

高温超電導電力ケーブルの低損失化

先端技術総合研究所 渡辺和夫¹・日高輝²・明石一弥³・飯島康裕⁴
直江邦浩⁵
新規事業推進センター 菊竹亮⁶・永田雅克⁷・舘野文則⁸・大保雅載⁹
エネルギー EPC 事業部 吉田学¹⁰

Reducing Transmission Loss of the High Temperature Superconducting Power Cable

K. Watanabe, H. Hidaka, K. Akashi, Y. Iijima, K. Naoe, R. Kikutake, M. Nagata
H. Tateno, M. Daibo, and M. Yoshida

超電導ケーブルは、高電流密度、低交流損失の特長とともに、省エネルギー、CO₂削減効果、外部への磁気遮へい等、環境面でのメリットも有し、大容量（大電流）送電コンパクト型電力ケーブルとしての適用が期待されている。当社はNEDOプロジェクト「イットリウム系超電導電力機器技術開発」の最終年度（2012年度）に世界最大級の臨界電流 500 A/cm-w（at 77 K, s.f.）以上を有するイットリウム系線材（IBAD-PLD線材）を初めて 66 kV 5 kA_{rms}級ケーブルに適用し、目標の低損失化を達成した。今後さらなる大電流化が期待されているが、この際、超電導導体・シールドの損失以外にもケーブル構造各部の交流損失も顕在化してくることが懸念される。

すなわち、大電流超電導ケーブルに特有の導体・シールドの多重コイル構造に起因する内部軸方向磁界によって発生するフォーマ、断熱管等における渦電流損失等である。ケーブル全体の低損失化をはかるためには、各部の損失低減が必須となる。本稿では、当社におけるケーブル各部の損失低減の方策について報告する。あわせて、楕円関数を用いた解析例も紹介する。

High temperature superconducting (HTS) cables are expected to be adapted to large power transmission compact type cables. HTS cables have not only high current density and low AC loss but also some environmental merits such as energy saving, CO₂ gas reduction and magnetic shielding. In general, HTS tapes of the HTS conductor and shield layer of the HTS cables are wound in spiral form, and become a multi-layer winding with large current. As a result, since the HTS conductor and shield layer are a multiple coil structure with different winding pitches, the internal magnetic flux exists in the longitudinal direction. Therefore, in the AC cable, the eddy current loss is generated in the former. In addition, since the eddy current is induced in circumferential direction in the cryostat pipe in the case of the single-core cable, the joule loss is generated. It is considered that the magnitude of the magnetic flux (loss) depends on the winding direction, winding pitch of the HTS tape and the magnitude of the current, and comes actualized together with the large current. Therefore, in order to reduce the loss of the entire cable, each loss reduction for the former, the HTS conductor, the HTS shield and the cryostat pipe is necessary. In this paper, we report on these low-loss measures of Fujikura Ltd.

1. ま え が き

超電導とはある温度以下で物質の電気抵抗がゼロとなる現象である。1911年にオランダのオネスによって超電導現象が発見されて以来さまざまな物質で確認され、1986年以降になると液体窒素中（77 K = -196 °C）でも超電導特性を示す酸化物超電導体が発見された。これら酸化物超電導体は従来の超電導体に比べ超電導を示す温度（=臨界温度）が飛躍的に高いため高温超電導体と呼ばれ、従来の超電導体は低温超電導体または金属超電導

1 エネルギー技術研究部 主席研究員（博士（工学））
2 ファイバーレーザー研究部
3 エネルギー技術研究部 主席研究員
4 エネルギー技術研究部 次長（博士（工学））
5 エネルギー技術研究部長
6 超電導事業推進室 製造部 グループ長
7 超電導事業推進室 製造部長
8 超電導事業推進室 品質保証部長
9 超電導事業推進室 副室長
10 エンジニアリング部 次長

体と呼ばれている。高温超電導体の中でもイットリウム系超電導体は磁場中でも高い性能を示し、広範囲に適用可能な高温超電導線材として期待され、当社では 1991 年に当社独自の IBAD 法の開発¹⁾ に成功して以来、精力的にイットリウム系超電導線の開発を行ってきた。

この高性能線材開発と並行して機器への応用として、当社ではマグネット応用に向けて積極的にコイル開発も行ってきた²⁾。さらに、高臨界電流 (I_c) 線材が最も効果を発揮できる応用例として、大電流・低損失超電導ケーブルへの適用が強く望まれ、NEDO プロジェクト「イットリウム系超電導電力機器技術開発」の最終年度 (2012 年度) に世界最大級の臨界電流 500 A/cm-w (at 77 K, s. f.) 以上を有するイットリウム系線材 (IBAD-PLD 線材) が初めて 66 kV 5 kA_{rms} 級ケーブルに適用された。超電導ケーブルは、高電流密度、低交流損失の特長とともに、省エネルギー、CO₂ 削減効果、外部への磁気遮へい等、環境面でのメリットも有していることから、大容量 (大電流) 送電コンパクト型電力ケーブルとして期待されている。直流ケーブルの場合は電気抵抗がゼロのため原理的に電力損失は生じないが、交流の場合、超電導内部の磁気ヒステリシスなどによる交流損失等が発生する。イットリウム系線材は単位断面積当たりの臨界電流密度が非常に高く、低交流損失を実現できる可能性も有していることからこの適用にいたったもので、期待される低交流損失が検証された³⁾。

超電導ケーブルの最大の特長は低電圧大電流化 (大容量化) と低損失化である。今後、さらなる大電流化にともない超電導体・シールドの損失以外にもケーブル構造各部の交流損失も顕在化してくることが懸念される。すなわち、大電流超電導ケーブルに特有の導体・シールドの多重コイル構造に起因する内部軸方向磁界により発生する各部の渦電流損失等である。ケーブル全体の低損失化をはかるためには、各部の損失低減が必須となる。

本稿では、当社におけるケーブル各部の損失低減策について報告する。あわせて、解析では第一種、第二種完全楕円積分および等角写像がどのように活用されるかも紹介する。

2. 超電導電力ケーブルの構造

超電導電力ケーブルの基本構造を図 1 に示す。三相交流用ケーブルで三心 (相) 一括型と単心型の構造がある。単心型では三相分の 3 本のケーブルが必要となる。両者とも超電導体は、フォーム上に多数本の超電導テープ状線材をスパイラル状に巻きつけて形成される。超電導線材の一例として当社のイットリウム系超電導線材の構造と外観を図 2 に示す。フォームは、銅より線からなり、機械的剛性と事故時の大電流を超電導体と分流するため用いられる。電気絶縁体は絶縁紙に液体窒素を含浸させた複合絶縁体となっている。電気絶縁体の外側には多数本の超電導線材をスパイラル状に巻きつけた超

電導シールド層が形成され、導体電流と逆方向のほぼ同じ大きさの電流が誘起され、外部への磁気遮へい効果がある。その外側に銅シールド層として銅テープや銅条が巻かれ事故時の大電流を分流する役目がある。最外層に保護層が設けられケーブルコアとなる。三心一括型では三本のコアはより合わされ、その外部に断熱管が設けられる。コアと断熱管のギャップは冷却用液体窒素の流路となる。断熱管は通常ステンレス (SUS) コルゲート 2 重管で真空断熱構造となっている。断熱管の外周には防食層が施される。

3. 超電導ケーブルの内部軸方向磁界

ここで、図 1 (c) のケーブルコアの外部周方向磁界と内部軸方向磁界を考える。もし、導体、シールド層の超電導線材が直線縦添え (よりピッチが無限度) の場合には、シールド誘導電流は導体電流と同じ大きさの逆向き電流となり、シールド層の外部周方向磁界はもちろんゼロとなり内部軸方向磁界もゼロであるが、スパイラル巻の場合には、その両方の磁界を同時にゼロにすることは

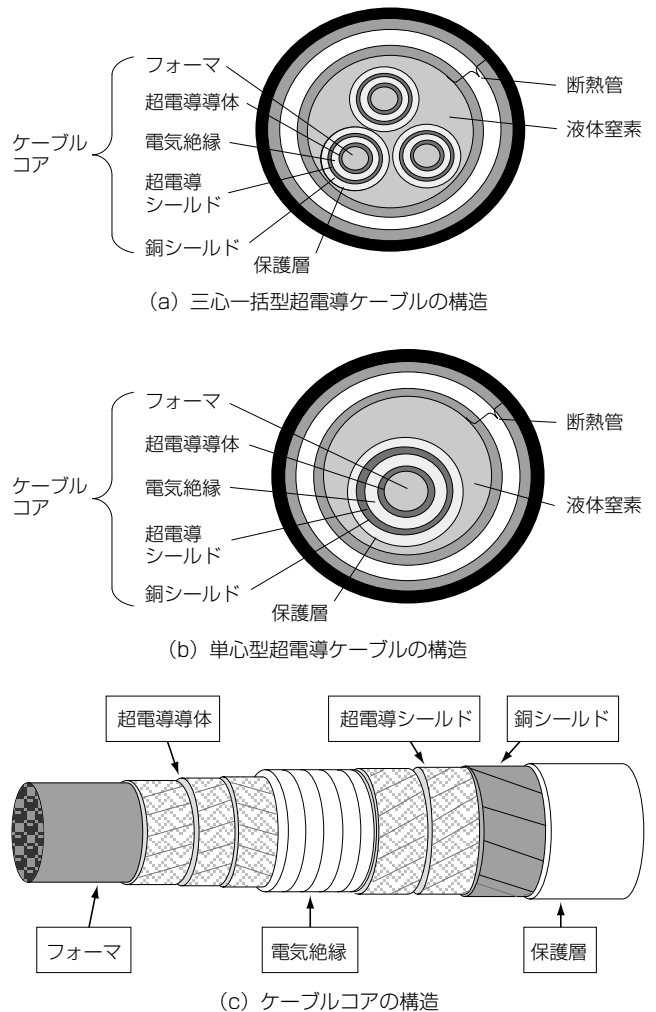


図 1 超電導電力ケーブルの構造
Fig. 1. Structure of superconducting power cable.

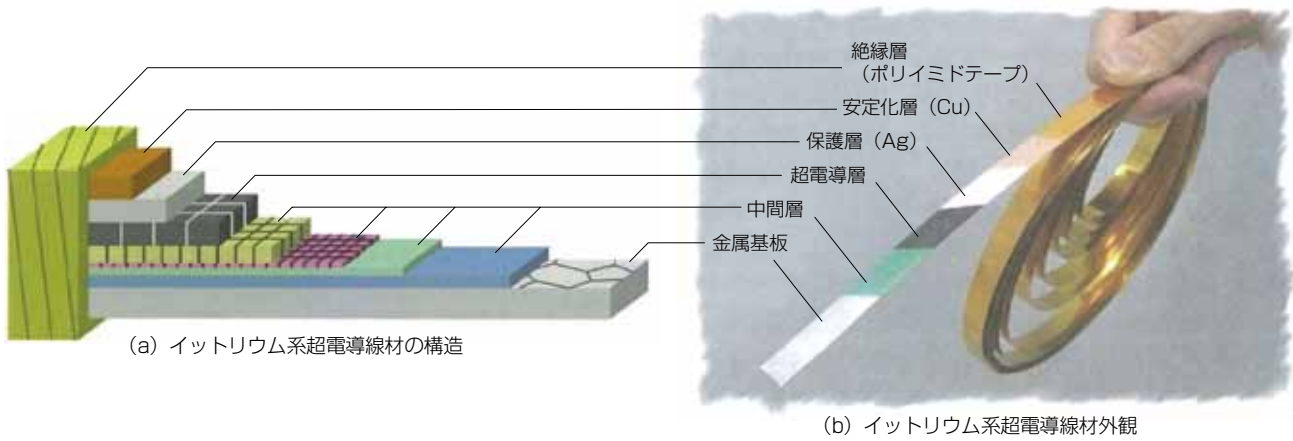


図2 イットリウム系超電導テープ線材の構造と外観
Fig. 2. Schematic of the structure and photograph of yttrium-based coated conductors.

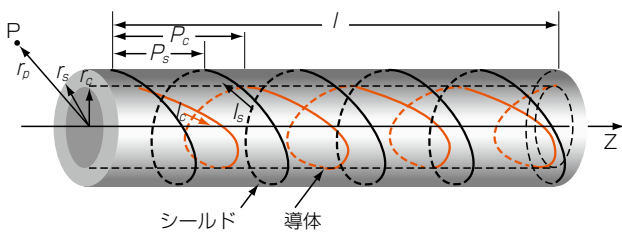


図3 導体1層+シールド1層の構造
Fig. 3. An example of structure of a conductor layer and a shield layer.

できない。このことを以下に示す。簡単のために、図3に示すように導体1層+シールド1層構造とし、導体とシールドのより方向を同じとして考察する。シールドに誘導される電流は、導体電流による鎖交磁束数とシールド電流による鎖交磁束数のトータルがゼロとなるように流れる。鎖交磁束数は、周方向の外部磁束数と内部軸方向磁束数の和となる。(1)式の第一、二項はそれぞれ導体電流による軸方向鎖交磁束数、外部周方向鎖交磁束数を示し、第三、四項は同様にシールド電流による各磁束数を示す。

$$\mu_0 \frac{l}{P_s} \frac{I_c}{P_c} \pi r_c^2 + \frac{\mu_0 I_c l}{2\pi} \ln \frac{r_p}{r_s} - \mu_0 \frac{l}{P_s} \frac{I_s}{P_s} \pi r_s^2 - \frac{\mu_0 I_s l}{2\pi} \ln \frac{r_p}{r_s} = 0 \dots (1)$$

$$\therefore I_c \left(\frac{\pi r_c^2}{P_s P_c} + \frac{1}{2\pi} \ln \frac{r_p}{r_s} \right) = I_s \left(\frac{\pi r_s^2}{P_s^2} + \frac{1}{2\pi} \ln \frac{r_p}{r_s} \right) \dots (2)$$

- ここに、
 P_c : 導体よりピッチ P_s : シールドのよりピッチ
 r_c : 導体半径 r_s : シールド半径
 r_p : 導体中心から任意の点Pまでの距離
 I_c : 導体電流 I_s : シールドに誘起される電流
 l : 今考えているケーブル長

ここで、導体中心から任意の点Pまでの距離 r_p は、単相平行往復電流回路と三相正三角形配置平衡電流回路では相

間距離にとればよい。

(2)式にて次の関係が成り立てば、 $I_c = I_s = I$ となりシールド層の外部磁界がゼロとなる。

$$\frac{r_c^2}{P_s P_c} = \frac{r_s^2}{P_s^2} \dots (3)$$

$$\therefore P_s = \left(\frac{r_s}{r_c} \right)^2 P_c \dots (4)$$

$r_s > r_c$ であるから、 $P_s > P_c$

したがって、導体電流とシールド電流による内部軸方向磁界 H_c と H_s はそれぞれ、次のようになり異なる値となる。

$$H_c = \frac{I}{P_c} > H_s = \frac{I}{P_s} \dots (5)$$

すなわち、シールドの外部磁界はゼロに逃げてきたとしても、同時に内部の軸方向磁界はゼロにキャンセルできないことになる。ただし、シールド層の鎖交磁束数としてはゼロとなる。

(注) (2)式によれば $I_s > I_c$ なわち、シールドに誘起される電流が導体電流より大きくなる解が存在することに留意されたい。

4. 超電導ケーブル各部の発生損失とその低減策

一般に、超電導電力ケーブルは大電流化とともに必要線材本数が増え、多層のスパイラル状に巻かれた(よられた)導体とシールド層からなる。その各層のよりピッチは隣接層間の鎖交磁束数(周方向磁束数と軸方向磁束数の総和)がゼロとなるように均流化設計される⁴⁾。したがって、各層ピッチの異なる多重コイル構造となる。この多重コイル構造ではシールド層の外部周方向磁界と内部軸方向磁界は前章で述べたように同時にゼロにすることはできないと考えられる。その結果、シールド外部磁

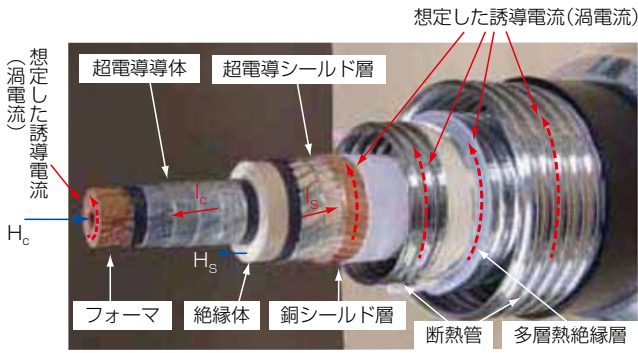


図4 単心型超電導ケーブルの軸方向磁界による各部の発生損失

Fig. 4. AC loss generation part by internal longitudinal magnetic flux of single-core HTS cable.

界は完全遮へいされても、内部軸方向磁界が存在するため、図4に示すようにケーブル内各所で誘導電流が流れジュール損失が発生することが予想される。銅より線フォームとSUS断熱管には内部軸方向鎖交磁束により周方向に渦電流が流れる。また、銅シールド層でも銅テープラップ巻の場合には同様に周方向に渦電流が流れ損失が発生する。しかも、渦電流損失は鎖交磁束数すなわち磁界（導体・シールド電流）の自乗に比例するため、大電流化とともに、これまで無視されてきた各部損失が顕在化してくることが懸念される。

図5に超電導ケーブルの大電流化に伴う低損失化の方策を示す。また、三心一括型と単心型ケーブルでの損失発生部位を表1に示す。三心一括型構造ではSUS断熱管内部の軸方向磁界は三相平衡電流でキャンセルされトータルでゼロとなるためSUS断熱管の渦電流損失は発生しない。超電導ケーブルは66 kV以上の高電圧化にともない絶縁体厚さも増え、かつ大電流化にともない導体・シールドの多層巻構造となることから、ケーブルコアも太くなる。そのため、高電圧化、大電流化にともない単心型構造が現実的な構造になると考えられる。

本稿では図5に示した低損失化方策の内、太枠(*)で囲った当社の方策について報告する。

(1) フォーマ損失低減

前述のように銅より線フォーム内に発生する渦電流損失の低減策として、各より線に絶縁皮膜を施すことが報告されている⁵⁾。この素線絶縁細線導体に替わって酸化第二銅(CuO)半導電皮膜の適用がフォームの渦電流損失低減にも有効であることを理論的に考察した。この皮膜の導体への適用は当社が常電導の大サイズ低損失導体用に開発したもので極低温ケーブル用導体にも適用実績がある。接続作業が簡素化できる等の利点がある。

(2) 超電導導体・シールド損失低減

超電導多層導体・シールド層の交流大電流輸送時の損失低減には二つの方法が報告されている。一つは電流負荷率 (I_t/I_c : 臨界電流 I_c に対する交流輸送電流の振幅 I_t の比率) を低減することにより低損失化がはかれるもので、こ

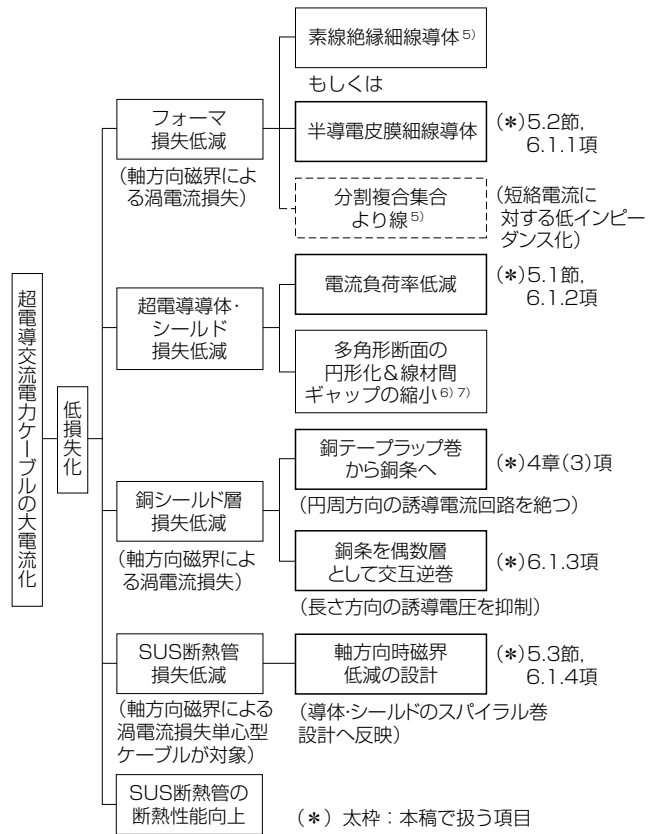


図5 超電導交流電力ケーブルの大電流化に伴う低損失化の方策

Fig. 5. The low-loss measures of HTS AC power cable with large current.

表1 三心一括と単心型超電導ケーブルの交流損失発生部位

Table 1. AC loss generation part of the three-core cable and single-core cable.

損失発生部位	三心一括型	単心型
フォーム	○	○
超電導導体&シールド	○	○
銅シールド	○	○
SUS断熱管	—	○

○: 損失発生

れには線材の臨界電流値 I_c を大きく向上させる必要がある。もう一つは雨宮氏らによって報告^{6),7)}されている導体断面のテープ線材の多角形配置を円形化し線材間ギャップを狭めることである。実際の導体は図6(a)に示すようにある幅のテープ線材を多数枚スパイラルに巻きつけるので導体断面のテープ線材は多角形状となる。この多角形状に起因して発生するテープ線材面に対する垂直磁界成分と線材間ギャップで磁力線が乱れ波打つことにより発生する垂直磁界成分が、交流損失を支配しているとされている。このテープ線材面に対する垂直磁界低減の観点から、線材幅を小さく線材枚数を多くして導体断面を真円に近づけること、線材間ギャップを狭くし周方向磁界の波打ちを抑えることが損失低減に有効であるとされている^{6),7)}。

本稿では前者の電流負荷率低減による方法について扱

う。第6章の実証試験では実際に高臨界電流線材を適用した低負荷率ケーブルを試作して損失低減を検証した。

(3) 銅シールド層損失低減

銅テープラップ巻構造の場合には周方向の渦電流が発生するので、銅条巻にして周方向電流ループを絶つことにする。たとえば、疎巻とする、銅条1本のみに絶縁テープ巻きとする、あるいは絶縁ひもを挿入するなどがあげられる。こうすると今度は銅シールド層はコイルとして働くため長さ方向に誘起電圧が発生する。その低減策として無誘導巻を考察した。

(4) SUS断熱管損失低減

内部軸方向磁界により断熱管に渦電流損が発生することを理論的、実験的に示し、導体・シールド層のよりピッチ設計にこの損失も考慮し最適設計をはかった。

5. 超電導ケーブル各部の低損失化

5.1 超電導体の低損失化

超電導体の交流損失の二つの低減策の内、本稿では高Icに伴う電流負荷率 I_t/I_c (I_t : 交流輸送電流の振幅)の低減による方策を扱う。

簡単のために単層導体の交流損失特性についてみる。図6(a)の実際の多数本のスパイラルに巻かれた線材からなる導体の交流損失は、次の二つの極限の間にあると考えられている^{6,7)}。すなわち、下限は図6(b)の線材の超電導層と同じ厚さの超電導円筒のヒステリシス損失(モノブロックモデルの場合⁹⁾)であり、上限は図6(c)の単独テープ線材のNorrisのストリップの式⁸⁾で与えられるヒステリシス損失を線材本数倍とする値である。

まず、前者のモノブロックモデルの場合である。臨界電流 I_c の超電導円筒が振幅 I_t の交流電流を輸送している場合、円筒単位長さあたりの電流変化1周期あたりの通電損失は次式で与えられる⁹⁾。 I_c と I_t/I_c の関数となる。

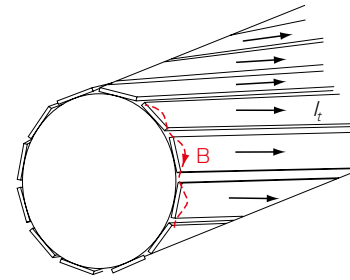
$$Q_{MB} = \frac{I_c^2 \mu_0}{2\pi h^2} \left\{ \left(2 - \frac{I_t}{I_c} h \right) \frac{I_t}{I_c} h + 2 \left(1 - \frac{I_t}{I_c} h \right) \ln \left(1 - \frac{I_t}{I_c} h \right) \right\} \dots (6)$$

$$h = \frac{D_1^2 - D_2^2}{D_1^2}$$

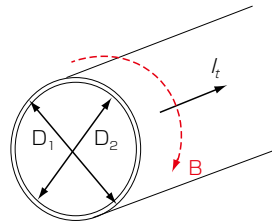
ここで、 D_1 、 D_2 は円筒の外径(直径)と内径(直径)である。この(6)式を I_t と I_t/I_c の関数に書き換えるため、右辺中の自然対数を無限級数展開を行い整理すると(7)式となる。

$$Q_{MB} = \frac{I_t^2 \mu_0}{\pi} \left(\frac{I_t}{I_c} h \right) \left\{ \frac{1}{2 \cdot 3} + \frac{1}{3 \cdot 4} \left(\frac{I_t}{I_c} h \right) + \frac{1}{4 \cdot 5} \left(\frac{I_t}{I_c} h \right)^2 + \frac{1}{5 \cdot 6} \left(\frac{I_t}{I_c} h \right)^3 + \dots \right. \\ \left. + \frac{1}{(r+1)(r+2) \cdot 6} \left(\frac{I_t}{I_c} h \right)^{r-1} + \dots \right\} \dots (7)$$

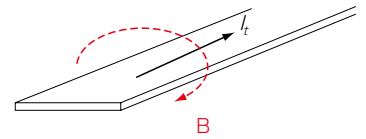
次に、後者の線材1本のNorrisのストリップの式で与えられるヒステリシス損失を線材本数倍とする場合である。線材1本の自己磁界によるヒステリシス損失は単位長さあたり次のように与えられる⁸⁾。



(a) 超電導体断面^{6) 7)}



(b) 超電導円筒 (モノブロックモデル)⁹⁾



(c) 単独テープ線材の本数倍 (Norrisのストリップの式の対象)⁸⁾

図6 超電導体断面と超電導円筒(モノブロック)モデル及び単独テープ線材

Fig. 6. Cross-sections of HTS cable conductor, the superconductor cylinder model and an isolated superconductor strip model.

$$Q_{L.N-s} = \frac{I_c^2 \mu_0}{\pi} \left\{ \left(1 - \frac{I_t}{I_c} \right) \ln \left(1 - \frac{I_t}{I_c} \right) + \left(1 + \frac{I_t}{I_c} \right) \ln \left(1 + \frac{I_t}{I_c} \right) - \left(\frac{I_t}{I_c} \right)^2 \right\} \dots (8)$$

この式も同様に I_t と I_t/I_c の関数に書き換えるため、右辺中の自然対数を無限級数展開を行い整理すると(9)式となる。この式を線材の本数倍したものが超電導体の交流損失となる。

$$Q_{L.N-s} = \frac{I_t^2 \mu_0}{\pi} \left(\frac{I_t}{I_c} \right)^2 \left\{ \frac{1}{2 \cdot 3} + \frac{1}{3 \cdot 5} \left(\frac{I_t}{I_c} \right)^2 + \frac{1}{4 \cdot 7} \left(\frac{I_t}{I_c} \right)^4 + \frac{1}{5 \cdot 9} \left(\frac{I_t}{I_c} \right)^6 + \dots \right. \\ \left. + \frac{1}{(r+1)(2r+1)} \left(\frac{I_t}{I_c} \right)^{2(r-1)} + \dots \right\} \dots (9)$$

この(7)(9)式とも、いま輸送電流 I_t を一定として、 I_c を向上させると電流負荷率 I_t/I_c が低下し、損失も低減されることを示している。この様子を図7に示す。縦軸の規格化損失は電流負荷率が1の場合のNorrisのストリップの式の線材本数倍とした損失値に対する比率を示す。(a)のNorrisのストリップの式では負荷率が1から低下するとともに損失も大きく減少し、負荷率0.5付近から傾斜(減少の割合)は緩やかになる。一方、(b)のモノブロックモデルの場合、リチウム系線材では超電導層が数 μm と薄いため(6)式の h が 10^{-4} オーダーと非常に小さくなり、(7)式の損失値も非常に小さくなる。実際の導体の交流損失は上記の二つの極限の間にあり、Norrisの

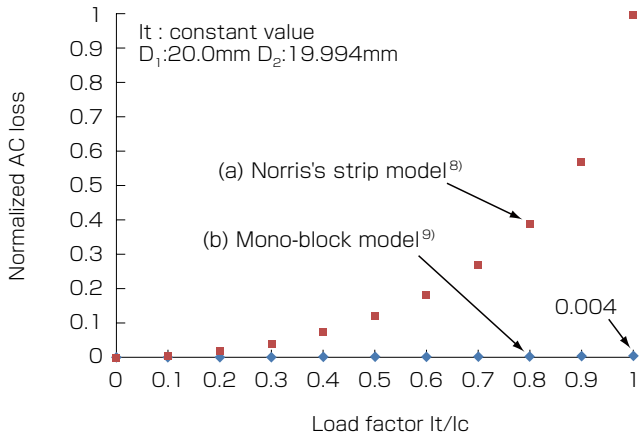


図7 輸送電流一定下での電流負荷率 (It/Ic) の低減による交流損失の減少 (Norrisのストリップの式とモノブロックモデルの式)
Fig. 7. Decrease in AC loss by the reduction of current load factor under the transport current uniformity. (Norris's strip model and mono-block model)

ストリップの式の線材本数倍とした損失の方に近いとされている^{6),7)}.

本稿では第6章で述べるように5 kA_{rms} (振幅 $I_t = \sqrt{2} \times 5 \text{ kA}$) の輸送電流に対し高 I_c 線材の適用により負荷率 50 % at 77 K の導体設計とした。

5.2 フォーマの低損失化¹⁰⁾

本節では、フォーマの各素線の絶縁皮膜に代わって抵抗皮膜を施した場合の渦電流損失と皮膜抵抗率の関係について考察を行い、半導電皮膜でも絶縁皮膜と同等の低減効果が期待できることを示す。この半導電金属皮膜としては、極低温ケーブル用低損失導体に適用した実績¹¹⁾のある酸化第二銅 (CuO) 皮膜があり、接続作業が簡素化できる等の利点がある。また、この皮膜は常電導の大サイズ低損失導体にもこれまで広く使用されてきている¹²⁾。

5.2.1 円柱導体フォーマと絶縁皮膜より線フォーマの渦電流損失

まず、基本となる無垢の円柱導体の渦電流損失を計算する。図8で単位長あたりの損失を考える。フォーマにかかる軸方向磁界による導体内の磁束の表皮効果による浸透深さを δ とすると、

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho_c}{\mu_0\omega}} = 3.2 [\text{mm}] \dots\dots\dots (10)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \mu_0 &= 4\pi \times 10^{-7} [\text{H/m}] \\ \rho_c &= 2 \times 10^{-9} [\Omega \cdot \text{m}] \text{ at } 77\text{K} \\ \omega &= 2\pi f \\ f &= 50 [\text{Hz}] \end{aligned}$$

渦電流は円周状に流れ、磁束の表皮効果により内部ほど渦電流密度は小さくなる。絶縁被覆されたより線フォーマでは素線径は磁束の浸透深さより小さいため図10に示すように各より線内全面にわたって円周状に流れる。図9で斜線部の円環領域の周方向の渦電流は円環の自己

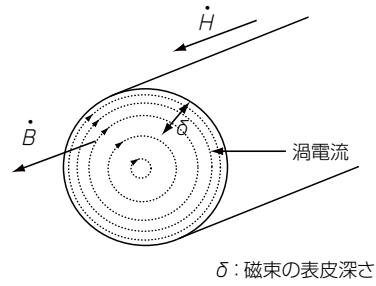


図8 円柱導体フォーマの場合の渦電流分布
Fig. 8. Eddy current distribution for circular cylinder former.

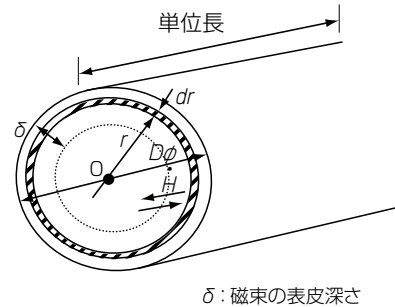


図9 円柱導体の渦電流損失計算モデル
Fig. 9. Calculation model of Eddy current loss for circular cylinder former.

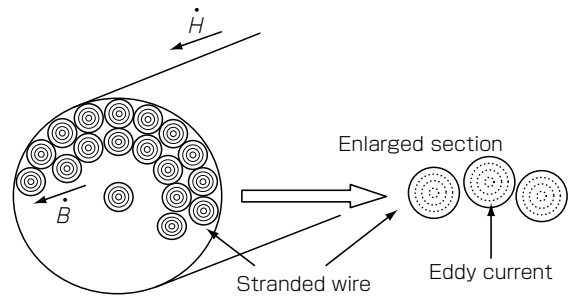


図10 絶縁皮膜より線フォーマの渦電流分布
Fig. 10. Eddy current distribution for former with insulated wires.

インピーダンスの抵抗分で支配されるとすると、抵抗 dR とジュール損 dW は、円環領域に鎖交する磁束を Φ として $dW = (d\Phi/dt)^2/dR \dots\dots\dots (11)$

$$\text{ここで、 } \Phi = \mu_0 H \pi \left\{ r^2 - \left(\frac{D}{2} - \delta \right)^2 \right\}, \quad dR = \rho_c \frac{2\pi r}{dr}$$

となるので、総渦電流損失は渦電流による起磁力を無視すれば、次式となる。

$$\begin{aligned} W &= \int dW = \frac{\pi(\omega\mu_0 H)^2}{2\rho_c} \int_{\frac{D}{2}-\delta}^{\frac{D}{2}} \frac{\left\{ r^2 - \left(\frac{D}{2} - \delta \right)^2 \right\}^2}{r} dr \\ &= \frac{\pi(\omega\mu_0 H)^2 G}{2\rho_c} \dots\dots\dots (12) \end{aligned}$$

$$G = \frac{D^4}{64} - \left(\frac{D}{2} - \delta\right)^2 \frac{D^2}{4} + \left(\frac{D}{2} - \delta\right)^4 \left(\frac{3}{4} + \ln \frac{D}{D - 2\delta}\right)$$

次に、絶縁皮膜より線フォーマのより線 1 本当たりの渦電流損失は (12) 式で $D \rightarrow d$ (より線 1 本の直径), $\delta = D/2$ に置き換えればよい。より線の総本数を n 本とすれば、総渦電流損失 W_1 は次式となる。

$$W_1 = \frac{n\pi(\omega\mu_0 H)^2 d^4}{8\rho_c 16} \dots\dots\dots (13)$$

$$n = \sum_{k=1}^N n_k \quad n_k: \text{第}k\text{層のより線本数}$$

5. 2. 2 抵抗皮膜より線フォーマの渦電流損失

ここでも、磁束の表皮効果がでてくるが、これを無視した場合は損失を大きく見積り、設計上は安全側となること、また扱いが簡単になるため本章では表皮効果を考慮しないで検討を進める。絶縁皮膜ではなく抵抗皮膜(半導電が主)のより線フォーマであるため、図 11 に示すように中心の 1 本のより線内の渦電流と各層の円周方向より線間を流れる電流とに分けて考える。中心 1 本 ($k=1$ 層とする) のより線内渦電流損失 w_1 は前章から、

$$w_1 = \frac{\pi(\omega\mu_0 H)^2 d^4}{8\rho_c 16} \dots\dots\dots (14)$$

各層の円周方向電流は、電流通路が隣接より線の接触部で制限され、かつ、抵抗皮膜による抵抗増加があるので、円柱導体の均一電流に対する体積抵抗率 ρ_c に代わって等価体積抵抗率 ρ_{ek} を考える。各層 (第 k 層) の渦電流損失 w_k は次式となる

$$w_k = \frac{\pi(\omega\mu_0 H)^2}{2\rho_{ek}} \int_{r_{k-1}}^{r_k} r^3 dr \dots\dots\dots (15)$$

$$= \frac{\pi(\omega\mu_0 H)^2}{8\rho_{ek}} (r_k^4 - r_{k-1}^4)$$

ただし、 r_k : 第 k 層の外半径, r_{k-1} : 第 $k-1$ 層の外半径, $k = 2 \sim N$ 層

(14) (15) 式より、フォーマ全体の総渦電流損失 W_2 は、

$$W_2 = w_1 + \sum_{k=2}^N w_k$$

$$= \frac{\pi(\omega\mu_0 H)^2}{8} \left\{ \frac{r_1^4}{\rho_c} + \sum_{k=2}^N \frac{r_k^4 - r_{k-1}^4}{\rho_{ek}} \right\} \dots\dots\dots (16)$$

ここで、素線径が各層すべて d のとき、すなわち、

$$r_k - r_{k-1} = d \quad r_k = \frac{2k-1}{2}d \quad r_{k-1} = \frac{2k-3}{2}d \text{ のとき、}$$

$$W_2 = \frac{\pi(\omega\mu_0 H)^2}{8} \times \frac{d^4}{16} \left\{ \frac{1}{\rho_c} + \sum_{k=2}^N \frac{(2k-1)^4 - (2k-3)^4}{\rho_{ek}} \right\} \dots\dots\dots (17)$$

次に、この (16) (17) 式で最も重要なパラメータである各層の等価体積抵抗率 ρ_{ek} を求める。

<等価体積抵抗率 ρ_{ek} >

図 12, 13 において、抵抗皮膜より線の等価抵抗 Re を次のように考える

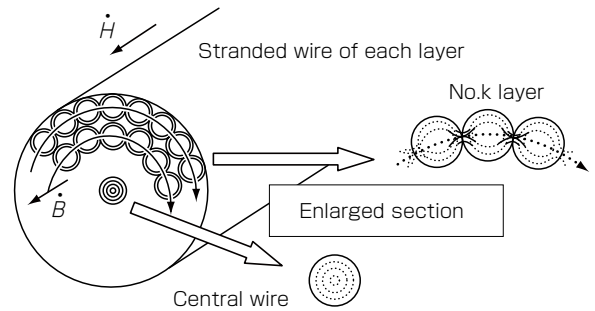


図 11 抵抗皮膜より線フォーマの渦電流分布
Fig. 11. Eddy current distribution for former with resistive film wires.

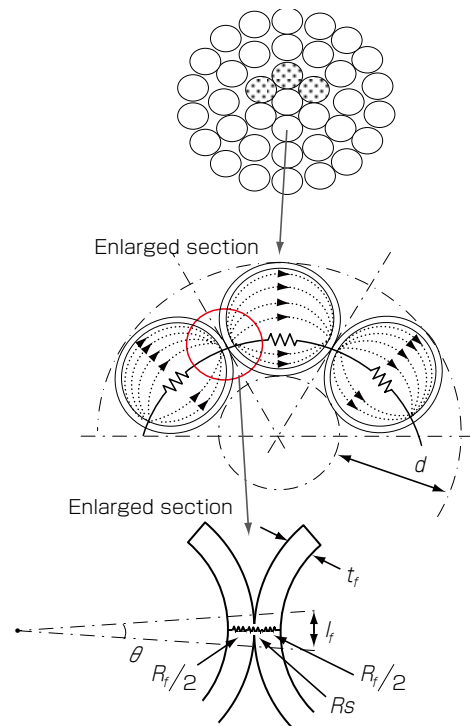


図 12 抵抗皮膜より線の導体円周方向の抵抗
Fig. 12. Circumferential resistance of resistive film wire.

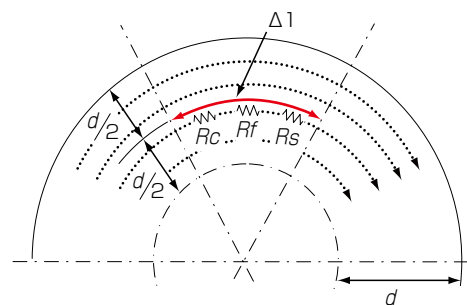


図 13 抵抗皮膜より線の等価抵抗 Re の考え方
Fig. 13. Equivalent resistance for resistive film wire.

$$R_e = R_c + R_f + R_s = \rho_e \frac{\Delta l}{d \times 1} \cong \rho_e \frac{d}{d \times 1} = \rho_e \dots\dots (18)$$

$$\because \Delta l \cong d \quad R_f = \rho_f \frac{2t_f}{l_f \times 1}$$

ここに、

R_c : より線金属の集中抵抗

R_f : より線接触部抵抗皮膜の単位長当たりの抵抗

R_s : 抵抗皮膜同士の接触抵抗 (今回は考慮せず)

ρ_c : より線金属の体積抵抗率

ρ_f : 抵抗皮膜の体積抵抗率

ρ_e : 抵抗皮膜より線の等価体積抵抗率

d : より線 1 本の直径

t_f : 抵抗皮膜の厚さ

l_f : より線の接触長 (円周方向) ($\frac{d}{2} \times \frac{\theta\pi}{180}$)

θ : 接触長の中心角

ϕ_k : 隣接より線の接触角度 (図 14)

等価体積抵抗率 ρ_e と ρ_c , ρ_f の関係式を求める。 R_s は一律に決められないこと、および、 $R_s=0$ とした場合の方が渦電流損を真値より大きく見積もり、設計上は安全側であることから今回は無視した。 R_c (より線金属の集中抵抗) については、以下のように楕円関数 (第 1 種完全楕円積分) を用いた等角写像により求める。これは、図 15 (a) のモデルの下で理論的に正確に導出される。その導出過程を図 15 (a)~(e) に示す。同一層内の隣接より線の接触角度 (図 15 (a) の ϕ_k) は、各層によって異なる。今、中心層を $k=1$ 層として、 k 層の接触角度を ϕ_k とすると図 14 に示すようになる。また、接触部の中心角度を θ とする。複素平面上での写像過程の概要を以下に述べる。図 14 \Rightarrow 図 15 (a): 対象とするより線と隣接より線との接触部をクローズアップし、原配置とする。(a) \Rightarrow (b): 正規化した電極の計算上の原座標を設定する。(b) \Rightarrow (c): 円形領域を次の写像関数を用いて複素上半平面領域に写像する。

$$z = \frac{1-w}{1+w}i \quad x = \tan \frac{\theta}{2} \dots\dots (19)$$

(c) \Rightarrow (d): z 面から Z 平面への写像には、次の一次関数を使用する。

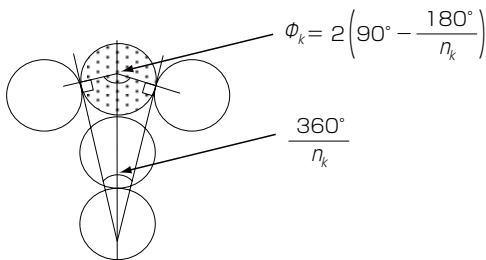


図 14 隣接するより線の接触位置
Fig. 14. Contact position of a strand wire with adjacent wires.

$$Z = \frac{az + \beta}{\gamma z + \delta} \dots\dots (20)$$

ここに、 a, β, γ, δ : 定数

a, β, γ, δ は、 z 面と Z 面との対応によって係数を定め、 A 点の座標 $1/k_1^2$ を求める。点 A, P, Q, R の x 座標をそれぞれ a, p, q, r とすると

$$k_1^2 = \frac{(r-q)(p-a)}{(a-q)(p-r)} = \frac{p(r-q)}{q(r-p)} \\ = \frac{\tan \frac{\theta}{2} \left\{ \tan \frac{\phi_k}{2} - \tan \frac{\phi_k - \theta}{2} \right\}}{\tan \frac{\phi_k}{2} \left\{ \tan \frac{\theta}{2} + \tan \frac{\phi_k - \theta}{2} \right\}} \dots (21)$$

(d) \Rightarrow (e): Legendre-Jacobi の第一種楕円積分 (22) 式を用いて Z 平面の上半平面領域を長方形領域に写像し、かつ、両電極が対辺になるようにする。この二辺の長さは (23) (24) 式の第一種完全楕円積分で与えられる。

$$W = \int_0^z \frac{dZ}{\sqrt{1-Z^2} \sqrt{1-k_1^2 Z^2}} \dots\dots (22)$$

$$K(k_1) = \int_0^1 \frac{dZ}{\sqrt{1-Z^2} \sqrt{1-k_1^2 Z^2}} \dots\dots (23)$$

$$K'(k_1) = \int_0^1 \frac{dZ}{\sqrt{1-Z^2} \sqrt{1-k_1'^2 Z^2}} \dots\dots (24)$$

$$k_1^2 + k_1'^2 = 1 \quad k_1: \text{母数}, k_1': \text{補母数} \dots\dots (25)$$

以上から、より線の集中抵抗 R_c は次式から求まる。

$$R_c = \rho_c \frac{K'(k_1)}{K(k_1)} \dots\dots (26)$$

したがって、等価体積抵抗率 ρ_e は (18) と (26) 式より次式となり、 ρ_e と ρ_c, ρ_f の関係式を表している。

$$\rho_{ek} = \rho_c \frac{K'(k_{1k})}{K(k_{1k})} + \frac{2t_f}{l_f} \rho_f$$

$$k_{1k}^2 = \frac{\tan \frac{\theta}{2} \left\{ \tan \frac{\phi_k}{2} - \tan \frac{\phi_k - \theta}{2} \right\}}{\tan \frac{\phi_k}{2} \left\{ \tan \frac{\theta}{2} + \tan \frac{\phi_k - \theta}{2} \right\}} \dots (27)$$

ここで、 ϕ_k は図 14 に示す隣接より線の接触角度で、

$$\phi_k = 2 \left(90^\circ - \frac{180^\circ}{n_k} \right)$$

$$l_f = \frac{d\theta\pi}{360}$$

以上より、フォーマ全体の総渦電流損失 W_2 は、 (17) と (27) 式から求まる。

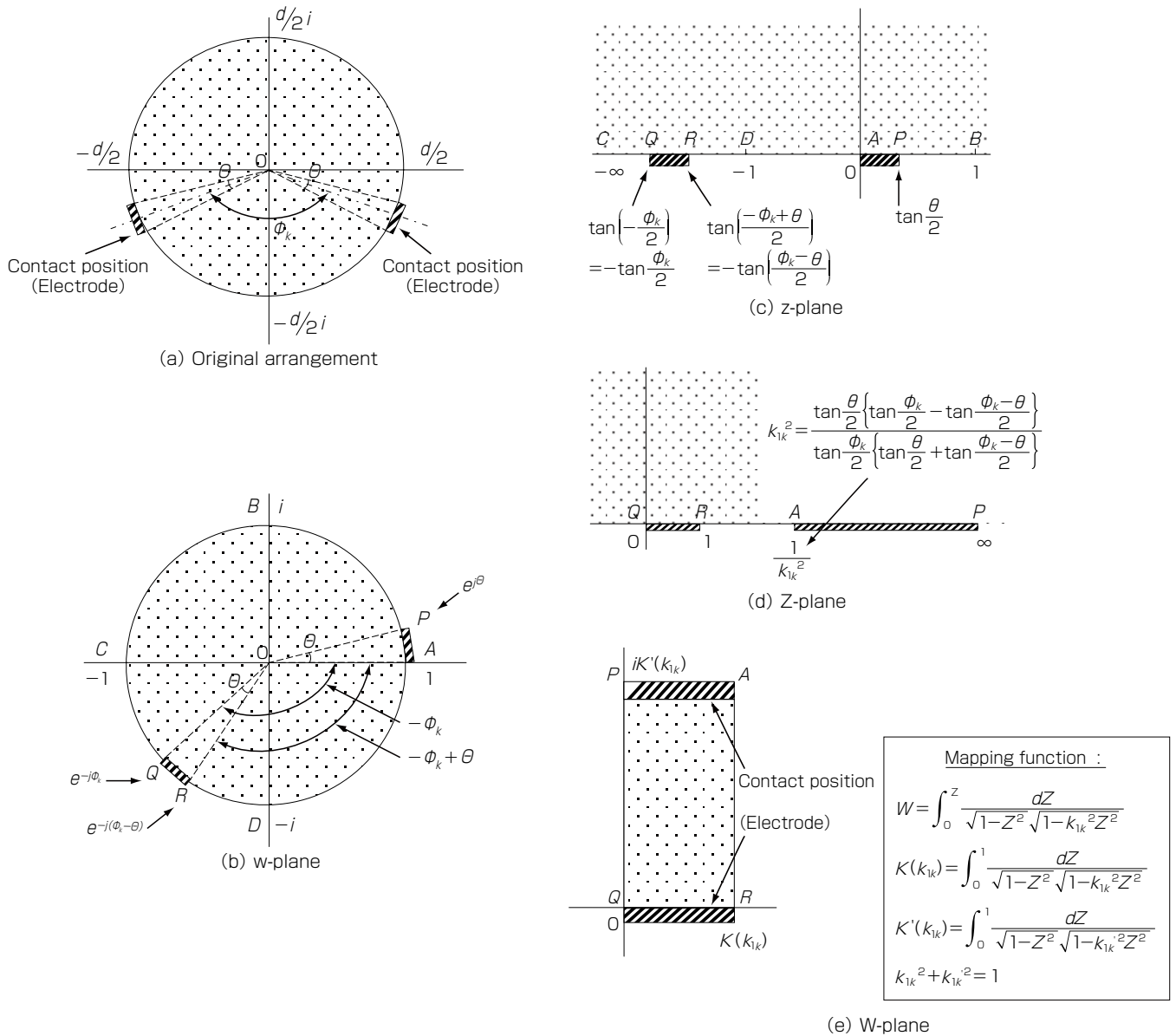


図15 より線の集中抵抗Rcの導出過程
 Fig. 15. Calculation process of concentrated resistance Rc of a strand wire.

5. 2. 3 抵抗皮膜素線と素線絶縁フォーマの渦電流損失の比較

以上より、最終的に求めようとする「抵抗皮膜素線フォーマの素線絶縁フォーマに対する渦電流損失の比率」は、(13)、(17) 及び (27) 式からまとめると、

$$\frac{W_2(\text{抵抗皮膜素線})}{W_1(\text{素線絶縁})} = \frac{1}{n} \left\{ 1 + \sum_{k=2}^N \frac{(2k-1)^4 - (2k-3)^4}{\frac{K'(k_{1k})}{K(k_{1k})} + \frac{2t_f}{l_f} \cdot \frac{\rho_f}{\rho_c}} \right\} \dots\dots (28)$$

ここで、 $K(k_{1k})$, $K'(k_{1k})$ は第一種完全楕円積分で (23)、(24) 式から求まる。 k_{1k} , k'_{1k} はそれぞれ母数、補母数で (25) 式の関係があり、 k_{1k}^2 は (27) 式より得られる。ただし、 $W_2 > W_1$ の範囲で意味をもつ。

一方、従来の皮膜を施さないより線からなるフォーマの場合の渦電流損失 (W_0) における絶縁被覆を施した場合の渦電流損失 (W_1) に対する比率 (W_0 / W_1) は、(28) 式において、

$t_f = 0$ あるいは、 $\rho_f = 0$ とおいて、次式となる

$$\frac{W_0(\text{裸素線})}{W_1(\text{素線絶縁})} = \frac{1}{n} \left\{ 1 + \sum_{k=2}^N \frac{(2k-1)^4 - (2k-3)^4}{\frac{K'(k_{1k})}{K(k_{1k})}} \right\} \dots (29)$$

次に試算例として下記の計算条件で (28) 式から W_2 (抵抗皮膜) / W_1 (絶縁皮膜) を試算してみる。第一種完全楕円積分の数値計算はインターネットの高精度計算サイトで容易に求まり、それ以外はすべて手計算で求まる。

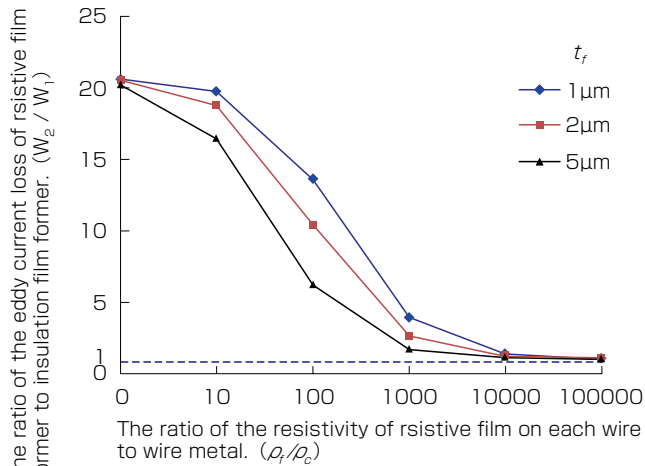
渦電流損失と皮膜抵抗率の関係を図 16 に示す。

<計算条件>

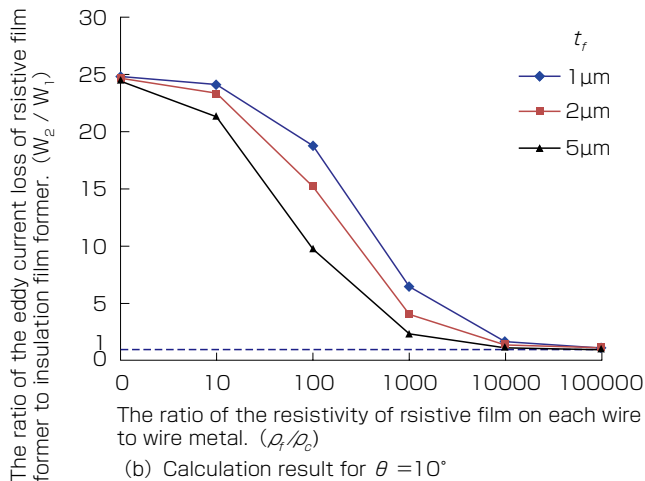
フォーマ外径 : $D=19$ mm, より線一本の直径 : $d=2.8$ mm, 総より線本数 (n) : 37 本, $n_1 = 1$ 本, $n_2 = 6$ 本, $n_3 = 12$ 本, $n_4 = 18$ 本, t_f : 抵抗皮膜の厚さ (1 ~ 5 μm), θ : 接触長の中心角 (5 ~ 10°)

図 16 の縦軸は, 絶縁皮膜より線の渦電流損失 (W_1) に対する比率で表し, 横軸は, 皮膜抵抗率 (ρ_f) のより線金属抵抗率 (ρ_c) に対する比率で表している. (a) と (b) のグラフより, ρ_f / ρ_c が 10^4 以上の範囲では W_2 / W_1 の比がほぼ 1 となっており, 抵抗皮膜 (半導電皮膜を含む) でも絶縁皮膜と同等の渦電流損失低減効果があることを示唆している.

(注) 上記渦電流の大きさは小さいので, これによって発生する軸方向磁束が元の磁束を打消す効果は無視できることを計算で確認済みである.



(a) Calculation result for $\theta = 5^\circ$
(θ : Central angle of contact length, 図14(a))



(b) Calculation result for $\theta = 10^\circ$
(θ : Central angle of contact length, 図14(a))

W_1 : Eddy current loss for former with insulation film
 W_2 : Eddy current loss for former with resistive film
 t_f : Thickness of resistive film
 ρ_f : Resistivity of film on each wire
 ρ_c : Resistivity of wire metal

図 16 抵抗皮膜の抵抗率と渦電流損失の関係 (計算結果)
 Fig. 16. Calculation result of eddy current loss vs. resistivity of resistive film.

5. 3 断熱管の低損失化^{13), 14), 15)}

前述のように超電導ケーブルは導体とシールド層の各層線材がスパイラルに巻かれ, 多重コイル構造となることから内部軸方向磁界が存在する. これにより単心型交流超電導ケーブルでは, 断熱管内に軸方向の鎖交磁束が生じ, 渦電流損失が発生する. この磁束 (損失) の大きさは各層のより方向, よりピッチ及び電流の大きさに依存し, 大電流化とともに顕在化してくると考えられる. 今回, 断熱管の渦電流損失の計算式を導出し, 実測と照合することを示し, 導体・シールド設計に反映させた.

5. 3. 1 断熱管の渦電流損失計算式

断熱管は一般にステンレスコルゲート二重管からなり, 厚さ t のコルゲート管の長さ方向断面を図 17 に示す. この図で今幅 dx の微小リングを考える. この断面は図 18 に示すように底辺 $t'=b+c$, 高さ dx の平行四辺形となる. このリング内を環状電流が誘導されジュール損が発生する. この断面積 $S=t'dx=(b+c)dx$ であり,

$$b = a \tan \alpha \quad c = a / \tan \alpha \quad a = t \sin \alpha$$

$$\tan \alpha = y'(x) = dy/dx$$

$$\therefore t' = b + c = a (\tan \alpha + 1 / \tan \alpha) = a (y' + 1 / y') \quad \dots\dots (30)$$

$$a = t \sin \alpha = t \frac{\tan \alpha}{\sqrt{1 + \tan^2 \alpha}} = t \frac{y'}{\sqrt{1 + y'^2}} \quad \dots\dots (31)$$

(30), (31) 式から

$$t' = b + c = a (\tan \alpha + 1 / \tan \alpha) = a (y' + 1 / y')$$

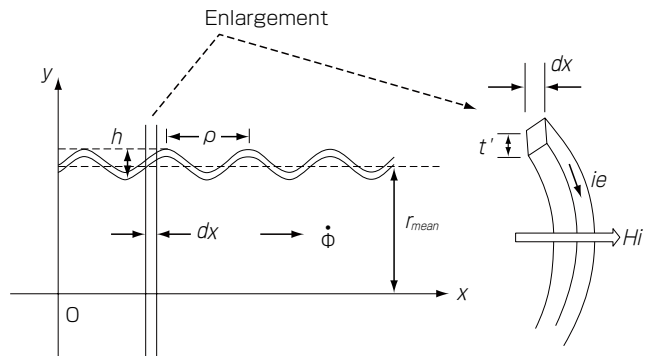


図 17 コルゲート形状での計算 (微小リング)
 Fig. 17. Calculation using corrugated shape.

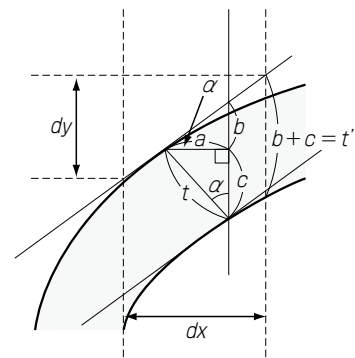


図 18 微小リングの断面
 Fig. 18. Cross section of the thin ring for calculation.

$$= t \frac{y'}{\sqrt{1+y'^2}} \frac{1+y'^2}{y'} = t\sqrt{1+y'^2} \dots\dots (32)$$

図 17 でコルゲート形状を独立リングで外面を正弦波とし、

$$y = \frac{h}{2} \sin \frac{2\pi}{p} x + r_{mean} \quad \therefore y' = \frac{h\pi}{p} \cos \frac{2\pi}{p} x \dots (33)$$

微小リングの環状抵抗

$$dR = \rho \frac{2\pi y}{t' dx} = \rho \frac{2\pi y}{t\sqrt{1+y'^2} dx} \dots\dots\dots (34)$$

ここに、 ρ : SUS 断熱管の体積抵抗率、 t : 厚さ、 r_{mean} : コルゲート平均半径、一般に $t \ll r_{mean}$ である。

微小リングの渦電流回路の自己インピーダンスはSUS材質の場合は抵抗成分 dR に支配される (リアクタンス成分は無視) ので渦電流損失 dW_{eddy} は、

$$dW_{eddy} = |d\Phi/dt|^2 / dR = (\omega\Phi)^2 / dR \dots\dots (35)$$

(34)式を代入して、コルゲート管単位長当たりの W_{eddy} は、

$$\begin{aligned} W_{eddy} &= |d\Phi/dt|^2 \int \frac{1}{dR} = (\omega\Phi)^2 \int \frac{1}{dR} \\ &= (\omega\Phi)^2 \frac{t}{2\pi\rho} \int_0^1 \frac{\sqrt{1+y'^2}}{y} dx \\ &= (\omega\Phi)^2 \frac{t}{2\pi\rho} \frac{1}{p} \int_0^p \frac{\sqrt{1+\left(\frac{h\pi}{p}\right)^2 \cos^2 \frac{2\pi}{p} x}}{\frac{h}{2} \sin \frac{2\pi}{p} x + r_{mean}} dx \dots (36) \end{aligned}$$

ここで、コルゲートの波高さが管の太さに対して十分に小さい場合 ($h \ll 2r_{mean}$) には、被積分関数の分母は、 r_{mean} となり、(37) (38) 式で示されるように第二種完全楕円積分で表される。

$$\begin{aligned} W_{eddy} &= \frac{(\omega\Phi)^2 t}{2\pi r_{mean} \rho} \frac{1}{p} \int_0^p \sqrt{1+\left(\frac{h\pi}{p}\right)^2 \cos^2 \frac{2\pi}{p} x} dx \\ &= \frac{2\pi \cdot f^2 \cdot \phi^2 \cdot t}{\rho \cdot r_{mean}} \cdot K \dots\dots\dots (37) \end{aligned}$$

$$\text{ここに、形状係数 } K = \frac{2h}{p \cdot k} \cdot E\left(\frac{\pi}{2}, k\right) \dots\dots\dots (38)$$

ここで、 $\omega = 2\pi f$ 、 $E\left(\frac{\pi}{2}, k\right)$: 第二種完全楕円積分

$$\text{母数 } k = \left(\frac{h\pi}{p}\right) / \sqrt{1+\left(\frac{h\pi}{p}\right)^2}$$

この形状係数 K はコルゲートの形状 (ピッチ p と波高さ h) の h/p を変数として定まる値でその係数表が作成されている¹⁶⁾。したがって、単心型交流超電導ケーブル断熱管の内部軸方向鎖交磁束による渦電流損失は、コルゲート管の諸寸法、抵抗率及び内部軸方向鎖交磁束数が分かれば (37) 式と付表 1 の係数表から手計算で容易に求め

ることができるようになっている。

(注) 上記渦電流による磁界が元の磁界を打消す効果は無視できることを計算で確認している。

5. 3. 2 断熱管の渦電流損失実測値との比較

表 2 に示す形状寸法の二重SUS断熱管の渦電流損失を内部軸方向鎖交磁束数を変化させて測定した。損失測定回路の構成を図 19 に示す。導体とシールドは片端で短絡し往復電流として、シールド外部の周方向磁界はゼロとし、導体とシールド層は逆方向よりとして内部軸方向磁界のみとした。これによる断熱管の渦電流損失は、試料作製時に導体上とシールド上に取り付けた電圧測定用リードからの信号 (V) と通電電流検出コイルリードからの信号 (I) をロックインアンプにとりこみ、両者の位相差 (θ) から損失 $P = V \times I \times \cos \theta$ を求め、断熱管有り・無し of 導体+シールドの損失差から求めた。断熱管は内管・外管とも実験上、液体窒素中に浸漬させた。

測定結果は図 20 に示すように計算値と良く一致している。(37) 式の簡略式での計算値も図中には示していないが一致している。これは表 2 の寸法からわかるように、簡略式的前提条件である $h \ll 2r_{mean}$ を満たしているからである。

5. 3. 3 多層熱絶縁層の渦電流損失

図 4 に示すSUS二重断熱管の内管上に巻かれた多層熱絶縁層は両面アルミ蒸着フィルムテープと絶縁フィルムの積層構造となっている。この熱絶縁層の有り・無しでの損失測定も 5.3.2 項とあわせて実施した。その結果、今回の測定範囲では有意差は認められず、多層巻熱絶縁層の渦電流損失は無視できることがわかった。ただし、

表 2 SUSコルゲート二重断熱管の各部寸法
Table 2. Dimensions of cryostat corrugated pipe.

項目	内管	外管
内径 (mm)	64	100
外径 (mm)	70	110
平均径 $2r_{mean}$ (mm)	67	105
コルゲート波高さ h (mm)	2.5	5
厚さ t (mm)	0.5	0.6
コルゲートピッチ長 p (mm)	7.5	9

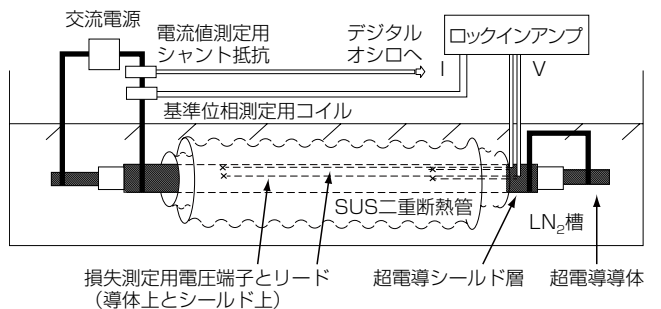


図 19 断熱管損失の測定回路構成
Fig. 19. Layout of measurement circuit of cryostat pipe loss.

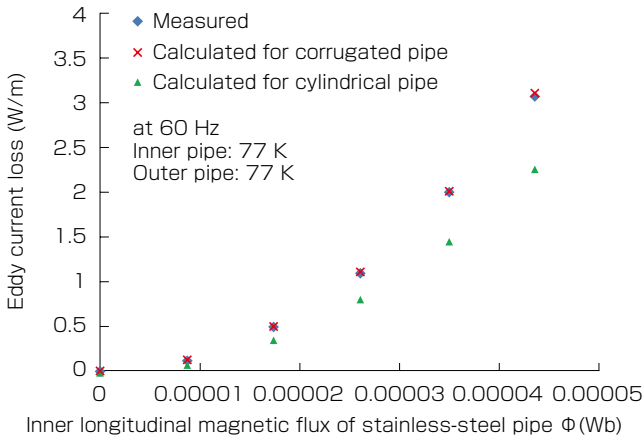


図20 SUS断熱管の渦電流損失実測値と計算値の比較 (断熱管の内管と外管ともLN₂中)

Fig. 20. Comparison of measurement and calculation for eddy current loss of SUS cryostat pipe.

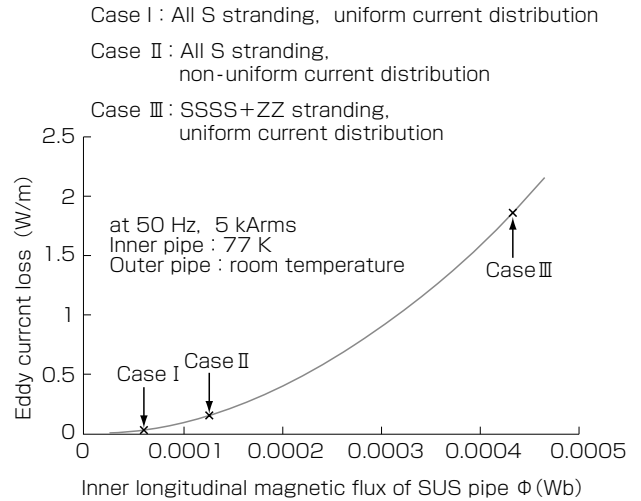


図21 SUS断熱管の実使用時の渦電流損失試算例 (内管はLN₂充填, 外管は常温)

Fig. 21. Estimated results of the eddy current loss of stainless-steel cryostat pipe for actual use.

表3 導体・シールドより方向と各層分流比の想定ケース
Table 3. Assumed cases for stranding direction and current branch ratio of each layer.

ケース	各層のより方向		各層の分流比 (%)	
	導体4層	シールド2層	導体4層	シールド2層
I	S, S, S, S	S, S	25, 25, 25, 25	-50, -50
II	同上	同上	28, 42, 26, 4	-65, -35
III	S, S, S, S	Z, Z	25, 25, 25, 25	-50, -50

ケースI：すべてSより・均流化設計
 ケースII：すべてSより・偏流の場合 (Sより：右より
 ケースIII：SSSS+ZZより・均流化設計 (Zより：左より

このテープがスパイラルコイルとして働くと長さ方向に誘起電圧が発生するので留意する必要がある。

5. 3. 4 実使用時の試算例

一例として、対象ケーブル：導体4層、シールド2層、導体下径22mm、シールド下径40mm、断熱管は表2のものとし、周波数50Hz、通電電流5000Aの場合を考える。導体・シールドのより方向と各層分流比の想定ケースを表3に示す。各ケースのよりピッチは適宜選定した。このときの断熱管内部軸方向の鎖交磁束数は図21の横軸に矢印で示した。ケーブル損失目標値を2W/mとした場合、各ケースに対応する渦電流損失値を見るとケースIIIは無視できない。したがって、単心ケーブルの場合、大電流化とともに断熱管の渦電流損失も設計に考慮していく必要があると考えられる。最終的に導体・シールドのよりピッチ、より方向などの設計はケーブルの製造性、機械特性も考慮して総合的に判断する。

6. 超電導ケーブル低損失化の実証³⁾

上述のケーブル各構成部の低損失化の方策はほとんどが先に実施されたNEDOプロジェクト「イットリウム系超電導電力機器技術開発」の一環として「大電流・低交流損失ケーブル化技術」の開発に適用された。

表4 66kV/5kA_{rms}級単心型超電導ケーブルの設計
Table 4. Specifications of 66kV / 5kA_{rms} class single-core HTS cable.

項目	仕様	
フォーマ	銅より線 (140mm ²)	20mmφ
超電導導体 (I _c =14kA)	4層, オール4mm幅線材 59本 I _c =240A / 4mm幅	
絶縁体	クラフト紙 (6mm厚さ)	
超電導シールド層 (I _c =127kA)	2層, オール4mm幅線材 53本 I _c =240A / 4mm幅	
銅シールド層	銅条 (100mm ²) 2層 無誘導巻	
保護層	不織布	45mmφ
断熱管	二重ステンレスコルゲート管 真空断熱方式	
防食層	PE	114mmφ

6. 1 ケーブル構造と各部の目標損失値

66kV単心5kA級超電導ケーブルの構造を図4と表4に示す。ケーブルコア設計の目標は、「定格容量：66kV/5kArms級 三心一括構造の1相分、交流損失：2W/m・相at 5kArms以下、コア外径：150mmφ管路に収納可能な三心一括構造のコア外径」とした。ケーブル構造は基本的にはNEDO「イットリウム系超電導電力機器技術開発プロジェクト」の成果¹⁵⁾に準拠して設計した。ケーブル各部の目標損失を表5に示す。あわせて、後述する実証値も載せた。SUS断熱管の損失については三心一括型では該当しないが、今回は試験の都合上、1相分のケーブルコアのみ断熱管に収納して単心型ケーブルとして評価した。

6. 1. 1 フォーマ

実際のフォーマは短絡電流に対する低インピーダンス化をはかるため素線絶縁あるいは抵抗皮膜細線からなる分割複集合集よりの構造となる。常時の渦電流損失計算は(13)式にこのより効果として、より込率と素線の長さ方向の渦電流損失も加味して求める。フォーマの素線

表5 66 kV / 5 kArms級単心型超電導ケーブル各部の目標損失と実証値

Table 5. Target loss value of each part of 66 kV/ 5 kA_{rms} class single-core HTS cable and the measured values.

at 77 K, kArms			
各部位	目標損失値	実証値	備考
フォーマ	0.1 W/m以下		別途実測から 0.03 W/m
超電導体&シールド層	1.8 W/m以下	1.4 W/m	三相一括型ケーブルの1相分の損失に相当(フォーマ・銅シールド層も含む)
銅シールド層	0		
SUS断熱管	0.1 W/m以下	0.05 W/m	理論的考察から
全体(合計)	2.0 W/m以下	1.45 W/m	別途実測から

*誘電体損失は今回は通電実証試験(課電なし)のため対象外とした。

径をパラメータにして軸方向磁束密度とフォーマの渦電流損失の計算結果を図 22 に示す。素線径は銅線内部への磁束浸透の表皮効果が無視できる範囲にある。渦電流損失を極力低減する目的で目標 0.1 W/m以下 at 5 kArmsとした。磁界のもっとも厳しくなるケースⅢ(導体・シールドがSSSS+ZZ巻)の場合でも目標を満たすには素線径を 0.3 mm φにする必要がある。NEDOプロジェクトでは入手が容易なエナメル皮膜細線を使用した。なお、0.3 mm φの細線集合よりとすることで、機械的剛性が小さくなりケーブル製造面が懸念されたが、特に問題は生じなかった。

6. 1. 2 超電導体とシールド層

NEDOプロジェクト「イットリウム系超電導電力機器技術開発」での 5 kArms用導体の電流負荷率と損失の解析結果¹⁸⁾に準拠し、導体とシールド負荷率をそれぞれ 50%, 55%とすることで総交流損失が 1.8 W/m以下になるとした。したがって、目標臨界電流値は、図 23 に示すように導体で 14 kA, シールドで 12.7 kA (at 77 K, s.f.)と設定した。導体、シールドの線材はすべて 4 mm幅とし、導体、シールド層それぞれ 59 本(4層巻), 53 本(2層巻)とした。1本当たりの平均Icはそれぞれ 260 A/4 mm-w, 243 A/4 mm-wで、1 cm幅換算でそれぞれ 650 A/cm-w, 610 A/cm-wとなり、これまでに類のない高Ic線材の初適用となった。導体・シールド層のよりピッチ設計には、各層均流化、シールド層の導体電流による外部磁界の遮へい率、フォーマ及びSUS断熱管の渦電流損失も考慮された。

6. 1. 3 銅シールド層

多数本の銅条巻とし周方向の誘導電流が生じないように、1本のみ絶縁テープ巻とし円周の電流ループを絶った。また、長手方向の誘導電圧を抑制するため、偶数層(2層)巻としてSZの無誘導巻きとした。

6. 1. 4 断熱管

この実証プロジェクトでのケーブルの交流損失目標は 2 W/m以下 at 5 kArmsであるので、5.3.4 節で述べたように図 21 のケースⅡ, Ⅲの場合は無視できない値である。そこで、ケースⅠのオールSよりでの各層均流化設計を採用した。損失は 0.05 W/m程度となる。

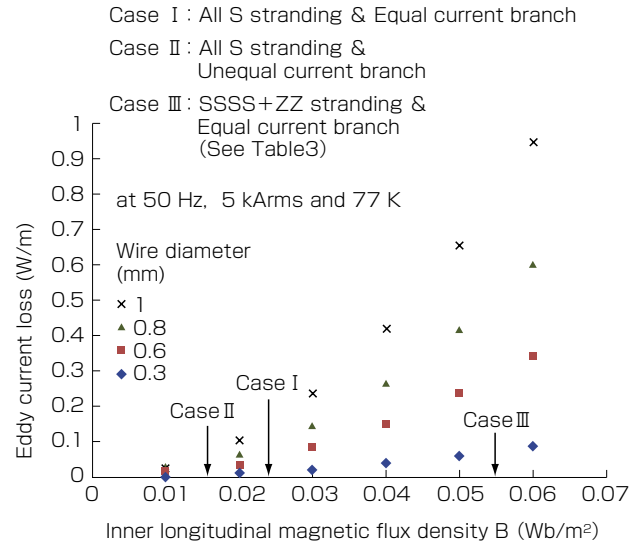


図22 フォーマの素線径と渦電流損失計算値
Fig. 22. Calculation result on dependence of eddy current loss of former on the diameter of each wire.

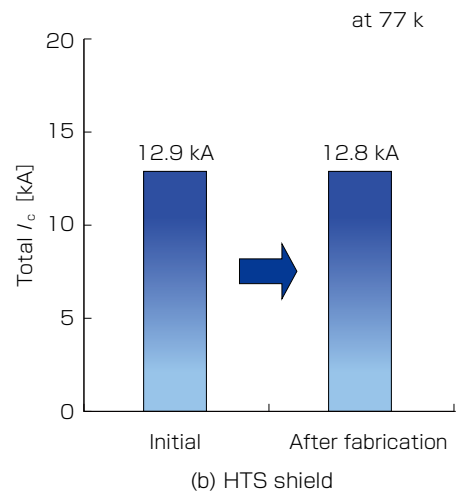
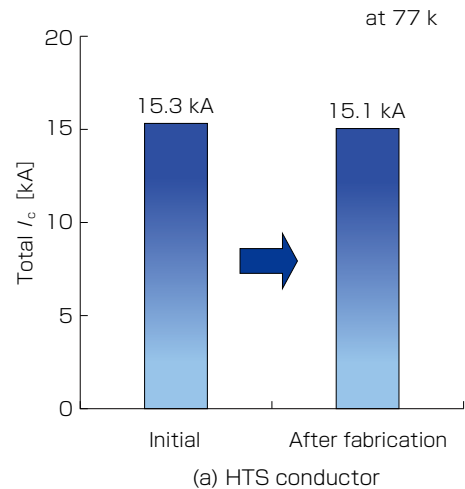


図23 ケーブルコア製造前後のトータル線材Ic測定結果
Fig. 23. Measurement result of total Ic of all tapes before and after manufacturing cable core.

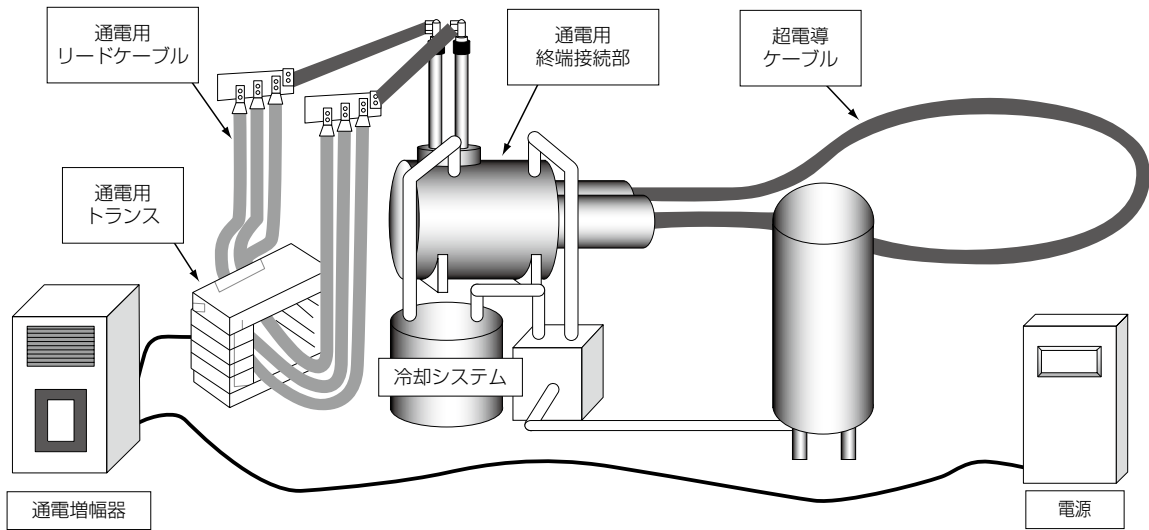


図24 通電試験線路レイアウト (当社佐倉事業所内)
Fig. 24. Layout of current loading test line of HTS cable.

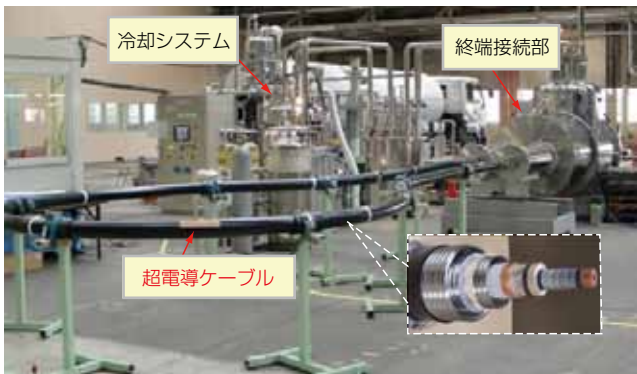


図25 検証システムの全景 (当社佐倉事業所内)
Fig. 25. The whole view of verification system.

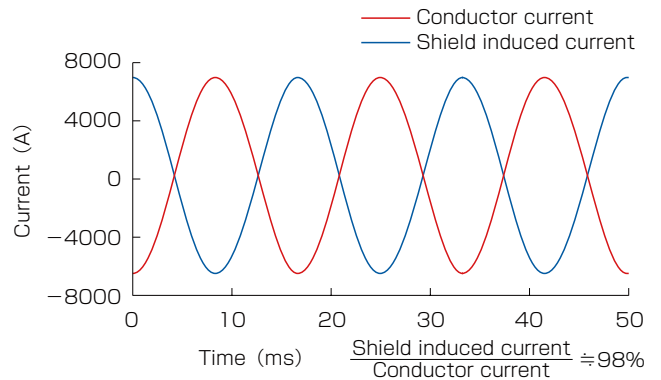


図26 導体電流とシールド誘導電流波形
(5kA_{rms}通電時)
Fig. 26. Conductor current & shield induced current
(at 5kA_{rms})

6.2 低損失化ケーブルの通電実証回路

図 24, 25 に示すようにケーブル通電用終端接続部・冷却システム試験設備を有する約 22 m長の試験線路を構築し、交流通電特性を検証した。冷却仕様は、「液体窒素温度 67 K ~ 77 K, 循環流量 最大 50 L/min, 冷却容量 2 kW」である。ケーブルは直径 3 mの円弧部を設け、二つの通電端末を一つの断熱容器内に納める構造とした。この理由は、超電導シールド層には導体電流とほぼ同じ大きさの逆位相の電流が誘導されるよう、導体・シールドのよりピッチ設計にも配慮し ((2) 式を多層巻に適用), かつ、シールド短絡部の常電導部を液体窒素中で極力短くしてインピーダンスを抑制しようとしたものである。また、交流損失測定はあらかじめケーブル製造時に導体上に無誘導巻で取り付けした電圧リードを容器外に引き出し、電気的交流四端子法にて測定した。この損失測定部位 (電圧端子間隔) は図 27 に示すように、8 m × 2 箇所 (①と②) = 16 mとした。この測定値には、導体損失・シールド損失、フォーマ及びSUS断熱管の損失も一括して含まれる。

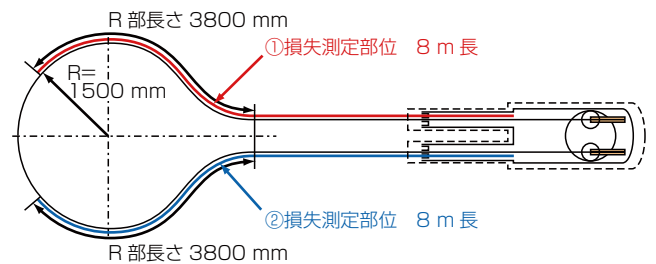


図27 交流損失測定部位
Fig. 27. Measurement portion of AC loss of HTS cable.

6.3 低損失測定結果

超電導導体に 5 kArms通電時の超電導シールド層に誘導された電流波形を図 26 に示す。超電導シールド層には設計通り、導体電流の約 98 %の電流が誘導された。導体上に取り付けした損失測定用電圧端子から測定された交流損失値には超電導導体の損失のほか超電導シールド層の損失も含まれる。

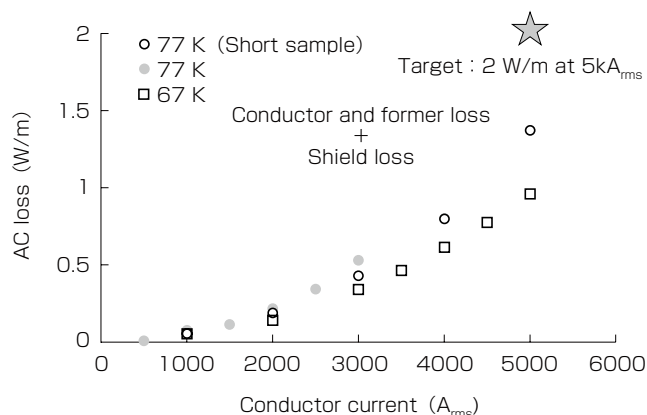


図28 交流損失測定結果 (単相ケーブルコア)

Fig. 28. Measurement result of AC loss of HTS cable.

ド層、フォーマ及び断熱管の損失も含まれる。この測定値から 5.3 節で述べた断熱管の渦電流損失値 (0.05 W/m at 5 kA_{rms}) を差し引き図 28 に示す。77 K, 5 kA_{rms}での各部の目標損失値と実証値を比較して表 5 に示す。SUS断熱管を除いた損失は、三心一括型ケーブルの 1 相分の損失に相当し、77 Kにおいてプロジェクトの目標値 2.0 W/m at 5 kArmsを十分にクリアした。さらに、67 Kにおいて目標損失値の半減が達成されている。断熱管損失を加わえた単心型ケーブルとしても同様である。

7. む す び

一般に超電導ケーブルは導体とシールド層の各層線材がスパイラルに巻かれ、大電流化とともに多層巻となり、多重コイル構造となることから内部軸方向磁界が存在する。交流超電導ケーブルでは、これによりフォーマに渦電流損失が発生し、さらに単心型ケーブルの場合には断熱管にも渦電流損失が発生する。この磁束 (損失) の大きさは各層のより方向、よりピッチ及び電流の大きさに依存し、大電流化とともに顕在化してくると考えられる。ケーブル全体の低損失化をはかるために、本稿で述べた主要な低減策は次の通りである。

- ・超電導導体・シールドの低損失化については、当社特有のイットリウム系高I_c線材 (IBAD-PLD線材) の適用により、「電流負荷率低減」による低損失化を実現した。

- ・フォーマ (銅より線) の低損失化については、現用ケーブルや試験用極低温ケーブルで実績^{11), 12)}のある「酸化第二銅皮膜」を適用した細線導体による低損失化を理論解析で立証した。エナメル皮膜細線に比べ接続作業が簡素化できる等の利点がある。

- ・SUS断熱管の低損失化については、内部軸方向磁束による渦電流損失を考慮する必要があることを解析と実験で立証した。「導体とシールド線材のより設計による内部軸方向磁束低減」により低損失化がはかられることを示した。

これらの損失低減策のほとんどはすでにNEDOプロジ

ェクト (2012 年度) の実証試験用 66 kV 5 kArms級ケーブルの設計に反映され、ケーブル全損失で目標値 2.0 W/m at 5 kArms以下を達成している。今後、さらなる大電流化にともない、本稿での損失低減策がますます重要になるものと考えている。なお、本稿におけるフォーマ損失の解析には、第一種楕円積分・完全楕円積分および等角写像が活用され、断熱管損失の解析には第二種完全楕円積分が使用された。その数値計算はインターネットの高精度計算サイトで容易に求まり、それ以外はすべて手計算で求めることができる。

謝 辞

本研究は 2010 年 8 月～2013 年 12 月にわたるもので、一部は、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 委託事業「イットリウム系超電導電力機器技術開発」の一環として 2012 年度に実施したものである。

本研究を遂行するにあたり、種々の助言をいただいた鈴木寛氏 (元電力中央研究所) ならびに吉田昭太郎氏、志関誠男氏 (元フジクラ) に深謝するとともに、実験実施に際し多くの助力をいただいた斎藤政夫氏、坂本中氏 (元フジクラコンポーネント)、平澤隆行氏、岩下昭治氏、長谷川豊氏および大塚正一氏 (元フジクラ)、さらに、本研究開発を終始一貫してご指導いただいた斎藤隆氏 (元フジクラ) に感謝するしだいである。

参 考 文 献

- 1) Y. Iijima, et al: "In-plane aligned YBa₂Cu₃O_{7-x} thin films deposited on polycrystalline metallic substrates" Applied Physics Letters, Vol.60, No.6, pp.769-771, 1992
- 2) 大保雅載ほか: 「φ 20cm室温ボア世界最大級イットリウム系5T高温超電導マグネット」, フジクラ技報, 第124号, pp.37-45, 2013
- 3) 吉田学ほか: 「世界最大5kA_{rms}級・低損失イットリウム系高温超電導ケーブル」, フジクラ技報, 第125号, pp.37-43, 2013
- 4) 濱島高太郎ほか: 「超電導導体内の電流分布解析」, 低温工学, Vol. 35 No.4 (2000), pp.176-183
- 5) NEDO事業原簿 [公開], 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」, pp.Ⅲ -27 ~ 31, 2009年11月
- 6) 雨宮尚之: 「高温超伝導体の交流損失 - 超伝導線から超伝導送電ケーブルまで -」, 低温工学, 45巻8号, pp.376-386, 2010
- 7) N. Amemiya, et al: "AC Loss Reduction of Superconducting Power Transmission Cables Composed of Coated Conductors," IEEE Trans.Appl.Supercond. 17 (2007) 1712-1717
- 8) W. T. Norris: "Calculation of Hysteresis Losses in Hard Superconductors Carrying AC: Isolated Conductors and

Edges of Thin Sheets,” J.Phys. D: Appl. Phys. 3 (1970) 489-507

9) G. Vellego and P. Metra : “An Analysis of the Transport Losses Measured on HTSC Single-phase Conductor Prototypes,” Supercond. Sci. Technol. 8 (1995) 476-483

10) 渡辺和夫 : 「超電導ケーブル導体フォーマの渦電流損失計算 - 楕円関数の応用例としての一考察 - 」, 電磁界理論シンポジウム, EMT - 11-141, 2011

11) 秋田調ほか : 「極低温短尺ケーブル実証試験 (その1) - 冷却システム運転結果と初期冷却時の電気的特性 - 」, 電力中央研究所研究報告, T86006, p.13, 1986年12月

12) 渡辺和夫ほか : 「酸化銅皮膜による素線絶縁導体」, 電気学会全国大会, No.1148, 1979

13) 渡辺和夫ほか : 「交流超電導ケーブルにおける磁気遮へいと断熱管の渦電流損失 - 楕円関数の応用例 - 」, 電磁界理論シンポジウム, EMT - 13-123, 2013

14) M. Daibo, et al: “Development of a 66 kV-5kArms class HTS power cable using REBCO tapes with high critical current” IEEE. Trans. on Applied Superconductivity, Vol.25, No.3, 5402105, June 2015

15) 渡辺和夫ほか : 「単心型交流超電導ケーブル断熱管の渦電流損失」, 2013年度秋季低温工学・超電導学会, No.1B-p07, 2013

16) 渡辺和夫ほか : 「単心型超電導ケーブル断熱管の渦電流損失計算式 - 楕円関数の活用例 - 」, 電気学会全国大会, No.7-143, 2016

17) M. Ohya, et al: “Development of 66kV/5kA Class “3-in-One” HTS Cable with RE123 Wires”, Abstract of

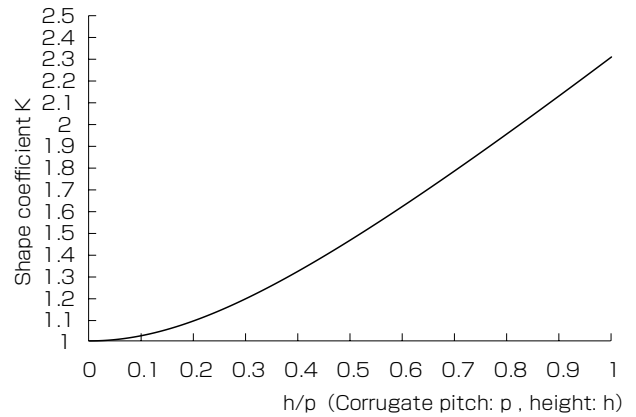
CSJ Conference, Vol.84 (2011), p.189.

18) NEDO事業原簿[公開], 「イットリウム系超電導電力機器技術開発プロジェクト」, pp.Ⅲ -2.2.18 ~ 19, 2010年8月

<付録>

本文 (37) 式における形状係数Kの数値表

この形状係数Kはコルゲートの形状 (ピッチpと波高さh) のh/pを変数として定まる値で付図 1 にグラフを, 付表 1 にその係数表を作成し示した. 結果としてこの係数はコルゲート実長の直管の長さに対する比率となっている.



付図1 断熱管渦電流損失計算式 (37) (38) 式の形状係数Kのグラフ

Appended Fig. 1. Graph of the shape coefficient K of eddy loss formula.

付表1 断熱管渦電流損失計算式 (37) (38) 式の形状係数Kの数値表 (コルゲート断熱管のピッチp, 波高さh, 平均半径 r_{mean}) (条件: $h \ll 2 r_{mean}$)

Appended Table I. Numeric table of the shape coefficient K of eddy current loss formula.

h/p	K	h/p	K	h/p	K	h/p	K	h/p	K
0	1	0.2	1.0924	0.4	1.3207	0.6	1.6186	0.8	1.9519
0.01	1.0002	0.21	1.1012	0.41	1.3343	0.61	1.6346	0.81	1.9692
0.02	1.001	0.22	1.1104	0.42	1.3481	0.62	1.6507	0.82	1.9865
0.03	1.0022	0.23	1.1199	0.43	1.3621	0.63	1.6669	0.83	2.0038
0.04	1.0039	0.24	1.1297	0.44	1.3762	0.64	1.6831	0.84	2.0212
0.05	1.0061	0.25	1.1398	0.45	1.3904	0.65	1.6994	0.85	2.0387
0.06	1.0088	0.26	1.1502	0.46	1.4048	0.66	1.7158	0.86	2.0562
0.07	1.012	0.27	1.1609	0.47	1.4194	0.67	1.7323	0.87	2.0737
0.08	1.0156	0.28	1.1718	0.48	1.434	0.68	1.7488	0.88	2.0913
0.09	1.0197	0.29	1.183	0.49	1.4488	0.69	1.7654	0.89	2.1089
0.1	1.0242	0.3	1.1945	0.5	1.4637	0.7	1.7821	0.9	2.1265
0.11	1.0292	0.31	1.2061	0.51	1.4787	0.71	1.7988	0.91	2.1442
0.12	1.0346	0.32	1.218	0.52	1.4939	0.72	1.8156	0.92	2.1619
0.13	1.0405	0.33	1.2302	0.53	1.5091	0.73	1.8324	0.93	2.1797
0.14	1.0467	0.34	1.2425	0.54	1.5244	0.74	1.8493	0.94	2.1975
0.15	1.0534	0.35	1.2551	0.55	1.5399	0.75	1.8663	0.95	2.2153
0.16	1.0605	0.36	1.2678	0.56	1.5555	0.76	1.8833	0.96	2.2332
0.17	1.0679	0.37	1.2807	0.57	1.5711	0.77	1.9004	0.97	2.251
0.18	1.0757	0.38	1.2939	0.58	1.5868	0.78	1.9175	0.98	2.269
0.19	1.0839	0.39	1.3072	0.59	1.6027	0.79	1.9347	0.99	2.2869
								1	2.3049