

第6章 電力系統制御用 Y 系 SMES の概念設計

6. 1 まえがき

負荷変動補償や系統安定化等の電力系統制御用 SMES システムは、瞬低補償用に比べ、さらなる大容量化が必要である。他の電力貯蔵装置に経済性で勝るには、スケールメリットのある SMES を大容量化することが最も効果的であるが、強大な電磁力の支持構造、コイル保護時の電流遮断時定数短縮と誘導電圧低減の両立、交流損失低減によるランニングコスト低減等の技術課題が実用化への障壁となっている。

第2章で実用化した金属系 SMES コイルと比較し、第3章では、高温超電導線材を用いることで、SMES コイルの耐電圧・温度安定性の向上が図られることを検証した。第4章では、大容量 SMES を実現するための方向性を示すとともに、Y 系線材の高磁界・高強度特性等について評価・検証した。特に、IBAD/CVD-YBCO 線材はより高温・高磁界中での高い通電特性とともに、これまで大容量 SMES コイルの制約要因となっていたフープ応力耐性が 1 GPa を超えることを実証し、従来の設計限界を超える設計の可能性等、SMES への要求仕様に対するポテンシャルの高さを示した。また、第5章では、Y 系線材を用いたコイルの製作性・特性を世界に先駆けて評価・検証し、SMES コイルとしての有用性を実証した。

本章では、第2章から第5章までの研究・開発の技術成果を総括し、電力系統制御用 SMES システムの中で、より大規模でスケールメリットが大きく、NEDO プロジェクトで想定されている 100 MVA/ 2 GJ 級の負荷変動補償用途 [1],[2] を最終目標として選定し、その基本仕様について検討し、概念設計を実施した。具体的には、優れた特性を有する IBAD/ CVD-YBCO 線材を用いて

SMES システムの各構成機器であるコイル、変換器、冷却システム等の個別検討およびそれらのコーディネーションを実施したので、その全体システムについて述べる。

6. 2 負荷変動補償用 SMES への要求仕様

貯蔵エネルギー2 GJ 級、出力容量 100 MVA の負荷変動補償用途としての運転パターン（充放電基本動作）モデルを図 6-1 に示す。また、その負荷変動補償用 SMES システムに要求される基本仕様を表 6-1 に示す。出力 100 MVA を確保するため、必要な SMES 最小電流を定格の 50 %、利用可能エネルギーを 1.8 GJ と設定した[1],[2]。

6. 3 SMES 用 Y 系コイルシステムの設計

6. 3. 1 コイル用線材

IBAD/CVD-YBCO 線材は n 値が 30~40 程度と高く、僅かな電流マージンで定常損失を極めて小さくすることができる。また、1 μm 程度の薄膜のため、トロイド形状など超電導層面を高磁界方向に平行となる方向にコイル巻線構造を最適化し、垂直磁界成分を低減することで、交流損失を低減することができる[3],[4]。さらに、大規模コイルではフープ応力耐性により高エネルギー密度化に制約を受けるが、1 GPa を超える線材そのもののフープ応力耐性に加え、テープ状線材はさらなる高強度化の際の伴巻きによる補強も容易と考えられることから、2.4 GJ SMES コイルへ IBAD/ CVD-YBCO 線材の採用を決定した。

今回の設計に用いた IBAD/ CVD-YBCO 線材は、現状の線材開発状況に照らし合わせ、寸法は厚さ 0.1 mm、幅 10 mm を基本構造とし、その通電特性は液体窒素温度 77 K、自己磁界中での I_c を現実的な 300A@1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ とした。線材

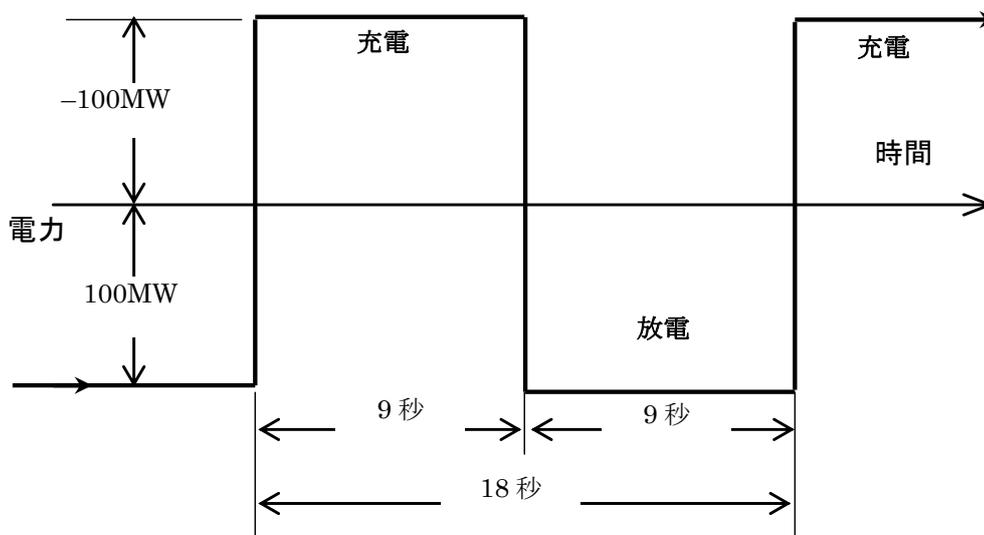


図 6-1 負荷変動補償用 SMES の充放電基本パターンモデル

表 6-1 負荷変動補償用 SMES システムの基本仕様

用途	負荷変動補償
SMES コイル定格容量 (最大貯蔵エネルギー)	2.4 GJ
定格充放電出力	100 MVA
充放電周期	18 s
制御対象電力	有効および無効
充放電エネルギー量	各 0.9 GJ
SMES 待機時電流	定格の 79 %
SMES 最小電流	定格の 50 %
使用線材	IBAD/ CVD-YBCO 線材

の熱安定化に関しては、通電時の冷却およびクエンチ発生時の熱の吸収・拡散を考慮し、ハンダによる必要厚さの銅テープの複合化処理や線材周囲に必要な厚さの銅メッキ処理を実施することを想定した。電磁力対策としては、さらにフープ応力への耐性を高めるため、同じ幅の Hastelloy テープを伴巻きにする方法により補強する方法を採用した。Hastelloy 厚さをフープ応力の低減に必要な厚さに調整することでフープ応力を任意に決定することが可能である。

6. 3. 2 要素コイル構造

Y系線材による SMES 用トロイド要素コイルの構造として、下記理由によりパンケーキ型コイルの積層方式を採用した。

- ・ Y系線材内部の積層材料等に起因して線材厚さ方向の熱伝導が小さく、また、20K 温度領域においては、コイル構成要素の Cu や FRP 等の熱拡散率が 4.2 K より 2 桁程度小さく、温度勾配が大きくなり易い[5]。このため、線材長手方向全長に亘り低熱抵抗で同等に冷却することが重要となるが、パンケーキ巻きでは巻線部両側面（コイル軸方向に垂直なコイル両面）に同等に近接して冷却板を設置できるため、線材全長を同等に冷却することが可能となる。
- ・ Y系線材は断面アスペクト比の高い幅広のテープ形状であるため、ソレノイド巻きの場合、コイル軸方向端部の巻き返しにおいて捻り方向の歪みがコイル層間に挟まれた状態で負荷されるが、パンケーキ巻きとすることでコイル軸方向への線材転位（捻り）をなくすことで、超電導特性の劣化要因となり得る巻線時の歪発生を防止する。なお、「5. 2. 1 コイルの巻線技術」で検証した結果から、ダブルパンケーキ巻きについても歪み発生を抑制することが可能である。
- ・ 遮断時に発生するコイル誘導電圧の分割を可能とするマルチセル変換器とのマルチ取り合いを考慮し、多数の要素コイルで全体コイルの構成が可能となる配置とする。
- ・ 長尺製造が困難な Y系線材を比較的短い線材長でコイル構成可能とする。
- ・ 線材 I_c 等に起因する各コイル特性の優劣に対し、コイル全体での磁界分布を考慮して各コイルの配置を任意に調整できるため、コイル通電電流（エネルギー密度）を高めることができる。

また、下記理由によりダブルパンケーキ型コイルの積層方式を採用した。

- ・ コイル内周側は外周側に配置する冷凍機からの冷却が困難であるため、コイル電極を外周側に設置し、接続抵抗や冷却部材の渦電流によるコイル内部での発熱を抑制する。
- ・ 高磁界により高い電磁力が負荷される内径側への電極設置を避けることで線材接続部での電磁応力を低減する。
- ・ 内径側での電極設置や導体接続を無くし、コイルの組み立てにおいて電極接続時の作業を外周側に統一することにより製作性を向上させる。

SMES 用コイルの構成においては、電力変換器との取り合いに関して、コイル電流容量については、変換器の電流仕様に応じて線材の集合導体化（バンドル化）を行い、コイル電圧については、多分割コイルの耐電圧の適正化およびコイル直列化による対応調整を行うこととした。

6. 3. 3 全体コイル構成

大容量 SMES の低コスト化を目指したコイル小型化、線材量最小化を実現するためには、全コイルの磁気回路を共通にすることが最も効果的である。そこで、以前に電力系統制御用 SMES として概念設計された金属系超電導コイル [6]-[11] の中で、磁界制約により 3 分割してコイルを構成せざるを得なかった貯蔵エネルギー 2.4 GJ の容量を、Y 系線材を用いることで共通の磁気回路のコイル 1 セットで構成することを試みた。ただし、万一のコイル保護を想定し、焼損防止のために電流遮断時定数を短くする必要があるが、コイル電流遮断時には誘導電圧がコイルに発生するため、コイル耐電圧の制約によりインダクタンスをある程度以上大きくすることはできない。そこで、今回、1 つの磁気回路で構成する全コイルの電気回路を多分割することで、コイル耐電圧の低減を図った。具体的な多分割コイルと多分割変換器の組み合わせとなる電気回路については「6. 4 SMES システムコーディネーション」で後述するが、小容量

のセルモジュール型変換器の直並列構成で大容量が構成可能なマルチセル型変換器を採用することで実現可能とした。

全体コイルの組合せ構成は、「4. 3 SMES コイルに要求される特性評価」で前述したようにトロイド配置方式を採用した。ここで、今回の常時充放電する負荷変動補償用途を想定した交流コイルにおいては、高温超電導コイルのヒステリシス損失に起因する冷却コストの割合がライフサイクルコストに対して大きくなるため、ヒステリシス損失の低減が重要な課題となる[1],[2]。

以上の考え方から決定した今回の Y 系線材を用いた大容量交流コイルに対する設計コンセプトを以下にまとめる。

- ・磁気回路の最小化、コイル・変換器組み合わせ電気回路の多分割化
- ・各要素コイルへ作用する電磁力（フープ応力、向心力）の低減
- ・コイル垂直磁界成分の低減によるヒステリシス損失の低減
- ・コイル垂直磁界成分の低減によるフロー損失の低減（コイル許容電流値の増加による必要線材量の削減）
- ・冷凍機を含めた周辺機器へ影響を及ぼすコイル外部への漏洩磁界の低減
- ・マルチセル型変換器とコイルの取り合いとなる電流リードの分散配置
- ・多分割組み合わせ回路による遮断・保護動作時の近傍要素コイルでの誘導電圧、誘導電流、転倒力等の低減
- ・一部点検・補修・取替時における作業範囲・影響の最小化、作業容易性

上記設計コンセプトを基に、「4. 3 コイルに要求される特性評価」で実施した有限要素解析と同じ手法で負荷変動補償用 2 GJ 級 SMES の全体コイルの最適設計を実施した。ただし、コイル内径側で最大となっているフープ応力を低減するための手法として、巻線間隔をパラメータに追加した[12]。設計条件に関しては、フロー損失は全コイルの接続電極部で想定されるジュール損と同等レベルの 100 W 以下とし、最も重要なフープ応力は、前述した「4. 4 Y

系線材の機械特性評価」の結果を基に、事故時の要素コイル間の誘導電流増加等を考慮して設計裕度を 50 %とし、600 MPa 以下とした。この値は従来の金属系コイルの 2 倍に匹敵し、コイルの高磁界化（高エネルギー密度化）が十分実現可能である。寸法条件については、全体でのコンパクト化を図るため、輸送制限に加えて新たにクライオスタット設置スペースをφ 10 m 級以下と設定した。以上の解析から得られた 2.4 GJ 負荷変動補償 SMES 用コイル設計諸元を表 6-2 に、同コイルのイメージ図を図 6-2 に示す。

表 6-2 負荷変動補償用 2GJ 級 SMES コイル設計諸元

要素コイル数	180 個
トロイド中心径/トロイド配置外径	φ 6.95 m/ φ 9.25 m
要素コイル内径/外径	φ 1.5 m/ φ 2.3 m
要素コイル高さ	0.060 m
線材厚（補強材 0.57 mm）	0.82 mm/ 条
使用線材長	2,090 km
貯蔵エネルギー	2.4 GJ（最大）
運転冷却温度	20 K
通電電流@素線	540 A
最高磁界（垂直）	11 T (0.67 T)
最高電界	0.05 μV/cm
フロー損（最大）	70 W
ヒステリシス損（最大）	3.7 kW
コイル用冷凍機総容量	20 K×4.5 kW
電流リト ^レ ・熱リト ^レ 用冷凍機総冷却容量	50 K×18 kW
巻線フープ応力	600 MPa
要素コイル当りの向心力	3.7 MN
5 ガウスライン	φ 11.4 m

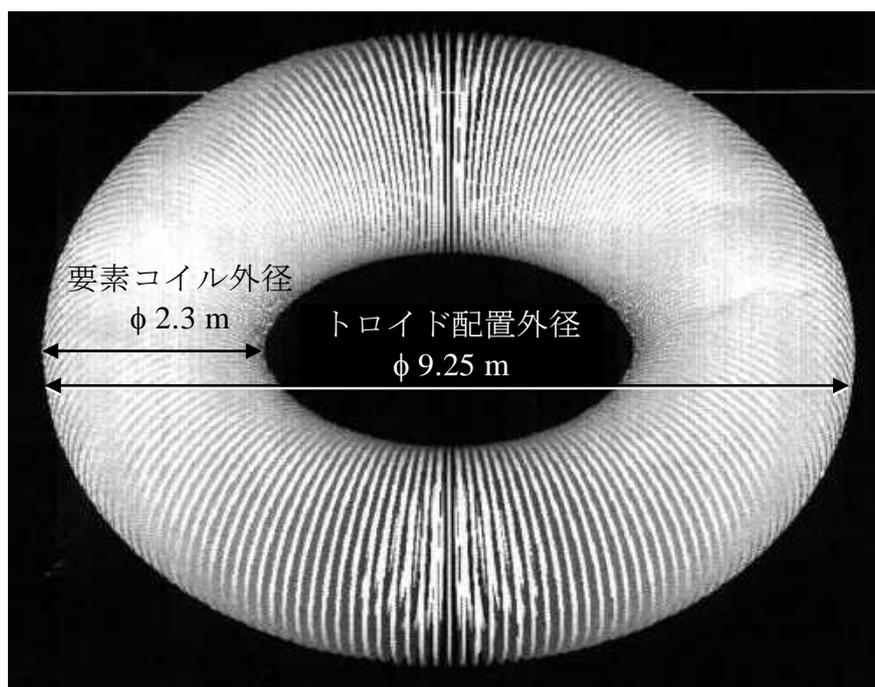


図 6-2 2.4GJ 負荷変動補償 SMES 用コイルイメージ図

今回、負荷変動補償の運転パターンに応じて Y 系線材を用いた SMES コイルの損失を実測した線材特性に基づき解析した結果、従来想定されていた 12 分割の要素コイル[1],[2]では総線材量は減少するものの、ヒステリシス損失に起因する冷却コストが甚大となり、その低減対策が不可欠となった。そこで、要素コイル数の増加に伴うコイル垂直磁界成分の低減によりヒステリシス損失の大幅な低減が可能となること、「6. 4 SMES システムコーディネーション」で後述するマルチセル変換器との取り合いやダブルパンケーキ型 2 積層となる要素コイルの伝導冷却が容易となることとともに、要素コイル数の増加による必要線材量の増加が 3 %以下と極めて小さいことから、要素コイル数を 180 個と決定した。この多分割要素コイル採用の結果、ヒステリシス損失を 1 桁以上低下、フロー損低下による電流値を約 30 %増加、5 ガウスラインを約 30 %縮小させてクライオスタット表面にまで縮小、要素コイルの向心力を 1 桁程度低下させることを可能とした。

6. 3. 4 コイル冷却システム

Y系線材を用いた SMES 用コイルは、「4. 3 SMES コイルに要求される特性評価」で前述したように、Y系線材の温度別 J_c - B 特性から 4.2 K~40 K 温度領域での冷却が適している。また、その他構成材料に関しても、Cu 等の常電導材料の電気抵抗や冷却材の熱抵抗も大幅に低下するため、電極部等でのジュール損失および冷却部の温度勾配を低減することができる。具体的な温度は、詳細な設計には CVD/ YBCO 線材の低温での磁界角度依存性のデータが不足することや、磁場中での通電特性が現在向上し続けており、最適温度は今後も見直す必要が出てくることから、今回は組み合わせる極低温冷凍機の効率および能力を総合的に評価し、高効率・インバータ運転が可能な最新の 1 段 GM 型冷凍機で到達可能な温度 20 K で超電導コイルを伝導冷却する方法を採用した。

コイルの冷却設計において、20 K の温度領域では、従来から用いている液体ヘリウムの 4.2 K 温度領域と異なり、超電導コイルの内部及び周辺の超電導線材や Cu や Al 等の冷却用伝熱体の熱容量は、選定される極低温冷凍機の容量に対して極めて (Cu の場合、純度に依存するが一般的に 2 桁程度) 大きくなる。このため、過渡的に発生する損失熱量に対して十分な緩衝能力を有しており、クエンチ抑制による信頼性の向上や過渡的な交流損失の発生に対する冷却バッファとしての効果が期待される。しかしながら、液体ヘリウム温度領域と比較して熱拡散率が低下し、局所的な温度上昇による温度勾配が生じ易くなるため、高い温度勾配による熱歪みの影響等、詳細な冷却設計においてはより一層の注意が求められる。具体的には、大型コイルにおける局所的な温度上昇を避け、熱拡散率を高めるため、自励式ヒートパイプの適用等が検討されている [13]。

6. 3. 5 クエンチ保護システム

Y系 SMES コイルは、金属系 SMES のコイルと異なり臨界温度に対する運転温度の温度マージンを大きく確保でき、また、液体ヘリウム温度より高い 20 K 温度領域で運転され、比熱が著しく増加することから、通常の運転条件ではクエンチ発生の可能性は低いと考えられる。しかしながら、経年劣化等の万一の場合を想定したクエンチ等に対するコイルの保護対策は必要である。

まず、異常時の検出に関して、20 K 温度領域で伝導冷却 SMES コイルにクエンチが発生した場合、Y系線材は n 値が大きいものの、低い熱拡散率により温度上昇が局所的に抑えられ、従来から用いられているコイルの差電圧計測による検出方式では電圧変動やノイズに対して検出すべき差電圧が小さく、クエンチの検出が困難と考えられる。このため、従来と異なる新たなクエンチ検出手法が必要とされる。

「6. 4 SMES システムコーディネーション」で後述するが、変換器との取り合いの電流容量を確保するため、SMES コイルには Y系線材の集合導体化が必要となる。交流損失の低減には集合導体の素線絶縁が重要であるため、素線絶縁集合導体を用いたコイルがクエンチした場合について電流挙動を解析した結果、素線間での速やかな転流現象が発生することが確認された。そこで、各素線電流を常時監視することをクエンチ検出方法として考案した。クエンチ時の電流・温度変化を解析した結果、クエンチ部の温度上昇が数 10 K 程度の間に検出が可能と確認されたため[14]、本検出法が有効に活用できる。この他の方法として、「6. 3. 4 コイル冷却システム」で前述した自励振動式ヒートパイプを採用した場合には、局所的発熱時においてもヒートパイプ内の圧力変化は迅速と考えられることから、その圧力を監視することでクエンチを速やかに検出することが有効と考えられる[15]。

次に、検出後のコイル保護方法に関して、まず、外部保護抵抗によるエネルギー

ギーの回収について考える。保護完了の条件となるコイル電流値に減少するまでの所要時間は次式で計算される。

$$t = - (L / R_P) \times \log_e (I_F / I_M) \dots \dots \dots (6-1)$$

- ただし
- t : エネルギー回収に要する時間(s)
 - L : SMES コイルのインダクタンス(H)
 - R_P : 保護抵抗器の抵抗値(Ω)
 - I_F : 保護完了時の最終電流(A)
 - I_M : コイルの最大電流(A), $I_M = V_D / R_P$
 - V_D : 直流電圧(V)

クエンチ時には、コイルの焼損を回避するとともにクライオスタット内部での発熱量を低減するため、保護抵抗は時定数が小さくなるよう大きな値を採用するのが望ましいが、一方で、コイル遮断時に回路に発生する誘導電圧が回路の耐電圧を超えない範囲に抑えるため、コイルのインダクタンス等を考慮して決定しなければならない。SMES コイルの電流低下に従い、保護抵抗器によるエネルギー吸収量は次第に減少するため、できるだけエネルギー回収時間を短縮する方法として、電流減衰に伴い、保護抵抗の印加電圧が一定となるように保護抵抗値を増加させる可変式抵抗器を採用することでエネルギーの回収時間を短縮することが可能である[16]。ただし、電力系統制御用のようにコイルの貯蔵エネルギーが大きく、保護抵抗短絡時の減衰時定数が 10 s を超えるように極めて長い場合は、外部保護抵抗によりエネルギーを外部へ回収する場合も、その間のコイル内クエンチ箇所での発熱挙動に留意し、焼損を回避しなければならない。今回、20 K 温度領域を適用するため、コイルの熱容量が大きく、クエンチの可能性が極めて低くことから、従来と異なる熱的挙動に着目して発想を転換し、外部へのエネルギー回収ではなく、コイル内でエネルギーを消費する方法について検討した。

Y系コイルを 20 K 温度領域で運転する場合は、従来のヘリウム温度での運

転に比べ、線材、安定化銅、伝導冷却導体等のコイルシステム構成材料の熱容量が格段に大きくなる。このため、2 GJ 級の大容量エネルギーでも構成材料の熱容量を活かして温度上昇を常温以下に抑えることは可能である。ただし、Y 系線材は n 値が高く、クエンチした場合の抵抗増加およびそれに伴う温度上昇が早く、また、20 K 温度領域では、液体ヘリウム温度領域と比べて熱拡散率が大幅に低下することから、局所的な温度上昇により焼損する可能性が高いと考えられる。そのため、対策としてクエンチを全体に広げ、発生熱量をコイル全体に拡散し、温度上昇の均等化を図ることができれば、貯蔵エネルギーをコイルの温度上昇で吸収し、健全にコイルを保護することも可能と考えられる。

ここで、浸漬冷却方式を採用する場合、冷媒のガス化による内圧上昇が大きく、ラプチャーディスクや安全弁では能力不足が懸念される。このため、コイル内でエネルギーを消費する場合は、安全面から伝導冷却方式でのコイルシステムが必要と考えられる。

クエンチ発生時のコイル保護方法の主な観点について以下にまとめる。

- ・ 素線絶縁コイルの転流現象モニタリングにより、高速、高精度、高信頼性でのクエンチ検出および電源遮断
- ・ 局所的な温度上昇によるコイル焼損防止のため、コイルシステム自身の熱容量によるエネルギーの均等吸収
- ・ 無冷媒冷却システムとなる伝導冷却方式により、クライオスタット内部の冷媒ガス圧力上昇回避、安全性確保
- ・ トロイドコイルの多分割により、健全コイルに対するクエンチ波及対象の限定および貯蔵エネルギーの吸収量低減

6. 3. 6 電流リード冷却システム

電流リードシステムは、常温の外部と極低温状態のコイル間の電気エネルギー

一の授受に使用され、大電流を通電し、かつ、侵入熱を低減する必要があることから、一般的に電気抵抗が小さく、熱抵抗が大きい高温超電導材料から構成される電流リードが用いられる。電流リードの冷却は、冷媒の気化潜熱と熱容量を活用した浸漬冷却方式とコイル側と同様に極低温冷凍機による伝導冷却方式の2方式があるが、SMES コイルの冷却と同様に取り扱いの簡便な冷凍機による伝導冷却を採用し、冷凍機の動力損失を低減するため、専用とした電流リード用冷凍機は高温超電導電流リードの高温端側のみを冷却し、液体窒素温度付近にサーマルアンカーを設ける方法を採用した[17]。

電流リードの冷却システムは、常電導電流リードを経由して外部から侵入する熱量が多いため、大きな熱容量で複数の電流リードをまとめて冷却でき、高いサイクル効率で駆動電力が少なく、また、運転寿命時間が長く保守の容易なパルス管とスターリング式を組み合わせた冷凍機を採用した。

冷凍機のコールドヘッド温度は、電流リードに使用する高温超電導材の許容電流、熱伝導度の温度特性、および、コイルの熱シールドの冷却へ共用すること、ならびに、各部での侵入熱の増加による温度上昇や限界点までの裕度を考慮し、冷凍機的能力上限の 50 K に設定した。

6. 3. 7 クライオスタット構造

本章で述べてきた要素コイル構造、全体コイル構成、コイル冷却システム、クエンチ保護システム、電流リード冷却システムの各計画を 2 GJ 級 SMES 用コイルシステムに全て反映し、クライオスタットの構造を決定した。図 6-3 にその鳥瞰図を示す。

コイル支持構造に関しては、トロイドコイル構成を基本構造に採用し、トロイド中心方向への向心力に対しては、ウェッジ支持構造の原理を応用した。ここで、SMES の場合の利点は、核融合炉等のように磁界空間を使用目的としな

いため、コイルコアに支持構造材を配置することで、内力として相殺させ、基本的にクライオスタットでの強大な電磁力支持は不要とし、外部からの支持が簡略化できる構造（図 6-3 のコイル支持材参照）を採用した。

コイル冷却システムに関しては、無冷媒伝導冷却方式の採用により冷媒タンク省略等の冷却システムの簡略化を行うことを可能とし、コイル本体、接続導体、電流リードの冷却は 20 K 冷凍機からの伝導冷却とした。また、外壁の内側に輻射伝導断熱材および熱シールドを設けたクライオスタットを採用し、内部全体を高真空中で運転する方法を採用した。

さらに、工場内や最終設置場所での組立作業や輸送の便宜に配慮し、取り扱い最小単位を小さくするため、クライオスタットは分割組立を可能とし、15 要素コイルを 1 ユニットとした 12 ユニットから構成する構造を考案した。この方法では、故障時における 1 ユニット毎の昇温、交換、搬入前の予備冷却など、通電に関する操作以外は基本的に独立して対応が可能となるため、効果的に運用することができる。

6. 4 SMES システムコーディネーション

SMES コイルに貯蔵されたエネルギーを電力系統制御用として用いるには、コイルの直流電流を交流に変換し、電力系統と出し入れを行う電力変換器が必要となる。SMES コイルの基本設計においては、線材の温度・磁界中での通電特性から決定されるコイルの電流およびコイルの物理的形狀により決定されるインダクタンスにより電力貯蔵容量が決定されるため、変換器は基本的に超電導コイルの設計諸元には直接影響を与えず、独自に基本設計することが可能である。

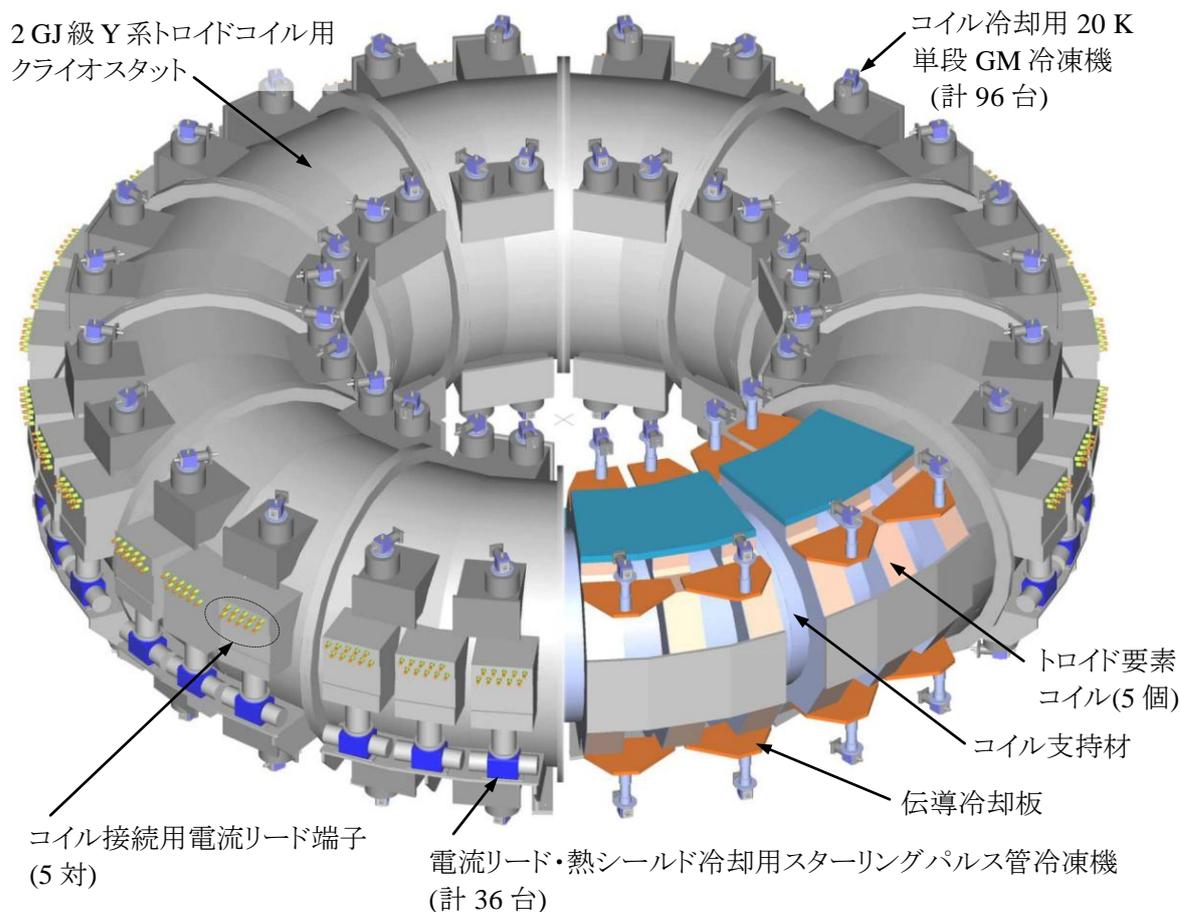


図 6-3 2 GJ 級負荷変動補償用 SMES 鳥瞰図 (クライオスタット外径 : 10 m)

第 2 章において瞬低補償用変換器の開発を実施し、技術確立したが、常時待機し、年間に数回程度瞬間的に動作する瞬低補償用と常時充放電動作を繰り返す負荷変動補償用途では変換器に要求される仕様が異なるため、以下の考え方で変換器の開発を実施した。2 GJ 級負荷変動補償 SMES 用変換器に要求される基本的資質は、安価で、変換効率が高く、電力系統や SMES コイルに対する電力制御の精度や応答性に優れ、長期使用に対し安定し、信頼性が高いことである。今回、基本設計した負荷変動補償用 Y 系 SMES 用の変換器には、さらに、下記理由により、耐電圧設計条件の緩和および貯蔵エネルギーの細分化によるクエンチ保護の安全・確実な対策が求められる。

- ・ 負荷変動補償用 SMES は貯蔵エネルギーが大きく、充放電時間が長い
ため、事故時における変換器や保護抵抗器へのエネルギー一括回収による
保護方法では、耐電圧からの制約により速やかなエネルギー放出が困難
であり、コイルの焼損防止対策が不十分と考えられる。
- ・ コイル冷却システムを従来の冷媒による浸漬冷却方式ではなく、極低温
冷凍機を用いた伝導冷却方式としているため、コイルや電流リードの絶
縁部を含めた冷却系の熱抵抗を低減する必要があり、高い熱伝導特性と
相反する高い耐電圧の両立は困難と考えられる。

上記の考え方を踏まえ、2 GJ 級 SMES コイルに組み合わせる 100 MVA 変換器システムは、トロイドコイルを分割して独立制御でき、コイル保護時の誘導電圧を低く抑えることができるマルチセル方式が最適と判断し、基本設計を実施した。その変換器モジュールブロック図、変換器仕様をそれぞれ図 6-4、表 6-3 に示す。また、マルチ要素コイルとマルチセル変換器の組み合わせにより構成される SMES システム（以下「M-M SMES システム」という）の結線説明図を図 6-5 に示す。

M-M SMES システムにおいては、180 台の変換器セルモジュールを 180 分割のトロイド要素コイルにそれぞれ連結させている。スイッチング素子の耐電圧値 1,200 V から出力 560 KVA の変換器セルモジュールの直流中間電圧値は 750V と設定し、その直流中間の平均電流値 747 A からチョッパ回路の直流最小電流値は 810 A と設定した。以上より、変換器セルモジュールとトロイド要素コイル間の取り合いの電流値、電圧値は、それぞれ 1,620 A、750 V と決定した。この電流値は、多条本数の集合導体化が困難な Y 系線材を 3 本程度束ねた集合導体でコイルが製作可能であり、また、この電圧値は、高い熱伝導特性が要求されるコイルの伝導冷却ならびに過電圧を抑制したクエンチ時のコイル保護の両立が可能であると考えられる。

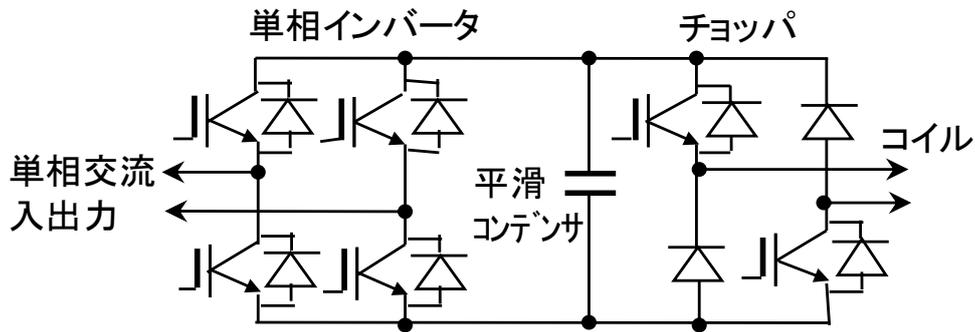


図 6-4 マルチセル型変換器モジュールブロック図

表 6-3 2 GJ 級 SMES システム用交直変換器主要仕様

形式及び定格容量	マルチセル型 100 MVA
系統電圧/定格電流	77 kV/ 750 A
モジュール単機容量/台数	560 kVA/ 180 台
モジュール組合せ構成	5 P × 3 A × 3 S × 2 S × 2 U
系統側変換器方式	電圧型単相ブリッジインバータ
SMES 側変換器方式	電圧極性可逆式チョツパ
モジュール定格出力電圧/電流	480 V/ 1,170 A
モジュール直流電圧/直流電流	750 V/ 1,800 A
コイル電流 (Duty) 最大～最小	1,620 A (50 %)～810 A(100 %)
スイッチング素子及び仕様	IGBT 1,200 V×1,400 A
モジュールスイッチング素子個数	8 個/ 変換器モジュール (2 イン 1)
冷却方式	強制空冷
変換効率 (充放電平均)	98 %以上

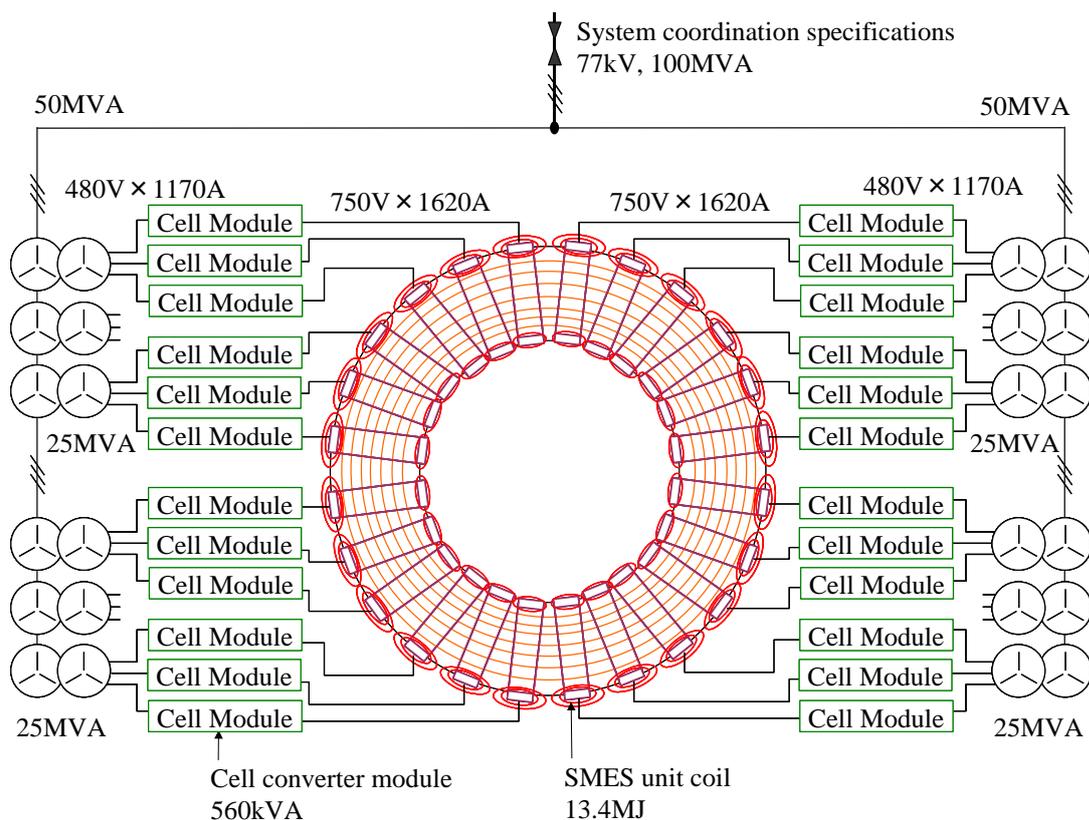


図 6-5 2GJ 級トロイド型 SMES システムにおけるマルチ要素コイルおよびマルチセル変換器の主要結線図（全 180 対に対し、24 対に簡略化表示）

検証モデル用に製作したセルモジュールを用いた 2,500 kVA マルチセル変換器盤を図 6-6 に示す。模擬 SMES コイルと組み合わせた系統連系充放電動作試験を問題なく実施し、空冷化の実証、マルチセル変換器の有効性を検証した。なお、今回製作したマルチセル変換器盤（入出力盤除く）は、第 2 章で述べた容量 2 倍の 5 MVA 変換器が寸法 7,900(W)×2,200(D)×2,800(H)に対し、寸法 1,300(W)×1,200(D)×2,200(H)、重量 1,820 kg と大幅なコンパクト化が実現できており、また、以下の特長を有している。

- ・最新の高速・小型パワー半導体素子 IGBT を用いた変換器のモジュール化、空冷化により低コスト・低損失のインバータハードウェアを採用
- ・変換器モジュールの直列接続構成により、高調波成分の少ない高品質の電力変換が可能であり、高電圧化・大出力化が容易

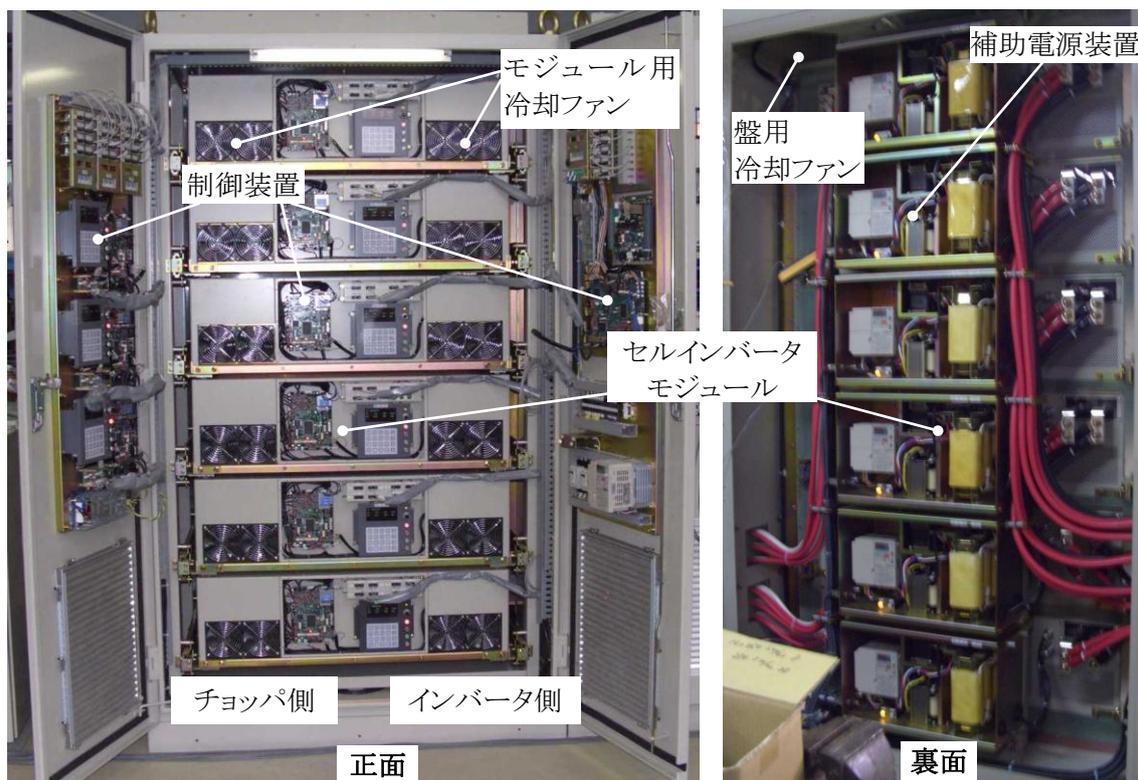


図 6-6 マルチセル変換器盤（セルモジュール 6 台構成）の内部構造

最後に 2GJ 級 M-M SMES システムの全体配置図を図 6-7 に示す。2.4 GJ の貯蔵エネルギーの Y 系トロイドコイル、極低温冷却装置、交直変換器、入出力盤等を寸法 50 m×20 m の電気室へ配置し、屋外に変圧器を設置した。図 6-5 に結線図を示したように、各要素コイルと組み合わせられた単相の各セルモジュール型変換器を 25 MW 変圧器に各相 5 台並列接続・昇圧し、変換器 2 台により 1 ユニット 50 MVA を構成し、2 ユニット連系して出力 100 MVA を確保する計画としている。参考に、従来の金属系 NbTi 線材を用いた SMES コイル概念設計結果との比較図を図 6-8 に示す。高磁界化によるコンパクト化（高エネルギー密度化）や高温での簡素な運転等、SMES 性能の大幅な向上を可能としている。

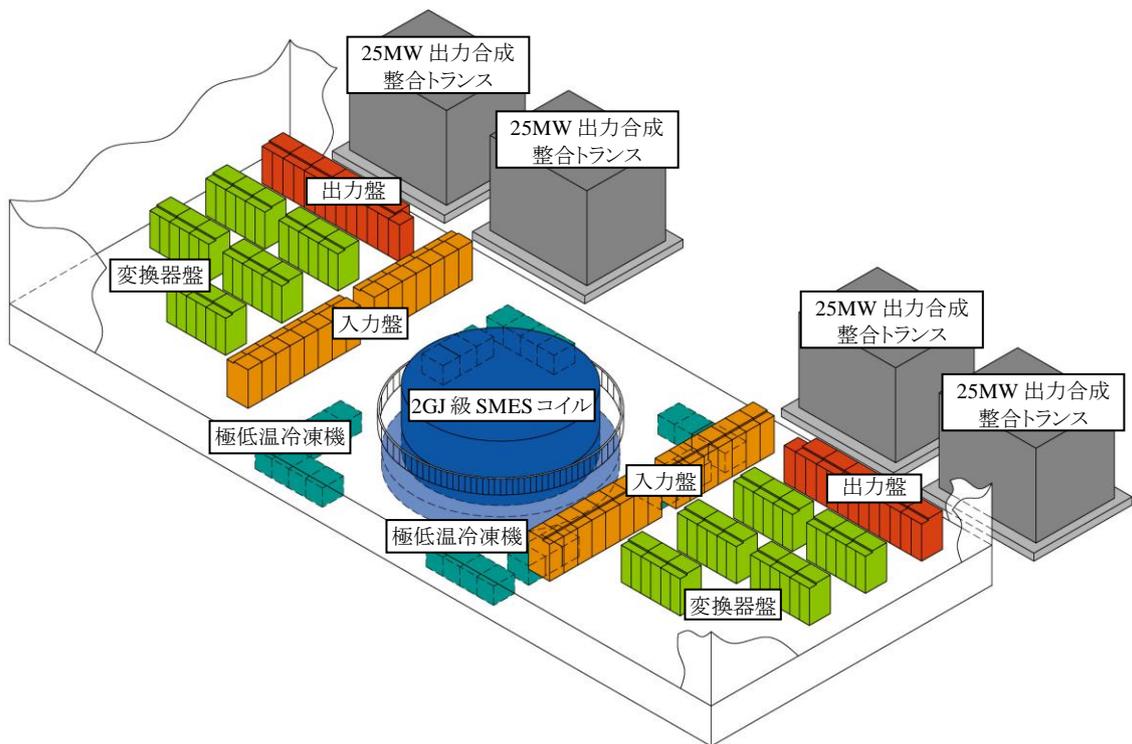


図 6-7 負荷変動補償用 100 MVA/ 2 GJ 級 Y 系 SMES システム配置図
(電気室平面寸法 : 50 m × 20 m)

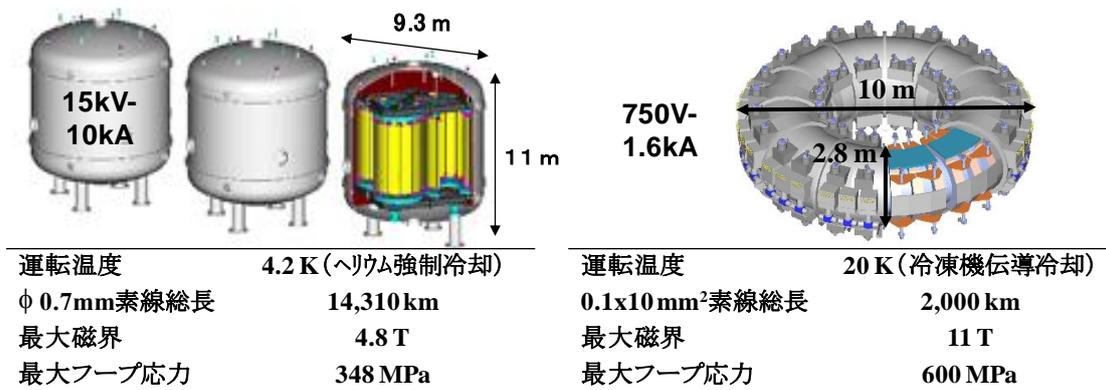


図 6-8 NbTi および Y 系線材を用いた負荷変動補償用 2 GJ 級 SMES 比較図

6. 5 結論

Y系線材を用いた 100 MW/ 2 GJ 級負荷変動補償用 SMES システムの概念設計により、SMES 各構成機器の個別検討および変換器と組み合わせたシステムコーディネーションを実施し、SMES システムの全体構成を明らかにするとともに、SMES の大幅な性能向上を可能とした。それらの結果を要約すると、下記のとおりである。

- (1) SMES コイルにトロイド型を採用し、180 の多分割要素コイルを新たに提案することで以下の特長を可能とした。
 - ・最も効果的にエネルギー密度を高めるため、トロイドコイル磁気回路を 1 つに統合するとともに 11 T 級へ高磁界化し、2 GJ 級大容量コイルを $\phi 10$ m 以下のサイズにコンパクト化した。
 - ・11 T への高磁界化と同時に垂直磁界成分を 0.7 T へ低減することで、常時充放電する負荷変動補償動作においても経済性が成立する 3 kW 以下のレベルにまで交流損失を低減した。
 - ・漏洩磁界の影響を抑え、5 ガウスラインをトロイド中心から $\phi 11.4$ m の位置にまで縮小した。
 - ・漏洩磁界を低減することで要素コイルの周方向に冷凍機の均等配置を可能とするとともに、要素コイル軸長を短くすることで要素コイル両面からの伝導冷却によるコイル内部の温度勾配を低減する高効率伝導冷却システムを適用可能とした。
- (2) 変換器にマルチセル型を採用し、要素コイルと同数のセルモジュール変換器を用いることで、双方小型ユニットで組み合わせるダブルマルチユニット構成を新たに提案した。磁気統合したトロイド要素コイルを電気回路ではセルモジュール変換器で各々独立して制御できるため、以下の特長を有する。

- ・構造上、集合導体化が従来の線材より困難な Y 系コイルの電流容量を 2 kA 級へ低減した。
- ・コイル電流遮断時における遮断時定数の短縮によるクエンチ対策および 2 kV 級への誘導電圧の低減による過電圧保護の両立を可能とした。
- ・クエンチコイルの独立制御やクエンチコイル電流遮断時の誘導電流・電圧、電磁力変動の低減を可能とする等、コイル保護対策の選択肢を広げた。

以上の成果より、大容量 SMES 実用化への課題であった高磁界コンパクト化、電磁応力の低減、交流損失の低減、コイル保護遮断時の遮断時定数低減と過電圧低減の両立等により、SMES の大幅な性能向上を可能とした。これらの成果達成により、資源エネルギー庁のプロジェクト「イットリウム系超電導電力機器技術開発」で実施されている「イットリウム系超電導電力貯蔵システム技術開発」へ進展した。

第6章の参考文献

- [1] 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
- [2] 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
- [3] K. Funaki, T. Sueyoshi, M. Iwakuma, K. Shikimachi, N. Hirano, S. Nagaya: “Basic AC Loss Properties of IBAD/ CVD-YBCO Tapes for Pancake-Type Coils,” *Physica C*, Vol. 468, pp. 1723-1726, 2008.
- [4] K. Kajikawa, K. Funaki, K. Shikimachi, N. Hirano, S. Nagaya: “Numerical evaluation of AC loss properties in assembled superconductor strips exposed to perpendicular magnetic field,” *Physica C*, Vol. 469, pp. 1436-1438, 2009.
- [5] 真鍋智之、中村武恒、東川甲平、式町浩二、平野直樹、長屋重夫、“MOCVD-YBCO コイルの層間熱伝達特性” 平成 20 年電気学会全国大会講演論文集, Vol. 5, 230, 2008.
- [6] 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.
- [7] 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. 392-396, pp. 1196-1200, 2003.
- [8] 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.
- [9] 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.

- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 知的財産権 (特許)、発明者: 東川甲平、中村武恒、長屋重夫、平野直樹、式町浩二、名称: 超電導コイルおよびその製造方法、出願番号: 特願 2006-303235、出願日: 2006 年 11 月 8 日
- [13] T. Mito, K. Natsume, N. Yanagi, H. Tamura, T. Tamada, K. Shikimachi, N. Hirano, S. Nagaya: “Development of Highly Effective Cooling Technology for a Superconducting Magnet using Cryogenic OHP,” *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, Vol. 20, No. 3, pp. 2023-2026, 2010.
- [14] H. Ueda, A. Ishiyama, K. Shikimachi, N. Hirano, S. Nagaya: “Stability and Protection of Coils Wound with YBCO Bundle Conductor,” *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, Vol. 20, No. 3, pp. 1320-1323, 2010.
- [15] 知的財産権 (特許)、名称: 自励振動式ヒートパイプが組み込まれた超電導マグネット、発明者: 平野直樹、玉田勉、式町浩二、三戸利行、柳長門、田村仁、夏目恭平、出願番号: 特願 2009-241397、出願日: 2009 年 10 月 20 日
- [16] 式町浩二: 「モジュール型 SMES 用パルスコイルの保護」、九州大学修士学位論文
- [17] “Current Lead Design”, US Particle Accelerator School, University of Wisconsin-Madison, June 21-25, 2004