

超電導ケーブルと冷却システム

浮上式鉄道技術研究部 超電導・低温研究室
主任研究員 小林 祐介

- ・鉄道のき電系統に電気抵抗ゼロで送電が可能となる超電導ケーブルを導入すると次の効果が期待できる
 - ・回生効率の向上
 - ・電力損失の低減
 - ・変電所間の負荷平準化
 - ・電圧降下抑制による変電所の集約化 等
- ・一方で、超電導状態を維持するために冷媒を用いた冷却が必要
- ・本発表では、以下を報告
 - ・超電導き電システムを構成する超電導ケーブルと冷却システムの設計
 - ・400m超電導ケーブルの冷却試験結果

1. 超電導ケーブル概要

2. 冷却システム

3. 400m超電導ケーブルの冷却試験結果

1. 超電導ケーブル概要

2. 冷却システム

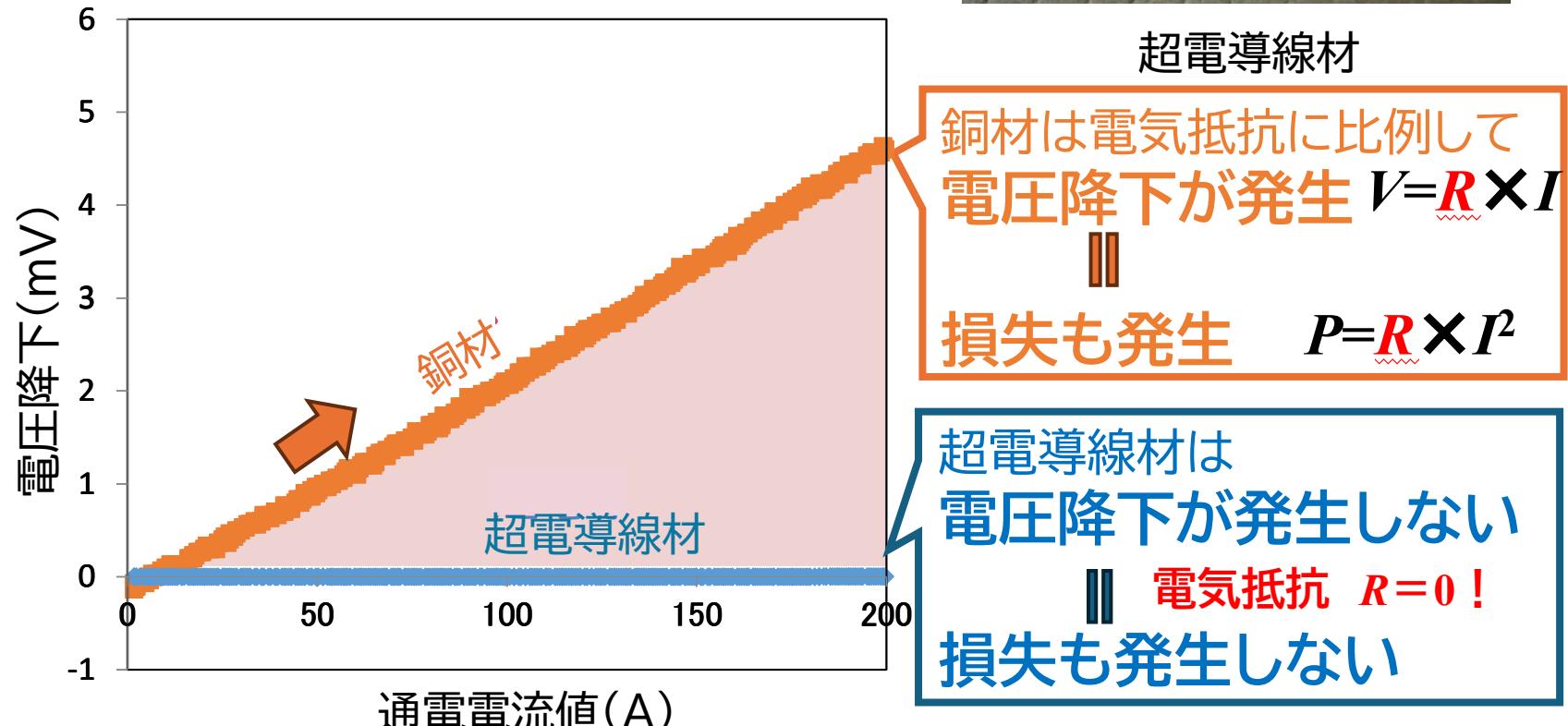
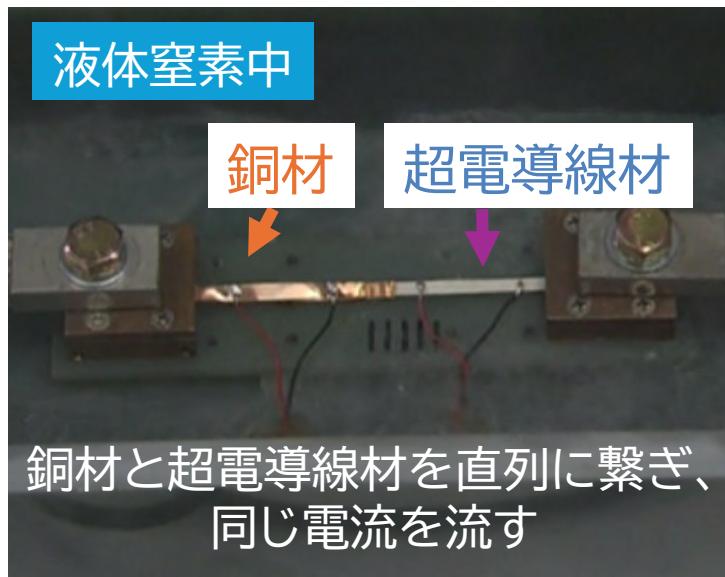
3. 400m超電導ケーブルの冷却試験結果

超電導とは

Railway Technical Research Institute

超電導の特性

超電導線材と銅材への通電実験



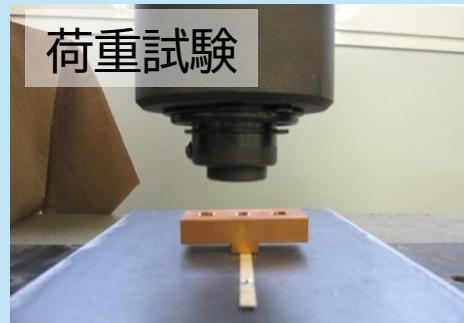
超電導は、電気抵抗ゼロで電気を送ることができる

超電導応用研究: ケーブル構造の検討

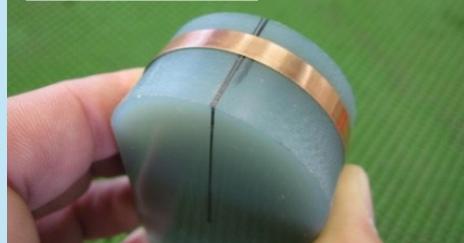
Railway Technical Research Institute

材料評価

荷重試験



曲げ試験



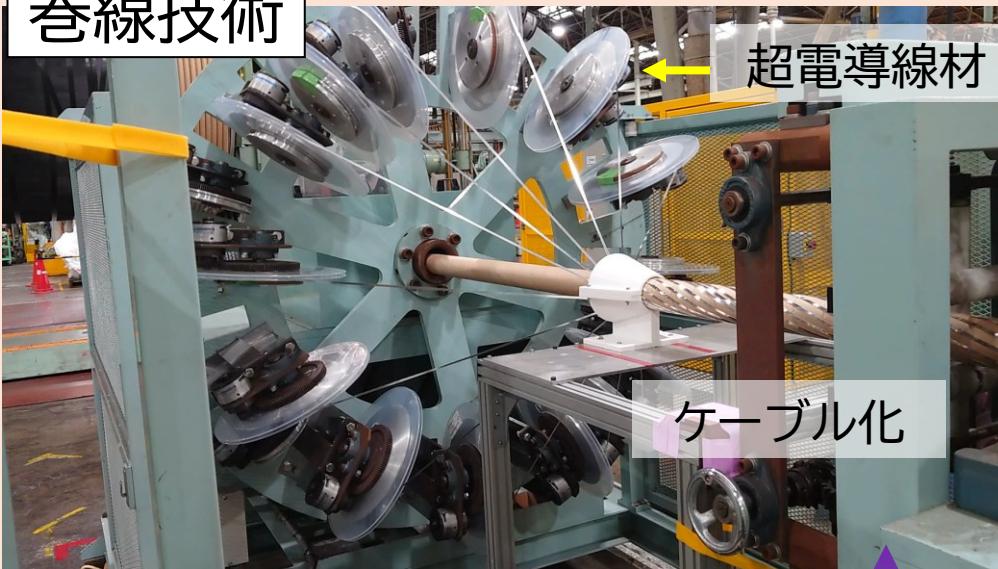
過電流特性評価



巻線技術

超電導線材

ケーブル化

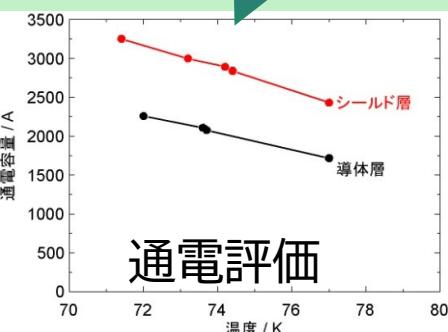


超電導ケーブル



超電導線材を巻線することで
超電導ケーブルとなる

ケーブル評価

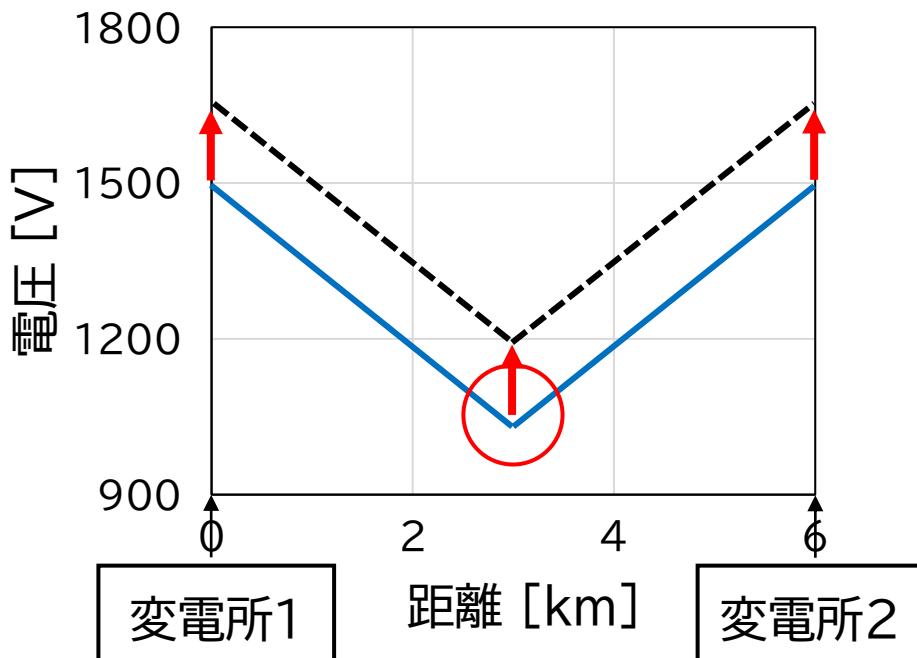
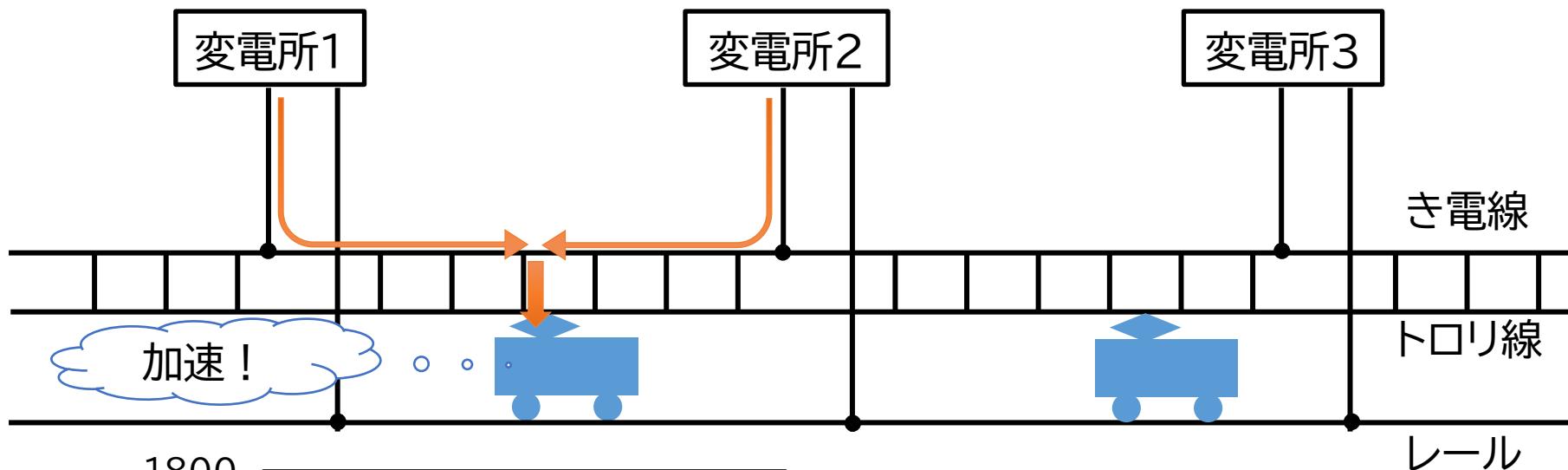


通電評価



直流き電方式の電気の流れ

Railway Technical Research Institute

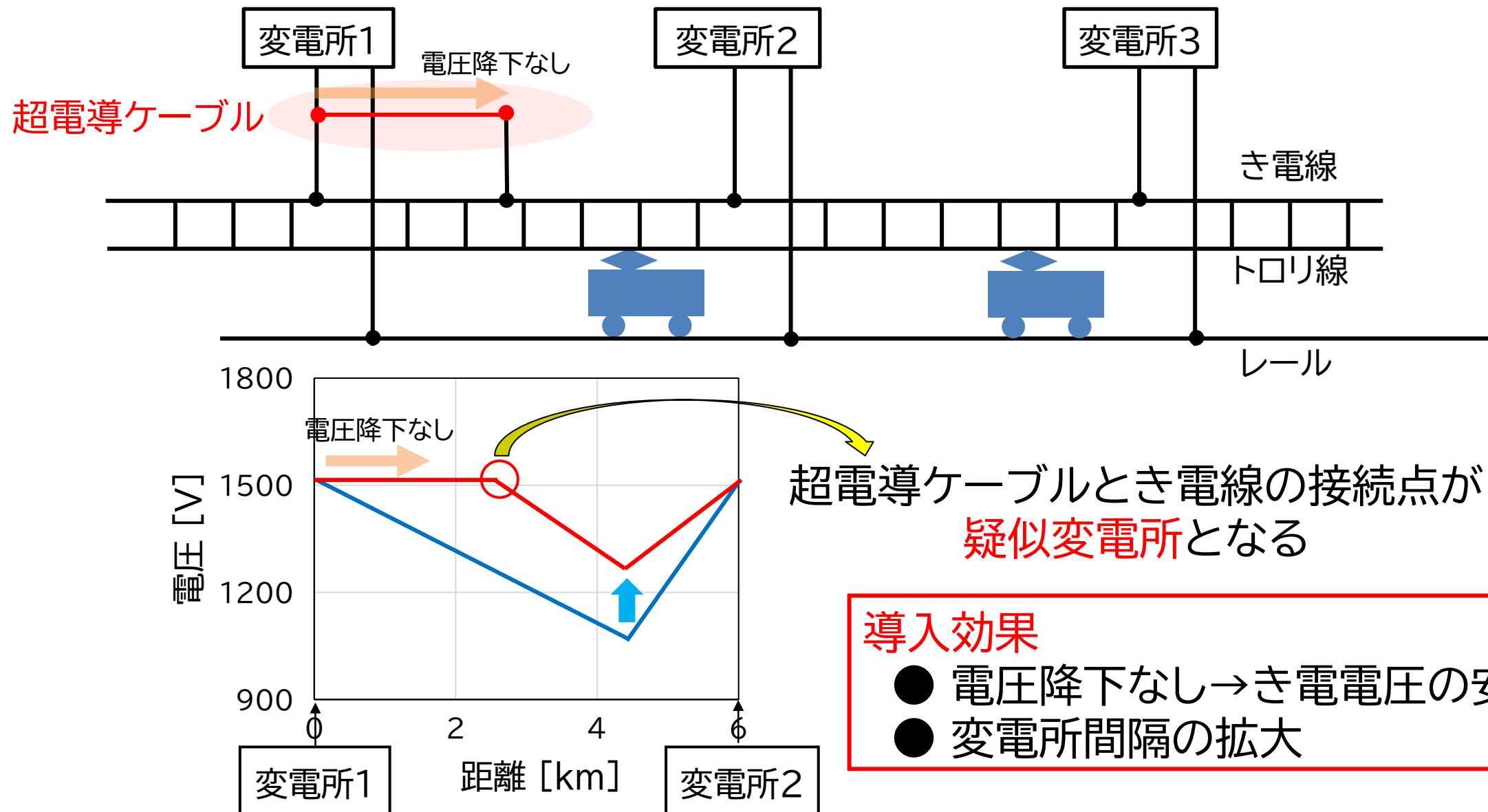


電気抵抗による電圧降下が発生
● 車両電圧不足によるノッチ規制
→ 安定輸送へ支障

電圧降下に対する従来の対策
● 変電所の送り電圧を上げる
● 変電所間隔の短縮(変電所新設)

直流き電方式の電気の流れ(超電導導入時)

Railway Technical Research Institute



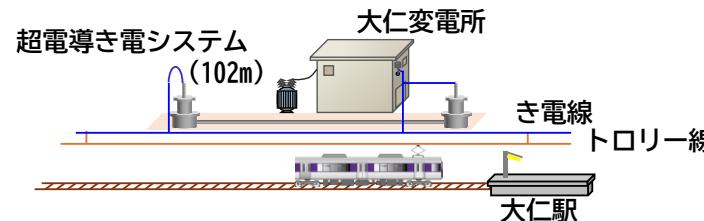
鉄道総研での超電導ケーブルの実証実験

Railway Technical Research Institute

伊豆箱根鉄道駿豆線



2025年10月プレスリリース



宮崎実験線

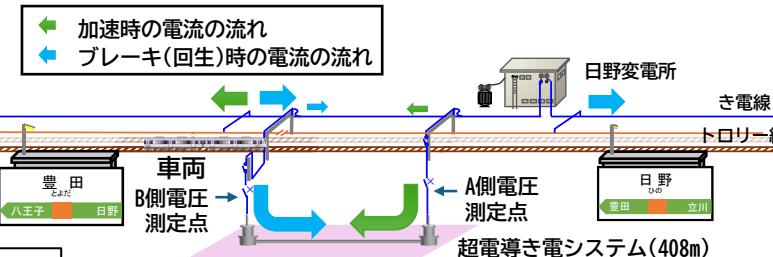


営業線での長期耐久性検証

JR東日本中央本線



2025年10月プレスリリース



都市圏鉄道の稠密線区での実証



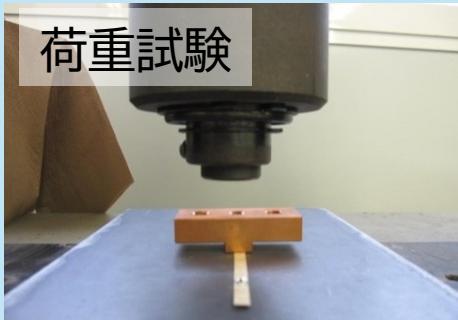
リニア実験線跡地で長距離冷却試験

超電導応用研究: ケーブル構造と冷却系の検討

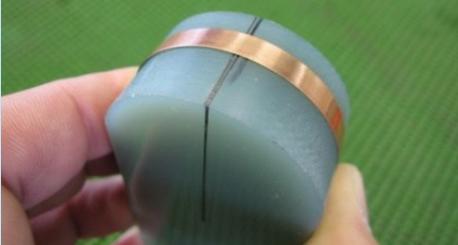
Railway Technical Research Institute

材料評価

荷重試験



曲げ試験



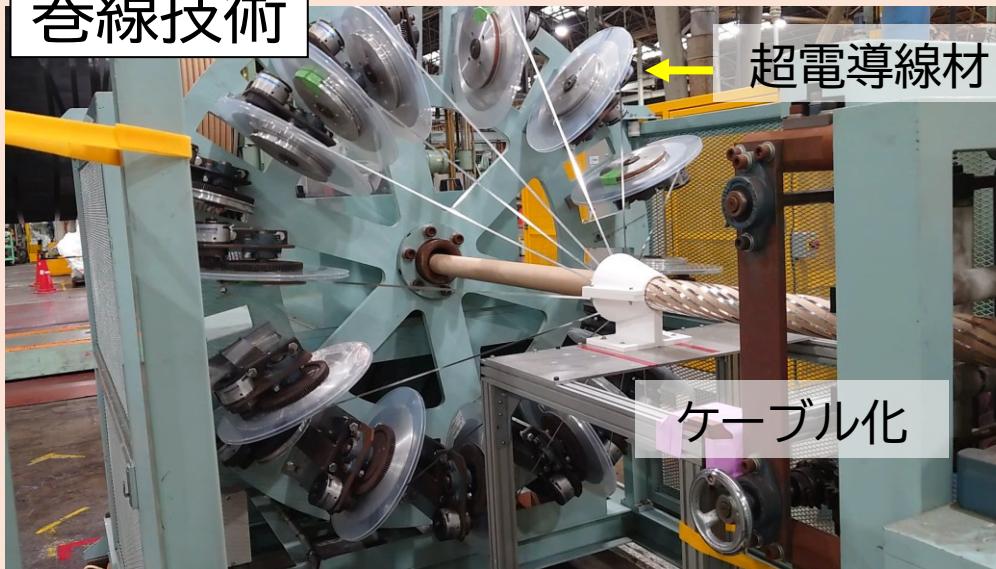
過電流特性評価



巻線技術

超電導線材

ケーブル化



超電導ケーブル



冷却機器



高効率、大容量化

超電導状態になるのは
一定の温度以下の場合のみ
→超電導ケーブルを
全長に亘って冷却する必要あり

1. 超電導ケーブル概要

2. 冷却システム

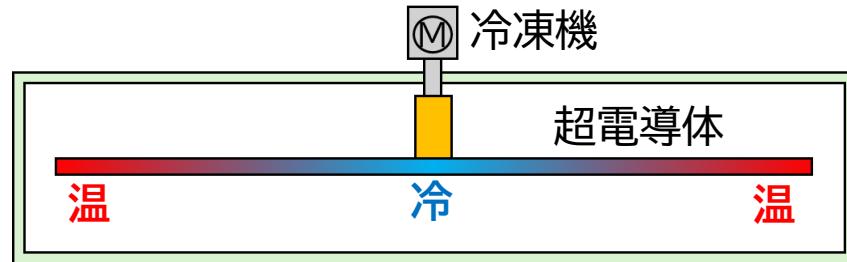
3. 400m超電導ケーブルの冷却試験結果

超電導ケーブルの冷却方式

Railway Technical Research Institute

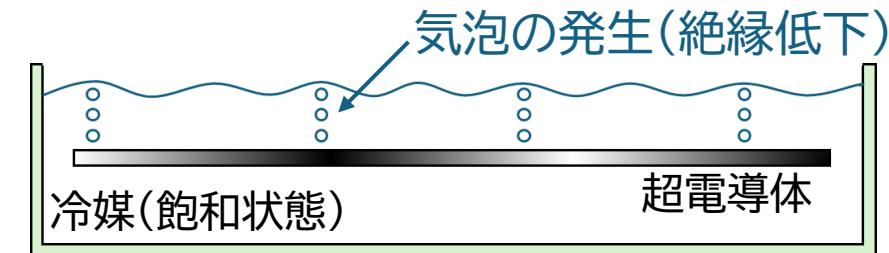
超電導機器の冷却方式

・冷凍機による伝導冷却



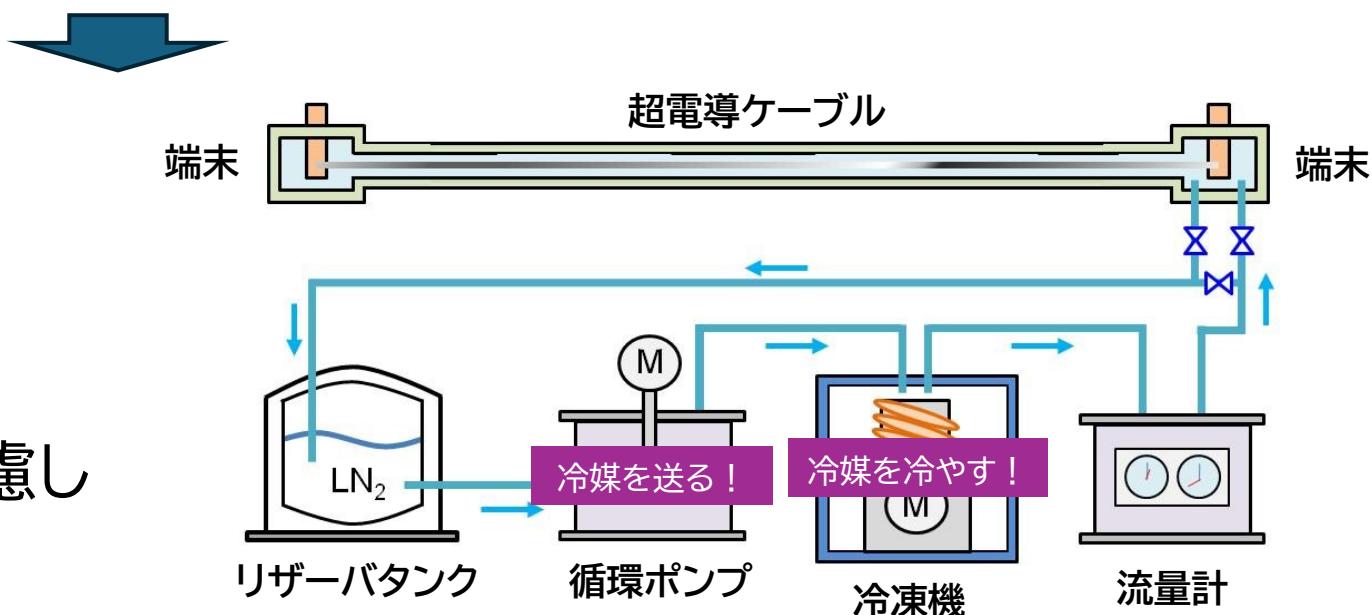
→長距離の冷却に不向き

・冷媒による浸漬冷却



→電気絶縁性能に課題あり

- ・双方の欠点を補うため、
2つの冷却を組み合わせた、
冷凍機などにより**冷媒を過冷却状態**とし、
循環ポンプにより**循環させる方式**を採用
- ・冷媒は高温超電導材料の温度特性を考慮し
安価で安全な**液体窒素**を採用



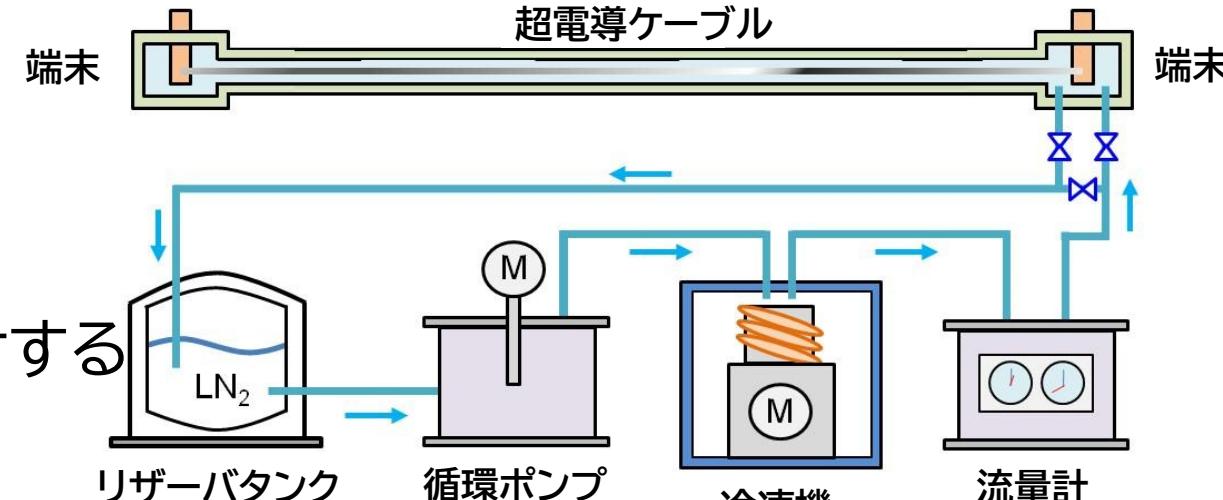
液体窒素の冷却方式

Railway Technical Research Institute

直接冷却方式

超電導ケーブルの液体窒素を
冷凍機などで「直接」冷却する方式

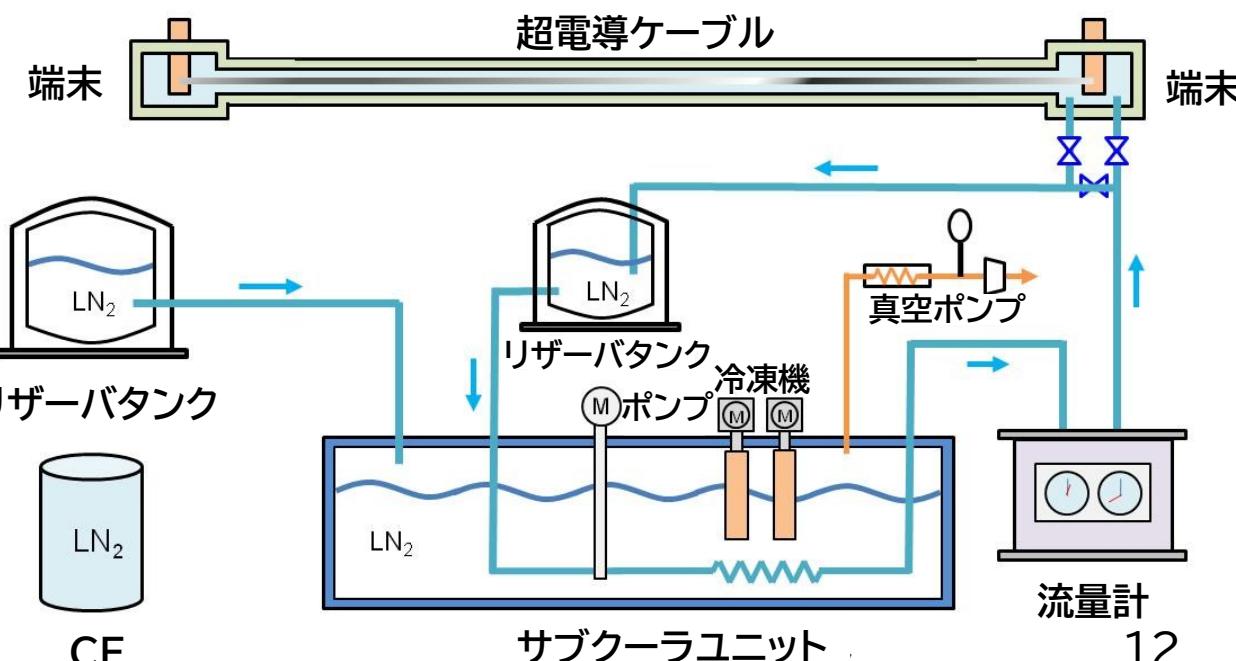
- 冷却効率がよい
- 冷凍機の出力調整により冷媒の温度制御に対する
応答性がよい



間接冷却方式

冷凍機などを用いてある冷媒を冷やし、
その冷媒で「間接」的に超電導ケーブルの
液体窒素を冷やす方式

- 冷凍機などの故障時でも、超電導ケーブル
側の液体窒素が遮断されない
- 冷媒槽に蓄えられている冷媒の熱容量で
冷却を継続できる
- バックアップ機能を減圧ポンプで保証可
→冗長性あり

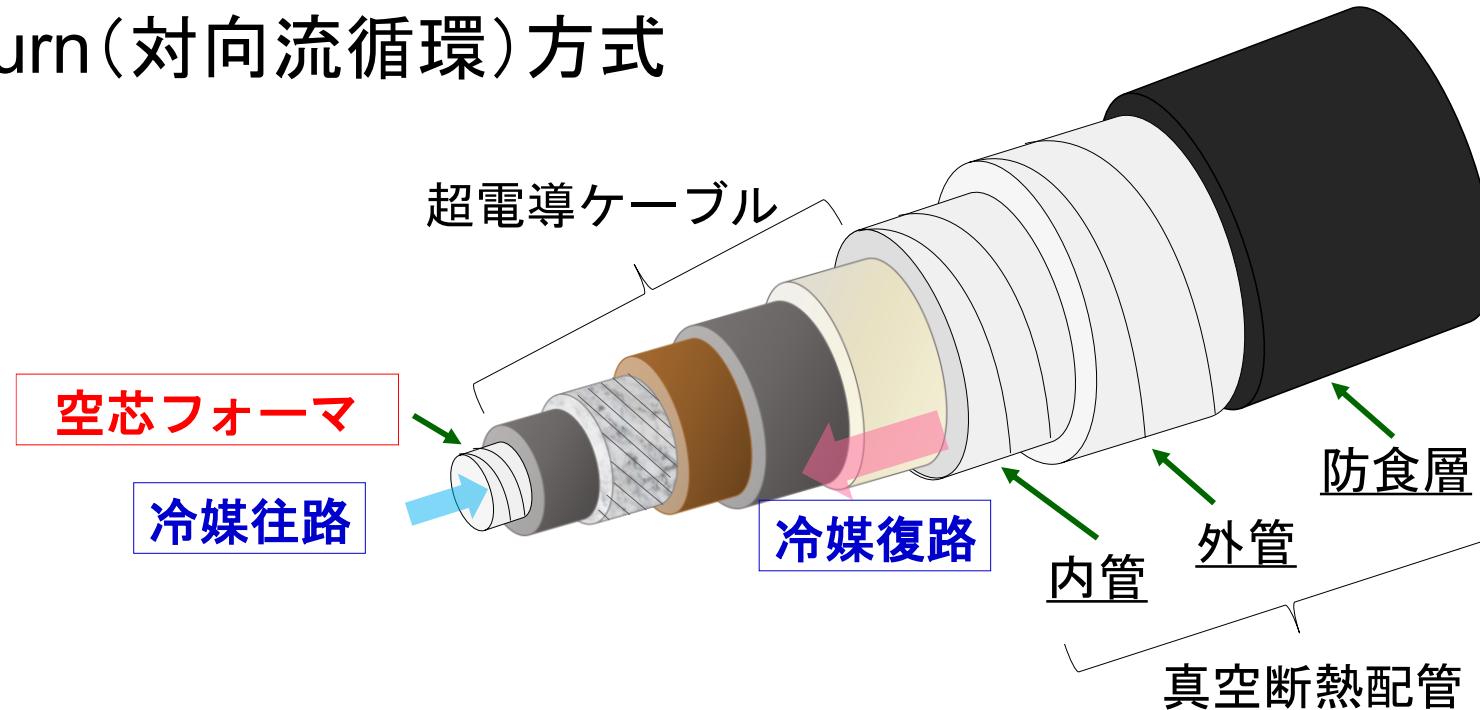


Go-Return方式

Railway Technical Research Institute

液体窒素の循環系を考えた場合、
鉄道においては上り線と下り線を用いて循環する方法が考えられるが、
往路と復路の冷媒を1本の真空断熱配管に収納すれば効果的

Go-Return(対向流循環)方式



Go-Return方式においては、冷媒往路と冷媒復路がケーブルを介して熱が伝達する
→この熱伝達係数が温度分布に大きな影響を与える

超電導ケーブルの温度分布の式

Railway Technical Research Institute

伝熱方程式より

$$\left[\begin{array}{l} T_{\text{inner}}(x) = -\frac{chq}{2(C_p m)^2} x^2 + \frac{chqL + chQ}{(C_p m)^2} x + T_0 \\ T_{\text{outer}}(x) = -\frac{chq}{2(C_p m)^2} x^2 + \frac{chqL + chQ - qC_p m}{(C_p m)^2} x + T_0 + \frac{qL + Q}{C_p m} \end{array} \right]$$

x : 地点

T_{inner} : 冷媒往路温度

h : 往路と復路の熱伝達係数

q : 単位長当たり熱侵入量

T_0 : ケーブル入口温度

m : 流量

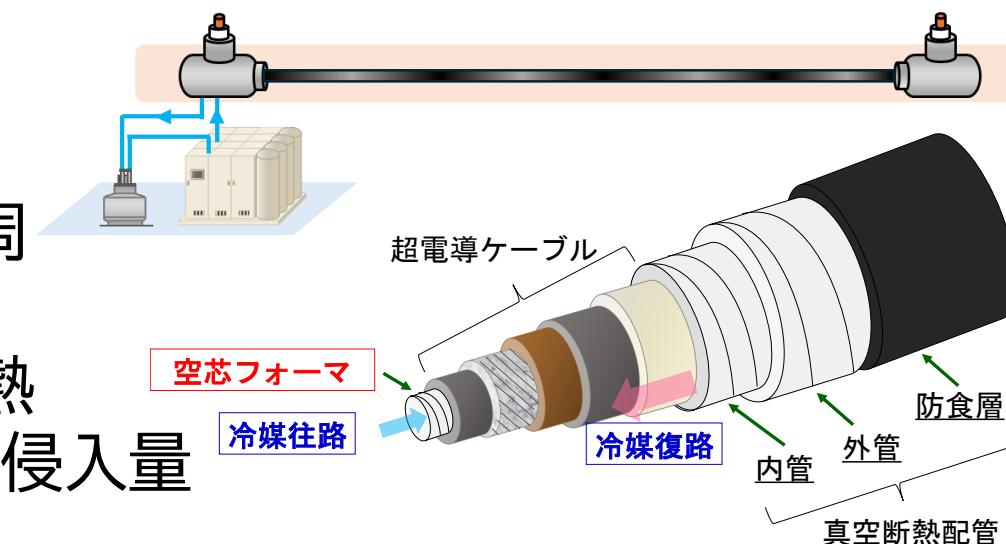
T_{outer} : 冷媒復路温度

c : 2つの流れの境界円周

L : ケーブル長さ

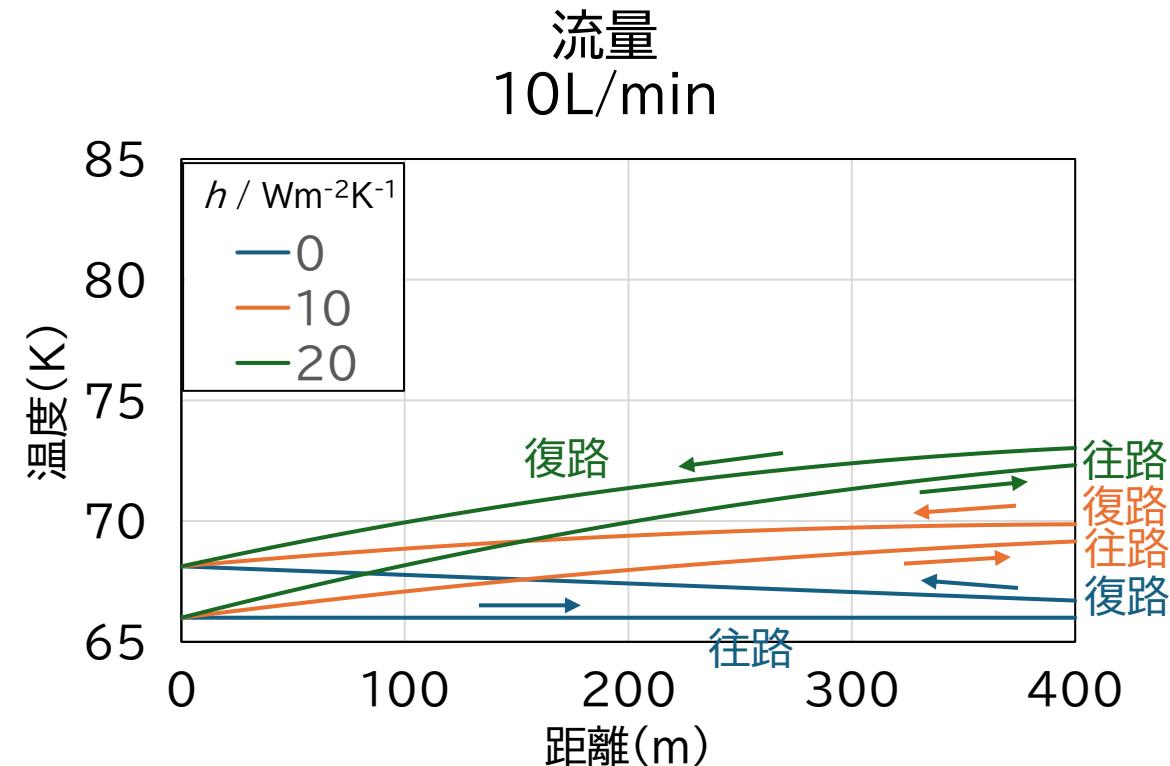
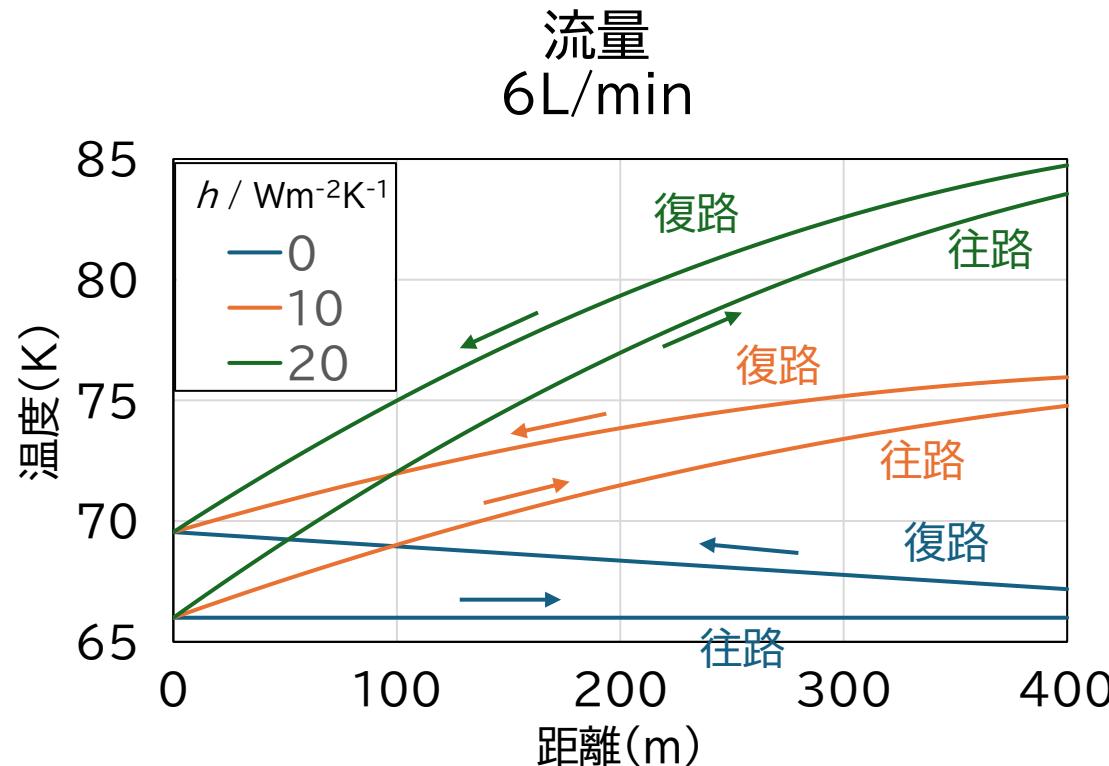
C_p : 液体窒素の定圧比熱

Q : 折り返し端末部の熱侵入量



超電導ケーブルの温度分布の例

h:往路と復路の熱伝達係数



- ・熱伝達係数を下げる
 - ・流量を上げる

ことが有効

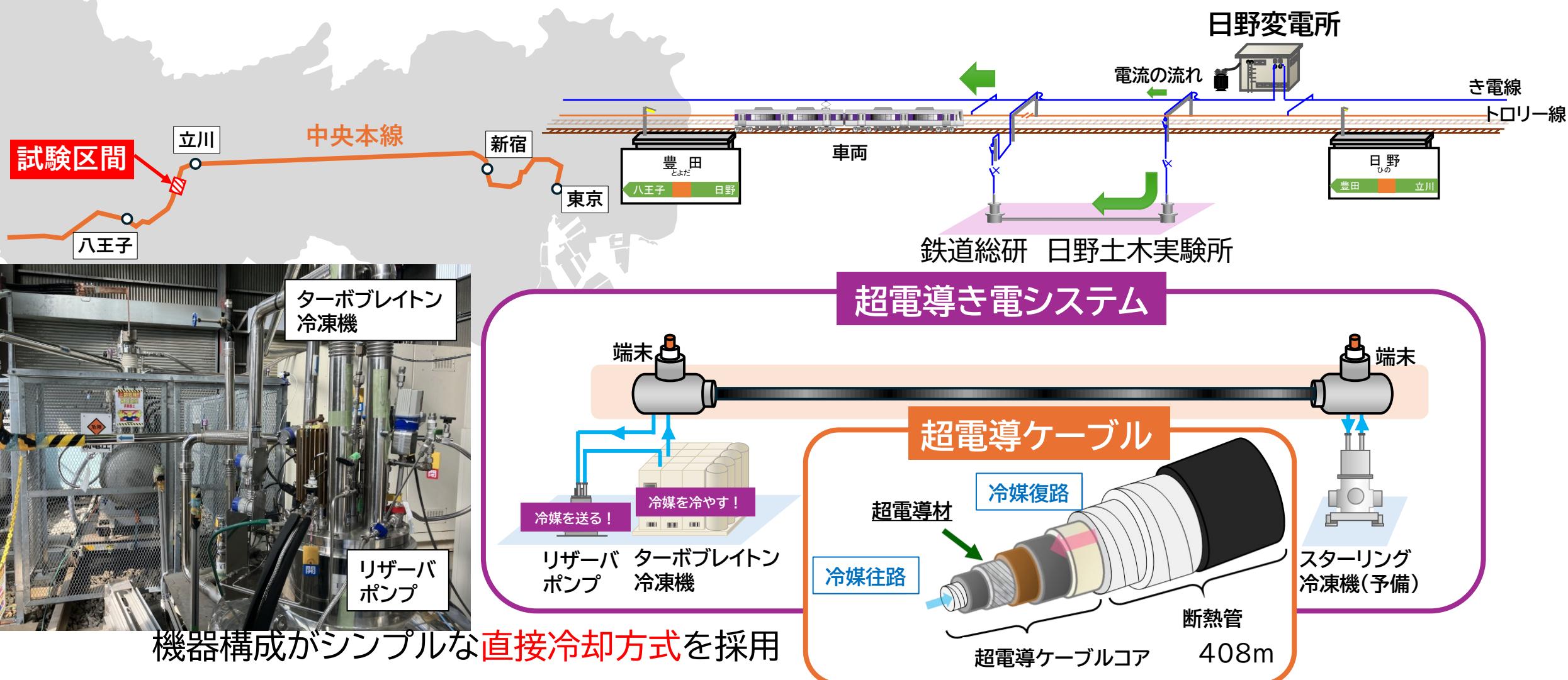
1. 超電導ケーブル概要

2. 冷却システム

3. 400m超電導ケーブルの冷却試験結果

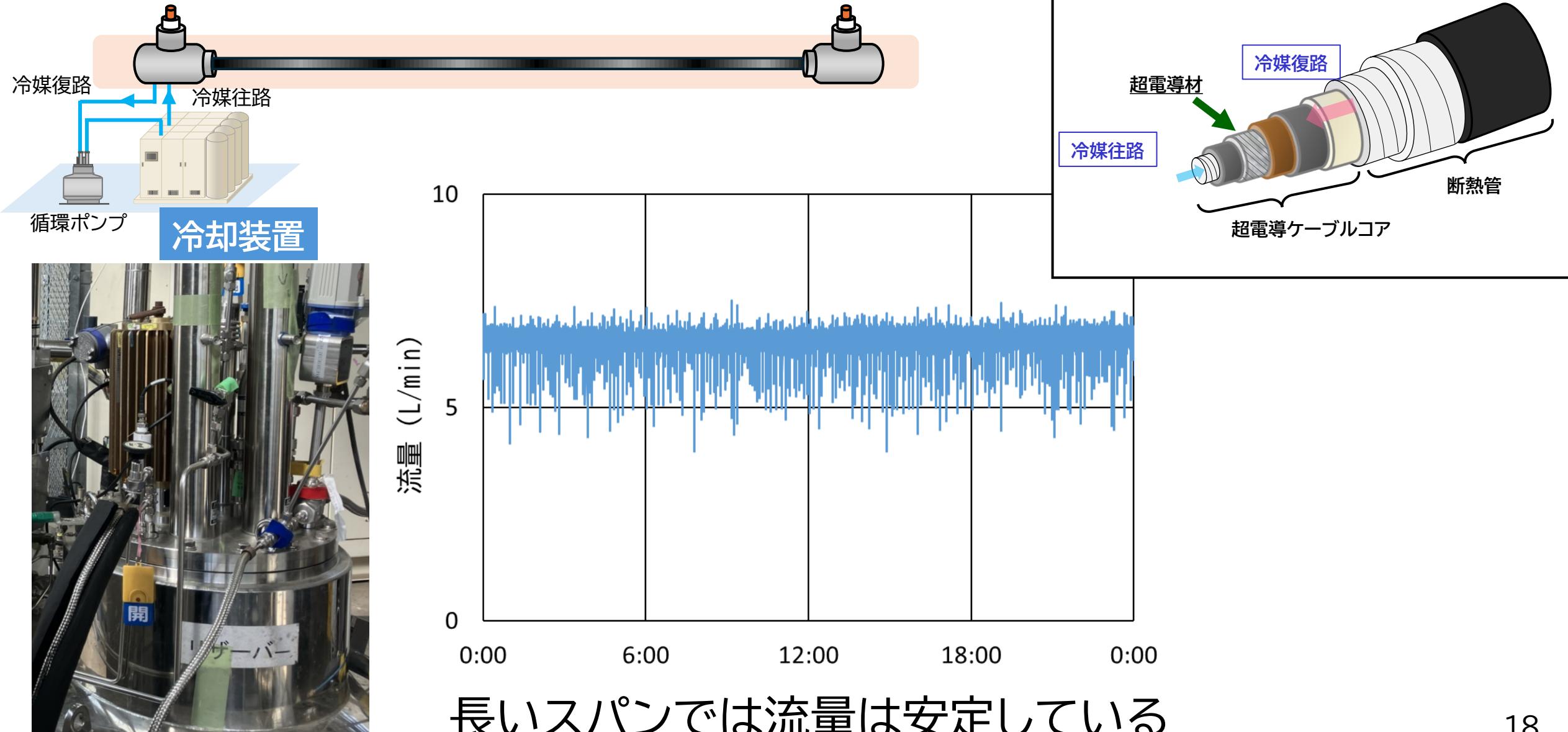
JR東日本中央本線の超電導ケーブル概要

Railway Technical Research Institute



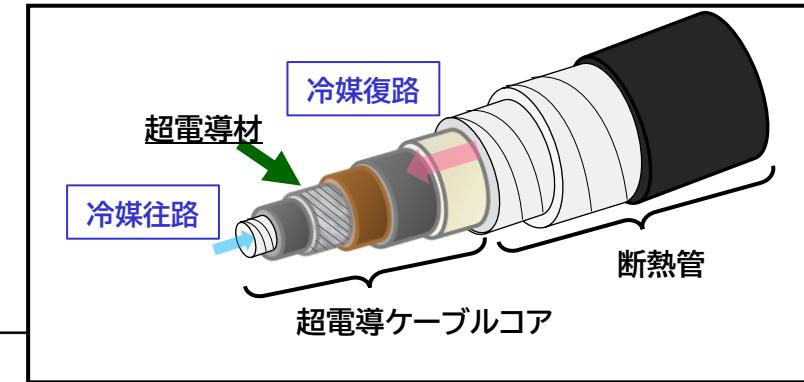
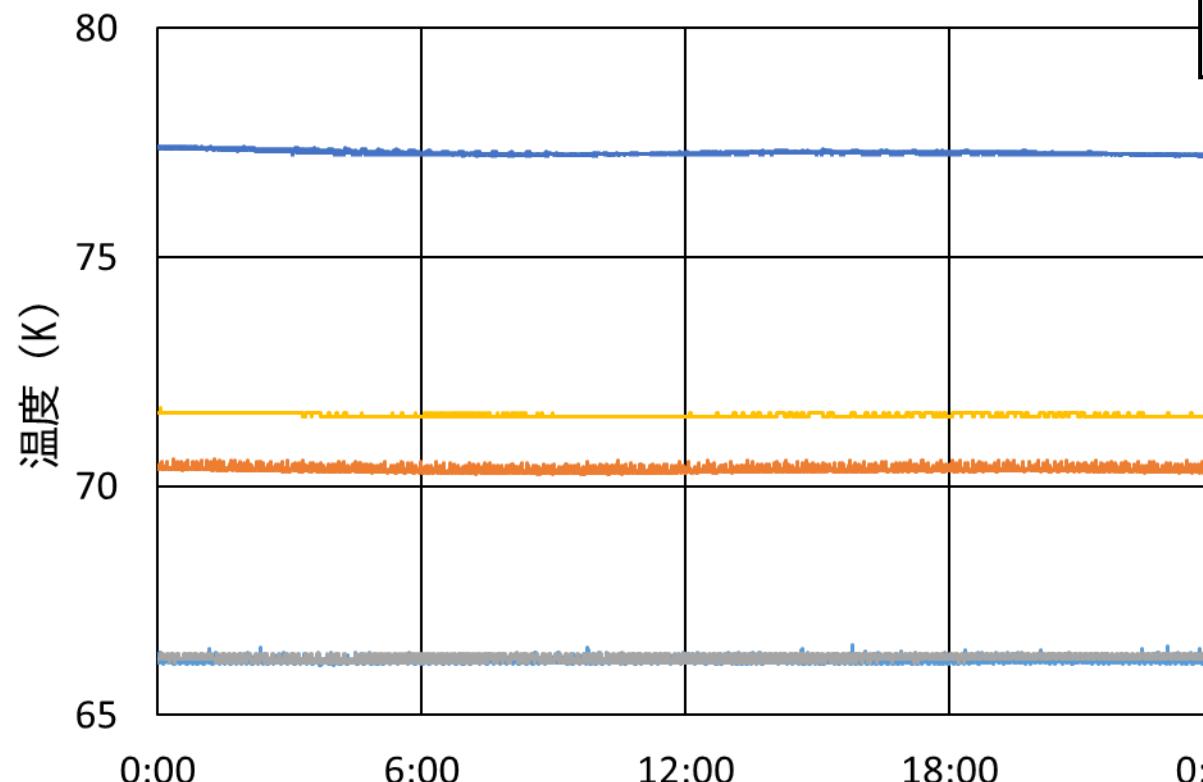
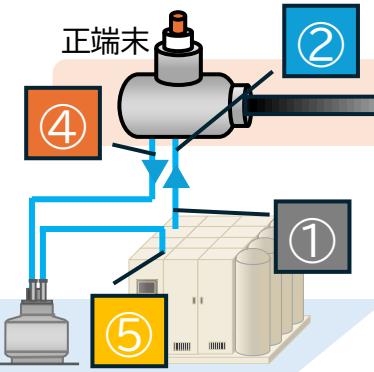
400m超電導ケーブルの冷却試験結果: 流量

Railway Technical Research Institute



400m超電導ケーブルの冷却試験結果: 温度

Railway Technical Research Institute

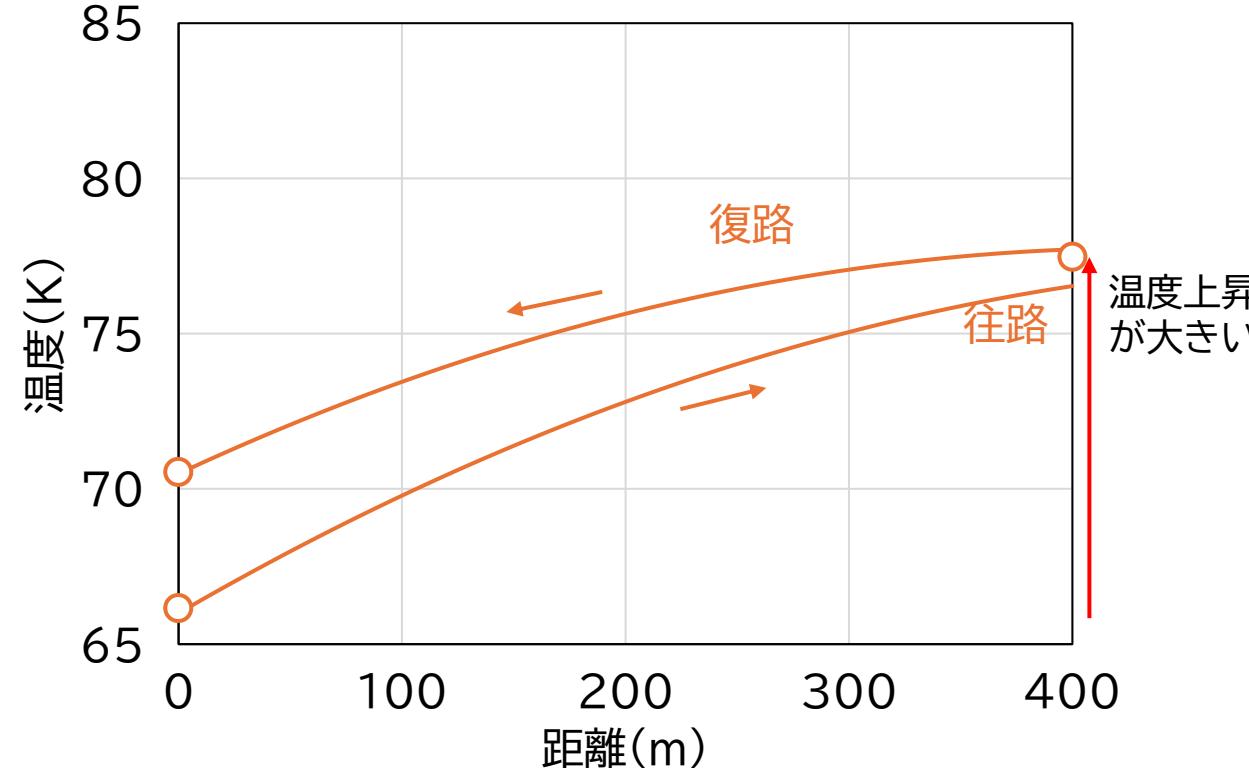


- ⑤ 冷凍機入口
- ④ ケーブル出口
- ② ケーブル入口
- ① 冷凍機出口

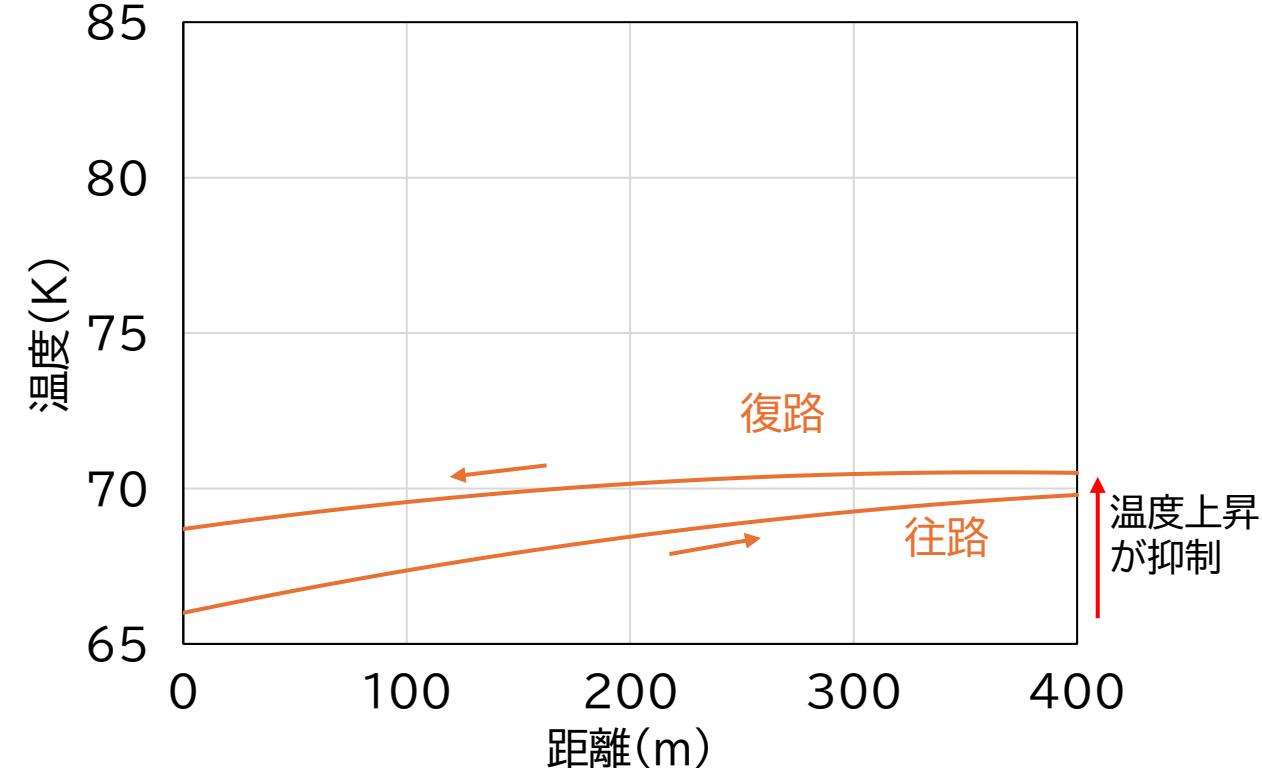
温度も安定している

温度分布考察

流量6L/minの解析



流量10L/minの解析 (流量を上げた場合)



解析により、温度分布を推定することが可能
→冷媒流量を上げることで、温度分布を抑制することができる

- ・超電導ケーブルの冷却方式として、冷凍機などにより液体窒素を過冷却状態とし、循環ポンプにより循環させる方式を採用
- ・液体窒素の流路として、往路と復路の液体窒素を1本の真空断熱配管に収納するGo-Return(対向流循環)方式を採用
- ・Go-Return方式においては、往路と復路の熱伝達係数を下げ、液体窒素の流量を上げることが重要
- ・伝熱方程式により超電導ケーブルの温度分布が推定可能

- ・超電導ケーブルを鉄道路線へ導入する際に、路線に応じた冷却システムの設計が可能
- ・参考文献

小林祐介, 石原篤, 鈴木賢次, 福本祐介, 富田優:超電導き電ケーブルの冷却方式, 鉄道総研報告, Vol.36, No.6, pp.33-38, 2022

本研究開発は、国土交通省の補助金、国立研究開発法人科学技術振興機構(JST)の「戦略的イノベーション創出推進プログラム(S-イノベ)(JPMJSV0921)」「未来社会創造事業(JPMJMI17A2)」、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託・助成事業を受けて行っている。