



高温超電導体出現の前と後

村上吉繁*

超電導研究への道

筆者が超電導研究をそれまで行って来た電気機器とパワーエレクトロニクスの研究の延長のなかでとらえ始めたのが十数年前である。当時实用超電導材料としてのNbTiによるコイル製作技術は漸やく完成の域にはいり、化合物系材料のNb₃Snは、ブロンズ法などの線材作成技術が提案され技術的課題の研究の最盛期にあった。

電気機器の開発はそのまま電気工学のたん生であったと言っても過言でなく古典的なものである。このような古い技術のなかに新しい技術を導入して筆者自身の研究のあらたな展開をはかりたかった。

この構想は1980年に設立された超電導工学実験センターにおいて、電力貯蔵容量0.5MJの超電導マグネットとサイリスタ電力変換装置から成る超電導電力貯蔵装置、50万V/280kmの超高压長距離送電システムを模擬する電力システムを開発する機会を与えられ眼に見える図1のような形となった。

超電導電力貯蔵(SMES)には二つの応用が開かれている。一つは揚水発電所規模の10¹³Jの貯蔵容量で昼間の尖頭負荷対策を想定するものである。もう一つは電力システムの安定化制御用であり10⁷~10⁸Jの規模で、有効電力の充放電とともに進みより遅れの広い範囲の無効電力の供給を行うことにより電力システムの定態および中間領域から過波にわたる安定度を改善できる。近年原子力発電の比重が高まり発電地点が遠隔の地に偏在化し、消費中心に長距離送電線により電力輸送が行われる傾向にある。このような

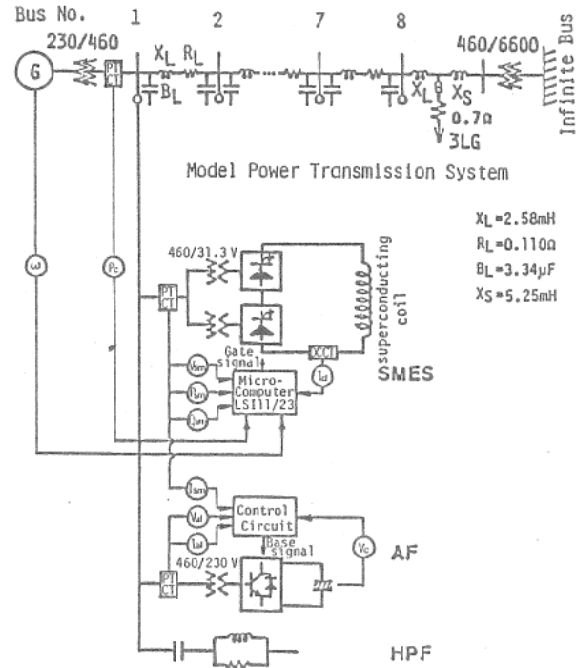


図1 模擬送電システムとSMES (超電導電力貯蔵装置)の構成

システムでは長周期の電力動揺が容易に発生して減衰しにくく安定度が低下するおそれがある。そのために送電システムの熱的な容量限界よりもはるかに低レベルで電力輸送の安定度による限界が生じる。SMESによってこのようなシステムの安定度を改善し大電力の輸送を安定に行うことができる。また各種のシステム攪乱に伴う電力潮流および周波数の動揺もSMESの安定化制御によって減衰できることを提案して来た。

図1のシステムは実験的にこの提案を確かめることを目的としている。送電線の電力を図2のように除々に増して行くと、SMESの安定化制御がなければ7kW(70万kWに相当)で電力潮流の動揺が生じる。SMESの安定化制御があれば10kW(100万kWに相当)すなわち約1.5倍位に送電容量を高めることができる。以上の研究成果を昨年十月アメリカのバルチモアで行われた応用超電導会議(ASC)とウィスコンシ

*村上吉繁 (Yoshishige MURAKAMI), 大阪大学工学部, 超電導工学実験センター, 助教授, 工学博士, 電気工学

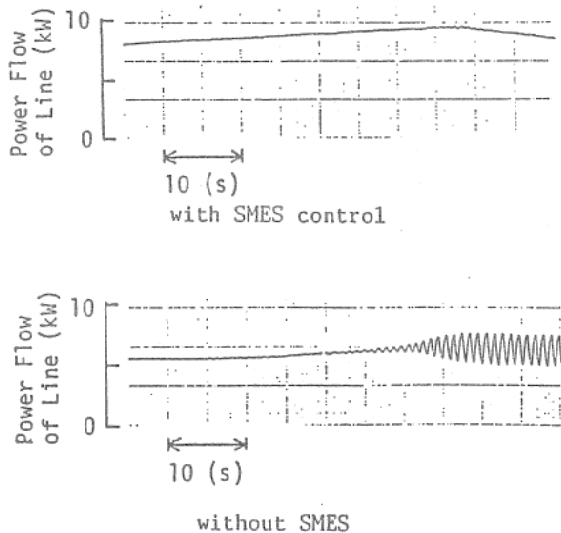


図2 送電電力と系統の安定性

ン大学の招待講演で報告した。この年は1911年のカマリンオンネスの超電導発見の75周年に当り、ASCではバーディーン、クーパー、ピパーなど超電導現象の解明にすぐれた寄与をなした研究者の記念講演があった。しかし講演者を含めて出席者の唯一人今日の高温超電導の可能性に言及したものはなかった。

高温超電導材料の出現

本年の始めLa-Sr-Cu-O酸化セラミック超電導材料の発見に引き続き、Y-Ba-Cu-Oによって臨界温度が液体窒素温度を越えるに及んで、これまでの筆者の超電導研究のなかで最大の興奮を経験した。その後の超電導工学実験センターの専門委員を中心とする研究の進捗、また基礎工学部、産研のすぐれた新超電導材料の研究成果は、阪大の持つ研究スタッフの層の厚さと新しい課題に対する意欲的な姿勢を示すもので心強い。

筆者の行って来たSMESを中心とする超電導のエネルギー応用には高温超電導材料はどのような期待を抱かせるであろうか。図3は超電導線材が液体ヘリウム(4.2K)、液体窒素(77K)、をそれぞれ冷媒とする場合および室温(300K)でも使用できる場合に分けて、超電導電気機器の電力容量別にどのように応用が広がるかを考察したものである。数万から数十万kWの大容量電力機器では、SMES、超電導送電、超電導発電機、磁気浮上、磁場閉じ込め核融合

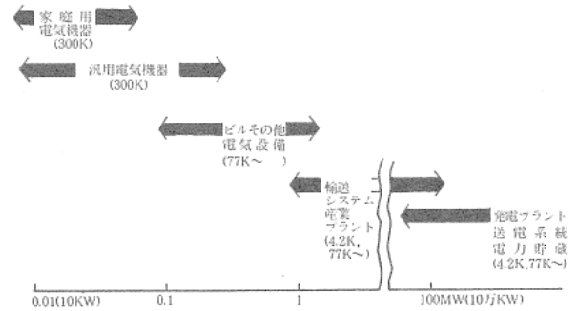


図3 電力機器の規模と超電導臨界温度

炉などがこれまで液体ヘリウム温度の超電導材料で成り立つ応用として提案されて来た。それが液体窒素の超電導となるとさらに可能性が高まる。

数百から1万kWの中容量の領域は液体窒素冷却超電導体によって成り立つ新領域として開拓する価値がある。常温超電導体が出現すれば数kWから数百kWの家庭用および汎用の電気機器にも応用され数兆円あるいは十兆円産業にもなるであろう。中小容量機器への超電導応用は想像をたくましくするばかりで余りにも不現実であるから、筆者の経験から或る程度課題を提示できる大容量機器への応用について以下では述べてみたい。

図4に見るように新超電導材料の電気特性は磁界10テラス(1テスラ=10,000 Gauss)電流密度1000 A/mm²で液体窒素温度中で応用されるこ

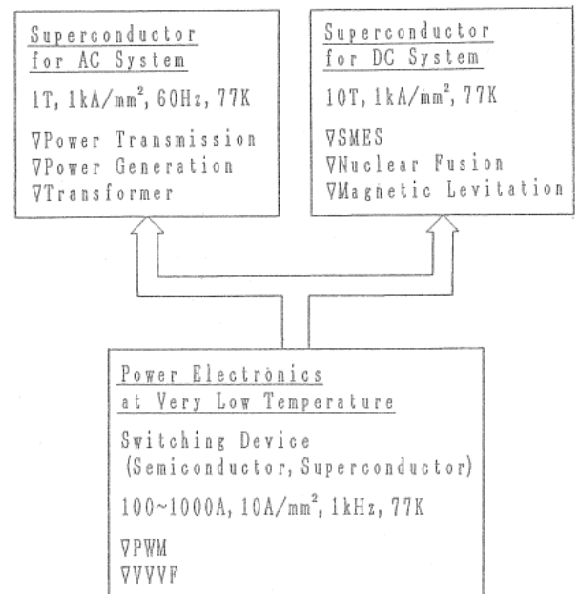


図4 Applications to Energy System and Properties of High To Superconducting Material

とを期待する。これに対して超電導機器の電力制御はパワーエレクトロニクスによることになるが、現状ではパワーデバイスの集積度が低すぎ、スイッチング損失が過大である。例えば日本原子力研究所のJT-60実験炉のマグネット駆動設備のスペースは、JT-60マグネット本体のスペースより相当大きくなっている。また電力の制御はパワーデバイスのオン・オフのスイッチ動作によって行うが、交流の60 Hzに高調波妨害を与えないためには、1 kHz以上の高い周波数でオン・オフを行いながら電流パルスの中を制御して得られた電流パルス列に僅かにフィルタをかけて滑らかな波形の電流が出力されるようにしなければならない。このような高周波のスイッチングを行っても損失の少ないデバイスは未だない。

次に大容量機器の中心装置は巨大な超電導マグネットであるが、高磁界で大形になる程電磁力の問題が深刻になる。系統安定化用の400MJ超電導マグネットを例にとり、最大磁界が24テスラでも安定に通電できると想定しよう。最大磁界が6テスラまでしか許容できない場合と比べ超電導マグネットのサイズは図5に見るように約1/20となる。しかし円周方向応力の最大値は 1.45×10^9 パスカルとなり銅の許容応力の10倍にもなる。そこで構造材料を用いて補強しなければならない。結局構造材料を含めて考えるとマグネットの建設費はあまり変わらないであろう。

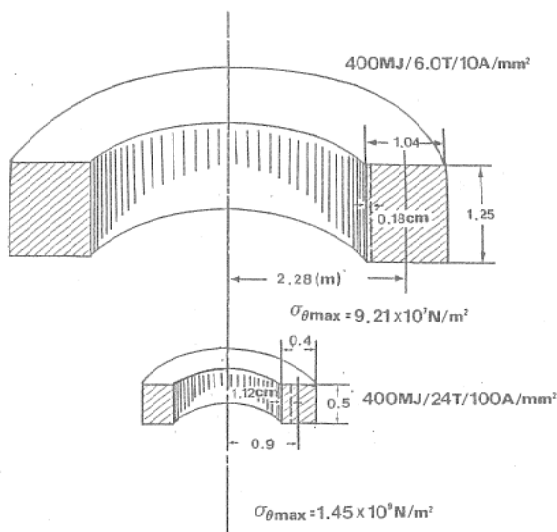


図5 超電導線材の性能とマグネットサイズ

液体窒素で冷却できるメリットは超電導マグネットの連続運転で生かされる。すなわち液体ヘリウム中での1ワットの熱損失によるヘリウムの蒸発は、300~400ワットの電力を用いてヘリウムを冷却することによって補わねばならない。しかし液体窒素中の1ワットは数ワットの電力で生成できる。すなわちコイルを冷却し続けるための電力量が極めて少なくてよい。このことから電力を貯蔵し再び電力として用いるサイクル効率も100%に近くなる。また冷却のための構造も極めて簡単となる。

中小形機器になると電磁力の問題はなくなるが、冷却設備が必要となると応用が限られるから常温超電導で始めて大きな展開が見込まれる。いずれにしても安定に高電流密度の通電が可能な線材が実現しなければならないが、現状では未だ材料生成の手法の模索が続いている。

パワーデバイスの高集積化と低損失については、筆者は数年前から低温パワーエレクトロニクスの可能性を追求している。低温マイクロエレクトロニクスについては十年以上の研究の積み重ねがあり、高集積化、高性能化、低温環境デバイスとの一体化を目標にしている。本年十月末ハワイで最初の低温エレクトロニクスシンポジウムが行われ、筆者一人のみはマイクロエレクトロニクスでなく低温パワーエレクトロニクスを提案し、半導体ユニポーラデバイスが応用可能であると論じた。図6はパワーMOSFETの連続スイッチ動作において、スイッチ周波数とスイッチング損失の関係をプロットしたものである。液体窒素中でMOSFETを動作させればスイッチで制御する電力

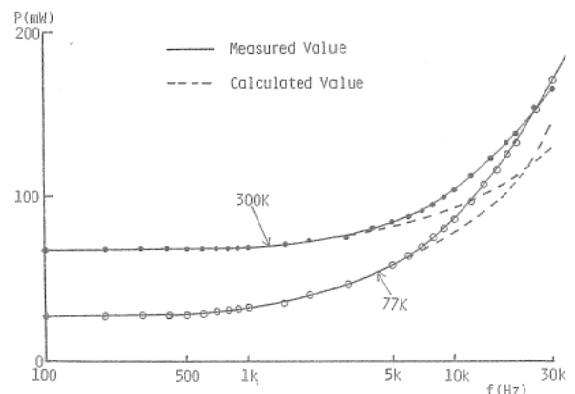


図6 くり返し方形波パルス駆動によるMOSFETの電力損失(平均値)。Power Loss of MOS FET

の1.6%の電力損失(平均値)があるが常温における動作の損失の約 $\frac{1}{8}$ にとどまる。

低温パワーエレクトロニクスが実現すれば、超電導マグネット、電力制御パワーエレクトロニクスを一体化した閉じたシステムを構成して高い集積度と高性能化をはかることができる。

半導体デバイスはこの例からも見られるよう

に液体窒素温度で最も優れた性能を発揮することができる。液体窒素温度の超電導とともにこの温度領域は応用および基礎的な物性研究にとってますます魅力的となって来ている。究極の目標として、超電導と半導体の複合デバイスの実現を目指して行きたい。

