「イットリウム系超電導電力機器技術開発」
（中間評価）第1回分科会
資料7－2

超電導電力ケーブル研究開発

（中間評価）
（2008年度～2012年度　５年間）
プロジェクトの詳細説明（公開）

サブプロジェクトリーダー
(財)国際超電導産業技術研究センター
藤原　昇　（2008年6月～2010年6月）
大熊　武　（2010年7月～　）

参画機関：（財）国際超電導産業技術研究センター、
住友電気工業㈱、古河電気工業㈱、㈱フジクラ、
（財）ファインセラミックスセンター、昭和電線ケーブルシステム㈱
（株）前川製作所、京都大学、早稲田大学、名古屋大学

２０１０年９月１日

複製を禁ず

研究開発の目標

平成22年度までに、電力ケーブルの大電流・低交流損失ケーブル化技術、高電圧絶縁・低誘電損失ケーブル化技術に関する重要な要素技術の開発およびケーブル対応線材の安定製造技術開発を行い、平成24年度までに、66kV大電流ケーブルシステム、275kV高電圧ケーブルシステムの課通電特性や送電損失等の実用性を検証する。

研究開発項目

（１）大電流・低交流損失ケーブル化技術の開発
（２）高電圧絶縁・低誘電損失ケーブル化技術の開発
（３）電力ケーブルの熱収支に関する評価研究
（４）ケーブル対応線材安定製造技術開発
（５）66kV大電流ケーブルシステム検証
（６）275kV高電圧ケーブルシステム検証

事業原簿　Ⅱ-1.2

1. 66kV大電流ケーブル化技術の開発

・開発スケジュール
・目標と達成度
・中間評価までの成果
・最終目標の達成

電力ケーブルの開発スケジュール（H22年度末）

項　目	H20	H21	H22	中間目標	H23	H24	最終目標
大電流低交流損失ケーブル	**大電流・低交流損失技術** → ・低損失化解析的検討 ・クラッド-PLD線材導体の低損失化検証 0.08W/m@1kA ・3kA級導体設計・試作	・多層導体の低損失化解析的検討 ・3kA級導体試作・評価 0.3-0.5W/m@2kA	・5kA導体の試作・評価 320A/cm級-4mm幅線材にて、2W/m/-相@5kA達成の見込み	・2W/m-相@5kA モデル導体検証	長期課通電試験		
	三心一括ケーブル導体検証 → ・ケーブルコア短絡試験実施、解析コードと線材仕様へフィードバック	・ケーブルコア短絡試験実施、I_c低下なし ・製造工程における線材機械特性の検証	・三心ケーブル試作・機械特性評価 ・三心ケーブル短絡事故時の電磁力検証	・三心ケーブル短絡試験（31.5kA,2s相当）	66kV5kA 三心一括 15m		
	大電流接続技術開発 → ・線材接続抵抗評価 ・5kA電流リードの設計検討	・5kA電流リード試作 5kA通電・66kV課電試験完了 ・端末接続部の設計検討	・端末接続部の試作 ・端末接続部とケーブルを組み合わせた5kA通電検証	・5kA電流リード設計評価	←ケーブル、機器製造→	組立 ↔ 試験・評価 ↔	
	クラッド-PLD線材 → ・11kA/cm² 1km	・13kA/cm² 3km	・15kA/cm² 4km	15kA/cm²の線材作製技術確立			2.1W/m-相@5kA Φ150mm管路収納 終端部を有したシステム検証
	システム設計	・システム設計、試験計画案検討		⇓ システム設計			

公開

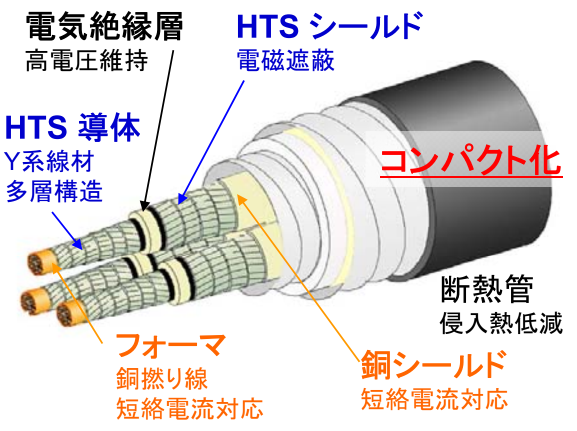
個別研究開発項目の目標と達成状況
大電流ケーブルの技術開発

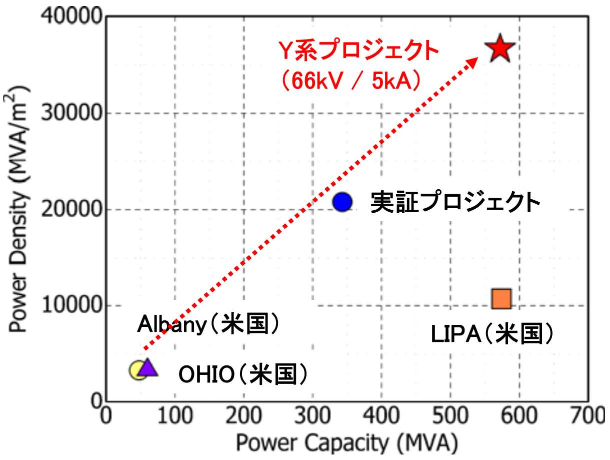
●基本計画： 66kV級大電流・低交流損失超電導ケーブルの要素技術開発を完了し、ケーブルシステムの実用性を検証して、実用化に目処をつける。

項　目	中間目標 （基本計画書抜粋）	成果（状況）	達成度	達成度と課題
① 大電流・低交流損失	ケーブル交流損失 2W/m-相＠5kA 以下	•導体構造を「導体4層、シールド2層」に絞り込み •線材幅2、4mmの導体を試作 •3W/m/-相@4.5kAまで低減	○	4ｍｍ幅の I_c 向上（320A/cm）、2mm幅線材の端部 J_c 改善によりH22年度中に実施
② 三心一括ケーブル導体の検証	短絡試験（31.5kA, 2sec相当）でケーブルの性能に劣化が無いこと	モデルケーブルコアを作製し、31.5kA、2secで性能が低下しないことを確認	○	コア間に発生する電磁力の影響について評価をH22年度中に実施
③ 大容量接続技術の開発	5kA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	大容量電流リードを開発し、5kA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5kA通電試験をH22年度中に実施
④ システム検証	検証用超電導ケーブルのシステム設計完了 課通電試験計画書作成	システム設計、課通電試験計画案を作成	○	技術委員会等にて意見を聞いてH22年度中に確定

○：H22年度中に達成見込み

公開





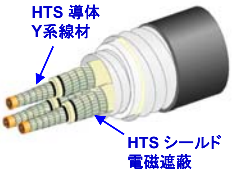
主な開発目標	根拠
定格：66kV/5kA 容量：570MVA	既存の154・275kV-ケーブルを66kV-超電導ケーブルで代替するために必要な目標値 →世界最大級の送電容量
交流損失：2W/m/相	冷却効率を考慮しても、既存ケーブルの1/3以下となる送電損失レベル →世界最小レベルの交流損失（同構造のAlbanyケーブルの1/7）
短絡電流：31.5kA、2秒	66kV級遮断器に規定されている過電流レベル
サイズ：φ150mm管路対応	66kV既存ケーブル用の代表的な管路サイズに対応するコンパクト化 →世界最大の送電密度（米国LIPAケーブルの4倍）

公開

①大電流・低交流損失

超電導ケーブルの構造検討

■開発目標
大電流化：5kA　(66kV)
低損失化：2.1W/m-相@5kA
耐短絡電流：31.5kA、2秒
コンパクト：150mmΦ管路対応



※大容量化には超電導層の多層化が必須
　→ケーブル外径制限140mm以内

■層数検討

導体層数	2層	4層	6層	8層
シールド層数	1層	2層	3層	4層
コア外径	40	42	44	46
ケーブル外径	132	136	140	144

×：現状の線材特性で12kA程度のI_c確保が困難（負荷率0.6想定）

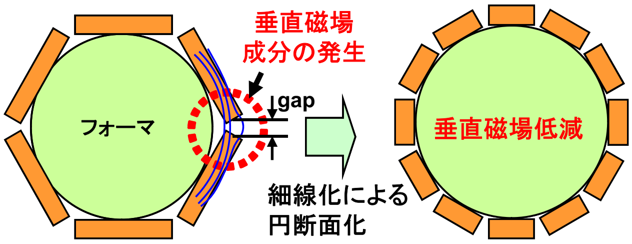
×：150mm管路に収納が困難

×：製造可能な範囲で均流化スパイラルピッチの解がなく不採用

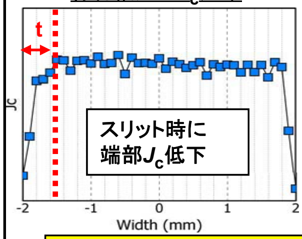
「導体4層、シールド2層」構造を採用

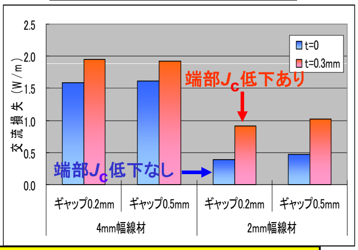
低交流損失化の指針

Y系線材を用いたケーブルの損失の特徴
■テープ面に平行な磁場による損失は非常に小さい
■損失主要因は線材間ギャップに発生する垂直磁場



■細線化による線材端部のI_c低下が損失に影響





●指針：細線化により円に沿わした形状
ギャップ部の磁場をテープ面に平行化
→線材幅 4mm、2mmで検討

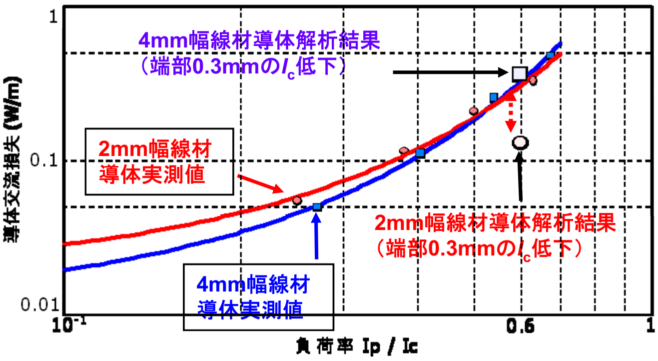
公開

①大電流・低交流損失

(目標)低交流損失な超電導導体を開発する。交流損失(導体のみ)「1.5W/m@5kA」以下

交流損失(Y系超電導線材を集合化した導体)

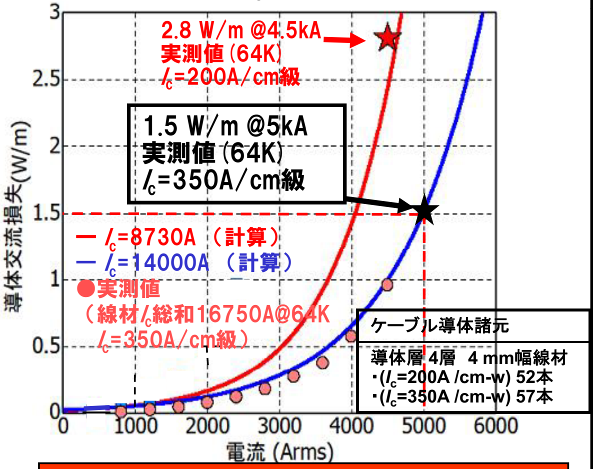
導体：4層導体	導体I_c@77K	外観
2mm幅線材(200 A/cm級)×104本	4510A	
4mm幅線材(200 A/cm級)×52本	4180A	



・4mm幅線材導体：実験結果と計算とが一致
・2mm幅線材導体：実験結果と計算とは乖離
　→線材端部のJ_c低下が予想以上に悪いと推定

目標達成の見通し

①4mm幅線材：線材I_cを向上させ4層導体を作製



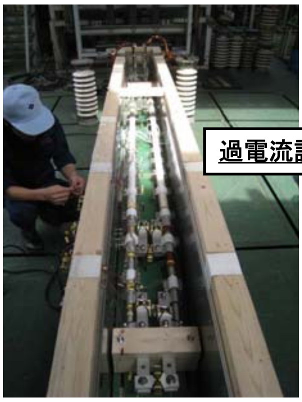
導体損失1.5 W/m @5kA 達成 →
シールド損失込みで目標2 W/m@5kA
達成見込み

②2mm幅線材：線材端部の特性向上を試行中
→スリット方法の改善等(H22下期以降予定)
※①より損失が小さくなる可能性あり

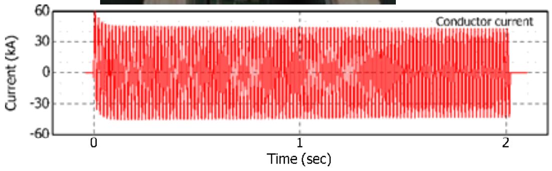
公開

②三心一括ケーブル導体の検証

（目標）耐過電流特性：31.5kA、2s 劣化無し



過電流試験サンプル

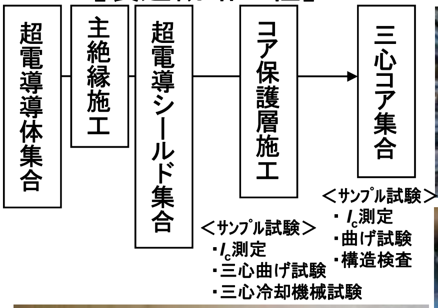


31.5kA、2秒通電電流波形

・過電流試験で特性劣化なし
・過電流時の漏れ磁場を測定、電磁解析を実施
→コア間に働く電磁力は影響のない範囲と推定

（目標）線材機械特性検証を行う

【製造概略工程】



三心ケーブルコア（試作）

三心ケーブルコア曲げ試験

三心ケーブルコア引張試験装置

■検証結果 製造工程で線材特性低下なし
ケーブル形状で十分な機械特性確認

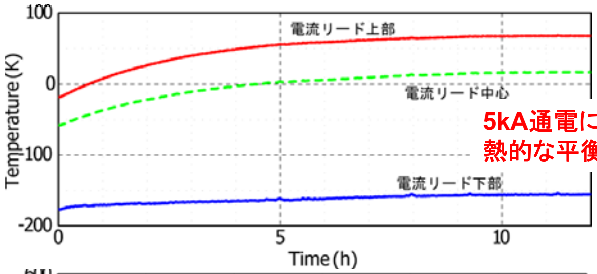
公開

③大容量接続技術の開発

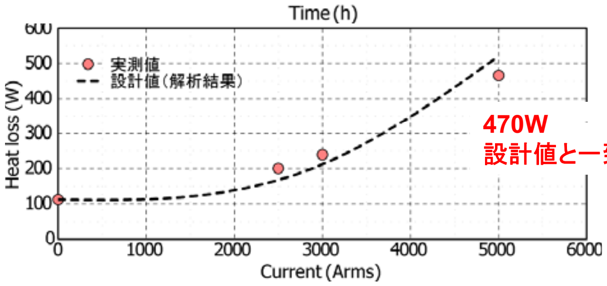
大容量電流リードの開発

（目標）：66kV / 5kA級 終端接続部の開発

■開発結果
・大容量電流リードを開発
5kA連続通電試験完了
・66kV級ブッシング定格課電試験完了



5kA通電にて
熱的な平衡を確認



470W
設計値と一致

高温超電導機器向け
世界最大級の電流リード

公開

④システム検証

検証システムの設計と試験計画

■開発目標

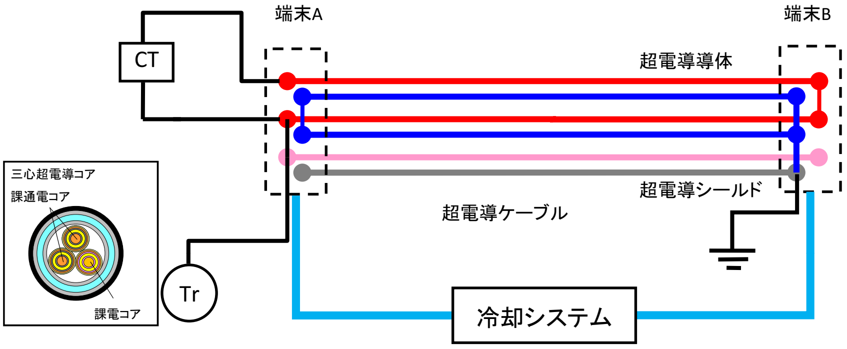
66kV/5kA/15mケーブルを開発し、損失検証と課通電試験を行い、ケーブルが要求特性を満足することを検証

■開発結果

・システム概略設計完了

・課通電試験計画案作成

世界最大級容量の
超電導ケーブルシステム



項目	内容
構成	15m－三心超電導ケーブル、ブッシング付き端末1台（端末A）、ブッシングなし端末1台（端末B）
課通電	二心へ単相（往復）通電、三心へ単相電圧課電
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、昇温
必要冷却容量	3.5kW@65K
最終目標達成	三心形状の実現、66kV課電、5kA通電、ACロス評価等、目標の検証が可能

事業原簿　Ⅲ-2.2.42～47

SUMITOMO ELECTRIC

公開

個別研究開発項目の最終目標の達成可能性
大電流ケーブルの技術開発

	最終目標（平成24年末）	達成見通し
66kV 大 電 流ケーブルシステム検証	（最終目標） 両端に終端接続部を有する検証用66kV／5kA、三心一括の15m長の超電導電力ケーブルシステム製作 ・150mmΦの管路に収納可能 ・損失2.1W/m-相＠5kA以下	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、ケーブルシステムを製作
	（最終目標） 課通電試験によりシステム設計の妥当性を検証する。	これまで検討してきた課通電試験計画書の試験条件を用いて、上記のケーブルシステム検証試験を実施し、最終目標の達成見込み。

事業原簿　Ⅲ-1.2.9

公開

2. 275kV高電圧ケーブル化技術の開発

・開発スケジュール
・目標と達成度
・中間評価までの成果
・最終目標の達成

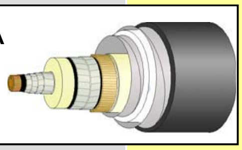
事業原簿　Ⅲ-2.2.51～102

公開

高電圧ケーブルの開発スケジュール

項　目	H20	H21	H22	中間目標	H23	H24	最終目標
高電圧絶縁低誘電損失ケーブル	**高電圧絶縁・低誘電損失ケーブル技術** ・試験導体作製 交流損失:0.01W/m@1kA ・誘電損失試設計:0.5W/m	・試験導体評価 交流損失:0.235W/m@3kA-68.7K 誘電損失:0.6W/m@275kV設計	・試験導体試作・評価 交流損失:0.235W/m@3kA 誘電損失:0.46W/m@275kV級 誘電損失 0.46W/m@275kV トータル0.7W/m	・0.8W/m-@3kA モデル導体検証 ・短絡試験 （63kA,0.6s相当）	・試験導体試作・評価 「交流損失(シールド層含む) +誘電損失」:0.8W/m@275kV級		0.8W/m-単心@3kA Φ150mm以下 中間・終端部を有するシステム検証
	低温電気絶縁特性 ・電気絶縁材料候補の電気・機械特性把握	・電気絶縁材料の選定と特性把握実施 ・電気絶縁設計	・電気絶縁材料の選定と特性把握 ・電気絶試設計・評価 320kV 10分の耐電圧確認 寿命特性も確認		長期課通電試験 作製	試験・評価	
	高電圧接続技術 ・終端部試設計実施	・終端部試作、評価	・終端部試作・評価 ・中間接続部の試作・評価 275kV級気中端末試作 低接続ジョイント試作	・終端部，中間接続部設計評価			
	IBAD-MOD線材 ・200A/cm幅　1.5km	・200A/cm幅　2km ・システム設計検討	・200A/cm幅　2km 200A/cm幅級の線材提供量 3km (9月～)	・200A/cm幅　3km ↓ システム設計			

275kV3kA
単相
30m



赤字はH22達成・実施

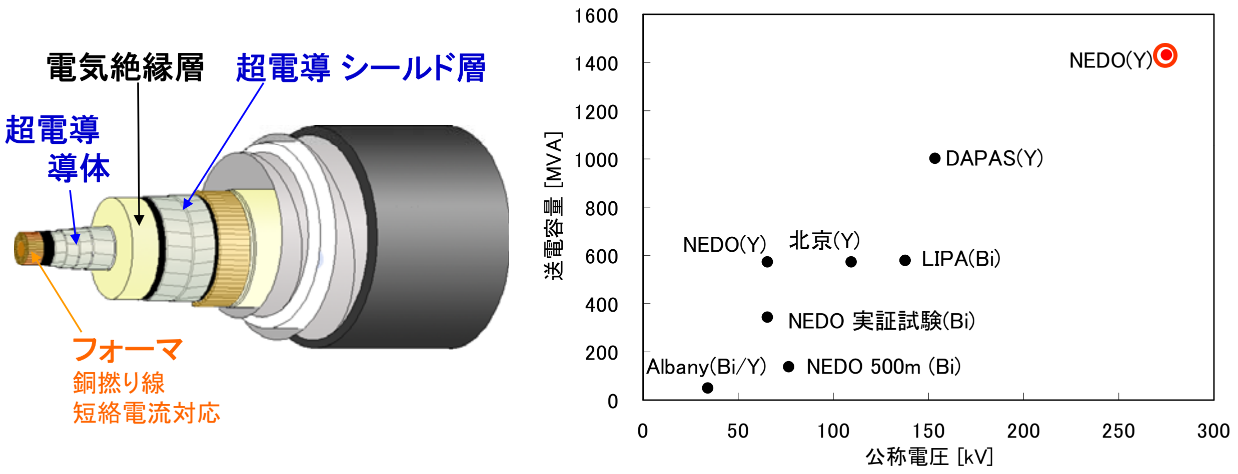
事業原簿　Ⅱ-1.10,11,15,16

個別研究開発項目の目標と達成状況
高電圧ケーブルの技術開発

●基本計画： 275kV級高電圧・低誘電損失超電導ケーブルの要素技術開発を完了し、ケーブルシステムの実用性を検証して、実用化に目処をつける。

項　目	中間目標 （基本計画書抜粋）	成果（状況）	達成度	達成度と課題
①高電圧絶縁・低誘電損失技術の基礎特性評価	ケーブル損失（交流損失（導体層）、誘電損失）で0.8W/m-相@3kA以下 絶縁材料の絶縁設計検討	・超電導導体の交流損失0.235W/m@3kA ・PPLP-Cを絶縁紙として採用し、誘電体損の設計値0.46 W/mの見込み ・交流損失と誘電体損失で0.70W/m	◎	最終目標に向けて開発
②高電圧接続技術の開発	中間部、終端接続部の開発 275kV-3kA連続課電により、導体、超電導-常電導接続部、電流リードに異常が無いこと	・超電導-超電導接続部は3.6 nΩの低抵抗を達成 ・3kAの超電導導体を作製・評価し、導体、超電導-常電導接続部に異常が無い事を確認	○	電流リードと接続部などの組合せ試験をH22年度中に実施
③超電導電力ケーブル電気絶縁特性の調査	長時間課電時および短絡電流(63kA-0.6sec)が流れた場合の絶縁特性についてモデル実験により評価	・モデルケーブルで連続課電、寿命特性取得 ・フォーマや銅保護層の最適化により、過電流通電(63kA-0.6s)による温度上昇を抑制 ・課電試験により誘電・破壊・部分放電特性を取得	◎	過電流通電(63kA-0.6s)は達成 長時間課通電試験をH22年度中に実施
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	・ケーブルシステムを設計 ・275kV-3kAの試験条件の選定、課通電試験計画を作成	○	設計の妥当性を確認

◎：達成　○：H22年度中に達成見込み



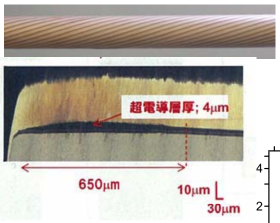
主な開発目標	根拠
定格：275kV/3kA 容量：1420MVA	既存の275kVケーブルのリプレースするために必要な目標値 →世界最大の電圧と送電容量
ケーブル損失：0.8W/m/相 （交流損失＋誘電体損失）	冷却効率を考慮しても、既存ケーブルの1/3以下となる送電損失レベル →世界最小レベルの交流損失
短絡電流：63kA、0.6秒	275kV級遮断器に規定されている過電流レベル
サイズ：φ150mm管路相当	275kV CVケーブルと同サイズ →世界最大の送電容量

①高電圧絶縁・低誘電損失技術

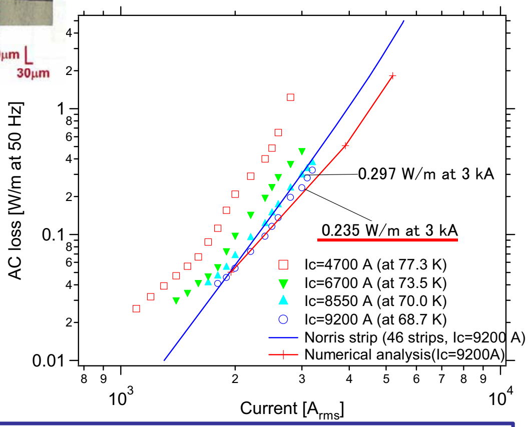
(目標)低交流損失な超電導導体を開発する。
交流損失(導体のみ)「0.3-0.4W/m@3kA」以下

(目標)曲げに対する機械的な問題が無いことを確認する

交流損失(3mm幅Y系超電導線材を集合化した導体)

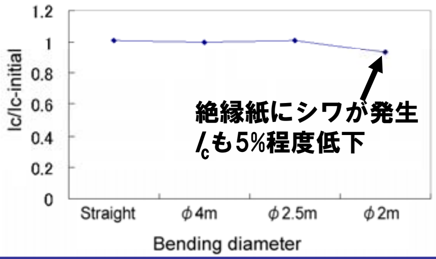


導体:2層導体	導体I_c@77K
3mm幅線材(300-330 A/cm級)×46本	4700A



交流損失値 0.235 W/m @3kA(I_t / I_c =0.46) 目標達成

絶縁PPLP-C　26 mmt



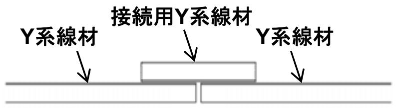
曲げ直径2.5mまで超電導性能の低下無し
製造上の問題がないことを確認

②高電圧接続技術の開発

(目標)275kV-3kA-中間接続部・終端接続部付のケーブルシステムの設計を完了する。

中間接続技術の開発

■5 mm幅線材の接続



47-73 nΩの低抵抗を確認

■スパイラルに巻き付けられた場合の線材の接続

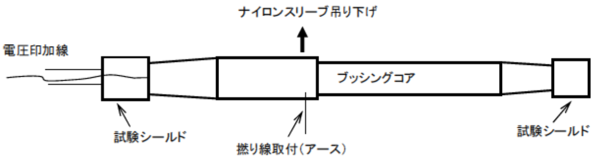
■ケーブル導体の接続

5 mm幅14本の接続　3.6 nΩの低抵抗を確認

今後:中間接続の耐電圧試験を実施する。

終端接続技術の開発

仕様:AC400 kV部分放電フリー、Imp1260 kV
　耐電圧試験でも部分放電を発生させない。
誘電特性:設計通り。
部分放電:SF6中で180kVまで、大気中で100kVまでフリー



終端部組立を行い、20mmtの絶縁モデルケーブルと共に耐電圧確認→AC325kV-10minクリア。

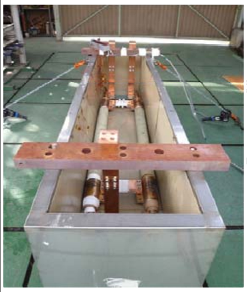
275kV終端部の開発に成功

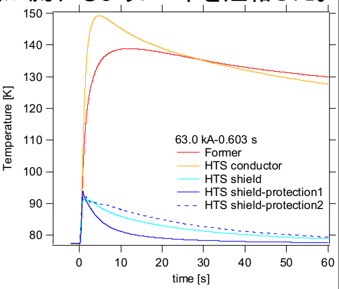
公開

③超電導電力ケーブル電気絶縁特性の調査

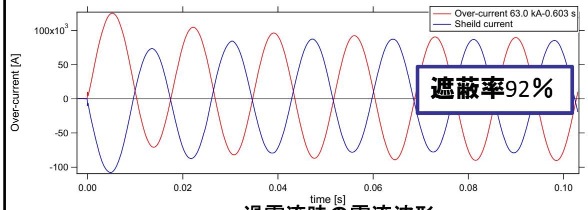
（目標）63kA$_{rms}$-0.6 sの過電流に耐える

超電導ケーブル2本を平行に並べ、
導体は、大電流トランスと閉回路を構成した。
シールドは、誘導電流が流れるように2本を短絡した。





過電流時の温度上昇



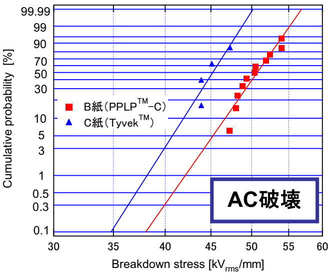
過電流時の電流波形

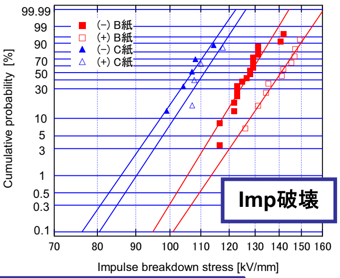
・試験前後でI_cの変化無し。設計された構造で
63kA-0.6secに対して、十分な耐性を示した。

(目標)耐高電圧・低誘電損失な材料を選定
275 kVで0.4 W/m以下

Sample	ε	tanδ [%]	誘電損失W/m ※
A紙（PPLP-A）	1.9	0.077	0.62
B紙（PPLP-C）	1.9	0.057～0.061	0.46～0.49
C紙（Tyvek）	1.8	0.008	0.06
D紙（Normex418）	2.2	0.22	2.03

※導体遮蔽径27 mm　絶縁厚25 mmで試算





・電気特性はB紙が良い。
・C紙は厚みのバラツキからシワが入りやすい。

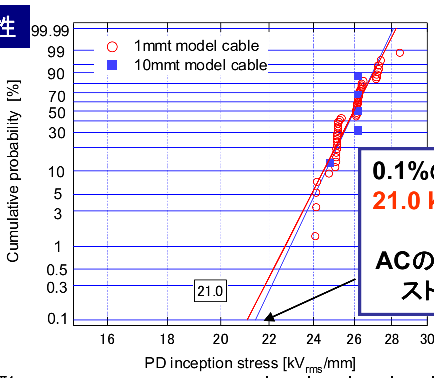
B紙を選定。
誘電特性値オーバは交流損失低減でカバーできる。

公開

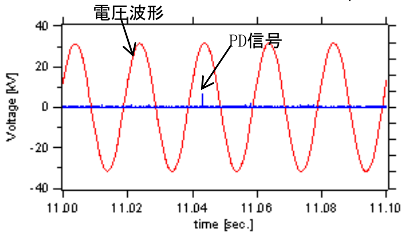
③超電導電力ケーブル電気絶縁特性の調査

(目標)275 kV-3 kA-中間接続部･終端接続部付のケーブルシステムの設計を完了する。
ー交流課電(AC)･雷インパルス課電(Imp)の設計ストレスを決定するー

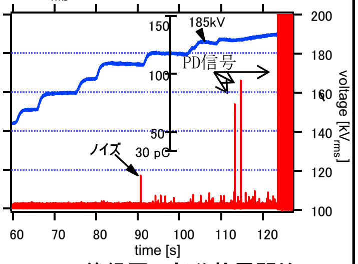
部分放電特性



0.1%の発生確率で
21.0 kV/mm
↓
ACの部分放電開始
ストレスとした。

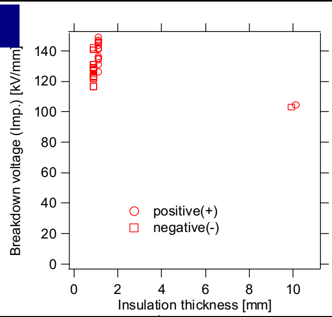


1mm絶縁厚の部分放電開始



10mm絶縁厚の部分放電開始

Imp破壊特性



	PPLP-C 1mmt		PPLP-C 10mmt	
	Imp(+)	Imp(-)	Imp(+)	Imp(-)
有効サンプル数	10	20	1	1
平均(kV/mm)	139.9	127.3	104.3以上	103.1
平均−3σ	116.7	107.8		
累積発生0.1%	100.9	94.9		

・厚さに伴い、ストレスは低下傾向にある
・実機レベルの絶縁厚(10mm)が1mmと同様のバラツキ(3σ)をもつとして
Impの設計ストレスを83 kV/mmとした。

公開

④システム検証

(目標)275kV-3kA-中間接続部・終端接続部付のケーブルシステムの設計を完了する
－ケーブル設計：試験電圧とケーブル絶縁厚を決定する－
設計条件：誘電損失＋交流損失（導体のみ）で0.8 W/m以下、外径150 mm以下

電圧試験条件は、国内規格（JEC)、
国際規格（IEC)、超電導ケーブルの実績から選定

構成		絶縁紙：B紙（PPLP-C）
設計絶縁厚		25.5 mm
フォーマ外径		21.7 mm
導体遮蔽外径		27.0 mm
絶縁外径		78.0 mm
コア全体外径		87.0 mm
断熱内管	内径	95 mm
	外径	105 mm
断熱外管	内径	127 mm
	外径	141 mm
防食層		150 mm
誘電損失(275 kV)		0.46 W/m
交流損失（3 kA_{rms}）（導体のみ）		0.235 W/m

設計条件
AC 300kV-10分で部分放電フリー
Imp　1155 kV 3回

試験名称	試験条件（案）
長期課通電試験	200 kV-3ヶ月
雷インパルス試験	1155 kV-正負3ショット
商用周波耐電圧試験	300 kV-10 min 長期課通電前に部分放電フリー
（参考試験IEC62067）商用周波耐電圧試験2	400 kV-30 min 破壊しないこと

・外径150 mm以下
・誘電損失＋交流損失（導体のみ）で0.7 W/mで中間目標値を達成。

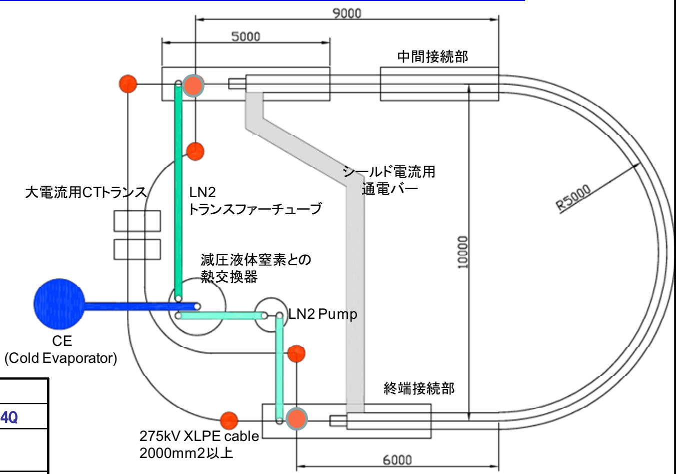
事業原簿　Ⅲ-2.2.93～96

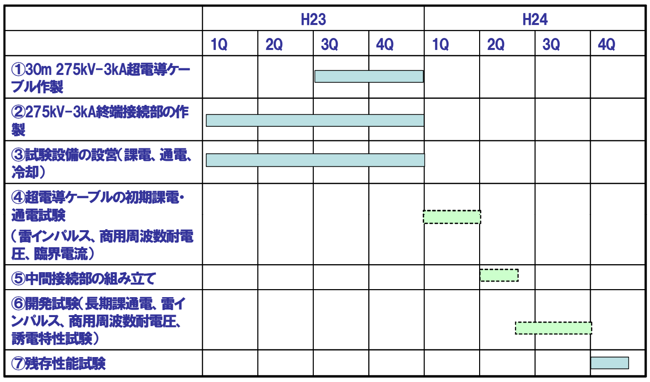
公開

④システム検証

（目標） 耐久性を評価できる課通電試験計画書を作成

試験名称	試験条件（案）
長期課通電試験	200 kV-3ヶ月
雷インパルス試験	1155 kV-正負3ショット
商用周波耐電圧試験	300 kV-10 min 長期課通電前に部分放電フリー
（参考試験IEC62067）商用周波耐電圧試験2	400 kV-30 min 破壊しないこと





長期課通電試験の試験条件、試験スケジュール、試験回路について作成した。

事業原簿　Ⅲ-2.2.96～100

公開

個別研究開発項目の最終目標の達成可能性
高電圧ケーブルの技術開発

	最終目標(平成24年末)	達成見通し
高電圧絶縁・低誘電損失技術の基礎特性評価	(最終目標) 交流損失(導体・シールド層)、誘電体損失で0.8W/m-相@3kA以下	線材の端部J_cの向上と細線化劣化の抑制による交流損失の低減と、低tanδ絶縁材料の適用の可能性の検討を進め目標を達成する見込み。
275kV高電圧ケーブルシステム検証	(最終目標) ケーブル外径150mm以下のシステム検証試験を実施。	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システムを製作
	(最終目標) 課通電試験によりシステム設計の妥当性を検証する。	275kV-3kAの課通電試験および耐電圧試験条件を作成し、中間目標を達成した。 この試験条件を用いて、上記のケーブルシステム検証試験を実施し、最終目標の達成見込み。

事業原簿　Ⅲ-1.2.9

公開

3. 超電導電力ケーブル対応線材の安定化製造技術開発

- 目標と達成度
- 中間評価までの成果

事業原簿　Ⅲ-2.2.103～135

公開

個別研究開発項目の目標と達成状況
超電導電力ケーブル対応線材の安定製造技術開発

項　目	目標(H22年度達成)	これまでの成果	達成度	今後の課題
大電流用ケーブル対応線材安定製造技術開発	・J_e=15kA/cm²(2mm-w×20m)に相当する線材安定作製技術確立 ・大電流ケーブル用線材総長8kmを安定製造・提供	・ケーブル用線材製造の要素技術を確立し、J_e=17kA/cm²(2mm幅線材×28m)線材作製・実証 ・これまで4.3km作成	○	H22中に4kmを提供
基板・中間層テープの開発	・J_e =15kA/cm²(2mm-w×20m)を得られる基板・中間層テープの安定高速製造技術検討 ・IBAD中間層テープ20km提供	・求められた特性を得られる安定製造技術を開発 ・IBAD-GZO基板をH21年度時点で16.2km提供	○	H22中に10.8kmを提供
MODプロセスによる高電圧ケーブル用線材の開発	TFA-MOD法による長尺安定製造技術の確立を図る 線材供給6.5km(H20-22年度) 歩留り向上70%達成(H22年度)	H21年度時点でIBAD-TFA-MOD法により作製された線材3.8km(10mm幅換算)を提供、歩留り63%達成	○	H22中に3kmを提供、歩留まりの向上
微細構造解析	超電導層等を微細構造観察し、評価結果をフィードバックして安定製造を支援	MOD線材の構造観察を行い、フィードバックすることで線材開発・ケーブル開発に寄与	◎	目標の達成
IBAD-PLD線材の安定製造技術の開発	200A/cm-w級IBAD-PLD線材によるケーブルシステム成立性を確認するため、IBAD-PLD線材の安定製造技術開発を行う。	IBAD-PLD線材を用いた2層導体を作製(I_c=2750A@77K) 導体の交流損失:0.0258W/m@1kA$_{rms}$ ケーブルシステムの成立性を確認	◎	目標の達成
線材の評価技術の開発	Y系超電導線材を長尺線材I_c 評価装置などで評価を行い、評価パラメータによる効率的、効果的な評価についての検証を行う。	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、その目的に適した評価装置について検討した。	◎	目標の達成

事業原簿　Ⅲ-1.2.8

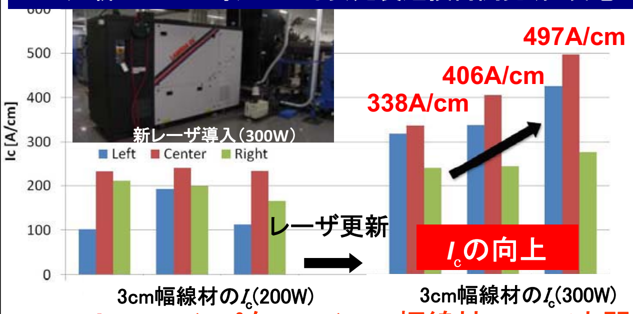
◎:達成　○:H22年度中に達成見込み

公開

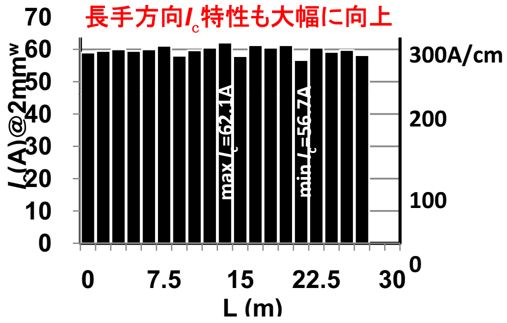
(目標)J_e=15kA/cm²(2mm幅×20m以上)に相当する線材を安定に作製可能な技術の確立

大電流ケーブル開発用

PLD用新レーザー導入による安定製造技術開発(住友電工)



分割
2mm
4mm



2mm幅線材の長手方向I_c分布(J_e=16.7kA/cm² −28m)

・J_e=15kA/cm²を2mm/4mm幅線材−20mで中間目標達成　・4kmレベル@H22を提供見込み

高電圧ケーブル開発用

GZO-IBAD基板作製(フジクラ)

基板　:ハステロイ
中間層:IBAD

世界最大クラスのイオンソースを配置した大型IBAD装置

基板供給

・計画通り高電圧ケーブル開発用に基板・中間層を提供
・J_e=15kA/cm²を実現し得る基板・中間層を作製

高電圧ケーブル開発用

CeO_2-MOD(YBCO)線材作製(昭和電線)

MODプロセスにおいてBatch式熱処理を適用した世界唯一の長尺化プラント

・計画通り高電圧ケーブル開発用線材を提供した
・30m単長の歩留まりは60%以上

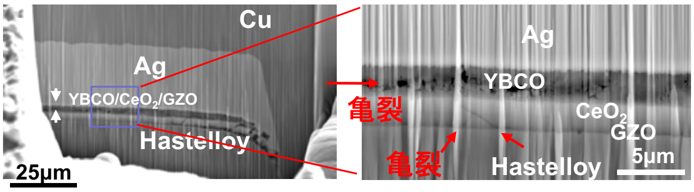
事業原簿　Ⅲ-2.2.103～118

公開

（目標）SEM観察等による線材安定製造技術の開発支援

線材分割のプロセス開発を支援 (JFCC)

スリッタ切断後、銅めっきしたサンプル



SEM観察により分割加工後の線材組織を詳細に解析できた。

製造プロセスにフィードバックし、安定製造技術開発支援を行う

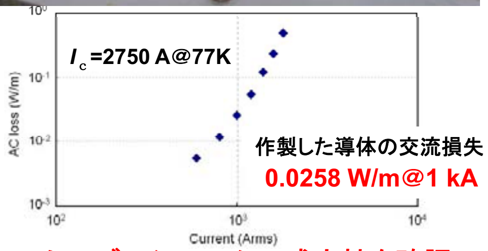
（目標）線材の評価技術の開発の開発

Y系超電導線材を長尺線材I_c評価装置などで評価し、評価パラメータによる効率的、効果的な評価についての検証を行う

（目標）IBAD-PLD線材の安定製造技術の開発

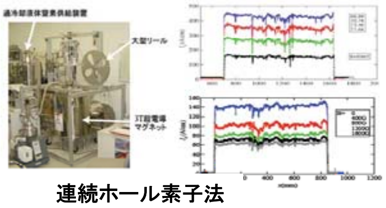
- 線材の安定製造技術開発
- IBAD/PLD線材による超電導導体を作製・評価

IBAD-PLD 2mm幅線材(I_c=200A/cm-wの線材)より2層導体を作製

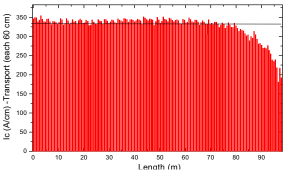


ケーブルシステムの成立性を確認

・超電導線材評価装置による評価結果（一部）



連続ホール素子法



*I-V*特性評価装置

○超電導電力ケーブル用線材評価装置の性能を確認した
○装置の特徴を活かした運用により、効率的な評価が可能

- 線材 I_c 特性を簡易に評価　→　連続ホール素子法
- 真値の評価　→　*I-V*特性評価装置
- 劣化・剥離等の効率的な確認　→　SQUID装置
- 劣化箇所の詳細な評価　→　MOI評価装置

公開

4. 超電導電力ケーブルの熱収支に関する評価研究

- 目標と達成度
- 中間評価までの成果
- 最終目標の達成

公開

個別研究開発項目の目標と達成状況
ケーブルの熱収支に関する評価研究

項　目	目標（H22年度達成）	これまでの成果	達成度	今後の課題
定常通電時および事故時の伝熱特性検討	システム検証用ケーブルの設計から熱解析を行い、シミュレーション結果を設計へフィードバック	・定常運転時の伝熱特性を解析し、ケーブルフォーマ・設計にフィードバック ・過電流通電時の温度特性を解析し、ケーブル設計にフィードバック、および実験により妥当性を確認	◎	最終目標にむけて開発
スラッシュ窒素の研究	スラッシュ窒素冷却に適したケーブル冷却方法を検討し、実用化を目指したスラッシュ窒素冷却システムの検討・課題抽出	・スラッシュ窒素の冷却特性を評価 ・スラッシュ窒素の冷却システムの要素研究 ・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	◎	最終目標にむけて開発
超電導電力機器の冷却設備の調査研究	冷却設備の最新動向・超電導ケーブルなどに要求される冷却設備の仕様・法的規制に関する調査	・冷却設備の動向を調査し、超電導ケーブルに要求される冷却設備・仕様を検討 ・導入・普及に向けた法規制関係を調査	◎	最終目標にむけて開発

◎：達成

事業原簿　Ⅲ-1.2.8

公開

（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

3次元有限要素法と回路方程式を結合した電流分布-熱連成解析

各時間ステップごとに連成計算を行う

電流分布解析

電流分布・ジュール発熱等を計算

$\nabla\cdot\sigma(\nabla\phi)=0$ ➡ 3D FEM

$$\begin{bmatrix} R_{cond} & 0 \\ 0 & R_{shield} \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} I_{cond} \\ I_{shield} \end{Bmatrix}+\begin{bmatrix} L_{cond} & M \\ M & L_{shield} \end{bmatrix}\frac{d}{dt}\begin{Bmatrix} I_{cond} \\ I_{shield} \end{Bmatrix}+\begin{Bmatrix} V_{cond} \\ V_{shiled} \end{Bmatrix}=\begin{Bmatrix} E_{cond} \\ 0 \end{Bmatrix}$$

➡ Equivalent circuit

$V=V_c\left(\frac{I}{I_c}\right)^n$: *n*-value model

発熱値　物性値

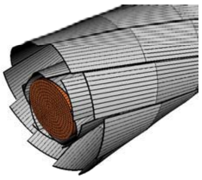
熱解析

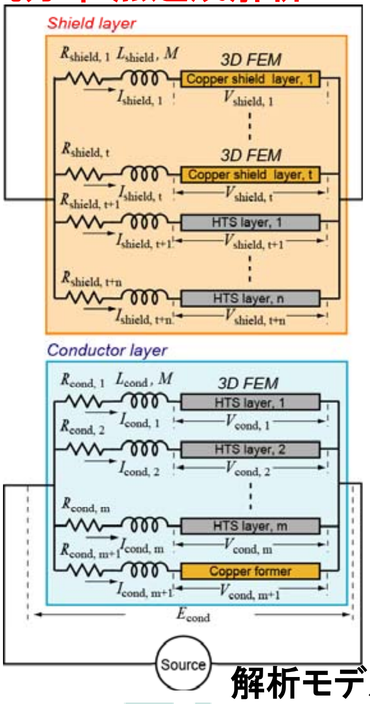
温度分布を計算

$$C\frac{\partial T}{\partial t}=\nabla\cdot(k\nabla T)+Q_j-Q_q$$ ➡ 3D FEM

ケーブル表面にLN_2(非線形熱伝達特性)

PPLP絶縁紙は、LN_2との混合モデル





解析モデル

事業原簿　Ⅲ-2.2.136～138

Waseda University　ISTEC

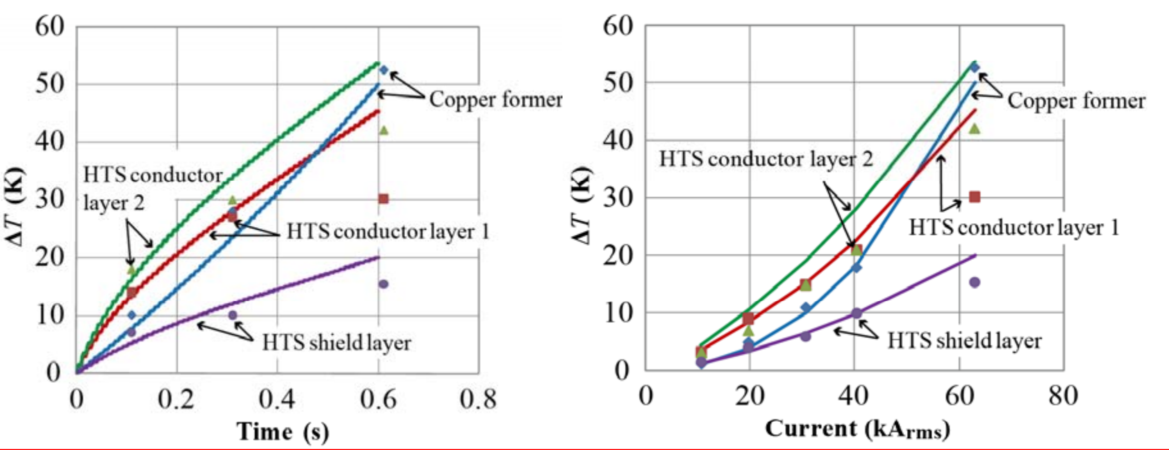
公開

（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

・275 kV級高電圧超電導ケーブルの短絡試験（63kA 0.6sec）の伝熱特性について解析を実施

シミュレーションと実験結果の比較

Copper former　HTS conductor layer 1　HTS shield layer　HTS conductor layer 2　プロット：測定結果



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

・上記以外、66kV大電流ケーブルにおける過電流通電時の伝熱特性、275kVケーブルの定常時の伝熱特性の解析等を実施し、ケーブル設計へフィードバックした。

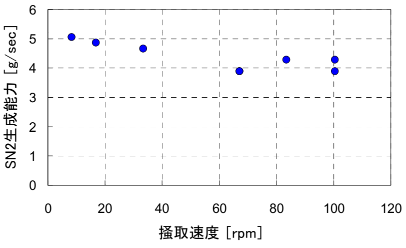
公開

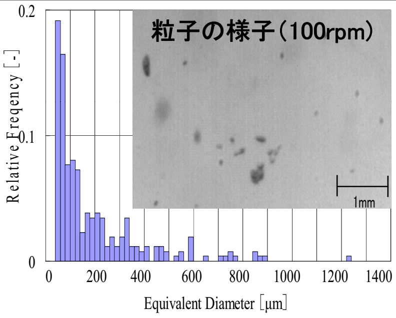
（目標）ケーブルのスラッシュ窒素冷却を実現するためのシステムを構築する

①システムの検討

生成装置外観

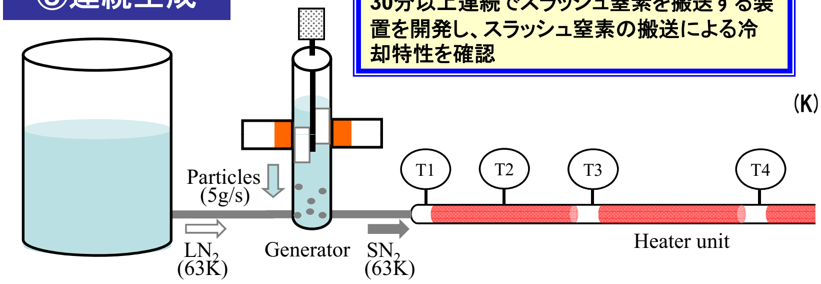
②固相率制御



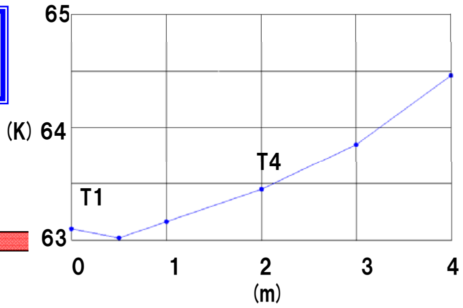


・掻き取り回転数による粒子生成量の制御を確認。
・平均100μ程度の粒子を連続的に生成、搬送できることを確認

③連続生成



30分以上連続でスラッシュ窒素を搬送する装置を開発し、スラッシュ窒素の搬送による冷却特性を確認



公開

（目標）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
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

冷却器の仕様と能力

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1 kW(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
設置スペース（5～10kW）	9㎡/kW　(*1)	4㎡/kW	2㎡/kW	8㎡/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

超電導機器の運用における関連規制

・電気事業法（施行法則含む）　・高圧ガス法

電気事業法においては超電導電力関連機器に関する明確な規制がない。
導入・布設時は該当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。

事業原簿　Ⅲ-2.2.147～151

公開

個別研究開発項目の最終目標の達成可能性
熱収支に関する研究

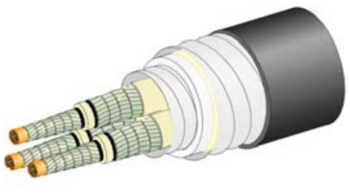
	最終目標（平成24年末）	達成見通し
定常通電時および事故時の伝熱特性検討	（最終目標） システム検証結果に合致する汎用性のあるシミュレーション技術を確立	ケーブルシステム検証における、温度上昇解析・短絡電流通過時の電磁力解析、気中終端接続部の超電導／常伝導接続の電流転流の挙動解析および伝熱解析を行って行くことで目標を達成する見込み
スラッシュ窒素の研究	（最終目標） スラッシュ窒素冷媒の有用性のシステム検証	製作した搬送試験装置を用いて循環試験装置の製作を行い、スラッシュ窒素の固相率を変化させてスラッシュ窒素と液体窒素との冷却特性を把握する。さらに、循環試験装置の冷却容量の拡大やモデルケースに基づく設計検討を実施することで目標を達成する見込み

事業原簿　Ⅲ-1.2.9

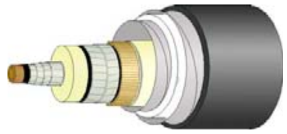
公開

超電導電力ケーブル研究開発　成果の意義

開発項目	開　発　成　果	成果の意義
大電流ケーブル	定格：66kV／5kA 容量：570MVA	世界最大級の 三心一括送電容量
	交流損失：2W/m-相	世界最小レベル （三心一括）
	サイズ：150mmΦ管路内布設	世界最大の送電密度
高電圧ケーブル	定格：275kV／3kA	世界最大級の 電圧と送電容量
	ケーブル損失：0.8W/m-相 （交流損失＋誘電体損失）	世界最小レベル
	サイズ：150mmΦ管路相当	世界最大の送電容量



66kV/5kA大電流ケーブル



275kV/3kA高電圧ケーブル

事業原簿　Ⅲ-1.2.11

公開

（3）知的財産権、成果の普及（超電導電力ケーブル研究開発）

	H20	H21	H22	計
特許出願	4	7	2	13件
論文（査読付き）	3	9	0	12件
研究発表・講演	21	54	22	97件
受賞実績	0	1	1	2件
新聞・雑誌等への掲載	2	3	0	5件
展示会への出展	4	4	3	11件

※平成22年度8月26日現在

事業原簿　添付資料8

特許出願状況

ケーブル開発に関わる特許	国内出願： 13件
	海外出願： 1件

テーマ	代表的特許
①大電流ケーブル化技術の開発	■磁性基板線材を用いたケーブルの低損失化（住友電工）
②高電圧ケーブル化技術の開発	■電気的に安定な終端接続部（古河、ISTEC） ■低誘電損失な超電導ケーブル絶縁（古河、ISTEC）
③ケーブル対応線材安定製造技術開発	■表裏識別容易な超電導線材（住友電工） ■酸化物超電導線材製造方法及び製造装置（昭和電線）

プレス発表等

「イットリウム系低磁性配向基板線材で世界初の高速化、高性能化に成功」
NEDO ホームページ
平成22年度2月2日

「イットリウム系超電導線材開発用設備を増強」
日刊工業新聞
平成22年度3月30日

受賞

低温工学協会 2010年度優良発表賞
「66kV/3kA級薄膜超電導ケーブルの交流損失特性」

公開

プレス発表

「イットリウム系超電導電力ケーブルを
“北海道洞爺湖サミット”に展示」

平成20年6月30日

展示会等

環境エネ展にて、超電導ケーブルのCO_2削減効果について説明(2008)

当時　民主党幹事長であった鳩山前首相に説明

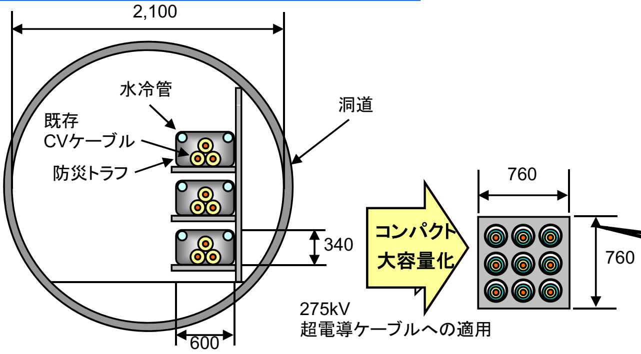
エコメッセ千葉にて超電導の実験

事業原簿　添付資料8

FURUKAWA ELECTRIC

公開

実用化の見通しについて



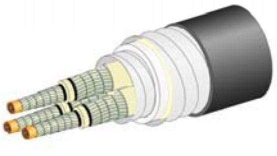
275kV現用ケーブルと超電導ケーブルの布設サイズ例の比較

◎超電導ケーブルのメリット、特徴
- ・送電ロスの低減
  (従来地中送電線の1／3)
  省エネルギー、CO_2削減
- ・コンパクトで大容量送電が可能

従来の洞道布設が必要なケーブルを
地中に埋設された管路に布設が可能

◎66kV大電流ケーブル

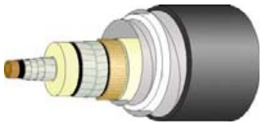
○都市部連系系統
・既存ケーブルの増強



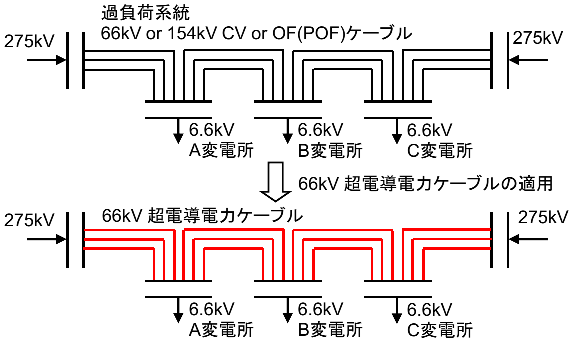
66kV/5kA大電流ケーブル

◎275kV高電圧ケーブル

○都心導入部系統
・老朽化ケーブルのリプレース



275kV/3kA高電圧ケーブル



66kV or 154kV過負荷系統への超電導電力ケーブルの適用例

事業原簿　Ⅳ-1.8～13

CO_2削減効果について

超電導ケーブル導入による地球環境対策としてのCO_2量削減の効果が期待できる。

超電導ケーブル導入量（国内）をベースにCO_2削減量を計算

	A	B	C		
年	超電導化による損失低減量※1 kW/km(Lf=1.0)	予想されるケーブル導入量 km（累積）	損失率 (Lf)	1年間の低減電力量 A×B×C(24×365) GWh/年	1年間のCO_2削減量 千t-CO_2/年※2
2020年	70	190	0.7	82	28
2025年	70	400	0.7	172	58
2030年	70	650	0.7	279	95

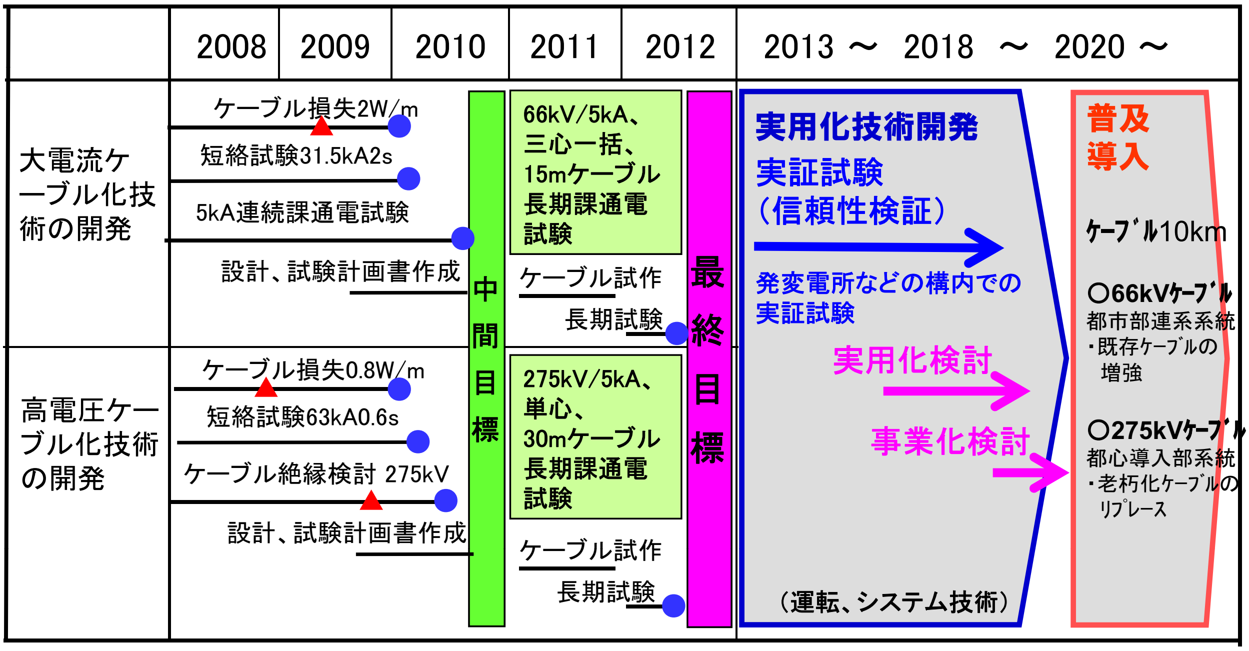
2030年の省エネ効果は279 GWh/年となり、CO_2削減効果は95千t-CO_2/年になると推計した。

なお、この推定は国内のケーブルへの適用を考えた場合であり、全世界的で考えれば、数十倍～数百倍の効果が期待できる。

※1　表中Aの“損失低減量”は常電導ケーブル100 kW/kmと超電導ケーブル30 kW/km@2020年の差を示す
※2　CO_2排出原係数単位は電気事業連合会による目標値 0.34 kg-CO_2/kWhを適用
出典「高温超電導電力応用機器の市場調査研究報告書（平成19年2月　ISTEC）」

事業原簿　Ⅳ-1.13～14

事業化までのシナリオ

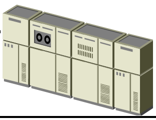
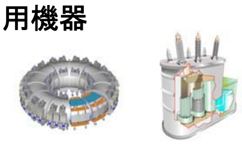


▲:基本原理確認　●:基本技術確立

事業原簿　Ⅳ-1.8～13

公開

波及効果について

		2010 / 2015 / 2020
産業分野	○自然エネルギー用送電 ○直流送電 ○データーセンター用屋内配線 	直流送電技術 研究開発 → 実用化検討 → 実証試験 → 実用化；研究開発 → 実用化検討 → 実証試験 → 実用化
輸送分野	○直流き電	直流送電技術 研究開発 → 実用化検討 → 実証試験 → 実用化
その他	○超電導応用機器 	冷却技術 研究開発 → 実用化検討 → 実証試験 → 実用化