Nb₃Sn 導体使用による SMES の低コスト化の可能性

津田 芳幸, 江川 邦彦^{*1}, 斉藤 龍太^{*2}, 高柳 貞敏^{*3}, 長屋 重夫^{*4}, 堤 克哉^{*5}

三菱電機(株) 先端技術総合研究所 尼崎市塚口本町 8-1-1

^{*1} 三菱電機(株) 先端技術総合研究所 相模原市宮下 1-1-57

^{*2} 三菱電機(株) 社会インフラ事業本部 東京都千代田区丸の内 2-2-3

^{*3} 三菱電機(株) 電力・産業システム事業所 神戸市兵庫区和田崎町 1-1-2

^{*4} 中部電力(株) 電力技術研究所 名古屋市緑区大高町字北関山 20-1

^{*5} 九州電力(株) 総合研究所 福岡市南区塩原 2-1-47

(2002 年 2 月 25 日)

Study on Cost Reduction of SMES System, Using Nb₃Sn Conductor

Yoshiyuki TSUDA, Kunihiko EGAWA,^{*1} Ryuta SAITO,^{*2} Tadatoshi TAKAYANAGI,^{*3}
Shigeo NAGAYA^{*4} and Katsuya TSUTSUMI^{*5}

Mitsubishi Electric Corporation, Advanced Technology R&D Center, 8-1-1 Tsukaguchi-honmachi, Amagasaki 661-8661

^{*1} Mitsubishi Electric Corporation, Advanced Technology R&D Center, 1-1-57 Miyashimo, Sagamihara 229-1195

^{*2} Mitsubishi Electric Corporation, Public Utility Systems Group, 2-2-3 Marunouchi, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8310

^{*3} Mitsubishi Electric Corporation, Energy & Industrial Systems Center, 1-1-2 Wadasaki-cho, Hyogo-ku, Kobe 652-8555

^{*4} Chubu Electric Power Co., Inc., Electric Power R&D Center, 20-1 Kitasekiyama Ohdaka-cho, Midori-ku, Nagoya 459-8522

^{*5} Kyushu Electric Power Co., Inc., Research Laboratory, 2-1-47 Shiobaru, Minami-ku, Fukuoka 815-8520

(Received February 25, 2002)

Synopsis: A cost-reduction design of the SMES system is proposed, using Nb₃Sn conductors that in recent years have shown progress in cost and performance. The main feature of this design should be a combination of Nb₃Sn single-strand conductors and a small bore solenoid (=CELL) coil. The cost reduction was intended to use mass production methods and to operate small or medium-sized factories. However, this simple and compact design brings up new issues. Quench protection is especially a key issue. It needs high-speed quench detection and forced-quench that will reduce the unbalance magnetic force at quench and prevent the CELL coil from burning up. This cost-reduction design of the SMES system using Nb₃Sn conductors is sufficiently competitive with the other designs that use NbTi conductors.

Keywords: SMES, Nb₃Sn, CELL coil, cost reduction

1. はじめに

現在実用化されている超電導マグネットに用いられる超電導線材は量的には NbTi 線材が大半を占め、次いで使用されているのが Nb₃Sn 線材である。いずれも金属系材料であり、使用される温度は液体ヘリウム温度近傍である。

Nb₃Sn は臨界磁界、臨界温度ともに NbTi と比べて高い性能を有するにもかかわらず、これまで線材の製造コストが高かったため、主に磁界 8~9T 以上の、NbTi では発生できない高磁界領域でしか使用されてこなかった。しかし、近年、国際熱核融合実験炉 (ITER) 用

の超電導線として国際競争的な環境のもとで開発が進んだ結果、低コストで高性能を発揮する Nb₃Sn 超電導線の製造が可能になってきた。

本稿では、SMES システムの低コスト化を実現する 1 つの選択肢として、Nb₃Sn 線材の適用を検討した設計結果を報告する。なお、ここで紹介する設計結果は別稿にて述べられる SMES システムのコスト分析用設計データとして活かされている。

2. エネルギー貯蔵用コイル

SMES システムの建設コストをエネルギー貯蔵用コイル (クライオスタット含む)、冷却装置、交直変換装

置、保護装置等周辺機器に分類すると、使用する超電導材料がコストに影響を与えるのは、まずエネルギー貯蔵用コイルである。

Nb₃Sn の高臨界磁界(～20T at 4.2K, NbTi は～12T), 高臨界温度(～18K at 0T, NbTi は～9K)特性を活かし、エネルギー貯蔵用コイルのコストを低減する手段として以下の設計コンセプトを採用、その調和を図った。

- (1) 高磁界・高エネルギー密度化: 超電導線, クライオスタット等の物量, および, 設置面積の低減
- (2) 低交流損失超電導線の採用: 超電導材料使用量, および, 充放電時における冷却動力の低減
- (3) 電気絶縁を介した間接冷却方式の採用:
高耐電圧化 (He 直接冷却との比較) による待機時冷却動力の低減と交直変換装置のコスト低減
- (4) 小型ソレノイドコイルの採用:
量産効果, 簡易製造設備による製造コストの低減 (中小メーカーでも製造可能なサイズを採用)
- (5) 六極配置の採用:
漏洩磁場低減による設置面積の低減
- (6) 充放電率の最適化: トータルコストの低減

3. セルコイルの発生磁界と口径

本方式は『セルコイル』と称する小型のコイルを最小構成単位とし, この『セルコイル』を多数直並列に結線してクライオスタット単位の要素コイルを構成するところに特徴がある。SME Sシステム定格を決定する上でコイル最小構成単位である『セルコイル』の仕様を固定する必要があるため, 発生磁界と口径(コイル内径)の選定を行った。

その結果, クエンチ時のコイル平均到達温度の上限温度からセルコイル口径は 400mm を選定した。また, 発生磁界のコスト低減への効果はそれほど顕著ではないが, 装置のコンパクト化による設置スペースや輸送上のメリットを重視して, セルコイル設計磁界は 12T (無限長時) を選定した¹⁾。

4. エネルギー貯蔵システム構成と充放電率

充放電率 K (= 充放電エネルギー / 最大貯蔵エネルギー) は SMES システムの基本仕様 (エネルギー貯蔵用コイル諸元, 交直変換装置仕様・容量等) とシステムコストの相関をみる上で 1 つの重要なパラメータである。

本プロジェクトでは Table 1 に示す 2 つの用途・仕様

Table 1 Two type specifications of the SMES system.

Objective	Specification
(A) System-Stabilization	100MW / 15kWh
(B) Fluctuating Load Compensation and Frequency Control	100MW / 500kWh

Fig. 1 Configuration of system-stabilization SMES.

Table 2 Rating of system-stabilization SMES.

	Normal	Unit	Note
MAX. Energy	197	MJ	54.5kWh
Standby Energy	147	MJ	40.8kWh
In/Out Energy	Charging Start	50	MJ
	Discharging Start	-	-
Charging Rate	25.4	%	
Operating Current	18.9	kA	
Operating Voltage	±6.128	kV	
Operating Power	±100	MW	

の SMES システムを検討した。最大貯蔵エネルギーおよび充放電率は, パルス動作によるセルコイルの温度上昇を 1 サイクル/断熱通電条件で導体の分流開始温度を超えない範囲で, かつ, システム全体コストを増大させないほぼ最小の値を選択した。定格電流および定格電圧はセルコイルの配置・組合せが可能な範囲で, 交直変換装置の素子数, コイル耐電圧, 待機電流のバランスをとって決定した。

4.1 システム安定化用途 (System-stabilization)

エネルギー貯蔵システム構成を Fig. 1 に, システム定格を Table 2 に示す。

交直変換装置を 20MW×5 モジュールに分割し, 各モジュール 1 個の要素コイルを結線し, メンテナンス時には, 該当するモジュールのみ停止し, 他のモジュールは運転を継続することが可能である。クエンチ保護装置は要素コイル毎に設置し, ある要素コイル内でクエンチが発生しても, 他の要素コイルにクエンチを波及させない。

冷凍システムは各要素コイルのクライオスタットに小型冷凍機を設置し, 保守を簡便化する。クライオス

Fig. 2 Configuration of fluctuating-load-compensation and frequency-control SMES.

Table 3 Rating of fluctuating-load-compensation and frequency-control SMES.

		Normal	Unit	Note
MAX. Energy		2,575	MJ	715kWh
Standby Energy		1,675	MJ	465kWh
In/Out Energy	Charging Start	900	MJ	250kWh
	Discharging Start	-900	MJ	-250kWh
Charging Rate		70	%	
Operating Current		82.5	kA	
Operating Voltage		±2.23	kV	
Operating Power		±100	MW	

タット内に貯液している液体ヘリウムは何回かの安定化動作を行うと補充する必要があるが、待機時には補充の必要はない。

なお、接地は変換装置変圧器一次側およびクライオスタット真空容器で行う。

4.2 負荷変動補償・周波数調整用途 (Fluctuating-load-compensation and Frequency-control)

エネルギー貯蔵システム構成を **Fig. 2** に、システム定格を **Table 3** に示す。

交直変換装置各モジュールに 5 個の要素コイルを並列結線する。クエンチ保護装置は要素コイル毎に設置し、ある要素コイル内でクエンチが発生しても、他の要素コイルにクエンチを波及させず、変換装置でクエンチしてない要素コイルのエネルギーを再生し、その後、該当モジュールのみを停止する。

冷凍システムは 1 系統のみであるが、冷凍系内部でメンテナンスを要する部位については多重化し、メンテナンス時の連続運転を可能にする。

その他は系統安定化用途と同様である。

Table 4 Specification of Nb₃Sn strands design for system-stabilization SMES.

	HF	MF	LF
Hysteresis Loss : Q _h	150 (mJ/cc), @±3T, Non-Cu		
Critical Current Density : J _c	760 (A/mm ²), @12T, 4.2K, Non-Cu		
Critical Current I _c (A) @4.2K	860 @12T	580 @10T	735 @6T
Cu/Non-Cu Ratio	1.0	1.0	1.5
Strand Diameter (mm)	1.70	1.15	1.00
Strand Twist Pitch (mm)	10	9	16

Table 5 Specification of Nb₃Sn strands design for fluctuating-load-compensation and frequency-control SMES.

	HF	MF	LF
Hysteresis Loss : Q _h	110 (mJ/cc), @±3T, Non-Cu		
Critical Current Density : J _c	500 (A/mm ²), @12T, 4.2K, Non-Cu		
Critical Current I _c (A) @4.2K	440 @12T	416 @10T	419 @6T
Cu/Non-Cu Ratio	0.7	1.0	1.5
Strand Diameter (mm)	1.38	1.20	0.93
Strand Twist Pitch (mm)	9	9	16

5. 超電導導体の設計・試作

セルコイルを構成する超電導導体はガラス被覆された 1 本の Nb₃Sn 素線である。全体コストに影響する臨界電流密度と交流損失を確認するため試作素線の評価を行った。

5.1 素線の設計

コイルの運転パターンから、①充電スタート、②1 サイクル通電、③交流損失で断熱温度上昇ーの前提条件を与え、導体到達温度が分流開始温度以下になるように、かつ、温度マージンをある程度見込んで素線仕様を決定した。

素線はセルコイルのグレーディングに合わせて高磁界(HF)用素線、中磁界(MF)用素線、低磁界(LF)用素線の 3 種類を使用する。ツイストピッチを短くすることは素線の加工時間の増加を招くため、[ツイストピッチ/線径] 比は、磁界変化速度の大きい環境下で使用する素線ほど小さくしている。

素線はセルコイルのグレーディングに合わせて高磁界(HF)用素線、中磁界(MF)用素線、低磁界(LF)用素線の 3 種類を使用する。ツイストピッチを短くすることは素線の加工時間の増加を招くため、[ツイストピッチ/線径] 比は、磁界変化速度の大きい環境下で使用

Table 6 The developed 3 low-loss Nb₃Sn strands.

	HF	MF	LF
Strand Diameter (mm)	1.38	1.2	0.92
Cu/Non-Cu Ratio	0.85	1.12	1.56
Filament Modules	9I	6I	37
Strand Twist Pitch(mm)	8	8	12
Hysteresis Loss @±3T (mJ/cc)	80	79	75
Non-Cu Critical Current Density J _c (A/mm ²), @12T, 4.2K	495	511	535
Critical Current I _c (A) @12T, 4.2K	400	271	141
Critical Current I _c (A) @10T, 4.2K	582	401	208
Critical Current I _c (A) @6T, 4.2K	1168	817	433

する素線ほど小さくしている。

系統安定化用途では磁界変化速度が大きくフィラメント間の結合損失が大きくなるため、ツイストピッチを製作上可能な限り短く設定した(Table 4)。負荷変動補償・周波数調整用途では系統安定化用途と比べて磁界変化速度が小さく、かつ、連続運転となるため非銅部 J_cを低めに設定し、ヒステリシス損失を抑制した(Table 5)。

5.2 素線の試作

負荷変動補償・周波数調整用途の素線仕様をベースに、系統安定化用途並の短いツイストピッチの素線を試作評価した。

試作した素線の諸特性実測値を Table 6 に示す。

また、試作した素線のうち HF 用素線の断面写真を Fig. 3 に示す。

HF および MF 用素線は銅比が大きめに仕上がったため、臨界電流値が設計値を下回ったものの、非銅部臨界電流密度が 500A/mm² at 12T と高く、かつ、ヒステリシス損失は 80mJ/cm³ at ±3T と小さく優れたパルス特性を示した。

6. セルコイル設計

6.1 セルコイル構造・電気諸元

セルコイルの構成を Fig. 4 に示す。対地絶縁の施された HF、MF、LF 各コイルの外周に電磁力支持材であるステンレス線を密に巻線している。同心状に組み合わせられる HF、MF、LF 各コイルの間には冷却チャンネルが設けられている。

セルコイルの寸法および電気諸元を Table 7 にまとめる。系統安定化用途と負荷変動補償・周波数調整用途では諸元の一部が異なる。

Fig. 3 Cross-sectional photograph of the HF strand.

Fig. 4 Structure of CELL coil.

Table 7 Dimension and electromagnetic specifications of CELL coils.

		(A) System-stabilization			(B) Fluctuating-load-compensation and Frequency-control		
		HF	MF	LF	HF	MF	LF
Operating Current (A)		315			275		
Operating Voltage (kV)	Terminal-Terminal	±6.1			±0.743		
	to Ground	±6.1			±2.2		
Axial Length (mm)		300			300		
Inner Radius (mm)		200	236	293	200	231	288
Outer Radius (mm)		216	254	313	211	248	307
Outer-bind thickness(mm)		15	34	17	14	34	17
Self-inductance (H)		47.7			45.2		
MAX. Energy (MJ)	Stand-alone	2.4			1.7		
	Assembled	3.3			2.9		
MAX Magnetic Flux Density (T)	Stand-alone	8.9			7.6		
	Assembled	10.6			11.1		

6.2 安定性解析（温度マージン）

間接冷却コイルでは交流損失による発熱とコイルの伝熱条件により、導体温度とその分布が時間とともに変化する。

時間と場所に依存する交流損失値を、セルコイルの

Fig. 5 Operation pattern of system-stabilization SMES and estimated temperature rise in HF coil. (with 3mm thickness of insulation to the earth)

Fig. 6 Operation pattern of fluctuating-load-compensation and frequency-control SMES and estimated temperature rise in MF coil. (with 3mm thickness of insulation to the earth)

伝熱構成（超電導素線，ガラス，エポキシ樹脂，対地絶縁，ステンレスバインド）に与えて，温度分布の時間変化を求めた。

系統安定化用途の場合，発熱源である交流損失はフィラメント間の結合損失が支配的なため，温度上昇は脈動が少なくほぼ単調に上昇する．運転パターン²⁾の4サイクル目の最後，コイル中央部で最高温度に達する．磁界変化速度の最も大きいHFコイルで最高8Kに達す

るが(Fig. 5)，温度マージンが最も小さくなるのは3.5秒時の最後の磁界ピークにあたる．このとき，到達温度約7.8Kに対して分流開始温度は約10.5Kとなる．同様に他のコイルの最高温度位置における分流開始温度は，MFコイルで約11K，LFコイルで約12Kであるため温度マージンは十分であり問題ない．

一方，負荷変動補償・周波数調整用途の場合，発熱源である交流損失はフィラメントのヒステリシス損失が支配的なため，温度上昇には脈動が発生する．1～5サイクル程度で，コイル中央部で最高温度に達する．巻線部肉厚が最も厚いMFコイルで最高4.5Kに達する(Fig. 6)．

7. 要素コイル設計

7.1 要素コイル構造・諸元

主にエネルギー貯蔵容量の違いから，系統安定化用途と負荷変動補償・周波数調整用途では要素コイルの寸法と構成が異なる．

(1) 系統安定化用途

1要素コイルは六極配置×2段＝計12個のセルコイルからなり，全てのセルコイルは並列結線されている．

1ブランチ欠落運転（強制クエンチ失敗）時の要素コイル破損を防ぐためのセルコイル間電磁力支持構造をクライオスタット内に有している(Fig. 7)．

要素コイルの寸法および電気諸元をTable 8に，クライオスタット内4.2K領域への熱負荷（全5要素コイル分）をTable 9にまとめる．

(2) 負荷変動補償・周波数調整用途

1要素コイルは六極配置×3段／1ブランチ×2段＝計36個のセルコイルからなり，1ブランチのセルコイルは直列結線，全てのブランチが並列結線されている．

系統安定化用途同様，セルコイル間電磁力支持構造をクライオスタット内に有している(Fig. 8)．

要素コイルの寸法および電気諸元をTable 10に，クライオスタット内4.2K領域への熱負荷をTable 11にまとめる．

7.2 電磁力解析

セルコイル間電磁力支持構造を決定する上で最も厳しい条件として1ブランチ欠落運転（強制クエンチ失敗）時のアンバランス電磁力を求めた²⁾．

1つのセルコイルでクエンチが発生した場合，各セルコイルは並列結線されているため，そのまま放置すると各ブランチの電流に大きな開きが生じ，アンバランス電磁力が発生する．クエンチ時のコイル保護方法と

Fig. 7 Element coil of system-stabilization SMES.

Table 8 Specification of element coil of system-stabilization SMES.

Item		Designed Value	Unit
Max. Energy		39.3	MJ
		10.9	kWh
Cooling Method		LHe, thermal conduction through Insulation	
Normal Current		3.78	kA
Normal Voltage		6.128	kV
Self-Inductance		5.5	H
Charging Energy		10	MJ
Min. Current		3.26	kA
Power		20	MW
Height of Coil		0.62	m
Outer Dia. Of Coil		2.22	m
Magnetic Flux Density of assembled CELL coil	Center	9.32	T
	Max.	10.56	T
Average Current Density of CELL coil		8.6×10^7	A/m ²
MAX. Load factor on Load line of CELL coil		70 at 4.2K	%
Number of CELL coils per Element coil		12	-

Table 9 Estimated heat load to 4.2K level of system-stabilization SMES.

Heat Load on 4.2K level	Average at Charging Start (active 4 cycles) (W)		NOTE
	1 Element Coil	5 Element Coils	
AC loss of CELL coils	1,320	11,040	almost in superconducting
Current Leads & Connections	0.28 (0.26)	1.4 (1.3)	(): at standby mode
Eddy Current Loss of Magnetic Force Supports	1,500	7,500	
Eddy Current Loss of Helium Vessel	520	2,600	
Conduction from Gravity Supports	2	10	Total weight of CELL coils = 24 ton
Radiation from Thermal Shield			
Total (W)	3,342	16,710

Fig. 8 Element coil of fluctuating-load-compensation and frequency-control SMES.

Table 10 Specification of element coil of fluctuating-load-compensation and frequency-control SMES.

Item		Designed Value	Unit
Max. Energy		103	MJ
		28.6	kWh
Cooling Method		LHe, thermal conduction through Insulation	
Normal Current		3.3	kA
Normal Voltage		2.23	kV
Self-Inductance		18.9	H
Charging Energy		72	MJ
Min. Current		1.8	kA
Power		20	MW
Height of Coil		1.92	m
Outer Dia. Of Coil		2.22	m
Magnetic Flux Density of assembled CELL coil	Center	10.9	T
	Max.	11.1	T
Average Current Density of CELL coil		7.7×10^7	A/m ²
MAX. Load factor on Load line of CELL coil		84 at 4.2K	%
Number of CELL coils per Element coil		36	-

して、あるセルコイルでクエンチを検出すると直ちに他のセルコイルを強制的に全てクエンチさせる「強制クエンチ方式」をとっているため、このアンバランス電磁力はごく軽微であり問題にはならない。

しかし、何らかの重故障でこの「強制クエンチ」が失敗した場合、セルコイル保護に失敗しても要素コイル全体の損傷を食い止めるために、セルコイル間電磁力支持構造はこの1ブランチ欠落運転時のセルコイル間電磁力に耐えるものでなければならない。

系統安定化用途の1ブランチ欠落運転時のアンバランス電磁力を Table 12 および Fig. 9 に示す。

Table 11 Estimated heat load to 4.2K level of fluctuating-load-compensation and frequency-control SMES.

Heat Load on 4.2K level	Average at Charging Start (continuous operation) (W)		NOTE
	1 Element Coil	25 Element Coils	
AC loss of CELL coils	130	3,258	almost in superconducting () : at standby mode
Current Leads & Connections	< 0.31 (0.25)	< 7.7 (6.3)	
Eddy Current Loss of Magnetic Force Supports	7.7	192	
Eddy Current Loss of Helium Vessel	0.84	21	Total weight of CELL coils = 360 ton
Conduction from Gravity Supports	< 6	< 150	
Radiation from Thermal Shield	< 6	< 150	
Total (W)	< 145	< 3,600	

Table 12 Magnetic force to each CELL coilin case of the U2 coil dropping out (= quench).

CELL coil No.	Components of magnetic force		
	F _x (N)	F _y (N)	F _z (N)
U2	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
U1	-5.02E+05	-6.27E+04	-6.60E+06
U6	2.76E+05	4.28E+05	-6.60E+06
U5	4.39E+05	-6.28E-11	-6.60E+06
U4	2.76E+05	-4.28E+05	-6.60E+06
U3	-5.02E+05	6.27E+04	-6.60E+06
L2	-4.66E+05	-2.73E-12	5.77E+05
L1	-2.38E+05	3.95E+05	6.29E+06
L6	2.58E+05	4.18E+05	6.63E+06
L5	4.39E+05	6.09E-11	6.60E+06
L4	2.58E+05	-4.18E+05	6.63E+06
L3	-2.38E+05	-3.95E+05	6.29E+06

Fig. 9 Coordinate system and magnetic force vectors in case of the U2 coil dropping out (= quench).

Fig. 10 Local temperature rising at forced-quench in design of CELL coil for system-stabilization SMES.

7.3 クエンチ解析

要素コイル内であるセルコイルがクエンチすると、アンバランス電磁力による要素コイル全体の損傷を防ぐために、強制クエンチヒータで他のセルコイルを全てクエンチさせる。はじめにクエンチを起こしたコイルとその他のコイルとでは厳密には時間差が生じるが、検出までの所要時間は0.1～0.2secと見積もられ、ほとんど無視できる。このときの、コイル局所最高温度をFig. 10に示す。同種コイルの保守的な実績値レベルである局所最高温度150K以下を満足しており、問題ないが、強制クエンチヒータは必須要件である。

8. システムレイアウトと0.5mTライン

100MW/15kWh 系統安定化用途 SMES のシステムレイアウトおよび漏洩磁界0.5mTラインをFig. 11に示す。30m×55m の設置スペースとなり、小型コイルと六極配置によって漏洩磁界0.5mTラインは極めて狭い領域に収まっている。Fig. 12は負荷変動補償・周波数調整用途 SMES の要素コイル(全25個)の配置を鳥瞰図で表したものである。

9. おわりに

ーNb₃Sn 導体使用による低コスト化の可能性ー

Nb₃Sn 導体を使用して、現状技術の延長線上で達成可能な SMES システムの低コスト化設計を紹介した。

本設計の最もユニークな点は Nb₃Sn 導体と小型ソレノイドコイルの組合せにある。この発想の原点には、

Fig. 11 Layout and 0.5mT area of system-stabilization SMES.

普及する工業製品には必ずあてはまる、量産化と中小工場での製造による低コスト化があるが、そのために発生する（メーカーの視点から見た）新たな開発課題もある。特に、クエンチ保護については重要である。クエンチ時のアンバランス電磁力を極力小さくし、かつ、セルコイル焼損を避けるため、従来よりも高速なクエンチ検出と強制クエンチを行う必要がある。

これまで、 Nb_3Sn 導体と小型ソレノイドコイルの組合せは静的な高磁界を発生する高価な研究用マグネットという印象があった。冒頭で触れたように、具体的なコスト試算値に言及することは本稿の目的ではないが、近年 Nb_3Sn 線材の性能が向上し、かつ、製造コストも低下したしてきたことから、本設計によれば、 NbTi 導体を使用した SMES システムに十分比肩しうるレベルまで低コスト化が可能である³⁾。

本研究は、資源エネルギー庁の補助事業「超電導電力貯蔵システム技術開発」として新エネルギー・産業技術総合開発機構からの委託により実施したものである。

参考文献

- 1) 津田芳幸ら：第 63 回 2000 年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集，210
- 2) 津田芳幸ら：第 63 回 2000 年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集，205
- 3) 長屋重夫ら：低温工学 37(2002) 98

Fig. 12 Bird's eye view of 25 element coils : Fluctuating-load-compensation and frequency-control SMES.