

電子の海の航海日誌 古河電工の素材技術・来し方行く末

A Logbook Across the Ocean of Electrons A Story of Material Technology in Furukawa Electric: Now and Then



福島 徹*
Toru Fukushima

〈概要〉

古河電工は、明治の黎明期に純銅の精錬を経て銅線ケーブルを製品化した。電力ケーブル網の整備、モータや発電機の普及、電話・電信網の拡大を助け、我が国の近代化に深く関わってきた。

こうした当社の祖業の成り立ちは、街を安全な電灯で明るく照らしつつ、時空を超えて人々の交流を促し、産業発展の原動力を生み、企業が果たすべき社会貢献のひとつの源流となった。以後、祖業から派生したさまざまな素材技術を世に問い、例えば光ファイバや半導体レーザなども素材技術に加えて、新しい情報社会の端緒を拓いた。

一方、気候温暖化とそれに伴う自然災害の大規模化が、この地球の新たな脅威になりつつある。有効かつ持続的な手段を模索する中、核融合発電の早期実現を目指す試みが増えている。これを支える素材が、当社が長年培ってきた超電導線材である。新たな社会貢献向け素材技術を究めてゆきたい。

本寄稿では、銅素材の探求に始まり、超電導物質をはじめとする新素材の商用化を目指す当社の来し方行く末について述べる。

1. はじめに 古河電工の水力発電

古河本店(その後、古河鋳業を経て古河機械金属株式会社)の手掛けた足尾銅山の開発は、かの枯山が民間に払い下げられ、創業者古河市兵衛が購入した1877年に遡る。

一方、産出した粗銅を極めて低抵抗な純銅、すなわち電線へと変身させるためには、電解精錬という純化プロセスを経る。つまり、送電線を作るために多くの電力を使う、という輪を閉じねばならない。事業の一環に「発電」という機能を組みこむことは自然な流れであっただろう。古河合名会社は1906年から日光電気精銅所(現当社日光事業所)近辺の4か所(細尾・上の代・馬道・背戸山)に順次水力発電所を設置し、運営を開始した。ここで生み出された電気エネルギーは足尾銅山へ送電され、今もなお当時の託送用送電線は生きている。現在の当社日光事業所も、これらの水力発電所で得られた電力で稼働している。

「水力」という自然エネルギーを活用する案は、当社日光事

業所の置かれた自然環境や地域貢献の必要性からも、理想的な選択肢であった。中禅寺湖の水量を活かし、美しい森林河川と事業との両方を結び合わせて次世代に伝える、という、創業当時の人々の想いを今も引き継いでいる。

当社は次世代の社会インフラと新しいモビリティ実現に向け、素材技術をもとに社会貢献を果たし、上に述べた創業者の心意気を継承する。昨今の地球環境変化は急を告げるばかりで、当社がこれまで培ってきた素材技術及び製品事業の上にもう一步、「地球貢献」のシナリオを加えてゆきたい。いわばそれが本稿のテーマである。

2. 純銅線のもたらした黎明

電解精錬という手段で徹底的に不純物を取り除くと、純化された銅の塊は均一かつ整列された銅原子を核とし、そのまわりに自由電子を豊かに湛えた「電子の海」と化す。銅が「良導体」としての機能を果たす秘密は、この「電子の海」が、巨大な電流から微細な電圧振幅まで、あたかも津波か、あるいは漣(さざなみ)のように、波頭の勢いを衰えさせることなく遠くまで

* 地産地承エネルギープロジェクトチーム長 兼 研究開発本部副本部長

エネルギーを伝達するからだ。純銅は、電気エネルギーだけでなく、熱の良導体としても機能する。また、純化するほど展延性を増し、細く長い線材に加工しやすくなる。

銅という素材が、装飾品や貴金属あるいは貨幣、という「あかがね」古来の用途を脱し、19世紀初頭に産業発展の一翼を担う基礎素材に躍り出たのは、「電子の海」の発見と、「線材」という製品の具現化と、電気的应用ニーズとが、絶妙のタイミングで重なったからに他ならない。

今でこそ成熟分野と目されがちだが、歴史を紐解けば、純銅線が世の中にもたらしたインパクトの大きさをたどることができる。1858年に成し遂げられた、初の大西洋横断ケーブルなどはその好例であろう。世界初の大西洋間モールス信号は、7本の純銅線をより合わせた、全長3,200 kmの中心導体によって伝達された。まさに、「電子の海」が、地球上の大海をまたぐ通信路に化けるとはいかにも痛快な話だが、その完成は難航し、開始から2年余りの歳月を要した¹⁾。

大英帝国ヴィクトリア女王と、アメリカ合衆国ブキャナン大統領は、開通した海底ケーブルを通じて、都合98語の電信を取り交わしたという。船舶を用いて手紙を届ける以外に通信手段のなかったこの時代に、同時通信を成し遂げた快挙は、後のアポロ月面着陸に匹敵するセンセーションを巻き起こした。しかし、初の大西洋横断ケーブルは、壮挙のあと数週間も経たぬうちに機能を停止してしまった。絶縁被覆材(天然ゴム)が劣化し、中心導体が海水と導通したことが故障の原因とされた。人類が手にした「電子の海」による「自然の大海」に対する初挑戦は、黒星に終わった。

時は移り1884年。本所鎔銅所が開設し、純銅から電線製造に至る事業を始める。これを起点として、古河電工は1920年に誕生した。欧米に遅れること久しく、大西洋横断ケーブルの快挙から既に四半世紀が経過していた。一刻も早く、我が国に電気と通信の夜明けをもたらしたい、との先達の痛切な想いを今にして振り返る。純銅の精錬に礎をおき²⁾、線引き加工、そして被覆材料の研究、と立て続けに道を急いで困難を乗り越えた先達のガッツは計り知れない。欧米陣営の海底ケーブルの先例も参考に、改良構造や被覆絶縁技術の開発に心血を注いだはずだ。

3. 電気抵抗・電子の海の水平線

さて、電力を運び、情報を伝送し、産業の発展に寄与する銅電線だが、あらためて言うまでもなくその電気抵抗はゼロではない。また、銅と同様に良導体のアルミニウムなど、その他の金属についても当てはまることだが、温度が高いほど抵抗値は増加する(表1)。

表1 銅およびアルミニウムの体積抵抗率と動作温度の関係
The dependency on the operating temperatures for the resistivities in Copper and Aluminum.

金属	体積抵抗率 [$\mu\Omega\text{cm}$]					
	-195℃	0℃	100℃	700℃	1083℃	1200℃
アルミニウム	0.21	2.5	3.55	24.7	-	32.1
銅	0.2	1.55	2.23	6.7	21.3	-

これは、「電子の海」の限界であり、永遠に到達しない水平線だ。動作中の温度が高いほど、金属原子の熱振動が激しくなる。例えば、電子の海の海面は激しく沸き立ち、エネルギーを伝える波頭が乱れ、その航海は妨げられる。高温の極限に至れば、融点を迎えて溶断してしまう。もはや電線としてエネルギーを伝える機能を果たせなくなるのだ。

ではその逆に、銅やアルミニウムで作った電線をとことん冷やしたらどうか? 同じ表に記した-195℃とは、電線を液体窒素にどっぷりと浸して冷却した状態である。室温動作時に比べ、抵抗値は約10分の1に減少する。同じ電流を流した時に発生する熱エネルギーは、抵抗値に比例して10分の1に減少する。では更に、電子の海が全く静寂になる、極限の低温まで冷やしたらどうか、という素朴な疑問が浮かぶ。これがまさに絶対零度の状態で、-273℃にあたる。金属原子は熱振動を止め、その周囲の電子は自由に動き回れるから、抵抗は限りなくゼロに近づくはずだ。もっともっと大きな電流を流したい場合、発生する熱エネルギーは電流の二乗で激増するから、ゼロ抵抗の実現は究極の理想だ。

しかし残念ながら、絶対零度に冷やしても、銅線の電気抵抗は決してゼロにならない。それは何故かという真理と、電気抵抗がゼロとなる夢のような物質はどこかにないかというあくなき探求が、超電導線材の実現につながる。

4. 超電導・電子の海を越えて

純金属を絶対零度に冷却すると、自由電子本来の量子力学的な性格が現れる。すなわち、時計回りに自転する電子と、反時計回りに自転する電子の二種類(正・負のスピン極性)に明確に分かれてくる。そして、スピン極性の同じ二つの電子が出会うと、却ってお互いの進行を妨げる。これが、電子の海の限界=最後に残る微小な電気抵抗の原因だ。この限界を打破することはできないものだろうか、との探索が続いた。

一方、水銀を極低温にすると「抵抗ゼロ・超電導」の状態になることは、理論的解明よりもずっと早く、オランダの科学者であるKamerlingh Onnesによって1911年に発見された。その後、ニオブとチタンの合金などが、液体ヘリウム温度(-269℃)で「抵抗ゼロ」の状態になることが見いだされた。この現象の根本にある物理は、研究者達の熱心な探求心を引き寄せる。

もしも、それぞれ正負二種類のスピン極性をもつ電子がペアを組んで、スピンをもたない一つの粒子のようにふるまうことが出来たら何が起きるだろうか? すると、一組のペアは、他のペアと干渉せずに、全くのゼロ抵抗で自由に進行できるようになるのではないか? これらの仮説に迫った3人の科学者(John Bardeen, Leon Neil Cooper, John Robert Schrieffer)は、1957年に超電導現象を量子力学的に説明することに成功した。そして、個別の電子に代わり、一对の新しい電子の組合せ(Cooper pair: クーパー・ペア)が、電気抵抗ゼロの超電導状態を実現するとの可能性を示した。この発見は、3人の頭文字を取り、「BCS理論」と命名された。BCS理論の功績により、Bardeenらには1972年にノーベル物理学賞が贈られている。

理論物理の世界でBSC理論により超電導の説明が見ついたころ、実験物理の世界でも超電導臨界温度が高いだけでなく磁場

や電流にも強い超電導体の発見が相次いだ。それまで難しいと思われていた超電導材料の実用化の可能性が示されたのだ。1963年からは当社日光事業所においても超電導金属素材の基礎研究が始まり、時を移さずニオブ合金系超電導線材の製品化に成功した。以後、現在に至るまで世界各国のお客様に低温超電導線材を供給し続けてきた。

しかしニオブチタンなどの低温超電導フィラメントは、無酸素銅(超高純度・超低抵抗)で覆わないと完全な超電導状態を保てない。この高純度無酸素銅の開発には苦戦と工夫の秘話がある。新素材の製品化は、既存素材の究極を目指す果てに成し遂げられる、その好例といえよう。当社が理想的な無酸素銅技術を確立したのは2003年のこと。高純度化をさまたげる不純物の入る経路を徹底的につぶし、プロセスと設備の根本改善する努力が実った。超低抵抗の指標となるRRR(Residual Resistivity Ratio: 残留抵抗比)値は500。従来比で3倍以上の改良に至り、当社低温超電導線材の品質とブランドの基礎を築いた。改良研究もたゆまず継続し、トップレベルの性能と品質で高い評価をいただいている³⁾。

一方、これらの合金系超電導線材は、高価で扱いの難しい液体ヘリウムで極低温(4 K/-269℃)に冷却しないと超電導状態にならない。前述のBCS理論によれば、超電導状態が実現できる温度範囲には限度があり、もう少し使いやすい冷媒、例えば液体窒素(77 K/-196℃)で抵抗ゼロになる物質はないものか、との探索は非常に困難とされた。

しかし、1986年春、IBM社の二人の研究者(Johannes Georg Bednortz, Karl Alexander Muller)は、バリウム・ランタン・銅を組み合わせた酸化物が約35K/-238℃で電気抵抗ゼロの超電導状態になることを見出した。彼らの発見は、コロンブスによるアメリカ大陸到達と同じく偶然に近かったともいわれている。

これを機に、1986年から1987年の短期間に、欧米・日本の各研究機関が続々と成果を公表し、様々な高温超電導物質が産声を上げた。イットリウムなど希土類(Re)と、バリウム(Ba)、および銅(Cu)の3種の金属を組み合わせた酸化物、いわゆる「REBCO」のほか、ビスマス(Bi)系銅酸化物「BSCCO」なども、液体窒素温度で再現性良く超電導状態を示すことが明らかになった。これらの素材に共通するのは、銅と酸素の結びついた結晶面に、超電導キャリアの通り道が形成される点で、一括して「銅酸化物系超電導材料」と呼ばれる。

ちなみに、上記のような酸化物素材で見られる高温超電導状態を説明できる完璧な理論については、未だに多くの研究者の議論を呼び、いくつかの仮説が立てられている。その議論の果てには、また別な素材が偶然に発見され、電子の海原の向こうには新たな水平線が忽然と現れるかもしれない。

5. REBCO 高温超電導線材の量産実用化

当社は1986年当時から基礎研究を開始し、銅酸化物系超電導材料の試作と評価に取り組んだ。REBCO結晶は、脆いセラミックそのものであり、線材としての機能を果たすために細く長いしなやかな形状を実現するには、さらに年月を要した。

現在のREBCO超電導線材は、基材となる金属テープと、そ

の上に蒸着された誘電体多層膜、さらには超電導電流を運ぶREBCO結晶薄膜(厚み1ないし2 μm)で構成される。構造全体に曲げと引張り応力が加えられても、その大きさが金属テープ基板の弾性限界以下であれば、薄膜各層はダメージを受けず、正常に機能する。

そして2012年、YBCO薄膜の成膜プロセスに関して有機金属化学気相成長法(MOCVD)を導入して顕著な成果を上げていたSuperPower社を買収し、REBCO超電導線材の量産製造に向け大きく舵を切った⁴⁾。

MOCVD法を用い、成膜中にジルコニア(Zr)を添加すると、磁束をピン止めする効果が現れる。これにより高磁場中での臨界電流密度が改善される。この技術的な特長と、当社のもつづくりノウハウとを合体させることで、品質、特性、および工程能力の改善を進めてきた⁵⁾。

2020年2月、量産に適したラインレイアウトを考慮したワンフロアの建屋を新築して、既存のプロセスラインを移設完了した。2023年現在、REBCO高温超電導線材の需要の増加に応じ、新しいプロセス設備を追加し、製造能力の引き上げを継続中である⁶⁾。

さて、量産化に向けた技術的な取り組みと同じく重要なことは、適切な用途を見出すことである。冒頭に述べたように、純銅線の系譜は電気エネルギーの用途を拡大し、20世紀以降の消費型経済と産業の基盤を築いたが、世紀も改まって20年余を経過し、社会要請はすでにターニングポイントを迎えている。では一体、REBCO線材の持つ特性上の利点は、今現在そして将来の地球環境にどのような貢献をもたらしことができるだろうか。電子の海をまたぎ、クーパー・ペアの限界も超え、30年以上の歳月をかけてようやく具現化した新素材にかける期待は大きい。今までとは違った、何か新しい用途、新しい使い方の貢献が求められる。

そこで、超電導の持つ利点をもう一度振り返ってみよう。まず、電気抵抗による発熱がゼロになり、投入した電力が100%向こうに届くから送電ロスがゼロになる、という第一の利点は、消費経済的なメリットではある。しかし別な角度の見方として、極大の電流を通じても全く発熱しない、という第二の利点に着目すべきだ。すなわち、銅線を用いたのでは実現できないような小さなコイルを巻くことができ、その中に「超」強力な磁場を閉じこめることができる、というのが、この線材のユーザーにとって、本当にありがたい「コト」である。超電導コイルの発生する超高磁場を利用し、表2に挙げるような技術分野の進展に寄与しつつある。

なお、表2に記した適用分野はすべて、すでにニオブ系超電導線材(当社は日光事業所で製造)により開拓され、例えば国際核融合炉(ITER)においては、ニオブスズ超電導線材を用いた電磁石が発生する磁場によって重水素・三重水素の燃料プラズマを凝縮し閉じ込めるという基本コンセプトが具現化しつつある。しかし、複数の国が分担して開発に参加し、大型電磁石や炉体を建設して推進する巨大規模のプロジェクトで、その完成にはなお長い期間を要する。

一方、高温超電導線材を用いると、さらに強力な磁場を発生する電磁石を作れる。これにより、もっとコンパクトかつ高密度にプラズマを凝縮することができ、核融合炉のサイズを数分

表2 超電導線材が適用される分野の例
Examples of applications for superconductors.

NMR (核磁気共鳴)	発生する磁場を強くすればするほど、複雑なタンパク質や高分子を同定できる。先端医療研究、新薬開発、食品衛生、などの分野で必須の分析装置。
粒子加速器	素粒子物理の研究(例:欧州原子核研究機構・CERN)や、医療機器(がん治療用重粒子線照射装置)などの進展に寄与。
核融合発電	ITER(国際核融合炉)で、実用化に向けた研究が進行中。REBCO線材を用いると、より設備を小型化できることから、複数の民間プロジェクトが発足しつつある。夢の人工太陽が、一歩現実になづく。
磁気浮上・ 回転・移動	超電導コイルで重量物を浮き上げさせ、摩擦抵抗ゼロで回転・直線移動が可能になる。フライホイール蓄電・次世代交通・高性能モーターなど、モビリティ分野での応用を期待。

の1以下に縮めることができる。炉の建設に要する費用や期間を削減でき、実現は早まると期待される。表2に記した適用分野においても、現在はREBCOなど新しい高温超電導線材への切り替えや併用(ハイブリッド構成)によって、システムや機器の高性能化および小型化が進展している。当社のREBCO線材を用いて超電導磁石を試作し、20 Tの強磁場を発生させて小型核融合炉の可能性を示したトカマクエナジー社の実績などは、そうした取り組みの一例である(図1)。

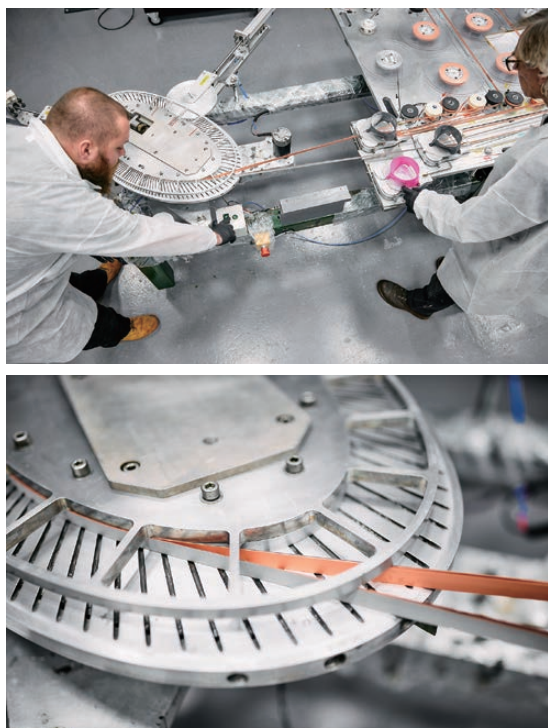


図1 トカマクエナジー社の開発した小型核融合炉用・高温超電導マグネット
The HTS magnet for compact fusion reactor developed by Tokamak Energy Ltd.

超電導線材の応用で、かつてはSFの世界とみなされていたものごとを現実に引き寄せることができる。例えば、核融合炉によって地上の人工太陽を生むことができたなら、もう化石燃料を燃やさずともよくなる。あるいは高磁場を用いて新しい化合物が生み出されたら、増えつつある二酸化炭素を急速に固定してくれるかもしれない。高性能化したNMRを用いて新薬や新しい食材ができたなら、病気も飢えも消えてなくなるかもしれない。浮上し高速で移動する交通網ができたなら、人びとも物資も、

もっと安全に素早く運ばれる。それは共感と共創を紡ぎ、世界中の紛争の種を除いてくれるだろう。

当社は今後も、高品質の超電導線材の量産技術を高め、これらの応用分野を開拓するお客様の期待に応えてゆく。

6. むすび

純銅線に始まる「電子の海」から、超電導が引き寄せた「水平線」まで、いささか迂遠な航海を点描した。素材技術は、それを応用する様々な分野の基礎になるが、そこに至るまでの労力と時間は膨大である。素材が新技術を生み、新技術が次の素材を生む、という輪廻も、これからまだまだ紡いでゆかねばならない。基礎研究から事業に至る道のりは平たんではないが、それを歩み切る力の源泉は、次世代の人々の健康と安全、あるいは地球環境の保全のため、素材と技術で貢献するという使命感にはかならない。

情報の行き来と密度は、電子の海からいち早く抜け出た光ファイバ通信技術によって、格段に向上した。世の中の出来事は、初の大西洋電信ケーブルの頃よりもずっと早く広く伝わり、そのおかげで人々の心も考え方も、以前より激しいテンポで移り変わるようになった。でも、何かがまだ欠けている。この地球はいつまで穏やかでいられるのだろうか。人々は、本当に心安んじて暮らしていけるのだろうか。

今はまだ夢物語かもしれないが、新素材と新技術で、母なる地球と人びとの将来を繋いでゆきたい。古河電工時報は、そうした数多くの技術者の思いを乗せ、これからも秒針を止めず、ちくたくと時を刻む。

参考文献

- Allison Marsh, Tiffany's transatlantic telegraphy doodad, IEEE Spectrum, Vol.56 Issue 11 (2019), 60. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8889974>
- 花輪経男, 日光電気精銅所の電解操業, 日本鉱業会誌, Vol.84 No.963 (1968), 729-731.
- 杉本昌弘ほか, Cu-Nb 強化型Nb₃Sn 線材の開発, Cu-Nb 強化型Nb₃Sn 線材の開発, 古河電工時報, 143 (2024), 9-15.
- Drew Hazelton, 福島徹ほか, SuperPower Inc.と高温超電導線材のご紹介, 古河電工時報, 136 (2017), 8-10.
- 古河電工, 高性能REBCO-HM 線材, 古河電工時報, 143 (2024), 28-30.
- Gene Carota, 立石徹ほか, SuperPower社の紹介, 古河電工時報, 143 (2024), 6-8.