

대전류 인가용 과부하 전류인입선

■ 보유기관 국가핵융합연구소

■ 주요 발명자 이영주, 박영민

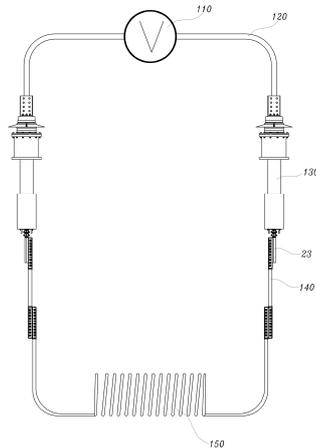
■ 권리사항	
· 출원번호	10-2005-0123384
· 출원일	2005년 12월 14일
· 현재상태	■ 등록 □ 공개(심사중) □ 미공개
■ 기술완성도	□ 기초연구단계 □ 실험단계 ■ 시작품단계 □ 제품화단계

■ 적용가능분야 및 목표시장 극저온 냉동기

■ 기술 개요

본 기술은 대전류 인가용 과부하 전류인입선에 관한 것으로, 제작공정이 단순해지고 접촉저항이 감소되며 가스누설을 방지하는 데 목적이 있음

■ 기술 개념도



[그림] 본 기술에 따른 전류인입선의 구성상태도

■ 기술 내용 및 동향

[상세 기술 내용]

본 기술은 액체헬륨 온도인 4.2K의 극저온 영역에서 운전되는 초전도 코일과 상온(300 K)에서 운전되는 외부전원을 전기적으로 연결시켜 주는 전류인입선에 관한 것임

일반적으로 초전도 코일에 전류를 공급하기 위한 전류 전송라인은 상전도 코일에 전류를 공급하는 경우에 비해 복잡한데, 상전도 코일의 경우 전원과 코일 사이에 단순히 두 개의 상전도전선(이하, 상전도버스바라 칭함)을 연결하나 초전도 코일은 액체헬륨을 냉매로 극저온(4.2K 영역) 온도영역에서 운전되기 때문에 저온용기 내에 설치되어 운전함

이와같은 초전도 코일에 10kA 이상의 대전류를 공급하기 위한 전원장치는 초전도 코일 응용장치와 동떨어져 있는 경우가 많음

액체헬륨 온도에서 운전되는 초전도 코일은 고가의 장치일 뿐만 아니라 초전도성이 깨어질 경우 발생하는 막대한 양의 열에 의해 파손될 위험이 매우 높기 때문에 운전할 때의 충분한 열적/기계적 안정성이 확보되어야 하는 장치임

전류인입선은 이 초전도 코일에 전기적/열적으로 연결되어 있기 때문에 전류인입선 상단의 상온 영역으로부터 초전도 코일이 연결되어 있는 하단의 저온 영역으로 전달되는 전도열(Conduction Heat) 및 전류인가에 의해 자체적으로 발생하는 주울열(Joule Heat)이 초전도 코일로 전달되는 것을 최소화 하는 기술이 필요함

종래의 전류인입선은 전류인입선 상단의 상전도 버스바 조인트 및 솔더컵이 분리되어 있어 소프트 솔더링하여 전기적으로 연결시키고 볼트로 추가 체결을 하여 기계적 강도를 보강하는 구조인데, 이 경우 황동선재 다발을 솔더컵에 끼워 솔더링한 후 상전도 버스바 조인트를 다시 이 솔더컵에 솔더링 해야 하고 상전도 버스바를 솔더링할 때는 솔더컵에 황동선재를 솔더링할 때 이용된 솔더가 녹지 않도록 주의를 해야 하는 등 전체 공정이 복잡해지고, 볼트를 추가로 체결해야 하는 번거로움이 있으며, 조인트 저항이 증가하는 단점이 있어 추가적인 기술개발이 필요함

다른 종래의 기술은 상전도버스바 조인트에 용접되는 실린더와 열교환부 상단 플랜지에 용접되는 실린더가 서로 분리되어 두 실린더가 맞물리는 곳에 링플랜지를 하나 더 추가하여 서로 용접되는 구조였는데 이러한 구조는 조립시에 현장용접 공정이 있어 제작기간이 늘어나고 용접부의 가스누설 문제를 야기하는 단점이 있어 이를 개선한 기술이 필요함

또한, 종래의 전류인입선은 전류가 흘러가는 컴포넌트들이 단순한 솔더링 기법(상전도버스바 조인트, 열교환부, 초전도링크, 랩조인트의 사이에 솔더컵이 연결되고 솔더링됨)으로 전기적으로 연결되는 구조이고 보통 솔더로는 납-주석 합금(또는 납이 함유되지 않은 솔더)을 사용하는데, 이때 납-주석 합금으로 구리 재료를 솔더링하면 구리표면에서 주석-구리간의 반응에 의한 구리-주석 합금이 생성되어 솔더링 표면의

접촉강도를 증가시킬 수는 있으나 합금형성으로 인해 접촉저항이 증가할 우려가 있어 추가적인 기술개발이 필요함

구리재료를 솔더링하기 위해서는 솔더가 녹는 온도까지 가열을 시켜야 하는데, 가열 시간이 길어지게 되면 그만큼 더 많이 구리 표면의 산화가 진행되어 접촉 저항을 증가시킬 수 있음

솔더링된 계면의 접촉저항은 항상 일정한 것이 아니라 시간에 따라 변하는 성질이 있으며 대전류 인가용 전류인입선은 초전도 코일이 작동하는 시간만큼 안정적이어야 하기 때문에 10년 이상의 안정성이 요구되므로 이에 대한 검증이 필요함

종래의 전기히터는 히터선재를 에폭시글라스로 감싸는 구조이며 이를 다시 전류인입선에 접착제를 이용하여 접착시키는 구조인데, 이는 히터 선재가 끊어져 전기히터를 교체할 경우 떼어내기 불편한 단점이 있어 이를 해결할 수 있는 기술개발이 필요함

종래의 전기절연체 하단의 플랜지는 단순히 12개의 볼트로 저온 진공용기에 체결될 수 있는 구조인데 이러한 구조는 전류인입선 하단의 램조인트에 초전도 코일 끝단의 램조인트를 연결할 때 발생할 수 있는 조립각도 편차에 의해 코일 조립이 어려워지는 문제점이 있어 이를 개선한 기술이 필요함

종래의 전류인입선은 초전도 링크, 헬륨용기 하단의 솔더컵 및 초전도 코일 램조인트가 별도로 제작되어 조립되는 구조이다. 이러한 경우, 소프트 솔더링 기법으로 조립되는 부분의 기계적 강도가 약할뿐만 아니라 조인트 부분의 전기저항에 의해 주열이 발생하여 헬륨용기에 채워진 액체헬륨을 필요 이상으로 증발시켜 헬륨냉동기 부하를 증가시키는 단점이 있음

액체헬륨용기 상단의 배관연결포트는 상단 플랜지에 수직 방향(열교환부와 나란한 방향)으로 뚫려 있고, 제작이 완료된 전류인입선은 아크방전 위험을 방지하기 위하여 저온 진공용기에 조립 전/후에 진공용기 안쪽에 노출된 부분을 에폭시글라스(Epoxy Glass) 테이프로 감싸게 되는데 종래의 배관연결포트는 에폭시글라스 테이프를 감기에 불편함이 발생하는 문제가 있어 이에 대한 개선이 요구됨

[기술의 특징점]

본 기술의 대전류 인가용 과부하 전류인입선은 상전도버스바 조인트와 솔더컵이 일체구조로 형성되고, 초전도링크와 램조인트가 일체 형성되며, 열교환부의 상부와 열교환부 상단의 솔더컵에 진공실린더가 일체로 연결됨으로써, 제작공정이 단순해지고 접촉저항이 감소되며 가스누설을 방지할 수 있는 효과를 가짐

황동선재가 접촉결합되는 솔더컵의 접합면에 그루브가 형성됨으로써 황동선재가 솔더컵에 균일하게 솔더링될 수 있고, 황동선재의 상하단이 은도금으로 표면처리됨으로써 솔더링시 접촉저항의 증가를 방지할 수 있음

전기히터는 세라믹으로 형성되어 열전도도가 높고 상전도버스바조인트의 외측에 볼트결합되어 조립분해가 용이한 효과를 가짐

전기절연체의 하부에 회전플랜지가 형성되어 전류인입선 전체가 자유롭게 회전한다. 헬륨용기의 상단의

배관연결포트가 수평으로 돌출 형성되어 전기절연 테이프를 용이하게 감을 수 있는 효과를 가짐

[기술동향]

□ 초전도 선재

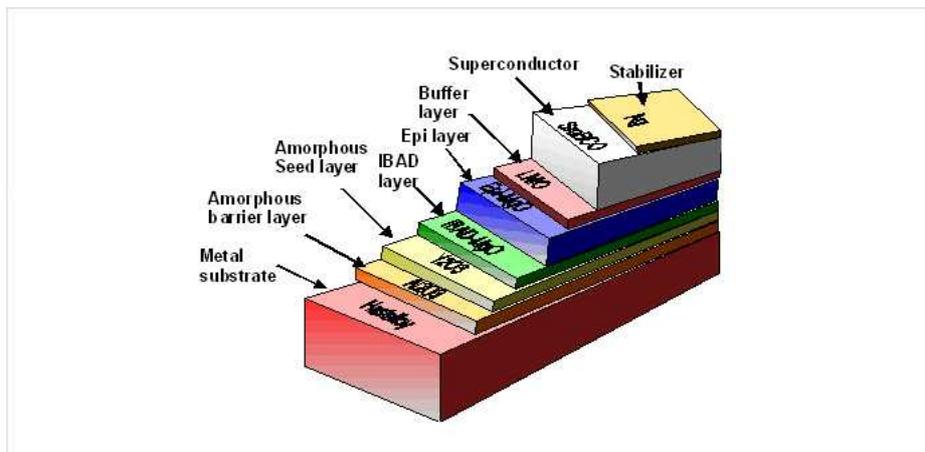
세라믹인 고온초전도체를 선재화한 것으로 완충층이 코팅된 금속기판에 고온 초전도층을 코팅한 테이프형 구조로 되어 있으며 일반적으로 1MA/cm² 이상의 임계전류밀도로 전류를 저항 손실없이 통전할 수 있음

금속기판 기술은 세라믹인 초전도체의 유연성 및 기계적 변형에 대한 인성을 부과하기 위하여 얇고 강도가 높은 금속 기판을 제조하고 이를 이용하여 표면을 거울면으로 깨끗하게 가공하는 기술임

이축배향 기술은 초전도층의 성능향상을 위하여 높은 이축 배향 완충층을 금속기판에 코팅하는 기술로서, 우수한 이축배향도를 가진 완충층을 빠른 속도로 제조하는 것이 기술의 핵심임

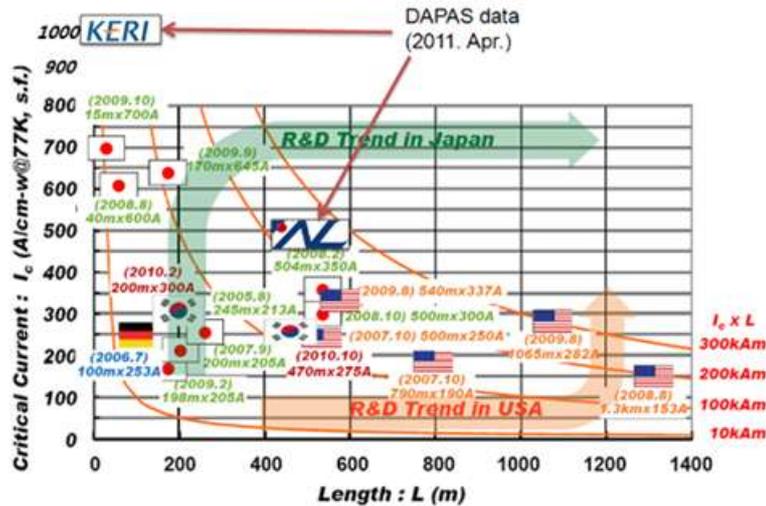
초전도층 증착 기술은 초전도층의 이축배향 특성이 우수할수록 높은 전류밀도로 전류를 통전할 수 있기 때문에 초전도 선재의 성능을 결정짓는 가장 핵심 기술이며, 자장 중 통전특성 향상을 위하여 인위적으로 자속고정점을 주입하기도 함

안정화층 생성 기술은 통전 중 초전도층의 퀸치가 발생할 경우 전류의 우회를 위한 것과 기계적 강도 향상을 위하여 금속층을 입하는 기술임



[그림] 안정화층 생성기술

(출처 : 'CAST 미래기획위원회 기획활동 결과 보고서' 2011년 1월 31일)



[그림] 초전도 선재 개발동향 및 수준

(출처 : 'CAST 미래기획위원회 기획활동 결과 보고서' 2011년 1월 31일)

□ 극저온 냉각기술

극저온은 일반적으로 영하 150도 (120K) 이하의 온도영역으로, 불활성 기체(공기, 산소, 질소, 네온, 수소, 헬륨 등)의 비등점이 존재하는 온도 영역임

고온 초전도체는 특정 온도영역에서만 고유의 특성을 갖는 초전도 현상이 나타나기 때문에 초전도체를 초전도 상태로 유지하기 위해서는 반드시 냉각이 필요함

액체 냉각방식

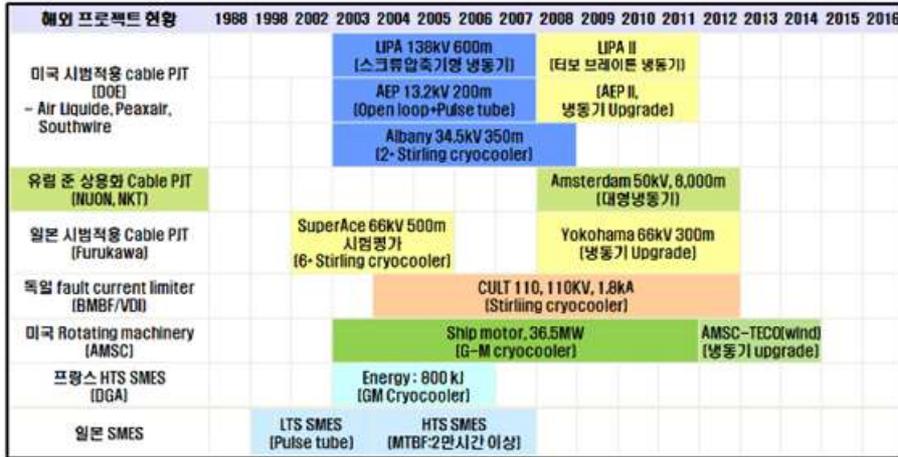
- 액체 헬륨이나 액체 질소 등의 극저온 액체를 이용하는 방식
- 장점 : 초전도 시스템에 열적 교란에 의한 발열이 있을 경우 초전도체 표면에서 저온 액체의 비등 (boiling)을 동반한 열전달이 이루어지므로, 단위 면적당 열전달이 매우 크고, 일정한 압력 하에서는 액체의 포화 온도로 일정하게 유지할 수 있어 열적인 안정성이 우수함
- 단점 : 저온 액체의 저장이나 이송에 따른 열손실이 존재하고, 저온 액체 용기에 대한 열부하로 인해 냉각 시스템 효율이 떨어지며, 시스템의 소형, 경량화가 어려움

전도 냉각방식

- 냉동기 저온부에 냉각 대상을 직간접적으로 접촉시켜 냉각하는 방식
- 장점 : 어느 곳에서나 전원만 연결하면 초전도 시스템을 운전할 수 있고, 저온 액체나 고압가스 등에 대한 전문 인력이 필요없으며, 또한 액체의 저장이나 순환에 따른 열손실을 줄일 수 있고, 시스템의 소형, 경량화가 가능하며, 설치 위치나 각도에 있어서도 유연한 구성을 할 수 있음
- 단점 : 액체 냉각방식의 경우 냉각되는 초전도체의 온도는 기본적으로 액체의 포화 온도로 일정하지만, 전도 냉각의 경우 극저온 냉동기의 냉동 특성과 초전도 도체의 발열 특성에 의해 온도가 크게 변할 수 있어 열적 안정성이 떨어짐

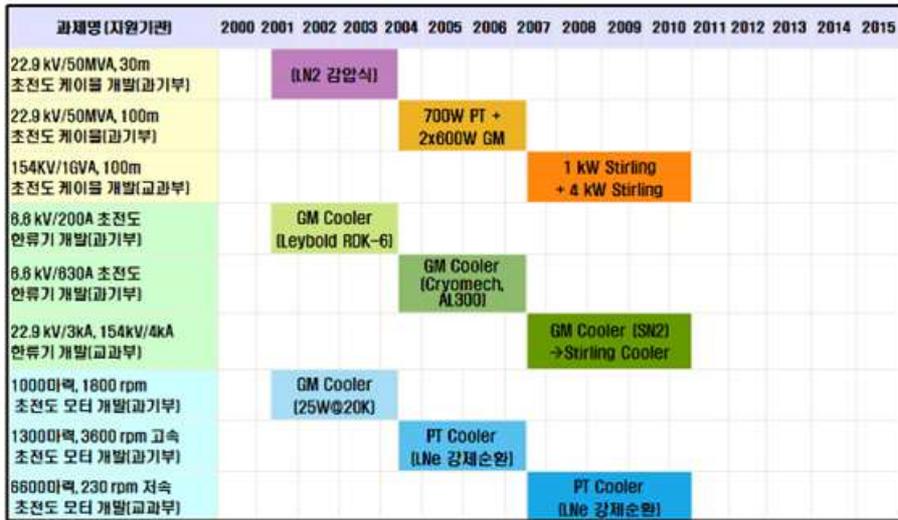
극저온 기술은 다음과 같이 구분할 수 있음

- 극저온 발생기술 : 극저온 냉동기 기술, 저온 유체 제조기술
- 극저온 유지기술 : 고진공 기술, 단열기술, 저온용기 설계 및 제작기술
- 극저온 전달기술 : 극저온 열교환기 기술, 극저온 펌프 및 배관 기술



[그림] 해외현황

(출처 : 'CAST 미래기획위원회 기획활동 결과 보고서' 2011년 1월 31일)



[그림] 국내현황

(출처 : 'CAST 미래기획위원회 기획활동 결과 보고서' 2011년 1월 31일)

■ 관련 시장 동향

[시장 정의 및 시장규모]

선진국이 세계시장을 주도하고 있으나, 최근 중국, 브라질 등 아시아와 중남미 지역 후발 개도국의 시장 규모가 폭발적 증가 추세임

- 2008년 현재 전력용 케이블 \$97억, 차단기 \$183억, 변압기 \$219억, 대용량 회전기기(발전기/모터) \$147억의 연간 시장규모를 가짐
- 2008년 현재 대륙별 규모는 미주 \$274억, 유럽 \$327억, 아시아 \$580억을 차지하며, 기타 호주와 아프리카는 미미한 수준임

세계 송배전전력기기 시장규모는 2008년 1,232억불이며, 매년 4.65% 내외의 안정 성장세가 유지될 것으로 전망됨

- 2020년까지 2,043억불로 성장할 것으로 예상되며 향후 송배전기기 패턴은, 기존 단품 중전기기에서 Green Energy 및 융복합 디지털기기화로 전환됨에 따른 신규 수요 창출이 기대됨
- 차세대 성장기술에 과감한 투자 발생, 스마트 그리드 및 신재생 등
- 세계 중전기기 선두 업체는 ABB, Siemens, Areva 등 100년 이상의 기술력을 가진 유럽업체가 여전히 세계시장을 주도할 것으로 예상

[표] 품목별 세계 중전기기 시장규모 전망

(단위:억불)

구분		2008	2015	2020	2030	2040	2050
송배전기기	케이블	97.25	124.28	143.59	226.21	356.38	561.44
	차단기/개폐기	183.38	266.81	326.40	514.21	810.09	1276.22
	변압기	219.27	304.45	365.30	575.50	906.64	1423.32
회전기기	발전기/전동기	147.82	204.57	245.11	386.14	608.33	958.37
합계		647.72	900.11	1,080.4	,702.06	2,681.44	4,219.35

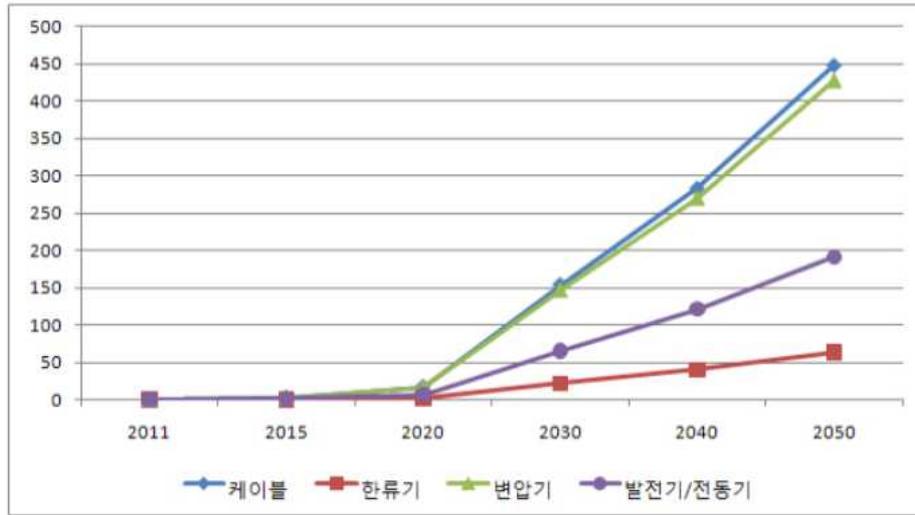
(출처 : Goulden Reports, June 2009를 참조, 2020년 이후는 4.65% 성장률 가정)

[표] 세계 중전기기 지역별 시장규모 전망

(단위:억불)

구분	2008	2015	2020	2030	2040	2050
아메리카	273.89	369.46	437.72	689.59	1086.38	1711.49
유럽	326.65	386.86	429.93	677.31	1067.04	1681.03
아시아	580.45	877.76	1090.12	1717.38	2705.57	4262.37
아프리카	35.21	52.83	65.41	103.05	162.34	255.75
오세아니아	15.76	17.87	19.37	30.52	48.07	75.74
합계	1,231.96	1,704.78	2,042.55	3,217.85	5,069.4	7,986.38

(출처 : Goulden Reports, June 2009를 참조, 2020년 이후는 4.65% 성장률 가정)



[그림] 연도별 초전도기기별 세계시장 규모 전망

(출처 : ‘초전도 응용기기 시장예측 보고서’ , 차세대초전도응용기술개발 사업단, 2010년 2월)

[주요기업 동향 및 경쟁현황]



[그림] 극저온 기술 응용 분야

극저온 냉각기술의 위의 그림과 같이 다양한 분야, 군사, 우주, 의료, 진공, 에너지, 정보통신, 수송관련 등에 사용되고 있음

(주)CVE의 경우, 극저온 냉각기술의 구현을 재생 열교환기의 고효율에 초점을 맞추어 진행함

LG전자의 경우, 한국기계연구원과 초전도 직냉형 CRYCOOLER에 대한 기초기술을 연구함

미국 AMSC는 ORNL의 기술을 바탕으로 RABiSTM기판위에 MOD기법을 이용한 초전도 층을 증착방법으로 초전도 선을 개발, 제작 및 판매하고 있음

미국 AMSC사의 초전도 선은 344TM라는 이름으로 판매되고 있다. 3은 기본적 구조의 초전도 선 양면에 안정층으로 SUS 또는 구리로 동일한 뚜께 정도의 층을 입혀 3층이라는 의미로 3, 그리고 기존의 1G 초전도 선에서 사용된 4.4mm의 선폭을 동일하게 사용한다는 의미에서 44를 사용하고 있음

SP사는 AMSC사와 강한 라이벌 관계에 있는 초전도 선 개발, 제조 및 판매회사이고 비즈니스를 제외한 2G 초전도 선의 성능자체만을 본다면, 세계최고수준의 기술력 보유라는 측면을 누구도 부인할 수 없다. 단지, AMSC사와 비교했을 때, 회사의 규모가 작고, 전략비즈니스모델의 폭이 좁다는 점이 있다. SP사에서 제작되는 2G 초전도 선의 내부 구조는 아래 그림과 같다. IBAD-MgO 기판위에 MOCVD공법을 이용한 초전도층 증착을 실시하고 있음

또한, 다른 현재 주성엔지니어링·아이피에스·국제엘렉트릭·아토·유진테크 등 국내 장비업체들이 PE CVD, LP CVD, MO CVD 등 각자 고유영역을 확보하며 시장을 확대해 나가고 있음

Fujikura에서는 Contact heating방식과 새롭게 Hot-wall heating방식을 채택하고 있으며 Contact heating방식에서 GdBCO로 초전도층을 바꾸고 Throughput속도를 아주 높게 향상(300A@45m/h, 600A@15m/h)시켰고, 새롭게 Hot-wall heating방식을 채택하여 1,000A(Short sample)가 넘는 임계전류를 달성했고 IBAD장비로 대형화시켜 300~1000m/h의Throughput을 달성함

■ 문의처	
· 소속	과학사업화팀
· 담당자	김보경
· 연락처	042-879-6232, godpk2@nfri.re.kr