



# 토카막 핵융합장치용 초전도 자석

류경우\*, 류강식\*\*, 오봉환\*\*\*, 오상수\*\*\*

(\*전남대 공대 전기공학과 전임강사, \*\* 전기연구소 초전도응용연구사업팀 팀장, \*\*\* 동 사업팀 선임연구원)

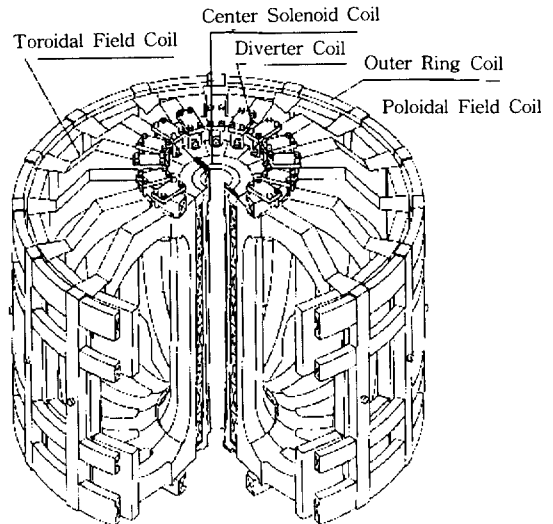
## 1. 개 요

핵융합 반응을 일으키기 위한 조건으로써는 핵융합 연료를 초 고온(1억도 이상)의 플라즈마상태로 그 밀도와 밀폐(반응)시간의 곱이  $10^{20} \text{sec/m}^3$  이상에 도달하도록 핵융합 반응 공간내에 밀폐시켜야 한다[1]. 현재까지의 밀폐방식은 강력한 전자석의 전자력을 이용하는 자계 밀폐방식(Magnetic Confinement)과 레이저등을 이용하는 관성 밀폐방식(Inertial Confinement)이 있다. 강력한 자장 발생이 용이한 특징을 지닌 초전도자석이 요구되는 자계 밀폐방식에도 여러가지 방식이 있으나, 크게 분류해 보면 원환체(Torus)상의 자장을 발생시키는 토러스 밀폐방식과 직선상의 자장을 발생시키는 개방형 밀폐방식으로 대별되며 그 중에서도 핵융합 반응을 일으키기 위한 조건에 가장 근접한 플라즈마를 실현시키고 있는 토러스 밀폐방식의 일종인 토카막(Tokamak) 핵융합장치용 초전도자석에 대해 고찰한다.

## 2. 토카막 핵융합장치용 자석계통

초 고온의 플라즈마를 전자력으로 밀폐시키기 위해서는 자장이 플라즈마에 가하는 자기압력이 플라즈마 자체압력보다 크도록 해야할 필요가 있으며, 이를 위해 토카막 핵융합장치에서는 그림1과 같이 원환체상의 플라즈마를 감싸도록 배치된 톨로이달자장 코일(Toroidal Field Coil)이 요구되며 이 코일이 플라즈마를 원환체상으로 밀폐시키는 톨로이달자장을 발생시키는 기능을 담당하게 된다. 초 고온의 플라즈마는 이 톨로이달자장과 플라즈마 중에 흐르는 전류에 의해 발생된 자장과의 합성인 나선형의 자장에 의해 밀폐된다. 토카막 핵융합장치에서는 플라즈마를 밀폐시키는 기능을 담당하는 톨로이달자장 코일외에도 장치 중앙에 위치해 플라즈마에 전류를 유도시켜 지속적인 플라즈마의 주열가열 기능을 담당하는 중앙 솔레노이드코일(Center Solenoidal Coil)과 플라

즈마 중의 전류에 의해 발생된 자장과 자신의 전류에 의해 플라즈마는 외부로 팽창하려 하는데 이를 방지시켜 원환체상의 중심으로 플라즈마의 위치를 제어하는 기능을 담당하는 외부 링코일(Outer Ring Coil), 그리고 플라즈마내의 불순물 제어 및 핵융합 반응결과 생성되는 물질을 핵융합장치 외부로 배출시키는 기능을 담당하는 다이버터코일(Divertor Coil)로 구성되며, 톨로이달자장 코일은 정자장(Static Field)을 발생시키는데 반해 나머지 코일 전부는 원환체상의 플라즈마에 수직인 방향으로 펄스자장(Pulse Field)을 발생시키며 이들을 통칭하여 폴로이달자장 코일(Poloidal Field Coil)이라 불려지고 있다.



ITER Superconducting Magnet System

그림 1. 토카막 핵융합장치용 자석계통

현재까지 세계 3대 임계플라즈마 시험장치로 알려진 미국의 TFTR(Tokamak Fusion Test Reactor), 유럽 공동체의 JET(Joint European Tokamak) 및 일본의 JT-60(Japan Tokamak)은 전부 토카막 핵융합장치이지만 초전도자석이

채택되고 있지 않다[2,3]. 세계 각국들은 상기와 같은 장치 다음으로 핵융합실험로 규모(세계 3대 임계플라즈마 시험장치의 3-4배)의 차세대 핵융합장치를 검토·계획하고 있으나, 이와 같은 규모의 장치에서는 초전도 코일의 채택은 필수 불가결할 것으로 생각된다. 일례로써 일본의 JT-60에 사용된 톨로이달자장 코일의 플라즈마 중심에서 자장은 4.5 T, 코일의 저장에너지는 2.8 GJ, 수냉식의 상전도(Cu) 도체가 채택되고 있으며 코일의 운전 모드는 5초간의 펄스적 운전이 되고 있다[4]. 이 장치의 경우 코일의 1회 통전에서도 톨로이달자장 코일의 저항손실은 코일 저장에너지의 약 3.5배인 10 GJ로써 막대하다. 일본의 차세대 실험로 계획의 하나인 FER(Fusion Experimental Reactor)의 경우를 살펴보면 톨로이달자장 코일의 저장에너지가 30 GJ, 코일의 통전 시간도 JT-60의 100배가량 긴 시간이 요구되고 있다. 따라서 핵융합 실험장치의 정상상태 운전이라는 점과 더 나아가서 핵융합장치 연구의 최종 목표인 핵융합 발전을 고려할때 초 대형의 코일에 의한 고 자장 발생은 필수 불가결 하며 이와 같은 핵융합장치에서 상전도 도체의 사용을 생각한다면 막대한 코일의 저항손실로 핵융합 발전의 효율을 대단히 저하시켜, 결국 초전도 코일 없이는 그 실현이 불가능할 것으로 생각된다. 물론 초전도 코일의 냉각에 소비되는 전력손실은 발생하게 되지만 상전도 코일에서 발생하는 저항손실과 비교해 대략적으로 100분의 1~1000분의 1정도이며, 이와같은 상황은 톨로이달자장 코일뿐만 아니라 폴로이달자장 코일의 경우도 상황은 동일하다.

이상에서는 핵융합 장치에 있어서 초전도 코일의 필요성을 고찰하였지만 이 뿐만아니라 초전도응용 분야에서도 가속기가 초전도응용 기술의 성능면에서 고도화에 크게 기여한 바와같이 핵융합용 초전도 코일기술은 초전도응용 기술의 대형화에 크게 기여할 것으로 생각된다. 특히 핵융합장치용 초전도 코일기술과 깊은 관계를 갖는 대전류용량 초전도 도체기술 및 대형 초전도 코일기술 등은 거의 공통된 기술을 요구하는 중 규모이상의 초전도 전력에너지 저장장치의 실현에도 큰 기여를 할 것으로 기대된다.

### 3. 토카막 핵융합장치용 초전도자석

#### 3.1. 초전도자석에 요구되는 사항

토카막 핵융합장치용 초전도자석의 제작에서 고려되지 않으면 안될 여러가지 문제점들이 있지만 그 중 중요한 사항들을 살펴보면 무엇보다도 먼저 초전도자석의 외형적 거대화(직경 수-수십m) 및 대전류용량화(수kA-수십kA)를 들수있으며, 다음으로 초전도자석의 고성능화(특히 폴로이달자장 코일중 중앙 솔레노이드코일의 경우 고 자장화 및 고 전류밀도화) 이는 핵융합반응으로 부터 발생하는 고 에너지의 중성자는 초전도자석에 방사선 손상을 가하게되고 이와같은 손상을 경감시키기 위해 충분히 차폐를 시키게 되면 차폐체에 의해 자장공간의 충분한 이용이 불가능해져

초전도자석을 더욱 커지게 하는 원인이 된다. 그리고 초전도자석의 수명을 결정하는 전기절연재료의 경우 방사성 영향을 가장 쉽게받는 재료로써 내방사성이 우수한 재료를 초전도자석의 절연재료로써 선택해야 하며, 특히 톨로이달자장 코일은 운전중 다수의 중성자에 노출되고 코일용기 등에 사용되는 스텐레스강이 방사성에 오염이 된다. 이 때문에 사람의 접근이 불가능하게 되고 만일 고장시는 원격 수리작업을 해야한다. 따라서 현실적으로는 방사성에 오염된 후 수리는 불가능함으로 톨로이달자장 코일은 영구적 부품과 동등한 신뢰성이 요구된다고 말할수 있다.

#### 3.2. 초전도자석을 채택한 핵융합장치

핵융합장치용 자석으로써 상전도 도체를 채택하고 있는 핵융합 장치는 앞서 지적인 TFTR, JET, JT-60외에도 상당수가 세계 각처에 현존하며, 특히 여기서는 정상상태 운전실험을 목표로하는 핵융합장치에서 필수 불가결한 초전도자석을 채택한 핵융합장치에 대해 외국의 사례를 중심으로 고찰한다. 현재까지 세계적으로 개발된 핵융합장치용 초전도자석으로써는 미국 Lawrence Livermore 국립연구소의 직선상의 자장을 발생시키는 개방형 자계 밀폐방식인 MFTF(Mirror Fusion Test Facility)의 음양 초전도 코일, 일본 국립핵융합과학연구소에서 1997년 완공 예정인 원환체상의 자장을 발생시키는 토러스 자계 밀폐방식의 일종인 LHD (Large Helical Device)에서 2개의 나선형 초전도 코일(Helical Coil) 및 3개의 폴로이달 초전도 코일이 개발된 바 있으며[5,6], 그 외 핵융합반응 조건에 가장 근접한 플라즈마를 실현시키고 있는 토러스 밀폐방식의 일종인 토카막 핵융합장치로써는 소련 I.V.Kurchatov 원자력연구소의 T-15[7], 프랑스 Centre d'Etudes Nucleaires de Cadarache의 TORE SUPRA[8], 일본 큐우슈대학의 TRIAM-1M의 톨로이달자장 초전도 코일이 개발된바 있으며 초전도자석을 채택한 토카막 핵융합장치에 대해서만 요약 정리하면 표1, 2, 3, 4와같다.

표 1. 토카막 핵융합장치용 초전도자석의 주요 특징

장치명	소련	프랑스	일본
	T-15	TORE SUPRA	TRIAM-1M
형상	원형	원형	D형
크기[m]	2.6	2.6	0.9×1.2
냉각 방식	강제냉각 (SHe)	침지냉각 (SFHe)	침지냉각 (LHe)
초전도체	Nb <sub>3</sub> Sn	NbTi	Nb <sub>3</sub> Sn
최대 자장[T]	9.3	9	11

SHe:Supercritical Helium, LHe:Liquid Helium, SFHe:Superfluid Helium

표 2. T-15 장치의 주요 제원

장치	플라즈마 주 반경 [m]	2.43
	플라즈마 부 반경 [m]	0.7
	플라즈마 전류 [MA]	2
	플라즈마 축상의 TF [T]	4.5
톨로이달자장 코일	Double pancake의 수	24
	턴 수	456
	정격 전류 [kA]	5.6
	인덕턴스 [H]	50.5
	최대 자장 [T]	9.3
	충·방전 시간 [s]	24
초전도체	도체 무게 [Tons]	90
	크기 [mm×mm]	18×6.5
	소선 수 [개]	11
	초전도체/안정화재	Nb <sub>3</sub> Sn/Cu
	냉각체닐 수 [개]	2
소선	조립에서 단위 도체길이 [m]	340
	직경 [mm]	1.5
	필라멘트수 [개]	14,461
	필라멘트 직경 [μm]	4.5

TF:Toroidal Field

표 3. TORE SUPRA 장치의 주요 제원

장치	플라즈마 주 반경 [m]	2.25
	플라즈마 부 반경 [m]	0.7
	플라즈마 전류 [MA]	1.7
	플라즈마 축상의 TF [T]	4.5
톨로이달자장 코일	Double pancake의 수	
	턴 수	
	정격 전류 [kA]	1.4
	인덕턴스 [H]	
	최대 자장 [T]	9
	충·방전 시간 [s]	30
초전도체	도체 무게 [Tons]	45
	크기 [mm×mm]	2.8×5.6
	NbTi/Cu/CuNi	0.29/0.62/0.09
	필라멘트 직경 [μm]	20
	필라멘트 수 [개]	10,800
	조립에서 단위 도체길이 [m]	

### 3.3. 대형 초전도자석 개발사례

상기의 초전도자석을 채택한 토카막 핵융합장치외에도 국제 에너지기구(International Energy Agency)의 후원으로 미국, 일본, 유럽공동체 및 소련이 참가하여 핵융합의 과학적,

표 4. TRIAM-1M 장치의 주요 제원

장치	플라즈마 주 반경 [m]	0.8
	플라즈마 부 반경 [m]	0.12×0.18
	플라즈마 전류 [MA]	0.5
	플라즈마 축상의 TF [T]	8
톨로이달자장 코일	Double pancake의 수	
	턴 수	
	정격 전류 [kA]	6.2
	인덕턴스 [H]	
	최대 자장 [T]	11
	충·방전 시간 [s]	
초전도체	도체 무게 [Tons]	
	크기 [mm×mm]	14×7.1
	Nb <sub>3</sub> Sn/Cu/Al	
	필라멘트 직경 [μm]	4
	필라멘트 수 [개]	361×1.447
	조립에서 단위 도체길이 [m]	

공학적 및 기술적 입증을 목표로한 국제 열핵융합 실험로 (International Thermonuclear Experimental Reactor : ITER)용 초전도 톨로이달자장 코일의 경우 대 직경이 16 m, 최대자장이 12 T, 정격 전류가 30 kA가 요구되며, 톨로이달자장 코일의 경우 직경이 1.7 ~ 11 m, 최대자장이 6 ~ 13 T, 정격 전류가 38 ~ 43 kA가 요구된다[9]. 이와 같은 초대형 초전도 코일의 실현을 위한 전단계의 초전도자석 개발이 행해져나 있으며 고 전류밀도·고 자장 초전도 도체 개발을 목표로한 일본 TMC(Test Module Coil), 미국, 독일,일본 및 스위스가 공동으로 국제 열핵융합 실험로용 톨로이달자장 코일 개발의 전단계로써 초전도자석을 제작하여 미국 Oak Ridge국립연구소에서 6개의 코일을 원환체 주위에 배치하여 모의 시험평가하는 것을 목표로한 LCT(Large Coil Task)[10-13] 그리고 국제 열핵융합 실험로용 직류 운전모드의 톨로이달자장 코일 및 펄스 운전모드의 톨로이달자장 코일용 대 전류, 고 자장, 저 교류손실의 초전도 도체 개발을 목표로한 일본 DPC(Demonstration Poloidal Coil)의 연구개발 사례도[14] 있으며 토카막 핵융합

표 5. 대형 초전도자석의 주요 특징

시업명 내용	일본	미국, 독일, 일본, 스위스	일본
	TMC	LCT	DPC
개발 대상	톨로이달자장코일	톨로이달자장 코일	톨로이달자장코일
코일 형상	원형	D형	원형
코일 크기[m]	1.584	3.5×4.5	2
냉각 방식	침지냉각 (LHe)	강제 혹은 침지냉각 (SHe 혹은 LHe)	강제냉각 (SHe)
초전도체	NbTi, Nb <sub>3</sub> Sn	NbTi, Nb <sub>3</sub> Sn	NbTi, Nb <sub>3</sub> Sn

SHe:Supercritical Helium, LHe:Liquid Helium

표 6. LCT 초전도 코일의 주요 제원

개발국 내용	미국			독일	일본	스위스
	ORNL			KfK	JAE-RI	SIN
주 관 기	ORNL			KfK	JAE-RI	SIN
제작 사	GD	GE	W	Sim-ens	Hit-achi	BBC
초전도체	NbTi	NbTi	Nb <sub>3</sub> Sn	NbTi	NbTi	NbTi
운전 온도 (K) 및 냉각 방식	LHe 침지	LHe 침지	SHe강제	SHe강제	LHe 침지	SHe강제
정격 전류 (kA) at 8T	10.2	10.4	18.0	11.0	10.2	15.0
기차력 (MAT)	6.65	6.98	7.36	6.62	6.73	6.60
권선 방식	Lay-er	Panc-ake	Pan-cake	Pan-cake	Pan-cake	Pan-cake

ORNL:Oak Ridge National Laboratory  
 KfK:Institut Fu'r Technische Physic, Kernforschungszentrum Karlsruhe  
 JAERI:Japan Atomic Energy Research Institute  
 SIN:Swiss Institute for Nuclear Research  
 BBC:Brown Boveri Cie., Ltd  
 GD:General Dynamics, GE:General Electric  
 W:Westing House  
 SHE:Supercritical Helium, LHe:Liquid Helium

장치용 초전도자석 개발을 목표로 했던 대형 초전도자석 개발사례를 요약 정리하면 표 5, 6, 7, 8, 9와 같다.

#### 4. 핵융합장치용 초전도도체

핵융합장치와 같은 대형 초전도자석에 사용되는 초전도도체에서 고려되어야 할 중요 사항을 살펴보면 강한 전자력에 견딜수 있는 높은 기계적 강도를 가질 것, 펄스운전 및 플라즈마 붕괴시 발생하는 교류손실을 최대한 억제하는 도체방식이어야 하며, 다양한 외부교란에 대해서도 초전도성이 깨지지 않는 높은 안정성을 가질 것, 대형 초전도자석에서 켄치가 발생시 조기 켄치검출이 가능할 것, 초전도도체의 전류밀도가 높을 것, 펄스운전 및 켄치시 발생하는 고전압에 견디도록 충분한 전기절연 내력을 가질것 등을 들 수있으며, 이와 같은 요건을 잘 충족시키는 도체방식으로는 초임계 헬륨에 의해 냉각되는 강제냉각 방식의 초전도도체로써 CIC(Cable-in -Conduit)도체가 가장 활발히 연구 개발되고 있다. ITER용 대전류 용량 초전도도체 개발을 목표로 하여 수십 kA급의 CIC도체에 대한 시험평가를 완료한 DPC를 중심으로 요약 정리하면 표 7, 8, 9와 같다. DPC-U의 경우는 저 교류손실의 NbTi초전도도체 개발을[15], DPC-EX의 경우는 저 교류손실의 Nb<sub>3</sub>(SnIn)도체 개발을[16], DPC-TJ의 경우는 고 기계적강도 및 고 전류밀도 (NbTi)<sub>3</sub>Sn도체 개발을 목표로 했던 대형 초전도도체들 이다[17].

표 7. DPC-U 초전도 펄스코일의 주요제원

코 일	내 직경 (m)	1
	외 직경 (m)	2
	높 이 (m)	0.3
	Double pancake의 수	4
	턴수 (턴수/Pancake)	127 (16)
	정격 전류 (kA)	30
	인덕 턴스 (H)	0.02
	최대 자장 (T)	7
	충·방전 율 (T/s)	7
	전류 밀도 (A/mm <sup>2</sup> )	24
초전도 도체 (Mitsubishi)	크기 (mm×mm)	36.3×30.3
	소선 수 (개)	3×3×3×3×6
	Void fraction (%)	38
소선 (Showa) (Formvar)	직 경 (mm)	1.12
	NbTi/Cu/Cu10%Ni 비	1/3.3/1.3
	필라멘트 수 (개)	2,160
	필라멘트 직경 (μm)	10

표 8. DPC-EX 초전도 펄스코일의 주요제원

코 일	내 직경 (m)	1
	외 직경 (m)	1.6
	높 이 (m)	0.17
	Double pancake의 수	2
	턴수 (턴수/Pancake)	120 (30)
	정격 전류 (kA)	10
	인덕 턴스 (H)	0.024
	최대 자장 (T)	10
	충·방전 율 (T/s)	7
	전류 밀도 (A/mm <sup>2</sup> )	25
초전도 도체 (Mitsubishi)	크기 (mm×mm)	40.8×10.1
	소선 수 (개)	3×3×17
	Void fraction (%)	52
소선 (Showa) (Chromium)	직경 (mm)	0.81
	Nb <sub>3</sub> (SnIn)/Ta백/비	
	필라멘트 수 (개)	
	필라멘트 직경 (μm)	

표 9. DPC - TJ 초전도 직류코일의 주요제원

코일	내 직경 [m]	1
	외 직경 [m]	1.8
	높 이 [m]	0.11
	Double pancake의 수	2
	턴수 (턴수/Pancake)	72 (18)
	정격 전류 [kA]	24
	인덕 턴스 [H]	0.009
	최대 자장 [T]	12
	충·방전 율 [T/s]	DC
	전류 밀도 [A/mm <sup>2</sup> ]	40
초전도 도체 (Toshiba)	크기 [mm×mm]	27.5×22
	소선 수 [개]	3×3×3×3×6
	Void fraction [%]	40
소선 (Showa) (Formvar)	직경 [mm]	0.67
	(NbTi) <sub>3</sub> Sn / / 비	
	필라멘트 수 [개]	
	필라멘트 직경 [μm]	

특히 일본 DPC의 연구개발에서 중요한 의의를 살펴보면 펄스용 대형 초전도 도체개발의 성과를 들수 있으며 지금까지 불가능 했던 폴로이달자장 코일까지도 초전도화의 실현을 가능하게 했다는 점이며 세계 최초의 나선형 및 폴로이달자장 코일 전부를 초전도화 시킨 LHD에 응용되고 있다.

참 고 문 헌

[1] 赤崎正則외3인, “플라즈마工學의基礎”, 産業圖書株式會社, pp.183-199, 1990

[2] 核融合技術調査專門委員會 “トカマク形核融合爐の電氣技術”, 日本電氣學會技術報告書, 제188호, pp.1-77, 1985

[3] 大形核融合裝置技術調査專門委員會, “核融合技研究開發の進展と大形核融合裝置技術の開發”, 日本電氣學會技術報告書, 제501호, pp.1-88, 1994

[4] おぎわらひろやす, “應用超傳導”, 日刊工業新聞社, pp.149-157, 1986

[5] O.motojima, J.Yamamoto, K.Yamazaki, N.Ohyabu, T.Mito, M.Takeo, S.Moromoto, M.Fujiwara, A.Iiyoshi, “Project

of Large Herical Device for Currentless steady experiment”, 11th International Conference on Magnet Technology, pp.777-782, 1989

[6] Y.Tuda, K.Toyoda, T.Hirayama, S.Kida, K.Kuno, “First Construction of a Superconducting Herical Coil for Feasibility Study of Large Herical Coil”, 11th International Conference on Magnet Technology, pp.789-794, 1989

[7] N.A. Chernoplekov, N.A. Monoszon, “T-15 Facility and Test”, IEEE Trans. Mag. Vol.23, No.2, pp.826-830, 1987

[8] B.Turck, “TORE SUPRA: A Tokamak with Sperconducting Toroidal Field Coils”, IEEE Trans. Mag. Vol.25, No.2, pp.826-830, 1989

[9] 吉田清, “強制冷却方式による大型超傳導磁石の安定性保と護研究”, JAERI-M 92-119, 日本原子力研究所, pp.1-23, 1992

[10] J. A. Zichy and G. Vecsey, “Design and Testing Results of the Swiss LCT Coil”, IEEE Trans. Mag. Vol.23, No.2, pp.819-825, 1987

[11] A.Ulbricht, “The EURAT-LCT Coil”, IEEE Trans. Mag. Vol.23, No.2, pp.812-818, 1987

[12] P.N. Haubenreich, “The Large Coil Task and results of testing”, IEEE Trans. Mag. Vol.23, No.2, pp.800-805, 1987

[13] S.Shimamoto, “The Japanese-LCT Coil”, IEEE Trans. Mag. Vol.23, No.2, pp.806-811, 1987

[14] H.Tsuji외, “Evolution of the Demo Poloidal Coil Program”, 11th International Conference on Magnet Technology, pp.806-811, 1989

[15] T.Kumano 외, “Development of Superconductors for the Demo Poloidal Coil (DPC-U1,U2)”, 11th International Conference on Magnet Technology, pp.841-846, 1989

[16] Y.Takahashi외, “Verification Tests of the Nb3Sn Demo Poloidal Coil(DPC-EX)”, 11th International Conference on Magnet Technology, pp.862-867, 1989

[17] M.Nishi외, “Development of High Current Density, Large Superconducting Coil for Fusion Machines:DPC-TJ Program”, Cryogenics, Vol.33, No.6, pp.573-580, 1993

## 저 자 소 개



**류경우(柳炅佑)**

1962년 2월 10일생. 1983년 2월 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1985년 2월 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 3월 일본 Yokohama National Uni. 전자정보공학과 졸업(공학). 1986년 5월-1995년 11월 한국전기연구소 초전도응용연구사업팀 선임연구원. 1996년 1월-현재 전남대 공대 전기공학과 전임강사.



**류강식(柳康植)**

1956년 8월 20일생. 1980년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 광운대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 한국전기연구소 초전도응용연구사업팀 팀장.



**오봉환(吳鳳煥)**

1959년 9월 1일생. 1985년 명지대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 일본 Nagoya대학 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 한국전기연구소 초전도응용연구사업팀 선임연구원.



**오상수**

1982년 2월 경북대 공대 금속공학과 졸업. 1989년 3월 일본 경도대 금속공학 졸업(석사). 1992년 3월 일본 경도대 금속공학과 졸업(공학). 1992년 4월~현재 한국전기연구소 초전도 응용 연구사업팀 선임연구원