

# 第 1 章 緒言

## 1. 1 まえがき

国内における電力の供給信頼度は、様々な停電対策への取り組みを実施してきた結果、他の先進諸国と比較し、極めて高いレベルにある。しかしながら、落雷等により瞬間的に広範囲で発生する電圧低下に対しては電力系統側での回避は困難であり、高度な電力品質が要求される半導体工場やデータセンター等においてはその被害の甚大さから対策が強く求められている。IT 関連機器の普及が進展する高度情報化社会においては、さらにその影響は増大すると予想される[1]-[6]。一方、近年の世界的な環境意識の高まりから、国内でも太陽光発電や風力発電等の自然エネルギーの導入が進み、今後さらに増加すると予想されるが、安定性の観点から電力系統への影響が懸念されており、電力系統においてはこれまで以上に系統制御能力が重要となってくると予想される[7]。このように、瞬時電圧低下および電力系統の安定性低下への対策として、大容量で高速に充放電することが可能な電力貯蔵装置の導入要請が高まっている。

電力貯蔵装置の一つに超電導電力貯蔵システム (Superconducting Magnetic Energy Storage System、以下、SMES という)が挙げられる。SMES は、極低温下で電気抵抗がゼロになる超電導線材を用いたコイルに電流を流し、磁界を発生させ続けることで、磁気エネルギーを貯蔵することができる装置である。国内では資源エネルギー庁のプロジェクトとして、1991 年度から電力系統制御用途の SMES の研究開発が精力的に推進されてきた[8]-[9]。2007 年度までの第 3 期には実系統への連系試験により SMES 電力系統制御機能が実証され[10]、その後「イットリウム系超電導電力機器技術開発」プロジェクトの中で、イットリウム系線材を用いた SMES の研究開発が続けられている。

## 1. 2 電力貯蔵装置導入の技術的要請

### 1. 2. 1 瞬時電圧低下対策の現状

送電線への落雷等で電力系統に故障が発生した場合、故障区間・時間を最小限に抑えるため、保護装置で故障区間が検出され、速やかに切り離されるが、この間、故障点を中心に電力系統のインピーダンスに応じて広範囲に電圧が低下する現象、瞬時電圧低下（以下、瞬低という）が発生する（図 1-1 参照）。瞬低発生頻度について、電圧低下度別・継続時間別に図 1-2 に示す。一般的な停電とは異なり、全体の 80 % 以上は継続時間が 0.2 s 以下であり、頻度としては平均すれば 1 年間に数回～十数回程度である。しかしながら、図 1-3 に示すように電圧低下に敏感な電磁開閉器・パワーエレクトロニクス応用可変速モータ等は、瞬低による影響で停止や誤動作が生じる[6]。近年の高度化・組織化・自動化された半導体工場やデータセンター等においてはこのような機器は欠かすことができず、瞬低による被害は甚大となっている。

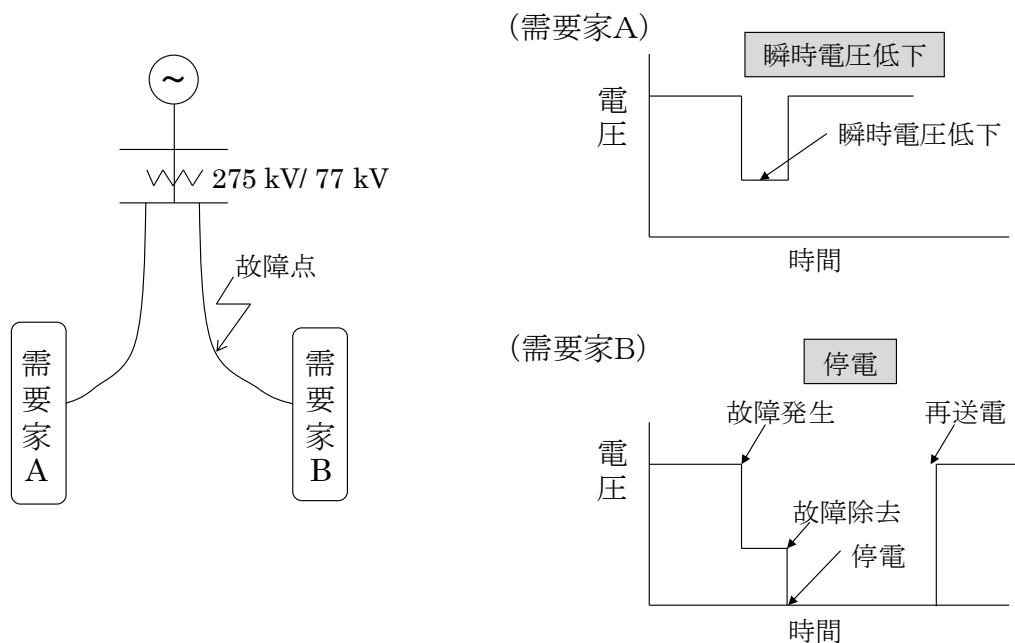


図 1-1 電力系統故障による停電および瞬時電圧低下

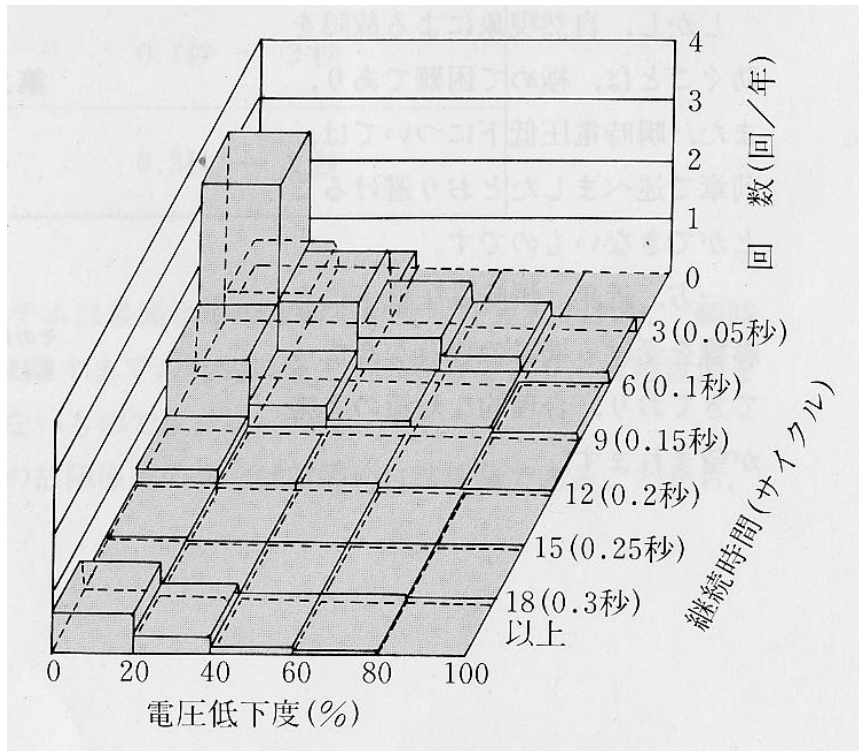


図 1-2 6.6kV 高圧配電線 1 回線・1 年当たりの瞬時電圧低下状況[6]

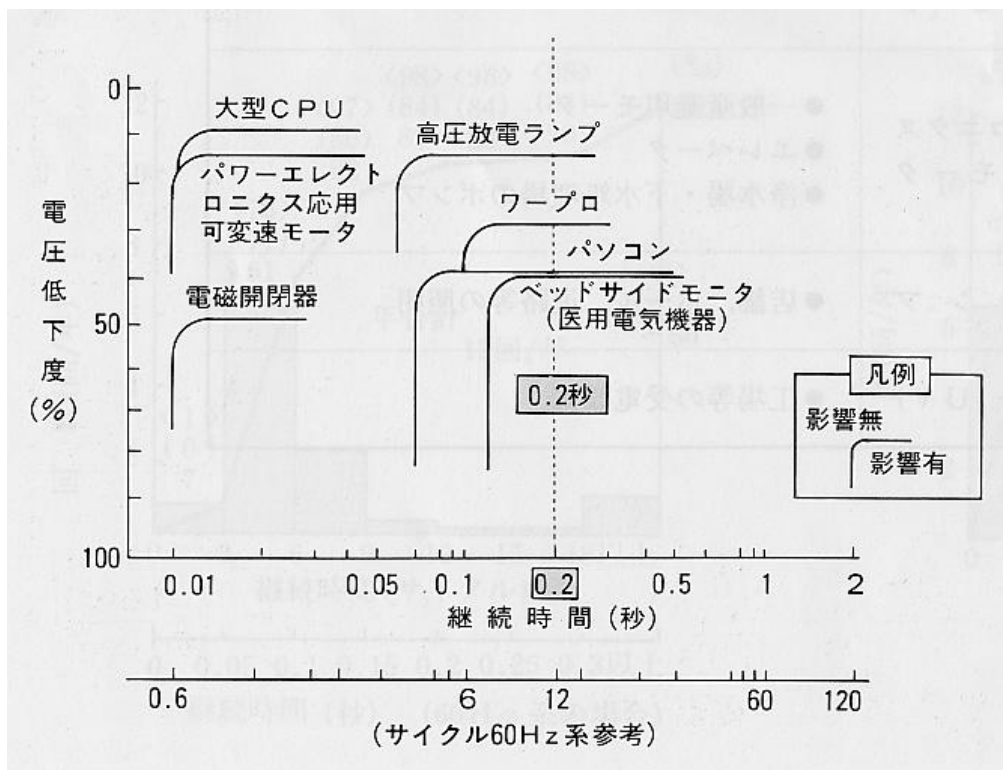


図 1-3 負荷機器の電圧低下による影響例[6]

このような中、瞬低への完全な回避策を電力系統側で実施することは非効率的で現実的に困難であるため、需要家側で個々に瞬低補償対策を実施することが求められる。表 1-1 に様々な観点からの瞬低対応策について示す。雷情報により事前操業停止や瞬低発生時に機器の自動停止・再起動等の方法も考えられるが、高度化・組織化・自動化された半導体工場等においては正常運転継続に対する要望が強く、電力貯蔵装置からの電力供給等により瞬低を補償することが求められている。前述の図 1-3 より電圧低下度 10%程度以下、電圧低下継続時間 10 ms 程度以下であれば通常の機器への影響はないと考えられるため、電力貯蔵装置によりその値以下に電圧低下度・電圧低下継続時間を抑制することができれば、工場の機器は安定して動作し、正常運転を継続することができると思われる。

表 1-1 瞬低に対する対応策

分類	原理	対策例
ソフト的対策	瞬低発生時、製品へのマーキングや事前操業停止	異常時データ判定設備 雷情報の活用による事前予測
自動停止・再起動	瞬低発生時、機器自動停止・再起動	パワエレ応用可変速モータ 瞬時再点灯型高圧放電ランプ
正常運転継続	変化に追従させない	遅延積放型電磁開閉器
	CGS+系統分離	自家発+高速遮断器
	変化を補償する	UPS、キャパシタ、新型電池、SMES

CGS: Co-Generation System  
 USP: Uninterruptible Power System

## 1. 2. 2 電力系統制御の現状

電気事業法の改正に伴う電力事業の自由化が進展するとともに、近年、世界的な環境意識が高まっており、低炭素社会の実現に向けた動向が強まっている。

このため、電力系統では特定電気事業者による独自の電源接続や太陽光・風力に代表される再生可能・自然エネルギーによる電源接続が増加してきており、負荷変動に応じた柔軟な追従が困難だけでなく、出力そのものが変動する電源が増加傾向にある。一方、系統負荷側においてもリニア中央新幹線の構想が動き出すなど変動負荷の増大が予想される。このように電力系統はますます複雑に構成されてきており、電力系統における安定度の低下が懸念されるため、電力系統を健全に保つための高度な制御技術がより一層重要となってきた。

このような電力系統に必要な具体的な制御技術として、「1. 2. 1 瞬時電圧低下対策の現状」で前述した需要家毎の瞬低補償とは異なり、電力系統での事故による電圧変動等に対する安定化、大型負荷等の変動に対する補償、変動電源等による周波数変動の調整等が挙げられる。系統安定化に関しては、一部の弱小なローカル系統では事故時の電源脱落等で電圧や過渡安定度が不安定になる可能性があり、100 MW 規模の安定化ニーズが想定される。負荷変動補償に関しては、大型製鉄所の圧延負荷や高速鉄道等の大型負荷の設置箇所において繰り返される 30～300 MW 規模の変動に対する補償ニーズが想定される。周波数変動調整に関しては、今後著しく増加が予測される再生可能・自然エネルギーは電源側の変動をもたらし、また、温暖化防止の観点から見直されている原子力発電は火力発電と異なり出力を柔軟に変動させることが困難であることから、今後、周波数変動に対する調整ニーズは増大してくると予想される。

これらに対応するためには、電力貯蔵装置を電力系統に導入し、柔軟に系統制御を行うことが必要となる。例えば、再生可能・自然エネルギーや原子力による発電機のみならず、現在周波数調整のために定格を下回る出力でガバナフリー運転を行っている火力発電機に対しても、電力貯蔵装置を導入することで、定格出力を維持し、運転効率を向上させるとともに二酸化炭素の排出削減に寄与すると期待される。

電力貯蔵装置の導入にあたっては、有効・無効電力の独立制御や瞬時大電力の充放電など柔軟に対応できる制御性の高さとともに、信頼性の高さ、安価なコスト等が重要となることに留意しなければならない[8]-[9]。資源エネルギー庁のプロジェクトで調査され、電力系統制御用として導入の必要性が認められた電力貯蔵装置の用途および仕様を表 1-2 にまとめ、導入適用対象例を図 1-4 に示す。

表 1-2 電力系統制御用電力貯蔵装置への要求仕様例[9]

用途	出力	貯蔵容量
系統安定化	100 MW	15 kWh
負荷変動補償・周波数調整	100 MW	500 kWh

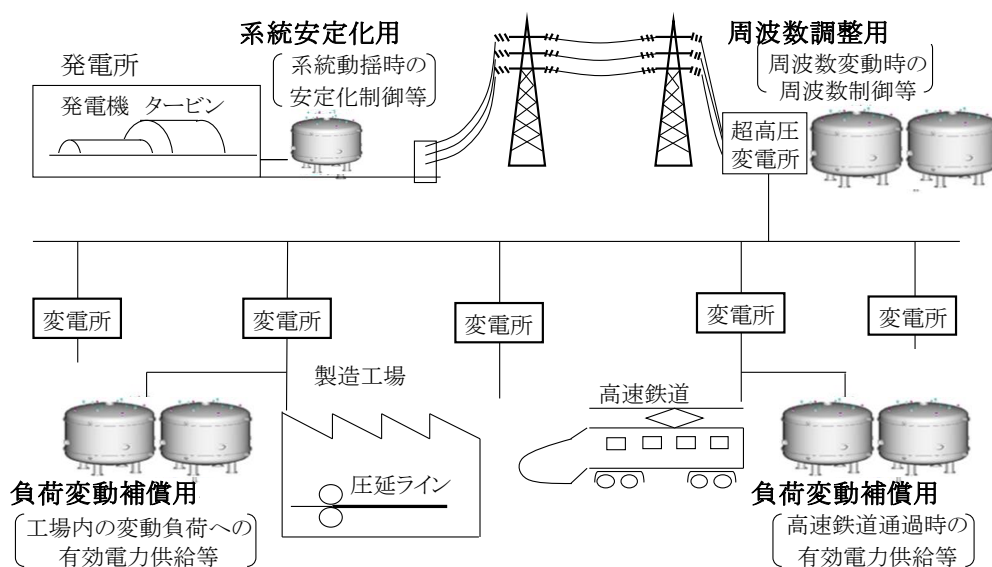


図 1-4 電力系統への電力貯蔵装置の導入適用対象例

### 1. 3 超電導電力貯蔵システムの概要

極低温下で電気抵抗がゼロになる超電導線材を巻線した超電導コイルで閉回路を構成し、通電した場合、コイル電流の減衰時定数が無限大となり、その回

路内を電流が流れ続け、一定の磁界を発生し続けるため、電力を磁気エネルギーとして貯蔵することが可能となる（図 1-5 参照）。これが超電導電力貯蔵 (SMES) と呼ばれる超電導技術を用いた電力貯蔵法である [11]。

表 1-3 に各種電力貯蔵技術の特徴を示す。SMES の特長として、まず他の貯蔵手法が電力を化学エネルギーなど何らかのエネルギー変換を伴うのに比べ、電気抵抗がゼロで電流を流し続け、磁気エネルギーとして貯蔵することから、エネルギー変換による損失のない高い貯蔵効率である。また、同様の理由により、充放電速度が速いことが挙げられる。他の電池と比較した場合の出力容量と継続時間の関係を図 1-6 に示す。前述したように充放電速度が速く、SMES は短時間大出力に優位性を持つことが分かる。このため、図 1-7 に示すように、大出力化のためには、他の蓄電池は長時間出力が可能ではあるものの大規模な貯蔵容量が必要なことから、同じ出力容量 10 MW で比較すると SMES は圧倒的にコンパクトにすることが可能である [12]-[14]。

また、SMES は、蓄電池のような化学変化を伴わず、極低温下でエネルギーの充放電をするため、数十万回もの繰返し充放電に対してもサイクル劣化のような寿命への影響がほとんどなく、耐久性に優れ、寿命が極めて長いと考えら

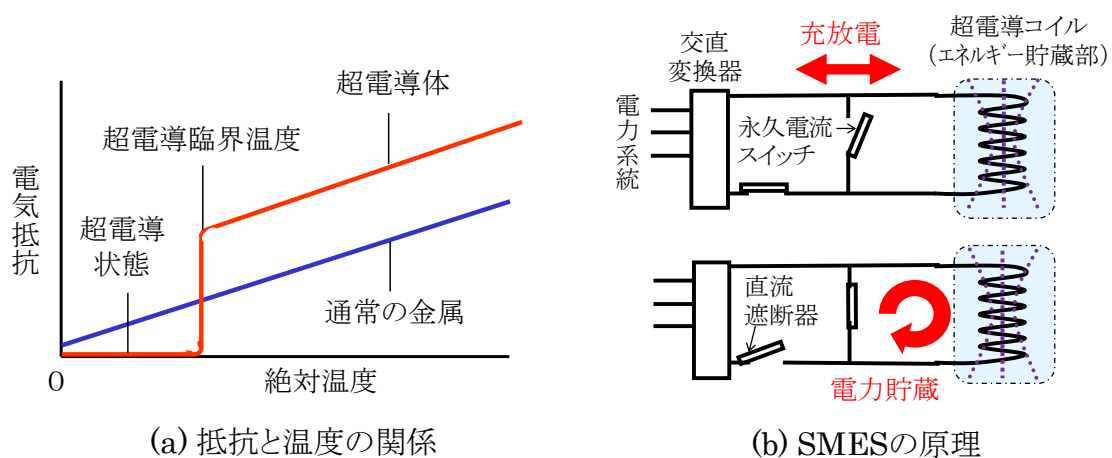


図 1-5 超電導体の電気抵抗および SMES の原理

れる。また、環境汚染につながる廃棄物質の発生が少ない電力機器であることから、地球環境の保全にも寄与できると考えられる。さらに、SMESが他の電力貯蔵装置と大きく異なるのは、大容量になるほど高いエネルギー密度で大電力を貯蔵できるというスケールメリットを有することである。このため、より大型の電力貯蔵装置に適していると考えられる。

表 1-3 各種電力貯蔵技術の特徴

装置	用途	特徴
SMES	瞬低(停)補償	<ul style="list-style-type: none"> <li>・サイクル的な寿命がない</li> <li>・大電力を瞬時に放出でき、スケールメリットが大</li> </ul>
電気二重層キャパシタ	瞬低(停)補償	<ul style="list-style-type: none"> <li>・サイクル寿命は10,000回以上</li> <li>・電池よりエネルギー密度が低い</li> </ul>
鉛電池	瞬低(停)補償	<ul style="list-style-type: none"> <li>・電池寿命は5年程度</li> <li>・市場に多く出回っており、安価</li> </ul>
NaS電池	瞬低(停)補償 負荷平準化	<ul style="list-style-type: none"> <li>・サイクル寿命は、2000回程度</li> <li>・動作温度が高く、サイクル運転が必要</li> </ul>
レドックスフロー電池	瞬低(停)補償 負荷平準化	<ul style="list-style-type: none"> <li>・サイクル寿命は、12,000回(電解液)程度</li> <li>・電解液タンクの設置スペースが必要</li> </ul>
コンデンサ(電解コンデンサ)	瞬低補償	<ul style="list-style-type: none"> <li>・停電補償は困難</li> <li>・装置が小型で安価</li> </ul>

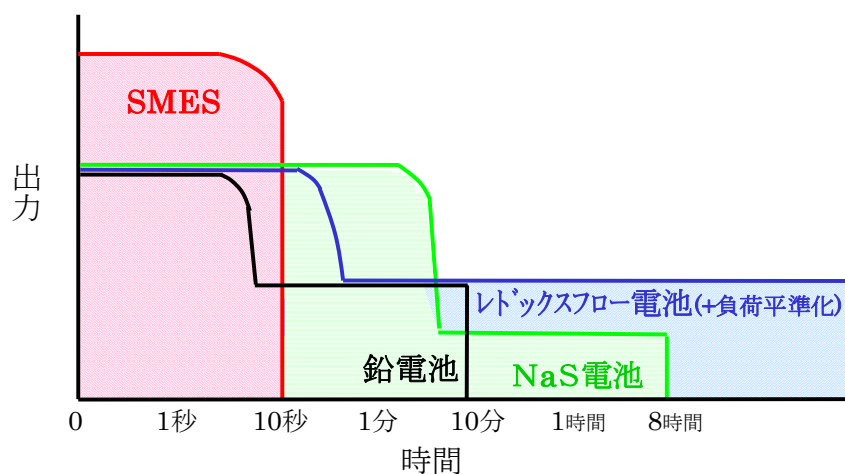


図 1-6 電力貯蔵装置の出力と継続時間の関係



これまで電力貯蔵装置としての SMES の特長を述べてきたが、SMES 等の電力貯蔵部を瞬低補償あるいは電力系統制御の用途として用いる場合、三相交流の電力系統と連系が必要のため、交直変換器等の付属機器が必要となる。特に、SMES は超電導コイル単独で用途としての機能が発揮されるのではなく、交直変換器等も含めたシステム機器全体のコーディネーションでその能力が決定されるため、システム全体で開発・検証していくことが重要である。参考に瞬低補償用途に必要な SMES システムの主回路を示した構成例を図 1-8 に示す。

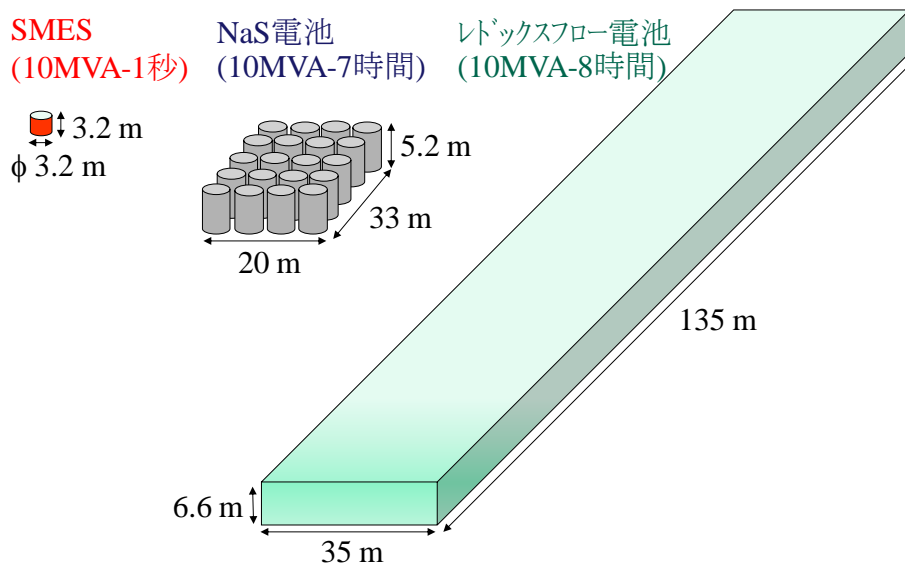


図 1-7 出力 10 MVA 瞬低補償装置のサイズ比較

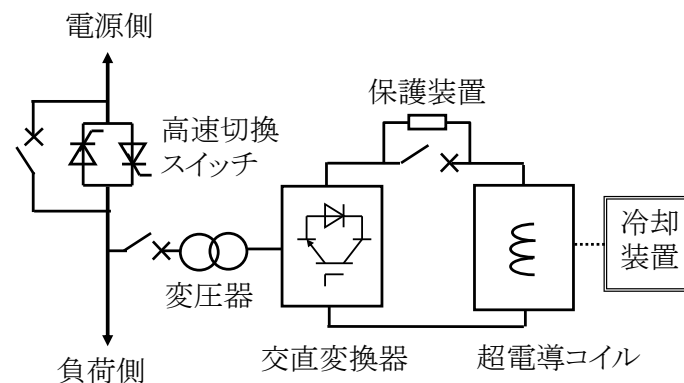


図 1-8 瞬低補償用 SMES システムの主回路構成例

## 1. 4 超電導電力貯蔵システムの技術的変遷

SMES は、1970 年代初頭の米国 Wisconsin 大学での概念設計（容量：5～10 GWh）に端を発し、1980 年代までは揚水発電の代替として期待され、米国等を中心に検討された[15]。しかしながら、大規模な大容量 SMES の開発には強大な電磁力対策が必要とされるなど技術的なハードルが極めて高いことから、その後、対象をやや小規模に絞って検討が進められてきた。

国内における SMES 開発は、1980 年代後半から 1990 年代前半にかけて東北・東京・中部・関西・九州電力等により種々の研究開発が実施され、1991 年からは資源エネルギー庁の国家プロジェクトとして精力的に進められた。1991 年度から 1998 年度までの第 1 期の開発では、多目的用途の SMES を実現するための要素技術（超電導コイル、交直変換器、直流遮断器等）の開発に取り組み、図 1-9 に示す定格電流 20 kA、貯蔵エネルギー 8 MJ 級の超電導コイルを試作・検証するなど必要な要素技術が確立された。一方で、電力系統制御用小規模 SMES に占める超電導コイルのコスト割合は 62 %に上り、実用化には超電導コイルのコスト低減が重要課題であることが明確にされた[16]。



(a) 1/2 ユニット強制冷却型超電導コイル外観 (b) コイル導体・素線断面

図 1-9 100 kWh SMES 用 1/2 ユニットコイルおよび超電導導体

第1期の結果を受け、1999年度から2003年度までの第2期では、市場ニーズがあり、実用化の可能性が見込まれる電力系統制御用途として、出力100 MW、貯蔵エネルギー1.8 GJ（負荷変動補償・周波数調整用）および54 MJ（系統安定化用）のSMESシステムにターゲットを絞り、超電導コイル部分のコスト低減技術開発が進められた。系統安定化用途および負荷変動補償・周波数変動用途として製作・検証されたSMESおよびその導体構造をそれぞれ図1-10および図1-11に示す。系統安定化用では秒変化5 kA級の高速通電を確認し、負荷変動補償用では世界に例のない10 MJ級で1万回に及ぶ繰り返し通電が実施された。これら性能面でも従来の超電導コイルの性能を大きく改善させるとともに、課題であったコイルコストを1/6~1/10に低減させ、コスト低減と性能の両立性が検証された。一方で、コイル以外の部分を含めたSMESシステムトータルでの統合化や最適化の方向性や開発課題が明確にされた[17]-[22]。

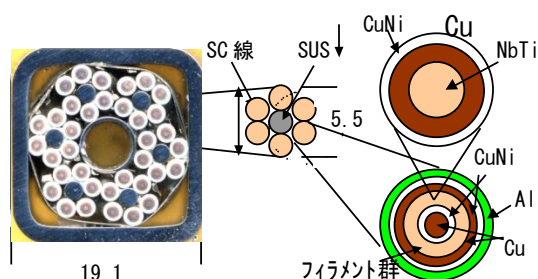


図1-10 2.9 MJ 系統安定化用 SMES および 9.6 kA 導体構造

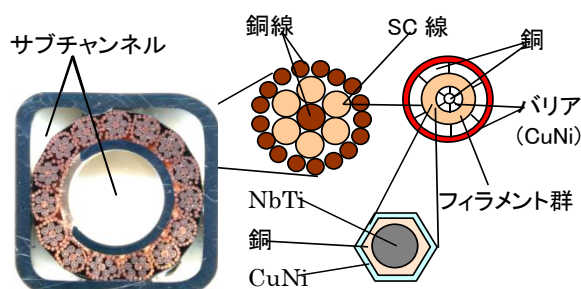


図1-11 10.5 MJ 負荷変動補償・周波数調整用 SMES および 10 kA 導体構造

2004年度からの第3期の「超電導電力ネットワーク制御技術開発」プロジェクトでは、高温超電導コイル等の開発とともに SMES の実系統連系試験検証が行われた[10],[23]。図 1-12 に示すように、要素機器（超電導コイル、変換器等）を SMES システムとして組合せ、実系統での負荷変動に対する 5 万回以上の補償動作等が行われ、実運用上での制御応答性、安定性、耐久性等が検証された。現在は「イットリウム系超電導電力機器技術開発」プロジェクトにおいてイットリウム系超電導線材を用いた SMES 開発が進められている。

海外においても SMES 開発が進められてきたが、図 1-13 の×印に示すように、大容量化における技術的な課題やコスト面などを克服できず、米国、ドイツ等で開発が中止されたものも少なくない。同図は 2002 年当時の状況であるが、「Chubu EP, 10 MW, 2.8 kWh (2003)」は、今回の研究開発で実用化した世界最大の 10 MW-10 MJ 瞬低補償用 SMES (第 2 章で後述) であり、「ISTEC, 100 MW, 500 kWh (20XX)」は、今回の様々な研究成果をもとに全体計画を明らかにした 100 MW-2 GJ 級電力系統制御用 SMES (第 6 章で後述) である。現在、SMES 開発はフランス、韓国、中国等でも実施されている[24]-[25]が、我が国の SMES 開発[26]-[29]が他国を先導している状況である。

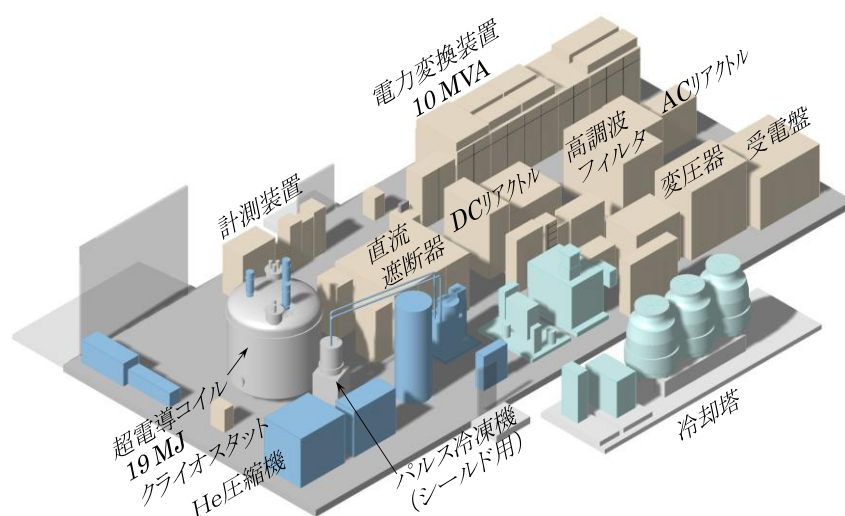


図 1-12 負荷変動補償用 SMES システムの実系統試験サイト配置図

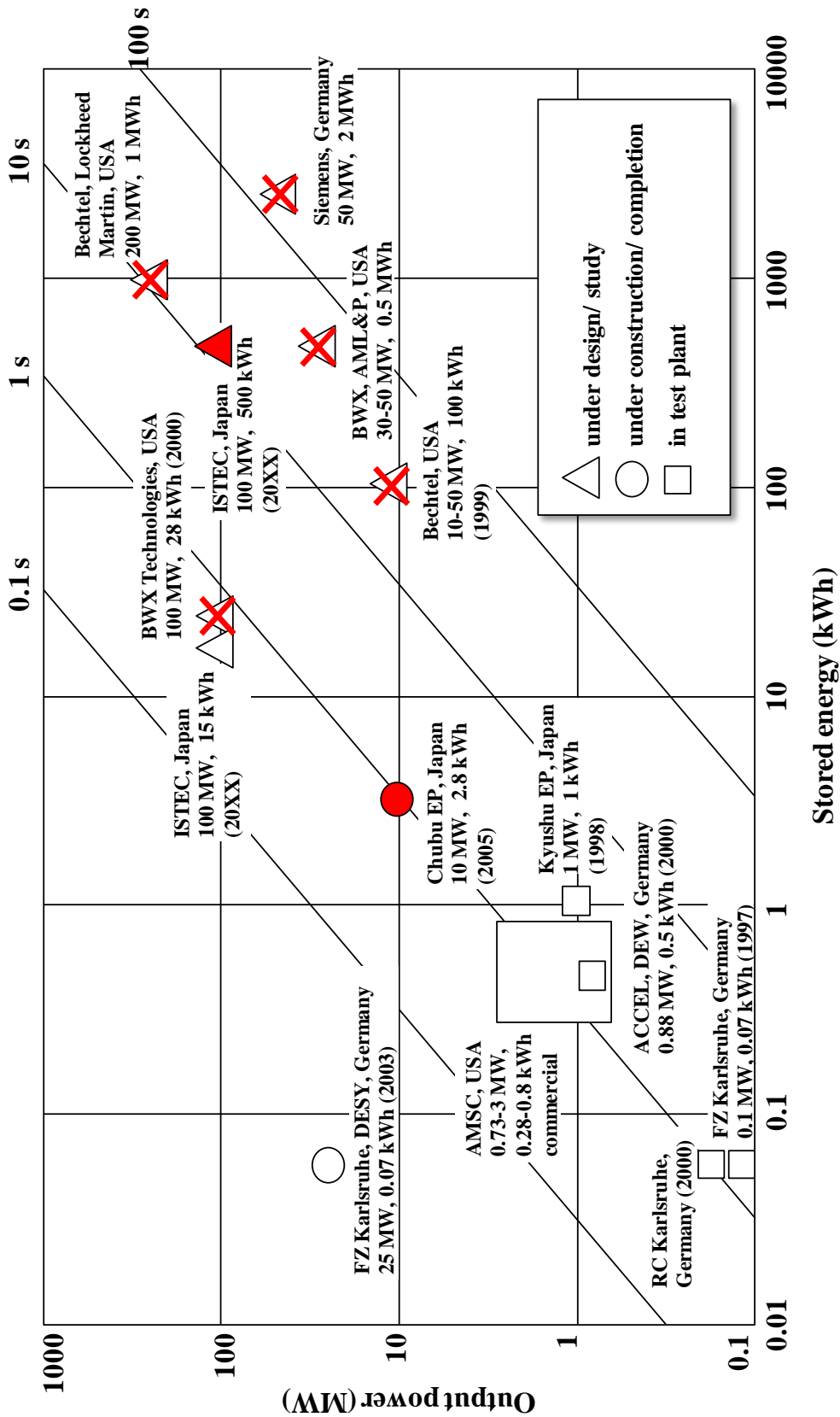


図 1-13 国内外における SMES 開発状況 [2002 年当時]

## 1. 5 本研究の目的および構成

### 1. 5. 1 本研究の目的

SMES は貯蔵効率が高く、耐久性、環境負荷が小さい等の優れた特長を有するが、他の競合する電力貯蔵装置との経済的メリットを考えた場合、瞬時大出力を得意とする短時間大出力へのニーズ、もしくは、大容量化により優位性が高まるスケールメリットを活かした大容量化へのニーズに向けた開発を実施すべきと考える。

これまで、国内外において SMES の優れた特長を活かすべく SMES の研究開発が進められたが、技術的な課題を克服できず、図 1-13 に示したように海外では大容量化を目指した開発が中止される状況であった。

このような中、他の電力貯蔵装置では実現困難であった大出力 10MW 級の大容量コンパクト瞬低補償装置へのニーズが具体的となった。一方、電力系統制御が可能となる大容量クラスの SMES 開発においては、さらに電磁力対策や低コスト化などの技術課題が残されていたが、金属系と比べて優れた特性を有する高温超電導線材の開発が進展し、長尺高温超電導線材を機器に応用することが可能となってきた。

そこで、本研究では、時代のニーズに即応して金属系超電導コイルを用いて早期に瞬低補償用途の SMES の実用化技術を確立するとともに、ビスマス系およびリットリウム系超電導線材を用いた高温超電導コイルを製作・評価検証し、温度安定性向上による信頼性向上、高磁界化・高強度化等によるコンパクト化（高エネルギー密度化）等の技術開発により、電力系統制御用途としての大容量 SMES の性能向上を図ることを目的とした。

### 1. 5. 2 本論文の構成

本論文は全 7 章から構成されており、各章の概要は以下のとおりである。

第 2 章では、瞬時大出力の特長を活かすことができ、電力系統制御用の大容量よりも早期に実現が可能と想定される瞬低補償ニーズに対して容量 5 MW-5 MJ の金属系 SMES を開発するとともに、2 年以上の長期実フィールド試験等を実施し、瞬低補償用としての SMES システムの有用性を検証する。さらに、その知見を反映して改善を実施し、10 MW-10 MJ への大容量化とともに高効率化を図り、実用化に至るまでの技術開発を実施する。

第 3 章では、前章で実用化した金属系 SMES コイルの温度安定性等の特性向上を図るため、温度マージンを活かすことができるビスマス系高温超電導線材を用いて SMES コイルの温度安定性向上（信頼性向上）、高耐電圧化（大出力化）を実施する。また、製作した高温 SMES コイルを 1 MW-1 MJ 級の瞬低補償システムに組み合わせ、実用途としての高温 SMES システムの実用性・信頼性を検証する。

第 4 章では、高温・高磁界中で優れた通電特性のイットリウム系高温超電導線材を用いて高温運転や高磁界化（高エネルギー密度化）等により大容量 SMES コイルのさらなる性能向上を図るため、SMES 用線材に要求される通電性能・機械強度を概念設計により解析評価するとともに、高特性が要求されるイットリウム系線材の機械強度を試験検証することで、大容量 SMES への適用可能性を把握する。

第 5 章では、イットリウム系線材は従来の金属系・ビスマス系超電導線材と全く異なるテープ状薄膜積層構造であるため、SMES 用コイル化（巻線・電極形成・樹脂含浸等）技術を新規開発する。また、これまで実績の少ない 20 K 以上の高温領域で使用する伝導冷却型 Cu 安定化コイルを開発・評価し、コイル化基盤技術を検証するとともに、小型トロイドコイルを開発し、イットリウム系コイルとしての SMES 基本動作、耐久性等の実運用性を検証する。

第 6 章では、第 4 章、第 5 章の研究成果をもとに、SMES 適用において高い

ポテンシャルが期待されるイットリウム系線材を用いて大容量 100 MW/ 2 GJ 級電力系統制御用（負荷変動補償用）SMES システムの概念設計を実施する。SMES 構成要素のコイルシステム、伝導冷却システム、クエンチ保護システム、電流リードシステム等の個別検討とともに、変換器と組み合わせたシステムコーディネーションにより負荷変動補償用 SMES の全体構成を明らかにする。

第 7 章では、本論文の成果についてまとめる。



## 第 1 章の参考文献

- [1] 新藤孝敏:「総論瞬低問題を考える」、電気評論、No. 443, pp. 7-10, 2002.
- [2] 新藤孝敏、林敏之:「瞬時電圧低下(瞬低)の現状と対策」、電気学会論文誌 B, Vol. 123, No. 6, pp. 679-682, 2003.
- [3] 大西一彦、河崎吉則:「瞬時電圧低下対策装置の現状」、電気学会論文誌 B, Vol.124, No. 6, pp. 803-806, 2004.
- [4] 奥村睦、小林直樹:「最近の電力品質技術の動向」、電気学会論文誌 B, Vol. 125, No. 7, pp. 643-646, 2005.
- [5] 樋野邦央、坂本淳一:「需要家における瞬低への取り組み」、電気評論、No. 443, pp. 18-23, 2002.
- [6] 電気協同研究会:「瞬時電圧低下対策」、電気協同研究、Vol.46, No.3, 1990.
- [7] 電気協同研究会:「電力系統における電力品質の現状と対策技術」、電気協同研究、Vol. 60, No. 2, 2005.
- [8] 超電導電力貯蔵システム技術開発推進委員会、コスト低減技術分科会、高温超電導 SMES 分科会:「平成 14 年度 超電導電力貯蔵システム技術開発の成果」、平成 15 年 3 月
- [9] 超電導電力貯蔵システム技術開発推進委員会、コスト低減技術分科会、高温超電導 SMES 分科会:「平成 15 年度 超電導電力貯蔵システム技術開発の成果」、平成 16 年 3 月
- [10] T. Katagiri, H. Nakabayashi, Y. Nijo, T. Tamada, T. Noda, N. Hirano, T. Nagata, S. Nagaya, M. Yamane, Y. Ishii, and T. Nitta: “Field Test Result of 10MVA/20MJ SMES for Load Fluctuation Compensation,” IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 19, No. 3, pp. 1993-1998, 2009.
- [11] 低温工学協会:「超伝導・低温工学ハンドブック」、オーム社、pp. 1001-1005, 1993.
- [12] 長屋重夫:「超電導瞬低補償 SMES の開発」、電気評論、No. 476, pp. 69-72, 2004.
- [13] 田代洋一郎:「大容量瞬低対策機能付き NAS 電池システムの開発」、日本

電気技術協会会誌、平成 16 年 10 月

- [14] 住友電気工業：「特集／レドックスフロー電池」、住友電工ニュースレター, No.284, 2001.
- [15] R. J. Loyd, G. F. Moyer, J. R. Purcell, J. Alcorn: “Conceptual Design and Cost of a Superconducting Magnetic Energy Storage Plant,” EPRI Report EM-3457, 1985.
- [16] 主催 財団法人 国際超電導産業技術研究センター：「SMES プロジェクト 成果発表会 資料」、平成 11 年 3 月 17 日
- [17] S. Hanai, A. Shimada, T. Tsuchihashi, T. Kurusu, M. Ono, K. Shimada, S. Koso, K. Tsutsumi, S. Nagaya: “Design and Test Results of CIC Conductor for a Cost Reduced 100 MW/500 kWh SMES,” IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 13, No. 2, pp. 1810-1813, 2003.
- [18] H. Kimura, Y. Hatabe, H. Hayashi, K. Tsutsumi, T. Ishii: “Test results of long-term operation for a 1 kWh/1 MW module-type SMES,” Physica C, Vol. 392-296, pp. 1196-1200, 2003.
- [19] Y. Tatsuta, S. Koso, H. Abe, M. Urata, H. Ohsaki, A. Ishiyama, S. Taniguchi, S. Nagaya, S. Akita, K. Terazono, N. Hirano, T. Semba, S. Hanai: “Development of SMES for Power System Control,” IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 14, No. 2, pp. 693-698, 2004.
- [20] H. Ohsaki, S. Taniguchi, S. Nagaya, S. Akita, S. Koso, M. Tatsuta: “Development of SMES for power system control: present status and perspective,” Physica C, Vol. 412-414, pp. 1198-1205, 2004.
- [21] 長屋重夫：「電力系統制御用 SMES の開発」、平成 18 年電気学会全国大会講演論文集[5]、pp. 5-S9 (1-3), 2006.
- [22] 林秀美：「SMES 系統連系試験の成果」、平成 18 年電気学会全国大会講演論文集[5]、pp. 5-S9 (7-10), 2006.
- [23] 中部電力, 九州電力, 国際超電導産業技術研究センター：「平成 17 年度中間年報「超電導電力ネットワーク制御技術開発」(H16～H19)」、2006.
- [24] H.J. Kim, K.C. Seong, J.W. Cho, J.H. Bae, K.D. Sim, K.W. Ryu, B.Y. Seok, S.H. Kim: “Development of a 3 MJ/750 kVA SMES system,”

- Cryogenics, Vol. 46, pp. 367-372, 2006.
- [25] X. Jiang, X. Liu, X. Zhu, Y. He, Z. Cheng, X. Ren, Z. Chen, L. Gou, X. Huang: "A 0.3 MJ SMES Magnet of a Voltage Sag Compensation System," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 14, No. 2, pp.717-720, 2004.
  - [26] S. Nagaya, N. Hirano, M. Kondo, T. Tanaka, H. Nakabayashi, K. Shikimachi, S. Hanai, J. Inagaki, S. Ioka, S. Kawashima: "Development and Performance Results of 5MVA SMES for Bridging Instantaneous Voltage Dips," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 14, No. 2, pp. 699-704, 2004.
  - [27] S. Nagaya, N. Hirano, K. Shikimachi, S. Hanai, J. Inagaki, K. Maruyama, S. Ioka, M. Ono, K. Ohsemochi, T. Kurusu: "Development of MJ-Class HTS SMES for Bridging Instantaneous Voltage Dips," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 14, No. 2, pp. 699-704, 2004.
  - [28] K. Shikimachi, H. Moriguchi, N. Hirano, S. Nagaya, T. Ito, J. Inagaki, S. Hanai, M. Takahashi, T. Kurusu: "Development of MVA Class HTS SMES System for Bridging Instantaneous Voltage Dips," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 15, No. 2, pp. 1931-1934, 2005.
  - [29] S. Nagaya, N. Hirano, H. Moriguchi, K. Shikimachi, H. Nakabayashi, S. Hanai, J. Inagaki, S. Ioka, S. Kawashima: "Field Test Results of the 5 MVA- 5 MJ SMES for Bridging Instantaneous Voltage Dips," IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 16, No. 2, pp. 632-635, 2006.

