

2.2 超電導電力ケーブル研究開発

2.2.1 66 kV 大電流ケーブル化技術の開発

Y系超電導線材はBi系超電導線材に比べ高い臨界電流密度を有し、また低交流損失を実現できる可能性も有している。このことから、66 kV/5 kA級のコンパクトで大容量の超電導ケーブルの開発を目指している。過去の検討から、交流損失を低減するためにはY系超電導線材テープ表面に対しての垂直磁場の影響を低減する必要があり、細線化線材の適用や、多層化時の影響を考慮したケーブル設計を行う必要がある。本開発では、ケーブル形状に導体化した場合の線材特性への影響、多層導体構造での低交流損失設計の検討および低損失化の実証、ケーブルの機械的強度特性に関する検証等を行った。併せて大電流適用に対応した電流リード部と超電導-常電導接続部の構造設計の開発を行った。また、三心一括型ケーブルとする場合には、三心形状での機械特性や熱収縮応力下でのケーブル変形の影響、短絡電流通過時の電磁力によるケーブルコアへの影響等が懸念されるため、それらの検証・評価を行った。

さらに、66 kV級大電流ケーブルの実用性を検証するためには、大電流通電技術、交流損失低減技術等の開発成果を活かしたケーブルを作製し、実用化時の要求仕様に基づいた課通電試験を行う必要がある。このため、課通電試験向けケーブルシステムの設計および課通電試験計画案を作成した。

なお、本プロジェクトで設定した目標を表 2.2.1-1 にまとめる。

表 2.2.1-1 大電流ケーブルの開発目標

項目	中間目標	最終目標
①大電流・低交流損失 交流損失の測定・評価 ケーブル導体の評価	ケーブル交流損失 2 W/m-相@5 kA 以下	左記、各要素特性を備えた 66 kV/5 kA/15 m ケーブルを開 発し、2.1 W/m-相以下の損失検 証と、課通電試験計画書に沿っ た試験を行い、ケーブルがそれ らの特性を有していることを 検証する
②三心一括ケーブル導体の検証 三心一括型導体の試作・評価 過電流通過時の影響評価	短絡試験 (31.5 kA, 2 sec 相 当) でケーブルの性能に劣化 が無いこと	
③大容量接続技術の開発 接続部の構造設計検証 5 kA 級電流リードの開発	5 kA 連続通電を行い、ケー ブル導体、超電導-常電導接 続部、電流リードに異常がな いこと	
④システム検証 システム設計 試験条件検討	検証用超電導ケーブルシス テムのシステム設計完了 課通電試験計画書の作成	

2.2.1-1 大電流導体技術(住友電気工業)

(1) 研究開発目標

超電導ケーブルの通電電流を 5 kA に大容量化するためには多層導体を形成する必要がある。一方で、導体多層化時の課題としては、ケーブルの大径化や各層に対して通電電流を均等に分配させる(均流化)設計の必要性が挙げられる。このため、本項では、66 kV 級三心一括型超電導ケーブルの構造について説明した後に、大電流化(多層化)に関して検討した結果について述べる。

(2) 三心一括型超電導ケーブルの構造

三心一括型超電導ケーブルの構造を図 2.2.1-1 に示す。三本のコアを 1 つの断熱管に収納する構造であり、それぞれのコアに断熱管を必要とする単心型超電導ケーブル・3 条と比較して、ケーブルの布設スペースや外部侵入熱が小さくなるメリットを有している。ケーブルコアは、銅撚り線フォーマの上に、超電導導体層、電気絶縁層、超電導シールド層、銅シールド層を同軸上に巻付けた構造となっている。定常時は超電導導体層に送電電流が流れる。この際、両端末で三心コアのシールド層を短絡接続することにより、超電導シールド層には電磁誘導によって導体電流とほぼ同じ大きさの電流を逆位相で流すことができる。本構造により、磁気遮蔽が実現でき、ケーブルの外部に対して EMI (Electromagnetic Interference; 電磁波障害) フリーとなる。

また、短絡事故時においては、定格電流の数倍の大電流が導体やシールドに流れるが、この事故電流を超電導線のみで流すように設計すると非経済的である。よって、超電導導体層に対しては銅フォーマを、超電導シールド層に対しては銅シールド層を設けることにより、事故電流をこれらの保護層に分流させ、温度上昇を抑制する構造を採用している。

ケーブルコアを収納する二重ステンレスコルゲート管の間には多層断熱層を設けるとともに、高真空に維持することにより、高い断熱性能を得ている。

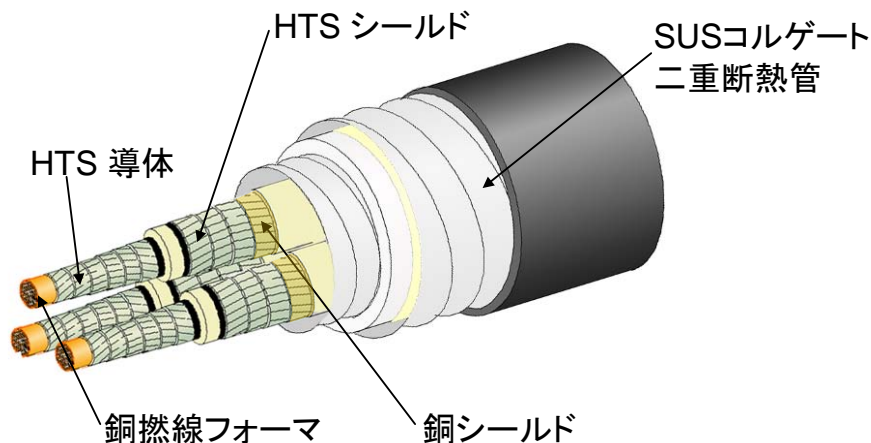


図 2.2.1-1 三心一括型超電導ケーブルの構造

(3) 三心一括型超電導ケーブルの設計検討

上記のような構造を有する三心一括型超電導ケーブルに対して、超電導導体層および超電導シールド層の層数をパラメータとして構造設計を行った結果を表 2.2.1-2 に示す。一例として、「超電導導体 4 層、超電導シールド 2 層」構造の設計結果を表 2.2.1-3 に示す。フォーマにはこれまでに 66 kV 級超電導ケーブル用フォーマとして使用した実績のある分割集合タイプの銅撚り線フォーマを採用し、絶縁層は液体窒素中で良好な課電実績を有する PPLP[®] (Polypropylene laminated paper) を主絶縁とし、実績のある 7 mm 厚に対して裕度を削った 6 mm 厚で設計を行った。なお、Y 系超電導線材の厚みは 0.17 mm とした。本ケーブルの開発目標である内径 150 mmφ の管路内に収納するためには、ケーブル外径を 140 mm 以下に抑える必要があり、表 2.2.1-2 に示す結果から「導体 6 層、シールド 3 層」が多層化の限界であることが分かる。なお、「導体 2 層、シールド 1 層」構造では、現状の線材特性に対して 5 kA の通電容量を確保することが困難なため設計候補から除外した。

表 2.2.1-2 多層超電導ケーブルの設計結果

	導体 2 層 シールド 1 層	導体 4 層 シールド 2 層	導体 6 層 シールド 3 層	導体 8 層 シールド 4 層
コア外径 (mm)	39.7	41.7	43.6	45.6
ケーブル外径 (mm)	131.5	135.8	140.0	144.3

表 2.2.1-3 多層超電導ケーブルの設計例 (導体 4 層、シールド 2 層)

項目	諸元	外径 (mm)
フォーマ	140 mm ² 分割集合銅撚り線導体	18.0
超電導導体	4 層、層間絶縁あり	20.3
絶縁層	内部半導電層 主絶縁層 : PPLP [®] 、厚さ 6 mm 外部半導電層	33.7
超電導シールド	2 層、層間絶縁あり	34.7
銅シールド	4 層、層間絶縁あり	39.2
保護層 (ケーブルコア外径)	クラフト紙、不織布	41.7
断熱管 (ケーブル外径)	二重ステンレスコルゲート管 真空多層断熱方式 PVC 防食層	135.8

交流超電導ケーブルにおいて導体を多層化した場合、各層の巻付けピッチ（スパイラルピッチ）を同じにすると、各層のインダクタンスが外層ほど小さくなるために電流は外層に集中して流れる。このような偏流状態にある導体では各層の負荷率（臨界電流値に対する通電電流ピーク値の割合）が大きく異なり、大容量化や低損失化が困難となる。この偏流現象を解消するため、各層のスパイラルピッチを調整して、各層の電流を均一に（均流化）する方法が一般的に用いられている。

多層導体の各層を図 2.2.1-2 に示す円筒モデルで近似し、電流がスパイラル方向と平行に流れていると仮定した場合、各層の自己インダクタンスと相互インダクタンスは式(2.2.1-1,2)で表される。ここで、 d はケーブルの長さ、 a は各層の中心半径、 p は各層の撚りピッチ、 s は撚り方向の係数（S 撚りが 1、Z 撚りが -1）である。

$$L_i = \mu_0 \frac{\pi a_i^2}{p_i^2} d + \frac{\mu_0 d}{2\pi} \left(\ln \frac{2d}{a_i} - 1 \right) \quad (2.2.1-1)$$

$$M_{ij} = \mu_0 s_i s_j \frac{\pi a_i^2}{p_i p_j} d + \frac{\mu_0 d}{2\pi} \left(\ln \frac{2d}{a_j} - 1 \right) \quad (j > i) \quad (2.2.1-2)$$

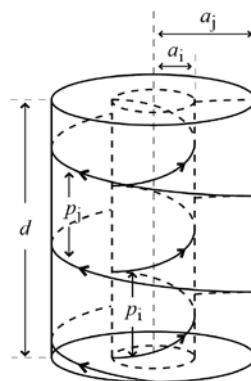


図 2.2.1-2 多層導体の円筒モデル

上記インダクタンスを用いて多層導体の電気回路方程式をたて、各層の電流値が等しくなるような条件で解いたときに得られる解が、各層を均流化するスパイラルピッチとなる。このとき注意すべき点として以下の 3 点が挙げられる。

- ① 線材をフォーマ上に巻きつけたときに特性が低下しないスパイラルピッチ以上で構成する。
 - フォーマに対するスパイラル試験の結果、100 mm ピッチ以下では線材の歪みが限界歪みを超え I_c が低下するため、最小スパイラルピッチを 120 mm として導体設計を実施した。
- ② ケーブルをドラム曲げした際に特性が低下しないスパイラルピッチ以下で構成する。
 - 集合機を用いた導体化後の曲げ試験において、600 mm ピッチ以上では線材に座屈発生したため、最大スパイラルピッチを 500 mm として

ケーブル設計を実施した。

③ 製造時や布設時に発生するピッチ乱れを許容できる解を選択する。

図 2.2.1-3 は、最小スパイラルピッチを 120 mm として多層導体の均流化ピッチを検討した結果であり、2 層導体および 4 層導体については設計可能な解が存在するが、6 層導体については解が存在しない。なお、最小スパイラルピッチを 100 mm として 6 層導体の均流化ピッチを検討した場合には、600 mm 以下の範囲で解が存在するが、この際には要求されるスパイラルピッチの精度が数 mm 以下と非常に厳しく、ケーブル設計が困難と判断した。なお、各層の巻方向を変えたり、超電導シールド層が存在したりする場合の均流化ピッチの解は異なるが、必要な最大スパイラルピッチは大きくは変わらない。

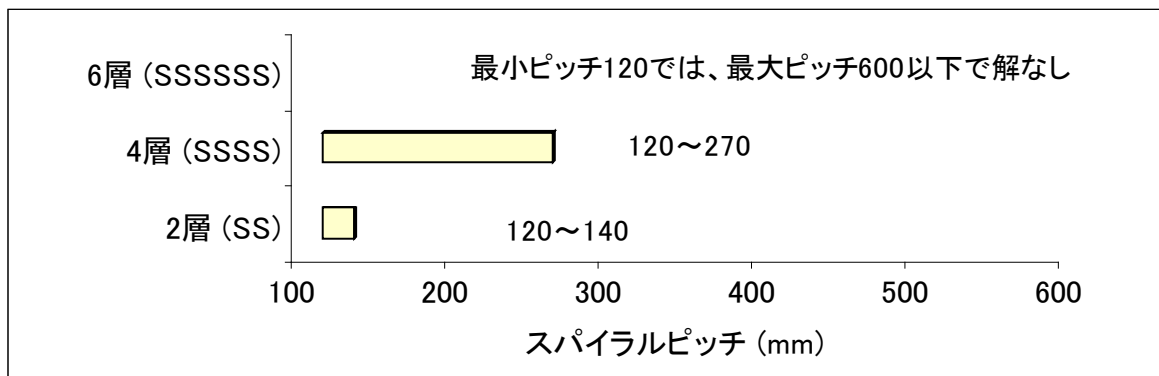


図 2.2.1-3 均流化ピッチ検討結果

(4) まとめ

- ・ 内径 150 mmφの管路に収納できる大電流ケーブルの構造に関する設計検討を行った結果、「超電導導体 4 層、超電導シールド 2 層」構造を選定し、各種要素技術開発を進めることとした。

2.2.1-2 交流損失低減技術(住友電気工業、京都大学)

(1) 研究開発目標

従来ケーブルと比較して超電導ケーブルの送電損失を低減するために、交流損失の低減は重要な技術課題である。Y 系超電導線材の超電導層は非常に薄く、断面アスペクト比が非常に大きいため、その交流損失特性は著しい異方性を示す。すなわち、線材面に平行な交流磁界変動に対する交流損失は大変小さく、線材面に垂直な交流磁界変動に対する交流損失は大きくなる。一般的に、超電導ケーブルにおいては、磁界は線材面に平行な成分が主となるが、Y 系超電導線材においては、その著しい異方性ゆえに、交流損失は実質的には線材幅方向端部近傍の垂直磁界成分に支配され、その低減が交流損失低減の鍵となる。下記のプロジェクト目標を達成する

ため、線材の細線化と可撓性の利用という二つのアプローチを用いて、交流損失低減に関する技術開発を行った。

●中間目標（平成 22 年度）

- ・ ケーブル損失（交流損失）2 W/m-相@5 kA 以下

(2) 低損失化への指針

薄い超電導層で真円状断面の円筒を構成し、それに交流電流を通電した場合、磁界は超電導層に完全に平行になるため、交流損失は極めて小さくなる。高臨界電流密度の単層円筒超電導体が交流損失低減の観点から超電導ケーブルの理想形であるが、このようなケーブルを製造することは難しく、現実のケーブルは数 mm 幅の超電導線材を多角形状、多層に集合化して構成されている。この場合、集合導体断面が真円でなく多角形であること、線材間の有限のギャップ数で導体周りの磁力線が乱れることに起因して線材面に対する垂直磁界成分が発生し、交流損失を増加させている。このため、図 2.2.1-4 に示すように、「線材の細線化」と「線材の可撓性を活かした導体化」により、集合導体断面を真円に近づけ、垂直磁界成分を減少させることにより低損失化を図った。

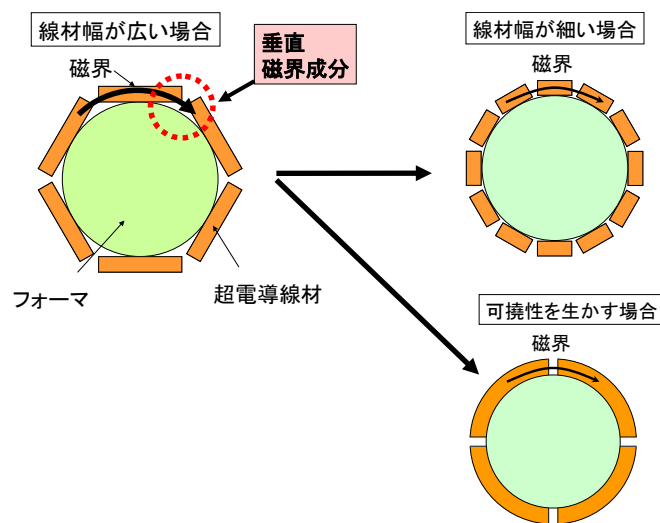


図 2.2.1-4 低損失化の指針（細線化と可撓性）

(3) 細線化による交流損失低減

集合導体断面を真円形状に近づけて垂直磁界成分を減少させ、交流損失を低減するためには、線材を細線化して、層を構成する線材数を増加させればよい。これにより、臨界電流と導体層の径を一定に保ったままで多角形の角数が増加して真円に近づく。一方で、現実の集合導体では、線材間のギャップの存在も垂直磁界成分発生につながるが、線材数を増やすということはギャップ数を増やすことであり、細線化（線材数増加）に伴うギャップ数増加は交流損失を増加させる可能性もある。そこで、数値電磁界解析によって超電導ケーブルの交流損失を求め、細線化による

交流損失低減効果について理論的に評価した。

実際のケーブルでは、各層を構成する線材はケーブル（集合導体）軸に対して螺旋（スパイラル）を成しているが、このようなスパイラル構造は無視して線材はケーブル軸に等しいと仮定し、ケーブル（集合導体）軸に垂直な 2 次元平面内で解析を行った。さらに、Y 系超電導線材の超電導層は極めて薄いことから、各線材について、線材面に平行な磁束密度成分・線材面に垂直な電流密度成分を無視した薄板近似を適用した⁽¹⁾。

まず、基礎的な現象を把握するため、表 2.2.1-4 に線材幅と各層の構成を示した線材間ギャップ 0.2 mm の 2 層導体（断面を図 2.2.1-5 に示す）および、その外層と同構成の単層導体に対して解析を行った。交流損失の計算値を図 2.2.1-6 に示す。

●単層導体の解析結果（図 2.2.1-6 (a)参照）

- ・ 線材幅を 8 mm から 4 mm に減らすと交流損失は大幅に減少する。これは、導体の断面が真円形状に大きく近付き、これにより線材面に対する垂直磁界成分が大幅に減るためと考えられる。
- ・ 線材幅を 4 mm から 2 mm に減らしても損失はあまり減少しない。この領域では、導体断面が真円に近づくというメリットと、ギャップ数増加というデメリットが拮抗してしまうためと考えられる。

●2 層導体の解析結果（図 2.2.1-6 (b)参照）

- ・ 線材幅を 4 mm から 2 mm に減らしても交流損失は大きく減少する。その原因は外層の損失減少にある。外層の交流損失の主要因は、内層電流の作る外部磁界であり、内層電流が作る外部磁界に関して言えば、線材間ギャップの存在が外層線材に対する垂直磁界成分を増加させることはない。このため、細線化によって、線材間ギャップの数が増えることは外層の損失を押し上げず、断面が円に近づくという細線化のメリットがうまく利用され、交流損失が低減すると考えられる。
- ・ 線材間ギャップを 0.2 mm から 0.4 mm に広げることにより交流損失は増加する。層数の少ない導体において、細線化によって交流損失を低減する場合には、線材間ギャップを小さく保った状態で線材を集合する技術が重要である。

表 2.2.1-4 線材幅と 2 層導体の内層・外層の線材数

線材幅	2 mm	4 mm	8 mm
1 層目（内層）の線材本数	32	16	8
2 層目（外層）の線材本数	36	18	9
線材間ギャップ	0.2 mm		
内径	22.3 mm	21.1 mm	19.8 mm
外径	25.2 mm	23.8 mm	22.6 mm
内層と外層の距離	1.4 mm	1.35 mm	1.36 mm

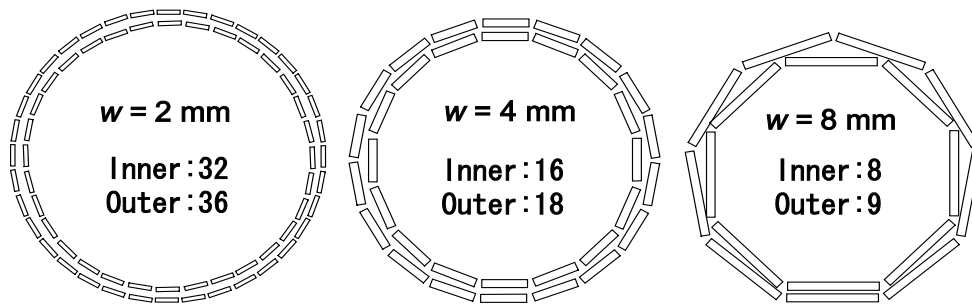
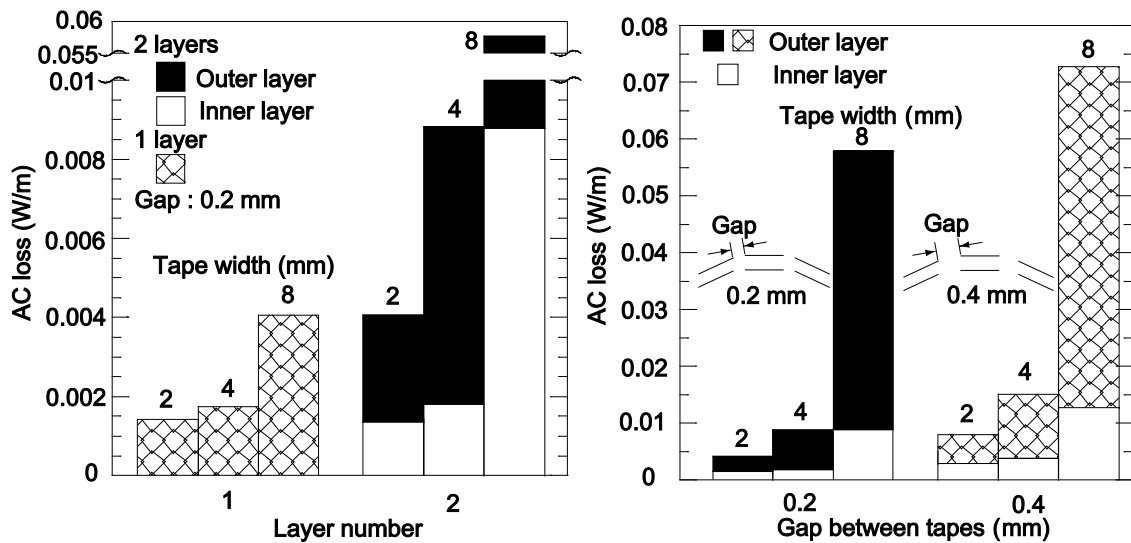


図 2.2.1-5 2層導体の断面図



(a)線材幅の影響、(b)線材間ギャップの影響

図 2.2.1-6 単層および2層導体の交流損失解析結果

次に、表 2.2.1-5 に諸元を示すような、2 mm 幅および 4 mm 幅線材で構成した 4 層導体の交流損失を計算して比較した。導体臨界電流は 11.8 kA に、通電電流は 5 kA_{rms} に固定した。ギャップは表に示すような 3 通りをパラメータとし、線材幅方向の J_c 分布については、図 2.2.1-7 に示すように、一様な場合、線材端部 0.2 mm で J_c が低下している場合、線材端部 0.3 mm で J_c が低下している場合の 3 通りについて計算を行った。図 2.2.1-8 に交流損失の計算結果を示す。

●4層導体の解析結果

- ・ 4層導体においても、線材幅を 4 mm 幅から 2 mm 幅に減らす効果は大きい。
- ・ 2層導体と比較して、線材間ギャップが交流損失に与える影響は小さく、0.4 mm 程度のギャップであれば損失の増加は小さい。
- ・ 線材幅方向 J_c 分布が交流損失に与える影響は大きい。特に 2 mm 幅線材を用いた場合には、理想的な Flat な J_c 分布 (J_c 均一) を有する線材と、端部 0.3 mm で J_c が低下している線材では損失が倍程度異なる。
- ・ 2 mm 幅線材を用いた導体の損失は 1 W/m@5 kA 程度に収まっており、4層導体で 12 kA 級の I_c を有する導体の実現できれば損失目標達成の可能性が高い。

- 4 mm 幅線材を用いた導体の損失は 2 W/m@5 kA 程度であり、損失目標達成には、導体の高 I_c 化、あるいは後述する線材の可撓性を活かした低損失化等が必要である。

表 2.2.1-5 2 mm 幅および 4 mm 幅線材で構成する 4 層導体の諸元

線材幅	線材本数	ギャップ (mm)	線材 I_c (A)	導体 I_c (kA)	通電電流 I_c (kA _{rms} /kA)
2	25	Small: 0.26/0.25/0.24/0.23	111	11.8	5/7.07
	26	Midium: 0.36/0.35/0.34/0.33			
	27	Large: 0.56/0.55/0.54/0.53			
4	13	Small: 0.26/0.25/0.24/0.23	203	11.8	5/7.07
	14	Midium: 0.36/0.35/0.34/0.33			
	15	Large: 0.56/0.55/0.54/0.53			
	16				

※ ギャップ数値は内層側から外層側へ順番に記載

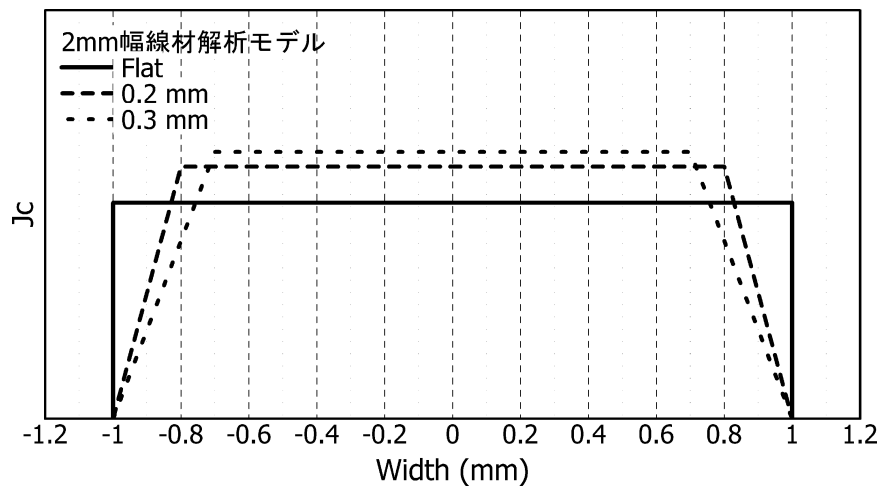
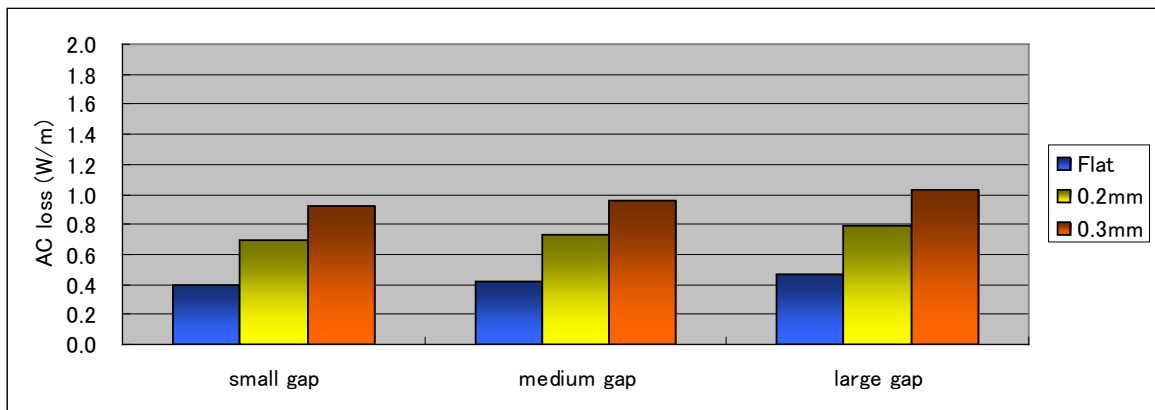
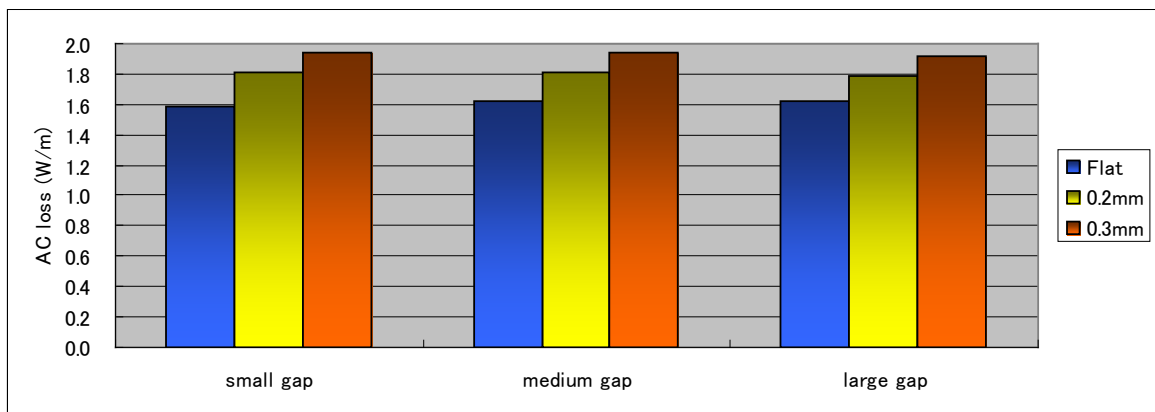


図 2.2.1-7 線材端部 J_c 低下を模擬した幅方向 J_c 分布モデル (2 mm 幅線材)



(a) 2 mm 幅線材の解析結果



(b) 4 mm 幅線材の解析結果

図 2.2.1-8 4 層導体の交流損失解析結果

(線材間ギャップと線材端部 J_c 低下が損失に与える影響)

●シールド付きケーブルコアの解析結果

表 2.2.1-6 に諸元を示すような、「導体 4 層、シールド 2 層」構造のケーブルコアの交流損失を計算して比較した。なお、導体層は 2 mm 幅の線材を用いて構成し、シールド層は 2 mm 幅線材を用いた場合と、4 mm 幅線材を用いた場合の 2 通りを計算した。導体層及びシールド層の臨界電流は 11.8 kA に、通電電流は 5 kA_{rms} に固定した。なお、線材の幅方向 J_c 分布は Flat (J_c 均一) である。図 2.2.1-9 に交流損失の計算結果を示す。

- ・ シールド層に対しても、線材幅を 4 mm から 2 mm に減らす効果は大きい。
- ・ 4 mm 幅線材を用いた場合でも、シールド層の損失は全体の 1/4 程度であり、ケーブルコアの主たる損失は導体層で発生する。

本解析結果より、シールド層の損失は導体層に比べて小さいことが予想されるため、まずは導体層の低損失化に目処をつけることとした。この際、導体層の低損失化の目標値としては、ケーブルコア全体の損失目標値 (2 W/m@5 kA) の 3/4 に相当する 1.5 W/m@5 kA とした。

表 2.2.1-6 ケーブルコアの諸元 (導体 4 層、シールド 2 層)

導体層数	シールド層数	ギャップ (mm)	線材 I_c (A)	導体 I_c (kA)	通電電流 I_t (kA _{rms} /kA)
4 (2mm 幅)	-	0.26/0.25/0.24/0.23	111	11.8	5/7.07
4 (2mm 幅)	2 (2mm 幅)	0.26/0.25/0.24/0.23 - 0.23/0.22	111 - 119	11.8 - 11.8	
4 (2mm 幅)	2 (4mm 幅)	0.26/0.25/0.24/0.23 - 0.23/0.22	111 - 231	11.8 - 11.8	

※ ギャップ数値は内層側から外層側へ順番に記載

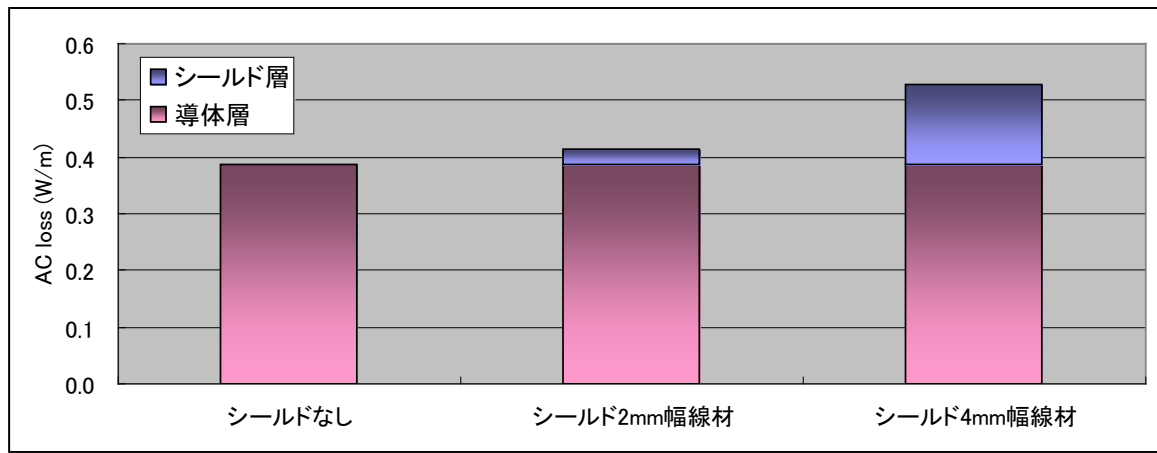


図 2.2.1-9 ケーブルコアの交流損失解析結果 (導体 4 層、シールド 2 層)

以上の解析結果から、細線化による低損失化の方針として、まずは導体層に 2 mm 幅線材を適用した 4 層導体を試作して損失特性を検証することとした。損失目標値は導体層だけで 1.5 W/m@5 kA 以下とし、使用する線材の幅方向の J_c 分布が損失特性に大きく影響することに注意する必要があるため、使用する線材の J_c 分布の測定も合わせて行うこととした。

(4) 可撓性を利用した交流損失低減

ハステロイ™ 基板と異なり、結晶粒配向金属基板はある程度軟らかく可撓性を有している。円形フォーマの上に、配向金属基板上に超電導層を積層した Y 系超電導線材を並べ、その可撓性を利用して円形フォーマに沿わせて変形させれば、多角形導体に比較して線材面に対する垂直磁界成分を低減でき、交流損失を低減できる可能性がある。

まず、可撓性を利用した集合導体の円断面化による損失低減を理論的に検証するため、数値電磁界解析による交流損失計算を行った。円断面化した集合導体においては、損失が低減された結果として線材面に対して平行な磁界成分の交流損失への寄与が無視できなくなる可能性があるため、ここでは、前項で述べた薄板近似は適用せず、線材面に垂直な磁束密度成分と平行な磁束密度成分の双方を考慮して、ケ

ケーブル（集合導体）軸に垂直な 2 次元平面内で解析を行った⁽²⁾。解析は図 2.2.1-10 に示したような集合導体断面が円形になるように線材を変形させた導体と、比較のために平らな線材を集合した六角形導体について行った。解析に用いた有限要素モデルを図 2.2.1-11 に示す。解析対象は線材数 6 本の単層集合導体であるが、対称性から、線材 1 本を実際の解析領域とした。解析結果の磁束線分布と交流損失を図 2.2.1-12、図 2.2.1-13 にそれぞれ示す。円断面化によって、線材端部での線材面に対する垂直な磁束が減り、交流損失は約 10 分の 1 になっている。

次に、幅 10 mm の結晶粒配向金属基板（クラッド基板）線材 6 本を用いて円断面導体と六角形導体を実際に製作し、その交流損失を実測した。それぞれの臨界電流は 887 A と 903 A、線材間ギャップは 0.47 mm と 1.34 mm である。測定にあたっては、線材間の電流分布を一様にするために 6 本の線材を直列接続して通電した。損失測定結果を図 2.2.1-13 に合わせて示す。円断面化によって、交流損失が約 3 分の 1 に低減できていることがわかる。なお、理論値と実験値を比較すると、理論値では交流損失が約 10 分の 1 になっているのに対して、実験値では交流損失の減少は約 3 分の 1 にとどまっている。この理由としては、用いた線材の幅方向の臨界電流密度分布の不均一性や基板の磁性の影響、および導体断面構成の誤差（ギャップの不均一性等）の影響が考えられる。

解析および実験の両面から、線材の可撓性を活かした導体化によって損失の低減が可能であることが示された。しかしながら、線材をフォーマに沿わせて曲げた場合、線材の幅方向曲げによる臨界電流の低下が問題となり得る。表 2.2.1-7 に、上記実験で用いた円断面導体を構成する 6 本の線材の、集合化前（曲げる前の平らな状態）の臨界電流と、集合化後（フォーマに沿わせて曲げた後）の臨界電流を比較して示す。線材によりばらつきはあるものの、線材 1 を除いて 1 割前後の臨界電流の低下が発生している。このように、幅広の線材を完全に小径フォーマに沿わせて集合化した状態では臨界電流が低下するため、実際には、幅 4~5 mm 程度の細線化と可撓性を利用した円断面化とを組み合わせることが現実的と考えられる。

図 2.2.1-8 に示したように、4 mm 幅線材を用いた 4 層導体 ($I_c=11.8$ kA) では、1.5 W/m@5 kA 以下にすることは難しいが、可撓性を組み合わせることにより 2 割程度損失が低減されれば損失目標を達成できる可能性がある。このため、4 mm 幅線材を用いた 4 層導体についても試作を行い、損失特性を評価することとした。

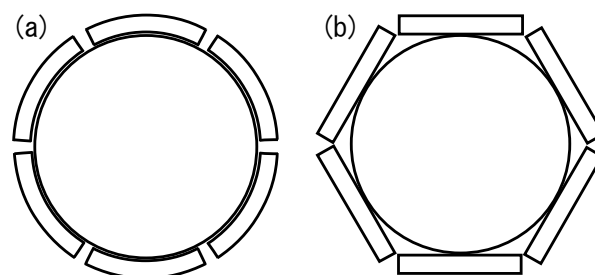
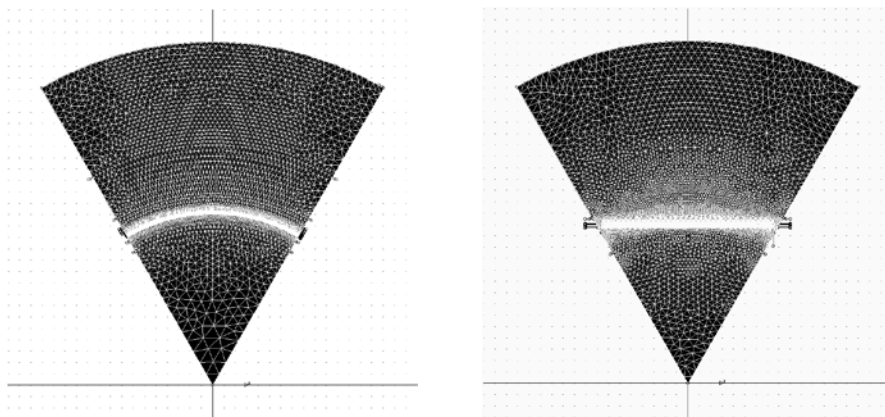
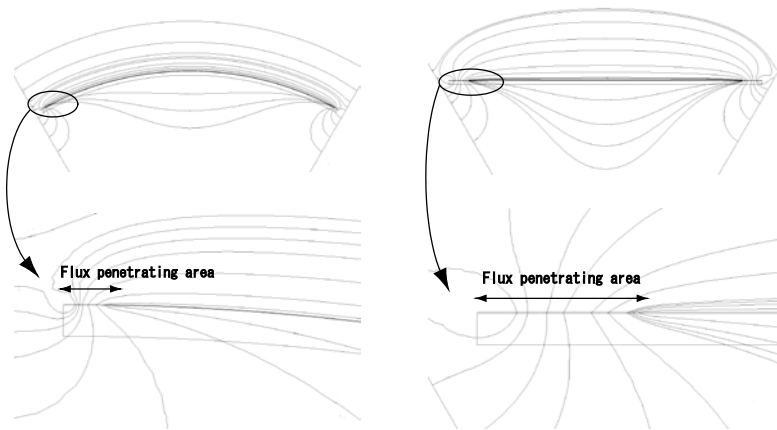


図 2.2.1-10 円断面導体と六角形導体



(a)可撓性を利用した円断面導体 (b)六角形導体

図 2.2.1-11 解析対象の有限要素モデル



(a)可撓性を利用した円断面導体 (b)六角形導体

図 2.2.1-12 解析によって求められた磁束分布図

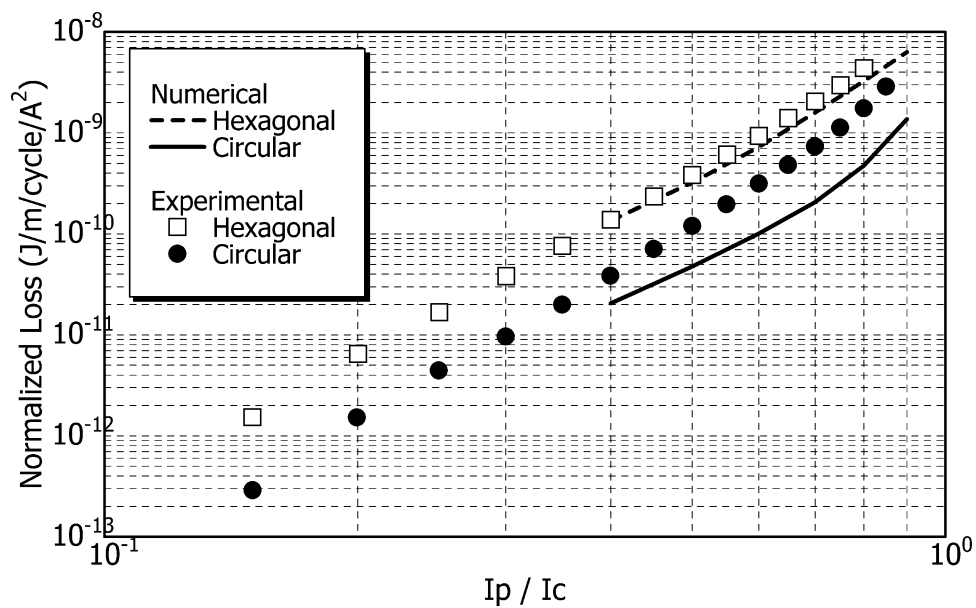


図 2.2.1-13 円断面導体と六角形導体の交流損失比較 (解析および実験結果)

表 2.2.1-7 円断面集合導体における各線材の幅方向曲げによる臨界電流低下

線材番号.	1	2	3	4	5	6
曲げ前の I_c	168 A	168 A	164 A	162 A	168 A	169 A
曲げた状態の I_c	136 A	151 A	151 A	146 A	147 A	155 A

(5) 低損失配向基板線材の評価

上記検討により、2 mm 幅への細線化、4 mm 幅程度の線材で可撓性を活かすという二つのアプローチがともに交流損失低減に有効であるという見通しを得ることができた。一方で、結晶粒配向金属基板線材を用いる場合、基板自体が有する磁化損失（ヒステリシス損失）の低減が課題となる。住友電気工業では、これまで Ni 合金配向基板を用いた線材開発を行っていたが、金属基板の磁化損失が大きく、機械強度も弱いという問題点があった。このため、高強度のステンレステープの表面を、2 軸配向を有する銅およびニッケル膜で覆ったクラッドタイプの結晶粒配向金属基板（Clad 基板）を開発した。図 2.2.1-14 は、Clad 基板および Ni 合金基板のヒステリシス曲線を示しており、Ni 合金基板に比べて Clad 基板の磁性が大きく低下しているのが分かる。表 2.2.1-8 に示すように、基板の磁化損失は 1/25 に低減、強度は 2.5 倍に向上し、安価で高強度かつ低損失な配向基板の開発に成功した。

表 2.2.1-8 基板の磁化損失と機械強度

基板	磁化損失 (J/m^3)	機械強度 (MPa)
Clad 基板	52	500
Ni 合金基板	1300	200

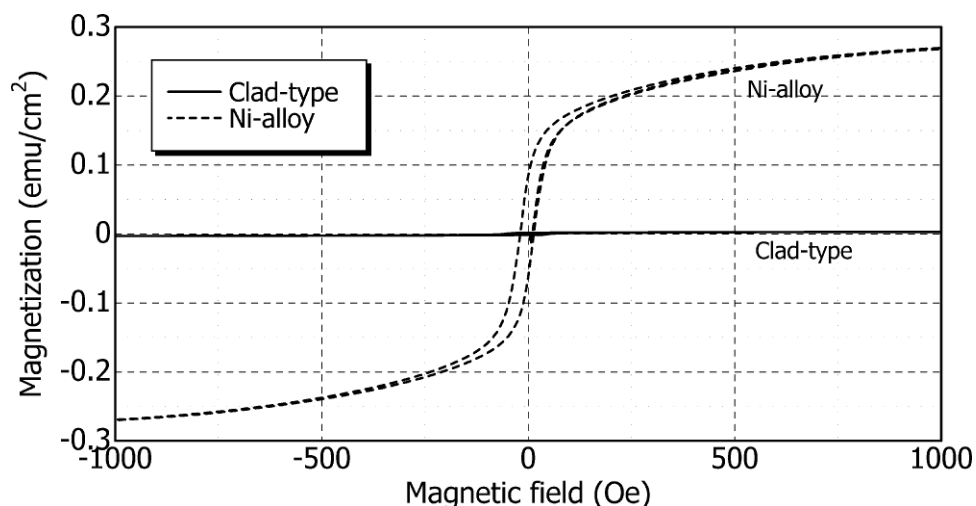


図 2.2.1-14 基板のヒステリシス曲線

Clad 基板線材のケーブルへの適性を検証するため、10 mm 幅で成膜した Clad 基板線材を 2 mm 幅にスリットして 2 層導体（C-1）を作製した。作製した導体の

諸元を表 2.2.1-9 に示す。なお、比較対象として 4 mm 幅の Ni 合金基板線材を用いて作製した導体 (C-2) の諸元も同表中に示す。図 2.2.1-15 に 2 本の導体の交流損失測定結果を示す。使用した線材の臨界電流値 (I_c) の差異により導体 I_c が大きく異なるため、横軸は I_c で規格化した通電電流ピーク値、縦軸は I_c の 2 乗で規格化した交流損失値で示す。主に基板の磁化損失 (Q_{Sub}) の低減により、C-1 の損失は C-2 に比べて大きく低減している。Clad 基板線材を用いた C-1 の損失は 0.08 W/m@1 kA_{rms} であり、本線材を用いたケーブルの低損失化の可能性を実証した⁽³⁾。

表 2.2.1-9 超電導導体の諸元

導体番号	C-1	C-2
フォーマ直径	17.5 mm	18.5 mm
超電導導体層 (2 layers)	Clad-type wires 2 mm-w, 52 本	Ni-alloy wires 4 mm-w, 28 本
外径	18.5 mm	19.5 mm
長さ	1.5 m	1.0 m
導体臨界電流 (I_c)	2440 A	1340 A

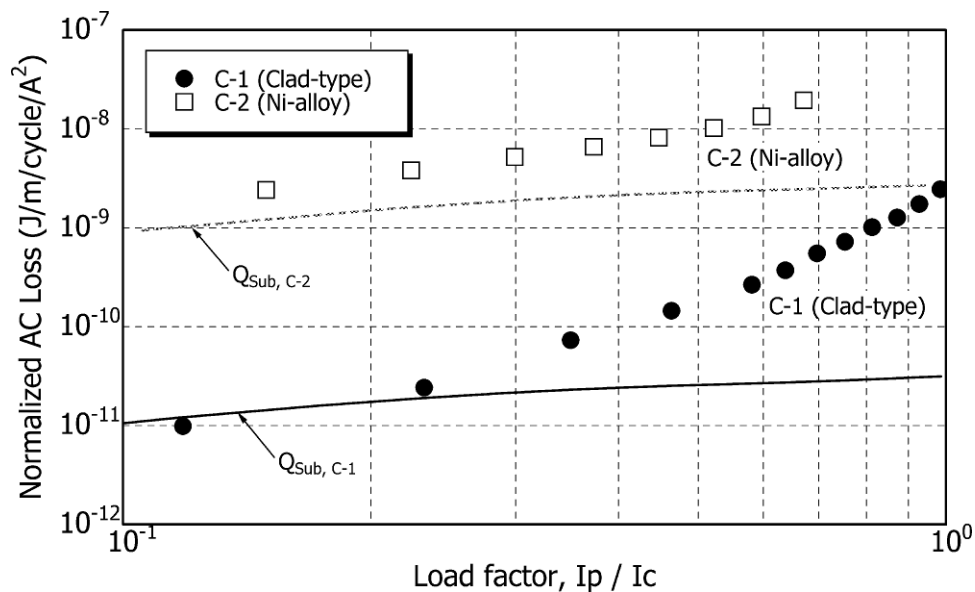


図 2.2.1-15 超電導導体の交流損失測定結果 (規格化)

(6) 大電流導体の試作・評価

次ステップとして、4 層構造の多層ケーブル導体の試作を行い、交流損失特性の評価を実施した。使用した線材の仕様を表 2.2.1-10 に示す。線材は、幅 30 mm の Clad 基板上に CeO₂ / YSZ / CeO₂ の中間層を積層し、中間層上に GdBa₂Cu₃O_x の超電導層を PLD 法により成膜したものである。上記線材は、Ag 安定化層をスパッタリングした後に 2 mm 幅あるいは 4 mm 幅にスリットされ、全周に銅メッキ

を施してある。ケーブル導体の諸元を表 2.2.1-11 に示す。FRP パイプ上に線材をスパイラル状に巻き付けた 4 層導体であり、各層のスパイラルピッチは、交直流電流が均等に分流するように調整を行っている。なお、導体の有効長は約 1.5 m である。試作した 2 本の導体の臨界電流測定結果 (77 K、大気圧) を図 2.2.1-16 に示す。1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ で定義した臨界電流は、C-3 が 4510 A、C-4 が 4180 A であり、使用した線材の I_c 総和と J_c - B 特性を考慮した計算値と一致することを確認した。

表 2.2.1-10 使用線材の諸元

	2 mm 幅線材	4 mm 幅線材
幅 (mm)	2	4
厚さ (mm)	0.15	0.15
臨界電流@77 K (A)	40~50	70~90

表 2.2.1-11 4 層ケーブル導体の諸元

	C-3 (2 mm 幅線材)	C-4 (4 mm 幅線材)
フォーマ	FRP フォーマ、18 mm ϕ	FRP フォーマ、18 mm ϕ
超電導導体層	4 層 2 mm 幅 Clad 基板線材 (104 本)	4 層 4 mm 幅 Clad 基板線材 (52 本)
臨界電流@77 K (A)	4510	4180

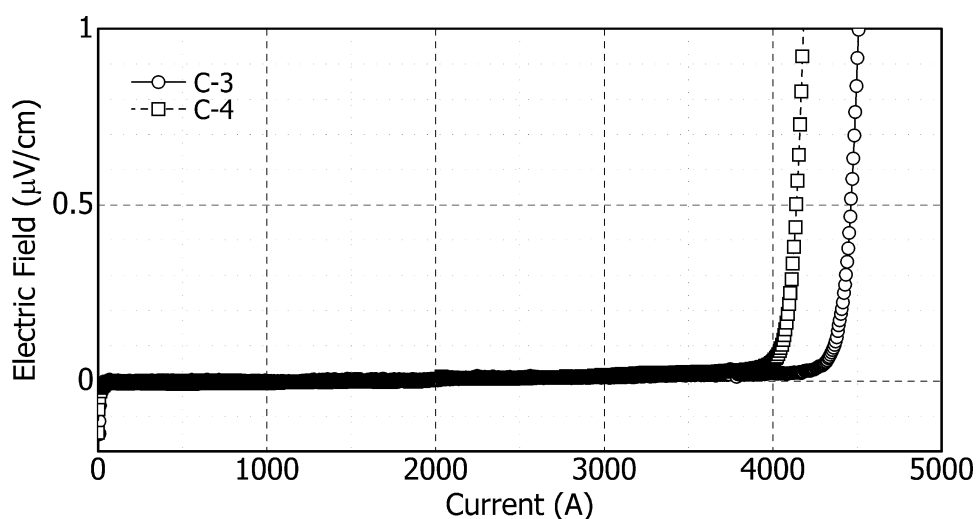


図 2.2.1-16 4 層導体の臨界電流測定結果 (77 K、大気圧)

77 K における 4 層導体の交流損失測定結果を図 2.2.1-17 に示す。同図中には、線材端部の J_c 低下を模擬して、図 2.2.1-7 に示すように、幅方向の J_c 分布が均一でない線材で構成した 4 層導体の交流損失解析結果 (解析導体の臨界電流は全て 4500 A) も示してある。また、実際に 2 mm 幅および 4 mm 幅 Clad 基板線材の幅方向の J_c 分布を磁気ナイフにより測定した結果を図 2.2.1-18 に示す。

- $2 \text{ kA}_{\text{rms}}$ 通電時の損失は、 2 mm 幅線材を用いた 4 層導体 (C-3) が 0.33 W/m (50 Hz , 負荷率 0.63)、 4 mm 幅線材を用いた 4 層導体 (C-4) が 0.47 W/m (50 Hz , 負荷率 0.68) であり、導体 I_c の違いによる負荷率の相違を考慮すると、両者の交流損失はほぼ同程度であると考えられる。
- C-3 (2 mm 幅) について、図 2.2.1-18 に示すように実際の線材の端部 J_c 低下領域が 0.3 mm 程度であるのに対して、導体交流損失実測値は「端部 $0.6 \text{ mm} \cdot J_c$ 低下」を模擬した解析値とほぼ同等である。
- C-4 (4 mm 幅) について、導体交流損失実測値は「端部 $0.3 \text{ mm} \cdot J_c$ 低下」を模擬した解析値とほぼ一致し、実際の線材の端部 J_c 低下と一致する (図 2.2.1-18 参照)。ただし、注意すべき点として、数値解析では線材の可撓性の効果を考慮していないため、 4 mm 幅線材を用いた導体の交流損失実測値も解析値より大きいと見るべきである。

これまでの解析による検討結果から、実験結果と解析結果の乖離の一因として線材幅方向の J_c 分布の不均一性が挙げられる。 J_c 分布測定を行った線材は図 2.2.1-18 に示した 1 サンプルずつのみであり、導体作製に使用した線材の J_c 分布が測定結果とは異なる可能性もある。本件については、今後測定サンプル数を増やして検討を進める。

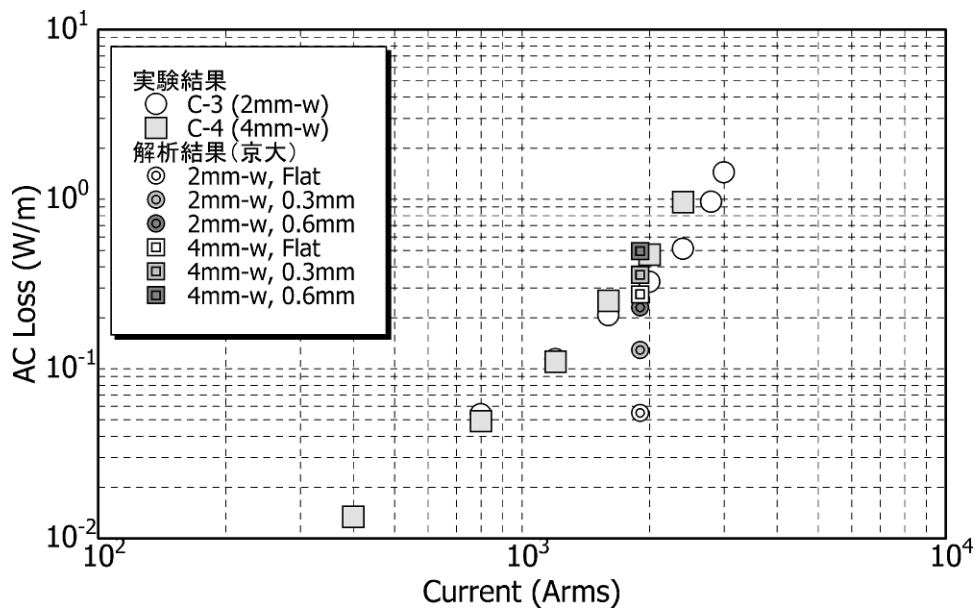


図 2.2.1-17 4 層導体の交流損失測定結果 (77 K、大気圧)

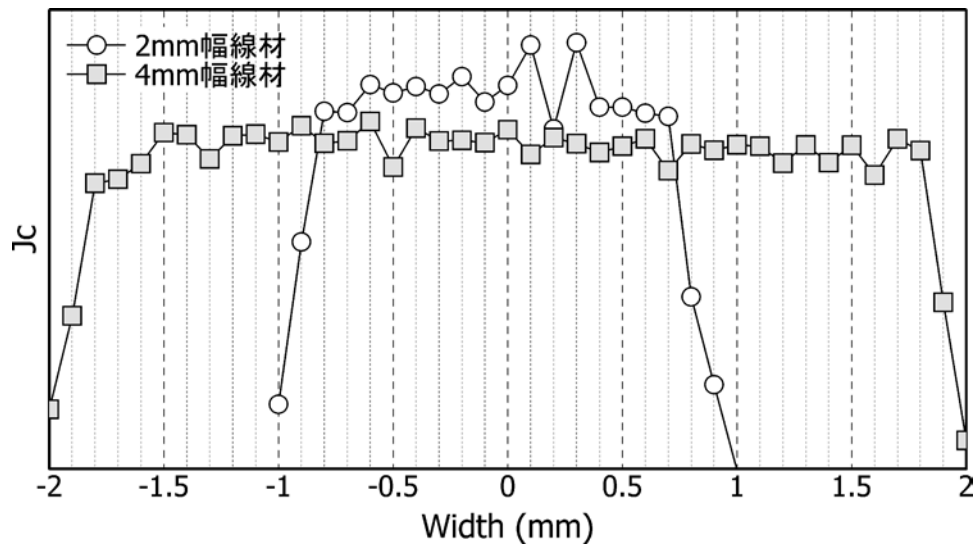


図 2.2.1-18 Clad 基板線材の磁気ナイフによる幅方向 J_c 分布測定結果

(7) 今後の計画と中間目標達成の見通し

上記測定結果および解析結果を踏まえて、A : 4 mm 幅線材を用いた場合の目標達成の方策、B : 2 mm 幅線材を用いた場合の目標達成の方策を以下に示す。なお、下記の線材必要特性については、ケーブル外径を 140 mm まで大きくした場合 (20 mmφ フォーマ) を想定して計算を行っている。

A : 4 mm 幅線材を用いた場合の目標達成の方策

図 2.2.1-19 は、図 2.2.1-17 に示した交流損失測定結果をもとに、線材 I_c が向上した場合を想定して導体損失を予想した曲線である。損失目標である 2 W/m-相@5 kA は「導体層+シールド層」の損失であり、導体層のみの損失としては 1.5 W/m-相@5 kA が目標達成の目安となる。図 2.2.1-19 より目標達成には 14000 A 程度の I_c が必要となる。このとき必要な線材 I_c は下記の通りである。

$$14000 \text{ A} / 59 \text{ 本 (4 mm-w)} = 237 \text{ A} / 4 \text{ mm-w} (= 593 \text{ A/cm-w}) (@77 \text{ K, s.f.})$$

現状の線材 I_c は 100 A/4 mm-w (@77 K, s.f.) (250 A/cm-w) 程度であるが、2.2.3-1 項で述べるように、新レーザの導入によって 320 A/cm-w (@77K, s.f.) 級の特徴が得られている。今後、さらなる特性向上を目指す。中間目標時点では、130 A/4 mm-w (320 A/cm-w) 級線材を用いて導体を製作し、過冷却運転をすることで線材の I_c を高くして上記 14000 A の導体 I_c を得るようにする。例えば、65 K まで運転温度を下げた場合には 1.9 倍程度の臨界電流向上が見込まれるため、計算では 14300 A 程度の導体 I_c が期待できる。これにより、中間目標である 2 W/m/-相 @ 5 kA の検証を行う。

なお、図 2.2.1-17 に示した導体 (C-4) を過冷却により 64 K まで温度を下げて損失を測定した結果は図 2.2.1-20 に示すとおりであり、損失の実測値は 2.8 W/m@4.5 kA であった。このときの導体 I_c は 8730 A であり、必要である 14000 A

には満たないため、中間目標値には達していないが、77 Kの導体 I_c (4180 A) よりも I_c が高くなることで、ほぼ予想通りに損失が低下することを確認した。これにより本指針は、目標達成に向けた方策として有効であると考えられる。

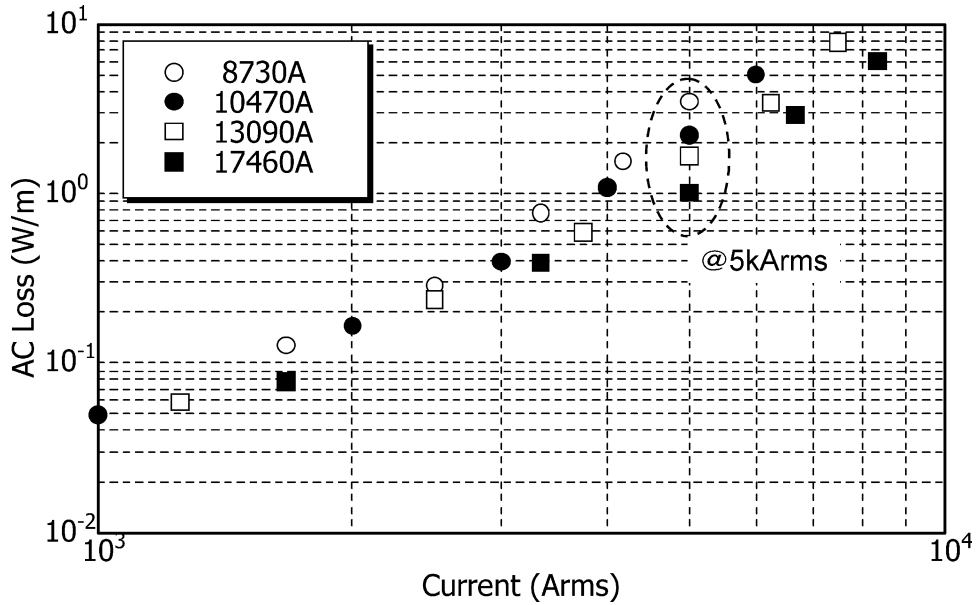


図 2.2.1-19 導体 I_c をパラメータとした損失予想 (4 mm 幅線材)

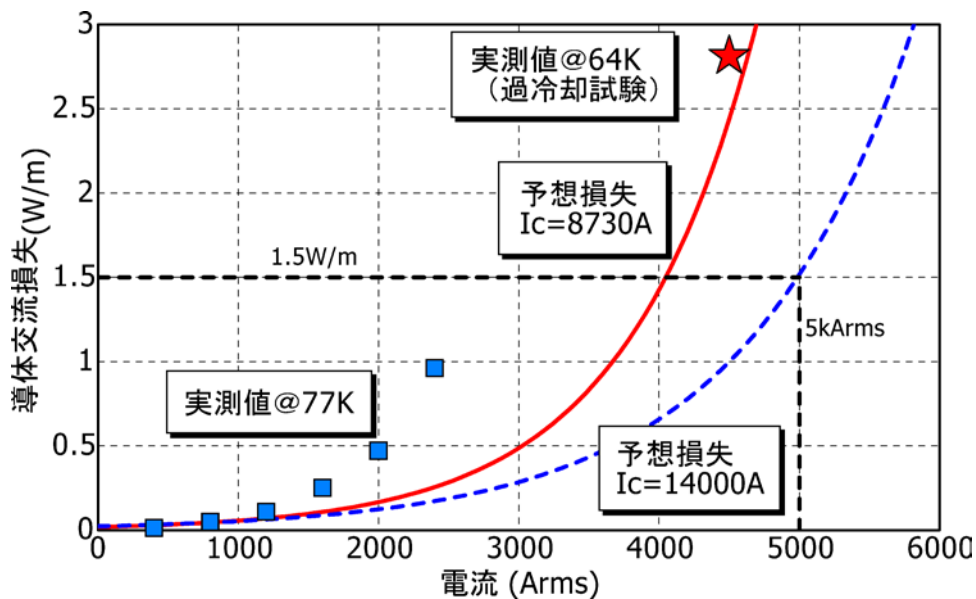


図 2.2.1-20 4 mm 幅線材を用いた 4 層導体の過冷却試験結果

B : 2 mm 幅線材を用いた場合の目標達成の方策

2 mm 幅線材を用いた導体に対して同様の議論をした場合、必要線材 I_c は 400 A/cm-w(@77 K, s.f.)を上回る。一方で、図 2.2.1-17 に示したように、2 mm 幅線材を用いて導体を構成した場合には線材端部の J_c 低下が損失に大きく影響する。今後、線材スリット方法を改善することにより、損失が現状の 2 割程度減少すると想

定して損失を予想した結果を図 2.2.1-21 に示す。この場合には、導体 I_c は 10000 A 程度で目標を達成するが可能となり、このとき必要な線材 I_c は下記の通りである。

$$10000 \text{ A} / 118 \text{ 本} (2 \text{ mm} \cdot \text{w}) = 85 \text{ A} / 2 \text{ mm} \cdot \text{w} (= 425 \text{ A/cm} \cdot \text{w} (@77 \text{ K, s.f.}))$$

現状の 50 A/2 mm-w (250 A/cm-w) (@77 K, s.f.) 級の線材を用いて構成した導体に対して、65 K まで運転温度を下げた場合、11000 A 以上の導体 I_c が期待できるため、中間目標を検証することが可能と推測される。また、2 mm 幅に細線化した線材においても 65 A/2 mm-w (320 A/cm-w) 級の I_c が実現できれば、より 77 K に近い温度領域で目標を検証することが可能と思われる。

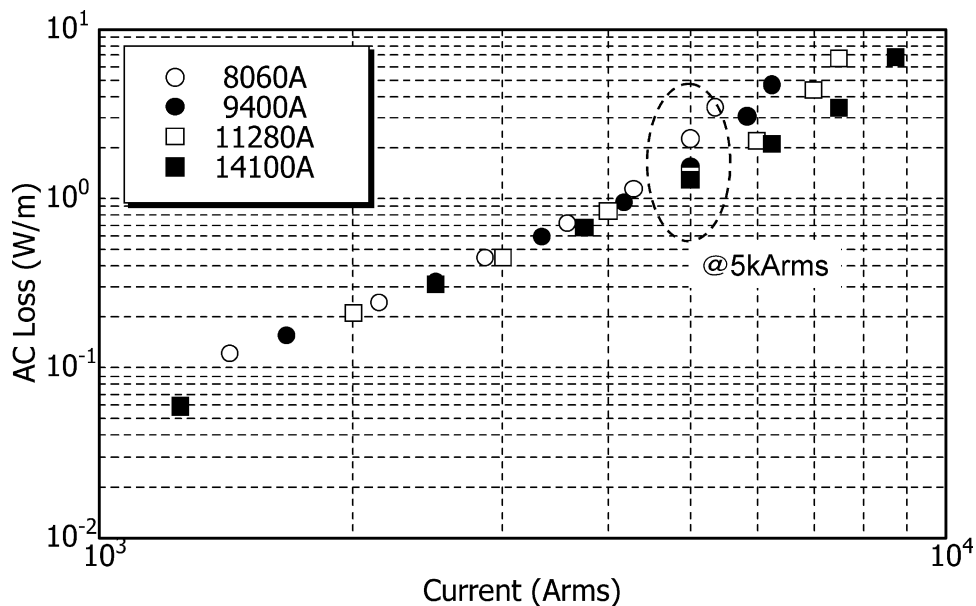


図 2.2.1-21 導体 I_c をパラメータとした損失予想 (2 mm 幅線材)

(8) まとめ

- ・ 数値解析および実験により、2 mm 幅への細線化による低損失化、線材可撓性を活かした低損失化の可能性を示した。
- ・ 2 mm 幅線材を用いた 4 層導体では、現実的な線材間ギャップやスリット時の線材端部 J_c 低下を考慮しても、12 kA 程度の I_c を有する導体を実現することにより 1 W/m-相@5 kA 程度に低損失化できる解析結果を得た。
- ・ 10 mm 幅線材の可撓性をいかした活かした低損失化を試みたが、フォーマに巻付けた際に線材 I_c 低下が発生することが判明し、10 mm 幅線材の適用を断念した。
- ・ 2 mm 幅および 4 mm 幅線材を採用候補として 4 層多層導体を作製し、交流損失特性を評価した。2 mm 幅を用いた導体の交流損失は解析結果の 2 倍程度と大きく、使用した線材の端部 J_c 低下が懸念される。4 mm 幅を用いた導体の交流損失は解析結果とほぼ同等であり、2 mm 幅を用いた導体とほぼ同等の交流損失特性を示した。
- ・ 現時点で目標値 2 W/m-相@5 kA は達成出来ていないが、4 mm 幅線材を用い

た導体については、現状より I_c を向上させた線材 ($130 \text{ A}/4 \text{ mm}\cdot\text{w} = 320 \text{ A}/\text{cm}\cdot\text{w}$ 級(@77 K, s.f.)) を適用することにより目標値を達成できる見込みである。2 mm 幅線材を用いた導体については、線材 J_c 分布の改善により現状の 2 割程度損失特性が改善されれば、現状の線材 I_c ($50 \text{ A}/2 \text{ mm}\cdot\text{w} = 250 \text{ A}/\text{cm}\cdot\text{w}$ 級(@77 K, s.f.)) でも目標値の達成が可能であると考えられる。

(9) 今後の予定

- ・ 320 A/cm-w 級(@77 K, s.f.)の線材を適用し、4 mm 幅線材を用いた 4 層導体を作製して、1.5 W/m-相@5 kA 以下の交流損失を確認する。
- ・ 並行して線材スリットの改善を行い、2 mm 幅線材を用いた極低損失ケーブルの実現の可能性を検討する。
- ・ 4 層導体で 1.5 W/m-相@5 kA 以下を達成した後、シールド層付きのケーブルコアを作製し、最終目標 2 W/m-相@5 kA を検証する。

2.2.1-3 耐過電流ケーブル設計技術（住友電気工業、早稲田大学）

(1) 研究開発目標

電力系統においてケーブルの相間短絡事故が起こった場合、定格電流に比べて非常に大きな短絡電流が流れる。例えば、本ケーブルのターゲットである 66 kV 系統においては、最大「31.5 kA、2 sec」の短絡電流が流れると想定されている。超電導ケーブルの場合、この電流を超電導状態で流すためには非常に多くの本数の超電導線材が必要であり、ケーブルの寿命期間に発生するかしないかの短絡事故のために、定格電流の数倍もの事故電流を流すための超電導線材を用いることは非常に不経済であるといえる。本項では、経済性も考慮し、短絡電流が流れた場合は超電導状態から常電導状態に転移して、常電導抵抗によるジュール熱が発生することを許容する設計方針とし、短絡電流が流れてもケーブルが健全であることを検証した。

●中間目標（平成 22 年度）

- ・ 短絡試験（31.5 kA, 2 sec 相当）でケーブルの性能に劣化がないこと

(2) 耐過電流設計

設計コンセプトとしては、短絡電流が流れた場合に超電導状態を維持できないことを許容し、常電導抵抗によるジュール熱が発生してもケーブルが健全性を保てることを保証する設計とする。そのためには、定格電流以上の短絡電流が流れた場合に、超電導層以外の常電導保護層に電流を分流させ、ケーブルコア内の発熱を小さくすることで、温度上昇を抑制する必要がある。一方で、過剰な常電導保護層を設けることはケーブル径を大きくし、内径 150 mmφの管路に収納できるサイズに抑えることを困難にする。このため、早稲田大学の計算機シミュレータ（電流分布－熱伝導連成解析プログラム）⁽⁴⁾を用いて過電流が流れた場合の温度上昇を解析し、

耐過電流保護設計の妥当性を検証した。

66 kV 級大電流超電導ケーブルの保護設計の概要および数値シミュレーションモデルを図 2.2.1-22 に示す。電流分布解析は 3 次元有限要素法 (ϕ 法) を用いて定式化し (式(2.2.1-3))、Y 系超電導線材の I - V 特性には n 値モデルを採用した (式(2.2.1-4))。ここで、式(2.2.1-3)の ϕ は電気スカラーポテンシャル、 σ は導電率である。式(2.2.1-4)の I は超電導線材に流れる電流、 V は発生電圧、 I_c は臨界電流、 V_c は基準電界 ($1 \mu\text{V}/\text{cm}$)、 n は n 値である。なお、超電導線材の臨界温度を 90 K とし、臨界電流の温度依存性を線形近似している。

$$\nabla \cdot \sigma(\nabla \phi) = 0 \quad (2.2.1-3)$$

$$V = V_c \left(\frac{I}{I_c} \right)^n \quad (2.2.1-4)$$

自己インダクタンス L および相互インダクタンス M は集中定数として回路方程式 (式(2.2.1-5)) に代入し、3 次元有限要素法より求めた各導体内のスカラーポテンシャル (電位 ϕ) より各導体両端の電位差 V を求め、各導体に流れる電流 I を求めた。なお、式(2.2.1-5)の R は端末部の常電導接続抵抗、 E は導体層の両端電圧であり、シールド層は三相短絡を想定して両端電圧を 0 としている。それぞれの変数に対する添え字の *cond* は導体層を、*shield* はシールド層を意味する。

$$\begin{bmatrix} R_{cond} & 0 \\ 0 & R_{shield} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} I_{cond} \\ I_{shield} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{cond} & M \\ M & L_{shield} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{Bmatrix} I_{cond} \\ I_{shield} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} V_{cond} \\ V_{shield} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} E_{cond} \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2.2.1-5)$$

銅フォーマのインダクタンス算出に際しては円柱モデルを用い、電流が断面内を一樣に分布して長手方向に流れると仮定した。超電導導体層と超電導シールド層および銅シールド層の各層は図 2.2.1-22 に示す円筒モデルで近似し、電流が断面内を一樣に撚りピッチと並行に流れると仮定した。銅フォーマの自己インダクタンスおよび他層との相互インダクタンスを式(2.2.1-6)および式(2.2.1-7)に示す。超電導導体層と超電導シールド層および銅シールド層の各層の自己インダクタンスおよび多層との相互インダクタンスを式(2.2.1-8)および式(2.2.1-9)に示す。式(2.2.1-6)-(2.2.1-9)の d はケーブルの長さ、 a は銅フォーマの半径および他各層の中心半径、 p は銅フォーマ以外の各層の撚りピッチ、 s は撚り方向の係数 (S 撚りで 1、Z 撚りで -1) である。

$$L_i = \frac{d}{2\pi} \left(\frac{\mu_0}{4} + \mu_0 \left(\ln \frac{2d}{a_i} - 1 \right) \right) \quad (2.2.1-6)$$

$$M_{ij} = \frac{\mu_0 d}{2\pi} \left(\ln \frac{2d}{a_j} - 1 \right) \quad (j > i) \quad (2.2.1-7)$$

$$L_i = \mu_0 \frac{\pi a_i^2}{p_i^2} d + \frac{\mu_0 d}{2\pi} \left(\ln \frac{2d}{a_i} - 1 \right) \quad (2.2.1-8)$$

$$M_{ij} = \mu_0 s_i s_j \frac{\pi a_i^2}{p_i p_j} d + \frac{\mu_0 d}{2\pi} \left(\ln \frac{2d}{a_j} - 1 \right) \quad (j > i) \quad (2.2.1-9)$$

熱伝導解析は 3 次元有限要素法を用いてモデル化し、式(2.2.1-10)より定式化した。

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q_j - Q_q \quad (Q_q = h(T - T_b)) \quad (2.2.1-10)$$

上式の ρ は密度、 c は定圧比熱容量、 k は熱伝導率、 T は温度、 Q_j は電流分布解析から求まるジュール発熱、 Q_q は液体窒素冷却を示し、 h は液体窒素への熱伝達係数、 T_b は液体窒素の温度 (77.3 K) である。比熱容量、熱伝導率などの各物性値には非線形性を考慮し、各時間ステップにおけるケーブル各層の温度分布を計算している。境界条件は、ケーブル最外層の保護層の表面が液体窒素に接触しているとし、液体窒素への熱伝達係数は非線形熱伝達特性を考慮した。なお、PPLP[®]の比熱容量と熱伝導率は、液体窒素との混合状態を考慮した一定値とした。

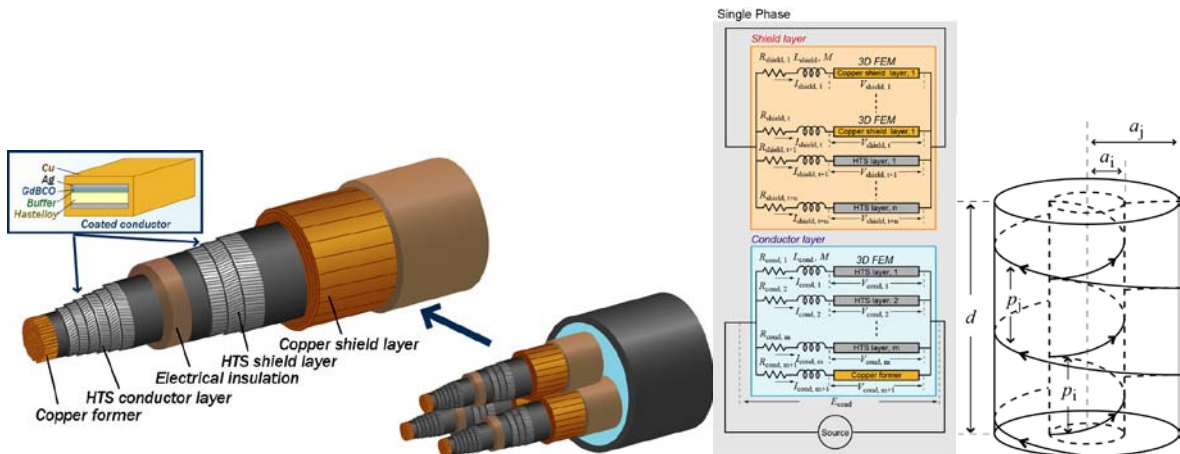


図 2.2.1-22 超電導ケーブルの保護設計と数値シミュレーションモデル

数値シミュレーションの対象とした超電導ケーブルコアの諸元を表 2.2.1-12 に示す。フォーマは銅撚り線を用いた分割集合導体であり、銅の断面積は 140 mm² である。超電導導体層は 4 層構成で、トータルの I_c を 3060 A とした。超電導導体層と超電導シールド層の主絶縁層は PPLP[®] で構成し、厚さは 6 mm である。超電導シールド層は 2 層構成で、トータルの I_c を 2700 A とした。銅シールド層は 4 層構成で、トータルの銅の断面積が 100 mm² である。超電導線材は厚さ 0.17 mm、幅 4 mm であり、安定化層として厚さ 20 μ m の銅メッキ加工が施されている。Y 系超電導線材の常電導転移後 (90 K 以上の温度領域) の「抵抗-温度特性」は実際の線材の測定値をプログラムに組み込んだ。

表 2.2.1-12 66 kV 級超電導ケーブルコアの諸元

項目	諸元	外径 (mm)
フォーマ	140 mm ² 分割集合銅撚り線導体	18.0
超電導導体	4 層、層間絶縁あり	20.3
絶縁層	内部半導電層 主絶縁層：PPLP [®] 、厚さ 6 mm 外部半導電層	33.7
超電導シールド	2 層、層間絶縁あり	34.7
銅シールド	4 層、層間絶縁あり、100 mm ²	39.2
保護層	クラフト紙、不織布	41.7 (ケーブルコア外径)

「31.5 kA、2 sec」の過電流に対する数値シミュレーションの結果を図 2.2.1-23 に示す。超電導導体層および超電導シールド層の温度上昇 (ΔT) は常電導保護層に比べて小さく、それぞれ 142 K および 160 K である。また、導体層を構成する超電導線材 1 本に流れる電流波形は図 2.2.1-24 に示す通りである。

想定される過電流が超電導線材に流れて温度が上昇した際の、線材の臨界電流特性 (I_c) の健全性を検証するため、線材単体に対する耐過電流試験を実施した⁽⁵⁾。図 2.2.1-25 に示すように、線材を FRP 製の治具に固定した状態で低温真空容器内に配置し、伝導冷却により温度を 77 K まで下げた。この後、図 2.2.1-24 に示す電流波形の相似形状の電流を印加し、線材の温度上昇および過電流印加前後の I_c の変化を測定した結果を図 2.2.1-26 に示す。横軸は線材に流した電流と想定電流 (図 2.2.1-24 の電流波形) との比を示している。なお、本試験で過電流を印加する 2 sec 間において線材は断熱状態と見なすことができ、周囲に液体窒素が存在する実際のケーブルよりも厳しい条件下における試験となっている。超電導線材に対して、事故時に想定される過電流を流した際の温度上昇は 170 K であり、図 2.2.1-23 の温度上昇解析結果よりも若干大きいにも関わらず I_c の低下は発生していない。また、想定電流の 1.3 倍の電流を流しても I_c に低下は見られず、図 2.2.1-23 に示したケーブルコアに対する解析結果 (温度上昇) は超電導線材にダメージが発生しない範囲内に収まっていると考えられる。以上の検討結果より、表 2.2.1-12 に示す常電導保護層を有するケーブルコアに対して短絡電流試験を実施することとした。

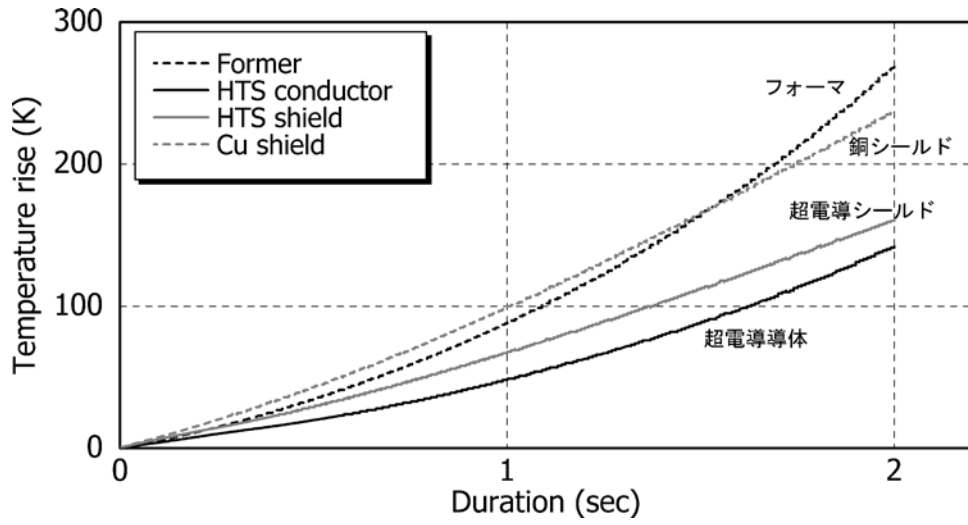


図 2.2.1-23 過電流印加時の温度上昇解析結果 (31.5 kA、2 sec)

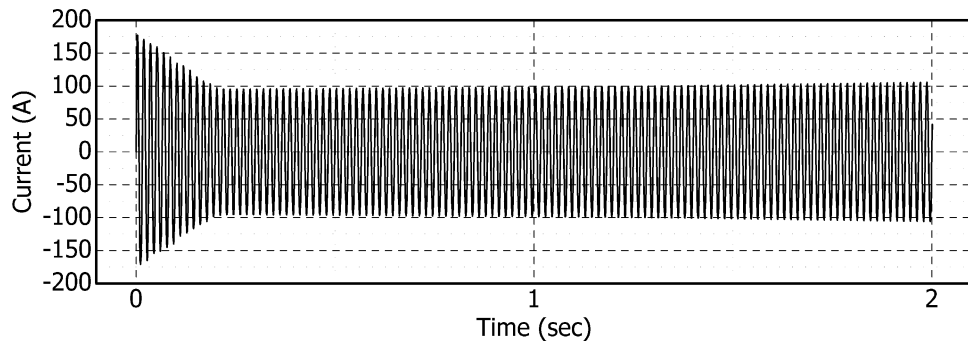


図 2.2.1-24 短絡事故時に超電導線材 1 本に流れる電流

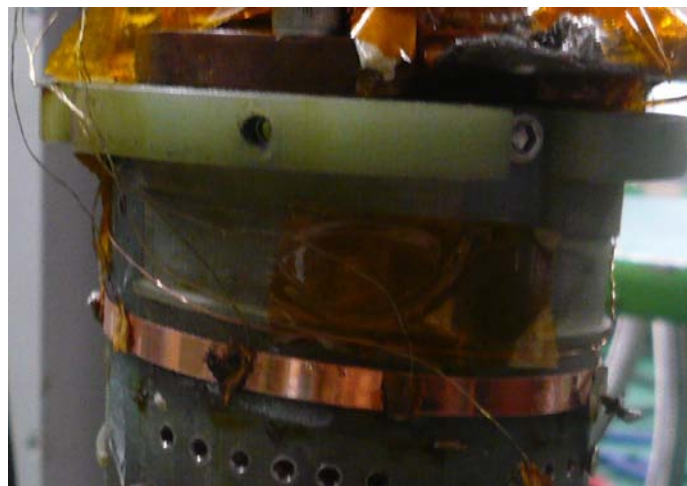


図 2.2.1-25 線材単体の耐過電流試験の概要

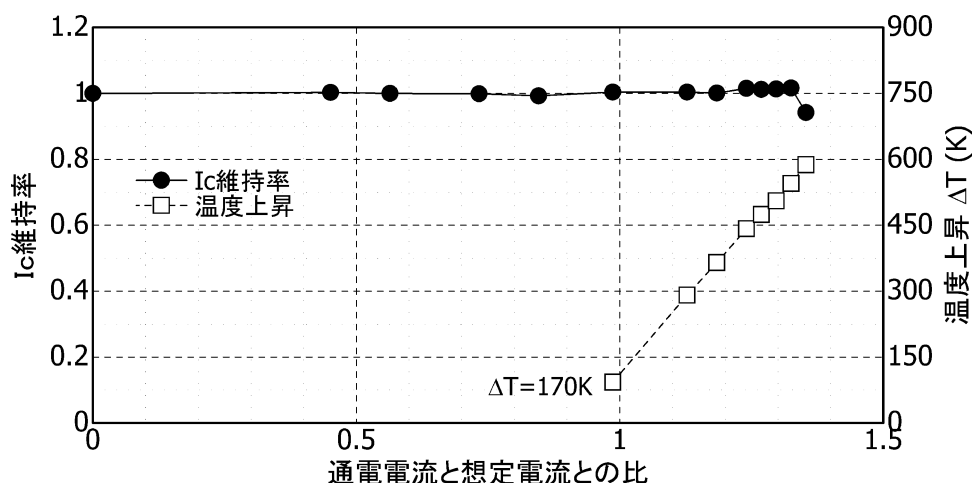


図 2.2.1-26 線材単体の耐過電流試験結果

(3) 耐過電流試験

超電導ケーブルコアに、最大「31.5 kA、2 sec」の過電流が流れても導体が健全であることを確認するため、図 2.2.1-27 に示す短絡発電機を有する試験設備を用いて、過電流が流れた際の温度上昇の確認、および過電流が超電導特性に与える影響について検証した。

過電流試験は、図 2.2.1-28 に示すように、約 2.7 m の 2 本の超電導ケーブルコアを並べ、2 本のコアのシールド層を短絡、閉回路とした状態で導体層に往復通電を行うことで、シールド層に遮蔽電流が誘起される方式とした。試験サンプルの諸元を表 2.2.1-13 に、写真を図 2.2.1-29 にそれぞれ示す。試験サンプルの臨界電流 (I_c) は、コア 1 の導体層が 3270 A、コア 2 の導体層が 3670 A、コア 1 のシールド層が 3650 A、コア 2 のシールド層が 2900 A であり、計測素子として、過電流印加時のコア内部温度上昇を計測するための熱電対、シールド層の誘導電流を計測するためのログスキーコイル、およびコアの漏れ磁場を計測するためのホール素子を取り付けられている。

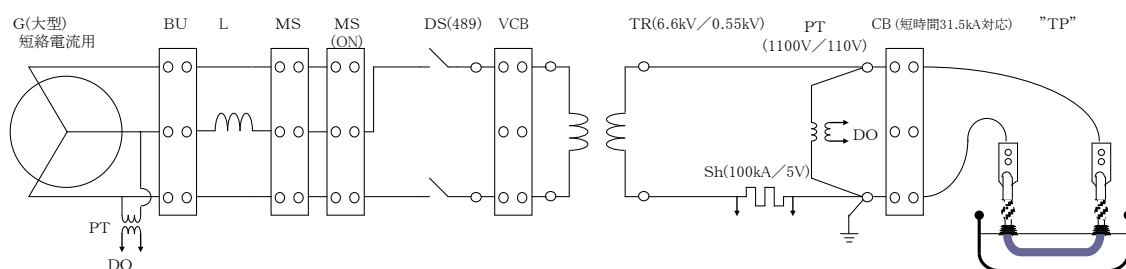


図 2.2.1-27 耐過電流試験回路の概要図

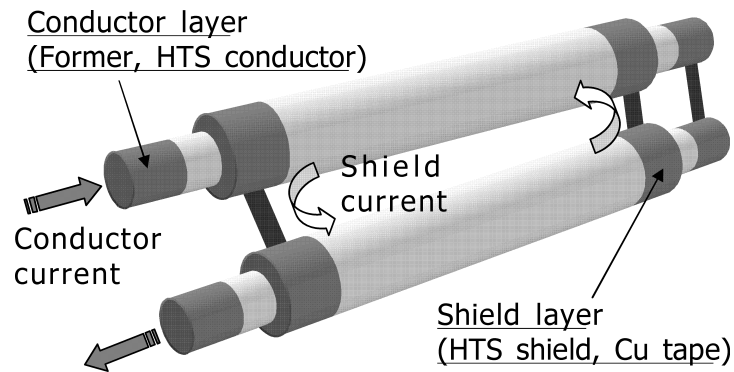


図 2.2.1-28 耐過電流試験サンプルの概要

表 2.2.1-13 耐過電流試験用ケーブルコアの諸元

項目	Core 1	Core 2
フォーマ	140 mm ² 分割集合銅撚り線導 体	140 mm ² 分割集合銅撚り線導 体
超電導導体	4層、4mm幅線材 $I_c=3270$ A	4層、2mm幅線材 $I_c=3670$ A
絶縁層	内部半導電層 主絶縁層：PPLP ^a 、厚さ 6 mm 外部半導電層	内部半導電層 主絶縁層：PPLP ^a 、厚さ 6 mm 外部半導電層
超電導シールド	2層、4mm幅線材 $I_c=3650$ A	2層、4mm幅線材 $I_c=2900$ A
銅シールド	4層、層間絶縁あり、100 mm ²	4層、層間絶縁あり、100 mm ²
保護層	クラフト紙、不織布	クラフト紙、不織布

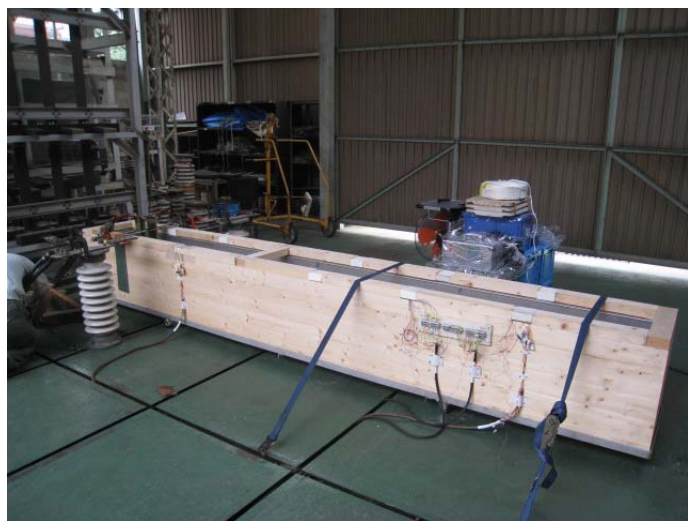


図 2.2.1-29 過電流試験サンプルおよび試験場の写真

「31.5 kA、2 sec」の耐過電流試験時の導体層およびシールド層の電流波形を図 2.2.1-30 に、ケーブルコアの温度上昇を示す。最大「31.5 kA、2 sec」印加時の温度上昇は、超電導導体層で約 100 K、超電導シールド層で約 120 K である。同図中には、数値シミュレーション結果 (図 2.2.1-23 に示した結果) も示してあり、試験結果は解析結果から想定される範囲内である。短絡電流試験後のケーブルコアの健全性を確認するために実施した臨界電流測定結果を、試験前の測定結果と合わせて図 2.2.1-32 に示す。試験前後において、2 本のコアの導体層及びシールド層すべてにおいて臨界電流特性に変化は見られず、最大「31.5 kA、2 sec」の過電流に対してケーブルコアにダメージが発生しないことを確認した。

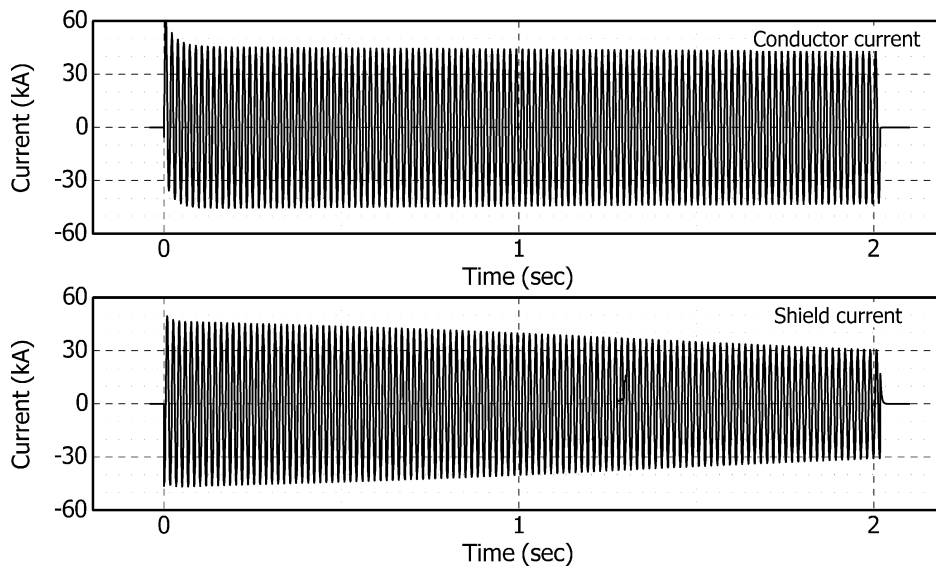


図 2.2.1-30 過電流試験時の電流波形

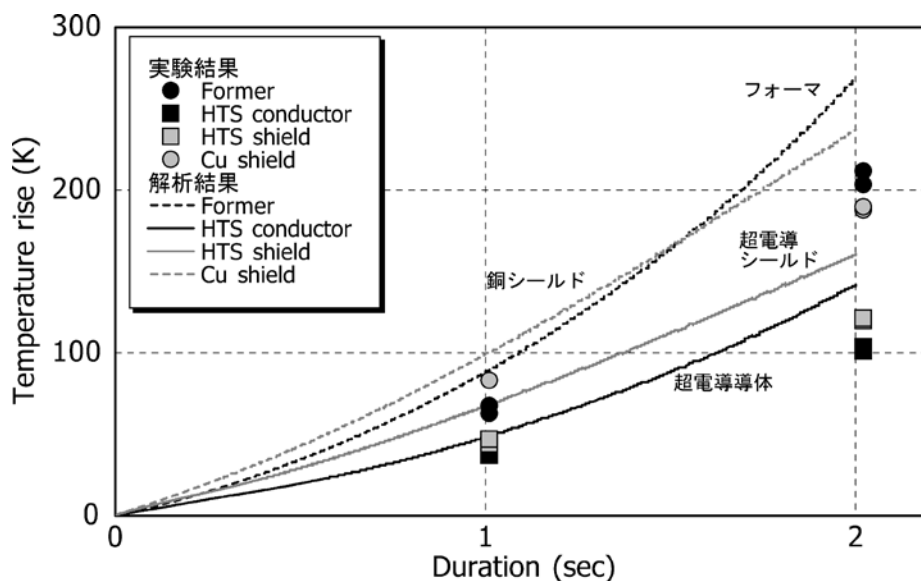


図 2.2.2-31 過電流試験時の導体温度上昇と解析結果との比較 (実験結果の各 2 点はコア 1 とコア 2 の結果を示す)

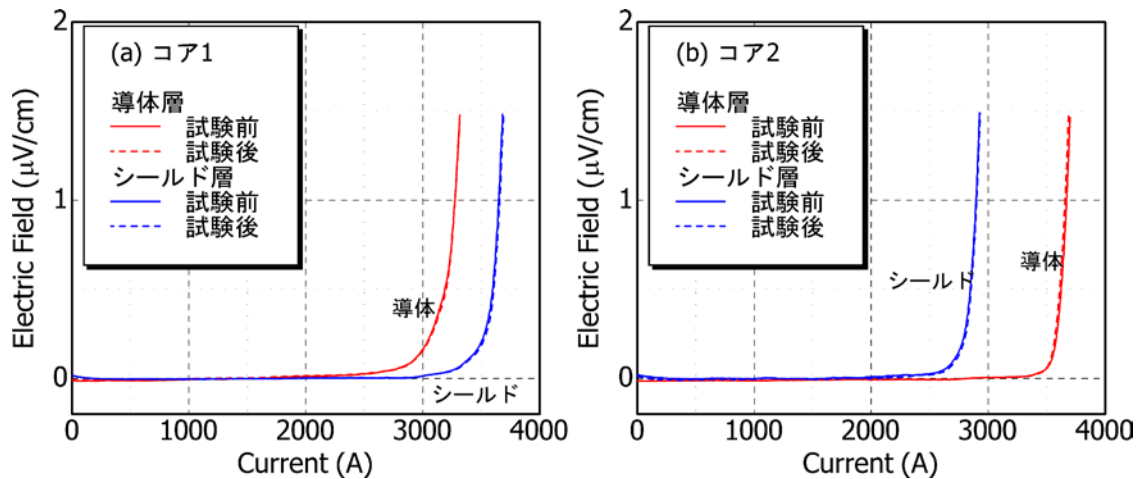


図 2.2.1-32 過電流試験前後の臨界電流測定結果

(4) 短絡事故時の電磁力の影響検討

超電導シールド層を有する三心一括型ケーブルにおいて、定常時は、超電導導体層に流れる送電電流とほぼ同じ大きさで逆位相の電流が超電導シールド層に誘導されて磁気遮蔽を実現するため、ケーブルコア間に発生する電磁力は無視できる。一方で、臨界電流を超える事故電流が流れた場合には、超電導シールド層が常電導転移し、図 2.2.1-30 に示したようにシールド電流が減衰するため、コア外部への漏れ磁場が発生してコア間に電磁力が発生する。この電磁力による影響が懸念されるため、シミュレーション結果を基に検討を行なった。

漏れ磁場が最大となるのは、シールド電流の減衰が大きい遮断直前であり、短絡事故時 (31.5 kA、2 sec) の電流波形解析結果の遮断直前の拡大図を図 2.2.1-33 に示す。本図において、導体電流(A)とシールド電流(B)との和、つまり非遮蔽電流(C)に起因した漏れ磁場が発生すると想定される。前項の耐過電流試験において、コア直上に取り付けたホール素子によって測定した漏れ磁場の大きさは、この非遮蔽電流(C)によって発生する磁場の大きさと同程度であることを確認しており、以下の議論では、最大 20 kA_{peak} の非遮蔽電流によって発生する漏れ磁場の影響を検討した。

図 2.2.1-34 に示すように、三相のうち二相間で短絡事故が発生した場合、事故相 (W, V 相) には位相が反転した事故電流が流れると想定され、2 コア間に反発力が発生する。上述のように、非遮蔽電流 20 kA_{peak} に対して 2 コア間に発生する反発力 (側圧) を計算した結果、1860 N/m となった。本側圧値は、これまでの開発実績から考えて、ケーブルの特性に影響を及ぼさない範囲に収まっていると考えられるが、今後詳細な電磁力解析を行うとともに、その影響を実験により検証する予定である。

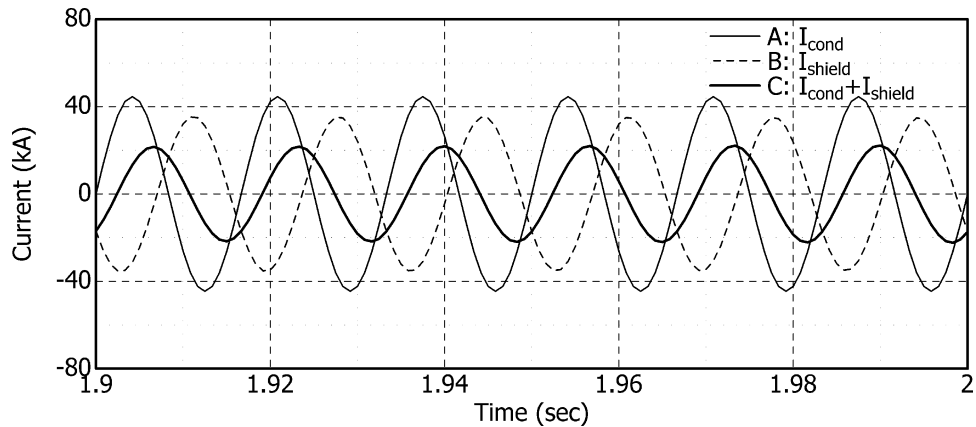


図 2.2.1-33 短絡事故時（31.5 kA、2 sec）の電流波形解析結果（拡大図）

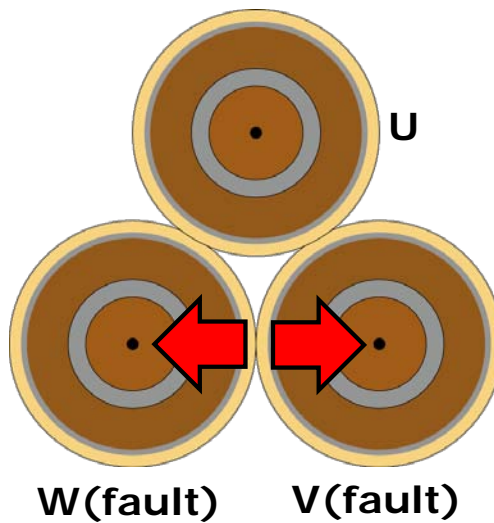


図 2.2.1-34 二相短絡時のモデル

(5) まとめ

- 計算機シミュレータを用いて過電流通電時の温度上昇解析を行い、内径 150 mmφの管路に収納可能なケーブルの保護設計を行った。
- 過電流保護設計の妥当性を確認するため、ケーブルコアを作製して短絡試験を行った結果、ケーブルコア内の温度上昇はシミュレーション結果から想定される範囲内であり、最大「31.5 kA、2 sec」の過電流に対してケーブルコアにダメージが発生しないことを確認した。
- 二相短絡事故（31.5 kA、2 sec）を想定して、ケーブルコア間に発生する電磁力の検討を行った。

(6) 今後の予定

- 短絡事故時にコア間に発生する電磁力の詳細解析を行い、ケーブルに及ぼす影響についてさらに検証を進める。

2.2.1-4 三心一括ケーブル技術（住友電気工業）

(1) 研究開発目標

検証用超電導ケーブルの最終設計に際しては、前項 2.2.1-2 項の交流損失低減技術、2.2.1-3 項の耐過電流設計技術をもとにケーブル構造を決定するが、それら以外に考慮すべき点として、ケーブル製造時のドラム曲げや三心撚りによってケーブルに機械的な応力（引張り、曲げ）が加えられるため、その応力に対してもケーブルの健全性が保たれることが重要となる。さらに、両端末を固定した状態で初期冷却を行う三心一括型ケーブルにおいては、室温から液体窒素温度まで冷却した際に発生する約 0.3 %の熱収縮に対するケーブル特性の劣化が懸念される。

本項では、三心一括型ケーブルの製造から初期冷却までの工程において、ケーブル（Y 系超電導線材）が経験する機械的な応力に対する健全性を検証するため、下記の試験を実施した結果について述べる。

- ・ 実際の製造ラインを通した三心ケーブルコアの試作・検証
- ・ 初期冷却を模擬した三心ケーブルコアの熱機械特性検証試験

(2) 三心ケーブルコアの試作・検証

各種要素試験により決定した試作用三心一括型ケーブルの設計を表 2.2.1-14 に示す。フォーマは分割集合導体であり、銅の断面積は 140 mm²である。超電導導体層は 2 mm 幅の Clad 基板線材を用いて構成した 4 層構造である。なお、超電導導体層に使用する線材幅は 4 mm 幅を本命としているが、スリット技術の改善によって 2 mm 幅線材を採用する可能性も残っているため、機械的な特性に劣る 2 mm 幅線材を用いた試作を実施することにした。超電導導体層と超電導シールド層の間の絶縁層は PPLP[®]で構成し、厚さは 6 mm である。超電導シールド層は 4 mm 幅の Clad 基板線材を用いて構成した 2 層構造である。銅シールド層は 4 層で構成され、銅の総断面積が 100 mm²である。Y 系超電導線材には安定化層として銅がメッキ加工されており、メッキ厚が 20 μm である。なお、ケーブルコア 3 心のうち、超電導線材が入っているのは 1 心（超電導コア）のみであり、残りの 2 心は機械強度特性を揃えるために基板を同幅にスリットしたダミー線材を用いて構成したダミーコアである。また、超電導コアの各超電導層に使用した Y 系超電導線材は 3 本であり（超電導導体層：計 12 本、超電導シールド層：計 6 本）、残りの線材は機械特性および表面摩擦係数を揃えるために基板を同幅にスリットしたダミー線材に同厚の銅メッキを施した線材を用いている。

上記設計に対して試作した「10 m 三心ケーブルコア」の試作概略工程と試作時の状況写真を図 2.2.1-35 に示す。本試作は超電導ケーブルの製造に使用する実際のラインを通じて行った。超電導線材集合工程において、2 mm 幅に細線化した線材のギャップ管理等に問題がないことを確認した。

表 2.2.1-14 試作用三心一括型超電導ケーブルの設計（導体 4 層、シールド 2 層）

項目	諸元	外径 (mm)
フォーマ	140 mm ² 分割集合銅撚り線導体	18.0
超電導導体	4 層、2mm 幅 Clad 基板線材 層間絶縁あり	20.3
絶縁層	内部半導電層 主絶縁層：PPLP [®] 、厚さ 6 mm 外部半導電層	33.7
超電導シールド	2 層、4mm 幅 Clad 基板線材 層間絶縁あり	34.7
銅シールド	4 層、層間絶縁あり、100 mm ²	39.2
保護層 (ケーブルコア外径)	クラフト紙、不織布	41.7
三心撚り (三心コア外径)	緩み無し三心集合	89.8

【製造概略工程】

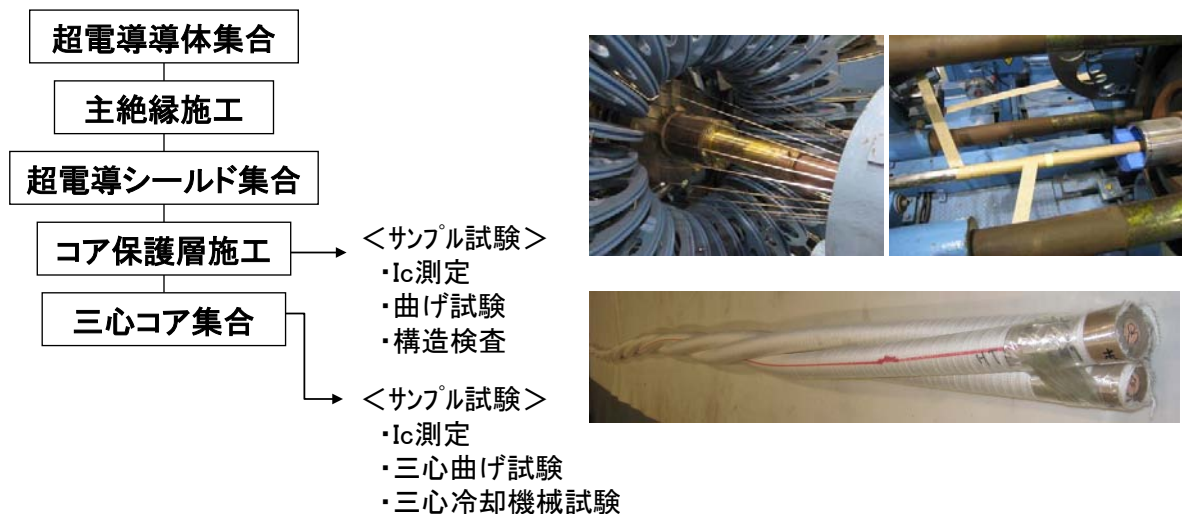


図 2.2.1-35 10 m 三心ケーブルコアの試作概略工程と試作時の写真

●単心ケーブルコア検証結果

コア保護層施工後に切り出した 2.5 m 単心ケーブルコアの I_c 測定を行った結果、全ての線材で I_c の低下がないことを確認した。本結果から、単心コア製造工程において、2 mm 幅および 4 mm 幅に細線化した Clad 基板線材の特性が低下しないことを確認した。

図 2.2.1-36 は、I_c 測定終了後の 2.5 m 単心ケーブルコアに対して実施した曲げ試験結果である。曲げ試験では、所定の直径を有する曲げ治具に対して 2 回の往復曲

げを行った後に直状にもどした状態で I_c 測定を実施した。なお、縦軸はケーブル化後（曲げ試験前）に測定した I_c に対する曲げ試験後の I_c の維持率を示しており、各層 3 本の超電導線の維持率の平均値で示している。試験結果から分かるように、試作したコアは 1500 mmφ の曲げに対しても I_c 低下が生じることはなく、十分な機械特性を有していることが確認された。

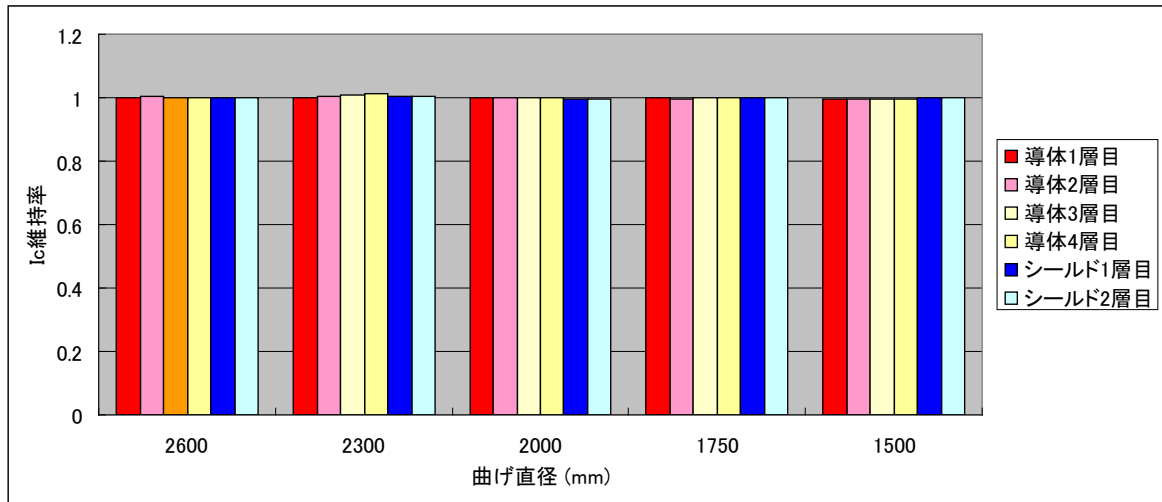


図 2.2.1-36 単心ケーブルコアの曲げ試験結果

●三心ケーブルコア検証結果

三心撚り工程後に切り出した 7 m 三心ケーブルコアの I_c 測定を行った結果、全ての線材で I_c の低下がないことを確認した。本結果から、三心コア製造工程において、2 mm 幅および 4 mm 幅に細線化した Clad 基板線材の特性が低下しないことを確認した。

図 2.2.1-37 は、 I_c 測定終了後の 7 m 三心ケーブルコアに対して実施した曲げ試験結果である。曲げ試験では、2300 mm φ の直径を有するドラムに対して 2 回の往復曲げを行った後に直状にもどした状態で I_c 測定を実施した。なお、縦軸は曲げ試験前に測定した I_c に対する曲げ試験後の I_c の維持率を示しており、各層 3 本の超電導線の維持率の平均値で示している。試験結果から、試作した三心コアは 2300 mm φ の曲げに対して I_c 低下が発生しないことが確認された。140 mm φ のケーブルに対する出荷試験で規定されている曲げ直径は 2500 mm φ（ケーブル外径の 18 倍）程度であり、十分な機械特性を有していることが確認された。

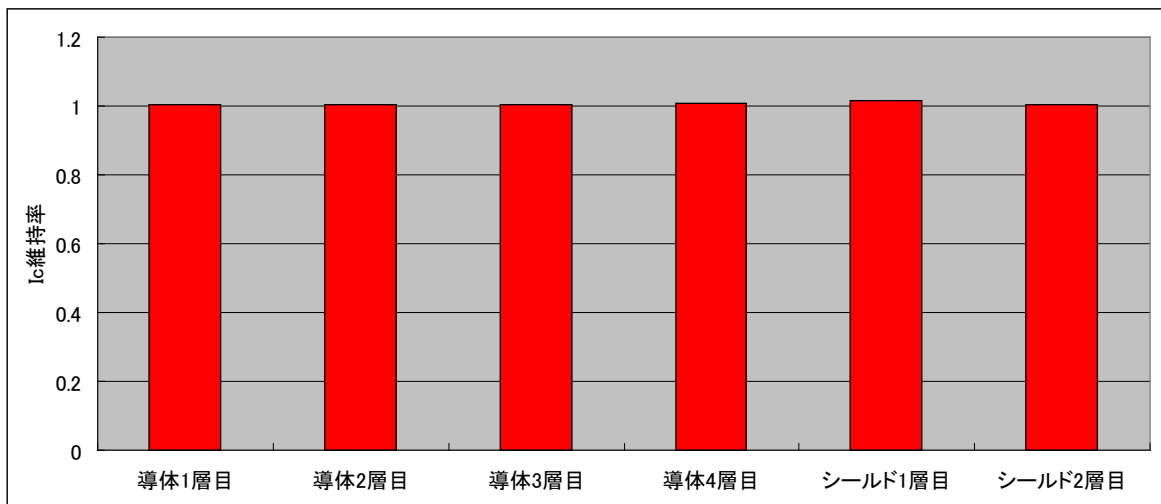


図 2.2.1-37 三心ケーブルコアの 2300 mm φ曲げ試験結果



図 2.2.1-38 三心ケーブルコアの曲げ試験

(3) 三心ケーブルコアの熱機械特性検証試験

ケーブルは室温から液体窒素温度に冷却すると約 0.3 %の熱収縮を起こす。これまでは、三心ケーブルを弛ませて冷却時の熱収縮を弛みで吸収する方法が検討されてきた。一方、本プロジェクトでは、150 mm φ管路に適用するケーブルを目指しており、そのコンパクト化が求められている。これまでの設計検討の結果、従来通り三心を弛ませる構造では、ケーブルサイズをコンパクトにすることが難しく、三心を弛ませないことを前提にケーブル設計を進めている。三心を弛ませず、かつ端末を固定した状態においてケーブルを室温から冷却すると、ケーブルコアに熱収縮による引張力が印加される。ここでは、この引張力を試作した三心ケーブルコアを用いて実測するとともに、熱収縮に対するケーブル性能の健全性について検証した。

試験装置の概略図および概観写真を図 2.2.1-39 および図 2.2.1-40 に示す。三心コアサンプルは試験容器の両端に固定されており、サンプルを液体窒素中に浸漬した状態で試験容器を引っ張ることにより引張試験を行う。試験容器部には、引張試

験時に容器自身が分担する張力を抑制するためにベローズが 2 箇所挿入されており、0.3 %伸びに相当するサンプル引張時に容器が分担する張力は約 20 kg である。上記張力は、サンプルに発生する張力約 3 t レベルに比べ無視できるほど小さい値である。なお、試験時の引っ張り量は 1.5 mm ピッチのボルトナットの回転数により管理した。試験状況を図 2.2.1-41 に示す。

液体窒素中における引っ張り試験結果を図 2.2.1-42 に示す。液体窒素中において最大 0.35 %の引っ張り歪みをサンプルに印加したが、線材の I_c 特性に低下は見られなかった。また、0.3 %熱収縮に相当する引張力は約 3 t であり、フォーマの機械特性から想定される値とほぼ同等であることを確認した。なお、本サンプルで確認した引張力は直線状態での値であり、実際の長尺ケーブルでは曲がりおよびオフセットなどが存在することから、実際のケーブルに発生する引張力は上記値よりも小さくなると予想される。

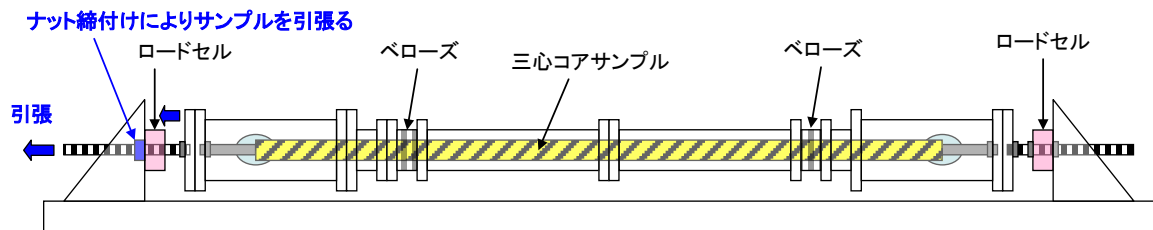


図 2.2.1-39 三心コア引張試験装置の概略図



図 2.2.1-40 三心コア引張試験装置の概観写真



図 2.2.1-41 三心コアサンプルの LN₂ 中での引張試験状況

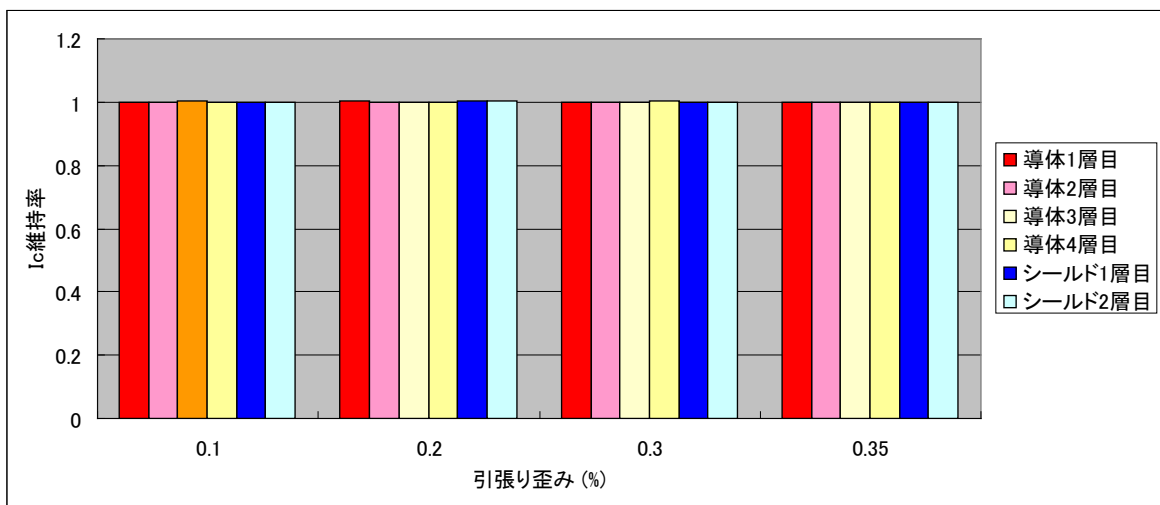


図 2.2.1-42 三心コアサンプルの熱機械試験結果

(4) まとめ

- ・ 実際の製造ラインを通した三心ケーブルコアの試作により、2 mm 幅および 4 mm 幅線材ともに製造工程において特性が低下しないことを確認した。
- ・ 試作した単心ケーブルコアおよび三心ケーブルコアに対して曲げ試験を実施した結果、十分な機械特性を有することを確認した。
- ・ ケーブル両端末を固定した状態で冷却した際に発生する熱収縮によって、ケーブルの特性が低下しないことを確認した。

(5) 今後の予定

- ・ ケーブル最終設計完了後に再び機械試作を行い、15 m 検証ケーブルの製造条件および健全性の確認を行う。

2.2.1-5 終端接続技術（住友電気工業）

(1) 研究開発目標

大電流・低損失超電導ケーブルシステムの実現のためには、超電導ケーブルの開発だけでなく、それと常電導機器（送電線、遮断器、変圧器等）とを接続する終端接続部の開発が不可欠である。しかしながら、これまでに 5 kA 級の大電流高温超電導機器向けの終端接続部の開発が行なわれた実績はほとんどなく、本項では大容量接続技術の開発を行なった結果について述べる。

終端接続部の特徴をまとめると、以下のように記述できる。

- ▶ 機械的特性：超電導ケーブルシステムが室温から液体窒素温度まで冷却された際に発生する熱収縮によってケーブル部に引張力が発生するため、終端接続部はその引張力を引止める構造を有する必要がある。
- ▶ 電気的特性：超電導部と常電導部との電氣的な接続部には接続抵抗が存在する。ここで発生するジュール熱がケーブル部に伝達し、ケーブルの温度を上昇させて常電導転移させることなく安定に通電できる必要がある。
- ▶ 熱的特性：接続する常温機器からの外部からの侵入熱や上述した接続抵抗による発熱など、終端接続部はケーブル部と比べて熱損失が大きくなる箇所である。特に極低温部から常温部へ電気を引き出す電流リードからの侵入熱は大きく、その侵入熱の低減が重要な課題である。

前項 2.2.1-4 において熱収縮によって発生する引張力は従来と同等であることが確認されたため、「機械的特性」に関する新規開発項目はない。一方で、5 kA の大電流化に対しては、電流リードの大容量化と超電導－常電導接続部の熱的安定性の確認が重要課題である。下記のプロジェクト目標を達成するため、電流リードおよび超電導－常電導接続部の開発を行った。

●中間目標（平成 22 年度）

- ・ 5 kA 連続通電^{*}を行い、ケーブル導体、超電導－常電導接続、電流リードに異常がないこと

※ケーブルの熱平衡が得られるまで連続通電を行う

(2) 大容量電流リードの開発

電流リードのサイズは、端末容器やブッシング等の終端接続部全体のサイズを決定する要因であることから小型化が期待されている。本プロジェクトでは定格電流が 5 kA と大電流であることから、小型化に適している絶縁被覆を有する細径銅素線を撚り合わせた素線絶縁銅撚線を用いた電流リードを採用した。

電流リードの熱損失は終端接続部全体の熱損失において支配的であることから、電流リードの低損失設計が望まれている。電流リードの熱損失は電気抵抗から発生するジュール損失と常温側からの熱伝導による侵入熱が主なファクターであり、これらの熱損失を低減するために、電流リード断面積をパラメータとした検討を実施

した。

電流リード長さは 66 kV 級の碍子サイズから 2.7 m と決定し、電流リードの断面積と 5 kA 通電時における熱損失の相関を定常熱伝導シミュレーションにより求めた結果を図 2.2.1-43 に示す。図(b)から分かるように、5 kA 通電時の熱損失を最小にするためには約 6000 mm²の電流リードが必要となる。一方で、図(a)から分かるように、断面積を大きくすれば無負荷時の熱損失は大きくなり、同時に電流リード自体のサイズも大きくなる。ここではよりコンパクトな電流リードを指向することとし、電流リードの断面積を 3500 mm²に決定して試作・検証を行った。

電流リードの熱損失測定試験状況を図 2.2.1-44 に示す。電流リードは 66 kV 級の FRP ブッシングを貫通した状態で容器内に挿入され、2 本の電流リードに往復通電を行って熱損失を測定した。電流リードの熱損失測定結果を解析結果と合わせて図 2.2.1-45 に示す。実験により得られた熱損失は解析結果から想定される範囲であり、設計の妥当性を確認した。さらに、熱損失測定試験に引き続き、5 kA の連続通電試験を実施した結果を図 2.2.1-46 に示す。電流リード各部の温度をモニタしながら通電を行った結果、通電中に急激な温度変化等は見られず、熱的な平衡が安定に得られていることを確認した。

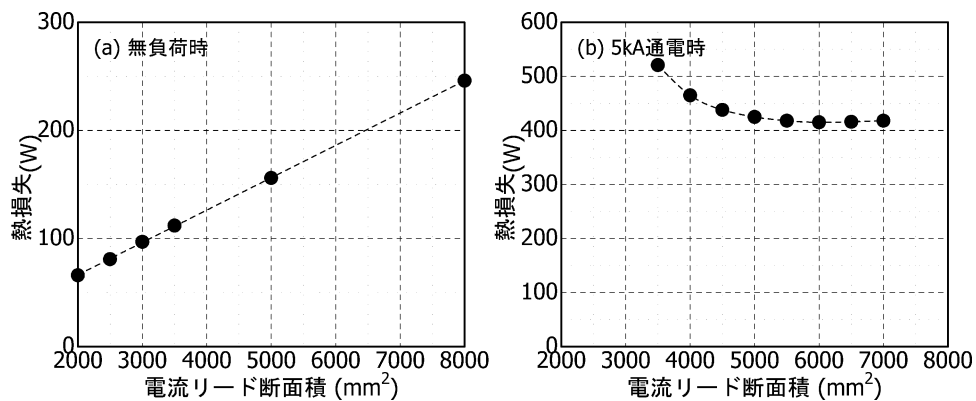


図 2.2.1-43 電流リード熱損失数値解析結果



図 2.2.1-44 3500 mm²電流リードと熱損失測定試験

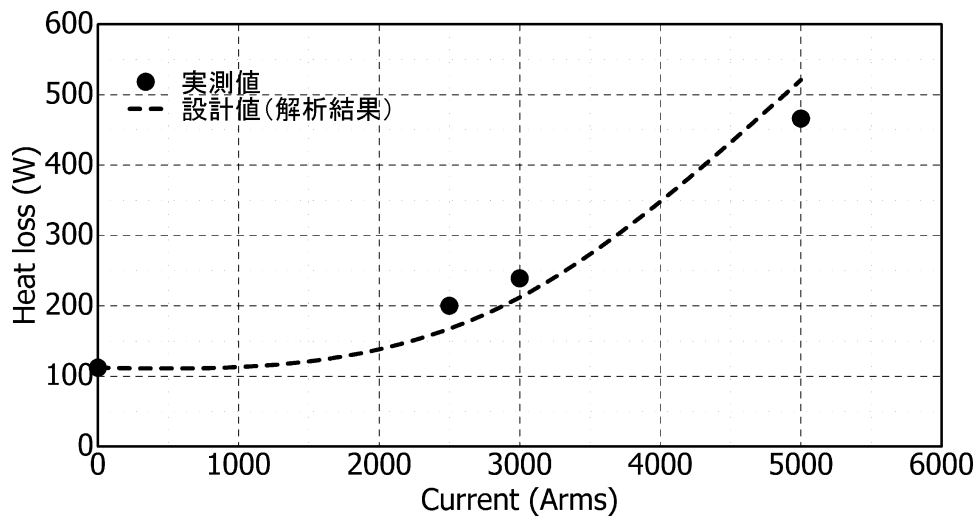


図 2.2.1-45 3500 mm² 電流リードと熱損失測定試験結果

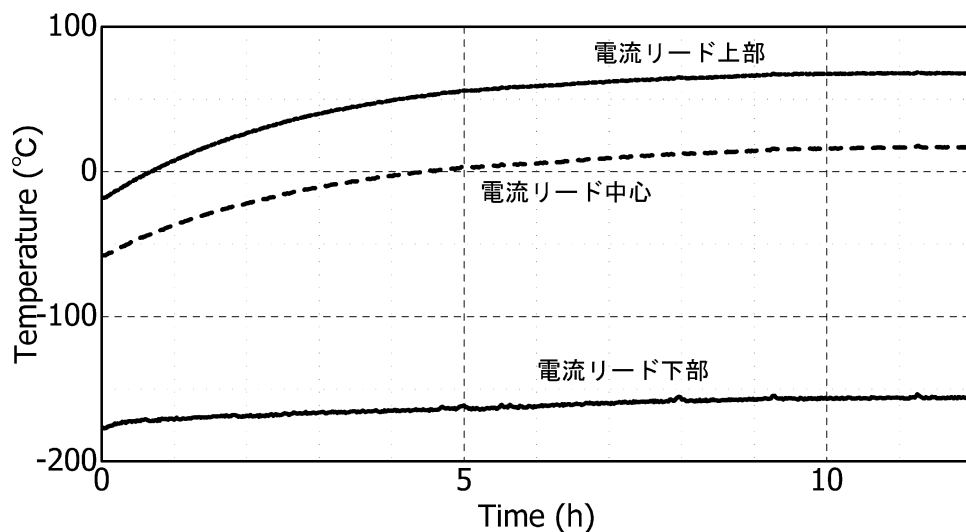


図 2.2.1-46 5 kA 通電時の電流リード各部の温度変化

(3) 超電導—常電導接続部の開発

超電導—常電導接続部では、超電導線と銅製の接続金具とがハンダで接続される。接続金具の設計において重要なパラメータとなるのが、接続長と金具厚みである。接続長を長くすれば接続抵抗は小さくなるが金具のサイズが大きくなる。また、金具厚みを厚くすれば直流抵抗は小さくなるが、交流通電時には表皮効果により通電に寄与する断面積が増加しない懸念がある。この 2 つの設計寸法を決定するため、以下の試験および解析を実施した。

超電導線と接続金具との接続長を決定するため、図 2.2.1-47 のような治具を用いた接続抵抗測定試験を実施した。接続長をパラメータとして接続抵抗を測定した結果を図 2.2.1-48 に示す。なお、使用した線材は 4 mm 幅の Clad 基板線材である。試験の結果、20 mm 以上の接続長では接続抵抗の変化はほとんどなく、施工時のズレを加味して接続長を 25 mm に決定した。

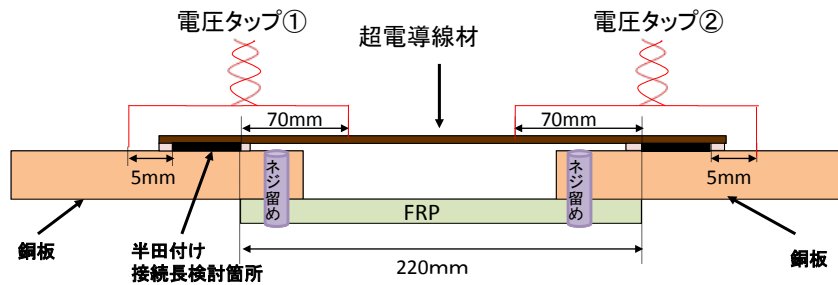


図 2.2.1-47 接続抵抗測定試験モデル図

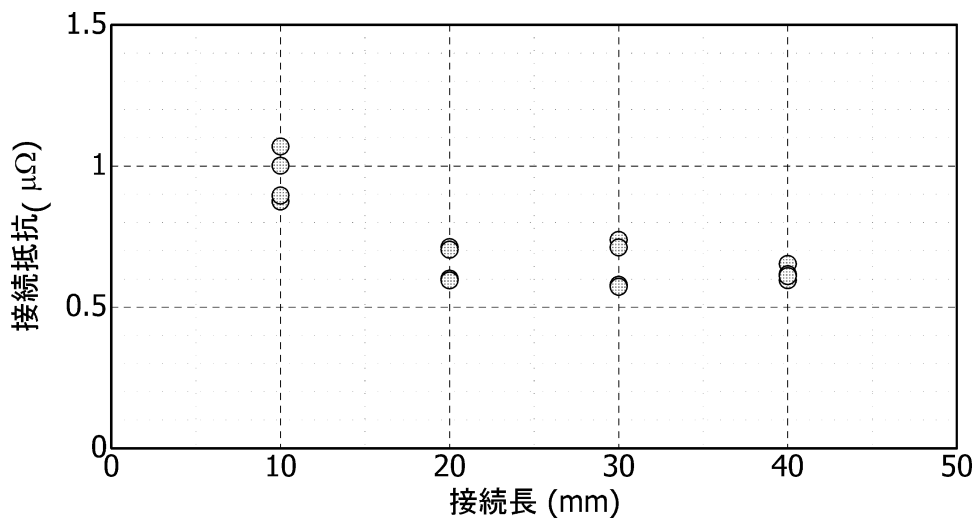


図 2.2.1-48 接続抵抗測定試験結果

次に、金具厚みを決定するため、金具厚みをパラメータとして電流分布解析を実施した結果を図 2.2.1-49 に示す。図には典型的な例として厚みが 3 mm の場合と 10 mm の場合の 2 通りを示しているが、金具が厚くなるほど電流は表面を流れ、断面積の大部分が通電に寄与しない結果、交流抵抗は 3 mm と 10 mm でほとんど差異がない。実際に 1 層導体を用いて金具の交流抵抗を測定した試験においても同様の結果が得られた。以上の結果から接続金具の厚みを 3 mm に決定した。

以上の検討結果を反映して設計した超電導－常電導接続金具の構造を図 2.2.1-50 に示す。今後、本金具とケーブルとを組み合わせた 5 kA 連続通電試験を実施する予定である。

(4) まとめ

- ・ 5 kA 級電流リードの設計検討を行った結果、3500 mm² 撚り線構造を採用した。
- ・ 3500 mm² 電流リードを試作して熱損失を評価した結果、設計値と同等の 470 W@5 kA であることを確認した。
- ・ 電流リードの 5 kA 連続通電に成功した。この際、電流リード各所で熱的な平衡が安定に得られていることを確認した。
- ・ 超電導－常電導接続金具の設計パラメータである接続長と金具厚みに対して

実験および数値解析による検討を行い、構造設計を完了した。

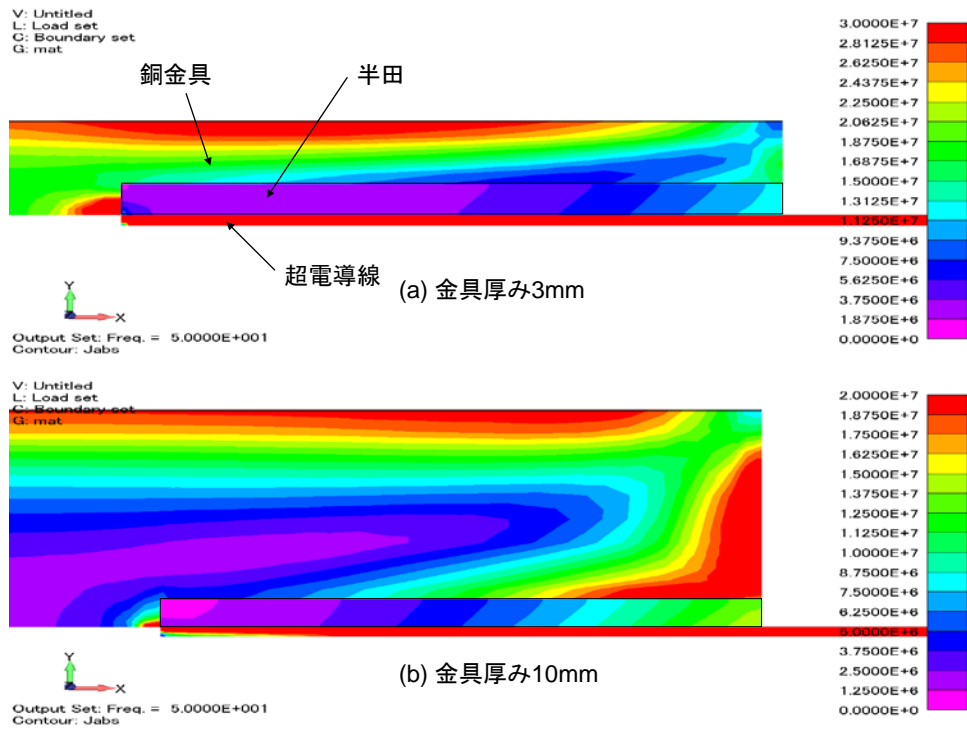


図 2.2.1-49 金具厚みをパラメータとした電流分布解析結果

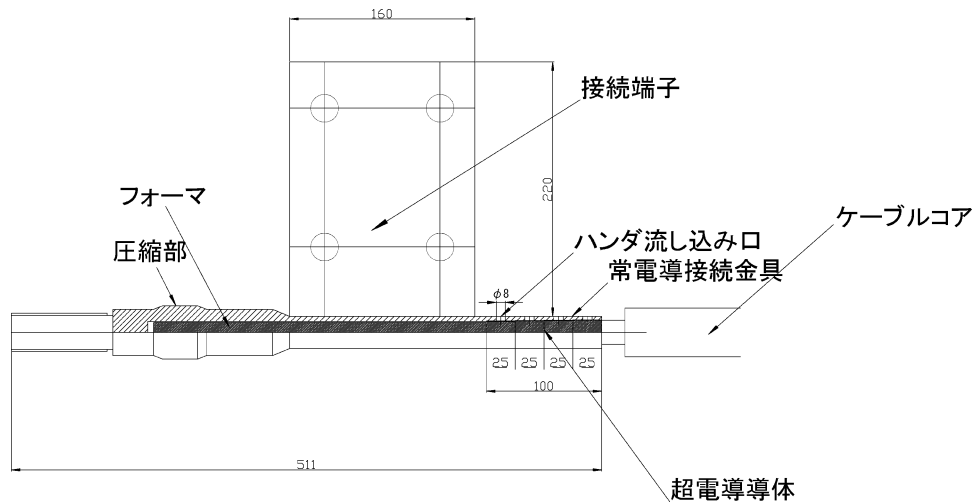


図 2.2.1-50 超電導-常電導接続金具の構造

(5) 今後の予定

- ・ 超電導ケーブルと超電導-常電導接続金具を組み合わせた 5 kA 連続通電試験を実施し、設計の妥当性を確認する。
- ・ 5 kA 級電流リードのさらなる低損失化の可能性について検討を行う。

2.2.1-6 66 kV 大電流ケーブルシステム検証（住友電気工業）

(1) 研究開発目標

66 kV 大電流ケーブルの実用性を検証するためには、大電流通電技術、交流損失低減技術の開発成果を活かしたケーブルを開発し、実用化時の要求使用に基づいた課通電試験を行う必要がある。このため、前記大電流・低損失ケーブル化技術の開発成果を踏まえて、検証用超電導ケーブルシステムの設計を行い、課通電試験計画案を作成した。

●中間目標（平成 22 年度）

- ・両端に終端接続部を有する検証用 66 kV / 三心一括 / 5 kA, 15 m 長の超電導ケーブルシステムのシステム設計を完了する。
- ・耐久性を評価できる課通電試験計画書を作成する。

○最終目標（平成 24 年度）

- ・下記性能を有する 66 kV / 三心一括 / 5 kA, 15 m 長の超電導ケーブルを作製する。
 - ◇ ケーブル外径：内径 150 mmφの管路に収納できること。
 - ◇ ケーブル損失（交流損失、誘電体損失）：2.1 W/m-相@5 kA 以下。
 - ◇ 中間目標で得られた課通電試験の設定条件下における課通電試験を実施し、試験計画書の性能を満足することを検証する。

(2) 検証試験項目（案）

66 kV 大電流ケーブル実用化時の耐久性を評価するためにとりまとめた試験条件を表 2.2.1-15 に示す。15 m ケーブルシステムを用いて検証すべき主要試験項目は以下の 3 点となる。

- ・ 66 kV 級電力ケーブルに要求される耐電圧試験
- ・ 30 年間運用に相当する加速試験条件における課通電試験
- ・ ケーブル損失 2.1 W/m/-相@5 kA, 66 kV の確認

耐電圧試験および課通電試験（加速試験）条件の算定根拠を表 2.2.1-16 に示す。試験条件の決定に際しては、超電導ケーブル実証プロジェクト(2007 年)、Super-GM-500 m ケーブル試験結果（2004 年）、及び JEC3401（66 kV / 77 kV 級ケーブルの試験電圧、2006）を参考にした。課通電試験（加速試験）は試験スケジュールを考慮して試験期間を 1 ヶ月とし、30 年運用に相当する加速試験条件として試験電圧を 51 kV に設定した。なお、通電は 8 時間 ON、16 時間 OFF のサイクル試験とした。

表 2.2.1-15 検証試験項目

No.	項目	出荷試験	15m 検証試験	残存試験
1	商用周波長時間耐電圧試験 (90 kV, 3 h)	●		●
2	商用周波耐電圧試験 (110 kV, 10 min)	●		●
3	部分放電試験	●	○	●
4	雷インパルス耐電圧試験 (±385 kV, 3 回)	●		●
5	長期課通電試験 (1 ヶ月)		○	
6	外観検査	○	○	
7	静電容量試験	○ (室温) ●	○	●
8	誘電正接試験	●	○	●
9	絶縁抵抗試験	● (室温)	○ (メガ)	
10	導体抵抗試験 (フォーマ)	●		
11	構造試験	●		
12	曲げ試験	●		
13	I_c 測定	●	○	●
14	シールド電流測定		○	
15	交流損失測定	●	○	●
16	断熱管侵入熱測定		○	
17	気密試験	○ (室温)	○ (室温)	
18	真空リーク試験	○ (室温)	○ (室温)	
19	圧力損失測定		○ (参考)	
20	インダクタンス測定	● (参考)		

●サンプル試験あるいはモデル試験、○全長試験

表 2.2.1-16 試験電圧の算定根拠

試験項目	OF ケーブル (JEC-3401(2006))	超電導ケーブル (15 m 検証ケーブル)
<p>形式試験 商用周波 長時間 耐電圧試験 (サンプル)</p>	<p>$V_{ac} = \frac{U_m}{\sqrt{3}} \times K1 \times K2 \times K3$</p> <p>Um : 最高使用電圧 72 kV</p> <p>K1 : 時間係数 (30 年/3 時間) $^{(1/n)}$, n=30</p> <p>K2 : 抜き取り試験に対する安全率 1.1</p> <p>K3 : その他係数 1.25</p> <p><u>Vac = 90 kV at 3 時間</u></p>	<p>左記計算式より計算。 超電導ケーブルの n については、Super-GM にて n=49 が報告されているが、データ数が少ないため、厳しい側として OF ケーブルで使われている n=30 を使用。 <u>Vac = 90 kV at 3 時間</u></p>
<p>開発試験 商用周波 耐電圧試験 (サンプル)</p>	<p>試験電圧 $V=U_m \times C1 \times K3$</p> <p>$C1=k1 \times k2 \times k3 \times k4$</p> <p>k1: 1 線地絡時の健全相の電圧上昇倍率 1.0 at 66 kV</p> <p>k2: 時間換算係数 $(2/600)^{(1/n)}$; n=20 (短時間)</p> <p>k3: 負荷遮断時の電圧上昇倍率 1.35 at 66 kV</p> <p>k4: 機器の耐電圧試験裕度 1.14</p> <p>K3: 不確定要素に対する裕度 1.1</p> <p><u>V = 100 kV at 10 分</u></p>	<p>左記計算式より計算。 K2 の値は未確定。 厳しい側で考え、n=30 とする。 <u>V = 110 kV at 10 分</u></p>
<p>開発試験 雷インパルス 試験 (サンプル)</p>	<p><u>試験電圧=LIWV×K2'×K3'=425 kV</u></p> <p>LIWV = 350 kV (66 kV 級)</p> <p>K2' : 温度係数 1.1 (常温)</p> <p>K3' : 裕度 1.1</p> <p><u>回数 : ±3 回</u></p>	<p>左記計算式より計算。 温度係数については、温度変化が小さいため、K2'=1.0 として計算。 <u>試験電圧 385 kV at ±3 回</u></p>
<p>開発試験 長期 課通電試験 (全長)</p>	<p>試験電圧 $= (30 \text{ 年/試験期間})^{(1/n)} \times U_m / \sqrt{3}$</p> <p>試験期間=30 年/2^M</p> <p>M= (試験温度 - 基準温度) /7</p> <p>通電条件 : 当事者間で協議</p> <p>※例 電圧 : 48 kV 試験期間 0.5 年、n=30、Um=72 kV at 66 kV</p>	<p>左記計算式より計算。 n=30、試験期間 1 ヶ月として、 <u>電圧 : 51 kV</u> <u>通電 : 8 時間 ON, 16 時間 OFF</u></p>

(3) 検証試験システム構成 (案)

図 2.2.1-51 に検証用超電導ケーブルシステムの構成案を示す。ケーブルは 15 m 長の三心一括型であり、三心のうち二心は課電および通電を行う課通電コアであり、残り一心は課電のみを行う課電コアである。ケーブル両端には終端接続部 (端末) を設けており、A 端末はブッシング 3 本 (うち通電用電流リードを有するのは 2 本) を有する端末であり、B 端末はシステム全体の熱負荷を低減するために容器内部で各相の接続を行うブッシングがない端末である。なお、両端末内においてケーブルは大地に対して固定され、この状態で冷却および昇温が行われる。本ケーブルシステムを冷却システムに接続し、液体窒素を循環させることで冷却を行う。冷却システムは、冷凍機、液体窒素循環ポンプ、リザーバタンクなどで構成されている。

通電時には、課通電コア二心の導体層に单相 (往復) 通電を行う。この際、二心のシールド層は両端末内で短絡処理されているため、シールド層には導体層とは位相が反転した誘導電流が発生する。ケーブルの交流損失測定は、ケーブル各部に取り付けられた温度センサを用いて液体窒素の温度差を測定し、熱損失に換算するカロリメトリック法を用いる。また、課電時には、三心の導体層に対して单相電圧課電を行う。

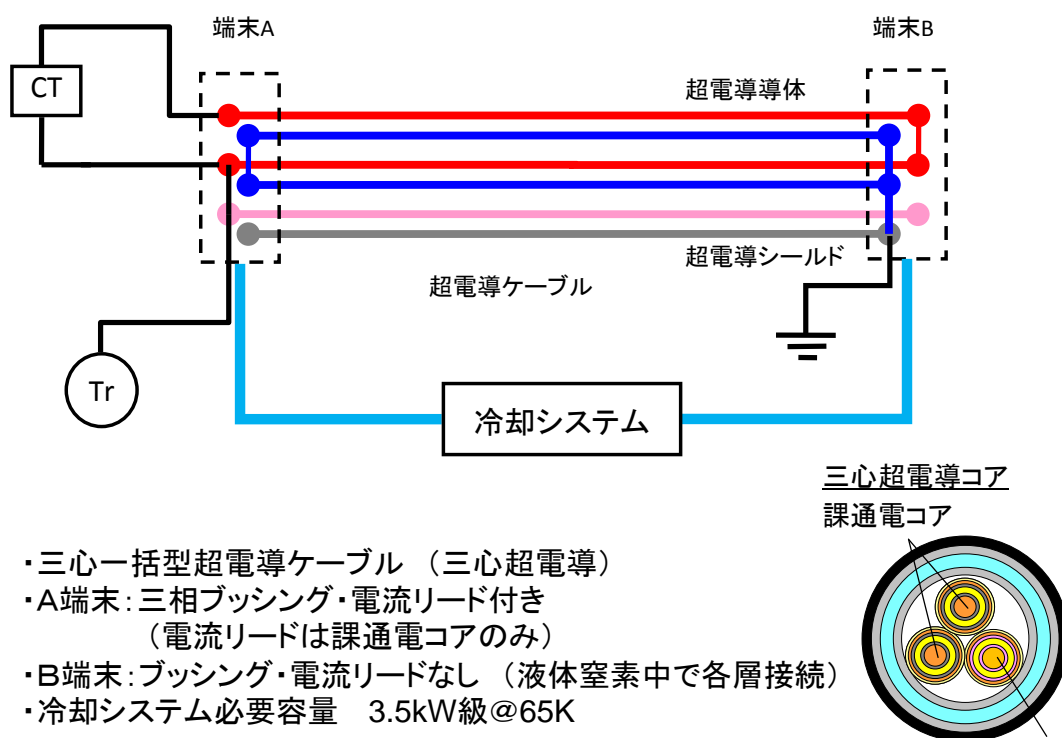


図 2.2.1-51 15 m 超電導ケーブル検証システムの構成 (案)

表 2.2.1-17 15 m 超電導ケーブル検証システムの特徴

項目	内容
構成	15 m、三心超電導コア ブッシング付き端末 1 台、ブッシングなし端末 1 台
課通電	二心へ单相（往復）通電（通電用 CT×1 台） 三心へ单相電圧課電
I_c 測定	導体のみ測定（二相一括、課通電相のみ測定）
AC ロス	二相分の AC ロス測定（熱的手法）
熱機械特性	三相両端固定にて、冷却および昇温
必要冷却容量	3.5 kW at 65 K
最終目標達成	三心形状の実現、66 kV 課電、5 kA 通電、AC ロス評価等、目標の検証可能

(4) 検証試験スケジュール（案）

検証試験用超電導ケーブルの製造および検証試験のスケジュール案を図 2.2.1-52 に示す。平成 23 年度上期までに線材製造を終了させ、下期に検証用 15 m ケーブルの製造を行う。合わせて、終端接続部や冷却システムの製造を平成 23 年度中に終了させ、平成 24 年度第一四半期にて検証システムの組立を行う。この後、約 3 ヶ月間の検証試験を実施し、残存性能の確認を行って検証試験を終了とする。

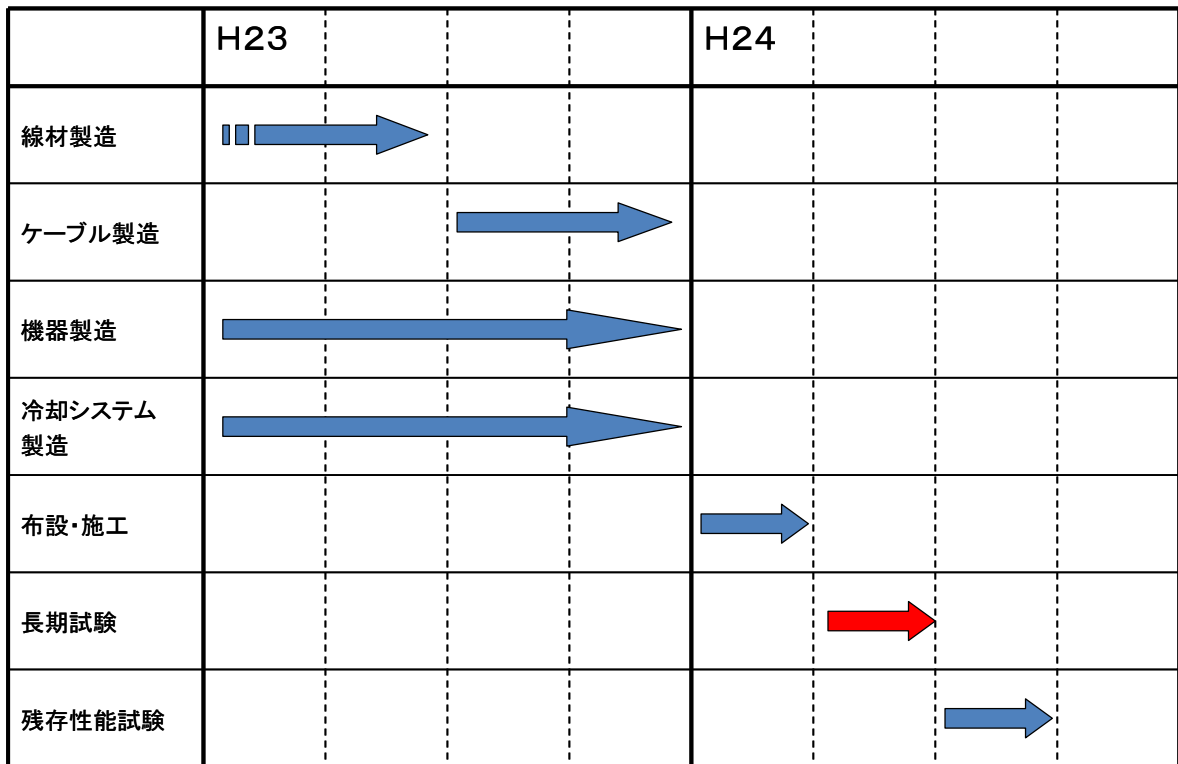


図 2.2.1-52 検証試験スケジュール（案）

(4) まとめ

- ・ 両端に終端接続部を有する検証用 66 kV / 三心一括 / 5 kA, 15 m 長の超電導ケーブルシステムのシステム設計案を取りまとめた。
- ・ 66 kV 大電流ケーブル実用化時の耐久性を評価するための試験条件をとりまとめ、課通電試験計画案を作成した。

(5) この後の予定

- ・ 中間評価後に、端末容器や冷却システム、および課通電試験装置の詳細設計を行う。

2.2.1-7 成果のまとめ

<構造設計>

- ・ 内径 150 mm ϕ の管路に収納できる大電流ケーブルの構造設計を行った結果、「超電導導体 4 層、超電導シールド 2 層」構造を選定した。

<交流損失低減技術>

- ・ 中間目標である交流損失値 2 W/m-相@5 kA の達成に向けて、線材 I_c の向上あるいは線材 J_c 分布の改善が必要である。
- ・ 4 mm 幅線材を用いた導体については、130 A/4 mm-w (320 A/cm-w 相当) (@77 K,s.f.)級の I_c (@77 K,s.f.)を有する線材を適用することにより目標値の達成を検証できる。なお、この場合は 65 K でのサブクール液体窒素冷却試験を前提としている。
- ・ 2 mm 幅線材を用いた導体については、線材 J_c 分布の改善により現状より 2 割程度損失が低減すると期待されるため、現状の線材 $I_c=50$ A/2 mm-w = 250 A/cm-w 相当) (@77 K,s.f.)でも目標値達成の検証が可能である。なお、この場合も 65 K でのサブクール液体窒素冷却試験を前提としているが、より高い I_c を有する線材を使用すれば、77 K 付近での検証も可能と考えている。

<耐過電流設計技術>

- ・ 線材開発/線材特性の把握により線材の耐久性を確認し、この線材を集合化してケーブルを作製した。
- ・ 最大「31.5 kA、2 sec」の過電流に対してケーブルコアにダメージが発生しないことを確認した。
- ・ 二相短絡事故 (31.5 kA、2 sec) を想定して、ケーブルコア間に発生する電磁力の検討を行った。

<三心一括ケーブル技術>

- ・ 機械試作によりケーブル製造工程における健全性を確認した。
- ・ 試作した単心ケーブルコアおよび三心ケーブルコアの曲げ特性を検証した。
- ・ 冷却時に発生する熱収縮に対する健全性を確認した。

< 終端接続技術 >

- ・ 大容量電流リードを開発し、5 kA の連続通電に成功した (熱的平衡を確認)。
- ・ 超電導-常電導接続金具の構造設計を完了した。

< 検証システム設計 >

- ・ 検証用システムの設計案および課通電試験計画案を作成した。なお、設計に際し、線材開発/線材特性の把握による知見が一部寄与されている。

2.2.1-8 今後の計画と目標達成の見通し

図 2.2.1-53 に今後の開発計画を示す。

- ・ 320 A/cm-w(@77 K,s.f.)級の 4 mm 幅線材を用いて 4 層導体を作製し、1.5 W/m-相@5 kA 以下を確認する (平成 22.7/E)。
- ・ 線材スリットの改善を行い、2 mm 幅線材を用いた極低損失ケーブルの実現の可能性を検討する (平成 22.9/E)。
- ・ シールド層付きケーブルコアで最終目標 2 W/m-相@5 kA を達成する (平成 23.3/E)。
- ・ 短絡事故時に発生する電磁力がケーブルに及ぼす影響について検証する (平成 22.12/E)。
- ・ 最終設計に対して機械試作を行い、製造条件および健全性の確認を行う (平成 23.3/E)。
- ・ 5 kA 連続通電試験を実施する (平成 23.3/E)。
- ・ 検証システムの詳細設計を完了する (平成 23.3/E)。

表 2.2.1-18 大電流ケーブルの目標達成度

項目	中間目標	成果（状況）	見通し
①大電流・低交流損失	ケーブル交流損失 2 W/m・相@5 kA 以下	導体構造を「導体 4 層、シールド 2 層」に絞り込み 2 mm 幅、4 mm 幅線材を用いて導体を試作・評価 3 W/m/相@4.5 kA まで損失を低減	4 mm 幅線材の I_c 向上 (320 A/cm-w(@77 K,s.f.))、及び 2 mm 線材の端部改善により、平成 22 年度中に目標性能検証の見込み
②三心一括ケーブル導体の検証	短絡試験 (31.5 kA, 2 sec 相当) でケーブルの性能に低下が無いこと	線材開発/線材特性の把握により線材の耐久性を確認し、この線材を集合化したケーブルコアを作製し、31.5 kA、2 sec の過電流で性能が低下しないことを確認	平成 22 年度中に電磁力の影響を検討 →達成の見込み
③大容量接続技術の開発	5 kA 連続通電を行い、ケーブル導体、超電導-常電導接続部、電流リードに異常がないことを確認する	大容量電流リードを開発し、5 kA 通電を実施して異常のないことを確認	ケーブルと接続部を組み合わせた 5 kA 通電試験を平成 22 年度中に実施 →達成の見込み
④システム検証	検証用超電導ケーブルシステムのシステム設計完了 課通電試験計画書の作成	システム設計、課通電試験計画案を作成 なお、設計に際し、線材開発/線材特性の把握による知見が一部寄与されている。	平成 22 年度中に技術委員会等にて意見を聞いて確定予定 →達成の見込み

	H22 8	9	10	11	12	H23 1	2	3
交流損失 低減技術	スリット改善、2mm線材を用いたさらなる低損失化		シールド付きケーブルコアの損失評価、2W/m-相@5kAの達成					
耐過電流 設計技術			短絡事故時の電磁力の影響検証					
三心一括 ケーブル技術					最終設計に対する試作・検証			
終端接続技術			5kA連続通電の確認					
検証システム設計			システム詳細設計					

図 2.2.1-53 今後の開発計画

引用論文リスト

- (1) N. Amemiya, Z. Jiang, T. Kato, K. Ohmatsu, T. Masuda and Y. Shiohara, “Transport losses in polygonal assemblies of coated conductors with textured-metal substrate”, *Physica C* vol.469 (2009) 1427-1431
- (2) K. Takeuchi, N. Amemiya, T. Nakamura, M. Ohya, H. Yumura, Y. Shingai, T. Nagaishi, N. Fujiwara and Y. Shiohara, “AC loss reduction of superconducting power transmission cable using flexibility fo coated conductors with textured metal substrate”, 21st International Conference on Magnet Technology (MT-21) (2009)
- (3) M. Ohya, H. Yumura, T. Masuda, Y. Shingai, T. Nagaishi and N. Fujiwara, “AC loss characteristics of RE-123 superconducting cable”, 9th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS 2009)
- (4) X. Wang, A. Ishiyama, M. Ohya and N. Fujiwara, “Over-current characteristics in 66 kV REBCO Superconducting Model Cable”, The Papers of Technical Meeting on Application of Superconductivity, IEE Japan, (2010) ASC-10-026
- (5) X. Wang, M. Hiroshi, A. Ishiyama, M. Ohya, O. Kazuya and N. Fujiwara, “AC Over-Current Characteristics of REBCO Coated Conductors”, The Papers of Technical Meeting on Application of Superconductivity, IEE Japan, (2010) ASC-10-027

2.2.2 275 kV 高電圧ケーブル化技術の開発

高電圧ケーブルは 275 kV/3 kA_{rms} を送電可能とする終端部と中間接続部を有する単相ケーブルであり、後半 2 カ年間で 30 m ケーブルの検証試験を計画している。高電圧ケーブルに使用する Y 系超電導線材の構造とケーブルの構造を図 2.2.2-1 に示す。Y 系超電導線材は、ハステロイ™ 基板上に IBAD 法等により中間層を、MOD 法によって超電導層(YB_{1.5}C₃O_y 組成)を形成し、その上に DC スパッタリング法で Ag 安定化層を形成する。その後、銅メッキ等を施し、ケーブル用 Y 系超電導線材を作製する。高電圧ケーブルは、フォーマ、超電導層、電気絶縁層、シールド層、保護層から構成される超電導ケーブルコアを、2 重構造のステンレス製コルゲート管に収納し、ケーブルコアと管の隙間を流れる液体窒素で冷却される。このケーブル開発状況について以下に述べていく。

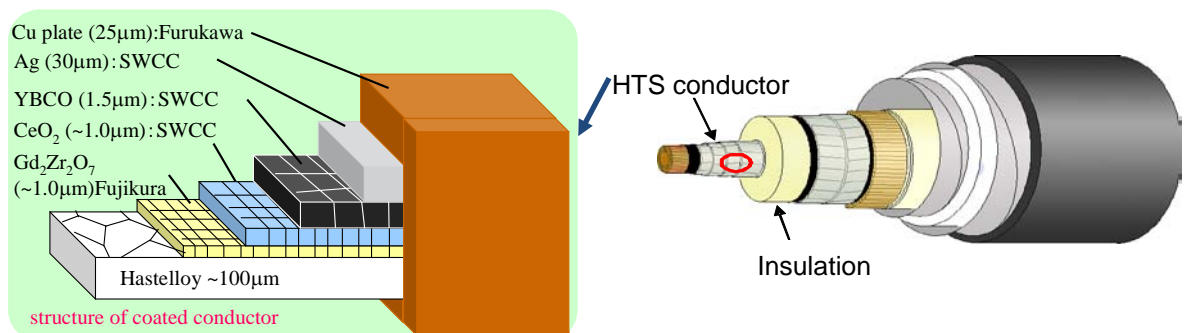


図 2.2.2-1 275 kV 高電圧ケーブルの構造と使用する超電導線材

2.2.2-1 高電圧絶縁・低誘電損失技術（古河電気工業、名古屋大学）

(1) 研究開発目標

超電導ケーブルによる高密度・大容量・低損失送電の実現に向けて、世界各国において実証試験が進められている。この超電導電力ケーブル開発での重要技術課題の一つとして、電気絶縁技術がある。超電導電力ケーブルの電気絶縁構造は、高電圧導体上に積層・巻回された絶縁テープに液体窒素が含浸された複合絶縁系である。この絶縁テープについては、液体窒素中における複合的な材料による電気的特性、機械特性を把握する必要がある。超電導ケーブル、低温機器、高電圧設備に使用実績のある材料を選択し、誘電特性、破壊特性、機械特性を取得している。特に、誘電特性に於いては 275 kV 超電導ケーブルの損失の主要因となる可能性があり、3 kA_{rms} の交流損失と 275 kV の誘電体損失で 0.8 W/m 以下とすることを目標とした。

(2) 研究内容 1 ー絶縁材料の選定ー

高温超電導ケーブルの電気絶縁材料としては、半合成紙（クラフト紙とポリプロピレンフィルム（PP）のラミネート紙）が使われており、この半合成紙としては、

これまで PPLP®-A (A 紙) が用いられてきた。しかしながら、A 紙はクラフト紙の比率が高いために誘電体損失が大きくなる問題がある。そこで、A 紙に加えて新たに 3 種類の絶縁紙を評価した。この選定基準は、大量に入手可能で超電導ケーブル、低温機器、高電圧設備に使用実績のあるものとした。PPLP®-C (B 紙) は PP の比率を A 紙の 40 % から 60 % にしている。次に、極低温電線の絶縁紙として実績のある Tyvek® にカレンダー処理を施したもの (C 紙)、さらに変圧器に実績のある絶縁紙としてノーマックス紙に、電気特性をあげるためにマイカ (雲母) を混入させて高圧の電気機器への応用を目指したタイプ 418 (D 紙) を候補とした。ここで、A 紙は仕様厚み 125 μm のもの、B 紙は仕様厚み 120 μm のものを使用した。

機械試験は、以下のように実施した。まず、幅 25 mm に絶縁材料を切断し、その両端を固定端部間 75 mm で固定し、室温と液体窒素に浸漬した状態 (浸漬時間 5 分以上) でそれぞれ引張試験 (引張り速度 10 mm/min) を実施し、破断強度を測定した。長手方向と幅方向で測定した結果、液体窒素中の方がほとんどの場合で強度が大きくなっており、液体窒素下での使用に関しての問題はない。

次に、絶縁厚 4 mm、長さ 2 m の絶縁モデルケーブルを作製して、比誘電率 ϵ と誘電正接 $\tan\delta$ 測定した。これらの試験結果を表 2.2.2-1 に示す。この試験結果から、導体遮蔽外径を 27 mm として、絶縁厚 25 mm とした場合の 275 kV (対地電圧 160 kV) 課電時の誘電体損失も合わせて示した。D 紙は、誘電体損失に影響する $\tan\delta$ が大きく、ケーブル開発目標である損失 0.8 W/m-相を達成できない。また、A 紙を使用するとケーブルの全損失 0.8 W/m 以下を達成するのに、交流損失分のマージンが小さくなり、目標達成が難しい。C 紙 (Tyvek) を使用すると、誘電体損失が 0.06 W/m と見込まれ、目標レベルの 1/10 の低損失である。一方、B 紙では誘電体損失がやや高く、交流損失のマージンが少なくなる。しかしながら、このレベルの交流損失低減は可能と判断した。

この結果、絶縁材料候補として、B 紙と C 紙に絞り込んだ。

表 2.2.2-1 絶縁材料の誘電特性と見込まれる誘電体損失

Sample	ϵ	$\tan\delta$ [%]	誘電体損失 W/m 導体遮蔽径 27 mm 絶縁厚 25 mm で試算
A 紙	1.9	0.077	0.62
B 紙	1.9	0.057~0.061	0.46~0.49
C 紙	1.8	0.008	0.06
D 紙	2.2	0.22	2.03

次に B、C 紙を用いて、破壊特性を調査した。 $\phi 20$ mm の長さ 400 mm の金属ロッド上に絶縁厚 1 mm の絶縁モデルケーブルを作製し、0.3 MPa (abs) に加圧した液体窒素下にて課電試験を実施した。この時の絶縁モデルケーブルの仕様を表 2.2.2-2 に、その外観を図 2.2.2-2 に示す。

表 2.2.2-2 絶縁モデルケーブル仕様

構造	仕様
電極	φ20 mm、400 mm 長の銅棒
内部半導電層	カーボン紙 2 枚、1/2 ラップ巻き
電気絶縁層	1/3 ラップ Gap 巻き。絶縁 1 mm 厚 (B 紙 9 枚、C 紙 11 枚)
外部半導電層	カーボン紙 2 枚、1/2 ラップ巻き



図 2.2.2-2 絶縁モデルケーブルの外観 (上が C 紙、下が B 紙)

図 2.2.2-3 は B 紙と C 紙の AC 破壊試験を示しており、電圧は 1 分毎に 1 kV 上げるステップとした。図 2.2.2-4 は PPLP®-C と Tyvek®の雷インパルス (Imp) 破壊試験を示しており、Imp 電圧は、設定電圧で 3 回行なった後に、3 kV ずつ電圧を上げるステップとした。図 2.2.2-3、図 2.2.2-4 より、AC, Imp 試験ともに、B 紙の耐電圧特性の方が C 紙よりも良いことが確認された。このため、C 紙で設計すると、絶縁厚が厚くなり、コンパクト性を失ってしまう。一方、誘電特性においては、表 2.2.2-1 で示したように C 紙の方が一桁程度小さく出来る。今回、使用した C 紙はカレンダー加工を施して、厚みを均一化したがる、密度差があり、特に絶縁厚が厚くなればなるほど、皺が入りやすいという問題点が見つかった。275 kV ケーブルは基幹線路として高信頼性を必要とするため、今回の研究では B 紙に絞り込んで、体積効果や長期特性のデータを取得することにした。

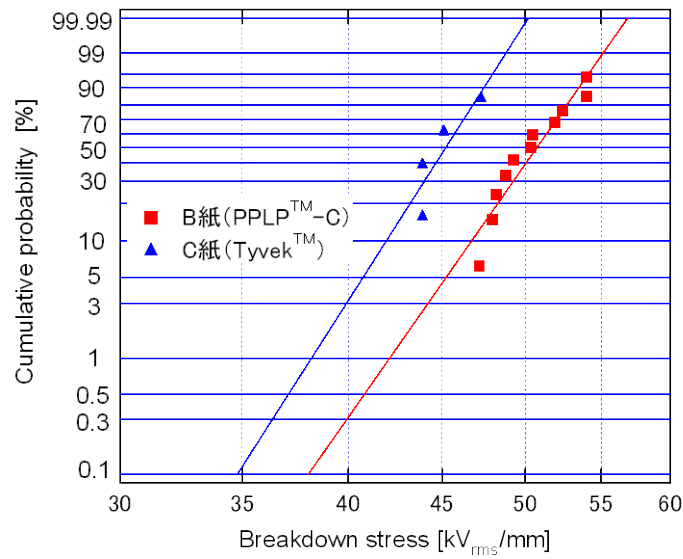


図 2.2.2-3 AC 破壊試験結果のワイブルプロット

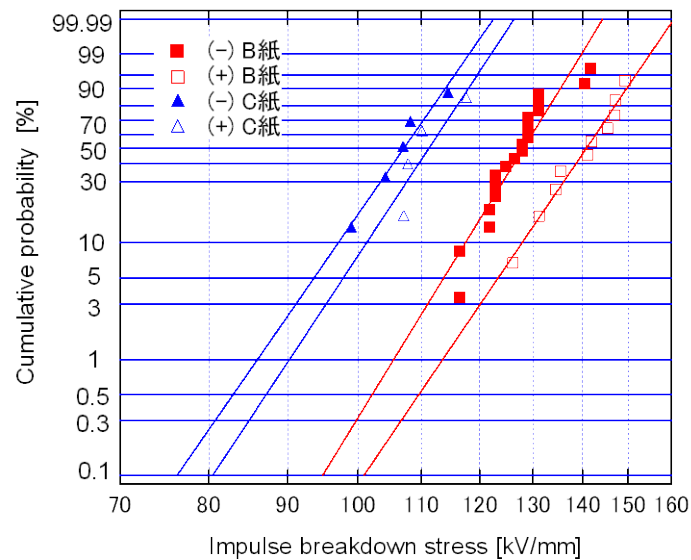


図 2.2.2-4 Imp 破壊試験結果のワイブルプロット

(3) 研究内容 2 一部分放電特性一

超電導ケーブルで用いられている液体窒素／積層テープ複合絶縁系に局所的な部分放電 (PD: Partial Discharge) が長期間発生すると絶縁耐力の劣化を引き起こし、最終的には絶縁破壊に至る危険性があるとされている。そこで、超電導電力ケーブル用の電気絶縁材料を用いた液体窒素／積層テープ複合絶縁系の部分放電計測を行い、実用的・合理的な絶縁設計に資する部分放電開始特性の取得を試みた。

A 紙 (PPLP-A) は 500 m の超電導ケーブル実証試験⁽¹⁾にも使用されており、多数の部分放電データの蓄積がある。今回選定した B 紙 (PPLP-C) が A 紙と比較して、どのような部分放電特性を持っているのかを調査した。

供試電極系の構造を図 2.2.2-5 に示す。供試電極系は、エポキシモールドを施した高電圧平板電極と接地平板電極との間に PP 積層テープを挟み、バッドギャップを模擬した直径 5 mm の円孔を設けた平行平板電極モデルである。実験では、積層テープの種類、枚数、バッドギャップ数、および高電圧電極径を変化させた。A 紙のデータは文献などで公表されているデータ^②を使用した。

PD 検出時点の印加電圧実効値を積層テープ中の電界値に換算したものを部分放電開始電界 (PDIE: PD Inception Electric field strength) と定義した。各実験条件において PDIE を 20 回測定し、この PDIE をワイブル分布により統計的に処理し、統計的電界体積 (SSLV: Statistical Stressed Liquid Volume) を算出した。SSLV は絶縁材料の誘電率の違いから電界が集中する部分において、その微小ユニットの局所電界での重み付けを考慮した有効長全体の電界体積である^③。B 紙 (PPLP-C) の 50 %PD 開始電界 (PDIE50) の SSLV 依存性を A 紙 (PPLP-A) とともに図 2.2.2-6 に示す。同図より、A 紙、B 紙ともに、SSLV の増加とともに絶縁上の弱点 (液体窒素中のマイクロバブルなど) が増加するため、PDIE50 は減少した後、ほぼ一定になることが分かる。PDIE50 の一定値 (下限値) は A 紙で 15.4 kV/mm、B 紙で 21.6 kV/mm であり、B 紙の方が A 紙よりも約 40 %高いことが分かる。これは、PP 割合の高いことによる効果と考えられる。また、ケーブル構造では、SSLV は大きくなるため、同図のほぼ一定値の部分に相当する。このことから、ケーブルの絶縁厚が 1 mm でも 30 mm でも、PDIE 値は、ほぼ同じ値を持つことが期待される。

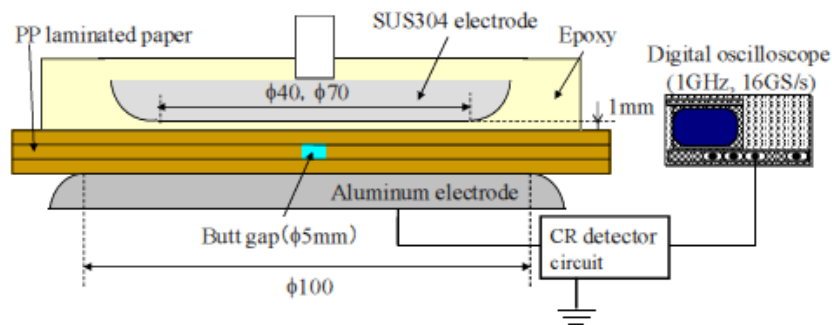


図 2.2.2-5 供試電極系

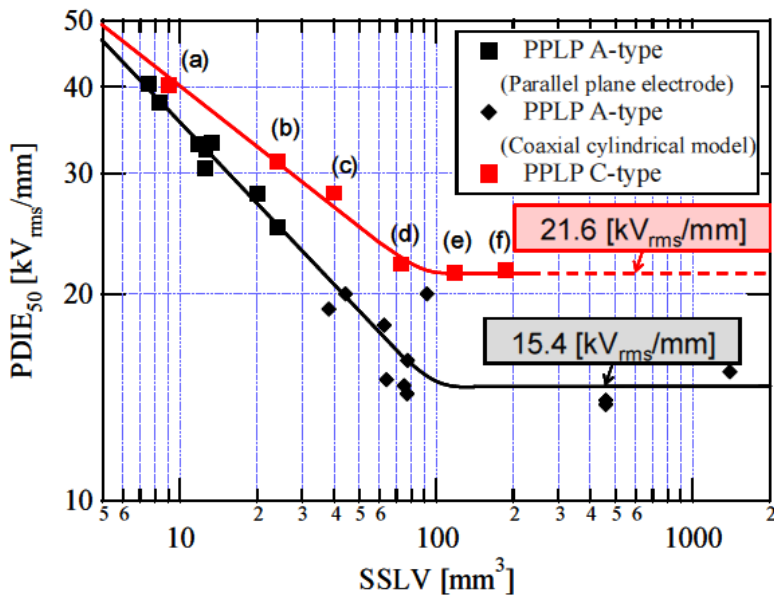


図 2.2.2-6 A 紙、B 紙の PDIE50-SSLV 特性

表 2.2.2-2 の 1 mm 絶縁モデルケーブルの PDIE を測定した。電圧は 1 kV/min のステップで上げ、約 5 pC の部分放電信号をトリガーにした。そのワイブルプロットを図 2.2.2-7 に示す。同図より、PDIE50 は 26.0 kV/mm、0.1 % の累積確率は 21.0 kV/mm となり、0.1 % の累積確率値を暫定の設計ストレスとした。部分放電信号は図 2.2.2-8 に示すように、波形のピークで発生している。

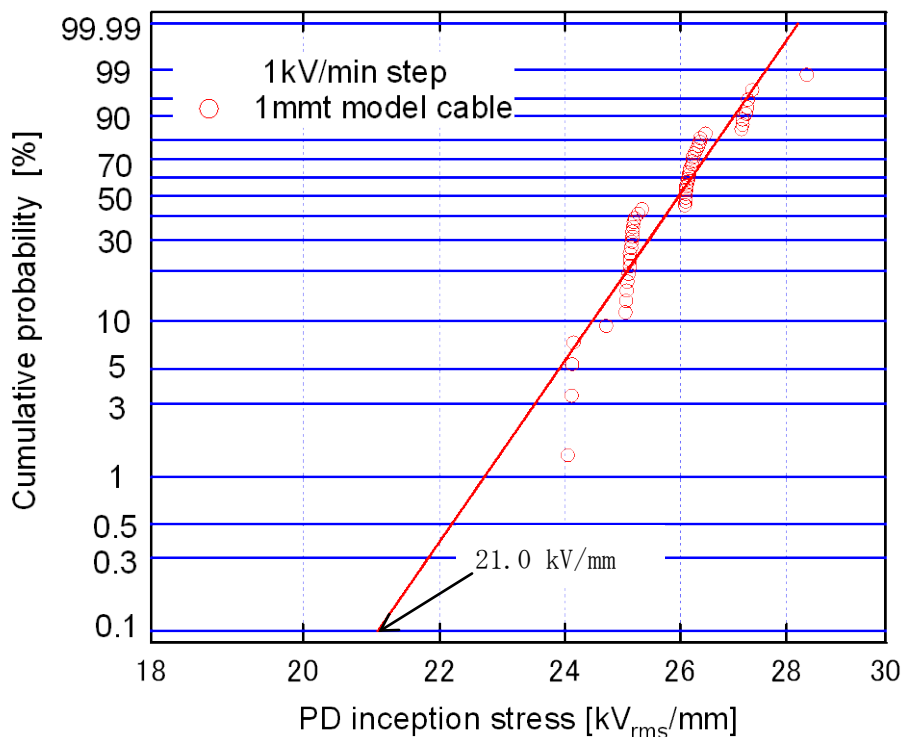


図 2.2.2-7 B 紙の PDIE のワイブルプロット

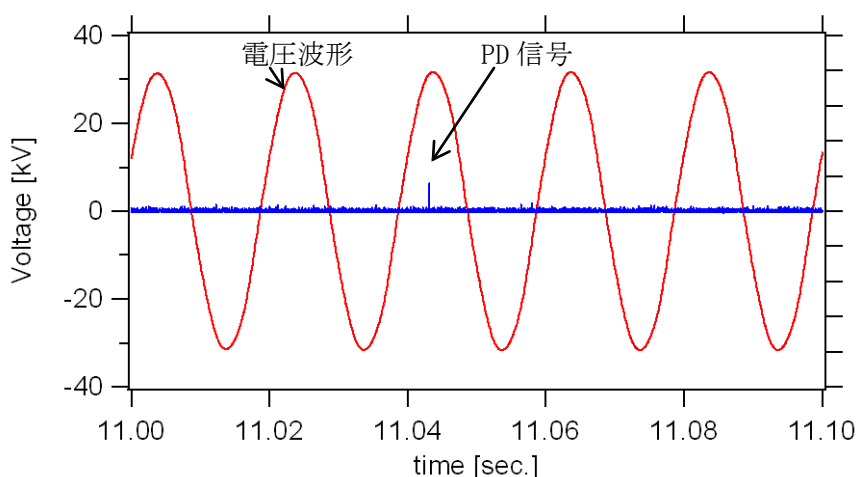


図 2.2.2-8 B 紙の PDIE の発生状況

次に、表 2.2.2-3 の 10 mm 絶縁モデルケーブルの PDIE を測定した。図 2.2.2-9 の容器に 5 m 長のケーブルを入れ、液体窒素への浸漬は 1 日以上とし、0.3 MPa(abs)の圧力で 30 分以上維持した後、部分放電(PD)試験を開始した。この試験では、5 m 長のケーブルの中央に遮蔽のスリットを入れ、スリット両側のケーブルを同調させることで、部分放電測定を行った。この時の部分放電の検出感度はパルスジェネレータにより 30 pC であった。課電時の部分放電の様子を図 2.2.2-10 に示す。185 kV から 190 kV の電圧を上昇する過程で 50-100 pC の信号を検出し、190 kV で 1000-2000 pC の部分放電信号が連続で検出された。この条件での PD 開始電圧を 190 kV とし、電圧値を徐々に下げて、PD 消滅電圧を確認した後、電圧をゼロまで落とした。このサイクルを 5 回繰り返したところ、1 回目の PD 開始電圧が 180 kV (24.8 kV/mm)、2-5 回目が 190 kV (26.2 kV/mm) であり、PD 消滅電圧は全て 160 kV であった。この結果、1 mm と 10 mm の絶縁モデルケーブルの PDIE はほとんど変化無く、今回想定している 20~30 mm の絶縁モデルケーブルでも PDIE 値は、ほぼ同じ値を持つことが期待される。

表 2.2.2-3 10mm 絶縁モデルケーブルの仕様

構造	仕様	外径 [mm]
銅フォーマ (高電圧)	325 mm ² 銅撚り線	21.7
半導電層	カーボン紙	23.5
絶縁層	PPLP®-C	43.5-43.7
半導電層	カーボン紙	44.9
遮蔽 (接地)	平編み銅線	



図 2.2.2-9 課電試験容器

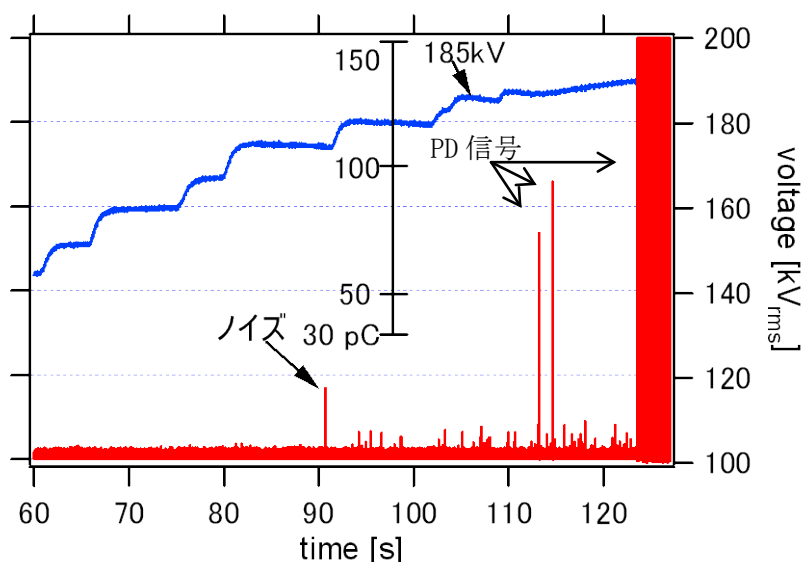


図 2.2.2-10 10 mm 絶縁モデルケーブルの PDIE の発生状況

(4) 研究内容 3 -Imp 破壊特性-

表 2.2.2-3 の 10 mm 絶縁モデルケーブルの雷インパルス(Imp)試験を実施した。雷インパルス電圧の昇圧は 25 kV-3 回のステップとした。正極性で 750 kV(755 kV-3 回をクリア)の耐電圧を確認後、負極性で試験を行い、746 kV で試料有効部での破壊を確認した。電界値で換算すると正極性では 104.3 kV/mm 以上、負極性では 103.1 kV/mm となった。この値を 1 mm 絶縁モデルケーブルと比較したのが、図 2.2.2-11 である。この結果より、10 mm 絶縁モデルケーブルの破壊値は 1 mm のそれと比較して低下傾向にある。今後、20-30 mm 絶縁モデルケーブルの Imp 破壊データ数を増やして、バラツキを評価する予定である。Imp の設計ストレスは、10 mm 絶縁モデルケーブルの破壊データが 1 mm 絶縁モデルケーブルと同様のバラツキ (3σ) をもつとして、83 kV/mm とした。

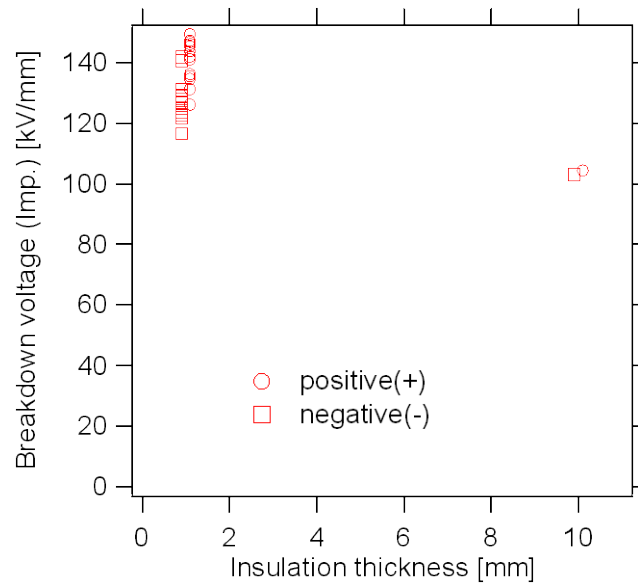


図 2.2.2-11 10 mm 絶縁モデルケーブルと 1 mm 絶縁モデルケーブルの Imp 破壊特性

(5) 研究内容 4 -AC 破壊と部分放電の長期特性-

A 紙については、絶縁厚 1 mm の絶縁モデルケーブルにおいて、1,000 時間までの破壊特性が取得されており、破壊の寿命指数 $n=49$ が見いだされている⁽⁴⁾。B 紙においても図 2.2.2-12 に示すように 1 時間までであるが、寿命指数 $n=51$ が得られている。図中では B 紙の絶縁強度が A 紙と比較して低く見えるが、これは圧力条件の違いによるもので、同条件で測定した場合の破壊強度は同等である。B 紙は A 紙と材料構成がほとんど変わらないことから、A 紙と同様の破壊の寿命指数 49 が予想される。一方、A 紙の部分放電の長期特性は、シートサンプルにおいて、100 前後の寿命指数が公表されている⁽⁵⁾。B 紙の絶縁モデルケーブルについては、図 2.2.2-12 (右) のように、現時点で寿命指数 91 が確認されており、A 紙の文献値と同等である。今後、1000 時間までのデータを取得して、長期特性を確認する予定である。

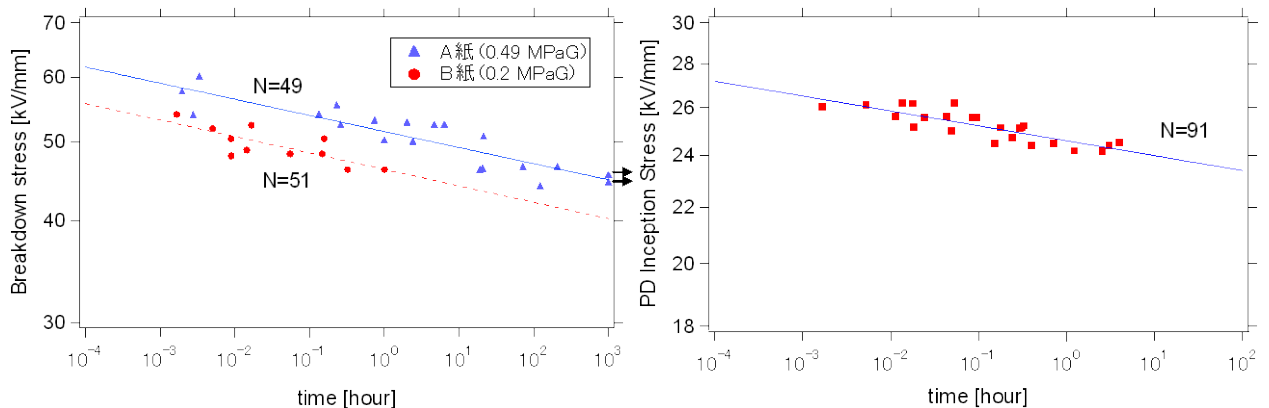


図 2.2.2-12 B 紙絶縁モデルケーブルの破壊 V_t 特性 (左)、PD の V_t 特性 (右)

(6) 研究内容 5 –ケーブルの設計–

試験条件については、2.2.2-6 で後述するが、Imp 試験が 1155 kV-3 回、AC 試験が 300 kV-10 分で部分放電フリーとした。

Imp の設計電界は 10 mm 絶縁モデルの結果 103.1 kV/mm(746 kV 破壊)から 1 mm 絶縁モデルの 3 σ をとって、83 kV/mm とした。一方、AC の設計電界は図 2.2.2-7 のワイブルの結果から 0.1%の発生確率として 21.0 kV/mm であり、この値を設計ストレスとした。絶縁厚 t は式 (2.2.2-1) から算出する。

$$t = r \times (\exp(V/Er) - 1) \quad (2.2.2-1)$$

ここで、 r は導体遮蔽外半径、 V は試験電圧、 E は設計電界である。

2.2.2-2 の交流損失低減技術および 2.2.2-4 の耐過電流ケーブル設計技術から導体遮蔽外半径は 13.5 mm としており、この数値を代入すると、絶縁厚は Imp 設計で 24.5 mm、AC 設計で 25.5 mm となる。そのため、25.5 mm を絶縁厚とした。

この時のケーブル設計を表 2.2.2-4 に示す。絶縁厚 25.5 mm のケーブルに、現在まで得られている誘電特性の値を使用すると、誘電体損失は 0.46 W/m となり、交流損失のマージンはやや少ない。一方、誘電特性を減らして、さらに設計電界への裕度をもたせて、絶縁厚を 28 mm にした場合、誘電体損失は 0.43 W/m となり、交流損失へのマージンは大きくなる。

表 2.2.2-4 275 kV 超電導ケーブルの設計

構成		絶縁紙：B 紙 (PPLP-C)		
設計絶縁厚		24.5 mm (IMP 設計)	25.5 mm (PD フリー設計)	28 mm (誘電体損失小)
フォーマ外径		21.7	21.7	21.7
導体遮蔽外径		27.0	27.0	27.0
絶縁外径		76.0	78.0	83.0
コア全体外径		85.0	87.0	91.0
断熱内管	内径	95	95	95
	外径	105	105	105
断熱外管	内径	127	127	127
	外径	141	141	141
防食層		150	150	150
誘電体損失(275 kV)		0.47 W/m	0.46 W/m	0.43 W/m
交流損失のマージン		0.33 W/m	0.34 W/m	0.37 W/m

(7) 成果

275 kV で使用する絶縁材料を選定した。C 紙 (Tyvek) を使用すると、誘電体損失が 0.06 W/m と見込まれ、目標レベルの 1/10 の低損失である。しかし、現在

入手可能な C 紙は密度や厚さにムラがあるため、絶縁が厚くなる 275 kV ケーブルでは、巻き皺が生じやすく、信頼性に不安がある。そのため、今後の適用可能性はあるものの、今回は、従来材料 (A 紙 PPLP-A) に近い B 紙 (PPLP-C) を採用した。これにより、誘電体損失は 0.4~0.5 W/m となり、全体を 0.8 W/m 以下にするには、交流損失は 0.3~0.4 W/m になるが、このレベルの交流損失低減は可能と判断した。

B 紙は従来材料と比較して、ポリプロピレンの比率を 40% から 60% に上げているが、これにより部分放電開始特性は 40% も改善した。部分放電開始特性はシートだけではなく、1 mm, 10 mm 絶縁厚のモデルケーブルでも同様の特性が得られている。

B 紙の AC 長期特性は、現在までの所、A 紙と同等の結果を得ており、今後、さらに長期間の特性取得を試みる。

B 紙の Imp 特性は、現在までの所、絶縁厚 10 mm のモデルケーブルで 746 kV の破壊データを得ている。

今回得られた B 紙のデータを基に、部分放電フリー設計と Imp 耐電圧設計を行ったところ、設計絶縁厚は 25.5 mm になった。このケーブルの誘電体損失は 0.46 W/m となるが、交流損失の低減により、目標の 0.8 W/m 以下の損失は達成可能である。

引用論文リスト

- (1) S. Mukoyama, S. Maruyama, M. Yagi, N. Ishii, H. Kimura, H. Suzuki, M. Ichikawa, T. Takahashi, T. Okamoto, A. Kimura and K. Yasuda, "Demonstration and verification tests of a 500 m HTS cable in the super-ACE project", *Physica C* 426-431 (2005) 1365-1373
- (2) N. Hayakawa, R. Yamaguchi, H. Kojima, F. Endo and H. Okubo, "Partial Discharge Inception Strength in a Full-scale HTS Cable Based on LN₂/Polypropylen Laminated Paper Insulation", 16th IEEE International Conference on Dielectric Liquids, pp. 353-356, 2008
- (3) N. Hayakawa, T. Kobayashi, M. Hazeyama, T. Takahashi, K. Yasuda and H. Okubo, "Partial Discharge Inception Characteristics of LN₂/PP Laminated Paper Composite Insulation System for High Temperature Superconducting Cable", *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 12, No.1, pp. 166-174 (2005)
- (4) M. Yagi, S. Mukoyama, S. Tanaka, S. Honjo, M. Shimodate and Y. Takahashi, "V-t characteristics of liquid nitrogen impregnated insulation for HTS cable", in Proc. 13 the Annual Conference of Power & Energy Society, IEE Japan, No.423(2002) (in Japanese)
- (5) H. Okubo, M. Hazeyama, N. Hayakawa, S. Honjo, and T. Masuda, "V-t

characteristics of Partial Discharge Inception in Liquid Nitrogen/PPLP Composite Insulation System for HTS Cable”, IEEE Trans, Dielect. Elect Insulation, Vol.9, No.6, pp. 945-951 (2002)

2.2.2-2 交流損失低減技術（古河電気工業、京都大学）

(1) 研究開発目標

3 kA_{rms} / 275 kV 級高電圧ケーブルの開発において、交流損失の低減が大きな技術課題となっている。Y系超電導テープ線材の超電導層は非常に薄く断面アスペクト比が非常に大きいので、その交流損失特性は著しい異方性を示す。すなわち、線材面に平行な交流磁界変動に対する交流損失は大変小さく、線材面に垂直な交流磁界変動に対する交流損失は大きくなる。一般的には磁界は線材面に平行な成分と垂直な成分を持つが、Y系超電導テープ線材においては、交流損失は実質的には垂直磁界変動成分に支配され、その低減が交流損失低減の鍵である。

275 kV-3 kA_{rms} で 0.8 W/m の損失以下（侵入熱を除く）とすること、150 mmφ以下のケーブル外径が目標として掲げられており、超電導導体の低交流損失化がより一層重要となっている。2.2.2-1 項より誘電体損失が 0.4~0.5 W/m が見込まれることから、3 kA_{rms} の交流損失として、0.3 W/m 以下を目標とした。

(2) 研究内容 1 - 交流損失低減（その 1） -

275 kV 用の 2 層超電導導体を作製した。その仕様を表 2.2.2-5 に示す。

表 2.2.2-5 作製した超電導導体の仕様

構造	仕様
超電導線材	ロッド番号 SWM-0010 Hastelloy/Gd ₂ Zr ₂ O ₇ /CeO ₂ /YBCO/Ag=100/1/1/1.5/10 μm
幅, I _c	4.5 mm, 249-330 A/cm-w
超電導導体	2 層 銅撚り線中空フォーマ 250 mm ² 1-layer 内径φ30.0 -500 mm (S)ピッチ 2.25 mm幅 36本 (2227.1 A) 2-layer 内径φ30.7 +500 mm (Z)ピッチ 2.25 mm幅 38本 (2319.8 A)
長さ, 合計 I _c	1 m, 4547 A

極力、超電導線材の I_c 値を揃えたが、使用した線材は 112.1 A~148.8 A であり、10 mm 換算にすると、249 A~331 A/cm-w とかなり大きい。さらに、レーザ加工は光ファイバレーザを用いており、条件が最適化されていないこともあって、劣化

率も 9 %前後とやや大きい。導体の仕上がりを図 2.2.2-13 に示す。

この導体の I_c の温度依存性を図 2.2.2-14 に示す。この図で 77.3 K での I_c は 4612 A であり、導体作製前の線材の I_c 合計 4547 A から変化していない。

交流損失の測定結果 (77.3 K) を図 2.2.2-15 に示す。0.0904 W/m@1 kA_{rms} の結果は、前プロジェクトの実績である⁽¹⁾。一方、今回作製した導体は、この実績に対して、約 1/9 にまで損失が小さくなっている。この理由として、 I_c の向上 (約 2 倍)、径が大きくなる (φ20→30) ことによる経験磁場の減少、超電導導体の層数の減少 (3 層から 2 層) による経験磁場の減少、が理由として考えられる。図 2.2.2-15 中の実線は Norris のストリップモデルの計算式(2.2.2-2)から算出された損失である。今回の導体は 2.25 mm 幅の超電導線材が 74 枚から構成されており、1 枚あたり 61.5 A の I_c となる。Norris のストリップモデル⁽²⁾は、1 枚の線材が通電により自分自身で発生する交流磁界のみで交流損失を表す解析式であり、線材同士がお互いに磁場的に影響を与えないときの損失を示している。

$$Q_{NS} = \frac{N \cdot I_c^2 \cdot \mu_0}{\pi} \left\{ \left(1 - \frac{I_t}{I_c} \right) \ln \left(1 - \frac{I_t}{I_c} \right) + \left(1 + \frac{I_t}{I_c} \right) \ln \left(1 + \frac{I_t}{I_c} \right) - \left(\frac{I_t}{I_c} \right)^2 \right\} \quad (2.2.2-2)$$

ここで、 Q_{NS} [J/m/cycle]、 N は線材の本数、 I_t は通電電流のピークを表している。

実際の超電導導体では、各線材が発生した磁場が他の線材に影響を与えるので、このモデルとは一致しない。単層構造であれば、隣り合った線材同士が発生磁場により、端部での縦磁界がキャンセルされるので、損失は Norris のストリップモデルよりも小さくなる。2 層導体であれば、1 層目の損失は単層導体と同様に損失は小さくなるが、2 層目の損失は、1 層目の導体の発生磁場の影響を受けるため、Norris のストリップモデルよりも大きくなる。結果として、今回の 2 層導体の損失は Norris のストリップモデルよりは若干高い値となっている。将来的には 2 層導体でも Norris のストリップモデルよりも小さくすることが目標であり、Norris のストリップモデルとの比較は、損失の指標としては有用である。

次に、交流損失の温度依存性を図 2.2.2-16、図 2.2.2-17 に示す。図 2.2.2-17 のように I_c で規格化すると温度依存性はほとんど見えなくなっている。74.0 K で I_c は 6100 A であり、3 kA_{rms} での交流損失は 0.8 W/m ($I_t/I_c=0.70$)、72.0 K で I_c は 7047 A であり、3 kA_{rms} での交流損失は 0.49 W/m ($I_t/I_c=0.60$) であった。この損失値は、Norris のストリップモデルよりも 1.3 倍程度高く、この比率を使えば、目標の 0.3 W/m 以下にするには I_c を上げれば到達も可能 ($I_c=9$ kA (約 68 K) で 3 kA_{rms} の交流損失は 0.27 W/m) である。

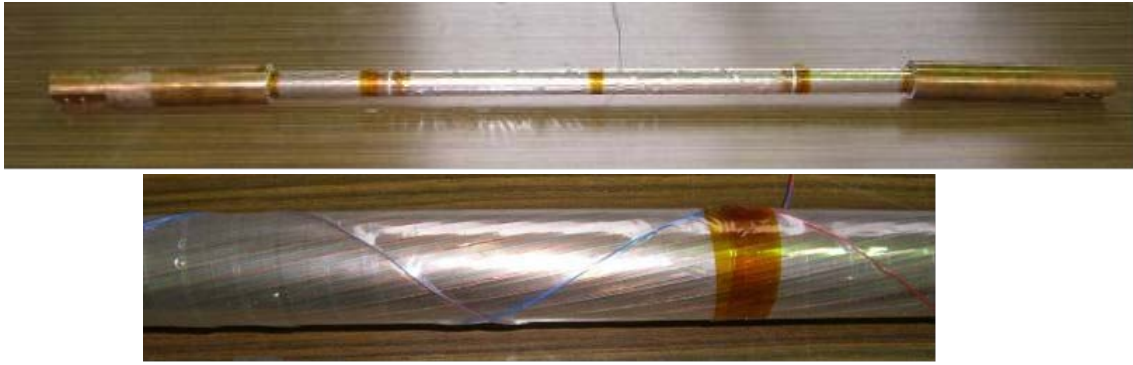


図 2.2.2-13 作製した超電導導体

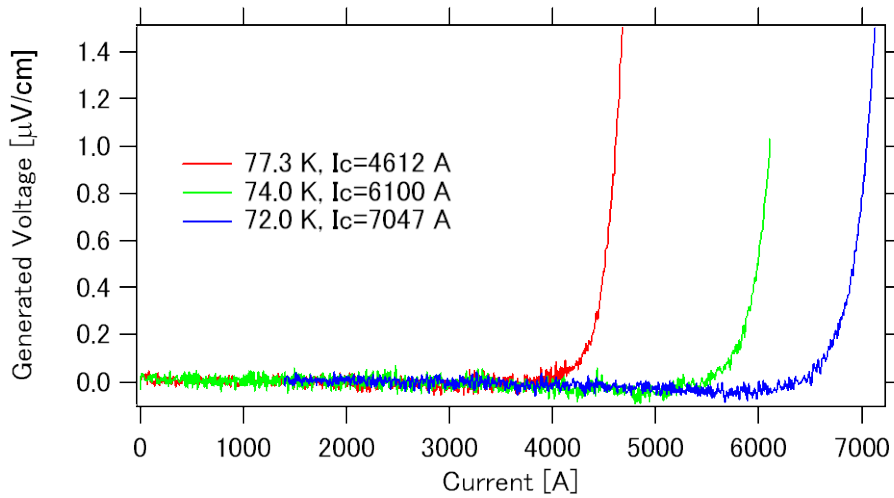


図 2.2.2-14 作製した超電導体の I_c の温度依存性

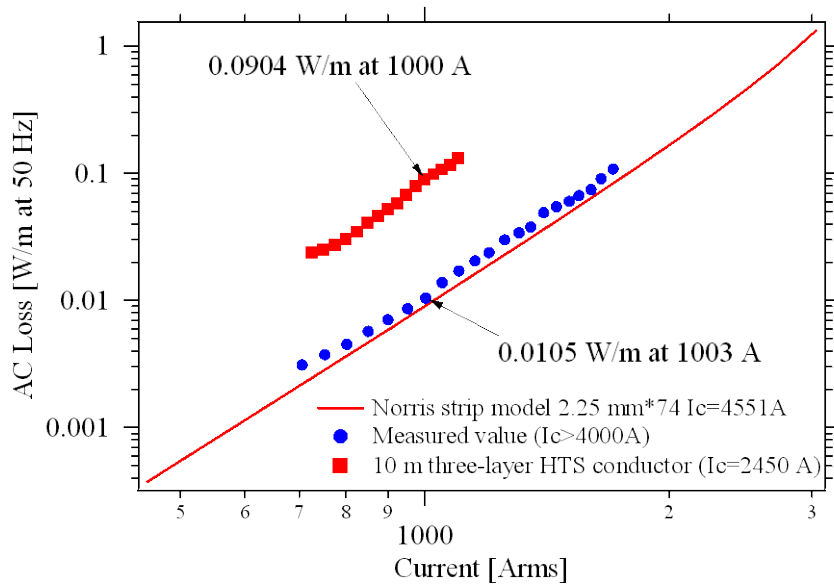


図 2.2.2-15 交流損失測定結果 前プロジェクトの導体と比較

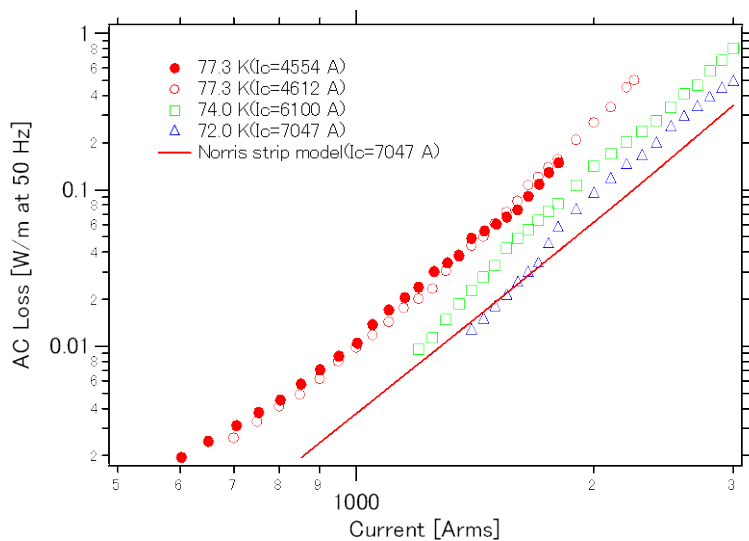


図 2.2.2-16 作製した 2 層導体の交流損失

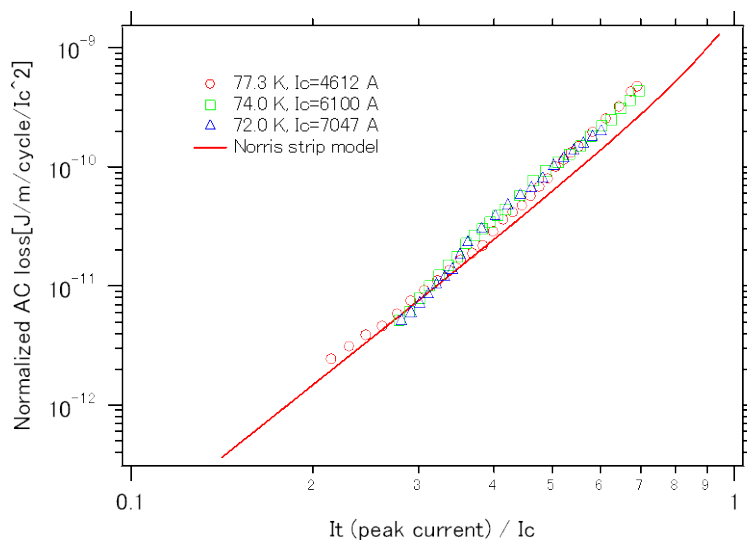


図 2.2.2-17 I_c で規格化した交流損失

(3) 研究内容 2 —交流損失低減 (その 2) —

提供された超電導線材の幅は 5 mm であるが、 CeO_2 を付けた後に、10 mm 幅の基板をスリッタで切断しており、この切断により、マイクロクラックが生じ、YBCO の成膜の妨げとなる。また、TFA-MOD 法は、線材の幅方向両端の J_c (臨界電流密度) が低くなることが分かっている。そこで、両端の J_c を図 2.2.2-18 のように仮定して、肩のスロープ s をパラメータにして、数値計算を実施した。両端 J_c の特性は、交流損失に大きく影響を与えると考えられる。

まず、第 1 の交流損失低減手法として、多層導体の層間を離すことで、損失の主要因となる外層の経験磁場を減らすことを考えた。具体的な構造とその結果を表 2.2.2-6 に示す。線材は 5 mm 幅を想定したため、図 2.2.2-18 の J_c 分布のパラメー

タは、 $S=0.8, W=5$ を使用した。表 2.2.2-6 の構造図を見ると、5-a 導体と 5-b 導体の線材使用量は同じで、2 層目の構造は同じである。1 層目の構造が異なっており、5-b は 1 層目の内径を小さくすることで、1 層目と 2 層目の層間距離が伸びている。層間を離すと、発生磁場の波打ちは小さくなって円周に近づき、1 層目が発生する磁場は、2 層目へあまり影響を与えなくなる（垂直磁場が減少する）と考えて、損失は小さくなると考えた。しかし、実際は 2 層目を通電することによる自己磁場により発生磁場は波打ちし、1 層目の発生磁場と重ね合わせると、たまたま、強め合うところも出る。これは、1 層目と 2 層目の線材配置に起因するものであり、数値計算の結果、表 2.2.2-6 に示すとおり、層間を離すことによる交流損失の低減効果はほとんど見られなかった。層間距離を開くことは、ケーブルのコンパクト性を失うことになるので、層間距離は 5-a のように従来そのままとした。

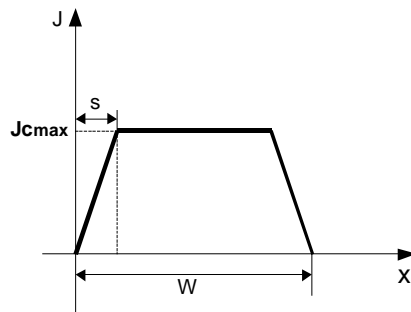
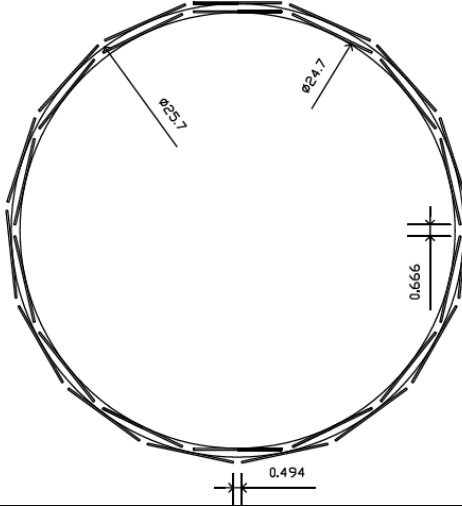
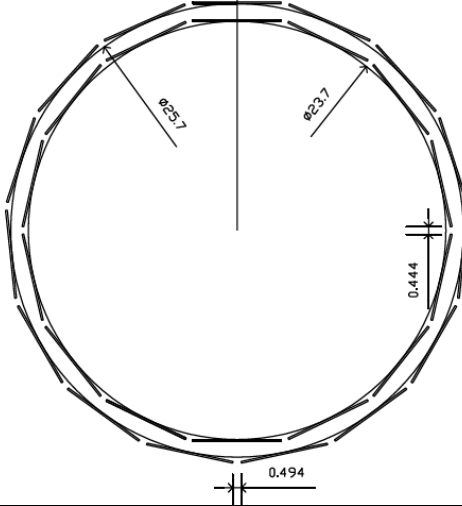


図 2.2.2-18 線材の幅方向 J_c 分布

表 2.2.2-6 層間距離を変えた導体の損失比較




	5-a	5-b
Structure		
Spec.	線材幅 5 mm (1 layer/2 layer=14/15)、 1 層目内径 24.7 2 層目内径 25.7 導体外径 26.9 mm、層間距離小	5 mm (1 layer/2 layer=14/15) 1 層目内径 23.7 (5-a より層間が広い) 2 層目内径 25.7 層間距離大 (5-a との比較)
Loss	1 層目の損失 3.963E-01 W/m 2 層目の損失 6.980E-01 W/m 1.095 W/m at 3kA ($I_c = 7.308$ kA)	1 層目の損失 3.847E-01 W/m 2 層目の損失 7.202E-01 W/m 1.105 W/m at 3 kA ($I_c = 7.308$ kA)

次に、第 2 の交流損失低減手法として、線材端部の J_c 劣化部をレーザで落とす事で、交流損失低減を考えた。両端 0.5 mm を落として 4 mm 幅の線材、両端 1 mm を落として、3 mm 幅の線材を加工した。数値計算では、図 2.2.2-18 のスロープ長 s をパラメータとして、5 mm 幅の未処理の線材 ($w=5$ mm) ではスロープ長 s を 0.8 mm、3 mm、4 mm 幅の線材 ($w=4$) ではレーザ加工による熱影響部とスロープ長 s に分けられると考えた。レーザ加工前後の I_c から熱影響部は 4 mm 幅線材で 0.375 mm、3 mm 幅線材で 0.1 mm とし、この熱影響部では、 I_c は無くなっていると仮定した。これは、線材幅 w が狭くなっていることと同意であり、4 mm 幅の線材、3 mm 幅の線材の w はそれぞれ、3.3 mm、2.8 mm となる。さらに、スロープ長 s はどちらも 0.1 mm とした。細線化で使用したレーザは「超電導応用基盤技術開発 (第 II 期)」プロジェクトで実績のある YAG レーザとし、これらの超電導線材を使って、表 2.2.2-7 に示す 3 つの導体を作製した。

使用した線材の分布を図 2.2.2-19 と 2.2.2-20 に示す。図 2.2.2-19 はロッド番号 0076 の線材分布である。使用箇所は 10.5-55.5 m であり、長手方向には均等な分布である。図 2.2.2-20 はロッド番号 0071 の線材分布である。使用箇所は 13~70.5 m であり、長手方向には均等な分布である。

図 2.2.2-21 に 3 つの導体の交流損失の比較を示した。5 mm 幅の未処理の線材は、端部の J_c 低下が大きいいため、低電流領域の交流損失が大きい。4 mm 幅の線材は端部 J_c の低い部分を取り除き、さらにレーザーによる熱影響で、 J_c 分布が一様になったと考えられ、Norris のストリップモデルに近い結果を得た。しかし、レーザーによる熱影響部が大きいいため、線材間ギャップを小さくした効果は顕著に見られなかった。一方、3 mm 幅の線材は、端部 J_c の低い部分を取り除き、レーザーによる劣化も小さいことから、線材間ギャップが小さくしたことによる垂直磁場のキャンセルの効果が見られている。3 kA_{rms} の交流損失は、0.297 W/m ($I/I_c=0.50$)、0.235 W/m ($I/I_c=0.46$)と目標値である 0.3 W/m 以下を達成した。

表 2.2.2-7 3本の超電導導体仕様

導体名	5-C	4-C	3-C
線材幅	5 mm	4 mm	3 mm
導体構造			
導体仕様	1層目内径 23.7 mm 14本 400 mm ピッチ 2層目内径 24.5 mm 14本 -250 mm ピッチ、 導体外径 25.5 mm	1層目内径 23.7 mm 18本 400 mm ピッチ 2層目内径 24.5 mm 18本 -250 mm ピッチ 導体外径 25.5 mm	1層目内径 23.7 mm 23本 400 mm ピッチ 2層目内径 24.5 mm 23本 -250 mm ピッチ 導体外径 25.5 mm
使用した線材のロッド番号と I_c	0068,0078 140 – 160 A (280 – 320 A /m-w)	0076(10.5-55.5 m) 150-160 A (300-320 A /m-w)	0071(13-70.5 m) 150 -165 A (300 -330 A/m-w)
3kA _{rms} の交流損失	1.56 W/m ($I/I_c=0.76$)	0.421 W/m ($I/I_c=0.51$)	0.297 W/m($I/I_c=0.50$) 0.235 W/m($I/I_c=0.46$)

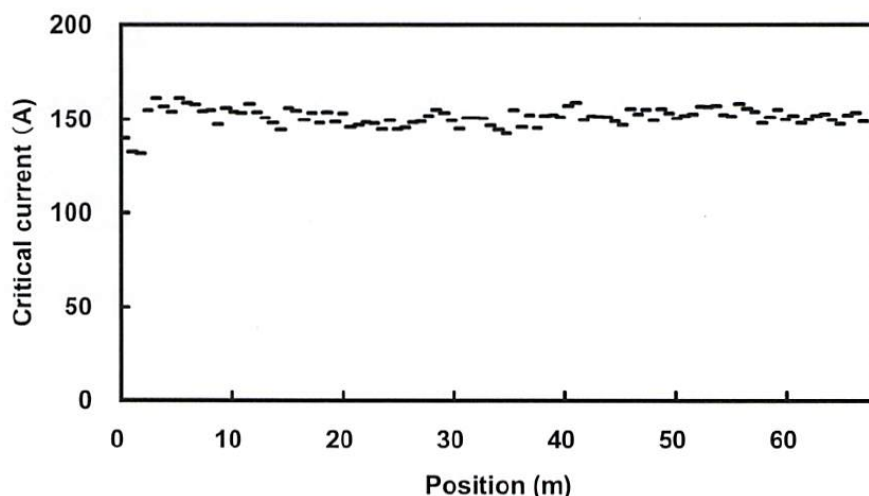


図 2.2.2-19 4-C で使用した線材(ロッド番号 0076)の長手方向分布

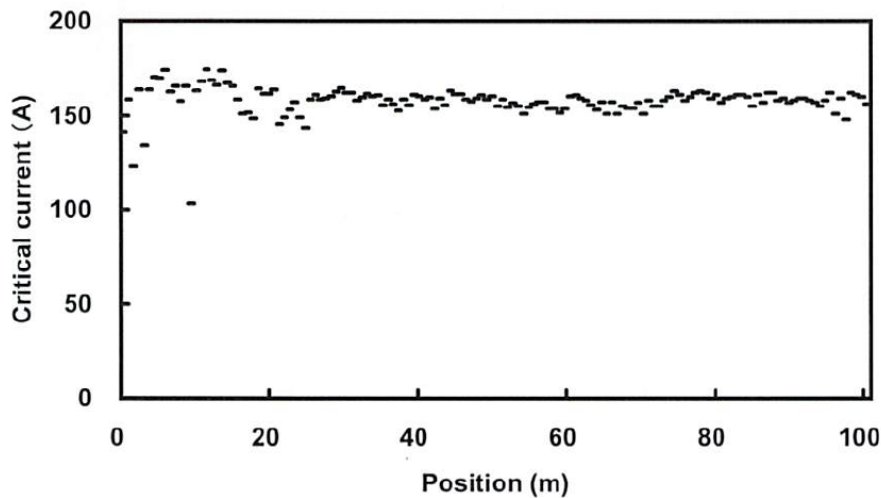


図 2.2.2-20 3-C で使用した線材(ロッド番号 0071)の長手方向分布

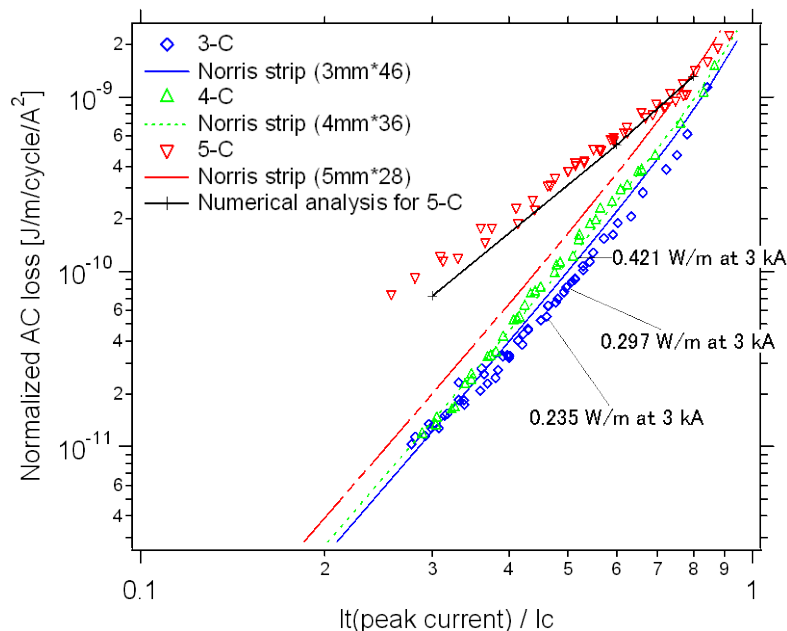


図 2.2.2-21 3つの導体の規格化した超電導の交流損失

3-C の臨界電流の特性を図 2.2.2-22 に示す。77.3 K で I_c が 4700 A であったが、3 mm 幅線材 1 本当たり 102 A であり、5 mm 幅に換算すると 170 A である。元々の未処理の線材の I_c が 150-165 A であり、 J_c の低い端部を除いたことを考えると、妥当な結果である。

図 2.2.2-23, 図 2.2.2-24 に交流損失の結果を示す。Norris のストリップモデルよりも明らかに損失の低減が見られ、線材間ギャップを小さくすることによる、垂直磁場のキャンセル効果が見られている。3 kA_{rms} の交流損失は、0.297 W/m ($I/I_c=0.50$)、0.235 W/m ($I/I_c=0.46$)と目標値である 0.3 W/m 以下を達成した。

また、解析では、レーザによる熱影響部 (0.1 mm) および端部の J_c (図 2.2.2-18 線材の幅方向 J_c 分布で $s=0.1$ mm) の改善を考慮したところ、今回の実験結果とほぼ良い一致をみせた。

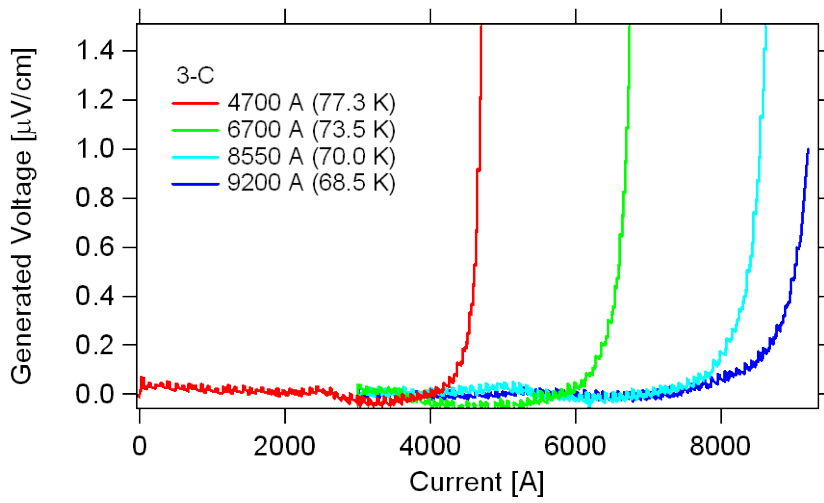


図 2.2.2-22 3-C の V-I 特性

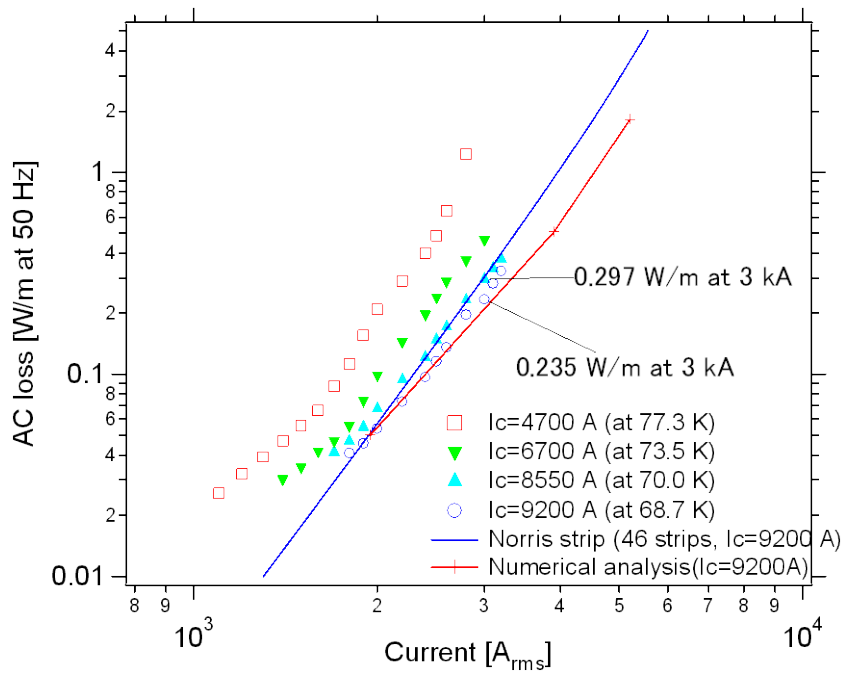


図 2.2.2-23 3-C の交流損失結果

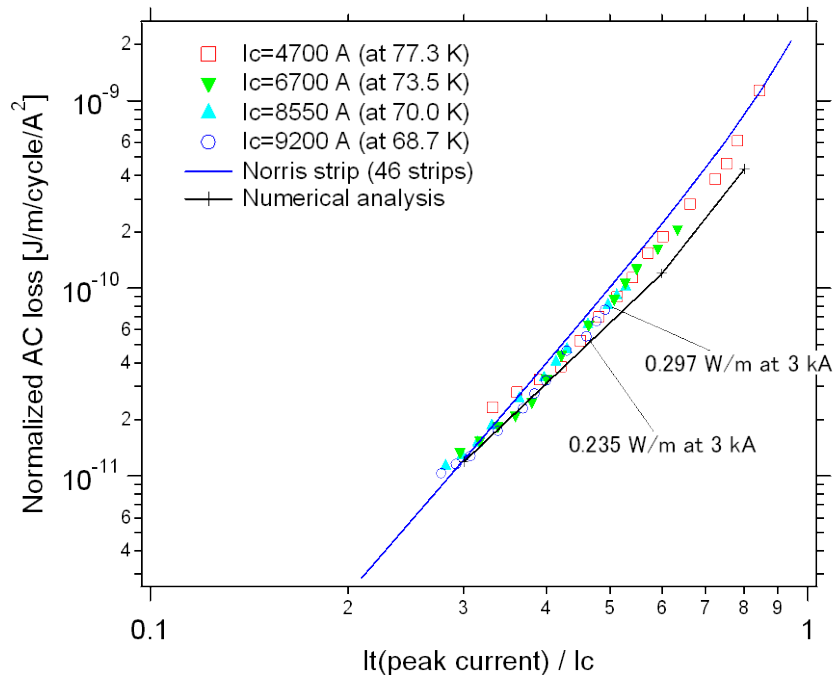


図 2.2.2-24 3-C の I_c で規格化された交流損失結果

(4) 研究内容 3 -機械曲げ特性-

325 mm²の銅撚り線に超電導線を巻き付け、絶縁厚 26 mm にして、275 kV 級のケーブルコアを作製してケーブル曲げ試験を実施した(図 2.2.2-25)。曲げ直径を変えて曲げ履歴を与えた後に、 I_c 測定を行い劣化率の調査と、2 m 曲げ後にケーブルコアを解体して絶縁紙の状況を確認した。その結果、曲げ直径 2.5 m まで超電導性能の低下がないことを確認して、さらに 2 m 曲げまで絶縁紙への変形(破れ、皺)が無いことが確認できた。275 kV の超電導ケーブルコアとして、曲げ特性としては製造上問題ないことが確認できた。

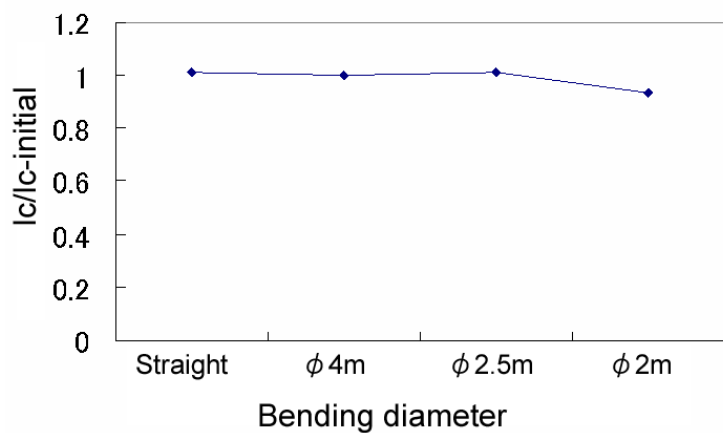


図 2.2.2-25 機械曲げ試験

(5) 成果

線材端部の特性劣化部をレーザーで落とすことで、交流損失低減を考えた。5 mm 幅の超電導線材の両端 1 mm をレーザーで切断し、3 mm 幅の線材を使って、導体を作製した結果、3 kA_{rms} の交流損失は、0.297 W/m ($I/I_c = 0.50$)、0.235 W/m ($I/I_c = 0.46$)と目標値である 0.3 W/m 以下を達成した。

曲げ直径 2.5 m まで機械試験を行い、超電導性能の低下と絶縁紙への変形(破れ、皺)が無いこと分かり、275 kV 超電導ケーブルの曲げに対する機械的な課題がないことを確認した。

引用論文リスト

- (1) M. Yagi, S. Mukoyama, N. Amemiya, S. Nagaya, S. Kashima and Y. Shiohara, “Development of a 10 m long 1 kA 66/77 kV YBCO HTS cable with low AC loss and a joint with low electric resistance”, Supercond. Sci. and Tech. Vol.22 (2009) 085003
- (2) Norris W T 1970 J. Phys. D: Appl. phys. 3 489-507

2.2.2-3 定常通電の伝熱特性検討 (早稲田大学、古河電気工業)

(1) 研究開発目的

275 kV 高電圧ケーブルは、単心で管路内に布設するケーブル構造が考えられており、ケーブルコアは冷却性向上のため、銅フォーマを従来の丸撚り形状から中空にすることも検討されている。275 kV という高電圧により、絶縁体の誘電体損失が大きくなり、さらに、3 kA_{rms} の通電により、超電導導体層と超電導シールド層で交流損失が発生する。ケーブルの絶縁厚は、275 kV の耐電圧特性を持たせるために、厚くなり、その結果、伝熱特性が悪くなるので、定常運転に影響を与える可能性がある。よって、275 kV 高電圧ケーブルでは、交流損失と誘電体損失による発熱を考慮した定常通電の伝熱特性評価が重要である。そこで、275 kV 高電圧ケーブルの交流損失と誘電体損失を想定した伝熱特性評価を行い、適切な銅フォーマの形状について検討するために、銅フォーマが中空と丸撚りのモデルケーブルを 2 本作製して、定常伝熱特性試験を実施するとともに、有限要素法を用いてモデルケーブル内の伝熱特性について数値解析を行い、実験結果と比較して数値解析の妥当性を確認する。

(2) 研究内容 1 ー 定常伝熱特性試験 ー

銅フォーマが中空 A と丸撚り B のモデルケーブルを 2 本作製し、交流損失と誘電体損失を模擬するヒータをモデルケーブル内に配置した。図 2.2.2-26 にモデルケーブル A、B の写真を示す。

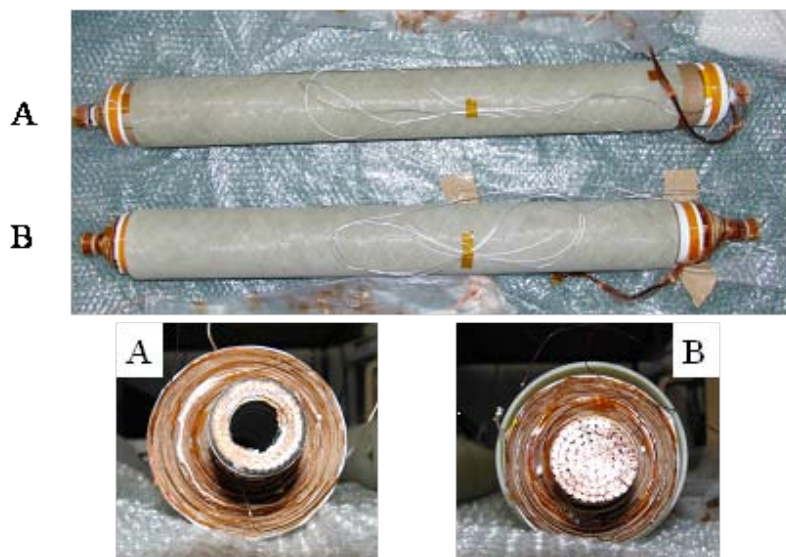


図 2.2.2-26 中空 A と丸撚り B のモデルケーブル

モデルケーブル A の寸法およびヒータと白金抵抗温度計の配置図を図 2.2.2-27 に示す。モデルケーブル A の中空部は直径 18 mm である。モデルケーブル B の寸法およびヒータと温度計の配置は、銅フォーマの形状が丸撚りであることを除いて A と同様にした。

モデルケーブル A、B は、超電導導体層・絶縁層中央・超電導シールド層にヒータを配置して、交流損失と誘電体損失を模擬した。275 kV 高電圧ケーブルのプロジェクト設計目標値である 0.8 W/m をもとに、交流損失と誘電体損失はそれぞれ 0.3 W/m と 0.5 W/m に設定し、ヒータの出力は超電導導体層で 0.15 W/m、絶縁層中央で 0.5 W/m、超電導シールド層で 0.15 W/m となるように実験を行った。モデルケーブル A、B は、全長約 1 m のケーブル中央に 12 個の白金抵抗温度計 (T1-T6、T11-T16) を配置して温度測定を行なった。なお、T1 と T11、T2 と T12、T3 と T13、T4 と T14、T5 と T15、T6 と T16 はそれぞれケーブル中心から同距離に設置した。実験は、77.3 K の液体窒素を 0.03-0.05 MPaG のヘリウム加圧した冷却条件で行った。測定は、ヒータに通電し、温度計の出力が定常状態に落ち着くまで温度観測を行なった。なお、外部から実験装置への熱侵入により液体窒素の温度が上昇するため、モデルケーブルのすぐ外にも温度計を配置し、ケーブル内の温度からケーブル外部の熱侵入の影響を除去した。

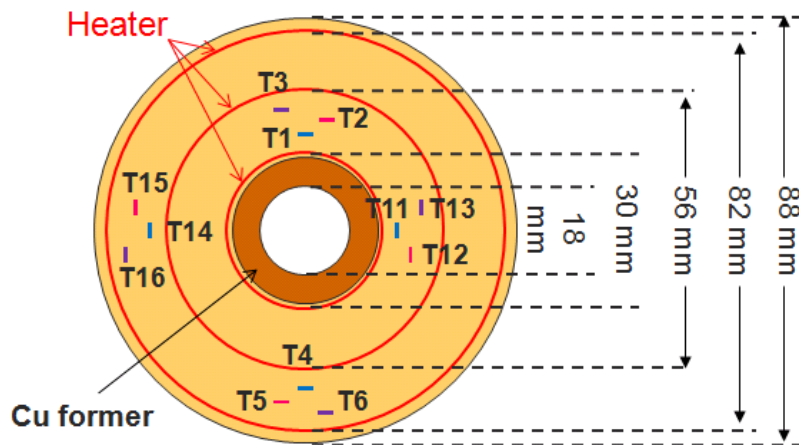


図 2.2.2-27 モデルケーブル A の寸法、ヒータと白金抵抗温度計の配置図

(3) 研究内容 2 –伝熱特性の数値解析–

伝熱特性の数値解析は 3 次元有限要素法を用いてモデル化し、式(1)、(2) より定式化した。比熱容量、熱伝導率などの各物性値の温度依存性や非線形性を考慮して、各時間ステップにおけるケーブル内の温度分布を計算している。境界条件はケーブル最外層の絶縁層 (PPLP) の表面が液体窒素に触れているとして、液体窒素への非線形熱伝達特性 (図 2.2.2-28 参照⁽¹⁾) を考慮した。なお、ケーブル表面は円筒状だが、切り開いた場合に平板として近似できるため、モデルは平板を考慮している。PPLP は液体窒素が浸漬した状態であるため、熱物性値の熱伝導率 k_{pplp} と比熱容量 c_{pplp} は既存するデータがなく、本解析ではパラメータとして推定した。式(2.2.2-3)の ρ は密度、 c は定圧比熱容量、 k は熱伝導率、 T は温度、 Q_j は電流分布解析から求まるジュール発熱、 Q_q は液体窒素の冷却項である。式(2.2.2-4)の h は液体窒素への熱伝達係数、 T_s はモデルケーブル表面の温度、 T_b は液体窒素の温度である。

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q_j - Q_q \quad (2.2.2-3)$$

$$Q_q = h(T_s - T_b) \quad (2.2.2-4)$$

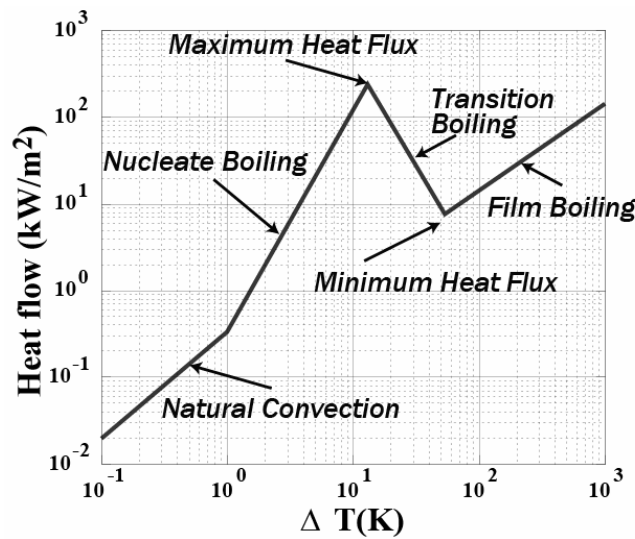


図 2.2.2-28 液体窒素の非線形熱伝達特性

(4) 研究内容 2 –実験結果との比較–

ヒータから交流損失と誘電体損失を模擬する発熱を投入し、定常状態になるまでモデルケーブル A、B 内の温度分布を測定した。モデルケーブル A について、定常時におけるケーブル断面の半径方向の温度分布の実験結果と解析結果を図 2.2.2-29 に、同様にモデルケーブル B の結果を図 2.2.2-30 に示す。またモデルケーブル A について、定常状態になるまでの温度分布の実験結果と解析結果を図 2.2.2-31 に、同様にモデルケーブル B の結果を図 2.2.2-32 に示す。図 2.2.2-29、2.2.2-30 の横軸はケーブル中心から半径方向への距離で、縦軸は初期温度からの温度上昇である。図 2.2.2-31、2.2.2-32 の横軸は時間で、縦軸は初期温度からの温度上昇である。実験における超電導導体層、絶縁層中央、超電導シールド層のヒータ出力はそれぞれ約 0.15 W/m、0.48 W/m、0.14 W/m であった。図 2.2.2-29、2.2.2-30 の LN₂ は液体窒素領域を表す。図 2.2.2-29 のモデルケーブル A は中空部である 0-0.009 m までも液体窒素領域である。図 2.2.2-30 の解析において、PPLP の熱伝導率 k_{pplp} は 0.1-0.2 W/mK、比熱容量 c_{pplp} は 0.5×10^6 J/m³K を用いた。図 2.2.2-29 の解析において、PPLP の熱伝導率 k_{pplp} は 0.2-0.3 W/mK、比熱容量 c_{pplp} は 0.8×10^6 J/m³K を用いた。

図 2.2.2-29 より、モデルケーブル A は絶縁層中央のヒータ (0.48 W/m) 付近で最も温度上昇が大きく、その両側は一定の傾きで低下していく。これは、中空部及びケーブル外部の両方から冷却されているためである。また、絶縁層中央のヒータより両側の温度分布は非対称になっており、ケーブル外側の温度が低い。これは、中空部よりもケーブル外部の冷却面積が広いためである。図 2.2.2-29 より、モデルケーブル B はケーブル中心に近いほど温度が高い傾向にある。これは、ケーブル外部のみから冷却されているためである。図 2.2.2-29、2.2.2-30 の解析結果は実験結果とよく一致しており、モデルケーブル A の最大温度上昇は 0.4 K 以下、モ

デルケーブル B は 0.3 K 以下と推定される。

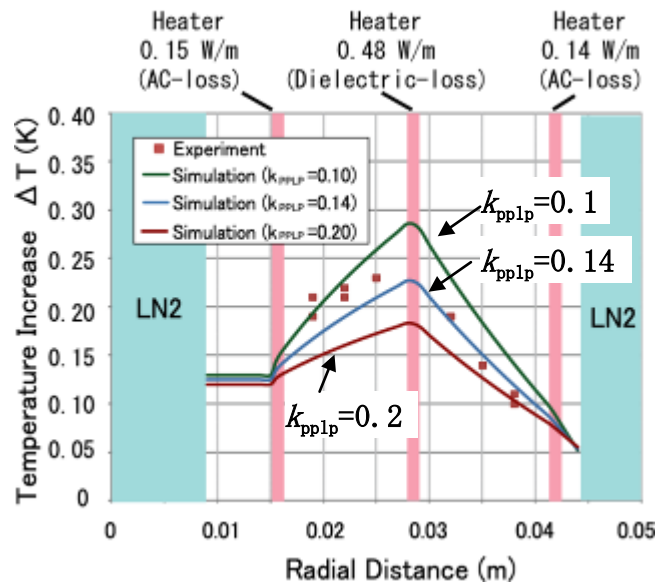


図 2.2.2-29 モデルケーブル A の半径方向の温度分布

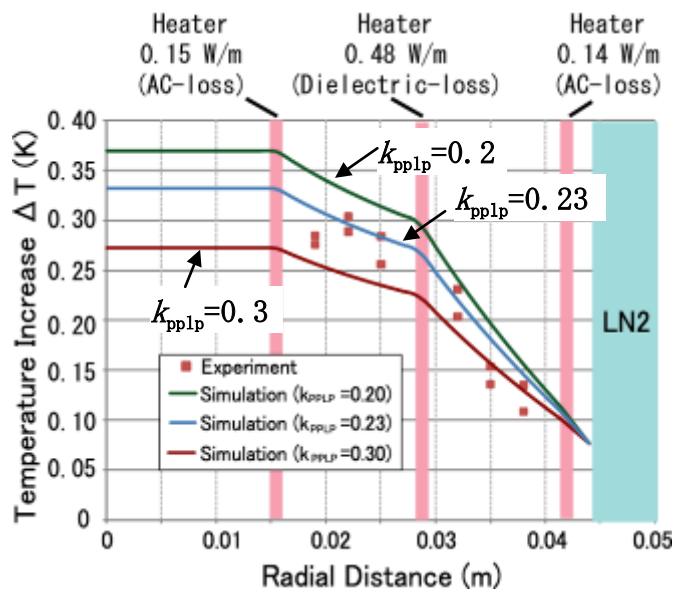


図 2.2.2-30 モデルケーブル B の半径方向の温度分布

図 2.2.2-31、2.2.2-32 より、両モデルケーブルはヒータ投入開始 (0 s) からとも 6000 s 程度で定常状態になった。解析結果は実験結果とよく一致しており、ケーブル内部の過渡的な熱特性の再現を確認した。また解析結果より、液体窒素浸漬状態の PPLP の熱伝導率 k_{pp1p} は 0.1-0.3 W/mK、比熱容量 c_{pp1p} は 0.5×10^6 - 0.8×10^6 J/m³K と推定でき、この物性値は世界的にも報告例がなく、超電導ケーブルの熱特性評価において非常に重要なデータである。

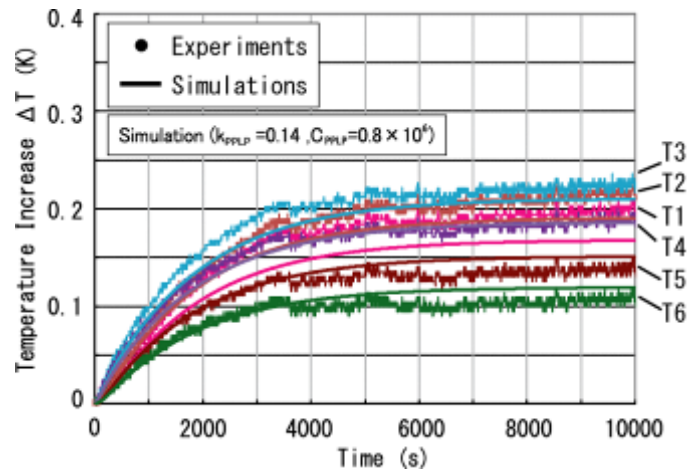


図 2.2.2-31 モデルケーブル A の定常までの温度分布

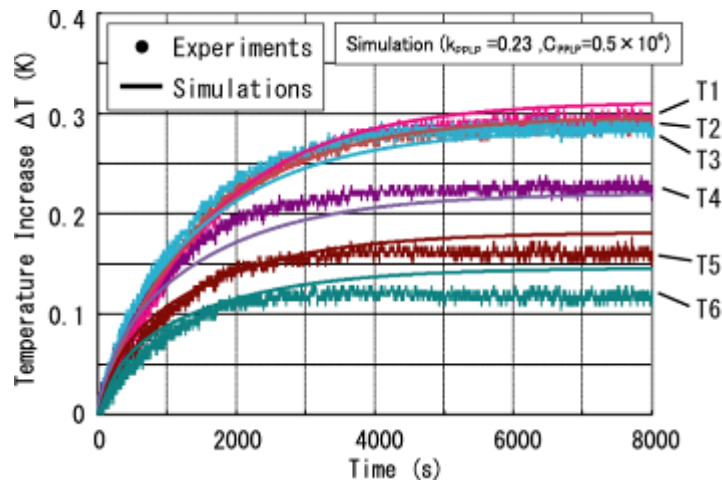


図 2.2.2-32 モデルケーブル B の定常までの温度分布

(5) 成果

中空 A と丸撚り B の銅フォーマで構成されたモデルケーブルの定常通電における伝熱特性を十分に確認した。両モデルケーブルの伝熱特性に大きな差がなく、丸撚りの銅フォーマによるケーブル構造を選択した場合でも、定常運転時における伝熱特性に問題はなく、実現可能であることが確認された。

引用論文リスト

- (1) 「超伝導・低温工学ハンドブック」 p1065 図 2-57 液体窒素の沸騰熱伝達曲線

2.2.2-4 耐過電流ケーブル設計技術 (古河電気工業、早稲田大学)

(1) 研究開発目標

275 kV 級高電圧超電導ケーブルは、単心で管路内に布設するケーブル構造が考えられており、ケーブルコアは図 2.2.2-33 のようにケーブル中心から銅フ

フォーマ、超電導導体層、絶縁層、超電導シールド層、銅シールド層で構成されている。超電導導体層と超電導シールド層には、それぞれ複数の Y 系超電導線材が並列に接続されており、それらの複合導体には最大で 63 kA_{rms}、0.6 sec の突発的な短絡事故電流が流入する恐れがある。それゆえ、突発的な短絡事故電流による温度上昇が線材の劣化・焼損を引き起こさないように、超電導保護層としての銅安定化層、銅フォーマや銅シールド層を適切に設計することが必要となる。

本研究の目標は、275 kV 系統で考えられる最悪の事故ケース 63 kA_{rms}-0.6 sec の過電流に対しても超電導が耐性を示す超電導ケーブルを開発することである。

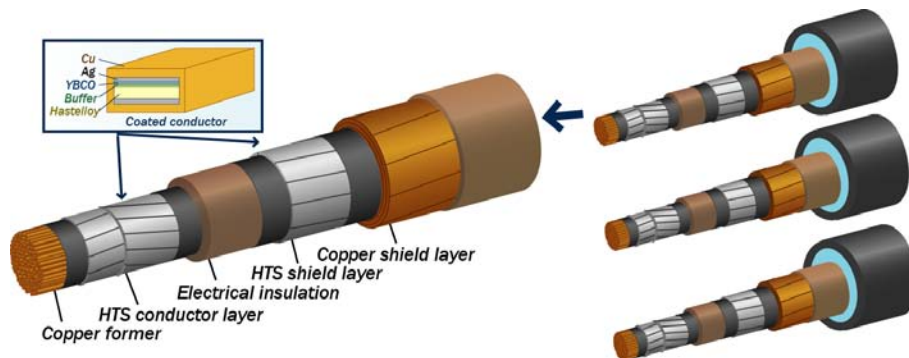


図 2.2.2-33 275 kV 級高電圧超電導ケーブル

(2) 研究成果 1 ー超電導線材への耐過電流対策ー

超電導線材の銅メッキ厚と銅シールド層の断面積をパラメータとして、275 kV 級高電圧超電導ケーブルで想定される最大の短絡事故電流 63 kA_{rms}、0.6 sec 通電した際のケーブル内の温度上昇について解析評価した。銅メッキ厚と銅シールド層の断面積の解析設定値を表 2.2.2-8 に示す。解析対象のケーブル構造は、銅メッキ厚と銅シールド層の断面積を除いて、図 2.2.2-33 で示した超電導モデルケーブルと同様にした。銅フォーマと超電導導体 1, 2 層目の温度上昇と銅メッキ厚の関係を図 2.2.2-34 に、銅シールド層が 240 mm² および 310 mm² での超電導シールド層の温度上昇と銅メッキ厚の関係を図 2.2.2-35 に示す。図 2.2.2-34 の解析結果より、銅メッキ厚の増加に伴い、超電導導体 1, 2 層目の温度上昇は増加し、一方銅フォーマの温度上昇は緩やかに低下した。この原因として、銅メッキ厚の増加により超電導導体層の抵抗が減少し、全過電流のうち超電導導体層に流れる電流が増加したためである。一方、超電導導体層に流れる電流が増加することで銅フォーマに流れる電流は減少し、銅フォーマの熱容量が大きいことから温度変化しにくいこともあり、温度上昇は緩やかに低下した。図 2.2.2-35 の解析結果より、銅メッキ厚の増加に伴い、超電導シールド層の温度上昇は図 2.2.2-35 の HTS 導体層と同様に増加した。この原因は超電導導体層の原因と同じである。また図 2.2.2-35 の解析結果より、銅シールド層の断面積を 310 mm² から 240 mm² に減らしたことで、超電導シールド

層の温度上昇は各銅メッキ厚とも約 15 K 増加した。これは、銅シールド層を減らしたことにより、超電導シールド層に流れる電流の増加を引き起こしたものである。なお、銅シールド層の断面積の変化は銅フォーマと超電導導体層の温度上昇にはほとんど影響がなかった。図 2.2.2-34, 図 2.2.2-35 の解析結果から今回の銅メッキ厚と銅シールド層断面積の設定範囲において、熱的な要因による超電導特性の劣化が引き起こされる可能性は極めて低く、275 kV 級高電圧超電導ケーブルで想定される最大の短絡事故電流 $63 \text{ kA}_{\text{rms}}$, 0.6 sec の熱的ダメージから超電導ケーブルを保護できるといえる。一方、超電導ケーブルの作製コストの低減を考えた場合には、できる限り保護としての銅層を減らすことが重要となる。よって、今回の解析結果は、銅メッキ厚と銅シールド層断面積を減らした構造も短絡事故から 275 kV 級高電圧超電導ケーブルを保護できる可能性があることを示唆している。

表 2.2.2-8 線材の銅安定化層の厚みと銅シールド層の断面積

	構造
銅メッキ	厚み 12.5, 25, 32.5, 50, 75 μm
銅シールド層	断面積 240, 310 mm^2 (2, 3 層)

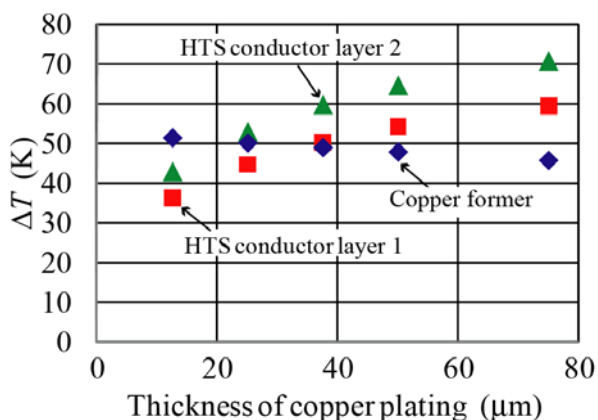


図 2.2.2-34 銅フォーマと超電導導体層の温度上昇

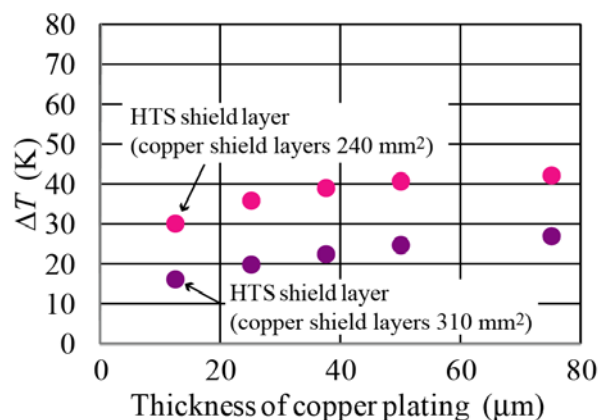


図 2.2.2-35 超電導シールド層の温度上昇

(3) 研究成果 2 ー過電流時の分流ー

275 kV 級高電圧超電導ケーブルの開発では、 $63 \text{ kA}_{\text{rms}}$, 0.6 sec の耐短絡電流特性が要求される。今回はその耐短絡電流特性の検証として、2 m 級超電導モデルケーブルを用いて過電流通電試験を行った。モデルケーブルの諸元を表 2.2.2-9 に示す。モデルケーブルは 2 本とも同じ構造である。銅フォーマは銅断面積 325 mm^2 の撚り線構造となっている。超電導導体層は 2 層構成でトータル I_c が約 700 A である。超電導導体層と超電導シールド層の間の絶縁層はポリプロピレンラミネート紙 (PPLP) で構成し、25 mm 厚である。超電導シールド層

は1層構成でトータル I_c が約 1,300 A である。銅シールド層は3層構成で、銅断面積が約 310 mm² となっている。超電導線材は5 mm 幅で、安定化層として銀層はスパッタリングされて厚みは 15 μm と銅層はメッキ加工されており、メッキ厚は 25 μm である。試験で使用した超電導線のメッキの様子を図 2.2.2-36 に示す。端部での膨らみが無くなり、表面も綺麗に仕上がっている。

試験回路は2本のモデルケーブルの導体層（銅フォーマ、超電導導体層）を電源と直列接続し、シールド層（超電導シールド層、銅シールド層）は両モデルケーブルの端部を短絡接続して、導体層からの誘導でシールド電流が流れるように構成した。過電流通電によるケーブル内の温度上昇を測定するため、ケーブル長手方向の中央部に白金抵抗温度計（Platinum thermometer）を設置した。実験は液体窒素浸漬冷却（初期温度 77.3 K）で行い、過電流として約 10, 20, 30, 40, 63 kA_{rms} を通電した。

表 2.2.2-9 275 kV 級超電導モデルケーブルの諸元

	仕様	外径 (mm)
銅撚り線フォーマ	325 mm ²	21.7
超電導導体層 (2層)	28 tapes	26.9
絶縁層 (PPLP-C)	厚み:25 μm	79
超電導シールド層 (1層)	42 tapes	80
銅シールド層(3層)	310 mm ²	85
保護層	絶縁紙	90

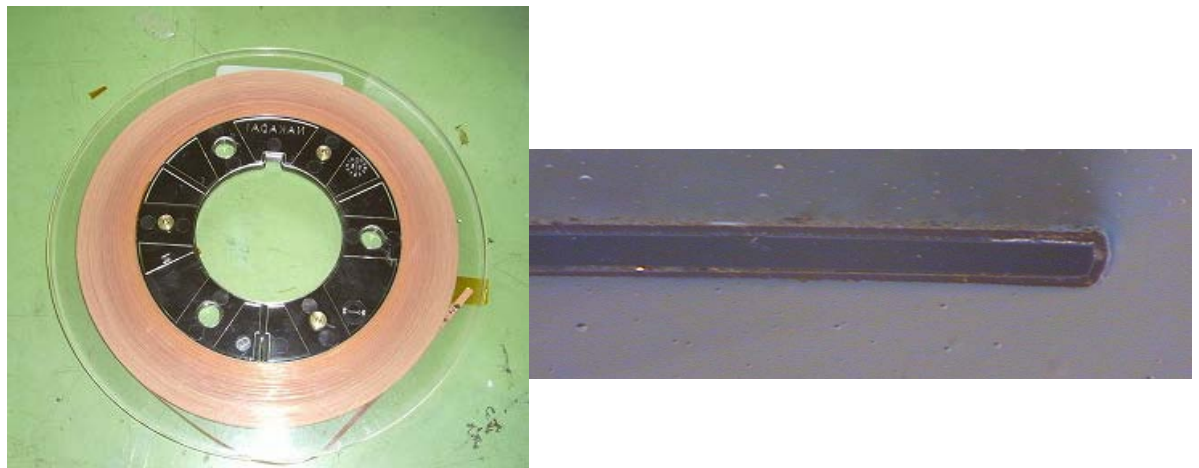


図 2.2.2-36 銅メッキ仕上げ後の超電導線材

次に、銅フォーマ、超電導導体 1, 2 層目、超電導シールド層の初期温度 (77.3 K) からの温度上昇 (ΔT) について、63 kA_{rms} 通電時の通電時間との関係を図 2.2.2-37 に、また 10, 20, 30, 40, 63 kA_{rms} の 0.6 sec 通電時の過電流値との関係を図 2.2.2-38 に示す。図 2.2.2-37, 2.2.2-38 のプロットは実験値で、実線が解析値である。図 2.2.2-37 の実験結果より、275 kV 級高電圧超電導ケーブル

で想定される最大の短絡事故電流 $63 \text{ kA}_{\text{rms}}$, 0.6 sec を通電した際に、銅フォーマは約 53 K 、超電導導体 1 層目は約 30 K 、超電導導体 2 層目は約 42 K 、超電導シールド層は約 15 K の温度上昇となった。図 2.2.2-37 の解析結果は、時間推移に伴う各層の温度上昇が 0.3 sec まで実験とよく一致している。 0.6 sec では実験と解析に差が出ているが、実験での温度計には時間遅れがあるため、測定誤差が生じていると考えられる。また、解析のモデル構成が完全に実験の構成を再現できていないことも原因と考えられる。図 2.2.2-38 の実験結果において、過電流値の増加に伴い、各層の温度も急激に上昇している。特に銅フォーマの温度上昇は、 $63 \text{ kA}_{\text{rms}}$ 通電時には超電導導体層と同程度もしくはそれ以上になっている。以上より、熱的な解析結果は、実験結果と定性的によく一致している。

$40 \text{ kA}_{\text{rms}}$ 通電時の各層の電流分布の実験結果を図 2.2.2-39 に、解析結果を図 2.2.2-40 に示す。図 2.2.2-39 の実験結果よりシールド電流は通電開始直後からほとんど減衰がなく、遮蔽率は約 91% である。通電開始から 0.3 sec 付近における各層の電流分布は、銅フォーマのピーク値が約 55 kA 、HTS 導体層が約 3.1 kA 、超電導シールド層が約 3.6 kA 、銅シールド層が約 47.5 kA である。図 2.2.2-40 の解析結果も実験結果と同様にシールド電流は通電開始直後からほとんど減衰がなく、遮蔽率は約 97% である。通電開始から 0.3 sec 付近における各層の電流分布は実験結果とよく一致しており、各層の電流位相差もほぼ再現できている。

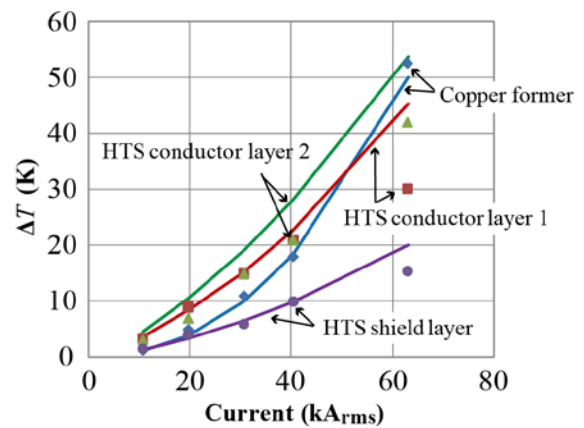
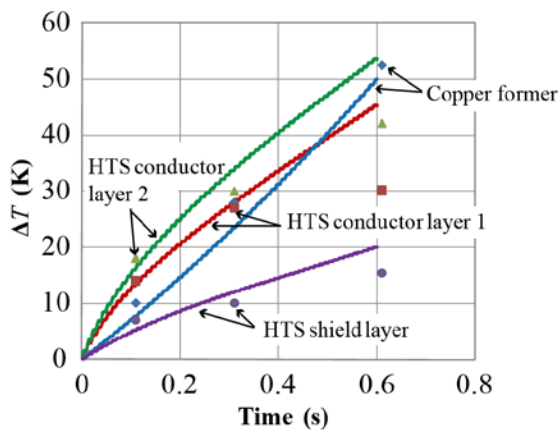


図 2.2.2-37 $63 \text{ kA}_{\text{rms}}$ 通電時の温度上昇

図 2.2.2-38 過電流値と温度上昇の関係

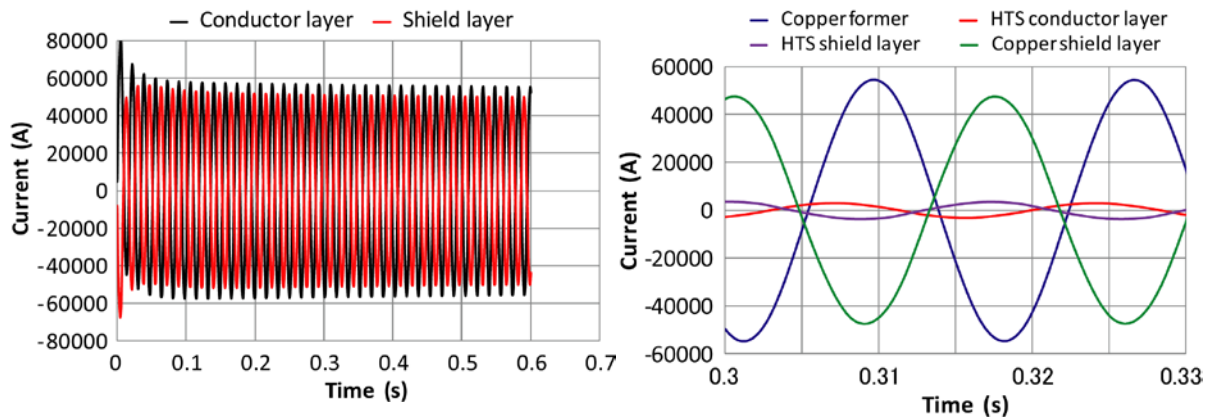


図 2.2.2-39 40 kArms 通電時の電流分布の実験結果

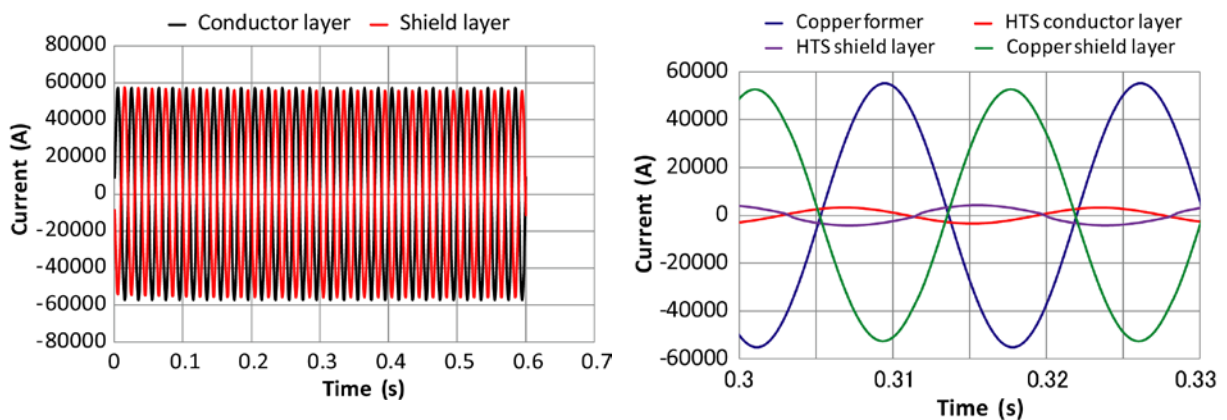


図 2.2.2-40 40 kArms 通電時の電流分布の解析結果

(4) 研究成果 3 –超電導ケーブルへの耐過電流対策–

超電導線の I_c が 300 A/cm-w(@77 K,s.f.) の場合で、短絡前後の健全性を評価した。超電導線材は 5 mm 幅で、超電導の I_c が高いため、安定化層として銀層の厚みは 30 μm と厚くしており、銅層はメッキ加工されており、メッキ厚が 25 μm である。試験回路は 2 本のモデルケーブルの導体層（銅フォーマ、超電導導体層）を電源と直列接続し、シールド層（超電導シールド層、銅シールド層）は両モデルケーブルの端部を短絡接続して、導体層からの誘導でシールド電流が流れるように構成した。ケーブルの仕様を表 2.2.2-10 に示す。超電導導体、シールドを図 2.2.2-41 に、供試体を図 2.2.2-42 に示す。作製後の導体とシールドの I_c を測定したところ、それぞれ、4370 A と 6340 A であり、表 2.2.2-10 で示した超電導線材単線の I_c 合計値と変わらず、作製・取付に伴う I_c 低下は見られなかった。

図 2.2.2-43～46 までに 63 kArms -0.05, 0.1, 0.3, 0.6 sec の試験波形を示す。最初のピーク値で直流成分を重畳して 120 kA にしたが、シールド電流もそれに誘導されて、遮蔽率は 92 % であり、設計通りであった。図 2.2.2-47,48 には過電流後の温度上昇を示している。63 kArms -0.05,0.1 s では最高到達温度は

90 K 以下に抑えられている。一方、63 kA_{rms} -0.3、0.6 sec では温度上昇は大きく、0.6 sec では、約 70 K の温度上昇が見られた。63 kA_{rms} -0.6 sec の過電流試験後に図 2.2.2-42 の直流電源を使用し、超電導の I_c を測定した。その VI 特性図を図 2.2.2-43 に示しているが、 I_c は試験前後で全く変わらず、過電流試験への耐性を確認した。

表 2.2.2-10 275kV-3kA 仕様の超電導モデルケーブル

超電導線材	5 mm 幅 Ag 安定化層 30 μ m、銅メッキ 25 μ m I_c 140-160 A(@77 K,s.f.) (280-320 A/cm-w 相当)	
構成	仕様	外径(mm)
銅フォーマ	325 mm ² 銅撚り線	21.7
超電導導体	2 層 28 本 $I_c=4200$ A (単線の合計)	26.8
半導電層	カーボン紙	27.0
絶縁体	PPLP-C 厚さ 24 mm	75.0
半導電層	カーボン紙	75.3
超電導シールド	1 層 43 本 $I_c=6450$ A (単線の合計)	75.8
銅シールド層	3 層 310 mm ²	82.2
保護層	絶縁紙	84.0



図 2.2.2-41 超電導導体 (上)、超電導シールド (下)

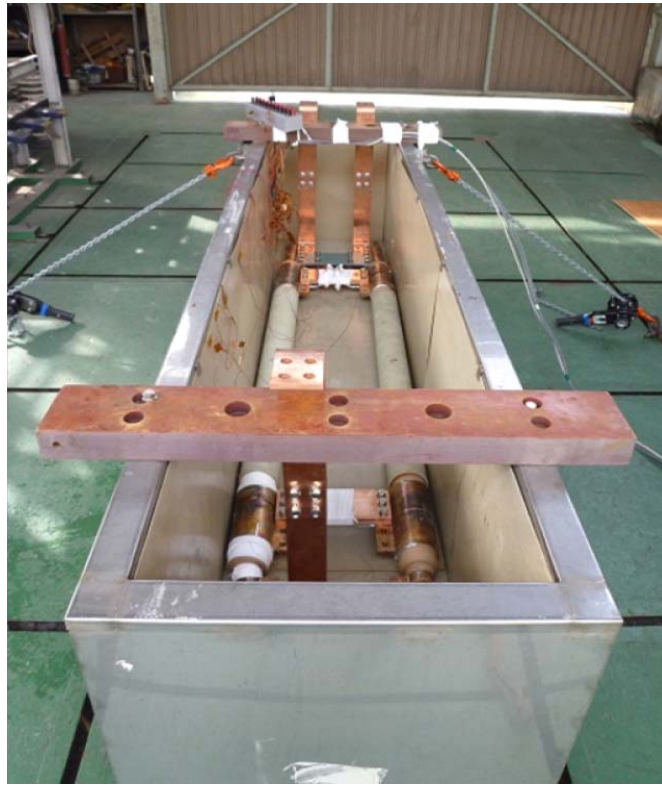


図 2.2.2-42 過電流試験の供試体

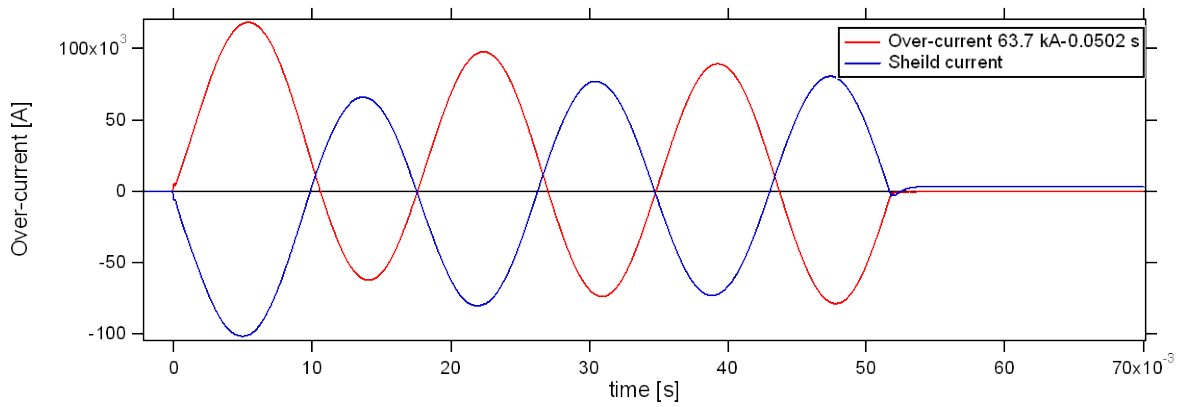


図 2.2.2-43 63 kA_{rms} -0.05 sec の試験波形

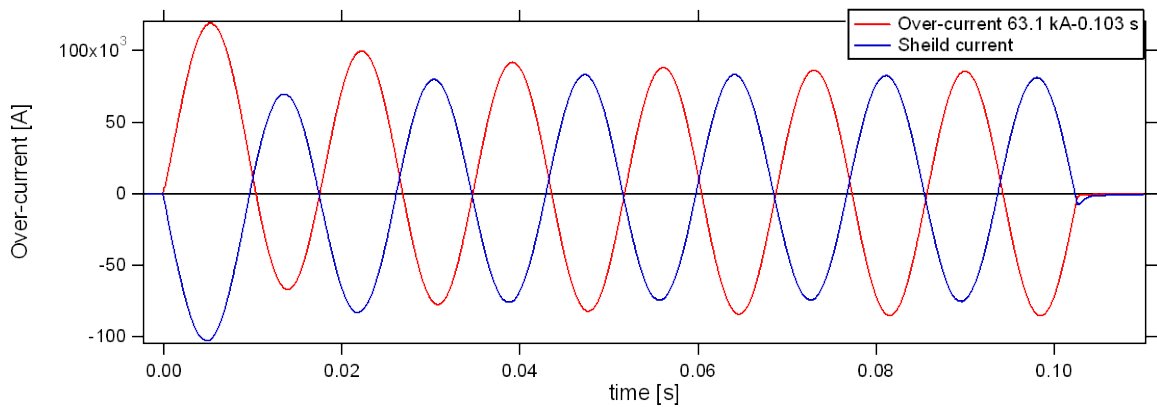


図 2.2.2-44 63 kA_{rms} -0.1 sec の試験波形

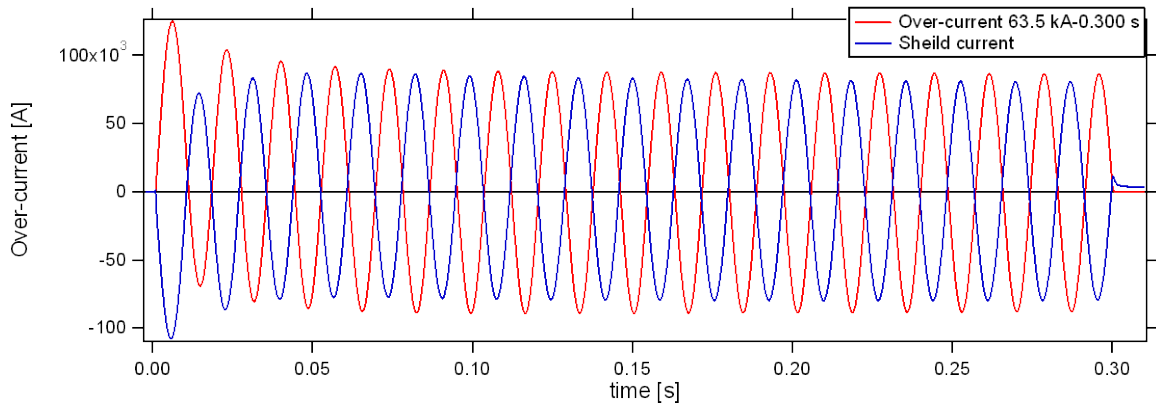


図 2.2.2-45 63 kA_{rms}-0.3 sec の試験波形

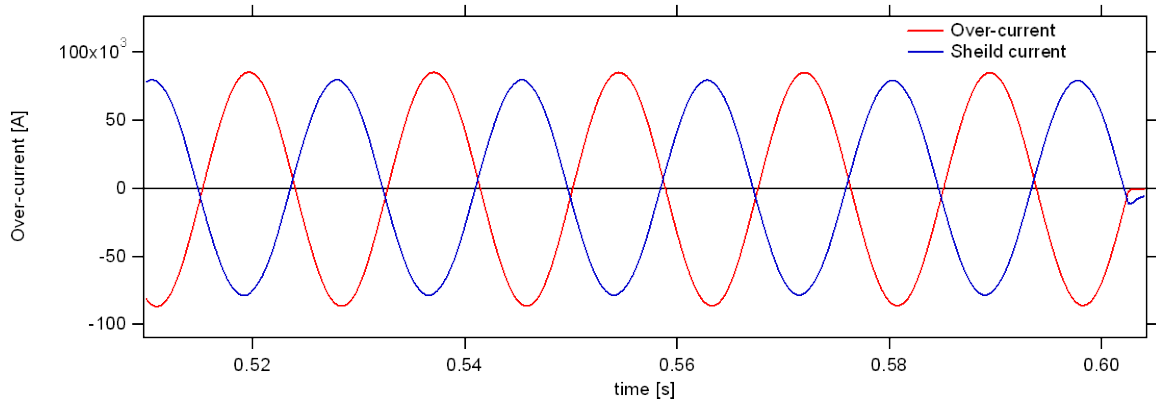
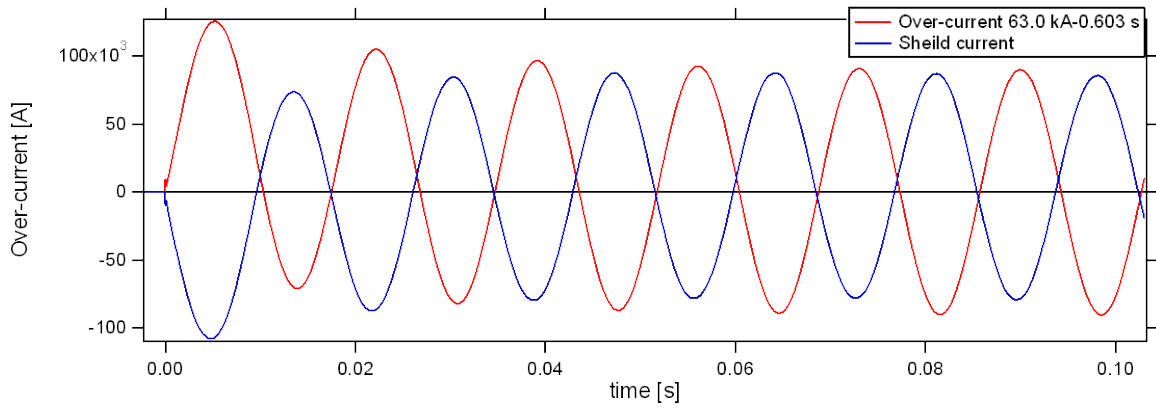


図 2.2.2-46 63 kA_{rms}-0.6 sec の試験波形
0-0.1 sec (上)、0.5-0.6 sec (下)

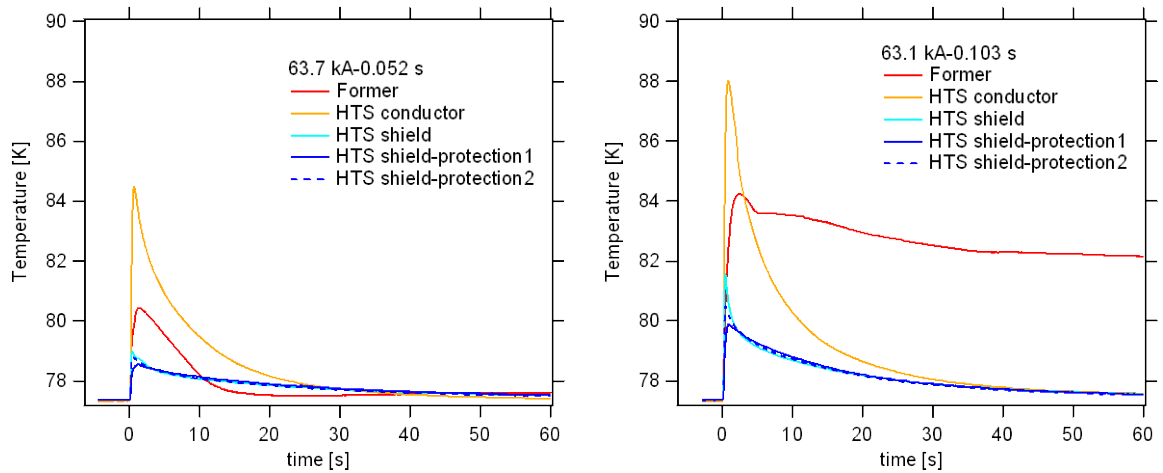


図 2.2.2-47 63 kA_{rms} 時の温度上昇、0.05 sec 時 (左)、0.1 sec 時 (右)

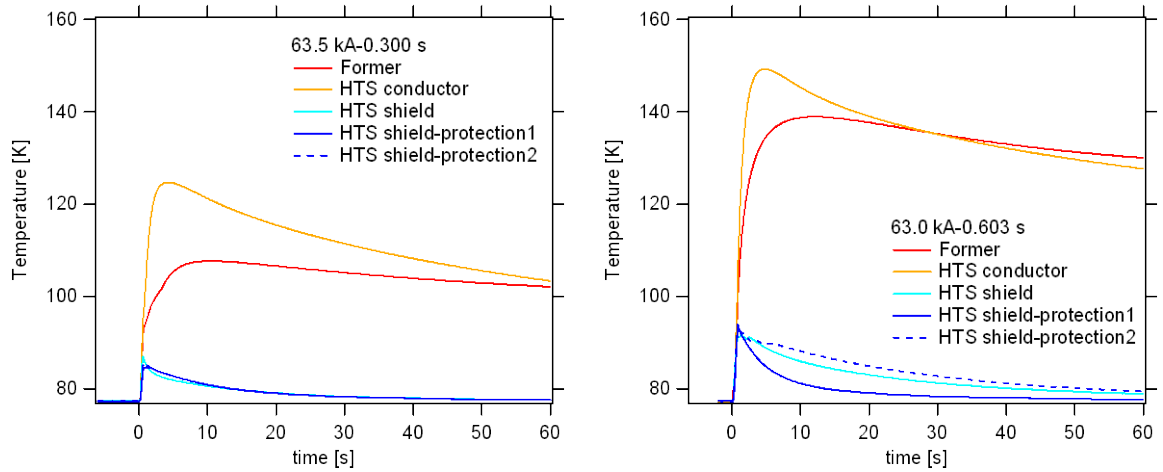


図 2.2.2-48 63 kA_{rms} 時の温度上昇、0.3 sec 時 (左)、0.6 sec 時 (右)



図 2.2.2-49 直流電源による I_c 測定

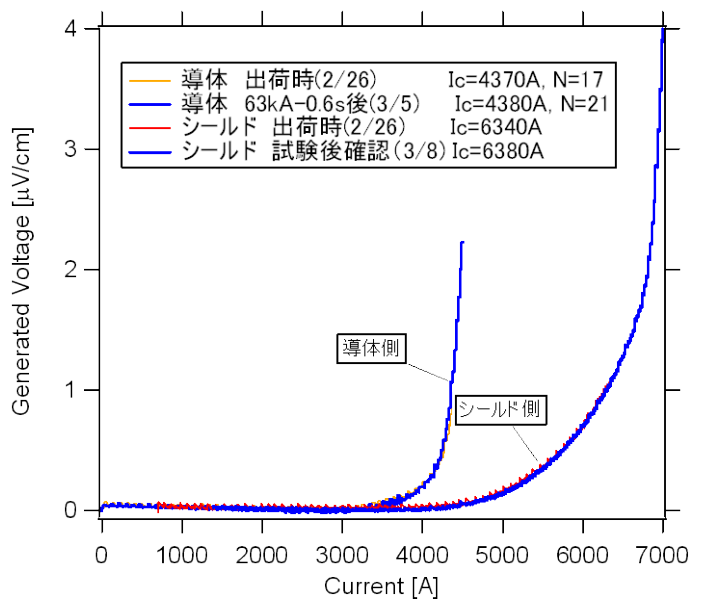


図 2.2.2-50 試験前後の I_c

(5) 成果

超電導モデルケーブルを用いて過電流通電試験を行い、超電導モデルケーブル内の温度上昇と電流分布について数値シミュレーションの結果と比較検討を行なった。解析結果は実験結果とよく一致しており、開発した計算機シミュレータの妥当性を確認できた。

実験で使用した超電導導体には銅撚り線 325 mm² の丸撚り導体、超電導シールドには銅編組線 310 mm² を使って、事故電流による過電流保護としたところ、最悪の事故ケース 63 kA_{rms}-0.6 sec の過電流に対しても耐性を示し、中間目標を達成した。

2.2.2-5 中間・終端接続技術（古河電気工業）

(1) 研究開発目標

275 kV高電圧ケーブルのシステム検証を行うためには、超電導電力ケーブルの両端に課通電用の終端接続部として気中終端接続部、ケーブル接続部には中間接続部が必要である。

275 kV高電圧ケーブルの中間接続部としては、局所的な発熱と絶縁の問題、 I_c 値の高い線材の接続技術と接続抵抗の把握が重要である。275 kV終端接続部としては、ケーブルの試験を実施するために、ケーブルと同等の性能を持つ必要がある。実施計画で述べられている研究開発目標は、以下の通りである。

- ・（中間接続部）高 I_c 線材の接続抵抗評価、電界解析のための解析モデルの作成、中間接続部の設計と試作、さらに課電試験を通して中間接続部の設計を確立する。
- ・（終端接続部）室温から低温部への温度勾配、電界分布を担うブッシングの開発、ケーブル絶縁の開発のために、試験末端を用いた交流課電試験、インパルス課電試験、部分放電試験を実施する。この試験基準として、国内規格、国際規格、さらには過去の超電導ケーブル試験を参考にする。さらに、終端部を構成する部品に関して単品試験を行う。これらのデータを蓄積して、システム検証用さらに実機としての終端接続部設計を行う。

(2) 研究内容(1) ー超電導線材の接続ー

高 I_c のY系超電導線材（5 mm幅で150 A（300 A/cm-w）@77 K,s.f.）を2本用意して、図2.2.2-51に示すように超電導線を接続した。接続長は100 mmであり、この時の接続抵抗測定の結果を表2.2.2-11に示す。この表に示すように47～73 nΩの低抵抗な接続ができることを確認した。



図2.2.2-51 5 mm幅Y系超電導線の接続

表2.2.2-11 5 mm幅Y系超電導線の単線の接続抵抗

	接続抵抗 [nΩ]
Joint 1	59
Joint 2	47
Joint 3	68
Joint 4	62
Joint 5	73

実際の超電導線材はスパイラルで巻き付けられているため、そのスパイラルに合わせて1本ずつ接続することは難しく、図2.2.2-52のように接続用線材を並べて、層全体で接続する⁽⁴⁾。接続部全体の概略図を図2.2.2-53に示す。この図に示すように超電導導体の各層の接続長は100 mm（シールドは120 mm）としている。熱が拡散するように各層の接続部は重ならないようにしている。この設計に基づいて、実際の超電導ケーブルの導体接続を試みた。超電導線材は5 mm幅を14本使用した超電導導体を使用した。（図2.2.2-54）。接続した結果、接続抵抗は3.6 nΩであり、単線の抵抗14本分の合成とほぼ同等である（50 nΩが14本とすれば、合成抵抗は3.6 nΩである）。

接続抵抗がこのような低い場合、接続部の温度上昇は、他の部位と比較して、約0.1 K未満に抑えられることが解析結果から推定されている。そのため、局所的な発熱による絶縁性能の低下の可能性はきわめて極めて低いと考えられる。



図2.2.2-52 スパイラルに巻き付けられた場合の超電導線材の接続

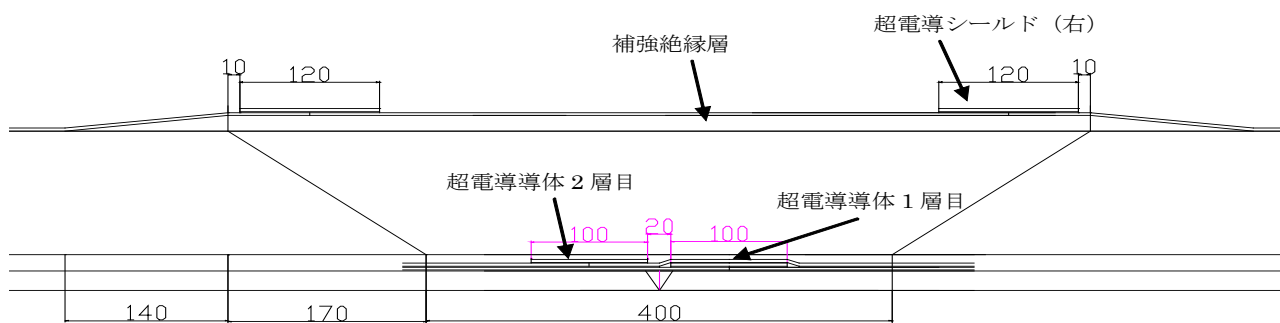


図2.2.2-53 超電導ケーブルの接続図

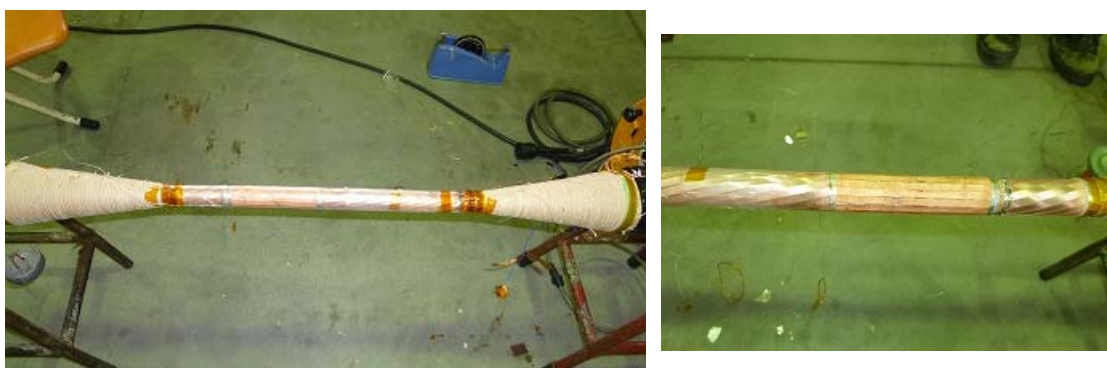


図2.2.2-54 超電導ケーブル接続の組立 (接続抵抗は3.6 nΩ)

(3) 研究内容(2) —中間接続部の設計—

図2.2.2-53に考えている中間接続部を示したが、補強絶縁部は現地による施工で行うため、その部位の破壊ストレス評価が必要である。通常、工場で作製したケーブルよりも設計電界は劣ると考えられ、この評価用として、2つの中間接続部を設計した。2つの接続とは、図2.2.2-55の補強絶縁部の貫通破壊用、図2.2.2-56の沿面の破壊用である。これらの図には電界解析結果も示しており、等電位線の間隔が狭いほど電界のストレスは大きい。図2.2.2-55では、スロープの電界よりも補強絶縁の電界ストレスが大きいため、補強絶縁で壊れると考えられる。また、図2.2.2-56では補強絶縁部が厚いため、スロープの電界の方が大きくなり、スロープ部で壊れると考えられる。このように、中間接続部を実際に作製し、破壊特性を取ることで、設計電界および現地工事による裕度を考えて設計を行う。

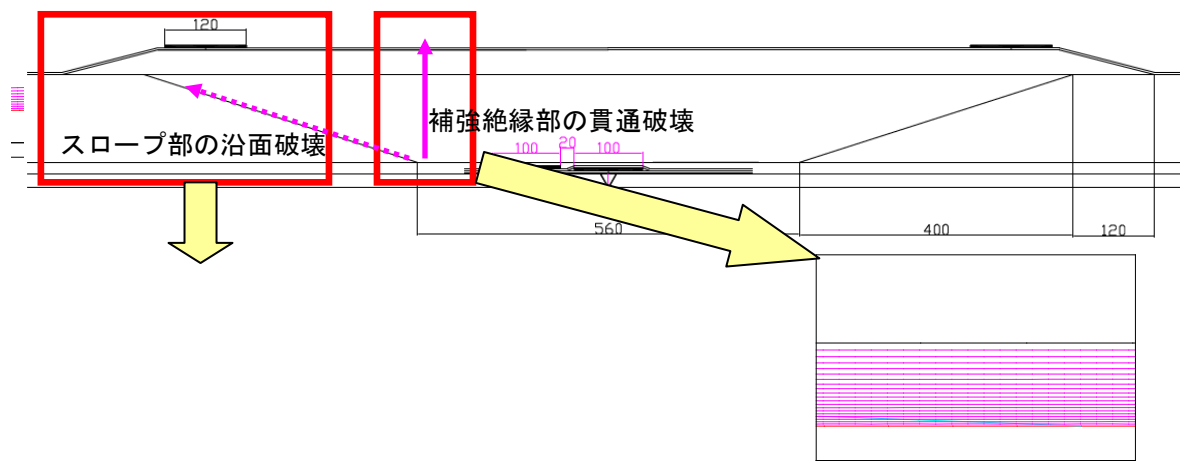


図2.2.2-55 補強絶縁部の破壊用の中間接続部

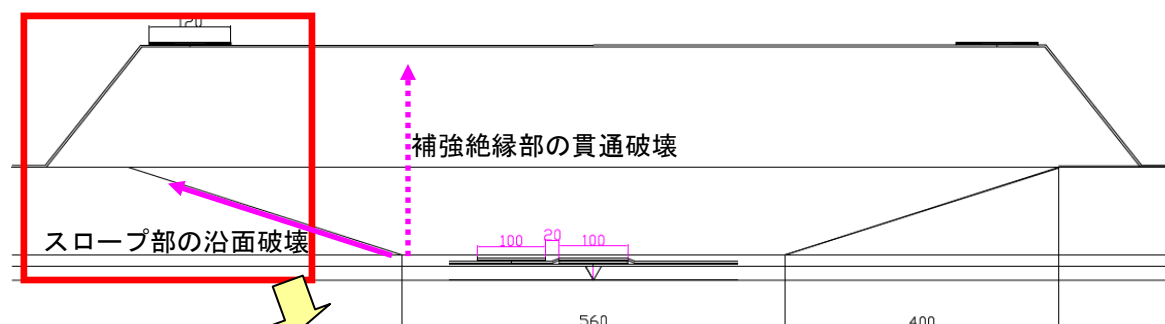


図2.2.2-56 スロープ部の破壊用の中間接続部

(4) 研究内容(3) ー終端接続部用の作製と評価ー

気中終端部の中で、電流を室温部から低温部への温度勾配部で低熱侵入を実現するための電流リード設計を行った。その結果、熱侵入を120 Wに抑える電流リードの設計を完了した。この電流リード設計結果を用いて、電気絶縁を担うブッシングの設計を行った。

この気中終端接続部に要求される電気特性は、構造に近いOFケーブルの試験電圧である。気中終端部の仕様耐電圧はAC400 kVで部分放電フリー、Imp1260 kVで破壊しない構造で終端接続部の設計・作製を行った。ブッシング単体での初期試験では、誘電特性・気中での100 kVの部分放電試験を行い、設計通りの特性を得た(図2.2.2-57)。また、液体窒素と常温のヒートサイクル試験、絶縁ガスSF₆中での180 kVの部分放電試験、気密試験にそれぞれ、合格し、想定通りのブッシングの作製に成功した。現在、このブッシングを図2.2.2-58に示す終端部に組み込んで、

終端接続部を完成し、275 kV超電導ケーブルのシステム検証のために使用している。現在、20 mm絶縁厚ケーブルとともに試験を実施し、ACでは325 kV-10分間までの性能を確認している。

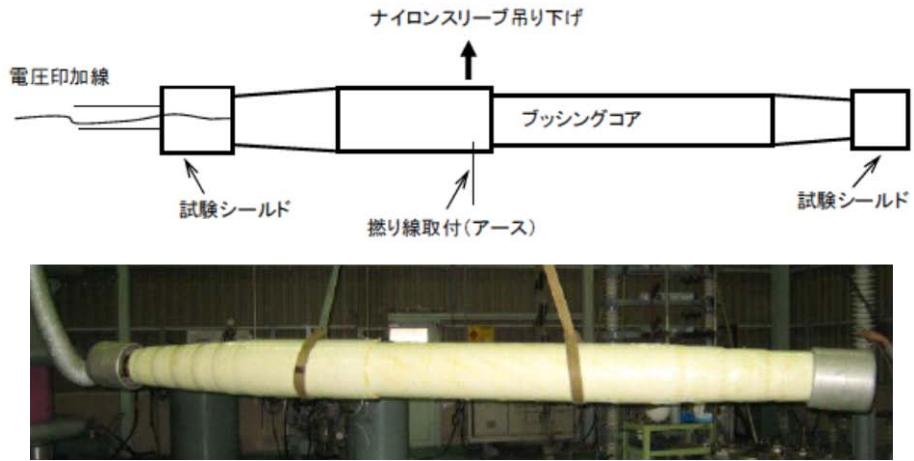


図2.2.2-57 ブッシングの単体試験

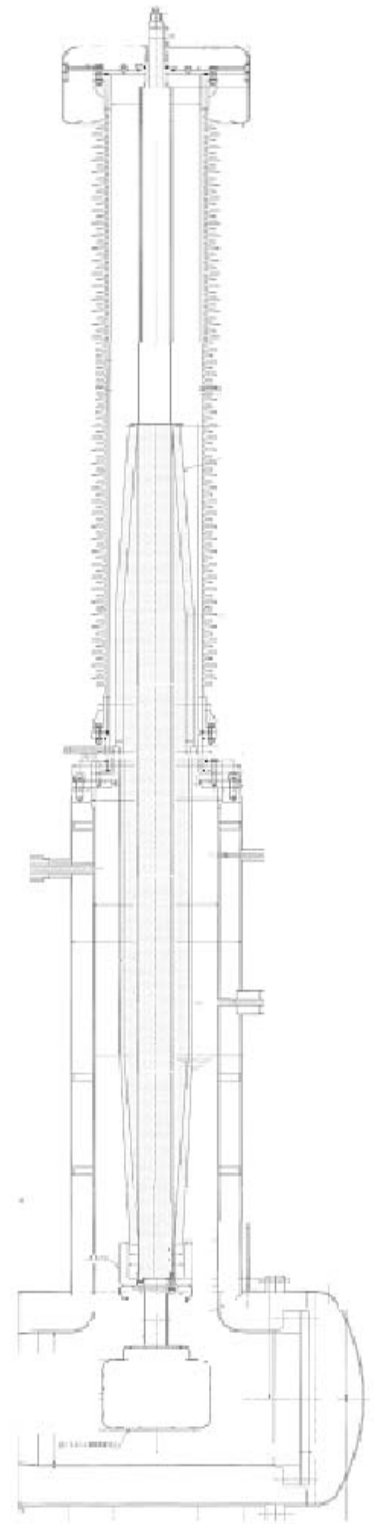


図 2.2.2-58 終端接続部

(5) 成果

高 I_c 超電導線の接続を実施し、低抵抗な超電導接続が可能であることを確認した。また、実際の中間接続部を組み立てて、 $3.6 \text{ n}\Omega$ という低抵抗な接続を確認した。数値計算によると、このときの温度上昇は 0.1 K 未満であり、定常運転に問題ないことが示唆された。

2 通りの中間接続部を設計し、この中間接続部を今後評価することで、さらに課電試験を通して中間接続部の設計を確立する。

室温から低温部への温度勾配、電界分布を担うブッシングを開発した。気中終端部の仕様耐電圧は $AC400 \text{ kV}$ で部分放電フリー、 $Imp1260 \text{ kV}$ で破壊しない構造とした。初期試験は当初の設計通りであり、ブッシングを気中終端に組み込み、 275 kV 超電導ケーブルのシステム検証のために使用している。現在、 20 mm 絶縁厚ケーブルとともに試験を実施し、 AC では 325 kV -10 分間までの性能を確認している。

引用論文リスト

- (1) M. Yagi, S. Mukoyama, N. Amemiya, S. Nagaya, S. Kashima and Y. Shiohara, “Development of a 10 m long 1 kA 66/77 kV YBCO HTS cable with low AC loss and a joint with low electric resistance”, Supercond. Sci. and Tech. Vol.22 (2009) 085003

2.2.2-6 275 kV 高電圧ケーブルシステム検証 (古河電気工業)

(1) 研究開発目標

275 kV 高電圧ケーブルシステムの検証として、両端に終端接続部と中間接続部を有する検証用 275 kV /単心/ $3 \text{ kA}_{\text{rms}}$ 、 30 m 長の設計を行う必要がある。試験の実施にあたってはまず、試験条件の検討を行い、次に耐久性を評価できる課通電試験計画書を作成した。

(2) 研究内容 1 –試験電圧の決定–

AC (交流) における絶縁破壊メカニズムは、①絶縁紙間あるいはバットギャップで部分放電が開始される(部分放電開始電圧)、②バットギャップでの部分放電の連続発生と進展、③バットギャップでの部分放電の進展と増大、絶縁紙の劣化、④絶縁破壊、と考えられている⁽¹⁾。①と④の間には約 2 倍近い電界値の違いがあり、①を基に設計しておけば、長期においても絶縁破壊は起きる危険はない。 Imp (インパルス) における絶縁破壊メカニズムは、①インパルス部分放電の発生、②絶縁体全体への部分放電の進展、③絶縁破壊、である。

275 kV の絶縁試験電圧の考え方としては、現有の $XLPE$ ケーブルおよび OF ケーブルの試験電圧と整合をとる必要がある。国内規格であれば、 $JEC-3401-2006$

(OF ケーブル)、JEC-3408 (XLPE ケーブル)、国際規格であれば IEC60141-1-1993 (OF ケーブル)、IEC62067-2006 (XLPE を含むプラスチック ケーブル) がある。また、過去・現在の国内での超電導ケーブル試験とも整合を取る必要がある。試験としては、全て 66/77 kV の同一の電圧階級であり、東電-住友 100 m ケーブル、Super-ACE500 m ケーブル、現在 NEDO プロで進めている「Bi ケーブル実証プロジェクト」300 m ケーブルがある。

ここでは、Super-ACE の場合と同じように JEC-3408 を基調にして、設計を進めた。試験法は「開発試験」、「形式試験」、「受入試験」の 3 種類に区別される。開発試験は開発品の設計・製造施工方法が実用可能であることを実証するために行うもので、現在は開発試験の段階である。形式試験は設計・製造および施工方法の認定試験、受入試験は出荷製品の製造・品質の確認である。

275 kV 超電導ケーブルは開発段階であることから開発試験を規定する。開発試験には以下の 3 つの試験がある。

- ①長期課通電試験---所定の商用周波電圧に耐える寿命を有すること。試験条件として、V-t 特性の n 乗則を用いて、ケーブルの最高電圧と使用期間に相当する試験電圧と試験期間で確認する。
- ②雷インパルス試験---長期課通電試験を終了した試料から供試して、系統に発生する雷インパルス過電圧に耐えること。
- ③商用周波数耐電圧試験---長期課通電試験を終了した試料から供試して、系統上で発生する異常電圧（過電圧）耐えること。例えば、負荷遮断時の電圧上昇や一線地絡時の健全相電圧上昇などがある。超高压送電線では有効接地系（直接接地系）を採用して異常電圧を抑制している。

①～③の試験条件について、その詳細をみていく。①の長期課通電試験では

$$V_{ac}=(E_0/\sqrt{3})\times K1 \quad (2.2.2-5)$$

ここで、 E_0 ：最高電圧 300 kV、

$K1$ ：劣化係数 = (使用年数 30 年 / 試験期間) ^(1/n)、n: 寿命指数

寿命指数を n=15 (XLPE ケーブル)、n=30 (OF ケーブル)、n=49 (超電導ケーブル) でそれぞれ考えると試験電圧は表 2.2.2-12 のようになる。

表 2.2.2-12 長期課通電試験の試験電圧

試験期間	1 ヶ月	3 ヶ月	6 ヶ月
n=15	260 kV	240	230
n=30	220	210	200
n=49	200	200	190

②の雷インパルス試験では、以下とする。

$$V_{imp}=LIWV\times K1\times K2 \quad (2.2.2-6)$$

ここで、LIWV：機器の耐電圧 (1050 kV)、 $K1$ ：裕度 1.1、 $K2$ ：温度係数 1、

超電導ケーブルは考慮しない。よって、試験電圧は 1155 kV とする。

③の商用周波耐電圧では以下とする。

$$\begin{aligned} \text{異常電圧} &= \text{ケーブル最高電圧} \times \text{負荷遮断時の電圧上昇倍率 (継続時間 1.43 秒)} \\ &= 300 \text{ kV} \times 1.79 / \sqrt{3} = 310 \text{ kV} \end{aligned} \quad (2.2.2-7)$$

1.43 秒の短時間現象を、10 分の試験として時間係数を掛けてさらに裕度を掛けて試験電圧とする。

$$V_{ac} = \text{異常電圧} \times (1.43 / \text{試験時間(10 分)})^{(1/n)} \times \text{裕度(1.1)} \quad (2.2.2-8)$$

寿命指数 $n=15$ のとき試験電圧値 270 kV、 $n=30$ で 290 kV、 $n=49$ で 300 kV となる。以上より、超電導の寿命係数 49 を使った場合の試験電圧を表 2.2.2-13 にまとめた。

表 2.2.2-13 開発試験の試験条件 (現状案)

試験名称	試験条件	判定
長期課通電試験	200 kV-3 ヶ月	部分放電フリー
雷インパルス試験	1155 kV-正負 3 ショット	絶縁破壊しないこと。
商用周波耐電圧試験	300 kV-10 min	絶縁破壊しないこと。但し、長期課通電前では部分放電フリー
(参考試験 IEC62067) 商用周波耐電圧試験 2	400 kV-30 min	規定しないが絶縁破壊しないことが望ましい

他の規格を表 2.2.2-14, 表 2.2.2-15 に示す。国際規格においては type test が開発試験に相当し、耐電圧試験 400 kV-30 min が最も高い電圧であり、表 2.2.2-13 に参考試験として追加した。なお、JEC-3408 の形式試験に 525 kV-1 h という試験があるが、これは形式試験であり今回の適用外であること、 n 値を 15 と設定していること、温度係数 1.2 が掛け合わされていること等、これらを考慮して今回の試験からは除外した。

表 2.2.2-14 国内規格による 275 kV の試験条件

試験項目	OF ケーブル JEC-3401-2006		XLPE ケーブル JEC-3408-1998	
長期課通電試験 (開発)	200 kV	0.5 年 N 値 30	230 kV	0.5 年 N 値 15
雷インパルス (開発、形式)	1260 kV 1155 kV(高温)	正負 3 回 LIWV1050 kV	1455 kV 1155 kV(高温)	正負 3 回 LIWV1050 kV
商用周波耐電圧 (開発)	330 kV	10 分 N 値 30	275 kV	10 分 N 値 15
商用周波耐電圧 (形式)	350 kV	3 時間 N 値 30	525 kV	1 時間 N 値 15
出荷耐電圧 (受入)	330 kV	10 分 N 値 30	300 kV	10 分 N 値 15
誘電正接特性試験 (開発、形式)	159 kV 318 kV	誘電正接に判定値有り		

表 2.2.2-15 国際規格による 275 kV($U_0=160$ kV)試験条件

T:Type tests, S: sample tests, R: routine tests

試験項目	OF ケーブル IEC60141-1-1993		XLPE ケーブル他 IEC62067-2006-03	
High Voltage test	(T)375 kV, 1.73× U_0 +100 (R)275 kV	24 h 15 min	(R,T)400 kV 2.5× U_0	30 min
Partial discharge			(R,T)240 kV 1.5× U_0	280 kV-10 s 後に 240 kV
Heating cycle test			(T)320 kV 2.0× U_0	8 h(heating)-16 h (cooling)×20
Impulse voltage test	(T)1050 kV		(S,T,P) 1050 kV	10 positive, 10 negative
Voltage test after Impulse			(S,T) 320 kV	15 min

(3) 研究内容 2 –試験計画書の作成–

最終形態の超電導ケーブルは 0.8 W/m-相(3 kA_{rms})の損失である。この損失値は Super-ACE で実施した 500 m 長の交流損失値 1.3 W/m-相(1 kA_{rms})よりも小さい値である。さらに、断熱管の外部浸入熱が Super-ACE での実績値 (1 W/m) と同

等であれば、500 m 長冷却システムの考えがそのまま踏襲でき、数 km の長尺冷却が可能である。

試験の手順は以下のように考えた。

①30 m ケーブルを作製後、数 m の作製余長を使って初期課電・通電試験を行う。課電試験は雷インパルス試験、部分放電試験を行い、設計通りの絶縁性能を有しているか確認する。また、これとは別に通電試験を行い、設計通りの I_c を有しているか確認する。

②30 m 長 275 kV-3 kA_{rms} 超電導ケーブルの長期課通電試験の電圧条件は 3 ヶ月、1 ヶ月の場合、200 kV の連続課電とする。通電条件は、3 kA_{rms} とし、8 時間オン／16 時間オフの 1 日 1 回のヒートサイクルを行う。長期課通電試験条件の試験構成を図 2.2.2-59 に示す。布設は曲げ半径 5 m の U 字形状とし、中間接続部は長期課通電後の試験に供試するため終端部側に配置する。通電回路は XLPE ケーブルを使用するが、3 kA_{rms} を通電するには XLPE ケーブル 1 本では十分ではなく、2 本使用する。冷却回路としては、CE (Cold Evaporator) から供給される窒素を減圧冷却して貯めたりザーバタンクを用意する。30 m の超電導ケーブルを循環する窒素は、このリザーバタンクを通して、冷却される。

③長期課通電試験前後には、誘電特性を測定し、設計通りの低誘電体損失が維持されているか確認する。また、 I_c と交流損失を測定し、設計通りの低損失が達成されているか確認する。

④試験終了後には、中間接続部端部で切断し、中間接続部とケーブルに雷インパルス試験、耐電圧試験を行い、30 年を模擬した長期課通電後もその性能を維持していることを確認する。解体時に接続抵抗を確認する。

以上の 275 kV システム検証試験のスケジュールを表 2.2.2-16 に、試験項目と判定条件を表 2.2.2-17 にまとめた。

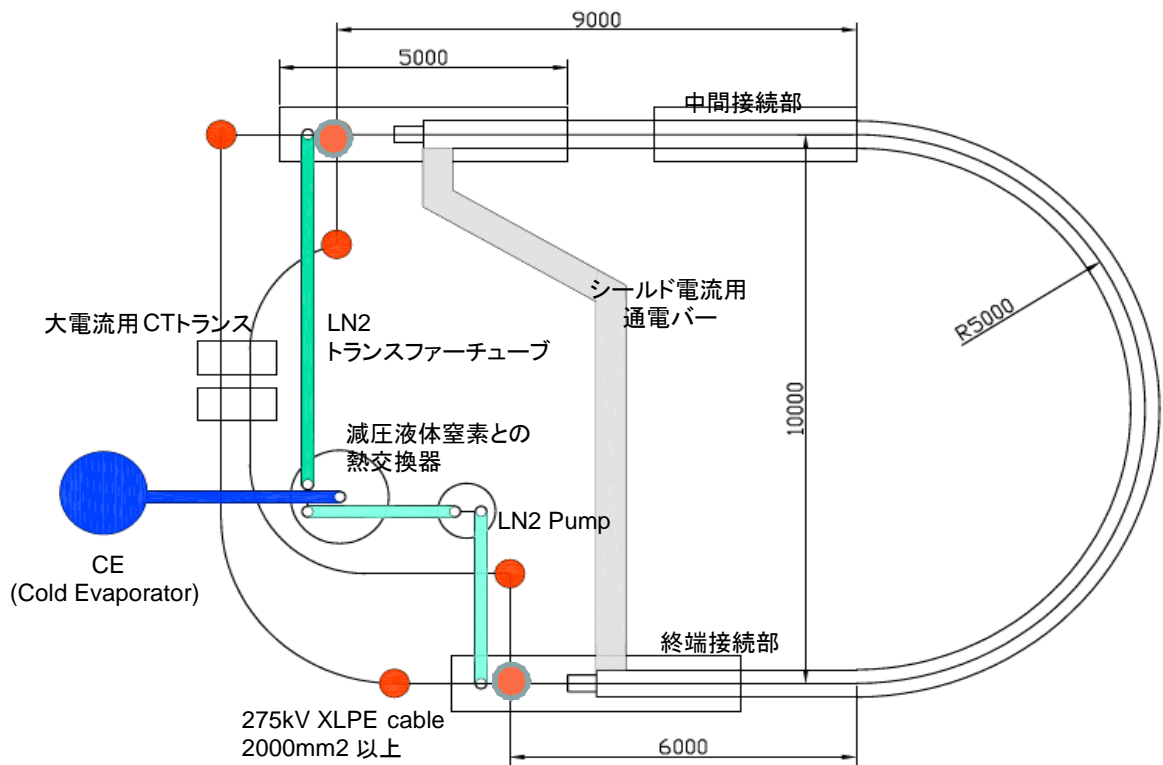


図 2.2.2-59 長期課通電試験の試験回路図

表 2.2.2-16 275 kV システム検証試験の試験スケジュール

	H23				H24			
	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q
①30m 275kV-3kA超電導ケーブル作製			■					
②275kV-3kA終端接続部の作製	■							
③試験設備の設営(課電、通電、冷却)	■							
④超電導ケーブルの初期課電・通電試験 (雷インパルス、商用周波数耐電圧、臨界電流)					■			
⑤中間接続部の組み立て						■		
⑥開発試験(長期課通電、雷インパルス、商用周波数耐電圧、誘電特性試験)							■	
⑦残存性能試験								■

表 2.2.2-17 275 kV システム検証試験の試験項目と判定

試験項目	試験条件	判定	部位
ケーブル I_c (初期)	直流通電による VI	使用した線材の I_c 合計値と同等	余長
部分放電特性 (初期)	課電電圧のステップ昇圧	300 kV 部分放電フリー	余長
商用周波耐電圧試験 (初期)	400 kV-30 min	絶縁破壊しないこと	余長
雷インパルス試験 (初期)	1155 kV-正負 3 ショット	絶縁破壊しないこと	余長
ケーブル I_c	直流通電による VI	使用した線材の I_c 合計値と同等	30 m
通電による交流損失	カロリメトリック法 (一定の液体窒素循環による上流と下流の温度差)	設計通り (目安: 0.3 W/m 未満)	30 m
誘電特性	課電時のシェーリングブリッジ / カロリメトリック法	設計通り (目安: 0.5 W/m)	30 m
部分放電特性	課電電圧のステップ昇圧	300 kV 部分放電フリー	30 m
長期課通電試験	200 kV-1 ヶ月 or 3 ヶ月 3 kA _{rms} -8 時間オン / 16 時間オフ	絶縁破壊しないこと	30 m
ケーブル I_c	直流通電による VI	初期と同等	30 m
通電による交流損失	カロリメトリック法	初期と同等	30 m
誘電特性	課電時のシェーリングブリッジ / カロリメトリック法	設計通り (目安: 0.5 W/m)	30 m
部分放電特性	課電電圧のステップ昇圧	—	30 m
商用周波耐電圧試験	300 kV-10 min	絶縁破壊しないこと	30 m
雷インパルス試験	1155 kV-正負 3 ショット	絶縁破壊しないこと	抜取
商用周波耐電圧試験	300 kV-10 min	絶縁破壊しないこと	抜取
商用周波耐電圧試験 2	400 kV-30 min	絶縁破壊しないこと	抜取
解体	絶縁紙外観、ブッシング etc	破れ、皺、放電痕のないこと	抜取
接続部の接続抵抗	直流通電による VI	設計通り	抜取

(4) 成果

275 kV ケーブルシステム検証用の試験条件を検討・整理し、その案をまとめた。長期課通電試験としては 200 kV-1 ヶ月又は 3 ヶ月、雷インパルス試験としては 1155 kV 正負 3 ショット、耐電圧試験としては 300 kV-10 分間とした。また、両

端に終端接続部と中間接続部を有する検証用 275 kV／単心／3 kA_{rms}、30 m 長のシステム検証試験の試験項目と判定条件をまとめ、耐久性を評価できる課通電試験計画書を作成した。

引用論文リスト

- (1) 早川他 「超電導電力機器における電気絶縁技術研究の現状と展望」 電学論 B, Vol. 126 (2006)

2.2.2-7 成果のまとめ

- ・ 3 kA_{rms} での交流損失評価を実施した。レーザ細線化による交流損失低減に成功し、世界最小となる 0.235 W/m を確認した。
- ・ ケーブルフォーマや銅保護層の断面積の最適化、ならびに線材の銅メッキ層の最適化により過電流通電 (63 kA-0.6 sec) の耐性を確認した。なお、ケーブルの過電流における耐久性を設計するにあたり、線材開発/線材特性の把握における線材単体の過電流に対する知見が寄与している。
- ・ 複数材料の電気特性を評価して、275 kV の絶縁材料として PPLP-C を選定した。さらに、1 mm 厚と 10 mm 厚絶縁ケーブルによる AC 課電試験、1 mm 厚と 10 mm 厚と 20 mm 厚絶縁ケーブルの Imp 試験を実施し、そのデータを取得した。
- ・ ケーブルモデルを試作して、曲げ試験を実施して、曲げ径 > 2500 mmφ で絶縁上、超電導上 (I_c) 劣化等の問題がないことを確認した。
- ・ ケーブル評価用として、275 kV 級気中端末の製作と試験を実施した。現在まで、325 kV の AC 課電まで問題ないことを確認した。
- ・ 中間接続部については、電界計算を実施して構造設計を行なった。さらに、超電導-超電導接続部を作製し、3.6 nΩ の低抵抗を確認した。
- ・ 275 kV 級超電導ケーブルの設計検討として、これまで得られた電気絶縁データを基にした設計電界、交流損失や短絡対策による導体サイズなどを考慮した。さらに、275 kV 級超電導ケーブルの試験電圧に関する検討を行った結果、現時点での絶縁厚は 25.5 mm となり、誘電体損失は 0.46 W/m となる。これにより、ケーブル損失 (交流損失 (導体層)、誘電体損失) は 0.70 W/m となり、中間目標である 0.8 W/m 以下を達成した。なお、設計に際し、線材開発/線材特性の把握による知見が一部寄与している。
- ・ 後半の 30 m 超電導ケーブル試験に対する試験計画の提案を行った。

2.2.2-8 今後の計画と目標達成の見通し

- ・交流損失、誘電体損失を合わせたケーブル損失で、 $0.8 \text{ W/m}\cdot\text{相}@3 \text{ kA}_{\text{rms}}$ 以下の達成を目指す。具体的には、線材の端部 J_e の向上に伴う交流損失の低減と、低 $\tan\delta$ 絶縁材の適用の可能性の検討を進めて目標達成を目指していく。
- ・ケーブル外径 150 mm 以下の達成に関しては、ケーブル損失と絶縁厚、フォーマ径などを合理的に設計してコンパクト化を達成する。さらに、断熱管のスリム化検討も並行して目標達成を目指す。
- ・平成 23 年度より 275 kV 級、 $3 \text{ kA}_{\text{rms}}$ の 30 m 超電導ケーブルシステムの設計、製造を行い、平成 24 年度に長期試験を含め他フィールド試験を実施する。このフィールド試験においては、超電導ケーブルの初期性能特性の評価、長期課通電試験の実施を行う。これまで蓄積してきた設計データ、要素技術を用いることで、ケーブルの健全性を確保して、成功裡にすべての試験を完了させる予定でいる。また、フィールド試験においては、事前に故障解析等を用いた安全性評価を実施する。さらに、ケーブルの各種センサを配置して、運転時のモニタリングによる危険回避をすることで、実際の超電導ケーブルに反映できる運転に関する技術等の習得も可能と考えている。

表 2.2.2-18 中間目標とその達成見込み

	中間目標	達成状況	達成見込み
高電圧絶縁・低誘電損失ケーブル化技術の開発	ケーブル損失（交流損失（導体層）、誘電体損失） $0.8 \text{ W/m}\cdot\text{相}@3 \text{ kA}_{\text{rms}}$ 以下	超電導導体の $3 \text{ kA}_{\text{rms}}$ における交流損失は 0.235 W/m 達成。	達成
		PPLP-C を絶縁紙として採用し、現在までの設計で 0.46 W/m の誘電体損失見込み。	
		交流損失と誘電体損失を合わせて 0.70 W/m となり、目標の 0.8 W/m 以下を達成した。	
	短絡試験（ $63 \text{ kA}_{\text{rms}}\cdot 0.6 \text{ sec}$ 相当）でケーブル性能に劣化がないことを確認する	線材開発/線材特性の把握により線材の耐久性を確認し、この線材を集合化してケーブルを作製した。 $63 \text{ kA}_{\text{rms}}\cdot 0.6 \text{ s}$ の短絡試験で耐性を確認し、温度、分流は設計通りであった。	達成
	$275 \text{ kV}(3 \text{ kA}_{\text{rms}})$ 連続課電を行いケーブル導体、超電導-常電導接続部、電流リードに異常が無いことを確認する	$3 \text{ kA}_{\text{rms}}$ の超電導導体を作製・評価を通して、ケーブル導体、超電導-常電導接続部に異常がない事を確認した。 超電導-超電導接続部は $3.6 \text{ n}\Omega$ の低抵抗を達成した。	<ul style="list-style-type: none"> ・超電導-超電導接続部の連続通電を行い、定常状態の安定性を確認する。 ・電流リードの作製と安定運転を確認して、達成見込み。

	中間目標	達成状況	達成見込み
275 kV 高電圧 ケーブルシステム 検証	両端に終端接続部と 中間接続部を有する 検証用 275 kV/単 心/3 kA _{rms} , 30 m 長の超電導電力ケー ブルシステムのシス テム設計を完了する	絶縁厚 10 mm までの AC 課電試 験を実施し、誘電特性、部分放電 特性を取得した。 絶縁厚 10 mm までの Imp 課電試 験を実施し、破壊特性を取得し た。 275 kV 用終端部の設計と作製を 行い、現在まで、325 kV・10 min の耐電圧まで確認した。 中間接続部の設計を行った。 275 kV の課電試験電圧（案）を 選定した。なお、設計に際して、 線材開発/線材特性の把握による 知見が一部寄与している。	<ul style="list-style-type: none"> ・絶縁厚 20 mm の試験、絶 縁厚 1 mm の長期 V-t 試験を 経て、ケーブル絶縁を設計 し、設計絶縁厚で設計の妥当 性を確認する。 ・275 kV 終端部の最終仕様 性能までの確認をする。 ・中間接続部の部分放電・破 壊特性から最適設計を行い、 設計の妥当性まで確認する。 以上を行い、達成見込み。
	耐久性を評価できる 課通電試験計画書 を作成する	他規格などを調査し、275 kV・3 kA _{rms} の試験条件の選定。長期課 通電試験の計画書を作成した。	達成

2.2.3 超電導電力ケーブル対応線材安定製造技術開発

2.2.3-1 大電流用線材の安定製造技術の開発（住友電気工業）

(1) 研究開発目標

大電流超電導ケーブルシステムへの適用を目指して、結晶粒配向金属基板(配向金属基板)を用いた超電導線材を安定に作製可能な技術を確立する。作製する超電導線材は、結晶粒配向金属基板、RF スパッタリング法により基板上に作製した中間層(CeO_2 、YSZ、 CeO_2 の三層)、レーザ蒸着法(PLD 法)により中間層上に作製した超電導層($\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$)、そして銀安定化層と銅保護層から構成される。銀安定化層成膜後、ケーブルの仕様に合わせて、2 mm 幅もしくは 4 mm 幅に機械スリッタにより細線加工を施す。

表 2.2.3-1 に大電流超電導モデルケーブルの目標性能を示す。この目標値を満たす超電導ケーブルを開発するためには、素材として十分な I_c を持ち、かつ大量の超電導線材が要素開発及び製造に必要である。また、特に達成レベルが高度な損失目標を達成するためには線材自体が強い磁性を持たないことが重要であり、従来の Ni 合金系磁性基板は適用できない。そこで、まず低磁結晶粒性配向金属基板上と Ni 合金系磁性基板で得た、高 I_c 、長尺線材作製技術を統合することにより低磁性結晶粒配向金属基板上、高 I_c 超電導線材作製技術開発を行い、その後に基板の幅広化 (1 cm 幅→3 cm 幅)と長尺線材作製プロセスの最適化によるスループットの向上を行うことにより高い I_c を持つ Y 系超電導線材を大量に製造する技術開発を行い、大電流超電導モデルケーブル用線材を安定的に製造することのできるプロセスの確立を行った。また、PLD 装置を更新することにより超電導層の歩留りを向上させ、さらなる製造能力の向上を図った。開発内容を以下に示す。

- ・低磁性結晶粒配向金属基板を用いた高 I_c 線材の開発
- ・中間層の幅広化、安定製造技術開発
- ・超電導層の幅広化、安定製造技術開発
- ・PLD 装置更新による超電導層成膜プロセスの歩留り向上

目標とするケーブル開発用線材の提供量は、1 cm 幅で平成 20 年度は総長 1 km レベル、平成 21 年度は総長 3 km レベル、平成 22 年度は総長 4 km レベルである。

(2) 低磁性配向金属基板を用いた高 I_c 線材の要素技術開発

開発に際して、Ni 合金系磁性基板と低磁性結晶粒配向金属基板の I_c 差は大きく、後者の I_c を大幅に向上させる必要があった。図 2.2.3-1 に基板による I_c の超電導層厚依存性を示す。Ni 合金系磁性基板上超電導線材(◆プロット)と低磁性結晶粒配向金属基板上超電導線材 (●プロット) の I_c 差は大きく、低磁性配向金属基板を用いた超電導線材の I_c 値は Ni 合金系磁性基板の約半分の値であった。

表 2.2.3-1 大電流超電導ケーブルの仕様と達成目標

容量	5 kA-66 kV、3 相
損失	2.1 W /m-相@5 kA 以下
サイズ	15 m 長、150 mmφ管路に収納可能

ケーブル用線材の超電導層の設定膜厚を $2\ \mu\text{m}$ とした場合、低磁性配向金属基板を用いた超電導線材の I_c 値は $150\ \text{A/cm-w}(@77\ \text{K,s.f.})$ が見込まれ、 J_c に換算すると $9\ \text{kA/cm}^2$ となり、平成 20 年度の目標値である、 $J_c = 11\ \text{kA/cm}^2$ に満たない値となる (本項での J_c は $20\ \mu\text{m}$ の銅保護層まで成膜した際の総線材厚み $170\ \mu\text{m}$ で計算した値とする)。そこで、この I_c 差の原因を究明し、低磁性配向金属基板上での I_c 向上を試みた。

中間層以降の製法は、Ni 合金系磁性基板、低磁性結晶粒配向金属基板とも同一であるので基板の比較を行った結果、Ni 合金系磁性基板表面に比べ、低磁性結晶粒配向金属基板表面は多くの欠陥が確認された。また、この欠陥は中間層及び超電導層成膜後にも確認されたことより、この欠陥が超電導電流の流れを阻害し、結果として低磁性結晶粒配向金属基板上超電導層の I_c 値が低下していることが予想された。そこで、基板表面の平滑化を図った結果、表面の欠陥はほぼ解消した。改善後の基板を用いて I_c 値の膜厚依存性を調査した結果、図 2.2.3-1 中の改善後に示すように、低磁性配向金属基板においても Ni 合金系磁性基板と同等の I_c 値が得られた。また、短尺線材において GdBCO 超電導膜厚が $2\ \mu\text{m}$ 時の I_c 値は最大で $380\ \text{A/cm-w}(@77\ \text{K,s.f.})(J_c = 22\ \text{kA/cm}^2)$ を示し、ケーブル用線材として十分な I_c 値が得られることが確認された。

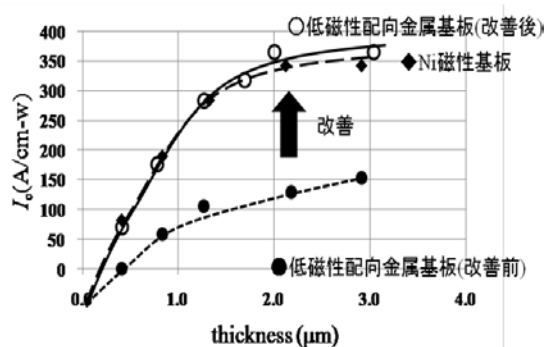


図 2.2.3-1 基板による I_c の超電導膜厚依存性

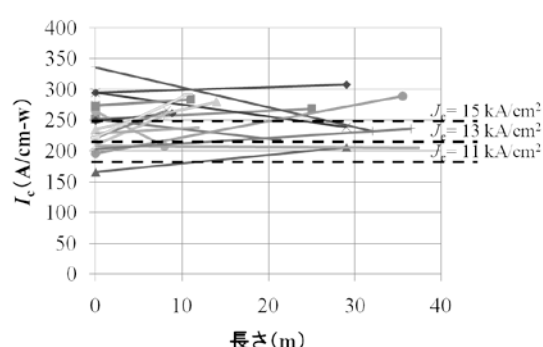


図 2.2.3-2 作製した線材の長さ及び I_c

次に、開発した技術を基に低磁性結晶粒配向金属基板を用いた長尺 Y 系超電導線材の作製を行った。作製した線材の長さ及び I_c を図 2.2.3-2 に示す。作製された線材は長手方向に I_c 値の差が生じているが高い J_c 値を有することが確認された。また、平成 22 年度の目標である、 $J_c = 15\ \text{kA/cm}^2$ ・20 m をこえる超える線材の作製に成功したことも確認でき、1 cm 幅の低磁性配向金属基板を用いたケーブル

用超電導線材の作製要素技術開発に成功した。この結果を基に、平成 20 年度の製造目標である 1 km/cm-w を製造し、ケーブル用線材として供給した。

(3) 中間層の幅広化 (3 cm 幅プロセス)

3 cm 幅の低磁性結晶粒配向金属基板を用いることにより線材スループットの向上を試みた。幅広化にあたり、まず中間層作製工程の 3 cm 幅化を行った。中間層は CeO₂、YSZ、CeO₂ の 3 層からなっており、RF スパッタリング法により作製している。作製した 3 cm 幅中間層の最表層 CeO₂ 層の面内方向の結晶粒配向性($\Delta\phi$)、表面粗さ(Ra)、CeO₂(200) 結晶粒配向度の幅方向分布を図 2.2.3-3 に示す。 $\Delta\phi$ 、Ra、CeO₂(200)配向度ともに幅方向に分布はなく、均一な特性であった。次に 3 cm 幅中間層を 1 cm 幅に分割し、同条件で超電導層を成膜することにより、中間層による幅方向の I_c 特性を調査した。その結果、1 cm 幅-3 本の I_c の差は 10% 以内であり、 I_c 特性においても大きな幅方向の特性差が確認されず、3 cm 幅において均一な特性を持つ中間層が作製されたことを確認した。

次にケーブル用線材の安定製造技術を確立するため、3 cm 幅中間層の長尺線材作製技術開発に着手した。30 m 長の第一 CeO₂ 中間層を作製し、その長手方向の特性を評価したところ、CeO₂(200) 結晶粒配向性の長手方向の分布に図 2.2.3-4 のような長さとともに低下する結果が得られた。十分な特性を持つ超電導線材を作製するためには第一 CeO₂ 層の CeO₂(200) 結晶粒配向性は 90 % 以上が必要である。そこで第一 CeO₂ 層の CeO₂(200) 結晶粒配向性の安定化を成膜時毎、成膜時間による雰囲気、成膜温度条件の変化と CeO₂(200)配向性の相関を調査した結果、成膜温度と強い相関があることがわかり、温度の安定化を図った。その結果、図 2.2.3-5 に示すように長手に渡り、均一な CeO₂(200) 結晶粒配向性を持つ 100 m 級の 3 cm 幅長尺の中間層が得られた。また、抜き出し検査により、 $\Delta\phi$ 、Ra、CeO₂(200) 結晶粒配向度の幅方向特性が均一であることも確認でき、3 cm 幅、100 m 級中間層の安定製造技術確立を確認した。

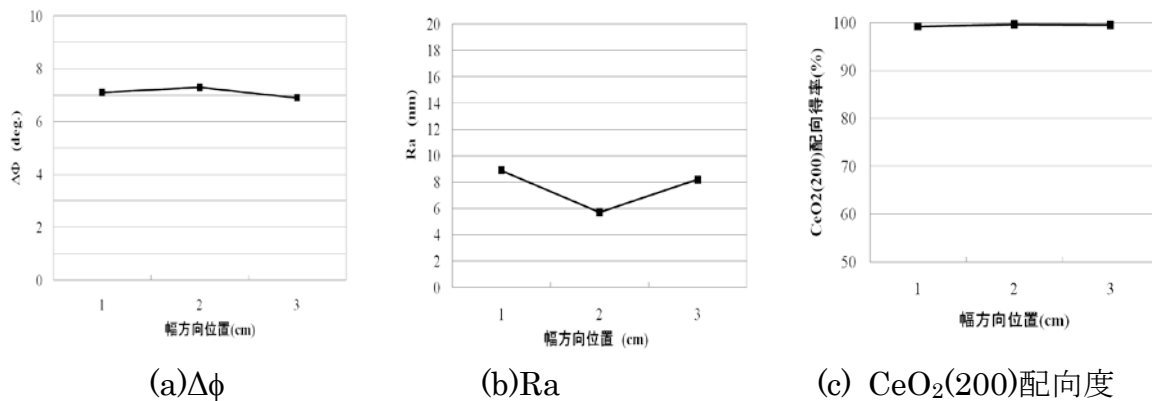


図 2.2.3-3 3 cm 幅中間層の幅方向特性分布

(4) 超電導層の幅広化 (3 cm 幅プロセス)

3 cm 幅中間層の作製技術確立後、超電導層作製工程の 3 cm 幅化を実施した。3 cm 幅中間層上に $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ を作製し、その幅方向 I_c を評価したところ、図 2.2.3-6 に示すように基板の中央 2 cm で従来の I_c 値 ($I_{c0} = 200 \sim 250 \text{ A/cm-w} @ 77 \text{ K, s.f.}$) が得られた。これにより超電導層作製工程のスループットが実質 2 倍となった。次にさらなるスループット向上を行うために、幅方向端部の低 I_c 原因の調査・解決を試みた。調査の結果、幅方向端部は成膜時の温度が低いため、 I_c 値が低下していることが判明した。そこで、PLD の成膜ヒータを 3 cm 幅全域に亘り、均熱が得られるヒータに更新した。新ヒータで成膜した結果を図 2.2.3-7 に示すが、狙い通り幅方向端部の I_c が改善していることが確認できた。本技術開発結果を基に、平成 21 年度目標である、3 km/cm-w の超電導線材を 3 cm 幅プロセスにて製造した。本工程において作製した 2 mm 幅線材の典型例を図 2.2.3-8 に示す。また、作製した超電導線材の I_c 度数分布を図 2.2.3-9 に示す。 $I_c = 200 \text{ A/cm-w} @ 77 \text{ K, s.f.}$ 以上の Y 系超電導線材の歩留りは図 2.2.3-8 より 68 % と算出された。大電流ケーブル開発用に適用可能な長さを有する Y 系超電導線材を安定に製造できるプロセスを確立した。

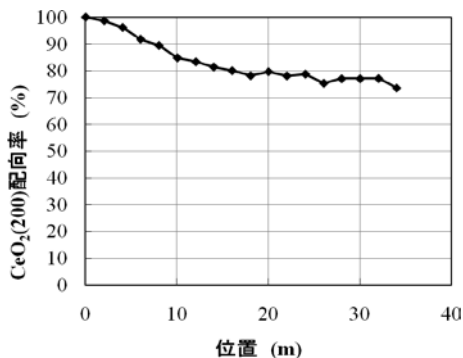


図 2.2.3-4 第一 CeO_2 層の $\text{CeO}_2(200)$ 結晶粒配向性 (改善前)

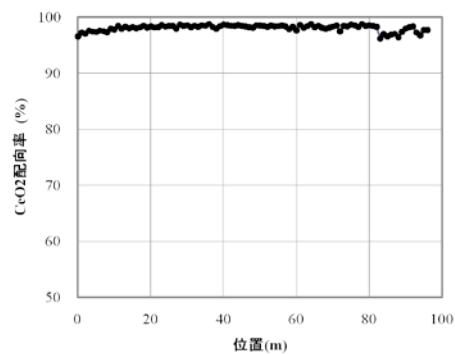


図 2.2.3-5 第一 CeO_2 層の $\text{CeO}_2(200)$ 結晶粒配向性 (改善後)

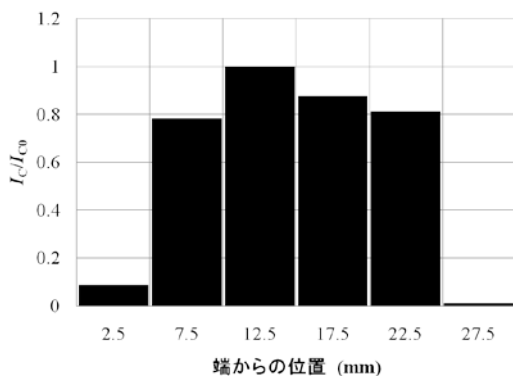


図 2.2.3-6 3 cm 幅超電導層の I_c 分布 (改善前)

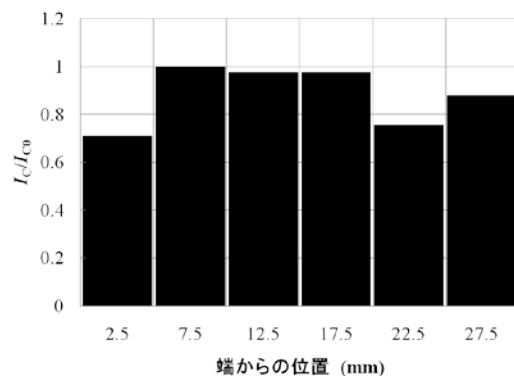


図 2.2.3-7 3 cm 幅超電導層の I_c 分布 (改善後)

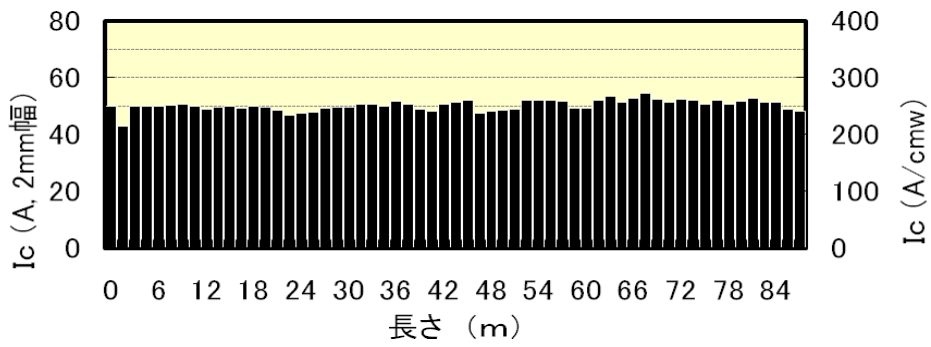


図 2.2.3-8 3 cm 幅プロセスにて作製した 2 mm 幅線材の典型例

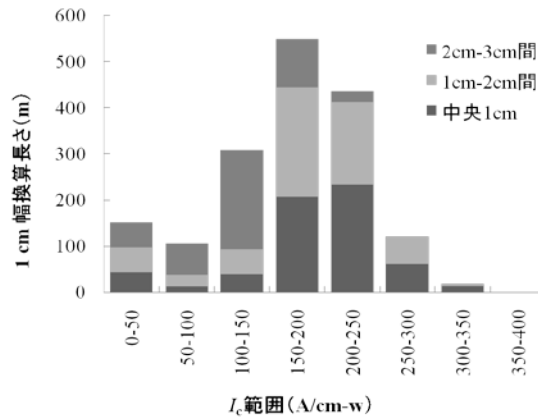
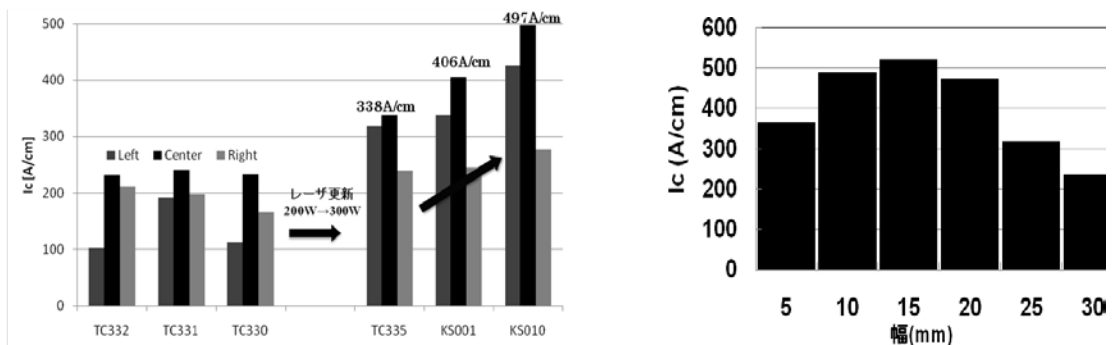


図 2.2.3-9 作製した線材の I_c 度数分布

(5) PLD 用新レーザ導入による安定製造技術開発

ケーブル開発用線材の供給を確実にし、ケーブル開発の促進を図るには線材の製造能力を向上させることが重要となる。このために、超電導層形成プロセスにおいて、従来の 1.5 倍(200 W → 300 W)の高出力を有する PLD 用エキシマレーザを新規導入した。図 2.2.3-11 に、新レーザを使用して成膜した 30 mm 幅線材の幅方向 I_c 分布を示す。新レーザによるレーザ出力向上とプルームサイズの増大により、超電導層の単位膜厚当たりの成膜速度が旧レーザに比べ 1.75 倍に向上し、より短い成膜時間で線材全体の I_c が向上する結果が得られた。

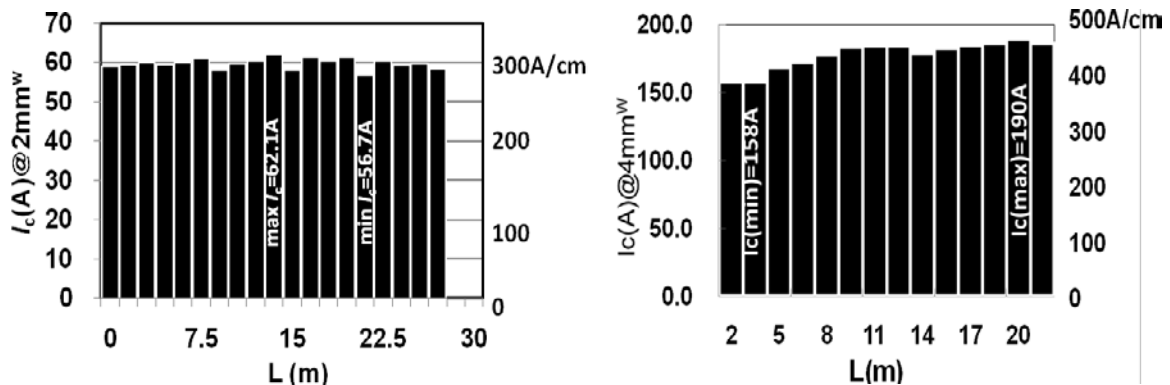


(a) 30 mm 幅線材の I_c 向上の推移

(b) 30 mm 幅線材の高 I_c 分布

図 2.2.3-10 レーザ更新による I_c の向上

図 2.2.3-10(a)中の各線材の膜厚は、新レーザ導入前 (TC330、TC331、TC332) が $2 \mu\text{m}$ 、新レーザ導入後 (TC335、KS001、KS010)) が $2.8 \mu\text{m}$ である。また、成膜速度が向上したことにより、基板が受ける熱履歴が低下し、歩留り低下の原因であった膜剥がれも抑制され、線材の歩留りが向上した。さらに、新レーザによるレーザーエネルギーの安定性向上と、ヒータ周辺の温度分布の改善により、幅方向の I_c 分布も改善され、図 2.2.3-10(b)に示すように線材中央部で $500 \text{ A/cm} (@77 \text{ K, s.f.})$ 以上の I_c を得た。従って、膜厚増加による I_c 向上と線材幅方向の I_c 分布改善により、ケーブル開発用線材として提供できる線材量の増加が見込める結果が得られ、図 2.2.3-11 に示すように細線加工後の 2 mm 幅線材と 4 mm 幅線材の I_c 特性も大幅に向上した。、さらに、超電導線材の月当たりの製造量は 3 cm 幅化により最大 1 km/cm-w に向上し、平成 22 年度の 4 km/cm-w が製造可能となったことが確認できた。以上より、 I_c 特性と歩留りの向上、および成膜速度の高速化を実現し、 4 km レベルのケーブル開発用線材の製造見通しを得た。



(a) 2 mm 幅線材 ($J_e = 16.7 \text{ kA/cm}^2$ -28 m) (b) 4 mm 幅線材 ($J_e = 23 \text{ kA/cm}^2$ -21 m)
 図 2.2.3-11 高 I_c を有す細径線材 (レーザ更新後)

(6) 成果

大電流・低交流損失ケーブルに適用するための低磁性クラッドタイプの結晶粒配向金属基板-PLD 線材作製技術開発を実施し、ケーブル化に必要な性能および製造速度等を満足する Y 系超電導線材製造の要素技術を確立した。本技術を基にして、中間目標である $J_e = 15 \text{ kA/cm}^2$ (2 mm 幅 $\times 20 \text{ m}$ 以上)の製造技術レベル達成を確認するために、 $J_e = 17 \text{ kA/cm}^2$ (2 mm 幅線材 $\times 28 \text{ m}$ 、 J_e は 20 \mu m の Cu メッキを含む線材厚さ $170 \mu\text{m}$ で算出) の特性を有する線材を作製・実証した。なお、線材提供実績は、平成 20 年度 : 1.1 km 、平成 21 年度 : 3.2 km であり、平成 22 年度計画は 4.0 km である。

(7) 今後の計画と目標達成の見通し

今後 (平成 22 年度) は、これまでに開発した製造技術と向上された線材製造能力を基に、 1 cm 幅で総長 4 km レベルのクラッド結晶粒配向金属基板-PLD 線材

の作製を実施し、線材のさらなる特性向上、長尺線材作製、歩留り改善等を実施することで、 $J_e=15 \text{ kA/cm}^2$ (@77 K,s.f.) (2 mm 幅×20 m 以上)に相当する線材の安定製造技術を確立する。

2.2.3-2 基板・中間層テープの開発（フジクラ）

(1) 研究開発目標

交流電力機器に Y 系超電導線材を適用する際問題となるのは、アスペクト比の非常に大きなテープ状線材に対して垂直方向にかかる磁界成分に伴う交流損失が無視できなくなることである。超電導電力ケーブルの場合はこれを回避するために円筒状に線材を敷き詰める構造となるが、その際の成形性の問題から幅の狭い線材の開発が求められている。2 次元的構造の Y 系超電導線材においては、隣接する結晶の粒界で生じる弱結合の分布によって有効な通電断面積が決まってしまうため、パーコレーション的に不利な配置になる確率を低減するためには出来るだけ結晶粒径が小さいことが望ましい。IBAD 法中間層線材は、無配向で結晶粒径の小さい金属テープを基板とし、結晶粒配向中間層の結晶粒径が非常に小さいため、超電導膜における粒径も小さくなる傾向がある。これまでに開発してきた基板・中間層テープの長尺製造技術を有効活用し、2 mm 幅の幅狭線材においても 20 m 長において $J_e = 15 \text{ kA/cm}^2$ (77 K,s.f.)の通電特性を実現し得る基板・中間層テープの安定で高速な製造技術を検討する。プロトタイプケーブル用線材の基板として結晶粒配向度 16 度以下の特性を有する IBAD 中間層テープを平成 20 年度～22 年度で合計 20 km 長の提供を行いケーブル要素技術開発に資する。

(2) 中間層テープの提供

「超電導応用基盤技術開発（第 II 期）」プロジェクトで（株）フジクラ及び（財）ISTEC が開発を進めてきた大型 IBAD 装置には、世界最大のアシストイオンソースが設置されており、結晶粒配向度が 16 度以下の IBAD-Gd₂Zr₂O₇(以下 IBAD-GZO)中間層テープを連続的に 100 m 以上のオーダで製造することが可能である。平成 20 年度～22 年度にプロジェクトより課せられた IBAD-GZO 中間層テープの供給計画は表 2.2.3-2 のとおりである。

表 2.2.3-2 中間層付きテープ供給計画

年度	計画	
	条長(m/月)	総長(m/年度)
20 年度	1125	7875
21 年度	750	7500
22 年度	900	10800

平成 20 年度～21 年度にフジクラがプロジェクト内の他機関に対して提供した

IBAD-GZO 中間層テープの供給実績を表 2.2.3-3 に示す。

表 2.2.3-3 平成 20 年度～21 年度 中間層テープ提供実績

年度	実績		
	条長 (m/月)	総長 (m/年度)	期間
20 年度	1126.6	7886	9 月～3 月
21 年度	832.0	8319.8	6 月～3 月
22 年度	900 (予定)	10800 (予定)	4 月～3 月

平成 20 年度は 3 月末時点で、7886 m を提供し、平成 21 年度は 8319.8 m を提供した。月毎の提供量は必ずしも一定ではないが、各年度の計画に対して年度内に全量を提供済みである。平成 21 年度末までに提供した総長で約 16.2 km であり、平成 22 年度末までの提供量は 27.0 km である。

(3) 中間層高速堆積方法検討

IBAD-GZO 中間層は、結晶粒配向度を 16 度以下にするために、1 μm 厚程度まで膜を成長させる必要がある。そのため、IBAD-GZO 層の製造速度は 5～7 m/h が上限であった。中間層の提供を円滑に行うためには製造速度のさらなる高速化が不可欠となる。

図 2.2.3-12 に示した連続巻き取り式イオンビームアシスト蒸着装置は、中央部分が薄膜を堆積させる真空チャンバであり、チャンバ内部には 110×15 cm² の世界最大のアシストイオンソースが設置されている。装置両脇には、送り出し・巻き取りリールを配置されており、連続的にテープ基材が真空チャンバに供給され、数 100 m の長さを有する基材上に IBAD 層が形成することが可能となっている。



図 2.2.3-12 連続巻き取り式イオンビームアシスト蒸着装置

本装置を用いて IBAD 法により極めて薄い膜厚で結晶粒高配向度の中間層を形成可能な MgO 層（以下 IBAD-MgO）の導入を検討した。IBAD-MgO は、金属基板上に金属元素の拡散を防止するため 100 nm 厚の Al₂O₃ 膜と、その上にベッド層として形成した 20 nm の Y₂O₃ 膜上に形成される。図 2.2.3-13 はベッド層形成後

に図 2.2.3-12 の装置で毎時 1,000 m で成膜した IBAD-MgO 層断面の透過電子顕微鏡(TEM)写真である。ベッド層の上に厚さ 5~10 nm 程度の IBAD-MgO 層が形成され、さらにその上に結晶粒が配向した CeO₂ 結晶粒が連続的に成長している様子が観察された。

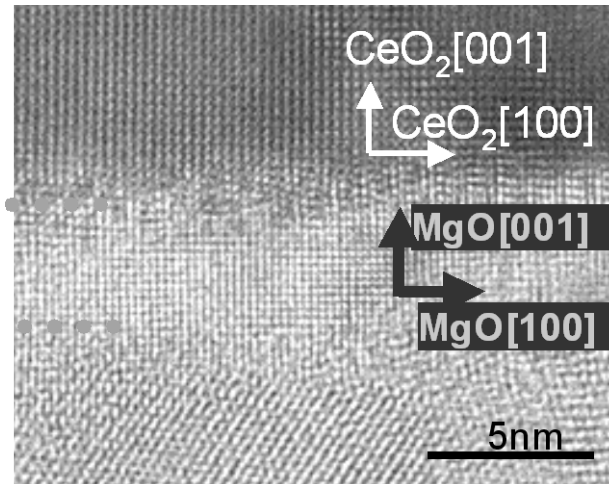


図 2.2.3-13 IBAD-MgO 層の透過電子顕微鏡観察結果

そこで、IBAD-MgO 層上に IBAD-GZO 層と同程度厚さの CeO 層を形成後に、厚さ 1 μm の超電導層を形成した。得られた線材の I_c の長さ方向の分布を図 2.2.3-14 に示す。

77 K、s.f.において直接通電により線材を 700 mm 間隔で I - V 特性を測定し、1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ に到達した電流値を I_c 値とした。170 m 超の長さを有する線材において、全長にわたって 300 A/cm-w 以上の I_c 値を実現している。 I_c 値の平均値は 340 A/cm-w であり、標準偏差は 6.1 A であった。また、IBAD-MgO 中間層を使用した線材は $J_c = 2.2 \text{ MA}/\text{cm}^2$ の性能を有し、 J_c 値に換算すると 18.5 kA/cm² の通電特性を実現し得ることが確認された。(J_c 値は 25 μm の Cu メッキ層、1.5 μm の超電導層を含む線材厚さ 183.5 μm で算出)

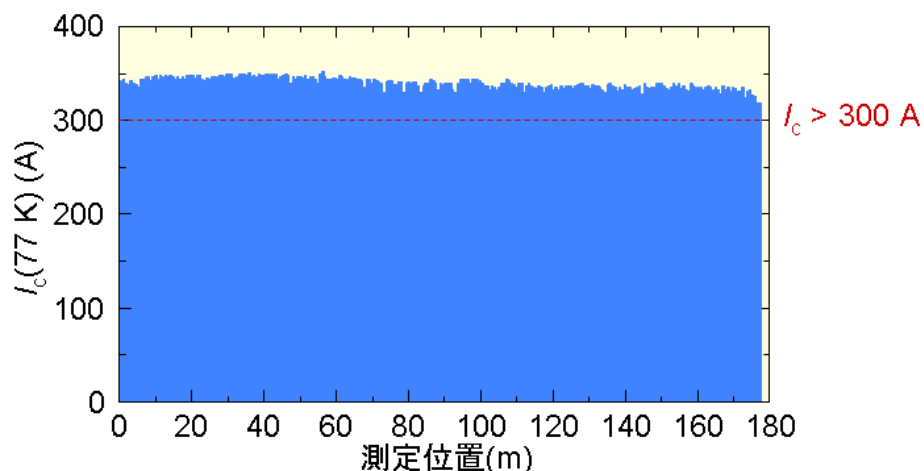


図 2.2.3-14 IBAD-MgO 層、PLD-CeO₂ 層上に形成された超電導層の I_c の長さ方向分布

図 2.2.3-15 に IBAD-GZO 層上に CeO_2 層を形成後、厚さ $1\ \mu\text{m}$ の超電導層を形成した線材の I_c の長さ方向分布を示す。

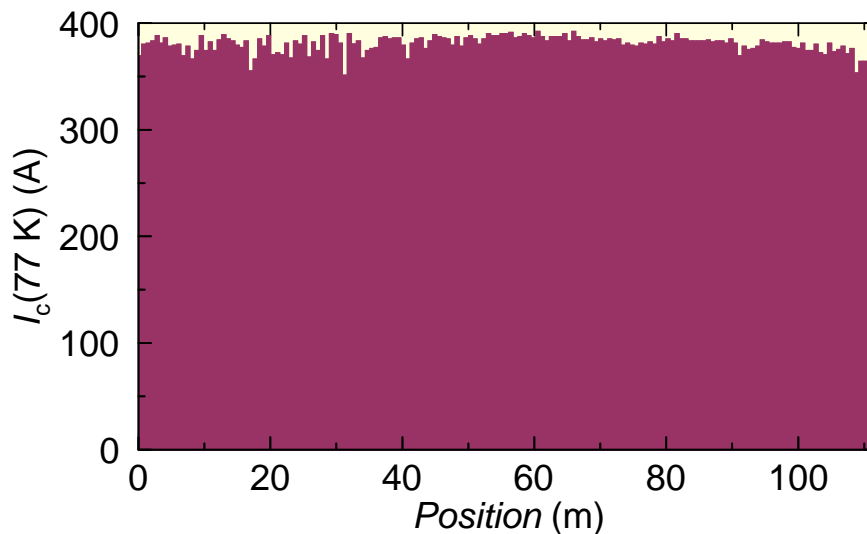


図 2.2.3-15 IBAD-GZO 層、PLD- CeO_2 層上に形成された超電導層の I_c の長さ方向分布

100 m 超の長さを有する線材において、 I_c 値の平均値は $380\ \text{A/cm-w}(@77\ \text{K}, \text{s.f.})$ であり、標準偏差は $7.3\ \text{A}$ であった。このことから IBAD-GZO 層と比較して 100 倍以上の高速で成膜された IBAD-MgO 層は、IBAD-GZO に代わって長尺の Y 系超電導線材製造に十分使用可能であることが確認された。

(4) まとめ

平成 20 年 9 月より本プロジェクト内での中間層の提供を開始しており、平成 20 年 9 月から平成 23 年 3 月までに提供する $5\ \text{mm}$ 幅の IBAD-GZO 中間層テープは総長で約 $27.0\ \text{km}$ となる見込みである。月毎に計画された提供量をほぼ計画通り提供している。平成 22 年度は毎月 $900\ \text{m}$ をプロジェクト内での供給する予定である。

100 m 長の IBAD-GZO 中間層を使用した線材において $380\ \text{A/cm-w}(@77\ \text{K}, \text{s.f.})$ の I_c 値を、170 m 長の IBAD-MgO 中間層を使用した線材は $300\ \text{A/cm-w}(@77\ \text{K}, \text{s.f.})$ 以上の I_c 値を実現しており、 $J_e = 15\ \text{kA/cm}^2$ 以上の通電特性を実現し得る基板・中間層テープの安定製造技術を開発した。

2.2.3-3 MOD プロセスによる高電圧ケーブル用超電導線材の開発（昭和電線ケーブルシステム）

(1) 研究開発目標

超電導電力ケーブルで使用される超電導線材は、交流損失低減の見地から将来的

には幅 2 mm の細線化が求められている。このため、線材の幅方向に存在する欠陥や膜厚の不均一性の存在は臨界電流特性の低下を招き、好ましくない。従って、線材長手方向の均一性ととも幅方向の均一性を向上させることが重要となる。

本プロジェクトでは、以下の検討を行うことにより TFA-MOD 法による長尺安定製造技術の確立を図る。

- (i) 仮焼膜の膜厚分布の調査
- (ii) 長手方向の特性分布向上の検討
- (iii) 長尺 Y 系超電導線材の安定製造の検討

(2) 仮焼膜の膜厚分布の調査

三弗化酢酸塩を原料とする有機酸塩熱分解法(TFA-MOD 法)で作製した幅 5.0 mm の線材において、幅方向の膜厚分布を測定した。(株)フジクラより供給された IBAD-Gd₂Zr₂O₇(GZO)中間層付ハステロイ™ 金属基板の上に、高周波スパッタリング法により CeO₂ 中間層を形成した。この CeO₂ 中間層の表面に TFA-MOD 法で超電導層となる仮焼膜を作製した。基板表面に原料溶液を塗布する手法は一般にディップコーティングと呼ばれるものであり、溶液溜りに基板を漬け、基板を引き上げる速度と溶液の粘度のバランスで膜厚をコントロールするものである。本検討に使用した試料は、実際に供給用の線材を作製する Reel-to-reel(RTR)式仮焼炉で作製したものであり、12 回の塗布で 1.5 μm の膜厚を塗布するように溶液粘度を調整したものである。図 2.2.3-16 に仮焼炉の全景を示す。膜厚分布を計測した試料は、塗布速度を 5 m/h と 10 m/h で塗布したものとバッチ式本焼炉に塗布用の治具を取り付けて作製した 1 点を用意した。



図 2.2.3-16 Reel-to-Reel 式連続塗布塗布仮焼炉の全景

仮焼膜を本焼した後、5.0 mm 幅の線材を幅方向に 3 分割し、その試料片の超電導層を硝酸に溶かしてプラズマ発光質量分析(ICP)により元素の質量分析を行った。

求めた各元素の重量と、理論密度、試料の面積から膜厚を換算した結果を図 2.2.3-17 に示す。線材の引き上げ速度が 5 m/h において、幅方向に均一に超電層が形成されており、基板の引き上げ速度がさらに速い 10 m/h やバッチ炉を使用した塗布では端部と中央部の膜厚のバラツキが大きくなることを示しており、5 m/h の塗布速度で仮焼した膜の幅方向の膜厚は $\pm 4.8\%$ 以内に入り、塗布膜の膜厚均一性を $\pm 10\%$ 以内に収める目標を達成した。

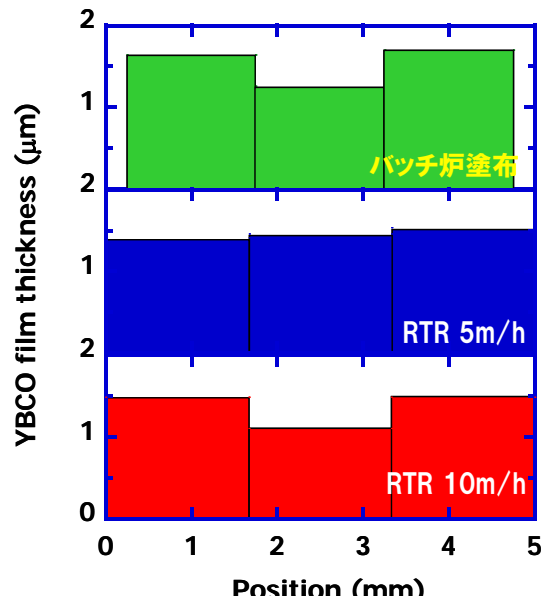


図 2.2.3-17 異なる塗布速度で作製した Y 系超電導膜の幅方向の膜厚分布

(3) 長手方向の特性分布向上の検討

TFA-MOD 法による長尺線材に使用する CeO_2 中間層の作製方法として、昭和電線ケーブルシステムは高周波スパッタリングプロセスを選択した。装置の導入コストが低コストで済み、自動インピーダンス整合器を併用することで長時間の無人運転が可能なこと、非常に平滑な表面を形成できることなどが主な理由である。高周波スパッタリングによる CeO_2 中間層成膜に関する研究は日が浅く、Y 系超電導線材の長手方向の特性分布を向上させる研究開発において重要なテーマであると考えられる。成膜条件の最適化を行った結果、図 2.2.3-18 に示すように 130 m 単長で全長に亘って $\Delta\phi=5$ 度の均一な結晶粒 2 軸配向性を示し、均一な CeO_2 中間層を作製出来ることが判った。図 2.2.3-19 に平成 21 年度に提供用線材に使用する目的で成膜した CeO_2 中間(単長：80~100 m)層の結晶粒 2 軸配向度を使用した IBAD-GZO 層の結晶粒 2 軸配向度に対してプロットした結果を示す。

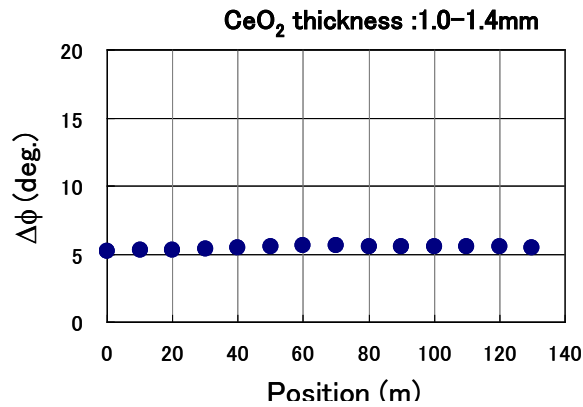


図 2.2.3-18 130 m 長で作製した CeO₂ 中間層の結晶粒 2 軸配向度の分布

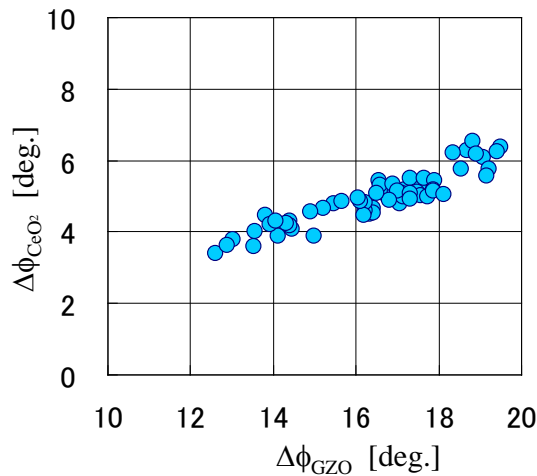


図 2.2.3-19 提供線材の両端から採取した CeO₂ 中間層における結晶粒 2 軸配向度と IBAD-GZO 層の結晶粒 2 軸配向度の関係

図2.2.3-20に100 m単長で作製した線材の I_c 値の長手方向の均一性を示す。全長にわたり亘り1 cm幅換算で300 A/cm-w(@77 K,s.f.)を超える I_c 値を示しているが、所々 I_c 値が低下した箇所が散見される。全体では±10%の範囲に I_c 値は分布している。局所的に低下している箇所は、中間層の欠陥や傷、仮焼膜の作製工程において付着した異物に起因するケースが多い。今後、各工程において対策を行ない、さらなる均一性の向上を図る。

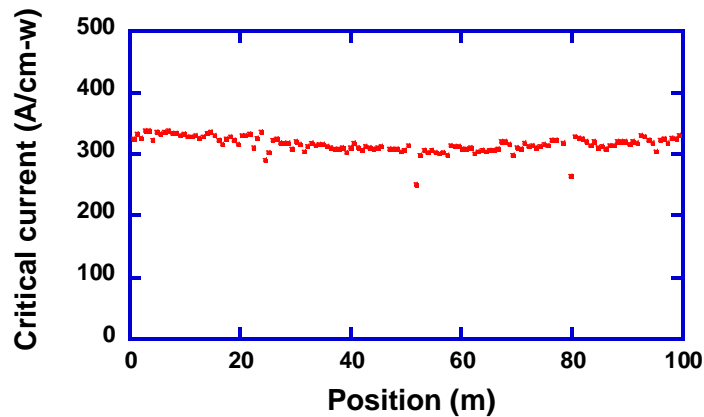


図2.2.3-20 長さ100 mで作製した線材の I_c 分布

(4) 長尺Y系線材の安定製造の検討

高電圧要ケーブルに使用する超電導線材は、将来の低コスト化が見込まれるTFA-MOD法にバッチ式本焼プロセスを適用した作製方法で製造した。このY系超電導線材は、超電導線材の性能を表す臨界電流値と線材長さの積（以下 $I_c \times L$ ）で世界第3位の155,000 Amの特性を示した実績がある。平成20年度～22年度にプロジェクト内で予定するIBAD-MOD超電導線材の供給計画は表2.2.3-4のとおりである。

表2.2.3-4 平成20年度～22年度の超電導線材供給計画

	試験項目	線材仕様		
		I_{cAv} (A)	単長(m)	総長(m)
平成20年度	新しいレーザー加工の評価1	>75	10	100
	新しいレーザー加工の評価2	>75	10	100
	試験用線材（早大）	>75	4	4
	試験用線材（早大）	>75	4	4
	導体の作製(電圧用)	>75	30	150
	導体の作新製(電圧用)	>75	30	450
	導体の作製(交流損失評価用)	>75	60	600
	導体の作製(電流通電用)	>75	60	600
平成21年度	導体の作製(長尺用)	>75	100	1,000
	低交流損失導体の作製・評価1	>100	>10	600
	低交流損失導体の作製・評価2	>100	>10	600
	低交流損失導体の作製・評価3	>100	>10	600
	機械特性評価	>100	>10	1,000
	中間接続評価1	>100	>10	300
	中間接続評価2	>100	>10	300
過電流試験評価	>100	>10	600	

	試験項目	線材仕様		
		I_{cAv} (A)	単長(m)	総長(m)
平成 22 年度	30 m 導体作製検証	>100	>33/66	3,000
	30 m シールド作製	>100	66	3,000
平成 23 年度	ケーブルシステム検証用	>100	66	6,000

表2.2.3-5 平成20年度～21年度の超電導線材供給実績

	試験項目	提供実績		
		I_{cAv} (A)	提供線材 の長さ	総長(m)
平成 20 年度	新しいレーザー加工の評価 1	>103	80 m+20 m	100
	新しいレーザー加工の評価 2	>100	30 m×2 本+75m	135
	試験用線材 (早大)	>104	4	4
	試験用線材 (早大)	>104	4	4
	導体の作製(電圧用)	>139	30 m×3 本他	150
	導体の作製(電圧用)	>109	110 m×1 本他	472
	導体の作製(交流損失評価用)	>117	123×2 本 134×2 本他	636
	導体の作製(電流通電用)	>117	133 m×2 本他	635
	導体の作製(長尺用)	>120	123 m×3 本、124 m×1 本他	1,056
平成 21 年度	低交流損失導体の作製・評価 1	>117	100.8 m×1 本他	615
	低交流損失導体の作製・評価 2	>123	78.4 m×1 本、 67.2 m×1 本他	672
	低交流損失導体の作製・評価 3	>105	44.8 m×4 本他	610
	機械特性評価	>103	89 m×2 本他	1,153
	中間接続評価 1	>110	100.8 m×1 本他	347
	中間接続評価 2	>100	67.2 m×1 本他	312
	過電流試験評価	>109	78.4 m×2 本他	660

表 2.2.3-5 は供給実績である。5 mm 幅線材で平成 20 年度 3,192 m、平成 21 年度に 4,369 m を高電圧ケーブルプロジェクトへ提供した。

(5) 結果

平成 20 年度より高圧超電導ケーブル対応線材安定製造技術開発プロジェクトに対し 5 mm 幅の超電導線材 7,588 m を供給した。平成 21 年度に製造したケー

ブル用の線材に関し、単長を 30 m とした場合の歩留り計算の結果を表 2.2.3-6 に示す。

表 2.2.3-6 平成 21 年度製造線材の単長 30 m の歩留り

30 m 単長	
良品本数 (本)	歩留り (%)
145	63

試作用ケーブルの長さが 30 m であることから、単長を 30 m として整理した。平成 21 年度にケーブル向けに製造した線材総長 6,887 m に対し、有効本数 145 本 (4,350 m) となり歩留りは 63 % となった。

供給するために線材を大量製造した年度後半で製造歩留りが低下する傾向がみられた。基板の傷など明らかな欠陥以外に工程内で発生する異物の付着が確認されており、平成 22 年度は工程内欠陥の対策を施すことにより 50~100 m 単長の製造歩留りを上げ、さらに 100 m を超える長さの超電導線材の製造歩留り向上を図る。

(6) 成果のまとめ

- ・仮焼膜を塗布する工程における線材の引き上げ速度を変えた試料で仮焼膜の膜厚分布を調査した結果、線材の両端部の膜厚が厚くなる傾向が認められた。線材の引き上げ速度を 5 m/h に設定すると幅方向の膜厚分布は ± 4.8 % となり、目標を達成することが分かった。
- ・長手方向の特性分布の向上については、本プロジェクトにおいて適用した高周波スパッタ法による CeO_2 中間層成膜の結果が鍵となっており、その結果、100 m 級で全長にわたり亘り均一な結晶粒二軸配向膜が得られ、1 cm 幅換算で 300 A/cm-w(@77 K,s.f.)の通電特性が得られることを確認した。
- ・高電圧超電導ケーブルに使用する Y 系超電導線材提供については、平成 20 年度、21 年度合わせた提供目標 7,000 m (5 mm 幅) に対し、7,580 m を提供し、目標を達成した。

(7) 今後の計画と目標達成の見通し

- ・平成 22 年度と 23 年度に提供を予定する線材の総量は、各々 6,000 m (5 mm 幅) である。平成 22 年 10 月以降の提供を予定しており、歩留り 50 % 以上が確保できれば予定通り提供できる見通しである。
- ・歩留り向上の対応として、局所的な特性低下の原因を調査・分類し、各々の対策を実施中である。対策後は局所的な特性低下部が減少することが期待され、30 m 以上の単長で歩留りが、さらに向上することを期待している。

2.2.3-4 微細構造解析 (JFCC)

(1) 実施目的

超電導電力ケーブル研究開発のケーブルシステム検証に必要な Y 系超電導線材について、透過型電子顕微鏡(TEM)等を用いて詳細にその微細構造解析を行う。これらの結果を線材製造プロセスにフィードバックし、超電導電力ケーブル対応用 Y 系超電導線材の安定製造技術開発支援を行う。

(2) 実施内容

超電導ケーブル対応線材安定製造技術開発における、安定化銅成膜プロセス開発を支援するため、有機酸塩熱分解(MOD)法により作製された Y 系超電導線材(5 mm 幅に分割切断)に銅メッキを施したサンプルの断面を、走査型電子顕微鏡(SEM)観察および TEM 観察を行った。観察を行った領域は、磁気光学(MO)法により超電導特性が健全と判断された領域と、メッキ銅の上にハンダ付けし、超電導特性が劣化していると判断された領域である。サンプルは Hastelloy™ 基板上に $\text{CeO}_2/\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7(\text{GZO})$ 中間層を形成し、MOD 法により $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y(\text{YBCO})$ 層を成膜し、スパッタリング法により安定化 Ag 層を形成した後、銅メッキされたものである。このように作製された線材の断面観察試料調製は集束イオンビーム(FIB)法を用いた。図 2.2.3-21(a)に健全と判断された領域の $\text{Cu}/\text{Ag}/\text{YBCO}/\text{CeO}_2/\text{GZO}/\text{Hastelloy}$ の断面 SEM 像、(b)に劣化と判断された領域の断面 SEM 像を示す。両方の部位で Cu メッキ層と Ag 層は密着していることがわかる。MO により健全と判断された領域の YBCO 層内部にいくつか空隙が観察されるものの、 $\text{YBCO}/\text{CeO}_2/\text{GZO}$ の積層構造は保たれている。これに対し、ハンダ付け後に劣化と判断された領域では Ag 層と超電導層の間に大きな隙間が形成され、Ag 層直下に層状のコントラストが観察でき、本来 YBCO 層が存在した領域上に球状の物質が形成されている。

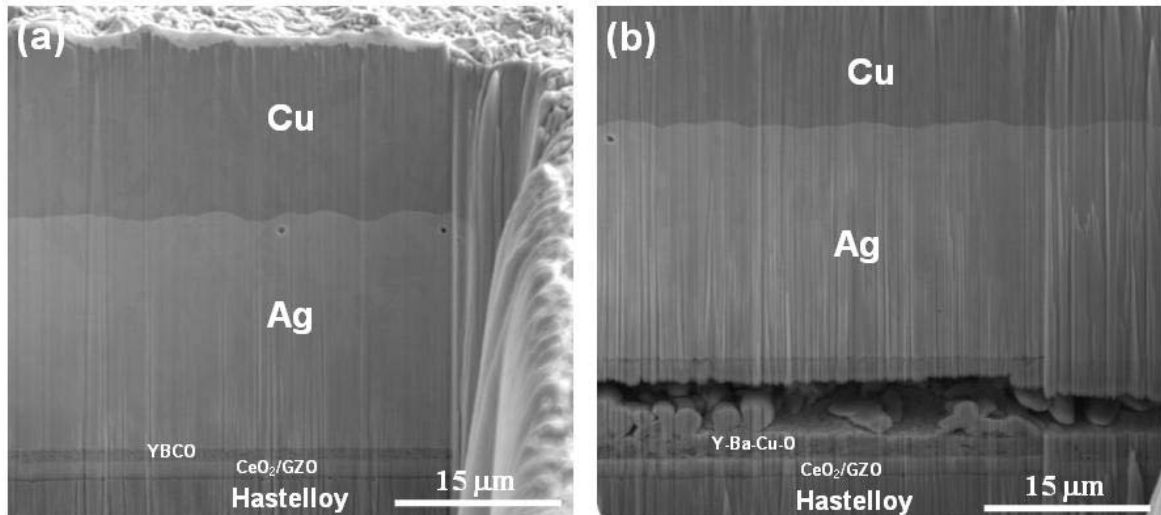


図 2.2.3-21 (a)MO により健全と判断された領域の Cu/Ag/YBCO/CeO₂/GZO /Hastelloy™ の断面 SEM 像
 (b)MO により劣化と判断された領域の断面 SEM 像

さらに、図 2.2.3-22(a)~(j)に劣化と判断された領域の Ag、Y、Ba、Cu、Ce、Gd、Zr、Cr、Ni、O の EDS 元素マッピング結果および(k)にマッピング領域の SEM 断面像を示す。Ag 層直下および、本来超電導層であったところの上部に、Hastelloy 成分である(i)Ni、(h)Cr、(j)Mo が強いコントラストで現れており、何らかの熱により Hastelloy™ 成分が安定化 Ag 層と超電導層の間に堆積したと考えられる。このサンプルで、安定化 Ag 層直下の領域を TEM 観察した。図 2.2.3-23 に安定化 Ag 層直下の断面 TEM 像を示す。Ag 層直下には積層構造が観察される。その積層構造から得られた電子回折図形および回折リングの指数を図 2.2.3-24 に示す。積層構造は主に、Ag、Ni を含む Hastelloy™ 成分から構成されていることが判明した。

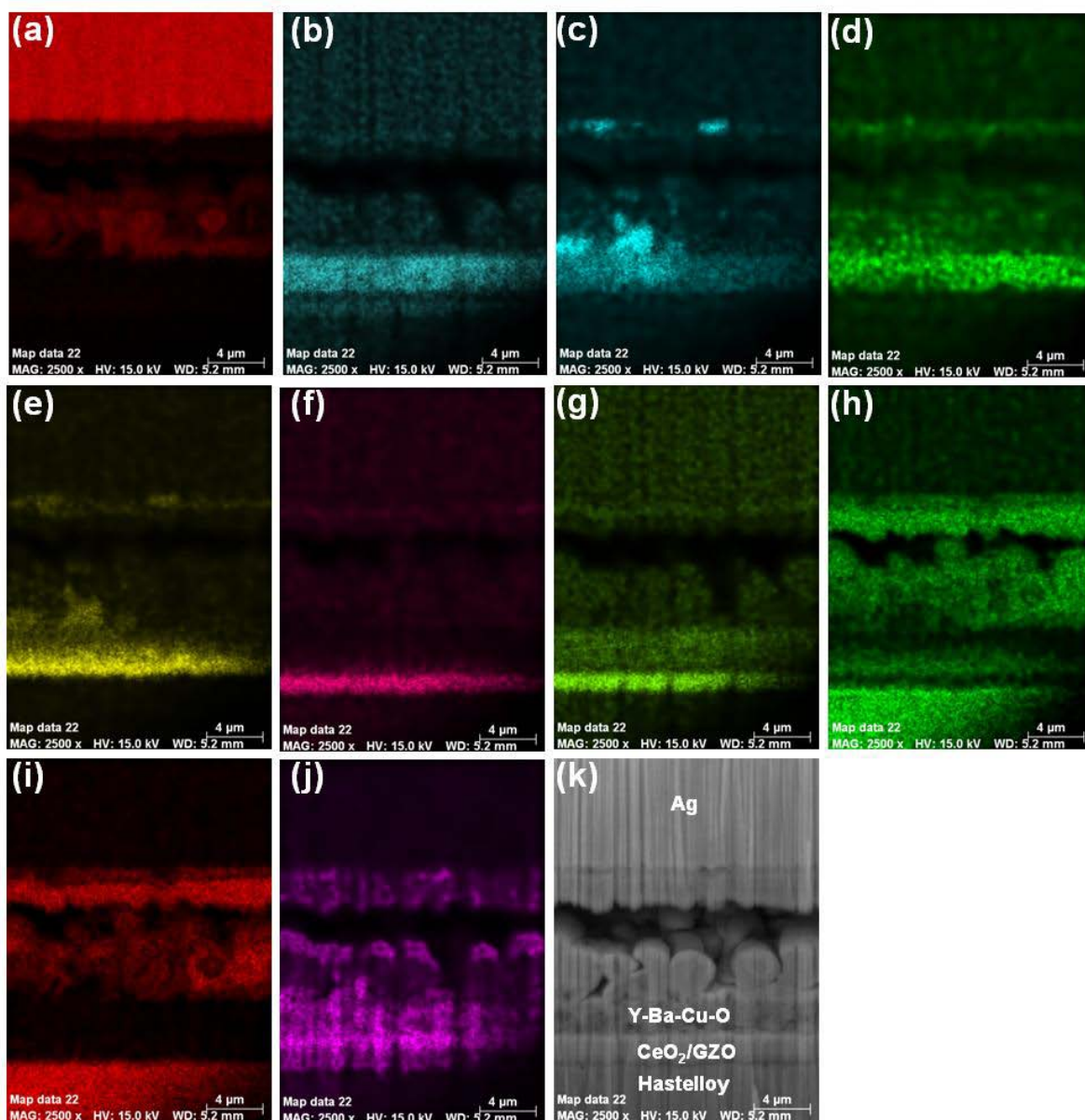


図 2.2.3-22 MO により劣化と判断された領域の EDS 元素マッピング結果
 (a)Ag、(b) Y、(c) Ba、(d) Cu、(e) Ce、(f) Gd、(g) Zr、(h) Cr、(i) Ni、
 (j) O および、(k) マッピング領域の SEM 断面像

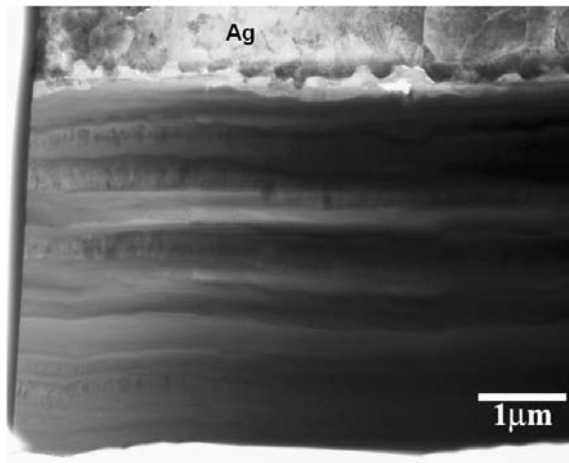


図 2.2.3-23 MOにより劣化と判断された領域の安定化 Ag 層直下の断面 TEM 像

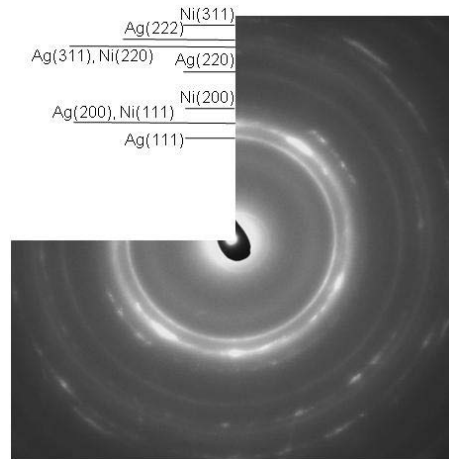


図 2.2.3-24 図 2.2.3-23 で示した積層構造から得られた電子回折図形および回折リングの指数

次に、超電導ケーブル用に線材を分割するプロセス開発を支援するため、種々の線材切断手法とメッキ手順を変えたサンプル切断面を SEM 観察した。観察したサンプルは、①スリッタ切断後、銅メッキしたサンプル、②銅メッキ後にレーザ切断を行い、その後、再び銅メッキしたサンプル、③銅メッキ後にレーザ切断したサンプル 3 つである。図 2.2.3-25(a)~(c)に①~③の切断面の断面 SEM 像を示し、(a')~(c')に拡大 SEM 像を示す。①のサンプルでは超電導層および中間層 (CeO_2/GZO) に亀裂 (図 2.2.3-25(a')に矢印で示す)が入っている。③のサンプルでは、切断加工面からおよそ $50 \mu\text{m}$ 内側に超電導層/中間層界面に亀裂 (図 2.2.3-25(c)および(c')に矢印で示す)が入っている。②のサンプルでは切断加工面からおよそ $10 \mu\text{m}$ 程度まで超電導層に空隙が観察されるのみである。以上のような SEM 観察から、分割加工後の線材組織を詳細に解析することができ、これらの結果と分割後の I_c 値の変化を比較することにより、超電導電力ケーブル対応線材安定製造のための切断プロセス開発、メッキプロセス開発を支援している。

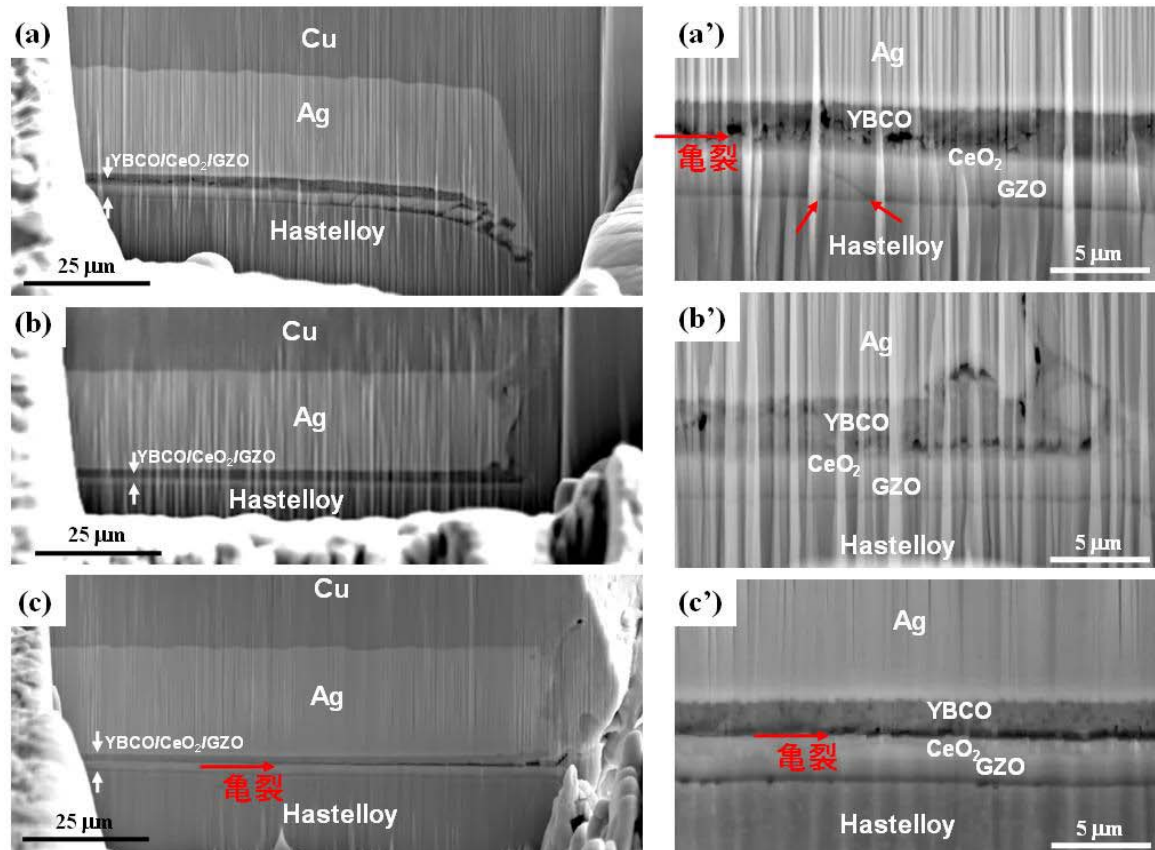


図 2.2.3-25 分割加工および銅メッキを施した線材切断面の断面 SEM 像
 (a)スリッタ切断後、銅メッキしたサンプル
 (b)銅メッキ後にレーザ切断を行い、再銅メッキしたサンプル
 (c)銅メッキ後にレーザ切断したサンプル
 (a')~(c')は(a)~(c)の拡大 SEM 像

(3) 成果のまとめ

銅メッキ後のサンプルを SEM 断面観察したところ、Cu/Ag は非常によい密着を示しており、超電導特性が健全な領域で YBCO/CeO₂/GZO の積層構造は保たれていた。銅メッキを行い、銅上にハンダ付けを施した後、超電導特性が劣化していた領域を調査したところ、Hastelloy™ 成分が安定化 Ag 層と超電導層の間に堆積していることが判明した。また、超電導ケーブル用に線材を分割するプロセス開発を支援するため、種々の線材切断手法とメッキ手順を変えたサンプル切断面を SEM 観察し、それぞれのプロセスにおける切断面近傍の超電導層および中間層の組織変化を示すことができた。また、これらの組織観察と分割後の線材の I_c 値の変化を比較することにより、超電導電力ケーブル対応線材安定製造のための切断プロセス開発、メッキプロセス開発を支援している。

今後も、超電導電力ケーブル研究開発のケーブルシステム検証に必要な Y 系超電導線材について、透過型電子顕微鏡(TEM)等を用いて詳細にその微細構造解析を行う。これら微細構造解析結果と線材の超電導特性とを比べ、検討することにより、

比較結果を製造プロセスにフィードバックし、超電導電力ケーブル対応用超電導線材の安定製造技術開発支援を行う。

2.2.3-5 IBAD-PLD 線材の安定製造技術開発 (ISTEC)

(1) 開発目的

200 A/cm-w(@77 K,s.f.)級 IBAD/PLD 線材による電力ケーブルシステム成立性を確認するため、Y 系超電導線材の安定製造技術開発を行い、IBAD-MgO/PLD-GdBCO 線材による超電導導体を作製・評価する。

(2) 200 A/cm-w 級 IBAD/PLD 線材

超電導線材の作製工程は、ハステロイ™ 基板を機械研磨にて表面平滑性を向上させ、1 cm-w に加工する。この基板の上に Ion Beam Sputtering-Gd₂Zr₂O₇/IBAD-MgO/RF Sputtering-LaMnO₃/PLD-CeO₂ の各層を蒸着する。この上に PLD 法にて GdBCO 超電導層、DC スパッタ法にて Ag 安定化層を形成する。作製した超電導線材の特性結果を図 2.2.3-26、27、28 に示す。図 2.2.3-26 はホール素子式長尺線材 I_c 評価装置（連続ホール素子法、）による測定結果であり、80 m-300 A/cm-w(@77 K,s.f.)、90 m-200 A/cm-w(@77 K,s.f.)の特性を有していることが分かる。また図 2.2.3-27 は超電導線材を 60 cm 間隔で I - V 特性（閾値 1 μ V/cm）を評価し、 I_c 特性と線材長の関係を示したものであり、この結果からも 80 m-300 A/cm-w(@77 K,s.f.)、90 m-200 A/cm-w(@77 K,s.f.)の特性を有していることが分かり、図 2.2.3-26 と図 2.2.3-27 の結果が一致している。次に、図 2.2.3-28 は作製した線材をレーザーで 1 mm-w に 10 分割し、 I - V 特性（閾値 1 μ V/cm）を測定し、幅方向における均一性を評価した結果である。レーザーによる損失は、加工前 ($I_c = 346$ A/cm-w(@77 K,s.f.)) と加工後 ($I_c = 315$ A/cm-w(@77 K,s.f.)) から約 9%、1 回の加工による損失は約 1%であり、幅方向の線材特性は、両端 1 mm-w に線材特性の低値が確認された。

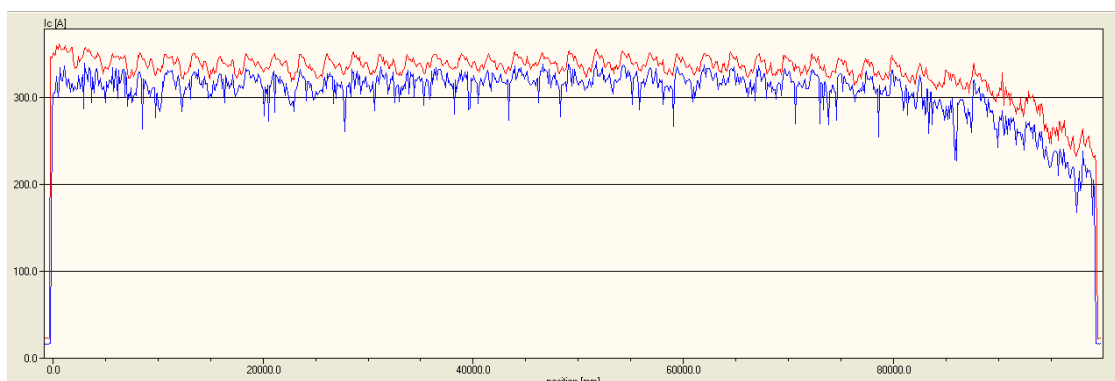


図 2.2.3-26 100 m 級 GdBCO 超電導線材の I_c 値の連続ホール素子法による測定結果

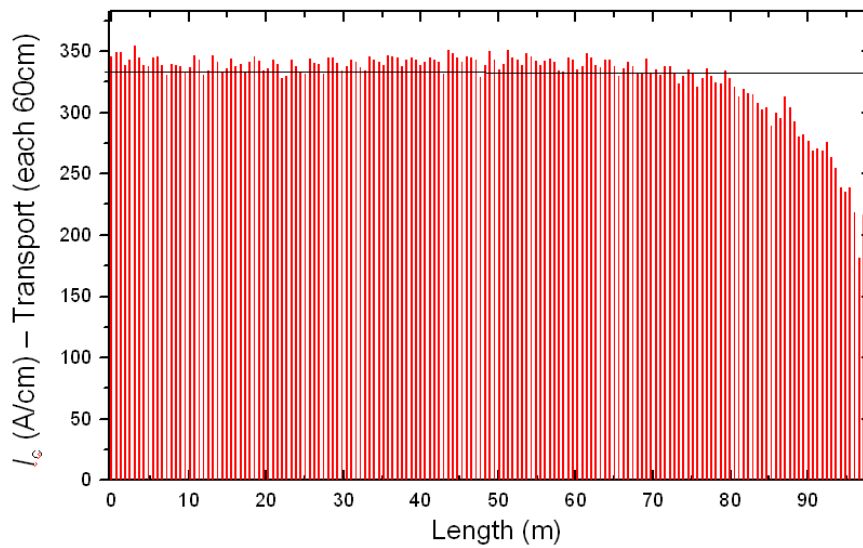


図 2.2.3-27 100 m 級 GdBCO 超電導線材の I_c 特性

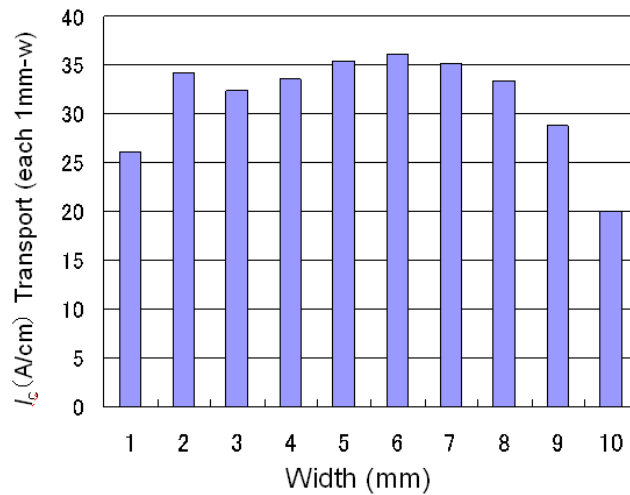


図 2.2.3-28 10 分割 1 mm-w の I_c 特性

(3) 1 m 級導体

2.2.3-5 (2)項で示した超電導線材を用いて、導体を作製した。 I_c 特性が低い両端 1 mm をレーザーで切断し、2 mm-w の線材 4 本を作製した後、電解メッキによる銅安定化層を形成した。2 mm-w の超電導線材を 50 cm 間隔で $I-V$ 特性 (閾値 1 $\mu\text{V}/\text{cm}$) の評価を行い、 I_c 特性と線材長の間隔を図 2.2.3-29 に示す。線材の一部に劣化が確認されるものの、概ね 40 A/2 mm-w(@77 K,s.f.)の I_c 特性を示している。これらの線材を用いて 2 層導体を作製した。表 2.2.3-7 に 2 層導体の仕様、図 2.2.3-30 に作製した導体、図 2.2.3-31、32 に導体の特性を示す。作製した 2 層導体は 2,750 A (@77 K,s.f.)の特性を有し、交流損失 0.0258 W/m@1 kA_{rms} (負荷率 0.51) を示した。

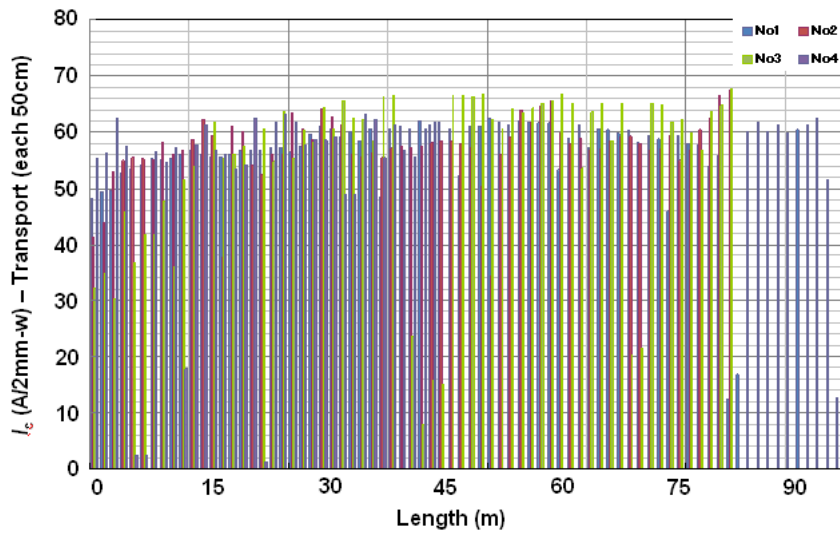


図 2.2.3-29 100 m 級 2 mm-w 線材の I_c 特性

表 2.2.3-7 2 層導体の仕様

項目	内径 (1 層目)	導体層数	線材幅	線材本数 (内層/外層)	$I_c@77\text{ K}$
2 層導体	18.0 mm	20	2 mm	25/25	2750 A



図 2.2.3-30 作製した 2 層導体

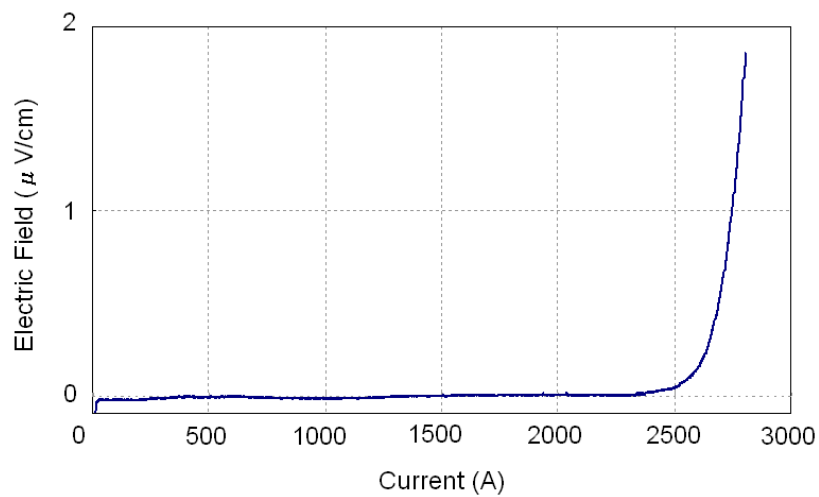


図 2.2.3-31 2 層導体の I - V 特性

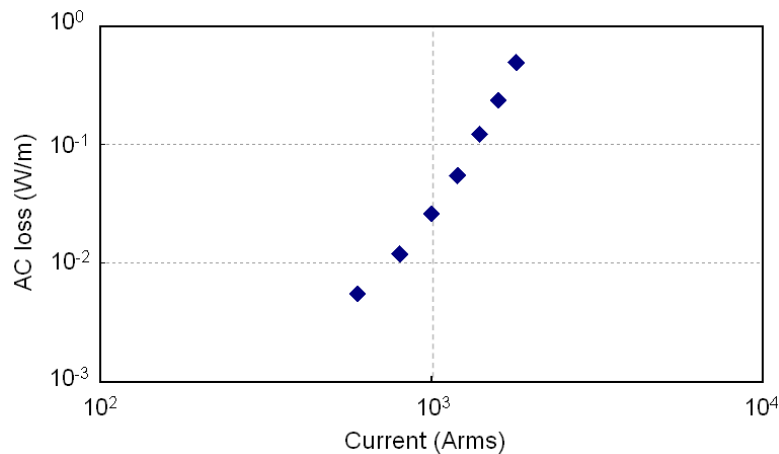


図 2.2.3-32 2層導体の交流損失

(4) まとめ

- ・ IBAD-MgO/PLD-GdBCO 線材を作製し、90 m-200 A/cm-w(@77 K,s.f.)の特性を持った線材開発を行った。
- ・ 超電導ケーブルの要素技術である細線化技術を用いて線材加工し、40 A/2 mm-w(@77 K,s.f.)線材を作製した。
- ・ 上記加工線材 2 mm 幅 50 本を用いて 2 層構造を持った超電導導体を作製し、 $I_c=2750$ A(@77 K,s.f.)の特性を得た。
- ・ 導体の交流損失として、0.0258 W/m@1 kA_{rms} (負荷率 0.51) を得た。

2.2.3-6 線材の評価技術の開発 (ISTEC)

(1) 実施目的

Y系超電導線材を用いた電力ケーブルが所用の性能を達成するためには、線材の安定的な製造技術の確立とともに、線材の性能を的確に把握する評価技術が重要である。テープ状の超電導線材を電力ケーブルへ組み込む前段階において、超電導線材の臨界電流性能、幅方向の電流均一性評価、機械的欠陥評価、欠陥除去などの評価技術を開発する必要がある。また、こうした評価技術は、産業用としての見通しを得るために、効率的かつ効果的に行われる必要がある。こうした線材の評価技術の開発を行う。

超電導線材を連続ホール素子法、長尺線材 I_c 評価装置などの装置での評価を行い、評価パラメータによる効率的、効果的な評価について検証を行う。

(2) 超電導線材評価装置

「超電導応用基板技術研究開発」で開発された超電導線材評価装置を用いて線材評価を行い、評価パラメータによる効率的、効果的な評価について検証を行う。評価装置を下記に示し、特長を記す。

- (i)連続抵抗法 I_c 測定装置 (Reel to Reel- I - V 特性：直接通電法)
- (ii)連続ホール素子法
- (iii)MOI 線材評価装置 (磁気光学法)
- (iv)SQUID 評価装置 (超電導量子干渉素子法)
- (v)連続線材 X 線評価装置 (X 線回折)

(i) 連続長尺 I_c 評価測定装置 (Reel to Reel- I - V 特性：直接通電法)

直接的に長尺線材の I_c 値を 4 端子法を用いて測定する。通常の 4 端子法では、ハンダ付け等で 4 端子を接続し、通電によって発生する電圧を測定する。しかし、この方法では、長尺線材を測定するのに時間を要する。そこで、端子を線材に押し付けることによって測定を行い、評価速度を上げている。線材は 1 cm 幅 500 m 長まで連続して測定することができ、1 回の測定長は、10 cm～1 m まで可変することができる。線材評価速度は、10 m/h～50 m/h である。評価装置図を図 2.2.3-33 に示す。この装置を用いて 100 m 級線材を単長 60 cm ごとに測定した結果を図 2.2.3-34 に示す。評価時に測定温度は液体窒素 77 K に浸して行う。

Y 系超電導線材の機器応用には、磁場中での臨界電流特性 I_c 値も重要な特性である。超電導ケーブルでは磁場中の影響は小さいが、変圧器 0.02 [T]、SMES1.0 [T] 程度の磁場中の I_c 特性を知る必要がある。本装置は、0.1 MPa@77 K で 0.1～0.5 [T] まで磁場を線材に対して垂直に発生させることができ、Y 系超電導線材の磁場中の I_c 特性を評価することができる。図 2.2.3-35 に 30 m 長の磁場中における I_c 特性測定結果を示す。磁場を 0, 0.1, 0.3, 0.5 [T] まで変化させ、単長 60 cm ごとに測定した結果であり、超電導線材の磁場中の I_c 特性が評価できている。



図 2.2.3-33 連続抵抗法 I_c 値測定装置

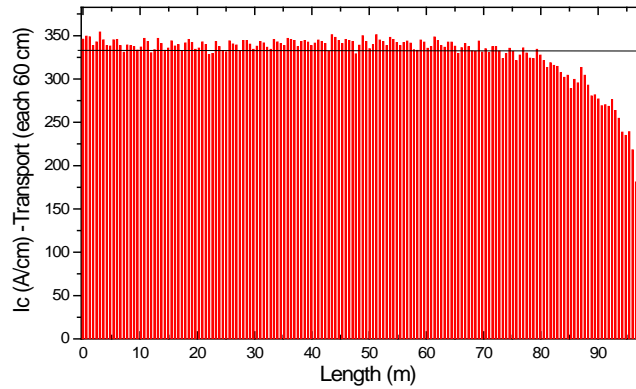


図 2.2.3-34 100 m 長線材の連続抵抗法 I_c 値測定装置による評価結果

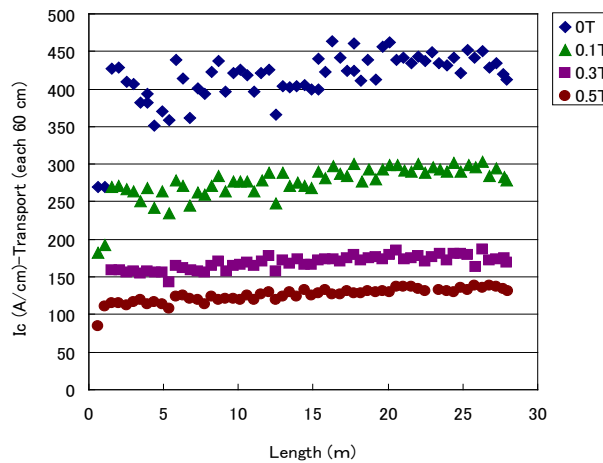


図 2.2.3-35 連続抵抗法 I_c 値測定装置による 30 m 長線材の垂直磁場中 (0~0.5 [T]) の I_c 特性評価結果

(ii) Reel to Reel-連続ホール素子法による線材特性評価

Reel to Reel-連続ホール素子法は対象物（超電導線材）に外部磁場を印加させ超電導線材中に超電導電流を誘起し、誘起された電流の作る磁場の大きさと分布をホール素子アレーで観測する方法である。電流を導入する方法を必要としないため、電極の必要がなく試料の損傷がほとんどないことが特徴である。試料を一定の速度で動かしながら測定でき、長尺線材を比較的短期間に連続的に測定ができる。測定可能線材長は 1 km、測定速度は 270 m/h、サブクール液体窒素を使用して 66K、外部磁場は 3 T まで可能であり、低磁場では、ホール素子法が、高磁場では誘導法による測定となる。図 2.2.3-36 に Reel to Reel-連続ホール素子法装置の概略図を示す。図 2.2.3-37 に温度依存性と磁場依存性の測定結果を示す。温度依存性は、77.6 K~66.8 K まで液体窒素をサブクール状態まで冷却し、Y 系超電導線材の温度依存性を Reel to Reel で評価し、磁場依存性は、0~0.16 T まで磁場を変化させ

線材の磁場依存性を Reel to Reel で評価した。誘導法による評価は、実際の電流を印加する I_c 測定よりも低い電解領域での測定となる。

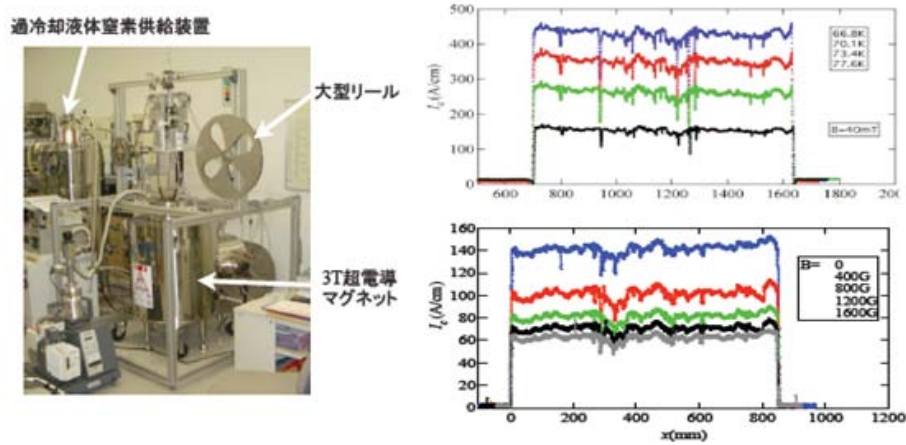


図 2.2.3-36 Reel to Reel-連続ホール素子
法装置の概略図

図 2.2.3-37 温度依存性 (上)
磁場依存性 (下)

(iii) Reel to Reel-MOI 装置による線材特性評価 (磁気光学法)

Reel to Reel-MOI 装置の概観を図 2.2.3-38 に示す。測定速度は 1.5~2.0 m/h と低いものの、CCD 分解能は 1 μm と高いため、欠陥位置の同定や加工線材の評価に用いられる。図 2.2.3-39 に 5 mm 幅 MOD 線材の測定結果を示す。白い箇所が線材特性の低い箇所または、特性劣化している箇所を示している。



図 2.2.3-38 Reel to Reel-MOI 装置の概観

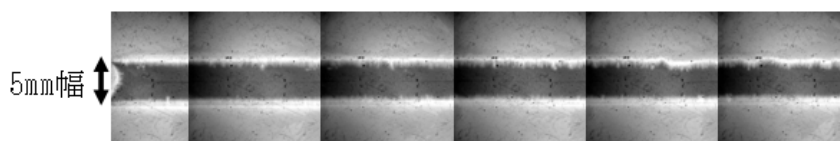


図 2.2.3-39 Reel to Reel-MOI 評価装置による 5 mm 幅線材の評価結果

(iv) Reel to Reel-SQUID を用いた高温超電導線材検査装置

超電導線材の剥離や欠損などを高温超電導-SQUID を用いて検査する。図 2.2.3-40 に装置概略図と装置内部を示す。超電導線材は、Reel to Reel で送りながら 2 台の冷凍機に接続された冷却ステージと液化窒素で冷却された補助冷却機構によって熱接触で冷却される。誘導コイルにより超電導線材に誘導電流が流れ、超電導層内に欠陥がある場合、この誘導電流は欠陥を迂回して流れる。そのときそこに生じる垂直磁場成分の傾きを SQUID で検出する。また渦電流法非破壊検査装置用高感度センサとして、グラジオメータを用い磁気シールドの無いシステムであり、最大計測速度は 80 m/h、500 m 長の線材を測定できる。図 2.2.3-41 に 5 mm 幅線材を測定した結果を示す。

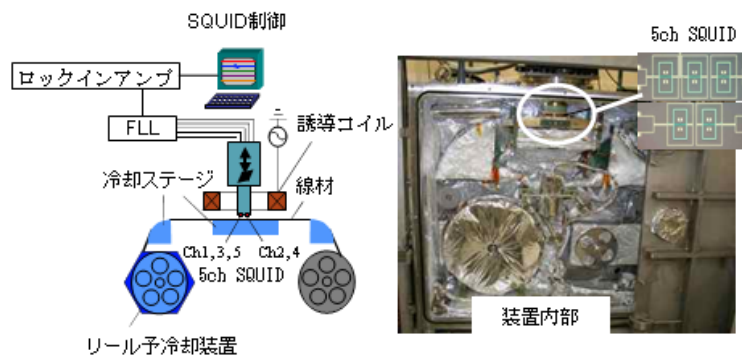


図 2.2.3-40 HTS-SQUID を用いた高温超電導線材検査装置

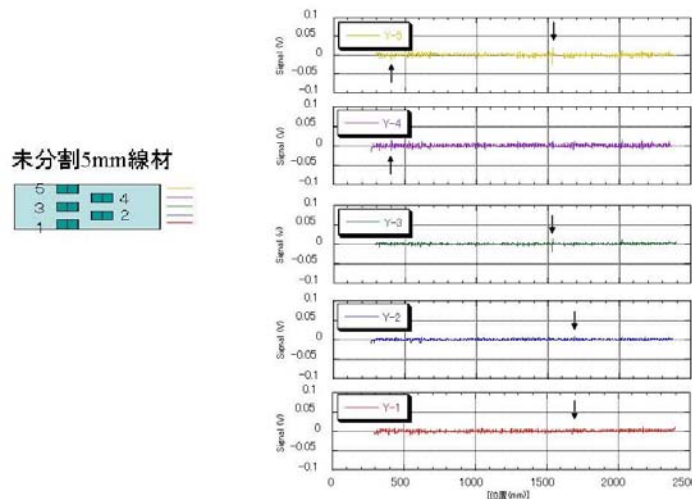


図 2.2.3-41 HTS-SQUID による 5 mm 幅線材を測定した結果

(v) Reel to Reel-X 線回折評価装置

線材作製において、基板上に成膜される物質の結晶粒面内配向が優れているものほど、特性が高い。薄膜積層構造である Y 系超電導線材は、各層の結晶粒面内配向を良くし、超電導層の結晶粒面内配向の向上を目指し、開発している。その評価として、X 線回折が用いられる。従来の X 線回折では、短尺のものしか評価でき

ず、線材一様（長手・幅）の結晶粒面内配向度を評価できなかった。本装置は一定の間隔で超電導線材の結晶粒面内配向度を評価・確認でき、線材の均一化が図れる。図 2.2.3-42 に装置図を示し、図 2.2.3-43 に 200 m 長線材の中間層（CeO₂）を 5 m 間隔について、結晶粒面内配向度を評価した結果を示す。この結果から、長手方向に一様な結晶粒面内配向を有していることが分かる。1 箇所測定に有する時間は 2 分、測定間隔は 10 cm～数 m、線材移動速度は 0.5 m/sec、自動で測定することが可能である。

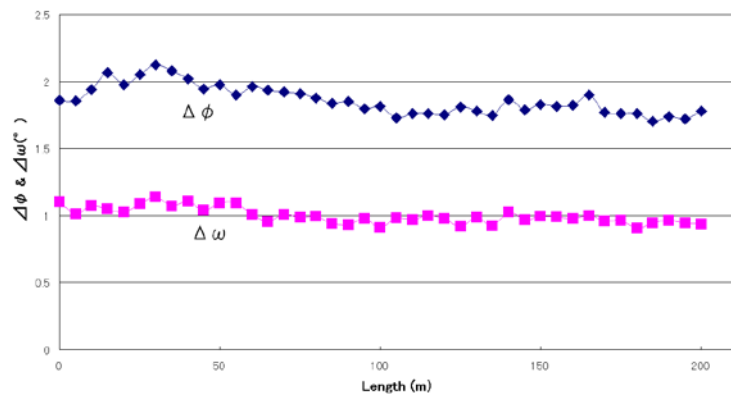


図 2.2.3-42 RTR-X 線回折装置 図 2.2.3-43 200 m 長の中間層（CeO₂）の面内結晶粒配向評価結果（5 m 間隔）

(3) 評価装置の比較

ケーブル用 Y 系超電導線材の特性を評価する装置について、性能を比較した。評価装置の分解能と測定速度の関係について、図 2.2.3-44 に示す。測定速度が遅く、分解能が小さい Reel to Reel-MOI は詳細な観察を行うことに向いている。Reel to Reel-SQUID は、測定速度は速いが分解能が小さく、 I_c 特性を評価することができない。Reel to Reel- $I-V$ 測定装置は、測定速度が速く、直接通電法により $I-V$ 特性を得、 I_c 特性を評価できるが、通電することで線材へダメージを与える可能性がある。Reel to Reel 連続ホール素子法は、非破壊に I_c 特性を見積もることができ、測定速度も速い。また、1 km 長まで連続して評価することができ、分解能が 1 mm 前後のため、異常部位を特定し易く、他の評価装置による 2 次検査に入り易い。このことから、効率よく評価する装置としては、Reel to Reel 連続ホール素子法が有効と思われる。

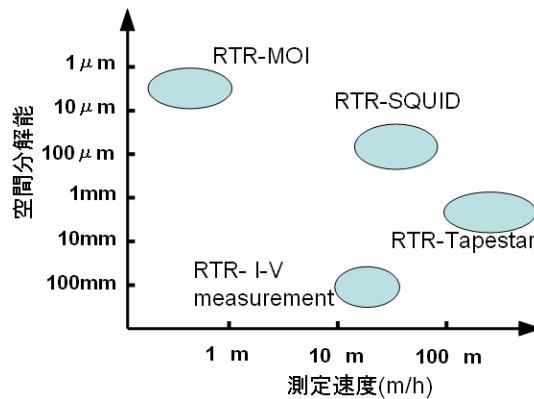


図 2.2.3-44 分解能と測定評価速度の関係

(4) まとめ

超電導電力ケーブル用線材評価装置として、現在使用されている評価装置の性能を確認した。それぞれの特徴を活かした適材適所の評価運用を行うことで、効率的に評価できる。線材特性を効率的・簡易に評価するには、Reel to Reel 連続ホール素子法が優れているが、 I_c 特性は見積もられたものあり、真値が必要な場合には、Reel to Reel- $I-V$ 特性評価装置である。劣化・剥離等を効率的に確認するには、Reel to Reel-SQUID 装置であり、細かく評価するには Reel to Reel-MOI 評価装置である。

2.2.3-7 成果のまとめ

大電流・低交流損失ケーブルに適用するための低磁性クラッドタイプの結晶粒配向金属基板-PLD 線材作製技術開発を実施し、ケーブル化に必要な性能および製造速度等を満足する Y 系超電導線材製造の要素技術を確立した。本技術を基にして、中間目標である $J_e = 15 \text{ kA/cm}^2$ (@77 K, s.f.) (2 mm 幅×20 m 以上) の製造技術レベル達成を確認するために、 $J_e = 17 \text{ kA/cm}^2$ (@77 K, s.f.) の特性を有する Y 系超電導線材を作製・実証した。なお、線材提供実績は、平成 20 年度：1.1 km、平成 21 年度：3.2 km であり、平成 22 年度計画は 4.0 km である。

基板・中間層テープの開発においては、IBAD-GZO 基板を平成 21 年度時点で 16.2 km 提供した。平成 22 年度には 10.8 km 提供を予定している。100 m 長の IBAD-GZO 中間層を使用した線材において 380 A/cm-w (@77 K, s.f.) の I_c 値を、170 m 長の IBAD-MgO 中間層を使用した線材は 300 A/cm-w (@77 K, s.f.) 以上の I_c 値を実現しており、 $J_e = 15 \text{ kA/cm}^2$ 以上の通電特性を実現し得る基板・中間層テープの安定製造技術を開発した。

高電圧超電導ケーブルに使用する TFA-MOD 法により作製された Y 系超電導線材の提供については、線材供給 6.5 km (平成 20~22 年度) に対し、平成 21 年度時点で線材 3.8 km (10 mm 幅換算) を供給し、歩留り 63 % を達成した。

また、線材の引き上げ速度を 5 m/h に設定すると幅方向の膜厚分布は $\pm 4.8\%$ となり、目標を達成することが分かった。長手方向の特性分布の向上については、100 m 級で全長にわたり均一な結晶粒二軸配向膜が得られ、1 cm 幅換算で 300 A/cm-w(@77 K,s.f.)の通電特性が得られることを確認した。

微細構造解析においては、線材の加工技術の影響を評価し、加工工程・技術に寄与した。また、MOD プロセスによる超電導線材の断面観察を行い、超電導構造および中間層の状態を確認および劣化箇所の組成分析を実施した。

IBAD/PLD 線材の安定製造技術の開発においては、IBAD-MgO/PLD-GdBCO 線材を作製し、90 m-200 A/cm-w (@77 K,s.f.)の特性を持った Y 系超電導線材開発を行ない、超電導ケーブルの要素技術である細線化技術を用いて線材を切断加工し、40 A/2 mm-w(@77 K,s.f.)線材を作製した。上記加工線材 2 mm 幅 50 本を用いて 2 層構造を持った超電導導体を作製し、 $I_c=2750$ A (@77 K,s.f.)の特性を得た。また導体の交流損失として、 0.0258 W/m@1 kA_{rms} (負荷率 0.51) を得た。

線材評価装置については、現在使用されている評価装置の性能を確認した。それぞれの特徴を生かした適材適所の評価運用を行うことで、効率的に評価できる。線材特性を効率的・簡易に評価するには、Reel to Reel 連続ホール素子法が優れているが、 I_c 特性は見積られたものあり、真値が必要な場合には、Reel to Reel- $I-V$ 特性評価装置である。劣化・剥離等を効率的に確認するには、Reel to Reel-SQUID 装置であり、細かく評価するには Reel to Reel-MOI 評価装置である。

2.2.3-8 今後の計画と目標達成の見通し

大電流ケーブル用 Y 系超電導線材の安定製造技術の開発として、今後は開発された製造技術と向上された線材製造能力を基に、1 cm 幅で総長 4 km レベルのクラッド結晶粒配向基板-PLD 線材の作製を実施し、線材のさらなる特性向上、長尺線材作製、歩留り改善等を実施することで、 $J_e=15$ kA/cm²(@77 K,s.f.)(2 mm 幅×20 m 以上)に相当する Y 系超電導線材の安定製造技術を確立する。

高電圧ケーブル用への基板・中間層テープの供給については、平成 22 年度末までに総長で約 27 km 供給予定であり、目標達成の見込み。

TFA-MOD プロセスによる高電圧ケーブル用 Y 系超電導線材の供給については平成 22 年度と 23 年度に提供を予定する線材の総量は、各々 6,000 m(5 mm 幅)である。平成 22 年 10 月以降の提供を予定しており、目標達成の見込み。なお、歩留り向上の対応として、局所的な特性低下の原因を調査・分類し、各々の対策を実施中である。対策後は局所的な特性低下部が減少するので、30 m 以上の単長で歩留りが向上することが期待でき、歩留り 70 %を達成の見込み。

微細構造解析については、超電導電力ケーブル研究開発のケーブルシステム検証に必要な Y 系超電導線材について、透過型電子顕微鏡(TEM)等を用いて詳細にその微細構造解析を行う。これら微細構造解析結果と線材の超電導特性とを比べ、検

討することにより、比較結果を製造プロセスにフィードバックし、超電導電力ケーブル対応用超電導線材の安定製造技術開発支援を行う。

評価技術の開発については、現状の評価装置を用いて線材評価を続け、線材特性のデータ蓄積および線材特性の選別を効率良く行うことで、線材特性評価装置の用途を把握する共に、評価装置の性能向上に繋げていく。

2.2.4 超電導ケーブルの熱収支に関する評価研究

2.2.4-1 定常通電時および事故時の伝熱特性検討（早稲田大学、ISTEC）

(1) 開発目的

コンパクト化・大電流化をめざす 66 kV/5 kA 超電導電力ケーブル開発においては、事故時の通電電流による電磁的影響・熱特性などの把握が必要である。また、絶縁材料の厚い 275 kV/3 kA 高電圧ケーブルにおいては事故時の伝熱特性のみならず、定常運転時の交流損失および誘電体損失と冷却のバランスを考慮した設計が必要である。

耐過電流導体構成技術の確立を目指して、66 kV/5 kA 大電流ケーブルおよび 275 kV/3 kA 高電圧ケーブルの定常時・事故時の発熱・冷却に関する熱収支検討と最適設計化のための計算機シミュレータ開発を行い、システム検証用ケーブルの設計にて熱解析を行い、ケーブルの最適設計手法を確立し、シミュレーション結果を設計へフィードバックすることを目的とするとともに、汎用性のあるシミュレーション技術を確立する。なお、基礎的な評価実験との整合性を確認しながらデータベース化とシミュレータの反映を行う。

●中間目標:超電導電力ケーブル構造の最適化のために伝熱および電磁界数値シミュレーションを行う。

○最終目標:システム検証結果に合致する汎用性のあるシミュレーション技術を確立する。

(2) 66 kV 大電流ケーブルの過電流通電時の伝熱特性

66 kV 級大電流超電導ケーブルの耐過電流導体構成評価および設計用に、3次元有限要素法と回路方程式に基づく電流分布-熱伝導連成解析用計算機プログラムを開発した。

66 kV 級大電流超電導ケーブルの開発では、31.5 kA_{rms}、2 s の耐短絡電流特性が要求される。今回はその耐短絡電流特性の検証として、2 m 級超電導モデルケーブルを用いて過電流通電試験を行なった。約 2.7 m の 2 本の超電導ケーブルコアを並べ、2 本のコアのシールド層を短絡、閉回路とした状態で導体層に往復通電を行うことで、シールド層に遮蔽電流が誘起される方式とした。実験は液体窒素浸漬冷却（初期温度 77.3 K）で行い、過電流として 31.5 kA_{rms}、2 s 通電した。

試験結果では、66 kV 級大電流超電導ケーブルで想定される最大の短絡事故電流 31.5 kA_{rms}、2 s を通電した際に超電導導体層は約 100 K、超電導シールド層は約 120 K の温度上昇となった。試験結果は解析結果から想定される範囲内である。

(3) 275 kV 高電圧ケーブルの定常通電時の伝熱特性解析

中空銅フォーマと丸撚り銅フォーマの伝熱特性を確認するため、2つのモデル導体を作製した。導体内部にヒータを設置し、ヒータから交流損失と誘電体損失を模擬した発熱を投入し、定常状態になるまで中空銅フォーマのモデルケーブル、丸撚り銅フォーマのモデルケーブルの温度分布を測定した。中空銅フォーマの解析において、PPLPの熱伝導率 k_{pplp} は $0.1\sim 0.2\text{ W/mK}$ 、比熱容量 c_{pplp} は $0.5\times 10^6\text{ J/m}^3\text{K}$ を用いた。丸撚り銅フォーマの解析において、PPLPの熱伝導率 k_{pplp} は $0.2\sim 0.3\text{ W/mK}$ 、比熱容量 c_{pplp} は $0.8\times 10^6\text{ J/m}^3\text{K}$ を用いた。解析結果と実験結果はよく一致しており、中空銅フォーマの最大温度上昇は 0.4 K 以下、丸撚り銅フォーマは 0.3 K 以下と推定される。また、両モデルケーブルはヒータ投入開始 (0 s) からともに 6000 s 程度で定常状態となり、解析結果は実験結果とよく一致しており、ケーブル内部の過渡的な伝熱特性の再現を確認した。また解析結果より、液体窒素浸漬状態のPPLPの熱伝導率 k_{pplp} は $0.1\text{-}0.3\text{ W/mK}$ 、比熱容量 c_{pplp} は $0.5\times 10^6\text{-}0.8\times 10^6\text{ J/m}^3\text{K}$ と推定できた。この物性値は世界的にも報告例がなく、超電導ケーブルの熱特性評価において非常に重要なデータである。

(4) 275 kV 大電流ケーブルの事故時の伝熱特性解析

超電導線材の銅メッキ厚と銅シールド層の断面積をパラメータとして、275 kV 級高電圧超電導ケーブルで想定される最大の短絡事故電流 $63\text{ kA}_{\text{rms}}$ 、 0.6 sec を通電した際のケーブル内の温度上昇について解析評価した。解析結果より、銅メッキ厚と銅シールド層断面積の設定範囲において、熱的な要因による超電導特性の劣化が引き起こされる可能性は極めて低く、275 kV 級高電圧超電導ケーブルで想定される最大の短絡事故電流 $63\text{ kA}_{\text{rms}}$ 、 0.6 sec の熱的ダメージから超電導ケーブルを保護できることが分かった。今回の解析結果より、銅メッキ厚と銅シールド層断面積を減らした構造も短絡事故から275 kV 級高電圧超電導ケーブルを保護できる可能性があることが分かった。

耐短絡電流特性の検証として、2 m 級超電導モデルケーブルを用いて過電流通電試験を行った。実験は液体窒素浸漬冷却（初期温度 77.3 K ）で行い、過電流として約 $10, 20, 30, 40, 63\text{ kA}_{\text{rms}}$ を通電した。

実験結果では、275 kV 級高電圧超電導ケーブルで想定される最大の短絡事故電流 $63\text{ kA}_{\text{rms}}$ 、 0.6 sec を通電した際に、銅フォーマは約 53 K 、超電導導体1層目は約 30 K 、超電導導体2層目は約 42 K 、超電導シールド層は約 15 K の温度上昇となった。解析結果では、時間推移に伴う各層の温度上昇が実験とよく一致していた。実験と解析のわずかな誤差は、温度計に時間遅れがあるため、測定誤差が生じている可能性や解析のモデル構成が完全に実験の構成を再現できていないことが推測された。また、実験結果において、過電流値の増加に伴い、各層の温度も急激に上昇し、特に銅フォーマの温度上昇は、 $63\text{ kA}_{\text{rms}}$ 通

電時には超電導導体層と同程度もしくはそれ以上になり、解析結果と実験結果は定性的かつ定量的によく一致した。

(5) 成果

定常通電時および事故時の伝熱特性に対するシミュレーションを行い、超電導電力ケーブル構造設計の最適化にフィードバックした。

超電導モデルケーブルを用いて過電流通電試験を行い、超電導モデルケーブル内の温度上昇と電流分布について数値シミュレーションの結果と比較検討を行った。解析結果は実験結果とよく一致しており、開発した計算機シミュレータの妥当性を確認できた。

(6) 今後の見通し

今後は、66 kV 大電流超電導ケーブルシステム検証においては、短絡電流通過時の温度上昇解析・評価および短絡電流通過時の三心ケーブルに働く電磁力解析・評価を行い、275 kV 高電圧超電導ケーブルシステム検証においては、気中終端接続部の超電導／常伝導接続の電流転流の挙動解析および気中終端接続部の熱解析を行っていくことで、最終目標であるシステム検証結果に合致する汎用性のあるシミュレーション技術の確立を目指す。

2.2.4-2 スラッシュ窒素の研究（前川製作所）

(1) 研究開発目的

現状の高温超電導ケーブルの冷却システムの冷媒には、超電導体性能や絶縁特性などを考慮し、サブクール状態の液体窒素が用いられている。サブクール窒素は、ケーブルを冷却するに従い温度が上昇していくが、固体と液体の二相流であるスラッシュ窒素では固体が存在する限り、その温度は融解温度である 63 K という、サブクール窒素より低温かつ一定に維持される。このことはケーブル性能の向上にも寄与できると考えている。

本研究では、高温超電導ケーブルの新冷媒として、スラッシュ窒素の冷却特性を評価するため、システムの検討、固相率制御方法の研究、連続生成方法の研究を実施したので以下に報告する。

(2) システムの検討

スラッシュ窒素とは、液体窒素中に微細な固体窒素粒子が分散したスラリー状の固液二相流体であり、サブクール窒素冷却と比較し以下のような長所を有する。

- ・融解潜熱分だけ冷却に利用できるエネルギーが液体窒素より大きい。
- ・固体の融解の効果で、固体が融解するまで一定温度を維持することが可能。
- ・融解温度が維持されるため冷却温度がサブクール窒素冷却と比べ低く保持するこ

とが可能。

また、壁面と流体間の冷却を示す無次元数としてヌッセルト(Nu)数がある。これまでの液体窒素冷却とスラッシュ窒素冷却の管内冷却試験を比較してもヌッセルト数は同等⁽¹⁾で、これは固体窒素の融解潜熱が寄与しているためと考えられる。これらのことからスラッシュ窒素はサブクール窒素よりも低温かつ冷却性能も優れた特性を有しているといえる。

サブクール窒素冷却における主要な構成機器は、冷凍機、循環ポンプとサブクール窒素を貯留するリザーバタンクである。スラッシュ窒素冷却ではこれらに付加して固体窒素を生成する生成装置、生成装置に付属する冷凍機、一定した固相率でケーブル管内にスラッシュ窒素を供給するための濃度計が必要となる。連続的かつ微細な固体窒素を生成する生成装置と生成した固体窒素の固相率の計測方法については後述のように研究開発を実施してきた。

スラッシュ窒素の特性を活かした適応場所についても検討を実施した。検討例として、発電機端から昇圧トランスに至るケーブルの冷却が想定される。ここは距離が短いものの電流変化も大きく、超電導化しても性能上負担の大きい場所であると考えられる。スラッシュ窒素冷却ではケーブル温度がサブクール窒素冷却よりも低く保たれるため交流損失やケーブル負荷率が低く抑えられることが期待できる。また、ケーブル端末なども熱負荷が大きく、スラッシュ窒素冷却に適した場所と考えられる。

(3) 固相率制御方法の研究

現状の高温超電導ケーブルの冷却では、冷媒にサブクール窒素を用いているが、超電導ケーブルの入口のサブクール窒素温度を所定範囲内で制御することでケーブルの必要とする冷却量を安定的に供給している⁽²⁾。スラッシュ窒素の場合には、サブクール窒素の温度に代わり、全流体中に占める固体の質量割合である固相率を一定とすることで常に一定の冷却量をケーブルに供給する。そこで、固相率の制御はスラッシュ窒素冷却の実用化に欠かせない技術であり、本研究では、固相率一定の状態ですラッシュ窒素を冷却部に供給するための制御方法の研究を行った。

固相率を制御するには、固体窒素とサブクール窒素を混合しスラッシュ状態とした後ヒータにより固相率を調節する方法、固相率の高いタンクを別途設けサブクール窒素と混合し固相率を調節する方法、固体窒素生成装置で固体生成量を調節する方法などが考えられる。これらの得失を検討した結果、本研究では生成装置で固体生成量を調節する方式を採用し、生成装置としては冷凍機の運転方法を変えることで生成量を調節でき、かつスラッシュ水素の生成方法⁽³⁾としても実績のある掻き取り方式を採用した。

本研究で開発したスラッシュ窒素生成装置の概略図を図 2.2.4-1 に、写真を図 2.2.4-2 にそれぞれ示す。本生成装置では、冷凍機を用いて液体窒素を冷却面に固化させ、固化した窒素を掻き取り羽根で剥離することでスラッシュ窒素を生成する

方法を用いている。生成装置は、スラッシュ窒素およびサブクール窒素を貯槽する液体窒素槽、2台のGM冷凍機、掻き取り羽根、羽根を駆動するモータから構成されている。モータの回転数を変更して掻き取り速度を調整する。

掻き取り速度を変更して生成装置の生成量を確認した。生成量は、スラッシュ窒素が生成される際の熱量を測定し、融解潜熱を用いて算出した。掻き取り速度を変更した場合におけるスラッシュ窒素の生成熱量と冷凍機冷凍能力の関係を図 2.2.4-3 に、算出した生成量を図 2.2.4-4 にそれぞれ示す。解析の結果図 2.2.4-3 に示すように、掻き取り速度 17 rpm の場合には冷凍機冷凍能力 160 W の内、125 W の冷熱量をスラッシュ窒素の生成熱量として利用出来ることが分かった。さらに、掻き取り速度 17 rpm の場合にはスラッシュ窒素の生成量が約 5g/s であることが分かった(図 2.2.4-4)。また、掻き取り速度を増加させると生成量が減少しており、掻き取り速度を用いて生成量の制御が可能であることを確認した。

スラッシュ窒素を用いて超電導ケーブルをより効率的に冷却するためには、ケーブル内における均一な二相流状態(分散二相流)の保持が重要であり、これを実現するためには μm オーダーの均一な粒子径を有する固体窒素を生成する必要がある。そこで、分散二相流状態の保持を可能とする最適な粒子径を定性的に理解するために数値シミュレーションを用いた評価研究を行った。シミュレーション結果を図 2.2.4-5 に示す。本結果は、配管内径 $\phi 14\text{ mm}$ 、配管長さ 300 mm の中に流速 0.2 m/s にて粒径 1.4 mm、100 μm 、50 μm の粒子をそれぞれ流し、搬送開始 1 秒後における粒子の分散の様子を表しており、図中の点は固体粒子を表現している。シミュレーションの結果より、100 μm 程度まで固体窒素粒子の微細化を行えば、現状の高温超電導ケーブルに用いられているサブクール窒素の流速 (0.2~0.3 m/s) でも管内において固液分離しない見通しを得た。

さらに、生成装置にて生成した固体粒子をテレセントリックレンズおよび高速カメラを用いて撮影し、投影面積を求めて粒子径を算出した。図 2.2.4-6 に掻き取り速度 100 rpm において観測された代表的な粒子の写真を示す。また、図 2.2.4-7、図 2.2.4-8 に掻き取り速度 17 rpm と 100 rpm での粒子径のヒストグラムをそれぞれ示す。本測定では 250 個以上の粒子の投影面積から粒子径を求めた。測定の結果より、掻き取り速度 100 rpm において中央値 119 μm の粒子が生成され、数値シミュレーションから得た目標をほぼ満足することが分かった。さらに、掻き取り速度 100 rpm の場合は、17 rpm に比べて粒径のピークが鋭くなっており、平均粒径が小さくなるとともに、より均一な粒径の生成がなされていることが分かった。

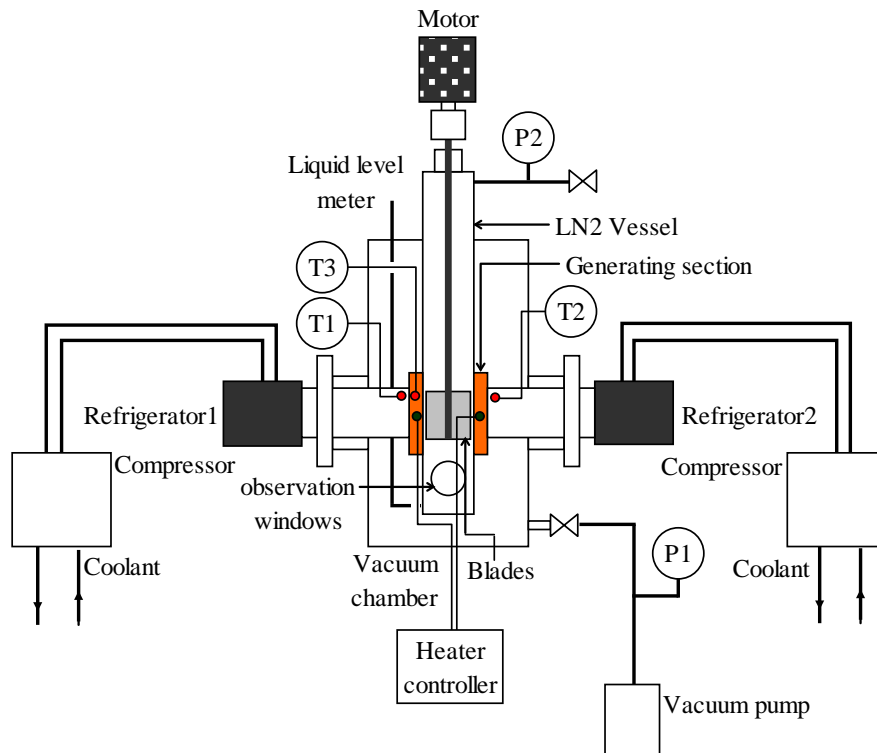


図 2.2.4-1 スラッシュ窒素生成装置の概略



図 2.2.4-2 スラッシュ窒素生成装置の写真

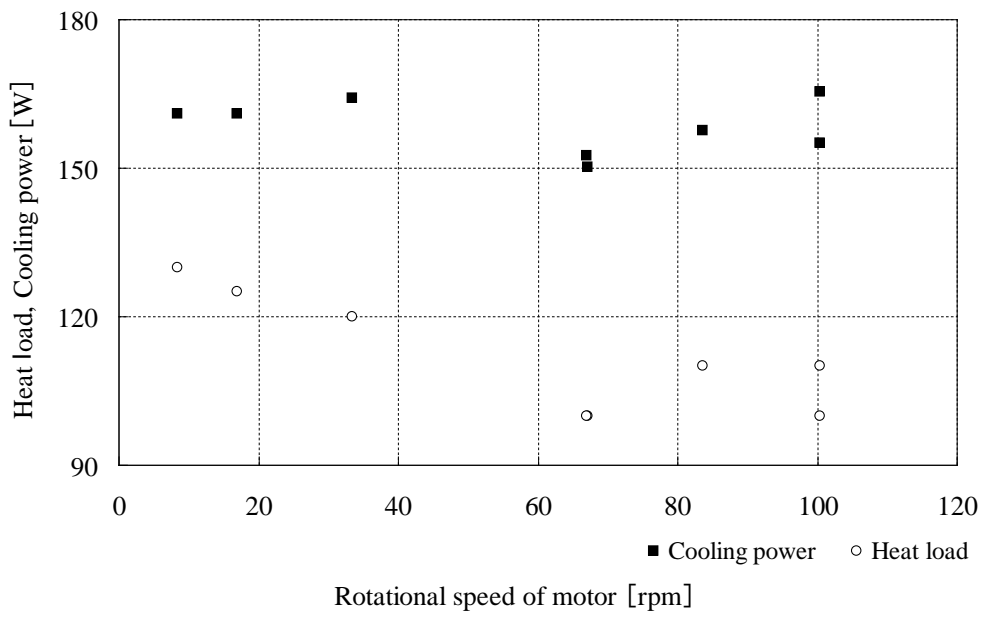


図 2.2.4-3 掻き取り速度と生成熱量

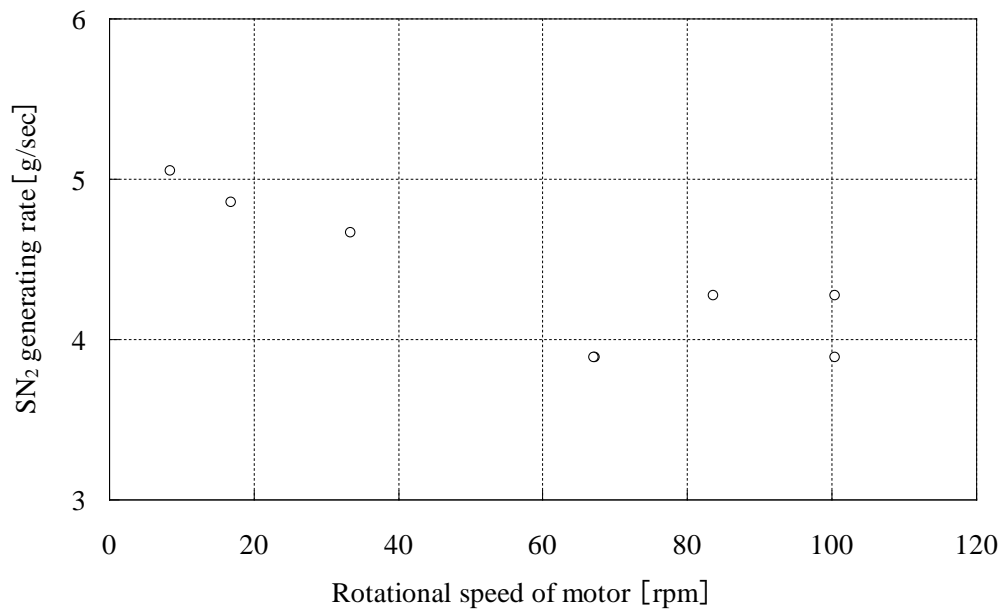


図 2.2.4-4 掻き取り速度と生成量

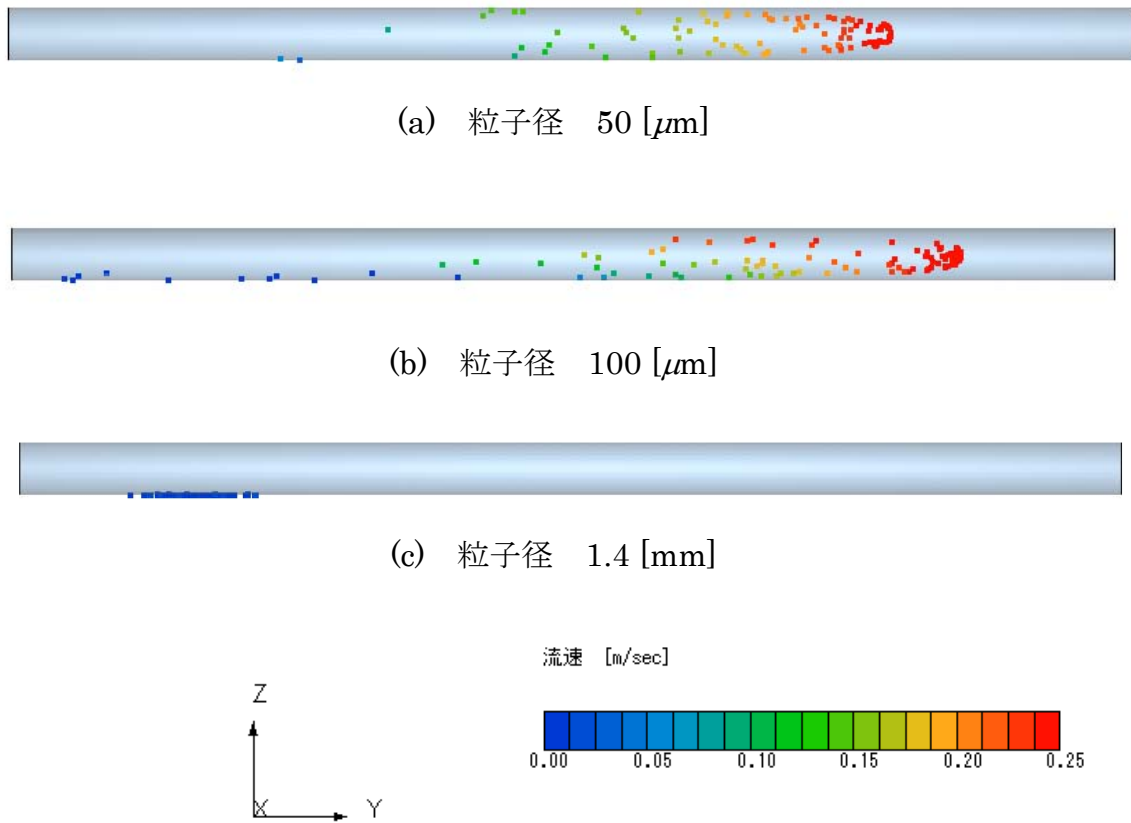


図 2.2.4-5 固体窒素粒子径変更による管内搬送数値シミュレーションの結果

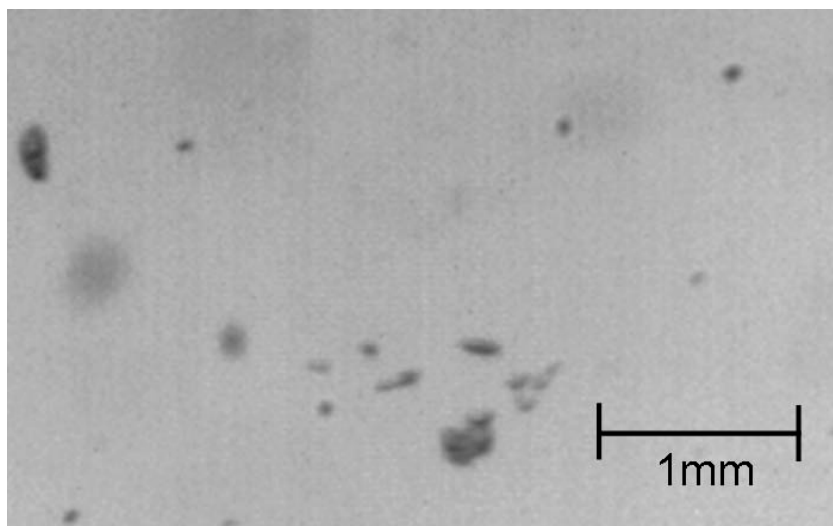


図 2.2.4-6 掻き取り速度 100 rpm における代表的な粒子

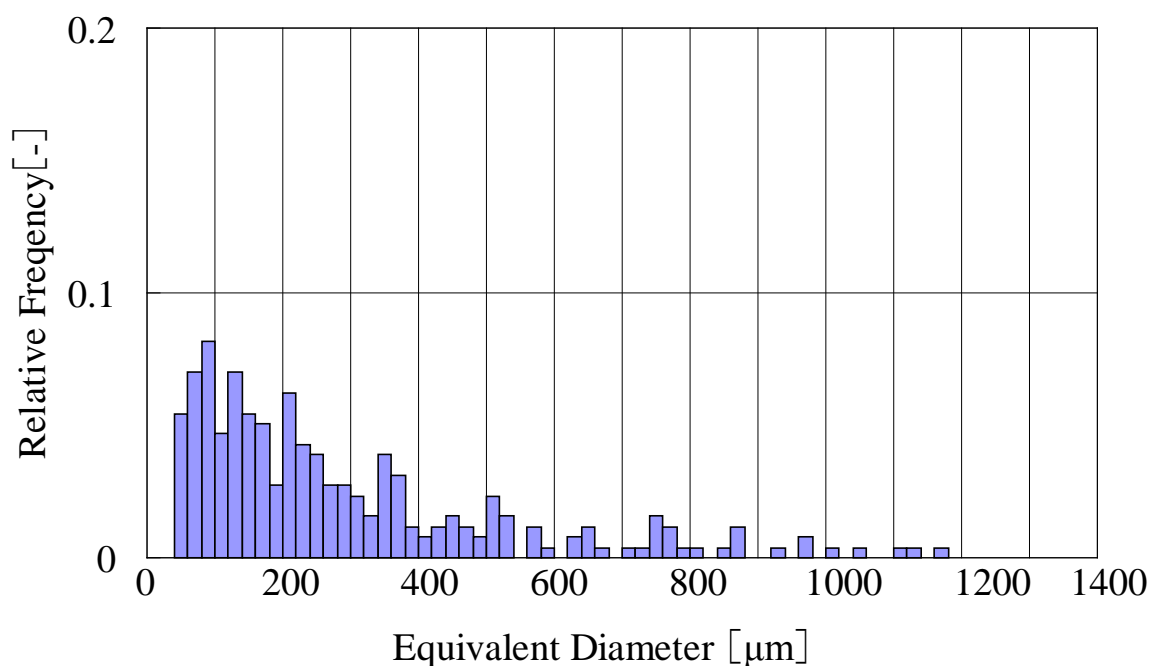


図 2.2.4-7 掻き取り速度 17 rpm における固体窒素粒子径のヒストグラム

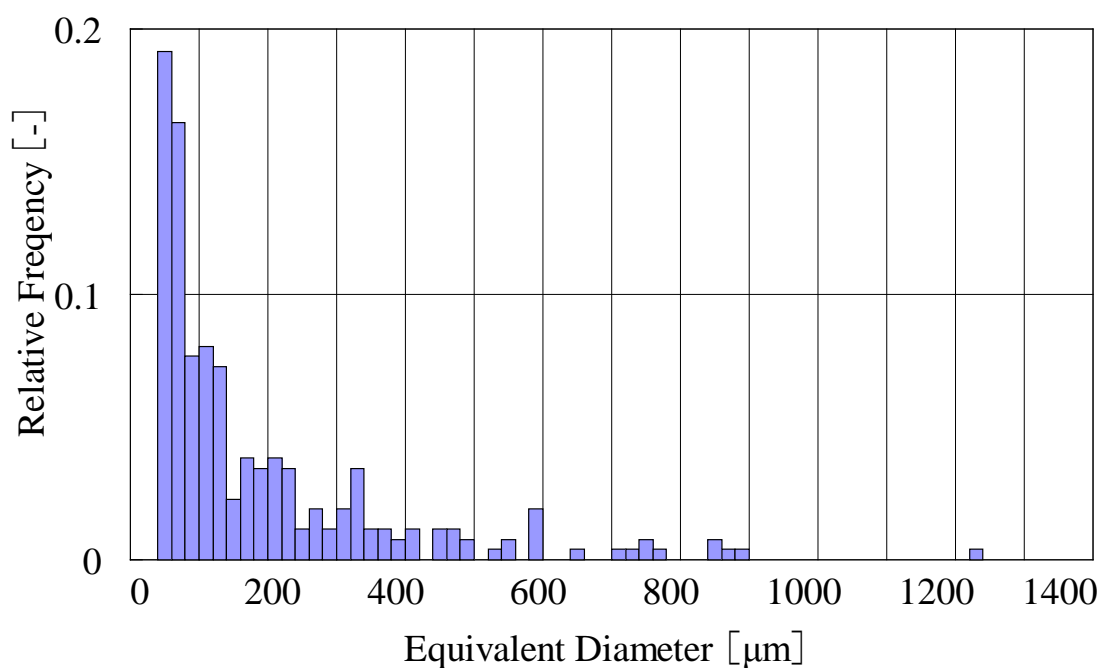


図 2.2.4-8 掻き取り速度 100 rpm における固体窒素粒子径のヒストグラム

(4) 連続生成方法の研究

スラッシュ窒素を実際の高温超電導ケーブル冷却システムに用いる場合、スラッシュ窒素を連続的に生成、搬送し、ケーブル冷却に利用するための運転研究による最適化が必要となる。そこで、スラッシュ窒素を連続的に生成する生成装置が必要となる。固体窒素の生成には低温ガス（ヘリウム等）を用いたバブリング法やエジェクタ法、真空引きで三重点に到達し固体を生成する **FREEZE THAW** 法がある

が、前者は窒素中に溶け込んだガスの分離に課題があり後者は連続的な生成ができない。そこで、2.2.4-2 (3)項に記した伝熱面に固体を生成しそれを剥離させて生成する固体窒素生成法を開発した。

スラッシュ窒素の冷却特性を評価するため、スラッシュ窒素生成装置を組み込んだ搬送装置を製作した。搬送装置の概略図を図 2.2.4-9 に、装置写真を図 2.2.4-10 にそれぞれ示す。本装置は、液体窒素を貯槽する液体窒素タンク、連続的にスラッシュ窒素を生成する生成装置、ヒータおよび温度計を設置したヒータユニットから構成した。ヒータユニットは全長約 4 m の二重管で、外管は真空断熱とした。温度計は図 2.2.4-9 に示す 6 箇所の内管中央部に取り付けた。内管の外周部には全長にパイプ式のヒータを設置した。液体窒素タンク内のサブクール状態の液体窒素を生成装置にヘリウムガスを用いて圧送し、生成装置でスラッシュ窒素を生成してスラッシュ窒素を常に混合させながらヒータユニットに送液し、ヒータユニットにて所定負荷を印加して流体の温度を測定した。

なお、今回は試験の都合上スラッシュ窒素の圧送にヘリウムガスを用いたが、ヘリウムガスは液体窒素中に溶解するため実用上使用できないことが明らかとなっている⁽⁴⁾。そこで、次年度以降は循環ポンプを使用してスラッシュ窒素を圧送することで試験を実施する予定である。

ヒータユニット出口での流量約 4.0 L/min、ヒータ負荷約 100 W での試験結果を図 2.2.4-11 に示す。本結果より、ヒータユニットの入口から距離 0.5 m までの流体の温度が、ほぼスラッシュ窒素の温度 63.1 K であり、さらに温度上昇がほとんどないことから、生成装置にてスラッシュ窒素を連続的に生成しながらヒータユニットに搬送することが出来た。

さらに、スラッシュ窒素の固体と液体の比重比を模擬した水とフェノール樹脂の混合流体を用いてコリオリ式質量流量計の流量測定精度の確認を行った。その結果、コリオリ式質量流量計は液体に固体が混合した場合でも十分に流量測定可能であることが分かった。

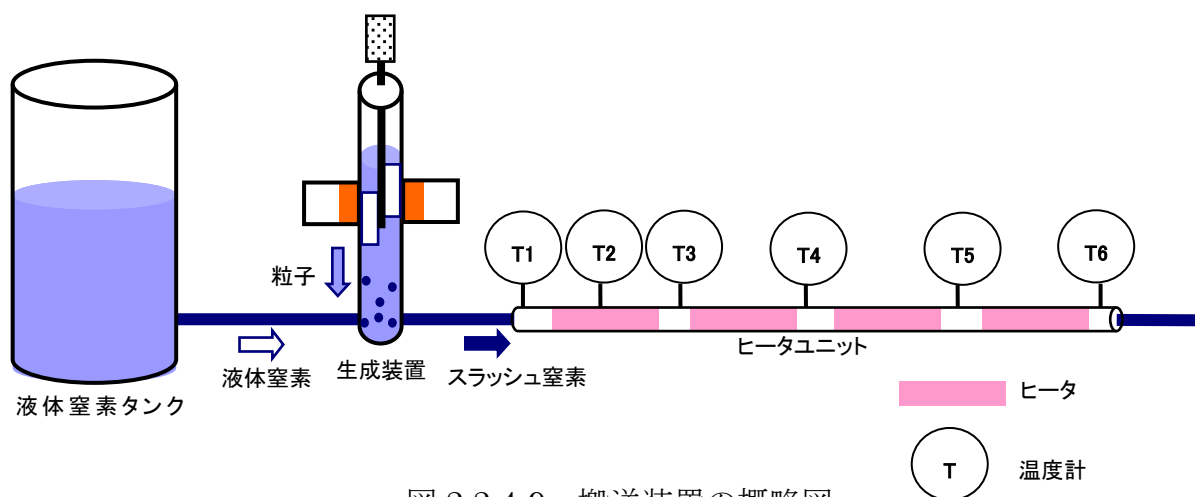


図 2.2.4-9 搬送装置の概略図

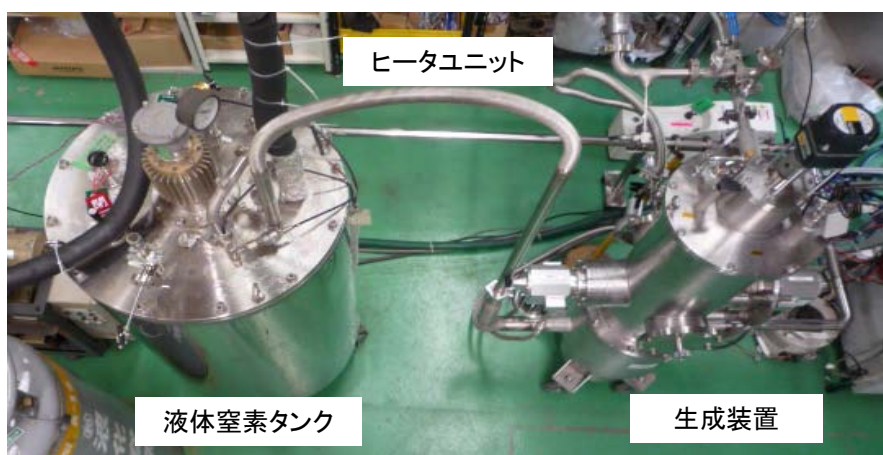


図 2.2.4-10 搬送装置の写真

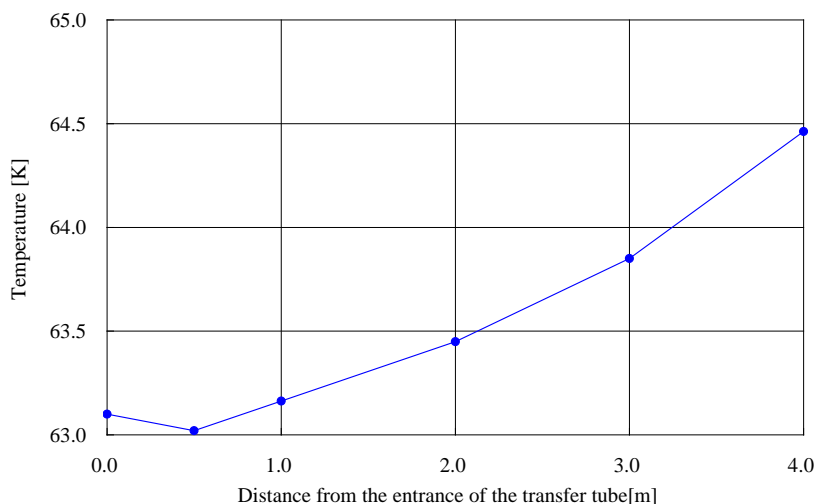


図 2.2.4-11 冷却評価試験結果

(5) 結論

高温超電導ケーブル用新冷媒としてのスラッシュ窒素の冷却特性を評価するため、システムの検討、固相率制御方法の研究、連続生成方法の研究を実施した。

システムの検討については、スラッシュ窒素の冷却システムでは微細な固体窒素を連続的に生成する生成装置、生成装置に付属する冷凍機、一定した固相率でケーブルにスラッシュ窒素を供給するための濃度計が必要となることが分かった。さらに、スラッシュ窒素の適応場所として、発電機端から昇圧トランスに至る部分およびケーブル端末などが想定されることが分かった。

固相率制御方法の研究では、開発したスラッシュ窒素生成装置にて固体の生成量および粒子径の制御が可能ながことが分かった。最大約 5 g/sec の固体の生成および、平均粒子径 100 μm 程度の粒子生成が出来る生成装置を開発した。

連続生成方法の研究では、スラッシュ窒素を連続的に生成しながら、スラッシュ窒素の温度 63.1 K で流体を搬送し、その特性の確認を行なった。

(6) 成果のまとめ

高温超電導ケーブルの新冷媒として、スラッシュ窒素の冷却特性を評価するため、システムの検討、固相率制御方法の研究、連続生成方法の研究を実施した。

スラッシュ窒素の冷却システムでは、ケーブル温度が液体窒素冷却よりも低く保たれることや交流損失やケーブル負荷率が低く抑えられることが期待できる。そこで、発電機端から昇圧トランスに至る部分およびケーブル端末などが想定される。スラッシュ窒素を高温超電導ケーブル冷却システムに用いる場合、スラッシュ窒素を連続的に生成、搬送し、ケーブル冷却に利用するための運転研究による最適化が必要となる。そこで、本研究ではスラッシュ窒素の生成装置を開発し、平均 100 μm 程度の粒子を連続的に生成、搬送出来ることを確認した。

スラッシュ窒素を連続的に生成しながら、スラッシュ窒素の温度 63.1 K で流体を搬送し、その特性の確認を行なった。

(7) 今後の計画と目標達成の見通し

H21 年までに製作した搬送試験装置を用いて循環試験装置の製作を行い、スラッシュ窒素の固相率を変化させてスラッシュ窒素と液体窒素との冷却特性を把握する。さらに、循環試験装置の冷却容量の拡大やモデルケースに基づく設計検討を実施する。

引用論文リスト

- (1) 池内他、“スラッシュ窒素の管内熱伝達特性に関する基礎研究”、低温工学 42 巻、4 号、2007
- (2) H.Yumura、et.al、SEI TECHNICAL REVIEW、No.64 (2007)
- (3) D.E.Daney、V.D.Arp、R.O.Voth、“HYDROGEN SLUSH PRODUCTION WITH A LARGE AUGER”、ADVANCES IN CRYOGENIC ENGINEERING、Vol.35、pp.1767-1776 (1990)
- (4) NEDO 委託事業、平成 16 年度委託業務成果報告書、「交流超電導電力機器基盤技術研究開発」超伝導送電ケーブル基盤技術の研究開発、ケーブル用長尺冷却技術の研究開発、長尺断熱管の冷却特性向上の研究、古河電気工業株式会社委託分、p21-p27 (2005 年 3 月)

2.2.4-3 超電導電力機器の冷却設備の調査研究 (ISTEC)

(1) 実施目的

超電導電力機器に用いる冷却設備の最新動向について調査を行い、超電導電力ケーブルなどに要求される冷却設備の仕様について検討する。また、冷却設備に要求される法的制度について調査および提言のための分析を行う。(要求される冷却設

備の仕様については、平成 23 年度以降に行うシステム検証用および普及・導入時の整備対象とする。)

(2) 冷却設備の最新動向

高温超電導機器の冷凍機技術は、現状技術では十分ではなく、超電導機器の開発に伴い、冷凍機技術の開発が望まれている。これまでの冷凍機として、GM 冷凍機、パルス管冷凍機、スターリング冷凍機、タービン冷凍機などがある^(1,2)。しかし、超電導機器に適用できる冷凍機は少なく、MRI 用冷凍機、実験機器用冷凍機などの特定機器に対して製造されてきた。超電導機器としては、ケーブル、変圧器、SMES、モータ、限流器、発電機などがあり、それらの必要な冷却能力と現在の冷凍機能力を図 2.2.4-12 に示す。超電導機器に必要な冷凍能力は図 2.2.4-12 に示す領域と考えられており、現在入手可能な冷凍機で得られる温度領域は 3 K~100 K まであり、超電導機器を冷却するには十分な温度領域を網羅している。1 kW 以下の冷凍能力で冷却可能な超電導機器には、GM 冷凍機、パルス管冷凍機、スターリング冷凍機があり、冷却方法は冷却対象物を直接冷却する、または冷媒を通して冷却する。一方で、10 kW 以上の冷凍機としてタービン式冷凍機があり、冷凍機側で冷却された冷媒 (He) を用いて、冷却対象物の冷媒 (LN₂) を冷却する方式である。しかし、図 2.2.4-12 で示すように、超電導機器に必要とされる冷却能力では、現状の冷凍機能力では不足または過大であり、超電導機器に必要な冷凍能力を持った冷凍機の開発が必要であり、コスト面、運用面、信頼面、システム面などを考慮しての開発が望まれる。1 kW 以下の冷凍方式での大容量化は難しく、開発には至っていないが、タービン式ブレイトン冷凍機では、2 kW 級の開発を行っており、今後の開発動向に注目される。

超電導機器を冷却するには、1 台で行う必要はなく、設置場所、コスト、運用、信頼性、効率、など様々なことを考慮して冷却システムとして設計する必要があり、1 kW 級以下の冷凍機では、メリットを維持し、効率を向上させた大容量化が望まれる。

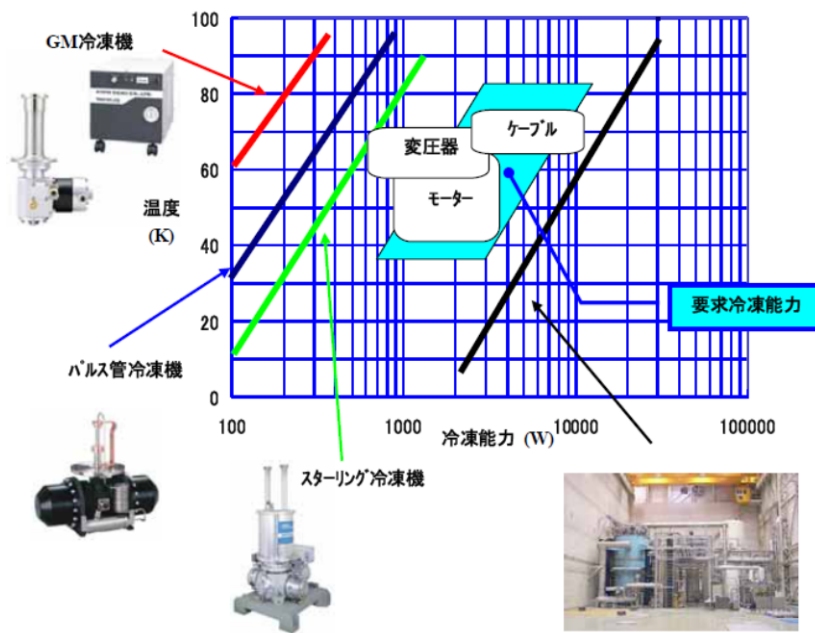


図 2.2.4-12 冷凍機の冷凍能力

(3) 超電導ケーブルの冷却設備の仕様

超電導電力ケーブルを冷却する方法には2つの方法がある。直接冷却と間接冷却である。前者は、冷却対象物（超電導ケーブル等）を冷却する冷媒（ LN_2 ）を直接冷凍機で冷却する。特徴として、①熱交換が1回で済み、熱効率が良い、②冷凍機の出力調整により、冷媒の温度制御に対する応答性が良い、③圧力損失が大きい、などがある。後者は、冷却対象物（超電導ケーブル等）を冷却する冷媒（ LN_2 ）を冷却する冷媒（ Ne ）を冷凍機側の冷媒で冷却する。特徴として、①圧力損失が小さい、長距離輸送に向いている、②熱交換が2回あり、熱効率が低い、③冷却に対する応答性は低い、④故障時、設備の切り離しが可能、などがある。

現在、既存の地中送電ケーブルで採用されている冷却方式は後者であり、強制風冷、強制水冷が主である。ここで水冷冷却について記述する。水冷方式は、冷却対象物（ケーブル）の近郊に水冷管路を布設し、空気およびトラフを通じて冷却対象物を冷却する。冷媒である水は、数百 m～数 km を循環している（途中で圧力損失により流速が低下するため、ブースターポンプを有する場合がある）。冷媒は冷凍機および冷却塔で冷却され、貯水槽（送水用）に蓄えられ、送水ポンプにて循環され、貯水層（帰路用）に戻り、再び冷凍機等で冷却される。この方法では、貯水槽を有するため、冷凍機が故障しても短時間の冷却装置運転が可能である。

過去の超電導ケーブル開発（Super-GM 500 m ケーブル、東電 - 住友 100 m ケーブル）における冷却方法について記す。冷却方式は、直接冷却であり、冷媒である液体窒素（ LN_2 ）を冷凍機にてサブクール状態にし、循環ポンプにて循環・冷却している。このとき使用されたのは、スターリング冷凍機（1 kW 級）である。Super-ACE 500 m ケーブルでは、スターリング冷凍機 6 台（1 kW 級）をケーブ

ル冷却用 4 台、終端部冷却用 2 台として使用した。

本プロジェクトでは、66 kV-5 kA 大電流・低損失ケーブル技術開発においては、ケーブル損失 2.1 W/m-相 (計 6.3 W/m) としている。室温からの熱侵入は 1 W/m と見込まれ、計 7.3 W/m と見積もられる。5 km 間隔で冷却設備を設置では、36.5 kW の冷却能力を有する設備が必要となる。1 km 間隔で 7.3 kW であり、500 m 間隔で 3.7 kW の冷却能力が必要となる。275 kV-3 kA 高電圧・低誘電損失ケーブル技術開発においては、ケーブル損失 0.8 W/m-相 (計 2.4 W/m) としている。室温から侵入熱は 1 W/m-相が見込まれ、計 5.4 W/m と見込まれる。1 km 間隔で冷却設備を設置する場合 5.4 kW、500 m で 2.7 kW の冷却能力が必要となる。長距離ほど高い冷却能力が必要である。もちろん、複数台で冷却能力を満足しても良く、コスト、設置箇所、運用面、信頼性、圧力損失、流量、流速などを考慮して設置することが必要である。

表 2.2.4-1 は、冷却装置の能力を比較したものである^③。スターリング冷凍機は超電導ケーブルとして実績がある。騒音・メンテナンス面で難があるが、他と比較して COP が高い。パルス管冷凍機は次世代として期待され、開発が進められている。メンテナンスの必要はほとんどないが、低容量・低 COP のため難がある。また、大型冷凍機であるブレイトン冷凍機の小型化の開発も行われているが、低 COP、また圧縮機のセパレーターのメンテナンス等、難がある。超電導機器においては、必要冷凍能力に応じた冷凍機を採用するが、COP・メンテナンス・装置サイズなどの技術開発向上が望まれる。

表 2.2.4-1 冷凍機の仕様と能力

項目	スターリング 冷凍機	スターリング パルス管	GM パルス管	ブレイトンサイクル	ブレイトンサイ クル(応用基盤)
冷凍容量 (kW)	1 kW (77 K) 低温での容量低下:大	0.3及び1kW(77 K) 低温での容量低下:大	1 kW/65 K 低温での容量低下:大	10 kW 以上 低温での容量低下:小	2.7 kW (70 K)
メンテナンス 間隔	6000~8000 時間 メンテ所要期間 1ヶ月	長寿命	長寿命	10000 時間以上 メンテ所要期間 1ヶ月	30,000 時間
COP (運転効率)	0.067@77 K (1 kW)	0.38@77 K(10 W)	0.36@77 K (850 W)	0.06@77 K	0.044@70 K
ケーブル 用実績	有	無	無	無	無
現状レベル	カタログ品	評価中	開発中	実用化	開発・ 評価中
騒音	80 dB/台	50~60 dB/台	50~60 dB/台	88 dB/台	
設置スペース (5~10kW)	9 m ³ /kW (*1)	4 m ³ /kW	2 m ³ /kW	8 m ³ /kW	
課題	騒音・保守対策 大容量化が必要	信頼性、熱交換器 大容量化	信頼性、圧縮機、 大容量化	騒音、少容量化、 保守対策	運転効率、 信頼性 保守対策

(4) 法的規制に関して

超電導機器を運用するにあたり関連規制として2つ挙げられる。(i)電気事業法と(ii)高圧ガス保安法である。電気事業法では、開発途中である超電導電力設備に関する規制はない。そのため、実証段階では、電気事業法内の類する規制に則り運用することとなる。また液体窒素による冷却システムを使用するため、高圧ガス保安法に則ることとなる。高圧ガス保安法では、「電気事業法第二条第一項第十六号の電気工作物（政令で定めるものに限る）内における高圧ガス」は適用しないと規定しているが、準拠する必要はある。電気事業法で超電導電力機器に関する明確な規制がないため、実系統導入・運用するためには、位置づけを明確にする必要がある。そのためには、超電導電力機器のデータ・情報などを多く集め、有識者による法整備が必要となる。

電気事業法や高圧ガス保安法の他に、下記のような規制がある。規制には、国、都道府県、市町村による規制があり、騒音・振動規制法や建築基準法などは、設置地域により様々で様ではない。道路法や道路交通法は、機器や機材のサイズや重量など運搬に関するの制約を受ける。安全面では、労働安全衛生法、消防法などの規制を受ける。超電導機器に付属する設備を含め、的確な対応・許可・届出が必要となる。

- ・ 電気事業法（施行規則含む）
- ・ 電力設備に関する技術基準を定める省令 EMF（1mの高さ 3 kV/m以下）
- ・ 高圧ガス保安法 冷凍保安規則（第1種製造設備）冷凍則 一般則
- ・ 消防法
- ・ 労働安全衛生法
- ・ 騒音、振動規制法 設置・居住地域で決まる
- ・ 建築基準法
- ・ 道路交通法
- ・ 道路法
- ・ 環境保健基準（EMF）100 μ T
地上1mにて地中ケーブル：2.7 μ T 架空線：1.5～9.2 μ T

(5) まとめ

冷凍機の能力を確認し、超電導機器に必要な冷凍能力を確認した。また超電導ケーブルを布設するための必要な冷凍能力を検討した。法規則に関しては、対応が必要と思われる関連法規則を調査した。導入・布設時は、該当する法規則を管理する関係箇所と協議・確認・許可・申請を的確に行う必要がある。

2.2.4-4 成果のまとめ

- ・定常通電時および事故時の伝熱特性に対するシミュレーションを行い、超電導電力ケーブル構造設計の最適化にフィードバックした。
- ・超電導モデルケーブルを用いて過電流通電試験を行い、超電導モデルケーブル内の温度上昇と電流分布について数値シミュレーションの結果と比較検討を行った。解析結果は実験結果とよく一致しており、開発した計算機シミュレータの妥当性を確認できた。
- ・スラッシュ窒素の冷却特性を評価するため、システムの検討、固相率制御方法の研究、連続生成方法の研究を実施した。
- ・システムの検討については、スラッシュ窒素の冷却システムでは微細な固体窒素を連続的に生成する生成装置、生成装置に付属する冷凍機、貯留するスラッシュ窒素を攪拌する攪拌機を開発した。
- ・スラッシュ窒素の適応場所として、低電圧大電流の発電機端から昇圧トランスに至る部分およびケーブル端末などが想定されることが分かった。
- ・スラッシュ窒素生成装置にて固体の生成量および粒子径の制御が可能となり、約 5 g/s の固体の生成および、平均粒子径 100 μm 程度の粒子生成が出来る生成装置を開発した。
- ・連続生成方法の研究では、スラッシュ窒素を連続的に生成しながら、スラッシュ窒素の温度 63.1 K で流体を搬送し、その特性の確認を行なった。
- ・冷凍機の能力を確認し、超電導機器に必要な冷凍能力を確認し、超電導電力ケーブルに必要な冷凍能力を確認した。
- ・法規制について、現状把握を実施し、的確な対応・許可・届出が必要であることを確認した。

2.2.4-5 今後の計画と目標達成の見通し

定常通電時および事故時の伝熱特性検討について、66 kV 大電流超電導ケーブルシステム検証においては、短絡電流通過時の温度上昇解析・評価および短絡電流通過時の三心ケーブルに働く電磁力解析・評価を行い、275 kV 高電圧超電導ケーブルシステム検証においては、気中終端接続部の超電導／常伝導接続の電流転流の挙動解析および気中終端接続部の熱解析を行っていくことで、最終目標であるシステム検証結果に合致する汎用性のあるシミュレーション技術の確立を目指す。

スラッシュ窒素の研究においては、平成 21 年までに製作した搬送試験装置を用いて循環試験装置の製作を行い、スラッシュ窒素の固相率を変化させてスラッシュ窒素と液体窒素との冷却特性を把握する。さらに、循環試験装置の冷却容量の拡大やモデルケースに基づく設計検討を実施する。

引用論文リスト

- (1) ISTEK 超電導 Web21 2008 年 6 号 「冷凍機技術開発の進展」 P.3-P14
- (2) ISTEK 超電導 Web21 2009 年 6 号 「冷凍・冷凍技術の現状」 P.3-P13
- (3) NEDO 委託事業、平成 21 年度中間評価分科会、「高温超電導ケーブル実証プロジェクト事業原簿」、冷却システムの設計検討 p116-p125 (2009 年 11 月)