

## 高温超伝導技術の現状と将来展望

### Current Status and Future Prospects of High- $T_c$ Superconducting Technologies

青学大<sup>1</sup> ○下山 淳一<sup>1</sup>

Aoyama Gakuin Univ.<sup>1</sup> ○Jun-ichi Shimoyama<sup>1</sup>

E-mail: shimo@phys.aoyama.ac.jp

直流電流に対して電気抵抗がゼロになる超伝導現象が発見されてから 100 余年、実用的な超伝導材料の開発が始まってから約 50 年、さらに層状銅酸化物で液体窒素温度(77 K)を超える臨界温度( $T_c$ )を示す高温超伝導が発見されてから 30 年が経過した。今日の超伝導体の応用は、いずれもマクロな量子化に由来するものであるが、電磁石や送電ケーブルに代表される大電流高電流密度通電の特徴を生かしたものと、ジョセフソン接合などを利用した多様な電子デバイスに大別できる。現れる効果は前者では高エネルギー密度と低損失であり、後者では高感度計測、高速動作などが挙げられるがやはり省電力である。前者の特徴は、主に 1960 年代以降の加速器や核融合用の超伝導磁石の設計開発を推進する原動力となった一方、電力・エネルギー分野への応用も、液体ヘリウム冷却(4.2 K)が必須だった高温超伝導発見以前から検討されており、前世紀末までには孤立した機器である発電機やモーター、変圧器、超伝導電力貯蔵装置(SMES)、さらに送電ケーブルまで試作された。

これらの研究開発は、超伝導材料を高温超伝導材料に変えても原理的には同じであるため、長尺かつ実用的な臨界電流密度( $J_c$ )を持つ高温超伝導線材が開発され始めた今世紀初め頃から、様々な電力応用機器、設備に高温超伝導材料を利用するプロジェクトが世界中で進められた。高温超伝導材料応用のメリットは運転温度の上昇であり、冷却方法、冷却容器の設計が容易になるだけでなく、物体の比熱が桁違いに大きくなることから熱的により安定な状態での稼働となる。

現在もなお、従来からの金属系超伝導体である Nb-Ti( $T_c \sim 10$  K)と Nb<sub>3</sub>Sn(同 18 K)の線材が工業的に生産されている超伝導線材の 9 割以上を占め、主に医療用 MRI や加速器に使われている。なお、Nb<sub>3</sub>Sn 線材は 2025 年の実験開始を目指して建設中の熱核融合実験炉の巨大超伝導磁石に用いられている。これに対し、銅酸化物超伝導線材としては Bi 系 ( $T_c \sim 110$  K)と RE 系( $T_c \sim 90$  K)が生産されており、さらに今世紀に入ってから発見された金属系超伝導体 MgB<sub>2</sub> ( $T_c = 39$  K)の線材も量産され始め、これらのシェアは少しずつではあるが伸びている。Bi 系線材を用いた超伝導ケーブルは国内では 2001 年より試験が始まり、6 年前には東電旭変電所で 230 m のケーブルが実系統につながれ、ドイツのエッセン市でも 4 年前より全長 1 km のケーブルが稼働している。これらは液体窒素冷却によるもので、開発と同時に管路の断熱技術、液体窒素の温度管理(冷凍機で沸点以下の温度に維持する)技術が向上した。一方、直流送電ケーブル開発も平行して行われ、最近のプロジェクトでは石狩市で 500 m と 1 km のケーブルが設けられ、前者は太陽電池とデータセンタを結ぶ。RE 系線材を用いたケーブル試験も Bi 系にやや遅れて進められており、さらに MgB<sub>2</sub> 線材の液体水素冷却(20 K)による電力応用も検討されている。

ところで、再生可能エネルギーによる発電と超伝導技術の組み合わせは本質的に良い。例えば太陽電池の発電は直流、低電圧で大電力輸送には電流容量が大きく距離が伸びても低損失な直流超伝導送電が最適である。風力発電では発電機の大型化・大重量化への問題に超伝導発電機への置換が有効であり、最近、本格的に検討され始めた風力熱発電システムの発熱機部分での強磁場発生にも超伝導磁石の採用が考えられている。さらに、高温超伝導コイルと高温超伝導バルク磁石を組み合わせたメガソーラー発電所出力の平準化のためのフライホイールも山梨県で試運転されている。

高温超伝導技術の広範な応用への課題は、線材や冷却システムの低コスト化と、冷却状態を長期にわたって維持する技術の確立である。しかし、これらは様々なプロジェクト試験を経て徐々に軽微なものとなってきている。

講演では、高温超伝導応用加速の可能性を持つ超伝導線材接続技術の最新動向を含めて、高温超伝導技術の現状を紹介し、エネルギー応用を中心に未来の超伝導技術の展開について議論する。