정책연구 2018-1

중국의 희토 연구개발 현황 및 한·중 협력 타당성 조사

발간 한중과학기술협력센터



KOSTEC Korea-China Science & Technology Cooperation Center

주 의

1. 이 보고서는 한중과학기술협력센터의 위탁을 받아 바오터우시훙버터과기유한책임공사에서 수행한 연구과제의 최종보고서입니다.

2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 한중과학기술협력센터에서 시행한 사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.

3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표하거나 공개하여서는 아니됩니다.

서 론

중국은 세계에서 가장 큰 희토 국가로 널리 알려져 있다. 중국의 희토산업은 자원 매장량, 생산량, 판매량 및 사용량 면에서 모두 세계 1위를 자랑한다. 중국은 다양한 종류의 희토제품을 서로 다른 등급으로 대량 공급할 수 있는 국가로 발전하였고 전 세계 희토시장에서 지배적이고 독점적인 입지를 굳혔다. 이와 동시에 희토 재료분야의 과학연구에서 획기적인 발전을 이루었고 연구개발팀의 실력이 꾸준히 강화되었으며 학과 플랫폼 구축이 더욱 완비되었고 국제협력과 교류 또한 갈수록 활성화되고 있다.

희토는 원소주기표에서 란탄계열 원소 란타늄(La), 세륨(Ce), 프라세오디뮴(Pr), 네오디뮴(Nd), 프로메튬(Pm), 사마륨(Sm), 유로퓸(Eu), 가돌리늄(Gd), 테르븀(Tb), 디스프로슘(Dy), 홀뮴(Ho), 에르븀(Er), 툴륨(Tm), 이테르븀(Yb), 루테튬(Lu)와 동족의 세칸듐(Sc)과 이트륨(Y)을 합쳐서 총 17개 원소를 통털어 이르는 말이다. 원소원자량 및 물리화학성질에 따라 경(轻)희토, 중·중(中·重) 희토 원소로 분류하며, 앞 5개 원소를 경희토로, 나머지 12개 원소를 중·중희토로 분류한다.

희토는 독특한 물리·화학적 성질 때문에 신에너지, 신소재, 에너지절약·친환경, 항공우주, 전자정보 등 분야에 광범위하게 응용되고 있으며 현대공업에서 불가결한 중요한 요소로 인정받고 있다. 희토원소는 독특한 4f 전자구조, 큰 원자 자기 모멘트, 매우 강한 스핀궤도결합 등의 특징이 있어 기타 원소와 희토 화합물을 형성할 때 배위수가 3~12 사이에서 변화하고 희토 화합물 결정구조 또한 다양하다.

전 세계의 경제와 사회구도의 심각한 변화와 새로운 과학기술 혁명의 급속한 발전에 힘입어 희토 신소재는 전 세계 과학기술, 경제와 국방 경쟁의 감제고지가 되었으며 또한 중요한 전략적 자원으로 떠올랐다. 17가지 희토원소에대한 심층 연구를 통해 새로운 특성의 발견과 신소재의 탐구 나아가 재료과학의 새로운 발전을 촉진시키는데 유리하다. 희토원소의 특성과 f전자구조와 관련하여 많은 연구가 이루어지고 있지만 향후 보다 심층적으로 연구하고 탐구해야 할 문제들이 여전히 남아 있다.

현재, 희토 재료 분야의 연구는 기초 연구, 응용 기초 연구, 응용 연구, 산업화 기술 및 장비 개발에 이르기까지 다양하게 병행 발전하는 추세를 갖추었다. 보다 많은 기초연구성과의 상용화, 실용화로의 전환주기가 단축되었고 기초연구와 응용연구의 경계가 갈수록 희미해졌으며 과학과 기술의 결합 및 상호작용, 상호 전환이 가속화되었으며 뚜렷한 진전을

이루었다. 희토학과의 첨단기초분야에 대한 연구에서도 많은 경험을 갖추었고 응용분야에서도 새로운 돌파를 가져왔다.

희토 채굴·선광 및 제련 분야에서 중국은 1980년대에 자체 개발한 황산법을 내몽고 바오터우(baotou, 包头) 혼합형 희토광 산업화기술 및 희토 용매 추출분리 등 첨단기술을 돌파하여 중국의 희토제련 및 분리추출산업이 대규모 연속생산이 가능해졌고 생산원가가 대폭 줄어들면서 전 세계 희토산업 구도에 거대한 변화를 일으켰다.

희토 야금분야의 경우 주로 희토 광물원료에서 희토화합물 및 금속재료 전반 과정에 이르는 화학 및 분리 정제 연구에 관한 과학기술 문제를 다루었다. 하지만 최근 몇 년간 희토자원의 과도한 채굴과 환경오염 등은 발전을 저애하는 걸림돌이 되었으며 희토 제련분리기술의 발전은 새로운 도전에 직면하였다. 희토의 청정분리화학 및 제련분리공업응용기술을 발전시키는 것은 희토자원의 고효율 이용과 환경오염을 해결하고 희토의 국제적 입지를 굳히기 위한 필수 경로가 되었다.

해당 분야에서 중국은 핵심기술과 첨단기술을 보유하고 있다. 희토 기능성소재의 경우 기초연구와 응용연구의 발전이 가장 신속하며 많은 분야에서 국제와 거의 동시에 발전하였다. 특히 재료공정기술의 급속한 발전에 따라 재료의 종류가 다양해졌을 뿐만 아니라 빛, 소리, 전기, 자기, 초전도, 소성 및 초강도, 초경도, 내고온 등 다양한 기능을 갖게 되었고 심층적인 발전이 이루어졌으며 중국의 전략적 신흥산업 발전을 크게 촉진시켰다.

희토 과학연구플랫폼 구축이 더욱 개선되었는데, 하드웨어장비와 소프트웨어 환경의 두가지 측면에서 구현되었다. 국가 중점실험실과 국가공정연구센터가 혁신발전의 중심이 되었다. 국제 과학기술의 발전경험과 중국의 과기 발전 과정은 국가실험실이 학과발전을 추진하는 중심과 원천혁신을 선도하는 기지가 되었음을 충분히 입증하고 있다. 국가중점실험실의 설립과 발전은 중국의 국가혁신체제 건설을 촉진시키는 중요한 방식이 되었다. 국가중점실험실은 병목을 타파하기 위한 전략적 방향을 제시하였고 대형 과학연구문제 연구를 주도하였으며 국가핵심경쟁력과 원천혁신능력을 높이는 필요한 방식과 원동력이 되었다. 국가중점실험실은 국가목표와 과기 중대수요를 충족시키기 위해 자원배치, 분야별 교차메커니즘 등의 종합적인 개혁을 한층 더 추진하였으며 제도적 측면에서 과학, 기술과 공정을 보장하는 유기적인 결합으로 혁신주도형 발전전략을 실시하기 위해 새로운 패턴을 제공하고 새로운 경험을 만들어내었다. 현재 북경대학을 중심으로 설립한 희토재료화학 및 응용국가중점실험실, 중국과학원 장춘응용화학연구소를 중심으로 설립한 희토자원이용 국가중점실험실이 그것이다. 기업국가중점실험실과 관련하여 바오터우희토연구원을 중심으로 설립한 바이윈오보(白云鄂博)희토자원연구 및 종합이용 국가중점실험실, 안후이대지

웅신소재주식유한공사(安徽大地熊新材料股份有限公司)에 의존해 설립한 희토영구자석재료 국가중점실험실을 꼽을 수 있다. 소프트웨어환경과 관련하여 학술간행물과 학과 조직을 통해 한층 더 학과의 발전을 촉진시켰다. 학술간행물은 과학기술사업의 중요한 구성부분으로 과기사업자 학술생명을 구현하는 방식이자 과학기술발전의 역사적 기재이기도 하다. 학술간행물의 역할은 학술지식 확산, 과학기술인력풀 양성, 혁신기술 탄생 촉진, 과학기술 애로사항 해결, 새로운 과학기술방법 제공 등에서 구현된다.

희토 연구진의 규모가 계속해서 확장되었고 팀 구조가 꾸준히 최적화되었다. 중국은 세계 일류의 희토 과학자와 기술전문가를 보유하고 있다. 희토 개발응용 및 관련 분야에 종사하는 연구인력 가운데 50여명이 중국과학원원사 혹은 중국공정원원사이다. 현재 희토 연구진은 연령대별로 노년, 중장년, 청년 연구자들로 인력풀을 구성하였으며 인재 육성정책이 강화되면서 특히 청년학술리더가 급증하는 추세를 보이고 있다. 경제글로벌화의 심층적인 발전은 국가간의 협력과 교류를 강화시켰으며 과기인재의 국가간 이동 속도와 규모가 계속해서 증가되는 추세를 보이고 있다. 국가중점혁신프로젝트, 중점실험실, 중앙기업 등을 통한 일류 인재 도입이 강화되었으며 일부 해외고급인재의 귀국창업에 대한 지원이 집중적으로 이루어졌다.

이와 동시에 희토 과학연구의 국제협력과 교류성과가 뚜렷해졌는데, 국제교류 인력의 증가, 국제 학술논문 공동저자 및 성과의 증가와 국제협력 참여의 확대로 나타났다. 희토재료 분야와 세계 과학과의 신속한 융합이 이루어지면서 해당 분야 발전의 국제적 시야가 크게 높아졌으며 과학기술, 경제와 사회발전을 한층 더 촉진시켰다.

희토 분야의 과학연구는 수십년간의 역사적 검증을 거친 후 그 발전방향과 추세가 더욱 뚜렷해졌다. 향후 과학기술 첨단연구와 국가중대 전략수요에 초점을 맞추어 기초이론연구를 지속적으로 강화하고 발전방향을 파악하여 전략적 신흥산업의 발전을 지원하며 학과발전 병목 돌파와 자주혁신의 저력을 강화하기 위해 노력해야 한다.

이 보고서는 최근 몇 년간 중국의 희토과학기술의 발전과 성과에 초점을 맞추어 주로 희토추출분리기술, 희토영구자석재료, 특수 희토자성소재, 희토촉매재료, 희토수소저장재료, 희토 형광체, 희토 초전도재료, 희토 결정재료, 철강 및 비철금속중에서의 희토 응용, 희토보조제, 희토유리, 희토 세라믹재료 등에서의 중요한 성과와 진전을 돌이켜보았다. 희토 중점연구분야의 발전, 중국과 국제 관련 분야의 발전수준과의 비교, 희토 연구분야 국제과기협력 현황을 개괄하였다. 이를 토대로 희토 연구개발분야의 발전추세를 전망하였고 한중공동연구과제에 대한 건의를 제안하였으며 한중 양국간의 희토 관련 분야에서의 심층적인 협력교류의 타당성과 경로를 도출하였다.


KOSTEC
韩中科学技术合作中心
한중과학기술협력센터
Korea-China Science& Technology Cooperation Center

목 차

제 1 장 중국의 희토 연구개발 현황과 중점연구분야 ····· 1

1. 개요 ····· 1
2. 희토 자원 분포 ····· 2
3. 총체 상황 ····· 4
4. 희토 연구현황 및 최신 진전 ····· 9
5. 국제 비교 ····· 49
6. 연구성과 및 지적재산권 상황 ····· 60
7. 희토 관련 연구기관 ····· 64

제 2 장 희토 중점연구분야의 발전추세 및 전망 ····· 72

제 3 장 한·중 협력 및 공동연구과제에 대한 제언 ····· 80

1. 배경 ····· 80
2. 희토분야 국제 과학기술협력 현황 ····· 82
3. 희토분야 한·중 협력추진과정 ····· 84
4. 한·중 공동연구과제에 대한 제언 ····· 88

표 목 차

표 1-1 ▌세계 희토 매장량 분포 (REO로 환산, 만톤) ····· 3
표 1-2 ▌희토재료 우위 연구기관 ····· 70

제 1 장

중국의 희토 연구개발 현황과 중점연구분야

1 개요

중국의 희토산업은 신중국의 건국과 발전에 따라 떠오른 신산업이다. 중국 희토산업의 발전역사는 사실상 과학기술진보의 역사이며, 무에서 유, 소규모에서 대규모로 발전하면서 눈부신 성과를 올렸다. 특히 개혁개방이후 과학기술투입이 지속적으로 증가함에 따라 중국의 희토산업이 급속히 발전하였으며 채광, 선광, 분리추출, 정밀가공, 신소재 및 희토응용제품의 연구개발, 생산, 응용을 일체화한 희토산업시스템을 갖추었다. 세계 최대의 희토자원, 생산, 수출 및 소비국이 되었고, 국제시장에서 지배권과 주도적 입지를 굳혔으며 소수의 국제경쟁력을 갖춘 우위산업이 되었다. 희토산업은 중국의 국민경제와 국방건설을 위해 중요한 기여를 하였고 세계 첨단기술산업의 발전을 위해 중요한 촉진과 지탱역할을 하였다.

"6차 5개년", "7차 5개년", "8차 5개년" 국가중점 과학기술 공관 및 "9차 5개년", "10차 5개년", "11차 5개년", "12차 5개년" 국가중점프로젝트 및 중대전문프로젝트를 통해 중국은 희토 연구개발에 무려 50억 위안의 연구개발비용을 투입시켰고, 제련분리, 정밀가공 및 응용 분야에서 획기적인 진보를 이루었으며 장비수준이 지속적으로 향상되어 희토산업의 기초연구, 응용연구 및 산업화 개발을 강력하게 추진하였다. 특히, 최근 10년 동안 국가차원에서

희토 등 전략적 자원에 대한 관심이 높아지면서 연구개발투입이 지속적으로 증가되었다. "12.5"기간 국가차원에서 희토소재 전문프로젝트를 입안하고 연구개발경비 20억 위안을 투입하였다. "희토 채광선광제련, 분리추출 (희토화합물 및 금속) - 자기, 광학, 전기, 촉매 등 첨단기능성소재-고부가가치 응용" 에 이르는 전반 산업사슬을 둘러싸고 희토자원 우위를 충분히 발휘하여 기초연구, 첨단기술, 응용기술에서 산업화 시범의 산업사슬 전반에 이르는 중점기술을 돌파하였으며 독자적 지적재산권을 보유한 희토 신소재, 신공법, 신기술, 신제품, 신규 설비를 개발하였고 대규모 시범응용을 실현하였으며 저탄소경제, 첨단기술산업과 국방 첨단응용의 수요를 충족시켰으며 첨단재료에서의 희토원소의 균형적인 응용과 고부가가치화 이용을 촉진시켰으며 희토산업의 경제성장방식을 전환시켰고 국제 영향력과 주도적 입지를 향상시켰다.

2 희토 자원 분포

희토는 지구상의 지각에 널리 분포되어 있지만 그 함량은 낮다. 희토함량이 10%이상인 희토산화물(REO) 광물종류만해도 70가지가 넘는다. 그러나 산업적 경제이용가치가 있는 광물은 바스트네사이트(bastnaesite), 이온흡착형광, 모나자이트(monazite), 인산이트륨광(xenotime) 등 4가지밖에 안되며, 희토 생산량의 95 % 이상이 이 4가지 광물을 이용한 것이다. 세계 희토자원 매장량은 주로 중국, 러시아, 미국, 호주, 인도, 자이르, 캐나다, 브라질, 말레이시아, 남아프리카 등 지역에 분포되어 있다. 바스트네사이트와 모나자이트는 상대적으로 경희토 함량이 많으며 인산이트륨광은 중희토와 이트륨을 함량이 높지만 매장량이 적다. 이온흡착형광은 중국의 남부지역에만 분포되어 있으며 중희토 함량이 풍부하다. 희토 함량이 가장 높은 광물은 바스트네사이트인데, 주로 중국 내몽고 바오터우(Baotou)의 바이윈오보(BaiyunObo)

광산에 분포되어 있으며 그다음으로 미국의 마운틴패스 (Moun- tain Pass) 희토광산이다. 희토 함량이 비교적 높은 모나자이트는 주로 호주와 중국에 분포되어 있다.

2001년 영국 로스킬드정보서비스회사(Roskilde Information Services Cor- poration)가 「World rare earth economy」(제11버전)에서 전 세계 희토 자원 분포를 열거했다. 상세한 내용은 표 1을 참조하면 된다. 그중 중국의 희토 산업 매장량은 4,300만톤, 중국의 희토 예상 매장량은 4,800만톤, 세계 희토 예상 매장량은 1억1,000만톤에 달한다.

[표 1-1] 세계 희토 매장량 분포 (REO로 환산, 만톤)

국가	산업 매장량		예상 매장량	
	만톤	%	만톤	%
중국	4300	40.97	4800	42.16
러시아와 키르기스스탄	1900	18.1	2100	18.44
미국	1300	12.39	1400	12.29
호주	520	4.95	580	5.09
인도	110	1.05	130	1.14
콩고 (금)	100	0.95	100	0.88
캐나다	94	0.86	100	0.88
남아프리카 공화국	39	0.37	40	0.35
브라질	28	0.27	31	0.27
말레이시아	3	0.03	3.5	0.03
기타	2101.4	20.02	2101.51	18.45
합계	10495.4	99.96	11386.01	99.98

비고: 산업 매장량은 이미 탐지된 채굴 가능한 매장량을 가리키며, 예상매장량은 탐지된 매장량, 경계매장량과 현재 경제적 이용 가치가 없는 매장량을 가리킴

표 1-1에서 보다시피 중국의 희토산업 매장량과 예측 매장량은 세계 희토 매장량과 예측 매장량의 각각 40.97%와 42.16%를 차지하여 전 세계 1위를

차지한다. 중국의 희토 자원은 주로 바스트네사이트, 이온흡착형광 및 모나자이트가 있으며, 그중 내몽고 바오터우(Baotou)의 바이윈오보광산은 세계 최대 규모의 희토광산으로 그 생산량은 중국 희토 생산량 전체의 80%를 차지한다. 바스트네사이트 위주이며, 모나자이트가 함유되어 있으며, 경희토 함량이 풍부하다. 이온흡착형광은 중국 남부지역에만 분포되어 있는데, 중희토 함량이 풍부하며, 특히 이트륨이 많이 함유되어 있으며, 중국은 세계 이트륨자원의 주요 공급국이다. 중국의 희토자원은 품종이 다양하여 절대적으로 우위를 갖추었다.

3 총체 상황

가. 희토 채굴 및 제련분야

중국은 1950년대부터 희토에 대한 분리추출공정연구에 착수하였고, 1970년대에 산업화를 실현하였으며, 1980년대에는 자체 개발한 황산법으로 내몽고 바오터우(baotou, 包头)의 혼합형 희토광 산업화기술 및 희토 용매 추출분리 등 첨단기술을 공략하여 희토제련 및 분리추출산업의 대규모 연속생산을 실현하였고 생산 비용을 대폭 절감하였으며 전 세계 희토산업 구도에 획기적인 변화를 일으켰다.

60여년동안 중국의 희토 종사자들은 희토자원의 특징에 비추어 대량의 선진적인 희토채굴·선광 및 제련 공법을 개발하였다. 또한 산업에 광범위하게 응용시켰고 완비된 희토산업시스템을 갖추었으며 전 세계 희토 생산대국으로 발전시켰다. 중국이 산업에서 응용되는 희토광물은 주로 바오터우 혼합형 희토광, 쓰촨(四川) 바스트네사이트 및 남방의 이온흡착형 희토광의 3가지가 있다. 광물종류, 성분과 구조에 따라 채굴·선광 및 제련공정이 서로 다르다. 전통적인 채광공법은 바이윈오보 희토광의 노천채광법, 쓰촨 바스트네사이트의

노천 및 지하 채굴 상호결합법이 있으며, 선광공법은 주로 바이윈오보 희토광의 "약자성-강자성-부유선별 연합공법, 쓰촨의 바스트네사이트의 중력선별-자력선별-부유선별 연합공법"이 있으며, 이온흡착형 중·중희토자원에 대해서는 독특한 암모늄염 침출-침전 농축회수이용기술을 개발하였다.

제련분리와 관련하여 자체 개발한 바오터우 혼합형 희토광의 황산배소법과 가성소다분해법(그중 90%는 황산배소법 채택), 바스트네사이트의 산화배소-염산침출법 등이 있다. 희토분리추출과 관련하여 쉰광센(徐光宪) 원사 등 과학자들은 희토케시케이드추출이론을 도출하였고 선진적인 P204, P507, naphthenic acid(环烷酸) 등 첨단 희토추출분리기술을 연구개발하여 중국의 희토산업생산에 광범위하게 응용시켰다. 최근들어 환경보호에 대한 규제가 갈수록 강화되면서 중국의 과학기술 연구인력들은 불비누화(The saponification) 희토분리추출 신공법, 저탄소 저염 무암모니아질소 희토 추출분리 신기술, 저온배소기술, 이온형 희토광 무암모니아 침출신공법 등 다양한 청정제조기술을 잇달아 개발하였다. 이밖에 해외에서 지속적으로 발견되는 새로운 희토자원에 비추어 중국은 다양한 광종에 상응한 추출분리신기술을 개발하였는데 해당분야에서 핵심기술과 첨단기술을 보유하고 있다.

나. 희토기초재료 심층정제 분야

초고순도희토는 희토기능성재료의 기초물질적 보장으로, 원자, 전자 차원의 연구는 희토재료 조직구조와 성능과계와의 순조로운 추진을 확보하였고 희토원소의 본질적 특성을 구현시켰다. 희토원소의 결정재료, 광섬유재료, 광학유리, 디스플레이 형광체, 전자재료, 초자외성 신축재료 등은 5N이상의 초고순도 희토로 그 고성능을 보장하며, Fe, Al 등 비희토금속의 불순물에 대한 요구가 매우 높은데, 일반적으로 ppm ~ ppb 범위에 있다. 현재 중국은 다양한 희토금속 및 희토화합물의 심층 정제기술과 전용장비를 개발하였는데, 10여종 희토금속의 절대 순도가 4N이상, 희토화합물 순도가 5N이상에 달하며, 희토산업에 광범위하게 응용되고 있다. 현재 해외에서는 저차원 희토제

품 정제에 대한 연구개발투입이 기본상 중단되어 있으며 주로 중국에서 납품하는 희토화합물제품에 의존한다. 하지만 해외는 비희토 불순물 제거에서 여전히 뚜렷한 우위가 있으며 중국은 초고순도 희토화합물을 여전히 수입에 의존하는 상황이다. 현재 초고순도희토의 생산량은 약 희토 총소비량의 5~10%이며, GDP 차지비중이 20%이상에 달하며 고부가가치 제품으로 경제수익성이 매우 높으며 연간 10%이상의 경제 성장률을 유지하고 있다. 시장은 기본상 프랑스 플랭크(Planck, France)와 일본 ShinEtsu(信越) 등에 의해 독점되다 시피 하였다. 중국의 우쾅다화(五矿大华)는 연간 100톤 규모의 용제추출분리법을 이용한 초고순도 희토 생산라인을 구축하였으며, 기타 생산이 가능한 기관들로는 장쑤줘췬나노희토주식기업(江苏卓群纳米稀土股份有限公司), 장춘응용화학연구소 등이 있다. 그러나 초고순도 희토화합물의 합성공정 기술이든 제품품질에서든 모두 비교적 큰 격차를 보이고 있다.

다. 희토자성소재

희토자성소재는 산업로봇, 현대교통 및 청정에너지와 국방 분야의 필수 핵심소재이다. 희토 영구자석 산업은 중국 희토응용 분야에서 가장 큰 비중을 차지하는 산업으로 전체 시장의 40%이상을 차지하며 국제시장에서 희토산업 현황을 반영하는 바로미터(barometer)가 되었다.

희토영구자석산업은 한편으로 해외의 첨단생산기술을 추격하여 장비제조를 완비하였고 재료성능과 제조 안정성 향상 측면에서 비약적인 발전을 이룩하였으며, 다른 한편으로 희토자원강국의 우위에 입각하여 자원의 균형적인 이용 등에서 특색을 갖추었으며 희토영구자석산업의 새로운 발전의 붐을 일으켰다. 그중 "디스프로슘침투기술" 및 "결정립계 재건" 등 관련 기술의 진보는 소결 자석성능을 한층 더 향상시켰고 희토 소결 네오디뮴철붕소(NdFeB) 영구자석재료 제품의 종합 자력성능 [(BH)max(MGOe) + Hcj(kOe)]이 75에 달하였으며 전체 자성재료산업의 성분 조정을 조직과 구조제어의 차원으로 발전시켰다. 희토자원의 고효율이용을 위해 "쌍주상(双主相)"기술을 대표

로 하는 고품위 영구자석체를 개발하였으며 관련 기술은 산업에서 광범위하게 응용되었으며 개발한 네오디뮴철붕소 자석체가 세륨 함량이 35%일 경우 (희토총량) (BH)max>42 MGOe이며 이밖에 개발한 등방성 SmFeN자석파우더, 세륨철붕소, 방향성 방사능 링, 표면 디스프로슘 침투기술은 La, Ce, Sm 등 함량이 상대적으로 많은 희토원소의 응용을 크게 촉진시켰으며 고함량 희토자원의 응용영역을 확대시켰고 네오디뮴, 디스프로슘과 같이 상대적으로 부족한 희토자원의 사용량을 줄였으며 희토자원의 첨단희토재료 중에서의 균형적인 응용과 고품질화 응용을 촉진시켰다. 중국은 고성능 희토영구자석에 대한 연구와 개발에서 어느 정도 진보를 이룩하였으나 제품 품질의 안정성 및 응용 특성 등에서 여전히 해외제품과 격차가 있기 때문에 제품의 안정적인 제조과정, 희토 영구자석재료 성능의 정밀 구조, 자석 미세구조 등에 대한 심층적이고도 계통적인 연구를 필요로 한다.

라. 희토 광기능성소재

희토 광기능성소재는 차세대 조명과 디스플레이부품 발전에서 없어서는 안되는 핵심재료이다. 중국은 희토 광기능성소재의 최대 생산국이자 소비국이며, LED 조명과 디스플레이산업 규모가 방대하다. "12.5"기간의 발전을 거쳐 중국은 백색광 LED용 알루미늄산염계열과 질화물계열의 형광체 산업화제조기술을 확보하였고 형광체 상용화 기술수준은 해외 선진국수준에 접근하였으나 일부 고급 형광체 재료의 제조기술은 아직 확보하지 못한 상태이다. 또한 고성능 형광체 합성장비도 해외에 비해 일정한 수준의 격차가 있으며 특히 고온고압 연속합성장비의 결핍으로 고성능 형광체 제품의 시장경쟁력이 약하다. 일본 및 유럽 기업들은 LED 조명과 디스플레이 분야의 첨단기술과 발전 동향을 예의주시하고 있다. 예를 들어, 조명 분야에서 반도체 조명용 희토형광체 핵심 원소와 응용 관련 특허는 미쯔비시 화학 (Mitsubishi Chemical)과 일본국립재료연구소(Japan Material Research Institute)와 같은 일본기업이 장악하고 있기 때문에 첨단 희토 기능성소재 및 하부의 산

업 발전에서 특허의 규제를 받고 있다. 디스플레이 분야에서 광대역 디스플레이용 녹색형광체(â-Sialon)의 핵심특허와 고온고압제조기술도 해외기업에 의해 통제되고 있다. 이밖에 새로운 풀 스펙트럼 반도체조명기술도 해외기업이 이미 수년간 개발해왔고 특허를 출원하였으나 아직 시작단계에 머물러 있다.

희토 광기능성 결정소재는 레이저 및 정보탐지 등 첨단기술 분야의 핵심소재이다. 레이저결정체는 고체레이저의 핵심작동 매개체로 레이저 무기, 정보저장, 정밀 가공, 의료, 통신 등 영역에서 널리 응용되고 있으며 특히 국방 안전, 열 핵융합 등 대형과학프로젝트, 신흥 레이저 조명, 디스플레이 영역에서 중요한 응용가치를 지닌다. 섬광 결정체는 중요한 고에너지 방사선 및 방사선 검출 재료로서 핵의학, 고에너지 물리학, 공간물리학, 산업용 CT, 석유 탐사, 보안 검사 등 영역에서 널리 응용되고 있으며 특히 양전자 방출 단층술(PET, positron emission tomogr- aphy)과 같은 첨단의료진단장비, 슈퍼충돌장치, 암흑물질 탐지와 같은 첨단과학공정 및 핵확산 방지, 테러방지 등 국토안전과 관련된 국제 사무에서 대체 불가능한 중요한 역할을 한다. 미국은 희토 레이저결정체 산업에서 세계 선두수준이며, 국제적 영향력이 있는 몇몇 레이저 결정체 생산기업은 모두 미국에 집중되어 있다. 최근 중국은 절대다수 레이저결정체 부품의 생산능력과 독자적 공급능력을 갖추었으나 산업화수준은 미국을 대표로 하는 국제첨단수준과 여전히 뚜렷한 격차가 있다.

마. 희토촉매재료

희토촉매재료는 에너지, 환경 분야에서 대체 불가능한 핵심기초재료이다. 석유화공, 자동차배기가스정화, 도시미세먼지 처리 및 정화, 독성유해가스정화 등 영역에서 없어서는 안될 핵심기초재료이다. 가솔린차량, 디젤차량, 오토바이와 CNG차량 등 배기가스정화재료 및 그 산업화기술과 장비, 고효율 친환경 희토 탈황탈질 촉매제 및 공정화 응용기술, 고성능 희토촉매재료의 고정원 독성 유해 배기가스치리기술 등 핵심기술은 아직 지속적인 연구가 필요하다.

중국산 크래킹 촉매제의 응용성능은 해외 동류 촉매제 수준에 도달했다. 대부분의 중국산 촉매제는 각 정련소의 원자재와 장비의 실제 상황에 따라 맞춤식으로 설계 제조되기 때문에 일부 성능 지표는 실제 응용과정에서 해외의 촉매제보다 우수하다. 그러나 휘발유 생산 증가를 위한 크래킹 촉매제의 개발 기술은 해외와 여전히 큰 차이가 있다. 가솔린 차량용 희토 촉매제 및 시스템 통합 기술은 EU V 배출기준을 부분적으로 충족시킬 수 있지만, 중국의 자동차 배기가스 정화 촉매제의 기술수준은 전반적으로 해외 촉매제 수준보다 뒤떨어져 있으며, 디젤 차량 배기가스 정화기술도 해외와 격차가 더욱 크다.

바. 희토수소저장재료

희토수소저장재료는 중요한 에너지저장재료로 주로 니켈수소전지, 수소에너지 저장 및 운송, 축열 및 열펌프, 정적 압축기 및 촉매제 등에 응용되며 현재 니켈수소전지에 가장 많이 응용된다. 최근 몇 년간, 신에너지와 신에너지 자동차의 급속한 발전은 희토 수소저장재료에 방대한 공간을 제공하였으며, 풍력 등 간헐적 신에너지의 저장, 연료전지의 고밀도 수소 공급원은 희토 수소재료의 점진적으로 응용핵심이 되고 있다. 중국은 희토 수소저장재료 최대의 생산국가이지만 고급 희토 수소저장재료 및 응용 분야에서는 일본과 격차가 존재한다.

4 희토 연구 현황 및 최신 진전

가. 희토 제련분리기술

(1) 희토 습식분리기술

대부분의 경우, 희토 원소는 자연계에서 화합물 형태로 다양한 유형의 광

물에 존재한다. 그러나 중국 남부지역의 쟝시(Jiangxi), 광둥 (Guangdong) 및 푸지엔 (Fujian) 등 지역에 "이온 흡착형 희토광"이 분포되어 있는 데, 희토 원소는 이온형태로 지각 표층의 토양에 흡착되어 있다. 전자는 채굴과 선광을 거쳐 처음에는 희토를 농축시켜 희토정광이 되며 희토정광을 분해하여 혼합 희토원소 농축물을 추출해낸다. 후자는 선광을 필요로 하지 않으며, 채굴과정에서 혼합 희토원소 농축물을 직접 추출할 수 있다. 2가지 희토 농축물은 재차 분리과정을 거쳐 희토 단일금속을 형성하거나 혹은 다양한 화합물로 만들어져서 응용자에게 공급된다. 이러한 추출, 분리 및 제조 과정은 학과 측면에서 습식야금범주에 속한다. 비 수용액을 이용해 물리, 화학적 방법으로 그 광물, 화합물, 혼합금속, 합금을 적절하게 가공하여 상응하게 금속, 혼합신금속, 신합금으로 만들거나 혹은 조제품의 순도를 한층 더 높이는 정제과정은 건식야금범주에 속한다.

현재 중국의 희토 야금 분리추출 능력은 연간 40만톤 (REO) 이상이며, 희토의 연간 생산량은 약 10만톤(REO)에 달하여 세계 총 생산량의 90% 이상을 차지한다. 희토의 추출분리공정은 엄청난 양의 불소와 유황을 함유한 폐기, 산알칼리 폐수와 토륨 등의 방사성 물질을 배출하므로 중국의 젖줄인 황하강 상하류 오염이 심각한 수준이다. 중국의 관련 기업들은 환경보호시설을 제대로 갖추지 못하였기에 환경오염 문제해결에 직면해 있다. 따라서 희토 청정 분리추출기술을 개발하는 것은 희토자원의 효율적인 이용과 환경오염 해결 나아가 희토의 국제적 입지를 확보하기 위한 필수적인 경로이다.

희토 분리추출기술은 주로 습식제련분리기술과 건식제련분리기술이 있다. 습식야금분야에서는 복잡한 체계의 캐스케이드 추출이론 및 응용을 발전시켰고 복잡체계의 연동추출의 최소 추출량 계산방법이 개발되었으며 다양한 성분체계의 불순물 경사도 해석방법을 고안하였는데, 극한조건에서 원료 피딩 레벨 제거라는 가설을 통해 다중성분분리체계의 최소 추출량과 최소 세척량 공식을 도출하였으며, 추출법으로 초고순도 희토산화물 제조 신기술을 성공

적으로 개발하였고 희토 불순물과 비희토 불순물을 효과적으로 제어하였으며 5N이상 순도의 란타늄산화물, 가돌리늄산화물, 테르븀산화물, 디스프로슘산화물과 이트륨산화물 등 제품을 안정적으로 생산할 수 있게 되었는데, 그중 비희토 불순물 Fe_2O_3〈1ppm , CaO〈5ppm , SiO_2〈5ppm이 포함된다. 또한 상대순도가 5N이상, 절대순도가 4N에 달하는 고순도 스칸듐산화물 제조공법을 개발하였고 토륨을 0.05%에서 0.95ppm으로 낮추고 지르코늄을 0.2%에서 1.25ppm수준으로 낮추었다.

희토추출분리과정에서 암모니아질소 등 폐수가 대량으로 발생하는 오염문제를 해결하기 위해 산성인추출제 협동추출기술, 추출과정의 산평형기술, 희토 농도 경사도 조정기술 등을 이용해 "불비누화 희토 분리추출 신공법"을 성공적으로 개발하여 암모니아질소 등 폐수오염을 원천적으로 제거하였으며 생산 및 환경처리 비용을 절감하였고 2012년도 국가과학기술발명상 2등상을 수상했다.

고염도 폐수 배출문제에 비추어 화학 시약의 재활용을 목적으로 저탄소, 저염도, 무암모니아질소 추출분리 기술을 개발하였으며 자연계에 대량으로 존재하는 저렴한 칼슘마그네슘 알칼리 화합물로 분리추출과정에서 생성된 마그네슘 함유 폐수를 처리하였으며, 회수한 CO_2을 이용해 연속 탄화법으로 고순도 중탄산염 용액을 제조하여 액체암모늄, 액체 알칼리와 중탄산암모늄을 대체하여 희토용제 추출분리 정제 및 희토 농축물 침전 등에 응용시켰으며 암모니아질소폐수의 발생을 제거하였다. 희토 추출 분리 및 배소 침전과정에서 생성된 CO_2를 효과적으로 회수하여 탄소법으로 중탄산염 용액을 제조하는데 응용함으로써 CO_2의 재활용과 저탄소배출을 실현하였다. 추출분리와 침전과정에서 생성된 염화마그네슘 폐수를 중탄산염용액을 제조하는데 재활용하여 마그네슘의 재활용과 저염배출을 실현하였으며 고염도 폐수 처리비용을 절감하였고 운행비용을 대폭 줄였다.

(2) 건식분리기술

중국의 희토 건식분리기술에 대한 연구는 1950년대에 시작되어 용융염 전해, 열환원 등과 같은 희토금속 제조공정기술 및 장비를 개발하였으며 기술 확산을 통해 중국의 희토금속 및 합금산업체계를 갖추었다. 희토염화물 용융염 전해법 희토금속 제조장비와 기술, 희토 불화물계열 산화물 용융염 전해법 희토금속 제조장비와 기술을 개발하였는데, 희토 염화물 용융염 계열 전기분해는 희토금속, 단일 경희토금속 및 합금을 제조하는 주요 방법중 하나이다. 염화물 용융염 전해법의 희토 제조 기술 공법은 전기분해 온도가 낮고, 전해질이 저렴하며, 그루브(groove) 및 전극 재료의 재질 선택성이 많은 등 장점이 있다. 당시 일부 공장들에 채택되어 희토 금속의 시장 수요를 부분적으로 충족시켰다. 하지만 원료가 쉽게 습기를 흡수하고 용융물 증기압이 높으며 희토 회수율이 낮고 전기소모가 높으며 양극가스로 인한 환경오염 등 문제는 염화물 전해의 발전을 제약하였다. 2010년에 국가공업정보화부에서 발표한 낙후된 생산능력 도태 공지 (122 호, 2010) "일부 산업 분야의 낙후 생산 공정 장비와 제품 도태 가이드목록"에 따라 희토 염화물 용융염 전해법 금속제조기술 공정을 도태시키기로 확정하였다.

희토불화물계열 산화물 용융염 전해법으로 희토 금속을 제조하는 전극공정은 알루미늄 전해 전극공정과 기본적으로 유사하다. 최근에는 희토금속 및 합금 조제 공정 및 장비를 둘러싸고 "희토 금속 용융염 전해, 에너지절감 청정생산공정기술" 및 "대형 산화물 전해 희토 금속 제조장비 및 기술" 등 연구를 수행했다. 1만Å급 전해법 희토 금속 제조 생산 기술체계를 갖추었고 규모화 생산과정에 배기가스 수집처리 기술을 응용시켜 배기가스중에 함유된 희토산화물과 불화물을 회수하였다. 액상 음극 희토 용융염 전해조 및 공정 개발을 통해 음극 희토 전해조 장비를 제조하였고 전해법 네오디뮴금속 제조공정기술 개발하였다.

초고순도 희토 금속 제조기술 개발에서 획기적인 돌파를 가져왔고 희토금속 정제 공정화 수준을 개선하였다. 3세트의 초고순도 희토금속 고효율제조

및 정제공정기술을 개발하였고 초고도 진공 및 고진공 희토금속 정제장비를 여러 세트 설계 및 개발하였고 절대순도가 4N이상인 초고순도 희토금속(C, S, N 및 O 가스를 포함한 70종 불순물의 총 함량이 100mpm 미만)을 10여 종 얻었다.

나. 희토 영구자석재료

희토자성재료는 일종의 새로운 기능성 소재로서 희토 영구자석재료, 희토 자기변형재료 및 희토 자기냉각재료가 포함된다. 그중에서 희토 영구자석재료는 또 소결형 희토 영구자석재료 (Sm-Co 소결자석, Nd-Fe-B 소결자석), 희토 영구자석 본드재료 및 열프레스 / 열변형 Nd-Fe-B 자석으로 세분할 수 있다. 희토 자성재료는 중요한 희토 신소재로서 에너지, 운송, 기계, 화공, 의료, 전력 및 정보 등 다양한 분야에서 널리 응용되고 있으며 국가 경제에서 중요한 지원역할을 한다.

희토 영구자석재료는 중국의 희토응용 분야에서도 규모가 가장 크고 가장 빠르게 성장하는 산업으로 고성능 소결영구자석 재료의 산업화 핵심기술을 개발하고 독자적 지재권을 확보하였으며 재료의 종합성능이 안정적으로 향상되었으며 고급 NdFeB 소결자석 생산능력을 갖추었는데, 제품의 일부 성능은 세계 선진수준이다. 최근 몇 년간 희토영구자석은 괴상재료, 나노입자, 자성박막 및 희토자석 회수기술 개발에서 큰 진보를 가져왔다.

"10.5"에서 "12.5"기간, 1,000 톤급 고성능 NdFeB 생산라인에 존재하는 공통적인 문제를 해결하기 위해 기업의 적극적인 참여와 끊임없는 노력끝에 고성능 소결형 NdFeB 자석은 "이중 합금", 미세 분말 제조, "쾌속 응고 공법 + 이중 (영구자석) 주상", 자동 성형, 연속 소결, 저산소 공법, 결정립계 확산, 표면보호 등 핵심공정기술을 개발하여 중국의 고성능 소결형 강자성 영구자석의 산업화 수준을 기본상 일본이나 독일 등 선진국 수준으로 끌어올렸다. "희토 영구자석 산업기술 고도화 및 통합혁신"은 2014 년도 국가

과학기술진보상 2 등상을 수상했다. 고성능 자성메커니즘 및 신형 Ce 영구자석재료의 개발에서 획기적인 발전을 거두었고 신형 Ce 영구자석재료의 연구에 성공하면서 응용규모가 가장 큰 중, 저급 희토영구자석시장을 형성하였으며 상대적으로 자연계에 많이 존재하는 희토원소를 영구자석재료에 응용한 성공사례가 되었다.

"NdFeB 결정립계의 재건 및 저비용 고성능 자석 생산 핵심기술"이 2013 년도 국가기술발명상 2 등상을 수상했다. 전통적인 생산과정에서 자연적으로 생성된 결정립계 네오디뮴 농축상 성분을 변화시켜 다양한 성능특징을 지닌 새로운 결정립계의 NdFeB 재료를 개발하였다.

중희토 함량이 적거나 혹은 함유되지 않은 영구자석재료에 대한 연구에서 중국은 결정립계 확산, 입자 미세화, 이중 액상, 희토 수소화물 및 이중 영구자석 주상 첨가 등 다양한 기술을 개발하였다. 수많은 연구소, 대학과 기업들이 다양한 기술과 방법을 채택하여 디스프로슘을 주상과 결정립계 상의 계면층에 진입시켰으며 네오디뮴의 결정 위치를 치환하는 방법으로 경자성을 강화시켰고 항자성 핵형성을 억제하였다. 또한 자석의 미세구조를 제어하는 방법으로 자석의 비가역성 손실을 줄였고 감자 곡선의 직각도를 개선하였으며 저온도계수를 획득하였다. 실험실에서 기류 연마법으로 분말입자크기를 2㎛ 수준으로 낮추었고 결정체 입자크기를 5~6㎛로 조정하였으며 중희토 함량을 줄이는 동시에 보자력의 온도계수를 뚜렷이 낮추었다. 최근 일본은 PLP(pressless process) 공법을 개발하였는데, 기류 연마법으로 2㎛크기의 자석분말을 공급하는 방법으로 보자력이 16.84kOe에 달하는 자석을 제조하는데, 자기에너지는 여전히 50MCOe을 유지하는 디스프로슘이 함유되지 않은 NdFeB 자석을 만들어 낼 수 있기 때문에 동일한 유형의 자석에 비해 중희토 사용량을 20~30% 줄이는 효과를 보았다.

이방성 희토 영구자석 본드재료에 대한 연구에서 이방성 R-Fe-N (R = Nd, Sm) 및 R-Fe-B (R = Nd, Pr) 본드 영구자석 재료에 대한 개발에 중점

을 두었다. 격자 간 원자 효과에 의한 R-Fe 물질의 자기 특성을 높이는 물리적 원인을 해명하였고 무결함 단일 제품의 이방성 영구 자석 R-Fe-N 자성 분말 제조를 위한 기술로드맵을 제시하였으며, 고성능 이방성 R-Fe-N 자성 재료 및 자석 산업화 핵심기술 및 장비를 개발하였고 100톤 규모의 생산라인을 구축했다.

HRRD(hydrogenation disproportionation desorption recombination) Nd-Fe-B 계 영구 자석 분말을 형성하는 핵심메커니즘 및 고 보자력을 얻기 위한 방법을 발견하였고 고성능 HDDR (Pr, Nd) FeB 자성 분말과 고온 안정성 자석분말의 안정적인 생산을 실현했다. 단상 자석 및 하이브리드 자석의 제조 기술을 연구하였고 고성능 이방성 본드 자석을 만들어내어 향후 다양한 이방성 자석의 대량 생산을 위한 활발한 탐구가 이루어졌다.

나노결정 영구자석 재료에 대한 연구 개발에 있어서, 개발한 이방성 나노결정 NdFeB 영구자석을 중국계량학회 (China Institute of Metrology)에서 측정한 결과, 최대 자기에너지적(BHmax)이 53.67MCOe을 기록하였는데, 이는 제3자 권위 전문 측정기구가 제공한 최고 성능의 나노결정 영구자석이다. 여러 기관들에서 공동 수행한 국가 "863" 중대 프로젝트 "고압 희토 영구자석의 규모화 생산 핵심 기술"과제는 열변형 자석의 균질성 및 균열 문제를 성공적으로 해결하였으며 자석의 자기에너지적(BHmax) 및 제조효율을 대폭 향상시켰다. 2011년에는 처음으로 대변형률 (〉 85 %) 고압 / 열 유변학적 방법으로 강한 자기 이방성을 갖는 SmCo 나노 결정 영구자석을 만들어냈는데 자기에너지적이 등방성 고온 압축 자석에 비해 176 % 높아졌다. 최근 듀얼 위상 복합 나노 결정 희토 영구 자석 괴상자석에 대한 연구에서 진전을 이루었는데, 주로 일부 신기술 분야에서 응용되고 있다. 연구자들은 Nd 함량이 적은 NdFeB 비정질 합금을 원료로 하여 대변형률의 열유동기술을 통해 조밀한 이방성 a-Fe / $Nd_2Fe_{14}B$ 이중상 복합 나노 결정 자석을 만들어냈다.

"탑다운"방식으로 미크론 크기의 입자를 나노입자로 파쇄하는 새로운 기술이다.

최적화된 제조공정 하에서 제조된 나노 시트 재료는 강자기 이방성 및 높은 보자력(max 17.7 kOe)을 갖추었으며 탁월한 영구자기 특성을 나타낸다. 또한 저온(<-80℃) 계면활성제의 볼밀링법을 이용한 희토 영구자석 나노입자 제조방법을 발전시켰는데, 저온이 나노입자의 형성에 유리하며 제조한 입자의 보자력이 대폭 향상되었음을 발견하였다.

자성 마이크로전자시스템의 핵심부품으로 영구자석박막에 대한 연구가 주목받고 있다. 현재 희토 영구자석박막재료의 연구에서 주도적 지위를 차지하는 것은 이방성 연자성 아중상 복합 나노영구자석 박막이다. 자성 스퍼터링법으로 $Nd_2Fe_{14}B$/ Ta/$Fe_{67}Co_{33}$/Ta 다층막을 제조하였는데, 그 자기에너지적이 61MGOe에 달한 것으로 이는 현재 보고된 영구자석재료의 최고치이다. 영구자석박막 연구의 다른 하나의 인기분야는 단일상($Nd_2Fe_{14}B$, $SmCo_5$등) 박막의 보자력 향상과 경자성 메커니즘에 대한 연구이다. 중국과학원 금속연구소는 Dy 결정립계의 확산이 단상 Dy NdFeB 영구 자석 박막의 보자력에 미치는 영향에 대해 연구를 통해 Dy이 결정립계 층에 확산되어 (Nd, Dy)$_2Fe_{14}B$ 상을 형성하였으며 자석의 보자력이 61% 높아졌음을 발견하였다.

희토 영구자석 재활용기술 측면에서 보았을 때 회수방안의 선택은 자석의 성분 및 불순물의 함량에 의해 결정된다. 주기가 짧을 경우, 자석의 성능이 다소 저하되며 화학 정제법으로 고품질의 자석을 얻을 수 있지만 제조비용이 크게 높아지고 주기가 상당히 길어진다. 산소 함유량이 높은 NdFeB폐기물의 경우 가능한 방법은 재용융시키는 방법으로 산소를 제거하는 것이다.

다. 특수 희토자성소재

(1) 희토자기냉각소재

새로운 유형의 냉각기술로서 자기냉각은 전통적인 냉각기술과 비교하였을

때 3가지 뚜렷한 장점을 가지고 있다. 첫째, 친환경 및 환경 보호 : 자기 냉각은 고체 냉매를 사용하여 냉각 가스의 온실 효과 문제를 해결하였다. 둘째, 고효율 및 에너지 절약 : 장기 냉각의 열효과는 높은 열역학과정에서 높은 가역성이 있으며, 카르노 사이클 효율이 50% 이상에 도달하였다. (3) 안정성 / 신빙성 : 자기 냉각은 가스 압축기를 필요로 하지 않으며, 진동 및 소음이 작고 수명이 길며 신빙성이 높다. 따라서 녹색 냉각기술이라 불린다. 매우 낮은 온도에서부터 상온 이상에 이르기까지 자기 냉각이 널리 적용된다. 저온 영역에서 자기 냉각 기술은 액화 헬륨, 질소, 특히 녹색 에너지 액화 수소의 제조에 좋은 적용 가능성을 가지고 있으며, 고온 특히 실온 부근에서 자기 냉각기 소재는 냉장고, 에어컨 및 슈퍼마켓 식품 냉동 시스템에서 응용전망이 밝다.

우수한 적용 가능성으로 인해, 저온 및 심지어 실내 온도에서의 자기 냉각 재료 및 기술에 대한 연구가 큰 주목을 받고 있다. 중저온 구역은 액체 수소 및 액체 질소를 제조하는 중요한 온도 구역이며 관련 온도 구역에서의 자기 유질서 상변화 재료에 대한 연구가 줄곧 인기 연구 대상이 되었다. 최근에는 중저온 구역에서 거대 자기 열효과를 지닌 다양한 중희토 금속간 화합물이 보고 된 바 있다. 대표적인 예로는 RAl2 (R = Er, Ho, Dy, Gd, Pd), RCo2 및 RNi2 (R = Gd, Dy, Ho, Er), RNi (R = Gd, Ho, Er), RNiAl, RCoAl, RCuAl (R = Tb, Dy, Ho)을 꼽을 수 있다. 그 중에서도 laves phase를 지닌 RCo2, 특히 ErCo2는 경우 페르미 준위 근처의 특수 에너지밴드 구조 사이의 풍부한 자기적 상호작용으로 인해 뚜렷한 자기 열효과를 나타는데 저온 구역에서 가장 주목받는 자기 냉각 재료 중 하나이다.

상온 자기열효과재료는 광범위한 자기 냉각 응용으로 인해 보다 많은 관심을 끌고 있다. 지난 십여년간 발견된 새로운 유형의 상온 거대 자기 열재료는 상온 자기 냉각 기술의 발전을 크게 촉진시켰다. 이들 재료는 Gd-Si-Ge, $LoCaMnO_3$, Ni-Mn- (Ga, In, Sn), La (Fe, Si) 13 계열 화합물, FeRh 화합물, MnAs 계열 화합물 등을 포함하는데, 그 공통의 특징은 자기열효과가

전부다 일반 재료인 Gd보다 훨씬 뛰어나며 상변화 특성은 1등급이며, 대부분 강한 자기 결정 결합 및 자기 탄성 효과를 나타낸다. 기존의 발견된 신형의 상온자기냉각재료가운데 $La(Fe,Si)_{13}$계열 화합물은 원자재가격이 저렴하고 무독성이며 제조하기 쉽고 원자재 순도에 대한 요구가 높지 않은 등 특징을 지니고 있으며 국제적으로 가장 유망한 상온 자기냉각재료로 인정받고 있다. $La(Fe,Si)_{13}$계열 화합물의 상변화 특성을 보면 냉각 온도 범위를 50~450K에서 조절할 수 있고 다양한 구성성분의 엔탈피 변화범위가 Gd의 엔탈피 변화 범위를 크게 웃돈다.

상온 자기냉각재료거나 혹은 저온 자기냉각재료를 제조하든 혹은 능동형 자기냉각 밴드거나 혹은 수동형 자기냉각밴드를 제작하든 할 것 없이 전부다 안정적인 대규모 제조, 절단, 가공성형, 자성 및 비자성 테스트 등 과정을 거쳐야 한다. 최근 몇 년간 해외에서는 신소재를 개발하는 동시에 자기냉각소재 시제품을 전략적으로 발전시켰다.

(2) 희토 마이크로웨이브 자성재료

희토 마이크로웨이브 자성재료에 대한 연구와 관련하여 중국의 연구자들은 우선 이론 측면에서 스누크(Snooker)의 한계를 초월할 수 있는 동시에 재료의 마이크로웨이브 자기 투자율을 높이고 재료의 자연 공진주파수를 5~20GH 범위로 제어 가능한 여부에 초점을 맞추었다. 이면 (평면, 추면)의 이방성을 갖는 희토 자성 재료를 신형의 희토 마이크로웨이브 자성 재료로 개발가능하다는 결론을 내렸다. 이를 토대로 많은 실험이 이루어 졌으며, 결정 구조가 다른 여러 종류의 이면형 희토 마이크로웨이브 자성체를 제조하여 마이크로웨이브 흡수 및 전자기 검출에 응용하여 우수한 효과를 얻었다.

고주파 자성 재료의 자성 특성을 나타내는 이방성(Bi-anisotropic)에 대한 연구를 통해, 이방성을 이용해 높은 투자율을 지닌 신형의 자성소재를 개발할 수 있다는 결론을 얻었다. 예를 들면 평면형 희토 - 3d 금속간 화합물의 경

우, 제1차원리로 $NdCo_5$의 자기 결정 이방성에 대한 계산 분석을 하였다. 궤도자기모멘트의 이방성 및 이와 메트릭스 기하와의 상관관계를 이용해 $NdCo_5$ 평면 자기 이방성의 미시적 기원에 대해 해석하였다. $R_2Fe_{14}N_3$-ä (R=Ce,Ph,Nd)의 제조, 전자기 특성 및 마이크로웨이브 흡수의 응용 연구 등이 그러하다.

(3) 희토 거대 자기변형재료

자기변형재료(Rare earth Giant Magnetostrictive material, RGMM)는 일종의 지능형 재료로서 그 길이와 부피가 자화상태에 따라 변화되기에 전자기에너지와 기계에너지의 상호 전환이 가능하며, 에너지전환, 작동, 센서 등 영역에서 응용된다. 신형의 희토 거대 자기변형재료는 높은 자기변형성능, 높은 전환효율, 빠른 응답속도 등으로 인해 주목받고 있다.

희토 자기변형재료의 메커니즘에 대한 연구는 자기변형 신축메커니즘, 재료제조기술, 새로운 합금시스템 및 응용진전 등이 포함되며 대량의 연구를 수행했다. 예를 들어 자기장 응고와 자기장 열처리는 희토 거대자기변형 합금에 대한 기술처리를 통해 자기변형신축성능을 높이며, 희토 거대자기변형 박막재료는 순간 증발, 빔 스퍼터링, 직류 스퍼터링, 무선주파수 마그네트론 스퍼터링 등 방법으로 필름에서 막코팅을 하며 주로 마이크로 기능성 재료부품에 응용되며, 경희토원소 Nd로 중희토원소 테르븀과 디스프로슘을 대체하여 자기결정의 이방성을 낮춤으로써 재료의 자기변형특성을 높일 수 있다. 희토 거대자기변형재료에 대한 심층 연구과 진전을 바탕으로 "신형의 자기 탄성 재료의 기능 조절, 결정 성장 및 거대 자기변형 특성 연구" 과제가 2017년도 국가자연과학상 2등상을 수상했다.

라. 희토촉매재료

희토는 촉매제, 촉매제 담체 및 촉매 보조제에 널리 응용되며 촉매 성능을 높이는데에 결정적인 역할을 한다. 촉매 분야에서의 희토의 응용은 주로 석유

촉매 크래킹용 촉매제, 자동차 배기가스 정화기용 희토 촉매재료 및 산업 탈질 촉매제가 포함된다. 촉매제가운데 희토 소비량이 가장 많은 영역은 석유 크래킹 촉매제 및 자동차 배기가스 처리 촉매제이다.

희토 촉매에 대한 국제 연구는 1960년대 중반에 시작되어 40년간의 축적 과정을 거쳐 촉매 작용을 통해 희토의 역할에 대한 깊은 이해를 갖게 되었다. 많은 연구를 통해 희토 및 다른 구성 요소 사이에 시너지 효과가 발생하여 촉매의 성능을 뚜렷이 향상시킬 수 있음을 보여주었다. 현재, 란탄 및 세륨과 같은 희토 원소는 석유 공정, 천연 가스의 촉매 연소, 자동차 배기가스, 유독성 및 유해 가스 정제, 탄소 화학 물질 및 연료 전지(고체 산화물 연료 전지) 올레핀 중합과 같은 많은 중요한 공정에 널리 응용되어 왔다. 유체 촉매 크래킹 (fluid catalytic cracking, FCC)은 석유 정제에서 가장 중요한 단계이다. 1960년대 초반에 희토원소로 치환한 Y형 분자체 (RE-Y)로 비정질 실리카 알루미나 화제를 대체하여 가솔린 생산율을 10% 이상 높였는데 이는 석유 산업의 혁명으로 알려져 있다. 연구에 따르면 분자체에 희토 원소의 도입으로 산성 분포 및 산 강도를 조절한 동시에 활성제의 활성을 높였고 생성물의 분포를 조절하였으며 분자체 틀의 안정성을 강화시키는 효과를 보았다. 현재 촉매 크래킹기술의 발전추세는 촉매 크래킹 신공법의 개발, 다양한 원료오일에 비추어 개발한 크래킹 제품의 정밀제어기술로 시장의 변화 수요 충족, 고효율, 저오염물 배출의 크래킹 기술 및 이와 대응한 다성분 첨가제의 디자인 및 제조공법, 신형의 기저재료 및 첨가제의 제조 및 산업응용 등이 포함된다.

중국의 촉매 크래킹 촉매제의 개발은 추적, 모방, 2차 혁신 및 기술 혁신 단계를 거쳤다. 1987~1990년 사이에 개발된 초안정성 Y형 촉매제는 해외의 촉매제와 동등한 수준에 있었으나 1996~1997년 이후 중국산 신규 촉매제의 성능은 같은 시기 해외의 신제품보다 월등하게 우수했다. 중국산 촉매제는 대부분이 정제소의 원료 및 장비의 실제 조건에 따라 맞춤식 설계 및 제조되었

기에 실제 응용과정에서 일부 특정 성능 지표가 해외의 촉매제보다 뛰어났다. 예를 들어 디젤유 중유 크래킹 촉매제의 품종 개발에 있어서 선두수준이다. 또한 경질 올레핀 증산 촉매 크래킹 기술을 개발하였으며, 경질 올레핀 증산 전용 촉매제의 품종개발 우위를 갖추었다. 중국산 크래킹 촉매제의 응용 성능은 해외 촉매제와 같은 수준이며 실제 응용과정에서 일부 특정 성능지표는 해외 촉매제보다 우수하다.

자동차의 배기가스 정화는 희토 촉매재료가 가장 광범위하게 응용되는 다른 한가지 분야이며, 자동차 배기가스 촉매제의 개발에 있어서 희토재료는 항상 중요한 역할을 담당하고 있다. 배기가스 촉매기술의 희토 재료 기술의 발전은 촉매재료 기술의 개발과 매우 밀접히 연계되어 있기 때문에 상호 촉진하는 관계로 간주할 수 있다. 중국의 여러 대학과 기업들이 공동으로 수행한 "희토 촉매재료 및 자동차 배기가스 정화에서의 응용" 과제는 배기가스 정화에 대한 주요 반응 촉매제 활성 성분에 대한 설계, 촉매제를 구성한 핵심재료, 희토 및 (비)귀금속 성분과의 상호작용 및 촉매제 제조공법 등의 연구를 토대로 자주혁신을 통해 국가배출기준 요구보다 우수한 자동차 배기가스정화 촉매제의 핵심재료 및 시스템통합기술을 개발하였는데, 2009년도 국가과학기술진보상 2등상을 수상했다.

가솔린 자동차 촉매제와 비교하였을 때, 디젤 차량 촉매제의 기술개발이 늦게 시작되었으며, R&D 기반이 상대적으로 취약하며 실제 상용화 경험이 더욱 부족하다. 중국의 많은 연구소와 기업들이 공동 수행한 "중형 디젤차량 오염배출저감을 위한 고효율 SCR 기술의 연구 개발 및 산업화"과제를 통해 국제선진수준의 SCR 촉매제 및 제조 기술을 독자적으로 설계 및 개발하였고 대규격 SCR 촉매제 담체를 연구개발 및 양산화하였으며 고정밀도 환원제 공급시스템과 차량탑재 고장진단기술을 자체 개발하였다. 또한 "대규격 촉매제 담체 - 촉매제 생산 및 포장 - 매칭 제어 기술 및 통합" 과제를 수행해 완비된 기술산업사슬을 갖추었고 국산화를 실현하였으며 해외기술과 제품의 독점

구도를 타파하였고 자국산 중형 디젤차량에 대규모 응용을 실현한 공로를 인정받아 2014년도 국가과학기술진보상 2등상을 수상했다.

촉매 연소 기술은 고효율적이며, 2차오염이 없고 응용범위가 넓은 등의 특징을 지니며 천연 가스 발전, 산업용 용광로 등에 응용전망이 밝으며 산업원 VOCs의 가장 효과적인 정화기술이기도 하다. 고성능 촉매제의 관건은 희토 산화물이 담체 또는 보조제로서 대체 할 수 없는 중요한 역할을 하는 것이다. 귀금속 촉매제의 경우 희토를 응용하면 귀금속의 분산성을 크게 향상시키며 화학적 안정 상태에 도달하기에 촉매의 활성과 안정성을 높일 수 있다. 희토 복합 산화물의 경우, 제조 방법에 대한 최적화를 통해 귀금속 촉매제와 동등한 활성을 얻을 수 있다. 현재 연소를 촉매하는 촉매제의 개발 방향은 주로 다음과 같다. (1) 포름알데히드, CO 등의 경우, 고온 적응형 저온촉매 산화 촉매제의 개발 (2) VOCs, 메탄 등의 연소 촉매의 경우, 개발 방향은 주로 촉매제의 저온 활성을 높이는 동시에, 안정성 (열안정성, 항독 능력 등)을 높이는 것이다. 동시에 산업에서 배출되는 휘발성 유기 화합물 (VOCs)의 구성이 비교적 복잡하기 때문에 촉매제는 광범위한 응용 및 고효율의 특성을 필요로 한다. 또한 중독에 강한 저항력을 가진 높은 반응속도와 낮은 발화점 온도의 비 귀금속 촉매제 또한 인기 연구과제에 속한다.

석유 화학 제품, 자동차 배기가스 정화 및 촉매 연소와 같은 전통 분야 외에도 희토 촉매재료의 새로운 응용 분야에서도 획기적인 진보가 이루어졌다. 예를 들어 1kW급 천연 가스 개질 수소 생산 시스템과 10kW급 A 수소 생산 시스템을 개발 및 상용화하였으며, 고성능 희토 복합전지재료를 기반으로 1kW규모의 파이프모양 SOFC 배터리스택 개발에 성공하였으며 희토 산화물이 일반적으로 촉매 보조제의 역할을 하던 한계를 넘어서 희토를 주요 촉매 성분으로 하는 촉매 반응 시스템을 개발하였다. 예를 들면 클로로 카본의 촉매제 연소용 CeO_2 계열 촉매제, 메탄의 염소 산화 또는 브롬 산화가 CH_3Cl 또는 CH_3Br 과정을 거쳐 프로필렌로 전환되는 반응과정에서 CeO_2의 형태와

표면 개질을 조절함으로써 CH_3Cl와 CH_3Br의 선택성을 뚜렷이 높였다.

희토 촉매에 대한 이론적 연구는 주로 표면 및 산소의 활성화, 산소 결손의 형성 및 이동, CeO_2와 로딩된 금속 사이의 상호 작용 메커니즘 및 소분자 반응물 (CO, O_2, NOx 등) 흡착 및 반응 경로 등에 집중되었다. 국가 973 프로그램 등의 지원을 받아 4f 전자의 고도의 국소화 분포 및 표면 완화가 CeO_2 표면의 전자구조 및 특성에 미치는 영향을 심층적으로 연구하였고 세륨 - 지르코늄 고용체의 산소 저장 및 산소 발생의 특성을 연구하기 위한 이론적 모델을 구축했다. 또한 CeO_2의 4f 결합되지 않은 빈 궤도의 촉매 과정에서 "전자 저장 장치"의 역할을 발견하였고 희토 원소의 촉매 특성에 대해 심층적인 연구를 하였으며 고성능 희토 복합 촉매재료의 개발 및 발전을 위해 이론적 기반을 마련했다.

마. 희토 수소저장재료

에너지 부족과 환경오염이 갈수록 심각해지면서 신에너지와 환경 문제에 대한 탐구가 활발히 진행되었다. 수소에너지가 2차 청정에너지로 인식되고 있으나 수소의 저장 및 운송은 여전히 수소에너지 응용의 병목이 되었다. 수소저장합금은 특정 온도와 수소 압력 하에서 수소를 가역적으로 흡수 및 방출할 수 있는데 개발된 일련의 수소저장합금가운데 희토 수소저장합금이 가장 널리 응용되고 있다. 수소저장합금은 수소를 흡착하는 원소 또는 수소와 강한 친화력을 갖는 A 원소와 수소 흡착력이 작거나 혹은 수소와 친화력이 약한 B 원소로 구성된다. A 원소는 수소저장합금 구성의 핵심 요소인 수소저장량을 제어하며, 일반적으로 희토, 마그네슘 등 원소가 그것이다. B 원소는 수소 흡착 / 방출의 가역성을 제어하고 발열 및 분해 압력을 조절하는 역할을 하는데, 일반적으로 니켈, 망간, 알루미늄과 같은 전이 금속 원소가 대표적이다. 희토수소저장합금의 수소저장은 안전성이 높고 수소저장밀도가 크며 수소 흡착 및 방출 과정에서 열 효과를 발생시키는 동시에 온도 변화에 따라 평형 압력이 기하급수적으로 변화하는 데 이러한 특성을 바탕으로 희토수

소저장합금은 전기 화학적 수소저장, 기·고상 수소 저장, 축열 및 정적 압축에 응용되고 있다.

최근 희토수소저장재료는 기초 연구, 첨단기술개발, 핵심기술 연구에서 어느 정도 진전을 이루었다. 심층적인 기초연구를 통해 이론 또는 미시적 관점에서 재료의 구조, 성능 및 상호 관계를 이해하였고 재료의 응용개발을 촉진시켰다. 예를 들어, 고체 및 분자 경험전자이론 (EET) 및 밀도 함수 이론 기반의 1차 원리 연구, SVR (Support vector regression)과 입자 최적화 알고리즘을 결합한 수학모형 구축을 통한 다양한 원소 성분이 합금의 전기 화학적 특성에 미치는 영향 연구, PCI 모델 시뮬레이션을 응용한 합금의 수소화 탈수소 동력학 연구, 고해상도 싱크로트론 가속기 분말 X선과 중성자 회절을 통한 합금 및 수소화물 / 중수소화물 연구 등이 포함된다.

MH 전지 발전 수요를 충족시키기 위해 고출력, 대용량, 낮은 자기방전, 장수명, 저온 / 고온 / 넓은 온도 대역, 저비용 등 희토 수소저장재료에 대한 개발을 강화하는 동시에 재료의 종합 성능을 고려하였다. 재료의 구성 혹은 제조공정 제어구조에 대한 최적화 또는 개선, 표면 처리 또는 촉매 활성의 도입 등을 통해 재료의 특정 성능을 개선하였고 보편적인 과학법칙과 결론을 도출하였다. 다상 구조의 $AB_{3-3.5}$형 La-Mg-Ni 희토수소저장합금 전극의 전기 화학적 사이클 안정성 및 전하 유지율이 취약한 문제점을 해결하기 위해 합금 구성 단계의 특성 및 상 형성 법칙을 체계적으로 연구하였다. 많은 연구 결과에 따르면 A_5B_{19} (Pr_5Co_{19}) 및 A_2B_7 (Ce_2Ni_7) 유형의 La-Mg-Ni 합금은 AB_5 유형, AB_4 유형 및 AB_3 유형 단계보다 우수한 사이클 안정성을 나타내었다. 적절한 열처리 공정을 통해 Pr_5Co_{19}형 주상을 뚜렷이 증가시킬 수 있으며, Gd, Sm, Y 등은 적절한 양으로 La를 대체하여 Ce_2Ni_7형 상 형성에 기여하였다.

MH/Ni 전지의 발전 방향은 주로 전지의 에너지 밀도 및 전력 밀도를 더 높이고 방전 특성을 개선하며 전지의 사이클 수명을 높이는 것이다. 수소저장

합금이 충방전 과정에서 쉽게 분말화, 산화 및 부식되는 등의 문제는 전지의 성능에 심각한 영향을 미쳤다. 이러한 현상을 줄이기 위해 합금에 대한 표면 처리 연구가 진행되었는데 불소화 처리, 알칼리 처리, 코팅 등 합금의 표면 상태를 변화시켜 전지의 전기 화학적 성능을 안정적으로 발휘하여 전지수명을 연장시키는 등의 연구가 포함된다. 연구 결과에 따르면 표면 처리 후 희토 수소저장합금 분말의 특정 성능이 뚜렷이 개선되었다.

기·고상 수소 저장 분야에서는 관련 장비, 연료전지, 반도체 산업, 보호기체, 산소원자시계 및 산소정화 등 영역에 희토수소저장재료의 고체수소저장 기술이 응용되었다. 재료 구성 및 구조 조정을 통해 재료의 균형 산소 압력과 산소 저장 용량을 조정하였고 금속 수소화물 압축기에 대해 실용 가치가 있는 "합금 쌍"을 개발하였다.

신형 희토수소저장재료를 개발하기 위해, Mg_3RE, $LaMg_{12}$ 및 기타 희토 마그네슘합금과 같은 RE-Mg-Ni 수소저장합금을 연구하였으며 AB_2 유형 RE-Mg-M (M은 특정 전이금속원소) 계열 수소저장 합금 및 AB_4 유형의 La_5MgNi_{24} 수소저장 합금 연구를 진행하였다.

용융 합금의 성분 편석을 줄이고 일정한 특성을 향상시키기 위해 급속 냉각 및 자장 열처리와 같은 다양한 첨단소재제조기술이 점차적으로 응용되었다. 마그네슘 함유 수소저장합금의 고온제련공정이 합금 구성을 제어하기 어렵고 마그네슘 휘발이 잠재적인 안전 문제를 야기한다는 문제점을 해결하기 위해 다양한 소결기술, 고 에너지 볼밀링 기술 및 전해 공융 합금 기술과 같은 제조 신기술이 연구되고 응용되었다.

바. 희토발광재료

희토 방광은 희토 이온 4f가 서로 다른 에너지레벨에서 튀어 나와 발생한 것으로 여기방식에 따라 발광은 포토 루미 네 슨스(PL, photoluminescence, 적외선, 청색광 LED, 자외선, 진공 자외선 발광, X선 발광, 음극선 발광, 방사성 발광 등),

일렉트로 루미 네 슨스 (electroluminescence) 및 화학 발광 (chemiluminescence)으로 분류 가능하다. 희토 이온 발광은 강한 흡수 능력, 높은 색순도, 높은 전환 효율의 특징을 지니며, 자외선에서 적외선까지의 스펙트럼을 방출할 수 있고 특히 가시광선 대역에서 매우 강한 방출능력을 가지기 때문에 조명, 디스플레이, 탐지 및 통신 등 분야에 광범위하게 응용된다.

최근에는 희토 발광재료 분야의 신기술 성과, 신규 제조공정 및 새로운 응용 분야에서 급속한 발전이 이루어졌다. 신형 백색광 LED 조명용 질화물/질산화물 희토발광재료의 설계 및 제조핵심기술, 양자 절단, 의학 및 항공용 섬멸크리스털 및 세라믹재료, 희토 복합 발광재료(OLED) 및 생물 발광 표기재료 (상향 전환 / 긴 잔광) 등의 분야에서 큰 성과를 거두었다. 이와 동시에 램프용 3색, 음극 방사선, 고압 수은램프, 금속할로겐램프 등 희토 발광 재료 및 디스플레이용 냉음극 CFL 형광재료 시장수요량 및 논문 발표수량이 갈수록 줄어드는 추세이다.

현재, LED 형광체의 연구 초점은 질화규소 및 산소 질화물 형광체이다. 제조한 고성능 수소화물 적색 형광체의 제품 성능은 국제 선진 수준에 도달했다. 질산화물 녹색 형광체를 자체 개발하여 해외의 핵심 특허의 규제에서 벗어날 것으로 예상된다. AC LED 분야에서 잔광 수명 조절이 가능한 희토 LED 발광 재료는 AC LED 조명 장비의 스트로보 라이트를 효과적으로 개선함에 따라 중국은 전 세계에서 유일하게 희토 형광체로 저주파 플래시 AC LED 제품을 생산할 수 있는 국가가 되었다.

상향전환(upconversion) 발광은 장파장 광조사가 단파장 광조사로 전환되는 과정을 가리킨다. 입사광보다 큰 여기 광 에너지를 상향 전환 광이라고 한다. 따라서 상향전환 발광은 반스톡스 형광(anti-Stokes fluorescence)이라고도 불린다. 현재, 상향전환 발광 재료는 적외선 탐지, 적외선 이미징 예를 들면 야간 투시장치는 매우 성숙된 기술이다. 또한 상향전환형 발광재료는 레이저, 광통신, 디스플레이 분야 예를 들면 3차원 디스플레이 및 생물 의학

디스플레이 영역에서 응용전망이 밝으며 갈수록 중요한 역할을 한다.

형광 탐침 기술에 응용되는 희토 발광 재료는 고감도이며 거대분자의 구조를 파괴하지 않기 때문에 생물학적 고분자 연구에 광범위하게 응용되고 있다. 희토 온도 감응형 발광재료를 응용하는 인광성 열지도(heat map)기술은 항공기의 풍동 열 테스트에 응용될 수 있다.

희토 발광 재료의 기초 연구에서 희토 기능성 재료의 구조가 복잡하고 다변화하며 합성 제어가 어려운 등 문제점에 비추어 나노재료 계면이 벌크 재료에 대해 높은 활성을 갖고 배위 작용의 영향과 쉽게 변조되는 특성을 이용해 배위화학작용을 기반으로 기능성 나노제품의 구조, 특성 및 조립을 정확히 제어하는 방법을 고안하였다. 유기 / 무기 하이브리드 및 나노 복합 광전 재료의 새로운 제조 방법 및 기술을 제안하여 재료 설계 및 성능 예측을 위한 과학적 근거를 제공하였다. 3중 결합 시스템의 섭동 함수(Perturbation function)와 이온 사이의 전기 다극 상호 작용을 이용하여 다중 이온 협력 전이 이론을 도출하였고 CaF : Yb^{3+} 시스템에서 검증을 거쳤다.

사. 희토 초전도 재료

스위스 취리히에 위치한 IBM 실험실의 JGBednorz와 KAMüller는 1986년 4월에 Ba-La-Cu-O의 초전도 임계 온도가 35K 이상에 이를 수 있음을 발견하였다. 이로써 희토 산화물 초전도체 연구의 서막이 열렸고 높은 임계 온도의 초전도체에 대한 연구가 급속히 진행되었으며 연구팀이 급속도로 확장되었고 많은 재료과학자, 화학자 및 물리학자들이 산화물 초전도체로 연구 방향을 바꾸었다. Y-Ba-Cu-O (YBCO) 초전도체는 액체 질소 온도를 초과하는 임계 온도를 갖는 것으로 밝혀진 최초의 산화물 초전도체이다.

희토 산화물 초전도체는 세라믹 재료이며, 기존의 세라믹스 소결법에 의해 제조된 희토 산화물 초전도체는 많은 미립자들로 이루어져 있다. 간섭성 길이(coherence length)가 매우 짧기 때문에 입계에서의 비도전성이기 때문에

전체적으로 약 결합 입자의 성능에 초전도성으로 나타난다. 희토 산화물 초전도체도 이방성 재료이며, 불규칙적인 결정 방위를 갖는 소결체는 높은 임계 전류 밀도 (Jc)를 가질 수 없으며, 자기장 하에서 Jc가 급격하게 떨어지기 때문에 실제 응용 조건을 충족시킬 수 없다. YBCO 초전도 재료는 높은 비가역성 외에도 낮은 마이크로웨이브 표면 저항의 장점을 가지고 있다. DC 경우와 달리 초전도체의 저항은 고주파 교류 전자기장에서 0과 같지 않다. 전류가 초전도체를 통과할 때, 직류 조건 하에서 초전도 전자는 저항없이 초전도체를 통과한다. 이때 초전도체에 걸리는 전압 강하는 없으며 전기장은 0이다. 전류의 방향이 바뀌면 초전도 전자의 운동 방향도 바꿔야 한다. 초전도 전자가 관성을 가지고 있기 때문에 운동 방향을 바꾸기 위해서는 외력이 필요하며, 필요한 외력은 추가된 전기장에 의해 생성된다. 고주파에서 초전도 전자는 끊임없이 운동 방향을 바꾸기 때문에 초전도체 내에 교대 전기장이 필요하다. 전기장의 존재로 정상적인 전자도 운동시키게 되며 이로 인해 에너지 소모가 일어난다.

YBCO와 기타 구리 산화물 초전도체는 층상 구조로 인해 정상상태 또는 초전도상태에서 강한 이방성을 나타내는 특성을 지닌다. 즉, a-b면을 따른 YBCO의 특성과 c 축의 특성 사이에는 명확한 차이가 있다. 이러한 강한 이방성은 YBCO 박막의 성장 방향이 박막의 성능에 중요한 영향을 미친다는 것을 설명한다. YBCO 박막은 기판 상에 주로 두 가지 성장 방향을 갖는다. YBCO의 c축 방향은 기판의 표면과 수직을 이루는데 c축 성장이라고 불리며, YBCO의 Y축은 기판과 수직을 이루는데, a축 성장이라고 불린다. 초전도 전류는 주로 a-b면에서 전도되기 때문에 c축을 따라 초전도 박막을 에피택셜 성장시켜야 한다.

YBCO는 모든 고온 초전도 재료에서 단일 구조를 가지기 때문에 잘 결정화된 단상 박막을 얻기 쉽다. 임계 전이 온도는 92K에 달하며 임계 전류 밀도 (Jc)는 $10^6 A/cm^2$ 이상이다. 특히, YBCO 박막은 마이크로 웨이브 성능이

탁월하며 액체 질소 온도와 10GHz에서 마이크로파 표면 저항 (Rs)은 Cu보다 2자리 수 낮다. 마이크로 웨이브 장치는 매우 좁은 대역폭, 매우 낮은 삽입 손실, 높은 대역 외 제어 및 높은 Q 값 등을 달성 할 수 있으며, 위성 장비용, 항공 및 지상 통신 시스템에서 널리 응용되며 시장 전망이 밝다. YBCO 박막의 응용은 박막 제조 기술에 크게 좌우된다. YBCO 박막 제조 기술은 크게 물리적 방법과 화학적 방법의 2가지로 나눌 수 있다.

고온 초전도 박막을 기반으로 하는 응용 분야로는 고온 초전도 필터 및 고온 초전도 부품(SQIUD)이 있다. 전자는 이동 통신 기지국에서 응용되었으며 대역 외 억압〉 90dB, 단일 채널 잡음 지수가 1.0dB 미만인 3G 및 4C 이동 통신용 초전도 필터 시스템을 개발했으며, 후자는 광물 검출과 관련하여 부분적으로 연구가 진행된 외에 주로 의료 분야에서 자기장 측정에 집중되어 있다. "단일 도메인" 초전도체 벌크 재료의 개발은 발전 방향이며, 제품으로 YBCO 용융 조직 벌크 재료는 우수한 초전도성 및 기계적 특성뿐만 아니라 공정의 재현성 및 양산화가 매우 중요하다.

박막 및 블록 외에도 희토 고온 초전도 스트립(strip)을 응용할 수 있다. $YBa_2Cu_3O_{7-x}$로 대표되는 2세대 초전도 스트립은 우수한 종합성능(77K에서 7T, 자기장의 임계 전류밀도 $10^6A / cm^2$)으로 제1세대 고온 초전도체 스트립 (Bi 기반 스트립)의 약 자기장에서만 응용 가능하던 한계를 돌파하여 고전압 영역 (액체 질소 온도 영역), 강한 자기장에서도 완전히 응용할 수 있기 때문에 초전도 전력 기술의 상용화 과정을 크게 촉진시켰다.

따라서 고온 초전도 재료 및 그 제조 기술은 「국가 중장기 과학기술발전규획 강요(2006-2020)」에 의해 최첨단 기술로 선정되었으며 최근 10년간 미국, 일본, 한국 및 유럽에서도 적극 발전시키는 주요 고온 초전도 재료가 되었다. 임계 전류 값 (L×IC)을 곱한 길이는 한개 국가의 고온초전도(HTS) 기술 개발 수준을 드러내는 표징이 되었다. YBCO 스트립의 개발에서, 이축 텍스쳐로 YBCO 초전도 층을 얻는 방법은 핵심기술 중 하나이다. 2009년 미국

Superpower업체는 길이 1065m의 YBCO 초전도 스트립을 생산하였는데, 최소 임계 전류 IC가 282A, 스트립 전체의 L×IC 값이 300330A·m에 달하였다. 2013년 한국의 SuNAM 회사는 IC가 421.7A, 길이가 1000m, L×IC 값이 421700A·m에 달하는 2세대 고온 초전도 스트립을 생산하였다. 일본 후지 쿠라 (Fujikura)회사는 2014년에 YBCO 코팅 도체를 개발하였는데 길이가 1000m, 평균 전류가 600A 이상이며 IC×L 값이 60000A·m을 초과하였다. 길이가 1000 이상, IC가 300 A에 접근하는 2세대 고온 초전도 스트립을 생산하였다. 버퍼층 및 초전도층의 제조 방법, 금속기반 스트립 압연 등에 있어서도 진전을 이루었다. 2세대 고온 초전도 스트립의 급속한 발전에 따라 중국 및 국제의 일부 기관들은 YBCO 고온 초전도 스트립을 기반으로 초전도 케이블, 초전도 전류 제한기, 초전도 모터 및 초전도 자석 등 전력장치에 대한 연구를 진행하였다. 그러나 YBCO 초전도 스트립의 상용화과정에서 여전히 2가지 병목이 존재하였다. 그중 하나는 현재 가격대가 250~400$ 범위에 있어 초전도 기술의 규모화응용의 수용 가격 (50 $ /kA·m)보다 여전히 높기 때문에 YBCO 초전도 스트립의 성능대 가격비를 더욱 높여야 한다. 다른 하나는 YBCO 고온 초전도 스트립의 성능은 자기장 세기가 증가함에 따라 급격히 떨어진다. 따라서 YBCO 코팅 도체의 자기장에서의 초전도성능을 높이는 것이 YBCO 초전도 스트립의 응용 과정에서 시급히 해결해야 할 핵심 문제가 되었다.

아. 희토 결정체 재료

희토 결정체 재료는 희토 원소가 결정학 구조에서 완전히 격자점을 차지할 수 있는 결정체를 가리킨다. 희토 결정체 재료는 인공 결정체의 중요한 부분으로 광학, 자기 및 전기 등 풍부한 기능적 특성을 지니며 현대 산업 발전에 물질적 지탱역할을 하였다. 희토 결정체 재료는 기타 형태의 재료(분말, 세라믹 등)과 비교하였을 때, 결함이 적고 자기, 광학 및 전기적 특성이 뛰어나다. 광섬유 통신, 스마트 소재, 정밀 기계, 핵의학 및 무기 유도탄 제조 등의 첨단

기술영역에서 높은 선호도를 보이며 중요한 전략적 위치와 응용 가치를 지닌다. 희토 결정체 재료의 개발은 희토 화학, 결정체학, 결함 화학 등 학과의 내용을 풍부하게 하였고 광학, 자기학 및 핵과학 등 관련 학과의 발전을 촉진하거나 선도하였으며 희토 화학 및 결정체학이 상호 교차되고 융합된 새로운 학과를 점진적으로 형성하였다.

원자핵 외부의 특별한 전자 배열로 인하여, 인공 결정체 재료에서 희토 원소의 응용이 갈수록 광범위하고 중요해졌다. 특히 레이저 결정체, 섬광 결정체, 전기 광학 결정체, 자기광학 결정체, 비선형 광학 결정체 및 복합 광학 기능 결정체와 같은 광학 기능성 재료에서 희토 원소의 역할은 주목할만하며 신형 레이저 결정체 및 섬광 결정체에 필수 불가결한 원소가 되었다. 희토 레이저 결정체와 희토 섬광 결정체는 대체 불가능한 우월성을 나타내며 신형의 결정체의 등장으로 관련 산업의 발전을 강력하게 촉진시켰다.

레이저 재료는 레이저 기술 개발의 핵심 및 기초이다. 희토 레이저 결정체는 희토 이온을 결정 매트릭스에 도핑하여 형성된 레이저 재료를 가리킨다. 실제 응용 수요와 중요성에 따라 중요한 레이저 결정체는 주로 고출력 레이저 결정체, 중·저출력 레이저 결정체, 중간 적외선 레이저 결정체, 가시광선 레이저 결정체 및 라만 레이저 결정체의 5가지로 분류된다. 희토 섬광 결정체는 희토 또는 희토 이온을 발광 중심으로 하는 인조 결정체로서 감마선, X선 또는 기타 고에너지 입자를 흡수 한 후 빠르게 감쇠하는 자외선 또는 가시광선 광기능 결정체를 가리킨다.

고출력 레이저 결정은 높은 평균 출력 레이저 결정과 높은 피크출력 레이저 결정으로 분류된다. 전자는 주로 레이저 가공, 레이저 무기 등에 응용되며, 후자는 주로 초고속 레이저 장치, 초강도 초단 레이저 광학 프로젝트, 레이저 융합 점화 프로젝트에 등에 응용된다. 중저출력 레이저 결정체의 대표적인 물질로는 네오디뮴이 도핑된 이트륨 바나데이트 결정체 (Nd^{3+} : YVO_4)로, 레이저 방출 절단면이 크며 Nd^{3+} : YAG의 4 배 이상이며, 고효율 및 저임계

레이저 출력을 얻기에 유리하며 1340nm와 1060nm 레이저로 연속 작동을 구현할 수 있다. 현재 LD 펌핑 Nd^{3+} : YVO_4 레이저는 효율이 50% 수준이다. 흡수 계수가 커기에 작은 크기의 결정이 펌프 광을 완전히 흡수할 수 있어 장치의 소형화에 유리하다. 매트릭스 YVO_4는 단일축 결정이며 흡수 및 방출 스펙트럼은 LD 펌핑 소스의 편광과 일치하는 강한 편광을 가지며 고효율 레이저 설계에 유리한 조건을 제공하였으며 LD 펌핑 소규모 전고체 레이저를 제조하기에 이상적인 재료이다. 현재 중적외선 레이저 재료 및 관련 부품에 대한 연구는 다음과 같은 두가지에 집중되고 있다. (1) 레이저가 1.9-3.0 ìm 부근에서 작동하는 Tm, Ho 및 Er과 같은 희토 이온이 도핑된 YAG (이트륨 알루미늄 석류석), YAP (알루미늄산 이트륨), YLF (불화이트륨리튬), LLF (불화루테튬리튬) 등의 레이저 결정 재료 및 레이저 소자. (2) Cr, Fe 등 원소가 도핑된 ZnSe 등의 II-VI 반도체 재료 및 레이저 소자로, 레이저 파대역은 주로 2~5ìm 구간에 있다.

희토 섬광 결정체(scintillating crystal)는 최근 10년간 수십가지 종류가 발견, 연구 및 개발되었는데, 그중 많은 Ce^{3+} 활성화 섬광 결정체가 대규모 생산 및 상용화되었다. 대표적인 물질로는 Ce^{3+}로 활성화된 Ln_2SiO_5 결정체인데 LSO와 LYSO가 성숙된 제품이 되었으며, 독일의 Siemens, 미국의 GE, 네덜란드의 Philips에서 PET의 핵심검출재료로 선정하였으나 성능 최적화와 관련된 연구는 여전히 계속되고 있다. 2012년에 우크라이나 섬광재료연구소는 Gd을 도핑하고 Lu / Gd의 비율을 조절하는 방법으로 LSO 결정의 에너지 밴드 구조를 조절하였으며, 나아가 최적의 광출력 및 에너지 분해능 (Gd / La = 23)을 얻었다고 밝혔다. 또한 지멘스는 공동 도핑된 Ca 또는 Yb 이온이 LSO 결정의 광출력을 증가시키고, 에너지 분해능을 향상시키며, 감쇠 시간을 단축시키고, 잔광 강도를 감소시킬 수 있음을 발견하였다. 많은 중국 기업들이 LSO 결정의 성장 기술을 연구하고 Ö80mm × 240mm 크기의 결정체를 제조했으며, LYSO를 검출기로 응용하는 PET 프로토 타입도 연

구 중에 있다. 2013년 일본 동북대학(Tohoku University)은 La^{3+}의 공동 도핑이 $GdSi_2O_7$ 결정의 용융을 억제하지 않는 문제를 극복할 뿐만 아니라 광출력 및 에너지 분해능을 최고로 40,000 광자 / MeV 및 4.4 %까지 증가시킬 수 있음을 발견하였으며, 현재 일본 C & A 회사에서 시장개척에 나서고 있다. Ce^{3+} - 활성화 $Ln_3Al_5O_{12}$ 기반의 섬광 결정은 산화물 섬광 결정가운데 새롭게 주목받고 있다. 결정 구조에 다수의 양이온 자리가 존재하기 때문에, 이러한 섬광 재료의 도핑 개질을 위한 충분한 공간이 존재한다. $Ln_3Al_5O_{12}$ 매트릭스의 적절한 양의 Lu 및 Al을 각각 Gd^{3+} 및 Ga^{3+}로 대체함으로써 생성된 Ce : (Gd, Lu) OG (Gd, Lu) O_{12} (GGAG) 결정은 56000 ph./MeV의 광출력을 보이며, 에너지 분해능은 5.3%에 달하였다. 또한, Mg^{2+}, GGAG : Ce의 Ce^{3+}를 Ce^{4+}에 공동 도핑함으로써, 광 감쇠율이 크게 가속될 수 있고, 감쇠율 및 시간 해상도가 각각 40ns 및 200ps에 달하였다.

희토 할로겐화물 섬광 결정은 최근 몇년간 인기 연구분야가 되었다. 이러한 재료의 특성은 매우 높은 광출력, 높은 에너지 분해능, 짧은 감쇠 시간 등으로 원자력 및 방사선 감지 및 응용에서 강한 경쟁 우위를 갖추었지만 수분 흡수성이 강하기 때문에 제조에 어려움이 있다. 그중 Ce^{3+} 활성화된 LnX_3 ($X \neq F$) 기반의 섬광 결정의 개발이 더욱 성숙되었으며 가장 대표적인 것은 LaBr : Ce 결정이다. 2010년부터 프랑스 Saint Gobain회사는 $LaBr_3$: Ce를 둘러싸고 공동 도핑 실험을 수행하였는데, Sr을 도핑 한 후 에너지 분해능이 2%로 높아져 무기 섬광 결정의 에너지 분해능의 최고 기록을 세웠다. 많은 중국 기업들도 관련 크리스탈에 대한 개발에 노력을 기울이고 있으며 Ö76mm×76mm의 크리스탈 블랭크를 만들어냈고 관련 탐지기도 개발 중에 있다. 그러나 $LaBr_3$: Ce 결정에는 방사성 배경 방사능이 있기 때문에 응용이 제한받고 있다. 이 문제를 해결하기 위해 미국 RMD 회사는 고유의 섬광 특성을 지닌 $CeBr_3$ 결정체를 개발하였는데, 방사성 배경 방사가 $LaBr_3$: Ce보다 1~2 자리수 낮으며 발광의 균일성이 양호하였다 .2014년에 크기가

Ö75mm ×75mm에 달하였다. Ce^{3+} 활성화된 A_{26} LiLnX (A = Na, K, Cs, Ln = Y, La, Gd, Lu) 칼륨 빙정석 결정은 감마 중성자 이중 탐침 물질의 새로운 종류가 되었으며, 그중 CLYC, CLLC 및 CLLB가 많이 주목받고 있다. 미국 RMD회사는 3.6%의 에너지 분해능을 가진 Ö152mm CLYC 결정체를 성장시키는데 성공하였다. SrI_2 : Eu^{2+} 결정 다음으로, Eu^{2+}에 의해 활성화된 새로운 품종의 할로겐화물 - 섬광결정이 계속 나오고 있다. 2010년에 미국의 LBNL 연구소는 $CsBa_2I$: Eu^{2+} 결정체가 최대 97,000 광자 / MeV의 광 수율과 3.9%의 에너지 분해능을 갖는 Eu^{2+} 활성화 $CsBa_21_5$, Cs (Sr, Ba) I 및 BaBr1 결정을 처음으로 발표하였다. 그 밀도 (5-5.3g /cm^3), 감쇠 시간 및 조해 내성(The deliquescence resistance) 모두 SrI_2 : Eu^{2+} 결정보다 우수하다. 현재 신형 희토 섬광 결정의 개발은 결정 성장으로부터 결정 장치 및 섬광 검출기의 제조로 발전하고 있다.

자. 철강 및 비철금속에서의 희토응용

(1) 철강에서의 희토응용

철강 산업에서의 희토의 응용은 한동안 희토 제품의 최대 소비 시장이 되었다. 국내외의 연구자들은 철강에 희토원소를 첨가하는 야금학적 원리 및 희토의 철강재료 성능에 미치는 다양한 야금 요소 및 작용메커니즘에 대한 심층적인 연구를 수행했다. 현재 중국은 희토의 철강 및 비철금속에서의 응용 수준이 세계에서 앞서 있다.

현재, 중국은 VD 정련로에 희토를 첨가하는 공법을 성공적으로 개발하여 희토 중질 레일 및 희토 이음매 없는 강철 튜브의 순조로운 생산을 가능케 하는 대형 원형 빌렛 및 대형 원형 빌릿에 희토를 첨가하는 방법을 고안해냈다. 2014년 광폭후판 연속주조 몰드의 온라인 희토 첨가에서 큰 성공을 거두었다. 희토 첨가공법이 안정적이며 주물(billet)의 불순물 크기가 5㎛ 미만이며, 철강링의 각 부위의 희토 함량이 0.016 % ~ 0.018 % 범위에 있으며, 희토

수율이 80 % 이상이었다. 특히 자동차 휠스틸강에서의 희토 첨가 효과가 특히 뚜렷하다. 중국이 개발한 희토 - 크롬 중금속 레일강은 미국, 브라질, 멕시코 및 기타 국가에 약 5.7만톤 수출되었다. 또한 중국의 고속철도에도 성공적으로 응용되었는데, 고강도 희토 미세합금 열회수 전용 파이프 BT100H를 성공적으로 개발하였으며 제품의 신장률 및 수평, 수직 충격성능은 세계 최고 수준이다.

비방향성 전기강에 희토를 첨가하여 응고조직을 효과적으로 개선하였고 주상결정을 억제하고 등축 결정을 증가시켜 주름의 결함을 극복하기 위한 기술적 지원을 제공하였다. 연구를 통해 희토 첨가제 란타늄철 합금의 순도(산소함량)가 철강 연속 주조의 절삭에 큰 영향을 미치는 것을 발견하였다. 란타늄 합금의 산소 함유량이 200~300ppm인 경우, 연속주조공정에 결절 현상이 심각하며, 산소 함유량이 50ppm로 낮아지면 결절 현상이 사라진다.

최근 해외에서는 희토 고강도 강, 희토 내열강, 희토 스테인리스 강, 희토 파이프 라인 강, 희토 고속강, 희토 금형 강 및 희토 표면 경화 강에 대한 연구에서 많은 성과를 올렸고 산업 전망이 밝은 편이다.

희토강의 생산량이 여러 가지 요인의 영향을 받고 있고 최근 들어서는 전국적으로 감소 추세를 보이고 있지만 희토강의 개발 속도는 여전히 드뎌지지 않고 있다. 2014년에 광폭후판 연속주조 몰드에 희토 원소를 첨가하였는데, 희토첨가공법이 안정적이며 주물 안의 불순물 크기가 5㎛ 미만이며 주물의 희토함량 분포가 매우 균일하였다. 희토가 430 페라이트계 스테인리스강의 성능에 미치는 영향을 연구하였는데, 희토를 첨가할 때 수평방향 충격 인성과 고온 항산화성능이 대폭 향상되는 것을 발견하였다. 연구를 통해 $4Cr_{13}$ 마르텐사이트계 스테인리스강에 희토 란탄을 첨가하였을 때 강의 강도, 소성 및 내식성이 뚜렷이 높아지는 것을 발견하였다. 또한 후크 및 트랙 슈와 같은 철도 차량에 희토를 응용하여 큰 성공을 거두었는데 그중 -60℃에서의 후크 주물의 충격 인성은 해외 거래처의 엄격한 요구를 충족시켰다. 연마재료를 용접

하지 못하거나 혹은 용접이 가능한 재료는 내마모성이 부족한 기술애로사항을 해결하였다. 고온에서 내열, 내마모성, 열충격 방지, 내열피로성이 우수하고 용접성이 양호한 크롬기반 희토 용접강을 개발하였다.

최근 몇 년간 중국과학원 금속연구소는 많은 실험실 연구와 공정화 테스트를 통해 산소 함량이 희토강에 미치는 결정적인 역할을 규명하였고 희토의 산소 함유량 제어 및 저산소강에 대한 희토원소의 정확한 첨가 방법을 제안하였으며 서브마이크론 사이즈 불순물의 희토 제련 기술 개발하였다. 이리하여 희토의 철강 대규모 산업 응용과정에서의 기술 병목을 해결하였다.

주철 재료의 고성능화 및 고신빙성을 추구함에 따라 희토는 특히 대형의 복잡한 특수 주조 부품의 생산에서 고품질의 주철 생산에 없어서는 안될 요소가 되었다. 이트륨계 중금속 희토 복합 구상 화제를 채택하여 상응한 강제냉각, 순차 응고, 지연 잉태(Delayed gestation) 등 생산 공정을 통해 대단면(벽두께 ≥120m)구상주철부품 중심부위의 흑연 변형과 조직이 느슨해지는 등의 문제를 해결하였으며 각종 중형, 대형, 특대형 구상주물부품을 성공적으로 제조하였다. 이트륨계 희토 복합 구상화제로 제조한 다양한 구상흑연주철은 무게가 85톤, 벽두께가 440mm에 달하여 800℃ 온도의 핵연료의 운반장비를 운송 및 저장할 수 있으며, 독일재료테스트협회와 물리기술협회로부터 최고등급 안전증서를 받았다. 이트륨기반 중희토로 제조한 횡단면이 805mm에 달하는 구상흑연주철 박판 롤러는 응용수명을 50% 연장시켰고 롤러의 절단율을 뚜렷이 줄였다. 고강도(äb≥1000MPa , 최고치≥1600MPa), 높은 절단성능(A≥11%)의 오스테나이트 구상주철(ADI)을 개발하여 자동차, 디젤엔진, 트랙터와 공정기기의 기어, 곡축과 각종 구조물에 응용되고 있다.

(2) 비철금속에서의 희토 응용

2000년 Shi Changxu(师昌绪)원사와 Li Hengde(李恒德)원사를 대표로 하는 과학자들이 과학기술부에 "중국의 마그네슘 금속 산업의 발전을 촉진시

키기 위한 제안"을 제안하였고 마그네슘 산업과 희토 산업의 유사점을 피력하였다. 중국은 마그네슘과 희토가 풍부한 국가로 자원 우위를 산업 우위와 경제우위로 전환시키는 것은 국가의 장기적인 전략적 이익과 관련된다. 이에 2001년 8월, 과기부는 "10.5"기간 국가과기공관계획을 실시하였다. 그후 유리형성능력이 강한 Mg-Cu-Ag-Gd계 4차원 희토마그네슘합금이 개발되었으며, 고강도 Mg-Gd-Y-Zr계 희토마그네슘합금이 기어 박스, 실린더 블럭 및 군용 부품의 주조에 응용되었다. 압출성형용 Mg-Zn-Y 희토 마그네슘합금, 자동차용 ALa / Ce44 및 AZ91X 희토 마그네슘합금이 양산화 단계에 들어섰다. 압연판재의 경우, 산업 롤링 기술을 이용하여 생산한 고 연신률 (상온에서 연신률 〉 43%)과 상온에서 딥드로잉 (deep-drawn) 및 딥드로잉 (deep-drawn)이 가능한 Mg-Zn-RE 마그네슘 합금 냉간 압연 판재를 개발하여 업계에서 마그네슘 합금의 상온 소성성형이 불가능한 기술 애로사항을 해결하였고 고연신률의 주조 및 압연이 가능한 Mg-Mn-Zn-RE 희토 마그네슘 합금 박판을 개발하였다.

Mg-4Al-4La-0.4Mn 합금에 미량의 B 원소를 첨가할 경우 합금의 미세조직이 크게 변화하는데, 0.03%의 B 원소를 첨가하면 합금의 인장강도가 30MPa 이상 증가하며 연신률이 약 70% 높아진다. 또한 합금의 염수 분무 내식성도 50배 정도 향상된다. 신형 희토 마그네슘 다이캐스트 합금 (AZ91X), AM-SCI 및 AE44는 각각 고성능 엔진 실린더 헤드, 시험 제작한 3기통 엔진 블록 및 자동차 엔진 브라켓에 응용되었다.

Mg-Gd-Y계 합금에 대한 연구를 통해 Mg-10Gd-5.7Y-1.6Zn-0.7Zr 합금의 뚜렷한 시효 경화 효과는 미세 조직상의 조밀하게 분포된 침전물에서 기인하며 Gd 함량이 많이 함유되지 않은 Mg-Gd 합금 시스템에 1 ~ 2wt%의 Zn을 첨가하면 합금의 고용체 보강 효과가 효과적으로 향상되며 상대적으로 시효 경화 효과가 높아짐을 발견하였다. Mg-Gd-Y 합금은 변형 후, 인장강도 및 항복 강도가 각각 460MPa 및 420MPa에 달할 수 있으며 연신율은

약 4%이다. T5 처리 후 인장 강도 및 항복 강도가 550MPa 및 475MPa에 달하며 연신율도 약 8%로 높아졌다. 최신 개발한 MB_{26}, $NZ_{30}k$ 및 WEA_3는 자동차 범퍼, 우주 항공 및 우주 부품에 각각 응용되고 있다.

Mg-RE 합금은 종합 기계 성능 및 내식성이 우수하기 때문에 Mg-Y, Mg-Gd, Mg-Dy, Mg-Y-Zn, Mg-Nd-Y-Zr, Mg-Nd-Zn-Zr, Mg-ZnY-Nd, WE_{43} (4wt.%Y , 3wt.%RE)과 LAE_{422}(4wt.%Li , 4wt.%Al , 2wt.%RE)에 의해 바이오의료재료로 간주되며 그중에서도 WE_{43}계열 합금은 임상실험에 응용되기 시작하였다. 마그네슘 합금은 생분해성 금속 임플란트 재료 분야의 인기 연구과제가 되었다. 그 이유는 다음과 같다. 첫째, 우수한 생체 적합성. 마그네슘은 인체의 뼈 성장에 필수적인 원소이다. 둘째, 좋은 역학적 적합성. 마그네슘 합금의 탄성 계수는 인체의 뼈 탄성 계수에 더 가까우며, 뼈 성장과 결합을 촉진하고 2차 골절을 예방한다. 셋째, 완전한 생분해성. 인체의 체액 환경에서 쉽게 생성된 마그네슘 이온은 주위 신체 조직에 의해 쉽게 흡수되거나 혹은 체액을 통해 배설된다.

차. 희토 고분자 첨가제

희토 첨가제는 특정 고분자 재료 또는 제품의 생산 및 가공 과정에서 생산 공정을 개선하고 제품 성능을 향상시키기 위해 고분자 재료 매트릭스에 첨가되는 희토 원소를 포함하는 다양한 보조 화학 물질을 가리킨다. 첨가제의 응용은 고분자 재료의 성능을 향상시키는 가장 편리하고 경제적인 방법이다. 다양한 기능성 첨가제의 첨가는 고분자 재료의 높은 성능을 실현하는 중요한 방법이며, 첨가제는 고분자 재료에 없어서는 안될 중요한 성분이다. 희토를 고분자 물질에 기능 보조제로 응용하는 것은 새로운 분야로서 고분자의 가공 및 응용성을 개선하고 고분자에 새로운 기능을 부여하는 독특한 효과가 있다.

최근 희토 첨가제는 기초 연구와 응용 연구 분야에서 큰 진전을 가져 왔으며 폴리염화비닐 다기능 첨가제, 합성고무 산화 방지제, 폴리프로필렌 베타결

정 핵형성제 및 폴리아미드섬유 직물 보조제 등 영역에서 성공적으로 응용되었다.

친환경 폴리염화비닐 (PVC) 첨가제 : PVC는 플라스틱 건축 자재의 중요한 기초 수지로서 처리 및 응용 성능을 향상시키는 것이 매우 중요하다. 그 가운데 희토 안정제에 대한 연구가 가장 먼저 이루어졌으며 사용량이 가장 많은 희토 첨가제이다. 최근 몇 년간 신형의 희토 화합물에 대한 최적화된 제제 및 응용기술에 대한 연구를 통해 희토 안정제의 종류, 효과 및 비용 등 분야에서 뚜렷하게 개선되었으며 희토, 칼슘, 아연 다기능 열안정제 등 다양한 신제품을 개발하여 무납 열안정제의 개발 과정에서 존재하던 초기의 착색 - 아연 연소 - 장기간의 고온 내열성이 약하며 - 쉽게 침전되는 등의 문제점을 해결하였고 열안정제로 납, 카드뮴 및 기타 유독성 및 유해 원소를 대체하는 기술적인 돌파를 이루었다. PVC의 변색 속도가 느리며 국내외 칼슘/아연 제품보다 월등하며 납과 카드뮴이 함유되지 않은 중요한 친환경 PVC 열안정제가 되었다. 희토 다기능 발포 안정제는 안정성 윤활, 가소화 촉진, 발포 등 기능을 가지고 있기에 UPC / 탄산칼슘 발포 복합체계 첨가제의 독성이 높고 기능이 단일하며 제품 가공주기가 짧고 발포 밀도가 높은 등의 문제점을 해결하였다. 연간 4만톤급의 자동 무납 창문 이형재 및 1만톤급 발포 PVC 화학 건축자재의 시범생산에서 190℃에서의 제품의 정적 노화 시간은 70min 이상이며 200℃에서 콩고 레드에서 블랙으로 변하는 시간은 20min 이상이다. 고속 압출 연속 가공주기는 8~12d이며 발포 제품의 밀도는 0.45~0.75g/㎥에서 생산을 제어할 수 있으며 가격대비 성능은 기존의 포뮬라 제품보다 우수하다. 경질 PVC 제품 가공과정에서 납/카드뮴 기술을 완전히 대체하였다.

폴리올레핀 첨가제 : 폴리프로필렌 (PP)은 최근 몇 년간 가장 빠르게 성장한 범용 플라스틱으로 PP의 결정 성분이 완전히 베타 결정으로 전환되거나 베타 결정의 함량이 증가하면 PP의 인성 약해지고 내열성 등급이 높지 못한

병목문제를 해결할 수 있다. "베타 핵형성제(beta nucleating agent)"를 첨가하는 것은 고함량 â-PP의 산업 생산을 위한 유일한 방법이다. 희토 â 핵형성제는 구리가 풍부한 경희토 원소와 기타 금속 원소를 혼합한 이종 핵형성 중합체를 기반으로 개발한 폴리프로필렌(PP) 신형의 베타결정 핵형성제로 산업화 생산에 응용이 가능한 세계에서 몇 안되는 원천기술을 보유한 베타 핵형성제중의 하나이다. 정상적인 공정조건에서 유도성 폴리프로필렌은 베타결정 형태의 90% 이상을 형성하며, 높은 핵형성효율, 안정된 성능 및 뚜렷한 변성 효과 등의 특징을 지닌다. 해외의 유사한 기능을 갖는 아라미드 â 결정 핵형성제 제품과 비교하였을 때, 핵형성 안정성 및 B 결정 선택성이 더 우수하다. 특히, 폴리프로필렌 제품의 열 변형 온도를 높이는 데 뚜렷한 우위가 있으며, 판매 가격은 해외 제품의 60%에 불과하다. 희토 â 핵형성제의 이러한 특성을 이용하여 전통적인 경우 PP 인성을 강화시킬 때 소재의 인성은 증가하는 반면에 강성 및 내열 성능이 크게 저하되는 모순을 극복할 수 있어 PP의 저비용 고성능화의 중요한 경로가 되었다. 희토 표면 처리제는 무기 입자와의 결합력이 강하여 매트릭스 수지 및 무기 필러 또는 안료 표면의 역할을 크게 향상시킬 수 있다. 현재 널리 응용되는 커플링제와 비교하였을 때 폴리올레핀의 무기 입자의 분산성을 개선하고, 복합체의 유동성 및 응용성능을 향상시키는 등의 강점이 뚜렷하며 성능대 가격비가 높다. 현재 10만 톤 규모의 폴리프로필렌 합성 생산라인에 보조제를 첨가하여 B-P를 직접 제조하는데 성공하였으며 폴리프로필렌 결정구조 a-beta 전환을 통해 인성이 제고되었으며 고내열성 및 굴곡 탄성계수가 기본상 변하지 않는 등 특성과 유기적으로 결합시켰으며 범용 플라스틱의 고성능화를 촉진시켰고 경제적 효율을 뚜렷이 높였다.

고무용 희토 첨가제 : 고무 합성을 위한 희토 촉매 외에도 고무 노화 방지, 가황 촉진, 보강, 피로 및 필러 표면 처리에서 독특한 효과가 있다. 신형의 희토 고무산화 방지제는 천연 고무 및 스티렌 - 부타디엔 가황 고무에 응용되

며, 100℃에서 72시간 동안 열풍 노화시킨 후 희토 산화 방지제를 첨가한 천연고무 가황 물질의 인장강도 유지 및 인성 연장 효과는 각각 83.9%와 82.6%에 달하였다. 시중 판매되는 산화 방지제 4010NA와 RD의 비교 성능 지표는 각각 72.39%, 75.8%, 79.5%, 78%로 나타났다. 이는 희토 고무 노화 방지제는 시중에서 판매되는 항산화제보다 천연 고무에 대한 열산소 노화방지 효과가 더 뛰어남을 의미한다. 또한 소량의 희토 착화합물이 통상적으로 응용되는 산화방지제와 협동작용을 통해 가황 고무의 내열 산소 노화, 자외선 노화 저항 및 오존 노화 저항 성능을 뚜렷이 높일 수 있으며, 산업용 산화방지제를 단독으로 응용할 때 보다 효과가 훨씬 뛰어나다. 다기능 희토 고무 첨가제는 고무의 압축 피로 성능을 크게 변화시킬 수 있고 SBR 가황 고무의 압축 피로의 온도 상승을 약 20% 감소시킬 수 있다. 또한 다기능 희토 보조제를 첨가하면 60℃에서 SBR의 Tan ä 값을 감소시킬 수 있는데 이는 희토 착화합물이 타이어 회전 저항력을 효과적으로 감소시키고, 내마모성 및 노화 방지성을 향상시키며 타이어의 수명을 증가시킬 수 있음을 나타낸다.

섬유 산업은 중국의 기간산업에 속하며, 중국 역시 세계 최대의 섬유 생산 및 소비국이다. 그러나 중국의 섬유 산업은 동질화, 규모화, 저차원화 등의 문제가 존재하며 이는 국가 섬유 제품의 국제 경쟁력에 심각한 영향을 미친다. 폴리아미드 섬유는 고강도, 부드러운 질감, 편안한 착용감, 쉬운 염색성으로 인해 선호되지만 중국의 폴리아미드 섬유는 동질화가 심각하며 제품의 부가가치가 낮은 것이 문제점으로 지적받고 있다. 폴리아미드 섬유의 극세화는 섬유의 품질을 향상시키고 부가가치를 높이는 필수 수단이다. 그러나 기술적인 병목 현상으로 인해 폴리아미드 섬유의 극세화를 아직 실현하지 못하였다.

폴리아미드의 아미드기는 금속 이온, 특히 희토 이온과 일정한 배위 능을 가지므로 극세 데니어 및 폴리아미드 섬유의 기술 병목 현상을 극복할 수 있는 기회를 제공하였다. 희토 이온과 아미드기 사이의 복잡한 배위는 상이한 폴리아미드 분절을 가교 결합시켜 폴리아미드 용융 강도를 향상시킬 수 있다.

동시에, 희토와 아미드기 사이의 상호 작용은 폴리아미드 6 용융물의 결정화 속도를 낮추고 토우(tows)의 비결정성 영역의 비율을 높기 때문에 폴리아미드 6 섬유가 방적사상에서 보다 가늘게 만들 수 있다. 위의 기술을 토대로 중국 과학자들은 많은 실험 연구를 통해 란타늄, 세륨 및 이트륨을 함유한 고활성 희토 복합체를 선별하여 폴리아미드 방사 전용 희토 첨가제를 개발하였고 폴리아미드 6 용융물에 도입한 결과 폴리아미드 6 섬유 방사 실험에서 성공을 거두었다. 이는 미세/ 극세 데니어 폴리아미드 6 섬유의 양산화 실현을 위해 기반을 다져놓았다. 현재 고농축 란타늄 희토 보조제 생산라인과 연간 100톤 규모의 미세 / 초극세 데니어 폴리아미드섬유 시범화 생산라인을 구축하였으며 연간 50톤 규모의 미세 / 초극세 데니어 폴리아미드 6 섬유의 생산에 성공하였으며 대규모 생산을 실현하였다. 이를 토대로 미세 / 초극세 데니어 폴리아미드 6 섬유 및 섬유 제품 가공의 요구를 충족시키는 품질 기준의 기술 표준을 수립하고 미세 / 극세 데니어 폴리아미드섬유의 산업화 생산을 위해 기술 지원을 제공하였다.

현재 희토 기능성 첨가제의 연구 개발, 생산 및 응용을 유기적으로 결합시켜 해당 신흥산업의 형성을 촉진시켰으며 세계적으로 앞서 있다. 중국의 고성능, 다기능 희토 첨가제는 독자적인 지적재산권을 보유하고 희토 유기화학 및 첨가제 연구의 새로운 방향으로 발전하였다. 그러나 비교적 늦게 시작하였으나 전반적인 보조제 산업에서 차지하는 비율은 여전히 매우 낮다. 핵심기술은 여전히 더 개선하고 획기적인 돌파를 이룩해야 한다. 따라서 신흥산업 분야에서 희토 기능성 첨가제의 기초 연구 및 응용연구를 강화하고 중국의 고분자 재료 산업의 개발 수준을 향상시키며 고농축 희토 원소의 균형적인 응용 개발을 효과적으로 추진시켜야 한다.

카. 희토 황화물 안료

희토 황화물은 특정 결정 형태와 입자 크기를 갖는 경희토 (주로 란타늄세륨) 화합물 (염기성 탄산염)을 원료로 하여 유황 원소 혹은 황 화합물 가스와

고온에서 특정 희토 황화물을 형성하여 착색처리(불소화, 코팅 및 선별)를 거친 후 얻은 일종의 안료 표준에 부합하는 착색재료로 희토 황화물 안료라 불린다.

관련 연구는 희토 황화물의 제조에 관한 것인데, 대부분의 연구는 희토 세스퀴 황화물(Rare earth sesquisulfide) Ln_2S_3에 집중되어 있다. 주로 직접법, 환원법, 기계연마법, 분무열분해법, 전구체 열분해법, 황화붕소 가황법, 저가 희토염 산화법, 용제가열법, 액상 자기조립법 등이 있다.

최근 몇년간 일부 연구기관 및 과기형 기업들은 희토 황화물 친환경 안료의 요구에 부합시키기 위해 희토 황화물에 대한 후처리 기술을 연구하기 시작했다. 합성한 희토 황화물에 도핑처리를 거치면 합격된 안료가 만들어진다. 이온을 도핑하면 ã 상을 안정시킬 수 있을 뿐만 아니라 ã- 황화물의 제조 온도를 크게 낮출 수 있으며 재료의 전자 에너지 준위 구조의 특성을 조절할 수 있기 때문에 재료의 색상 등 물리적 성질을 설계 및 제어 가능하다. 일반적으로 응용되는 도펀트에는 알칼리 금속 이온, 알칼리토금속 이온, 중희토 이온, 탄소 및 규소 등을 포함한다.

현재 주요 처리 기술수단으로 합성이후 안료표면에 코팅처리를 하는데, 예를 들면 SiO_2, Al_2O_3, ZrO_2 및 $ZrSiO_4$로 희토 황화물 안료를 코팅하면 안료의 열안정성 (대기중에서 안정 온도 500℃), 산에 대한 내식성 및 분산성을 뚜렷이 높일 수 있고. 표면 개질은 희토 황화물계 안료와 착색 매트릭스와의 상용성을 효과적으로 개선할 수 있으며 그 응용범위를 넓힐 수 있다. 예를 들면 안료 입자 표면의 유기 작용기를 개질하면 유기 용제에서의 분산성을 높일 수 있다. 불소처리 또한 중요한 후처리 기술수단 중 하나이다. 불소 이온으로 처리한 희토 황화물은 색상이 더욱 선명하다. 처리과정을 거친 분말 입자가 고르게 분포될 수 없을 경우 요구 조건에 따라 체질 분급 처리를 거쳐 필요한 제품을 최종적으로 얻을 수 있다.

1990년대 중반에 프랑스 Rhodia업체는 세계에서 유일하게 연간 500톤 규모의 희토 친환경 안료 생산라인을 구축하였다. 이 생산라인은 기상·고상 방법을 채택하였는데, 원료 제조생산라인, 합성 생산라인 및 후처리 착색 완제품 생산라인의 3가지 생산공정이 포함된다.

중국과학원 장춘응용화학연구소는 온화한 조건 하에서 희토 산화물에서 산소를 제거하고 황을 첨가하는 과학적인 기술난제를 해결하였고 터널 킬른 희토 황화물 착색제의 연속 생산을 위한 창의적인 방법을 고안하였으며 중국과학원 바오터우희토연구개발센터와 협력하여 2016년 바오터우(Baotou)에 희토 황화물 착색제 용 연속 터널 킬른 생산라인을 구축하였다. 이 공법은 조작이 간단하고 생산과정이 친환경적이며 연속 생산이 가능하다. 현재 중국과학원 장춘응용화학연구소는 특허를 27건 출원하였는데, 그 중 7건은 이미 등록되었으며 배합방법에서 생산공정 및 장비, 후처리기술과 제품응용에 이르기까지 특허체계를 갖추었다. 2017년 11월 4일, Baotou Zhongke Century Technology Co. Ltd.(包头中科世纪科技有限责任公司)와 중국과학원 바오터우희토연구개발센터는 "그린 친환경 희토 착색제의 산업화 제조 및 중요 기술성과 기술이전 계약"에 서명하고 기술성과 이전을 완료하였다.

타. 희토 유리

희토 유리는 반세기 이상 중국에서 개발되어 왔다. 유리를 구성하는 희토의 역할은 본체, 도핑, 개질, 플럭스, 정화 및 결정입자 제어 등으로 다양하며 희토 무색 광학유리, 희토 광학 유리 등 시리즈 제품을 형성한다. 희토 광학 유리의 공법, 기술과 산업규모가 지속적으로 확대되고 발전하면서 그 응용은 광정보의 생성, 전송, 변조 및 저장 등 다양한 분야에 미치게 되었다. 희토 레이저 유리는 광에너지의 생성 및 증폭에서 중요한 역할을 한다.

지난 10년은 희토 유리기술의 응용 분야에서 급속한 발전을 거듭해온 시기라 할 수 있다. 무색 광학 유리, 유색 유리 및 기타 희토 원소의 유리중에서의

도핑 응용은 품종 개발, 성능 지표, 제조 공정 및 응용 분야에서 큰 진전을 이루었다.

희토 산화물의 이온 반경이 크기 때문에, 전기장 강도가 크고 배위 수가 높은 편이다. 붕소-산소 사면체에서 배위 요구 조건 또한 높기 때문에 결과적으로 구조물 내의 근거리 서열 범위가 증가하였고 국부 응집현상이 쉽게 일어나며 유리가 분상(phase splitting)되거나 혹은 결정이 석출되어(devitrification) 유리를 불투명하게 만들기 쉽다. 따라서 희토 광학 유리의 구성성분을 연구하는 주요 취지는 희토의 첨가량과 광학성능을 보장하는 기초 상에서 기타 구성성분을 합리적으로 구성하여 희토의 유리에서의 결정 석출 현상을 낮추며 상대적으로 간단한 공정으로 각항 지표를 충족시키는 희토 광학유리 제품을 만들어내기 위한데 있다.

최근, 비구면 광학 소자의 정밀 프레스 성형에 대한 수요를 충족시키기 위해 저 연화점 광학 유리가 크게 개발되었다. 그 중에서도 저 연화점 희토 광학 유리는 친환경 희토 광학 유리를 기본으로 하고, 유리 연화 온도 (Tg)가 뚜렷이 낮아지도록 알칼리 금속 산화물 Li_2O 및 2가 산화물 ZnO 등을 첨가시켰다. 알칼리 금속 산화물의 적절한 유형 및 함유량을 선택하면 용융 공정, 유리 점도, 화학적 안정성, 결정석출 방지 성능, 유리 Tg 온도 및 유리 팽창계수의 균형을 실현하는 데 매우 중요한 역할을 할 수 있다.

희토 산화물은 굴절률이 높기 때문에 초고 굴절률의 광학 유리를 제조하는 이상적인 소재이다. 과거에는 원료 및 공정의 한계로 인해 초고 굴절률의 희토 광학 유리 개발 진도가 느렸다. 고 굴절률을 얻기 위해, 고 굴절률의 광학 유리에 La_2O_3, Y_2O_3 및 Gd_2O_3와 같은 희토의 고 굴절 산화물을 대량 첨가하였다. 저 굴절률 유리와 비교하였을 때, SiO_2, B_2O_3 등 초고 굴절률 유리 섬유 형성체의 함유량은 비교적 적으며, 일반적인 저 굴절률 광학 유리에 비해 유리의 결정 실투(devitrifica- tion) 성능이 저하되어 배합 조정이 어렵고 소요되는 조건은 더욱 까다롭다. 이는 제련 공정 및 후기의 2차 압출성형

과정에서 유리가 결정화를 일으키지 않도록 유리 구성성분 분배 비율이 합리적이고 정확할 것을 요구한다.

희토 필터 유리는 광전자 정보, 과학 연구 및 방위 등 분야에서 광범위하게 응용되는 광학 소재이다. 현재 다양한 농도의 착색제와 다양한 종류의 기초 유리가 가능한 가장 넓은 스펙트럼 범위에서 개발되어 필터의 유형별 개발이 촉진되었으며 우수한 필터 특성을 얻을 수 있게 되었다. 홀뮴(Ho) 유리는 자외선, 가시광선 및 근적외선 대역에서 일련의 흡수 피크를 나타낸다. 흡수 피크의 위치는 안정적이며 온도 변화는 파장의 위치를 변경하지 않고 흡수 피크의 측광 값을 변경만 하고 응용 및 저장하기가 편리하다. 이러한 조건은 홀뮴 유리를 자외선, 가시광선 및 근적외선 대역에서 이상적인 참조 물질로 되게 하였다.

내구성, 불연성 및 미생물, 물 및 다양한 용액에 대한 안정적인 역할 등의 특징을 지니기 때문에 고급 유리 예술품 및 공예품의 최적의 소재로 간주되어 유리 제품의 예술적 가치를 향상시키는 중요한 방법중 하나가 되었다. 고급 기구 및 예술 작품의 제작시 유리의 투명도, 광택, 색상 및 모양이 응용되는데, 색상의 선택은 기술 요구 및 유리 예술가들의 예술에 대한 감상에 따라 달라진다.

컬러 불투명 유리(Colored opal glass)는 기초 유리 성분에 불투명제 및 착색제를 동시에 첨가하여 만들어지지만, 불투명 유리는 유리상 이외에 불투명한 결정상을 가지기 때문에 착색제의 양은 투명 착색 유리의 양보다 많다. 유색 유리에 가시광선을 입사하면 유리상에서 빛의 흡수가 선택적으로 일어나고 결정립에서 광 산란 현상이 일어나는데 종합작용 결과 착색제의 역할이 크게 약화되면서 컬러 불투명 유리가 만들어진다. 색상이 투명한 유리에 있는 착색제의 컬러가 아니라 비취 색상처럼 옥색 비슷한 효과를 나타낸다. 이러한 효과는 가치가 있으며, 벽옥, 공작석, 마노 등 제품을 모조할 수 있다.

파. 희토 세라믹 재료

희토 세라믹 재료에서 희토는 매트릭스 성분 또는 도핑 개질 원소로서 응용될 수 있다. 세라믹에서의 희토의 응용은 본질적으로 4f 전자의 금속성, 이온성 및 광학적 및 자기적 특성에 기인한다. 이 네 가지 기본 속성은 희토 세라믹 재료를 개발하는 주 맥락이다. 그중 4f 전자는 희토 이온이 유일하게 보유한 특성이며, 4f 전자 층에서의 전이 (f-f) 및 중간 전이 (f-d) 및 쌍을 이룬 4f 전자에 의해 나타나는 자기적 성질에 해당 물리적 특성이 반영된다. 또한, 희토 이온의 반경이 크기 때문에, 희토 원소는 다른 원소, 특히 비금속성 질소, 산소 및 할로겐 원소와 쉽게 결합할 수 있고, 또한 변가되는 성질을 지니므로, 희토 이온은 재료의 미세 구조를 조절하기 위한 첨가제로서 응용될 수 있다. 재료의 거시적 특성을 변경하여 다양한 희토 구조용 세라믹 및 희토 변형된 기능성 세라믹을 형성할 수 있다.

따라서 희토 세라믹의 기능은 주로 광학 및 자기 특성을 포함한다. 희토계열 투명 세라믹은 주로 희토 세스퀴 옥사이드 (rare earth sesquioxide)와 가닛 (garnet) 구조를 포함하며, 전자는 Y_2O_3와 Lu_2O_3이며, 후자는 주로 $Y_3Al_5O_{12}$와 $Lu_3Al_5O_{12}$ 및 이들의 혼합 금속 원소 또는 도핑된 유도체가 있다. 현재 상용화되어 있고 다량으로 연구되고 있는 희토계열 투명 세라믹은 입방정계 위주이다.

희토계 투명 세라믹은 광학 응용 분야와 비 광학 분야의 두 가지 주요 범주로 나눌 수 있다. 전자는 주로 레이저, 플래시 및 백색광 LED용 투명 세라믹을 포함한다. 그 중, 레이저 투명 세라믹의 매트릭스는 주로 가닛 $RE_3Al_5O_{12}$ 및 세스퀴 옥사이드 RE_2O_3 큐브시스템이고, 발광 중심은 Nd, Er 및 Yb 위주이다. 현재 투명성, 열적 물성, 광발광 효율 및 발광 수명은 단결정제품 수준에 이르렀으며 광산란 및 mesoscopic - 거시 구조와 관련된 특성을 종합적으로 비교 분석해보았을 때 여전히 개선의 여지가 있다. 최근의 연구에 따르면 레이저 투명 세라믹은 레이저 출력 및 효율 면에서 뛰어나며 기본적으

로 단결정과 일치하며 상대적으로 높은 기계적 특성을 가지고 있으며 내열 손상 저항성 측면에서 전망이 밝다. 최근의 투명 유리질의 빠른 개발은 레이저 투명 세라믹과 유사하며, 가닛 $RE_3Al_5O_{12}$와 세스퀴 옥사이드 RE_2O_3 큐브 시스템에 의해 주도되고 있으며, 단결정에 버금가거나 심지어 더 우수하다. 또한 새로 등장한 백색광 LED 투명 세라믹은 주로 황색 세라믹 Ce : YAG 투명 세라믹으로 만들어져 칩과 결합되어 백색광 LED로 되는데 세라믹 내부의 광 투과가 분말 내부와 동일하지 않기 때문에, 이렇게 결합된 구조는 완전한 3차원 발광을 구현한 것이다. 비 광학 용도의 투명 세라믹은 주로 전기 광학 투명 세라믹 및 자기 광학 투명 세라믹을 포함하며, 투과 방향 (굴절 및 산란)과 같은 전기장 및 자기장 아래의 광학 투과 특성에 응용되어 광학 셔터 및 광학 메모리, 편광기 및 광변조장치 등에 응용된다. 희토는 주로 전기 광학 세라믹(optocera- mics)의 첨가제로 응용된다. 투명 세라믹 연구 분야에서는 국제 추세를 바싹 추격하고 있으며 독자적인 기술 혁신을 통해 석영 계열과 세스퀴 옥사이드 시스템의 투명 세라믹이 모두 진전을 이루었고, 개발된 투명 알루미나 세라믹은 상업용 고압 나트륨 램프에 성공적으로 응용되었다. Nd : YAG 세라믹 스트립으로 달성한 1064mm 레이저 출력은 일본과 미국 등 선진국이 제조한 레이저 세라믹과 같은 수준이다.

희토 나노 세라믹은 전통적인 세라믹과 나노 신기술을 결합한 결과물이다. 최종 용도에 따라 나노 세라믹은 크게 두 가지로 분류된다. 첨가제인 나노희토분말은 일반적으로 희토의 큰 이온 반경 등 전자의 역할과 무관한 특성을 기반으로 하며, 관련 연구는 주로 산업화, 제품 성능 향상을 위한 기술 개발 및 특정 기술 자료 축적에 중점을 두고 있다. 기능성 희토 나노 세라믹은 주로 희토 원소가 매트릭스 성분 또는 발광 첨가제로만 응용될 수 있는 발광 분말로 구현되며, 현재 국내외 연구 방향은 다양한 형태 제어 및 합성 기술과 생체 형광 추적기, 다양한 조명 디스플레이 특히 LED 및 심지어 고속 광 감쇄 응용 분야의 재료이다. 기본 연구는 기능성 희토 나노 세라믹스에 초점을

두고 있으며 단일 기판 백색 발광은 희토 도핑 텅스텐 나노 결정의 자기 조립에 의해 달성되며 적색 광 강도는 Eu 도핑된 나노 결정의 상전이 및 형태에 의해 강화되는데 국제 선두 수준이다.

희토 유리 세라믹의 개발은 주로 상분리 이론과 기술 및 광학 소재 연구의 두 가지 방향에서 이루어지며 전자는 두 번째 상을 직접 생성하기 위한 유리 원료의 응용뿐만 아니라 현재까지도 나노 세라믹과 유리 원료를 혼합하는 기술로서 여전히 공정 탐구 및 경험 법칙 도출 단계에 머물러 있다. 광학재료의 응용은 주로 적외선 파대역의 광통신재료, 레이저재료, 섬광재료와 조명디스플레이재료 위주이며, 대부분의 연구는 광 발광 특징 혹은 초보적인 동력학 메커니즘 연구단계에 처해 있다. 현 단계의 연구는 주로 국제 발전을 추적하는 기초 연구를 수행하고 있으며 적외선에서의 전환과 전통 조명에 대한 연구가 주류를 이룬다. 형광체의 연구와 유사하게 희토 유리세라믹의 연구에서 중국은 탄탄한 연구실력을 갖추었으며 관련 기술진보는 산업 발전을 촉진시켰다.

5 국제 비교

희토는 대체 불가능한 전략적 자원으로 전 세계의 주목을 받고 있다. 특히 최근 몇 년간 중국정부가 희토산업에 대한 정리정돈과 통제를 강화하면서 희토가격이 대폭 상승하였고 국제적으로 희토자원 개발의 붐을 일으켰으며 생산을 중단한 해외 기업들이 잇달아 생산을 회복하거나 혹은 생산을 확대하는 움직임을 보이고 있으며 일부 희토자원 탐사, 채굴 프로젝트가 가동되었다. 그러나 21세기에 들어서서 제련 및 분리추출공정에 대한 연구 투자가 상대적으로 줄어들면서 분리추출과 관련된 연구인력과 개발능력이 부족하여 관련 기술은 주로 중국에서 찾고 있다. 해외의 환경보호에 대한 요구는 중국보다 앞서 있으며 암모니아 질소 및 불화물 등 특정 오염물질의 배출 기준치는 중

국 표준보다 훨씬 낮다. 게다가 해외의 희토 분리추출기업은 주로 말단처리 위주이며 환경보호 투자가 중국보다 10배 이상 높기 때문에 해외의 희토제련 분리기업의 생산운영비용이 높고 단기적으로 경쟁력이 없다.

중국은 희토 화합물 재료 제조 분야에 대한 연구를 강화하고 있으며 그린 합성 기술에서 큰 진전을 이루어내었으며 그린 합성을 위한 핵심 특허를 다수 확보하였다. 현재 해외 선진국과의 격차는 재료의 기초 연구 및 혁신 역량, 규모화 안정적 합성공정, 생산 장비 및 응용 성능 테스트 등에서 구현된다. 첫째, 주요 복합 재료의 원천 특허는 주로 해외에 의해 확보되었으며, 둘째 첨단 희토 화합물 재료의 제조 공정 및 장비의 제어 수준이 낮고 제품의 양산화 안정성이 낮다.

중국은 "12.5"기간 조직제어기술을 통해 생산공정을 최적화하였고 과거의 단순히 성분으로 자석의 성능을 제어하던 기술방법을 변화시켜 자석의 보자력, 온도특성 등 주요 마그네틱성능을 높였으며 종합 자기 성능 (BH) max (MGOe) + Hcj (kOe) ≥ 75 인 고성능 NdFeB 자석 (실험실 수준)을 개발하였다. 일본의 연구팀은 분말입자의 크기를 줄이는 방법으로 더욱 미세한 자석 결정미립을 얻었고 자석 보자력을 대폭 높였다. 1㎛입자의 자석분말로 제조한 자석결정입자 크기는 1.5㎛ 수준이며 입자 치수를 줄였고 제조한 중희토가 함유되지 않은 NdFeB 자석의 보자력이 20kOe에 달하였으며 중희토를 절감하는 목적에 도달하였다.

소결 자석 외에도 이방성 희토 본드자석은 시급히 개발되어야 할 중요한 부분이다. 지난 몇 년 동안 중국과 일본은 대량의 인력과 물력을 투입하여 자석분말의 생산기술을 개발하였으며 자석분말 온도의 저항성을 개선하였으나 자석 성형기술 면에서 일본 아이치철강(Aichi Steel) 외에 자력 성형기술이 아직 성숙되지 못하였으며 자석의 보급과 응용에 걸림돌이 되고 있다. 미래의 발전 역시 고성능, 저가격 자석분말과 가격대 성능비가 높은 성형기술을 둘러싸고 이루어질 것이다. 소결 자석의 경우 중국과 해외의 최대의 격차는 자석

분말 제조이며 최근 몇 년간 Sm-Fe- N 합금 급속 냉각 및 질화 기술이 크게 발전하였다.

열압 / 열유변 희토 영구 자석에 관한 연구는 1985년 초 미국, 유럽 및 일본에서 이미 시작되었다. 주로 전단계의 기초 연구 및 산업화 기술 및 장비의 개발에 종사하였으며, 또한 기초연구와 관련하여 자석성분, 재료체계, 자기성능, 미시적 구조, 이방성 형성메커니즘 등에 대해 심층적이고 체계적인 연구가 이루어졌다. 중국의 열압 자석의 산업화 핵심기술에 대한 연구는 21세기 초반에 시작되었으며 국가과기프로그램의 지원을 받아 다수의 중대 핵심기술을 돌파하였는데, 예를 들면 박벽 방사형 고리모양 자석 제조기술, 연속 열압 / 열유변 공정기술이 그것이다.

신소재 시스템의 개발은 해외 연구와 거의 같은 시기에 이루어졌으며, 특히 저온 자기 냉각 재료는 국제적으로 선도적인 수준이다. 과거 몇년 동안 자기 냉각 재료 가공 방향에 대한 인식이 부족하고 연구개발을 늦게 시작하였으며 격차가 뚜렷하며, 재료 물리와 장비와의 협력 부족으로 자기 냉각분야의 전반적인 기술 지연을 초래했다. 최근에는 연구인력의 학제 간 상호 방문, 교류, 토론과 상호 보완 및 국가 고급인재정책의 출범을 통해 자기냉각재료 제조와 가공실력이 크게 향상되었다.

희토 촉매 재료 : 중국의 FCC 촉매제를 해외 제품과 비교하였을 때 추적, 모방, 2차혁신 및 기술혁신 등 단계를 거쳐 현재 자국산 FCC 촉매제의 활성, 선택성, 수열 안정성 등 성능이 동일한 수준에 있으며 또한 중국의 실제상황에 부합하여 자체의 특징을 갖추었다. 전반적으로 보았을 때 중국산 FCC 촉매제는 사용성능 면에서 해외 동류 촉매제 수준에 도달하였다. 하지만 해외의 환경규제가 엄격하고 역사가 비교적 길기 때문에 친환경 FCC 촉매제 품종의 개발에 있어서 해외가 뚜렷한 강점이 있다. FCC 가솔린의 황 농도 감소를 위한 촉매 및 첨가제, SO_2 및 NOx 배출을 줄이기 위한 보조제의 개발에 있어서는 해외와 큰 격차가 여전히 존재한다.

자동차 배기가스 정화의 경우, 배출 규제 출범의 지연으로 인해 중국의 자동차 배기가스 정화 촉매제는 자주혁신능력이 해외와 비교하였을 때 비교적 큰 격차가 있으며 해외기술의 발전을 추적하고 독자적 지재권을 지닌 신제품이 부족하며 차량 배기가스 정화촉매제의 핵심재료, 제조공법 및 완제품 차량 매칭기술에서 해외와 격차가 존재한다. 가솔린차량의 배기가스정화용 삼원촉매제(TWC)에서 Weifu Lida, Kun-Guizhou 등의 촉매 회사는 BASF 및 Johnson Matthey와 같은 국제 촉매제 회사와의 정면 경쟁에서 긍정적인 시장 인정을 받았다. 가솔린 자동차 촉매와 비교할 때, 디젤 차량 촉매의 개발은 나중에 시작되었으며, R&D 기반이 상대적으로 취약하며 실제 응용 경험이 더욱 부족하다. 연구 기관과 산업화 기관의 공동의 노력을 거쳐 자체 지적재산권을 지닌 국산화 "대규격 촉매 운반체 - 촉매 생산 및 포장 - 매칭 제어 기술 및 통합" 의 완벽한 기술 산업 체인이 형성되었다.

마찬가지로 중국의 환경 보호 법규가 수립되는 중이고 환경 보호의 이행이 충분히 엄격하지 않기 때문에 VOCs에 대한 촉매 정화 기술의 혁신과 응용에 직접적인 영향을 미쳤다. 독일의 Sud Chemie회사나 영국의 Johnson Matthey회사와 비교해보았을 때 중국의 촉매제와 해외 제품 사이에는 뚜렷한 차이가 없었다. 그러나 촉매 제조용 핵심재료 (예 고성능 알루미나 등), 촉매제 제조장비의 자동화 수준과 정밀제어 등에서 해외와 비교적 큰 격차가 존재한다. 동시에 중국 VOCs 촉매 연소 촉매제의 응용 분류, 불순물에 대한 안정성 평가, 특수 유기 물질 (예 다이옥신 등)의 촉매 연소 등에서도 큰 차이가 있었다. 천연 가스 / 메탄의 촉매 연소 기술의 경우, 중국이 기초 및 응용 기초 연구를 대량으로 진행하였고 개별 기관은 응용시범사업을 수행하였지만 정책과 기술상의 이유로 대규모 산업화 응용을 실현하지 못하였으나 시장전망이 매우 밝을 것으로 예상된다.

탄소 화학 물질, 연료 전지 등의 경우, 대규격 고체 산화물 연료 전지 제조 기술에서 획기적인 진전이 있었다. 하지만 산업응용과는 아직 거리가 멀다.

최근 희토 수소 저장 재료에 대한 연구는 희토 수소 저장 합금의 성능 개선 및 생산 비용 절감 등에 집중되어 있으며 주로 소재의 구성 최적화, 재료 구조 조정, 표면 처리 기술, 재료 제조공정 개선 등 연구수단이 있다. 국내외 대규모 기업의 전통적인 $LaNi_5$ 수소 저장 합금의 생산 기술, 공정 수준 및 제품 성능에는 큰 차이가 없다. 전기 자동차 동력전지용 수소 저장 합금 분말의 일부 성능은 아직 개선될 여지가 있으며 저출력 자기 방전 니켈 수소 전지용 La-Mg-Ni계 수소 저장 합금이 산업화 단계에 진입했지만, 실제 제품 품질과 생산 공정기술은 일본에 비해 여전히 큰 격차가 있다. 해외 수소 저장 합금 기술이 앞선 것은 급속 용융 용해 공정 및 열처리 공정을 통해 상 구조의 균질성 및 안정성을 제어하는 것이며, 합금 분말의 표면 처리를 통해 낮은 내부 저항과 높은 활성 표면의 수소 저장 합금 음극 재료를 얻는다. 수년간의 개발 끝에 중국의 연구 기관 및 연구인력풀이 계속 확대되었는데 다양한 희토 수소 저장 재료의 개발 조건을 이미 갖추었으며 연구 범위가 해외에 비해 훨씬 크며 재료 구성 원소 혹은 재료참가원소 및 원소의 역할과 함량에 대해 다양한 연구를 수행하였으며 학술논문 발표량이 훨씬 앞섰고 특허 출원건수 역시 안정적으로 증가되었다. 그러나 해외와 여전히 일정정도 격차가 존재하는데 주로 다음의 몇가지로 구현된다. (1) 과학 연구 및 제품 개발의 독창성이 상대적으로 적고 희토 수소 저장 재료 제품의 핵심 기술이 부족하며 다양한 종류의 수소 저장 합금 제품 구성이 일본, 미국 및 선진국의 특허 범위에 속해 있다. (2) 수소 저장 재료 특허의 주요 출원인은 대학이나 연구 기관에 집중되어 있으나 세계 상위 10위 특허 출원자는 대부분이 일본 기업이다. 이는 중국의 특허 기술이 산업화 수준과 집중도가 낮다는 것을 의미한다. (3) 연구기관과 기업 간의 실질적인 협력 연구가 비교적 드물고 기업의 연구 개발실력이 상대적으로 약하며 연구 성과의 응용과 산업화 개발사업이 상대적으로 약한 편이다.

현재, 희토 발광 재료에 대한 연구는 높은 발광 효율, 높은 현색성 발광 재

료, 신형 디스플레이용 발광 재료, 생물 형광 태그, 형광 검출 등 분야에 집중되어 있다. 고채도 백색광 LED용 적색 질화물 형광체 가운데, 미국 특허(No.7253446) 는 질화물 적색 형광체 $MA1SiN_3 : Eu^{2+}$ (M = Ca, Sr)의 발광 효율이 YAG : Ce의 155%이며, 온도 특성이 양호하고, 150℃에서의 휘도는 실온의 86%에 달한다고 밝혔으며, 일본 특허 (2003-273409)는 $(Ca, Sr, Ba)_2Si_5N_8 : Eu^{2+}$ 형광체가 Eu^{2+}의 도핑 농도가 높아짐에 따라 주황색에서 적색으로 변화한다고 밝혔다. 중국은 관련 제품을 생산할 수 있지만 제품 성능 면에서 약간의 차이가 있다.

신형 디스플레이 기술 - OLED (Organic Electroluminescence)의 두가지 주요 기술 시스템중, 저분자 OLED 기술은 일본이, 폴리머 PLED- LG 휴대폰의 소위 OEL체계의 기술 및 특허는 영국의 과기형 기업인 CDT회사에서 확보하고 있는데 양자를 비교해보면 PLED 제품의 색상 면에서 여전히 어려움이 있다. 저분자량 OLED는 착색이 쉽기 때문에 삼성 등 회사들은 이미 휴대폰과 같은 소형 디스플레이에 응용시켰다. 중국 또한 관련 연구를 적극적으로 수행하고 있으며 일련의 자체 지적재산권과 관련 제조 기술을 보유하고 있으며, 선두수준이다. OLED 핵심 기술의 자주혁신 및 산업화를 적극적으로 추진하고 차세대 평면 패널 디스플레이 기술의 고지를 선점하기 위해 노력하고 있다.

1940년대 초반 미국의 Weissman회사는 희토 이온 및 유기 리간드의 형광 특성및 분자 내 에너지 전달에 관한 연구에 착수하였다. 20년이 지난후 레이저 분광학의 출현으로 사람들은 희토 화합물의 스펙트럼과 광 물리 작용에 관한 연구를 계속적으로 진행했다. 1966년에 Crosby는 희토 유기 화합물의 발광현상을 요약하였고, 1984년 Horrock과 Albin은 배위 화학 및 생화학 분야에서 희토 발광을 요약하여 발표하였으며 생체 분자 분야에서의 응용을 해석하였다. 현재 생물학적 고분자의 형광 표기 기술은 국제적으로(핀란드 LKB 사) 상용화되었으나 중국은 아직도 연구 개발 단계에 머물러 있다.

상향 변환 레이저는 반도체 레이저에 비해 높은 변환 효율, 낮은 레이저 임계 값 및 신뢰할 수 있는 성능을 갖는다. 상향 변환 (upconversion) 레이저 및 광섬유는 이러한 재료의 인기 연구과제이다. 최초의 레이저 출력은 1971년 YH^{3+} / Ha^{3+} 및 Yb^{3+} / Er^{3+} 공동 도핑한 BaY_3F_8 결정을 이용해 7K 온도에서 녹색 및 적색을 출력한 것이다. 현재 광섬유 레이저의 대부분은 상온에서 출력이 가능하며 불화물 광섬유 위주이다. 독일의 Linos사는 2003년에 최초의 상업용 청색 섬유 광섬유 상향 변환 레이저를 출시하였으며 독일의 Lumics사와 미국의 National Laser사에서도 청록색광 상향변환 레이저를 연속적으로 도입했다. 또한, 상향변환기술은 정적 이미징의 3차원 디스플레이로서 최초로 1994년 스탠포드대학(Stanford University)과 IBM사가 Pr^{3+} 활성화 불소 유리로 공동 연구 및 성공을 거두고 1996 년 스탠포드대학(Stanford University)은 최초의 3차원 디스플레이 장치를 성공적으로 개발했다. 이러한 디스플레이 방법은 육안으로 컴퓨터 처리된 고속 모션 입체 영상을 표시할 수 있는 입체 영상의 360도 뷰를 볼 수 있게 한다. 현재 연구 단계에 있으며 상향 변환 물질의 선택적 제조, 펌프 구성의 최적화 및 스캐닝 시스템의 선택 등 측면에서 효과가 있다.

대면적 YBCO 필름의 개발에 관한 많은 연구가 수행되었다. 독일 뮌헨공과대학(Munich University of Technology)은 다양한 동시 증발 방법을 채택하였는데 현재 가장 성공적인 제조방법으로 인정받고 있다. Theva사는 이 방법을 채택하여 YBCO 양면 박막의 양산화를 실현하였다. 독일 라이프치히 대학(Leipzig)는 PLD공법을 채택하여 역방향 증착 4인치 양면 YBCO 박막을 만들었고, 독일 FZK사는 표적 양쪽에 동시 증착하여 3인치 양면 YBCO 박막을 만들었으며, 미국의 듀폰(DuPont)사는 축외 증착기술(Off-axis)을 응용하여 PLD공법으로 3인치 양면 YBCO 박막을 제조하였다. 북경유색금속연구총원과 중국과학원 물리연구소는 3인치 양면 박막을 소규모 제조하였으나 중복성과 안정성에서 모두 어느정도 문제가 있었다.

최근 몇 년 동안 해외의 초전도에 대한 연구경비는 제2세대 고온 초전도 밴드재에 집중적으로 투입되었다. 미국 의회는 2001년에 고온코팅도체혁신공정(ACC1, Accelerated Coating Conductor Innovation Project) 프로그램을 승인했다. 이 프로그램은 주로 Y계열 고온초전도밴드재의 중요성을 강조하였고 이에 상응하여 고출력 전력 분야에서 고온초전도체의 개발, 응용 및 산업화를 촉진시키기 위한 목적으로 전력공업장기프로그램을 수립했다. 미국에서 제2세대 고온 초전도밴드재의 개발 및 산업화가 급속히 이루어지면서 세계의 선두주자가 되었다. 2009년기준 미국 초전도기업인 Superpower 사는 줄곧 Ic × L 값의 세계 기록의 보유자이며 IBAD + MOCVD 기술 로드맵의 대표자이기도 하다. 미국의 초전도 기업 AMSC (American Superconductor Corporation)은 RABiTS + MOD 기술 로드맵의 대표자로서 지금까지 2세대 고온초전도밴드재의 출하량이 세계 1위인 기업이다.

해외에서는 2004년에 100미터 크기의 2세대 초전도 스트립을 생산하였으나, 중국에서는 2011년이 되어서야 100미터급 초전도 스트립 생산이 가능케 되었으며, 밴드의 길이도 국제수준과 격차가 큰 편이다. 하지만 최근 몇년간 기업의 참여와 투자 강화가 이루어지면서 중국은 2세대 스트립의 연구 개발에서 큰 진전을 이루었다. 현재 많은 연구기관과 기업들은 산학연 협력방식을 통해 1천미터급 제2세대 고온초전도 스트립을 생산하였는데 임계 전류가 200A/m을 초과하였다. 중국 자체의 2세대 스트립 기반으로 첫 초전도 코일을 제조하였는데, 77K에서 중심 전계강도가 0.5T에 달하였다.

21세기 초반부터 현재까지 국제 레이저 결정체의 발전 특징은 다음과 같다. (1) 생산 규모가 급격히 확대되었고 결정의 크기가 지속적으로 증가하였으며 품질이 꾸준히 향상되었다. (2) 결정 소자가 단일 매질에서 복합 구조로 바뀌었다. (3) 레이저 결정에 대한 연구가 "인공 합성 결정"에서 "결정 구조 설계 및 성능 제어"로 바뀌었다. 또한 다양한 레이저 결정이 상품화되었으며 초소형 Nd : YAG 결정과 Czochralski 방법에 기반한 Nd : YVO 결정이

대규모 생산되었다. 신형의 레이저 결정 재료에 대한 연구 및 개발과 관련하여 희토가 도핑된 알칼리토 불화물 레이저 결정의 구조 설계 및 성능 제어가 이루어졌으며 신형의 Yb, Na : CaF_2, Nd, Y : CaF_2 및 Nd, Y : SrF_2레이저 결정이 형성되었고 대규모 레이저 프로젝트에 응용되었다. 개발된 LYSO 크리스탈은 크기와 성능 면에서 국제 수준으로 발전했으며 소형 동물 PET 크리스탈 어레이 영상장치를 개발했다. 직경 98mm, Ö30mm × (30 ~ 45) ìm의 초박형 Ce : YAG 섬광 결정을 개발하였고, 초박막 Ce : YAG 결정을 기반으로 한 고해상도 X선 검출기를 개발하여 고해상도 영상을 구현하였다. 이미지 품질이 CRYTUR사보다 더 우수한 대비도와 더 높은 해상도를 나타내었다. 중국산 Yb : YAG 및 Yb : YAP 크리스탈에서 400ps의 초고속 플래시 라이트가 측정되었는데 이는 강한 펄스 방사선 검출 분야에서 얻은 가장 빠른 섬광 신호이다. Yb 이온은 잔광 강도가 가장 낮고 발광 효율이 가장 높은 CsI (T1) 섬광 결정을 성장시키는 도펀트(dopant)로 응용되었다. $CeCl_3$ 및 CeF_3가 도핑된 $LaBr_3$ 결정은 결정의 조해를 감소시키는데 효과를 보았으며 결정 크기 및 결정 성능은 국제 선진 수준에 도달했다. 자기 개발한 마이크로 드롭 다운 결정 성장로에서 직경 3mm, 길이 300mm에 달하는 Nd : YAG 단결정 광섬유를 성장시켜 기술공백을 매웠다.

강인성의 종합적 개선을 목표로 하는 희토 고강도강과 관련하여 중국은 철강에서의 희토의 역할메커니즘에 대한 연구에서 큰 진전을 이루었다. 예를 들어 용강에서의 희토의 물리 화학적 거동, 존재 형태, 특히 입계 편석 특징 및 희토의 철강중의 미세합금화에 대한 연구가 국제 선진 수준에 도달했다. 그러나 최근 몇 년간 중국의 희토 고강도 강재에 대한 연구가 해외에 비해 크게 뒤처져 있다. 고온 내산화성 개선을 주요 목표로 하는 희토 내열강은 유럽, 미국, 일본 및 호주에서 양산화를 실현하였다. 대표적인 강철 등급은 스웨덴의 253MA 강이며, 희토 함량은 0.03% ~ 0.08%이며 희토 첨가 방식은 기밀이며 선진국의 연간 생산량은 15만톤이다.

해외에서는 대 횡단면 (120mm 두께) 구상주철 부품 중심부위의 그라파이트 변형 및 조직 황화물 문제를 성공적으로 해결하였고 최대 100 톤 무게의 대형 구상 흑연 주철 핵연료 운반장비를 포함하여 다양한 무겁고 규격이 큰 특수 구상주철부품을 성공적으로 생산했다. 해외의 페라이트 구상주철 생산 및 응용 분야가 급속도로 확장되면서 자동차, 디젤엔진, 트랙터 및 공정기기의 기어, 곡축과 각종 부품에 광범위하게 응용되었다. 해외에서는 고급 ADI 전문 열처리 장비를 채택하여 전문적인 열처리 생산 라인을 구축하였기 때문에 ADI 생산 제어가 보다 정확하고 편리하며 안정적이고 신빙성이 있으며 생산량이 급격히 증가되었다. 중국은 강도와 인성이 높은 오스템퍼 처리 덕타일 주철(ADI, Austempered ductile iron)을 응용하는 수준은 여전히 전반적으로 낮은 편이다. 철 합금의 내열성을 개선하고 자동차 응용범위를 넓히기 위해 해외에서는 마그네슘 합금의 첨가제로 희토 마그네슘 합금을 개발하였으며 특히 희토 원소를 첨가 한 후 150 ℃에서 장시간 사용할 수 있다.

1980년대 중국은 처음으로 PVC 희토 열안정제를 개발했는데 무독성, 고효율성, 다기능성 및 적절한 가격이라는 장점을 지니기 때문에 부드럽고 단단하고 투명하고 불투명한 PVC 제품에 적용되었으며 최근에는 열안정제산업 연구와 발전의 인기 화제가 되었다. 희토 열안정제는 주로 기존의 열 안정제와 유기 주석을 대체할 수 있는 경희토 스트론튬, 세륨 및 네오디뮴의 유기 약산염 및 무기염을 주로 포함한다. 적외선 분석은 희토 원소가 배위 착화합물을 형성하는 능력을 갖고, PVC 가공에서 방출되는 많은 양의 HCl을 흡수할 수 있으며 PVC중의 대부분 Cl^- , 특히 불안정한 알릴 클로라이드 및 3차 염소 원자가 안정화되어 PVC를 안정화시키는 역할을 한다. 자원 문제 때문에 해외에서 아직 상품화된 희토 안정제가 시판되지 않고 있는 것으로 추정된다. 신형의 고효율 무해화 희토 기능성 안정제는 중국 특색을 지닌 무독성 안정제로서 그 시장수요가 크고 전망이 매우 밝다.

희토 배위, 기공 흡착, 산 염기 중화 등 다양한 개념을 결합시켜 다차원 시

너지 효과를 지닌 새로운 유형의 희토 - 히드로탈시트(hydrotalcite) 복합 안정제를 개발할 수 있다. 호스트 - 게스트 희토 기능 첨가제의 설계를 통해 첨가제의 다기능 특성을 지니며 납 (카드뮴) 안정제를 전반적으로 대체하여 중국 PVC 산업의 그린화를 위한 기술지원을 제공한다.

희토 광학 유리 분야에서는 연구 방향과 연구 수준이 국제 수준에 매우 근접하며 특허 출원, 과학 연구 성과 및 시장 점유율 간의 격차가 급속히 줄어들고 있다. 희토 광학 유리에 대한 해외 기업의 연구는 주로 배합방법, 용융공법 및 장치 등에 중점을 두고 있으며 희토 (란탄계열) 광학 유리 제조 기술 특허를 대량으로 출원했다. 유리성능 향상, 희토 원료 도입량 저감 등 희토 광학유리 배합 최적화 기술 및 관련 공정 개선 등에서의 심층적인 연구를 통해 유리용융과정에서 희토 원료의 유효 이용률을 높여 다양한 광학계통의 굴절률, 아베 수(Abbe number) 및 투과율 등 광학성능지표에 대한 수요를 충족시켰다.

기업들은 주로 추적 연구 개발 전략을 채택하고 특허 인용 분석 및 특허 KIN 분석에 대한 연구를 적극적으로 수행하며 해당 분야 핵심 특허기술을 종합 정리하였다. 특허 침권 분석 및 우회 특허 설계 등의 대응, 해외 특허 기술의 회피를 통해 희토 광학 유리의 핵심 제조 분야에서의 외국 특허 기술 장벽을 타파하였다. 기업들이 핵심기술을 적극적으로 창출하도록 유도하였고 보다 많은 독자적 지적재산권을 보유하고 강한 경쟁력이 있는 희토광학 유리 제품을 개발하였다.

특정 연구 방법들로는 SCHOTT, HOYA, OHARA 등의 광전자 제조업체의 국제 특허에 대한 심층적인 연구를 통해 다양한 기술 솔루션 및 경로를 찾았고 희토 원소 도입을 줄이는 등 방법으로 다양한 희토 광학 유리 제품을 설계해 희토 자원의 효과적인 이용을 향상시켰다. 희토 광학 유리의 배합방법, 공정, 제련 및 측정장비와 같은 핵심 기술에 있어서는 다양한 주제에 대한 특허 검색, 분석 및 비교, 주요 데이터베이스 구축 및 분석 보고서의 핵심 병목

문제를 해결하고 희토 광학 유리의 연구 및 제조 종합능력을 전반적으로 높인다.

희토 세라믹 분야에서는 대학 및 연구 기관이 기초 연구 분야에서 큰 진보를 이루어 국제 선두수준에 도달했으며, 전문 정기 간행물에 게재된 학술 논문의 수와 품질은 지속적으로 증가했지만 완제품화 및 상용화에 있어서는 여전히 외국과 격차가 있다. 레이저 투명 세라믹을 예로 들면, 2006년에 와트급 레이저 출력을 달성했으나 미국 리버모어 국립 연구소는 일본의 Kojima Chemical Co., Ltd.에서 제공하는 투명 세라믹판을 열용량 레이저 실험에 응용하고 25kW의 레이저 출력을 얻었으며 이어서 37kW 레이저 출력을 얻었다. 또한 세스 퀴 옥사이드 섬광체 투명 도자기 분야에서 Toshiba사는 CT 이미징 머신에 대한 상용화 응용을 이미 시작했으나 중국은 아직까지 실험실 연구 단계에 머물러 있다. 따라서, 희토 세라믹 분야에서 한편으로 지속적으로 투자를 늘려 현재의 기초연구를 국제화 수준 나아가 국제 선두 수준으로 발전 혹은 유지하며 다른 한편으로 산업화 연구 개발을 격려 및 지원한다. 이를 가늠하는 기준은 독자적 지적재산권(특허 또는 표준 등)의 확보이며, 이밖에도 생산공법 및 부품 제조도 중요시한다. 향후 중국은 희토세라믹 분야에서 기초연구를 강화하는 외에, 국제 선두수준을 목표로 신소재와 신규 생산공법 개발에 주력하며 자체 지적재산권을 확보를 강조할 것이다.

6 연구성과 및 지적재산권 상황

중국의 희토의 발전은 과학 연구에서 시작되었다. 1927년 7월 3일 Ding Daoheng(丁道衡)의 바이윈오보광산(Baiyun Obo Mine) 발견과 1934년 He Zuolin(何作霖)이 바이윈오보광석에서 희토 광물을 발견한 이 2가지 중요한 과학 발견으로 중국의 희토 사업의 서막이 열렸다. 그후 수십년간 대량

의 연구성과는 중국 희토산업의 태동, 발전과 확장을 촉진시켰다. 13.5시기에 들어서서 특히 국가차원에서 신소재산업을 크게 추진하는 시점에서 희토산업 발전에 대한 과학연구의 추진역할이 갈수록 두드러지고 있다.

국가과학기술장려사무실이 주관하는 국가과기성과정보서비스플랫폼을 통해 1993년부터 등록된 약 4,500건의 희토 관련 과학기술 성과를 조회할 수 있는데 그중 응용기술성과가 약 4,000건, 기초이론성과가 400건 이상, 소프트웨어과학 성과가 20건에 달하는 것으로, 응용기술성과가 전체의 90%, 기초이론성과가 10%를 차지한다. 이러한 성과는 28개 성 및 직할시에 분포되어 있다. 그중 베이징, 상하이, 저장, 내몽고자치구 및 랴오닝성에서 가장 많은 등록 건수를 보유하고 있으며, 각각 500건, 300건, 280건, 260건 및 230건이다.

등록된 성과의 대부분은 국가과학기술프로그램, 국가자연과학기금, 국제협력, 지방기금, 부처 기금, 지방프로그램, 수평 협력, 민간 기금 및 자체 선정 과제의 지원을 받아 수행되었다. 그중 지방기금의 지원을 받아 수행된 프로젝트가 590건으로 가장 많았고, 그다음은 국가과학기술프로그램의 지원을 받아 수행된 프로젝트와 자체선정 과제가 각각 460건이었다.

프로젝트는 각각 전자정보, 첨단제조, 우주항공, 바이오의학 및 의료기기, 신소재, 신에너지 및 에너지절감, 환경보호, 지구, 우주 및 해양, 원자력 응용기술 및 현대 농업 등 11개 분야에 미친다. 그중 신소재 분야의 등록 성과는 약 1,200건으로 전체 등록 건수의 25%를 차지한다. 전체 등록 성과 가운데 산업화 응용에 관한 성과가 약 1,400건에 달하며, 약 30%를 차지한다.

관련 자료의 불완전한 통계에 따르면, 1949년에서 2016년까지 희토 과학연구 성과 수상건수는 230건 이상이며, 그중 국가 발명 1등상 2건, 국가 발명 2등상 4건, 국가 발명 3등상 7건, 국가 발명 4등상 1건, 국가과학기술진보 1등상 1건, 국가 과학기술진보 2등상 19건, 국가 과학기술진보 3등상 6

건, 국가 자연과학 2등상 4건, 국가 자연과학 3등상 1건, 국가 자연과학 4등상 1건, 과학기술 발명 2등상 4건과 국가 과학기술 돌파상 2건이 있다.

희토 산업 체인의 분포에 따라 중국 희토 학회의 특허 부분의 데이터를 응용하여 희토 선광의 습식 분리 신기술, 화합물 및 금속 제조, 강 및 비철금속에서의 희토 응용, 희토 촉매 재료, 유리 및 세라믹에서의 희토 응용, 희토 영구 자석 재료 및 응용, 희토 발광 재료 및 응용, 희토 수소 저장 재료 및 전지, 환경 보호 분야에서의 희토 응용, 희토 결정 재료, 희토 자원의 종합 재활용, 생물 농축산 양식업 및 의료 보건 분야에서의 희토 응용 및 기타 기능성 재료(주로 희토 연마재, 희토 자기변형 재료, 희토 자기냉각 재료 및 응용 분야, 희토 타깃재, 희토 나노재료 등이 포함) 등을 둘러싸고 2003년부터 2015년까지 중국이 신청한 특허에 대한 통계 및 분석이 이루어졌다.

2003년부터 2015년까지 중국이 출원한 특허는 전반적으로 증가 추세를 보이고 있으며, 출원 건수는 누계 9,111건, 연 평균 출원건수가 523건이며, 특히 2009년 이후 특허 출원 건수가 바쁘게 증가되면서 연평균 36.5%의 높은 성장률을 보였다. 2009년에 중국이 신청한 특허 출원 건수는 248건이었다. 2013년, 2014년 및 2015년에 이르러 각각 1,478건, 1,471건 및 1,879건에 달하였는데, 무려 8배 가까이 증가된 셈이다.

특허 출원의 분포 영역을 보았을 때, 화합물 및 금속 제조, 비철금속에서의 희토 응용, 희토 촉매 재료, 유리 및 세라믹에서의 희토 응용, 희토 영구 자석 재료 및 응용, 희토 발광 재료 및 응용 및 기타 많은 기능성 재료에 관한 특허가 높은 비율을 차지하였으며, 각 분야의 특허 출원 건수가 모두 400건 이상이며, 그중 기타 기능성 재료가 1,200건 이상을 차지하였다.

2003년부터 2006년까지 특허 출원의 중점, 즉 연구개발의 중점이 주로 유리 세라믹에서의 희토 응용에 집중되어 있었다. 2007년부터 2009년까지 특허 출원의 중점 영역 및 연구개발의 중점이 주로 희토 자성 재료 및 응용, 희

토 발광 재료 및 응용 분야에 집중되어 있었다. 2010년부터 2013년까지 특허 출원 및 기술 개발의 중점이 희토 자성 재료 및 응용, 희토 발광 재료 및 응용, 희토 타깃재 및 희토 나노 재료와 같은 특수 영역에 집중되어 있으며, 2013년 이후 LED 분야의 특허 수량이 빠르게 증가되었는데, 이러한 추세는 현재 희토 산업의 발전 현황과 일치를 이루었다.

특허출원 주체를 보았을 때 2003년에서 2013년 사이, 2008년 이전까지만해도 출원 주체가 연구소나 연구기관이었으나, 2008년부터 2013년사이 기업 비중이 1위로 상승하였고 연구기관이 뒤를 이었다. 또한, 각종 유형의 특허출원 주체의 출원 건수가 기본적으로 지속적으로 증가하는 추세를 보였다, 이는 최근 몇 년 동안 희토 관련 기업들이 기술 혁신과 기술 개선에 갈수록 더 많이 참여하고 있음을 의미한다.

화합물 및 금속 제조 분야에서 최근 10년간의 특허 기술 분포는 희토 화합물 제조시 배출 가스 및 폐수 처리 기술, 특수 화합물의 제조 기술, 희토 야금 공정의 환경 보호 기술 및 에너지 절약 기술뿐만 아니라 폐기물 종합 자원 회수 등을 포함한다.

희토 합금 분야에서 기술 분포는 주로 희토 마그네슘 합금, 알루미늄 합금, 철 합금과 같은 고강도, 고 인성 희토 비철 금속 합금 및 기타 희토 합금의 개발 및 응용을 중심으로 이루어지고 있다.

자성 재료 분야에서 최근 10년 동안 출원한 특허 기술은 주로 NdFeB 소결 영구자석 재료의 표면 보호 기술 개발, 디스프로슘 저감기술 개발, 고성능 NdFeB 영구 자석 재료 개발 및 NdFeB 생산 공정의 개선, 폐기 재료중 희토 자원 재활용기술 등 방향을 둘러싸고 분포되어 있다. 또한, NdFeB 본드 자석, SmCo 소결자석, SmCo 본드자석 등 분야의 특허출원 건수도 증가추세를 보인다.

연마 재료 분야에서 최근 10년 동안 출원한 특허 기술은 주로 희토 폴리싱

솔루션과 같은 신형 희토 연마재, 슬러리의 개발을 중심으로 분포되어 있다. 또한 연마 성능 등의 특허 출원 수도 점차 증가되고 있다.

희토 수소 저장 재료 및 전지 분야에서 특허 출원 건수는 비교적 안정되어 있지만 최근 2년간 증가세를 보이고 있다. 국가차원의 신에너지 자동차 지원 정책에 영향을 받아 니켈수소전지의 응용기술이 주목받고 있으며, 주로 수소 저장합금의 특성, 전지 설계 및 성능 등에 기술이 분포되어 있다.

희토 발광 재료 분야에서는 희토 발광 재료 시장이 점차 위축되었지만 최근 10년간 통계 결과, 해당 분야에서의 특허 출원 건수가 계속해서 증가되는 추세를 발견하였다. 기술은 주로 신형 희토 발광재료의 개발, 희토 발광 재료의 응용 기술 등 영역에 집중되어 있다.

희토 촉매 재료 분야에서 출원된 특허 기술은 주로 자동차 배기가스 정화, 연기 탈황 및 탈질 등에 집중되어 있으며, 최근 몇 년간 특허 출원 건수가 기본적으로 안정되어 있다.

최근 몇 년간 출원된 특허를 분석한 결과, 현재 희토 산업의 지적재산권에 대한 가장 큰 문제점은 유효 특허기술의 비중이 높지 못하며, 중국 기업의 국제 특허 전략이 부족한 것으로 나타났다. 글로벌 경제 추세에 적응하기 위해서는 지적재산권에 대한 투입을 강화할 필요가 있다.

7 희토 관련 연구기관

국가 정책 및 경비 지원을 받아 중국은 희토 재료 분야에서 비교적 완비된 혁신 시스템을 형성하였으며 희토재료 국가중점실험실, 국가공정연구센터, 국가공정실험실, 기업기술연구개발센터 등 국가 및 성·부급 기술개발기지를 설립하였고 희토 채광, 선광, 야금, 자성, 광학 및 전기 등 희토 기능성 소재

의 연구개발과 분석 측정 특징 플랫폼을 구축하였으며 희토 신소재의 신속하고 지속적인 발전을 위해 강력한 보장을 제공하였다.

가. 국가중점실험실

중국 국가중점실험실은 원 국가계획위원회가 주도한 국가중점실험실을 설립함으로써 시작되었다. 1984년에 기초연구와 응용기초연구를 지원하기 위한 목적으로 원 국가계획위원회에서 국가중점실험실건설프로그램을 주도하여 실시하였는데, 주요 임무는 교육부, 중국과학원 등 부처의 관련 대학과 연구소에서 기존의 기초를 바탕으로 일부 국가실험실을 설립하는 것이다. 희토 연구 분야에서는 여러 개의 국가중점실험실가 설립되었는데, 이들은 다음의 기관들이 포함된다.

중국과학원 상하이규산염연구소 고성능 세라믹 및 초미세구조 국가중점실험실은 1988년에 중국과학원 상하이규산염연구소에 의존해 설립되었다. 실험실은 고성능세라믹재료 및 무기기능성 재료의 설계 원리, 합성 제조과정의 물리와 화학적 문제, 재료의 구성, 구조 및 특성 관계 및 재료의 특징과 평가 신방법 등에 대한 기초와 응용 기초 연구를 주요 연구 방향으로 한다.

1990년에 설립된 중국과학원 물리연구소 자력학국가중점실험실은 자성물리의 기초연구를 지도로 중요한 응용배경이 있는 재료 - 희토 전이금속간 화합물과 산화물, 스핀전자학 등을 중점으로 물질의 기본 자성과 자력 전기, 자기 열, 광자기 등의 효과 연구를 진행하고 미시적 전자구조, 메조포러스, 계면 및 복합상에서 거시적 자성 사이에 존재하는 내재적인 관계를 탐구하며, 신소재와 새로운 인공구조재료의 자성물리학을 탐구한다.

1991년에 설립된 북경대학 희토재료화학 및 응용 국가중점실험실은 희토 기초연구와 응용기초연구에 전문적으로 종사하는 국가중점실험실이다. 북경대학 화학학부의 희토화학연구센터와 무기화학 교습실에서 공동으로 희토발광재료팀을 구성하였고 이를 기반으로 설립한 것이다. 연구분야는 분자 및 조

립, 클러스터, 나노 및 상 등 다척도 구조 하에서 희토 기능성소재에 대한 거시적 특성 및 그 미시적 구조와의 연관성 연구, 희토 기능성 재료의 설계이론과 제어성 합성방법 연구, 탄소베이스 나노재료의 제조, 수식 및 구조제어방법, 신형의 광전기 전환, 수소저장, 촉매 및 고성능 전지 등 에너지재료 체계의 개발, 정보 저장, 운송, 전환 및 디스플레이 등 정보재료와 부품 개발, 생물학적 고분자 및 세포구조와 기능에 관한 다기능 탐침과 표기재료 연구, 희토 고효율, 청정 분리방법, 공정 설계 이론 및 응용연구 추진 등이 포함된다.

1992년 2월 국가계획위원회의 승인을 거쳐 중국과학원 푸지엔(福建)물질구조연구소 구조화학국가중점실험실의 전신 저명한 화학자 Lu Jiaxi(卢嘉锡) 원사가 개설한 푸지엔구조화학개방실험실로 1985년 중국과학원이 첫 번째로 설립한 개방실험실중의 하나이다. 구조화학 연구를 방향으로 현대 구조화학 연구방법으로 기능성 신소재에 대한 탐구 응용을 통해 신형 화합물을 합성하고 원자와 분자 수준에서 신형의 화합물의 분자와 원자구조 및 거시적 성능 간의 관계를 연구하며 그 응용전망을 탐구하고 신소재의 연구제작을 위해 지속적으로 원천기술을 제공하였다. 주요 연구내용은 원자클러스터화학, 기능성 화합물의 분자디자인, 나노재료의 구조화학, 무기-유기 하이브리드재료 및 초분자화학, 구조 감응형 재료에 대한 기초연구 등이 포함된다.

2007년 비준 설립된 희토 자원이용 국가중점실험실은 중국과학원 장춘응용화학연구소에 의존하여, 1987년 과학기술부의 승인을 받아 설립한 "희토화학 및 물리 중점실험실"을 기반으로 설립되었는데, 관련 연구역량과 관련 자원을 통폐합한 것이다. 유명한 희토 화학자 Ni Jiazuan(倪嘉缵) 원사와 Su Jiang(苏锵) 원사가 학술 방향을 파악하고 있다. 희토이론, 희토 기능성 소재, 희토 분리 및 희토 생물학 등 분야에서 획기적인 성과를 올렸다. 연구분야는 희토 유기-무기 하이브리드 광학, 전기, 자기 기능성 소재, 신형의 희토 및 전이 금속 나노 광전기 및 촉매재료의 구축 및 성능, 희토 기능 및 구조재료의 기초연구 및 응용, 알루미늄마그네슘 희토합금 및 그 다공성 복합재료 등이

포함된다.

2015년에 바오터우희토연구원을 기반으로 과학기술부의 승인을 받아 바이윈오보(白云鄂博) 희토자원연구 종합이용 국가중점실험실이 설립되었다. 희토의 채광 및 선광, 효율 청정제련기술, 희토 경질합금재료, 희토 자성 재료 및 응용, 희토 등 유가 자원 종합 재활용 등 분야에서 응용기초연구와 공통기술연구를 추진하며 국제, 국가 및 산업표준을 제정하여 중국의 희토산업 자주혁신능력과 전반적인 기술수준을 높이며 바이윈오보희토자원종합이용과정에서 존재하는 중요한 기술 애로사항을 해결하고 희토 과학연구와 희토산업의 빠른 발전을 선도한다. 실험실은 바이윈오보 희토자원에 대해 보다 과학적인 발전방향과 평가를 통해 희토 채굴, 제련, 재료, 종합이용 등 측면에서 응용기초 및 공통성기술연구를 수행하며 희토원소 응용의 불균형 문제에 대한 솔루션을 탐구하고 관련 표준을 제정 및 수정한다. 연구방향은 희토의 채굴 신공법, 신기술 연구, 희토광물 자원의 고효율 추출 청정 제련 기술연구, 희토 경질합금 재료 및 응용기술연구, 희토 자성재료 및 응용기술연구, 희토 고효율 청정 종합 재활용기술 연구 등 5대 분야에 미친다.

2015년에 과학기술부의 비준으로 설립된 안후이(安徽) 대지웅(大地熊)영구자석재료 국가중점실험실은 안휘이 대지웅 신소재업체를 중심으로 설립한 국가급 기업중점실험실이다. 이 실험실은 희토 영구자석 재료의 제조 및 방호기술 연구에 있어서 미래지향적이고 전략적이며 독창적인 연구를 수행하고 있으며 관련 산업의 공통기술과 핵심 기술난제를 돌파하였다.

나. 국가공정센터

국가공정센터는 국가발전개혁위원회가 설립한 국가공정연구센터와 과학기술부가 설립한 국가공정기술연구센터의 2가지 부류로 나뉜다. 그 중 국가공정연구센터는 국가과기혁신시스템의 중요한 구성부분으로 국가발전개혁위원회가 혁신형 국가와 산업구조 최적화 고도화의 중대 전략적 수요에 근거해

자주혁신능력 향상, 산업핵심경쟁력 및 발전저력 강화를 목적으로 강한 연구개발실력과 종합실력을 갖춘 대학, 연구소 및 기업 등을 조직하여 설립한 연구개발 실체를 가리킨다.

국가의 지원을 받아 희토산업은 선후로 2개 유형의 국가공정센터를 여러개 설립하였다. 1993년 원 국가계획위원회(과기부)의 승인을 받아 설립된 국가저성소재공정기술연구센터는 북경광산야금연구총원 산하의 베이쾅자성재료주식유한공사(北矿磁材科技股份有限公司)를 중심으로 설립하였다. 연구개발의 핵심은 고성능 사출 페라이트 자성 분말의 개발 및 응용, 고성능 압연 페라이트 자성 분말의 개발, 고성능 건식 프레스 소결 페라이트 자성 분말의 개발, 자기 기록 분말의 개발 및 산업화; 이방성 NdFeB, SmCo 희토 자기 분말 및 펠릿(pellet)의 개발 및 산업화, 전자기파 흡수 재료의 개발 및 산업화, 토너용 Fe3O4 자성 분말의 개발, 제품 중 환경 관련 유해 물질의 검출 기술 등이다.

1995년 원 국가계획위원회의 승인을 거쳐 세계은행의 대출을 받아 설립된 희토 재료 국가공정연구센터는 북경유색금속연구원을 중심으로 설립되었다. 주로 희토 광석 분해 및 정제, 고순도 희토 화합물, 희토 금속 및 합금, 발광재료, 자성 재료, 희토 생물 농업용 기술 및 기타 기능성 재료의 연구 개발 및 생산에 종사하고 있다. 고순도 희토 화합물, 희토 금속 및 기능성 재료의 2개 전문 실험실을 보유하고 있으며 희토 금속 및 합금재료, 희토 자성 재료, 희토 발광 재료, 희토 화합물 및 희토 바이오 농업용 재료 등 상당한 규모의 생산라인을 구축하였다.

2001년 전 국가계획위원회의 승인을 받아 희토 야금 및 기능성 재료 국가공정연구센터는 바오터우희토연구원을 기반으로 설립되었다. 희토 습식 제련 공법 및 환경 보호 공정 실험실 및 파일럿 생산라인, 희토 기능성 재료 공정 실험실 및 자기 변형 재료 파일럿 생산라인, 희토 분석 검출 센터, 희토 정보 서비스 센터 등이 있다. 희토 습식 야금 신공법, 신제품 및 환경 보호 기술,

특수 분말 재료 및 희토 화합물, 대형 희토 용융염 전해 공정 기술, 세트 설비, 희토 금속 중간 합금, 고순도 희토 금속 및 희토 금속 분말, 와이어, 막대재, 희토 영구 자석 재료, 희토 거대 자기 변형 재료, 희토 초고온 전기 가열 재료, 자기 냉동 재료 등에 대한 연구를 집중적으로 진행한다. 또한 희토 분석 방법에 대한 연구와 희토 정보 기술에 관한 연구도 수행한다.

2002년 과학기술부의 승인을 받아 국가 희토 영구 자석 모터 공정 기술 연구 센터가 선양(沈阳)공업대학을 기반으로 설립되었다. 희토 영구 자석 응용 분야와 첨단기술장비에 초점을 맞추며 다양한 희토 영구 자석 모터, 전기 제품 및 관련 제어 시스템의 연구 개발에 주력하고 있다.

2009년에는 국가발전개혁위원회가 승인한 선진에너지저장재료기술연구센터(先进储能材料国家工程研究中心)가 후난커리웬하이테크(湖南科力远高技术控股有限公司), 후난커리웬신에너지(湖南科力远新能源股份有限公司), 중난대학자산경영유한공사(中南大学资产经营有限公司), 진촨그룹(金川集团有限公司), 후난루이샹신소재(湖南瑞祥新材料股份有限公司)와 타이방테크[泰邦科技（深圳）有限公司]을 기반으로 설립되었다. 연구는 니켈계열 전지재료, 리튬계열 전지재료, 수퍼커패시터전지재료, 연료전지재료 및 신형 전통 전지재료 등 제조 핵심 공통성 기술, 공법과 장비 제조에 과한 연구개발 시스템 통합 등 분야에 집중되어 있다.

2012년에는 국가과기부의 승인을 받아 간저우희토그룹(赣州稀土集团有限公司), 간저우유색야금연구소(赣州有色冶金研究所), 장시이공대학(江西理工大学) 등을 기반으로 국가 이온형 희토자원 고효율 개발이용 공정기술연구센터가 설립되었다. 이온형 희토산업의 핵심, 기초 및 공통성 기술연구의 연구에 집중하고 있으며 주로 이온형 희토자원 청정 고효율 추출, 청정분리제련 및 2차자원회수이용, 희토광산지역 생태복구 및 환경치리, 희토원소의 균형적 이용 및 신형 희토재료 제조기술의 5개 방향에 대한 연구와 성과전환 응용 연구에 주력한다.

[표 1-2] 희토재료 우위 연구기관

유형		기관명	강점분야
기초연구 우위기관		베이징대학, 칭화(清华)대학, 베이징과기대학, 란저우(兰州)대학, 저장(浙江)대학, 산둥(山东)대학, 베이징화공대학, 중국과학원 물리연구소, 금속연구소, 닝보(宁波)재료연구소, 장춘(长春)응용화학연구소, 상하이광학정밀기기 및 물리연구소, 다롄(大连)화학연구소	희토재료 기초이론연구
공정화연구 우위기관		중국철강과기그룹유한공사, 철강연구총원, 안타이(安泰)과기	희토 자성재료
		베이징유색금속연구총원(有研稀土 포함)	희토 야금, 희토 자석, 광,
		바오터우(包头)희토연구원	희토 야금 및 재료
		호난(湖南) 희토금속재료연구원	희토 금속 제련
응용연구 우위기관		중커산환(中科三环), 닝보윈성(宁波韵升), 옌타이정하이(烟台正海)	희토 자성 재료
		샤먼텅스텐(厦门钨业), 베이징자동차신에너지(北汽新能源), BYD(比亚迪), Goldwind(金风科技), FAW그룹(一汽集团)	희토 수소저장재료
		Nationstar(国星光电), Shenzhen Optoelectronics(深圳光峰光电)	희토 발광재료
		Guizhou Sino-platinum(贵研铂业)	희토 촉매재료
		간저우희토그룹(赣州稀土集团), 중국희유희토그룹(中国稀有稀土集团), 우쾅희토그룹(五矿稀土集团)	희토 야금재료
국가급 R&D 플랫폼	실험실	베이징대학 희토화학 국가중점실험실	희토 야금, 희토 발광재료
		장춘응용화학 희토자원 고효율이용 국가중점실험실	희토 야금, 희토 발광재료
	연구센터	희토재료국가공정연구센터	희토 야금, 희토 자석, 광, 촉매 및 기타 재료
		희토 야금 및 재료 국가공정연구센터	희토 야금 및 재료
		국가 이온형 희토 자원 고효율 개발이용 공정기술연구센터	남방 이온형 희토광 야금

수십 년간의 개발 끝에 중국은 희토 재료에 대한 상대적으로 완비된 연구개발 시스템을 갖추었다. 해당 분야의 연구에 수십개의 대학, 연구소와 기업이 참여하며, 산학연협력방식으로 수많은 중대과학연구프로젝트가 수행되어

완료되었고 희토산업에 존재하는 중대 공통성 핵심기술 난제를 해결하였으며 많은 창의적인 연구성과가 성공적으로 산업화되어 희토산업의 급속한 발전을 크게 촉진시켰다. 중국의 희토 재료 연구개발 관련 우위기관은 표2에 열거했다.

제 2 장

희토 중점연구분야의 발전추세 및 전망

현재 중국은 희토 기초연구 및 산업화에서 일부 성과가 국제선진수준에 도달하였다. 그러나 전반적으로 미국, 유럽, 일본 등 선진국과 비교하였을 때 첨단 기술 확보에 있어서 어느 정도 격차가 있다. 많은 기초연구는 아직 추적 상태이며 연구성과나 혹은 첨단기술의 공정화 전환 응용에서는 여전히 취약한 편이다. 향후 장기간에 걸쳐 기초연구에서 중장기 응용프로젝트를 수행해야 하며 다음과 같은 연구분야에서 중점적으로 추진해야 한다.

자원 및 환경 문제는 희토 산업의 발전을 제약하는 중요한 문제이며, 희토 자원의 종합이용효율을 높이고, 환경오염을 줄이는 것은 여전히 중국 희토 산업의 미래 발전을 위한 변하지 않는 목표이다. 이 분야의 핵심은 희토 제련 및 분리 영역에서의 우위를 이용해 경제적인 희토 자원의 고효율 청정 제련 분리 기술 연구를 중점적으로 추진하여 원천으로부터 소비를 줄이고 폐가스, 폐수, 폐기물의 3폐 배출량을 줄이며 화공원료와 수자원의 재활용을 중요시하며 오염물의 제로방출을 실현하는 것이다. 희토 화합물 재료의 향후 발전의 핵심은 분말재료의 물리성능제어에 치우치며, 제품의 입자 및 분포, 형태, 분산 유동성능, 비표면적, 벌크 비중, 결정 유형, 결정상 구조 등 정량화 및 정성화 지표의 안정성 제어문제를 해결하는 것이다. 희토 건식제련의 연구개발 추세는 주로 여전히 에너지 소모절감, 고효율, 친환경 신형 제련공법, 숏 프로세스의 생산기술과 고성능 희토기능성 소재 개발에 필요한 초고순도 희토

금속의 저원가, 지능화 규모화 제조기술이다.

자주혁신능력을 높이고 지적재산권 보호를 중요시하며 희토 자성재료제조의 쾌속응고공법, 저산소제어공법, 미세구조제어공법, 중희토 함유량이 적은 공법, 고농축 희토 균형이용공법 및 상응한 합금 용융, 분쇄 및 밀링, 방향성 성형장비, 측정장비 및 가공설비, 신소재개발 및 산업응용 등에서 재적재산권 전략을 계획적으로 수립한다. 국가의 차세대 영구자석재료방안에는 제조과정용 신형 영구자석재료, 희토영구자석재료 성능 향상 및 제조비용을 낮추는 복합신소재시스템, 공간적 시간적 변화를 예측하기 위한 모델링 및 시뮬레이션 툴 등이 포함되어야 한다. 희토 영구자석재료의 재활용과 지속가능한 발전을 중요시하고 상대적으로 완비된 희토영구자석재료 재활용산업을 형성하며 중국의 희토자원을 더욱 합리적으로 이용한다. 중국의 희토영구자석재료의 발전을 새로운 차원으로 끌어올리고 희토 영구자석대국에서 국제적 영향력이 있는 희토영구자석재료 강국으로 매진한다.

자기, 힘, 전기 및 기타 멀티 필드 냉각 및 커플링 열 효과의 개발을 진행하여 다중 물리장 자기 구역, 위상 인터페이스, 결정립 경계 등으로부터 상 변형 핵형성 및 성장 메커니즘에 대한 연구를 진행한다. 다중 여기 조건 하에서의 자기열재료의 단열 온도 변화 동력학에 대한 연구를 진행한다. 전자 구조, 변형층 왜곡 에너지, 부피 효과, 에피택시 파라미터 제어 등에 대한 연구와 이력(hysteresis) 현상을 제어한다. 자기 냉동 재료의 분말 야금 (소결 및 핫 프레스)에 대한 연구를 강화하고, 특히 금속 매트릭스 복합 재료 및 중합체 본딩과 같은 특수 공정 연구를 진행한다. 사출 성형, 분말 압연 및 3D 프린팅과 같은 자기 발열 재료 성형에 적합한 신기술을 적극적으로 개발한다.

페라이트 재료보다 평면 희토 마이크로파 자성 재료의 단점은 벌크 재료의 저항이 너무 작다는 것인데(약 1 ~ 102 Ù·cm), 이러한 어려움에 대한 해결책은 최근 수년간 급속히 발전된 미세 분말 (나노) 제조 기술과 분말 야금 기술을 채택하여 미크론 및 서브 미크론 크기의 자성 분말 복합 재료를 만들어

우수한 고유 자기 특성 및 고주파 마이크로파 자기 특성을 유지하는 전제하에 복합 재료의 고유 저항을 크게 높일 수 있으며, 오랫동안 응용 되어온 페라이트 마이크로파 자성 재료를 대체하여 마이크로파 장치의 부피와 무게를 줄이는 동시에 성능을 향상시킬 수 있다.

희토의 거대 자기 변형 재료는 자기 왜곡이 크고 자기 - 기계 결합 계수가 높고 에너지 밀도가 높으며 베어링 압력이 높고 응답 속도가 빠르며 신빙성이 높고 구동방식이 단순한 등 특징을 지니기 때문에 부품 개발자와 설계자들이 선호한다. 정밀 구동 및 중부하 구동과 같은 구동 방식의 실현은 새로운 솔루션을 제공한다. 현재 이 소재는 국방 및 국가 경제 발전의 여러 분야에서 널리 응용되고 있다. 미래에는 희토 자기 왜곡 재료의 다중 장 결합 조건 하에서 비선형 히스테리시스(hysteresis), 온도 안정성 및 성능 특성을 개선하여 소자 성능을 향상시키고 재료 응용을 더욱 증진시키는 소자 설계의 관점에서 재료를 개발할 필요가 있다.

환경 보호와 신에너지 기술이 갈수록 주목받으면서 촉매 재료를 핵심으로 하는 촉매 기술에 대한 요구가 높아지고 있다. 예를 들어 원유가 갈수록 중질화되는 전제하에서 저올레핀과 저유황 함량의 청정 가솔린 생산 기술, 석유를 대체가능한 에너지이용 신기술 개발을 통한 전통 석유에 대한 의존도 낮춤, 석탄가스와 유전 가스 등 경질올레핀의 고품질 이용 기술 개발, 동력차량의 갈수록 엄격해지는 배출규제를 위해 높은 활성, 고안정성, 저렴한 비용의 배기가스정화촉매제 제공, 휘발성 유기물(VOCs) 정화기술, 특히 염소 등 불순물 원자의 분해가 힘들고, 독성 오염물의 정화 등 기술, 바이오매스의 고효율 이용, CO2의 이용 등이 그러하다. 이러한 공정의 돌파구는 고성능 촉매제 체계의 개발에 의존해야 한다.

동시에, 환경 보호와 에너지 화공 분야에 미치는 반응 과정의 복잡성으로 인해, 예를 들어 자동차의 배기가스 정화과정에서 산화, 환원 및 개질 등의 많은 반응 공정에서 디젤 차량 배기가스의 정화과정에서의 고상 - 기상 - 고

상의 다상 촉매반응, 휘발성 유기 화합물 (VOCs)의 정화 과정에서의 큰 공간 속도, 낮은 농도, 다양한 작업조건 등, 청정연료 생산의 고효율 "분자정제"기술, 탄소화공 및 바이오매스 연료 생산과정과 관련된 다양한 화학반응과 기상-액상-고상 3상 촉매반응 등은 촉매제 및 응용기술에 대해서도 더욱 높은 요구를 제시하였다. 이는 복잡한 반응조건에서 희토의 촉매활성 센터에 대한 수식과 조절제어메커니즘을 명확히 하였으며 응용과정에서 희토의 촉매작용을 충분히 발휘하고 다양한 복합성분의 다양한 기능이 집적된 촉매제 체계를 개발하여 희토촉매재료와 관련 분야의 기술혁신과 기술진보를 촉진시키며 희토촉매재료의 응용 영역을 적극적으로 개척해야 한다.

희토 수소 저장 재료는 중요한 에너지 저장, 운송 및 전환 신소재이며, 또한 중국의 풍부한 La 및 Ce 희토 자원의 주요 응용 분야 중 하나이다. 따라서 희토 수소에너지저장재료의 개발사업을 지속적으로 추진하고 기술수준을 높이며 응용범위를 확대하는 것은 국가 에너지구조의 합리적인 조정과 자원의 균형적이고 효율적인 이용을 촉진시키는데에 중요한 현실적 의의를 지닌다. 향후 몇 년간 희토 수소저장재료는 다음의 몇가지 측면에서 발전을 추진해야 한다. 첫째, 이론적 관점에서 재료의 구성, 구조 및 성능 사이의 관계를 탐구하고, 실험 결과 및 법칙을 체계적으로 도출하며, 재료 응용과정에서 존재하는 주된 문제점을 연구하고 솔루션을 제시하며 재료의 개발 및 응용 등 사업을 지도한다. 둘째, 전기자동차 동력니켈수소전지와 낮은 자체방전 니켈수소전지용 희토수소저장재료 핵심기술을 돌파하여 선진국 기술수준을 따라잡는다. 셋째, 독자적 지재권을 보유한 희토 수소저장재료 체계의 구축 및 산업화 실현에 주력하며 재료제조 신기술, 신공법, 신규 장비를 적극적으로 개발한다.

최근 몇 년간 청자색 LED (405nm, 395nm)와 장파 UV LED가 크게 발전하여 백색광 LED을 발전시키는 또 다른 하나의 선진 솔루션으로 각광받고 있다. 향후 청자색 광 또는 장파 UV LED의 효율을 획기적으로 향상시킴에

따라 더욱 선진적인 3원색 백색광 LED를 실현할 수 있을 것으로 보인다. 많은 효율적인 형광체를 선택할 수 있기 때문에 그들의 발광효율은 황색광 YAG : Ce 형광체보다 훨씬 높다.

유기 전계 발광 소자(OELD)가 차세대 평면 패널 디스플레이를 구현하는데 성공하여 업계의 주목을 받고 있다. 국제적으로 OLED 디스플레이의 발전은 최근 2년 동안 급속히 발전해 왔으며 LCD(Liquid Crystal Display)와 한동안 경쟁 관계였다. 효율적인 유기 또는 무기 UV EL 재료는 특정 신기술 개발의 원천으로 응용될 수 있다. 새로운 고효율 형광체는 새로운 진보를 가져올 것이며 이러한 장치의 성능을 새로운 차원으로 끌어 올릴 것이다. 희토 상향 변환 나노 - 발광 재료, 희토 유기 및 복합 형광 재료는 태양 에너지 이용, 바이오 이미징, 검출 및 센서 분야에서 널리 응용될 것이다.

희토발광재료는 30년간의 발전과정을 거쳐 정보디스플레이, 조명공정, 광전자 등 산업의 핵심재료로 발전하였다. 발광재료의 발전 및 기타 영역에서의 첨단기술과의 유기적인 결합을 통해 지적재산권이 있는 신기술과 새로운 산업을 태동 및 발전시켰다. 중국은 우수한 연구인력과 산업기반 그리고 원자재의 공급확보가 가능하기에 정부의 강력한 지원하에 선진국과의 격차를 줄이고 있으며 희토발광재료의 발전을 새로운 차원으로 끌어올렸다. 향후 보다 심도 있는 연구가 추진됨에 따라 경제의 발전에 더욱 큰 기여를 할 것으로 보인다.

YBCO 박막의 경우 일부 특정 응용 가운데서 기질의 양면에 막을 형성하여 부품의 성능을 높일 필요가 있다. 예를 들면 YBCO를 일부 필터의 집지면으로 사용하면 삽입 손실을 30%까지 줄일 수 있기 때문에 YBCO 양면 박막은 초전도박막 연구의 핵심이면서 인기 연구과제가 되었다. 제2세대 고온 초전도 밴드재가 향후 산업화를 실현할 수 있는지 여부는 비용을 대폭 절감할 수 있는지 여부에 달려 있으며 비용을 절감하는 경로는 가격대성능비와 완제품률 및 새로운 저비용 생산기술을 향상하는 것이다. 1986년에 희토산화물

초전도체가 발견되어 30년동안 심도 있는 연구를 거쳐 제조된 박막, 스트립, 블록 등이 점차 상용화단계에 들어섰다. 최근에는 희토 고온 초전도재료 제조기술의 진보와 재료성능의 개선 및 제조비용의 절감이 이루어지면서 초전도기술의 응용이 크게 촉진될 것이다. 중국의 송전선로를 전부다 초전도케이블을 응용한다면 연간 400억위안의 비용을 절약할 수 있다. 초전도 코일자석은 모터의 자기장 강도를 5T까지 증가시킬 수 있어 초전도 발전기의 발전 용량은 기존의 발전기보다 5~10배 높이고 부피를 절반정도 줄이며 무게를 1/3 줄이고 발전효율을 50% 높일 수 있다. 고 자기장 초전도 자석은 자기부상열차, 자기분리장치, 고에너지 가속기, 핵융합장치, 기뢰제거(mine sweeping, 소해)기술, 자기공명영상, 자기공명 및 자기유체추진 등에서 중요한 응용가치를 지닌다. 초전도 필터 서브시스템의 3C 이동통신시스템은 커버 영역, 용량, 비트오류율, 항간섭능력 및 수신기 전력 등에서 3C 시스템의 원래 성능을 크게 개선하였음이 입증되었으며, 미래 이동통신영역에서 잠재적인 응용전망이 있다.

희토 섬광 결정에서 희토화합물 섬광 결정과 희토 산화물 섬광 결정이 병행 발전하는 추세이다. 재료의 구조는 단결정 벌크 재료에서 다결정, 박막, 어레이 및 섬광 섬유의 방향으로 발전하고 있다. 탐지가능한 방사선 또한 감마선과 X선을 탐지하던데서 중성자, 양성자 및 기타 다양한 입자가 공존하는 혼합필드 탐지가 가능해졌다. 핵의학 및 보안테스트 등의 신흥 민간기술은 고에너지 물리를 대체하여 섬광 결정재료의 발전을 추진하는 주요 추진력이 되었다. 특히 많은 세계 일류의 연구기관은 단일 재료 제조에서 검출기의 설계, 가공 및 일체화 집적의 방향으로 확장되고 있는데, 이는 재료 개발의 타당성, 유효성과 선도성을 크게 향상시킬 것이다.

희토는 특별한 용광로 정제 용제로서 특수강 생산과정에서 중요한 역할을 한다. 현재 제철 회사는 희토의 우수한 혼합 개질제와 강력한 마이크로 합금원소의 특징을 충분히 활용하여 실리콘과 칼슘을 대체하고 있는데, 이는 가장

유망한 합금방법이라 할 수 있다. 희토 구상흑연주철 영역에서 구상화 처리기술의 진보에 따라 중국은 G.F method, tundish-cover method, Magnesium injection method, cored-wire injection method 등 새로운 구상화 처리공정을 갈수록 많이 응용하고 있으며, 이트륨 기반 중희토의 후판 구상주철중에서의 응용기술 연구를 중점적으로 강화하고 있다. ADI와 CADI의 응용을 강화하며, 초대형, 대단면, 복잡구조, 고성능 주철부품의 발전 및 원료의 복잡성으로 인해 희토의 주철에서의 응용에 대한 요구가 갈수록 높아졌다. 이에 대응하여 고품질의 안정된 성분의 용철의 제련, 측정 및 제어기술, 선진적이고 안정적인 구상화기술, 잉태기술은 기초보장조건이기 때문에 연구와 제조를 크게 강화해야 한다.

현재, 마그네슘 합금의 발전은 고온 내열성 고강도 마그네슘 합금을 발전시키는 추세가 더욱 강하며, 희토 마그네슘 합금은 일반적으로 고온 내열성이 좋으며, 많은 희토 마그네슘 합금 또한 강도가 높다. 그러나, 주조 마그네슘 합금의 경우, 그 강도는 일반적으로 400MPa 미만이며, 주조 희토 마그네슘 합금은 많은 분야에서 잠재적 응용 가치가 크다. 따라서, 고강도 및 고인성 마그네슘 합금의 설계 및 개발은 현재 및 미래의 중요한 연구 및 발전 방향이 되었다. 향후 희토 마그네슘 합금의 연구방향은 주로 다음의 몇가지에 초점을 맞출 것이다. 첫째, 희토 원소에 의한 마그네슘 합금의 강인화, 부식방지 및 크리프 내성 작용메커니즘에 대한 연구, 둘째, 희토 마그네슘 합금 최적화, 다성분 희토원소의 마그네슘합금에 대한 복합 초기화작용 연구 및 고강도 희토 마그네슘합금 개발, 셋째, 선진 합금제조공법을 채택, 다이캐스팅, 급냉응고, 심층 소성변형공법 및 변형 열처리 등 과정을 통해 희토마그네슘 성능 진일보 향상, 넷째, 희토 마그네슘합금의 수소동력자동차의 수소저장 매체응용, 순환 안정성 불량, 높은 수소 흡수 및 방출 온도 및 느린 수소 흡수 및 방출 속도 등의 단점을 극복하기 위한 연구, 다섯째, 희료용 희토 마그네슘합금 연구 수행, 바이오의료용 재료로서의 희토마그네슘합금 독성 평가, 인성 및 내

부식성 개선, 분해 억제능력 향상 등이 그것이다.

현재 광전자 제품은 고화질, 고해상도, 소형화 혹은 대형화, 높은 대비도, 고휘도의 방향으로 발전하며, 광학영상재료의 착색도, 내부 투과율 등에 대해 많은 새로운 요구를 제기하였다. 란타늄계열 광학유리 특히 nd1.95이상의 중바륨 플린트는 광학일치성(2×10-5), 착색도(390/410 미만) 및 줄무늬(B급) 등 지표에 대한 요구가 지속적으로 높아지면서 제조비용 절감(희토 원재료 사용량 감소) 등을 중요시하고 있다. 제련생산공정이 지속적으로 혁신을 이루면서 백금 용융, 2차 제련, 정밀 성형 등 신규 공정은 유리생산량과 품질을 신속히 향상시켰고 제품 성능의 극한이 끊임없이 경신되었다.

발광투명세라믹은 현재 세계적인 주목을 받는 첨단재료이며, 또한 향후 첨단 희토 세라믹재료의 발전방향이기도 하다. 예를 들면 레이저 투명 세라믹은 고체 레이저 및 대출력 레이저 광원/ 무기의 관건으로 섬광 투명 세라믹은 테러방지, 의료 검진 및 고에너지 물리학 등과 밀접한 연관이 있다. LED 투명 세라믹의 백색광 LED는 21세기의 그린 조명광원으로 세계 각국에서 국가발전전략계획에 포함시켰다. 따라서 희토계 발광투명세라믹산업은 향후 첨단 희토재료산업 및 신형의 희토 세라믹 재료발전의 주요 방향이 될 것이다.

최근 몇 년간 중국의 희토 거시 경제 발전 전략이 강화되고 기초 연구 및 기술 개발 투입 또한 지속적으로 증가되고 있으며 응용 수준도 점차 높아지고 있다. 중국은 희토 자원이 풍부한 국가로 자원 우위를 연구개발과 생산 우위 및 경제적 우위로 전환하는 것이 발전 목표이다. 이러한 목표를 달성하기 위해서는 중국의 희토 산학연 기초연구개발수준을 높이고 제품 품질을 향상시키며 나아가 선도적인 공정화 응용기술을 개발하는 것이 근본적인 돌파구이다.

제 3 장

한·중 협력 및 공동연구과제에 대한 제언

1 배경

경제의 글로벌화, 혁신자원과 혁신활동의 국제화가 이루어지면서 국제과기협력 수요가 더욱 뚜렷해졌다. 세계 각국은 국제 과기협력을 통해 전 세계적으로 가장 우위를 갖춘 생산요소와 가장 선진적인 과기성과를 모색하고 있다. 개혁개방 40년 동안 중국정부도 국제 과기협력을 중요시해왔으며 정책 선도와 프로그램 실시 등의 다양한 방식으로 협력을 지속적으로 추진시키고 있으며 포괄적이고 다양한 채널의 다자간의 고차원적인 국제과기협력구도를 갖추고 있다.

과학기술부가 발표한 "13.5 국제과학기술혁신협력 전문계획"에서는 현재 세계 경제가 우여곡절 속에서 회복을 이어가고 있는 가운데 차기의 과기혁명과 산업 변화가 촉발되면서 글로벌 거버넌스체계의 심각한 변화를 겪고 있으며 혁신을 통한 지속가능한 발전 추진은 전 세계적인 공감대를 형성하였다고 밝혔다. 그리고 과기혁신활동은 지역이나 기구 또는 기술의 한계에서 벗어났으며, 전 세계적인 범위에서 혁신적인 요소의 흐름은 전례없이 활발해졌기 때문에 지구적이고 광범위하며 심층적인 국제협력은 전 세계적인 도전에 능동

적으로 대응하고 경제성장과 지속가능한 발전을 실현하는데 필수적인 경로가 되었다. 이에 국제과기혁신협력은 새로운 시기에 상생협력을 중심으로 한 새로운 형태의 국제관계를 구축하기 위한 중요한 경로인 동시에 중국이 글로벌 거버넌스에 적극적으로 참여하고 글로벌 혁신네트워크에 융합되며 국가 외교 전략의 이행을 보장하는 효과적인 경로가 되었다.

중국 희토협회 (China Rare Earth Association)가 제정한 희토산업개발 계획 (2016-2020)에서도 국제 과학 기술 협력을 중요한 내용으로 다루고 있다. 세부적으로는 다음과 같은 내용을 기술하고 있다. ① 희토분야의 국제협력을 강화하고 희토 관련기업과 해외 신소재기업 및 기술개발기구와의 협력을 통해 국제화 운영능력을 높이도록 지원한다. ② 해외 전문인력, 선진기술과 관리경험을 도입하고 희토 환경치유와 첨단응용 및 제품제조산업 등 영역으로의 외국인 투자를 유치한다. ③ 희토표준의 국제화를 추진하고 희토산업 고도화를 둘러싸고 희토표준의 제정을 강화하며 기업, 연구기관과 중개기구의 역할을 이행하며 중국 희토표준의 영향력을 높이고 중국표준의 해외진출을 촉진시키며 희토표준과 국제표준과 연계한다. ④ 대외교류 및 협력을 강화하고 기업이 자사의 기술과 관리우위 및 특허, 표준 등 기술수단을 이용하여 해외의 희토자원개발 및 재료 정밀가공 프로젝트와의 협력을 추진한다. ⑤ 정부간, 기업간의 의사소통과 교류를 증진시키고 "대외진출" 기업에 대한 협조를 강화하며 국제협력프로젝트의 수준을 높인다. ⑥ 국제금융기구와의 협력을 강화하고 희토기업에 대한 국제협력 및 융자지원을 강화한다.

현재까지 국제혁신단지, 국제공동연구센터, 국제기술이전센터 및 시범형 국제과기협력기지를 포함하여 549개의 국제과기협력기지를 설립하였다. 중국은 158개의 국가 및 지역과 과기협력관계를 구축하였으며 111개의 정부간 과기협력협정을 체결하였으며 200여개의 정부간 국제과기협력기구에 가입하였고 전 세계의 주요 국가, 지역 및 국제기구를 포괄하는 안정된 정부간 협력 메커니즘을 구축하였다.

2 희토분야 국제 과학기술협력 현황

중국과학기술부와 국가자연기금위원회 (현재 과학기술부에 합병됨)는 중국이 국제협력 추진을 주관하는 부처로서 국제과기협력전문프로그램을 운영하고 있다. 국제과기협력프로젝트는 중국정부가 국제과기협력을 촉진시키는 중요한 방식으로서 국가차원에서 해외의 혁신자원을 효과적으로 이용하고 해외 협동혁신을 추진하는 중요한 플랫폼이다. 국제과기협력의 지속적인 발전에 힘입어 중국은 국제과기협력프로젝트에 대한 지원을 지속적으로 강화하고 있으며, 프로젝트의 협력규모, 협력범위가 지속적으로 확대되고 있다. 과학기술부 및 관련 기능기구가 지정한 "국가지정 국제과기협력기지"의 경우, 주관 기관은 주로 국가국제과기협력사업 수행과정에서 뛰어난 성과를 올렸거나 발전 잠재력 또는 시범선도역할이 있는 과학기술단지(사이언스파크), 연구기관, 대학교, 혁신형 기업 또는 과기중개기구 등이다.

희토재료의 국제과기협력은 주로 희토 신소재 및 응용 연구에 집중되어 있는데, 예를 들면 자성재료 및 응용연구, 특수 희토자성재료 예를 들면 희토자기냉각재료, 희토 자기변형재료 및 응용연구, 희토 수소저장재료 및 니켈수소전지, 연료전지, 운송 및 수소정화 등 신에너지 영역에서의 응용연구, 희토발광재료 및 응용, 희토 초전도재료, 희토결정재료, 희토세라믹재료 등의 응용연구, 희토 연마재료, 희토의 비철금속, 농축산업 등 기타 영역에서의 응용연구, 관련 측정장비의 연구제작 등에 집중되어 있다. 중국의 많은 대학 또는 연구소의 연구원이나 기업의 기술인력들은 해외의 학자 또는 연구자들과 장기적이고 안정적인 연구개발프로젝트에 대한 협력과 심층적인 학술교류를 추진하고 있다.

2007년 과학기술부와 국가외국인전문가국이 북경유색금속연구총원에 국제과기협력공동연구개발센터- 한중신소재공동연구센터 설립을 허가하였고

2008년에 북경유색금속연구총원에서 국제공동연구센터 현판식을 가졌다. 이 센터는 1997년에 한·중 양국 과기부가 승인한 한중신소재협력센터 사업을 기반으로 설립한 것으로, 한국과의 협력에 있어서 경금속재료에 중점을 두었으며, 또한 반도체재료, 신에너지재료 등 영역에서는 영국, 러시아, 독일, 프랑스, 일본과의 협력 및 교류를 적극적으로 추진하였다. 이와 동시에 대외협력 과정에서 핵심기술인재양성과 직접 도입에 중점을 두었으며 프로젝트 협력플랫폼을 이용한 고급연구개발인재를 양성하였고 기지-프로젝트-인재양성이 유기적으로 연계된 패턴을 갖추었다. 이 센터는 현재 연구개발인력이 1000여명에 달하는데, 중국 비철금속산업에서 규모가 가장 큰 종합연구개발기구로서, 주로 반도체재료, 희토야금 및 재료, 희소금속 및 귀금속재료, 경금속재료 및 합금재료 등 다양한 레벨과 다양한 영역을 아우르는 연구개발을 수행하고 있다.

2009년 12월, 과학기술부의 인정을 받아 바오터우희토연구원(Baotou Rare Earth Research Institute)을 중심으로 희토 재료 국제 과기협력기지를 설립하였다. 이를 토대로 바오터우희토연구원은 과기협력 분야를 지속적으로 확대해왔으며 이후로 한국, 미국, 이태리, 일본, 유럽, 몽고 등 국가들과 희토원소의 분리추출, 수소저장재료, 희토자기냉각재료, 희토자기변형재료 및 희토의 농업분야에서의 응용 등 다양한 영역에서 유익한 협력을 추진하였고 국제과기협력프로젝트를 다수 공동 수행하였다. 희토 습식야금, 희토 건식야금, 관련 환경보호 공정연구, 희토기능성소재, 희토경질합금, 희토의 농업분야에서의 응용연구, 희토분석측정기술 등 분야에서 과기부 국제협력프로젝트를 10여건 수행하였다. 바오터우희토연구원은 희토재료 국제과기협력기지 플랫폼을 활용하여 유럽, 미국, 일본 등 선진국의 희토재료 관련 선진기술 및 장비를 파악하였고 소화흡수를 통해 자체의 기술개발수준을 높였으며 새로운 연구 분야를 개척하였다. 이와 동시에 몽고국, 베트남 등 개발도상국에 기술지원과 성과이전을 통해 해외의 희토자원의 탐사, 개발 이용을 위한 기술지원

을 제공하였다.

이외에도, 안타이과기주식유한공사(安泰科技股份有限公司)를 중심으로 설립한 "선진 금속 재료 국제 과학기술 협력기지"가 있다. 이는 2016년에 과학기술부 국제협력부에 의해 인증된 국제과학기술협력기지이다. 첨단금속재료의 주요 사업에 중점을 두며, 연구분야는 나노에너지재료, 분말야금, 자성소재, 초경질재료 및 생체의료용재료 등 다양한 분야를 아우른다. 다수의 대학, 연구소 및 해외 유명기업들과 "선진 재료 연구 및 개발 전략적 협력" 파트너십 관계를 맺었다. 국가천인계획, 전문가 영입 등 채널을 통해 업계에서 다양한 유형의 국제 과학기술 인재를 도입하였으며 기업의 연구개발역량을 더욱 강화시키고 있다.

3 희토분야 한·중 협력추진과정

한·중 양국은 희토분야에서 밀접한 과학기술 교류와 협력관계를 맺고 유지해왔다. 양국간 협력에는 공동연구과제의 수행, 방문학자의 정기적 파견, 유학생 및 학술세미나 개최 등의 다양한 방식이 있다. 문화 및 생활습관이 유사하기 때문에 양국간의 유학생과 방문학자의 교류가 활발히 이루어지고 있다. 구체적인 통계를 내오기는 힘들지만 한중과학기술협력센터와 바오터우희토연구원의 교류와 협력을 가장 대표적인 사례로 들 수 있다.

양 기관의 교류는 2009년 상반기에 이춘근 전 한중과학기술협력센터장의 바오터우희토연구원 기관방문으로 시작되었다. 2010년 12월 8일, 한중양국간의 희토분야 협력가능성을 검토하기 위해 이춘근 전 한중과학기술협력센터 수석대표를 포함한 한국대표단 일행이 바오터우희토연구원을 재차 방문하였다.

바오터우희토연구원은 1963년에 설립되어, 원 야금공업부에 소속되었다가, 1992년도에 조직개편을 통해 바오강희토그룹[包鋼(集團)公司]에 합병되었다. 이 연구원은 세계 최대의 희토광산으로 알려진 바이윈어버(白云鄂博) 광산에서 입지적으로 가장 가까이 위치해 있으며, 현재 중국 최대 규모의 희토류 전문 연구기관이다.

2011년 4월 7일 이춘근 수석대표는 바오터우희토연구원과 협력협정서(MOU)를 체결하고, 한·중 양국간의 과학기술교류와 희토류 협력을 증진하기 위해 폭넓은 교류를 진행하며, 향후 다양한 형태의 장기적인 협력을 추진하기로 합의하였다.

2011년 7월 31일부터 8월 6일까지 한중과학기술협력센터의 주선으로 바오터우희토연구원 기술조사단 일행이 한국을 방문하였다. 방문기간 포스코(POSCO), 포항산업과학연구원(RIST), 한국재료연구소(KIMS), 한국지질자원연구원(KIGAM), 삼성전자, 한국광해관리공단(MIRECO) 등 기관들을 방문하고 교류가 이루어졌다.

2011년 8월 25일, POSCO, RIST 방문단 일행 12명이 바오강희토그룹과 바오터우희토연구원을 방문하고 희토신소재, 희토마그네슘합금, 희토분리추출, 희토분석측정기술, 환경오염치유 등 다양한 주제를 둘러싸고 폭넓은 토론을 펼쳤다. 이번 방문을 통해 양측은 상호 기술진보 촉진, 호혜호리를 전제로 한 협력추진에 공감대를 형성하였다. 권오전 전 포스코 회장과 주웅용 전 RIST 원장이 각각 2012년 8월과 2013년 2월에 바오터우희토연구원을 방문하고 MOU를 체결하였다.

2012년 8월 8일~10일, 제4회 중국(국제)희토산업포럼이 "글로벌 희토 신소재산업 발전 및 윈윈"을 주제로 내몽고 바오터우시에서 개최되었다. 한·중 양국간 희토분야의 협력을 촉진하기 위하는 취지에서 한중과학기술협력센터는 한국지질자원연구원, 한국재료연구소, 한국화학연구소, 한국포항산업연구

원을 대표로 하는 연구기관과 삼성, POSCO, SK, LG 등을 대표로 하는 기업 대표 40여명의 한국대표단을 구성하여 이번 행사에 참가시켰다. 행사기간 희토연구원을 방문하여 희토연구원으로부터 전반적인 연구현황을 소개받았고, 양국 전문가 간 서로가 관심을 갖는 연구분야를 둘러싸고 교류의 시간을 가졌다.

희토연구원방문이 끝난 후, 한국참석자들은 양국 간에 희토분야에서 학술차원의 연구개발과제 도출이나 산업차원의 협력사업을 발굴해나가기 위해서는 우선적으로 대등한 입장에서 대화가 이루어져야 하며, 선제적 대응책 마련으로 한국은 협회나 학회 혹은 연구회와 같은 조직의 발족이 필요하다는 공감대를 형성하였다.

희토산업포럼은 1년에 한번씩 개최되는 희토산업계의 대표적인 행사로, 2011년까지만 해도 중국 자국의 업체들만 참가하는 행사에 불과하였으나, 2012년에는 처음으로 국제포럼으로 격상시켰다. 행사규모 면에서도 2011년에는 포럼 참석자가 500명 정도였지만 2012년에는 2배가 넘는 1,200명에 달하였다. 해외 15개 국가의 해외참석자가 130여 명에 달하였다.

한중과학기술협력센터는 2013년 4월 11일 한국생산기술연구원과 "제4회 한·중 국제 워크샵"을 인천에서 공동 개최하고, 중국 희유금속 산업과 국내 희유금속 업계가 함께 나아가야 할 방향을 토의했다. 이를 위해 한중과학기술협력센터는 중국 바오터우강철그룹 자오증치(趙增祺) 전 부총공정사, 바오터우희토연구원 마지홍(馬志鴻) 전 부원장, 중국과학원 장춘응용화학연구소 린쥔(林君) 박사, 천지(陳繼) 박사 등 4명의 희토전문가를 초청하여 회의에서 학술 논문을 발표하였다. 또한 한국 생산기술연구원, 한국지질자원연구원, 인천대학교 등 한국측 전문가들과 자원-소재-제품-재활용에 이르는 희소금속 산업 전반의 핵심 쟁점들을 두루 짚어보고 양국간 협력방안을 모색했다.

2015년 9월 7일 한중과학기술협력센터의 주최로 "2015년 한·중 희토전문

가포럼"이 베이징에서 개최되었다. "희토산업 기술혁신과 산업사슬 연장"을 주제로 개최된 이번 회의에서는 김택수 생산기술연구원 한국희소금속산업기술센터 전 소장, 박병권 한국해양과학기술원 전 이사장, 이진영 한국지질자원연구원 박사를 포함한 한국측 발표자 5명과, 마즈홍 바오터우희토연구원 전 부원장, 우원위안(吴文遠) 동북대학 교수, 장양환(張羊換) 북경강철연구총원 기능성재료연구소 교수 등 중국측 발표자 3명이 각각 발표를 하였다. 양국의 희토전문가와 기업대표 40여명이 참석한 가운데 희토자원과 산업 발전현황을 소개하고 서로의 연구성과를 공유하며 협력 가능성에 대해 논의하였다.

2016년 10월 14일 한중과기협력센터는 내몽고자치구 바오터우시에서 바오터우희토연구원과 공동으로 "한중 신소재 발전현황 및 협력전망"을 주제로 한 한·중 신소재세미나를 개최하였다. 이번 세미나에서 방건웅 한국뉴욕주립대학 교수, 반봉찬 한국뉴욕주립대학 교수, 김택수 한국희소금속산업기술센터 소장, 마지홍 바오터우희토연구원 부원장, 추이젠궈(崔建國) 바오터우희토연구원 습식야금연구소 부소장, 왕옌(王艷) 바오터우희토연구원 습식야금연구소 희토촉매재료실험실 엔지니어 등 한중 전문가들이 신소재 분야 특히 희토 응용기술을 포함한 최신성과와 관련 정책을 둘러싸고 협력가능성에 대해 토론하였다.

10년간의 지속적인 교류를 통해 한중과학기술협력센터와 바오터우희토연구원은 돈독한 협력관계를 맺었을 뿐만 아니라 상호 신뢰를 바탕으로 향후 실질적인 협력추진을 위한 탄탄한 기반을 다져놓았다.

장기적인 국제과기협력과 교류는 중국의 대외 희토응용수준의 향상과 희토산업의 발전을 크게 촉진시켰다. 자체의 노력과 적극적인 대외개방과 교류를 통해 중국의 희토 연구개발수준은 주목할만한 진전을 이뤘으며, 일부 분야의 기술수준은 국제수준에 도달하였으며 특정 분야에서는 세계적으로 선도적인 기술을 확보하였다. 현재 중국의 희토 선광, 추출분리 및 야금기술은 국제선두수준을 자랑하며 독자적 지적재산권을 보유한 희토 선광, 고효율 청정추출

및 희토금속 심층 제련기술과 전용장비 및 희토자원의 종합이용기술을 개발하였다. 중국의 희토산업은 40년 남짓한 건설과 발전을 거쳐 광제품, 제련가공제품 및 후가공제품의 생산에서 연구개발 및 보급응용에 이르는 비교적 완비된 희토산업시스템을 갖추었다. 신소재 및 그 응용제품에서 빠른 발전을 이루어내었으며 일부 성숙된 희토 신소재분야에서 그 규모 효과가 가시화되었다. 중국은 세계 최대의 희토재료 생산국과 공급국으로 위상을 굳혔다.

그러나 대부분의 희토 신소재의 지적재산권은 미국, 일본이나 유럽의 주요 국가들에 의해 확보되어 있으며, 희토응용분야의 핵심기술의 대부분은 해외에 의해 통제되고 있다. 예를 들면 석유화학분야의 희토 크래킹 촉매제, 교통분야의 자동차 배기가스 정화 촉매제, NdFeB 영구자석 재료의 구성 성분, 공정 및 장비, 고성능 희토 연마 재료, 희토 거대 자기변형재료와 희토자기냉각재료 및 소자 등 희토기능성재료 및 소자에 대한 특허권은 기본상 해외기업에 의해 확보되고 있으며, 새로운 특허가 계속해서 출원되고 있다. 중국의 희토산업은 기술혁신에서 뚜렷한 진전을 이루었지만 해외기업의 발전과 비교하였을 때 여전히 뚜렷한 격차가 존재한다. 주로 첨단기술분야에서 첨단제품의 개발에 필요한 기술의 부재와 핵심경쟁력을 보유한 제품의 부족에서 나타난다. 이러한 문제점을 조속히 해결하지 못할 경우 중국의 희토산업 사슬의 연장과 발전을 제약하는 중요한 기술 병목이 될 것이다. 보다 적극적이고 개방적이며 공유되고 상호 이익이 되는 국제 과학기술 교류를 활성화하는 것이 이러한 문제점들을 해결하는 효과적인 방법이 될 것이다.

4 한·중 공동연구과제에 대한 제언

과학기술협력은 한·중 양국 관계의 중요한 구성부분으로서 20여 년의 발전을 통해 큰 성과를 거뒀다. 중국은 풍부한 희토자원과 완비된 과학연구 및

산업시스템을 갖추었으며 한국은 과학기술이 발달되었는데, 전자정보, IT, 컴퓨터, 자동차, 선박제조업과 환경보호 기술 등 분야에서 세계 선진수준이다. 특히 환경, 에너지, 지속 가능한 발전 등 양국이 공동으로 관심을 갖고 있는 분야에서의 교류와 협력은 양국이 지속적으로 발전하는데 튼튼한 버팀목이 되고 있다.

양국의 협력은 "호혜호리", "윈윈구도", "상호보완", "공동 발전", "공동 진보"라는 큰 틀 안에서 이루어져야 한다. 과학기술 협력은 크게 두 가지로 나눌 수 있는데, 하나는 과학기술개발이고, 다른 하나는 성과이전이다. 양국의 연구인력, 특히 청년학자들간의 교류, 상호 방문을 강화해야 하며 양측 기관간의 인적 교류도 강화해야 한다. 양국은 아래와 같은 몇 가지 방면으로부터 고려할 수 있다. ① 과학기술 정보 교류와 공유, ② 공동으로 연구 개발한 기술 성과 및 지적재산권의 공유로 인한 상여금, ③ 산학연협력 연구 강화를 통한 기술 혁신 촉진, 구체적으로 공동연구, 기술지도, 기술학습, 핵심기술정보 서비스, 특허 사용 등, ④ 국제과학기술교류시범기지 공동 구축 등을 고려할 수 있다.

희토류 과학기술과 산업에서 한중 협력은 기회와 도전이 병존한다. 희토원소는 자성, 빛, 전기 등 특수 성능을 갖고 있기 때문에 신소재 "보물창고"로 불린다. 때문에 세계 과학자들이 가장 주목하는 연구대상으로써 경제, 산업 등 영역에서 널리 응용되고 있으며 첨단기술 발전과 전통 산업의 고도화에서 중요한 역할을 하고 있다.

하지만 희토류 과학기술과 산업발전에도 시급히 해결해야 할 문제점이 많다. 최근 들어 희토류 신소재 및 응용과학기술에서 큰 진전을 이루지 못해 희토류의 보급과 응용이 제한받고 있다. 또한 희토 분야의 생산공법과 장비도 업그레이드시킬 필요가 있으며 희토산업의 환경오염 문제도 갈수록 심각해지고 있으며 지금까지 효과적인 해결대책이 없는 상황이다.

대부분 희토류 신소재의 지적재산권은 미국이나 일본 등이 소유하고 있어 중국이나 한국의 관련 산업 발전과 기술진보를 크게 제약하고 있다. 따라서 한·중 양국 연구자간의 협력은 개발공유, 상호이익을 기반으로 각자의 강점을 충분히 살려, 신소재, 신에너지와 환경보호를 둘러싸고 다음과 같은 연구과제를 추진할 것을 제안한다.

가. 자동화 및 지능화를 위한 전통 희토산업의 기술고도화와 장비 업그레이드

「중국제조2025」, 전략적 신흥산업 등 국가전략 실시와 미래 산업발전을 목표로 원천혁신, 통합혁신과 도입·소화흡수·재혁신을 통해 희토금속 자원의 고효율 분리추출, 저비용 청정 제련분리, 고급제품 제조, 희토 폐기물 재활용 등 핵심기술과 장비에 대한 연구를 수행해야 한다.

나. 희토 원자재의 청정생산공정기술 및 환경보호기술

희토 자원의 친환경 고효율 채굴, 선광 및 제련 분리를 위한 신기술 및 주요 장비를 적극적으로 개발하고, 이온형 희토원광의 친환경 고효율 침출 일체화, 저탄소 저염 분리 정제 등 희토 채굴, 선광, 제련 분리 청정생산공정 보급을 강화하며, 기업 생산기술과 공정장비의 최적화 및 고도화에 힘쓰며 생산, 환경보호(저탄소, 에너지절약 및 오염물 배출저감) 등 기술수준을 한층 더 높이며 에너지소모를 줄이고 폐수의 제로방출과 폐기물 자원화이용을 실현하며 완비된 재활용체계를 갖춘다.

다. 2차자원의 회수이용 및 리사이클링

희토 공생·반생자원인 니오브, 불소 등 유가원소의 종합회수이용기술 및 희토 2차자원의 청정 고효율 회수이용기술을 개발하여 자원의 청정 고효율 리사이클링을 실현하며 시범공정을 형성한다. 관련 기술표준과 산업규범을 제정하고 미광자원, 반생자원의 종합이용을 강화하며 희토 폐기물의 재활용 관련 기술을 개발하며 완비된 희토리사이클링체계를 구축하여 희토자원의 종

합이용수준을 높인다.

라. 희토 기능성 재료의 응용연구

「중국제조 2025」와 결합하여 고급 희토 구조재료와 기능성 재료의 제조 및 응용기술을 개발하며 관련 고급 부품 개발에 힘쓴다. 희토 기능성 소재의 차세대 정보기술, 산업로봇 등 주요 응용분야에서의 돌파를 가져온다.

마. 희토의 새로운 용도 개발

희토 원소의 본질적 특성을 파악하고 희토의 새로운 기능을 탐색하며 새로운 응용 분야를 확장한다. 국제 첨단 신소재에 초점을 맞추어 재료유전자공정에 기반한 희토 자력, 촉매, 광기능 등의 신소재에 대한 연구를 추진하며 국가에서 시급히 필요로 하는, 미래 지향적인 희토 신소재 및 청정 제조 핵심기술을 확보한다.

바. 희토 고부가가치화 응용 연구

초 고순도 희토 금속 및 그 화합물, 초 고순도 희토 금속 및 그 타깃재 등 정밀가공제품의 제조 기술을 개발하고, 초 고순도 및 특수 물성 희토 화합물 재료의 규모화 제조기술을 개발하며, 첨단 희토기능성 결정재료를 개발하고, 고성능 희토 발광재료 및 부품을 개발하여 고에너지 밀도의 레이저 광원, 전체 스펙트럼 조명 및 광역 고화질 디스플레이 응용수요를 충족시키며, 고성능 바이오 농업 조명재료 및 부품을 개발한다.

사. 란타늄/세륨/이트륨 등 매장량이 풍부한 원소의 고부가가치 응용기술 개발

란타늄/세륨/이트륨(La/Ce/ Y) 등과 같은 매장량이 풍부한 희토 원소의 산업 에너지 절약, 자동차 배기가스 정화, 산업용 용광로 배기가스 탈질 등 환경 보호 분야에서의 응용을 확장하고, 희토 강 및 알루미늄 및 마그네슘 합금과 같은 경량 재료의 응용 연구를 강화한다. 희토 특수 유리, 이트륨 - 지르코늄 세라믹, 연마제, 화학 첨가물, 안료, 오수 처리제, 코팅 등 기능성 재

료의 연구 개발 및 산업화를 추진한다. 테르븀, 디스프로슘의 감량화와 란타늄, 세륨, 이트륨의 프라세오디뮴, 네오디뮴 대체기술을 발전시키며 저비용 희토 자성 재료를 개발하여 세륨(혹은 고함량 세륨)자석의 산업화를 초진해 모터 및 기타 분야의 응용을 확대한다. 또한 국제 과학기술 협력 및 교류를 수행하기 위해서는 먼저 한·중 양국 과학자, 연구자 및 학자들의 교류와 협력을 고도로 중요시해야 한다. 특히 신진 과학자 육성을 중요시하며, 방문학자 상호파견을 통해 상호 교류를 촉진시키며 진보를 도모한다.

최근 몇 년간 과학의 복잡성과 과학자의 전문성이 강화되면서 갈수록 많은 과학기술은 더 이상 단순히 한 개 국가에 의해 완성되기 보다는 수요가 다른 대상국 사이의 협력에 의해 수행되는 추세를 보이고 있다. 우수한 협력대상을 잘 선택하면 기술개발 속도를 높일 수 있을 뿐만 아니라 협력 양국의 위험을 줄이고 상호 이익을 증진시키며 과기자원의 실효성을 효과적으로 높일 수 있다.

중국에는 "해납백천, 유용내대(海納百川, 有容乃大 (바다는 모든 하천을 받아들이며 이런 포용력때문에 바다는 크다)"와 "단사불성선, 독목불성림(單絲不成線, 獨木不成林(한 가닥의 생사는 실을 이루지 못하고, 한 그루의 나무는 숲을 이루지 못한다)"이라는 명언이 있다. 이 명언은 "협력공영(合作共贏)"의 중요성을 잘 반영하였다.

협력은 긍정적인 마음가짐뿐만 아니라 지혜가 동반되어야 한다. "천리를 보려면 더 높은 곳에 올라가야 한다"는 속담과 같이 오늘 날의 한·중 관계는 더욱 높은 차원에서 더 넓은 시야로 더욱 큰 목표를 가져야 한다. 한·중 양국은 협력을 통해, 동방의 지혜로 양국의 꿈을 아시아의 꿈으로 만들어야 하며, 아시아 각국의 국민들과 함께 번영의 길을 개척해야 한다.

한중과학기술협력센터 오시는길



한중과학기술협력센터 韓中科學技術合作中心

Korea-China Science & Technology Cooperation Center

北京市朝阳区酒仙桥路甲12号电子城科技大厦1308室(100015)
Tel : 86) 10-6410-7876, 7886 / Fax : 86) 10-6410-7846
Http://www.kostec.re.kr / E-mail : webmaster@kostec.re.kr

중국의 희토 연구개발 현황 및 한중협력 타당성 조사보고서

| 발행일 | 2018년 8월

| 발 간 | 한중과학기술협력센터