

「超電導電力貯蔵システム(SMES)の研究開発」 (中間評価)

(2008年度～2012年度 5年間)

プロジェクトの詳細説明(公開)

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

サブプロジェクトリーダー
中部電力株式会社 技術開発本部 電力技術研究所
超電導プロジェクトリーダー 研究主査 長屋 重夫

2010年9月1日

複製を禁ず

1/39

II. 事業の目標 1. 1. 1 超電導電力貯蔵システム(SMES)の研究開発

公開

研究開発の目標

基幹系統安定化用に適用できる規模である2 GJ級SMESを想定した大容量コイルシステムの実現に向け、金属系コイルでは実現不可能な高磁界コンパクトコイルの要素技術開発や伝導冷却構造の開発を実施する。また、2 GJ級コイルシステムの成立性を確認するために、コイル配置や運転条件等の最適化を行い、これらの結果を踏まえコイルを試作し、その性能を検証する。

研究開発項目

- ①2GJ級高磁界・大電流コンパクトコイル構成技術開発
- ②高効率コイル伝導冷却技術開発
- ③高磁界コンパクトSMESシステムモデル検証
- ④SMES対応線材開発

SMESの開発スケジュール

	H20	H21	H22	H23	H24
○SMES対応 線材開発	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block; margin: 5px;">モデルコイル用線材作製 200 m - 200 A</div>				
○2GJ級 高磁界・大電流 コンパクトコイル 構成技術開発	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block; margin: 5px;">耐フープ応力 600MPa以上 (通電容量 2kA以上)</div>				
○高効率 コイル伝導冷却 技術開発	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block; margin: 5px;">20~40K 伝導冷却技術 (電気絶縁性能 2kV以上)</div>				
○高磁界コンパクト SMESシステム モデルコイル検証	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block; margin: 5px;">基本システム最適化 保護システム検討</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block; margin: 5px; margin-left: 200px;">限界性能把握 2万回以上の充放電試験</div>				

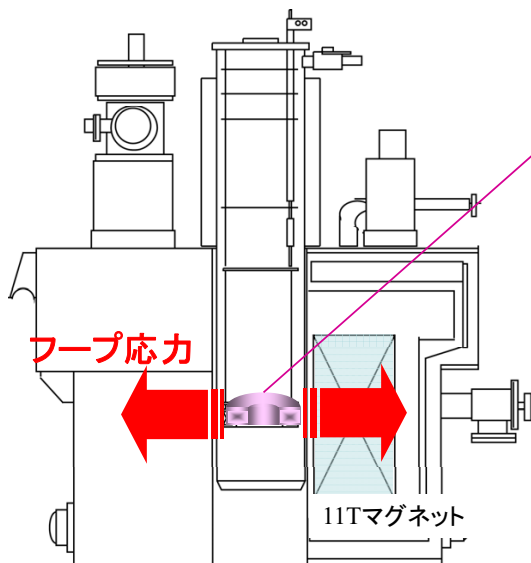
成果と今後の課題

サブテーマ	中間目標 (H22末)	成果	達成度	今後の課題
(1) 2GJ級高磁界・大電流コンパクトコイル構成技術開発	<ul style="list-style-type: none"> ■ 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250 mm)の製作、600 MPa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650 mm)の製作、2.6 kA通電を実証	◎	最終目標に向け開発を推進
(2) 高効率コイル伝導冷却技術開発	<ul style="list-style-type: none"> ■ 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中 6kVの絶縁設計技術確立	○	電気絶縁性能の検証 (H22末)
(3) 高磁界コンパクトSMESシステムモデル検証	<ul style="list-style-type: none"> ■ 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	○	クエンチ検出、コイル保護手法の確立 (H22末)
(4) SMES対応線材開発	<ul style="list-style-type: none"> ■ 線材安定製造技術確立 SMESシステムモデル試作用 (仕様例: Ic=20A/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。コイル用線材作製を実施中。	○	安定製造技術のメーカ移管

2GJ級高磁界・大電流コンパクトコイル構成技術開発

研究開発項目	研究開発の目標 (青:中間)
2GJ級高磁界・大電流コンパクトコイル構成技術開発	<ul style="list-style-type: none"> ・SMESコイル構成技術 -フープ応力600MPa以上 -通電容量2kA以上
高効率コイル伝導冷却システム開発	<ul style="list-style-type: none"> ・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
高磁界コンパクトSMESシステムモデル検証	<ul style="list-style-type: none"> ・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(高磁界コンパクト・高効率伝導冷却コイル) ・試験計画作成(SMESシステム適用性検証評価) ・SMES動作検証(2GJ級評価用試験モデル) ・特性検証(日光試験ベースの2万回以上繰り返し充放電)
SMES対応線材開発	<ul style="list-style-type: none"> ・モデルコイル用線材作製 <p>(システム検証用: Ic: 20A/cm@77K & 3T)</p>

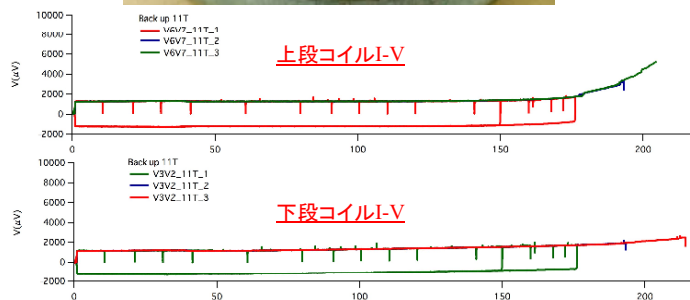
小型多層巻コイルによるフープ応力評価



コイル仕様
 シングルパンケーキ型 2積層
 外径 Φ250 mm / 内径 Φ200 mm

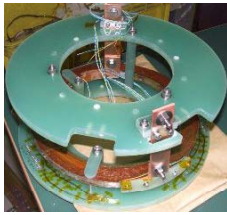


巻線部で高強度基板に対する560MPaの電磁応力耐性を実証
 また、コイルの一体変形を確認
 ただし電極部劣化のため再試験



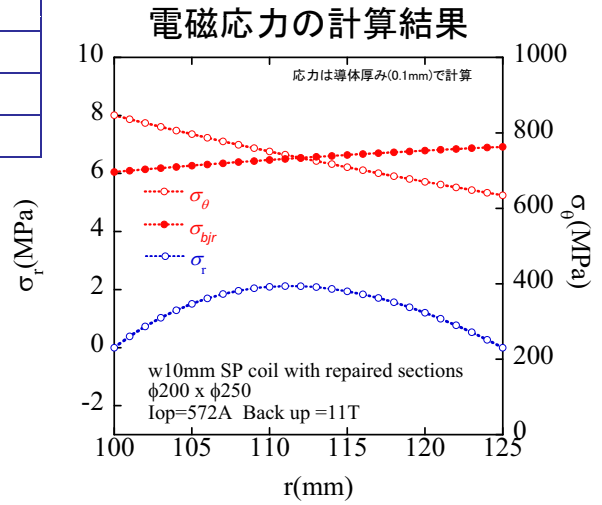
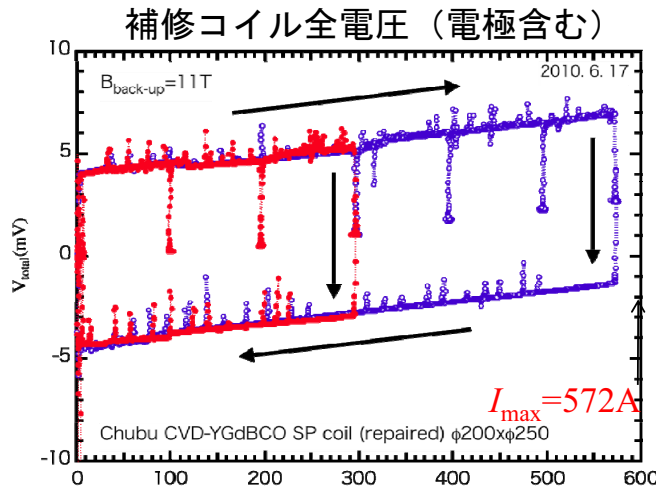
11T外部磁界中でのコイル3回繰り返し通電結果

小型多層巻コイルによるフープ応力再評価



SPコイル（補修有）

コイル内径	mm	200
コイル外径	mm	251
1ターン平均厚さ	mm	0.367
巻数	turns	69.5



目標の600MPaに対し、独立変形 (BJR)で約**740MPa**、一体変形で約**850MPa**のフープ応力耐性を実証

600mm級コイル大電流通電試験結果

<実規模コイル諸元>

線材	Cu安定化CVD-YBCO線材
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	611 mm
高さ	10 mm
電流	2.6 kA

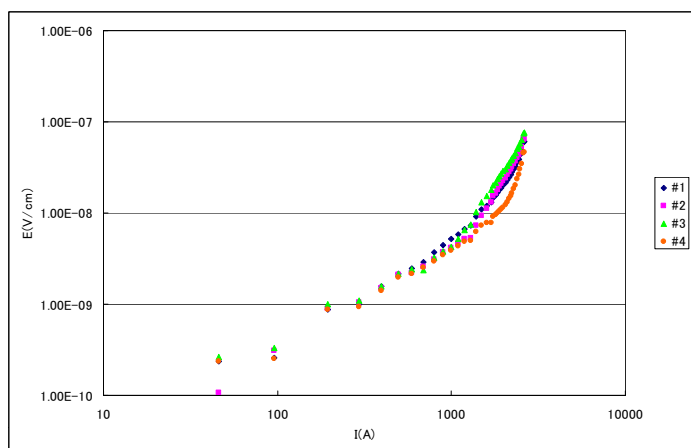
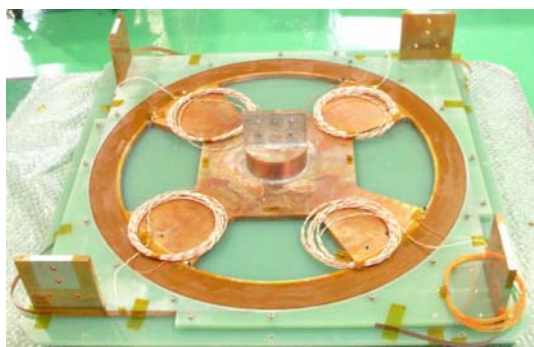


図 LHe中で通電時の各素線発生電圧 (横軸: 全電流)

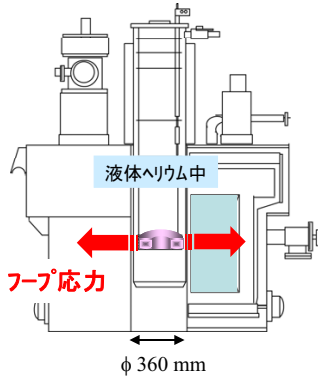
Y系集合化導体を用いた実規模コイルを製作し、通電試験により、2kAを超える大電流通電を実証

Y系コイルの耐フープ応力検証評価

小規模(Φ250mm)による基礎評価 → 実規模(Φ630mm)による検証評価

CVD-YBCOコイル

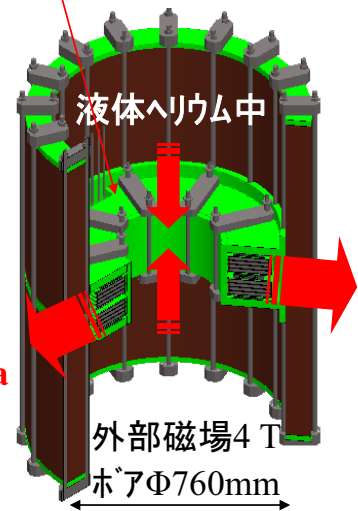
Φ250 mm



CVD-YBCOコイル

Φ630 mm
電流2kA
4枚積層導体
2個程度積層

フープ応力
600 MPa



- 600MPa以上の耐フープ応力検証
- 応力が集中する電極の製作・評価
- コイル励磁時のコイル内部応力伝達・分布の評価

- 集合導体コイルの応力バランス評価
- 繰り返し充放電等によるYBCOコイルの耐性検証

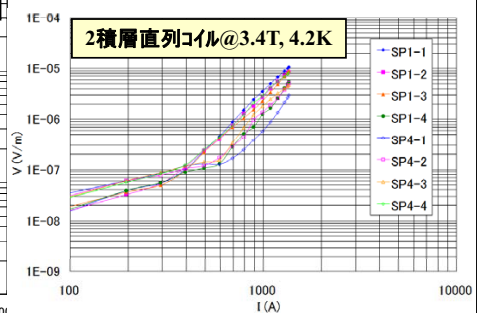
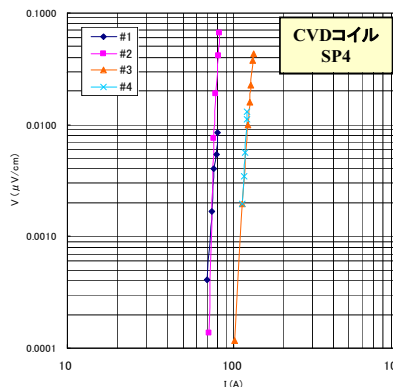
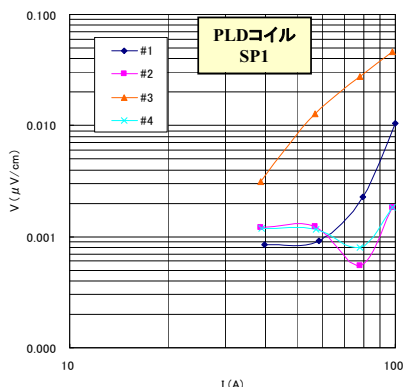
630mmコイル通電試験結果

<実規模コイル諸元>

線材	Cu安定化CVD-GdYBCO線材 Cu安定化PLD-GdBCO線材
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



コイル2個積層、
3.4Tマグネット中
で1.4kA通電
400MPaのフープ
応力印加



高効率コイル伝導冷却技術開発

研究開発項目	研究開発の目標 (青: 中間)
2GJ級高磁界・大電流 コンパクトコイル構成技術開発	<ul style="list-style-type: none"> SMESコイル構成技術 <ul style="list-style-type: none"> -フープ応力600MPa以上 -通電容量2kA以上
高効率コイル 伝導冷却システム開発	<ul style="list-style-type: none"> コイル伝導冷却技術 <ul style="list-style-type: none"> ★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
高磁界コンパクトSMES システムモデル検証	<ul style="list-style-type: none"> 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(高磁界コンパクト・高効率伝導冷却コイル) 試験計画作成(SMESシステム適用性検証評価) SMES動作検証(2GJ級評価用試験モデル) 特性検証(日光試験ベースの2万回以上繰り返し充放電)
SMES対応線材開発	<ul style="list-style-type: none"> モデルコイル用線材作製 (システム検証用: $I_c: 20A/cm @ 77K \& 3T$)

Y系SMES要素コイル 電気絶縁構造設計

巻線機器(直流)の試験電圧: $2E+1(kV)$

絶縁耐圧の経時劣化を考慮

30年後のFRP絶縁性能25%以上(常温・大気圧)

対地絶縁

定格6(kV) → $13 \times 4 = 52 kV$ を設計値

耐電圧52 kV に耐える厚さ: 3.4 mm以上

層間絶縁

層間最大3kV → 試験電圧: $3 \times 2 + 1 = 7 kV$

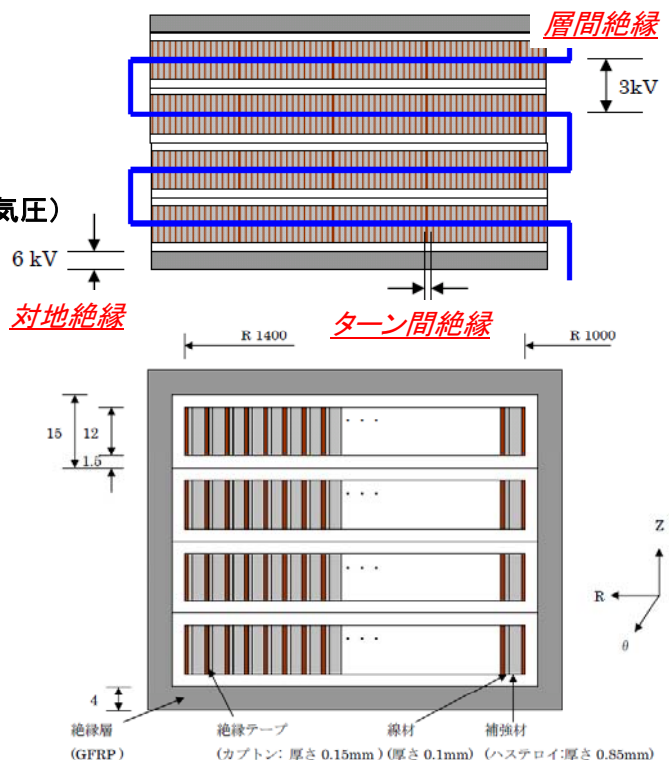
設計電圧: $7 \times 4 = 28 kV$

耐電圧28 kV に耐える厚さ: 1.8 mm以上

ターン間絶縁

$6kV / 1620 \text{ ターン} = 3.7 V$

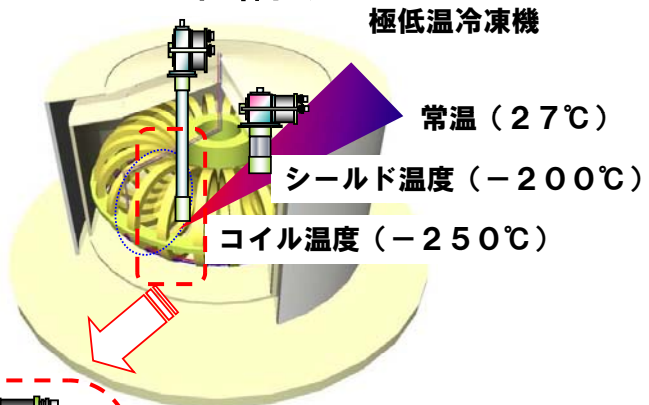
0.15mm カプトンテープで十分



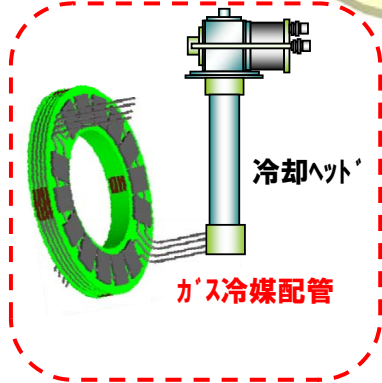
冷却システム基本構成

冷却システムの変遷

コイル温度	冷却方式
金属系: 4K	浸漬冷却 (従来)
↓	↓
Y系: 20~50K	伝導冷却 (今回)



伐熱を
・効率良く
・確実に行う
↓
ガス冷媒配管
による冷却



冷却システムの課題

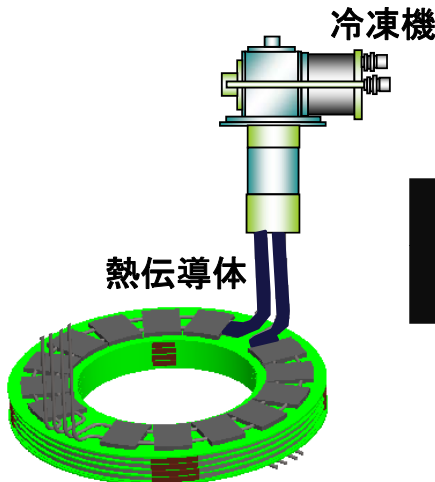
1. 伝導冷却システムの確立
2. 冷凍効率の向上
(ランニングコスト削減)
COP : 0.01 @ -250℃
0.1 @ -200℃

安価で使いやすい冷却システム

コイル伝導冷却

従来

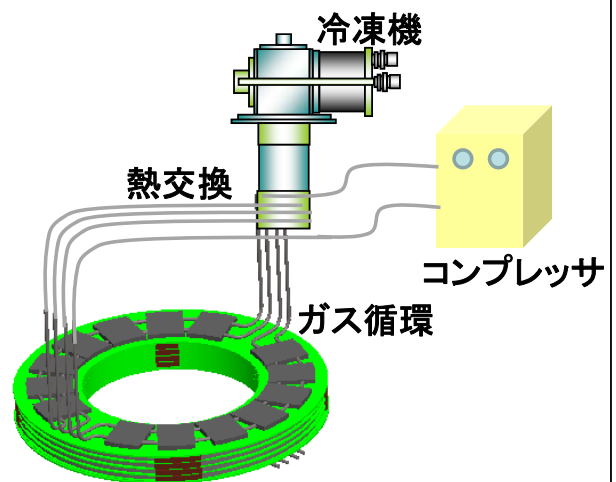
冷凍機とコイル間を固体熱伝導体で接続し伝導冷却



長距離冷却時に熱勾配が発生

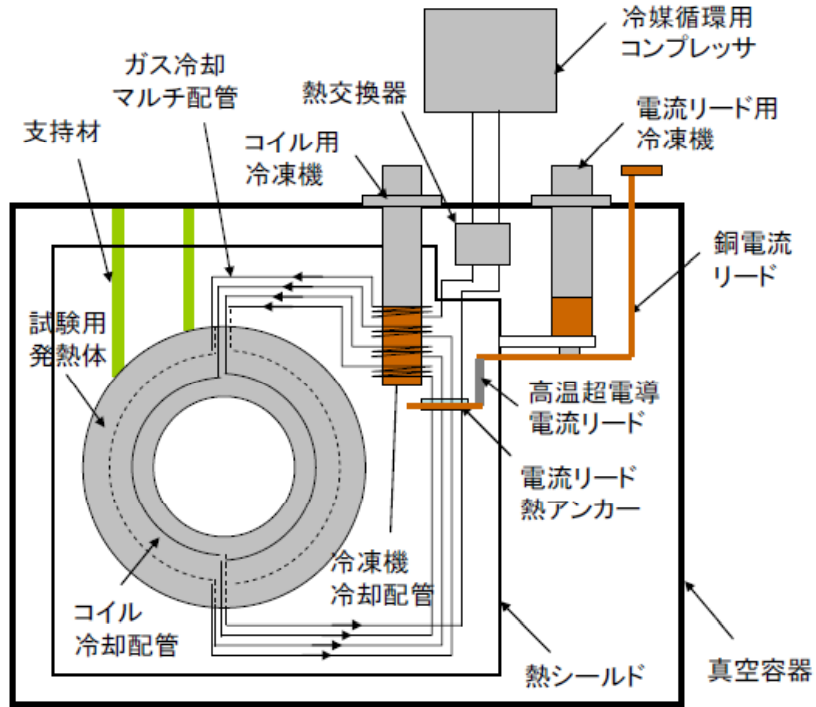
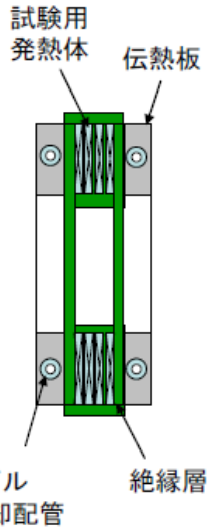
今回

冷凍機とコイル間を極低温ガスの循環により冷却



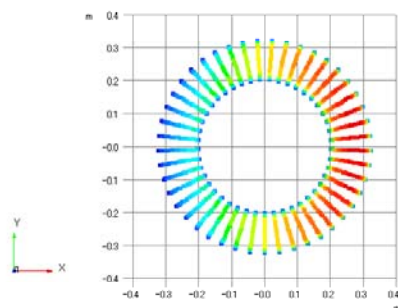
コイル全体を均等冷却

冷却システム試作評価試験



冷却システムのシミュレーション結果

実規模コイルの発熱分布



実規模コイルの模擬発熱体

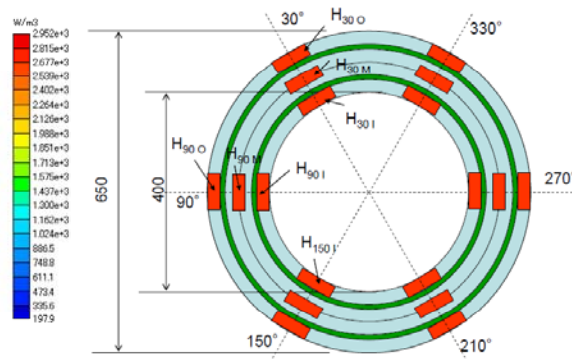


図9-1 ヒーター取付け位置 (平面図)

- 試験用発熱体の冷却シミュレーション条件
- コイル表面熱流速 21.8 W/m²
 - 配管1本当たり発熱量 2.25 W/配管
 - 配管長 825 mm
 - 配管径 外径8 mm, 内径6 mm
 - ガス流量 0.56 g/s
 - 発熱分布 一様発熱と分布発熱

コイル断面

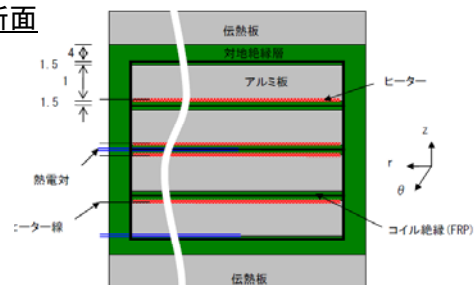


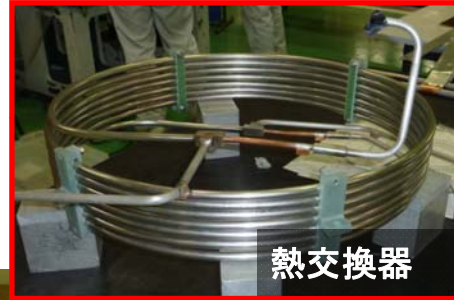
図9-2 ヒーター取付け位置 (断面図)

3 W/m²に対して21.8 W/m²の冷却実現の見通し



冷却システム試験装置

クライオ全景



熱交換器



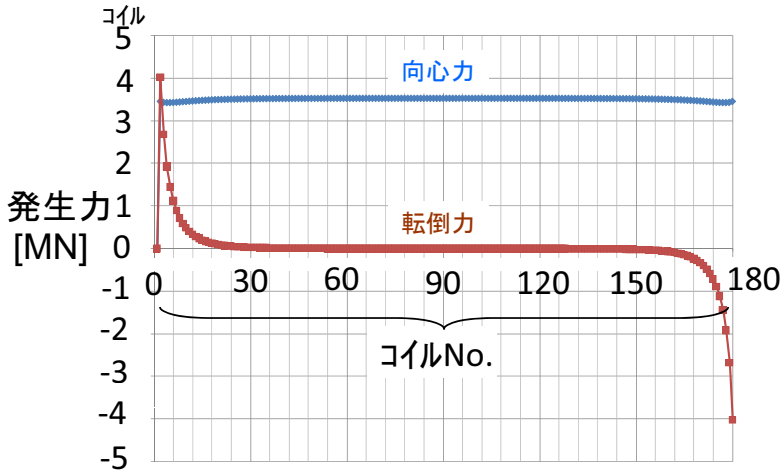
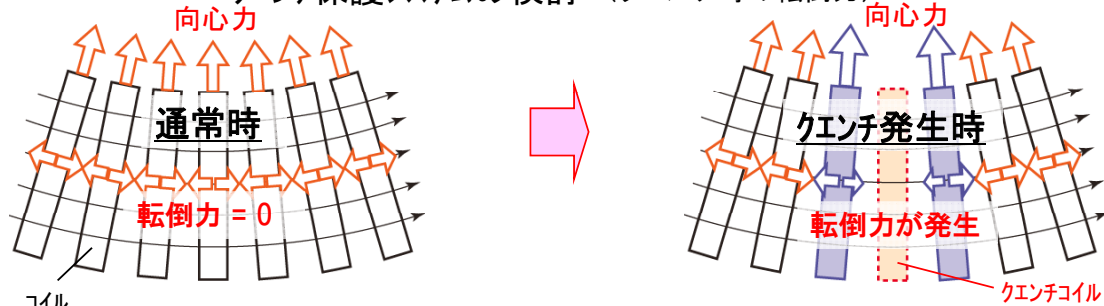
リード部

高磁界コンパクトSMESシステムモデル検証

研究開発項目	研究開発の目標 (青:中間)
2GJ級高磁界・大電流 コンパクトコイル構成技術開発	<ul style="list-style-type: none"> ・SMESコイル構成技術 <ul style="list-style-type: none"> -フープ応力600MPa以上 -通電容量2kA以上
高効率コイル 伝導冷却システム開発	<ul style="list-style-type: none"> ・コイル伝導冷却技術 <ul style="list-style-type: none"> ★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
高磁界コンパクトSMES システムモデル検証	<ul style="list-style-type: none"> ・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(高磁界コンパクト・高効率伝導冷却コイル) ・試験計画作成(SMESシステム適用性検証評価) ・SMES動作検証(2GJ級評価用試験モデル) ・特性検証(日光試験ベースの2万回以上繰り返し充放電)
SMES対応線材開発	<ul style="list-style-type: none"> ・モデルコイル用線材作製 (システム検証用: $I_c: 20A/cm @ 77K \& 3T$)

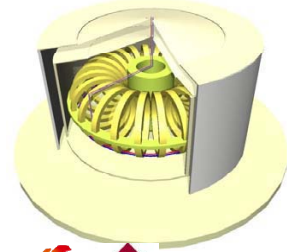
基本システム最適化

クエンチ保護システムの検討 (クエンチ時の転倒力)



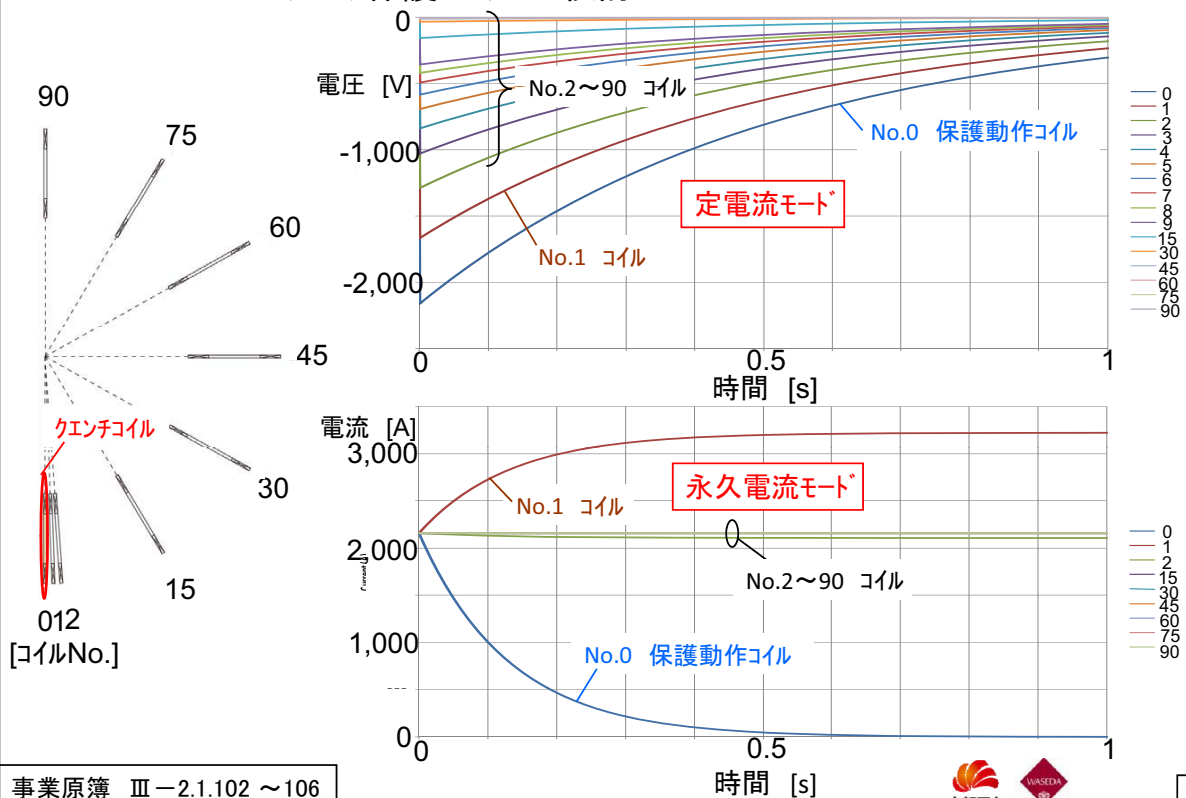
クエンチ発生時

- ①外部抵抗によってクエンチコイル電流を減衰
- ②当該コイル磁束が減衰
- ③全体の磁束変化を少なくするため周辺コイル電流を上昇



基本システム最適化

クエンチ保護システムの検討 (クエンチ時のコイル発生電圧・電流)

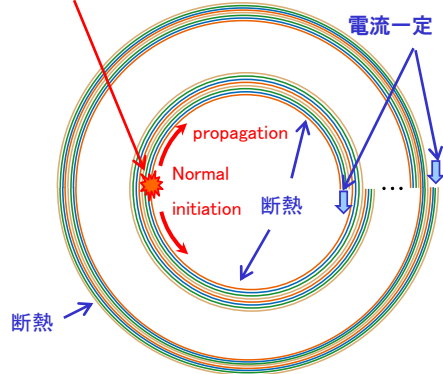


素線絶縁集合導体におけるクエンチ挙動の評価

Y系集合導体コイルのクエンチ現象を解析評価

線材4枚集合化導体

1層目、1ターン目で超電導特性が劣化 ($k=0$) と仮定

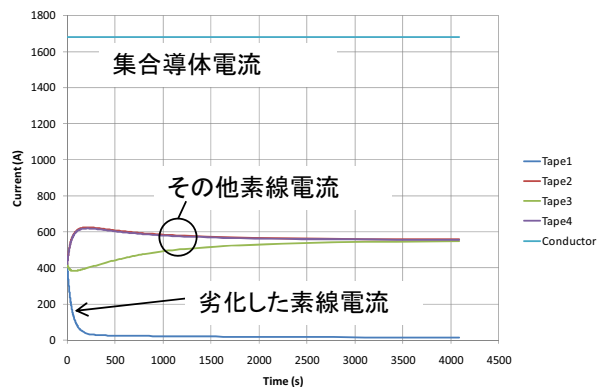


待機運転時に素線1本が劣化した場合の集合導体コイル各素線電流を解析し、他の素線へ転流が発生することを確認
→ クエンチ検出法として検討



素線テープ1
素線テープ2
素線テープ3
素線テープ4

導体電流と素線の電流配分



SMES対応線材開発

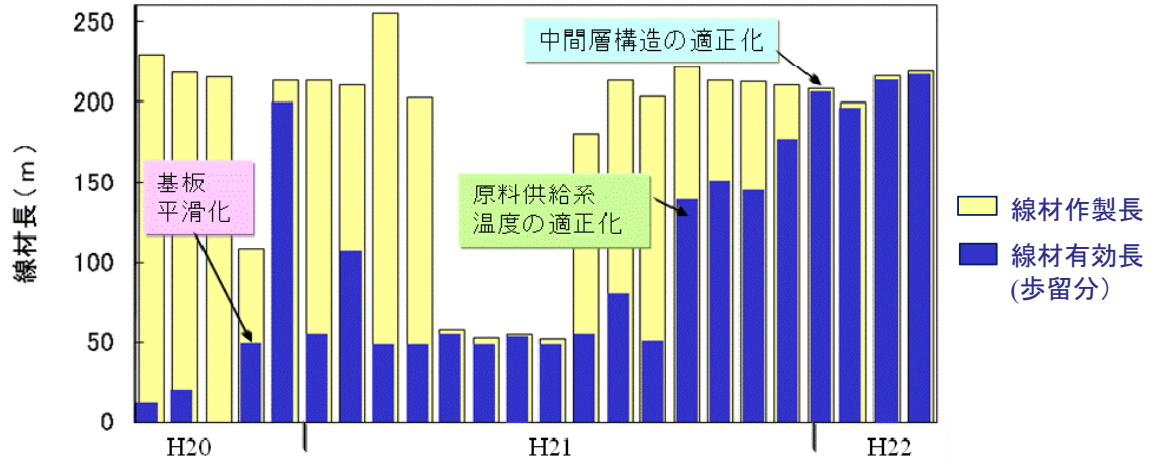
研究開発項目	研究開発の目標 (青: 中間)
2GJ級高磁界・大電流 コンパクトコイル構成技術開発	<ul style="list-style-type: none"> SMESコイル構成技術 <ul style="list-style-type: none"> -フープ応力600MPa以上 -通電容量2kA以上
高効率コイル 伝導冷却システム開発	<ul style="list-style-type: none"> コイル伝導冷却技術 <ul style="list-style-type: none"> ★20~40K領域における伝導冷却が可能 ★高伝熱コイル構造 ★電気絶縁2kV以上
高磁界コンパクトSMES システムモデル検証	<ul style="list-style-type: none"> 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 (高磁界コンパクト・高効率伝導冷却コイル) 試験計画作成 (SMESシステム適用性検証評価) SMES動作検証 (2GJ級評価用試験モデル) 特性検証 (日光試験ベースの2万回以上繰り返し充放電)
SMES対応線材開発	<ul style="list-style-type: none"> モデルコイル用線材作製 (システム検証用: 200 A - 200 m)

IBAD-MOCVD長尺線材の作製実績

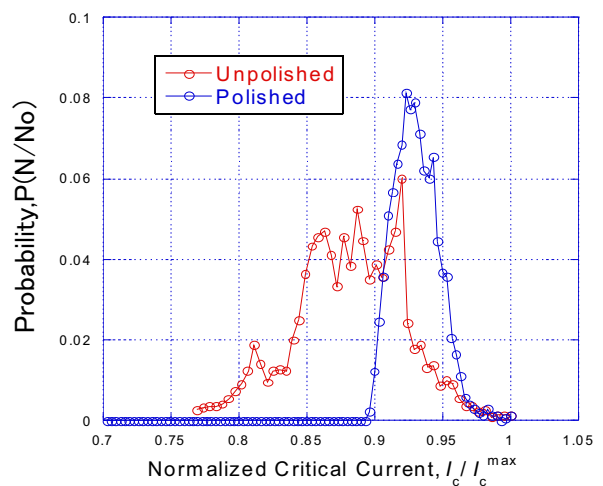
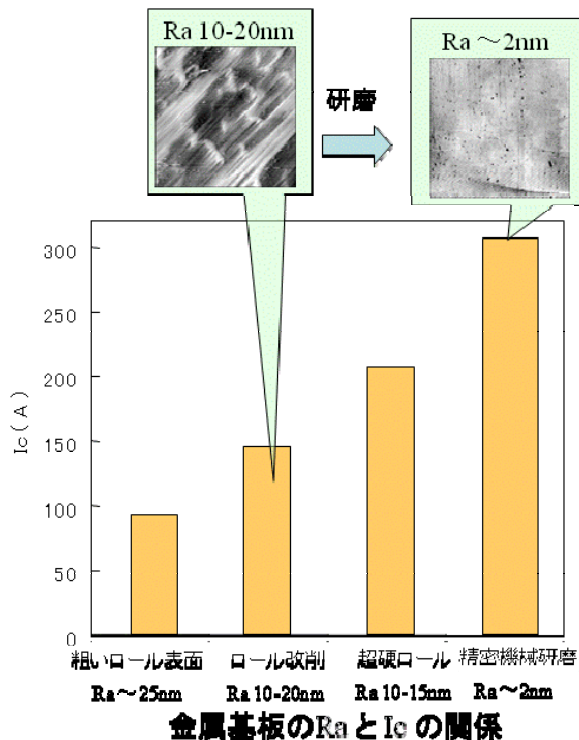
期間	作製長 (m)	100 A以上、50 m以上		200 A級、75 m以上		200 A級、150-300m	
		本数	歩留	本数	歩留	本数	歩留
H20	1,503	11	48.4	1	14.3	1	14.3
H21	4,363	33	58.0	0	0	0	0
H22(～7月)	841	6	84.1	3	59.2	2	50.0

歩留：作製長に対する所定Icと所定単長を達成した線材長の割合

Ic: 200A 級線材の作製状況



基板の平滑化

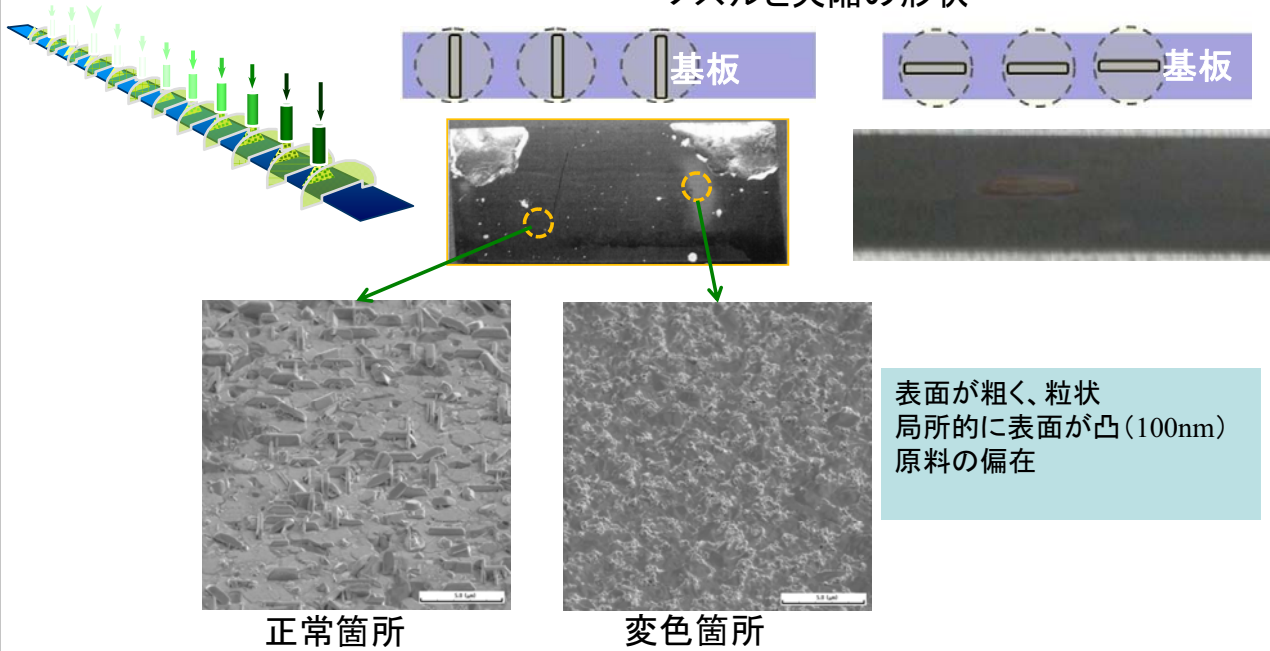


局所Icの統計分布の比較

長時間成膜の特性低下要因検討

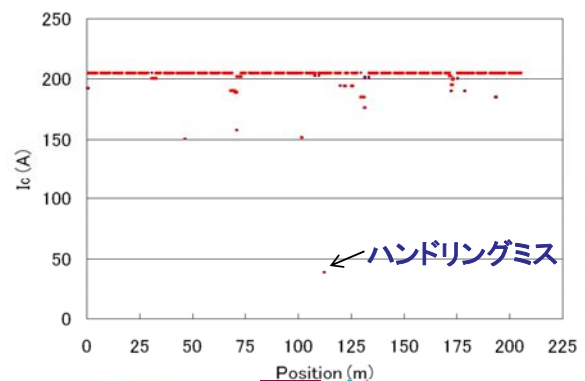
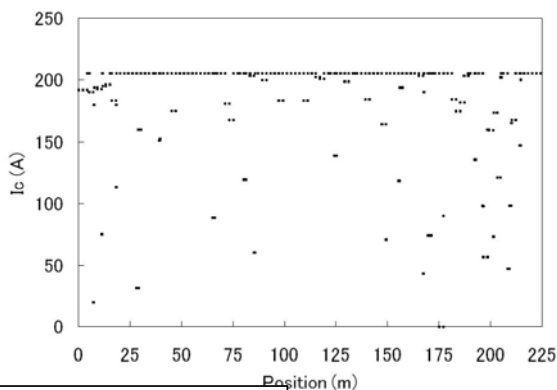
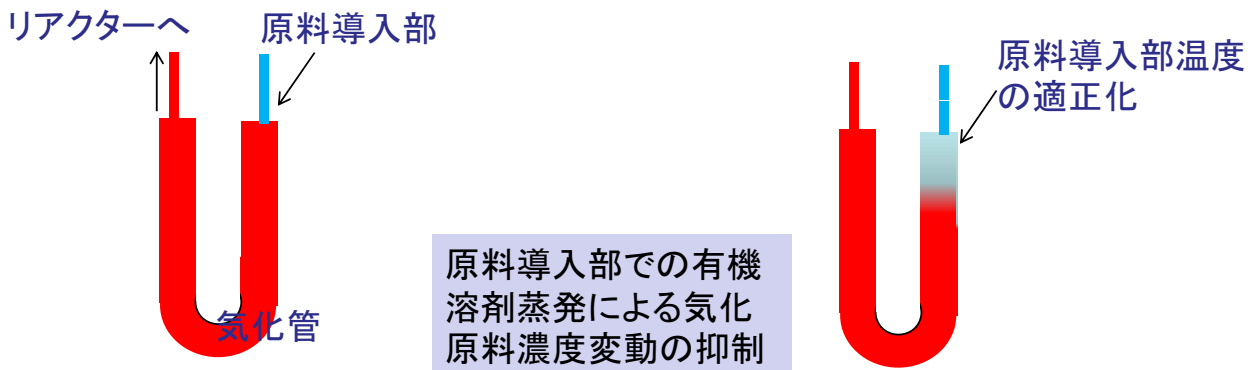
-原料ガスの不安定性-

ノズルと欠陥の形状



局所的な低 I_c 箇所 : ノズル形状に応じた変色領域の発生

原料ガス供給系の安定化

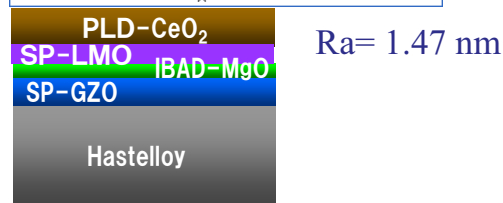
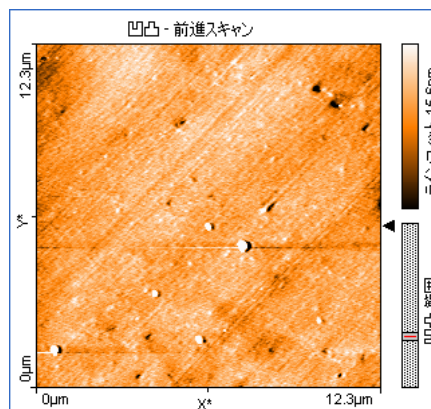
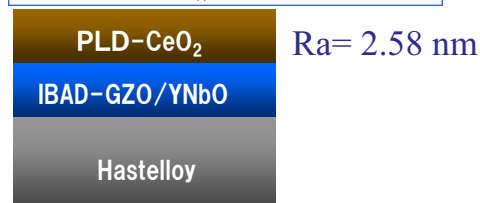
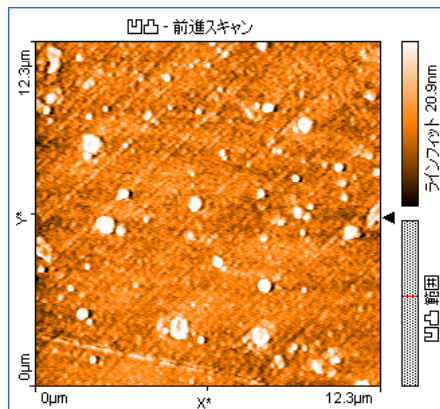


中間層の欠陥の抑制

- ・ 薄化と多層化による欠陥成長の抑制
- ・ 金属基板直上のベッド層による平滑化



中間層表面の欠陥の減少
平滑性の向上



知的財産権、成果の普及

	H20	H21	H22	計
特許出願(出願)	1※	3※	0	4件
論文	0	0	1	1件
研究発表・講演	8	36	21	65件
受賞実績	0	0	0	0件
新聞・雑誌等への掲載	0	2	0	2件
展示会への出展	1	0	0	1件

※ : 2010年度7月30日現在

(注) ※ H20年度特許「ダブルパンケーキコイル、中部電力」
H21年度特許「超電導線材及びその製造方法、古河電工・中部電力」他

超電導EXPO2008での展示
 2008/12/11～12/13
 @東京ビッグサイト



専門雑誌への投稿

国内外SMES開発状況

	日本	韓国	欧州	アメリカ
1990年	NbTi ★ 3.6 MJ			マイクロSMES アラスカSMES NbTi 2.7 MJ ★ NbTi 1.8 GJ ↓ 中止
2000年	NbTi 7 MJ ★ Bi2212 1 MJ	NbTi 3 MJ ★ Bi2223 1 MJ	フランスBi2212 ★ 0.8 MJ	DOEプロジェクト ARPA-E (画期的な クリーンテック戦略)
2010年	2 MJ Y系 ★ 2 GJ	★ Bi or Y系 2.5 MJ	★ フランス Y系	★ Y系 3.4 MJ (4.2K)

SMESシステムの開発 成果の意義

開発項目	開発成果	成果の意義
(1) 2GJ級高磁界・大電流コンパクトコイル構成技術開発	従来の金属系超電導コイルの2倍相当の600 MPaのフープ応力耐性を大口径多層巻コイルで実証 テープ状Y系線材を束ねた導体コイルによる2 kA以上の通電を実証	世界最高性能
(2) 高効率コイル伝導冷却技術開発	6kV以上の電気絶縁性能を有した20K伝導冷却Y系コイルの開発としては世界最大(外径650 mm級)	世界最高性能
(3) 高磁界コンパクトSMESシステムモデル検証	クエンチ保護が困難な高温超電導コイルに対して素線絶縁集合導体の素線間転流現象を活用する新たな検出法を考案	世界初

最終目標に対する達成見込み

研究テーマ	最終目標	達成へのアプローチ及び見込み
(1) 2GJ級高磁界・大電流コンパクトコイル構成技術開発	フープ応力600 MPa以上、2 kA以上の通電容量を持つSMESコイルによるモデル検証	φ 650mm級の4束導体コイルを作製し、3.5T級大口径マグネット中で繰り返しフープ応力試験を実施し最終目標を達成見込み。
(2) 高効率コイル伝導冷却技術開発	繰り返し充放電試験における20-40K、2kV以上の冷却システムの検証	模擬発熱体を用いてコイル発熱量の7倍(21W/m ²)の発熱量に対し冷却システムが成立することを実証中。絶縁性能においては2kVの3倍(6kV)の電圧に対し設計は完了しており、性能を確認する。今後、φ 650mm級コイルにおいて伝導冷却と電気絶縁性能を検証し、最終目標を達成する見込み。
(3) SMES対応線材安定製造技術開発	下記仕様例を満足する線材の安定製造による2MJ級モデルコイルへの線材供給	中間層の欠陥抑制、基板平滑化および原料供給系の温度適正化によって、線材の歩留りが向上し、線材作製技術の安定化を達成した。引き続き、モデルコイル用の線材作製を行い供給目標・安定製造を達成する見込み。
(4) 高磁界コンパクトSMESシステムモデル検証	2MJ級評価用試験モデルを用い、電力系統制御SMESの運転を模擬した2万回以上の繰り返し充放電検証	積層したφ 650mm級の4束導体コイルを伝導冷却型クライオスタットに組み込み、日光で系統連係試験時の波形を電源から入出力することで、繰り返し充放電によるY系SMESコイルの特性を検証する見込み。

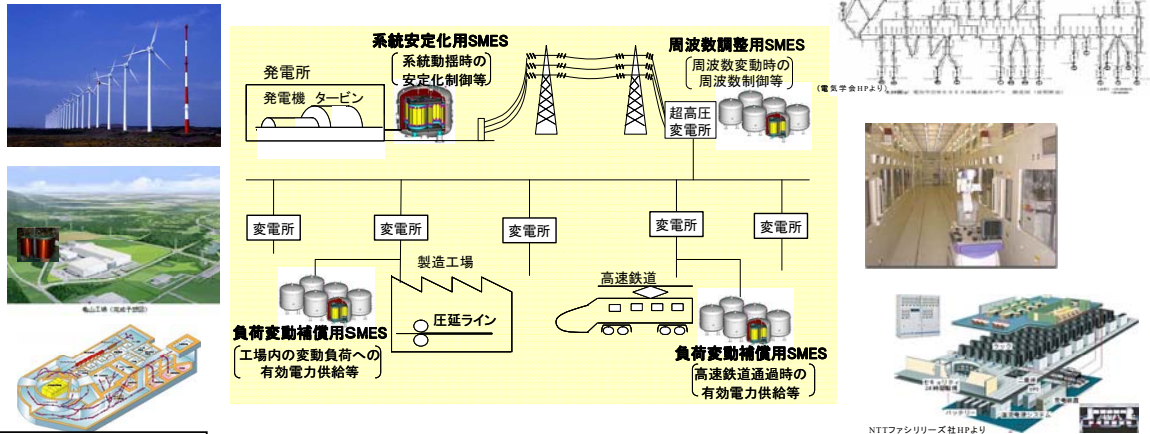
前フェーズ成果

SMESシステム適用技術

目的：SMESシステムの実用化や適用拡大の円滑化

- ・電力ネットワークの規模、形態、目的用途に応じた導入効果の評価
- ・産業応用用途に応じた最適化、コストミニマム化が可能なSMESシステムの適用性検討
- ・試験方法を含む標準化調査

(SMESシステムの適用技術標準化検討対象)



前フェーズ成果

市場ニーズ調査結果

■ SMESは電力用・産業用で各種用途が期待されている。

電力用

系統安定化

過渡安定対策(長距離電源等)
ルート断事故時等の電圧対策
SVC、STATCOM代替

負荷変動補償

変動負荷の平準化
フリッカ対策

周波数調整

火力機ガバナフリー代替

分散電源対応

風力発電・太陽光発電連系対策

産業用

(鉄鋼・非鉄・自動車・電機・化学・鉄道等)

瞬低対策

落雷等による瞬低予防
工場ライン停止予防、不良品排除

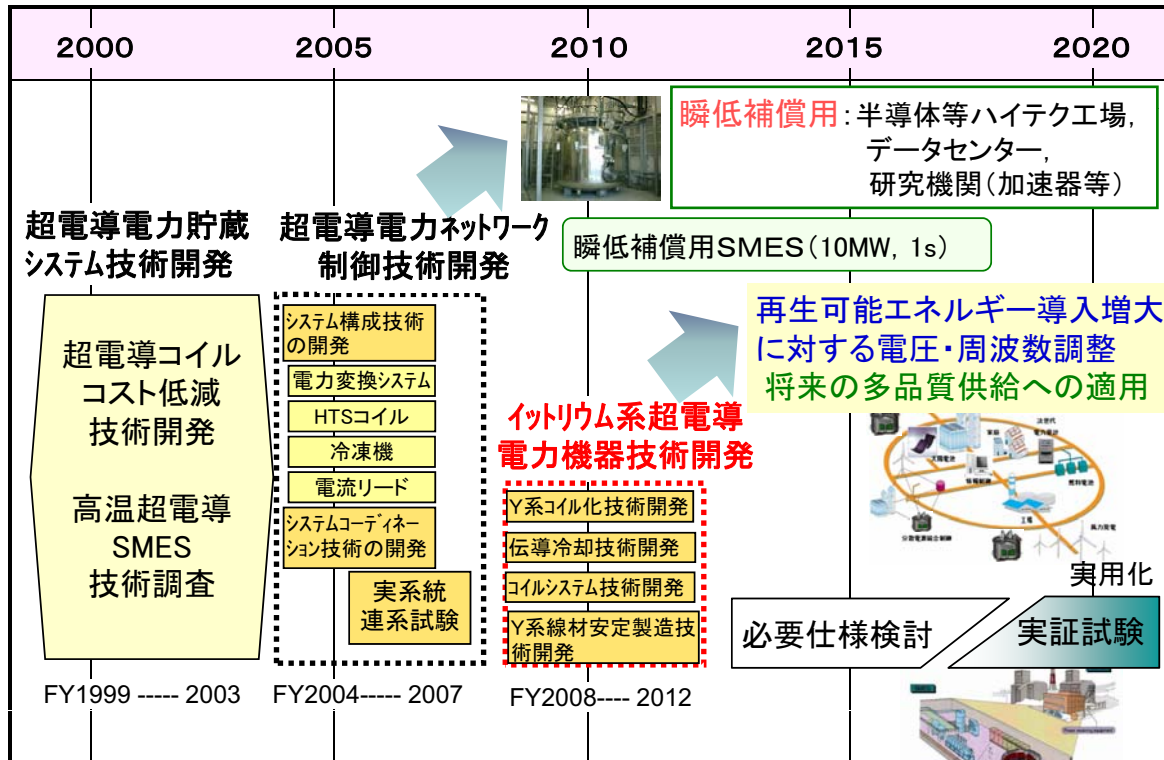
電圧変動対策

鉄鋼炉フリッカ対策
高速鉄道等変動負荷対策
SVC、SC代替

電力品質向上

高品位な電力、無停電源

電力系統制御用SMES開発ロードマップ



SMESの分散電源対応適用イメージ

周波数調整用途

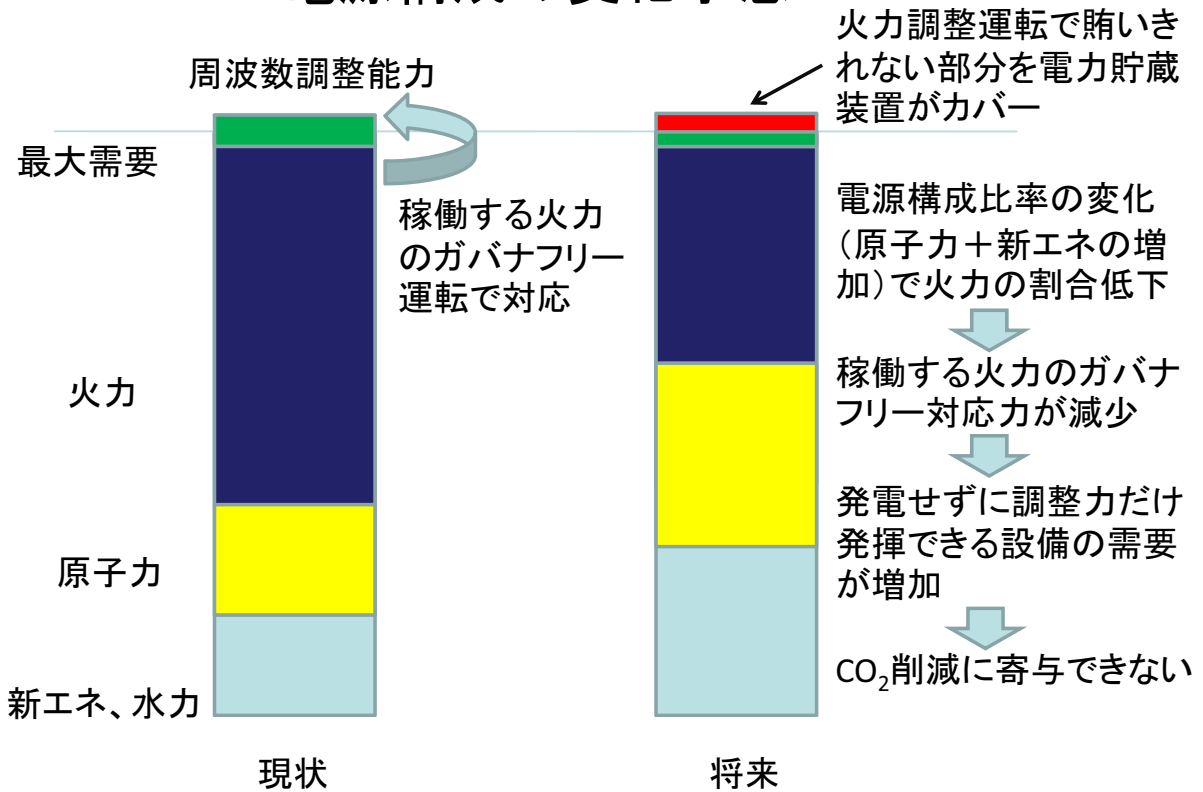
原子量発電や再生可能エネルギーの増加により、電源構成比率が変化し、従来、システムの周波数調整や需給バランス制御を分担してきた火力機の割合が相対的に低下。

太陽光自体はシステムに大きな影響を与えない可能性があり、再生可能エネルギーが増えても電力貯蔵が同時に導入される可能性は低い。

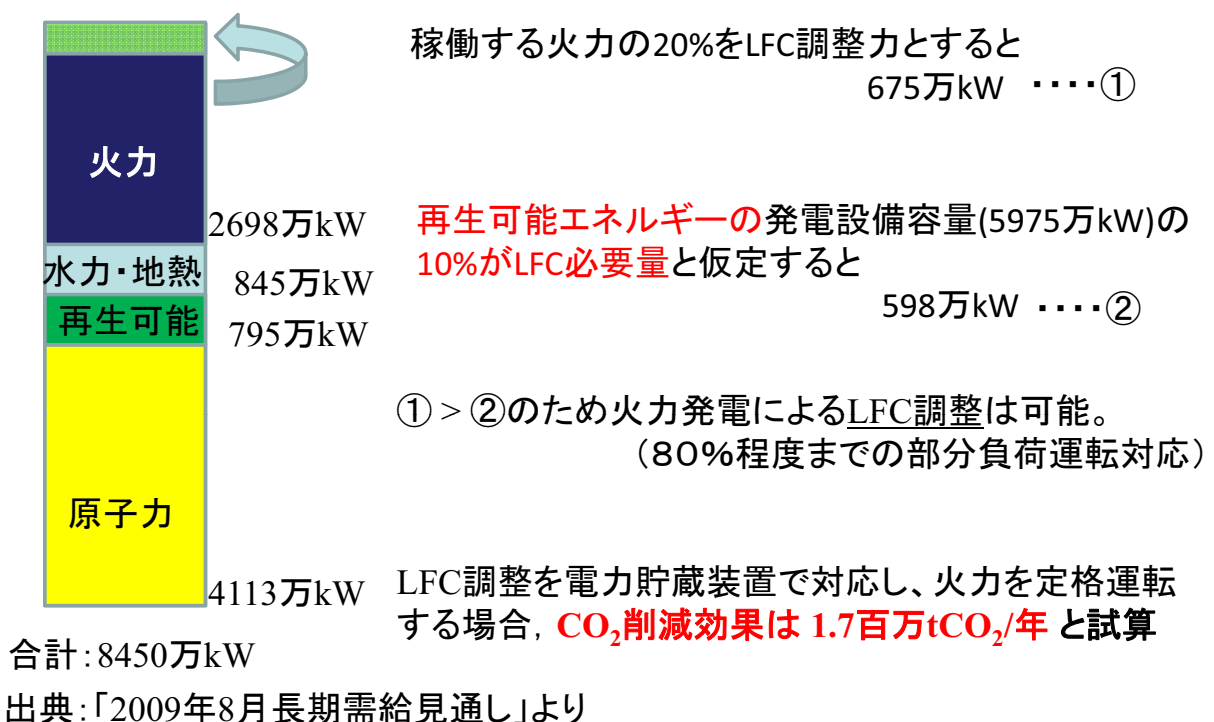
従来通り火力機で調整するとした場合、ホットスタンバイ状態の火力機が増え、CO₂削減に寄与できない。

SMES等の電力貯蔵設備や揚水発電で上記機能を代替えることにより、大幅なCO₂削減が期待される。

電源構成の変化予想



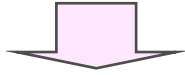
CO₂削減効果試算例



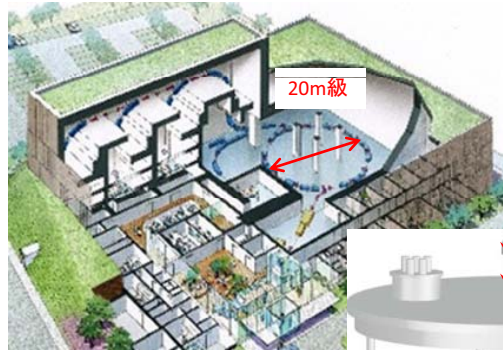
他用途への波及効果

SMES用Y系コイル

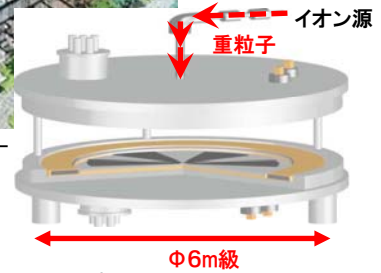
・ 高磁場技術



加速器
核融合
産業用マグネット
MRI, NMR, etc



群馬大学 重粒子線医学研究センター
ホームページより



・ 高温領域伝導冷却技術



大容量超電導風力発電機冷却

