

초전도자석의 선재와 응용기술



한양대학교 공과대학
재료공학과
교수 송진태

1. 序 言

초전도란 어떤 물질을 저온으로 냉각시켜 갈때 어느온도에서 돌연 전기저항이 0이되는 현상을 말한다. 이러한 성질을 갖는 재료를 초전도재료라 부르며 단 일원소, 합금, 화합물을 합쳐 무려 2,000종류 이상이 된다. 그러나 현재 실제로 실용화 되고 있는 초전도재료는 NbTi, Nb₃Sn, V₃Ga의 3가지 뿐이다. 초전도상태에서는 재료에 전류가 흘러도 에너지 손실없이 영구히 전류가 흐를수 있고 또 코일로 만들어 통전하면 대전류를 보낼 수 있고, 전력소모없이 강한 자장을 발생시킬 수 있다. 따라서 초전도재료는 구리와 같은 상전도재료와는 달리 고성능을 갖는 전선재료로서 전력을 송전 및 발전할 수 있는 생에너지기술, 또는 MHD발전과 핵융합로와 같은 새로운 에너지연구개발에, 그리고 초고속도로로서 주행하는 자기부상열차와 의료진단의 핵자기공명 단층영상장치(NMR-CT 또는 MRI)와 같은 신기술개발에 응용될 수 있다. 뿐만 아니라 Electronics분야에서는 Josep hson효과를 이용한 SQUID와 초고속컴퓨터에도 응용될 수 있다. 이러한 초전도재료가 갖는 가능성과

응용성을 생각할 때 초전도체료기술은 2000년대의 첨단산업과 기술혁신을 실질적으로 뒷받침하여주는 선도적, 기반적 요소기술이라 말할 수 있다. 더욱이나 핵융합과 가속기 및 자기부상열차와 같은 초전도응용분야에서 그동안에 이룩한 개발성과와 금속계초전도선재의 제조기술, 극저온시스템의 기술등이 확립되어 MRI를 비롯한 산업용의 각종 초전도자석(주로소형)이 제품화되고 거기에 최근에 발견된 고온초전도체는 액체질소온도에서도 초전도상태가 일어나게 되어 초전도응용기술에 대한 기대와 관심은 급속히 높아져 가고 있다.

본란에서는 먼저 금일까지의 초전도기술발전의 원동력이 된 초전도체료의 개발과 초전도체의 선재화 기술에 관하여 언급하고 다음에 초전도응용기술에 관하여 논하되 본 잡지의 성격을 고려하여 초전도응용기술은 주로 전력기기와 에너지에 관한 것에 대하여 기술하고자 한다.

2. 초전도선재의 제조기술

2-1. 초전도선재에 요구되는 특성

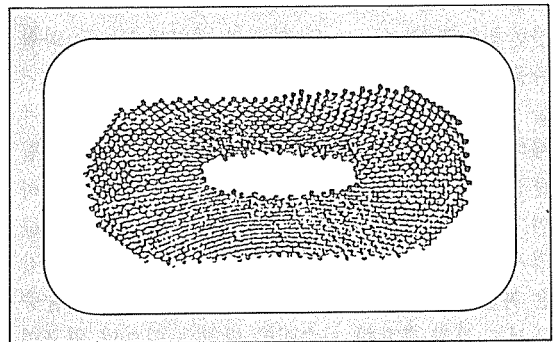
초전도체료를 전력기기에 이용하려면 먼저 선재화 되어야 한다. 따라서 최근의 고온초전도체가 장차, 보다 높은 임계온도(Tc)를 갖는다 하여도 이의 실용화를 위해서는 반드시 선재 또는 박막으로 만들어져야 한다. 한편 초전도선재는 이용분야, 응용되는 기기에 따라 요구되는 성능이 크게 달라진다. 즉 어느 분야에, 어떤기기에 응용되느냐에 따라 선재의 전류밀도, 자속변화율, 운전자장, 인장강도, 열손실 등 요구되는 전기적, 기계적 및 열적 성능은 달라지며 이에 따라 선재구조도 케이블구조, 테이프구조 등 여러가지 형태를 갖게 된다. 예를들어 초전도발전기의 고속회전장에서 사용되는 계자(회전자) 권선은 발전기의 운전효율을 크게 하기 위하여 전류밀도가 커야하고 운전사고시에 일어나는 변동자장에 대하여 안정하여야 하고 또 고속회전에 의한 원심력 및 전자기력에 견딜 수 있도록 강성이 커야한다. 이에 대하여 전기자(고정자) 권선용선재는 상용주파수에서 사용되기 때문에 교류손실이 적고, 액체 헬륨중에서 고전압에 견딜 수 있는 높은 절연내력을 갖지 않으면

안된다. 종래의 금속계초전도체료(Nb-Ti, Nb₃Sn 등)는 그동안의 연구개발기술의 발전으로 선재에 요구되는 위와 같은 성능에 적용되고 있으나 최근에 고온초전도체료에 있어서는 재료의 합성, 물성, 선재화 가공기술등이 아직도 기초적 연구단계에 있기 때문에 앞으로의 실용화에는 연구되어야할 과제가 산적하고 있다고 말할 수 있다.

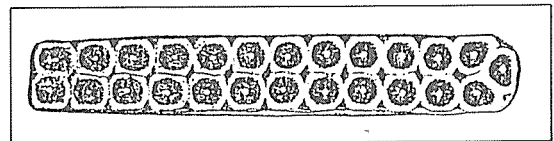
2-2. 금속계초전도선재의 제조

금속계초전도에 있어서 최초로 선재화된 재료는 Nb-Zr계 합금이었으나 현재는 Nb-Ti계합금이 독점적 지위를 차지하고 있다. Nb-Ti선재는 합금법으로 제조되며 그 기본 공정은 다음과 같다.

전자 Beam 또는 Arc용해로 용제한 Nb-Ti합금을 열간 단조후 환봉상으로 냉간 가공한다. 이 Nb-Ti환봉을 Cu관중에 많이 삽입한 복합체를 인발 또는 압출가공하여 단심선으로 만든다. 이들 단심선을 묶어 다발로 하여 Cu관속에 다시 넣어 인발 또는 압출가공을 반복하여 직경이 수 μ m, 심선의 수가 수천~수만개에 이르는 Nb-Ti극세다심선(Multi filamentary wire)을 얻는다. 그림1은 위와같은 제조공정



〈그림 1-a〉 MRI용 (NbTi) 도체(평각선)



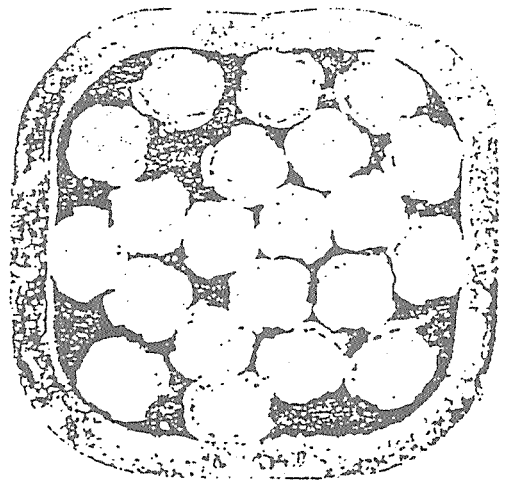
〈그림 1-b〉 전자추진선용 (NbTi) 도체

으로 만든 MRI 및 전자추진 선박용 Nb-Ti극세다심 초전도선재를 보여준다. 일반적으로 Nb-Ti합금선의 임계전류밀도(Jc)는 단면감소율 10⁵이상의 강한 가공과 시효열처리의 조합으로 크게 증대한다. Nb-Ti 합금의 조성으로서는 임계온도Tc 및 임계자장 Hc₂가 높은 40~60Wt%Ti조성이 실용되고 있다. 그러나 초전도체로 특유의 고착중심(pinning center)을 석출시켜 Jc-B특성(고자장에서 Jc향상)이 좋은 선재를 얻기 위해서는 다소 높은 Ti조성이 유리하다. 또 양호한 가공성을 확보하기 위해서는 O₂, N₂ 등의 가스함유량을 제어함도 중요하다. 최근에는 Nb-Ti 합금의 초전도 특성을 개선시키려 Ta를 첨가하는 연구가 행하여지고 있으며 초유동He(1.7~2.0k)중에서 10~12T(테슬라)의 고자장을 발생시키는 핵융합, 고에너지용 초전도자석용의 Nb-Ti-Ta합금 선재가 연구개발되고 있다.

다음 화합물초전도선재, 예를 들어 Nb₃Sn선재의 제조방법으로서는 여러가지가 있으나 공업화가 가장 진전된 제조법은 복합가공법(Bronze법)이다. Nb₃Sn극세다심선의 제조법은 Cu-Sn합금중에 다수의 Nb봉을 삽입한 복합체를 만들어 이것을 압출 또는 인발가공하여 600℃~700℃에서 열처리하여 고체화 산반응으로 Nb와 Cu-Sn합금의 계면에 Nb₃Sn화합물을 형성케하는 것이다. 이 복합체에 미리 확산장벽을 넣어 안정화등을 복합하여 놓으면 안정화합물 극세다심선이 얻어진다. 최근 복합가공법에 의한 화합물선재의 고자장 특성과 기계적 특성의 개선을 위하여 Nb₃Sn에 Ti, Ta과 같은 제3 또는 제4의 원소를 첨가하는 연구가 활발하게 행하여지고 있다. 위와같은 복합압출가공법은 초전도선재를 제작하는 기술중에서도 가장 중요한 기술이라 말할수 있으며 최근의 고온초전도재료의 선재화에도 그대로 적용, 응용되고 있다. 그림2는 복합가공법으로 제조된 전기기계의 제자권선용 Nb₃Sn연선케이블선재를 보여준다. 압출법중에서도 정수압압출법은 콘테이너와의 마찰이 없이 균일한 압출채를 얻을 수 있어 양산성이 높고 선재의 Long Wire 및 대응량화가 가능하여 유리하다.

또한 최근에 연구개발되고 있는 Nb₃Sn선재의 새로운 제조법으로서는 In-Situ법을 들수있다. Cu-Nb, Cu-V합금등은 상태도적으로 볼때 2상분리

형에 속한다. 이때문에 고주파유도 또는 Arc용해로 Cu-Nb, Cu-V합금을 용제하면 Cu모상내에 Nb, V가 수지상(Dendrite)으로 정출한 혼합조직이 된다. In-Situ법은 이러한 혼합조직의 Cu-Nb주괴를 강가공하여 Cu기지내에 Nb를 극히 가느다란 섬유상(Fiber)으로 배열하게 한후 이 선재의 표면에 Sn을 도금하여 열처리로 이를 확산시켜 Nb₃Sn극세섬유다심선을 생성하게 하는 방법이다. 따라서 Bronze법에서의 같이 Nb봉을 복합화시켜 가공하는 복잡한 공정을 간략화 할수 있어 초전도화합물의 극세섬유를 함유하는 선재를 간단히 대량으로 생산할수 있는 이점이 있고 전 전류밀도가 복합가공선재보다도 큰 특성을 갖는다. 또 섬유의 분산강화로 선재의 강도가 크고 Bending Strain에 의한 특성의 열화가 적은 특징등이 있어 제3의 선재화법으로서 주목을 받고 있다.



〈그림 2〉 Nb₃Sn 강제냉각형 케이블

2-3. 고온초전도재료의 선재제조

고온초전도재료는 전술한바와 같이 아직도 합성 및 특성연구의 기초단계에 있으며 또 일종의 세라믹이므로 금속계의 초전도재료와는 다르다. 주지하는 바와 같이 1986년 이후의 고온초전도체에 대한 열기와 분속에 이재료의 특성과 선재화에 관한 연구가 꾸준히 진행되어 일부의 선재 및 코일의 제작이 시도

되어 그 선제화기술이 상당히 진전되고 있다. 표(1)는 고온초전도체의 현재까지의 선제화 Process를

Process		특 성
분말가공	신선-압연	양산성
	Doctor Blade	
박 막	용사, 용탕급냉	치밀화
	Sputter 흡착(PVD)	배향화
	CVD	

〈표 1〉 고온초전도 재료의 선제화 Process

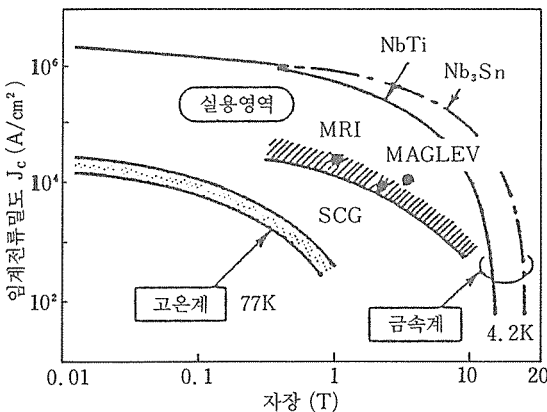
보여주고 있다. 분말가공법에서는 은통(Ag Sheath) 속에 초전도분말을 충전하여 기계적 가공을 한 후에 산소분위기속에서 재소결처리하여 초전도선제를 얻고 있으며 양산에 가능한 잇점이 있다. 이에 대하여 분말을 용융시켜 선제를 얻는 용사법과 용탕급냉법에 있어서는 결정의 치밀한 조적을 용이하게 얻을 수 있고, 기판에 초전도재료를 증착시켜 박막형선제를 만드는 박막증착(Sputter 증착) 및 CVD법에서는 결정의 단결정과 배향화를 기하여 높은 임계전류밀도 J_c 를 가져올 수 있다. 이들 Process중에서 가장 앞서 있는 것은 분말가공의 신선-압연법이며 전락에너지기기의 초전도자석용의 선제를 목표로 한다. 그러나 현단계에 있어서 이들 방법으로 만들어지는 초전도특성은 비관적이다. 예를들어 고온초전도 선제를 초전도자석에 이용하려면 1테스터이상의 자장내에서 적어도 $10^4 \sim 10^5 A/cm^2$ 의 J_c 를 가져야 하는데 그림3에서 보는바와 같이 현재의 J_c 값은 $10^3 A/cm^2$

cm 이하의 값을 가지고 있다. 또한 고온초전도체를 초전도자석에 응용하려면 적어도 10m이상의 긴 선제(Long Wire)로 제작하여 Coil화할 필요가 있다. 재료의 안정성과 임계전류밀도의 향상을 가져오는 새로운 가공기술의 연구개발없이 현재의 신선-압연법으로 이와같은 Long Wire와 Coil화를 기한다는 것은 분명 어려운 과제라 생각한다. (일부의 사람들이 프레스와 압연을 조합시킨 압연기술을 개발하여 길이 10m의 은 피복테이프선제를 가공하고 Coil을 시작재료하고 있기는 함), 따라서 고온초전도선제의 제조에 있어서는 재료의 고전류밀도화를 기하고 고성능의 특성을 갖는 긴 선제의 개발과 Coil화를 실현할 수 있는 여러가지 요소기술개발에 관한 연구가 기대되고 있다.

2-4. 금후의 과제와 전망

초전도현상이 발견된지는 이미 80년이 경과하고 있으나 실제로 초전도응용기술이 개발된 것은 불과 20년 이내라 말할 수 있다. 이것은 초전도이용기술이 소위 말하는 극한기술이며 그 본격적 이용에는 많은 기술의 축적이 필요하였기 때문이다. 현재 합금계 예를들어 Nb-Ti초전도선제와 Nb_3Sn 초전도선제의 제조법은 이미 연구개발의 단계를 지나 공업적 제조가 가능한 단계에 있다. 따라서 합금계초전도선제는 의료용의 MRI를 비롯하여 리니어모터카, 핵융합로에 이르기까지 폭넓은 需要를 가지고 있다고 본다.

현재의 초전도제품의 세계시장규모는 일본의 Yen으로 의료용MRI가 300억Yen, 분석기기용NMR가 50억Yen, SQUID가 15억 Yen등 1년에 약400억Yen정도이며 NRC(일본의 닛고 연구센터) 조사에 의하면 금세기중에 실현되리라 예상되는 초전도응용시장은 그림(4)과 같이 MRI가 7000억 Yen, 리니어모터카가 3조Yen, 초전도저장시스템(SMES)이 2000억 Yen, 기타 SQUID등 1000억Yen등 합쳐서 4조Yen 이상이 되고 있다. 한편 일본 CMC지의 추계에 의하면 표2에서 볼 수 있는 바와 같이 2000년까지 고온초전도선제의 일부실현을 전제로 초전도시장규모는 약 4.5조Yen, 2010년의 초전도시장규모는 합계 13.7조Yen에 이를 것이라 보고 있다. 그러므로 금후의 당면과제로서는 고온초전도체와 그 선제화에 관한



〈그림 3〉 고온초전도선제의 현황

〈표 2〉 실현시기 및 시장규모

시장분야	구 체 예	고온초전도 실현시기 ¹⁾	2000년의 시장규모 ²⁾	2010년의 시장규모 ²⁾
A. 기존시장*	연구용 각종자석	1995년경	680	2,300
	MRI용자석	1995년경	** (6800)	** (15,000)
	NMR용자석	1992년경	** (880)	** (2,800)
	SQUID		3,520	9,600
	기 타		4,200	11,900
	계		(11,680)	(29,700)
B. 정보·통신	고속 LSI배선	1995년경	1,650	4,700
	초전도반도체복합IC	2000	350	3,000
	초집속소자	1995	5,300	11,000
	초전도트랜지스터	1996	3,330	8,700
	프린트기판배선	1995	170	1,650
	초 LSI 전자장치	2000	650	1,650
	자기센서	1994	3,480	11,700
	자기차폐	1994	1,000	4,000
	기 타			
계		15,900	46,400	
C. 교통·운수	리니어모터카	2005년경	5,000	22,000
	자기추진선	2015	1,100	11,000
	초전도밸브	2005	200	330
	자기부상열차	2010	100	340
	자동차부품	2007	100	330
	기 타			
계		6,400	34,200	
D. 전력·에너지	초전도발전기	2010년경	120	1,100
	MHD발전	2015	120	1,100
	초전도송전선	2025	110	1,100
	초전도핵융합	2050	110	1,100
	에너지저장	2020	110	1,100
	기 타			
계		570	5,500	
E. 산업용 동력	초전도모터	2008년경	1,130	2,200
	초전도변압기	2010	2,250	3,300
	초전도추진기	2020	220	1,100
	기 타			
계		3,600	6,600	

시장분야	구 체 예	고온초전도 실현시기 ¹⁾	2000년의 시장규모 ²⁾	2010년의 시장규모 ²⁾
F. 선단가공· process 응용	SOR	2008년경	1,140	3,100
	자기분리	2005	1,140	2,000
	이온주입	2005	220	400
	자기베어링	1995	900	2,000
	기 타			
	계		3,400	7,500
G. 의료·계측 ·연구개발	MRI	1995년경	6,800	15,000
	NMR	1995	680	2,800
	SSC	2015	230	660
	전자현미경	2005	120	240
	초전도가속기	2010	2,270	3,900
	기 타			
	계		10,100	22,600
H. 우주·해양	적외선센서	1995년경	150	620
	해저케이블	2040	150	310
	자원탐사·암시장치	2000	150	620
	기 타			
	계		450	1,550
I. 기 타	신기능	2010-년경	억Yen	억Yen
	(초전도 laser 등)	2100	40	
	신용도(완구등)	1990	340	580
	계		380	750
J. 초전도시장합계			45,000	13,700

(주) * : 현재의 세계시장은 MRI 300억Yen, NMR 50억Yen, SQUID 15억 Yen 등 합계 400억 Yen/년 정도

** : G. 의료, 계측, 연구개발분야와 중복 (G 분야에 계상)

1) 액체질소온도이상 실온이하에서의 초전도 실현시기

2) 액체질소온도이상에서의 초전도시장규모 (단위억Yen/년, 세계시장규모)

所得은 정당하게 消費는 알뜰하게

〈표 3〉 고온초전도 실현시기——시장분야별 (제품별)——예측

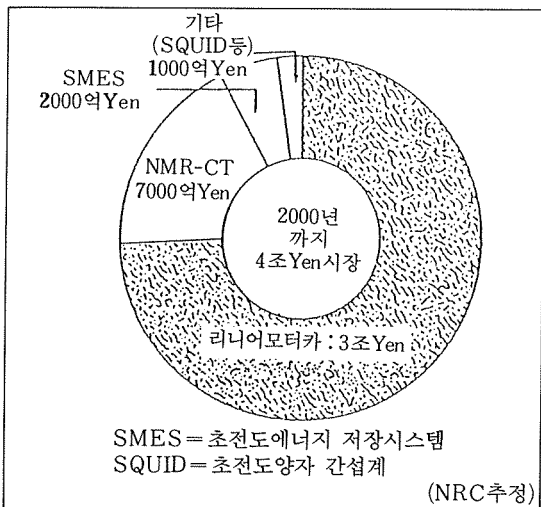
시장분야	구 체 예	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
A. 기존시장	연구용 각종자석 MRI 용자석 NMR 용자석 SQUID	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→
B. 정보·통신	고속 LSI 배선 초전도반도체복합 IC 조셉슨 소자 초전도트랜지스터 프린트 배선 기판 초 LSI 전사 장치 자기센서 자기차폐	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→
C. 교통·운수	리니어 모터카 자기 추진선 초전도 밸브 자기 부상 열차 자동차 부품	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→
D. 전력·에너지	초전도 발전기 MHD 발전 초전도 송전선 초전도 핵융합 에너지 저장	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→
E. 산업용 동력	초전도 모터 초전도 변압기 초전도 추진기	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→
F. 선단가 공프로 세스응용	SOR 자기분리 이온주입 자기 배어링	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→
G. 의료·계측·연구개발	MRI NMR SSC 전자현미경 초전도 가속기	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→
H. 우주·해양	적외선 센서 해저 케이블 자원탐사·암시장치	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→
I. 그 외 (기타)	신기능 (초전도 laser 등) 신용도 (완구 등)	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→

연구개발을 병행하되, 이들 수요증가에 대응할 수 있는 종래의 Nb-Ti합금선제의 대량제조법의 개발과 경비절감에 힘써야 할 것이다. 또한 1990년 후반에서 2000년초에 기필코 개발될 초전도발전기와 나아가서는 SMES, 대형의 입자가속기, Pulse자석, 초전도케이블등에 사용될 초대용량의 초전도도체화를 목표로 Troidal코일, 교류코일등 이들용도에 적합한 선제구조의 초전도선제를 제작할 수 있는 최적의 공정기술을 구체화시키고 이들 선제에 요구되는 초전도체의 고성능화 즉 고전류밀도화, 저손실화, 고안정화에 관한 연구가 진행되어야 한다고 본다. 한편 화합물선제도 각종의 극세다심선이 연구개발 되어 현재중형의 고자장발생용자석에 사용되고 있으나, 금속에는 극세다심화합물선제에 의한 20T(테스터) 초전도자석의 실현과 대형초전도자석용 10KA급 선제를 양산할 수 있는 제조법의 개발이 과제가 될 것이다.

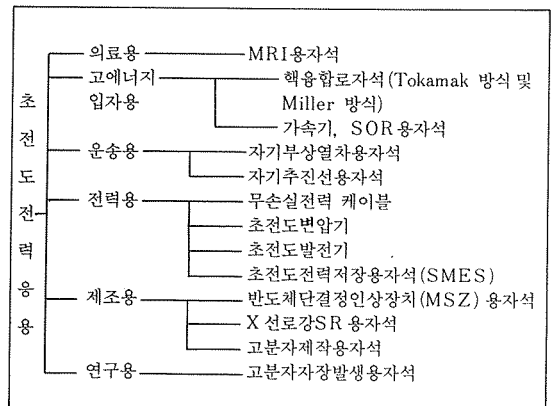
다음 고온초전도재료에 있어서는 앞서 말한바와 같이 이 재료가 발견된지가 4년에 불과하며 합성, 특성, 선제제작연구에 있어 아직도 기초연구단계를 벗어나지 못하고 있다. 따라서 이재료가 실용화되려면 먼저 재료레벨까지의 품질을 향상시키는 기본기술의 확립이 필요하며 새롭고 독특한 착상에서, 재료 Process에 관한 기초과학적 기술연구가 꾸준히 축

적되어가야 한다. 그것은 금속계초전도재료와는 달리 이 재료는 전연성이 없어 부스러지기 쉽고 Perovskite형 층상결정구조를 하고 있어 초전도전류의 이방성을 가지며, 결정입계와 관계되는 Weak Link문제가 극복되고 미소한 자장내에도 임계전류밀도 Jc가 급격히 감소하는 소위말하는 자장에 의한 Jc감소가 개선되어야하는 등 재료가 갖는 고유의 여러가지 어려운 과제가 산적하고 있기 때문이다. 그러나 이러한 기술적 과제가 극복되면 고온초전도의 응용은 광범위하게 전개되어 21세기의 고도기술사회를 구축하는 혁신적기술이 될것이다. 고전류밀도를 가지며 높은 자장내에서도 열화가 적은 고온초전도선제와 고성능의 긴선제화 Coil이 제작되면 첫째 전력시스템의 초전도화로 고효율의 그리고 대용량의 초전도발전기 및 에너지저장장치(가)가 가능하게 될 것이고 여기에 보다 높은 임계온도Tc를 갖는 초전도선제가 개발되면 초전도송전 및 변전도 가능하여 전류유통기술에 일대변혁을 가져올 것이 기대된다.

둘째는 고자장을 이용한 신기술의 개발이 가능할 것이다. 즉, 초고속의 자기부상열차, 전자추진선박이 연구개발되고 초전도리니어모터카가 등장될 것이다. 뿐만 아니라 초전도 MRI장치가 의료진단장치의 Star가 되어 병원에서 활약할 것이고 21세기의 새로운 에너지원이 되는 초전도핵융합로가 출현할 것이라 본다. 표3은 고온초전도선제를 이용한 각종기기의 실현시기를 일본 CMC지에서 예측한 것이다.



<그림 4> 금세기에 실현 예상되는 초전도 응용시장



<표 4> 초전도의 응용분야

3. 초전도자석의 응용기술

초전도선재의 주요한 응용분야는 표4와 같으며 에너지, 전력, 교통수송, 의료기기, 정보기기등 광범위하다. 여기에서는 최근 우리 귀에 익은 몇가지 대표적인 응용예를 들어 보고자 한다.

3-1. 전력기기에의 응용(초전도발전기와 과제)

초전도재료기술은 본질적으로 생에너지기술이므로 발전, 전력저장, 송전등 전력에너지에의 응용을 기대할 수 있고, 또 전력에너지의 초전도화는 이미 가시화되고 있다. 다만, 대규모의 시스템이 되어 많은 개발비와 많은 인력의 투입이 필요할 뿐이다.

초전도발전기의 구조는 그 원리에 있어서 종래의 발전기와 같으며 회전자의 계자코일에 초전도선재가 사용되고 있는점이 다르다. 그리고 이 초전도계자코일은 액체Helium으로 냉각시켜야 하므로 회전자는 Cryostat를 겸하고 있으며 액체Helium은 축의 한쪽에서 공급된다. 이에 대하여 전기자에는 보통의 구리로 되는 코일을 사용한다. 계자코일에 초전도선을 사용하므로 전력소비가 전혀없다. 최근의 보고에 의하면 초전도발전기의 효율은 0.5~1% 높게 되어 종래의 발전기보다 에너지 손실이 1/2~1/3로 감소된다고 한다. 또한 발전기가 소형화 및 경량화되고 발전기의 Reactance가 적어 단락비가 커져서 생자재, 수송비경감을 기할 수 있을 뿐만 아니라 발전기의 전자특성을 개선시킬 수 있다고 한다. 초전도발전기가 갖는 이러한 메리트들은 경제효과(Economic benefit)와 나아가서는 사회효과(Social benefit)를 가져온다. 예를 들어 실용규모의 초전도발전기를 1,000MW 라 가정할 때 발전기의 효율이 0.5~1%향상되면 1,000MW급 출력의 발전소의 전기출력은 5,000~10만KW 증가한다. 이것은 5~10MW의 발전소를 새로이 건설한 것과 동일한 효과가 된다. 동시에 발전소의 부가가치를 그만큼 올리는 셈이 된다.

1975년부터 일본에서는 초전도발전기의 원리실증과 기본적인 제문제해결을 위하여 용량 6MVA, 30MVA의 초전도발전기가 연구시작되었으며, 최근에

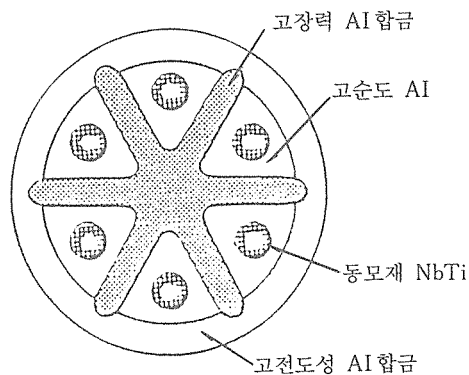
는 역률을 개선하고 송전손실의 감소와 계통의 안정도향상 등 전력의 질적개선을 기하기 위하여 50MV A의 초전도발전기가 시작되었다. 미국 및 소련에서는 300MVA의 초전도발전기의 연구개발이 이미 시작되어 실용규모의 Field Test에 들어가 있다. 프랑스에서는 교류의 초전도선재를 발전기의 전기자에 적용한 전초전도발전기의 기초연구가 행하여지고 있다. 이들에 사용되는 초전도선재는 모두가 Nb-Ti 선재이나 선진적 발전기에 사용될 급속계의 고성능 선재와 고온초전도재료의 선재화가 병행되어 연구개발되고 있다. 따라서 1990년대에는 초전도발전기가 본격적으로 실용될 가능성이 보여지고 있으며 이렇게 볼때 초전도발전기는 초전도의 공업응용중에서도 가장 실용단계에 가까운 상태에 있다고 말할 수 있다. 그러나 초전도 및 극저온과 같은 신기술을 이용하는 전혀 새로운 구조의 발전기이므로 재료, 제조기술, 전력계통과의 적합성등이 급후 구체적으로 검토하여야 할 것이고 장래에 있어서는 계자권선 이외에 전기자권선의 초전도화를 포함한 완전초전도발전기 및 트랜스레스의 초고압 직접발전형 초전도 발전기의 연구개발을 위하여 전력계통의 신뢰도를 유지하면서 생산경비의 절감을 위하여 에너지자원의 성력화를 실현시켜야 할 것이다.

3-2. 전력기기에의 응용 [초전도전력저장장치(SMES)]

에너지는 일반적으로 수요에 따라 생산, 공급된다고 말할 수 있다. 그러나 그 수요공급이 시간적으로 반드시 일치하지는 않는다. 예를들어 전력소비가 주간과 야간에 같다고는 볼 수 없다. 따라서 수요이상의 잉여전력을 야간에 저장하여 놓아 주간의 고부하시에 방출하자는것이 에너지저장시스템의 착상이다. 이러한 에너지저장에는 양수발전과, 연료전지에 의한 전력저장 방식이 있으나 초전도자석에 의한 에너지저장이 유리하다. 즉, 초전도상태에서는 전기저장이 없기 때문에 장기간에 걸쳐 에너지 손실없이 영구 전류상태를 실현할 수 있고 전자기에너지의 형태로 저장할 수 있기 때문에 응답성이 빠르고 효율이 좋다. 그러나 우리가 관심을 갖는 저장효율이 90%이상이면 되려면 장치의 실제규모의 크기는 Solenoid코일의

경우 직경이 수 100m 이상이 되고, 높이가 100m 정도에 이르게 된다. 이러한 초대형자석의 기술개발과 경제성에는 큰문제가 뒤따르기 때문에 현재에는 초전도도체의 연구와 그 설계연구에 그치고 있는 실정에 있다. 사용되는 초전도선재는 대용량의 전류를 흘려보낼 수 있고 견고한 구조로 되어있지 않으면 안된다.

한 예로서 그림 (5)에 표시한바 같이 에너지 저장코



〈그림 5〉 에너지저장 코일용선재 예

일용도체는 고순도AI로 안정화되고, 고장력AI합금으로 기계적강도를 부여하여 7T(테스티)에서 765, 000암페어의 직경 13.5cm의 초대형선재가 되지 않으면 안된다. 선재에 작용하는 전자력은 단일성의 지지구조체를 통하여 암반에 전하여지며 또 장력을 감소시키기 위하여 초전도선재는 파형구조를 갖게한다. 그러나 만일에 고온초전도체가 실용화되어 적용될 수 있다면 이러한 단일구조는 크게 간략화 될 것이 기대되고 있다.

이상 초전도자석의 전력기기에의 몇가지 응용에 대하여 고찰하여 보았으나 기타를 포함한 여러전력기기에 초전도자석을 이용할때의 merit와 금후의 과제를 표5에 나타낸다.

3-3. 초전도 핵융합로에의 응용과 과제

핵융합반응은 풍부한 에너지를 발생하는 것으로 지대한 기대를 받고 있다. 특히 자원이 고갈되고 있는 최근, 선진각국은 새로운 에너지공급원으로서의 핵융합로를 목표로 하여 많은 연구와 투자를 하고 있다. 핵융합반응의 실현에는 벌써1억도를 넘는 Plasma를 자장으로 가두어 놓든가 고도의 압축으로 가

두어 놓든가 어느 한쪽의 수단이 필요하다. 전자의 자기방식의 핵융합장치로서는 Tokamak방식, Miller방식이 있으며 후자에는 Laser방식이 있다. 주지하는 바와같이 고자장을 발생시키려면 구리도체를 코일상으로 감아 이것에 전류를 보내는 방법이 취하여지며 이경우 구리의 Joule열에 의한 전력손실이 발열을 제거하기 위하여 냉각에너지가 필요하게 된다. 이로 인하여 고자장발생에는 막대한 전력이 필요하였다. 이때 구리대신에 초전도재료를 사용하여 전자석을 만들면 전기저항이 없기 때문에 Joule 발열이 전혀 없게 된다. 그러나 그대신 전자석을 액체Helium 온도에 유지하기 때문에 냉각에너지가 필요하게 된다. 구리로 만든 전자석에서의 Joule손실과 초전도자석의 냉각에 요하는 에너지를 비교하면 동일한 전자석에 있어서 후자의 쪽이 현격히 적다. 이러한 차는 전자석이 대형화되면 될수록 커지게 되어 초전도자석은 핵융합장치, 고에너지물리의 가속장치등에 불가결의 것이 되었다. 이러하여 세계의 선진각국에서는 핵융합로를 위한 초전도자석의 개발을 강력히 또, 끊임없이 추진시켜 나가고 있다.

그동안 연구제작된 것의 예로서는 소형이기는 하나 소련의 T-7 Tokamak초전도 Troidal 코일을 들 수 있으며 이 외에도 소련은 T-15 Tokamak장치, 프랑스는 TORE SUPRA라 하는 중형규모의 초전도 Tokamak장치의 건설에 착수하고 있다. 한편, 미국에서는 Miller방식의 세계최대의 핵융합장치개발을 추진시키고 있으며, 또 Tokamak형 실험로를 목표로 여기에 필요한 초전도 Troidal Coil의 개발을 위한 대형코일사업(LCT : Large Coil Task)이 Oak Ridge국립연구소를 중심으로 하여 다국간의 국제협력으로 진행되고 있다. 그러나 핵융합용초전도자석의 실현을 위해서는 금후 해결되어야할 기술적 문제가 수없이 많다. 예를들어 고자장발생과 Pulse자장발생등의 과제를 들 수 있다. 즉, 핵융합에 필요한 자장은 적어도 8Tesla 이상이 요구되며 현재 개념설계가 진행되고 있는 실험로에서는 12Tesla의 자장이 필요하다. 이때문에 초전도재료가 고자장에서 상전도로 Quenching(전이)하지 않도록 재료의 성질과 냉동방법을 개선시킬 필요성이 있으며, 또한 초전도자석의 권선부는 종래의 산업기에서 볼 수 있는 압력치가 비교가 되지 않을 정도로 큰 압력을

〈표 5〉 초전도 응용전력기기 장점과 개발과제

적용기기	초전도화의 장점		과 제	산화물계초전도 (액체질소냉각)의 효과
	협의를 장점 주 1	광의의 장점 주 2		
저속응려자 초속응려자 계자권선만의 초전도화	<ul style="list-style-type: none"> • 효율 향상 (0.5~1.0%) • 소형화 (50%) • 경량화 (50%) 	<ul style="list-style-type: none"> • 안전도 향상 저속응려자에서 1.3배 정도 초속응려자에서 1.7배 정도 	<ul style="list-style-type: none"> • 회전자구조 전자력 냉각 • 계자권선의 기계적안전성 • 고정자권선의 기계적 전기적 안전성 	<ul style="list-style-type: none"> • 회전자구조가 일부 간략화되어 구조상의 문제가 경감된다. • 발전효율은 0.03된다. • 중량이 95%로 된다.
완전초전도 계자권선 고정자권선	<ul style="list-style-type: none"> • 효율 향상 (0.8~1.3%) • 소량화 • 경량화 	<ul style="list-style-type: none"> • 안전성 향상 		
변 압 기	<ul style="list-style-type: none"> • 효율 향상 (0.1%~0.2%) • 경량화 (60%) • 소형화 (40%) 	<ul style="list-style-type: none"> • 초전도계와 상온계의 결합 (계통연계) • 고장전류억제 	<ul style="list-style-type: none"> • 전자력 • 절연 • 권선구조 교손실의 저하 • 냉각(초임계 헬륨) • 급냉시 운전방식 	<ul style="list-style-type: none"> • 기기의 구조가 간략화되어 절연면에서도 용이하여 짐. • 냉각효율이 향상된다.
교 류 케 이 블	<ul style="list-style-type: none"> • 효율 향상 • 275KV 3GVA에서 손실이 OF 케이블 경우의 1/10 • 소형화 • 275KV 3GVA에서 소요공간이 OF 케이블 경우의 1/5 • 제조한계용량의 확대 	<ul style="list-style-type: none"> • 허용송전거리의 장거리화 • 전력계통의 대전류화, 저전압화 (계통구조의 저코트화) 	<ul style="list-style-type: none"> • 케이블구조 • 교류손실 • 열수축 • 절연 	<ul style="list-style-type: none"> • 단열구조, 냉각시스템이 간략화되어, 케이블코스트가 20~40% 저하된다. • 냉각효율과 병합하여, 송전코스트가 10~30% 저하된다.
전 력 저 장		<ul style="list-style-type: none"> • 고효율전력저장 (저장효율 90% 이상) 	<ul style="list-style-type: none"> • 전자력지지 (암반) • 급냉방지대책 • 자기차폐 	<ul style="list-style-type: none"> • 단열구조가 간략화되어, 건설비가 감소된다.

(주 1) 협의의 장점 : 적용기기단체로서 현재의 기기와 비교하였을때의 장점

(주 2) 광의의 장점 : 적용기기를 전력시스템이나 플랜트에 결합하였을때의 장점

받으며 경우에 따라서는 100 kg/mm^2 에 이르는 전자력이 작용하게 된다. 이러한 전자력의 응력치에, 또 Pulse자장에 의한 이들 전자력의 반복응력에 견딜 수 있는 구조재료의 개발이 필요할 뿐만 아니라 극저온에서의 이들 재료성질을 평가하는 평가시험방법도 급후 확립되어야 한다. 기타에도 Helium액화기, 전자석주변의 냉동계의 제어기기 및 이들로 구성되는 전운전시스템의 검토와 신뢰성의 확립이 중요한 과제이기도 하다. 초전도자석을 비롯한 위와 같은 기초적, 공학적 기술의 제 과제가 극복될때 비로소 "인류의 꿈"이라 일컬어지는 핵융합로의 실현이 기대될 것이라 생각한다.

3-4. 초전도자기부상열차에의 응용과 과제

21세기의 수송수단으로서 자기부상열차(Linear mortar car)가 주목을 받고 있다. 그 실현을 목표로 현재 여러가지 기술개발이 시도되고 있으나 그중에서도 가장 유망시 되고 있는 것이 초전도코일의 유도반발력을 이용하여 차체를 부상시키는 초전도방식이다. 여객수송수단으로서의 철도는 오랜 역사를 가지고 있으며 증기기관차로부터 전기기관차, Diesel기관차, 전차와 같이 그동력방식의 형태가 변화하여왔다. 그러나 레일과 차륜의 접촉이란 기본구성은 변화하지 않고 있다. 철도차륜은 차륜과 레일의 마찰력으로 구동력을 지면에 주어 그 반발력으로 주행한다. 이러한 경우 주행속도는 열차속도의 거의 사승에 비례하여 증가하는 저항을 받게된다. 따라서 주행속도는 어느한계를 갖게되며 이속도가 $300\sim 350\text{ km/hr}$ 이라 일컬어지고 있다. 또 고속화하면 할수록 차륜운동에 불안정이 뒤따르고 진동소음이라는 새로운 공해문제를 발생하게 된다. 초전도를 이용한 자기부상식철도의 최대의 특징은 전연 새로운 발상에 의한 철도시스템을 구성하는데 있다.

즉, 초전도자기부상열차는 강력한 자장을 발생시키는 차내의 초전도코일과 지상 주행로에 설치한 코일(상전도코일) 사이에 일어나는 유도반발력으로 차륜을 부상지지, 안내, 추진시켜 위와 같은 제문제를 일거에 해결할 수 있다. 그 원리를 살펴보면 차내에 초전도코일을 좌우대칭으로 추진방향을 NS NS와 같이 교대로 배치하고 이들 맞은편의 지상주행로에

는 부상용 지상코일을 같은 간격으로 부설한다.

또 측벽에는 추진과 차륜안내겸용의 지상 Coil이 설치되어 있다. 차륜을 주행시키면 차내의 초전도자석의 자속이 지상Coil을 끊게 되어 전자유도의 원리에서 Coil에 전류가 흘러 차내의 자석과 지상Coil사이에 반발력이 생겨 차륜이 부상하게 되는 것이다. 유도전류를 이용하기 때문에 정지시에는 부상력은 없으며, 또 속도가 낮을 때에도 부상력은 충분치 않으므로 별도의 보조지지장치를 이용한다. 인내력의 발생원리도 부상의 경우와 같으나 좌우측의 안내용 지지Coil을 전기적으로 접촉시켜 좌우양측의 유도전류를 상쇄하게 하여 차륜의 중심이 주행로의 중앙에 위치하게 한다. 만일에 어느 한쪽으로 기울어질 때에는 유도전류가 흘러 가까워진 지상 Coil과는 반발하고 멀어진 Coil과는 흡인하여 중앙에 돌아오게 한다. 추진력은 LSM (Linear Synchronous)을 이용하며 차내의 초전도자석의 자장과 지상의 추진안내Coil에 흐르는 전류와의 상호작용으로 추진력을 발생시킨다. 자극이 한pitch나아가 반대의 극성으로 되는 것에 맞추어(동기) 지상coil의 전류를 반전시키면 계속하여 같은 방향의 추진력이 나오게 된다. 따라서 지상coil의 전류를 반전시키는 속력, 즉 주파수로서 차륜을 가속 또는 감속하게 한다.

초전도자기부상방식열차는 일본의 미야사기실험선(ML 500및 MLUOOI)에서 그 고속안정성과 LSM추진의 기술적 가능성이 이미 검토, 확립되었다. 금후의 연구개발의 중점은 차륜용초전도자석, 차내의 냉동장치 및 전력공급시스템에 있다고 보며 장치나 시스템의 내구성, 신뢰성을 더욱 추구하여갈 것이다. 또한 저온기술, Power Electronics, 광정보전송 등의 새로운 기술은 초전도자기부상열차의 개발에 크게 기여할 것이라 생각한다. 미국에서는 MIT에 의한 초전도방식 LSM추진아루미 쉬-트부상의 M agneplan구상의 모형실험을 이미 완료하였으며, 또 진공 Tube내를 주행하는 초전도자기부상열차의 개발연구를 추진하고 있다. 캐나다에서는 도시간 고속에 LSM추진초전도부상, 도시내 교통은 흡인형부상을 목표로 하여 실물대의 초전도자석의 시작을 검토하고 있는 단계에 있다. 참고로 초전도자기부상열차가 현재의 철도열차에 대해서 갖는 장점을 표(6)에 비교하여 보았다.

〈표 6〉 리니어 모터카와 재래형철도 비교

항 목	리 니 어 모 터 카	신 간 선
최고속도	시속 500km	시속 260km
차량지지·추진	자력으로 비접촉지지·추진	차륜과 레일로 지지·추진
소음·승차감	부상하기 때문에 바람을 가르는데 정도이고 소음·진동은 거의 없다.	소음, 고속운전시의 진동 모두 크다. 반드시 대책이 필요
보 수	궤도와 접촉이 없고 보수는 거의 불필요 집전이 필요없으므로, 가선이 불필요	궤도·가선의 마모와 변동이 많고, 보수가 항상 필요
안전성	탈선등의 위험성이 없다	탈선의 가능성이 있다
건설비용	신간선보다 염가	

(주) : 리니어 모터카의 최고속도는 JR 초전도 방식의 것. (NRC 작성)

3-5. 의료에의 응용 (NMR-CT 또는 MRI)

최근 의학, 의료의 분야에서 NMR-CT (핵자기공명단층영상장치)가 새로운 단층영상법으로서 주목을 받고 있다. 그것은 X선이나 초음파에 의한 단층상에 비하여 핵자기공명단층상의 경우에는 조형제가 불필요하고 뇌와 골수와 같이 빠르게 둘러 쌓여진 부분까지도 영상화할 수 있고, 또 반사에 의한 허상이 없으며 용이하게 임의의 절단면에 대한 영상을 나타낼 수 있기 때문이다. 그러나 NMR-CT의 제일의 특징은 형태진단과 더불어 기능진단이 가능하여 생체내에서의 생화학적 과정의 시공간분포에 관한 정보를 주어 여러가지 병의 조기발견이나 대사이상의 발견이라 하는 의학, 의료상의 문제 뿐만 아니라 넓게는 생체 기능을 해명하여 가는데 아주 중요하다고 할 수 있다.

핵자기공명단층영상법의 원리는 간단히 다음과 같다. 원자핵의 속성에는 질량, 전하 및 Spin 등이 있으며, Spin에 유래하는 자기 Moment를 갖는다. 자기 Moment를 갖는 원자핵을 자장속에 놓아 전자파를 보내면 핵종과 자장으로 정하여지는 일정한 주파수의 전자파를 흡수하여 여기상태로 된다. 이를

핵자기공명상태라 부른다. 전자파를 끊으면 핵은 최초의 상태로 돌아가며 이때 전자파를 방출한다. 방출되는 전자파의 강도는 Spin-격자완화시간 T_1 과 Spin-Spin완화시간 T_2 에 관계하며 T_1 과 T_2 는 NMR의 Parameter이다. 한편, 현재 NMR단층영상에서 측정의 대상이 되고 있는 핵은 주로 양성자이며 이것은 생물체의 주체인 물의 수소원자핵이다. 양성자의 T_1 과 T_2 는 수소의 화학적 결합상태 및 물리적상태에 따라 다르게 된다. 환언하여 T_1 과 T_2 는 인체의 조직에 의해서도 또 그것이 악성종양화하여 있어도 다르게 된다. 따라서 인체각부의 공명강도 T_1 및 T_2 의 분포를 측정하면 각각에 대한 영상을 그릴수가 있다. 핵자기공명단층상이란 바로 이들 Parameter의 공간분포를 영상화한 것이라 말할 수 있다.

처음의 핵자기공명단층상용의 자석으로서의 직경 0.5m 정도의 공간에 자장의 세기가 0.1~0.3Tesla (상전도) 이고 변동율 10^{-5} 정도의 균일한 자장을 발생시키는 것이었으나 현재에는 초전도재료를 이용, 그 Tesla 정도의 자장을 발생시키는 초전도자석이 주종을 이루고 있으며, 자장의 안정도가 좋고 자장이 강하여 보다 선명한 영상이 얻어지고 있다. 뿐만 아

나라 인체의 대부분을 이루는 수소 즉, 수소이외의 P, Ca, C등의 영상화도 기대되고 있다. 인체를 구성하는 수소 이외의 구성요소인 P, Ca, C등의 핵종에서 나오는 신호강도는 수소에 비하여 극히 약하므로 이들의 실용상의 영상화를 위해서는 초전도자석이 반드시 필요하며 MRI에 있어 초전도자석은 장래 필수적인 것이 될 것이다.

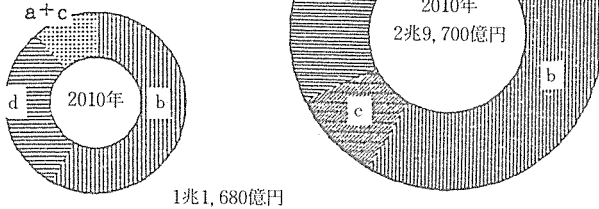
현재 국내에도 이들 장치가 소수 있기는 하나 가까운 일본에서는 1989년 현재 700대가 큰 병원등에 도입되어 임상용의로기기로서 활용되고 있다. 급후에도 수요는 대폭으로 증가할 것이 예상되고 있다. 현재 MRI에 있어서 최대의 기술과제는 자기차폐에 있다고 말할 수 있다. 이미 관리구역 경계에서 5T(테스터)이란 규제를 달성하는 기술은 실현되고 있으나 자기Shield를 포함하는 MRI시스템 전체의 경

량화, 소형화, Cost경감 등이 급후 해결되어야 할 과제라 생각한다.

한편, 최근의 고온초전도체의 선제가 실현되면 동일한 자장을 보다 높은 온도에서 발생시킬 수 있을 것이므로 초전도의 MRI에의 응용기술은 보다 진전될 것이 확실시된다. 그러나 현재의 Nb-Ti계 초전도 선제와 같이 고전류밀도의 Jc를 가져, 대전류의 높은 자장을 발생시킬 수 있는 고온초전도코일의 제작 가능성은 다소 요원하다고 본다.

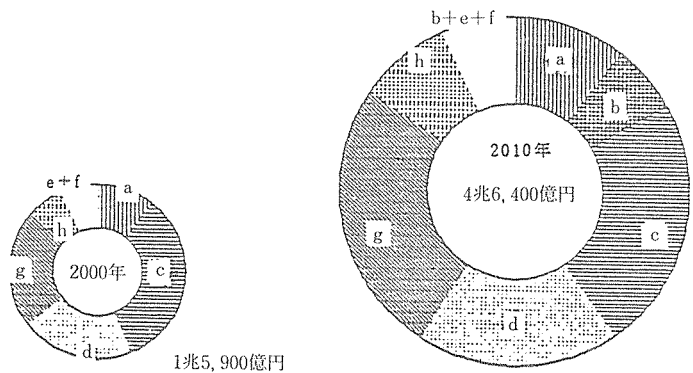
이상 초전도자석의 응용으로서 초전도발전, 에너지저장, 초전도수송, 핵융합, 의료등에 대하여 언급하였다. 본란에서 고찰하지 않은 초전도 Electronic는 차치하더라도 위에서와 같이 초전도기술의 응용 분야는 실로 광대하기만 하다. 또한 미래산업의 중핵이기도 하다. 그러나 초전도기술은 일종의 극한과학

- a. 研究用各種磁石
- b. MRI用磁石
- c. NMR用磁石
- d. SQUID



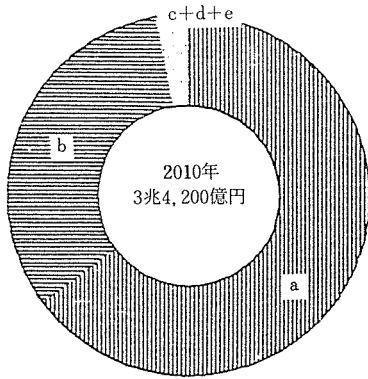
〈그림 6〉 既存市場으로부터의 發展分野의 市場規模

- a. 高速 LSI 配線
- b. 超電導半導體複合IC
- c. Josepson 素子
- d. 超電導 Transistor
- e: Print 基板配線
- f. 超LSI 転写装置
- g. 磁氣 Sensor
- h. 磁氣 Shild



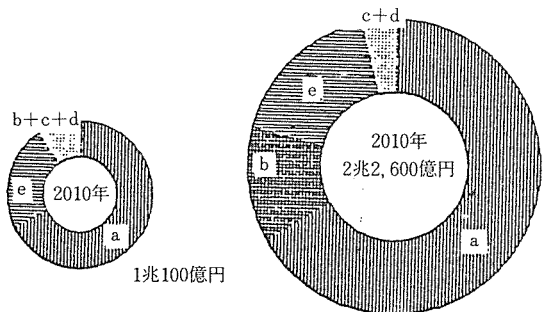
〈그림 7〉 情報·通信分野의 市場規模

- a. Linear Motor Car
- b. 磁氣推進船
- c. 超電導 Valve
- d. 磁氣浮上 Car
- e. 自動車部品



〈그림 8〉 交通·運輸分野의 市場規模

- a. MRI
- b. NMR
- c. SSC
- d. 電子顯微鏡
- e. 超電導加速器



〈그림 9〉 醫療·計測·研究開發分野의 市場規模

기술이어서 이제까지 미답분야에 속하였다고 본다. 그러던것이 최근에 새로운 재료로 되는 고온초전도체가 발견됨에 따라 초전도는 우리인류에게 친근한 것으로 되었으며 현대의 에너지, 정보, 통신, 교통, 의료, 기초과학등 사회의 모든 분야를 근본적으로 변혁시키는 21세기의 Key Technology로서 현재 전세계의 정부, 기업, 대학, 연구소에서 연구개발의 표적이 되고 있다. 그러기에, 현재 우리경제가 봉착하고 있는 성장한계를 극복하고 산업구조를 고도화하여 2000년대의 선진국 진입을 하여 첨단기술산업육성에 총력을 기울이고 있는 우리나라 및 우리나라기업으로서는, 이 분야가 거대과학이고 대규모 투자라하여 외면만은 할수 없다고 본다. 현대는 모방의 기술보다는 창조의 개발을 요구하고 있다. 우리경제가 목표로하는 고부가가치제품의 생산과 첨단기술은 우수한 특성을 갖는 새로운 소재의 개발과 이를 응용하는 기술의 발전 즉 재료기술의 고도화에 토대를 두어야 한다. 초전도기술은 이미 MRI, SQUID 등에 응용되고 있으며 그 진가를 발휘하고 있다. 또 금세기내에는 초전도발전기, 초전도고온가속기, 초고속 Computer 등에서 그일부가 기필코 이용될 것

이 예상되고 있다. 이러한 시점에서 우리로서는 “거창한 개발목표”의 전시보다는 초전도의 소규모응용이 가능한 기술부터 연구개발하여 이들 요소기술의 축적을 기반으로하여 점차로 대규모의 과제로 확대시켜 가는것이 현명하다고 본다. 이러한 소규모응용의 대표적인 것이 MRI장치라고 필자는 보고있다. MRI는 금후 필수적인 임상용의료기기로서 그 자리를 굳힐 것이며 그 수요도 해가 거듭할수록 전세계에 걸쳐 대폭적으로 증가할 것이라 본다. 한가지 부연하고자 하는것은 위와같은 초전도응용기술발전의 원동력이 된것은 초전도체의 개발과 그 선재화기술의 발전이라 본다. 따라서 금후의 고성능초전도체재료의 개발과 그 선재화기술은 장래의 초전도응용기술의 요소가 될 것이며 이들 재료기술의 연구발전을 통하여 그 비약을 기대할 수 있을 것이다. 끝으로 위에서 언급한 각 초전도자석의 응용기기 및 시스템에 있어서 예상되는 금후의 시장규모를 각 분야별로 그림6, 7, 8, 9에 나타낸다.

이 자료는 New Ceramics No. 10(1990)에 근거한 것임.