



都城工業高等専門学校

National Institute of Technology (KOSEN), Miyakonojo College

# 3芯一括型高温超電導ケーブル1相分の 交流損失解析

都城高専 電気情報工学科

野地 英樹

# 1. 研究背景と目的

2013年、(株)フジクラにより66 kV-5 kA級超電導ケーブルの交流損失・測定結果が公表された。



REBCOテープの巻き付け方向と巻き付けピッチ（ケーブル構成パラメータと呼ぶ）を決定するため、電気回路モデルを基に、数式処理ソフト Mathematicaでプログラミング。



決定したケーブル構成パラメータによりケーブルの3次元モデルを作成し、有限要素解析ソフトCOMSOL Multiphysicsで3次元電磁界解析を行った。

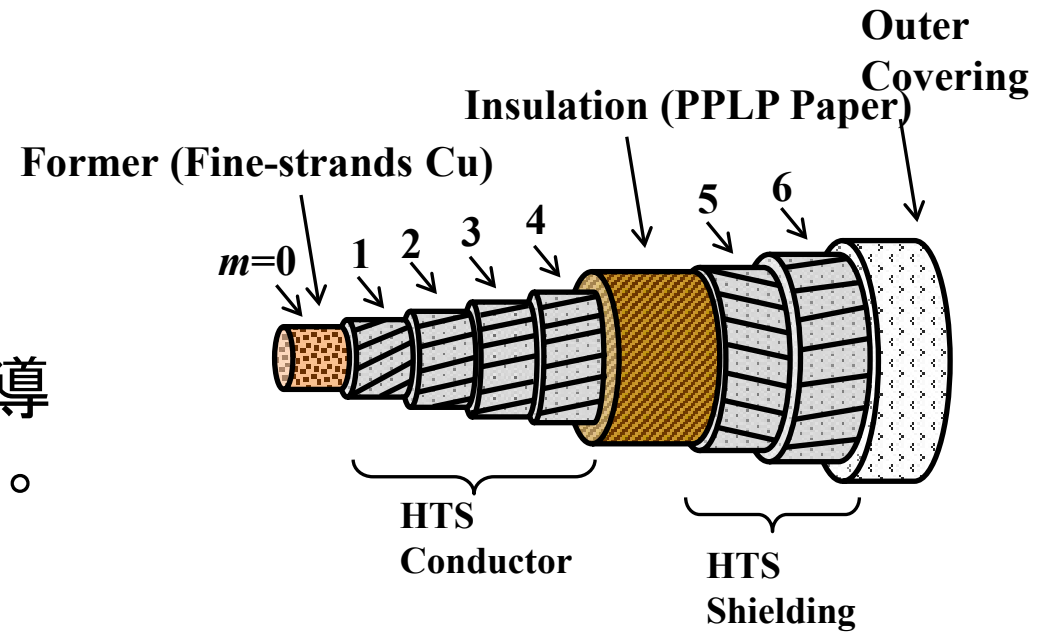


図1 3芯一括型超電導ケーブル1相分

## 2. 計算方法

### 2.1. 電気回路モデル

推移式アルゴリズムによりケーブル構成パラメーターを決定（32通りあるREBCOテープの巻き方向の組み合わせに対して巻き付けピッチを変化させ、Norrisの方程式を基にして最小の損失が得られるケーブル構成パラメーターを計算）。

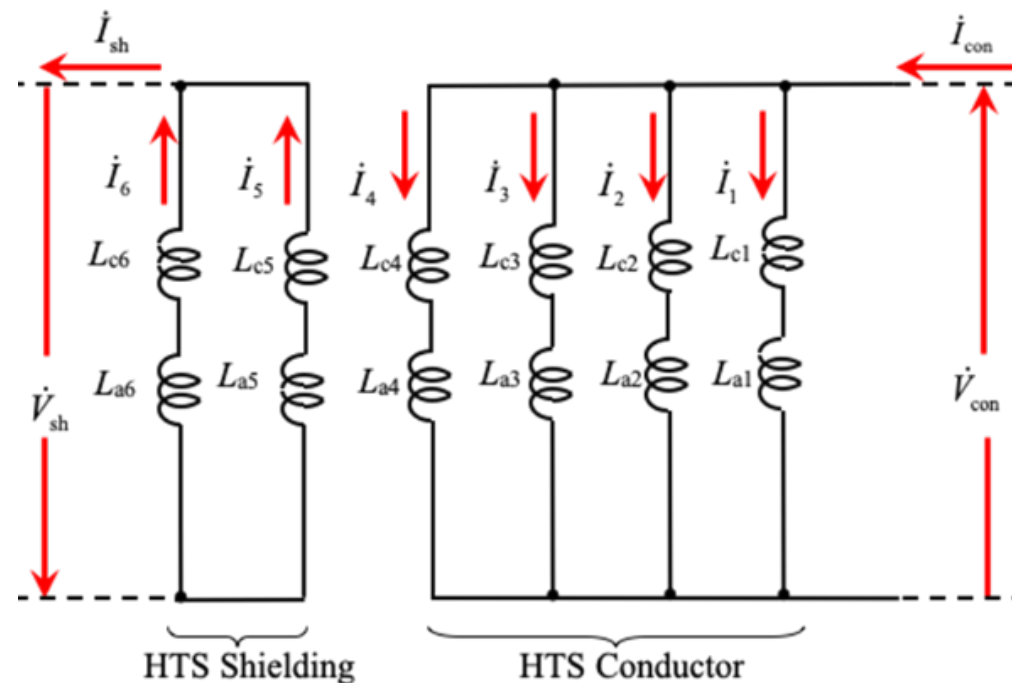


図2 電気回路モデル



ただし、この方法では各層電流が均一になるときのケーブル構成パラメーターとは異なることが分かっている。

## 2.2. 3次元電磁界解析

AC/DCモジュール (mfh) による  
解析の基本式

(1) Maxwell方程式

$$\begin{aligned} \mathbf{J} &= \nabla \times \mathbf{H} \\ \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \end{aligned}$$

(2) 超電導固有の抵抗率の式

$$\begin{aligned} \rho_x &= \frac{E_C}{J_C} \left( \frac{J_x}{J_C} \right)^{n-1} \\ \rho_y &= \frac{E_C}{J_C} \left( \frac{J_y}{J_C} \right)^{n-1} \\ \rho_z &= \frac{E_C}{J_C} \left( \frac{J_z}{J_C} \right)^{n-1} \end{aligned}$$

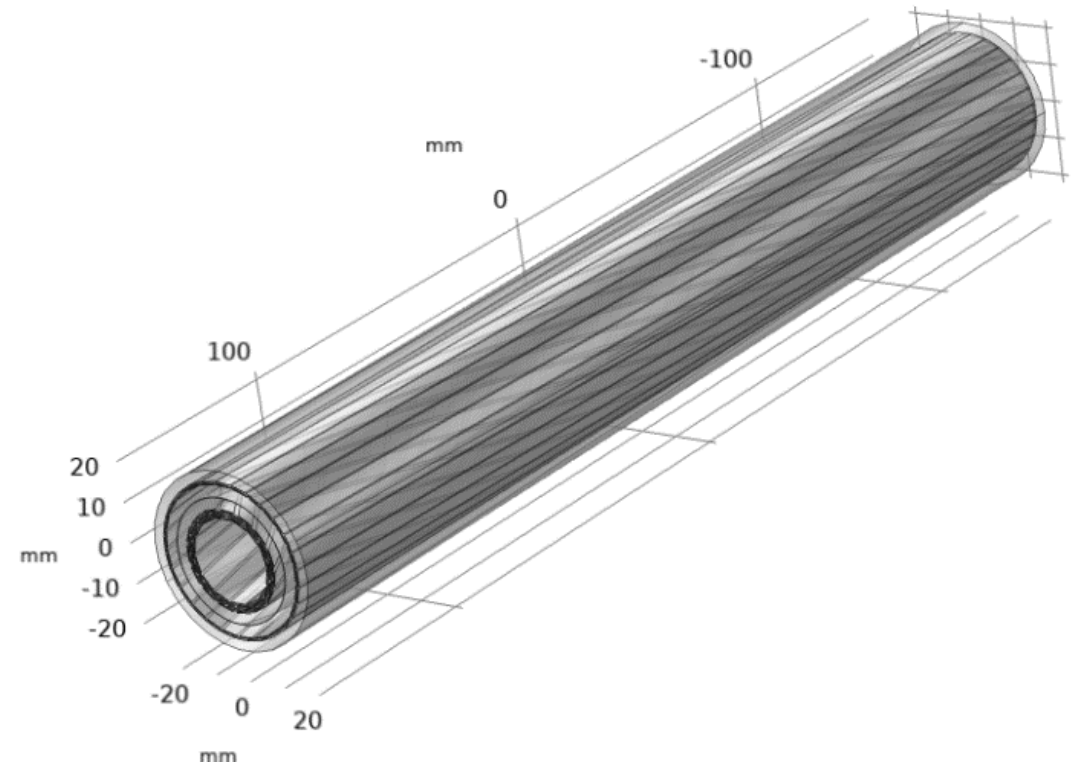
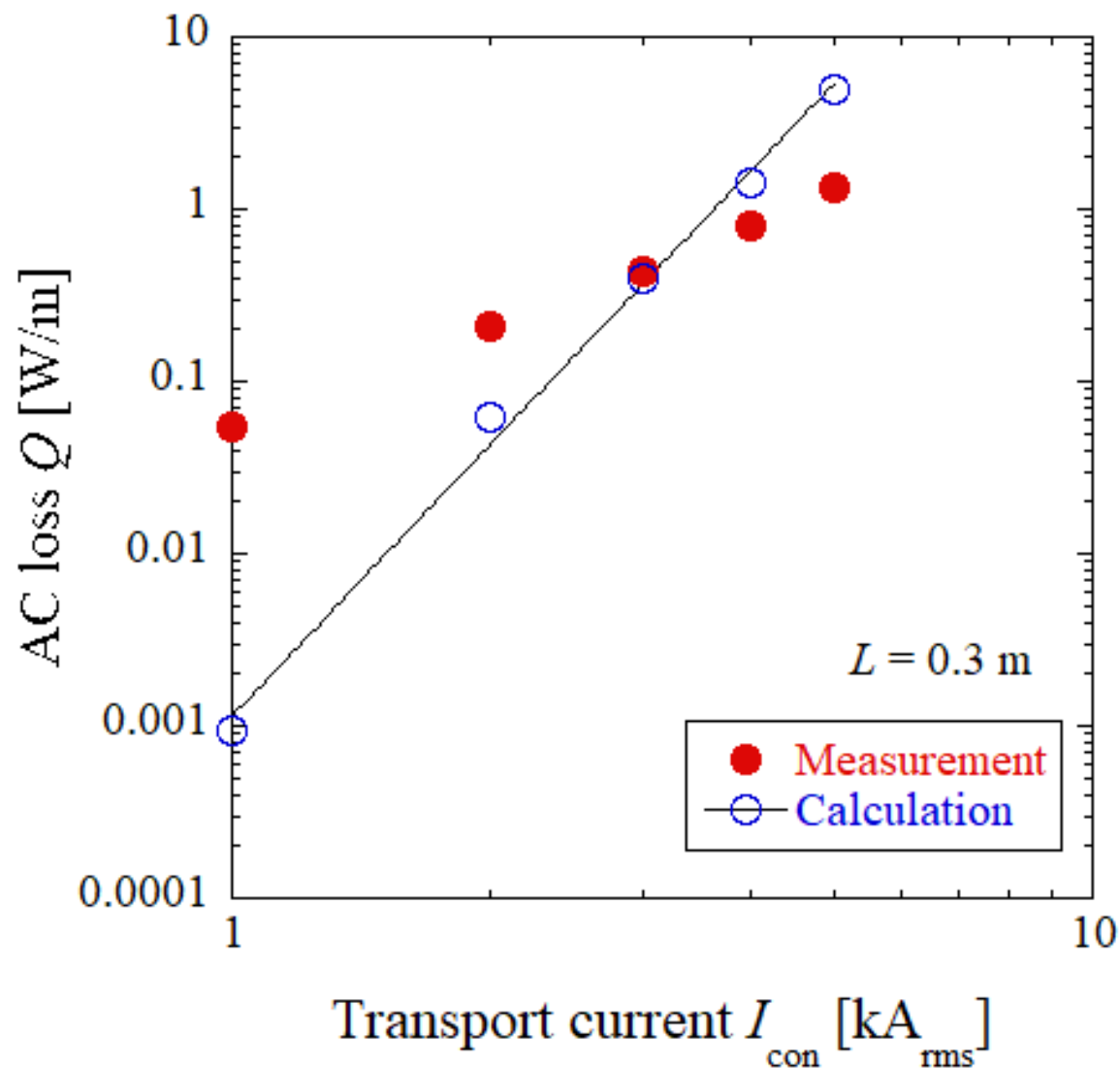


図3 ケーブルの3次元モデル

(3) 交流損失の計算式

$$Q = \frac{f}{L} \int_{\frac{1}{f}} dt \int_V \mathbf{E} \cdot \mathbf{J} dV$$

## (2) ケーブル損失の通電電流依存性



赤実丸がフジクラの測定結果  
青白丸が計算結果



測定結果も計算結果も指数で近似できる。

測定結果：傾き=2

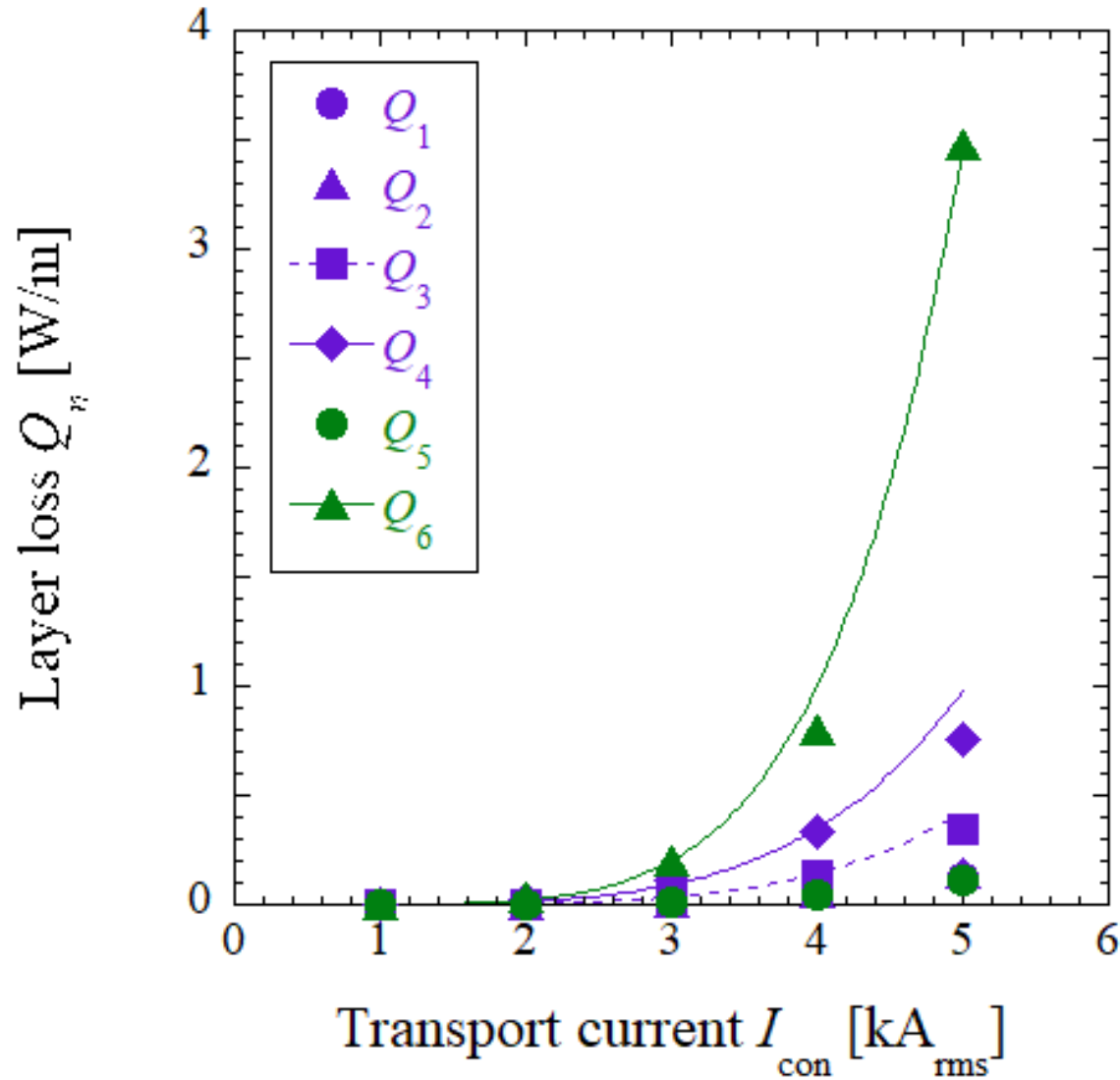
計算結果：傾き=5



かなり違いがある。

図5 ケーブル損失vs通電電流特性

### (3) 層損失の通電電流依存性



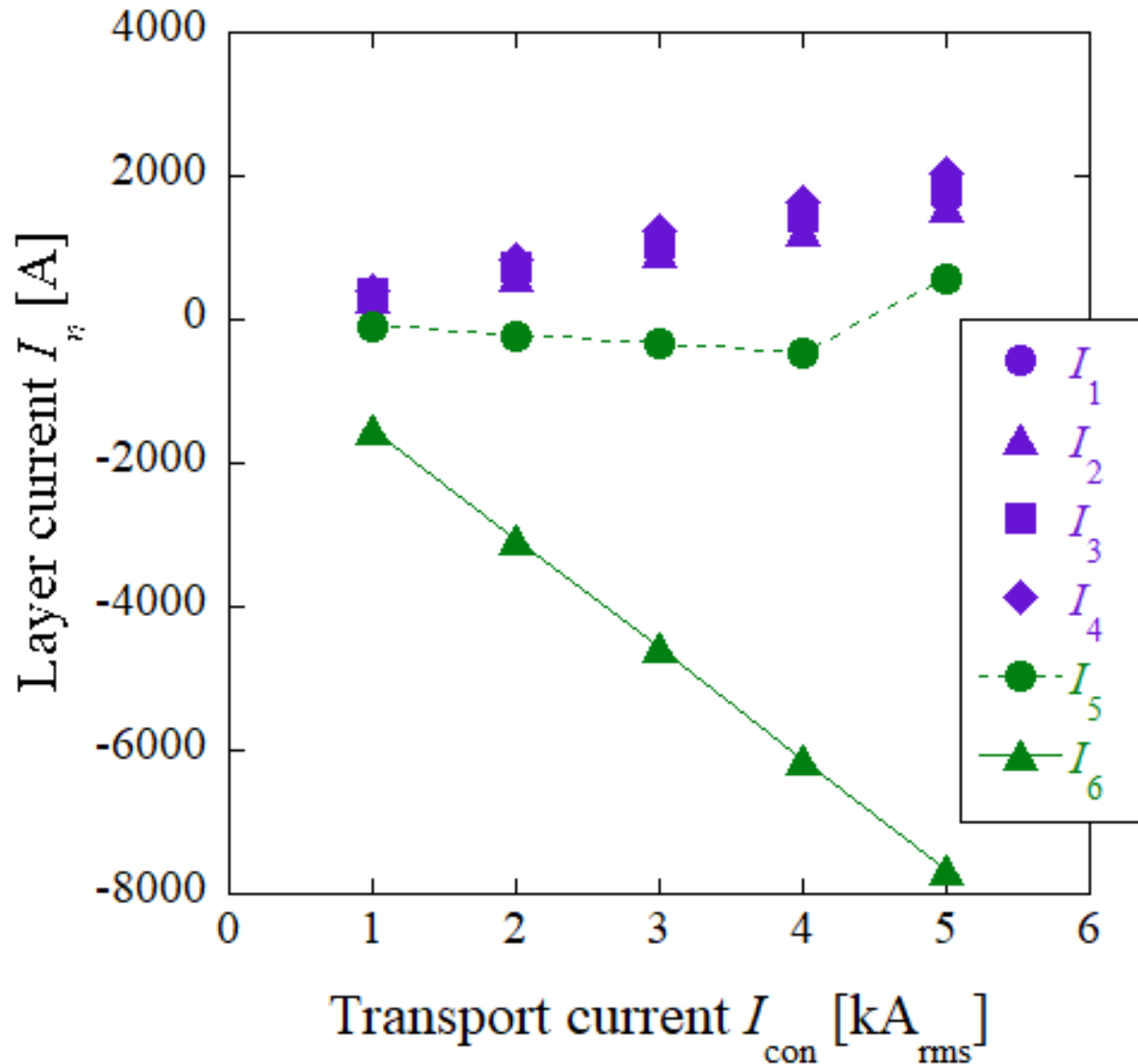
紫色のデータが導体部分の計算結果  
緑色のデータがシールド部分の計算結果



シールド最外層の損失 $Q_6$ が極端に大きい。

図6 層損失vs通電電流特性

## (4) 層電流の通電電流依存性



紫色のデータが導体部分の計算結果  
緑色のデータがシールド部分の計算結果



シールド最外層の層電流 $I_6$ が極端に大きい。



ケーブル構成パラメーターが間違っている可能性がある。

図7 層電流vs通電電流特性



## 4. まとめ

- ・ フジクラの66kV-5kAケーブルが研究対象。
- ・ 電気回路モデルを基にケーブル構成パラメータを決定。
- ・ 3次元電磁界解析でケーブルの損失を計算。
- ・ 計算結果は測定結果と一致しなかった。
- ・ 解析の結果、シールドの最外層の層電流が極端に大きいため、計算結果が（特に高通電電流値側で）大きくなったものと考えられる。