SMES プロジェクトの計画概要

山本 政弘, 佐藤 隆^{*1}, 塚本 修巳^{*2}, 村上 吉繁^{*3}, 正田 英介^{*4}

(財)国際超電導産業技術研究センター 東京都港区新橋 5-34-3

^{*1} 核融合科学研究所 土岐市下石町 322-6

^{*2} 横浜国立大学 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5

^{*3} 福井工業大学 福井市学園 3-6-1

^{*4} 東京理科大学 野田市山崎 2641

(1998 年 6 月 22 日受理)

SMES Project Plan

Masahiro YAMAMOTO, Takashi SATOW,^{*1} Osami TSUKAMOTO,^{*2}

Yoshishige MURAKAMI^{*3} and Eisuke MASADA^{*4}

International Superconductivity Technology Center, 5-34-3, Shinbashi, Minato-ku, Tokyo 105-0004

^{*1} National Institute for Fusion Science, 322-6 Oroshi, Toki 509-5292

^{*2} Yokohama National University, 79-5 Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama 240-0067

^{*3} Fukui University of Technology, 3-6-1 Gakuen, Fukui 910-0028

^{*4} Science University of Tokyo, 2641 Yamasaki, Noda 278-0022

(Received June 22, 1998)

Synopsis:

The rapid increase in the demand for electric power and the reduced load factor in Japan have encouraged the development of SMES (superconducting magnetic energy storage) systems for utility power grid applications. The Ministry of International Trade and Industry launched an 8-year national project to develop and establish the component technologies required to realize a small scale 100 kWh/40 MW SMES and its practical application in the utility network. The key component technologies developed in the project consist of a superconducting coil, a quench detection system, a power converter, a circuit breaker and a persistent current switch. A model coil for the core of the SMES system has been designed and fabricated. Performance tests in cooperation with The Japan Atomic Energy Research Institute were successfully completed in 1996. The following paper describes in detail the test results and their subsequent evaluation. The model coil is presently installed in the test facilities at Lawrence Livermore National Laboratory, in the United States, for long-term excitation testing. The tests are part of an international cooperation plan with the U.S. Department of Energy (DOE).

Keywords: SMES, forced flow system, cable-in-conduit conductor, performance test

1. はじめに

通産省資源エネルギー庁では、日本における本格的な超電導電力貯蔵システム (SMES) 開発の第一歩として小規模 SMES パイロットプラント建設に必要な要素技術の確立のためのプロジェクト「超電導電力貯蔵システム要素技術開発調査」を、平成 3 年度から 8 年計画で進めており、これを(財)国際超電導産業技術

研究センター (以下, ISTEK という) が受託し、これに学識経験者・電力会社・メーカーが参画して計画を推進している¹⁻⁸⁾。

わが国においては、総エネルギー需要の増加とともに電力エネルギーへの依存率の拡大が予想され、これに対応するため電力系統の規模が大きくなっていくとともに負荷率低下の改善が求められている。また一方では省資源・省エネルギー・地球環境保護などの社会

Fig. 1 Development road plan for SMES.

的要請から電力の有効活用が求められている。このため、電力の負荷平準化・品質維持向上、電力設備の高効率運用に対する要求は大きく、電力貯蔵への技術開発の期待がますます大きくなっている。電力貯蔵技術のうち、SMES は、①エネルギーの貯蔵効率が低い、②エネルギーの出入れ速度が速い、③有効・無効電力を独立に制御できる、などの特徴から負荷平準化・変動負荷補償・系統安定度向上・周波数調整などの多様な用途に、貯蔵容量 (kWh) 面のみでなく出力 (kW) 面での瞬時電力変動への利用などができ、将来の電力系統において重要な役割を果たすものと期待がかけられている。

本稿では、SMES 全体計画のうち各種要素技術開発の心臓部である超電導コイルについて、開発経緯および試作モデルコイル製作および日本原子力研究所との共同研究で実施したコイル性能試験の計画概要を紹介する。

2. 計画の概要

SMES は負荷変動補償用や系統安定化用など小規模なものから、負荷平準化用の中・大規模なものまで幅広い適用性を持つ電力貯蔵技術であるが、規模の大きな SMES の実用化には克服すべき技術課題も多く、長期的に運転信頼性・安定性を求められる電力系統では、先ず小規模なものからの段階的開発・系統併入検証が好ましい。また小規模な SMES 開発では、これまでの核融合研究などでの超電導技術開発の実績や、周波数変換や直流送電などのパワーエレクトロニクス技術応用の交直変換装置の実績等から、その実現性が非常に高い。これらのことから、本要素技術開発調査では Fig. 1 に示す開発ステップをイメージし、まず第 1 段階として、負荷変動補償や系統安定度向上など多用途の運転に対し安定性・効率・経済性・運転制御保護性能・環境影響などの実用性を評価できる小規模

Table 1 Specifications for SMES pilot plant.

項 目	仕 様	用 途
利用可能貯蔵容量	100 kWh (360 MJ)	多目的用途
利用可能出力	20 MW	・ 負荷変動補償用
最大貯蔵容量	133 kWh (480 MJ)	・ 系統安定化
定格電流	20 kA	・ 電圧変動補償用
定格電圧	2 kV	・ 瞬時電圧低下対応
コイル形式	トロイダル型	要素コイル数 12 個 インダクタンス 2.4 H

20 kA 時の最大経験磁界：5.64 T、電磁力による最大フープストレス：4.68 M

Fig. 2 Conceptual view of magnetic coil system for SMES pilot plant.

パイロットプラント建設に必要な要素技術の確立および最適なシステムの研究評価を行うこととし、これにより小規模 SMES の実用性能検証や負荷平準化用の中・大規模 SMES 開発の可能性を見極めるパイロットプラント開発を目指した計画である。開発目標およびコイル部のイメージ図を Table 1, Fig. 2 に示す。

パイロットプラントの位置付けは、Fig. 3 に示す規模・適用領域図のとおり現在商用化されているマイクロ SMES に比べ、大容量化へのステップ開発として技術レベルとして革新的である。(ある文献によればアラスカ SMES は最近中断されたとの情報があ

Table 3 Development objectives of components.

要素	技術開発課題	開発目標
超電導コイル	低交流損失化	交流損失 0.05 % 以下
	高安定化	耐クエンチ熱的安定マージン > 300 mJ/cc
	低抵抗接続	$1 \times 10^{-9} \Omega$ 以下
	高絶縁耐力	耐電圧 > 3 kV
クエンチ保護	検出感度向上	検出感度 10 mV
	保護システム	動作時間 10 ms
交直変換装置	変換効率向上	効率 > 95 %
永久電流スイッチ	高容量	30 kA 級
	高速応答性	< 0.1 s
	長寿命・高信頼性	~30,000 回
	ON 時低抵抗	$1 \mu\Omega$ 以下
直流遮断機	大容量	20 kA 級
	高耐電圧	3 kV 級
	高速遮断	< 0.1 s

る⁹⁾。

開発調査としては、Table 2 の開発調査スケジュールに示すとおり、超電導コイル・クエンチ検出保護・交直変換装置・直流遮断器・永久電流スイッチについて各要素機器の開発目標 (Table 3) を目指した要素技術開発と、最適システム構成および SMES の系統導入効果などについて、調査検討・基本設計・部分試作試験・シミュレーション等を行い評価することとしている。

Table 2 SMES project plan.

	3 年 度	4 年 度	5 年 度	6 年 度	7 年 度	8 年 度	9 年 度	10 年 度	
要素技術開発	要求仕様検討 技術詳細検討 要素機器の設計・ 試作・試験			中 間 評 価	要素機器の設計・試作・試験				総 合 評 価
システム研究	系統導入効果の検討・評価				環境影響・系統導入効果の検討・評価				
	最適システムの検討 評価				最適システム・保護制御の検討・評価 基本性能評価試験・評価				
超電導材料の 試験・評価 方法	超電導材料の試験・ 評価方法の検討・評価				超電導材料の試験・評価方法の検討評価				価

Fig. 3 Applications of SMES and their corresponding positions in energy-power map.

3. 超電導コイルの開発研究

超電導コイルおよびクエンチ検出・保護の研究調査項目および要素開発スケジュールを Table 4 に示す。

平成3～5年度の間に、NbTi 浸漬冷却、NbTi 強制冷却、Nb₃Sn 強制冷却・一重コンジット、Nb₃Sn 強制冷却・二重コンジットの4方式のそれぞれについて共通の要求仕様に基づき、技術検討・設

計、短尺導体の試作・試験・評価を行い、平成5年度末の中間評価においてパイロットプラント用のコイル/導体の方式としてNbTi 強制冷却方式を選定した。コイル保護については、浸漬冷却方式と強制冷却方式の両方式ごとに現状技術の調査を行い、その結果も参照して基本仕様、コイル保護とその方式、クエンチ検出とその方式等の検討を行った。その結果、中間評価においてNbTi 強制冷却コイルの保護方式とし

Table 4 Development plan for superconducting coil and quench detection & protection system.

研究調査項目		H 3	H 4	H 5	H 6	H 7	H 8	H 9	H10	
超電導コイル	超電導コイルの要求仕様・技術検討・設計									総合評価
	超伝導導体の試作・試験・評価		試作	試験 評価						
	試作要素コイルの製作・試験・評価(原研試験)				製作	据付	試験 評価			
	試作要素コイルの試験・評価(LNL試験)						詳細設計	据付	試験	
	電流リード・直流母線の開発検討				技術調査		設計	製作	試験	
クエンチ保護	現状技術の調査および基本仕様									総合評価
	オリフィス流量計素子の試験									
	試作要素コイルによる検出試験				要素製作	据付	試験 評価			
	模擬冷却回路による流体法クエンチ検出試験						設計	製作	試験	

Table 5 Model coil structure.

項 目	仕 様
コイル形状	(外径 ϕ 3.34 m : 内径 ϕ 2.76 m) $\times$ 幅 0.67 m
超電導導体/冷却形態	NbTi ケーブル・イン・コンジット/強制冷却
巻線方法(ターン数)	ダブルパンケーキ巻 (11 ターン/層 $\times$ 16 層)
定格電流/臨界電流	20 kA/60 kA
耐電圧	3 kV 以上
被冷却重量	9.2 t

Fig. 4 Overview of SMES model coil.

て外部抵抗保護方式、クエンチ検出方式として電圧ブリッジ法と流体法を選定した。

その後平成6年度から、選定したNbTi強制冷却方式の導体の製作に入り、平成7年度にパイロットプラント用要素コイルと内外径が同一サイズで幅が1/2のコイル(モデルコイル、もしくは試作要素コイルと称している)を試作した。そのモデルコイルの構造および外観をTable 5, Fig. 4に示す。

試作に当たって各工程で試験検査を実施した。素線段階では外形検査・電気特性試験を行い、問題がない結果を確認している。また導体段階では臨界電流試験・安定性試験・交流損失試験および機械強度試験を、コイル製作段階で積層・接続・絶縁処理において形状検査・絶縁・気密試験等を行い確認をしている。

こうして完成したモデルコイルを、ISTECと日本原子力研究所(以下、原研と略す)との共同研究で、原研のITER試験装置を用いて性能評価試験を実施した。主な試験内容は以下のとおりである。

- ・冷却試験
- ・定格通電試験
- ・安定性試験
- ・臨界電流試験
- ・機械強度試験
- ・高速通電試験

これら試験は原研の精力的な支援のもと、計画どおり遂行でき、成果として貴重な性能検証を得ることができた。成果概要は以下のとおりである。

冷却試験では、初期冷却時間が約150時間、昇温時間は110時間であった。非通電時のコイルの熱侵入量は7.5 Wであった。

安定性試験では、パイロットプラントの定格条件(20 kA, 5.64 T/4.5 K)で十分安定なことを確認できた。また安定性マージンが830 mJと評価でき高安定性を確認できた。

臨界電流試験では、コイル性能は素線特性とほぼ同様な性能を維持しており、臨界電流データおよび分流通開始温度データが計算値とほぼ一致したことから安定性が高いことを確認できた。

機械強度試験では、定格20 kAで最大変位約0.2 mmであり、強度的に問題ないことを確認した。

高速通電試験では、パイロットプラント運転で負荷変動補償用途の仕様と同一の磁場変化(充電時0.13 T/s, 放電時0.18 T/s)を与えクエンチしないことが確認できた。その時の電流波形の一例をFig. 5に示す。また交流損失についての測定結果をFig. 6に示す。これを解析した結果、長尺導体のコイル化による影響のためか、長い時定数の交流損失が発生することが今回判明し、今後要因分析および導体改良などの対

Fig. 5 An example of current waveforms in pulse performance tests.

Fig. 6 AC loss of SMES model coil.

策検討を行うこととなった。具体的な試験データ・解析結果および成果については本書の各論で紹介する。

4. 今後の予定

モデルコイルについては、平成10年度に長期繰返し励磁試験を米国ローレンスリバモア国立研究所のFENIX試験設備を利用して国際協力で実施する予定であり現在その準備も最終段階に至っている。今後、この米国での試験結果とこれまでの成果を併せて評価する予定である。

また、SMESプロジェクト全体においても平成10年度は最終年度であり、現在各要素機器の開発およびシステム研究では試作品も用いた性能評価検証を進めており、今後これらの結果を踏まえて年度内に総合評価を行う予定である。

5. 結 び

8年間にわたる本SMESプロジェクトでは、100 kWh級SMESパイロットプラントの開発を目標に要素機器開発・システム研究を進めてきたが、所期の目標を達成できる見込みであり、次期の開発計画の展開について本プロジェクトの関係者を含め現在検討中である。

SMESの実用化開発には経済性を含め解決すべき課題も規模拡大に応じて少なくないが、今後の電力環境が需要の増大とともにIPPや託送導入による電力システムの変化、太陽光や風力発電・燃料電池などの新エネルギーによる電源の分散化の進展などを考慮すると、SMESの適用用途の多機能性およびエネルギー資源の有効活用面からニーズがますます高まっていくものと考えられる。

本開発の成果が十分活用され、さらに今後の開発の進展に繋がっていくことを期待する。

最後に末尾ながら、本プロジェクトの推進にあたり、委託元である通産省資源エネルギー庁をはじめ関係者の日頃の並々ならぬご尽力に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) E. Masada, et al.: Proc. IEA-Symposium on the Use of Superconductivity in Energy Storage, Karlsruhe (1994) 97
- 2) Y. Murakami, et al.: Proc. ICEC-16/IMC (1996) 1041
- 3) T. Satow, et al.: The International Conference on Electrical Engineering '97 (1997) 122
- 4) E. Masada: Proc. ISS '97 (1997) 11
- 5) ISTE「超電導電力貯蔵システム要素技術開発調査」研究発表会予稿集 (1997)
- 6) 山本政弘: 超電導エネルギー貯蔵シンポジウム '97 予稿集 (1997) 91
- 7) 高野一郎: 超電導エネルギー貯蔵シンポジウム '97 予稿集 (1997) 99
- 8) E. Masada: Proc. Int. Superconductivity Symp. (ISS'91) (1992) 37
- 9) 船木和夫ら: H 10 年度電気学会全国大会予稿集 (1998) S 27-9