



高温超電導技術：過去・現在・未来

佐藤 謙 一

High-Temperature Superconductivity : Past, Present and Future — by Ken-ichi Sato — In 2011, we will celebrate the centennial anniversary of the discovery of superconductivity. The past, present and future perspective based on 24 years' activity of high temperature superconductivity will be summarized. The superconductivity is deeply related with our social infrastructure and everyday life, and it is important to pursue sustained R&D activity.

Keywords: superconductor, superconductivity, cable, motor, magnet, wire

1. はじめに

1911年に発見された超電導現象。来年2011年は、超電導現象発見100周年という記念すべき年に当たる。超電導現象が発見された1911年、その同じ年には現在の住友電気工業(株)が住友電線製造所として会社が創立(創業は1897年の住友伸銅所)され、高圧の電力ケーブルのビジネスを開始した。究極の電線を目指して、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」が2007～2012の計画で実施されている。超電導100周年という記念すべき年に高温超電導ケーブルが日本で始めて東京電力(株)・旭変電所において実際の電力網に接続される。1986年に高温超電導が発見されて24年。これまでの歩みを振り返り、現在の進捗と未来への展望をまとめてみたい。

2. 高温超電導線：24年の歩み

1988年1月に物質・材料研究機構の前田弘博士によって発見され世の中に知らされたビスマス系超電導材料(Bi-Sr-Ca-Cu-O)を用いた線材化の開発はその直後に始まった。その1年前の1987年の2月には、イトリウム系の材料発見があり、イトリウム系(Y-Ba-Cu-O)の線材化の試みはビスマス系より1年前から始まっていた。

ビスマス系超電導線^{*1}は、基本的に銅線と同様の加工法を適用でき、断面構造がプロセス毎には変わらない、いわば“金太郎飴”に比喻される。2004年に工業製品化の重要なブレイクスルーがあり、それ以降、超電導応用システム開発へと動いている。

イトリウム系超電導線^{*2}は、薄膜の多層積層構造をとり、いわば“ミルフィーユ”に比喻される。製法は半導体の製造方法を適用することとなる。プロセス毎に新しい層が追加され構造が新しくなるので、そこに本質的な歩留の概念が入ってくる。一工程毎のオンライン制御ができるかどうか

かが工業製品化にとって重要になるとされる。

ビスマス系超電導線の開発の過程は、大きく分けると5期に分類される。

第I期(1988-1990)：黎明期-主として短尺から数十m級の線材で線材のコンセプト探索

第II期(1991-1995)：成長期-1,000m級の製造技術開発(JSTの委託開発)

第III期(1996-1998)：停滞期-思うように性能向上、長尺歩留が得られなかった困難な時期

第IV期(1999-2003)：潜伏期-困難な時ではあったが、アカデミアとの連携で飛躍を期した時期

第V期(2004-現在)：躍進期-新しい製造技術とアカデミアとの連携でブレイクスルーが実現。性能向上とコスト低減、また応用製品システム開発への時期

2-1 第I期(1988-1990)：黎明期 この時期は、try & errorでいろいろなアイデアを試した時期であった。現在の2段焼結法の基礎を早い時期に掴んだことがその後の臨界電流の向上につながった。相変態挙動が大きな意味合いを持つことを把握したことも大きかった。材料技術者として、我々に与えられたこの材料の究極の性能はどこまで行くのだろうかということが最も重要であると、当時の副社長の中原恒雄から教えられた。私なりに考えてみると、そこに富士山がある(究極の性能とは何か)ということが大事で、登山ルート(どうやって到達するか)は一つではないからである。多芯線^{*3}によるフレキシブル化を確認した後、開発を多芯線に集中したことはManagerとして大きな決断であった。単芯線の方が圧倒的に高い臨界電流を示していたからである。その後の長尺化、性能や歩留向上の経緯を見ればこれが間違っていなかったことを再確認できる。

2-2 第II期 (1991-1995)：成長期 この時期は、JST (科学技術振興機構、その当時は新技術事業団) からの委託開発の時期で当時としては大きな金額である約10億円という無利子融資を得て、1,000m級の製造技術に挑んだ時期である。1,000mを実現するための設備を自分たちのアイデアに基づいて開発し、必要な部材や設備のソフトも自分たちで開発しなければならなかった。1991年からは東京電力(株)との超電導ケーブルの導体化の共同研究が始まり、今日のNEDO・高温超電導ケーブル実証プロジェクト(横浜プロジェクト)へとつながっていることは感慨深い。この時期に入社した若い人たちが現在の中心開発者として育ってきていることは喜ばしい限りである。

2-3 第III期 (1996-1998)：停滞期と第IV期 (1999-2003)：潜伏期 この時期の前半はいろいろな開発がなかなか成果に結びつかず、後半も最初の間は厳しい時期であった。2004年から稼働した加圧焼成炉のアイデアは1999年に始まったが、その設備としての世界初という困難さから多大の苦労を積み重ねることとなった。原理的に正しいことは必ずその努力が報われることを後でかみしめることとなる。性能向上については、アカデミアとの連携を強化し、ベテランから新進気鋭の若手研究者までの幅広い方との出会いが多数あったことは大変幸運であった。我々が気がつかない新しい発想など勉強させられるところが多く、現在でもこういう出会いは大切にしている。

2-4 第V期 (2004-現在)：躍進期 当初の目的は、線材としてのRobust性に目標を置いて開発した加圧焼成法が順調に稼働し、線材としてそれまでとは異なった様相を示し始めた。臨界電流の向上、機械的特性の向上などで大きな進歩が得られ、また長尺線材としての特性も飛躍的に向上した。いろいろなアイデアを基に試作した結果が系統的な結果として得られ始めたこともその後の飛躍につながっていると思う。

アカデミアとの連携としては、臨界温度自体も117.8K^{(1),(2)}という今までにない高い温度を示し、電磁的・機械的な評価^{(3)~(5)}も系統だった結果が得られ、次の一手として打つ手も従来に比べ確率の高いものとなった。図1には、高温超電導線の24年の歩みを示した。長尺線の単長も2,000mを越え、性能評価指数である臨界電流x線材単長(Axm)も300,000Amを量産レベルで達成している。300,000Amの性能評価指数は、工業製品としてのレベルを代表する指数である。臨界電流自体も今までの基礎的な研究の積み重ねを元に改善が図られ、2009年11月には臨界電流の最高値として、236Aを記録した。

2-5 応用へ向けての特性の現状 種々の超電導線の特性を比較する際、臨界電流密度(単位断面面積当たりの電流密度)を使う場合と臨界電流(電流の絶対値。とにかく超電導線1本でどのくらい電流が流すことができるかを表し、実使用上はこちらが重要である)を使う場合があるが、応用上重要な臨界電流で比較することが肝要である。図2, 3には超電導ケーブル応用を考えた場合、高磁場マグネット応用を考えた場合の二つのケースで長尺の高温超

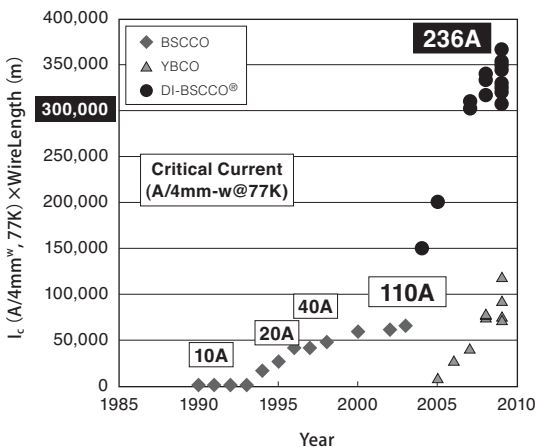


図1 高温超電導線の24年の歩み

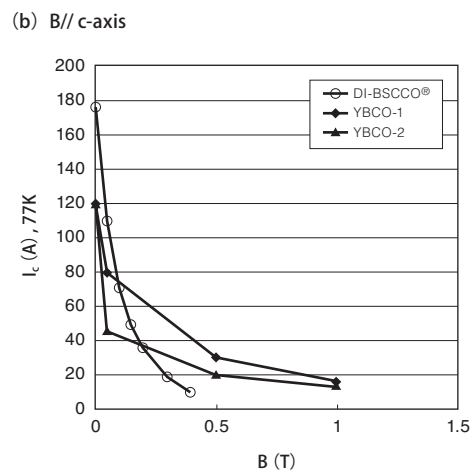
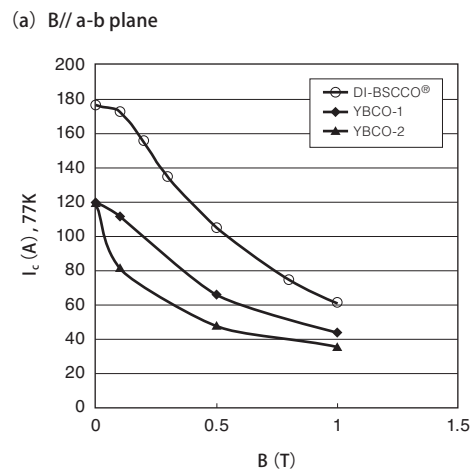


図2 長尺超電導線のIc-B特性 (77K)

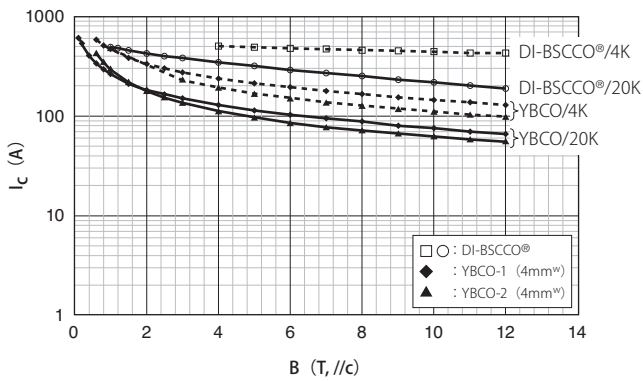


図3 長尺超電導線のIc-B-T特性 (高磁場)

超電導線の臨界電流の磁場特性を比較して示した。ビスマス系超電導線の優れた特性が理解できる。さらにビスマス系超電導線は臨界温度が112Kとイットリウム系超電導線の90Kに比べて高いので、長距離の電力ケーブルとしての応用を考えると、冷却温度の変化に対しても安定であるメリットも有している。例えば、ビスマス系超電導線は90Kにおいても液体窒素温度(77K)の半分の臨界電流を有しており、局部的に温度上昇しても安定度が高い。

ビスマス系高温超電導線は磁場に弱いと一般には誤って理解されている面もあるが、それは臨界電流密度(A/cm²)で示すとそのような理解を生みやすいからである。臨界電流密度での比較は、物性値としては間違っていないのだが、ビスマス系超電導線とイットリウム系超電導線の超電導部分の断面積が二桁異なるので、臨界電流(A)で比較しないと正確な比較は出来ない。応用製品として使う場合、臨界電流(A)で設計し、臨界電流密度(A/cm²)では設計しない。今後の課題としては、液体窒素温度でのc軸に平行な磁場(5,000ガウス以上)に対する臨界電流はビスマス系超電導線の場合、急激に低下するので、改善を必要とする。

3. 応用製品の24年の歩み

超電導線といっても、高温超電導材料は酸化物であり、開発当初は超電導電流としては1アンペア以下の臨界電流しか流れなかったし、こんな脆弱な材料で長い電線が作れるとは誰も思っていなかった。

多芯線が繰り返し曲げ特性に優れフレキシブルな超電導線として可能なことが判り、この超電導線を用いて、応用製品の姿を世の中に示してゆこうとして、図4のような“おもちゃ”を作った。いずれも手のひらサイズの大きさでありながら、今日の実規模サイズのプロトタイプができるまでになるとは全く思えない段階で、とにかくこの我々に与えられた材料を用いて何とか使える物を開発したい、との思いで世の中に示した。

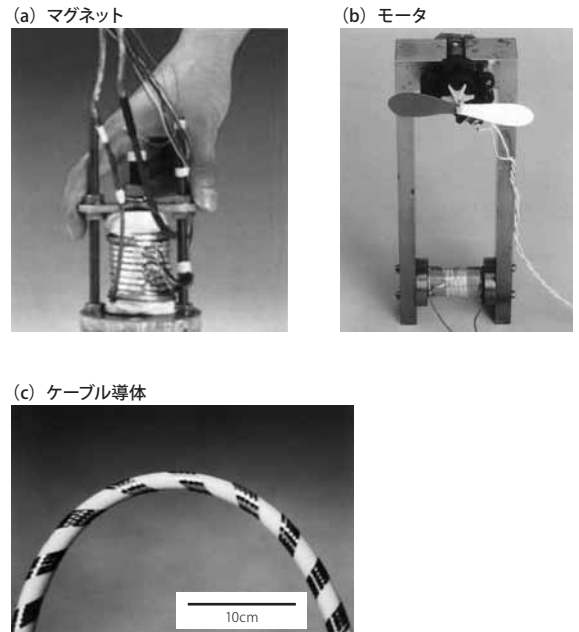


図4 高温超電導“手のひらサイズ”応用製品

いずれも今日では、数MWの電気推進船のモータ、超電導電気自動車のモータ、実際の電力網につながり電気を家庭や工場へ送り届けた地中電力ケーブル、リニアモーターカー、MRIやNMR^{*4}のマグネットなど実規模のプロトタイプが開発され、評価されている。

図5には応用製品開発の歩みの例として電力ケーブル開発の歩みを示す。電力ケーブルの開発は東京電力(株)との共同研究として、1991年から導体化研究としてスタートし、7mモデルケーブルでのデモも並行しながら、その後長尺化、電気絶縁、端末などの開発を経て、約10年後に66kV、100m長さの世界初の超電導ケーブルの実験線路での実用性検証試験へと進めることができた。

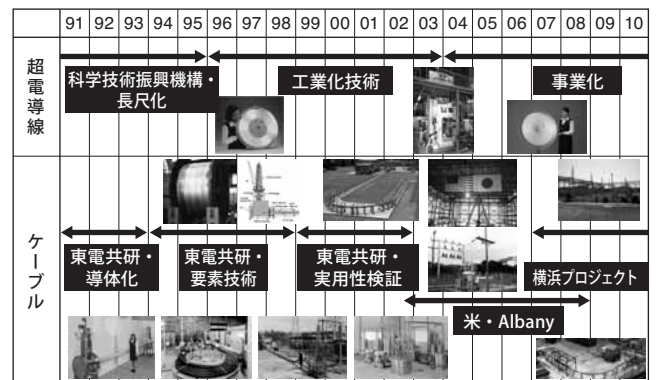


図5 電力ケーブル開発の歩み

電力ケーブルの開発は、地中送電線の基幹電力ケーブルの超電導化を狙ったものであり、地中送電線は表1に示すように現在の日本では21,000km回線に及ぶ。圧倒的に配電線レベルの線路距離が大きいもの大都市を中心に地中送電線が布設されており、このうち約50%が東京地区に存在する。

表1 日本の送配電線回線延長

配電線	架空	3,948,159 km
	地中	67,683 km
送電線	架空	146,241 km
	地中	21,011 km

日本における電力総需要は約1兆kWhであり、図6に示すように送配電損失は約5%、すなわち500億kWhと膨大な電力が銅やアルミニウムの電線のオーミックな損失として熱となって捨てられており、図6からこれ以上の損失低減は不可能なことを示している。この損失を超電導ケーブルにより低減させるとともに、コンパクトな超電導ケーブルにより直径15cmの標準的既設管路への送電用ケーブル敷設が可能となり、従来の直径が3mにも及ぶ洞道（トンネル）が不要となるので総合的な建設費を低減させることもできる。

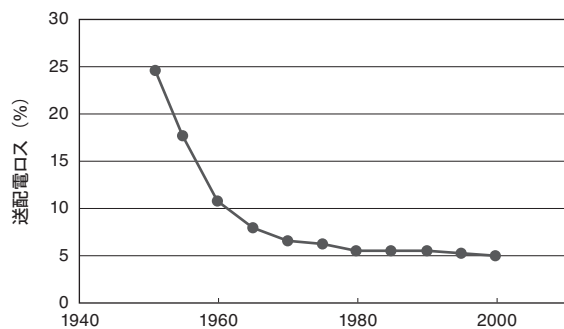


図6 日本の送配電ロス率 (電気事業連合会のデータを元にグラフ化)

電力ケーブルは一例であるものの、応用基礎研究から要素技術開発、プロトタイプの研究まで約10年の歳月が必要であった。最近、国の技術開発プロジェクトでも科学技術振興機構の戦略的イノベーション創出推進⁽⁶⁾のようにこれら応用基礎、要素技術、プロトタイプのステージをシームレスに支える制度が誕生し、短期的な目標に振り回されることのない腰を落ち着いた開発が可能となったことは大きな進歩である。

超電導関係のプロジェクトというと、超電導基幹部品の開発にスポットライトがあたるのは当然であるものの、実用化への道のりを考えると、超電導ではない技術の部分が実際の実用化には足かせになる場合があり、大きな効果のある超電導技術を使いこなすには周辺技術や応用ソフト技術を含めた一くくりの技術体系を開発する覚悟が必要となる。一例として、液体窒素温度における冷凍機の効率を考えてみる。図7に示すようにカルノー効率^{*5}に対して現状では高々30%程度の効率であり、これは液体窒素温度での成績係数^{*6}であるCOP (Coefficient of Performance) と言うと0.1程度であり、液体窒素温度での損失に対し室温動力は10倍必要となり、経済的な合理性を獲得する上で一つの大きな課題である。そのほか実際に実用化をしてゆく上で重要なことは、メンテナンス期間の間隔長期間化や冷凍機コストの低減であり、継続して開発が必要である。

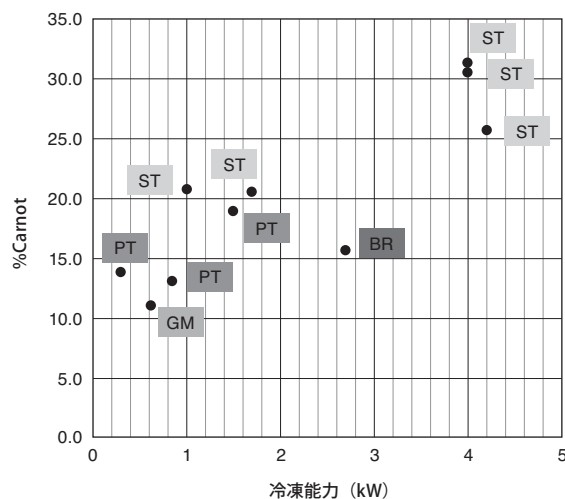


図7 高温超電導機器用冷凍機の効率の現状 (ST: スターリング、PT: パルスチューブ、BR: プレイトン、GM: ギフォードマクマフォン)

4. 高温超電導線と応用製品の将来展望

前章までに高温超電導線および応用製品の過去と現状を見てきた。2004年のビスマス系超電導線の工業製品化以来、応用製品のシステム開発が実規模レベルでスタートしてきた。

今後は、これらの製品の実用化とともに適用箇所を更に拡大し、グリーンエネルギーや省エネルギーの旗手としての超電導応用のフロンティアを開拓してゆくことが求められている。

4-1 超電導線の将来 多くの種類の応用製品を実用化し拡大・促進するためには、基本となる高温超電導線の持っているポテンシャルを發揮させて更なる性能向上を

追求する必要がある。材料研究者にはそれぞれが取り組む材料が持っている究極の姿を目指すことが求められる。現在のビスマス系超電導線の性能は開発当初の臨界電流値である数Aから見れば200Aと20倍以上の値となっているが、この材料の持っているポテンシャルである1,000A～2,000Aから見ればまだまだ究極の姿を実現しているとは言い難い。

現在のビスマス系超電導線を走査型ホール素子磁気顕微鏡で詳細に検討・解析された結果、中心部分の超電導体には平均の超電導体の2倍近い80,000～90,000A/cm²の臨界電流密度が確認⁽⁷⁾されており、微細結晶構造の精密制御により臨界電流の飛躍的な向上が期待できる。

高温超電導線は、コストパフォーマンスから見ると、円/Amで評価されるので、円/mは量産効果や生産技術の改善で向上させ、円/Aは性能アップで向上させよう。これらの相乗効果で経済合理性の一面を向上させることができる。性能アップには、金属元素だけで5元素が必要で酸素を入れると6元素系となる、この多元素系の材料で複雑な固体化学反応の制御、配向度の向上、臨界温度自体の向上とともに、未だ明快な測定結果もままならない粒界の構造解析とその制御が必要と考えられる。強力な放射光設備であるSPring-8^{*7}や中性子線設備であるJ-PARC^{*8}などを駆使した先端的な計測評価設備の活用がキーとなろう。

4-2 高温超電導応用の将来 高温超電導線の応用は、次の五つの大きな分野において開発が進んでいる。

- (1) 地球とエネルギー・環境技術（電力ケーブル、発電機、変圧器、限流器など）
- (2) 都市インフラと交通技術（船舶用モータ、超電導自動車、リニアなど）
- (3) 暮らしとIT・ユビキタス技術（インターネットデータセンター直流配電など）
- (4) 工場とモノ作り技術（単結晶引き上げ装置、磁気分離、誘導加熱装置など）
- (5) 医療とバイオ技術（MRI、NMRなど）

これらの応用分野は私たちの社会インフラ、健康、日常生活に深く関わりあうものである。高温超電導線が省エネルギー・小型化・軽量化・高性能化・省資源化の特徴をもたらすので、今後の低炭素社会を実現してゆく際の切り札的存在になってゆくであろうことが想像される。その応用分野の一つに、直流送電がある。超電導は交流では小さいながらもヒステリシス損失が不可避であるが、超電導直流ではそれがなく、限りなく電圧降下の小さな送電システムが考えられる。現在の直流送電システムの実例は、①長距離架空送電線、②海底ケーブル、③直流連系や周波数変換、④直流電化である地下鉄や電車のき電線（750V、1500V）、が主なものである。

1880年発電機を開発したエジソンは直流配電システムの事業化に乗り出した。しかしながら銅線で電気を送る場合、RI²で表されるオーミックロスが発生し、電圧ドロップ

のため高々2kmが送電できる限界であった。これは我が国で最初の商業発電が実施された京都・蹴上の水力発電所からの配電でも同様であった。高温超電導直流送配電は今までの技術では不可能であった低電圧・大電流の新しい電力システムを生み出すことが可能である。

例えば、太陽光発電で生み出された低電圧の直流電流を高温超電導ケーブルにより低損失で長距離を運ぶことができると、自然エネルギーの泣き所である、空間的な不均一さや時間的な不均一さを解消して人類の共通の財産として分け隔てないエネルギー供給が可能となる。

図8には再生エネルギーと超電導直流送電を統合した新しい電力網を描いたものを示す。二次電池を有効活用して制御された電力供給を目指すもので、二次電池は需要地近傍に持つてくることも可能である。

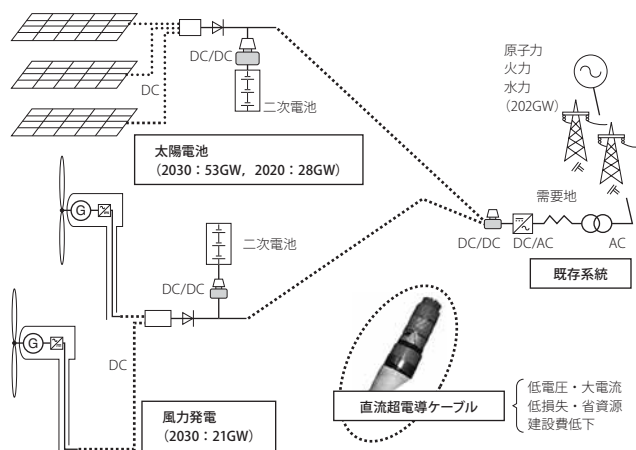


図8 再生エネルギーと超電導直流送電統合例

再生エネルギーと超電導直流送電の組合せを考えた場合の課題と目標を表2に示す。

表2 再生エネルギーと超電導送電統合例の課題

課題	対応策
再生可能エネルギーのお天気任せによるきまぐれさ	<ul style="list-style-type: none"> ・太陽光発電や風力発電の稼働率の低さ→種々のエネルギー源や蓄電池との併用による時間的平準化 ・ローカルサイズ→国サイズ→地球サイズ、の係による時間的空間的な平均化
超電導ケーブルは常に冷却が必要。例えば、夜間の太陽光発電がされていない時でも冷凍機を運転して冷却。	<ul style="list-style-type: none"> ・冷凍機効率の改善（現状：カルノー効率の20～30% →将来：45%） ・ケーブル断熱技術の改善（液体窒素温度への熱侵入量の低減）
システム検討の必要性	<ul style="list-style-type: none"> ・再生可能エネルギーと超電導送電システム検討 ・直流グリッドにおける技術的諸問題の検討

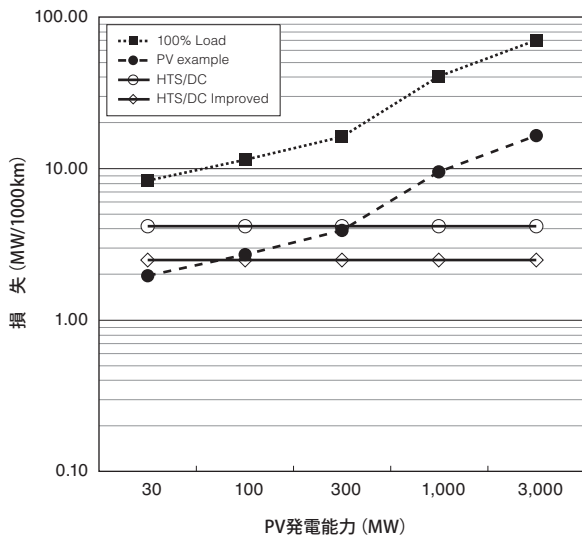


図9 太陽光発電と超電導送電の組合せの損失計算例
 (100% Load：高圧架空線の100%電流負荷時の損失、
 PV example：太陽光発電の30%稼働率の場合の高圧架空線の損失、HTS/DC：現状高温超電導ケーブルを用いた場合の損失、HTS/DC Improved：近い将来の高温超電導ケーブルを用いた場合の損失)

図9には太陽光発電と超電導送電の組合せ時の損失を従来考えてこられた超高圧架空線による直流送電と比較した結果の例である。太陽光発電は稼働率が低いが、30%のものできている。太陽光発電の容量としては、現在ではスペインの60MWが運転中のものとしては最大であるが、大規模のものが計画されており、80MWから600MW級の計画が進行している。ケーブル収納線路としての断熱管の断熱性能向上や冷凍機の性能向上により、損失の点で超電導ケーブルによる直流送電が有利となる容量は数十MW程度となり、現在計画中の容量レベルでも可能性が出てきたと考えられる。

同様の応用例として、超電導直流送電による鉄道の直流電化への応用が考えられる^{(8)~(10)}。現在、直流電気鉄道への超電導ケーブルの適用可能性シミュレーション結果が発表されており、超電導直流送電をき電システムに用いることにより、損失の低減、変電所数の削減、回生失効確率の低減の可能性が指摘されている。

また、超電導モータを搭載した電気推進船や電気自動車が可能となれば大幅な省エネルギーが可能となり、リニアとともに新しいモダリティを生み出すと期待される。

5. 結 言

高温超電導発見から24年、超電導発見から99年が経ち、高温超電導技術が実規模システムの評価段階へと進んできた。これから実用化への粘り強い歩みを必要とされ、これにチャレンジする若い人たちの活躍にエールを送るとともに

に、今まで御支援・御指導いただいている社内外の関係者の皆様に感謝いたします。

用語集

※1 ビスマス系超電導線

Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O_{10-x}で表される高温超電導材料を用いた実用超電導線。ケーブル、モータ、マグネットなどに使用される。材料は日本で発見された。

※2 イットリウム系超電導線

YBa₂Cu₃O_{7-x}で表される高温超電導材料を用いた超電導線。国家プロジェクトで開発が進行中。材料は米国で発見された。

※3 多芯線

高温超電導材料を100本くらいのフィラメントに分割して金属マトリックスに配置した超電導線。セラミックスの高温超電導材料であるがこの構造でフレキシブルになる。

※4 MRIとNMR

いずれも外部磁場と測定物質の核スピンの相互作用で断面写真や物質の分析を行う装置。磁気共鳴画像診断装置(MRI)、核磁気共鳴装置(NMR)と呼ばれる。

※5 カルノー効率

理論的な熱効率を意味し、高温(T_{high})と低温(T_{cool})の間での熱効率は、T_{cool} / (T_{high} - T_{cool})で示され、室温と77Kでは0.345である。%Carnotは、実際の効率とカルノー効率の比で表す。

※6 成績係数

COP (Coefficient of Performance) と言われ、P_{output} / P_{input}で表し、投入エネルギーのうち使用されるエネルギーの比である。エネルギーの消費効率の目安として使われる。

※7 SPring-8

Super Photon ring-8 GeVの略称で、大型の放射光施設。兵庫県の播磨科学公園都市にあり、強力な放射光で物質の最先端の分析が非破壊で可能。産業利用も盛んに行われている。

※8 J-PARC

Japan Proton Accelerator Research Complexの略称で、2008年度末に完成した大強度陽子加速器施設。素粒子、原子核、原子、物質、生命科学までの広い分野を研究対象としている。強力な中性子による物質の最先端の分析も期待されている。

参 考 文 献 -----

- (1) J. Shimoyama et al. : Jpn. J. Appl. Phys. 44 (2005) L1525.
- (2) J. Shimoyama et al. : Physica C 460-462 (2007) 1405.
- (3) Y. Himeda et al. : Physica C 445-448 (2006) 722.
- (4) H. Kitaguchi et al. : Supercond. Sci. Technol. 22 (2009) 045005.
- (5) S. Machiya et al. : Supercond. Sci. Technol. 21 (2008) 054007.
- (6) <http://www.jst.go.jp/s-innova/>
- (7) 本田貴裕ほか、「第81回2009年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集」(2009) 87.
- (8) 大柴満春ほか、「平成20年電気学会全国大会」(2008) 5-056.
- (9) 大柴満春ほか、「平成21年電気学会全国大会」(2009) 5-071.
- (10) 上條弘貴ほか、「第80回2009年度春季低温工学・超電導学会講演概要集」(2009) 53.

執 筆 者

佐藤 謙一 : フェロー
材料技術研究開発本部 技師長
工学博士
超電導線と超電導機器の開発に従事

