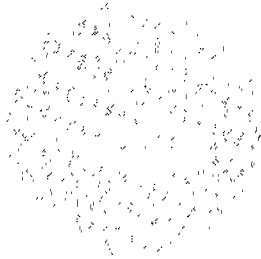


高温超電導体の 出現과 超電導時代

The Advent of High
Temperature Superconducting
Material and Superconduction
Era has begun...



李 承 院

서울대학교工大 教授

1. 우리나라에 있어서 Enertopia 건설계획과 超電導의 利用

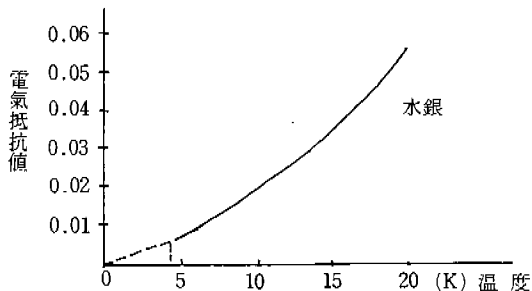
今年은 우리나라에 처음으로 電燈이 點燈된지 100年이 되는 뜻 깊은 해다. 이 뜻 깊은 해에 우리는 또 다른 두가지 큰 의의있는 사실을 독자 여러분께 알릴 수 있게 되었다. 그 첫째는 韓國電力이 기획하고 있는 Enertopia의 建設계획이다. 韓國電力은 해방후 겪어온 전력난으로 인한 곤경을 또다시 겪는 일이 없이 풍부한 電力을 國民에게 供給할 수 없을까苦心한 끝에 一次에너지가 거의 생산되지 않은 우리나라에서 무한한 電力供給이라는 것은 新技術(핵융합技術)이 開發될 때까지는 어려운 일이므로 차선책으로 原子力發電시설을 國產化하고 그 原料의 가공을 自力으로 이룩하여 電力을 準國產化함으로써 또다시 電力 빈곤상태가 오지 않게 하겠다는 것이다.

둘째는 지금으로부터 약 75年前에 發見되었으나 큰 빛을 못보고 있던 超電導技術의 所產인 超電導 에너지 貯藏裝置의 開發을 이 Enertopia 建設의 일환으로 수년전부터 서울대학교와 共同으로 開發하고 있다는 事實이다. 原子力發電을 위주로 하는 Enertopia 시대에는 原子力發電 出力이 Base Load를 훨씬 넘을 것이므로 최첨단 技術인 超電導技術을 應用하여 에너지貯藏裝置를 開發, 잉여분의 電力을 貯藏한다는 事實이다. 超電導라는 것은 모든 물질들은 導體이거나 半導體, 또는 不導體인데 이 들中 어느 것들은 그 온도를 내릴 경우 전기저항이 완전히 없어지게 되는 現象이다. 이런 것을 超電導體라고 하는데 前記한 바와같이 이런 현상은 절대 온도 0°에 가까운 極低溫에서 일어나는 현상이기 때문에 그 應用이 어려웠다. 그런데도 불구하고 韓國電力은 이를 電氣에너지의 貯藏裝置로서 利用할 수 있는 研究를 진행시켰으나 필요한 저온유지에 많은 어려움이 있었다. 그런데 다행스럽게도 액체질소에서 사용할 수 있는 고온超電導體(98K)가 발명됨으로써 이의 성공적利用이 더욱 용이하게 되었다. 今年에는 우리나라에 電氣文明이 도입된지 100年

이 되는 해이고 電力設備 容量이 2000萬KW로 1000 억불의 국민생산을 지원할 수 있게 되는 뜻깊은 해인데 고온超電體까지 出現 Enertopia 건설에 있어서 가장 필요한 超電導에너지 貯藏의 成功을 確信할 수 있는 뜻깊은 해라고 생각된다. 이 고온超電導體 내지 상온超電導體의 出現은 비단 우리나라 Enertopia 건설의 일환인 超電導에너지 貯藏裝置의 利用을 앞당기게 하는데 그치지 않고 電力의 發生, 輸送, 配分, 貯藏利用등 모든 면에서 革新을 가져와 앞으로 人類社會에 크게 공헌 할 것으로 예상되는바 고온超電導體의 出現을 기해서 超電導현상의 發見時點부터 현재에 이르기까지 발달과정과 상온超電導體의 出現으로 인한 電力系統의 변모에 대하여 기술해보기로 하겠다.

2. 超電導性的 發見

1911年 Leiden 대학의 Kamerlingh Onnes 교수는 수은을 사용하여 그 電氣抵抗을 측정하던 中 그 溫度抵抗曲線이 그림 1 과 같이 되었다. 古典 物理學에 따르면 불순물에 의한 금속격자의 결함으로 인한 電子의 충돌 때문에 저온부분에서는 그림 2의 점선과 같이 되며 불순물이 없다고 하더라도 파선과 같이 되어야 하는데 그림 1을 살펴 보면 4.2K까지는 상상했던 대로 온도의 감소에 따라 電氣抵抗이 비례적으로 감소하다가 4.2K 근처에 와서 電氣抵抗이 급격히 감소하여 완전히 0이 되어버렸다. 이것이 바로 超電導 現象으로서 이제까지의 고전물리학으로서는 說明할 수 없는 현상이었다. 그러나 뒤이어



〈그림-1〉 水銀의 溫度抵抗曲線

발달하기 시작한 量子論의 해석이 가능하게 되어 이의 理論的 뒷받침이 가능하게 되었다.

3. 超電導 物質

극저온에서 超電導현상을 나타내는 물질은 Onnes 교수의 수은 이후 많은 과학자들에 의해서 연구가 거듭되어 표 1과 같이 많은 순수 초전도 물질들이 발견되었다. 그런데 超電導물질의 利用상 가장 큰 소망은 高磁界의 실현인데 이 순수물질들은 극히低磁界에서도 磁界의 侵入으로 말미암아 그 超電導性을 알게 되었다. 이로 인하여 超電導에 대한 흥미가 상실되어 이 현상의 발견 이후 50년이란 긴 세월이 헛되이 지나갔다.

〈표-1〉

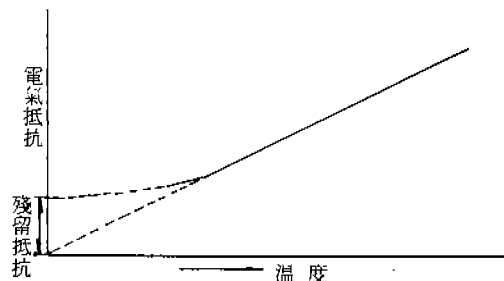
第一種 超電導 材料

元素	Tc (K)	元素	Tc (K)
Al	1.18	Ru	0.49
Ga	1.08	Ta	4.39
In	3.41	Tc	3.22
Ir	0.44	Tl	2.38
La	4.30	Th	1.37
Pb	7.23	Ti	0.42
Hg	4.15	W	0.01
Mo	0.92	U	0.08
Nb	9.17	V	5.3
Os	0.66	Zn	0.85
Re	1.70	Zr	0.55

〈표-2〉

第二種 超電導 材料

材 料 名	Tc (K)
(化合物)	
Nb ₃ Sn	18.2
V ₃ Ga	16.8
Nb ₃ (Al _{0.3} Ce _{0.2})	20.7
Nb ₃ Ge	~23
Nb ₃ Al	17.5
(合金)	
Nb·Zr	~10
Nb·Ti	~9
Nb·Zr·Ti	~10



〈그림-2〉 不純物 混入物質의 抵抗曲線

그런데 1954년에 B. T. Mathius 등이 순수물질이 아닌 Nb₃Sn이라는 화합물이 超電導性を發揮함을 발견하였고 그뒤 J. E. Kunzler가 8.8T의 高磁界를 발생하는데 성공함으로써 다시 연구가 활발히 진행되기 시작, 1963年 10T의 磁界를 발생하는 超電導磁石을 만드는데 성공하기에 이르렀다. Nb₃Sn과 같은 超電導材料는 단일 元素금속의 超電導材料와는 그 현상이 상이하고 理論的으로도 좀 상이한 점이 있다. 이들을 표시한 것이 표2와 같다. 그리고 단 일금속으로 된 것을 제 1종 초전도체, 화합물 또는 합금으로 된것을 제 2종 초전도체라고 구별해서 부르고 있다. 이 제 2종 超電導体の 出現으로 超電導 시대 도래의 전망이 뚜렷해졌다.

4. 超電導의 특징

科學技術 발달중 電氣技術의 발달은 많은 부분을 차지한다. 특히 최근에 있어서의 電子技術은 半導體의 출현으로 인하여 눈부신 발전을 이룩하고 있다. 그러나 이 기술은 電氣技術이라기 보다는 光學에 기인하는 부분이 많으며 電子計算機도 Computer 科學에 기인하는 발전이라고 볼 수 있는 반면 超電導 技術은 電氣의 根本原理的인 신기술로서 電氣 技術發展에 革新的인 도움을 줄것으로 생각된다.

超電導體는 다음 4가지 특징을 가지고 있다

- ① 電氣抵抗이 없다.
- ② 大電流를 흘릴 수 있다(동선의 10¹¹배)
- ③ 強磁界의 磁石을 만들 수 있다(20T 이상)
- ④ 영구전류를 흘릴 수 있다(10만년 이상)

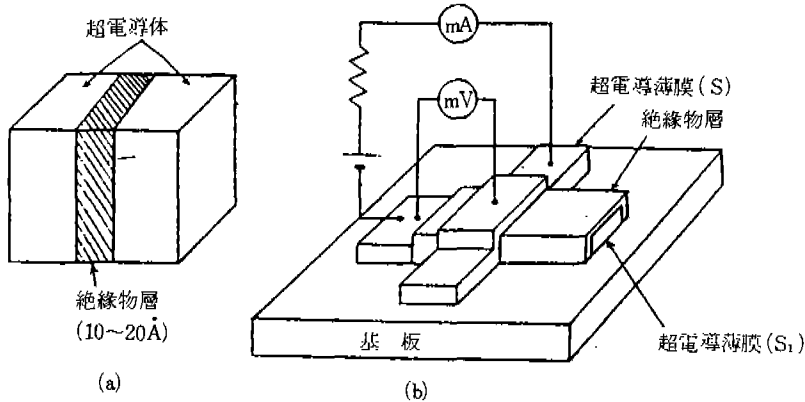
省에너지의 관점에서 볼 때 電氣機器를 超電導體로 제작할 경우 抵抗에 의한 발열을 없게 할 수 있으며 대전류를 흘릴 수 있다는 특징은 기계를 아주 작게 만들 수 있다는 것이다. 大電流를 흘릴 수 있다는 것은 導體의 단면을 작게할 수 있을 뿐만 아니라 기계의 구성요소인 磁石에 철심을 쓰지 않아도 된다는 것을 의미하므로 경량화를 이룰 수 있게 한다.

다음에 超電導의 영구電流의 특징은 신비하여 이해하기 어려운 성질이다. 常導體코일에 電壓을 가

해서 전류를 흘리다가 전원과 분리시켜 보면 그 전류는 대체적으로 1/10초 이내로 사라져 버리는데 반하여 초전도체로 만든 코일에서는 거의 영구적으로 이 電流가 흐른다. 이 성질을 利用해 電氣에너지를 저장하려는 연구가 바로 前記한 Enertopia의 건설계획의 일환으로 연구하고 있는 에너지저장장치이다. 이와같이 超電導는 현재 기대되고 있는 新技術中에서도 가장 소망스러운 것으로 이것이 얼마나 빨리 電氣界에 革命的인 기술로 등장하느냐는 것은 高온 超傳導體의 出現에 달려 있다고 보고 있었는데 드디어 그것이 實現된 것이다. 아마도 앞으로 5년이 못가서 액체질소환경下에서 더욱 쉽게 초전도 연구를 진행하게 될 것으로 기대된다.

5. 超電導 이론

정상상태에서 도체가 超電導體로 되는 것은 냉각에 의해서 액체가 고체로 되는 것과 비슷한 일종의 응축상태로의 相移轉이다. 액체에서 고체로의 변화에 있어서는 그 구성原子的 배열이 규칙성을 이루게 되는데 超電導의 경우는 자유전자도 질서정연한 상태로 되어 系진체로서 정상상태보다 낮은 에너지 상태를 이루게 된다. 극저온에서 超電導상태를 이루는 모든 물질의 電導電子는 電子, 格子(Lattice)간의 상호작용을 통하여 반대 방향의 運動量과 스핀을 갖는 두개의 電子가 陽子를 사이에 두고 引力을 끼치어 쌍(Cooper-Pair)을 이룩한다. 이 Cooper-Pair를 이룩한 電子쌍이 서로 강한 상관관계를 갖게 되어 일단 전체를 가하여 기동시켜 놓으면 양자와 충돌함이 없이 질서정연하게 이동하여 電流에 기여하게 된다. 이것이 超電導에 있어서의 完全電導性, 完全反磁性, 磁束量子化등의 독특한 특성의 원인이 되는 것이다. 이 이론은 Bardeen, Cooper 및 Schrieffer에 의해서 정립되었기 때문에 이 이론을 B. C. S이론이라고 한다. 이 현상은 그 導體가 어떤 극저온의 임계온도 이하가 되어야 일어나며, 온도가 임계온도 이상으로 올라가면 Cooper-Pair는 깨어져 常導體가 되어 버린다. 또 Cooper-Pair의 이동은 파동성을 갖고 있어 터널효과에 의



〈그림-3〉 조셉슨 접합

해 그림 3 과 같이 超電導體간에 끼워놓은 절연막 (조셉슨 소자)을 통과할 수도 있어 반도체 현상을 나타낸다. 이것도 전도체의 큰 특징으로 電子工學 部門에 널리 응용된다. 제 2종 超電導體의 발견에 의해서 높은 H_c , T_c 를 가진 超電導體가 계속 발견 되어 超電導의 工學的 利用研究가 계속되고 있으나 현재까지는 임계온도가 너무 낮아(액체 He의 온도) 크게 발전하지 못하고 있었던 것이다. 그런데 액체 질소의 온도(77K)에서 안정하게 동작되는 임계온도가 98K인 超電導材料가 出現하였으니 超電導가 人間生活에 크게 貢獻할 날이 目前에 이르렀다고 볼 수 있다.

6. 超電導의 利用

超電導는 核融合, 電氣에너지의 저장 超電導發電機, 超電導變壓器, 超電導케이블, 磁氣浮上列車MHD發電등 광범위하게 新에너지 기술의 중심적 역할을 담당하려 하고 있다. 이것은 에너지분야 뿐만 아니라 電子工學분야에서도 超電導조셉슨素子는 超LSI에 이어 다음 세대의 電子計算機素子로서 주목되고 있다.

超電導磁石은 중래의 電磁石과 같은 鐵心이 없어 磁氣飽和현상이 없기 때문에 臨界磁石정도의 高磁界(5~20T)를 발생시킬 수 있어 그 用途가 대단히 확대된다. 即 從來의 用途에 쓰일 경우 그 성능이

대단히 향상될 뿐 아니라 磁界內에 플라즈마를 가두는 機融合, 磁氣浮上列車, MHD發電등을 가능케 하고 電氣에너지의 유일한 결점인 電氣에너지의 직접貯藏을 가능하게 함으로써 電氣ener지를 결점없는 완벽한 에너지로 만들 수 있게한다.

또 超電導發電機, 電動機에 응용할 것 같으면 그 효율을 높게할 수 있을 뿐 아니라 소형화, 경량화할 수 있다. 發電機의 界磁코일을 超電導化하면 높은 磁界를 발생시킬 수 있기 때문에 常電導磁石의 경우에 비해 그 중량을 수분지일 정도로 할 수 있으며 코일 손실이 전혀없어 그만큼 효율이 상승된다. 그래서 超電導發電機에 대한 연구도 세계 각국에서 활발히 진행되고 있다. 미국에서 30만KW, 일본에서 5만KW, 소련에서 5만KW, 등의 超電導發電機가 시작된다. 이 초전도발전기는 전기한 특징 이외에 그 특성이 크게 개선됨에 따라 送電系統의 안정도를 크게 개선할 수 있다. 따라서 送電線 容量도 증가시킬 수 있는 이점이 있다. 超電導에 의한 電氣에너지貯藏은 電力系統의 尖頭負荷供給用 電力 저장장치로 使用할 수 있어 그 效率이 65%정도 밖에 안되는 揚水發電所 대신 使用하게 된다. 이 경우 그 效率은 90% 이상이 된다. 揚水發電所 규모 의 에너지 저장량은 보통 10^{12} J (1000MWh) 정도인데 Wisconsin 대학의 연구예에 의하면 이 경우의 초전도코일의 직경이 110~150m 정도가 된다.

또 超電導磁石을 核融合爐에 있어서 플라즈마를

잡아두는 磁界의 發生裝置로 사용하고 있다. 이 경우 소요되는 磁界는 (10~20T) 정도 이어야 하기 때문에 常電導체로서는 磁氣飽和와 電力損失 때문에 불가능하며 超電導코일이라야만 가능하다. 그래서 이에 필요한 강력 核融合磁石이 국제적 협력에 의해서 연구제작되고 있다(LCT계획).

이상과 같이 超電導工學의 에너지 技術에서의 응용은 대단히 광범위하다. 지금 電力수요가 격증했을 경우 電力의 發電부터 輸送貯藏利用에 이르는一聯의 電力系統의 超電導化를 생각해 보자. 電力은 超電導磁界를 이용한 核融合에 의해서 熱에너지가 발생되며 이 열은 超電導發電機를 一定出力으로 항상 少量 發電할 수 있으므로 수요의 증감에 따른잉여 電力은 암반중에 설치되어 있는 超電導에너지저장장치에 저장될 것이다.

이들간의 電流의 수수는 수10만 Ampere 급이 될 것이며 送電線路도 같은 水準의 電力을 수송해야하므로 超電導케이블이 필요하게 된다. 그리고 이 케이블 양단에는 超電導변압기를 連結, 대형공장에서는 超電導電動機가 운전되며 또 수요가가 자체적으로 수용율을 낮추기 위해서는 소형 超電導에너지저장장치를 설치하게 될 것이다. 또 電力系統의 안정화, 電壓의 조정을 위하여 系統의 필요한 곳에 많은 소형 超電導에너지 저장장치를 설치하게 될 것이며, 또 變電所의 有, 無効電力의 조정도 콘덴서나 리액터 대신에 이 에너지 저장장치가 사용될 것이다. 여기에 이르기까지의 과정은 멀고 평탄하지 않을 것이라고 생각되어 왔으나 고온 초전도체의 발견으로 電力系統의 超電導化는 目前에 다가와 10~20年内에 全System이 超電導化될 것으로 예상된다

또 조셉슨 素子를 스위칭 素子로 이용할 경우는 그 개폐시간이 현 반도체의 경우의 1/10로 줄어들며 손실은 1/1000로 감소되기 때문에 다음세대 電子計算機素子로 유망시 되고 있으며 SQUID에 의해서는 $10^{-13} \sim 10^{-14}$ T급의 미소磁場이 측정되므로 이것을 이용하여 인체의 모든 세포활동을 측정할 수 있게 되므로 人体診斷에 크게 기여할 것이다. 이와 같이 超電導는 電力工學, 電子工學分野를 막론하고 크게 인류에 기여할 수 있는 능력을 갖추고 있는 점

단기기술인데도 그 現象이 發生하는 환경이 절대온도 근방이어서 개발 速度가 늦어졌으나 이제 고온超電導체의 개발로 前記한 바와같이 超電導時代는 目前에 다가온 것이다.

7. 高温超電導時代의 到來

가) 高温超電導체의 出現

昨年까지 발견된 超電導체의 臨界溫度의 最高値는 23.2K로서 B. C. S 理論上으로는 이것이 最高일 것이라고 생각되었는데, 昨年 4月 Switzerland의 I. B. M. Zürich 연구소에서 K. Alex Müller와 J. Georg Bednorz에 의해 Ba, Lt, Cu, O 화합물로 된 物体가 35K에서 超電導性을 나타내는 것을 發見한 後 金屬酸化物에 對한 관심이 급격히 높아지게 되어 日本 東京大學의 Shoji Tanaka 教授가 이의 再試驗에 의해서 37K에서 超電導체로 傳位함을 확인하였고 그후 이 溫度는 繼續上昇 39K(일본), 40K(미국), 43K(일본), 54K(일본)로 上昇하더니 지난 2月15日에는 Müller의 酸化物의 Lt대신 Yt를 사용함으로써 액체질소온도에서 使用할 수 있는 98K의 高温超電導체가 미국의 Houston 大學의 物理學者 C. W. Chu 博士에 의해서 發明 되었다. 그후 U. C. Berkeley에서 233K의 것이 만들어졌다고 했다가 곧 취소되었고 또 日本의 鹿兒島大에서 常溫 即 15°C에서 超電導性을 發揮하는 것을 개발했다고 했으나 이것은 不確實하다. 그러나 이로 미루어봐서 常溫超電導체의 出現도 그리멀지 않을 것으로 예상된다

이와같은 산화물의 超電導性의 原理는 여러가지 說이 주장되고 있으나 아직 公認된 定說은 없다. 이것을 해명할 수 있게 되면 常溫超電導체개발에 拍車를 加하게 될 것이다.

나) 高温超電導의 理論

高温超電導체는 結晶中の 格子의 物理적 振動 뿐만 아니라 銅이온을 中心으로한 電荷의 電氣的 振動도 생기며 그것도 引力의 中間役割을 하고 있을 것이라고 생각하고 있다. 이와같은 電荷의 振動을 푸라스몬이라고 부름으로서 이전부터 提案되고 있

던 說이기는 하나 이것이 꼭 高温超電導說에 관계된다는 確定은 없다. 오히려 이런 說은 다 適用되지 않고 지금까지 磁性은 電子雙을 깨뜨린다고 생각되었는데 이것이 電子雙을 만드는 方向으로 작용할 수도 있다고 보기도 한다. 또 Phonon으로도 150 K까지는 설명이 가능하다는 說도 있고 또 電子間의 電氣的 反발력만 가지고 引力을 설명한 논문도 있으며 Zürich 大學에서도 新理論이 나오고 있어 앞으로 계속 이런 新理論이 발표될 것으로 예상되는데 어떤 것이 맞을 것인가는 실험 結果에 의해서 判定될 것이다.

今後 臨界溫度가 어느 정도까지 상승할 것인가 그리고 어떤 획기적인 이론이 튀어 나올 것인가 그리고 이에 대한 노벨상은 누구의 것이 될 것인가는 全世界學者의 注目거리가 되고 있다.

다) 高温超電導体の 製作法

1年前까지만해도 液体窒素溫度를 넘는 超電導体는 어쩌면 今世紀中에는 나타나지 못할 것이라고 생각되었었는데 그것이 지극히 단순하게 실현된 것이다.

第2의 産業혁명을 일으키리라고 생각되는 高温超電導体가 CuO와 希土類 元素를 섞어서 곱게 갈아 압축 成形한 후 電氣爐의 溫度를 調節하면서 구움으로써 아주 간단하게 제조된다. 이 과정은 國民學校의 理科實驗過程度에 속하는 程度로 簡單하다. 今년부터 日本의 어느 출판사에서 超電導에 對한 記事를 내면서 하도 簡單히 제작된다고 하여 과학기술에 소양이 없는 會社員으로 하여금 실험 製作케한 과정을 소개 하기로 하겠다. 이 會社에서 試作한 超電導体的 組成은 Chu 박사가 만든 것과 같은 Y. Ba CuO의 混合体로 시약으로는 산화Y, 탄산Ba, 산화제 2등을 각각 0.6 1.5 1.0의 比率로 混合하여 全体가 灰色의 완전한 분말이 되도록 분쇄한 다음 이것을 成形 850℃의 一定한 溫度로 電氣爐에서 2時間 굽고 0.5~1시간에 걸쳐 서서히 냉각시켜 製作한 것이다. 이 會社에서 이 試作品을 만들기 위해서 使用한 費用은 器具를 포함 약 30만원이 소요되었다고 한다.

7. 高温超電導体的 實用化

高温超電導体는 그 발견이 겨우 2個月 밖에 안되는데다가 그 이론도 아직 定立되지 못한 실정이라서 오늘 내일로 실용화된다고는 보기 힘들지만 實用化의 有望性을 검토해 보기로 한다.

現在 개발中인 磁氣浮上列車, 實用中인 N. M. R CT 등에는 液体He으로 냉각해야 하는 超電導体를 使用하고 있다. 그런데 이 He은 稀少資源으로 그 價格도 1ℓ 당 20,000원 정도나 한다. 이에 反하여 액체질소는 1ℓ 당 300원인 데다가 空氣의 3/4 이 窒素이니까 資源으로서는 무한정하다. 이런 점에서 볼때 前記한 여러가지 초전도응용기구들이 얼마나 손쉽게 값싸게 개발될 수 있을까는 가히 짐작하고도 남음이 있을 것이다.

實로 高温超電導体的 出現은 제2의 産業革命을 일으킬 수 있다고 보아도 무방할 것이다. 그러나 아직은 이의 線材化等に 多少의 時間이 所要될 것이므로 그의 實用化에 약간의 時間의 지연이 있을 것으로 예상된다. 물론 常溫超電導体的 出現도 豫想되고 있는데 이경우 그 效果가 얼마나 至大할 것인지는 前記 事實에 비추어 보면 可히 짐작하고 남음이 있을 것으로 본다.

