

# 초고속 Maglev용 초전도 마그넷 요소 기술 및 국내 연구 개발 현황

## Core Technologies of Superconducting Magnet for High-speed Maglev and R&D Activities in Korea

이창영†      강부병\*      한영재\*      심기덕\*\*      박동근\*\*\*      고태국\*\*\*  
Lee, Chang-Young    Kang, Bu-Byoung    Han, Young-Jae    Sim, Ki-Deok    Park, Dong-Keun    Ko, Tae-Kuk

### ABSTRACT

Ultra-speed tube train, which runs in vacuum atmosphere to overcome aero-dynamic dragging force, is considered as a high-speed ground transportation system to back up long-distance air travel. To realize the ultra-speed tube train, feasibility study of currently available Maglev technologies especially for propulsion and levitation system is needed. Propulsion by linear synchronous motor(LSM) and levitation by electro-dynamic suspension(EDS) which are utilized in the Japan's MLX system could be one of candidated technologies for ultra-speed tube train. In the LSM-EDS system, the key component is superconducting magnet, and its reliability and performance is very important to guarantee the safe-operation of Maglev.

As the initiative of the feasibility study, this paper deals with the basic structure of superconducting magnet and core technologies to design and operate it. And by surveying the current R&D achievement in Korea, the nation's capability to develop advanced superconducting magnet for Maglev is presented.

### 1. 서 론

미래의 항공수요를 보완할 중,장거리 육상 초고속 교통수단으로서 초고속튜브트레인에 대한 관심이 국내외적으로 증대되고 있다. 초고속 튜브트레인이란 철도의 궤도를 튜브로 감싼 후 진공 또는 아진공 상태로 유지하여 열차주행에 따른 공력저항을 최소화시킴으로서 시속700km/h이상의 초고속 주행이 가능한 철도시스템이다. 초고속튜브트레인을 실현하기 위해서는 초고속 자기부상철도(Maglev) 기술의 개발이 반드시 필요하며, 독일의 Transrapid 기술로 대표되는 LSM-EMS(상전도 흡인식)방식과 일본의 MLX 기술로 대표되는 LSM-EDS(초전도 반발식)방식이 초고속 자기부상철도 기술로 검토되고 있다. 이 중 LSM-EDS방식은 LSM-EMS 방식에 비해 차량의 자기부상과 안내를 위한 별도의 제어장치가 필요하지 않다는 특징 때문에 시속 700km/h이상의 초고속 튜브트레인의 구현에 기술적 이점이 있으나 차량의 추진 및 부상에 충분한 여자력을 만들기 위해 고자장의 초전도 마그넷의 탑재가 필요하다. 따라서 LSM-EDS 방식에 의한 초고속 튜브트레인을 구현하기 위해서는 신뢰성 있는 고자장 초전도 마그넷의 개발이 기술적 핵심 이슈가 되고 있다. 본 논문에서는 초고속 튜브트레인 개발을 위한 기술적 타당성 분석을 목적으로 초전도 마그넷의 주요 요소 기술과 일본의 Maglev용 초전도 마그넷 기술 대비 국내의 초전도 마그넷 기술 역량을 살펴보고자 한다.

† 책임저자 : 정회원, 한국철도기술연구원, 초고속열차연구실, 선임연구원  
E-mail : cylee@krri.re.kr  
TBL : (031)460-5525 FAX : (031)460-5023

\* 정회원, 한국철도기술연구원, 초고속열차연구실

\*\* 비회원, 한국전기연구원, 초전도응용기기연구실

\*\*\* 비회원, 연세대학교, 전기전자공학과

## 2. 본 문

### 2.1 초전도 마그넷 원리 및 주요 요소 기술

초전도 마그넷은 사용목적에 따라서 Pancake 코일, Toroidal 코일, Split코일, Yin-Yang 코일, 그리고 안장코일로 제작되며, 자기부상용 초전도 마그넷으로는 타원구조의 Pancake 코일로서 Racetrack 코일로 불린다. 그림 1은 Pancake 코일의 기본 형상을 보여주고 있다.

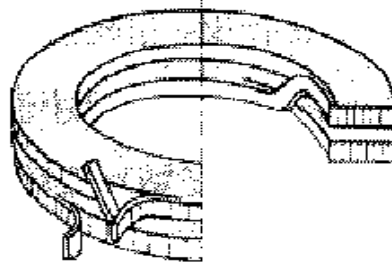


그림 1. Pancake 코일 기본 형상(JR Central Maglev2008 발표 자료 인용)

초전도 마그넷이 정상적으로 동작시키고 원하는 자계를 얻기 위해서는 마그넷을 구성하는 초전도 선재를 초전도 상태로 유지하기 위한 임계값을 만족시켜야 한다. 이 임계값은 임계전류( $J_c$ ), 임계온도( $T_c$ ), 임계자장( $B_c$ )으로서 초전도 선재가 이 세 가지 임계조건 이내에서 동작하도록 하는 코일 형상의 최적설계가 필요하다. 다음은 초전도체의 초전도 상태를 유지하고 열손실을 최소화하기 위한 열절연 구조와 극저온 냉각이 필요하다. 냉각방식은 액체헬륨이나 액체질소등의 냉매를 이용하는 방식과 냉매를 이용하지 않고 열전도에 의한 냉각방식이 있으며 냉각효율을 최대화 할 수 있는 냉각시스템의 설계가 중요하다. 열침입은 복사, 대류 그리고 전도의 형태로 외부로부터 마그넷 내부로 침입하며, 열침입을 최소화 할 수 있는 마그넷 외함(Cryostat) 및 전류인입선(Current lead)의 설계가 필요하다.

초전도 마그넷이 갖는 가장 중요한 특징은 일정한 자계강도를 얻기까지 초전도 마그넷에 전류를 흘려준 후 외부전원을 제거하면 코일에는 영구전류가 흐르므로 이 전류에 의해 자계가 지속적으로 유지된다. 이것은 초전도상태에서 전기 저항이 없기 때문에 가능한 현상이며 자기장을 유지하기 위하여 외부에서 전원을 지속적으로 공급해야 하는 상전도 마그넷과 구별되는 특징이다. 초전도 마그넷의 기본 구조 및 운전방법은 그림 2와 같다.

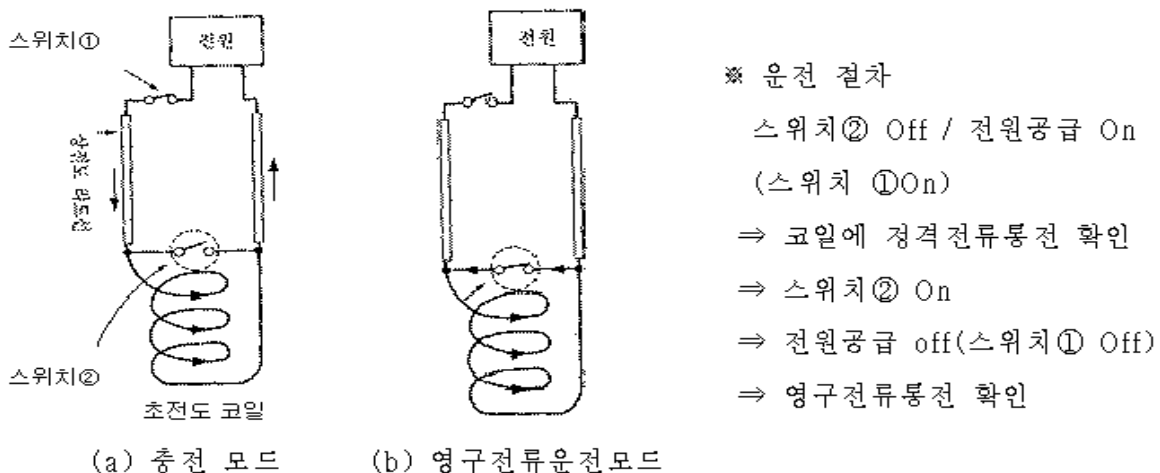


그림 2. 초전도 마그넷 동작 원리

그림2에서 초전도 마그넷에 사용되는 스위치는 초전도선에 열선을 설치하여 열에 의한 상전도와 초전도의 상태변이로서 스위치 작용을 하는 원리이다. 실제 초전도 마그넷에서는 초전도체와 초전도체, 초전도체와 상전도체 간의 접합부분이 필연적으로 존재하며 이 접합부분에서의 전기저항 때문에 영구전류모드로 운전하더라도 시간에 따라 점차 전류가 감소하게 된다. 이러한 전류 감소율이 자기부상열차용 초전도 마그넷의 성능을 좌우하는 요소가 된다. 따라서 전류감소율을 최소화 할 수 있는 초전도 스위치 설계가 필요하다. 이상은 초전도 마그넷의 설계에 있어서 필요한 기술들이며, 자기부상열차에 탑재되는 초전도 마그넷의 경우에는 LSM 추진 코일로부터 작용하는 외부자장에 대한 고려와 차량의 고속 주행에 따른 진동에 대한 성능이 확보될 수 있도록 설계되어야 한다. 자기부상열차용 초전도 마그넷의 설계를 위한 중요기술을 분류하면 다음과 같다.

도표 1. 자기부상열차용 초전도 마그넷 설계 기술 분류

항 목	설계 고려 변수
초전도 코일 설계 기술	코일크기, 최대 자장, 기계적 응력, 진동 특성, 영구전류모드운전특성
열절연 구조(Cryostat) 기술	마그넷 크기, 열침입량
냉각시스템 기술	냉각용량, 무게
초전도 스위치 기술	접합저항, 스위치 응답력, 전류감쇠율
전류 도입선 설계 기술	열침입량, 단면적

2.3 초전도 선재 개발 현황

1911년 Omnes가 발견한 수은에서의 초전도 현상부터 지금까지의 초전도체의 발견 및 개발현황은 그림 3과 같다. 그러나 다양한 초전도체의 개발에도 불구하고 재료의 안정성 및 선재화 공정능력등의 이유로 4K이하의 냉각온도에서 초전도성을 갖는 NbTi 소재만이 자기공명영상장치(MRI), 입자가속기 등의 초전도 마그넷소재로 이용되어 왔다. 그러나 1986년에 액체질소온도인 77K 이상에서도 초전도성을 갖는 고온초전도체의 발견은 그동안 상용화를 가로막고 있던 큰 벽인 임계온도문제를 해결함으로써 다양한 초전도 기기의 실용화 개발 가능성을 제시하게 되었다.

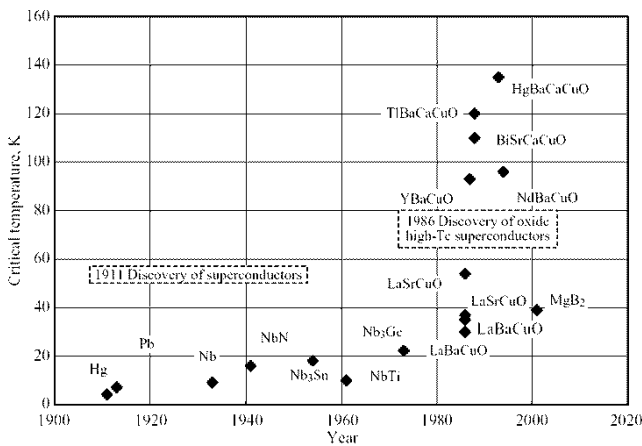


그림 3. 초전도체 개발 현황

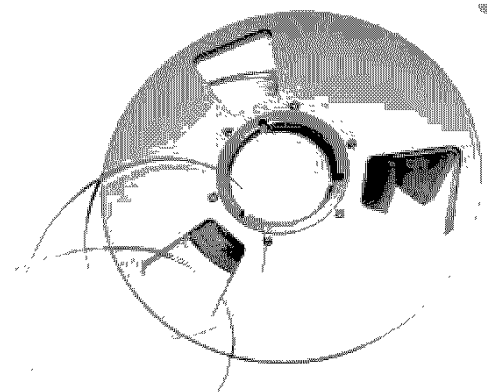


그림 4. 2세대(YBCO)고온초전도선재(IGC Superpower사)

고온초전도체는 1세대 고온초전도체와 2세대 고온초전도체로 나눌 수 있다. 1세대 고온초전도체인

Bismuth화합물계열의 Bi6Sr2Ca1Cu2O8 (BSCCO)는 초전도기에 적용 가능한 선재로 이미 상용화 개발되었으며, BSCCO 선재를 사용한 초전도 케이블, 초전도한류기, 초전도 모터등이 개발 중에 있다. 그러나 BSCCO의 경우 제조공정특성상 고가의 은(Ag)을 모재로 사용하기 때문에 초전도기기 제작비용의 80%이상을 차지하는 초전도 선재 가격의 하락에는 한계가 있다. 특히 BSCCO선재의 자장특성이 저온초전도체인 NbTi보다 불리하기 때문에 자장성능을 필요로 하는 초전도 마그넷용으로는 불리한 단점이 있다.

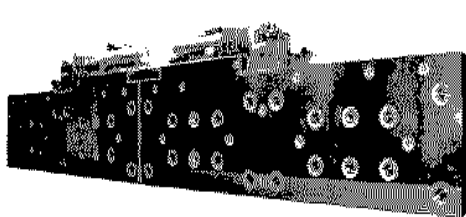
2세대 고온초전도체인 Y1Ba2Cu3O7(YBCO :Coated Conductor)는 초전도 선재의 가격을 구리 도체 수준까지도 낮출 수 있는 소재로서 초전도 기기의 제작 비용을 획기적으로 줄일 수 있는 초전도체이다. 특히 BSCCO 선재에 비해 높은 전류밀도를 가질 뿐 아니라, 자장특성 및 기계적 강도가 우수하기 때문에 초전도 마그네 응용에 큰 이점이 있다. YBCO의 경우 임계전류가 높으면서도 초전도기기의 제작에 적합한 수준까지 장선화 공정 기술의 개발이 가장 큰 관건이다. 2세대 선재제조기술은 미국의 IGC Superpower사와 AMSC사가 기술의 선두에 있으며 최근 Superpower사의 발표에 따르면 Ic=153A/cm, 길이 1311 m까지 제조가 가능한 장선화 공정을 달성하였다고 한다. 도표 2는 1세대 고온초전도체인 BSCCO와 2세대 고온초전도체인 YBCO의 성능을 비교하고 있다.

도표 2. 고온 초전도체 비교

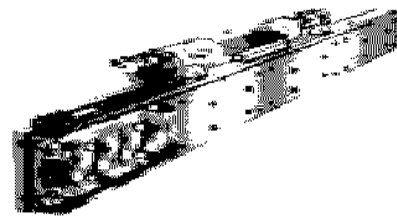
항 목	BSCCO		YBCO
	Without SUS Tape	With SUS Tape)	
선재 폭	4.5 mm	4.5 mm	4 mm
선재두께	0.30 mm	0.30 mm	0.095 mm
최대 제조 길이	1500m 이하	500 m 이하	-
임계전류 (77K, Self-field)	180A 이하	180A 이하	80~110A
최대 허용 인장강도	130 MPa	270 MPa	550 MPa
최대 허용 굽힘반경	70mm	60mm	11mm

#### 2.4 일본의 MLX용 초전도 마그넷 개발 현황

일본의 MLX용 초전도 마그넷은 약 1000~1500회의 권선수를 가지는 4개의 Racetrack형 코일을 N-S-N-S의 극배치가 되도록 교차직렬로 연결한 상태에서 500A의 전류를 통전하여 4.7T의 자장을 발생시킬 수 있는 구조로 제작되었다. 주행최고기속도인 581km/h는 저온 초전도체인 NbTi 선재를 사용하고 액체헬륨을 냉매로 하는 저온초전도 마그넷을 탑재한 주행시험에서 달성되었다. 1999년부터는 초전도마그넷의 경량화 및 구조의 단순화를 목적으로 1세대 고온초전도 선재인 BSCCO를 사용한 고온초전도 마그넷을 개발하였고, 2005년 주행시험에 성공함으로써 고온초전도 마그넷에 의한 초고속 자기부상열차의 실현 가능성을 확인하였다.



(a) 고온초전도 마그넷



(b) 저온초전도 마그넷

그림 5. 일본 MLX용 초전도 마그넷

그러나 기존 저온(NbTi) 초전도 마그넷에 비해 냉각비용측면에서의 이점에도 불구하고 초전도선재의 가격 때문에 BSCCO선재를 사용한 고온 초전도마그넷의 제작 비용 절감 효과는 그다지 크지 않다고 한다. 최근에는 YBCO 고온초전도선재의 급속한 성능 향상에 따라 YBCO 선재를 사용한 고온 초전도 마그넷의 개발에 박차를 가하고 있으며, YBCO 선재에 의한 고온초전도 마그넷이 개발될 경우 차량의 성능향상 및 초고속 Maglev의 건설비용을 획기적으로 줄일 수 있을 것으로 기대된다. 현재 마그넷 설계시 필요한 YBCO 선재의 냉각조건, 주변자장특성, 그리고 차량주행 동특성등의 운전환경을 고려한 기본특성에 대한 연구가 진행되고 있다.

도표 3. MLX용 고온 및 저온 초전도 마그넷 비교

	저온초전도 마그넷	고온초전도 마그넷
기차력	700-750kA	750kA
초전도 코일 수	4	4
코일 형상	Racetrack	Racetrack
Coil dimensions	1.070 X 500mm	1.070 X 500mm
Straight part	570mm	570mm
정격전류	500A	544 A
권선수	1,400-1,500 회	1,380 회
초전도체	NbTi	BSCCO
전류감쇄율	0.1%/day 이하	1%/day 이하
초전도냉각온도	4.2 K	20 K 이하
냉각방식	액체질소, 액체헬륨	전도냉각(냉매Free)
냉동기	GM cryocooler GM/JT cryocooler	GM-type 2-stage pulse-tube cryocooler

#### 2.4 초전도 마그넷 국내 기술 개발 현황

국내에서는 1992년에 한국전기연구원이 러시아와 공동연구로 추진한 “고자장(8T급) 발생용 초전도 자석개발연구”를 시작으로 저온 초전도 마그넷에 대한 기초연구가 시작되었다. 이 연구를 통하여 NbTi 선재를 이용한 저온초전도마그넷의 기본 설계 및 제작 기술을 확립하고, 점차 그 성능을 향상시켜 17T 까지도 가능한 초전도 마그넷의 개발에까지 성공하였다.

저온초전도 마그넷에 대한 본격적인 기술개발은 국가R&D사업으로 1995년부터 추진한 KSTAR(Korea Superconducting Tokamak Advanced Research) 프로젝트가 계기가 되었다. KSTAR 프로젝트란 현재의 우라늄기반의 원자력발전을 대체할 수 있는 미래 에너지원으로서 핵융합발전의 핵심이 되는 차세대 초전도 토카막 장치를 국내 기술로 개발하고자 하는 사업이다. 이 사업을 통하여 초전도 마그넷의 설계 및 해석, 극저온 냉각시스템 개발 및 마그넷 운전 등 초전도 마그넷의 주요 핵심기술을 선진국과 대등할 정도로 확보할 수 있게 되었다.

국내의 고온초전도체 및 고온 초전도기에 대한 기술개발은 21C 프런티어연구개발사업인 차세대 초전도 응용기기 개발사업(DAPAS사업)을 통해 본격적으로 시작되었다. 2001년부터 2010년까지 10년에 걸쳐 연간 100억원 규모의 연구비가 투입된 사업으로서 YBCO 고온초전도선재 개발을 비롯하여, 초전도 케이블, 초전도한류기, 초전도 변압기, 초전도모터등 실용화 적용이 가능한 수준의 고온초전도 전력기기의 개발을 최종 목표로 하고 있다.

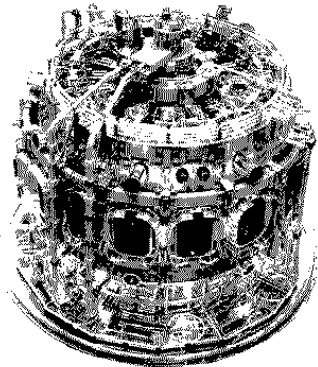


그림 6. KSTAR 초전도 토카막 장치

	1 <sup>st</sup> Phase			2 <sup>nd</sup> Phase			3 <sup>rd</sup> Phase			
	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
	<b>시험기 개발</b>			<b>모델기 개발</b>			<b>실증기 개발</b>			
초전도 케이블	22.9kV/50MVA, 30m 초전도케이블			22.9kV급 100m 실증기 및 154kV 초전도케이블 핵심기술			154kV/1GVA 초전도케이블 실증기 및 22.9kV 대용량 초전도케이블			
초전도 변압기	22.9kV/6.6kV, 10MVA, 단상 초전도변압기			154kV/22.9kV 초전도변압기 실용화 핵심기술			154/22.9kV, 100MVA, 단상 초전도변압기			
초전도 한류기	8.6kV/200A, 3상 초전도한류기			22.9kV/830A, 3상 초전도한류기			154kV/4kA, 단상 및 22.9kV/8kA, 3상 초전도한류기			
초전도 모터	100마력급 초전도모터			1MW(1,300마력)급 초전도모터			5MW(6,700마력)급 초전도모터			
초전도 선	5m/20A급 초전도 선			100m/250A급 초전도 선			1km/500A급 초전도 선			

그림 7. DAPAS 사업 개요

현재, 3단계 2차년도 연구가 진행중에 있으며 초전도 케이블 및 초전도 한류기는 한전의 실계통 투입을 준비 중에 있다. DAPAS 사업을 통해 확보된 고온초전도기기 운전기술, 단열(Cryostat) 및 냉각시스템 기술, 저손실 전류도입부 기술, 최적화선재 설계기술 등은 Maglev용 고온초전도 마그넷 개발에 필요한 핵심기술로서 충분히 응용이 가능한 기술들이라 하겠다. 특히 2세대 고온초전도선재의 국산화 개발은 그동안 국외 업체로 부터 독점 공급받던 핵심소재의 국외의존을 탈피할 수 있는 기반이 마련되었다고 할 수 있다.

그동안 쌓아온 고온초전도 마그넷분야의 기술을 기반으로 하여, 2007년부터 국내 대학을 중심으로 교육과학부의 지원을 받아 미래 첨단 바이오의료분야의 핵심기술인 GHz급 초고자장 NMR용 고온초전도 마그넷 기초 연구가 진행 중에 있다. 또한 2008년에는 국내 최초로 냉매를 사용하지 않는 전도냉각방식으로 2T급 고온초전도마그넷을 한국전기연구원에서 개발하기도 하였다.



그림 8. 전도냉각방식의 2T급 고온초전도마그넷(한국전기연구원)

### 3. 결 론

그동안 일본의 초고속 자기부상열차(MLX)는 부상 및 추진시스템의 핵심부품인 초전도 마그넷의 신뢰성 및 제작비용이 실용화의 걸림돌로 인식되어 왔다. 그러나 최근의 기술 개발 성과에 따르면 이미 400,000km이상의 주행시험을 통하여 저온초전도 마그넷 신뢰성은 충분히 검증되었다. 또한 비용저감을 위한 노력으로서 1세대 고온초전도체로 제작된 고온초전도마그넷으로서 주행시험을 성공적으로 완수하고 2세대 고온초전도체인 YBCO 선재를 이용한 초전도마그넷 개발에 착수하였다. YBCO 선재를 이용한 고온초전도마그넷이 개발될 경우, 향후 초고속 자기부상열차의 건설비용을 획기적으로 줄일 수 있을 것으로 기대된다. KSTAR, 21C 프린티어사업등을 통해 확보된 국내의 초전도 마그넷기술은 이미 차세대

에너지 및 의료기기분야에 파급 적용중에 있으며 국내에서도 YBCO 선재를 사용한 고온초전도 마그넷의 기반핵심기술들을 확보한 것으로 판단된다. 향후 LSM-EDS 방식에 의한 초고속 튜브트레인을 구현할 경우 국내의 독자기술로 고온초전도 마그넷을 개발할 수 있는 충분한 기술적 역량을 보유하고 있는 것으로 분석된다.

## 참고문헌

1. 김석환, 한송엽(2004), "초전도 공학 개론", 대영사
2. 한병성, 황종선, 박성진(1997), "초전도 공학", 동일출판사
3. 권영길 (2006), "고자장 발생용 초전도 마그넷의 개발현황 및 전망" 초전도 저온공학회 학회지, 8권, 2호
4. Motohiro Igarashi 외 (2005), "Persistent Current HTS Magnet Cooled by Cryocooler(1)-Project Overview", IEEE Tran. on Appl. Supercon., Vol.15, No.2, June
5. Kenji Tasaki 외(2005), "Persistent Current HTS Magnet Cooled by Cryocooler(3)-HTS Magnet Characteristics", IEEE Tran. on Appl. Supercon., Vol.15, No.2, June
6. Kaoru Nemoto,(2006), "HTS Magnet for Maglev Application (2)-Magnet Structure and Performance" IEEE Tran. on Appl. Supercon., Vol.16, No.2, June
7. H.Ohsaki (2008), "Impact of High-Temperature Superconductors on the Superconducting Maglev", No.92, Maglev2008
8. <http://www.cast.re.kr>
9. <http://www.knfp.net>
10. <http://www.superpower-inc.com>