 착수한 수소생산 고온가스로, 핵융합로와 같은 미래 원자력시스템 개발 등을 고려할 때 원자력재료 분야에 대한 재료관련 연구자의 관심을 촉구하는 바이다.



홍 준 화

- 한국원자력연구소 원자력재료연구부장
- 관심분야 : 원자력재료 및 재료강도
- E-mail : jhong@kaeri.re.kr