

2. 研究開発項目毎の成果

2.1 超電導電力貯蔵システム (SMES) の研究開発

2.1.1 2 GJ 級高磁界・大電流コンパクトコイル構成技術開発

2.1.1-1 開発方針

(1) 研究開発目標

中間目標 (平成 22 年度)

- ・ 20~40 K 付近の温度領域における伝導冷却を可能とするコイル伝導冷却技術を開発する。

(2) 研究内容

2 GJ 級大容量 SMES コイル実現のためには、従来の金属系 SMES では達成できなかったレベルへの貯蔵エネルギー密度の向上が課題となり、磁場中特性に優れた Y 系超電導線材によるコイルを用いた高磁界化による貯蔵エネルギー高密度化が必要となる。この高磁界コイルの実現には、コイル通電時に発生する通電電流と最大経験磁場、コイル径の積として加わる強力な電磁力 (フープ応力) の繰返しに耐えるコイル構成を開発することが不可欠である。「超電導電力ネットワーク制御技術開発」プロジェクトにおいて IBAD/ CVD-YBCO 線材の機械強度を評価し、77 K 液体窒素中においてフープ応力方向の一軸引張応力が 1 GPa を超えても I_c 値が可逆領域であること、また、SMES 充放電繰返し動作のように引張応力を 10^6 回繰返ししても 1 GPa を超える領域まで疲労破断による劣化がなく、高磁場 SMES へ高いポテンシャルを有する線材特性であることを検証した。さらに、IBAD/ CVD-YBCO 線材を用いて、応力集中が懸念されるコイル電極部構造への対策を施した小型コイルを作製してフープ応力試験を実施し、実際に耐フープ応力 1 GPa を有することを実証した。今回、高磁界化による高エネルギー密度化コンパクトコイルを目指し、従来の金属系 SMES コイルの許容可能なフープ応力(300 MPa 程度)の 2 倍の応力 (600 MPa) を連続して繰返し加えても使用可能な高強度コイルとして、2 GJ 級大容量 SMES コイルの技術見通しを得るために必要な 20MJ 級システムの要素コイル規模である外径 700 mm 級コイルを開発する。既存仕様レベルの I_c 200 A(77 K,s.f.)-200 m 長級線材を用いて目標レベルのフープ応力の検証評価ができるよう配置した外部マグネット磁場下において、開発コイルを励磁し、フープ応力を繰返し作用させ、コイルが 600 MPa 以上の耐フープ応力特性を有することを実証する。なお、要素コイル規模のコイル試験評価に先立ち、外径 200 mm 級の小コイルを試作評価することでコイル化技術の確立を図る。

また、SMES システムとして必要な出力容量を実現するため、大電流容量コイルの開発を行う。大電流容量化のためには素線の並列化が必要であるが、「超電導電力ネットワーク制御技術開発」プロジェクトにおいて、Y系超電導線材特有の積層構造による電極部の不均一な構造・接合により電流の偏流が生じ、従来の集合導体化手法では困難であったため、均流化を実現する電極構成により集合導体化コイルを開発した。高磁界コイルは電極部での高応力に耐える必要があることから、今回、600 MPa 級フープ応力コイルの電極部において高応力を許容できる導体コイル構造を開発し、2 kA 以上通電可能な大電流容量コイルの構成技術開発を行う。加えて、線材積層構造でのコイルの場合、製作誤差等による電流偏流のため損失の増大が懸念されることから、電極部だけでなくコイル全体の構造最適化を図る。

2.1.1-2 集合導体・コイルの応力歪特性検討（中部電力、京都大学）

(1) 研究開発目的

大容量 SMES コイルの開発には、大電流導体の開発が不可欠である。Y系超電導線材は従来の超電導線材構造と異なり、基板に薄膜を積層した厚さ方向に非対称なテープ状構造であるため、Y系超電導線材の大電流容量導体化について、集合導体コイル構造の最適化の観点から応力歪特性について評価した。

(2) Y系集合導体の積層構造間の応力歪評価

Y系超電導線材は薄膜積層構造をしているため、厚さ方向に非対称である。このため、集合導体の構成方法において、パターン別にコイル巻線時に負荷される応力歪の比較評価を実施した⁽¹⁾。ここで、安定化層を構成する Cu 層に関しては、弾性変形のみの場合と塑性変形を含む場合の両方について検討した。計算に用いた積層構造モデルは図 2.1.1-2-1 の 3 パターンである。ただし、Cu 層と HastelloyTM 基板のヤング率 E_{Cu} 、 E_H 、厚さ t_{Cu} 、 t_H はそれぞれ、 $E_{Cu}=120$ GPa、 $E_H=200$ GPa、 $t_{Cu}=t_H=0.1$ mm とした。

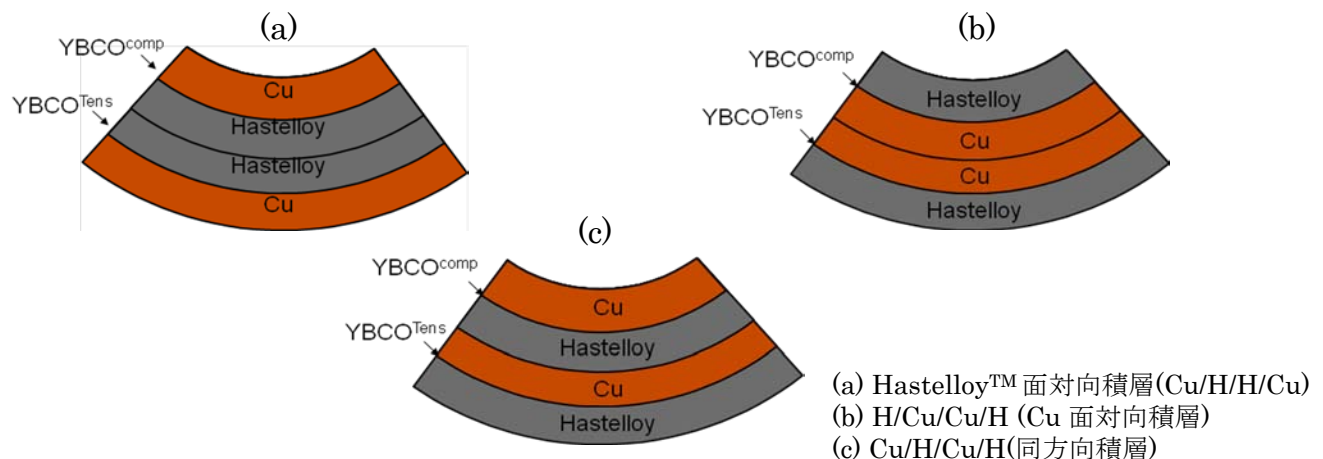


図 2.1.1-2-1 Y系線材 2本集合化時の積層パターン

導体中心から中立軸までの距離 (mm)をパターン別に表 2.1.1-2-1 に示す。また、Y系超電導層に発生する引張曲げひずみを図 2.1.1-2-2 に示す。大容量 SMES コイルサイズにおいては、いずれの場合も小さく、問題ないレベルと考えられる。

表 2.1.1-2-1 導体中心から中立軸までの距離 (mm)

	Cu/H/H/Cu	H/Cu/Cu/H	Cu/H/Cu/H
Cu:Elastic	0	0	0.0125
Cu:Plastic	-0.0346	-0.0117	0.0038

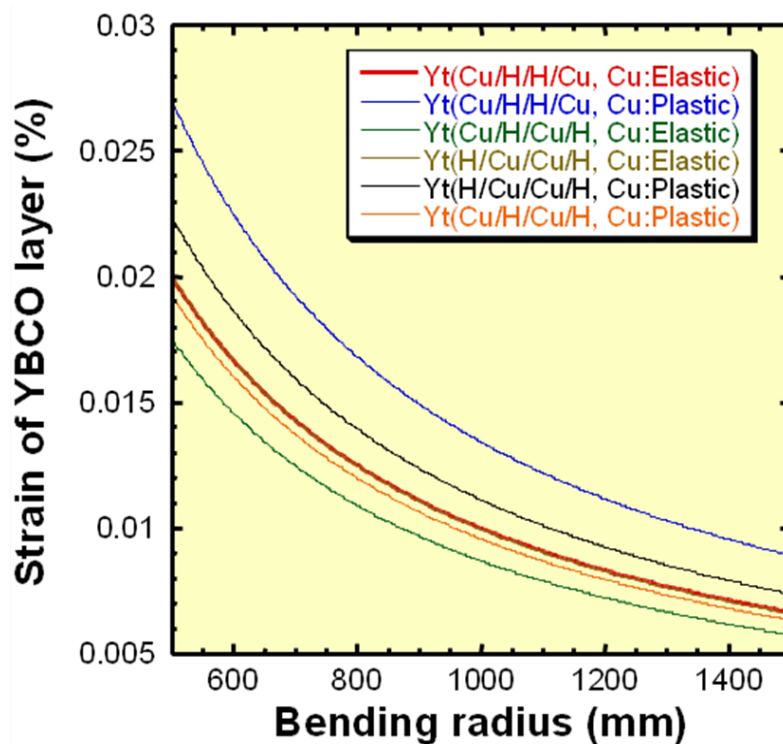


図 2.1.1-2-2 引張曲げひずみと曲げ半径の関係

次に、導体の曲げ、せん断応力の計算を実施した。3点曲げにより、2点支持の間は 100 mm とし、曲げ半径 1 m で評価した。パターン別のせん断応力分布および曲げ応力分布を図 2.1.1-2-3～図 2.1.1-2-5 に示す。パターン別に応力の違いがあるが、いずれの場合も絶対値は小さい。

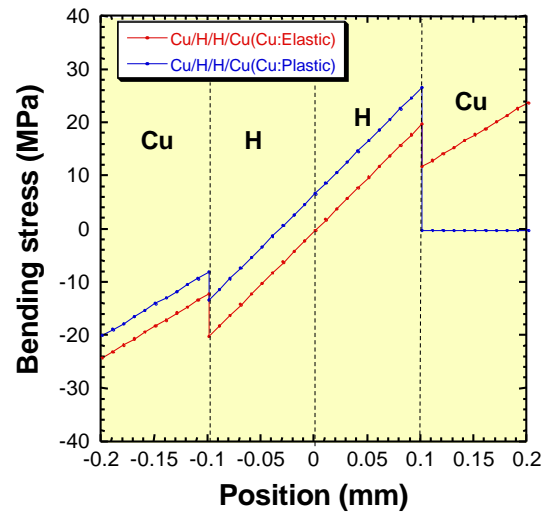
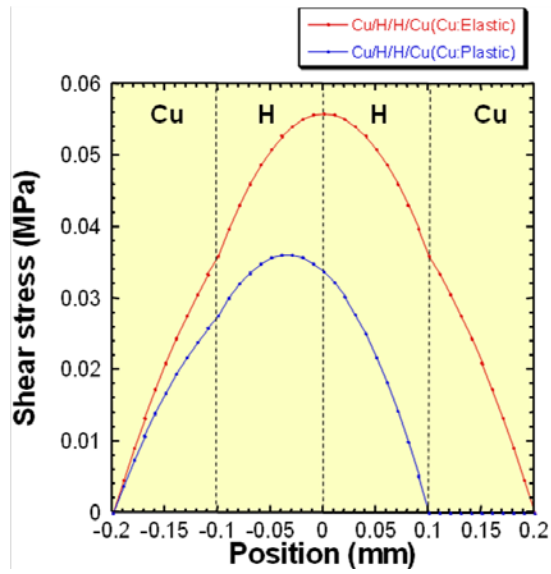


図 2.1.1-2-3 Hastelloy™ 面対向積層(Cu/H/H/Cu)時のせん断応力および曲げ応力

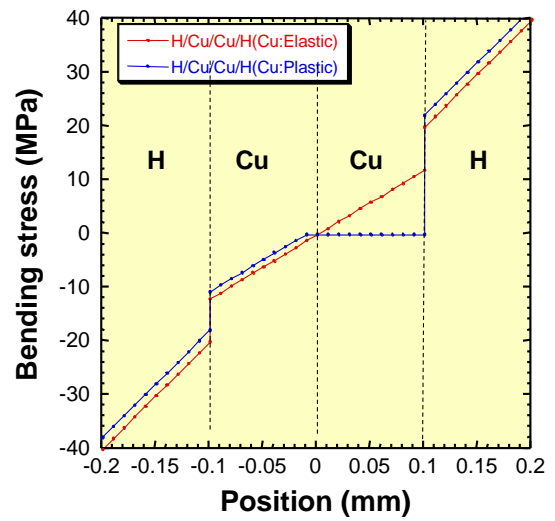
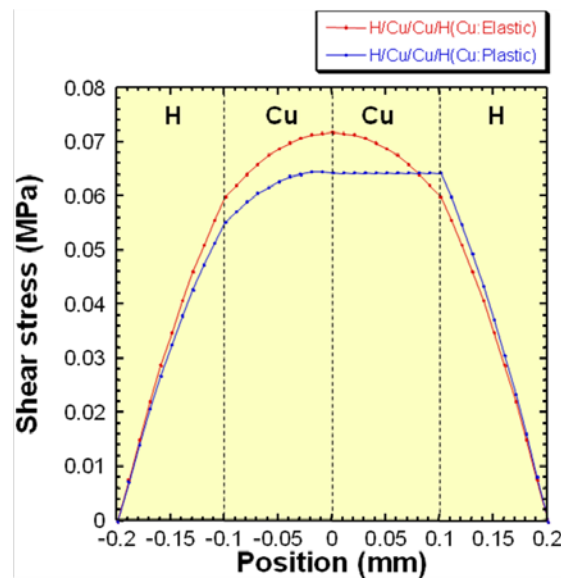


図 2.1.1-2-4 H/Cu/Cu/H (Cu 面対向積層)時のせん断応力および曲げ応力

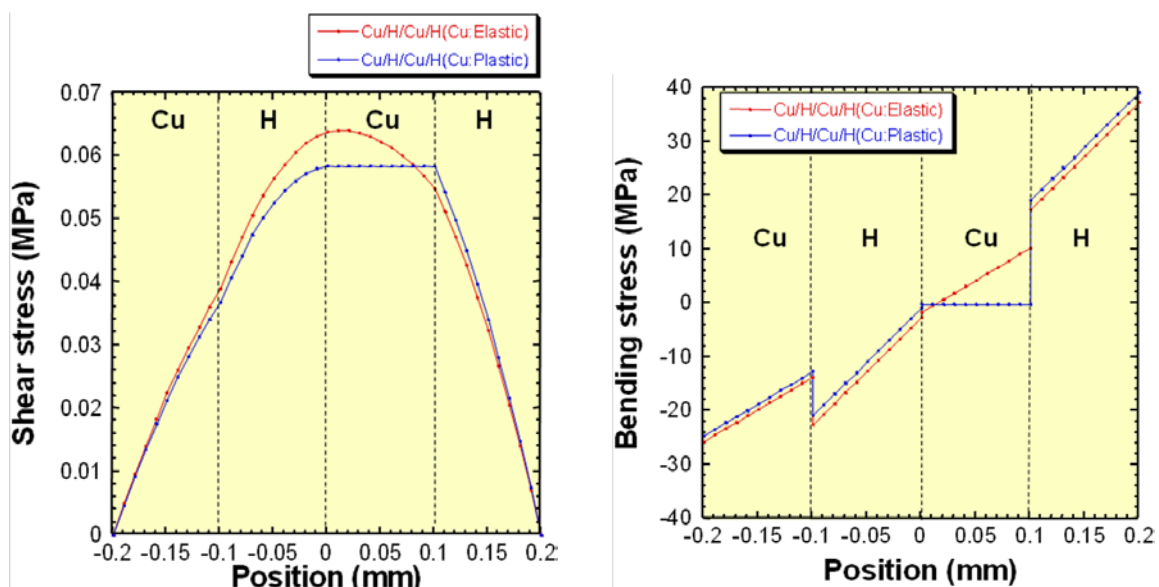


図 2.1.1-2-5 Cu/H/Cu/H(同方向積層)時のせん断応力および曲げ応力

(3) 結果

集合導体の構成方法において、パターン別にコイル巻線時に負荷される応力歪の比較評価を実施した。その結果、大容量 SMES コイル規模では、いずれの積層構造についても Y 系超電導層に発生する曲げひずみは 0.015 %以下と小さく、Cu/Hastelloy™ 界面に働くせん断応力は、導体厚さが薄いため非常に小さいことが確認された。よって、SMES コイル設計においては、導体の曲げ応力、せん断応力以外の応力（フープ応力、樹脂/線材間の熱残留応力等）への配慮がより重要と考えられる。

引用論文リスト

- (1) 「材料力学の基礎」 培風館 p.68

2.1.1-3 集合導体・コイルの構造最適化検討（中部電力、早稲田大学）

(1) 研究開発目的

大容量 SMES コイルの開発には、大電流導体の開発が不可欠である。このため、Y 系超電導線材を用いた大電流容量集合導体コイルの構造最適化のため、通電特性・熱特性について評価した。

(2) 集合導体・コイルの通電特性・熱特性評価

SMES 用コイルの素線として想定する Y 系超電導線材は、テープ幅は 10 mm、超電導層の厚さ 1 μm 、77 K における自己磁界中の臨界電流(I_c)は 280 A/cm-w である。この線材を用いて設計した SMES 用コイルの諸元を表 2.1.1-3-1 に示す。内

半径 1.0 m、外半径 1.4 m、厚さ 0.6 m の要素コイル 180 個が、半径 3.7 m でトロイダル状に配置される。1 要素コイルは 4 つのパンケーキコイルから成り、1 ターンの幅は 1.1 mm である (表 2.1.1-3-2)。この SMES 用コイルに 1 素線当たり 540 A の電流を通電すると、動作温度 20 K で 2.4 GJ の磁気エネルギーを蓄積できる。

表 2.1.1-3-1 2 GJ 級トロイダル SMES の諸元

貯蔵エネルギー	2.4 GJ
運転温度	20 K
要素コイル数	180
トロイダル中心半径	3.7 m
最大運転電流	2160 A
最高磁場 (垂直成分)	11 T (0.67 T)

表 2.1.1-3-2 2 GJ 級トロイダル SMES を構成するパンケーキコイルの諸元

内径	ϕ 2.0 m
外径	ϕ 2.8 m
高さ	0.06 m
線材巾	15 mm
線材厚さ (絶縁材・補強材込)	1.1 mm
導体素線数	4
巻数	91

Y 系超電導線材はテープ形状をしているため、導体は積層導体となる。2 kA の導体の場合、想定される素線の通電電流が 540 A であるから、基本的に 4 枚を積層することになる。そこで、図 2.1.1-3-1 に示すような Y 系超電導線材を 4 枚束ねた Y 系集合導体について検討した。

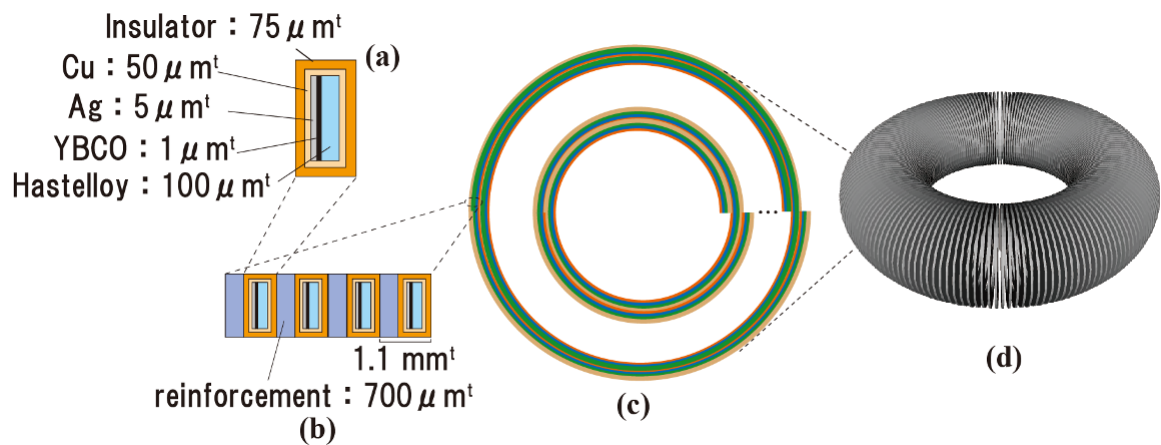
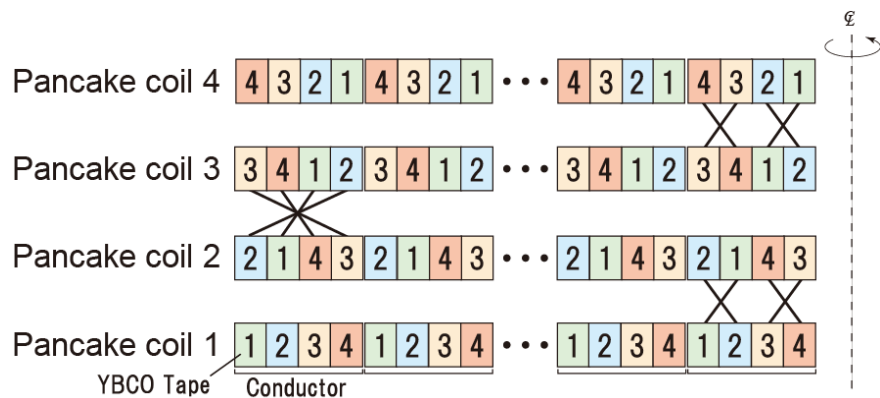


図 2.1.1-3-1 (a) Y 系超電導線材、(b)集合導体、(c)パンケーキコイル、
(d)トロイダルコイルの概略図

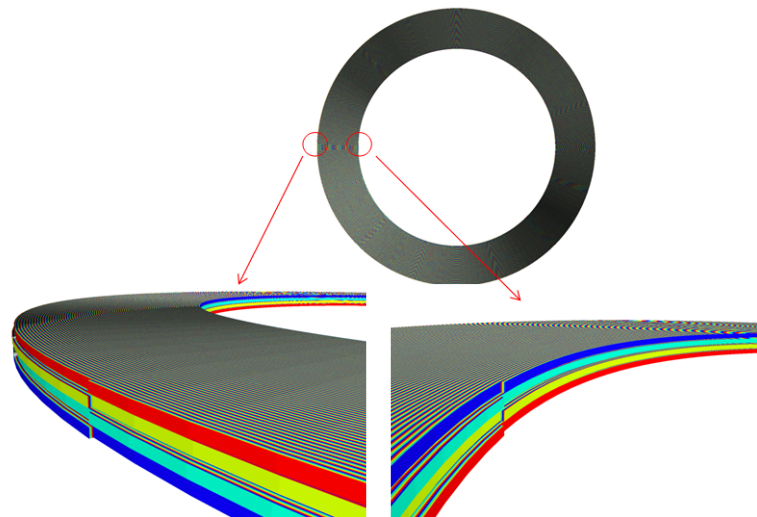
テープを積層して導体化する場合、偏流と交流損失が問題となる。偏流が発生すれば、導体の電流容量の低下、交流損失の増大が問題となるため、均流化が不可欠となる。一方、交流損失はテープ面に垂直な磁界変動が損失を支配するが、これは多モジュールコイル／トロイダル方式の採用により、垂直磁界の低減を図る方向で検討している。一方、積層導体の素線間の電磁結合が大きいと平行磁界に対する結合損失が大きくなるため、素線間の電磁結合の抑制が課題となる。そこで、検討している集合導体の素線は、交流損失を低減するため、素線間電気絶縁を施すこととした。素線絶縁された素線を集合導体にした場合、素線間の電流転流が端部で起きる。導体の均流化のためには転位が必須であるが、Y 系超電導線材はテープ形状をしているため、ツイストによる転位ができない。従って、パンケーキ間の接続部で転位を行う必要がある。

本プロジェクトで想定している導体は図 2.1.1-3-1 (b)のように超電導層厚さ $1 \mu\text{m}$ × 幅 1 cm の線材が 1.1 mm 間隔で 4 枚巻かれる。トロイダルコイルを構成するユニットコイルは 4 個のパンケーキコイルから成る。したがって、接続転位はユニットコイル内では 3 回まで可能である。そこで、図 2.1.1-3-2 に示すような転位を考える。コイルの諸元は表 2.1.1-3-1 で示した通りである。このときインダクタンスは表 2.1.1-3-3 で与えられる。結合係数は表 2.1.1-3-4 のように 0.999 程度になり、素線間結合は非常に強い。

ユニットコイルのインダクタンスは図 2.1.1-3-3 に示す。ユニットコイルの各線材に流れる電流を計算すると、電流の分布は図 2.1.1-3-4 のようになり、均流していることが確認できた。



(a) 接続部の転位



(b) インダクタンス計算のモデル

図 2.1.1-3-2 4 枚積層導体、4 パンケーキコイルの転位

表 2.1.1-3-3 コイルに巻かれた集合導体内の素線のインダクタンス

	Tape 1	Tape 2	Tape 3	Tape 4
Tape 1	0.51215 H	0.51207 H	0.51200 H	0.51207 H
Tape 2	0.51207 H	0.51215 H	0.51207 H	0.51200 H
Tape 3	0.51200 H	0.51207 H	0.51215 H	0.51207 H
Tape 4	0.51207 H	0.51200 H	0.51207 H	0.51215 H

表 2.1.1-3-4 コイルに巻かれた集合導体内の素線の結合係数

	Tape 1	Tape 2	Tape 3	Tape 4
Tape 1	--	0.99983827	0.99970913	0.99982753
Tape 2	0.99983827	--	0.99983084	0.99970913
Tape 3	0.99970913	0.99983084	--	0.99983827
Tape 4	0.99982753	0.99970913	0.99983827	--

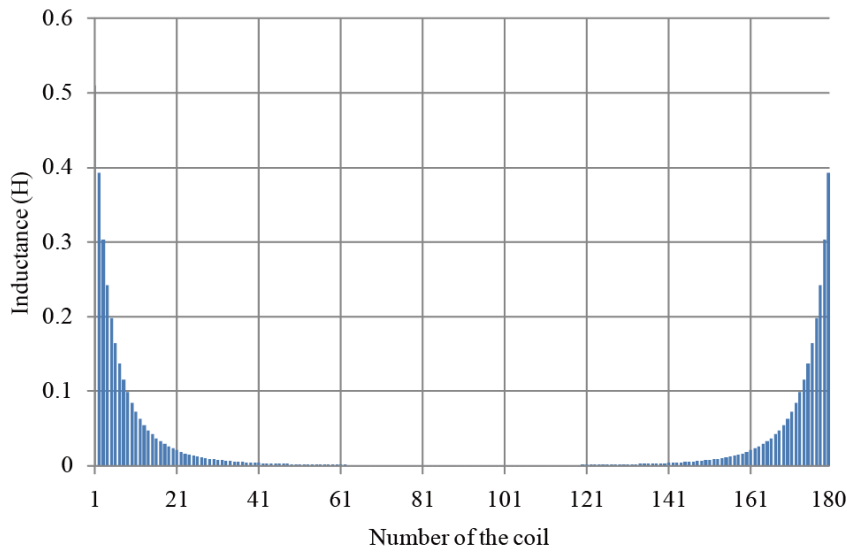


図 2.1.1-3-3 ユニットコイルのインダクタンス

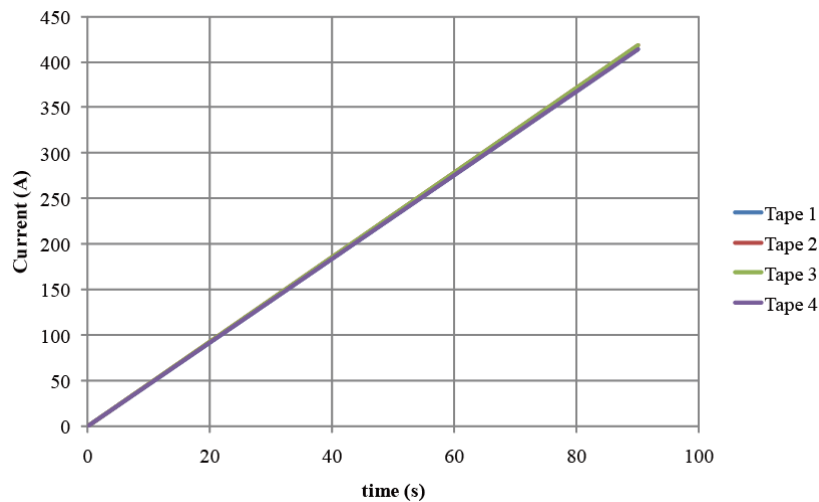


図 2.1.1-3-4 4枚積層導体の素線の電流分布

コイルは集合導体で巻かれるが、電流が各素線に均等に流れていると仮定すれば、素線 1 本について常電導伝播解析をすればよい。そこで、安定化層の厚さが異なる Y 系超電導線材に局所的に常電導部が発生した場合の線材内の温度分布、発生電圧について調べた。

解析において、Y 系超電導線材の抵抗発生は I - V 特性 (J_c 、 n 値) の分布に依存するため、有限要素法で解くことにした。Y 系超電導線材は、幅 1 cm、ハステロイ厚さ 100 μm 、Cu 層厚さ 25~200 μm で、 $I_c=600 \text{ A/cm-w}$ (@1 $\mu\text{V/cm}$ 、20 K)、 n 値は 30 のものを想定した。

I_c の温度依存性は、以下のように仮定した。

$$E = E_c \left(\frac{I}{I_c} \right)^n \quad (\text{式 2.1.1-3-1})$$

$$I_c = I_{c0} \frac{T_c - T}{T_c - T_{op}} \quad (\text{式 } 2.1.1-3-2)$$

ここで、 E_c は I_c を定義する電界、 I_{c0} は運転温度 T_{op} における臨界電流である。

通電電流は $I_c=600 \text{ A}$ (@ $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ 、 20 K) に対して負荷率 0.5、0.6、0.7、0.8、0.9 に相当する値を流し続けた。

図 2.1.1-3-5 は、長手方向に 1 cm の劣化 ($I_c = 0 \text{ A}$) が発生した場合、コイル両端電圧が 0.1 V になるまでにかかる時間とそのときの温度を Cu 層の厚さを横軸に整理したものである。これらの結果から、この結果から、 0.1 V 発生時のホットスポットの温度は負荷率に増加に伴って、減少する傾向がある。また、安定化層の厚さが増えると、ホットスポットの温度は減少する。 0.1 V 発生時のホットスポットの温度は最高で 140 K 程度である。

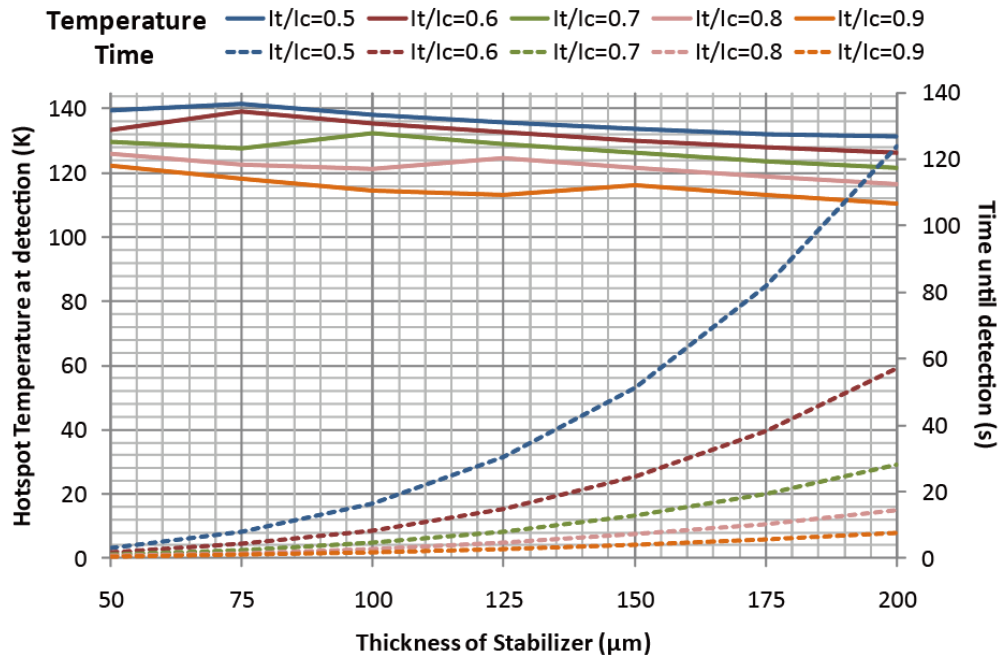


図 2.1.1-3-5 1 cm の劣化が発生した時の線材両端で 0.1 V 発生するのに要する時間と劣化部の温度

(3) 結果

テープを積層して導体化する場合、素線間の電磁結合が大きいと平行磁界に対する損失が大きくなるため、素線間の電磁結合の抑制が課題となる。そこで、交流損失を低減するため、集合導体の素線は素線間絶縁を施すことと決定した。Y 系超電導線材はテープ形状をしているため、ツイストによる転位ができない。このため、パンケーキ間の接続部で転位を行うこととした。その時のユニットコイルの各線材に流れる電流を計算した結果、電流の分布は均流していることが確認された。また、

電流が各素線に均流に流れている場合において、素線絶縁を施した集合導体コイルの常電導発生後の温度変化について評価した。その結果、素線絶縁を施した集合導体内で、ある素線で常電導領域が発生しても、転流は速やかに発生することが明らかとなった。

2.1.1-4 均流化に関する検討（中部電力、東北大学）

(1) 研究開発目的

超電導コイルに用いる高温超電導体（HTS）は、一般的に Bi 系、あるいは Y 系のテープ線材である。1本の HTS テープ線材の電流容量は約 100 A 以下であるので、それ以上の大電流に対して、多数のテープ線材を用いる必要がある。そこで、超電導コイルの大容量化を図る構成として、多数の HTS テープ線材を一組の導体とし、それを並列に積層して巻線した並列多層超電導コイルがある。例として並列 4 線材多層ダブルパンケーキコイルは、外径側に計 8 個の電極を形成する。これにより単線式のものと比較して線材の枚数に応じて容量が大きくなり、要素コイルあたりの使用線材単長が短くなる。しかしこのように多重テープ導体を単純に多層に巻線する構成のコイルでは、電流が最も内側のテープ線材に集中する偏流現象が発生する。単純に多重線材を多層に巻き合わせた構成の並列多層超電導コイルでは、各線材におけるリアクタンスが不均一となるため電流が内側の線材に多く流れてしまう。この現象を偏流現象と呼び、SMES 用超電導コイルの通電能力低下などの特性劣化現象が多く見つかっている。偏流を防止する方法の一つとして、矩形断面を持った並列線材に対し適切な箇所転位を施すことにより各線材におけるリアクタンスを均一にする方法がある⁽¹⁾⁽²⁾。ここで、ダブルパンケーキコイルでは最内層において軸方向に一度の転位を施すが、要素コイル当たりでは転位は一度しかできない。よって並列 2 線材多重超電導コイルでは一度の転位で偏流が防止できるが、並列 3 線材以上では一度の転位ではリアクタンスが対称とならない線材が存在してしまう。この制約条件により、任意の層数および線材本数に対する超電導ダブルパンケーキコイルを構成することができない。

本研究では、SMES を構成する要素コイルの導体構成パラメータを直接扱うことのできる電流分布の評価方法を確立することが目的である。具体的には、コイルの最内層で軸方向転位を施す並列多層超電導ダブルパンケーキコイルを対象として、任意の層数、任意の線材本数において偏流のない様な電流分布を得る方法を新しく提案し、並列多層超電導ダブルパンケーキコイルの電流分布と線材の構成パラメータとの関係を明らかにする。

(2) 並列多層超電導コイルの構造選択

Y 系超電導テープ線材の 1 本の電流容量は数 100 A 程度であるので、それ以上の大電流を目指すには多数のテープ線材を用いる必要がある。HTS テープ線材を

② 2パンケーキによる方法：

この方法は、各テープ線材の鎖交する磁束が等しくなるようにするために、図 2.1.1-4-2 に示すように、テープ間に追加の絶縁物、あるいは、補強材を追加する方法である。この方法では、2つのパンケーキの内側の導体渡り部の1箇所の転位で均流化できる。4枚のテープ線材で構成する導体の場合には、②と③の間、および③と④の間に追加厚を挿入する。

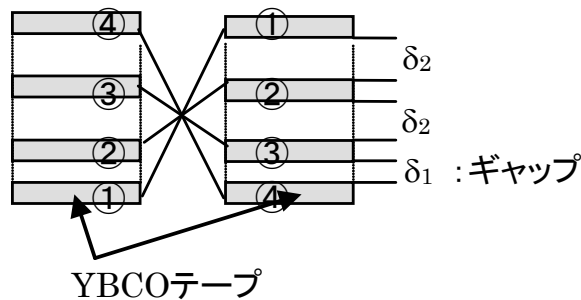


図2.1.1-4-2 ダブルパンケーキ内の1回の転位のテープ導体構成図

(4) 超電導導体と試験コイル

本パンケーキに用いる Y 系超電導テープ線材と導体の諸元を表 2.1.1-4-1 に、また、その構成図を図 2.1.1-4-3 に示す。追加厚が必要な場合には、図に示すように、絶縁物を挿入する。

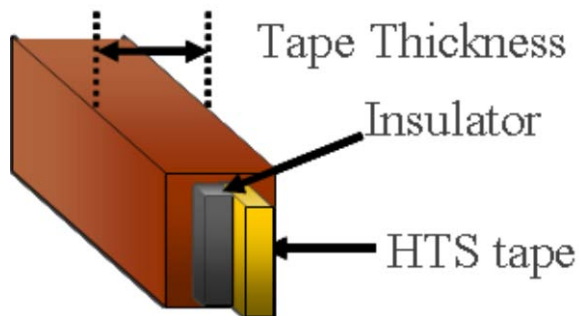
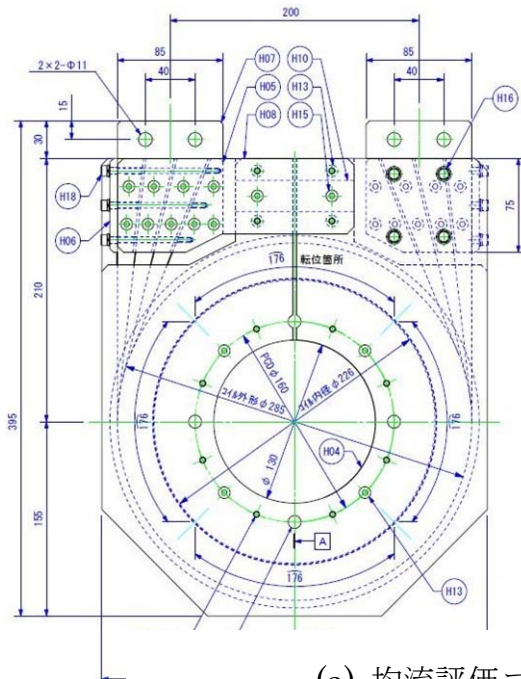


図2.1.1-4-3 テープ線材の構成図

表 2.1.1-4-1 HTS テープ線と導体の諸元

HTS テープ構成	
(1) IBAD/CVD-YBCO 寸法	10 mm w x 0.1 mm t
(2) 銅めっき厚さ	0.05 mm
(3) カプトンテープ	0.025 mm x 2 層ラップ巻
(4) テープの寸法	10.2 mm w x 0.3 mm t
導体構成	4 枚並列
追加厚のないときの導体寸法	10.2 mm w x 1.2 mm t

今回用いた試験コイルの諸元と構成図を図 2.1.1-4-4 に示す。



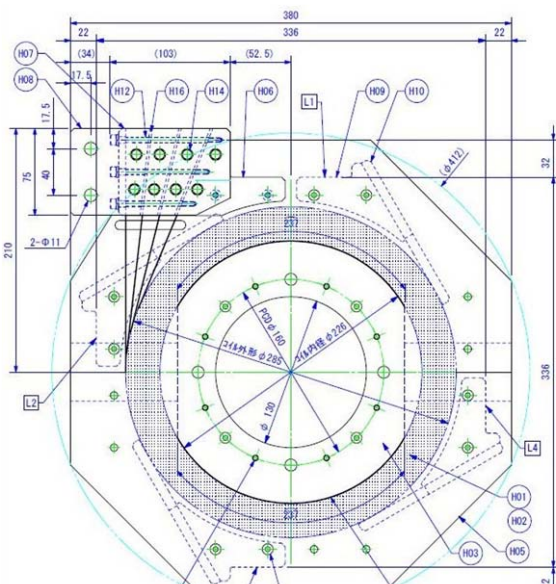
(a) 均流評価コイル (2 パンケーキ)

均流評価コイル(単独タイプ)諸元

線材	CuメッキCVD-YBCO線材
断面形状	10.1 mm×0.21 mm(絶縁前) 10.2 mm×0.31 mm(絶縁後)
導体	絶縁素線4枚束導体
断面形状	No. 4, No. 3 素線に0.075mm厚
コイル形状	ダブルパンケーキ型
コイル内径	226 mm
コイル外径	283 mm
コイル高さ	24 mm
巻数	20×2 ターン

均流評価コイル(2積層タイプ)諸元

線材	CuメッキCVD-YBCO線材
断面形状	10.1 mm×0.21 mm(絶縁前) 10.2 mm×0.31 mm(絶縁後)
導体	絶縁素線4枚束導体
断面形状	10.2 mm×1.24 mm
コイル形状	ダブルパンケーキ型2積層
コイル内径	226 mm
コイル外径	280 mm
コイル高さ	24 mm
巻数	20×2 ターン



(b) 均流評価コイル (4 パンケーキ)

図 2.1.1-4-4 試験コイル

(5) 試験装置と測定方法

装置は図 2.1.1-4-5 に示すように、試験コイルを液体窒素中で浸漬冷却し、可変周波数電源で電流をコイルへ供給し、各テープ線に鎖交する電流を Rogowski コイルで測定する。Rogowski コイルは必ずしも均一に巻線されていないことや、設置場所の関係でテープ線を中心とした円形に取り囲むことができないために、全体を通電したのちに、各テープ線に単独に通電して Rogowski コイルの出力の校正を行った。Rogowski コイルの校正のために、電極は脱着可能な接続構成として、各テープ線に単独通電ができる構成である。したがって、ハンダ接続のような低電気抵抗とならないため、電極表面にインジウム薄膜を挟んで接触抵抗の低減を行い、直流接触抵抗値として $20 \mu\Omega$ 以下で実験を行った。解析によると、この程度以下の接触抵抗では抵抗による位相のずれが無視できる。

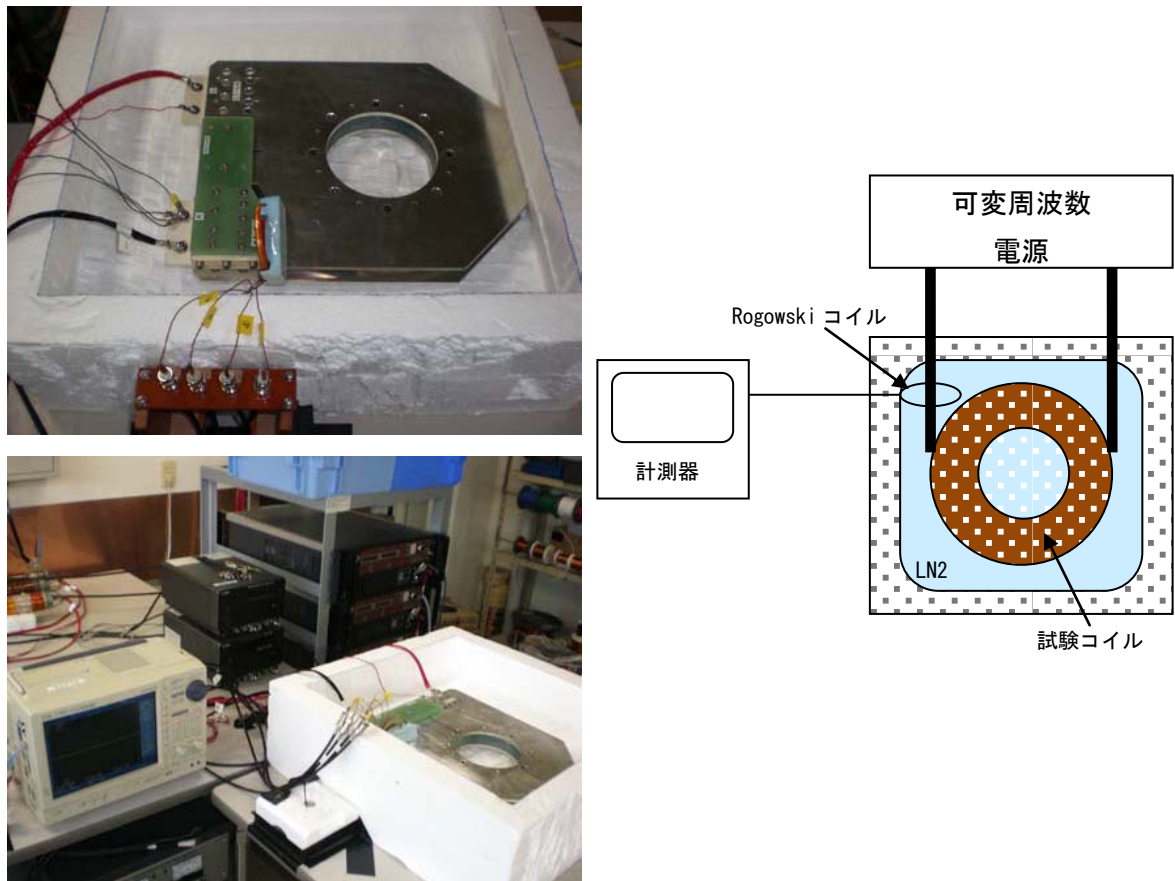


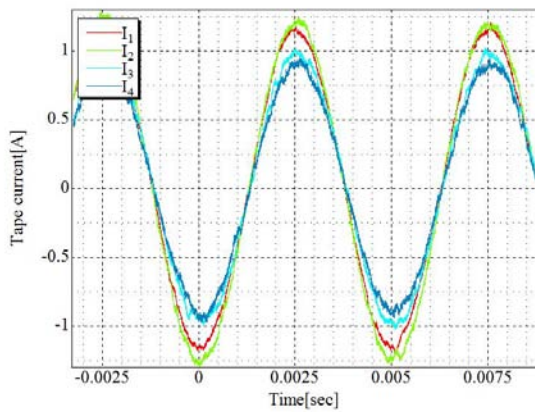
図 2.1.1-4-5 実験装置の写真と配置図

(6) 試験結果と考察

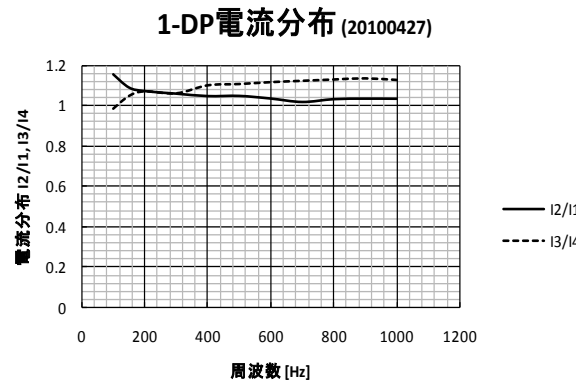
① 2パンケーキ試験コイル：

図 2.1.1-4-6(a)に 2パンケーキ試験コイルの Rogowski コイル出力を校正して各テープ線に流れる電流波形結果を、また、図(b)には、同試験コイルの I_2/I_1 、および、 I_3/I_4 の電流分布の周波数依存性を示す。

図の 2パンケーキコイルの波形と周波数依存性から、各テープ線の電流分布は I_2/I_1 、および、 I_3/I_4 の比の不均一度が約 5%である。図 2.1.1-4-7には、20ターンの試験コイルのテープ追加厚さと均一度のターン数依存性の解析結果を示す。図から、追加テープ厚さが $75\ \mu\text{m}$ では、約 5%の分布の不均一度があることが分かり、ほぼ試験結果と一致する。



(a) 2パンケーキコイルの各テープ電流波形 (200 Hz)



(b) 2パンケーキコイルの I_2/I_1 と I_3/I_4 の周波数依存性

図 2.1.1-4-6. 1-DP 試験コイルの各テープの電流波形

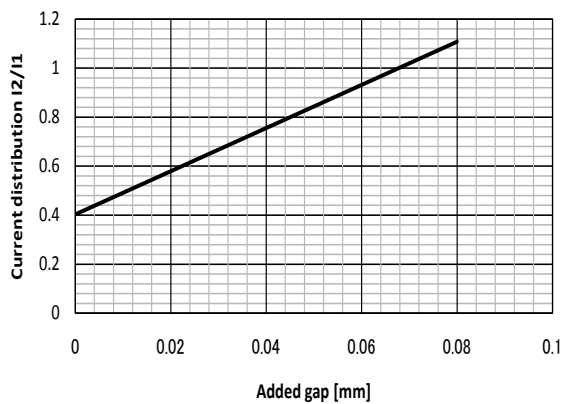


図 2.1.1-4-7 2パンケーキ試験コイルのテープ厚さと均一度の解析結果

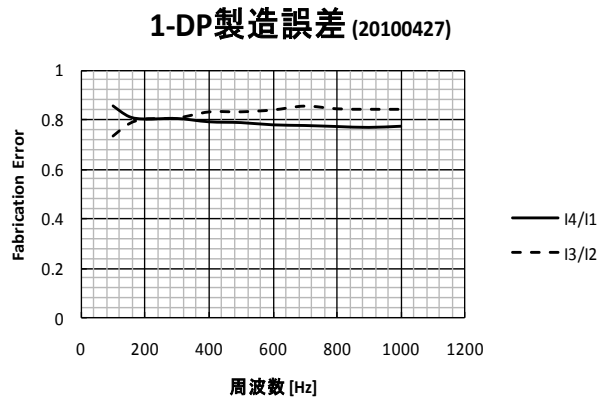


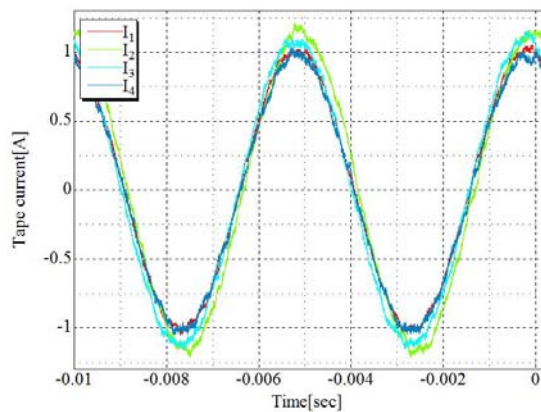
図 2.1.1-4-8 2パンケーキコイルの I_4/I_1 と I_3/I_2 の製造誤差

一方、テープ線の本来の特性から、全く同様に製作されるならば、 $I_1 = I_4$ と $I_2 = I_3$ との同じ特性を示す筈であるが、図 2.1.1-4-6 では少し特性が異なるように見えるので、図 2.1.1-4-8 に I_4/I_1 と I_3/I_2 の特性を示す。図 2.1.1-4-8 の不均一度は製造誤差によるものと考えられ、その大きさは約 20 %程度である。この製造誤差の原因を確かめるために、片側パンケーキの最内層 1 層のテープ間隔がそれぞれ、(1-2)間=0.141 mm、(2-3)間=0.262 mm、(3-4)間=0.148 mm の誤差厚が生じたとして解析すると、均一度は $I_2/I_1=1.07$ 、 $I_3/I_1=0.86$ 、 $I_4/I_1=0.81$ となり、約 20 %の不均一度は製作時の僅かな誤差によるものと考えられる。

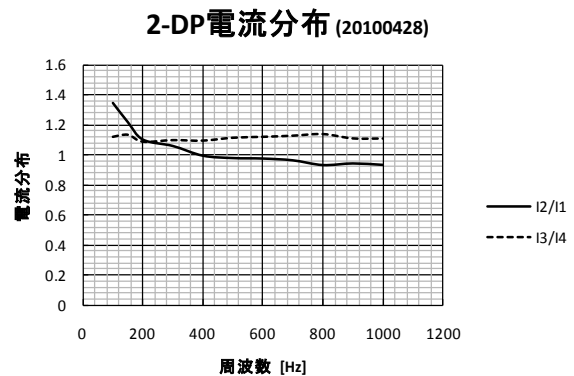
② 4 パンケーキ試験コイル

また、図 2.1.1-4-9 には同様に、4 パンケーキ試験コイルの電流波形と、 I_2/I_1 と I_3/I_4 の電流分布の周波数依存性を示す。電流分布 I_2/I_1 は周波数に多少依存するが、 I_3/I_4 はほぼ一定で 9 %程度の不均一度である。図 2.1.1-4-10 には、4 パンケーキ試験コイルの均一度の層数依存性の解析結果を示す。層数が 20 ターンの試験コイルでは約 9 %の不均一度であるので、 I_3/I_4 はほぼ予定値である。

また、図 2.1.1-4-11 には、 I_4/I_1 と I_3/I_2 の特性を示す。図から、 I_4/I_1 は幾何学的に同じ特性であり、同じように製造されているようで、ほぼ 1 に近い値である。一方、 I_3/I_2 は周波数に依存して変化しているが、最大でも 15 %程度の製造誤差に伴う不均一度が認められる。



(a) 4 パンケーキコイルの各テープ電流波形 (200Hz)



(b) 4 パンケーキコイルの I_2/I_1 と I_3/I_4 の周波数依存性

図 2.1.1-4-9 4 パンケーキ試験コイルの各テープの電流波形

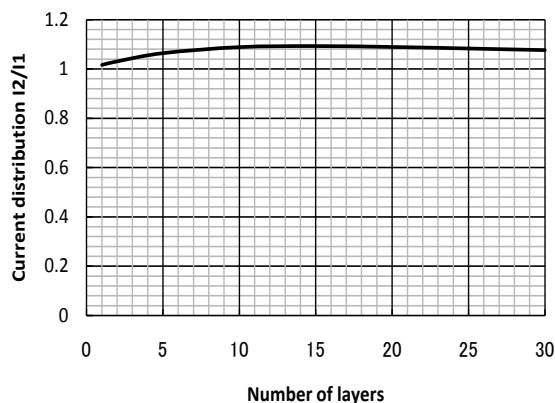


図 2.1.1-4-10 4 パンケーキ試験コイルの層数と均一度の解析結果

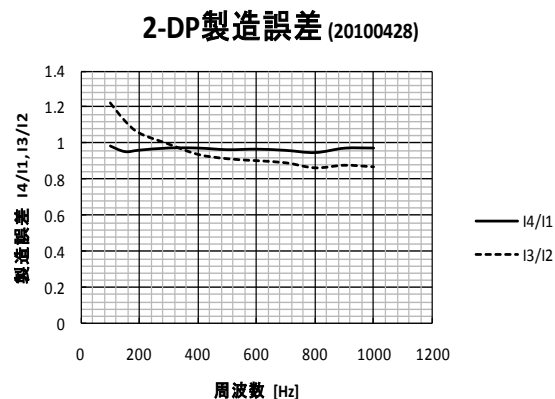


図 2.1.1-4-11 I4/I1 と I3/I2 の製造誤差

(7) 結果

今回の試験では、各テープ線の電流分布を正確に計測するために Rogowski コイルを電極に取り付け、その校正のために電極間を単なる締め付けで行うことになった。したがって、ハンダ接続と異なり、コイルのターン数が少なく、インダクタンスも小さい本試験コイルでは、接触抵抗の影響を完全に無くすることはできなかった。しかし、解析では抵抗分による位相のずれを無視できる程度になることが予想できる値である数 $10 \mu\Omega$ 以下にまで抑えて実験を行った。試験結果は、予想した均一度をほぼ満足して得ることができたので、理論の基本的な実証ができた。

以上のことから、多層導体でコイルを構成して導体内の電流分布を均一化する方法には、テープ本数に等しいパンケーキを用いてパンケーキ毎に転位して均一電流分布を得る方法や、今回の実験で証明できたように、2 パンケーキの 1 箇所での転位とテープ間厚さを調整して電流分布を均一化する方法があることが分かった。

引用論文リスト

- (1) 後村直紀, 千葉悠太, 谷貝剛, 津田理, 濱島高太郎, 式町浩二, 平野直樹, 長屋重夫: 「SMES 用ダブルパンケーキコイルに用いる並列多層 HTS テープ導体内の電流分布解析」, 第 82 回 2010 年度春季低温工学・超電導学会講演概要集, p22, 2010
- (2) 千葉悠太, 後村直紀, 津田理, 濱島高太郎, 式町浩二, 平野直樹, 長屋重夫: 「ダブルパンケーキコイル用並列多層 HTS テープ導体内の電流分布の一様化」, ASC-10-034, pp89-94, 2010

2.1.1-5 低損失化に関する検討（中部電力、鹿児島大学）

(1) 研究開発目的

大容量 SMES コイルの開発には、大電流導体の開発が不可欠である。Y 系超電導線材を用いた大電流容量集合導体コイルの損失を低減する構造について最適化を検討するため、トロイダル形状に依存した磁場中での交流損失特性について評価した。

(2) トロイダル型 SMES コイルの交流損失評価

磁化損失とは、Y系超電導線材に外部磁界を印加した際に超電導部分で発生する損失である。要素コイル単体とトロイダル配置したコイルにおける巻線に印加される磁界の分布の比較を図2.1.1-5-1 に示す。ソレノイドコイルに対して、コイルをトロイダル配置にし、全てのコイルに通電するとコイルの1 ターン分の磁界分布は導体長手方向に変化し不均一になる。したがって、磁化損失は不均一磁界中で発生することになる。不均一な磁界中での磁化損失測定を行うために、一様磁界空間内に、Y系導体を捻った状態で設置した。作製した導体は、Y系超電導線材1 枚およびY系超電導線材を4 枚積層させたものの2 種類である。積層枚数によって磁化損失特性が変化するので、Y系超電導線材1 枚の導体とY系超電導線材を4 枚積層した導体を用意した。Y系超電導線材を4 枚積層したものは銀面とハステロイ™面が向き合うように重ね、線材間に絶縁シートを挿入して絶縁処理を施している。また、導体幅広面に垂直に印加される磁界成分を導体長手方向に対して変化させるため導体の両端を捻り、捻り角度を0度から360度まで変化させ、不均一の特性長が磁化損失に及ぼす影響を調べた。

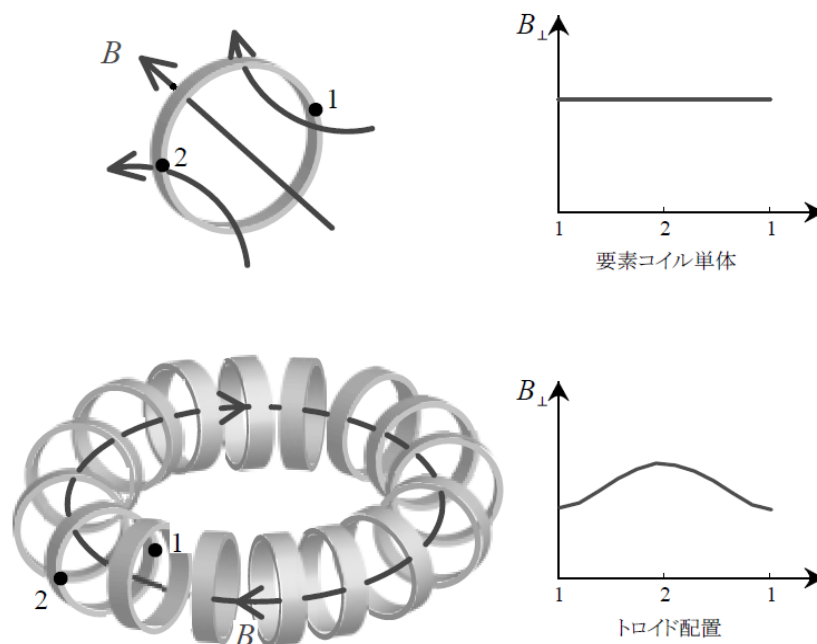


図 2.1.1-5-1 要素コイル単体とトロイダル配置にしたコイルの磁界分布

1 枚導体の捻り角度が0度の際の交流損失測定結果を図2.1.1-5-2 に、捻り角度を0度から360度まで変化させたときの交流損失測定結果を図2.1.1-5-3 に示す。4 枚積層導体の捻り角度が0度の際の交流損失測定結果を図2.1.1-5-4に、捻り角度を0度から360度まで変化させたときの交流損失測定結果を図2.1.1-5-5 に示す。縦軸は一周期あたり、単位体積あたりの交流損失をとっている。また、図中の(a)、(b)はそれぞれ周波数特性、印加磁界特性である。図2.1.1-5-3、図2.1.1-5-5は捻り角度を変化させた際に、1 枚導体、4 枚積層導体の交流損失特性に変化があるかを確かめるために (a) は10 mT に、(b) は0.04 Hz と1 Hz に注目した。測定結果から以下のことが分かる。(1) 捻り角度を変化させた1 枚導体、4 枚積層導体どちらの場合でも測定値に周波数依存性はない。このことから、測定した損失は導体幅広面に垂直な磁界成分による磁化損失であり、周波数依存性のある渦電流損失は磁化損失に対して非常に小さい。(2) 測定値は、1 枚導体において印加磁界の約2.65 乗に、4 枚積層導体において印加磁界の約2.7 乗に比例しており印加磁界に対する損失の傾きが一定である。このことから、印加磁界はそれぞれの導体の中心到達磁界より十分小さい。(3) 捻り角度および線材の積層枚数で周波数特性や印加磁界特性などの交流損失特性に大きな変化は見られない。

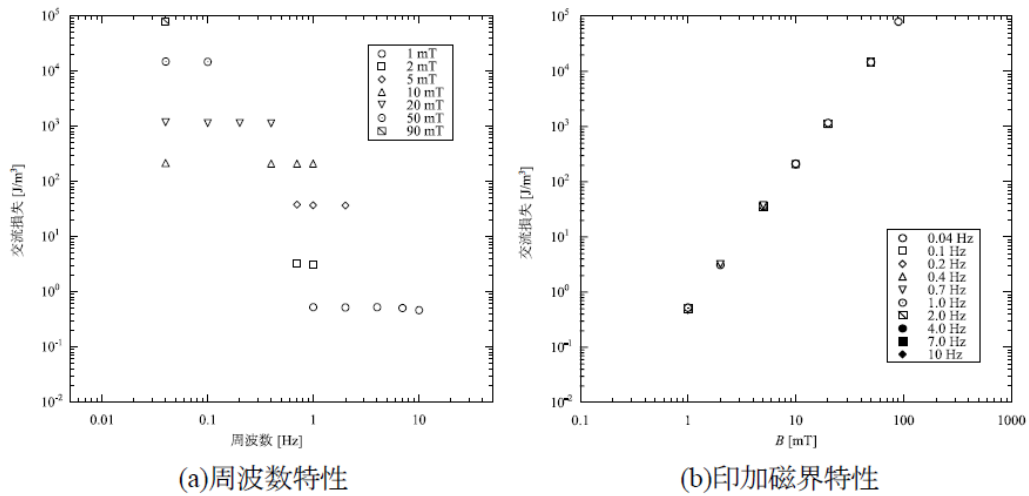
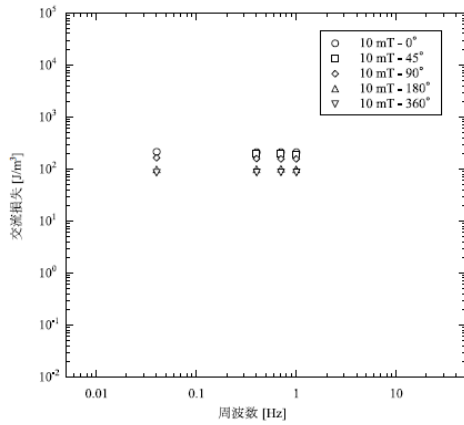
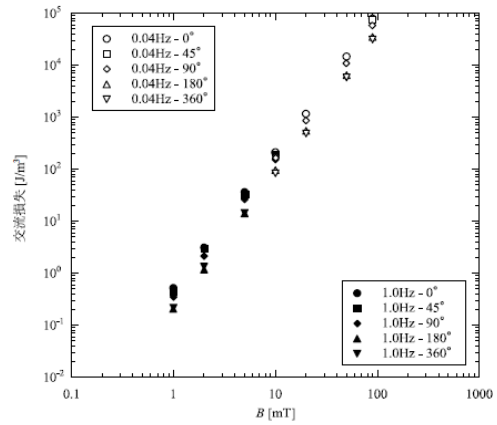


図 2.1.1-5-2 1 枚導体を 0 度捻った場合の磁化損失測定結果

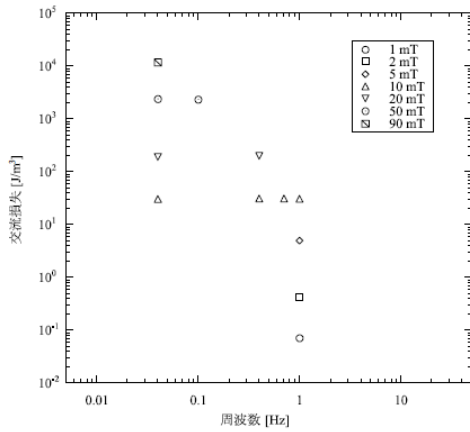


(a)周波数特性

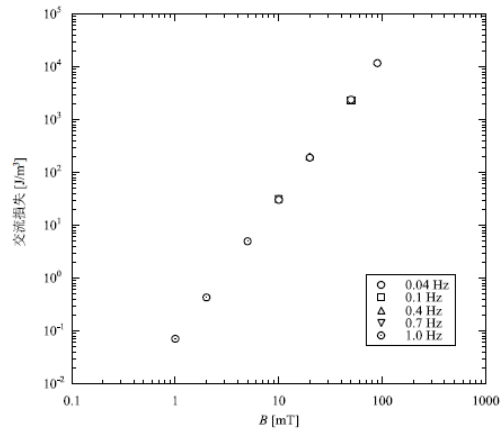


(b)印加磁界特性

図 2.1.1-5-3 1 枚導体を 0~360 度捻った場合の磁化損失測定結果

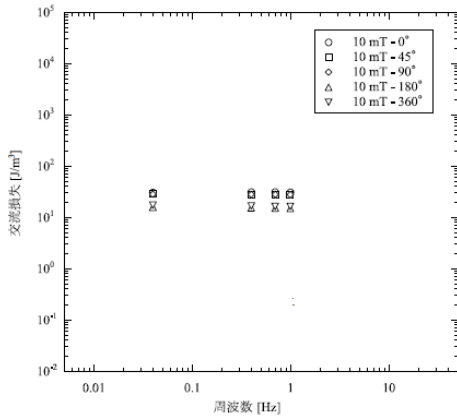


(a)周波数特性

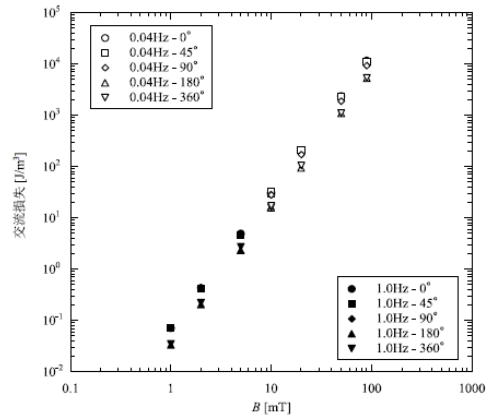


(b)印加磁界特性

図 2.1.1-5-4 4 枚導体を 0 度捻った場合の磁化損失測定結果



(a)周波数特性



(b)印加磁界特性

図 2.1.1-5-5 4 枚導体を 0~360 度捻った場合の磁化損失測定結果

サンプル導体を捻った状態で一様な垂直磁界を印加すると、導体には導体幅広面に垂直な磁界成分と、導体幅広面に平行な磁界成分が印加される。導体幅広面に平行な磁界成分による磁化損失は、導体幅広面に垂直な磁界成分によるものに比べて非常に小さいことが明らかにされている。このため、磁化損失の検討は印加された磁界のうち導体幅広面に垂直な磁界成分によって発生する損失のみを検証する。

一様磁界空間内にサンプル導体を捻った状態で設置すると、図2.1.1-5-1 に示したように導体幅広面に垂直な磁界成分が長手方向に対して変化する。これに伴い、磁化損失も長手方向に対して変化する。ここで、磁化損失に周波数依存性がないことは明らかであるため、印加磁界依存性のみを考える。1枚導体の捻り角度0度の場合、磁化損失は印加磁界の2.64 乗に、4枚積層導体の捻り角度0度の場合には印加磁界の2.67 乗に比例している。したがって、Y系超電導導体の各場所で発生する磁化損失が、1枚導体は印加磁界の2.64 乗に、4枚積層導体は印加磁界の2.67 乗に比例するとして、各場所で発生する損失を導体全長にわたって積分したものを磁化損失の計算値とする。

まず、1枚導体の磁化損失の捻り角度依存性について検討する。1枚導体の捻り角度依存性を図2.1.1-5-6に示す。また、測定値、計算値を捻り角度0度の値で規格化したものを示している。図2.1.1-5-6から測定値は計算値とよく一致していることがわかる。このことから、1枚導体では不均一磁界が交流損失に及ぼす影響はほとんどないと考えられる。

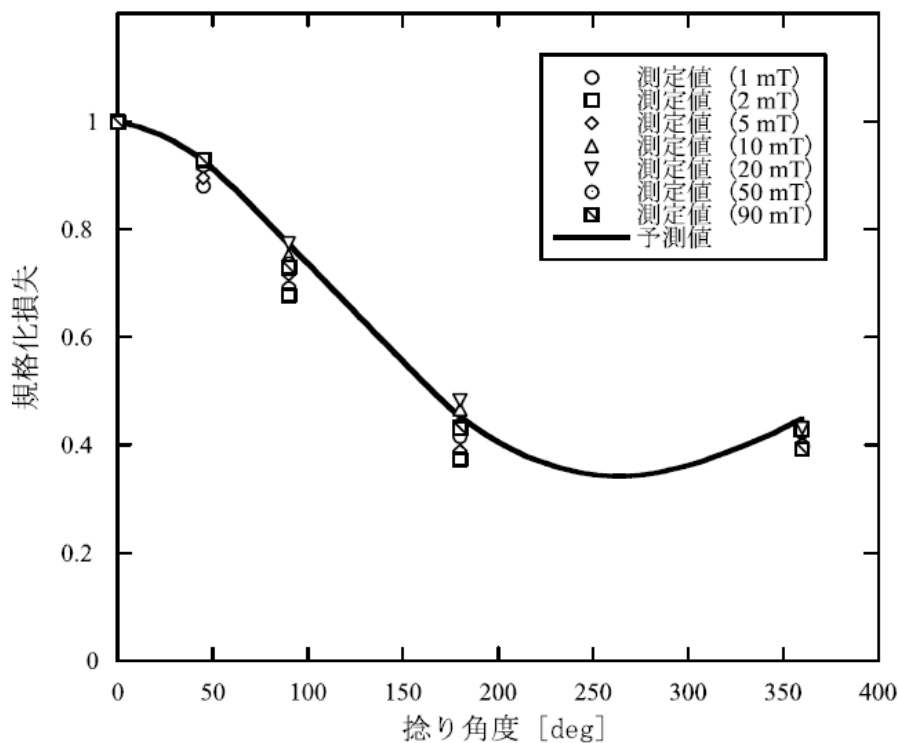
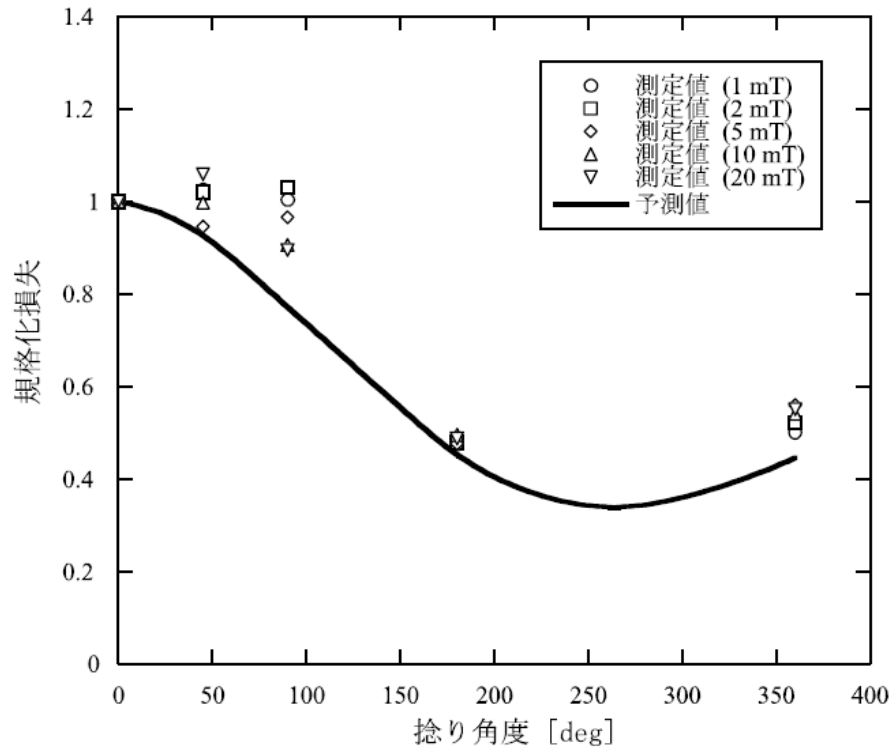
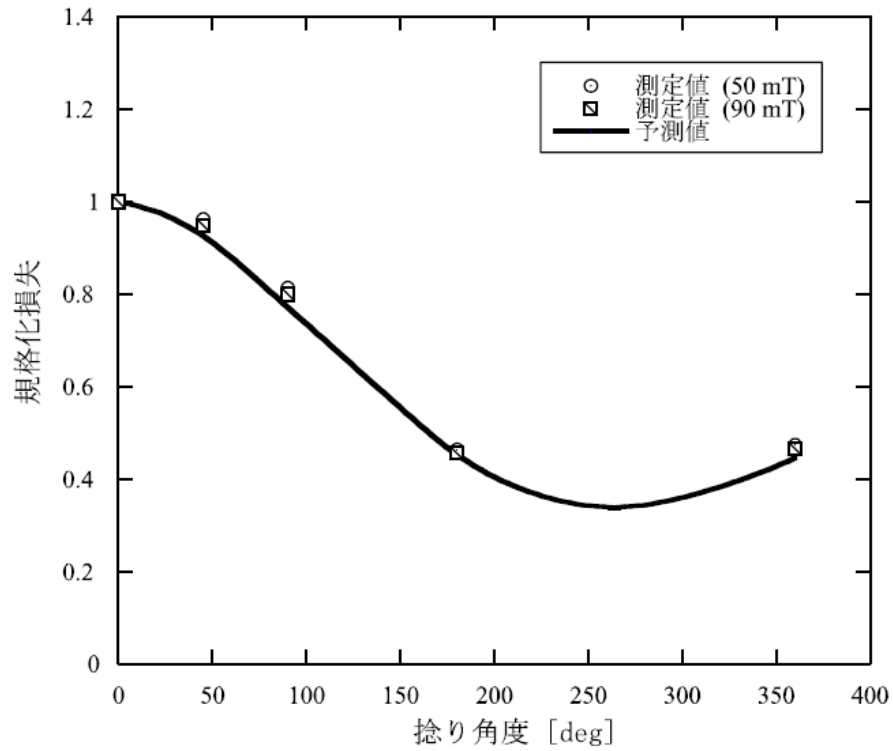


図 2.1.1-5-6 1枚導体の磁化損失の捻り角度依存性



(a) 印加磁界 1~20 mT



(b) 印加磁界 50,90 mT

図 2.1.1-5-7 4 枚積層導体の捻り角度依存性

次に、4枚積層導体の磁化損失の捻り角度依存性について検討する。4枚積層導体の捻り角度依存性について、印加磁界が1~20 mTのものを図2.1.1-5-7(a)に、印加磁界が50、90 mTのものを図2.1.1-5-7(b)に示す。図2.1.1-5-7には測定値、計算値を捻り角度0度の値で規格化したものを示している。図2.1.1-5-7(a)より印加磁界が1 mTから20 mTのときの捻り角度が45度と90度では、測定値が計算値よりも大きくなっている。これは不均一磁界が交流損失に及ぼす影響と、4枚積層した線材のうちいずれかの線材が他の線材と比べて臨界電流分布が極端に不均一であること、線材間の相互作用などが考えられる。また、図2.1.1-5-7(b)より印加磁界が50 mTと90 mTの場合は測定値と計算値がよく一致しているため、測定値は導体幅広面に垂直な磁界成分による磁化損失であることがわかる。以上のことから、トロイダル配置のコイルで導体長手方向に生じる不均一磁界中での磁化損失は、印加磁界が小さい場合は不均一磁界が交流損失におよぼす影響などにより大きくなるが、印加磁界が大きい実用条件（垂直磁界が0.6 T近傍）では導体幅広面に垂直な磁界成分を考慮すれば求まることがわかった。

(3) 結果

SMES用トロイダルコイルでは、コイル1ターン分の磁界分布が、ソレノイドコイル1つだけに通電した場合とは異なり、不均一になる。そこで、不均一な磁界分布が交流損失に及ぼす影響を調べるため、不均一磁界中でのY系短尺超電導導体の磁化損失を測定し、その検討を行った。その結果、不均一磁界中での磁化損失特性においては、1枚導体では、捻り角度を変化させた場合でも、発生する損失は導体幅広面に垂直な磁界による磁化損失であることがわかった。さらに4枚積層超電導導体では、印加磁界が小さい場合、導体幅広面に垂直な磁界成分による磁化損失よりも大きくなったが、印加磁界が大きい実用条件(0.6 T近傍)では導体幅広面に垂直な磁界成分を考慮すれば求まることがわかった。

2.1.1-6 高耐フープ応力特性評価（中部電力、東北大学）

(1) 研究開発目的

これまでCVD法により作製されたYBCO超電導線材（以降CVD-YBCO線材と称す）の機械特性評価⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾とともに単層ソレノイド巻コイルのフープ応力基礎検証評価⁽⁵⁾を実施し、高強度特性を検証してきた。今回、長尺のCVD-YBCO線材を使用した小型多層巻パンケーキコイルを製作し、外部磁場中で600 MPa級のフープ応力試験を実施し、CVD-YBCOコイルの電磁応力耐性を評価した。

(2) CVD-YBCO コイルのフープ応力試験評価

a. コイル製作

SMES 開発で目標としているフープ応力 600 MPa を実証するため、長尺 CVD-YBCO 線材を用いてフープ応力試験用小型コイルを製作した。使用した線材は幅 10 mm、厚さ 100 μm のハステロイTM基板に IBAD 法による中間層、CVD 法による YBCO 層を成膜後、5mm 幅に切断し、安定化銅を線材全周囲に厚さ 50 μm めっきした。Cu めっき後の線材寸法は、幅約 5.5 mm、厚さ約 250 μm である。この線材を用いて製作したシングルパンケーキ(SP)コイル 2 個を積層した 2-SP コイルの諸元を表 2.1.1-6-1 に、その設計図、外観写真を図 2.1.1-6-1、図 2.1.1-6-2 に示す。コイルはエポキシ樹脂により真空含浸した。

表 2.1.1-6-1 フープ応力試験用 2-SP コイル諸元

線材種類	Cu めっき IBAD/ CVD-YBCO テープ線材
線材長	50 m + 50 m
絶縁線材平均幅	5.7 mm
絶縁線材平均厚さ	350 μm
コイル形状	シングルパンケーキ型コイル 2 積層
内径	200 mm
外径	249 mm
高さ	12 mm
巻数	139

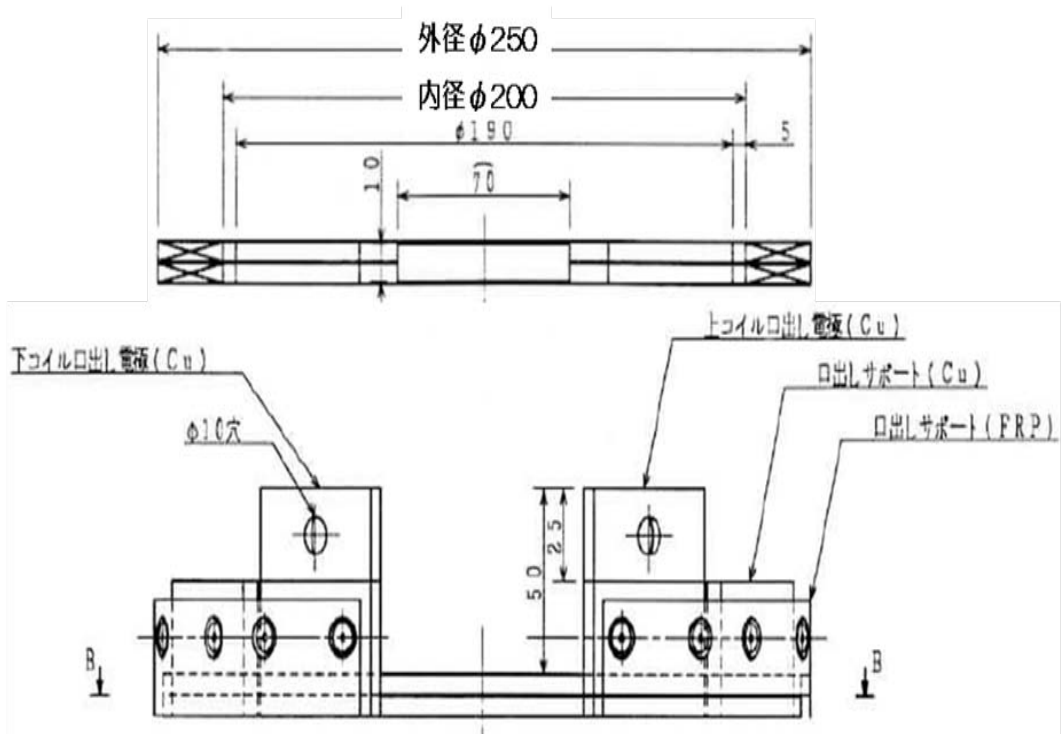


図 2.1.1-6-1 フープ応力試験用 2-SP コイル図

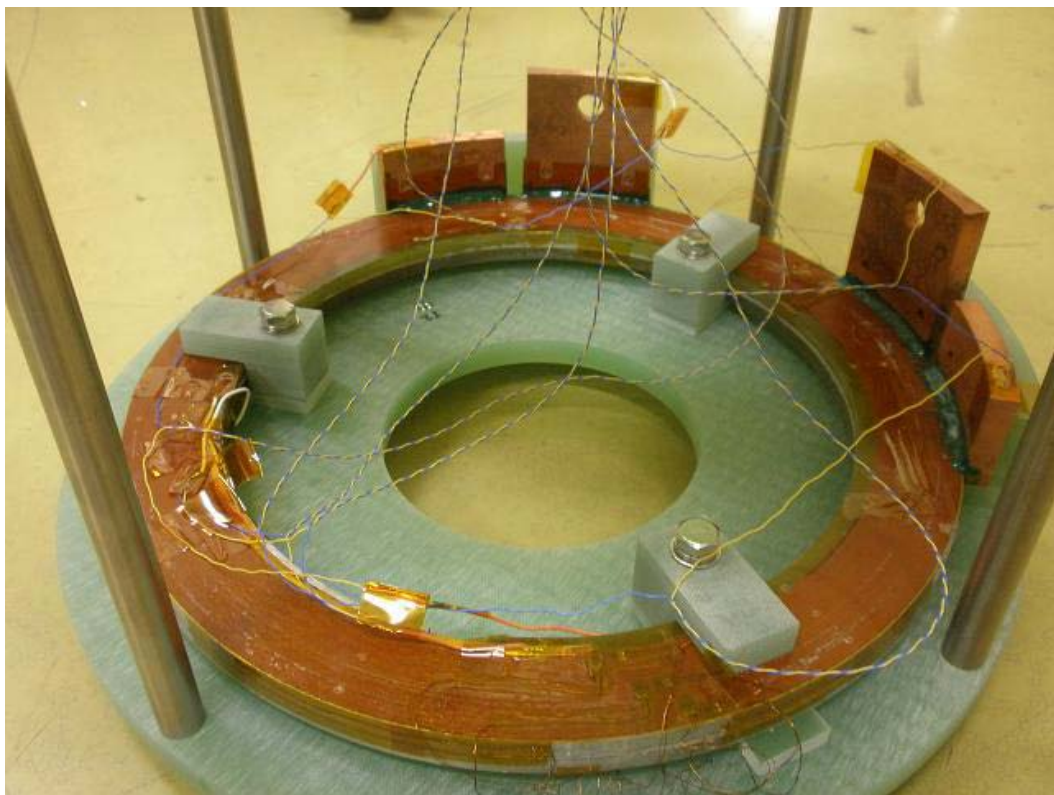


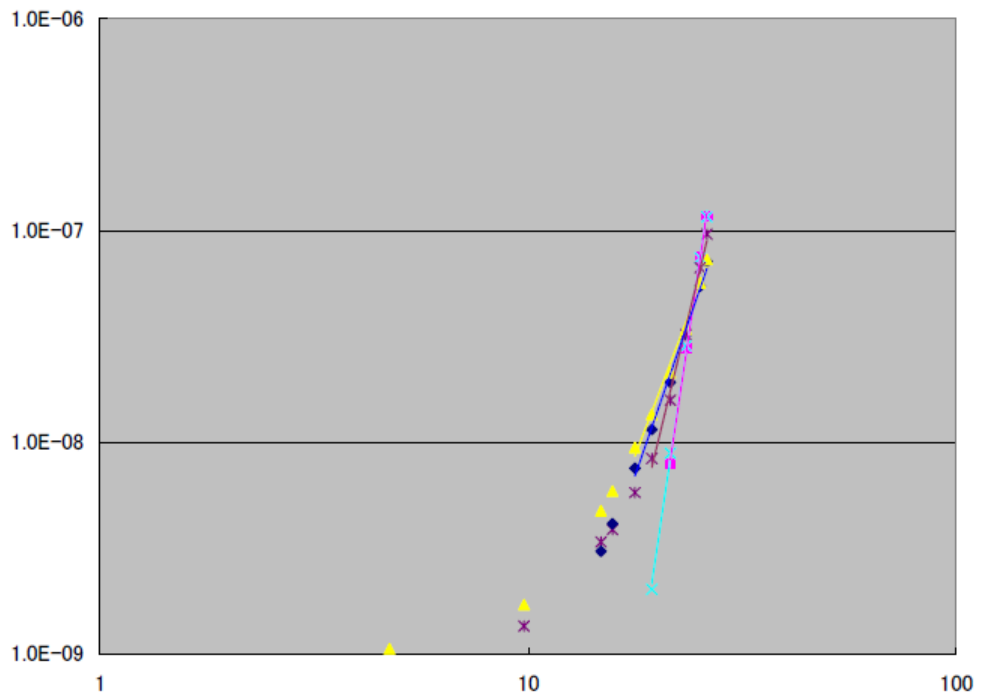
図 2.1.1-6-2 フープ応力試験用 2-SP コイル外観

b. 通電確認試験

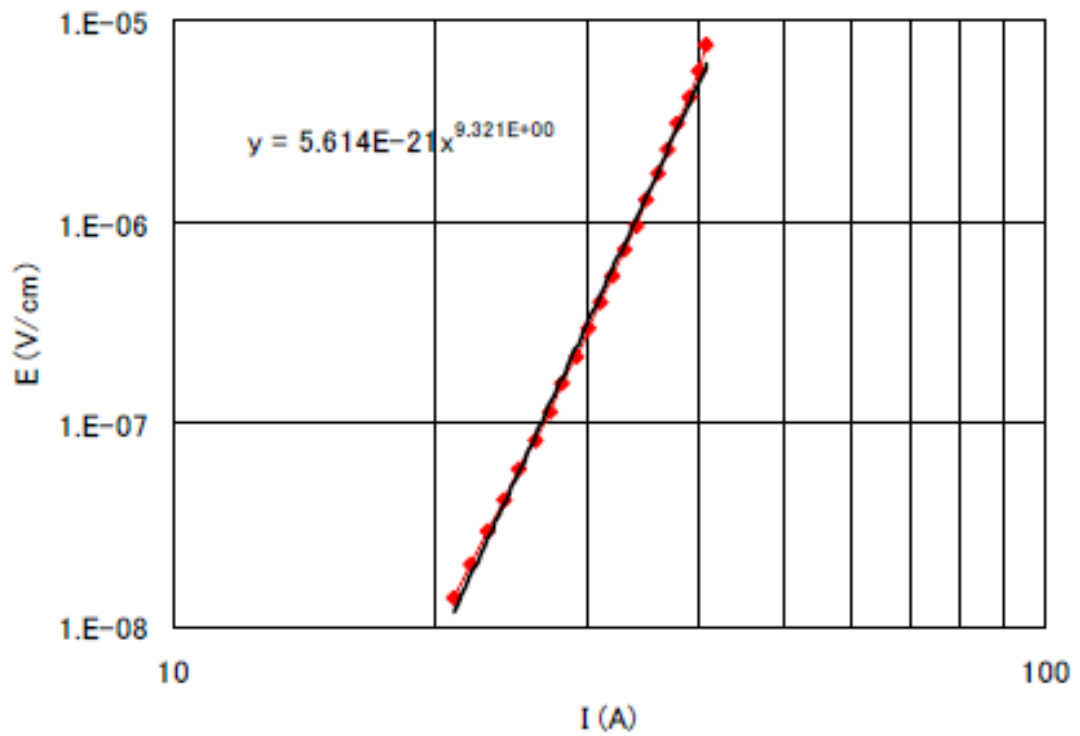
液体ヘリウム中でのフープ応力試験の実施に先立ち液体窒素浸漬冷却によりコイルの通電試験を実施し、2-SP コイルの特性を確認した。上・下段コイル（電極込・除）、2-SP コイルの各部 I-V 測定結果を図 2.1.1-6-3(a)に示す。コイル 2 個を積層する前に通電した結果、電極部を除いた上段コイルの I_c 値および n 値はそれぞれ 31 A, 14 であり、下段コイルではそれぞれ 42A、 6 であった。また、上下段 2 個積層した 2-SP コイルの I_c 値は 35 A、 n 値は 8 程度であった。また、Cu めっき前の線材 I-V 特性から 2-SP コイル I-V 特性を推定した計算結果を図 2.1.1-6-3 (b) に示す。使用した CVD-YBCO 線材の I_c -B-T- θ 特性は網羅できていないが、計算結果は表 2.1.1-6-1 の結果からコイル自己磁場を考慮して I_c 値低下を概略見込んでいる（磁場分布に応じ線材 I_c 値の 0.46-0.71 倍）。コイルの I-V 実測結果は推定結果とほぼ一致しており、CVD-YBCO 線材は問題なく巻線されたと考えられる。

c. フープ応力試験

液体ヘリウム浸漬冷却により 2-SP コイルを 4.2 K まで冷却し、外部磁場を印加後に通電することで、多層巻 CVD-YBCO コイルとしてのフープ応力耐性を検証した。図 2.1.1-6-4 に 2-SP コイルの電圧タップ取り付け位置を示す。図 2.1.1-6-5 に外部磁場 11 T において 2-SP コイルを 3 回繰り返し通電した時の上段コイル両端、下段コイル両端および上下段コイル間接続電極の I-V 測定結果を示す。上段コイルは下段コイルと比較して I_c 値は高いものの n 値が低いため、120 A 付近から上段コイルにおいて電圧が発生し始めている。1 回目に 176 A 付近まで通電した際、コイル間接続電極の電圧が跳ね上がった。その後、再通電、再々通電により電流値を増加し、通電電流の増加とともに発生電圧が上昇し、最終的に 214 A 付近で過電圧により通電不能となった。試験後の検査により、電圧の跳ね上がりはコイル間接続電極の不具合が原因であることが判明した。本試験において 11 T 中では 3 回繰り返し通電を実施したが、電極部を除くコイル電圧は常に同じ軌跡を辿っており、今回のフープ応力負荷によるコイル巻線部の劣化はなかったと考えられる。



(a)



(b)

図 2.1.1-6-3 2-SP コイルの I-V 特性 (a) 測定値 (b) 計算値

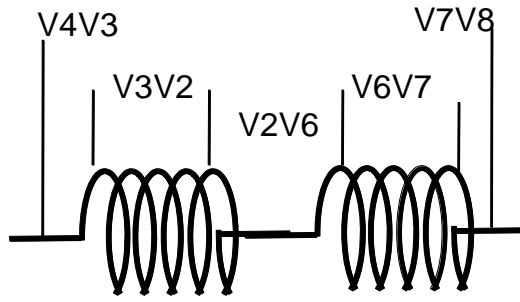


図 2.1.1-6-4 2-SP コイルの電圧タップ位置

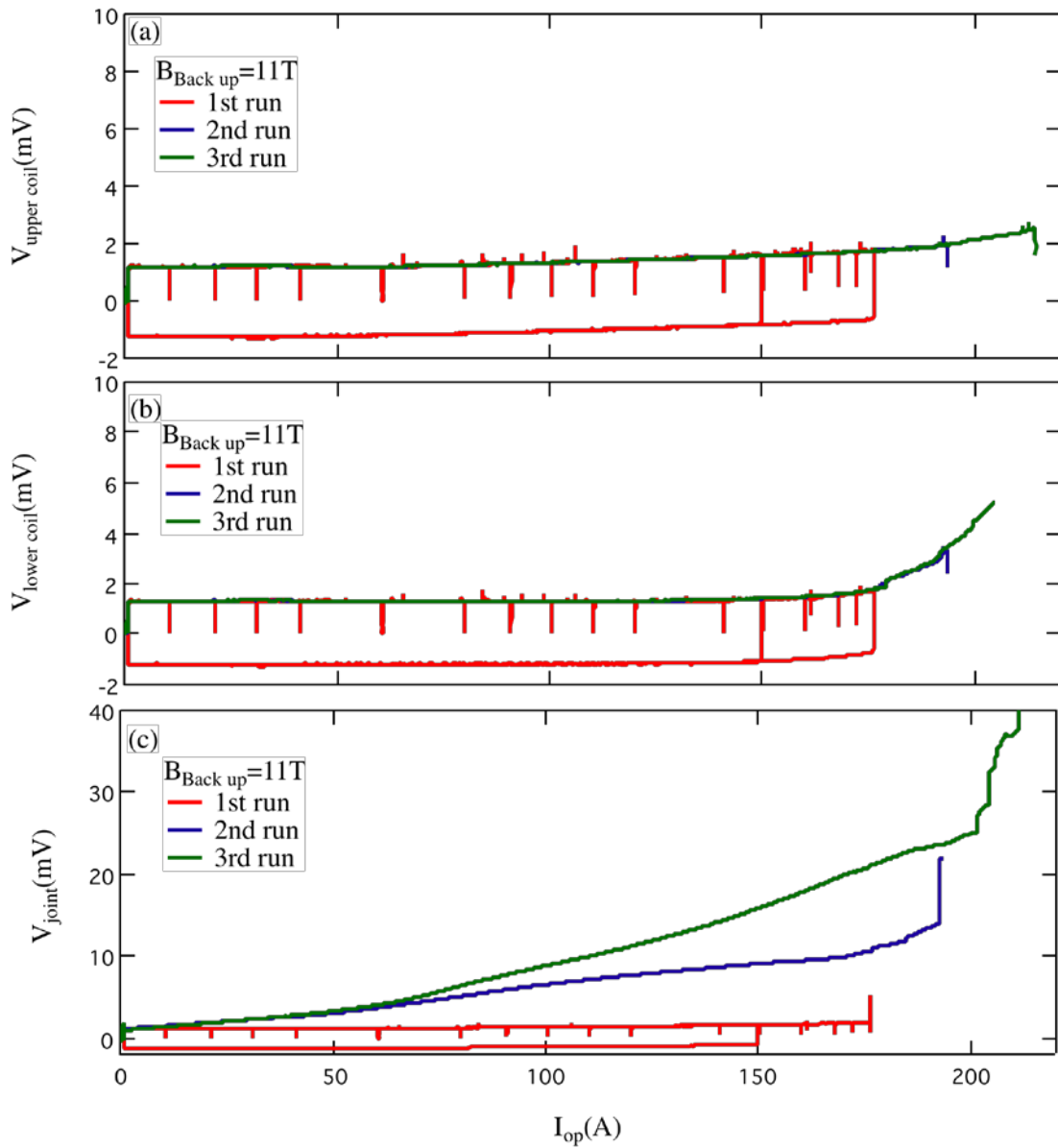


図 2.1.1-6-5 2-SP コイルの I-V 特性

(a) 上段コイル (b) 下段コイル (c) 上下段コイル接続部

図 2.1.1-6-6 に 214 A 通電時に 2-SP コイルに誘起される電磁応力分布を示す。ここで σ_{bjr} , σ_{θ} , σ_r は、それぞれ線材を独立とした時の周方向応力、一体変形する場合の周方向応力、径方向応力である。特にコイル周方向の応力であるフープ応力は、線材が完全に独立であるとして磁場 (B) \times 電流密度 (J) \times 半径 (R) で計算した値 σ_{bjr} とコイルが一体変形した場合の値 σ_{θ} を示している。ただし、応力はハステロイ™ 基板にかかる応力としている。なお、 σ_{θ} は無限長のコイルを仮定して Wilson の式から計算した結果である。図から分かるように、コイルが完全に一体変形を起こす場合には、コイル内部応力は BJR から計算される値とは異なる。この違いは、コイルの径方向に働く応力が影響するためであり、コイルが発生する自己磁場と外部磁場の割合によって振る舞いが異なる。今回の場合では、 σ_{bjr} と σ_{θ} の半径方向の分布が大きく異なっていることが分かる。結果として、最大フープ応力は σ_{bjr} より σ_{θ} の方が大きくなる。これらの結果から、214 A の通電によって、一体変形を仮定すると 636 MPa, BJR の場合には 560 MPa の最大フープ応力が 2-SP コイルに負荷されたと考えられる。

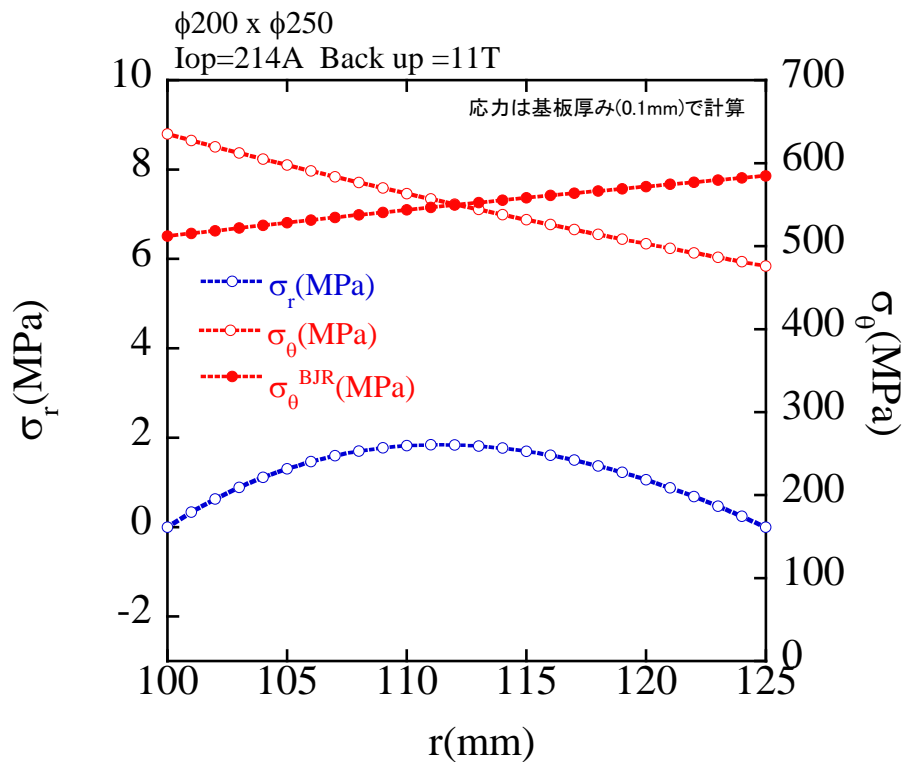


図 2.1.1-6-6 外部磁場 11 T 中で 214 A 通電時の 2-SP コイルの応力分布

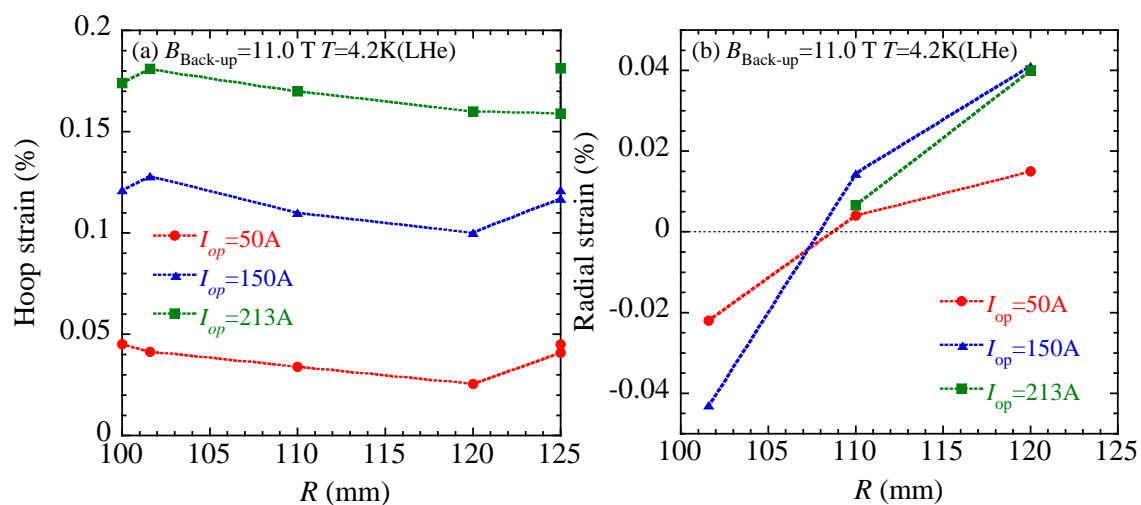
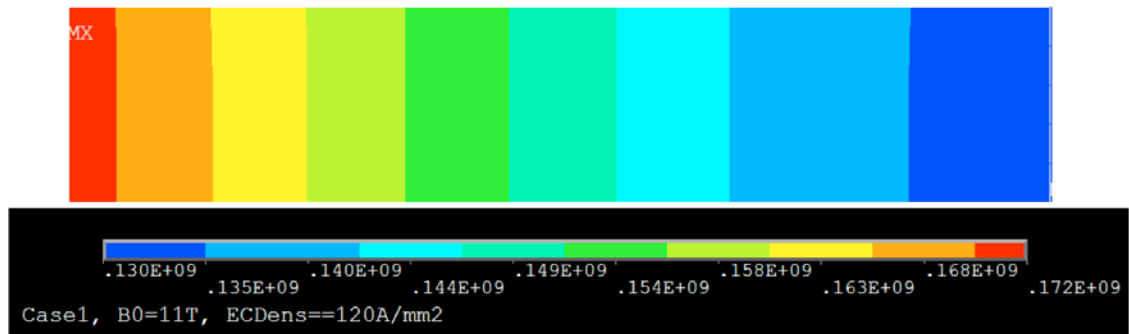


図 2.1.1-6-7 外部磁場 11 T 中で励磁時の 2-SP コイルの歪み分布
(a) 周方向 (b) 径方向

歪みゲージで測定した各部の歪み分布を図 2.1.1-6-7 に示す。フープ応力により誘起された歪み(図 2.1.1-6-7 (a))は最内層で最大となりコイル外側に向かって減少し、さらに最外層部分で増加する傾向が見られた。この結果、図 2.1.1-6-6 と比較すると、コイルが一体変形すると仮定した結果と定性的に一致する。また、コイル径方向(コイルの内層-外層間)の歪みは、最内層で圧縮を示したがコイル中心では引っ張りとなり、最外層ではさらに大きくなっている。したがって、少なくとも印加した応力レベルでは、コイルは一体変形を起こしたと結論できる。図 2.1.1-6-8 に、有限要素法によってさらに詳細に計算した内部応力分布の結果を示す。図 2.1.1-6-8 より、フープ応力は最内層で最大となる図 2.1.1-6-6 の結果と概ね一致していることが分かる。一方で、径方向の応力分布は最内層で負となり外に向かって増大する傾向を示し、図 2.1.1-6-6 の解析的な計算結果とは異なっているが、図 2.1.1-6-7 の実験結果と定性的な一致が見られている。図 2.1.1-6-6 の計算結果は、無限長のコイルを仮定しコイル内部の磁場分布を線形としているために、実際の結果とは若干相違が見られていると考えられる。従って、本実験ではコイルの一体変形挙動が歪み分布の測定結果から実証することができた結論できる。

(a) Hoop stress (Pa)



(b) Radial stress (Pa)

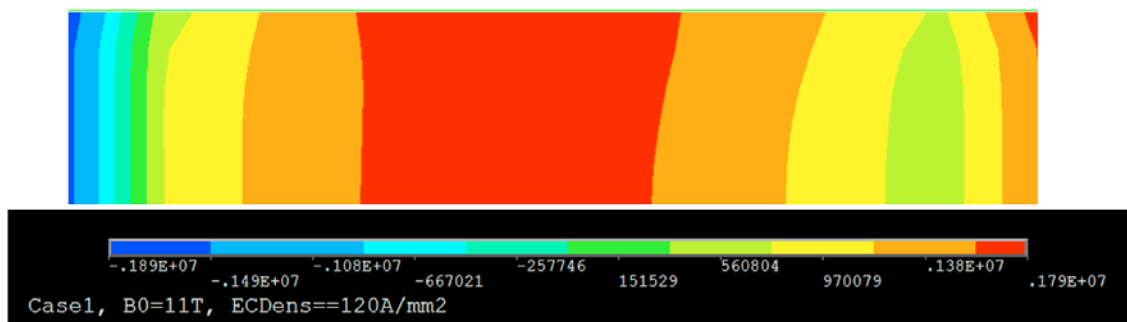


図 2.1.1-6-8 有限要素解析による外部磁場 11 T 中で 214 A 通電時の応力分布
(a) 周方向フープ応力 (b) 径方向応力

d. フープ応力再試験

幅 10 mm のテープを用いて中間ジョイントのないシングルパンケーキ SP を作製(2nd SP coil)し、さらに大きな電磁力試験を行った。コイルサイズは上述のコイルと同じ内径 200 mm x 外径 250 mm である。本コイルには 3 箇所 J_c 低下部分の補修を施し、その影響も調べた。

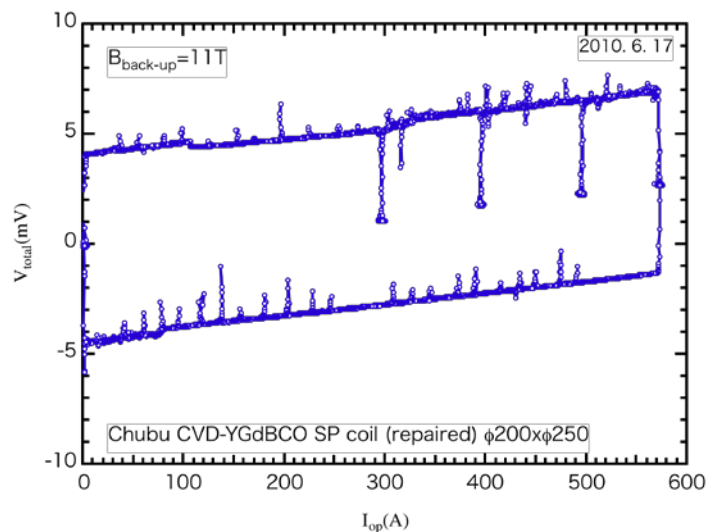


図 2.1.1-6-9 外部磁場 11 T 中での補修有り線材を用いた再試験用コイルの全電圧

図 2.1.1-6-9 は 2nd SP coil のバックアップ 11 T における電流-電圧特性である。発生電圧には、コイルのインダクタンスに起因したヒステリシスを伴う電圧約 4 μV と両端電極の接触抵抗成分が現れているが、最高 572 A までの通電に対して常伝導転移にともなう電圧発生は見られなかった。

図 2.1.1-6-10 に 572 A 通電時に 2nd SP コイルに誘起される電磁応力分布を示す。ここで σ_{bjr} , σ_{θ} , σ_r は、2.1.1-6-6 同じ内容を示している。ただし、応力はハステロイ TM 基板にかかる応力としている。この時の最大電流によってコイルに誘起される電磁応力は、ハステロイ TM 基板に対して *BJR* で約 744 MPa、一体変形で約 854 MPa と見積もられる。

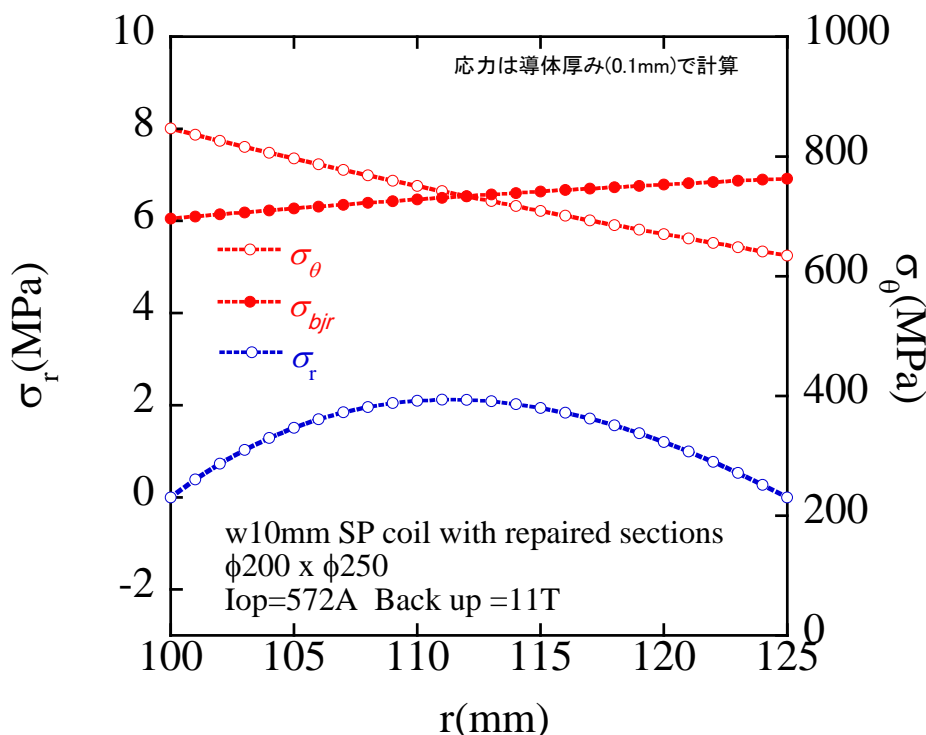


図 2.1.1-6-10 外部磁場 11 T 中で 572 A 通電時の 2nd SP コイルの応力分布

図 2.1.1-6-11 は、各補修箇所における電流-電圧特性である。補修 1 及び 3 からは電圧の発生が全く見られていない。また補修 2 には線形抵抗が観測されているが、これは補修時に残った接触抵抗であり、電磁力印加による劣化はないと見なすことができる。従って、補修箇所すべては、液体窒素温度で試験した結果をほぼ再現しており、600 MPa を越えるフープ力による劣化は全く見られていないことが確認できた。

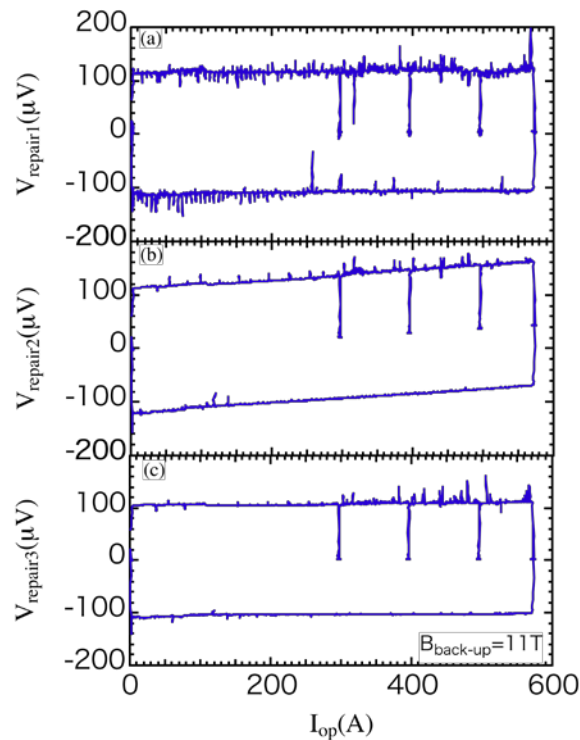


図 2.1.1-6-11 外部磁場 11 T 中で 572 A 通電時の 2nd SP コイルの補修部 3 箇所
の I-V 特性

(3) 結果

大規模 SMES のコイル化要素技術を開発するため、CVD-YBCO 線材を使用した小型多層巻コイルを製作し、フープ応力特性を評価した。液体ヘリウムで浸漬冷却し、11 T の外部磁場中で通電することで、多層巻 CVD-YBCO コイルが線材基板に対し 600 MPa のフープ応力に耐えることを実証した。さらに今回の評価結果から、コイルが一体変形していることが検証できた。一体変形の場合は最大フープ応力が軽減されており、一体変形の最大フープ応力を許容可能とした場合、さらに高磁界コンパクト化を高めることが可能であると考えられる。

引用論文リスト

- (1) M. Sugano, T. Nakamura, K. Shikimachi, N. Hirano, S. Nagaya, “Stress tolerance and fracture mechanism of solder joint of YBCO coated conductor,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 17, pp. 3067-3070, 2007.
- (2) M. Sugano, K. Shikimachi, N. Hirano, S. Nagaya, “Simultaneously Bending and Tensile Strain Effect on Critical Current in YBCO Coated Conductors,” *Physica C* 463-465 (2007) 742-746.
- (3) M. Sugano, Y. Yoshida, M. Hojo, K. Shikimachi, N. Hirano, S. Nagaya, “Two different mechanisms of fatigue damage due to cyclic stress loading at 77 K

for MOCVD-YBCO coated conductors,” *Supercond. Sci. Technol.* 21 (2008) 054006.

- (4) M. Sugano, T. Nakamura, T. Manabe, K. Shikimachi, N. Hirano, S. Nagaya, “The intrinsic strain effect on critical current under a magnetic field parallel to the c axis for a MOCVD-YBCO-coated conductor,” *Supercond. Sci. Technol.* 21 (2008) 115019.
- (5) G. Nishijima, H. Oguro, S. Awaji, K. Watanabe, K. Shikimachi, N. Hirano, S. Nagaya, “Transport Characteristics of CVD-YBCO Coated Conductor under Hoop Stress”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 18, pp. 1131-1134, 2008.

2. 1. 1-7 実規模コイルの作製と性能評価（中部電力）

(1) 研究開発目的

大出力容量を実現するため、SMES コイルには高耐電圧とともに大電流が要求される。想定している SMES の 100 MW 級出力には 2 kA 以上の電流容量が必要となるため⁽¹⁾、Y 系超電導線材を集合導体としてコイル化する必要がある。今回、素線絶縁した CVD-YBCO 線材(CVD 法により作製された Y 系超電導線材) 4 本を共巻きした集合導体コイルを製作し、液体ヘリウム中で 2 kA 級の大電流通電試験を実施し、集合導体コイルの通電特性を評価した。

(2) CVD-YBCO 集合導体コイルの大電流特性評価

a. 集合導体コイル製作

SMES コイルに要求される 2 kA 以上の電流容量を確保するため、Y 系超電導線材 4 枚を並列に束ねた集合導体としてコイル巻線した。また、コイルサイズは 2 GJ 級トロイダル型 SMES 主要諸元(11 T、600 MPa)と同等となる 20 MJ 級トロイダル型 SMES の要素コイルの外径 $\phi 650$ mm 級とした。そのコイル諸元を表 2.1.1-7-1 に、その外観写真を図 2.1.1-7-1 に示す。コイルは円盤型の一体内側電極に、4 素線を 90 度ずらした対称配置でハンダ付けして巻き始め、90 度ずつずらして対称配置された外側電極で巻き終わる形とすることで、回転対称の形状を確保し、4 素線のインダクタタンス等の電気定数を合わせることで、4 素線の均流化を図っている。

表 2.1.1-7-1 大電流通電試験用 4 束導体コイル諸元

線材種類	Cu めっき絶縁 CVD-YBCO 線材
線材幅	10 mm
導体素線数	4
コイル形状	シングルパンケーキ
内径	φ 520 mm
外径	φ 611 mm
高さ	11 mm
巻数	33 ターン

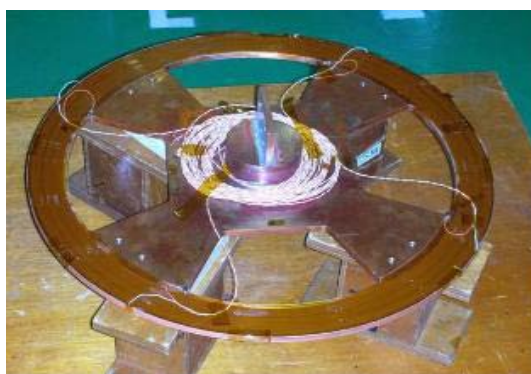


図 2.1.1-7-1 大電流通電試験用 4 束導体コイル外観（含浸後）

b. コイル通電確認試験

2 kA 級大電流通電に先行して、4 束導体コイルを液体窒素中で通電し、コイルの通電特性を確認した。素線電流は各素線にシャント抵抗を接続し、測定した。通電結果を図 2.1.1-7-2 に示す。4 束集合導体コイルの各素線電流には大きなばらつきが観測され、218 A 通電時、#4 素線の電流割合は 10 % 以下であった。各素線の外径側末端部の電圧をそれぞれ測定した結果、#4 素線抵抗値が他より高く観測された。#4 線材は電極接続部において Cu めっきが十分ではなかったため、接触抵抗が高くなり、偏流が生じたと考えられる。

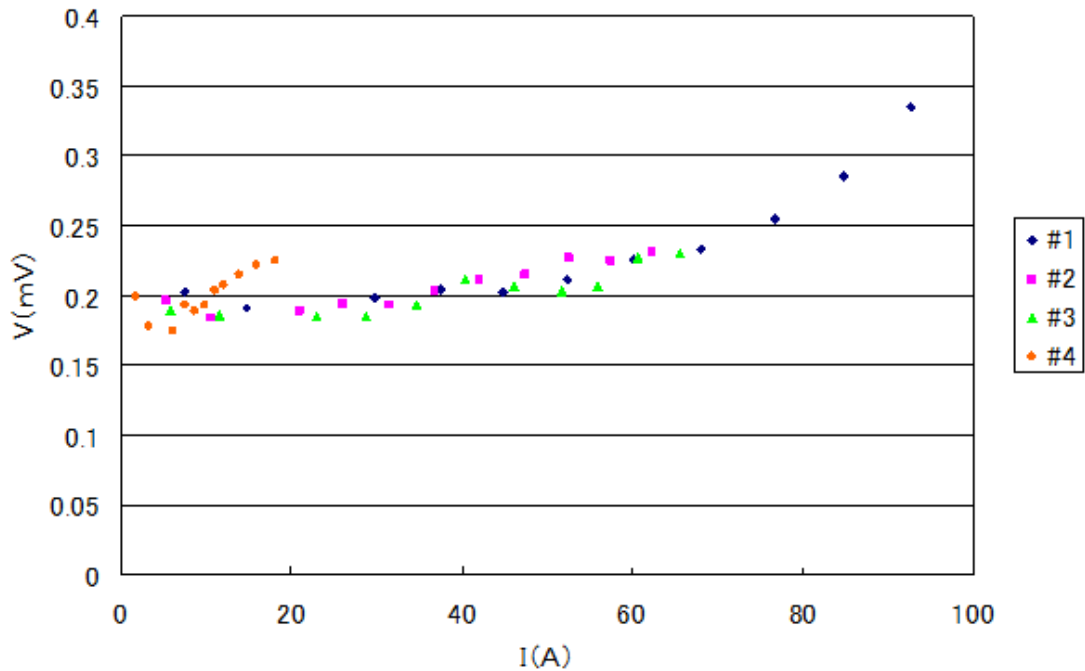


図 2.1.1-7-2 液体窒素中での 4 束導体コイル各素線 I-V 特性

c. 2 kA 級大電流通電試験

通電確認試験において 4 束導体電極部の抵抗差による偏流が生じたため、液体ヘリウム浸漬冷却通電試験を実施する前に、端末接続部を除き、Cu めっきが比較的良好な部位にて電極を形成した。電極部における線材接続長は全て 100 mm である。また、各素線の発生電圧を測定するための内側電極－外側端部間電圧タップの他、各素線間の偏流特性を評価するため、各外側電極近傍にホール素子を、また、4 束導体の各素線の外側端部－外側電極間に電圧タップを設置した。図 2.1.1-7-3 にコイルに設置したこれらの計測センサーの位置を示す。

液体ヘリウム中においてコイルに大電流を通電した時のコイル各素線の発生電圧を図 2.1.1-7-4 に示す。横軸はコイルの全通電電流を示したものである。コイルの全通電電流が 1 kA 付近までは各素線の発生電圧に大きな差異は観測されていないが、1 kA 付近から各素線の発生電圧に明確な差異が観測されているため、素線間に偏流が発生していることが推測される。

各素線の電流値を観測するために設けたホール素子で測定した各外側電極部での磁界の 1 次関数からの差異分、および外側端部－外側電極間電圧の 1 次関数からの差異分をそれぞれ図 2.1.1-7-5、および図 2.1.1-7-6 に示す。ホール素子で測定した各外側電極部での磁界の一次関数からの差異は、各素線間の偏流に基づく磁界と考えられる。また、外側端部－外側電極間電圧は、接続抵抗や Cu 電極そのものの抵抗による電圧降下が支配的であることから、外側端部－外側電極間電圧は各素線の通電電流と比例関係にあると考えられる。図 2.1.1-7-5、2.1.1-7-6 に示されるように両者は同様の傾向を示しており、全通電電流が 1 kA を超えた付近から素線#3 の電流割合が低下し、その後、素線#4 の電流割合が増加し、電流が増加するにつ

れ、素線 #3 から素線 #4 へ偏流が顕著に発生していると考えられる。

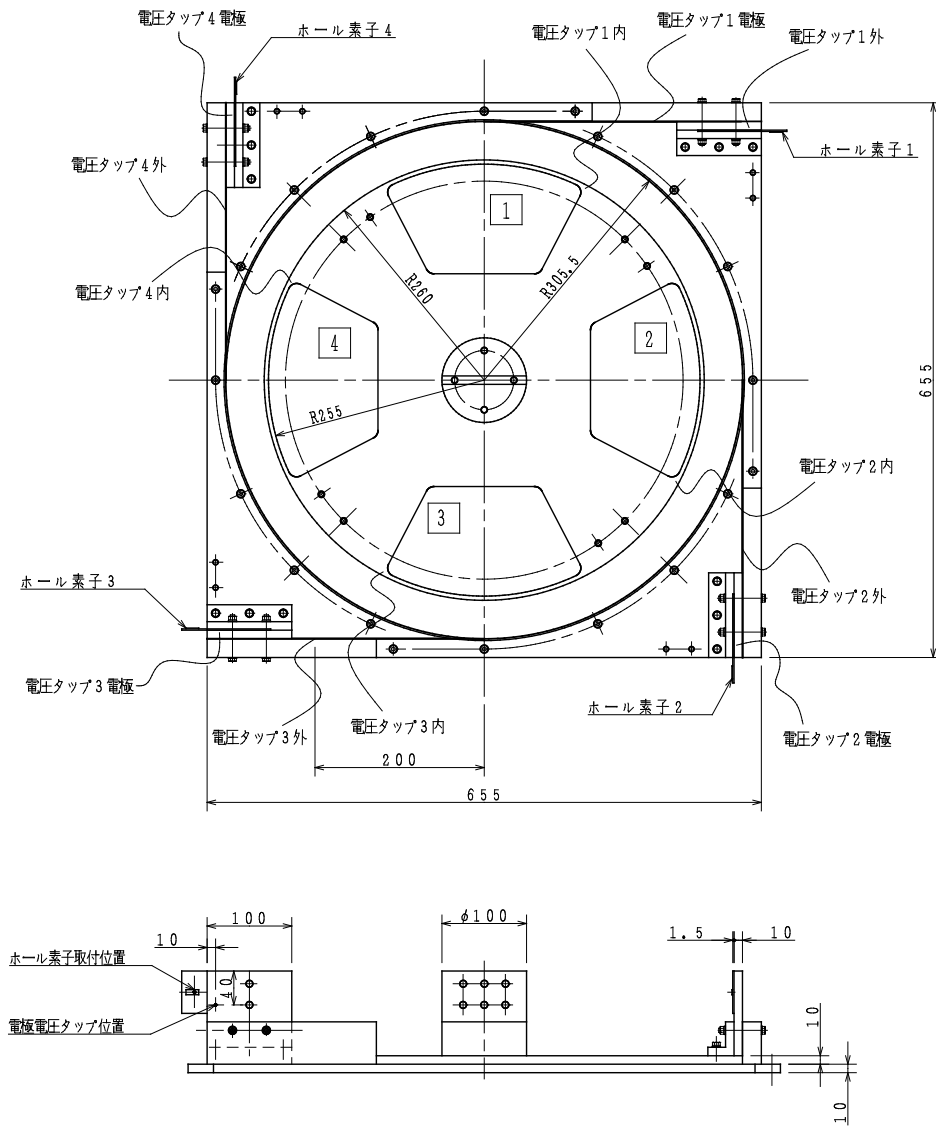


図 2.1.1-7-3 4 束導体コイルの電圧・磁界計測位置

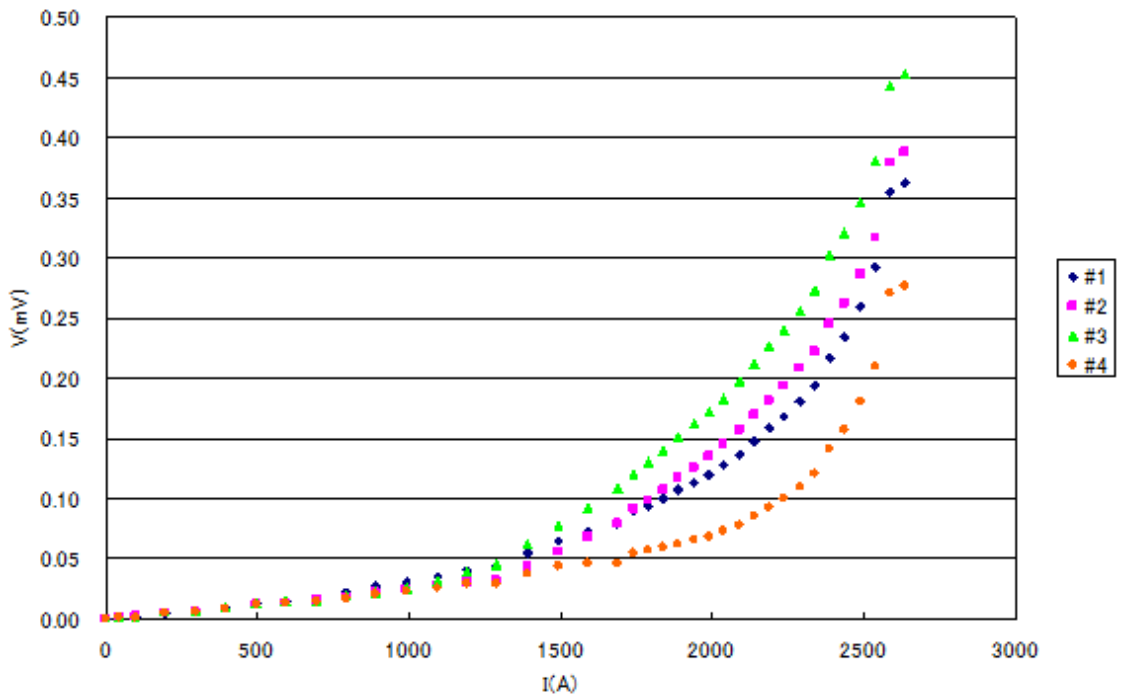


図 2.1.1-7-4 液体ヘリウム中での 4 束導体 I-V 特性
(横軸の電流値はコイル全電流)

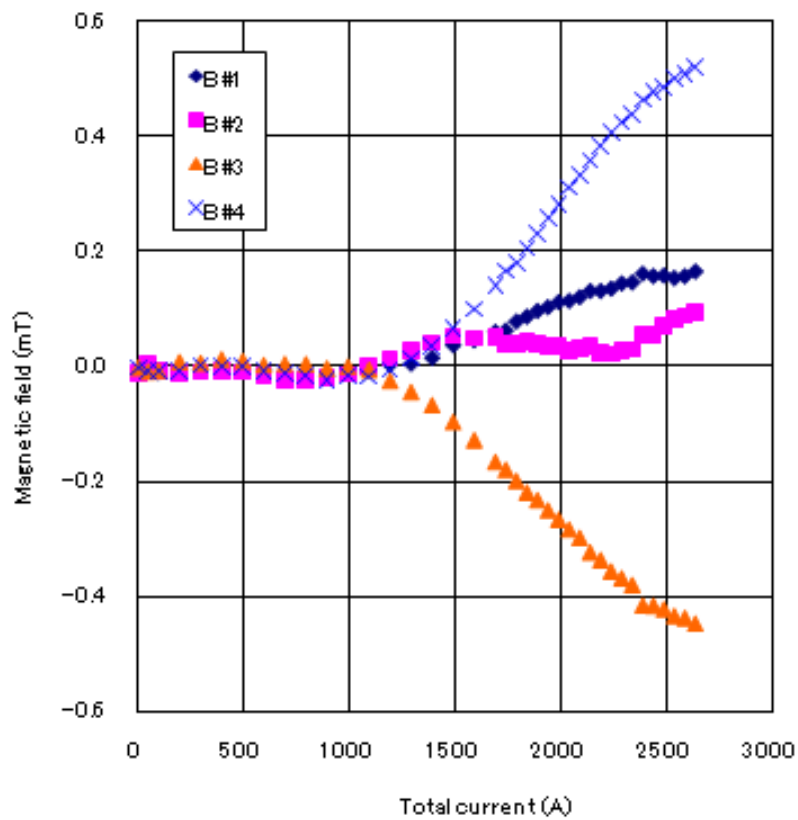


図 2.1.1-7-5 外側電極部での測定磁界 (一次関数からの差異分)

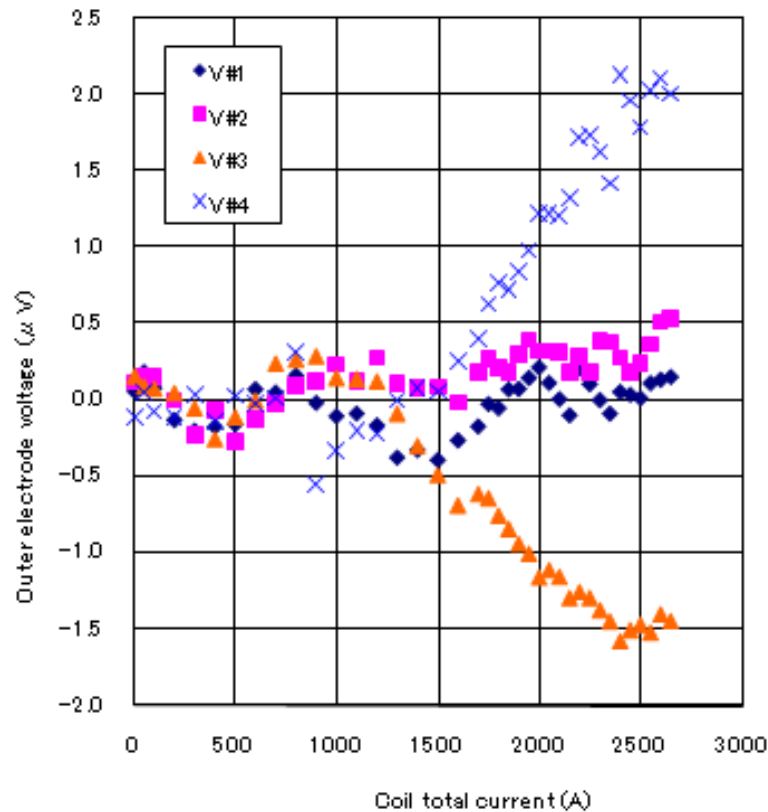


図 2.1.1-7-6 外側電極部の測定電圧（一次関数からの差異分）

これらのデータから各素線に流れた電流値を下記の 2 通りの方法で推定した。

まず、測定された磁界と解析解との比較から各素線に流れる電流値を推定した。ただし、以下の仮定を設定した。

- ・対象外の素線外側電極を流れる電流による影響は無視
- ・全電流 1 kA まで偏流はなく、1 kA 以上での磁界の変動が偏流によるものとし、データを補正(1 次係数の決定)
- ・推定した各素線電流の和が全電流と一致するように補正(2 kA 時で 3 %程度)

次に、外側端部－外側電極間電圧は主に抵抗成分によるものとし、1 kA までの発生電圧から、1 kA 以上の領域での通電電流値を推定した。ただし、以下の仮定を設定した。

- ・全電流 1 kA まで偏流はなく、1 kA 以上での電圧の変動が偏流によるものとし、データを補正(1 次係数の決定)
- ・推定した各素線の電流値の和が全電流と一致するように補正。(2 kA 時で 3 %程度)

以上の条件で算出した大電流通電試験時の各素線の電流値を図 2.1.1-7-7、図 2.1.1-7-8 に示す。両者は同様の傾向を示しており、1.2 kA 付近からコイル電流の増加に伴い偏流が顕著となり、最大 2,637 A 通電時の素線 #3 と素線 #4 の間には約 2 倍の電流差が生じたと推定される。これは、4 本の素線そのものの通電特性

に差があり、通電時の各素線インピーダンスに対して磁束フローによる発生電圧が無視できないレベルまで増加したためと考えられる。磁束フロー発生領域までのコイル通電を含めた SMES 運転を想定する場合は、冷却コストとの兼ね合いとなるが、集合化導体の素線通電特性が偏流に影響を及ぼし、さらに損失や電磁力へも影響を及ぼすことに留意する必要がある。

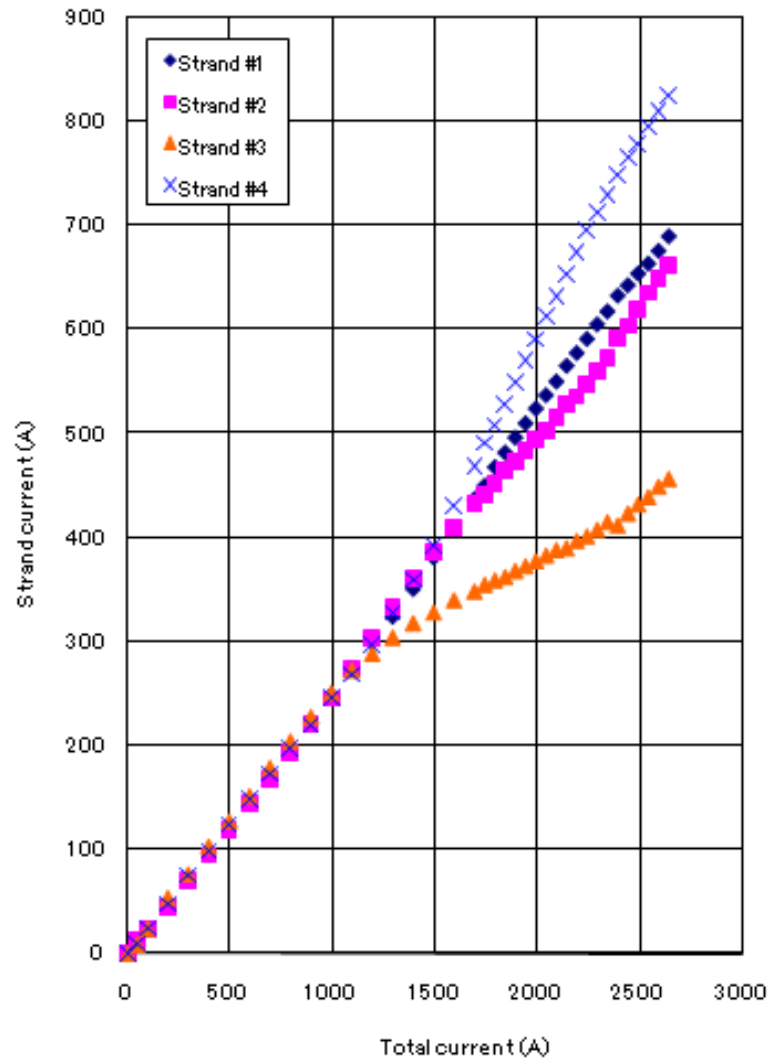


図 2.1.1-7-7 測定磁界から算出した 4 束導体コイルの各素線電流

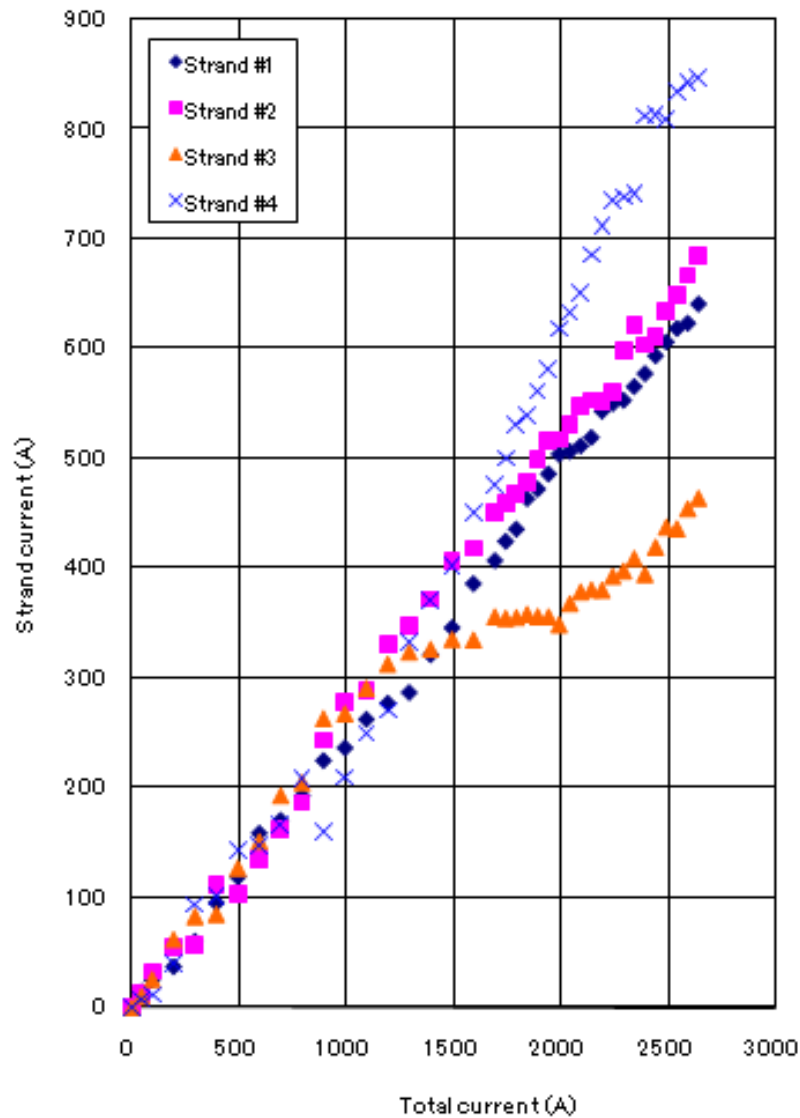


図 2.1.1-7-8 電極電圧から算出した 4 束導体コイルの各素線電流

(3) 結果

大出力容量 SMES コイルに要求される大電流通電特性を評価するため、CVD-YBCO 線材 4 本を束ねた集合導体コイルを製作し、2.6 kA の大電流通電を実証するとともに均流特性を確認した。

引用論文リスト

- (1) K. Shikimachi, N. Hirano, S. Nagaya et al., “System Coordination of 2 GJ Class YBCO SMES for Power System Control”, IEEE Trans. Appl. Supercond., vol.19, no.3, pp.2012-2018, 2009.

2.1.1-8 まとめ

従来の金属系 SMES コイルの許容可能なフープ応力(300 MPa 程度)の 2 倍の応力(600 MPa)を連続して繰返し加えても使用可能な高強度コイルとして、2 GJ 級大容量 SMES コイルの技術見通しを得るために必要な 20 MJ 級システムの要素コイル規模である外径 700 mm 級コイルを対象とした、フープ応力 600 MPa 以上、2 kA 以上の通電容量を持つ SMES コイル構成技術確立することを目標とし、開発を進めた。

CVD-Y 系超電導線材を用いたフープ応力評価用小型コイル(外径 250 mm)を製作し、従来の金属系 SMES コイルの許容フープ応力の 2 倍となる 600 MPa 級のフープ応力試験を CVD-Y 系コイルを用いて実施した。また、2GJ 級大容量 SMES コイルの技術見通しを得るために必要な 20 MJ 級システムの要素コイル規模となる SMES コイルの開発を開始した。SMES システムとして必要な出力容量を実現するため、機械特性や交流損失等を評価して構造を決定した大電流容量 Y 系超電導集合導体を用いて、高強度・低損失が実現可能な定格 2 kA 級、外径 650 mm 級のコイルを製作し、通電特性等の基礎検証試験を開始した。

今後も引き続き、電気機器や超電導技術に関する学識経験者、重電メーカー各社、および各電力会社等からなる超電導電力貯蔵システム研究開発委員会等を開催し、コイル構造等を十分に議論した上で開発を進める。

具体的には、22 年度末までには、NbTi コイルと組み合わせ、外径 650 mm のコイルにおいて 600 MPa 以上の電磁力を発生させる試験を実施し、コイルの健全性を評価する計画である。

2.1.2 高効率コイル伝導冷却技術開発

2.1.2-1 開発方針

(1) 研究開発目標

中間目標（平成 22 年度）

- ・ 20～40 K 付近の温度領域における伝導冷却を可能とするコイル伝導冷却技術を開発する。
- ・ 2 kV 以上の電気絶縁性能を有する高伝熱コイル構造を開発する。

(2) 研究内容

テープ線材を用いたパンケーキ型積層コイルの巻線間相互作用の評価が「超電導電力ネットワーク制御技術開発」プロジェクトの課題として残されているため、その評価を実施する。また、20 K～40 K 温度領域においては、従来の液体ヘリウムの温度領域に比べ、コイルが非常に高い熱安定性を有することを同プロジェクトにおいて確認しており、高い熱容量を活かした短時間過負荷運転が可能であり、また、高効率な冷凍機で冷却することが可能である。ただし、同温度領域においては、4K 温度領域と異なり固体熱伝導のみによる冷却システムだけでは十分な熱伝達の実現が困難である。一方、SMES システムとして必要な出力容量を実現するために必要となる高熱伝導性能とトレードオフの関係になる電気絶縁性能に関しては、「超電導応用基盤技術研究開発（第 II 期）」プロジェクトにおいて Y 系超電導線材の剥離等の劣化を回避できる材料開発も含めた含浸樹脂技術を開発し、「超電導電力ネットワーク制御技術開発」プロジェクトにおいて樹脂含浸コイルを試作して 20-40 K 領域において絶縁性能評価試験を行い、含浸コイルの部分放電開始電圧が 3 kV 程度であることを検証しているものの、同温度領域での真空／固体複合絶縁系に関する試験評価データは少ない。以上のことから、同温度領域の伝熱・電気絶縁に関するコイル特性評価を行い、高効率伝導冷却性能を有するとともに 2 kV 以上の電気絶縁性能を有するコイル構造を検討する。

さらに、2 kV 以上の耐電圧を有する伝導冷却型ダブルパンケーキコイル構造等を検討評価する。また、20-40 K 温度領域において十分な熱伝達を得るため、例えばガス冷媒配管を一部活用した冷却システムやヒートパイプを用いた冷却システム等の検討評価を行うとともに、20 MJ 級システムの要素コイル規模である外径 700 mm 級コイルを対象とした伝導冷却試験により SMES 運転時に想定される発熱に対し冷却できるシステムの成立性を検討し、「超電導電力ネットワーク制御技術開発」プロジェクトにおいて概念検討した一例であるコイルシステムの形状と発生熱量から必要とされる少なくとも 3 W/m² 以上の熱流束を可能とする高熱伝導冷却システムの開発を行う。

上記開発により、高効率伝導冷却性能かつ高耐電圧性能を有する高効率コイル伝導冷却技術を開発する。

2.1.2-2 コイル損失検討(中部電力、九州大学)

(1) 研究開発目的

2 GJ 級 SMES コイルは、多数のパンケーキコイルをトロイダル配置した構造を有するが、パンケーキコイルで発生する交流損失、特に超電導体内部への不可逆な磁束侵入に伴うヒステリシス損失の評価手法はまだ確立されていない。そこで、本研究では、パンケーキコイル特有の内部構造や、SMES として想定される運転パターンを考慮した履歴損失の算出方法を検討し、SMES コイル内で発生する交流損失を定量的に評価する。

(2) 通電電流の影響を考慮した SMES コイルの交流損失評価

電力系統制御用として概念設計された 2 GJ 級 SMES コイル⁽¹⁾に関して、図 2.1.2-2-1 に示すような 2 つのパターンで SMES を運転した場合を想定して、発生する交流損失を見積もった。ただし、通電電流の影響を考慮した各ターンの平行磁界損失と垂直磁界損失をそれぞれ評価し、その和を全交流損失とした^{(2)・(6)}。交流損失の全積算値(コイル 180 個分)に対する結果を表 2.1.2-2-1 に示す。外部磁界のみを考慮した場合と同様に、通電電流の影響を考慮した場合もパターン 2 の方が磁界変化の振幅が大きく、結果として発生する交流損失も大きくなる。外部磁界のみと比較して、平行磁界損失の大きさはほとんど変わらず、通電電流の影響は無視できることがわかる。これは、平行磁界成分の磁界振幅が中心到達磁界に比べて非常に大きいためである。一方、垂直磁界損失は通電電流の影響を強く受け、値が 2 倍以上増加した。その結果、パターン 2 の場合で全交流損失は 0.47 kW となる。SMES システム全体コストの観点から、全損失を 10 kW 以下に抑えることが必要であるが、この場合でも十分小さく、問題ないレベルである。

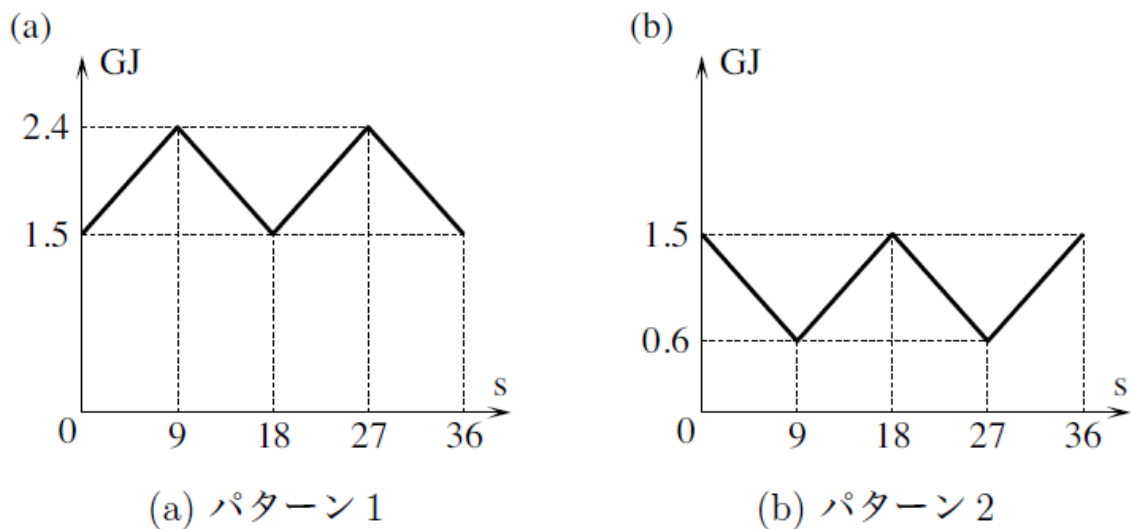


図 2.1.2-2-1 SMES の典型的な運転パターン

表 2.1.2-2-1 通電電流の影響を考慮した SMES コイルの交流損失

成分	パターン 1	パターン 2
平行磁界損失	0.05 kW	0.07 kW
垂直磁界損失	0.18 kW	0.40 kW
全交流損失	0.23 kW	0.47 kW

(3) 結果

Y 系超電導線材からなるパンケーキコイルを多数トロイダル配置した SMES 用コイルで発生する交流損失を定量的に評価した。負荷変動補償用 SMES の運転パターンを分析することにより、パンケーキコイルがさらされる複雑な電磁環境を明らかにし、従来の外部磁界のみに加え、通電電流の影響を考慮して交流損失を算出したが、冷却コストから制約される目標 10 kW より十分低い値であることを確認した。

引用論文リスト

- (1) K. Shikimachi, N. Hirano, S. Nagaya, H. Kawashima, K. Higashikawa and T. Nakamura: “System coordination of 2 GJ class YBCO SMES for power system control,” IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 19, No. 3 (2009) pp. 2012-2018.
- (2) W.J. Carr, Jr.: “AC loss from the combined action of transport current and applied field,” IEEE Trans. Magn., Vol. 15, No. 1 (1979) pp. 240-243.
- (3) K. Funaki, M. Iwakuma, K. Kajikawa, M. Takeo, J. Suehiro, M. Hara, K.

- Yamafuji, M. Konno, Y. Kasagawa, K. Okubo, Y. Yasukawa, S. Nose, M. Ueyama, K. Hayashi and K. Sato: “Development of a 500 kVA-class oxide-superconducting power transformer operated at liquid-nitrogen temperature,” *Cryogenics*, Vol. 38, No. 2 (1998) pp. 211-220.
- (4) K. Kawasaki, K. Kajikawa, M. Iwakuma and K. Funaki: “Theoretical expressions for AC losses of superconducting coils in external magnetic field and transport current with phase difference,” *Physica C*, Vols. 357-360, Part 2 (2001) pp. 1205-1208.
- (5) 柁川一弘、船木和夫、式町浩二、平野直樹、長屋重夫：「SMES の充放電動作を模擬したパンケーキコイル巻線の交流損失評価」、第 80 回 2008 年度春季低温工学・超電導学会(2009) 1P-p19.
- (6) K. Kajikawa, K. Funaki, K. Shikimachi, N. Hirano and S. Nagaya: “Numerical and theoretical evaluations of AC losses for single and infinite numbers of superconductor strips with direct and alternating transport currents in external AC magnetic field,” *Physica C* (2010) in press.

2. 1. 2-3 高耐電圧・高熱伝導コイル構造検討（中部電力）

(1) 研究開発目的

伝導冷却システムに組み合わせることが可能で、対地絶縁性能 2 kV（設計目標 6 kV）、及び表面での熱流束 3 W/m²（一様）となるコイルについて構造検討する。なお、表面での熱流束については、2 GJ 級 SMES の運転に伴い発熱する熱量を、冷却できるコイル断面積で除した値として設定したものである。

(2) 絶縁設計の考え方

はじめに、対地絶縁性能 2 kV（設計目標 6 kV）を満たす絶縁厚さを計算する。巻線機器の直流機器の試験電圧は、JEC によると定格電圧 E(kV)の場合に 2E+1 kV の試験電圧と定められている。本装置でも目標定格電圧 6 kV に対して試験電圧を 2E+1 の 13 kV とする。設計値はこれに裕度を考慮する。ケーブルでは規格が決まっているが、電力機器ではこのようなものは無く、各メーカーで基準が異なる。

設計裕度として絶縁耐圧の経時劣化を考慮し以下のように設定する。絶縁耐圧の時間変化には $t \propto V^{-n}$ の関係があり、FRP では $n = 12 \sim 14$ になるとされている。ここではより劣化の大きい $n = 12$ の場合を想定する。1 分間の耐電圧試験で確認した耐電圧が 30 年後にどこまで劣化するかを図 2.1.2.-3-1 に示す。この場合、30 年後には 25 %まで低下するので、これを見越して裕度 4 倍以上が必要である。ここでは $13 \times 4 = 52$ kV を設計値とする。

ここで、絶縁破壊電圧は耐電圧試験で確認した電圧より高いこと、 n が 12 より大きければ経時劣化はもっと小さいこと、真空中・低温の環境で使用する超電導コ

イルでは熱および酸化劣化が小さいと考えられることから、4倍の裕度は安全側と考えられる。

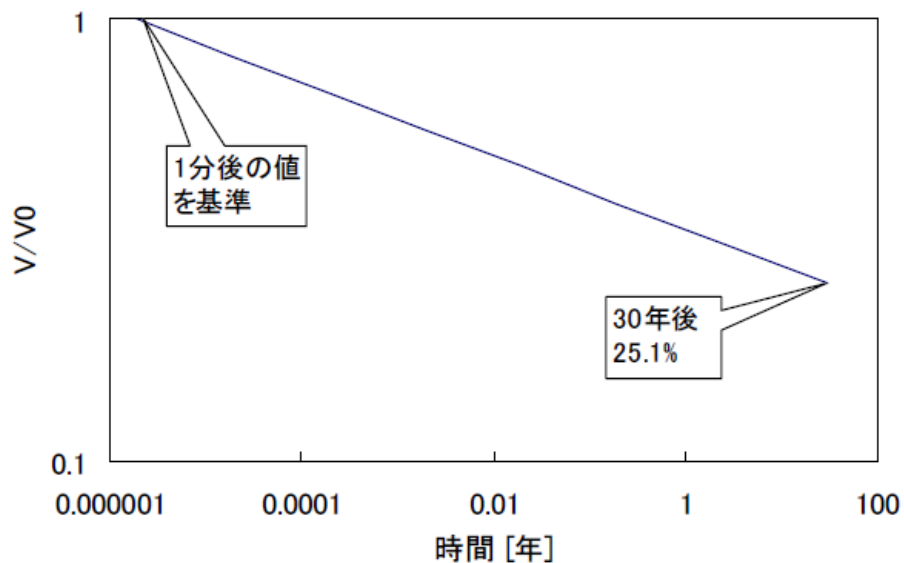


図 2.1.2-3-1 絶縁耐力の経時変化

一方、GFRP 板の絶縁耐圧は材料により異なるが安全側のデータとして、厚さ 3.175 mm の板で 15.7 kV/mm の値を用いた。また絶縁板の厚さと絶縁耐圧の間には $V \propto d^n$ の関係があり、 n は 0.6~1 の値を示す。図 2.1.2-3-2 に n が 0.6 の場合と 1 の場合の絶縁板厚さと絶縁耐圧の関係を示す。2 本の線の低い方の値を採用することにして、この図から 52 kV に耐える厚さを求めると 3.4 mm 以上となる。本検討では絶縁用 FRP 板の厚さを 4 mm とした。

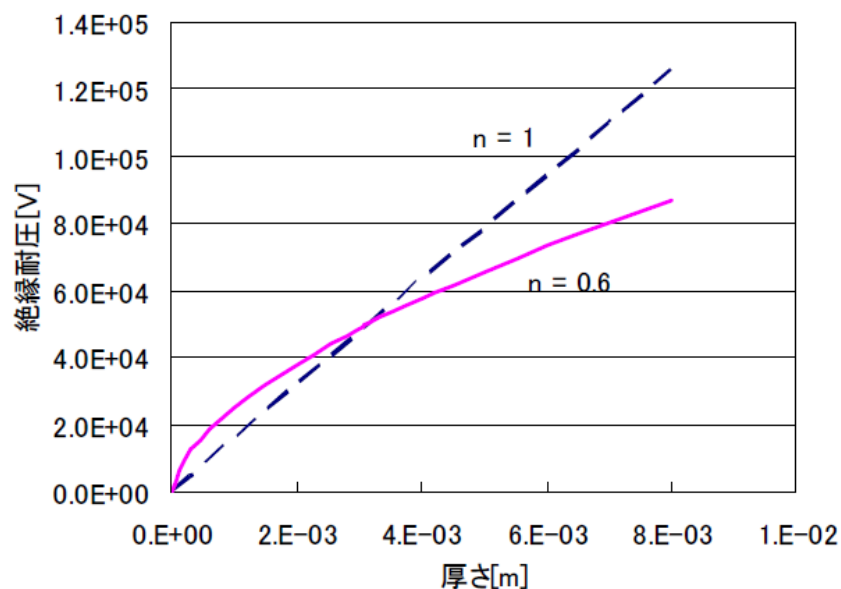


図 2.1.2-3-2 GFRP の厚さと絶縁耐圧の関係

(3) コイルの伝熱量の考え方

コイル断面構造を仮定し、コイル表面で 3 W/m^2 の一様な熱流束があった場合のコイル内部および対地絶縁部で生じる温度差について検討した。

計算モデルとしてコイル断面形状を図 2.1.2-3-3 に示す。コイル表面での熱流束が一様な条件なので r 、 θ 方向の対称性から z 軸のみの 1 次元モデルとした。また、対称性を考慮して 4 パンケーキの下半分の 2 パンケーキ分をモデル化した。計算モデルを図 2.1.2-3-4 に示す。

コイルへの熱負荷としては、コイル発熱と外部からの輻射熱が考えられるが、コイル発熱と比較して輻射熱は小さいため、熱負荷としてコイル発熱のみを考慮した。コイル発熱はコイル表面での熱流束が 3 W/m^2 となる条件とし、コイル巻線部で一様に発熱するとした。

計算に用いた諸元を表 2.1.2-3-1 に示す。

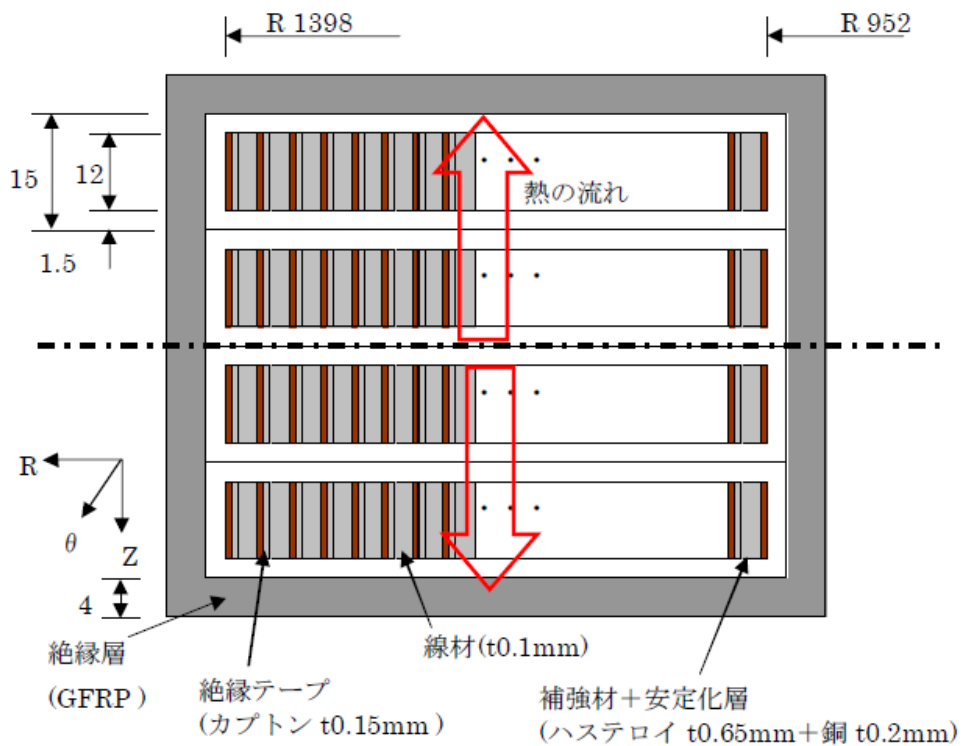


図 2.1.2-3-3 コイル断面形状

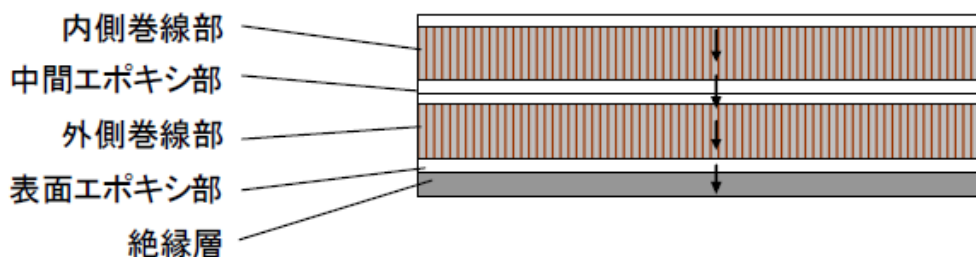


図 2.1.2-3-4 計算モデル(1次元)

表 2.1.2-3-1 検討条件

要素コイル寸法	外半径	1.4 m
	内半径	1.0 m
	高さ	60 mm
	表面積(両側面)	6.03 m ²
熱流束 (一様)		3.0 W/m ²
伝熱量(1 コイル当り)		18.1 W

コイル内部の z 方向温度分布は、コイル内をセルに分割して各セルの温度差を計算し、この温度差を積算する方法を用いた。各セルの温度差は式 2.1.2-3-1 で表される。

$$q = \frac{Q}{A} = \lambda \frac{dT}{dx} \quad \text{式 2.1.2.3-1}$$

ここでλは、絶縁層とエポキシ部及び FRP 板ではエポキシの熱伝導率を用い、コイル巻線部ではコイル巻線部 z 軸方向の等価熱伝導率を用いた。コイル巻線部の z 軸方向の等価熱伝導率λ_zは、線材と補強材の熱伝導率としてハステロイ™の値を、絶縁テープと絶縁材の熱伝導率としてエポキシの値を用い、安定化層を銅として式 2.1.2-3-2 から計算した。

$$\lambda_z = \frac{A_{\text{ハステロイ}}}{A} \lambda_{\text{ハステロイ}} + \frac{A_{\text{エポキシ}}}{A} \lambda_{\text{エポキシ}} + \frac{A_{\text{銅}}}{A} \lambda_{\text{銅}} \quad \text{式 2.1.2.3-2}$$

各材料の熱伝導率と等価熱伝導率を表 2.1.2-3-2 に示す。温度分布計算には 20K での値を用いた。

表 2.1.2-3-2 各材料の熱伝導率と等価熱伝導率

材質	厚さ	熱伝導率
線材(ハステロイ™)	0.10 mm	2.8 W/m K
補強材(ハステロイ™)	0.65 mm	2.8 W/m K
安定化銅	0.20 mm	833 W/m K
カプトン	0.15 mm	0.10 W/m K
巻線部 z 軸方向	1.10 mm	153 W/ mK

(4) 結果

伝導冷却に用いるコイルの形状について検討した。このときの線間の絶縁厚については、解析結果より、FRB の厚み 4 mm あれば 2 kV 以上の絶縁を確保できることがわかった。ここで、コイル内の温度差の分布の計算結果を図 2.1.2-3-5 に示す。コイル巻線部と絶縁部では熱伝導率が異なるため温度分布に違いが生じ、コイ

ル表面と絶縁層の温度差は 0.17 K で、コイル内部の温度差を合わせても 0.21 K となる。コイルと冷凍機間の温度差としてこの温度差を見込むこととした。今後、伝導冷却システムの検証の中で、今回設計した絶縁性能について確認する予定である。

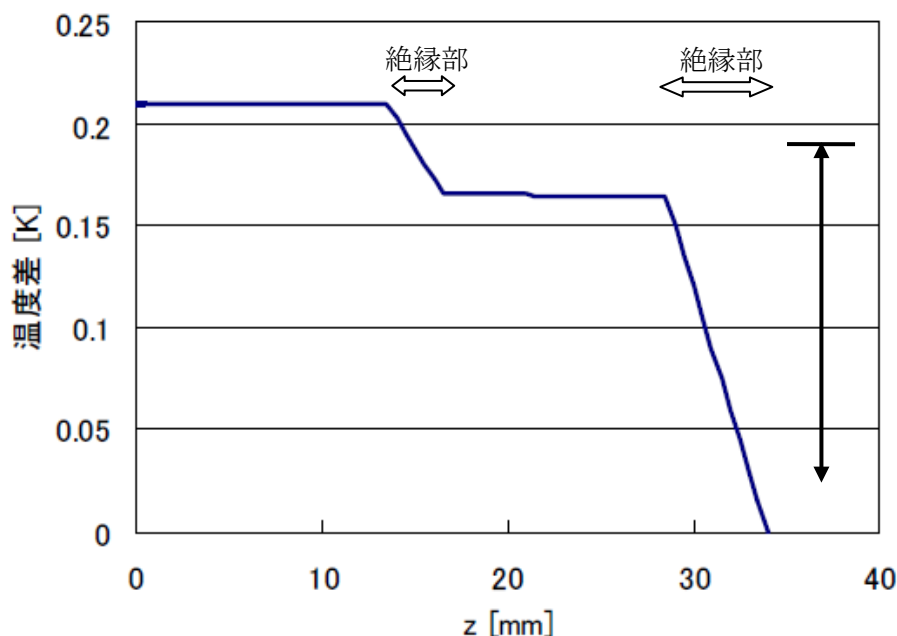


図 2.1.2-3-5 コイル内の温度差分布

引用論文リスト

- (1) 放電ハンドブック 第2版 下巻 p251
- (2) 超伝導・低温工学ハンドブック p1088

2.1.2-4 長距離伝導冷却システム試作・評価（中部電力）

(1) 目的

2 GJ 級 SMES の冷却システム実現に必要な伝導冷却特性（2 GJ 級 SMES の熱負荷を加えてコイル温度を 20 K 程度に冷却できる能力）および電気絶縁性を満足する冷却試験モデルシステムを作製し、性能を検証する。

具体的には、2 GJ 級コイル表面での熱流束 3 W/m^2 を模擬するため、試験発熱体で約 9 W 相当の熱量を発生(模擬コイル表面積 3 m^2)させ、試験体各部の温度を測定・記録し、コイル表面温度が上昇しないことを確認する。

(2) 冷却系の構成

伝導冷却試験装置の構成を図 2.1.2-4-1 に示す。1 台のコイル用冷凍機で冷却したガスを用いて試験用発熱体を冷却する。

この冷却系における配管出口温度を検討し、構成が妥当であることを検証する。ここでは配管の熱伝達による温度差等は無視し、冷凍機の温度上昇と配管入口出口の温度差のみを考慮した。検討に用いた冷凍機の冷凍能力を図 2.1.2-4-2 に示す。また、熱交換器効率を 95 %、室温温度は 300 K とした。熱負荷条件を表 2.1.2-4-1 に示す。

検討結果として、 3 W/m^2 の熱負荷での流量と配管出口温度の関係を図 2.1.2-4-3 に、 9 W/コイル の熱負荷での流量と配管出口温度の関係を図 2.1.2-4-4 に示す。配管出口温度は 20 K 程度であり、冷却系の構成は妥当であると考えられる。

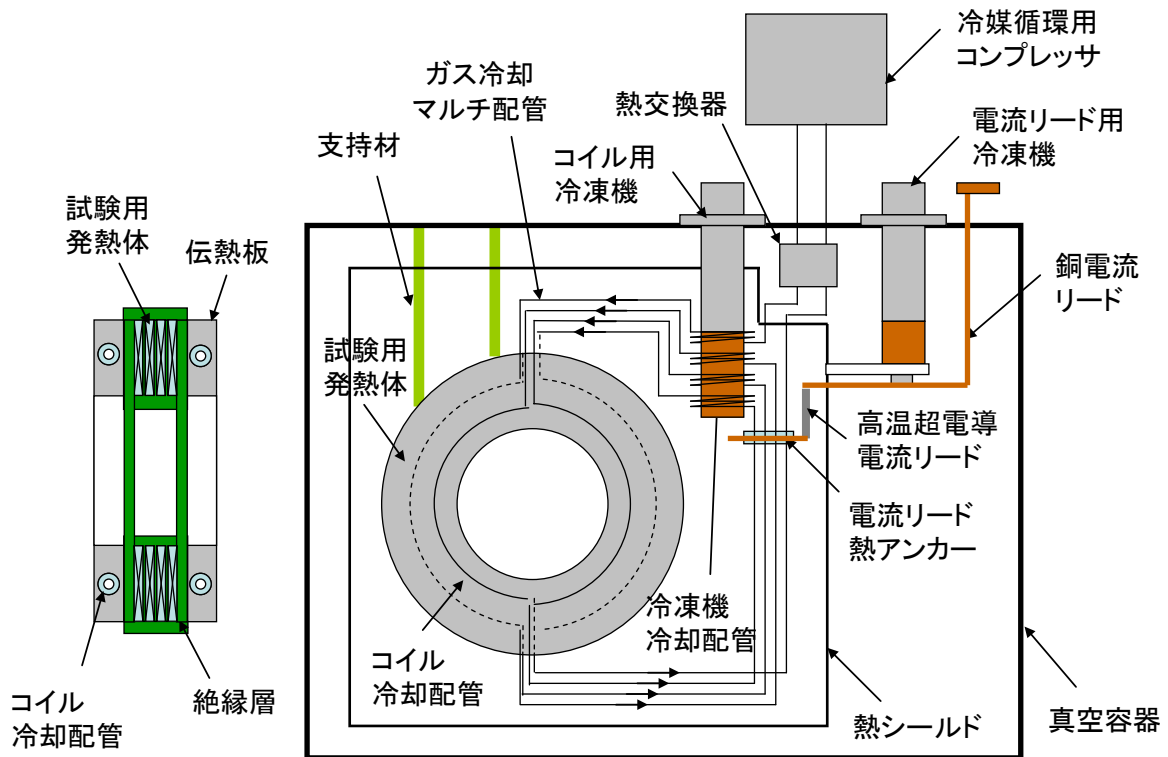


図 2.1.2-4-1 伝導冷却試験装置の構成

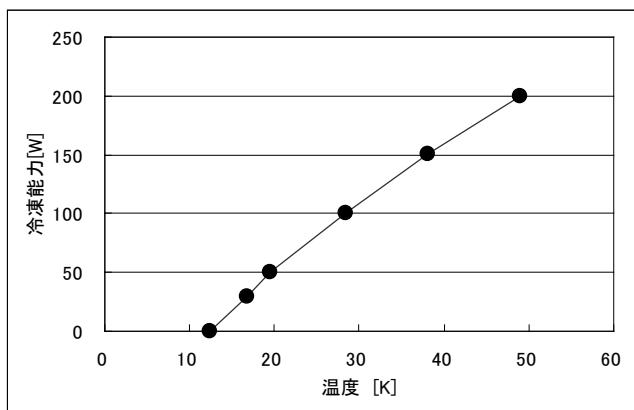


図 2.1.2-4-2 冷凍機温度と冷凍能力の関係

表 2.1.2-4-1 試験用発熱体の熱負荷

	条件 1	条件 2
コイル発熱(模擬)	1.23 W	9.0 W
1 配管当りの伝熱量	0.31 W	2.25 W

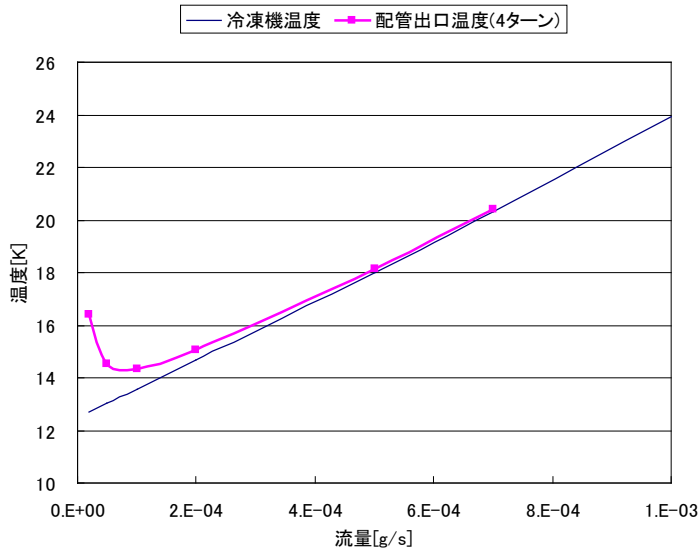


図 2.1.2-4-3 3 W/m² 相当の熱負荷での流量と配管出口温度の関係

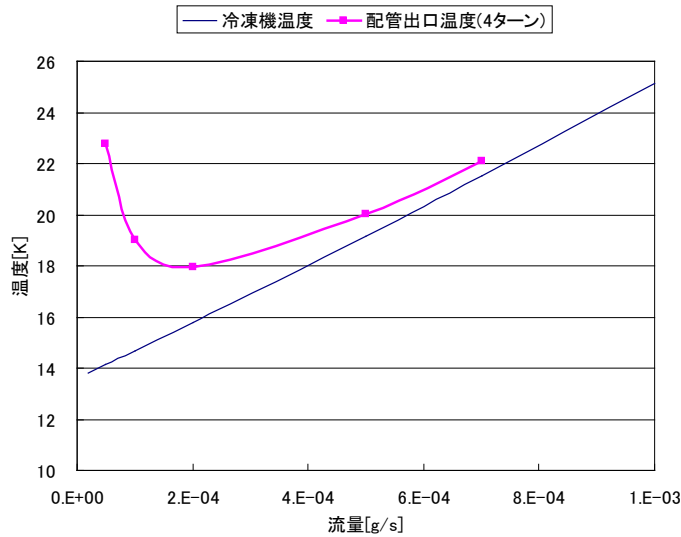


図 2.1.2-4-4 9 W/コイル相当の熱負荷での流量と配管出口温度の関係

(3) 試験用発熱体の構成

試験用発熱体の寸法は実規模コイルの寸法に合わせ表 2.1.2-4-2 の数値とした。また r 、 θ 、 z 方向の等価熱伝導率が 2 GJ 級 SMES コイルに近くなるような構成を考える。2 GJ 級 SMES コイルの材質と等価熱伝導率を表 2.1.2-4-3 に示す。等価熱伝導率の計算は直列の場合は式 2.1.2-4-1 を並列の場合は式 2.1.2-4-2 を用いた。

$$\text{直列の場合} \quad \lambda = \left(\sum_k \frac{l_k}{l} \frac{1}{\lambda_k} \right)^{-1} \quad (\text{式 2.1.2-4-1})$$

$$\text{並列の場合} \quad \lambda = \sum_k \frac{A_k}{A} \lambda_k \quad (\text{式 2.1.2-4-2})$$

θ 、 z 方向の等価熱伝導率は153 W/m Kと大きく、アルミ(A1100)と同程度である。一方、 r 方向の等価熱伝導率はかなり小さくこれを模擬するためにはアルミ板を分割してFRPを挟む構成とする。試験用発熱体の断面形状を図2.1.2-4-5に、この構成での等価熱伝導率を計算した結果を表2.1.2-4-4に示す。

表 2.1.2-4-2 試験用発熱体の寸法

外径	650 mm
内径	400 mm (1.29 mm 幅×160 m 線材 97 ターンと仮定)
厚さ	60 mm

表 2.1.2-4-3 コイルの構成と等価熱伝導率

	材質	厚さ	比率	熱伝導率
線材	ハステロイ TM	0.10 mm	9.1 %	2.80 W/m K
補強材	ハステロイ TM	0.65 mm	59.1 %	2.80 W/m K
安定化材	銅	0.20 mm	18.2 %	833 W/m K
絶縁材	エポキシ	0.15 mm	13.6 %	0.10 W/m K
合計		1.10 mm		

巻線部等価熱伝導率(θ 、 z) 153 W/m K

巻線部等価熱伝導率(r) 0.62 W/m K

表 2.1.2-4-4 試験用発熱体の分割構成と等価熱伝導率

	材質	幅	比率	熱伝導率
アルミ板	A1100	105 mm	84.0 %	200 W/m K
絶縁材	FRP	20 mm	16.0 %	0.10 W/m K

巻線部等価熱伝導率(θ 、 z) 168 W/m K

巻線部等価熱伝導率(r) 0.62 W/m K

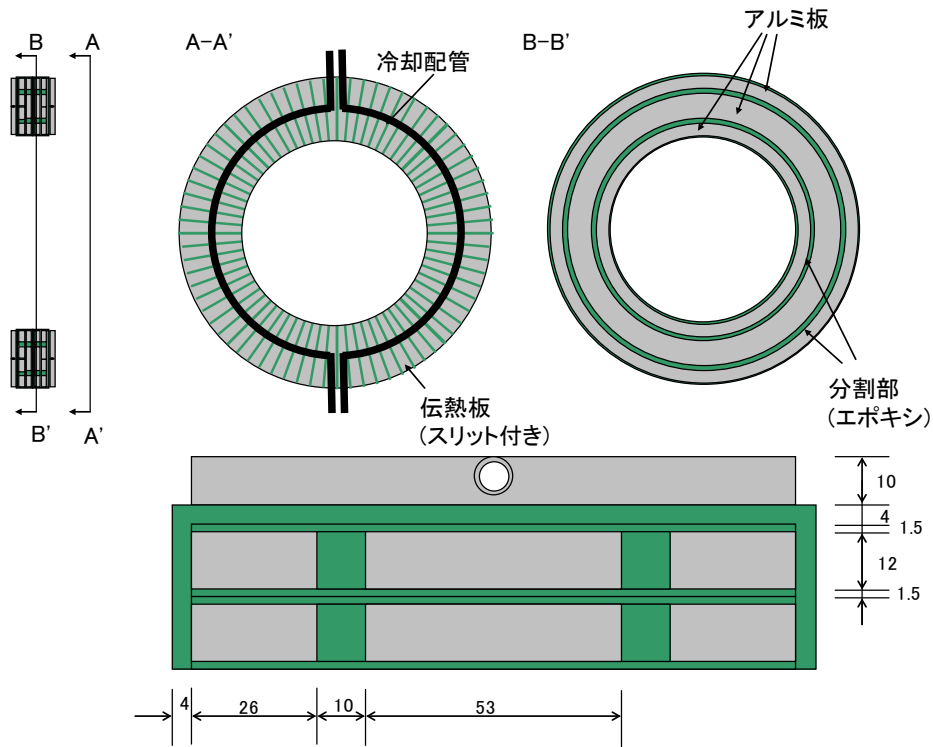


図 2.1.2-4-5 試験用発熱体の断面形状

(4) 実規模コイルの発熱分布モデルと冷却シミュレーション

これまではコイルが均一発熱している場合について検討してきたが、2 GJ 級 SMES コイルには発熱分布が存在する (図 2.1.2-4-6)。

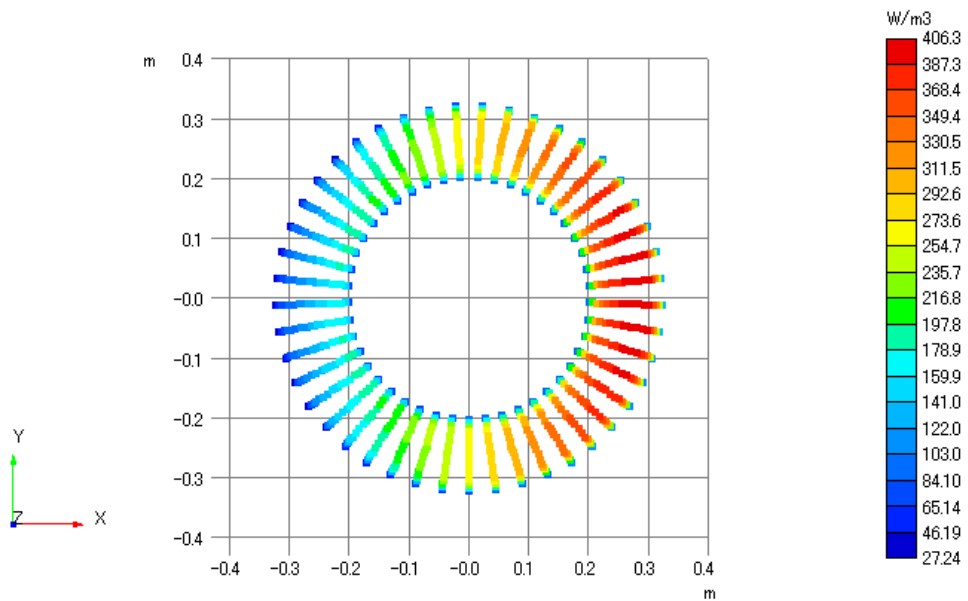


図 2.1.2-4-6 実規模コイルの発熱分布 (外側コイル)

この発熱分布がある実規模コイルに対し冷却シミュレーションを実施した。解析条件を表 2.1.2-4-5 に示す。

表 2.1.2-4-5 発熱分布がある実規模コイルの冷却シミュレーション条件

	C 1
コイル表面熱流速	21.8 W / m ²
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	分布

注)ガス流量は 2 GJ 級 SMES コイルにおいて計算上冷却能力が最も高くなる値を採用

解析結果を図 2.1.2-4-7 に示す。

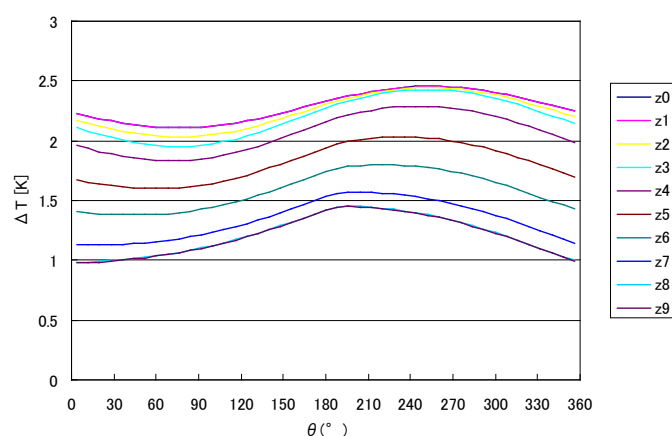


図 2.1.2-4-7 実規模コイルの ΔT 分布 (1 配管当たり発熱 2.25 W)
(最外周部、配管入口温度基準、z0 がコイル内側、発熱分布有り)

(5) 試験用発熱体のヒーター取付け位置

前項の結果を受け、発熱分布を模擬できるようにヒーターは周方向に 6 等分配置することとする。取付け位置を図 2.1.2-4-8 及び図 2.1.2-4-9 に示す。

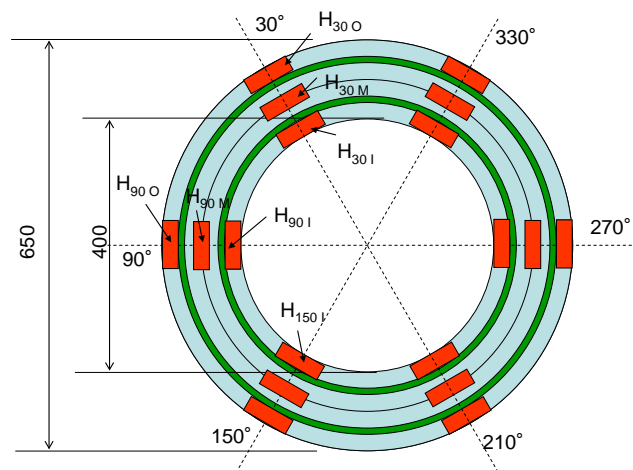


図 2.1.2-4-8 ヒーター取付け位置（平面図）

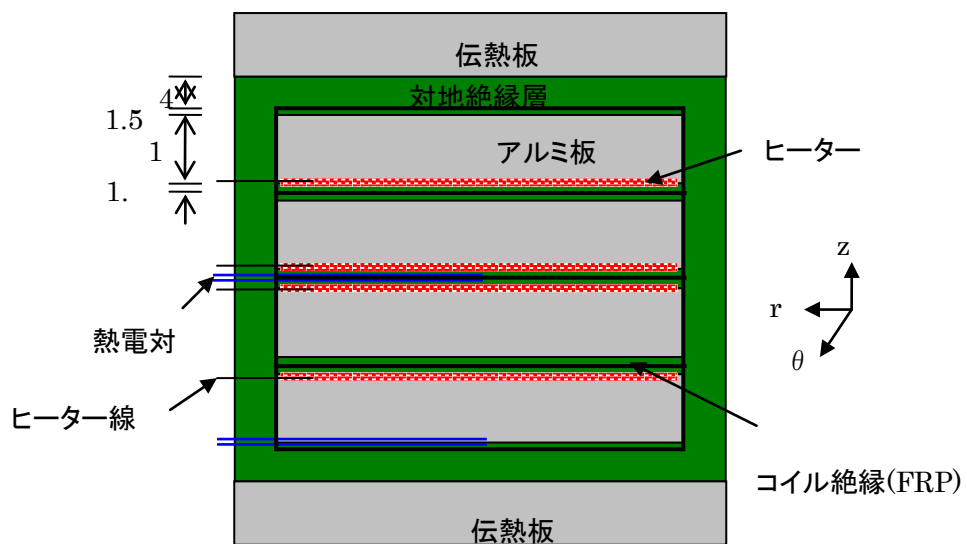


図 2.1.2-4-9 ヒーター取付け位置（断面図）

(6) 伝導冷却試験装置製作

①伝熱性能

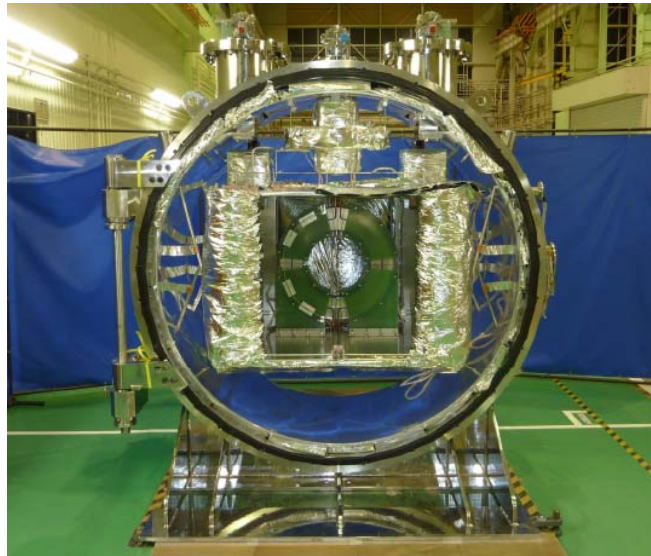
コイル（試験用発熱体）表面で平均熱流束 3 W/m^2 の熱交換を行い、コイル（試験用発熱体）温度を 20 K 程度に冷却できる能力とする。また、冷却性能を検証するため、以下のア～オの温度を $4 \sim 80 \text{ K}$ 領域において 0.1 K 程度の精度で計測を行えるものとする。

- ア) コイル（試験用発熱体）温度
- イ) コイル（試験用発熱体）－伝熱板間の絶縁層温度
- ウ) 伝熱板温度
- エ) コイル冷却配管内の入口及び出口温度
- オ) 冷凍機冷却配管の入口及び出口温度

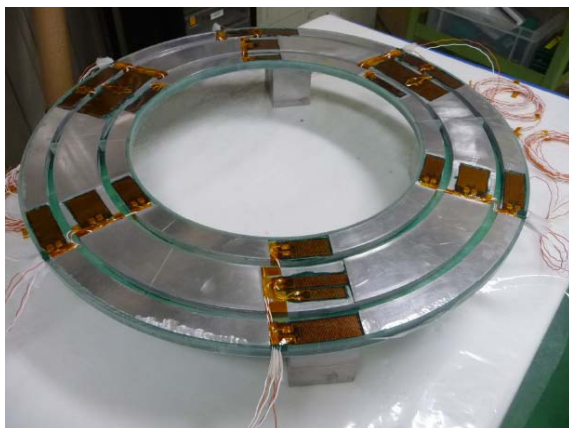
②絶縁性能

コイル（試験用発熱体）－伝熱板間の電気絶縁性能を 6 kV 以上とする。

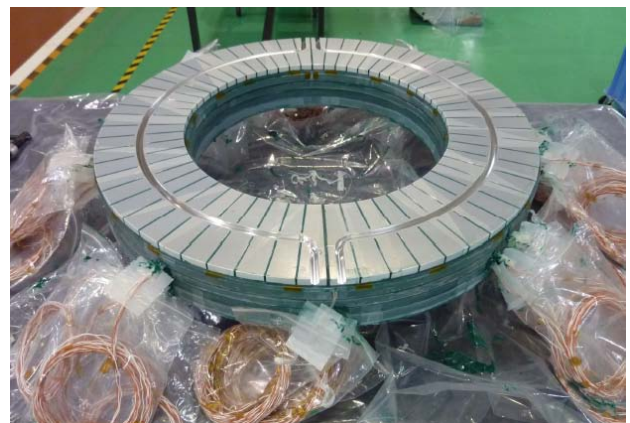
これらの性能を満たす伝導冷却試験装置について図 2.1.2-4-10 のように製作した。



(a) 伝導冷却試験装置全体



(b) 試験用発熱体



(c) 試験用発熱体冷却部

図 2.1.2-4-10 伝導冷却試験装置

(7) 模擬コイルによる伝導冷却試験

図 2.1.2-4-10 の伝導冷却試験装置は、冷凍機で冷却したヘリウムガスを循環させることで、コイルを模擬した試験用発熱体を冷却する。冷凍機－伝熱板間のガス冷却系での伝熱と、伝熱板とコイル内部の伝導冷却系の伝熱特性を測定する。ガス冷却系は循環用コンプレッサ、熱交換器、冷凍機伝熱部、コイル伝熱部、電流リード熱アンカーとそれらをつなぐ配管で構成される。ガス冷却系の測定項目としては、コンプレッサ流量特性、熱交換器効率、各伝熱部の伝熱特性、各部の圧力損失がある。また、伝導冷却系は伝熱板、絶縁層、コイル（試験用発熱体）で構成される。伝導冷却系の測定項目としてはコイル内伝熱特性、絶縁層伝熱特性、伝熱板伝熱特

性がある。

そこで、伝導冷却試験装置の温度、圧力、流量の計測点を図 2.1.2-4-11 に示す。また、コイルに与えるヒーター入力値を表 2.1.2-4-5 に示す。

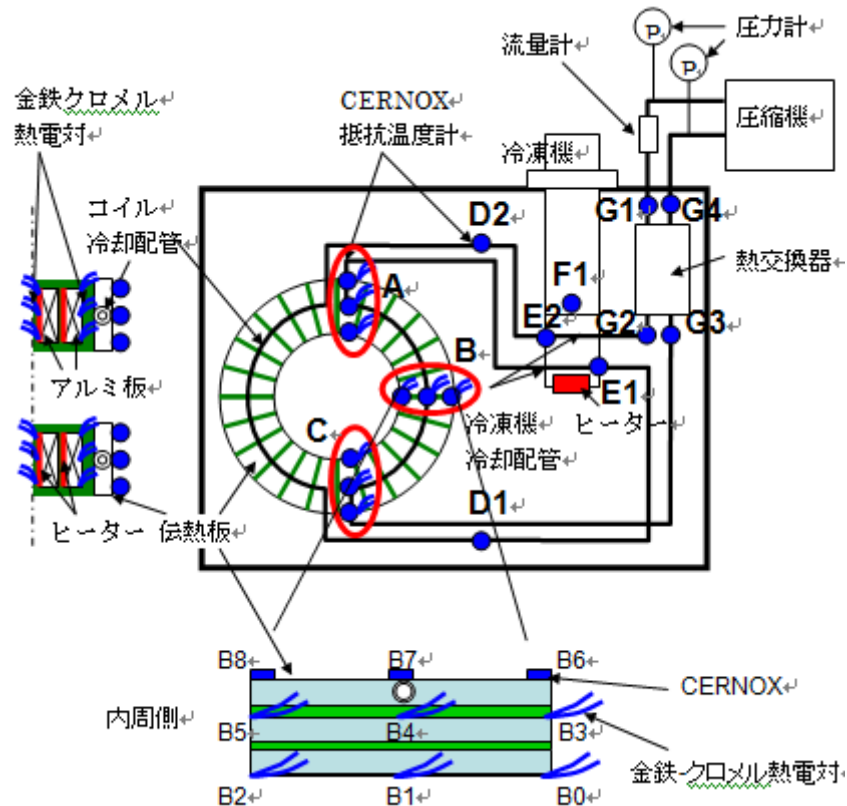


図 2.1.2-4-11 伝導冷却試験装置の計測点

表 2.1.2-4-5 発熱分布を模擬した場合のヒーター入力値 (合計 9 W)

	内側コイル			外側コイル		
	内側:内周	内側:中間	内側:外周	外側:内周	外側:中間	外側:外周
0° -60°	0.009 W	0.023 W	0.014 W	0.084 W	0.306 W	0.125 W
60° -120°	0.009 W	0.023 W	0.014 W	0.084 W	0.226 W	0.125 W
120° -180°	0.009 W	0.023 W	0.014 W	0.084 W	0.306 W	0.125 W
180° -240°	0.009 W	0.023 W	0.014 W	0.153 W	0.500 W	0.227 W
240° -300°	0.009 W	0.023 W	0.014 W	0.200 W	0.575 W	0.227 W
300° -360°	0.009 W	0.023 W	0.014 W	0.153 W	0.500 W	0.227 W

今後、模擬発熱体を使った伝導冷却システム試験装置を運転し、設計通り冷却できているかを評価する予定である。また、模擬発熱体を実規模コイルに置き換え、実規模コイルにおいても冷却性能を確認する予定である。

引用論文リスト

超伝導・低温工学ハンドブック p1088

2.1.2-5 絶縁特性向上に関する検討（中部電力、名古屋大学）

(1) 研究開発の目標

SMES 開発において解決すべき技術課題の一つとして、電気絶縁設計が挙げられる。SMES の電力機器としての基礎性能である耐電圧性能については未解明な部分が多く、実用化に向けての技術的障壁となっている。特に、伝導冷却 SMES では、極低温／真空／固体絶縁物による複雑な絶縁環境が形成される。このような複合絶縁系においては、絶縁破壊の前駆現象としての部分放電（PD）特性の把握が重要となるが、極低温／真空／固体複合絶縁系の PD 特性に関する研究は皆無であると言っても過言ではない。そこで、本研究では、伝導冷却 SMES における超電導コイルの絶縁性能向上を目標として、電界解析によりターン間絶縁および対地絶縁方法を検討した。さらに、伝導冷却コイルモデルを用いて、PD 開始特性を実験的に評価した。

(2) 研究開発の内容

a. SMES コイルの印加電圧波形

SMES システムは、図 2.1.2-5-1 に示すようにインバータ、チョッパ、超電導コイルで構成され、超電導コイルには図 2.1.2-5-2 に示すような直流電圧とサージ電圧が重畳した両極性繰り返し電圧が印加される。このような複雑な電圧波形が印加される SMES コイルの絶縁性能を評価する際、正弦波交流電圧による絶縁試験が考えられる。これは、SMES コイルの電圧波形がピーク値を持つこと、両極性の繰り返し波形であることなどの類似点に基づいている。また、サージ電圧に対する耐電圧が交流電圧に対する耐電圧よりも一般的に高いことを考慮すれば、安全サイドの絶縁性能を確保すると言う意味においても妥当である。以上のような観点から、本研究では正弦波交流電圧（60 Hz）を用いることとした。

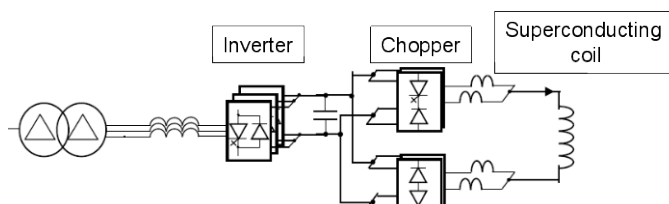


図 2.1.2-5-1 SMES システムの構成

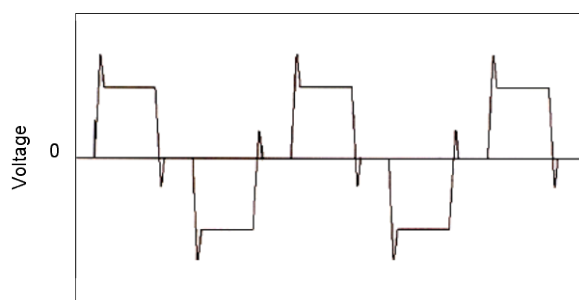


図 2.1.2-5-2 SMES コイルの印加電圧

b. Y系超電導コイルモデルの電界解析

1) Y系超電導コイルモデル

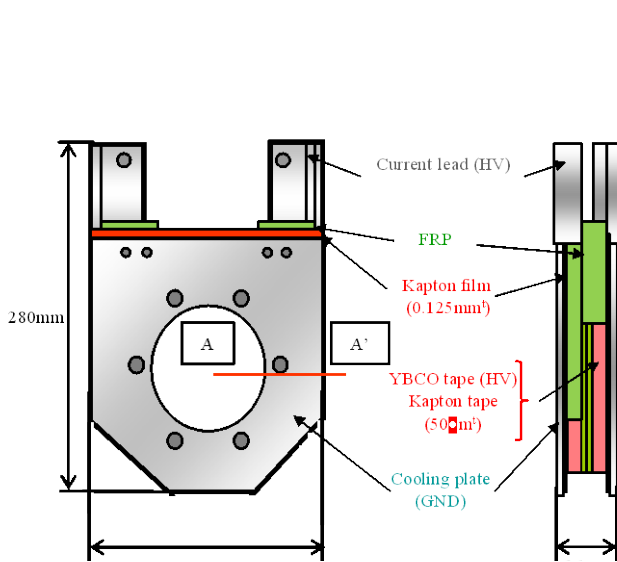


図 2.1.2-5-3 SMES コイルモデル

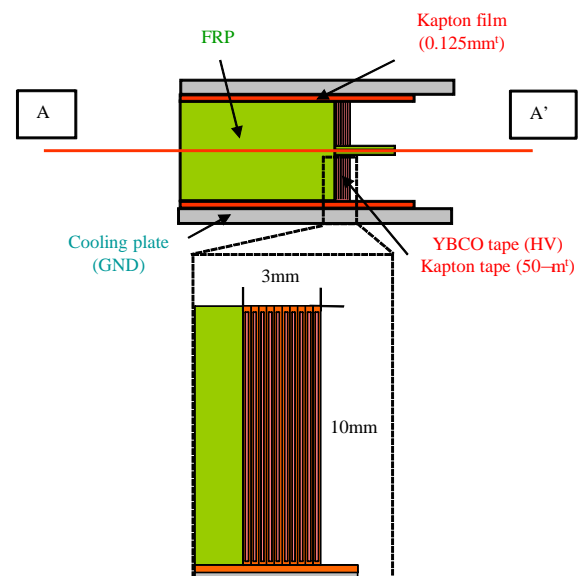


図 2.1.2-5-4 SMES コイルモデルの断面図

Y系超電導コイルモデルの構造を図 2.1.2-5-3 に示す。図 2.1.2-5-4 は図 2.1.2-5-3 の A-A'断面図である。Y系超電導コイルは 10 mm 幅の Y系超電導線材テープを 1 層あたり 10 ターン巻回したダブルパンケーキコイルであり、両側面は冷却板 (Cu) でサンドイッチされた構造である。コイルと冷却板の間は厚さ 0.125 mm のカプトンフィルム、Y系超電導線材テープは厚さ 50 μm のカプトンテープ、ダブルパンケーキの層間絶縁は厚さ 1.5 mm の FRP2 枚を介して絶縁されている。

Y系超電導コイルモデルにおける絶縁特性向上方法として、超電導コイルのターン間絶縁方法の「共巻き」と「ラップ巻き」を検討した。ここで、「共巻き」とはテ

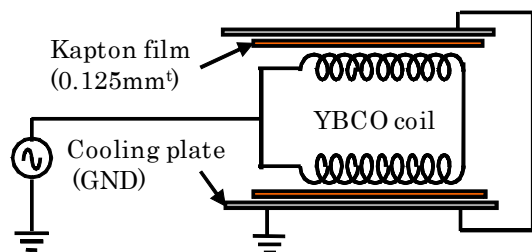
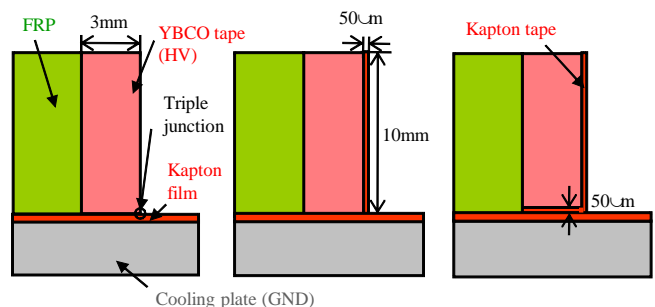


図 2.1.2-5-5 SMES コイルモデルの絶縁構成



(a) Triple junction (b) Laminated insulation (c) Lapped insulation

図 2.1.2-5-6 Y系超電導線材テープの絶縁モデル

ープ導体（Y系超電導線材）と絶縁テープ（カプトン）を重ね合わせて巻く方法である。また、「ラップ巻き」とはテープ導体に絶縁テープを螺旋状に巻きつけてテープ導体を完全に覆う巻き方である。

2) 電界解析

供試コイルの絶縁試験において、図 2.1.2-5-5 に示すように Y 系超電導線材コイルを高電圧電極として正弦波交流電圧を一括印加し、カプトンフィルムを介して、冷却板を接地する。超電導コイルのターン間絶縁として共巻きを用いた場合、Y 系超電導線材テープとカプトンテープとの重なり具合により、Y 系超電導線材テープのエッジ部分において高電圧電極（コイル）－固体絶縁物（カプトンフィルム）－真空のトリプルジャンクションが形成されて電界が集中し、耐圧の低い真空側が弱点となり、放電が発生する可能性がある。図 2.1.2-5-6 にトリプルジャンクション近傍領域をモデル化した図を示す。(a)図はトリプルジャンクションが形成された場合のコイルモデル、(b)図は共巻きのコイルモデル、(c)図はラップ巻きのコイルモデルである。各モデルにおいて Y 系超電導線材テープ（HV 側）に電位 $1 \text{ kV}_{\text{rms}}$ を与え、有限要素法により 2 次元モデルとして電界解析を行った。

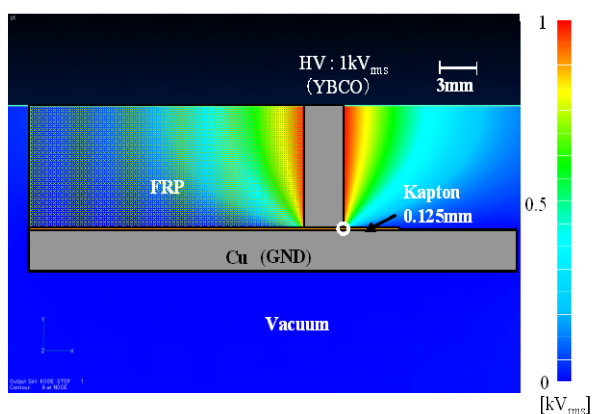


図 2.1.2-5-7 SMES コイルモデルの電位分布

トリプルジャンクションがある Y 系超電導コイルモデルの電位分布を図 2.1.2-5-7 に示す。ここで、図中の白丸で囲まれたトリプルジャンクション近傍の電位分布および電界分布を図 2.1.2-5-8 および図 2.1.2-5-9 にそれぞれ示す。両図において、トリプルジャンクション近傍において電界が集中しているこ

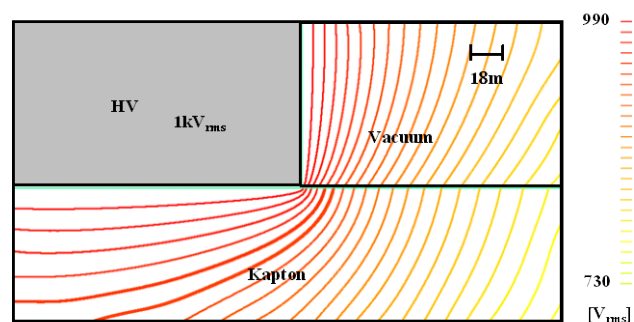


図 2.1.2-5-8 トリプルジャンクション近傍の等電位線

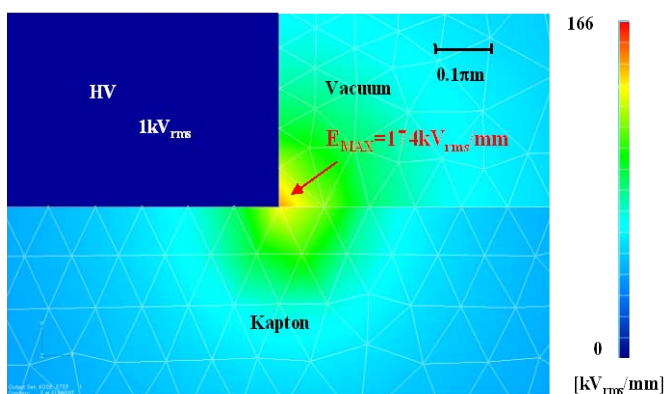


図 2.1.2-5-9 トリプルジャンクション近傍の電界分布

とがわかる。

Y系超電導コイルのY系超電導線材テープ（HV側）－冷却板（GND側）間のカプトンフィルムの厚さを変化させ、図2.1.2-5-6の各絶縁モデルにおいて同様の電界解析を行った。Y系超電導線材テープの絶縁方法とカプトンフィルムの厚さ依存性を調べるために、真空中最大電界のカプトンフィルム厚さ依存性を図2.1.2-5-10に示す。同図の縦軸は、トリプルジャンクションあり/カプトンフィルムの厚さ0.125 mmのケースで規格化している。同図より、トリプルジャンクションありのケースと比較して、共巻きモデルでは15%、ラップ巻きモデルでは13%にまで最大電界が緩和されることがわかる。さらに、ラップ巻きモデルにおいて、カプトンフィルムの厚さを1 mmに増加することにより、最大電界が5%にまで緩和されることがわかる。

以上の電界解析から、超電導コイルのターン間絶縁をラップ巻きにしてトリプルジャンクションの形成を防止し、対地絶縁のカプトンフィルムを厚くすることで最大電界を5%にまで緩和できることを定量的に明らかにした。このような絶縁方法により、Y系超電導コイルの耐電圧向上が期待される。

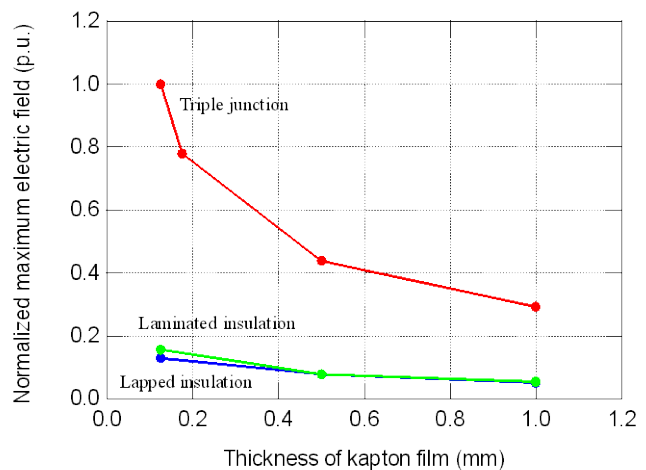


図 2.1.2-5-10 真空中最大電界のカプトンフィルム厚さ依存性

c. Y系超電導コイルモデルの絶縁特性

1) 実験方法

今回用いたY系超電導コイルサンプルの外観を図2.1.2-5-11、実験系を図2.1.2-5-12に示す。同図のダブルパンケーキコイルにおいて、コールドヘッド側のコイルをコイルA、反対側のコイルをコイルBとする。冷凍機のコールドヘッドからL字型の高純度アルミプレート（純度99.99%以上）2枚を介してコイル両側面の冷却板に接続し、伝導冷却系を構成した。Siダイオードセンサを冷却板下部側の左右の2箇所および上部側の1箇所に取り付け、冷却過程の温度分布および温度推移を取得した。

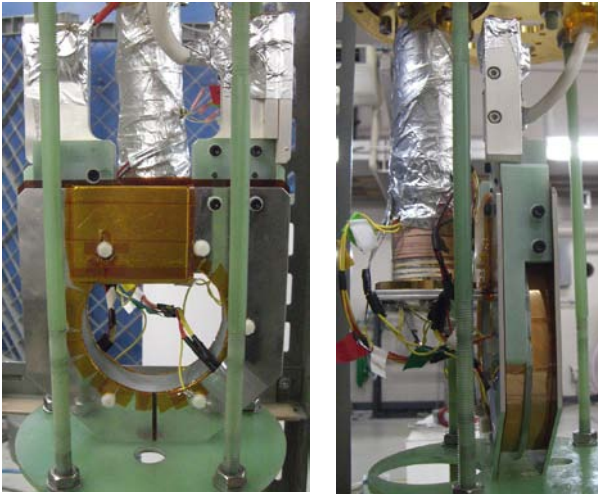


図 2.1.2.5-11 コイルサンプル

交流電圧印加時の部分放電開始電圧 (PDIV) を測定するために構築した実験回路を図 2.1.2-5-13 に示す。交流電源 (60 Hz) を用いて、クライオスタット内に設置したコイルサンプルに課電した。コイルサンプルと冷却板を電氣的に絶縁し、CR 検出回路を介して PD 信号を検出した。PD 検出感度は 40 pC である。

2) 実験結果および考察

ターン間の絶縁方法としてラップ巻を用い、カプトンフィルムの厚さが 0.125 mm の Y 系超電導コイルモデルの伝導冷却特性を図 2.1.2-5-14 に示す。同図より、冷却開始から 10 時間後に各測定点の温度が約 20 K で一定になり、コイル全体が一様に冷却されていることがわかる。

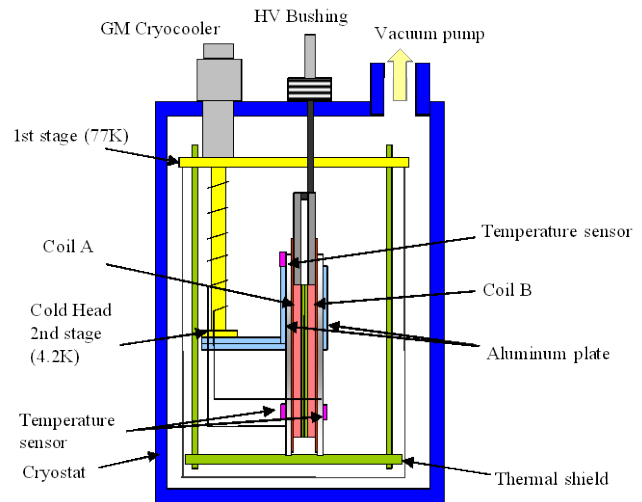


図 2.1.2.5-12 実験系

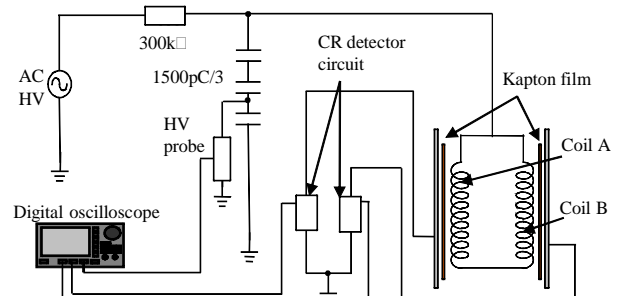


図 2.1.2-5-13 実験回路

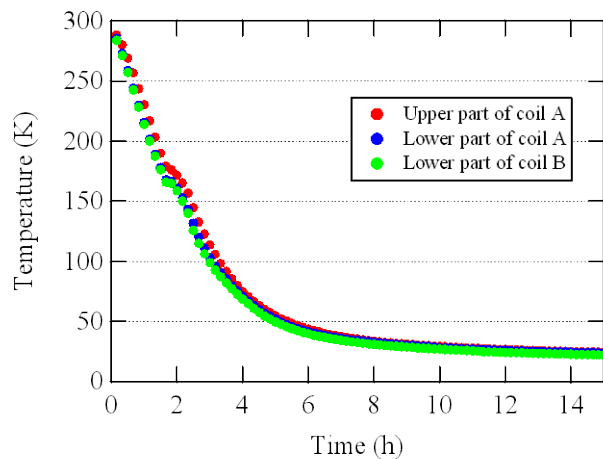


図 2.2.5-14 コイルサンプルの冷却特性

供試コイルモデルにおいて、ターン間絶縁方法とカプトンフィルムの厚さをパラメータとして、PDIVを繰り返し測定した結果を図 2.1.2-5-15 に示す。同図には、共巻き/カプトンフィルム厚さ 0.125 mm⁽¹⁾、ラップ巻き/厚さ 0.125 mm、ラップ巻き/厚さ 1 mm における PDIV の電圧印加履歴を示している。同図より、どの

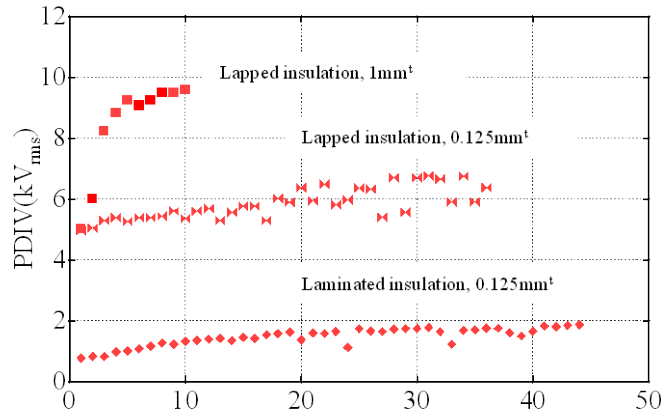


図 2.1.2-5-15 PDIV の電圧印加履歴

ケースにおいても電圧印加回数の増加に伴い、PDIV が向上・飽和していることがわかる。これは真空放電現象特有のコンディショニング効果⁽²⁾によるものと考えられる。PDIV の飽和後の平均値は、共巻き/厚さ 0.125 mm のとき 1.7 kV_{rms}、ラップ巻き/厚さ 0.125 mm のとき 6.3 kV_{rms}、ラップ巻き/厚さ 1 mm のとき 9.5 kV_{rms} であった。すなわち、供試コイルの PDIV は、共巻きからラップ巻きにすることで 3.7 倍、さらにカプトンフィルムの厚さを 0.125 mm から 1 mm にすることで 5.6 倍に向上した。

以上の実験結果から、先に述べたラップ巻きによる最大電界緩和効果、Y 系超電導線材テープ (HV 側) - 冷却板 (GND 側) 間のカプトンフィルムの厚さ依存性を検証することができた。

(3) 具体的な成果

本研究では、伝導冷却 SMES の電気絶縁特性の向上を目指し、電界解析によってラップ巻きによる最大電界緩和効果と電極間の固体絶縁物の厚さ依存性を評価した。また、Y 系超電導コイルモデルを用いて絶縁試験を実施し、以下の結果を得た。

- a. 電界解析により、超電導コイルのターン間絶縁方法として共巻きを用いると、トリプルジャンクションありのケースに対して最大電界を 15 %、ラップ巻きを用いると 13 %にまで緩和できることを明らかにした。さらに、ラップ巻きにしてトリプルジャンクションの形成を防止し、カプトンフィルムを 1 mm に厚くすることで最大電界を 5%にまで緩和できることを定量的に明らかにし、Y 系超電導コイルの耐電圧向上の可能性を示唆した。
- b. Y 系超電導コイルモデルにおける真空中コンディショニング飽和後の PDIV は、共巻きをラップ巻きにすることで 3.7 倍、さらに電極間のカプトンフィルムを 0.125 mm から 1 mm に厚くすることで 5.6 倍に向上することを明らかにした。

(4) 今後の計画

供試コイルの PD は、コイルエッジ部分の微小な空隙で発生していると考えられる。そこで、その空隙を樹脂含浸することによって PDIV をさらに向上するとともに、含浸方法を最適化し、その効果を検証する。

引用論文リスト

- (1)大村、早川、小島、遠藤、平野、長屋、大久保:「伝導冷却 SMES コイルモデルの真空/固体複合絶縁系における電気絶縁特性」、電気学会全国大会、No.5-122 (2009)。
- (2)塩入、上川路、横倉、大島、柳父:「真空ギャップのコンディショニング効果に関する実験的検討」、電気学会論文誌 B、Vol.120、No.10、pp.1343-1349 (2000)。

2.1.2-6 高効率伝導冷却技術の開発 (中部電力、日本大学、核融合科学研究所)

(1) 研究概要

超電導技術の電力機器への応用を妨げている理由として、液体ヘリウム温度の極低温までの冷却が必要なことによる取り扱いの煩雑さ、信頼性の低下や高コストなどが挙げられてきた。酸化物高温超電導体の発見によって、冷却の煩雑さから開放され、その応用が一気に加速するものと期待されている。しかしながら、超電導コイルの運転温度の上昇に伴い、構成材料の熱拡散率の低下により、コイル内で発生した熱を速やかに外部に取り出すことが困難となるなど、新たな技術開発課題も明らかとなってきた。そこで、超電導コイルの冷却に新技術を導入することにより、高効率かつ高熱負荷への対応が可能な伝導冷却技術を開発する。さらに、コイル構造に関して安定性、安全性の両面からの詳細な検討を行い、今後の超電導コイルの主流になると考えられる伝導冷却型コイルシステムの設計指針を確立する。また、20~40 K 付近の温度領域における高信頼、高効率な冷凍システムを目指し、スターリング型パルス管冷凍機における 40 K 以下の温度で最適となる低温部構造も合わせて検討することを目的とする。

(2) 自励振動式ヒートパイプの極低温での動作特性

① 固体熱伝導冷却と自励振動式ヒートパイプの比較

固体熱伝導とヒートパイプを用いた冷却方式の違いについて図 2.1.2-6-1 に示す。固体熱伝導 (銅バー) による冷却では、銅バーと加熱端、冷却端の間の温度差 ΔT_{hs} 及び ΔT_{cs} は小さく、大部分の温度差は銅バーの長手方向に生じる。一方、ヒートパイプ冷却では、作動流体とのパイプ壁面との熱伝達+パイプ肉厚方向の熱伝導+加熱端、冷却端での接触熱抵抗による温度差 (ΔT_{hs} 及び ΔT_{cs}) が支配的で、ヒートパイプ内部の作動流体の温度差はほとんど発生しない。従って、熱輸送距離が長

くなるほど固体熱伝導に対するヒートパイプ冷却の優位性は高く、熱輸送特性及び時間遅れの両方の観点から明らかである。

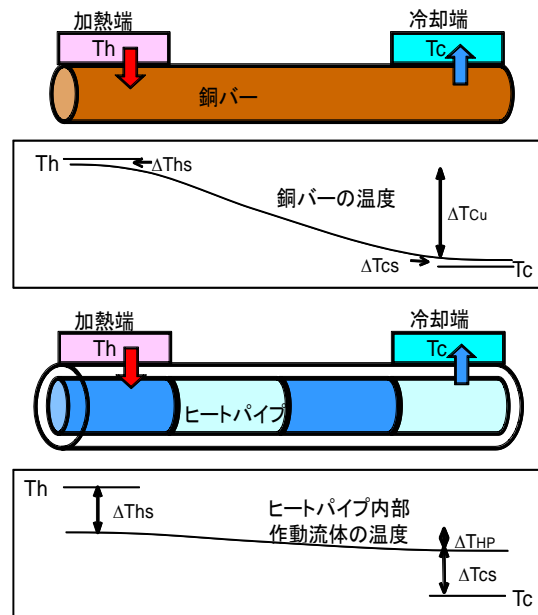


図 2.1.2-6-1 固体熱伝導とヒートパイプ冷却の特性比較

② 自励振動式ヒートパイプの低温での動作実験

自励振動式ヒートパイプは、ヒートパイプ内に封入した作動流体の気液 2 相の密度変化及び温度勾配によって発生する自励振動を利用した高性能の熱輸送素子である。図 2.1.2-6-2 にその動作原理を示す。パイプを繰り返し折り返し、両端を接続したループ形状のパイプ内に、気液の混合比が 50 % 程度の作動流体を充填し、気体と液体のプラグが縞模様をなした状態とする。加熱部と冷却部の間に温度差が生じると気体と液体の密度差に起因して自励振動が発生する。この自励振動を駆動力として凝縮端から蒸発端に気液混合状態の作動流体を環流させる。自励振動式ヒートパイプは、重力による液体の環流を利用したサーモサイフォン等と違い、設置方向の制限がないこと及び薄いシート状に加工できることから、超電導マグネット内に組込む高熱伝導率の冷却素子として適している。

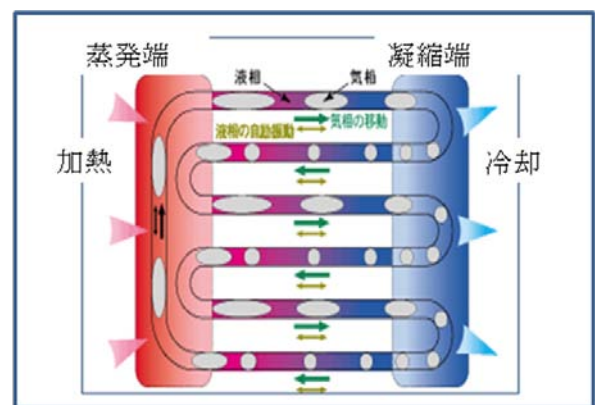


図 2.1.2-6-2 自励振動式ヒートパイプの動作原理

低温での作動流体のリークを防止し、作動流体の種類を変えた実験を可能とする自励振動式ヒートパイプ構造として、図 2.1.2-6-3 に示した外径 1/16 インチ (1.59 mm)、内径 0.78 mm のステンレス配管を 10 回折り返し、両端を 1/16 インチのス

エジロック T 字継手に接続している。T 字継手の先端の空いた部分は作動流体の導入部となる。加熱端及び冷却端となる銅ブロックはステンレス配管のピッチに合わせた溝加工を施してあり、配管とはハンダで接合されている。加熱端の銅ブロックの裏面にヒータを貼り付け、入熱量の制御を行う。冷却端の銅ブロックは冷凍機のコールドヘッドに接続された冷却銅板に取り付けられ、冷却端の温度を一定の試験温度に保つ。ヒートパイプ全体の形状を保つため、ステンレス製の枠に銅ブロックが固定されている。加熱端、冷却端の銅ブロックには抵抗温度計測素子を取り付けられ、ヒータ入熱量と温度差との関係を測定することにより、ヒートパイプの熱輸送特性が測定可能となっている。

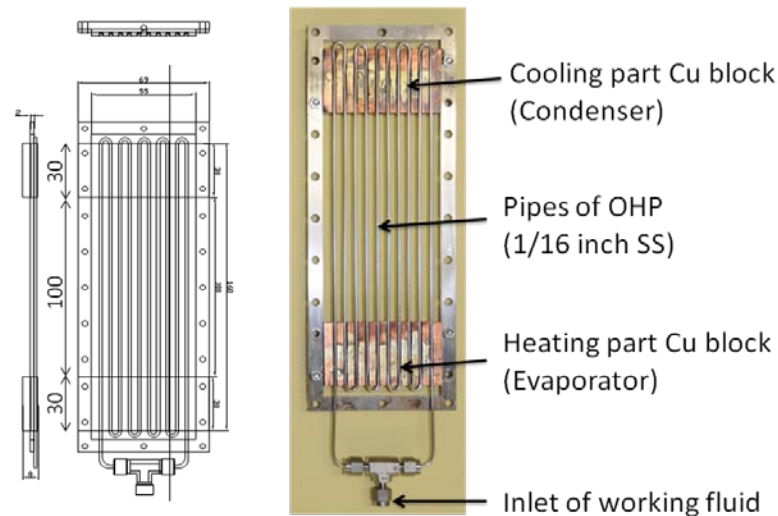


図 2.1.2-6-3 低温動作実験用自励振動式ヒートパイプ

③ 作動流体の種類による動作特性の相違

作動流体を変更することにより、ヒートパイプの動作温度範囲を変更することができる。表 2.1.2-6-1 に作動流体を、窒素、ネオン、水素にした場合の動作温度範囲、液体封入率、入熱量を変化させた場合の等価的な熱伝導率をまとめる。作動流体を適切に選択することにより、17 K～91 K の幅広い温度範囲で、自励振動式ヒートパイプを動作させることが可能である。

表 2.1.2-6-1 自励振動式ヒートパイプ(1/16 インチ)の作動流体の相違による動作特性の比較

作動流体	動作温度範囲 [K]	液体封入率 [体積 %]	入熱量 [W]	等価的な熱伝導率 [W/(m*K)]
窒素	67 - 91	17 - 70	0 - 7	5,000 - 18,000
ネオン	26 - 34	16 - 95	0 - 1.5	1,000 - 8,000
水素	17 - 27	31 - 80	0 - 1.2	500 - 3,500

④ ヒートパイプの設置方向による影響

本来自励振動式ヒートパイプは設置方向の制限がないことが特徴となっている。しかし、図 2.1.2-6-4 に示すように、自励振動を起こしやすい上側冷却一下側加熱のヒートパイプの設置方向に対し、逆向きの上側加熱一下側冷却の方向に設置したところ、自励振動を誘発することができず、自励振動式ヒートパイプの動作が確認できなかった。そこで、図 2.1.2-6-5 に示したように、単体では動作しない上側加熱一下側冷却のヒートパイプと上側冷却一下側加熱のヒートパイプの両端を直列に接続した動作実験を行った。

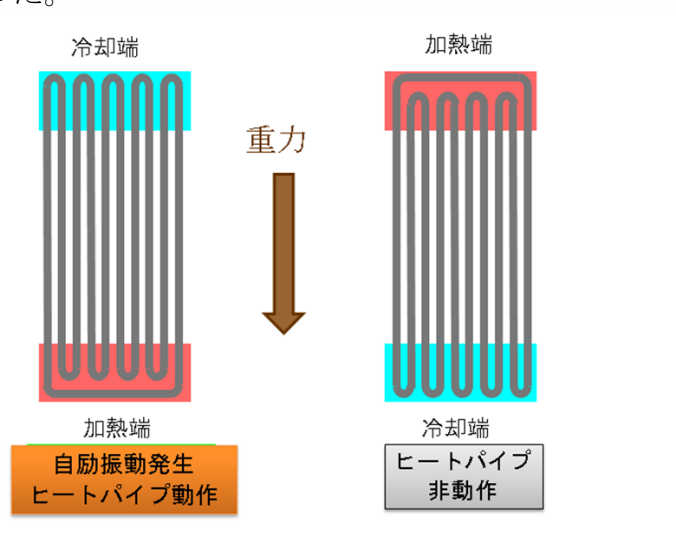


図 2.1.2-6-4 自励振動式ヒートパイプの設置方向の影響

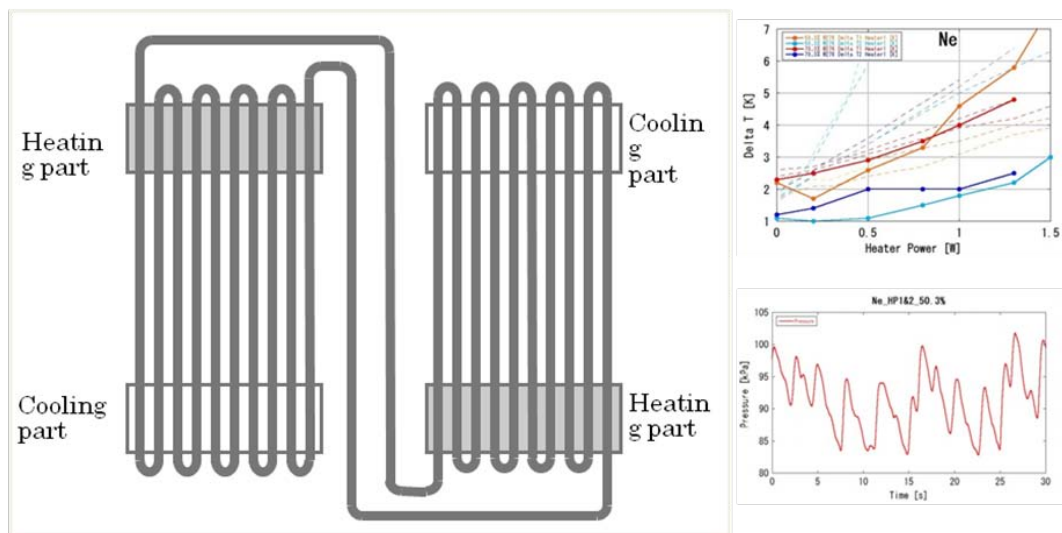


図 2.1.2-6-5 設置方向の異なる自励振動式ヒートパイプの直列接続動作結果

結果として、2つのヒートパイプの直列接続により、上側加熱一下側冷却のヒートパイプに自励振動を誘発することができ、両者を同時に動作させることが可能であることが明らかとなった。

⑤ 両端冷却中央加熱ヒートパイプの動作実験

超電導マグネット内に組み込む自励振動式ヒートパイプについて、設置方向の相違による動作特性の差が起こり難いことが望ましい。今後、配管径や並列流路の最適化などにより、上側加熱一下側冷却のヒートパイプについても動作可能となる可能性もあるが、より確実に安定な動作が見込める方法として、図 2.1.2-6-6 に構造示した両端冷却—中央加熱方式の自励振動式ヒートパイプを開発した。

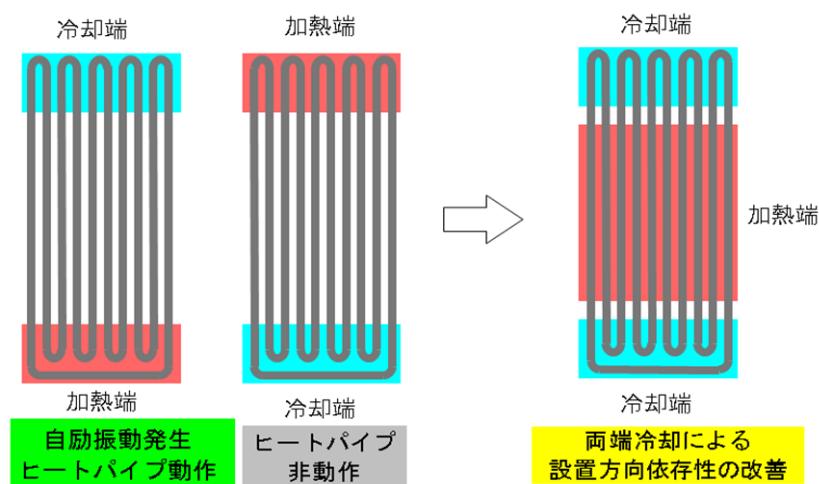


図 2.1.2-6-6 両端冷却型自励振動式ヒートパイプの構造

図 2.1.2-6-7 に低温動作実験用に試作した両端冷却中央加熱の自励振動式ヒートパイプを示す。

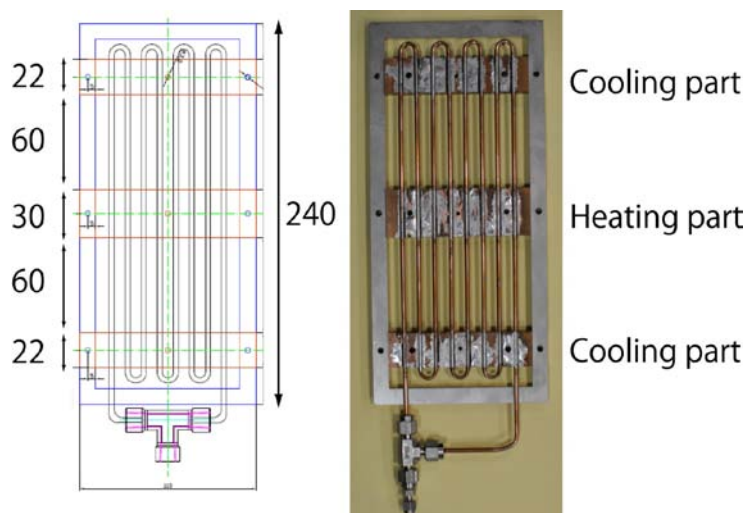


図 2.1.2-6-7 試作した両端冷却型自励振動式ヒートパイプ

図 2.1.2-6-8 に圧力波形を示すように、片側冷却、片側加熱のヒートパイプ単独動作時と同様な安定な圧力振動が得られており、安定な自励振動動作が発生していることが確認できた。

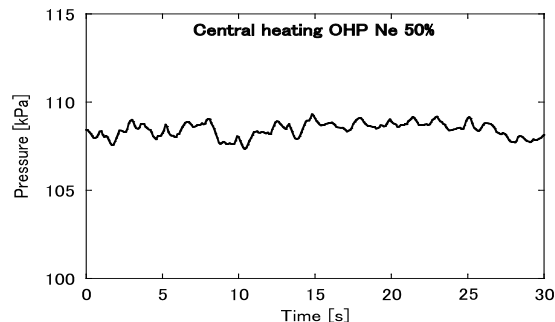


図 2.1.2-6-8 自励振動式ヒートパイプ
圧力波形

⑥ 今後の予定

図 2.1.2-6-9 のように、自励振動式ヒートパイプを組み込んだ冷却パネルと超電導コイルを模擬したダミーコイルとの組み合わせ実証実験を行う予定である。

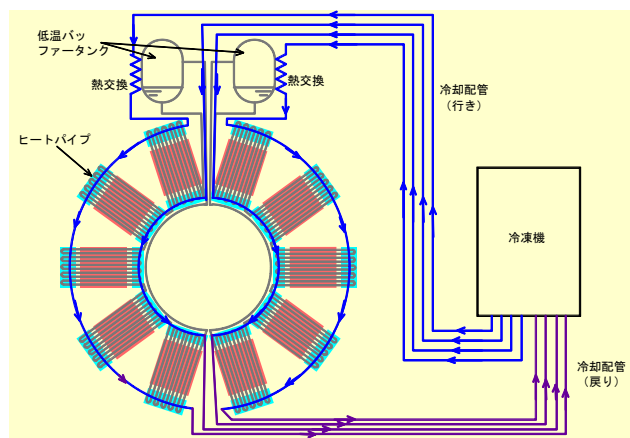


図 2.1.2-6-9 ダミーコイルを用いた自励振動
ヒートパイプの実証実験

(3) 高効率冷凍機システムの開発

図 2.1.2-6-10 に代表的なイナータンス方式パルス管冷凍機に対する多段化の構成例を示す。圧力振動源としては GM 型、スターリング型いずれにも適用できる。

図 2.1.2-6-10(a)の構成では各段のパルス管と蓄冷器とはそれぞれ同一の温度レベルで動作している。すなわち下段パルス管の高温端に熱的に統合されている。このような直列型パルス管による多段化方式の問題点は、下段パルス管内でのエンタルピーの流れを上段パルス管の冷凍仕事の一部を消費することによってのみ取り去らなければならないため、効率の良い多段冷凍機を構成させることが難しいと考えられる。そこで、パルス管用として、(b)や(c)に示すようにパルス管を並列にした多段化方式が新たに提案され、(b)方式の 3 段パルス管では極低温 3.6 K も達成され、並列方式の優位性が実証されるようになった。

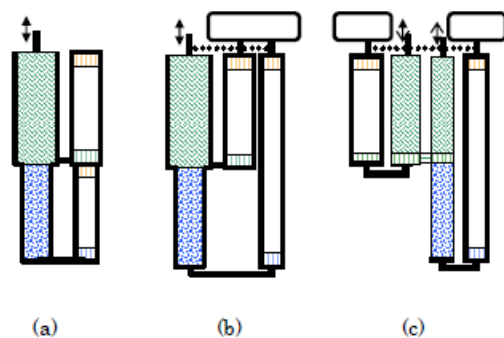


図 2.1.2-6-10 インナータンス方式の多段パルス管冷凍機の構成例
 (a)直列型多段方式, (b)並列多段方式 (直列蓄冷材), (c) 並列多段方式 (並列蓄冷材)
 (塗り込められた部分は蓄冷材、両端に色付けしたのはパルス管、両端矢印は圧力振動、白抜きの四角はバッファータンク、等々)

今回、蓄冷材の検討が重要となるため、2 段蓄冷部が比較的容易に切り離され、独立して改変し易い(c)の方式を採用することにした。また、20 K 温度領域における蓄冷材として鉛が有効的なため、図 2.1.2-6-11 のような蓄冷材を充填する容器を考案し、性能確認できるようにした。今後、これらを冷凍機に組み込み冷凍性能を確認する予定である。

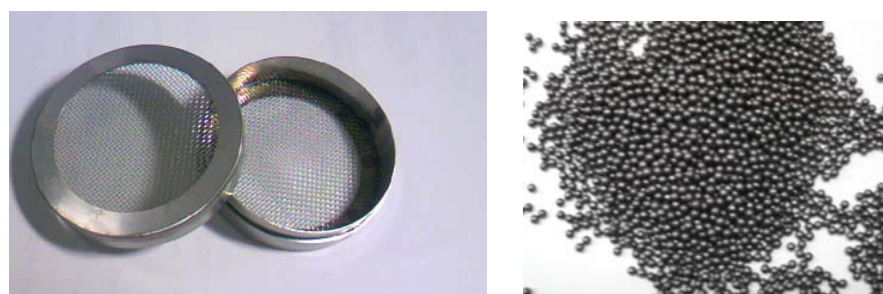


図 2.1.2-6-11 蓄冷材充填容器と充填材 (鉛)

2.1.2-7 まとめ

20~40 K 付近の温度領域において十分な熱伝達を得るため、ガス冷媒配管を一部活用した 3 W/m^2 以上の熱流束を可能とする高熱伝導冷却システムについて検討を行い、伝導冷却システムを検証する試験装置の製作を完了した。平成 22 年度中に、試験を実施し評価する予定である。また、自励式ヒートパイプを用いた伝導冷却システムにおいて単体での動作確認が完了し、今後、模擬コイルに組み込み、コイル伝導冷却技術の検証を実施する見込みである。

2 kV 以上の電気絶縁性能を有する高伝熱コイル構造については、製作を進めており、平成 22 年度中に実際に装置に組み込み、絶縁性能を確認出来る見込みである。以上により、高効率伝導冷却性能かつ高耐電圧性能を有する高効率コイル伝導冷却技術については、当初目標を達成できる見込みである。

2.1.3 SMES 対応線材安定製造技術開発（中部電力、古河電気工業、ISTEC、フジクラ、九州大学、九州工業大学）

(1) 開発目標

高磁界・コンパクトコイルの技術開発に適用可能な SMES 対応 Y 系超電導線材の安定製造技術の確立を目的とした開発を進める。そのため、金属基板は高磁場中の大電流通電によるフープ力に耐える機械強度を有すること、中間層は薄化され線材の平坦性を維持できることが必要とされる。また、Y 系超電導層は SMES 運転条件下において必要とされる通電特性を有していること、安定化層は SMES 用導体の通電時の安定性と加工歩留りの向上に適していることが肝要とされる。本開発では、前述の要素を兼備した、SMES モデルコイル作製に必要とされる超電導線材の供給を通じて安定製造技術の確立を図る。線材仕様の一例として、「 $I_c=20$ A/cm-w(77 K, 3 T)で引っ張り強度 1 GPa を有する 100 m に相当する線材」が挙げられる。この仕様例は SMES モデルコイルの経験磁場とその磁場中における超電導線材の臨界電流によって定義される。図 2.1.3-1 は素線 1 本に 540 A/cm-w (20 K) を通電するモデルコイルにおける超電導線材の経験磁場とその磁場下の超電導線材の臨界電流の推定値を示す。素線 1 本に 540 A/cm-w を通電するコイルにおいて、コイルの磁場により超電導線材の通電電流が 540 A/cm-w 以上であるためには、77 K、3 T で超電導線材表面に平行から 10 度傾斜した磁場中で $I_c=20$ A/cm-w 以上であることに相当することになる。

さらに磁場中の通電特性の改善を図り 3 T の垂直磁場下で $I_c=20$ A/cm-w(77 K, @3 T)で引っ張り強度 1 GPa を有する 50 m の線材の安定製造技術開発を目指す。

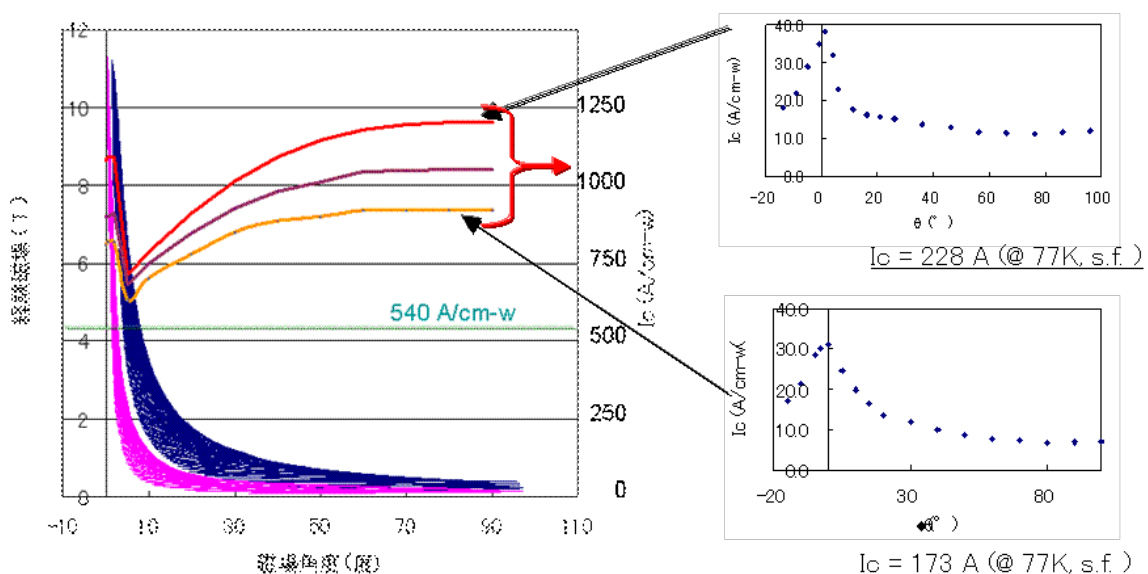


図 2.1.3-1 2 GJ 級 SMES コイルにおける Y 系超電導線材の経験磁場と臨界電流の推定値

(2) 研究開発内容

a. SMES 対応線材安定製造技術開発 (IBAD-MOCVD 線材)

a-1 MOCVD プロセス対応金属基板作製技術開発

SMES コイル用導体に使用される超電導導体は、高磁場中での大電流通電時のフープ応力に耐え得るために、機械的強度の強い線材であることが必要であり、長尺にわたり安定な線材が必要である。また、Y 系積層線材では、中間層や超電導層の剥離の懸念があり、各層の接合性の向上も要求される。これらの観点から、コイル構成技術開発、システムモデル検証に必要な Y 系超電導線材の安定製造技術開発の確立を目指した。

金属基板に関しては、基板表面の平滑性が I_c に大きく影響することから、研磨等のプロセス技術の適正化を行い、長尺にわたり表面平滑性が高い基板を作製し、 I_c 安定化の見通しを得ることを目標に開発を行った。まず、既存のハステロイ™ 基板の調査から、基板表面欠陥は、図 2.1.3-2 に示すような、基板圧延時の異物の押し込み、接品との擦れ、圧延ロール表面荒れの転写などであることを突き止め、ロール、接品管理などにより、その改善を図った。また、電解研磨、精密機械研磨などの表面平滑化方法の検討を行い(図 2.1.3-3)、精密機械研磨法により、算術平均粗さ (Ra) ≤ 3 nm の表面を持つ短尺基板サンプルを作製した。この短尺基板上に IBAD-GZO 層/PLD-CeO₂ 層/MOCVD-YBCO 層を作製し評価した結果、膜厚 1 μ m の YBCO 層で $I_c=300$ A/cm-w(77 K, s.f.) が得られた。さらに、精密機械研磨法により試作した 200 m 長の表面平滑化基板は、光学検査において全長にわたり著しい欠陥が無いこと、40 m 毎に切り出した試料基板に IBAD-GZO 層/PLD-CeO₂ 層/MOCVD-YBCO 層を形成し評価した結果、いずれの試料も $I_c=250$ A/cm-w(77 K, s.f.) 以上を膜厚 1 μ m の YBCO 層で達成できることが確認された。この結果から長尺にわたり安定な特性を有する超電導線材を作製するための基板作製技術の見通しを得た。この知見をもとに、平成 20 年度後半より長尺基板の作製を行っている。図 2.1.3-4 に基板表面性状の一例として、精密機械研磨前後の基板表面の原子間力顕微鏡(AFM)像を示す。表 2.1.3-1 に平成 20 年度および 21 年度における基板の作製結果を示す。作製本数を重ねるに従い、圧延後、および平滑化後の表面粗さ (Ra) が改善される傾向にある。また、図 2.1.3-5 に基板の応力-伸び曲線を示す。基板強度は 0.2 %耐力で 1.6 GPa 程度が安定に得られている。

次に、研磨によって平滑化したハステロイ™ 基板の超電導線材作製への適用を検討した。非研磨ハステロイ™ 基板を用いた超電導線材の I_c 分布は、図 2.1.3-6 に一例を示すように低 I_c 箇所が頻繁に出現し、高 I_c 箇所も少ない。一方、研磨したハステロイ™ 基板を使用することで到達 I_c 値が向上し、かつ低 I_c 箇所も減少させることが可能であることが判明した。その結果、図 2.1.3-7 に示すような高 I_c ・長尺線材を平成 20 年度に作製した。図 2.1.3-6 および図 2.1.3-7 に示されるように同じ中間層構造全長 (PLD-CeO₂ (450 nm) / IBAD-GZO (500 nm) / IBAD

-YNbO₄ (30 nm)) であっても、平滑化基板を使用すると長尺線材において 200 A/cm-w(@77 K, s.f.)以上の I_c 値が得られ、金属基板の平滑化により特性向上と均質化が図られることが確認された。

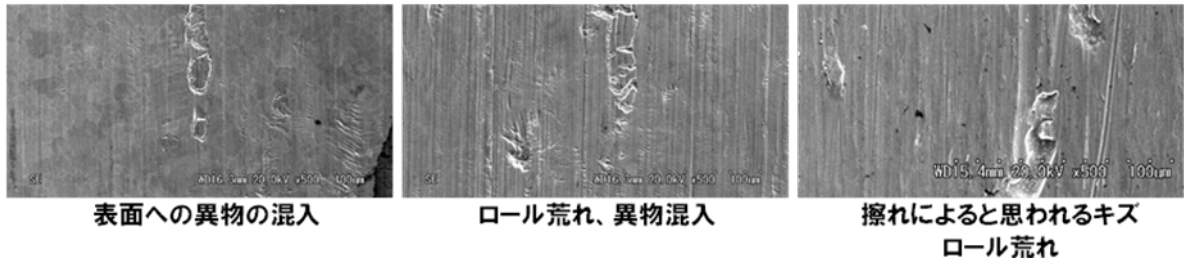


図 2.1.3-2 従来基板における表面欠陥の例

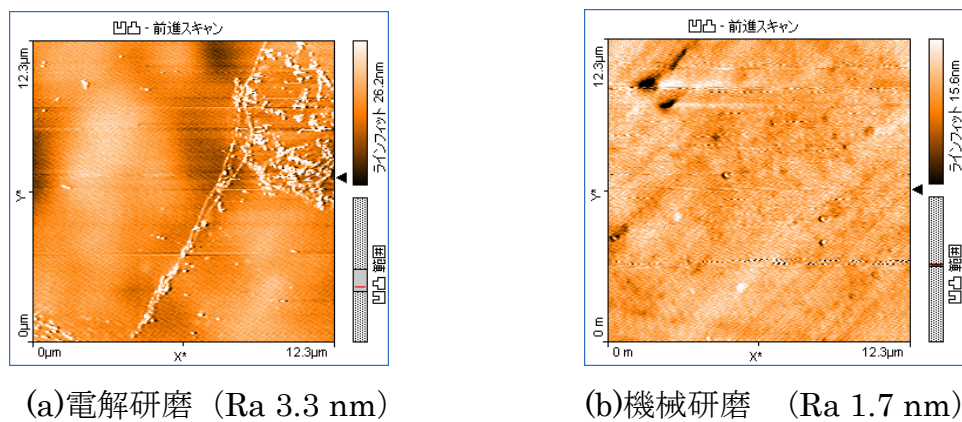


図 2.1.3-3 各種研磨法における基板表面

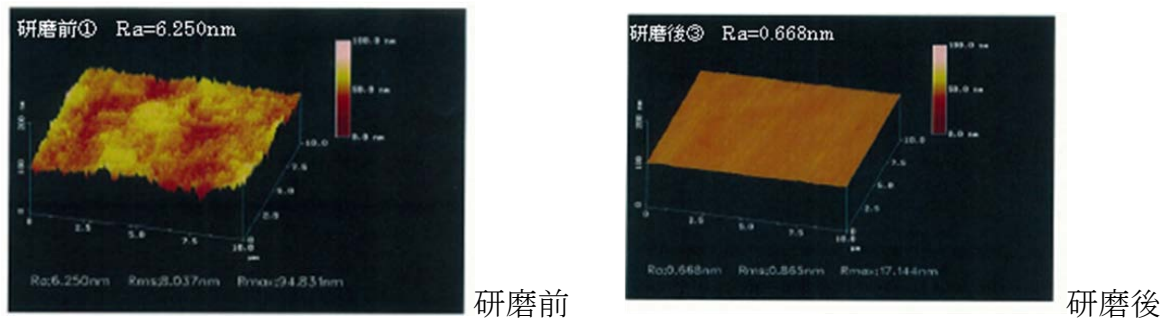


図 2.1.3-4 精密機械研磨前後における基板表面の原子間力顕微鏡 (AFM) 像

表 2.1.3-1 平滑化基板の作製結果

作製期間	作製量の和 (m)	平滑化前の基板の Ra (nm)		平滑化後の基板の Ra (nm)	
		先頭	後端	先頭	後端
平成 20 年度	1364	4.8-13.7	5.3-12.1	1.1-2.3	1.1-2.9
平成 21 年度	6238	3.8-11.7	4.4-11.9	0.7-1.7	0.7-2.0

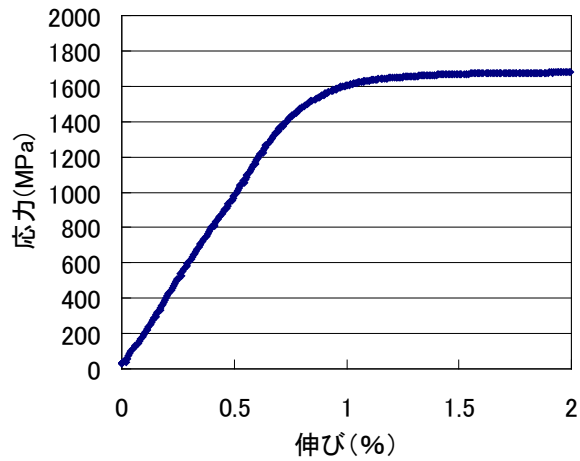


図 2.1.3-5 基板の応力-伸び線図 (室温)

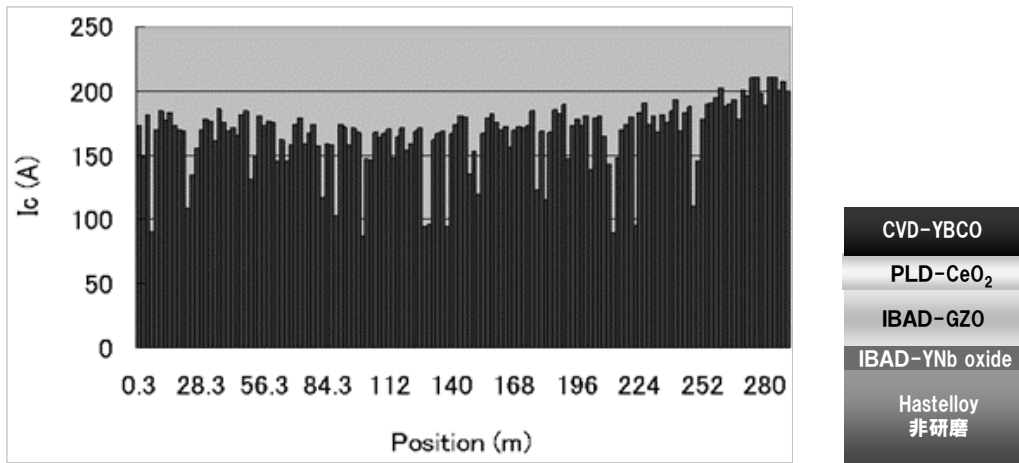


図 2.1.3-6 非研磨ハステロイTM基板を用いて作製した MOCVD 線材の I_c 分布の一例

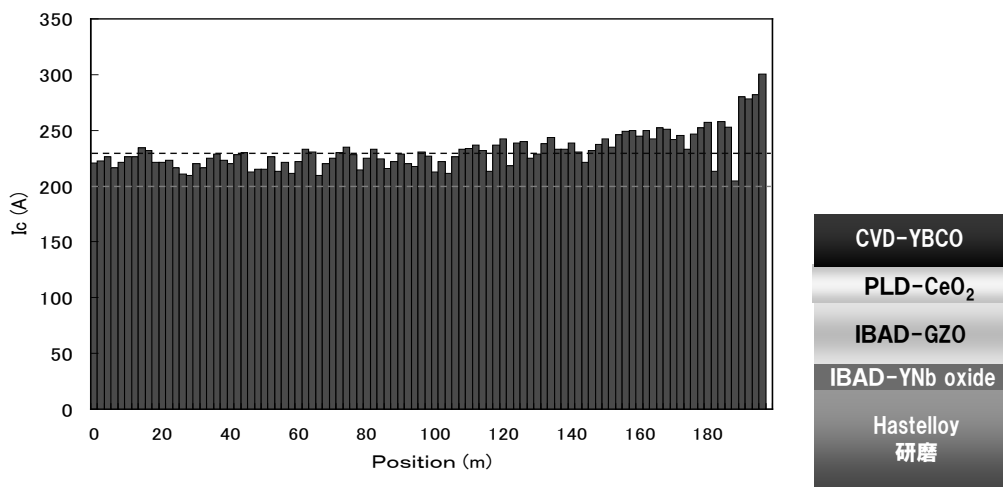


図 2.1.3-7 研磨ハステロイTM基板を用い作製した MOCVD 線材の I_c 分布の一例

a-2 MOCVD による超電導層形成の安定化

MOCVD による超電導層形成では、原料ガスとキャリアガス、酸素ガスのガス流経路の形状を適正化するために平成 20 年度に MOCVD 装置の改造として、図 2.1.3-8 に示すようなガス流のバランスシステムを 3 基の 12 段 MOCVD ユニットに設置した。12 段 MOCVD ユニートを 3 基連結した MOCVD 装置では、1 つのユニットの真空状態の変動が他のユニットの真空も変動させたり、ガス流経路を歪ませるなど、相互にユニットが影響することが問題であった。ガスバランスシステムを MOCVD ユニット間で動作させることで、雰囲気制御時のユニット間の連動した真空の変動のような相互の影響が抑制されるので、単独のユニットを各々制御することで複数のユニットの同時運転が可能となった。



図 2.1.3-8 ガスバランスシステム

次に、平滑化基板を用いて複数の 12 段 MOCVD ユニートを使用した長時間成膜を行い、超電導層の成膜サイクルの高速化と長時間成膜に伴う特性低下の要因の把握を図った。図 2.1.3-9 に示すように局所的な低 I_c 箇所を有する線材の超電導層の表面を、銀安定化層を除去して観察したところ原料ガスの導入ノズルと似た形状の変色領域が観察された。変色箇所は図 2.1.3-10 に示すように、正常箇所と比較して粒状の組織になっており、銅などの元素の偏析が確認された。変色領域がノズルに似た形状であることから、気化器もしくは原料配管からの噴出によって低 I_c 箇所が発生したと推察された。有機溶剤に有機金属原料を溶解させた液体原料を気化させる際、不適正な気化温度では、溶剤の優先蒸発などで原料の析出や分解が生じる。原料ガスの噴出防止のため、気化器の原料導入部での急激な溶剤の蒸発を抑制し、原料配管までに完全に気化するように気化器内に温度傾斜を設定し原料の気化の適正化を推進した。その結果、図 2.1.3-11 に示すように高 I_c 線材を作製した。線材の焼損防止のため通電は 205 A までとした。中央部のハンドリングミスにより線材に折れが生じた箇所を除いて、 I_c 値が 150 A/cm-w(@77 K, s.f.)以下に低下することは無く、均質性が向上したことを確認した。

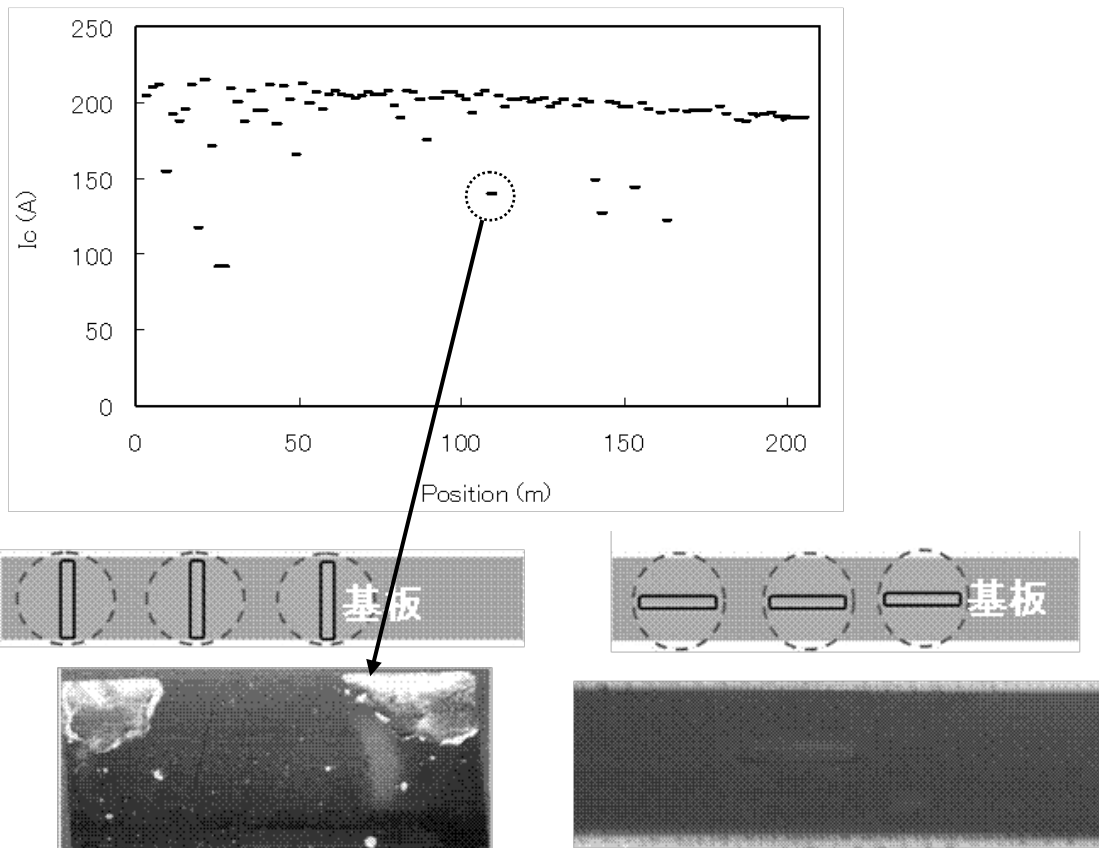


図 2.1.3-9 原料ガスの導入ノズルと超電導層の変色領域の形状

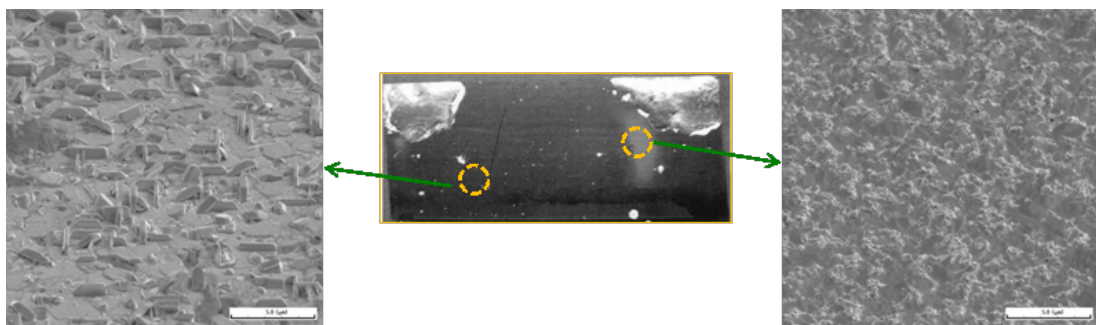


図 2.1.3-10 超電導層の正常領域(左)と変色領域(右)の表面観察結果

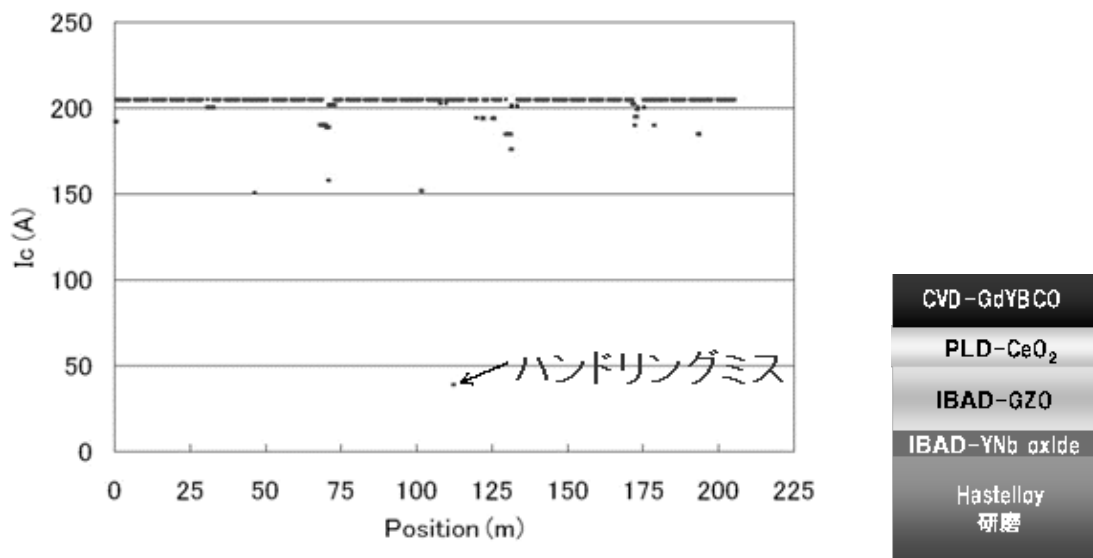


図 2.1.3-11 気化器及び配管の温度を調整して作製した MOCVD 線材の I_c 分布例

また、平滑化基板を用いて磁場中通電特性の向上のため、Y-Gd 混晶系の超電導層の厚膜化による高 I_c 化を検討した。MOCVD プロセスに混晶系を適用すると、厚膜化時の a 軸成長結晶粒の生成が抑制される傾向が、X 線回折および SEM による表面観察の結果から確認され、 I_c 膜厚依存性も図 2.1.3-12 に示すように通常の Y 系超電導膜に比して、 I_c の増大が厚膜化しても維持される傾向にあった。膜厚 $1.5 \mu\text{m}$ の混晶系超電導層の短尺試料では $I_c=390 \text{ A/cm}\cdot\text{w}(@77 \text{ K, s.f.})$ という高い通電特性を得、さらに図 2.1.3-13 に示す磁場中特性 ($77 \text{ K, } B \perp \text{ テープ線材面}$) の評価結果を得た。磁場 3 T における I_c 値は $20 \text{ A/cm}\cdot\text{w}(@77 \text{ K, } 3\text{T.})$ であり、磁場中超電導特性向上の指針を得た。

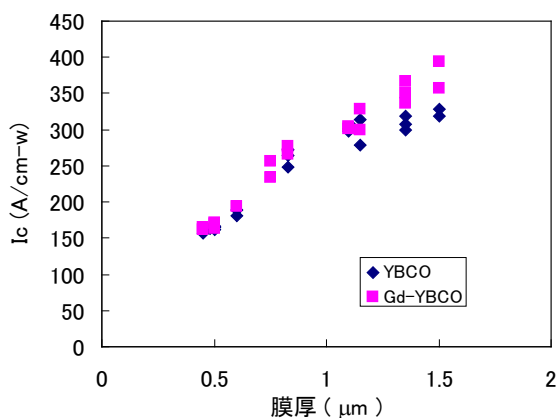


図 2.1.3-12

平滑化基板上に MOCVD で形成した超電導層の膜厚依存性

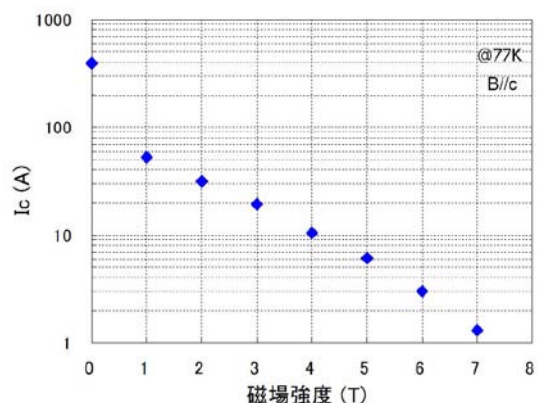


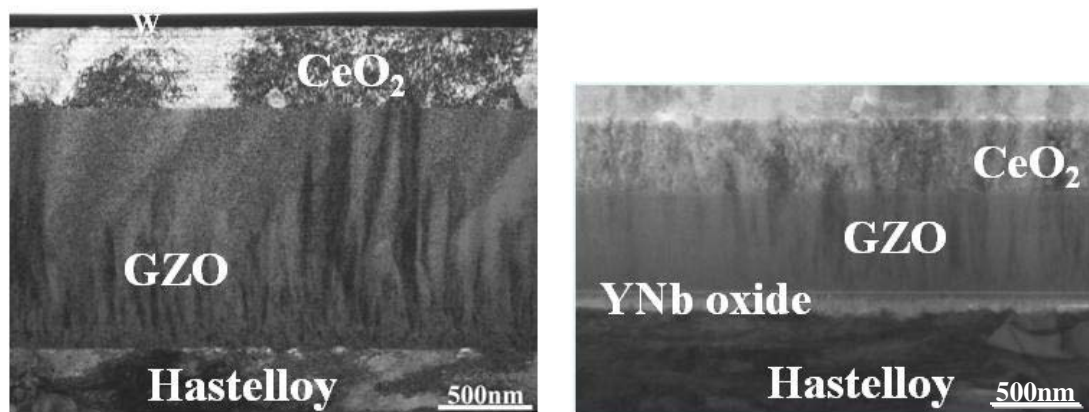
図 2.1.3-13

平滑化基板上に MOCVD で形成した Gd-YBCO 層の磁場特性

a-3 MOCVD プロセス対応中間層作製技術開発

MOCVD による超電導層形成では、中間層に関しては、SMES 用超電導コイルにおいて、超電導線材に必要とされる長尺性、平坦性を有する中間層を作製することによって、製造工程と線材品質の安定化を検討した。

線材の平坦性の保持には、IBAD 中間層を薄化する必要があり、かつ IBAD 中間層の薄化は中間層の作製速度の増大につながる。IBAD 中間層は従来の GZO 層のみの構造から、GZO 層を主体として Y-Nb 複合酸化物を組み合わせた構造で薄化を図り、長尺基板を作製した。図 2.1.3-14 に両者の構造の違いを示す。また、金属基板は当初、非研磨の Hastelloy™ を使用していたが、研磨した Hastelloy™ 基板を用いた短尺試験の結果で通電特性の向上が確認できたため、研磨基板を使用した開発に変更した。表 2.1.3-2 に作製した基板の結晶粒の配向度をまとめた。基板前・後端の IBAD 中間層の $\Delta\phi$ が 17 度以下で安定して得られており、同様に PLD-CeO₂ キャップ層の $\Delta\phi$ も基板前後端で 6 度以下に制御されているので、安定製造に貢献しうるものとする。



従来の IBAD-GZO 中間層

Y-Nb 酸化物を用いた IBAD-GZO 中間層

図 2.1.3-14 Y-Nb 複合酸化物を用いて薄化した IBAD-GZO 中間層構造

表 2.1.3-2 GZO を主体とした IBAD 基板の作製結果

作製期間	構造	作製量の和(m)	$\Delta\phi$ (GZO層)		$\Delta\phi$ (PLD-CeO ₂ 層)	
			先頭	後端	先頭	後端
平成20年度	GZO/非研磨 Hastelloy	373	11.2 - 12.7	10.9 - 12.8	3.4 - 4.8	3.2 - 4.8
	GZO/YNbO/非研磨 Hastelloy	1,763	12.0 - 15.8	13.4 - 16.9	4.3 - 5.4	4.4 - 5.7
	GZO/YNbO/研磨 Hastelloy	967	11.4 - 14.3	10.9 - 15.5	3.3 - 4.1	2.9 - 3.7
平成21年度	GZO/YNbO/非研磨 Hastelloy	1,578	11.0 - 16.7	12.4 - 16.9	3.8 - 5.8	4.0 - 5.9
	GZO/YNbO/研磨 Hastelloy	3,227	10.2 - 14.6	11.9 - 15.2	2.6 - 3.4	3.8 - 4.5

IBAD 基板上のキャップ層に関しては PLD による CeO₂ キャップ層形成だけでなく、スパッタを用いて、高速かつ安定な作製技術の検証を進めた。まず、スパッタ法による CeO₂ キャップ層と IBAD 層の界面接合性を確保するため、折り曲げ破

断においても、CeO₂ キャップ層と IBAD 層との剥離が認められず、CeO₂ キャップ層と IBAD 層の接合性が確保される成膜条件を確認した。次に、図 2.1.3-15 に示す様に種々の IBAD 基板上で CeO₂ キャップ層厚と、CeO₂ キャップ層の $\Delta\phi$ を検討することにより、平滑化基板上、CeO₂ キャップ層厚 200 nm において、 $\Delta\phi \leq 6$ 度の見通しを得た。これにより、1 μm 厚の YBCO 層成膜において $I_c = 300 \text{ A/cm-w} (@77 \text{ K, s.f.})$ の結果を得た。さらに、スパッタ法による CeO₂ キャップ層成膜の高速化を行うため、複数ターゲット化および reel to reel 成膜のマルチターン化の検討を進めた。マルチターン成膜における影響およびレーン間における特性分布を検討し、CeO₂ キャップ層成膜の安定性、中間層の接合性に問題がないことを確認した。この結果から、複数ターゲット化およびマルチターン化により、CeO₂ キャップ層厚 200 nm において成膜速度 10 m/h の高速成膜が可能であることを確認した。スパッタによる CeO₂ キャップ層の長尺成膜の結果の例を図 2.1.3-16 に示す。平滑化基板上において $\Delta\phi = 6$ 度が安定に得られている。スパッタ法を用いた CeO₂ キャップ層に関しては、平成 20 年度に総量 983 m を作製した。

さらに、中間層の安定性の向上をはかるため、GZO 層より IBAD 中間層の薄化が可能な IBAD-MgO 系中間層の導入を、ISTEC の協力の下、推進した。IBAD 層直上への CeO₂ キャップ層形成よりも、IBAD 層と CeO₂ キャップ層の間へ LMO 層を導入した構造の方が、 $\Delta\phi$ が 5 度程度の CeO₂ キャップ層が安定に二軸配向することを確認した。表 2.1.3-3 に中間層の構造と酸化物キャップ層 (PLD-CeO₂) の配向を作製結果のまとめとして示す。いずれの PLD-CeO₂ 酸化物キャップ層の $\Delta\phi$ も基板前後端で 5 度以下に制御されており、配向の安定性が示された。また、PLD-CeO₂ 酸化物キャップ層の表面を AFM により観察した結果、図 2.1.3-17 に示すように、IBAD-MgO 層上では欠陥の発生が比較的抑制されていることが確認された。

表 2.1.3-3 IBAD-MgO 層上の PLD-CeO₂ キャップ層の配向

試料 No.	基板長 (m)	$\Delta\phi$ (LMO層)		$\Delta\phi$ (PLD-CeO ₂ 層)	
		先頭	後端	先頭	後端
1	205	—	—	3.73	4.63
2	213	13.7	13.8	4.17	2.68
3	223	14.6	13.5	4.43	3.73
4	222	16.6	18	3.93	3.64



スパッタ法による CeO₂ キャップ層形成においては、GZO 中間層と同等の条件では、長尺において特性の低下が生じたが、成膜条件の適正化により、図 2.1.3-18 に示す様に $\Delta\phi = 5$ 度程度の安定した長尺成膜が可能となった。この、より薄化した IBAD 層に関しては、これまでに 2.4 km 程度作製した。

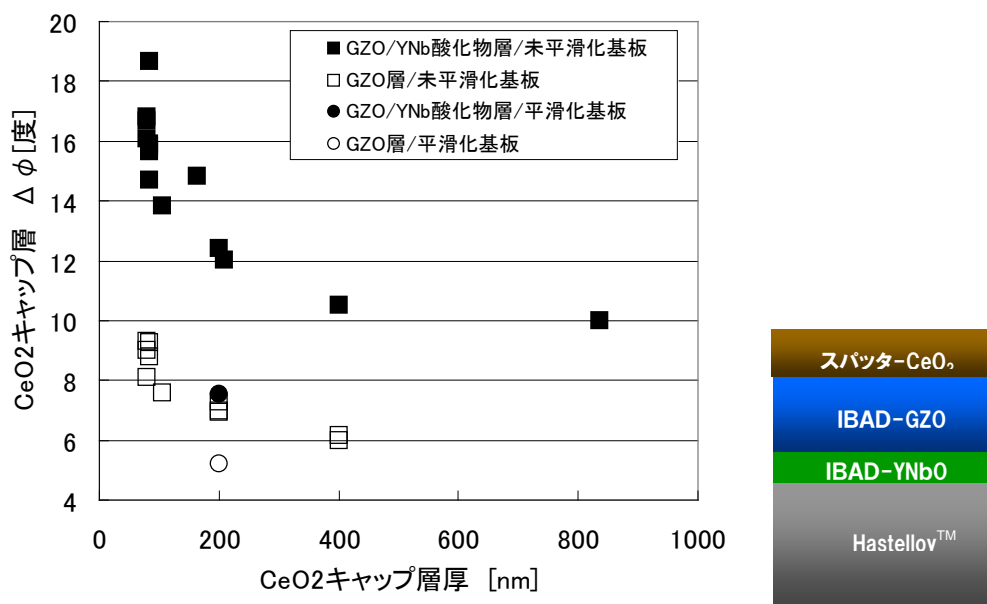


図 2.1.3-15 種々の IBAD 基板上で CeO₂ キャップ層厚と、CeO₂ キャップ層の Δφ の比較

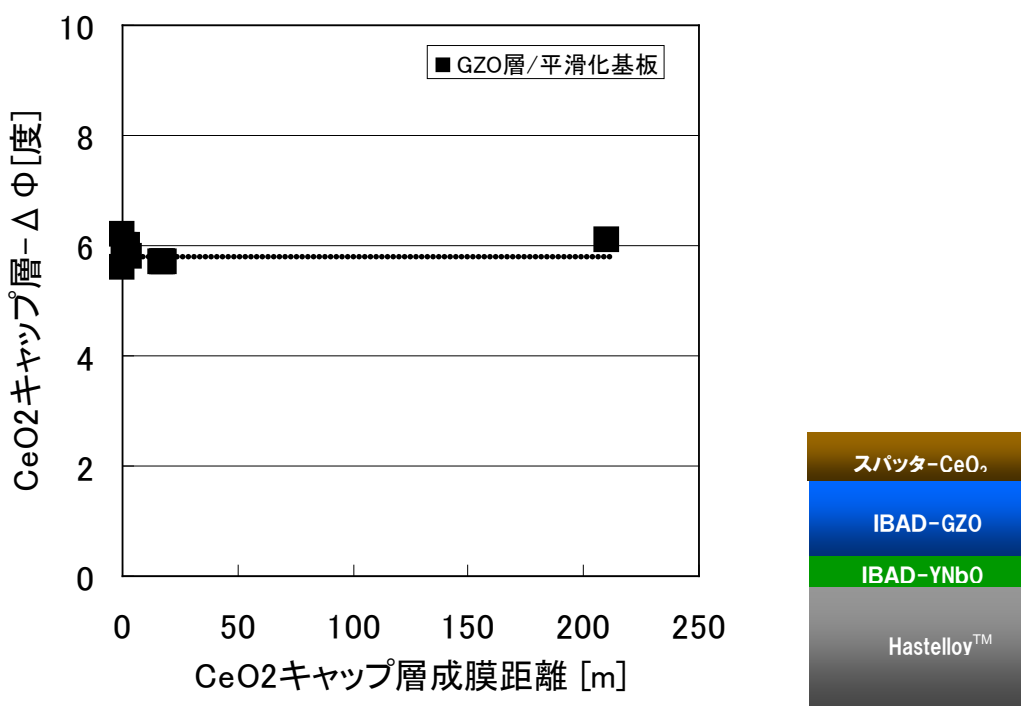


図 2.1.3-16 スパッタ法による CeO₂ キャップ層長尺成膜結果 (IBAD-GZO 層上)

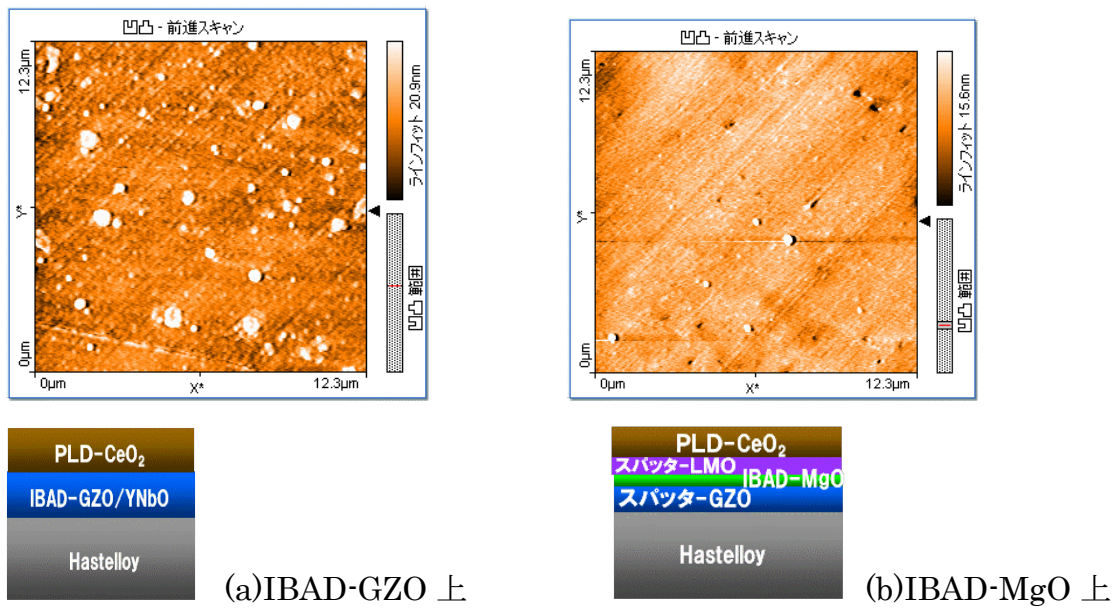


図 2.1.3-17 各構造の IBAD 中間層上の PLD-CeO₂ キャップ層表面

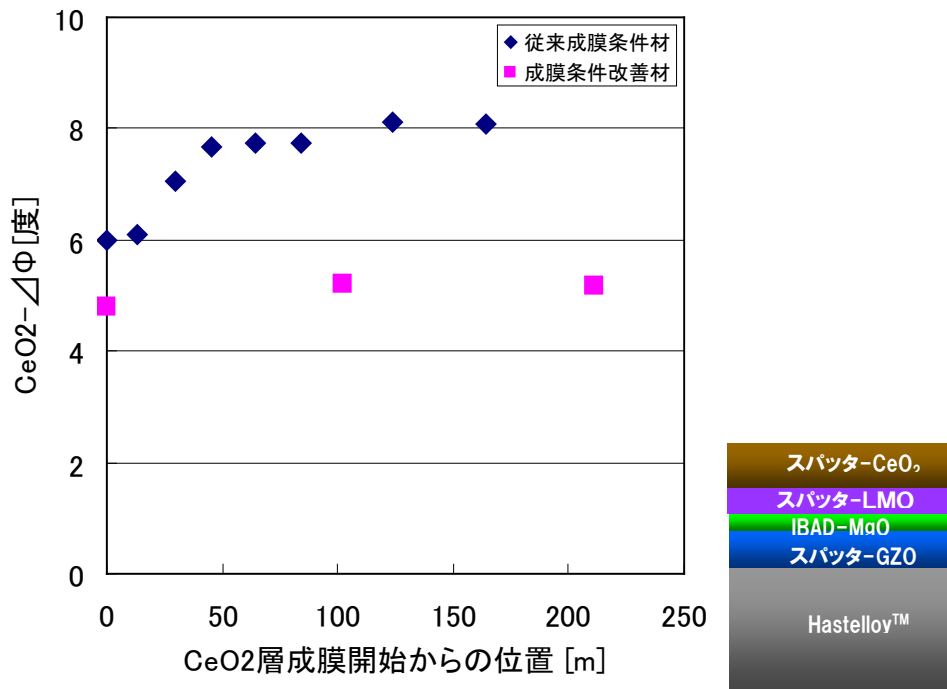


図 2.1.3-18 スパッタ法による CeO₂ キャップ層長尺成膜結果 (IBAD-MgO/LMO 層上)

続いて、薄化によって中間層の欠陥が抑制された IBAD-MgO 基板を用いて超電導線材作製を行った。図 2.1.3-19 に IBAD-MgO 基板を用いて作製した線材の I_c 分布を示す。線材の焼損防止のため通電は 205 A までとして測定を行なった。若干の低 I_c 箇所が認められるが、殆どの箇所 $I_c > 205 \text{ A/cm-w} (@77 \text{ K, s.f.})$ 以上を達成し、高い通電特性を有する線材を複数本作製することが可能になった。

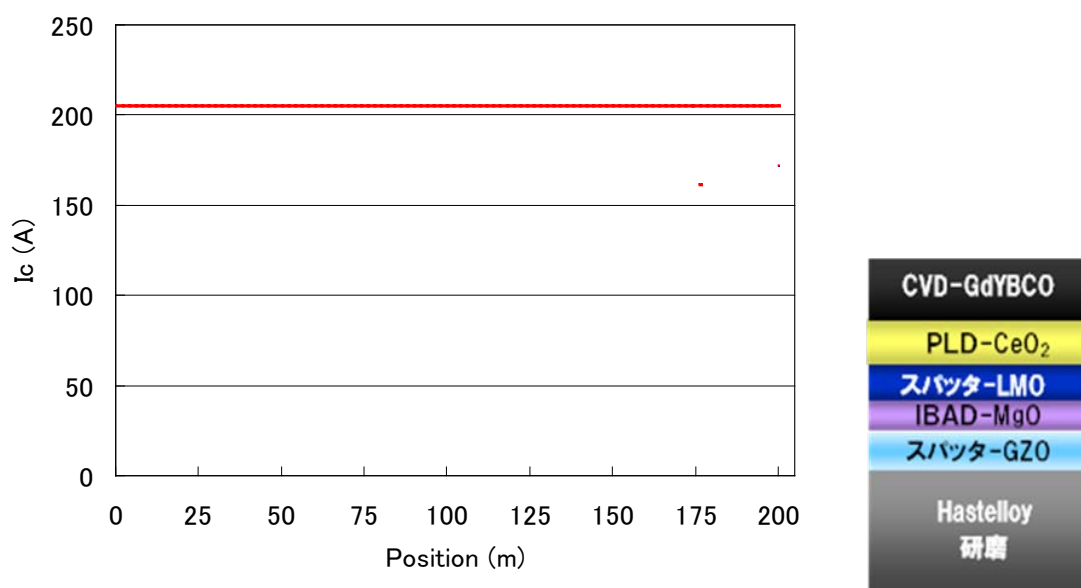


図 2.1.3-19 IBAD-MgO 基板を使用して作製した MOCVD 線材の I_c 分布例

以上の超電導製造技術開発によって、SMES モデルコイル用導体用の安定化層複合化技術開発や SMES モデルコイルの要素技術検討、要素試験などに平成 20 年度は総長で 1.5 km、平成 21 年度は 4.8 km の超電導線材を供給した。表 2.1.3-4 にこれまでに作製した線材量とその歩留りを示す。金属基板の平滑化、中間層構造の適正化、MOCVD の原料ガス供給系（気化器・配管）の温度の適正化を行ってきた結果、平成 22 年度に入ってから、 I_c 値：200 A/cm-w(@77 K,s.f.)、150 m 長を超える線材の歩留りも向上した。

表 2.1.3-4 IBAD-MOCVD 線材の製造実績

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 I_c と所定単長を達成した線材長の割合							

a-3 Cu めっきを用いた安定化層形成技術開発

安定化層に関しては、まず、硫酸銅浴を用いた電解 Cu めっき法により銅安定化層の短尺試作を行い、片側 50 μm 厚の Cu めっきが可能ないことを確認した（図 2.1.3-20）。Cu 複合法と Cu めっき法との比較では、表 2.1.3-5 に示すようにハンダで Cu テープを複合する Cu 複合法に比べ、Cu めっき法が SMES 用導体として適していることを確認した。平成 21 年度には、Reel to Reel 式の超電導線材用 Cu めっき装置を導入し、Cu 安定化層の長尺化を図った。図 2.1.3-21 (a) に初期の Cu めっきによる Cu 安定化層材の

断面写真を示す。この図から明らかなように、線材の端部において Cu めっき厚が厚い。めっきにおいては、線材端部に電界集中が生じるため線材端部に Cu が偏肉してめっきされる。コイル化のためには、断面形状が一様であることが望ましいため、Cu めっき槽内における線材端部への電界集中を避ける検討を行い、図 2.1.3-21 (b)に示す線材形状を得た。SMES 用線材の場合、積層導体における電流偏流の抑制のために、線材形状の均一性は重要な開発要素であるため、Cu めっき材の厚さの長手方向分布を測定した。その結果を図 2.1.3-22 に示す。めっき材の両端において厚さの変動があるが、これは、超電導線材とその両側のダミー線との抵抗の違いによってめっき厚に違いが生じたものである。この部分を除くと、長手方向においても厚さ変動は少ないと考えられる。図 2.1.3-23 に長尺の Cu 安定化線材の Cu めっき前後における I_c の測定結果を示す。線材の焼損防止を目的に Cu めっき前は $I_c = 205 \text{ A/cm-w} (@77 \text{ K, s.f.})$ で Cu めっき後においても $225 \text{ A/cm-w} (@77 \text{ K, s.f.})$ で通電制限をしているため、Cu めっき前後における詳細な I_c 値の比較は行っていない。しかし、 I_c 値が Cu めっき前に低下していた箇所において、Cu めっき後の I_c 値が低下する傾向が認められている。基本的に I_c 値が大きく低下している箇所は、コイルに使用されないが、今後の線材製造歩留りの向上のため、Cu めっきの条件の適正化により I_c 値低下を防ぐことができるか、あるいは、Ag 保護層/超電導層の界面の接合性に問題があり、それが Cu 層が付加されることにより顕著になるのか等を含め今後の安定化製造技術開発を通して検討する。

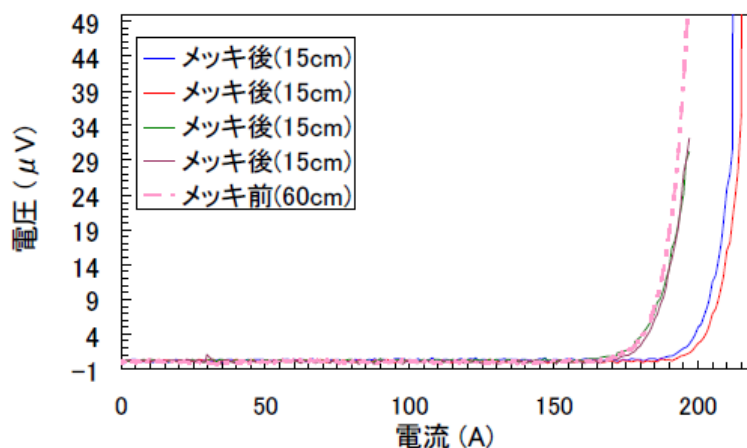


図 2.1.3-20 短尺試料における Cu めっき前後の I_c 変化

表 2.1.3-5 Cu めっき法と Cu テープ複合法の比較 (概要)

項目	Cu テープ複合法	Cu めっき法
片厚 $50 \mu\text{m}$ の安定化層	◎ : Cu テープ寸法精度良好	○ : めっき条件により調整
銅層と銀層の密着性	△ : 端部に複合不良部有	◎ : 密着性良好
複合後の厚さ	△ : 複合不良部の厚さ大 ハンダ部の厚み付加	○ : 断面内の厚さにばらつき有



(a) 改善前の Cu めっきによる Cu 安定化線材



(b) 改善後の Cu めっきによる Cu 安定化線材

図 2.1.3-21 Reel to Reel 式 Cu めっき装置による線材断面 (形状改善前後)

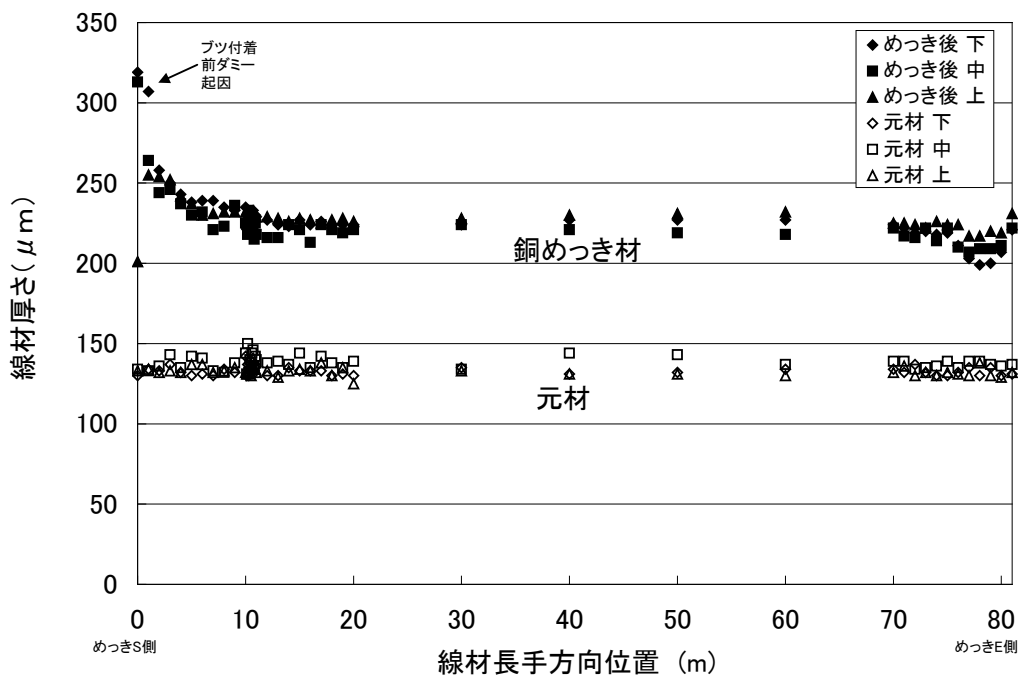
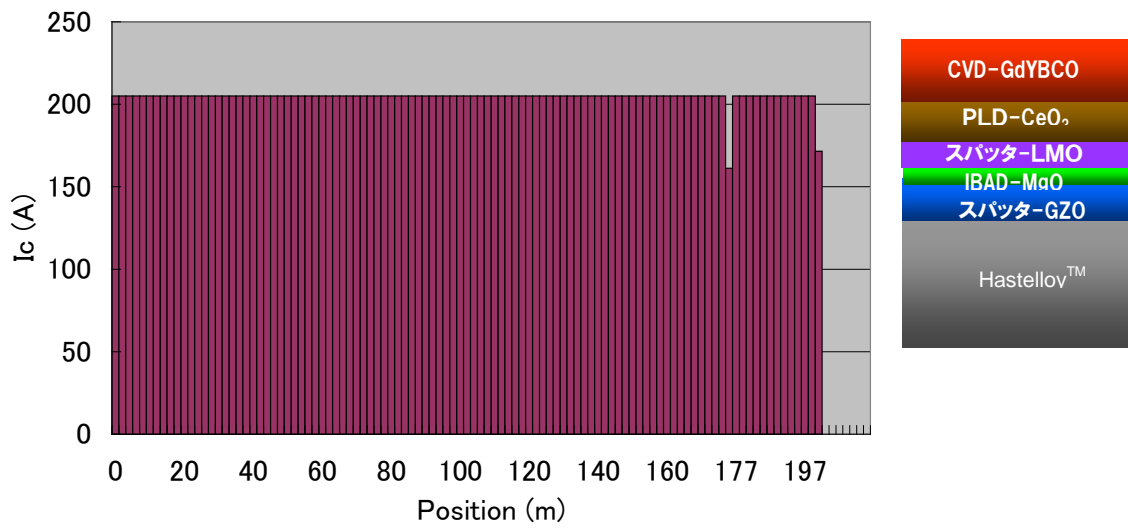
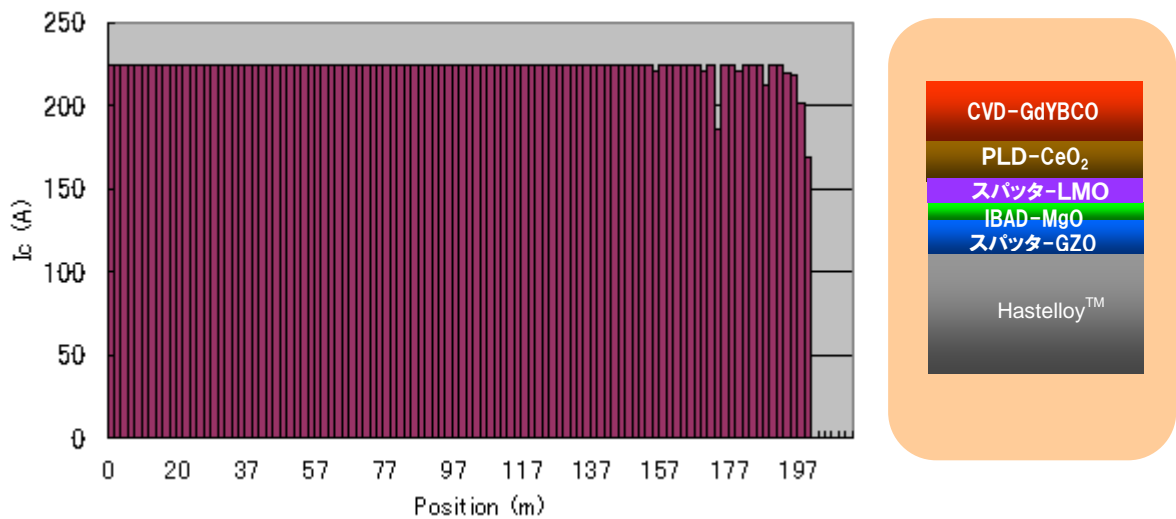


図 2.1.3-22 Cu めっき材の寸法の長手方向分布例



(a)Cu めっき層付加前 (205 A で通電制限)



(b)Cu めっき層付加後 (225 A で通電制限)

図 2.1.3-23 Cu めっき安定化層付加前後の I_c 比較

b. SMES 対応線材安定製造技術開発(IBAD-PLD 線材)

b-1 長尺 IBAD-PLD 線材の安定製造の検討

200 A/cm-w(@77 K, s.f.)級 IBAD-PLD 線材を用いた SMES モデルコイルの成立性を確認するため、2 kA 以上の通電が可能な大電流容量コイルの導体の評価用の IBAD-PLD 線材の安定製造技術の開発を行ってきた。

今回開発を行った線材における超電導線材は図 2.1.3-24 に示すように PLD-CeO₂ (500 nm)/ IBAD-MgO(10 nm)/Y₂O₃-bed 層(20 nm)/ Al₂O₃-bed 層(100 nm)の構造の中間層をハステロイ™上に形成し、超電導層は PLD で GdBCO を厚

さ 約 $2.2 \mu\text{m}$ 成膜した。図 2.1.3-25 に作製した線材の I_c 分布図を示す。300 m 以上の全長にわたって $I_c > 300 \text{ A/cm-w} (@77 \text{ K, s.f.})$ 以上を達成し、測定箇所数から求めた平均 I_c 値は $437 \text{ A/cm-w} (@77 \text{ K, s.f.})$ に達した。特性の長手方向の位置依存性として中央部が若干 I_c 値が低い傾向があるが、これは中間層の配向などに起因する特性低下で、IBAD-MgO もしくはキャップ層の成膜時の成膜条件の時間変動によるものと推定される。今回の線材作製結果は全長で高い特性を得ており、歩留りは 100 % で、安定製造という観点からは、十分な安定性を示し、目標を達成した。

材料	厚さ
銀	16 μm
GdBa ₂ Cu ₃ O _x	~2.2 μm
CeO ₂	500nm
MgO	~10nm
Y ₂ O ₃	~20nm
Al ₂ O ₃	~100nm
ハステロイ	100 μm

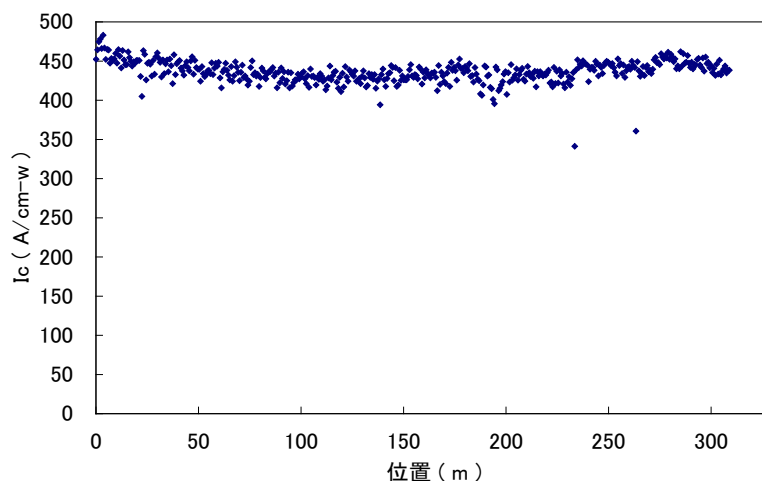


図 2.1.3-24
長尺 IBAD-PLD 線材の構造

図 2.1.3-25
長尺 IBAD-PLD 線材の I_c 分布図

b-2 長尺 IBAD-PLD 線材の安定製造の検討

極低コスト線材として中間層に IBAD-MgO を用いた超電導線材の SMES への適用性を評価するために $200 \text{ A/cm-w} (@77 \text{ K, s.f.})$ 級 IBAD-MgO 線材の安定製造技術開発を行っている。本項では、IBAD-MgO 中間層を用いた線材の安定製造技術開発の成果をまとめる。IBAD-MgO 線材は、ベッド層、IBAD 層、バッファ層、キャップ層から成るが、構造、材料によって省略される層もある一方、ベッド層などは複数の層で形成される場合もあり、4 つ以上の中間層を有する 경우가一般的である。全部で 2 層の IBAD-GZO 線材に比べて複雑な構造ではあるが、それぞれの層が非常に薄く、高速で成膜が出来るメリットがある。中間層厚みが 2 層合わせて $2 \mu\text{m}$ にもなる GZO 系の場合に比べて、MgO 系の場合は全中間層層の合計厚みは $1 \mu\text{m}$ 以下であり、層数が多くかつそれぞれが薄いという特徴を有する。高製造速度化が可能な特徴から将来線材として位置付けられている IBAD-MgO 基板であるが、薄い多層構造であるため、長尺での安定性確保が難しく、また、界面が多いため GZO 系に比べて剥離しやすいことも考えられる。そこで、SMES への IBAD-MgO 線材の適用性評価のため、 $200 \text{ A/cm-w} (@77 \text{ K, s.f.})$ 級の単長数十 m 線材を作製することを目標とし、安定製造技術の開発を行った。

今回開発を行った線材における中間層の構造は PLD-CeO₂ (500 nm) / Sputter-LMO (18 nm) / IBAD-MgO(5 nm) / Sputter-GZO(110 nm) / ハステロイ™ であり、超電導層の材料および作製プロセスとしては PLD-GdBCO (厚み：1.2~1.5 μm) を選択し、単長 75 m、150 A/cm-w(@77 K, s.f.)を仕様として 4本の線材 A-D を作製した。図 2.1.3-26(a)~(d)に作製した線材の I_c 分布図を示す。線材 C を除く 3本は目標の単長 75 m、150 A/cm-w(@77 K, s.f.)をクリアしたが、線材 C は一ヵ所目標 I_c 値を下回る結果となった。この低 I_c 部は磁化法測定により 2 cm 程度のサイズと確認出来、この場所は中間層付き基板に同程度のサイズの欠陥が確認されており、特性劣化が欠陥に起因するものであることが示唆される。また、線材 A 及び C には、特性の位置依存性に全体として減少あるいは増加の傾向があるが、これは基板の配向度の分布に起因する特性低下であり、IBAD-MgO 層成膜時に成膜条件が時間経過によって変化したことによるものと考えられる。

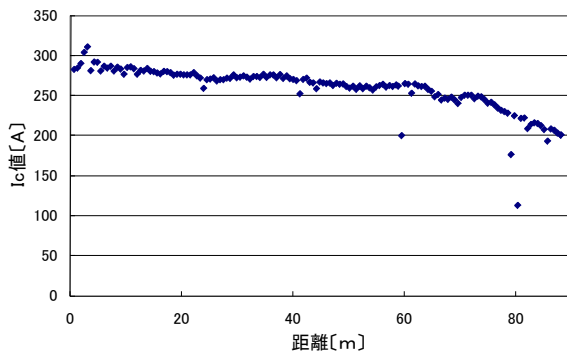


図 2.1.3-26(a) 線材 A の I_c 分布図

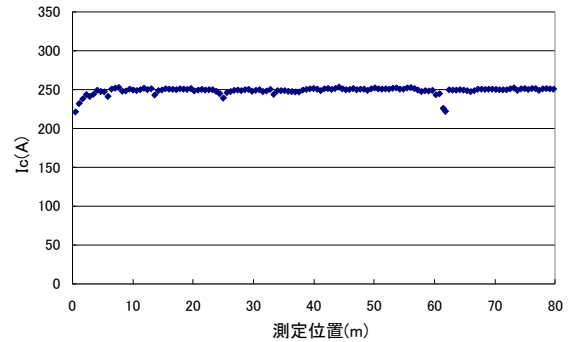


図 2.1.3-26(b) 線材 B の I_c 分布図

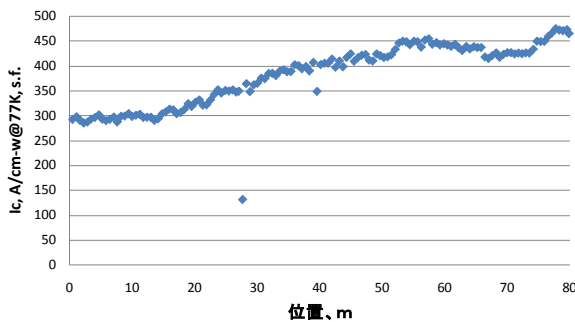


図 2.1.3-26(c) 線材 C の I_c 分布図

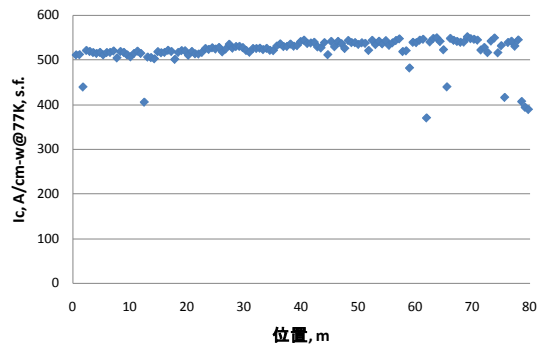


図 2.1.3-26(d) 線材 D の I_c 分布図

これまでに、様々な線材における特性劣化部位とその原因究明を行った結果、大きな特性低下の原因となる欠陥は、中間層成膜時、特に IBAD-MgO 層成膜までに金属基板に付着した汚れが主要因ではないかと考えられており、基板の清浄化と成膜条件の安定化により特性劣化部の抑制が可能になると考えられる。

安定製造という観点からは、今回の線材作製における歩留りとしては 3/4 と、開発途中の線材としては十分な安定性を示した。また、作製した線材の殆どの部分で

は $I_c > 200 \text{ A/cm-w} (@77 \text{ K, s.f.})$ の特性を得ており、目標を達成した。

(3) SMES 対応線材安定製造技術開発のまとめ

高磁界・コンパクトコイルの技術開発に適用可能な SMES 対応 Y 系超電導線材の安定製造技術の確立を目的として Y 系超電導線材を作製し、モデルコイル作製への寄与を図ってきた。

IBAD-MOCVD 線材の安定製造において、以下のような安定製造に向けた技術の進展が達成された。

1. ハステロイTM 基板の圧延加工および精密機械研磨の検討により長尺基板の高強度化と平滑性の向上が達成された。
2. 平滑化ハステロイTM 基板を使用によって、到達 I_c 値および I_c 分布の向上が可能であるという知見を得た。また MOCVD 装置の気化器および周辺温度の適正化によって、局所的な低 I_c 箇所の発生を低減し均質性の向上が図られた。
3. 中間層の薄化について、GZO 層を主体として Y-Nb 複合酸化物を組み合わせた IBAD 中間層構造の検討を行い、 CeO_2 酸化物キャップ層の $\Delta \phi$ が長尺基板の前後端で 6 度以下に制御された長尺基板が安定して作製された。
4. 中間層の薄化有効な IBAD-MgO 中間層の検討を行い、 CeO_2 酸化物キャップ層の $\Delta \phi$ が長尺基板の前後端で 6 度以下に制御されている長尺基板を再現性よく作製した。また、IBAD-MgO 基板上で高い通電特性を有する線材が複数本作製され、歩留りが向上してきた。
5. Cu 安定化層形成では、長手方向において厚さ変動が少なく、課題となるような I_c の低下を抑えることが可能と思われる長尺線材に向けた Cu めっき技術を開発した。

IBAD-PLD 線材の SMES モデルコイルへの適用性検討においては、これまでに約 600 m の線材を作製し、線材の殆どにおいて $I_c > 200 \text{ A/cm-w} (@77 \text{ K, s.f.})$ の特性を得た。また、作製した線材はコイル開発に使用する導体の作製検討に供した。

(4) 今後の計画と達成の見通し

IBAD-MOCVD 線材はこれまでの開発によって不良箇所発生を抑制し、歩留り向上を図ってきた。金属基板、中間層、超電導層にそれぞれ改善が施されたことによって現在までに歩留りが向上してきている。今後は、引き続き、コイル試験用超電導線材の作製供給を通じて、さらなる歩留り向上を図り、目標達成を目指す。

IBAD-PLD 線材の安定製造技術開発では、 $I_c > 200 \text{ A/cm-w} (@77 \text{ K, s.f.})$ の特性を線材の殆どで得ており、高い歩留りと超電導特性の安定性を得た。今後は、引き続き、Y 系超電導線材をコイル開発用導体の作製検討に提供するとともに、Cu めっき技術による安定化層複合化やコイル加工を行い、コイル適用への課題抽出とその解決を図り、適用化を目指す。

2.1.4 高磁界コンパクト SMES システムモデル検証

2.1.4-1 開発方針

(1) 研究開発目標

中間目標（平成 22 年度）

- ・ 2 GJ 級 SMES コイル基本システム構成の最適化並びに高磁界コンパクト・高効率伝導冷却コイルを用いた評価用試験モデルの設計を完了する。
- ・ SMES システムとしての適用性を検証評価する試験計画を作成する。

最終目標（平成 24 年度）

- ・ 2MJ 級評価用試験モデルを用いて、適用性検証評価試験計画に基づいて SMES 動作検証を行うとともに、電力系統制御 SMES の運転を模擬した 2 万回以上の繰返し充放電による特性検証を実施する。

(2) 研究内容

本プロジェクトにおける SMES システムモデル検証の最終目標としては、2.1.1 項、2.1.2 項 に記載の要素コイル開発結果を反映し、複数個のコイルの組合せにおいてクエンチ等の動的な変化等が発生した場合を想定したコイルの限界性能を把握し、コイル自体ならびにコイルシステムとしての裕度の適正化を図ることで、Y 系コイルの限界設計技術を確立し SMES のさらなる低コスト化の見通しを得ることにある。

平成 20 年度は、2 GJ 級 SMES コイル基本システム構成の検討を行うとともに、クエンチ発生時の挙動に関する事前解析等を実施し、動的な変化が発生した場合のコイルの健全性等を評価するために必要となる試験方法の検討を行う。また、電気機器や超電導技術に関する学識経験者、重電メーカー各社、および各電力会社等からなる委員会において、SMES システムモデル検証方法等を十分に議論した上で開発を進める。

平成 21 年度からは 2.1.1 項、2.1.2 項(1)、(2)に記載の Y 系 SMES コイル評価結果を反映して 2 GJ 級 SMES コイル基本システム構成の改善を図るとともに、そのために検証すべき複数個のコイルの組合せにおいてクエンチ等の動的な変化等が発生した場合の保護の考え方を整理し、クエンチ時の挙動検証等を含めた評価試験方法を立案するとともに、評価試験用モデルコイルシステムの設計を実施する。

2.1.4-2 コイル構成最適化の検討（中部電力、北海道大学）

(1) 研究開発の目標

トロイダル配置した 180 個の要素コイルの間には、電気絶縁、冷却手段、機械的強度サポートなどを配置する必要がある。また、設計諸元に対し、実際に製作実現可能であることが必須である。これらを勘案し、構成要素の寸法制約を検討して、「超電導電力ネットワーク制御技術開発」プロジェクトの概念設計結果に対してコイルの基本電気設計を見直し、最適化検討を実施した。

(2) 2.4 GJ コイル設計最適化の考え方

a. トロイダル中心半径の計算

トロイダル配置した 180 個の要素コイルの間には、電気絶縁、冷却手段、機械的サポートなどを配置する必要がある。これらの構成要素の寸法制約を検討して、「超電導電力ネットワーク制御技術開発」プロジェクトの概念設計結果に対して要素コイル間のスペースを考慮したコイルの基本電気設計を見直した。基本設計を検討する際の拘束条件を表 2.1.4-2-1 に示す。トロイダル中心半径を大きくした場合には蓄積エネルギーが小さくなるが、コイルの内径を小さくして巻数を増やすことで対応する方針とした。

表 2.1.4-2-1 基本設計の条件

項 目	値
最大蓄積エネルギー	2.4 GJ
運転温度	20 K
要素コイル数	180 コ
パンケーキコイル数／要素コイル	4 コ
線材寸法	幅 12 mm×厚 0.2 mm

コイルと、基本的な構成要素である対地絶縁構成、冷却構成、機械的強度サポート等の概略を図 2.1.4-2-1 に示す。コイルを冷却するために、巻線部端面には絶縁板を介して冷却板を取り付ける。これを要素コイル 1 ユニットとして、これらの中に機械的強度サポート部品を配置する。以下で各項の寸法を検討する。

1) 要素コイル

要素コイルを構成するパンケーキコイルは、12 mm 幅の線材を 13 mm 幅の巻枠に巻き、端面に FRP を接着する。パンケーキコイル間の絶縁は、要素コイル両端に 6 kV 印加時、隣接コイル間で耐圧 3 kV が必要になる。耐電圧を考慮して、片側に 1 mm ずつの FRP 板を接着した 2 mm の FRP による絶縁を想定した。パンケーキコイル幅は 15 mm となる。ターン間の絶縁については、要素コイル両端に

6 kV を印加時のターン間電圧は 4 V 程度であり、線材間にカプトンを介在させる。

2) 絶縁板

対地絶縁は、巻線部とコイル冷却板との間で 6 kV を確保するため、厚さ 4 mm の FRP 絶縁板を入れることを想定した。

3) 冷却板

各要素コイルの端面に、冷却配管を埋設したアルミ製の冷却板を接着する。配管は、冷媒の圧力損失を考慮して内外径を決め、冷却板はこの配管を埋設できる厚さとする。配管の内径は「超電導電力ネットワーク制御技術開発」プロジェクトで成実性が確認された内径 6 mm φ (外径 8 mm φ) を最大とし、これを埋め込む冷却板は厚さ 10 mm を想定した。

4) コイル間サポート

電磁力に対する補強構造設計にとって、向心力サポートが重要である。向心力サポートは、要素コイル間にウェッジ形状の FRP 板を挟みこんで接着する方法とする。この部材のトロイダル中心側は、製作性を考慮して厚さ 5 mm を想定した。

以上の結果により、角度 2 度毎の周長 d は、

$$\begin{aligned} d &= (\text{パンケーコイル} \times 4 \text{ 個}) + (\text{絶縁板} \times 2 \text{ 枚}) + (\text{冷却板} \times 2 \text{ 枚}) + (\text{コイル間サポート端部}) \\ &= (15 \text{ mm} \times 4) + (4 \text{ mm} \times 2) + (10 \text{ mm} \times 2) + (5 \text{ mm}) \\ &= 93 \text{ mm} \end{aligned}$$

となり、次式よりトロイダル中心半径 R が 4064 mm 必要であることが分かった。図 2.1.4-2-2 に構成図を示す。ただし、図 2.1.4-2-2 中の内径は「超電導電力ネットワーク制御技術開発」プロジェクトにおける値である。

$$93 = 2\pi(R - 1400) \times \frac{2}{360}$$

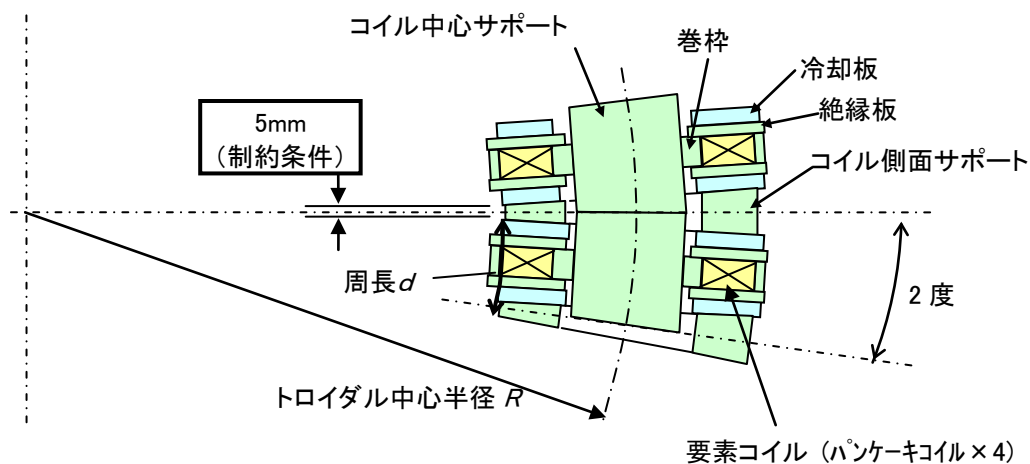


図 2.1.4-2-1 コイル間に必要な構成要素

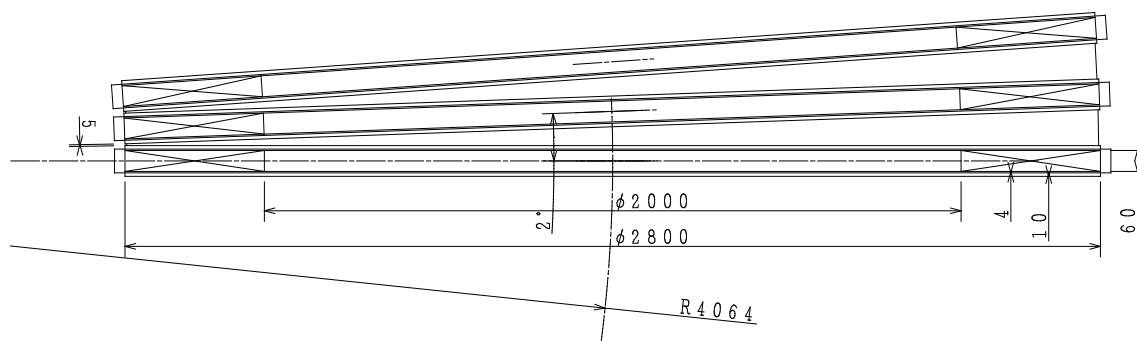


図 2.1.4-2-2 コイル配置の成立性に関わる構成要素と寸法制約

b. 全体構成の検討

向心力サポートがあることによって電極および冷却配管の構成が制約されるため、それらの全体構成について検討した。

電極やフィーダは、向心力サポートとの干渉を避けて配置する必要がある。また、バンドルする線材間の偏流を抑制するために、線材に同じ磁場を経験させる構成にする必要がある。偏流抑制に関しては、各コイルが上下対称・トロイダル内／外側で非対称であり、また、4 シングルパンケーキの積層中心で対称である形状を考慮してバンドル数を 4 枚とし、電極 4 個を 90 度ずらした 4 回対称に配置する構造が適していると考えられる。

冷却配管は、電極部や口出しをかわすためにコイルの上下から導入する構成とした。冷却板は、磁場変動による渦電流を定量的に検討し、スリットを入れる等の対策を施す必要がある。

全体構成の概略を図 2.1.4-2-3 に示す。要素コイルの自重量は、コイル側面サポートに取り付けた吊サポートで保持することができる。

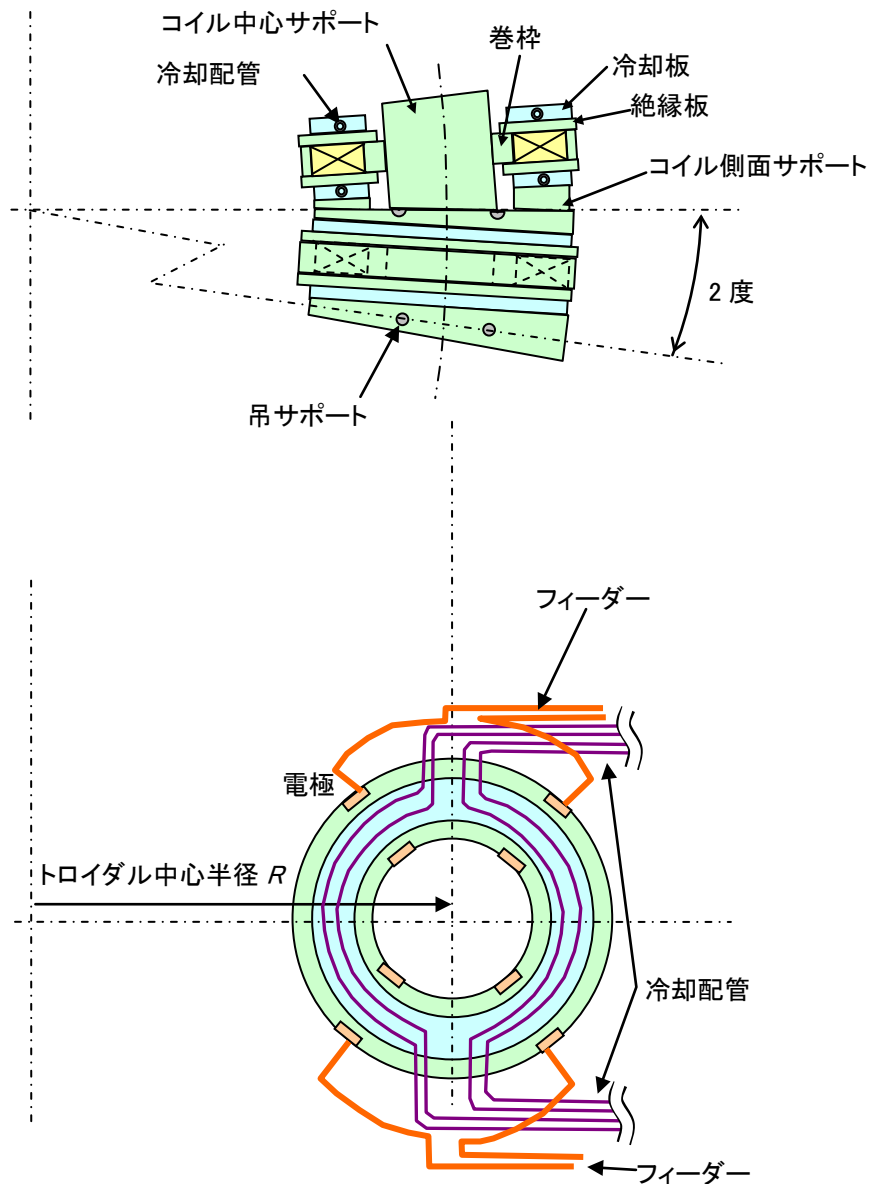


図 2.1.4-2-3 全体構成案

c. 2.4 GJ コイルの基本設計

トロイダル中心半径を増加し、コイル内半径を調節して蓄積エネルギー2.4 GJを維持させたコイルの基本設計をした。主要な諸元を表 2.1.4-2-2 に示す。図 2.1.4-2-4 に、パンケーキコイルの断面構成を示す。1 ターン分の厚さ 1.1 mm のうち Y 系超電導線材（主に Hastelloy 基板）は 0.1 mm とする。安定化層（銅）の厚さは、「超電導応用基盤技術開発（第 II 期）」プロジェクトでの検討結果に基づいて 0.2 mm を仮定し、線材寸法を 0.1 mm として、絶縁 0.15 mm を引いた残り 0.65 mm を Hastelloy 補強材とした。コイル外半径は 1398 mm となり、巻数を増やすためにコイル内径は 952 mm と小さくした。フープ力を Hastelloy TM 断

面で担うとすると、*BJR* 最大値は 588 MPa になる。

表 2.1.4-2-2 トロイダルコイルの諸元

蓄積エネルギー	2.4 GJ
運転温度	20 K
要素コイル数	180
トロイダル中心半径	4064 mm
コイル内半径	952 mm
コイル外半径	1398 mm
コイル高さ	60 mm
ターン数/要素コイル	1620
使用線材長	2153 km
線材幅	12 mm
1 ターン厚さ	1.10 mm
ハステロイ基板	0.10 mm
安定化層	0.20 mm
補強材(ハステロイ)	0.65 mm
絶縁材	0.15 mm
通電電流@素線	540 A (2160 A/4 枚バンドル)
最大磁界	10.3 T
<i>BJR</i> 最大値 ※1	588 MPa
向心力@要素コイル	3.42 MN

※1 *BJR* はハステロイTM の断面 (基板+補強材) で負担と仮定

$$J = 540 / \{12 \times 10^{-3} \times (0.10 \times 10^{-3} + 0.65 \times 10^{-3})\} \text{ [A/m}^2\text{]}$$

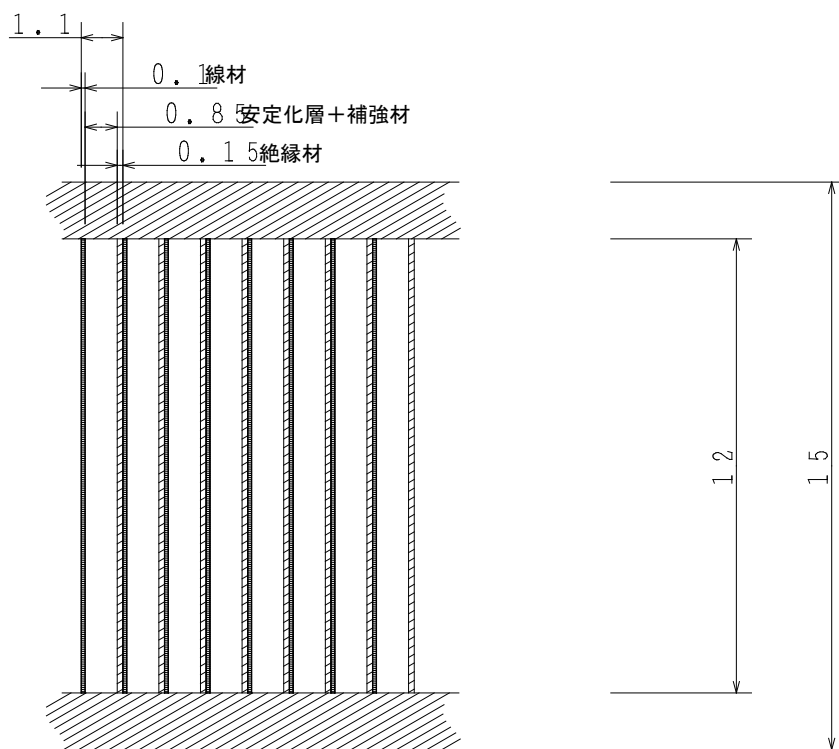


図 2.1.4-2-4 パンケーキコイルの断面構成

d. 磁場解析結果

要素コイル 180 個をトロイダル配置し、素線に電流 540 A (4 並列で 2160 A) を通電した時の発生磁場を計算した。180 個のコイルを配置した外観を図 2.1.4-2-5 に示す。1 つの要素コイルについて、経験磁場分布の解析結果を図 2.1.4-2-6 に示す。

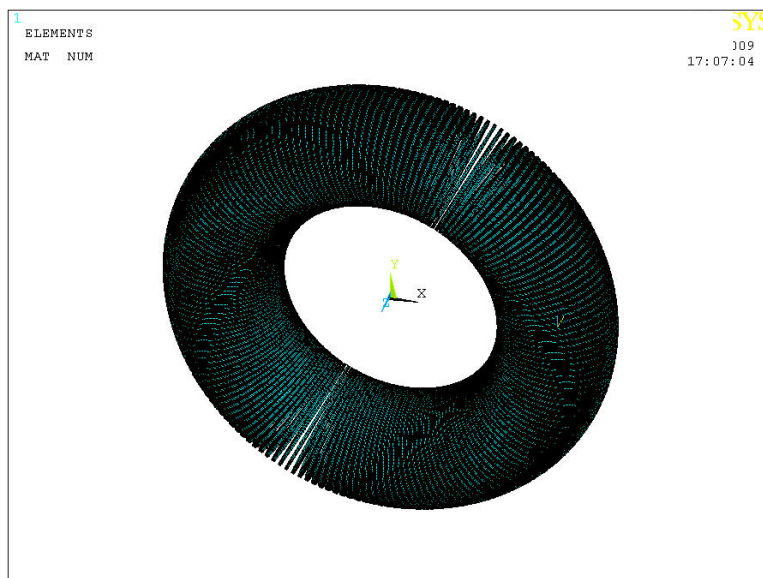


図 2.1.4-2-5 要素コイルを 180 個配置した外観

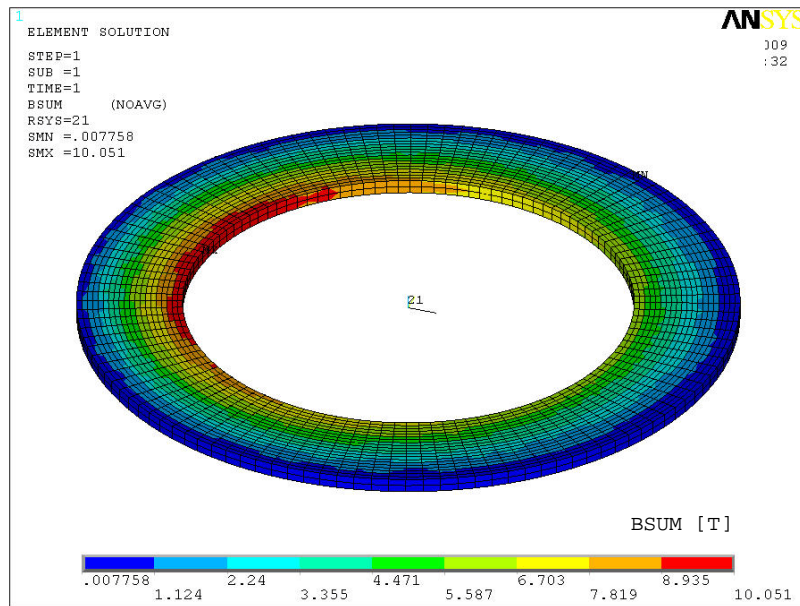


図 2.1.4-2-6 要素コイルの磁束密度分布

(3) トロイダル型コイルの機械強度評価

コイルの支持構造は、コイル間サポートとコイル中心サポートとで隣接コイル同士を支えあう構造とした。支持構造の構成を図 2.1.4-2-7 に示す。以下に考慮したポイントごとに検討した内容をまとめる。

a. 向心力

励磁により定常的にコイルに生じる向心力は、トロイダル周方向の圧縮力で保持される。したがって支持部材はこの圧縮力に耐えられるように、面積を確保する必要がある。以下に、圧縮力を支持する 2 つの方法について検討する。

要素コイル間に「コイル側面サポート」を入れ、向心力をコイル側面（ $\phi 1904 - \phi 2796$ のドーナツ型、 3.3 m^2 ）で支持する方法が考えられる。その場合、圧縮力 $F=106 \text{ MN}$ ($3.71 \text{ MN}=F \cos 89 \text{ 度} \times 2$) が加わり、面圧は 32 MPa になる。これは FRP の強度で耐えられる値である。

コイル巻枠の側面で圧縮力を受ける方法もあるが、同等の面圧にするには、直径 $\phi 1700 \text{ mm}$ 程度の巻枠内側全体を支持体で埋める必要がある。この「コイル中心サポート」で圧縮力を受けると、面圧は 46 MPa になる。コイル側面サポートに加えてこの巻枠内側のコイル中心サポートを併用することで、面圧を低減することができる。ただし、コイル中心サポートは巻線部の内径側（高負荷率）部分に圧縮力を与えることになる。コイル内側は高磁場であり渦電流による発熱が問題になる可能性があるため、材質は FRP とする。

b. 転倒力

コイル間隔の製作誤差があった場合や保護時などの不均衡なコイル電流が発生した場合には、コイルに転倒力が発生するため、その支持構造が必要となる。この転倒力に対しても、前述のコイル側面サポートが有効である。

c. せん断力

トロイダル配置の外側方向成分の力により、くさび型の面（ウェッジ）の摩擦力が低いとすべりが生じる。コイル間サポートの面積に向心力がほぼ水平に加わるとき、せん断応力は 0.6 MPa になる。これは、コイル側面とコイル側面サポートとの摩擦力（接着力）で保持できる値であると考えられる。

また、製造寸法誤差の影響で要素コイルがトロイダル配置の θ 方向にずれた場合にはコイル間の吸引力が、 r 、 z 各方向にずれた場合にはコイル側面にせん断力が生じる。これらもコイルとコイル間サポートとの接着力で拘束させる。

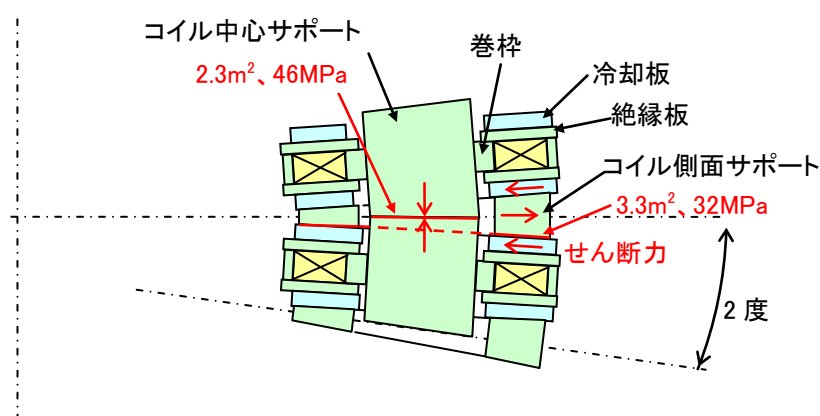


図 2.1.4-2-7 支持構造の構成（圧縮応力はそれぞれ単独での値）

コイル構造および支持構造について解析モデルをもとに r 方向・ θ 方向・ z 方向の応力、トロイダル半径方向変位量について評価した。解析モデルの全体図を図 2.1.4-2-8 に、モデルの構成を図 2.1.4-2-9 に示す。巻棒の厚さは 100 mm とした。なお、解析ケースは以下の 4 通りで実施した。

- 解析ケース (1) : コイル中心サポートあり、巻棒あり
- 解析ケース (2) : コイル中心サポートなし、巻棒あり
- 解析ケース (3) : コイル中心サポートなし、巻棒なし
- 解析ケース (4) : コイル中心サポートなし、巻棒なし、コイル側面サポートの物性値変更

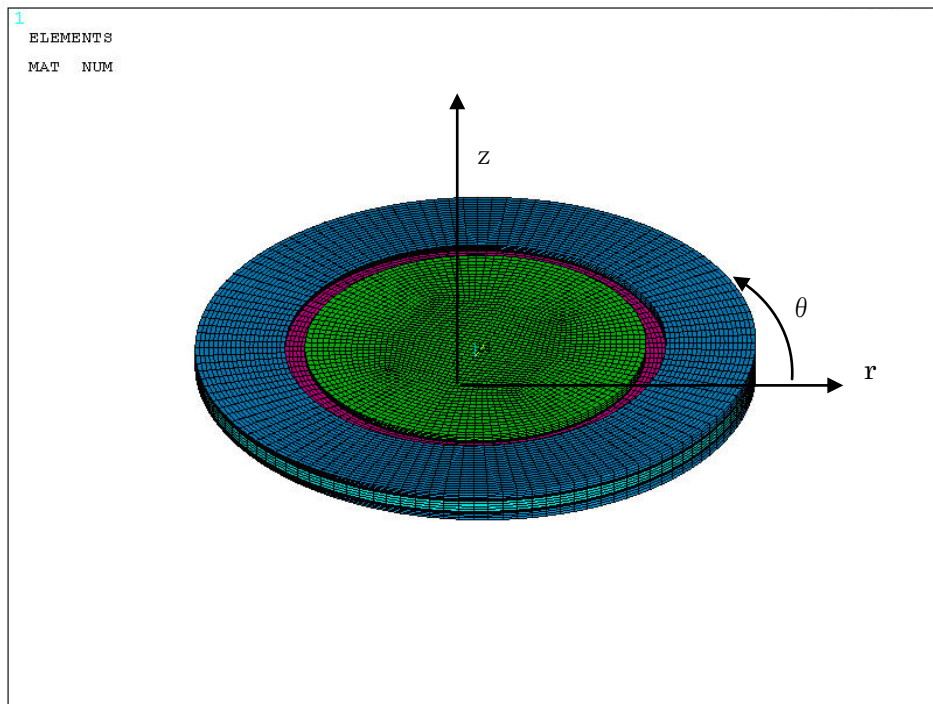


図 2.1.4-2-8 解析モデルの全体図

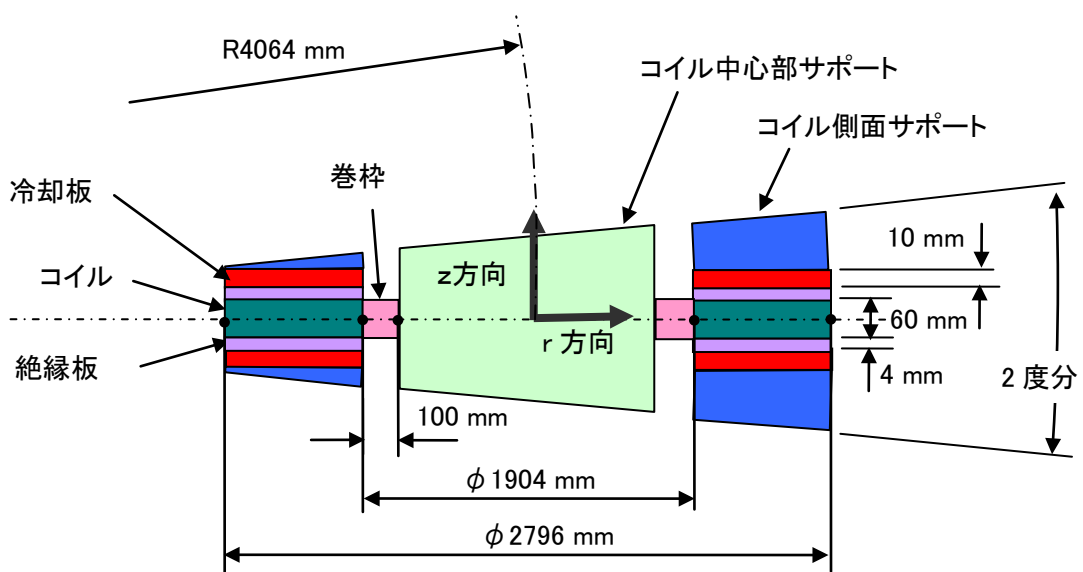


図 2.1.4-2-9 解析モデルの構成 (断面図)

Y系超電導線材の剥離方向の力となるために最も懸念されたコイルのr方向の引張り応力に関しては、「コイル中心サポートなし、卷棒なし、コイル側面サポートの材質をFRP-B」とした場合が2MPaと最も小さくなり、支持構造として適していると考えられる。このケースでの他の応力成分は、コイルのθ方向の最大引張り応力は251MPa（Y系超電導線材に換算して460MPa）、最大圧縮応力は-123

MPa、コイル z 方向の最大引張り応力は 130 MPa、最大圧縮応力は、-100 MPa となった。

また、要素コイルが完全に設計図どおりに配置されず、製造寸法誤差などが原因でずれた場合にコイルに加わる電磁力についても評価したが、問題ないレベルであることが確認された。

(4) 結果

2 GJ 級コイルの概念設計結果を基にして、要素コイル 180 個からなるトロイダルコイルの基本電気設計を行った。要素コイルの間に必要な、電気絶縁、冷却手段、機械的サポートなどの構成要素を検討し、それらの寸法制約からトロイダル中心半径とコイル内半径を調節して、蓄積エネルギー 2.4 GJ のコイルの基本設計を得た。

2 GJ 級 SMES 用高強度コイルとしてのトロイダル型 Y 系コイル構造の成立性を確認するため、向心力、フープ応力などを考慮して支持構造を仮定し、構造解析を実施した。その結果、Y 系超電導線材の剥離方向の力となるために最も懸念されたコイルの r 方向の引張り応力に関して、最も小さい場合で 2 MPa となり、Y 系 SMES コイルの支持構造として実現可能と考えられる。

2.1.4-3 システム安定性に関する検討（中部電力、早稲田大学）

(1) 研究開発目的

大容量 SMES では、漏れ磁束を少なくし、磁気エネルギーを効率よく蓄積するために、複数のコイルをトロイダル配置することが想定される。超電導コイルでは、1 つのコイルに何らかの異常が発生した場合、保護のため、外部抵抗によってそのコイルのエネルギーをダンプすることになる。コイルをトロイダル配置すると、1 つのコイルをダンプした場合、他のコイルを永久電流モードのままにしておくと、ダンプするコイルの電流減衰による誘導電流が重畳されることとなる。こうしたトロイダル配置の SMES コイルシステムにおいて、1 個あるいは複数のコイルが保護動作に入った場合の他のコイルの挙動を解析し、システムとしての安定性について評価した。

(2) トロイダルコイルシステムの安定性

解析評価に用いたコイルの諸元を表 2.1.4-3-1、表 2.1.4-3-2 に示す。パンケーキコイル 4 段を要素コイルとし、それを 180 個トロイダル配置する。図 2.1.4-3-1 にインダクタンスの計算結果を示す。

表 2.1.4-3-1 2 GJ 級 SMES 用トロイダルコイル諸元

要素コイル内半径	1.0 m
要素コイル外半径	1.4 m
要素コイル高さ	0.06 m (15mm × 4 layers)
1ターン幅	15 mm
1ターン厚(補強材)	1.10 mm (0.85 mm)
導体構成	4枚バンドル(導体厚4.4mm)
ターン数	364 (91 turns × 4 bundles)

表 2.1.4-3-2 2 GJ 級 SMES 用トロイダル要素コイル諸元

運転温度	20 K
要素コイル	180
位置(トロイダル中心半径)	3.7 m
要素コイル内半径	1.0 m
要素コイル外半径	1.4 m
要素コイル高さ	0.06 m
通電電流@素線	540 A

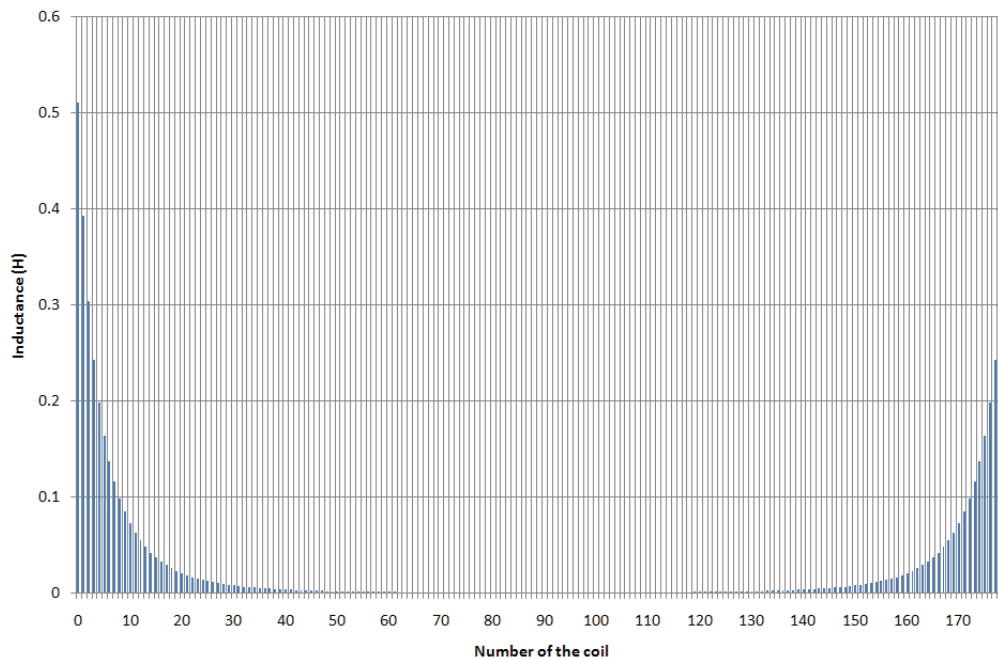


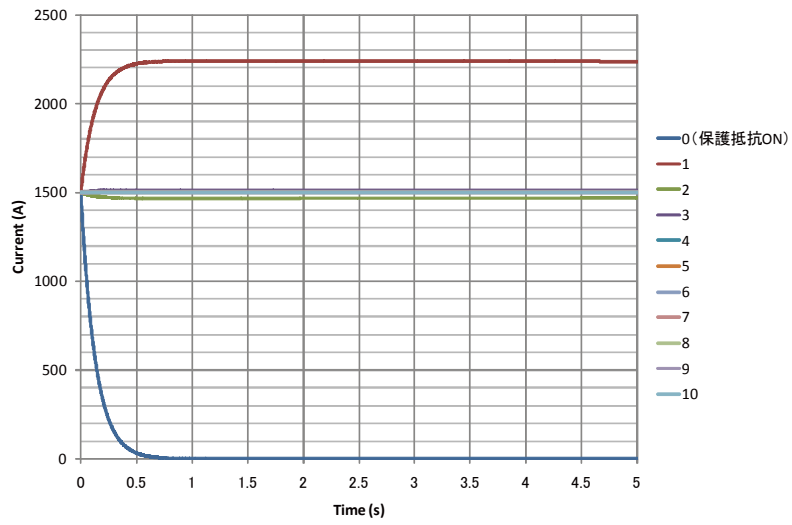
図 2.1.4-3-1 トロイダル要素コイルの各インダクタンス

a. 永久電流モード

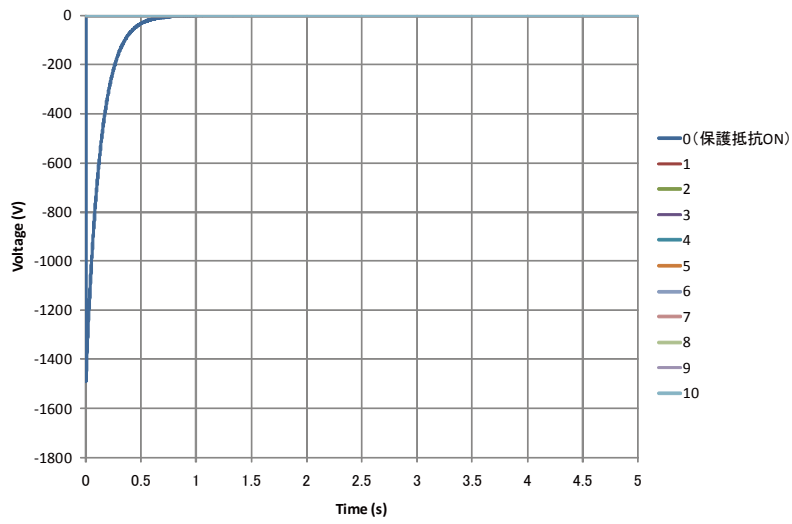
180 個のコイルが独立に電流 1500 A (素線 375 A × 4 枚バンドル) で永久電流モードにあるとする。その状態から、いくつかのコイルが外部抵抗保護モード (抵抗 1 Ω で閉ループ)、他のコイルがそのまま永久電流モード (0 Ω で閉ループ、超電導状態を維持) の場合、各コイルの電流、電圧変化を回路方程式と熱解析も連成し

て計算した。Y系超電導線材は幅 1cm、ハステロイ厚さ 100 μm 、銅層厚さ 100 μm で 4 枚バンドル、 $I_c=2160\text{ A}$ (@20 K、0.05 $\mu\text{V}/\text{cm}$ 基準)、 $n=30$ とした。 I_c の温度依存性と銅層抵抗の温度依存性を考慮したが、磁場依存性は考慮していない。また、交流損失は考慮していない。熱解析においては、銅とハステロイTM の熱容量の温度依存性を考慮した。

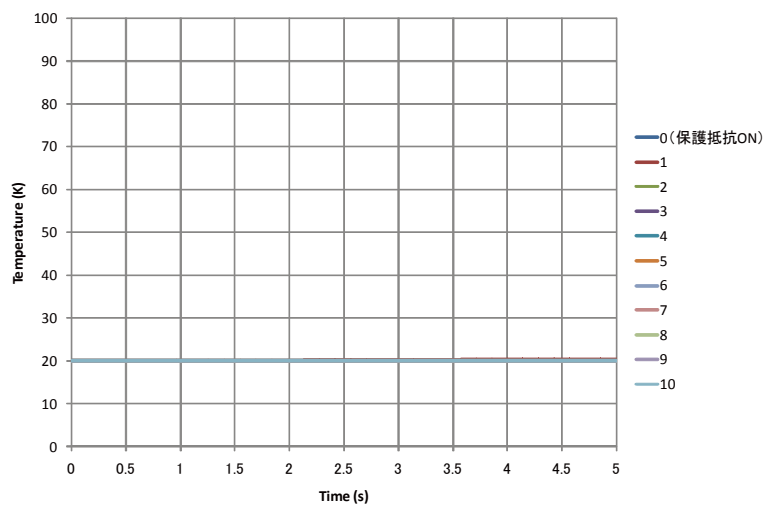
コイル 1 個および 5 個ダンプした場合の計算結果をそれぞれ図 2.1.4-3-2、図 2.1.4-3-3 に示す。1 つのコイルが保護動作を開始したとき、隣のコイルの超電導状態が維持される限り、磁場の変化はそのコイルでほとんど遮へいされるため、隣のコイルの電流が 1.5 kA から 2.2 kA に増加する。増加した場合でも超電導状態は維持される。2 つ以上のコイルが保護動作に入った場合、1 つ隣のコイルの電流上昇が大きいため、超電導状態が維持できなくなる。従って、コイル自身の抵抗によって、電流減衰が始まる。その結果、2 つ隣のコイルの電流が上昇する。以下、クエンチが次から次へとコイルに伝播していく。



(a) 電流

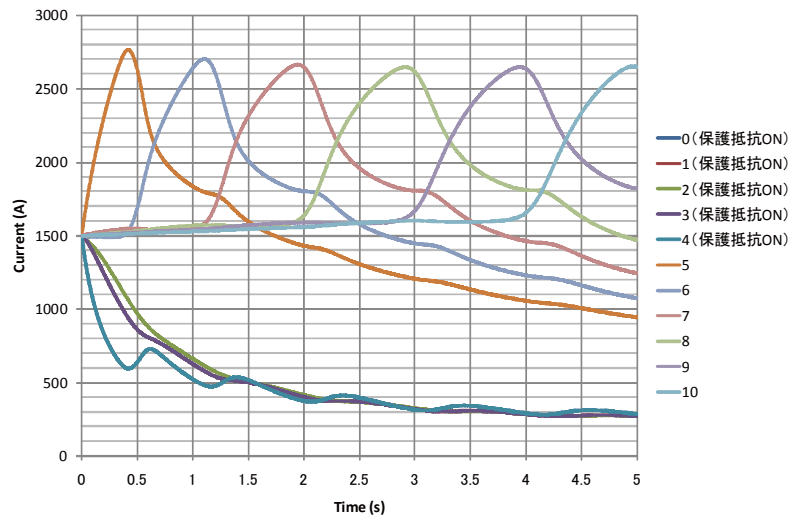


(b) 電圧

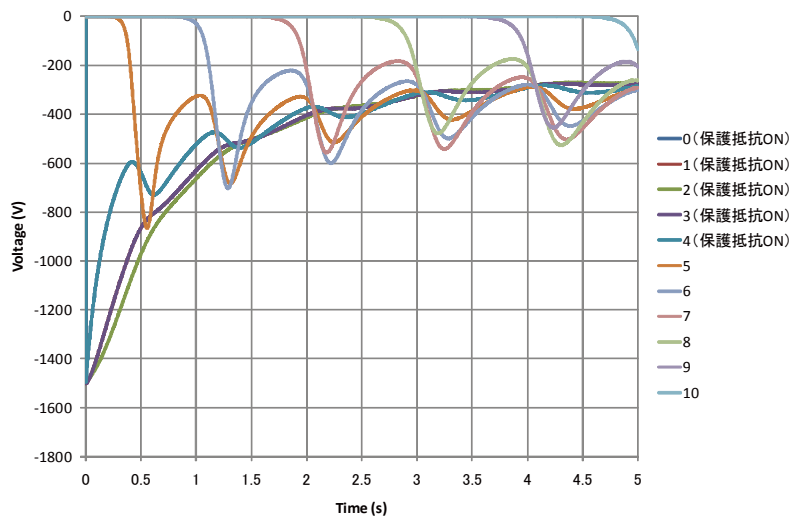


(c) 温度

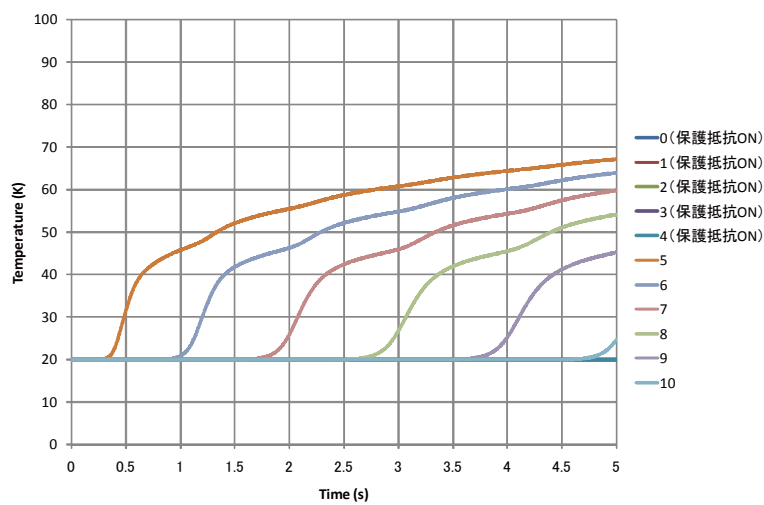
図 2.1.4-3-2 永久電流モード運転の場合の保護動作時の電流・電圧・温度変化 (コイル 1 個をダンプ)



(a) 電流



(b) 電圧



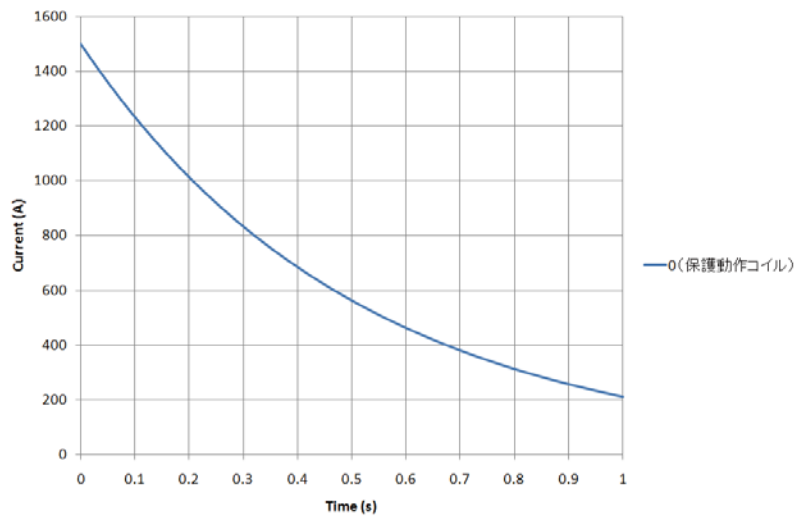
(c) 温度

図 2.1.4-3-3 永久電流モード運転の場合の保護動作時の電流・電圧・温度変化 (コイル 5 個をダンプ)

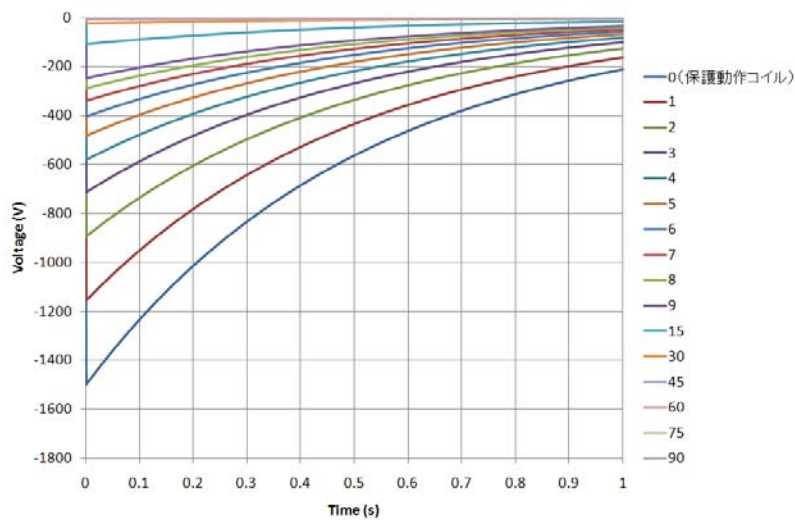
b. 定電流モード

180個のコイルが独立に電流 1500 A ($375 \text{ A} \times 4$) で定電流モードにあるとする。1つのコイルがある時定数 (1 Ω相当) で強制減衰し、他のコイルはそのまま定電流モードを維持した場合の、各コイルの電流、電圧の変化を求めた。

結果を図 2.1.4-3-4 に示す。各コイルは、ダンプするコイル以外は、定電流であるため、そのコイルとの誘導成分の電圧が発生する。この結果から、1つのコイルが保護モードの入った場合、他のコイルが定電流を維持できれば、最大発生電圧は保護動作中のコイルで 1.5 kV、隣のコイルで 1.15 kV であることがわかる。



(a) 電流



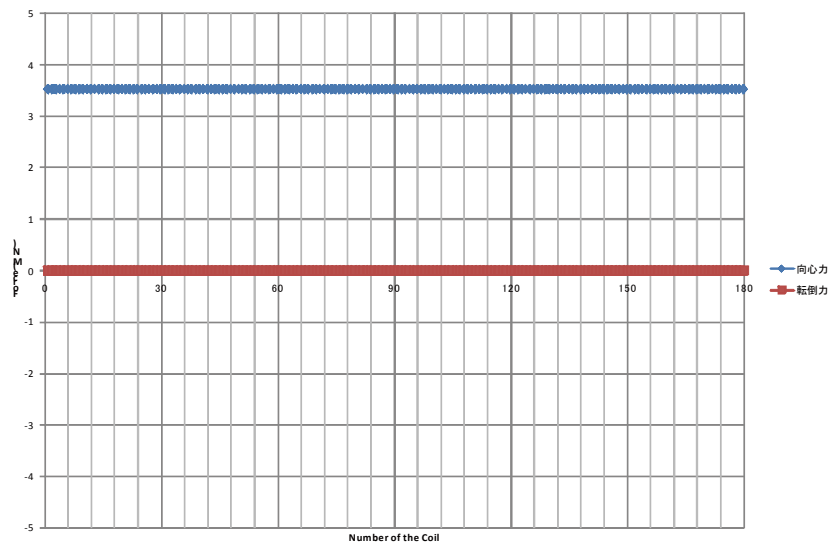
(b) 電圧

図 2.1.4-3-4 定電流モード運転の場合の保護動作時の電流・電圧変化

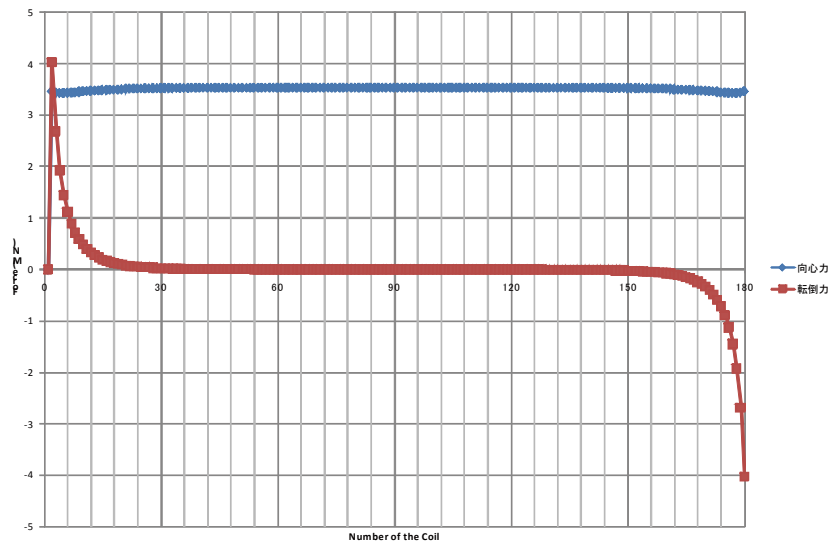
c. コイルに作用する転倒力

コイルをトロイダル配置した場合、すべてのコイルに同じ電流が流れていれば、転倒力は発生しない。しかし、これまで述べてきたような保護動作によって1つのコイルがダンプすると、力の平衡がくずれて、転倒力が発生する。図 2.1.4-3-5 に

定常運転時と保護動作時の向心力および転倒力の計算結果を示す。定常運転時、向心力は 3.5 MN、転倒力は 0 MN であるが、保護動作時は、向心力は 3.5 MN、転倒力は 4 MN が発生する。



(a) 定常時



(b) 保護動作時

図 2.1.4-3-5 定常運転時と保護動作時の向心力および転倒力

(3) 結果

大容量 SMES 用トロイダル配置のコイルにおいて、いくつかのコイルが保護動作に入った場合の他のコイルの挙動を回路解析によって評価した。その結果、永久電流モードにおいて運転する場合は、隣接コイルの電流が増加するため、そのマージンを考慮した保護システムを構築する必要がある。変換器と要素コイルを 1 対 1 で構成するような定電流モードにおいて運転することができる場合は、保護動作時においても隣接コイルの誘導電圧は低く抑えられることが確認された。また、トロイダル配置において、いくつかのコイルが保護動作に入った場合、不平衡荷重によ

り転倒力が作用するが、解析結果、問題ないレベルであることが確認された。

2.1.4-4 クエンチ検出・保護方法に関する検討（中部電力、早稲田大学）

(1) 研究開発目的

コイルのクエンチ検出は、一般にコイル端子間電圧を監視することにより行われる。コイル内の常電導部で発生した電圧が一定の閾値を超えるとクエンチが発生したと判断される。HTS 線材・コイルは、LTS に比べて圧倒的に高い熱的安定性を有しているが、何らかの要因で常電導転移が発生すると、常電導領域の伝播が極めて遅いため、局所的な温度上昇発生の可能性がある。一方、集合導体内の素線は結合損失を抑制するために、絶縁を施しており、常電導発生後の転流は接続部で発生する。この転流による電圧は非常に微小で数 mV レベルであるため、検出は困難である。また、SMES の運転を想定した場合、変換器などのノイズレベルによっては常電導による発生電圧が埋もれてしまって、検出が困難になることが考えられる。したがって、素線絶縁を施した集合導体コイルのクエンチ検出は電圧を監視する方法では困難であるため、新たな検出法について検討した。

(2) クエンチ時の集合導体コイルの挙動

集合導体は、素線間絶縁を施しているため、線材の途中で他の線材に転流せず、線材端部でのみ転流が起きる。従って、素線レベルの自己および相互インダクタンス L 、 M を集中定数で与えた。熱解析は有限要素法を用いて、電流分布解析と連成することで、発熱分布を考慮できるようにした。冷却条件は断熱とした。運転温度は 20 K とし、導体を構成する 4 枚の線材 1 枚で長手方向に 1 cm 劣化した場合 ($I_c = 0$) の常電導伝播特性を解析した。なお、計算は線材の温度が 400 K になった時点で終了した。

a. 待機状態 1680 A（1 枚当たり 420 A）通電

待機状態 1680 A（1 枚当たり 420 A）通電時に線材 1 枚（Tape 1）で 1 cm の劣化が発生した場合について、各素線の電流および両端電圧と温度を計算した。図 2.1.4-4-1 に導体および各線材に流れる電流、各線材の劣化部の温度、導体および各線材両端に発生する電圧を示す。図 2.1.4-4-1(a) より、10 秒程度で劣化が発生した Tape 1 の電流が約 200 A 減衰し、他の線材に転流するが、Tape 2、4 の電流が線材の I_c に到達し、Tape 3 に転流が始まる。転流が起きている間、両端電圧はほとんど発生しない。この時点で線材の劣化部の温度は図 2.1.4-4-1 (c) より、約 30 K である。100 秒後には、電流の変化がなくなり、Tape 2、3、4 の電流値が同じになる。その後、170 秒で Tape 2、3、4 の電流が減衰し、Tape 1 に転流が始まる。これは、Tape 2、3、4 で温度が徐々に上昇し、 I_c が下がり、抵抗が発生したためである。この後、図 2.1.4-4-1 (b) のように導体両端の電圧が急上昇する。このとき、

0.1 V 発生時で 120 K、0.5 V 発生時で 245 K である。

b. ピーク状態 2160 A (1 枚当たり 540 A) 通電

動作ピーク時に相当する 2160 A (540 A/tape) 一定で通電し続けた際、線材 1 枚 (Tape 1) で 1 cm の劣化が発生した場合について、各素線の電流および両端電圧と温度を計算した。図 2.1.4-4-2 に導体および各線材に流れる電流、各線材の劣化部の温度、導体および各線材両端に発生する電圧を示す。図 2.1.4-4-2 (a) より、3 秒程度で劣化が発生した Tape 1 の電流が約 100 A 減衰し、他の線材に転流するが、Tape 2、4 の電流が線材の I_C に到達し、Tape 3 に転流が始まる。この時点で線材の劣化部の温度は図 2.1.4-4-2 (c) より、約 30 K である。その後、10 秒で Tape 2、3、4 の電流が減衰し、Tape 1 に転流が始まる。これは、Tape 2、3、4 で温度が徐々に上昇し、 I_C が下がり、抵抗が発生したためである。この後、図 2.1.4-4-2 (b) のように導体両端の電圧が急上昇する。このとき、0.1 V 発生時で 115 K、0.5 V 発生時で 228 K である。

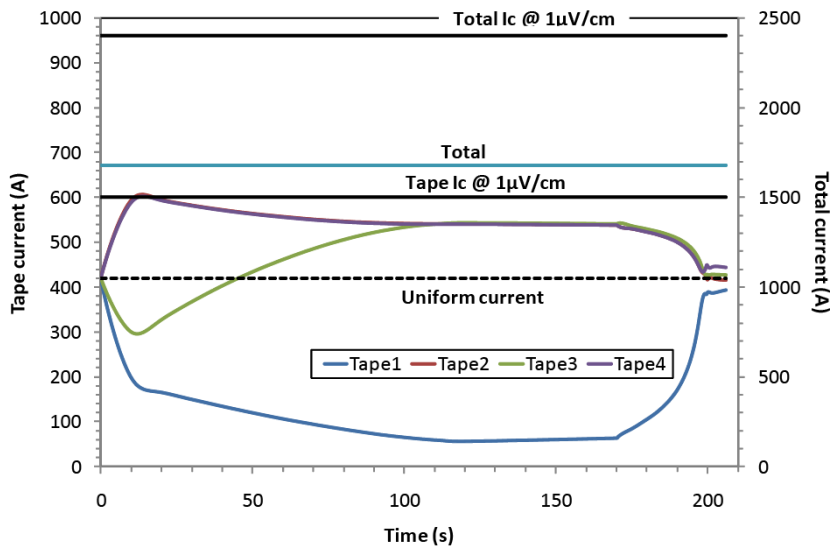
c. 系統安定化運転

系統安定化 SMES の運転パターン (1680 A \Rightarrow 2160 A \Rightarrow 1680 A の 3 秒周期の三角波パルス を 5 回) を通電する際、最初のパルスが入った時に、線材 1 枚 (Tape 1) で 1 cm の劣化が発生した場合について、各素線の電流および両端電圧と温度を計算した。図 2.1.4-4-3 に導体および各線材に流れる電流、各線材の劣化部の温度、導体および各線材両端に発生する電圧を示す。図 2.1.4-4-3 (a) より、パルス通電中に転流が発生し、パルス終了後に、20 秒程度で劣化が発生した Tape 1 の電流が約 200 A 減衰する。その後、Tape 2、4 の電流が Tape 3 に転流する。この時点で線材の劣化部の温度は図 2.1.4-4-3 (c) より、約 30 K である。その後、110 秒で Tape 2、3、4 の電流が減衰し、Tape 1 に転流が始まる。これは、Tape 2、3、4 で温度が徐々に上昇し、 I_C が下がり、抵抗が発生したためである。この後、図 2.1.4-4-3 (b) のように導体両端の電圧が急上昇する。このとき、0.1 V 発生時で 115 K、0.5 V 発生時で 228 K である。

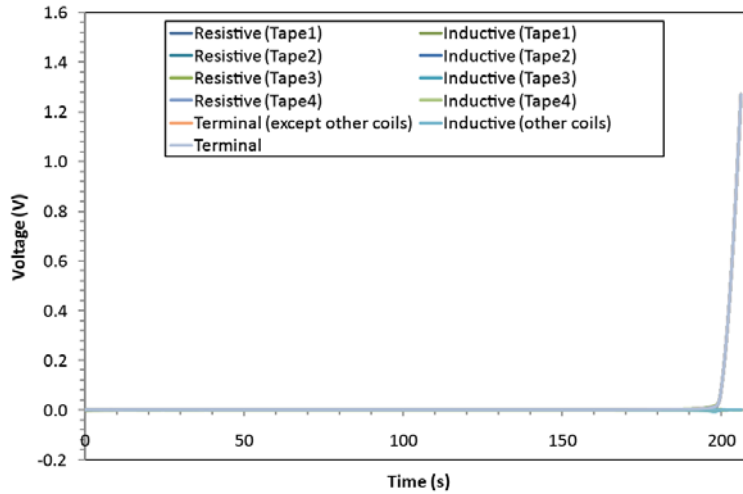
d. 負荷変動補償運転

負荷変動補償 SMES の運転パターン (1680 A \Rightarrow 2160 A \Rightarrow 1680 A の 18 秒周期の三角波パルスの繰り返し) を通電する際、最初のパルスが入った時に、線材 1 枚 (Tape 1) で 1 cm の劣化が発生した場合について、各素線の電流および両端電圧と温度を計算した。図 2.1.4-4-4 に導体および各線材に流れる電流、各線材の劣化部の温度、導体および各線材両端に発生する電圧を示す。図 2.1.4-4-4 (a) より、パルス通電中に転流が発生し、パルス終了後に、5 秒程度で劣化が発生した Tape 1 の電流が約 100 A 減衰する。その後、Tape 2、4 の電流が Tape 3 に転流する。この時点で線材の劣化部の温度は図 2.1.4-4-4 (c) より、約 30 K である。その後、25 秒で Tape 2、3、4 の電流が減衰し、Tape 1 に転流が始まる。これは、Tape 2、3、

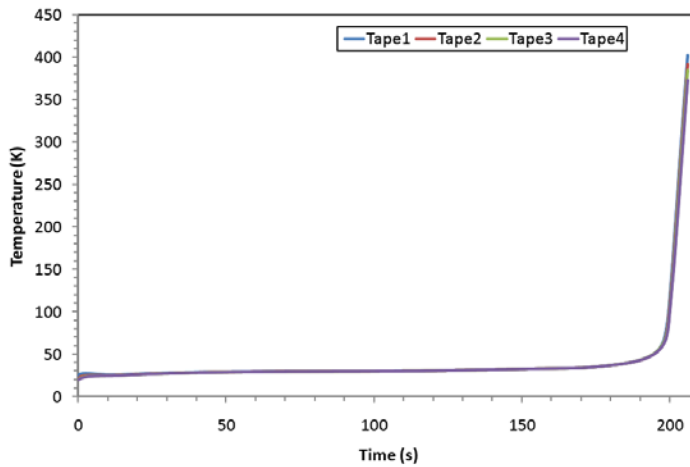
4で温度が徐々に上昇し、 I_C が下がり、抵抗が発生したためである。この後、通電電流は減衰しているものの、図 2.1.4-4-4 (b)のように導体両端の抵抗性電圧は急上昇する。ただし、導体の全電圧は 100 V 級の誘導性電圧が重畳されるためこのとき、ほとんど変化は見られない。抵抗性電圧が 0.1 V 発生時で線材温度は 130 K、0.5 V 発生時で 250 K である。



(a) 集合導体の電流

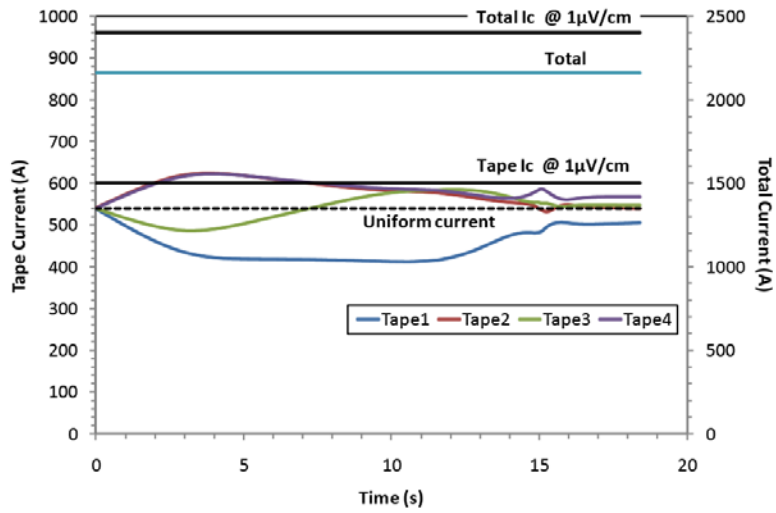


(b) 電圧

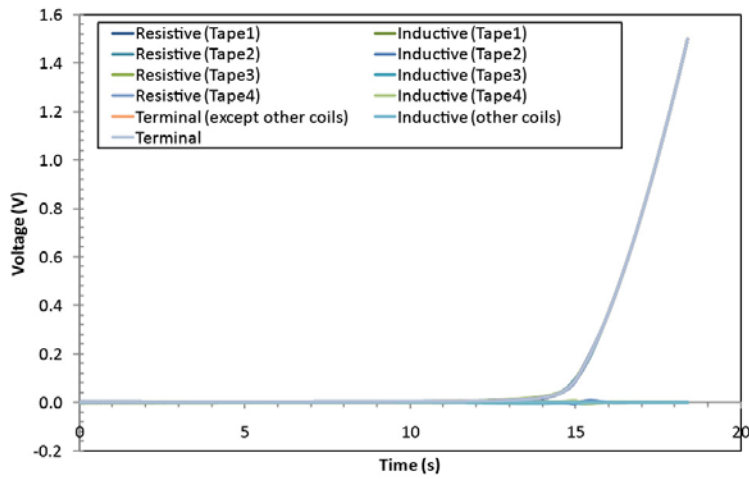


(c) 劣化部の温度

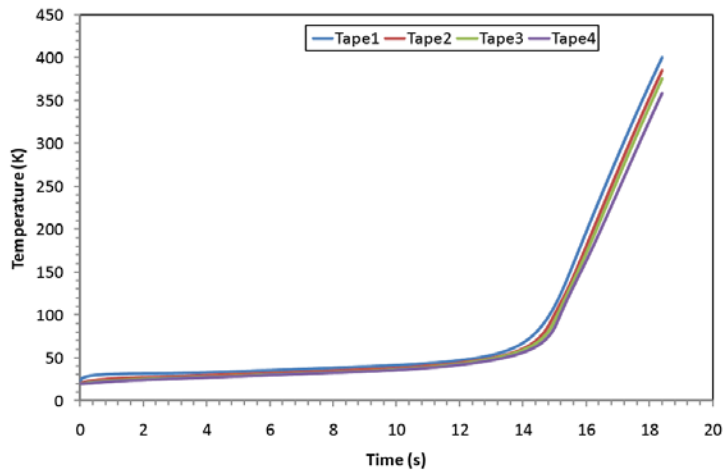
図 2.1.4-4-1 待機状態 1680 A (1 枚当たり 420 A) 通電時に線材 1 枚で 1 cm の劣化が発生した場合の集合導体内の電流分布、電圧、温度



(a) 集合導体の電流

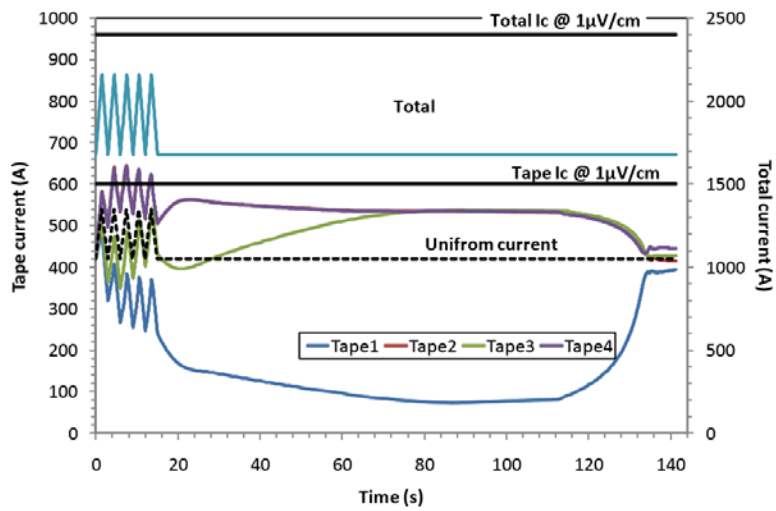


(b) 電圧

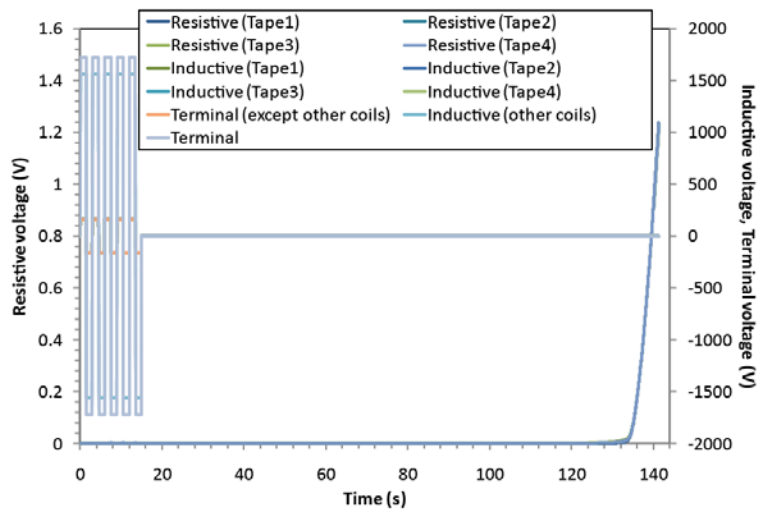


(c) 劣化部の温度

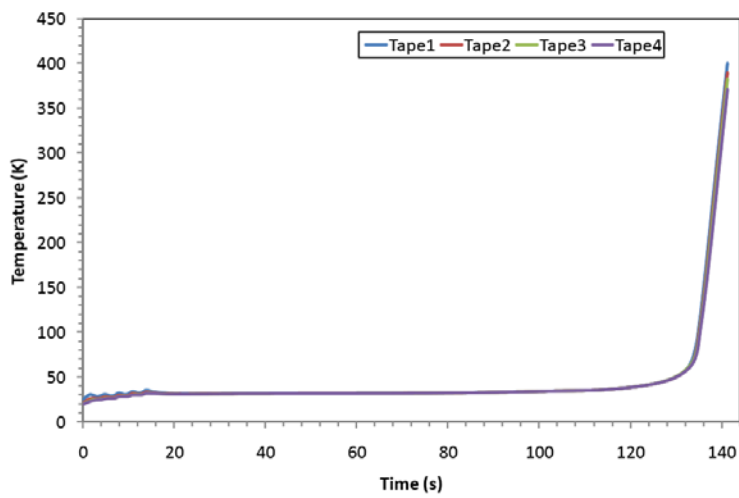
図 2.1.4-4-2 ピーク状態 2160 A (1 枚当たり 540 A) 通電時に線材 1 枚で 1 cm の劣化が発生した場合の集合導体内の電流分布、電圧、温度



(a) 集合導体の電流

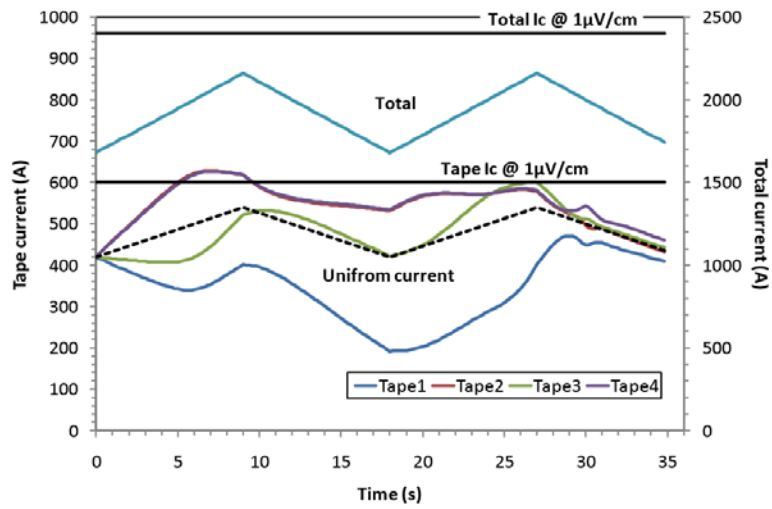


(b) 電圧

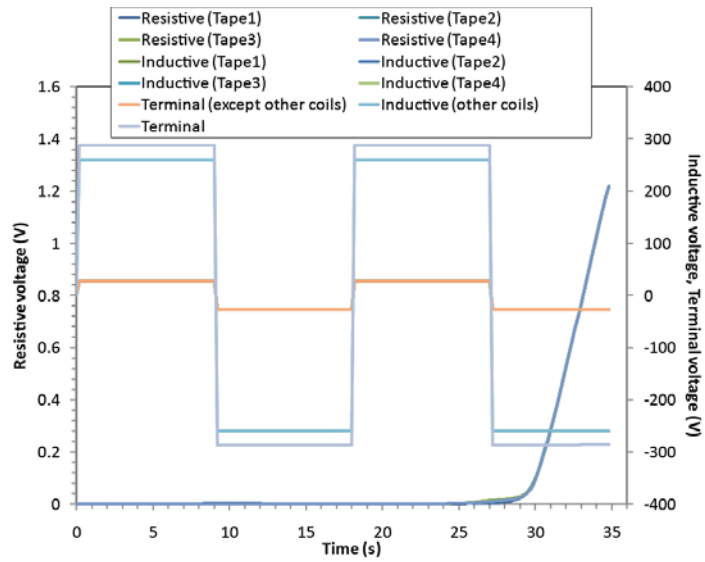


(c) 劣化部の温度

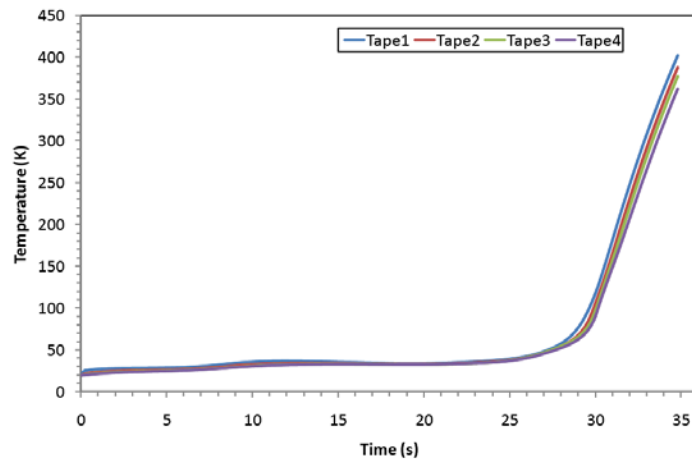
図 2.1.4-4-3 系統安定化運転時に線材 1 枚で 1 cm の劣化が発生した場合の集合導体内の電流分布、電圧、温度



(a) 集合導体の電流



(b) 電圧



(c) 劣化部の温度

図 2.1.4-4-4 負荷変動補償運転時に線材 1 枚で 1 cm の劣化が発生した場合の集合導体内の電流分布、電圧、温度

(3) クエンチ検出方法の検討

「(2) クエンチ時の集合導体コイルの挙動」で述べたように素線絶縁を施した集合導体内で、ある素線で常電導領域が発生しても、転流は速やかに発生する。ここで発生する転流を監視すれば、クエンチの検出が可能になると考えられる。そこで、集合導体内の素線 1 枚で常電導が発生した場合と同様に 2～4 枚で常伝導が発生した場合についても評価し、表 2.1.4-4-1 に偏流（導体内の素線の最大電流と最小電流の差）が 100 A になるまでの時間と温度を示す。これによると、偏流 100 A を検出した時点で、常電導部の温度は 30～40 K である。積層導体内の素線で常電導領域が発生しても、偏流によってクエンチ検出が可能と考えられる。

一方、抵抗性電圧が 0.1 V 発生するのにかかる時間とその時の温度を表 2.1.4-4-2 に示す。偏流によるクエンチ検出は 4 枚の線材で発生する常電導領域の抵抗の差がある場合に有効である。しかしながら、抵抗の差がない場合、特に 4 枚の線材で全く同じ常電導領域が発生した場合、偏流は発生しない。この場合は電圧検出を利用することになる。表 2.1.4-4-2 より、0.1 V 発生時の線材の温度は 120～150 K となる。

以上の結果を踏まえ、既に提案している「外部保護抵抗によるエネルギー回収に基づく安定化層厚の決定法」によって、必要な安定化層厚を求めることが可能となる。

表 2.1.4-4-1 線材に 1 cm の劣化が発生した場合の集合導体内で偏流 100 A 時点の温度

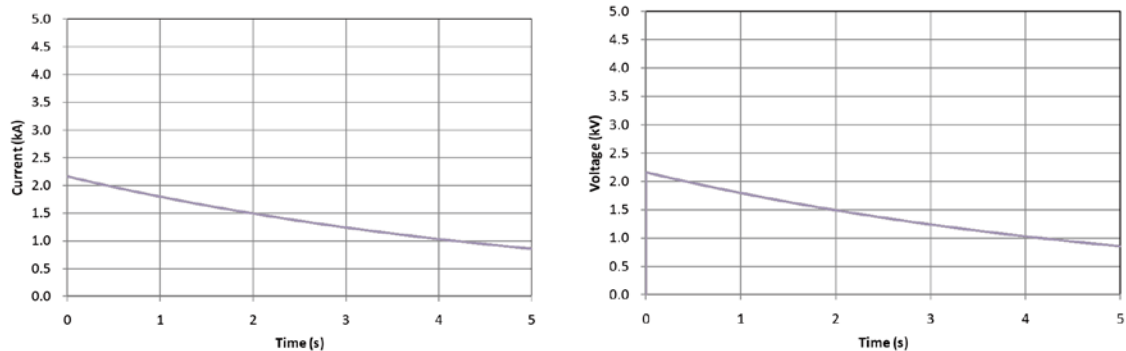
	1 枚劣化	2 枚劣化	3 枚劣化	4 枚劣化
待機状態	1.85 s 27 K	6.75 s 37 K	1.95 s 34 K	偏流なし
ピーク状態	1.45 s 31 K	3.80 s 46 K	1.50 s 41 K	偏流なし
系統安定化	1.60 s 30 K	5.10 s 43 K	1.70 s 39 K	偏流なし
負荷変動補償	1.80 s 28 K	5.85 s 41 K	2.00 s 36 K	偏流なし

表 2.1.4-4-2 線材に 1 cm の劣化が発生した場合の集合導体内で抵抗性電圧 0.1 V 時点の温度

	1 枚劣化	2 枚劣化	3 枚劣化	4 枚劣化
待機状態	200 s 118 K	32.2 s 127 K	18.1 s 133 K	13.4 s 136 K
ピーク状態	15.1 s 117 K	8.5 s 125 K	5.8 s 131 K	4.8 s 134 K
系統安定化	135 s 119 K	15.1 s 132 K	9.8 s 135 K	7.4 s 138 K
負荷変動補償	30.0 s 119 K	13.0 s 138 K	9.6 s 149 K	8.0 s 139 K

(4) トロイダル型集合導体コイルの保護

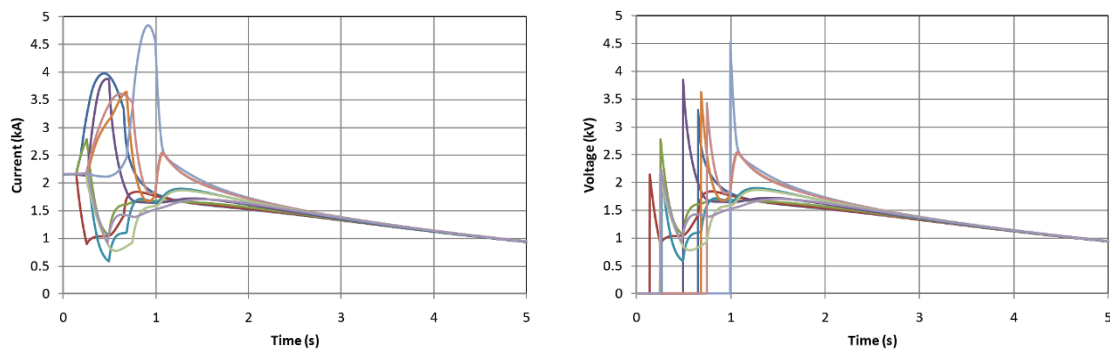
現在、想定されている 2 GJ 級 SMES では 180 個のパンケーキコイルが系統から見ると変換器を介して並列に接続されている。例えば、コイルが永久電流モードの状態では 1 つのコイルでクエンチが検出され、外部抵抗でエネルギーを回収する場合、隣のコイルに電流が誘導され、運転電流に重畳されることになる。さらに、180 個のコイルが完全に同時ダンプすれば、図 2.1.4-4-5 のように全てのコイルが同じ電流・電圧でエネルギー回収がなされるが、ダンプ開始にばらつきがあれば、ダンプ開始が遅れたコイルでは電流が重畳された状態でエネルギー回収が開始するため、コイル両端電圧 ($V = R_{ext}I$) は図 2.1.4-4-6 のように運転電流で想定される値よりも大きくなる。したがって、重畳される電流値が耐絶縁電圧 $V_{max} = R_{ext}I$ を超えない時間内に 180 個のコイルがエネルギー回収を始める必要がある。ダンプ抵抗 R_{ext} が小さい方が、重畳される電流値が許容値を超える時間に余裕ができるが、エネルギー回収時定数が長くなる。



(a) Current

(b) Voltage

図 2.1.4-4-5 トロイダルコイルにおいて全てのコイルが同期してダンプした場合の電流および電圧変化



(a) Current

(b) Voltage

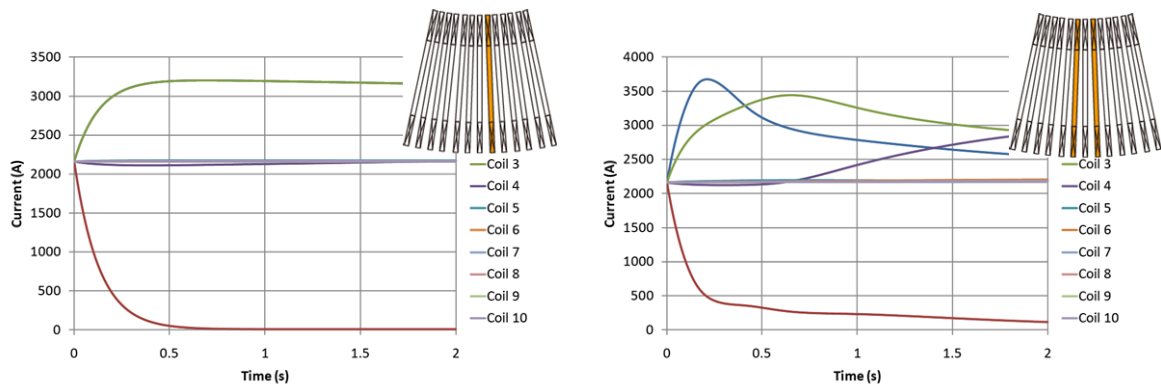
図 2.1.4-4-6 トロイダルコイルにおいてダンプのタイミングがずれた場合の電流および電圧変化

a. 誘導電流

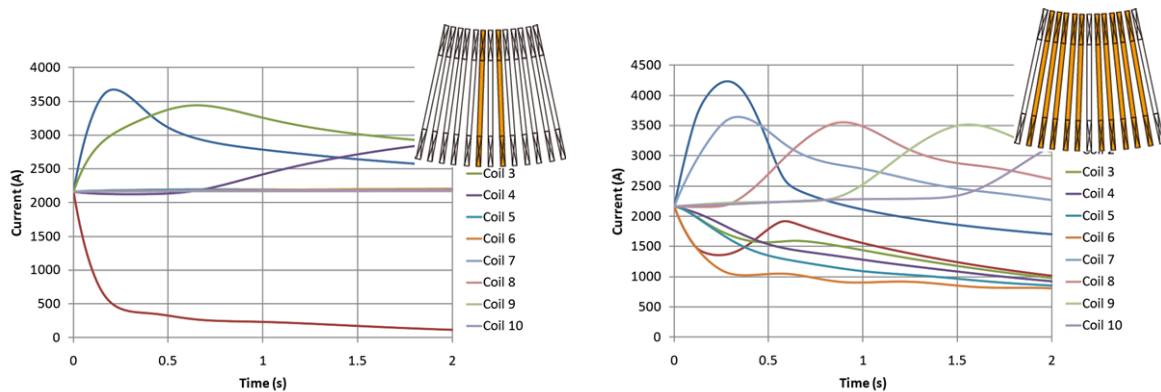
解析結果の一例として、保護抵抗 1.0Ω で1個、2個、4個、10個のコイルがダンプした場合の電流変化を図 2.1.4-4-7 に示す。1個のコイルがダンプした場合、隣のコイルの超電導状態が維持される限り、磁場の変化はほとんど遮へいされるため、隣のコイルの電流が 2.16 kA から 3.2 kA に増加する。しかし、温度上昇はないため、クエンチせずとその状態で電流が流れ続ける。一方、2個以上のコイルがダンプした場合、健全なコイルに誘導される電流が I_c を超えるため、コイル自身の抵抗によって、電流減衰が始まる。その結果、さらに隣のコイルの電流が上昇する。以下、クエンチが次から次へとコイルに伝播していく。10個のコイルがダンプした場合、電流のピーク値は 4.3 kA となる。

b. 向心力および転倒力

解析例として、保護抵抗 1.0Ω で1個、2個、4個、10個のコイルがダンプした場合の向心力および転倒力を図 2.1.4-4-8、2.1.4-4-9 に示す。1個のコイルがダンプした場合、向心力は 5.2 MN 、転倒力は 4 MN 発生する。ダンプするコイルの数が増えると、向心力、転倒力ともに増加する。10個のコイルがダンプした場合、向心力は 6.8 MN 、転倒力は 12 MN 発生する。

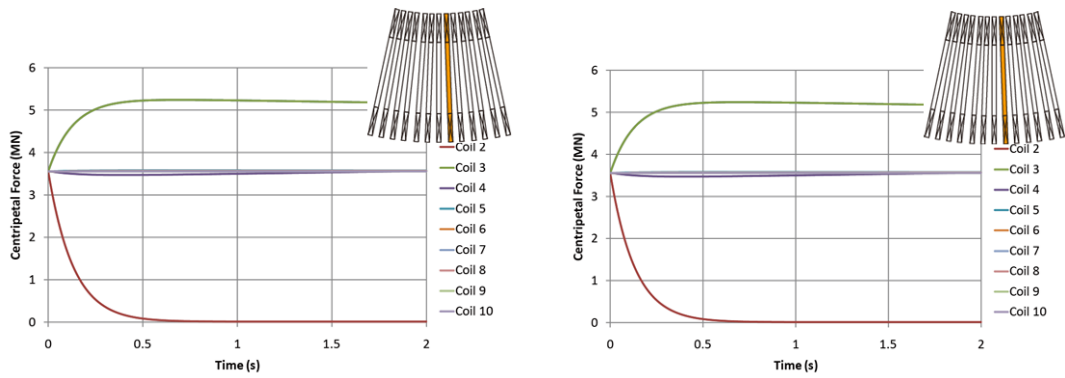


(a) dump of 1 coil (b) dump of 2 coils

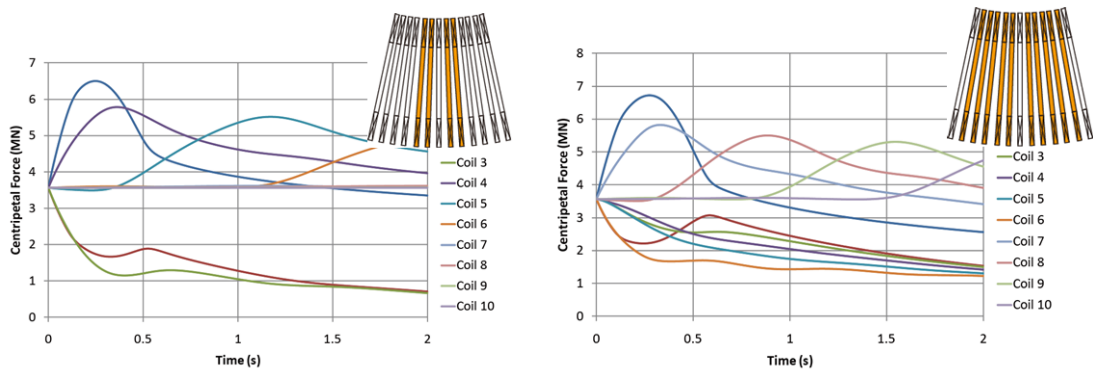


(c) dump of 4 coil (d) dump of 10 coils

図 2.1.4-4-7 1.0Ω でダンプした場合の電流変化

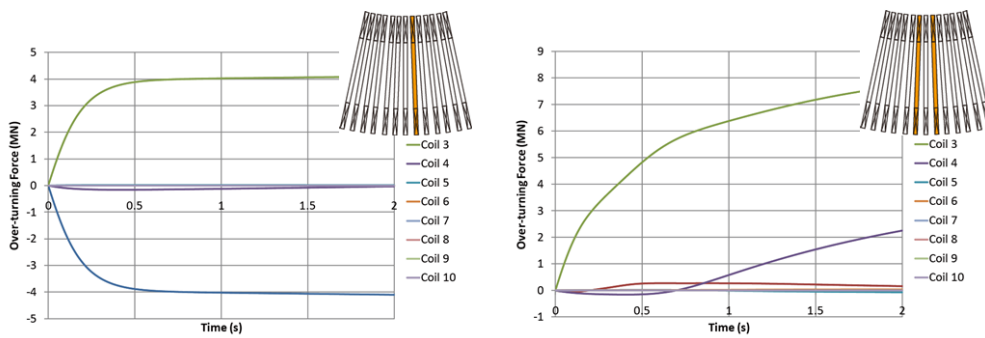


(a) dump of 1 coil (b) dump of 2 coils

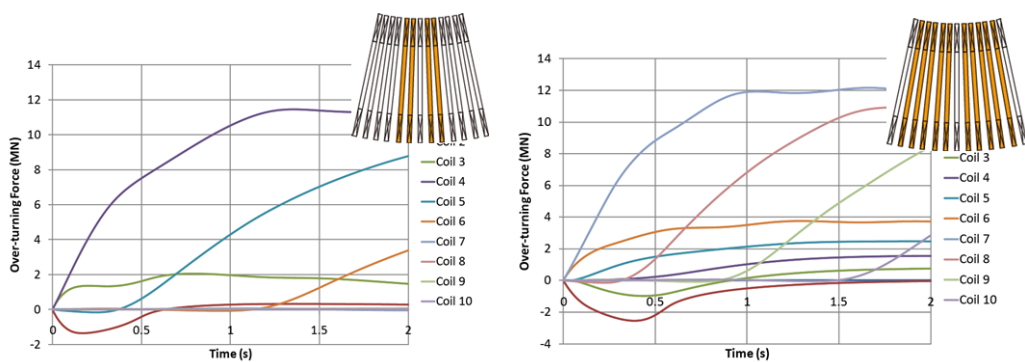


(c) dump of 4 coil (d) dump of 10 coils

図 2.1.4-4-8 1.0 Ω でダンプした場合の向心力の変化



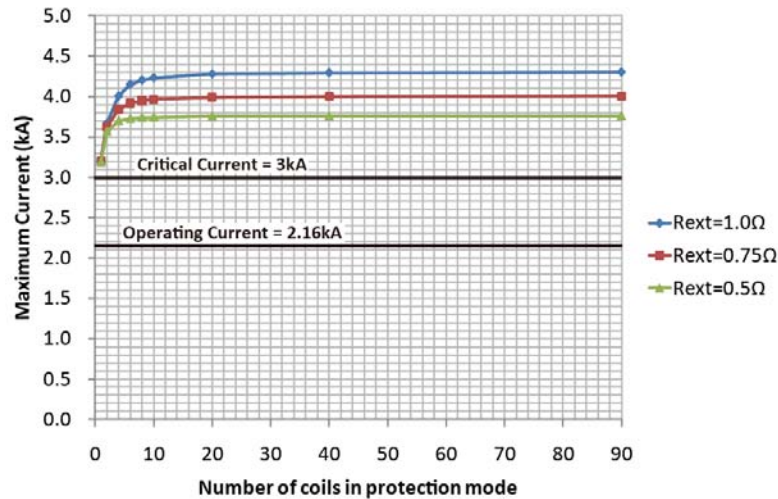
(a) dump of 1 coil (b) dump of 2 coils



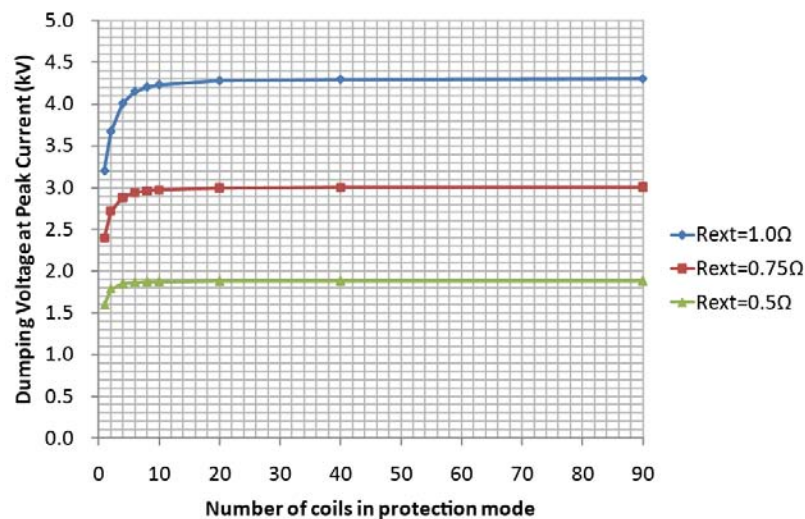
(c) dump of 4 coil (d) dump of 10 coils

図 2.1.4-4-9 1.0 Ω でダンプした場合の転倒力の変化

図 2.1.4-4-10 にダンピングするコイルの個数と電流の最大値、コイル両端電圧の最大値を示す。保護抵抗が 1.0、0.75、0.5 Ω の場合、最大電流はそれぞれ、4.3、4.0、3.8 kA になり、コイル両端電圧はそれぞれ 4.3、3.0、1.9 kV となる。図 2.1.4-4-11 にコイル両端の最大発生電圧を 2.0、2.5、3.0 kV に抑えるためにダンピングを開始する時間を示す。表 2.1.4-4-3 に保護抵抗と最大電流、最大電圧の結果をまとめる。以上の結果から、保護抵抗 1.0 Ω の場合、コイル両端電圧を 2.0 kV に抑えることはできない（完全に同時にダンピングした場合でも 2.16 kV 発生する）が、20 ms、50 ms 以内にすべてのコイルがダンピングを開始すれば、それぞれ 2.5、3.0 kV に抑えることができる。保護抵抗 0.75 Ω では、コイル両端電圧を 2.0 kV 以下に抑えるためには 40 ms の以内にすべてのコイルでダンピングを開始する必要がある。保護抵抗 0.5 Ω では、コイル両端電圧は常に 2.0 kV 以下に抑えられる。



(a) Maximum current



(b) Maximum voltage

図 2.1.4-4-10 保護動作中の最大電流および最大電圧

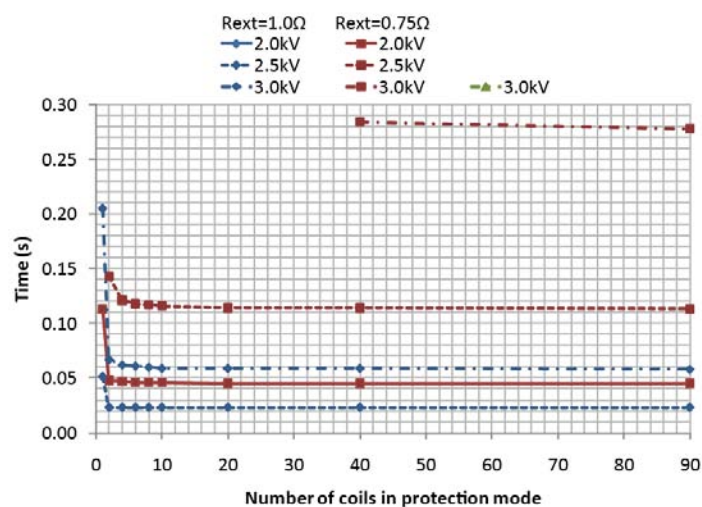


図 2.1.4-4-11 ダンプした際の電圧が 2.0、2.5、3.0 kV で抑えるための遅れ許容時間

表 2.1.4-4-3 保護動作中の最大電流および最大電圧

保護抵抗		1.0 Ω	0.75 Ω	0.5 Ω
最大電流		4.3 kA	4.0 kA	3.8 kA
(Imax/It)		(2.0)	(1.86)	(1.74)
(Imax/Ic)		(1.43)	(1.34)	(1.25)
最大電圧		4.3 kV	3.0 kV	1.9 kV
遮断時定数		5.4 s	7.2 s	10.8 s
許容可能遮断遅れ時間	< 2.0 kV	×	40 ms	○
	< 2.5 kV	20 ms	0.1 ms	○
	< 3.0 kV	50 ms	0.25 s	○

超電導コイルが常電導転移すると、コイルに蓄積されていた磁気エネルギーは常電導転移領域で熱として消費されて温度が上昇し、最終的に特性劣化や焼損に至ることがある。したがって、コイルと並列にダンプ抵抗を接続し、この抵抗によって事故時にコイル内に蓄積されていた磁気エネルギーを回収する方法（外部抵抗保護法）が採られる。ここでは、Y系線材を4枚バンドルした集合導体で2 GJ級のトロイダル型 SMES コイルを構成した場合のエネルギー回収について調べた。例えば、長手方向に1 cmの劣化（ $I_c = 0$ A）が発生した場合、「(3)クエンチ検出方法の検討」の結果から、偏流100 A発生時の温度は50 K、クエンチ検出電圧0.1 Vのときの温度は150 Kである。この温度からダンプした場合、最高到達温度300 Kを抑えるために必要な銅安定化層の厚さを求める。保護抵抗は、「(4)トロイダル型集合導体コイルの保護」の結果を考慮すると、コイル両端電圧2 kV以下に抑えるためには、0.75 Ωあるいは0.5 Ωが適している。コイル両端電圧2.5 kVまで許容す

れば保護抵抗 1.0Ω でもエネルギー回収が可能である。ユニットコイル1つ当たりのエネルギーを $E = 2.4 \text{ GJ} / 180 \text{ coils} = 13.4 \text{ MJ}$ 、線材積層数 $N = 4$ 、線材幅 $w = 1 \text{ cm}$ 、Y系超電導層の厚さ $d_{\text{YBCO}} = 1.0 \mu\text{m}$ 、中間層は無視、基板の厚さ $d_{\text{sub}} = 800 \mu\text{m}$ （補強材 $700 \mu\text{m}$ を含む）として、必要な銅安定化層の厚さを求めた。表 2.1.4-4-4 に結果をまとめる。

表 2.1.4-4-4 エネルギー回収条件から要求される安定化層の厚さ
(a) 保護抵抗 1.0Ω

トロイダルコイルの貯蔵エネルギー	2.4 GJ			
要素コイル数	180			
要素コイルの貯蔵エネルギー, E	13.4 MJ			
運転電流, I_0	2.16 kA			
要素コイルのインダクタンス, L (相互インダクタンス込)	5.74 H			
保護抵抗, R	1.0 Ω			
端子間電圧, V_m	2.16 kV			
遮断時定数	5.74 s			
YBCO 層厚さ, d_{YBCO}	1.0 μm			
基板厚さ, d_{sub}	100 μm			
補強材厚さ, d_{reinf}	700 μm			
導体素線数, N	4			
クエンチ検出時の温度, T_0	50 K		150 K	
最高到達温度, T_m	300 K			
保護動作開始遅れ時間, t_d	0 s	0.5 s	0 s	0.5 s
銅安定化層厚さ, d_{stab}	95 μm	110 μm	197 μm	226 μm

(b) 保護抵抗 0.75 Ω

トロイダルコイルの貯蔵エネルギー	2.4 GJ			
要素コイル数	180			
要素コイルの貯蔵エネルギー, E	13.4 MJ			
運転電流, I_0	2.16 kA			
要素コイルのインダクタンス, L (相互インダクタンス込)	5.74 H			
保護抵抗, R	0.75 Ω			
端子間電圧, V_m	1.62 kV			
遮断時定数	7.66 s			
YBCO 層厚さ, d_{YBCO}	1.0 μm			
基板厚さ, d_{sub}	100 μm			
補強材厚さ, d_{reinf}	700 μm			
導体素線数, N	4			
クエンチ検出時の温度, T_0	50 K		150 K	
最高到達温度, T_m	300 K			
保護動作開始遅れ時間, t_d	0 s	0.5 s	0 s	0.5 s
銅安定化層厚さ, d_{stab}	123 μm	137 μm	250 μm	277 μm

(c) 保護抵抗 0.5 Ω

トロイダルコイルの貯蔵エネルギー	2.4 GJ			
要素コイル数	180			
要素コイルの貯蔵エネルギー, E	13.4 MJ			
運転電流, I_0	2.16 kA			
要素コイルのインダクタンス, L (相互インダクタンス込)	5.74 H			
保護抵抗, R	0.5 Ω			
端子間電圧, V_m	1.08 kV			
遮断時定数	11.5 s			
YBCO 層厚さ, d_{YBCO}	1.0 μm			
基板厚さ, d_{sub}	100 μm			
補強材厚さ, d_{reinf}	700 μm			
導体素線数, N	4			
クエンチ検出時の温度, T_0	50 K		150 K	
最高到達温度, T_m	300 K			
保護動作開始遅れ時間, t_d	0 s	0.5 s	0 s	0.5 s
銅安定化層厚さ, d_{stab}	175 μm	187 μm	346 μm	369 μm

(5) 結果

素線絶縁を施した集合導体コイルの常電導発生後の転流現象について、数値解析によって評価した。その結果、素線絶縁を施した集合導体内で、ある素線で常電導領域が発生しても、転流は速やかに発生することが明らかとなった。

SMES の運転を想定した場合、変換器などのノイズレベルによっては常電導による発生電圧が埋もれてしまって、検出が困難になることも考えられる。そこで、今回、集合導体の転流を監視する方法を検討した。集合導体内の素線で常電導が発生した場合、偏流（導体内の素線の最大電流と最小電流の差）が 100 A を検出した時点で、常電導部の温度は 30～40 K となった。積層導体内の素線で常電導領域が発生しても、偏流によってクエンチ検出が可能と考えられる。

この結果を踏まえ、外部保護抵抗によるエネルギー回収に基づく安定化層厚の決定法によって、必要な安定化層厚を求めることが可能となる。現在、想定している 2 GJ 級 SMES では 180 個のパンケーキコイルが系統から見ると変換器を介して並列に接続されている。例えば、コイルが永久電流モードの状態では 1 つのコイルでクエンチが検出され、外部抵抗でエネルギーを回収する場合、隣のコイルに電流が誘導され、運転電流に重畳されることになる。そこで、ダンプするコイルの個数と電流の最大値、コイル両端電圧の最大値について評価し、必要となる安定化層の厚さを求めた。その結果、保護抵抗が 0.75 Ω の場合、初期温度（クエンチ検出時温度） $T_0 = 150$ K、最高到達温度 $T_m = 300$ K とすると、必要な銅安定化層の厚さは 108 μm となる。保護抵抗が 0.5 Ω の場合、同様に必要な銅安定化層の厚さを計算するとは 154 μm となった。

2.1.4-5 高磁界コンパクト SMES システムモデル評価試験方法の検討（中部電力）

(1) 研究開発目的

通電特性や冷却性能、絶縁性能などの Y 系 SMES コイル評価結果を反映し、2 GJ 級 SMES コイル基本システム構成の改善を図るとともに、トロイダルコイル配置となるコイルシステムを構成する複数個のコイルの組合せにおいて、クエンチ等の動的な変化等が発生した場合のクエンチ検出ならびに保護の考え方を前項において検討・整理した。本項では、クエンチ時の挙動検証等を含めた高磁界コンパクト SMES システムモデルの評価試験方法について検討する。検討に当たっては、前フェーズにおいて実施した試験法検討結果を踏襲し、新たに Y 系超電導コイルシステムとして追加すべき評価試験方法について検討を実施する。

(2) SMES 試験法

前フェーズにて検討した SMES 試験方法を以下に示す。

a. SMES デバイス試験法

今後の標準となりうる SMES システム試験法について検討した。SMES システムは図 2.1.4-5-1 のように構成される。

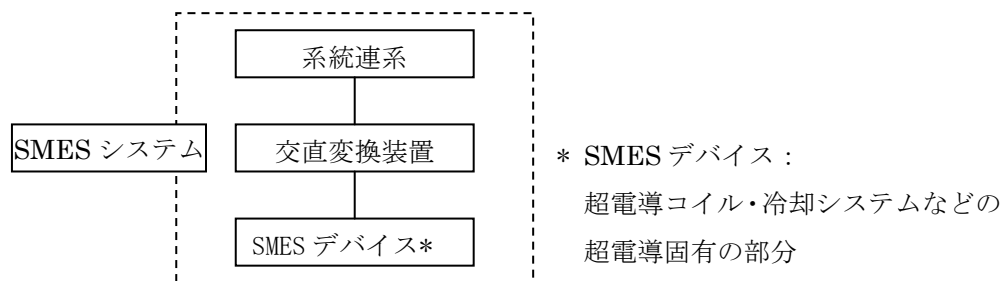


図 2.1.4-5-1 SMES システムの構成

このうち、交直変換装置と系統連系に関しては、他の電力貯蔵装置における標準的な試験法が既に存在している。そこで、まずは SMES デバイスに関する試験法の検討を行い、成果として、SMES デバイス試験法を取りまとめた。

試験とはすなわち「性能」の確認である。ここでいう「性能」には、狭義の性能（使用に足ること）と、安全性の2つの意味合いがある。また、安全性の確認として、機械的な安全性と、電気的な安全性の2面がある。これらを峻別することは特にユーザの使用に際して非常に重要であり、表 2.1.4-5-1 に取りまとめた。

表 2.1.4-5-1 試験項目の分類

機械的安全性の確認に係る試験	<ul style="list-style-type: none"> ・外観検査・寸法検査 ・耐圧力試験 ・気密試験 	<ul style="list-style-type: none"> ・真空リーク試験 ・安全確認試験
電気的安全性の確認に係る試験	<ul style="list-style-type: none"> ・絶縁抵抗測定 ・電気絶縁耐力試験 	<ul style="list-style-type: none"> ・電流遮断試験 ・漏洩磁界測定
使用に足ることの確認に係る試験	<ul style="list-style-type: none"> ・冷却試験 ・熱侵入量測定 	<ul style="list-style-type: none"> ・定格通電試験 ・繰返し充放電試験

b. SMES システムの試験法

SMES デバイス試験法をもとに、SMES システム全体の試験法について検討した。

まず、他の電力貯蔵装置における試験法の調査、そして今回のフィールド機における試験法検討のなかで、次の2つの規格を引用・参照できることが判明した。

- ① JEC-2470-2005 分散形電源系統連系用電力変換装置
- ② JEAC 5006-2000 電力貯蔵用電池規程

上記2規格の引用参照範囲と、SMES デバイス試験法の対象範囲の関係は図 2.1.4-5-2 のとおり。

2.1.4-6 まとめ

2 GJ 級 SMES コイル基本システム構成の最適化並びに高磁界コンパクト・高効率伝導冷却コイルを用いた評価用試験モデルの設計と、SMES システムとしての適用性を検証評価する試験計画を作成することを中間目標とし、これらの目標を達成した後、2 MJ 級評価用試験モデルを用いて、適用性検証評価試験計画に基づいて SMES 動作検証を行うとともに、「超電導電力ネットワーク制御技術開発」プロジェクトにおいて実施した試験をベースとした 2 万回以上の繰返し充放電による特性検証を実施することを最終目標として検討を進めている。

これまでの成果としては、2 GJ 級トロイダル型 SMES において、Y 系集合導体構造コイルのクエンチ保護方法について検討した。SMES コイルを構成する絶縁素線集合化導体でクエンチが発生した場合、素線間で転流が発生することをシミュレーションで確認し、クエンチ検出法への素線間転流現象の適用性検討を開始した。

今後も引き続き、電気機器や超電導技術に関する学識経験者、重電メーカー各社、および各電力会社等からなる超電導電力貯蔵システム研究開発委員会等を開催し、コイル構造やクエンチ挙動等を十分に議論した上で開発を進める。

具体的には、Y 系集合導体構造コイルの特徴を活かしたクエンチ検出方法とコイル保護方法について、モデルによる試験検証を計画しており、すでに明らかとしている絶縁素線集合化導体でクエンチが発生した場合の素線間転流シミュレーション結果との比較検証を実施する計画である。