

## 2.5 超電導電力機器の適用技術標準化

イットリウム系超電導電力機器技術開発の事業では、超電導電力機器の中で最も導入時期が早いと考えられる超電導電力ケーブル、超電導電力貯蔵システム、超電導変圧器に絞って研究開発が進められ、かつそれらの応用に特化した超電導線材の開発が行なわれている。また超電導技術の国際標準化を積極的に推進してきたわが国にとって、これら開発と平行して超電導電力機器の国際標準化を目指すことは産業競争力強化の観点からも重要である。

そこで、本事業では、超電導線材やこれを適用した超電導電力ケーブル等超電導電力機器に関する標準化に必要な技術動向や標準化ニーズ動向の調査を実施し、国際標準化合意醸成をはかりつつ、国際的な規范文書原案につながる規格素案の作成を目指した。これによって、超電導電力機器の早期実用化、市場導入の円滑化、グローバル市場の拡大に資するものと考えられる。

以下に超電導線材、超電導電力ケーブル及び超電導電力機器における標準化の成果について報告する。

### 2.5.1 超電導線材関連技術標準化 (ISTEC、住友電気工業、フジクラ、中部電力、昭和電線ケーブルシステム、古河電気工業、九州大学、東北大学)

超電導線材の一般要求事項(通則)の作成を目標として、超電導線材の通電特性並びに機械的電磁気特性の試験方法を調査するとともに、Y系超電導線材並びに実用超電導線材の特徴を整理し、規格素案をまとめた。また、この規格素案作成に併行して、米国、欧州、アジア等の現地調査や国際専門家討論会を通じて情報集約並びに国際合意状況の把握を行なった。

#### (1) 超電導線材の通電特性並びに機械的電磁気特性の試験方法の調査

高温超電導線材の通電特性と機械的電磁気特性の試験方法の調査を目的として、九州大学及び東北大学との共同研究等を実施した。その結果、超電導線材の臨界電流試験に係わる電界基準及び電圧端子間距離に関して、線材特性が均一である場合、現行規格の電界基準(1  $\mu\text{V}/\text{cm}$  及び 0.1  $\mu\text{V}/\text{cm}$ )並びに電圧端子距離(30 mm から 100 mm)は妥当であることが分かった。一方、線材の長手方向に亘って局在的な欠陥の分散で不均一の場合には、局在的な欠陥に基づく電圧発生があるにもかかわらず電圧端子間距離で平均化されることを考慮した検討が必要と考えられる。また、超電導線材の機械的電磁気特性の試験方法については、応力-歪特性、 $I_c$ の歪依存性及びn値の歪依存性を調査し、統計的なデータ解析を実施した。

##### (a) 臨界電流試験法についての検討

現在、超電導線材の臨界電流の決定にあたっては四端子法が主要な測定法であり、10  $\mu\text{V}/\text{m}$  と 100  $\mu\text{V}/\text{m}$  の電界基準及び  $10^{-14}$   $\Omega\text{m}$  と  $10^{-13}$   $\Omega\text{m}$  の抵抗率基準が金属

超電導線材に適用されている（Bi系超電導線材では  $100 \mu\text{V/m}$  と  $500 \mu\text{V/m}$  の電界基準及び  $2 \times 10^{-13} \Omega\text{m}$  と  $10^{-12} \Omega\text{m}$  の抵抗率基準）。しかしながら、過去の超電導電力機器の標準化に関するパネル討論会において、Y系超電導線材については臨界電流決定に用いる電界基準を見直すべきでないかという意見が提出された。今後、磁界下での臨界電流測定などを含めて、様々な修正要求が出されることが想定されるため、そうした修正の必要性などについての検討が求められるであろう。

ここではそうした背景から、Y系超電導線材の場合に出された見直し提案の妥当性を検討するにあたり、提案された電界基準値が現行の金属系超電導線材の試験で用いられる二つの電界基準値の間にあることから、この電界基準を用いた測定を実行し、電界基準値を変更することの影響を考察した。

試料は幅  $10 \text{ mm}$ 、超電導層厚さ  $1.0 \mu\text{m}$  の IBAD/PLD 法 Y系超電導線材で、測定では長さ  $160 \text{ mm}$  の線材を用い、電流端子間距離  $124 \text{ mm}$ 、電圧端子間距離  $104 \text{ mm}$ 、電流端子部の長さ  $18 \text{ mm}$  の構造とした。これを液体窒素に浸漬し、電流を通电しながら発生する電圧を測定した。

得られた電流-電界特性を図 2.5.1-1 に示す。この結果、臨界電流値は現行の  $10 \mu\text{V/m}$  の電界基準を用いた場合に  $132 \text{ A}$ 、 $100 \mu\text{V/m}$  を用いた場合に  $139 \text{ A}$  となる。したがって、両者の違いは  $5.2\%$  である。なお、パネル討論会で提案された電界基準は  $20 \mu\text{V/m}$  であるが、この定義を用いても臨界電流値は  $134 \text{ A}$  で、大きな違いはない。本測定試料の  $n$  値は  $10\text{--}100 \mu\text{V/m}$  の電界域で  $42$  である。

以上のように  $n$  値が  $42$  の試料の場合、電界基準の値によって得られる臨界電流値の違いはほんのわずかでしかなく、現行の金属系超電導線の二つの基準の違いによっても、最大で  $5.2\%$  程度である。すなわち、この二つの値の間の任意の基準で測定した結果について、これを矩形分布とみなしても対応する相対的標準偏差は  $1.5\%$  でしかなく、同一条件の試験法で目標とするラウンドロビン試験の目標 COV の  $5\%$  よりもはるかに小さい。なお、長尺の線材の場合に使用条件と合わせるためにさらに低い電界基準を用いることになったとしても、図 2.5.1-1 に見られるようにさらに  $n$  値が増加するため、現行の電界基準で得られる臨界電流値と大きく違わないと判断される。

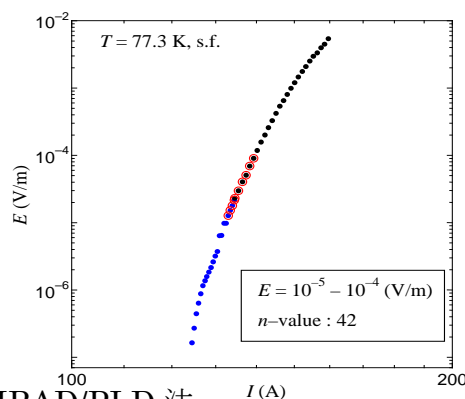


図 2.5.1-1 IBAD/PLD 法  
Y系超電導線材の電流(I)-電界(E)特性 (77 K、自己磁界中)  
III-2.5.2

したがって、Y系超電導線材の場合、電界基準の違いは性能評価において大きな問題ではなく、金属系超電導線材に対して用いられている電界基準で十分である。Y系超電導線材の臨界電流の試験法の標準化を目指すにあたってこの電界基準の変更の必然性はなく、むしろ金属系超電導線材との競合を想定した場合、同一の基準とすることが望ましい。n値の違いによってある程度の違いはありうるが、今後、n値を必要な試験項目としておけば、製作者と使用者の間で大きな齟齬をきたす問題もないと考えられる。

しかしながら、将来、高磁界応用の可能性が高いことから、n値が下がる高磁界での臨界電流試験法において現行の電界基準でよいかどうかについては議論を残すところである。Y系超電導線材を用いて $0.2 \mu\text{V/m}$ の超低電界までの輸送特性の測定結果から用いる電界基準が臨界電流値の評価結果に及ぼす影響を調べた。試料はn値が42の標準的なものであるが、得られた結果では現行の金属系超電導線材について用いられている電界基準の範囲内で大きな違いとはならず、現行の電界基準で十分であることが判明した。むしろ、金属系超電導線材とY系超電導線材の互換性の観点からは共通の基準とするほうが標準化の趣旨に合致するものと判断される。

ところで、臨界電流試験で用いられている四端子法では、直接計測は電圧(V)であり、電界値は空間均一性を仮定した値である点に注意が必要である。Y系超電導線材では、結晶粒界や欠陥により局所的な臨界電流値の不均一性の影響を受ける。したがって、臨界電流値の定義を与える電界基準の議論においては、対象とする試料内の不均一性を支配する空間周波数と、電圧端子間距離を考慮した議論が不可欠である。Y系超電導線材の実用化にあたっては、試料内の長周期なマクロ欠陥などextrinsicな因子の影響と共に、ピン止め機構や熱擾乱などによるE-J特性そのものに対するintrinsicな因子の影響についてさらに検討していく必要がある。前者の影響は特に、長尺線材の全長試験において、後者は磁場中角度依存性や、直流応用を想定した超低電界領域での損失を把握するうえにおいて重要になると考えられる。

#### (b) 機械的電磁気特性試験方法についての検討

超電導線を超電導電力機器に適用する場合の引張、曲げ、ねじりなどの単一あるいは複合的な機械的応力・歪環境における超電導線の電磁気特性の試験方法を調査した。

表 2.5.1-1 に示す Bi2223 テープ線材 Type S および Type ST を試料とした。各線材は 25 m あり、本年度試験では端部より 1 m の部分から試験片を切り出した。試験片長は 40 mm、試験片数は Type S について 4 片 Type ST について 5 片である。

表 2.5.1-1 Bi2223 線材諸元

	Type S	Type ST
Width [mm]	2.6±0.3	2.7±0.4
Thickness [mm]	0.19±0.03	0.32±0.04
Critical current ( $I_c$ ) [A] at 77 K, self-field	~70	~70
Lamination	--	Cu-alloy (50 $\mu$ m)× 2
Sample length [mm]	40	40
Number of samples	4	5

装置は片桐らによって開発された強磁場極低温応力効果測定装置<sup>[1]</sup>をもとにして、報告者らによって開発された<sup>[2]</sup>。本装置の特徴を下記に挙げる。

超電導マグネットのボア中（直径 52 mm）で、試料に引張り応力を印加しながら臨界電流を測定できる。応力は室温で負荷ロッドの引張り力をロードセルによって測定する。また、試料の伸びは、電流端子間距離をクリップゲージで計測しており、変位を初期長さで除することで歪を得る。試料長 40 mm のうち、電流端子長を除いた有効試料長は約 20 mm である。電圧端子間距離は 10 mm である。

クリップゲージ（歪ゲージ式変換機）の磁場、温度の影響を実験的に較正するための機構を有している。実験毎に較正を行うため、信頼性の高い歪値を得られる。本研究では液体窒素温度でのデータが必要との考えから、本装置の試料部分を液体窒素デュワに浸漬した。試料に応力を印加し、一定歪を保持した状態で、200 A/10 V の定電流源によって 3.3 A/s の掃引速度で電流を線形に供給し、試料に発生する電圧を測定した。

Type S および Type ST の臨界電流( $I_c$ )の歪依存性、n 値の歪依存性および応力-歪特性を、図 2.5.1-2 に示す。Type S, ST とともに  $I_c$  の歪依存性はほぼ線形に緩やかに低下している。Type S は 0.4 %、Type ST は 0.6 %歪で破断した。 $I_c$  の歪依存性が観測されなかった理由は、破断箇所が電圧端子間の外、電極近傍であったためである。電極近傍に応力が集中して機械的に劣化することはコイルでもしばしば観測されるため、コイル設計の際は注意する必要がある。

対数表示した電流-電界曲線の、1  $\mu$ V/cm 近傍の傾きから求めた n 値は、S および ST とともに約 20 であり、破断直前まで大きな変化は見られなかった。本研究では装置の制約から電圧端子間距離が 10 mm であるために、0.1  $\mu$ V/cm 以下の低電界領域の n 値が評価できなかった。低電界領域の n 値が評価できればフィラメントクラックに起因する n 値低下の情報が得られると考えられる。

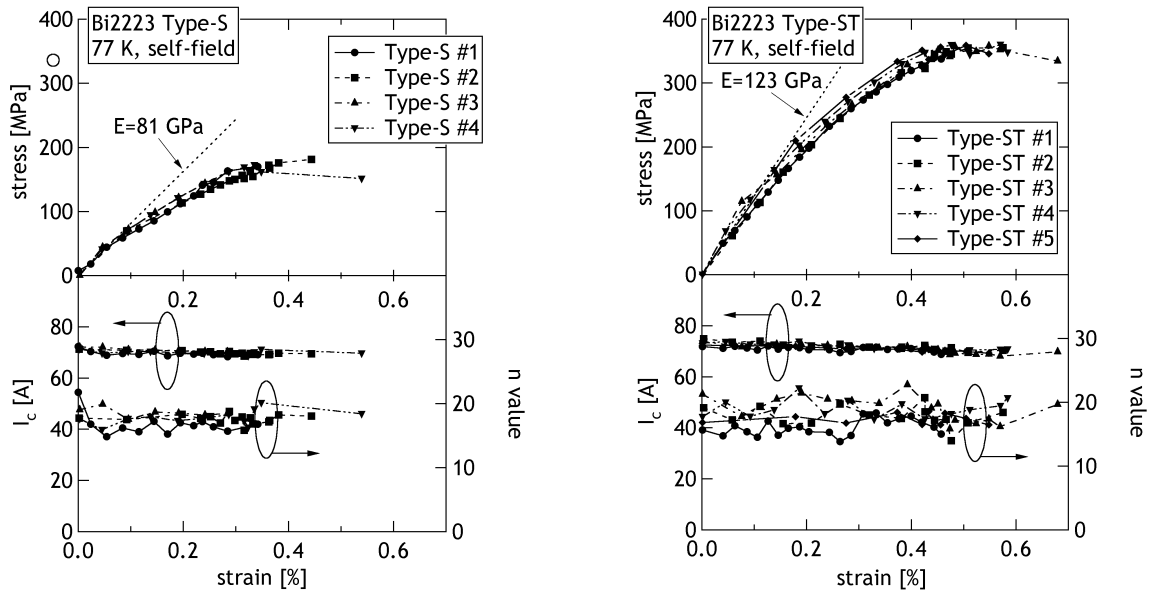


図 2.5.1-2 Type-S(左)および Type-ST(右)について、応力-歪特性、 $I_c$ の歪依存性、 $n$  値の歪依存性

応力-歪曲線からは、低歪側の勾配よりヤング率が求められ、Type S, ST それぞれ 81 MPa, 123 MPa となる。しかし、Ag 合金マトリクスは低歪で降伏してしまうために、0.05~0.1 %以上は塑性域であり、ヤング率は意味を持たない。材料の強度の指標として用いられる 0.2 %耐力も、超伝導線材の場合はそのような大きな歪では用いられないので、意味が無い。そこで、0.2 %歪に対応する塑性流動応力を比較すると、Type S が 120 MPa であるのに対して Type ST は 200 MPa と 1.7 倍に向上している。破断応力もそれぞれ 180 MPa, 360 MPa であり、Cu 合金によるラミネーションの効果が顕著であることがわかる。

Type S #4 と ST #3 がそれぞれ他の試料に比べて大きな歪まで到達しているが、これは断線直前に完全に降伏してしまったためである。このことは応力-歪曲線において歪が増加していても応力が不変か、むしろ低下していることから明らかである。Type-S および ST の測定値に基づき、ゼロ歪における  $I_c$  [A] および  $n$  値について単一箇所における測定の不確かさ解析を行った。計算過程は Type-S のみについて示し、表 2.5.1-2 に結果をまとめた。

ここで、Type-S は  
 単一箇所における試験数  $n=4$   
 単一箇所における平均値  $x$

$$x(I_c) = (72.16 + 71.24 + 71.96 + 71.31) / n = 71.67 \text{ [A]}$$

$$x(n) = (21.72 + 17.71 + 19.92 + 17.84) / n = 19.02 \text{ [-]}$$

である。また、平均値の実験標準偏差  $s(x)$  は

$$s(x) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

$$s(I_c) = \sqrt{\frac{(72.16 - 71.67)^2 + (71.24 - 71.67)^2 + (71.96 - 71.67)^2 + (71.31 - 71.67)^2}{4-1}}$$

$$= 0.4614$$

$$s(n) = \sqrt{\frac{(21.72 - 19.02)^2 + (17.71 - 19.02)^2 + (19.02 - 19.02)^2 + (17.64 - 19.02)^2}{4-1}}$$

$$= 1.9070$$

である。標準不確かさ  $u(x)$  は

$$u = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad , \quad u(I_c) = \frac{s(I_c)}{\sqrt{n}} = 0.2307 \quad , \quad u(n) = \frac{s(n)}{\sqrt{n}} = 0.9535$$

とした。

表 2.5.1-2 データ解析結果一覧

	Type-S	Type-ST
単一箇所における試験数 $n$	4	5
単一箇所における測定値	$I_c=72.16, 71.24, 71.96, 71.31$ [A] $n=21.72, 17.71, 19.02, 17.64$	$I_c=71.72, 74.82, 73.75, 73.12, 72.35$ [A] $n=15.63, 19.13, 21.24, 17.73, 16.83$
単一箇所における平均値 $x$	$I_{c,average}=71.67$ [A] $n_{average}=19.02$	$I_{c,average}=73.15$ [A] $n_{average}=18.11$
平均値の実験標準偏差 $s(x)$	$s(I_c)=0.4614$ $s(n)=1.9070$	$s(I_c)=1.2078$ $s(n)=2.1662$
標準不確かさ $u(x)$	$u(I_c)=0.2307$ $u(n)=0.9535$	$u(I_c)=0.5401$ $u(n)=0.9688$

今後、これらの知見を Y 系超電導線材にも適用して検討していく必要がある。

参考文献リスト

- (1) K. Katagiri et al., Adv. Cryog. Eng. 36(1990)69
- (2) 西島ら, 第 79 回 2008 年度秋季低温工学超電導学会

## (2) 超電導線の電力機器側からの要求事項の検討

超電導線は、各種超電導電力機器並びに超電導マグネットに適用される。したがって、各用途分野からの要請に適合する用語の定義及び試験方法の整備が必要である。ここでは、各種超電導電力機器並びに超電導マグネットからの要件特性項目を調査・抽出すると共に、超電導線関連規格の素案作成に反映した。

具体的には、次の技術資料に基づく調査を実施し、表 2.5.1-3 の結果を得た。

- ・超電導応用基盤技術研究開発－標準化調査、平成 20 年 3 月
- ・平成 16 年新発電システム等調査研究（超電導電力機器技術基盤の標準化に関する調査研究）、平成 17 年 3 月
- ・電気学会技術報告書 第 946 号－超電導電力機器の仕様と特性－、2003 年 11 月

表 2.5.1-3 超電導電力機器側からの超電導線の試験項目要件調査

電力機器名	機器システム性能項目 (機器仕様)	機器・コイル製作側への要求項目	超電導線への試験項目要件
超電導電力ケーブル	(交流超電導電力ケーブルの場合 <sup>a)</sup> ) (同軸型ケーブル)	寸法設計	寸法設計
		ケーブル断面構成寸法	超電導線最外寸法
		ケーブル最大外寸法	超電導線条長
	相数	ケーブル条長	
	周波数	中間・終端接続寸法	
	定格電圧		
	交流耐電圧	電磁気設計	電磁気設計
	インパルス耐電圧	ケーブル心数	超電導線臨界温度
	短絡・地絡電流	ケーブル定常・過負荷電流密度	超電導線臨界電流
	布設条件における静電容量	公称電圧	超電導線の臨界電流温度依存性
	耐压構造及び耐圧力	定常最高電圧	超電導線の過負荷電流特性
	ケーブルの断面構成の詳細	超電導線/常電導線接続抵抗	超電導線の長期通電特性
	電気絶縁厚さ、最大電位傾角	出荷耐電圧	
	運転条件における最大定格電流	シールド臨界電流	
	運転温度における有効抵抗	熱設計	熱設計
	布設条件におけるインダクタンス	定常・過負荷運転温度範囲	超電導線交流損失温度依存性
	冷媒温度	定常(交流損失)・過負荷熱損失	超電導転移直上抵抗
		断熱方式	超電導線熱(収縮・比熱)特性
			超電導線の比熱・熱伝導率
		機械設計	機械設計
		ケーブル曲げ特性	超電導線応力/歪特性
		ケーブル引張強度	超電導線引張強度
		ケーブル冷却重量	超電導線の疲労・繰返曲げ特性
	ケーブル冷却特性	超電導線の単位重量	
	冷凍機保守間隔・保守時間	超電導線の熱サイクル特性	

SMES	(100 MW 級 SMES の場合)	寸法設計	寸法設計
	(成形撚線)	コイル形状・寸法	超電導線最外寸法
	(テープ積層集合導体)	SMES デバイス最外寸法	超電導線条長
	定格交流電圧	電磁気設計	電磁気設計
	定格交流電流	定格直流電圧	超電導線の $I_c$ - $B$ - $T$ 特性
	定格周波数	定格直流電流	超電導線の総電流密度
	相数、線数	定格貯蔵容量	
	運転温度	利用可能容量	
	導入・設置場所	最大磁界	
	冷却方式		
		熱設計	熱設計
	変換装置定格	動作時間	超電導線交流損失
	直流遮断機定格	最大許容温度	<b>MQE</b>
	保護装置定格		安定性
	クエンチ検出定格	機械設計	機械設計
	真空断熱容器定格	最大圧力	超電導線応力/歪特性
	冷却装置定格	コイル冷却重量	超電導線引張強度
	監視制御装置定格	コイル冷却特性	超電導線の疲労・繰返曲げ特性
		冷凍機保守間隔・保守時間	超電導線の単位重量
		超電導線の熱サイクル特性	
超電導変圧器	(2 MW 級超電導変圧器の場合)	寸法設計	寸法設計
	(スライブテープ積層集合導体)	コイル最外寸法	超電導線最外寸法
		変圧器最外寸法	超電導線条長
	設置場所	電磁気設計	電磁気設計
	相数	定格 1 次/2 次電圧	超電導線臨界温度
	定格容量	定格 1 次/2 次電流	超電導線臨界電流
	定格電圧	ターン間、層間電圧	
	定格周波数		
	冷媒温度上昇	熱設計	熱設計
	系統短絡容量	負荷損失	超電導線交流損失
	短絡%インピーダンス	無負荷損失	
	負荷損・無負荷損		
	定格力率	機械設計	機械設計
	騒音	定格冷媒温度	超電導線応力/歪特性
	重量	定格冷媒圧力	超電導線引張強度
		コイル冷却重量	超電導線の疲労・繰返曲げ特性
		コイル冷却特性	超電導線の単位重量
		冷凍機保守間隔・保守時間	超電導線の熱サイクル特性



超電導限流器	(SN 転移型及び整流器型の場合)	寸法設計	寸法設計
	(テープ積層集合導体)	限流素子最外寸法	超電導線最外寸法
		限流器最外寸法	超電導線条長
	定格電圧	電磁気設計	電磁気設計
	定格電流	超電導状態転移温度	超電導線臨界温度
	商用周波数耐電圧	定常定格電流	超電導線臨界電流
	雷インパルス	限流時電流電圧	超電導転移直上抵抗
	開閉インパルス耐電圧	超電導転移直上抵抗	
	定格周波数		
	効率	熱設計	熱設計
	限流動作・不動作責務	超電導転移直上抵抗	超電導転移直上抵抗
	限流電流	冷却保持時間	超電導線の常電導伝搬速度
	限流時間	定格冷媒温度	超電導線熱特性
	限流動作回数	許容温度条件	
	定常・最終限流インピーダンス		
	限流動作開始電流	機械設計	機械設計
	過渡回復電圧	騒音・耐震	超電導線応力/歪特性
	短時間耐電流	定格冷媒圧力	超電導線引張強度
		初期冷凍時間	超電導線の疲労・繰返曲げ特性
		冷凍機復帰時間	超電導線の単位重量
	コイル冷却重量	超電導線の熱サイクル特性	
	コイル冷却特性		
	冷凍機保守間隔・保守時間		
超電導回転機	(超電導発電機、電動機など)	寸法設計	超電導線寸法
	(成形撚線、テープ積層集合導体)	電磁気設計	超電導線 $I_c$ -T 特性
		界磁コイル設計	超電導線の総電流密度
	動作電流	電機子コイル設計	超電導線の磁界中最大電流変化率
	動作電圧	熱設計	超電導線の交流損失特性
	運転温度	機械設計	超電導線の単位重量
超電導直流器	(高磁界マグネット、NMR、MRI、加速器など)	寸法設計	超電導線寸法
	(丸線、平角線、テープ、成形撚線)	電磁気設計	超電導線 $I_c$ -B-T 特性
		ソレノイドコイル設計	超電導線応力/歪特性
	動作電流	パンケーキコイル設計	超電導線引張強度
	動作磁界	熱設計	超電導線の疲労・繰返曲げ特性
	運転温度	機械設計	超電導線の単位重量
	含浸コイル設計		

上記の検討結果を後述する超電導線材の通則素案へ反映させた。具体的な項目としては、不可逆磁界試験、 $n$  値試験、臨界電流分布試験、工業的臨界電流密度試験、フラックスジャンプ試験、交流損失試験、形態検査、超電導線固有寸法（丸線、平角線、テープ）試験、引張・圧縮・曲げ試験、可とう性試験、超電導線固有剥離試験、疲労試験、摩耗試験、耐溶剤試験、超電導線固有耐冷媒試験、はんだ付け試験、融着性試験、電気抵抗試験、残留抵抗比試験、接続抵抗試験、絶縁破壊試験、熱的パラメータ試験、熱サイクル試験及び熱衝撃試験をあげた。しかし、臨界電流試験における電界基準の選定、高温超電導線の磁界中特性試験、蒸発法による交流損失試験、可逆歪み特性試験、過電流特性試験、最小クエンチエネルギー（MQE）試験、クエンチ伝ぱん試験及び超電導線の信頼性に関する寿命試験並びに加速試験に関しては、今後の高温超電導線及び各超電導機器の技術進展を調査し反映することとした。

### (3) 超電導線の規格素案の作成

2008年のIEC/TC90 ドイツ・ベルリン会議において、超電導線関連のアドホックグループ設置の基本合意が得られ、超電導線の国際標準化に向けた検討を行なっている。IEC/TC90 アドホックグループ 3 の国内外のメンバー(ad-hoc3)からのコメントを反映させ、超電導線の規格通則素案を作成した。

#### (a) 国内外からのコメントに対する検討

スコープにおいて、超電導線の内 LTS 線はすでに商品化済であるため高温超電導線に限定してはどうか（ドイツ）に関して、低温超電導線と高温超電導線を網羅した超電導線として合意醸成に努める。超電導素線の英語訳 strand か monolithic strand に関して、strand が選定される方向である。

出荷表示（Shipping label）には、一般に製品を識別するためのラベル（Label）とその製品の性能等の技術情報（Technical reports）の表記がある。ラベルに関しては、現行規格及び実態調査を反映し、簡潔な表記にする。例えば、製品名又は製品コード、超電導線の長さ、超電導線の重さ、出荷日及び製造者名を製品に表記する。技術情報に関しては、当事者間で協議事項とし、随意とする。Labe 表記に関して、米国からこのままの表記では vendor 仕様を利用者に押しつけることが危惧される旨の意見が寄せられ、Labe 項目から臨界電流及び絶縁層の 2 項を削除した一般的な表示項目に変更した対案やその根拠を提示することによって米国の合意醸成に努める。

米国から超電導に関する幅広い用語説明（lexicon）に関して、購入仕様の交渉に有用と思われる反面、超電導線の構造の制限、革新的製品の市場導入制限、規定されていないより良い製品の制限、自由な超電導製品利用に対する一義的な IEC 規格の拘束などが危惧されるとの指摘がなされた。この指摘に対して、現行 Draft 並びに附属書について超電導に関する現行規格を前提とした引用、工業製品として

要求されるべき事項の峻別、工業製品としての新規試験項目の推奨などの視点で精査した対案を提示して合意醸成に努める。超電導線の一般的特徴、超電導特性、超電導線の構成と形態及び工業材料としての一般的特性試験はいずれも参考事項とする。

米国から、このまま ad-hoc3 を発展させるよりも、用語説明 (lexicon) の有用性もあるので WG1 (超電導関連用語) に某の議論動議するような方向転換を期待するとの提案がなされたが、WG1 における高温超電導体に係わる用語追加などメンテナンスの進捗状況を説明するとともに、「超電導関連用語」と「超電導線通則」の違いを丁寧に説明し、「超電導線通則」に対する理解を求める方針とする。

ドイツからの「超電導線通則」提案の取り下げ動議並びに米国からの現行 Draft の見直し提案を重く受け止め、「超電導線通則」の提案者でありかつ幹事国である日本としては、ドイツ及び米国 (L.Cooley) に対して誠意を持って対応し、標準化に係わるいろいろな危惧を払拭することに努めるべきとの確認がなされた。

#### (b) 超電導線の規格通則素案の概要

これらのコメントを反映して超電導線の規格通則素案を作成した。その概要を表 2.5.1-4 に示す。

表 2.5.1-4 「超電導線の通則」の規格素案の概要

目次	概要
1.序文	
2.適用範囲	超電導線の一般的共通事項について規定、集合導体、編組導体、より線導体は含まれない
3.引用規格	関連する国際規格のリストを記載
4.用語	IEC 61788 と IEC 60050-815 および ISO 6892 で与えられるもの
5.定義	附属書 A の中で概説された特性を規定
5.1 超電導に関する特性	i) 臨界温度; ii) 臨界磁場; iii) 臨界電流; iv) 安定化; v) 交流損失; vi) 機械的・電磁気学的特性; それらの詳細な記述は附属書 B
5.2 超電導線の構成	i) 線を構築する部材 a. 超電導体; b. マトリックス; c. 安定化材料;

<p>5.3 工業原料としての一般的な特性</p>	<p>d. 補強材 e. 高抵抗材料 f. 絶縁材料 ii) 線の断面形状 iii) SC 線の応用 それらの項目別の記述は附属書 C 項目別の記述は附属書 D</p>
<p>6.出荷書類 6.1 表示  6.2 技術報告書</p>	<p>i) 超電導線の名称あるいはコード名 ii) 超電導線の長さ iii) 超電導線の重量 iv) 出荷の日付 v) 製造者名 上述した 5 節の項目が商取引に必要な時、それらの項目の試験報告書を含めることが可能</p>
<p>附属書 A (参考) 超電導線の一般的な特徴 A.1 超電導線の特性  A.2 超電導線の工学的観点</p>	<p>以下の項目毎に超電導線の特徴を説明  i) 臨界温度: ii) 臨界磁場及び不可逆性磁場 iii) 臨界電流及び n 値 iv) 安定化; v) 交流損失; vi) 機械的・電磁気的特性 i) 線の構成材料 a. 超伝導材料: b. マトリクス材: c. 安定化材料 d. 補強材: ii) 線の構造 iii) 応用別の超電導線の分類: iv) 統計特徴:</p>
<p>附属書 B (参考) 超電導に関連する特性</p>	<p>以下の特性の測定原理、試験方法、その標準規格について記載 (1)臨界温度 (2)臨界磁場および不可逆磁場 (3)臨界電流および n 値</p>

	<p>(4)安定化</p> <p>(5)交流損失</p> <p>(6)機械的・電磁気的特性</p> <p>(7)信頼度</p>
<p>附属書 C (参考)</p> <p>超電導線の構成</p>	<p>要素材料、断面形状、応用に分類して記載</p> <p>C.1 線の構成要素（超電導材料：超電導材料、金属系、Bi系、レアース系、補足材料：マトリックス材、安定化材、補強材、高抵抗材、絶縁材）</p> <p>C.2 線の断面形状（丸、矩形、膜）に分類</p> <p>C.3 超電導線の応用（直流、交流、パルス）</p>
<p>附属書 D (参考)</p> <p>工業原料としての一般的な特性</p>	<p>以下の項目について測定原理と測定方法と標準規格について記載</p> <p>(1)検査 表面検査</p> <p>(2)形態 直径、ツイストピッチ、幅と厚さ、銅比、基板と安定化材の厚さ</p> <p>(3)機械的特性 引張特性、圧縮特性、曲げ特性、可とう性、剥がれ試験、摩擦抵抗、疲労特性</p> <p>(4) 化学的性質 溶解性、冷却耐性、ハンダ性、付着性</p> <p>(5)電気特性 電気抵抗、残留抵抗、接触抵抗、絶縁破壊、均一性試験</p> <p>(6)熱的特性 比熱、熱伝導率、熱膨張、熱衝撃、熱サイクル</p> <p>(7)信頼性 表面検査、全長抵抗の均一性検査</p>

#### (4) 超電導線の試験方法の規格素案の作成

2008年のIEC/TC90 ドイツ・ベルリン会議において、超電導線関連のアドホックグループ設置の基本合意が得られ、超電導線の試験方法についても国際標準化に向けた検討を行なっている。

超電導線の試験方法としては、寸法試験、機械的特性試験、化学的特性試験、電

磁気的特性試験、熱的特性試験及び信頼性試験に大別した。表 2.5.1-5 に超電導線材の試験方法の規格素案の概要を示す。

表 2.5.1-5 「超電導線の試験方法」の規格素案の概要

目次	概要
まえがき	
序文	共通する試験方法を規格化の対象
1.適用範囲	高次に加工する超電導導体及び／又は超電導機器に用いる超電導線の試験方法について規定
2.引用規格	引用規格リストを記載
3.用語及び定義	主な用語及び定義は、IEC 60050-815 による。
4.一般要求事項	全ての試験は、個々の試験方法に規定された条件の範囲で実施、試験環境、試験準備作業など
5.外観検査	たば巻き、ドラム巻き、ボビン巻き又はリール巻きの状態で実施
6.寸法検査	一般寸法試験法、ツイストピッチ長試験法、テープ状超電導線の寸法試験法などについて記述
7.機械的特性試験	室温引張試験、圧縮試験、曲げ試験、可とう性試験、剥離試験などについて記載
8.化学的特性試験	耐溶剤試験、耐冷媒試験、ハンダ付け性試験、融着性試験などについて記載
9.電磁気的特性試験	臨界温度試験、臨界磁界試験、不可逆磁界試験、室温電気抵抗試験、残留抵抗比試験、臨界電流試験、n 値試験について記載
10.熱的特性試験	比熱測定試験、熱伝導率測定試験、熱膨張率測定試験、熱サイクル試験、熱衝撃試験について記載
11 信頼性試験	長手方向の故障間隔評価、渦流探傷試験、疲労試験について記載
附属書 A (参考)	n 値試験方法について説明
附属書 B (参考)	不可逆磁界試験方法について説明

今後の国際合意醸成の状況を反映し、試験方法は見直していくことになる。特に臨界電流試験における電界基準の選定、高温超電導線の磁界中特性試験、蒸発法による交流損失試験、可逆歪み特性試験、過電流特性試験、最小クエンチエネルギー (MQE) 試験、クエンチ伝ぱん試験、超電導線の信頼性に関する寿命試験並びに加速試験等に関しては、さらに技術情報を収集する必要がある。

高温超電導線の臨界電流試験に関して、臨界電流基準の見直し及び臨界電流の磁

界依存性の系統的な調査も必要である。また Y 系超電導線材の臨界電流試験に係わる電界基準及び電圧端子間距離に関して、これまでの考察から次の知見が得られている。

- ① Y 系超電導線材の長手方向に亘って材料特性が均一である場合、現行規格の電界基準 ( $1 \mu\text{V}/\text{cm}$  及び  $0.1 \mu\text{V}/\text{cm}$ ) 並びに電圧端子距離 (30 mm から 100 mm) は妥当である。
- ② ただし、外部磁界を印加する場合、測定空間や計測器の精度の制約がある。
- ③ Y 系超電導線材の長手方向に亘って局在的な欠陥が分散するなど材料特性が不均一である場合、局在的な欠陥に基づく電圧発生があるにもかかわらず電圧端子間距離で平均化されて顕在化しない恐れがある。したがって、このような場合、現行規格に準拠した試験方法と連続ホール素子法 (TapeStar™)、MOI などによる非破壊全長検査の併用が肝要である。
- ④ Y 系超電導線材の長手方向に亘って局在的な欠陥が分散するなど材料特性が不均一である場合、健全な線材を用いた補修が可能である。その場合線材の臨界電流試験に際し接触界面積 (接続長さ) に依存する抵抗に起因する電圧発生があることを考慮する必要がある。

## 2.5.2 超電導電力ケーブル関連技術標準化 (ISTEC、住友電気工業、古河電気工業、フジクラ、昭和電線ケーブルシステム)

既存規格及び超電導電力ケーブル関連技術動向を調査し、超電導電力ケーブルの規格素案を作成した。また、国際大電力システム会議 (CIGRE) 等との連携により国際専門家討論会を通じて情報集約並びに国際合意状況の把握を行なった。

### (1) 超電導電力ケーブルシステム等の環境安全面についての検討

超電導電力ケーブルシステム等の導入による、経済側面、環境及び安全側面について効果を評価することになるが、システムの設計仕様に基づく原材料の調達に始まり、製造、流通、使用並びに処分の過程までのライフサイクルを考慮した検討を行う必要がある。ここでは、超電導電力ケーブルシステム等の導入効果のガイドラインを検討することとし、それを策定するにあたり ISO/IEC ガイドに基づく次の JIS を参照した。

JISZ8051:2004(ISO/IEC GUIDE 51:1999):安全側面－規格への導入指針

JISQ0064:1998(ISO GUIDE 64:1997):製品規格に環境側面を導入するための指針

#### (a) 環境側面

超電導電力ケーブルシステムは、運転時の送電損失を軽減することができるので、それに係わる発電のための原料や発電プロセスに係わるコストを低減に寄与することができる。その結果、CO<sub>2</sub> 排出量の削減にも効果があると考えられる。超電導電力ケーブルシステムにおいては、すでに IEC/TC20 では現行電力ケーブルシステムについて“Environmental statement specific”として技術報告書を発行している。また、CIGRE の超電導ケーブルに関する前フェーズ WG (Working Group) の報告書においても“Environmental aspect”が調査された経緯が報告されているなど関係者の大きな関心事である。したがって、今後 CIGRE における TF (Task Force) 及び WG の活動に資するためにも、わが国として国際性のある包括的な情報提供が求められることが想定される。

超電導電力ケーブルシステムに係わる廃棄コストには、超電導電力ケーブルシステムのすべての原材料調達、製造プロセス、布設、運用、廃棄において、ガス、水などの放出物、法規制物質を伴わない製品設計、廃棄物の処理の経済的負担の軽減、省エネルギープロセスの継続的な技術開発等を通じて CO<sub>2</sub> 排出量削減等環境改善への寄与を包括することが望まれる。

また、超電導電力ケーブル及び関連機器において法規制された物質の有無、製造プロセスで使用する溶剤及び補助材料中の法規制物質の有無、製造プロセスにおける処分製品中の法規制物質の有無は超電導電力ケーブル製造者の責任のもとですべてが把握されなければならない。したがって、最終製品である超電導電力ケーブル並びに関連機器に法規制物質が含まれるか否かは製品に明確にその存在形態並



びに適切な処理方法を表記しなければならないであろう。ここに、法規制物質とは、欧州連合加盟国に適用される法令「電気電子機器に含まれる特定物質の使用制限に関する指令 2002/95/EC（施行予定 2003 年 2 月 13 日）：Restriction of the use of Certain Hazardous Substances in Electrical and Electric Equipment」略称 RoHS（ローズ）指令又は RoHS 基準に規定された次の 6 種類の特定化学物質を指す。すなわち、鉛、水銀、六価クロム、ポリ臭化ビフェニール(PBB)又はポリ臭化ジフェニールエーテル(PBDE)は 0.1 wt%(1000 ppm)以下、カドミウムは 0.01 wt%(100 ppm)以下とする。

#### (b) 安全側面

安全側面は、超電導電力ケーブルシステム等の企画、設計、開発、製造プロセス、布設、流通及び廃却のすべてのライフサイクルを考慮して、人、財産、環境又はこれらの組合せに及ぼすハザード（危害の潜在的な源）の特定並びにリスク（危害の程度）の見積・低減の方策を講じなくてはならない。すなわち、超電導電力ケーブルシステム等の安全は、特定されたハザードが許容可能なリスクレベル内に維持されていなければならない。したがって、すべての超電導電力ケーブルシステムには許容可能なリスクレベルが決定されていることが望ましい。

超電導電力ケーブルシステム等では、JIS Z 8051 に準拠する特定されるハザードとして極低温液体冷媒、気化冷媒ガス、低温露出部、漏れ磁束、クエンチ時の蓄積エネルギー放出、関連電気機器などがあり、個々の機器におけるリスクレベルを見積り、決定した結果を規格に記載することが必要である。具体的には、極低温液体冷媒が溢れた場合の凍傷、気化冷媒ガスに伴う酸素欠乏水準、漏れ磁束と 5 ガウスライン、一般電気取扱則の遵守などを挙げることができる。また、これらに関連する地域固有の法規制（電気事業法、高圧ガス保安法、等）にも配慮しなければならない。

### (2) 超電導電力ケーブルシステムの技術調査

超電導電力ケーブルの規格素案作成のための技術調査として、国内外の超電導電力ケーブル開発状況及び超電導電力ケーブル試験項目を調査した。

#### (a) 超電導電力ケーブル関連プロジェクトの調査

超電導電力ケーブル関連プロジェクト実態調査を実施し、その結果を表 2.5.2-1～表 2.5.2-5 に示した。既に終了した超電導電力ケーブルプロジェクトは 9 件で、その内で交流超電導電力ケーブルは 8 件、直流超電導電力ケーブルは 1 件である。また、進行中及び計画中超電導電力ケーブルプロジェクトは 25 件で、その内で交流超電導電力ケーブルは 22 件、直流超電導電力ケーブルは 3 件(IEECAS、1.3 kV、10.0 kA、380 m, Energized in 2010：中部大学、±10 kV、>2 kA、200 m、Bi2223：Tres Amigas, SuperStation Project、±200 kV、12.5 kA、5 GW、YBCO) である。

表 2.5.2-1 高温超電導電力ケーブルプロジェクトの調査（日本）

日本										
Project		Members	Utility	Fund	Budget	Cable			Period	Etc.
1	TEPCO	SEI	TEPCO	Private	20M\$	66kV-1000A,100m	CD	3-in-One Bi2223	2001- 2002	—
2	Super-ACE	Super-GM (Furukawa, CRIEPI)		METI/ NEDO		77kV-1000A,500m	CD	Single x 1 Bi2223	2004- 2005	
3	NEDO	SEI		METI/ NEDO		66kV-5kA,15m 2.1W/m-phase @5kA	CD	3-in-One YBCO	2008- 2012	Started
4	NEDO	Furukawa		METI/ NEDO		275kV-3kA,30m 0.8W/m-phase @3kA	CD	One-in-One YBCO	2008- 2012	Started
5	Yokohama	SEI	TEPCO, Mayekawa	METI/ NEDO	27M\$	66kV-200MVA, ~300m	CD	3-in-One Bi2223	2007- 2012	Started
6		Chubu U, SEI	Chubu U	MEXT /Japan		10kV-3kA,DC,20m	CD	One-in-One Bi2223	2005- 2009	Current only
7	DC-SCP T	Chubu U, SEI	Chubu U	MEXT/ Japan		±10kV->2kA,DC, 200m	CD	Bipolar, One-in-One Bi2223	2010- 2013	Planning

表 2.5.2-2 高温超電導電力ケーブルプロジェクトの調査（韓国）

韓国 (アンダーラインは、未確認情報を指す。)										
Project		Members	Utility	Fund	Budget	Cable			Period	Etc.
8	DAPAS1	LS cable, KERI,KIMM	KEPCO	Korean Ministry of S&T		22.9kV-1250A, 30m	CD	3-in-One Bi2223	2001- 2004 2004.5 -12	Test
9	DAPAS2	LS Cable, KERI,AMSC	KEPCO	Korea Gov		22.9kV-1250A -50MVA, 100m	CD	3-in-One Bi2223	2005- 2007	Alive
10	DAPAS3	LS Cable, KERI, AMSC	KEPCO	Korea Gov		154kV-1GVA, 100m	CD	3-phase, YBCO	2008- 2011	Gochang Test Center
11	KEPRI LS cable	KEPRI, AMSC, KBSI, LS cable etc.	KEPCO	KEPRI Korea Gov.	2.4M\$	22.9kV-1250A, 100m	CD	3-in-One Bi2223	2007-	Alive Cable development
12	KEPRI SEI cable	KEPRI,SEI, KERI,KBSI, etc	KEPCO	KEPRI Korea Gov.		22.9kV-1250A, 100m	CD	3-in-One Bi2223	2006-	Operation method training
13		LS Cable, AMSC	Seoul, Korea			22.9kV-50MVA , 500m	CD	3-phase, YBCO	2009-	Install & Operation in 2010

表 2.5.2-3 高温超電導電力ケーブルプロジェクトの調査（中国）

中国 (アンダーラインは、未確認情報を指す。)										
Project		Members	Utility	Fund	Budget	Cable			Period	Etc.
14	Yunnan	Innopower, InnoST, Shanghai Cable	Yunnan Electric	China S&T, Beijing City, Yunnan Pro.	5M\$	35kV-2000A, 33.5m	WD	Single x 3 Bi2223	2004.4-	
15	Lánzhōu	IEE/CAS, Changtong Power Cable Company AMSC		China S&T	1.2M\$	10.5kV-1500A, 75m	WD	Single x 3 Bi2223	2004-	
16	China EPRI	China EPRI	Beijing, China			110kV-3000A, 1000m	CD	YBCO	2011-2015	Planning
17		IEECAS	China			1.3kV-10.0kA, DC, 380m	WD		2006-2010	

表 2.5.2-4 高温超電導電力ケーブルプロジェクトの調査（欧州）

欧州 (アンダーラインは、未確認情報を指す。)										
Project		Members	Utility	Fund	Budget	Cable			Period	Etc.
18	Copenhagen	NKT, NST		Denmark DOE		30kV-2000A, 30m	WD	Single x 3 Bi2223	2001-2003	
19	Super3C	Nexans, Bruker (EHTS)	Spain, Labein lab.	European Union	5.2M Euros	10kV-1000A, 30m	CD	One phase YBCO/MOD	2004-2008	
20		Nexans	Hannover, Denmark			138kV, 1.8kA, 30m	CD	One-phase, YBCO	2007	
21	Amsterdam	NKT, Plaxair, Ultra	Nuon	TBD		50kV-250MVA, 6000m	CD	Triaxial YBCO	2009-2014	
22		Nexans	Spain			20kV-1kA, 30m	CD	One-phase, YBCO	2008-2013	
23		VNIKP, Nexans, SEI	Moscow, RU			20kV-50MVA, 200m	CD	Single x 3 Bi2223		Installed by the end of 2010
24	Edesa	Nexans,	Spain Barcelona			25kV-3.2kA, 30m,	CD	One-phase, Bi2223		

表 2.5.2-5 高温超電導電力ケーブルプロジェクトの調査 (米国)

米国 (アンダーラインは、未確認情報を指す。)										
Project		Members	Utility	Fund	Budget	Cable			Period	Etc.
25	Southwire	Southwire		DOE		12.5kV-1250A, 30m	CD	Single x 3 Bi2223	2000-	
26	Detroit	Pirelli, AMSC	Detroit Edison	DOE		24kV-2400A, 120m	WD	Single x 3 Bi2223	2001	Failed
27	Albany	SuperPower SEI, Linde	National Grid	DOE、 NYSERDA	26M\$	34.5kV-800A, 350m	CD	3-in-One B2223, YBCO	2006- 2009	On Grid to Apr.08
28	Ohio	Ultera	AEP Columbus	DOE		13.2kV-3000A, 200m	CD	Triaxial Bi2223	2006-	Sep. On Grid
29	LIPA 1	AMSC, Nexans, AirLiquide	Long Island Power Authority	DOE	46.9M\$	138kV-2400A, 600m	CD	Single x 3 Bi2223	2008-	Apr. 08 On grid
30	LIPA 2A	AMSC, Nexans, AirLiquide	LIPA	DOE	18M\$ +7.6M\$	138kV-2400A, 600+am One phase will be replaced with intermediate joint  Bi2223 → YBCO	CD	Single x 1  YBCO  Single x 2 Bi2223	2008- 2011	Started
31	Hydra	AMSC, Southwire	Con- Edison	DHS	39.3M\$	13.8kV-4000A, 300m	CD	Triaxial YBCO	2007- 2010	Started
32	Entergy	Southwire, NKT	Entergy, US New Orleans	DOE	26.6M\$	13.8kV-48MVA, 1760m	CD	Triaxial YBCO	2007- 2011	Started
33	Tres Amigas, Super Station	AMSC	Clovis, New Mexico, US	Tres Amigas, LLC		±200kV-12.5kA,  22.5 sq. miles,5GW, DC		Bipolar  YBCO		Planning

(b) 直流送電システム関連の技術調査

CIGRE SC B1 WG のガイドラインでは、すべてのケーブルシステム（単心、3心、3心撚りケーブル）が対象とされている。既存のケーブルには交流送電ケーブルシステムと直流送電ケーブルシステムがあるため、超電導電力ケーブルについても交流超電導電力ケーブルと直流超電導電力ケーブルを対象にした調査が必要と想定されるため、直流送電の実態調査を実施した。その調査結果を表 2.5.2-6 に示す。

(注記) 出典：田辺茂ほか：直流システム関連規格の状況、平成 21 年電気学会産業応用部門大会シンポジウム S10、2009 年 9 月 2 日

表 2.5.2-6 主な直流送電

Project	Members	Utility	Cable/Overhead trans.			Period	Etc.
	ASEA/ Sweden	スウェーデン Gotland 島	10-20MW			1954	世界初
北本連系	古河電工 住友電工 フジクラ 日立電線	電源開発	600MW	±250kV	167km	1979	日本初
	ABB	スウェーデン Hellsjon	3MW	±10kV		1997	VSC 適用 世界初
インガ・シヤバ	ASEA/ Sweden	コンゴ	600MW	±500kV	1700km	1985	最長架空
紀伊水道直流連 系	古河電工 住友電工 日立電線 フジクラ	電源開発 関西電力 四国電力	1.4GW	±500kV 2800A	100km	2000	当時 世界最大 容量
Trans Bay	CETS, USA	Pittsburg-San Francisco	400MW	200kV	59-miles	2006- 2008	VSC 適用
ノルネッド	ABB	ノルウェー オランダ	700MW		580km	2008	最長海底
CAPRIVI LINK INTER- CONNECTOR	ABB	ナミビア		±350kV	970km	2009	VSC 適用
NIMSCAN	State Grid DC Project Constructio n Co. Ltd.	シャンジャハ Xiangjiaba -上海	6.4GW	±800kV 4kA	2071km	2010-2011	
イタイプ	ASEA/ Sweden, ASEA/Brazi l, PROMON, FURNAS, CEPEL	ブラジル	6.3GW	±600kV	800km	2012	最高容量

IEC/TC22 (パワーエレクトロニクス) から引き継いだ IEC SC22F において、1970 年以降“高電圧直流送電(HVDC)”が扱われている。1995 年以降、“Power Electronics For Electrical Transmission and Distribution Systems”に改名して活動、活動範囲は直流送電 HVDC、静止形無効電力補償装置 SVC 及びサイリスタ制御直列コンデンサ TCSC である。活動が活発な国は、中国、ドイツ、日本、ロシア、スウェーデン、英国などである。P-メンバーは 13 ヶ国。これまでの成果、IS4 件、TS1 件、TR2 件、PAS5 件。

IEC60633 : HVDC の関する用語 ; バルブ、変換器の動作状態、HVDC 構成、変換所機器、制御方法など。→2008 年改訂済み。将来 IEC60050IEVPart55 に TC1 と協調し組み込む予定。

－IEC60700-1 : HVDC 用サイリスタバルブの電気試験。IEEEstd857 との協調必

要。

- IEC607001 : メンテナンス (保守) 関連
- IEC61803 : 交直変換所の損失の求め方についての規格
- IEC61954 : SVC (TCR 及び TSC) 用サイリスタバルブの電気試験の規格 → 改正中
- IEC60919 : Part1 ; 定常特性 (TR)、Part2 ; 開閉動作や事故時の過渡特性 (TR)、Part3 ; 交流系統との相互作用や高調波共振等を考慮したダイナミック特性 (TS) →改正中、審議中
- IECPAS61975-2004 : HVDC 設備のシステム試験のガイド→IS 規格移行検討中
- IECPAS62001-2004 : HVDC 変換所の交流フィルタの仕様作製及び設計評価のためのガイド
- IECPAS62344-2007 : HVDC 用設置電極の設計ガイド
- IECPAS62543-2008 : VSC 変換器を使用した HVDC システムの全般を網羅したガイド
- IECPAS62544-2008 : HVDC におけるアクティブフィルタのガイド
- IEC62501 : 自励 HVDC 用バルブの電気試験 WG 作業中
- 他 TC/SC との連携 : TC115 (100kV を越える高電圧直流送電システム)、TC28 (絶縁協調)、TC33 (電力用コンデンサ)
- 超電導直流ケーブル関連資料として、次の論文が 1 件抽出された。  
露木和彦、鷺田 栄、丹田 修、増田孝人、加藤幸一、中島武憲、向山晋一 : 超電導直流ケーブルの電気絶縁に関する研究、低温工学、Vol.35、No.7(2000)、(b p350-p365

#### (c) 超電導電力ケーブル試験項目調査

交流超電導電力ケーブルの試験項目に関して、IEC、JEC 及び、AEIC 規格等をもとに、CV ケーブル、OF ケーブル及び POF ケーブル関連規格項目との対比検討を実施した。形式試験、受入試験及び竣工試験の各試験項目の対比結果を表 2.5.2-7 ~ 表 2.5.2-9 に示し、試験方法素案の見直しに反映した。

直流送電システムについても試験方法調査を実施し、その結果を表 2.5.2-10 及び表 2.5.2-11 に示す。

(注記) 出典 : 小山茂ほか : 紀伊水道横断 DC±500kV 海底 OF ケーブル、フジクラ技報、第 98 号、pp28-37、2000 年 4 月

表 2.5.2-7 型式試験項目

番号	試験項目	従来ケーブル試験項目			超電導ケーブル試験項目				備考	コメント
		形式			形式					
		CV	OF	POF	出荷相当品		全長			
			室	低	室	低				
1	外観点検	○	○	○			●			
2	構造試験	◎	○	○	●					
3	絶縁抵抗試験	○	○	○			●	●		
	シース絶縁抵抗試験	○	○				●		室温全長試験追記	必要なし
4	静電容量試験	○	○	○	●	●	●	●		
5	出荷耐電圧試験	○	◎			●		●	12と同じ	
6	直流耐電圧試験又はスパーク試験	○	○				●			
7	導体抵抗試験	○	○	○			●			
8	誘電正接試験		○	○	⊖	●	⊖	●	室温時は水分の影響 大低温での値に意味	
9	誘電正接温度特性試験	◎	◎	○					温度変化小さく不要	
10	ガス試験		○						OF特有	
11	長期導通電試験	◎							不要・開発試験	OF開発試験、CV規定なし・必要
12	商用周波数耐電圧試験	◎	◎	○		●			部分放電の確認を行う	
13	雷インパルス耐電圧試験	◎	◎	○		●				必要
	雷インパルス耐電圧試験 (シース)	⊖	⊖						項目削除	
14	半導電層試験	△							DM特有	
15,16	シース又は防食層試験	◎	◎		⊖				CVでの材料試験、不要	
17	部分放電試験	◎							不要でよいか?	
18	絶縁体試験	○△							DM特有	
19	耐火試験	△							DM特有	
20	水密試験	△							DM特有	
21	ブリーディングアイ試験	○	○	○			●		ブリーディング単体試験	
22	曲げ試験	◎	◎	○	●					必要なし
23	側圧試験			○					不要でよいか	必要
24	絶縁油試験		○	○					OF/POF特有	
25	油圧試験		○						代替	
26	商用周波破壊試験	○	○	○					納入者明示事項	
27	雷インパルス破壊試験	○	○	○						
28	防食層雷インパルス破壊試験	○	○							
29	極度曲げ試験		○	○						
30	捻り曲げ試験	○	○							
31-44	その他									
101	定格電流試験					●		●	追記	必要なし
	臨界電流試験					⊖		⊖	明示事項	
102	交流損失試験					⊖		⊖	明示事項	必要なし
103	断熱性能試験					⊖		⊖	明示事項	必要なし
104	過負荷試験								開発試験	
105	短絡電流試験								開発試験	
106	圧力損失試験							●	明示事項	必要なし
107	布設模擬試験								開発試験	
108	気密試験				●			●		必要
109	耐圧力試験				●			●		必要
110	ケーブルインダクタンス試験								協議事項	
111	サーマルサイクル試験								開発試験	
112	圧力サイクル試験								協議事項	
113	低温老化・変形試験								協議事項	
114	漏れ磁界測定								協議事項	
115	熱収縮試験								開発試験	

○JEC等国内規格のみ規定されているもの、◎国内、海外規格に規定されているもの  
 △海外規格にのみ規定されているもの、●超電導ケーブル試験項目  
 OF、CVケーブルの海外規格は、IEC、POFの海外規格はAEIC

表 2.5.2-8 受入試験項目

番号	試験項目	従来ケーブル試験項目			超電導ケーブルの試験項目案				備考	コメント
		受入			受入					
		CV	OF	POF	出荷ケーブルから切		全長			
			室	低	室	低				
1	外観点検	○	○	○			●			
2	構造試験	◎	◎	◎	●					
3	絶縁抵抗試験	○	○	○			●			
	シース絶縁抵抗試験	○	○						形式でよい	必要なし
4	静電容量試験	◎	◎	○	⊖	⊖	●		5と同時測定	
5	出荷耐電圧試験	◎	◎	◎		●			部分放電の確認を行う	
6	直流耐電圧試験又はスパーク試験	○	○				●			
7	導体抵抗試験	◎	◎	◎			●			
8	誘電正接試験		◎	◎	⊖	⊖	●		5と同時測定	
9	誘電正接温度特性試験			○					温度変化小さく不要	
10	ガス試験		○						OF特有	
11	商用周波数耐電圧試験			◎		⊖			不要(5で実施)	
12	雷インパルス耐電圧試験			◎		⊖			不要(5で実施)	
	雷インパルス耐電圧試験(シース)			⊖					不要(項目削除)	
13	部分放電試験	◎							5で測定	必要
14	絶縁体試験	○							CV特有	
15	フリージングアイ試験		○	○			●		単体試験	
16	曲げ試験			◎					不要よいか?	必要なし
17	非金属シースの電気試験	△							CV特有	
18	導体検査	△							?	
19	絶縁体のホットセット	△							CV特有	
20	防食層試験		△						?	
21	機械試験		△	△					?	
22	シース厚測定			△					?	
23	合成紙剥がれ試験								?	
101	臨界電流試験					●			初期特性把握	必要なし
									導体、シールド測定	
102	交流損失試験					●			初期特性把握	必要なし
103	断熱性能試験					●			初期特性把握	必要なし
104	過負荷試験								協議事項	
105	短絡電流試験								協議事項	
106	圧力損失試験								不要	必要なし
107	布設模擬試験								協議事項	
108	気密試験						●			必要
109	耐圧力試験						●			必要
110	ケーブルインダクタンス試験								協議事項	
111	サーマルサイクル試験								協議事項	
112	圧力サイクル試験								協議事項	
113	低温老化・変形試験								不要	
114	漏れ磁界測定								協議事項	
115	熱収縮試験								協議事項	
116	シールド電流測定									必要なし
117	真空リーク試験						●			必要なし

○JEC等国内規格のみ規定されているもの、◎国内、海外規格に規定されているもの  
 △海外規格にのみ規定されているもの、●超電導ケーブル試験項目案  
 OF、CVケーブルの海外規格は、IEC、POFの海外規格はAEIC



表 2.5.2-9 竣工試験項目

番号	試験項目	従来ケーブル試験項目			超電導ケーブル試験項目案		備考	コメント
		竣工			竣工			
		CV	OF	POF	全長			
			室	低				
従来ケーブル試験項目	1 導体抵抗試験	○	○	○	■			
	2 絶縁抵抗試験	○	○	○	■			
	3 シース絶縁抵抗試験	○	○	○	■			
	4 静電容量試験	○	○	○		■		
	5 誘電正接試験	○	○	○		■		
	6 耐電圧試験	◎	◎	◎		■		
	7 油流抵抗試験		○	○			106で代用	
	8 ガス定数試験		○	○			OF特有	
	9 絶縁油分析		○	○			OF特有	
	10 もれ電流試験	○					不要	必要なし
	11 部分放電試験	○					協議事項	
	12 防食層試験		○				協議事項	
	13 警報回路動作試験		○				不要	
	14 シース耐圧力試験	△					108で代用	
超電導ケーブル特有の試験項目	101 臨界電流試験					●		
	102 交流損失試験					●	測定難、不要	
	103 断熱性能試験					●		
	104 過負荷試験						不要	
	105 短絡電流試験						不要	
	106 圧力損失試験					■		
	107 布設模擬試験						不要	
	108 気密試験				■			
	109 耐圧力試験						不要	
	110 ケーブルインダクタンス試験						不要	
	111 サーマルサイクル試験						不要	
	112 圧力サイクル試験						不要	
	113 低温老化・変形試験						不要	
	114 漏れ磁界測定						不要	
115 熱収縮試験						不要		
116 シールド電流測定						協議事項		
117 真空リーク試験					●			

QJEC等国内規格のみ規定されているもの、◎国内、海外規格に規定されているもの  
 △海外規格にのみ規定されているもの、●超電導ケーブル試験項目案  
 OF、CVケーブルの海外規格は、IEC、POFの海外規格はAEIC

表 2.5.2-10 中間試験項目

試 験 項 目		
枠試験	外観検査	
	直流導体抵抗試験	
	静電容量試験	
	絶縁抵抗試験	
	ガス試験	
	絶縁体直流電圧試験	
	防食層商用周波耐電圧試験	
試料試験	構造試験	
	曲げ試験	
	直流長時間耐電圧	
	極性反転耐電圧	
	直流重畳開閉インパルス耐電圧	
	開閉インパルス耐電圧	
	雷インパルス耐電圧	
	誘電正接温度電圧特性	
	防食層	防食層雷インパルス耐電圧
		引張試験
		加熱老化
		耐油性
		加熱変形
	絶縁油	絶縁油粘度試験
		絶縁油商用中は絶縁破壊試験
絶縁油防食試験		
油圧試験		

表 2.5.2-11 完成試験項目

試験項目		
枠試験	外観検査	
	直流導体抵抗試験	
	静電容量試験	
	絶縁抵抗試験	
	ガス試験	
	絶縁体直流耐電圧試験	
	油流抵抗試験	
	光ファイバ	光ファイバユニット接続部損失
		接続部防食層直流耐電圧
		光ファイバユニット通光特性
		ステンレス管溶接部外観
		光ファイバユニット損失(温度センサ以外)
		温度センサ機能(温度センサのみ)
	埋設位置検知線	直流導体抵抗試験
接続部外観検査		
接続部耐電圧試験		
試料試験	構造試験	

### (3) 超電導電力ケーブル関連国際標準化の状況調査

#### (a) 各国固有の冷凍関連法令

超電導電力ケーブルに係わる我が国の高圧ガス保安法及び冷凍保安規則の扱いは、実証試験段階が続く限り実用実績を監督官庁に提示することができないため、当面冷凍システム個別に特認扱いを受けて対応せざるを得ない。我が国固有の地域的阻害事項とも考えられるため、国際標準化の観点から、実用実績を蓄積し最終的には特認扱いを越えて無人システムを目指すというシナリオを策定することが必要と考えられる。

#### (b) 国際標準化の進め方

2008年から1年間活動した CIGRE SC B1 TF は、2009年9月22日～24日にポーランドのボスナンで開催された CIGRE SC-B1 の定例会議において、昨年から立ち上がった超電導ケーブルの TF B1-31 の報告が、Convener の Lindsay 氏からなされた。付託事項 (TOR) として、電圧階級の範囲、冷却に関して、短絡条件下の検討などいくつかの修正がされた。また、電圧が 10～145kV であるために、8 番目として、275 kV まで展望して視野に入れることを追加した。提出された TF

B1-31 の Technical report は承認され、WG 移行も異議なく承認された。

CIGRE SC WG B1 31 は 2009 年 9 月から 2012 年 8 月まで 3 年間の予定である。CIGRE SC WG B1 31 には、カナダ、フランス、ドイツ、韓国、イタリア、オランダ、スペイン、日本、アメリカの 9 ヶ国が参加表明した。

CIGRE SC WG B1 31 の委員募集が、原則 1 カ国 1 名、2009 年 12 月 20 日で行われた。日本から住友電工増田孝人氏、古河電工向山晋一氏の両氏を推薦した。結果として、委員として増田氏、オブザーバとして向山氏の参加がそれぞれ承認された。CIGRE SC WG B1 31 の課題として、次の 6 項が採択された。

- (i) 対象は高温超電導(HTS)のみとし、低温超電導(LHS)は含めない。電圧階級は 10~145kV とする。
- (ii) 極低温冷却機器は SC-WG B1 31 の対象範囲外であるので、本 WG でも対象外とする。ただし、運転仕様、信頼性、要求機能は取り扱うことにする。
- (iii) 現存の HTS プロジェクトの詳細実績を調査する。
- (iv) 運転条件下並びに短絡条件下でのケーブル、接続部、付属品をふくむ HTS ケーブルシステムを検討対象とする。
- (v) ガイドラインは、すべて既存のケーブルシステム (単心、3 心、3 心撚りケーブル) を対象とする。
- (vi) ガイドラインは、HTS ケーブルシステムに適用される圧力パイプや圧力容器の設計や運転に係わる試験要求事項を含める。
- (vii) HTS ケーブルシステムの推奨試験項目として以下を扱う。形式試験/長期認定試験、工場試験、竣工試験
- (viii) 275 kV まで展望として視野に入れる。

2009 年で終了した CIGRE SC D1 (コンビーナ: 大久保 仁、名古屋大学) は、2009 年 9 月後続で CIGRE SC D1 を提案し、承認された。後続 CIGRE SC D1 は、期限を 2009 年から 2014 年までとし、目的を超電導に係わる共通技術(絶縁材料、構造材料、冷凍設備)とする。したがって、後続 CIGRE SC D1 と CIGRE SC WG B1 31 との連携が肝要である。

#### (4) 超電導電力ケーブルの規格素案の作成

超電導電力ケーブルシステムの定義の再確認として、交流超電導電力ケーブル及び直流超電導電力ケーブルに係わる総括的な通則について、超電導ケーブルシステム定義、規格大系、一般要求事項並びに各記述項目の過不足を明らかにし、超電導電力ケーブルシステムの定義をつぎのように確認した。

超電導電力ケーブルシステムは、変電所間及び又は変換所間を結ぶ連系線路のうち、超電導に係わる交流超電導送電線路及び又は直流超電導送電線路並びに超電導状態を維持・制御する関連機器システムと定義する。なお、超電導電力ケーブルシ

システムには構内利用及び特高・高圧配電線を含めるものとするが、発電機並びに調相設備、変圧器、遮断器、断路器、避雷器、フィルタ、接地電極、コンデンサなど現行の送変電関連機器は含めないものとする。

ここで、交流超電導送電線路は、単数又は複数の交流超電導電力ケーブル、中間接続及び終端接続（厳密には終端接続のヘッドまで）で構成する。また、直流超電導送電線路は、単数又は複数の直流超電導電力ケーブル、中間接続及び終端接続（厳密には終端接続のヘッドまで）で構成する。更に、超電導状態を維持・制御する関連機器システムは、断熱管路、冷媒、冷凍機、冷媒循環など冷却システム及び監視システムで構成される。

超電導電力ケーブルシステムに係わる国際規格大系案を表 2.5.2-12 に示す。当面、超電導電力ケーブルシステムに係わる国際標準化は、国際的な技術動向と標準化ニーズ動向に鑑みて、超電導電力ケーブルシステム通則及び交流超電導電力ケーブルの試験方法に注力することにした。当面国際規格化の対象とする項目を太字で示した。

表 2.5.2-12 超電導電力ケーブルシステムに係わる規格体系

超電導電力ケーブルシステム通則	交流超電導送電線路	交流超電導電力ケーブル	用語、性能、試験
		中間接続	(交流超電導送電線路関連機器)
		終端接続	
		冷却システム	
		監視システム	用語、性能、試験
	直流超電導送電線路	直流超電導電力ケーブル	用語、性能、試験
		中間接続	(直流超電導送電線路関連機器)
		終端接続	
		冷却システム	
		監視システム	用語、性能、試験

上記固有事項の調査結果を反映し超電導電力ケーブル通則を作成した。その概要を表 2.5.2-13 に示す。超電導電力ケーブルとしては、交流超電導電力ケーブル及び直流超電導電力ケーブルを適用範囲とした。ただし、CIGRE SC WG B1 31 のガイドラインが交流超電導電力ケーブルに有ることも加味することにした。

表 2.5.2-13 「超電導電力ケーブルシステムの通則」の規格素案の概要

目次	概要
まえがき	
序文	
1.適用範囲	電力システムに超電導電力ケーブルを適用するための超電導電力ケーブルシステムに対する一般要求事項について規定
2.引用規格	関連する国際規格のリストを記載
3.用語及び定義	<p>主な用語の定義は、IEC 60050-815:2000 によるほか、次による</p> <p>超電導電力ケーブルシステム、超電導電力ケーブル、交流超電導電力ケーブル、直流超電導電力ケーブル、低温絶縁超電導電力ケーブル、室温絶縁超電導電力ケーブル、単心超電導電力ケーブル、3心超電導電力ケーブル、3相同軸超電導電力ケーブル一本のフォーマの周りに、これと同心的かつ層状に3相の導体を組合せたケーブル、中間接続（箱）、終端接続（箱）、冷媒循環装置、交流送電、直流送電：HVDC、静止形無効電力補償装置：SVC、サイリスタ制御直列コンデンサ：TCSC</p>
4.使用条件	
5.システム構成	電力システムの構成要素となる超電導電力ケーブルシステムは、超電導電力ケーブル、中間接続、終端接続などから構成する付属機器及び冷媒循環装置から構成

<p>6.性能</p> <p>6.1 交流超電導電力ケーブルの性能</p> <p>6.2 直流超電導電力ケーブルシステムの性能</p> <p>6.3 その他付属機器の性能</p>	<p>電力ケーブルシステムの性能は、つぎによる他 IEC60502-2(2005) 、 IEC60840(2004) 及び IEC62067-ED1.1(2006)に準拠</p> <p>次の性能項目を明示</p> <p>(1) 定格電圧(kV)</p> <p>(2) 交流耐電圧(kV)</p> <p>(3) インパルス耐電圧(kV)</p> <p>(4) 短絡・地絡電流、短時間耐電流 (kAs)</p> <p>(5) 布設条件における静電容量 (<math>\mu\text{F}</math>)</p> <p>(6) 管路の耐圧構造及び耐圧力(Pa)</p> <p>(7) ケーブルの断面構成の詳細</p> <p>(9) 電気絶縁厚さ(mm)、最大電位傾度 (<math>E_0/\text{mm}</math>)</p> <p>(10) 定格電流(A)</p> <p>(11) 運転温度における超電導電力ケーブルの有効抵抗(<math>\Omega/\text{km}</math>)</p> <p>(12) 布設条件におけるインダクタンス(H/km/相)</p> <p>(13) 冷媒温度(K)</p> <p>直流超電導電力ケーブルシステムを構成する直流超電導電力ケーブルに係わる性能明示項目については、受渡当事者間の協議</p> <p>電力ケーブルシステムにおけるその他付属機器の性能は、IEC6050-2(2005) 、 IEC60840(2004) 及び IEC62067-ED1.1(2006)に準拠</p>
<p>7.試験</p> <p>7.1 試験の種類</p> <p>7.2 試験項目</p> <p>7.3 試験方法</p>	<p>超電導電力ケーブルシステムの試験の種類は、IEC60840(2004)及び IEC62067 に準拠</p> <p>形式試験 (Type test)、受入試験 (Sample test)、竣工試験 (After laying test) について記載</p> <p>試験項目は、形式試験、受入試験及び竣工試験について、設定</p> <p>交流超電導電力ケーブルシステム固有の試験項目を現行電力ケーブルシステムの試験項目の対比を附属書 C (参考) に記載</p> <p>交流超電導電力ケーブルシステム試験方法は別途規定、直流超電導電力ケーブルシステムの試験方法は当事者間で協議</p>

8.表示	
8.1 一般的共通事項	各要素製品の表記及び信頼性に係わる表記
8.2 要素製品の表記事項	要素製品に対する表記、包装の対する表記（名称又は超電導線の分類、寸法、長さ、重さ、代表的特性、製造年月日、製造者名）
8.3 要素製品の信頼性	輸送及び規定環境条件に耐える巻付け、当事者間で決めたドラム、超電導電力ケーブルの外観等代表的特性が簡易的に確認できることなどを記載
9.付帯事項	
附属書 A(参考)	超電導電力ケーブルシステムの基本構成概念
附属書 B(参考)	超電導電力ケーブルの構成概念 (a) 常温絶縁超電導電力ケーブル概念構成図 (b) 低温絶縁超電導電力ケーブル構成概念図 (b)-1 単心超電導電力ケーブル (b)-2 3心超電導電力ケーブル (b)-3 3相同軸超電導電力ケーブル
附属書 C(参考)	交流超電導電力ケーブルシステムの試験項目形式試験 (Type test)、受入試験 (Sample test)、竣工試験 (After laying test)について詳細な試験項目について記述
附属書 D(参考)	直流超電導電力ケーブルシステムの試験項目中間試験項目と完成試験項目について記載
参考文献	

### (5) 超電導電力ケーブル試験方法の規格素案の作成

交流超電導電力ケーブルと現行の電力ケーブルとの大きな操作上の相違点は、現行電力ケーブルよりも約 150 °C以上低い温度で操作されること、超電導固有の材料に依存する臨界温度、臨界電流値があることなどを挙げることができる。したがって、初期導入・運用機関並びに初期操作関係技術者を対象とした視点で検討した。まず、一般的な技術課題は、交流超電導電力ケーブルがどの程度信頼性がある、それをどのように定量的に試験し、規格にどのように反映するかである。信頼性試験に関する一般的な事項を調査し、交流超電導電力ケーブルにおける信頼性試験事例の情報収集、これらの試験方法規格素案への反映について検討を進めることとした。

また、CIGRE SC WG B1 31 のガイドラインが交流超電導電力ケーブルにあることから、交流超電導電力ケーブル試験方法に注力した。交流超電導電力ケーブル



試験方法に関して、Super-ACE で検討結果、平成 12 年度交流基盤での検討結果及び AEIC の POF ケーブルの試験項目内容をまとめ、超電導電力ケーブルの試験方法の規格素案を作成した。その概要を表 2.5.2-14 に示す。

(注記) 平成 12 年度 委託業務成果報告書 交流超電導電力機器基盤技術研究開発 トータルシステム等の研究 導入効果等の調査 平成 12 年度成果報告書 平成 13 年 3 月、(社)電気学会この報告書は、JEC や IEC の項目がうまくまとめられている。

(注記) Specification for impregnated paper and laminated paper polypropylene insulated cable high-pressure pipe-type (5th edition), Association of Edison Illuminating Companies (AEIC) 600 North 18th Street, Post Office Box 2641 Birmingham, Alabama 35291-0992, May 1990, AEIC-CS2-90

表 2.5.2-14 「交流超電導電力ケーブルの試験方法」の規格素案の概要

目次	概要
まえがき	
序文	
1.適用範囲	酸化物系超電導線を適用した交流超電導電力ケーブルであって、低温電気絶縁を施した単心、3心又は3相同軸型ケーブル構造を有し、かつ液体窒素循環装置に適合するケーブルに適用
2.引用規格	関連する国際規格のリストを記載
3.用語	主な用語の定義は、IEC 60055-1:2005 及び IEC 60050-815(815):2000 によるほか、次による公称電圧、ケーブル及びその付属機器が通常動作する電圧、最高インパルス耐電圧、ケーブル及びその付属機器に印加できる最高の電圧、定格電圧、最大許容電圧、地絡継続時間、定格値、概略値、測定値、接続、端末、臨界電流、運転温度、環境温度、最大許容張力を記載
4.一般要求事項	
4.1 一般試験条件	環境温度、周波数試験電圧の周波数及び波形、雷インパルス試験電圧の波形、開閉インパルス試験電圧の波形、験電圧と定格電圧の関係について記載
4.2 超電導固有試験条件	試験温度及び圧力、試験ケーブル長について記載

5.試験	
5.1 試験の種類	形式試験 (Type test)、受入試験 (Sample test)、竣工試験 (After laying test) について記載
5.2 試験対象	超電導電力ケーブルであって、超電導電力システムを構成する中間接続、終端接続及び冷媒循環装置を含まない
5.3 試験項目	形式試験 (Type test)、受入試験 (Sample test)、竣工試験 (After laying test) の詳細な試験項目について記述
5.4 超電導固有試験方法	超電導固有の試験方法は、附属書 A による
6.性能	
6.1 基本性能明示事項	交流超電導電力ケーブルの表にしめす性能事項を明示しなければならない
6.2 固有性能明示事項	ルートプロフィール (ケーブル高低差、冷却区間長、ケーブル且長など)、ケーブル布設条件 (管路、洞道など) などを加味しなければならない
6.3 交流超電導電力ケーブル性能事例	性能事例を附属書 B に示す
附属書 A (規定)	交流超電導電力ケーブルの固有試験方法 出荷耐電圧試験、商用周波数耐電圧試験、雷インパルス耐電圧試験、部分放電試験、臨界電流試験、交流損失試験、断熱性能試験、保護層の耐電圧試験について規定
附属書 B (参考)	交流超電導電力ケーブルの性能事例

形式 (Type) 試験項目 (表 2.5.2-7)、受入試験項目 (表 2.5.2-8)、竣工試験項目 (表 2.5.2-9) は既に示した通りであるが、中間接続、端末、安全弁、真空排気設備等附属部品・関連設備の試験項目は、今後の検討項目とする。

### 2.5.3 超電導電力機器関連技術標準化（ISTEC、中部電力、古河電気工業、九州電力、フジクラ、昭和電線ケーブルシステム）

SMES、超電導変圧器等の機器仕様並びにこれらの試験方法の標準化の基礎となるデータ等を調査するとともに、技術動向並びに標準化ニーズ調査も実施した。これらの結果をもとに SMES 及び超電導変圧器の規格骨子案を作成した。

#### (1) SMES 導入に係わる固有事項の調査

##### (a) SMES 導入に関する国内外の情勢

国際エネルギー機構（International Energy Agency, IEA）は、2050 年までに CO<sub>2</sub> 排出量を半減させるシナリオ（BLUE Map シナリオ）として、再生可能エネルギー源を積極的に導入する場合に不可欠と考えられる電力貯蔵設備の拡充に着目し、現行 100 GW の設備能力を 2050 年までに 500 GW まで増加させる数値目標を設定している。この目標達成のためには、現行の主力揚水発電に加え電池、CAES（圧縮空気エネルギー貯蔵）、SMES などの得失分析調査が必要としている。超電導エネルギー貯蔵研究会（RASMES）は、平成 20 年 12 月 IEA のこの活動・要請に応じた WG を発足し、平成 21 年 4 月に報告書を IEA に提出した。

IEA が想定する 2050 年迄に最大 305 GW の必要貯蔵設備に主力揚水発電に加え電池、CAES、SMES などの貯蔵設備を想定しており、これらのうち SMES にはその優れた性能から今後の貯蔵装置として期待されている。

国内の SMES 開発は、国家プロジェクトとして多目的用途 SMES から用途を系統安定化・負荷変動補償の電力系統制御用に絞り、平成 3 年度から進められてきており、現在は 4 期目の Y 系超電導線材を用いたコイル開発が取り組まれている。この背景には、従来の金属系 SMES では系統制御用途の SMES であっても貯蔵エネルギーが 500 kWh クラスの容量を実現するためには電力貯蔵部である超電導コイルやそれを保冷するクライオスタットが大型となるため、Y 系超電導線材の特長である高磁場での高い通電特性と電磁力にも耐えうる高強度を活かしたコイル開発により、コンパクトで低コストな SMES を実現することが狙いにある。また、最近活発に検討されている再生可能エネルギーの電力系統への大量導入の将来シナリオにおいて、電力の需給調整力として、従来、火力発電の果たしてきた役割を担う調整能力が必要との議論がある。これに対し、繰り返しの電力の入出力を行っても電力貯蔵部が劣化せず、応答性も速い SMES が火力発電に代わって機能することで、CO<sub>2</sub> 削減にも寄与することが期待されている。

再生可能エネルギーの導入は、陸上風力を年間 4800 万 kW、洋上風力を 2300 万 kW、太陽光発電 3000 万 kW、太陽熱発電 2000 万 kW、地熱発電 10 万 kW の増設を見込んでいる。2008 年の欧州委員会では、風力イニシヤティブ、貯蔵イニシヤティブ、電力系統イニシヤティブなどの戦略計画が提示されている。これに呼応して、我が国の「Cool Earth－エネルギー革新技术計画」2009 年 8 月では、高

性能電力貯蔵に関して日欧で蓄電分野の安全性と寿命に関する評価・試験方法について連携していくことが合意されている。再生可能エネルギーの導入候補の内、図 5.2.3-1 に示すように出力の不随変動対策（出力安定化）が特に不可欠な風力発電の年間 7100 万 kW に対応可能な出力 100-200 MW 級 SMES として、表 2.5.3-1 に示すような 3 つの用途モデルが提示されている。

IEA の風力発電時間 8 時間/日、稼働率 50 %、稼働期間 42 年間として必要貯蔵容量の再調査により、2050 年までに全世界で必要とする貯蔵設備が最大 305 GW になる。一方、現行の貯蔵設備で賄えるのは 100 GW に過ぎないことを考慮すると、RASMES が提示した SMES は、有力な技術候補になるものと期待される。

（出典：超電導エネルギー貯蔵研究会技術委員会：超電導エネルギー貯蔵研究会研究会平成 20 年度研究報告書、平成 21 年 6 月）

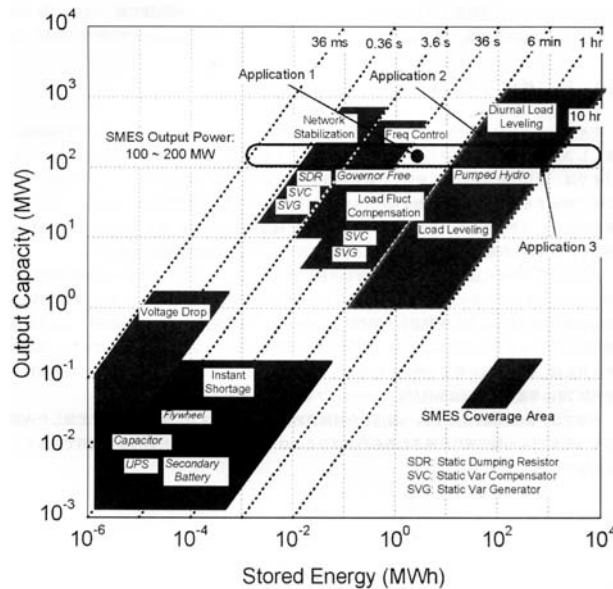


図 2.5.3-1 SMES の適用領域

表 2.5.3-1 各用途 SMES の概要

	用途 1	用途 2	用途 3
目的	周波数調整・負荷変動補償・ 発電変動補償：分単位補償	負荷平準化：ピーク カット効果	日負荷平準化：揚 水代替
出力、MW	100～200	100～200	100～200
補償時間	100 sec	30 min～1 hr	5～10 hr
使用可能貯蔵エネルギー、MWh(GJ)	3～6 (10～20)	50～100 (180～720)	500～2000 (1800～7200)
備考	対応技術ほぼ完成	技術展開可能	技術課題大

(b) 電導エネルギー貯蔵研究会 (RASMES) の報告書の調査

SMES 装置 1 基当たりの設備容量を技術的に可能とされる 100-200 MW に設定し、導入対象を①分単位補償（風力対応など周波数調整、負荷変動補償、発電変動補償）、②30 分-1 時間負荷変動補償及び③5-10 時間補償（日負荷平準化）の 3 パターンとして提案されている。大型超電導コイル技術の実績として①の対象に対応する蓄積エネルギーとして 1-数 10 GJ のシステムを達成ことは可能であるが、SMES コイルの実績としては 5-20 MJ の水準であることから、導入対象の規模に依存するが小容量のコイルを 10 個程度並列ユニット化するシステムモデルを提案した。

SMES システムの経済性に関しては、現行の超電導コイルの価格実績並びに国プロによるコスト低減予測を参考に、現行の¥10 M/kWh を 1/100 にするためには SMES システムが複数個設置できることで¥100 k/kWh が達成できるとの試算が行なわれている。更に、SMES システムの経済性を競合機と比較するためには、ライフサイクルコストで比較することの必要性を指摘されている。この観点から評価すれば、SMES の年間コストは NaS 電池や揚水発電よりも有利であるとの試算が行なわれている。

(c) 「リットリウム系超電導電力機器技術開発」における SMES 開発について

IEA 向け RASMES の報告書は、プロジェクトにおける SMES が掲げる技術的方向性（20 MJ→200 MJ→2 GJ）に合致するものであると同時に、将来の SMES 技術の適用対象を再生可能エネルギー源用電力貯蔵設備と明確化されている点で大きく評価し、SMES 技術の展開の 1 選択肢として考えられる。SMES はその電力貯蔵の原理から、大容量の電力貯蔵には必ずしも有利ではなく、短時間に大出力が可能な瞬時電圧低下補償、系統安定化用途や、数秒～分周期の充放電の繰り返し求められる負荷変動補償、周波数調整用途に適した電力機器として期待されている。RASMES の報告書は、SMES の開発初期に目指した揚水発電代替の時間オーダーの GWh 級電力貯蔵の可能性について、競合技術となる NaS 電池との比較結果が提示されており、性能面だけでなくコストでも十分競合すると結論付けられている。SMES 開発が直ちに GWh 級の大容量化に向かうとは考えにくいですが、少なくとも将来の再生可能エネルギー大量導入により必要となる需給調整機能を有した電力機器として、現在、国家プロジェクトで開発ターゲットとしている出力 100 MW/10 sec、使用可能貯蔵エネルギー 2 GJ(500 kWh)級 SMES の早期実現が期待されることは言うまでもない。

(d) 高圧ガス保安法等地域法令

SMES は、電気事業法における電気工作物の適用を受ける・受けないにかかわらず、その冷凍に関しては現行法において高圧ガス保安法の適用を受けるため、冷凍機に係わる規制緩和の取り組みを行った経緯がある。現在、冷凍機に関する規制

緩和申請を監督官庁に行い、その判断待ち状態である。

高圧ガス保安法も個別の機器容量によって単機容量規制かシステム総容量規制かを適用地域自治体ごとに精査することが肝要である。また、この方式を国際標準にどのように展開するか、あるいはさらなる法令緩和を必要とするかは、今後の諸外国の法令調査の結果によって判断することが肝要である。

## (2) SMES 関連規格骨子案の作成

2008年のIEC/TC90 ドイツ・ベルリン会議によると、超電導電力ケーブルを除く SMES 等超電導電力機器の国際標準化ニーズが急速に進展する可能性が低いと判断された。かかる状況に鑑みて、ここでは前項の調査結果等及び関連 IEC 規格を参考にして、SMES 規格骨子案を作成した。その結果を表 2.5.3-2 に示す。

表 2.5.3-2 「SMES の通則」の規格素案の目次

超電導磁気エネルギー貯蔵装置に対する一般要求事項 <b>General requirements for superconducting magnetic energy storage system</b>
目次
まえがき
序文
1. 適用範囲
2. 引用規定
3. 用語
4. 一般要求事項 4. 1 使用条件 4. 2 定格 4. 3 性能 4. 4 構成 4. 5 試験 4. 6 表示 (銘板に記載すべき事項)
5. 試験方法 5. 1 SMES システム試験方法 5. 2 SMES デバイス試験方法
6. 付帯事項 6. 1 環境側面 (企画、設計、製造、設置、廃棄、省エネルギー効果、CO <sub>2</sub> 排出量削減効果) 6. 2 安全側面 (冷媒、発生ガス)
附属書 A (参考) 代表的 SMES システムの入出力と貯蔵容量
附属書 B (参考) SMES の基本的要素の概念構成
附属書 C (参考) SMES システムの試験項目
附属書 D (規定) SMES デバイスの試験項目
附属書 E (参考) SMES の仕様事例
引用文献

本規格骨子案では、SMES システム通則と SMES の試験方法を融合し、SMES システム通則事項を一般要求事項に集約した。また SMES の試験方法を新試験方法とした。さらに付帯事項として、環境側面（企画、設計、製造、設置、廃棄）及び安全側面（冷媒、発生ガス）を記載することを検討している。

### (3) 超電導変圧器関連規格骨子案の検討

SMES と同様に超電導変圧器の国際標準化ニーズも急速に進展する可能性が低いと予想されていることから、ここでは前項の SMES 等の調査結果等及び関連規格（IEC60076-1（変圧器一般）、JEC2200（1995）（変圧器））を参考にして、超電導変圧器の規格骨子案を作成した。超電導変圧器の規格骨子案を表 2.5.3-3 に示す。

表 2.5.3-3 「超電導変圧器の通則」の規格素案の目次

超電導変圧器に対する一般要求事項及び試験方法 <b>General requirements for superconducting transformers and their test methods</b>
目次
まえがき
序文
1. 適用範囲
2. 引用規定
3. 用語
4. 一般要求事項 4. 1 使用状態 4. 2 定格 4. 3 構造 4. 4 裕度 4. 5 試験 4. 6 表示（銘板に記載すべき事項）
5. 試験方法 5. 1 一般試験方法（IEC60076-1（変圧器一般）及び JEC2200(1995)（変圧器）の引用） 5. 2 超電導変圧器固有の試験方法
6. 付帯事項 6. 1 環境側面 （企画、設計、製造、設置、廃棄、省エネルギー効果、CO <sub>2</sub> 排出量削減効果） 6. 2 安全側面 （冷媒、発生ガス、騒音）
附属書 A（規定） 箇条 1 から箇条 6 までの追加規定事項
附属書 B（参考） 変圧器の照合並びに注文の際の指定事項
附属書 C（参考） 超電導変圧器の開発試験
附属書 D（参考） 単相 1MVA 高温超電導変圧器の製作仕様事例－Bi 系
附属書 E（参考） 単相 2 MVA 高温超電導モデル変圧器の製作仕様事例－Bi 系
附属書 F（参考） 66kV/6.9kV-2MVA(20MVA)高温超電導モデル変圧器の製作仕様事例－RE 系
引用文献

本規格骨子案では、超電導変圧器通則的事項を一般要求事項とし、超電導変圧器固有試験方法を現行変圧器試験方法と超電導変圧器試験方法とで構成した。照合並びに注文の際の指定事項及び開発試験を附属書（参考）に記載した。また試験方法は、一般的試験方法は現行規格の引用記述とし、超電導変圧器固有の試験方法を **normative**（規定）として詳述する方針とした。さらに、注意事項を付帯事項に集約し、環境側面（企画、設計、製造、設置、廃棄）及び安全側面（冷媒、発生ガス）を記載することを検討している。

#### (4) 限流器・回転器等超電導電力機器の技術調査

国内外で開発が進んでいる超電導限流器及び超電導回転機等を取り上げ、これら超電導電力機器の標準化を目的として技術調査を実施した。

##### (a) 超電導限流器

###### (a-1) 用語

###### ①超電導限流器 **superconducting fault current limiter**

限流器は、落雷等に伴う電力系統内の短絡事故時に発生する過大な事故電流を抑制する装置であり、超電導限流器は従来の非超電導タイプと比較して、次の 2 つの特長を有する。

- ・ 平常時の送電損失が非常に小さい。（従来タイプの 1/10 以下）
- ・ 事故時の限流動作が素早い。（事故電流によるクエンチ現象を利用して瞬時に動作）

###### ②限流機能付き超電導電力機器 **superconducting power equipment with functional current limiting**

前項①の超電導機器は単体で存在するものであるが、近年は超電導変圧器や超電導ケーブルに限流機能が付加されたタイプも研究開発されている。これは、超電導電力機器（変圧器、ケーブル）自体の機能を維持しながら、機器構成を大幅に変更することなく限流機能を有するものである。

###### (a-2) 分類

###### ①超電導限流器

- － SN 転移形（抵抗形、鉄心飽和形）
- － 整流器形（超電導コイル形）

###### (a-3) 技術の現状

###### ①SN 転移形

1980 年代後半、金属系超電導線（NbTi 線材）の製造に併せ、超電導限流器の開発が始まった。その後、酸化物超電導線材（Bi 系、Y 系線材）が製造され始めると、国内外で高温超電導限流器の研究が進められるようになって



た。

②整流器形

上述の SN 転移形における酸化物超電導線 (Bi 系超電導線材) の製造に併せ、国内外で高温超電導限流器の研究が進められるようになった。

③各国の開発状況

2010 年 1 月時点における各国の開発状況を表 2.5.3-4 及び表 2.5.3-5 に示す。超電導限流器は単体、変圧器組込型、ケーブル組込型の 3 つの形態で研究が進められていることが分かる。超電導限流器の開発については、実用化に向けた取組みが各国で実施されているが、全体的に見ればまだ研究途上にあり、その技術動向を今後も見守っていく必要がある。

中国のプロジェクトでは Bi 系超電導線材の限流器単体型で実運用中である。名古屋大学では、2 MVA の超電導限流変圧器を製作し、限流動作試験及び超電導復帰試験を実施中である。またイットリウム系超電導電力機器技術開発プロジェクトでは、4 巻線構造のモデル変圧器を使った試験で限流機能の現象確認を完了し、現在は試験データを詳細分析中であり、その結果を今後試作する数百 kVA 級モデル変圧器の設計に反映する予定である。なお、SuperPower からの情報によると、同社も参画している DOE のスマートグリッド関係の研究において、Waukesha Electric Systems が限流機能付超電導変圧器を開発中とのことであり、その動向が注目される。

表 2.5.3-4 国内外の超電導限流器開発状況

プロジェクト	国	容量(kVA)	電圧(kV)	電流(A)	型式	線材	系統連系	開発期間	その他
Y系電力機器	日本	20,000	66		抵抗型	Y系		2008-2012	変圧器組込型
応用基盤	日本		6.6	1,000	抵抗型	NiCrY(Gd)系	○	2005-2008	
名古屋大学	日本	2,000	22	52.5	抵抗型	YBCO/Cu Bi2223Ag		2009-	変圧器組込型
DOE AMSC	米国	2,000	115	2,000	抵抗型	Y系(AMSC)	○	2007-2013	
DOE SuperPower	米国		138		抵抗型	Y系	○	2009-	
DOE Zenergy Power	米国		13.8	800	鉄心飽和型	Y系	○	2008-2011	最終目標 56MVA, 138kV, 800A
CESI	伊	15,000	9.5	200	抵抗型	1G,2G	○	2008-2011	
CURL10	独	10,000	10	600	バルク型	Bi2212	○	1999-2007	
ECCOFLOW	EU		138級			Y系	○	2009-	Nexans他15社
DAPAS	韓国	8,300	22.9	630	SN/Siハイブリッド型	Y系(AMSC)	○	2001-2010	最終目標 154kV, 4,000A
KEPCO	韓国		22.9	630/3,000	SN/Siハイブリッド型	Y系(AMSC)	○	2009-2013	
InnoPower	中国	90,000	35	1,200	鉄心飽和型	Bi系	○	-2008	実運用中
InnoPower	中国		220	1,200	鉄心飽和型		○	2009-	

青字:進行中 黒字:終了 赤字:新規or計画中

表 2.5.3-5 国内外の限流機能組込型超電導ケーブル開発状況

プロジェクト	国	電圧 kV	電流 A	容量 MVA	長さ m	形態	線材	系統連 系	試験年	その他
LIPA2 (DOE)	米国 Long Island, NY	138	2400	574	600	単心×3	Y	○	未公表	1相中間接続部有 LIPA1の張替
Hydra (DHS)	米国 NY	13.8	4000	96	300	tri-axial	Y	○	2010	3m、25mテスト実施中
KEPCO	韓国	22.9	1260	50	500	三心	Y	○	2010	KEPCO/LS Cable Soul 近郊 Ichcon substation
			3780	150		三心	Y	○	2013	

青字:進行中 黒字:終了 赤字:新規or計画中

(b) 超電導回転機

(b-1) 用語

①超電導回転機 **superconducting rotating machine**

回転又は直進の動作が電磁誘導作用に基づく超電導装置。

②超電導単極発電機 **superconducting homopolar generator**

機械的回転力をスリップリングとブラシを介して直流電力に変換する超電導機械。直流発電機ともいう。

③超電導同期発電機 **superconducting synchronous generator**

機械的な回転速度が系統の周波数の正確に比例するような交流電気力に変換する超電導機械。交流発電機ともいう。

④超電導同期調相機 **superconducting synchronous condenser**

機械的負荷のない状態で系統の周波数と正確に比例するように回転する超電導機械。

⑤超電導フライホイール **superconducting flywheel**

超電導コイル又は超電導バルクを利用して回転子に機械的エネルギーとして蓄え、この機械的エネルギーを電気エネルギーに変換して放出する機械。

⑥超電導電動機 **superconducting motor**

電力を機械的動力に変換する超電導機械。

(b-2) 分類

[超電導回転機]

①発電機

—超電導単極発電機

—超電導同期発電機

—超電導同期調相機

②調相機

—超電導同期調相機、超電導同期電動機

—超電導フライホイール

③電動機

- アキシアルギャップ型超電導モータ
- 超電導同期モータ
- かご型回転子誘導超電導モータ

(b-3) 技術の現状

①発電機

初期の超電導発電機は、単極発電機（直流発電機）が主流であった。その後、運転特性、効率、制御性、高圧化に優れた同期発電機（交流発電機）に開発の主流が移行した。わが国における低温超電導同期発電機の開発の歴史は、図 2.5.3-2 に示すように 1970 年代の遡ることができる。また、1980 年代後半からスタートした Super-GM における 70 MVA の超電導同期発電機は、実系統連係試験まで実施した点で世界最高の技術水準にある。

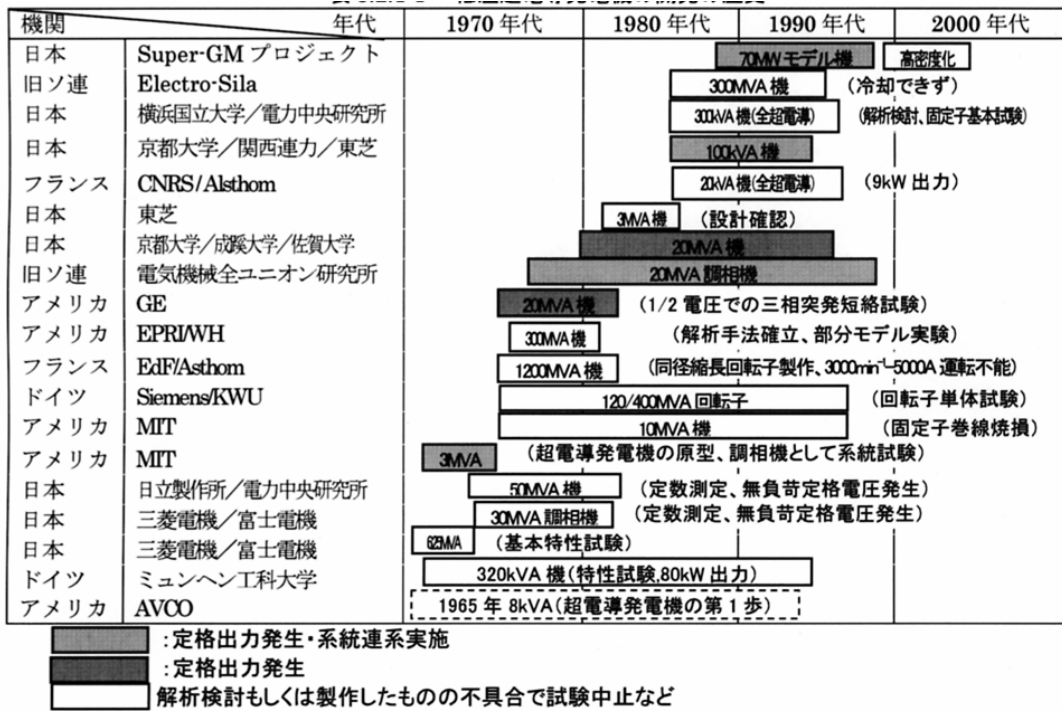


図 2.5.3-2 低温超電導発電機の開発の歴史<sup>(1)</sup>

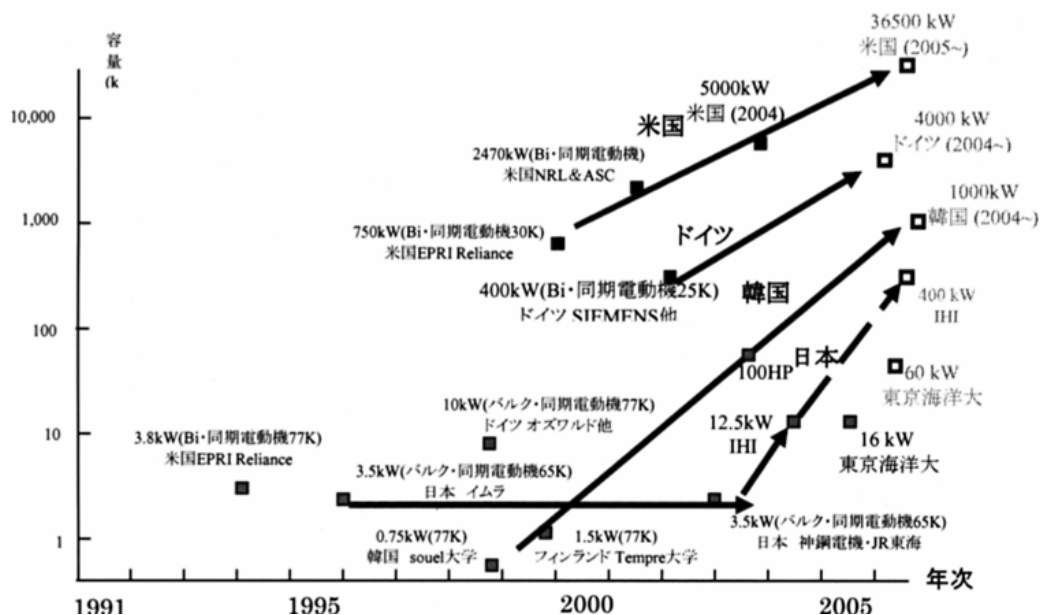


図 2.5.3-3 高温超電導回転機の開発状況<sup>(1)</sup>

一方、高温超電導体の技術開発に伴い、図 2.5.3-3 に示すように 1990 年代後半から世界的に高温超電導バルク材を適用した同期電動機の研究開発が活発化しているものの、高温超電導体が発電機に適用された事例は現在のところない。しかし、英国の Convertteam 社は、8 MW、12 rpm の超電導同期発電機を第 3 世代風力発電のナセルに搭載する計画を 2005 年に立案し、2010 年製造開始、2013 年運転開始を目標に掲げ技術開発を進めるとしている。

### ②調相機

超電導調相機の技術開発は、超電導発電機の開発とほぼ同時期に開始されている。まず、低温超電導線を適用した 30 MVA 級の超電導調相機が 1980 年代初頭に開発されている。その後、Bi 系超電導線材を適用した同期電動機が開発され、調相機としての動作確認がなされた。米国の AMSC 社では 4 MVR の超電導ダイナミック同期コンデンサ (SuperVAR) の商品化に続き、4 MVR の超電導ダイナミック同期コンデンサを開発している。

一方、フライホイール方式による瞬低補償など超電導調相機に超電導軸受を適用する技術開発が、我が国で精力的に実施された。平成 12 年度から平成 16 年度にラジアル型超電導バルク軸受を適用した 100 kWh 級を目指した 5 kWh 級のフライホイール実証試験が、また平成 17 年度～平成 19 年度に超電導コイルスラストを適用した 50 kWh 級を目指したフライホイールのパイロットシステム試験が実施された。

### ③電動機

高温超電導材料の技術開発の進展に合わせて、図 2.5.3-4 に示すように 1990 年代後半から超電導電動機の技術開発がなされている。まず超電導バルクを適用したバルク同期電動機が、2000 年代になって Bi 系超電導線材を適用した同期電動機の

技術開発がなされている。我が国では、2008年にBi系超電導線材を用いた400kW級のアキシタルギャップ型超電導モータが、2006年にY系超電導線材を適用した15kWの同期電動機が開発されている。

米国のAMSC社によるBi系超電導線材を適用した36.5MWの船舶用電動機、ドイツのジーメンス社のBi系超電導線材を適用した4MW同期電動機、韓国の1MW級の超電導同期電動機、また日本の川崎重工業の1MW級船舶用電動機がそれぞれ開発されている。

(b-4) 今後の見通し

超電導発電機に関して、Y系超電導線材を用いた同期発電機の技術動向を見守る必要がある。超電導調相機に関して、Y系超電導線材を用いた同期調相機及び超電導軸受けを適用したフライホイールの技術動向並びにこれらの実系統における実証実績を見守る必要がある。超電導電動機に関して、Y系超電導線材を用いた同期電動機の技術動向を見守る必要がある。

参考文献リスト

- (1) NEDO 委託「超電導技術を利用した風力用発電機の実用化可能性調査」平成18年度成果報告書、平成19年3月、(財)国際超電導産業技術研究センター
- (2) NEDO 委託「超電導フライホイールシステムの開発」平成17年度～平成19年度成果報告書、平成20年5月、東海旅客鉄道株式会社

#### 2.5.4 超電導電力機器技術の動向調査

超電導線の試験方法及び超電導電力機器に係わる技術動向及び標準化ニーズ等を国際会議に参加して調査した。

##### (1) ASC2008 (米国イリノイ州シカゴ市)

8月17日より22日まで2008 Applied Superconductivity Conference (ASC2008)が米国シカゴ市の Hyatt Regency Chicago において開催された。本会議における発表は Electronics, Large Scale, Materials の3部門に分類されており、ここでは超電導線と超電導電力機器について重要と思われるものについて報告する。

##### (a) 超電導線の技術動向

##### (a-1) Y系超電導線材の開発状況に関するもの

3MAセッションではY系超電導線材、特にその長尺化がテーマであった。まず3MA01ではSuperPower社のSelvamanickamが自社の研究開発の進展について報告した。内容はY系超電導線材をはじめて実際の送電網に組み込んで運転した事、Zr添加によって人工ピンを導入して磁場中特性を向上させた事、ソレノイドコイルを巻いてこれまでで最高の磁場を発生させた事、km級の長尺線の作製が可能になった事などを含む盛りだくさんな物だった。続いて3MA02ではAMAC社のLiが同様に最近の成果を紹介した。それらは従来の4cmに加えて、10cm幅の線材が製作可能になった事、4cmの場合には100A,200m級の線材が製作可能になった事、新たに真鍮を安定化層とする構造を開発した事、などである。3MA03と3MA04ではSRLの山田とフジクラの羽生によって日本における最近の成果が報告された。3MA05ではEuropean High Temperature Superconductors (EHTS)のUsoskinがヨーロッパの現状を報告した。EHTSにおける手法はSRLやフジクラとおなじPLD法である。ヨーロッパの長尺線材作製技術は日米には遅れをとっているが、それでも40m長で300A/cm-wが実現しているという事であった。3MA06ではTrithorのBaeckerがall-chemical solution法について紹介した。但しこれは将来の技術開発に待つところが大きい手法である。3MA07ではヒューストン大のFreyhardtがNIST等を含む共同研究を代表してY系超電導線材の電氣的及び剥離の問題を含む機械的特性について報告した。最後の3MA08ではIndustrial Research社のBadcockがRoebel型ケーブル開発について報告した。これは交流ロスの低減を第一に重視し、他の不都合には甘んじるという方式と言えるが、臨界電流値400A程度のケーブルの試作に成功しているようである。また欠陥の検出に28個のホールセンサーからなるアレーを用いる方法とホールセンサーを連続的にスキャンする方法を用いているが、これらは他の形状の線材の評価にも使える方法である。

(a-2) 超電導線の試験方法に関するもの

1LPJ01 で GE の Lvovsky は I-V 測定から  $n$  値を求める場合、臨界電流値以下のわずかな発熱の効果で  $n$  値が過大評価される現象について注意を喚起していた。1LPJ03 では Oak Ridge 国立研の Rey が Y 系超電導線材の接続部の電気抵抗について発表していた。接続部の電気抵抗の温度依存性は弱い、磁場依存性は強いという事であった。1LPJ10 では Lawrence Berkeley 国立研のグループで超電導マグネットがクエンチを起こしたとき、その起点がどこであったかを突き止めるための測定システムを提案していた。

3MPC は Y 系超電導線材 の機械特性がテーマであった。3MPC01 はフロリダの強磁場国立研究所の発表で、線材の特性のばらつきを統計的手法で解析しようという試みである。今後大量の線材が製作されるようになるので生産管理の点で統計的手法は必要になると思われる。ただし、この発表で採用されていた方法が適切かどうかは検討を要すると思われる。

3MPD04 はスイスからの発表で超電導体内の電流分布を数値計算で求める場合に空間次元の内一つを時間と見なし、時間発展方程式を解く形にする事によって計算スピードが向上するという報告であった。5MC02 でロスアラモス研の Coulter は永久磁石を使った長尺線材の評価法を紹介した。これは以前から同研究所で行っている方法であるが永久磁石が増強されていた。また臨界電流値の分布だけでなく  $n$  値の分布も合わせて測っていたが、この二つの分布に相関があるという結果であった。5MC03 はオースオリアの magnetoscan の発表であった。この方法も以前から行われているが、今回特に大きな進歩は見られなかった。5MC04 は Cambridge の Durrell の発表でプログラムとタイトルが違っていたが、RABiTS 基板上の PLD および MOD 線材における粒界の影響を調べる内容であった。5LB08(5MC07 から変更) は Air Force Research Laboratory の Levin の発表で線材安定化層超電導層との間の界面抵抗が安定性に与える影響がテーマであった。結論は数値計算の結果、現状の界面抵抗の値で十分であるという事であった。

5MZ のテーマは高温超電導体の機械特性であった。5MZ01 は 3MPC01 と同じ研究者による発表で同じ方針による解析である。5MZ02 はヒューストン大の発表で薄膜線材のひねり変形に関するものであった。変形のモードとして理想的なものを仮定しているが実際にはもっと複雑な変形がおこるので、単純な解析は無効ではないかと思われる。座長の Ekin が盛んに “very complex experiment” と複雑な状況であることを指摘していたが、暗にその事を言っているようにも思えた。5MZ03 は NIST の発表で線材に歪みを与えた時の臨界電流値の可逆的变化に関するものであった。同グループがかねてから詳しく調べているテーマであるが、単結晶基板上の薄膜のデータ等が新しかった。機構として臨界温度の歪み依存性を考えているようだが、それが正しいかどうか現在の所不明である。5MZ04 は京大の Sugano の発表で、同じく臨界電流値の歪み依存性の実験であるが同グループでは

測定を磁場中で行っているのが特徴である。磁場領域によって定性的な振る舞いが違ってくるということであった。5MZ03 は Karlsruhe のグループの発表で Roebel 型ケーブルを念頭に置いた研究であるが特にひねり変形に注目していた。これについても 5MZ02 の時と同じようなニュアンスの Ekin のコメントがあった。5MZ06 は SuperPower 社の発表で、より実用サイドからのアプローチで、細線化線材、Roebel 型ケーブル、接合部などの特性を調べたものである。細線化については 4 mm 幅テープを 5 分割している。15 m 長の細線化に成功しているが、細線化の方法については明確にしていなかった。

#### (a-3) 超電導線の応用に関するもの

8月19日の Plenary Lecture の講演者はフロリダ州立大の Luongo で内容は高温超電導体を航空機応用するというものであった。これは電気飛行機と言うべきもので、ガスタービンによって発電した電力でモータをまわし推力とするものである。モータは当然軽量かつ高効率でなければならず、超電導モータが使われる。電氣化する事により設計の自由度が生まれるために、航空機燃料の効率的消費が実現し、騒音も減少するという事であった。現在は様々な要素技術の原理検証の段階で、2030年頃の実用化を目指しているという事であった。今はまだ夢のような話としか思えないが、ライト兄弟から100年で航空機の技術が今の様な状態までは発展した事を考えると、数十年後の事は予測が難しいであろう。

ポスターセッション 2LPP は電流リードのセッションであった。2LPP02 ではドイツのグループがトカマク用の酸化物高温超電導体の電流リードについて発表していた。4.5 K の領域と 77 K の領域をつなぐ電流リードで 25.7 kA の容量を持つものである。2LPP05 では産総研のグループが液体窒素温度での超電導機器の運転を想定し、室温から液体窒素温度をつなぐ電流リードの平均的な Lorenz number を各種材料について液体窒素の蒸発量から換算する方法で評価していた。2LPP08 では韓国のグループが semi-retractable な電流リードについて発表していた。これは液体ヘリウム中で運転する超電導マグネットのためのもので、液体ヘリウム温度から中間温度までを高温超電導体でつなぎ、そこから室温までを正常金属でつなぎものである。超電導マグネットを励磁した後永久電流モードに移し、正常金属の電流リードのみを取り外して熱流入を防ぐというアイデアである。2EPL04 では神戸大、岩谷、NIMS、のグループが細い MgB<sub>2</sub> 線を液体水素の液面計に応用する研究を発表していた。2MPM02 では韓国のグループが YBCO 線材を接合する際に接合抵抗を減少させるために安定化層をケミカルエッチングで除去する方法を提案していた。2MPM02 ではスロバキアのグループがテープ線材の幅方向の電流分布を評価する方法を提案していた。これはホールセンサーによって線材表面の垂直方向の磁場分布を測定し、そのデータからある仮定に基づいて電流分布を算出するものである。幅方向の臨界電流密度分布の評価は YBCO 線材の細線化にあたっては重要な情報になるので今回の学会でもいくつかの評価法が提



案されている。この発表もその一つである。ただ方法は既知のものであり、特に新しいアイデアは含まれていないように見受けられた。

8月20日のPlenary Lectureの講演者はMITのAntayaで小型サイクロトロン応用についてであった。他の条件が同じであればサイクロトロンのサイズは磁場に反比例する。従って、必要なサイクロトロンの体積は磁場の3乗に反比例する事になる。超電導マグネットによる強磁場を利用できればサイクロトロンは巨大な装置ではなくポータブルな物になる。小型サイクロトロン応用としては放射線治療などがあるが、その他意外な応用としては、核物質の発見がある。米国ではテロリストによる核物質を使った攻撃に非常に敏感になっているが、高濃縮ウランの放射能はあまり強くないので比較的簡単にシールドされてしまい、受動的な検出法ではなかなか発見できないそうである。そこでサイクロトロンから疑わしい物質にむかってしかるべき放射線を照射し、それによって引き起こされる核反応を検出しようというのである。小型サイクロトロンを航空機に積んで、接近しつつある船舶または航空機に特殊核物質が積載されていないかを調べようという計画があるらしい。

8月21日の3日目のPlenary Lectureの講演者はGEのBrayで超電導体が実用化されるために最も必要なのは何かテーマだった。それは基礎的な研究者が考える臨界温度や臨界電流値というよりも、むしろコストや信頼性であるという、いわれてみればもっともな話であった。ただし各種要請の優先順位が民生用と軍事用ではかなり違っているという点も興味深かった。軍事用という発想は日本の普通の研究者にはすぐには浮かばないであろう。

8月22日の最終日のPlenary Lectureの講演者はITERのWuで、中国における超電導応用の現状がテーマであった。主な内容は中国における超電導トカマクの開発、ITER計画における中国の分担内容および中国におけるY系超電導線材の開発であった。

## (b) 超電導電力機器の技術動向及び標準化ニーズ

### (b-1) 超電導電力ケーブルに関するもの

ロングアイランドに設置された高温超電導ケーブルの実証試験(米国、American Superconductor)について報告があった。ケーブルは138 kVで574 MVA供給でき、長さ600 mを設置。プロジェクト概要、ケーブルと終端接続部、冷却装置、試験サイト、試験結果などの報告がなされた。2007年にケーブル、終端接続部及び冷却装置を設置し、2008年にケーブルを系統連系している。ケーブル終端接続部は、Nexans製。現場でのケーブル試験は、交流高圧試験、部分放電測定などが実施されている。今後は、2008年4月から最低1年間運転して限流波形、冷凍装置の運転状況、ケーブルの熱と電氣的運転状況を観測する予定である。また、LIPA2期プロジェクトとして、同地区で600 mの2G(Y系)ケーブルの実証試験をする

予定。

アルバニーケーブルプロジェクトのフェーズ I、II の試験結果（米国、SuperPower）について報告があった。ケーブルは 34.5 kV、48 MVA 供給でき、長さ 350 m をフェーズ I では BSCCO ケーブルで設置し、フェーズ II ではそのうち 30 mm を YBCO ケーブルに張替えて試験を行った。ケーブル仕様、冷却装置の概要説明の後、2008 年の成果として、YBCO/BSCCO ケーブルの設置、冷却について、見通しが得られたこと等が報告された。30 m YBCO ケーブルでは、AC ロスは、0.34 W/m/phase at 0.8 kArms, 60Hz とのことであった。耐電圧試験は、AEIC に基づき 10 分間の交流 69 kV、5 分間の直流 100 kV で実施した。フェーズ I、II の試験を通して、すべての目標を達成し、12 ヶ月以上もケーブルは稼働し続け、設備/システムともに商業上の要求を満足しているとのことであった。

日本の応用基盤プロジェクトの成果として、京都大学の雨宮先生から応用基盤技術開発のケーブル要素技術開発の成果について報告があった。低交流損失化技術は、40 cm 導体での原理検証、次に 1 m 導体で 0.05 W/m@1 kA 以下を達成。低コスト線材導体化技術では、線材単体で 0.2 W/m@1kA 以下の低交流損失を達成。過電流技術では、20 m 導体で 31.8 kA、2.02 S を達成。ケーブル接続技術については、中間部の接続抵抗 0.6  $\mu\Omega$  を達成し、これらすべて NEDO の開発目標をクリアし、20 m ケーブルの試験によって検証されたことが報告された。

DAPAS 計画(韓国、韓国電気工学研究所)は、ケーブル、変圧器、限流器、モータなどの技術を開発するプロジェクトで、2001 年から取組みがなされている。高温超電導開発品の研究と商業化を第 1 のターゲットとして取組み、2001 年から 3 ヶ年を第 1 フェーズとしコアテクノロジー期間、2004 年から 3 ヶ年(第 2 フェーズ)を商業化前の予備期間、2007 年から 4 ヶ年(第 3 フェーズ)を商業化期間として、取組みが行われている。ケーブルプロジェクトは、22.9 kV ケーブル開発、22.9 kV 100 m システム開発の後、今フェーズでは 3 相の 1 GVA、154 kV のものを開発目標に掲げて取組んでいる。2006 年の 100 m ケーブル試験では、普通のケーブルと変わらない操作性を検証し、負荷サイクル試験、誘電損失の結果等試験は成功を収めたとのことであった。また、3 相 100 m (154 kV、1 GVA) の設備を KEPCO 試験センターに設置し、第 3 フェーズを始めたことが報告され、これにより韓国の原子力発電所 20 基分が 1 GVA 超電導ケーブル 1 つでカバーでき、韓国全体の最大電力容量 60 GW を賄えるとのことであった。

東京電力で実施している高温超電導ケーブルに実証プロジェクトが、住友電工によって報告された。66 kV 300 MVA 級高温超電導ケーブルで、3 心一括の構造のものを東京電力の朝日変電所に設置して検証を実施している。プロジェクトは 2007 年より、5 ヶ年で計画され、ケーブル形状、雷サージに対する影響評価、交流損失測定結果、短絡電流通電試験結果等が報告され、系統に運用可能な見通しが得られたとの報告がなされた。今後、2008 年 30 m 級ケーブルの事前検証とデモ

装置のケーブルを 2009 年に作成予定である。

100 m 高温超電導ケーブルシステムの試験結果（韓国、韓国電気工学研究所）について報告があった。KEPCO の系統に設置した 22.9 kV 超電導ケーブルシステムを、3 年にわたり冷却や常温化を 7 回実施し、ケーブルの影響評価、DC 臨界電流試験、熱損失、交流損失などを計測した結果が報告されていた。DC 臨界電流試験の結果、悪影響がなかったこと。冷却システム検証による技術の確立、高温超電導ケーブルシステムの系統導入技術の確立などが報告されていた。2009 年に 500 m ケーブルプロジェクトがスタートする予定。

YBCO 超電導ケーブルの低交流損失と接続部の低電気抵抗に関する開発について、古河電工から報告があった。古河製と住友製の高温超電導ケーブルを接続し、交流損失、耐過電流特性、ケーブル接続損失などを 20 m のケーブルで検証。交流損失は、10 m で 0.1 W/m 以下。耐過電流に対しては、31.5 kA・2 秒に耐え、低交流損失、低電気抵抗の検証が図れたと報告されていた。

20 m 長 YBCO 超電導ケーブルの過電流特性の報告が早稲田大学からあった。オールで発表のあったケーブル要素技術開発における過電流試験の試験結果が、詳細に報告されていた。

#### (b-2) SMES に関するもの

ポーランド SMES の設計と試験結果についてポーランドの超電導技術研究所から報告があった。Bi2223 を使用した 7 つのダブルパンケーキ型のコイル形状で構成されており、寸法は、直径 210 mm の外形で、高さ 191 mm。50 K で 10 kJ の貯蔵容量である。高温超電導マグネットと冷却システムは、試験も順調に進み、今後 3 年間で操作性の試験をする予定である。

2.5 MJ SMES 開発に向けた高温超電導マグネットの設計について韓国の韓国電気技術・科学調査研究所から報告があった。韓国国家プロジェクトの 600 kJ 級の SMES の成果を基に、2.5 MJ の SMES を開発。コイル形状を検討しソレノイドとトロイド配置で検証。今回の結果を受け。トロイドタイプを調整した 2.5 MJ 級の SMES の設計を行う予定との報告がなされた。(形状は日本の SMES プロジェクトで検討したものに非常に似ていた)

#### (b-3) 超電導変圧器に関するもの

超電導変圧器の設計手法についてドイツのカールスルーエ物理学技術研究所から報告があった。超電導変圧器の最適設計手法の報告。巻き線電圧に対し、変圧器の体積、重さとコストの関係を計算し、変圧器の最適形状と最適化により、超電導変圧器の開発に役立つ見通しが得られると報告されていた。

154 kV 超電導変圧器と負荷タップ切換器の絶縁設計について韓国の Gyeongsang 国立大学から報告があった。超電導変圧器の商業化のための技術には、AC ロスの低減、高温超電導特性の改善、冷却システム、絶縁技術及び負荷タップ

切換の技術が必要であり、今回、154 kV 級変圧器と負荷タップ切換の絶縁設計及びブッシングの絶縁設計について報告がされた。

#### (b-4) 限流器等に関するもの

限流器の電流制限開始についての制御技術概念の報告が電力中央研究所からあった。限流器の動作を温度コントロールし、制限時の臨界電流と始動電流の温度依存性を測定した。結果、液体窒素の温度を調整することにより、限流器の臨界電流を制御可能なことを証明したことが報告されていた。

直列接続の YBCO 導体のクエンチ特性について韓国の Yonsei 大学から報告があった。直列接続の導体について、クエンチ特性を解明する取組みで、導体化マグネット応用を高電圧送電線で適用するために検証されたものである。検証の結果、導体に分路抵抗を平行に取付けることにより、クエンチの安定性が増す結果が報告されていた。今後、分路抵抗器を使用して、クエンチ効果を良くした超電導限流器の仕様について、調査が進められる予定である。

限流モジュールを統合したモジュール型超電導限流器の限流特性について韓国の朝鮮大学から報告があった。YBCO 導体を使った超電導リアクトルで、単体を組合せて特性を解析。単体と接続時のリアクトルで作られた磁場分布の結果では、接続時リアクトルでの磁場が単体リアクトルに比べ大きいことが確認された。また、接続時リアクトルでは、外部磁場は中心より 40 mm はなれた時点でもっとも大きくなることなどが報告されていた。

## (2) EUCAS2009 (独、ドレスデン)

2009 年 9 月 13 日から 9 月 17 日に開催された第 9 回欧州応用超電導会議 (EUCAS2009)にて報告のあった超電導線材と超電導電力機器について報告する。

第 9 回 EUCAS において発表された超電導電力機器のプロジェクトについて表 2.5.4-1 にまとめる。電力ケーブルについては、日本、アメリカでの開発が進むとともに、オランダ、スペインやロシアなどヨーロッパでの開発が再び始められた。限流器については、ヨーロッパと中国で Grid 接続へ進んでいる。モータ、発電機については、実規模のデモ機が完成間近である。

表 2.5.4-1 超電導電力機器技術動向調査結果

対象	プロジェクト	開発者	進捗状況
ケーブル	Ohio Bixby	Southwire, AEP (Dept. of Energy)	13.2 kV-3000 A-200 m 2006.8.6 スイッチオン後、継続してGridに接続中
ケーブル	Entergy New Orleans	Southwire (Dept. of Energy)	13.8 kV-60 MVA-1700 m 230kV ケーブルに代わる solution として計画中
ケーブル	NY Hydra	AMSC, Southwire, ConEdison, (Dept. of Homeland Security)	13.8 kV-4000 A-200 m 短絡電流を25 %減少させ、変圧器の共有を可能とする目的で計画中。25 m サンプルで原理検証
ケーブル	横浜	SEI, 東電, マエカワ	66 kV-200 MVA-~300 m 30 m 検証用ケーブル評価試験中
ケーブル	M-PACC	SEI, 古河, ISTE C	66 kV-5000 A-15 m, 275 kV-3000 A-30 m 開発中
ケーブル	中部大学	中部大学	20 kV(DC)-2000 A-200 m 布設完了
ケーブル	Amsterdam	NKT, Ultera, Alliander	50 kV-250 MVA-6,000 m 原理検証(2009-2011)、順調に行けば2013-2014 に 布設
ケーブル	BNI IKP	BNI IKP	20kV-2000 A-200 m 2009.10 月、評価開始
ケーブル	ENDESA	Nexans	25 kV-3200 A-30 m 進行中
ケーブル	POSE <sup>2</sup> IDON	Nexans	600 V-10 kV(DC) 船舶用DC ケーブル
ケーブル	中国	不明	北京の 110 kV 級ケーブルなど2 件立案中
限流器	Vattenfall	Nexans	12 kV-800 A-4100 A(50ms) 2009.10 月にGrid 接続予定
限流器	UK/ASL	Nexans	12 kV-100 A-460 A(10s) 2009.10 月にGrid 接続予定
限流器	Puji	Innopower	35 kV-1500 A 2008.1 月から運転中
限流器		Siemens	138 kV-1200 A 2012 に3 相分完成予定
限流器		産総研	500 V-200 A 10 cm × 30 cm の大面積基板
変圧器		名古屋大	2 MVA-22 kV/6.6 kV 評価中
モータ		川崎重工	1 MW(30 K), トルク : 150 kNm 開発中
モータ		Siemens	4 MW@120rpm, トルク : 320kNm Rotor 試験中
発電機	EU Framework 6	Convertteam	1.7 MW-5.25 kV-28 pole@214 rpm Hirschaid の水力発電所に導入予定

### (3) IEC/TC90-VAMAS/SWTA16 合同会議（日本、つくば）

2009年11月5日に開催されたIEC/TC90-VAMAS/SWTA16合同会議にてヨーロッパを主にした超電導電力機器関連プロジェクト関連の技術動向調査を行なった。以下にSMES、超電導電力ケーブル、限流器及び回転機について表2.5.4-2、表2.5.4-3、表2.5.4-4及び表2.5.4-5にそれぞれまとめて示す。

表 2.5.4-2 SMES 関連プロジェクト

中心企業	国	時期	データ	適用材料	応用
FZ Karlsruhe	Germany	1997	320 kVA, 203 kJ	NbTi	Flicker compensation
AMSC	USA		2 MW, 2.6 MJ	NbTi	Grid stabilization
FZ Karlsruhe	Germany	2004	25 MW, 237 kJ	NbTi	Power Modulator
Chubu	Japan	2004	1 MVA, 1 MJ	Bi 2212	Voltage quality
Chubu	Japan	2005	10 MVA, 21 MJ	NbTi	Voltage quality
KERI	Korea	2005	750 kVA, 3 MJ	NbTi	Grid quality
Chubu	Japan	2007	1 MVA, 19 MJ	NbTi	Load compensation
CAS	China	2007	0.5 MVA, 1 MJ	Bi 2223	-
CNRS	France	2008	800 kJ	Bi 2212	Military application
KERI	Korea	2009	1 MJ	Bi 2223	-
Chubu	Japan	2012	2 MJ (20K)	YBCO	Grid stabilization

表 2.5.4-3 交流超電導ケーブル関連プロジェクト

企業名	設置場所, 国, 時期	絶縁	データ	適用材料
Furukawa	Yokosuka, JP, 2004	CD	77 kV, 1 kA, 500 m, 1-ph.	Bi 2223
Innopower	Yunnan, CN, 2004	WD	35 kV, 2 kA, 33 m, 3-ph.	Bi 2223
Sumitomo	Albany, US, 2006	CD	34.5 kV, 800 A, 350 m, 3-ph.	Bi 2223
Ultera	Columbus, US, 2006	Triax	13.2 kV, 3 kA, 200 m, 3-ph.	Bi 2223
Sumitomo	Gochang, KR, 2006	CD	22.9 kV, 1.25 kA, 100 m, 3-ph.	Bi 2223
LS Cable	Gochang, KR, 2007	CD	22.9 kV, 1.26 kA, 100 m, 3-ph.	Bi 2223
Sumitomo	Albany, US, 2007	CD	34.5 kV, 800 A, 30 m, 3-ph.	YBCO
Nexans	Hannover, D, 2007	CD	138 kV, 1.8 kA, 30 m, 1-ph.	YBCO
Nexans	Long Island, US, 2008	CD	138 kV, 1.8 kA, 600 m, 3-ph.	Bi 2223
Nexans	Spain, 2008	CD	10 kV 1 kA, 30 m, 1-ph	YBCO
Ultera	New York, US, 2010	Triax	13.8 kV, 4 kA, 240 m, 3-ph.	YBCO
Ultera	New Orleans, US, 2011	Triax	13.8 kV, 2.5 kA, 1700 m, 3-ph.	to be defined
Ultera	Amsterdam, NL, -	Triax	50 kV, 2.9 kA, 6000 m, 3-ph.	YBCO
Nexans	Long Island, US, -	CD	138 kV, 2.4 kA, 600 m, 1-ph.	YBCO
LS Cable	Gochang, KR, 2011	CD	154 kV, 1 GVA, 100 m, 3-ph.	YBCO
LS Cable	Seoul, KR	CD	22.9 kV, 50 MVA, 500 m, 3-ph.	YBCO
Sumitomo	Yokohama, JP, 2013	CD	66 kV, 200 MVA, 200 m, 3-ph.	Bi 2223
Sumitomo	TEPCO, JP	CD	66 kV, 5 kA	to be defined
Furukawa	TEPCO, JP	CD	275 kV, 3 kA	Bi 2223
Sumitomo	Chubu U., JP, 2010	CD	10 kV, 3 kA DC, 20 m, 200 m	Bi 2223
VNIKP	Moscow, RU	CD	20 kV, 200 m	Bi 2223
Nexans	Spain	CD	10 kV, 3,2 kA, 30 m, 1 ph.	Bi 2223

表2.5.4-4 限流器関連プロジェクト

中心企業	国/試験時期	タイプ	データ/対地電圧	相数	適用材料
ACCEL/NexansSC	Germany / '04	Resistive	12 kV, 600 A	3-ph.	Bi 2212 bulk
CAS	China / '05	Diode bridge	10.5 kV, 1.5 kA	3-ph.	Bi 2223 tape
CESI RICERCA	Italy / '05	Resistive	3.2 kV, 220 A	3-ph.	Bi 2223 tape
CESI RICERCA	Italy / '05	Resistive	0.6 kV, 270 A	1-ph.	MgB2 wire
Siemens / AMSC	D / USA / '07	Resistive	7.5 kV, 300 A	1-ph.	YBCO tape
LSIS	Korea / '07	Hybrid	24 kV, 630A	3-ph.	YBCO tape
Hyundai / AMSC	Korea / '07	Resistive	13.2 kV, 630 A	1-ph.	YBCO tape
KEPRI	Korea / '07	Res.-hybrid	22.9 kV, 630 A	3-ph.	Bi 2212 bulk
Innopower	China / 2008	DC biased iron core	35 kV, 90 MVA	3-ph.	Bi 2223 tape
Toshiba	J / 2008	Resistive	6.6 kV, 72 A	3-ph.	YBCO tape
Nexans SC	D / 2009	Resistive	12 kV, 100 A	3-ph.	Bi 2212 bulk
Zenergy Power	USA / 2009	DC biased iron core	12 kV, 1.2 kA	3-ph.	Bi 2223 tape
Zenergy Power	USA / 2009	DC biased iron core	15 kV, 1.2 kA	3-ph.	Bi 2223 tape
Nexans SC	D / 2009	Resistive	12 kV, 800 A	3-ph.	Bi 2212 bulk
Nexans SC	D / 2011	Resistive	12 kV, 800 A	3-ph.	YBCO tape
Innopower	China / 2010	DC biased iron core	220 kV, 300 MVA	3-ph.	Bi 2223 tape
ERSE	I / 2010	Resistive	9 kV, 250 A	3-ph.	Bi 2223 tape
ERSE	I / 2010	Resistive	9 kV, 1 kA	3-ph.	YBCO tape
KEPRI	Korea / 2010	Resistive	22.9 kV, 3 kA	3-ph.	YBCO tape
AMSC / Siemens	USA / D / 2012	Resistive	115 kV, 1.2 kA	3-ph.	YBCO tape
Rolls Royce	UK / -	Resistive	11.5 kV, 400 A	3-ph.	MgB2 wire



表 2.5.4-5 高温超電導回転機関連プロジェクト

企業／国	回転機の容量	時期
AMSC (US)	5 MW demo-motor	2004
	8 MVA, 12 MVA synchronous condenser	2005/2006 (Field test)
	40 MVA generator design study	2006
	36 MW ship propulsion motor	2008
	8 MW wind generator design study	2010
GE (US)	100 MVA utility generator	2006 (discontinued)
	5 MVA homopolar induction motor	2008
LEI (US)	5 MVA high speed generator	2006
Reliance Electric (US)	10.5 MVA generator design study	2008
IHI Marine, SEI (JP)	365 kW ship propulsion motor	2007
	2.5MW ship propulsion motor	2010
Doosan, KERI (Korea)	1 MVA demo-generator	2007
	5 MW motor (homopolar)	2010
Siemens (Germany)	400 kW demo-motor	2001
	4 MVA industrial generator	2005 (Field test)
	4 MW ship propulsion motor	2010
Converteam (UK)	200 kW demonstrator	2006
	1.25 MVA hydro-generator	2010
	500 kW demo-generator	2008
	8 MW wind generator design study	2010

## 2.5.5 パネル討論会の結果

超電導電力機器関連国際標準化の国際合意醸成の一環として、第6回パネル討論会（ISS2008 と併催）並びに第7回パネル討論会（IEUCAS2009 と併催）を開催した。

### (1) 第6回パネル討論会（ISS2008 と併催）

2008年10月27日につくば国際会議場にてISS2008との併催の形で第6回パネル討論会を開催した。本討論会の目的は、超電導関連技術の国際標準化の理解深化と必要性の討論である。今回の討論会では、参加者は49名、参加国は6カ国であった。

#### (a) 報告内容

松下委員長から超電導関連の国際標準化への理解深化のために、“Standardization in IEC/TC90 for Superconductivity”と題した報告がなされた。長村光造氏（応用科学研究所）から超電導関連パネル討論会実施状況とIEC/TC90における標準化活動レビューがなされた。Dr. David Larbalestier氏（Florida State University, USA）からは“HTS wire development and measurement methods in ASC”に関する話題提供がなされた。また、中尾公一氏（SRL/ISTEC）から“Measurement methods of Y-system coated conductors”に関する報告がなされた。大崎博之氏（東京大学）から“HTS power cable technology and measurement methods”に関する話題提供がなされた。佐藤謙一氏（住友電工）からは“How to international-standardize SC power cable”に関する報告がなされた。最後に Dr. Paul N. Barnes氏（Air Force Laboratory, USA）から“SC machines related measurement methods”に関する話題提供がなされた。

#### (b) 標準化に関する討論

上記の報告及び話題に対して次の討論がなされた。

##### (b-1) 超電導線の国際標準化

国際規格化に際し、目下開発中の線材もあり、標準化対象を明確にする必要がある。開発中の線材を対象にした微視的試験方法、特性の均一性試験方法などは、均一性を前提とする実用超電導線材に対して工業的試験方法としてどの程度簡略化できるかの見極めが必要である。長尺の実用超電導線材における臨界電流  $I_c$  及び工学的臨界電流密度（オーバオール  $J_c$ ） $J_c$  は、IEC60050-815のメンテナンス時に定義の見直しが必要である。実用超電導線材における特性保証は、低温超電導線材で実施されているプロセス保証が究極の姿である。

##### (b-2) 超電導電力ケーブル

国際大電力システム会議 CIGRE と IEC とはリエゾン関係にないため、国際標

準化には周到的配慮が必要である。超電導電力システムには超電導線材、超電導ケーブル、中継接続、冷凍システム、終端接続など多くの構成要素について、システム設計側との密接な連携と話し合いの基でニーズを包括した規格化が肝要である。冷凍システムは不可欠であることから、信頼性試験及び保安項目の記述に配慮が必要である。

#### (b-3) その他の超電導機器

超電導機器には多くに個別パラメータがあるが、超電導機器に共通するパラメータと機器固有のパラメータの峻別が必要である。工学的臨界電流密度（オーバオール  $J_c$ ） $J_c$  や絶縁に関して、超電導線レベルと機器レベルで異なった定義になることを明確にする必要がある。高温超電導線材を適用する機器においては、クエンチの検出方法と試験方法との整合性が必要である。

#### (b-4) 超電導電力機器関連の国際規格化

超電導電力機器の導入の動機はライフサイクルコストに大きく依存するため、個々の機器における規格化にはなんらかの配慮が肝要である。超電導電力機器の国際規格化には、研究者、機器技術者及びユーザの密接な協力関係が必要である。超電導電力機器関連の国際規格化のタイミングから判断し、超電導線材及び超電導電力ケーブルの国際標準化の着手判断は妥当である。

### (2) 第7回パネル討論会（EUCAS2009 と併催）

2009年9月15日にドイツのドレスデン工科大学にて EUCAS2009 との併催の形で第7回パネル討論会を開催した。本討論会の目的は、過去の6回のパネル討論会の成果のレビュー、超電導電力ケーブルの現在の R&D 活動のレビュー（CIGRE の活動含む）と標準化の早期実現への準備の議論、及び超電導線の現在の R&D 活動のレビューと標準化の早期実現への準備の議論である。今回の討論会では、参加者は18名、参加国は8カ国であった。

#### (a) 報告内容

まず松下委員長から過去の6回のパネル討論会の成果が紹介され、その中で電流リードに続いて応用化が最も進んでいる超電導ケーブルと、あらゆる応用機器に用いられる超電導線についての標準化の必要性が高まってきていることが紹介された。佐藤謙一氏（住友電工）からこれまでに行われた、そして現在、進行中及び計画中の超電導ケーブルのプロジェクトの紹介があり、ついで、参加できなかった Lindsay 氏の代理として、高温超電導電力ケーブルについての CIGRE と IEEE の活動の紹介があった。湯山洋康氏（住友電工）から日本国内の現在、進行中の超電導電力ケーブルのプロジェクト3件の紹介がなされた。これは Bi 線材を用いた横浜プロジェクト、ISTEC が推進する YBCO コート線材を用いたプロジェクト及び中部大学が推進する直流超電導ケーブルのプロジェクトである。Dag Willen 氏

(ULTERA, Denmark) からは、ヨーロッパ及びロシアにおける幾つかのプロジェクトの紹介があった。Ying Xin 氏 (Innopower, China) からは、中国における 2 件のプロジェクトの紹介があった。Steven Fleshler (AMSC, USA) 氏からは、米国における LIPA のプロジェクトの紹介があった。長村光造氏 (応用科学研究所) から、これまでの議論をベースに TC90 のアドホック・グループ 3 で作成した超電導線の標準化のドラフト (Ver. 1 と委員からの修正を加えた Ver. 2) が配布され、これについての説明が行われた。Chan Park 氏 (Seoul N. Univ., Korea) からは、DAPAS プロジェクトで開発されている SmBCO コート線材の報告があった。Ying Xin 氏 (Innopower, China) からは、中国で開発されている ITER 用の Nb-Ti、Nb<sub>3</sub>Sn 線材、Bi-2223 テープ、Y 系超電導線材、MgB<sub>2</sub> 線材についての紹介があった。

#### (b) 標準化に関する討論

上記の報告及び話題に対して次の討論がなされた。

##### (b-1) 超電導電力ケーブルの国際標準化

Pre-standard 活動をする CIGRE において新しいワーキング・グループを作ることが合意される予定で、今後、試験方法などについて検討が行われ、3 年くらい後に IEC に勧告が出される見通しであることが紹介され、了承された。ケーブルについて従来の標準を主体とするか、新しい標準とするかについて質問があった。今後、TC90 から超電導ケーブルについての特殊性がある事項の情報を TC20 に提供し、この件について詰めていくこととした。

##### (b-2) 超電導線の国際標準化

scope の定義の中で超電導線材を”monolithic strand”としていることについて異議が提出された。会議での議論の結果、定義を”single strand”とすることについて異論はなかった。Label に normative information として何を載せるかについて、特に contract title の中に材料名 (材質名) を記載することについて意見交換を行った。代表的な意見は「取引の当事者は材料についてはよく承知しているので contract 番号等、当事者間で了解できる内容に留めればよい。」であった。しかし stock yard (stock room) に数種の超電導製品が置かれていることを想定すると、当事者が現場作業員に指示する時点では、作業者に“材料名”、“重量”、“長さ”を具体的に指示したほうが作業が容易になることが想定される。他の材料、例えば銅線、アルミニウム線等における Label の調査は参考になると考えられる。企業からの専門家にさらに調査と意見の提出を依頼することになった。

ドイツの参加者より、高温超電導線材と低温超電導線材を分け、低温超電導線材についてはすでに当事者間に defacto 的な線材仕様が決められているので、新しく standard を作る必要性はないという意見が提出された。これに対して、本来の International Standard の精神は共通化した知識・技術を open にして市場を活性

化させることである。将来的に新しく市場に参入する者にとり高温超電導線材と低温超電導線材を分けることよりも、統一的なしかも open な standard のほうが理解しやすく、扱い易いという意見も出された。なお、現状において、Nb-Ti インゴット、MRI 等の原材料、製品は国際的な一部企業が独占しているため、IEC/TC90 で International Standard を作成することは不可能である。

工業製品である超電導線を議論する委員会に企業からの委員を加えるべきとのドイツからの意見に基づき新しいメンバーを追加したアドホック・グループ 3 メンバー構成にするため、最初のメンバーに追加を行った新しいメンバー案を紹介した。会議でさらにアメリカ、ドイツにメンバーとしての参加を要請したところ、Fleshler 氏から Cooley 氏と相談してみるとの発言を得た。

今後、新しいメンバーを加えたアドホック・グループ 3 で議論していくこととなった。

## 2.5.6 成果のまとめと今後の予定

電力・エネルギー、産業・輸送、診断・医療等の分野における超電導技術の標準化の一環として、不可欠な要素となる超電導線材やこれを適用した超電導電力ケーブル等超電導電力機器に関する標準化に必要な技術動向や標準化ニーズ動向の調査を実施した。また国際標準化合意醸成をはかりつつ、これら技術に対する規格素案を作成した。

超電導線関連技術標準化では、超電導機器側からの試験項目要件を調査し、この調査結果とアドホックグループの各委員からのコメントを反映して「超電導線に対する一般要求事項」及び「超電導線の試験方法」の規格素案を作成した。また、2008年6月ドイツ・ベルリンにて開催した第11回 IEC/TC90 国際会議、及び2009年9月ドイツドレスデンにおける第7回パネル討論会などを通じて、日本から提案している超電導線標準化に対して合意醸成に努めた。今後も国際合意醸成を図り、日本が提案する国際規格の制定を目指していく。

超電導電力ケーブル関連技術標準化では、ライフサイクルに係わる環境側面並びに安全側面を調査し、これの結果とこれまでの超電導電力ケーブル開発成果を基に「超電導電力ケーブルシステムに対する一般要求事項」及び「交流超電導電力ケーブルの試験方法」の規格素案を作成した。また、国際大電力システム会議(CIGRE)と連携した国際標準化活動を実施するとともに、TC90/TC20 国内リエゾンアドホックグループで国内意見の集約に努めた。今後、国内のTC90とTC20の連携強化を図り、CIGRE内での合意を最優先とした活動を行なっていく必要がある。

超電導電力機器関連技術標準化等では、SMES、超電導変圧器、超電導限流器及び超電導回転機の技術動向並びに標準化ニーズ調査を実施し、これらの結果を踏まえてSMES及び超電導変圧器の規格骨子案を作成した。今後、これらの成果をベースとしてSMES並びに変圧器の規格素案の作成を行う。

## IV. 実用化の見通しについて

### 1. 実用化の見通し

#### 1.1 超電導電力貯蔵システム (SMES) の実用化の見通し

##### 1.1.1 実用化の見通し

SMES は、NaS 電池やレドックスフロー電池等の 2 次電池やコンデンサなど他の電力貯蔵装置に比べ、電力貯蔵効率が高く、短時間に大電力の出し入れ可能という特長がある。また、SMES はコイルで電力を貯蔵することから、コイル容量や通電電流により、エネルギー貯蔵量に自由度が高く、必要なエネルギー量だけ貯蔵することが可能である。さらに、繰り返しの充放電では、電池の場合、その回数に制約があり、頻度の多い場合、電池本体の交換が必要となるが、SMES の場合、基本的には貯蔵部のコイルは数万から数十万回の充放電に耐える。このことから SMES は、繰り返しの変動が発生する分散電源や自然エネルギーの変動電力を補償する用途や、数秒の出力時間で良いが、大出力が必要な電力ネットワークの系統安定化用途に最適な電力貯蔵装置である。

そこで、低コスト高信頼性の SMES システム技術開発が達成された暁には、まず電力自由化の進展や電力コストの抑制の面から低コストで送電線運用容量の大幅アップが期待される箇所への適用が想定される。また、風力等の自然エネルギーや分散電源の系統連系点での補償装置としての適用も期待される。

これまでの技術調査により、SMES システムが実用化できた場合、初期コスト、ライフサイクルコストともに十分な経済性をもちうることが判明している。

現在までの成果に基づき、実用化のイメージを想定すると、今後、本プロジェクトでの酸化物系超電導線材の適用も含めたパイロットシステムの製作、検証、システム技術確立を踏まえることができれば、これまでの SMES プロジェクト（「超電導電力貯蔵システム技術開発」「超電導電力ネットワーク制御技術開発」）の成果である金属系 SMES を用いて産業応用が実現している瞬低補償用途から市場導入が考えられる。

なお、金属系超電導線材を用いた出力 10 MW の瞬低補償用 SMES は、液晶テレビ工場に設置され現在も稼働しており、フィールド試験期間を含めこれまでに 30 回以上の瞬時電圧低下を補償する実績を上げ、最先端の製造現場で多大な貢献をしている。現在、液晶テレビ工場だけでなく、研究施設や半導体工場への SMES 設置が進められている。

負荷変動補償用では、需要家側での個別ニーズに合わせた仕様、性能、機能に

より需要家側の利便が十分大きくなる場合、他と同様に市場参入が行われると考えられる。例えば、新幹線による変動補償を SMES で行うことを想定した場合は、新幹線用変電所 30 カ所に出力 30 MW の SMES を配置するとして、90 万 kW の市場が推定される。

系統安定化用途では、電力系統の安定度面からの運用制約により送電容量が抑えられている箇所では、その対策に膨大な設備投資が必要とされ電力コストの増大要因となる。そのため、SMES を設置することにより低コストで送電線運用容量の大幅アップが期待される箇所への市場参入が行えると考えられる。

系統安定化および負荷変動補償・周波数調整用の SMES システムそれぞれの用途で導入コストを上回る便益が得られる見通しが先のプロジェクトの成果として得られている。また、これを実現するコスト低減技術の中心であるコイル系や大容量電力変換システム、ランニングコストに影響を与える極低温冷凍機の信頼性向上については、要素技術確立の見通しが得られている。加えて、先のプロジェクトにおいて 10 MVA/20 MJ 級 SMES システムを製作し、電力系統との連系試験実施したことで、SMES システムとしての技術を検証することができている。これらの成果とともに、貯蔵部を Y 系超電導線材を用いた高磁場コンパクトコイル化することで、一層の低コスト化を実現することが実用化には不可欠である。さらに、実規模級のパイロットプラントを開発し、総合的に実フィールドでの実証を行なった後、長期的な信頼性に関する評価・改良を進めて市場導入を図ることになる。その後、さらなるコストダウンを進め、普及拡大を目指す。

超電導技術の応用は、電力分野では発電機、送電ケーブル、変圧器、限流器が、医療関連分野では MRI や NMR、また、産業分野では磁気分離、電動機、加速器や核融合に代表される各種高磁場利用が考えられている。本事業で開発される SMES システム技術は、特に、現時点の超電導技術の実用化に立ちはだかる大きな要因であるコストパフォーマンスの問題を大幅に改善することに貢献できるものである。超電導技術を応用する場合、その大半はコイルを用いるため、本プロジェクトによる高磁界コンパクトな Y 系超電導コイル開発や伝導冷却技術などが与える波及効果は極めて大きい。また、本プロジェクトにより開発される SMES は、電力分野においてコスト面で成り立つ初の実用超電導機器となると考えられ、超電導技術の広範な産業応用に大きく貢献が期待される。

また、系統制御技術としての要求よりは、小さな規模で済む産業応用への波及分野としては、電気エネルギーに高い品質と信頼性を要求するハイテク産業における瞬低対策技術として、広汎な導入・普及が期待される。

今回の開発により、ヘリウム温度領域を越えた 20 K 付近で利用可能な超電導コイル応用における線材設計の高度化のほか、市場拡大による超電導線材の低廉化が



期待でき、他の超電導技術応用分野での経済性向上の可能性が高まってくる。加えて、将来の超電導応用機器としての要求性能と期待される市場が明確化されたことにより、これに必要な線材開発が一層活発化して行くものと考えられる。

### 1.1.2 実用化の効果 (CO<sub>2</sub>削減量)

CO<sub>2</sub>削減効果については、II.3.4.3項において、SMES、ケーブル、変圧器毎に試算している。ここでは、太陽光や風力発電などの再生可能エネルギーが電力系統に大量導入されることを想定した場合に、想定される電源構成比の変化に伴い電力貯蔵技術の必要性が高まることを仮定し、それによるCO<sub>2</sub>削減量を試算し、最後にSMES、NaS電池、鉛蓄電池のコスト比較も行う。

#### (1) 再生エネルギー導入によるCO<sub>2</sub>削減効果

再生可能エネルギー大量導入時には、低負荷時に発電が需要を上回ることで発生する余剰電力対策の他に、太陽光発電の出力変動を緩和するためのLFC (Load Frequency Control: 負荷周波数制御) 調整力が必要となる。通常、LFC調整力としては火力発電が用いられるが、その場合、部分負荷で稼動する必要があるため発電効率が低下する (図 1.1.2-1)。

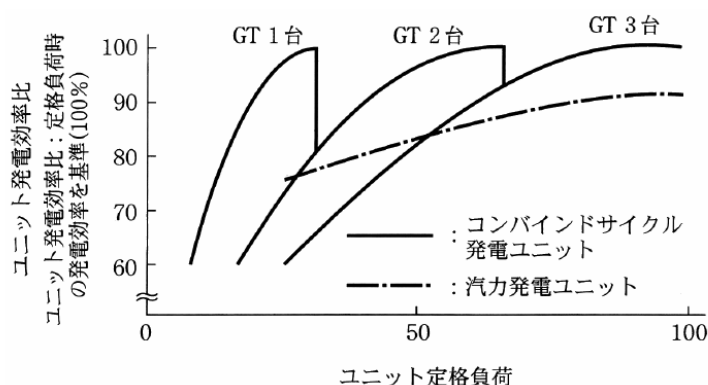


図 1.1.2-1 ガスタービンの総合発電効率特性の例

出典)「ガスタービン技術」(財)エネルギー総合工学研究所

一方、LFC対策用の電力貯蔵装置を導入した場合、火力発電を定格運転することができるため、火力発電の効率が向上し、その分のCO<sub>2</sub>削減効果が見込める。「長期エネルギー需給見通し(見直し)」から、2030年における発電種別毎の、設備容量、発電電力量および設備利用率は表 1.1.2-1 のとおりである。

表 1.1.2-1 2030 年における発電設備容量、発電量、設備利用率

発電種別	発電設備 (万 kW)	発電量 (億 kWh)	設備利用率
水力	5,077	889	15 %
一般	2,302	834	32 %
揚水	2,775	54	2 %
火力	12,090	3,080	22 %
石炭	3,003	1,346	39 %
LNG	4,881	1,371	25 %
石油等	4,206	363	8 %
原子力	6,315	4,695	65 %
地熱	120	75	55 %
再生可能エネルギー	5,975	907	13 %
合計	29,577	9,646	29 %

出典) 発電設備および発電量は「長期エネルギー需給見通し(再計算)」より。

この表から、発電設備容量に設備利用率を乗じ、2030 年における平均的な火力発電所の容量を求めると 2,698 万 kW となる。

ここで、再生可能発電エネルギー導入量の 10 %、30 %、50 %が必要であると仮定した場合の LFC 調整量は表 1.1.2-2 の通りになる。

表 1.1.2-2 再生可能エネルギー導入による LFC 調整必要量

再生可能エネルギー導入量 (万 kW)	5,975		
LFC 調整力として必要な割合 (%)	10	30	50
LFC 調整力の必要量 (万 kW)	598	1,793	2,988

表 1.1.2-2 で算出した LFC 調整力を全て火力発電で担うこととし、その際の負荷を 80 %とすると、火力発電の運転構成は表 1.1.2-3 のようになる。

表 1.1.2-3 火力発電の構成 (LFC 用電力貯蔵装置の設置なし)

LFC 割合	項目	定格運転 (万 kW)	80 %運転 (万 kW)	合計 (万 kW)	不足 LFC (万 kW)
10 % ケース	必要火力設備	308	2,988	3,296	0
	火力出力合計	308	2,390	2,698	
30 % ケース	必要火力設備	0	3,373	3,373	1,118
	火力出力合計	0	2,698	2,698	
50 % ケース	必要火力設備	0	3,373	3,373	2,313
	火力出力合計	0	2,698	2,698	

ここで、火力発電を負荷率 80 %で稼動した場合の定格運転からの効率低下を

5%、火力発電のCO<sub>2</sub>排出量原単位を0.69 kg-CO<sub>2</sub>/kWh、表 1.1.2-1 から火力発電所の設備利用率を22%として、火力発電のCO<sub>2</sub>排出量を求めると表 1.1.2-4 の通りとなる。

本検討では火力発電からのCO<sub>2</sub>削減を検討しているため、CO<sub>2</sub>排出量原単位は火力発電の値である0.69 kg-CO<sub>2</sub>/kWhを用いた。なお、発電設備全体としては0.34 kg-CO<sub>2</sub>/kWhとなる。

表 1.1.2-4 LFC 用電力貯蔵装置を設置しない場合の火力発電からのCO<sub>2</sub>排出量

項目	10%ケース (百万 tCO <sub>2</sub> )	30%ケース (百万 tCO <sub>2</sub> )	50%ケース (百万 tCO <sub>2</sub> )
CO <sub>2</sub> 排出量	38.1	38.3	38.3

一方、LFC 調整力を電力貯蔵装置で賄い、稼動する火力発電を定格運転とした場合、火力発電の運転は表 1.1.2-5 のようになる。

表 1.1.2-5 火力発電の構成 (LFC 用電力貯蔵装置を設置)

LFC 割合	項目	定格運転 (万 kW)	80%運転 (万 kW)	火力合計 (万 kW)	LFC 不足量 (万 kW)
全ケース	必要火力設備	2,698	0	2,698	0
	火力出力合計	2,698	0	2,698	

表 1.1.2-5 から、前述のケースと同様に火力発電所からのCO<sub>2</sub>排出量を求めると、一律36.4百万tCO<sub>2</sub>となる。

よって、LFC 用電力貯蔵装置を導入することによって、部分負荷で稼動する火力発電設備が削減されることで得られるCO<sub>2</sub>削減効果は表 1.1.2-6 のとおりとなる。

表 1.1.2-6 LFC 調整用電力貯蔵装置によるCO<sub>2</sub>削減効果

項目	10%ケース (百万 tCO <sub>2</sub> )	30%ケース (百万 tCO <sub>2</sub> )	50%ケース (百万 tCO <sub>2</sub> )
CO <sub>2</sub> 排出量 (電力貯蔵装置なし)	38.1	38.3	38.3
CO <sub>2</sub> 排出量 (電力貯蔵装置設置)	36.4	36.4	36.4
CO <sub>2</sub> 削減効果	1.7	1.9	1.9

(2) LFC 用電力貯蔵装置の導入コスト比較

(非公開)

(非公開)

(非公開)

## 1.2 超電導電力ケーブルの実用化の見通し

### 1.2.1 実用化の見通し

#### (1) 送電分野における現状と課題

昨今、地球温暖化防止対策における CO<sub>2</sub> 排出量の削減は、喫緊の課題となっている。また、「Cool Earth-エネルギー革新技术計画」の中で、重点的に取り組むべきエネルギー革新技术「21」に「超電導高効率送電」がエネルギー供給側技術で効率向上をめざす発電・送電部門に位置づけられている。この超電導高効率送電の技術概要には「高温超電導材料を送電ケーブルに活用することにより、現行の 5%程度の送電ロスがこの技術を適用する区間で 1/3 程度に削減することが可能である」と紹介されている。

このように超電導電力ケーブルを早期に実用化することにより、電気抵抗による送電損失を極小化できるゆえ、送電ロスの少ない電力の輸送が実現することで、運転コストが低減できるとともに、多量の CO<sub>2</sub> 削減効果が可能となり、CO<sub>2</sub> の低減と資源の有効活用を達成し、無駄の少ないエネルギーの利用に資することが期待されている。

また、超電導電力ケーブルは、従来の電力ケーブルと比較して導体部分のエネルギー密度が非常に高く、また低損失なことから、冷却に必要なスペースを考慮してもケーブル収容断面積を小さくすることが可能となる。つまり従来の電力ケーブルは、都市部において洞道と呼ばれる直径約 2~3 m のトンネルに布設されている。これが超電導電力ケーブルに置換わると、管路と呼ばれる地中埋設された内径 150 mm の管に布設することができ、新たな収容設備(洞道、管路)の建設を行うことなく、既設設備を有効利用することによって、コンパクトな設置が可能となる。よって地中設備形成の建設コストの大幅な削減、コストダウンにもつながることが期待できる。

一方、既設の電力ケーブルのうち、OF(Oil Filled)ケーブルや POF(Pipe-type Oil Filled)ケーブルは布設後約 40 年が経過しているものも多く、老朽化に伴う漏油の問題が生じており、経年ケーブルから順次取替が必要となってきた。また、一般家庭等の電化率の向上による電力需要の増加に対応すべく設備の増強の必要性があり、電力流通設備の地中化率(図 1.2.1-1)が年々増加しているが、将来に亘り従来の電力ケーブルによる新たな送電設備を地下に設けるには莫大なコストと地下埋設のスペースが必要となる。さらには、電力需要の増加、高信頼度の系統構成の構築により、火力発電所の増強等のリプレースによる熱効率の向上や稼働率の向上に伴って、電力流通設備の新增設や超高压送電線の冷却設備の建設等の電力流通設備に対する増容量対策が必然となってきた。

このような状況の中、超電導電力ケーブル技術は、上記のすべての課題を解決できる革新技術であり、次世代の電力送電網の構築においても重要な技術と位置づけられる。

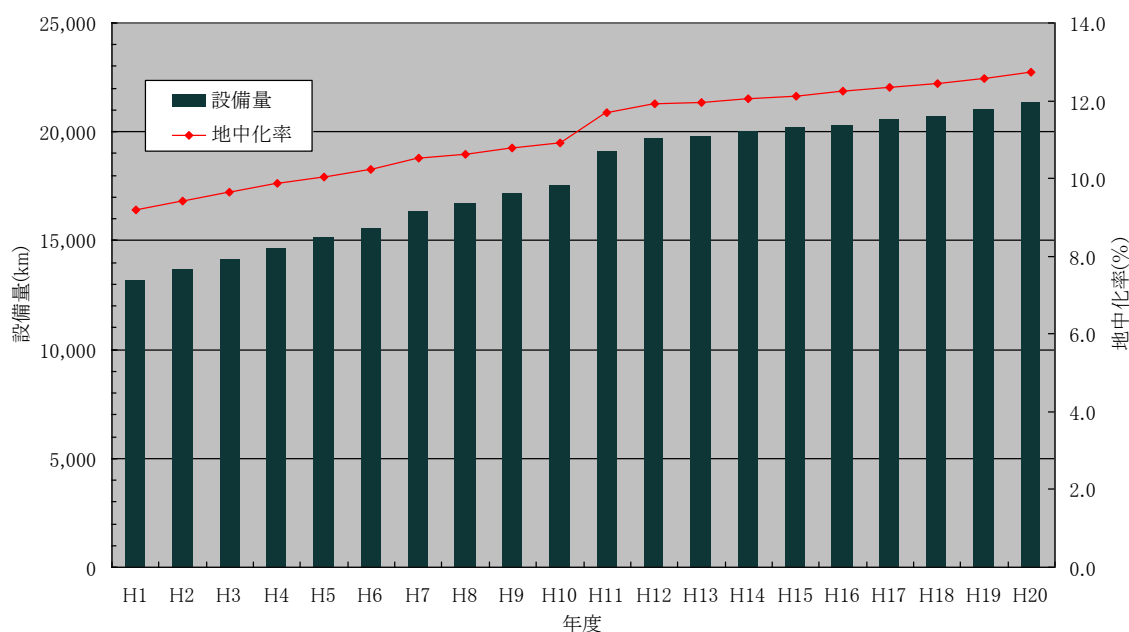


図 1.2.1-1 地中送電設備量の推移

## (2) 66 kV 大電流・低交流損失の超電導ケーブルの適用

### ① 背景

配電用変電所への供給や変電所間の連系など都市部の連系用電力ネットワークの主流は、154 kV や 66 kV 系統となっている。この 154 kV や 66 kV 系統は、特に夏場や冬場の電力需要がピークに達する時期には過負荷となり、設備の稼働としてはギリギリの運用をしている箇所もある。また、都市部における設備の形態は非常に過密化しており、新たな設備の増設は不可能に近く、既存の 154 kV または 66 kV 系統の増容量化を行うことは容易ではない。

さらに近年、経年化による順次リプレースの必要性のある系統も少なくはなく、CV(Cross linked polyethylene Vinyl)ケーブルで対応する場合には既設管路の活用による送電容量の制約から既存の経年ケーブル等の増容量は出来ず、増容量対策を行うには新たな管路設備(洞道)が必要となってくる。

### ② 過負荷の 66 kV または 154 kV 系統設備への適用

都市部の配電用変電所への供給や変電所間の連系（都市部連系系統）など、154 kV や 66 kV 系統となっている過負荷設備に 66 kV 大電流・低交流損失の超電導ケーブルを適用すると、課題なる過負荷が解決でき、新增設を行うことなく増容量化に対応できるうえに既設管路の活用が可能で、大幅なコストダウン



と CO<sub>2</sub> 削減が可能となる。(図 1.2.1-2 参照)

### ③ 経年化した 66 kV または 154 kV 系統設備への適用

経年化した既存の 66 kV または 154 kV の都市部連系系統 (CV ケーブル、OF・POF ケーブル等) の代替としての 66 kV 超電導ケーブルを適用すると、既設管路へそのまま CV ケーブルにリプレースする場合の送電容量の制約が解消でき増容量対策が可能となるとともに、増容量対策による新たな設備の必要性がなくなりコスト削減が可能となる。

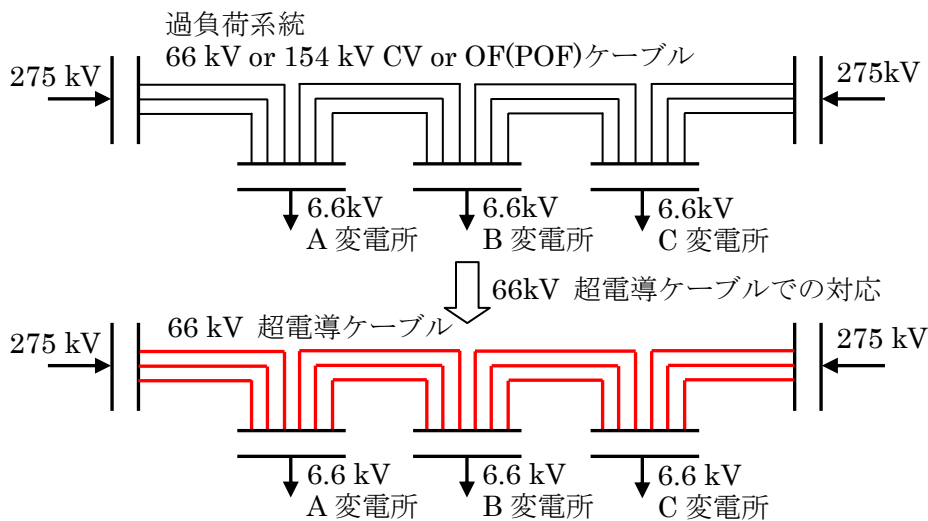


図 1.2.1-2 66 kV or 154 kV 過負荷系統への超電導ケーブルの適用例

### (3) 275 kV 高電圧絶縁・低誘電損失ケーブルの適用

#### ① 背景

電源から都市部へ電力を供給する流通設備(電力系統)は、架空送電線と地中送電ケーブルで構成され、特に都市部においては地中送電ケーブルが用いられている。このような設備構成の中、超電導ケーブルの最も有効な適用例は、275 kV の地中送電ケーブルで構成される基幹系の電力送電網への導入である。

電力需要の増加、高信頼度の系統構成に伴い、275 kV 系統の増強が不可欠となってくる中、これを既存の 275 kV 現用ケーブルで構築するとなると新たな布設管路(洞道、管路)の建設が必要となり莫大なコストがかかってしまう。特に都市部においては地下空間に公共インフラが集中しており、新たな収容設備を建設することが非常に困難になっている。(図 1.2.1-3 参照)

さらには電圧 275 kV 超電導ケーブルの適用から系統両端の既存設備、遮断機や断路器、変圧器等の主要機器の使用電圧が超電導ケーブルと同じ 275 kV なので大幅な機器の改修の必要性がなくなってくる。

#### ② 都心導入系統への適用例

具体的な適用例としては、防災トラフ内間接水冷システムが導入されている設備で冷却システムの稼働率が高い系統での適用が挙げられる。特にその中でも、高効率な発電所から超高圧変電所間の都心導入系統で年間を通して平均して過負荷に近い大電流が流れ、かつ冷却システムの稼働率が高い系統への超電導ケーブルの適用が考えられる。(図 1.2.1-4 参照)

### ③ 連系系統への適用例

都市部における 275 kV 超高圧変電所間の連系、特に防災トラフ内間接水冷システムが導入されている設備で冷却システムの稼働率が高い系統(冷却システムを稼働しないと要求される送電容量が確保出来ない系統)への適用が考えられる。また、275 kV 超高圧変電所間の連系用系統で超高圧線路が多回線布設され、他の系統からの熱の影響を直接受けるような線路で、他線路の影響が送電容量の制約となってしまう系統への適用も有効と考えられる。

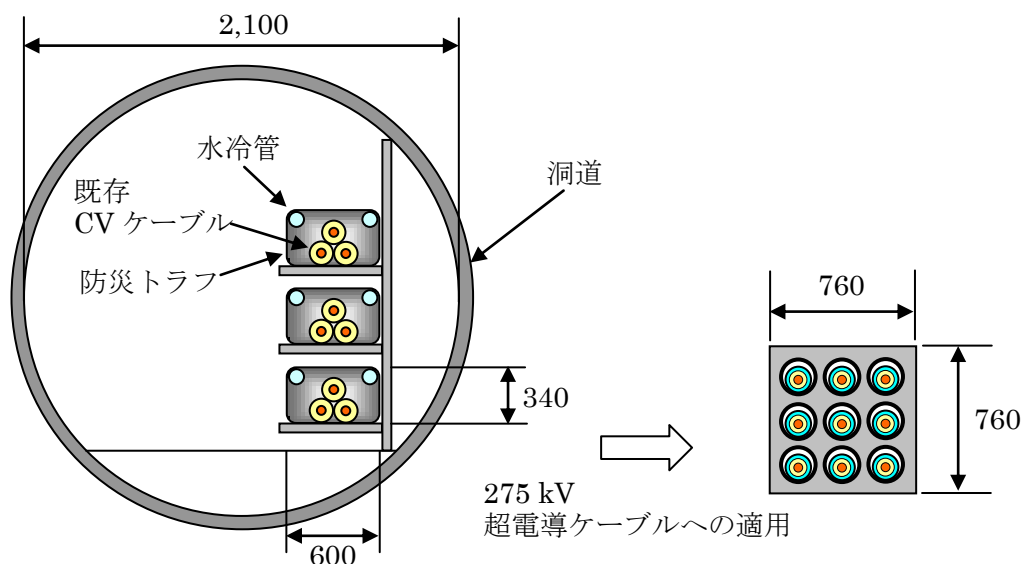


図 1.2.1-3 275 kV 現用ケーブルと超電導ケーブルの布設サイズ例の比較

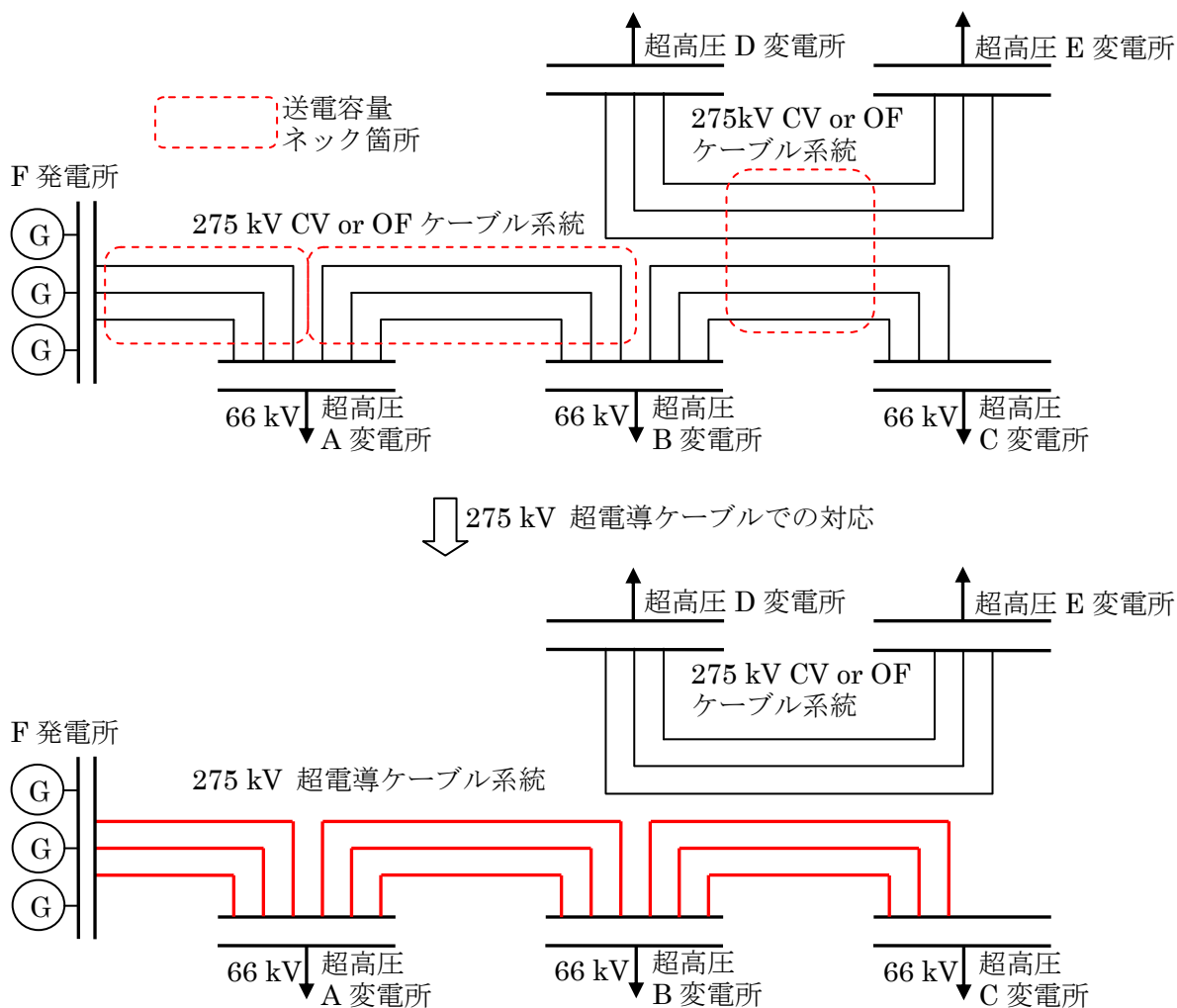


図 1.2.1-4 275 kV 系統(電源系統、都心導入系統)への超電導ケーブルの適用例

#### (4) 超電導ケーブル実用化までのシナリオ

本「Y系超電導電力機器技術開発」プロジェクトにおいては、2020年頃の超電導電力ケーブルの導入・普及に向けて、重要な要素技術開発、モデル機器開発およびシステム検証試験を実施することによってシステム検証を行う。一方、1.2.1項にて示した適用例のような実用化を目指すためには、こうしたシステム検証に加え、実系統などでの長期課通電による実証試験によって機器としての性能を確認するとともに、機器の信頼性、メンテナンス性などについて十分な検証が必要である。

この実証試験では、超電導電力ケーブルを電力の安定供給を支える電力設備としての性能を検証・確認するとともに、電力ケーブルシステムとしての信頼性、メンテナンス性、さらにはユーザーである電力会社が導入するためのコスト

ト検証を行う必要がある。具体的には、変電所構内などでの試験を考慮した 150 m 級のものから、地中線設備として変電所間を結ぶ最小長さを想定した中間接続部を有する 500 m 級電力ケーブルシステムでの長期間の課通電試験を実施する。

この実証試験においては、電力ケーブルを実際の設置環境を想定した布設工事を実施することによって、設置に対する性能の検証を行うことも重要であり、さらに布設した状態での初期冷却および冷媒による継続的な冷却運転、冷凍機の連続運転性能、実負荷での各種性能など様々な試験・計測を長期間実施する。これにより電力ケーブル設備のみならず、冷却システムなどの補機類のメンテナンスに関するデータを取得し、超電導電力ケーブルのトータルシステムとしての信頼性、メンテナンス性を確認・検証する。

このためにも、本プロジェクトでは、Y 系超電導線材を用いた超電導ケーブルシステムとしての技術開発を行い、モデル機器開発およびシステム検証によって、ケーブル設計技術を確立するとともに、実システムへの適用を考慮した低損失・大電流、大容量接続、高電圧絶縁、高電圧接続などの重要な要素となる技術開発とケーブル性能を検証するために必要な試験条件などを導く技術開発を行う。この結果は、プロジェクト後半のシステム検証試験を実施することによって、最終目標とする Y 系超電導線材を用いたケーブル設計技術と性能検証技術の確立を図ることで、次のステップへとつなげて行く。

また、本プロジェクトの開発成果について、他部門への波及効果としては、電力ケーブル以外に産業分野（工場・ビル内など）におけるケーブルや直流送電技術として、太陽光や風力発電など自然エネルギー用送電設備、データセンター用屋内配線、直流き電などへの応用が考えられる。

## 1.2.2 実用化の効果

### (1) CO<sub>2</sub>削減効果

超電導ケーブル導入による地球環境対策としての CO<sub>2</sub> 量削減の効果が期待できる。超電導ケーブル導入量(国内)をベースに CO<sub>2</sub> 削減量を計算すると、表 1.2.2-1&2 のように試算される。2030 年の省エネ効果は 279 GWh/年となり、CO<sub>2</sub> 削減効果は 95 千 t-CO<sub>2</sub>/年になると推計した。公開データによると 2008 年度の 1 世帯あたりの電力消費量は、年間で約 3,460 kWh(出典：「原子力・エネルギー」図面集 2010)であることから、省エネ効果は、およそ 8 万世帯が 1 年間に消費する電力量が期待できる。

なお、この推定は国内の 66 kV 以上のケーブルへの適用を考えた場合であり、全世界的で考えれば、数十倍～数百倍の効果が期待できる。

表 1.2.2-1 予想される超電導ケーブルの導入量

	超電導ケーブル線路 (累積) (km 回線)
2020 年	190
2025 年	400
2030 年	650

表 1.2.2-2 予想される省エネ量・CO<sub>2</sub>削減量

年	A	B	C		
	超電導化による 損失低減量 kW/km(Lf=1.0)	累積 導入 量 km	損失 率(Lf)	1 年間の低減電力量 A×B×C(24×365) GWh/年	1 年間の CO <sub>2</sub> 削減量 千 t-CO <sub>2</sub> /年
2020 年	70	190	0.7	82	28
2025 年	70	400	0.7	172	58
2030 年	70	650	0.7	279	95

(注)常電導ケーブルの損失量は 100 kW/km、超電導ケーブルの損失量は 30 kW/km@2020 年以降と考え、その差が表中 A の損失低減量にあたる。2020 年以降の CO<sub>2</sub> 排出原単位は、電気事業連合会による目標 0.34 kg-CO<sub>2</sub>/kWh を適用した。なお、超電導ケーブルの実用化に伴う省エネ量、CO<sub>2</sub> 削減量については「高温超電導電力応用機器の市場調査研究報告書 (平成 19 年 2 月 ISTEK)」の試算結果を参照している。

## (2) コストの削減効果

既存ケーブルでの系統構築から超電導ケーブルでの系統構築に移行することにより、既存ケーブル用の洞道新設が不要となるなど、大幅なコスト削減が期待される。

(非公開)

(非公開)

### 1.3 超電導変圧器の実用化の見通し

#### 1.3.1 実用化の見通し

今後の電力需要や高経年変圧器などから、配電用変圧器の市場規模について検討した。配電用変圧器の市場は、「電力統計情報」(電気事業連合会)から66kV又は77kVの配電用変電所は約4,300箇所であり、各変電所は平均2バンク(2台設置)と仮定すると変圧器数は約2倍となる。変圧器の寿命を平均40年と仮定すると、変圧器の更新数は、約220台/年となる。また、「平成18年度供給計画の概要」(中央電力協議会)変電所増分容量の伸び率は0.5%であることから変圧器の新設は約40台/年となり、合せて約260台/年と想定される。その市場規模の想定を図1.3.1-1に示す。

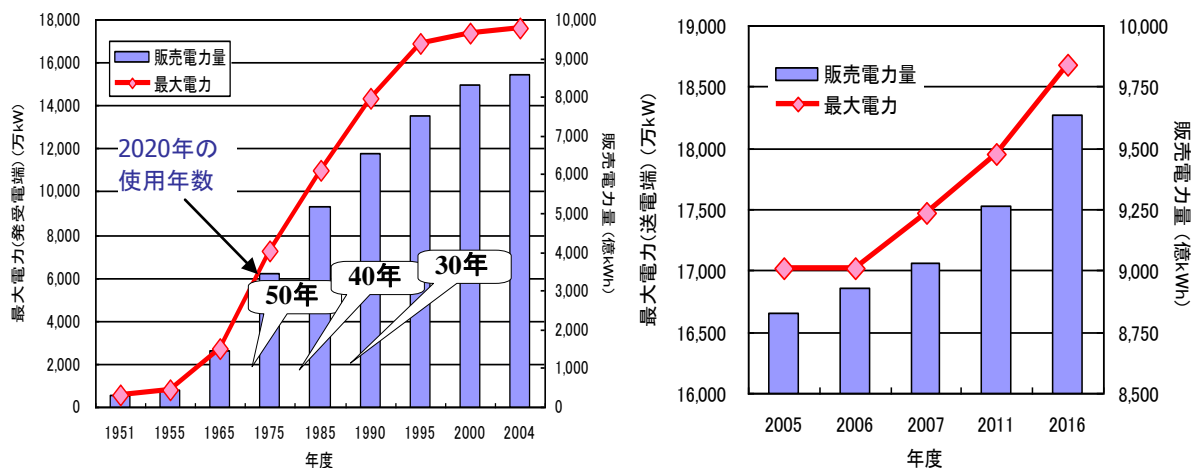


図 1.3.1-1 配電用変圧器の市場規模の想定

変圧器の技術の動向として、電気学会技術報告(第1023号、2005年)の「社会動向やニーズから見た配電用変圧器対応技術及び製品動向」を図1.3.1-2に示す。Y(YBCO)系超電導線材を変圧器に適用すると、その高電流密度や低損失特性から、巻線や鉄心の断面積を小さくでき、大幅な小型・軽量化が図れるとともに、冷媒は液体窒素であるため不燃となる(図1.3.1-2)。それらの特長から、超電導変圧器は、電力需要増に伴う変圧器増の対応、変電所の新設対応が有利であり、超電導ケーブルと共存(変電所容量増、限流機能)などの用途が考えられ、都心部を主とした変電所やビル等での早期実用化が期待されている(図1.3.1-4)。

小型・高効率化(冷却装置の削減)から地下式や屋内式変電所の容量増対応や保守面で有利となる。また、小型化(容量増)から、変電所(送電線含む)

の新設回避や繰延べに有利となる（図 1.3.1-5）。限流機能付変圧器では、限流器運用に加え、超電導ケーブル適用時の送電容量と短絡容量対策に貢献できる（図 1.3.1-6）。それらの用途を考慮した超電導変圧器の開発成果と実用化見通しを図 1.3.1-7 に示す。

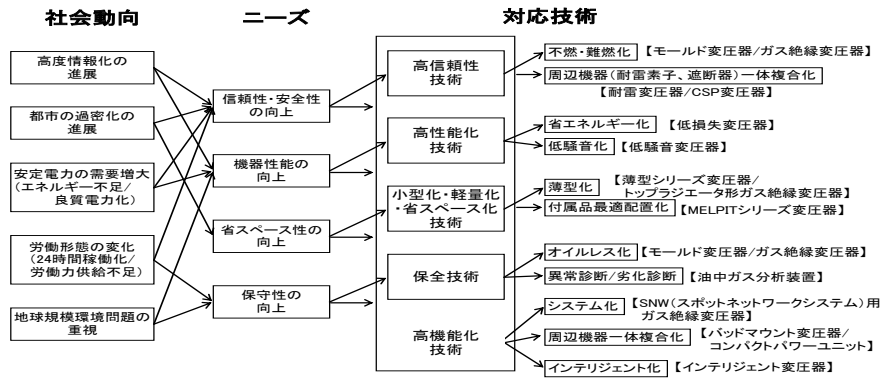


図 1.3.1-2 社会動向から見た配電用変圧器対応技術及び製品動向  
 (出典：電気学会技術報告第 1023 号 2005 年 6 月)

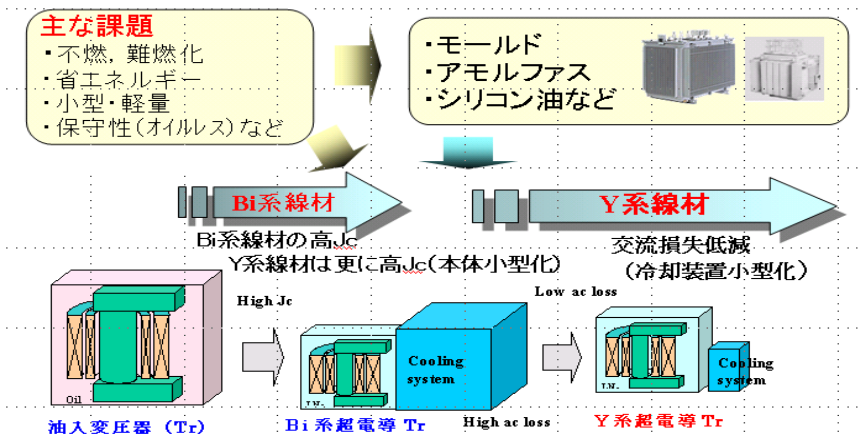


図 1.3.1-3 Y系変圧器の特長（Y系線材の低損失化により冷却装置の小型化が図れる）

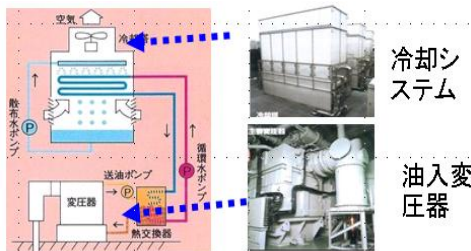


図 1.3.1-4 地下式変電所の既存変圧器例

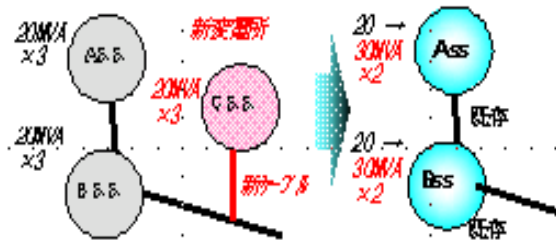
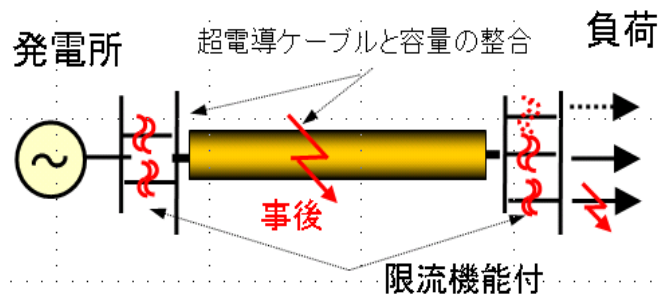


図 1.3.1-5 変電所（送電線含む）の新設回避や繰延べに有利な例





1.3.1-6 超電導限流機能変圧器の効果(同変圧器は限流器運用に加え、超電導ケーブル適用時の送電容量と短絡容量対策にも有効)

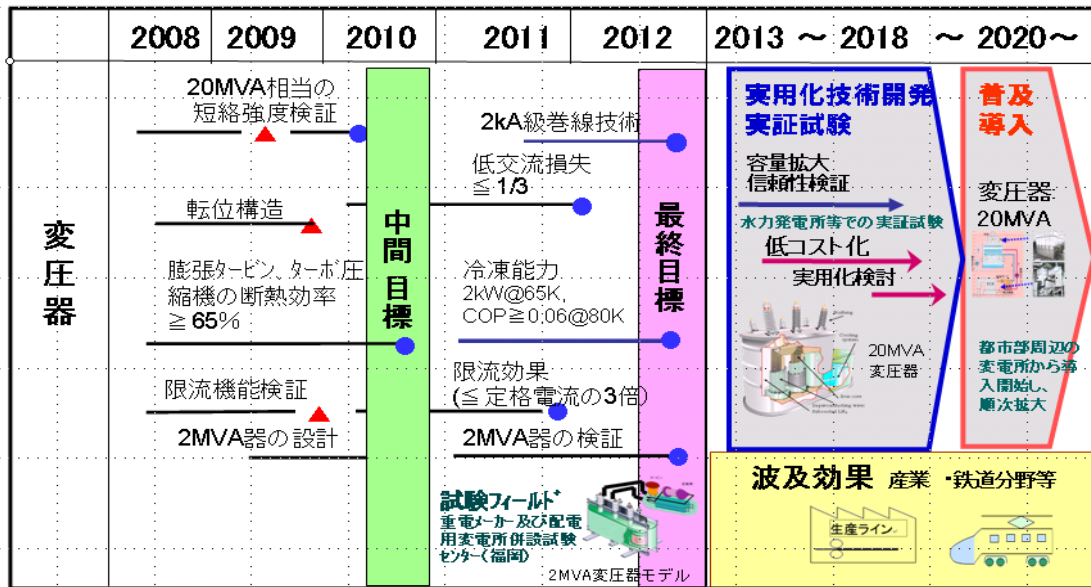


図 1.3.1-7 超電導変圧器の開発成果と実用化の見通し

### 1.3.2 実用化の効果

#### (1) CO<sub>2</sub>削減効果

省エネルギー量は、既存変圧器と高温超電導変圧器との損失量の差から求め、それに CO<sub>2</sub> 排出係数を乗じて CO<sub>2</sub> 削減量を求めた。

具体的には、省エネ量は油入変圧器と Y 系変圧器のそれぞれの効率 (99.4 %、99.85 %)、設備利用率 (50 %)、超電導変圧器の予想普及台数から試算した。なお、変圧器の予想普及台数は、電事連の電力統計情報 (2004 年版) をベースに「超電導分野技術戦略マップ」(第 4 回同左策定委員会) による伸び率を用いて算定し、CO<sub>2</sub> 排出係数は、電気事業連合会による排出原単位目標及び資源エネルギー庁の見解に基づき、2020 年 0.34 (kg-CO<sub>2</sub>/kWh) を適用した。ケース 1 は 66 kV 以上 77 kV 以下のみを対象、ケース 2 はケース 1 + 110 kV 以上 275 kV 以下を対象として試算した。それらの超電導変圧器による CO<sub>2</sub> 削減効果を表

1.3.2-1 に示す。本試算によると、2030 年までの CO<sub>2</sub>削減量は約 37～52 万 t/年となる。

表 1.3.2-1 超電導変圧器による CO<sub>2</sub> 削減効果

	2020 年	2030 年	2040 年	2030 年
ケース 1 (kt/年)	93.5	373.9	654.4	934.8
ケース 2 (kt/年)	93.5	523.0	1286.9	2041.7

## (2) 超電導変圧器の経済性

超電導変圧器の経済性の評価として、その設備費である初期コストと運転・保守時の損失などの運用コストとを合せた総合コストを算定し、油入変圧器と比較した。初期コストは、開発予定の Y 系線材技術、冷却装置技術を基に Y 系変圧器のコストを算定した。主な諸元は次のとおりである。

(非公開)

(非公開)

### (3) 超電導変圧器の波及効果

超電導変圧器は、超電導ケーブルや限流器と複合して適用することにより、将来的に増大するリプレース需要や大容量電力輸送に貢献するとともに、更には、太陽光等の再生可能エネルギーの導入拡大や米国や韓国で検討されているスマートグリッド等へ適用も考えられる。また、超電導機器の適用により、電力系統運用への貢献や、低炭素化及び経済性等での貢献も期待される。

一方、変圧器は、電力用はもとより、産業用や輸送用など、殆どの電力機器へ、系統電圧の返還や侵入雷の絶縁対策等から適用されている。図 1.3.2-2 に 超電導変圧器の各種設備への適用例を、図 1.3.2-3 に超電導変圧器の各種設備展開への適用技術の相関を示す。これらの超電導変圧器は、用途により設備利用率超電導化により、小型、高効率及び不燃などの高性能化への貢献及び低炭素社会への貢献が期待される。

超電導変圧器の冷却システムについても、電力用に加え産業用や科学分野でも貢献できると考えられる。図 1.3.2-4 に 超電導変圧器用冷却システム技術の適用拡大例を、図 1.3.2-5 に既存の石油ガス・希ガスの極低温蒸留分離装置およびスペースチャンバーコールドパネル冷媒供給装置を示す。冷却システムを含

め超電導変圧器の周辺技術の適用拡大も期待される。

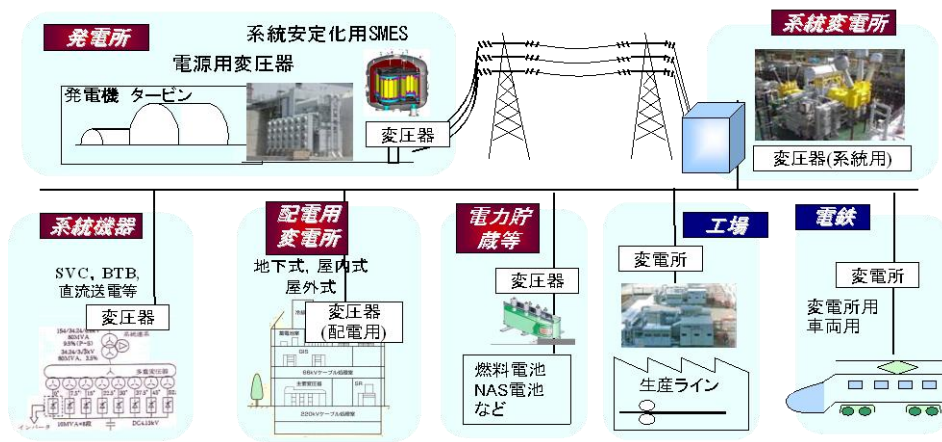


図 1.3.2-2 超電導変圧器の各種設備への適用例

分野	2005	2010	2015	2020
<b>電力分野</b>	・配電用変圧器 (再生可能エネルギー用) ・系統用変圧器 ・限流機能変圧器	巻線、冷却等の要素技術開発 2MVA変圧器システム開発	容量拡大、低コスト化 信頼性検証	段階的に 高電圧化、大容量化 信頼性検証、低コスト化 → <b>実用化</b>
<b>産業分野</b>	・工場・ビル等用の 変圧器		容量拡大、低コスト化 信頼性検証、実用化検討	小規模から → <b>実用化</b>
<b>輸送分野</b>	・車載用、船用の変 圧器		耐振動対策、低コスト化 信頼性検証、実用化検討	小規模から → <b>実用化</b>

図 1.3.2-3 超電導変圧器の各種設備展開への適用技術の相関

分野	2005	2010	2015	2020
<b>電力分野</b>	・配電用変圧器 ・系統用変圧器 ・超電導ケーブル等	冷却の要素技術、2MVA変圧器	容量拡大、低コスト化、信頼性	段階的に 大容量化 → <b>実用化</b>
<b>産業分野</b>	石油ガス・希ガスの 極低温蒸留分離		大容量化、低コスト化、高効率化 信頼性検証、蒸留プロセスとの融合	小規模から → <b>実用化</b>
<b>科学分野</b>	スペースシャトル コントロールパネル		大容量化、低コスト化 信頼性検証、低温度化	→ <b>実用化</b>

図 1.3.2-4 超電導変圧器用冷却システム技術の適用拡大例



図 1.3.2-5 石油ガス・希ガスの極低温蒸留分離装置およびスペースシャトルコントロールパネル冷媒供給

#### 1.4 超電導電力機器用線材の実用化の見通し

超電導電力機器用線材の技術開発を中心的に実施している(財)国際超電導産業技術研究センター (ISTEC) は、自ら研究員及び研究設備・資機材を保有しており、過去 20 年以上に亘り超電導の研究開発にあたり、単独あるいは共同研究体を組織し、広い範囲にわたり多くの成果を挙げている。それぞれの共同研究体においては、研究の遂行のみでなく、研究体の中枢として研究方針・内容などの策定を行い、自身の成果を挙げるのみではなく、マネジメント機能も発揮し、共同研究体としての成果も出している。本テーマである Y 系超電導線材の開発に関しては、全てのテーマに関して中間目標として設定されている実証試験時に必要とされる線材レベル達成に主体的に取り組み、世界最高水準の成果を挙げている。ここでは、低コスト化や経時・経年変化の把握と対策等の線材作製プロセスの基本重要技術の開発はもとより、機器応用に必要な磁場特性向上や特性均一化と細線化、フィラメント化の複合化による低交流損失線材開発及び高強度で高  $J_c$  線材の開発などの開発中の各電力機器から求められる個別仕様を満足する線材の開発を精力的に遂行してきている。

今後は、当財団が公益法人であることから、自らが実用化・事業化主体にはなれないものの、エンドユーザをはじめとする多くの会員企業との連携により実用化・事業化に繋げていきたいと考えている。具体的には、導入・普及時に必要な仕様を満足させる線材作製プロセス開発を推し進め、上記の技術を含めて核となるプロセス技術を線材メーカーへ移管することで実用化に貢献する。また、一方で、エンドユーザを含めた委員会等を組織し運営することや、学会等を通じた普及啓蒙活動を通して、超電導市場の開拓、拡大に努める考えである。その際、機器を含めた分析・評価等の活動を通し上記活動を加速させることにより実用化を促進させたいと考えている。

Y 系超電導線材の実用化・事業化を担うことになる線材メーカーの実用化見通しは以下の通りである。

住友電気工業(株)は、クラッド型結晶粒配向金属基板上の PLD 成膜線材において、高  $J_c$  開発と安定製造技術開発により低コスト量産技術を確立して市場への販売を開始し、高温超電導線材をニーズに応じて提供していく意向である。応用展開については、高機能低コスト Y 系長尺超電導線材の段階的開発状況に応じて、ケーブル開発や超電導モータ等の応用開拓や実証にも注力していきたいとしている。超電導技術の進展には線材の開発と並行して応用の開発を進めることが重要との視点に立って、これまで積極的に、主として Bi 系超電導線材ではあるが、線材応用のプロジェクトに参画してきている。超電導ケーブルのデモンストレーションでは主要なものとして(株)東京電力との共同研究の電力

中央研究所横須賀研究所のフィールドで実施した 100 m ケーブル実証プロジェクト(66 kV、1000 A)、米国 DOE、NYSERDA のスポンサーシップにより NY 州 Albany 市において 7000 時間に亘って 7 万所帯に電力を供給した 350 m ケーブル実線路(一部 30m は Y 系超電導ケーブル)デモンストレーション(34.5 kV、800 A)、韓国電力・電力研究院(KEPRI)に納入した 100 m ケーブルのデモンストレーション(22.9 kV、1250 A)があげられる。いずれのデモンストレーションも成功裡に終了し、超電導ケーブルシステムの製作技術、布設技術、運転技術が実用レベルに至っていることを実証してきた。また、船用超電導モータ、超電導自動車用モータ、MRI 用マグネットなど多岐に亘る超電導応用プロジェクトを進めている。なお、現在開発が進められている超電導ケーブルプロジェクトのうち、1 件は住友電気工業(株)が(株)東京電力と共同で実施中の NEDO プロジェクト高温超電導実証ケーブルプロジェクトである。これは横浜の旭変電所構内に約 300 m 長のケーブル(66 kV、3 kA)を布設して実負荷試験を行なうものであり、2011 年に運開の予定である。住友電気工業(株)としては、超電導線材のリーディングカンパニーとして、多様なユーザーニーズ、応用ニーズに対する品ぞろえを用意することが必要と考えている。高い特性と低コストのポテンシャルを秘めた Y 系超電導線材について、高機能低コスト長尺線材の安定製造技術の確立を行いたいと考えている。低磁性高強度の特性を有すクラッド型結晶粒配向金属基板線材により、高  $I_c$  線材開発と安定製造技術開発により大電流ケーブル実証を行う。中長期的には、低コスト量産技術を確立して市場への販売を開始し、高温超電導線材をニーズに応じて提供できるメーカーの位置を構築していきたいとのことである。

古河電気工業(株)では、本委託業務成果と古河電気工業(株)が保有する超電導線材加工、電力ケーブル製造等の量産化技術を融合し、製造技術を高めるとともに量産体制を確立し、市場の需要に対応していきたいと考えている。市場としては、高温超電導線材の現在「Y系電力機器開発プロジェクト」で行われている SMES、電力ケーブル、超電導変圧器等の電力機器応用に加え、さらには発電機、モータなどへの応用も考えられ、大幅な省エネルギー化が期待されている。また、エネルギー・環境問題への切札的技術とも言われ、幅広い応用が期待されているのも追い風である。その市場については、全世界的に 2015 年以降、本格的に市場が立ち上がり、2020 年以降、大きなビジネスになるものと考えている。そこで、その市場の需要にあわせて、古河電気工業(株)としては、現在のプロジェクト終了の数年後から本委託業務成果と古河電気工業(株)が保有する製造技術を高め、高温超電導線材の長尺製造技術、コスト低減化技術のさらなる進展を図りながら、量産体制を確立していきたいと考えている。同時に、品質保証体制を構築し、市場の需要に対応していきたいと考えている。

超電導電力ケーブル用線材の事業化については、以下のように考えている。国内では、2020年からの超高圧OFケーブル、POFケーブルの寿命引き換えタイミングで、その一部の置き換えから始まると考えられる超電導電力ケーブルに、そのタイミングに対応して、電力ケーブル用線材の開発・製造を行っていきたいと考えている。また、海外においては国内より市場も大きく、ケーブル・線材で進出を図りたいと考えている。さらに、SMES等の各種機器応用に向けた超電導線材の外販を進めていく予定であり、プロジェクトの成果である超電導線材の高磁界、高強度化技術および安定製造技術をさらに応用して、より優れた超電導マグネット用線材を供給したいと考えている。また、古河電気工業(株)では金属系超電導線材の事業を行っており、そのノウハウを活用しながら、金属系超電導線材と高温超電導線材の両方が供給可能な総合線材メーカーとして、市場へのアクセスを図り、需用の拡大を図っていく。

Y系超電導線材の実用化・事業化へは①長尺かつ低コスト線材製造技術確立②種々の機器への応用・実証の段階を経て、市場を睨みながら、2015年頃には数百 km/年、2020年頃には数千 km/年の生産能力をもち、世界へ供給したいと考えている。

(株)フジクラでは、Y系超電導線材作製のキーテクノロジーといえる結晶粒配向中間層作製技術であるIBAD法を開発し、その後、長尺線材化・高性能化・低コスト化の可能性を鑑み、IBAD/PLD法を選択し、研究開発を進めてきた。「超電導応用基盤技術研究開発(第Ⅱ期)」プロジェクトが始まった平成15年においては、まだ数十 m、 $I_c$ 値で数十 A/cm-w(@77 K,s.f.)の線材がようやくできたころであった。平成19年度末のプロジェクト終了時において  $I_c$ 値で 350 A/cm-w (@77 K,s.f.)、502 m を得るに至った。この時点においては、まだ 300 A を超える特性の超電導線材は年間数本しか製作することができなかったが、現プロジェクトにおいて、歩留り改善、長さ方向の均質性改善に取り組んだ結果、100~300 m 長の超電導線材に対して 70%を超える歩留りで製造できる目処が立つようになった。さらに長さ方向の臨界電流分布では H19 年においては 20~30%程度あったが、標準偏差で 3%以下に出来る見通しも得られるようになった。既に平成 20 年にはプロジェクトで活用した超電導線製造装置の一部について購入を行い、事業化のための足がかりとして平成 21 年度より超電導線材の販売も開始し、Y系超電導線材の機器応用を検討している研究機関等へ提供している。今後、機器試作、モデル機器等に進展することで超電導機器への活用が拡大していくものと考えている。提供価格は未だ「超電導応用基盤技術研究開発(第Ⅱ期)」プロジェクトでの技術コストである 12 円/Am を大きく上回っているが、今後、さらなる特性改善、超電導原料等の作製コスト削減等によりコスト低減にも注力し、より安価な超電導線材の供給ができるよう努力を継

続いていくとともに、事業規模のさらなる拡大を目指している。

現時点において超電導プロジェクトで実施している電力機器以外の実用化を目指した国のプロジェクトや民間のプロジェクトに対して線材の販売や共同研究形態による実用化のための機器開発に関与している。国のプロジェクトでは科学技術振興機構(JST)が推進しているイノベーション創出事業 (S-イノベ) における機器開発用の Y 系超電導線材の販売を始めた。S-イノベでは超電導機器として 5 つの課題について推進されているが、このうちいくつかのテーマについては超電導線材の販売や引き合いを頂いている。また東北大学での高磁場マグネットに Y 系超電導線材を適用するための検討に参画している。さらに、これ以外に自らの資金により超電導機器を開発する内外の企業等にも超電導線の販売や共同研究として実施している。これらにより Y 系超電導機器の早期実現・実証を行い、Y 系超電導機器の実用化および超電導事業の確立を目指している。

昭和電線ケーブルシステム(株)においては、線材開発で先行する Bi 系超電導線材による機器検証を進めながら市場の掘り起こしが行われ、Y 系超電導線材に転換することによって機器の性能向上を推進しながら実用化が進んでいくと考えている。置き換えの対象となる応用機器は、医療・分析機器の分野では MRI や NMR、産業・輸送・電力の分野では単結晶引上げ装置、リニアモーターカー、大型モータ、電力ケーブル、車載用を含めた変圧器等が見込まれるとしている。このうち、電力ケーブルや変圧器などは次世代送電網の発展とともに実用化が図られ、特に海外を中心とした市場が形成されると考えている。中国、韓国においてもケーブルを中心としたプロジェクトが複数立ち上がっており、中国は国内で使用するケーブルシステムとして、韓国としては輸出用システムとして開発が始まっている。また、これまで超長距離送電でなければコストメリットが出ないと言われてきた直流送電についても、近年直流給電に対する取り組みがデータセンター、構内配電の分野で活発化し、流れが変わって来ている。昭和電線ケーブルシステム(株)では、ケーブリングを担当する他社との協業を念頭に、安価な MOD 法による Y 系超電導線材の供給会社としての事業を行うことを考えている。また、直流ケーブルへの電流供給を行うための端末の開発もすでに自社開発を開始しており、こちらの方でも市場参入を図っていく方針である。送電ケーブルの展開に関しては、国内で Y 系超電導線材を使用したシステム構築を行い、海外で実証試験・導入といった展開が最も好ましく、本プロジェクトにおいて線材供給でケーブル用線材に必要な技術課題を克服し、プロジェクト終了後に事業を開始できるような状態を整えておきたいと考えている。また、市場展開に必要な特許問題に関しては、米国特許の調査を終了しており、現在は中国国内の特許調査を実施しているところである。中国での超電導開発



や市場性についても随時調査を行っていく予定である。加えて、昭和電線ケーブルシステム(株)は超電導電流リードを超電導線材の実用化に向けたキーパーツとして捉えている。超電導電流リードはあらゆる超電導応用機器に少なくとも1対使用される部品であり、超電導機器ビジネスの拡大とともに電流リードビジネスも拡大する。過去15年に亘りBi系酸化物超電導電流リードを製造・販売してきた実績がある。しかし、Bi系酸化物超電導焼結体を用いてきたため、加速器や核融合炉用に使用する大容量タイプの電流リードの作製は難しかった。これに対し、Y系超電導線材を使用した電流リードでは、線材の本数を調節することにより所望の通電容量を実現することが可能となり、通電容量に対し大きな自由度を持つ。また~20 Tの高磁場中で使用する機器の電流リードでは外部磁場の影響を無視することができ、外部磁場に起因する特性低下を見込んだ容量設計が不要となることなどそのメリットは大きい。磁場特性に優れるY系超電導線材を使用することにより、これまでできなかった高磁場用機器及び大型機器向け大容量電流リードの製品化が可能となり、市場の拡大を目指すことができる。

さらに、平成21年4月22日に鉱工業技術研究組合法を技術研究組合法に改正する法案が可決・成立し、新たな研究開発パートナーシップ制度(技術研究組合制度)が創設され、研究開発から事業化まで一貫して行い、研究成果をビジネスにつなげることが容易・可能となった。この制度を積極的に活用し、(株)フジクラ、昭和電線ケーブルシステム(株)、及び(財)国際超電導産業技術研究センターは、産業用超電導線材・機器技術研究組合(ISTERA)を、平成21年9月24日に設立し、超電導技術を利用した次世代の産業用機器及び当該機器に用いる線材の研究開発を実施し、一般超電導機器の実用化・事業化を目指して、関連技術を保有する線材メーカーと研究機関が協同し、機器の要素技術及び線材作製技術の開発を進めている。超電導技術を巡る我が国の国際競争力の強化とともに、高性能MR I・医療用加速器、リニアモーターカー、高効率産業用モーター等の実現を通じ新市場の創出を目指している。

以上の通り、本「Y系超電導電力機器技術開発」プロジェクトを最先端の技術・人的資産・設備・ノウハウを備えた上述の機関の参画により遂行することで超電導電力機器の実用化展開が大いに見込まれるものである。

## 2. 今後の展開

### 2.1 プロジェクト研究開発実施体制の見直し

本事業を効率的に遂行して超電導電力機器の実用化を図るには、線材安定製造技術や変圧器および SMES 要素技術の開発、機器設計の検討が終了した段階で、機器製作の設備や技能を有する重電メーカーの積極的参画が必要である。そのため、前期 3 ヶ年で要素技術に関する実績や特許を有する電力会社、大学、および国際超電導産業技術研究センター (ISTEC) による機器要素技術や線材メーカーによる線材供給技術を確立するとともに、重電メーカーは後期 2 ヶ年に本事業への参画を検討し、実施する予定である。但し、重電メーカーは技術開発状況を把握するため、委員会には前期から参加してきた。

超電導電力機器用線材の実用化に向けては、それぞれの機器開発時期に対応した性能・コストを含めた仕様及び量を満たした線材の十分な供給体制が整えられている必要がある。本プロジェクト終了後の「実用化技術開発」及び「導入・普及」時期には、それぞれの機器に適した高性能仕様の線材が必要になる。本事業中の「超電導機器用線材の技術開発」では、前期 3 ヶ年（平成 20 年度～平成 22 年度）において、「実用化技術開発」に必要な線材を作製する技術を開発し、後期 2 ヶ年（平成 23 年度～平成 24 年度）においてこれを線材メーカーで安定的に製造できる技術として確立することで本事業終了後の長期信頼性試験等の「実用化技術開発」に必要な線材を提供可能な体制構築を目指している。これと並行し、後期 2 ヶ年（平成 23 年度～平成 24 年度）では、2020 年頃の「導入・普及」時期に必要な線材仕様を満たす線材の製造技術を開発する。このレベルの線材の安定製造、量産技術開発に関しては、上述の「実用化技術開発」時期に並行して線材メーカーが行い、必要時期となる 2020 年頃までには供給体制を構築することで線材の事業化及び機器の事業化につなげる事になる。なお、本プロジェクトで開発を進めている電力機器（SMES、ケーブル、変圧器）の実用化、普及・導入へのシナリオ・スケジュールを、図 IV.2.1-1 に示す。

2008			2012			2020								
20	21	22	中間目標		23	24	最終目標							
			25			～ 32								
<b>イットリウム系超電導電力機器技術開発プロジェクト</b>														
<b>SMES</b>			<ul style="list-style-type: none"> <li>SMESコイル構成技術 7-φ応力600MPa、電流2kA以上</li> <li>コイル伝導冷却技術 20～40K領域、電気絶縁2kV以上</li> <li>2GJ級SMESコイル 基本システム最適化</li> </ul>		 <ul style="list-style-type: none"> <li>○ MJ級SMES動作検証 20K伝導冷却コイルにおける 2万回以上の繰返し充放電</li> <li>試験フィールド：中部電力東政変電所 併設超電導試験センター（名古屋）</li> </ul>		<b>実用化技術開発 (実証試験)</b> SMES: ~MW級 性能・コスト等の 総合評価 競合技術との比較検討 ↓ 系統対策必要箇所検討 実証試験 ケーブル: 150～500m ○66kVケーブル 実証PIのように変電所 構内等での実証試験 ○275kVケーブル 変電所等の構内での 実証試験 変圧器: 20MVA 水力発電所等での 実証試験							
			<ul style="list-style-type: none"> <li>○大電流ケーブル ケーブル損失(交流損) 2W/m-相@5kA 短絡試験: 31.5kA-2s 5kA連続送電</li> <li>○高電圧ケーブル ケーブル損失 (交流損・誘電損) 0.8W/m-相@3kA 短絡試験: 63kA-0.6s 275kV連続送電</li> </ul>							<ul style="list-style-type: none"> <li>○大電流ケーブル 66kVケーブルシステム製作・試験 試験フィールド：住友電工(株) (熊取) 66kV/三心一括/5kA, 15m ケーブル損失: 2.1W/m-相@5kA 内径150mmφ 管路上布設</li> <li>○高電圧ケーブル 275kVケーブルシステム製作・試験 試験フィールド：徳島スチール(市原) 275kV/単心/3kA, 30m ケーブル損失: 0.8W/m-相@3kA ケーブル外径: 150mmφ 以下</li> </ul>		ケーブル: 10km ○66kVケーブル 都市部連系系統 既存ケーブルの増強 ○275kVケーブル 都市部連系系統 者行化ケーブルの リアレス 変圧器: 20MVA 都市部周辺の変電 所から導入開始し、 順次拡大		
			<ul style="list-style-type: none"> <li>20MVA相当の短絡強度検証 膨張タービン、ターボ圧縮機 の断熱効率≧65%</li> <li>変圧器モデルで限流機能を検証</li> <li>2MVA級変圧器モデルの設計</li> <li>実用化技術開発用線材作製 技術の開発</li> </ul>							 <ul style="list-style-type: none"> <li>○2MVA級変圧器 2kA級巻線技術 低交流損失≦1/3 限流効果(≦定格電流の3倍) 冷凍能力 2kW@65K, COP≧0.06@80K</li> <li>試験フィールド：重電メカ及び 配電用変電所併設試験センター(福岡)</li> </ul>		変圧器: 20MVA 都市部周辺の変電 所から導入開始し、 順次拡大		

図 IV.2.1-1 実用化、普及・導入へのシナリオ・スケジュール

## 2.2 超電導線材・機器の実用化への展開

### (1) 「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」(通称: Bi ケーブル実証プロジェクト) との連携強化

本プロジェクト「Y 系超電導電力機器技術開発プロジェクト」とともにビスマス系 (Bi) 線材を使った「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」(平成 19～24 年度) (Bi ケーブル実証プロジェクト) が進行している。

Bi ケーブル実証プロジェクトにおいては、ケーブル化技術で実績のある Bi ケーブルの開発成果などを踏まえ、高温超電導ケーブルや冷却技術などを統合する高温超電導ケーブルシステムを構築し、ケーブル単体のみならず、線路設計、運転、保守を含めたトータルシステムの信頼性を実証するために実系統に連系した実証試験を実施することとしている。これによって超電導ケーブルのトータルシステムとしての総合的な信頼性を実証するとともに、革新的な高効率送電技術の開発・検証を行っている。

一方、本プロジェクトにおいては、Y 系超電導線材が優れた特長を有する一方、線材の長さや供給量が Bi に及ばないため、Y 系超電導線材の特長を生かした大電流化や低損失化を目指した高性能な短尺ケーブル (15 m、30 m) の技術

開発を行っている。さらに、大学との共同研究によってケーブル設計の基本となる大電流化した際の交流損失低減、過電流通電時の熱挙動、液体窒素温度領域での電気絶縁現象について基礎的な研究を行っている。

Bi ケーブル実証プロジェクトでは、冷却を含めたシステム化や、運転、保守を含めたトータルシステムの信頼性について、今後の Y 系超電導ケーブルの開発に非常に役立つ内容が含まれているため、Bi ケーブル実証プロジェクトの成果を参考にする必要はある。さらに、両プロジェクトには、ケーブル試験や機器の標準化といった点で共通した検討を行い、効率的に研究を進める必要がある。

こうした観点から、両プロジェクトは強い連携関係を持って、今後の開発を進めている。

## (2) 希少金属使用量削減プロジェクトとの連携強化

並行実施されている「希少金属代替材料開発プロジェクト」(平成 21~22 年度)では、IBAD/PLD、IBAD/TFA-MOD 法により 300 A/cm-w(@77 K、自己磁場)の特性を有し、1km を超える超長尺 Y 系超電導線材の作製を見通す技術開発を実施している。本プロジェクトにおける「超電導電力機器用線材の技術開発」では、長さは 50 m 及び 200 m ではあるが、各機器の特別な仕様を満たす線材開発を実施している。それぞれの要素技術は、補完関係にあることから、将来、それぞれの成果を融合することにより、各種の機器に対応可能な超長尺線材の実現が可能になり、経済産業省での新成長戦略分野としての高温超電導技術の実用化の方向性を実現するためのアクションプランの中で謳われている「各種回転機(モータ、発電機)の開発・実証を前倒して実施し、システム化・実用化の遅れを挽回する。また、高温超電導線材の供給体制の早期確立を推進する。」が可能になる。更には、この高性能長尺線材の供給体制の構築は、より広い応用展開が期待できることになり、同じアクションプランで記されている、「スマートグリッドの高度化を実現するインフラとして、モデル事業による超電導技術による省エネ効果等の実証導入を推進する。」を実現させることが可能となる。このスマートグリッド関連技術は世界的に強く求められている技術であり、国内に留まることなく戦略的に米国、欧州を始めとする海外への技術展開が期待できることになると考えられる。

## 2.3 標準化事業の今後の積極的展開

超電導分野の国際標準化活動は、これまでは基盤的規格である超電導材料の試験方法規格を我が国が提案し成立させてきたが、今後は、超電導関連産業競争力、超電導関連市場創成拡大の観点から、製品規格の標準化を目指すことに

シフトしていく必要がある。

超電導電力機器分野では、超電導線材及びこれを適用した超電導電力ケーブルに関して、IEC/TC20（電力ケーブル）、CIGRE（国際大電力システム会議）等関連する団体との連携を図りながら、製品規格化への国際合意を形成し、この分野の国際標準活動に対して、今後も主導的役割を果たしていくことが重要である。

今後は、超電導関連産業競争力、超電導関連市場創成拡大の観点から、本プロジェクトで得られた成果を基に高温超電導技術に関連した製品規格の標準化を目指すことにシフトしていく。また、超電導デバイス分野についても研究開発と標準化とを一体的に推進していくとともに、超電導エレクトロニクス素子等に関して国際標準化を目指して調査研究を継続していく。