

# 핵융합장치에 사용되는 초전도 도체에 관하여

권영철 · 한국전기연구원, 책임연구원  
하동우 · 한국전기연구원, 책임연구원  
임병수 · 한국기초과학지원연구원, 선임연구원

\_e-mail : ykkwon@keri.re.kr  
\_e-mail : dwiha@keri.re.kr  
\_e-mail : beltm@kbsi.re.kr

이 글에서는 핵융합 장치와 핵융합의 핵심구성품인 초전도자석의 기본 소재로 사용되는 초전도 도체에 대하여 소개하고자 한다.

## 초전도기술과 핵융합

초전도 기술은 1911년 네덜란드의 Onnes에 의해서 그 현상이 처음으로 발견된 이후로 많은 발전을 거듭해왔고, 여러 가지 초전도 재료가 개발되고, 이의 실용화를 통하여 다양한 분야에서 초전도기술 및 초전도 재료가 사용되고 있다. 초전도 도체는 일정 온도 이하에서 전기저항이 제로가 되는 특성을 이용하여, 많은 전류를 통전할 수 있고, 구리 등의 상전도 도체에 비하여 매우 높은 전류밀도 값을 가지는 전자석을 제작할 수 있어 강자장을 발생시키는 대형 자석의 제작 및

사용이 가능하다. 현재까지 개발된 초전도 재료로는 30여 종에 이르며, 실용화가 본격적으로 이루어져 각종 초전도응용기기에 사용되고 있는 초전도 도체는 액체헬륨온도에서 사용되고 있는 소위 저온 초전도체라고 불리고 있는 NbTi 및 Nb<sub>3</sub>Sn 초전도선과 액체질소 온도에서 사용가능한 고온 초전도체라고 불리고 있는 BSCCO 초전도선과 YBCO 초전도선을 대표적으로 이야기할 수 있다.

이와 같은 초전도선을 이용하여 다양한 초전도 응용기기가 개발 중에 있거나, 실용화가 완료되어 MRI와 같이 일반 시중에서

쉽게 접할 수 있을 정도로 널리 보급된 것도 있다. 현재 여러 가지 측면에서 인류의 미래 에너지 원으로서 가장 유망하다고 예측되고 있는 핵융합장치 및 기술도 초전도기술의 발전과 더불어 구현 가능하게 된 것이다.

특히 요즈음 더욱 심각하게 대두되고 있는 고유가와 대체에너지 문제 그리고 이에 따른 환경 및 안전 문제 등에 대한 소식을 자주 접할 수 있다. 이와 같이 에너지의 경제적, 환경적, 안전성 등의 문제 등을 고려해 볼 때 대체에너지 중, 가장 강력한 후보로 핵융합 발전이 거론되고 있다.

핵융합 발전은 보통 중수소와

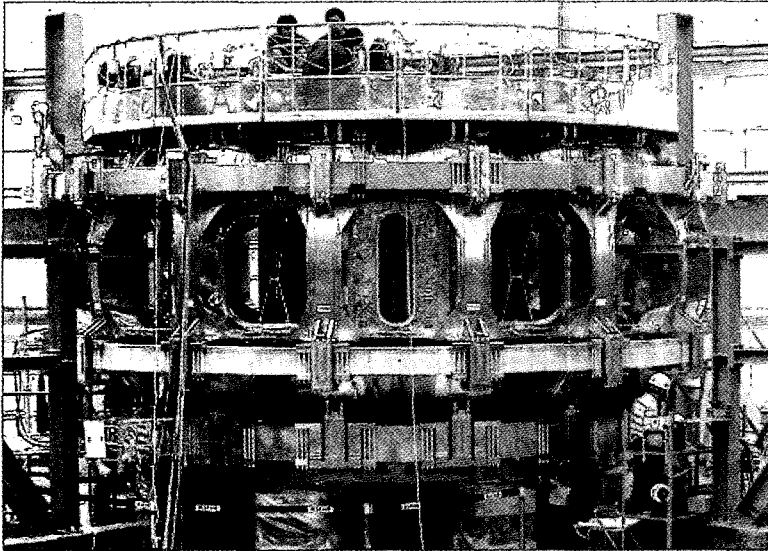


그림 1 현재 건설 중인 KSTAR

삼중수소와 같은 두 개의 가벼운 원자핵이 하나로 합쳐지면서 질량결손에 의하여 발생하는 막대한 에너지를 전기를 생산하는 데 이용하는 것을 말하는데, 핵융합 발전의 주된 연료인 중수소는 바닷물에서 얻어지기 때문에 화석 연료와 달리 무한정에 가까운 에너지 부존량을 가지고 있고, 온실 효과와 방사성 폐기물과 같은 환경적 문제도 걱정할 필요가 없다.

핵융합 발전의 상용화 직전 단계에 있는 지금 인류는 핵융합 플라즈마를 장시간 유지시킬 수 있는 기술의 확보와 엄청난 열부하에 견딜 수 있는 재료의 개발 등 미해결 과제를 해결하기 위하여 많은 노력을 기울이고 있다. 이를 위해 국제협력을 통해 2015년경 건설이 완료되어 가동 예정에 있는 ITER(International

Thermonuclear Reactor)장치가 공학적인 면에서 핵융합의 상용화 가능성을 실증하고, 그 이후 세계 각국은 시범 상용 핵융합로인 DEMO 장치를 건설하고자 계획하고 있다.

우리나라도 이러한 핵융합 발전의 상용화의 실현에 중요한 역할을 수행하고자 한국기초과학지원연구원을 중심으로 1995년에 KSTAR(Korea Superconducting Advanced Tokamak Advanced Re-searcher device)로 이름 지어진 '차세대 초전도 핵융합 연구 장치'의 개발 사업을 시작하여 2007년 장치 건설을 완료할 예정으로 있다. 이러한 KSTAR 장치는 향후 ITER의 Pilot Plant로서 역할을 수행할 것으로 기대되고 있다.(그림 1)

이 글에서는 핵융합 장치와 핵융합의 핵심구성품인 초전도자석의 기본 소재로 사용되는 초전도 도체에 대하여 소개하고자 한다.

## 핵융합장치 개발 현황

핵융합 반응이 일어나는 온도는 보통 1억℃ 이상으로서 이와 같은 초고온에서 핵융합 연료 물질은 이온(원자핵)과 전자로 분리되어 전기적으로 중성인 플라즈마 상태로 바뀐다. 핵융합 반응을 지속적으로 일으켜 끊임없이 에너지를 얻기 위해서는 이 핵융합 플라즈마를 잘 가둘 수 있어야 하는데, 하전입자에 자기장을 걸어 주면 이 자기장을 따라 하전입자가 움직이는 성질을 이용하여 플라즈마 알갱이를 가두는 방식을 자기가둠(magnetic confinement) 방식이라 한다. 이런 방식의 핵융합장치는 수 테슬라 이상의 자기장을 필요로 하며 이는 보통 전자석 코일에 전기를 흘려 발생시킨다.

핵융합 발전의 상용화를 이루는데 가장 가능성이 있는 장치로 평가받고 있는 것이 자기가둠 방식을 사용하는 토카막(Tokamak) 장치이다. 한국에서 개발 중인 KSTAR는 물론 국제협력으로 추진 중인 ITER 역시 토카막 형태의 핵융합 장치이다. 토카막 장치가 플라즈마를 발생, 구속 제어하기 위해서는 전자석 코일이 필요하며, 이를 위한 토카막

내의 전자석 코일을 기능적으로 살펴보면, 플라스마를 구속하기 위한 TF(Toroidal Field) 코일과 플라스마를 발생·유지하기 위한 CS(Central Solenoid) 코일, 그리고 플라스마의 위치 및 형상을 제어하기 위한 PF (Poloidal Field) 코일 등이 있다.

핵융합 플라스마의 온도는 1억℃ 이상으로 매우 높아서 지구상에 이를 견딜 수 있는 재료가 없다. 이를 해결하고자 토카막 장치에서는 도넛 모양의 진공용기 내부에서 플라스마가 발생되면서 이 플라스마 전류에 의한 폴로이달 자기장과 TF 코일에 의한 토로이달 자기장이 함께 소위 '자기장 용기(magnetic vessel)'를 만들게 된다. 플라스마가 일차적으로 이 '자기장 용기' 안에 갇히게 되므로 고온의 플라스마가 직접 진공용기 벽에 닿는 일은 없다.

한편 핵융합 장치에 사용되는 전자석은 종래에는 상전도자석을 사용하였는데, 막대한 전력 손실로 인하여 장시간 운전이 전혀 불가능하였다. 따라서 장시간 운전이 되어야 하는 상용의 핵융합 로에는 반드시 전력 손실이 거의 없는 초전도자석을 사용하여야만 한다. KSTAR를 비롯하여 EAST(중국), ITER(국제공동) 등 근래에 건설되고 있는 핵융합 장치는 필요한 자석 모두 초전도자석으로 만들고 있다.

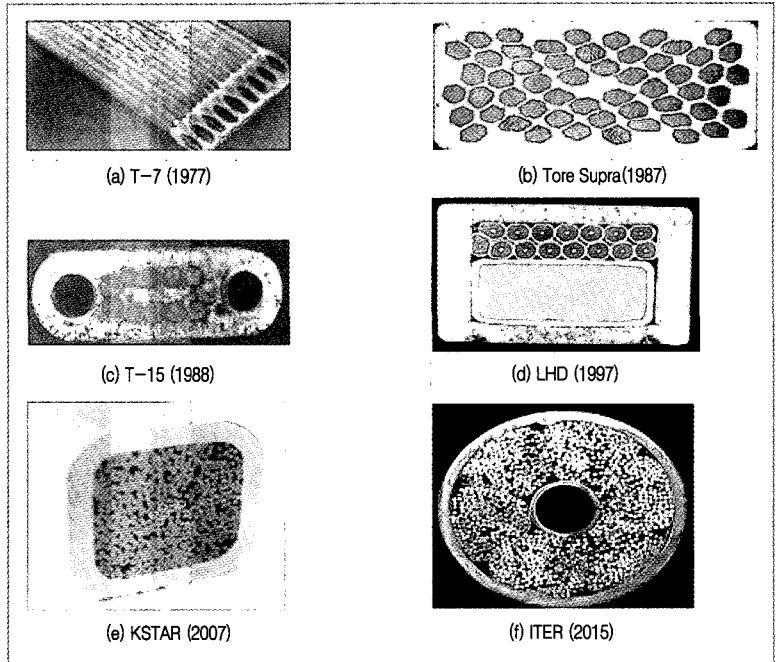


그림 2 핵융합장치용 초전도 도체

## 핵융합용 초전도 도체 개발 현황

소형 초전도자석의 경우는 초전도선재를 바로 코일 형태로 감아서 만든다. 그러나 핵융합 장치에 쓰이는 초전도 자석은 크기가 큰 것은 10m가 넘을 정도로 거대하므로 초전도자석의 재료가 되는 도체는 초전도선재를 여러가닥 합쳐서 만들게 된다.

초전도선재의 기술이 발전한 것과 같이 핵융합용 초전도 도체도 끊임없이 발전하여 왔다(그림 2)<sup>(1)</sup>. 일반적으로 핵융합용 초전도자석은 고자장이 요구되므로 NbTi, Nb<sub>3</sub>Sn 등과 같은 저온 초전도체를 사용하는 경우가 대

부분이고 이 때문에 이를 냉각시켜 주기 위해 불활성 기체인 헬륨을 냉매로 사용하는 헬륨냉동기가 필요하다.

초전도자석을 적용한 최초의 토카막 장치는 1977년에 완공된 러시아의 T-7 장치이다. 이 장치는 TF 자석만 초전도로 만들었으며 냉매를 초전도 도체 내부로 흘리는 강제유동냉각(forced flow cooling)방식을 사용하였다. 그림 2(a)에서 보는 바와 같이 도체 내부에 헬륨이 흐를 수 있도록 9개의 냉각통로가 형성되어 있고 초전도체가 보다 잘 냉각될 수 있도록 냉각관에 최대한 가까이 NbTi 선재를 배치하였다. 그런데 선재를 평행하게 배치하

는 바람에 교류손실이 매우 커져서 공칭전류(nominal current)의 80%밖에 흘릴 수 없었다.

프랑스는 Tore Supra라는 장치를 T-15보다 1년 먼저 제작하여 1988년 운전에 들어갔다. T-7 및 T-15 장치와 마찬가지로 TF 코일만 초전도로 만들어졌으나 그들과 달리 초전도 자석의 냉각은 강제유동냉각방식이 아닌 4.2K 액체헬륨 및 1.8K 초유동헬륨에 담가서 냉각하는 침지냉각(pool cooling)방식을 사용하였다. 이 방식의 경우 냉매와 도체와의 접촉을 좋게 하기 위해서는 도체 바깥으로 절연층을 두껍게 할 수가 없으므로 절연상태가 나쁘고, 또한 국부적으로 퀘치가 발생하면 기포가 발생하여 그 부분에서 냉각이 잘 안 되는 단점이 있다.

일본의 LHD 장치는 헬리컬 장치로는 세계 최초로 필요한 자석 모두 NbTi 초전도체로 만들었으며 특히 PF 자석에 관내연선도체(CICC : Cable-In-Conduit Conductor)를 처음 사용한 핵융합 장치이다. 헬리컬 자석은 직경 1.74mm의 NbTi 선재 15가닥을 사용한 모놀리식 도체(Monolithic Conductor)를 감아서 만들었으며 침지냉각방식을 사용한다. 이 도체는 그림 2(d)에서 보는 바와 같이 극저온 안정성을 높이기 위하여 구리재질의 하우징 안에 면적이 큰 안정화 알루미늄을 넣은 것이 특징이다.

## 한국 KSTAR용 핵융합용 초전도 도체

우리나라에서도 TF 및 CS 코일에는 Nb<sub>3</sub>Sn CICC도체가, 외부 Outer Ring 코일에는 Nb-Ti CICC도체가 사용되었고<sup>(2)</sup>, 그림 3에서는 한국형 초전도 토카막 핵융합장치의 초전도 마그네트와 CICC도체를 나타내고 있다. KSTAR용 Nb<sub>3</sub>Sn CICC도체에 사용되는 소선은 ITER의 사양인 고임계전류밀도형과 저교류손실형의 사양을 모두 만족하는 HP-3 등급으로서 4.2K, 12 T의 조건에서 non-Cu Jc가 750A/mm<sup>2</sup> 이상이어야 하며, 4.2K, ±3 T 조건에서 교류손실 값은 250mJ/cc 이하여야 하는데, 이러한 사양을 만족시키기 위해서는 높은 임계전류밀도를 확보하면서 중간열처리 공정의 생략으로 가공공정이 용이한 내부확산법(internal tin method)을 Nb<sub>3</sub>Sn 초전도 소선의 제조공정

으로 선택하게 되었다.

내부확산법은 초전도 선재 선 가공 시 내부 모재가 순 구리(OFHC : Oxygen Free High purity Copper)이기 때문에 가공경화를 해소하기 위한 연화처리가 필요 없고 Nb<sub>3</sub>Sn 생성에 필요한 Sn의 양을 Cu-Sn브론즈의 고용한도 이상으로 첨가할 수 있어서 고임계전류밀도의 Nb<sub>3</sub>Sn 선재를 제조하는 데 적합하다고 할 수 있다<sup>(3)</sup>. Nb<sub>3</sub>Sn 초전도 선재의 여러 제조 공정에 비해 내부확산법에 의한 개발이 늦게 시작하였지만 최근에 많은 발전이 진행되었으며 또한 앞으로 고자장, 대전류 통전이 요구되는 초전도 응용기에 사용이 많이 될 것으로 전망된다<sup>(4,5)</sup>. KSTAR 연구의 초창기에는 KSTAR에서 요구하는 사양을 충족시킬 수 있는 선재를 제조할 수 있는 회사는 현재 세계적으로 IGC와 MELCO 두 업체만 있을 정도로 아직까지는 초전도 특성

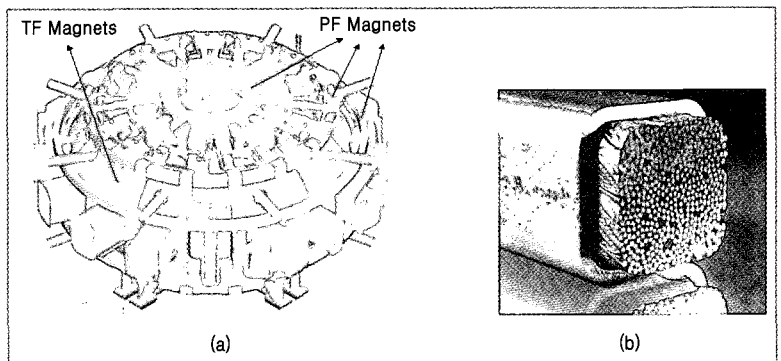


그림 3 한국형 초전도 토카막 핵융합 장치의 초전도 마그네트(a)와 CICC도체(b)

향상을 위한 제조법 및 열처리에 의한 미세조직 제어와 같은 연구가 브론즈법에 비해서는 부족한 실정이었다.

한국전기연구원에서는 기초과학지원연구원과 넥스스코리아와 함께 1997년부터 국내 최초로 내부확산법에 의한 Nb<sub>3</sub>Sn 초전도선의 제조와 특성 평가를 수행하였으며, Nb<sub>3</sub>Sn 초전도선 개발과 관련하여 다음과 같이 소개하고자 한다.

내부확산법에 의한 초전도 선재의 제조에 있어 우선적으로 Cu 모재, Nb 봉재Sn core로 구성된 sub-element를 제조하는 기술을 보유하는 것이 매우 중요하며 이 과정에서 선재직경, 동비, 필라멘트 직경, 필라멘트간 거리, non-Cu 영역에서의 Nb 필라멘트의 체적비 그리고 기지의 잔류 주석의 양 등을 고려하여 각 성분의 비율과 분포를 결정할 수 있는 빌렛 설계 능력과 빌렛의 제조 및 압출 과정에서의

여러 가지 민감한 기술을 확보하여야 한다<sup>(6)</sup>. 또한 sub-element를 적층한 복합재 상태의 초전도 선재의 가공에서는 Sn의 낮은 용점으로 인해 열간 가공이 불가능하기 때문에 복합재를 냉간 가공만으로 금속간의 결합이 이루어지도록 하여야 한다. 그래서 표면의 오염을 방지하기 위해 표면처리와 조립공정 시 세심한 주의를 요한다. 그리고 열처리 과정에 있어 Cu-Sn 상을 형성하기 위한 저온 확산과정과 Nb<sub>3</sub>Sn 상을 형성하기 위한 고온 확산과정을 이해하여야 한다.

그림 4에는 sub-element 빌렛의 압출한 단면을 보이고 있다. 핵융합 마그네트용 초전도 선재의 요구 조건인 내부확산법에 의한 Nb<sub>3</sub>Sn 초전도 선재를 개발하기 위하여 빌렛의 설계 기술과 균일하고 단선이 없는 초전도 선재를 가공할 수 있는 기술을 확보하여 그림 4와 같은 균일한 빌렛을 가공할 수 있게 되었다.

이와 같이 개발된 Nb<sub>3</sub>Sn 초전도체를 사용하여, KSTAR에서 사용되는 초전도 자석용 CICC도체를 제작하였다. Nb<sub>3</sub>Sn을 초전도로 사용하는 CICC초전도 도체로 제작된 자석은 자석 권선용 열처리를 시행하는 Wind & React법을 사용해야만 하기 때문에 자석 제작과정 중 열처리공정이라는 과정을 필수적으로 거치게 되는데, 이 과정 중 선재 간의 소결을 방지하고 선재 사이의 전기저항을 키워 교류손실을 낮추기 위해 선재에 2미크론 두께의 크롬도금을 실시한다.

다음으로 크롬 도금된 초전도선 수백가닥을 단계별로 꼬아서 집합연선화(cabling)하는 작업을 수행한다. 즉 초전도선과 무산소동선의 비율을 2:1로 혼합하여 연선화 작업을 수행하고 최외곽에는 SS316L 필름을 감아서 후속공정인 조관작업에 의한 초전도선재의 손상을 막는다. 제작된 초전도 집합연선의 외경을 제어

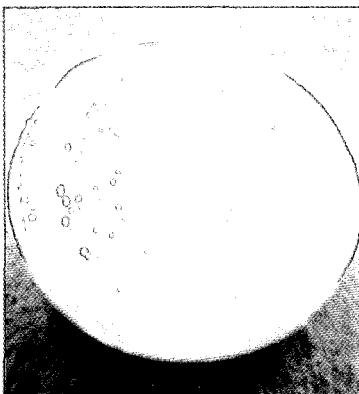


그림 4 압출한 sub-element 빌렛의 단면

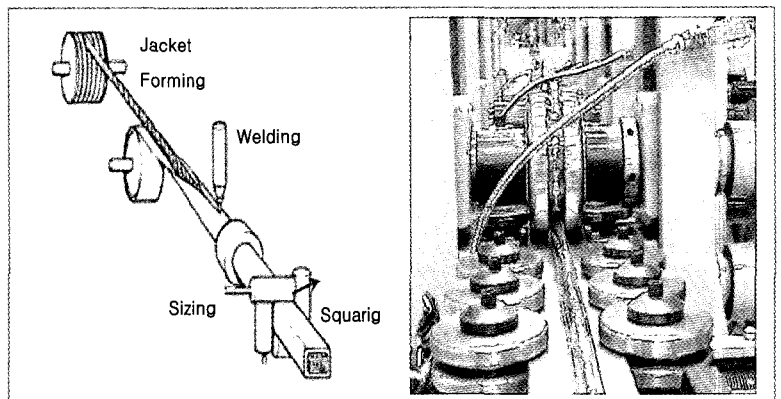


그림 5 KSTAR 초전도 도체 조관공정

하기 위해 압착공정을 수행한다. 집합연선은 TF의 경우 486 가닥, PF의 경우 360 가닥의 선재로 각각 이루어져 있다.

CICC는 초전도 케이블을 사각형의 금속관으로 둘러싸는 공정인 조관공정(Jacketing)을 통해 제작된다(그림 3). 이를 위해서는 적합한 조관재료를 선택하여야 한다. KSTAR에서는 Nb<sub>3</sub>Sn 초전도체의 경우 초전도체에 걸리는 응력이 커지면 임계전류의 저하 문제가 발생되기 때문에 냉각시 응력을 최소화하기 위하여 초전도체와 열수축률이 비슷한 Incoloy 908 합금을 조관재료로 선택하였다. 조관 공정은 성형공정과, 조관 용접 공정, 사이징(sizing) 공정, 스퀘어링(squaring) 공정으로 이루어진다. 초전도 케이블을 조관재료로 감싸는 성형공정은 성형 롤(roll)을 거쳐 원형 파이프 형태로 초전도 케이블을 조관재료로 감싸는 공정이다. 원형 파이프 형태로 성형된 조관재료는 조관재료의 길이방향 단부를 용접하는 조관 용접 공정을 통해 원형단면을 가진 CICC가 된다<sup>(7)</sup>. 다음으로 원하는 CICC 크기 및 형태를 만들기 위해 원형파이프의 직경을 줄이는 사이징 공정과 목표로 하는 사각단면의 CICC로 성형하는 스퀘어링 공정을 통해 CICC 제작이 완성된다. 제작된 CICC는 이후 누설검사를 통해 누설유무를

검사한 후 누설이 발견되면 부분 가공을 한 후 보수 용접을 통해 누설 부위를 보수한다.

## 맺음말

초전도 도체 및 응용기술의 발달과 더불어 다양한 응용분야가 개척되고 있고, 이중 한 분야로서 대형 초전도 자석을 이용한 핵융합장치인 토카막장치가 개발되고 있고, 우리나라에서도 1995년부터 초전도 핵융합장치 개발사업인 KSTAR 사업이 시작되었다. 토카막장치에는 대형 초전도 자석제작에 필요한 관내연선도체(CICC)를 사용하고 있으며, KSTAR사업에서도 Nb<sub>3</sub>Sn초전도체를 사용한 소선으로 제작된 CICC를 성공적으로 개발하여 초전도 자석제작에 사용하였다. 이와 같은 연구성과를 바탕으로 우리나라도 핵융합장치의 실용화를 위해 진행 중인 국제협력을 통해 2015년경 건설이 완료되어 가동 예정에 있는 ITER 장치 개발에 참여할 수 있는 계기를 마련하였고, 향후 ITER 장치의 건설이 완료되어 운영단계에 접어들었을 때 많은 기여를 할 수 있을 것이며, 우리나라도 세계 수준의 핵융합 연구를 수행할 수 있는 능력을 확보할 수 있고 나아가 세계 핵융합 선진국과 동등한 수준의 연구결과를 창출할 수 있을 것으로 판단된다.

## 참고문헌

- (1) Pierluigi Bruzzone, "30 years of conductors for fusion, a summary and perspectives", MT-19 Conference, Genova, September 2005.
- (2) J. H. Schulz, KSTAR Design description Document, KSTAR Magnet System Review, T13&14, (1999).
- (3) 低溫工學會編, 超傳導·低溫工學 Handbook, Ohm press (1993).
- (4) P. J. Lee, J. R. Ruess and D. C. Labalestier, IEEE Trans. on Applied Superconductivity, 7(2), 1516 (1997).
- (5) E. Gregory, E. Gulko and T. Pyon, Adv. Cryo. Eng. (material), 44, 903 (1998).
- (6) S. Foner and B. B. Schwartz, Superconductor Materials Science, Chapter 4, 201 (1981).
- (7) B. S. Lim, S. I. Lee, K. Kim and J. Y. Choi, et al., "Fabrication of the KSTAR superconducting CICC," IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 12, p. 591, 2002.