

先進國의 新素材 研究現況

原子力發電의 高稼働率에 관해서는 機器·部品の 재료개선이 큰 역할을 하고 있다. 또 장래의 輕水爐 高度化 추진에도 新素材 開發은 그중 核心技術이 되고 있다. 同 技術의 研究開發은 어떻게 추진되고 있는가. 本稿에서는 日本原子力用次世代機器開發研究所(ANERI)가 최근 종합한 資料에서 先進 各國에서의 輕水爐 機器·部品에 대한 新소재 적용 現황을 소개한다.

日本 改善推進되는 輕水爐部材

1970년 이후, 輕水爐材料는 應力腐蝕減少(SCC)대책과 증기발생기(SG) 傳熱管腐蝕대책을 비롯 각종기기·부품재료에 대해 신뢰성, 안전성, 경제성 등의 향상을 목표로 하여 연구가 추진되어 오고 있다.

BWR 1次系배관의 耐SCC 향상대책에 대해서는 SUS 304(18크롬 8니켈系)를 低炭素, 몰리브덴이 들어 있는 SUS316 L 등의 스텐레스鋼으로 개량되고, 용접법의 개량도 포함하여 성과를 올리고 있다.

PWR 증기발생기전열관의 부식대책에 대해서는 인코넬 600의 특수열처리와 크롬을 많이 함유한 인코넬690의 사용이 예정되고 있다. 그리고 같은 傳熱管用支持板의 耐蝕性 向上대책에 대해서는 炭素鋼에서 스텐레스鋼으로 변경되고 있다.

또, BWR의 格納容器와 壓力容器는 大容量化에 따르는 強度향상을 위해 炭素鋼에서 格納容器는 高張力鋼, 壓力容器는 低合金鋼(크롬, 몰리브덴 등을 3~5%이하로 한 것)으로 각각 개량된 외에 PWR 壓力용기의 저합금강의 개량도 행해지고 있다.

이밖에 재순환펌프 主軸의 耐SCC 향상대책을 위한 스텐레스鋼의 개량, 抽氣系배관의 減肉對策으로서 炭素鋼에서 低合金鋼으로의 개량, 더

욱 종사자가 받는 방사선량의 低減을 위해 改良型制御棒驅動裝置(CRD) 가이드로라材를 코발트 함유가 많은 코발트基合金으로 이행하는 등 여러가지 개량이 시행되고 있다.

또, 재료가 시스템의 개선 등에 좋은 영향을 주는 것으로서 高分子系素材의 中空系膜을 이용한 復水濾過裝置가 개발되고 있다.

尖端技術素材의 開發을 目標

ANERI가 현재 연구개발을 추진하고 있는 후보新소재와 적용대상기기·부품은 다음과 같다.

<金屬系>

압력용기내의 체결볼트 耐久性을 現在 使用材인 스텐레스鋼과 인코넬X-750에 대해 보다 높이기 위해 結晶粒界가 존재하지 않는 結晶制御合金과 金屬母材中에 固溶度가 적고 미세한 입자를 분산한 分散強化合金의 적용개발을 하고 있다.

밸브시트材의 현재 사용재는 코발트基合金의 스테라이트이며, 밸브의 마모나 溶出에 의해 코발트가 放射化하여 종사자가 받는 방사선량이 높아지기 때문에 이 低減을 위해 밸브시트材를 니켈基合金과 鐵基合金材로 한다. 또, 밸브시트 表面硬化材로서의 니켈基合金과 레이저에 의한 amorphous化의 개발도 실시중이다. 그밖에 섬유강화금속(FRM)의 원자로냉각系펌프 메카니칼 시일과 低壓터빈브레이드에의 적용개발을 하고

있다.

〈세라믹스系〉

세라믹스 耐蝕性, 耐摩耗性, 耐熱性 등이 우수하기 때문에 構造材로서는 원자로냉각系 펌프 用 메카니칼 시일과 海水펌프用 軸受 등의 적용개발을 하고 있다.

〈炭素·炭素複合材〉

현재, 탄소·탄소복합제(c/c복합제)의 개발이 추진되고 있기 때문에 펌프의 메카니칼 시일과 패킹가스킷에의 적용을 검토하고 있다.

〈高分子系〉

고분자계 재료에 대해서는 制御棒驅動裝置用

分類	후보 신소재		적용 연구 대상 기기	
	명칭	특징	기기·부품	現用材
금속계	結晶 제어 합금	單結晶합금은 粒界가 존재하지 않기 때문에 粒界에서 應力腐蝕감소나 고온침식의 가능성이 적고, 長壽命化가 기대된다.	압력용기 내의 체결 볼트	• 스텐레스鋼 • 인코넬 750
	분산 강화 합금	금속의 母材中에 固溶度가 적은 알루미늄이나 등의 산화물과 析出物의 미세한 입자가 분산된 합금이며 고온내습성이 강하다.	압력용기내의 체결 볼트	• 스텐레스鋼 • 인코넬 750
	섬유 강화 금속(FRM)	금속계 복합재료로 Fiber Reinforced Metals를 말한다. Al이나 티타늄 합금등의 금속 母材속에 탄소섬유의 위스커(고양이 털)와 탄화규소, 알루미늄, 보론의 고강도 강화섬유(長·短있음)와 복합화하는 것이며, 중량비에 대해 강도가 높고 고온강도도 높다.	원자로 냉각계 펌프 메카니칼시일	• 燒結 카본 • 超硬合金 • 알루미늄
	低 코발트 대책 개량 재료	(輕水爐중사자의 코발트60에 의한 방사선량을 低減시키기 위해) ① 종래의 코발트 基合金의 페라이트 벨브 시트를 Ni基合金과 Fe基合金으로 한다. ② 종래의 코발트 함유율(0.05% 이하)보다 低減된 코발트 스텐레스鋼으로 한다. ③ 低코발트 표면으로 하기위해, Ni基合金 肉盛材와 레이저에 의한 아몰페스화하는 기술 ④ 종래보다도 고도로 강한 新티타늄合金 및 Fe基合金肉盛材	벨브 시트 爐内구조물	• 페라이트 鋼 • 스텐레스鋼
개량형 스텐레스鋼 (二相 스텐레스 鋼)	현재의 스텐레스는 Ni+Cr 등의 Fe基合金으로 약 3천종류 있지만, 이중 강인하고 녹슬지 않는 오스티나이트系와 應力腐蝕에 강한 페라이트系의 二相으로 한 耐海水性의 합금을 개발한다.	저압 터빈 및 에로 존실드材	• 海水 펌프 케이싱·임펠라 • 스텐레스鑄鋼	
기능성 금속 복합 재료 (크라드鋼)	하나의 재료만으로는 그 요청을 만족시킬 수 없으므로, 구조재에 다른 기능을 갖는 금속과 조합시킨것으로, 外管을 炭素鋼으로 하고 內管을 不銹鋼 및 Cu-Al 합금등의 크라드化와 금속溶射에 의해 耐蝕性을 높인 것.	海水배관	• 탄소강+라이닝	
세라믹스系等	單體의 구조재 [탄화규소] 질화규소 알루미늄 [질코니아]	금속재료보다 가볍고(1/3~1/2), 耐蝕性, 耐마모성, 내열성 등이 뛰어나다. 또, 중성자흡수단면적이 적고, 방사선에 의한 核種의 생성량도 적다.	원자로 냉각계 펌프 用 메카니칼 시일 制御棒驅動 장치용 가이드 로라	• 燒結 카본 • 超硬合金 • 알루미늄 • 스테리이트鋼

코일과 海水펌프임펠라, 탱크내부의 塗裝·라이닝, 패킹類 및 塩素를 포함하지 않은 非할로겐系 難燃性케이블 등을 대상으로 한 적용개발을 추진하고 있다.

분 류	후 보 신 소 재		적 용 연 구 대 상 기 기	
	명 칭	특 징	기 기 · 부 품	現 用 材
세라믹 스系等	單體의 구조재 [탄화규소] 질화규소 알루미나 [질코니아]	과제는 脆弱性 재료이기때문에, 적용상 주의를 요한다. 주로 常壓燒結, 反應燒結 ($SiO_2 + C \rightarrow SiC$), 핫프레스燒結, 熱間 靜水壓(HIP)燒結, 자기 燒結($C + Si \rightarrow SiC$)로 만든다.	制御棒驅動 장치용 시일部材	• 燒結카-본
			海水 펌프用 軸受	• 카본 • 니트릴系 고무
			電氣페네트레이션	• 에폭시 충전제
被 膜 材 (코팅)	금속母材의 耐蝕性, 耐마모성 및 코발트 溶出방지 등을 도모하기 위해, 각종 파인 세라믹스를 코팅한다. 주로 화학적蒸着방식(CVD: 할로겐 금속 $TiCl + CH_2$ (메탄) $\rightarrow TiC$)과 물리적 증착방식(PVD: 이온화해서 부착), 기타 플라즈마 溶射방식으로 시공한다.	瓣 시트	• 페라이트鋼	
		증기발생기 등 교환기의 傳熱管	• 인코넬 600	
		爐内구조물	• 스텔레스 304, 316	
		저압 터빈 브레이드	• 스테라이트鋼 • 12 Cr鋼	
탄소-탄소 복 합 제 (C/C 컴포지트)	탄소母材를 탄소강화섬유로 강화한 것이며, 耐蝕性, 耐마모성, 내열성, 電導性, 輕量 및 치수안정성에 뛰어나다.	원자로 냉각系 펌프 用 메카니칼 시일	• 燒結카본 • 超硬合金 • 알루미늄	
		펌프 밸브用 패킹	• 그라파이트 • 석면 • 고무	
高分子系	섬유 강화 플라스틱 (FRP), 섬유 강화 플라스틱 (FRTP) 및 FRP-FW	Fiber Reinforced Plastics와 Fiber Reinforced Thermo plastics 및 FRP-Filament Winding(강화목적)이라고 하는 것으로, 加工性에 뛰어난 강도, 彈性率이크다.	펌프밸브用 패킹	• 그라파이트 • 석면 • 고무
			海水배관	• 탄소鋼+라이닝
수 피 엔지니어링 프라스틱스 (수피엔프라)	내열성, 강도, 내마모성이 뛰어난 고기능성 樹脂로 폴리미이드, 폴리아미드 이미드 등의 10종류의 것이 있다.	海水펌프임펠라 制御棒驅動장치 코 일 업센부리	• 스텔레스鑄鋼 • H種 二重유리 卷線(모래·실리콘 충전재)	
		탱크내부도장· 라이닝	• 에폭시	
각종 분자계 樹脂	耐食性, 耐水性, 低溶出性, 耐剩離性등에 뛰어난 비닐에스텔系, 不飽和포리에스텔系, 에폭시系等 많은 종류가 있다. 염소성분을 포함하지 않은 폴리오레핀 등으로 구성된다.	非 할로겐系 難燃케이블	• 架橋포리에치렌 • 할로겐系 難燃材	

미 국 新素材 金屬關係 研究開發

미국에서는 주로 건설허가의 발행일부터 起算한 40년간의 運轉認許에 대해 2000년대에는 운전인허가만의 廢爐가 많아지고, 전력회사의 부담이 증대된다는 전망에서 운전인허가 연장

의 요청이 강하고, 이에 대응하기 위한 長壽命化研究가 국가기관의 협력에 의해 시행되고 있다.

이런 상황에서 輕水爐에의 신소재적용현황으로서 중사자의 被曝低減化를 위한 低코발트系 金 및 爐内구조물이나 증기발생기 등의 耐應力

腐蝕性合金 등의 주로 금속관계의 연구개발이 추진되고 있다

또, 低壓터빈브레이드나 증기발생기傳熱管의 세라믹 코팅, 爐內機器의 수명예측에 필요한 爐內감시센서 개발 등 신소재 적용에 관심을 나타내고, 일부 연구도 되고 있다.

구체적으로는 爐內구조물의 部材로 인코넬 X-750을 사용하고 인코넬718, 鐵基금속A-286을 검토하는 등 爐內구조물이나 증기발생기 등에서의 耐應力腐蝕性合金이나 低코발트합금의 금속관계 연구에 중점이 두어지고 있다.

세라믹에 대해서는 원자로 1차냉각펌프용 메카니칼시일에 아루미나, 窒化珪素를 사용, 耐用年數도 4년간으로 일부 카트리지형으로 하고 있는 것을 비롯 세라믹코팅에 대해서도 低壓터빈브레이드 표면의 적용을 연구하고 있다.

이밖에 GE社가 수중배관접속에 形狀記憶合金을 사용한 경험을 갖고 있다.

프랑스 素材開發에 関心

프랑스의 원자력기술개발은 仏원자력청(CEA)과 仏전력공사(EDF)가 주체이지만 輕水爐 소재 개발의 중심은 EDF와 프라마토프사이다.

EDF에서는 輕水爐用 신소재개발의 필요성을 그다지 생각하지 않고, 기존재료에 대한 소재개발과 교환계획의 연구개발에 주력하고 있다. 한편, 프라마토프사에서는 소재개발에 강한 관심을 갖고 있다.

프랑스의 주된 상황을 보면 압력용기의 용접부 방사선脆弱化작용에는 銅, 니켈, 인이 관계가 있다고 하며, 그 함유율을 새로운 방법으로 도입하고 있다.

또, 증기발생기의 傳熱管은 크롬함유량이 적은 인코넬600의 耐粒界應力腐蝕 減少향상을 위해 특수열처리한 인코넬600과 크롬함유량이 많은 인코넬690, 인코도이800 및 二相스텐레스鋼을 평가하고 있다.

특히, 인코넬690은 700도의 열처리에 의해 一次系爐水에도 在來材보다 耐蝕性에 뛰어나고, 二次系알카리應力腐蝕에 대해서도 저항력이 크다고 간주하고 있는 외에 350度~500度の 長壽命試驗에서도 건전성이 확인되고 있다.

서독 民間에서 新素材 開發

현재 서독의 원자력발전 설비용량은 16基, 1, 693만 4천KW로 총발전전력량에 차지하는 원자력의 비율은 31%이다.

서독의 원자력개발은 관민협력으로 하고 있지만, 輕水爐기술은 이미 성숙된 것으로서, 정부기관에 의한 신소재개발은 中斷되고 민간에게 전면적으로 맡겨지고 있다. 이때문에 KWU그룹만이 소재개발 및 혁신적인 연구를 하고 있다.

서독의 주된 상황을 보면 먼저 증기발생기傳熱管에는 인코로이800(鐵基超合金)이 운전실적 최고 15년이며, 매년 정기점검에서도 양호한 결과를 얻고 있다.

한편 인코넬690(니켈基超合金)은 검토를 했지만, 지금 현재로서는 채용할 전망은 서 있지 않다. 또 코발트에 의한 중사자의 被曝線量低減化의 대상機器·部品은 爐內구조물의 支持材, CRD, CRD시일部材, 가이드로라 및 펌프메카니칼시일과 베어링 등을 생각하고 있다.

이들 機器·部品の 코발트合金을 대신하는 소재에 대해서는 54종류를 검토하고, 溶接被覆材 3종류, 燻발스프레이코팅材 1종류, 構造材 1종류를 고려하고 있지만, 모든 용도에 공통으로 사용할 수 있는 소재는 없다고 생각하고 있다.

그리고 현재 KWU社의 플랜트는 全코발트合金材의 약 95%가 대체합금으로 바꿀 수 있지만, 制御棒驅動機構만 바꿀 수 없다.