

超電導電力貯蔵システム(SMES)の研究開発

(事後評価)
(2008年度～2012年度 5年間)
プロジェクトの詳細説明(公開)

サブプロジェクトリーダー
中部電力株式会社
長屋 重夫 (2008年6月～2013年2月)

参画機関: 中部電力(株)、古河電気工業(株)、
(株)フジクラ、(公財)国際超電導産業技術研究センター、
早稲田大学、東北大学、京都大学、名古屋大学、
九州大学、九州工業大学、鹿児島大学、北海道大学、
核融合科学研究所、日本大学、

2013年8月9日

© 2013 Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

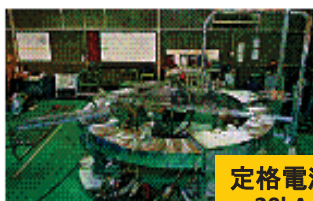
1 / 33

II. 研究開発マネジメントについて 2.1.1 超電導電力貯蔵システム(SMES)の研究開発

公開

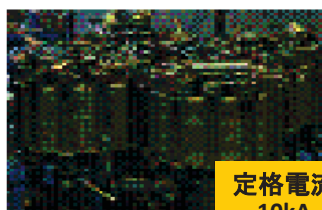
これまでのSMES開発プロジェクト 着実な低コスト化への取り組みの展開

フェーズⅠ
(平成3～10年度)
【超電導電力貯蔵システム
要素技術開発調査】
プロジェクト総額: 約60億円
・要素技術開発
・コイル設計・製作技術
◇コスト: 400万円/kW以上



定格電流
20kA

フェーズⅡ
(平成11～15年度)
【超電導電力貯蔵
システム技術開発】
プロジェクト総額: 約38億円
・コイルコスト低減技術開発
◇コスト: 20万円/kW



定格電流
10kA

フェーズⅢ
(平成16～19年度)
【超電導電力ネットワーク
制御技術開発】
プロジェクト総額: 約53億円
・変換器低減技術開発
・実系統連系による検証
◇コスト(目標: 14万円/kW)

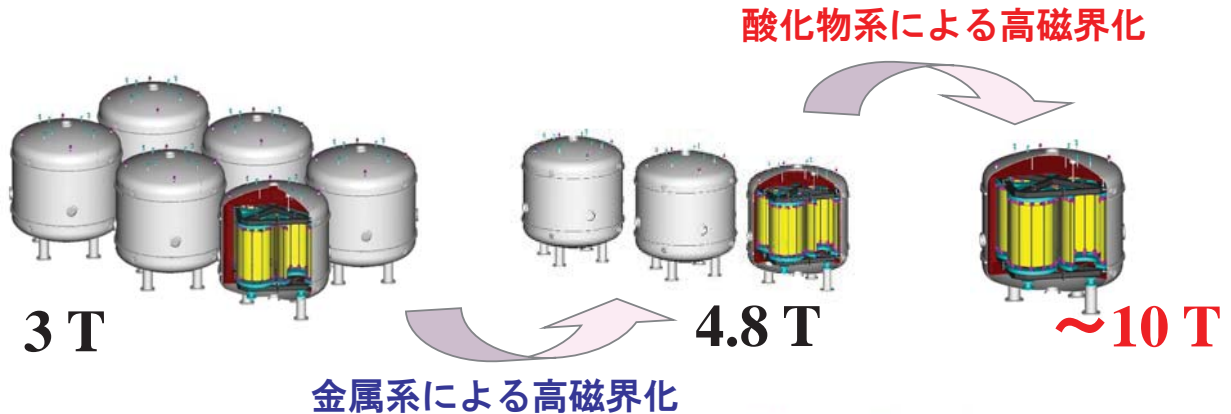


定格電流
1.4kA

産業化: × 超電導線材の高機能化
○ 不要な機能の削減・ニーズに特化し低コスト化

SMESの特徴 (フェーズⅢ スタート時)

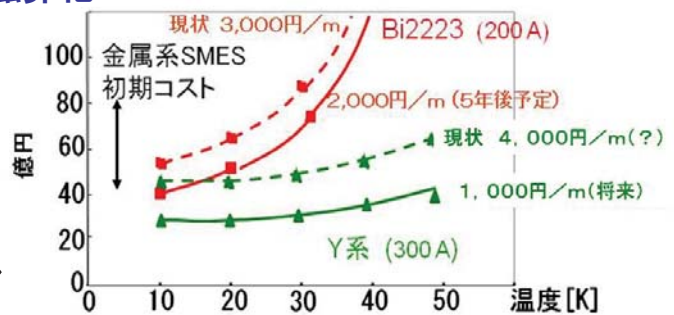
負荷変動補償用途：1. 8 G J級SMES



コンパクト化

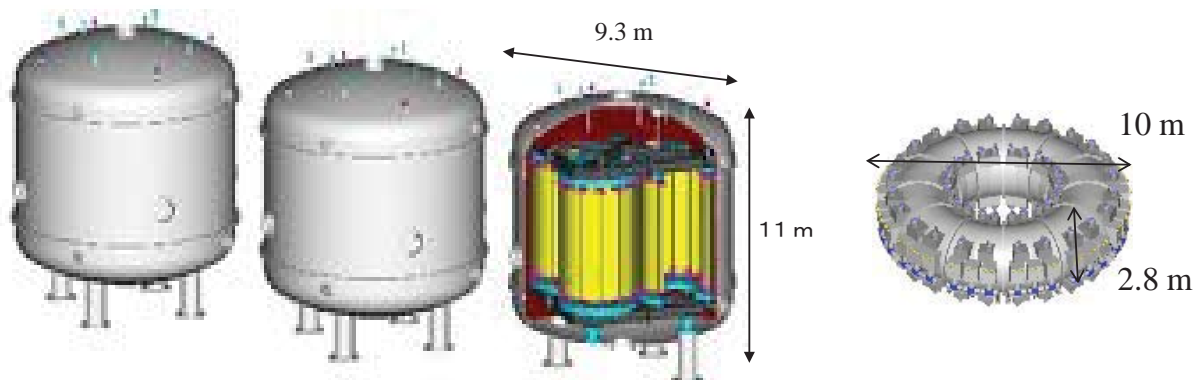
物量低減によるコスト低減
現地施工性・運搬性にも優れたコイル

事業原簿 II-2.8



高強度コイルの開発 ＜本プロジェクトの目標＞

金属系とY系SMES比較
100kVA負荷変動補償 (2GJ級)



運転温度	4.2 K (ヘリウム強制冷却)
Φ0.7mm素線総長	14,310 km
最大磁界	4.8 T
最大フープ応力	348 MPa

運転温度	20 K (冷凍機伝導冷却)
0.1x10mm ² 素線総長	2,000 km
最大磁界	11 T
最大フープ応力	600 MPa

Y系高強度導体による大幅な磁界UPでコンパクト化

事業原簿 II-1.4

大規模SMESコイル最適化の考え方

(目的)

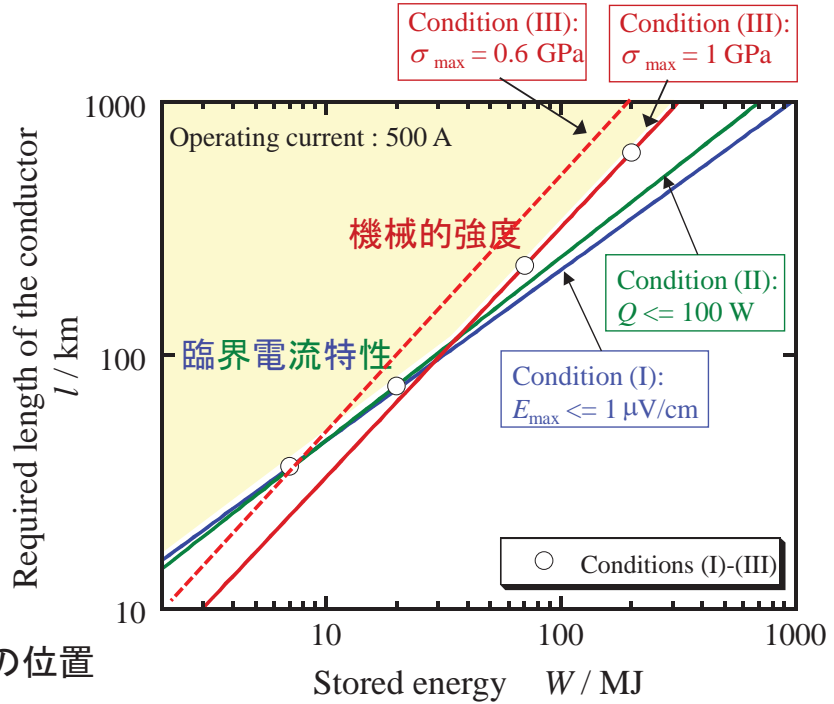
Y系線材使用量最小化

(制約条件)

- 蓄積エネルギー
- 運転温度
- 総発熱
- 最大電界
- 最大フープ応力
- 空間制約

(変数)

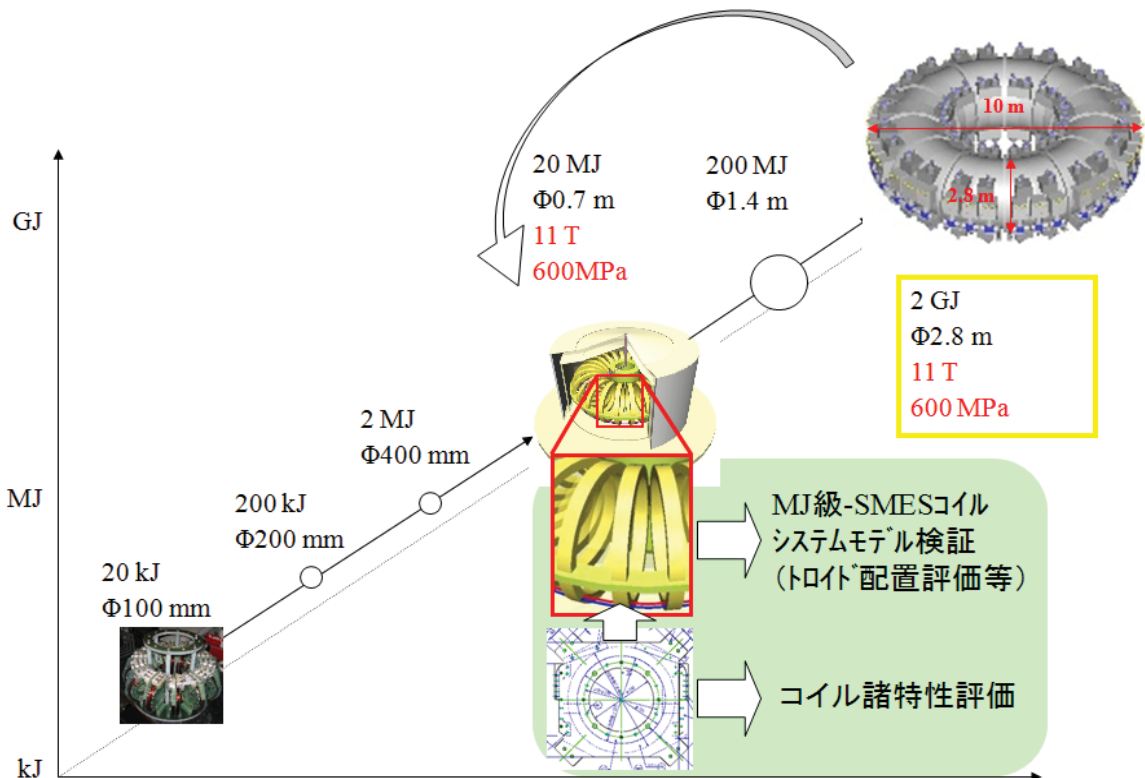
- 要素コイル寸法
(内半径、外半径、高さ)
- 要素コイルの中心軸からの位置
- 要素コイル数
- 通電電流



使用線材長の蓄積エネルギー依存性@20K

→ 大規模においては機械的強度が重要

2GJ級Y系SMESコイル開発ステップ



開発工程

<最終目標>

実運転条件におけるコイル線材及びコイル構造を評価することで、平成22年度に見られたコイル特性低下に対して対策を検討し、その解決策を提案する。

	H20	H21	H22	H23	H24
○SMES対応 線材開発	モデルコイル用線材作製 200 m - 200 A				
○2GJ級 高磁界・大電流 コンパクトコイル 構成技術開発	耐フープ応力 600MPa以上			特性低下 対策検討	限界性能把握 課題整理・解決策提案
	通電容量 2kA以上				
○高効率 コイル伝導冷却 技術開発	20~40K 伝導冷却技術確立				
	電気絶縁性能 2kV以上				
○高磁界コンパクト SMESシステム モデルコイル検証	基本システム最適化 保護システム検討				
○高信頼性・高耐久 性 SMESコイル 要素技術開発					

事業原簿 II-2.15

© 2013 Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

7 / 33

SMES研究開発の目標達成度

サブテーマ	目標	成果	達成度
○SMES対応線材 開発 (~H22)	■線材安定製造技術確立 SMESシステムモデル試作用 (仕様例: $I_c=20A/cm-w$ @77K&3T, 1GPa, 100m)	線材メーカーに技術移管完了。 線材コスト 4円/Amの実現見通 (2014年)	○ 達成
○2GJ級高磁界・大 電流コンパクトコイル構成 技術開発 (~H22)	■SMESコイル構成技術 ・フープ応力600MPa以上 ・通電容量2kA以上	・600 MPaを超えるフープ応力耐性実証 ・2.6 kA通電を実証	○ 達成
○高効率コイル伝導 冷却技術開発 (~H22)	■コイル伝導冷却技術 ・20~40K領域における伝導 冷却が可能 ■高伝熱コイル構造 ・電気絶縁2kV以上	・20Kの伝導冷却と、目標値3W/m ² を超える 冷却性能を実証 ・6kVの絶縁設計技術確立	○ 達成
○コンパクトSMES システムモデル検証 (~H22)	■2GJ級SMESコイル基本 システムの最適化 ■評価用試験モデル設計	・具体的支持構造検討により2GJ級SMES コイル基本システムの最適化 ・評価用試験モデルのうち伝導冷却試験 システムの設計・製作を実施	○ 達成
○高信頼性・高耐久 性 SMESコイル要素 技術開発(H23~24)	■コイル最適設計法の確立 ・特性変化要因把握と対策 ・伝導冷却特性評価 ・クエンチ保護法検討・評価	・最大フープ応力1.7GPa(推定 2 GPa以 上)の高耐久性コイルの開発に成功。 ・伝導冷却温度分布0.1°Cを実現 ・転流を利用したクエンチ保護方法開発	◎ 大幅に達成

事業原簿 III-1.6~1.7

◎:大達成、○:達成、△:達成見込み、×:未達成

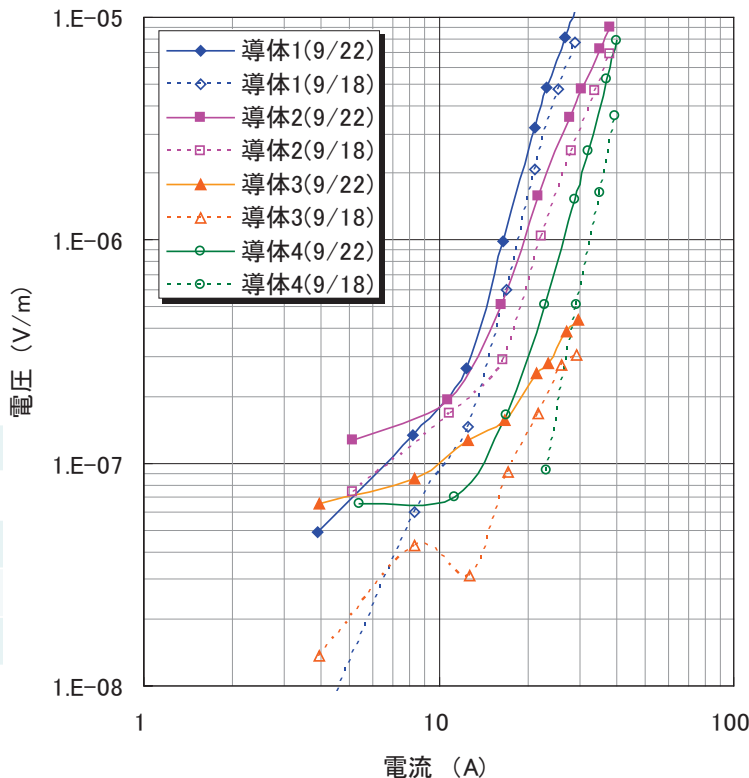
© 2013 Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

8 / 33

多層巻コイル(Φ650mm)による通電特性の変化



導体	素線絶縁4本積層
形状	シングルパンケーキ型
内径	520 mm
外径	630 mm
巻数	各41ターン



事業原簿 III-2.1.35~1.40

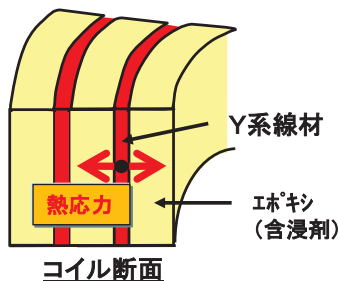
© 2013 Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

9 / 33

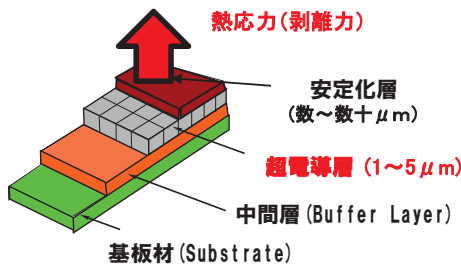
実規模多層巻コイル(Φ650mm)による通電特性の変化

実規模コイル(Φ650mm)のフープ応力試験後、コイル通電特性の変化を発見(試験後 I_c 特性が低下)

推定原因 : SMES実規模コイルの構造・構成等に起因した冷却時におけるコイル径方向への熱応力による線材劣化の可能性



エポキシと線材の熱膨張率が異なるため、冷却時、線材に熱応力が発生



線材の剥離耐力を超える熱応力により超電導層が剥離し、 I_c 特性が低下した可能性

線材の剥離耐力に適合した SMESコイルの絶縁技術・設計手法
・ 素線絶縁による絶縁の確保

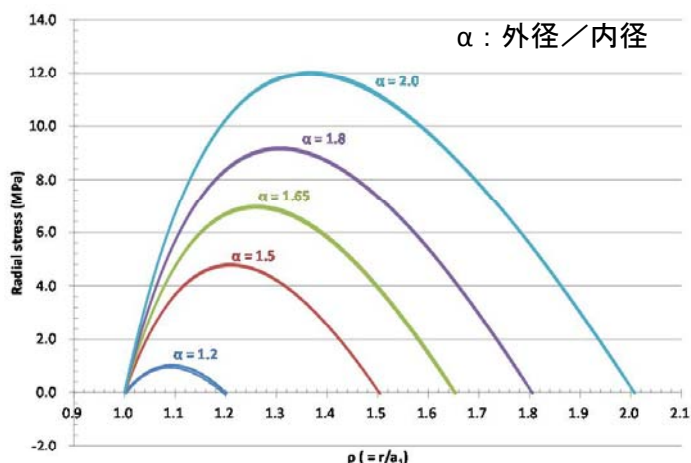
線材耐力 < コイル応力 ⇒ ×
線材耐力増大
線材耐力 > コイル応力 ⇒ ○
コイル応力 0 非含浸

事業原簿 II-3.31~32

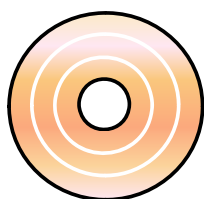
© 2013 Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

10 / 33

コイル分割による応力低減



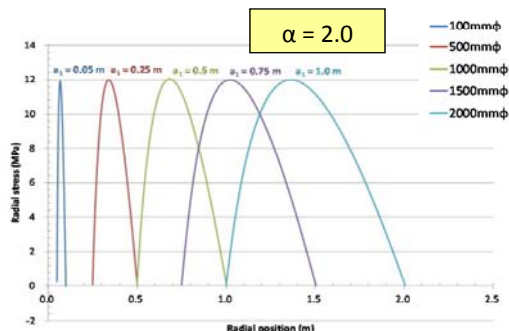
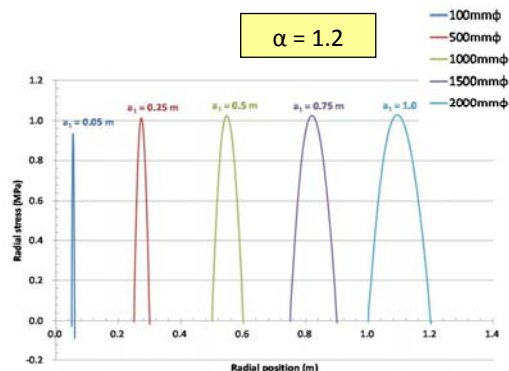
コイルの内外径比を小さくすることにより熱応力を軽減できる



コイル分割

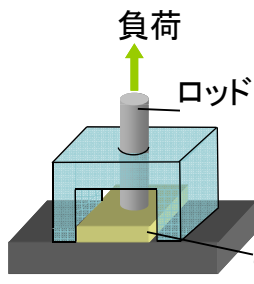
分割による応力軽減には限度がある。

事業原簿 III-2.1.136



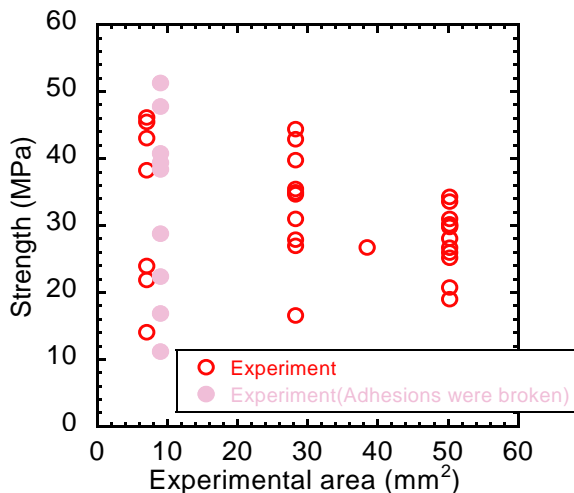
© 2013 Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

剥離強度の測定

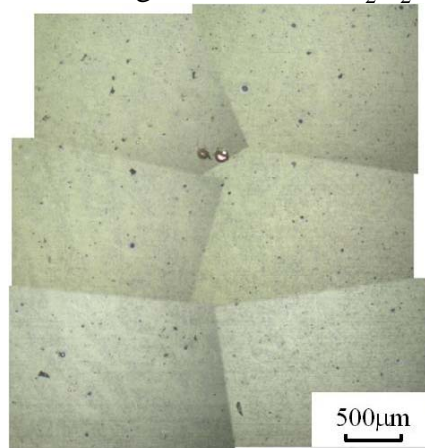


$$\sigma_c = \frac{P}{S}$$

σ_c : 強度, P : 荷重,
 S : 評価面積



線材のAgをエッチング (H₂O₂+NH₃)



多数の欠陥を確認

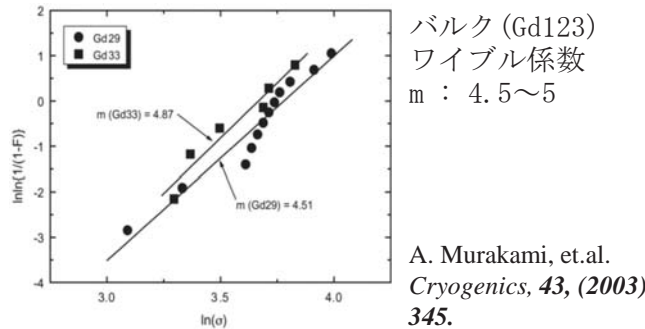
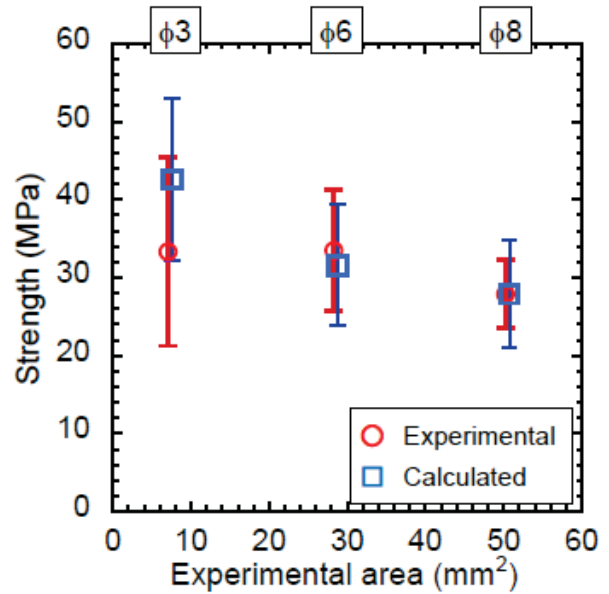
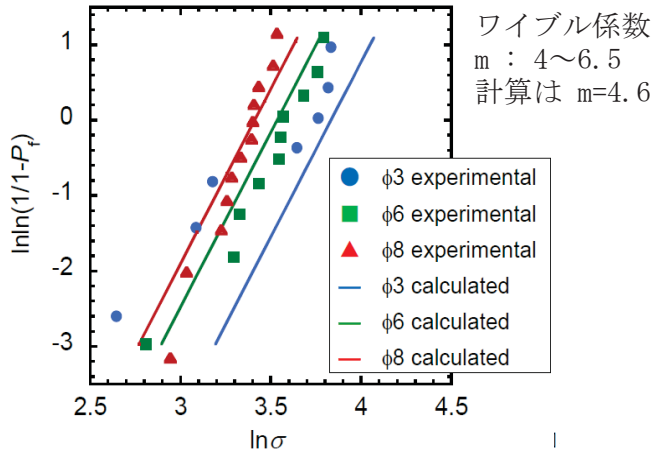


剥離の起点となる欠陥が試料表面に観察された

事業原簿 III-2.1.128~1.130

© 2013 Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

ワイブルプロットと強度の確率的予測



応力が作用する面積が大きいほど剥離強度は低下

事業原簿 III-2.1.131~1.133

強度の確率的予測 考察

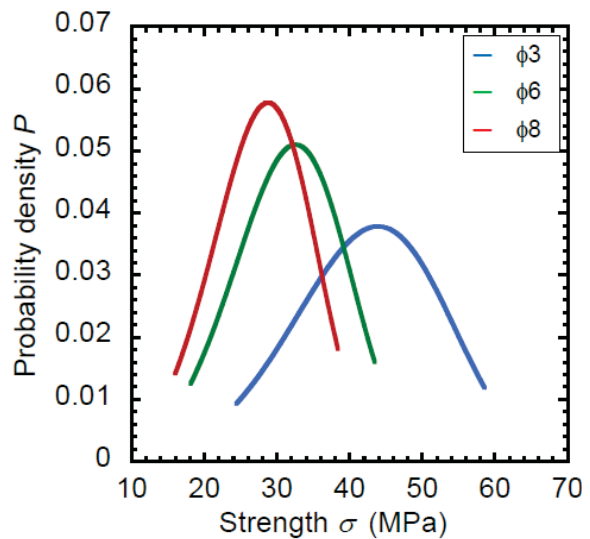
欠陥サイズの分布から予測される剥離強度の各ロッドでの平均強度、確率密度分布

	φ3	φ6	φ8
$\sigma_{ave(cal)}$ (MPa)	42.6	31.6	27.9
$D_{(cal)}$ (MPa)	10.4	7.7	6.8

$\sigma_{ave(cal)}$: 予測される平均強度
 $D_{(cal)}$: 予測される強度の標準偏差

応力が作用する面積が大きいほど剥離強度は低下

面積増加により剥離強度0に漸近



確率密度分布計算

$$\Rightarrow P(\sigma, S) = \frac{\partial P_f}{\partial \sigma} = \left(\frac{mS}{S_0 \sigma_0} \right) \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{m-1} \exp \left[-\frac{S}{S_0} \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right]$$

ワイブル係数 m	4.6
破壊じん性値 K_{IC}	0.34 (MPa · m ^{1/2})
代表強度 σ_0	40 (MPa)
S	応力負荷面積

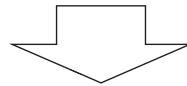
事業原簿III-2.1.132

新型コイル補強構造

Y系超電導線材は高機械強度 × → 剥離の発生
長尺線材の不均質性と信頼性 × → 線材の強度のみに依存できない

線材の剥離耐力に適合 → × 一体化(含浸)
→ △ 分割(分割数、線材強度の信頼性)

線材の剥離耐力：コイル内(長尺線材)では0に漸近する



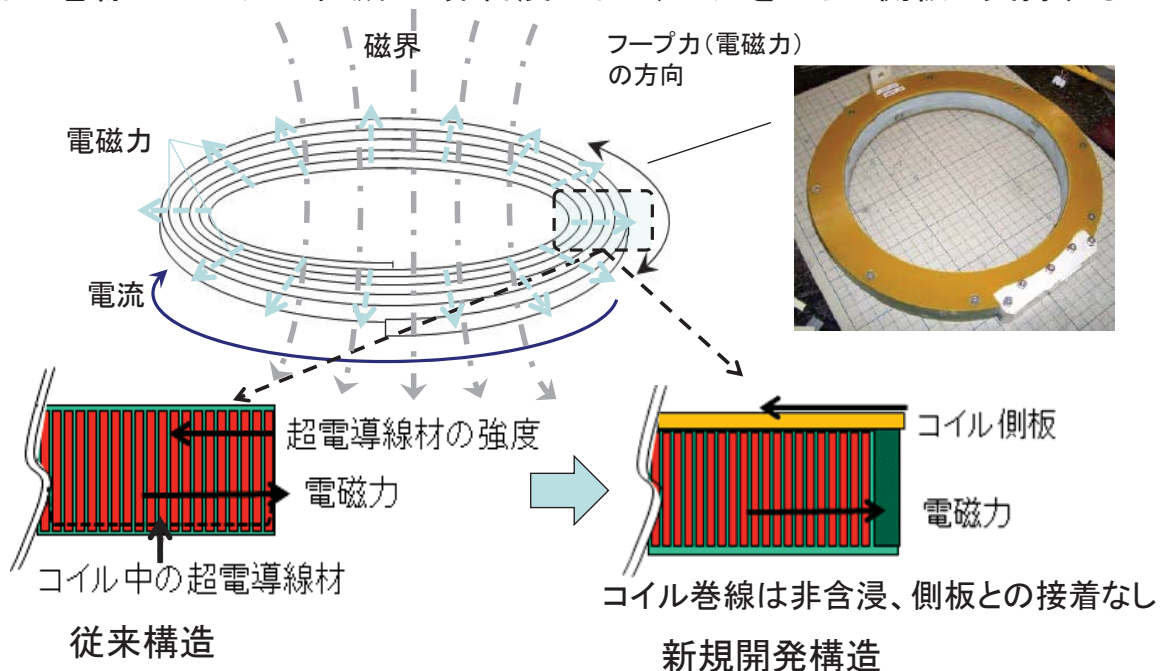
新型コイル補強構造の概念

非含浸により線材間に作用する応力を低減する
コイル構造で超電導線材に作用する応力を低減する

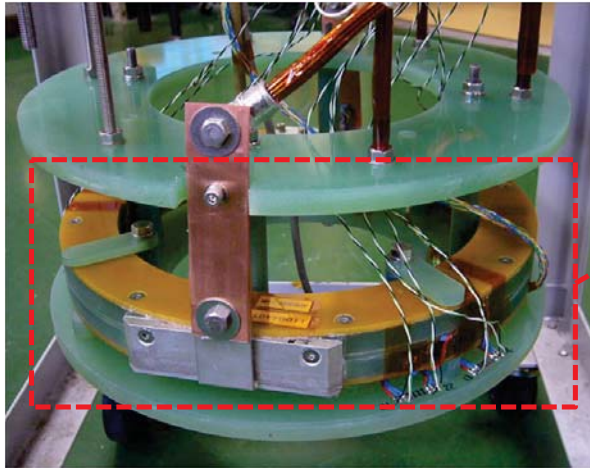
- ・応力を(効果的に)負担するコイル補強構造
超電導線材のひずみの抑制 → 線材特性低下の防止
- ・テープ状超電導線材 (Y系, Bi系) に適したコイル構造

新型コイル補強構造

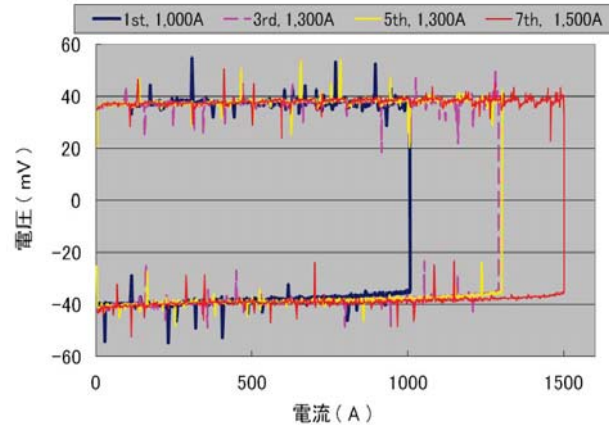
Yoroi-coil (Y-based oxide superconductor and reinforcing outer integrated coil)
コイル巻線への応力の低減：非含浸コイル、応力をコイル側板で支持する



構造強化型コイル (Yoroi-coil)



コイル通電 1,500A(電源の最大出力) @ 8 T.



SMES要素技術検討 (2011)

ダブルパンケーキ型

内径 : 219 mm

外径 : 240 mm

高さ : 30 mm

最大電磁応力 : 1.7 GPa

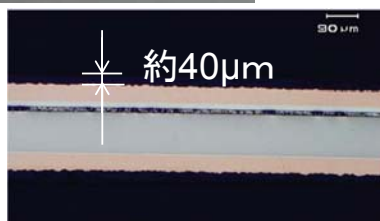
事業原簿 III-2.1.140-141

© 2013 Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved. 17 / 33

低温硬化塗布絶縁手法の開発

新規コーティング絶縁

- ・絶縁被覆処理温度150°C以下
- ・線材の被覆性、極低温での柔軟性に優れる
- ・熱伝導率が良好 2W/K・m (カプトテープの10倍程度)



断面図

従来の絶縁技術

ホルマール等のワニス絶縁
処理温度が高温

テープラップ絶縁

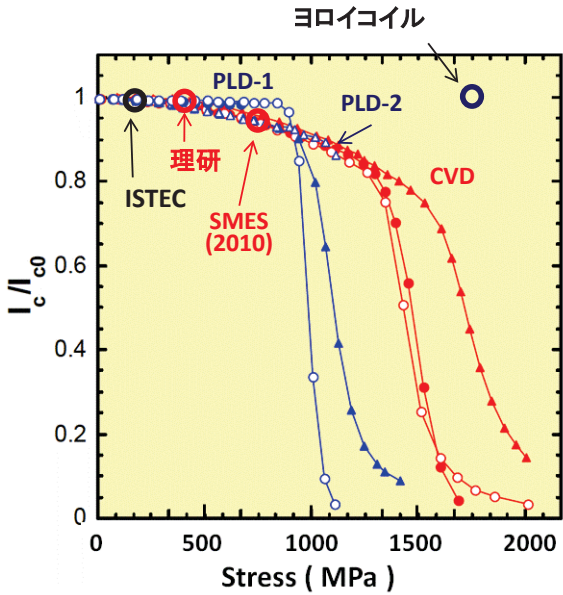
- ・コイル巻線時のずれ
- ・沿面距離の変動による絶縁低下の可能性
- ・ラップ部分の応力集中
- ・熱伝導率が低い



事業原簿 III-2.1.138

© 2013 Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved. 18 / 33

ヨロコイルの位置づけ



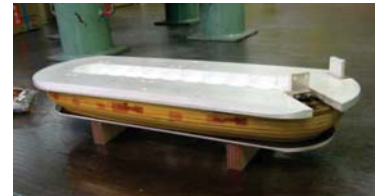
SMES要素技術検討 (2010)

シングルパンケーキ型
 内径 : 200 mm
 外径 : 250 mm
 高さ : 12 mm
最大電磁応力: 740 MPa



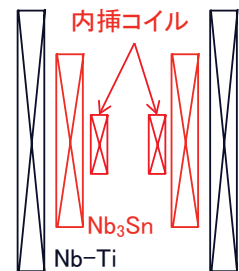
Y系超電導モータ (ISTEC)

平傘型レーストラック型
 短径 : 184 mm
 長径 : 514 mm
 高さ : 86 mm
 最大電磁応力: 150MPa



NMR開発用内挿コイル(理研)

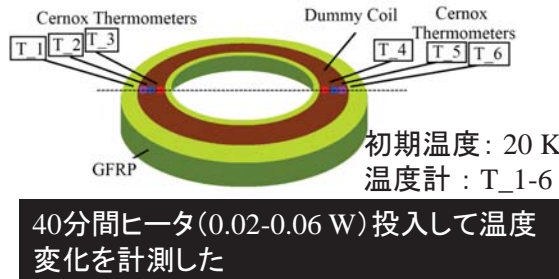
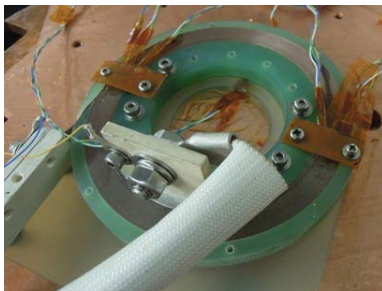
レイヤー巻
 内径 : 50 mm
 外径 : 113 mm
 高さ : 88 mm
最大電磁応力: 408MPa



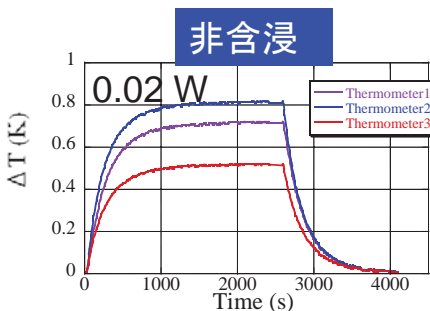
事業原簿 III-2.1.136

パラフィン含浸コイルの伝熱特性

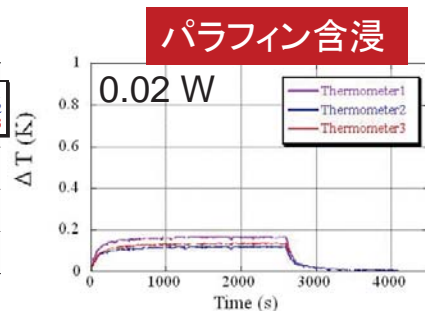
同一の銅モデルコイルを用いて非含浸およびパラフィン含浸コイルの伝熱特性 (AC-lossを模擬したヒータ熱(0.02 W)投入による温度変化)を評価した



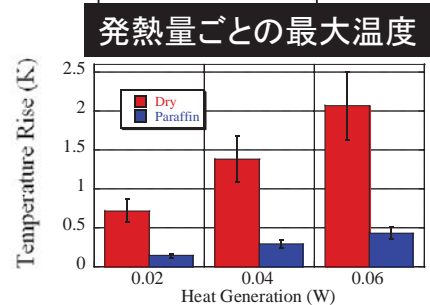
Single pancake coil	
Inner diameter	100 mm
Outer diameter	123 mm
Height	24 mm
Turn	50



最大温度上昇: 約0.82 K



最大温度上昇: 約0.17 K



パラフィン含浸により、最大温度上昇は非含浸の約1/5

事業原簿 III-2.1.146~1.151

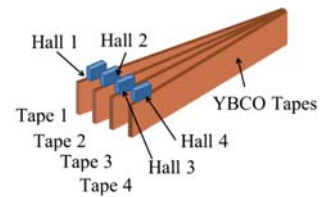
常電導転移の検出

ダブルパンケーキコイルの諸元

Inner radius	200 mm
Outer radius	242 mm
Number of tapes in conductor	4
Number of pancake coils	2
Number of turns	16 × 2 turns
I_c of tape 1, 2, 3, and 4 at 77 K	159, 155, 150, 152 A

ホール素子による電流推定方法

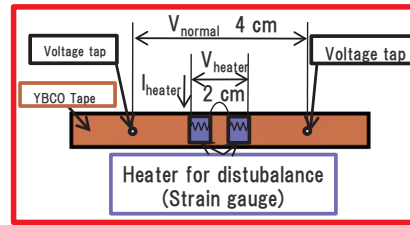
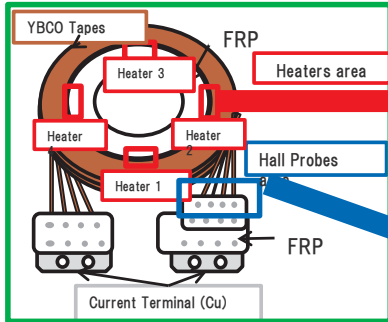
各テープに電流を流し、各ホール素子の電圧から以下の行列Aを求める。



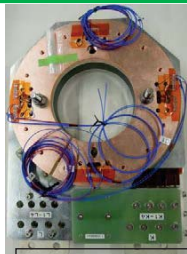
$$\begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & A_{24} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & A_{34} \\ A_{41} & A_{42} & A_{43} & A_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{pmatrix}$$

テープ全体に電流を流し、ホール電圧と先に求めた行列Aの逆行列A⁻¹から各テープの電流値を逆算する。

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & A_{24} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & A_{34} \\ A_{41} & A_{42} & A_{43} & A_{44} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{pmatrix}$$



- 線材の諸元
- Insulator : 50 × 10⁻⁶ [m]
 - Cu : 50 × 10⁻⁶ [m]
 - Hastelloy : 100 × 10⁻⁶ [m]
 - Buffer : 495 × 10⁻⁹ [m]
 - YBCO : 875 × 10⁻⁹ [m]
 - Ag : 16 × 10⁻⁶ [m]

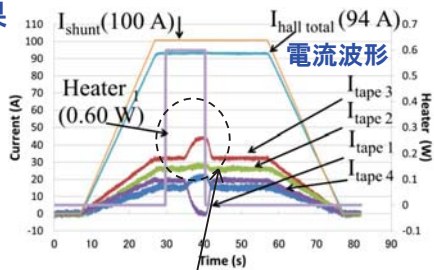


事業原簿 III-2.1.156~1.158

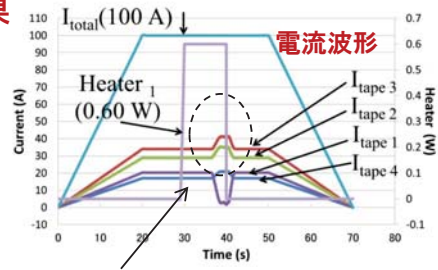
常電導転移の検出

1枚劣化を想定してTape 1にヒータ投入

実験結果

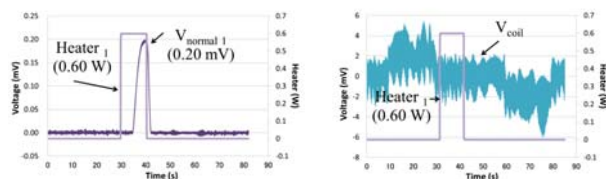


解析結果



常電導領域発生から約2.4秒後に電流転流 ($\Delta I_{max} - \Delta I_{min} = 10$ A)

Tape 1(-19 A) Tape 2(+1 A) Tape3 (+12 A) Tape 4(+6 A)

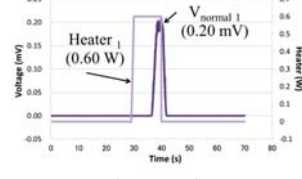


ヒータ周囲(4cm長)の電圧

コイルの両端電圧

常電導領域発生から約2.5秒後に電流転流 ($\Delta I_{max} - \Delta I_{min} = 10$ A) 最高到達温度:89.5K ($\Delta 12.5K$ @初期温度77K)

Tape 1(-18 A) Tape 2(+7 A) Tape3 (+7 A) Tape 4(+4 A)



ヒータ周囲(4cm長)の電圧

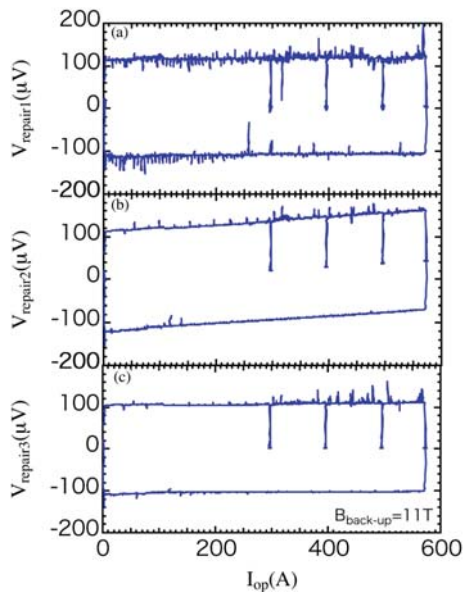
ヒータ投入によりホットスポットが発生し、局所的な電圧上昇を観測できたが、コイル両端電圧からは常電導発生が検出できない

実験結果と同様の結果が得られた

本結果から、電圧監視で検出困難な局所的なホットスポットに対して、ホール素子を用いた電流監視による常電導転移検出が可能であること、またその有効性が示された。

事業原簿 III-2.1.160~1.161

コイル用超電導線材の補修・接続

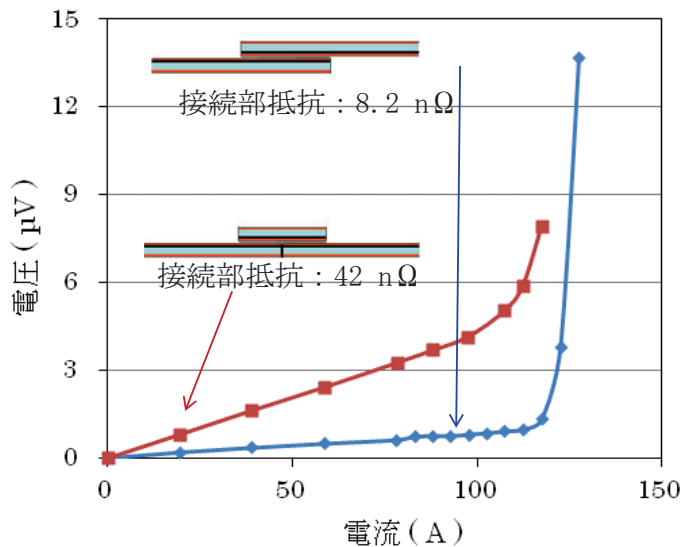


572 A通電時の補修部3箇所の I-V特性
特性低下無

コイル内/外径：200/250mm
11T, 4.2K, フープ応力 600MPa

事業原簿 III-2.1.34

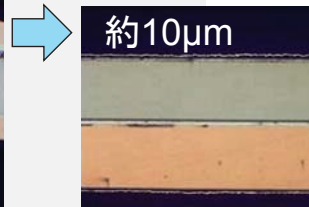
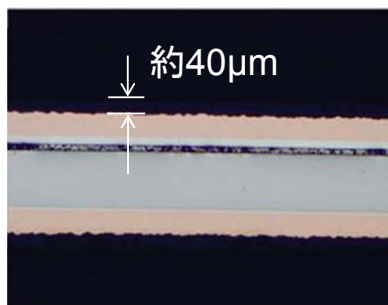
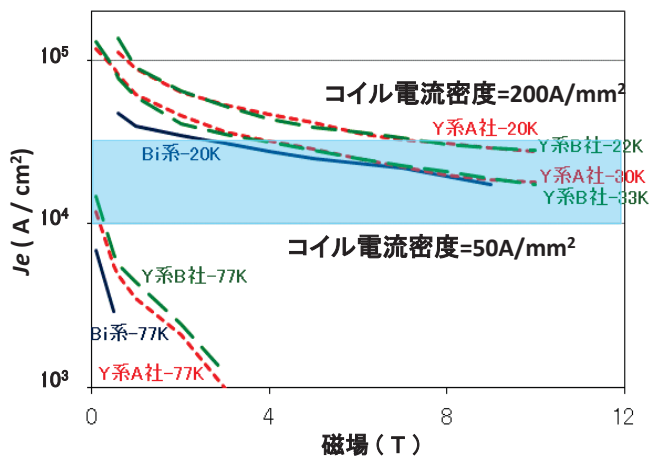
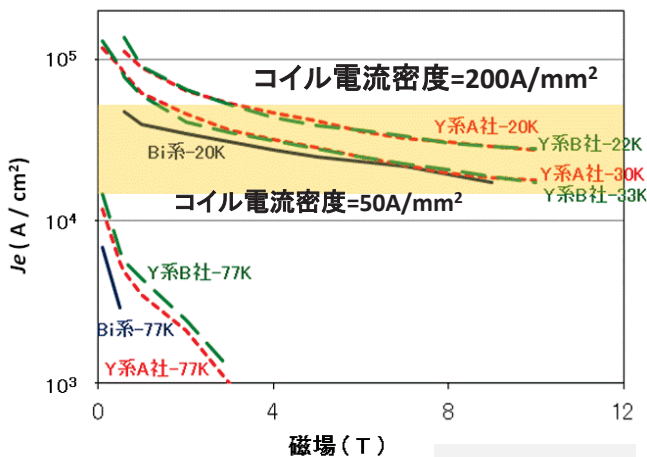
低抵抗接続 → 接続による長尺化



接続面積：180 mm(L) × 6 mm(W)

大型コイル用導体に適用

コイルの高電流密度化の検討



Y系線材A社: Ic= 500A/cm幅

Je= 280A/mm² (基板厚 75 μm), @77K

Y系線材B社: Ic= 280A/cm幅

Je= 292A/mm² (基板厚 50 μm), @77K

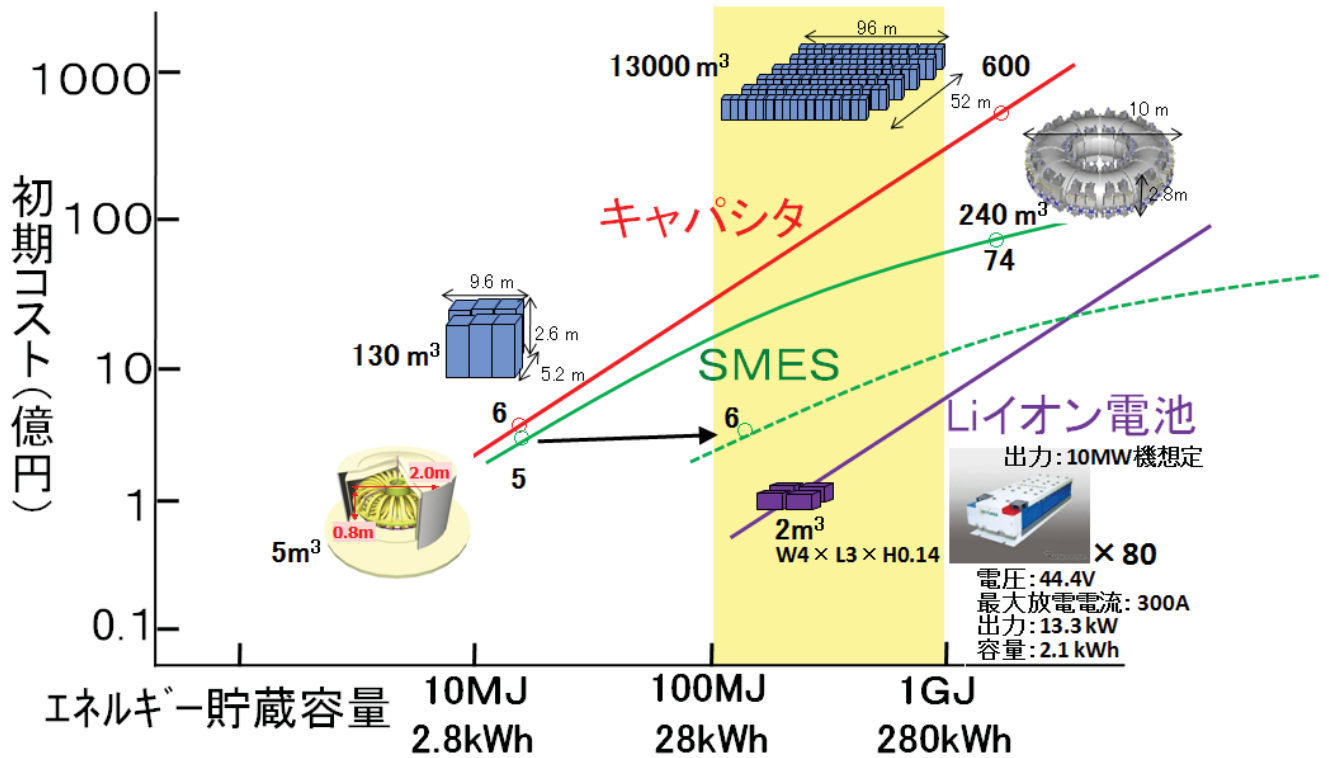
Bi系線材: Ic= 180A/4.2mm幅

Je= 194A/mm² @77K

絶縁被覆の薄化 → Jc の増大

事業原簿 II-2.8、III-2.1.138

Y系SMESと電気二重層キャパシタの貯蔵部比較



事業原簿 IV-1.9

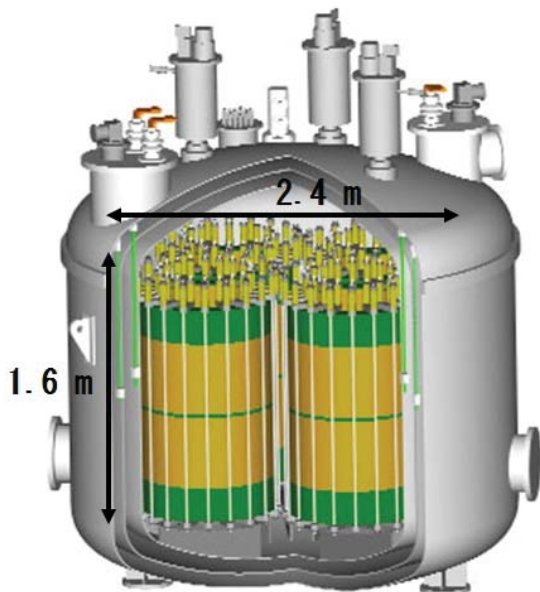
© 2013 Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

25 / 33

瞬低補償用 SMES

補償容量: 10000kW 1秒
NbTi SMES

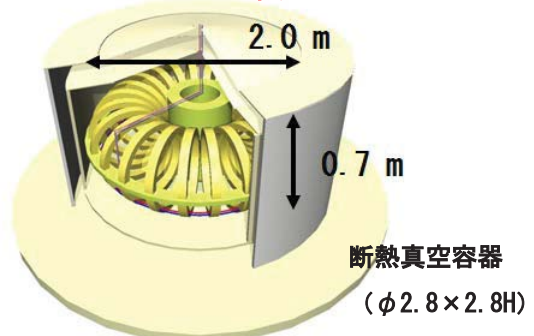
<4K運転>



	電気二重層 キャパシタ	SMES
エネルギー密度 (Wh/L)	0.04	金属系:0.1 Y系:1 YOROI:6
大容量化	◎ 10MW級	◎ 10MW以上
コスト (万円/kW)	◎ 5	◎ 2~6

イットリウム系SMES

<20K運転>

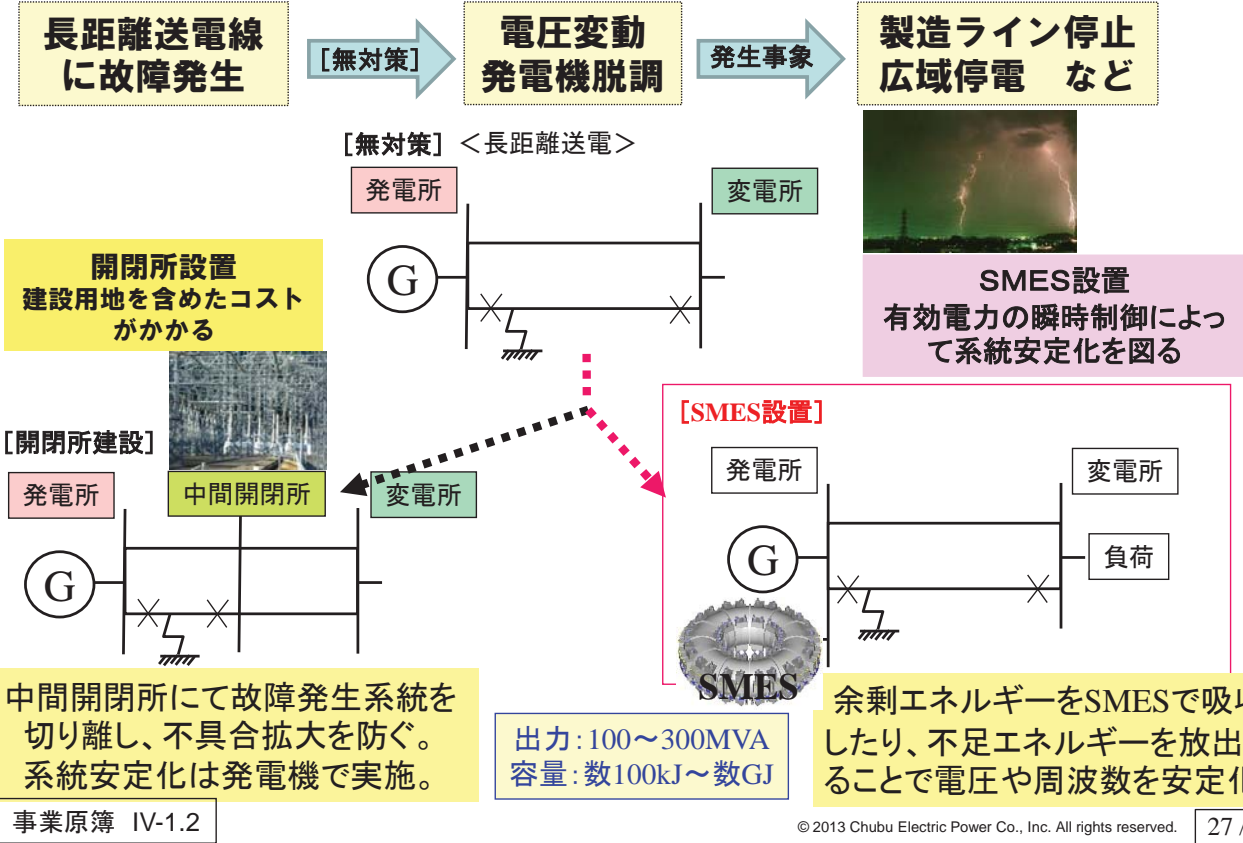


事業原簿 IV-1.2

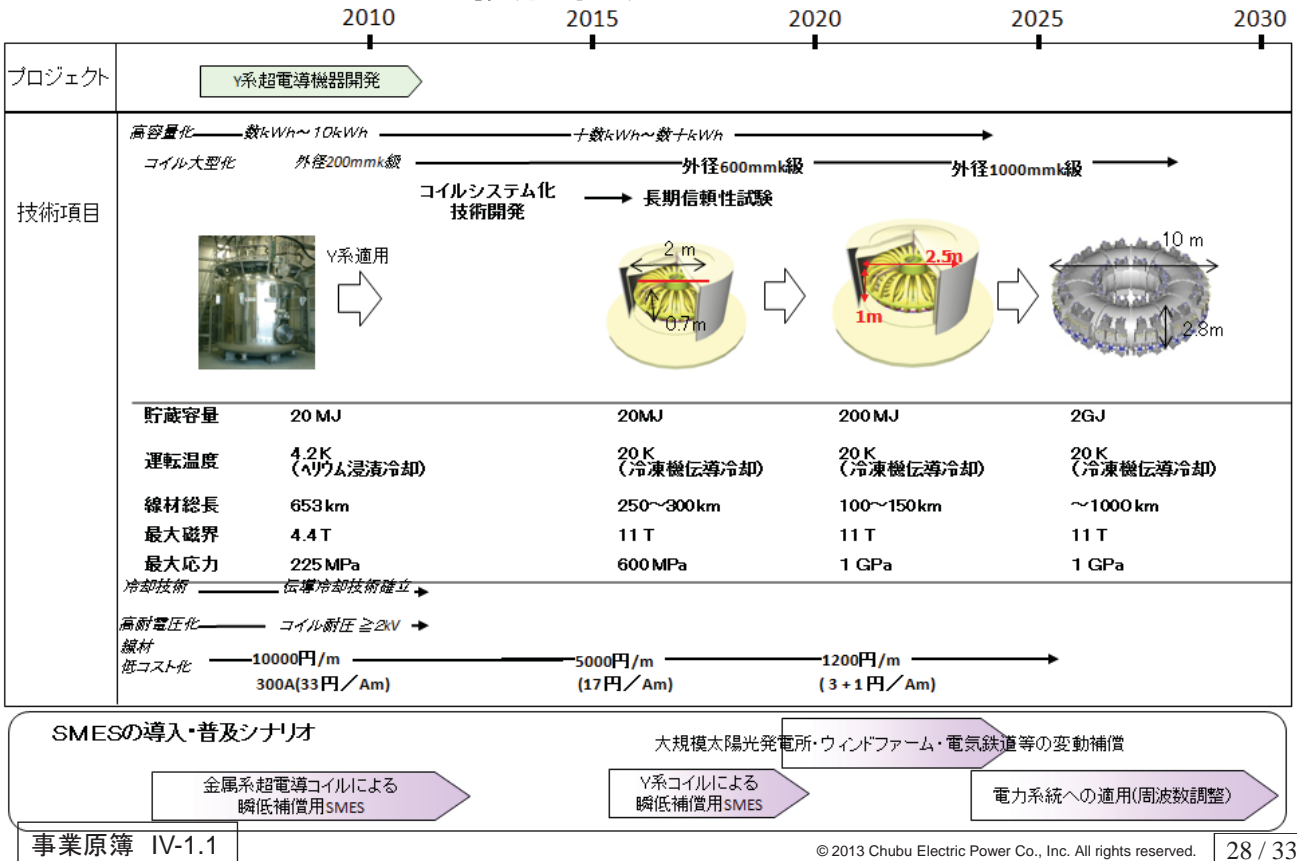
© 2013 Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

26 / 33

SMESの大電力制御による系統安定化



SMES技術開発ロードマップ

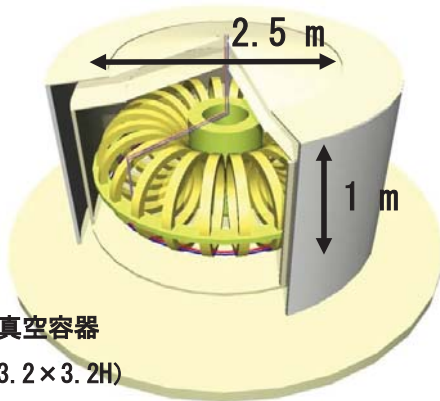


変動補償用 SMES

補償容量: 10000kW 60秒
 100MJ 級 (~167kWh)
 出力: 10MW

	リチウムイオン電池	SMES
エネルギー密度 (Wh/L)	200~300	金属系:0.1 Y系:1 YOROI:6
大容量化	△ 1MW級まで	◎ 10MW以上
寿命 (サイクル数)	△ 6~10年 3500回	◎ 20年以上 制限なし
コスト (万円/kW)	△ 20	◎ 2~6

イットリウム系SMES <20K運転>



事業原簿 IV-1.2

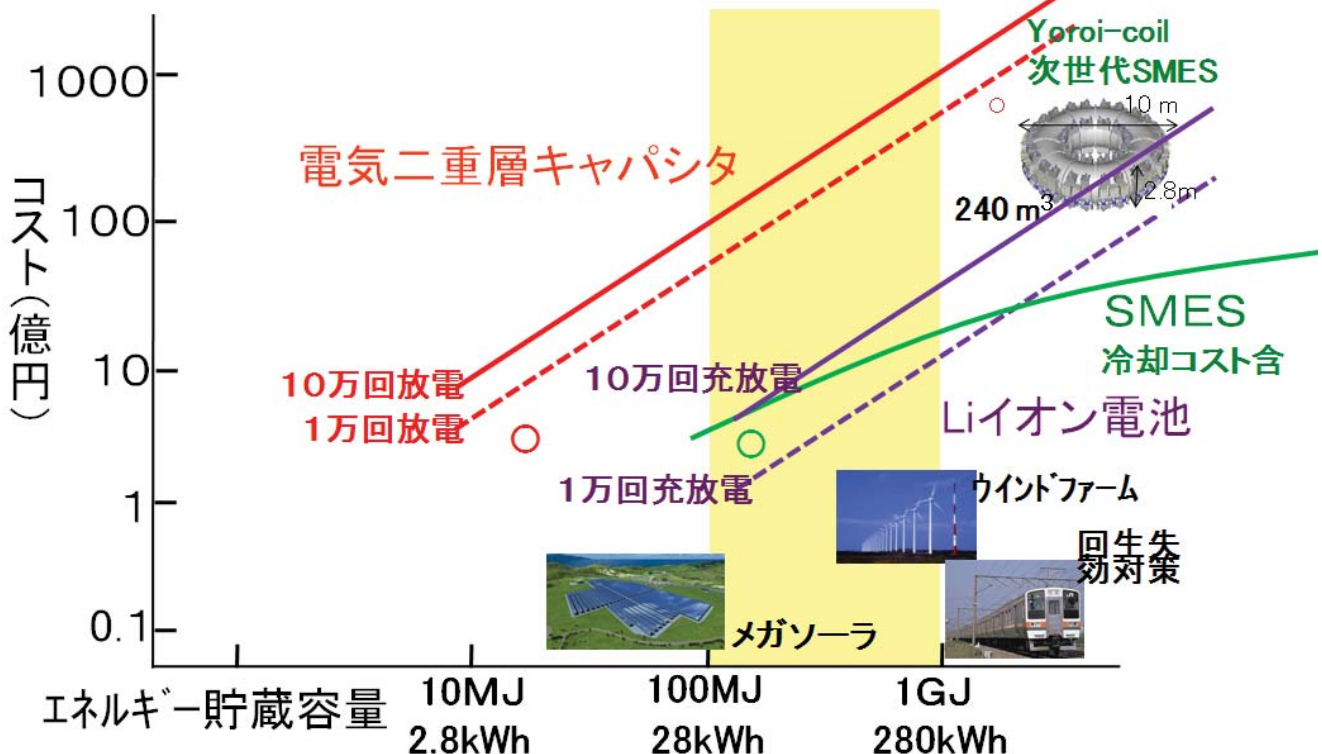
リチウムイオン電池の一例



× 80

電圧: 44.4V
 最大放電電流: 300A
 出力: 13.3 kW
 容量: 2.1 kWh

Y系SMESとキャパシタ、Liイオン電池の貯蔵部比較 (出力1万kW)



事業原簿 IV-1.9

各種電力貯蔵装置との比較

種類	Ni水素	Liイオン	NaS	超電導 フライホイール	電気二重層 キャパシタ	SMES
コスト (万円/kW)	△ 10	△ 20	△ 24	◎ 7	◎ 5	◎ 2~6
寿命 (サイクル数)	△ 5~7年 2000回	△ 6~10年 3500回	○ 15年 4500回	◎ 20年以上 制限なし	○ 15年 10万回以上	◎ 20年以上 制限なし
大容量化	△ ~MW級	△ 1MW級 まで	○ MW級 以上	○ 単体MW 並列化要	◎ 10MW級	◎ 10MW 以上
充電状態の 計測・監視	△	△	△	◎	◎	◎
安全性	○	△	△	○	○	○
温度管理の 必要性	○ 無	○ 無	△ ($\geq 300^{\circ}\text{C}$)	△ 冷却要	○ 無	△ 冷却要
エネルギー密度 (Wh/L)	40~100	200~300	144	66	0.04	金属系:0.1 Y系:1 YOROI:6

事業原簿 IV-1.1

© 2013 Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

31 / 33

成果の意義

サブテーマ	目標	成果	成果の意義
(1) SMES対応線材開発	■線材安定製造技術確立 SMESシステムモデル試作用 (仕様例: $l_c=20\text{A/cm幅}$ @77K&3T, 1GPa, 100m)	長尺線材の特性低下に対して、超電導層、中間層、基板の各課題解決をはかり、モデルコイル用線材の歩留が向上。	安定製造技術 メーカ移管で低 コスト化に目処
(2) 2GJ級高磁界・大電流コンパクトコイル構成技術開発	■SMESコイル構成技術 ・フープ応力600MPa以上 ・通電容量2kA以上	多層巻コイル(外径250mm)の製作、 1.7GPaを超えるフープ応力耐性の実証 Y系4束導体コイル(外径650mm)の製作、 2.6kA通電を実証	世界最高性能
(3) 高効率コイル伝導冷却技術開発	■コイル伝導冷却技術 ・20~40K領域における伝導冷却が可能 ■高伝熱コイル構造 ・電気絶縁2kV以上	模擬コイルを使ったコイル伝導冷却システムを検証する試験装置を製作し試験を実施 6kVの絶縁設計技術確立	世界最高性能
(4) 高磁界コンパクトSMESシステムモデル検証	■2GJ級SMESコイル基本システムの最適化 ■評価用試験モデル設計 ■試験計画作成(SMESシステム適用性検証評価)	具体的支持構造検討により2GJ級SMESコイル基本システムの最適化を実施 評価用試験モデルのうち伝導冷却試験システムの設計・製作を実施 転流計測によるクエンチ検出法を検証	世界初
(5) 高信頼性・高耐久性 SMESコイル要素技術開発	■高信頼性・耐久性コイル要素技術開発に向けた課題抽出と解決策を提案	コイル構成部材による電磁力を支持する高強度化技術の確立 熱伝導性にも優れたコーティング絶縁技術の確立	世界初

事業原簿 III-1.9

© 2013 Chubu Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

32 / 33

特許・プレス・論文・学会発表件数

	H20	H21	H22	H23	H24	計
特許出願（国内のみ）	0	4	0	0	10	14件
論文（査読付き）	3	14	16	10	6	49件
研究発表・講演	5	27	36	26	26	120件
受賞実績	0	0	0	0	1	1件
新聞・雑誌等への掲載	2	5	0	5	11	23件
展示会への出展	3	2	2	2	1	10件

成果の普及 → 事業化・実用化の取り組み

超電導機器メーカーにて、Yoroi-coil による機器開発が進展