

東京大学大学院 新領域創成科学研究科
基盤科学研究系
先端エネルギー工学専攻

平成18年度
修士論文

高温超電導線材を用いた SMES用コイルの設計

Design study of SMES coils
using high-temperature superconducting wires

2007年2月提出
指導教員 大崎 博之 教授

56216 橋本 昌樹

内容梗概

本論文は、超電導電力貯蔵装置 SMES 用コイルを対象とし、高温超電導線材を用いての設計を行った。本研究のテーマは大きく次の 2 点にまとめられる。

- (1) 高温超電導線材を用いた SMES コイルの設計コードを作成する
- (2) Bi2223 系線材及び Y 系線材について設計に際しての条件や制約を様々に変えての設計を行い検討を行う

以下に各項目の概要を示す。

(1) 設計コード

高温超電導 SMES (超電導磁気エネルギー貯蔵装置) 用コイルについて、最大貯蔵容量 100MJ、輸送を考慮して最大コイル外径 3m としてコイルを設計する。設計に当たっては各コイル形状ごとの印加磁界、コイルインダクタンス、高温超電導線材電流特性、周方向フープ応力等を計算によって導くことで、機械設計と電気設計を行い、流す電流に必要な線材量やフープ応力に耐えるために必要な補強材の量を求め、コイル形状内に収まるよう設計した。

(2) 設計と検討

線材や温度、コイル形状を変えながら設計を行った。結果を整理し、現設計コードにおける課題を見つけるとともに線材使用長最小となるコイル形状・線材種類を考察した。また、漏洩磁界についても考慮した。

以上により高温超電導 SMES について線材使用長を最小とすることでコスト面で有意な設計となるよう基礎設計を行うと共に、高温超電導線材の高磁界領域応用へ向けての道を拓いた。

目次

1	はじめに	1
1.1	現在の電力系統とその抱える問題点	1
1.2	超電導磁気エネルギー貯蔵装置 (SMES) の普及可能性	2
1.2.1	電力貯蔵装置	2
1.3	超電導磁気エネルギー貯蔵装置 (SMES)	3
1.3.1	原理	3
1.3.2	構造	4
1.3.3	既存の SMES の普及・大容量化における問題点	4
1.3.4	高温超電導 SMES	4
1.4	高温超電導線材	5
1.4.1	高温超電導線材の特長 [1] [2]	5
1.4.2	Bi2223 線材	6
1.4.3	Y 系線材	7
1.5	高温超電導コイル	9
1.5.1	超電導コイル	9
1.5.2	超電導コイルの設計に要する計算	10
1.5.3	冷凍機と運転電流 [1]	11
1.6	研究の目的	12
1.7	本論文の構成	12
2	高温超電導 SMES コイル設計に関する検討	13
2.1	設計に当たっての条件及び制約	13
2.2	貯蔵容量の決定	14
2.3	運転温度の決定	14
2.4	コイル形状	15
2.5	輸送制約	16
2.6	超電導コイル設計に用いた変数及び指標の定義	16
2.7	高温超電導線材の $J_c - B(\theta)$ 特性	19
2.7.1	基本式	19
2.7.2	Bi2223 線材の $J_c - B(\theta)$ 特性	20
2.7.3	Y 系線材の $J_c - B(\theta)$ 特性	21
2.8	磁界・インダクタンス計算	22
2.8.1	トロイダルコイルの磁界計算	23
2.8.2	ソレノイドコイル及びマルチポールソレノイドの磁界計算	24
2.9	応力計算	29

2.9.1	材料の機械的性質	29
2.9.2	コイルに印加する応力	30
2.10	設計コード	32
3	コイル設計の結果及び考察	34
3.1	コイル設計結果	34
3.1.1	10K における設計	34
3.1.2	20K における設計	36
3.1.3	30K における設計	37
3.1.4	40K における設計	38
3.1.5	50K における設計	39
3.2	各設計制約の設計に与える影響	41
3.2.1	線材使用長の温度依存性	41
3.2.2	最大経験磁界に制約を掛けた場合の影響	42
3.2.3	補強材強度を変更しての設計比較	44
3.2.4	要素コイル間距離制約と組み合わせコイルの形状	45
3.2.5	マルチポールソレノイド	45
3.2.6	トロイダルコイル	46
3.3	各種コイル形状に関する考察	48
3.3.1	マルチポールソレノイドに関する考察	48
3.3.2	トロイダルコイルに関する考察	52
3.4	各種形状と漏洩磁界	52
3.5	まとめ	54
4	結論	55
4.1	結論	55
4.2	今後の課題	56

第 1 章

はじめに

1.1 現在の電力系統とその抱える問題点

製鉄所での圧延ラインや高速鉄道の通過時などでは急激に消費電力が変動する。自然エネルギー発電もクリーンなエネルギーながら常に出力が変動し、安定した電力の供給は出来ない。一方、需要の側からは近年高度に制御化されたシステムなどにおいてこれまで以上に高品質な電力が求められている。このような状況に対して、電力を貯蔵しておくことによって安定的に電力を供給出来ることが必要とされている。

超電導磁気エネルギー貯蔵システム（以下 SMES: Superconducting Magnetic Energy Storage）は、電力の貯蔵効率が高く貯蔵・放出時の応答が速いなどの特徴を有しているため、電力の変動負荷補償や分散型電源を含んだ電力供給システムにおいて系統安定化などの役割が期待されている。これまでも SMES は電力の高品質性が要求される半導体産業等において、落雷などで一時的に電圧が低下する瞬時電圧低下（瞬低）を補償する瞬低対策用、及び系統末端における系統電圧低下時の電圧回復用などに低温超電導体を利用したものが実用化されている。シャープ亀山工場に設置されている瞬低対策用 SMES を図 1.1 に示すこの SMES は容量 20MJ であり、瞬低を比較的大規模な工場全体にあたる 10MVA に対して 1 秒間補償する。

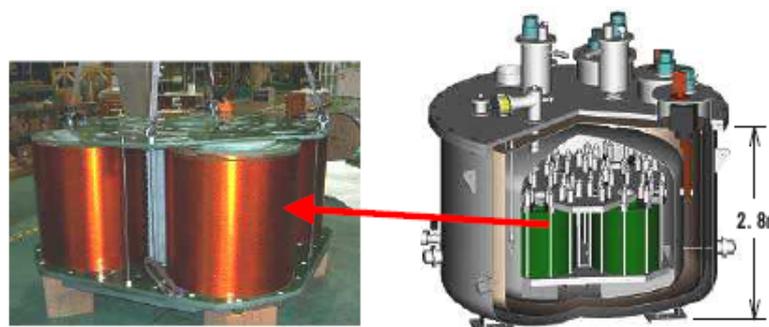


図 1.1: 瞬低対策用低温超電導 SMES の概観 [3]

1.2 超電導磁気エネルギー貯蔵装置 (SMES) の普及可能性

1.2.1 電力貯蔵装置

電力貯蔵は必要な時に電気エネルギーの貯蔵・放出を可能にする技術でありその用途は多岐にわたる。貯蔵された利用可能エネルギー (kWh) は出力 (kW) × 時間 (h) の二項の積で表せる。これら出力と時間二つのバランスから最適な用途を示したものを図 1.2 に示す。図 1.2 から現在実用化されている揚水発電機が出力・持続時間の両面では優れているが、この揚水発電は (放出) / (充電) で表されるエネルギー貯蔵効率が 70 % 程度と低い。一方、SMES は効率が 85 % 程度と高く、さらに大電力を高い応答速度で供給でき、繰り返し使用に耐えられるなどの長所を有することから、現状は瞬低対策用途がほとんどであるものの、将来的には以下で示す電力貯蔵の広範な用途に対応できるものとして期待されている。また、SMES は貯蔵装置としての用途以外にも電力系統に微小動揺を与え、その応答を解析することでオンラインの固有値を計測して安定度を把握するといった研究も行われている [4]。

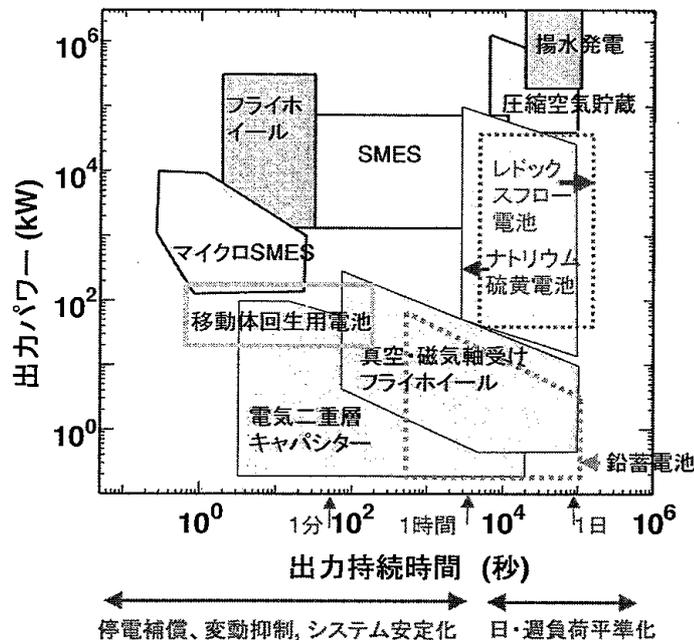


図 1.2: 電力貯蔵装置とその出力-持続時間 [5]

瞬低対策

瞬低とは瞬間的に電圧が低下する現象であり、例えば落雷の際、事故地遠方においても瞬間的に電圧の低下を生じることがある。これは一秒以下の期間電圧が数割程度下がるのが年数回起きるとい程度だが、精密環境・長期間工程を要求される半導体製造などの分野においては大きな損失となる。この極短時間の瞬低を補償するためには高速・高出力での応答

が必要となるが，出力持続時間は少なく，貯蔵エネルギーは少なくて済むため，様々な装置による実用化がなされている。

需要変動補償

大規模な需要の増減（パルス的変動）が短時間に繰り返し生じる機器やシステムは，そのまま電力系統につなげると急峻な変動が電力系統に悪影響を与える。そのため，電力貯蔵等によって電力供給側の負担を減らす必要があり，対象としては大電力実験施設・鉄鋼などの圧延負荷，高速電気鉄道などが考えられ，代表的なものとして JT-60 に用いられたフライホイールがある。

系統（システム）安定化

微小な系統変動に対しての定態安定度や，事故時の擾乱による変動に対しての過渡安定度の向上，さらには出力そのものの変動する太陽光や風力などへの対応として設置することが考えられる。これまでは SVC,SVG，同期調相機などと呼ばれる半導体装置によって無効電力補償設備があるが，無効電力のみの制御でなく有効電力の制御も可能な電力貯蔵装置であれば，電力系統の安定化に，より効果的に貢献することができる。

負荷平準化

昼夜の電力需要の違いを埋めるために，需要の低い夜に充電，昼に放出を行う。有意なものにするためには大出力を数時間持続できるものが要求される。現在，実用化されているものに揚水発電がある。

1.3 超電導磁気エネルギー貯蔵装置 (SMES)

1.3.1 原理

SMES の原理は W : エネルギー， L : コイルインダクタンス， R : 抵抗， I : 電流として，次の二式で表される。

$$W = 1/2LI^2 \quad (1.1)$$

$$R = 0 \quad (1.2)$$

(1) 式はコイルに電流 I を流し続けるとそこには磁界としてエネルギーが蓄えられること，(2) 式は超電導体であれば抵抗 R が 0 となり半永久的に電流を流し続けられること（時定数： L/R 無限大），を表している。なお，超電導コイルの直流電流の変動時には $V = L \frac{dI}{dt}$ となるため，コイル端電圧 V が生じエネルギーも増減する。これだけを見るとロスはないが実際には冷却損失・変換損失・接続抵抗・交流損失などがあるため，システム全体としての損失を考えると効率は 80-90 % 程度となる。

磁界としてエネルギーを貯蔵するため SMES は，変換効率が非常に良い，応答が速い，静止器かつ化学変化を伴わないため長寿命である，変換器にもよるが電流源的な振る舞いをする，等の特長を有する。

1.3.2 構造

SMES の概略構造は図 1.3 の通りとなる。超電導コイルにてエネルギーを貯蔵し，入出力変換器を介して電力の出し入れを行う。また，コイルは低温に保たれねばならず冷却システムによる冷熱供給と真空断熱容器による断熱を必要とする。この真空容器内低温部と外部の常温部を電氣的に接続するのが電流リードである。電流リードでは電気抵抗によるジュール発熱を低く抑えかつ熱伝導による熱進入も抑える必要があるため銅だけではなく高温超電導材を用いた高温超電導電流リードが一般的になってきている。

交流損失低減のために安定化材を必要最低限にしている SMES では特にクエンチは短時間で検出・保護する必要がある。このため，高速かつ確実なクエンチ検出装置や保護抵抗投入スイッチが要求される。

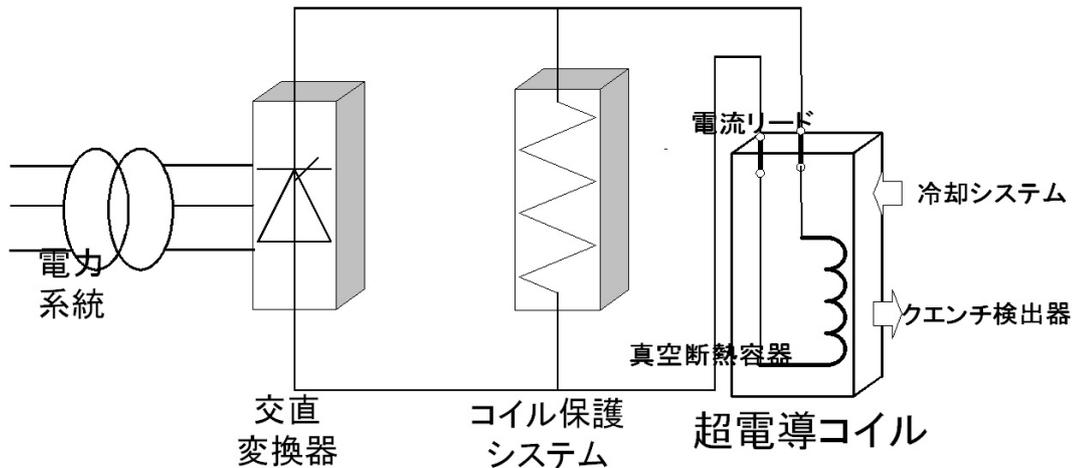


図 1.3: SMES のシステム構成

1.3.3 既存の SMES の普及・大容量化における問題点

SMES の進展目標を図 1.4 に示す。SMES を大容量化するためには，コイルを大きくするかコイルに流れる電流を大きくすれば良い。ここで，矩形断面電流密度一定でコイルサイズを k 倍すればコイル体積は k^3 倍となるのに対して，蓄積エネルギーは k^5 倍，磁界は k 倍になる。また，同じ形状で矩形断面に流す電流密度を m 倍すれば蓄積エネルギーは m^2 倍，磁界は m 倍となる。超電導線材は同一線材であっても印加する磁界の大きさによって臨界電流密度特性は異なり，流せる電流の限界が変わってくる。磁界を大きくすると流せる電流量は小さくなってしまいうため，現状の線材で大容量化を行おうとすると，コイルサイズを大きくしつつ流す電流量は小さくするような設計になってしまい，極端な大型化は避けられない。このため，大容量化にあたっては高い磁界下においても高い電流特性を維持できるような高性能な線材が必要とされ，高温超電導線材の利用が期待されている。

1.3.4 高温超電導 SMES

現在，Bi2212 系高温超電導線材を用いた大電流容量導体の開発が進んでおり，これを用いた 10～50K の運転温度で運用する SMES の設計が国によって検討されている。高温超電導線

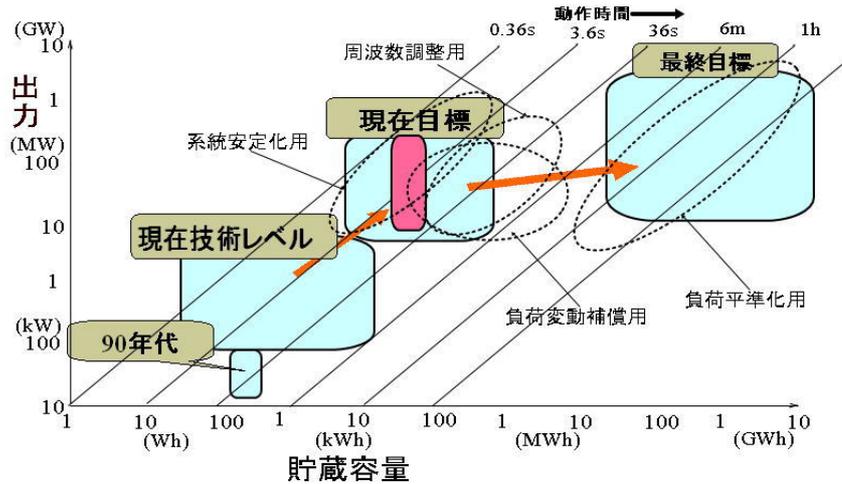


図 1.4: SMES の現状と目標

材にはさらに特性の優れた Bi2223 系や Y 系等があり，これら超電導線材は長尺線材開発段階であるが，実用導体が開発されればこれ等を用いて更なるコンパクト化が期待できる。

高温超電導線材を用い，10K 以上で伝導冷却運転をする SMES は 4.2K の際と比べて線材・構造材の比熱が大きくなり，熱的現象の時定数が長くなる。つまり常電導転移が緩やかに進行するため臨界電流を過渡的に超えたいわゆる過負荷運転を考慮しての設計が可能になる。低温領域での高温超電導線材はこれまでの超電導線材と比べ高磁界においても高い電流密度特性を有しているため，従来の NbTi コイルにおいては 4~6T 程度であった最大経験磁界が 10T 以上となるような高磁界 SMES が考えられるようになる。

1.4 高温超電導線材

1.4.1 高温超電導線材の特長 [1] [2]

これまで SMES の超電導コイルには NbTi を中心に Nb₃Sn など低温超電導線材が用いられてきたが，コンパクト・大容量化を目指してより高性能な Bi2223 や Y 系のような高温超電導線材の利用が考えられている。

高温超電導体は 1911 年のオネスによる超電導現象の発見から 75 年，1986 年に IBM チューリッヒ研究所のペドノルツとミュラーが比較的高い温度で超電導になる銅酸化物超電導体 LaBaCuO を発見したことから始まる。これから数年間で臨界温度は一気に上昇したが，それらが実際にヘリウム温度以上で産業用に使えるレベルに達してきたのはつい最近のことである。一例として，実証試験の段階ながら磁気浮上式鉄道（リニアモーター）用のコイルとして Bi2223 線材を用いた 20K 用コイルが作成されている [6]。

超電導体は臨界温度，臨界磁界，臨界電流密度の 3 つの物理量で性質が決まり，高温超電導体の場合は，図 1.5 に示すようにこれら全てにおいて従来の低温超電導線材よりも高い性質を示す。また Bi2223（ビスマス系）と Y 系（Y123：イットリウム系）では一般的に Y 系の

方が高性能であるが、Y系は配向を揃える困難さから長尺化に難航している。高温超電導体はさらに磁界の線材に印加する角度によっても特性が変わってくるという性質を有する。

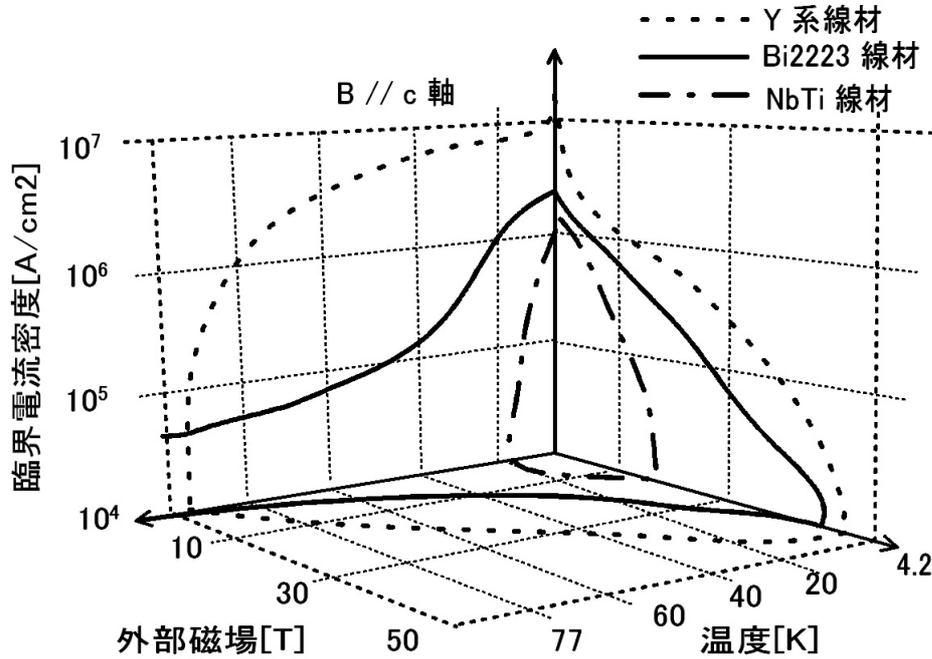


図 1.5: 超電導線材の特性

1.4.2 Bi2223 線材

Bi2223 は T_c が $\sim 110\text{K}$ 程度と高く、 77K でも低磁界であれば高 J_c 特性を、 20K 程度まで冷やせば高磁界用途にも耐える $J_c - B$ 特性を有する。Bi系線材を流れる超電導電流は、結晶方位が電流の流れやすい ab 面に揃った板状結晶内や結晶間を流れる必要がある。つまり Bi2223 超電導線材の性能に関しては、Bi2223 を単相化し、テープ面によく配向させた板状結晶の間を、密に結合（結晶粒接合）させることにより、超電導電流が流れやすくなるので、高い性能をもつ超電導線材が得られると考えられている。Bi系線材はパウダーインチューブ (PIT: Powder In Tube) 法と呼ばれる製造法がメインであり [7]、(株)住友電気にて Bi2223 線材製造に用いられている加圧焼成法による方法を図 1.6 に示す。Bi2212 と Ca, Cu, Pb などの化合物からなる材料粉末を銀または銀合金によるチューブに詰め込み、これを単心で押し出しや伸線加工等の塑性加工を施し単心線とし、さらに多数本重ねての伸線加工後、圧延と焼成を繰り返すことで Bi2223 結晶を密にかつ配向性を持たせて線材化できる。しかし、圧延時のクラック生成や結晶方向のわずかにずれた結晶は焼結時に疎を作る原因となっていた。加圧焼成法は二次焼結時に不活性ガス及び酸素から成るガスによって加圧することで、クラック修復及びフィラメント密度の低下を抑えている。これによって、85%程度であった密度が 100%まで上昇し、近年の臨界電流や機械強度の大幅な向上へとつながっている。

Bi2223 線材の工業的電流特性を挙げる方法としては、製造時に用いている銀の銀比（（銀

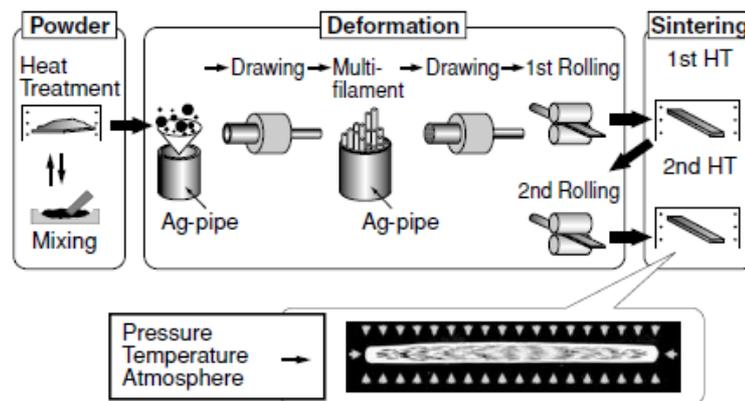


図 1.6: Bi2223 線材 (下) とその製造法 (上)[7]

面積) / (超電導フィラメント総面積)) を下げて線材断面積中の超電導体が占める割合を大きくしてやること, 超電導フィラメント部の密度及び配向度を上げてやる必要がある。

現状の Bi2223 線材は銀比低減や長尺線材化において一定のレベルに達しており, 200A 級が 700m, 150A 級が 1500m と製造技術面での問題は少なく今後は低コスト化・高電流密度化が課題である。さらなる配高度の向上によって, 現在, 300A 級を目指した研究が進められている [8]。

1.4.3 Y 系線材

Y123 は T_c が $\sim 93\text{K}$ と Bi 系よりも低いが高磁場中での電流密度特性など総じて Bi 系より優れており, またコスト面でもシースに銀を用いる Bi 系線材と比べて限界コストにおいて優れており, 図 1.7 に示すように [9] コスト的にも Bi 系線材と比べて優位に立つといわれている。しかし, Bi 系がテープ面に沿ってさえいけば良かった (c 軸配向, 一軸配向) のに対して Y 系は c 軸に加えて a 軸または b 軸の 2 軸を配向化させなくてはならず, 良好な線材特性を得るにはほとんど単結晶のような結晶構成が要求される。このため, Bi 系線材を上回る線材として期待されているものの, 長尺化がしにくく, 線材生成速度の高速化が難しいなど課題も多い。

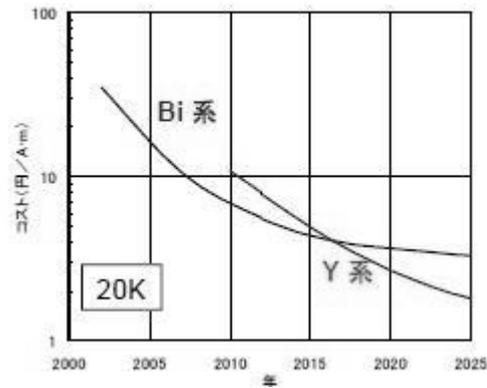


図 1.7: 20K 使用を想定した超電導線材のコスト比較

Y系線材の二軸配向化技術としてはIBAD (Ion Beam Assisted Deposition) 法とRABiTS(rolling-assisted biaxially textured substrates) 法が開発されている。IBAD 法は無配向金属テープ上に低エネルギーのイオンビームを照射することでYSZ バッファ層などを形成する。一方、RABiTS 法では二軸配向した Ni や Cu などの fcc 金属テープを基板として圧延と熱処理によって立方体集合組織を形成するが、この表面が線材用基板として利用できる。これらにさらに一ないし複数の中間層を形成して高配向な中間層を作った後でPLD 法などによって $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ を形成することで Y 系線材は作成される。PLD (Pulsed Laser Deposition) 法は、化学量論組成の焼結体ターゲットにパルスレーザを照射して蒸発させ対向させプラームとし、基板の上に堆積させる。他に、成膜法として熱平衡に近いプロセスでの気相法による超高真空を必要としないMOCVD (Metal Organic Chemical Vapor Deposition : 有機金属気相成長法) 法や、TFA (トリフルオロ酢酸塩) を用いた塗布法によって化学量論組成に調整した前駆体を作成、酸素雰囲気中で焼成して結晶化させる TFA-MOD 法等がある。IBAD-PLD 法による Y 系線材の代表的組成を図 1.8 に、IBAD 法及び RABiTS 法の作成プロセスを図 1.10 に、PLD 法のうち複数のプラームを線材長手方向に発生させるマルチプラーム PLD 法のプロセスを図 1.9 にそれぞれ示す。

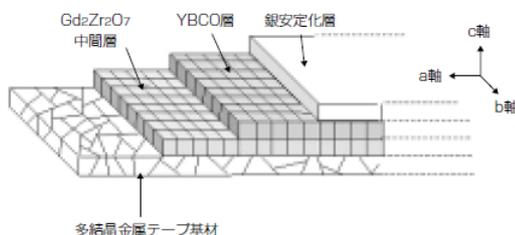


図 1.8: 基板無配向型 Y 系線材

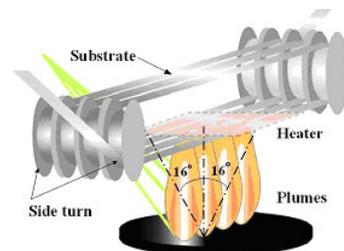


図 1.9: マルチプラーム PLD 法

本研究で想定している Y 系線材はこのうち IBAD-PLD 法と呼ばれる作成法で作られるものである。超電導線材の性能は 77K 自己磁界下における臨界電流と線材長の積で評価され、この現在の性能は (株) フジクラによる $52087 \text{ Am}(=212.6\text{m} \times 245\text{A})$ [10]、作成速度は IBAD;

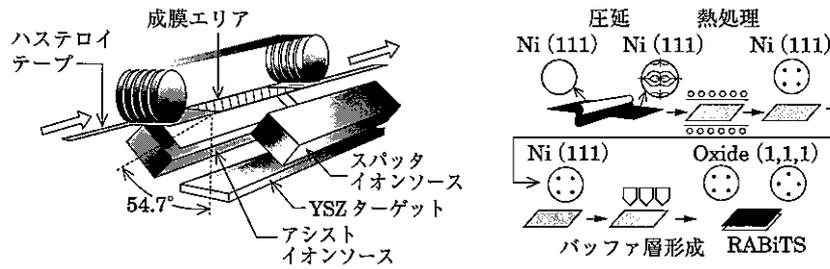


図 1.10: IBAD 法 (左) 及び RABiTS 法 (右) による作成プロセス

60m/s, CeO_2 層: 10m/s, PLD: 20m/s となっている [11] [12]。

なお、現在 (2007 年 2 月) の Y 系線材全体としての世界最高記録はアメリカの SuperPower 社による IBAD-MOCVD 法線材での $81,550\text{Am}(=191\text{A} \times 427\text{m})$ であり、作成速度はそれぞれ IBAD: 120m/h, Buffer: 80m/h, MOCVD: 45m/h である。また、短尺の 60m ながら SRL 名古屋 (ISTEC) によって磁場中電流特性及び作成速度が Y 系に比べて三倍程度優れる GdBCO が報告されている [13]。

1.5 高温超電導コイル

1.5.1 超電導コイル

コイルの基本形はソレノイドコイルと呼ばれ、糸巻きのように一層ずつ巻き上げるレイヤ巻タイプと蚊取り線香のようにした扁平なパンケーキを積み重ねていくパンケーキ巻があり、高温超電導線材はテープ型で加工が難しいためパンケーキ型がメインとなる。工業利用の際はさらに次のような組み合わせコイル形状にして用いることが多い。

- グレーディング：高磁界など臨界電流密度の低くなる箇所と低磁界部で異なる線材を使用することでコイルのコンパクト化・低コスト化を図る。高温超電導 SMES においては端部周辺のみ異なるパンケーキコイルを使用する、例えば将来の線材の製作速度やコストによっては全体を Bi 系 SMES として端部のみ Y 系パンケーキコイルを用いたマルチポールソレノイド型等も考えられる。
- ノッチ：基本ソレノイドコイルの周囲に小型のノッチコイルを設置することで中心部磁界の均一度を高められる。MRI や NMR などで利用される。
- 変型：磁気浮上鉄道用コイルのレーストラック型、発電機・加速器ビーム偏光用の鞍型などがある。
- 組み合わせ型：後述するマルチポールソレノイドやトロイダルコイル。

1.5.2 超電導コイルの設計に要する計算

磁界計算

線材の臨界電流密度を求めるために、コイルの発生する均一磁界の大きさや均一度を知るために行う。ただし SMES において目的は電力貯蔵であるため後者よりも前者に重点が置かれる。コイルの最大経験磁界はソレノイドコイルではコイル中心面上の巻線部最内層の点であるため、低温超電導ソレノイドコイルでは最大経験磁界としてこの点のみ計算すれば臨界電流密度の限界が求められたが、高温超電導コイルにおいては磁界の印加する角度も重要になってくるため、複数点の磁界から臨界電流密度を計算して最低となるものを選択する必要がある、より複雑となる。

インダクタンス計算

励磁速度や励磁電圧、蓄積エネルギーを知るのに必要である。インダクタンスは近似式を使える自己インダクタンス及び一部基本的な形状の相互インダクタンスを除いて数値積分を用いた計算が必要となり計算に時間を要する。

電磁応力計算

運転中、常時コイルに印加する力には先述の通りフープ応力と向心力がある。フープ応力は線材のひずみで作成時曲げひずみ、冷却時の収縮率の違い、運転時の電磁力によるもの、などによる。向心力は複数コイルシステムの各要素コイルが中心側と外側の磁界不均一によって要素コイル全体として電磁力に偏向を起こすために生じる。他にトロイダルコイルなどでは各要素コイルが突然クエンチを起こす等で組み合わせコイル系の磁界バランスが崩れた際に近隣のコイルへアンバランスにより倒れるような力が生じ、これを転倒力という。超電導コイルにはこのような各種力に耐えうるような設計が求められる。それぞれの力について図 1.11 に示す。なお、フープ応力については運転時電磁力に起因するものを示している。

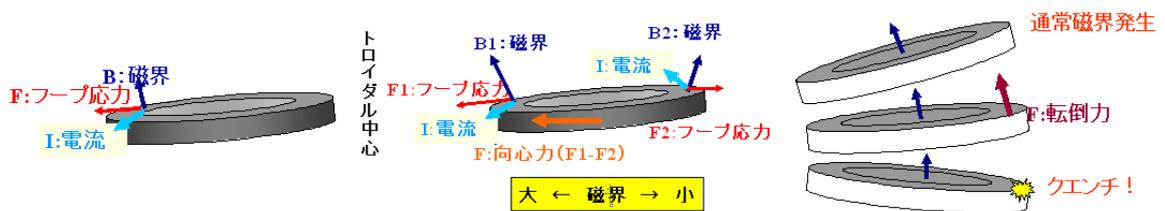


図 1.11: フープ応力 (左) 向心力 (中央) 転倒力 (右)

温度 T[K]	カルノー 仕事	冷凍 ペナルティー
4.2	70.4	500-700
20.3	13.8	50-70
27.1	10.1	50-60
77.3	2.8	10-20

表 1.1: 運転温度別カルノー仕事と冷凍ペナルティー

安定度

低温金属系超電導コイルではわずかな線材の動きなどによっても発生するじょう乱によって常電導転移の芽が生じる。これに対して、線材の時期的不安定性を抑制する・安定化母材として銀や銅を複合した導体とすることで常電導転移時の電気抵抗とジュール発熱を抑える・線材間及び冷媒等への速やかな熱伝達によって温度上昇を抑えられる設計とする等が求められる。高温超電導線材において、Bi系では銀シースが安定化母材としても働くが、Y系には安定化層が必要となる。高温超電導線材の安定化の考え方は運転温度及び線材の特性の違いにより低温超電導線材のそれとは大きく異なるため冷凍機の現状と併せて次で詳しく述べる。

1.5.3 冷凍機と運転電流 [1]

ある超電導線材と冷凍機の関係を示した図 1.12 を用いて冷凍機冷却能力と高温超電導線材の運転電流について見ていく。まず、A の温度まで下げれば I_{OP} の運転電流の発熱と冷凍機の冷却能力は等しく、超電導体コイルは温度一定で運転できる。

この時、コイルにどのようなじょう乱が加わるかを考える。低温超電導コイルの場合は線材が動くことや含浸材のひび割れ等であるが、20K ~ 50K での運転となる高温超電導コイルでは熱容量が 2 ~ 3 桁大きくなり、低温で数 K 程度で温度上昇したのが数 10 ~ 100mK 程度となりこのような機械的じょう乱が熱暴走へとつながることは極めて考えにくい。温度上昇の主因となるのは過負荷電流による発熱である。 I_{OP} よりも高い電流が流れると冷凍機による冷却が発熱に追いつかなくなり、徐々に温度が上がる。温度が上がると同じ電流でも発熱は大きくなる。このままだと温度があがるだけとなる。しかし、高温になると動作温度において冷凍能力 1W を得るのに必要な実際の所要動力は下がるため、同じ冷凍機でも高温域では冷却能力が上昇する。そのため、冷凍機冷却能力との交点の無くなる熱暴走電流 I_{TR} 以上の電流とならない限り、冷凍機の冷却能力とコイル発熱はバランスして新しい温度で一定になる。この運転電流 I_{OP} と熱暴走電流 I_{TR} の差を電流マージン、 I_{OP} と冷凍能力の両交点の差を温度マージンと呼ぶ。高温超電導コイルの設計に当たって、今回は基本電界 E_c を 10^{-6} と取ったときの臨界電流に対して負荷率を考えての設計としているが、熱暴走電流とそれに対してどれだけのマージンを持たせるかという視点で設計を考えることもある。

また、図 1.12 の冷凍機冷却能力をみれば同じ冷却能力なら低温にするほどコストが高くなることが分かる。各温度での冷凍能力 1W に必要な理想的最小仕事量であるカルノー仕事及び、実際に必要な仕事である冷凍ペナルティーを次表 1.1 に示す。

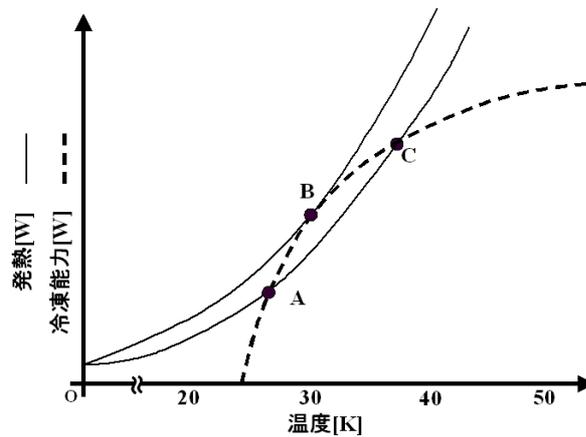


図 1.12: 高温超電導線材の電流温度マージン

1.6 研究の目的

SMES は電力貯蔵装置として数多くの特長を有し、その実用化が期待されている。このような SMES の大容量化・低コスト化を目指す上でコイルに Bi2223 や Y 系といった高温超電導線材を使用することが考えられる。SMES に関する研究はこれまでも低温超電導 SMES に関して精力的に行われており、高温超電導線材を用いた SMES に関しては現在各種設計が進められている段階である。しかし、代表的高温超電導線材である Bi2223 及び Y 系の二つの線材について、ソレノイドコイル、マルチポールソレノイド、トロイダルコイルといった複数の SMES コイル形状の設計を行い系統だった比較を行った例は少ない。本研究の目的はこれら様々な SMES コイルに対してさらに制約条件を変えての設計を行うことによって、SMES コイルの形状について系統建てた比較を行い、高温超電導線材使用長の最小化を目指すことである。

1.7 本論文の構成

第 1 章では序論として本研究の背景と目的を述べた。第 2 章以降は以下の通りである。

第 2 章では、高温超電導 SMES の設計について、各種制約条件及び計算手法を述べる。

第 3 章では、第 2 章に述べた計算手法によって設計した結果を示し、制約条件を変えた場合の結果も含めそれについての基礎検討を行う。

第 4 章では結論を述べる。

第 2 章

高温超電導 SMES コイル設計に関する 検討

2.1 設計に当たっての条件及び制約

高温超電導線材を使用した SMES を量産する場合を想定し、コストの最小化を考えるに辺り、各用途ごとの SMES の製作コストとその分担を図 2.1 に示す [14]。このうち一番大きな割合を占めているのが交直・直行変換器等の電力変換機器だが、これは必要な変換器容量及び何を用いるかによってコストが決まってしまう。一方、次に大きな割合を占めている超電導体は超電導コイル部位で使われ、超電導コイルは最大蓄積エネルギー量を決めても形状によって、高価な超電導体使用量や周囲への漏洩磁界が大きく変わってしまう。次に大きな割合を占めているのは構造材大きくコイルのフープ応力に対応するコイル補強用構造材と、コイルの向心力及び転倒力に対応するためのコイル支持用構造材がきている。各構造材の使用量、真空容器の大きさ、冷凍機の運転温度と運転容量などから全体のコストが決まってくる。これ等単価を想定し、重み付け評価することによってシステム全体のコストを試算してコスト最適化されたコイル設計を行うことも考えられるが、不確定な要素が多くなってしまうため、本研究においては超電導線材の使用長最小化に的を絞った設計を行う。

設計に当たっては、貯蔵容量や運転温度を決めると共に SMES が輸送可能となるようコイル最外径に 3m 以内という制約を与える必要がある。また、要素コイル間の距離等にも設計上の制約が必要であるが、その正確な値を知るには詳細な構造設計が必要である。そのため本研究においては固定せず一つのパラメータとしてその与える影響を見るに留めた。設計に必要な計算として、磁界・インダクタンスの導出には Biot-Savart の法則及び自己インダクタンス線素間インダクタンスの近似式 [18],[19] を、使用線材長決定にはパーコレーションモデル [21],[20] を参考に印加磁界の角度と大きさに依存する線材の臨界電流密度の特性式を、構造材の算定のための θ 方向フープ応力計算には電磁力の働く厚肉円筒モデルを用いてそれぞれ用いている。

次節以降においては、まず本研究に関する用語についての定義を行い、次いでコイル設計の際に考慮した各種パラメータ及び計算式について順次説明していく。

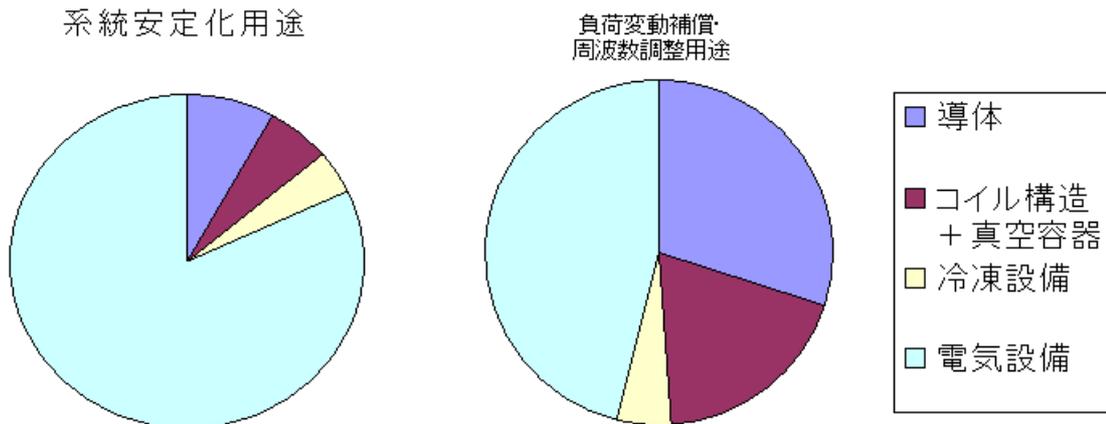


図 2.1: SMES のコスト分析

2.2 貯蔵容量の決定

最大貯蔵エネルギーに充放電率を掛けると実際に使用できる充放電エネルギーとなる。ここで充放電率とはコイルに蓄えたエネルギーをどこまで使用するかを示す指標である。コイルにエネルギーが 100 % 貯蔵されている状態と 25 % 貯蔵されている状態とを比較すると、インダクタンス L は一定なのだから (1) 式より 25 % 時に流れる電流は $1/2$ となる。一方、電力貯蔵装置として出力 ($P=IV$) は一定であることが要求されるため、コイル電圧は 100 % 時の 2 倍にまで上げてやらなければならない。つまり、充放電率を大きくするほどコイルに掛かる最大電圧は上昇する。また、電力変換器に掛かる最大電流は 100 % 時のものである。電力変換器の容量は (最大電圧) \times (最大電流) で決まり、仮に充放電率を 75 % とすると、最大電圧は 25 % 時の電圧となり、最大電流は 100 % 時の電流となる。つまり、変換器をどうするかにもよるが全般的に充放電率を高くすると必要となる電力変換器容量が増えて必要な素子数も多くなる。一方、充放電率を低く設定するとコイルの蓄積エネルギーのうち利用するエネルギーを少なくするわけなので、充放電エネルギーが同じならコイルの線材使用長は大きくなる。実際の設計に当たってはこの二つのバランスを取って設計は行われ、先行研究 [22] による試算では系統安定化用で 50 % 程、負荷変動補償・周波数調整用で 80 % 程が良いとされている。

本研究の設計条件においては最大貯蔵エネルギーのみを考え、100MJ としているが、充放電率 54 % と考えれば 54MJ (15kWh) となる。これは図 1.4 に示したように、現在の低温超電導を用いた技術レベルにおいて達成されているものから、次のターゲットである系統安定化や周波数調整といった市場を目指した入り口に当たる。

2.3 運転温度の決定

高温超電導体は液体窒素温度 (77K) 以上の高温使用も可能な超電導体であるが、より低温の領域では臨界電流密度特性が良くなる。一方、低温にすれば当然冷却コストは上昇する。

冷却方式には対象を冷媒に浸漬する液体窒素・液体ヘリウム浸漬冷却方式，冷媒をコイル導体内部に循環させて発熱を吸収し，熱除去は外部にて行う強制冷却方式冷凍機からの冷熱を対象に接触させた冷却ヘッドとの熱伝導によって冷却する伝導冷却方式がある。浸漬冷却や強制冷却は冷媒の大きな蒸発線熱を利用することが出来るが冷媒を利用しているためメンテナンスなど取り扱いが面倒である。伝導冷却は冷却に液体窒素や液体ヘリウムなどの冷媒を用いずに済むため取り扱いが容易で運転コストを低く抑えられ，かつ運転温度を自由に設定できるなどの利点がある。今回は伝導冷却方式を想定して運転温度は自由に換えられるものとした。

高温超電導 SMES コイルにおいては高磁界の運転が想定されるため，使用する高温超電導線材には強い磁界下で高い電流密度特性が求められる。電流密度 - 磁界 ($J_c - B$) 曲線は図 1.5 に見た様に温度が低い程良い特性を示しており，線材使用長最小化には低温ほど適していると言える。特に Bi 系は 30K 以下にて自己磁界臨界電流密度特性が大きく上昇している。一方，ある負荷に対して，冷凍機で温度を維持するために必要な入力電力は，77K の場合を 1 とすると，20K では 4，4.2K では 50 となり [14]，20K 以下の温度領域ではそれ以上の温度領域と比べて，冷却に要するコストが大きくなる。本研究においては両者を考慮し，設計条件として 10K ~ 50K での伝導冷却を想定した。

2.4 コイル形状

超電導コイルの構成としては大きくソレノイド型 (図 2.2 左) とトロイダル型 (図 2.2 右) がある。ソレノイド型は磁束が外部に漏れ電磁力は外側へ膨らむように作用するフープ力が中心となる。トロイダル型では磁束は閉じていて理想的には外部に漏れず電磁力はトロイダル中心への向心力及びフープ力となる。

実際に SMES としてエネルギー貯蔵を考える際には，周辺環境へ配慮してソレノイド型を 4 つ極を変えて組み合わせたマルチポール型 (図 2.2 中央) として閉じた磁界を作る，トロイダル形状は加工が複雑なためソレノイドを複数円筒状に組み合わせたソレノイド結合型トロイダル (以降これをトロイダル型と呼ぶ) とする，ソレノイドで起こるフープ力とトロイダルで起こる向心力両者を組み合わせたヘリカル型とする，などが現実的な SMES コイルの候補として挙げられている。

さらに高温超電導 SMES を考えるに当たって，高温超電導線材は線材に印加する磁界の角度によっても臨界電流密度特性が変わり，線材幅方向に対して磁界が平行に近いほど，つまり磁界の線材印加角度が小さいほど特性が良くなるという性質を持っている。コイル端部に印加される磁界角度はコイル形状から，全体的にマルチポールが大きく，要素コイル数を多くしたトロイダル型ほど小さくなるという傾向を持つ。

以上から，設計条件としてはソレノイド型，マルチポール型，トロイダル型を考えられ，それぞれ長所と短所を有することが分かる。核融合などの分野に用いられているヘリカル型は応力が小さくなる可能性などが指摘されているが [15]，構造が複雑なため製造コストが他と比べて高くなることが想定され，超電導体使用量による単純な比較には不向きなため除外した。



図 2.2: 各種コイル形状とその組み合わせコイル外径 : ソレノイド型 (左), マルチポール型 (中央), トロイダル型 (右)

2.5 輸送制約

SMES を製造工場で作成して完成品を現地までトラックなどで輸送するか, SMES を現地にて作成するかでは材料・加工機械・人員を現地まで輸送すること, 現地にて作成すること等によりコストの面で大きな差が生じる。トラックで完成品を現地に輸送することの条件としては輸送制約として真空容器に入れた状態で最大外径 3.4m 以下であることが求められる。本研究においては組み合わせコイルの最大径が 3m 以内であることを条件としている。それぞれの組み合わせコイルの最大外径は図 2.2 に示したように円形のクライオスタットに入れるに当たってクライオスタット径を決める径で定義している。

2.6 超電導コイル設計に用いた変数及び指標の定義

本研究にて, 超電導コイルを設計するに当たって使用している変数及び指標の用語を以下に定義する。

要素コイル

1 ソレノイドコイルのことを指し, 本研究ではこの要素コイルを複数組み合わせた組み合わせコイルとして, SMES 用コイルを設計した。各変数を図 2.3 に示す。要素コイルの設計値は (平均) 半径 r , 軸長 h , 幅 d によって決まり, 斜線部がコイルの矩形断面である。コイル矩形断面内は機械特性, 電気特性共に一様と仮定した。なお, m 層 n ターンのコイルを想定すれば要素コイル線材長 l は $l = m \sum_{k=1}^{n/2} 2\pi(r + \frac{kd}{n}) + m \sum_{k=1}^{n/2} 2\pi(r - \frac{kd}{n})$ として表せ, k の項が消えるため $l = 2\pi mn r$ となり半径と巻数によって求まり厚さにはよらない。磁界はコイル内側の最大経験磁界となる中央部磁界計算点及び角度が大きく出た磁界も大きい端部磁界計算点の地点で計算した。

組み合わせコイル

組み合わせコイルの各設計値を以下の図 2.4 に示す。

本来はドーナツ状のトロイダルコイル表面に線材を巻いて電流を流す構成であるが, 製造が難しいため, 要素コイル数 N として N 個の同形状要素コイルをドーナツ状に配置して

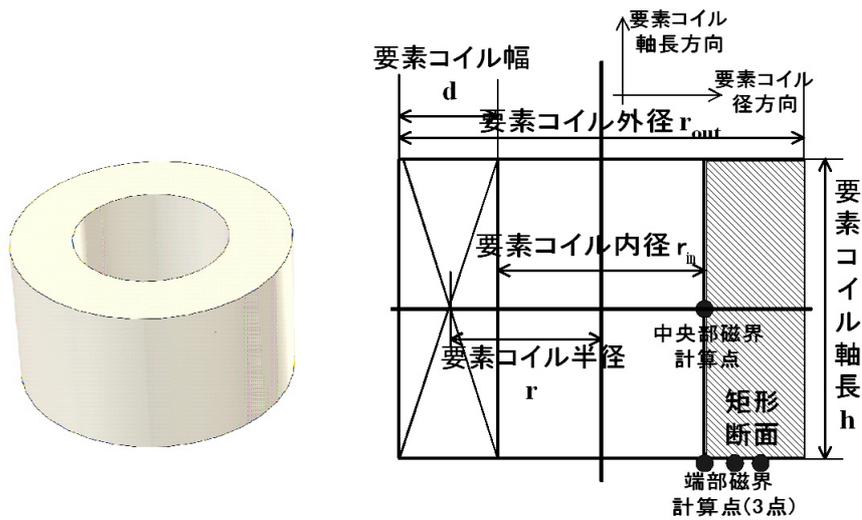


図 2.3: 要素コイル

設計し，電流はすべて同量同一方向に流すことで，ドーナツ内に閉じたループ磁界を形成させる。トロイダル中心から要素コイル中心までの距離をトロイダル大半径 R_l ，要素コイル平均半径 r をトロイダル小半径 R_s とした。また，トロイダルコイル最外径を組み合わせコイル外径 R_c とした。要素コイル間距離 d_c は組み合わせコイルが最も近接する地点，つまり組み合わせコイル最内周端部における隣接コイル間の距離を示している。要素コイル平均半径 r と小半径 R_s は要素コイル，組み合わせコイルどちらに重点をおくかで言い換えるが同一のものである。

マルチポールコイルは同形状要素コイルを4つ流す電流を互い違いにして配置することで極磁性が交互になり，閉じた磁界となるコイルである。容器であるクライオスタットの形状が内部を真空にするため円形となることを考慮して，離れた二つのコイルを完全に覆える距離を組み合わせコイル外径 R_c とした。要素コイル間距離 d_c は隣接コイル間の近接点における距離としている。

なお，アスペクト比として， $\alpha_s = (\text{要素コイル幅 } d) / (\text{要素コイル平均半径 } r)$ ， $\beta_s = (\text{要素コイル軸長 } h) / (\text{要素コイル平均半径 } r)$ ， $\beta_t = (\text{トロイダルコイル小半径 } R_s) / (\text{トロイダルコイル大半径 } R_l)$ を定義する。

要素コイル導体間距離（コイル間絶縁制約）

要素コイル導体間距離について図に示す。これは対地絶縁や補強に必要な間隔であり，本研究においては必要な最小間隔として理想状態として0mm，他に15mm，25mm，50mmの各場合について考える。

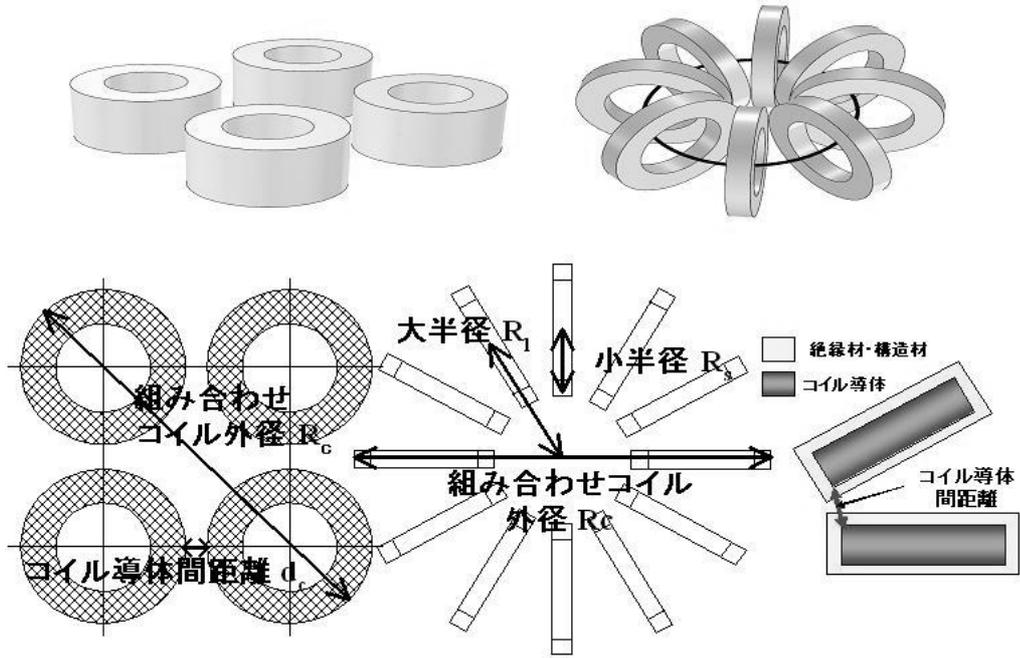


図 2.4: マルチポールソレノイド概観 (左上), トロイダルコイル概観 (右上), マルチポールソレノイドモデル図 (左下), トロイダルコイルモデル図 (中央下), トロイダルコイル間距離 (右下),

インダクタンス

要素コイル自己インダクタンス L_i , 及び要素コイル間相互インダクタンス M_{ij} の合計値として, 要素コイルの矩形断面電流 I_m を用いて, 組み合わせコイル全体の貯蔵エネルギー E_t を $E_t = \frac{1}{2}MI^2$ と表す M を組み合わせコイルの総インダクタンスとして定義しておく。

要素コイル数 N 個のトロイダルコイルについて総インダクタンス M は

$$E = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N L_i I_i^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N M_{ij} I_i I_j \quad (2.1)$$

ここで, 要素コイルはすべて同形状で通電電流も同じであり, トロイダル上に配置されていることを考慮して自己インダクタンス L と相互インダクタンス M_j を用いて

$$E = \frac{1}{2} N L I^2 + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N M_j I^2 = \frac{1}{2} N \left(L + \sum_{j=1}^N M_j \right) I^2 \quad (2.2)$$

結局, $M = N \left(L + \sum_{j=1}^N M_j \right)$ となる。

次にマルチポールソレノイドの総インダクタンス M は各コイルすべて同形状で通電電流も同じであり, 4つの要素コイルが対象配置されていることから, 自己インダクタンスを L , 隣接コイルの相互インダクタンスを M_{near} , 遠方コイルの相互インダクタンスを M_{far} として,

$$E = 4 \left(\frac{1}{2} L I^2 + 2 \frac{1}{2} M_{near} I^2 - \frac{1}{2} M_{far} I^2 \right) \quad (2.3)$$

結局， $M = 4(L + 2M_{near} - M_{far})$ となる。

線材

線材に印加する磁界の角度及び大きさは次図 2.5 の通り定義する。また，線材の形状などを示すこともあるが，本研究の計算過程において線材は体積で計算しており，線材一本辺りの寸法・断面積によってコイル形状は制限していない。同様に，導体化するに際しても線材と補強材の体積比のみ着目し形状などは考慮していない。

超電導体の電流密度 J_c という場合は線材の超電導体部分のみの電流特性であり，基準電界 10^{-6} の臨界電流密度に裕度として 0.85 を乗じたものである。この臨界電流密度では補強材及び線材の超電導層以外の材料の断面は含んでいない。線材断面積を考えた工業的臨界電流密度は J_e で表す。電流特性 I_c は超電導線材断面形状を考慮して一本の線材に流せる電流である。

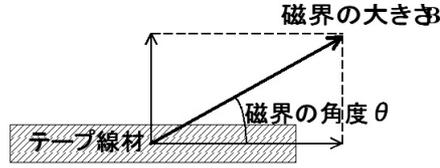


図 2.5: 線材に印加する磁界の定義

2.7 高温超電導線材の $J_c - B(\theta)$ 特性

2.7.1 基本式

高温超電導線材の磁界の印加角度を考慮した臨界電流密度 - 磁界 ($J_c - B(\theta)$) 特性についてはパーコレーションモデルに基づく式 [8] [17] に，実測値 [16] [17] とよく合うような係数を代入している。

高温超電導体の臨界電流密度 J_c は結晶構造の複雑さや熱攪乱の影響等によって超電導体内において分布を有しているという J_c 分布の考え方をを用いることで $J_c - B^\perp$ 特性は次のようにして求められる。まず， J_c の統計分布パラメータとして，その最小値，半値幅，形状をそれぞれ J_{c0} ， J_0 ， m と置くと，その代表値は $J_{ck}(= J_{cm} + J_0)$ と表せる。この時，最小ピン力密度 $F_{pm}(= J_{cm}B)$ ならびに代表的ピン力密度 $F_{pk}(= J_kB)$ は A, ξ, γ, δ をピンパラメータ (定数) として次式のように記述される。

$$\begin{aligned}
 F_{pm} &= J_{cm}B^\perp = AB_{GL}^\perp(T)^\xi \left(\frac{B^\perp}{B_{GL}^\perp(T)} \right)^\gamma \left(1 - \frac{B^\perp}{B_{GL}^\perp(T)} \right)^\delta & \text{for } B^\perp \leq B_{GL}^\perp \\
 F_{pm} &= J_{cm}B^\perp = -AB_{GL}^\perp(T)^\xi \left| 1 - \frac{B^\perp}{B_{GL}^\perp(T)} \right|^\delta & \text{for } B^\perp \geq B_{GL}^\perp \\
 F_{pk} &= J_{ck}B^\perp = AB_k^\perp(T)^\xi \left(\frac{B^\perp}{B_k^\perp(T)} \right)^\gamma \left(1 - \frac{B^\perp}{B_k^\perp(T)} \right)^\delta & \text{for } B^\perp \leq B_k^\perp \quad (2.4)
 \end{aligned}$$

ここで、 B_{GL} 、 B_k はそれぞれ J_{cm} 、 J_{ck} が 0 となるような磁界であり、温度に依存する関数である。これら磁界の温度依存性は a, b, vp は定数、 $t = 1 - T/T_C$ として、次の様に表せる。

$$B_{GL}(k) = \frac{b}{1 - vp} t \left(1 - \frac{a}{t} + \sqrt{\left(1 + \frac{a}{t}\right)^2 - 4vp \frac{a}{t}} \right) \quad (2.5)$$

求めたい臨界電流密度の基準電界を E_c とすると、結局臨界電流密度は磁束フロー時の抵抗率 ρ_{FF} を用いて

$$J_c = \begin{cases} J_{cm} + \left(\frac{m+1}{\rho_{FF}} E_c J_0^m\right)^{\frac{1}{m+1}} & (B \leq B_{GL}) \\ -|J_{cm}| + \left[\frac{m+1}{\rho_{FF}} E_c J_0^m\right] + |J_{cm}|^{m+1} \right)^{\frac{1}{m+1}} & (B > B_{GL}) \end{cases}$$

となる。

これらの式に実測値に合うようそれぞれの線材固有のパラメータを与え、印加磁界の角度依存モデルを加えることで、Bi2223、Y 系の両線材についての特性式とした。

2.7.2 Bi2223 線材の $J_c-B(\theta)$ 特性

文献 [8] より、磁界の印加角度をモデルに加えることで (2.4) 式と出来る。具体的には $B(\theta)$ に対する J_{cm} 、 J_k を求めるために先ほどの B_{GL}^\perp に対して $B_{GL}(\theta)$ との関係を示す関数 $f(\theta)$ ($= \frac{B_{GL}(\theta)}{B_{GL}^\perp}$) を用い、次のように書ける。

$$J_{cm} B = AB_{GL}^\perp(T)^\xi f(\theta)^\xi \left(\frac{B}{B_{GL}^\perp(T) f(\theta)} \right)^\gamma \left(1 - \frac{B}{B_{GL}^\perp(T) f(\theta)} \right)^\delta \quad \text{for } B \leq B_{GL} \quad (2.6)$$

$$J_{cm} B = -AB_{GL}^\perp(T)^\xi f(\theta)^\xi \left| 1 - \frac{B}{B_{GL}^\perp(T) f(\theta)} \right|^\delta \quad \text{for } B \geq B_{GL} \quad (2.7)$$

$$J_{ck} B = AB_k^\perp(T)^\xi f(\theta)^\xi \left(\frac{B}{B_k^\perp(T) f(\theta)} \right)^\gamma \left(1 - \frac{B}{B_k^\perp(T) f(\theta)} \right)^\delta \quad \text{for } B \leq B_k \quad (2.8)$$

なお、この関数 $f(\theta)$ は次のように表される。

$$f(\theta) = \frac{B_{GL}(\theta)}{B_{GL}^\perp} = \left(\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{h(\theta - x)} P_f(x) dx \right)^{-1} \quad (2.9)$$

$$P_f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (2.10)$$

$$\left| h(\theta) \sin \theta \right| + \left(\frac{\tilde{B}_{GL}^\perp}{\tilde{B}_{GL}} h(\theta) \cos(\theta) \right)^2 = 1 \quad (2.11)$$

ここで、 $\frac{\tilde{B}_{GL}^\perp}{\tilde{B}_{GL}}$ は実測値に基づく線材固有の異方率である。これを実測値に合うように下記のように多項式近似後調整した。

$$f = 1 + \{ (5.8348\theta^9 - 57.7314\theta^8 + 242.3224\theta^7 - 564.6529\theta^6 + 799.4402\theta^5 - 702.7049\theta^4 + 369.5700\theta^3 - 98.2327\theta^2 + 1.6070\theta + 5.7637) - 1 \} * 1.3 \quad (2.12)$$

それぞれのパラメータは実測値 [16] に合うよう次表 2.1 のように定めた。なお、10K については実測値に合わせるために得られた電流密度特性にさらに 1.13 を掛けている。得られる

表 2.1: Bi 系電流密度特性係数

	A	ξ	$\hat{\xi}$	γ	δ	a	b	vp
F_{pm}	$3.52 * 10^8 (\leq 45K)$	$1.55 (\leq 45K)$	1.08	0.77	1.26	0.690	0.273	0.995
	$4.64 * 10^8 (> 45K)$	$1.10 (> 45K)$						
F_{pk}	$3.96 * 10^9 (\leq 45K)$	$1.61 (\leq 45K)$	1.021	0.94	1.67	0.650	0.799	0.995
	$1.532 * 10^8 (> 45K)$	$0.83 (> 45K)$						
	TC	σ	m	ρ				
	108	10^{circ}	3.92	10^{-7}				

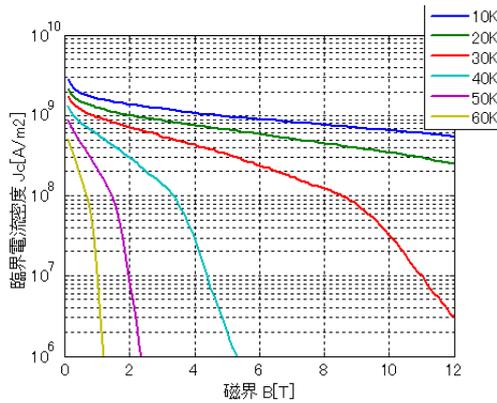


図 2.6: Bi 系線材 J_c - B 特性の温度依存性

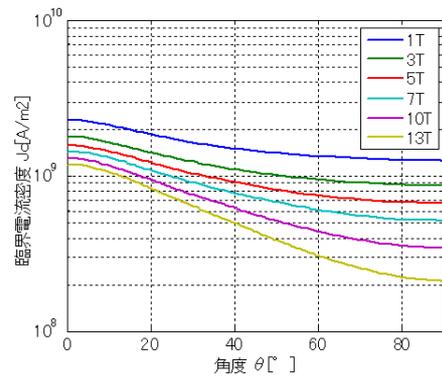


図 2.7: Bi 系線材 J_c - θ 特性の角度依存性

Bi2223 線材モデルの各温度ごと J_c - B^\perp 特性及び 20K における J_c の磁界印加角度依存性をそれぞれ図 2.6, 2.7 示す。

以上は 200A 級線材についての結果である。300A 級線材についてはまだ実在していないため、単純に 200A 級線材の 1.5 倍の臨界電流密度特性となることを仮定した。

2.7.3 Y 系線材の J_c - $B(\theta)$ 特性

印加される磁界の大きさを B_m , 角度を θ として、擬似的な B_m^\perp を考えることで 1 節の基本式 (2.4) に当てはめられるようにする。c 軸方向にキャリアが動きにくいことを考慮した面内の質量比と有効質量の比の平方根 α を用いて角度依存を表すモデルを有効質量モデルという。

$$B_m^\perp = B_m * \sqrt{\alpha^{-2} \cos^2 \theta + (\sin \theta)^2} \quad (2.13)$$

さらに、0 度付近における c 軸配向性による急激なカーブを再現するために、得られた J_c を $(1 + 0.8 \cos^{80 B_m} \theta)$ 倍している。

それぞれのパラメータは実測値 [17] に合うよう次表 2.2 のように定めた。得られる Y 系線材モデルの各温度ごと J_c - B^\perp 特性及び 20K における J_c の磁界印加角度依存性をそれぞれ図 2.8, 2.9 に示す。

表 2.2: Y 系電流密度特性係数

	A	ξ	γ	δ	a	b	vp
F_{pm}	$2.21 * 10^8 (\leq 60K)$	$1.74 (\leq 60K)$	0.72	1.65	1.0	21.0	0.9999
	$7.15 * 10^8 (> 60K)$	$1.36 (> 60K)$					
F_{pk}	$4.45 * 10^8 (\leq 60K)$	$2 (\leq 60K)$	1.07	1.64	1.0	31.0	0.9999
	$4.27 * 10^9 (> 60K)$	$1.42 (> 60K)$					

TC	α	m	ρ
88.7	3.23	4.4	10^{-7}

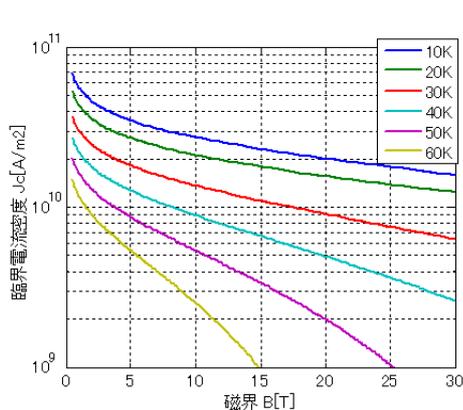


図 2.8: Y 系線材 J_c - B 特性の温度依存性

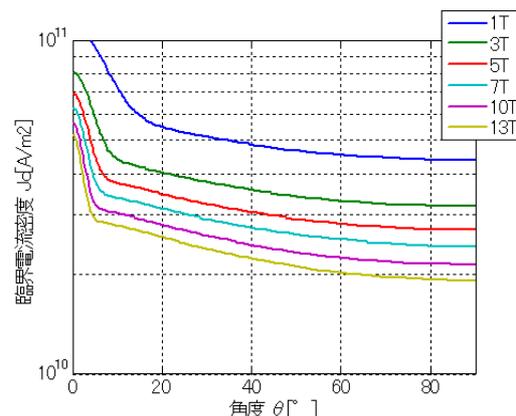


図 2.9: Y 系線材 J_c - θ 特性の角度依存性

2.8 磁界・インダクタンス計算

最初にトロイダルコイルの磁界インダクタンス計算についての計算を JAERI/CODE の空心コイル電磁計算プログラム (COIL2)[18] を用いて行った。この計算コードはトカマク型核融合装置用に特化されておりトロイダルコイル及び同軸上コイルの計算に強い反面、汎用性は無い。つまり、適用可能なコイルに対しては割と高速な計算が可能であるが、トロイダルコイルにおいて要素コイル高さが要素コイル半径と比して大きくなる場合（要素コイル数 6 個以下などの少ない場合）には精度が悪く、また想定外のコイルに対して用いることは出来ない。単純ソレノイド用の計算コードも有しているがマルチポールソレノイド用の計算には用いられない。そのため、ソレノイドコイル・マルチポールソレノイドの磁界・インダクタンス導出には計算コードを別途作成した。作成したコードによって得られた相互インダクタンスを有限要素解析ソフト JMAG によって求めた値と比較、0.5 % 以内の精度を確認した。ただし計算に要する時間の短いことから、多数の相互インダクタンス計算を必要とするトロイダルコイルについては COIL2 による結果を採用している。

なお、相互インダクタンス計算は積分を用いるため計算に時間が掛かってしまい、繰り返しの最適計算を行うには適さない。ただし、インダクタンス計算や磁界計算は一つのモデルを計算してしまえばその流す電流や、コイル全体のサイズを変えたとしてもその差に応じた係数で調整してやるだけで様々なモデルについて試せる。そのため、本論文においては相互インダクタンス計算を含まないソレノイドコイルモデル以外においては、単位電流を流し要

素コイル半径を単位長さとした形状の違うコイルモデルを複数用意し、それぞれについて磁界とインダクタンスをはじめに求めておき、設計計算時にはそのモデルデータを参照することで条件を変えての設計計算を簡単・高速に行えるようにしている。

2.8.1 トロイダルコイルの磁界計算

計算には JAERI の空心コイル電磁計算プログラム (COIL2)[18] を用いた。円筒コイルについて、磁界計算はピオ・サバルの法則より次のように書ける。

$$B_r(r_0, z_0) = \frac{\mu_0 J}{2\pi} \int_0^\pi f_{rx} d\theta \Big|_{Z_1}^{Z_2} \Big|_{r_1}^{r_2} \quad (2.14)$$

$$B_z(r_0, z_0) = \frac{\mu_0 J}{2\pi} \int_0^\pi f_{rz} d\theta \Big|_{Z_1}^{Z_2} \Big|_{r_1}^{r_2} \quad (2.15)$$

ただし、

$$f_{rx}(r, \theta, Z) = A \cos \theta + r_0 \cos^2 \theta \ln(r - r_0 \cos \theta + A) \quad (2.16)$$

$$f_{rz}(r, \theta, Z) = Z \left(\ln(r - r_0 \cos \theta + A) + \frac{r_0 \cos \theta}{2|Z|} \ln \frac{a - |Z|}{A + |Z|} \right) - Z \left(\frac{r_0 \sin \theta}{|Z|} \tan^{-1} \frac{|Z|(r - r_0 \cos \theta)}{r_0 \sin \theta A} \right) \quad (2.17)$$

$$A = \sqrt{Z^2 + r^2 + r_0^2 - 2rr_0 \cos \theta} \quad (2.18)$$

ここで J はコイルの電流密度、 $Z = z_0 - z$ ($Z_1 = z_0 - z_1$, $Z_2 = z_0 - z_2$) であり、各点については図 2.10 に示すとおりである。今回のように複数コイルを考える場合にはそれぞれのコイルについて計算し、その結果を重ね合わせる。また、計算が発散する場合には磁界計算点を $0.1 \mu\text{m}$ ずらして計算している

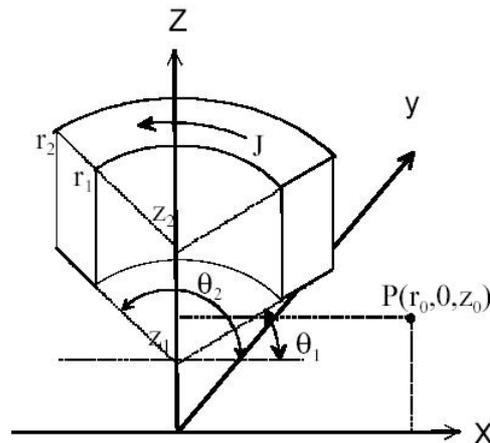


図 2.10: 磁界計算条件

インダクタンスは線素間インダクタンスの合成という形で Neumann 公式より求める。2本の線素を u, v ベクトルとし、線素間を w ベクトルとした線素 u, v 間の自己インダクタンス

L 及び相互インダクタンス M は次式 (2.19) から求める。解を求めるには数値積分が必要である。

$$M_{u,v} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_0^v \int_0^u \frac{dudv}{r} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\sum_{k=1}^3 u_k v_k}{\sqrt{a}} \int_0^1 \ln \frac{f_2(q)}{f_1(q)} dq \quad (2.19)$$

$$f_1(q) = |b + 2\sqrt{ab}| \quad (2.20)$$

$$f_2(q) = |2a + b + 2\sqrt{a(a+b+c)}| \quad (2.21)$$

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{R_s} - 1 \right) \quad (2.22)$$

p, q : 独立変数, a, b, c : 変数, u, v, w : ベクトル

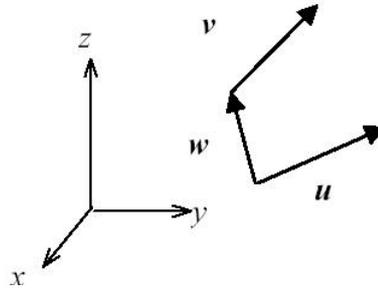


図 2.11: 線素計算条件

2.8.2 ソレノイドコイル及びマルチポールソレノイドの磁界計算

磁界計算

磁界計算は一つの円筒形コイルについて、中心軸を z 軸としその内半径、外半径をそれぞれ r_1, r_2 、軸方向の下端と上端をそれぞれ z_1, z_2 と置き、コイルに一樣に電流密度 J が流れていると仮定すると、任意の観測点 (r_0, z_0) における磁界成分は Biot-Savart の法則を巻き線の体積全体にわたって積分することによって次のように書ける [18]。

中心軸上 ($R_p = 0$) において、

$$B_r = 0 \quad (2.23)$$

$$B_z = \frac{\mu_0 J}{2} (z - Z_p) \{ 2 \ln 10 + \ln \sqrt{a^2 + (z - Z_p)^2} + a \}]_{a_1}^{a_2}]_{z_1}^{z_2}$$

中心軸以外 ($R_p \neq 0$) において

$$B_r = \{ B_{r1}(a, z) + B_{r2}(a, z) \}]_{a_1}^{a_2}]_{z_1}^{z_2} \quad (2.24)$$

$$B_z = \{ B_{z1}(a, z) + B_{z2}(a, z) + B_{z3}(a, z) \}]_{a_1}^{a_2}]_{z_1}^{z_2}$$

ただし,

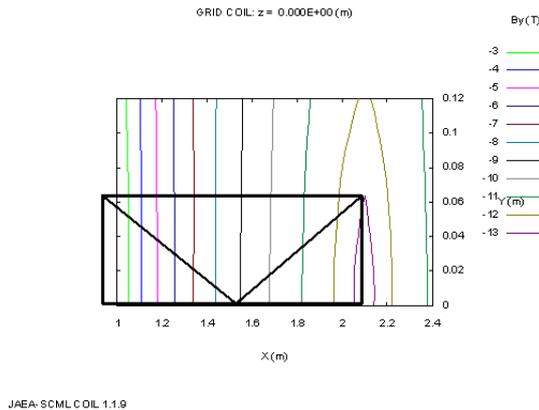
$$\begin{aligned}
B_{r1}(a, z) &= \frac{\mu_0 J}{4\pi} \int_0^{2\pi} R \cos \theta d\theta & (2.25) \\
B_{r2}(a, z) &= \begin{cases} \frac{\mu_0 J}{4\pi} R_p \left\{ \pi \ln R_p - \frac{\pi}{4} (1 + 2 \ln 2) + 2\pi \ln 10 \right. \\ \left. + \int_0^{2\pi} \cos^2 \theta \ln (\sqrt{2} + \sqrt{1 - \cos \theta}) d\theta \right\} & (Z_p = z, R_p = a) \\ \frac{\mu_0 J}{2\pi} R_p \left\{ \frac{\pi}{2} \ln R_p - \frac{\pi}{4} (1 + 2 \ln 2) + \pi \ln 10 - \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos^2 \theta \ln (R - a + R_p \cos \theta) d\theta \right. \\ \left. + \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} \cos^2 \theta \ln (R + a - R_p \cos \theta) d\theta \right\} & (Z_p = z, R_p > a) \\ -\frac{\mu_0 J}{4\pi} R_p \left\{ 2\pi \ln 10 + \int_0^{2\pi} \cos^2 \theta \ln (R + a - R_p \cos \theta) d\theta \right\} & (Z_p = z, R_p < a \text{ or } Z_p \neq z) \end{cases} \\
B_{z1}(a, z) &= \begin{cases} 0 & (Z_p = z) \\ \frac{\mu_0 J}{4\pi} Z \left\{ 4\pi \ln 10 + \int_0^{2\pi} \ln (R + a - R_p \cos \theta) d\theta \right\} & (Z_p \neq z) \end{cases} \\
B_{z2}(a, z) &= \begin{cases} 0 & (Z_p = z) \\ -\frac{\mu_0 J}{4\pi} R_p \frac{Z}{|Z|} \left\{ \pi + \int_0^{2\pi} \cos \theta \ln (R + |Z|) d\theta \right\} & (Z_p \neq z, R_p = a) \\ \frac{\mu_0 J}{8\pi} R_p \frac{Z}{|Z|} \int_0^{2\pi} \cos \theta \ln \left(\frac{R - |Z|}{R + |Z|} \right) d\theta & (Z_p \neq z, R_p \neq a) \end{cases} \\
B_{z2}(a, z) &= -\frac{\mu_0 J}{4\pi} R_p \int_0^{2\pi} g(a, z, \theta) d\theta \\
g(a, z, \theta) &= \begin{cases} 0 & (\theta = 0, \pi, 2\pi) \\ \sin \theta \tan^{-1} \left[\frac{(a - R_p \cos \theta) Z}{R_p R \sin \theta} \right] & \end{cases} \\
R &= \sqrt{a^2 - 2aR_p \cos \theta + R_p^2 + Z^2} & Z = z - Z_p
\end{aligned}$$

今回のような複数コイルではそれぞれのコイルについて計算し、その結果を重ね合わせる。なお、高温超電導体の電流特性は印加する磁界の大きさだけでなくその角度にも依存する。このため、低温超電導コイルにおいては最大経験磁界となる中心磁界のみ考えればよかったが、印加する磁界の角度と大きさから総合的に臨界電流密度の最低点を探さねばならない。そのため、トロイダルコイルにおいては上端内周の端部から 5mm 内側の地点を、マルチポールコイルにおいては端部から 5mm の地点、端部から要素コイル幅の 3 割地点、及び 5 割地点 (平均半径) の磁界を取り、その臨界電流密度特性を調べ、最低点を探ることにした。

マルチポールソレノイドにおいてのみ端部以外も調べる理由は、図 2.12, 2.13, 2.14, 2.15 に示すように印加磁界の違うためである。図に大半径 2.5m, 要素コイルの半径 1m, 幅 1.2m, 高さ 0.13m, 矩形断面電流 5.4MA, 要素コイル数 24 個及び 2 個のトロイダルコイルの要素コイル磁界を示す。ここで、要素コイル数二個というのはマルチポールコイルの要素コイルについてその隣接コイル一つから受ける磁界の影響のみを考えた場合に当たる。

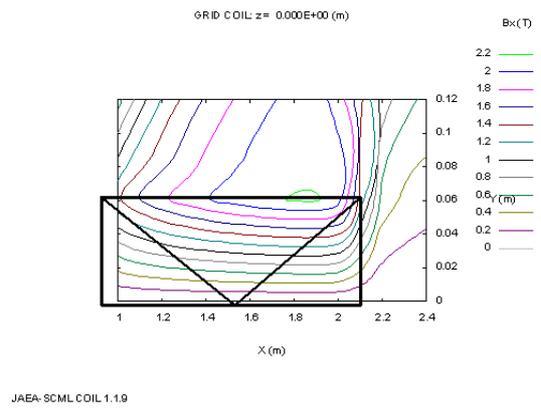
軸長方向の磁界について要素コイル数 24 個の場合が圧倒的に大きいのに比べて、径方向の磁界はむしろ要素コイル数 2 個の方が広い範囲にわたって強い。これは磁界の印加角度を考えた場合、最内周部においてもコイル内部においても要素コイル数 2 個のマルチポール近似モデルの方が大きいということである。

トロイダルコイルの一つの要素コイルは上側半分のコイル群と下側半分のコイル群からの磁界のうち、トロイダル周方向の磁界は強めあい、トロイダル径方向の磁界は弱めあい、要素コイル中心部においては他のコイルからトロイダル径方向の磁界は受けない。しかし、要素コイルの上下端においては要素コイルの高さ方向の分だけ磁界がずれ、それが要素コイル自身の作るトロイダル径方向の磁界を弱めるためである。



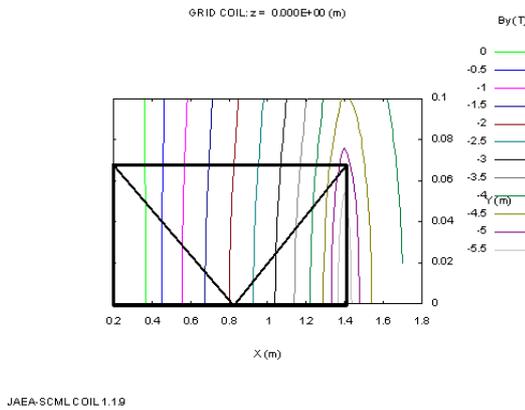
JAEA-SCML COIL 1.1.9

図 2.12: トロイダルコイル軸長方向磁界

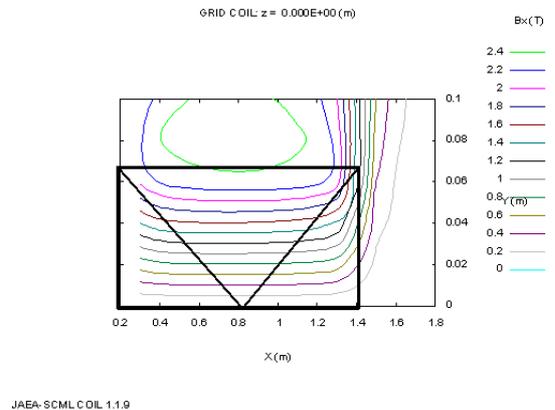


JAEA-SCML COIL 1.1.9

図 2.13: トロイダルコイル径方向磁界



JAEA-SCML COIL 1.1.9



JAEA-SCML COIL 1.1.9

図 2.14: マルチポールソレノイド軸長方向磁界 図 2.15: マルチポールソレノイド径方向磁界

自己インダクタンス計算

自己インダクタンスについては文献 [19] にある近似式を用い，相互インダクタンスについては上述の磁界計算式を用いて求める。

まず，自己インダクタンスの近似計算式を次式 (2.26),(2.27),(2.28),(2.29) に，それぞれの適用範囲を図 2.18 に示す。これらの近似式はその適用範囲において最悪で 0.2 % 程，大体において 0.05 % 以下の精度を有している。なお長岡の近似式は Dwight の近似式及び Butterworth の近似式にて用いるため参照している。

Lyle の近似

$$\begin{aligned}
 L = & \mu_0 a N^2 \left(\ln \left(\frac{8a}{d} \right) + \frac{1}{12} + \frac{(u+v)}{12} - \frac{2}{3} (w+wd) \right. \\
 & + \frac{1}{96a^2} \left((3b^2 + c^2) \ln \frac{8a}{d} + \frac{1}{2} b^2 u - \frac{1}{10} c^2 v - \frac{16}{5} b^2 w + \frac{69}{20} b^2 + \frac{221}{60} c^2 \right) \\
 & \left. + \left\{ \left(-30b^4 + 35b^2 c^2 + \frac{22}{3} c^4 \right) \ln \frac{8a}{d} - \left(115b^4 - 480(bc)^2 \right) \frac{u}{12} - \frac{23}{28} c^4 v \right\} \right)
 \end{aligned}$$

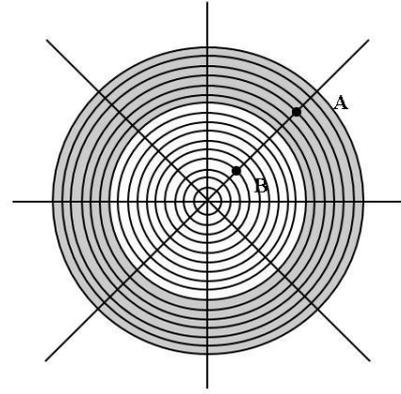
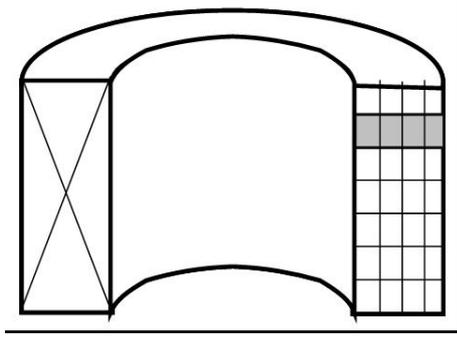


図 2.16: 分割モデル

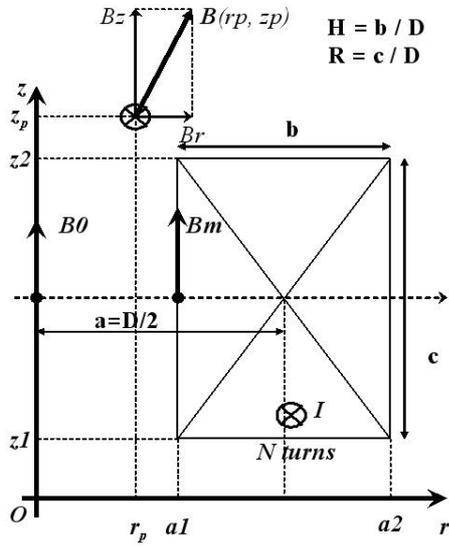


図 2.17: コイルモデル

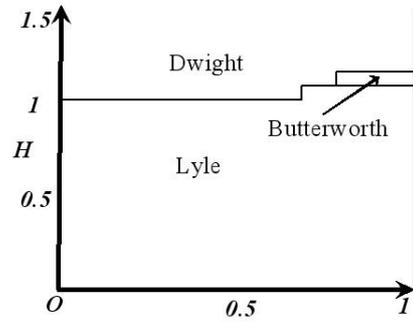


図 2.18: 自己インダクタンス計算適用範囲

$$\begin{aligned}
 & + \frac{256}{21} (6b^4 - 7(bc)^2) w - \frac{36590b^4 - 2035(bc)^2 - 11442c^4}{840} \} / (30720a^4) \\
 & + \left((525b^6) - 1610(b^4c^2) + 770b^2c^4 + 103c^6 \right) \ln(8a/d) \\
 & + \left(3633/10b^6 - 3220b^4c^2 + 2240b^2c^4 \right) u - 359/30c^6v \\
 & - 2048 \left(5/3b^6 - 4b^4c^2 + 7/5b^2c^4 \right) w + 2161453/840b^6 - 617423/180b^4c^2 \\
 & - 8329/60b^2c^4 + 108631/840c^6) / (6881280a^6) \quad (2.26)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 d &= \text{sqrt}(b^2 + c^2) \\
 u &= (b^2/c^2) * \ln(d^2/b^2) & v &= (c^2/b^2) \ln(d^2/c^2) \\
 w &= (b/c) * \arctan(c/b) & wd &= (c/b) \arctan(b/c)
 \end{aligned}$$

長岡の近似

$$\begin{aligned}
 L &= KL1 & (2.27) \\
 K &= \begin{cases} -\frac{4k}{3\pi kd} + \frac{1-kd^2/k^2+(kd^2/k^2(1+8\beta/(1+\alpha)+8\gamma/(1-\delta)))/2\ln(1/q)}{3\pi\sqrt{q}(1+\alpha)^2} & (H < 1) \\ -\frac{4k}{3\pi kd} + \frac{2}{3(1-\delta)^2}(1+8\beta/(1+\alpha)+kd^2/k^2 8\gamma/(1-\delta)) & (H > 1) \end{cases} \\
 L1 &= \mu_0\pi a^2 N^2/b \\
 k &= \frac{2a}{\sqrt{4a^2+b^2}} & kd = \frac{b}{\sqrt{4a^2+b^2}} \\
 l &= \begin{cases} \frac{1-\sqrt{k}}{1+\sqrt{k}} & (H < 1) \\ \frac{1-\sqrt{kd}}{1+\sqrt{kd}} & (H > 1) \end{cases} \\
 q &= \frac{l}{2} + 2\left(\frac{l}{2}\right)^5 + 15\left(\frac{l}{2}\right)^9 \\
 \alpha &= q^2 + q^6 + q^{12} & \beta = q^2 + 3q^6 + 6q^{12} \\
 \gamma &= q - 4q^4 + 9q^9 & \delta = 2q - 2q^4 + 2q^9
 \end{aligned}$$

Dwight の近似

$$\begin{aligned}
 L &= KL1 + \Delta L & (2.28) \\
 \Delta L &= \mu_0 \frac{\pi N^2 D^2}{4b} \left(-\frac{2}{3} \frac{c}{D} + \frac{c^2}{3D^2} + \frac{4D}{3\pi b} \left(\frac{c^2}{4D^2} \left(\ln \frac{4D}{c} - \frac{23}{12} \right) - \frac{c^4}{80D^4} \left(\ln \frac{4D}{c} - \frac{1}{20} \right) \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. - \frac{1}{896} \left(\frac{c}{D} \right)^6 \left(\frac{23}{20} \ln \frac{4D}{c} - \frac{4547}{5600} \right) \right) + \left(\frac{c}{D} \right)^2 \frac{D}{b} \left(\frac{m}{6} - \frac{5}{24} m^3 + \frac{m^5}{3} - \frac{95}{128} m^7 \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + \frac{217}{128} m^9 - \frac{2135}{512} m^{11} + \frac{21571}{2048} m^{13} - \frac{895895}{32768} m^{15} \right) + \frac{c^4}{D^3 b} \left(\frac{m}{36} - \frac{17}{180} m^3 + \frac{53}{96} m^5 \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. - \frac{1265}{576} m^7 + \frac{38857}{4608} m^9 - \frac{3913}{128} m^{11} + \frac{2206281}{20480} m^{13} - \frac{1519375}{4096} m^{15} \right) + \frac{c^6}{D^5 b} \right. \\
 &\quad \left. \left(-\frac{1}{120} m^3 + \frac{15}{112} m^5 - \frac{1117}{672} m^7 + \frac{1183}{96} m^9 - \frac{76461}{1024} m^{11} + \frac{4043831}{10240} m^{13} - \frac{15637479}{8192} m^{15} \right) \right) \\
 m &= \frac{D}{\sqrt{D^2+4b^2}}
 \end{aligned}$$

Butterworth の近似

$$\begin{aligned}
 L &= KL1 + \Delta L & (2.29) \\
 \frac{\Delta L}{L1} &= -\frac{1}{3} \frac{c}{a} \left(1 - \frac{c}{4a} - \frac{1}{2\pi} \frac{c}{b} \left(\ln \frac{8a}{c} - \frac{23}{12} \right) \right) + \frac{1}{160\pi} \frac{c^3}{a^2 b} \left(\ln \frac{8a}{c} - \frac{1}{20} \right) \\
 &\quad - \frac{1}{4} \frac{ac}{b^2} \left(1 - \frac{7}{4} \frac{a^2}{b^2} + \frac{17}{4} \frac{a^4}{b^4} \right) - \frac{1}{96} \frac{c^3}{ab^2} \left(1 - \frac{39}{10} \frac{a^2}{b^2} \right)
 \end{aligned}$$

相互インダクタンス計算

相互インダクタンスは一つの円形リングに 1A の電流を流した時にもう片方の円形リングに鎖交する全磁束量として考え、二つのコイルを無数の円形リングの組み合わせとして、コイル断面部及びコイル内側の磁界を導出する。この際、互いの巻き数を 1 と仮定し、円形リングに鎖交する磁束量は径方向と周方向の分割の各交点について求めるとすると、相互イン

ダクタンスは差分法の考え方をういて次式 (2.30) のように考えられる。また、この時の概念図は図 2.16 のようになる。

$$\begin{aligned}
M &= \frac{N_2}{n_z} \sum_{h=1}^{n_z} \left[\sum_{i=1}^{n_0} 1 \times \left(\frac{1}{n_{ang}} \sum_{k=1}^{n_{ang}} B_z(r_i, z_h, ang_k) \right) \times 2\pi r_i \Delta r_0 \right. \\
&\quad \left. + \sum_{j=1}^{n_r} \frac{a_{22} - r_j}{a_{22} - a_{21}} \times \left(\frac{1}{n_{ang}} \sum_{k=1}^{n_{ang}} B_z(r_j, z_h, ang_k) \right) \times 2\pi r_j \Delta r_r \right] \\
&= \frac{2\pi N_2}{n_z} \sum_{h=1}^{n_z} \left[a_{21} n_0 \sum_{i=1}^{n_0} r_i \left(\frac{1}{n_{ang}} \sum_{k=1}^{n_{ang}} B_z(r_i, z_h, ang_k) \right) \right. \\
&\quad \left. + \frac{1}{n_r} \sum_{j=1}^{n_r} r_j (a_{22} - r_j) \left(\frac{1}{n_{ang}} \sum_{k=1}^{n_{ang}} B_z(r_j, z_h, ang_k) \right) \right] \quad (2.30)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
r_i &= (2i - 1) \frac{a_{21}}{2n_0}, & r_j &= a_{21} + (2j - 1) \frac{a_{22} - a_{21}}{2n_r} \\
z_h &= z_{21} + (2h - 1) \frac{z_{22} - z_{21}}{2n_z} \quad (2.31)
\end{aligned}$$

コイルの内側 (B 点) の磁束についてはリングを流れる全電流が鎖交するが、コイル断面部 (A 点) の磁束では、その円周外部を通る電流リング分しか鎖交していない。コイル外側の磁束はインダクタンスに関与しない。コイルはコイル断面部径方向、コイル内側径方向、コイル高さ方向、周方向について、それぞれの長さに応じて 40-80, 40-80, 40-150, 8 の分割数で分割している。周方向 8 箇所をその周における磁界の大きさとしている。

2.9 応力計算

ローレンツ力は $F = B \times J$ で表されるが、100MJ 級 SMES コイルではこの磁界、電流ともに非常に大きな値となることが予想され、その値を把握するとともに対策が必要である。

2.9.1 材料の機械的性質

今回使用した材料について機械的な性質を表 2.3 に示す。なお Y 系線材については安定化材 0 のものを示している。

表 2.3: 使用材料の機械特性

	Bi 系線材	Y 系線材	補強材
ヤング率 (GPa)	160	205	204
設計限界 (MPa)	142	370	760

設計限界 σ (MPa) を考えるに当たって、設計基準として ASME の基準に従い、基本は次式 (2.32) の通り [23] としている。

$$\sigma = \text{Min}((\text{降伏応力}) * \frac{2}{3}, (\text{破壊応力}) * \frac{1}{2}) \quad (2.32)$$

Bi系のヤング率は、測定結果[24]を参考にして160GPaとした。また、設計限界については高臨界電流使用のDI-BSCCO[®]の公称許容応力が77Kにおいて160MPaであること[25]、引っぱり試験結果として電流が77Kにおいて200MPaで一気に劣化し始め、無負荷時の95%となる応力が195MPa、降伏応力が214MPaであったこと[26]、等から公称許容応力及び設計限界の基本式(2.32)を満たし、臨界電流密度特性も良好な範囲内である142MPa(=214* $\frac{2}{3}$)を設計限界とした。なお、DI-BSCCO[®]の公称許容曲げ直径は70mmであり、要素コイル内径は70mm以上とする必要がある。

Y系のヤング率は、その構成材の大部分を占めるハステロイ(197GPa[27])のデータを用い、低温においてヤング率は若干大きくなる傾向にある[23]ことを考慮して205GPaとした。引っぱり試験結果として電流特性は400MPaから劣化し始めるが、600MPaでも4%程度しか落ちていない[28]、しかし、破壊応力は700MPaであるので、設計基準に従い370MPa($\approx \frac{750}{2}$)を設計限界とした。

補強材としては強度を重視して高窒素 SUS316LN の機械強度を想定した[29]。10K から50K において実験値[29]と合う様、温度 $T(K)$ の関数として次の式とした。ヤング率はオーステナイト系 SUS(197GPa[27])を参考にして204GPaとした。

0.2%耐力： $-3.3691 * T + 1684.5$ (MPa)

破壊応力： $1238.7 * e^{-0.0043 * T}$ (MPa)

2.9.2 コイルに印加する応力

先行研究[30]において電磁力によるひずみの周方向フープ応力が支配的とされているため、設計条件としては一番強い力の働く最内部の線材について周方向フープ応力を調べ、応力に耐えるよう補強材と線材の比を求めた。

フープ応力計算

詳細な応力を知るには詳しい磁界・構造解析が必要になるが、簡単のためにトロイダル要素コイルについて、均一電流 J の流れる厚肉円筒モデルに、線形対称な磁界が掛かるという条件を仮定して、方向フープ応力 σ_θ を解いた。電磁力を考えるにあたって、磁界 B は r 方向に線形減衰(最内周で最大、外周で0を仮定)、方向に均一な単純ソレノイドとしている。このモデルは中心側に強い力が働き周縁部に向かって弱くなっていくという組み合わせコイルの応力条件を再現しておらず正確さには欠けるが、簡易なモデルということで繰り返し計算に適した高速な応力計算が可能となる。

応力を計算する地点は最内周から7mmのところとしている。これは補強材と線材併せて一辺14mmの導体を仮定した場合のその中心点として決めトロイダル中心側のみに掛かる最大印加磁界を全周に仮定しているため求められたフープ応力の95%を実フープ力と仮定。機械的特性はコイル全体に均一と仮定しポアソン比0.3、ヤング率はBi2223線材で1.50e+11(GPa)、Y系では1.95e+11(GPa)を採用した。

電磁力 F_{BJ} について磁界が要素コイル中心部から端部に掛けて線形減衰し、電流密度がコイル内で一定であることを想定して、 $F_{BJ} = \frac{jBm}{R_1 - R_2}(r - R_2)$ とすると、圧肉円筒モデルにおける力の釣り合い式は次の通りとなる。

$$b \int_0^\pi (\sigma_r + \frac{d\sigma_r}{dr} dr)(r + dr) \sin \theta d\theta - b \int_0^\pi \sigma_r r \sin \theta d\theta + b \int_0^\pi f r \sin \theta dr d\theta = 2b\sigma_\theta dr \quad (2.33)$$

境界条件は最内周 (R_1) 及び最外周 (R_2) にて径方向応力が 0 ($\sigma(R_1) = \sigma(R_2) = 0$)、
解いて、

$$\sigma_r = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left\{ (1-\nu) \left\{ -a \left(\frac{2}{3} R_2 r - \frac{3}{8} r^2 \right) + C_1 - \frac{C_2}{r^2} \right\} + \nu \left\{ -a \left(\frac{R_2}{3} r - \frac{1}{8} r^2 \right) + C_1 + \frac{C_2}{r^2} \right\} \right\} \quad (2.34)$$

$$\sigma_\theta = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left\{ (1-\nu) \left\{ -a \left(\frac{R_2}{3} r - \frac{1}{8} r^2 \right) + C_1 + \frac{C_2}{r^2} \right\} + \nu \left\{ -a \left(\frac{2}{3} R_2 r - \frac{3}{8} r^2 \right) + C_1 - \frac{C_2}{r^2} \right\} \right\} \quad (2.35)$$

(ただし、 $C_1 = \frac{a \{ \frac{7-2\nu}{24} R_2^4 - \frac{2-\nu}{3} R_1^3 R_2 + \frac{3-2\nu}{8} R_1^4 \}}{R_2^2 - R_1^2}$
 $C_2 = \frac{a \{ \frac{7-2\nu}{24} R_2^2 - \frac{2-\nu}{3} R_1 R_2 + \frac{3-2\nu}{8} R_1^2 \}}{(1-2\nu) \left(\frac{1}{R_2^2} - \frac{1}{R_1^2} \right)}$)

なお、ここで求められた応力は実際にはコイルを構成する材料によって分担される。今回、
簡単のため線材、補強材の他は空隙として下式 (2.37) のように計算した。

$$F = \frac{(F_{sus} * E_{sus} * S_{sus} + F_{sc} * E_{sc} * S_{sc})}{E_{sus} * S_{sus} + E_{sc} * S_{sc}} \quad (2.36)$$

$$\frac{S_{sus}}{S_{sc}} = \frac{E_{sc}(F_{sc} - F)}{E_{sus}(F - F_{sus})} \quad (2.37)$$

補強材の応力分担については掛かる力を P 各材料の断面積，ヤング率，分担応力をそれぞれ $S_1, E_1, \sigma_1, S_2, E_2, \sigma_2$ として， $\sigma_1 = P * E_1 / (S_1 * E_1 + S_2 * E_2)$ ，

2.10 設計コード

前節までの設計及び計算をまとめて、設計を行うコードを開発した。

設計手順としては、まず表 2.4 に示したような設計に際しての条件や制約を決める。制約条件には最大外径 (輸送制約), 要素コイル導体間距離, 運転温度, 最大経験磁界があり, 次に線材性能や安定材量・補強材種類を調節する線材・補強材の設定を行う。

コイルの総インダクタンス L_{base} 及び端部と中央部の磁界について等, 時間を要する計算については事前に要素コイル半径を単位長さ, 流す電流を単位電流としてその他のパラメータを変えて多数のコイルモデルを作成, 求めておく。これ等のコイルモデルについて, 要求される最大蓄積エネルギーを満たすように流す電流やコイル全体のスケールを変えながら, 線材と構造材の使用量がコイル体積と一致するように電流やスケールを決定し, その中で超電導線材使用長が最小となるようなコイルを探していく。結果は, 最小線材使用長となるコイルの寸法 r, h, d, R 等, 及びその時の線材長 $l(\text{km})$, (線材体積に対する) 補強材使用量比, 最大経験磁界 B_{max} , 矩形断面電流 I_m , 超電導線材の臨界電流密度 J_c , 周方向フープ応力, などを出力する。

ここで, コイル全体のスケールを変えるとは, 組み合わせコイルの半径 r , 幅 d , 高さ h 及び組み合わせコイル間の距離 d_c 等を定数 (k) 倍することである。コイルモデルとコイルスケール k が決まると組み合わせコイルのインダクタンス $L_{real}(=kL_{base})$ と容積が決まる。最大蓄積エネルギー E_{max} は $E_{max} = \frac{1}{2}L_{real}I_{real}^2$ であるから流す電流を単位電流の何倍 (m 倍) とすれば良いかは一意に求まる。この時の磁界は単位電流単位要素コイル半径のときの磁界 B_{base} を用いて $\frac{B_{base}ms}{ks}$ である。その流す電流に必要な線材量は矩形断面電流と線材の $J_c - B$ 曲線から求まる。必要な補強材の量については断面についての応力計算式から求まる。結局, それら材料量とコイルモデルのコイル容積が等しい時が最大蓄積エネルギーの条件を満たすコイルモデルのスケールと電流になる。計算過程をまとめたフローチャートを図 2.19 に示す。

今回, コイルを設計するに当たっては, 超電導線材, 補強材, 絶縁材についてコイル中に占める割合を考えるに留め, 体積や断面積についてのみ考慮し, 線材の縦横寸法や導体形状などは考慮していない。また, 線材量・補強材量・冷却容積等のコストに指標が出来てくればコストを考慮しての重み付けを行うなども, 本コードを改良することによって容易に実現可能である。

表 2.4: 設計条件

項目	
線材	Bi 系 200A , Bi 系 300A , Y 系 200
補強材	HiN ₂ -SUS316LN , 500MPa , 300MPa
Y 安定化層 (μm)	0 , 100
温度 (K)	10 , 20 , 30 , 40 , 50
最大径 (m)	3 6
最大磁界 (T)	45, 20 , 18 , 16, 14 ,12
コイル間隔 (m)	0 , 0.015 , 0.025 , 0.050 , 0.100

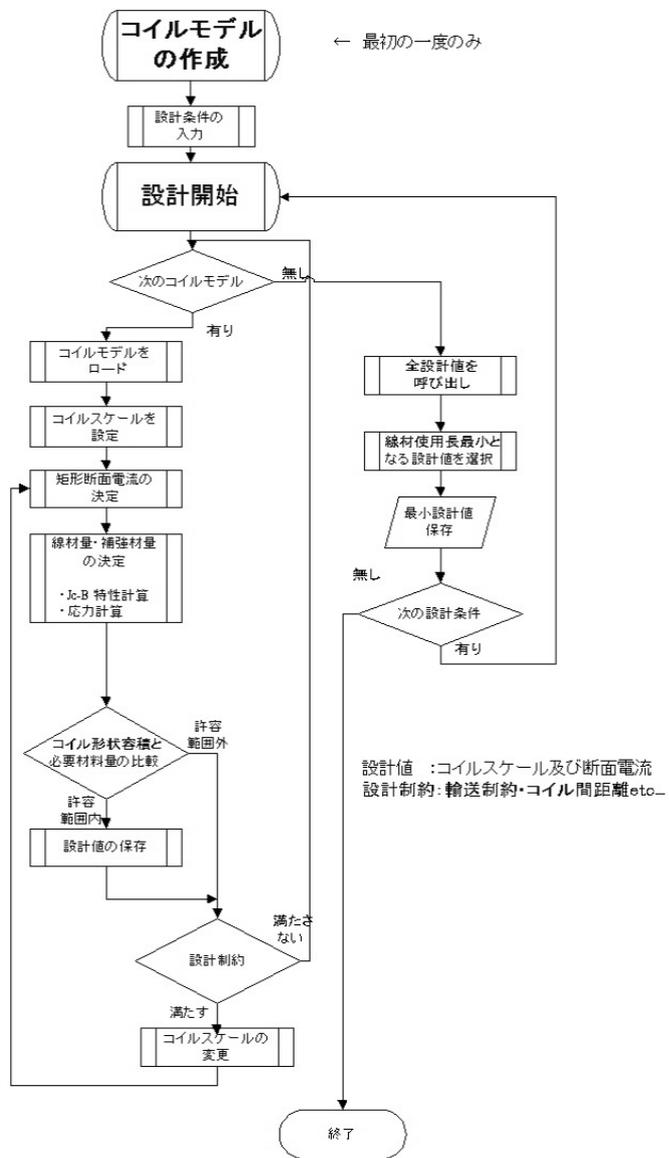


図 2.19: 設計フローチャート

第 3 章

コイル設計の結果及び考察

3.1 コイル設計結果

ソレノイドコイル，マルチポールソレノイド，トロイダルコイルについてそれぞれ容量 27.8kWh (100MJ) の SMES を温度を変えて設計した。線材には，Bi 系線材としてソレノイド及びマルチポールソレノイドには Bi 系 300A 級線材を，トロイダルコイルには Bi 系 200A 級線材を用い，Y 系線材としては 200A 級線材，補強材は高窒素含有 SUS316LN，組み合わせコイル外径 3m 以下，コイル間距離を 25mm 以上，磁界制限 18T 以下として，温度 10K，20K，30K，40K，50K について設計した。

3.1.1 10K における設計

線材使用長としてはソレノイドコイルが圧倒的に小さいものの，補強材も多くなっている。これは輸送制約いっぱいまで形状を活用しているためで，特に Bi 系では厚みを増して印加磁界角度を小さくすることを狙い，結果，厚くかつ半径方向にも大きいというフープ応力を増大する形状になり補強材は線材の 9 倍以上となっている。コイル外径制約をよりきつくして設計したところ，線材量はほとんど変わらず補強材を大幅に削減する設計となり，冷却コストとしてコイル体積に重み付けを行う等によって外れる設計と考えられる。

その他のコイル形上においては両線材とも似たようなアスペクト比となるが，Bi 系は全体的に要素コイル幅が Y 系より厚く，磁界の印加角度依存性の強い Bi 系がより低い磁界印加角度となる肉厚形状とすることによって線材量を低くしているのが分かる。

表 3.1: 100MJ 10K SMES コイルの設計

形状 線材		ソレノイド		マルチポール		トロイダル	
		Bi 系 300A 級	Y 系	Bi 系 300A 級	Y 系	Bi 系 200A 級	Y 系
使用線材長 [km]		140	153	259	245	205	220
最大経験磁界 [T]		17	12	18	18	13	15
臨界電流密度 J_c [10^9 A/m ²]		1.31	25.60	0.86	22.47	1.32	30.18
J_c 規定磁界 [T]		7.2	8.3	11.8	12.3	13.0	13.9
J_c 規定磁界角度 [°]		46	66	59	60	5.4	8.6
総インダクタンス [μ H]		9.92E-01	2.29E+00	3.08E+00	3.30E+00	7.71E-05	8.57E-05
組み 合わせ コイル	要素コイル数 [m]	1	1	4	4	24	20
	最大外径 [m]	2.95	2.59	2.80	2.73	2.95	3.00
	コイル間隔* [m]			0.056	0.055	0.842	0.871
	全体積 [m ³]	1.345	0.654	0.642	0.578	0.615	0.567
要素 コイル	平均半径 [m]	0.775	0.995	0.417	0.422	0.421	0.523
	軸長 [m]	0.233	0.199	0.250	0.253	0.028	0.050
	幅 [m]	1.395	0.597	0.292	0.253	0.421	0.209
	中心磁界 [T]	17	6	13	12	9	7
	矩形断面電流 [MA]	14.20	9.35	8.05	7.79	1.61	1.53
周方向フープ応力 [MPa]		740	692	579	612	619	627
補強材構成比		9.19	3.27	1.62	1.36	2.18	1.58

*トロイダル大半径・マルチポールコイル間隔

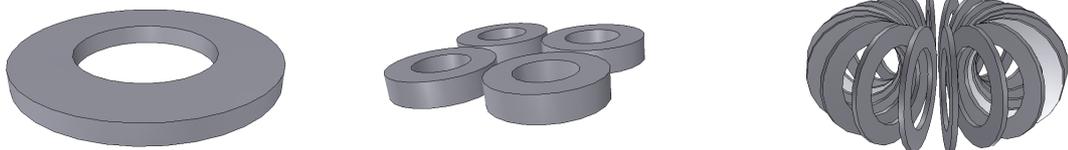


図 3.1: Y系線材 10K における設計図

ソレノイドコイル (左) マルチポールソレノイド (中央) トロイダルコイル (右)



図 3.2: Bi系線材 10K における設計図

ソレノイドコイル (左) マルチポールソレノイド (中央) トロイダルコイル (右)

3.1.2 20K における設計

10K と全体的な傾向は変わらないものの、運転温度の上昇による線材長の増加量は Bi 系では Y 系以上となっている。

表 3.2: 100MJ 20K SMES コイルの設計

形状 線材	ソレノイド		マルチポール		トロイダル		
	Bi 系 300A 級	Y 系	Bi 系 300A 級	Y 系	Bi 系 200A 級	Y 系	
使用線材長 [km]	209	193	430	316	285	280	
最大経験磁界 [T]	16	12	17	17	14	14	
臨界電流密度 J_c [10^9 A/m ²]	0.85	20.08	0.54	17.69	0.95	24.00	
J_c 規定磁界 [T]	7.4	8.1	10.7	11.8	13.6	13.4	
J_c 規定磁界角度 [°]	49	66	57	60	6.2	6.5	
インダクタンス [μ H]	1.08E+00	2.34E+00	3.01E+00	3.38E+00	7.82E-05	5.28E-05	
組み 合わせ コイル	要素コイル数 [m]	1	1	4	4	24	20
	最大外径 [m]	2.83	2.64	3.00	2.80	2.88	2.92
	コイル間隔* [m]			0.060	0.056	0.848	0.834
	全体積 [m ³]	1.245	0.682	0.833	0.641	0.663	0.650
要素 コイル	平均半径 [m]	0.786	1.017	0.431	0.434	0.424	0.417
	軸長 [m]	0.236	0.203	0.258	0.260	0.037	0.036
	幅 [m]	1.258	0.610	0.345	0.260	0.339	0.417
	中心磁界 [T]	14	6	12	11	9	9
	矩形断面電流 [MA]	13.63	9.25	8.15	7.69	1.60	1.95
周方向フープ応力 [MPa]	678	647	494	566	543	590	
補強材構成比	5.30	2.53	1.05	1.03	1.46	1.32	

*トロイダル大半径・マルチポールコイル間隔

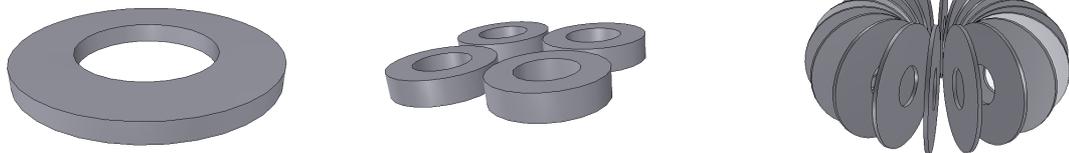


図 3.3: Y 系線材 20K における設計図

ソレノイドコイル (左) マルチポールソレノイド (中央) トロイダルコイル (右)

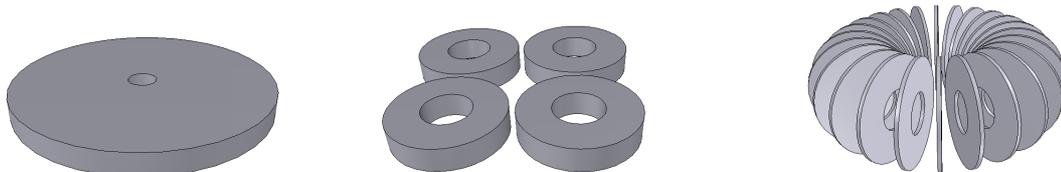


図 3.4: Bi系線材 20K における設計図
ソレノイドコイル (左) マルチポールソレノイド (中央) トロイダルコイル (右)

3.1.3 30K における設計

Bi系トロイダルコイルは個数を増やし、要素コイル厚みを増すことで印加磁界の角度低減を行っている。Bi系マルチポールソレノイドは肉厚形状では必要とする線材を納めきれず、一転して厚さが減って軸長の大きな高い要素コイルとなり、その分 20K から 30K における線材長の増加率は他の形状と比べて大きくなってしまっている。

表 3.3: 100MJ 30K SMES コイルの設計

形状 線材		ソレノイド		マルチポール		トロイダル	
		Bi 系 300A 級	Y 系	Bi 系 300A 級	Y 系	Bi 系 200A 級	Y 系
使用線材長 [km]		407	293	1024	487	411	420
最大経験磁界 [T]		15	12	11	17	13	14
臨界電流密度 J_c [10^9 A/m ²]		0.45	13.72	0.28	11.86	0.69	16.11
J_c 規定磁界 [T]		6.9	8.6	7.2	11.0	13.0	13.7
J_c 規定磁界角度 [°]		49	50	64	59	4.7	6.3
インダクタンス [μ H]		1.12E+00	2.19E+00	1.90E+00	3.24E+00	7.81E-05	7.72E-05
組み 合わせ コイル	要素コイル数 [m]	1	1	4	4	30	24
	最大外径 [m]	2.96	2.74	2.93	2.94	2.99	2.85
	コイル間隔 * [m]			0.049	0.059	0.889	0.839
	全体積 [m ³]	1.448	0.796	1.081	0.764	0.830	0.698
要素 コイル	平均半径 [m]	0.821	1.014	0.424	0.439	0.356	0.420
	軸長 [m]	0.246	0.203	0.975	0.263	0.030	0.040
	幅 [m]	1.314	0.710	0.127	0.307	0.498	0.336
	中心磁界 [T]	13	6	10	12	11	9
矩形断面電流 [MA]		13.33	9.56	10.26	7.85	1.60	1.61
周方向フープ応力 [MPa]		597	594	217	499	487	511
補強材構成比		2.76	1.71	0.12	0.57	1.14	0.66

*トロイダル大半径・マルチポールコイル間隔



図 3.5: Y系線材 30K における設計図
ソレノイドコイル (左) マルチポールソレノイド (中央) トロイダルコイル (右)



図 3.6: Bi系線材 30K における設計図
ソレノイドコイル (左) マルチポールソレノイド (×) トロイダルコイル (右)

3.1.4 40K における設計

Bi系マルチポールソレノイド及びトロイダルコイルにおいて解が得られなかった。マルチポールソレノイドについては軸長の大きなコイルモデルを用意すれば解を得られる可能性はあるがBi系ソレノイドコイルの30Kと40Kにおける使用線材長や総体積の差から、Bi系マルチポールソレノイドにおいても30Kと比べて極端に大きなものになることが予測される。運転温度を高く設定してもコイル体積が数倍となれば冷却コストは30Kの時以上に高くなってしまったためこの時の解を得る意義は薄いと考えた。Y系トロイダルコイルは要素コイル数を増やすことで磁界角度を小さくしており、線材使用長の増加率は他と比べて小さい。

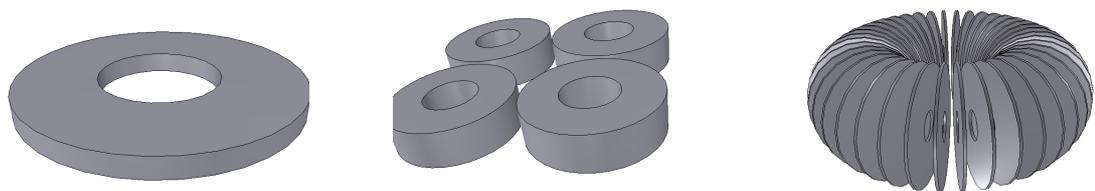


図 3.7: Y系線材 40K における設計図
ソレノイドコイル (左) マルチポールソレノイド (中央) トロイダルコイル (右)



図 3.8: Bi系線材 40K における設計図

ソレノイドコイル (左) マルチポールソレノイド (×) トロイダルコイル (×)

表 3.4: 100MJ 40K SMES コイルの設計

形状 線材		ソレノイド		マルチポール		トロイダル	
		Bi 系 300A 級	Y 系	Bi 系 300A 級	Y 系	Bi 系 200A 級	Y 系
使用線材長 [km]		2175	427		747		567
最大経験磁界 [T]		4	11		17		14
臨界電流密度 J_c [10^9 A/m ²]		0.11	9.74		7.99		12.48
J_c 規定磁界 [T]		3.7	8.1		10.7		13.2
J_c 規定磁界角度 [°]		70	48		57		3.9
インダクタンス [μ H]		1.43E+00	2.08E+00		2.60E+00		1.41E-04
組み 合わせ コイル	要素コイル数 [m]	1	1		4		40
	最大外径 [m]	2.54	2.85		2.83		2.92
	コイル間隔* [m]				0.057		0.889
	全体積 [m ³]	2.058	0.916		0.925		0.796
要素 コイル	平均半径 [m]	1.210	1.018		0.406		0.356
	軸長 [m]	2.782	0.204		0.325		0.025
	幅 [m]	0.121	0.815		0.325		0.427
	中心磁界 [T]	4	6		14		11
	矩形断面電流 [MA]	11.85	9.81		8.76		1.20
周方向フープ応力 [MPa]		99	543		432		463
補強材構成比		0.00	1.15		0.24		0.40

*トロイダル大半径・マルチポールコイル間隔

3.1.5 50K における設計

Y系ソレノイドコイル及びマルチポールソレノイドにおいてのみ解が得られた。トロイダルコイルにて解を得られなかったのは他のコイルと違い軸長方向へ大きくしていくということが出来ないためと考えられる。マルチポールコイル 40K, 50K において, 線材長は 20K と比べてそれぞれ 2.5 倍, 4 倍程度となっているが, コイル全体としては低磁界化により補強材をほとんど必要としないためコイル体積は 20K 時の二倍以下に収まっている。これは Y 系線材においては線材コストの低下が条件ではあるが比較的高温領域における SMES 実現の可能性を示している。

また、Bi系においてソレノイドコイル、マルチポールソレノイドにて輸送制約を最大外径6mまで緩めて解を探索したところ、線材使用長はそれぞれ5,000km、10,000km以上という現実的とはいえない結果を得た。

表 3.5: 100MJ 50K SMES コイルの設計

形状		ソレノイド		マルチポール		トロイダル	
線材		Bi系 300A級	Y系	Bi系 300A級	Y系	Bi系 200A級	Y系
使用線材長 [km]			633		1144		
最大経験磁界 [T]			11		12		
臨界電流密度 J_c [10^9 A/m ²]			6.71		5.65		
J_c 規定磁界 [T]			8.5		7.7		
J_c 規定磁界角度 [°]			48		64		
インダクタンス [μ H]			3.16E+00		2.16E+00		
組み 合わせ コイル	要素コイル数 [m]		1		4		
	最大外径 [m]		2.96		2.97		
	コイル間隔* [m]				0.058		
	全体積 [m ³]		1.034		1.144		
要素 コイル	平均半径 [m]		1.058		0.485		
	軸長 [m]		0.212		0.582		
	幅 [m]		0.847		0.194		
	中心磁界 [T]		6		9		
矩形断面電流 [MA]			9.62		7.95		
周方向フープ応力 [MPa]			484		249		
補強材構成比			0.63		0		

*トロイダル大半径・マルチポールコイル間隔

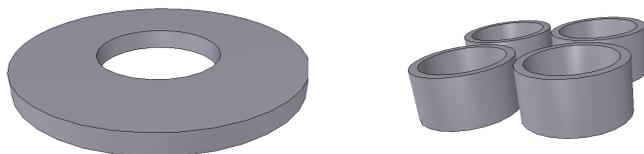


図 3.9: Y系線材50Kにおける設計図

ソレノイドコイル (左) マルチポールソレノイド (中央) トロイダルコイル (×)

3.2 各設計制約の設計に与える影響

3.2.1 線材使用長の温度依存性

超電導線材の臨界電流密度特性は温度によって大きく影響を受け、同じ磁界であっても設定温度を高くするほど臨界電流密度の特性は悪くなる。このため、高温ほど線材使用長が大きくなること、低磁界となること、等が予想される。このような設定温度による線材使用長の変化を見るために、容量 27.8kWh (100MJ) の SMES を補強材として高窒素含有 SUS316LN を用い、組み合わせコイル外径 3m 以下、コイル間距離 25mm 以上、磁界制限 18T 以下にて温度を 10K、20K、30K、40K、50K と変えてマルチポールコイルを設計した。線材は、Bi 系 200A 級線材、Bi 系 300A 級線材、Y 系 200A 級線材、Y 系 200A 級線材 (100 μ m の安定材有り) としている。結果を図 3.10 に示す。

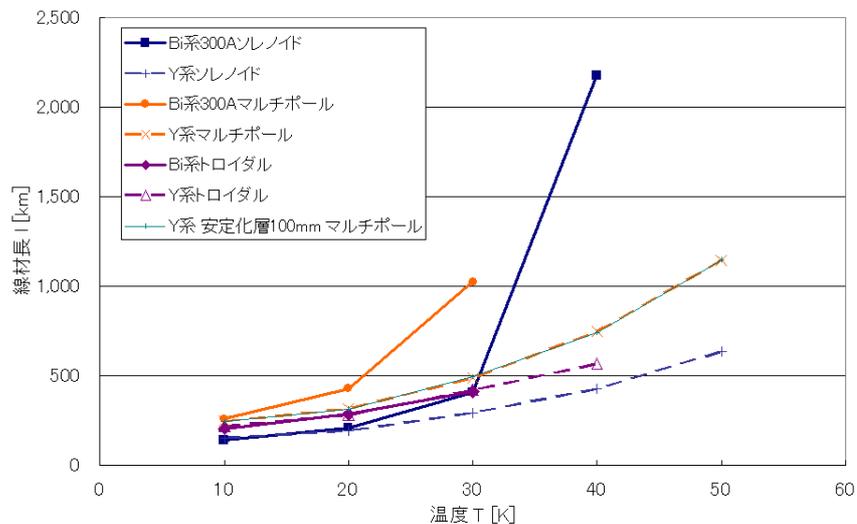


図 3.10: 線材使用長の温度依存性

Bi 系は温度依存性が大きく、10K では 200A 級線材が Y 系とほぼ同程度の線材使用長となっているが、40K 以上では 20K の時と比べて約 10 倍となり、結局 Bi 系では 40K 以上の解析を行う意義は薄い。一方、Y 系においてはそこまで顕著な差は見られず、40K では 20K の 2 倍程度、50K では 20K の 4 倍程度となっている。また、Y 系線材に安定化層 100mm を加えた場合のマルチポールソレノイドの線材使用長は安定化層無しの場合とほとんど変わらない。これは線材の断面積を二倍に、つまり工業的臨界電流密度は半分となったことになるが線材使用長に大きな影響を与えないことが分かる。

次に、10K ~ 30K の温度領域における結果を調べるために先のグラフの一部を拡大したものを図 3.11 に示す。

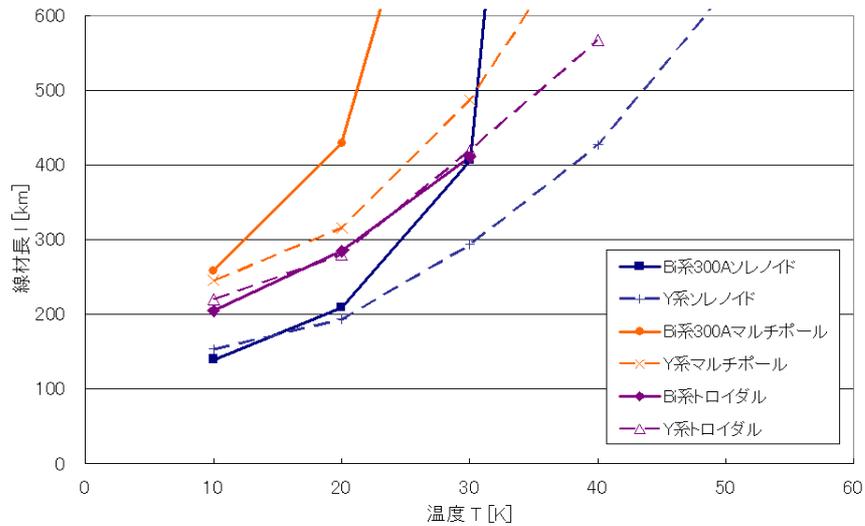


図 3.11: 線材使用長の低温域における温度依存性

30K 以下においては全体的に線材や温度によらずソレノイドコイルの線材使用長がもっとも少ないのは低温超電導体を用いた場合と変わらないが、マルチポールソレノイドとトロイダルコイルの結果は低温超電導体を使用した場合に想定されたものとは逆に、トロイダルコイルの方が少ないという結果になっている。これは線材の性能が角度依存によって変化する高温超電導線材には角度低減効果を有するトロイダルコイルが有効である可能性を示している。

3.2.2 最大経験磁界に制約を掛けた場合の影響

これまで、磁界には 18T 以下という制約を掛けてきたが、これはマルチポールソレノイドの一部にて制約無しでは 25T 以上など高磁界の解が生じるためである。しかし、このような強い磁界を許した設計が、現実に成立するとは考えにくい。本研究においては、ローレンツ力による応力について圧迫力、向心力、転倒力などは設計条件として考慮しておらず、他にも支持固定部等の箇所において応力集中が生じることや、線材の何倍もの補強材を必要とするような応力に対して、補強材を用いたところで実際に線材が耐えられるかどうかなどは重要であるが今回は考慮されていないためである。

磁界について、12T, 14T, 16T, 18T, 20T, 45T 以下であることを制約に加えてのマルチポールソレノイドの計算結果を図 3.12 に示す。設計条件は容量 27.8kWh (100MJ) の SMES を線材に Y 系 200A 級線材及び、Bi 系 200A 級線材、補強材として高窒素含有 SUS316LN を用い、組み合わせコイル外径 3m 以下、コイル間距離 25mm 以上に温度 20K のマルチポールソレノイドとして設計した。

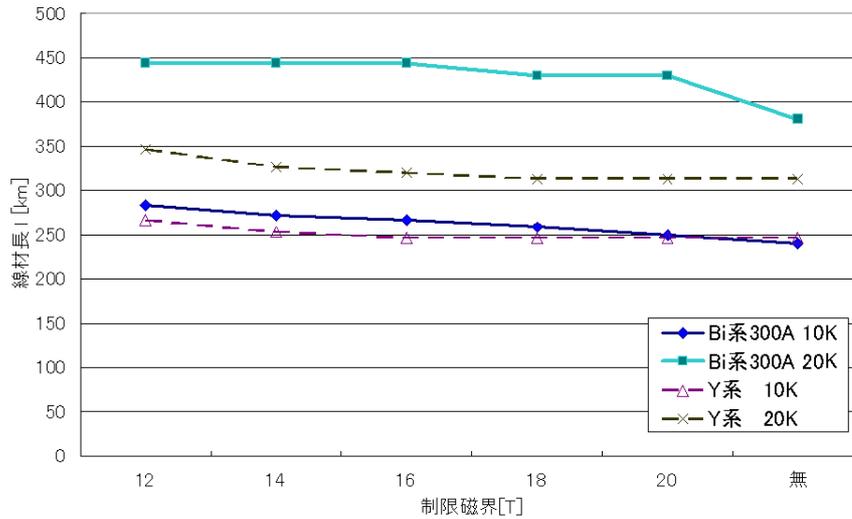


図 3.12: 磁界制約条件下における線材使用長

磁界に制限を掛けてしまうと線材使用長が変わってしまう。コイル形状の変化を見るためにさらに図 3.13 に、磁界に制限を掛けた場合の Bi 系 300A マルチポールソレノイド 10K における要素コイルの平均半径・幅・軸長及び要素コイル体積について示す。取れる磁界強度が小さくなるほど要素コイルの幅が小さく、軸長が大きくなっていくことが分かる。

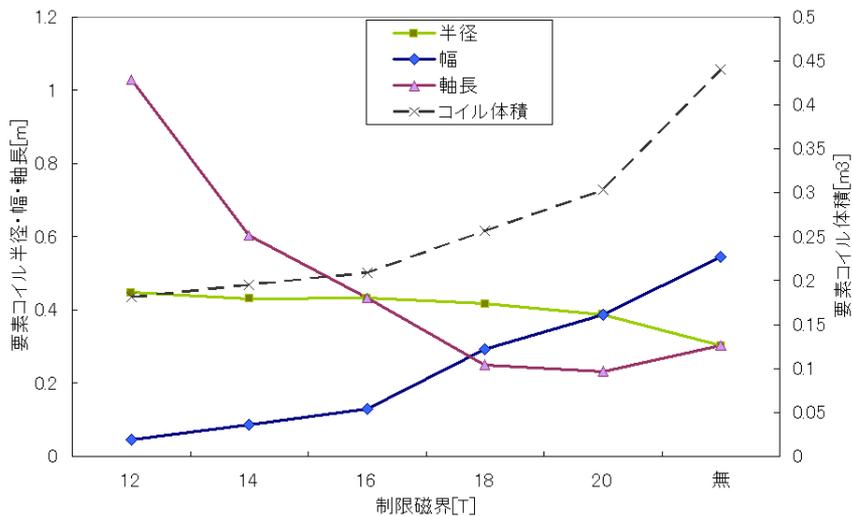


図 3.13: 磁界制約条件下におけるコイル形状

磁界角度を小さくするために幅を厚く取っていた構造が高磁界化を招いていたこと、低磁

界領域では線材使用長は大きくなるもののコイル体積は小さくなっており、高磁界領域における設計の容易さだけでなく、冷却コストを考えることによっても高磁界領域の解が出なくなることも予想される。本研究においては現在の最高磁界マグネットとして [31] による 18.1T があり、低温とのハイブリット運転であること、電流やコイルのサイズが大きく異なること、など設計値として扱うには問題があるが、とりあえずの設定として最大磁場は 18T とした。

3.2.3 補強材強度を変更しての設計比較

これまで用いてきた補強材は高窒素 SUS316LN であり、それ自体が高価となることが予想される。そのため、補強材の設計値をこれまでのものに加え 500MPa, 300MPa とした二つの場合について、線材量、補強材料がどのように変わるかを検討した。マルチポールソレノイドについて容量 27.8kWh (100MJ) の SMES を温度を変えて設計した。線材には、Bi 系線材として Bi 系 300A 級線材を、Y 系線材としては 200A 級線材、補強材は高窒素含有 SUS316LN, 500MPa, 300MPa, 組み合わせコイル外径 3m 以下、コイル間距離を 25mm 以上、磁界制限 18T 以下として、温度 10K, 20K, 30K, 40K, 50K について設計した。

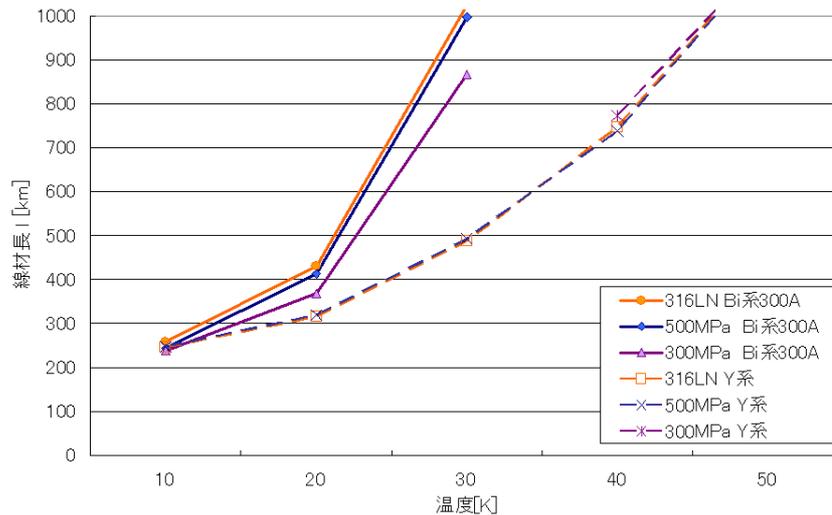


図 3.14: 補強材の設計限界と線材長

結果、線材使用長はほとんど変化しない。ただし、Bi 系マルチポールについては 500MPa で線材長が若干減少し、300MPa では大幅に減少している。これは補強材を多量に用いコイルを肉厚な形状にすることで磁界の印加角度を小さくするコイル形状を作成しているためで、コイル全体積は 760MPa の際の三倍以上となっており、冷却コストを考えると一概に有利な結果とはいえない。

なお、補強材の強度 300MPa というのは補強材以上の設計限界を持たせている Y 系にとっては補強材を用いないという条件に等しいが Y 系はこの際、低温において解を持たない。これは要素コイル厚さが要素コイル平均半径の 0.1 以下となる際のモデルを作っていないためである。このようなモデルは作成したところで輸送制約下においてはコイル厚さ 10cm 程度

かそれ以下となるような設計であり、高温超電導洗剤の主要な巻き方であるパンケーキコイルの製作に問題が出ると思われる。トロイダルでは磁界の印加角度は元から低いため、補強材を弱くして体積が増えると流す電流の多い形状となることで必要な線材量は増加した。トロイダルコイル 300MPa においては両線材において解を有さない。

3.2.4 要素コイル間距離制約と組み合わせコイルの形状

ここまで、SMES コイルとして論じてきたものは正確には超電導線材、補強材、導体間絶縁であり、コイル導体部のみであり、現実にはコイル外側にさらに対地絶縁や構造材が必要である。そのため、この要素コイル間距離を変化させた場合についてトロイダルコイルとマルチポールソレノイドの二種類で論じる。

なお本研究においてはコイル導体外周に 10mm の対地絶縁を施し、5mm 程度のコイル間構造材を想定し、設計では合わせて要素コイル導体間距離 25mm 以上とした。

3.2.5 マルチポールソレノイド

設計条件は容量 27.8kWh (100MJ) の SMES を線材に Y 系 200A 級線材及び、Bi 系 200A 級線材、補強材として高窒素含有 SUS316LN を用い、組み合わせコイル外径 3m 以下、温度 10K、20K、30K、磁界 20T 以下の条件下でコイル間距離を 0mm 以上、25mm 以上、50mm 以上、100mm 以上と変えてマルチポールソレノイドコイルを設計した。

表 3.6: 要素コイル間距離制約と線材長 [km]

線材 コイル間距離	10K	20K	30K	40K	50K
Bi 系 0mm	255.3	416.3	1024.1	×	×
Bi 系 100mm	256.5	441.5	1024.1	×	×
Y 系 0mm	245.3	317.5	489.465343	737.3	1142.7
Y 系 100mm	244.3	314.4	494.2661841	741.8	1148.3

組み合わせコイルの相互インダクタンスに着目するなら大きいほど有利なはずであり、つまり離れるほど線材長は長くなるはずであるが、今回設定したコイル間距離の制約内にて、特に大きな差は見られなかった。

コイルを近づけるとコイル端部に印加する磁界の角度が大きくなってしまいうため、要素コイル間隔が大きくなっても導体使用長は変わらないと当初考えた。しかし、実際には輸送制約としての組み合わせコイル外径 3m 以下が大きく効いてきており、コイル中心間距離はほとんど変わらず、臨界電流密度もおよそ一緒。コイル中心間距離が同じであるため、相互インダクタンスの差はコイル形状の差の分、つまり要素コイル幅が薄くなりその分軸長が大きくなることによる変化分、でしかない。

3.2.6 トロイダルコイル

設計条件は容量 27.8kWh (100MJ) の SMES を線材に Y 系 200A 級線材及び, Bi 系 200A 級線材, 補強材として高窒素含有 SUS316LN を用い, 組み合わせコイル外径 3m 以下, 温度 10K, 20K, 30K の条件下でコイル間距離を 0mm 以上, 15mm 以上, 25mm 以上, 50mm 以上と変えてトロイダルコイルを設計した。

トロイダルコイルでは要素コイル数を増やすほど理想的なトロイダル形状に近づき線材に印加する磁界の角度が小さくなり, 線材使用長が小さくなると予想されるが, トロイダル外径 r_{out} , トロイダル内径 r_{in} , 要素コイル数 N を固定して要素コイル間距離 l_{coil} を変えた場合に図 3.15 のような形状となる。結局, 要素コイル数がある程度大きいと要素コイル高さ h と要素コイル間距離 l_{coil} はトロイダル内周 $l_{in}(= 2\pi r_{in})$ に対して $l_{in} = N(h + l_{coil})$ と近似できることから, l_{in} 固定として要素コイル数 N を増やすと組み合わせコイル全体の高さ $H(= hN = l_{in} - l_{coil}N)$ が小さくなり, 組み合わせコイル体積を大きく取りにくい形状となっている。つまり輸送制約条件下で要素コイル間距離を設けつつ, 要素コイル数を増やしすぎると, 今度は疎なコイルとなってしまい最適なコイル形状を保てなくなる。

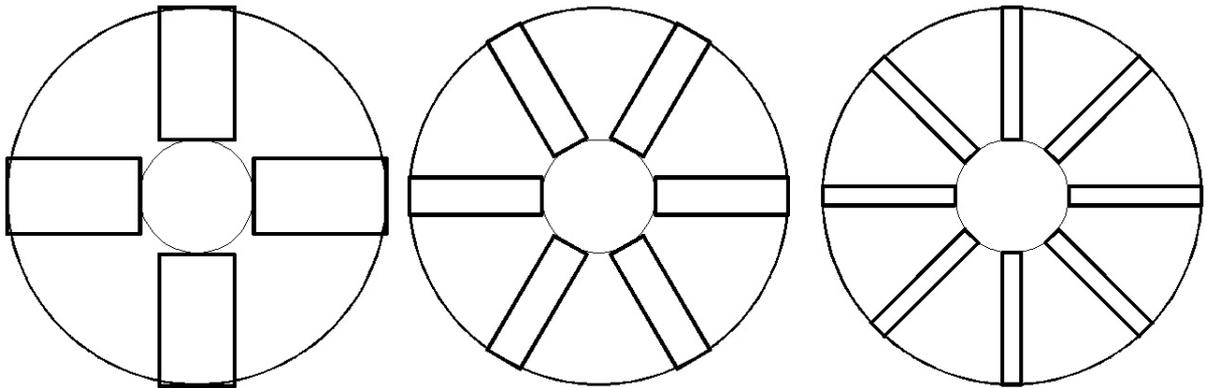


図 3.15: 要素コイル数と要素コイル軸長

温度 20K の場合の設計結果を Bi 系について表 3.16 に, Y 系について表 3.17 に示す。

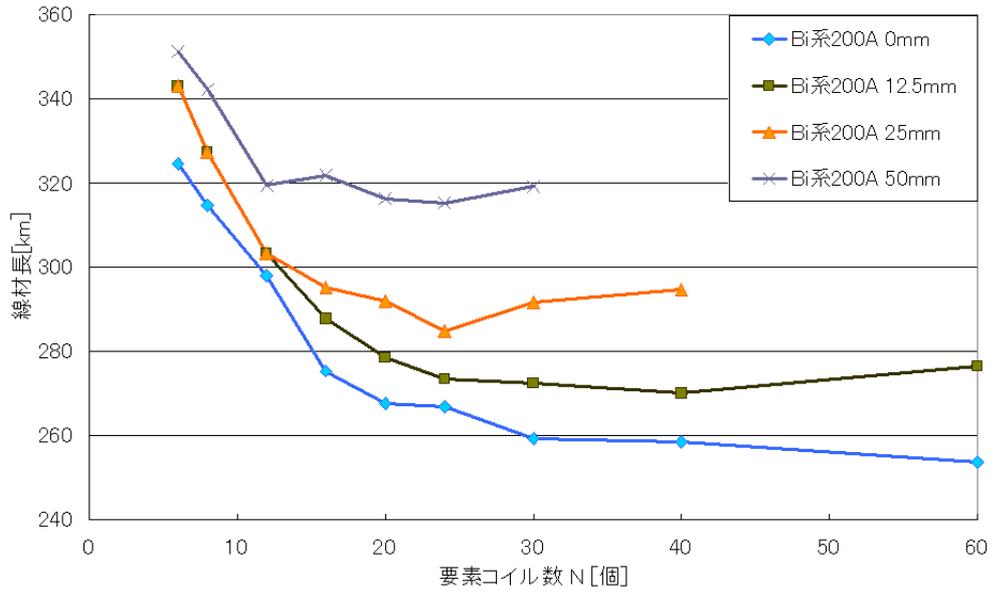


図 3.16: Bi 系トロイダルコイルの要素コイル間距離依存性

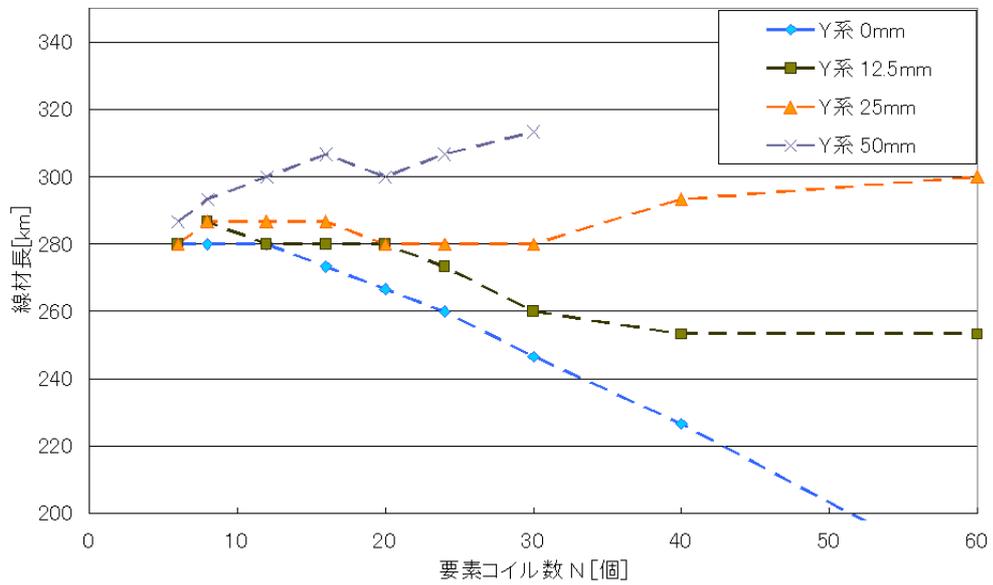


図 3.17: Y 系トロイダルコイルの要素コイル間距離依存性

要素コイル間距離が 0mm の時にはコイル数を増やすほど線材使用長は減っている。コイル間距離 0 であれば要素コイル数を増やした時に、組み合わせコイル全体の高さは変わらず、線材に印加する磁界角度だけが小さくなる。Y 系 40 個以上で特に減りが大きいのが、これは 2.9 で示した通り印加磁界の角度が 10° 以下の領域に入ると臨界電流密度特性が急激に上昇するためである。

しかし、要素コイル間距離を考慮するとそのような理想的な設計は出来なくなり線材使用長を最小化する要素コイル数が現れる。30 個以上に解が無い設計条件があるのは外径 3m 以下という輸送制約下で要素コイル間距離まで大きく定められてしまうと、要素コイル数を多くした場合に解の得られないことを表している。

3.3 各種コイル形状に関する考察

3.3.1 マルチポ - ルソレノイドに関する考察

高磁界化の生じた理由に関する考察

10K モデルにて 28T が最良となる結果を出した理由について考え、併せてコイル形状と線材長の関係を見る。まず、単純のためにソレノイドコイル一つ、コイル矩形断面に流せる電流 I は任意かつ電流密度は均一とした状態で自己インダクタンス L を比較する。 $Et = \frac{1}{2}LI^2$ であるから、コイルの L が大きいほど流す電流は少なくて済む。自己インダクタンス L はコイルに 1A 流した時に作る磁界が自身に鎖交する磁束量である。コイル半径を固定した場合、単純に形だけを考えるのであれば軸長もコイル幅も 0 となる線電流が良い。しかし、現実のコイルは軸長と幅を要し、それがインダクタンス低下につながる。

これは簡単のために二本の円電流コイルで考えると分かりやすい。コイル軸長及び幅を各 2mm、平均直径 40mm の同軸コイルの場合を想定し、

- a, 軸方向に同心で直径 30mm と 50mm の場合を幅方向用に、
 - b, 直径 40mm で軸方向に 4mm 離れている場合を軸長方向用に、
 - c, 直径 40mm で 2turn のものを比較用に、
- それぞれ図 3.18 用意し、 I A 流すとする。

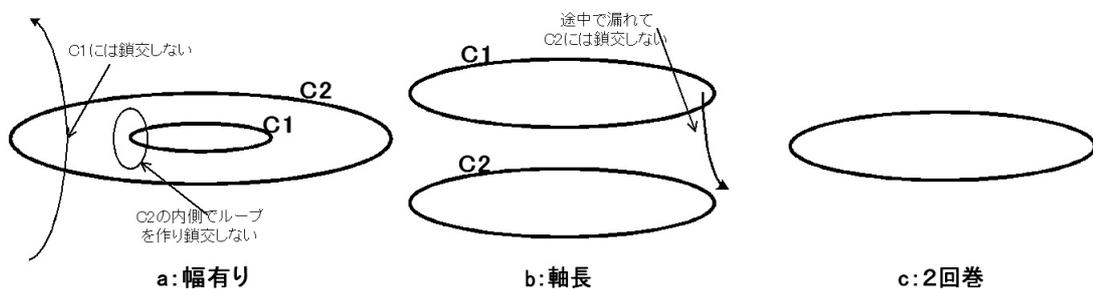


図 3.18: 円電流の位置と鎖交磁束

これらの自己インダクタンス L_1, L_2 と相互インダクタンス M から蓄えられるエネルギー E は $E = \frac{1}{2}(L_1 I^2 + L_2 I^2) + MI^2$ となる。結果を次表 3.7 にまとめると

表 3.7: 円電流とインダクタンス

モデル	L_1 [H]	L_2 [H]	M [H]	E
a: 幅有り	6.01E-08	1.16E-07	2.09E-08	$\frac{1}{2} 2.18E-07 I^2$
b: 軸長	8.70E-08	4.35E-08	8.70E-08	$\frac{1}{2} 2.61E-07 I^2$
c: 2 回巻	3.49E-07			$\frac{1}{2} 3.49E-07 I^2$

総線電流長は $80\pi\text{mm}$ で等しいにも関わらずインダクタンスに差が出て同じ電流であれば蓄えられるエネルギーは幅方向にも軸長方向にも広がりを持たない c モデルであることが分かる。これは、a モデルでは外側の円電流の作る磁界の一部しか内側の円電流とは鎖交しておらず、内側の円電流の作る磁界も外側の円電流より内部でループしている分は鎖交とならない等、発生した磁束と鎖交する磁束に差があるためである。b についても鎖交する前に漏れてしまう磁束がある。一方、c はそれぞれの作る磁束線すべてがもう一方と鎖交するモデルであり、このような差がインダクタンスの違いとして現れている。実際の軸長方向、幅方向に長いモデルについても、このように分割して考えれば長くなるほどインダクタンスの低くなる理由は分かる。しかし、28T モデルを見ると要素コイル軸長も要素コイル幅も他の制限を加えたコイルよりも大きく、変わりに要素コイル平均半径が経験磁界に制限を加えたモデルと比較して小さくなっている。

そこで次に、これまでの考察にて固定としていた平均直径を変えてみた。同じ貯蔵容量なら平均直径 R の大きい方が鎖交磁束量は大きくなりインダクタンスも大きくなる。つまり、コイル断面に流す電流は少なくすむ。しかし、線材長 l は n 回巻として $l = n \times \pi R$ となり、半径が長いほど 1 巻辺りの線材長は多くなる。

そこで、平均直径と線材長の関係を調べるために線電流は 1 巻辺り 100A 流せるとして、100J を蓄えるために各コイル形状ではどれだけの線電流長が必要であるかを調べた。なお、線電流長は (平均直径) \times (巻数) で定義し、巻数は各コイルで 100J 蓄えるのに何 A 必要かによって決まる。結果を図 3.19 に記した。

全体的に平均直径が小さいほど線電流長は小さい。

しかし、軸長 1mm、幅 10mm のモデルと比較すると、平均直径が 90mm の時は矩形断面を流れる電流は 990A であったのが 30mm の時では 2060A となっている。

このように、コイルサイズを小さくして線電流長を小さくするというのは、コイルに流す電流を大きくすることになる。当然、半径の小さいコイルに大きなインダクタンスであるから磁界は大きくなる。つまり、矩形断面電流及び磁界の大きくなるモデルであり、現実的には断面積を考えなければならない上、超電導線材の $J_c - B$ 特性や補強のことを考慮すると幅や軸長の方向で大きくなってしまふことになり、幅や軸長が大きくなれば使用線材長が大きくなるのは図 3.19 の通りであるため、超電導コイルにとって特に好ましい条件ではない。事実、輸送制約としての外径 3m を外せば制約のある時より線材使用長を削減できる設計となることが多い。

そこで、全体の設計を比較してみた。容量 27.8kWh (100MJ) の SMES を Bi 系 200A 級

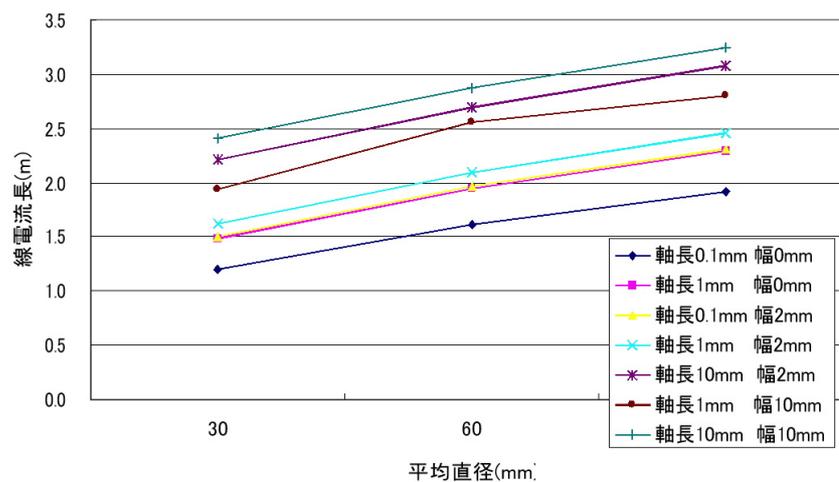


図 3.19: 平均直径と線電流長の関係

線材，高窒素含有 SUS316LN を用い，組み合わせコイル外径 3m 以下，温度 10K の条件下でコイル間距離を 25mm 以上としたモデルについて，磁界に 18T 制限を加えた場合と加えない場合の二つの設計値を以下 3.8 に示す。

表 3.8: 磁界制限による設計の違い

項目	磁界制限無し	20T 磁界制限
超電導線材	239.1649049	253.435518
要素コイル半径 (m)	0.274	0.3879
要素コイル幅 (m)	0.4384	0.3879
要素コイル軸長 (m)	0.3836	0.23274
組み合わせコイル外径 (m)	2.4511	2.8917
最大経験磁界 $B_{max}(T)$	28.3292	19.3415
総インダクタンス $M(H)$	2.64134E-07	6.18066E-07
矩形断面電流 $I_m(MA)$	13.7628	8.9959
超電導体電流密度 $J_c(10^9 A/m_2)$	1.0474	0.9148
周方向応力 (Mpa)	669.028	619.0929
補強材比	3.3877	2.1762

表 3.8 のように，半径を小さくした分，軸長や幅が大きくなっており，総インダクタンスは小さくなっている。結局，インダクタンスの小ささを補うために矩形断面を流れる電流が大きくなっていることと，高い磁界によって生じる大きなフープ応力を支えるために線材量の 3.3 倍という補強材を使用していることが分かる。

また，最大経験磁界が大きいにも関わらず超電導線材の電流密度特性は良くなっている。こ

これは、高温超電導線材独自の現象であり、電流密度の特性が線材に印加する磁界の大きさだけでなく図 2.7 で示したように角度方向によっても変わり、角度が小さい場合なら高い磁界でも大きな電流を流せる。

コイル中心部に印加する磁界の大きさである最大経験磁界及びコイル端部に印加する端部磁界の大きさと角度を次表 3.9 に示す。最大経験磁界の角度は 0^{circ} である。

表 3.9: コイルの印加磁界

磁界制限	最大経験磁界	端部磁界大きさ	端部磁界角度
なし	28.3T	19.2T	10.7°
20T 以下	19.4T	15.9T	21.0°
18T 以下	17.9T	14.8T	26.7°

他のデータも当初マルチポールコイルの印加磁界角度として想定していたものより低い、磁界制限を掛けなかった時の端部磁界角度 10.7° は極端に低い。

単ソレノイドコイルの形状と端部磁界角度の関係を 3.10 に示す。なお、直径 50mm、幅 20mm,35mm,45mm の場合について軸長 20~100mm に渡って調べることで、その範囲においては軸長方向大きさの影響はほとんど見られないこと、それでも内径の小さな領域では軸長方向の大きな方が若干角度が小さくなることを確認した。

表 3.10: コイル形状と端部磁界角度

内径	外径	高さ	コイル角度
30	70	60	24.5
15	85	60	13.2
5	95	60	5.6
5	75	60	6.5
5	155	60	4.1

3.10 より磁界の角度はコイル内径を小さくすることでかなり小さく出来る。つまり、28T 設計は要素コイル半径を小さく、要素コイル幅を大きくすることで要素コイル内径を小さくし、さらに軸長方向も他の場合と比べて大きくするなど、端部における磁界の印加角度を小さくする設計となっていたと言える。また、ここまで見てきたことで、他の Bi 系マルチポール設計においても軸長方向よりもまず幅方向へ大きくなって内径を小さくしており、印加磁界に制限を加えられたり高温になって高磁界に絶えられなくなるにしたがって低磁界となる軸方向長へ伸びていったこと、高い最大経験磁界に関わらず磁界印加角度が低いために電流密度特性が悪くないよう、設計条件を変えた際の Bi 系の触れ幅が Y 系と比べて大きいのは高磁界での 10~90° の領域において図 2.7, 2.9 の示す通り Bi 系の感度が高いのが原因と考えられる。

3.3.2 トロイダルコイルに関する考察

3.3.1 節にて見てきたコイル形状に関する考察を考慮すると、トロイダルコイルがエネルギーを貯蓄するという条件に対して特に適しているわけではないことが分かる。

最大経験磁界を見ても、マルチポールコイルの結果と比較して、ではあるが特に大きな磁界というわけではない。トロイダルコイルの特長は大きくコイルに印加する磁界の角度を小さく出来ること、漏洩磁界の小さなことの二点となる。印加する磁界の大きさと角度が小さいことから線材の電流密度特性はマルチポールの時と比べて全体的に約4割ほど増えており、これがトロイダルコイルの高温超電導体を用いたコイル設計における優位性に繋がると考えられる。

3.4 各種形状と漏洩磁界

磁界が開いた系である単一ソレノイドコイル型と比べてトロイダルコイル型のような閉じた系は漏洩磁界の領域が圧倒的に少なくなり、またトロイダルコイル型でも要素コイル数を増やすほど漏洩磁界を少なく出来る [32]。

SMES はその用途より変電所や需要家近傍に設置されることになる。この際、周辺への漏洩磁界の影響を考慮しなくてはならない。特に今回のような高磁界 SMES においては正確に知る必要があると共に、漏洩磁界の強い領域は5 ガウスラインとして立ち入り禁止区域等とする必要も出てくるため用地活用の点でも漏洩磁界の低減が必要となる。なお、5 ガウスの規定についてはICNIRP(時間変化する電界、磁界及び電磁界による曝露を制限するためのガイドライン) によって静磁界から数十 Hz という領域において公衆に対して求められている値を参考にした [33]。

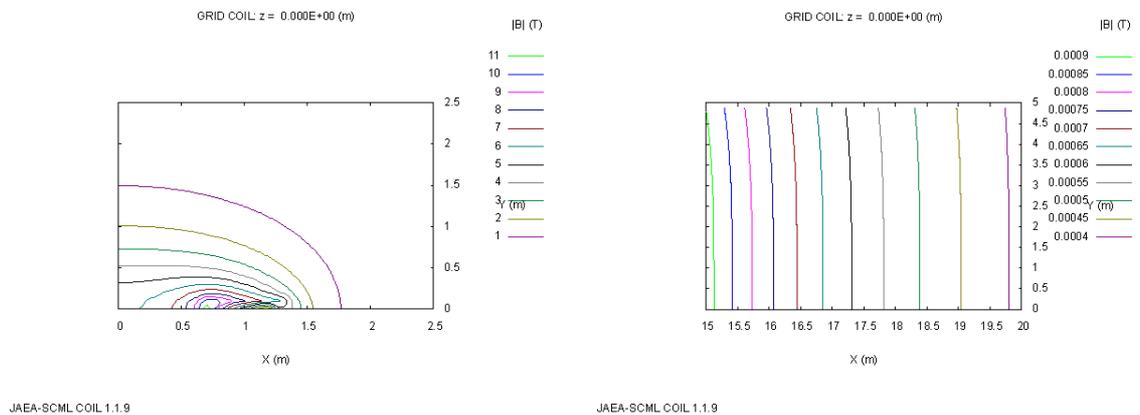


図 3.20: ソレノイドコイル形状における周辺及び漏洩磁界

今回の設計結果について Y 系 20K について磁界分布を調べた結果を図 3.20, 3.21, 3.22 に示す。磁界分布図は各種組み合わせコイルの中心を原点に取り、上から見た時のその第一象限を示している。横軸の二乗と縦軸の二乗和の平方根が中心からの距離となる。ただし、ソレノイドについては磁界がコイル周方向には一定なため横軸は中心からの径方向距離、縦軸は軸長方向距離としている。また輸送制約により組み合わせコイルの外半径はおよそ 1.5m である。

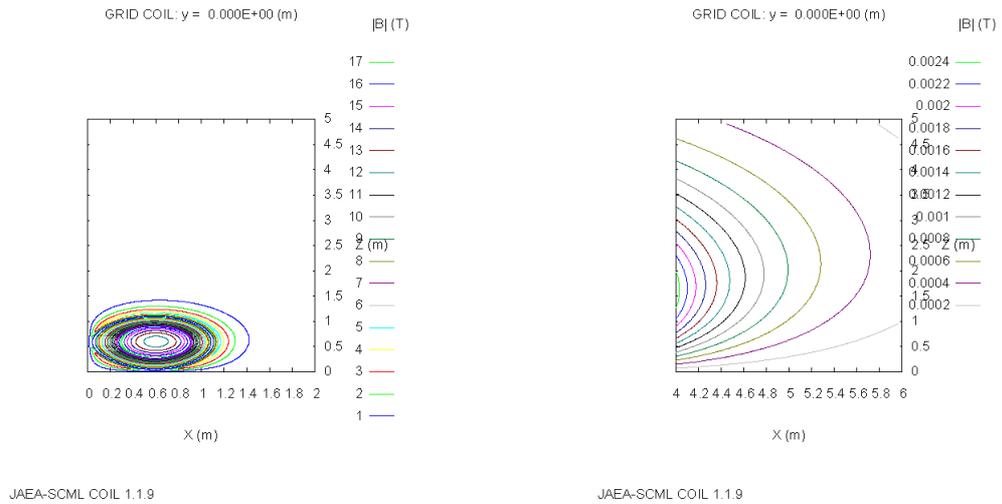


図 3.21: マルチポールソレノイド形状における周辺及び漏洩磁界

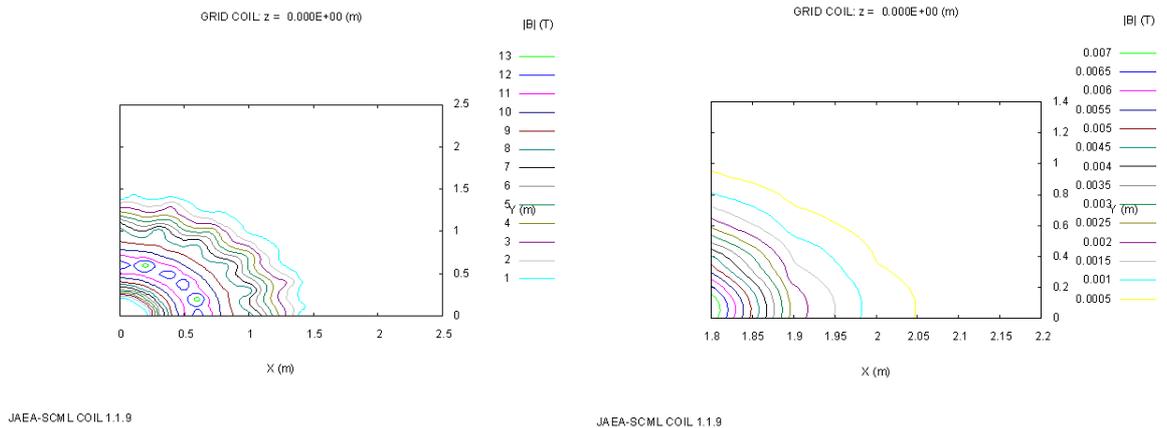


図 3.22: トロイダルコイル形状における周辺及び漏洩磁界

これを見ると 1T まではどれもすぐに減衰しているもののそれ以降は圧倒的にトロイダルコイルの漏洩磁界の小さいことがわかる。また、磁界の開いているソレノイドコイルは 18m 以上の 5 ガウスラインが必要となっており、工場や変電所に置くといったことが難しい。なお、同様にトロイダルコイル要素コイル数 6 個の場合、24 個の場合 (B i 系 20 K 設計) を調べてみたところ、6 個において 4.22m、24 個において 1.99m であった。各々の 5 ガウスラインについて調べた結果を表 3.11 に示す。

SMES の外半径は輸送制約より 1.5m 程度であり、それに対して 5 ガウスラインが 2m 程度であるトロイダルコイルの要素コイル数 20 個以上は十分な磁界閉じ込め効果を持つといえる。以上から印加磁界角度の低減という面だけではなく、漏洩磁界の面からも要素コイル数のある程度多いコイル設計が望ましいことが分かる。

表 3.11: Y系線材 20K 設計における各種コイル形状の漏洩磁界

形状	トロイダルコイル			マルチポール ソレノイド	ソレノイド コイル
	要素コイル数	6	20		
5Gauss Line[m]	4.22	2.05	1.99	6.32	18.4

3.5 まとめ

Bi系を用いる場合、角度依存が大きく効いてくるため、トロイダルコイル形状が良い。一方、Y系においても線材使用長はトロイダルコイルの方が総じて少ないものの、その差はBi系ほどに大きくはない。トロイダルコイルは要素コイル数が多く、全体の機械設計もマルチポールコイル以上に難しくなる可能性もあり、Y系 SMES の設計に当たってはより詳細を判断する必要がある。5 Gaussラインに着目して漏洩磁界を考慮する場合、トロイダルコイルが優れているが、総じて高磁界となっているにも関わらずマルチポールソレノイドも設置する場所によっては十分に現実的な値といえる。Y系線材の高温域での強さと共に、Bi系も低温域においては十分に産業応用の可能性があることを示した。以下に、これまでの設計結果を考慮して、各条件下での SMES コイルモデルの提案を行う。

Bi系線材のみ線材製造が工業レベルに達した場合

10K 及び 20K における Bi系を用いたトロイダルコイル設計が挙げられる。

両線材の線材製造が工業レベルに達した場合

Bi系トロイダル及びY系トロイダル・Y系マルチポールが対象となる。線材長から見ればトロイダル形状が有利であるが、現実にはいずれが採用されるかは更にその時点におけるコストによる重み付けを行い、製造コストなども考慮しての詳細なコスト設計が求められる。

両線材の線材製造が工業レベルになったが、コスト低減が実現されなかった場合。

上の条件とほとんど変わらないが、この場合、設置箇所によっては線材使用量に着目して10K程度におけるソレノイドコイルの考慮される可能性がある。

Y系線材の線材製造が工業レベルになり、線材コストの大幅な低減が実現された場合。

低温時と比べ体積が増えるため冷却コストと併せて考える必要はあるものの、高温領域と比べて良い40K、50K領域にてのY系を用いたソレノイドコイル設計が挙げられる。漏洩磁界が気になるのであれば40K Y系トロイダルコイルも考えられる。

第 4 章

結論

4.1 結論

本論文では、超電導電力貯蔵装置 SMES 用コイルを対象とし、高温超電導線材を用いての設計を行い、高温超電導線材を用いた SMES 大容量化を行う上での SMES コイル形状に関する提示を行った。また、Bi2223 系線材及び Y 系線材について設計に際しての条件や制約を様々に変えての設計を行うことで各設計制約ごとに有効な線材及び設計について論じた。

まず第 1 章において、高温超電導発電 SMES を取り巻く背景についてまとめた。第 2 章においては設計手法として、先に複数個のコイルモデルを作成し、それぞれ貯蔵容量制約、コイル容積制約からそのコイルスケール及び流す電流を決め、最小線材使用長モデルとする設計コードを開発した。相互インダクタンス計算等の積分計算を先に済ませて繰り返し計算部には含ませないことで条件を変えての繰り返し計算に適したコードとなっている。

第 3 章では第 2 章で作成した設計コードを用いて、実際に様々な設計条件を課して、設計結果がどのように変わるかの検証を行った。

まず温度条件を変えての設計によって 40K 以上では Bi 系は設計が難しく、輸送制約を緩めて無理に作成しても桁違いの線材使用長となることが分かった。Y 系についてはそれほど極端ではないものの 40K で 20K の二倍以上という結果であった。10K では 20K までと比較して冷却コストが増大となり、熱的安定性も低下する等マイナス要素も多いものの、Bi 系において線材使用長が 20K の 3 割程度、Y 系においても 2 割程度の削減となるため冷凍コストとのバランスとはなるがコスト低減の可能性は高い。

次にマルチポールソレノイドにおいて高い磁界を許す解が発生しているため、磁界に制約を果たした際のコイル設計条件の変動を見た。今回は仮に最大経験磁界 18T 以下を設計基準としている。

補強材については 20K において降伏応力 1140MPa、破壊応力 1620MPa という高い機械特性を有する高窒素の SUS316LN を考え、760 MPa を補強材設計限界としているが、これは高価なため補強材設計限界を 500MPa 及び 300MPa とした場合の設計を行い、コイル体積が大幅に増加することを確認した。補強材使用量については線材使用長と合わせてコスト配分に合わせた重み付けを行うことで考えるべきであるがいずれにしても SMES のさらなる大容量化には高性能な補強材は必要と思われる。

SMES 要素コイル同士について、最低限の絶縁等を設けるためにはコイル導体間に一定の間隔が必要である。これを設けた場合、トロイダルコイルの線材長を最小にする要素コイル

数が一意に決まり，その要素コイル数は温度や要素コイル間距離の設定によって変わるが 16 から 30 程度に収まることを示した。

線材使用長を見ると全体的にソレノイドコイルが優れ，次いでトロイダルコイルとなったが，漏洩磁界を見るとトロイダルコイルが圧倒的に優れ，ソレノイドコイルは 5 ガウスラインが温度 20K の Y 系で 18.4m と使用できる場所が極めて限定されてしまうことが分かった。

Bi 系線材は [8] にみられるように現在更なる高性能化，300A 級線材化を目指した研究が進められており，これを仮に現状 200A 級線材の 1.5 倍の電流特性が実現されるとした設計での線材使用長は 10K，20K において最小である。一方，Y 系線材の長尺化も着々と進んでおり，本研究においては基板厚さ $1\mu\text{m}$ に対して超電導層 $1.5\mu\text{m}$ としているが，超電導層の厚膜化による電流特性向上の余地は高い。

高温超電導線材に関しては将来的なコスト面，性能面における Y 系線材の Bi 系線材と比べての優位性が言われているが，Bi 系線材は 20K 以下において良い電流特性を示す。このため高温超電導線材を用いて大容量 SMES 用コイルの設計を考えるにあたっては，急速に進展を続ける高温超電導線材のその時点，その時点での特性を考慮に入れなければならないが，Bi 系線材が選択される可能性や，40，50K 程度での Y 系 SMES の設計が行われる可能性も高いことを本研究結果は示唆している。

4.2 今後の課題

本研究においては，一部において高磁界での設計を出す結果を許してしまったが，現実的に成立するとは考えにくい。また，15T 以下の低磁界設計では線材長は大きくなるものの補強材を含めたコイル体積は小さくなることも分かった。今回は磁界制限を掛けることで対処したが，高磁界設計となったコイル設計を詳細な応力解析に掛けて何を設計条件に加えれば良いのかについて検討することや，コイル体積による冷却コスト等を条件に加えてみる必要がある。

また，今回最終的に提示したコイル設計について，さらに用途を特定しての冷却や電力変換なども考慮した踏み込んだ検討を行うことで，高温超電導 SMES システム全体の設計とすることができる。

謝辞

本研究は東京大学大学院新領域創成科学研究科 大崎博之教授のご指導のもとに遂行されたものであり、終始懇切丁寧かつ熱心な御教示と御鞭撻を賜りました。ここに深甚なる感謝の意を表します。

以前所属しておりました仁田研究室のメンバーには仁田旦三教授，馬場旬平助教授，千葉政邦先生を始めとする皆様から，研究に関してご助言を頂き，またともに充実した研究生生活を送ることができました，厚く感謝致します。

本研究室助手の関野正樹先生には，不慣れな機械分野を中心に随時貴重なご助言とご指導を頂きました。心より感謝申し上げます。

本研究室の講師でいらっしゃいました産業総合研究所の金 載浩先生には，特にシミュレーションについて多くの貴重なご助言を頂き，深く感謝致しております。

研究室秘書の山崎裕子氏には研究を進めるにあたって様々な便宜をはかっていただき，快適な研究生生活を送ることができました。本当にありがとうございました。

本研究室博士課程の白石良佑氏，一木洋太氏，上田靖人氏，修士課程の河本哲氏，銭小飛氏，服部幸博氏，金東 氏，多田羅智史氏，卒論生の松村聡介氏，本研究室卒業生の阪東総一郎氏，永山武氏，藤本将司氏には，研究に関して大変お世話になり，またともに楽しい研究生生活を送ることができ，心より感謝致します。

最後に，家族と友人を含め，私の研究生生活を支えてくださった全ての皆様に感謝の意を表し，皆様の今後のご健康とご活躍を心からお祈り申し上げます。

参考文献

- [1] 仁田 旦三 :「超電導エネルギー工学」, オーム社, (2006)
- [2] ISTE C ジャーナル編集委員会 :「超電導技術とその応用」, 丸善, (1996)
- [3] (株)東芝 HP : <http://www.toshiba.co.jp>
- [4] Takenori Yonezu, Tanzo Nitta, Jumpei Baba, Yasuyuki Shirai, and Katsuhiko Shibata :「On-Line Measurement of Real Parts of Eigenvalues in Multi-Machine Power System by Use of Superconducting Magnetic Energy Storage」, MT-19, THA09PO03(2005)
- [5] 伊勢 敏史 :「電力システムにおける電力貯蔵の最新技術」, シーエムシー出版 (2006)
- [6] 五十嵐 基仁, 根本 薫, 奥富 健志, 平野 智士, 桑野 勝之, 草田 栄久, 寺井 元昭, 栗山 透, 戸坂 泰造, 田崎 賢司, 丸川 宏太郎, 花井 哲, 山下 知久, 柳瀬 康人, 山地 睦彦, 中尾 裕行 :「永久電流高温超電導マグネットの開発 : 磁気浮上式鉄道への適用性検証」, 低温工学, Vol.39, No.12, pp. 651-659, (2004)
- [7] Takeshi KATO, Jun FUJIKAMI, Shin-ichi KOBAYASHI, Kohei YAMAZAKI, Naoki AYAI, Koso FUJINO, Eisaku UENO, Masashi KIKUCHI, Satoru YAMADE, Kazuhiko HAYASHI and Ken-ichi SATO :「Development of Drastically Innovative BSCCO (DI-BSCCO) Wire」, SEI Technical Review, No.62, (2006)
- [8] 山崎 浩平, 綾井 直樹, 小林 慎一, 菊地 昌志, 山出 哲, 石田 友信, 上野 栄作, 藤上 純, 加藤 武志, 佐藤 謙一 :「Bi2223 超電導線材の高性能化」低温工学・超電導学会講演概要集, Vol. 75, pp. 4 (2006)
- [9] 新エネルギー・産業技術総合開発機構 :「平成 14 年度 委託業務調査報告書 超電導応用基盤技術研究開発 総合調査研究 超電導技術開発実用化状況の調査」
- [10] 須藤 泰範, 中岡 晃一, 松田 潤子, 吉積 正晃, 和泉 輝郎, 塩原 融, 斉藤 隆 :「Y 系線材における CeO₂ キャップ層厚みの影響」, 低温工学・超電導学会講演概要集, Vol. 75 (2006)
- [11] 羽生 智, 飯島 康裕, 富士 広, 柿本 一臣, 齊藤 隆 :「IBAD 中間層における線速依存性および高速化基礎検討」, 低温工学・超電導学会講演概要集, Vol. 75, pp. 227 (2006)
- [12] 柿本 一臣, 飯島 康裕, 富士 広, 羽生 智, 齊藤 隆 :「PLD 法による YBCO 高速成膜化の検討」, 低温工学・超電導学会講演概要集, Vol. 75, pp. 228 (2006)
- [13] A. Kinoshita¹, K. Takahashi¹, H. Kobayashi¹, Y. Yamada¹, A. Ibi¹, H. Fukushima¹, M. Konishi¹, S. Miyata¹, Y. Shiohara¹, T. Kato², T. Hirayama² :「DEVELOPMENT OF

THICK GdBCO AND ZrO₂-DOPED GdBCO FILM WITH HIGH CRITICAL CURRENT ON PLD-CeO₂/IBAD-GZO METAL SUBSTRATE」, ISS2006 , WTP-61(2006)

- [14] 超電導応用基盤技術研究開発プロジェクト評価 (中間) 報告書 , (2002)
- [15] Tsutsui H. , Nomura S. , Shimada R. :「 Optimization of SMES coil by using virial theorem 」, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 12, No. 1, pp. 800-803(2002)
- [16] Takeshi KATO, Jun FUJIKAMI, Shin-ichi KOBAYASHI, Kohei YAMAZAKI, Naoki AYAI, Koso FUJINO, Eisaku UENO, Masashi KIKUCHI, Satoru YAMADE, Kazuhiko HAYASHI and Ken-ichi SATO :「 Development of Drastically Innovative BSCCO (DI-BSCCO) Wire 」, SEI Technical Review, No. 62, pp. 10, (2006)
- [17] NEDO :「 第 1 回 「 超電導応用基盤技術研究開発 (第 II 期) 」 (中間評価) 分科会 」 (2005)
- [18] 吉田清, 磯野高明, 杉本誠, 奥野清 :「 空心コイル電磁計算プログラム : COIL 」 JAERI-Data/Code 2003-014(2003)
- [19] 柁川一弘, 海保勝之 :「 矩形断面円筒形コイル用自己インダクタンス計算式の適用範囲について 」, 低温工学, Vol. 30, No. 7 , pp. 324-332.(1995)
- [20] T. Kiss, M. Inoue, T. Kuga, M. Ishimaru, M. Takeo :「 Angular dependence of critical current properties in YBCO coated tape under high magnetic field up to 18 T 」, Physica C , Vol. 378-381 , No. 2 , pp. 1113-1117(2002)
- [21] H. Okamoto, T. Kiss, S. Nishimura, M. Inoue, M. Kanazawa, Y. Sumiyoshi :「 Angular dependence of the extended E - J characteristics in Bi-2223/Ag sheathed tape 」, Physica C , Vol. 357-360 , pp. 1190-1192(2001)
- [22] NEDO :「 超電導電力貯蔵システム技術開発平成 15 年度 成果報告書 」 (2003)
- [23] (社) 低温工学協会 :「 超電導・低温工学ハンドブック 」, オーム社 (1993)
- [24] 橋本 雅弘, 北條 正樹, 田中 基嗣, 安達 泰治, 菅野 未知央, 落合 庄治郎, 長村 光造 :「 銀合金溶解による Bi2223 フィラメントの力学特性評価 」, 低温工学・超電導学会講演概要集 , Vol. 73 , pp. 154 (2005)
- [25] 加藤 武志, 藤上 純, 小林 慎一, 山崎 浩平, 綾井 直樹, 藤野 剛三, 上野 栄作, 菊地 昌志, 山出 哲, 林 和彦, 佐藤 謙一 :「 革新的ビスマス系高温超電導線 (DI-BSCCO[®]) の開発 」, SEI テクニカルレビュー・Vol. 16 No. 8 pp. 19-23(2006)
- [26] 大倉健吾, 小林慎一, 林和彦, 石本学, 長村光造 :「 銀被覆 Bi 系 2223 超電導線材の機械的特性 」, 低温工学・超電導学会講演概要集 , Vol. 70 , pp. 62 (2004)
- [27] 国立天文台 :「 理科年表 平成 8 年 (机上版) 」, 物 28 , pp. 448(1995)
- [28] 小飯塚翔, 石山敦士, 斉藤隆, 塩原融「 引張り及び圧縮応力による YBCO テープの特性変化 」, 低温工学・超電導学会講演概要集 , Vol. 73 , pp. 239 (2005)

- [29] 石尾 光太郎, 中嶋 秀夫 :「316LN ステンレス鋼の機械的特性に及ぼす窒素 (N) の影響」, 鉄と鋼, Vol. 92, No. 2, pp. 90 (2006)
- [30] 超電導応用基盤技術研究開発成果報告書, (2003)
- [31] 西島 元, 淡路 智, 渡辺 和雄, 京籐 誠, 田崎 賢司, 高橋 政彦, 来栖 努, 瀧上 浩幸, 花井 哲 :「小型冷凍機冷却 18 T 高温超伝導マグネットの開発」, 低温工学, Vol. 41, No. 7, pp. 322-327.(2006)
- [32] 浜島 高太郎, 嶋田 守, 花井 哲, 和智 良裕, 手塚 勝, 高野 広久 :「SMES コイル配置の漏洩磁界」, 低温工学誌, Vol. 33, No. 12, pp. 15-23(1998)
- [33] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection :「Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300GHz)」(1998)
- [34] 菅野 未知央, 式町 浩二 :「Y 系 SMES コイル応用を指向した MOCVD-YBCO 導体の特性 (1) - 臨界電流の一軸ひずみ特性」, 低温工学・超電導学会講演概要集, Vol. 75, pp. (2006) 長村光造, 菅野未知央 :「YBCO および BSCCO テープ線材の機械的性質とその臨界電流への影響」, 低温工学・超電導学会講演概要集, Vol. 73, pp. 238 (2005)
- [35] 柳井正浩, 石山敦士, 秋田調, 笠原奉文, 榊寿義, 高祖聖一「SMES 用 HTS 小型モデルコイルの熱特性」, 低温工学・超電導学会講演概要集, Vol. 68, pp. 236 (2003)

発表文献

本研究に関する発表文献

- [P1] 橋本 昌樹, 大崎 博之:「高温超電導線材による SMES コイルのモデル設計」低温工学・超電導学会講演概要集, Vol. 75, pp. (2006)
- [P2] 横尾 亮佑, 浅野 正彦, 福本 祐介, 橋本 昌樹, 鄭 然大, 金 仁植, 宮崎 寛史, 中川 久司, 大田 友哉, 島崎 毅, 寺尾 泰昭:「2006 年度 第 9 回低温技術講習夏合宿 - 7T 超伝導マグネットへの挑戦 - 」低温工学・超電導学会講演概要集, Vol. 75, pp. (2006)
- [P3] 橋本 昌樹, 藺田 将人, 坂本 織江, 仁田 旦三:「アナログ型電力系統シミュレータ用デジタル型風力発電機モデルの作製」, 平成 17 年電気学会全国大会, No. 5-138