ISSN (Print) 1598-5385
ISSN (Online) 2233-6648
≪해설논문≫ Journal of the Korean Magnetics Society 24(6), 197-201 (2014) http://dx.doi.org/10.4283/JKMS.2014.24.6.197

Strategic Elements Project of Japan

Pan-Kyu Choi*
MTI Co., Ltd., Pyeongtaek 451-833, Korea

(Received 10 December 2014, Received in final form 16 December 2014, Accepted 16 December 2014)

As the importance of rare metal is increasing globally, Japan introduced the concept of Strategic Elements in 2004, and started Strategic Elements Project in 2007. The Goal of this project run by MEXT (Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology) is to develop high-function materials and components that do not use rare or harmful elements by studying the role and characteristics of the elements that compose materials and components and decide their functions and characteristics. In September 2010, Japanese coast guard arrested a Chinese fishing boat near Senkaku Islands (Diaoyudao Islands by China), which escalated to the territory issue and eventually a big diplomatic and economic conflict. In order to put pressure on Japanese Government, China used an economic option, which is the ban of rare earth export to Japan. This incident doubled Japan's motivation to develop Strategic Elements and put more efforts into this Project. MEXT set the following three research areas in February 2012: Study of alternative materials using sufficient and harmless elements, Study of applications for the high-functions of Strategic Elements, Study of practical design for components using Strategic Elements. Through a course of gathering the opinion of professionals, MEXT settled down with the following 4 research and study areas for the Strategic Elements Project in June 2012. 1. Magnetic materials to replace Dy, Nd. 2. Catalyst/Battery materials to replace Pt, Rh/Li, Co. 3. Electronic materials to replace In, Ta. 4. Structural materials to replace Nb, Mo. This paper deals with the first area and reviews the results of the research and study as of now.

Keywords : strategic elements, rare element, rare metal, magnetic materials

일본의 원소전략 프로젝트

최판규*
(주)MTI, 경기 평택시 청북면 백봉길 27, 힐탑빌 A-309, 451-833

(2014년 12월 10일 받음, 2014년 12월 16일 최종수정본 받음, 2014년 12월 16일 게재확정)

전세계적으로 희소금속의 중요성이 높아지고 있는 가운데 일본은 2004년부터 원소전략 개념을 도입하고 2007년부터는 원소전략사업을 추진하게 되었다. 일본의 문부과학성의 "원소전략 프로젝트"는 물질과 재료를 구성하고 그 기능과 특성을 결정하는 원소의 역할과 성격을 연구하고, 물질과 재료의 기능과 특성의 발현기구를 명확히 규명함으로써, 희소원소나 유해원소를 사용하지 않는 고기능을 가진 물질과 재료를 개발하는 것을 목적으로 하고 있다. 특히, 2010년 9월 일본명 센카쿠렛도(중국명 댜오위다오)에서 중국어선과 일본순시선이 충돌하는 사건이 일어나서, 중국어선을 나포하여 영토문제, 외교, 경제 갈등으로까지 확산되었다. 일본이 국내법을 적용하여 사법처리 하려하자, 중국이 꺼낸 카드가 희소금속의 일본수출금지였다. 이 때부터 위기감을 느낀 일본은 더욱더 원소전략 프로젝트에 박차를 가하기 시작했다. 일본정부는 풍부하고 무해한 원소에 의한 대체재료의 연구, 전략원소의 유효기능의 고활용, 원소유효이용을 위한 실용재료설계기술 등 3가지 제안으로 연구테마를 2012년 2월에 공모하여, 2012년 6월 "원소전략 프로젝트" 연구영역과 연구거점 4군데를 채택하였다. 1. Dy, Nd 등을 대체할 목적의 자성재료영역. 2. Pt, Rh/Li, Co 등을 대체할 목적의 촉매/전지재료영역. 3. In, Ta 등을 대체할 목적의 전자재료영역. 4. Nb, Mo 등을 대체할 목적의 구조재료영역. 본 논문에서는 원소전략의 4개의 영역 중에서 자성재료영역의 현재까지의 연구동향에 대해서 기술하고자 한다.

주제어 : 원소전략, 희소원소, 희소금속, 자성재료

© The Korean Magnetics Society. All rights reserved.
*Corresponding author: Tel: +82-10-4216-9744,
Fax: +82-31-682-5095, e-mail: pkchoimti@hanmail.net

I. 원소전략이란

일본의 경제전문가들은 2050년에는 현재 매장량의 수배의 금속자원이 필요하다고 판단하고 있다. 2050년에 거의 다 고갈되는 금속으로는 철(Fe), 크롬(Cr), 몰리브덴(Mo), 텅스텐(W), 코발트(Co), 백금(Pt), 팔라듐(Pd) 등 이며, 2050년까지 현재 매장량의 2배 이상의 사용량이 될 금속은 망간(Mn), 아연(Zn), 납(Pb), 구리(Cu), 니켈(Ni), 주석(Sn), 안티몬(Sb), 리튬(Li), 은(Ag), 인듐(In), 금(Au), 갈륨(Ga) 등 이라고 판단하고 있다. 이렇게 금속자원의 중요성이 고조되는 가운데, 특히 2010년 중일간의 희토류파동으로 더욱더 금속자원 및 희소원소의 전략적 확보가 국가산업발전의 중요한 요소가 되었다. Table I에 각종 희소원소의 매장량과 생산량을 나타낸다.

"원소전략"이라는 단어가 일본에서 처음 사용된 것은 2004년 일본과학기술진흥기구 (JST)가 하코네에서 주최한 일본의 저명한 화학자들의 워크샵에서 였다. "원소의 기능을 최대한으로 발휘하여 신재료를 실현한다" 라는 "원소과학"의 개념을 좀더 발전시키기 위해서 동경대학의 나카무라 에이이치(中村 栄一) 교수가 처음으로 "원소전략"이라는 개념을 발표했다. "원소과학"의 경우 원소를 과학적으로 해명하는 것으로

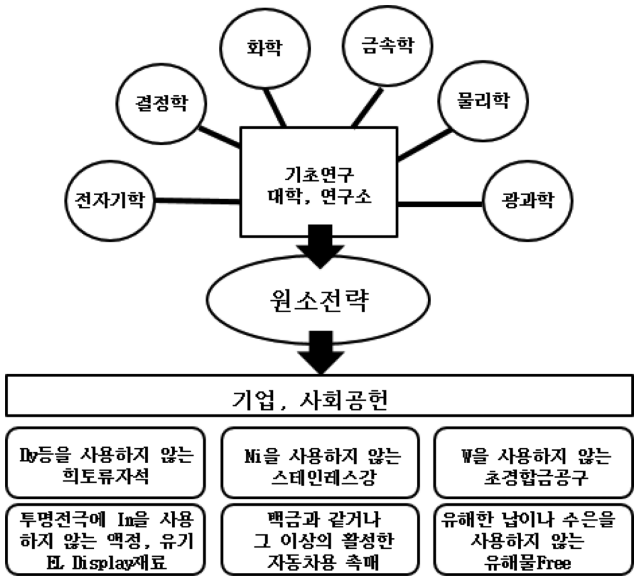

Fig. 1. The concept of strategy elements.

과학자들만이 연구하면 된다는 의미이지만, "전략"이라는 단어를 붙인 것은 과학자들 뿐만 아니라 산업계와의 연계도 필수가 되어야 한다는 개념이었다. 화학 이외의 금속, 전기(電

Table I. Reserves and production of a variety of rare elements.

USGS Mineral Commodity Summaries 2013으로부터 작성

원소번호	원소기호	원소명	매장량	총생산량	1위	생산량	2위	생산량	3위	생산량
3	Li	리튬	13,000,000	37,000	칠레, 호주	13,000	-	-	중국	6,000
4	Be	베릴륨	-	230	미국	200	중국	25	모잠비크	2
5	B	붕소	210,000	4,000	터키	2,500	아르헨티나	600	칠레	500
22	Ti	타이타늄	6,550,000	190,000	중국	80,000	일본, 러시아	40,000	-	-
23	V	바나듐	14,000,000	63,000	중국	23,000	남아공	22,000	러시아	16,000
24	Cr	크롬	460,000	24,000	남아공	11,000	인도, 카자흐스탄	3,800	-	-
25	Mn	망간	630,000	16,000	남아공	3,500	호주	3,400	중국	3,000
27	Co	코발트	75,000,000	110,000	콩고	60,000	중국	7,000	캐나다	6,700
28	Ni	니켈	75,000,000	2,100,000	필리핀	330,000	인도네시아	320,000	러시아	270,000
32	Ge	게르마늄	-	128,000	중국	90,000	러시아	5,000	미국	3,000
34	Se	셀레륨	98,000	2,000	독일, 일본	650	-	-	벨기에	200
38	Sr	스트론튬	6,800,000	380,000	중국	190,000	스페인	145,000	멕시코	31,500
39	Y	이트륨	540,000	8,900	중국	8,800	인도	56	브라질	15
40	Zr	지르코늄	48,000,000	1,420,000	호주	610,000	남아공	400,000	중국	150,000
41	Nb	나이오븀	4,000,000	69,000	브라질	63,000	캐나다	5,000	기타	700
42	Mo	몰리브덴	11,000,000	250,000	중국	105,000	미국	57,000	칠레	35,300
46	Pd	팔라듐	66,000,000	200,000	러시아	82,000	남아공	72,000	캐나다	13,000
49	In	인듐	-	670	중국	390	한국, 일본, 캐나다	70	-	-
51	Sb	안티몬	1,800,000	180,000	중국	150,000	남아공	10,000	볼리비아	4,000
52	Te	텔루륨	24,000	-	러시아, 일본	35	-	-	캐나다	10
73	Ta	탄탈럼	150,000	765	모잠비크	260	브라질	180	콩고	95
74	W	텅스텐	3,200,000	73,000	중국	62,000	러시아	3,300	캐나다	2,000
75	Re	레늄	2,500,000	52,000	칠레	27,000	미국	9,400	폴란드	6,200
78	Pt	백금	-	179,000	남아공	128,000	러시아	26,000	짐바브웨	11,500
83	Bi	비스무트	320,000	7,400	중국	6,000	멕시코	1,000	볼리비아, 캐나다	100
	RE	희토류	110,000,000	110,000	중국	95,000	미국	7,000	호주	4,000

機), 자동차업계와의 연계가 꼭 필요하다는 것이었다. Fig. 1에 원소전략의 개념도를 나타낸다.

원소전략의 하부전략으로 감량전략, 대체전략, 순환전략, 규제전략의 기본전략 4가지가 있다. 감량전략은 전략원소의 고도활용에 의해 희소원소나 규제원소의 사용을 최대한 줄이는 것이며, 대체전략은 희소원소나 유해 · 규제원소를 다른 입수용이하고 범용하며 무해한 원소로 대체하는 것이다. 순환전략은 희소원소의 회수순환시스템을 구축하는 것이며, 규제전략은 희소원소나 환경열화로 연결되는 우려가 있는 원소에 대한 규제를 하는 것이다. 최근에는 자원 · 에너지전략, 지적재산전략, 외교전략 등의 세부전략이 추가되어 운영되고 있다.

II. 일본의 원소전략 프로젝트

2007년 일본의 경제산업성과 문부과학성은 공동개발사업으로 실질적인 "원소전략" Project를 시작하였다. 원소전략에 따라 기존의 재료를 다양한 시각에서 접근하여 새로운 기능을 찾아내는 연구를 시행하여, 효율적인 재료이용 기술과 제조공정 기술을 개발함으로써 희소 · 부족 자원의 고갈에 대처하고, 유해 물질 · 재료 사용량을 획기적으로 줄일 수 있는 대체 재료와 기술을 제공하는 것을 목표로 하였다. 무해한 원소 · 물질을 이용한 대체재료 연구, 전략 원소의 유효기능 고도(高度) 활용, 실용재료 설계 기술 등 3개 주제에 대해 16개 과제를 선정하였다. Table II에 그 16개 과제를 나타낸다.

2012년에 이르러 대학과 국립연구소의 대형 연구시설을 유기적으로 연계해 하나의 프로젝트와 같이 운영해야 할 필요성이 제기되면서 문부과학성은 2012년 7월에 거점형성형 "신원소전략 Project"을 발족시켰다. 재료분야에서 세계 최고수준의 소형연구거점 프로그램을 확립한다는 목표 하에 희토류를 사용하지 않는 신재료개발을 목표로 하였다. 자석재료, 촉매 · 전지재료, 전자재료, 구조재료 등 4개 분야에서 연구개발을 추진했다.

자석재료 분야는 자석성능에 관여하는 각 원소의 역할을 해석하고 희토류 영구자석과 성능은 동등하지만 디스프로슘(Dy), 네오디움(Nd) 등의 희소원소를 이용하지 않는 새로운 자석을 개발하는 것과 보자력(Coercivity) 발생원리를 이론적으로 해명하는 것을 목표로 하고 대표연구자로 (독)물질 · 재료연구기구(NIMS)의 히로사와 사토시(広沢 哲) 박사가 선정되었다. 히로사와 사토시 박사는 스미토모특수금속(현 히타치금속)에서 사가와 마사토(佐川 真人) 박사와 같이 네오디움자석(Nd-Fe-B자석)을 개발한 인물로 널리 알려져 있다. 또한 이 프로젝트에는 NIMS의 호우노 카즈히로(宝野 和博) 박사와 동북대학의 스기모토 사토시(杉本 諭) 교수도 소속되어 있어, 각각 보자력의 발생원리 연구와 희소원소를 대체하는 자석연구의 리더로 활동하고 있다.

촉매 · 전지재료 분야는 촉매나 이차전지 부자재에 대해 고체, 기체, 액체 상태에서의 원소 상호반응을 해석하고 귀금속이나 백금, 로듐(Rh)/리튬, 코발트 등의 희소원소를 사용하지 않는 대체 재료를 개발하는 것을 목표로 대표연구자로 동경공업대학의 호소노 히데오(細野 秀雄) 교수가 선정되었다. 컴퓨터, 디지털카메라, 스마트폰 등에 이용되는 것이 리튬이온전지(2차전지)이며, 자동차의 배기가스의 정화장치로 사용되는 것이 백금촉매이다. 백금족 수요의 절반 정도가 배기가스 정화의 촉매로 사용되고 있다. 그러나, 그 공급을 남아프리카

Table II. 2007 Research project of strategy elements.

과제명	연구단체
1. 풍부하고 무해한 원소 혹은 물질을 이용한 대체재료 연구	
고분산 귀금속 미니멈화 촉매의 물질설계 및 프로세싱	구마모토대학('08 채택)
탈귀금속을 목표로 한 나노입자 자기형성 촉매 신규 발굴	원자력연구개발기구('07 채택)
귀금속 프리(Free) · 나노하이브리드 촉매 창제	홋카이도대학('08 채택)
귀금속 대체분자촉매를 이용하는 현식적인 에너지변혁 시스템 개발	규슈대학('08 채택)
희토류 원소 조성 고성능 이방성 나노복합체 자석의 개발	히타치금속('07 채택)
ITO 대체로 이산화티탄계 투명도 전극재료 개발	가나가와과학기술아카데미('07)
압전(壓電)프론티어 개척을 위한 바륨계 신규 거대전압재료 창조	야마나시대학('07 채택)
알루미늄 양극산화막을 이용한 차세대 불휘발성 메모리 개발	물질 · 재료연구기구('07 채택)
복합계면제어를 통한 백금족 원소 Free 기능성 자성재료 개발	츠쿠바대학('09 채택)
유기분자를 활물질로 이용한 2차전지 고성능화 및 충방전기구 해명	오사카대학('09 채택)
환경 친화적인 포스트 리튬이온2차전지 창조	규슈대학('09 채택)
아연을 대체하는 용융Al합금계 도금을 통한 표면처리강판 개발	도쿄공업대학('07 채택)
2. 전략원소의 유효 기능 고도(高度) 활용	
재료 유비쿼터스 원소협동전략	도쿄공업대학('08 채택)
서브 나노 격자물질 중 수소가 유발하는 신기능	도호쿠대학('07 채택)
규소 산소계 화합물의 정밀합성을 통한 기능설계	와세다대학('08 채택)
3. 원소의 유효 이용을 위한 실용재료 설계기술	
화학포텐셜도(圖)에 입각한 다원계 기능재료의 정밀제어	교토대학('09 채택)

등의 일부 국가에 의존하고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위한 것이 이 프로젝트의 과제이다.

전자재료 분야는 기초물리, 계산과학, 첨단해석기술을 융합해 반도체, 투명전극 · 반도체, 유전체 등 전자부품 재료개발에 인듐, 탄탈럼(Ta) 등을 대체하는 새로운 대체재료 개발을 목표로 대표연구자로 교토대학의 타나카 츠네히로(田中 庸裕) 교수가 선정되었다. 액정디스플레이, 유기EL 등에는 인듐, 반도체 제조공정에는 갈륨, 비소(As) 등이 사용되고 있다. 이러한 희소원소를 사용하지 않고 대체재료를 개발하는 것이 이 프로젝트의 목표이다.

구조재료 분야는 기초과학 단계부터 재료의 강도나 인성과 같은 상반된 성질을 해석해 나이오븀, 몰리브덴 등의 희소원소를 대폭 줄인 구조재료의 대체재료 개발을 목표로 대표연구자로 교토대학의 타나카 이사오(田中 功) 교수가 선정되었다. 구조재료는 큰 선박, 항공기, 빌딩부터, 작은 골프채 등의 스포츠용품까지 자중과 외력으로부터 형상을 보호하기 위해서 사용되고 있다. 구조재료서는 철, 알루미늄(Al)은 물론 최근에는 탄소섬유(C) 등이 각광을 받고 있다. 이러한 구조재인 철에 미량첨가 함으로써 초강도화를 실현시키는 나이오븀, 내열강으로 변화시키는 몰리브덴, 내식용 도금에 사용되는 아연 등의 희소원소가 있다. 이러한 희소원소의 소비량의 대부분이 구조재료로 사용되고 있다. 이러한 구조재의 희소원소의 대체재료를 개발하는 것이 이 프로젝트의 목표이다. Table III에 각종 산업분야에 쓰이는 희소원소를 나타낸다.

Table III. Rare elements used in various industrial fields.

산업분야	희소원소
태양전지	Ga, As, In, Cd, Ru
연료전지	Pt, Rh, La, Ce, Gd
전지	Li, Co, Ni, RE
열전소자	Bi, Te, Co, Sb
Motor	Dy, Nd, Sm, Co, B
LED	Ga, In, La, Eu, Y
전자부품	Ag, Au, Pd, Rh, In, Ta, W, Ni
촉매	Pt, Pd, Rh, RE

신원소전략의 사업기간은 10년으로 장기 프로젝트이며, 2012년도 예산은 22.5억엔이 책정되었다. 자석재료, 촉매 · 전지재료, 전자재료 3개 분야에는 연간 6~7억엔을 투입하고, 구조재료 분야는 새로운 원리 탐구 기간을 고려해 일단 연간 1.5억엔을 지원하기로 결정되었다. 분야별로 거점을 정하고 이를 지원하는 연구 네트워크를 구성하는 방식으로 많은 산업체, 대학, 연구소가 참여할 수 있게 되었다.

2012년 연구개발을 시작한 이후로 디스프로슘을 저감하거나, 넣지않고도 고특성을 나타내는 많은 결과물들이 나오기 시작했다. 또한, $Nd_2Fe_{14}B$계 보다 이방성자계와 포화자화값의

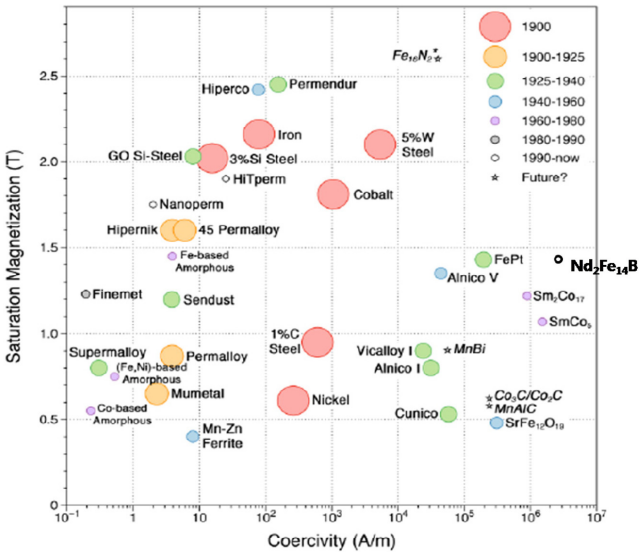

Fig. 2. (Color online) Coercivity and saturation magnetization of the various magnetic materials including new hard magnetic materials under development.

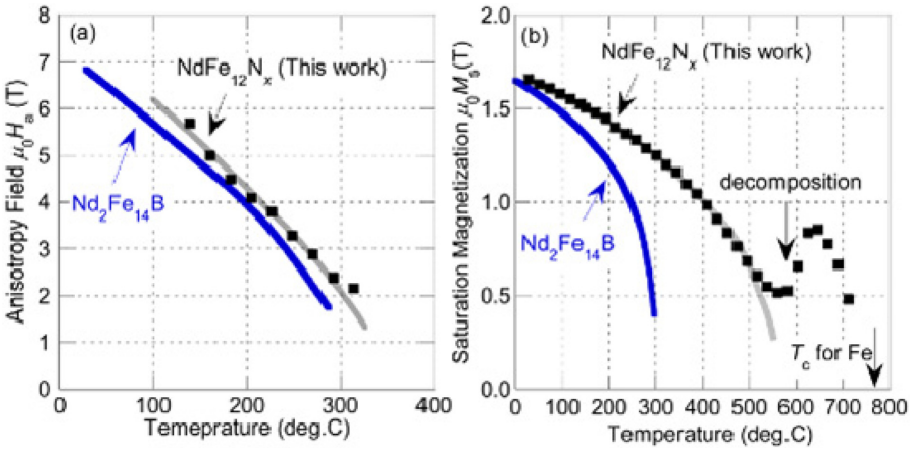

Fig. 3. (Color online) The temperature dependence of the (a) anisotropy field and (b) saturation magnetization of $NdFe_{14}B$ and $NdFe_{12}N_x$.

온도의존성이 좋은 새로운 화합물이 개발되었다. Fig. 2에 지금까지 개발된 자성재료의 이방성자계와 포화자화값을 나타낸다. Fig. 3에 $Nd_2Fe_{14}B$와 신규자성화합물 $NdFe_{12}N_x$의 이방성자계와 포화자화의 온도의존성을 나타낸다. 신규자성화합물의 실온에서의 이방성자계가 약 8테슬라(T), 포화자화값이 1.66테슬라를 나타낸다[1]. 이외에도 유사한 조성으로 높은 자기특성치를 나타내는 결과들이 나오기 시작했다[2].

III. 각국의 원소전략 프로젝트

미국의 에너지부(United States Department of Energy, DOE) “Critical Materials Strategy”가 분석하는 일본, EU, 중국, 한국의 자원전략에 대해서 소개한다.

일본은 국내산업을 지속적인 발전을 위해서 원료의 안정공급을 확보하는 것을 목표로 하여, 국제적인 광물탐사 자금의 지원, 하이리스크 광물획득 프로젝트의 책임보증, 광물비축, 정보수집 등의 사업을 전개하고 있다. 연구개발방침은 경제산업성(Ministry of Economy, Trade and Industry, METI)과 문부과학성(Ministry of Education, Culture, Sport, Science and Technology, MEXT) 의 자금제공에 의한 대체물질조사, 독립법인 석유 · 천연가스 · 금속광물자원기구(Japan Oil, Gas and Metals national Corporation, JOGMEC) 의 자금제공에 의한 탐사, 채굴, 제련, 안전성 조사 등이다. 관심을 갖고 있는 물질은 니켈, 망간, 코발트, 텅스텐, 몰리브덴, 바나듐(V) 등이다.

EU는 물질의 잠재적인 공급부족에 의한 유럽경제의 영향을 제한하는 것을 목표로 하고, 국제적인 공개시장에 있어서의 광물무역방침, 정보수집, 토지허가의 합리화, 리사이클 제도의 도입 등의 사업을 추진하고 있다. 연구개발방침은 응용에 의한 물질효과향상, 대체물질의 특정, 제품회수와 리사이클 프로세스의 향상 등이다. 관심을 갖고 있는 물질은 주석, 베릴륨(Be), 코발트, 갈륨, 게르마늄(Ge), 인듐, 마그네슘, 나이오븀, 희토류(Rare-Earth), 탄탈럼, 텅스텐, 형석(螢石, Fluorite), 그라파이트(Graphite) 등이다.

중국은 산업강화, 과잉생산완화, 위법무역의 축소를 통한 국내소비 목적의 원료의 안정공급유지 등을 목표로 하고 있다. 희토류 수출의 관세와 할당, 해외기업의 희토류 채굴금지, 산업강화, 가격형성 틀의 통일화, 생산할당 등의 사업을 추진하고 있다. 연구개발방침은 희토류 분리기술과 새로운 기능소재의 탐색, 희토류의 광학, 전기, 자성재료, 희토류의 기초이화학 등 이다. 관심을 갖고 있는 광물은 안티몬, 주석, 텅스텐, 철, 수은(Hg), 알루미늄, 아연, 바나듐, 몰리브덴, 희토류 등이다.

한국은 국내주요산업에 필수인 물질의 안정적 공급확보를 목표로, 해외광산에서의 한국기업에 자금지원, 자원이 풍부한 나라들과의 자유무역협정 혹은 MOU, 자원의 비축 등의 사업을 추진하고 있다. 연구개발방침은 최종제품의 리사이클성의 디자인, 대체물질개발, 생산효율성 등이다. 관심있는 광물은 비소, 타이타늄(Ti), 코발트, 인듐, 몰리브덴, 망간, 탄탈럼, 갈륨, 바나듐, 텅스텐, 리튬, 희토류 등이다.

IV. 제 언

일본의 원소전략 프로젝트를 보면 우리가 나아가야 할 방향을 짚어볼 수가 있다. 지금의 한국의 연구개발 프로젝트를 보면 3년 이상의 연구개발사업이 거의 없다. 특히 기초연구는 거의 없다고 봐도 무방하다. 우리나라도 연구비 투자는 상당히 큰 금액이고 종류도 다양하나 거의 다 단기적인 결과를 요구하는 과제나 프로젝트가 주를 이루고 있다. 산업체에서는 이익을 추구하는 단체이므로 당연한 결과이겠지만, 먼 장래를 생각해서는 대학교나 연구소에서는 단기간의 결과에 얽매이지 말고 일본처럼 10년 동안 장기적인 프로젝트도 필요하다고 판단된다. 또한, 연구비의 사용처를 보면 빈익빈 부익부의 현상도 매우 두드러진다. 특히 지방의 대학교나 연구소는 과제나 프로젝트에 참여할 수 있는 기회가 매우 적다. 정부가 주도하는 장기간의 프로젝트가 생긴다면 기초연구와 균형발전의 측면을 고려해서라도 많은 연구기관에서 안정적으로 연구할 수 있도록 배려했으면 한다.

References

[1] Y. Hirayama, Y. K. Takahashi, S. Hirosawa, and K. Hono, Scripta Materialia **95**, 70 (2015).

[2] S. Suzuki, T. Kuno, K. Urushibata, K. Kobayashi, N. Sakuma, K. Washio, H. Kishimoto, A. Kato, and A. Manabe, AIP ADVANCES **4**, 117131 (2014).