



은 상

원자력 산업에서의 세라믹스 응용

박 지 연

한국원자력연구소 원자력재료기술개발팀
선임연구원



금속 우라늄(U)에 산소가 결합하면 UO_2 가 되고, 질소가 결합하면 UN, 탄소가 결합하면 UC가 되어 금속 재료가 아닌 세라믹스 재료로 분류된다.

이와 같이 금속의 산화물·탄화물·질화물·붕화물인 세라믹 소재들은 경도·내열성·내마모성·내식성·단열성·열전도성·경량성·기능성 및 내방사선성이 우수하여 원자력 분야에서 핵연료·차폐재·감속

재·피복재·고화체·증식재·단열재·기능재 등으로 다양하게 이용되고 있다. 그럼에도 불구하고 방사선 환경이라는 특수한 여건으로 실용화를 위한 연구에 많은 제약을 받고 있다.

기존 상용로인 경·중수로 관련 분야에서는 원자로의 효율성 향상을 위한 기존 소재의 건전성 평가 등의 연구와 더불어 세라믹 소재를 포함한 신소재의 적용을 위하여 많은 연구가 진행되고 있으며(일본의 경우는 ANERI라는 조직이 결성되어 연구를 진행중임), 방사성 폐기물, 특히 고준위 폐기물 관련 분야에서는 고화체로서 세라믹 소재가 매우 중요한 역할을 하고 있다.

한편 2000년대 초나 중반에 상용화를 목표로 하는 액체 금속로나 핵융합로 분야에서는 운전 온도가 상대적으로 높기 때문에 고온 물성이 좋은 다양한 세라믹 후보재들이 제안되어 개발되고 있으며, 실용화에 필요

한 재료 물성 자료의 생산과 평가를 통하여 그 잠재력을 인정받고 있다.

국내에서는 여러 종류의 세라믹 소재가 개발되어 다양한 분야에 적용되고 있지만, 원자력 산업은 특수한 분야로만 인식되어 세라믹 소재의 응용이 많은 연구자들의 관심 밖에 있는 실정이다.

그러나 세라믹 소재 산업의 발달은 원자력 분야에서도 세라믹 소재의 활용 잠재력을 높였으며, 특히 한국원자력연구소에서 보유하고 있는 연구로 '하나로'는 원자력 분야에서 중요한 내방사선 평가를 위한 조사(irradiation) 시험을 가능하게 하여, 원자력 분야에서 세라믹 소재를 포함한 신소재의 적용을 위한 연구 영역을 넓혀 주었다.

따라서 축적된 세라믹 소재 제조 기술 및 지식과 확대된 연구 영역 및 소재 적용 범위의 잠재력이 효과적으로 접목된다면 국내에서도 세라믹 소

재가 원자력 산업에 다양하게 적용되어 원자력 산업의 발달에 도움을 줄 수 있으리라 판단된다.

이 글에서는 원자력 산업용 세라믹스에 대한 이해에 도움을 주고자 원자력 산업용 세라믹스의 이용 현황을 정리하고, 이와 관련하여 본인이 참여하였던 연구 사례 일부를 요약하며 본인이 영광된 상을 받게 된 기쁨과 고마움을 전하며 맺고자 한다.

원자력 산업에서 세라믹스의 이용

세라믹스의 이용을 편의상 구분하면 핵연료 분야와 소재 부품 분야로 나누거나 핵분열(fission) 에너지의 이용과 핵융합(fusion) 에너지의 이용으로 나눌 수 있다. 이 글에서는 후자를 기준으로 기술하였다.

1. 핵분열 에너지 분야의 이용

가. 원자로 관련 세라믹스 재료

열중성자를 이용하는 원자로 재료(reactor materials)의 구성 요소는 노형에 따라 차이가 있으나, 노심(core)재와 노(reactor)재로 구분할 수 있으며, 이들은 핵연료(fuel), 피복재(cladding), 감속재(moderator material), 냉각재(coolant material), 제어재(control material), 반사재(reflector material), 차폐재(shielding material), 노 구조재 등으로 구성된다.

핵연료는 원자핵이 열중성자(thermal

neutron) 혹은 고속 중성자(fast neutron)를 흡수하여 핵이 분열할 때 에너지를 방출하는 원소로 이루어진 물질이다.

대표적인 핵연료로는 금속 우라늄과 플루토늄 및 이들의 합금인 금속 핵연료와 $UO_2 \cdot PuO_2 \cdot ThO_2 \cdot (U \cdot Pu)O_2 \cdot UC \cdot UN$ 등과 같은 세라믹 핵연료가 있다.

피복재는 핵연료를 냉각재로부터 격리해서 핵연료 및 핵분열 생성물(fission product)이 외부로 누출하지 못하도록 한다. 중·경수로에서는 zircaloy, stainless steel, aluminium 합금 및 magnesium 합금 같은 금속 재료가 피복재로 쓰이며, 고온 가스 냉각로(high temperature gas cooled reactor)에서는 반응 온도가 높기 때문에 열분해 탄소(pyrolytic carbon)와 SiC 또는 ZrC가 UO_2 에 도포되어 피복재로 사용된다.

감속재는 수냉각로에서는 중수나 경수가 이용되며, 흑연은 가스 냉각형 열중성자로의 중성자 감속재 및 반사재로 이용된다. 이외에도 ZrH 또는 Be_2C 가 감속재나 반사재로 이용되고 있다.

제어재는 원자로의 핵반응도를 조절하기 위하여 중성자를 흡수하는 재료로서 제어봉으로 별도로 만들거나 핵연료봉 내에 첨가 혹은 도포한다.

중성자 흡수 단면적이 좋은 물질로는 $^{10}B \cdot ^{157}Gd$ 와 같은 희토류 금속, ^{113}Cd 및 ^{181}Ta 등이 있으며, 이들의 합금이나

산화물 형태로 실용화되고 있다.

제어봉으로는 Cd계의 합금이 사용되다가 최근에는 $B_4C \cdot B_4C-Al_2O_3$ 환형 소결체 및 붕규산 유리 등이 고려되고 있으며, B_4C 가 실용화되고 있다. 한편, 핵연료 펠렛에 첨가되는 가연성 독물(burnable poison)로는 희토류 금속 화합물인 $Gd_2O_3 \cdot Er_2O_3 \cdot Sm_2O_3 \cdot Dy_2O_3$ 와 보른계 화합물인 $B_4C \cdot ZrB_2$ 등이 있으며, 원자로의 이용 효율 향상을 위한 고연소도 핵연료 개발 분야에서는 초기 잉여 반응도 제어를 위하여 적용하고 있다.

차폐재는 원자로에서 발생하는 알파선·베타선·감마선·중성자 및 핵분열 파편과 같은 방사선이 외부로 누출되지 않도록 차단하는 기능을 지니고 있다.

중성자를 감속시켜 차폐하는 세라믹스 재료로는 중성자를 감속시키는 C와 중성자를 흡수하는 붕소를 함유한 탄화물·산화물·질화물과 Gd_2O_3 이 이용된다.

감마선 차폐는 일반 콘크리트 성분에 철 광석, $BaSO_4 \cdot BaCO_3 \cdot 2Fe_2O_3 \cdot 3H_2O$ 를 첨가한 중콘크리트가 이용되며, 중성자를 탄성 산란시켜 감속시킬 수 있는 수소화물인 $ZrH_2 \cdot TiH_2 \cdot ThH_2$ 등을 첨가한 콘크리트가 고/저 에너지의 중성자와 감마선의 차폐에 이용된다.

또한 $B_4C/Al \cdot B_4C/Cu$ 와 같은 B_4C /금속의 서메트도 고속 중성자 감속과 저속 및 열중성자의 흡수를



위한 차폐재로 사용된다.

투명한 차폐재로는 밀도가 높은 납 성분이 함유된 납유리가 사용된다.

이외에도 원자로 냉각 펌프의 mechanical seal · gasket · 펌프 축 수 · 여과기 · 절연물 · 배관 등 각종 부품의 요소 재료로 세라믹스가 이용된다.

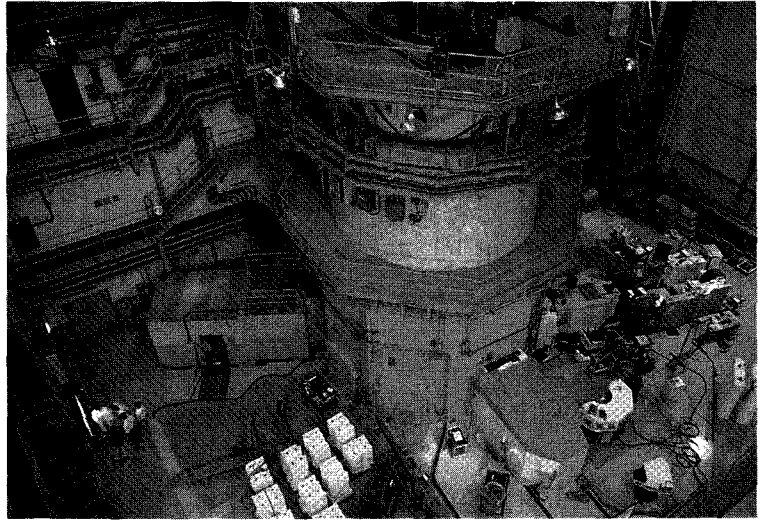
앞에서 기술한 열증성자를 이용하는 원자로와는 달리 액체 금속로는 고속 증성자를 이용하고, 냉각제가 액상 나트륨이며, 운전 온도가 중·경수로 보다 높다는 특징을 갖는다.

따라서 중·경수수에 비하여 고온 특성이 우수하고, 높은 증성자 에너지 영역에서 조사 특성이 좋으며, 액상 나트륨과 양립성을 지닌 재료의 이용이 중요하다.

액체 금속속에 세라믹스 소재가 쓰일 수 있는 가장 유망한 부분은 고속 증성자 에너지 영역에서 흡수 능력이 뛰어난 보론계 화합물을 이용한 제어 및 차폐 분야와 세라믹스의 내열·단열성을 이용한 분야를 고려할 수 있다.

차폐재로는 1차 주냉각계 배관 관통부, 노심 상부, 연료 저장 용기 등을 차폐하기 위하여 B₄C 및 B₄C/금속 서메트가 연구되고 있으며, 제어 재료로는 B₄C 나 B₄C/Al · EuB₆ 등이 적용 및 연구되고 있다.

한편 단열·내열재료는 stainless steel과 ZrO₂와 같은 금속과 산화물의 경사 기능재 (functionally graded material)가 연구되고 있다.



연구용 원자로 '하나로'. 세라믹 소재 산업의 발달은 원자력 분야에서도 세라믹 소재의 활용 잠재력을 높였으며, 특히 한국원자력연구소에서 보유하고 있는 연구로 '하나로'는 원자력 분야에서 중요한 내방사선 평가를 위한 조사(irradiation) 시험을 가능하게 하여, 원자력 분야에서 세라믹 소재를 포함한 신소재의 적용을 위한 연구 영역을 넓혀 주었다.

또한 액체 나트륨을 순환시킬 전자 펌프의 펌프 코일로 Al₂O₃ 봉산 Cu가 고온용 전도체로 쓰이며, 펌프 코일의 절연재로 운모 · E-유리 · 세라믹스 cloth가 고려되고 있다.

이외에도 노형에 상관없이 일반 대형 구조물과 마찬가지로 loose part monitoring sensor, acoustic sensor, oxygen sensor 와 같은 각종 세라믹 센서가 안정성 향상 및 효율적인 운전을 위하여 사용되고 있다.

한편 85년 일본에서는 ① 신소재의 경수로용 기기 및 부품 적용 가능성 검토 ② 신소재의 개량/개발 ③ 신소재의 경수로 환경에서 적성 평가 시험 실시 ④ 신소재를 적용한 기기 및 부품의 확정 시험 등을 통하여 경수로의 장수명화, 안전성 향상, 저피폭성, 고효율화 등을 위한 연구를 목적으로 기술연구조합 원자력용 차폐

대 기기 개발 연구소 (ANERI : Advanced Nuclear Equipment Research Institute)를 85년에 조직하였다.

이 조직에는 22곳의 소재 제조사, 3곳의 plant 제조사, 3곳의 소재센터 등이 참여하였으며, 세라믹스뿐만 아니라 금속과 고분자 소재 등 모든 재료 분야가 포함되어 있다. 세라믹스 관련 기기 부품별 연구 현황을 <표>에 요약하였다.

나. 방사성 폐기물 관련 세라믹스 재료

방사성 폐기물은 방사성 핵종의 반감기나 붕괴에 의한 방사선 준위와 붕괴열에 따라 저준위와 고준위 폐기물로 크게 분류한다.

방사성 핵종의 반감기가 짧고 붕괴열이 없거나 적은 중·저준위 폐기물은 시멘트 고화법이 보편화되었고,

〈표〉 일본 ANERI의 소재 개발 현황

기종	기기	부품	현재 사용 재료	적용 소재
펌프	해수 펌프	수중 축수	페놀계 수지	AL ₂ O ₃ , SiC, Si ₃ N ₄
	원자로 냉각계 펌프	mechanical seal	소결탄소(고정) 초경합금 알루미나	C/C composite 단섬유 FRM SiC, Si ₃ N ₄
	펌프 전반	packing, gasket O-ring	graphite, EP고무흑연	C/C composite
배관	RW계 배관	관, 이음부 등	SUS316L	ceramic coating
전열 기기	열교환기 가열기	전열관 등	SUS316L, 304L Titanium	ceramic coating
제어봉 구동 장치	CRD	guide roller (개량 CRD)	스테라이트 #3 저 Co-Ni기합금	Si ₃ N ₄ , SiC, Cr ₃ C ₂
		seal부재(기설 CRD)	소결 carbon	Al ₂ O ₃ , SiC
	CRDM	coil assembly	H중 silicon 수지사	Silica 계 ceramics
노내 기기	노내 구조재	노내 구조재 radial supporter	austenite 계 (Co≤0.2-0.05)	Co 용출 제어 표면 처리 ceramics coating Cr- Ni계 coating
	조임 부분	bolt 등	Inconel X-750	분산 강화 합금
터빈	저압 터빈	plate	스테라이트 #6 Titan 합금	Fe, Ni기표면 경화제 ceramics coating Titan 합금, ceramic coating
정확계 (물처리)	원자로 냉각재 정화 장치	이온 교환기	이온 교환 수지 유기물(스틸렌계)	금속 filter에 ceramic coating
격납 용기	penetration	전기 인입구의 절연체	에폭시	glass, Al ₂ O ₃
전기 계장품	중성자 계장품	LPRM Seal	알루미나	MgAl ₂ O ₄
		검출 안내관 외측	SUS316, 304	각종 세라믹스 코팅

아스팔트 고화법과 플라스틱 고화법 등이 개발되었다.

반면 사용후 핵연료나 이를 재처리 할 때만 발생하는 고준위 폐기물은 장기간 건전성을 유지할 수 있도록 적절한 고화체를 이용하여 고화시키고 밀봉하여 저장 및 처분하여야 하는데 이를 위한 고화체로 세라믹스가

이용된다.

대표적인 고화체는 붕규산 유리 (borosilicate glass)이며, SYNROC (synthetic rock), 결정화 유리 (glass ceramics), 유리/금속 복합체, tailored 세라믹스 등이 대체 고화체로 개발되고 있다.

이외에도 고알루미나-고칼슘 유리,

fluoride 유리, 점토 등이 고려되고 있으며, 방사성 폐기물의 외부를 고화체로 감싸는 다중방벽 고화체로 열분해 탄소와 탄화규소, Pb/Sb/Sn 합금에 붕규산 유리 bead를 첨가한 vitromet 및 aluminosilicate 혹은 titanate와 금속의 서메트(cermet) 등이 개발되고 있다.

2. 핵융합 에너지 이용

핵융합과 관련한 연구는 60년대 말에 러시아의 T-3 토카막에서 1,000만℃ 플라즈마 온도를 달성한 이래로 일본의 JT-60, 미국의 TFTR, 유럽 연합의 JET, 러시아의 T-15 와 같은 핵융합로는 토카막 방식을 채택하여 기초 과학적인 개념 연구가 진행되어 왔다.

국내의 연구 수준은 아직은 미미한 실정이나 원자력 선진국에서는 2050년 상용로 실현을 목표로 체계적인 연구가 진행되고 있다.

토카막형 핵융합로는 핵융합 반응계, 열변환 및 수송계, 연료 순환계 등으로 구성되어 있다.

핵융합 반응계는 핵융합 플라즈마 노심, 각종 전자석, 플라즈마 가열 장치, 진공 배기 장치, 연료 주입 장치 등으로 이루어져 있으며, 노의 구성 요소는 제1벽(first wall), 블랭킷(blanket), 자석 및 자석을 위한 차폐재와 전기 절연체, 중성자 빔 가열기 및 고주파 유도관(RF waveguide) 등이 있다.



핵융합로의 제1벽은 핵융합에서 발생한 고속 중성자, 플라즈마로부터 나온 하전 입자 및 플라즈마 주변에서 발생한 중성자 등에 의한 조사(irradiation)와 플라즈마로부터 열복사를 받게 되며, 플라즈마 불순물에 의한 침식(erosion)을 받게 된다.

이러한 조건을 견디기 위해서 제1벽은 금속으로 구조물을 만들고 플라즈마의 가장자리 부분(limiter)과 마주하는 내벽은 세라믹스로 도포하는 방법이 고려되고 있다.

이에 적합한 세라믹스 재료로는 C·TiC·TiN·SiC 및 Si₃N₄가 고려되고 있으며, 섬유 강화 세라믹스인 CFC(carbon fiber reinforced carbon)나 SiCf/SiC 복합체도 낮은 밀도와 중성자 활성화도, 낮은 열팽창성, 우수한 열전도도와 부식 저항성을 지니고 있어 내벽재로 고려되고 있다.

핵융합로 증식재는 삼중 수소를 만들 수 있는 유일한 물질인 Li의 산화물, 액체 금속, 용융 금속염이 고려될 수 있으나, 삼중 수소의 방출 능력, 고온 열물리, 화학적·기계적인 성질과 조사 거동 등으로 인하여 Li₂O·LiAlO₂·Li₂ZrO₃·Li₄SiO₄·Li₂TiO₃와 같은 산화물이 유망한 후보재로 연구되고 있으며, 실용화되고 있다.

한편 에너지 변환과 관련된 블랭킷 층은 구조물로는 고온 물성과 중성자 조사 손상을 감안하여 흑연과 SiC가 후보재로 고려되고 있다.

중성자나 감마선의 외부 방출을 차

단하기 위하여 블랭킷 층의 바깥쪽으로 차폐층이 존재한다.

차폐재로는 중성자 흡수 단면적이 큰 SiC나 C이 고려되고 있다.

이외에도 플라즈마를 부가가열하기 위한 고주파 가열 방식에서 window 재료로 MgO와 Al₂O₃ 등이 고려되고 있다.

연구 개발 성과

원자력 재료 기술 개발 과제 중 원자력 산업용 세라믹스 재료 개발에 대한 성과를 소개하고자 한다. 92년에 시작된 이 연구는 크게 원자력 산업에 응용될 초미립 분말 제조 공정 개발과 구조용 세라믹스 재료 개발로 진행되고 있다.

1. 초미립 분말 제조 공정 개발

80년대 중반부터 비약적으로 발전하기 시작한 세라믹스 분말 제조 공정은 세라믹스가 지닌 공유 결합성에 의한 높은 제조 온도를 획기적으로 낮추는 성과와 아울러 ppm 정도의 극미량 성분이 균일하게 첨가된 세라믹스 소재 개발을 가능케 하였다. 더욱이 최근 nano 크기의 분말 제조는 세라믹스의 응용 영역을 더 확장시키고 있다.

본 연구에서는 습식 화학법과 자기연소 반응법을 이용한 자발 착화 연소법을 이용하여 세라믹 초미립 분말을 제조하는 공정을 개발하고자 하였다.

자발 착화 연소 공정은 자체 연소에 의한 고온의 반응과 많은 양의 가스 방출에 의해 미세한 결정질의 분말을 얻을 수 있는데, 다양한 형태의 단성 분체 및 다성 분체 산화물 분말의 제조에 응용될 수 있다.

이 방법에서는 증류수에 금속 질산염과 유기물 연료를 녹이고, 이 수용액을 끓이면 물이 증발됨에 따라 점도가 높은 농축액이 형성되며, 이 용액을 유기물 연료가 착화될 정도로 가열하면 연료는 연소되고, 동시에 금속의 산화 반응이 지속적으로 진행되며 산화물 분말이 형성된다.

반응 생성물은 많은 양의 가스 방출을 수반하므로 다공성으로 쉽게 부서지는 초미립 산화물 분말을 얻게 된다.

이 방법으로 개발된 분말들은 nano 크기의 일차 입자들로 이루어져 있고, 균일한 조성을 지니며, 일단 착화되어 연소되면 30초 이내에 산화물이 생성되는 빠르고 단순한 공정이라는 장점이 있다.

본 연구에서는 고온형 구조재로 응용될 Y₂O₃계 산화물, Al₂O₃계 산화물, Ni-ZrO₂ 서메트, 산화물 분산 강화 구리 분말 및 악티나이드계의 핵종을 고용시켜 방사성 폐기물을 고화시킬 수 있는 CaTiO₃ 분말과 핵융합로 연료인 트리튬의 source 물질인 Li계 산화물을 제조하는 공정을 개발하였다.

Y₂O₃계 산화물은 고온용 내열·단

열제로 이용될 수 있으며, 개발된 분말을 이용하면 상용분말을 이용한 경우에 비하여 제조(소결)온도를 300~400℃ 낮출 수 있는 특징을 갖는다. 이와 관련하여 국내 특허를 출원하였다.

Al₂O₃계 산화물로는 ZrO₂가 Al₂O₃ 지지상의 입내와 입계에 고르게 분산된 ZrO₂ 분산 강화 Al₂O₃ 복합체를 제조할 수 있으며, 실제 상용 분말끼리 기계적 혼합에 의하여 얻기 어려운 조성까지도 ZrO₂가 고르게 분산된 복합체를 얻을 수 있다.

이 결과는 95년 한국요업학회가 매년 주최하는 세라믹스 미세 구조 사진 논문전인 CERAMOGRAPHY-95에서 최우수상을 받았다.

산화물 분산 강화 구리는 액체 금속로의 전자 펌프용 코일이나 핵융합로의 heat sink용 구조 소재로 이용되며, 본 공정을 적용하여 제조하면 산화물의 분산 및 크기가 균일하고 매우 작으며, 제조 공정이 단순하여 쉽게 분말을 합성할 수 있다.

현재는 경제성을 평가하여 기존의 상용 분말과 비교하여 실용화를 계획하고 있으며, 국내 특허를 출원하였다.

고준위 폐기물 고화체로 호주에서 개발된 SYNROC의 구성 성분의 하나인 CaTiO₃는 악티나이드계 핵종을 고용시킬 수 있는 물질이다.

고준위 폐기물의 일부는 질산염 상태로 처리된다는 점에 착안하여 질산염을 출발 물질로 하는 본 공정을 적

용하면 별도의 조작 없이도 방사성 폐기물을 처리할 수 있으리라 기대된다.

핵융합로 증식재인 Li계 산화물은 핵융합로를 실현시키려는 선진국에서 다양한 방법이 개발되어 실증 실험을 수행하고 있다.

본 공정을 적용하면 LiAlO₂는 여러 가지 상들 중에서 증식재로 이용 가능한 γ 상이 쉽게 얻어지며, 최근 노내 특성이 우수하여 실용화되고 있는 Li₂ZrO₃, Li₂TiO₃도 nano 크기의 분말이 합성되어 소결 온도를 낮출 수 있는 특징을 갖는다.

이와 관련하여 국내 특허를 등록하였으며, 현재는 실험실 규모의 제조 공정 개발에서 양산화를 위한 연속 제조 공정 개발을 진행하고 있다.

이상에서 간략히 서술한 초미립 분말 제조 공정은 원자력 산업 분야 외에도 일반 산업에서도 그 활용 범위가 매우 넓다.

이와 관련하여 파생된 결과로 TiO₂ 광촉매를 이용한 환경 정화제 개발이 실용화 과제로 수행되고 있으며, 전기 저항기 소자용 착막 기술 개발과 관련된 중소 기업 기술 지도가 성공리에 진행되었다.

현재 추진중인 양산화 공정이 완성되면 그 파급효과는 더 확대될 수 있으리라 기대된다.

2. 구조용 세라믹스 개발

80년대 이후 선진국에서는 21세기의 전력 수요에 부응하기 위하여 신

형 발전로(차세대 경수로, 액체 금속로, 핵융합로 등)의 개발에 필요한 신기능 재료의 개발을 적극적으로 추진하고 있다.

이와 관련된 구조용 소재로는 경·중수로의 효율성 향상을 위한 내마모·고강도 특성을 지닌 대체 소재, 차세대 신형 발전로의 개발에 필요한 특성을 가지는 복합 재료, 초내열 및 단열 재료, 핵융합로용 대면재, 블랭킷 소재, 차폐재와 같은 구조용 재료 등을 들 수 있다.

금속, 고분자 및 세라믹스의 다양한 소재가 구조용 소재로 이용될 수 있으며, 세라믹스의 소재로는 SiC·Si₃N₄·graphite 등의 단이나 복합체를 고려할 수 있다.

SiC/C 복합체는 대표적인 구조용 세라믹 소재로서 핵융합로의 대면재, 고온 가스 냉각로의 피복재, 경·중수로와 액체 금속로의 내마모재, 일체형 동력로의 베어링 부재 등으로 원자력 산업에서 다양하게 활용될 수 있다.

SiC/C(혹은 SiC) 복합 소재가 원자력 분야의 구조재로 이용되려면 대면적 제조 공정이 확립되고, 노내의 특성 및 성능 평가 기술이 구축되어야만 한다.

그러나 국내에서는 아직 본 연구에서 적용하려는 화학 증착법에 의한 대면적 제조 공정은 연구 경험이 미천하며, SiC/C(혹은 SiC) 복합 소재를 비롯한 세라믹스의 노내 특성 평



가에 대한 경험은 전무한 실정이다.

본 연구에서는 우선 실험실 규모의 제조 공정을 확립하고 대면적 복합 소재 제조 공정으로 규모를 확장시키는 연구, 이에 수반되는 기계적·열적·화학적 특성 평가 및 조사 시험을 통한 노내 특성 평가 연구를 수행하고자 하였다.

아울러 이 결과들은 앞의 초미립 분말 공정 개발 연구와 마찬가지로 반도체 산업, 치구 산업 등과 같은 일반 산업의 고부가 가치 창출을 유도할 수 있는 부가적인 장점도 있다.

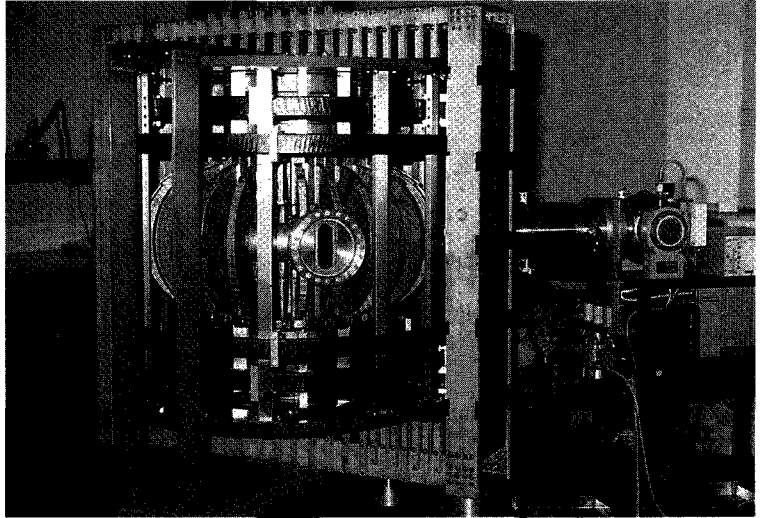
이와 관련된 연구는 올해로 3년째에 접어들어 아직은 연구 시작 단계이다.

현재는 실험실 규모의 제조 공정 확립이 완성되었으며, 대면적 제조를 위한 장치의 설계 및 제작, 특성 평가법의 표준화, 노내 성능 평가를 위한 자료 조사를 추진하고 있다.

특히 세라믹 소재의 노내 특성 측정 및 평가는 선진국에서는 활발한 연구가 있는 반면 국내에서는 아직도 걸음마 단계에 불과하므로 체계적인 연구 체계의 구축은 기존의 원자로 개선이나 차세대형 원자로의 개발을 위해서 매우 중요한 요소 기술로 기대된다.

수상 소감 및 맺는 글

본인은 88년 한국원자력연구소에 입소하여 이 분야의 연구에 종사한



핵융합 장치 토카막. 핵융합로의 제1벽은 핵융합에서 발생한 고속 중성자, 플라즈마로부터 나온 하전 입자 및 플라즈마 주변에서 발생한 중성자 등에 의한 조사(irradiation)와 플라즈마로부터 열복사를 받게 되며, 플라즈마나 불순물에 의한 침식(erosion)을 받게 된다. 이러한 조건을 견디기 위해서 제1벽은 금속으로 구조물을 만들고 플라즈마의 가장자리 부분(limiter)과 마주하는 내벽은 세라믹으로 도포하는 방법이 고려되고 있다.

지 올해로 11년째를 맞는다.

재료 관련 학회를 참석하면 원자력이라 소외되고, 원자력학회에 참석하면 세라믹이라 관심 밖에 있기를 수없이 반복하며 한해 한해를 맞이하곤 했다.

입사 초기에는 UO₂ 핵연료 개량과 관련된 연구에 참여하였고, 92년부터는 원자력 산업용 세라믹 소재 개발과 관련된 연구에 참여하여 왔다.

원자력 선진국과는 달리 다양한 노형을 개발하지 않는 국내 실정이나 개발된 소재의 실증 연구를 할 수 없는 상황에서는 많은 제약이 따랐다.

그러나 하나로 완공, 정보 통신의 발달에 따른 손쉬운 국내의 정보 교환, 원자력 산업용 소재에 대한 인식, 국내의 소재 산업의 발달 등 많은 연구 환경이 개선되었으며, 그 동안 축적된 경험과 지식은 미천하지만 개선

된 환경과 더불어 연구에 즐거움을 더해준다.

혹자는 원자력 산업을 복합 지식 산업이라 한다. 사실 어떤 산업도 마찬가지로이지만 면면을 살펴보면 다 그럴 것이다. 그렇지만 이번 기회가 세라믹 소재와 관련된 분야가 조그만 부분이랄 수도 있지만 원자력 산업의 한 분야로 위치함을 알릴 수 있는 좋은 계기가 되었길 바란다.

끝으로 물심 양면으로 좋은 연구 환경을 제공해 주신 많은 분들과 늘 옆에서 묵묵히 외길을 걷고 있는 동료들께 깊은 감사의 말씀을 드린다.

아직도 부족함이 많은 본인에게 앞날의 분투를 기대하셨다고 믿으며 한국원자력기술상을 주신 한국원자력 산업회의에도 진심으로 고마움을 전한다. ☺