

# 超電導 에너지貯藏裝置

增 田 正 美

(日本 高에너지研究所 教授)

■ 차 례 ■

- 1. 超電導性的 발견
- 2. 超電導體의 特徵
  - 2.1 超電導體의 無抵抗性
  - 2.2 超電導體의 反磁性性
  - 2.3 超電導體의 永久電流性
  - 2.4 超電導體의 半導體性
- 3. 超電導 導線
- 4. 超電導에너지 저장장치
  - 4.1 에너지 저장장치의 필요성
  - 4.2 超電導 에너지 저장의 원리 및 특징과 응용
  - 4.3 超電導 에너지 저장시스템의 구성과 운용
  - 4.4 超電導 에너지 저장장치의 효율
  - 4.5 超電導 에너지 저장장치의 효율성 및 개념설계 사양
- 5. 결 론

## 1 超電導性的 발견

1911년 Leiden 대학의 Kamerlingh Onnes 교수는 수은을 사용하여 그 전기저항을 측정함으로써 액체 He의 온도를 측정했다. 온도 측정 매체로써 수은을 사용했던 이유는 순수금속이어야만 열운동 정지후에도 원자 配列格子가 이그러지지 않아 전기저항이 最小狀態가 되는데 수은은 실온에서도 流動性을 가진 액체금속이므로 이를 증류, 순도가 높은 금속으로 만들기가 용이하였기 때문이다. 이때 Onnes 교수가 측정한 수은의 溫度抵抗曲線이 그림 1과 같이 되었다. 고전물리학에 따르면 불순물에 의한 金屬格子의 결함으로 인한 전자의 충돌때문에 저온 부분에서는 그림 2의 점선과 같이 되어야 하며 불순물이 없다하더라도 破線과 같이 되어야 하는데, 이 그림 1을 살펴보면 4.2K까지는 상상했던 대로

온도의 감소에 따라 전기저항이 비례적으로 감소했는데 4.2K 근처에서 전기저항이 급減하여 거의 零狀態에 이르렀다. 이것은 이제까지의 고전물리학으로서는 해명이 되지않는 현상이었으나, 매마침 발달하기 시작한 양자론에 의해서 그 해석이 가능하게 되었다. 그리고 이를 超電導現象이라고 부르게 되었다.

그후 Onnes를 비롯 많은 과학자들은 수은 이외도 많은 물질들이 각기 다르기는 하나 極低溫領域에서 초전도현상을 나타냄을 발견했다. 이때의 온도를 각기의 臨界溫度라고 하며, 대개는 절대온도를 數K내지 數10K 정도의 극저온이다.

극저온이 어느정도의 온도인가를 감지할 수 있게 하기 위해서 표시한 것이 표 1이다.

또 이들은 각기 다르기는 하나 어떤 자계에 이르러서는 그 초전도성을 상실, 전기저항이 있는 상전도상태로 돌아가며 다시 자계를 약하게 해가면 초전도상태로 복귀함도 발견했다. 이때 轉移가 일어나는 자계를 臨界磁界라고 하는데 이 임계자계 He가 임계온도내에서 온도T에 따라 변화함도 알게되었다.

Onnes 이후 많은 과학자들에 의해서 초전도 물질은 계속 발견되어 현재까지는 표 2와 같은 많은 금속원소와 표 3과 같은 합금또는 초저도성을 갖고 있

본 원고는 지난 2월 27일 한국전력공사 울지로 별관 강당에서 본학회 주최로 개최된 강연회에서 일본 고에너지 연구소 교수로 제신 Dr. Masayoshi Masuda가 강연한 내용을 서울대 이승원 교수와 단국대 황석영 교수께서 원고화 한 것이다.

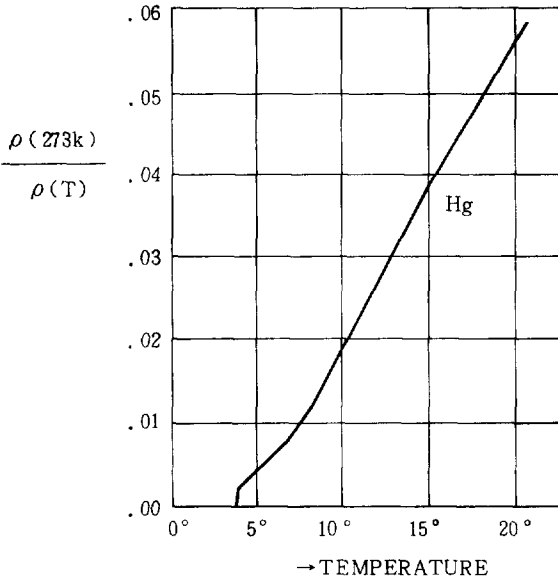


그림 1. 수은의 저항온도 특성

표 1. 各種氣體의 液化溫度

STATES	CELSIUS	KELVIN
ULTIMATE	-273° C	0K
LIQUID-He	-269° C	4K
LIQUID-H <sub>2</sub>	-253° C	20K
LIQUID-N <sub>2</sub>	-196° C	77K
DRY ICE	-78.5° C	200K

표 2. 第1種 超電導體의 臨界溫度

ELEMENT	T <sub>c</sub>	ELEMENT	T <sub>c</sub>
Al	1.2	Os	0.7
Cd	0.52	Rh	1.7
Ga	1.1	Ta	4.5
In	3.4	Tc	7.9
Ir	0.11	Th	2.4
La	4.8	Sn	3.7
Pb	7.2	Ti	0.4
Lu	0.1	W	0.01
Hg	4.2	U	0.6
Mo	0.9	V	5.4
Nb	9.3		

표 3. 第2種 超電導體의 臨界溫度와 臨界磁界

材料名	T(K)	H(4.2K)
(化合物)		
Nb <sub>3</sub> Sn	18.2	24T
V <sub>3</sub> Ga	16.8	21
Nb <sub>3</sub> (Al, G)	20.7	41
Nb <sub>3</sub> Ge	23	
Nb <sub>3</sub> Al	17.5	30
(合金)		
Nb-Zr	10	7
Nb-Ti	9	12
Nb-Zr-Ti	10	10
Nb-Zr-Ta		12.5

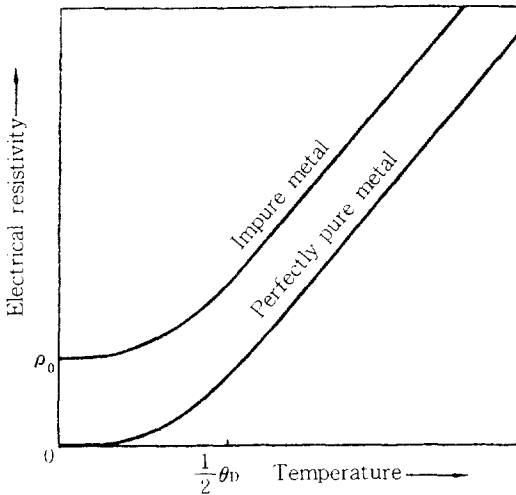


그림 2. 고전물리에 의한 저항온도 특성

음을 알게 되었다.

V<sub>3</sub>Ga는 임계자계가 대단히 높아 이에 의하여 高磁界磁石(18T까지 成功)을 만들 수 있게 됨으로써 초전도의 응용에 박차를 가하게 되었다.

## 2 超電導體의 特徵

### 2.1 超電導體의 無抵抗性(完全導體性)

通常電導機構에서는 반발력이 작용하던 전자가 임계

온도이하의 영역에 놓이게 되면 상호간에 결합작용이 나타나기 시작한다. 이 상태에서는 전자계가 질서 정연한 상태로 되어 系 전체로서 정상상태 보다 낮은 에너지 상태를 이루게 된다. 극저온에서 초전도상태를 이루는 모든 물질의 傳導電子는 電子-格子(lattice)간의 상호작용을 통하여 반대방향의 운동량과 스핀을 갖는 두개의 전자가 양자를 사이에 두고 인력을 갖게되어 쌍(cooper-pair)을 형성하고 일종의

Bose응축상태를 이룬다. 온도가 상승하면 이들 쌍의 일부는 勵起되어 일반적인 傳導電子的인 準粒子(quast-particle)로 되돌아 간다. 정상적 전도에서는 개개의 전자가 다른 것들과는 무관하게 불규칙한 운동을 하나 초전도의 경우는 전자쌍이 서로 강한 상관관계를 갖게되며 전체적으로 보아 질서정연하게 이동하여 電流에 기여하게된다. 이것이 바로 超電導의 完全電導性이다.

이 이론은 Bardeen, Cooper 및 Schrieffer에 의해서 정립되었다. 이 이론을 이 세사람의 이름첫자를 따서 B. C. S 이론이라고 한다. Cooper와 Schrieffer는 이 이론 정립당시 Lllinois대학의 대학원생이었고 Bardeen은 이들의 지도교수였다.

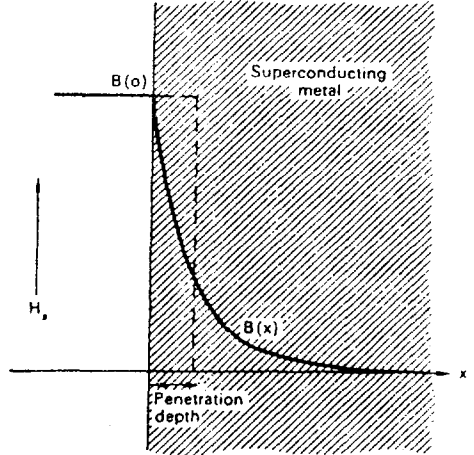


그림 4. 자계의 침투깊이

2.2 超電導體의 反磁性性

1933년 Meissner 와 Ochsensfeld 兩氏는 磁界中에서 임계온도이하로 냉각시킨  $P_0$  와  $S_0$  의 외부자속분포를 측정했을때 그림 3의 (b)와 같이 내부자속을 全部相殺해버려 자동적으로 完全反磁性체가 됨을 발견하게되었다. 만일 초전도체가 완전 도체성(전기 저항만이 완전히 없는 도체)만 갖고 있다면 그것은 그 내부에서의 자속변화만을 허용치 않으면 되는데 ( $\frac{dB}{dA} = 0$ ) 超電體는 어떠한 경우라 할지라도 그 내부에 자속의 존재를 허용치 않는( $B = 0$ ) 성질이 있음을 발견한 것이다.

즉 초전도체는 완전반자성특성임을 알게 된 것이다. 이 현상은 그 발견자인 Meissner씨의 이름을 따서 Meissner효과라고 부른다. 이 현상을 초전도체를 자계내에 투입하면 그 자계를 완전히 相殺 하는 表層電流가 흐르기 때문이다.

이 경우 表層電流密度와 자계의 침입상태를 나타낸 것이 그림 4이며  $10^{-5}cm$ 의 표층에  $10^{14}A/cm^2$ 의 전류밀도로 전류가 흐른다. 이것을 일반도체의 전류밀도  $10^2 \sim 3/cm^2$ 와 비교하면 실로  $10^{11-12}$ 배나 되는 큰 전류인 것이다.

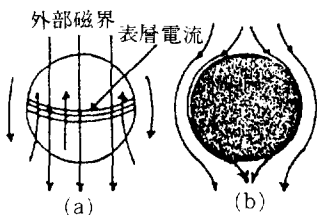


그림 3. 超電導球體에 흐르는 表層電流

2.3 超電導體의 永久電流性

그림 5와 같이 極低溫領域內에 초전도 Coil을 놓고 이에 전지를 연결하고 먼저  $S_2$ 를 열어 놓은채  $S_1$ 를 닫아 초전도 Coil에 전류를 흐르게 하여 일 정치에 달하게 한다음  $S_2$ 를 닫고  $S_1$ 을 열어 전지를 회로에서 분리시킬 것같은 초전도 Coil에는 영구전류가 흐른다.

이것은 Coil에 저항이 없기 때문으로써 時定數가 무한대가 되어 전류가 영구히 감쇄하지 않기 때문이다. 이 세상의 모든 사물은 실제로 마찰 또는 저항이 있으므로 우리가 인지할 수 있는 범위내에서는 영구운동이란 볼 수 없는 것이다. 그러나 量子論으로 다루어지는 미시적 영역에 있어서의 양자역학적 효과가 거시적 현상으로 나타난 것이다.

이와 같이 초전도 Coil에는 영구전류가 흐를 수

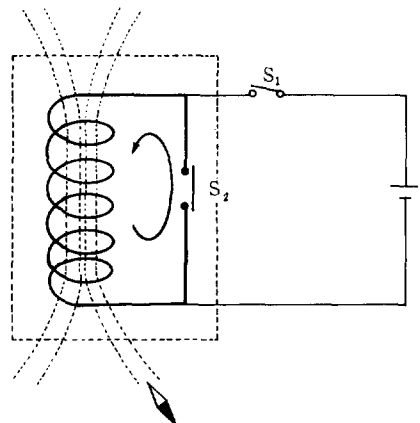


그림 5. 영구전류회로

있으므로 그에 영구히 電磁에너지를 저장할 수 있는 특징이 있음을 알 수 있다.

### 2.4 超電導體의 半導體性

Cabridge 대학의 대학원생이었던 B.D Josephson 은 1962년 2枚의 超電導體片 사이에 절연물( $10^{-7}cm$  이하)를 끼운 소자를 만들 경우 前記한 초전도전류 요소인 Cooper 쌍이 한쪽에서 다른 쪽으로 Tunnel 효과에 의해서 통과할 것이라고 예언하였다. 즉 Cooper 쌍이 두片的 초전도체가 마치 單體的의 경우와 마찬가지로 자유롭게 통과한다. 따라서 이때 통과하는 전류도 單體的의 초전도체에 흐를 경우와 똑같은 특성을 나타낸다. 2枚의 Al 초전도체편으로 만들어진 소자의 경우 전기적특성은 그림 6 과 같이 불순물농도가 약간 높은 예사기(江崎)다이오드와 흡사하다. 또 異種의 超電導片으로 만든 소자의 경우는 그림 7 과 같이 負性特性을 나타낸다. 이것은 2片的 초전도체의 특성이 다르기 때문으로써 Cooper 쌍을 만드는 에너지 갭이 상이하기 때문이다. 그리고 Josephson 소자는 이상의 Tunnel 효과외에 그림 8 과 같이 자계에 의해서 놀라운 정도로 민감한 성질이 있음도 알게 되었다. 즉 외부자계가  $10^{11} T$  보다 작게 변화하더라도 Josephson 전류가 용이하게 제어됨을 알 수 있다. 이와 같이 극히 약한 자계에 의한 전류의 제어는 전자계산기소자로서 대단히 소망스러운 특징이다.

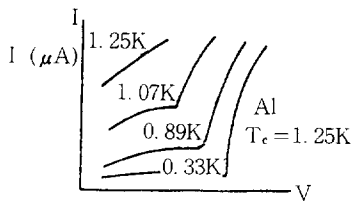


그림 6. Al - I - Al 接合의 V - I 特性

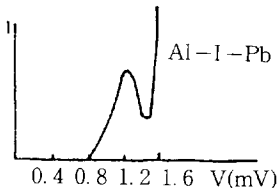


그림 7. Al - I - Pb 의 V - I 特性

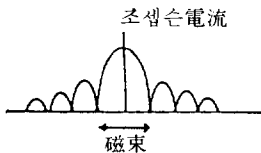


그림 8. Josephson 素子の 磁氣特性

### ③ 超電導 導線

전기한 바와 같이 많은 초전도재료들이 발견되었으나 현재 실용화되고 있는 것은 화합물에서는  $Nb_3Sn$  이고 합금중에서는 NbTi 이다.  $Nb_3Sn$  은 Tc 와 Hc 가 각각 18.2K, 24T 로써 대단히 매력적 이기는 하나 ductility가 부족해서 加工이 용이치 않은 결점이 있어 용도에 제한을 받고 있다. NbTi 는 Tc 가 9K, Hc가 12T 로써  $Nb_3Sn$  보다는 낮지만 합금이기 때문에 가공이 용이해서 비교적 널리 쓰이고 있다. 어느 경우나 초전도체는 그내부에 자속이 존재할 수 없는 성질을 갖고 있기 때문에 전류는 표피를 통해서만 흐르게 된다. 그래서 초전도선은 細線( $d = 数 \mu m$ )를 모아서 그표면을 될 수 있는대로 크게하는 구조로 해서 사용한다. 그리고 현재 초전도선은 그 질량당 가격은 엄청나게 고가이지만 그 통전능력으로 볼 것 같으면 Cu가 12,000원/KA-m 인데 비해 초전도체는 3,000원/KA-m 로서 Cu 의 1/4 밖에 안된다. 그代身冷媒인 액체 He가 소요되는데 이는 6,000원/ℓ 로서 코일수납용기의 용량만큼 필요하나, 그리 큰 값이 못된다. 그리고 열침입으로 인한 蒸發He의 액화비용도 대형저장 시설의 경우 그 저장에너지의 0.5% 밖에 되지 않아 전체적으로 보아 현재로서도 常導體使用時보다 비용이 저렴하다. 그리고 새로운 초전도체의 발견 이라던가 제작기술의 발전에 따라 그 가격이 크게 떨어질 것으로 예상됨으로 초전도의 이용전망은 대단히 밝다고 보겠다

### ④ 超電導에너지 저장장치

초전도는 J. E. Kunzler 의 고임계자계, 고임계온도물질의 발견과 이에 의한 Z.T.T.Stekkey의 고자계 자석의 제작성공과 더불어 그응용이 가속화되기 시작했다.

즉 전력분야에서는 여자가 초전도체에 의하여 이루어지는 발전기가 출현했고, 거대전력수송을 위한 고밀도송전연구가 활발해 졌으며 본 강연의 주제인 전력저장장치도 구상되게 되었다. 또 수송분야에서는 시속 500km를 초과하는 자기부상열차가 출현했는가 하면 超傳導磁力에 의한 선박추진도 연구하게 되었다. 인류가 갈망하고 있는 핵융합에너지도 초전도자석없는 그 실현이 불가능할 것으로 보여지고 있다. 이와 같이 거대에너지측면에서만 보더라도 초

전도현상을 가까운 장래에 인류생활에 크게 공헌할 획기적 기술이라고 아니할 수 없다. 여기서는 이 중에서도 에너지저장장치에 대해서 그 유풀과 일본 및 미국에 있어서의 연구현황에 대하여 설명하고자 하는 바이다.

#### 4.1 에너지 저장장치의 필요성

그림 9는 일본에 있어서의 전력수요의 년도별 변화를 표시한 것인데 이것을 보면 일본은 그침두부하가 1960년대까지는 冬期에 나타났었으나 최근에는 여름에 나타나기 시작했다. 그리고 그림 10은 최근의 夏節 최대침두부하시 하루의 것을 시간별로 나타낸 것인데 10시 부터 5시 사이에 침두부하가 나타남을 보여주고 있다. 이것은 일본의 특수사정으로서 일본에서는 고교야구가 범국민적 인기스포츠로서 야구경기를 Air Conditioner를 가동시켜놓고 T.V를 통하여 관람하기 때문에 일어나는 특수현상이다.

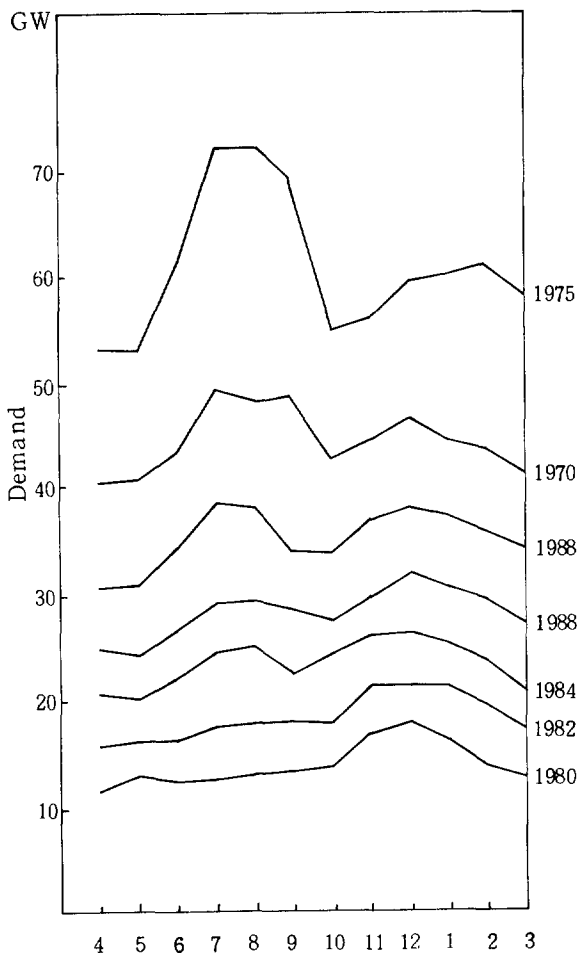


그림 9. 일본의 년도별 계절별 전력수요 현황

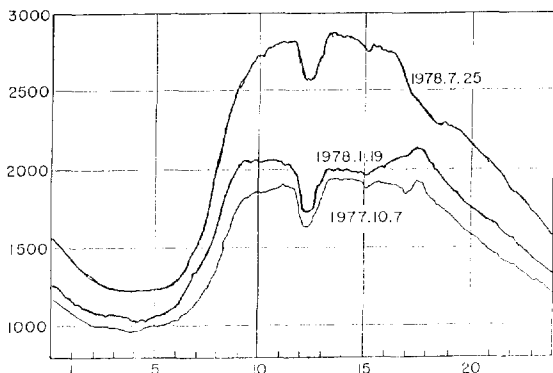


그림 10. 일본의 하절기 일일 부하현황

여하튼 우리인간이 그의 생활활동을 전력공급 능력에 맞추어서 하는 것이 아니고 그의 편리한 시간에 따라 하기 때문에 전력공급능력을 이에 맞출 수 밖에 없다. 그림 11은 미국에 있어서의 1주간의 수요변화를 표시한 것으로서 주간과 야간의 전력수요차를 볼 수 있다. 이 경우도 마찬가지로 이에 공급능력을 맞출 수 밖에 없다. 그러나 수요 Peak에 발전 능력을 갖춘다는 것은 대단히 비경제적이다. 그래서 그림 12와 같이 수요가 적을때 이를 저장했다가 Peak 때에 이를 사용토록하면 작은 공급시설로 전력을 공급할 수 있어 그림에 표시한 것과 같이 전력요금도 싸지게 된다. 그래서 현재는 각종에너지 저장장치가 고안되고 있는데 그 종류와 효율을 표시한 것이 표 4와 같다. 이표중 2~5까지는 그 효율도 나뉠 뿐만 아니라 극히 소용량이라서 극부적 저장장치에 지나지 않는다. 이 중 대전력의 저장이 가능한 것이 현재 실용화되고 있는 양수발전소와 S.M.E. S의 두 가지라고 볼 수 있다. 그런데 양수발전은 그효율이 아주 낮다. 이는 기계에너지와 전기에너지간의 변환을 두번이나 거쳐야하기 때문이다. 그래서 밀 뚫어진 양동이에 물 붓기와 비유하고 있는 형편이다. 그뿐만아니라 그立地에도 제한이 있고 넓은 면적을 차지하는 上下貯水池가 필요하게 된다. 그래서 대두된 것이 초전도코일로서 저항이 없이 영구히 전류를 흘릴 수 있는 특징을 이용하여 電磁에너지 형태로 전력을 직접저장하자는 것이 소위 S.M.E.S이다. 이는 최근 발달한 다이리스터 변환기에 의해 계통과의 연결도 가능케 되어 마침내 실용화를 시도하기에 이르렀다.

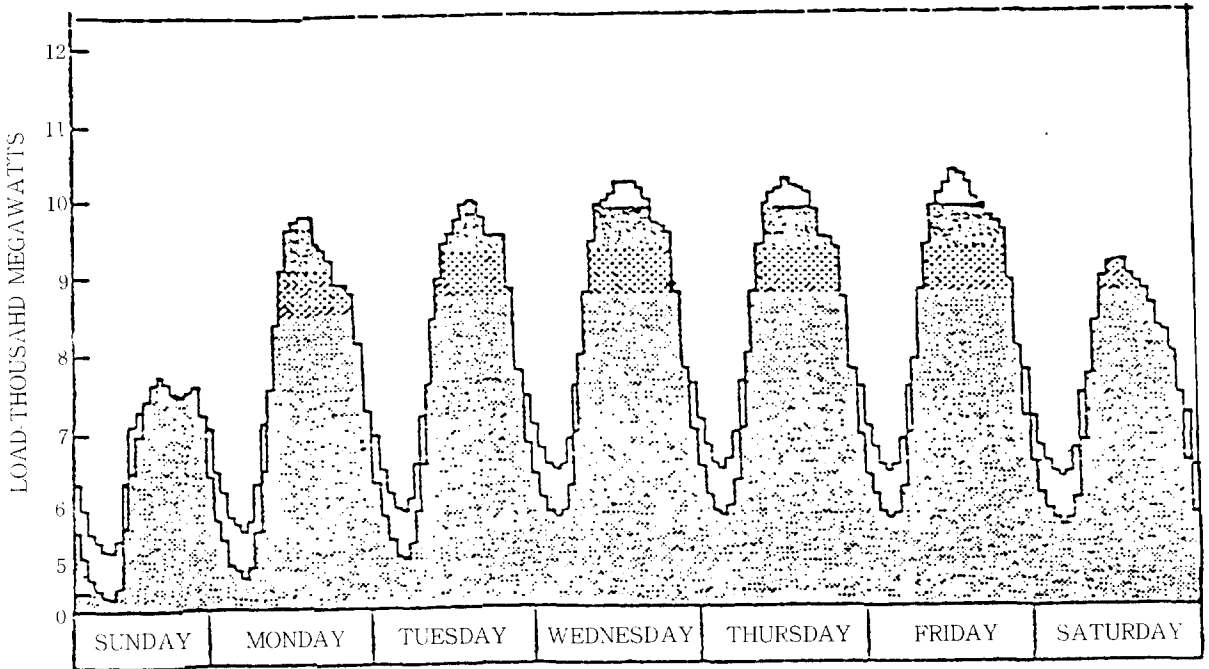


그림 11. 美國의 週間發電狀況

표 4. 各種 에너지 貯藏裝置의 効率

TYPE	EFFICIENCY
HYDRO PUMPED	65~70
ADVANCED BATTERY	75~80
FLYWHEEL	75
COMPRESSED AIR	70
HYDROGEN STORAGE	20
SMES	>90

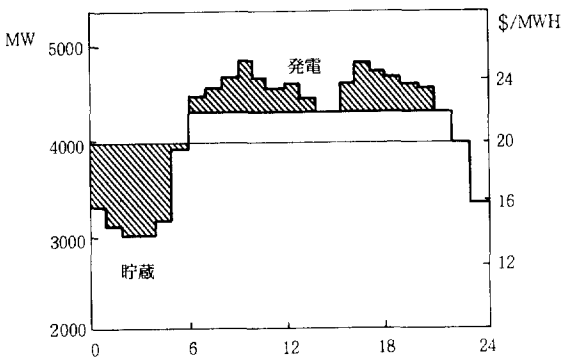


그림 12. 저장장치에 의한 부하조정

4.2 超電導 에너지 저장의 원리 및 특징과 응용

초전도 에너지 저장의 원리는 코일에 전류를 흘릴 때 저장되는 자기에너지 ( $\frac{1}{2}LI^2$ )를 이용하는 것으로 코일을 이루는 도체가 超傳導體이므로 초전도체의 특성과 손실 측면에서 다음과 같은 특징이 있다.

1) 무손실: 원리적으로는 손실(약수 경우는 누수)이 없는 영구 저장이 가능하다.

2) 철심 불필요: 대전류로 코일의 저항손을 발생하지 않고 강자계를 만들 수 있으므로 포화 특성과 철손이 있는 철심등의 자기재료가 필요없다.

3) 에너지 밀도와 전자력: 강자계일 수록 에너지 저장밀도  $\frac{B^2}{2\mu_0}$  ( $J/m^3$ )가 높으나 전자력  $\frac{B^2}{2\mu_0}$  ( $N/m^2$ )이 또한 커지므로 코일의 기계적 강도 및 지지문제와 초전도성의 임계치(전류밀도, 온도, 자계)등에서 자계를 정한다.

4) 초전도성 유지대책: 초전도성은 그림 13과 같이 임계치 이내에서만 초전도체가 되고 이것을 벗어나면 상도체가 되는 데 이경우 상도체화에 따른 전기저항에서 국부적으로 발생한 열은 다시 인접부분을 가열하여 또 다시 상도체화하는 현상이 눈사태식

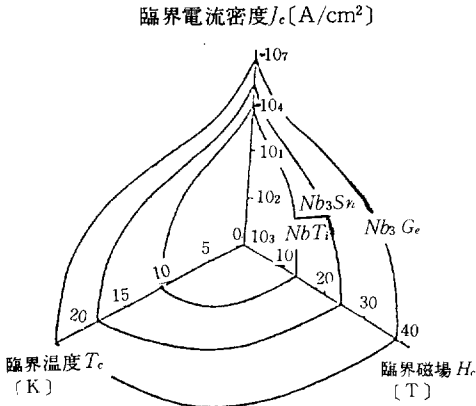


그림 13. 초전도체의 임계치

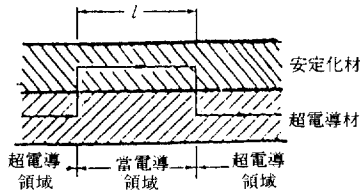


그림 14. 초전도 복합선의 진류경로

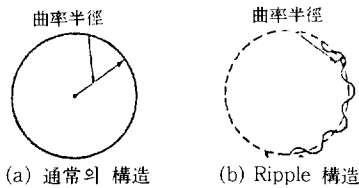


그림 15. 코일모양

으로 확대되는 즉 갑작스러운 대규모 상도체 전이를 Quench라 하는데 이것은 양수발전의 댐붕괴에 해당 하는 것으로 이의 발생 방지대책이 필요하다.

이를 위해서는 그림 14와 같이 초전도 복합선을 써서 국부적으로 상도체화한 부분의 전류는 열 및 전기의 전도도가 좋은 안전화재료( 동 또는 알루미늄 )에 바이패스시켜 상도체화의 확대방지 및 초전도성의 회복을 기하는 완전 안전화이론과 초전도체의 임계치에서 실제 적용할 전류밀도, 자계, 온도는 안전율의 고려 및 보호저항과 같은 후비보호법으로 해결 한다.

5) 초전도 코일지지: 초전도 코일의 소요극저온 유지와 강하 전자력에 견디도록 하는 방법에는 저온 지지 구조와 상온 지지 구조가 있다. 저온 지지 구조는 소형에 적합한 것으로 코일 및 코일 지지물 일체를 액체 He속에 넣는 구조이며 상온 구조는 코

일만 액체 He속에 넣고 코일 지지물은 암반에 지탱 되도록 하고 코일 간을 열전열하도록 한 구조로서 대형에 적합하다.

6) 코일 모양: 코일의 모양에는 슬레노이드와 같은 축대칭형의 것과 토로이덜과 같은 비축대칭형이 있는데 대용량의 것은 경제성의 면에서 슬레노이드 형이 채용되며 또 코일에 가해지는 장력을 줄이기 위하여 그림 15와 같이 리플(ripple)구조를 취한다.

7) 초전도에너지 저장의 응용과 충방전 시간: 초전도 코일의 에너지 저장(충전) 및 회수(방전) 시간에 관련한 초전도 에너지 저장의 응용은 그림16과 같다. 충방전 시간이 짧은 것은(pulse magnet) 충방전 시간이 긴 것과 달리 교류성분이 크므로 설계 개념이 다르다.

즉 충방전시 와류손과 히스테리시스손을 감소시키기 위하여 코일의 선재는 연선을 사용하고 권선의 감이틀등의 와류손을 줄이기 위하여 비자성체 재료를 사용하며 또 냉각 채널을 충분히 두어 손실열의 냉각을 좋게 한다.

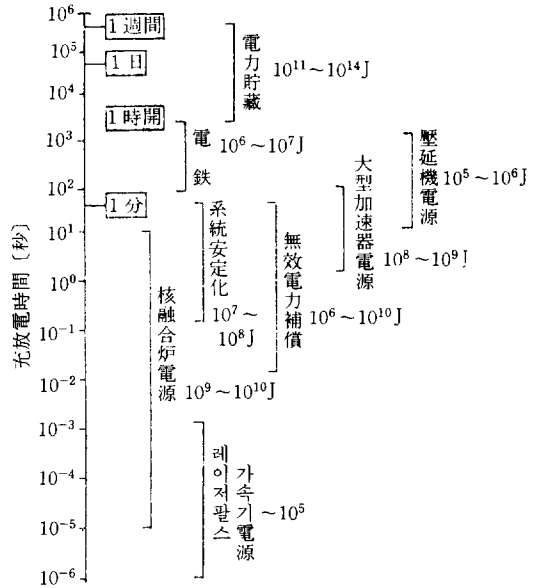


그림 16. 충방전시간과 초전도 에너지 저장의 응용

### 4.3 超電導 에너지 저장계통의 구성과 운용

#### 가) 초전도 에너지 저장계통의 구성

초전도 에너지 저장 장치는 전력계통과 연계하여 잉여 전력을 저장하고 계통 공급 전력 부족시는 저장에너지를 방출(방전)하여 피크 셰이빙(peak shaving)을 하는 봐 전력 계통의 일부로서 설치 상상

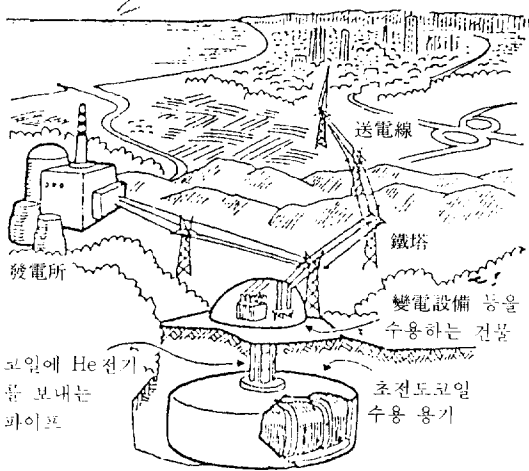


그림 17. 초전도 에너지 저장장치의 설치구상도

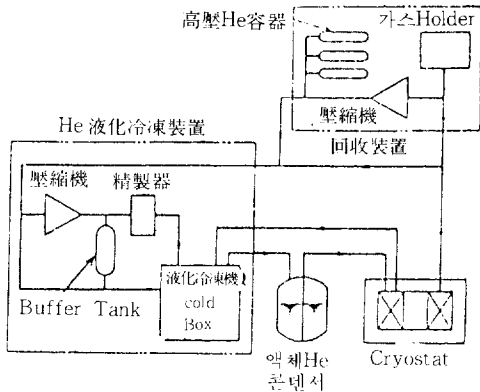


그림 18. He 냉각계통

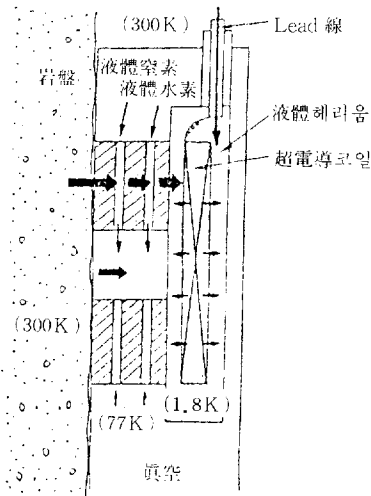


그림 19. 상온지지구조

도는 그림 17과 같으며 초전도에너지 저장 계통에 대하여 1)초전도 코일 2)초전도 코일의 냉각 3)전력 계통과의 연계 계통으로 나누어 개관하면 다음과 같다.

1) 초전도 코일

초전도 코일은 냉각 측면에서 볼 때

a) 코일의 권선 중에 액체He이 통할 채널을 만들어 초전도선이 확실히 액체He에 접촉하여 냉각이 좋도록 하 침적형과 b)epoxy수지에 함침한 함침형과 c) 초전도선 내부에 He를 통하게 하는 내부 냉각형이 있고, 코일 모양은 축대칭형과 비축대칭형이 있으며, 전자력의 분산을 위하여 진코일을 여러부분으로 나누는 분산형과 비분산형이 있다.

2) 초전도 코일 냉각 및 단열지지계통

초전도 코일의 극저온 유지를 위한 냉각계통은 그림 18과 같다. 그림 18에서 He액화 냉동장치, He콘덴서, He회수장치는 저온 구조와 상온 구조에 공통되며 저온 구조에는 cryostat의 벽이 최종적인 코일의 지지체이나 상온 구조에서는 Cryostat의 벽을 다시 그림 19와 같이 단열 지지물을 통하여 암반이 최종적인 지지체가 된다.

초전도 코일의 냉각법은 액체He에의 단순한 침적 냉각법에서 초임계He 강제 냉각법이나 초유동He 냉각법등으로 다양한데 냉각계에서는 냉동효율향상, 냉각속도, 시간을 포함한 초기 냉각문제, He의 소요량 저감등이 연구과제이다.

저온용기의 단열법은 이중 casing내부의 고진공, 지지구조재의 저열방사 및 저열전도의 3 가지 기본적인 단열법을 조합하여 단열한다. 단열구조 재료는 초전도 코일의 극저온 유지와 코일에서 발생하는 강력한 자계의 영향등에서 금속재료와 복합재료(비금속)가 있는데 열 침입량을 억제하고 큰 전자력에 견디는 특성에 대한 평가지수  $f$  는 다음식과 같고

$$f = \frac{\delta}{K}$$

$\delta$  : 재료의 강복강도 [  $kg/mm^2$  ]

$K$  : 열 전도도 [  $mw/cmK$  ]

각종 단열재료의 평가지수  $f$  는 표5와 같으며  $f$  가 클 수록 단열 구조재로서 양호한 것이 된다.

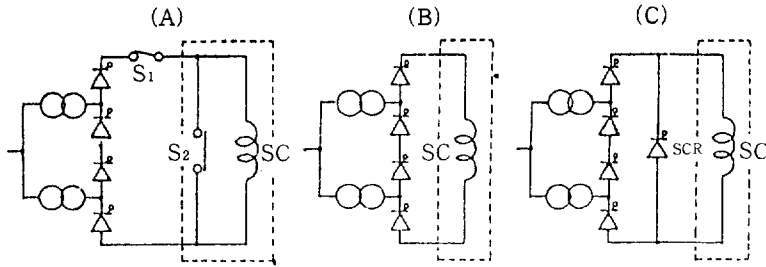
또 방사에 의한 열침입을 막기 위하여 방사를 반사하는 알미늄을 증착한 얇은 플라스틱 필름과 유리 섬유를 수백장 적층한 것을 고온부와 저온부 사이에 넣는다.

상온 지지 구조에서는 최종의 전자력 지지체인 암반의 강도에 맞게 자계의 강도를 선정할 필요가 있으며 지진에서도 지지구조에 이상이 없도록 하여야



표 5. 각종 단열재료의 f

재료명	온도영역 (°K)	밀도 ρ (g/cm <sup>3</sup> )	강복강도 δ (kg/mm <sup>2</sup> )	평균열전도도 K (mw/cm °K)	f( $\frac{\delta}{K}$ )
유리섬유강화 (GFRP)	300-77	2.0	84	8.0	10.5
	77-4.2		100	2.9	34.5
탄소섬유강화수지 (CFRP)	300-77	1.5	124	27	4.6
	77-4.2		107	1.5	71.3
스테인레스강 (SUS 316)	300-77	8.0	23	107	0.22
	77-4.2		49	50	0.98
티탄 합금 Ti-5Al-2.5Sn	300-77	4.5	72	60	1.2
	77-4.2		124	35	3.5



※ SC : 초전도코일

그림 20. 전력계통과의 연계 계통

표 6. 전류 리드선의 열침입량

	최적형상 LI/S	열침입량 Q/I
가스냉각리드선	$2 \sim 3 \times 10^7 \text{ A/m}$	$0.001 \sim 0.002 \text{ W/A}$
단열냉각리드선	$\sim 5 \times 10^6 \text{ A/m}$	$0.04 \sim 0.05 \text{ W/A}$

L : 길이 S : 단면적 I : 전류 Q : 열침입량

한다. 그리고 이 구조에서는 그림 19에서와 같이 액체질소(77°K)와 액체수소(20°K)에 의한 열차폐부를 설치하여 냉각에 필요한 전력을 최소가 되도록 한다.

3) 전력 계통과의 연계 계통

초전도 에너지 저장장치는 교류의 전력계통에서 저장시에는 교류에서 직류로 변환하여 저장하고 발전(방전)에는 직류에서 교류로 변환할 필요가 있으며 이를 위해서는 그림 20과 같이 계통 전압을 맞추어 주는 ① 변압기와 교류에서 직류 또는 직류에서 교류로 변환하는 ② SCR 전력 변환 계통과 계통의 보호 및 조작을 위한 ③ Switchgear와 초전도체 코일과 외부와를 연결하는 ④ 전류도선으로 구성된다.

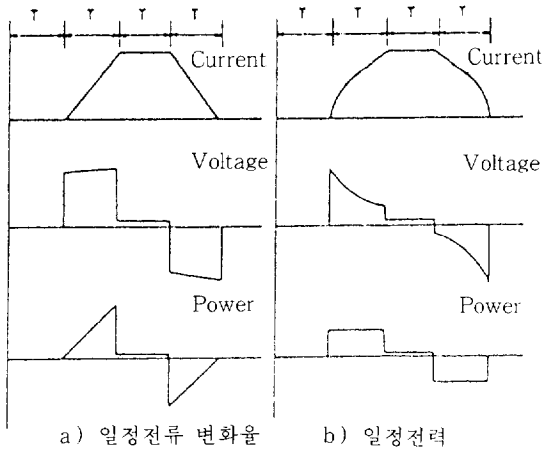
전류리드선에는 증발하는 He가스로 리드선의 표면을 냉각하는 가스 냉각 리드선과 가스로 냉각하지

면을 냉각하는 가스 냉각 리드선과 가스로 냉각하지 않는 단열 리드선이 있으며 전류도선의 열침입량은 도체의 단순한 열의 전도에 의한 것과 전기저항으로 인한 동손에 의한 것이 있는데 전류도선의 단면적과 길이와 통과 전류간에는 열침입을 최소화하는 최적 조건이 존재하는 바 그 최적 조건은 표 6과 같다.

나) 초전도에너지 저장 장치의 운용

전력계통용 초전도에너지 저장 장치의 운용은 그림 16에서 알 수 있는 바와 같이 저장용량이 양수방전 규모로( $10^{11} \sim 10^{14}$  J) 또 충방전 시간이 긴(1시간~1주) 전력저장용과 저장용량이 적은 반면에( $10^2$  초~1분) 전력 계통 안전용 및 무효전력 보상용으로 볼 수 있는데 후자는 충방전 시간이 짧으므로 앞에서 설명한 초전도 펄스 마그네틱트를 사용하는 계통안전용은 계통사고시 유효전력의 과부족을 흡수 또는 방출에 의하여 계통안정을 도모하고 무효전력 보상은 계통의 무효전력을 흡수 또는 방출에 의하여 계통의 무효전력을 보상한다.

전력저장용의 충방전 방법에는 그림 21과 같이 일정 전류 변화율 방법과 일정전력 방법과 이를 조합하는 방법이 있다.



a) 일정전류 변화율      b) 일정전력  
그림 21. 전력저장용의 충전방전 방법

4.4 超電導 에너지 저장장치의 효율

본 장치의 효율은 저장에너지 ES에 대하여 손실로서 소비된 에너지 ΔE를 감한 것에 대한 비로서 식으로 표시하면,

$$\eta = \frac{ES - \Delta E}{ES} \times 100 (\%)$$

ΔE에는 다음 4 과정의 손실로 나눌 수 있다.

- (a) 충전시
- (b) 저장시
- (c) 방전시(발전시)
- (d) 휴지시(휴지시의 방각계의 손실)

이 중에서 (d)항의 손실은 효율계산에서 고려하는 경우도 있고 무시하는 경우도 있다.

손실 발생부분으로 보서는

(a) SCR변환계통의 손실: SCR, 변압기 및 배선 손실

(b) 냉각계의 손실: 초전도 코일의 교류손에 의한 열부하와 외부열침입에 의한 열부하

이 중 (a)항의 손실은 충전 시간동안에 저항손의 적산량으로 충전 시간이 길수록 크다. (b)항의 손실은 초전도체의 세선화에 의한 교류손의 저감 및 적정 단열법 적용, 냉각계통 효율개선 등으로 저감할 수 있는 고정손실로서 이는 저장용량의 5.5% 이하 이다.

이상과 같은 손실 특성으로 인하여 초전도 전력저장 장치의 효율은 그림 22와 같이 저장용량이 클 수록 SCR 변환계통의 손실 비율이 적어져서 대용량화가 용이한 실온구조의 것은 저장용량이 1000MWH급에서 부터 효율이 90%이상 이 된다.

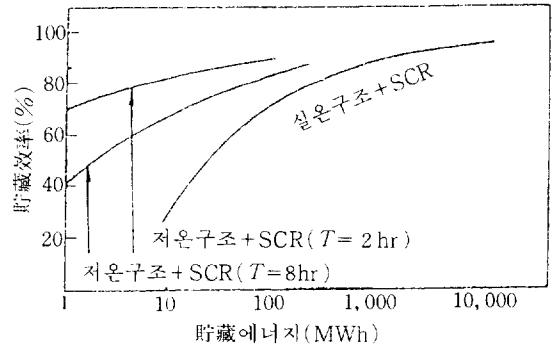


그림 22. 초전도 전력저장 장치의 효율

4.5 超電導 에너지 저장장치의 경제성 및 개념 설계 사양

초전도 에너지 저장장치에 대하여 앞에서 설명한 매력적인 잇점으로 인하여 미국에서는 1970년부터 위스콘신대학 및 로스알라모스 과학연구소에서 1,000~10,000MWH SMES의 개념설계를 행하고, 이것을 모체로 EPRI가 1982년에 경제성을 평가하고, 또 한편 전력계통 안정화를 위하여 BPA가 30MJ; 10MW급의 SMES를 1983년에 타코마 변전소에 설치, 시험하여 우수성을 입증한 바있다.

인근 일본에서는 신에너지개발기구(NEDO)에서 1983년에 10MWH급 SMES의 개발설계와 5,000MWH의 경제성을 평가한바 있으며, 기술진흥협회에서는 1984년부터 3년 계획으로 초전도에 관한 기술개발을 담당하고 있다.

이와 같이 실용규모를 위하여 선진 각국에서는 계속 활발히 연구하고 있는데 이에 대한 경제성 평가 결과는 종래 저장장치와는 경향되며 더우기 신규 발전 장치와도 경제분기점 측면에서 경향이 된다고 한다. 특히 표 7에서 보는 바와 같이 대용량화 함 수록 경제성이 유리한 특징이 있어 전력계통용으로 적합함을 알 수 있다.

참고로 미국에서 가장 적합하다고 보고 있는 실용규모의 초전도 에너지 저장장치의 개념설계사양과 일본에서 자국에 적합하다고 보는 것의 개념설계사양을 비교하면 표 8과 같다. 표에서 보는 바와 같

표 7. 용량별 상대적 건설단가

용 량	상대적 건설 단가
10,000(MWH)	0.46
5,000(MWH)	0.58
1,000(MWH)	1.00
100(MWH)	2.14

이 같은 용량, 솔레노이드 코일에 대하여 코일 직경에 대한 코일 높이의 비인 아스펙트 비(aspect ratio)가 일본의 것은 미국의 것보다 10배 큰데, 일본에서는 그들의 좁은 국토실정에 맞도록 고려한 것이라고 볼 수 있다.

5 결론

초전도 에너지 저장장치의 경제성 도모는 초전도 코일 선재의 임계치(임계전류, 임계자속밀도, 임계 온도)의 상승에 의한 재료절약 quench 방지를 위한 열 절연지지재 및 지지방법의 개발, 양호한 운전특성 및 효율을 위한 전력계통과의 인터페이스 부분의 부품 및 제어방법 개발, 냉각계통의 열 절연 및 냉각효율 향상, He의 소요량 감소 및 회수 방법의 개발 등에 대하여 계속 연구 중에 있으며 2000년대 초반에 현재의 양수발전 규모가 실용화 될 전망이다.

초전도 에너지 저장의 전력계통에의 운용으로서는 충방전 시간이 긴 양수발전 규모의 전력저장용과 충방전 시간이 짧고 용량은 적어도 되는 전력계통 안전용 및 무효전력 보상용을 들 수 있는데 이중 전력저장용은 높은 효율(90%이상), 우수한 속응성(수 m/sec), 대용량화의 용이성, 인지선정의 자유도가 큰 점 등에서 명실 상부한 전력 저장장치로서 이것이 실용화되면 현행의 양수발전에 대치될 것이다.

따라서 우리나라에서도 이의 연구 개발에 관심을 갖고 조기 적용의 기반을 구축함은 이 장치의 매력적인 이점을 그만큼 조기 향유할 수 있어 전력 수요자의 이익은 물론 국가적 이익면에서 그 의의는 크다고 본다.

표 8. 日本(NEDO)와 美國(EPRI)의 5 GWH S.M.E.S 諸元

	NEDO	EPRI
STORED ENERGY (MWH)	5000	5500
OUTPUT POWER (MW)	1000	1000
ASPECT RATIO	0.1	0.01
COIL CONFIGURATION		
DIAMETER (m)	376	1568
HEIGHT (m)	39.6	15
DEPTH (m)	150	15
NUMBER OF COIL	3-TUNNEL	TRENCH
MAX. FIELD (T)	8.4	7.0
He TEMPERATURE (K)	4.2	1.8
COIL CURRENT (KA)	707	765
CONDUCTOR		
MATERIAL	Nb <sub>3</sub> Sn	NbTi
SIZE (cm)	21×10	13.5φ
WEIGHT (Ton)	25000	24000
COLD STRUCTURE (Ton)	26000	41000
EXCAVATION (m <sup>3</sup> )	5.4×10 <sup>5</sup>	5.3×10 <sup>5</sup>
EFFICIENCY	0.95	0.94
CRYOGENIC LOSS (MW)	5.87	5.3
OVERALL EFFICIENCY	0.90	0.91