

第4章 Y系線材のSMES適用性評価・検証

4.1 まえがき

前章において、高い温度安定性を活かすことができる Bi-2212 線材を用いることで、第2章で実用化した金属系 SMES コイルの信頼性と耐電圧の両立や冷却システムを改善し、SMES の性能向上が可能であることを確認した。一方で、前章で述べたように Bi 系線材は J_c や n 値にばらつきが多く、今後も通電特性の改善が必要であるとともに高価な銀を母材としているため、将来においても大幅な低コスト化は困難と想定される。用いた第1世代の Bi 系線材は、初期に開発が進んだが、第2世代の Y 系超電導線材は、高価な銀を材料として多用しないため、将来的には大幅な低コスト化が見込まれ、また、磁界中における通電特性の高さから様々な機器への応用が期待されている。

これまで種々の手法で Y 系線材の開発が行われ、高い通電特性を実現するための課題であった 3 軸の結晶配向制御や長尺高速合成手法等の作製技術が近年著しく進展した。その結果、比較的安定して長尺線材が作製可能な状況となり、開発の重点課題は線材そのものからその機器応用へと移行しつつある。そこで、SMES のさらなる大容量化、性能向上を図るため、線材特性の高さや低コスト化が期待される Y 系線材の SMES コイルへの適用について検討した。

SMES コイルの性能向上を図るには、大出力化のための高耐電圧化・大電流導体化、コンパクト化のための高磁界化（高エネルギー密度化）、信頼性向上のための温度安定性、漏洩磁界低減のためのコイル配置、効率向上・運転簡素化のための高温運転等が要求される。本章では、これらの観点から、Y 系線材を SMES コイルに適用した場合の特性を評価することで、Y 系コイル開発の方向性について検討するとともに、SMES 大容量化において重要性となる Y 系線材の高磁界通電特性、機械特性等の基本特性を評価した結果について述べる。

4. 2 Y系線材の特長

これまでY系線材は様々な手法や材料を利用して開発が行われてきたが、ここではその構造例としてIBAD基板YBCO線材[1]-[3]の構造を図4-1に示す。ハステロイ等の金属テープ状基板の上にY系超電導体を2軸配向させるための中間層が積層され、配向された中間層の上に配向結晶化されたY系超電導層が積層され、その保護層として銀層が積層され、安定化層として銅層が積層されている。超電導層厚さにより磁界中での特性が異なるが[4]、実用的には1 μm 厚の超電導層が作製されている。

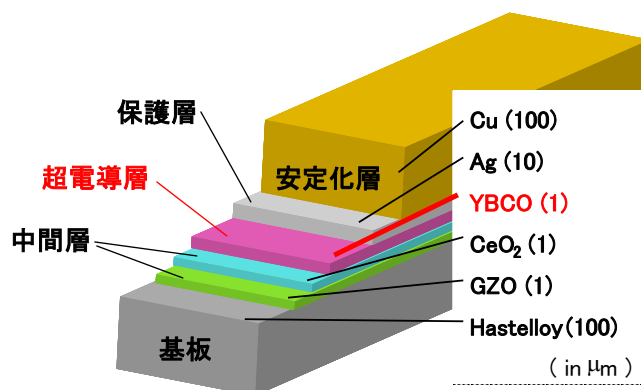


図 4-1 Y系超電導線材の構造例 (カッコ内は厚さ)

Y系(YBCO)線材の磁界中での臨界電流密度を図4-2に示す。ここで、Y系線材は磁界の向きが線材幅広面に対して垂直方向のデータであり、臨界電流密度 J_c が最も低い場合である。さらに、他の超電導線材は4.2 Kのデータであるのに対し、Y系線材はより高温の50 Kのデータであるにもかかわらず、高い J_c を示している。このため、YBCO線材をSMESコイルに適用することで、他の線材では不可能あるいは困難であった、より高温やより高磁界でSMESコイルを適用することが可能と期待される。さらに、ジルコニウム(Zr)等のドーピングによりピンニング力を高める試みが活発に行われており[5],[6]、現在も高磁界中での特性向上が進展している。

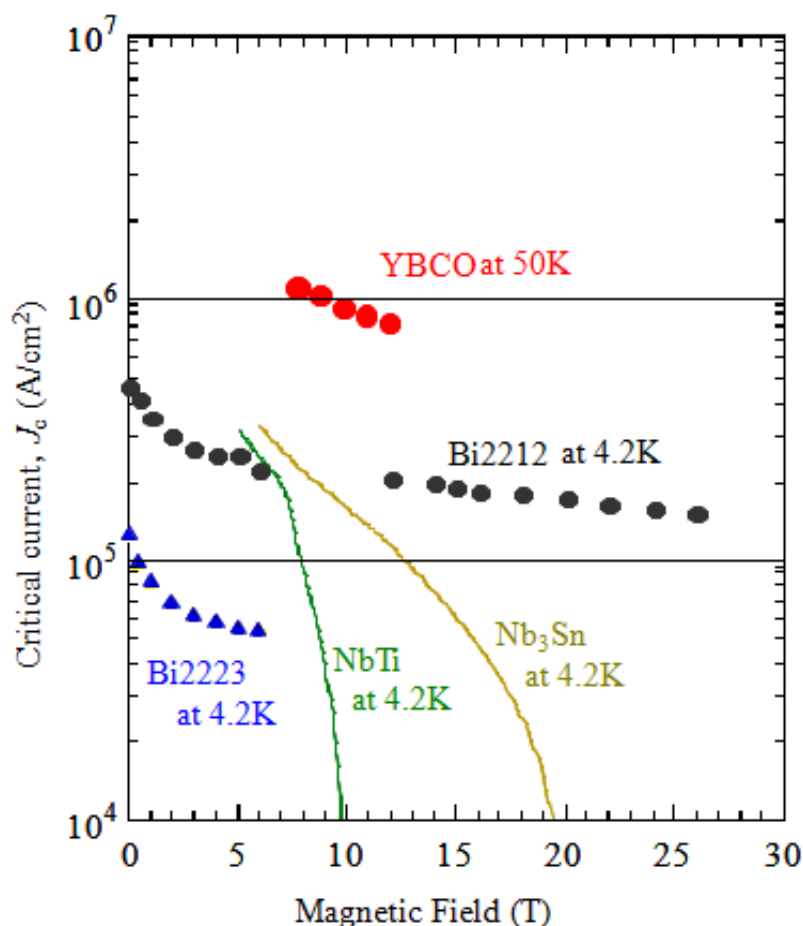


図 4-2 各種超電導線材の高磁界中の臨界電流密度特性

4. 3 SMES コイルに要求される特性評価

高磁界中で高い通電特性を示すことから Y 系線材を適用することでコイルの高磁界化かつ大電流通電が可能となり、高いエネルギー密度でコンパクトにエネルギーを貯蔵することが期待できる。ただし、大電流・高磁界下でのコイル励磁時にはコイルに強大な電磁力が発生し、コイルの巻線には線材長手方向へのフープ応力（引張応力）等が発生する。このため、高磁界・大電流コイルを実現するには、線材が強大な電磁力に耐えることが不可欠である。そこで、SMES コイルが許容可能な電磁力等をもとに、どの程度高磁界化、高エネルギー

一密度化が可能であるか評価するため、Y系線材の磁界中での電流密度-電界 (J - E)特性をもとに SMES コイルの設計最適化について検討した。

Y系線材を用いることで SMES コイルに 10 T を超える高磁界を適用可能と考えられるが、コイル外部に対しても高磁界が漏洩することが懸念されるため、自身の冷凍機を含めた周辺機器への影響がないようにする必要がある。また、SMES コイルへの適用を考えた場合、Y系線材はその通電特性や冷却コストの観点から液体窒素と液体ヘリウムの間温度領域が適しており、冷凍機を用いた伝導冷却が必要と考えられる。ここで、トロイド型コイルの場合、その幾何学的特徴から高磁界を適用しても漏洩磁界を極めて低く抑えることが可能であり、SMES コイルを伝導冷却するための冷凍機を各要素コイルの近傍かつ任意の位置に配置することが可能と考えられる。これは、伝導冷却方式において重要な冷凍機からコイルまでの冷却長を短く、かつ均等化する上で、極めて重要である。以上より、全体コイルの組合せ構成として、金属系超電導コイルで採用したマルチポール配置方式に代えてトロイド配置方式を採用した。なお、テープ形状の高温超電導線材で SMES 最適設計が実施された結果においても必要線材量はトロイド形状がマルチポール形状より少なく、優位性が示されている[7]。

図 4-3 に Y系線材の温度別 J_c - B 特性を示すが、液体窒素温度 77 K と比べて 4.2~40 K 温度領域では磁界の増加や温度上昇による J_c の低下が抑えられること、および、近年開発された比較的大容量の 50 W 冷凍機が 1 段で 20 K に到達でき、高効率かつインバータ運転が可能であることから、ここではコイル運転温度を 20 K と決定した。なお、前述したように、現在活発なピンニング特性の研究により今後も高磁界特性が向上すると想定されるため[5],[6]、運転温度等の最適な設計結果は、用途の確定に伴う詳細設計条件の見直しと同様、Y系線材の特性改善に応じて見直す必要がある。

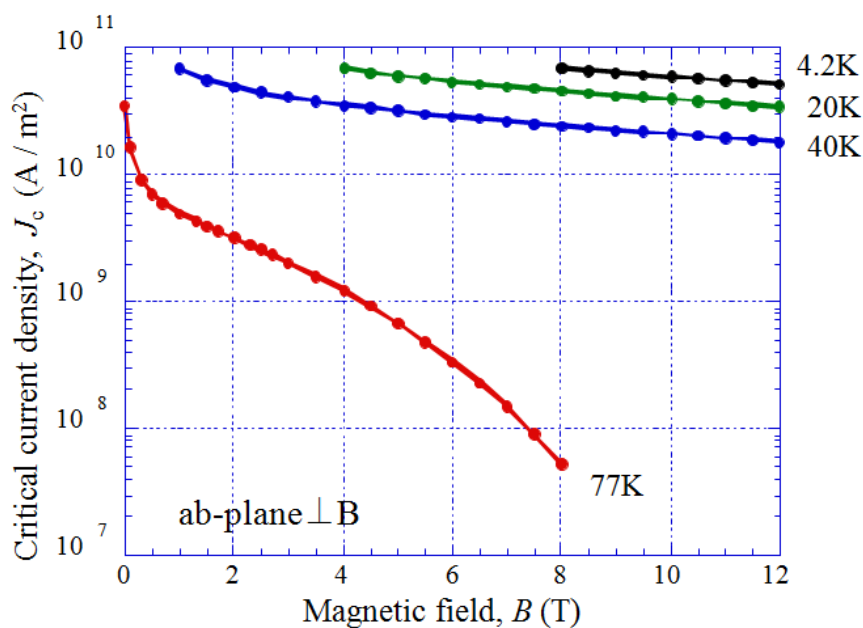


図 4-3 Y系線材の温度別 J_c - B 特性

SMES 用トロイド型コイルの最適設計においては、Y系線材使用量の最小化を目的として、図 4-4 に示すようにトロイド要素コイルの寸法（内径 r_i , 外径 r_o , 高さ h ）、トロイド中心軸からの位置 p , 要素コイル数 N , ならびに通電電流を SMES コイルの設計変数とし、有限要素解析を実施した[8]。なお、ここでは最適化の全体傾向を掴むため、用途や仕様を限定せず、妥当と考える制約条件を以下のとおり設定し、具体的な用途に対するコイルの諸元については、「第 6 章 電力系統制御用 Y系 SMES の概念設計」において後述する。ここで、高温超電導線材はフロー損失が発生し、従来のように I_c 前後で発熱量が明確に区別できないため、制約条件に最大電界のみでなく、総発熱量を追加するとともに、Y系線材の J_c , n 値ではなく、実測した線材 I - V (J - E) 特性（線材 I_c は図 4-3 のデータ）をパーコレーションモデルにより補間して用いた。なお、厳密には熱収縮や電磁力からの歪みによる通電特性への影響についても考慮すべきであるが[9]、20 K 温度領域ではその影響が小さいことから[10]、本設計ではその影響を無視した。

(制約条件) コイル形状	トロイド型
運転温度 T	20 K
最大総発熱 Q	100 W 以下
最大電界 E_{\max}	1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ 以下
最大フープ応力 σ_{\max}	1 GPa 以下

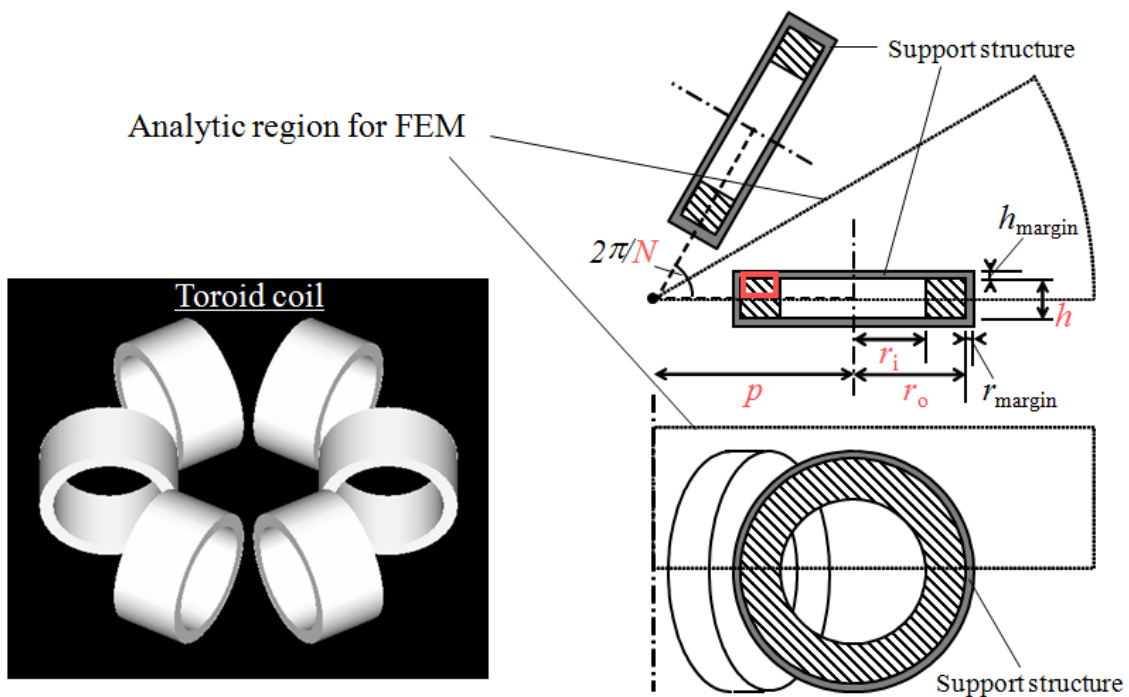


図 4-4 トロイド型コイルのイメージ図と最適設計における変数の定義

Y系線材の SMES コイル最適設計結果から判明した貯蔵エネルギーと必要線材量の関係を図 4-5 に示す。同図では、必要線材量依存性を次の 3 つの制約条件から示している。(I) 最大電界が 1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ 以下であること。(II) 総発熱量が 100 W 以下であること。(III) 最大フープ応力が 1 GPa 以下であること。今回、高磁界コイルには高い機械特性が要求されることが想定されたため、ハステロイ基板の弾性限の値を参考に従来の超電導コイルの最大フープ応力の 3 倍に匹敵する 1 GPa を設定した。図 4-5 より制約条件は 30 MJ 以下の領域では Y 系

線材の通電特性であり、その改善が重要であり、一方、30 MJ を超える領域においては Y 系線材の通電特性ではなく、機械特性が重要であることが明確となった。すなわち、大容量コイルではフープ応力によりコイルの高磁界化が制約を受けており、Y 系コイルのフープ応力耐性を高めることができれば、必要線材量を低減できることを確認した。なお、大容量領域では通電特性に余裕があるため、20 K よりも高い温度領域で運転することも可能であるが、その場合、発熱量が増加するため、運転温度を高くするかどうかは冷却コストとの兼ね合いで最適化を決定することができる。また、総発熱量等の制約条件も具体的な用途に応じ、例えば交流損失が比較的多い運転条件では、総発熱量の増加も相対的に許容すべきである。

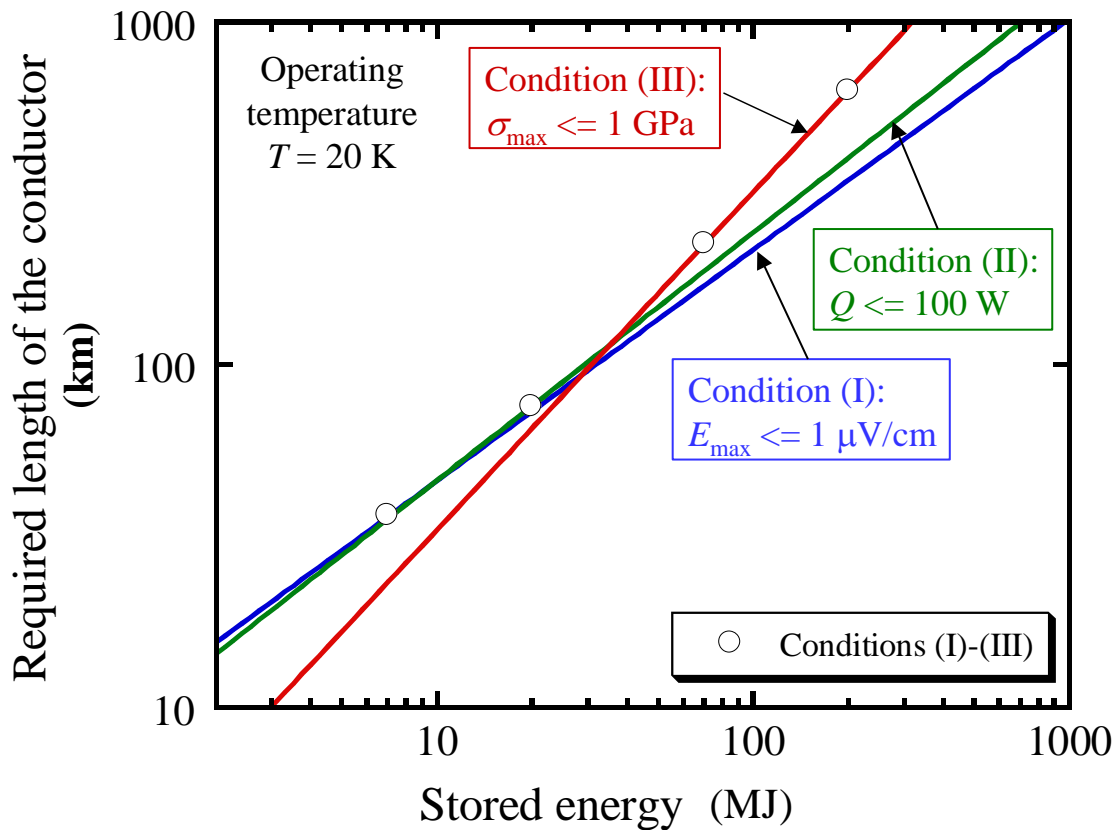


図 4-5 YBCO 線材必要量の貯蔵エネルギー依存性

4. 4 Y系線材の機械特性評価

大容量 SMES コイルの設計において、制約要因は機械特性であり、コイルの大容量化には機械強度を高めることが最も効果的であることを確認した。Y系線材は金属基板に超電導体を積層する構造であり、高強度の基板を使用すれば、高強度線材が実現可能と期待される。そこで、SMES への適用に高いポテンシャルを持つと期待される高強度の Hastelloy 基板を用いており、低コストで製造可能な有機金属化学気相蒸着法(Metal Organic Chemical Vapor Deposition, 以下、CVD という)により作製された Y系線材を中心に機械特性について実験により評価・検証を実施した。

Y系線材の機械強度は、その断面積のほとんどを占める基板の機械強度により支配される[11]。このため、イオンビームアシスト蒸着(Ion Beam Assisted Deposition、以下、IBAD という)法による中間配向層を積層した Hastelloy C-276 を基板とする IBAD 基板 CVD-YBCO 線材、金属圧延配向基板(Rolling Assisted Biaxially Textured Substrates, 以下 RABiTS という)の配向 Ni-5%(および 3%)W 基板、直接 YBCO 層を基板に成膜できる極めて簡素な構造の無配向銀基板 CVD-YBCO 線材、および熱履歴の影響を比較するための無配向銀基板(非熱処理)の機械特性を評価した。室温での引張試験によりそれらの応力歪み特性を測定した結果から求められた弾性限、ヤング率、オフセット法・全伸び法による 0.2%耐力を表 4-1 に示す。線材の劣化は YBCO 層の全伸び量に依存すると考えられたため、全伸び法による 0.2%耐力も求めている。

これらの実験結果から、無配向銀基板線材や配向 Ni-W 基板は機械強度が低いことが分かる。このため、SMES コイルにこれらの線材を用いる場合は、線材に対する高強度テープとのクラッド化、あるいは巻線時に線材への補強線材の伴巻き等の追加処理が必要と考えられる。一方で、Hastelloy を基板とする IBAD/ CVD-YBCO 線材は、弾性限が高く、ヤング率も高いことから、強大な

表4-1 室温における各種線材（基板）の応力歪み特性

試料線材(基板)	試験片寸法		弾性限 (%)	ヤング 率 (GPa)	0.2%耐力 (全伸び法) (MPa)	0.2%耐力 (オフセット法) (MPa)	引張強さ (MPa)	破断時 伸び (%)
	幅 (mm)	厚さ (mm)						
IBAD基板CVD-YBCO線材	10.00	0.108	0.70	140	280	1500 (歪1.3%)	1700	6
配向Ni-5%W基板 (成膜時と同等熱処理)	10.00	0.105	0.08	150	170	170 (歪0.3%)	500	24
配向Ni-3%W基板 (成膜時と同等熱処理)	10.00	0.105	0.08	140	150	150 (歪0.3%)	470	34
無配向銀基板CVD-YBCO線材	10.17	0.201	0.04	50	36	37 (歪0.3%)	160	45
無配向銀基板 (非熱処理)	10.17	0.200	0.20	54	96	240 (歪0.6%)	290	7

電磁力に耐えることが重要な要素となる大容量 SMES コイル用としてポテンシャルが高いと考えられる。このため、IBAD/ CVD-YBCO 線材を SMES コイル開発に用いることに決定した。

4. 4. 1 Y 系線材の応力歪み特性評価

SMES 用として優れた機械特性が確認されたことから、IBAD 法により配向させた Hastelloy 基板を用いて CVD 法により作製した Y 系線材を用いて一軸引張応力下において通電試験を実施し、線材特性について評価した。図 4-6 に液体窒素温度で線材長手方向に引張応力を負荷した時の応力歪み特性を示し、図 4-7 に引張応力を一旦負荷した後、負荷を取り除いて測定した時の臨界電流 I_c の変化を示す。図 4-6 と図 4-7 に示される矢印はそれぞれ同一ポイントを示す。両図より線材の弾性限は 1.3 GPa 程度であり、応力除荷後の I_c が同等に復元する限界（可逆 I_c 限界）は 1.5 GPa 程度であることを確認した。

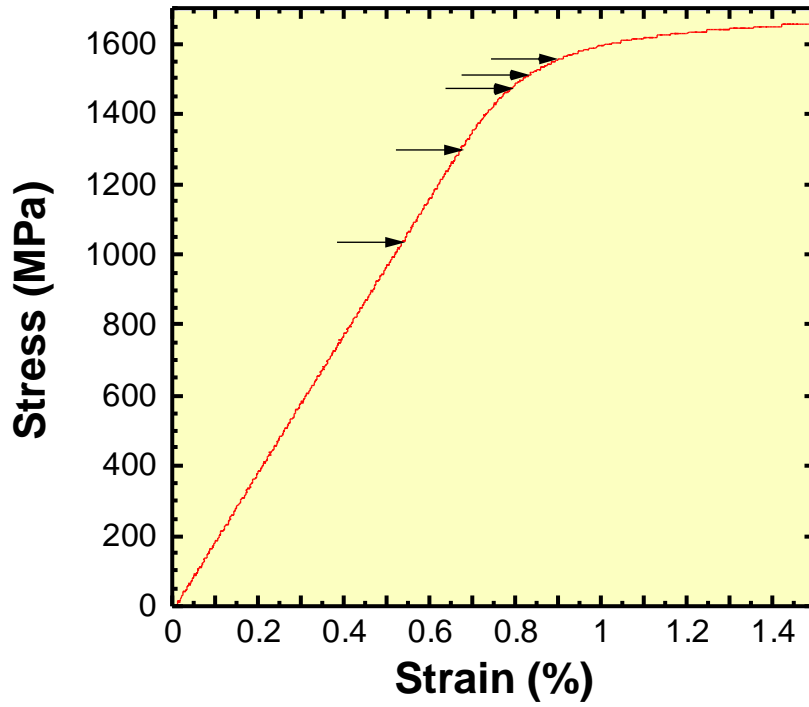


図 4-6 液体窒素中での IBAD/ MOCVD-YBCO 線材の応力歪み特性

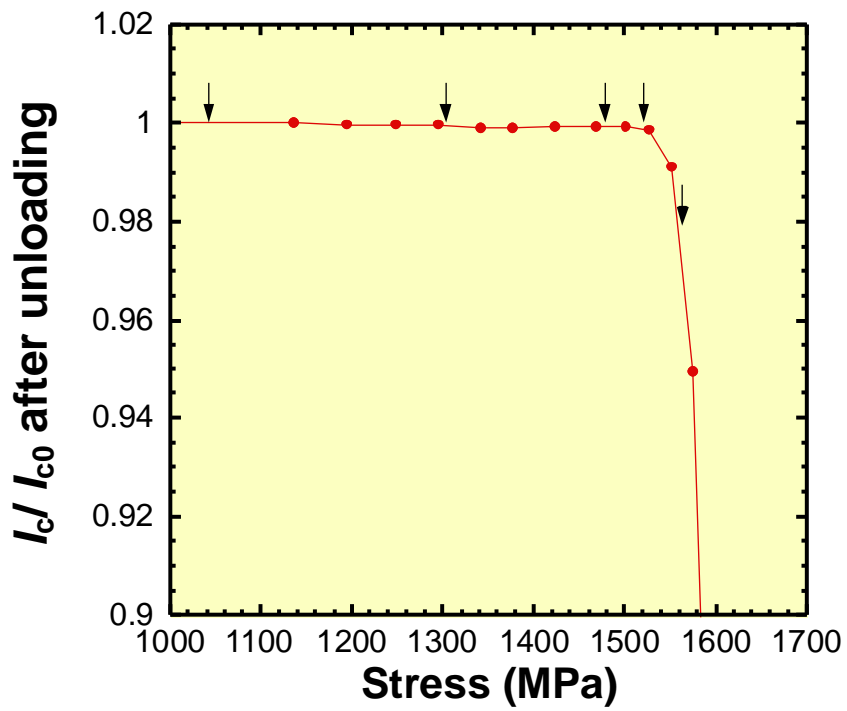


図 4-7 液体窒素中での引張応力除荷時の IBAD/ MOCVD-YBCO 線材の I_c

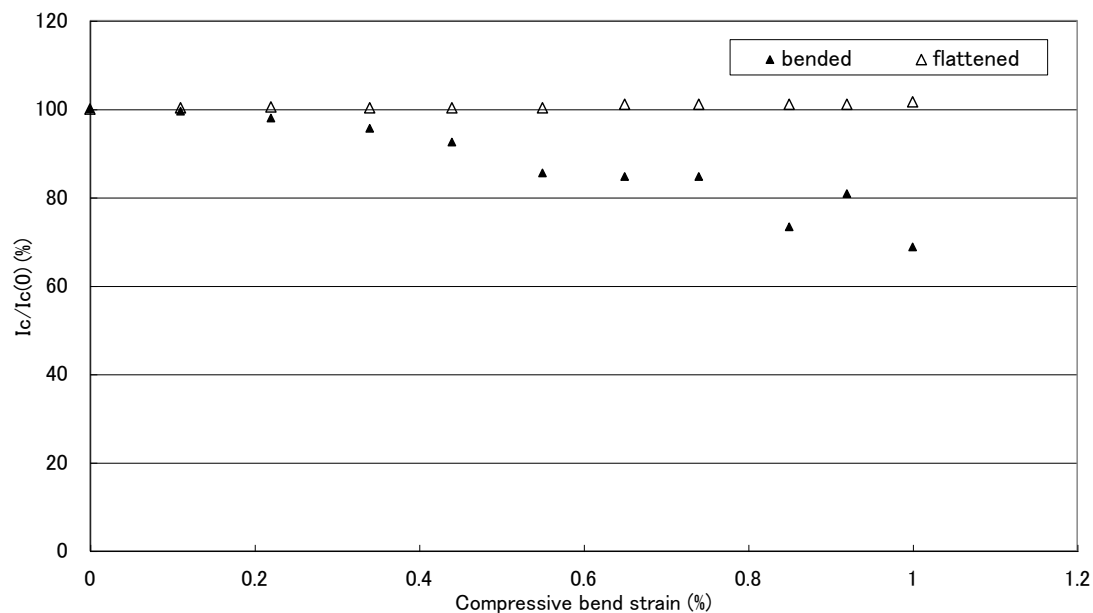
4. 4. 2 Y系線材の曲げ歪特性評価

コイル巻線時には線材に曲げ歪応力が負荷されるため、曲げ歪に起因する特性劣化を避けるため、IBAD/ CVD-YBCO 線材を用いてコイル曲げ歪応力下での通電試験を実施し、線材特性について評価した。YBCO 線材は厚さ方向に非対称な薄膜積層構造であり、線材 Ag 面が内側と外側の 2 通りの巻線方法があるため、曲げ歪試験においては YBCO 層(Ag 層)が引張側と圧縮側の 2 通りの方法で特性を評価した。試験方法は各々徐々に曲げ歪を大きくし、曲げ戻しの都度、液体窒素中で $I-V$ 測定を行い、 $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ 基準での臨界電流 I_c を求めた。曲げ歪率は線材全体厚さを曲げ径で除した値を近似値として用いた。

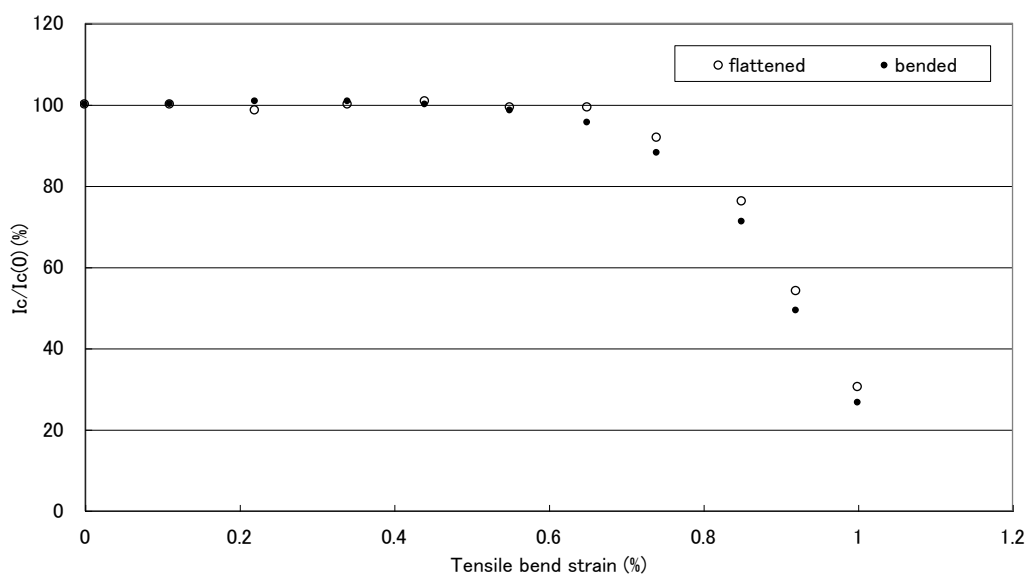
その時の圧縮側・引張側曲げ歪試験結果をそれぞれ図 4-8 (a), (b)に示す。試験の結果、圧縮側と引張側で明確な違いが観測された。YBCO 層が圧縮側の場合、曲げ歪を負荷した状態では 0.2 %程度から I_c の低下が始まるが、曲げ歪を除去すると 1 %の曲げ歪を経験した後も特性は回復している。1 %曲げ歪負荷状態での I_c 低下率は 20 %を超えていることから、可逆領域における IBAD/ CVD-YBCO 線材の真性曲げ歪効果は大きいと考えられる。一方、YBCO 層が引張側の場合、曲げ歪を負荷した状態では 0.5 %程度までは I_c が若干増加する傾向が見られるが、0.5 %を超えると徐々に I_c の低下が増加し、その後、歪を除去しても I_c は回復せず、1 %の曲げ歪負荷後は I_c が 30 %程度にまで低下している。

これらの結果、歪みが小さい段階では、曲げ歪が負荷された状態での I_c の低下は YBCO 層が引張側の場合が小さいが、可逆歪限界は YBCO 層が圧縮側曲げ歪の場合が大きい。これらの違いは、YBCO 層とハステロイ基板等の線膨張係数の違いにより、800 °Cを超える YBCO 成膜時から冷却時の-196 °Cまでの温度差による YBCO に負荷されている残留歪みが影響していると考えられる。ただし、SMES 用コイルは m 級のコイル径となるため、その他評価結果

[12]-[15]も含め、Y系線材は10 cm級の許容曲げ径に対しては十分な裕度があり、問題ないことを確認した。



(a)YBCO層圧縮側



(b)YBCO層引張側

図 4-8 初期値規格化 I_c の曲げ歪依存性 (Ag層:20 μm , YBCO層:0.4 μm , CeO_2 層:1 μm , $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 層:1 μm , ハステロイ層:100 μm)

4. 4. 3 フープ応力耐性評価

Y系線材が一軸引張特性等、極めて高い機械特性を示すことが確認できたが、コイルとして使用する場合、線材には曲げ歪と同時に、電磁力によるコイル径方向応力が発生し、結果としてコイル周方向に引張応力が発生する。特に、Y系線材の場合、超電導層が従来の金属系やBi系の超電導線材と全く異なる薄膜積層構造であるため、フープ応力は1 μm 程度の超電導薄膜に集中して作用する。このため、コイル適用時には、超電導層界面等の剥離方向の強度や線材の巻き線方向にも影響されることが懸念される。そこで、Y系線材のYBCO層を内側・外側にして単相ソレノイドコイル状に巻線し、実際にフープ応力を作用させ、フープ応力耐性について評価した。表4-2に製作した巻線諸元をまとめ、図4-9にその外観およびフープ応力試験図を示すように、大型マグネットの最高磁界の直近内側に巻線部が位置し、ほぼ均一に最高レベルの磁界が印加されている。

表 4-2 フープ応力試験用巻線諸元

線材種類	IBAD/ CVD-YBCO
線材寸法	0.12 mm ×10 mm
線材長	4 m
ハステロイ表面	内径側および外径側
コイル形状	ソレノイド
巻数	5 ターン
層数	1 層
巻線径	ϕ 250 mm
高さ	60 mm
バックアップ磁界	11 T
冷却方法	液体ヘリウム浸漬

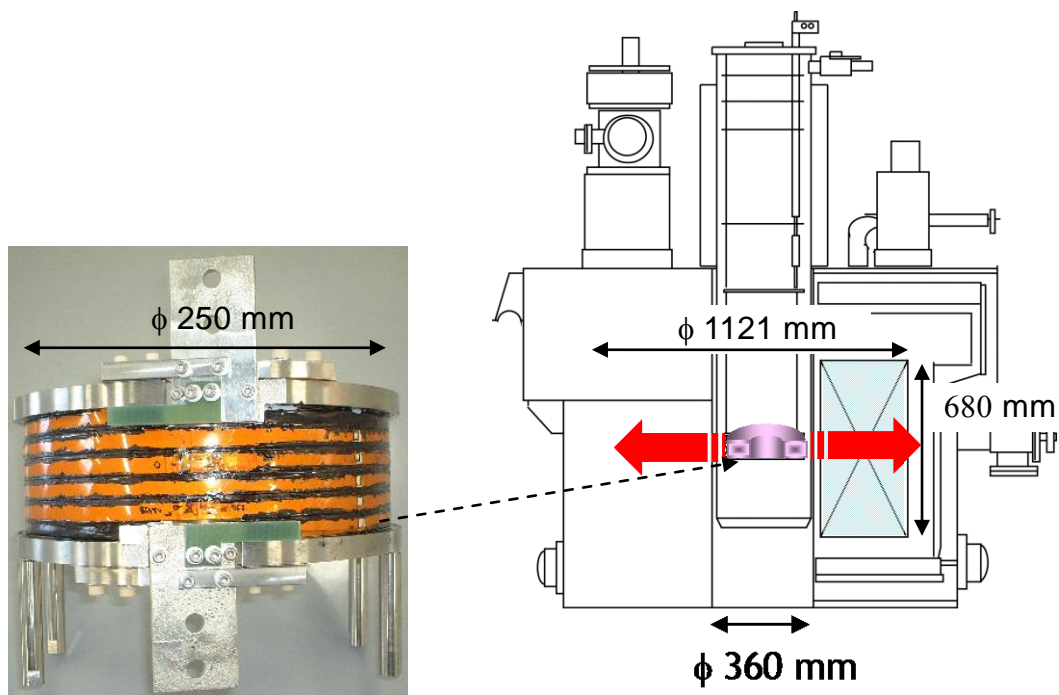


図 4-9 フープ応力試験用 IBAD/ CVD-YBCO 巻線およびフープ応力試験図

図 4-9 に示すように、この巻線を高磁界 11 T 中で通電し、フープ応力を作用させた。YBCO 層が内径側の時の I - V 特性を図 4-10 に示す。直線の傾きはコイル電極部を含めた常電導部の抵抗成分で、実線と破線の電界 E の差は I_c 基準とした $0.1 \mu\text{V}/\text{cm}$ である。Y 系線材そのものの I_c が十分高くはなかったため、876 A 通電時にコイル I_c に達し、894 A 通電時にクエンチしたが、その時のフープ応力を磁界・電流密度・半径の積から計算すると、巻線全体に対して 1 GPa のフープ応力が負荷されていたことになる。また、YBCO 層が外径側の巻線についても同様に試験を実施した結果、 I_c がより低かったため、676 A で電圧が発生し、通電を停止したが、その時巻線には 0.78 GPa のフープ応力が負荷されていた。以上より、コイルが経験するフープ応力を超電導層に実際に負荷させて得られた結果から IBAD/ CVD-YBCO 線材は、従来の線材では適用できなかった高い電磁応力を SMES コイルに適用することが可能であり、コイルのコンパクト化が可能と考えられる。

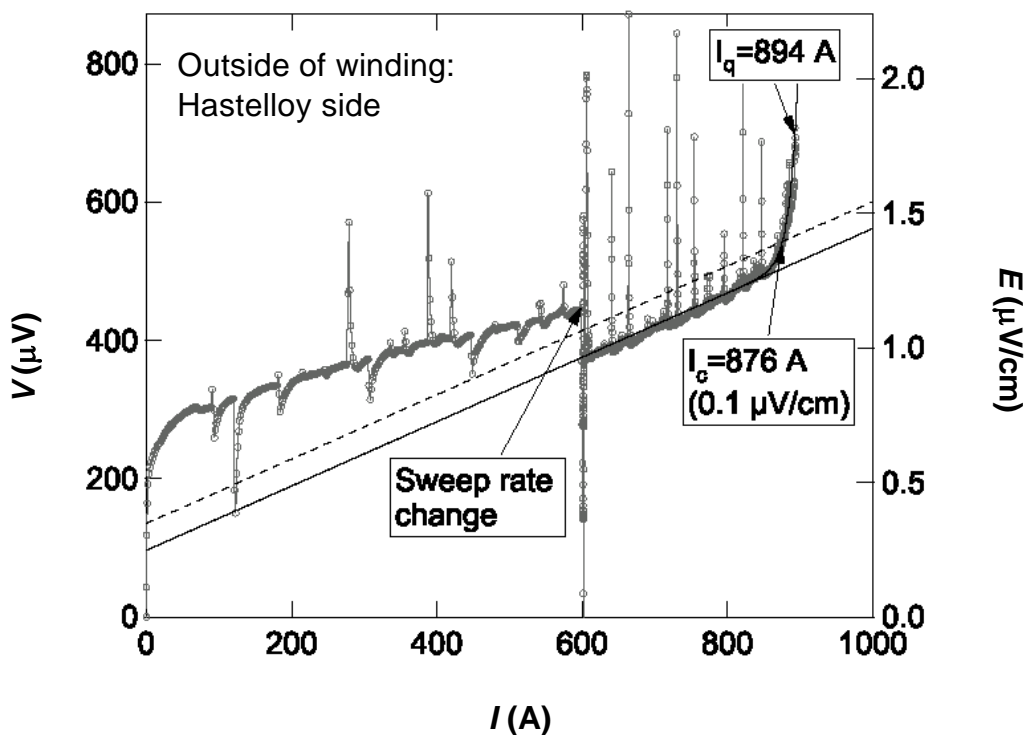
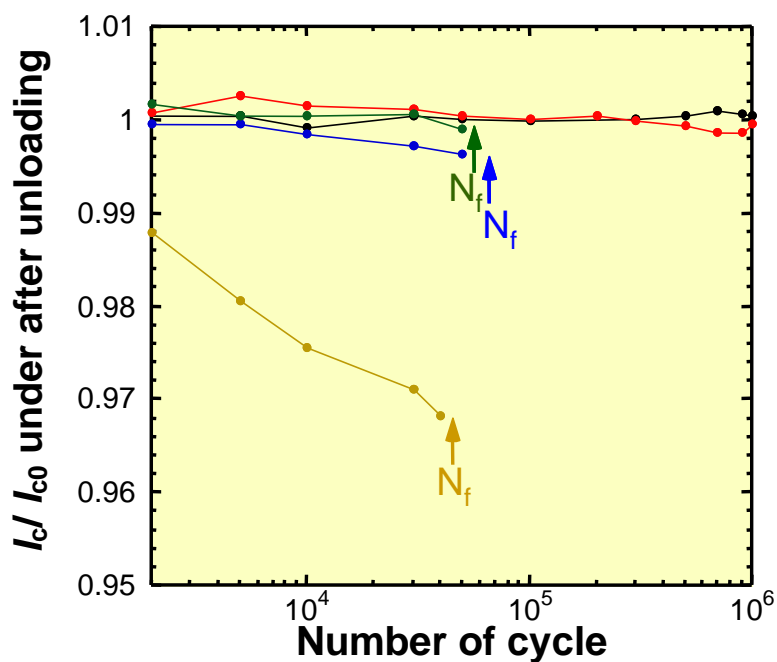


図 4-10 4.2K 液体ヘリウム中で 11.1 T 外部磁界印加時の巻線部 I - V 特性

4. 4. 4 繰り返し応力による疲労特性評価

SMES コイルへの適用を考えた場合、充放電を繰り返すことにより Y 系線材は繰り返しフープ応力を受ける。このため、Y 系線材の引張応力に対する疲労耐性を評価しておくことが必要である。実際のフープ応力を 100 万回程度繰り返し負荷することは困難であったため、「4. 4. 1 Y 系線材の応力歪み特性評価」と同様に液体窒素中での一軸引張応力による方法で、IBAD/ CVD-YBCO 線材に繰り返し弾性限界近傍の引張応力を負荷し、定期的に I_c を測定した。最大引張応力 σ_{max} が弾性限前後の場合の応力除荷時および応力負荷時の規格化 I_c の変化をそれぞれ図 4-11、図 4-12 に示す。 N_f で示す矢印の先は破断点を示す。可逆 I_c の範囲内であっても弾性限の 1.3 GPa を超過した引張応力の領域では数万回の繰り返しにより線材の破断が発生した。一方、弾性限の 1.3 GPa 以下であれば I_c が維持されており、繰り返し後も疲労劣化がないことを確認した。



- $\sigma_{\max}=1040$ MPa (弾性限の80%) 破断せず
- $\sigma_{\max}=1300$ MPa (弾性限) 破断せず
- $\sigma_{\max}=1480$ MPa (静的でIc可逆) $N < N_f$ でIc劣化無し, $N_f=6.4 \times 10^4$ で破断
- $\sigma_{\max}=1520$ MPa (静的でIc可逆) $N < N_f$ でIc劣化無し, $N_f=5.6 \times 10^4$ で破断
- $\sigma_{\max}=1560$ MPa (静的でIc不可逆) $N < N_f$ でIc劣化進行, $N_f=4.4 \times 10^4$ で破断

図 4-11 繰り返し引張歪負荷による IBAD/ CVD-YBCO 線材の I_c 変化

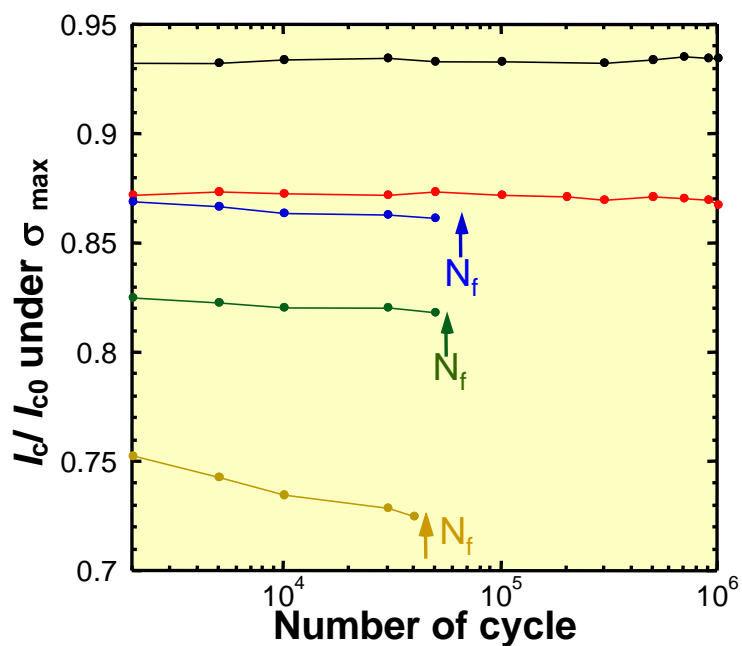


図 4-12 繰り返し引張歪負荷による IBAD/ CVD-YBCO 線材の I_c 変化
(図中の各データの色・記号は図 4-10 と同条件)

4. 5 結論

大容量 SMES 最適化設計等によりフープ応力耐性の最重要性等を把握、定量化するとともに、Y 系線材の機械特性について各種試験により評価し、Y 系線材の SMES 適用へのポテンシャルの高さを明らかにした。それらの結果を要約すると下記のとおりである。

- (1) SMES 用 Y 系コイルの形状として、漏洩磁界が小さく、伝導冷却に適したトロイド型を選定し、その運転温度を現状の線材特性や冷凍機能力から 20 K 近傍の温度領域と決定した。ただし、今後の用途の特定や Y 系線材の特性改善に応じて最適温度は見直す必要がある。
- (2) SMES 用 Y 系コイルの最適化設計を実施し、貯蔵エネルギー容量に対する必要線材量やフープ応力、最大電界、総発熱量との相関関係を定量的に把握した。本設計における 30 MJ 級を超える大容量領域では、フープ応力 1 GPa が制約要因となること、20 K を超える高温領域を適用しても通電特性の制約条件を超えなければ必要線材量は変わらないこと等により、フープ応力耐性の強化が最も重要であることを明らかにした。
- (3) 大容量 SMES 開発において、機械強度に優れたハステロイ基板を用いた IBAD/ CVD-YBCO 線材を SMES 用コイルに選定した。
- (4) SMES 大容量化に最も重要な機械特性を各種試験により評価し、以下の試験検証結果により、IBAD/ CVD-YBCO 線材の大容量 SMES へのポテンシャルの高さを明らかにした。
 - ・ 1 GPa 以上のフープ応力耐性
 - ・ 100 万回繰り返しの引張応力 1.3 GPa に対する耐久性
- (5) SMES 適用への Y 系線材のポテンシャルの高さから、Y 系線材を用いることで SMES コイルの高温運転や高磁界コンパクト化が可能となり、SMES の信頼性・効率向上や大容量化が可能となる。

第4章の参考文献

- [1] N. Kashima, T. Niwa, S. Nagaya, K. Onabe, T. Saito, T. Muroga, S. Miyata, T. Watanabe and Y. Yamada: “Long tape processing for coated conductors by multiple-stage CVD method,” *Physica C*, Vol. 412-414, pp. 944-947, 2004.
- [2] Y. Yamada, T. Muroga, H. Iwai, T. Watanabe, S. Miyata and Y. Shiohara: “Current status of pulsed laser deposition YBCO coated conductors in SRL using buffer layers by ion-beam assisted deposition GZO and self-epitaxy pulsed laser deposition CeO_2 ,” *Supercond. Sci. Technol.*, Vol. 17, S328-S331, 2004.
- [3] N. Kashima, T. Niwa, M. Mori, S. Nagaya, T. Muroga, S. Miyata, T. Watanabe, Y. Yamada, T. Izumi and Y. Shiohara: “Fabrication of Coated Conductors by Multiple-Stage CVD,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 15, pp. 2763-2766, 2005.
- [4] K. Himeki, M. Kiuchi, E. S. Otabe, T. Matsushita, K. Shikimachi, T. Watanabe, N. Kashima, S. Nagaya, Y. Yamada and Y. Shiohara: “Dependence of superconducting layer thickness on critical current density of IBAD/CVD processed YBCO coated conductors,” *Physica C*, Vol. 469, pp. 1457-1461, 2009.
- [5] A. Xu, J. J. Jaroszynski, F. Kametani, Z. Chen, D. C. Larbalestier, Y. L. Viouchkov, Y. Chen, Y. Xie and V. Selvamanickam: “Angular dependence of J_c for YBCO coated conductors at low temperature and very high magnetic fields,” *Supercond. Sci. Technol.*, Vol. 23, 014003 (7pp), 2010.
- [6] V. Selvamanickam, A. Guevara, Y. Zhang, I. Kesgin, Y. Xie, G. Carota, Y. Chen, J. Dackow, Y. Zhang, Y. Zuev, C. Cantoni, A. Goyal, J. Coulter and L. Civale: “Enhanced and uniform in-field performance in long (Gd, Y)-Ba-Cu-O tapes with zirconium doping fabricated by metal-organic chemical vapor deposition,” *Supercond. Sci. Technol.*, Vol. 23, 014014 (6pp), 2010.
- [7] 東川甲平: 「瞬時電圧低下補償用高温超電導 SMES の最適設計に関する基礎研究」、京都大学博士学位論文、2007.

- [8] K. Higashikawa, T. Nakamura, K. Shikimachi, N. Hirano, S. Nagaya, T. Kiss and M. Inoue: "Conceptual Design of HTS Coil for SMES Using YBCO Coated Conductor", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 17, No. 2, pp. 1990-1993, 2007.
- [9] K. Higashikawa, T. Nakamura, M. Sugano, K. Shikimachi, N. Hirano and S. Nagaya: "Performance Improvement of YBCO Coil for High-Field HTS-SMES Based on Homogenized Distribution of Magnetically-Mechanically Influenced Critical Current," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 18, No. 2, pp. 758-761, 2008.
- [10] M. Sugano, T. Nakamura, T. Manabe, K. Shikimachi, N. Hirano and 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, pp. 115019, 2008.
- [11] 式町浩二、丹羽利治、鹿島直二、長屋重夫：「CVD法による銀テープ上 YBCO薄膜の機械特性」、第70回低温工学・超電導学会講演概要集、p. 161, 2004.
- [12] 式町浩二、鹿島直二、渡部智則、長屋重夫、八木正史、向山晋一、和泉輝郎、中尾公一、塩原融：「銅安定化CVD-YBCO線材の機械特性」、第75回低温工学・超電導学会講演概要集、p. 184, 2006.
- [13] 式町浩二、鹿島直二、渡部智則、長屋重夫、八木正史、向山晋一、和泉輝郎、中尾公一、塩原融：「コイル応用のための銅複合化CVD-YBCO線材の曲げ歪特性評価」、第76回低温工学・超電導学会講演概要集、p. 154, 2007.
- [14] M. Sugano, K. Shikimachi, N. Hirano and S. Nagaya: "Simultaneously Bending and Tensile Strain Effect on Critical Current in YBCO Coated Conductors," *Physica C* 463-465, pp. 742-746, 2007.
- [15] 菅野未知央、北條正樹、吉田悠介、橋本雅弘、式町浩二、平野直樹、長屋重夫：「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」、第75回低温工学・超電導学会講演概要集、p. 127, 2006.

