

헬륨액화와 거대과학 - 가속기, 토카막

장 현 식, 조 광 운, 박 동 성, 김 양 수, 박 주 식
국가핵융합연구소 KSTAR 연구센터

1. 서 론

물질의 궁극적인 근원을 연구하기 위한 입자 가속기나 인류의 미래 에너지원에 대한 대안을 찾기 위한 토카막과 같은 거대과학 장치들은 각각의 최종 목표를 달성하기 위하여 그 규모가 점점 더 대형화되고 있는 추세이다. 대표적인 것들로는 현재 시운전 중인 LHC (Large Hadron Collider, 유럽연합), 그리고 앞으로 건설 예정인 ILC (International Linear Collider)와 ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) 등이 있다. 이러한 초대형 가속기나 토카막의 정상 운전 조건을 구현하기 위해서는 헬륨을 액화하는 장비가 필수적인데 그 이유는 그러한 거대 장치들의 중요 구성 시스템들이 액체헬륨 (liquid helium: LHe) 온도 (~4.5 K) 근처에서 일어나는 물리적 현상들을 이용하기 때문이다. 대표적인 중요 구성 시스템으로는 물질의 초전도 현상을 이용하는 초전도 전자석과 초전도 RF (radio frequency) cavity, 그리고 기체의 저온흡착 현상을 그대로 응용한 cryopump 등이 있다. 액체질소 온도 (~77 K)에서 초전도 현상이 일어나는 고온초전도체가 있지만 초대형 전자석으로 제작하기에는 그 기계적 성질이 취약하고 가속기의 RF cavity나 토카막의 전자석과 같이 교류 전자기장에서 사용은 아직 효율적이지가 않다. 그러므로 초대형 가속기나 토카막의 경우 그 기계적 성질이 뛰어나고 교류 전자기장 환경에서 사용이 용이한 니오븀 (Nb), 니오븀 합금 (NbTi) 또는 니오븀 복합체 (Nb₃Sn) 등의 저온초전도체가 적용되고 장시간의 안정적인 운전이 요구되기 때문에 액체헬륨을 이용하는 냉각 방식 외에는 현재 더 좋은 대안이 없는 상황이다.

2. 가속기와 토카막에서 초전도체 (액체헬륨 냉각)의 필요성

초대형 가속기나 토카막의 경우 보다 큰 자기장의 필요성 그리고 장시간의 연속 운전을 위하여 액체헬륨 온도로 냉각시켜야 하는 저온초전도체의 사용은 필수적이다. 그러나 보다 중요한 이유는 현대 거대과학 장치의 존재를 결정하는 비용 측면에서 초전도체를 사용하는 것이 절대적으로 유리하기 때문이다.

A. 초전도 RF cavity

가속기에서 RF cavity는 전기 전도성 cavity 내부에 고주파 공명 전자기장을 발생시켜 cavity를 통과하는 하전 입자들을 가속시키는 역할을 한다. 일반 구리 cavity에 비해서 초전도 cavity가 갖는 장점은 교류 저항이 훨씬 더 작아 장시간 그리고 효율적으로 (또는 더 큰 에너지로) 입자를 가속시킬 수 있다는 것이다.

구리 cavity는 전기 저항으로 발생하는 고열 때문에 장시간 효과적으로 냉각하는 것이 불가능하고 고에너지의 경우 구리 자체가 녹아버릴 수가 있다. 그러나 초전도 cavity는 발생하는 열이 적어 입자 가속에 사용되는 에너지 외의 낭비되는 에너지가 상대적으로 미미하다. 이는 곧 용량이 훨씬 더 작은 고주파 발생기로 일반 구리 cavity 대비 동일한 또는 그 이상의 입자 가속을 달성할 수 있다는 것을 의미한다.

단적인 예로 입자를 4 MeV/m로 가속시킬 수 있는 RF cavity의 경우 상전도 cavity가 초전도 cavity보다 수백 배의 에너지를 소모한다. 고주파 발생기는 출력 에너지가 높을수록 그 비용이 기하급수적으로 증가하는 장비이므로 초전도 cavity를 사용함으로써 가속기의 장비 및 운전 비용을 크게 절감할 수가 있다. 또한 초전도 cavity는 낭비되는 에너지가 적기 때문에 cavity의 하전 입자 출입구 단면적을 더 크게 제작하여 그만큼 더 많은 입자들을 가속시킬 수가 있다.

이러한 초전도 RF cavity는 대부분 니오븀으로 제작되었으며 KEK (高 Energy 加速機, 일본)를 시작으로 HERA (Hadron Elektron Ring Anlage, 독일), CEBAF (Continuous Electron Beam Accelerator Facility, 미국), LEP (Large Electron-Positron Collider, 유럽연합), LHC (유럽연합) 등 현대 대부분의 대형 가속기에 채택되고 있다.

B. 초전도 전자석

가속기에 사용되는 대표적인 초전도 자석들은 하전된 입자빔을 휘게 하는 dipole과 집속시키는 quadrupole이다. 또한 LHC의 ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS)와 CMS (Compact Muon Solenoid) 같이 가속기에서 일어나는 각종 충돌 반응들을 탐지하고 분석하는 초대형 초전도 자석 장비들도 있다. 토카막의 경우 토러스 모양의 자기장을 만들어 플라즈마를 가두는 toroidal field (TF) 자석과 렌즈의 법칙으로 플라즈마 전류를 유도시키는 poloidal field (PF) 자석이 대표적인 초전도 자석이다.

RF cavity와 마찬가지로 초전도 자석을 사용하는 이유는 전기 저항이 "0"에 가깝기 때문이다. 토카막에서 고온의 플라즈마를 장시간 가두기 위해서는 상전도 자석의 연속 운전 한계치인 2 T보다 큰 고자장이 필요하므로 연속 운전을 위해서는 초전도 자석의 채택이 불가피하다. 또한 상전도 자석은 선재의 전기 저항 때문에 동일 자장의 초전도 자석 대비 순간적으로 수십 배에서 수백 배의 전력을 소모하므로 미래 발전 장치로서의 토카막의 목표와 부합하지 않는다. 표 1에서 보는 바와 같이 월등한 크기와 성능에도 불구하고 전체 소비전력은 초전도 자석을 채용한 ITER가 상전도 자석을 채용한 JET (Joint European Tokamak, 영국) 보다 훨씬 낮다.

또 다른 예로서 LHC에서 상전도 자석을 사용했을 경우를 가정해보자. 상전도 자석에서 장시간 발생시킬 수 있는 최대 자기장은 철심을 사용했을 때 약 2 T 정도이다 [1]. 그럴 경우 표 2에서 보는 바와 같이 가속기의 크기와 함께 건설비용도 엄청나게 증가할 수밖에 없다. 그 외 상전도 자석의 유한한

저항으로 인하여 최대 50 MW [2] 정도인 초전도 자석 전력 소모량이 수백 MW로 증가해 가속기의 운영비용에도 치명적인 결과를 초래하게 된다. 단적인 예로 LHC 자석과 거의 동일한 양의 전력을 사용하는 상전도 자석으로 만들어진 SPS (Super Proton Synchrotron, 유럽연합)는 운전 가능 단일 빔의 세기가 315 GeV로 [3] LHC의 7 TeV와 비교하면 1/20도 되지 않는다.

표 1. JET [4]와 ITER [5]의 주요 제원 비교.

	JET	ITER
플라즈마 반경 [m]	3	6.2
플라즈마 전류 [MA]	7	15
플라즈마 지속시간 [sec]	60	>400
TF 자장 세기 [T]	4	5.3
핵융합 에너지 [MW]	16	500
"전체" 소비 전력 [MW]	700	500

표 2. LHC의 자석을 초전도와 상전도로 만들 경우 비교.

	자장 세기	가속기 둘레	전자석수
초전도	8.3 T	27 km	~1500
상전도	2 T	108 km	~6000

초전도 자석을 이용하는 장치로는 Tevatron (미국) HERA, SNS (Spallation Neutron Source, 미국), LHC 등의 대형 가속기와, Tore Supra (프랑스), EAST (Experimental Advanced Superconducting Tokamak, 중국) KSTAR (Korea Superconducting Tokamak Advanced Research, 대한민국) 등의 토카막, 그리고 토카막의 사촌격인 LHD (Large Helical Device, 일본), Wendelstein 7X (독일) 등의 Stellarator가 있다. 참고로, 이들 초전도 자석 중 오직 KSTAR만이 제작이 어렵지만 초전도 성질이 뛰어난 Nb₃Sn을 초전도체로 사용하였고 나머지는 모두 다 NbTi로 제작되었다.

C. 저온흡착펌프 (Cryopump)

초전도체를 이용하는 것은 아니지만 거대과학 장치에서 다량의 액체헬륨으로 냉각시켜야 할 또 하나의 장비가 cryopump이다. 토카막의 경우 수소나 헬륨 같은 가벼운 원자들을 플라즈마 반응이 일어나는

진공용기 밖으로 신속하게 배기시킬 필요가 있다. 그러나 가벼운 입자이고 고온일수록 기체의 속도가 커지기 때문에 보통의 turbo-molecular pump (TMP) 등으로는 효율적인 배기가 어렵다 [6]. 기체의 저온 흡착 현상을 이용하는 cryopump는 최종 흡착면을 액체헬륨 온도까지 냉각시킬 경우 대부분의 기체가 응결 및 흡착이 되므로 토카막의 진공용기와 같은 조건에서 가벼운 입자들을 효율적으로 배기시킬 수가 있다. 그림 1의 ITER진공용기용 cryopump의 경우 일차로 입자의 속도를 감속시키는 80 K baffle 그리고 최종적으로 입자를 저온흡착하는 다공성의 활성탄(activated charcoal)이 도포된 4 K cryopanel로 이루어져 있다.

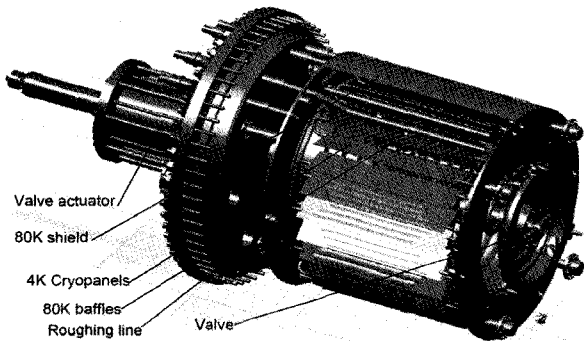


그림 1. ITER 진공용기용 cryopump의 구조 [7].

3. 대형 헬륨액화장치의 원리

현재 대부분의 대형 헬륨액화장치들은 Brayton cycle (등엔트로피 팽창으로 냉각)과 Linde cycle (등엔탈피 팽창으로 냉각)이 결합된 Claude cycle의 개량된 형태인 Collins cycle에 그 기초를 두고 있다. Collins cycle에서는 그림 2에서와 같이 압축 (13→1)된 기체헬륨 (gaseous helium: GHe)을 여러 단계의 등엔트로피 팽창(A→B, C→D)을 거쳐 5~6 K 근처의 초임계헬륨 (supercritical helium: SHE)으로 만든 후 Joule-Thomson (J-T) 밸브에서 등엔탈피 팽창(6→7)으로 액체헬륨을 생산한다. 물론 그림 2의 온도-엔트로피 (T-S) 선도에서 보이는 바와 같이 이상적인 등엔트로피 팽창은 불가능하다.

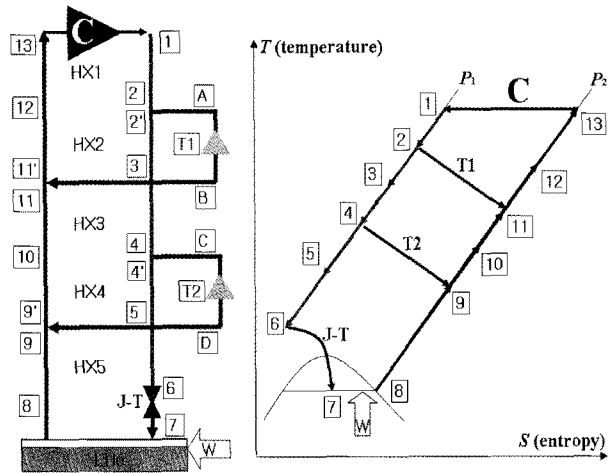


그림 2. Collins cycle 예제와 대응 T-S 선도.

이러한 냉각 cycle의 가장 중요한 단계는 그림 3에서와 같이 고압 (~20 bar 내외)의 헬륨이 터빈을 고속으로 회전시켜 외부 유체 (보통 고압의 헬륨)에 대항하여 일을 하면서 차가운 헬륨을 만드는 등엔트로피 팽창과 이렇게 차가워진 헬륨이 팽창하지 않은 고압의 헬륨을 열교환기 (heat exchanger: HX)에서 냉각시키는 과정이다. 압축을 제외한 Collins cycle의 모든 냉각 과정은 Cold Box (C/B)라 불리는 단일진공 용기 내에서 일어난다. 대형 헬륨액화 장치인 KSTAR 저온헬륨설비의 C/B에는 총 6기의 터빈과 11기의 열교환기가 탑재되었고 (그림 4 참조), 현재 단일 C/B로는 가장 큰 LHC 헬륨설비의 경우 제작사에 따라 최대 10기의 터빈과 13기의 열교환기가 내장되어 있다 [8].

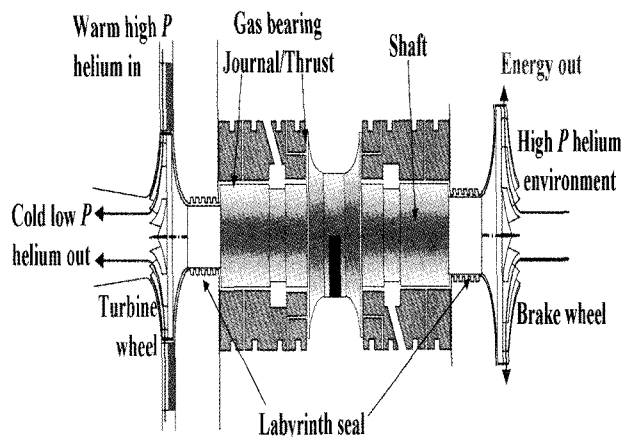


그림 3. 정적 기체 (static gas) 베어링을 사용하는 팽창 터빈의 작동 원리.

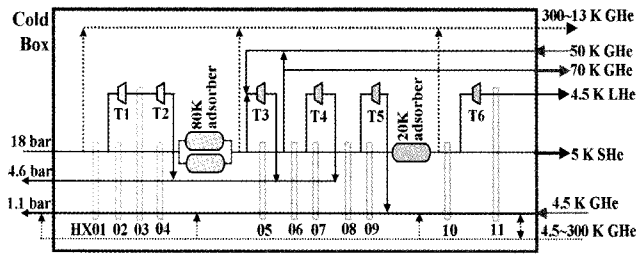


그림 4. KSTAR 저온헬륨설비 C/B의 내부 개략도.

4. 액체헬륨을 이용한 대형 장치의 냉각 방식

액체헬륨을 사용하는 거대 장치의 냉각 방식은 크게 두 가지로 분류할 수가 있다. 냉각 대상물을 액체헬륨이 담긴 용기에 잠기게 하여 전도로 냉각시키는 pool boiling 방식과 초임계헬륨을 냉각대상물의 냉각회로에 강제대류 시키는 방식이다. 이때 사용되는 액체헬륨의 형태는 그림 5에 표시되었듯이 포화된 액체헬륨 (He I)과 초유체헬륨 (He II) 그리고 가압된 초유체헬륨과 초임계헬륨이다. 그림 5의 초임계헬륨 영역은 초임계유체의 정의와 다르지만 헬륨에서는 편의상 온도가 변해도 상의 변화가 없는 영역을 초임계헬륨이라 부르고 있다 [9].

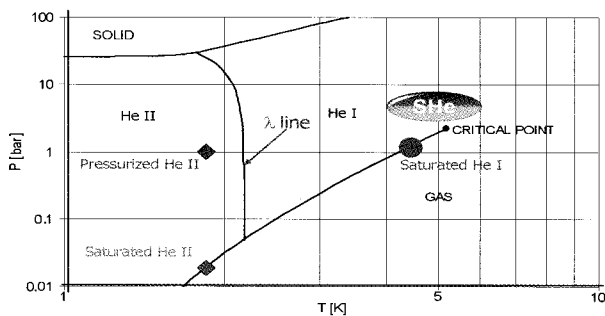


그림 5. 헬륨의 phase diagram [10].

가장 간단한 pool boiling은 그림 6에서와 같이 냉각대상물을 포화된 액체헬륨에 잠기게 하여 잠열로 냉각시키는 방식이다. 증발된 헬륨을 배출하는 port를 펌핑하여 액체의 증기압을 감소시키면 초유체헬륨 영역에서의 냉각도 가능하다. 초전도체의 lower critical field (B_{C1}) 이하에서 운전되고 방전의 위험이 없는 가속기의 초전도 RF cavity에서 주로 사용되는 방식이다.

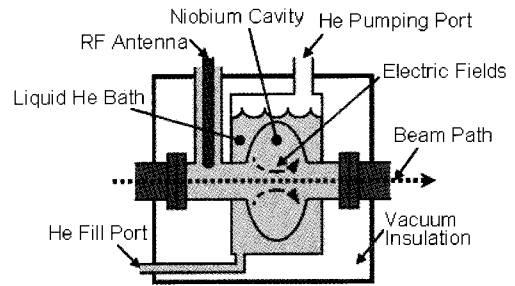


그림 6. 액체헬륨 pool boiling 방식을 이용한 초전도 (Nb) RF cavity의 냉각 [11].

NbTi로 만들어진 초전도 자석은 임계전류 (또는 임계자장)와 임계온도와 관계 때문에 경우에 따라 최저 1.8 K의 초유체헬륨으로 냉각시켜야 할 필요가 있다. 그러나 그림 6과 같은 pool boiling 방식으로 포화된 초유체헬륨을 사용하면 압력이 낮아져 전류 인가 시 방전의 위험이 있다 [12]. 그러므로 그림 7과 같이 자석과 열교환기를 Claudet bath라 불리는 액체헬륨에 잠기게 하고 열교환기에 포화된 초유체헬륨을 흘리면 대기압 정도로 가압된 초유체헬륨을 얻을 수가 있어 방전의 위험을 피할 수가 있다. 이 방식은 간접적인 냉각방식이지만 초유체헬륨 특성상 ("0"에 가까운 점성과 무한대에 가까운 열전도도) 가압된 초유체헬륨의 온도는 거의 증가하지 않는다.

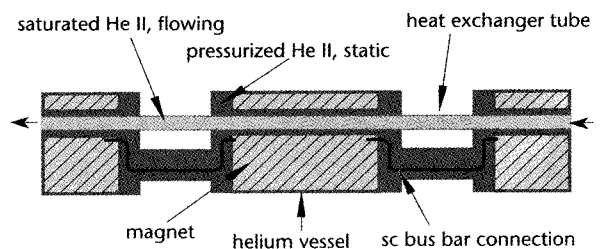


그림 7. Claudet bath를 이용한 LHC 초전도 자석 냉각 방식 [12].

핵융합 관련 기술의 발전과 더불어 토카막용 초전도 자석의 경우 자기장과 함께 인가되는 전류의 세기가 계속 증가하여 자석 자체에 가해지는 힘이 수백 톤에 달하게 되었다. 이러한 큰 힘에 견딜 수 있도록 자석의 선재로 채용된 것이 CICC (cable-in-conduit conductor)이다. CICC는 그림 8과 같이 고강도 도관 내에 초전도 선재가 내재되어 있어 초임계헬륨을 도관에 강제대류 시켜 냉각한

다. CICC 초전도 자석의 냉각방식을 살펴보면 일반적으로 다음과 같다 (그림 8 좌측 참조). 냉각된 초임계헬륨은 초전도 자석을 통과하면서 대류로 자석을 냉각시키고 자석을 통과하여 (또는 circulator에서 압축되어) 가열된 초임계헬륨은 액체헬륨에 잠긴 열교환기를 통하여 전도로 냉각이 된다. 초임계헬륨은 온도가 증가하더라도 상의 전이가 일어나지 않기 때문에 급격한 압력 변화가 없어 초전도 자석의 안정적인 운전이 가능하고 비압축성 유체에 가까워 circulator로 순환하기가 용이하다. 2장에서 언급한 cryopump도 4 K cryopanel에 부착된 배관에 초임계헬륨을 강제대류 시키면서 냉각하는 방식을 취하고 있다.

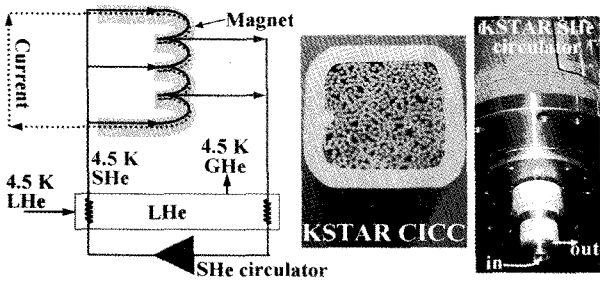


그림 8. KSTAR 초전도 자석의 SHe 강제대류 순환 냉각 방식 (좌), KSTAR 초전도 자석 CICC (중), KSTAR SHe circulator (우).

그림 9는 대형 헬륨액화장치인 KSTAR 저온헬륨설비의 C/B와 초전도 자석 강제대류 순환 시스템이 내장된 Distribution Box의 사진이다. 표 3에서는 액체헬륨 온도로 운전되고 있는 거대과학 장치의 초전도 장비와 냉각 방식을 비교하였다.

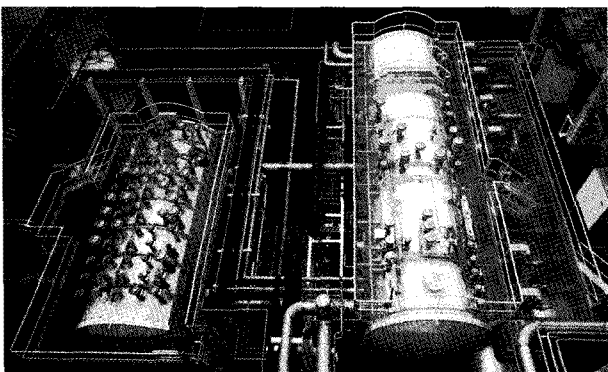


그림 9. KSTAR 저온헬륨설비의 Cold Box (우)와 Distribution Box (좌).

표 3. 거대과학 장치에 사용되는 초전도 장비와 냉각 방식 [13]. *는 건설 예정 장치임.

	초전도 RF cavity	초전도 자석	
		가속기	토카막
포화 HeI	KEK, HERA, LEP, LHC	/	/
포화 HeII	CEBAF, TTF, SNS, *ILC		
가압 HeII		LHC	Tore Supra
SHe		HERA, Tevatron	SST1, EAST, KSTAR, *ITER

5. 대형 헬륨액화장치의 전망

거대과학 장치에서 초전도 장치의 채택은 성능 측면 뿐 아니라 대형 헬륨액화 장치를 감안하더라도 비용 측면에서 절대적으로 유리하다. 이렇게 사용되는 저온초전도체의 냉각에 필수적인 헬륨은 우주에서 두 번째로 풍부한 원소지만 지구상에서는 화석연료와 마찬가지로 그 잔존량이 제한되어 있다. 상업적으로 이용이 가능한 헬륨은 대부분 천연가스과 같이 매장되어 있어 그 사용 가능 기한이 천연가스과 거의 유사하다. 그러므로 앞으로는 운전 시 방출되는 헬륨의 회수 및 정제 등을 통한 헬륨의 손실을 최소화 내지 없게 해야지만 경제적인 대형 헬륨액화장치의 운전이 가능할 것으로 예상된다.

참고문헌

- [1] M. Wilson, "Superconducting Magnets", ISBN 0-19-854805-2, pp3 (1982).
- [2] P. Proudlock, "Electrical Powering Strategy of LHC. First Design Study", LHC Project Report (1996).
- [3] P. Schmüser, "Superconducting magnets for particle accelerators", Rep. Prog. Phys. 54, pp683-730 (1991).
- [4] <http://www.jet.efda.org/pages/jet/features/index.html>.
- [5] <http://www.iter.org/Parameters.htm>.
- [6] M. H. Hablanian, "High-vacuum technology A practical guide" 2nd edition, ISBN 0-8247-9834-1, pp316-317 (1997).

- [7] A. Antipenkov, "Gas evacuation dynamics from ITER torus and NBI cryopumps", 51st IUVSTA Workshop, Värmdö Sweden (2007).
- [8] H. Gruehagen and U. Wagner, "Measured Performance of Four New 18 kW@4.5 K Helium Refrigerators for the LHC Cryogenic System", LHC Project Report 796 (2004).
- [9] Forschungszentrum Karlsruhe, "Encyclopaedia of cryogenic and related terms".
- [10] S. W. VanSciver, "Helium Cryogenics", ISBN 0-0306-42335-9 pp54 (1986).
- [11] http://en.wikipedia.org/wiki/Superconducting_Radio_Frequency.
- [12] L. Taviani, "Large Cryogenic Systems at 1.8 K", Proceeding of EPAC 2000, Vienna Austria, pp212-226 (2000).
- [13] T. S. Datta, "Cryogenics for Accelerator", Joint Accelerator School - 08, Indore India (2008).

저자이력



장현식 (張賢植)
1994년 포항공과대학교 물리학과, 1996년 포항공과대학교 물리학과 (이학석사), 2001년 포항공과대학교 물리학과 (이학박사), 현재 국가핵융합연구소 선임연구원.



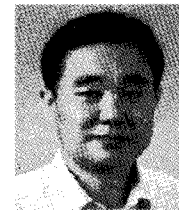
조광운 (趙光雲)
1992년 건국대학교 기계공학과 (공학석사), 현재 국가핵융합연구소 극저온연구부 헬륨설비팀장.



박동성 (朴東成)
1995년 충남대학교 기계설계공학과, 1997년 충남대학교 기계설계공학과 (공학석사), 2006년 충남대학교 기계설계공학과 (공학박사), 현재 국가핵융합연구소 선임기술원.



김양수 (金良洙)
1988년 아주대학교 물리학과, 1991년 아주대학교 물리학과 (이학석사), 1996년 아주대학교 물리학과 (이학박사), 현재 국가핵융합연구소 극저온연구부장.



박주식 (朴柱植)
1979년 서울대학교 원자핵공학과, 1981년 서울대학교 원자핵공학과 (공학석사), 1989년 서울대학교 원자핵공학과 (공학박사), 현재 국가핵융합연구소 KSTAR 연구센터장.