解 説

高温超電導 SMES の技術調査

一瀬 中[†], 秋田 調^{*1}, 石山 敦士^{*2}, 高祖 聖一^{*3}, 辰田 昌功^{*3}Feasibility Study on High- T_c SMESAtaru ICHINOSE[†], Shirabe AKITA^{*1}, Atsushi ISHIYAMA^{*2}, Seiichi KOSO^{*3} and Yoshinori TATSUTA^{*3}

Synopsis: High- T_c superconducting technology is thought to provide many merits for SMES systems. For example, a cryo-cooled system can be used as a cooling system for high- T_c superconducting coils, indicating that a wide range of operation temperatures can be selected. As a result, the heat capacity of the coil system becomes much larger than that at 4.2 K. If we could absorb transient heat generation with the heat capacity of the coil, SMES systems can be designed under the over-current state of critical current for a short duration. As the cooling capacity for an average heat load will be enough to cool the High- T_c superconducting coil system for an SMES, it is expected that refrigeration system cost can be reduced. Moreover, we are developing a high critical-current superconducting wire for the SMES system. The Bi2212 Rutherford conductors can carry 4 kA at 26 K under cryo-cooling. We also estimate the superconducting wire cost of the whole coil system, which is designed to minimize the superconductor volume. The conclusion is that the cost of a high- T_c SMES system can be reduced remarkably by using low-cost YBCO superconducting wires in the future.

Keywords: high- T_c SMES, cryo-cooling, Bi2212, Bi2223, Y123

1. はじめに

今まで、日本の電力の品質は世界的に高いレベルに確保されてきた。しかし、社会情勢の変化により、分散電源の導入拡大、電力変動の大きな負荷の増加等に対応して、電力システムはますます複雑な構成となり、電力品質や供給信頼度へ影響が及ぶことが懸念されてきている。これに対して、超電導電力貯蔵装置 (SMES: Superconducting Magnetic Energy Storage) システムの導入は、電力システムの安定化、電力品質の維持等とともに、送変電設備投資の軽減によるコスト構造の改善、エネルギー有効利用の向上による地球環境対策にも貢献できると期待されている。

SMES の開発研究は、平成 3 年度から平成 10 年度にか

けて、資源エネルギー庁が実施した「超電導電力貯蔵システム要素技術開発調査」(第 1 フェーズ)において、パイロットプラントを作製するための要素技術(金属系超電導線材による超電導コイル、交直変換装置、クエンチ保護方式、直流遮断器)は十分に確立可能であることが示された¹⁾。しかし、SMES のシステム化は、コスト面で大きな課題が残り、平成 11 年度から平成 15 年度に「超電導電力貯蔵システム技術開発」を実施し、実現可能性が見込まれる小規模な系統制御用 SMES をターゲットに絞り、第 1 フェーズにおいて主要なコスト要因と分析された超電導コイルのコスト削減を可能にするため、導体構成、コイルシステム構成の最適化等のコスト低減要素技術の開発を実施した²⁾。

一方、そのころ、高温超電導線材の開発にも大きな進展があった。既に長尺の線材が開発されていた Bi 系超電導線材においては、年々、臨界電流特性を上げていた。また、Y 系超電導線材においても、テープ状の線材開発が世界的に実施され、特性が飛躍的に向上していた。高温超電導線材を SMES に適用した場合、運転温度にも依存するが、「金属系超電導 SMES より高磁場で運転可能になる。」、また、「臨界温度が高いため、運転温度を高く設定できる。」等が予想され、高磁場化によるコンパクト化、また、冷却コスト低減等のさらなるコスト低減が期待された。そこで、平成 11 年度から平成 15 年度の「超電導電力貯蔵システム技術開発」において、高温超電導 SMES の技術的実現可能性を明らかにするために、要素モデルの試作・

Received February 28, 2005

財団法人電力中央研究所 電力技術研究所
〒240-0196 神奈川県横須賀市長坂 2-6-1
Central Research Institute of Electric Power Industry,
2-6-1 Nagasaka, Yokosuka, Kanagawa 240-0196, Japan.

*1 財団法人電力中央研究所 材料科学研究所
〒240-0196 神奈川県横須賀市長坂 2-6-1
Central Research Institute of Electric Power Industry,
2-6-1 Nagasaka, Yokosuka, Kanagawa 240-0196, Japan.

*2 早稲田大学理工学部電気・情報生命工学科
〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1
Dept. of Electrical Engineering and Bioscience, Waseda
University, 3-4-1 Ohkubo, Shinjuku-ku, Tokyo 169-8555,
Japan

*3 財団法人国際超電導産業技術研究センター
〒105-0004 東京都港区新橋5-34-3 栄進開発ビル6階
ISTEC, 5-34-3 Shinbashi, Minato-ku, Tokyo 105-0004,
Japan

[†] E-mail: ai@criepi.denken.or.jp

Table 1 Feasibility studies of HTS-SMES

	FY1999	FY2000	FY2001	FY2002	FY2003
Large current conductors for the SMES ·Large current ·Low ac loss ·High mechanical strength	Survey of large-capacity technologies using tape conductors	Survey of HTS wires for conductive cooling coils Tension test for Bi2212 Rutherford conductors	Investigation of large-current conductors using tape conductors	Manufacture of large-current conductors using Bi2223 PIT tapes	Measurement of electrical transport characteristics under an external magnetic field
	Investigation of tape conductor reinforcement Measurement of critical current for conductively cooled Bi2212 Rutherford conductors				
Magnet technologies ·Cooling technologies ·Electrical insulating technologies · Current lead technologies	Conductive cooling characteristics: Operation under over-current pulse for a short time	Electrical insulation of conductive cooling HTS magnets	Examination of conductive cooling parameters using a small coil with thick insulating layers as well as a practical level		Investigation of cooling and insulating between current leads and coils
			Development of the current leads combined with the GM-pulse tube refrigerator		
					Development of starling pulse tube refrigerators
Conceptual designs · Power system stabilization · Load fluctuation & frequency control · Possibility of cost reduction	Investigation on heat loads	Evaluation of loss reduction by dividing coils	Investigation of cost reduction using YBCO wires		Design of optimum coil shape Investigation on minimum volume of conductors
			Investigation of optimum coil shape		
	Investigation of possibility for an SMES using YBCO wires				

評価の実施を含めた技術調査を実施した。さらに、概念設計等を実施し、コスト低減の可能性についても検討した。本解説は、平成 11 年度から平成 15 年度の「超電導電力貯蔵システム技術開発」で実施した高温超電導 SMES の技術調査の成果のトピックスをまとめることとする²⁾。高温超電導 SMES に期待される特徴として、

- ・高温かつ広い温度範囲から運転温度を選択できる。
- ・冷凍機を用いた伝導冷却方式の可能性がある。
- ・大きな温度マージンと熱容量により高い安定性と大きな過負荷耐量が期待できる。
- ・高磁界化によるコンパクト化の可能性がある。

等により、製作コスト・運転コストの低減、運転・制御性の向上が期待される。Table 1 に高温超電導 SMES の技術調査の流れを示す。

2. 高温超電導 SMES 用大電流導体

2.1 はじめに

SMES 用超電導導体の特徴として、高磁場下で大電流を流す必要がある。この場合、電磁力による大きなフープ力が働くため、SMES 用の高温超電導線材・導体は、高機械強度化も重要となる。Y 系超電導テープ線材は磁場中

Table 2 Specifications of the Bi2223 conductor

Filaments	
Wire type	Bi2223 silver alloy sheath wire
Cross-sectional size	4.2mm×0.21mm
Critical strain for Ic reduction	Flatwise: 0.2% (measured by a wire maker) Edgewise: No data
Modulus of elasticity	75GPa (measured by a wire maker)
Insulator	No
Critical current	88A @77K,self field (measured by a wire maker)
Conductors	
Conductor type	Transported parallel
Wire number, distribution	6, 3 layers×2 lines
Radius	350mm according to the 700mm φ model coil
Maximum permission strain	Flatwise: 0.2%/Safety factor 1.6

での臨界電流特性が優れていることは周知の通りであるが、プロジェクト期間中は、Y 系超電導線材は開発中であったため、既に、長尺の線材が開発されていた Bi2223、Bi2212 超電導線材について試作・実験による技術調査を実施した。

Fig. 1 A tension tester for the Bi2223 conductor with six Bi2223 PIT tapes.

Fig. 2 I_c , n vs. tensile strain for a wire and conductor.

2.2 Bi2223 転位導体

Bi2223 超電導線材では、テープ線材の大電流化として、転位導体化技術を適用した。試作した転位導体はテープ状素線による転位導体の作製過程で素線に発生する最大歪が許容歪を超えないという設計条件のもとで作製した。

Table 2 に転位導体の概要を示す。また、導体の機械特性を評価するため、**Fig. 1** に示すように、液体窒素中で試料を引張りながら、臨界電流特性を測定できる「引張り試験の変位測定装置」を作製した。Bi2223 超電導素線、および、転位導体の機械特性の結果を **Fig. 2** に示す。Fig. 2 に示した通り転位導体化による機械特性の低下は観測されず、素線の機械特性と同等であることが確認された。以上のことにより、許容歪を用いた設計指針に沿って大電流化のためにテープ素線を転位導体化すれば良いことを示した。これは、Y 系超電導線材にも十分適用可能と考える。

Fig. 3 I V characteristics of the Bi2223 conductors with six Bi2223 PIT tapes. (① Conductor only, ② Conductor + GBT, ③ Conductor + epoxy + GBT)

一方、高温超電導 SMES では先に示した通り、コイルのコンパクト化を図るため高磁界設計となり、超電導体に加わる電磁力は極めて大きくなるため、何らかの電磁力補強構造が必要となる。一般に、テープ導体の場合は、導体に沿わせたテープ形状または門型の補強材に電磁力を分担させる方法が一般的である。そこで、転位導体に加わる電磁力によるフープ応力をテープ形状の補強材に分担させるための設計手法を提案し、フープ応力の影響を調べた。用いた補強材は樹脂含浸ガラスバインドテープで、物性値は FRP と同等とみなした。2 つのヤング率の異なる線を添わせて巻いた時、応力の分担はヤング率に比例すると考え、巻線数を設定した。補強材の効果の確認実験のために、Bi2223 転位導体による小型コイルを作製し、フープ力による臨界電流特性の変化を測定した。試験に使用した銀合金シース Bi2223 線材の銀比は約 2 程度であり、製作した転位導体による臨界電流測定用コイルの機械的補強構造は以下の 3 種類とした。

- ①転位導体のみ
- ②転位導体+ガラスバインドテープ(GBT)による補強
- ③転位導体+樹脂による固定+GBT

Fig. 3 は各フープ力を印加した後、外部磁界 2 T 中で I - V 特性および臨界電流値を測定した結果を示す。試験結果に示す応力値は、フープ力を Bi2223 線材の全断面積で割ることにより求めた値である。この試験の最大電磁応力は試験装置の制約からは約 100 MPa であった。

「①転位導体のみ」の臨界電流測定用コイルの I - V 特性に関しては、発生電圧が 1 μ V/cm に達しない通電電流値において発生電圧の増加があり、何らかの超電導特性の低下があったものと推定できる。これに対して「②転位導体+GBT」および「③転位導体+樹脂+GBT」の I - V 特性は、約 100 MPa までの電磁応力を加えても I - V 特性はほとんど変化がなく、「①転位導体のみ」との比較によりガラスバインドテープによる補強効果が確認できた。さらに、「③転位導体+樹脂+GBT」のコイルにおいて、液体ヘリウム温度、高磁界下での磁場によるフープ応力の影響を評価した。試験の結果、14 T の磁界下で電磁力が 338 MPa 印加されても臨界電流の変化はなかった。これは樹脂含浸とガラスバインドテープにより導体がコイルボビンと一体化し、電磁力をコイル構造物と共に分担することにより導体が分担する電磁力が小さくなったためと考えられる。

以上のことより、Bi2223 テープ転位導体において、転位導体化技術、および、巻線化技術の確立といった課題が残るが、高温超電導 SMES 用 Bi2223 大電流導体は十分開発可能であると言える。

2.3 Bi2212 ラザフォード導体

Bi2212 線材では高強度・大電流導体として外部補強および内部補強ラザフォード導体が開発されていたので、30 K 以上の高温領域での伝導冷却における大電流導体化に主眼を置いて技術調査を行った。

Fig. 5 に示す Bi2212 ラザフォード導体により作製したコイルは、概念設計で求めた SMES コイルの内径の大きさを模擬した 1 m 級伝導冷却コイルで、アルミ製の冷却板に取り付けた補強板付き 1 ターンモデルコイルである。**Fig. 4** に 1 ターンコイルを作製した補強無ラザフォード導体の写真、**Table 3** に導体およびコイルの概要を示す。Bi2212 ラザフォード導体による高温域での大電流伝導冷却コイルが可能かを調査するため、臨界電流特性の温度依存性を測定した^{3,5)}。外観写真を **Fig. 5** に示す。また、得られた臨界電流特性の温度依存性の結果を **Fig. 6** に示す。**Fig. 6** には素線×30 本の I_c (■)，無誘導法で測定した I_c (▲，@63.6 K)，自己磁場下での伝導冷却による I_c (■)の各測定点を示す。素線 30 本によるラザフォード導体化、および、1 ターンコイル化により、エッジ部での素線の変形および自己磁場の影響を受けるため、1 ターン

Fig. 4 A cross-sectional photo of the Rutherford

Fig. 5 The one-turn coil set on a cooling board.

Fig. 6 Temperature dependences of I_c (I_c - T characteristics)

Table 3 Specifications of the one-turn coil

Filaments	
Diameter	0.8mm ϕ
Number	30
Conductors	
Width	13.3mm
Thickness	1.55mm
One-turn coil	
Inner diameter	600mm ϕ
Binding a SUS board on the outside of the conductors	
Epoxy binder (high-temperature, high-pressure)	
Conductive cooling by a cooling board	

コイルの臨界電流値は、素線 30 本の合計の電流特性の 75%に低下したが、77 K、64 K の測定値から推定した臨界電流特性（太線）と低温での測定結果がほぼ一致した。

以上のことより、30 K 以上の高温領域での大電流伝導冷却 SMES 用コイル開発が開始可能であると言える。

今後、高温超電導 SMES として実用化するためには、コイル口出し部などの絶縁処理の方策、および、運転コストに反映される交流損失の低減といった要素技術の進展が重要である。

3. マグネット技術の調査

3.1 はじめに

マグネット技術としては種々の課題があるが、本プロジェクトは①伝導冷却における冷却特性、②高温超電導 SMES 用電流リードの 2 点について主に調査した。

3.2 伝導冷却における冷却特性

伝導冷却における冷却特性の評価には、補強付 Bi2212 ラザフォード導体を用いて直径 1 m 級の小型モデルコイルを試作し、伝導冷却による熱特性を測定し解析結果と対比した。Fig. 7 に直径 1 m 級の小型モデルコイルの外観写真、Table 4 に概要を示す。試作した小型モデルコイルは、電気絶縁は実機相当の 30 kV 対地絶縁（厚さ 15 mm 程度）の固体電気絶縁処理を施した。冷凍機伝導冷却条件における冷却特性を評価した。主に実施した伝導冷却特性の調査は、

- ①定常冷却特性（全面冷却）・（部分冷却）
- ②定常通電による熱暴走特性

である。

定常冷却特性は、コイル全周の電気絶縁外面からの全面冷却と 120 度相当の周長外面からの部分冷却の 2 通りを実施し、発熱源は巻線全長発熱ヒータ（全周ヒータ 5 W）と集中ヒータ（部分ヒータ 5 W）の 2 通りの合計 4 通りのパターンを初期設定温度 20 K と 50 K で実施した。

試験結果例として、発熱源が全周ヒータの場合について述べる。冷却方式が全面冷却、部分冷却に関わらず、径方向の温度は、ほぼ同じ温度（20 K の場合 1 K 以内、50 K の場合 2 K 以内）である。一方、周方向の温度差は、20 K の場合、全面冷却ではほとんど差がないが、部分冷却で 7 K の温度差がついた。また、初期設定温度の違いが、コイルの温度の平衡に至る時間に大きく影響することがわかった。20 K の場合、平衡に至る時間は 1～2 時間程度であったが、50 K の場合、11 時間経過しても平衡に達しなかった。これは、温度の違いによる超電導線材、構造材、絶縁材等の比熱の違いによるものと考えられる。

定常通電による熱暴走特性は、臨界電流以上の電流を一定通電し、発熱と冷却能力のバランスにより熱暴走に至るかどうかを調査した。その結果、全面冷却の場合、20 K では 1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ 基準の臨界電流値の 2 倍、50 K では臨界電流値の 2.7 倍で熱暴走が発生した。両ケースとも、比熱が大きいため、熱バランスに至るまでの時間が非常に長く、20 K の場合で約 3 時間、50 K の場合で約 9 時間である。また、熱暴走に至ると判断されてから、実際に温度が急激

Table 4 Specifications of the small model coil.

Filaments	
Diameter	1.02mm ϕ
Number	16
Conductors	
Reinforcement	NiCr(0.34mm $\times$ 6.88mm)
Twist pitch	Approximately 60mm
Thickness	2.8mm
Width	9.4mm
A coil	
Inner diameter	670mm ϕ
Outer diameter	786mm ϕ
Height	22mm
Turn Number	14
Strain & Stress	$\sigma=44\text{MPa}$ 、 $\varepsilon=0.074\%$

Fig. 7 A photo of the small-model coil using Bi2212 Rutherford conductors.

に上昇するまでに 1 時間以上を要する。このような熱特性により、高温超電導コイルが熱暴走に至る限界点で設計でき、暴走時の検出・保護に通常の運転操作で対応可能な余裕があると言える。

以上のように、高温超電導 SMES 用コイルは熱的安定度が高いため、電磁力による導体の動きなどの擾乱に起因するクエンチの可能性は極めて低く、高温超電導コイルの安定化設計の基本は、熱暴走対策、すなわち「熱暴走に至る電流値に対してどれだけマージンを取るか」がシステム設計において重要となると考えられている。

そこで、伝導冷却下における高温超電導コイルの過渡伝熱挙動を明らかにするために、冷凍機伝導冷却小型評価コイルを用いて、電力系統の動揺を安定化するために用いられる系統安定化 SMES を想定したパルス通電特性試験を実施した^{3,4)}。

試験には、Bi2223 線材による評価コイルを用いた。Fig. 8 に評価コイルの外観写真と系統安定化用 SMES の運転を模擬した通電電流波形を示す。待機電流を臨界電流 (I_c) の 75% とし、10 秒間に 5 パルスの I_{peak} (臨界電流 + α) となる三角波を通電した。さらに、有限要素法による数値シミュレーションを行い、試験結果との比較を行った。

Fig. 9 に小型特性評価コイルの試験結果および解析結果を示す。本評価コイルの試験では、短線試料の I_c (1

Table 5 Characteristics of the small evaluation coil

Wires	
Ratio of materials	2.5 (Silver・Silver alloy)
Width	3.94mm
Thickness	0.25mm
Number	61
A coil	
Inner diameter	110mm
Outer diameter	135mm
Height	100mm
Layer number	32
Turn number	720
Insulator between the layers	Kapton® tapes
Insulator between the turns	Nylon wires

Fig. 8 A photo of the small evaluation coil and a waveform of current for evaluation.

Fig. 9 Experimental and simulation results.

$\mu\text{V}/\text{cm}$ 基準) の約1.5倍の I_{peak} まで熱暴走することなく運転することができた。また、高温超電導線をコイル化した際に生じた超電導線特性の劣化を考慮して短線試料実測データで得られた n 値の0.6倍の値を用いると数値解析結果が実験結果と定性的かつ定量的に一致した。

以上の実験及び数値シミュレーションから、パルス通電に伴う熱発生と冷凍機の冷却能力のバランスに依存する熱暴走現象を定量的に評価し、それに基づいたコイルの熱設計および定格運転電流の決定等が可能であることがわかった。対象とした特性評価コイルは非常に小型であり、得られたパルス通電特性結果、すなわち、臨界電流の1.5 倍ま

Fig. 10 A conceptual design of a GM-pulse tube refrigerator with a current lead.

Fig. 11 A photo of a GM-pulse tube refrigerator with a current lead.

でのパルス通電が可能であるという結果がそのまま SMES に適用できるものではない。しかし、実規模のコイルにおいても、設計時の熱解析により過渡的に通電できる最大電流を事前に評価できる可能性が示されたと考える。また、冷凍機伝導冷却方式における発熱源であるコイルから冷凍機までの熱抵抗をできるだけ小さくすること、巻線内の温度勾配ができるだけ生じないような熱設計を行えば、冷凍機伝導冷却の採用が可能であり、高い過負荷耐量を有するコイルシステムの設計が可能であることが示された。

3.3 高温超電導 SMES 用電流リード

マグネット技術として重要な要素技術の一つに電流リードがある。高温超電導 SMES のシステム設計を行った場合、コイルでの発熱より電流リードからの侵入熱が支配的であることが数値解析による概念設計より明らかとなった。伝導冷却リードの熱侵入を減らすことができる有力な方法は高温超電導体を電流リードに利用することである。高温超電導を用いた電流リードは数社で既に商品化されているが、使用条件は 64 K 以下となっており、300 K から 64 K (中間温度) までは銅電流リードが用いられている。300 K から中間温度までの材質を変えた場合の侵入熱を試算した結果、材質によらず侵入熱はほぼ一定であることが

示された。したがって、電流リードの冷却の効率化と電気絶縁性能の確保を図るため、電流リード冷却用パルスチューブ冷凍機一体型電流リードに電流を流す方式を開発した。この方式では、パルスチューブ冷凍機そのものが電流リードであるため、室温部で絶縁を取れば、低温部ではそのまま高温超電導電流リードに接続することが可能である。さらに、特に系統安定化用高温超電導 SMES の場合は短時間での大容量のエネルギーの出し入れが必要であり、電流リードの大電流化、および、高耐電圧化が必要とされ、電流リードの高耐電圧化による電気絶縁が課題となったが、現在、真空度が低下した場合にも絶縁が保たれる構造として、GM パルス管冷凍機と高温超電導電流リードを一体とし、その全体を絶縁する Fig. 10 に示した電流リードが設計されている。試作した、GM パルス管冷凍機一体型電流リードの外観写真を Fig. 11 に示す。電流リードの真空雰囲気にある構造物全体を GFRP 円筒などで絶縁する方式では、電界は全て GFRP 円筒に印加されるため、絶縁円筒内部の構造は電気絶縁からの制約が無くなる。このため、自由な構造を取ることができ、構造が複雑であるが高効率のスターリングパルス管冷凍機に換えることも可能であり、設計の自由度が大幅に向上する結果となった。

4. 概念設計

4.1 はじめに

高温超電導 SMES の実用化のためには、技術的成立性だけでなく、高温超電導線材を用いた際に、どの程度金属系超電導 SMES より安くなるかといったコスト評価が重要である。「超電導電力貯蔵システム技術開発」のプロジェクトで実施している金属系超電導 SMES のコスト評価では、線材コストがコストの大半を占めることが示されたので、高温超電導 SMES においても線材コストを最小にする設計、つまり、線材量が最少になる条件を最適条件として概念設計を行った。今回、検討した高温超電導線材は Bi2223 線材、Y 系線材などのテープ線材で、テープ面に平行な磁界と比較して磁界の印加方向がテープに対して垂直な場合の臨界電流が大きく低下する超電導特性に異方性のある線材である。そのため、金属系線材を対象として研究開発が進められたコスト低減技術における 4 極マルチポール配置の超電導コイルが高温超電導テープ線材の場合にも最適なコイル形状であるとは限らない。そこで、コイル形状としてはトロイダルコイルおよび 4 極マルチポール配置コイル（縦長型、扁平型）の 3 種類を用いて、高温超電導 SMES において最適コイル形状は何かを検討した。検討結果を Fig. 12 に示す。4 極マルチポール配置コイルでは隣接するコイルが発生する磁界のテープ線材に対して垂直な磁界成分の影響を少なくするため、相互のコイル間隔を離す必要があることが明らかとなった。一方、12 要素コイルからなるトロイダルコイルの場合、4

Fig. 12 Optimum designs for a 4-pole coil system and toroidal coil system.

極マルチポール配置コイルと比較して、最大磁界が 8.2 T と高いにも関わらずテープ線材に垂直に加わる磁界を 2.6 T まで低減することが可能であるため、使用線材の体積は 4 極マルチポール配置コイルの 86~89%にすることが可能であることが明らかになった。また、コイル外形も 2.1 m まで縮小可能であることが示された。

4.2 概念設計によるコスト評価

高温超電導 SMES の概念設計では、コスト面からの最適運転温度を検討するため、12 コイルによるトライダルコイル形状を仮定して各運転温度での最適コイル形状を求め、温度をパラメータとして使用する高温超電導線材および冷却システムの初期コストを比較した³⁾。

概念設計検討において想定した高温超電導線材の特性は、Bi2212 線材、Bi2223 線材に関しては、既に入手可能な線材の特性を仮定し、Y 系線材に関しては現在進められている超電導応用基盤研究開発プロジェクトの最終成果を見込んだ特性とした。Table 6 に各線材の特性、および、コストを示す。また、概念設計で検討対象としている冷却システムに関しては、冷凍機から直接伝導冷却を想定しているので、冷凍機コストのみを算出し金属系 SMES の冷凍設備コストと比較した。仮定した冷凍機コストを表 Table 7 に示す。現在、技術的に完成している冷凍機が大量生産により低コスト化された場合のコストを仮定している。

概念設計は、電力系統安定化用 15 kWh 高温超電導 SMES および負荷変動補償用・周波数調整用 500 kWh 高温超電導 SMES について実施した。負荷変動補償用・周波数調整用 500 kWh 高温超電導 SMES の必要線材量のコスト、および、必要線材量のコストと冷却機のコストを足し合わせたイニシャルコストのパラメータサーベイ結果

Table 6 Characteristics of YBCO, Bi2223, Bi2212 for the conceptual design

Wire type & Cost	Characteristics for conceptual design
YBCO 10 \$/kAm (77K, self-field)	Tape : Ag (10 μm^t)/YBCO (2.0 μm^t)/Y ₂ O ₃ /IBAD-YSZ/Hastelloy substrates (50 μm^t) 10mm ^w I _c @77K, sf = 300A Conductor : Bundle of 50 tapes, Size : 8.5mm $\times$ 15mm
Bi2223 50 \$/kAm (77K, self-field)	Tape : Bi2223 PIT (0.25mm $\times$ 4.0mm) I _c @77K, sf = 66A Conductor : Bundle of 100 tapes, Size:14mm $\times$ 14mm
Bi2212 1¥/Am (4.2K, 5T)	Wire: Bi2212 PIT round (size: ϕ 1.0mm) I _c @4.2K, 5T = 300A Conductor : Bundle of 400 wires, Size : 28mm $\times$ 28mm

Table 7 Cost and characteristics of the refrigerator

Temperature	Cost per cooling capacity	Cooling coefficient of refrigerator
4.2K	\$1000/W	15%
10K	\$290/W	15%
20K	\$160/W	15%
30K	\$110/W	15%
40K	\$90/W	15%
50K	\$60/W	15%
80K	\$25/W	25%

を Fig. 13 と Fig. 14 に示す. 必要線材量に関しては, 各温度において要素コイルの断面形状およびトロイダルコイル形状を変化させて, 必要超電導線材量が最小となる形状を求めた. また, 必要線材量のコストと冷却機のコストを足し合わせた初期コストを求めた.

以上の結果より, 酸化物線材を用いた高温超電導 SMES では, 予想される通り運転温度を低くするほど使用線材量が少なくなり, 線材コストは低下することが示された. また, 冷凍機の初期コストに関しては, 20 K 以上では運転温度が高くなることによる削減効果は顕著ではなくなる. このため 20 K 以上における線材コストと冷却機コストの和の傾向は, ほとんど線材コストの温度に対する傾向と同一となる.

ただし, 運転温度が 20 K 以下の場合は, 冷凍機コストが線材コストに対して無視できないため, 温度の低い方でコストが高くなることがある. 今回のパラメータサーベイ結果から, 高温超電導 SMES の最適運転温度は補償すべき負荷変動の状況によっても異なることが予想され, 今後, 真空容器, 構造材料量などを含めた詳細な概念設計研究により見出すことが必要である.

Fig. 13 Conceptual design results for the wire cost of a 500 kWh (1.8 GJ) HTS-SMES, when future wire costs are adopted.

Fig. 14 Conceptual design results for summation of wire cost and cooling cost of a 500 kWh (1.8 GJ) HTS-SMES.

5. まとめ

今回の「高温超電導 SMES の技術調査」により, 高温超電導線材を用いた SMES の技術的特徴とその実現可能性を示すことが出来た. さらに, 更なるコスト低減に向けて, 今後開発すべき技術開発内容と, その結果として見通せる初期コストおよび運転コスト低減の可能性が定量的に示された. これらの結果は, 世界的にも他に例がない調査検討であり, 今後の高温超電導 SMES 研究開発の指針となることを期待する.

本報は, 「超電導電力貯蔵システム技術開発」の一環として (財) 国際超電導産業技術研究センター (ISTEC) を通じて, 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) から委託を受けて実施した「超電導電力貯蔵システム技術開発・高温超電導 SMES の技術調査」成果報告書から引用した²⁾.

参考文献

- 1) 財団法人国際超電導産業技術研究センター, 通産省資源エネルギー庁委託「超電導電力貯蔵システム要素技術開発調査」成果報告書, 平成 11 年 3 月

- 2) 財団法人国際超電導産業技術研究センター，新エネルギー・産業技術総合開発機構委託「超電導電力貯蔵システム技術開発」成果報告書，平成16年3月。
- 3) A. Ichinose, H. Kasahara, H. Sakaki, S. Akita: "Research and development of high- T_c SMES", submitted to IEEE Trans. Appl. Supercond.
- 4) A. Ishiyama, S. Akita, H. Kasahara and H. Sakaguchi: "Research and development of HTS-SMES system", Physica C **357-360** (2001) 1311-1314

一 瀬 中

1961年10月5日生。1987年筑波大学大学院理工学研究科修士課程修了。同年（財）電力中央研究所入所。1998～99年米国ウィスコンシン大学客員研究員。2001年7月より独立行政法人物質・材料研究機構客員研究員併任。現在，主として酸化物超電導体の線材化に関する研究に従事。低温工学協会，応用物理学会，電気学会会員。工学博士。

秋 田 調

1954年8月20日生。1979年東京大学大学院工学系研究科電気工学専攻修士課程修了。同年（財）電力中央研究所入所。1983～84年米国ウィスコンシン大学客員研究員，これまで，低温および超電導電力機器に関する研究に従事。低温工学協会，電気学会，IEEE会員。工学博士。

石 山 敦 士

1954年7月14日生。1983年早稲田大学大学院理工学研究科博士後期課程（電気工学専攻）修了。1983年早稲田大学理工学部専任講師。1991年同教授。超電導応用，電磁界数値解析法，生体磁気計測に関する研究に従事。低温工学協会，電気学会，生体磁気学会，IEEE会員。工学博士。

高 祖 聖 一

1956年12月24日生。1982年九州大学大学院総合理工学研究科エネルギー変換工学専攻修士課程修了。同年九州電力㈱入社，工務部，系統運用部等を経て，2002年より3年間ISTECへ出向し超電導電力機器に関する研究に従事。電気学会会員。

辰 田 昌 功

1951年12月9日生。1974年東京大学電気工学科卒業。同年通商産業省（現・経済産業省）へ入省エネルギー行政，技術開発行政等に従事。2001年（財）国際超電導産業技術研究センター常務理事，プロジェクトリーダーとしてSMES開発に従事。2004年から（財）天然ガス導入促進センター専務理事。電気学会会員。