

スマートグリッド分野における超電導技術の展開

Development of Superconducting Technologies for Smart Grid

向山 晋一*
Shinichi Mukoyama

概要 今から1世紀前に発見された超電導は、その後線材化の研究が進み、大電流を低損失で送ることができる線材として実用化・商用化された。それに伴い、MRI(核磁気共鳴画像法) マグネットをはじめとした応用機器の実用化も進んできており、超電導の特長を生かした機器開発も進んできている。この中で、液体窒素温度で超電導になる高温超電導材料が25年前に発見され、その応用分野も電力や産業分野に適用できる機器に広がる可能性をもち、多くの開発が進められている。一方、この1世紀の間に、人口増加が急速に高まり、それに伴いエネルギー源としての化石燃料の消費も急激に高まってきている。そのため、地球温暖化や化石燃料の枯渇などグローバルな問題も顕在化している。超電導技術は、省エネ技術として期待できる。さらに、人類が直面している危機への対応としてのスマートグリッド構想において、超電導技術が再生可能エネルギーの量的導入を可能とする技術になると予測されることより、古河電工においてもスマートグリッドを視野にいれた超電導機器の開発をスタートした。本書において、スマートグリッドへの適用可能な機器の解説とその開発状況について報告する。

1. はじめに

超電導現象とは、特定の金属や化合物を超低温に冷却したときに、電気抵抗がゼロになる現象であり、今から102年前に、オランダのライデン大学で、物理学者のヘイケ・カメルリング・オンネスにより発見された。オンネスは、ヘリウムを液化して作った4.2 Kの液体ヘリウムで水銀を冷やして電気抵抗を測定したところ、抵抗がゼロであることを発見した。

このような輝かしい物理現象が発見された1911年は、海外においては中国で辛亥革命が起こり、翌年には270年中国を統治してきた清朝が崩壊した年であり、日本においても、明治天皇が崩御され、大正時代に入った歴史的な時期である。これまでの列強国のパワーバランスが崩れ、世界大戦に向かう時代の始まりでもあるが、一方で、アインシュタインの相対論や、量子論が発表されたのもこの時期であり、科学技術が飛躍的発達する黎明期でもあった。

この当時の世界人口は国連の推定^{1), 2)}によると17億人であったのに対して、昨年の10月末には70億人を超えたと報告されている(図1)。さらに人口増加は加速化しており、あと20年でさらに10億人増加すると予想されている。このような人口増加は、当然のことながら人類が使うエネルギー消費量にも影響し、図2に示すように、1910年代に石油換算で1億トン／年の消費量が10億トンと10倍に跳ね上がっている³⁾。このよ

うな人口増加とエネルギー消費の増加は、エネルギー不足、食料不足、水不足などの人口問題に加えて、化石燃料の枯渇や地球温暖化が将来の危機として問題となっている。化石燃料については、石油や天然ガスはこのままのペースでの消費が続くと50年以内になくなると言われており、石炭も130年以内になくなると言われている。また、地球温暖化は、平均気温の上昇による異常気象の発生、生態系への影響、伝染病の流行、砂漠化による食糧不足と水不足の問題がある。また、海面の上昇は、都市部・居住部が低海拔地帯に広がる日本においては、高い懸念事項でもある。

地球温暖化対策としては、人類が化石燃料を燃やし大量の二酸化炭素(CO₂)を排出するエネルギー構造から脱却して、省エネルギー対策の徹底により世界のエネルギー需要を可能な限り減らすこと、そして電力の需要を風力や太陽光などの持続可能な再生可能エネルギーで供給することが必要と考えられている。これら省エネ、再生可能エネルギーの大量導入を円滑に進めるためにスマートグリッドが有効であり、古河電工としてスマートグリッドの技術の一つとして超電導がキー技術になると考え、この分野を成長分野として期待しているところである。

* 高温超電導事業化チーム 超電導応用開発部

2. スマートグリッドと超電導技術

スマートグリッドについての解釈、定義に関しては多くの説明がなされているが、超電導が適用される電力システムから語ると、スマートグリッドはエネルギーの流れを供給側・需要側の両方から制御し、多様なエネルギー源を効率的に組み合わせ、信頼性・安全性の高いシステム構築と考えられる。特に、風力発電や太陽光発電の導入は、化石エネルギー割合の低減、CO₂排出量削減に効果が高く、発電比率の向上が継続的な人類の発展には不可欠と考え、この導入を促進する技術として超電導技術の適用を考えている。

スマートグリッドの中での超電導機器の応用として、古河電工は超電導ケーブル、限流器、そして超電導電力貯蔵を考えている。超電導ケーブルとは、液体窒素温度（マイナス196℃）で

超電導状態となる高温超電導線材を電流が流れる導体に使用することで、小さな断面積で大電流を、低損失で流すことができる送電ケーブルである。再生可能エネルギー発電の新設により、これら発電設備から電力を送る送電線を新設する必要性があり、これらに超電導ケーブルが省エネ効果のある高効率送電線として利用できると考えている。限流器は、電力システムのネットワーク化（巨大化、複雑化）や、分散電源の導入による系統事故の拡大を抑制することができ、より大量の再生可能エネルギーの導入を許容することができる機器として検討している。また、超電導電力貯蔵としては、コイルの磁気エネルギーとして電力を貯蔵するSMES（Superconducting magnetic storage system）や、運動（回転）エネルギーとして貯蔵する大容量超電導フライホイールがある。本論文においては、古河電工におけるこれら開発状況について、報告する。

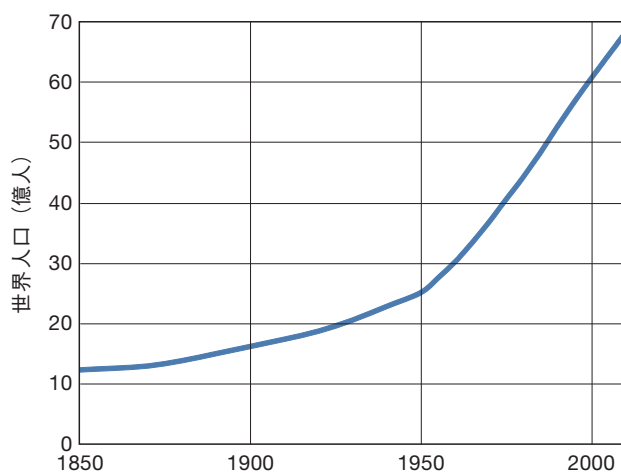


図1 世界人口（国連経済社会局の推定値をグラフ化）
Transition of the population of the world.

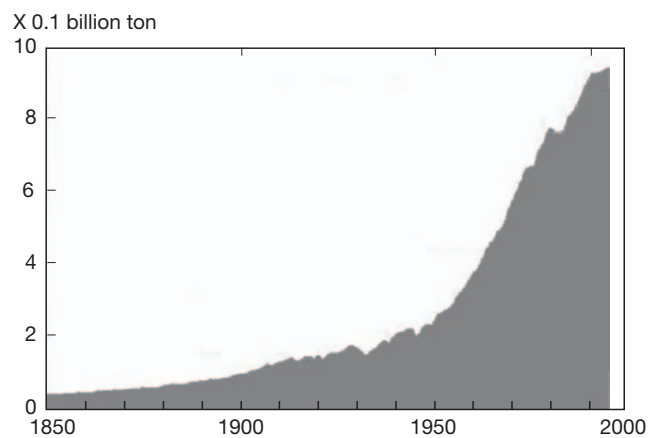


図2 世界のエネルギー消費量の推移
Transition of consumption amount of energy in the world.

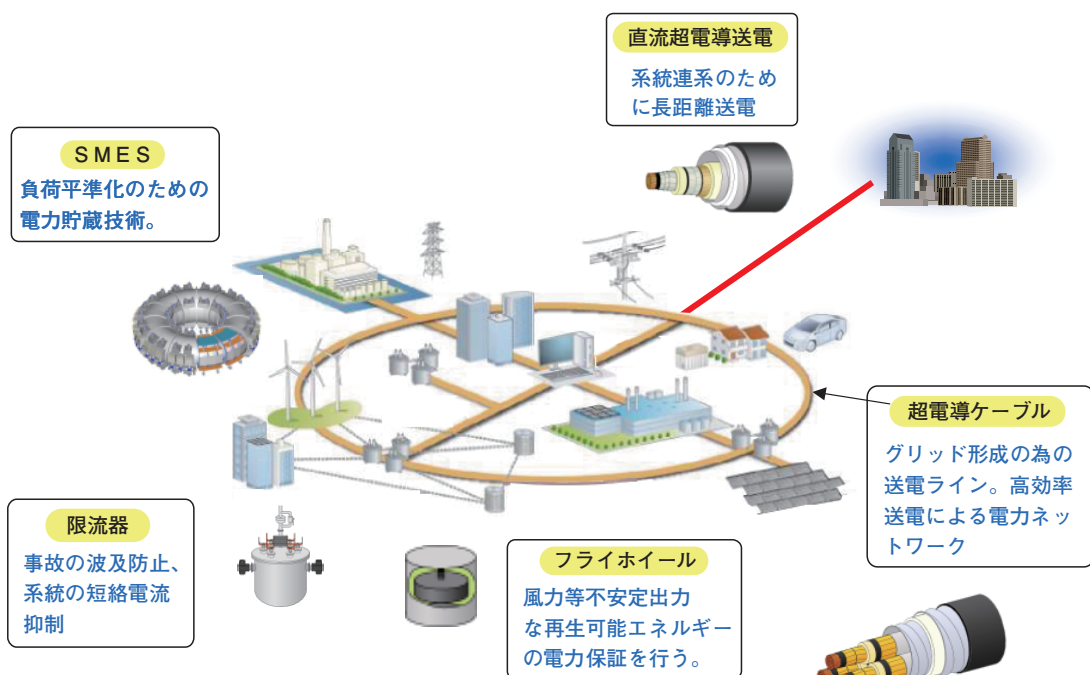


図3 スマートグリッドにおける超電導機器
Superconducting devices in Smart grid.

3. 超電導ケーブル

高温超電導線材を用いた高温超電導ケーブルの構造を図4に示す。超電導ケーブルの構造は、フォーマと呼ばれる円筒形状の銅張り線にテープ状の高温超電導線材を多数本螺旋上に巻きつけ、更にその上に、電気絶縁層、超電導シールド層、保護層を設けることでケーブルコアを形成しており、そのケーブルコアを断熱管の中に収納したものである。断熱管は、ケーブルコアを液体窒素温度に冷却するためにその内部を液体窒素が流れる。約マイナス200℃の液体窒素を蒸発させることなく流すために、断熱管には高い断熱性能が要求され、金属波付け管(コルゲート管)による2重管構造となり、その管の間には断熱材を施工して真空排気している。この超電導ケーブルは単心ケーブルと呼ばれ、ひとつの断熱管に一本のケーブルコアが収納されたタイプであり、絶縁厚の厚い275 kV級の超高電圧ケーブルに適用される。一方で、図5はひとつの断熱管に3本のケーブルコアが収納された三相一括ケーブルと呼ばれるもので、66/77 kV級の高電圧ケーブルに適用される。

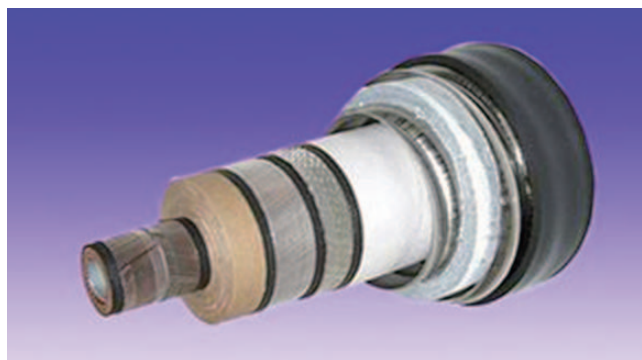


図4 単心型超電導ケーブル (275 kV 3 kA)
Single core HTS cable (275 kV 3 kA).



図5 三相一括型超電導ケーブル (66/77 kV 3 kA)
Three core HTS cable (66/77 kV 3 kA).

3.1 ビスマス (Bi) 系超電導ケーブルの開発

古河電工における高温超電導体を用いた超電導電力ケーブルの開発は、高温超電導体が発見された時期からスタートした。1995年には、電気絶縁層、および終端接続部を持ち、更に真

空断熱された断熱管に収められた、5 m長、単相66 kV/2 kAのプロトタイプケーブルの課通電試験を東京電力殿と共同で実施した⁴⁾。2000年には一本の断熱管の内部に、66 kV級のケーブル導体三相分を収容した20 m長のプロトタイプケーブルの試験を実施した⁵⁾。

2000年からスタートした独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(以下NEDO)殿の「交流超電導電力機器基盤技術研究開発」プロジェクトの中でも、超電導電力ケーブルの技術及び各機器固有の基盤技術の確立を目指す研究開発が進められてきた⁶⁾。このプロジェクトでは、超電導ケーブルの成立性を検証するため、当時世界最長の500 m超電導ケーブルの検証試験が電力中央研究所殿 横須賀研究所で実施された(図6)。このケーブルは、図7に示すように77 kV級1 kAのビスマス系単心極低温電気絶縁タイプの超電導ケーブルで、外径が143 mmであることから一部で管路布設を実施した。ケーブルの製造と布設は古河電工が担当して、試験を電力中央研究所殿と共同で実施した。試験は2004年3月より開始され、冷却特性、熱機械特性、電気特性などの試験を行い、実用化へ向けた課題を抽出することができた⁷⁾。

3.2 イットリウム (Y) 系超電導ケーブルの開発

高い臨界電流と低コスト化が見込まれるイットリウム系超電導線材を用いる高温超電導電力ケーブルの開発も、2006年よりNEDO殿の「超電導応用基盤技術研究開発(第二期)」でスタートした。このプロジェクトでは、イットリウム系線材の適用性を評価することに加えて、66 kV級の10 m長の超電導ケーブルを作製して、図8に示すように、中間接続部で接続して20 m長ケーブルとし、全長を液体窒素(77.3 K)で冷却して31.5 kA 2秒の短絡試験を行った⁸⁾。

イットリウム系超電導ケーブルの開発は、さらに2008年よりNEDO殿の「イットリウム系超電導電力機器開発」の中で機器開発として本格的にスタートした。古河電工は275 kV 3 kAの超電導ケーブル⁹⁾の開発を行っている。

これまでの超電導ケーブルの開発は、超電導の高密度大電流通電の特性を利用したコンパクト超電導ケーブルを開発して、比較的低電圧で大容量な電力ケーブルを実用化して都市部導入を目指してきた。一方で、近年、系統送電線として高電圧で大容量送電を目指した開発も各国で行われている。日本国内の電力系統は、発電所から都市近郊までは275 kV～500 kVの超高圧架空送電線が主に使われ、都市部近郊より都市内部へはケーブルは地中に布設され275 kV級地中送電ケーブルが用いられている。そこで、系統の上位の基幹系統への導入をめざした超電導ケーブルの開発として、世界最高の電圧と容量となる275 kV 3 kA超電導ケーブルの実用化開発を進めている⁹⁾。275 kV超電導ケーブルでは、その電気絶縁が開発の重要ポイントになる。また、電圧にほぼ比例して電気絶縁も厚くなるが、電気絶縁材料自身熱伝導が悪い材料を用いるために、導体の損失が大きいと導体が発熱して超電導を維持できなくなる可能性もある。そのために、通電損失を小さくすることが要求される。これらについての詳細は後述の論文に詳細を記載するが、電気絶縁については信頼性が重要であり、長期にわたって絶縁破壊がおきない材料選定を行い、超電導ケーブルモデルを作製した。そして、交流電圧破壊試験やインパルス破壊試験を実施して、

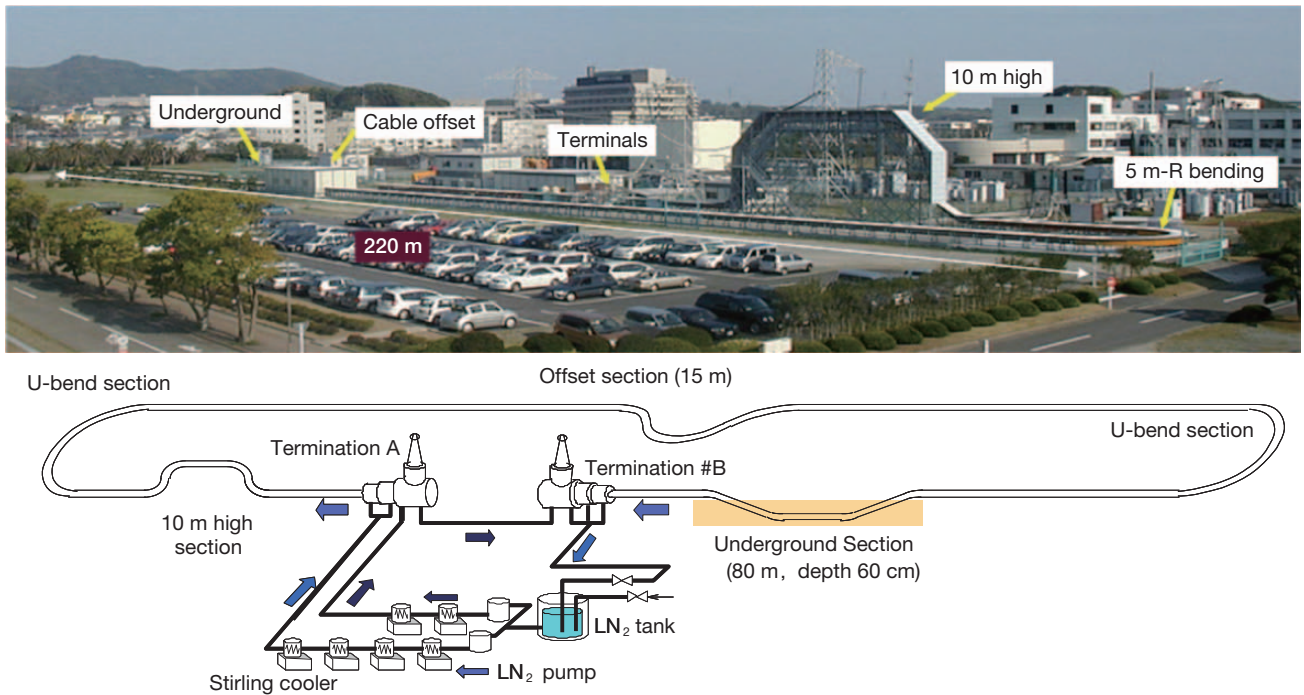
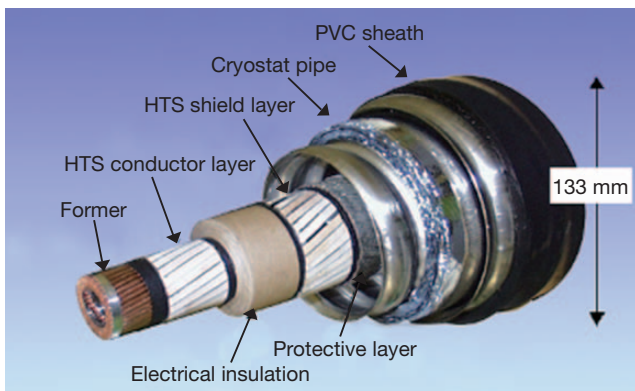


図6 500 m超電導ケーブルのデモンストレーションのレイアウト (上：写真，下：概念図)
Layout of 500 m HTS cable demonstration in the Super-ACE project.



Specification	
Voltage	77 kV
Current	1 kA
Thermal invasion	1 W/m
Wire	BSCCO

図7 500 m超電導ケーブルの構造
Structure of 500 m HTS cable.

設計に資するそれぞれの破壊電圧の許容値を求めた。また、破壊に至らない低い電圧でも絶縁体中で局所的に発生する放電（部分放電）が絶縁材の劣化を引き起こすと考えられていることから、部分放電発生電界の測定及び、その部分放電が発生しない直前の電圧を長時間かけ続けて、部分放電が発生するまでの時間を測定する絶縁材料の劣化に係わる長期特性の調査を行った。これらのデータを基に長期安定な設計電界を決めて、275 kV超電導ケーブルの絶縁設計を行った。一方、超電導体内のヒステリシス損失に関しては、3 mm幅の狭幅線材を、フォーマ上にギャップを小さくして巻きつける方法で低損失化



図8 66 kV 3 kA イットリウム系超電導ケーブルの短絡試験（ジョイントの手前が住友電工製超電導ケーブルで、奥の超電導ケーブルとジョイントが古河電工製）
Short-circuit current test of the 66 kV-3 kA YBCO HTS cable (A cable joint, and a 10 m cable that was set in the back from the joint were fabricated by FEC).

を図った。これにより、これまでの超電導導体の交流損失の50%となる0.12 W/m at 3 kAを実現することができた。一般の超電導機器は、容量が大きいほど冷却が必要とされる動力の割合が小さくなり、従来機器に比べて効率が良くなっていく。超電導ケーブルにおいても、275 kV超電導ケーブルでは、現用のCVケーブルに比べて、同じ送電容量の電力を送るケースにおいて送電損失を4分の1に低減することが可能となり、CO₂排出量の削減にもつながると期待している^{10), 11)}。

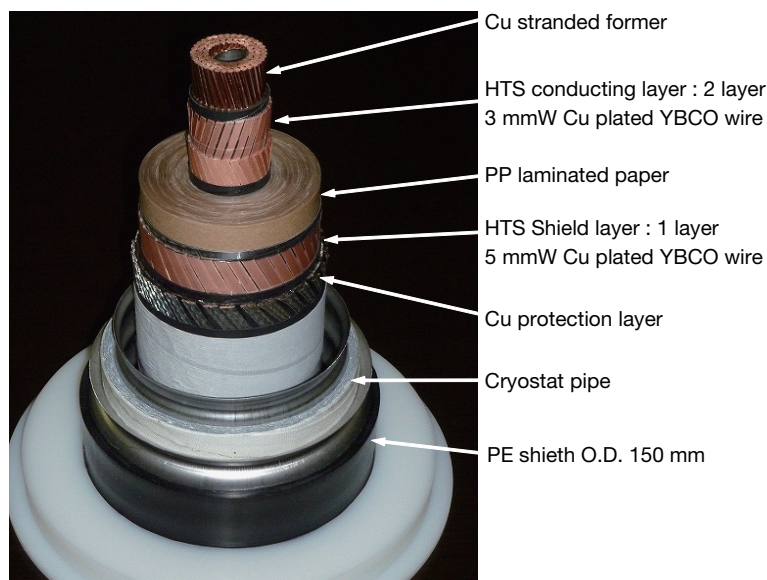


図9 275 kV 3 kA 超電導ケーブルの構造
Structure of the 275 kV 3 kA HTS cable.

4. 限流器

電力を送る送電線や送電設備において、自然災害（落雷、台風など）や他物接触（樹木、鳥獣、クレーンなど）、或いはトランスなど電気設備の老朽化により絶縁破壊が生じると、送電システムのインピーダンスが低下して、事故点に向かって大量の電流が流れる地絡事故や短絡事故が発生する。地絡／短絡事故（以下短絡事故）は停電を引き起こす原因となる。日本国内は、他国に比べて停電率が著しく低いが、これは電力会社が、電気設備の事故が起きないように保守点検を行うことはもとより、万一これら事故が起きた場合、保護継電器により事故回線の瞬時の切り離しが行われている。保護継電器の遮断スピードも技術進歩していて、古くは数秒かかっていたものが、現在では0.1秒以下で遮断することができる。しかしながら、電力システムの巨大化や複雑化、分散電源の導入により短絡電流容量が増加してきており、もし将来的に短絡事故による短絡電流の規模が現行の保護機器の容量を超えてしまうと遮断器では回路を切れなくなる問題が生じてくる。システムを構成するすべての機器の容量をアップするには多額のコストが必要となるために、対策として系統連系点などに限流器を導入し短絡電流を抑制することが提案されている。

限流器は、通過する電流が小さい時にはそのインピーダンスを小さくし、大きい時には大きくして過電流を抑制するものである。図10に示すように、通常の送電時には抵抗なく電流は流れているのに対して、過電流が流れる状況において電流の増加に応じてインピーダンスが増加して電流を抑えるようにしている。そのため、従来の遮断器のように時間遅れもなく過電流の第1波目から電流の抑制ができ、また最大到達電流を低くすることができる。

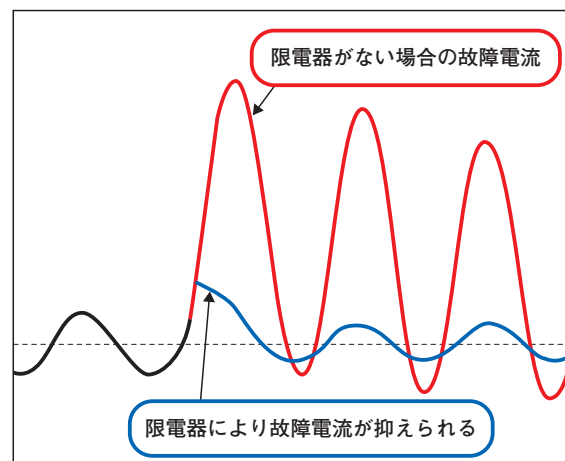


図10 抵抗型限流器の限流機能（短絡電流の抑制）
Principle of resistive SFCL (Suppressing Fault Current).

このインピーダンスを変化させる方式として、古河電工では、超電導のSN転移を用いる抵抗型と呼ばれる方式の限流器を2種類開発した。ひとつは、イットリウム系薄膜素子（YBCO素子）を用いた限流器であり、他方はイットリウム系線材（Y系線材）を用いた限流器である。

YBCO素子を用いた限流器は、Y系素子のS/N転移（superconducting-normal state transitions）を利用して、通常時はゼロ抵抗で、臨界電流以上の過電流が流れた時には高抵抗となって過電流を抑制する機能を持つ機器である。この超電導限流器は、クライオスタットと呼ばれる液体窒素を溜める低温密封容器に、複数のY系素子で構成された限流ユニットが内蔵されている。図11に、Y系素子の写真と、超電導限流器の概念図を示す。Y系素子は、独立行政法人産業技術総合研究所殿が開発してきた塗布熱分解法（MOD法）¹²⁾で、酸化物超電導体（ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$: YBCO）を作製する技術をベースに、古河電工では限流器用Y系素子として開発を行ってきた。構造は、サファ

イア基板上に中間層、超電導層、金属保護膜が順に形成された積層構造を有する超電導薄膜を備える。Y系素子を複数枚並列／直列接続してユニット化して、ユニット両端に電氣的に電流リードを¹²⁾接続して、密閉容器から取り出して電流導入部を構成している。この薄膜型限流器は、6.6 kV 400 Aの仕様で設計されており、配電系統や分散電源の保護機器として適用が期待されるものである。

古河電工の米国の子会社であるスーパーパワー社は、図12に示すように自社が製造するイットリウム系超電導線材を用いた138 kV限流器の開発を行った。開発では、製作した限流器モジュールで概念実証を行なった。138 kV限流器の仕様を、表1に示す。このスーパーパワー社の限流器は送電系統の保護機器としても利用することができる。

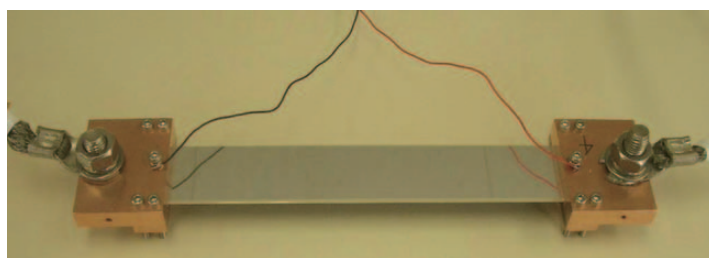
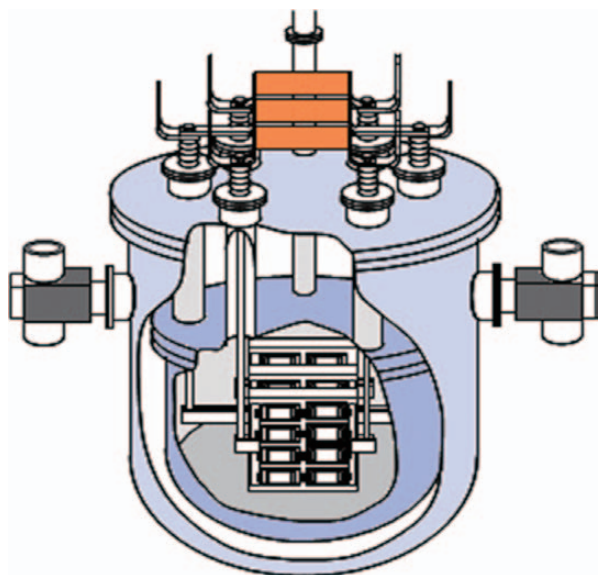


図11 古河電工が開発した薄膜超電導素子を用いた限流器（薄膜素子）

Conceptual design of SFCL and thin film YBCO superconducting plate. These were designed and fabricated by FEC.



限流器素子 並列配列された2G線材



図12 スーパーパワー社が開発した超電導限流器

SFCL that used 2G wires, which was developed by SuperPower inc.

表1 スーパーパワー社製限流器の仕様
Specifications of the SFCL developed by SuperPower.

	Transmission SFCL
Line Voltage	138 kV
Load Current (rms)	1,200 A
Power	165.6 MVA
Prospective Fault	40 kA
Limited Fault	10 kA
Limiting Capability	65-75 %
Type of Superconductor	2G HTS wire
Working Temperature	68 K - 77 K
Recovery Under Load	RUL Capable
Repetitive Fault Freq.	Any
Fault Duration	Any
System Dependence	100% Passive
Ground Footprint 3 Phase	6 m ²
MVA/Footprint	27.6 MVA/m ²

5. 超電導電力貯蔵

導入促進が期待される風力発電や太陽光発電などの再生可能エネルギーについては、風況や日照時間などの自然条件によって発電量が大きく変化することから、効率的にエネルギーを利用するためには、電力系統への影響を抑えることが必要となる。その対策として、再生可能エネルギーの発電量の変動を吸収し、電力の平準化を図るための蓄電システムの開発が必要となる。これらの蓄電システムに求められる機能としては、充放電の高速性と繰り返し性にある。それゆえに、化学反応を利用する蓄電池では十分な応答性を得られず、また繰り返し充放電による寿命短縮の問題がある。一方、超電導を用いたSMESやフライホイールは、半永久的な寿命をもつものである。

5.1 SMES

系統安定化用SMESとしては、2004年からの「超電導電力ネットワーク技術」で、中部電力殿などが電力系統制御用SMESの実証試験を2007年6月にスタートさせ、古河日光発電(株)の細尾発電所構内で古河電工の協力の下に20 MJ級の系統連系試験を実施した¹³⁾。このSMESシステムは、超電導線材としてNbTi線を用いられており、液体ヘリウム浸漬冷却のSMESシステムである(図13)。

高温超電導に関しては、コストダウンとスケールダウンを目的として、高磁場下での性能の良いイットリウム系SMESを開発するために、2008年から開始された「イットリウム系超電導電力機器」の中で、ISTEC(国際超電導産業技術研究センター)殿、中部電力殿、古河電工が20 MJ級SMESの要素コイル開発と2 GJ級のコイル設計を実施している¹⁴⁾。この中では、2 GJ級SMESの開発を見通す高磁界かつコンパクトなコイル設計技術の開発並びにメンテナンスを容易とするコイルの伝導冷却技術開発を行い、イットリウム系SMES対応線材の製造と要素モデルコイルを用いた通電試験や伝導冷却技術開発などを行なっている。



設備容量	1 万 kW	運転電流	1,350 A
蓄積エネルギー	19 MJ	運転電圧	1.1 kV
超電導コイル導体	NbTi	最大磁界	4.4 T
運転温度	4.2 K		

図13 古河日光発電(株)の細尾発電所構内に設置されたSMES (2007～2008年)

LTS SMES that set in Hosoo water power plant of Furukawa Nikko Power Generation Inc. (2007～2008)

5.2 フライホイール

NEDO殿による「安全・低コスト大規模蓄電システム技術開発」の公募に対し、鉄道総合技術研究所殿、クボテック株式会社殿、株式会社ミラプロ殿、古河電気工業株式会社と山梨県が共同して、超電導関連技術などを利用した電力貯蔵技術である「次世代フライホイール蓄電システムの開発」を提案したところ、助成交付予定先として選定された。

フライホイール蓄電システム¹⁵⁾は、図14に示すように、装置の内部にある大型の円盤を、太陽光発電などの電力を使って回転させることで蓄電し、曇天により発電量が減少した際に、その減少分を補填するように発電するものだが、今回開発を行うシステムは、超電導技術を活用し、回転する円盤を常に浮上させることにより、繰り返しの使用に強く、軸受けの摩擦損失の低下などによる運転効率の向上を目指している。古河電工は、この中で超電導ベアリングを構成するイットリウム系超電導コイルの開発を行う。さらに計画では、平成24年度から平成26年度にかけて機器の設計と製作を行い、平成27年度に、米倉山(甲府市)において新たに建設する予定のメガソーラーとの連系試験を開始する予定でいる。

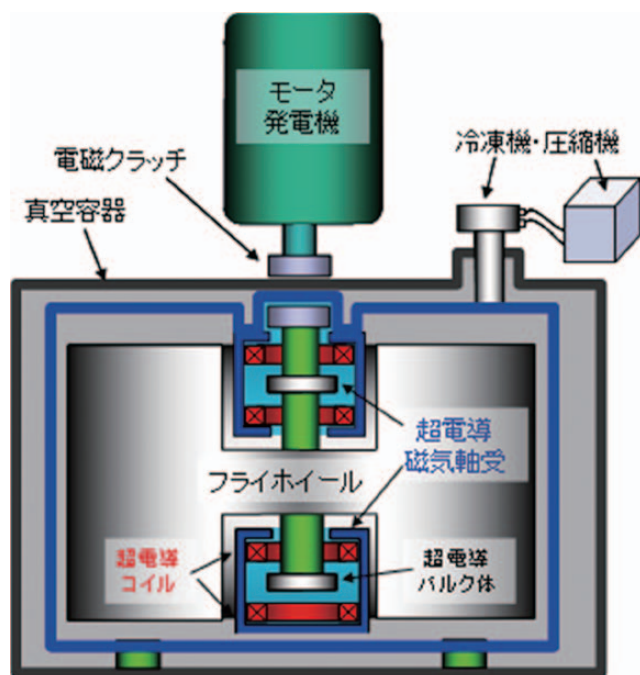


図14 フライホイールの概念図¹⁵⁾
Conceptual design of Flywheel Energy Storage System (FESS).

6. 今後の展開

将来のCO₂削減目標を達成するためには、化石燃料を使わない電源が必要で、再生可能エネルギーへの量的な期待が高まり、また導入スケジュールも早まっている。そのようななかで、系統に分散電源が多数連係されると、系統に多様な問題（逆潮流、単独運転、周波数変動など）が生じる。特に、分散電源のうち再生可能エネルギーは、その出力が不安定であることから、電力の安定供給のためには系統容量による許容値以上の導入ができない問題がある。これまで説明してきた超電導ケーブル、限流器、超電導電力貯蔵は、これらの問題を解決できる可能性をもっていると考えている。それゆえに、スマートグリッド分野においても、超電導機器をひとつの構成要素としてリスト化することで、スマートグリッドの設計自由度が高まり、効率が高く経済性の良好なシステムができ、その結果、高い利益を生むスマートグリッドができるものと考えている。そのために、これら超電導機器の開発においては、コストを意識した開発が必要であり、またその実現も2020年頃の実用化時期に間に合うように開発の早期化が必要となる。更に、インフラ設備に使われることになると、その信頼性、安定性、安全性は高いものが要求され、実系統などに導入した実証試験による信頼性などの検証と確認が必要となる。古河電工においては、電力会社やインフラ事業者と連携して、これら実証試験を実施することが次のステップと考えている。

7. おわりに

超電導現象が発見されて1世紀が過ぎ、また高温超電導が発見されて1/4世紀が過ぎた。古河電工においても、今から半世

紀前に東京中央研究所で研究が開始され、1968年にはNbTi系超電導線材の製造と販売が開始された。その後、多くの種類の金属系超電導線材の製品化が行われ、MRIマグネットをはじめとして、加速器分野、核融合分野などの先端応用への金属系超電導線材の供給が行われてきた。しかし、その事業規模は古河電工の主力事業分野である電力や通信、プラスチック、銅、アルミの素材分野に比べて小さく、これまでは量的にも大きな増加もなく進んできていた。その主たる原因は、超電導は高価であること、冷却の手間がかかることであり、これらの欠点に勝る用途としては、現用の常電導材料ではできない機器用途だけとなり、当然のことながらそのマーケットは小さなものであった。しかしながら、高温超電導の実現により、冷却のペナルティーがそれまでの液体ヘリウム温度に比べて液体窒素温度となることから大幅に改善され、高温超電導線材も将来的にはコストパフォーマンスの良いレベルまでになると予想されることから、現用機器に比べて、省エネ・経済的優位な応用が期待できるようになった。それゆえに、大きな事業規模が期待できるものである。高温超電導分野において、昨年度古河電工は米国のスーパーパワー社を買収して子会社化して、世界中の顧客にイットリウム系超電導線材の販売を行ってきている。

今回紹介したスマートグリッド分野は、日本だけでなく海外、特に新興国のインフラ整備として有効なシステムである。これまでエネルギーの大量消費をベースに発展してきた社会に対して、スマートグリッドの導入は、まさにスマートな社会発展と高効率な社会環境の実現が可能となると考えられる。人類の叡智を集結して地球に優しい技術発展が、超電導技術の採用により現実化できれば、この分野の開発に1/4世紀携わってきた筆者としては感慨深いものである。

謝辞

本研究の一部は、NEDOの委託プロジェクトで実施したものであります。また筆者は、この超電導機器の開発において関与いただいた多くの方々に感謝致します。

参考文献

- 1) World Population Prospects, the 2010 Revision, (http://esa.un.org/wpp/unpp/panel_population.htm)
- 2) "The World at Six Billion," 1999, (<http://www.un.org/esa/population/publications/sixbillion/sixbillion.htm>)
- 3) 世界の長期エネルギー需給展望と原子力の役割, 日本原子力研究開発機構, 経営企画部戦略調査室, 佐藤治, 平成17年11月24日 (<http://www.jaea.go.jp/03/senryaku/seminar/05-1.pdf>)
- 4) 三浦他: 平成7 年電気学会電力・エネルギー部門大会論文集, p.556
- 5) Mukoyama et. al.: The Development of a 66 kV-class High-Tc Superconducting Cable [in Japanese], Cryogenic engineering, Journal of the Cryogenic Society of Japan 33 (3), 137-144, 1998-03-25, 低温工学協会
- 6) K. Ueda et al.: Physica C 392-396 (2003) 1171
- 7) 八木他; 世界最長500 m超電導ケーブルのフィールド試験, 古河電工時報 第116号
- 8) 向山他: イットリウム系高温超電導電力ケーブルの開発, 古河電工時報第123号

- 9) 向山他；275 kV 級高温超電導ケーブルの開発，電気学会研究会資料，ASC10-007，超電導応用電力機器（2010）
- 10) S. Mukoyama et.al.; "DEVELOPMENT OF 275 kV 3 kA HTS POWER CABLE", 8th International Conference on Insulated Power Cables, C.6.2, Jicable'11, C.6.2, 2011
- 11) S. Mukoyama et.al. ; "Status of a 275 kV class REBCO Superconducting Cable Development", Applied Superconductivity Conference 2004, No. 3LB04, 2012
- 12) T. Manabe et.al., Preparation of high-Jc large-size YBCO films ($30 \times 10 \text{ cm}^2$) by coating-pyrolysis process on CeO₂-buffered sapphire", Physica C, 412-414, pp. 896-899, 2004
- 13) 実系統におけるSMESの実証試験と開発状況，技術開発ニュースNo. 131 / 2008-7, 中部電力
- 14) 長屋重夫他; SMES用イットリウム系コイル技術開発の状況，低温工学 46巻6号 p327-334, 2011
- 15) 超電導磁気軸受を用いた鉄道用フライホイール蓄電装置の研究・開発，公益財団法人 鉄道総合技術研究所ホームページ (<http://www.rtri.or.jp/rd/division/rd79/rd7920/rd79200107.html>)